一般社団法人防衛施設学会主催

年次フォーラム２０２０

（令和元年度年次研究発表会論文集）

令和２年２月

(一社)防衛施設学会
Japan Society of Defense Facility Engineers
http://www.jsdfe.org/

一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム 2020　論文集目次

新技術

座長：上野耕平（防衛省地方協力局）

(A1) マルチ打音システムを用いた構造物の診断
歌川紀之, 黒田千歳(佐藤工業(株)), 安永守利(筑波大学)･･･1
(A2) 輻射式冷暖房システムの冷房効果等の検証について
鈴木秀治, 内山大勢((株)エース・ウォーター) ･･･7
(A3) 鋼板サンドイッチ耐火断熱パネルの耐震性能に関する研究
宮里直也(日本大学), 外山圭(スタイロ加工(株)) ･･･13

国防遺産

座長：永田真(防衛省整備計画局)

(B1) 国防遺産の視座
岡田昌彰(近畿大学) ･･･19
(B2) 海自呉基地に残る旧呉鎮守府の地下施設群について　(1)調査の経緯と施設概要
上寺哲也, 難波宗功(呉工業高等専門学校), 光井周平(広島工業大学) ･･･23
(B3) 海自呉基地に残る旧呉鎮守府の地下施設群について
(2)佐世保・舞鶴に残る地下施設との比較
光井周平(広島工業大学), 上寺哲也, 難波宗功(呉工業高等専門学校) ･･･29
(B4) 旧呉鎮守府の赤レンガ倉庫群の建設年代について
難波宗功, 上寺哲也(呉工業高等専門学校), 光井周平(広島工業大学) ･･･33
(B5) 最新の計測技術を用いた歴史的遺構の記録保存および活用に向けた実践的検討
津口雅彦((株)パスコ) ･･･37

防災・基地対策

座長：北村福太郎(東京海洋大学)

(C1) 個別要素法を用いた土石流衝突荷重の推定法の提案
嶋川理, 堀口俊行(防衛大学校), 伊藤一雄(陸上自衛隊) ･･･45
(C2) 応災力向上への取り組みについて～防災・応災・減災　サバイバルという日常～
荻原洋聡((株)エヌ・ワイ・ケイ), 佐藤紘志(防衛大学校名誉教授) ･･･51
(C3) 揮発性物質含有土壌の掘削時におけるガス抑制技術の開発
日野良太, 大西健司, 大島義徳, 三浦俊彦, 西川直仁((株)大林組) ･･･59
(C4) 地域における複合的な抗堪性強化策（試論－２）
～亜臨界水技術をコアとする地域循環共生圏の形成～･･･67
松下潤(芝浦工業大学名誉教授, 中央大学理工学研究所), 松井三郎(京都大学名誉教授)
宮代知直(G-8 International Trading(株)), 吉村和就(グローバルウオーター・ジャパン)

爆発・破壊

座長：鳥越大智(内閣官房副長官補(事態対処・危機管理担当)付)

(D1) 殉爆現象の数値シミュレーション
吉田正典, ディン･スァン･チェン, 小山陽次, 石倉修一((株)爆発研究所) ･･･77
(D2) ポリウエア樹脂吹付による RC 版の耐衝撃性向上効果に関する研究
島崎利孝, 武者浩透(大成建設(株)), 片岡新之介, 別府万寿博(防衛大学校) ･･･83
(D3) SIFCON の接触爆発に対する耐爆性能とそれを用いた積層型耐爆構造部材の開発
森島慎太郎, 山口信, 渋谷颯志郎(熊本大学),
兼安真司, 居石鉄兵, 倉重聡(日鉄高炉セメント(株)) ･･･87
(D4) アラミド繊維シート補強による RC 版の局部破壊抑制効果に関する実験的研究
清田翔吾,別府万寿博,市野宏嘉(防衛大学校),佐藤和幸(前田工繊(株)) ･･･95
(D5) 核爆発時の人的被害評価法に関する研究
長谷川秀雄, 永田真(防衛省), 別府万寿博, 市野宏嘉(防衛大学校) ･･･101

List of contents

A New Technology

Chair: UENO K. (Bureau of Local Cooperation, Ministry of Defense)

(A1) Inspection of structures using Multi-Impact Acoustic Method
UTAGAWA N., KURODA C. (Sato Kogyo Co., Ltd.), YASUNAGA M.(Tsukuba University) ・・・1

(A2) Verification of air conditioning cooling effect of radiation cooling/heating system
SUZUKI H., UCHIYAMA T. (Ace Water Co., Ltd.) ・・・7

(A3) Study on seismic performance of fire resistant heat insulating sandwich panel made of steel plate and rockwool
MIYASATO N.(Nihon University), TOYAMA K.(Styrokakoh Co., Ltd.) ・・・13

B Defense Heritage

Chair: NAGATA M. (Bureau of Defense Buildup Planning, Ministry of Defense)

(B1) Trends of Defence Heritage
OKADA M, (Kindai University) ・・・19

(B2) Underground facilities of the former imperial Japanese navy remaining at JMSDF Kure naval base (Part-1) Background of investigation and facility overview
UEDERA T., NAMBA T. (NIT, Kure College), MITSUI S. (Hiroshima Institute of Technology) ・・・23

(B3) Underground facilities of the former imperial Japanese navy remaining at JMSDF Kure naval base (Part-2) Comparison with underground facilities remaining in Sasebo and Maizuru・・・29
MITSUI S. (Hiroshima Institute of Technology), NAMBA T., UEDERA T.(NIT, Kure College)

(B4) Construction age of red-brick warehouses of the former imperial Japanese navy remaining at JMSDF Kure naval base・・・33
NAMBA T., UEDERA T.(NIT, Kure College), MITSUI S. (Hiroshima Institute of Technology)

(B5) Practical study for preservation and utilization of historical remains using the latest measurement technology
TSUGUCHI M. (Pasco Co., Ltd.) ・・・37

C Disaster Prevention & Harmony between Local Communities and Bases

Chair: KITAMURA F.(Tokyo University of Marine Science and Technology)

(C1) Proposal of debris flow impulsive load evaluation using distinct element method
SHIMAKAWA O., HORIGUCHI T., (National Defense Academy), ITOH K. (JGSDF) ・・・45

(C2) An empirical proposal of disaster reaction strategy in terms of prevention, reaction and deduction
OGIHARA Y. (NYK Co., Ltd.), SATO H. (Emeritus of National Defense Academy) ・・・51

(C3) Development of volatile soil gas suppressors during excavation of contaminated soil
HINO R., ONISHI K., OSHIMA Y., MIURA T., NISHIKAWA N.(Obayashi Co., Ltd.) ・・・59

(C4) Integrated measures to secure multiple resilience of our country (version-2)
- Promotion of regional recycle-oriented industry and economy based on subcritical water technology
MATSUSHITA J. (Emeritus of SIT, Science and Technology Research Center, Chuo University), MATSUI S. (Emeritus of Kyoto University), MIYASHIRO T. (G-8 International Trading Co. Ltd.) YOSHIMURA K. (Global Water Japan) ・・・67

D Explosion & Collapse

Chair: TORIGOE D. (Cabinet Secretariat (Situations Response and Crisis Management))

(D1) Numerical simulation of sympathetic detonation
YOSHIDA M., DINH X. T., KOYAMA Y., ISHIKURA S. (Explosion Research Institute Inc.) ・・・77

(D2) Study on impact resistant improvement effect by spraying polyurea resin on the back surface of RC plates
SHIMAZAKI T., MUSHA H.(Taisei Corporation), KATAOKA S., BEPPU M. (National Defense Academy) ・・・83

(D3) Blast resistance of SIFCON against contact detonation and development of laminated blast-resistant members using SIFCON
MORISHIMA S., YAMAGUCHI M., SHIBUYA S. (Kumamoto University), KANEYASU S., SUEISHI T., KURASHIGE S. (Nippon Steel Blast Furnace Slag Cement Co., Ltd.) ・・・87

(D4) Experimental study on mitigation effects by aramid fiber sheets reinforcement on the local damage of RC slab
KIYOTA S., BEPPU M., ICHINO H. (National Defense Academy), SATO K. (Maedakosen Co., Ltd.) ・・・95

(D5) A study on the risk assessment for a design of nuclear bomb explosions
HASEGAWA H., NAGATA M. (Ministry of Defense), BEPPU M. ICHINO H. (National Defense Academy) ・・・101

A　新技術

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

マルチ打音システムを用いた構造物の診断

INSPECTION OF STRUCTURES USING MULTI-IMPACT ACOUSTIC METHOD

歌川紀之*，黒田千歳**，安永守利***
UTAGAWA Noriyuki ,KURODA Chitose and YASUNAGA Moritoshi.

*博（工）佐藤工業株式会社 技術センター 技術研究所 上席研究員（〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10）
**佐藤工業株式会社 技術センター 技術研究所 主席研究員（〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10）
***博（工） 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 教授（〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1）

キーワード：打音法、人工知能、コンクリート構造物、浮き・剥離
(Impact Acoustic Method, Artificial Intelligence, concrete structure, peeling)

1. はじめに

被弾や爆発による RC 構造物の健全性を評価する場合、特に外見上の問題がなくても、叩き点検を行い、浮き、はく離の有無を調べ、第三者被害を事前に防ぐ必要がある。また、桟橋などの塩害を受けた RC 構造物については長期間の活用を考慮し、耐久性を調べるために、浮き、はく離の有無を調べる必要がある。叩き点検は、ハンマで叩いた際に発生した音を聞いて、音色の違いからコンクリート表面にある浮きやはく離を調べる技術である。

一般的な大気中の RC 構造物では、鉄筋のかぶりが 4cm 程度であり、大きな浮きについては、誰が聞いても、簡単に浮いている範囲が分かるが、水中や土中の構造物では、鉄筋のかぶりが 7cm 程度で、欠陥の有無は分かりにくいケースもある。また、境界の影響を受けるような位置でも判断が難しいケースもある。そこで、ハンマで叩いて発生した音をマイクロフォンで測定し、音圧データを分析することにより、欠陥の有無や規模を調べる「打音法」の開発が進められている。ここでは従来の耳で聞いて判定する技術を「叩き点検」と呼び、区別することとする。また、近年、叩き点検を UAV などを用い、ロボット化しようとする動きもあり、このような場合でも、マイクロフォンを用い判定することとなり、「打音法」は必要となる。

ここでは、当社でこれまでに開発した打音法のシステム「健コン診断ポータブル」に AI(:Artificial Intelligence)を用いて探査性能を向上させた取組みである「マルチ打音システム」の開発について述べる。

2. マルチ打音システム

マルチ打音システムでは、これまでの打音法の厚さ評価に加え、2 種類の AI 的な評価法である SOM と SVM を新たに導入した。

2.1. 厚さ評価（物理的な評価）[1)]

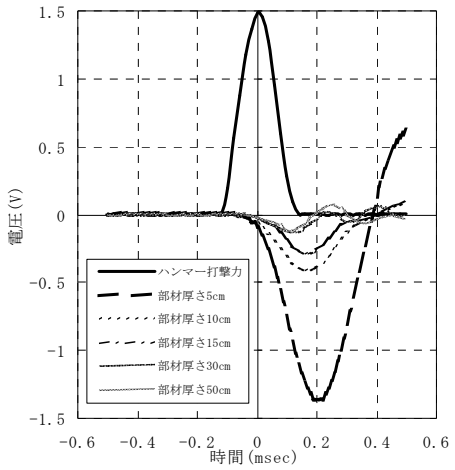
厚さ評価の原理は、無限板の衝撃インピーダンス理論である。ハンマによる衝撃力により、無限大の薄板に発生する曲げ速度は、インピーダンス式により以下のように与えられる。(L.Cremer,M.Heckel,E.E.Ungar:Structure-Borne Sound,p.281)[2)]

$$z \approx 2.3 \times C_L \times \rho \times h^2 \approx \frac{F}{v} \qquad (1)$$

ここで、z は、Driving point impedance=F/v （F は衝撃力、v は発生速度）で、C_L は弾性波速度、ρ は単位体積重量、h は板厚さである。

発生する音圧 P は板の振動速度 v に比例するので、音圧 P とハンマにより加力 N を用いることにより、板の厚さが推定できることになる。また、

式から、薄い板であると音圧が大きくなり、厚い板であると音圧が小さくなることが分かる。実際に異なる厚さのコンクリート板を打撃し、発生する音圧を図－1 に示す。



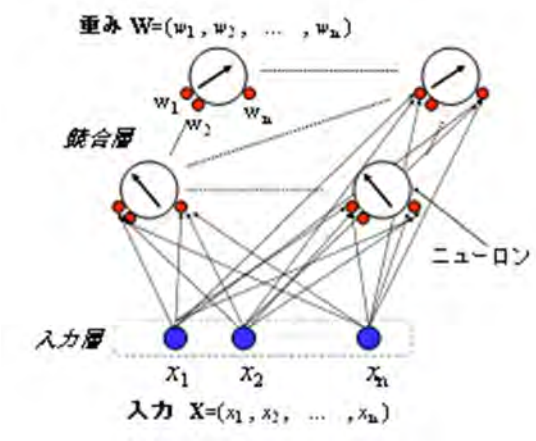
図－1　板厚が異なる場合に得られる打音法結果

本手法では、衝撃力 N により発生する一波目の最少音圧を P とし、振幅値比は P/N で定義し、振幅値比と部材の厚さの関係式から、厚さ h を推定する。なお、振幅値比と部材厚さの関係式は、1m×1m で、厚さ 5,10,15,20,25,30cm のコンクリート板を打撃し、音圧を 50 回測定することにより、最小二乗法を用い作成した。

2.2.　SOM 自己組織化マップによる評価（AI 的な評価）[3)]

自己組織化マップ(Self-Organizing Map, SOM)は、Teuvo Kohonen によって提案された機械学習アルゴリズムの一つであり、脳の視覚野をモデル化している。脳をモデルとした機械学習アルゴリズムとしては、近年、深層学習(Deep Learning)等が注目されているが、SOM は、深層学習とは異なり、①教師信号無しの学習であり、②学習(自己組織化)の過程と結果を可視化できることが大きな特徴である。

図－2 に SOM の構造を示す。「競合層」は、N×M 個のニューロンから構成されており、この 2 次元構造から“マップ”と呼ばれる。そして、それぞれのニューロンは、n 次元の重みベクトル $W_{N\times M}$ = (w1, w2, …, wn) を持つ。一方、「入力層」は、画像や音などの実際の信号データから抽出された n 次元ベクトル X = (x1, x2, …, xn) であり、入力 X は、競合層の各ニューロンに入力される。



図－2　自己組織化マップ

学習を行う前に各ニューロンの重み W をランダムに設定する。そして、学習過程では、複数の入力ベクトル(学習データセット)Xi について、以下の①と②を繰り返し行う。

① 力ベクトル Xi に最も近い重みベクトル $W_{N\times M}$ を持つニューロン(勝者ニューロン)を選ぶ。

② 勝者ニューロンの $W_{N\times M}$ を少し Xi に近づける。それと同時に、勝者ニューロン近くの複数のニューロンについてもそれらの重みベクトル $W_{N\times M}$ を少し Xi に近づける。

その結果、図－3 に示すように、競合層のニューロンの重みベクトル $W_{N\times M}$ は、入力ベクトルの類似度を反映した自己組織化が行われる(類似度マップが形成される)。学習後に、未知の入力ベクトル Zi を入力し、それに対する勝者ニューロンが属していたデータクラスにより、未知の入力ベクトルを分類(判定)することができる。

図－3　ニューロンの自己組織化

自己組織化が進むにつれて、似たベクトル（音圧ベクトル）が同じ場所に集まってくる。自己組

織化が終了した段階で、属性（健全部、欠陥）ごとに色分けを行う。

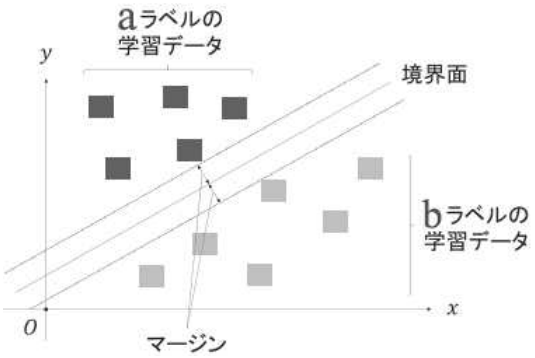
属性で色分けされたマップを用い、現地で、構造物を打撃し、得られた波形がどの色分けされたベクトルと似ているかで、健全部、欠陥部および欠陥の種類を判定する。

2.3. SVM サポートベクトルマシンによる評価（AI 的な評価）[4)]

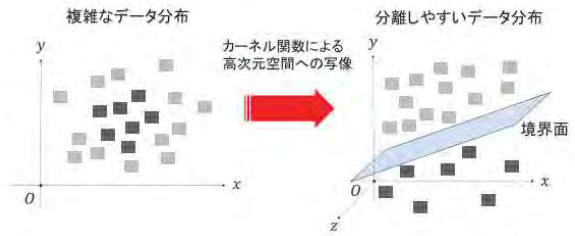
サポートベクトルマシン(Support Vector Machine, SVM)は Vladimir N. Vapnik, Alexey Ya. Chervonenkis により提案された線形 2 値分類を解くための機械学習アルゴリズムであり、その後非線形問題にも対応できるよう拡張され、パターン認識のため広く用いられている。

入力データとして n 次元ベクトル X = (x1, x2, …, xn)が図－4 のように与えられたとき、2 種類のデータを境界面により分けることができる。

それぞれのデータとの最小距離(マージン)を最大にする識別平面がただ一つ決まり、最小距離にある学習データをサポートベクトルと呼ぶ。また、データが図－5 のように平面で分離できないような分布を持つとき、カーネル関数というデータを非線形な高次元空間に移す関数を用いて線形分離することができる。これをカーネルトリックと呼ぶ。



図－4　識別超平面



図－5　カーネルトリック

2.4. ハードウェア

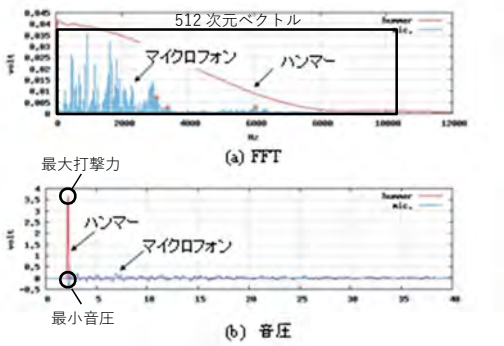
データ収録に用いるハードウェアは、従来、健コン診断ポータブルで用いたハードウェア（図－6）である。ハンマは打撃力を収録できる 250g のインパクトハンマである。マイクロフォンは、コンクリートから発生する音のみを収録できるフード付マイクロフォンである。学習データを有効に使うためフード付マイクロフォンについては、異なったマイクロフォンでも、できるだけ同様な音圧データを得られるように改良を加えている。

図－6　健コン診断ポータブル

2.5. 打音法で得られるデータ

本システムで得られたデータを図－7 に示す。1 打撃で得られるデータは打撃力、音圧ともに、測定インターバルは 0.02msec で、2100 個（打撃前 2msec、打撃後 40msec）である。

厚さ評価では、図－7 に示す時系列波形の最大打撃力と 1 波目の最小音圧を用い、SOM および SVM では、音圧 FFT 波形の 0～24kHz（512 次元ベクトル）を用いる。したがって、厚さ評価では叩いた瞬間の音圧を使い、板のたわみの大きさを見ており、AI 的な評価では、打撃後の振動特性に着目することになる。したがって、板の広さ方向の情報も得られることになる。



図－7　打音データ例

2.6.　AI の学習

AI による打音法では学習させることで、判定の精度が向上するものと考えられる。ここでいう学習とは、属性（健全、欠陥）がついている波形データを集め、AI プログラムに覚えさせる作業となる。属性がついている波形データを集めるためには、

① 実構造物で、経験者が判定したデータを集める方法
② 試験体（欠陥既知）のデータを集める方法

それぞれメリットとデメリットがあるが、ここでは②の方法で学習させることとした。図―8 に示す、広さとかぶりが異なる円形空洞試験体の健全部と欠陥部でデータを取得することとした。②を用いた理由は、データの取得が簡単であることである。ただし、実際の構造物の浮き、はく離欠陥を網羅できるのか？という課題がある。そこでここでは、3 つの評価手法を用い、欠陥の有無の精度を向上させるのと同時にある程度の欠陥の規模を推定できるようにした。

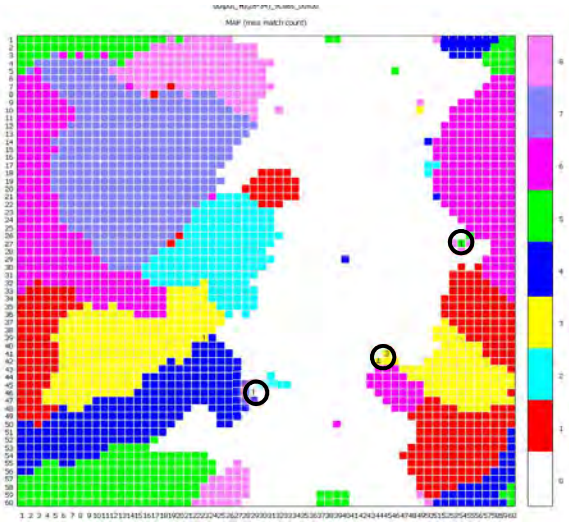
8 種の円形空洞試験体の空洞周辺より合計 4100 個の欠陥部と 4123 個の健全部の打音データを取得して、マイクロフォンの音圧波形から求めた周波数振幅をインパルスハンマーの周波数振幅の最大値で割ったものを学習データとした。

Φ50　：深さ 40mm
Φ100　：深さ 40mm，60mm
Φ150　：深さ 60mm，80mm
Φ200　：深さ 60mm，80mm，100mm

自己組織化マップのサイズを 60×60 とし、学習を 200 万回(1 データあたり 250 回)行うと図－9 のマップが得られた。

同じ学習データを欠陥部と健全部に分けてサポートベクトルマシンに与えた。カーネル関数としてガウスカーネルを用いた。

図－8　円形空洞試験体



図－9　学習されたマップ

3.　実構造物への適用

ここでは、薄い構造物（厚さ 20cm 程度）である橋梁の PC 桁（40 年間供用された切り出し試験体）と、厚い構造物（厚さ 70cm 程度）である汽水発電所の揚炭桟橋（供用中・供用開始後 35 年経過）の RC 梁を対象に本手法を適用した。どちらも、塩害による鉄筋腐食が原因の浮き、はく離が発生している。

3.1.　PC 桁

国総研が所有する切り出し PC 桁でマルチ打音法による判定を行った例を示す。調査対象は図－10 に示す、昭和 40 年から平成 17 年まで 40 年間供用され、塩害により撤去された PC 箱桁橋の主桁である。この主桁の内側の垂直な断面 A と、右上のハンチ部 B について判定を行った。

図－10　切り出し供試体

3.1.1.　切り出し PC 桁 断面 A

断面には大きなひび割れも入り、激しく損傷している。

図－11　切り出し供試体：断面 A

この断面を横 15 列、縦 5 列で格子状に打音したときの FFT による周波数振幅データを 512 次元の入力ベクトルとして与えて上記の自己組織化マップ(SOM)で判定した結果を図－12 に示す。図の、例えば”200-60”は大きさ 200mm、かぶり 60mm の位置に欠陥があることを示す。図－13 にサポートベクトルマシン(SVM)による欠陥と健全の判定結果を、図－14 に健コンによる推定厚さを示す。SOM による健全部(図では”Health”と表示)と SVM による健全部と判定された打音点は概ね一致し、推定部材厚の健全部(板厚よりも大きく推定された点)と欠陥部(板厚よりも小さく推定された点)も概ねこれらと一致した。推定部材厚は相対的な値であり、全体での分布を見ないと欠陥部を推定することが難しいが、SOM と SVM による判定は打撃点ごとに健全であるか、欠陥であるかを判定できる。

・SOM の判定

各1回目の測定　推定厚さ

	6-A-0			6-A-1			6-A-2			6-A-3			6-A-4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	200-80	200-80	200-60	200-60	150-60	200-80	200-60	200-60	200-60	200-60	100-40	150-60	150-60	150-60	Health
2	200-80	200-80	Health	200-80	200-60	200-60	150-80	200-100	50-60	Health	Health	Health	Health	50-60	Health
3	200-80	200-60	200-60	Health	Health	Health	Health	Health	Health	Health	Health	Health	Health	Health	Health
4	200-80	200-100	200-80	Health	Health	Health	Health	Health	50-60	Health	150-60	Health	Health	Health	Health
5	Health	Health	150-60	150-60	Health	Health	Health	Health	Health	Health	200-80	200-60	Health	Health	Health

図－12　SOM による判定結果
(欠陥の大きさと深さ)

・SVMの判定

	6-A-0			6-A-1			6-A-2			6-A-3			6-A-4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	健全	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	健全	欠陥	欠陥	欠陥
2	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	健全	欠陥	健全	健全	健全	健全
3	欠陥	欠陥	欠陥	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全
4	欠陥	欠陥	欠陥	健全	健全	健全	健全	健全	欠陥	欠陥	欠陥	健全	健全	健全	健全
5	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	欠陥	欠陥	健全	健全	健全

図－13　SVM による判定結果 (欠陥または健全)

・推定部材厚

各1回目の測定　推定厚さ

	6-A-0			6-A-1			6-A-2			6-A-3			6-A-4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	77	49	65	107	745	68	64	77	103	139	144	220	176	4103	181
2	80	74	83	95	95	113	135	178	206	261	198	276	250	238	256
3	89	89	75	110	179	250	296	258	223	296	231	238	227	226	346
4	46	29	43	259	375	301	320	320	236	227	234	264	258	264	294
5	348	318	310	314	285	376	317	238	251	283	59	38	264	294	296

図－14　健コンによる推定厚さ(mm)

3.1.2.　切り出し PC 桁 ハンチ部 B

ハンチ部は上部が幅 80cm、下部が幅 18cm となっている。

図－15　切り出し供試体：ハンチ部 B

同様に、ハンチ部分を横 9 列、縦 4 列で格子状に打音したときの自己組織化マップ(SOM)による判定結果を図－16、サポートベクトルマシン(SVM)による判定結果を図－17、健コンによる推定厚さの測定結果を図－18 に示す。

・SOMの判定

	6-B-0			6-B-1			6-B-2	6_B_2	6_B_2
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Health	200-60	Health	Health	Health	Health	150-60	Health	Health
2	200-60	200-60	200-80	200-60	200-80	200-60	200-60	100-60	Health
3	200-60	200-60	Health	200-60	200-80	200-80	200-80	200-60	Health
4	Health	200-60	Health	200-60	200-60	200-60	200-60	150-60	150-60

図－16　SOM による判定結果
(欠陥の大きさと深さ)

・SVMの判定

	6-B-0			6-B-1			6-B-2	6_B_2	6_B_2
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	欠陥	健全	健全	健全	欠陥	健全	健全	健全	健全
2	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	健全
3	欠陥	欠陥	健全	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	健全
4	健全	欠陥	健全	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥	欠陥

図－17　SVM による判定結果 (欠陥または健全)

・推定部材厚

	6-B-0			6-B-1			6-B-2	6_B_2	6_B_2
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	292	344	328	419	225	428	357	447	397
2	154	81	84	61	60	65	60	225	530
3	138	64	114	47	38	46	73	157	1607
4	1697	71	137	72	56	54	75	207	171

図－18　健コンによる推定厚さ(mm)

これらについても、SOM と SVM による健全と判定された点は推定部材厚が厚く評価された点に一致している。

3.2.　RC 梁

汽水発電所の揚炭桟橋の RC 梁で検査を行った結果を図－19 に示す。構造物は海面に近く、塩害による鉄筋の腐食に伴う浮きが生じていた。図－19 では健コンによる推定厚さが打音点に直接書かれている。表－1 に打音点ごとの自己組織化マップ(SOM)とサポートベクトルマシン(SVM)による判定と健コンによる推定厚さ、および点検者による判定と、SOM と SVM による判定との一致・不一致を示す。

図－19　揚炭桟橋の RC 梁

表－1　揚炭桟橋の RC 梁の判定結果

測定点番号	推定部材厚 (mm)	Row	Col	SOM	SVMの判定	人による判定	SOMとの判定不一致	SVMとの判定不一致
1	184.156	22	52	200-60	欠陥	欠陥		
2	242.698	43	47	150-60	欠陥	欠陥		
3	230.156	43	47	150-60	欠陥	欠陥		
4	165.41	20	51	200-60	欠陥	欠陥		
5	265.367	43	47	150-60	欠陥	欠陥		
6	208.24	21	51	150-80	欠陥	欠陥		
7	300.725	42	44	150-60	健全	欠陥		X
8	231.587	48	46	200-60	欠陥	欠陥		
9	154.959	34	9	200-60	欠陥	欠陥		
10	282.744	42	44	150-60	欠陥	欠陥		
11	210.952	21	51	150-80	欠陥	欠陥		
12	260.13	46	29	Health	欠陥	欠陥	X	
13	216.085	37	52	150-60	欠陥	欠陥		
14	291.943	47	29	150-80	欠陥	欠陥		
15	236.423	38	51	150-60	欠陥	欠陥		
16	325.564	42	44	150-60	欠陥	健全	X	X
17	274.679	20	50	Health	欠陥	健全		X
18	480.573	1	37	Health	健全	健全		
19	340.379	42	44	150-60	健全	健全	X	
20	348.146	42	44	150-60	健全	健全	X	
21	314.576	36	41	Health	健全	健全		
22	323.368	38	39	Health	健全	健全		
23	291.73	39	23	150-60	健全	健全	X	
24	381.57	41	45	150-60	健全	健全	X	
25	362.213	36	41	Health	健全	健全		
26	322.824	27	54	200-100	欠陥	健全	X	X
27	349.612	36	41	Health	健全	健全		
28	413.976	41	45	150-60	健全	健全	X	
29	351.401	19	48	Health	健全	健全		
30	309.397	42	44	150-60	健全	健全	X	
31	406.897	36	41	Health	健全	健全		
32	370.554	41	45	150-60	健全	健全	X	
33	352.861	14	47	Health	健全	健全		

表では推定厚さが 300mm 以下の欄をグレーにしている。この結果では推定厚さが 300mm 以下の部分とサポートベクトルマシン(SVM)による判定は比較的よく一致しているが、自己組織化マップ(SOM)とは不一致の部分が多い。自己組織化マップで不一致となる判定の個数を対応するセルに記入したものを図－9 に示す。マップでは不一致点は全て健全部(白)との境界近くにあり、かろうじて欠陥に分類されるが、健全に近い欠陥であることがわかる。

4.　まとめ

従来の物理的な評価手法に 2 種類の AI 的な評価手法を加えることにより、評価結果の信頼性が向上した。

現状の課題として、以下の項目があげられる。

① 三つの評価結果が異なる結果を出した場合にどのように最終的な評価を行うのか

② 打撃後の経過状況における音圧波形を用いること、AI の学習手間を考えると、できるだけ、異なったセンサで誰がどのように叩いても均質の音圧波形が得られるようにする必要がある。

③ AI 的な手法についてはそれぞれについて、精度を向上させる工夫が必要である。そのためには、必要に応じて試験体の種類を増やすこと、実構造物の欠陥のディメンジョンを含む学習データを集めることが必要となる。

参考文献

1) 北川真也，鍋谷雅司，高橋浩，伴享，歌川紀之：健コン診断ポータブルの開発―打音法によるコンクリート診断技術―，佐藤工業技術研究所報 No.34，pp.9-15，2009.

2) L.Cremer, M.Heckel, E.E.Ungar：Structure-Borne Sound, Springer-Verlag Berlin Heidelberg ，1973.

3) Teuvo Kohonen, “Self-Organizing Map (Second Edition)”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995.

4) Comparing support vector machines with Gaussian kernels to radial basis function classifiers, IEEE Trans. Signal Processing, Vol.45, No.11，pp.2758-2765，1997.

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

輻射式冷暖房システムの冷房効果等の検証について

Verification of air conditioning cooling effect of RADIATION COOLING/HEATING SYSTEM

鈴木秀治*、内山大勢*
Hideharu Suzuki，Taisei Uchiyama

* 株式会社エース・ウォーター（〒812-0036　福岡市博多区上呉服町 1 番 8 号　北九州銀行ビル）

キーワード：輻射，部分冷房，WBGT，省エネ
（Radiation, Partial cooling, WBGT, Energy saving）

1. はじめに

近年，大規模台風やゲリラ豪雨，大地震などの大規模な自然災害により，多くの住民が体育館や公民館などの緊急指定避難場所や指定避難所に避難を余技なくされる状況が多発している．

指定避難所は「災害の危険性があり，避難した住民が，災害の危険性がなくなるまで必要な期間滞在したり，災害により自宅へ戻れなくなった住民等が一時的に滞在させるための施設として市町村長が指定する．」（災害対策基本法第 49 条の 7）[1] とされているが，報道などでも明らかなように環境が整った指定避難所は十分とは言えない状況にある．

このような中，福岡県遠賀郡芦屋町では指定避難所である町立総合体育館**(写真-1)**の耐震等の改修に併せ環境改善のため新たに冷暖房装置を設置した．

設置にあたっては，設置費用が極力安価であることは当然であるが，その他に以下の３つの条件を満たす冷暖房システムについて検討が行われ，熊本県宇土市民体育館等で設置実績のある輻射式冷暖房システムが採用され，2019 年 3 月に完成した．

写真-1 芦屋町総合体育館（外観）

① 体育館使用の際の冷暖房等に関わる電気料金が利用者負担になることから電気料金が安価であること．

② バドミントンや卓球といった競技を考慮して風の影響が小さいこと．

③ 運転管理や維持管理に関わる人的・金銭的負担が小さいこと．

本報告は，輻射式冷暖房システムを設置した体育館の温度等の実地計測結果に基づき，部分冷房と電気料金削減について考察したものである．

2. 輻射式冷暖房システム設置の概要

(1) 輻射式冷暖房システムについて

輻射式冷暖房システムの概要を**図-1** に示す．

本システムは，熱源機（室外機）**（写真-2）**で温度設定された冷（温）水が輻射パネル（室内機）**（写真-3）**を循環し，輻射パネルからの輻射のみにより輻射パネルの前面方向の冷暖房を行うものであり，一般の対流型冷暖房装置のように冷温風の吹き出しがないことが大きな特徴となっている．

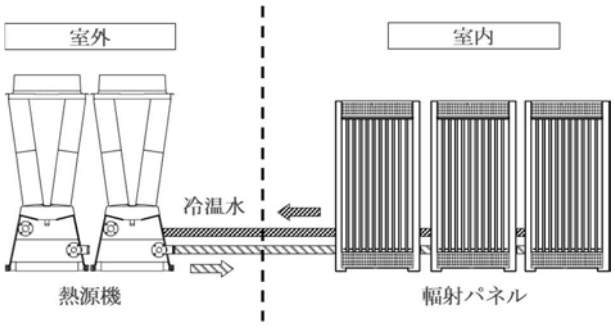


図-1 輻射式冷暖房システムの概要

輻射パネルは放射率を高めるためにアルミニウム製で，特殊なコーティングを施してある．また，パネルにはアルマイト加工されたフィン形状の冷温水導管が配置されている．

写真-2 熱源機（室外機）

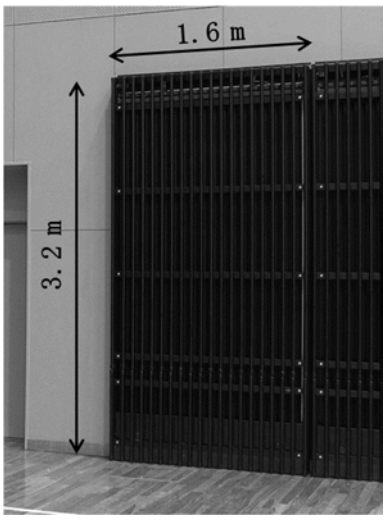


写真-3 輻射パネル（室内機）

(2) 必要冷暖房能力について

一般の体育館は日本バレーボール協会施設基準を用い，12.5m 以上の天井高が確保されている場合が多い．しかし，実際に人が利用する空間は床面から高さ 3.0m 程度であり，それより上の空間では冷暖房の必要がない．

このような考え方に基づいて本システムでは高さ 3.0m までの空間を部分的に冷暖房するものとして必要冷暖房能力を定めた．対流型冷暖房装置を対象とした熱負荷計算により熱負荷を求め，3.0m の高さまでの部分冷房を考慮して冷房負荷に補正係数を乗じて必要冷房能力を決定している．

補正係数はこれまでの設置実績等を基に 0.5 を採用した．

熱負荷計算の概要は**表-1** に示すとおりである．

表-1 熱負荷計算の概要

		メイン アリーナ	多目的 集会室
床面積（m^2）		1,198	662
天井高（m）		18.1	12.4
在室人数（人）		343	50
外気量（m^3/h）		686	100
冷房	外気最高温度（℃）	33.5	
	室内設計温度（℃）	26.0	
	〃　湿度（%）	50.0	
暖房	外気最低温度（℃）	-0.6	
	室内設計温度（℃）	14.0	
	〃　湿度（%）	50.0	
冷房負荷（kW）		216.27	132.33
暖房負荷（kW）		117.69	87.83
必要冷房能力（kW）		**108.13**	**66.16**

(3) 輻射式冷暖房システムの設置状況

計算結果に基づき，**表-2** に示すように輻射パネルを設置した．設置状況は，**写真-4** 及び**図-2** に示すとおりである．

輻射パネルのサイズは壁面の寸法により若干の違いはあるが，幅は約 1.6m，高さはメインアリーナ 3.1m，多目的集会室 3.6m とした．

熱源機は対流型冷暖房装置の室外機と同じ仕様であり，メインアリーナには 118kW×2 台，多目的集会室には 150kW×1 台を設置した．

表-2 輻射パネル設置の概要

	メイン アリーナ	多目的 集会室
パネル高さ（mm）	3,100	3,600
パネル幅（mm）	1,580～1,606	1,580～1,607
パネル１枚当たりの導管数（本）	36	
パネル１枚当たりの冷却能力（kW）	2.36	2.86
全パネル数（枚）	47	26
全導管本数（本）	1692	936
全冷房能力（kW）	112.33	74.36

写真-4 輻射パネルの設置状況

図-2 輻射パネル及び温湿度計設置図

3. 計測概要

(1) 温湿度計測

図-2 に示す位置において 1 分間隔で 24 時間 3 カ月（7～9 月）連続の温湿度計測を行った.

メインアリーナ内の 1 階競技エリア（**図-2 ①～⑥**）には一箇所あたり床面から高さ 10cm，1.0m，2.0m の位置に，計 18 個の温湿度計を設置した.

さらに，観客席（**図-2 ⑦**，高さ 5.0m）および室外（**図-2 ⑧**，高さ 50cm）の位置にもそれぞれ 1 個，温湿度を設置した.

写真-5 温湿度計

実験に使用した温湿度計は**写真-5**，1 階競技エリア，2 階観客席，室外それぞれの温湿度計の設置状況は**写真-6～8** のとおりである.

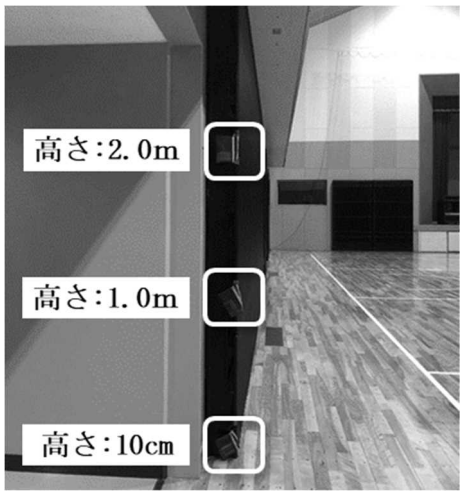


写真-6 温湿度計設置状況（1 階競技エリア）

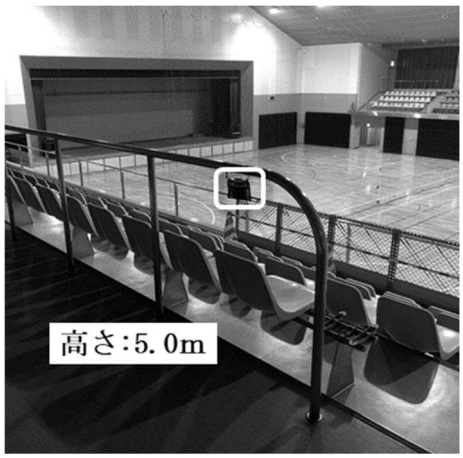


写真-7 温湿度計設置状況（2 階観客席）

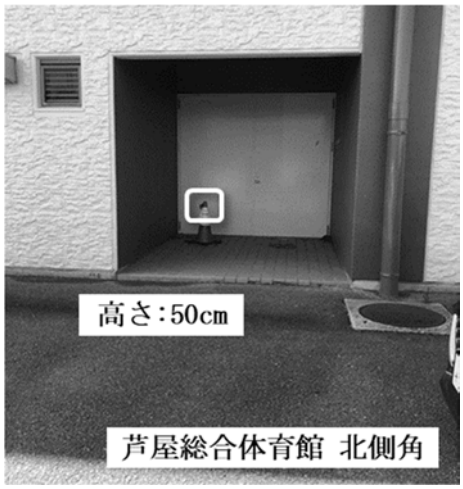


写真-8 温湿度計設置状況（室外）

(2) 消費電力計測

室外機に設置された電力計で，温湿度と同様に 1 分間隔で 24 時間計測を行った．

4. 計測結果および考察

(1) アリーナ内の温度ムラについて

図-3 に 7 月 12 日のメインアリーナ壁面沿いの①～⑥のそれぞれの高さにおける温度推移を示す．

図から明らかなように 1m の高さでは，②，④，⑤，⑥が①，③よりも約 2.0℃高い値を示しているが，2.0m の高さでは，①～⑥の各地点における温度はほぼ同じ値を示している．

2m 地点のデータが示すように，輻射パネル近傍では熱源機（室外機）からの距離にかかわらずアリーナ全域にわたり温度ムラはなくほぼ均一に冷房できていることがわかる．なお，1m の高さにおける温度差は利用者の出入り等に起因するものであると考える．

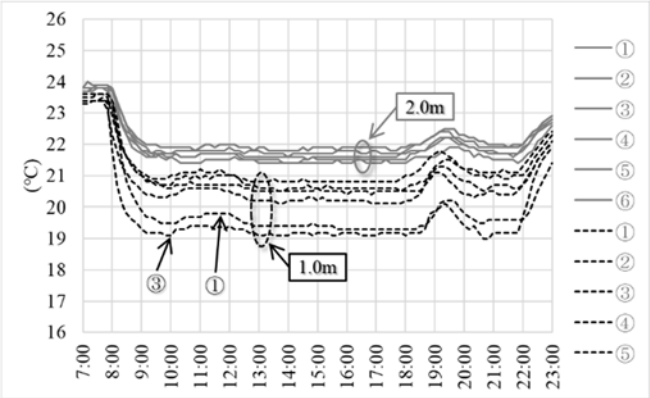


図-3 各位置における一日の温度推移（7 月 12 日）

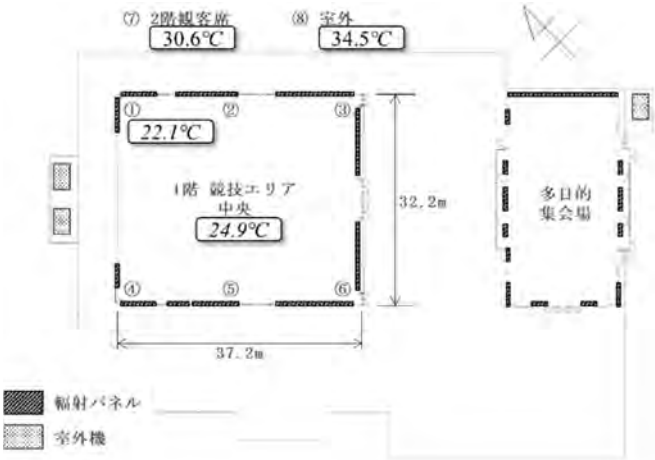


図-4 温度分布（8 月 9 日 14 時）

一方，アリーナ中央と壁面近傍との温度ムラに関する計測結果は**図-4** のとおりである．

高さ 1m 地点の壁面近傍が 22.1℃なのに対して，中央では 24.9℃であった．パネルから最も遠いアリーナ中央においても温度差を 3℃以内に保つことができており，アリーナ全域にわたりほぼ均一に冷房できているものと考える．

(2) 部分冷房効果について

計測期間の中で最高気温が最も高かった 8 月 9 日の温度推移を**図-5** に示す．冷暖房システムの運転時間は体育館利用開始時刻 30 分前の 8:00 から利用終了時刻の 22:00 までである．

また，高さ 2.0m までの温度は①～⑥地点の平均値である．

外気温は最高気温 34.5℃となる 14:00 まで上昇を続けそれ以降下降している．高さ 5.0m 地点の温度も外気温の推移にやや遅れながら上昇・下降している．

これに対し，高さ 2.0m までの温度変化に着目すると，運転開始の 8:00 から 9:00 までの 1 時間（**図-5（イ）の範囲**）で急激に下がり，それ以降運転停止の 22:00 までほぼ一定となっている．

以上のことから，高さ 2.0m と 5.0m の間に温度境界が生じ，人が利用する空間（輻射パネルの高さ）のみの部分冷房が出来ていることがわかる．

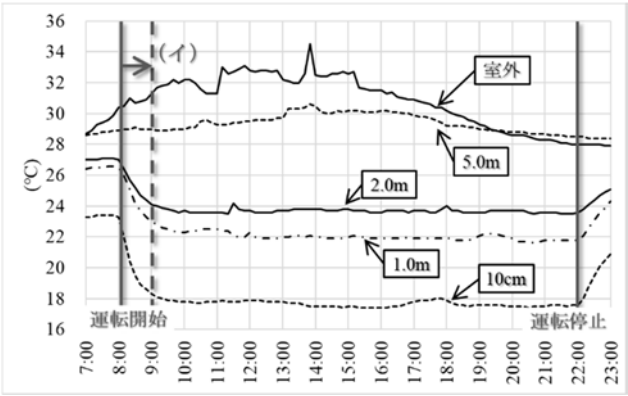


図-5 1 日の温度推移（8 月 9 日）

(3) 定温維持について

8 月の 1 ヵ月間の室外の最高気温と，その時点における 1 階競技エリア（10cm，1.0m，2.0m），2 階観客席（5m）の温度及び利用者数を**図-6** に示す．10cm，1.0m，2.0m の温度データは，6 箇所（**図-2①～⑥**）の平均値である．

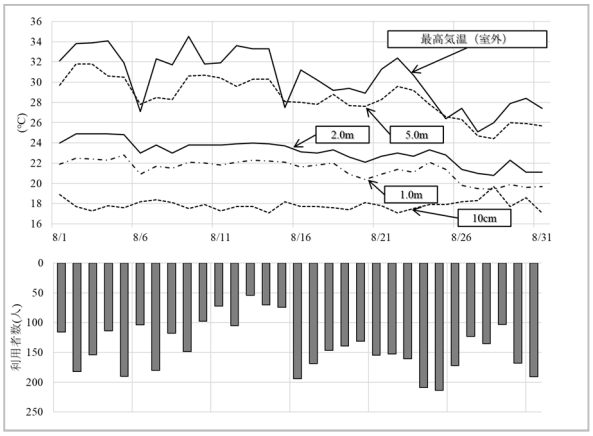


図-6 最高気温時の温度及び利用者数

図-6 から最高気温のみならず室内の熱負荷となる利用者数の変化にかかわらず，継続して設定温度に保たれていることが明らかである．

(4) WBGT について

WBGT（暑さ指数）は ISO 等で国際的に規格化された労働環境や運動環境の指針であり，日本生気象学会の「日常生活における熱中症予防指針」[2] 等でも活用されている．

WBGT は計算式からも求められるが，本報告では温湿度のデータから，（公財）日本スポーツ協会「熱中症予防運動指針」の運動に関する指針 [3] を参照し，推定値を算定した．

8 月の 1 ヵ月間における日最高気温時の WBGT 推定値は**図-7** のとおりである．

外気の WBGT 値が 28～31℃の「厳重警戒（激しい運動は中止）」となる日が 15 日間あり，高さ 5m 地点では 25～28℃の「警戒（積極的に休息）」となる期間もかなりの日数となる．

一方，2m 以下では最高値でも約 22.5℃であり，ほとんどが 22℃以下で 21～25℃の「注意（積極的に水分補給）」から 21℃未満の「ほぼ安全（適宜水分補給）」となっており，夏期においても快適にスポーツができる環境が維持できている．

ちなみにアリーナ利用者からは前年までとは大きく異なり快適な環境でスポーツができることへの喜びの声が多く聞かれた．また前年度に比べ利用者数も大幅に増加したとのことであった．

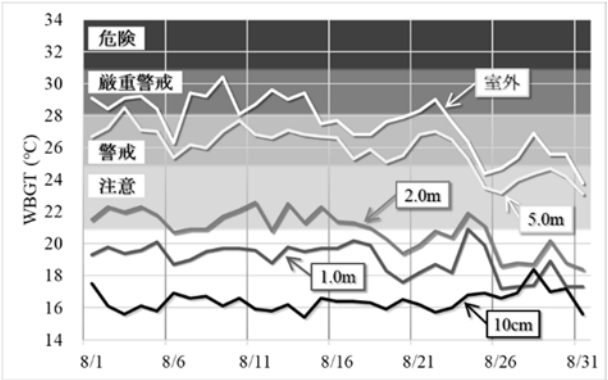


図-7 WBGT 値（8 月）

(5) 消費電力（電気料金）について

図-8 に 8 月の日消費電力と試算した日電気料金を示す．

概算の電気料金は室外機の電力計の値を用い（1）によりを試算した．

消費電力（kWh）× 電力量料金（円/kWh）

＝ 電気料金（円）・・・(1)

電力量料金は契約の種類によって異なるが，本報告では芦屋町の契約実績に基づき 13.28 円/kWh を用いた．

1 時間当たりの電気料金は 1 日の運転時間が 14 時間であることから，試算で求めた日電気料金を 14 で除した金額とした．

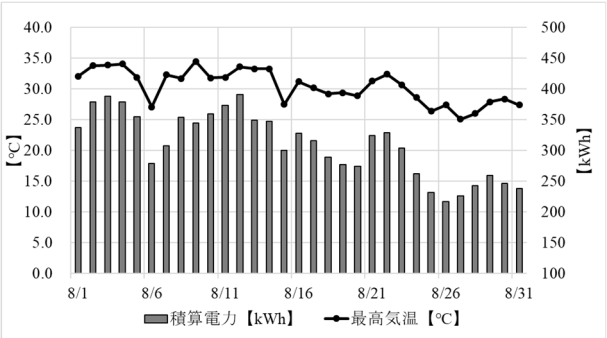


図-8 最高気温及び日消費電力

図-8 から明らかなように日消費電力は外気温や利用者数によってばらつきがあるものの，最大390kWh，平均値としては 310kWh であった．

この値を基に日電気料金を求めると平均 4,117 円（1 時間あたりの電気料金は平均 294 円）となる．なお，実際の電気料金にはこのほかに基本料金も含まれる．

次に 1 時間当たりの冷房関連料金について確認できた他自治体体育館との比較を**表-3** に示す．

それぞれの利用料金には電気料金のほかに管理費等も含まれると推測されるため，直接比較はできないものの，ほぼ同規模の体育館を有する他自治体に比べ安価であり，利用する住民はもとより芦屋町の負担軽減にも大きく寄与できるものと考える．

表-3 1 時間当たりの利用料金

施設名	面積 (㎡)	1 時間当たりの利用料金(円)
芦屋町総合体育館 [4]	1,198	380
A 市 総合体育館	1,110	3,240
B 市 総合体育館	1,198	2,420

5. まとめ

本計測を通じて得られた成果をまとめると以下のとおりとなる．

(1) 約 1,200 ㎡のアリーナの壁面近傍と中央の温度差（温度ムラ）は 3℃以下であり，輻射式冷暖房システムはアリーナ全域をほぼ均一に冷房できることが確認できた．

(2) アリーナ内各高さの温度計測により，輻射パネルの高さまでの部分冷房を効率的に行っていることが確認できた．

(3) 利用者数や外気最高気温の変化に関わらずアリーナ内の温度をほぼ一定に保持できることが確認できた．

(4) WBGT 値算定の結果，輻射式冷暖房システムによりスポーツに適した環境を提供できることが確認できた．

(5) 消費電力計測および電気料金の試算により，輻射式冷暖房システムの使用により電気料金の低減を図れることが確認できた．

本計測はアリーナ利用者や体育館管理者の多大なご支援により実施できたものであるが，夏期の冷房に関するもののみであり，冬期の暖房に関するデータなどについても計測したいと考える．

謝辞

本報告のための計測等にあたり協力していただきました芦屋町及び利用者の皆様，並びに計測方法等に関するご指導をいただきました 井上 浩一 教授（北九州市立大学 国際環境工学部 機械システム工学科）に対し深く感謝申し上げます．

参考文献

1) 災害対策基本法第 49 条の 7

2) 「日常生活における熱中症予防指針 Ver.3」（http://seikishou.jp/pdf/news/shishin.pdf）

3) 日本スポーツ協会「熱中症予防運動指針」の運動に関する指針

4) 芦屋町ホームページ (http://www.town.ashiya.lg.jp/view.rbz?nd=301&ik=1&cd=403)

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年2月）

鋼板サンドイッチ耐火断熱パネルの耐震性能に関する研究

STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF FIRE RESISTANT HEAT INSULATING SANDWICH PANEL MADE OF STEEL PLATE AND ROCKWOOL

宮里 直也*，外山 圭佑**
MIYASATO Naoya and TOYAMA Keisuke

* 博(工) 日本大学理工学部 建築学科
** 修(工) スタイロ加工株式会社

キーワード：ロックウール，耐火パネル，間仕切り壁，耐震性能，振動試験，サンドイッチパネル
(rock wool,fire resistant panel,partition wall,seismic performance,vibration test,sandwich panel)

1. はじめに

建築物内部を区画する防火区画は、一般に壁・床により構成される。この防火区画を構成する壁・床は、建築基準法第2条第5号の主要構造部にあたる。地震や台風などの外力に対して直接的に抵抗する構造耐力上の要素ではないものの主要構造部にあたるのは、火災の際に延焼を防ぎ、避難を助けるなど耐火・防火の側面からみた際に、建物を構成する重要な要素であることによる。また、防火区画を構成する間仕切壁に求められる性能は、延焼防止の耐火性能のみならず、地震に対する高い耐震性能も求められる。これは、地震発生直後に想定される火災に対する防火区画として性能を担保するためには、区画壁には延焼防止の機能を損なうような地震に伴う損傷等が許されないためである。地震による局部的な破損や、部分的な脱落であったとしても延焼防止性能が著しく低下し、隣接する区画に火災や煙が拡大してしまうのは、火災の性質上、明らかである。

しかしながら、2011年3月の東北地方太平洋沖地震により、工場・倉庫等の建物において使用されたALCパネル等の外壁及び間仕切壁に関して、大破や脱落した被害事例が幾つも報告されている[1)]。特に、階高の高い倉庫等の鉄骨建物において、必要な耐震性能を満たすために設けられる鉄骨中間梁により、上下に分割されて取り付けられたALC間仕切壁の被害が見られたこと[2)]も特徴的である。なお、被害がみられたALC間仕切壁の取り付けが、地震時の架構の層間変形への追随性能が高い、ロッキング構法によるものであり、その後の二次部材の設計に与えた影響は大きい事象であった。

また近年、日本では比較的大きな倉庫火災が多発している[3)]。倉庫は一般的な建物に比べて巨大な内部空間を有するものが多く、物品が天井高くまで積まれ、大量の可燃物が集積されることが倉庫火災の被害拡大の一因となっている。このため、巨大な内部空間を分ける耐火断熱パネルの需要が高まっているが、間仕切壁の大型化に伴い地震時の耐震性と安全性に関して懸念されている。

そこで本報では、大判断熱間仕切壁を対象に地震時の挙動の把握及び安全性の確認を目的として、間仕切壁の壁面外方向への動的加振試験を行った。

表-1 試験体概要

試験体	鋼板板厚 (mm)	総重量 (kg)	曲げ剛性 (×10¹¹N・mm²)	1次固有振動数* (Hz)
8m	0.5	177.3	4.30	3.45
10m	0.8	221.8	6.90	2.82
12m(1枚)	1.0	266.3	9.20	2.27
12m(3枚)	1.0	798.9	9.20	2.26

＊数値解析結果

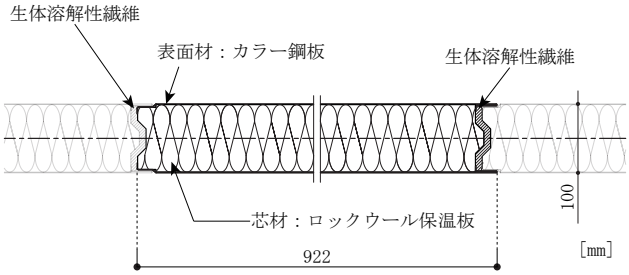


図-1 耐火断熱パネル断面図

2. 試験体概要

試験体概要を表-1に示す。なお、表中の1次固有振動数は、事前に有限要素解析プログラム(ADINA ver9.4.2)で行った数値解析結果である。試験体は表面材が鋼板、芯材がロックウールにより構成されている厚さ100mmの耐火断熱パネルであり、パネル同士の横方向接合部は嵌合接合とし、耐火性能を評価するうえで横方向接合部における空隙が問題となるた

め、試験体パネル同士の間には耐火性能の高い生体溶解性繊維を用いている（図-1）。パラメータは、パネル1枚について高さ8,10,12mの3ケース、横方向に連結された際の挙動の把握を目的として高さ12mのみパネルを3枚横に連結した1ケース、計4ケースの検討を行う（図-2）。幅はパネル1枚で922mm，3枚連結で2,722mmとなる。また、試験体の高さごとに鋼板の板厚を変えており、それに伴い各試験体で曲げ剛性が異なる値となっている。各試験体は、取り付け用のクリアランスを確保するため、試験体上部を30㎜切り落として設置を行っている。

3. 試験概要

本試験体の面外方向の動的挙動の把握を目的として、「共振振動試験」及び建物の揺れを想定した「動的加振試験」を行う。

「共振振動試験」は、数値解析により事前に求めた各試験体の共振振動数を参考にしながら、異なる振動数の正弦波により試験体を加振する。その後、各々の加速度応答倍率から実際の共振振動数を算出し、求められた共振振動数の正弦波による加振を繰り返すことで、共振時の挙動の把握を行う。

「動的加振試験」は、実際に耐火断熱パネルを取り付ける建物を高さ30㎜のS造倉庫と想定し、(1)式より算出した固有振動数1.1Hzの正弦波で加振することで、試験体の挙動の把握及び安全性の検証を行う。

$$f=1/(0.03h) \qquad (1)$$

但し、fは固有振動数(Hz)、hは建物高さ(m)を表す。

測定時間を20秒とし、加振準備及び停止までの前後各10秒を加えた計40秒加振した。なお、共振振動試験と動的加振試験は同一試験体を使用している。

図-3に試験体の全体図、図-4～8に取り付け詳細図及び設置状況をそれぞれ示す。加速度計はアクチュエータと試験体中央に設置し、図-3に示すY方向のアクチュエータの加速度を「入力加速度」、試験体中央の加速度を「応答加速度」として測定する。また、変位はアクチュエータの振幅を「入力変位」、試験体中央の応答加速度を2回積分して算出した値を「応答変位」としている。試験は、試験体頂点部を反力壁に設置した鉄骨冶具に、また脚部を下部に設置したスライド板にそれぞれ取り付け、スライド板をアクチュエータを用いて加振することで行う。試験体と鉄骨冶具はL字アングルを介して貫通ボルト及びドリルビスを用いて取り付けている。また、実験で得られた時刻歴波形にはノイズが含まれているためフーリエ変換を用いて、フィルター処理を行った（図-9）。なお、フィルター処理の振動数範囲は、入力した各振動数±0.5Hzと設定した。

図-2　試験体設置状況

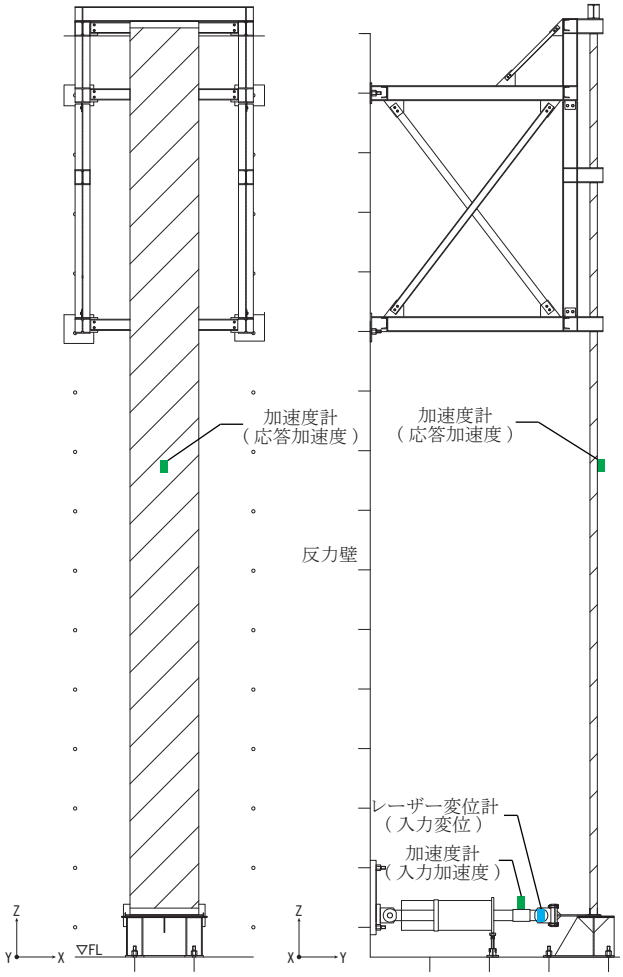


図-3 試験全体図

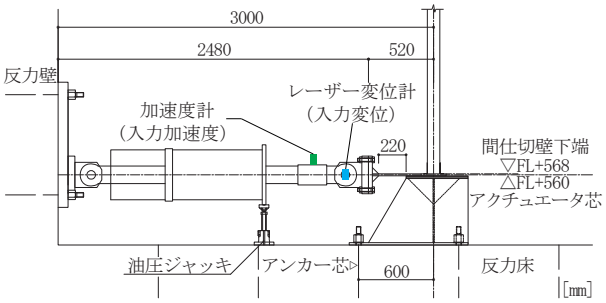
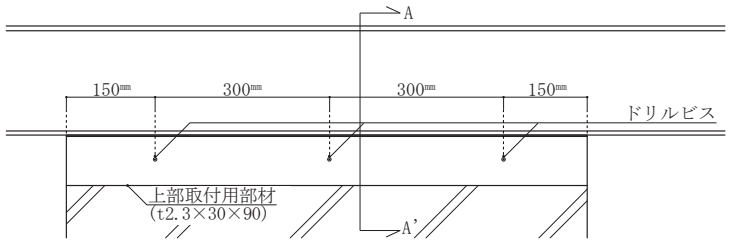
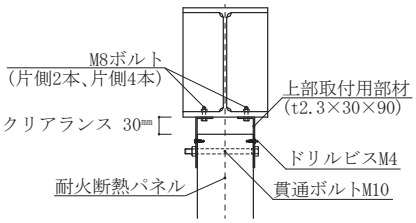


図-4　アクチュエータ取り付け詳細図

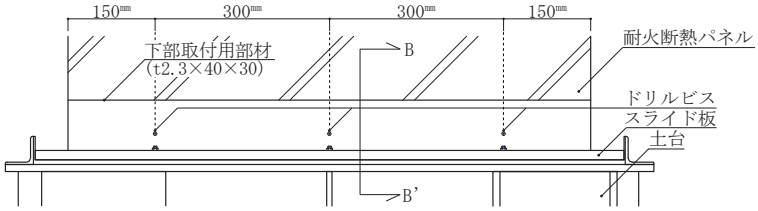


a)頂点部立面図

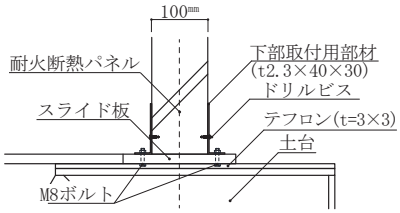


b)頂点部A-A'断面図

図-5 試験体頂点部詳細



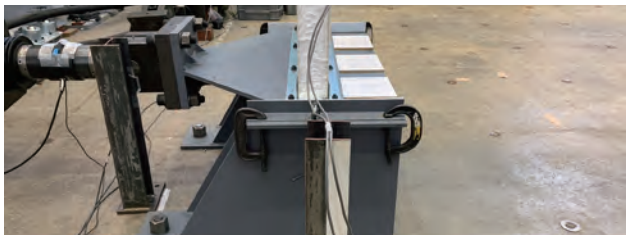
a)脚部立面図



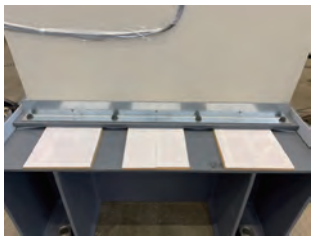
b)脚部B-B'断面図

図-6 試験体脚部詳細

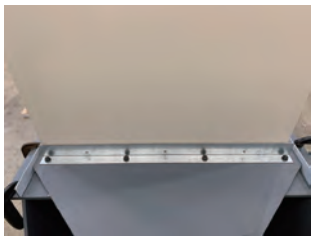
a)スライド板と耐火断熱パネルの取り付け状況・脚部前面



b)スライド板と耐火断熱パネルの取り付け状況・脚部側面



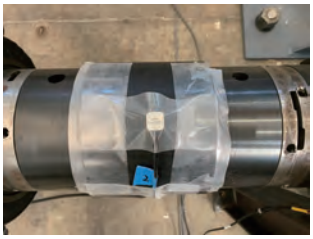
c)脚部アングル取り付け状況 (表)



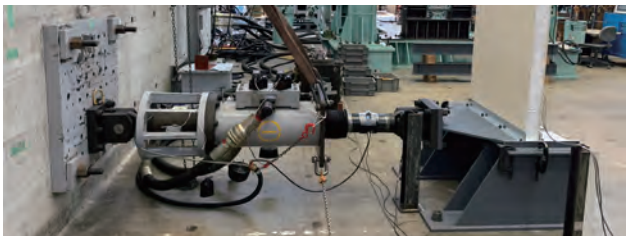
d)脚部アングル取り付け状況 (裏)

図-7 脚部取り付け状況

a)加速度計設置状況(アクチュエータ)

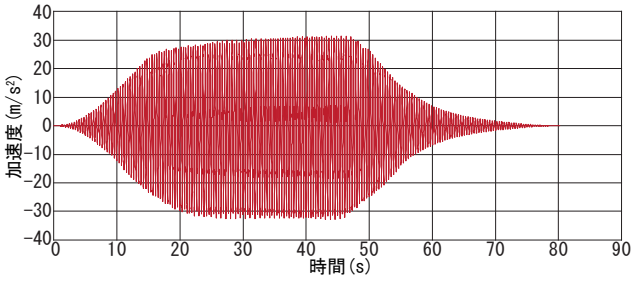


b)レーザー変位計設置状況

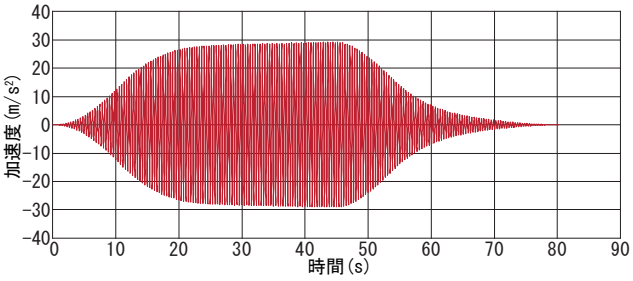


c)アクチュエーター設置状況

図-8 計測機器設置状況



a)耐火断熱パネル高さ12mの実験により得られた
応答加速度の波形(フィルター処理前)



b)耐火断熱パネル高さ12mの実験により得られた
応答加速度の波形(フィルター処理後)

図-9 波形のフィルター処理

4. 試験結果及び考察

4-1. 共振振動試験

数値解析結果より得られた固有振動数を参考に、アクチュエータにより入力加速度0.98m/s²一定で共振振動数の確認試験を行う。得られた試験結果から求めた加速度応答倍率(応答加速度/入力加速度)を図-10に示す。この試験から得られた共振振動数をもとに、共振振動試験を行う。

共振振動試験から得られた応答加速度を図-11のa-1)～4)に、応答変位をb-1)～4)に、最大値を表-2にそれぞれ示す。本試験で行った振動数(1.0～5.0Hz)の加振範囲内において2次モード以上の高次モードは見られなかった。共振時の応答加速度及び応答変位は、各試験体とも試験体中央部で卓越し、面外方向に弓なりに大きく変形する性状を示した。各試験体の高さにより比較すると共振時の最大応答加速度は22.53～28.90m/s²、最大応答変位は105.57～297.12mmとなっており、大きな違いが見られた。次にパネル枚数により比較すると、パネル1枚で応答加速度22.53m/s²、応答変位297.12mm、パネル3枚で応答加速度19.43m/s²、応答変位287.93mmとなっており、あまり差が見られなかったことから、パネル枚数による影響は小さいことが分かる。しかし、パネル加振後の応答波形を比較すると、減衰性能に違いが見られる。これはパネルの連結に伴う接合部の影響等が原因と推察される。

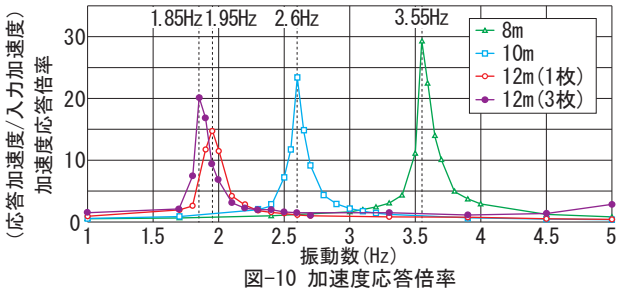
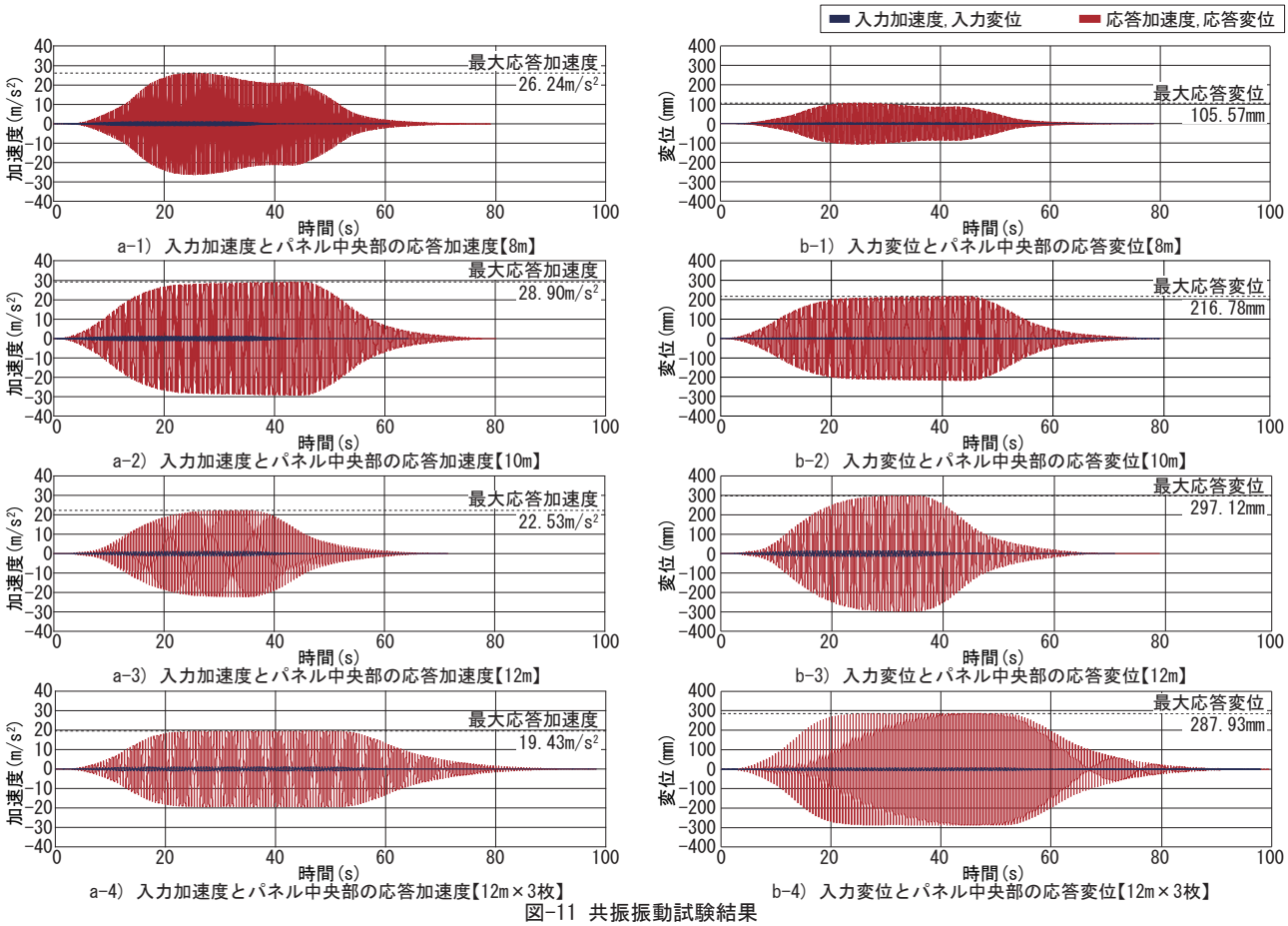


図-10 加速度応答倍率

表-2 共振振動試験最大値

試験体	周波数 (Hz)	入力加速度 (入力値) (G)	入力加速度 (計測値)		応答加速度 (m/s²)	入力変位 (mm)	応答変位 (mm)	加速度応答倍率
			(G)	(m/s²)				
8m	3.55	0.10	0.10	1.02	26.24	4.09	105.57	25.7
10m	2.60	0.10	0.12	1.14	28.90	8.54	216.78	25.4
12m(1枚)	1.95	0.10	0.11	1.11	22.53	7.16	297.12	20.3
12m(3枚)	1.85	0.10	0.10	1.01	19.43	7.37	287.93	19.3



a-1) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【8m】
b-1) 入力変位とパネル中央部の応答変位【8m】
a-2) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【10m】
b-2) 入力変位とパネル中央部の応答変位【10m】
a-3) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【12m】
b-3) 入力変位とパネル中央部の応答変位【12m】
a-4) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【12m×3枚】
b-4) 入力変位とパネル中央部の応答変位【12m×3枚】

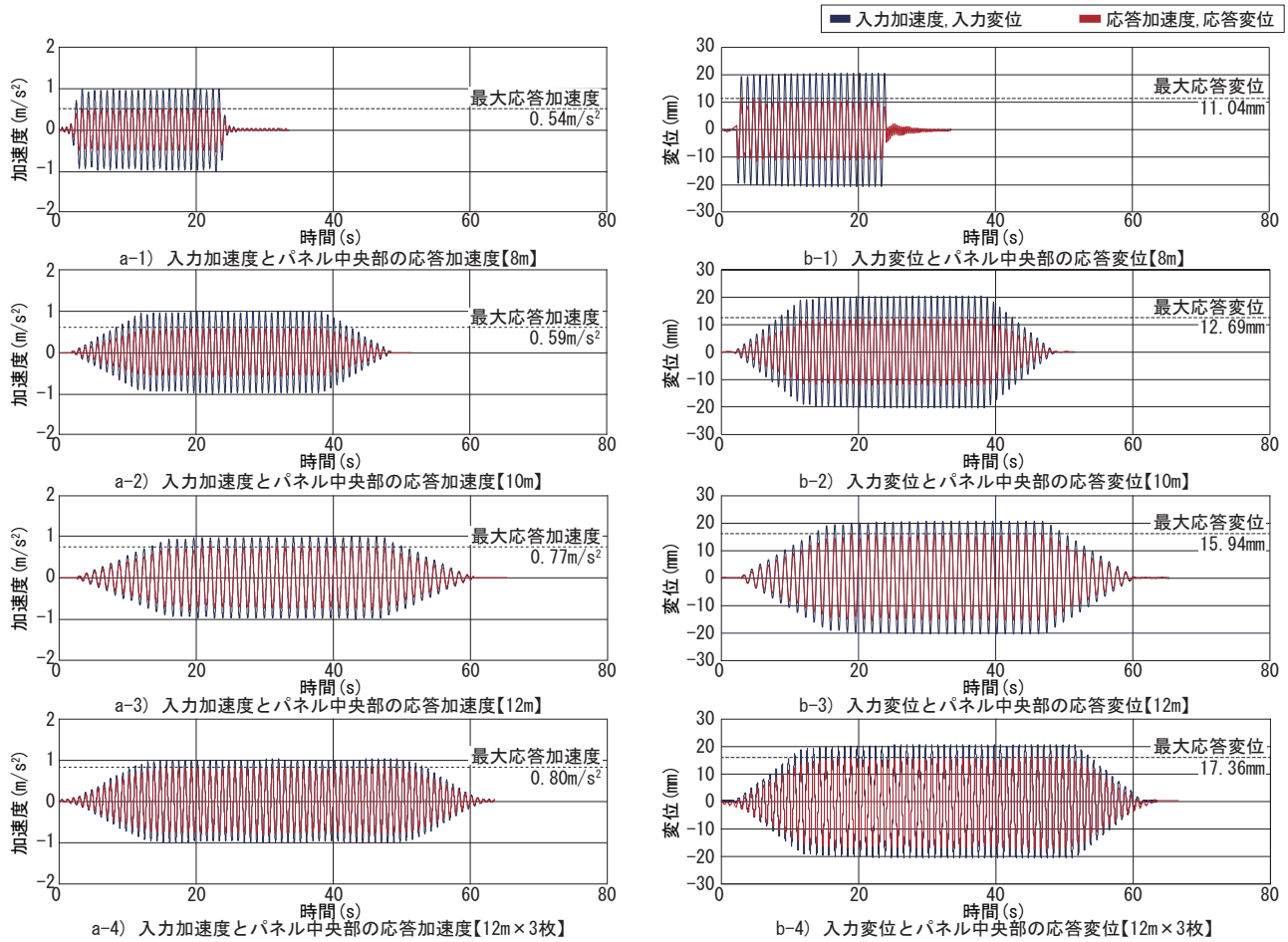
図-11 共振振動試験結果

4-2. 動的加振試験

動的加振試験結果を図-12のa-1)～4)に、応答変位をb-1)～4)に、最大値を表-3にそれぞれ示す。入力加速度0.1Gの時の最大応答加速度を比較すると、試験体8,10mではそれぞれ0.54m/s²,0.59m/s²を示し、概ね同様の挙動が確認された。一方、試験体12mでは0.77m/s²となっており、試験体高さが10mをこえると動的挙動が変化する可能性があることが示唆された。次に試験体12mのパネル1枚と3枚を比較すると、応答加速度、応答変位とも概ね同様の値を示し、パネルの枚数による影響は小さいことが分かる。各試験体とも入力加速度に対して応答加速度は小さい値を示したことから、想定した建物の固有振動数1.1Hzで加振した場合においては、建物の動的応答が試験体に与える影響が小さいことが把握された。

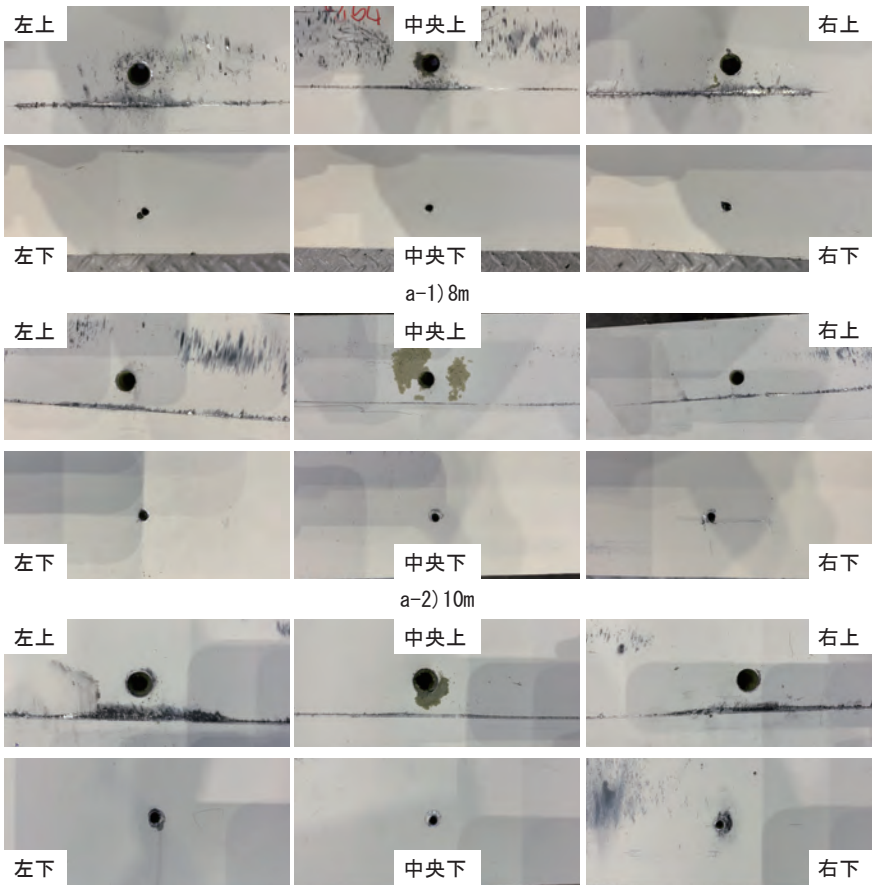
表-3　動的加振試験最大値(周波数1.1Hz、0.1～0.3G)

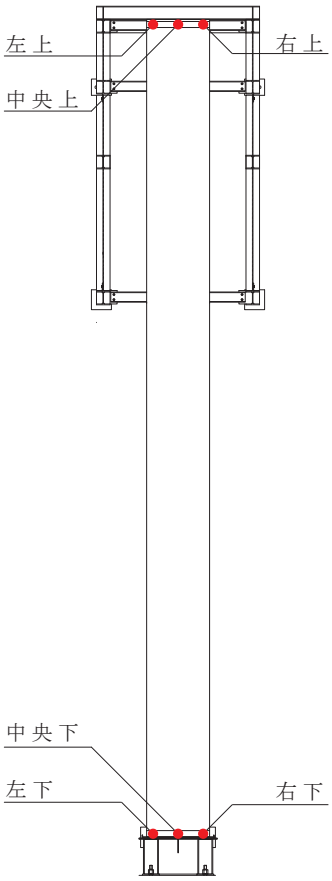
試験体	入力加速度(入力値)(G)	入力加速度(計測値)		応答加速度(m/s²)	入力変位(mm)	応答変位(mm)	加速度応答倍率
		(G)	(m/s²)				
8m	0.1	0.11	1.03	0.54	20.60	11.04	0.52
	0.2	0.21	2.06	1.08	41.10	21.67	0.52
	0.3	0.39	3.78	1.45	59.81	30.73	0.30
10m	0.1	0.10	1.03	0.59	20.57	12.69	0.58
	0.2	0.21	2.02	1.21	41.12	25.43	0.60
	0.3	0.62	6.11	1.64	59.33	34.51	0.27
12m(1枚)	0.1	0.10	1.00	0.77	20.54	15.94	0.76
	0.2	0.21	2.02	1.51	41.10	32.42	0.75
	0.3	0.28	2.75	2.06	59.33	43.74	0.75
12m(3枚)	0.1	0.10	1.03	0.80	20.51	17.36	0.79
	0.2	0.21	2.02	1.63	41.18	34.24	0.80
	0.3	0.28	2.75	2.21	59.09	46.43	0.80



a-1) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【8m】
b-1) 入力変位とパネル中央部の応答変位【8m】
a-2) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【10m】
b-2) 入力変位とパネル中央部の応答変位【10m】
a-3) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【12m】
b-3) 入力変位とパネル中央部の応答変位【12m】
a-4) 入力加速度とパネル中央部の応答加速度【12m×3枚】
b-4) 入力変位とパネル中央部の応答変位【12m×3枚】

図-12 動的加振試験結果





b) 試験体取り付け位置

図-13　試験体取り付け部（試験後）

4-3. 加速度と震度に関する考察

動的加振試験で得られた結果をもとに耐火断熱パネルの耐震性能の評価を行う。評価は、気象庁の示す均一な周期の振動が数秒間継続した場合の周期及び加速度と震度（理論値）の関係[4]を参考に、各入力加速度を震度に換算して行う。表-3の動的加振試験結果より耐火断熱パネルの高さ10m、0.3Gの試験おいて入力加速度6.11m/s²の結果が得られている。前述の気象庁の加速度と震度の関係より、周期が0.91sec(1.1Hz)のときでは5.0m/s²～6.0m/s²の間の値で震度7と判定されたため、試験体10mの耐火断熱パネルには震度7相当で加振されている。共振振動試験、動的加振試験終了後の各試験体取り付け部を図-13に示す。いずれのパネル本体及び接合部においても大きな損傷は見られないことから、大地震相当の震度7での安全性が確認されたといえる。

5. まとめ

本報では、耐火断熱パネルの面外方向への動的挙動の把握を目的として、共振振動試験及び動的加振試験を行った。本試験で得られた知見を以下に示す。

・ 共振時は入力加速度に対して応答加速度は卓越したが、パネル本体及び頂点部・脚部のパネル接合部には特に損傷は見られず、本試験体の共振時の安全性を確認した。

・動的加振試験より、入力加速度（脚部）に対する応答加速度（パネル中央部）は小さい結果となった。このため、想定した建物の固有振動数1.1Hzで加振した場合においては、地震による建物の応答がパネル本体に与える影響が小さいことを確認した。

・パネル高さ10mの試験体において周期0.91sec（1.1Hz）で震度7相当の加速度が加わった際の安全性が確認された。

参考文献

1）平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）調査研究（速報）、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、平成23年5月

2）ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策(その１～9), 寺本ほか、日本建築学会学術講演梗概集, 2013年8月

3）埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会報告書、総務省消防庁、平成29年6月

4）国土交通省　気象庁, http//www.data.jma.go.jp/

【謝辞】

本研究を実施するにあたりご協力を頂いたスタイロ加工株式会社 関係者各位に感謝の意を表します。

B　国防遺産

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

国防遺産の視座

Trends of Defence Heritage

岡田　昌彰*
Masaaki OKADA

*博士（工学）　近畿大学教授　理工学部社会環境工学科（〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1）

キーワード：国防遺産，土木遺産，視座，景観，利活用
Defence Heritage, Civil Engineering Heritage, Trends (Way of Seeing), Landscape, Reuse

1.　はじめに

砲台や掩体など、国防遺産に文化的価値を認める趨勢が近年高まりを見せている。例えば，和歌山市沖の友ヶ島要塞群が国防遺産としては初めて2003（平成15）年度の土木学会選奨土木遺産に認定されたほか，詫間海軍航空隊滑走台（同2006年度），東京湾要塞跡：猿島砲台跡・千代ヶ崎砲台跡の国史跡指定（2015年）など，文化財としての価値づけが近年活発に行われている（図１）。

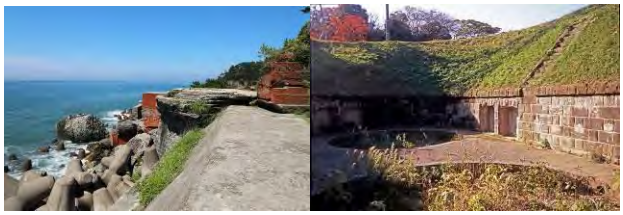


図１　国防遺産に対する文化的価値づけ
左）友ヶ島第二砲台（和歌山市：2003年選奨土木遺産）
右）千代ヶ崎砲台跡（横須賀市：2015年国史跡）

国防遺産は他の様々な近代化遺産と同様、我々の日常生活の成立に対し高い貢献度をもちながらも、「最も遠い存在」として認識されてきたといえる。“国防”という概念をその定義通り「外敵の侵略から国を守ること」と捉えるならば、近世以前の城から近代国防，そして現代の自衛に至るまでの一連の営為が連続的に評価されて然るべきであるが、その実情については本稿で敢えて言及するまでもなく、遺産に対する扱いが近代に前後してあまりにも不連続である。世界遺産の姫路城，国宝の松本城や松江城等に比べ、沿岸域に点在する明治以降の要塞などに対する価値づけが一部を除いてきわめて後発的であることは論を待たない。

本稿では、わが国において国防遺産に対し向けられてきた社会的視座の変遷を概観することで、価値づけの多様性をそのダイナミズムとともに明らかにすることとしたい。特に海事思想を背景とする戦前の活用から、一転する戦後の隠蔽・無関心、さらに近年の文化的再評価と空間的再利用に至るプロセスには、近代化・敗戦・高度成長という特有の近現代史を経てきた日本における各時代の社会情勢が明確に反映されていると言えるだろう。

なお、本稿は筆者が2012年までに発表した論文[1) 2)]に加筆・修正を施したものである。

２．国防遺産の両義性

国防が国家の存続に不可欠な事象であることは言うまでもないが、これが軍事あるいは戦争などの意味に通ずるものであることから、現代においてその解釈も両義性を帯びたものとなっている。戦後から現在に至るまで国防遺産に関する文献は多数刊行されているが、例えば下記２編の書籍における位置づけの相異を見てもそれは明らかである。学術的あるいは探訪対象として幕末期～昭和期の要塞を紹介するもの（図１左）に対し、反戦思想

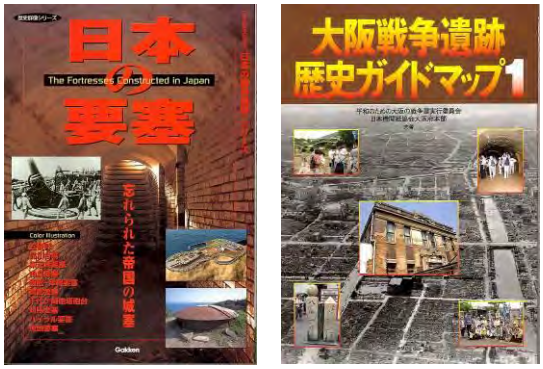


図２　国防遺産に対する両義的視点
左）学研「日本の要塞」2003年
右）「戦争遺跡歴史ガイドマップ」2001年

のもと国防遺産を戦争なる愚行のアイコン（図２右）として位置づけるものも存在している。

このような解釈の多様性を念頭に、これまでのわが国における国防遺産の扱われ方の変遷を概観してみたい。

３．戦前の国防遺産：海事思想と史跡指定

わが国において稼働を停止した国防施設を「価値ある文化遺産」として位置づけた最初の事例は、1920～30年代における史跡指定の中に認めることができる。当時指定対象となった主要な対象の中に、古代から近世以前にかけて建造された国防遺産が多数含まれているのだ。

1919（大正８）年に「史蹟名勝天然紀念物保存法」が公布され，全国各地において明治以前の寺趾や古墳，庭園などを中心に史跡指定が行われている．松本城（1930年指定）や元寇防塁（同1931年）など、1937（昭和12）年現在の史跡名勝天然記念物一覧に記載された史蹟名勝は幕末以前に竣工したものがその多くを占めているが（図３），例外として丸岡藩砲台（1919年指定），和田岬砲台（同1921年），西宮砲台（同1922年），品川台場（同1926年）など幕末の海岸防備砲台が相次いで指定されている（図４）．これらの指定の事由は、史跡名勝天然紀念物保存要目史蹟の部第４：古城趾・城砦・古戦場・国郡庁趾・その他“政治軍事に関係の深い史蹟”の項によるものであった[3]．

図３　幕末以前の国防遺産
左）松本城（松本市：1930年史跡指定）
右）西新元寇防塁（福岡市：1933年史跡指定）

図４　幕末の国防遺産
左上）丸岡藩砲台（坂井市）右上）和田岬砲台（神戸市）
左下）西宮砲台（西宮市）右下）品川台場（東京都）

また、この時期に国防遺産を含む空間が公園として整備されている点にも注目したい。品川台場は史跡指定の翌々年となる1928（昭和３）年に歴史公園として開園し一般開放されているが，現在も第三台場には当時整備されたと思われる大砲のレプリカが現存している（図５）．

図５　第三台場の大砲レプリカ（東京都港区）

一方、大阪府堺市にある「大濱公園」は、幕末の旧堺台場跡地が1879（明治12）年に公園として整備されたものである．元は陸軍省所管の土地であったこともあり，1910（明治43）年には第四師団秋季演習観兵式の挙行会場として用いられるなど，公園整備後も国防意識啓発の拠点の１つとして位置づけられていた．1920（大正９）年発刊の堺市史[4]にも大濱公園が紹介されており，「舊南臺場の疊石を以て林石を構へ」「北公園の西方は北臺場の舊址で當年の遺構を示すものが多い．」「外堀の残り」「煙硝の置かれたところ」「砲門置場址」など，国防遺産としての旧用途が随所に記述されている．加えて、昭和初期に南海電車が発刊していたパンフレットには、公園内には砲台のレプリカらしきものが設置されているのが確認できる（図６）．

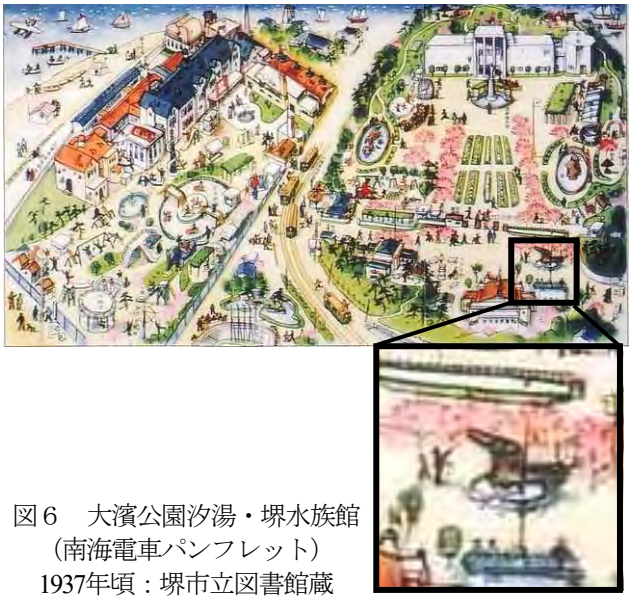


図６　大濱公園汐湯・堺水族館
（南海電車パンフレット）
1937年頃：堺市立図書館蔵

公園整備・史蹟指定された幕末の国防遺産とその構成する空間は，少なからず国防意識の啓発材料として活用されていたものと考えられる．1910年代前後から国民に対する涵養が試みられた「海事思想」を背景とし、旧施

設とその空間が表層的・端的に意味する“国防”なる偉業のアイコンとして，国防遺産あるいはその構成する空間が活用されていたと考えることができよう.

４． 戦後の国防遺産：無関心と隠蔽

明治以降、数多の国防施設が国内に建設されていくが、戦後その多くは軍事的機能を失う。殆どの跡地は公園などとして整備されることなく、そしてその存在すら知られることもなく放置され続けていくこととなる。

ところで、敗戦による日本社会の急激なまでの価値転換について、文芸評論家・加藤典洋（1948-2019）は以下のように指摘している[5)]。

「これまで戦争の死者といえば、どのようないくさの場合でも、わたし達は彼らを厚く弔うのを常としてきた。たぶん古代以来、それはどのような文化においてもそうだったはずだが、第二次世界大戦は、残された者にとってそこで自国の死者が無意味な死者となるほかない、はじめての戦争を意味したのである。」

（『敗戦後論』（1997））

加藤のこの論考はその後各方面にさまざまな反響を呼ぶこととなるが、ここで注目したいのはこのプロセスが国防遺産についても当てはまることである。19世紀末から20世紀初めにかけて各地に建設されそのまま遺存することとなった国防遺産はその後2000年前後まで十分な関心が払わることなく、むしろ隠蔽されていくのである。

図７　高烏砲台と
平清盛の「日招き像」
（広島県呉市）

この動きを象徴している事例として、広島県呉市の高烏砲台が挙げられる。これは標高218mの高烏台に旧陸軍が1901（明治34）年に建設した砲台であるが、戦後は一帯が音戸の瀬戸公園として整備されている。ここは平清盛（1180-1244）が夕日を招き返してその日のうちに音戸の瀬戸切り開き工事を完成させたという伝説の地であり、その800周年を記念して1967（昭和42）年に清盛の「日招き像」が建立されている。だが、現地でこれを確認したところ、その土台には弾薬庫らしき構造体が使われていることがわかった（図７）。敵艦の位置をいち早く見定めるべく選定された高烏砲台の眺望が、清盛の日招き伝説を演出する格好の場を提供したことは想像に難くないが、当地の説明板に記載されているのは清盛史のみであり、国防遺産としての位置づけは全く語られていない。1967年の事業で敬意が払われたのは中世史のみであり、ここに近代史は全く姿を現さず、忘却されているのである。

図８　火の山砲台と展望台
（山口県下関市）

同様の事例は山口県下関市の火の山砲台にも見られる（図８）。この砲台は1890（明治23）年に完成したものだが、戦後1956（昭和31）年に瀬戸内海国立公園の一部に包含され、その後ロープウェイ（1958年）やユースホステルなどとともに1960（昭和35）年には砲台を基礎として展望台が設置される。周辺に現存する弾薬庫や砲床などが近年その歴史とともに積極的に展示されてはいるが、この展望台の一角は戦後の国防遺産に対する冷ややかな扱いの歴史をむしろ強調していると言えるだろう。

一方、国防遺産の歴史的価値は必ずしも考慮せずともその外観的特徴を活かし再利用した事例が見られる。掩体を農業倉庫や遊具として再利用するものは全国各地に見られるが（図９）、北海道豊頃町トイトッキ浜にあるトーチカの遺構はその中でも最も特徴的である（図10）。1944（昭和19）年に建造されたトーチカの脇には戦後地元の漁師たちが施した小祠と鳥居が並置されているのだ。一見、戦死者の慰霊施設とも錯覚する風景であるが、豊

図９　掩体の再利用
左上）農業倉庫（八尾市）右上）資材置場（府中市（2004年撮影））
左下）資材置場（宮崎市）　右下）遊具（大村市）

図10　トイトッキのトーチカ（1944：北海道豊頃町）

頃町役場へのヒアリングによってその意外な経緯が明らかとなった。地面に固定されたこのトーチカは戦後、定置網漁に使用するロープのアンカーとして重宝され、いつしか国防遺産としての履歴を通り越し大漁祈願の信仰対象へと昇華したのである。ここでも国防遺産としての歴史に対する認識は著しく欠如していると言わざるを得ないが、残存した構造物を巧妙かつしたたかに生活の中に組み入れ利用し続けてきた戦後日本人の逞しさをここに見出すこともできるかも知れない。

５．近年の国防遺産：新たなる光

このような隠蔽・無関心の状態が戦後長く続くが、国防遺産に新たな光がふたたび当てられ始めるのは2000年前後からである。前述の土木学会による国防遺産の選奨土木遺産認定をはじめ各機関による文化財指定・登録に加え，歴史教育，レクリエーションの場としての空間整備が各地で行われている。また、独特の形態や雰囲気をもつ”ロマンに満ちた廃墟”として、写真家をはじめ芸術家たちが国防遺産に創作対象としての新たな価値を見出す事例も現出している（図11）。

それぞれ2006年，2015年に再整備された大沢一号掩体（調布市），川東掩体（鹿屋市）には、従来とは大きく異なるアプローチ法を読み取ることができる（図12）。前者においては掩体の説明板とともにその模型が展示されているほか、後者の周辺には駐車場も整備され、それぞれの歴史がアクセス整備とともに積極的に解説されているのだ。この他、2010年代半ばからSNSなどを通じてアニメの聖地として訪問客が急増している友ヶ島要塞，2019年より上陸ツアーが組まれた東京湾第二海堡など、近年は国防遺産に新たな光が積極的に当てられている。

図11　芸術と国防遺産
左）安島太佳由「日本戦跡」（2002）
右）友ヶ島第3砲台美術館（和歌山市+ Avex Entertainment）（2019）

図12　近年の掩体再整備の例
左）大沢一号掩体（調布市）　右）川東掩体（鹿屋市）

６　結語

このように、近代以降の国防遺産に対する視座はさまざまな変化を遂げてきたことがわかる。国防なる偉業を直接的・表層的に想起させるアイコンであったものが戦後突如隠蔽・無関心の対象として忘却され、近年は近現代史を語る重要な歴史遺産、あるいは非日常的・芸術的空間として新たな社会的価値を獲得している。日本人は国防遺産を客観的かつ現実的な視座から捉え始めるに至ったと言えるだろう。

国防遺産は軍事・戦争という概念に結びつきやすいが故に、その価値づけに対しては常に慎重論が付随してきた。しかしながら、これを単に好戦的施設と位置づけ排斥・無関心の対象とすることは歴史の隠蔽にも繋がりかねず、歴史再考の場自体を現代あるいは未来の国民から奪うことを意味しかねない。戦後75年を経た現代においても“国防”は綿密に検討され続けるべき重要な概念であると筆者は考えるが、日本の近現代史、第二次大戦、そして現代の国防そのものについても国内には現在もさまざまな意見が溢れており、その遺構に対する意見も一枚岩ではない。史実をどう解釈し未来の糧とするかはあくまで各時代の国民に委ねられるべき課題であるはずである。その検討材料を余すことなく未来に継承することは我々現代人の重要な任務と言えないであろうか。

例えば、英国などには国防遺産を良好な状態で保存し、国を守り続けてきた英雄的な歴史とともに、現代社会とも地続きである国防の重要さを雄弁に語らせることに成功している事例も少なくない[6]。ここに戦勝国・敗戦国という境界を定め前者を一蹴せんとする意見も時折耳にするが、もはやこれも生産的ではない。日本においても有史以来連綿と続くこの重要なテーマについて、遺構の空間整備や情報発信の方法論などとともに、今後さらに積極的に議論していく必要があろう。

【参考文献】
１）Masaaki OKADA （2012） Interpretation of Defence Heritage in Japan: a survey of ‘neglect and reuse’ and future potential as significant landscape, ICON: Journal of the International Committee for the History of Technology, Vol.17
２）岡田昌彰（2008）国防遺産の現況と可能性，日本遺跡学会遺跡学研究第５号
３）佐藤正夫（1997）品川台場史考，理工学社
４）堺市役所（1920）堺市史第三巻
５）加藤典洋（1997）『敗戦後論』講談社
６）岡田昌彰（2018）『美しい英国の産業景観』創元社

海自呉基地に残る旧呉鎮守府の地下施設群について
(1)調査の経緯と施設概要

UNDERGROUND FACILITIES OF THE FORMER IMPERIAL JAPANESE NAVY
REMAINING AT JMSDF KURE NAVAL BASE
(PART-1) BACKGROUND OF INVESTIGATION AND FACILITY OVERVIEW

上寺哲也*，光井周平**，難波宗功***
UEDERA Tetsuya, MITSUI Shuhei and NAMBA Tokikatsu

* 博（工）呉工業高等専門学校准教授 機械工学分野（〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11）
** 博（工）広島工業大学講師 環境学部建築デザイン学科（〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1）
*** 呉工業高等専門学校専攻科生 プロジェクトデザイン工学専攻（〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11）

キーワード：軍事遺産，地下施設，呉鎮守府，大日本帝国海軍
(Military heritage, Underground Facilities, Kure Naval Base, The Imperial Japanese Navy)

1. はじめに

太平洋戦争の後半に入ると、日本本土への米軍機による空襲が本格化し、日本各地の軍事施設や軍需工場が標的となった。旧海軍の拠点である呉鎮守府が置かれた呉市では、昭和 20（1945）年 3 月 19 日の呉軍港空襲をはじめ、同年 5 月 5 日に広地区海軍工作庁、6 月 22 日に呉海軍工廠への爆撃が行われるなど、度重なる空襲の被害を受けた。特に同年 7 月 1 日夜半から翌 2 日早朝にかけての空襲では、市街地の大半が焼失し多くの市民が犠牲となった[1)]。

このような状況の中で、軍の重要施設や軍需工場等を空襲の被害から守るために、市内や周辺地域に数多くの地下施設が建設された。こうした地下施設は，終戦後に埋められたり入口が塞がれたりするなどして徐々に姿を消してきたが、現在でも存在を確認できるものも少なくない。国土交通省が実施した平成 29 年度特殊地下壕実態調査結果[2)]によると、平成 30 年 3 月現在で全国に現存する地下壕は 8,474 にのぼる。「特殊地下壕」とは、“戦時中に旧軍、地方公共団体、その他これに準ずるものが築造した防空壕等”のことであり、広島県内（政令指定都市である広島市を除く）では 801 件が確認されている。これは、政令指定都市を除く都道府県別では、最も多い鹿児島県（1,700 件）に次いで全国で２番目に多い数値である。呉市内で確認されている地下壕は 648 件であり、広島県内の約８割を占めている。この数値は単独の市町村では全国で最も多いものであり、呉市内に建設された地下施設の数が全国的に見ても突出していることが分かる。このような戦時中に建設された地下施設の中でも規模が大きなものとして、旧呉鎮守府の敷地内に残る地下施設の存在が挙げられる。

著者らは、平成 29（2017）年より海上自衛隊呉地方総監部と共同で旧呉鎮守府（現在の海上自衛隊呉基地）内の地下施設群の調査･研究に取り組んできた。本報では、これまでに判明した地下施設群の構造や規模等について報告する。

2. 旧呉鎮守府内に残る２つの地下施設

旧呉鎮守府の敷地の多くは、現在は海上自衛隊呉基地として活用されている。隣接する旧呉海軍工廠については、戦後に民間に払い下げられ、現在はジャパンマリンユナイテッド株式会社の呉事業所等として利用されている。

著者らが調査に取り組んでいる地下施設の１つ目は、旧呉鎮守府庁舎（現在の海上自衛隊呉地方総監部第一庁舎）の西側、「大階段」と呼ばれる旧呉鎮守府庁舎から海側へと続く石造の階段の南側に隣接する半地下構造物（図- 1）と、それに繋がる地下通路である。２つ目は、旧呉鎮守府庁舎から南に直線距離で約 200m の位置にある地下構造物である。図- 2 は確認されている施設の出入口である。現在は周辺に土砂が堆積して一部が地表に出ている状態である。

これらの施設の戦時中の用途や施設名称については現

図- 1　旧電話交換所の西側外観

図- 2　旧防空指揮所の北側出入口

在のところ確定的な史料が発見されていないが、ここでは便宜上、前者を「旧電話交換所」、後者を「旧防空指揮所」、両者を合わせて「地下施設群」と呼称するものとする。図- 3 に旧呉鎮守府庁舎を中心とした旧防空指揮所、および旧電話交換所の位置関係を示す。

これらの施設は、海上自衛隊呉地方総監部からの協力依頼を受けて、平成 29（2017）年より著者らを含む研究者や呉工業高等専門学校および広島工業大学の学生有志によって調査が行われている。一連の調査の成果に基づき、平成 30（2018）年 6 月に日本遺産「鎮守府 横須賀・呉・ 佐世保・舞鶴～日本近代化の躍動を体感できるまち～」の構成文化財として追加認定された。また、同年 9 月には土木学会から選奨土木遺産にも認定されている。現在は定期的に一般公開もなされており、全国から見学者が訪れている。

2. 1　旧電話交換所の概要

旧呉鎮守府庁舎としてよく知られたレンガ建造物である現在の海上自衛隊呉地方総監部第一庁舎から大階段を経由してすぐの場所に、半地下構造のコンクリート構造物がある。呉地方総監部が平成元（1989）年に作成した『老朽本庁舎の改善及び地下壕の整備活用』によると、本施設は昭和 20（1945）年に駐留軍に接収された後、昭和 32（1957）年 11 月に駐留軍から返還され、海上自衛隊が中国財務局より管理委託を受けたとされている（昭和 32 年 5 月に中国財務局より所管換）。以来、しばらくの間は薪炭庫として使用されたようであるが、その後は

図- 3　旧呉鎮守府周辺の見取り図と地下施設の位置

ほとんど未利用の状況であり、雑多な物品が置かれた物置のような状態であった。その後、昭和 53（1978）年、同 58（1983）年、平成元（1989）年の 3 回に渡って調査が行われており、地下通路の構造や土砂の堆積状況、コンクリート強度の確認や劣化状況の調査等が行われたことが判明している。昭和 53（1978）年 5 月に呉地方総監部によって作成された『呉地方総監部旧防空壕の現状』に示されている旧電話交換所及び地下通路の平面図を図-4 に示す。旧呉鎮守府庁舎は江戸時代まで「塔の岡」と呼ばれた海側の地盤面よりも一段高い場所に築かれているが、丘陵地の地下に縦横に伸びる地下通路が造られていることが分かる。

また、昭和 58（1983）年に同じく呉地方総監部が作成した『旧防空ごうの現状』に示されている旧電話交換所の平面図を図-5 に示す。旧電話交換所の構造物は平面規模が東西、南北ともに約 22m、高さは最大で約 7.5m で、その上部に約 3m の盛土がなされている。内部はトンネル型の空間とその西側及び南側に接続する２階建て部分とで構成されており、かまぼこ型の広い空間は東西が約 15m、南北が約 14m、高さが約 6m である．コンクリート製の壁は 1～2m の厚さがあり、平成元（1989）年に実施された調査によると、φ25.4mm の丸鋼もしくは山形鋼 L-50×50×4 を用いて補強されている。昭和 19（1944）年 10 月に発行された『耐弾構造規準』[3]によると、コンクリートの 28 日圧縮強度が 150 kgf/cm2（≒14.7 N/mm2）の場合に天蓋及び側壁の厚さ 1.5m を満たすものを「甲耐弾式」（おおよそ 250kg 爆弾または中口径砲弾の直撃に耐える）としているが、本施設は概ね「甲耐弾式」以上の性能を想定して設計されたものであると考えられる。ただし、『耐弾構造規準』に掲載されている内容とは配筋方法が異なるなど相違点もあるため、注意を要する。

図-6 から図-9 に平成 29（2017）年から筆者らが調査時に撮影した現在の旧電話交換所及び地下通路の写真を示す。地下通路はコンクリート製の部分と素掘りの状態の部分とがあり、一部は掘りかけと思われる部分もあることから、終戦時にはまだ建設途中であったことが窺われる。旧電話交換所、地下通路ともにコンクリートの状態は比較的良好と思われるが、一部で表面のコンクリートの剥離や内部の鉄筋もしくは鉄骨の腐食などが見られる。また、素掘りの状態となっている部分では、岩盤の花崗岩が風化して下には土砂が堆積しており、今後も風

図-4　旧電話交換所及び地下通路の図面
(資料提供：海上自衛隊呉地方総監部)

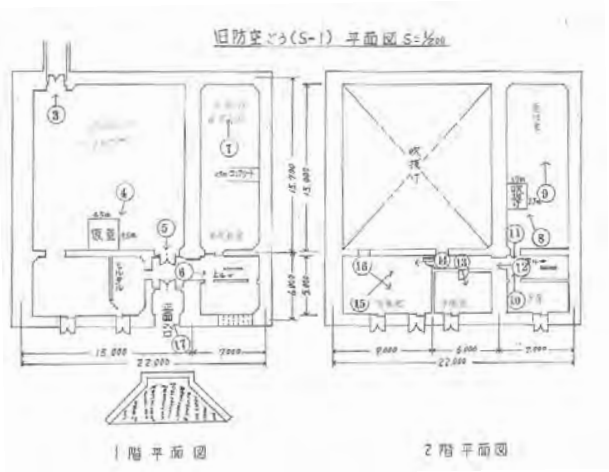


図-5　旧電話交換所平面図
(資料提供：海上自衛隊呉地方総監部)

図-6　旧電話交換所内のドーム型空間

図-7　旧呉鎮守府庁舎西側の地下通路入口

図- 8　図- 7 の入口から地下通路へと繋がる階段

図- 9 コンクリート製の壁面で覆われた地下通路

化は経年とともに進むものと思われる。コンクリートの強度や中性化等の劣化状況、土砂の堆積状況等については今後、詳細を報告する予定である。

2. 2　旧防空指揮所の概要

前節に示した旧電話交換所の調査の進展に伴って、旧呉鎮守府の敷地に隣接する旧呉海軍工廠の第四船渠近くに別の施設が存在していたという証言が得られるなど、旧呉鎮守府の構内に新たな地下施設が存在する可能性が浮上した。その後の調査により、戦時中に旧呉鎮守府に勤務していた上川繁人氏が記した『思い出の記』[4]の中で「呉鎮守府防空指揮所」について触れられており、図- 10 に示すような旧鎮守府庁舎や第四船渠との位置関係が示されていることが確認された。また、昭和 50 年 1 月 31 日付の中国新聞[5]に「旧鎮守府地下作戦室」として図- 11 に示す旧電話交換所とは異なる施設に関する記事が掲載されていることが判明した。

以上のような経緯を経て平成 31（2019）年に現地を確認したところ、新たに発見されたのが前掲の図- 2 の入口部分である。現在は周辺及び内部に土砂が堆積しており、下方に続く階段部分にも土砂が厚く堆積しているため詳細は確認できていないが、図- 12 に示すように通路の壁面及び上部は石造（もしくは石張り）になっていることが分かる。現時点では図- 12 で窺い知れる以上の内部の状態は確認できていないが、株式会社 IHI 呉事業所に残る工事図面の中に、昭和 54（1979）年に作成された図- 13 のような図面があることが確認された。この図面は、当時の石川島播磨重工業が発注した国道から敷地内への進入路の建設に伴う工事に際して作成されたもので、進入路の地下に構造物が存在することを把握して安全性の確認のために調査を実施したものと思われる。この図面によると、内部の最も大きな空間は幅 15m、奥行 43m、高さは最大で 8.8m のかまぼこ型であり、旧電話交換所と比較してさらに大きな空間が存在していることが分かる。また、内部にはその他にも部屋として活用されていたと推測される複数の空間があり、かなり大規模な地下施設となっていることが確認できる。

なお、上述の施設内最大の空間については、昭和 54（1979）年に実施された工事に際して土砂で埋められた

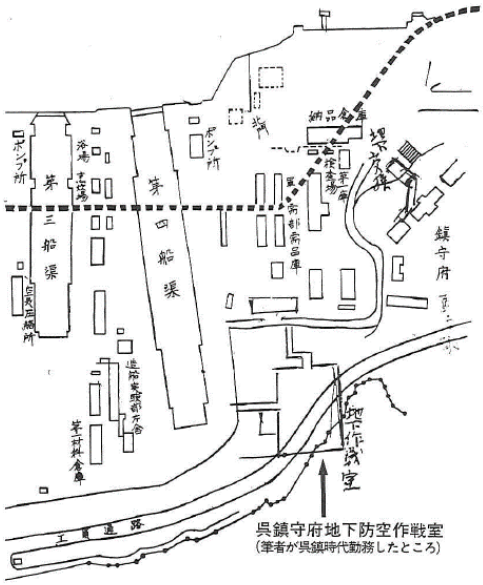


図- 10　『思い出の記』[4]に掲載されている見取り図

今も残る軍港呉の遺物

朽ちた側壁や鉄筋

歳月しのばす迷路

特報版

鎮守府地下作戦室を探訪

戦争末期から使用

厚かった機密のベール

図- 11「旧鎮守府地下作戦室」に関する新聞報道 [5]

図- 12　旧防空指揮所入口の内部の様子

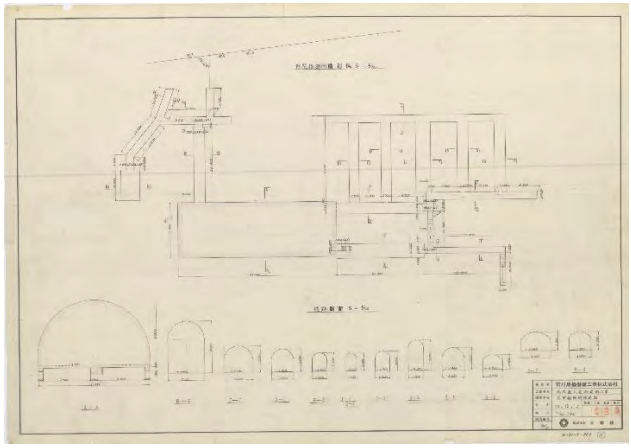


図- 13　旧防空指揮所の平面図及び断面図
(資料提供：株式会社 IHI 呉事業所)

ことが当時工事に携わった関係者の証言によって判明している。しかしながら、当該空間以外については手つかずのままで残されているものと考えられる。

新たに見つかった旧防空指揮所の施設は、旧電話交換所と比べてより重要度が高い機能を有していたものと思われる。おそらく旧呉鎮守府の地下施設としては最も重要なものと予想され、今後の調査によって建設の経緯や建設年代等の詳細を明らかにしたいと考えている。なお、今後の調査については現在海上自衛隊呉地方総監部のほか関係各署と調整を進めている。

3.　両地下施設の名称について

本報では、便宜上「旧電話交換所」と「旧防空指揮所」という２つの名称を用いて議論を進めてきたが、現時点で各施設の名称について確定的な史料は発見されていない。

昭和 26（1951）年 5 月に旧呉鎮守府の後継組織として戦後の復員業務にあたった呉地方復員残務処理部が作成した『旧海軍の地下施設について（回答）』[6]には、旧呉鎮守府司令部が管理する地下施設として「戦闘指揮所」が記載されている。また、戦後すぐの時期に旧呉鎮守府が作成したと考えられる文献 7)には、図- 14 に示すような手描きの図が残されている。図の中央右側に旧呉鎮守府庁舎が描かれており、近くにある「旧電話交換所」の位置には「呉鎮守府電話綜合交換所」と記載されている。「旧防空指揮所」と同じ位置である図の左下部分にも地下施設が描かれており、そこには「呉鎮守府戦斗指揮所」と記載されている。

文献 7)の記載内容等より、2.1 節で示したコンクリート構造物の用途は戦時中から電話交換所であったものと考えられる。これを踏まえて、本報では「旧電話交換所」の呼称を採用している。

一方、「旧防空指揮所」の名称については、文献 4)では「地下防空作戦室」「防空指揮所」「地下作戦室」などの表現が混在しており、文献 5)では「地下作戦室」の名称が用いられている。図- 13 の図面では「防空指揮所」の名称が記載されている。『広島原爆戦災誌』[8]にも被爆後の呉鎮守府関連の活動について記載されており、その中には「防空指揮所」「地下作戦室」「防空作戦室」の表現が見られる。文献 9)には当時設備工事に携わった方の手記が掲載されているが、その中には「地下作戦壕」と記載されている。以上のように、種々の名称が用いられているが、これらの史料はいずれも戦後になって作成されたものである。

戦時中に作成されたものとして『呉海軍警備隊戦時日誌』の昭和 18（1943）年 4 月 12 日の記事[10]に「防空指揮所地下作戦室」の名称が確認できる。上述の史料の内

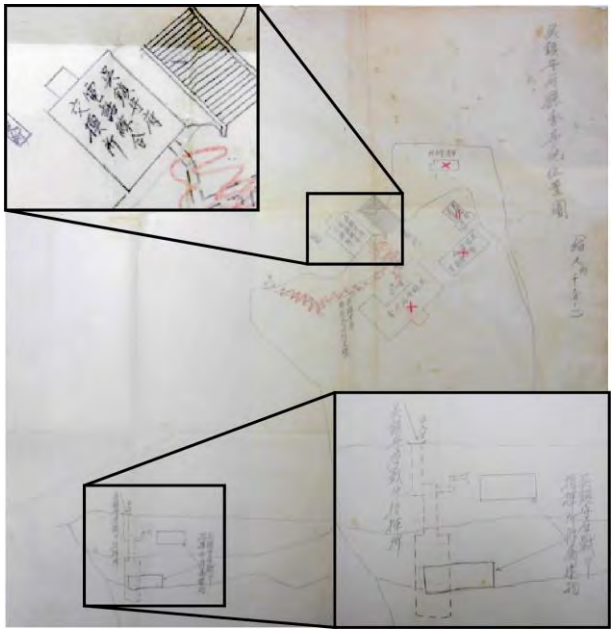


図- 14　呉鎮守府庁舎其ノ他位置図[7]

容も踏まえて考察すると、“防空指揮所”は施設全体の名称であり、“作戦室”は“防空指揮所”内部の室名の１つであるものと推察されることから、本報では「旧防空指揮所」の呼称を採用するものとした。なお、同じく『呉海軍警備隊戦時日誌』の昭和 18（1943）年 10 月 18 日の記事 [11]に、“〇九〇〇　防空指揮所竣工式”の記載が確認できる。この記事が「旧防空指揮所」に関するものであれば、本施設の建設時期が明らかとなる。他に裏付ける史料が見つかっていないことから、現段階での確定は避けたいが、今後も調査を継続したい。

4. まとめ

本報では、著者らが平成 29（2017）年より海上自衛隊呉地方総監部と共同で調査に取り組んできた旧呉鎮守府の地下施設群について、これまでに判明した地下施設の構造や各種史料に基づく施設の名称・用途に関する考察について報告した。

呉地域は旧呉鎮守府が置かれたことにより旧海軍関連の施設が数多く建設され、今もなお多くの建築物や土木構造物等が残されている。観光スポットとして著名なものも多く、旧呉鎮守府庁舎や旧呉鎮守府司令長官官舎などは研究対象としても頻繁に取り扱われている。一方で、本報で取り上げた地下施設群のように、戦後 75 年を迎えようとしている現在においても本格的な調査が行われておらず、その詳細が明らかとなっていない施設が多いのも現実である。

こうした施設は、旧海軍や呉の歴史を考える上で貴重な遺構であると同時に、当時の建築・土木技術を知ることのできる史料であり、材料や部材の長期間に渡る劣化の進行を確認することのできる大変貴重な教材であるとも言える。

今後は、戦時中に呉と同じく鎮守府の置かれた横須賀、佐世保、舞鶴の各都市に建設されたものや、旧海軍関連の他の地下施設とも比較しながら、本地下施設群の建設時期や施工方法、類似点や相違点について調査を進めていきたい。また、コンクリートの劣化状況や今後の維持・保存を考えた補修方法の検討などを進めていく予定である。

参考文献

1) 呉市総務部市史文書課編：増補改訂版 呉の歩みⅡ―英連邦軍が見た呉―，呉市役所，2006
2) 国土交通省都市局都市安全課：平成 29 年度特殊地下壕実態調査結果について，国土交通省，http://www.mlit.go.jp/common/001230019.pdf，2019.10.1 参照
3) 海軍施設本部：昭和十九年十月二十日 耐弾構造規準（防衛省防衛研究所所蔵）
4) 上川繁人：思い出の記，pp.258-314，1983
5) 中国新聞社:今も残る軍港呉の遺物　旧鎮守府地下作戦室を探訪，中国新聞 昭和 50 年 1 月 31 日付, 1975
6) 呉地方復員残務処理部：旧海軍の地下施設について（回答）（1951）（防衛省防衛研究所所蔵）
7) 作成者不明：呉鎮守府庁舎其ノ他位置図，呉鎮守府管内海軍施設目録（呉鎮守府電話交換局・補遺）（発行年不明）（防衛省防衛研究所所蔵）
8) 広島市役所編：広島原爆戦災誌，第 1 巻，pp.301-311, 1971
9) 呉市企画部呉市史編纂室編：呉市政一〇〇周年記念体験手記集『呉を語る』，pp.247-248, 2003
10) 呉海軍警備隊：呉海軍警備隊戦時日誌，JACAR（アジア歴史資料センター）Ref.C 08030472500，昭和 17 年 12 月 1 日～昭和 18 年 5 月 31 日　呉海軍警備隊戦時日誌（防衛省防衛研究所）
11) 呉海軍警備隊：呉海軍警備隊戦時日誌，JACAR（アジア歴史資料センター）Ref.C08030473400，昭和 18 年 6 月 1 日～昭和 18 年 11 月 30 日　呉海軍警備隊戦時日誌（防衛省防衛研究所）

海自呉基地に残る旧呉鎮守府の地下施設群について
(2)佐世保・舞鶴に残る地下施設との比較

UNDERGROUND FACILITIES OF THE FORMER IMPERIAL JAPANESE NAVY
REMAINING AT JMSDF KURE NAVAL BASE
(PART-2) COMPARISON WITH UNDERGROUND FACILITIES REMAINING IN SASEBO AND MAIZURU

光井周平*，上寺哲也**，難波宗功***
MITSUI Shuhei, UEDERA Tetsuya and NAMBA Tokikatsu

* 博（工）広島工業大学講師 環境学部建築デザイン学科（〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1）
** 博（工）呉工業高等専門学校准教授　機械工学分野（〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11）
*** 呉工業高等専門学校専攻科生　プロジェクトデザイン工学専攻（〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11）

キーワード：軍事遺産，地下施設，呉鎮守府，大日本帝国海軍
（*Military heritage, Underground Facilities, Kure Naval Base, The Imperial Japanese Navy*）

1. はじめに

本報では、前報(1)に続き、海上自衛隊呉基地内に残る旧呉鎮守府関連の地下施設群について、終戦まで呉と同じく旧日本海軍の拠点である鎮守府が置かれた長崎県佐世保及び京都府舞鶴に残された同様の地下施設との比較・検討を行う。ここでは特に前報の「旧防空指揮所」に着目して佐世保、舞鶴との比較を行い、呉の地下施設の内部構成や利用状況について考察する。

なお、前報でも述べたように、呉の地下施設群については戦時中の用途に関する確定的な史料を現時点までに発見できていないのであるが、これまでの研究成果を踏まえ、本報においても便宜上「旧防空指揮所」の呼称を用いることとし、呉鎮守府管内の防空指揮に関する用途に用いられていたものとして議論を進めることとする。

2. 佐世保及び舞鶴に残る地下施設の概要

明治期から終戦までの間、旧海軍の拠点として横須賀、呉、佐世保、舞鶴の４か所に鎮守府が設置された。本章では、鎮守府に関連する地下施設が現存する佐世保ならびに舞鶴について、地下施設の概要を述べる。なお、横須賀については旧鎮守府の主要部を米軍が管理していることなどから現時点においては調査を実施できていない。

2.1 佐世保鎮守府

佐世保鎮守府は、長崎県佐世保市に設置された旧日本海軍の鎮守府の一つであり、開庁は呉と同じく明治 22（1889）年である。昭和 20（1945）年 6 月の空襲により旧佐世保鎮守府庁舎は焼失したが、現在も周辺地区は海上自衛隊佐世保地方総監部の敷地として使用されている。

現在の佐世保地方総監部庁舎の北側に隣接して、図-1 に示すような地下へと通じる入口が残されている。現存するこの地下施設は「旧佐世保鎮守府防空指揮所跡」と呼ばれ、日本遺産の構成文化財の一つとして常時ではないが一般にも公開されている。

図-1　庁舎北側の地下への入口

佐世保に残る旧防空指揮所は地下２階、総面積が約 700 ㎡であり、呉のようなトンネル型ではなく、積層された形式となっている。地下へ降りると、柱が並んだ図-2 に示すような 22.65m×17.5m ほどの広さの空間が広がっている。

図-2　旧防空指揮所の現況

佐世保に残るこの地下施設の特筆すべき点は、旧海軍ならびに米軍が残した戦時中及び戦後の史料が残されていることである。図-3 ならびに図-4 に昭和 17（1942）年の『佐世保鎮守府戦時日誌』[1)]に掲載されている戦時中の防空指揮所内部の写真を示す。

図-3　地図盤及指揮卓（文献 1 より転載）

図-4　情報室（文献 1 より転載）

文献 1)には「十二月二十日佐世保鎮府防空指揮所完成セリ」との記述がある。この写真は、昭和 17（1942）年 12 月 23 日に撮影されたと記載されており、施設名称も「佐世保鎮守府防空指揮所」と明確に表記されている。図-2 と図-3 とを見比べると、柱頭部の特徴的な形状が同一であることが分かる。図-3 には佐世保鎮守府を中心とした地図が表示されているが、呉にも同様の設備があったことが文献 2)の証言から確認できる。また、図-4 には鎮守府管内の各砲台や探照灯台の設置された地名が示されており、各地からの情報を収集し指揮する機能を有していたことが分かる。当時の海軍がどのように防空指揮を行っていたのかを知る上で、大変貴重な資料であると言える。

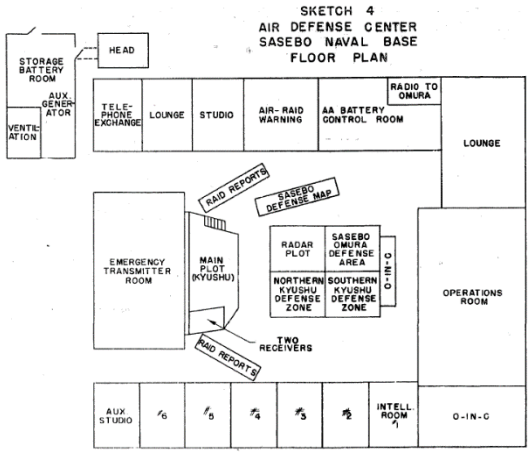


図-5　佐世保防空指揮所平面図（文献 3 より転載）

図-5 には、戦後に米軍によって作成された調査報告に掲載された佐世保防空指揮所の平面見取り図を示す。図中の「MAIN PLOT (KYUSHU)」が図-3、「INTELL. ROOM」が図-4 の位置に該当しているものと思われる。見取り図の他にも複数の写真が掲載されており、本施設の内部の様子を詳細に知ることができる。

なお、北東側に位置する図-1 とは異なる旧防空指揮所跡への入口部分を図-6 に示すが、この外観からは旧陸軍が建設した北部軍管区司令部防空作戦室 [4)]との類似性が推察される。旧陸海軍での防空施設に関する建設技術の比較についても今後検討を進めたい。

図-6　北東側の旧防空指揮所跡入口付近外観

2.2 舞鶴鎮守府

舞鶴鎮守府は、京都府舞鶴市に設置された旧日本海軍の鎮守府の一つであり、開庁は呉や佐世保から遅れること12年後の明治34（1901）年である。現在の海上自衛隊舞鶴地方総監部は旧海軍機関学校の跡地に位置しており、当時の舞鶴鎮守府庁舎は現在「東郷邸」と呼ばれて定期的に一般公開をされている旧舞鶴鎮守府司令長官官舎の隣地に位置していた。

舞鶴に残された地下施設は、旧舞鶴鎮守府庁舎の位置から東に直線距離で 1.8km ほど離れた東山と呼ばれる場所にある。現在は国有地として財務省近畿財務局が管理する敷地内に、図-7 に示すようなトンネル型の空間とそこに繋がる地下通路が残されている。図-7 のトンネル型の空間は幅16m、奥行36.5m、高さ8mほどで、呉に残る旧防空指揮所とほぼ同程度の広さである。

図-7　旧東山防空指揮所内部の現況

本施設の建設経緯や内部の使用状況、戦後の状況等については文献 5)で詳細に記述されている。建設年代は不明であるが、『舞鶴海軍警備隊戦時日誌』によれば、昭和18（1943）年12月[6]以降に「特設防空指揮所」の記述が見られることやそれ以前に防空指揮所の地下設備を構築中であると思われる記述があること等から、この頃には施設が完成していたようである。

内部の構成は文献 5)に見取り図が掲載されているが、これは USSBS（米国戦略爆撃調査団）による報告書に掲載されている図面[7]を参考に作成されたものと思われる。そこには「舞鶴鎮守府防空指揮所」と記載されている。形状は佐世保と異なるが、情報室、作戦室、砲戦発令室等の諸室が同様に設けられており、両者は同様の機能を有していたことが推察される。

本施設は終戦後に進駐軍により爆破が試みられたとのことであり、現在もその痕跡が確認できる。コンクリートの亀裂が入っている箇所も多く、図-8 に示すように内部に土砂が流入している部分も見られる。保存状態は必ずしも良好ではなく、今後の対策が必要と思われる。

図-8　内部への土砂流入状況

舞鶴の地下施設については、図面や写真等は残っていない一方で、戦時中の証言が多く残されている。前述の文献 5)のほか、昭和59（1984）年10月6日付の毎日新聞の記事には、戦時中に防空指揮所内で勤務していた当時の海上自衛隊舞鶴地方総監部勤務の自衛官などから聞き取った情報をもとに作成した略図が掲載されている。また、昭和61（1986）年3月から同年8月にかけて『“舞鶴市史”編さんだより』に舞鶴市文化財保護委員の渡辺祐次氏が寄稿した記事[8]には、戦時中に施設内部に勤務した女子挺身隊員の業務内容について詳細に記載されている。

3. 呉に残る旧防空指揮所との比較

前章に示した佐世保ならびに舞鶴に残る地下施設は、いずれも公的な記録から防空指揮所であったことが確認できる。また、双方で施設内部の平面構成についての記録も残されており、室配置や室名等が概ね明らかとなっている。舞鶴については内部の使用状況に関して戦時中の勤務者による証言が残されており、施設の機能についても概ね把握することが可能である。

呉の旧防空指揮所は、前報で示したようにトンネル型の空間が図面上で確認できているが、その大きさは舞鶴の防空指揮所とほぼ同程度である。『呉海軍警備隊戦時日誌』の昭和18（1943）年10月18日の記事[9]に、“〇九〇〇　防空指揮所竣工式”の記述が確認できるが、完成時期も舞鶴と同時期である推測される。また、当時呉鎮守府で通信業務に従事した複数の方から証言を得ることができたが、以下のような舞鶴との類似点があった。

・トンネル型の空間を２層して使用していた
・通信内容はカゴに入れて下階に渡していた
・施設内では女学生が電話交換業務を行っていた

室構成を踏まえると佐世保の防空指揮所も同様の業務が行われていたものと考えられる。一方、主要な空間が積層型であり呉や舞鶴のトンネル型とは異なる点や容積が大幅に小さい点などの差異も見られる。

４．まとめ

本報では、佐世保ならびに舞鶴に残された防空指揮所と呼ばれる地下施設について示した上で、前報(1)で紹介した海上自衛隊呉基地内に残る旧呉鎮守府関連の地下施設群の一つ、旧防空指揮所との比較を行った。

呉の防空指揮所は形状や規模が舞鶴と類似しており、戦時中の内部の使用状況も概ね同様であったと考えられる。建設時期も同程度であると思われることから、施設内部の室配置等についても舞鶴の防空指揮所を参考にすることで類推できるものと思われる。

一方、佐世保の防空指揮所は建設年代が早く、規模や形状も呉・舞鶴とは異なっている。陸軍が建設した北部軍管区司令部防空作戦室は昭和 17（1942）年 10 月竣工で同時期の建築であり、形状に類似性も見られることから、建設年代での防空施設に関する設計思想の変化があった可能性も考えられる。史料が限られているため分析は容易ではないが、今後も史料の収集や検討を継続したい。

また、一連の調査研究を通じて佐世保、舞鶴と比較して呉の地下施設群に関する研究が大きく出遅れていることを痛感した。戦後 75 年を迎えようとしている現在、当時のことを知る方々の高齢化も進み、証言の収集ができる期間も限られている。貴重な軍事遺産を後世に伝え、歴史や技術を継承するためにも、関連分野各位の協力をお願いする次第である。

謝辞

前報ならびに本報で紹介した地下施設群の調査に際しては、管理者である海上自衛隊呉地方総監部の多大なる協力を得た。調査の実施に際してご尽力いただいた総務課広報係をはじめ、関係各位に深甚なる感謝の意を表す。また、オーストラリア戦争記念館からの写真資料提供に際しては、呉地方総監の池太郎海将ならびに在オーストラリア防衛駐在官の天野晋介一等海佐（いずれも肩書は 2018 年当時）にご尽力いただいた。旧防空指揮所の資料収集にはジャパンマリンユナイテッド株式会社艦船事業本部顧問の山中邦明氏ならびに株式会社 IHI 技術開発本部の中田淳也氏のご助力を賜った。ここに記して感謝を申し上げる。最後に、調査の実施に際して献身的に協力をしてくださった呉工業高等専門学校の学生有志各位に深く感謝する次第である。

参考文献

1) 佐世保鎮守府司令部：昭和 17 年 12 月 1 日～昭和 17 年 12 月 31 日 佐世保鎮守府戦時日誌, JACAR（アジア歴史資料センター）Ref.C08030340500（防衛省防衛研究所）
2) 呉市企画部呉市史編纂室編：呉市政一〇〇周年記念　体験手記集『呉を語る』, pp.247-248, 2003.
3) U.S. Naval Technical Mission to Japan : Japanese Field and Amphibious Equipment; Kyushu Defense Systems, O-56(N), pp.55-71, 1946.
4) 石本正明、角幸博、野澤直之：北部軍管区司令部防空作戦室について，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.281-282, 2009.8.
5) 年金組合舞鶴支部戦跡サークル：舞鶴鎮守府東山（山頂・地下）防空指揮所研究・水雷団.軍需部.施設部.港務部.経理部の配置から舞鶴軍港強化を探る, 43P, 2009.
6) 舞鶴海軍警備隊：昭和 18 年 12 月 1 日～昭和 19 年 9 月 30 日 舞鶴海軍警備隊戦時日誌, JACAR（アジア歴史資料センター）Ref.C 08030487200（防衛省防衛研究所）
7) Civilian Defense Division, The United States Strategic Bombing Survey : Blueprint diagram of control center for air-raid defense of Maizuru Naval base, Reference Item No.5, Field Report Covering Air-Raid Protection and Allied Subjects in Kyoto, Japan,1947.
8) 渡辺祐次：東山顛末記①, “舞鶴市史” 編さんだより, No.163, pp.1-3, 1986.3.ほか
9) 呉海軍警備隊：呉海軍警備隊戦時日誌、JACAR（アジア歴史資料センター）Ref.C08030473400、昭和 18 年 6 月 1 日～昭和 18 年 11 月 30 日　呉海軍警備隊戦時日誌（防衛省防衛研究所）

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

旧呉鎮守府の赤レンガ倉庫群の建設年代について

CONSTRUCTION AGE OF RED-BRICK WAREHOUSES OF THE FORMER IMPERIAL JAPANESE NAVY REMAINING AT JMSDF KURE NAVAL BASE

難波宗功*，光井周平**，上寺哲也***
NAMBA Tokikatsu, MITSUI Shuhei and UEDERA Tetsuya

* 呉工業高等専門学校専攻科生 プロジェクトデザイン工学専攻（〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11）
** 博（工） 広島工業大学講師 環境学部建築デザイン学科（〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1）
*** 博（工） 呉工業高等専門学校准教授 機械工学分野（〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11）

キーワード：軍事遺産，赤レンガ倉庫，呉鎮守府，大日本帝国海軍
（*Military heritage, Red-Brick Warehouse, Kure Naval Base, The Imperial Japanese Navy*）

1. はじめに

明治 22（1989）年に鎮守府が開庁した呉市の周辺には、太平洋戦争が終結する昭和 20（1945）年までの期間に旧日本海軍によって建設された建築物などの海軍関連の軍事遺構が数多く残されている。それらのいくつかは地域の歴史遺産として観光資源等にも活用され、近年では、日本遺産に認定されるなど、その価値が広く認識されている。一方、戦後進駐軍の管理を経て海上自衛隊の施設として活用され、現在も使われ続けている建築物もある。こうした建築物はこれまで十分な調査・研究が行われておらず、一般にもあまり知られていない施設も少なくない。こうした建築物の歴史的価値を明らかにすることは、今後の保存や利活用を考える上で非常に重要である。

本報では、海上自衛隊呉基地内に残されたレンガ造の倉庫群について、文献調査ならびに実測調査により建設年代を検証した結果について報告する。

2. 旧呉鎮守府の赤レンガ倉庫群について

現在の海上自衛隊呉基地には、前述の旧呉鎮守府庁舎のほか、鎮守府が開庁した明治 22（1889）年に建てられた旧文庫測器事務所（現在の海上自衛隊呉地方警務隊本部庁舎）や建設年代は不明であるが昭和 2（1927）年以前には建てられていた旧呉海軍艦船部（現在の海上自衛隊呉造修補給所庁舎）など、戦前に建てられた多くのレンガ造建築物が今なお現役で使用されている[1)-3)]。

今回調査を実施したレンガ倉庫群もその一つであり、現在は 3 棟が残っている。現在はそれぞれ「31 倉庫」「32 倉庫」「33 倉庫」と呼称されているが、本報では便宜上、終戦時の呼称である「第七庫」「第八庫」「第九庫」を用いることとする。

現在の第八庫を西側から撮影した写真を図-1 に示す。建物内部は長手方向が約 35.5m、短手方向が約 8.2m であり、レンガ造の総二階建で切妻の屋根が架かっている。約 4m おきに設けられた外壁のバットレスが特徴的で、内部の小屋組は図-2 に、二階床の梁組は図-3 に示すような構成となっている。

図-1 第八庫西側外観

図-2 小屋組の木造トラス

写真 3　二階床の梁組（平行弦トラス）

小屋組は木造の真束小屋組（キングポストトラス）であり、レンガ造の壁上に整然と並んでいる。二階床の梁組は木造の平行弦トラスであり、引張力が作用する箇所には鋼製部材を用いている。なお、後述のようにこの建築物は昭和 20（1945）年の空襲でレンガ壁を除く部分は焼失しており、小屋組や床組は戦後の再建である。

3.　レンガ倉庫群の建設年代の検証

3.1.　文献に基づく建設年代の検証

海上自衛隊が保管する台帳には、調査対象のレンガ倉庫群は昭和 5（1930）年に登録されている。これまでその建設年代は明らかとなっていなかったが、防衛省防衛研究所に所蔵されている昭和 19（1944）年に呉海軍軍需部が作成した建築物の目録 [4]によると、「第七庫」「第八庫」「第九庫」の竣工年月は明治 33（1900）年 4 月と記載されている。なお、この目録には「第一庫」の竣工年月が明治 33（1900）年 2 月と記載されているが、関連する史料とを比較すると「第一庫」は現在の施設課事務所に該当する。

また、この度の調査では明治 33（1900）年 8 月に作成された工事竣工報告 [5]の中に、建設当初のレンガ倉庫の図面も確認された。見つかった図面を図-4 に示す。図面には「呉鎮守府機関部需品庫新営図」の表題が付けられている。

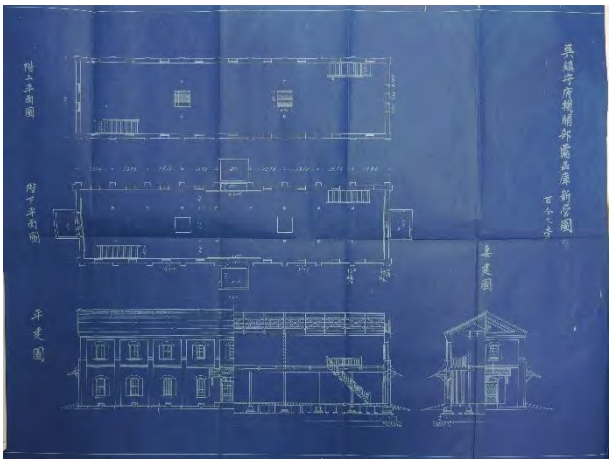


図-4　建設当初の赤レンガ倉庫の図面 [5]

階段位置や小屋組及び床組の形式、妻面がすべてレンガ壁となっているなど現状との差異も見られるが、開口部の位置、形状や外壁の特徴的なバットレスなど、レンガ壁部分の多くは建設当初と同様であることが分かる。

3.2.　英連邦占領軍が撮影した写真による検証

図-5 に示す昭和 21（1946）年に当時中四国地域の占領統治を担っていた英連邦占領軍（British Commonwealth Occupation Force、以下 BCOF と称す）が撮影した写真にレンガ倉庫群が写っており、戦時中にはすでに存在していたことが分かる。空襲で焼失した屋根も確認することができる。BCOF が昭和 25（1950）年に撮影した別の写真では、屋根が切妻造となっていることが確認できた。昭和 21（1946）年からの 4 年間の間に BCOF による修繕がなされて、現在の形になったものと考えられる。

図-5　1946 年に BCOF が撮影した写真[注 1)]

3.3. 明治芸予地震の被災写真による検証

国立科学博物館地震資料室のホームページ [6]では、明治芸予地震で被災した建築物の写真が公開されている。明治芸予地震とは、明治 38（1905）年 6 月 2 日に発生した安芸灘を震源とする地震であり、呉地域では当時の震度区分で最も大きな揺れである「烈震」を記録している。旧海軍関連の建築物も大きな被害を受けており、前述の旧呉鎮守府司令長官官舎や旧呉鎮守府庁舎は、この地震の被害を受けた後に新たに建設し直されたものである。なお、明治 22（1889）年に建てられた初代の呉鎮守府庁舎は、明治芸予地震の被災後も二階建を平屋建に改築して使用され続け、戦後は呉地方総監部第二庁舎として使用されていたが、昭和 56（1981）年に解体撤去されて惜しくも失われた。

さて、前述の地震資料室で公開されている写真の中で、「需品庫煉化二階倉庫」と示されている建物の外観が現存のレンガ倉庫群と酷似していた。そこで、今回の調査では、明治芸予地震の被災写真に残されたレンガ壁のひび割れ等の損傷がレンガ倉庫群に残っていないか確認を行った。図-6 は、公開されている写真の中で「需品庫煉化二階倉庫東北側壁封角線状亀裂」と注釈が記載されたものである。

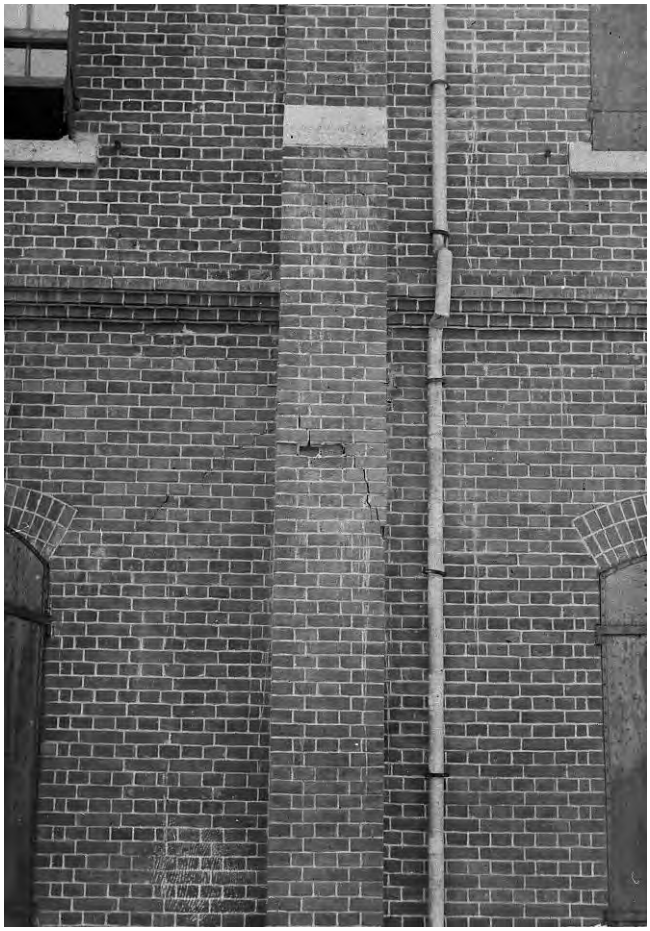


図-6　東北側壁封角線状亀裂[注2)]

図-7　第八庫東北側の外壁・バットレスのひび割れ

中央に写る外壁のバットレスに大きな亀裂が確認できるほか、左下の一階窓の右上部分へのつながる外壁のひび割れが見える。図-7 に示すのは、現在の第八庫の東北側に確認された外壁とバットレス部分のひび割れである。図-6 と 7 を比較すると、バットレス部分のひび割れが完全に一致することが分かった。また、バットレスから左下の一階窓へとつながるひび割れについても、ほぼ一致した。

図-8　東北側壁封角線状亀裂（47）ノ外部[注2)]

図-9　第八庫北側の外壁

図-8 は、公開されている写真の中で「東北側壁封角線状亀裂（47）ノ外部」と注釈が記載されたものである。写真左側上部の開口部より、左斜め上に向かってひび割れが生じている。図-9 に示す第八庫の外壁においても同じひび割れが確認できる。その他、レンガの目地の色の濃淡などにおいてもほぼ一致している。

このように、明治芸予地震の際に発生したと思われるひび割れが現在の第八庫、第九庫に確認をされたことにより、地震が発生した明治 38（1905）年 6 月の時点でこれらの建築物がすでに存在していたことが確認できた。

なお、国立科学博物館地震資料室ホームページには他にも旧海軍関連の建築物の被災写真が公開されているが、そ

の中に「需品庫煉化平家倉庫」と記載されたもの（図-10参照）もある。同じく平屋建で近くに現存するレンガ造の建築物として、現在の海上自衛隊呉地方総監部施設課事務所があり、この建物もレンガ倉庫群と同様に海上自衛隊の台帳には昭和 5（1930）年に登録されている。図-11 に施設課事務所の現在の写真を示す。窓上のアーチ状の部分を基準としてひび割れの位置を確認すると、図-10 と 11 とで窓左側上部から軒下へと伸びるひび割れがほぼ同様であることが確認できる。こうしたことから、施設課事務所の建物の建設年代についても確認できた。

図-10　需品庫煉化平家倉庫　東北側窓壁亀裂[注2)]

図-11　現在の施設課事務所東北側壁面のひび割れ

4. まとめ

本報では、海上自衛隊呉基地内に残るレンガ倉庫群を対象に、文献調査ならびに実測調査により、その建設年代を検証した結果について報告した。これまでは、海上自衛隊の台帳に記載されている昭和 5（1930）年が建設年代とされてきたが、今回の調査の結果、二階建のレンガ倉庫群（「第七庫」「第八庫」「第九庫」）は明治 33（1900）年 4 月、平屋建の施設課事務所は明治 33（1900）年 2 月であることが明らかとなった。

呉市に残る旧海軍関連のレンガ造建築物として明治 40（1907）年竣工の旧呉鎮守府庁舎などが知られているが、今回調査を行ったレンガ倉庫群もこれらと同様に高い歴史的価値を有することが確認されたと言える。旧呉鎮守府の歴史を考える上でも大変貴重な遺構であり、今後の保存・活用が期待される。

一方、図-12 に示すように、老朽化に伴う損傷が各所で進行していることも確認された。建設されてから約 120 年の歳月を経る中で、明治芸予地震や平成 13（2001）年に発生した芸予地震など数多くの地震などにも耐える中で、徐々に損傷が蓄積して現在に至っている。対策も一部でなされているが、現時点での外壁の変形状態を考えると、実際の補強効果は乏しいものと考えられる。今後も次世代へと引き継いでいくためには、構造的な補強対策が急務である。今後は、適切な補強方法の検討を行いたい。

図-12　現在の第九庫南西隅の外壁ひび割れ

謝辞

本報に示した調査の実施に際しては、海上自衛隊呉地方総監部の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

脚注

注 1)　写真提供：オーストラリア戦争記念館

注 2)　写真提供：国立科学博物館

参考文献

1) 呉レンガ建造物研究会編：街のいろはレンガ色ー呉赤レンガ考ー、 中国新聞社、 1993.
2) 防衛施設技術協会編：自衛隊施設内の歴史的建造物（明治・大正 編）、 2005.
3) 防衛施設技術協会編：自衛隊施設内の歴史的建造物（昭和編）、 2006.
4) 呉海軍軍需部：営造物及機械目録　昭和 19 年 4 月 1 日調、1944.4.（防衛省防衛研究所）
5) 呉鎮守府：工事竣功報告　明治 33 年度海軍拡張費建築費支弁に属する工事　明治 33 年 8 月 1 日、 呉鎮工事竣工報告巻 1　明治 33 年度、1900.8.（防衛省防衛研究所）
6) 国立科学博物館理工学研究部理化学グループ：明治芸予地震、国立科学博物館地震資料室、https://www.kahaku.go.jp/research/db/science_engineering/namazu/（2019 年 10 月 1 日参照）

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

最新の計測技術を用いた歴史的遺構の記録保存および活用に向けた実践的検討

Practical study for preservation and utilization of historical remains using the latest measurement technology

津口雅彦*

TSUGUCHI, Masahiko. (Pasco Co., Ltd.)

*株式会社パスコ環境文化コンサルタント事業部技術センター長

（〒192-0046東京都八王子市明神町2丁目12番21 明神町ビル3階）

キーワード：第一海堡，UAV，SfM

（*fort No1 in tokyo bay, Unmanned Aerial Vehicle, Structure from Motion*）

1. はじめに

本稿は、東京湾要塞第一海堡において最新の計測技術を用いて歴史的遺構の現状の記録保存を実施し、その成果の活用について実践的に検討した。記録は異なる撮影手法を用いて 2 時期の空中写真を取得して三次元の状況を計測し、現状の変化が認められる一部の箇所を差分として整理し活用した。

第一海堡は明治期に富津岬の海上に築造された 100 年以上を経過した構造物であり、東京湾海上要塞の一つである。明治期に西洋の土木技術を導入して建設された構造物として歴史的に貴重な施設である。（図－1）

なお、「海堡」とは明治から大正の間にかけて、海上に人工的な島を建設し、その上に砲台等の軍事施設を配備した構造物で、当時の東京を防衛するために東京湾口部に造られた人工島である。第一海堡のほか、第二海堡、第三海堡も存在した。第三海堡は竣工の 2 年後の関東大震災による被害を受け、東京湾口の海中に水没したため、航路上の障害となることから 2000 年から 2007 年にかけて撤去工事が実施された。[1)]

国土交通省関東地方整備局は、第二海堡の管理を実施している。それと同等の関連する施設として第一海堡の構造物の健全度を確認し、維持管理技術を検討するための現地調査が認められ、2019 年 5 月 24 日に概観目視確認が行われ、UAV での空中撮影を実施するために調査に参加した。現在でも第一海堡は、立ち入り禁止となっている。第一海堡は、建設当時の砲台跡や人工島護岸が当時の状態を残している。

図－1 第一海堡位置図

（国土地地理院地図より）

現在は第三海堡の遺構の一部は追浜展示施設やうみかぜ公園で展示されている。第一海堡などの建設経過は表－1 にまとめた。

表－1 海堡の建設経過

西暦（年号）	海堡の建設経過
1881 年（明治 14）	第一海堡建設着工
1887 年（明治 20）	第一海堡人工島部竣工
1889 年（明治 22）	第二海堡建設着工
1890 年（明治 23）	第一海堡砲台等完成
1892 年（明治 25）	第三海堡建設着工
1914 年（明治 25）	第二海堡竣工
1921 年（大正 10）	第三海堡竣工

２．第一海堡の現状記録保存（2 時期空中写真撮影）

2.1 第一海堡空中写真撮影（1 時期目記録）

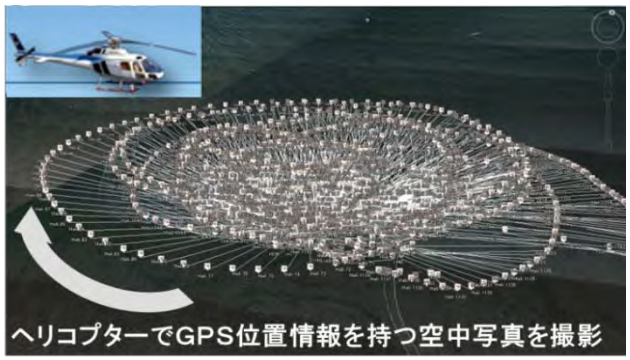
空中写真測量は、第一海堡の全景写真を撮影した。第一海堡は、富津岬から 1km ほど沖合に位置し，第二海堡と隣接している。1 時期目の現状記録保存は、2015 年（平成 27）国土交通省関東地方整備局東京湾中央航路第二海堡空中写真測量等業務に合わせて第二海堡空中写真測量終了後、ヘリコプターに搭乗し、最新の計測技術を用いた PALS システムを用いて連続する第一海堡の空中写真を撮影した。

PALS システムとは、PALS（Portable Aerial photography and Locator System）のことであり、カメラ・GPS・ジャイロ・加速度計・レーザ距離計の情報をカメラのシャッターのタイミングごとにパーソナルコンピュータで制御して計測値を同時に取得する撮影機器である。（図－2）

図－2 PALS システムの概要

撮影は、2015 年（平成 27）1 月 8 日の午後 1 時 30 分から午後 1 時 38 分の間に第一海堡の上空をヘリコプターで旋回しながら撮影した。写真枚数は、492 枚である。（図－3）

撮影した空中写真の 1 枚の画像は JPG 形式で概ね 4MB のサイズである。（図－4）



図－3 ヘリコプター空中撮影時位置情報イメージ

図－4 PALS システムで撮影した空中写真画像

空中写真撮影後は、撮影時のシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの三次元形状とカメラの位置を同時に復元する手法である SfM（Structure from Motion）により、3 次元幾何(Structure)とカメラ姿勢変化(Motion)を同時に算出する技術を使用して成果を作成した。（図－5）

図－5 SfM 技術の活用イメージ

なお、SfM を利用する利点は下記の項目が挙げられる。

・多数、多方向の写真から撮影対象の三次元座標を容易に構築できる。
・精度にこだわらなければ半自動処理ができ、災害時など即時性で効果的な成果が得られる。
・VR、AR、映像制作、セキュリティ産業、ロボット自律制御など、広範な分野で適用できる。

2.2 第一海堡空中写真撮影（2 時期目記録）

2 時期目の現状記録保存は、2019 年（平成 31）5 月 24 日に国土交通省関東地方整備局湾口航路事務所の協力を得て「歴史遺産の地盤工学に関する研究委員会第一海堡の研究視察実施（歴史的石造構造物部会）に関する」概観目視確認の現地調査に同行し、無人航空機（UAV ; Unmanned Aerial Vehicle　通称「ドローン」）により、第一海堡の全景を空中写真撮影した成果を活用した。

研究視察では第一海堡跡の健全度を把握し、その差異を明確にした上で、保存に向けた検討ができるように資料を作成するとともに、状況把握のため、UAV による空中写真測量、現地調査、基準点測量による現況三次元地形モデルを作成した。

本稿ではその調査実施で作成した資料を活用した。

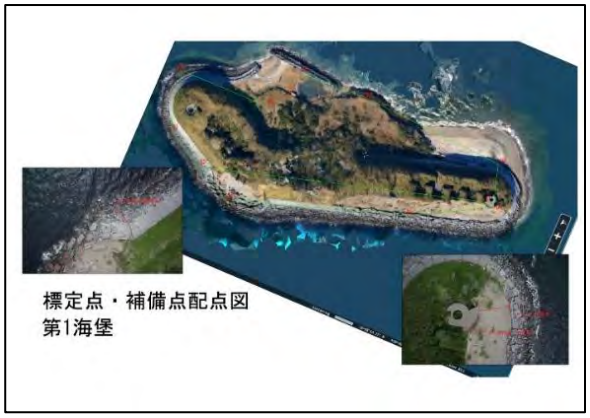
第一海堡構造調査のための実施内容は以下の通りである。（図－6）

図－6　調査実施フローチャート

撮影に使用したUAVは、DJI社製のMatrice600 Pro、重量（最大離陸重量）9,600g（15,000g）、カメラはSony　α7rを使用した。（図－7）

図－7　Matrice600 Pro

撮影は「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」及び「公共測量におけるUAVの使用に関する安全基準（案）」に準拠して計画した。撮影する空中写真の地上画素寸法は地上解像度1cmとした。撮影に際して対空標識（標定点）を踏査、選点した。数量は9点であり、対空標識（検証点）を2点配置し各々の対標位置座標を観測した。（図－8）



図－8　対空標識の位置図

対空標識の詳細な設置事例を表示した。（図－9）

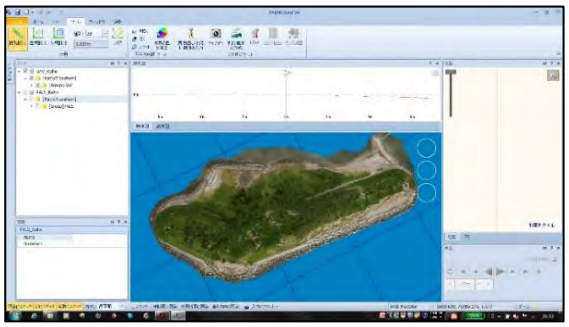
図－9　対空標識は図-7の詳細な設置事例

観測した対標位置座標を成果にまとめた。(表－2)

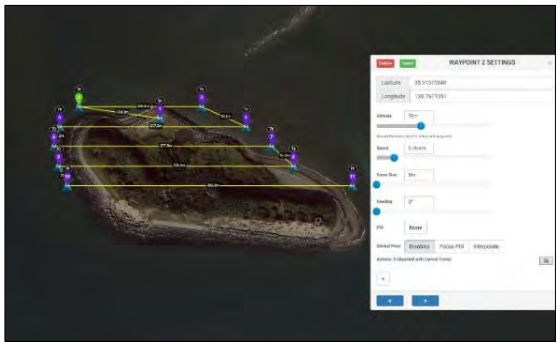
標定点成果表				
点名	X	Y	Z	備考
D1	−75933.433	−5895.141	1.240	
D2	−75955.738	−5835.933	2.678	
D3	−76019.953	−5708.957	1.925	
D4	−76061.140	−5713.397	13.403	
D5	−76068.661	−5795.644	2.903	
D6	−76053.698	−5965.421	1.606	
D7	−75987.053	−6016.922	2.482	
D8	−75931.309	−6006.343	2.031	
D9	−75965.436	−5925.753	2.507	
補測点成果表				
点名	X	Y	Z	備考
K1	−76056.119	−5719.637	13.494	
K2	−76022.773	−5987.830	2.426	

表－2　対空標識設置（標定点成果）

対空標識設置後、現地で UAV の飛行において障害となる対象物が無いか確認を実施した。最終的な UAV の自動航行による撮影コースはオーバーラップ 80%以上、サイドラップ 60%で設定した。(図－10)、(図－11)

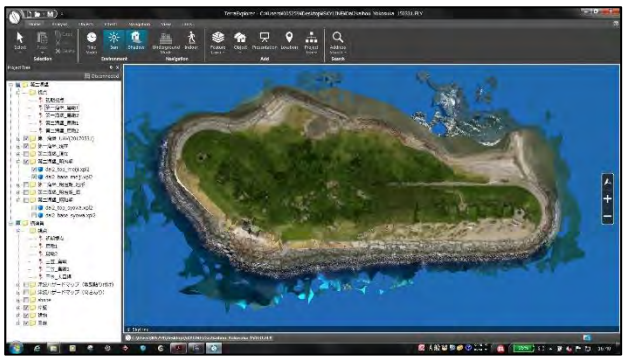


図－10　1 フライト目の撮影コース



図－11　2 フライト目の撮影コース

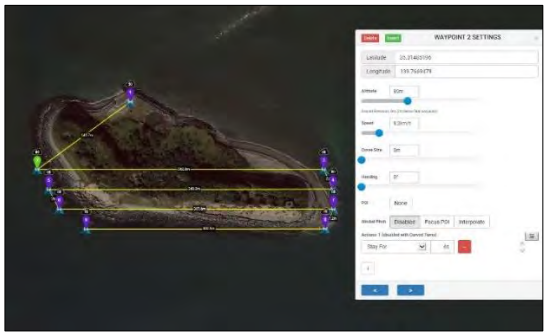
撮影は 10 時から 14 時の間に 635 枚の空中写真撮影を実施した。空中写真は活用に向けた実践的検討を行うため SfM 技術により三次元テクスチャ付ポリゴンモデルを作成し 2 種類の三次元表示システムで表示した。(図－12)、(図－13)



図－12　三次元表示システム（Skyline）

図－13　三次元表示システム（PADMS）

また、第一海堡の空中写真撮影後に UAV による動画撮影を 15 分程実施した。(図－14)



図－14　第一海保の動画撮影（画像上部が富津岬）

3. 第一海堡の活用に向けた実践的検討

3.1 第一海堡空中写真の SfM 処理

SfM は、コンピュータビジョン分野の三次元画像を作成するための一つの手段である。複数の視点で撮影した画像から、カメラの位置姿勢と物体の三次元形状を推定する方法である。SfM を使ったソフトウェアとして、オープンソースの Bundler や、市販ソフトの Pix4Dmapper、Metashape（旧 PhotoScann）などが登場しており、高度な知識がなくても、写真を入力して三次元のモデルを容易に作成することが

できる。また、フリー・オープンソース（VisualSFM、PMVS）やオンラインクラウドサービス（AutodeskReCap360）などもある。SfM の代表的なソフトの特徴を一覧表に記載した。（表－3）

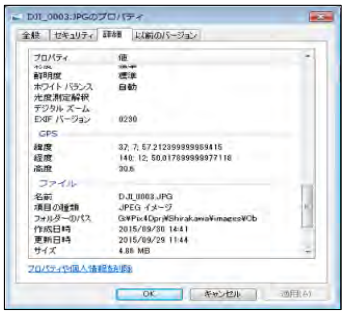
表－3　一般的な SfM ソフトウェア一覧

名称	メーカー	区分	備考
StreetFactory	AIRBUS	無制限	・大規模処理に有効 ・8ライセンス以上のサーバシステム ・PIXELFACTORYと統合されている
ContextCapture	Bentley	無制限	・大規模処理に有効 ・MasterとEngineで運用する ＊Engine×1の追加は450万
		30GPxまで	＊月利用もある
Pix4Dmapper	Pix4D	40MP/枚まで	・1ライセンスで2ユーザ利用できる ・500枚程度の小規模処理向け
		無制限	・ESRIに組み込みがある ＊月利用もある
Metashape（旧PhotoScan）	Agisoft	Professional	・500枚程度の小規模処理向け ・Erdasに組み込みがある
		Standard	＊アカデミックや月利用もある
ImageMater	TOPCON		・UAV撮影など小規模向けの処理

ここでは StreetFactory の SfM 処理を実践的な検討事例として、その流れを記載した。

1)　初期設定は、画像の取り込み、座標系の指定を行う。（図－15）、（図－16）

図－15　画像情報

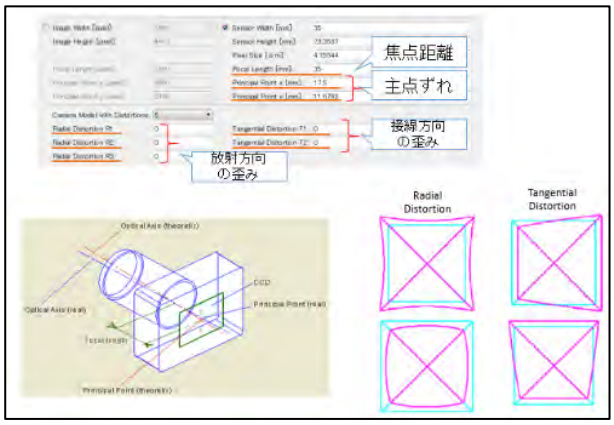


図－16　座標系情報

2)　カメラの位置・姿勢推定とタイポイントの三次元座標の算出は、SfM（バンドル調整）を行う。バンドル調整は写真測量における空中角測量で用いられている手法である。処理手順は画像上のキーポイントを抽出し、そのキーポイントをマッチングする。バンドル調整はカメラの内部標定要素も柔軟に調整することが可能である。調整の最適化を行うためには外部標定要素（EO：カメラ位置・姿勢）や内部標定要素（IO：カメラパラメータ）の初期設定を正しく行うことが重要である。（図－17）

3)　MVS（Multi View Stereo：点群、メッシュの生成）は多視点画像計測による点群計測（Dense Stereo Matching）で三次元点群を生成する。生成された三次元点群を用いて自由表面形状モデリングを行い、TIN（triangulated irregular network）作成を生成し UAV 撮影の第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルを出力する。（図－18）

4)　数値標高モデル（DSM ；Digital Surface Mode）は、一般に、地球の表面を作成する。オルソ作成は、写真を正射変換した画像を作成する。（図－19）



図－17　カメラの調整パラメータ

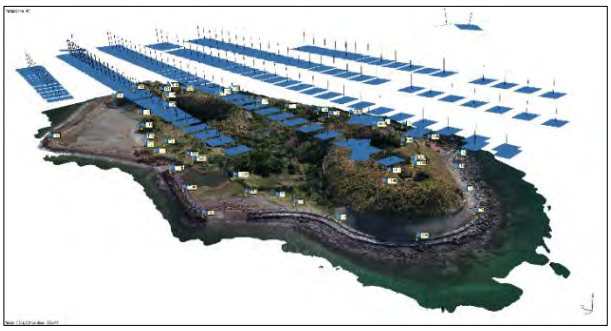


図-18　第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデル

図－19　第一海堡オルソ画像

3.2 第一海堡の2時期ポリゴンモデルの活用

SfM 処理で作成した 2 時期第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルを活用するため大容量三次元基盤情報の閲覧や使用が可能なアプリケーション PADMS を使用した。PADMS は、UAV や航空機、MMS 等多種多様な計測センサーによって取得・生成された情

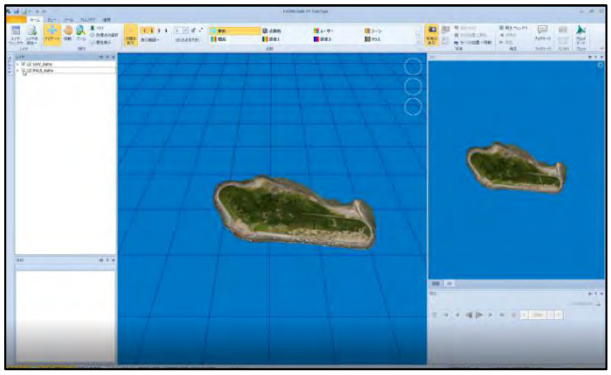
報と各種台帳を管理することができるソフトである。

ここでは特に PADMS-Viewer の機能に追加して ArcGIS/CAD と連携して MMS 計測データから数値図化することができる PADMS-Solid を活用した。PADMS-Solid は ICT を活用した建設・土木工事現場における施工管理では、現場写真や地層工法などをモデル化し、施工時における情報を一元的に管理することができる。また、維持管理として工事完成図や設計図など、3 次元基盤情報と連携した管理を高度化できる。2 時期第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデル活用は、PADMS-Solid に三次元フォーマット OBJ（OBJ；ウェーブフロント･テクノロジーズが開発した 3D 座標のポリゴン線や点、テクスチャマップ、他のオブジェクト情報を含む三次元物体に使用されるファイル形式）形式の取り込みを実施した。2 時期の第一海堡の OBJ を見える化し比較して空間的な構造物の把握について寸法、面積、土量を算出し既往の景況説明書の数量との比較を実践的に検討した。（図－20）、（図－21）第一海堡に配置された構造物の名称を表示した。（図－22）

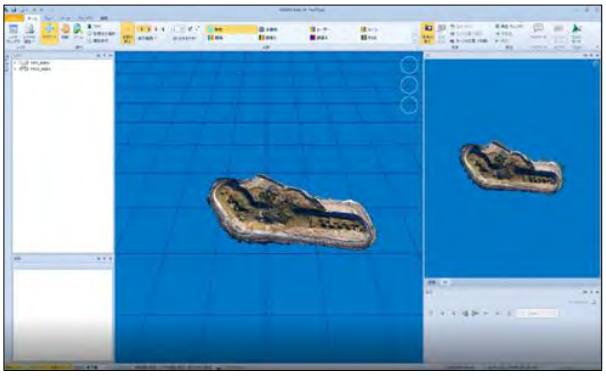
2 時期の比較の中で、特に崩壊が進んでいる中央突角部において三次元の状況を計測し、現状の変化が大きく認められる箇所を差分として算出した。比較に当たっては PALS 撮影による第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルと UAV 撮影による第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルを PADMS-Solid 上で平面直角座標系 9 系に読み込み、UAV 撮影の計算成果を基準として PALS 撮影による第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルの座標位置の調整を実施した。

2 時期の第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルの中央突角部において共通する範囲を PADMS-Solid 選択し面積 3149.7 ㎡を計測した。（図－23）

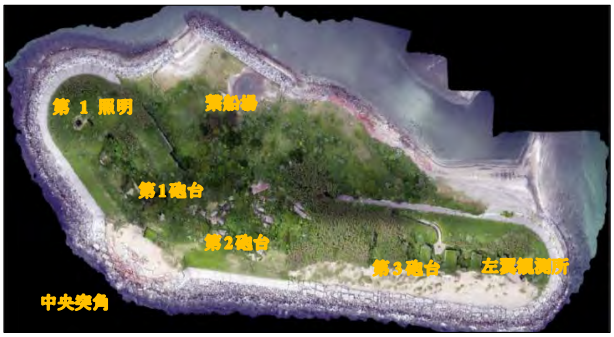
共通する範囲について ICT 活用のために開発した土木工事現場における施工管理の機能で出来形評価メッシュ作成を用いて、差分量に関する土量計算を実施した。基本モデルを UAV 撮影によるテクスチャ付ポリゴンモデルとし出来形計測モデルを PALS 撮影によるテクスチャ付ポリゴンモデルに設定した。土量メッシュは１ｍとした。（図－24）



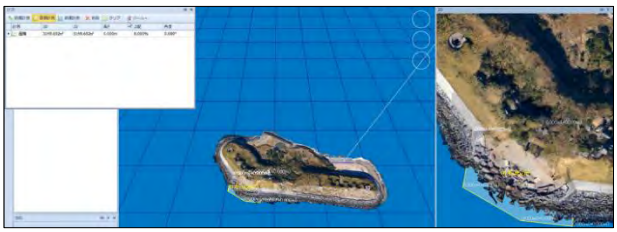
図－20 PALS 撮影によるテクスチャ付ポリゴンモデル



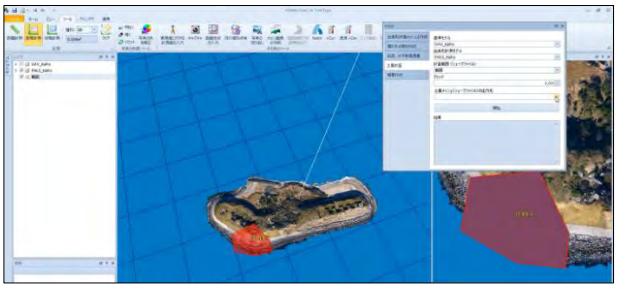
図－21 UAV 撮影によるテクスチャ付ポリゴンモデル



図－22 第一海堡に配置された構造物の名称を表示



図－23 共通範囲を PADMS-Solid で選択し面積計測



図－24 土量メッシュ（グリッド）は１ｍ

最終的に計算された切土量は、133.352 ㎥切土面積は、720.000 ㎡であり盛土量は 593.746 ㎥、盛土面積は、1881.000 ㎡、設定した範囲の計算面積は海上を除いて 2601.000 ㎡である。（図－25）

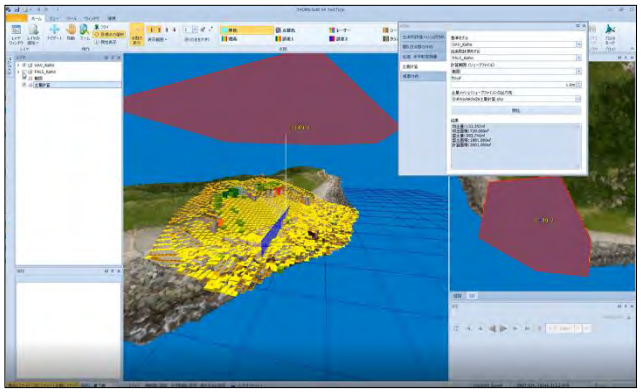
第一海堡の建設については、「日本帝国海堡建築之方法及景況説明書」に第一海堡の数量については、完成数量と実態が示されていると考える。景況説明書には一部、断面の記載がされている。（図－26）「日本帝国海堡建築之方法及景況説明書」（米国公文書館所蔵）東京湾第三海堡建設史より転載

第一海堡の護岸部は、概ね景況説明書の断面図とおりに施工されている。基本構造は石積部と盛土部（被覆コンクリートが一部使用されている）に分かれている。盛土部コンクリート下端には波打ち際に長大な石が外周に張り巡らされている。左翼側には図－19 に示したとおり第 2 砲台、第 3 砲台、左翼先端部には観測所がある。現状、左翼側の湾口側にある人工護岸および盛土は、概ね建設当時の石積施工やコンクリート被覆施工の様子を知ることができる。

現状のその箇所について UAV 撮影による第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルを使用して PADMS-Solid の機能より正面イメージと側面イメージ、断面図を表示した。「日本帝国海堡建築之方法及景況説明書」より満干の差は、2 m（HWL2.0m，LWL0.0m）であり防波堤頂上の高さ＋6 m、コンクリート被覆は現地調査の計測結果は概ね 4/5 勾配（38 度＝3.9/5 勾配）であり、記載と同様の角度で施工されていた。

なお、PADMS-Solid の機能計測した結果は 37 度であることを確認した。（図－27）

被覆石の高さは、計測したところ＋1.7 m である。コンクリート被覆は間隔を保持した小口部を設けている。[2)、3)]（図－28）



図－25　差分量に関する土量計算結果

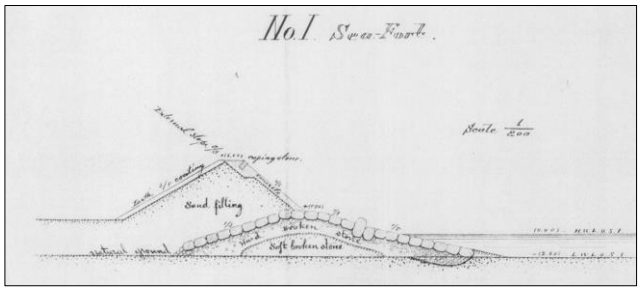
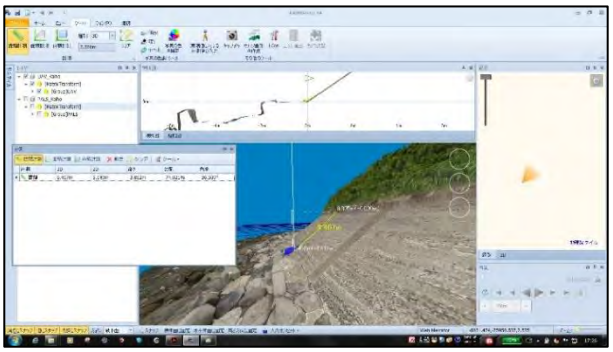
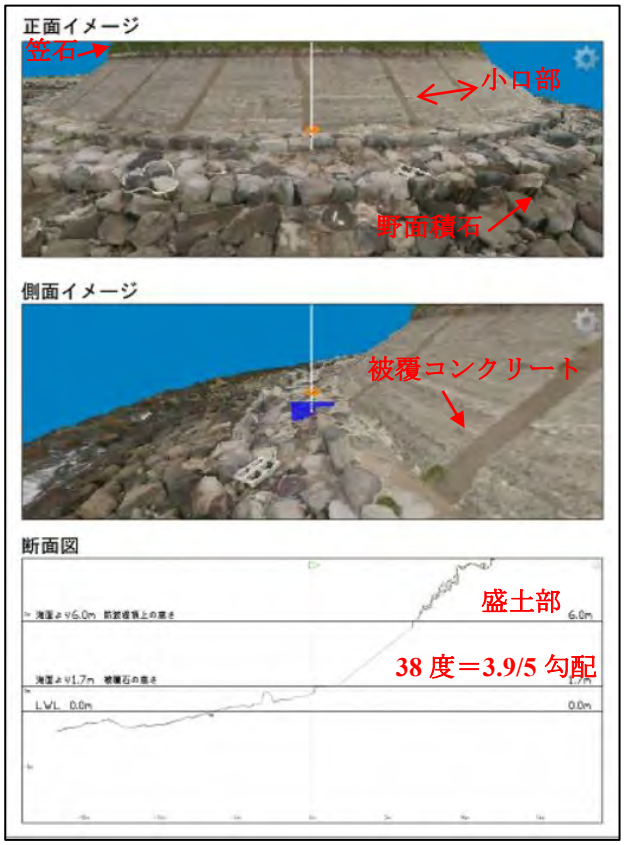


図-26　第一海堡の断面図



図－27 PADMS-Solid の計測結果



図－28　護岸部の断面図形状計測と確認

4. まとめ

本稿では、東京湾口に現在も存在する近代土木遺構である第一海堡に対する最新の計測技術を用いた歴史的遺構の記録保存および活用に向けた実践的検討結果について、その概要を以下に述べる。

明治に築造された第一海堡は、東京湾口の景観を形成する構造物である。現状は、中央突角とよばれた砲台が配置された個所は、護岸や上部盛土部分が完全に崩壊している。また、左翼側の護岸および盛土と一部の砲台も湾口側に向いて大きく崩れた状態となっている。

崩壊の原因は、波による野積の護岸がずれ、コンクリート被覆の下に海水が浸水し、被覆内部の海砂が抜け出て盛土下部の支持力が無くなり地滑りが生じ斜面が崩壊したと考えられる。

このような状況下、この歴史的遺構は、土木的な遺産価値の観点から見て、できうる限り次世代に継承してゆくことが望ましいと考える。

1)現状の記録保存は、2015 年（平成 27）1 月 8 日と 2019 年（平成 31）5 月 24 日に実施し、第一海堡テクスチャ付ポリゴンモデルによる三次元成果を保存した。

2) 2 時期の三次元成果を利用し、差分量に関する土量計算を実施した。

3)三次元成果計測の結果、護岸部が概ね景況説明書の断面図とおり同等に施工されていることを確認できた。

謝辞

本稿の第一海堡の寄稿にあたり財務省千葉財務事務所、関東地方整備局湾口航路事務所の協力を得ました。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

1) 日本帝国海堡建築之方法及景況説明書，米国公文書館（NARA）蔵，1906.10.3.

2) 野口孝俊，浦本康二，鈴木武：近代土木遺構「東京湾第二海堡」の建設技術，土木学会論文集，Vol.70.No

3) 国土交通省関東地方整備局東京湾口航路事務所：東京湾第三海堡建設史，2005.3.

C　防災・基地対策

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

個別要素法を用いた土石流衝突荷重の推定法の提案

PROPOSAL OF DEBRIS FLOW IMPLUSIVE LOAD EVALUATION USING DISTINCT ELEMENT METHOD

嶋川理*，堀口俊行**，伊藤一雄***
SHIMAKAWA Osamu, HORIGUCHI Toshiyuki, ITOH Kazuo

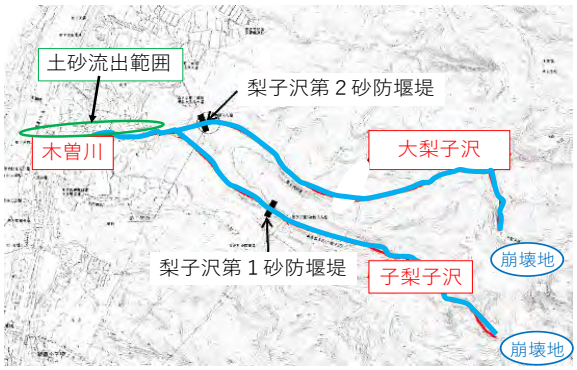
*防衛大学校，建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
**博（工），防衛大学校准教授，理工学研究科前期課程（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
***博（工），防衛省陸上自衛隊（〒306-0234 茨城県古河市上辺見 1195）

キーワード：土石流荷重，鋼製透過型砂防堰堤，個別要素法
(*debris flow load, open sabo dam, distinct element method*)

1. 緒　言

我が国は，保全地域から土砂災害対策として総合的な土砂管理を基準とし，土砂調節機構等を行っている．その中には，ハード対策として砂防構造物を複合的に活用することで，水系および流砂系を組織的に管理することを目指している．そのため，鋼製透過型砂防堰堤が設置されている．しかし，近年の気象変化の影響で局所的な豪雨をもたらし，想定した設計を遥かに超えるような土石流が高頻度で発生している．このため，透過型砂防堰堤の損傷事例として，平成 26 年 7 月長野県南木曽町で発生した土石流では，**図－1** に示すように梨子沢第 1 砂防堰堤が設置されており，一部が土石流の衝撃力によって破損した [1]．一方，近くにあった梨子沢第 2 砂防堰堤は，大きな破損を受けることなく，直接 6 m を超える巨礫を捕捉していた．この 2 つの堰堤の違いは，衝突した土石流の水深，流速といった条件が異なったために生じたとも考えられるが，2 つの堰堤の前面形状が，第 1 堰堤では直立，第 2 堰堤では下流側に傾斜を有していた．このことから，形状の違いで衝突荷重に与えた影響があると考えられる．砂防構造物の土石流外力においては，土石流の衝突荷重に関することが多く，圧縮性流体と非圧縮性流体に分けて衝撃荷重を算定していることが通例である [2-4]．大同ら [2]，水山ら [5]は，この現象論を整理し，土石流の設計流体力式を提案した．一方で，個々の巨礫における衝撃荷重は，接触理論を基に固体による集中荷重としている [6]．しかし，現行法では安全係数を 0.1 以下とすることを推奨しており，不確かな部分が多くある．

著者ら [7]は，透過型の前面傾斜角による土石流の衝突荷重低減効果を実験的に検証した．そのうえで，柔性構造物が土砂を捕捉したのち，減速・停止した土砂（デッドゾーン [8]．）と同様に先行して停止した礫の影響が，衝突荷重に影響を与えることを指摘している．しかし，定性的もしくは実験的な分析であり，解析に基づく定量的な解明をした研究は見当たらない．



図－1　被災事例河川略図

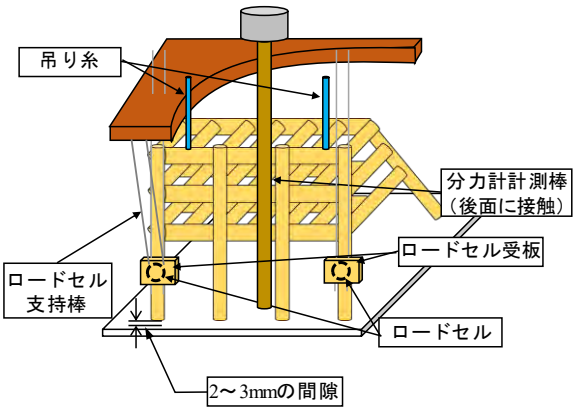
そこで本研究は，個別要素法を用いて事前実験における衝突荷重を再現することで，透過型砂防堰堤に生じる土石流荷重の推定法を提案するものである．

2. 実験の概要 [9]

実験で使用した直線水路は，水路長 4.0 m，幅 30 cm，深さ 30 cm である．**図－2** に，堰堤モデルを示す．堰堤モデルは，木製円筒の内部に鋼材を入れて部材を組み，高さ 27 cm ，幅 23 cm の模型である．堰堤モデルは，**表－1** に示す異なる 4 つの前面形状を変化させている．なお，その前面形状を前面傾斜角 θ_{LS} と呼ぶこととする．その堰堤モデルを水路

表－1　実験ケース

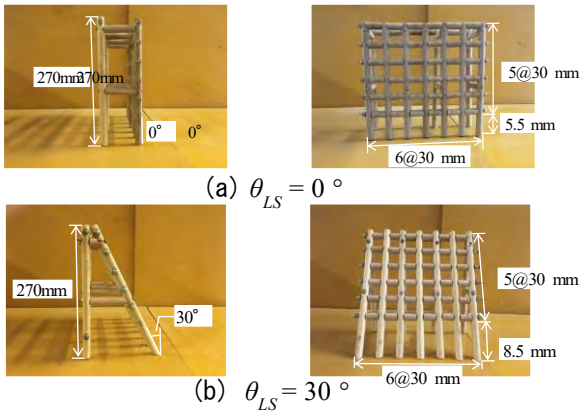
ケース	礫		水
$\theta_{LS}=0°$	A：15 mm 以下 B：16 mm-25 mm C：25 mm-35 mm	計 35 kg	0.06 m^3/s
$\theta_{LS}=10°$			
$\theta_{LS}=20°$			
$\theta_{LS}=30°$			



図－3　堰堤の固定および荷重測定要領

表－2　解析パラメータ

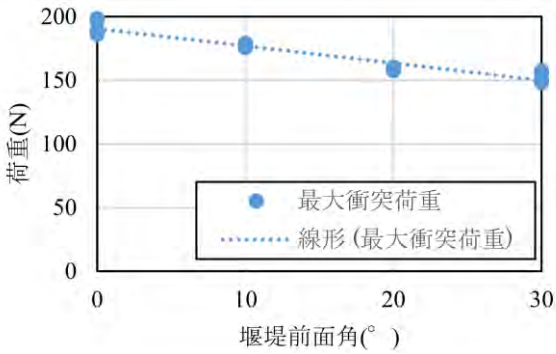
項　目			値
流水	初期流速(m/s)		2.0
	初期水深(m)		0.15
	抗力係数		0.49
堰堤モデル	円柱形要素(個)		26
	球形要素(個)		8
水路	平面要素(個)		4
	円柱形要素(個)		51
礫モデル	球形要素(個)	10～15mm	2552
		15～25mm	1101
		25～35mm	190
要素間ばね	ばね定数(N/m)	法線方向 K_n	1.0×10^6
		接線方向 K_s	3.5×10^5
	摩擦係数 $tan\varphi$		0.404
計算条件	時間刻み Δt (s)		1.0×10^{-6}



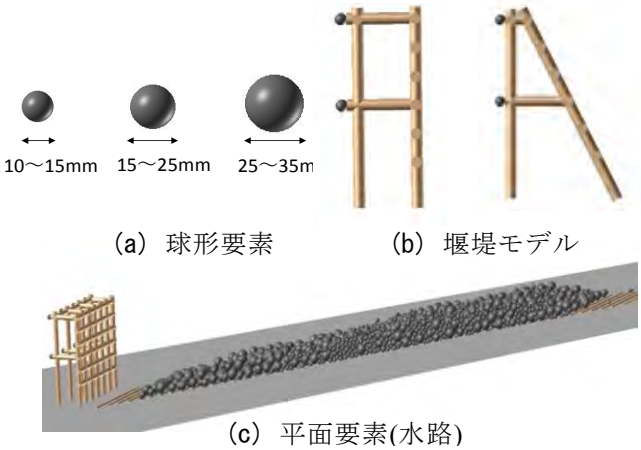
(a) $\theta_{LS}=0°$

(b) $\theta_{LS}=30°$

図－2　堰堤モデル



図－4　最大荷重～前面傾斜角関係（実験）



(a) 球形要素　　(b) 堰堤モデル

(c) 平面要素(水路)

図－5　解析モデルの概要図

の下流部に設置して，土石流を衝突させることで，荷重を計測している．**図－3** に示すように模型の設置要領は，上部から吊り下げて底面摩擦を受けない機構になっている．全ての荷重は，後方に接触させた分力計と 2 つのロードセルに伝達されるように工夫している．なお，後述する衝突荷重は，これらの荷重計による測定値の総和である．これに，上方 3.0 m の位置から，盛土状に置いた 3 種類の礫モデルに後方から 0.06 m^3/s の流量で水を一気に流して流下させる．

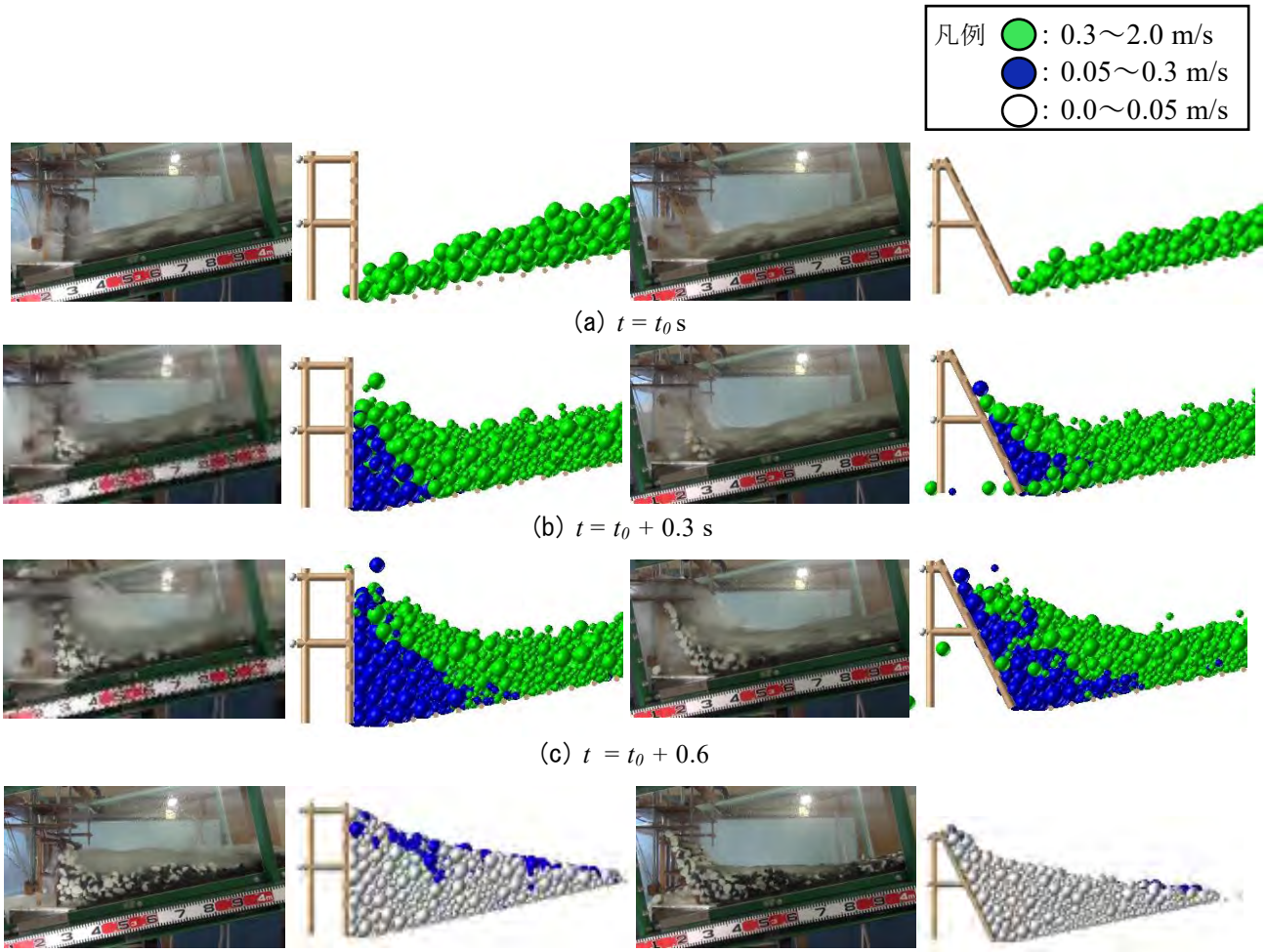
その結果，**図－4** に示すように，前面傾斜角が大きくなるにつれて最大荷重が小さくなることが示された．また，衝突してから最大荷重に至るまでの時間的な遅れが生じることで，荷重が低減していることを示した．

3. 荷重評価と荷重低減メカニズム

3.1　解析条件

本解析では，前面傾斜角の低減効果メカニズムについて顕著な差異について分析するものである．よって，直立堰堤 $\theta_{LS}=0°$ と前面傾斜角が最も大きい $\theta_{LS}=30°$ の 2 ケースについて解析を行った．

表－2 に解析諸元を示す．初期の水深は，実験の映像から 0.15 m とし，流速は 2.0 m/s とした．**図－5** に，解析で使用した礫要素，堰堤モデル，全体の



(a) $t = t_0$ s

(b) $t = t_0 + 0.3$ s

(c) $t = t_0 + 0.6$

(d) $t = t_0 + 3.0$ s

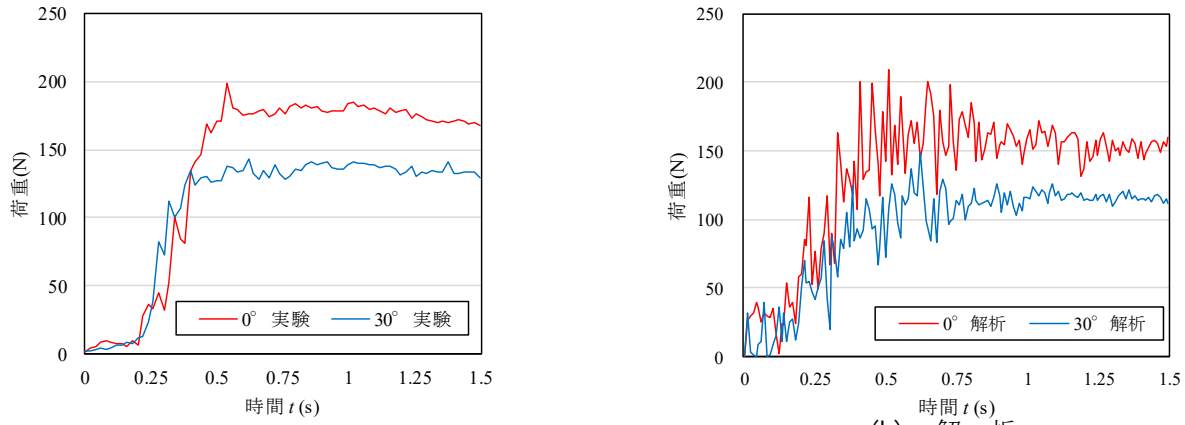
（I）$\theta_{LS} = 0$ °　　（II）$\theta_{LS} = 30$ °

図－6　$\theta_{LS} = 0$ °および $\theta_{LS} = 30$ °堆積形状の比較

水路モデルを示す．礫モデルとして球形要素，堰堤および水路の底面粗度を円柱形要素，水路に平面要素を用いてモデル化した．球形要素の粒径は，実験で用いた礫の粒径分布に基づき，3 種類の粒径の実験と解析における礫径分布が近似するようにランダムに与え，その合計質量が実験と同じ礫質前面の形状は，実験モデルと同様に縦方向部材に沿って 7 本の円柱を 30 mm の等間隔に配している．**図－5**(c)に示すように礫の初期配置は，実験と同様に堰堤から上流側 3.0 m の位置に礫をランダムに配置した．そのうえで，流速分布モデル [10]を用いた流体力を与えることで土石流モデルとして流下させている．そして，堰堤手前 0.3 m の位置まで流下させる解析を行った．以上のように衝突解析準備をするため，$\theta_{LS} = 0$ °と 30 °において堰堤に最初の 1 個が衝突するまでの個々の礫の位置や速度は全く同じ条件となっている．よって，同一の条件を用いることで，前面傾斜角が及ぼす影響を定量的に比較できるように設定している．なお，本解析では堰堤モデルと後方に固定された球形要素を付けて，得られたばね力を荷重としている．このばねは，連結ばねを使用しており，解析が安定するばね剛性を用いた [11]．

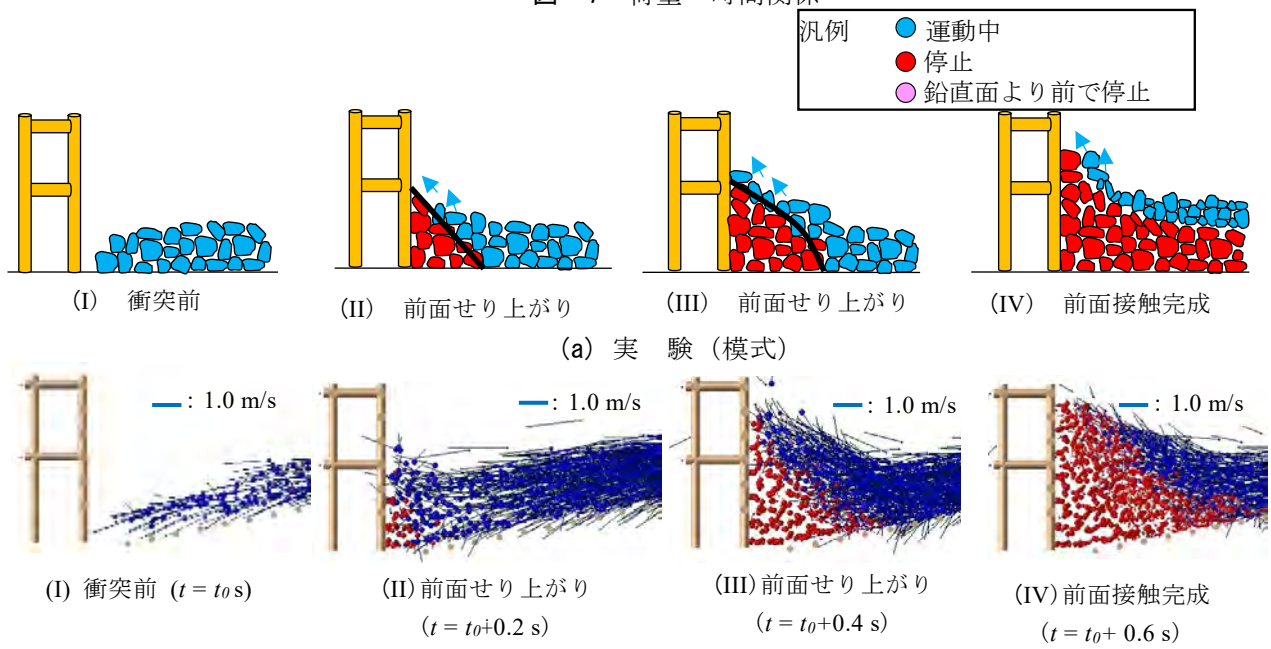
3.2　堆積過程

図－6 に，実験の堆積形状と解析結果の比較を示す．なお，解析結果の図は礫の速度について色分けしており，速度を有する要素を緑色（$v > 0.3$ m/s），概ね停止している要素を青色（$v \leqq 0.3$ m/s），ほぼ速度を失っている要素を白色（$v \leqq 0.05$ m/s）に，分けて表示した礫の分布状態を示している．**図－6**(a)の $t = t_0$ s は，実験と解析においてほぼ同じ状態である．この時間を荷重評価における衝突開始時間とした．**図－6**(b)の $t = t_0 + 0.3$ s，$\theta_{LS} = 30$ °で礫の堆積状況が $\theta_{LS} = 0$ °に比べて，礫の堆積高さが低くなっており，礫が堰堤全体を覆うまでの時間が遅れている．これは，前面傾斜角を有しているため礫が堆積するのに時間を要しているからである．解析も同様の傾向が見られる．**図－6**(c)の $t = t_0 + 0.6$ s 以降は，実験と解析の堆積過程を再現できている．**図－6**(d)の $t = t_0 + 3.0$ s は，最終的な堆積形状を比較すると，

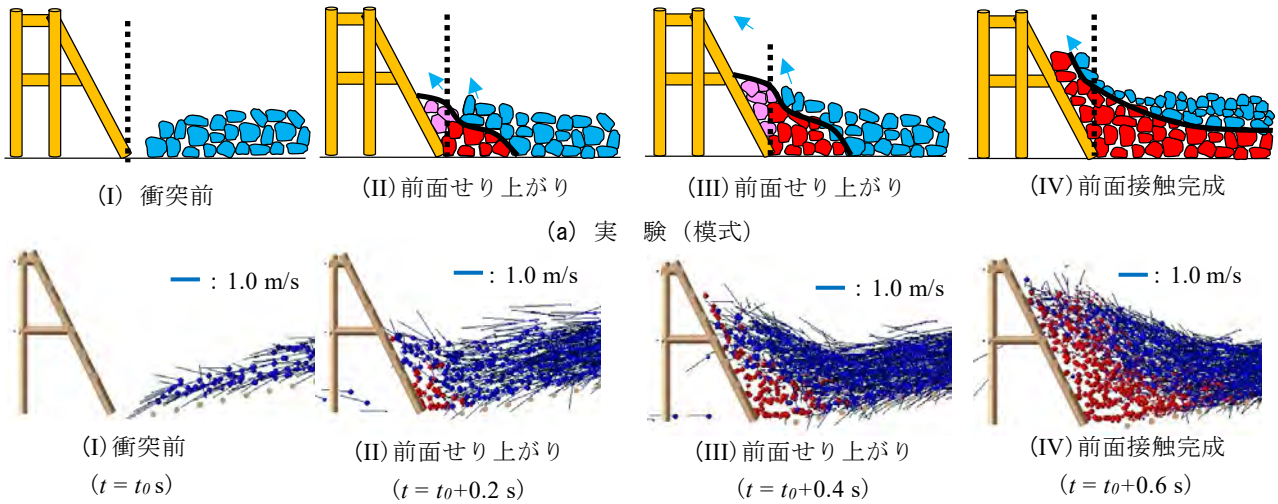


(a) 実 験　　(b) 解 析

図－7　荷重～時間関係

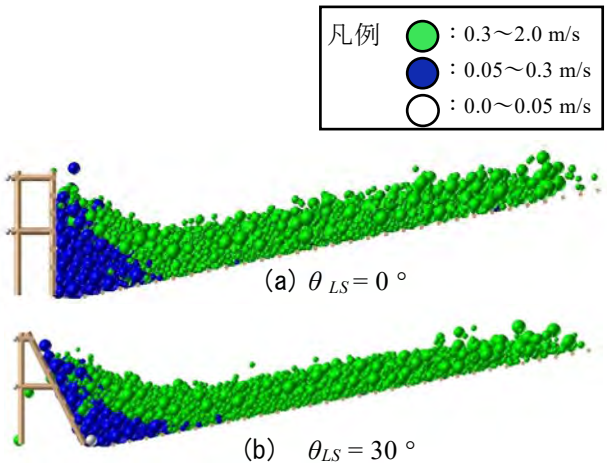


図－8　θ_{LS}= 0 °の礫塊停止メカニズム

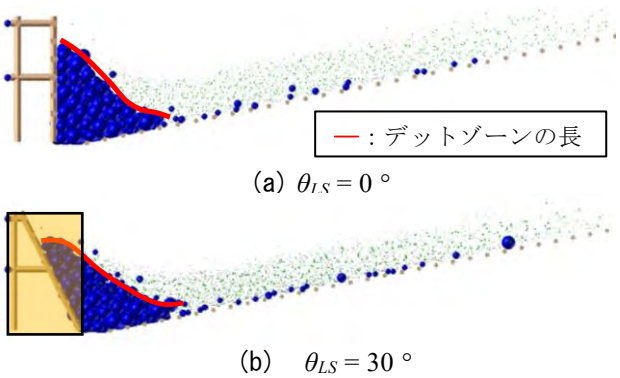


図－9　θ_{LS}= 30 °の礫塊停止メカニズム

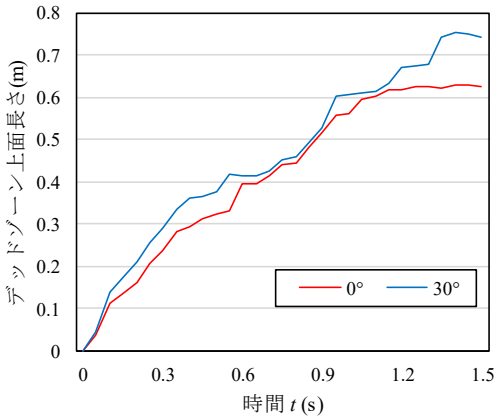
実験では下に凸となった形状で堆積し，解析の堆積形状はほぼ直線となっている．これは，礫モデルとして球形要素を使用しており，実礫に生じるかみ合わせを十分に表現できていないためと考えられる．



図－10 最大荷重時の礫速度分布



図－11 先行停止領域（デッドゾーン）



図－12 先行停止領域上面長さ

しかし，衝突から礫全体が捕捉し，安定（堆積）するまでの所用時間や概ねの堆積形状は再現できている．

3.3 荷重～時間関係

図－7 に，実験と解析の荷重～時間関係を示す．解析は，実験に比して荷重の上下が大きいが，衝突後に急上昇し，その後収束する定性的な傾向は再現できている．具体的には，実験では $\theta_{LS}=0°$，$t=t_0+0.5$ s で最大荷重 198 N，$\theta_{LS}=30°$，$t=t_0+0.6$ s で最大荷重 143 N に達した．最大荷重は，前面傾斜角を有すると約 30 % 軽減されており，最大荷重到達時間は 0.1 s ほど遅れている．一方，解析では，$\theta_{LS}=0°$，$t=t_0+0.5$ s で最大荷重 209 N，$\theta_{LS}=30°$，$t=t_0+0.6$ s で最大荷重 149 N に達している．実験と比較して解析の方がやや荷重が大きくなるが，前面傾斜角による荷重の低減効果を再現できている．さらに，最大荷重が発生するまでの時間の遅れも再現できている．また，堆積終了時の荷重が $\theta_{LS}=30°$ の方が，堆積荷重小さくなる点でも実験結果を再現しており，最大荷重の発生から堆積荷重までの過程を表現できていることがわかる．

3.4 先行停止礫塊形成過程の比較

図－8(a)，9(a)には，実験で想定された荷重低減メカニズムの考察を示す．さらに，図－8(b)，9(b)は，解析時における堆積過程を速度ベクトルを付して示している．図－8(a)，9(a)の第 I 段階では，礫のみの土石流の先端が堰堤に到達した時のものを示している．この時，実験と解析で荷重は生起しない．なお，解析の土石流では，両堰堤に対して，同じ状態を生起しているが，実験では必ずしも同一状態に再現できない．

図－8，9 の第 II 段階では，衝突後 0.2 s 後のものを示す．先頭部の礫が速度を失うことで，デッドゾーンを形成している．この形は直立堰堤では，直角三角形に形成し，$\theta_{LS}=30°$では，堰堤下部で鈍角な三角形を形成することになる．

図－8，9 の第 III 段階では，解析の $t=t_0+0.3$ s の状態を示している．ここでは，直立堰堤のデッドゾーンは第Ⅱ段階のものと相似形で形成し，その高さと上流側への伸びている．一方，図－9 の $\theta_{LS}=30°$の場合，高さは堰堤頂部直下まで達しているが，底面は上部に若干拡がった程度で，デッドゾーン上面の角度は第Ⅱ段階より急になっている．なお，両方ともデッドゾーン上面を流れる後続の礫の先端は，堤体頂部に向かって斜め上方に向かう運動をしている．

図－8，9 の第Ⅳ段階では，解析における $t=t_0+0.6$ s の状態を示している．直立（$\theta_{LS}=0°$）と前面傾斜（$\theta_{LS}=30°$）の堰堤におけるデッドゾーンは，その頂部が堰堤の頂部まで達しており，停止礫塊上面の角度は，前面傾斜を有している堰堤に比べて，直立堰堤の方が急になっている．また，停止礫の上面を滑動している後続の礫は接触することで勢いを失い，堰堤に直接，接触ができる流速ベクトルを有する礫が見当たらない．

3.5 先行停止領域（デッドゾーン）

図－10 に，最大荷重生起時における解析結果を示している．なお，礫の速度について色分けしており，概ね停止している要素を青色（v ≦0.3 m/s），

速度を有する要素を緑色（$v > 0.3$ m/s）に分けて表示した礫の分布状態を示す．また，**図－11** には**図－10** において速度を有していない礫のみを摘出したデッドゾーン（青色の要素）の形状を示す．なお $\theta_{LS} = 30$ °では 0.1 s ほど遅れて最大荷重に達するので，概ね同じ堆積高さのデッドゾーンを形成するのに時間を要することになる．これは，図中に黄色で網掛けした領域に停止礫が移動する必要があるためである．図中には，デッドゾーンの上面を沿った形で赤線を示している．これを比較すると直立堰堤の傾斜の方が急なことがわかる．このためデッドゾーンの右下下部から左上の頂部にかけての距離は明らかに $\theta_{LS} = 30$ °の方が長くなっている．**図－12** には，このデッドゾーン上面の長さの時間変化を示すが，最大荷重を迎える 0.6 s まで一貫して直立堰堤の方がその長さが短くなっている．

4. 結　言

本研究は，透過型砂防堰堤の前面傾斜角が土石流衝突荷重に与える影響について，個別要素法を用いて，衝突荷重評価について検討したものである．本研究の成果は，以下の通りである．

1) 個別要素法を用いて，直線水路における土石流実験で得られた荷重～時間関係や前面傾斜角の影響で最大荷重が減少することを再現することできた．

2) 荷重低減の原因として，前面傾斜角を与えることで，デッドゾーンの上面が伸びることで，後続の礫は停止礫塊と多く衝突（接触）するため，堰堤モデルが受けるまでに，運動量が小さくなる．このことによって，堰堤が受ける衝撃荷重を小さくしている．

3) 今後，デッドゾーンによる効果によって，摩擦・衝突エネルギーが堰堤の衝撃荷重を低減することが有用であれば，堰堤上流側の施工方法などの工夫によって，土石流の破壊力を低減する方法も考えられる．

さらに，上流側の不作為な河川形状の影響や土石流の流れ方によって，破壊を免れた実例検討などを加えることで，本提案手法における実用化へ向けた検討が必要であると考えられる．

参考文献

1) 平松ら：平成 26 年 7 月 9 日長野県南木曽町で発生した土石流災害，砂防学会誌，Vol.67, No.4, pp.38-48, 2014.
2) 大同淳之，吉栖雅人，中嶋健太：土石流による衝撃力，水工学論文集，第 38 巻，pp.557-562，1994.
3) 山本彰，山本修一，鳥井原誠，平間邦興：砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究，砂防学会誌，Vol.51，No.2，pp22-30，1998.
4) 三好岩生，鈴木雅一：土石流の衝撃力に関する実験的研究，新砂防，Vol.43，No.2（169），pp.11-19，1990.
5) 水山高久：砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点，新砂防，Vol.112，pp.40 - 43，1979.
6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：土石流・流木対策設計技術指針，土石流・流木対策設計技術指針 No905，2016.
7) Horiguchi T., Katsuki S., Ishikawa N., Mizuyama T. : Method for Evaluating the Trapping Effects of Woody Debris Using a Distinct Element Method International Journal of the Japan society of Erosion Control Engineering, Vol.12, No.1, pp.1-12, 2019.
8) Song D., Gordon G., D., Xu M., Choi G., E., Li S., Zheng Y. : Quantitative analysis of debris-flow flexible barrier capacity from momentum and energy perspectives, Engieering Georogy Vol.251, pp.81-92. 2019.
9) 小松喜治，堀口俊行，香月智，石川信隆，水山高久：鋼製透過型砂防堰堤の前面傾斜角が土石流衝突荷重に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.62A, pp779-778，2018.
10) 堀口俊行，香月智：個別要素法による鋼製透過型砂防堰堤に対する巨礫衝突荷重解析，砂防学会誌，Vol. 70, No.3， pp. 51-57，2017.
11) Horiguchi, T., Takahahsi, T., Takamori, K., Katsuki S. : Evaluation of load-carrying capacity of full-scale falling protection net using distinct element method, International Journal of Protective Structure, Vol.8, No.1, 1-20, 2017.

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

応災力向上への取り組みについて
～　防災・応災・減災　サバイバルという日常　～

An empirical proposal of Disaster Reaction Strategy in terms of Prevention, Reaction and Deduction

荻原洋聡*，佐藤紘志**
OGIHARA Yousou and SATO Hiroshi

*　株式会社　エヌ・ワイ・ケイ　参事（〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-16 北村ビル 2 階）
** 工　　博　防衛大学校　　名誉教授　(〒239-0803　神奈川県横須賀市桜ケ丘 1-8-2)

キーワード：防災、応災、減災、山津波、河川津波、海津波、被害の連鎖
（*Prevention, Reaction, Deduction, Mountain-River-Ocean tsunami, Chain of damage*）

１　はじめに
～コペルニクス的転回@ディブチ＆東日本大震災～

筆者の物事の観方・価値観が完全にひっくり返ったのは、アフリカ・ディブチ共和国での勤務と帰国後赴任した青森県八戸市に所在する海上自衛隊八戸基地で遭遇した東日本大震災体験をおいて他にない。

ソマリア沖海賊対処行動拠点整備の事前調整業務のためディブチ共和国で目の当たりにしたのは、沙漠の灼熱地獄の厳しい自然環境と、貧困の実情であった。それを象徴する一場面（写真-1）は、炎天下、ロバの背に薄汚れたポリタンクを載せて水運びをする少女の姿である。「安全な水を確保するためにその水源まで片道 1 ㎞以上歩かねばならない人達が 10 億人以上いる。」という俄かには信じ難い国連報告書の意味と現実を漸く理解・認識した瞬間だった。

「防災」・「応災」・「減災」を語る以前の現実世界は「サバイバルという日常」を生き抜く人々の世界だった。何不自由なく恵まれ過ぎた日本に生かされている奇跡を、真の意味で認識も感謝してもいない自分自身の認識の甘さに対する衝撃は、当時から 10 年余を経過した今も脳裏から消え去ることがない。

帰国して一冬明けた 3 月 11 日 1446i。Mw9.0 の一撃（写真-2）は未曾有の犠牲・被害を引き起こした。その際、津波に呑まれ辛うじて命長らえながらも、その夜の降雪・低温により多数が凍死に至った。生き残った側にも、両親と妹が行方不明で一人ぼっちとなり、生涯癒されない重い記憶を背負い続ける震災遺児の存在（写真-3）等に、我々はどこまで心を寄せることができるだろうか？そして、平成 30 年・令和元年は特に風水害による被害と犠牲が目立った。

本論では、同様の被害・犠牲が繰り返され途切れることがないのは何故か？何か見落としている肝心なことはないのか？その問題意識のもと「応災の在り方」を理屈（論）と実践検証で再考したい。

写真-１　灼熱の沙漠で水を運ぶ少女（ディブチ）

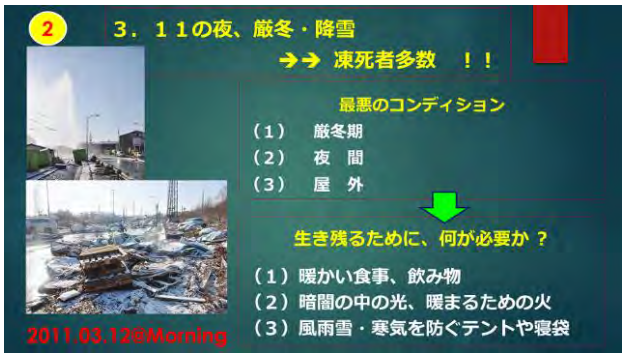


写真-2　東日本大震災翌日の青森県八戸市

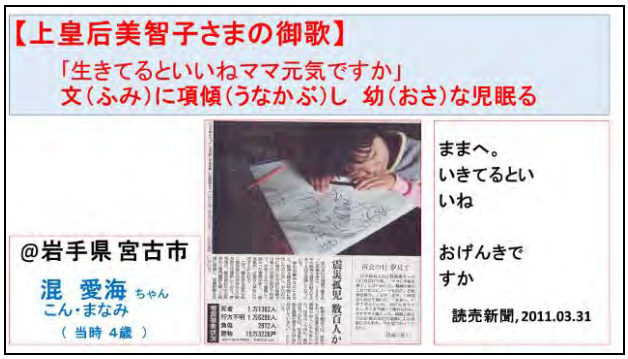


写真-3　震災遺児の存在

2　脅威に対する認識と対処・方策の再考
～　疑問・問題点の摘出（思考過程）～

東日本大震災以前、筆者らは阪神淡路大震災（1995年）、新潟県中越地震（2004年）、スマトラ沖地震（2004年）等の事例研究を通して、「防災・減災」すなわち発災以前の段階で備える「防災」と、発災後の被害極限を目指す「減災」達成のためには、その間を繋ぐ「応災態勢」（ハード・ソフト）を「自助・共助・公助」各レベルでバランスよく構築し、柔軟に運用することが極めて重要なことに気づいた（表-1）。

そこで、災害要因（種類）を類別し、それぞれが単独あるいは複合で発生する災害に対して、どのように応じていくか（応災）で、①発災前後（BEFORE &AFTER）の対応が異なることと、②発災直後の対応・対処能力の差異が判断を左右し、③ダメージそのものの程度に直結、④ダメージからの復旧・復興速度に直結すると考えていた（表-2）。

表-1　自助・共助・公助の時空間影響範囲イメージ

表-2　災害要因・烈度の時空間での脅威認識リスト

しかし、東日本大震災の現場では、あの大津波に巻き込まれて辛うじて命永らえながらも、その夜の降雪・低温が直接の死因となった多数の凍死犠牲者が出たことはあまり知られていない。津波という一原因・一現象を生き延びたとしても、耐寒対策が伴っていなければ生存に繋がらないという見落としと気づきである〔死因分析〕。

また、大混乱の現場への「公助」の急行派遣完了までにはどうしても時間を要し、必要な援助の手が差し伸べられないうちに犠牲者が増えていく無力感・もどかしさの極みにあった。「公助」が有する規模・威力が機能すれば多様な救援・支援が期待できるが、それが届くまで、その態勢が整うまでは「自助・共助」レベルで持ちこたえてもらう以外に手段がないという厳しい現実があった〔自助・共助・公助の長所短所と補完バランス〕。

さらに、平成30年の西日本豪雨、令和元年の台風による風水害では、多数の水死犠牲者が出た。筆者は、令和元年の台風19号による濁流で覆われた道路を水しぶきを跳ね上げながら平然と車列を連ねて移動・避難する報道場面を幾つも目にした。その瞬間東日本大震災の津波の体験者（筆者）にとっては、津波に向かって自動車で避難する避難行動と重なり、それらは自殺行為に等しい行為としか理解できなかった。案ずるまでもなくその後、死者77名の4割が住宅内で、3割は車で移動中だった水没車内で発見されたとの報道に接した（毎日新聞。2019.10.17）。

豪雨に伴う土石流やがけ崩れ、河川氾濫等がもたらす破壊力は、「風水害」という柔らかな語感のカテゴリーでは収まらない。むしろ、「風水害」は「津波並みの破壊力」を有する「山津波・河川津波、海津波」の何れかであるとの脅威認識に置き換えて改めない限り、「正常化の偏見（自分に都合の悪い真実から心の目を背けて、自分に都合良いように危機を過少評価する心理傾向）」を助長してしまい、同様の悲劇が繰り返されるのではないだろうか〔脅威認識と脅威対処判断の誤り〕？

以上の考察から、本論の問題意識の原点を以下の2点に絞った。

① 災害に対する脅威認識・識別根拠（基準）を災害主因（地震、津波、風水害等）に分類し、それらに対処する受身的マニュアル作成のみを以て、究極の「減災：被害の極小」に繋がるのか？死因分析に基づき、トリアージ対応の時間軸と整合する対処マニュアルであるべきではないのか（特に、不意打ちによる立ち上がり・対応対処が前提となる地震災害に対して）？

② 東日本大震災では「公助」の態勢が整うまでに失われた犠牲・被害が際立ったが、緊急救助・支援が不可欠の「自助・共助」との乖離をどのように補完し合えるのか？

そこで、次節においてはこの2点を判断基準に、まず日本全国で過去25ヵ年〔1994年1月～2020年1月〕に発生した地震の発生状況を分析して脅威対象の現状理解を試みる〔3.1節（現状・背景把握）〕。

その上で、東日本大震災等で直面し顕在化した問題点から、異常事態に遭遇した際の具体的対処手段の実地検証事例を提示・紹介することとしたい〔3.2節及び4節（実践検証）〕。

３　東日本大震災体験に基づく対策検証実践例
～　理論と実践検証編（荻原）～

3.1　日本全国における地震発生状況データ分析
【1994 年 1 月～2020 年 1 月の 25 ヵ年分】

筆者は、東日本大地震の余震で地面が揺れ続け、時に津波警報・注意報が発令される中、災害派遣のため部下に命令し送り出す立場（機動施設隊司令）にあった。部下の生命と安全確保のため、せめて、この一連の地震がいつどこでどのように発生しているのか？その見えざる姿を把握しなければ！という切実な想いがあった。その時、唯一自分にできると思いついたことは、地震発生の度にテレビ画面に表示される地震速報データをエクセル表に書き写していくことだけだった。

しかし、あまりの地震発生回数の多さから、データの羅列記録のみでは瞬く間に収拾がつかなくなり行き詰ってしまった。そこで、『エクセル表上に、日本全国を大雑把に「震源域毎」にエリア分けをする。そして、地震発生 1 回につき、対応する震源域で、発生マグニチュード階級毎（体感震度ではなく）の欄（セル）に★1 個をプロットする。』という単純な切り口と記録ルール（規約）に則って記録を開始したものである。詳細は「防衛施設学会平成 21 年度年次研究発表会（2012 年 2 月）」を参照されたい。

図-1 は、筆者らがさらに東日本大震災以前にも遡って、1994～2019 年の 25 ヵ年間に日本全国で発生した地震を震源域毎・発生マグニチュード毎の累計回数の時空間分布としてプロットしたものである。

図中、X 軸は震源域空間分布として〔北海道〕←→〔九州・沖縄〕に分割表示、Y 軸は時間軸として 1994 年（手前）←→2019 年（奥側）に分割表示、そして Z 軸は震源域毎・各 1 年間に発生した地震発生累積回数表示による 3 次元表現とした。

図-1 の 25 ヵ年（四半世紀）スケールの全貌でも、北海道付近、中央構造線沿い付近、九州・沖縄付近は他震源域に比較して地震活動が活発であると言える。また、2011 年以降は東日本大震災の余震が東北地方に継続的・漸減的に群発している様子が顕著である。その中から特に、単年（1 か年）スケールで、図-2「2011（H23）年_東日本大震災」及び図-3「2016（H28）年_熊本地震」に注目する。

図-1 における 2011 年の一列（1 ヵ年累計）分を拡大したものが図-2 であり、3 月 11 日以降の地震発生が如何に激しいものであったか鮮明に可視化されている。

また、図-1 における 2016 年の一列（1 ヵ年累計）分を拡大した図-3 は、被害が甚大であった熊本地震に意識が集中しがちであるが、2016 年 2 月には 100 名超が犠牲となった台湾地震後、沖縄近海で群発地震が発生し、桜島噴火後、熊本地震が発生した。その後、中央構造線沿いを這うように伝播継続し、年末には鳥取沖地震が発生している。この一連の現象を時空間系列で俯瞰するならば、沖縄トラフ沿いに南西から北東方向へと歪解放現象（地震）が伝播・発生しているようにも見える。その一方で南海トラフ沿いの地震活動は静穏に見えることは歪蓄積の段階にあるとも考えられ、いずれその歪解放が南海トラフ地震の引き金になるという見方もできる。

図-1 の 25 ヵ年スケールと、その構成部分となる 1 ヵ年スケール（図-1 における 2011 年及び 2016 年）の関係性は、A. Bejan 提唱の「コンストラクタル理論」に基づく、生物・無生物に共通する樹状（階層）構造、樹木の樹形（葉、枝、全体構造）に見られる「フラクタル構造」にも類似していることは興味深い現象である。

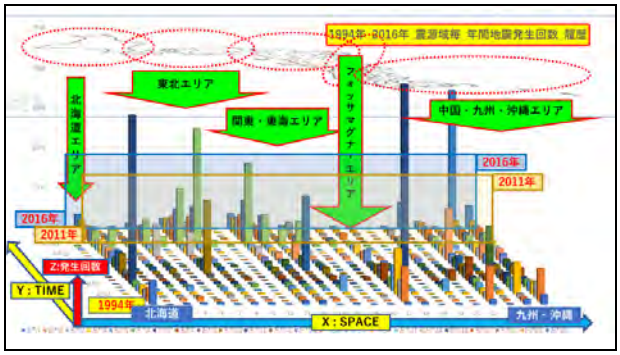


図-1　1994 年から 2016 年の日本全国の震源域毎における地震発生回数の時空間分布

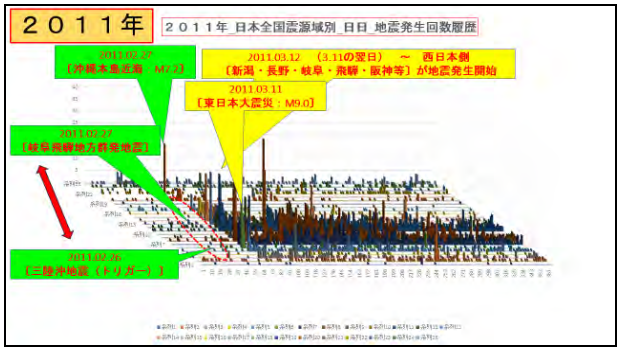


図-2　2011 年の日本全国地震発生時空間分布

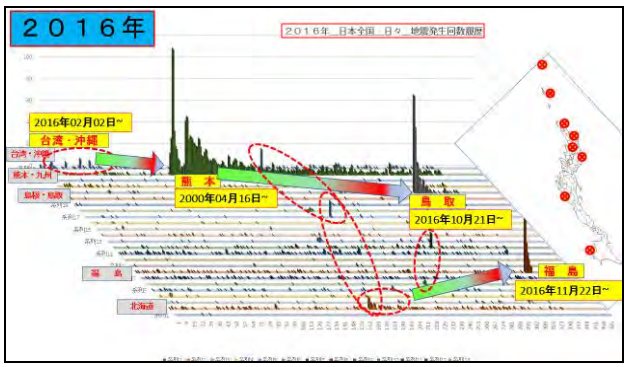


図-3　2016 年の日本全国地震発生時空間分布

さらに、地震発生回数の時空間分布上に、国土地理院が作成した 1997~2017 年の日本全国 GPS 水平移動距離のアニメーション・プロットを重ねて表示したものが図-4 である。特に 2011 年以降、日本全国の GPS データの水平挙動はそれ以前に比べて劇的な水平方向変動を示している。その 20 ヵ年の累積水平変位量から逆算・推算すると、日本付近では主として 3 か所に回転軸を持ち、かつ、連続体として異なる回転方向を有する回転運動が作用しているように見える（図-4）。

これらを統合的に組み合わせると、日本列島は東日本側と西日本側とでは異なる方向から日本本土を押し曲げようとする 2 本の単純梁の組み合わせで構成され、その 2 本の単純梁がフォッサマグナ付近で支点を共有する構造と捉えることができる。日本列島の背骨（脊梁山脈）が逆 S 字形を形成していることにも符号することは興味深い（図-5）。

このように、地震発生回数と GPS 水平移動の変化が対応付けられる一例である。さらに、2016 年の台湾～沖縄～桜島噴火～熊本地震～鳥取沖地震と、沖縄トラフに沿う一連の地震発生状況は、現時点では比較的に静穏ではあるものの、何れ発生が予想される南海トラフ地震の予兆現象であると筆者らは理解している。その対策にあたり、多様な可視化を併用することによって具体的解釈方法の展開が期待できる（図-4、図-5）。

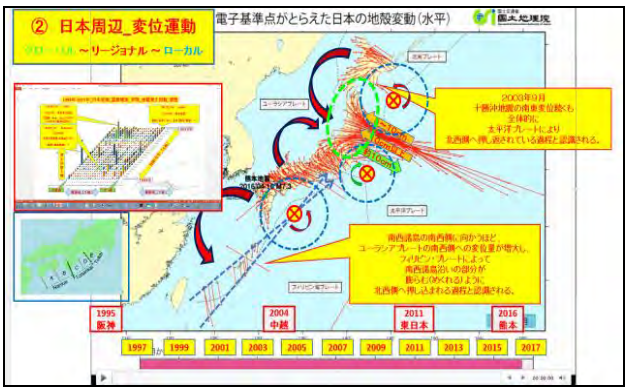


図-4　GPS 水平変位量（1997-2017 年:国土地理院）

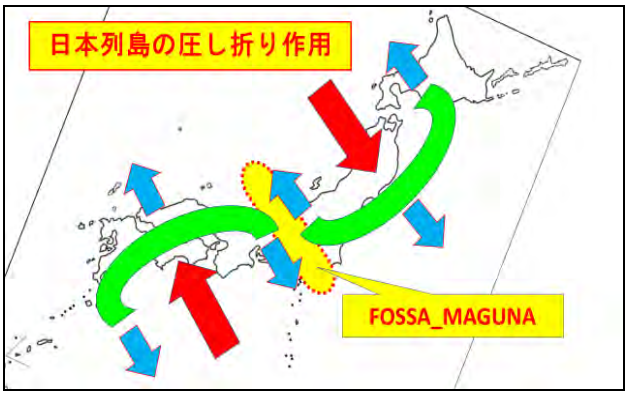


図-5　日本列島に作用している応力背景

3.2　東日本大震災体験に基づく耐寒検証事例

（1）　死因分析：1 時間以内の救助の必要性
～「72 時間の壁」という幻想　VS
「1 時間以内の壁」という厳実・事実～

阪神淡路大震災及び東日本大震災等における死因分析が徐々に進んでいる。地震メカニズム、発生場所、時間帯等により死因は多様である。NHK スペシャルでは阪神淡路大震災における死因分析の「72 時間（3 日間）が人命救助の限界目安」という時間スケールでの解析をさらに進め、発災後 1 時間以内に約 6 割が落命した事実と、具体的現実的な近隣共助の手段確保が延命に直結することに着目した（図-7）。

また、東日本大震災を体験した筆者としては、被災者が「厳冬期・夜間・屋外」という凍える数時間の環境を生き延びることを最低条件とした応災対策を追究する動機となった（図-6、図-7）。

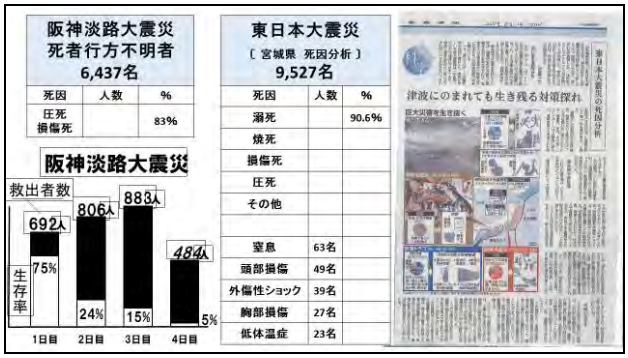


図-6　阪神淡路大震災・東日本大震災の死因分析
（QQ 防災クラブ・産経新聞 2019. 03. 10）

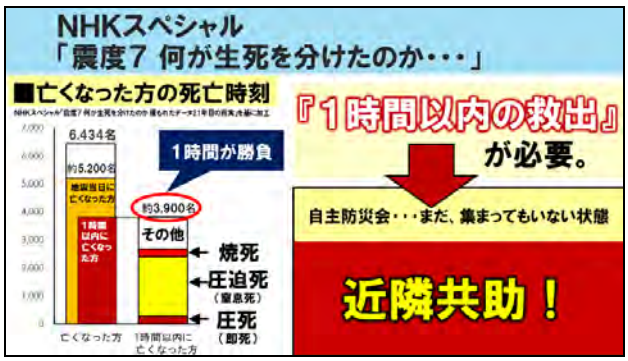


図-7　死因分析と近隣共助の重要性（QQ 防災クラブ）

（2）　検証項目事例
～　「厳冬期・夜間・屋外」を凌ぐために　～

阪神淡路大地震以降の震度 7 以上の地震被害分析に基づいて地震被害事象の特徴を分類し、被災者や避難拠点で生じた不具合・問題点を導出した。それらを個人ベースで対応・処置可能な手段を考察した。

特に、八戸航空基地隊勤務時に体験した「雪中救難訓練」実施時の装備や救難訓練項目を参考にした。現在も継続中の主な検証項目は以下のとおりである（表-3）。

表-3　過去の震度７以上の地震被害分析に基づき導出した問題認識と実地検証中の実施項目

ア　防風雨雪・防寒　～　雨露を凌ぐテント　～

写真-4　官舎窓開放・八戸越冬隊による越冬検証

2004 年の新潟県中越地震の避難場所（体育館）では、プライバシー確保ができないとの理由で車両内避難の結果エコノミー症候群による犠牲が多発した。体育館のような広大なスペースがあるなら家族単位のテントで犠牲回避できたのではないか？との問題意識を抱いていた。八戸勤務は単身赴任という自由気儘な環境（家族への配慮不要）の下、敢て官舎のガス契約をせず、電気・水道の契約のみで窓を解放し室内にテントを展張したまま、そこでの起居により３冬を過ごして検証した（八戸越冬隊長記録参照）。八戸の厳冬期１月は零下10℃を下回る期間もあるが、インナーをフライシートで覆う空気断熱２層構造となるテント内は、自身の体温のみで 15℃前後を維持できる快適空間であることを実証・体得できた。

イ　マイ防災バッグ

雨・風・露・雪を遮る空間が確保できた後は、生命を維持・繋ぐための「食」確保の可否が致命的となる。その手段として「マイ防災バッグ」が如何にあるべきかを追究している。特に配慮している点は“Simple is the Best ！”、特殊な器材・燃料や複雑精密な器具でないことである。「厳冬期・夜間・屋外」の被災時を想定して以下の基本セットを各バッグに収納している。発災直後の気が動転している状態から、ある程度心の余裕ができる段階に応じて、楽器（フルート・ミニサックス）を含む必要最小限であっても、確実に機能する物品を選別収集し試行・試用継続中である。まずはお腹を満たし（腹と身体の足し）、やがて心を満たす（心の足し）ニーズの時間・心理状況変化も考慮・反映している。

① 火打ち石（マッチ不要で 30000 回点火可能）
② THERMOS 保温水筒＋浄水キット（SAWYER）
③ マグカップ類（チタン製２層：保温タイプ）
④ 食器（折り畳みスプーン・フォーク・箸）
⑤ 火力源（ガスコンロ）
⑥ 発電・充電機能付き BBQ コンロ（木材燃料）
⑦ 携行食品（チョコレート、ナッツ等）
⑧ ペットボトルの米（晴天の霹靂２合分）
⑨ 太陽光充電による LED 照明器具　等

写真-5　マイ防災バッグ（中）の携行内容物

ウ　通信手段の確保（アマチュア無線）

写真-6　通信手段の確保（アマチュア無線局開局）

東日本大震災では発災後間もなく電話回線などの通信手段が遮断・途絶された反省から、筆者が取得済みのアマチュア無線免許（3 級）でアマチュア無線局を再開局した（C/S:JJ1-JSR）。送信出力 50W で運用が可能であり、基地局（50W）と子局（10W）の親子構成としている（写真-6）。今後、地元の防災訓練等において、電源や伝播覆域等の検証を進めたい。

上記の他、収集・集積した各種装具類等を以て、2018 年 2 月 21 日～22 日にかけ、岩手県久慈市久慈城址の山中（二之郭付近）において初体験者２名と共に雪中検証を行った。冬山縦走１週間前提の装具があれば、「厳寒期・夜間・屋外」においても概ね必要・十分条件を満足し、サバイバル可能との実感を得る貴重な検証実績・知見蓄積となった（写真-7）。

一連の体当たり的な行動は、第１次南極越冬隊長（西堀榮三郎氏本人）の「まずはやってみなはれ！」・「石橋をたたけば渡れない！」・「五分の虫にも一寸の魂！」・「出る杭を伸ばす！」の肉声講演メッセージを高校時に聴いて以来、それを人生訓とした延長上にある。「やってみなければ分からないし納得もできなかった！」と改めて原点を反芻し納得している。

写真-7 岩手県久慈市久慈城址での冬季耐寒検証

以上の実地検証を経て、避難期間の長期化と活動範囲（1 日～数日～1 週間程度）に応じた小（１個）・中（２個）・大（２個）の 3 種類のザックに装備品を分類収納し、状況に応じ何時でも持ち出せるように自宅２階（浸水対策上）の自室押入れに格納している。また、中サイズの１個は勤務先の事務所に常備している。単に「揃えて置いている」だけに留まらず、日常の食事や業務においてもそれらを積極使用して使い慣れ、使いこなす維持力向上に努めている。

４　日本各地の具体的な対策取り組み事例
～　地域特有の災害現象を考慮した取り組み　～

令和元年内に筆者自らが訪問取材・体験し、特に印象に遺る 4 件の災害対処訓練・取り組み事例を紹介したい。何れも他人任せ（ひとごと）ではなく、自らの生命・生業（なりわい）を営み続ける熱い想いが基底に在る。その心の姿勢と具体的な取り組みに衝撃と感銘を受けた事例である。また、各地特有の自然・気象条件等の相違から、発生確率の高い災害現象にも相違・多様性があることを再認識するに到った。既定概念に捉われず、自ら考え、創意工夫・試行錯誤しながら、たゆまぬ研鑽を継続する重要性を痛感させられた「自助・共助」レベルの代表的好事例と言える。

4-1　北海道・知床_斜里町_ウトロ地区津波避難訓練
～ 厳冬期・流氷の「氷塊混じりの津波」の想定 ～

知床半島先端の国立公園地域に隣接する斜里（しゃり）町ウトロ地区は人口約 1500 名の地区に、年間 150 万人超の観光客が来訪する観光地である。日々 4000 人以上の外来者が滞在している環境で、網走沖の活断層による海底地震発生後は 10 数分で津波が襲うという想定下、2019 年 2 月、流氷が接岸する厳寒期にウトロ地区・内閣府合同で津波避難訓練が実施・検証され筆者も参加した。部外者を含む観光道路沿いの除雪ボランティア作業に引き続く避難訓練である。東日本大震災の津波に流氷塊が混じっていたら？と戦慄を覚えた想定だった。訓練実施担当者は、訓練とはいえ実際の津波避難警報サイレンを吹鳴することが、不特定多数の観光客のパニックを誘発するのでは？という深刻な危惧を懐いていた。しかし何と！それは杞憂に終わった。北国の建物は殆んどが２重窓構造となっているので断熱・遮音性が高く、津波警報（音波）は室内には届かず聞こえないという新鮮、かつ、当たり前な？それでいて意外な発見があった。この一事例が示すように、その土地特有の災害形態を配慮した自助・共助態勢構築と検証の重要性を再認識させられた。また、高齢者等だけでなく多数の観光客は現地地理に疎い隠れた避難弱者としての考慮・対処の必要性を痛感した。

写真-8　流氷着岸の北海道知床半島ウトロ地区

写真-9　国道 334 号線沿い除雪ボランティア作業後、高台の避難場所への津波避難訓練に移行

4-2　八戸市・高館（たかだて）連合町内会避難訓練 ～自助・共助の確認検証（シャッター防災倉庫）～

海上自衛隊八戸航空基地に隣接する高館（たかだて）連合町内会は高台（海抜約 40m 超）に位置し東日本大震災時に八戸市民の津波避難の目的地になったことから、毎年 11 月に多様な避難訓練を継続実施している。特に 2019 年 11 月は青年部企画により、「自助の限界」と「共助による発展可能性」を検証する避難訓練を企画実施した。その際、各家庭で準備している防災グッズ等を持参し、各町内会代表に何を持参したかを展示・説明してもらった。各自が持ち出すものが「自助」であると同時に数量の限界は「自助の限界」である。しかし、各自持ち出したものを差し出し集めると「自助の限界を超えること」ができるようになる。それこそが「共助の可能性と拡張」である。「自助・共助」の意味を全員参加で認識共有進化する効果的な訓練手法事例である。

写真-10　八戸市・守田邸のシャッター防災倉庫と高館地区避難訓練チラシ（2019 年 11 月）

4-3　千村台自主防災会（ＱＱ防災クラブ） ～　自助・共助のハード・ソフト統合力　～

神奈川県秦野市の千村台自主防災会は、阪神淡路大震災における死因分析（図-6、7）の考察から、公助来援までの 1 時間以内の救命・救急を最優先とし、自助･共助態勢を「一時（いっとき）避難場所」として構築・推進している。設置箇所は各戸が日常使用しているゴミステーションそのものであると同時に（写真-11)、「いっとき避難場所」は近傍の「作業指揮所」の機能を果たすことになる（写真-12)。大規模な地域避難拠点に頼るのではなく、人間の通常行動領域（約半径 50m）圏内でアクセス可能であり、アメーバが各個単位・自己完結的に活発に動き回るように「自助・共助」の各箇所の救命拠点が有効に機能している（図-8)。また救命ボックスを各自宅から近い「一時（いっとき）避難場所」に設置したことにより、周囲住民の認識は「今まで防災倉庫に入っている資機材は、自主防災会の本部役員が使う物という感じだったのが、自分たちの道具と思うようになった。」と大きく変化しているとのことである。他人事ではなく我が事としての強い近隣一帯連帯意識が醸成されている証左である。公助が及ぶまでの隙間時空間を補完しうる理想的な自助共助事例であろう（第 23 回防災まちづくり大賞)。

写真-11「ゴミステーション」➔「いっとき避難場所」

写真-12「いっとき避難場所」➔「作業指揮所」

図-8「いっとき避難場所」選定・設定の工夫

4-4　災害で絶える事の無い生業（なりわい）の環境創り（未来永劫持続可能性を求めて）

BCP(Business Continuity Plan)は企業の事業継続としてホットなキーワードの一つだが、その構成単位である個人生命の LCP(Live Continuity Plan)こそが根底にあるべきと考えている。筆者らは津波の

破壊力は核兵器並みと認識しているが、東日本大震災から間もなく 10 年目を迎えようとする今日でも復興道半ばの事案が多々ある中、気仙沼の牡蠣じいさん・畠山重篤氏は東日本大震災の大津波で壊滅的な被害を受けながら、その翌年にはそれまでの日常と生業（なりわい）を取り戻す驚異的な立ち直りを示した（写真-13）。その実現は平成元年から漁師達が上流の森の植林を始めた長い努力の結晶・賜物だ。森が育むミネラル等の栄養は、河川を辿り流れ込む気仙沼の海のプランクトンを豊かに育む大循環を構築していた。それは大津波にも奪われることなく、豊富な牡蠣の稚貝と共に生き残っていたからである。

写真-13　森は海の恋人：気仙沼の牡蠣じいさん
畠山重篤氏（2019.06.12）

畠山氏の講演で聴いたメッセージは、災害発生前後の比較的近視眼的短期間の視点ではなく、一生涯のライフワークの時空間スケールにおいて、災害を受け止めて乗り越えていく知恵の神髄が具現化された事例だと考える。自然の中で生き生かされている、生きとし生けるものには限られたそれぞれの時間がある（はじめとおわり）。誰にも等しく「たった一度きりの限りある命」を自然の環・循環の中に関わって一体となる生き方が、やがて「はじめもおわりもない、永遠」という環・循環へと昇華して続いていくのだろう。

５　おわりに：荻原の余生の魂のミッション
～持続可能（SDGｓ）な応災力醸成に向かって～

災害は忘れたくてもやって来るが、それに晒され途切れることのない悲劇を繰り返さないことを原点に、蟷螂の斧をやみくもに振り回す気持ちで悪戦苦闘を続けている。これまでの体験・学びから、

～　各災害は、起きるべくして起きている！

～　風水害とは山津波・河川津波・海津波の何れかと心得よ！ ～

～　災害の前後だけを考えるのではなく、生業（なりわい）を持続可能とするために必要な環境創りと、「働き方」ではなく「生（活）き方」改革こそ、再考すべき問題といった一連の疑問を懐き始めている。

写真-14　ユスフ・荻原_魂のミッション（SDK 暖簾）

筆者の最終目標である移動喫茶【SALON_DE_KATA（サロン・ド・カータ）〔←サロン・土方のオヤジギャグ〕】の運用は、既に宮城県栗原市で活動中の僧侶・金田諦應氏の「Cafe de MONK」の移動傾聴喫茶活動を参考にしている。Monk とは（Monk：僧侶の意）と同時に、発音（もんく）を「悶苦・文句」に掛けて被災者住宅等を巡りながら傾聴・癒しを行う地道な活動である。持続可能かつ自己完結的な身の丈に応じた日常の中で自ずと成立しているような、移動喫茶運用を目指している（筆者調理師免許取得済み）（写真-14）。具体的には以下の主テーマを設定している。

① 東北地方等の復興住宅巡りをしながら元気を取り戻す一助となり、
② 米村でんじろう先生流儀の鮮やかな可視化による防災サイエンス的な出前講座等により、防災・応災・減災の意識醸成の場とする。
③ 平時は、元気・癒し・励ましの場として、
④ 災害時はそのまま、被災者への炊き出し屋台（食事提供機能）として運用する。
⑤ あるいは、当面・当座の日常社会問題となっている子ども食堂（日々）の一助としての活用もできよう。一方的に食事を与えるというのではなく、共に調理してそれを囲んで仲間といただくという一連の所作を通じて、料理する楽しさ、喜んでもらえる喜びを共有して共育〔自らも子ども達と共（友）に育つ〕する。

そのような活動の場を通じて、大言壮語する事無く、デクノボー精神（雨ニモマケズ・・）で世の為人の為の一助である生き方（働き方ではなく）を試みたいと考えている。「防災」とは、単に災害・災いへの対処が目的ではなく、それを乗り越え永く生き抜く智慧（サバイバル）としての「応災力」であるべきとの視点から、再考・検証を継続する所存である。

参考文献

1) QQ 防災クラブ　teamQQ244@gmail.com
2) 電子基準点がとらえた日本列島の地殻変動（国交省国土地理院）
3) 畠山 重篤，鵜飼 哲夫：牡蠣の森と生きる-「森は海の恋人」の 30 年 中央公論新社 pp1-176, 2019

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

揮発性物質含有土壌の掘削時におけるガス抑制技術の開発

DEVELOPMENT OF VOLATILE SOIL GAS SUPPRESSORS DURING EXCAVATION OF CONTAMINATED SOIL

日野良太*，大西健司*，大島義徳**，三浦俊彦**，西川直仁*
HINO Ryota, ONISHI Kenji, OSHIMA Yoshinori, MIURA Toshihiko and NISHIKAWA Naohito

※株式会社大林組エンジニアリング本部（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟）
※※株式会社大林組技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640）

キーワード：揮発性物質，ガス抑制，油，水銀
（*Volatile component soil, Gas restraint, Oil and Mercury*）

1. はじめに

2003 年に土壌汚染対策法（以下，法）が施行されてから日本各地において汚染土壌・地下水の検出事例が増加している．一般社団法人土壌環境センターの調査では，2017 年時点で法に則った土壌調査及び対策工事の件数が年間 8,000 件程度に及んでいる[1]．一方，法の対象物質外である油に関しては，油槽所や火力ガス発電所跡地などで確認されることがある．油汚染土壌は，法に則った調査や対策を行う必要はなく，不動産価値を低減させないために油汚染対策ガイドライン[2]に則った対応が望まれる．ここで，国内において法の対象物質が基準不適合土壌（以下，汚染土壌）や油が検出される一般的な事例として，工場跡地やトンネル工事などで発生する砒素やふっ素などの自然由来重金属などが挙げられる．その他にも返還された米軍基地跡地において各種有害物質や油分，DDT 等の難分解性農薬等が検出される事例が報告されている[3)4)]．

汚染土壌・地下水の対策方法は，掘削及び処理業者への場外搬出以外にも対象物質毎に処理方法がいくつかある[5)6)]．例えば，掘削した土壌を現地で処理するオンサイト処理として，水や溶媒で対象とする土壌を洗浄することで土壌から有害物質を剥離させる洗浄処理，熱によって有害物質を揮発させる加熱処理，土壌中に生育する微生物の活動によって有害物質を分解する現地バイオ処理などがある．また，掘削せずに地盤内で処理する原位置処理として，地下水の流れを強制的に発生させることで地盤から有害物質を剥離及び回収する通水処理，地盤内に酸化剤などを注入することで有害物質を分解する化学処理，地盤内に微生物の栄養剤を注入し，生息する微生物の活動を活発化させる原位置バイオ処理などが挙げられる．その他にも掘削土壌及び原位置で地盤中の有害物質を溶出しない形態へ変化させる不溶化処理，地下水流向下流側に対象とする有害物質を吸着・分解できる材料を充填した地下水を透過できる壁を造成することで敷地外への有害物質の拡大を防止できる透過性地下水浄化壁のような拡大防止策などがある．

ここで，汚染土壌・地下水の対策を行うにあたって，原位置処理や拡大防止処理など以外は，汚染土壌の掘削を行う必要がある．揮発性物質を含有している汚染土壌を掘削及び運搬する際には，有害物質が大気中に拡散する可能性が懸念される．そのため，周辺環境及び作業従事者への影響を低減する必要がある．

汚染土壌に含有されている揮発性物質として，油や揮発性有機化合物（以下，VOC），水銀およびその化合物（以下，水銀）などが挙げられる．これらの物質は，大気中に揮発する特性を有するため，掘削時などに物質が大気中に拡散することや作業員への暴露を抑制する対策が必要となる．ガスの揮発を抑制する方法として，密閉性テントの設置や作業従事者の防毒マスク装着などが挙げられる．さらに，汚染土壌の運搬に関するガイドライン[7]や油汚染対策ガイドライン[2]では，汚染土壌を敷地内から場外搬出する際に内袋付フレコンなどの密閉性容器に詰込むなどの対応が記載されている．そのため，周辺環境への影響に加えて，テント設置によるコスト増大やフレコン詰め込みなどの施工手間が課題となる．

そこで，筆者らは，揮発性物質を含有した土壌を掘削及び運搬する際にガスを抑制する技術について検討した．今回対象とした物質は，油と VOC，水銀としており，それぞれの物質特性を把握した上で資材を散布することによるガスの抑制技術を開発した

本論文では，開発資材の効果を確認するために各物質を含有した汚染土壌を用いて室内試験の結果と汚染サイトで開発資材を散布した場合のガス抑制効果を確認した結果を記載する．さらに，得られたデータを用いて揮発性物質を含有した土壌を場外搬出する際に荷姿を変更した場合の大気拡散を数値解析によって検討したケーススタディについても記載する．

2. 揮発性物質の特性

2.1 油

油は，炭素数によって名称及び沸点が異なる．例えば，炭素数がC6～C18はガソリンや灯油などであり，それよりも炭素数が大きい場合は軽油，重油や潤滑油，アスファルトとなる [2]．一般に炭素数が少ない場合に沸点が低くなることで油臭の揮発性が高くなる．

2.2 VOC

VOC は，多種多様の揮発性有機化合物の総称である．今回は，法の第一種特定有害物質として基準項目に挙げられているテトラクロロエチレン（以下，PCE），トリクロロエチレン（以下，TCE），ベンゼン（以下，Bz）に加えて，厚生労働省の作業管理基準に設定されているオルト-ジクロロベンゼン（以下，o-DCB），クロロベンゼン（以下，CB）を対象として検討を行う．

今回対象とするVOCの化学性状を**表-1**に整理する [8]．各物質とも沸点などの性状に違いはあるが，いずれも常温程度で揮発する物質である．また，溶解性は，水に対して表中の温度での溶解量である．VOC の揮発性に関しては，水と同じ過程で蒸発することを想定すると，水の蒸気圧が 25℃で 31.7hPa であり，それよりも高い値であれば同温度で水よりも揮発しやすい性状である．

2.3 水銀

水銀は，法の第二種特定有害物質として基準項目に挙げられており，油や VOC と異なり金属系の物質である．水銀の中でも金属水銀は，過去に蛍光灯などに使用されており，20℃の蒸気圧が 0.0016hPa と他の重金属類に比べても高い．

水銀は化合物が多く存在しており，無機水銀の酸化水銀は防腐剤に使用されており人体に毒性がある．一方，硫化水銀は塗料に使用されており，人体に毒性がほとんどない化合物もある．その他に有機水銀のメチル水銀は水俣病の原因物質であり，酢酸フェニル水銀は農薬などに使用されており，神経毒が非常に高い化合物である．

3. ガス抑制メカニズム及び方法

3.1 油，VOC

油と VOC は，液体の性状であるため，水と同様の過程で蒸発することが想定される．そのため，土壌中の間隙水に溶存もしくは土壌に吸着した揮発性物質が，乾燥や掘削に伴う曝気などに伴い水の蒸発とともにガスとして揮発する．

表-1 VOC の化学特性

	PCE	TCE	Bz	CB	o-DCB
沸点	121℃	86.9℃	80.1℃	131~132℃	180.5℃
融点	-22℃	-84.8℃	5.5℃	-45℃	-17.3℃
溶解性	206mg/L (水 25°C)	1,280mg/L (水 25°C)	1,880mg/L (水 23.5°C)	500mg/L (水 25°C)	156mg/L (水 25°C)
蒸気圧	24.6hPa (25°C)	78hPa (20°C)	101hPa (20°C)	16hPa (25°C)	1.6hPa (20°C)
作業管理基準	50mg/m^3	10mg/m^3	1mg/m^3	10mg/m^3	25mg/m^3

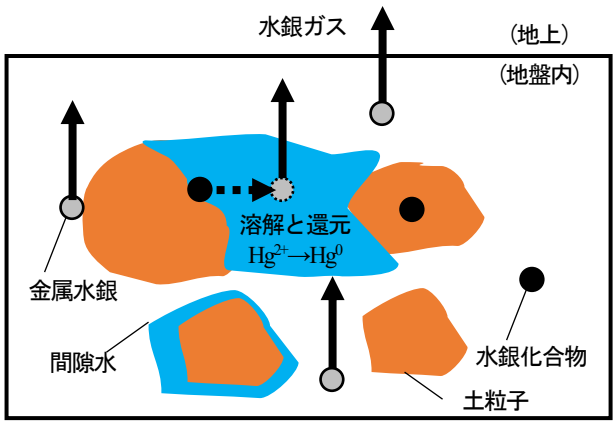


図-1 地盤中水銀の揮発メカニズム

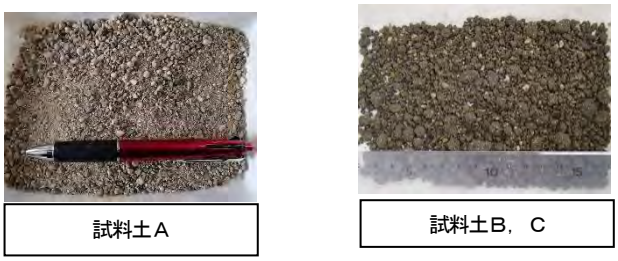


写真-1 試料土の状況

そこで，ガス抑制は，以下の方法が考えられる．①臭気が強い資材で対象物質の臭気を紛らわせる方法．②対象物質の揮発を抑制する資材を散布する方法．

①の資材は，油や VOC の揮発を抑制できる場合でも，資材自体の臭気が問題となることが想定された．そこで筆者らは，②として，油や多くの VOC と親和性がある非イオン系界面活性剤を主成分とするガス揮発抑制資材を開発した．この資材が対象物質と結合することで臭気の成分が揮発しにくくなる．

3.2 水銀

水銀は，油や VOC と異なり化学的に安定させることとした．水銀の揮発メカニズムを**図-1** に示す．水銀は，金属水銀が最も揮発しやすい形態である [9]．一方，酸化水銀などの水銀化合物も土壌中の間隙水に溶解及び還元することで金属水銀となり，揮発しやすくなる．そのため，水銀の溶解性を低減させる必要があると考えた．

そこで，筆者らは，水銀の化合物の中でも特に安定であり人体に無害で揮発性が小さい硫化水銀に形態変化させる方法を検討した．なお，溶解度は，金属水銀が

表-2 模擬汚染土壌の性状

項目		試料土		
		A	B	C
土の粒度分布	2~9.5mm(%)	20	13	13
	0.075~2mm(%)	76	48	48
	<0.075mm(%)	3	39	39
含水比(%)		5	13	13
土粒子の密度(g/cm^3)		3	3	3
油・Bz試験用				
TPH(mg/kg)		6,000	3,000	6,000
Bz(mg/kg)		5,000	5,000	5,000
VOC試験用				
TCE(mg/kg)		750	500	－
PCE(mg/kg)		750	500	－
CB(mg/kg)		300	200	－
o-DCB(mg/kg)		300	200	－

写真-2 試験装置

写真-3 資材の希釈状況

表-3 資材一覧

資材名	市販品A	市販品B	市販品C	開発資材
主成分	界面活性剤など	植物抽出物 界面活性剤など	植物抽出物など	界面活性剤(非イオン性)など
原液性状	無色液体	褐色液体	褐色液体	淡黄色液体
使用方法	いずれも原液を希釈し，希釈液を散布			
試験対象物質	油，Bz	油，Bz VOC	油，Bz	油，Bz VOC

25℃の水で 0.06mg/L，硫化水銀が不溶性である．そのため，土壌からのガス抑制方法として使用されることが多い水散布のみでは，土壌の湿潤に伴う短期的な抑制効果は期待できるが長期的な抑制は難しい．

硫化水銀を生成するためには，硫黄を水銀と反応させる必要がある．そこで，硫黄系の資材を開発した．これによって，水銀は化学反応によって硫化水銀（HgS）となり，溶解性及び揮発性が低下することでガス抑制が可能となる．

4. 室内試験

4.1 試験方法（油，VOC）

揮発抑制効果の比較試験用の供試土として，**写真-1** の模擬汚染土 2 種類を用いた．模擬汚染土は，対象物質によって作製方法を変更した．作製した模擬汚染土の性状を**表-2** に示す．

ベンゼンと油の模擬汚染土は，市販のガソリン及び軽油を重量比 1:1 で混合することで混合油を作製し，ベンゼンの含有量が 5,000mg/kg となるように試薬を混合油へ添加した．その後，所定の TPH（全石油系炭化水素）となるように模擬汚染土へ混合油を添加した．なお，ベンゼンを添加した混合油の TPH は 62,500mg/kg であった．

ここで，TPH とは，対象とする油の炭素数及び分布を把握するための指標である．C6-～C12 の炭素分布範囲を主体とする油はガソリン，C12～C28 の炭素分布範囲を主体とする油は軽油，C28～C44 の炭素分布範囲を主体とする油は残油（重油や機械油など）である．測定方法は，土壌試料を無水硫酸ナトリウムで脱水後，二硫化炭素等で振とう抽出を行い，GC-FID（水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ）で分析を行う．

VOC の模擬汚染土は，土壌から揮発する対象物質のガス濃度が作業環境評価基準値の数倍～数 10 倍となるように所定量を散布した．

表-3 に試験で用いた資材一覧を示す．開発した資材は，淡黄色液体の非イオン系の界面活性剤を有効成分とする．資材の環境影響および毒性評価試験 [10]では，7 日間で約 77%が分解し，28 日間でほぼ完全に生分解（>95%：DOC 法）した．急性経口毒性試験では，雌ラットへの経口投与で 2,000 mg/kg を投与しても影響がなかった．揮発抑制用の資材は，**表-3** に示す市販品と開発資材とし，比較用として無散布のケースを加えた．

試験は，供試土の表面に各種資材を散布し，周辺空気中の対象物質のガス濃度を測定して抑制効果を評価した．試験用装置を**写真-2** に示す．試験では，供試土 100 g を表面積が一定となるようにガラス製シャーレ（φ90 mm×H15 mm）に詰め，散布量を重量管理しながら霧吹きで各種資材を散布した．その後，シャーレを密閉容器（24 cm×18 cm×H15 cm）に入れ，一定流量（2 L/min）で清浄空気を容器に通して上端のガス採取口よりガスバックに捕集した [10]．資材は，**写真-3** の通り原液を一定の割合で希釈して使用した．資材の希釈率（10 倍）と散布量（0.5～1.0 L/m^2）は，製造会社の資材コストが同一となるように設定した．

4.2 試験結果（油，VOC）

各資材と供試土を用いた測定結果に対して無散布を 1 とした場合の各資材との比率を**図-3** から**図-8** に示す．なお，油に関しては，全 VOC 濃度を用いて評価した．全 VOC は携帯型 VOC モニター（RAE3000 RAE Systems 社製）を用いて測定した．

ベンゼンと全 VOC に関して，試料土 A は，開発資材を使用することで市販品と比べて 40%以下に抑制できた．試料土 B，C も油含有量によって抑制効果に若干の違い

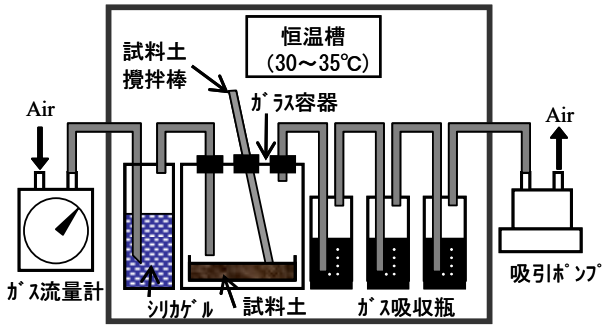


図-2 試験装置概要図

写真-4 試料土

写真-5 試験装置

が確認されるが，開発資材が市販品よりも優位であると言える．また，同時に測定したトルエンとキシレンに関しても同様に開発資材の効果が市販品よりも優れていることを確認した．

TCE 及び PCE に関して，試料土 A は，開発資材を使用することで市販品と比べて 50%以下に抑制できた．試料土 B は，市販品と同等程度の効果であった．一方，CB と o-DCB に関して，試料土 A と B は，開発資材を使用することで市販品と比べて 10～60%程度に抑制できた．

4.3 試験方法（水銀）

実現場から採取した水銀含有土壌（**写真-4**）を 5mm 篩によって，混合して均一化した．調整した試料土約 150 g をシャーレ（直径11.2cm，断面積0.01m^2）に入れ，**図-2** と**写真-4** の試験装置 [11]にセットした．資材散布のケースは，試料の上から所定量散布した．

試験期間中は，0.5mL/分の空気を 1 時間通気させ，発生した水銀ガスを過マンガン酸吸収液に補足した．吸収液の水銀濃度を測定し，水銀ガス発生速度を算出した．また，資材が乾燥した後の揮発性を確認するため，一部の試料土に対して 2 日間風乾させた後，再度水銀ガス発生試験を行った．

今回の試験では，開発した資材と水，無散布の 3 種類を検討した．開発した資材は，硫黄系の粉体資材を溶解した溶液（資材 A），硫黄系の粉体資材に消石灰を添加して溶解した溶液（資材 B）である．資材 B は，地盤内への浸透性を高めるために消石灰を添加した．

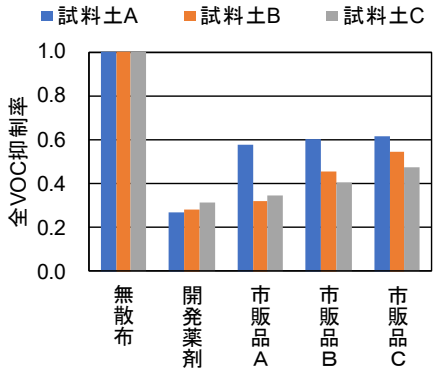


図-3 室内試験結果（全 VOC）

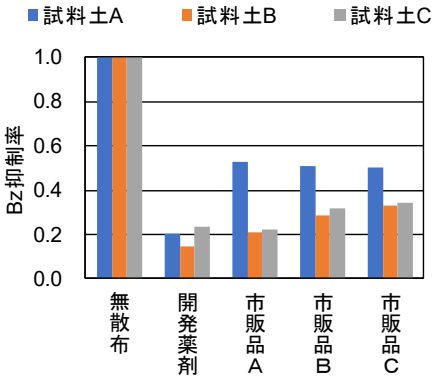


図-4 室内試験結果（Bz）

4.4 試験結果（水銀）

各資材と水銀ガスの揮発抑制結果を**表-4** に示す．開発した資材 A と資材 B は，今回使用した土壌に対しては，無散布及び水に対して 100%の抑制率を確認した．また，2 日間乾燥した後でも揮発抑制効果を維持できることを確認した．

5. 現場適用結果

5.1 A 重油汚染サイト

(1) サイト概要

本サイトでは，解体工事中に油含有土壌が確認された．油含有土壌を油汚染対策ガイドライン [2]に示された方法で TPH 試験を行った結果，A 重油系の油種であることを確認した．TPH は，最大 10,000mg/kg 程度であった．油含有土壌は，掘削後に処理施設へ場外搬出を行った．

(2) 試験内容

掘削時の油臭低減を目的として，現地で開発資材の散布前後の全 VOC と油臭を測定した．全 VOC は携帯型 VOC モニターを用いて測定し，油臭は，油汚染対策ガイドライン [2]に則った．

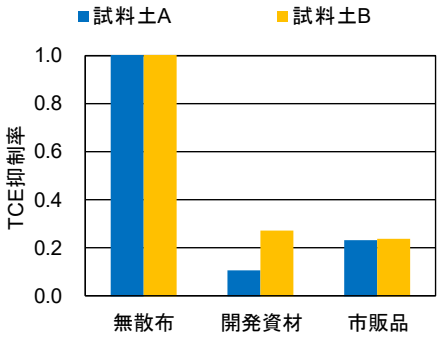


図-5 室内試験結果(TCE)

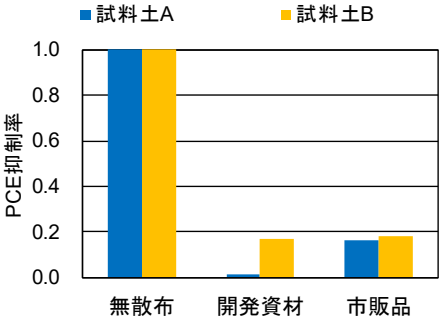


図-6 室内試験結果(PCE)

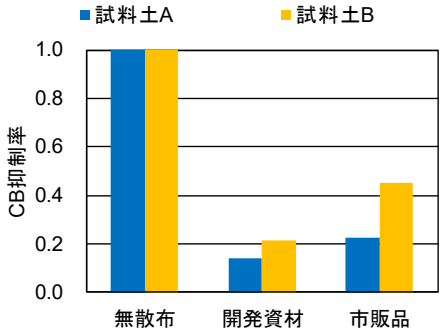


図-7 室内試験結果(CB)

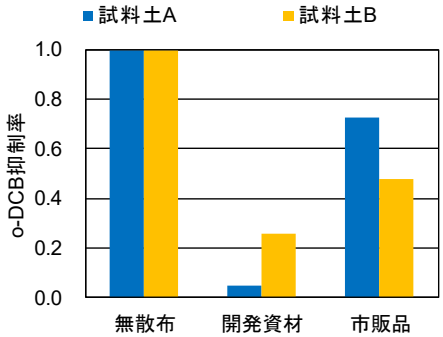


図-8 室内試験結果(o-DCB)

(3) 試験方法

試験で用いた油含有土壌は，TPH10,000mg/kg を検出した付近から掘削して試験範囲（5m×5m）に仮置きした．開発資材は，15 倍希釈した溶液を 1L/m^{2}で散布した．

測定場所は，試料土の直上と地表面から 1.5m の高さ，試料土表面から揮発するガスを直接測定するために，**写真-6** の密閉装置（幅 22cm×奥行 15cm×高さ 30cm）を使用した．密閉装置で滞留したガスは，吸引量 2L/min のポンプを用いてテトラパックに捕集した．また，資材の長期的な効果を確認するために散布 1 時間後も測定を行った．なお，測定時の天候は 32℃の晴天，風速は地表から 1.5m の高さで 0～3m/s であった．

表-4 室内試験結果(水銀)

散布薬剤		吸収量 (μg)	水銀ガス発生速度 (μg/m^2・分)	含水比 (%)	無散布に対しての抑制率 (%)
種類	量 (L/m^2)				
無散布	―	0.72	1.2	23.4	―
水	2	0.53	0.88	40.1	26%
資材A	2	<0.03	<0.05	40	100%
資材A	1	0.03	0.05	31.7	96%
資材A(乾燥)	2	<0.03	<0.05	4.2	100%
資材B	2	<0.03	<0.05	40	100%
資材B	1	0.05	0.08	31.6	93%
資材B(乾燥)	2	<0.03	<0.05	3.9	100%

写真-6 密閉装置測定状況

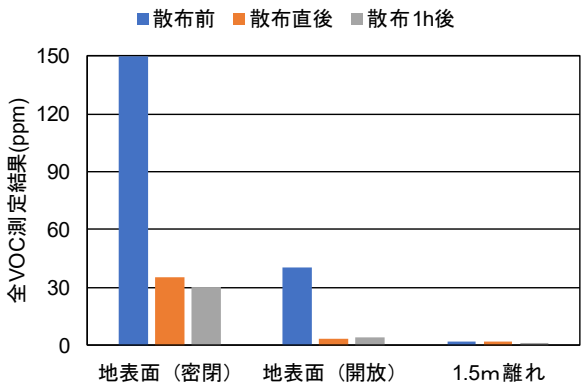


図-9 現地測定結果（全 VOC 濃度）

(4) 試験結果

試験結果を**図-9** に示す．密閉装置を使用した場合，散布前において 150ppm 程度で検出した全 VOC 濃度が，散布後に 30ppm 程度まで低減していることを確認できた．さらに，1 時間経過した後でも揮発抑制効果を維持できていることを確認した．一方，試料土直上と 1.5m 高さでも同様の効果を得られていることを確認した．

また，油臭については，資材散布前に密閉装置で 4～5 と判断されたが，資材散布後に 0～1 と判断された．

表-5 試験試料土（試験 b）

項目		単位	A	B	C
土質の種類		—	砂質土	砂質土	シルト
含水比		%	36.8	21	30.6
粒度分布	2～75mm	%	1.5	41.4	0
	0.075～2mm	%	54.8	33.8	47.5
	<0.075mm	%	43.7	24.8	52.5
土壌溶出量 (環告18号)		mg/L	0.0022	0.16	<0.0005
土壌含有量 (環告19号)		mg/kg	0.03	15	0.47

(5) 考察

開発資材による油含有土壌からの揮発抑制効果を確認することができた．また，試験範囲から敷地境界までの25m 程度までの一定間隔で地表から 1.5m 高さで全 VOC 濃度の測定を行ったが，本試験以外で発生及び拡散しているガス濃度も検出したため，十分なデータを得ることができなかった．ただし，油臭は，散布前と散布後で大きく低減していることが確認できた．

今後は，開発資材を用いた揮発抑制効果を確認するために油含有土壌に加えて，Bz などの VOC やその他の臭気発生土壌の適用効果を確認するために現場試験などを行う．

5.2 水銀汚染サイト

(1) サイト概要

本サイトでは，化学工場跡地において水銀の汚染土壌が確認された．水銀の汚染状態は，土壌溶出量が最大7.9mg/L（基準値：0.0005mg/L），土壌含有量が最大2,900mg/kg（基準値 15mg/kg）であった．本サイトで発生した汚染土壌の大部分は，掘削後にフレキシブルコンテナに詰め込み，処理施設へ場外搬出を行った．

(2) 試験内容

水銀の汚染土壌を掘削する際に，水銀ガスの揮発が懸念されたため，開発資材を散布する前に現場で試験を実施し，資材による水銀ガスの揮発抑制効果を確認した．

掘削時の水銀ガスの揮発抑制に関する検討以外に，運搬時にダンプトラックから揮発する水銀ガスの揮発抑制方法についても検討した．法では，水銀による汚染土壌を運搬する際の適切な運搬容器の例として，内袋有のフレキシブルコンテナが示されている[7]．

そこで，実際の水銀汚染土壌を対象に，運搬時の荷姿変更や揮発抑制剤の散布をパラメータとした水銀ガス濃度の測定を行った．また，測定結果を基に数値解析を行い，場外搬出時の揮発抑制効果について検討した．

本サイトにおいては，以下の試験を実施した．(a) 掘削時の揮発抑制効果を確認，(b) 場外搬出を行う際のフレキシブルコンテナ詰込と資材散布による水銀ガス揮発抑制効果の比較検討を行った．

(3) 試験方法

a) 掘削時の揮発抑制効果

水銀の汚染土壌を確認した範囲（土壌溶出量，土壌含有量ともに基準値の 5～10 倍程度の砂質土）において，4 地点において約 1m×1m の範囲で表土を 5cm 程度はぎ取った後，水，資材 A，資材 B を 2L/m^2 散布して，水銀ガス濃度を測定した．

水銀ガスの測定は，現地で測定できる簡易型水銀ガス濃度測定器（EMP-2 日本インスツルメンツ㈱）を使用し，土壌から揮発するガスのみを測定するために，油の揮発抑制効果を確認するために用いた密閉装置（写真-6）を使用し，この装置内において地表から 15cm 程度離した箇所で 5 分間測定を行った．なお，測定時の天候は 5℃の晴天，風速は地表から 1.5m の高さで 0.3～0.6m/s であった．

b) 場外搬出時の荷姿検討

測定には，現場から採取した 3 種類の土壌を使用した．表-5 に試料土の土壌溶出量と土壌含有量及び土質性状を示す．汚染状態は，A が土壌溶出量基準（0.0005mg/L 以下）不適合，B が第二溶出量基準（0.005mg/L 以下）不適合であった．なお，いずれの試料土も土壌含有量基準（15mg/kg 以下）適合であった．

試料土及びフレキシブルコンテナは，4t ダンプトラック（荷台面積 7.1m^2）に積み込んだ．測定箇所の概要図を図-10 に示す．測定は，試料土の直上と地表面から1.5mの高さ，試料土表面から揮発する水銀ガスを直接測定するために密閉装置を使用した．また，フレキシブルコンテナ開封時における水銀ガスの大気拡散の影響を把握するため，作業場所から 0.5m 離れた箇所で測定した．なお，測定時の天候は 30℃の晴天，風速は地表から1.5mの高さで 0.3～0.6m/s であった．

(4) 試験結果

a) 掘削時の揮発抑制効果

測定した 4 地点の平均の結果を図-11 に示す．水銀ガスの揮発量は，水散布によって 7 割程度の抑制率であったが，資材 A 及び資材 B によって 9 割以上の抑制率を確認することができた．

b) 場外搬出時の荷姿検討

試験ケース及び測定結果を表-6 に示す．各試料土で試験を行った結果，試料土 A と C の水銀ガスは，0～2μg/m^3 と低濃度であることから評価対象外とし，試料土

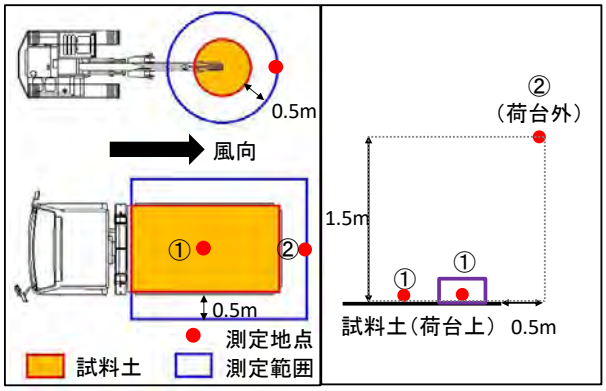


図-10 測定箇所の概要図（試験 b）

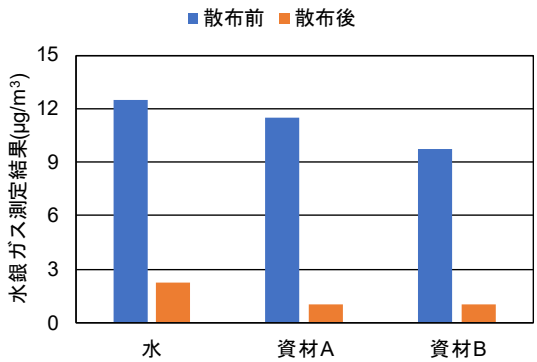


図-11 現地測定結果（試験 a）

表-6 試験ケースと現地測定結果（試験 b）

ケース	荷姿	備考	測定結果(μg/m³)		
			1.5m高さ	0m高さ	密閉装置
①	バラ積み	なし	1	7	18
②	バラ積み	シート掛け（厚み0.3mm）	0	0	2
③	フレキシブルコンテナ	密閉	0	0	0
④	バラ積み	資材A（2L/m²）	0	0	1
⑤	バラ積み	揮発抑制剤＋シート掛け	0	0	0
参考	フレキシブルコンテナの開封時		19	―	

B の測定結果を基に密閉装置で測定した値から単位面積当りの水銀揮発速度を算出した．

密閉装置を利用した場合，1～18μg/m³ で検出され，ケース③及びケース⑤は検出されなかった．水銀揮発速度を計算すると，0.06～1.1μg/m²･min であった．

(5) 考察

試験 a)の掘削時の揮発抑制効果においては，開発資材を用いることによって 9 割以上のガス抑制効果を確認できた．一方，水の散布のみでも短期的な抑制効果をある程度期待できるが，長期的には土壌が乾燥することで再度揮発すると考えられる．新村ら [11]は，資材散布有無における乾燥による揮発速度を検討しており，資材散布によって含水比に関係なく揮発量を低減できる．一方，資材を散布していない場合は含水比が 50%から 40%に低減することで水銀ガスの揮発量が 5 倍程度となった．

表-7 使用パラメータ（試験 b）

項目	単位	記号	値
排出強度	μg/min	Q_p	実測値
風速	m/min	u	660
車高	m	He	1.5
測定高さ	m	z	1.5
奥行距離	m	y	1.5
無風継続時間	min	T	3

また，資材 A と資材 B の違いについては，今回の試験で効果を確認することができなかったため，今後の室内試験や現場試験などで確認していきたい．

試験 b)の場外搬出時の荷姿検討においては，数値解析を実施した．数値解析は，大気拡散モデル [12]を用いた．汚染土壌を運搬する際は，道路の走行に加えて交差点等での停止が想定される．そこで，走行時は式(1)の点源プルーム式，停車時は式(2)の点源パフ式を利用した．なお，拡散式を解く際，ガスの拡散は点源から連続的に行われ，ガスが地表面で反射することを想定した．

$$C = \frac{Q_p}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left\{-\frac{(H_e - z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(H_e + z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad \text{式(1)}$$

$$C = \frac{2Q_p}{(2\pi)^{3/2}\alpha^2\gamma} \frac{1}{\left(\frac{R^2}{\alpha^2} + \frac{H_e^2}{\gamma^2}\right)} exp\left\{-\frac{1}{2T^2}\left(\frac{R^2}{\alpha^2} + \frac{H_e^2}{\gamma^2}\right)\right\} \quad \text{式(2)}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \alpha T \qquad \sigma_z = \gamma T$$

ここで，C は濃度(μg/m³)，Q_p は排出強度(μg/min)，u は風速(m/min)，He は点源高さ（車高）(m)，σ_y は奥行方向の拡散幅(m)，y は奥行距離(m)，σ_z は鉛直方向の拡散幅(m)，z は測定高さ(m)，R は点源と計算点の距離(m)，T は無風継続時間(min)である．**表-7** は，計算で使用したパラメータであり，σ_y と σ_z は安定度分類を A としてパスキルの拡散幅より算出し，その他は実測値と仮定条件より設定した．排出強度は，測定結果より算出した水銀揮発速度に車両の荷台面積（7.1m²）を乗じて算出した．風速（時速）は 40km/hr での走行を想定し，信号待ちに伴う停車は 3 分とした．

図-12 と**図-13** は，走行時と停車時の水銀ガス濃度の解析結果である．停車時の解析値は，ケース①（バラ積み　シートなし）で発生源から距離 100m において 0.000025μg/m³ であった．ここで，本報での管理値は，環境省に示されている指針値（年平均0.04μg/m³以下）以下とし，停車時の解析値と管理値を比較すると，ケース①（バラ積み　シートなし）は 1/1,500，ケース②（バラ積み シート掛け）は 1/15,000，ケース④（バラ積み 揮発抑制剤）は 1/30,000 であった．

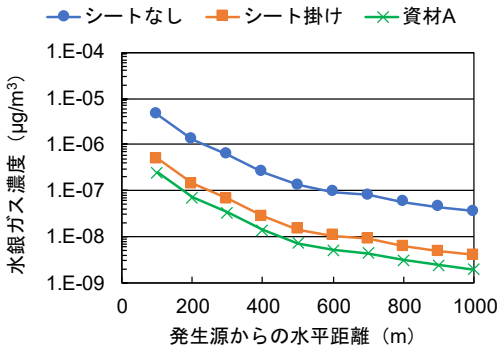


図-12　解析結果（走行時 バラ積み）

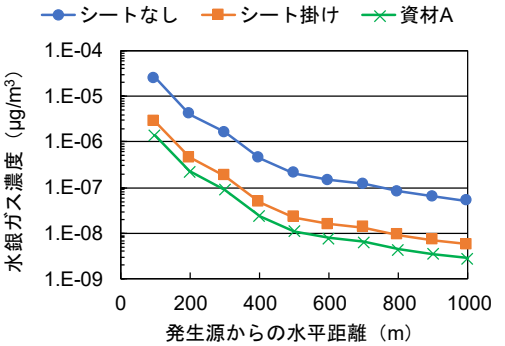


図-13　解析結果（停車時 バラ積み）

管理値を超過する水銀揮発速度を逆解析した結果，走行時は 10,000μg/m²･min であり，停車時は 1,750μg/m²･min であった．ここで，水銀揮発速度が 1,750μg/m²･min を超過する場合，土壌から発生するガス濃度は 30,000μg/m³ であることが予測された．

水銀汚染土壌の場外搬出時における揮発抑制案による水銀ガス揮発量を現地測定及び数値解析で検討した．その結果，シート掛け+揮発抑制剤散布によってフレキシブルコンテナと同程度の揮発抑制効果を確認できた．

今後の課題として，数値解析で使用した水銀揮発速度と土壌含有量の相関を明確にし，土壌含有量を閾値とした荷姿の検討を行う．また，ガイドラインに則ったフレキシブルコンテナ荷姿は，水銀ガス濃度が低濃度となるが，開封時に水銀ガス濃度が高くなる傾向があり，開封作業に伴う作業環境確保の検討が必要である．

6. まとめ

本稿では，揮発性物質を含有した土壌を掘削する際に発生するガスの揮発抑制技術について，筆者らが開発した資材を用いた室内試験及び現場試験で得られた結果を記載した．今回は，油と VOC，水銀を揮発性物質の対象とし，それぞれの物性に則した資材の開発を行い，十分な揮発抑制効果を得られた．

油と VOC に対しては，これらの物質と親和性のある物質等からなる開発資材を用いて，土壌からの臭気成分の揮散を抑制することを試みた．その結果，室内試験では物質や土質によって異なるが 8 割程度の臭気抑制効果を確認できた．また，現場試験においても全 VOC 濃度で 1/5 程度に低減でき，油臭に関しても同様に抑制効果を確認できた．

水銀に関しては，硫黄系材料の散布によって化学的に安定した化合物（硫化水銀）に形態変化させることで揮発抑制を行った．その結果，室内試験では 9 割以上の抑制効果を確認できた．また，現場試験においても掘削時及び場外搬出時の揮発抑制効果を確認できた．

以上より，今回の開発資材を掘削時及び場外搬出時に適用することで作業従事者及び周辺環境への影響を低減することに加えて，大気拡散防止用のテント設置手間を省略すること等によりコスト低減が可能であることが示された．

今回の開発資材は，掘削時及び場外搬出時のガス揮発抑制効果に加えて，他の処理方法にも適用することができる．油と VOC に対しての開発資材は，掘削した土壌に生息している微生物の活動を利用したバイオ処理の微生物栄養材としても機能し，バイオ処理能力を向上することができる．一方，水銀に対しての開発資材は，水への溶解性を低減できるため，汚染土壌から水銀の溶出を低減できる不溶化処理にも適用することができる．今後，上記処理の効果に関しても報告する予定である．

参考文献

1) 一般社団法人土壌環境センターHP：https://www.gepc.or.jp/04result/press29.htm, 2019.12.1 参照.
2) 環境省：油汚染対策ガイドライン-鉱物油を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方-, pp.1-21,資料 B-1, 2006.
3) 沖縄タイムズ：2016 年 1 月 9 日記事, https://www.okinawatimes.co.jp/articles/-/22574
4) 沖縄防衛局：平成 29 年 8 月 22 日 お知らせ, https://www.mod.go.jp/rdb/okinawa/07oshirase/kanri/kanri-info/290822oshirase.pdf
5) 中杉修身：土壌・地下水汚染の現状と対策, 廃棄物学会誌, Vol.5, No.2, pp.164-173, 1994.
6) 平田健正：わが国の土壌汚染と対策技術, 廃棄物学会誌, Vol.14, No.2, pp.85-92, 2003.
7) 環境省：汚染土壌の運搬に関するガイドライン（改訂第 4 版）, pp.58-59, 2019.
8) 一般社団法人化学物質評価研究機構 HP：https://www.cerij.or.jp/evaluation_document/hazard_assessment_report.html, 2019.12.1 参照.
9) E. Steinnes：Mercury In Heavy Metals in Soils, Ed. B. J. Allowy,pp.245～259, 1995.
10) 大島義徳, 大西健司, 石川洋二, 西川直仁, 桐山久：油臭拡散防止剤の室内試験と現地試験による効果確認, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, Vol.20, pp.190~193, 2014.
11) 新村亮, 下山真人, 三浦俊彦, 佐藤久美子, 久保博：水銀汚染土掘削時の化学的気化抑制技術の開発, 大林組技術研究所報, No.70, pp.1-6, 2006.
12) 公害研究対策センター：窒素酸化物総量規制マニュアル[新版], pp.181-243, 2000.

地域における複合的な抗堪性強化策（試論-2）
～亜臨界水技術をコアとする地域循環共生圏の形成～

INTEGRATED MEAURESMS TO SECURE MULTIPLE RESILIENCE OF OUR COUNTRY (VERSION-2)

PROMOTION OF REGIONAL RECYCLE-ORIENTED INDUSTRY AND ECONOMY BASED ON SUBCRITICAL WATER TECHNOLOGY

松下　潤*，松井三郎**，宮代知直***，吉村和就****
Jun MATSUSHITA, Saburo MATSUI, Tomonao MIYASHIRO, Kazunari YOSHIMURA

＊ 博（工）芝浦工業大学名誉教授，中央大学理工学研究所　（〒112-0003 東京都文京区春日 1-13）

**工博　京都大学名誉教授（〒616-8045 京都市右京区花園内畑町 10-46）

***博（学）G-8 ITERNATIONAL TRADING㈱会長（〒254-0807 神奈川県平塚市代官町 9-26）

****グローバルウオーター・ジャパン代表（〒275-0014 千葉県習志野市鷺沼 3-12-5）

キーワード：地域抗堪性，バイオマス，亜臨界水技術，資源循環産業，地域活性化
Multiple Resilience, Subcritical Water Tech., Biomass, Recycle-oriented Industry, Regional Socio-economic Development

１．論点

日本という国家は、Far East（極東）という形容詞が端的に物語るように、世界の中枢の欧米から見れば、世界の孤島である。ものづくりで稼ぐ外貨を海外から食糧やエネルギー資源を購入するのに使わざるをえない構造にある。

このように、地政的にも、また経済的にもいかにも脆弱に見える日本という国家が、戦後半世紀余りの間に世界第三位の経済力を持つ国家としての地位を築けたのは、いわゆる吉田ドクトリンのもと、独自の国土専守防衛政策を貫くとともに、資源小国ならではの効率的な資源・エネルギーインフラシステムを造り上げてきた国民のたゆまぬ努力よるものではないだろうか。

しかし、これからの四半世紀先を見通せば、わが国の従来の国家の骨組みが大きく揺らごうとしている。

特に懸念されるのは、経済のグローバル化と相まち、工場の海外移転と雇用減少、これらに付随する人口縮減の問題や農地や宅地、更にはインフラストックの過剰と劣化、更には消滅自治体の問題である。

2015 年の国勢調査によると、日本の総人口は、2010 年からの 5 年間に 95 万人もの減少を記録した。

さらに、2020 年には凡そ 380 万人、太平洋戦争の戦没者総数 310 万人を凌駕し、四国 4 県の現在人口に匹敵する甚大な人口縮減が予測される[1)]。

このような未曽有の人口縮減による負のインパクトによる影響、とりわけ人口のマスによる消費需要が支えるサービス産業や水道・鉄道など料金収入を源資とする地方公営・公益事業の経営問題、ひいては国民の豊かな暮らしがおびやかされる潜在的なリスクの存在に思いを馳せねばならない。

翻れば、防衛施設学会とは、そもそも防衛施設を中心とする建設工学、自然科学及び軍事工学等から構成される多角的な総合技術に求められる技術結集の場として設けられてきた。このため、その対象とされる領域も、衝撃・爆発，各種災害に対応する技術，堅牢な建築物に係る技術に加え、施設の保安等に関する技術というように学際的で、かつ幅広いテクニカルな領域に亘ることが特徴である[2)]。

これらの研究課題を防衛白書との関連性から捉えれば、国土防衛の根幹たる防衛装備・技術に関する諸施策の一翼を担う視点から[3)]、専ら抗堪性の高いハードな防護技術の開発を通して抗堪性強化に寄与する狙いを持つものであると解することができる。

これに対して、筆者らは、地域の人口が減少すればするほど、その地域を防衛する意味が薄れることから、わ

が国の国家としての存続基盤が大きく揺らぎ、人口縮減等の諸問題が顕在化するいまこそ、国民の暮らしの安全保障を担保するため、経済的な地域創生、なかんずく地域に賦存するバイオマス資源を活かした持続可能な産業育成が全国共通の課題であると認識する。

そのため、バイオマス資源化に有用な亜臨界水技術のコア技術としての活用方策を検討し、ソフト面からの国土防衛に寄与する新たな抗堪性強化シナリオについて考証する。

２．本研究の組み立てと研究方法

2-1 本研究の組み立て

筆者らは、平成 26-27 年度の防衛施設学会の研究発表会に提出した論文において、経済のグローバル化と相まち、地方からの工場の急速な海外移転と雇用減少に付随して人口が縮減し、農地や宅地の過剰と荒廃、インフラストックや老朽化などの問題に波及している現状に鑑み、試論として、人々の暮らしの安全保障の視点から、地域内発型経済の創生策に取り組む必要があることを提起した[4]。

そのうえで、事例分析をもとに、地域のバイオマス資源循環産業を下支えするコア技術として亜臨界水技術の可能性について論証した。

本研究では、この間の新たな進展として、(1) 亜臨界水技術が国（一府 6 省庁）の「バイオマス利用技術ロードマップ（2019 改訂版）」における位置付けを得たこと，(2) 受託研究「流木災害に資する流木資源化・利用システム開発」（国土交通省・2018～20 年度）の成果を基に、技術的なエビデンスを深掘りできたことをふまえ、亜臨界水技術の有用性や事業性についての論証を展開することとする。

そのうえで、地域賦存のバイオマス資源ベースの地域循環共生圏の形成方策について検討する。

翻って、防衛白書をみると、地域に果たす自衛隊基地の役割として、陸上自衛隊部隊の人員の 3/4 が地方に所在することから、地域コミュニテイーの維持・活性化に向けた社会貢献活動が期待されるとしている[前掲3)]。

これまでの活動実績では、最近の大規模災害時の救援活動のほうが目立ちやすい。しかし、これからの時代には、地域のバイオマス資源循環産業を下支えする観点から、自衛隊基地周辺地域対策の仕組みに基づく民生安定化事業に向けた支援方策のほうも重要な活動の中核的な課題として捉える必要がある。

先行事例には、例えば、北海道鹿追町で平成 28 年に上述の基地周辺地域対策（農業用施設）として稼働した乳牛ふん尿からのバイオガスプラント事業がある[5]。地域の農畜産業振興と再生可能エネルギー生産の二つを狙いとするもので、これからの時代におけるソフト面からの新たな抗堪性強化シナリオに向けてのモデルのひとつになると考えられる。

2-1 本研究の方法

本研究の組み立てと研究方法は、**図-1** に示す通りである。

第一に、特定防衛施設関連自治体や有人国境離島地域[6] 等を想定し、地域に産業と雇用があり人口を維持することで抗堪性の強い地域社会像をつくる視点から、地域固有のバイオマス資源を生かした「地域循環共生圏」の形成方策について考証する。

コア技術として、多様なバイオマス資源を効率的に資源化する先端的な亜臨界水技術の有用性について、「バイオマス利用技術ロードマップ」（一府 6 省）の位置づけを得たことをもとに論証する[7]。

第二に、資源循環産業モデルについて事例研究を行い、国土交通省の受託研究「流木資源化・利用システム開発」等を通して拡充し得たエビデンスをふまえ、亜臨界水技術をコアとする事業化可能性について考証する。

第三に、既存基地の統廃合計画等と一体的に付加すべき基地機能として、資金を効果的に活用する視点から、基地周辺地域に経済的な波及効果を持つ地域固有の資源循環産業としての実装方策を想定する。

これにより、地域の社会経済面の抗堪性を高め、持続的で安定した国土防衛体系に向けた課題を提起することとする。

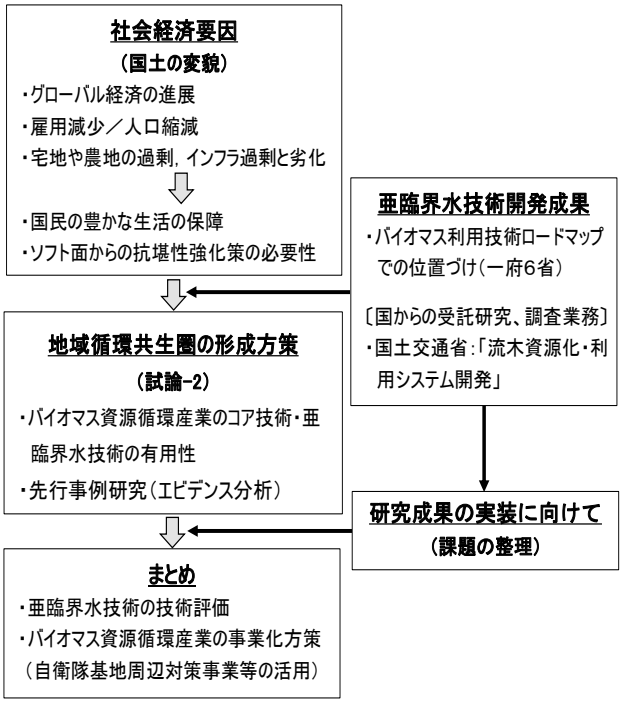


図-1 本研究の組み立てと研究方法

３．バイオマス資源化における亜臨界水技術の特長と公的な技術認証

3-1 バイオマス資源化における亜臨界水技術の特長

水という物質の性質の特徴は、図-2 に示すように、「臨界点」と呼ばれる〔374℃以上@220 気圧〕を境界条件として、大きく変化することである。

臨界点以上の「超臨界水」のもとでは、水は液体の水の密度のまま大きな熱エネルギーを得て、水分子はラジカル化し、ダイオキシンやフロンなどの有害物質を短時間で分解する。酸化剤が存在すると、有機物は瞬時に分解され二酸化炭素に転換されるが、強力な酸化力のため、超高温高圧水に対する耐熱・耐食性を備えたハステロイなどの高価な金属材料が必要であることから、実用化に供することがコスト的に非常に難しい。

これに対して、超臨界水よりも扱いやすい〔200℃@

れ生成物に取り込まれ、高濃度のイオン反応により、10-60 分前後の短時間で加水分解反応が引き起こされる。

この結果、高分子化合物である有機物を、高温高圧の亜臨界水のみを溶媒として、微生物が利用しやすい低分子化合物に転換することができる。

（例）たん白質はアミノ酸に，でん粉はブドウ糖、脂肪は低級脂肪酸などの有価物に各々転換され、優良な有機肥料やエコフィード，高濃度アミノ酸液肥のほか、メタン発酵素材などに適した生成物として再生利用できることが特長である[8]。

加えて、亜臨界水はもともと酸化反応を伴わないことから、処理工程における CO2 の発生がなく、焼却処理と比べて省エネルギー性が数倍高いことも特長である。このため、これからの低炭素社会におけるバイオマス資源化・利用システムに適合した技術であると

図-2 亜臨界水処理の温度・圧力条件及びバイオマス資源化利用特性

3-2 亜臨界水技術に対する公的な技術認証

1990 年代半ば以降、国内において開発された亜臨界水処理装置には、（1）液状の原料を対象とする連続式と（2）液状・固形を問わず様々な性状の原料に対応しうるバッチ式の二つのタイプがある。法律上は、いずれも「一種圧力容器」（労働安全衛生法・施行令第一条）としての規定を受ける。

連続式装置は、大阪府立大学吉田教授グループが下水生汚泥を対象として研究開発に取り組み、民間企業が最実用化した経緯がある。生汚泥をパイプ内で循環させる間に亜臨界水反応により加水分解し、メタン発酵の効率を改善する目的のものであるが、パイプ内での焦げ付きによる目詰まり防止のために高度な運転技術が必要とされる[10]。

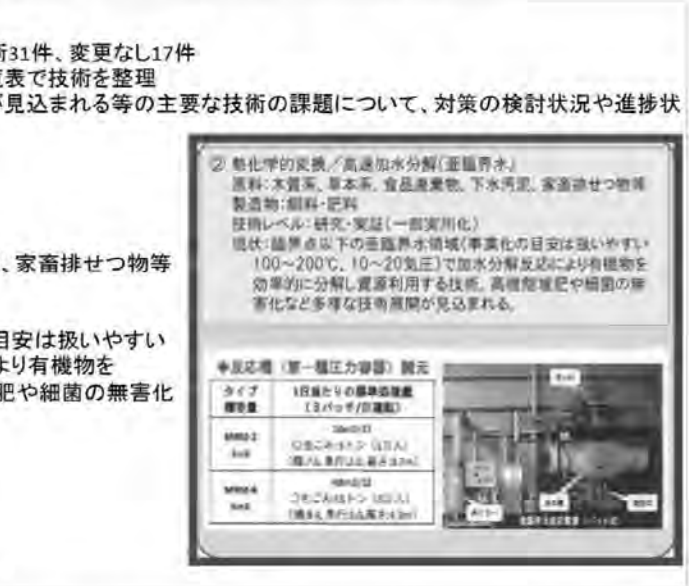
これに対して、バッチ式装置は、民間企業の G-8

INTERNATIONAL TRADING㈱が商用化に成功し、他社の先駆けとなった[前掲9) 11)]。国内外に、モデル的な先行事例が５例ある。

目安は扱いやすい〔実用的には 100～200℃・10-20 気圧〕で、有機物を効果的に加水分解し、資源化利用する技術。

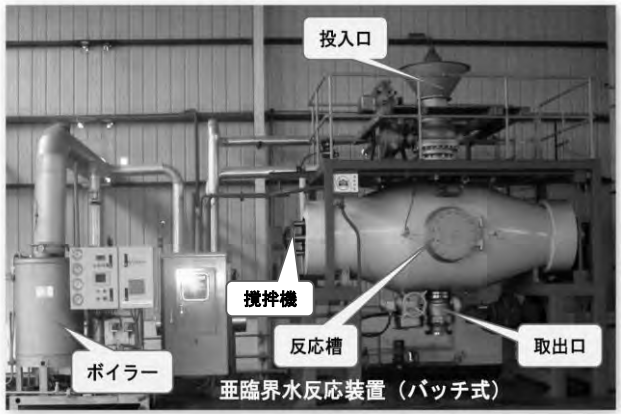
ス活用推進会議（関係１府6省）

技術ロードマップ」（2018改訂版）



出典：http://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/bioi/190527.html

置（バッチ式）の特長



《亜臨界水処理装置の能力》

運転操作手順

○投入口に原料を反応槽に投入する。

○ボイラーから〔100-200℃・10-20気圧〕の蒸気を反応槽に送出する。

○反応槽内で原料を撹拌しながら蒸気に触れさせて、加水分解を引き起こす。〔処理時間は10-60分〕

○反応終了後、蒸気を排出，処理物を取り出す。

処理能力（反応槽容量：2m3）

○1日当たり約15m3，都市ごみ約5トン〔6,000人分相当〕（ワンバッチ1.8m3，1日8バッチ運転のケース）

○ランニングコスト（水光熱費）：3,000-5,000円/ﾄﾝ

ス対策が要らないという点がメリットである。このため、燃焼装置のそれと比べると、イニシャルコストを数分の一のレベルに抑えることができる。

また、処理に要する投入エネルギーは、反応槽 $2m^3$ の場合、ワンバッチ当たり、ボイラー用の重油が 40ℓ 程度、攪拌機用の電力が 5kWh 程度であることから、処理にかかるランニングコスト（水光熱費）は 3,000-5,000 円である。その他には、標準的にボイラー技士 1 名と運転操作員 2 名を配置する必要があり、そのための人件費がかかる。

（技術の公的認証）

当該バッチ式装置は、国の一府６省から成るバイオマス活用推進会議によって定められる「バイオマス利用技術ロードマップ」（2019・改訂版）において新規技術として採択されている[前掲7)]。

その要点を箇条書きで示すと、以下の通りである。

○技術分類：熱化学的変換／高速加水分解（亜臨界水）

○原料：木質系，草本系，食品廃棄物，下水汚泥，家畜排せつ物等から飼肥料を製造する。

○技術レベル：研究・実証（一部実用化）

○技術の現状：臨界点以下の亜臨界水領域で、事業化の

４．先行事例研究：亜臨界水技術をコアとするバイオマス資源化事業モデル

4-1 先行事例研究（総論）

（先行事例の選定基準）

本研究では、先行事例の選定において、以下の３点を基本的な選定基準とすることとした。

○利用される原料に偏りがなく多様性なものであるとともに、各々亜臨界水技術の導入効果を明確に示すことができる事業であること，

○事業として原則３年以上の実績があること，

○国外の事例であるとしても、国内にも応用可能な示唆を与えるものであること，

（選定した先行事例）

上述の選考基準に従い、以下に示す４つの事例を選定することとした。

(1) 家畜排せつ物からの完熟有機肥料製造事業（台湾・中国）
(2) 動物性たん白質原料からの高濃度アミノ酸液肥製造事業（台湾・北海道）
(3) 木質バイオマスからの肥育牛向けの木質飼料製造事業（北海道）
(4) 木質バイオマスからの高濃度フルボ酸液肥抽出（国内・栽培実証試験段階）
(注) 先行事例（4）に関しては、国土交通省委託研究「流木災害に資する資源化・利用システム開発」の成果を一部援用する。

4-2 先行事例研究（各論）

(1) 家畜排せつ物からの完熟有機肥料製造事業モデル（台湾・中国）

事業概要

事業モデルは、台湾・宜蘭県と中国・江蘇省に立地する。地元の民間企業が各々事業を立ち上げているが、事業内容面はほぼ同様であるので、以下は主に台湾の事例をもとに事例研究を行う。

本事業では、バッチ式の MRM 装置（容量 2m^3）二基を用い、原料の家畜排せつ物や食品残さを日量 20 トン（年間 6 千トン）受け入れて処理する。処理後の生成物を、約 50 日間の土壌有用菌による醗酵プロセスを経て、完熟有機肥料として仕上げ、国家機関による認定を得て農家に販売している。（事業の全体構成は、図-4 に示す通りである。）

そのなかで、原料の家畜排せつ物等を亜臨界水処理する効果は、大きくは、①高温・高圧の水で処理することにより無菌状態の一次製品を作り出せること、②加水分解により有機物を短時間で低分子化できることの二点である。

①一次成品が無菌状態である効果は、土壌有用菌による発酵に向いた環境条件を調製できることによる。

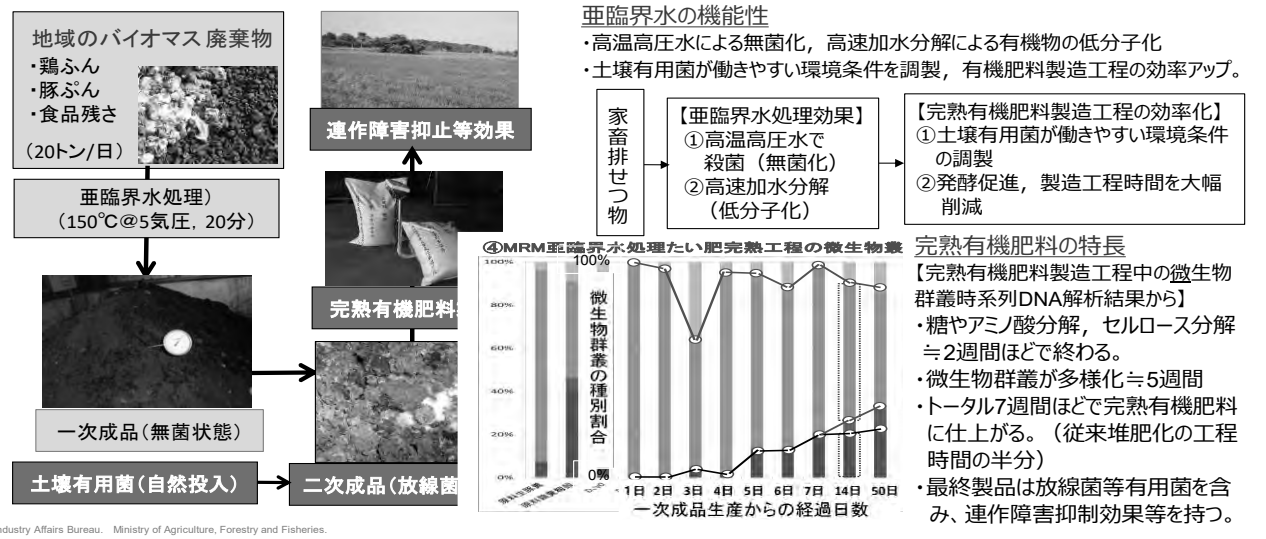
実務的には、近傍から放線菌等の土壌有用菌が付着する稲わらを持ち込めば、いわゆる生物学的な「馴致」といわれるプロセスを経て、これらの土壌有用菌が二次成品としての完熟有機肥料の一貫的な製造ラインに棲みつき、一次成品を完熟するまで短期間で発酵する働きを持続的に担ってくれる。

②有機物が低分子化されている効果は、従来の堆肥化工程で必要となるたん白質やでんぷんの分解工程と細胞膜の繊維質の分解工程が大幅に短縮されることによる。その根拠は、微生物菌群叢の時系列 DNA 解析から、完熟有機肥料に仕上げるまでの工程時間がトータル 7 週間ほどで済むと推定されることによる。

従来の標準的な堆肥化工程が経験上 12-16 週間かかるとされることから、亜臨界水処理によって完熟有機肥料製造に必要な工程時間はその半分でよいといえる。この結果、プラントの利用効率を高めて、既存の堆肥化プラントにおいては 2 倍量の原料を受け入れることが可能となる。

亜臨界水技術の付加価値

完熟有機肥料には放線菌等の土壌有用菌を含まれるため、農家の経験として圃場での連作障害抑止等効果



農林水産省 食料産業局 ／Food Industry Affairs Bureau. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries.

図-4 亜臨界水技術をコアとする完熟有機肥料製造デル事業（台湾）

（2）動物性たん白質からの高濃度アミノ酸液肥製造事業モデル（台湾）

事業概要

家畜排せつ物からの完熟有機肥料製造事業の立ち上げに成功した地元企業が、亜臨界水処理装置（2m3）を用い、地域において処理困難物とされる廃豚や廃鶏，患畜を受け入れ、新たに高濃度アミノ酸液肥製造事業に着手している。

受け入れ量は、廃豚類が推計 5 トン/日、年間 1,000 トンである。持ち込まれる廃患は専用の冷凍庫に運び入れ、冷凍保存される。反応槽（容量 2m3）に相当するボリュームに達すると冷凍庫から引き出し、裁断したものを直ちに亜臨界水反応装置に投入し処理する方法が採られている。

亜臨界水処理後の生成物からは、収率で 60%程度のアミノ酸液が製造されることから、アミノ酸液肥ベースでは年間推計約 600 トンの生産規模である。茶樹園での施用効果が認められ、取引価格はリットル当たり 2,000 円を超える。これに伴い、安定した事業収入を確保することができ、将来の普及促進が期待される。（事業の全体構成は、図–5 に示す通りである。）

なお、患畜類の衛生処理に関しては、日本国内では焼却処理もしくは現地での埋立処理以外の方法は認められていないが、台湾では事情が異なり、上記の会社に対して患畜の亜臨界水処理の業務委託が行われていると聞く。わが国においては、廃鶏や漁業廃棄物等への応用が期待される。

は、大きくは、①従来の酸分解法と異なり、水という安価で扱いやすい溶媒を使えるので、抽出工程の簡素化可能となること，②加水分解により原料中のたん白質から得られるアミノ酸液の分離・精製が容易であることの二点である。

①水という安価で扱いやすい溶媒を使える効果は、従来の酸分解法の場合にはアミノ酸抽出に硫酸を使い、更に中和のためにアルカリも必要となることから、亜臨界水技術を導入することに伴い抽出工程が簡素化されることによる。

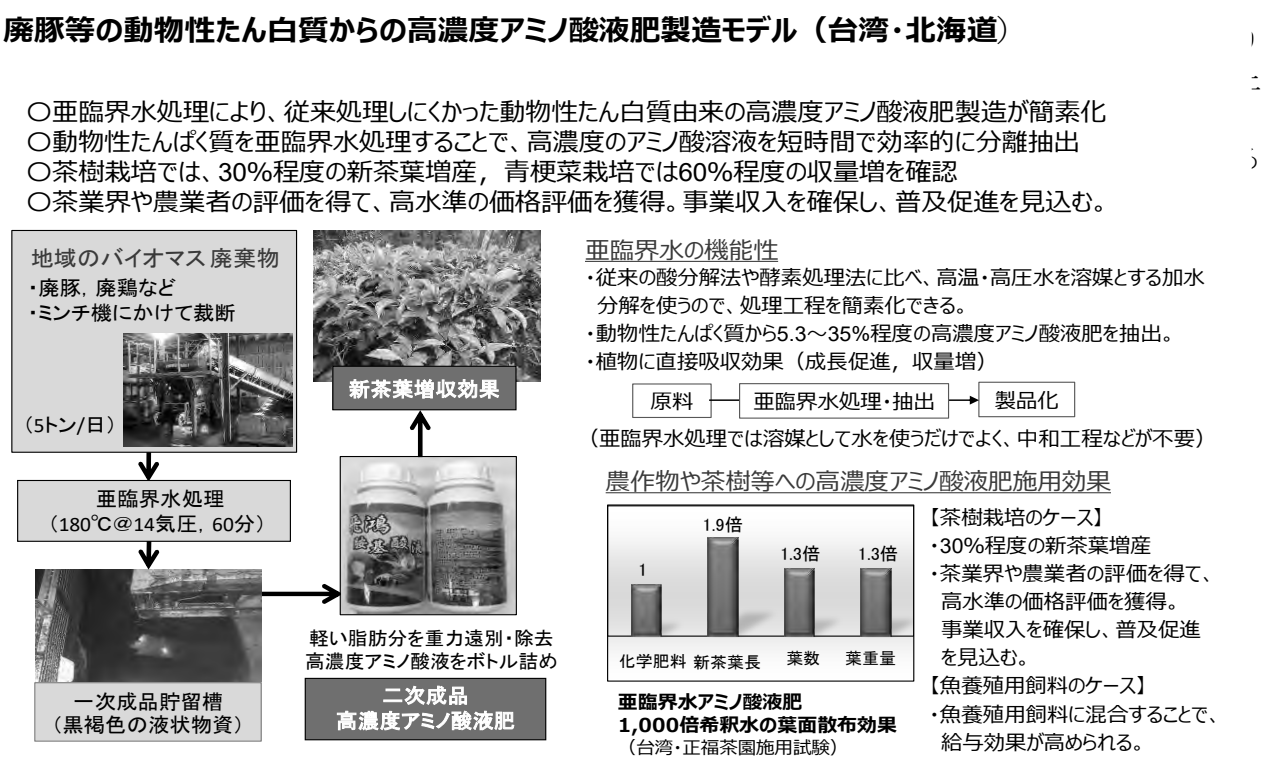
②加水分解により原料中のたん白質から得られるアミノ酸液の分離・精製が容易である効果は、一次成品がアミノ酸液のほか、低級脂肪酸や膨軟化した骨などが混じった液状物質であるため、密度の違いを利用した重力分離法を使えることによる。

下層部に沈殿した骨などの固形物と上層部に浮く脂肪類の間に溜まるアミノ酸液を抜き取り、抜き取った原液から不純物を濾しとることにより、高濃度アミノ酸液肥を短時間で得ることができる、

本事業では、廃豚類から 35%程度の高濃度アミノ酸液肥を効率的に抽出できている。歩留まりは 100%近くで、無駄も少ない。

亜臨界水処理の付加価値

茶園における栽培試験から、高濃度アミノ酸液肥の 300-1,000 倍希釈水を葉面散布することによって新茶葉の収率が 30%程度増加することが検証されている。また、官能試験においても味が甘くなる、あるいは苦みが



図–5 亜臨界水技術をコアとする高濃度アミノ酸液製造デル事業（台湾）

(3) 木質バイオマスからの肥育牛向けの木質飼料製造事業モデル（北海道）

事業概要

本事業は、北海道・北見市の民間企業が、亜臨界水反応装置（反応槽容量 2m3）を使い、地元の畜産農家の協力を得て、シラカバなどの未利用材から木質飼料を肥育牛向けに生産する実証試験に取り組み、2017 年に事業の立ち上げに到ったものである。現在までに肥料取締法の許可を得て、地域の畜産農家に木質飼料を販売している。（事業の全体構成は、図-6 に示す通りである。）

これに対して、農林水産省は、国内の粗飼料需要量の 551 TDN-トンのうち 1/4 に近い 220 TDN-トンを海外からの輸入に依存してきたことから、飼料米の活用も含めて国産飼料の増産による飼料自給率の向上を政策課題としている。（平成 20 年度食料・農業・農林白書・(3) 飼料自給力・自給率向上に向けた取組み）

本事業は、地域の未利用材を活用した木質飼料生産事業として、地域の畜産業の振興のみならず, 広くは食料自給率の改善という多面的な効果を持つモデル事業の可能性を提起するものである。

亜臨界水技術の機能性

本事業における木質飼料製造工程の特徴は、原料の木質バイオマスを亜臨界水処理して得られる一次成品を二次成品としての肥育牛向けの木質飼料に短時間で仕上げる「一貫的な製造ライン」を取り入れていることである。

蒸煮装置になかった撹拌機を備えたことによるものである。これにより、原料を均一に撹拌しながら内部に亜臨界水を送り込み、繊維質の軟化とセルロースの糖化を促進して、良質な一次成品を安定的に産出することが可能となる。

②一次成品から二次成品への加工が容易である効果は、自然乾燥しやすい性状の一次成品が得られるので、二次成品に仕上げるために必要な乾燥工程の手間が最小限で済むことによる。

亜臨界水技術の付加価値

木質飼料の飼料としての有用性を見ると、従来の蒸煮シラカバ標準飼料と比べて TDN（可消化栄養総量）ではそん色がなく、繊維質を多く含むことが特長である。このため、第一胃（ルーメン）において唾液と混じって微生物群と原虫によって分解・発酵が促進される結果、粗飼料としての生理活性効果が大きい。

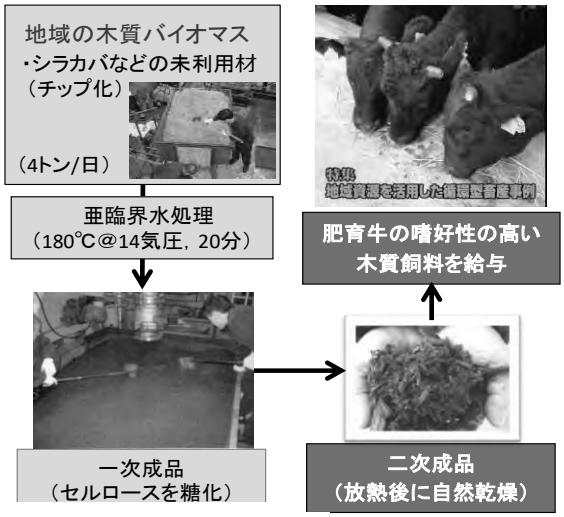
黒毛和牛の飼養実証試験（18 月齢～30 月齢）の結果からも、胃液の pH 値が高くアシドーシス（胃酸過多）になりにくいため、消化器系の治療歴がなかったこと、給与飼料の重量当たり増体量や成牛出荷後の枝肉重量の面で従来粗飼料より優れた結果を残している。

また、原料の自然由来の木質バイオマスは病原菌や有害物を含まないため、高い安全性の確保が期待される。酢酸を主成分とする有機酸を含むため、pH 値が低く、保存性も高いことも特長である。

国産飼料としての可能性では、病原菌侵入の怖れの

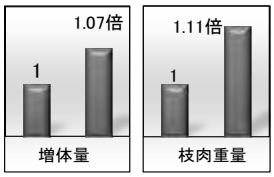
３．木質バイオマスを用いた木質飼料生産モデル（北海道）

○亜臨界水処理により、従来生成しにくかった木質バイオマスからの肥育牛向けの良質な飼料製造技術の向上。
○自然の木材由来ゆえ、病原菌や有害物を含まないため、高い安全性を確保。
○木質繊維の軟化，セルロースの糖化により、牛の嗜好性にあった栄養価の高い飼料が生産できる。
○繊維質が多いため、牛のルーメン（第一胃のこと）の機能増強，それによる健康の向上が期待できる。



亜臨界水の機能性・安全性
・従来の蒸煮技術には撹拌装置がなく、加水分解が不安定であった。亜臨界水技術は、撹拌機を備え、問題点を解消。
・短時間（20分程度）で木質繊維を軟化，セルロースを糖化栄養価（TDN）59%，繊維質70%の良質な木質飼料を製造。
・pHが3.5と低く、変質しにくいため、長期保存も可能。

木質飼料の肥育牛への給与効果
・肥育牛の飼養試験結果（18月齢～30月齢）
胃液のpHが6.2前後で安定、アシドーシス（胃酸過多）がない。
疾病歴なく、健康な牛が育てられた。
・飼養期間の増体量7%増，成牛の枝肉重量増11%を確認



亜臨界水木質飼料給与効果
（北見市・中野牧場飼養試験）

国産飼料への転換の可能性
・病原菌侵入の 怖れのある海外からの輸入稲わらの代替ニーズ，高価な海外輸入乾草代替ニーズへの対応が可能に。
・これによる国産飼料への転換，自給率向上への見通し。

図-6 亜臨界水技術をコアとする肥育牛向け木質飼料製造デル事業（北海道）

（4）木質バイオマスからの高濃度フルボ酸液肥抽出（国内・実証試験段階）

自然界におけるフルボ酸の効用

自然界では、フルボ酸は、木材中のリグニンが分解されてできる水可溶性の物質である。不溶性のヒューマス、アルカリ可溶性の腐植酸（フミン酸）と一緒に土壌中の腐植物質として存在する。（図-7 参照）

日本腐植物質学会の知見によれば、自然界のフルボ酸は、①植物ホルモン作用効果や他感機能効果（発芽率，根の成長促進，高収率），②ストレス環境耐性効果（特に温度障害や貧栄養障害がある圃場では強い），③その他の抗酸化効果（作物の鮮度維持効果）などの肥効性を持つとされる。また、カルボキシル基等の酸性官能機能により地下水中の二価鉄（Fe2+）と結合して錯体のフルボ酸鉄を形成する。このフルボ酸鉄が海域に流れこむと、海域の植物プランクトンの体内に取り込まれ、鉄分が植物プランクトンを増殖させる。この結果、海域が豊かになり、漁獲高を増やすことに繋がるというのが定説である[14]。

すなわち、このフルボ酸という天然素材を介して森林と海域が有機的に繋がり、いわゆる「森は海の恋人」（気仙沼湾のホタテ養殖業者。畠山重篤氏）という言葉に象徴される通り、流域単位の環境共生圏の形成が促進されるということもできる[15]。

湿地に溜まった自然界のフルボ酸は、濃度が概ね 1ppm のレベルである。これに対して、木質バイオマスの亜臨界水解繊時に抽出されるフルボ酸液は、濃度が 5,000-7,000ppm であり、自然界のそれの 1,000 倍以

以下、国土交通省研究委託に基づく流木からの亜臨界水由来の高濃度フルボ酸施用による水稲・スギ苗木水耕栽培試験の中間成果をまとめる[16]。（共同研究機関：京都府立大学田中國介特任教授・㈱ハイトカルチャーBT 研究所長）

水稲・スギ苗木水耕栽培試験

植物ホルモン作用効果や他感機能効果（発芽率，根の成長促進，高収率）を持つとされるフルボ酸に着眼し、異なる希釈倍率による水稲・スギ苗木水耕栽培試験を基に、水稲の収率増やスギ苗木の活着率等の効果を分析する。

テクニカルには、栽培条件を安定化させるため、透水性のセラミック筒を使う栽培方法を用いる。協力機関が独自に開発したもので、野菜の水耕栽培や苗木のコンテナ栽培に応用されている。希釈倍率は、①養液（または水）のみ、②養液（または水）＋高濃度フルボ案液肥 10.000 倍希釈，③養液（または水）＋高濃度フルボ酸液肥 1,000 倍希釈の三つのケースとする。

水稲水耕栽培（6 週間目）では、三つのケースを比較した結果、③養液＋フルボ酸液肥 1,000 倍希釈のケースにおいて、初期段階における成長ホルモンによる顕著な発芽・発根効果を確認することができた。

スギ苗木水耕栽培（12 週間目）では、②/③水＋亜臨界水由来フルボ酸 10,000/1,000 倍のケースにおいて、スギ苗木の生理活性化効果として、苗木の切口における水カビ菌発生が少ないため、枯れる割合が少なく活着率がよくなることと発根効果が認められた。

以上の成果から、今後の有望な分野として、水稲や野

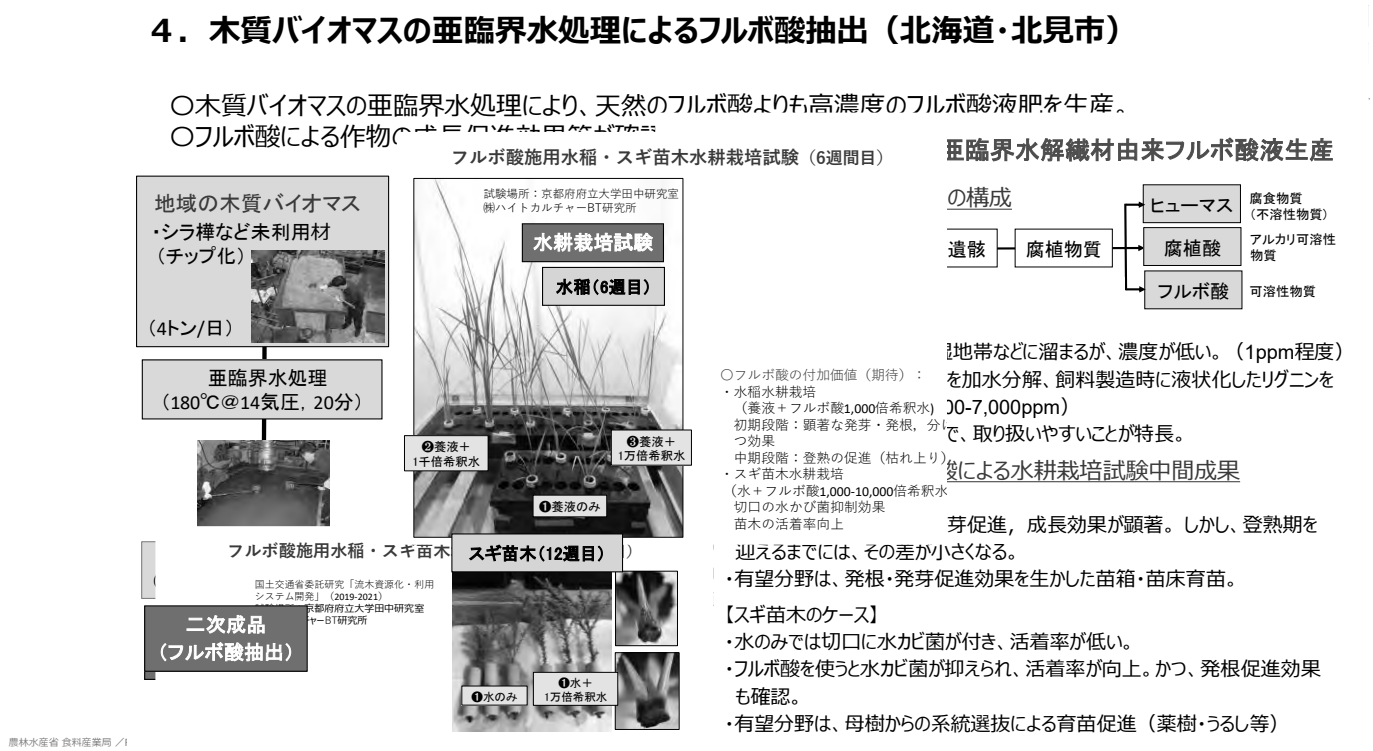


図-7 亜臨界水技術をコアとする未利用バイオマスからの高濃度フルボ酸液肥抽出（国内・実証試験）

５．結論及び今後の課題

以上の研究成果を基に、結論と今後の課題をまとめて列挙する。

(1) グルーバル経済の影響で急激な人口縮減が見込まれる地方の現状に鑑みるならば、地域の産業振興と雇用確保によって地域の抗堪性を強化し、人々の暮らしの安全保障をはかることが、これからの国土防衛上の課題となる。

(2) そのため、どの地域にも賦存するバイオマス資源を生かせる資源循環産業を育成することが汎用的な方法である。コア技術として、多様なバイオマスに対して高速加水分解機能を果たし、資源循環に対応しうる「亜臨界水技術（バッチ式）」が有効であること、更には国の「バイオマス利用技術ロードマップ」にも新たに位置付けられていたことを示した。

(3) 以上の前提のもとで、国内の装置メーカが商用化した亜臨界水技術をコアとする資源循環事業モデルとして、①完熟有機肥料製造モデル事業（台湾・中国）、②動物性たん白質からの高濃度アミノ酸液肥製造モデル事業（台湾），③木質バイオマスからの肥育牛むけ木質飼料製造モデル事業（北海道），④木質バイオマスからの高濃度フルボ酸液肥抽出（国内・実証栽培試験段階）四つのタイプを選定し、亜臨界水技術の機能性の側面から事業性についての分析を行い、同技術の効用や有用性を明らかにした。

(4) 以上の結果は、地域の抗堪性強化の観点から、地域の資源循環産業を育成に向けた支援策を講じることの意義や可能性を示唆するものである。

(5) 今後の実装に向けては、関係自治体との協力体制の下、自衛隊基地周辺地域環境整備法や有人国境離島地域法等の弾力的な運用を計ることが有力な方策となることを提起させて頂きたい。

参考文献：

1) 加藤久和著：人口 8000 万人社会の衝撃，祥伝社新書，2016.07
増田寛也編著：地方消滅～一極集中が招く人口急減，中公新書，2010,08
2) 防衛施設学会（学会設立趣旨）：www.jsdfe.org/
3) 防衛省: 平成 30 年度版防衛白書～日本防衛（2018）
4) 松下潤，松井三郎，宮代知直，吉村和就：亜臨界水技術による地方創生，平成 27 年度防衛施設学会年次研究発表会論文集 PP.83-92，2016.02
松下潤，松井三郎，宮代知直，吉村和就：地域における複合的な抗堪性強化策（試論）～亜臨界水技術が支える資源循環産業の育成と地域活性化，平成 28 年度防衛施設学会年次研究/特別報告，2017.02
5) 朝雲記事：北海道鹿追町にバイオガスプラント完成／北海道局の補助事業・然別演習場の環境整備，2016.08.01
6) 参議院議案情報：有人国境離島地域の保全及び特定有人国境離島地域に係る地域社会の維持に関する特別措置法
www.sangiin.go.jp/japanese/joho1/kousei/gian/190/meisai/m19005190018.htm
7) 農林水産省：バイオマス利用技術の現状とロードマップの見直し（2019）
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/roadmap_hontai.pdf
8) 吉田弘之編著：亜臨界水反応による廃棄物処理と資源・エネルギー化，シーエムシー出版，2007
9) 宮代知直：亜臨界水反応を用いた廃棄物の多目的資源化と安全性評価，筑波大学学位論文，2012,
Jun Matsushita, Saburo Matsui, Tomonao Miyashiro and Naoko Nakagawa: Technical Options to Improve Municipal Waste Management Mode, Proceedings for 7-th Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR7), 2016.09
10) 三菱長崎機工㈱：亜臨界水技術（連続式）の概要，同社 HP による。
11) G-8 INTERNATIONAL TRADING㈱：亜臨界水技術（バッチ式）の概要，同社 HP による。
12) 肉牛ジャーナル編集部：白かばの飼料で資源循環型畜産業を，肉牛ジャーナル pp.20-35、2015.11，肉牛新報社
13) 農林水産省生産局：飼料をめぐる情勢，2016.09，農畜産業振興機構：国内統計資料，2016.10
14) 松永勝彦：森が消えれば海も死ぬ，講談社，2010
15) 畠山重篤（2008）：鉄が地球温暖化を防ぐ，文藝春秋
16) 気候変動下の流木災害対策の背景やその必要性については、下記による。
松下潤：気候変動への適応・緩和策（総論），土木学会地球環境委員会編「気候変動への適応・緩和策」報告書，土木学会，2016.03
助川友斗・小森大輔（2017）：日本全国のダム貯水池における流木流出量の統計解析．土木学会論文集 G（環境）,73(5), I_55-I_61.
国土交通省（2018）：ダム貯水池流木対策の手引き（案）
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/damtyosuichiryubokutaisakutebikiH30.pdf

【補遺-1】流木災害対策に資する流木資源化・システム開発の概要【国土交通省委託研究：2018-2020】

背景・課題・目的

全国各地に広がりを見せる近年の流木災害では、異常豪雨時の多量の流木廃棄処分コストが河川管理上の隘路のひとつになっている。本委託研究では、流木災害による下流への影響を抑止する観点から、ダム貯水池において捕捉された流木を、地域ニーズに即して有効利用するためのシステム開発を目指す。

工程を吟味する。次に、②コア技術として亜臨界水技術を使い、流木から試験用試料を製造し、③試験機関等の協力を得てその利用実証試験として、木質飼料による肥育牛飼養試験とフルボ酸液肥による水耕栽培試験の二つを試行する。

以上の成果を基に、④地域における流木資源化・利用の出口を確保するとともに、流木の廃棄コスト削減

図-A1　流木災害対策に資する流木資源化・利用システム開発（研究体系）

【補遺-2】自衛隊基地周辺地域対策事業の先行事例（鹿追町環境保全センターの概要）

事業趣旨・意義

農業用施設／投資額：約 18.9 億円（補助率 2/3）

基地周辺地域対策事業
（モデル事例）

鹿追町環境保全センター

○民生安定化事業（農業施設）
事業費約19億円（補助率2/3）
稼働開始：2016.06
○バイオガスプラント
乳牛ふん尿受け入れ量：95トン/日
（成牛3,000頭分）
メタン発酵槽：7,800m3（消化日数：26日）
液肥貯留槽　：56,000m3（267日分）
発電機　　：250kW@4基（1,000kW）
○堆肥化プラント
乳牛ふん尿、生ごみ等：42トン/日
○ハウス園芸棟（余熱利用施設）

D　爆発・破壊

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会(2020 年 2 月)

殉爆現象の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF SYMPATHETIC DETONATION

吉田正典、 ディン スァン チェン、 小山陽次、 石倉修一
YOSHIDA Masatake, DINH Xuan Thien, KOYAMA Yoji, ISHIKURA Shyuichi

(株) 爆発研究所 (〒113-0033 東京都文京区本郷 3-5-2 第 2 田中ビル 3 階)

キーワード: 殉爆、 カードギャップ試験、 爆薬、 数値シミュレーション
（Sympathetic detonation, card gap test, explosive, numerical simulation）

1 Abstract

This paper presents the simulation of sympathetic detonation in a card gap test by the hydrodynamic code developed by the Explosion Research Institute Inc. based on open source code. The code adopted the multi-material Eulerian method and the Ignition and Growth reactive flow rate model to solve the shock induced detonation phenomenon. The reactant and product phases of high explosive were modeled by JWL EOS and the condensed inert phase was represented by shock Mie-Gruneisen EOS. As a verification of the code, the one-dimensional shock-detonation-transition SDT simulation is carried out. The run to detonation distance of the simulation was well agreed with the empirical correlation. In the sympathetic detonation simulation, both donor and acceptor are Composition B and the gap is plexiglass PMMA. The simulated critical gap for the SDT was in good agreement with the other published data. It implies that the code is valid for the SDT simulation.

2 Introduction

Sympathetic detonation is the chain reaction caused by an explosive to the surrounding explosives. The consequences of the sympathetic detonation have been catastrophic and in most cases have resulted to loss of human lives and equipment. Therefore, the reduction of the hazards of munitions has been the study of numerous organizations for decades [1].

The sympathetic detonation of high energetic explosives relates to number of phenomena including ignition by an external stimulus, detonation transition and propagation, the rapid expansion of detonation products, and the propagation of shock waves in various media. Therefore, the code for physical hazard analysis should be able to solve for multi-materials with chemical reaction. This requires the various models to be included in the code, such as the equations of state, the constitutive equations, and the burn models. There are many researches have developed hydrodynamic codes for the sympathetic detonation simulation. Most of the researches use the multi-material Eulerian method to represents all physic phenomenon on single mesh, since this method is simple to implement in a code. Saburi et al. [2] has developed a code based on CIP method to cure the numerical diffusivity in the Eulerian method. However, the code uses CIP method, so the conservation is in question. Alternatively, Kim et al. [3] has used the hybrid Eulerian and Lagrangian method where Eulerian method uses level set method and Lagrangian method tracks the massless particle to correct the level set function. This treatment preserves the mass. However, it is a complicated implementation. To avoid the use of mesh, Yang et al. [4] uses the smooth particle hydrodynamic SPH method. SPH is a pure Lagrangian tracking which can easily treat distinguish multi-material. The drawback of SPH method is the computation cost and complicated to implement a code. In the commercial codes, ANSYS LS-DYNA [5] and ANSYS Autodyn [6] are the major codes for such simulation and has been used in various researches [7,8].

It is robust and available for massive computation but expensive licensed cost.

To reduce the cost of massive computations, we developed a hydrodynamic code based OpenFOAM [9]. OpenFOAM is a source code to solve the partially differential equation PDE based on finite volume method. It is an open source code and written for unstructured mesh, so it is free for massive computation and easy to implement a new code. However, OpenFOAM has not included the numerical schemes for shock discontinuity except the Kurganov-Tadmor scheme which we experienced that is not applicable for the multi-material formulation. Furthermore, the current OpenFOAM has not implemented the constitutive relations for high energetic materials as equation of state and reaction model. Therefore, we are working to eliminate these drawbacks of OpenFOAM by developing the libraries of the models for high energetic material explosion simulation.

This paper introduces the application of our developed code for the sympathetic detonation simulation. The governing equations and the constitutive equations are shown in Section 3. In Section 4, the simulation data of simple shock-detonation-transition and the card gap test sympathetic detonation using the code are presented. By comparison of the experimental and numerical results, it is shown that our code can be used for the shock-detonation-transition phenomenon. Finally, the conclusion is included.

3 Numerical simulation

The developed code is based on the multi-material Eulerian method where all materials motion is governed on single set of equations based on mass, momentum, and energy conservation laws as

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot\rho U=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t}+\nabla\cdot\rho UU+\nabla p=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t}+\nabla\cdot\rho UE=0 \tag{3}$$

where ρ is the density, p is the pressure, U is the velocity, and $E = e + 0.5U^2$, e is the internal energy.

Each material is model by an equation of state as the constitutive model. For the explosive, both reactant and product are represented by Jones-Wilkins-Lee equation of state as [10]

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)e^{-R_1 v}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)e^{-R_2 v}+\frac{\omega\rho_0(e+E_0)}{v} \tag{4}$$

where $v = \rho_0/\rho$. The coefficients A, B, R_1, R_2, ω, E_0, and ρ_0 are the JWL parameters.

The condensed phase is modeled as Mie-Gruneisen equation of state as [11]

$$p=p_H+\frac{\rho_0\Gamma}{v}(e-e_H) \tag{5}$$

where p_H and e_H are the pressure and the internal energy along the Huguenot curve, Γ is the Gruneisen gamma, and $v = \rho_0/\rho$. They are expressed as following

$$p_H=\frac{\rho_0 c_0\mu(1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2} \tag{6}$$

$$e_H=\frac{p_H}{2\rho_0}\left(\frac{\mu}{1+\mu}\right) \tag{7}$$

$$\Gamma=\frac{\Gamma_0+a\mu}{1+\mu} \tag{8}$$

where c_0 is the sound speed at the reference condition, s and a are the parameters, and $\mu = 1/v - 1$.

The rate of the decomposition of the explosive is adopted from the Ignition and Growth model proposed by Lee-Tarver [12] as, where H(x) is the Heaviside function

$$\begin{aligned}\frac{d\lambda}{dt}=&I(1-\lambda)^b(\mu-a)^x H(\lambda-\lambda_{Imax})\\&+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y H(\lambda-\lambda_{G1max})\\&+G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z H(\lambda_{G2min}-\lambda)\end{aligned} \tag{9}$$

The governing equations (1)-(3) and the reaction rate (9) with the constitutive equations (4)-(8) are solved by the finite volume method based on the open source code OpenFOAM. The method to compute the fluxes is either Harten Lax van-Leer with Contact HLLC scheme [13] or Advection Upstream Splitting Method AUSM scheme [14], which are integrated to OpenFOAM.

4 Results and discussion

4.1 One-dimensional shock-detonation-transition

To confirm the reliability of the code, the simple one-dimensional shock-detonation-transition was simulated. The tube length is 100mm divided into 2000 cells. The first 20mm is modeled as the aluminum plate and the remain is the unreacted Composition B. The impact

condition is modeled as a high particle velocity at the left end region of the aluminum plate whose length is 0.05mm.

The JWL parameters of both reactant and product of Composition B used in this simulation are shown in Table-1. The rate of change from the reactant to product of Composition B is computed by the Ignition and Growth shown in Table-2. The aluminum is modeled as Mie-Gruneisen equation of state shown in Table-3. All these parameters are referred to Urtiew's work [15].

Table-1 JWL parameters for Composition B

	Reactant	Product
A (Mbar)	778.1	5.242
B (Mbar)	-0.05301	0.07678
R_1 (-)	11.3	4.2
R_2 (-)	1.13	1.1
ω (-)	0.8938	0.5
E_0 (MJ/kg)	-	4.9505
ρ_0 (kgm^{-3})	1717.0	-

Table-2 Ignition & Growth parameters

I (s^{-1})	4.0×10^{12}
a (-)	0.0367
b (-)	0.667
x (-)	7.0
G_1 ($Mbar^{-2}s^{-1}$)	140.0×10^6
c (-)	0.667
d (-)	1.0
y (-)	2.0
G_2 ($Mbar^{-3}s^{-1}$)	1000.0×10^6
e (-)	0.222
g (-)	1.0
z (-)	3.0
λ_{Imax} (-)	0.022
λ_{G1max} (-)	0.7
λ_{G2min} (-)	0.0

Table-3 Mie-Gruneisen parameters for aluminum

c_0 (ms^{-1})	5240.0
a (-)	0.48
s (-)	1.4
Γ_0 (-)	1.97
ρ_0 (kgm^{-3})	2703.0

Figure 1 plots the pressure with time at several location from the interface between the aluminum plate and Composition B when the interaction pressure is 4.35GPa (the first pressure rise at the location of 0mm). It shows that the pressure in Composition B increases and then shock-detonation-transition occurs between 13mm and 14mm.

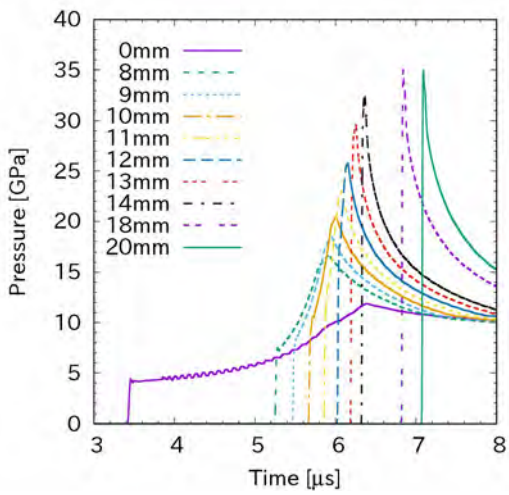


Figure-1 The pressure history for the impact pressure of 4.35GPa

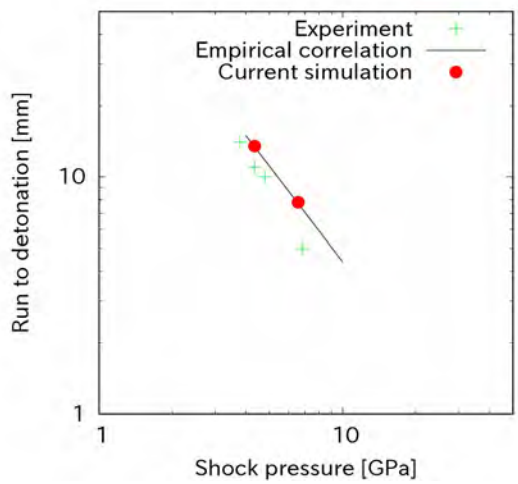


Figure-2 The run to detonation with impact pressure

Shock sensitivity of Composition B for various impact pressures is plotted in Figure-2, called "Pop Plot". It displays the dependence of the distance to detonation on the initial impact pressure. On a log-log plot the run distance to detonation versus shock pressure data mostly fall on a straight line. The closer the line is to the origin of the plot, the more sensitive is the material. The current simulation data is compared with the empirical correlation published by Gibbs and Popolato [16] and the experiment data by Urtiew [15]. It shows that the simulation data are in good agreement with these researches.

4.2 Gap test simulation

This section performs the simulation of the cylindrical card gap test as Kubota's work [17] as shown in Figure-3.

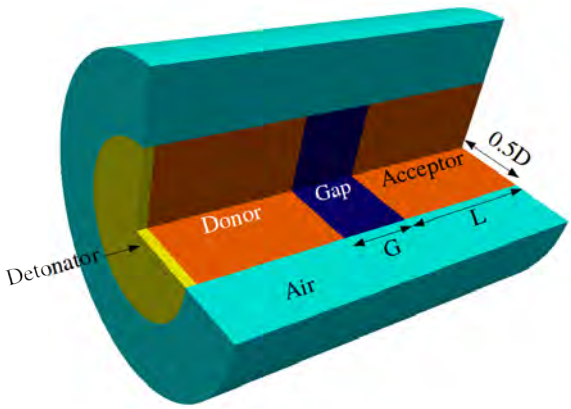


Figure-3 The gap test simulation configuration

The donor and acceptor are Composition B and the gap is pelixglass PMMA. The JWL parameters and the Ignition and Growth model parameters of the Composition B are identical to the previous one-dimensional SDT simulation. The Mie-Gruneisen parameters of the PMMA is shown in Table-4 [18]. The detonator is the detonated product of Composition B (Chapman-Jouguet point: p_{CJ} = 29.9GPa and v_{CJ} = 0.425cc/g) which computed by a tool developed by Explosion Research Institute Inc.

Table-4 Mie-Gruneisen parameters for PMMA

c_0 (ms^{-1})	2180.0
a (-)	0.0
s (-)	1.41
Γ_0 (-)	0.85
ρ_0 (kgm^{-3})	1182.0

The donor and acceptor have the same size and the diameter is equal to the length, D = L, which makes the aspect ratio of the donor and acceptor being 1.

The simulation is carried out in the axis-symmetrical model. Therefore, the the axis-symmetry module of the code is used. The computational domain has the length equally to the total length of the donor, acceptor, and the gap. The detonator has the depth of 2mm. The mesh is uniform with the size of 1.0mm. For the numerical stability, the MINMOD slope limiter was used in the computation of the fluxes. The time is advanced by explicit Euler method where the time step is controlled by Courant-Friedrichs-Lewy CFL number as bellow, where the subscript f represents the face value and δ is the cell-to-cell distance.

$$\Delta t = CFL \frac{\delta_f}{max(|U+c|_f, |U-c|_f)} \tag{8}$$

The distribution of the density when the shock impacts to the acceptor for the gap length of 15mm and the charge diameter of 32mm is depicted in Figure-4.

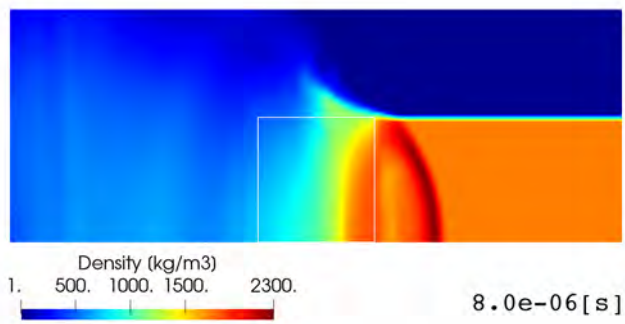


Figure-4 The distribution of the density. The shock moves from left to right. The line is the initial position of the gap.

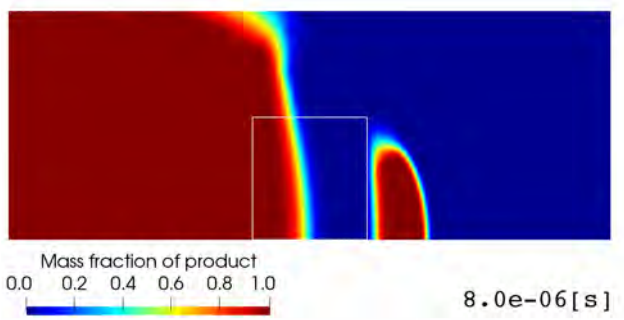


Figure-5 The detonated product distribution. The line is the initial position of the gap.

Similarly, the distribution of mass fraction of the detonated product of Composition B is displayed in Figure-5. It shows that the detonation occurs in the acceptor.

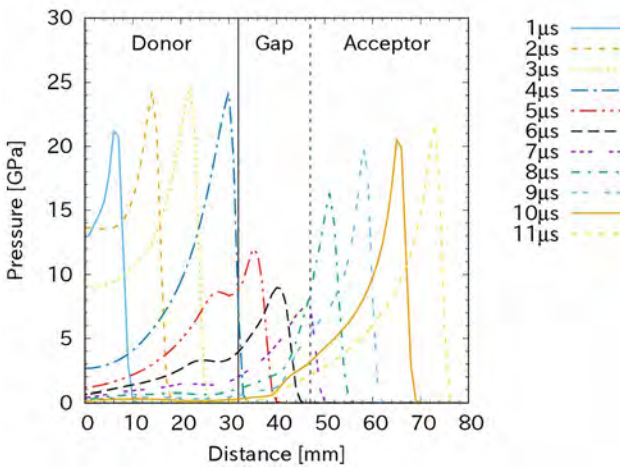


Figure-6 The shock propagation in the gap of 15mm and the charge diameter of 32mm case.

Figure-6 plots the pressure along the axis of the test configuration for various times for the gap length of 15mm in the case of the charge diameter of 32mm. The steady shock occurs in the donor, then it attenuates inside the gap, and then the detonation occurs again in the acceptor after a run to detonation distance. The run to detonation distance is about 10mm which is in good agreement with Kubota's work [17].

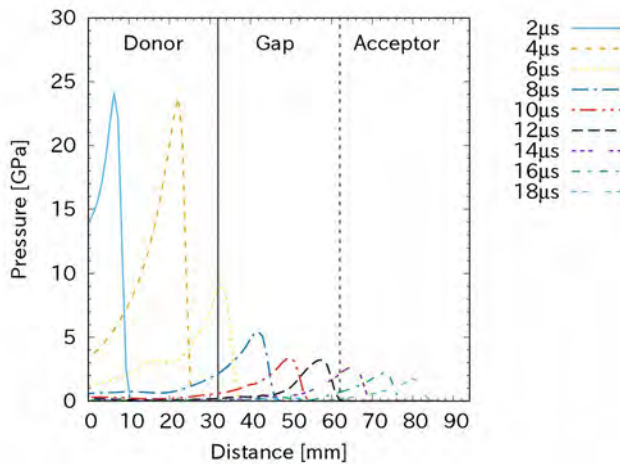


Figure-7 The shock propagation in the gap of 30mm and charge diameter of 32mm case.

Figure-7 plots the pressure as Figure-6 but for the gap length of 30mm. In this case, the detonation does not occur in the acceptor. Therefore, the shock is attenuated continuously from the gap to the acceptor.

The relation between the gap length and the charge diameter so that the sympathetic detonation whether occurs is shown in Figure-8. The circle symbol ○ represents the cases in which sympathetic detonation occurs and the cross symbols × are the cases where the sympathetic detonation is impossible. The dashed line is the regression line from the Kubota's data [17]. It show that the log-log of the relation between the critical gap and the charge diameter is linear and is approached to Kubota's research.

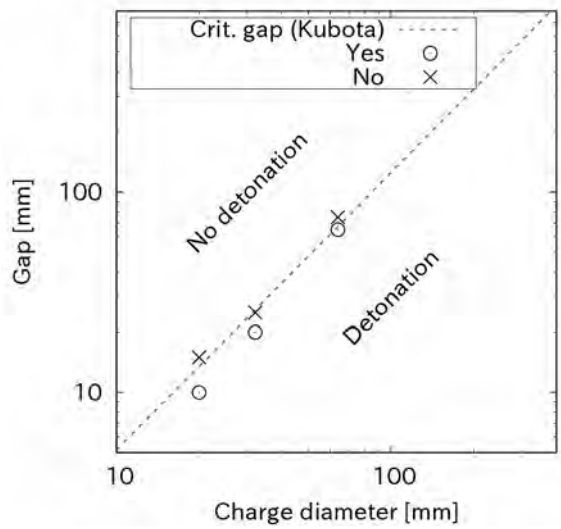


Figure-8 The critical gap length for sympathetic detonation

5 Conclusion

The simulation of shock-to-detonation transition by the hydrodynamic code developed by the Explosion Research Institute Inc. based on the open source code OpenFOAM was presented. The simulated data of the one-dimensional SDT was in good agreement with the empirical correlation. The card gap test was also carried out. The shock propagation in the test and the critical gap length were in good agreement with the other researcher's publication. It implies that the developed code is acceptable to simulation of SDT phenomenon. The code was developed in the open source code, so it is inexpensive for the massive computation.

In the future work, the code will be improved for the robust computation.

References

1) L. Chen, C. Wang, C. Feng, F. Lu, J. Lu, X. Wang, X. Guo: Study on random initiation phenomenon for sympathetic detonation of explosive, Defence Technology 9, pp224-228, 2013.
2) T. Saburi, S. Kobota, Y. Wada, M. Yoshida: Development of numerical code for physical hazard analysis of high-energy materials, Sci. Tech. Energetic materials 74(5), pp124-131, 2013.
3) K.H. Kim, J.J. Yoh: A particle level-set based Eulerian method for multi-material detonation simulation of high explosive and metal confinements, Proc. Combustion Institute 34, pp2025-2033, 2013.
4) G. Yang, Y. Fu, D. Hu, X. Han: Feasibility analysis of SPH method in the simulation of condensed explosives detonation with ignition and growth model, Computers & Fluids 88, pp51-59, 2013.
5) https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna
6) https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn
7) P. Yuan, Y. Zhao: Numerical simulation of damage to ship structure by underwater contact explosion shock wave, Chemical Engineering Transactions 62, pp673-678, 2017.
8) J.K. Chen, H. K. Ching, F. A. Allahdadi: Shock-induced detonation of high explosives by high velocity impact, J. Mechanics of Materials & Structures 2(9), pp1701-1721, 2007.
9) openfoam
10) R. Menikoff: JWL equation of state, Los Alamos National laboratory, Technical Report LA-UR-15-29536, 2017.
11) S.B. Segletes: An analysis on the stability of the Mie-Gruneisen equation of state for describing the behavior of shock-loaded materials, U.S. Army laboratory command, Technical Report BRL-TR-3214, 1991.
12) C.T. Tarver: Modeling detonation experiments on Triaminotrinitrobenzene (TATB)-based explosives LX-17, PBX 9502, and ultrafine TATB, Energetic Materials 30(3), pp220-251, 2012.
13) M.D. Lorenzo, M. P. Pelanti, Ph. Lafon: HLLC-type and path-conservative schemes for a single-velocity six-equation two-phase flow model: A comparative study, Applied mathematics and computation 333(15), pp95-117, 2018.
14) E. Shima, K. Kitamura: Parameter-free simple low-dissipation AUSM-family scheme for all speeds, AIAA 49(8), pp1693-1709, 2011.
15) P.A. Urtiew, K.S. Vandersall, C.M. Tarver, F. Gacia, J.W. Forbes: Shock initiation of composition B and C-4 explosives; experiments and modeling, Int. Conf. Shock waves in condensed matter, Saint Petersburg, Russia, Sep. 3-8, 2006.
16) T.R. Gibbs, A. Popolato: LASL Explosive Property Data, p.19, University of California Press, Berkeley, CA, 1980.
17) S. Kubota, Z. Liu, S. Otsuki, Y. Nakayama, Y. Ogata, M. Yoshida: A numerical study of sympathetic detonation in gap test, Materials Science Forum, Vol. 465-466, pp. 163-168, 2004.
18) B. Kim, M. Kim, J.J. Yoh: Shock to detonation transition analysis using experiments and models, Proc. Combustion Institute 36, pp2699-2707, 2017.

殉爆現象の数値シミュレーション

吉田正典， ディン スァン チェン， 小山陽次， 石倉修一
（株）爆発研究所（〒113-0033 東京都文京区本郷 3-5-2 第 2 田中ビル 3 階）

キーワード: 殉爆、カードギャップ試験、爆薬、数値シミュレーション

本論文では、弊社がオープンソースコードに基づいて開発したコードを用いて実施したカードギャップ試験における殉爆現象の数値シミュレーション結果を報告する。本コードは、殉爆現象における衝撃波による爆轟への転移過程を解析できるようにマルチマテリアルオイラー法を用いて、点火および反応伝搬モデルを採用している。爆薬の燃焼前と燃焼後の状態量は JWL 状態方程式によってモデル化し、凝縮相は Mie-Gruneisen 状態方程式でモデル化している。数値解析コードの妥当性を検証するために、1 次元の衝撃波による爆轟への転移過程（SDT）シミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、衝撃波による爆轟への転移過程は、実験結果との良い相関が得られた。このシミュレーションでは、ドナーとアクセプターの両方が Composition B であり、ギャップはプレキシガラス（PMMA）である。シミュレーションによる殉爆現象に至るクリティカルギャップは、他の公開データとよい一致を示した。実験結果の再現性を検証したことにより、解析コードの殉爆現象への適用性が示された。

ポリウレア樹脂吹付による RC 版の耐衝撃性向上効果に関する研究

STUDY ON IMPACT RESISTANT IMPROVEMENT EFFECT BY SPRAYING POLYUREA RESIN ON THE BACK SURFACE OF RC PLATES

島﨑利孝*，武者浩透**，片岡新之介***，別府万寿博****
SHIMAZAKI Toshitaka, MUSYA Hiroyuki, KATAOKA Shinnosuke and BEPPU Masuhiro

*　大成建設株式会社技術センター生産技術開発部（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1）
**　修（工）大成建設株式会社技術センター生産技術開発部（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1）
***　修（工）防衛大学校　理工学研究科後期課程　（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
****　博（工）防衛大学校　システム工学群建設環境工学科　（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

キーワード：ポリウレア，耐衝撃性能，衝突実験，裏面剥離
(Polyurea, impact resistance performance, collision experiment, scabbing)

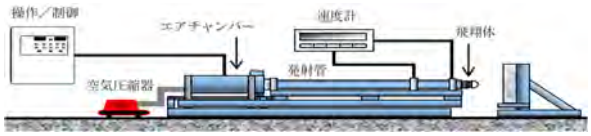
1. はじめに

近年，竜巻による飛来物や火山噴石に対する耐衝撃性能に関する多くの研究がなされてきている[1]．これには，電力設備や石油タンク等の重要構造物に高い耐衝撃性能が求められている背景がある．そのような中で，構造物の耐衝撃補強において，ポリウレア樹脂(以下，ポリウレア)に関する研究が行われてきている[例えば 2), 3)]．ポリウレアはポリイソシアネートとポリアミンの化学反応により生成するウレア結合を主体とした 2 液混合樹脂であり，優れた伸び率，引張強度を有している．日本では主に防水用途として工場の屋上や倉庫の床に使用されているが，海外では耐衝撃補強としても用いられている．しかし，ポリウレアを吹付けた構造部材の耐衝撃性能に関する研究例は少なく，その有効性に関しては不明な点が多い．そこで，本研究では，構造部材に対するポリウレアの耐衝撃性向上効果の検討を目的として，RC 版単体とポリウレアを裏面に吹付けた RC 版(以下，ポリウレア吹付版)に対して，65m/s~100m/s の範囲で飛翔体の衝突実験(以下，衝突実験)を実施した．これにより，RC 版単体の破壊性状とポリウレア吹付版の破壊性状を比較することで，RC 版に対するポリウレアの耐衝撃性向上効果の検討を行った．

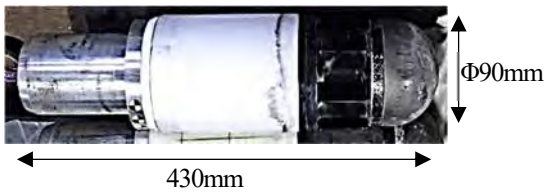
2. 実験概要

2.1　実験装置の概要

図－1 に衝突実験で用いた高圧空気式飛翔体発射装置の概要を示す．空気圧により質量 4～10kg の飛翔体を速度 20～100m/s で発射することが可能である．飛翔体の衝突速度は，試験体側面側に設置した高速度カメラで衝突の瞬間を記録し，その映像を解析することで算出した．写真－1 に本実験で使用した鋼製飛翔体を示す．鋼製飛翔体の先端部は直径 90mm の半球型とし，全長を 430mm とした．質量は竜巻飛来物等を想定して，8.3kg とした．



図－1　高圧空気式飛翔体発射装置の概要

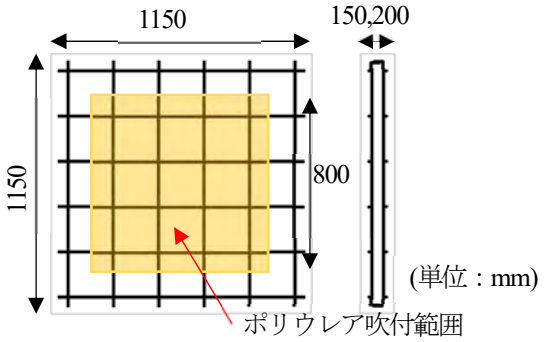


写真－1　鋼製飛翔体

表－1　実験水準

ケース名	RC版の厚さ(mm)	ポリウレアの吹付	衝突速度(m/s)
R150	150	無し	67(設定速度:70)
RP150	150	7.5mm吹付	71(設定速度:70)
R200	200	無し	96(設定速度:100)
RP200	200	7.5mm吹付	95(設定速度:100)

表－1 に実験水準を示す．実験パラメータはRC版厚と，ポリウレア吹付の有無および衝突速度とした．衝突速度は，RC 版の局部破壊評価式である電中研式[4]に基づき，それぞれの版厚で破壊モードが裏面剥離限界から貫通限界となるように設定した(版厚 150mm：速度 70m/s，版厚 200mm：速度 100m/s)．ただし，発射装置の制約上，設定速度と実測速度に誤差が生じるが，本研究の中では，5%以内の誤差にとどまっている．



図－2　RC 版配筋図

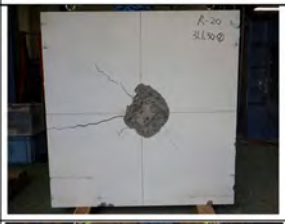
表－2　ポリウレアの物性

密度(g/cm³)	引張強度(N/mm²)	伸び率(%)	圧縮強度(N/mm²)
ASTM D-1622	ASTM D-412	ASTM D-412	ASTM D-695
1.10~1.12	19.3~22.1	400~500	5.52

※メーカーの技術資料をもとに作成.

写真－2　ポリウレアの吹付状況

表－3　実験結果

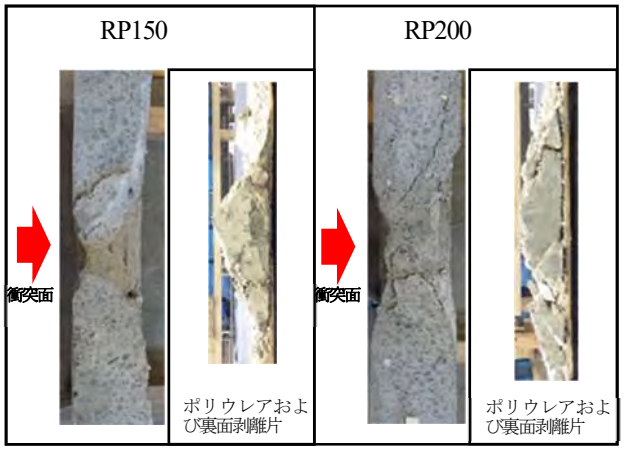
ケース名	R150	RP150	R200	RP200
衝突面				
衝突裏面				
厚さ(mm)	150	150	200	200
衝突速度(m/s)	67	71	96	95
破壊状況	裏面剥離(貫通限界)	内部剥離	裏面剥離	内部剥離
貫入深さ(mm)	(貫通孔が生じ計測不可)	(貫通孔が生じ計測不可)	63.8	58.8
裏面損傷面積(mm²)	241,000	371,000	303,000	352,000
裏面損傷面積割合(%)	18.2	28.1	22.9	26.6
ポリウレアの剥離面積(mm²)		472,000		451,000
残留接着面積割合(%)		26.2		29.5

RC 版の配筋図を図－2 に示す．RC 版は 1150mm×1150mm の平板であり，版厚は 150mm および 200mm とし，鉄筋間隔を 200mm，純かぶりを 30mm とした．厚さ 150mm の RC 版では D13 を用い，引張鉄筋比を 0.42%，厚さ 200mm の RC 版では D16 を用い引張鉄筋比 0.50%とした. 実験時における RC 版の圧縮強度は 40.3N/mm² である.

2.2　ポリウレアの材料特性

表－2 にポリウレアの物性を示す．ここで用いたポリウレアの伸び率は 400～500%であり，図－2 に示すように，RC 版の衝突裏面に 800mm 四方で吹き付けた．試験体は上下二辺を支持具に固定した．その際，ポリウレアが鋼材に挟まれないようにするため, ポリウレアの衝突裏面全面への吹付を行わなかった．これにより，衝突時に発生するポリウレアの RC 版からの剥離は, ポリウレアとコンクリートの接着が切れることによって生じることになる. ポリウレアの吹付状況を写真－2 に示す.

ポリウレアの吹付に際しては, 事前に吹付面をサンドペーパーで目荒しを行い，その上にプライマーを塗布した.



図－3　ポリウレア吹付 RC 版の断面状況

その後，プライマーが含浸するよう一定時間おき，ポリウレアの吹付を実施した．ポリウレアの平均吹付厚さは 7.5mm である．吹き付け厚さは，吹付後に超音波式膜厚計を用いて計測した．

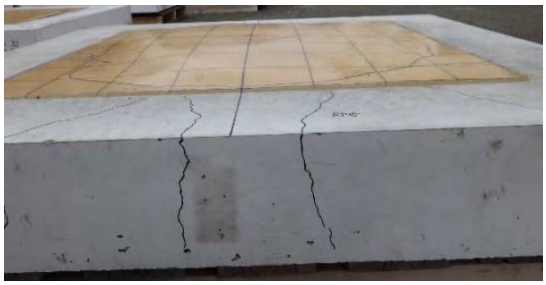
3. 実験結果

3.1　破壊性状

表－3 に各ケースの実験結果を示す．貫入深さは衝突面に生じる表面破壊の深さを示す．裏面損傷面積は衝突裏面の剥離部分の面積を示し，ポリウレア吹付版は試験後にポリウレアを剥がし，裏面損傷面積を計算した．裏面損傷面積割合は RC 版裏面面積における裏面損傷面積の割合を計算したものである．ポリウレアの剥離面積は，衝突実験後にポリウレア面を目視および打音検査を行うことでRC 版から接着が切れている面積を算出したものである．残留接着面積割合はポリウレア吹付面積におけるポリウレアと RC 版の接着が保持されている面積の割合を計算したものである．

破壊状況に着目すると，RC 版(R150，R200)には裏面剥離が生じ，衝突裏面で剥離片が激しく飛散した．一方で，ポリウレア吹付版(RP150，RP200)は，外観上は裏面のポリウレアに膨らみが生じたが，剥離片の飛散は確認できなかった．この破壊性状に関しては，高速度(200～500m/s)で行われた既往の飛翔体衝突実験 [5]でも同じ結果が報告されている．図－3 に示すポリウレア吹付版の断面写真からわかるように，RC 版部では剥離が生じており，ポリウレアが剥離片の飛散を抑制していたことが確認された．本研究では，このようにポリウレアの内側で RC 版裏面の剥離が生じた破壊状況を内部剥離と呼ぶこととした．

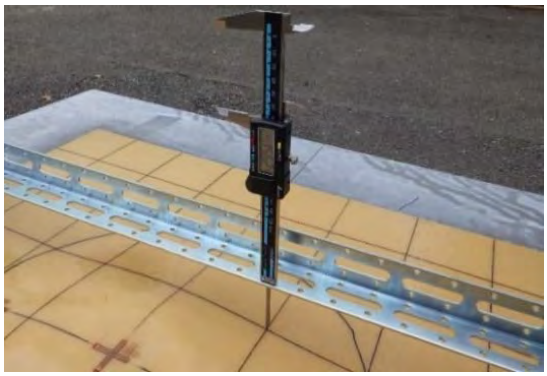
試験体断面から RP150 では貫通孔が確認され，R150 の貫通限界同様の破壊性状を示し，RP200 に関しても内部剥離が生じていることから R200 同様の RC 版部の裏面が剥離する破壊性状を示していた．ゆえに，ポリウレアの衝突裏面への吹付は，裏面の剥離片飛散抑制が可能である一方で，局部破壊を低減する補強効果は小さいことが確認された．これは，ポリウレアは剛性が小さく，補強としての効果が小さいためと考えられる．



写真－3　ポリウレアの隆起状況

表－4　試験後のポリウレアの形状データ

ケース名	最大残留隆起高さ(mm)	衝突時の隆起高さ(mm)	最大残留伸び率(%)
RP150	21	約60	2
RP200	10	約25	2



写真－4　残留隆起高さの計測状況

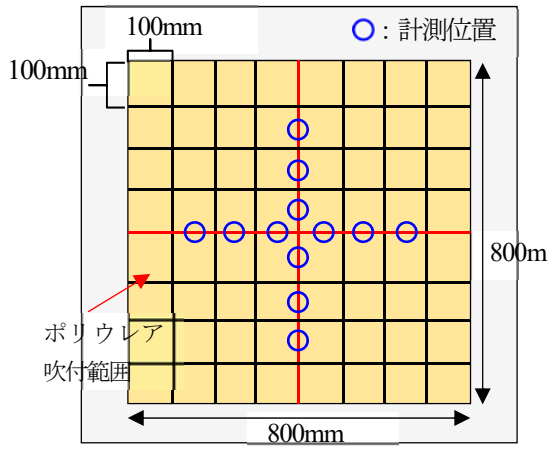
貫入深さに関しては R150，RP150 は貫通孔が生じたため，計測ができなかった．一方で，R200 は 63.8mm，RP200 は 58.8mm であり，ポリウレアの吹付けによる貫入深さの大きな変化は確認されなかった．

残留接着面積割合は，RP150 で 26.2%，RP200 で 29.5%となり，この面積のポリウレアと RC 版の接着により，ポリウレア層の剥離が抑制され，裏面の剥離片の飛散が抑制されていた．

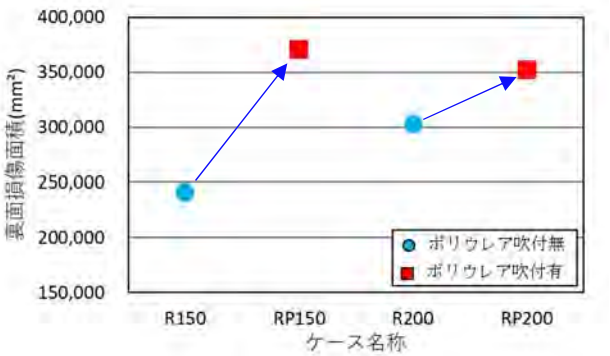
3.2　ポリウレアの衝突後形状

写真－3 に RP150 の側面写真を示す．衝突裏面中央部を中心にポリウレアが隆起しているのを確認することができる．

表－4 に衝突実験後のポリウレアの形状データを示す．ここで，最大残留隆起高さは，写真－4 に示すように，実験後にポリウレアの吹付面からの隆起している高さを一定高さからデジタルノギスで計測することで算出した．衝突時の隆起高さは衝突側面から撮影していた高速度カメラの映像から求めた．残留伸び率は，図－4 に示すように，事前にポリウレアに 100mm 間隔のメッシュを描き，衝突実験後に中央部を交差する 2 直線状のメッシュ長さを計



図―4　ポリウレア吹付版の伸び率計測位置



図―5　各試験ケースの裏面損傷面積

測し，次式を用いて各メッシュで算出した．

$$x = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \qquad (1)$$

ここに，xは残留伸び率，L_0は衝突前のメッシュ長さ(100mm)，L_1は衝突後のメッシュ長さ(mm) である．最大残留伸び率は，算出した残留伸び率の中で最大のものを示す．

隆起高さに関しては，RP150 が RP200 に比べて大きな値を計測した．これは，RP150 には貫通孔が生じ，RP200 よりも損傷が激しかったためと考えられる．また，RP150 と RP200 で最大残留隆起高さが異なるものの，最大残留伸び率が同一であるのは，隆起形状が異なることと，最大残留隆起高さの大きい RP150 は接着切れ面積も RP200 より大きく，伸び率が分散されたためと考えられる．

図―5 に各試験ケースの裏面損傷面積の比較を示す．厚さ 150mm，200mm での実験はいずれも，裏面損傷面積がポリウレアを吹付けたケースの方が大きかった．これは，ポリウレア吹付版に関しては衝突時に裏面の剥離片がポリウレアを隆起させ，ポリウレアと接着を保っていた RC 版の剥離発生箇所端部の脆弱部がポリウレアの隆起とともに剥がれたためと考えられる．

4. まとめ

本研究は，RC 版に対するポリウレアの耐衝撃性向上効果について衝突実験によって検討したものである．本研究で得られた知見を以下に示す．

1) 同じ実験条件において，RC 版では裏面剥離が生じた一方で，ポリウレア吹付版でも RC 版部裏面では剥離が生じたが，ポリウレアによる剥離片の飛散抑制効果が認められた．
2) RC 版と比較すると，ポリウレア吹付版は裏面の剥離片の飛散は抑制していたが，裏面損傷面積が大きい傾向にあった．
3) 本実験で実施した 2 体のポリウレア吹付版は，ポリウレア吹付面積における接着が保持されている面積の割合が，いずれも 30%程度であり，この面積におけるポリウレアと RC 版の接着により，ポリウレア層が剥離するのを抑制していた．

参考文献

1) 別府万寿博，上野裕稔：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート板の損傷に関する基礎的考察，防衛大学校理工学研究報告，第 52 巻，第 2 号，pp.21-30，2015 ．
2) 清敦俊，清原千鶴，別府万寿博，小澤満津雄：爆轟を受けた鉄筋コンクリート部材の耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol40，pp.555-560，2018.
3) 足立国明，原木大輔，香月智，福井秀平：樹脂補強コンクリート供試体の飛散片抑止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，pp.847-852，2008.
4) 電力中央研究所:飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計法，電力中央研究所報告，総合報告 U24，1991.
5) 三輪幸治:剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離の発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究，防衛大学校理工学研究科後期課程卒業論文，p95-116，2011.

SIFCON の接触爆発に対する耐爆性能とそれを用いた積層型耐爆構造部材の開発

BLAST RESISTANCE OF SIFCON AGAINST CONTACT DETONATION AND
DEVELOPMENT OF LAMINATED BLAST-RESISTANT MEMBERS USING SIFCON

森島慎太郎*，山口　信**，渋谷颯志郎***，兼安真司****，居石鉄兵****，倉重　聡****
MORISHIMA Shintaro, YAMAGUCHI Makoto, SHIBUYA Soshiro,
KANEYASU Shinji, SUEISHI Teppei and KURASHIGE Sou

* 修(工) 熊本大学 博士後期課程 大学院自然科学教育部（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
** 博(工) 熊本大学 助教 大学院先端科学研究部（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
*** 熊本大学 博士前期課程 大学院自然科学教育部（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
**** 日鉄高炉セメント(株) SL 事業部 技術グループ（〒803-0801 福岡県北九州市小倉北区西港町 16）

キーワード：スラリー充填繊維コンクリート，鉄筋コンクリート，積層構造，接触爆発，局部破壊
（*Slurry infiltrated fiber concrete, Reinforced concrete, Layered structure, Contact detonation, Local failure*）

1. はじめに

繊維補強セメント複合材料（以下，FRCC と略記）の靭性（エネルギー吸収能力）を向上させるためには，補強用繊維のアスペクト比（繊維の直径に対する長さの比率）を大きくすることや，繊維体積率を高くすることが必要である．しかし，これらの因子はフレッシュ時のコンシステンシーを著しく増大させるため，繊維体積率に関して言えば，その上限値は 3%程度とされるのが一般的である．一方，予め型枠中に繊維を敷き詰め，その間隙にグラウト材を充填して製造するスラリー充填繊維コンクリート（以下，SIFCON と略記）であれば，繊維形状によっては 10%を超える高い繊維体積率を確保できることが示されている [1]．

著者らはこれまでに，(i) 繊維間隙に充填可能な細骨材含有グラウト材の調合を開発するとともに，これを適用した SIFCON がペーストマトリックスによるものと同等の耐爆性能を有すること [2]，(ii) 鋼繊維 5 種類，合成繊維 4 種類の計 9 種類の繊維の中で，特に細径真直鋼繊維（φ0.2×13mm）を用いた SIFCON が良好な耐爆性能を有すること [3]等を明らかにした．

本報では，上記のグラウト材および細径真直鋼繊維を用いた SIFCON を対象に，爆薬量を 5 水準で変化させて接触爆発試験を行い，SIFCON の適用による鉄筋コンクリート（以下，RC と略記）版のスポール限界低減効率について考察した（シリーズ 1）．また，スポール発生が想定される裏面側を SIFCON で，爆発面側をプレパックドコンクリート（以下，PPC と略記）で構成したシームレスな積層型耐爆構造版の接触爆発に対する耐爆性能についても実験的検討を行った（シリーズ 2）．

2. 実験方法

2.1 使用材料および調合

表－1 に使用材料を示す．グラウト材には，結合材として早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末（6000 ブレーン品）を用い，細骨材として珪砂 8 号を用いた．補強用繊維として，SIFCON の良好なスポール抑止性能を得る上で適切と判断された細径真直鋼繊維 [3]を用いた．なお，SIFCON の繊維体積率は 10.0%とした．PPC 用の粗骨材としては砕石 6 号を用いた．グラウト材の使用調合は**表－2** に示す通り，水結合材比 35%，砂結合材比 40%とした．

表－1　使用材料

グラウト材	セメント	早強ポルトランドセメント
	混和材料	高炉スラグ微粉末（6000 ブレーン品）
	細骨材	珪砂 8 号 密度：2.40g/cm^3，粒径：0.3mm 以下
	化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤 メチルセルロース系増粘剤 ポリエーテル系消泡剤
補強用繊維	細径真直鋼繊維 密度：7.85g/cm^3，直径×長さ：0.2×13mm， 引張強度：2000MPa，引張弾性率：205GPa	
粗骨材	砕石 6 号 表乾密度：3.00g/cm^3，絶乾密度：2.98g/cm^3 吸水率：0.61%，最大寸法：15mm，実績率：59.4%	

表－2　グラウト材の使用調合

ID	*W/B* (%)	*W/P* (%)	*Sg/B* (%)	*S/B* (%)	単位量 (g/20 kg 缶)			
					W	*C*	*Sg*	*S*
S8-0.4	35	25	50	40	5000	7150	7150	5700

注）*W/B*：水結合材比，*W/P*：水粉体比，*Sg/B*：高炉スラグ微粉末によるセメント置換率，*S/B*：砂結合材比，*P*(=*C*+*Sg*+*S*)：粉体，*B*(=*C*+*Sg*)：結合材，*W*：水，*C*：セメント，*Sg*：高炉スラグ微粉末，*S*:細骨材．

2.2　製造方法

グラウト材の充填に先立ち，所定量の繊維および粗骨材を量り取り，型枠中にプレパックした．グラウト材の混練には高速ハンドミキサ（回転数 1100rpm）を用いて，粉体，水および化学混和剤を一括して 4 分間練り混ぜた後，5 分間練り置きした．その後，上面からの流し込みによりグラウト材を注入した．なお，グラウト材の繊維間隙への充填は，型枠への加振等は行わず，グラウト材の自重のみにより行った．**写真－1** に SIFCON の製造状況の一例を示す．

2.3　グラウト材単体，SIFCON および PPC の素材特性

表－3 グラウト材単体の特性試験結果を，**表－4** に SIFCON および PPC の特性試験結果をそれぞれ示す．

本繊維の間隙に充填可能なグラウト材の 0 打フロー値（JIS コーン使用）は 380 程度以上であることが確認されており [3]，それを満足する良好な流動性が得られていることが判る．なお，ブリーディングや沈降は一切認められなかった．各シリーズの SIFCON および PPC において，グラウト材の充填率（理論密度に対する実測密度の比）については 99%以上の良好な充填性が確認された．

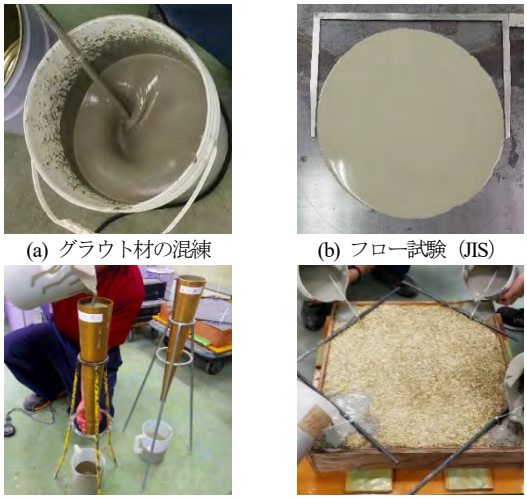
また，SIFCON の圧縮強度は 198MPa とグラウト材単体に比してかなり高くなっているが，PPC の圧縮強度は 36.6MPa と逆に大きく低下している．SIFCON では多量の鋼繊維の横拘束効果により圧縮強度が増大するが，PPC ではその効果が期待できず，尚且つ粗骨材同士が接触しているために粗骨材－グラウト材界面に生じた付着ひび割れが連結し易くなっているためであると推察される．ここで，曲げ靭性は繊維補強により最も顕著に改善される力学特性であるが，シリーズ 1 および 2 で用いた SIFCON の曲げ靭性係数はそれぞれ，40.6MPa および 33.4MPa であり，良好な曲げ靭性を有していることが確認される．

2.4　試験体

図－1 および **2** に各シリーズにおける試験体の形状，寸法および配筋をそれぞれ示す．試験体は 500mm 四方，厚さ 80mm の平板とした．すべての試験体は材齢 28 日目まで標準養生後，試験時まで 2 週間気中養生とした．

シリーズ 1 では，鉄筋と SIFCON との複合効果についても調べるため，縦横の間隔 120mm の格子鉄筋を版厚中央に 1 層のみ配したケース（シングル配筋）と，上端と下端の両方に配したケース（ダブル配筋）について検討した．

シリーズ 2 では，版の総厚が 80mm 一定の条件下で，裏面側の SIFCON 層の厚さを 0(無補強), 20, 40, 60 および 80(全体補強)mm の 5 水準で変化させた．その製造にあたっては，最初に所定量の厚さになるように鋼繊維をプレパックした後，その上から型枠上端まで粗骨材を詰め，その



(a) グラウト材の混練　(b) フロー試験（JIS）　(c) JP, J14 漏斗試験　(d) 繊維間隙へのｸﾞﾗｳﾄ材の充填

写真－1　SIFCON の製造状況の一例

表－3　グラウト材単体の特性試験結果

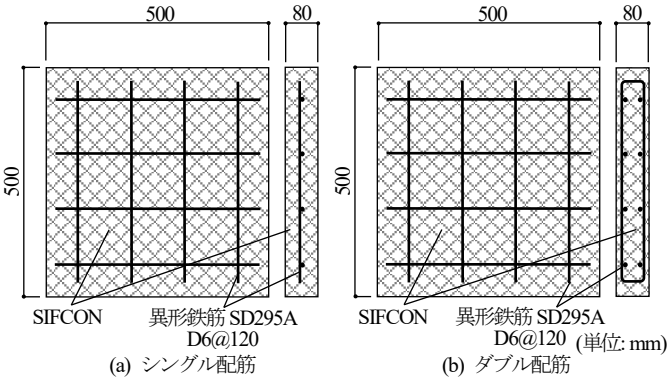
	T (℃)	$J14$ (s)	JP (s)	$Flow$ (JASS)	$Flow$ (JIS)	M (g/cm^3)	γ (kN/m^3)	σ_B (MPa)
ｼﾘｰｽﾞ 1	25.1	10.8	18.1	332	399	2.084	20.9	87.0
ｼﾘｰｽﾞ 2	24.9	13.8	20.8	331	397	2.077	20.7	97.8

注）T：練り上がり温度，$J14$：J14 漏斗流下時間，JP：JP 漏斗流下時間，$Flow$：0 打フロー値，M；フレッシュ時における単位容積質量，γ：硬化後の気乾単位体積重量，σ_B：圧縮強度．圧縮特性は ϕ50×100mm 円柱供試体により測定した．

表－4　SIFCON および PPC の特性試験結果

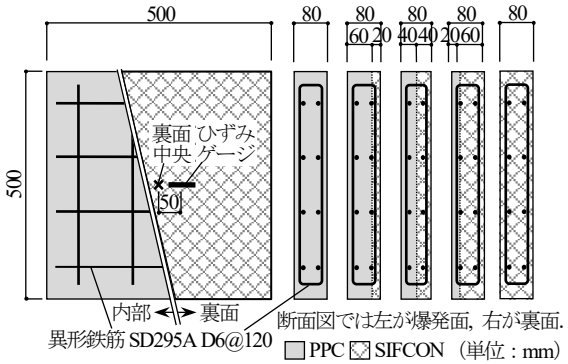
種類	F_g (%)	γ (kN/m^3)	σ_B (MPa)	E (GPa)	σ_f (MPa)	$\overline{\sigma_b}$ (MPa)
SIFCON (ｼﾘｰｽﾞ 1)	99.7	26.2	181	20.6	57.6	40.6
SIFCON (ｼﾘｰｽﾞ 2)	99.8	26.1	198	17.9	49.2	33.4
PPC (ｼﾘｰｽﾞ 2)	100	25.8	36.6	26.3	—	—

注）F_g：グラウト充填率，γ：気乾単位体積重量，σ_B：圧縮強度，E：ヤング係数，σ_f：曲げ強度，$\overline{\sigma_b}$：曲げ靭性係数．圧縮特性は ϕ100×200mm 円柱供試体，曲げ特性は 100×100×400mm 角柱供試体（載荷形式はスパン長 300mm の中央 3 点曲げ）により測定した．また，$\overline{\sigma_b}$ 算出にあたっての基準変位は 4.0mm とした．



(a) シングル配筋　(b) ダブル配筋

図－1　試験体の形状，寸法および配筋（シリーズ 1）



図－2　試験体の形状，寸法および配筋（シリーズ 2）

全層に上面からの流し込みによりグラウト材を充填した．また，これら試験体では，PPC 層と SIFCON 層とを機械的に接合することを目的にダブル配筋を採用した．なお，裏面の変形性状を調べるため，裏面中央から 50mm 離れた位置に検長 60mm のひずみゲージを貼付した．

2.5　接触爆発試験方法

試験体は，**図－3** に示すように 2 本の木製台座上に内法スパン 410mm となるように設置し，その上面中央で 6 号電気雷管を用いて SEP 爆薬を起爆させた．爆薬の形状は直径と高さが等しい円柱形とした．爆薬量について，シリーズ 1 では 130, 140, 150, 160 および 170g の 5 水準，シリーズ 2 では 140 および 170g の 2 水準とした．

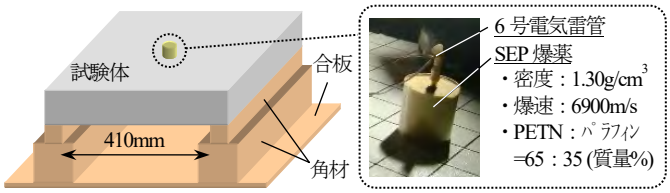
ここで，森下ら[4]は，普通 RC 版のスポールおよび貫通限界が下式で表せることを明らかにしている．

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \begin{cases} 3.6\ \mathrm{cm/g^{1/3}}; \text{スポール限界} \\ 2.0\ \mathrm{cm/g^{1/3}}; \text{貫通限界} \end{cases} \qquad (1)$$

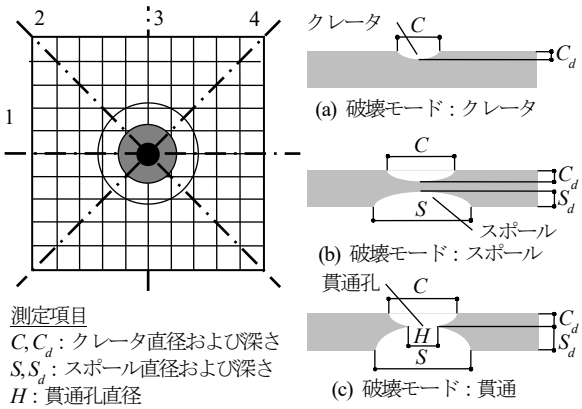
ここに，T : RC 版厚（cm），W_m : 爆薬のトリニトロトルエン等価質量（g）である．本実験条件の範囲は W=130～170g であり，これに対応する換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ を式(1)によって求めると，1.52～1.66cm/g$^{1/3}$ の範囲内にあることから，いずれも普通 RC 版であれば破壊モードが貫通となる条件であることが判る．

2.6　損傷評価方法

試験終了後，**図－4** に示す局部破壊寸法を測定した．クレータおよびスポールの直径は，形状が非対称となるために図中に示す直線 1～4 に沿って 4 箇所測定し，その平均値とした．クレータおよびスポールの深さはそれぞれ爆発面および裏面から最深部までの距離とした．その後，図中に示す直線 1 に沿って試験体を切断し，内部損傷状況を観察した．

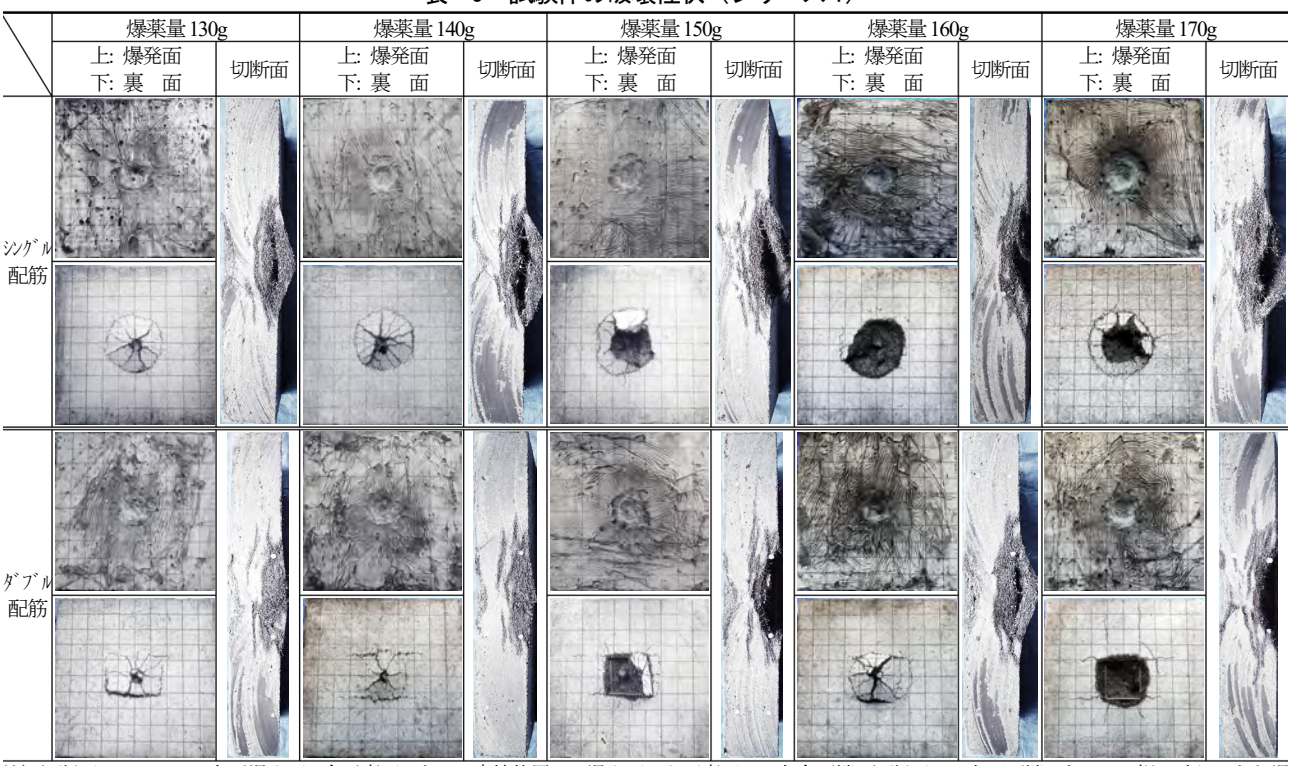


図－3　接触爆発試験方法



図－4　局部破壊寸法の定義

表－5　試験体の破壊性状（シリーズ 1）



注）切断面においては，左が爆発面，右が裏面である．支持位置は，爆発面および裏面では左右両端，切断面では上下両端である．目視で確認できた爆発面および裏面のひび割れは強調して示している．

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ1

3.1.1 破壊性状

表−5 にシリーズ 1 における試験体の破壊性状を示す．全ての試験体で，爆発面の爆薬直下に椀型のクレータが生じた．クレータの外周部には，ひび割れ等の目立った損傷は認められなかった．

裏面の損傷に関して，爆薬量が 130 および 140g の場合と，150g 以上の場合とに分類して以下に考察する．

(1) 爆薬量 130 および 140g の場合

シングル配筋試験体では，爆薬直下を中心とする円形の浮きが裏面に発生している様相が確認されるが，いずれの爆薬量においても，飛散片の発生は充分に抑止された状態にあった．なお，これら試験体の切断面を見ると，スポール破壊面を形成するひび割れが大きく開口しており，その傾向は爆薬量 140g において顕著である．このことから，版厚 80mm かつシングル配筋の SIFCON 版においてスポール限界となる爆薬量は 140g であると考えられる．

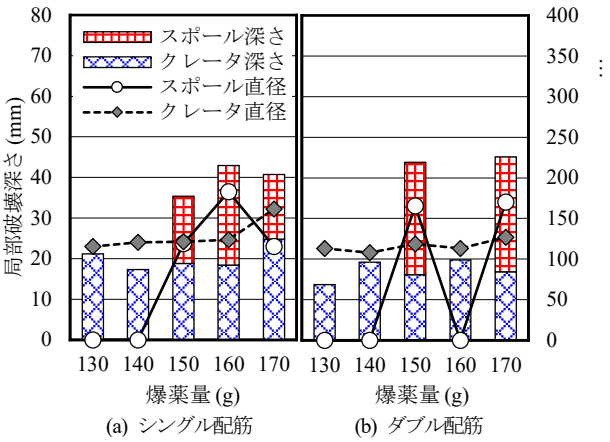
一方，ダブル配筋試験体では，いずれの爆薬量においてもスポールは抑止されたが，裏面の損傷状況はシングル配筋の場合とやや異なっている．すなわち，爆薬直下近傍で下端筋に沿う付着割裂ひび割れの発生が認められるとともに，スポール破壊部の膨らみの程度はシングル配筋の場合と比べてかなり小さくなっている．また，切断面を見ると，スポール破壊面を形成するひび割れはシングル配筋の場合ほど大きく開口していない．以上のことから，裏面近傍に配した鉄筋が，スポール破壊片の面外方向への変形を抑制していた可能性が考えられる．

(2) 爆薬量 150g 以上の場合

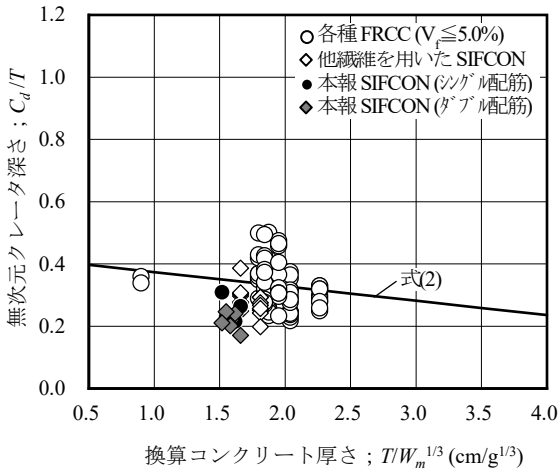
爆薬量が 150g 以上になると，シングル配筋試験体では裏面に円形に近い形状のスポールが生じた．また，切断面を見るとスポール破壊面に沿うようにひび割れが多数発生している様相が認められ，このことは，スポール破壊が圧縮応力波と引張応力波の干渉作用により内部へ向けて断続的に進行する破壊現象であることを示唆している．

一方，ダブル配筋試験体では，爆薬量 150 および 170g においてスポールが生じたが，160g では爆薬直下に膨らみは生じたものの破片は飛散に至っていない．このようなばらつきが生じた理由として，下端筋が配されたことにより裏面近傍の繊維の配向状態に変動が生じた可能性が考えられる．よって，安全側の評価とするならば，厚さ 80mm の SIFCON 版では配筋に関わらず爆薬量 140g（$T/W_m^{1/3}$ =1.62cm/g$^{1/3}$）をスポール限界と見做すのが妥当であると思われる．なお，爆薬量 150 および 170g において生じたスポールは四角形に近い形状を呈しており，これは，引張応力波により生じたひび割れと付着割裂ひび割れとが連結することで，下端筋に沿うようにスポールが生じたためであると推察される．

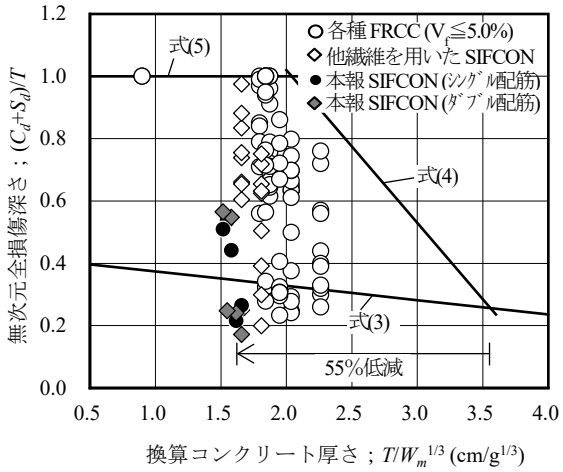
3.1.2 局部破壊寸法



図−5 局部破壊寸法の測定値（シリーズ 1）



図−6 換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さ



図−7 換算コンクリート厚さで整理した全損傷深さ

図−5 に爆薬量と局部破壊寸法との関係を示す．

クレータ直径については，ダブル配筋試験体において，シングル配筋試験体に比べて若干ではあるが低減される傾向にある．なお，クレータ深さに及ぼす爆薬量および配筋の明確な影響は認められなかった．

スポール直径および深さに関して，上述の通り配筋に関わらず爆薬量 150g 以上においてスポールが発生しているが，スポールが生じた試験体においてはダブル配筋の方で

シングル配筋よりもスポール直径および深さが大きくなる傾向にあった．すなわち，ダブル配筋としてもスポール限界がほとんど変化しないだけでなく，スポールが生じた場合にはシングル配筋の場合に比してその規模が拡大する可能性がある点には注意する必要があると考えられる．

3.1.3　普通RC版を対象とした損傷深さ評価式との対応

図－6および7にクレータ深さおよび全損傷深さを換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ で整理した結果を示す．なお，同図中には，普通RC版を対象とした以下の損傷評価式[4]による計算値を併記している．

$$\frac{C_d}{T} = -0.046\frac{T}{W_m^{1/3}} + 0.42 \tag{2}$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = \frac{C_d}{T} \quad \left(3.6 < \frac{T}{W_m^{1/3}}\right) \tag{3}$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = -0.49\frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0 \quad \left(2.0 \le \frac{T}{W_m^{1/3}} < 3.6\right) \tag{4}$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.0 \quad \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \le 2.0\right) \tag{5}$$

また，これらの図中には，混練時に繊維を分散混入した一般的な繊維体積率（5.0%以下）のFRCC[5-7]と他の繊維を使用したSIFCON[3]に関する実験データも併記している．

図－6より，SIFCONを除くFRCCのクレータ深さは式による計算値と平均的によく一致していることが判る．これに対し，本実験データを含むSIFCONのクレータ深さは，式による計算値よりも全体的にやや小さくなる傾向にあった．その理由として，多量の繊維を含有するSIFCONにあっては，それら繊維の拘束効果によりクレータ底部の脆弱化が低減される傾向にあるものと推察される．

図－7においては，$T/W_m^{1/3}$ が小さい場合においても無次元化された全損傷深さが小さく抑えられているものほど耐爆性能に優れていることになるが，細径真直鋼繊維を用いたSIFCONはこれまでに検討対象としてきた各種FRCCおよびSIFCONと比較して最も良好な耐爆性能を有していることが明らかである．また，普通RC版においてスポール限界となる $T/W_m^{1/3}$ は3.6cm/g$^{1/3}$であるが，本実験で検討対象としたSIFCONのスポール限界は配筋に関わらず1.62cm/g$^{1/3}$となる．すなわち，本材料を適用することにより，RC版でスポール限界となる $T/W_m^{1/3}$ を約55%低減できることが明らかである．

3.2　シリーズ2

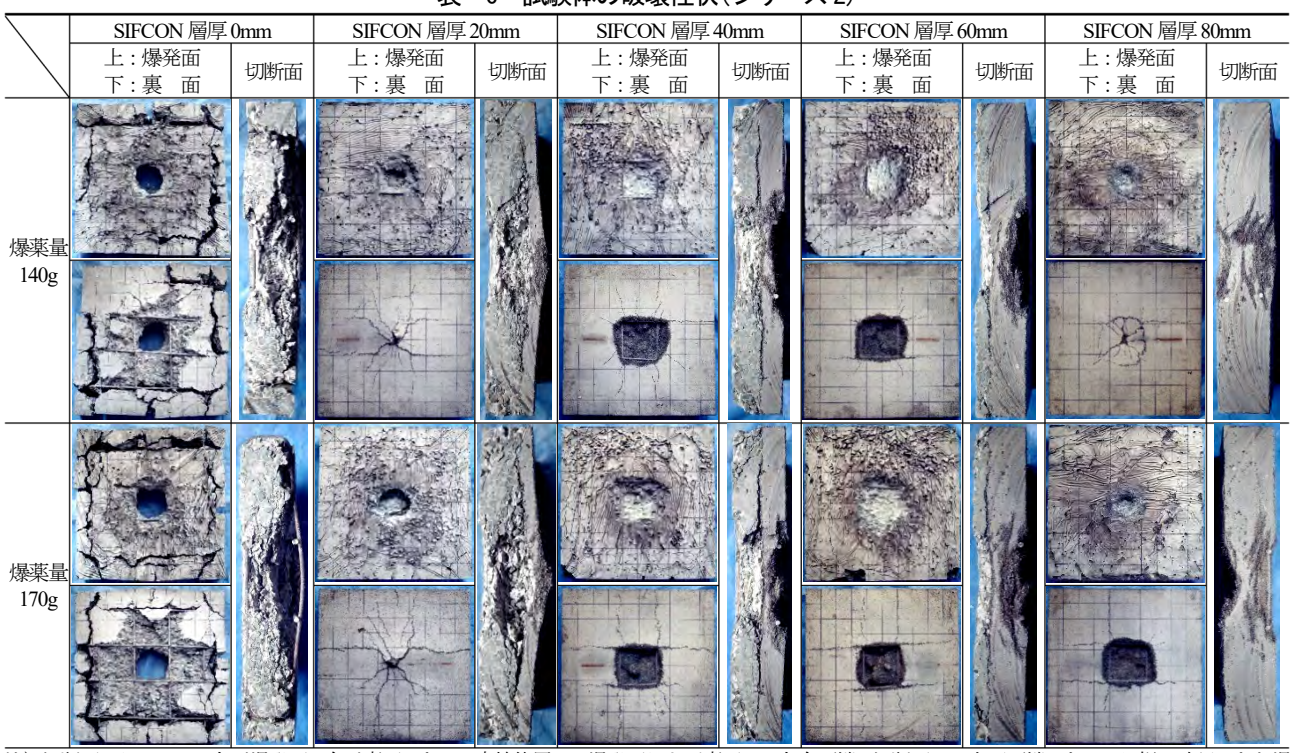
3.2.1　破壊性状

表－6に試験体の破壊性状を示す．

無補強の試験体では，爆薬量140, 170gともに完全な貫通が生じた．また，発生したスポールは円錐台形状ではなく，その底面がややいびつな形状となっている．その理由として，スポール破壊に伴い生じた破片の飛散圧により下端筋が面外方向へとはらみ出し，これにより裏面側の一部のPPCが押出された可能性が考えられる．

SIFCON層厚が20mm以上の試験体においては，それが

表－6　試験体の破壊性状（シリーズ2）



注）切断面においては，左が爆発面，右が裏面である．支持位置は，爆発面および裏面では左右両端，切断面では上下両端である．目視で確認できた爆発面および裏面のひび割れは強調して示している．

20mm の試験体と 40mm 以上の試験体とでスポール発生状況が以下のように異なっている.

(1) SIFCON 層厚が 40mm 以上の試験体

これら試験体の破壊モードはいわゆるスポール破壊モードであり, 裏面には下端筋に沿うようにスポールが生じている. 但し, 爆薬量 140g であれば, 全体補強試験体においては爆薬直下を中心とした円形の浮きが見られた程度で, スポールは抑止された状態にあった.

(2) SIFCON 層厚が 20mm の試験体

これらの試験体では, いずれの爆薬量においても PPC 層で発生したスポール破壊片が直下の SIFCON 層を押圧し, SIFCON 層には曲げたわみに類似した変形が生じていることが判る. 同時に, PPC 層で発生した斜めひび割れは SIFCON 層を貫通することなく, 途中から接合界面に沿って幅方向に進行している. なお, PPC 層に発生したスポール破壊の規模は無補強試験体とほぼ同規模であるが, SIFCON 層が貫通を免れたために, スポール破壊片は試験体内部に停留した状態となっている. また, SIFCON 層には, 爆薬直下の裏面近傍にごく僅かにスポール破壊が見られた程度である.

これらのことから, 裏面側の SIFCON 層を薄くすることは, SIFCON 層の破壊モードをスポール破壊モードから曲げ破壊モードへと変化させ, PPC 層で生じたスポール破壊片を捕縛する上で有効であると考えられる.

3.2.2 局部破壊寸法

図―8 に局部破壊寸法の測定値を示す.

上述の通り, 爆薬量 140g では SIFCON 層厚 40 および 60mm で, 爆薬量 170g では 40mm 以上でそれぞれスポールが生じたが, その場合もスポールの規模は無補強試験体と比べて顕著に低減されていることが判る. また, スポールが生じた SIFCON 積層補強試験体において, スポールの直径および深さに明確な差異は認められなかった.

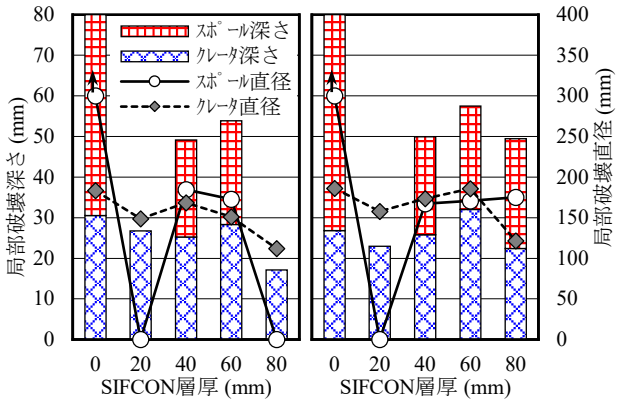
3.2.3 裏面のひずみ応答

図―9 に, 爆薬量 170g における試験体裏面のひずみ履歴を示す. なお, SIFCON 層厚 60mm の試験体については, データ取得に失敗したため未掲載としている.

無補強試験体に関して, 0.5 および 0.9ms 前後で引張ひずみがピークを迎えていることが判る. 但し, そのピーク値は 7000 μ 程度とコンクリートの引張ひずみとしては異常に大きいことから, 検長区間内に発生したひび割れの開口をひずみゲージが検出していたものと推察される.

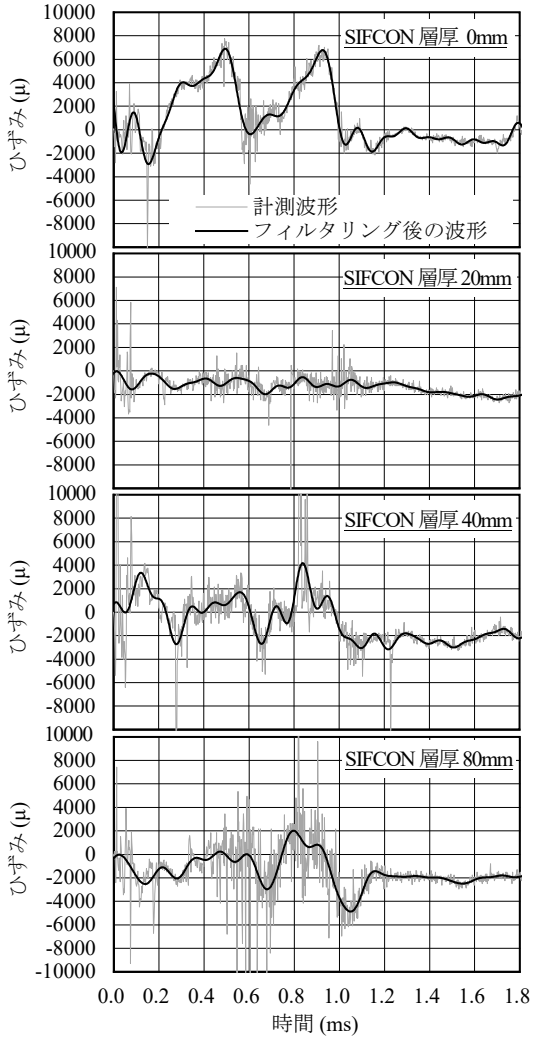
SIFCON 層厚が 40 および 80mm の試験体においては, ひずみの増減が数回繰返された後, 0.8～0.9ms 前後で引張ひずみがピークを迎えており, この段階でスポールが発生した可能性が考えられる.

一方, SIFCON 層厚が 20mm の試験体においては, 他の試験体のような引張ひずみがほとんど生じておらず, また, 経時に伴うひずみの増減の程度も著しく小さくなっている. このことは, 同試験体において裏面側の SIFCON 層が応力波伝播の影響をさほど強く受けていないことを示唆



注) 矢印は, 測定不能となったために仮に 300mm としていることを示す.

図―8 局部破壊寸法の測定値（シリーズ 2）



図―9 爆薬量 170g における裏面のひずみ履歴

しているものと考えられる.

3.2.4 SIFCON 積層によるスポール抑止メカニズムの考察

以上の結果より, SIFSON 層厚 20mm の試験体においては, 他と異なるメカニズムによりスポールが抑止された可能性が考えられる. そこで, 本問題を**図―10** に示す簡易な一次元波動モデルに置き換え, 先端に厚さ x の SIFCON 層を有する PPC 棒の中を, 波長λ, 強さσ_i の圧縮応力波が

伝播する場合について考察する．ある物体から別の物体へ応力波が入射する場合の物体界面における反射率α および透過率β は，各材料固有のインピーダンス z（$=\rho c=\rho\sqrt{E/\rho}$，$\rho$：密度，$c$：応力波速度，$E$：ヤング係数）を用い，下式により算出される．

$$\alpha=\frac{\sigma_r}{\sigma_i}=\frac{A_2z_2-A_1z_1}{A_1z_1+A_2z_2} \tag{6}$$

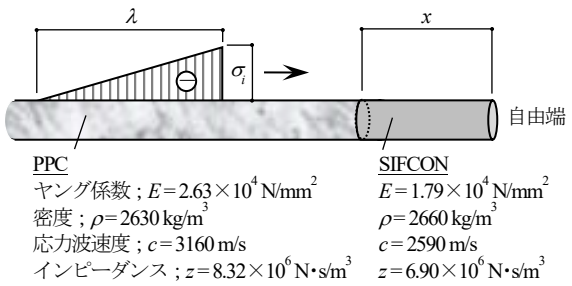
$$\beta=\frac{\sigma_t}{\sigma_i}=\frac{2A_1z_2}{A_1z_1+A_2z_2} \tag{7}$$

ここに，σ_i：入射応力，σ_r：反射応力，σ_t：透過応力，A_1，A_2：物体 1,2 の断面積，z_1, z_2：物体 1,2 のインピーダンスである．本問題では $A_1=A_2$ であることを考慮した上で，PPC-SIFCON 界面におけるαおよびβを算出した結果，応力波がPPCからSIFCONへ入射する場合の透過率は91%，その逆は109%となり，完全透過に近い問題であることが判る．従って，材料界面における応力波の増減により上述のような破壊モードの変化が生じたとは考えにくい．

一方，**表−7** に一次元波動モデルにおける応力波伝播挙動を示す．なお，同表中では，考察を容易にするため，材料界面における透過率を 100%と見做し，PPC および SIFCON の応力波速度は等しいものと仮定している．PPC 層から SIFCON 層へと入射した圧縮応力波は，自由端において逆位相の引張応力波となって反射するが，自由端近傍では圧縮応力波と引張応力波とが干渉し合うために，合成波の引張応力は自由端よりもやや内側で最大となる．従って，**図−11** に示すように，x がλ の 1/2 以下であれば，SIFCON 層に発生する引張応力は x の減少に伴って低減されることになる．

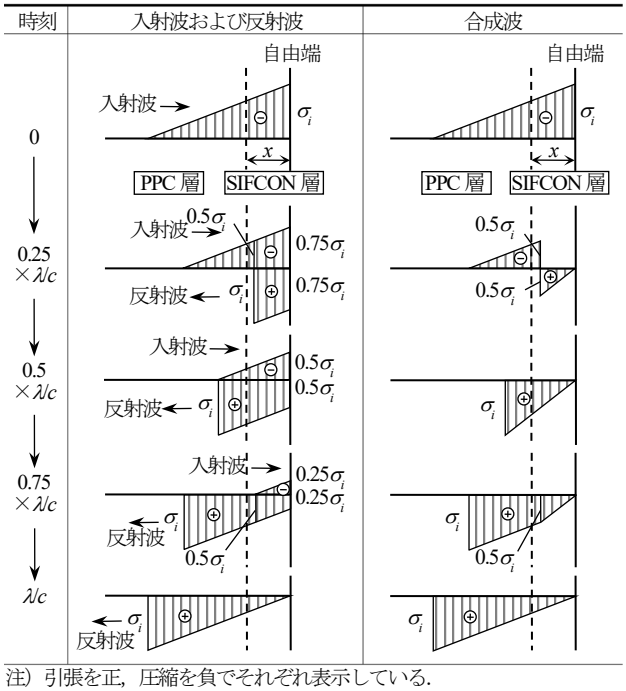
この場合，引張応力のピークは PPC 層で生じるため，PPC 層内で甚大なスポール破壊が生じることになる．しかし，SIFCON 層の曲げ靭性が高いために，PPC 層で発生したスポール破壊片の運動エネルギーは SIFCON 層のたわみ変形により吸収されると考えられる．さらに，SIFCON 層のせん断抵抗が PPC のそれに比して大きいために，PPC 層でスポール破壊に伴い生じた斜めひび割れは SIFCON 層を貫通せず，途中から材料界面に沿って進行すると考えられる．つまり，**図−12** に示すメカニズムによりスポールが良好に抑止された可能性が推察される．

ここで，爆薬量 140g のケースでは，SIFCON 層厚が 20 および 80mm の試験体でスポールが抑止されたが，このことは，良好な耐爆性能を得る上で ① SIFCON 自体のスポール破壊低減効果（SIFCON 層厚 80mm）と，② SIFCON 層が PPC 層で発生したスポール破壊片を捕縛する効果（SIFCON 層厚 20mm）のいずれかに期待した設計が可能であることを示唆している．しかし，爆薬量 170g になると，SIFCON 層厚 20mm の試験体では依然としてスポールが抑止されているのに対し，80mm ではスポールが生じていることから，上記②の効果に期待する方が SIFCON の

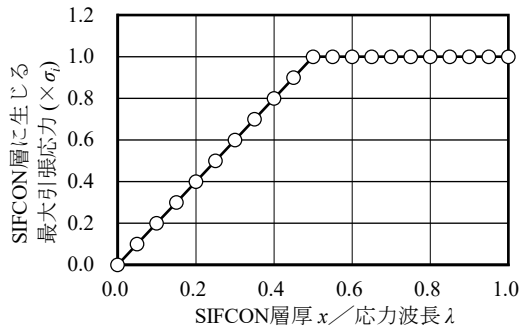


図−10　一次元波動モデル

表−7　一次元波動モデルにおける応力波の伝播挙動

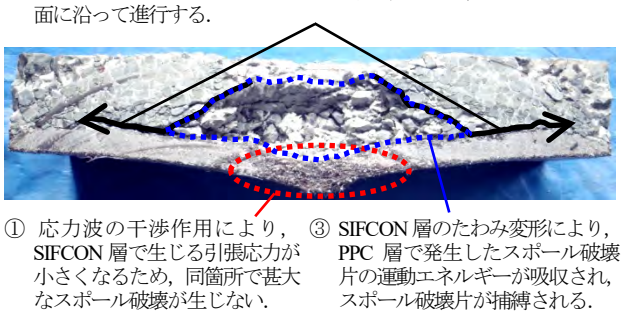


注）引張を正，圧縮を負でそれぞれ表示している．



図−11　SIFCON 層厚と SIFCON 層に生じる最大引張応力との関係

② SIFCON 層のせん断抵抗が PPC 層のそれよりも大きいため，PPC 層で発生した斜めひび割れが SIFCON 層を貫通せず，途中から接合界面に沿って進行する．



① 応力波の干渉作用により，SIFCON 層で生じる引張応力が小さくなるため，同箇所で甚大なスポール破壊が生じない．

③ SIFCON 層のたわみ変形により，PPC 層で発生したスポール破壊片の運動エネルギーが吸収され，スポール破壊片が捕縛される．

図−12　SIFCON 積層によるスポール抑止メカニズムの模式図

良好な曲げ靭性を活かした効果的な耐爆設計が可能になるものと思われる.

なお，普通 RC 版でスポール限界となる $T/W_m^{1/3}$ は 3.6cm/g$^{1/3}$ であるから [4]，爆薬量 170g に対する普通 RC 版のスポール限界版厚は 190mm となる. 従って, 厚さ 20mm の SIFCON 層は厚さ 130（=190 - (80 - 20) ）mm 以上の普通コンクリートと等価な耐爆効果を有しており, この時の版厚の低減効率は 85%以上となる．一方，3. 1 節で述べた通り, SIFCON 全体補強によるスポール限界版厚低減効率は約 55%であるから, SIFCON 層にスポール破壊片を捕縛させる効果に期待する方が, 効率的に耐爆性能を向上させる上でも有用であると考えられる.

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約する.

1） 検討対象とした SIFCON において，スポール限界となる $T/W_m^{1/3}$ は 1.62cm/g$^{1/3}$ であることが判明した．従って，本材料を全面的に適用することにより，普通 RC 版でスポール限界となる $T/W_m^{1/3}$ を約 55%低減できることが明らかとなった.

2） シングル配筋試験体とダブル配筋試験体との比較から，スポール限界となる $T/W_m^{1/3}$ は配筋に関わらず 1.62cm/g$^{1/3}$ とするのが妥当であると判断された.

3） SIFCON 自体のスポール破壊低減効果よりも, PPC 層で発生するスポール破壊片を SIFCON 層に捕縛させる効果に期待する方が，SIFCON の良好な曲げ靭性を活かした効果的な耐爆設計が可能になるものと考えられた.

4） SIFCON 層厚 20mm の試験体において，厚さ 20mm の SIFCON は厚さ 130mm 以上の普通コンクリートと等価な耐爆効果を有することが確認された.

謝辞

本研究は, 熊本大学パルスパワー科学研究所より研究支援を受け, 接触爆発試験は同研究所の爆発実験室にて行われました．実験にあたり，外本和幸教授，田中茂助教，草野健技術補佐員，戸田善統技術専門職員，濵﨑ありさ技術職員ならびに熊本大学学生である Danny Triputra Setiamanah 氏，藤澤礼至氏，才田大矩氏，峯崎寛隆氏，樋口洸太郎氏より多大なご協力を頂きました．さらに，本研究は JSPS 科研費基盤研究 (C)（課題番号 : 17K06647，研究代表者 : 山口信）の助成を受けて実施されました．ここに記して謝意を表します.

参考文献

1） D. R Lankard: Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6, No.12, pp.44-47, 1984.

2） 森島慎太郎，山口信，張志成，兼安真司 : モルタル調合による高流動グラウト材を用いた SIFCON の接触爆発に対する耐爆性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.733-738，2018.

3） 山口信，森島慎太郎，兼安真司，居石鉄兵 : 接触爆発を受けるスラリー充填繊維コンクリートの耐爆性能に及ぼす繊維種類の影響，防衛施設学会平成 30 年度年次研究発表会論文集，pp.47-54，2019.

4） 森下政浩，田中秀明，伊藤孝，山口弘 : 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1787-1797，2000.

5） 山口信，村上聖，武田浩二，三井宜之 : ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能，日本建築学会構造系論文集，Vol.72, No.619, pp.187-194，2007.

6） 山口信，村上聖，武田浩二，三井宜之 : 各種繊維補強コンクリートとの耐爆性能の比較検討ーポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能ー，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.631，pp.1681-1690，2008.

7） D. T. Setiamanah, M. Yamaguchi, S. Morishima, S. Shibuya, A. Ogawa and T. Katayama: Influence of Fiber Shape and Water-Binder Ratio on Blast Resistance of PVA Fiber Reinforced Mortar, AIJ Kyushu Chapter Architectural Research Meeting, Vol.58, pp.173-176, 2019.

防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2020 年 2 月）

アラミド繊維シート補強によるＲＣ版の局部破壊抑制効果に関する実験的研究

Experimental study on mitigation effects by aramid fiber sheets reinforcement on the local damage of RC slab

清田翔吾*，別府万寿博**，市野宏嘉***，佐藤和幸****
Shogo Kiyota, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino, Kazuyuki Sato

*防衛大学校，理工学研究科前期課程（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
**博（工），防衛大学校教授，建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
***博（工），防衛大学校准教授，建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
****前田工繊株式会社（〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル A 館 12F）

キーワード：裏面剥離，アラミド繊維シート，RC 版，飛来物衝突
(scabbing, aramid fiber sheet, RC slab, projectile impact)

1. 緒言

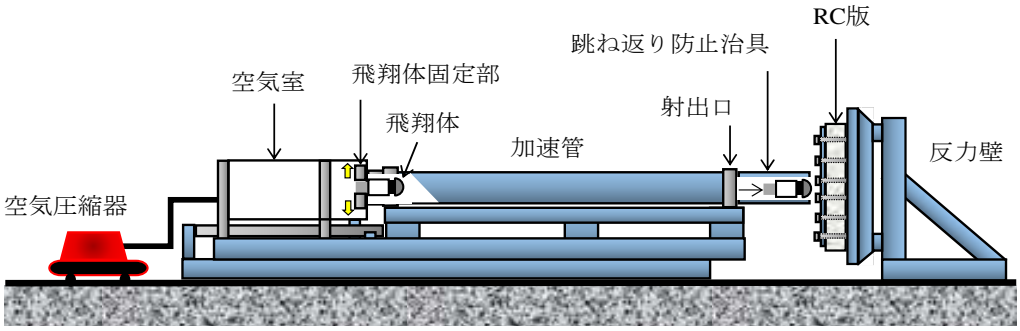
近年，気候変動や地殻変動などの影響を受けて竜巻や火山噴火が増加する傾向にあり，竜巻飛来物や火山噴石が原子力発電施設などの重要構造物に衝突する事態が懸念されている [1), 2)]．例えば，2014 年に発生した御嶽山の火山噴火では，火山噴石の衝突により多くの人命が失われており，火山噴石に対する退避シェルターの設計法の確立が求められている [3)]．このような災害報告や社会的要請を受け，飛来物の衝突を想定した構造安全性の審査に関する指針類が示されている [3),4)]．なお，これらの飛来物の衝突速度は 40m/s～150m/s 程度と想定されている [3),4)]．飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート（RC）版に関する研究は多く行われており [5)-8)]，衝突速度が大きい場合には RC 版に表面破壊・貫入，裏面剥離および貫通の局部破壊が生じることが知られている．著者らは，竜巻飛来物や火山噴石の衝突速度帯においては，RC 版に局部破壊が発生することを明らかにしている [9)-11)]．火山噴石に対する補強としては，木造の山小屋に対しては屋根にアラミド等の繊維シートを，RC 退避壕（版厚 22cm～40cm 程度）に対しては内側に FRP シートを貼付する補強の概念が提案されているが [3)]，具体的な検討は行われていない．ここで，衝撃荷重を受ける RC 版に対して，繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastic，FRP）シート等を貼付する補強方法について既往の研究を概観する．三上ら [12)] は重量 2.94kN の重錘を用いて，衝突速度 6m/s 以下の重錘落下実験を行い，繊維シートを裏面に貼付して補強した RC 版の補強効果を確認している．また三輪ら [13),14)]は，質量 46g の飛翔体を用いて，衝突速度 200～300m/s の高速衝突実験を行い，繊維シートで裏面補強したコンクリート板の局部破壊に対する繊維シートの補強効果を確認している．しかし，前述した竜巻飛来物や火山噴石に相当する衝突速度帯（40m/s～150m/s）における，RC 版の破壊に対する FRP シートの補強効果について検討した例はない．

本研究は，基礎的段階として約 40～70m/s の衝突速度に対して，アラミド繊維シート補強による RC 版の局部破壊抑制効果について実験的検討を行ったものである．まず，裏面を補強していない RC 版（無補強版）に鋼製飛翔体を衝突させる実験を行い，無補強版の破壊性状を調べた．次に，目付量の異なるアラミド繊維シートを用いて裏面を補強した RC 版に対して鋼製飛翔体を衝突させる実験を行い，繊維シート補強による RC 版の局部破壊抑制効果を調べた．

2. 実験の概要

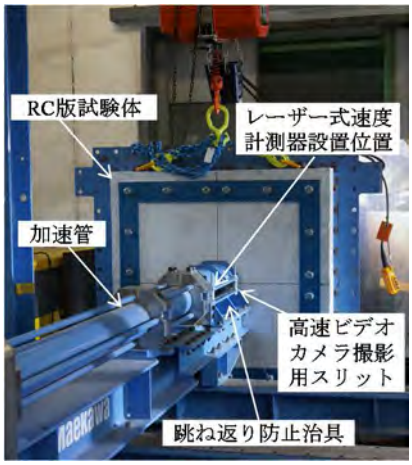
2.1 鋼製飛翔体および実験装置

実験では，図－1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いた．この装置は空気圧を調節（0.1MPa～4MPa）することで，図－2 に示す質量 8.3kg の飛翔体を 20m/s～100m/s で衝突させることが可能である．この質量 8.3kg は「原子力発電所設計の竜巻影響評価ガイド [4)]」で想定されている鋼製パイプの質量 8.4kg に相当するものである．また，火山噴石の密度を 2.5g/cm^3 とすると，直径 18cm の球形噴石の質量に相当する．飛翔体の先端形状については，直径 90mm の半球型で，先端部の材質は合金工具鋼（SKS93），胴体部には超々ジュラルミン（A7075B）を



図－1　高圧空気式飛翔体発射装置

図－2　飛翔体の寸法

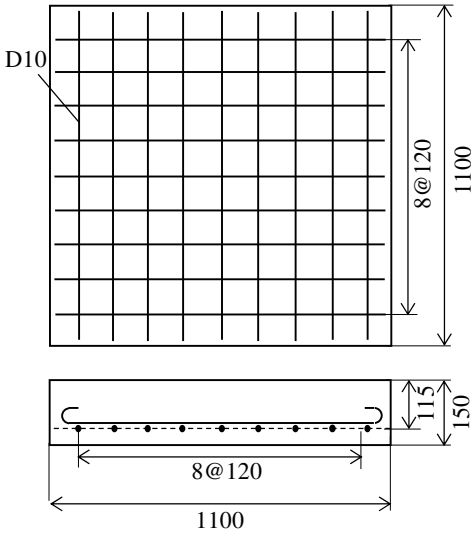


図－3　RC 版試験体の設置要領

用いた．衝突直前の飛翔体の速度については図－3 に示すように，発射装置の発射口に取り付けたレーザー式速度計測器を用いて 2 点間（10cm）の時間差を計測し，サンプリング周波数 230kHz で計測した．さらに，跳ね返り防止治具のスリットから，衝突前後における飛翔体の挙動を解像度 14 万画素（横 512×縦 272），撮影速度 100000 フレーム／秒の高速ビデオカメラにより撮影し，連続画像を解析して変位の時刻歴を算出した．また，この変位～時間関係を時間について微分することで速度を算定した．

2.2　RC 版試験体および繊維シート

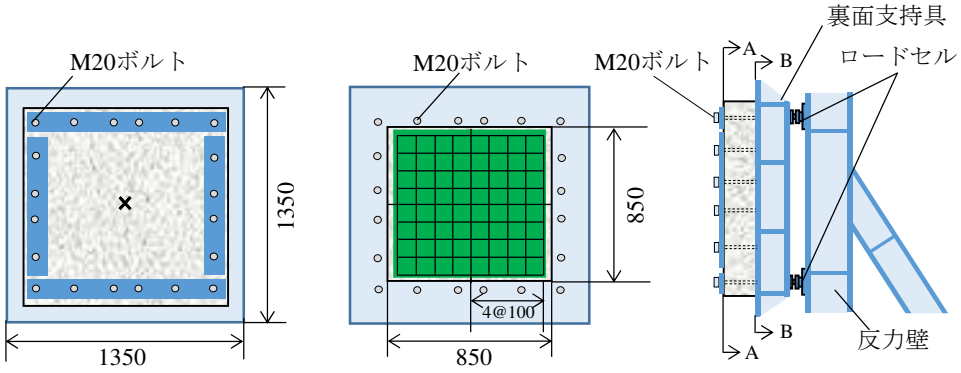
RC 版の寸法は，図－4 に示すように縦 1,100mm，横 1,100mm，厚さ 150mm とした．鉄筋比は既往の研究[11]を参考に 0.65%とし，D10 鉄筋を 2 方向の格子状に配筋した．鉄筋の両端については，定着を確保するために半円形フック状に折り曲げ加工を行った．なお，コンクリートの一軸圧縮強度の平均値は 38.5N/ mm^2 であった．図－



図－4　RC 版の寸法

5 に，RC 版試験体の設置要領を示す．RC 版は鋼製反力壁に付属されている鋼製フレームに，M20 ボルトを用いて固定した．

前述した FRP シートを用いた耐衝撃補強効果に関する実験では，炭素繊維やアラミド繊維等が用いられている[12)-14)]．本研究では，これらの材料の中で高い耐衝撃性が確認されているアラミド繊維を用いた．表－1 に，実験で用いたアラミド繊維シートの力学特性を示す．本実験に用いたアラミド繊維シートは二方向の平織である．なお，アラミド繊維の引張強度は 2060N/mm^2，破断伸びは 2%である．本実験のパラメータの一つである目付量についても既往の研究を参照して以下のように決定した．三上らの実験[12)]では，6m/s 以下の衝突速度に対して，目付量 415～435g/m^2 のアラミド繊維シートを用いて繊維シート補強の効果を検討している．三輪らは，200～300m/s の衝突速度において目付量 330～650 g/m^2 のアラミド繊維シートによる裏面剥離抑制効果を確認している[13),14)]．本研究では局部破壊を対象としているので，三輪らの研究を参考にして目付量 330g/m^2 を基準とした．その上で，目付量の大小が補強効果に与える影響を調べるため，目付量 180 g/m^2 のアラミド繊維シートについても検討を行った．繊維シートの特性として，目付量にほぼ比例して設計厚さが変化する．繊維シートの補強効果を表



(a)　正面図（A-A）　　(b)　裏面図（B-B）　　(c)　側面図

図－5　RC 版試験体の設置要領

表－1　アラミド繊維シートの力学特性

目付量 (g/m²)	密度 (g/cm³)	引張強度 (N/mm²)	設計厚さ (mm)	ヤング係数 (N/mm²)	引張剛性 (N/mm)	破断伸び (%)
180	1.45	2060	0.062	118000	7300	2
330			0.095		11200	

す指標である引張剛性は，ヤング係数に設計厚さを乗じたものとして定義される．本研究における引張剛性は，目付量 180g/m² および 330g/m² に対して，それぞれ 7300N/mm および 11200N/mm である．アラミド繊維シートは，以下の手順により RC 版に貼付した．まず，プライマーとエポキシ樹脂を下塗りした．プライマーを 12 時間養生した後，再度エポキシ樹脂を塗布してアラミド繊維シートを含浸し，アラミド繊維強化プラスチック（Aramid Fiber Reinforced Plastic ，AFRP）とした．なお，補強した RC 版を設置する鋼製フレームの内寸は図－5(b)で示したように 850mm×850mm であるため，繊維シートで補強できる範囲はその制約を受ける．本研究では，実験装置の制約内で極力広範囲に補強を施すため，繊維シートの寸法は 835mm×835mm とした．

2.3　実験ケースおよび破壊モード

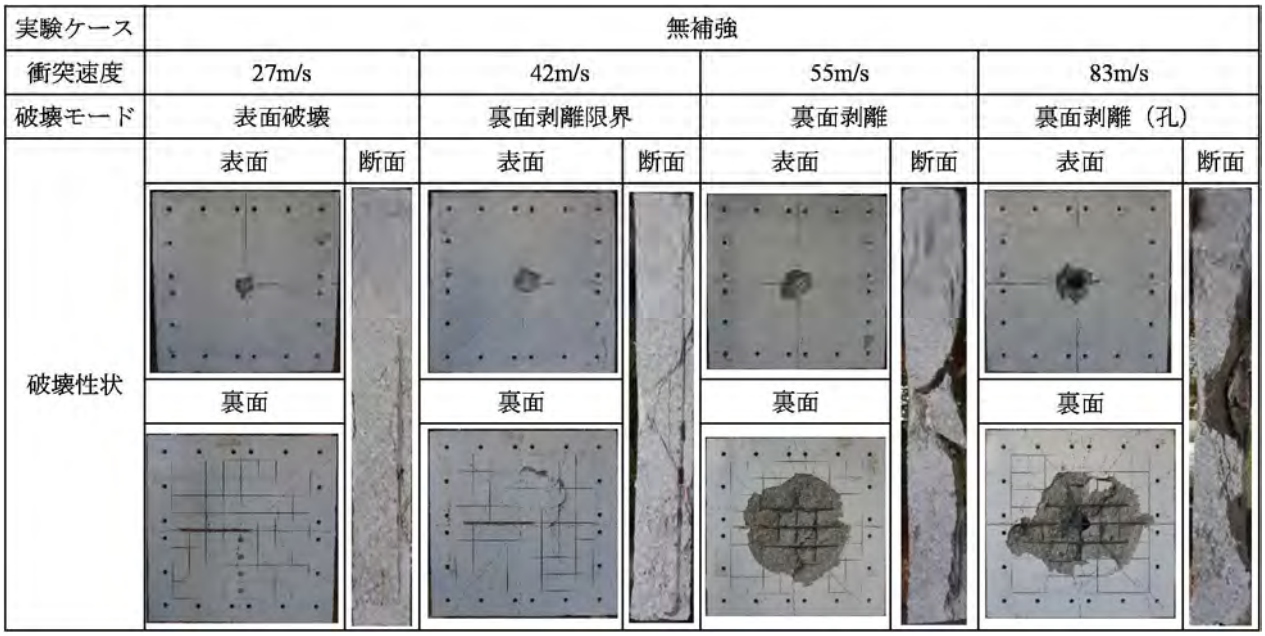
試験体は，無補強の RC 版（無補強版）および目付量が異なる 2 種類の AFRP シートで補強された RC 版（AFRPRC 版）を使用した．また，無補強版の耐衝撃性を確認するため，速度 25～80m/s の衝突実験を行った．AFRPRC 版については，既往の局部破壊評価式である CRIEPI 式[7]による評価結果を参考に，無補強版のケースにおいて裏面剥離が生じる衝突速度（40m/s および 50m/s）に設定した．さらに作用外力が増大した場合の補強効果について検討するため，衝突速度を 70m/s に設定したケースも行った．なお，基準ケースである目付量 330g/m² に対しては，限界性能のばらつきを把握する目的で衝突速度 70m/s のケースのみ 2 回の実験を行った．すなわち，目付量 180g/m² の試験体を 2 体，目付量 330g/m² の試験体を 4 体用いた．この際，CRIEPI 式によって算出される RC 版に裏面剥離が生じる速度（裏面剥離限界速度）との比較を行った．以下に示す CRIEPI 式は，電力中央研究所が行った実験データに基づく実験式である．

$$t_s = \alpha_s \times \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} f'_c{}^{0.4}} \tag{1}$$

$$t_p = \alpha_p \times \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{d \cdot f'_c}\right)^{0.5} \tag{2}$$

ここに，t_s：裏面剥離限界厚さ（mm），t_p：貫通限界厚さ（mm），V_0：基準速度（60.96m/s），V：衝突速度（m/s），M：飛翔体の質量（kg），d：飛翔体の直径（m），f'_c：コンクリートの圧縮強度（N/mm²），α_s および α_p は係数でそれぞれ 6.96×10^{-3}，8.96×10^{-4} である．

無補強版の破壊モードの分類は，既往の研究[6)-8)]を参考にし，表面破壊，裏面剥離および貫通に加え，裏面に円周状のひび割れが生じているが剥離片が飛散していない状態を裏面剥離限界，衝突部に孔が生じているが飛翔体が RC 版を通り抜けていない状態を裏面剥離（孔）とした．AFRPRC 版では，裏面のコンクリートの状態を直接確認できないこともあり，破壊モードを以下のように便宜的に定義した．裏面の AFRP シートに剥離や盛り上がりが生じない，あるいは剥離や盛り上がりが生じるが裏面のコンクリートおよび AFRP シートの剥落がない状態を表面破壊とした．また，RC 版のひび割れの範囲が広がり，AFRP シートの剥離や盛り上がりが AFRP シートの端部まで到達しているものを裏面剥離限界とした．さらに破壊が顕著となり，AFRP シートが RC 版から完全に剥落した場合は裏面剥離と定義した．



図－6　無補強版の破壊性状

3. 実験結果および考察

3.1　無補強版の破壊性状

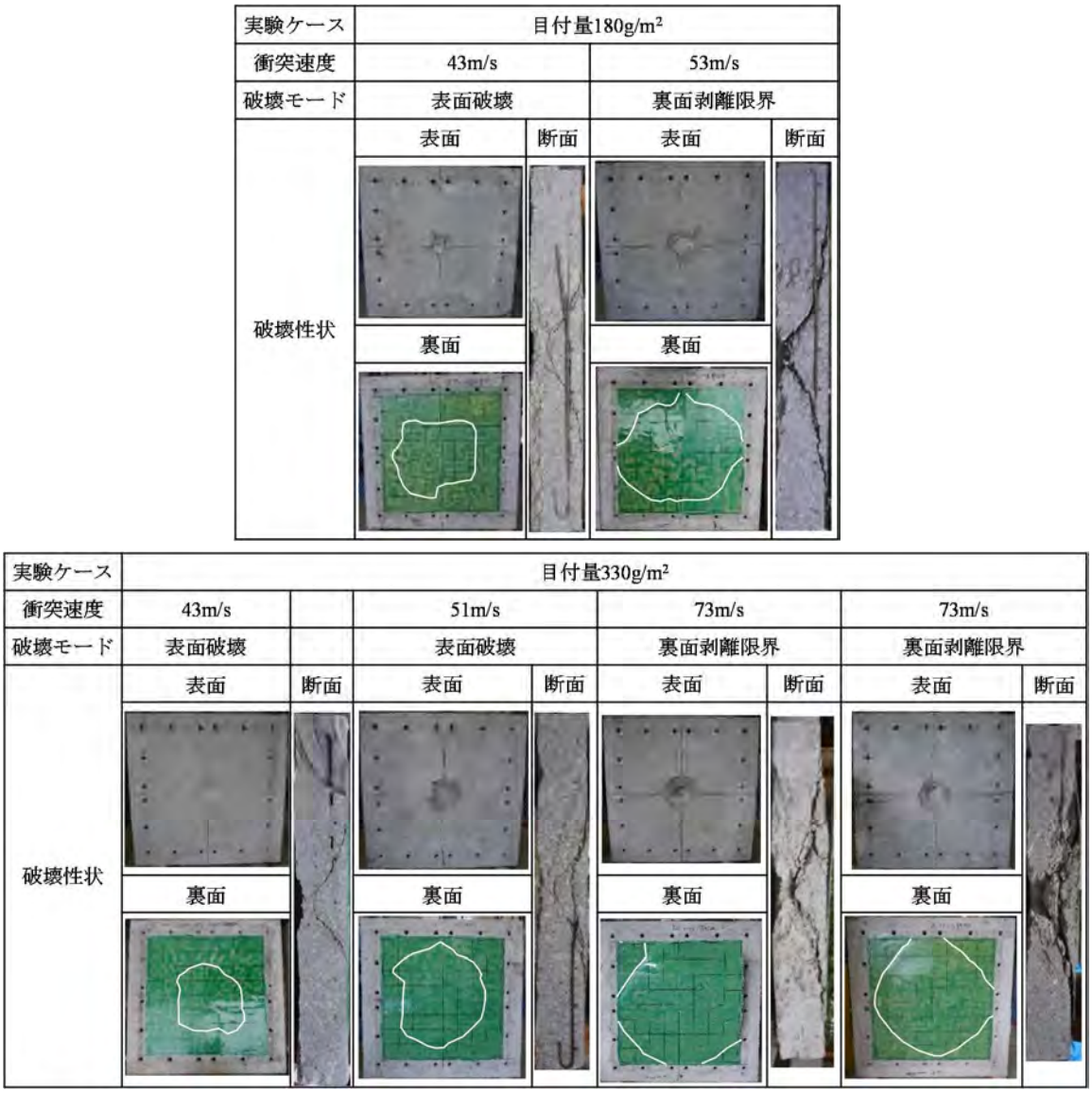
図－6 に，無補強版の破壊性状を示す．衝突速度 27m/s のケースでは，無補強版の裏面に放射状のひび割れが生じているが，断面には目視で確認できる斜めひび割れは生じていないため，破壊モードは表面破壊とした．衝突速度 42m/s のケースでは，衝突速度 27m/s のケースと同様に無補強版の裏面に放射状のひび割れが生じていることに加え，円周状のひび割れが生じて右上の一部が剥離している．このことから破壊モードは裏面剥離限界と判定した．衝突速度 55m/s のケースでは，無補強版の断面に斜めひび割れが生じるとともに，裏面のかぶり部分のコンクリートが飛散し，裏面剥離が生じた．かぶり部分内側のコンクリート片は，鉄筋の拘束により押さえられたため剥落はしていないが，断面の写真からは版内部まで破壊が進展している．さらに，衝突速度が 83m/s に増大すると，無補強版の衝突部には孔が生じており，鉄筋は衝突方向に大きくたわんでいるが，飛翔体は通り抜けていないため破壊モードは裏面剥離（孔）と判定した．

3.2　AFRPRC 版の破壊性状

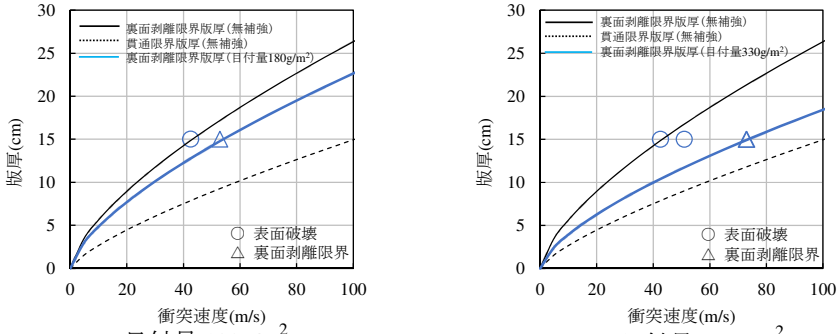
図－7 に，AFRPRC 版の破壊性状を示す．なお，試験体裏面の写真には，打診棒によって打音の変化から判定した，試験体裏面にシートの剥離が生じた部分の外周を白線で示した．目付量 180g/m^2，衝突速度 43m/s のケースでは，試験体の裏面中央に直径約 56cm の範囲に AFRP シートの剥離が生じた．また，RC 版の断面には斜めひび割れが生じている．この斜めひび割れの一部は版裏面にも到達して，裏面の AFRP シートには円形状の剥離が生じている．このケースの破壊モードは，版内部に生じたコンクリートの剥離を取り囲む領域における AFRP シートと RC 版の付着が十分保たれていることから，表面破壊と判定した．目付量 180g/m^2，衝突速度 53m/s のケースでは，目付量 180g/m^2，衝突速度 43m/s のケースよりもひび割れの開口が進展するとともに破壊の範囲が拡大した．それに伴い，AFRP シートの剥離もより広範囲に及び，AFRP シートの端部まで到達した．よって，破壊モードは裏面剥離限界と判定した．ちなみに，無補強版では，本ケースとほぼ同等の衝突速度 55m/s で顕著な裏面剥離が生じていた．したがって，目付量 180g/m^2 の AFRP シートによる補強によって，裏面剥離が抑制されたことがわかる．

次に，目付量 330g/m^2，衝突速度 43m/s のケースをみると，RC 版裏面の AFRP シートに直径約 47cm の円形状のシート剥離が生じており，目付量 180g/m^2，衝突速度 43m/s のケースとほぼ同様の破壊性状であり，破壊モードは表面破壊と判定した．目付量 330g/m^2，衝突速度 51m/s のケースでは，衝突速度 43m/s のケースと比較して断面のひび割れの開口が進展して破壊の範囲が拡大したが，AFRP シートの剥離は AFRP シートの端部まで至っていないため，破壊モードは表面破壊とした．さらに，衝突速度を 73m/s に増加すると，RC 版裏面の AFRP シートは右上の角部から広い範囲でシートが剥離した．ただし，AFRP シートが剥落することなくコンクリート片の飛散を抑止したため，破壊モードは裏面剥離限界と判定した．なお，2 回目の衝突速度 73m/s のケースでも，シート剥離は AFRP シートの端部まで到達したため，裏面剥離限界と判定した．

AFRPRC 版の破壊性状を無補強版と比較すると，RC 版の断面に生じる斜めひび割れの発生や進展に対する抑制効果はあまり認められなかった．しかし，RC 版の裏面に生じるコンクリート片の飛散を防止し，裏面剥離を抑制する効果は大きいことがわかった．ただし，シートの剥



図－7　AFRPRC 版の破壊性状



(a)　目付量 180g/m^2　　(b)　目付量 330g/m^2

図－8　CRIEPI 式による評価結果

離がシート端部に到達すると裏面剥離限界となるため，裏面剥離の直径に対する効果的な貼付範囲を検討する必要があると言える．

3.3 AFRPRC 版の破壊モードおよびシート補強の効果

図－8 に，AFRPRC 版の破壊モードと，CRIEPI 式による無補強版に対する評価を重ねて示す．目付量 180g/m^2 のケースでは，無補強版の裏面剥離限界速度である約 43m/s に対して表面破壊であったが，衝突速度が約 50m/s に増加すると裏面剥離限界となった．目付量 330g/m^2 のケースでは，衝突速度が約 50m/s に到達しても表面破壊であり，目付量 180g/m^2 よりも裏面剥離限界速度が大きいことがわかる．全体的に，AFRPRC 版の裏面剥離限界速度は，CRIEPI 式よりも大きくなることがわかる．図中

には，CRIEPI 式に対して，本実験結果と整合するように低減係数を乗じた式も示している．それぞれの目付量に対する低減係数は目付量 180g/m^2 が 0.88，目付量 330g/m^2 に対する低減係数が 0.70 であった．すなわち，無補強版と比較すると，同じ衝突速度に対して，AFRPRC 版の裏面剥離限界版厚は，目付量 180g/m^2 が 12%，330g/m^2 が 30%小さくなることを示している．また，この式から目付量 180g/m^2 の AFRPRC 版の裏面剥離限界速度は約 52m/s，目付量 330g/m^2 の場合は約 73m/s と算定される．ここで，目付量 180g/m^2 の裏面剥離限界速度に対応する無補強版の版厚は 18cm，目付量 330g/m^2 の裏面剥離限界速度に対応する無補強版の板厚は23cm であることから，本実験における AFRP シートの補強効果は，コンクリートに換算して約 3cm～8cm の版厚となる．また，無補強版と AFRPRC 版の裏面剥離限界速度の差から，AFRP シートを貼付したことによる吸収エネルギーを算定すると，目付量 180g/m^2 では約 8175kJ，目付量 330g/m^2 の場合は約 11408kJ と算定される．質量 8.3kg の飛翔体が無補強版に裏面剥離を発生させる運動エネルギー（裏面剥離限界エネルギー）は約 7673kJ となることから，AFRP シートを貼付することによって，裏面剥離限界エネルギーの約 1.07 倍～1.49 倍に相当するエネルギーを吸収したことがわかる．

4. 結言

本研究は，速度約 40～70m/s の飛翔体衝突に対して，AFRP シートによる RC 版の局部破壊抑制効果について基礎的な実験を行ったものである．本研究の成果を以下に要約する．

(1) 目付量 180g/m^2 および 330g/m^2 の AFRP シートで RC 版を補強した結果， RC 版の裏面剥離が抑制されることがわかった．

(2) CRIEPI 式による無補強版の裏面剥離限界版厚に対する低減係数を試算したところ，それぞれの目付量に対する低減係数は目付量 180g/m^2 が 0.88，目付量 330g/m^2 に対する低減係数が 0.70 であった．すなわち，無補強版に対して，裏面剥離限界版厚が目付量 180g/m^2 のシート補強で 12%，目付量 330g/m^2 のシート補強で 30%小さくなることがわかった．

(3) AFRP シートによる補強の効果は，コンクリート版厚に換算して，目付量 180g/m^2 で版厚 3cm の増加，目付量 330g/m^2 で版厚 8cm の増加に相当した．また，AFRPRC 版の裏面剥離限界エネルギーは，無補強版と比較して目付量 180g/m^2 で 1.07 倍，目付量 330g/m^2 で 1.49 倍となった．

参考文献

1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成 24 年に 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害（速報），2012.
2) 日本保全学会：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン，2015.
3) 内閣府（防災担当）：活火山における退避壕等の充実に向けた手引き，2015.
4) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド，原規技術第 1409172 号，2013，改正，2014.
5) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，1994.
6) Q. M. Li: Local impact effects of hard missiles on concrete targets, International Journal of Impact Engineering 32, pp. 224-284, 2005.
7) 伊藤千浩，大沼博志，白井孝治：飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 電力中央研究所総合報告，U24，1991.
8) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン－評価手法と対策技術, 2018.
9) 片岡新之介，上野裕稔，別府万寿博，市野宏嘉：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.62A，pp.1084-1096，2016.
10) 片岡新之介，別府万寿博：飛翔体の座屈変形が RC 版の局部破壊特性に及ぼす影響に関する考察, 土木学会論文集 A2(応用力学),，Vol. 74，No. 2 (応用力学論文集 Vol. 21)，pp.I_381-I_392，2018.
11) 片岡新之介，別府万寿博，市野宏嘉：飛来物衝突を受ける RC 版の裏面剥離メカニズムに関する研究, 構造工学論文集，Vol.65A，pp.876-889，2019.
12) 三上浩，岸徳光， 安藤智啓，栗橋祐介：FRP シートで下面補強した RC 版の耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集，Vol.48A，pp.1531-1542，2002.
13) 三輪幸治：剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離の発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究，防衛大学校理工学研究後期課程博士論文，2010.
14) 別府万寿博，三輪幸治，高橋順：高速衝突を受けるコンクリート版の裏面剥離発生メカニズムと連続繊維シート補強の効果, 土木学会論文集, A1, Vol.68, No.2, pp.398-412，2012.

核爆発時の人的被害評価法に関する研究

A STUDY ON THE RISK ASSESSMENT FOR A DESIGN OF NUCLEAR BOMB EXPLOSIONS

長谷川秀雄*，永田真**，別府万寿博***，市野宏嘉****
HASEGAWA Hideo and NAGATA Makoto and BEPPU Masuhiro and ICHINO Hiroyoshi

*防衛省　技官（〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 4-1）
** 博（工）防衛省　技官（〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 4-1）
***　博（工）　防衛大学校教授 建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10-20）
****　博（工）　防衛大学校准教授 建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10-20）

キーワード：核爆発，リスク評価，爆風，熱線，放射線
（*nuclear explosion, risk assessment, blast, thermal radiation, nuclear radiation*）

1. はじめに

2019 年版の防衛白書によれば，核拡散防止条約の枠組みに入っていない近隣国による核開発が進み，すでに弾道ミサイルに搭載するための核兵器の小型化・弾頭化がすでに実現しているとみられている [1]．また，国際テロ組織などの非国家主体による大量破壊兵器の取得・使用といった懸念もあり，Graham らによれば，今後，核兵器を用いた爆破テロが発生する可能性も指摘されている [2]．

一方，日本国政府は武力攻撃等から国民の生命，身体及び財産を保護し，武力攻撃の国民生活及び国民経済に及ぼす影響を最小とするために「武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律（以下，国民保護法）」を 2004 年に制定した．政府は国民保護法に基づく各自治体による国民保護計画の策定にあたって，「国民の保護に関する基本方針（平成 17 年 3 月閣議決定）」や「市町村国民保護モデル計画（平成 18 年 1 月消防庁作成）」を示している．その中で想定される武力攻撃事態の一つとして「核兵器による攻撃」を挙げているが，その被害に関する定量的な指標は示されていない [3]．

米国を中心とした先進諸国においては，核兵器が使用された場合を想定した避難施設の整備が進んでいる．しかし，我が国においては，避難施設の整備は始まったばかりであり，核爆発を想定した施設の設計基準は未だ確立されていない．

核兵器が使用される可能性は国際情勢の変化に伴って急激に変動するが，実際の施設整備には長い時間を要するため，平時より対策を検討する必要がある．

本研究では，核爆発によって引き起こされる爆風，熱線，放射線及びそれらによる人的被害の定量的な評価手法を提案する．本論文の構成は以下のとおりである．第 2 章では，既往の研究において示されている核爆発による物理作用及び被害評価手法を概説し，課題を確認する．第 3 章では，核爆発に伴って生じる人的被害の評価手法の概要を提案する．第 4 章では第 3 章で提案した評価手法の具体化について検討し，第 5 章では本研究のまとめおよび今後の研究課題を示す．

2. 核爆発に伴う物理効果及び既往研究における被害評価手法の概要

2.1 核爆発現象の概要

核爆発とは，原子を構成する素粒子同士の結合エネルギーが変化する過程を通じて，原子の持つ質量がエネルギーに変換される核反応プロセスが連鎖的に発生し，短時間に膨大なエネルギーが放出される現象である．核爆発においては通常の化学的爆発とはエネルギー源が異なること，また短い時間に通常の爆発とは比較にならないほど多量のエネルギーが放出されるため，通常の爆発では起こりえない様々な物理現象が発生する．

通常の爆発における，爆発の主たる物理効果は，高温高圧の気体が爆発点を中心に急速に生成されることによる大気中の衝撃波すなわち爆風の発生にある．核爆発においても，主たる破壊作用が爆風・衝撃波から生じることに変わりはない．しかし，核爆発においては通常の爆発の数千から数万倍の

エネルギーが放出されるため，発生する爆風は極めて大きな効果を持つ．また，通常の爆発に比べて爆発点周辺が極めて高温となるため，光及び熱に多くのエネルギーが変換され，熱線という形で地上の生物や構造物に被害を与える．さらに，核爆発においては，爆発反応が継続する爆発後 1 分間に初期放射線と呼ばれる透過性の高い有害な放射線が多く放出される．最後に，核爆発後に残された爆薬の残滓や反応によって生じた生成物が放射能を帯びて地表に降下することにより，地表が放射性物質によって汚染される．すなわち，爆発後の長い期間にわたって高い放射線量を保ち続けることになる．このような爆発から 1 分後以降に発生するすべての放射線を残留放射線（または後期放射線）と呼んでいる．また，こうした物理現象のほか，爆発に伴って強力な電磁パルスが発生することによって，電気機器及び電力・通信システムにダメージが発生する可能性が Glasstone らによって指摘されている [4]．

2.2 核爆発に伴い発生する被害

前述のとおり，通常の爆発と異なり核爆発においてはエネルギーが複数の形態で放出されるという特徴があり，これによって人命や構造物は様々な影響を受ける．

まず，爆風・衝撃波が与える影響については，人体に作用する圧力が急激に変化することによって人体の器官が損傷したり，吹き飛ばされて地面などに衝突し被害を受けたりする可能性がある．また，構造物が爆風圧を受けることによって損傷し，損傷によって生じる破片や崩落してきた部材によって死傷する可能性がある．

熱線が与える影響としては，放出される熱線を遮蔽保護なしに浴びた場合，人体が一度に大きな熱エネルギーを受け取ることになる．この影響を受けて，直接あるいは発火した衣類を通じて間接的に発生する熱によって死傷する可能性がある．また，爆心地近くの表面温度は摂氏数千度にも達するため，可燃物が発火・延焼し火災が発生する可能性がある．ただし，爆風によって建物が倒壊してストーブやコンロから延焼する等の間接的な火災との区別が困難であるため，火災による被害について評価を行うことは難しい．

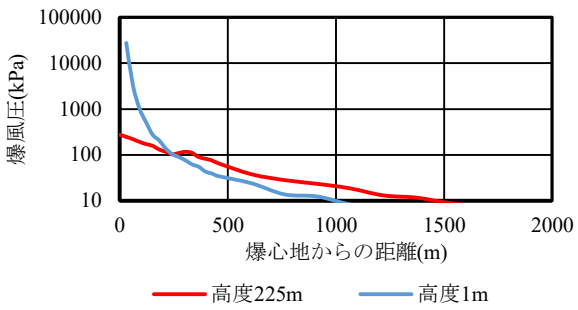
初期放射線及び残留放射線は，生物に種々の放射線障害を発生させ，場合によっては急性放射線症によって死者が発生する．ただし，残留放射線については，地面近くの土砂や瓦礫を吸い上げるプロセスを通して膨大な放射性物質が生み出される．よって，そのプロセスが発生しない十分な高度での空中爆発の場合，影響は他の作用に比べて無視できるレベルにまでに小さくなる．

核爆発では，このような被害が広範囲に渡って同時に発生する．このため，多数の死傷者が見込まれる上に瓦礫や火災の発生による道路の寸断，電力や上下水道の機能喪失及び残留放射線による高い環境放射線量，通信網の麻痺等によって，外部からの速やかな救援が困難な状況になることが想定される．したがって，核爆発に対する防護性能を有し，ある程度の期間にわたって避難者が生存可能な核シェルターを設置することが必要となる．

2.3 核爆発に伴う物理効果

核爆発に伴う爆風，熱線，初期放射線及び残留放射線の 4 種類の物理効果は，先行研究によってその影響が定量的に示されているが，爆風及び初期放射線については定式化されていない．本研究では，爆風圧については Glasstone ら [4]によって示されている図及び式による推定を行った．また，爆心地からの距離と放射線量の分布が線形に近く，定式化が容易である初期放射線については関数による定式化を行った．

一例として，TNT 換算爆発エネルギーが 1KT（以後，n KT-TNT 換算爆発エネルギーを n KT と表記）かつ高度が 1m あるいは 225m の核爆発で生じる地表面での爆風圧について，Glasstone ら [4]によって示されている図より数値を読み取ると，図－1 のような爆風圧と爆心地からの距離関係が得られる．



図－1　爆発エネルギーW=1KT の爆発時の地表面における爆風圧分布

また，爆発エネルギー1KT の爆発での爆発点からの距離d_0における最大爆風圧をP_0とおくと，出力 W KT の爆発での爆発点からの距離$d = d_0\sqrt[3]{W}$における最大爆風圧 P は，式(1)の関係が成り立つ [4]．

$$P = P_0 \tag{1}$$

図－1 及び式(1)を組み合わせることによって，

様々な爆発高度かつ様々なエネルギー量の爆発における爆風圧分布を推定することが可能となる．

熱線によって伝達される熱エネルギーの分布については，Glasstone らによって式(2)が提案されている[4]．

$$Q = \frac{10^8 fWT}{4\pi d^2} \ (cal/cm^2) \tag{2}$$

ここに，Q：単位面積当たりの熱エネルギー量
f：熱変換率
W：総爆発エネルギー量[KT]
T：総透過率
d：爆発点からの距離[m]　である．

初期放射線の線量分布については，Glasstone らによって式(3)のように定式化されている[4]．

$$D_T = p_\gamma D_\gamma + p_n D_n \tag{3}$$

ここに，D_T：総初期放射線量 [mGy]
D_γ：初期ガンマ線量 [mGy]
D_n：初期中性子線量 [mGy]
p_γ：ガンマ線地表補正係数
p_n：中性子線地表補正係数　である．

ただし，D_γ，D_nについては定式化されていないため，武谷らによる文献[5]をもとに式(4)のとおり近似を行った．

$$D_\gamma = W \times \frac{3.2\times10^{10}}{D^2} \times e^{\frac{D}{350.78}} + W' \times \frac{1.7\times10^{10}}{D^2} \times e^{\frac{D}{317.959}} \text{（p=1 のとき）}$$

$$D_\gamma = W \times \frac{2.1\times10^{10}}{{d_y}^2} \times e^{\frac{d_y}{357.251}} + W' \times p \times \frac{1.7\times10^{10}}{{d_y}^2} \times e^{\frac{d_y}{317.959}} \text{（p≠1 のとき）} \tag{4}$$

$$D_n = W \times \frac{1.8\times10^{11}}{{d_y}^2} \times e^{\frac{d_y}{244.152}} \text{（p=1 のとき）}$$

$$D_n = W \times \frac{1.3\times10^{11}}{{d_y}^2} \times e^{\frac{d_y}{253.443}} \text{（p≠1 のとき）}$$

ここに，W'：実効爆発エネルギー [KT]
p　：総爆発エネルギーに占める核分裂反応の寄与割合
d_y：爆発点からの距離 [yard]　である．

2.4　既往研究における被害シミュレーション

Allenheld らは，爆風による死傷者及び構造物への被害と熱線による死傷者を距離帯毎に算出している[6]．また，葉佐井らは，広島での核爆発で生じた爆風圧の分布と実際の被害状況を関連付けた被害想定に加え，熱線及び初期放射線による理論的な被害の算出を行っている[3]．いずれの想定においても，最も影響が大きいと考えられる爆風による被害及び各効果の複合的影響による被害については，1945 年の広島における爆風圧と死傷率を，限定的な統計データをもとに直接関係づけて算出している．

建築構造が大きく変化した現代都市に対してこうした被害想定手法を適用することは，不確定な死傷要因が増えることとなり，また核シェルターに求められる各々の物理効果に対する防護性能の評価を困難とする．

そのため，本研究においては，各物理効果を独立しているものとみなして，被害シミュレーションを実施し，シェルター設計の資となるリスク評価手法を検討するものとする．

3.　核爆発による人的被害評価手法の概要

3.1　リスク評価の概要

永田らによって提案されている爆発を伴うテロによる被害リスクを評価する手法は，「(望ましくない）出来事が起こる可能性」と「起こった場合の結果（被害）の大きさ」の積としてリスクを表現するものである[7]．

他方，核爆発の被害リスクの評価にあたっては，実例が少ないため発生確率と爆発規模の関係（ハザード）を算定することが困難である．そのため，いくつかの爆発シナリオを想定し，そのシナリオに沿った建物損傷確率及び人的被害確率を算定することによって，想定シナリオにおけるリスク（死傷者数）を評価することとする．

なお，通常の爆発であれば，リスクの要因となる物理効果は爆風のみであるが，核爆発においては爆風に加えて熱線，初期放射線及び残留放射線の 4 種類の物理効果がリスク要因となる．残留放射線は被害をもたらす時間スケール及び距離スケールが他の 3 種類の物理効果と大きく異なることから，本研究ではまず爆風，熱線及び初期放射線の 3 種類の物理効果を統合したリスク評価を行い，別途，残留放射線によるリスク評価を行う．

3.2　構造物損傷確率評価の概要

核爆発の爆風による構造物損傷確率の距離分布の評価にあたっては，まず，設定した爆発シナリオにおける最大爆風圧と距離の関係を求める．次に，Pickering ら[8]による核爆発に伴う爆風圧と構造物の部材の破壊確率の関係から爆風による構造物の

損傷確率を算定し，それらを掛け合わせた上で，構造物損傷確率の距離分布を求める．

3.3　人的被害確率評価の概要

人的被害確率評価にあたっては，爆風，熱線及び初期放射線それぞれの物理効果による被害確率評価を行った上で，各物理効果が互いに独立であると仮定して 3 種類の物理効果を統合した人的被害確率の評価を実施する．

爆風については，3.2 節で実施した構造物損傷確率の距離分布に，構造物の損傷と人的被害の関係を表す評価関数を掛け合わせることで，屋内滞留者に対する爆風の被害確率評価を行う．また爆風の影響を屋外で直接受ける場合についても評価を行う．

熱線については，想定する爆発シナリオにおいて地表面に到達する熱エネルギー量の分布から，熱線による人的被害と爆心地からの距離の関係を求め被害確率評価とする．

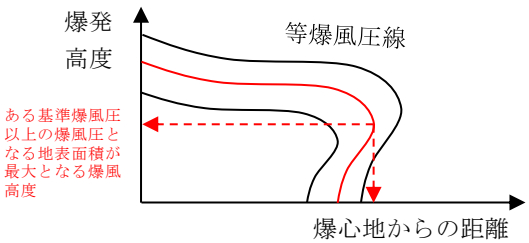
初期放射線についても，熱線と同様に，想定する爆発シナリオにおいて地表面に到達する放射線量の分布から，人的被害と爆心地からの距離の関係を求め被害確率評価とする．

最後に，これらの物理効果による人的被害確率を互いに独立なものとみなして掛け合わせることによって，統合した人的被害確率評価を行う．

4.　核爆発時の人的被害評価

4.1　爆発シナリオの設定

爆発シナリオについては，爆発エネルギー量，爆発高度及び総爆発エネルギー量に占める核分裂エネルギーの３つのパラメータを設定する．なお，爆発高度の設定については，図－2 に示す一定規模の爆発における爆風圧分布の凸性から，ある基準爆風圧を設定したときに，その基準爆風圧以上の爆風圧が作用する地表面の面積が最大となるような爆発高度が一意に定まる．



図－2　一定規模の爆発の爆発高度が変化した場合の地表面における爆風圧の分布

4.2　都市のパラメータ設定

爆発時の被害想定を行う都市については，①夜間人口密度，②昼間人口密度，③世帯ごとの建築構造比率，④場所ごとの滞留人口割合の 4 つのパラメータを設定する．

①　夜間人口密度の設定

都市の中心から x km 離れた地点における夜間人口分布$P_n(x)$ 人/km^2について設定する．

②　昼間人口密度の設定

都市の中心から x km 離れた地点における昼間人口密度$P_d(x)$ 人/km^2については，夜間人口密度$P_n(x)$と都市の中心から x km に離れた地点における昼夜人口比率$q(x)$の積として表される．

③　世帯ごとの建築構造比率の設定

世帯ごとの建築構造比率では，都市内にある住宅について木造住宅(戸建て住宅，長屋住宅)，低層住宅(共同住宅，1～2 階建て)，中層住宅(3～9 階建て)，高層住宅(10 階建て以上)に分類し，都市の中心からの距離帯別の割合として設定する．

④　滞留場所ごとの人口割合の設定

各時間帯における都市人口の時刻別場所別の滞留割合を設定することで，都市人口を屋外や木造家屋内等の滞留場所ごとに割り振り，距離帯別の滞留人口を設定する．

4.3　人的被害及び構造物の被害想定手法

4.3.1　爆発による建物損傷確率の評価

Pickering らは，核爆発によって発生する爆風が構造物へ与える影響について，各部材が破壊される確率は爆風による最大超過圧力の関数であるとしている[8]．また，同研究では建物種類ごとに各部材に対して 10%破壊確率，50%破壊確率，90%破壊確率を示している．部材ごとの破壊確率関数は α+β=8 となるパラメータ α，β をもつベータ分布に従うとしているため，各部材についての破壊確率関数を求めることができる[8]．

一例として木造家屋について考えると，窓ガラスの 10%破壊確率圧力p_{10}は 0.15psi，50%破壊確率圧力p_{50}は 0.30psi，90%破壊確率圧力p_{90}は 0.60psi であることから，$\frac{p_{50}-p_{10}}{p_{90}-p_{10}}=0.33$となるような α を持つベータ分布，つまりパラメータが α=1.2，β=6.8 であるベータ分布に従うことがわかる．さらに，0%破壊確率圧力p_0及び 100%破壊確率圧力p_{100}は同じ

α，β の値をパラメータとする一般的なベータ分布にて$\frac{p_{50}-p_0}{p_{50}-p_{10}}=1.256$，$\frac{p_{100}-p_{50}}{p_{90}-p_{50}}=4.452$の関係にあることから，$p_0=0.11$，$p_{100}=1.64$となり，ベータ分布の下限値と上限値を求めることができる．

他の部材，建築構造についても同様の計算を行った結果が図－3 である．

各部材の破壊と構造物の損傷状態の関係については，永田らの研究[7]を参考として，表－1 のとおり整理を行った．

表－1　部材の破壊と構造物の損傷の関係

	中被害	大被害	甚大被害
窓ガラス	破壊	破壊	破壊
間仕切り	非破壊	破壊	破壊
骨組	非破壊	非破壊	破壊

これによって部材ごとの破壊確率と構造物の損傷が関連付けられるため，爆風圧による構造物損傷確率が図－4 のとおり求まる．

第 2 章で求めた距離に対する爆風圧分布と爆風圧による構造物損傷確率を掛け合わせることで，想定したシナリオごとの構造物損傷確率の距離分布が求まる．

4.3.2　爆風による人的被害の評価

永田らの研究[7]を参考として，構造物の損傷と内部にいる人の人的被害の関係について表－2 のとおり仮定した．

4.3.1 で求めた構造物損傷確率の距離分布に表－2 の人的被害係数を掛け合わせることで，屋内滞留者に対する死傷率の距離分布を作成することができる．

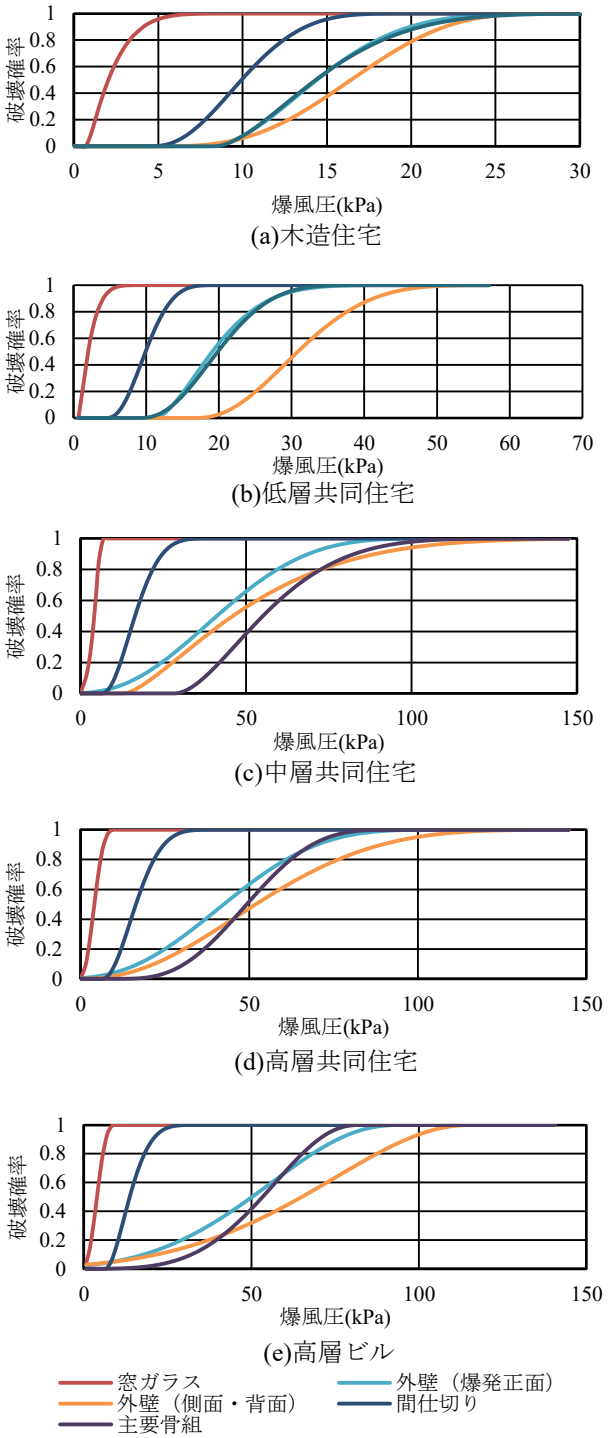
さらに，屋外滞留者に対する爆風の直接的な影響の閾値及び 100%被害確率が Glasstone らによって示されているので[4]，正規分布と仮定したうえで爆風圧に対する人的被害確率を図－5 のとおり作成した．この影響についても，第 2 章で求めた爆風圧分布を掛け合わせることで，爆発シナリオごとの死傷率の距離分布を求めることができる．

4.3.3　熱線による死傷率の評価

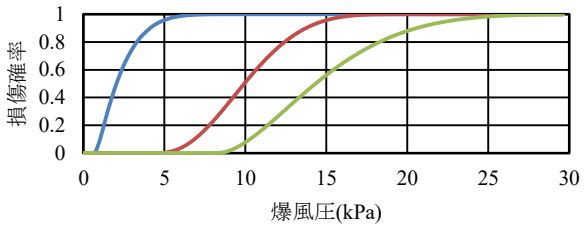
熱線による直接的な被害の様態については第 2 章で述べたとおりであるが，皮膚が熱傷になる熱エ

表－2　構造物の損傷と人的被害の関係

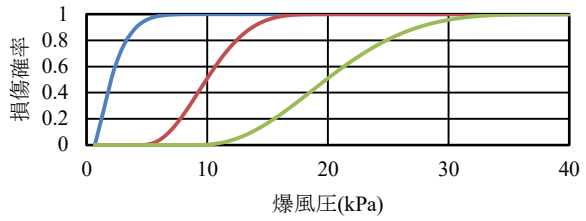
	中被害	大被害	甚大被害
死亡率	5%	10%	20%
負傷率	56%	80%	100%



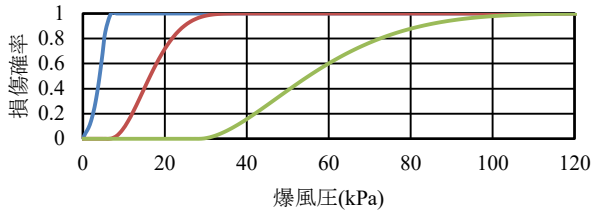
図－3 建築構造別の部材破壊確率関数



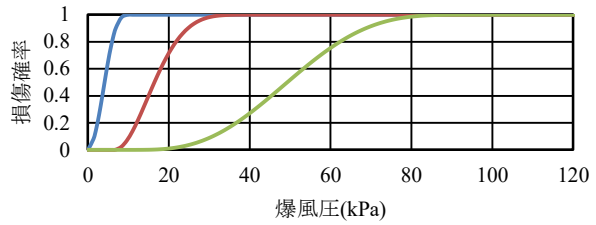
(a)木造住宅



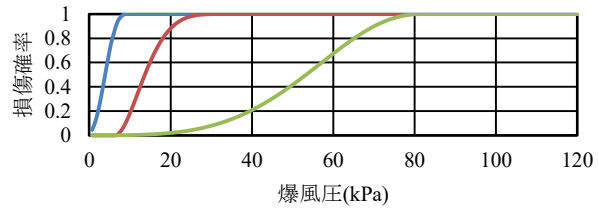
(b)低層共同住宅



(c)中層共同住宅



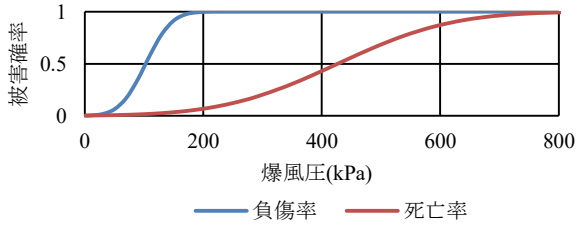
(d)高層共同住宅



(e)高層ビル

中被害　大被害　甚大被害

図－4 建築構造別の爆風圧による損傷確率



図－5 爆風の直接の効果による屋外滞留者に対する死傷率

ネルギー量の閾値が Glasstone らによって示されている[4]．ただし実際に衣類を身に着けた人体が均一な熱線を浴びた際に死傷する閾値は明らかになっていない．ここでは，1945 年広島で爆発が発生した際に得られた統計を用いて死傷率の閾値を推定することとする．

表－3 は 1945 年広島での爆発における熱線による負傷者統計[9]及び，第 2 章で述べた熱線計算式による熱エネルギー量の推定値である．

また，1945 年の広島における各学校生徒の被害統計[9]から，広場や校庭に集まっていた場合の熱傷による死亡率が，爆心地から 1.3km で 99%，爆心地から 1.6km で 1%となっていることから，対応する 19.9cal/cm^2及び 13.5 cal/cm^2を参考として，屋外における遮蔽なし時の死亡率を設定した．

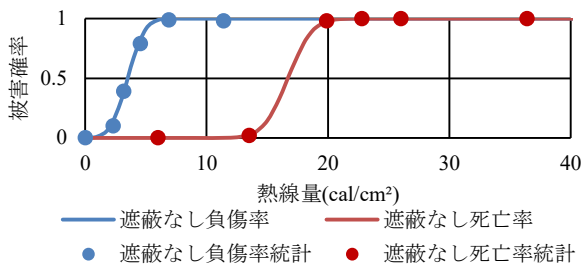
表－3 1945 年広島での爆発における熱線による負傷率

爆心地からの距離(m)	推定熱エネルギー量 (cal/cm²)	屋外遮蔽なし		屋外遮蔽あり	
		母数	発症率	母数	発症率
0~500	110.2	0	—	3	0.67
500~1000	46.8	22	1.00	68	0.50
1000~1500	21.2	172	1.00	144	0.35
1500~2000	11.4	528	0.98	176	0.36
2000~2500	6.9	443	0.99	150	0.46
2500~3000	4.5	124	0.79	94	0.20
3000~3500	3.2	85	0.39	58	0.03
3500~4000	2.3	40	0.10	12	0.00
4000~	1.7	9	0.00	3	0.00

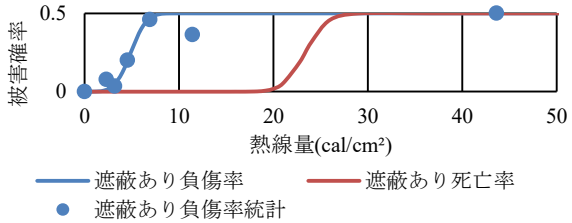
これらのデータから，屋外滞留者が遮蔽物なしに熱線を受ける場合と塀や建物などの遮蔽物の陰で熱線を受ける場合それぞれの死亡率と負傷率を正規分布の累積分布関数とみなして近似を行い，16KT 爆発時における図－6 の結果を得た．なお，遮蔽あり時の死亡率については，遮蔽あり時の負傷率と遮蔽なし時の負傷率の関係から推定を行った．

ただし，Glasstone らによって皮膚が熱傷になるような熱エネルギー量の閾値は，総爆発エネルギーが大きくなるほど高くなっていくことが示されている[4]．同研究にて図示されている閾値を利用して，死傷率の分布パラメータを補正することで，それぞれの爆発シナリオにおける熱線による被害確率の閾値を算定する．

算出された熱エネルギー量と死傷率の関係を，第 2 章で述べた熱エネルギー量の距離分布と掛け合わせることにより，熱エネルギーによる死傷率の評価を行った．なお，屋外滞留者のうち遮蔽物がある場合とない場合の人数の割合は便宜的に 1:1 と仮定

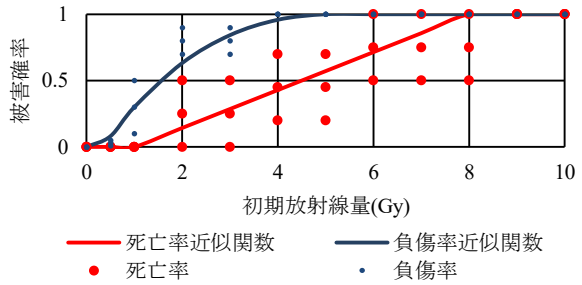


(a)遮蔽なし



(b)遮蔽あり

図－6　16KT 爆発時の熱線による死傷率



図－7　急性放射線症による死傷率

して評価を行っている．

4.3.4　初期放射線による死傷率の評価

初期放射線の影響については，国際原子力機関によって放射線量ごとの急性放射線症の閾値及び発症確率が示されている[10]ため，図－7 のとおり関数に近似した．

第 2 章で求めた初期放射線量の分布と放射線量による被害確率を組み合わせることによって，急性放射線による死傷率関数を作成する．なお，屋内滞留者は外壁によって放射線の一部が遮蔽されるため，木造住宅及び低層共同住宅の場合中性子線量に 0.8 倍，RC 造である中層共同住宅，高層共同住宅及び高層ビルについてはガンマ線量に 0.4 倍，中性子線量に 0.7 倍の補正をして死傷率評価を行った．

4.3.5　各物理効果を統合した被害確率の評価

各物理効果の死傷率を場所ごとの死傷率として統合する．本研究においては，各々の物理効果は完全に独立な変数とみなして，表－4 に示すようにある距離における物理効果ごとの死傷率を掛け合わせることによって，統合した死傷率を作成する．

なお，本研究においては，熱線が屋内滞留者に与える影響を考えないため，場所ごとの物理効果の組み合わせは表－5 のとおりとなる．

以上の手法によって作成した死傷率の距離分布を都市の人口分布にかけ合わせることによって核爆発による人的被害を評価することができる．

表－4　統合した死傷率の計算モデル

ある距離における死傷率		物理効果 2		
		死亡率　q1	負傷率　q2	負傷なし　p3
物理効果 1	死亡率　p1	死亡 p1×q1	死亡 p1×q2	死亡 p1×q3
	負傷率　p2	死亡 p2×q1	重篤度 1 p2×q2	重篤度 2 p2×q3
	負傷なし p3	死亡 p3×q1	重篤度 2 p3×q2	負傷なし

表－5　物理効果の組み合わせ

	爆風	熱線	初期放射線
木造住宅	○		○
低層共同住宅	○		○
中層共同住宅	○		○
高層共同住宅	○		○
高層ビル	○		○
屋外	○	○	○

5. 結言

5.1　まとめ

本研究は，核シェルターの設計基準を策定するために必要な核爆発による被害リスクの評価手法について提案した．まず，先行研究における爆風，熱線及び放射線の影響を整理した．次に，それぞれの物理効果による構造物及び人命への影響を積み上げる形で定量的な被害想定の評価を行うことで，人的被害評価手法の提案を行った．

5.2　今後の課題

本節では，核爆発による人的被害リスクの評価に関する課題を 2 点示す．

(1)物理効果の独立性に関する課題

本研究においては，爆風，熱線及び初期放射線の効果が互いに独立に作用すると仮定してリスク評価を行った．しかし，実際には各々の物理効果による被害にはある程度相関があるものと考えられる．

(2)爆風による死傷率評価に関する課題

本研究では，爆風による死傷率評価にあたって，永田ら[7]による爆破テロ時の死傷率の数値を参照

した．しかし，核爆発に伴い発生する爆風荷重による構造物の損傷が，局所的に爆風荷重が作用する爆破テロによる構造物の損傷と同一の人的被害をもたらすかどうかについては検討する必要がある．また，屋外滞留者がガラスの破片等で負傷したり，爆風に吹き飛ばされて負傷したりするケースについても検討が必要である．

参考文献

1) 防衛省：防衛白書　日本の防衛，2019
2) Alison Graham：核テロ 今ここにある恐怖のシナリオ，日本経済新聞社, 2006
3) 葉佐井博巳ら：核兵器攻撃被害想定専門部会報告書，広島市国民保護協議会, 2007
4) J.Dolan Glasstone and PhilipSamuel： Effects of Nuclear Weapons 3rd edition, 1977
5) 武谷三男ら：原子力ハンドブック 爆弾篇，商工出版社, 1958
6) Allanheld & Co.Osmun：The effects of nuclear war, Office of Technology Assessment Congress of the United States, 1980
7) 永田真，矢代晴実，別府万寿博：爆発荷重を受ける RC 構造物に対するリスク評価手法の一提案，構造工学論文集, 2015
8) E.E.Pickering and J.L.Bockholt：Probabilistic air blast failure criteria for urban structures, Stanford research institute, 1971
9) 梶谷鐶,羽田野茂：原子爆弾災害調査報告（広島），原子爆弾災害調査報告集，日本学術振興会, 1953
10) Jointly sponsored by the International Atomic Energy Agency and the World Health Organization：Diagnosis and treatment of radiation injuries, International Atomic Energy Agency, 1998