一般社団法人防衛施設学会主催

年次フォーラム２０２１

（令和２年度年次研究発表会論文集）

令和３年４月

(一社)防衛施設学会
Japan Society of the 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 2021　論文集目次

A 感染症・自然災害

座長：後藤 匠(防衛省整備計画局)

(A1) pH 調整次亜塩素酸ナトリウムの洗浄・殺菌操作における作用機序
福﨑智司, 吉田すぎる, 中村幸翼, 野嶋駿(三重大学) ･･･1

(A2) テンセグリティ構造と断層構造類の類似性に関する一考察
及び地震データの可視化・可音化の試みについて
荻原洋聡((株) エヌ・ワイ・ケイ), 佐藤紘志(防衛大学校名誉教授) ･･･9

(A3) 焼成卵殻・オゾン水の病原性微生物殺菌剤および消臭機能等実証事業
西山登士彦, 永富伯夫((株)ESC) ･･･15

(A4) 雨水桝への蚊絶滅マット（分別集水マット）設置による
感染症媒介蚊対策に関する実証実験
鈴木真菜,山田正（中央大学) ･･･19

B 施設維持管理

座長：服部大樹(防衛省整備計画局)

(B1) 既設滑走路の予防保全と被災時の安全性の検証についての一考察
國武正大(航空自衛隊) ･･･25

(B2) 大型水槽の側壁のひび割れ制御
伊藤朋紀,堅田茂昌(安部日鋼工業(株)),山﨑真一(三井造船特機エンジニアリング(株)),
綾部信吾(防衛装備庁艦艇装備研究所),小川清澄(岩国生コンクリート協同組合) ･･･31

(B3) AI を用いた打音法技術について
歌川紀之,黒田千歳(佐藤工業(株)),安永守利(筑波大学),
西敏臣,古賀美智恵((株)九検),黒田一郎(防衛大学校) ･･･37

(B4) 逆 T 型 PC 板を用いた合成スラブの開発
小田将太郎, 濱本哲嗣,八木沼宏己((株)富士ピー・エス) ･･･43

C 地盤・土壌汚染対策

座長：井口龍太(防衛省大臣官房)

(C1) ジオセルの材料特性と適用例
川俣さくら,原田道幸,大山亮貴(東京インキ(株)),宮本慎太郎(防衛大学校) ･･･49

(C2) 土壌洗浄による枯葉剤由来ダイオキシン汚染土壌の効率的な浄化・減容化処理
毛利光男,馬場直紀,青木陽士,平澤卓也(清水建設(株)) ･･･55

(C3) DDT 含有土を対象とした現地処理方法の開発
日野良太,西川直仁,緒方浩基((株)大林組) ･･･61

(C4) UAV からの音波照射加振を用いた遠距離浅層地中探査技術の研究
杉本恒美,杉本和子,中川裕,上地樹,高木均,坂本憲昭(横浜桐蔭大学),
歌川紀之,黒田千歳(佐藤工業(株)) ･･･67

D 鋼材の腐食対策・爆発

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) 鉄,コンクリートの再生・延命に関する研究
松岡歩美,関口有桂里,吉武敏雄（(株)染めQテクノロジィ) ･･･73

(D2) ポリウレアによる防爆緩和試験と耐震構造
緒方修一((一社)ポリウレア普及協会) ･･･79

(D3) 機械学習を用いた打音スペクトルの分析による鉄筋腐食の判定
黒田一郎,鈴木大地(防衛大学校),西敏臣((株)九検) ･･･85

(D4) 爆発による鋼材の損傷とその評価
市野宏嘉,別府万寿博(防衛大学校),萱森陽一,吉井健一(日本製鉄(株)) ･･･93

Contents list

A Infection disease, Natural disaster

Chair: GOTO T. (Bureau of Defense Buildup Planning, Ministry of Defense)

(A1) Mechanisms of actions of pH-controlled Sodium Hypochlorite in cleaning and disinfecting operations
FUKUZAKI S., YOSHIDA S., NAKAMURA K., NOJIMA S. (Mie Univ.) ･･･1
(A2) A Study on similarity between tensegrity structure and fault structure,
a trial of visualize and audible methods of earth quake dataset
OGIHARA Y. (NYK Co.,Ltd.), SATO H. (Emeritus of National Defense Academy) ･･･9
(A3) Demonstration project for pathogenic microbial fungicides and deodorant functions
for calcined eggshell and ozone water
NISHIYAMA T., NAGATOMI H.(ESC Corporation) ･･･15
(A4) Demonstration experiment on infectious disease vector mosquito control
filling catch basins with Mosquito Eliminating Mat
SUZUKI M., YAMADA T. (Chuo Univ.) ･･･19

B Facility management and maintenance

Chair: HATTORI T. (Bureau of Defense Buildup Planning, Ministry of Defense)

(B1) A study of preventive maintenance and safety verification in disaster for existing runways
KUNITAKE M. (JASDF) ･･･25
(B2) Crack control of large water tank wall ･･･31
ITO T., KATADA S.(Abe Nikko Kogyo Co.,Ltd.), AYABE S.(Naval system research center of ATLA),
YAMAZAKI S.(MES Tokki & Eng.Co.,Ltd.), OGAWA K.(Iwakuni ready-mixed concrete cooperative)
(B3) Inspection of structures by impact acoustic method using AI technology
UTAGAWA N., KURODA C. (Satokogyo Co.,Ltd.), YASUNAGA M. (Tsukuba Univ.),
NISHI T., KOGA M. (Kyuken Co.,Ltd.), KURODA I. (National Defense Academy) ･･･37
(B4) Development of synthetic slab using inverted T-type PC plates
ODA S., HAMAMOTO T., YAGINUMA H. (Fuji P.S Corporation) ･･･43

C Soil mechanics and Soil pollution countermeasures

Chair: IGUCHI R. (Minister’s Secretariat, Ministry of Defense)

(C1) Material properties and applications of Geocell
KAWAMATA S., HARATA M., OYAMA R. (Tokyo Printing Ink Mfg. Co.,Ltd.),
MIYAMOTO S. (National Defense Academy) ･･･49
(C2) Application of soil washing to the remediation and the volume reduction
of agent orange/dioxin contaminated soils
MOURI M. , BABA N., AOKI Y., HIRASAWA T. (SHIMIZU Corporation) ･･･55
(C3) Development of on-site treatment method for DDT-containing soil
HINO R., NISHIKAWA N., OGATA H. (Obayashi Co.,Ltd.) ･･･61
(C4) Study of long-distance shallow underground exploration technology
using acoustic irradiation induced vibration from UAV
SUGIMOTO T., SUGIMOTO K., NAKAGAWA Y., UECHI I., TAKAGI H.,
SAKAMOTO N. (Toin Univ. of Yokohama),UTAGAWA N., KURODA C. (Satokogyo Co.,Ltd.) ･･･67

D Steel corrosion and Explosion

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

(D1) Study on regeneration and prolong life duration of iron and concrete
MATSUOKA A., SEKIGUCHI Y., YOSHITAKE T. (SOMAY-Q Technology Corp.) ･･･73
(D2) Blast Mitigation Earthquake-resistant structure by Polyurea
OGATA S, (Polyurea Promotion Association) ･･･79
(D3) Judgement of reinforcement corrosion by sound spectrum analyses using machine learning
KURODA I., SUZUKI D. (National Defense Academy), NISHI T. (Kyuken Co.,Ltd.) ･･･85
(D4) Fracture characteristics and damage evaluation of steel subjected to explosion
ICHINO H., BEPPU M. (National Defense Academy),
KAYAMORI Y., YOSHII K. (NIPPON STEEL Corp.) ･･･93

防衛施設学会令和２年度年次研究発表会（2021 年４月）

pH 調整次亜塩素酸ナトリウムの洗浄・殺菌操作における作用機序

Mechanisms of Actions of pH-Controlled Sodium Hypochlorite in Cleaning and Disinfecting Operations

福﨑智司*，吉田すぎる**，中村幸翼**，野嶋　駿**
FUKUZAKI Satoshi, YOSHIDA Sugiru, NAKAMURA Kosuke, NOJIMA Shun

*　工博，** 修（学）三重大学大学院生物資源学研究科（〒514-8507　三重県津市栗真町屋町 1577）

キーワード：次亜塩素酸，洗浄・殺菌，超音波霧化，通風気化，気体状次亜塩素酸
（*Hypochlorous acid, cleaning and disinfection, ultrasonic fogging, forced-air vaporizing, gaseous hypochlorous acid*）

1. はじめに

次亜塩素酸ナトリウム（NaOCl）は、広い殺菌スペクトルと速効性をもつ殺菌剤であることから、食品産業をはじめ医療、介護施設において長年汎用されてきた。次亜塩素酸ナトリウムは、酸化作用を持つ強アルカリ性の液体であり、理想的な殺菌剤としての要件を数多く満たすことに加えて洗浄、漂白、脱臭作用を持ち、そして設備や機器に対しては，有効範囲内で制限なく使用することができることが特長である。

従来、次亜塩素酸ナトリウムは用途に応じて水で適度に希釈され、弱アルカリ性の水溶液として使用されてきた。昨今では、希薄な食塩水や塩酸を電気分解して調製する次亜塩素酸水（強酸性～微酸性）や、次亜塩素酸ナトリウムと塩酸を水道水に混合希釈して安全に調製される弱酸性の次亜塩素酸水溶液が使用されている（本稿では、製法を問わず、次亜塩素酸を含む水溶液を「次亜塩素酸水溶液」と総称する）。

これらの次亜塩素酸水溶液の主たる活性因子は、いずれの水溶液においても次亜塩素酸（HOCl）である。単純に考えれば、作用因子となる化学種とその濃度が同一であれば作用効果も同等となるはずである。ところが、実際には各水溶液の pH の違いにより洗浄、殺菌、漂白、脱臭の効力は大きく異なる[1-3]。

また、従来の次亜塩素酸水溶液の使用対象は設備・機器・食材などの「モノ」であったが、最近では浮遊菌・落下菌、付着菌対策として「室内空間」を対象とする微生物制御に適用する技術が普及し始めている。

本稿では、次亜塩素酸ナトリウムの活性因子である次亜塩素酸（HOCl）の化学的特性ならびに洗浄および殺菌・不活化機序について解説した後、次亜塩素酸水溶液を用いた超音波霧化方式および通風気化方式による空間微生物制御の安全性と有効性について述べる。

2. 次亜塩素酸の化学的特性

2. 1　酸化作用

次亜塩素酸（HOCl）の第一の特性は、酸化作用を示すことである。HOCl は、水分子（HOH）の１つの水素（H）が塩素（Cl）に置換された物質であり、水分子と同様に電気的に中性の分子である。すなわち、HOCl 分子中の塩素原子の酸化数は+1（Cl^+）であり、強い求電子種として作用する[2]。Cl^+は、電子密度の高い結合部位（δ^-）を選択的に攻撃し、２個の電子（$2e^-$）を奪い、自ら安定なCl^-となる過程で殺菌、洗浄、漂白、脱臭などの作用を示す。

2. 2　解離特性

次亜塩素酸の第二の特性は、弱酸であり、水溶液の pH が高くなるに従って OCl^-と H^+に解離することである（2 式）。HOCl の解離定数（pK_a）は、25℃で約 7.5 である[4]。

$$HOCl \rightleftharpoons OCl^- + H^+ \qquad (1)$$

図-1 に、次亜塩素酸水溶液の pH 領域によって変化する HOCl と OCl^-の存在割合の関係を示す[2]。通常の使用濃度に希釈された NaOCl 水溶液は弱アルカリ性（pH 8～10）

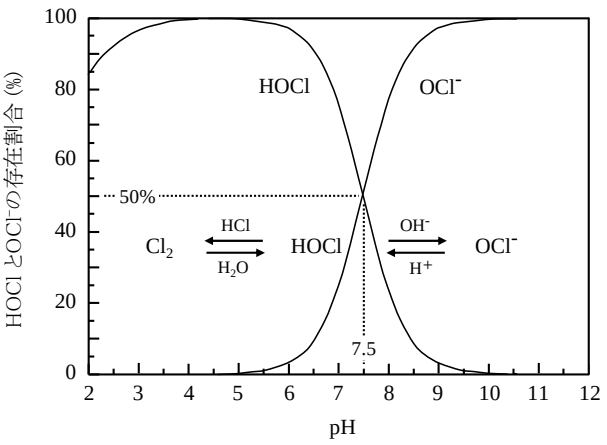


図-1　次亜塩素酸の解離特性とpHの関係

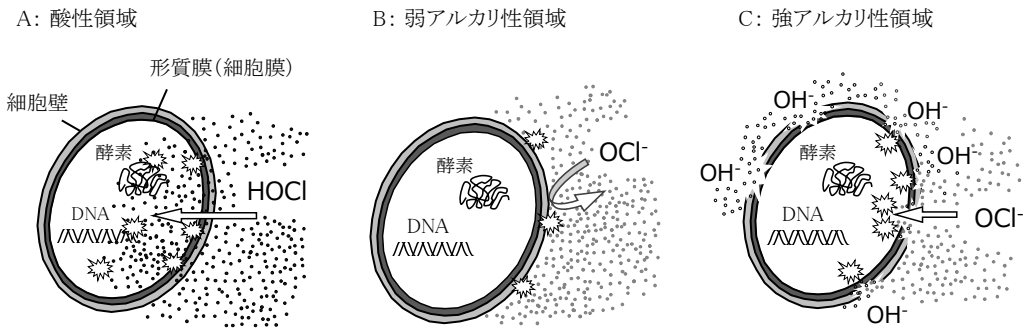


図-2 酸性から強アルカリ性領域における次亜塩素酸水溶液の殺菌メカニズムの概念図

であるため、次亜塩素酸は主としてOCl^-として存在する。pH がアルカリ性から酸性側に傾くと、OCl^-は徐々に H^+が付加されプロトン化して非解離型となる。弱酸性領域(pH4～6))では、非解離型の HOCl が高割合で存在する。この pH に依存した HOCl と OCl^-の存在比率が、洗浄や殺菌の作用効果を支配している。

さらに、塩酸を加えて pH を強酸性領域にすると、HOCl の一部は溶存塩素(Cl_2)に変化し、ほとんどの未溶解分子は気相中に飛散する (2 式)。“まぜるな危険”という表記は、この塩素ガスの発生の危険を警告するものである。

$$HOCl + HCl \rightarrow Cl_2 + H_2O \qquad (2)$$

3. 次亜塩素酸の殺菌・不活化機序

図-2 に、酸性、弱アルカリ性、強アルカリ性領域における次亜塩素酸水溶液による細菌 (原核細胞) の殺菌機構のモデル図を示す。一般に、細菌細胞の最外部の周囲には細胞壁があり、その内側に形質膜 (細胞膜) がある。細胞壁は厚く丈夫な構造体であるが、イオンや分子量の小さい親水性分子を容易に透過させる。これに対して、形質膜はリン脂質二重層 (内部に脂肪酸の疎水性層を形成) を基本構造としており、イオンや親水性分子の透過を妨げる。以下に、各 pH 領域における細菌に対する次亜塩素酸の殺菌機序の詳細を述べる。

3. 1 酸性～弱アルカリ性領域 (HOCl が主な殺菌因子)

次亜塩素酸ナトリウムの希釈水溶液 (弱アルカリ性) および酸性の次亜塩素酸水溶液の殺菌効果は、水溶液中の全遊離有効塩素濃度ではなく、非解離型 HOCl の濃度に強く依存する。非解離型の HOCl は、小さい分子サイズと電気的中性という性質から、受動拡散 (濃度勾配) により容易に細胞壁と形質膜を透過する (図-2A)。細胞内に侵入した HOCl は、電子密度の高い求核性部位である二重結合部やアミノ基、チオール基(-SH)、プリンおよびピリミジンの塩基、アミン、鉄ー硫黄中心などを選択的に攻撃して酸化し損傷を与える。さらに、HOCl による酸化ストレスにおいて、細胞内で発生するヒドロキシラジカル(・OH)が殺菌作用に関与していることも示唆されている[2]。このように、細胞内部での HOCl 作用機序は、強力な殺菌効果を与えることができる。

一方、図 2B で示した弱アルカリ性領域では OCl^-は形質膜にある脂質二重層を透過することができない。そのため、OCl^-は形質膜の外側から酸化作用を及ぼし損傷を与えることになる。そのため、同じ濃度であれば OCl^-の殺菌力は HOCl と比較すると大きく劣る。しかし、OCl^-の濃度を高めるか作用時間を延長することで、HOCl と同等の殺菌効果を得ることは可能である。

3. 2 強アルカリ性領域 (OH^-と OCl^-の相乗作用)

強アルカリ性の次亜塩素酸ナトリウムの濃厚溶液や次亜塩素酸ナトリウムを配合したアルカリ性洗浄剤は、高濃度の水酸化物イオン(OH^-)を含有する。高濃度の OH^-は、細胞壁や形質膜を構成する物質を局所的に分解し、細胞表層の構造に損傷を与える。そして、細胞表層が損傷を受けることにより OCl^-との反応性が高まり、必須酵素の-SH 基やアミノ基を酸化して触媒機能を阻害するものと考えられる (図-2C)。この効果は、芽胞や各種ウイルスの不活化に対しても有効である。

3. 3 殺菌活性の指標

一般に，速効性のある消毒剤による微生物の殺菌においては，消毒剤の濃度と作用時間が殺菌効率を決める主要な因子 (変数) となる．微生物の死滅過程を速度論的に解析するためのモデルとして，Chick-Watson の法則[2]がもっとも一般的に用いられている．

$$\log (N/N_0) = -kCT \qquad (3)$$

ここで、N_0 は微生物の初発生菌数、N は時間 T における生菌数、C は消毒剤の濃度、k は一次死滅 (不活化) 速度定数である。消毒剤の濃度の項は， C^n と表されることがあるが、実験室レベルの殺菌試験では $n=1$ となることが多く、$\log (N/N_0)$ vs CT のグラフは直線関係 (疑似一次反応) で表されることが多い。このグラフから、初発生菌数を一定割合減少させるのに必要な濃度時間積 (CT 値) や k 値を求めることができる。これらの CT 値や k 値の概念は、殺菌効力の指標として用いられている。

3. 4　細菌（栄養細胞）の殺菌

図-3 に、黄色ブドウ球菌（*Staphylococcus aureus*）を pH 6.0, 7.5, 9.0 に調整した次亜塩素酸水溶液（5.0 mg/L）で処理したときの死滅曲線を示す。縦軸は $\log(N/N_0)$、横軸は *CT* 値である（*C* は遊離有効塩素（FAC）濃度）。いずれの pH に対しても、(3)式の擬似一次反応に従う直線的な生残曲線が得られており、pH が弱アルカリ性から弱酸性に低下するほど死滅速度が大きくなった。ここで、次亜塩素酸水溶液中での非解離型 HOCl の存在割合は、pH 6.0 で約 97%、pH 7.5 で約 50%、pH 9.0 で約 3%である（図-1 参照）。すなわち、FAC 濃度が同じであれば HOCl の占める割合が大きいほど殺菌効果は大きいことになり、主たる殺菌因子が HOCl であることを示している。なお、pH 9.0 では HOCl の割合はわずか 3%であるが、1.2-log の減少が得られた。これは、極少量の HOCl とともに OCl^-（約 97%）にも *S. aureus* に対して殺菌効果があることを示している。

一般に、化学反応（酸化反応を含む）の進行は熱によって促進される。次亜塩素酸の酸化力に基づく殺菌力は Arrhenius 型の温度依存性を示し，温度が 10℃上昇する毎に約 2 倍増加すると概算されている [5]。

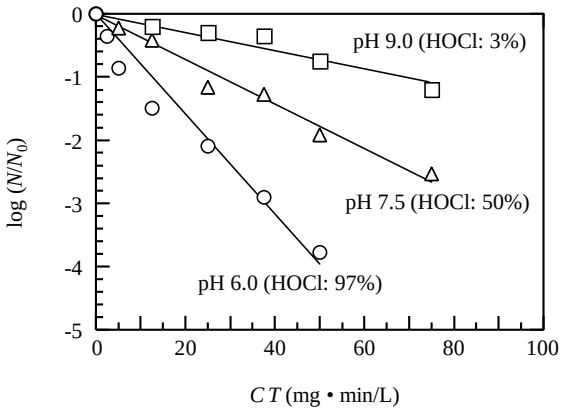


図-3　次亜塩素酸水溶液による *S. aureus* の殺菌に及ぼす pH の影響（FAC 濃度：5.0 mg/L；温度：20℃）

3. 4　ウイルスの不活化

図-4 に、蒸留水、pH 6.0 および pH 10.0 に調整した次亜塩素酸水溶液（50 mg/L）と A 型インフルエンザウイルス（pdmH1N1）の濃縮液を 9:1 の比率で混合し、一定時間浮遊接触させたときのウイルス感染価の減少を示す。ウイルス感染価は，イヌ腎臓細胞（MDCK 細胞）への感染性をプラーク形成単位（Plaque-forming unit: PFU）で評価している。蒸留水の場合、5 分間の接触時間内ではウイルス感染価の減少はほとんど見られず、感染価の減少は 0.2-log であった。pH 6.0 の次亜塩素酸水溶液の場合、感染価はわずか 10 秒間の接触で検出限界以下まで減少した（< 1-log）。pH 10.0 の次亜塩素酸水溶液の場合、ウイルス感染価の減少は 10 秒後では 2.5- log であったが、30 秒

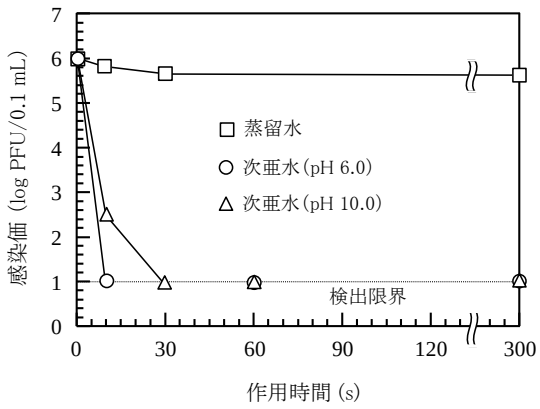


図-4　pH調整次亜塩素酸水溶液によるA型インフルエンザの不活化（FAC濃度，50 mg/L）

後には検出限界以下となった。このように、pH 6.0 と 10.0 の次亜塩素酸水溶液はいずれも、A 型インフルエンザウイルスに対して 30 秒以内でウイルス感染価を 4.7-log 以上減少（蒸留水との比較）させる速効的な不活化効果を示した。

pH 6.0 の次亜塩素酸水溶液の方がより強力な不活化力を示したのは、非解離型 HOCl のエンベロープ透過性と内部のウイルス RNA および関連酵素への損傷に起因すると考えられる。一方、次亜塩素酸水溶液中の OCl^-は、エンベロープ表面に突起した HA に対する酸化反応により HA の吸着能を不活化し感染価の減少をもたらすと考えられている。

4. 次亜塩素酸ナトリウムの洗浄機序

次亜塩素酸ナトリウムの主成分は、強アルカリ剤である水酸化ナトリウムと次亜塩素酸である。アルカリ剤とは、水溶液中で溶解して水酸化物イオン（OH^-）を放出する薬剤の総称である。アルカリ剤は毒性が少なく、中和によって無害化できることが利点である。OH^-は、タンパク質，多糖類，微生物，油脂などの有機性汚れに対して優れた溶解力と加水分解反応、けん化反応などを示し、複合汚れに対しても一括洗浄が可能であることから、次亜塩素酸ナトリウムの基盤的な洗浄力となっている。

4. 1　表面付着汚れ

ステンレス鋼などの硬質表面に付着した有機物や微生物に対する次亜塩素酸の洗浄力は、解離型である次亜塩素酸イオン（OCl^-）の濃度に依存する。図-5 に、水洗浄後にタンパク質が残存したステンレス鋼を、種々の pH（4～11）および遊離有効塩素濃度（100～1,000 mg/L）に調整した次亜塩素酸水溶液で洗浄したときの除去率を示す。水酸化ナトリウムで調製した洗浄液を用いた洗浄（OH^-の作用）と比較すると、次亜塩素酸水溶液を用いた洗浄では比較的低いアルカリ性 pH 領域において高い除去率が得られた（図-5A）。次亜塩素酸ナトリウムの効果は、

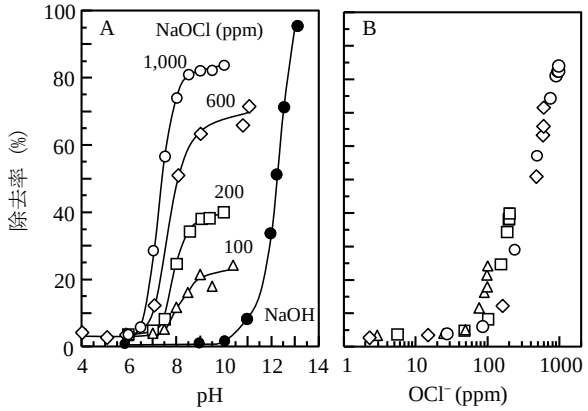


図-5　水洗浄後にステンレス鋼に残存したタンパク質の除去に及ぼす次亜塩素酸水溶液のpHと有効塩素濃度の影響（40℃）

有効塩素濃度が高いほど、また pH が高くなるほど顕著に現れた。一方で、有効塩素濃度が 1,000 mg/L と高濃度で存在しても、弱酸性の pH 溶液であれば次亜塩素酸水溶液の洗浄効果は得られなかった。

ここで、図-5A において OH^-の作用のみではタンパク質の除去が起こらない pH 4～10 の領域に着目してみる。図-5B は、各 pH における解離型 OCl^-濃度を算出し、タンパク質の除去率をOCl^-濃度の関数として整理し直した図である。異なる pH および遊離有効塩素濃度で得られたタンパク質の除去率は、OCl^-濃度に対して一本の線上に集約された。この結果は、次亜塩素酸水溶液の洗浄力が、解離型 OCl^-濃度に強く依存することを示している。図-5 の洗浄系の場合、次亜塩素酸水溶液の洗浄力が発現するためには、少なくとも 100 mg/L の OCl^-が存在しなければならないことになる。

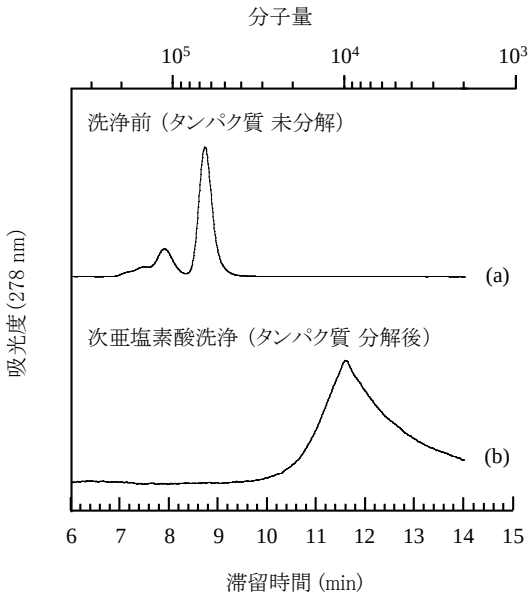


図-6　次亜塩素酸水溶液（pH 10.0）を用いた洗浄で離脱したタンパク質のGFCクロマトグラム

図-6 に、pH 10.0 の次亜塩素酸水溶液を用いた洗浄により除去されたタンパク質分子（分子量 : 67,000）のゲルろ過クロマトグラフィー（GFC）のクロマトグラムを示す。GFC 分析では，滞留（保持）時間（retention time: RT）が長いほど分子量が小さいことを意味する。洗浄前（未分解）のタンパク質試料のクロマトグラムの鋭敏なピーク位置（RT: 8.7 min）と比較すると、次亜塩素酸水溶液で離脱したタンパク質のクロマトグラムには長い滞留時間（RT: 11.6 min）の低分子量領域にピークが見られた。これは、洗浄過程において OCl^-によるタンパク質の酸化分解が起こっていることを示している。

このように、アルカリ性水溶液中の OCl^-は、OH^-の洗浄作用と相加・相乗的に、有機物汚れを酸化分解し低分子化することで汚れの離脱を促進していると考えられている。

4. 2　プラスチック収着汚れ

プラスチックに収着（吸着と吸収）した食品由来の香気成分や疎水性色素の分解に対しては、OCl^-ではなく、非解離型 HOCl が効力を発揮する。

図-7 に、ターメリックの黄色色素であるクルクミンが収着したポリエステル板を pH 4.0～12.0 の次亜塩素酸水溶液（1,000 mg/L）に 2 時間浸漬した後の着色度（*K/S* 値）を示す[6]。浸漬洗浄前の *K/S* 値は 72.0 であり、*K/S* 値が低いほどよく脱色されている（着色度は小さい）ことを意味する。pH 4.0～5.0 では、*K/S* 値は 0.4～0.7 まで減少し、顕著な脱色効果が得られている。pH 6.0～8.0 でも *K/S* 値は低い値（1.2～2.4）であるが、目視ではクルクミンの残色が認められる。*K/S* 値は、pH10.0 以上で脱色効果は著しく低下し、pH 11.0～12.0 では *K/S* 値の減少は全く見られていない。すなわち、OH^-および解離型 OCl^-による収着クルクミンの脱色効果はきわめて小さいといえる。以上の結果は、次亜塩素酸水溶液の pH の低下、すなわち非解離型 HOCl の存在割合に依存してクルクミンの脱色が起こったことを示している。

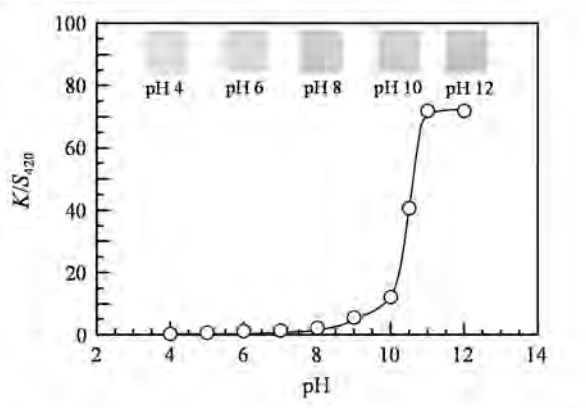


図-7　ポリエステル板に収着したクルクミンの脱色に及ぼす次亜塩素酸水溶液（1,000 ppm）のpHの影響

6　室内空間における低濃度次亜塩素酸の安全性

6. 1　室内における次亜塩素酸の２種類の形態

次亜塩素酸水溶液を使用する各種の屋内施設においては、いわゆる「塩素臭」が感じられる。この臭気成分の正体は、水溶液から揮発した気体状の次亜塩素酸（$HOCl_{(g)}$）である。非解離型 HOCl は揮発性であるため、水溶液の撹拌、バブリング、空間噴霧、通風気化によって室内空間に放散（液相から気相へ移動）する。すなわち、室内空間において次亜塩素酸は微細粒子中に存在する分子と気体状となって室内に拡散した分子の 2 種類の形態で存在し作用する.

このような室内環境では、作業者は次亜塩素酸水溶液の微細粒子や$HOCl_{(g)}$と接触することになる。次亜塩素酸水溶液の安全性については、実験動物を用いた経口投与試験、眼刺激試験、皮膚刺激性および感作試験、粘膜刺激性、急性毒性、変異原性など多くの試験項目で確認されている。

一方、微細粒子やガス状物質の場合，最も重要な暴露経路は吸入である。当然ながら、$HOCl_{(g)}$は極低濃度であっても生物に対して作用力を与える。次亜塩素酸の濃度によってはヒトへの影響も無視することはできない。それゆえ、次亜塩素酸水溶液を安全かつ有効に使用するためには，作業環境の安全基準を知り、作業環境における濃度を適正に管理する必要がある。

6. 2　安全性基準

6. 2. 1　塩素ガス（≒ $HOCl_{(g)}$）

気体状の化学物質に対する安全性の基準として、労働安全衛生法の環境基準および日本産業衛生学会が定める許容濃度がある[7]。現在、次亜塩素酸に対する基準は定められていないが、塩素ガス（Cl_2）に対して 0.5 ppm（=500 ppb）と定められている。これらは、1 日 8 時間、週 40 時間曝されても健康上問題のない濃度である。また、欧州連合リスク評価書（塩素）では、ヒトにおける吸入試験の全例において、吸入された塩素の 95%を超える量が上気道で吸収され（塩素の影響は主に上気道に限定）、上気道を超えて行くのは 5%未満で、呼吸空間（肺胞腔）に達するのは無かったことが記されている。そして、呼吸器刺激に関する NOAEC（無影響濃度）は 0.5 ppm としている[8]。

塩素ガスを基準とする理由は、塩素ガスは生体の水と反応すると速やかに次亜塩素酸に変換され（4 式）、この次亜塩素酸が生体に影響を及ぼすことになるから、次亜塩素酸の生体への影響は塩素ガスの影響に置き換えて評価することが理にかなっているからである。さらにいえば、(4)式では副生物として塩酸が生成するため、生体組織に与える影響は塩素ガスの方が大きいと考えられる。

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HCl \qquad (4)$$

6. 2. 2　微細粒子

次亜塩素酸水溶液の微細粒子の安全性に関しては、ラットを用いた実験例が報告されている[9]。実験は、超音波霧化器に 50, 100, 200 mg/L の弱酸性次亜塩素酸水溶液（pH 5.5～5.8）を充填して霧化噴霧し、13, 27, 53 mg/h・m^3 の 3 段階の気中濃度の霧化微細粒子をラット（8 匹／群）に 90 日間吸入させて行われた。吸入期間を通して、対照群（水道水を霧化）および暴露群ともに臨床所見は良好であり、体重の推移にも有意差は認められていない。肝機能、代謝機能、腎機能、血液一般検査、血液学的検査においても、両群に顕著な相違は認められていない。このことから、少なくとも 13～53 mg/h・m^3 の気中濃度の霧化微細粒子であれば全身毒性および吸入毒性はないと考えられる。

7　超音波霧化粒子の空間噴霧による微生物制御

次亜塩素酸水溶液を室内空間に超音波霧化噴霧すると、微細粒子は重力によって下方に落下を始め、空間中で水と次亜塩素酸の揮発現象をともないながら微細化が進み室内を浮遊する粒子となる。一方、微細粒子から揮発した$HOCl_{(g)}$は室内に拡散する。次亜塩素酸の密度という点では，明らかに微細粒子中（液相）の方が空間中（気相）よりも大きい。したがって、殺菌作用は微細粒子が直接接触する方が大きいが、接触箇所は限定される。$HOCl_{(g)}$は、空間での密度は小さいが、均一に拡散するため室内のあらゆる表面と接触させることができるうえ、濃度の制御も容易である。

7. 1　$HOCl_{(g)}$の室内濃度の理論的計算

一定容積の室内（90 m^3）において、一般的な噴霧条件である 50 mg/L の次亜塩素酸水溶液を 300 mL/h で 1 時間霧化噴霧したときの室内の気体状次亜塩素酸 $HOCl_{(g)}$の濃度を理論的に計算してみる[10]。

まず、標準状態（0℃, 1 atm）における理想気体 1 mol の体積を 0.0224 m^3 とすると、理想気体の状態方程式から 25℃での体積は約 0.0244 m^3 となる。次に、噴霧した微細粒子から全ての次亜塩素酸が揮発し、かつ揮発した$HOCl_{(g)}$の分解および固体表面への吸着は起こらないと仮定する。FAC 濃度「mg/L」は、1 L あたりの Cl_2 換算量であるから、Cl_2 の分子量を 70.91 とすると、1 時間霧化後の室内には 5.16×10^{-6} m^3 の $HOCl_{(g)}$が存在することになる（5 式）。90 m^3 の室内に $HOCl_{(g)}$が均一に拡散したとすると、$HOCl_{(g)}$濃度は 57.3 ppb (v/v)と算出される（6 式）。

$$[0.05 \times 300/1000]/70.9 \times 0.0244 = 5.16 \times 10^{-6}\ m^3 \qquad (5)$$

$$5.16 \times 10^{-6}\ m^3/90\ m^3 = 57.3\ \text{ppb (v/v)} \qquad (6)$$

一般的な噴霧条件では、理論上は Cl_2 の基準濃度（500 ppb）の約 1/10 程度の濃度となる。

7. 2　$HOCl_{(g)}$の濃度分布の測定例

図-8 に、上記理論的計算と同条件にて、90 m^3 の室内

において弱酸性次亜塩素酸水溶液（pH 5.8, 50 mg/L）の超音波霧化噴霧を 1 時間行った後の室内の $HOCl_{(g)}$ の濃度分布を示す[10]。噴霧口の高さは、床から 1.0 m である。霧化器からの各距離において測定された $HOCl_{(g)}$ の濃度には、高さ方向の濃度分布があった。$HOCl_{(g)}$ の濃度は床面でもっとも高く、上方に向かうほど低くなる傾向が見られた。この濃度分布は、霧化器からの距離に関係なくほぼ一致していた。$HOCl_{(g)}$ 濃度は、床面から膝下の高さ（0～0.3 m）でもっとも高くなっているが（25～27 ppb）、基準値の約 1/20 であった。さらに、着座姿勢および成人の起立姿勢の顔の位置（吸引する位置）では約 1/30～1/40 程度であった。

実空間での $HOCl_{(g)}$ の濃度測定では、1 時間噴霧後の $HOCl_{(g)}$ 濃度の最大値（27 ppb）は理論値（57.3 ppb）の約 47%に過ぎない。この理論値との差違は、理論計算の前提である、すべての HOCl/OCl^- が微細粒子から揮発するという仮定、そして $HOCl_{(g)}$ の分解および固体表面への吸着は起こらないとする仮定が成立しないからである。HOCl は揮発性ではあるが、ヘンリー定数はオゾンや Cl_2 と比較するとはるかに低く（水に溶解しやすく）、水溶液中には相対的に安定に存在する。

一方、放散した $HOCl_{(g)}$ の微細粒子への再吸収、室内の各種表面への吸着、吸着部位での酸化反応による分解により気相中の濃度は減少する。その結果、室内での $HOCl_{(g)}$ の放散量と消失量が低濃度領域で平衡に達したと考えられる。このように，次亜塩素酸水溶液の超音波霧化による気体状次亜塩素酸の室内濃度は極めて低濃度なのである。

さらに、噴霧時間を 1 時間から 4 時間まで延長した場合や、供給する次亜塩素酸水溶液の濃度を 100 mg/L に高めても、$HOCl_{(g)}$ の濃度は 32 ppb（測定高さ 0～0.3m）までしか上昇しないことも確かめられた（詳細は割愛）。

7. 3 霧化微細粒子の到達濃度の測定例

噴霧された微細粒子からは次亜塩素酸が揮発するため、

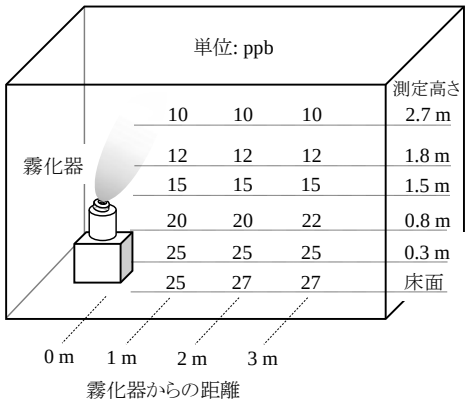


図-8 会議室において次亜塩素酸水溶液を超音波霧化噴霧したときの気体状次亜塩素酸の濃度分布（1時間噴霧）
（会議室：90 m³, 無人, 閉扉, 空気撹拌なし, ブラインド遮光；噴霧条件：pH 5.8, 50 mg/L, 300 mL/h, 3 m³/h）

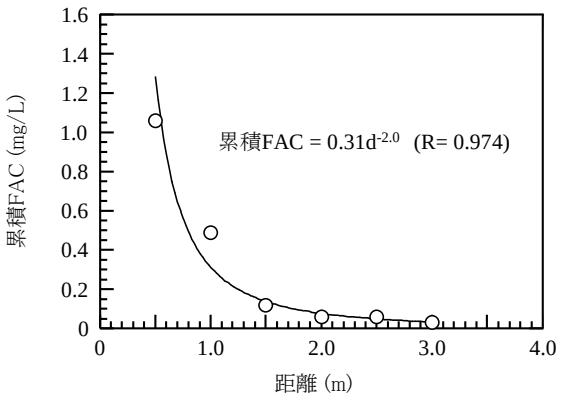


図-9 会議室において次亜塩素酸水溶液を超音波霧化噴霧したときの床面のシャーレ水（2 mL）に累積した遊離有効塩素濃度（8時間）（噴霧条件：図-8と同じ）

噴霧口から離れるほど微細粒子中の次亜塩素酸の濃度は減少する。濃度の測定は、一定の大きさの容器に微細粒子を捕集して有効塩素濃度を測定する方法が容易である。

図-9 に、上記理論的計算と同条件にて 90 m^3 の室内において弱酸性次亜塩素酸水溶液（pH 5.8, 50 mg/L）の超音波霧化噴霧を 8 時間行ったときに、床面に置いたシャーレ内の純水に捕集された微細粒子中の次亜塩素酸の遊離有効塩素（FAC）濃度（mg/L）を示す。噴霧口は、床から 1 m の位置にあり、霧化器から 0.5 m 間隔で床面にシャーレを置いた。FAC 濃度は、噴霧口から最も近い 0.5 m の位置では 1.06 mg/L であったが、距離（d）が増加するとともに減少し、3.0 m の位置では 0.03 mg/L であった。これは、微細粒子が届いていないのではなく、粒子の微細化が進み床面への落下量が減少するためと思われる。このように、8 時間の噴霧でも一定容器内に捕集される次亜塩素酸は水道水レベルの濃度である。

$$累積\ FAC = 0.31d^{-2.0} \quad (R=0.974) \qquad (7)$$

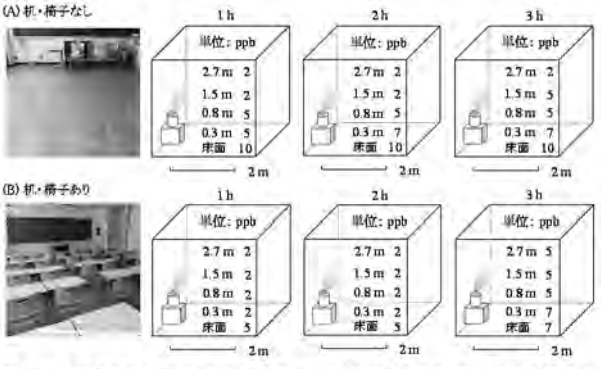
この結果から、噴霧口から 3.0 m までの距離内においてFAC 累積量はおおよそ距離の 2 乗に反比例して減少することがわかった。

7. 4 超音波霧化噴霧の殺菌効果

105 m^3 の教室において机と椅子（30 台, 30 脚）がある・なしの条件で、弱酸性次亜塩素酸水溶液（pH 6.0, 50 mg/L）の超音波霧化噴霧（霧化速度：300 mL/h）を 3 時間行い、霧化器から 2 m 離れた位置での霧化微細粒子の到達濃度、$HOCl_{(g)}$ の濃度、付着菌に対する殺菌効果を測定した。

7. 4. 1 霧化微細粒子の到達濃度と $HOCl_{(g)}$ の濃度

超音波霧化噴霧を 3 時間行ったとき、床面（2 m 位置）においたシャーレ内の純水（2 mL）に捕集された次亜塩素酸の FAC 濃度は、机と椅子がない空間では 0.02 ±0.01 mg/L、机と椅子がある状態ではシャーレを置く位置にも関係するが 0.01 mg/L 以下であった。霧化微細粒子が机と椅子表面に吸着することで、床面に落下する量が減少



図−10 机・椅子の存在・非存在下での教室における弱酸性次亜塩素酸水溶液の超音波霧化噴霧における気体状次亜塩素酸の濃度分布
（教室：105 m³，無人，閉扉，空気撹拌なし，ブラインド遮光；噴霧条件：pH 5.8, 300 mL/h, 3 m³/h）

することが確認された。

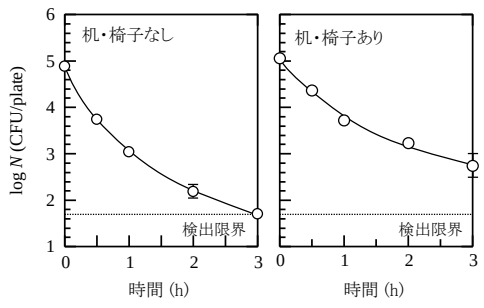
図−10に、超音波霧化噴霧を3時間行ったときの$HOCl_{(g)}$濃度の経時変化を示す（2 m位置）。机と椅子がない場合、床から天井にかけての$HOCl_{(g)}$濃度および濃度勾配は1〜2時間の霧化噴霧でほぼ平衡に達しており、床面では10 ppbと相対的に低い値が得られた。おそらくは、床面の汚染度（塩素消費物質）の影響ではないかと考えられた。

机と椅子がある場合、床面から0.8 mの範囲における$HOCl_{(g)}$濃度はさらに低濃度になっており、机・椅子のない空間の1/2〜1/3の濃度であった。これは、霧化微細粒子の机と椅子表面への吸着および次亜塩素酸の分解に起因すると考えられる。一方で、この実験結果から$HOCl_{(g)}$は机や椅子の下方空間（裏側）まで拡散していること、そして霧化噴霧時間を延長すれば$HOCl_{(g)}$濃度は徐々に増加することが確認できた。

7. 4. 2 付着菌に対する殺菌効果

図−11に、霧化噴霧を3時間行ったときの床面（2 m位置）に置かれた湿潤寒天平板上の*S. aureus*の生残曲線を示す（相対湿度：47〜72%RH）。机と椅子がない場合、*S. aureus*の生残菌数は噴霧時間とともに減少し、3時間後には検出限界以下に達した（>3.2-log減少）。微細粒子の到達量（0.02 mg/L）および$HOCl_{(g)}$濃度（10 ppb）は低くても確実に生菌数を減少させることができた。

また、机と椅子がある場合でも3時間後の生菌数の対数減少値は2.3に達した。机や椅子の足元付近でも十分な殺菌効果が得られることが示された。これは、$HOCl_{(g)}$の拡散による殺菌効果だと考えられる。



図−11 机・椅子の存在・非存在下での教室における弱酸性次亜塩素酸水溶液の超音波霧化噴霧による湿潤平板上の*S. aureus*に対する殺菌効果
（実験条件：図−10と同じ；霧化器から2 m離れた位置）

8 通風気化方式による空間微生物の制御

通風気化方式は、室内空気を装置内に吸引して次亜塩素酸水溶液を含浸させた気液接触部材内を強制通風させることにより、空気中に含まれる浮遊菌や臭気物質を気液接触により装置内部で酸化処理した後、処理空気を再び室内に吹き出す方式で処理が行われる。さらに、吹き出し空気には揮発した低濃度の$HOCl_{(g)}$分子が含まれており、付着菌に対して殺菌作用を示す。

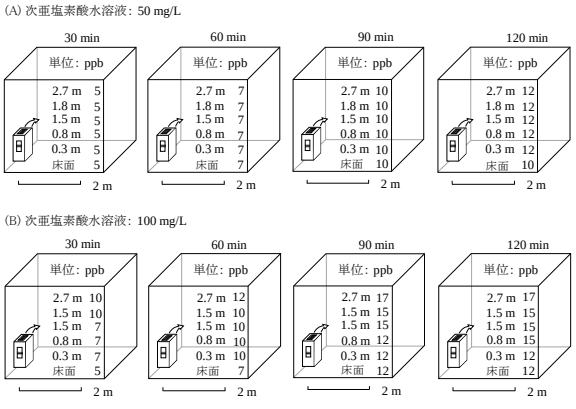
8. 1 $HOCl_{(g)}$の濃度分布の測定例

図-12に、無人の室内（75 m³）において次亜塩素酸水溶液（50, 100 mg/L; pH 8.5）を供給した通風気化式加湿装置を稼働（2 m³/min）したときの室内の$HOCl_{(g)}$の濃度を示す。次亜塩素酸水溶液は、60分間隔で入れ替えている。吹き出し口での$HOCl_{(g)}$濃度は、50 mg/L供給系で10〜22 ppb、100 mg/L供給系で25〜32 ppbであった。測定位置は、装置から1 m，2 m，3 m離れた地点で床面から天井に向けた種々の高さとした。$HOCl_{(g)}$の濃度は，装置からの距離方向ではほぼ一定であったため、図には装置から2 m離れた地点での測定値のみを示す。

$HOCl_{(g)}$の濃度は、いずれの次亜塩素酸水溶液の濃度においても床面から天井への高さ方向および装置からの距離に関係なくほぼ一定であり、$HOCl_{(g)}$が室内に均一に拡散していることが確認された。また、稼働時間とともに、そして供給次亜塩素酸水溶液の濃度に依存して$HOCl_{(g)}$濃度は高くなる傾向があるが、稼働120分後でも12〜17 ppbの範囲にある。この濃度は、Cl_2の安全性の基準濃度（500 ppb）の約1/30〜1/40である。

8.2 細菌に対する殺菌効果

図−13は、図−12の100 mg/L供給系において通風気化式加湿装置（2 m³/min）から3 m離れた棚（高さ0.9 m）に



図−12 会議室において通風気化式加湿器を稼働させたときの気体状次亜塩素酸の濃度分布
（会議室：75 m³，無人，閉扉，空気撹拌なし，ブラインドによる遮光；供給次亜塩素酸水溶液：pH 8.5; FAC濃度 50, 100 mg/L, 60分間隔で入れ替え；風速：2 m³/min）

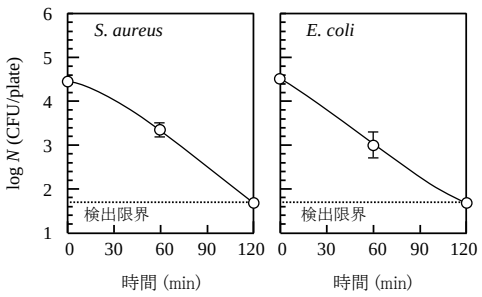


図-13 通風気化式加湿器を稼働させた室内における湿潤寒天平板上の細菌に対する殺菌効果（実験条件：図-12の100 mg/L供給系と同じ；装置から3 m離れた位置）

置いた湿潤寒天平板上の *S. aureus* および大腸菌（*Escherichia coli*）に対する殺菌効果である（相対湿度：55～70%RH）。*S. aureus* および *E. coli* とも、生残菌数は暴露時間とともに減少し，2 時間後には検出限界以下に達した（> 2.8-log 減少）。$HOCl_{(g)}$の濃度はヒトに安全な低濃度の領域（12～17 ppb）であっても、稼働時間を 2 時間まで延長することで、十分な殺菌効果を得ることができた。

9 食物アレルゲンの不活化

空間に$HOCl_{(g)}$を供給する方法の一つとして、シリコーンゴムの気体透過性を利用することができる。シリコーンチューブに弱酸性次亜塩素酸水溶液を充填すると、$HOCl_{(g)}$が透過気化して気相に放出される[11]。この現象を利用すれば、アレルギー物質を含む粉末食品残渣に対して乾式での不活化処理が可能となる。

アレルゲンの不活化実験は、10 mL の次亜塩素酸水溶液（pH 5.0, 1,000 mg/L）を充填したシリコーンチューブを入れた PC 容器内（3 L）にアレルゲンを塗布したポリエチレンテレフタレート（PET）板を置いて、透過気化した$HOCl_{(g)}$に 24 時間暴露させた（25℃）。暴露後、釈用緩衝液を染み込ませた綿棒で PET 板の表面をふき取り、イムノクロマト法でアレルゲン残留性を評価した。判定は、目視によりテストライン部分のラインがコントロールラインと同程度の濃さのものを陽性（＋）、ラインが見えないものを陰性（－）、コントロールラインの濃さよりも薄く見えるものを弱陽性（＋w）と判定した。

表-1 次亜塩素酸水溶液を充填したシリコーンチューブから透過気化した$HOCl_{(g)}$による各種アレルゲン物質の不活化

アレルゲン	テストラインの色の濃さ	
	未処理	$HOCl_{(g)}$暴露
大豆	＋／＋／＋	－／－／－
卵白	＋／＋／＋	－／＋w／－
小麦	＋／＋／＋	－／－／＋w
牛乳	＋／＋／＋	－／－／－
そば	＋／＋／＋	－／－／－
落花生	＋／＋／＋	－／－／－

表 1 は、各アレルゲン物質に対して$HOCl_{(g)}$による不活化試験を 3 回ずつ行ったときの結果である。この実験では、PC 容器内の$HOCl_{(g)}$濃度は 5,500 ppb 以上に保たれていた。卵白と小麦の試験において、弱陽性（+w）と判定される結果が 1 回ずつ見られたが、その他の試験ではすべて陰性（-）となった。この不活化効果は、$HOCl_{(g)}$がアレルゲンタンパク質を酸化分解する作用に起因すると考えられた。

謝辞

本論文の作成にあたり、防衛施設関連技術に関する有益な助言ならびに執筆の機会を提供頂いた株式会社 新興 研究開発部の岡村俊彦氏と東急不動産株式会社 企画戦略部の高野修一氏に対し深く感謝申し上げます。

参考文献

1) Rutala, W. A., and Weber, D. J. : Uses of inorganic hypochlorite (bleach) in health-care facilities. *Clin. Microbiol. Rev.*, **10,** 597-610 (1997).
2) Fukuzaki, S.: Mechanisms of actions of sodium hypochlorite in cleaning and disinfecting processes. *Biocontrol Sci.*, **11,** 147-157 (2006).
3) Urano, H., and Fukuzaki, S.: The mode of action of sodium hypochlorite in the cleaning process. *Biocontrol Sci.,* **10,** 21-29 (2005).
4) Morris, J. C. : The acid ionization constant of HOCl from 5 to 35°. *J. Phys. Chem.*, **70**, 3798-3805 (1966).
5) 福﨑智司，浦野博水，高橋和宏，山田貞子，高木明彦：次亜塩素酸ナトリウムの洗浄および殺菌作用に及ぼす温度の影響の速度論的研究，防菌防黴，**37,** 253-262 (2009).
6) 竹原淳彦，石田拓也，岩蕗 仁，福﨑智司：ポリエチレンテレフタレート板に収着したクルクミンの脱色に及ぼす次亜塩素酸ナトリウム水溶液の pH の影響，食生活研究、**36,** 338-343 (2016).
7) 日本産業衛生学会：許容濃度等の勧告（2019 年度），産衛誌，**61,** 170-202 (2019).
8) European Union Risk Assessment Report－CHLORINE, CAS Registry Number: 7782-50-5: https://echa.europa.eu/documents/10162/a29afaff-c207-42fa-873e-3ba647f587d8, 2007.（2020 年 10 月 23 日閲覧）
9) 三宅真名，那須玄明，山下光治，倉林 譲：ラットにおける噴霧弱酸性次亜塩素酸水吸入による血液及び生化学値に及ぼす影響，実験動物と環境，**11,** 42-47 (2003).
10) 野嶋 俊，福﨑智司：弱酸性次亜水の超音波霧化における気体状次亜塩素酸の濃度分布の測定，*J. Environ. Control Technique*, **38,** 359-365 (2020).
11) 吉田すぎる，福崎智司，浦野博水，岩蕗 仁：次亜塩素酸のシリコーンゴムへの透過挙動と殺菌作用，防菌防黴，**48,** 247-253 (2020)。

防衛施設学会令和２年度年次研究発表会（2021 年 4 月）

テンセグリティ構造と断層構造類の類似性に関する一考察
及び
地震データの可視化・可音化の試みについて

A Study on similarity between Tensegrity structure and Fault structure, and
A Trial of Visualize and Audible Methods of Earth quake dataset.

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

*　株式会社　エヌ・ワイ・ケ　　参事　（〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-16 北村ビル 2F）
** 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：テンセグリティ構造、断層構造、可視化、可音化
（Tensegrity structure, Fault structure, Visualize, Audible）

１　はじめに（問題認識）
～定性的解析と定量的解析のバランス追求～

本年、阪神淡路大震災（1995）から 26 年（四半世紀超）が経過した。東日本大震災を八戸で被災するとともに、海自・機動施設隊司令として災害派遣に従事したあの日々から 10 年の節目を目前にしている。更に，誰もが敵の正体を見極めることができないまま蔓延する COVID-19 の威力に漠然とした怯えを抱きながらも、それぞれの持ち場で最善を尽くす姿は、地震（余震）が止むこと無く続く最中、国を挙げて臨んだ当時の姿と重なって見える。しかし新常態下で生起している様々な自然災害の激度・烈度が増しているように感じるのは筆者だけであろうか？

筆者らは、1994 年～2021 年の延べ 27 ヵ年に渡る日本全国地震発生データベースを、震源域毎・発生マグニテュード毎に日々発生頻度プロットで可視化追跡し、以下の定性的な傾向・特徴を把握しつつある（図-1）。図-1 中、X 軸は震源域分布（北海道 ⇔ 沖縄）、Y 軸は時間（1994 年⇔2016 年）、Z 軸は各震源域における当該年の年間累積発生回数である。

① 各震源域毎に固有・特徴的な発生パターンが認められる。特に阪神淡路（1995）、東日本（2011）各大地震においては、【三陸沖】⇔【フォッサマグナ沿い】間の地震発生タイミングに相関関係（北米プレート端のギッコン～バッタン）が認められる。

② 熊本地震(2016)では、同年 2 月の台湾大地震以降、歪ピーク位相が沖縄トラフ（南海トラフに連接する琉球海溝北西側）沿いを切り裂くように北上、桜島噴火後、熊本地震が発生、鳥取県中部(10 月)地震へ伝播連動した。歪が蓄積される南海トラフ域に先行する地震現象（前兆?）にも見える（図-2）。

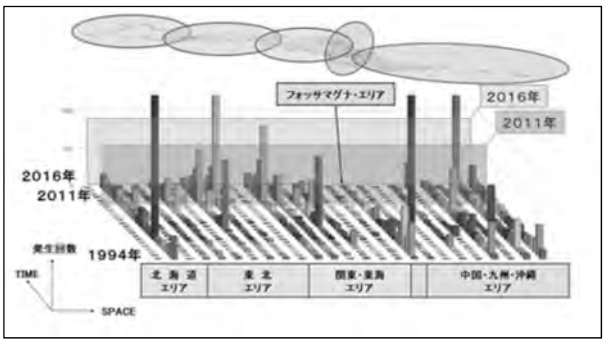


図-１　1994 年から 2016 年までの日本全国の震源域毎における地震発生回数の時空間分布
(http://www.chonet.org/)

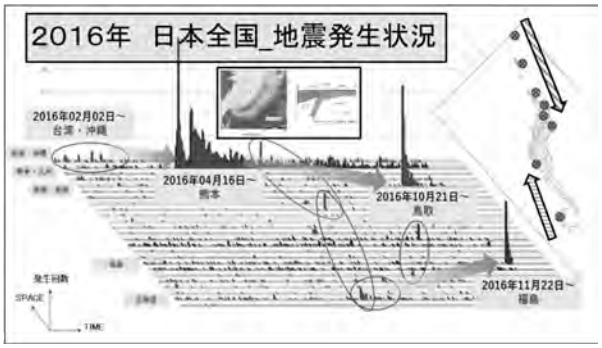


図-2　2016 年の日本全国地震発生時空間分布

③　国土地理院発表の日本全国 GPS 水平移動アニメーション・プロット等との組合わせから、特に東日本大地震（2011）以降、日本付近では主として 3 ケ所に回転軸を持ち、かつ、連続体として異なる回転方向を有する回転運動が、フォッサマグナを介して、「西日本の梁」と「東日本の梁」から構成される日本列島・脊梁山脈の各々を圧（へ）し折るように作用しているように見える（図-3、図-4）。

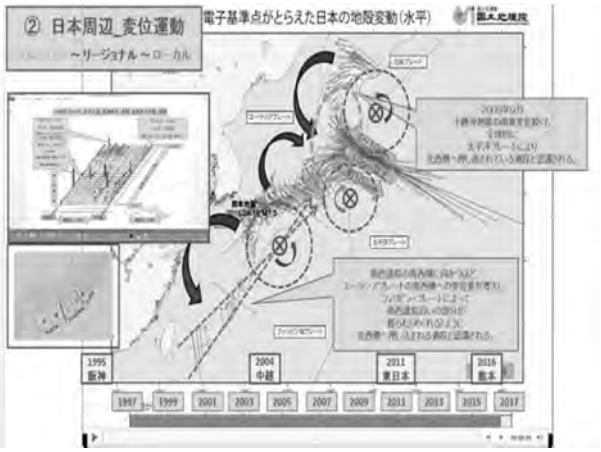


図-3 1997-2017 年 GPS 水平変位量（国土地理院）

図-4 日本列島に作用している応力背景（概観）

一方、本プロット（地震発生回数分布）のみでは地震発生自体の原因・評価・判断条件設定が極めて困難であり、客観的・定量的評価基準を明示できない点が弱点であると認識している。そこで本論は、地震発生 BEFORE & AFTER の時空間原点・分岐点評価そのもの、即ち、地震発生の決定的なメカニズム（仕組み）あるいは定量的な評価パラメーターの有無・有効性について考察するものである。

筆者は TV 番組で観た「テンセグリティ―構造」に「地層～断層構造の類似性」の閃きを得た（2020 年 7 月 16 日放映の TBS『アンビリーバボー・スペシャル』における紹介事例）。これを契機に「発震機構メカニズム」、「鞍部点（Saddle-Point）法」及び「地震発生と落雷プロセス【電荷（歪）チャージ～お迎え放電（前兆）～落雷（発震）】（荻原・佐藤 2019）」等の「自然現象と地震現象の類似性」に着目し、既存の評価ツールの組合せに基づく考察を提唱するものである。

なお、現時点では細部評価までには至っていないため、進捗概況（着手状況及び途中成果）と今後の考察方針として述べる。

2　地震発生メカニズムと断層構造

2-1 歪～応力関係（圧縮・引張り定義：プレート・テクトニクス）、落雷過程と発震タイミング類似性の考察

地震発生の駆動力源とそのメカニズムは、地球地殻を被覆構成するプレートテクトニクスにより説明される。また、コンストラクタル理論：『有限大の流動系が時の流れの中で存続する(生きる)ためには、その系の配置は、中を通過する流れを良くするように進化しなくてはならない。(エイドリアン・ベジャン 2013、2019)』の観点から、地球自体を生命体として捉えると、地震活動も地球自体の成長・進化途上の必然かつ不可避の生命（生理）現象として理解できる。さらに、落雷現象における「帯電=>お迎え放電=>落雷」過程は、地震発生過程の「歪蓄積=>予兆=>発震」との類似性があり、地震発生の「トリガー・スイッチ」としての対応評価が期待できる。

2-2 正断層・逆断層・横ズレ（左右）断層の定義と震源球（発震機構解：メカニズム解）の対応

地震学における地震現象の基本解析法として、①正断層・逆断層・右横ズレ断層・左横ズレ断層の「場」としての 4 分類と、②発生した地震特性の「時空間変化の追跡」としてのメカニズム解（発震機構解）が確立されている。①は地震発生『前・後』の地理・地質情報を把握する方法、②は地震発生『後』の地震特性の分析法であるから、その両者をテンセグリティ構造モデルおよび、筆者らの地震発生状況プロットを介して、連接・活用することにより、地震プロット表示の弱点とする定量的評価面での俯瞰的・鳥観的観点からの補強が期待できる。

3　テンセグリティ構造の定義と断層構造類との類似性の考察

3-1 三角（柱）形　および　四角（立方体）形のテンセグリティ構造

テンセグリティ―構造とは、TENS-ION(張力)と INT-EGRITY(全体性・完全性)の各単語の一部を合成した造語「TENSEGRITY」として、バックミンスター・フラーが提唱した概念である。テンセグリティは工学においては直線部材のピン接合からなる構造システムのうち、圧縮材が互いに接続されておらず、張力材とのバランスにより成立しているような構造システムで張力材は互いに接続されていてもよい。3 次元構造の場合、圧縮材の両端には少なくとも 3 本以上の張力材が接続されていなければならない。

最も単純化された構造模型（図-5, 図-6, 図-7）の三角形・四角形の立体構造は、上部・下部の独立する構造部分（圧縮材）が、各隅角部における張力材（糸又は磁力）で支持されており、中空に浮かんでいるようにも見える。

図-5 テンセグリティ構造模型

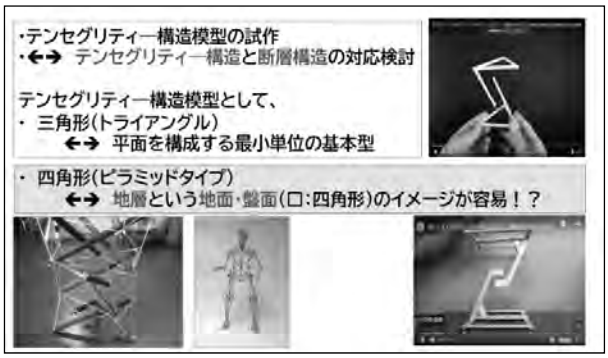


図-6 テンセグリティ構造模型と応用例

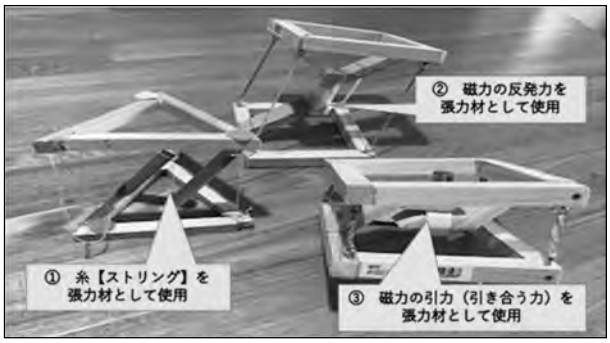


図-7 テンセグリティ構造模型の試作例（筆者試作）

筆者は、①図-5 と図-7 の上下各構造体（圧縮材）を、積層する 2 層の地層として認識し、②上下地層の各構造部分を分離している不連続面を断層面と直感（直観）したことから、テンセグリティ構造を断層構造として対応させることを思いついた次第である。さらに、③テンセグリティ構造の張力材が 2 層を連結していることから、それらの張力材のバランスの乱れ・崩れが 2 層（上下構造体）の不安定・ズレ、即ち、地震発生の対応付が可能ではないか？という考察のきっかけとなった。筆者が記録継続中の過去 27 ケ年分の地震プロットにおける地震発生現象を検証データベースとして、地震発生との原因・タイミングとして関連付けることができれば、定性的・主観的な分析に頼っていた地震プロット方法に、定量的な評価・判定基準を付加することが期待できる。

3-2 テンセグリティ―構造の断層構造へ適用と対応パラメーター候補（地震発生条件）の考察

筆者は、地震発生メカニズムの定量的評価基準として、

① まず、立体テンセグリティ構造と断層面と上下地層の張力関係と共に、震源球（発震機構）を対応させた（図-8, 図-9）。

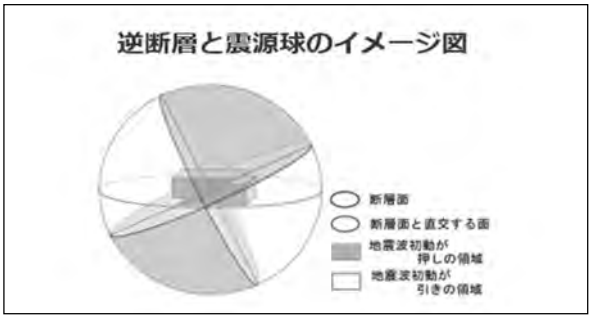


図-8 震源球の定義（逆断層の場合）

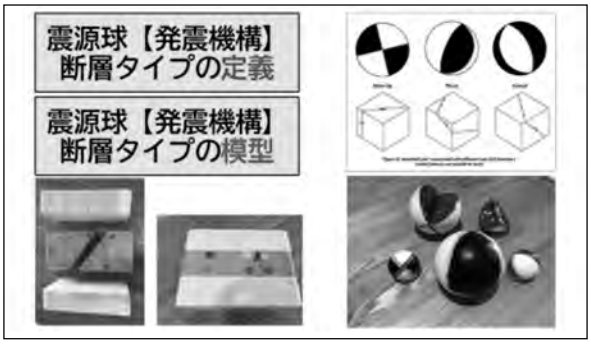


図-9 震源球と断層タイプの対応（筆者試作）

② 次に、断層のズレは、歪が蓄積し不安定緊張限界を超えて破壊（地震発生）し、歪解放直後の安定状態に至る履歴を繰り返す過程と捉える。断層のタイプは、縦ズレ（正・逆）断層と横ズレ（右横ズレ・左横ズレ）断層に大別される。地層変動・変位に伴う重力エネルギー変化過程イメージを、鞍部点（Saddle-Point）法における鞍部の面に沿った履歴（ヒステリシス）と対応づけることによって、既に確立されている既存の地震学・発震機構等との定量的・俯瞰的考察・評価への補助・連接が期待できる（図-10～図-13）。ただし、パラメーター数増加により相互関係分析が複雑化する要因は否めない。

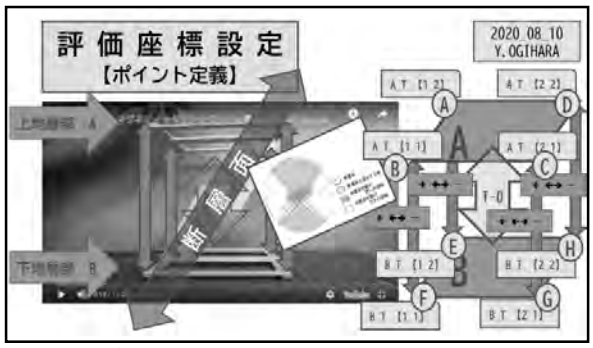


図-10 立体テンセグリティ構造の断層面との対応

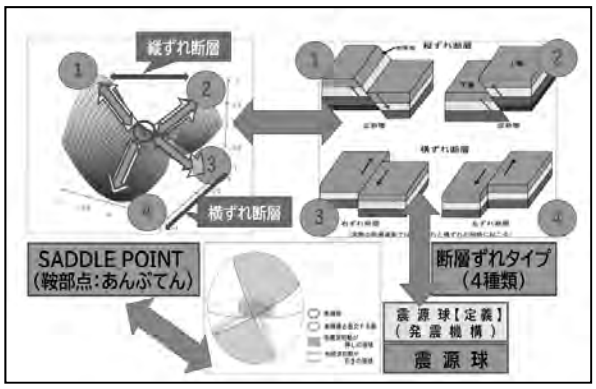


図-11 断層のタイプ～発震機構～鞍部点の対応関係

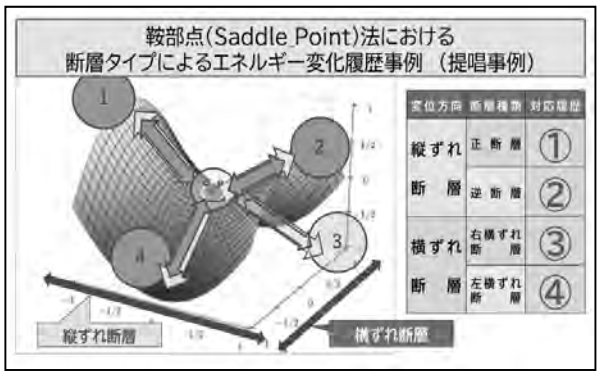


図-12 鞍部点法におけるエネルギー蓄積・放出履歴

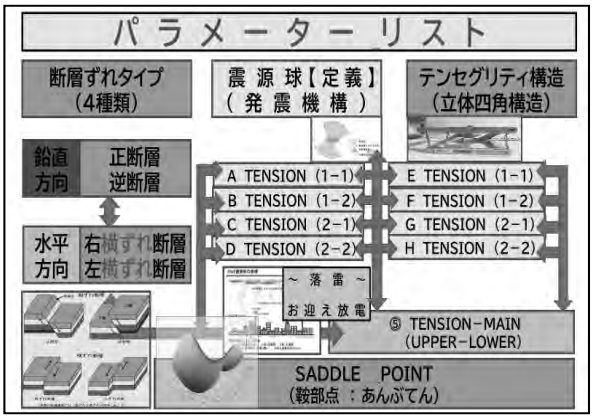


図-13 考察対象とするパラメーター相互関係の考察

4　テンセグリティ構造適用の試行・提案

4-1　北米プレート縁辺部を挟む三陸沖領域およびフォッサマグナ領域への適用の試み

本論の取り組みの端緒として、東日本大震災(2011年)の震源域への適用を試みる。図-10に示す立方体型テンセグリティ―構造と関連パラメーター(図-11)を適用するに当たって、以下の2点の検討が必要である。

① テンセグリティ構造を日本全国地図上のどの部分に配置、対応させるか？
② 評価に必要なデータが確保できるか？

配置場所については、太平洋プレートが北米プレートの下方へ潜り込む三陸沖の日本海溝付近（逆断層タイプ）とフォッサマグナ沿い（正断層タイプ）を設定する（図-14)。検証データとしては、1994年～2021年（本日）まで継続記録中の日本全国地震発生状況プロット（図-1）を1次データとし、発生マグニテュード・発生回数等を考慮の上、各パラメーターへの時系列・空間的作用経緯と地震発生の対応・相関関係の追跡評価を検討している。

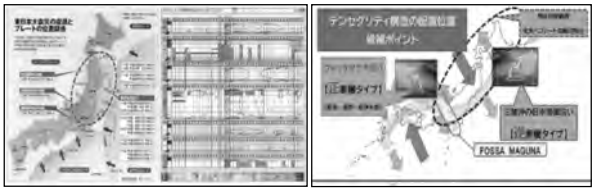


図-14 テンセグリティ構造体の配置検討

4-2　地震データの『可視化』『可音化』の試み ～「カリンバ」・「シート・オルゴール」とのコラボレーション～

データベースとしている地震プロット図は、震源域毎・発生マグニテュード毎の可視化プロットである。筆者はプロット作成開始当初より、各震源域の罫線が「五線譜」のようにも観えたことから、日本全国のプロット図からオーケストラの楽曲楽譜（楽器パート別構成）を連想した。また、各震源域は、大陸・海洋プレート境界に沿って存在しており、楽器店で目にしたカリンバ（アフリカの伝統的な楽器）の簡単な鍵盤構造と、その奏法を示す楽譜が地震プロットと殆んど同じ形式であることから（図-15)、その鍵盤を大陸・海洋プレートに対応させる着想を得た。さらに、地震データを楽譜上に変換して演奏する思案の延長上で、シート（楽譜カード）上に穴を開けて（パンチング）作曲したものが演奏可能となる手回しオルゴール（シート・オルゴール）を知り得た（図-18)。そこで特に、2011年の東日本大震災部分の再現に着目・着手した（図-16, 図-17)。地震プロットデータ（可視化）において

は、発生マグニテュード 5 以上、または、同一震源域で 1 日に 3 回以上地震が発生した場合には、当該日の各欄を『黄色』に着色処理している。当該オルゴール・ムーブメントは 20 音階鍵盤（弁）のため全 27 震源域を 20 域に集約した。シート（楽譜カード）上には、震源域を低音側（北海道）←→高音側（沖縄）に割当てる。1 楽譜カード長に収まる日数は 150 日に制約される。そこで 2011 年 1 月 1 日⇔5 月 31 日の約 5 か月分の各震源域プロット表の『黄色』着色日に対応する鍵盤部分を穿孔して「地震データ音符（時系列)」の作成（作曲）を試みた（図-18)。この一連の手作業（苦痛）を通じ、アナログ・データ（地震ビッグ・データ）からエッセンスをデジタル化するデータ処理過程を、①地震データの自動作図化（地震プロット作成と楽譜データ自動作成）と②シート・オルゴールの音源表現機能をシンセサイザーに置き換える発想の原点となった（次節で言及)。

図-15 鍵盤楽器「カリンバ」と地殻プレートの連想

図-16 2011 年の三陸沖地震予兆『ゆっくり滑り』

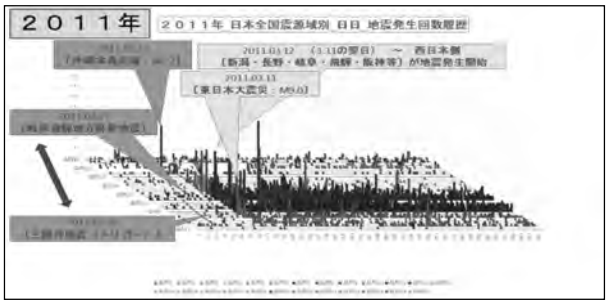


図-17 2011 年日本全国地震発生頻度の時空間分布

図-18 地震可『視』化データの
シート・オルゴールによる可『音』化

５　おわりに（現況と今後の展望）

現時点では、①テンセグリティ構造のプレート境界上への適用（図-14）と②シート・オルゴールによる「地震データ音符化（可音化)」に着手した段階である（図-18)。①に関しては、過去データベース（図-1）が対象範囲をカバーしており、巨大地震（震度 7 クラス）の阪神淡路地震（1995)、新潟中越地震（2004)、東日本地震（2011)、熊本地震（2016)、北海道胆振東部地震(2018)への適用を試みる所存である。②に関しては、2011 年 1 月 1 日⇔5 月 31 日データを再現した。その結果、破壊的な地震活動による不協和音に満ちたパンク/ロック調になると予想したが、前兆現象に相当する澄んだ単音予鈴が幾つか響いた後（図-16)、3 月 9 日（11 日含む）以降はまるで大河の潺（せせらぎ）の調べのように聴こえたのは意外であった（図-17)。「1/f の揺らぎ成分の存在」も意識しつつ、過去 27 ヵ年分(図-1)の『地震可視化データ』の『可音化』作業を進めている（表-1)。

表-1　今後の検討方針・思考過程

	分野	機能	着点	現時点	FUTURE【目標・期待成果】
比較例	宇宙開発	ロケット	ペンシルロケット	はやぶさ はやぶさ2	無限大（∞）
本研究の対象	❶ 地震プロット	1次データ	手作業プロット	手作業 →可視化 →可音化	既存の ハードウェア と ソフトウェア との融合
	❷地層・地下構造	機構モデル	テンセグリティ構造	実空間への対応	
	❸シンセサイザー （可音化）	ハード （可音化）	オルゴール	1994年 ～2021年までの 地震データ可音化	
		ソフト （デジタル）	音符シート		自動作図変換・分析
理論・手段	木村健次郎教授 @神戸大学 透過 → 可視化	散乱の逆問題	見えないものを 把握して 見える化 → 透視・可視化	がん細胞の 立体空間（3D） 可視化	地下構造（地震原因） の解析・可視化

今回着手し、提示している地震データとオルゴールの組合せによる可視化・可音化表現方法は、現段階では子供のオモチャ・レベルの試みかもしれない。しかし、地球～リュウグウ（大量資料採取）往復に続き、宇宙大航海の偉業達成中の「はやぶさ２」ロケット技術の第１歩は、糸川英夫博士開発による直系 18 ㎜、長さ 230 ㎜、重量 0.202 ㎏の「ペンシル・ロケット」であった。そのことに想いを馳せ重ねながら、本取り組みの更なる発展を模索している。

その第 1 は、地震プロットの自動作図（可視）化の取り組み（図-19）と、オルゴールをシンセサイザーに置き換える可音化表現(多様化)の模索である。本論で提示する地震データのオルゴール・シートへの変換プロセス（人力パンチングによるデジタル変換）は、1956 年起源のシンセサイザー基本機能（真空管製でパンチテープ制御式のコンピュータ用音源）と共通する原点である（図-18)。従って、地震の発生時刻（ｔ)、場所（ｘ：経度、ｙ：緯度、ｚ：深さ）と発生マグニチュード（M)、発生回数（N）等諸要素を、音の 3 要素（音の大きさ、音程、音色）にシンセサイザーを介するデータ変換（可音化）によって地震発生状況・記録を再現し、人間の五感（六感）センサーが共鳴する認識・理解支援が期待できる。

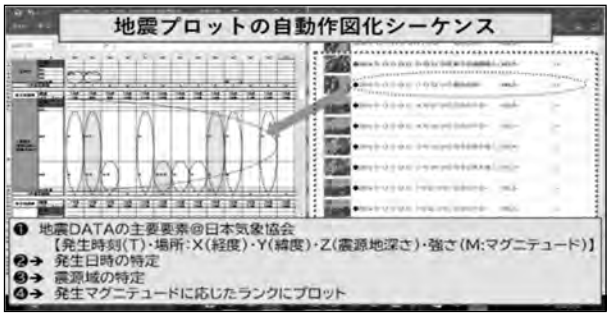


図-19 地震プロットの自動作図化シーケンス

第 2 は、地震発生機構および地質・地下構造そのものに対するアプローチである。本論では、テンセグリティ構造をその端緒（取っ掛かり）イメージとしているが、地震発生事象そのものは単純ではなく、かつ、目には見えない震源地（地中）で発生するものである。震源地近傍の地質・地下構造の把握が不可欠にも関わらず、現時点の直接的手法は、ボーリングや音波探査等の手段に限られる。筆者は、木村建次郎教授（@神戸大学）の「散乱の逆問題」解決法に基づく透視と可視化のアプローチに注目している。多種多様な構成物質及び複雑な組織・構造から形成される人体中のがん細胞の識別・画像処理（可視化）が確立・実用化されている。その手法を以て、地下構造（地質・断層等）にも適用可能ならば、本論の最弱点である地震メカニズムの「定量的評価」手段を飛躍的に高めることが期待できる。

今日の高精度の天気予報に比較すれば、現時点の地震予報・前兆把握は遥かに遅れる困難な道程途上にある。自分（人間は脇役）都合の勝手な思い込みでなく、地球（主人公）都合で発生する地震の実像・実相に対し忠実・着実・謙虚に臨む姿勢を忘れずに歩を進める所存である。また、「災害は忘れたくてもやってくる！」を不意打ちの諸災害・災難に対する警句と心得て、即応可能で具体的な『応災力』を高める工夫と実践(PDCA-Cycle)を並行継続中である。

特に、エヌ・ワイ・ケイ（株式会社/日本容器工業）は、NPO 法人「貯水タンク防災ネットワーク」を設立した。「貯＋ネット」から「ちょねっと➔Chonet」のニックネームをホームページに命名し開設した。(2019 年:NPO Chonet 貯水タンク防災ネットワーク http://www.chonet.org/) これまでの大地震でも破壊被害例が皆無の貯水槽メーカーとして、災害発生事態に遭遇しても「生命維持のため、必要な時に、必要不可欠なもの(水)がそこに在る!!!という安心・安全を確保・提供」し、工学的な面（平野廣和研究室@中央大学）や、人工透析医療面【東京 DIEMAS：緊急時透析情報共有マッピングシステム@東京透析医会】等の総合力で、特に災害弱者を支える貢献を念頭に活動中である。その中で筆者は「ユスフ大佐の防災・応災・減災セミナー出前講座」を担当している。東日本大震災の体験や本論内容を伝える語り部のひとりとして、『応災力向上の啓蒙』をライフワークとして試行錯誤の連続である。主張する 4 点セットのモットーは、以下のとおりである。

❶ 1 『見』は、100『聞』に如かず！
❷ 100 『見』は、 1『実行（検証・実験・訓練等)』に如かず！！ ゆえに、
❸ 10000『聞』は、1『実行』に如かず!!!
❹ そして、大自然の力を謙虚に畏れながら、
『まずは、やってみなはれ！（西堀榮三郎)』。

これらを自己経験と実践に基づく心の支え・気合いとし、身の丈に応じた努力を継続する所存である。

参考文献

1) 過去の地震情報－日本気象協会 http://www.tenki.jp/bousai/earthquake/entries
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) エイドリアン・ベジャン（著）柴田浩之（翻訳）流れとかたち-万物のデザインを決める新たな物理法則,2013
4) エイドリアン・ベジャン（著）柴田浩之（翻訳）流れといのち-万物の進化を支配するコンストラクタル法則,2019
5) 荻原洋聡・佐藤紘志「コンストラクタル法則に基づく日本全国の地震発生状況解釈の一提案」日本地震予知学会第 6 回学術講演会, 2019
6) NPO Chonet 貯水タンク防災ネットワーク
7) 木村建次郎（KIMURA Kenjiro）――「透視の科学」で人類に貢献を 乳がん検診を革新する技術開発 | Research at Kobe (kobe-u.ac.jp)
8) 久保司郎、総説逆問題の解析手法 Analysis Schemes of Inverse Problems by Shiro KUBO「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan), Vol.41, No.470, pp. 1595-1604, Nov. 1992
9) 西堀榮三郎,「南極越冬記」岩波新書 F102(青版) 318,270p,1958

焼成卵殻・オゾン水の病原性微生物殺菌剤および消臭機能等実証事業

Demonstration project for pathogenic microbial fungicides and deodorant functions for calcined eggshell and ozone water

株式会社 ESC　代表取締役　西山　登士彦　（東京都新宿区水道町 2-10）
株式会社 ESC　代表取締役　永富　伯夫　（鹿児島県日置市日吉町日置 5930）

キーワード：オゾン殺菌、強アルカリ殺菌、自然災害対策
（Sterilization by Ozone and Strong alkaline agent, Natural disaster countermeasures ）

1. はじめに

今後、開発が急がれる殺菌消臭剤は、災害対応時に必要となる感染症予防対策及び家畜伝染病予防法による殺処分対策においても散布時の安全性確保及び環境対策が必要となる。

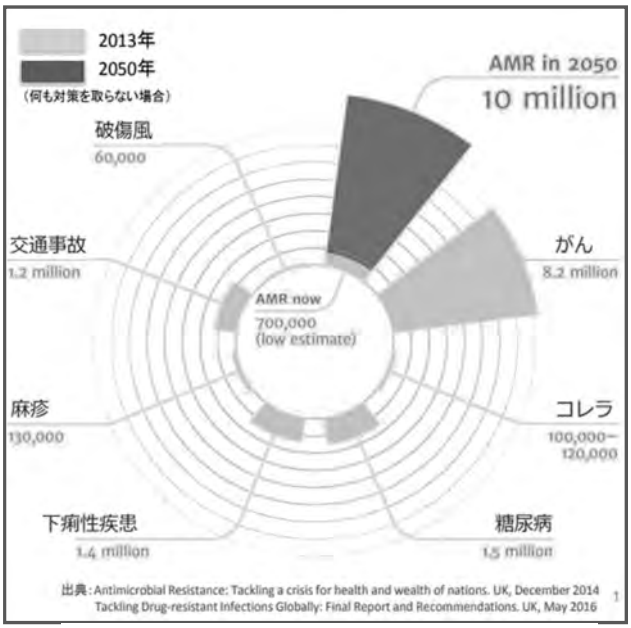
ここでは、オゾン水と焼成卵殻による病原性細菌類の殺菌効果について報告する。

殺菌消臭剤の開発ポイントは、以下 3 点となる。

(1) 強力かつ長期間の殺菌効果を有する
(2) 安全かつ生体（動植物）や自然環境への影響が無い
(3) 殺菌消臭剤の開発及び生産が廉価となること

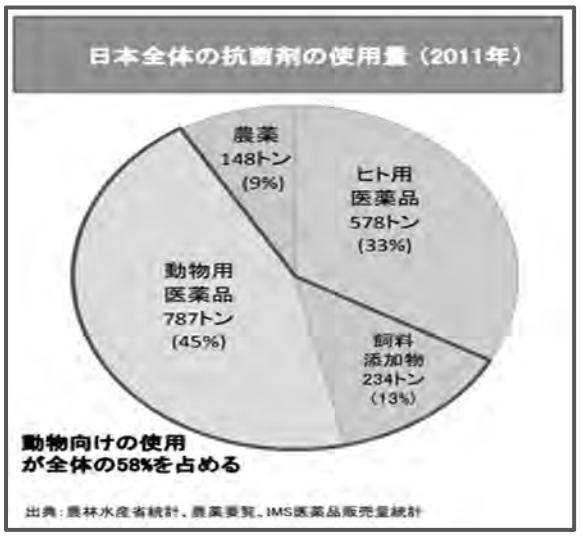
その背景としては、[1)]

① 抗生物質の乱使用による薬剤耐性菌の蔓延が原因の死亡率の増加。厚生労働省の予想では、2050 年度には薬剤耐性菌に起因する死亡数が癌を上回り第 1 位となる。（表-1 参照）



表－1　薬剤耐性が原因の死亡者（2050 年）

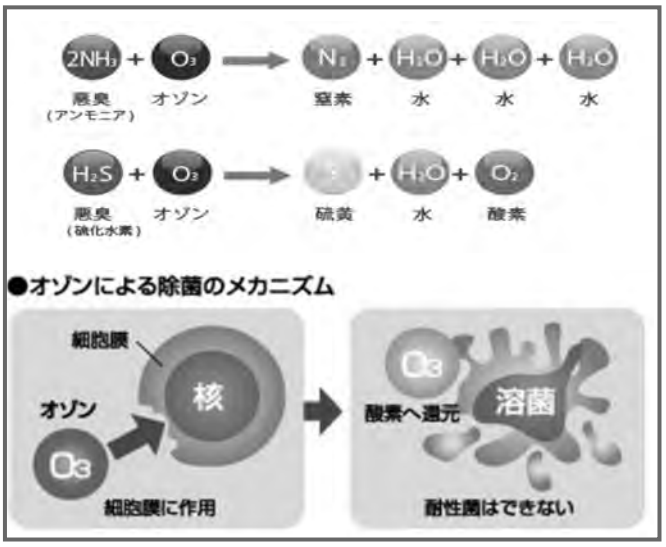
② HACCP（危害要因分析・重要管理点）に取組むにあたり、特に病原微生物の制御が、重要管理点となる。



2. 実証事業の概要及び殺菌効果

2.1 オゾンの殺菌効果

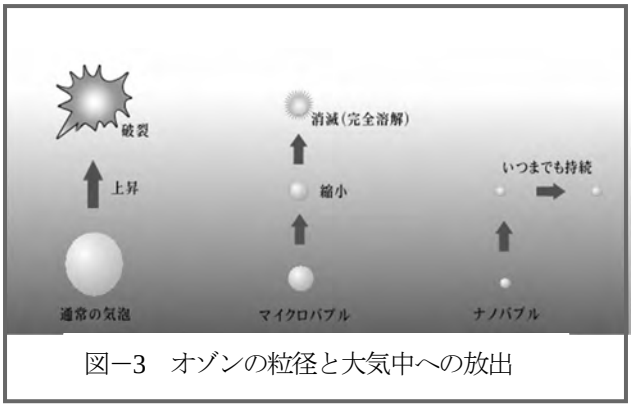
オゾンは、自然界に存在しフッ酸に次ぐ酸化還元力がある。有機物を一瞬にして分解（殺菌能力は数~10 秒程度）する特性を持ち、病原性細菌類を全て殺傷することができる。カビや花粉も同様に有機物のため、数秒で不活性化する能力も持ち合わせていると考えられている。(図-2 参照)



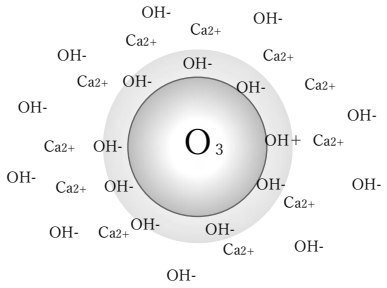
図－2　オゾンによる除菌のメカニズム

オゾン（0^3）についての注意点は、空気中 0.1ppm 以上で人体に悪影響(高濃度では死亡)を及ぼす懸念があるが、水中にあるオゾンは生体（人や動植物等）への影響が極めて小さいが、有機物への分解力は変わらず、殺菌・消臭能力は維持され最終的には酸素となり大気中へ放出される。（図-3 参照）

しかし、オゾン水に酸化カルシウム等の電解質が存在する場合は、正電荷となり安定した状態が保持でき、比較的長時間（数時間程度）オゾンを水中に保持できる。（図-4 参照）



図－3　オゾンの粒径と大気中への放出



図－4　オゾンの焼成卵殻による水中保持メカニズム

2.2　オゾン水の殺菌能力

新型コロナウイルスへの殺菌効果を３パターンで検証

・パターンＡ：　ウイルス液＋培養液

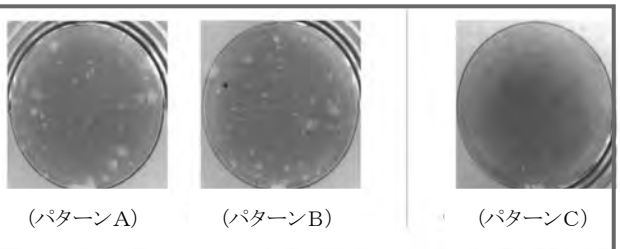
・パターンＢ：　ウイルス液＋滅菌水道水

・パターンＣ：　ウイルス液＋10ppm オゾン水

パターンＡ、Ｂでは、ウイルス増殖の所見である多数のプラーク（大小不同の白い点）が認められる。

パターンＣでは、プラークの発生が認められなかった。

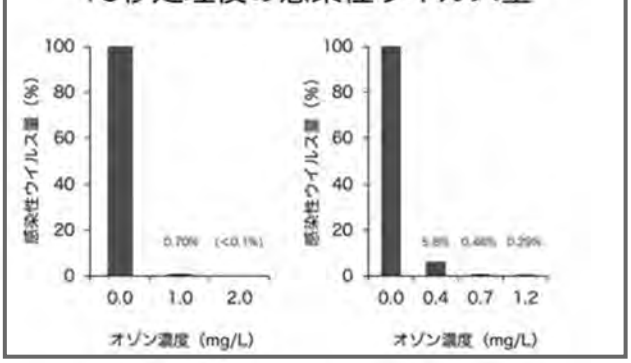
結果、オゾン水の殺菌効果により新型コロナウイルスが不活化されたことを示している。（図－５参照）[2)]



図－5 新型コロナの殺菌実験結果[2)]

低濃度オゾン水（１~2ppm）に関しても、ウイルス 0.70%軽減。2ppm のオゾン水では 0.1%未満にまで抑制された。液体での殺微生物効果を調べた結果、0.4ppm でもウイルス力価は 5.8%まで減少した。（表-2 参照）[3)]

表―2 低濃度オゾン水による感染性ウイルス量の変化



2.3　焼成卵殻（酸化カルシウム）の殺菌能力[4)]

焼成卵殻（表-3 参照）は、強アルカリ（ph12.5 以上）となる特性を持ち、全ての病原性微生物の蛋白質を変性させ殺傷を行う。

焼成卵殻粉末について、サルモネラ、大腸菌、鳥インフルエンザウイルス（AIV）、ニューカッスル病ウイルス（NDV）、伝染性ファブリキウス嚢病ウイルス（IBDV）を用いて、各種病原体に対する99.9%以上の不活性化能を指標に調べ、焼成法の最適条件を探った。

不活性化試験は、AIV、NDV あるいはIBDV の力価は、未処理では、1ml あたり、107.3-8.0 の50%組織培養感染量を示したが、焼成卵殻粉末処理の3分間後には、検出限界未満を示し、99.9%以上の不活性化が認められた。EC およびSI においても、コロニー形成単位（CFU/ml）で測定したところ、同様の99.9%以上の不活化が認められた。これら焼成卵殻粉末の不活化作用は、5%牛胎児血清による有機物存在下においても影響を受けなかった[4)]。

表－３　焼成卵殻の構成科学物質分類

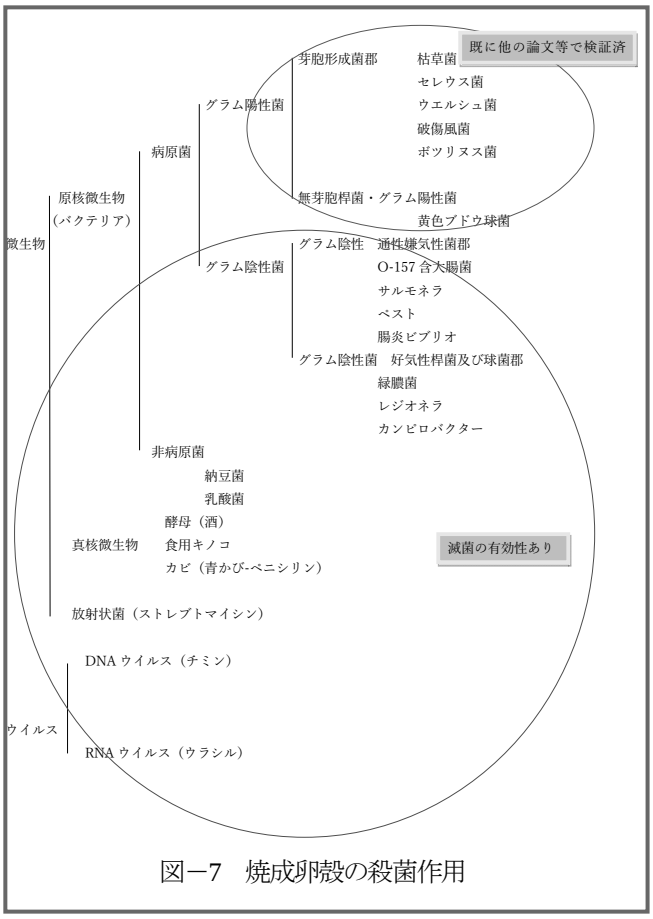
酸化カルシウム（CAS#:1305-78-8）	95%以上
酸化マグネシウム（CAS#:1309-48-4）	3%以上
リン酸カルシウム（CAS#:7758-87-4）	1%以下
炭酸カリウム（CAS#:584-08-7）	0.5%以下

1ppm のオゾン水を 10 秒処理することで感染性ウイルスは 0.70%に、2ppm のオゾン水では 0.1%未満になる。

続いて、液体での殺微生物効果を調べた。その結果焼成卵殻粉末の 10%液の遠心上清（水溶液）に 10 分の 1 量の微生物を添加し、3 分間あるいは 1 時間室温で静置し、その後、力価を測定した。AIV は、3 分間の感作では 10 分の 1 程度の力価の低下が認められた（90

%抑制）が、1 時間感作することにより、1,000～10,000 分の 1 に力価が低下した（99.9%以上抑制）。NDV は、3 分間で検出限界未満となった。細菌の場合、EC および SI は、3 分間感作で、いずれも検出限界未満となった[4]

検証結果、図－7 に示す赤円内の病原性ウイルス・細菌類に成卵殻の殺菌作用が証明された。青円内の部分に関しては、既に ph9~10 程度での殺菌効果が報告されており、全ての病原性ウイルス・細菌類に対して殺傷作用があることが判明した。



図－7　焼成卵殻の殺菌作用

焼成卵殻粉末の効果について、以下を検証。

① 焼成卵殻粉末を野外に散布した場合、太陽光線照射時及び降雨時の湿潤と乾燥を繰返した場合での殺菌殺ウイルス効果の持続性について検証した結果、湿潤・乾燥4 回後までpH 12.5 以上であった。AIV およびNDVも検出限界未満まで不活性化できた。太陽光照射後、1 週間ごとに粉末を回収した場合は、3 週後までAIV が検出限界まで不活性化された。

② 鶏ひな飼養環境下で農林水産省の「ひなの成長試験」に従い、ひなの体重増加の推移を、どの程度の濃度まで焼成卵殻粉末の添加可能について検証した結果、特定病原体フリー（SPF）ニワトリひなで水平感染抑制試験を用いての焼成卵殻の感染抑制効果は、敷料への焼成卵殻粉末の 10%添加および餌への 0.1%添加では、体重増加に負の影響は認められなかった。

【焼成卵殻の特徴】

① 全ての細菌・ウイルス類を殺傷する高殺菌効果
- 生石灰の 20 倍程度の殺菌効果を有する。
- 人, 動物に対して毒性が少ない。強アルカリ性（ph12.5 以上）となるが生体内での生成物のため生物に有害な物質が含まれない。

② 有機物の影響を受け難く、殺菌効果に持続性がある。
- 屋外散布で 3 週間以上の殺菌効果の有効性がある。

③ 不純物が少なく、環境に悪影響を与え難い。
- 生石灰や貝殻類に比較し高アルカリ性である。

④ 最終的に炭酸カルシウム（自然界に存在）に変化

⑤ 3%以上の水溶液でも殺菌効果がある。

2.4　焼成卵殻とオゾン水との融合

焼成卵殻とオゾン水の病原性細菌類への殺菌効果の特性を融合させた「焼成卵殻オゾン水」の特徴を述べる。

① オゾンによる短時間での強力な殺菌力がある。

② 焼成卵殻による有機物環境下（屋外土壌）での長時間（3 週間）の殺菌力の持続性がある。

③ オゾンは酸素へ、焼成卵殻炭酸カルシウムへ変化する環境への影響が極めて少ない。

④ 人体への影響が少なく、防護が軽微となる。

3.　焼成卵殻オゾン水装置の開発

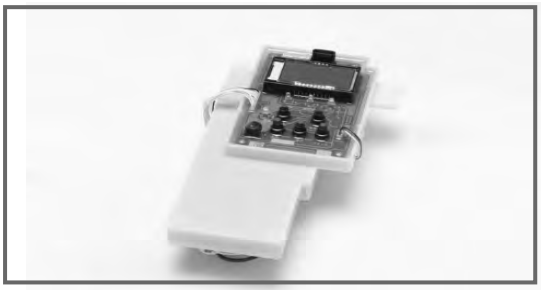
3.1 水害・災害時や感染症予防における広域消毒作業

家畜伝染病予防法による地盤消毒作業や殺処分対策は、3 種類の構成部品の組合せによりオゾン水の「ナノバブル化」が可能となり、焼成卵殻と融合させた水溶液により、短時間でのオゾン殺菌と長期間（3 週間）の殺菌能力を合わせた機能を持つ「焼成卵殻オゾン水」を使用することで、現状より大きい効果が期待できる。図－8 の様なイメージでの散布が可能である。

図－8 地盤消毒作業イメージ

3.2 「オゾン水のナノバブル化」生成装置

①ダイヤモンド電極・制御基板



【ダイヤモンド電極使用時のオゾン生成濃度】

・1台　：1.5ppm～2.0ppm
・2台　：3.0ppm～5.0ppm
・3台　：6.0ppm～8.0ppm
・4台　：8.0ppm～10.0ppm

② ナノバブル攪拌装置

【攪拌装置使用時のナノバブル化】

・ナノバブル　　：80%以上
・マイクロバブル：95%以上

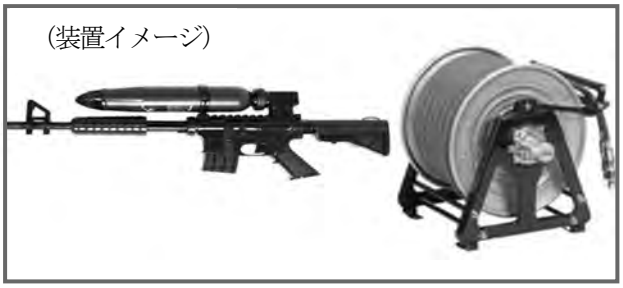
③ 焼成卵殻投入装置

【焼成卵殻投入量】

・5~10%の可変対応

④ 分離型焼成卵殻オゾン水装置

⑤ 一体型焼成卵殻オゾン水装置



4. まとめ

本実証事業により期待できる成果を以下に記述する。

① オゾン水による消毒対象物表面の瞬時での強力殺菌力と水溶液に染込ませた焼成卵殻水の長期間(10日~3 週間) 殺菌機能を有する特性から、広範囲の消毒対象区域でも消毒作業回数が軽減できる。
② 殺菌剤としての安全性の高さから防護服の簡易化が可能となり、作業効率向上にも繋がる。
③ 「焼成卵殻オゾン水」は、最終的には酸素と自然界に豊富に存在する炭酸カルシウムに変化するため、環境への影響が極めて少ない。

現在のコロナ禍対策の一環として、殺菌効果が期待できる「焼成卵殻オゾン水」を生成する弊社開発の焼成卵殻オゾン水装置が使用され、コロナをはじめとする病原性ウイルスや細菌類の対策に繋がれば幸いである。

参考文献

1) 厚生労働省における AMR の取組　2015 年
2) 日機装株式会社:オゾン水による新型コロナウイルスの不活性効果の確認, 2020 年
3) 藤田医科大　村田貴之教授：低濃度オゾン水の感染性ウイルス不活性化の確認, 2020 年
4) 東京農工大　竹原一明教授：卵殻由来焼成カルシウムによるバイオセキュリティ強化とHACCP の確立, 2015年

雨水桝への蚊絶滅マット（分別集水マット）設置による感染症媒介蚊対策に関する実証実験

Demonstration experiment on infectious disease vector mosquito control Filling Catch Basins With Mosquito Eliminating Mat

鈴木　真菜*・山田　正**
Mana Suzuki,Tadashi Yamada

*中央大学大学院　理工学研究科　都市人間環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）

**中央大学　理工学部都市環境学科　教授（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）

キーワード：蚊媒介感染症，蚊絶滅マット，雨水桝，実証実験，ボウフラ対策
（*Mosquito-borne infection, Mosquito eliminating mat, Street inlet, Demonstration experiment, suppresion of mosquito*）

1. はじめに

主な蚊媒介感染症には、ウイルス疾患であるデング熱、チクングニア熱、ジカウイルス感染症、日本脳炎、ウエストナイル熱、黄熱、原虫疾患であるマラリアなどがある．マラリア原虫を媒介するハマダラカは、日本国内にも生息しており、同じように国内に生息している媒介蚊によるデング熱やチクングニア熱と同様、マラリアも検疫感染症に指定されている．しかし、温暖化によるこれらの感染拡大が危険視されているものの、日本国内における、媒介蚊の生息地拡大や生息数増加を示唆する報告は未だ少なく、マラリア再興のリスクは小さい[1]．また、デング熱やジカウイルス感染症は、デングウイルスやジカウイルスに感染した蚊に刺されて起こる感染症（蚊媒介感染症）で、主な媒介蚊はヒトスジシマカである．いずれもアフリカを起源とするが、近年では、アジア、中南米を中心に流行している[2]．日本においては主に海外からの輸入感染症とされてきたが、デング熱に関しては 2014 年に国内感染例が報告され、2014 年 8 月に、海外渡航歴がなく都内の公園等で蚊に刺された人からデング熱患者が発生し、最終的に都内で 108 人の患者が報告されるに至った[3]．デング熱、チクングニア熱、ジカ ウイルス感染症といった死亡率は低いが経済に影響を与える感染症は 世界的に増加傾向にあるため[4]、我が国でも、蚊媒介感染症の流行が起こることも考えられる．

また、地球温暖化により媒介蚊の生息域が拡大し、蚊の活動が盛んになることで蚊媒介感染症の患者数も増加する可能性がある[5]．

デング熱やジカウイルス感染症には有効な予防接種がなく、予防するためには肌の露出をなくし、防虫剤を適宜使用する等、蚊に刺されないように注意するしかない．そのため蚊に刺されないためには自らの体を守る防御対策の他に、蚊の繁殖を抑制する、つまり蚊の発生を防徐する対策が考えられる．蚊の成虫は飛翔することから、防除することが難しく、蚊の防徐対策の基本は水中にいる幼虫（ボウフラ）を対象として対策を実施する（幼虫対策）ことにある．

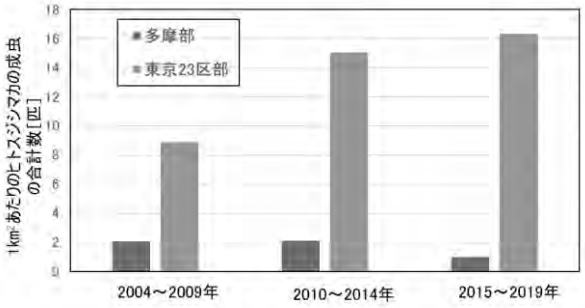


図-1　多摩部、東京 23 区部での調査箇所における 1㎢あたりのヒトスジシマカ成虫数の経年変化

蚊媒介感染症を引き起こす媒介蚊であるヒトスジシマは小さな水溜まりからも発生するため、雨水桝や排水桝、植木鉢の受け皿等が幼虫の生息場所となる．そのため幼虫対策として有効なのは、水溜まりをなくすこと、水が溜まるであろう不要物を片付けることにある[6]．都市における雨水桝は媒介蚊であるヒトスジシマカやアカイエカの主要な発生源になっており[7]、雨水桝や排水桝における幼虫対策としては環境的対策（定期的に点検して、清掃する方法）と IGR 剤（昆虫成長制御剤）のような薬剤を投入する方法がある[6]．

東京都では、蚊媒介感染症を未然に防止するため感染症媒介蚊サーベイランスとして、2004 年から広域サーベイランスを実施している．そして 2015 年からは利用者が多く、イベント等が開催される都内 9 公園で重点サーベイランスを実施している．**図-1** は多摩部、東京 23 区部

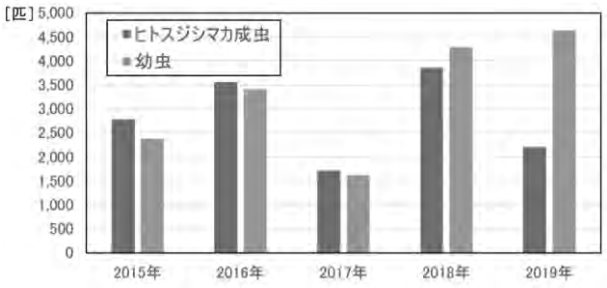


図-2　都内９公園におけるヒトスジシマカ成虫数と幼虫数の経年変化

図-3　代々木公園の雨水桝の様子
（調査日 2019 年 4 月 16 日）
（上図：雨水桝 A の様子）
（下図：雨水桝 B の様子）

での調査箇所における 1 ㎢ 2 あたりのヒトスジシマカの数の経年変化を示したものである．多摩部における 1 ㎢ ^{2} あたりのヒトスジシマカの成虫の数は 2015 年～2019 年の合計数が 2010 年～2014 年の合計数の半分であった．ヒトスジシマカの成虫が半減した理由としては 2015 年から雨水桝に IGR 剤を投入したからではないか思われる．しかし、東京 23 区部における 1 ㎢ ^{2} あたりのヒトスジシマカの数は 2004 年以降、増加を続けている．**図-2** は都内 9 公園における重点サーベイランスの結果を示したものである．重点サーベイランスの結果を見ても雨水桝に IGR 剤が投入されるようになった 2015 年以降もヒトスジシマカの成虫の数及び幼虫の数は増加しており、IGR 剤投入による効果が見られていない．

この理由の一つには、多摩部と東京 23 区部では圧倒的に雨水桝の数が異なり、大量にある雨水桝のすべてに薬剤を投入することが困難であろうことは容易に想像できる．

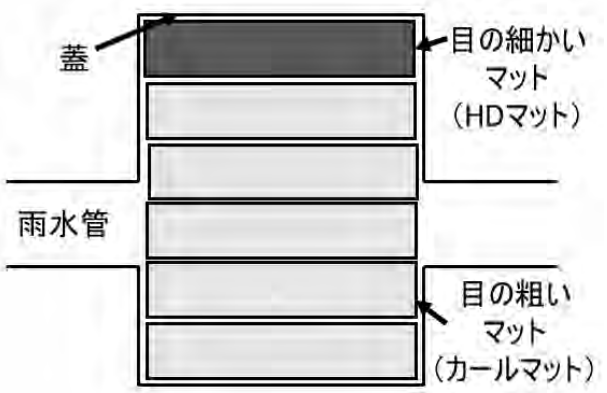


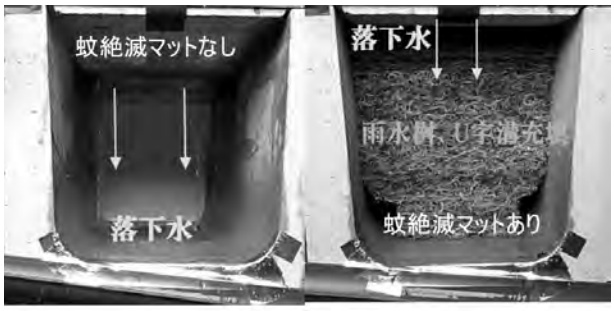
図-4　蚊絶滅マット（分別集水マット）の構造

図-3 は 2014 年、デング熱感染が多く報告された代々木公園内における雨水桝の内部状態確認調査を行った時の様子である．雨水桝 A の泥溜まりスペースは土砂で埋もれ、また横引き配管の穴は落ち葉によって半分程塞がれている状態であった．また、雨水桝 B は適切に維持管理されているようである為、落ち葉の流入も少なく、泥溜まりスペースに雨水が溜まっていることが確認できた。しかし、一般的には雨水桝 A の状態になっている桝が大半であり、そもそも貯留機能がなくなっていることから、こうした雨水桝に IGR 剤を投入したとしても効果が薄い．だからといって、降雨ごとに複数回投薬することも現実的でなく、結果として蚊繁殖抑制効果を得るためには薬剤投入以外の雨水集排水路を蚊の繁殖地としないための対策が必要であると思われる．

国土交通省 NETIS 登録番号 KT-160137-VR 蚊絶滅マット（分別集水マット）は、樹脂繊維を不織布状に整形したマットを雨水桝内の空間に充填することで物理的に蚊の幼虫の生息場所を無くすというものである．図-4 は雨水桝に設置する場合の蚊絶滅マットの構造を概略で示したものである．目の粗いマット（カールマット）を雨水桝内部の空間に充填し、目の細かいマット（HD マット）を最上部に敷く．分別集水マットにより、蚊の幼虫の繁殖を抑制するだけでなく、雨水桝のごみの堆積の問題も解決することが出来る．雨水桝への蚊絶滅マットの設置後、蚊の発生を防ぐことは検証されている[8)] が、公共施設等において利用する場合は、マットが雨水桝の排水能力に与える影響やメンテナンス頻度等、他の懸案事項についても検討する必要がある．

本研究では蚊絶滅マットが蚊にとってどのような物理的障害となるか、マットが雨水桝の排水能力に与える影響、そして、マット自体の耐久性を確認しておく必要があることからこれらに関する実証実験を行った．

図－5　物理的成長障害実験装置



図－6　蚊絶滅マット落下水比較実験

２. 実験の概要

まず、蚊絶滅マットによる物理的な繁殖抑制効果を確認するため、物理的成長障害実験を行った．そして、雨水桝は降った雨を集水し、下水道管に流すことで道路や街が浸水することを防ぐという役割がある．雨水桝に蚊絶滅マットを充填することにより、集排水能力に影響するのかどうかを確認するため蚊絶滅マット落下水比較実験を行った.

さらに、蚊絶滅マットの耐久性を確認するため、蚊絶滅マット設置直後と 5 年経過時の比較を行い、また、マットを公園内に設置し、1 年経過後の分別排水能力、目詰まりリスク、カールマットの空間維持能力についての確認をした.

(1) 物理的成長障害実験

図－5 は物理的成長障害実験の様子である.

蚊絶滅マットの蚊繁殖抑制効果の即効性の確認をするため、雨水桝やU字溝の１/4 スケールの水槽に蚊絶滅マットと水を入れ、実際に雨水桝やU字溝に蚊絶滅マットが充填されている状態の再現をした．そして、マット敷設から 3 日後の幼虫（ボウフラ）、蛹（鬼ボウフラ）、成虫の生存を確認し、その数を把握した.

また、比較実験として蚊絶滅マットを敷設していない水槽も用意し同様に確認作業を行った.

物理的成長障害実験は 4 回行い、試験実施日は 2016 年の 6 月 26 日－ 6 月 29 日、7 月 13 日－ 7 月 16 日、7 月 16 日-7 月 20 日、7 月 24 日-7 月 26 日である

(2)　蚊絶滅マット落下水比較実験

図－6 は分別集水マット落下水比較実験の様子である.

雨水桝やU字溝を模した空間に分別集水マットを充填した場合と何も入れていない場合の 2 通りの実験を行った.

降雨強度 25 ㎜/h、50 ㎜/h、70 ㎜/h 程度の水を流し、落下する水量の比較を行う．落下水は実験毎に貯め、メスシリンダーによって水量を測った.

(3) 蚊絶滅マット 5 年経過比較実験

蚊絶滅マットを公共施設等に設置する場合はその装置に係わるメンテナンスが必要になる．マット設置後から 5 年経過したことを想定した場合の分別集排水能力の確認、HD マット、カールマットの目詰り状況、土砂の堆積状況、形状維持能力についての確認をした.

また、蚊絶滅マットのメンテナンスを全く行わなかった場合を想定した実験も行った、当該実験は千代田町中学校武道館において実施した.

(4) 蚊絶滅マット公園内比較

分別集排水能力の 1 年経過確認、HD マット、カールマットの目詰りリスクの確認、HD マット、カールマットの空間維持能力の確認を行うために雨水桝、U 字溝での蚊絶滅マットのメンテナンスを全く行わなかった場合を想定し、1 年間経過観察をする．実際の公園内での比較を行うため千代田町なかさと公園で 1 年間、その経過を観察した.

3. 実験結果及び考察

(1) 物理的成長障害実験

表－1 は蚊の通常孵化状態について知るため、雨水桝やU字溝の１/4 スケールの水槽に水のみを入れ実験を行った通常孵化実験の結果をまとめたものである．初日には 20 匹全てが蛹であったが、その 3 日後には全て成虫になることがわかった.

表－2 は物理的成長障害実験結果を示したものである物理的成長障害実験は 4 回行ったが、いずれの実験でも 3 日致死率（初日に生存していた蚊が 3 日以内に死ぬ確率）は 80%を超えることがわかった．また、3 日致死率が 100%になった実験もあることから、蚊絶滅マットに蚊繁殖抑制能力の即効性が期待できることがわかった.

図－7 は HD マットとカールマットの間の蚊の様子である．HD マットの下にあるカールマットから上がってきた成虫は HD マットの間を通ることが不可能であることを確認できたため、HD マットは成虫が通ることが出来ないほど目の細かい構造をしているということがわかった．図－8 はカールマット内の蚊の様子であり、カールマットが孵化時に障害になり蚊が溺死していることがわかる.

図－9 はカールマットと水面の間の蚊の様子であり、幼虫が水面に出ることが出来ず、カールマット内で死亡し

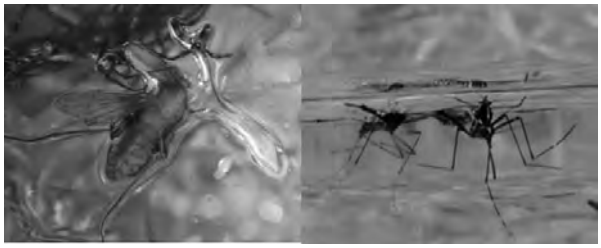
表－1　通常孵化実験結果

通常孵化実験	開始日	幼虫［匹］	蛹［匹］	成虫［匹］	確認日	幼虫［匹］	蛹［匹］	成虫［匹］	生存数［匹］	孵化率［%］
	6/26	0	18	2	6/29	0	0	20	20	100

表－2　理的成長障害実験結果

物理的成長障害実験	開始日	幼虫［匹］	蛹［匹］	成虫［匹］	確認日	幼虫［匹］	蛹［匹］	成虫［匹］	生存数［匹］	死骸数［匹］	3日致死率［%］
	6/26	0	18	2	6/29	0	0	0	0	20	100
	7/13	32	18	0	7/16	4	4	2	10	40	80
	7/16	30	20	0	7/20	3	2	0	5	45	90
	7/24	30	20	0	7/26	0	5	3	8	42	84

図－7　HDマットとカールマットの間の蚊の様子


図－8　カールマット内の蚊の様子

図－9　カールマットと水面の間の蚊の様子

表－3　蚊絶滅マット落下水比較実験結果

降雨強度［mm/h］	落下水量［ml］		マット有/マット無［%］
	マット無	マット有	
25	31.32	31.21	99.65
50	59.67	61.00	102.2
70	67.84	66.84	98.53

ていることが確認できる.

蚊絶滅マットは敷設が完了した時からHDマットを成虫が通過することが物理的に不可能であることから、HDマットは蚊の成虫化を遮断することができるといえる. また、カールマットは幼虫から蛹、蛹から成虫への成長を妨げる効果があることがわかった.

HDマットが遮断材となって、蚊の成虫は外部から入ることも内部から出ることも出来ない. 雨水排水路内の成虫はストレス死、溺死、寿命を迎え、また、卵の取り残しや流れ込みで幼虫になったとしても、カールマットが物理的障害物となって、呼吸するために水面まで移動しようとするが、そこへ辿り着くまでに時間がかかり、呼吸障害で溺死する. 蛹まで成長した個体も水面で羽が上手く広げられず溺死する、または、カールマットとHDマットの間まで上ることができても、HDマットが物理的障害となり、体力がつきて死滅する. この繰り返しによって、卵も幼虫も成長過程で時間とともに死亡し、絶滅している.

以上の結果から、蚊の成長抑制、死滅、発生防御のいずれの面から見ても蚊絶滅マットの設置は効果的であり、これを充填した際には、現在実施されているIGR剤（昆虫成長制御剤）等の薬剤の投入は不要になると言える。

⑵ 蚊絶滅マット落下水比較実験結果

表－3は蚊絶滅マット落下水比較実験結果を示したものである. この表を見ると降雨強度25 ㎜/h、50 ㎜/h、70㎜/hのいずれの場合でも、マットの有無は関係なく落下水量は同じであった. このことからマットの有無は雨水の排水能力に影響を与えないと言える.

また、東京都区部における浸水対策としては、都市化の進展に伴う下水道への雨水流入量の増加に伴い、50㎜/hの降雨に対応できる下水道幹線やポンプ所等の基幹施設の整備を行っている[9].

これを勘案した50 ㎜/hやそれ以上の降雨強度であってもマット有無による排水能力には差は見られなかったこ

図－10
蚊絶滅マット設置直後と5年経過後のマットの様子
（左図：マット設置直後）
（右図：マット設置から5年経過後）

とから、実際の公共施設等の雨水桝やU字溝に蚊絶滅マットを設置したとしても、雨水及びU字溝の排水能力には影響を与えないと言える.

(3) 蚊絶滅マット5年経過比較実験

図－10 は蚊絶滅マットのメンテナンスを全く行わず、設置から5年経過した前後でマットの様子を比較したものである．左図はマット設置直後、右図はマット設置から5年経過後の様子である.

マット設置から5年経過した後もHDマット上に極細砂を超えるゴミは残り、水も排水されていることを確認した。また、HDマット、カールマット共に目詰まりもしておらず、極細砂を超える堆積物もなかった.

さらに、HDマット、カールマットの形状も変化していなかった.

しかし、図－10の右図を見ると、HDマットに付着した細砂が乾湿の繰り返しで変形していることが確認できる.そのため、マットの性能自体には変化はないが、HDマットは5年程度で交換した方が良いと思われる.

(4) 蚊絶滅マット公園内比較

図-11の右図は雨水桝に蚊絶滅マットを設置し、1年経過後の雨水桝内の様子を撮影したものである．左図はマットを設置していない状態である.

この写真を見ると、蚊絶滅マットを設置した雨水桝は落ち葉などの堆積物が溜まらず、良好な排水状態を維持できるが、マットを設置していない雨水桝には通常通り落ち葉が溜まり、雨水の排水能力を低下させる状況となっていることがわかった．そして1年経過すると、HDマットは変形するが、カールマットの形状に変化はなかった.

また、図-12の下図は雨水桝に蚊絶滅マットを設置し、1年経過後のU字溝内の様子を撮影したものである．上図はマットを設置していない状態である．U字溝においても蚊絶滅マットを敷設することで落ち葉などが堆積せず、水の流れる底面が確保できることがわかった.

泥や砂の入り易い場所では蚊絶滅マットとグレーチングの間に、細砂と泥が堆積し、湿乾を繰り返すと目詰まりするため、雨が止んだ後に、グレーチングからかき出す

図－11
蚊絶滅マット設置から1年経過した雨水桝の様子
（左図：マットを設置していない時の
雨水桝の様子）
（右図：マットを設置した時の雨水桝の様子）

図-12
蚊絶滅マット設置から1年経過したU字溝の様子
（上図：マットを設置していない時の
U字溝の様子）
（下図：マットを設置した時のU字溝の様子）

ように清掃することで性能を維持できると考えられる.

以上の経過観察結果から、雨水桝、U字溝のHDマットは1年に1回程度、吸引メンテナンスを実施し、HDマットは5年毎に交換、カールマットは10年程継続して使用できると想定される

4. まとめ

蚊絶滅マット（分別集水マット）は樹脂繊維を不織布状に整形したマットを雨水桝内の空間に充填することで、蚊の繁殖を抑制するだけでなく、雨水桝のごみの堆積の問題も解決することが出来る.

本研究では蚊絶滅マットの蚊繁殖抑制効果、マットが雨水桝の排水能力に与える影響、また、マットの耐久性を確認するために蚊絶滅マットに関する実証実験を行った.

・雨水桝に蚊絶滅マットを充填することにより、排水能力に影響するのかどうかを確認するために蚊絶滅マット

落下水比較実験を行った.
その結果、降雨強度 25 ㎜/h、50 ㎜/h、70㎜/h のいずれもマット有無関係なく落下水量に変化が見られなかった. このことからマット有無は雨水桝またはU字溝の集排水能力に影響しないということが言える.
・蚊繁殖抑制能力を確認するために物理的障害実験を行った.
その結果、いずれの実験でも 3 日致死率（初日に生存していた蚊が 3 日以内に死ぬ確率）は 80%を超えることがわかった. そのため蚊絶滅マットに蚊発生抑制能力の即効性が確認することが出来た.
また、成虫は HD マットの間を通ることが不可能であることから、HD マットは蚊の成虫の遮断に有効であり、カールマットは幼虫、蛹段階で成長障害に有効である. このことから蚊絶滅マットは敷設が完了した時から HD マットが遮断材となり、蚊の成虫は外部から入ることも内部から出ることも出来ないことから蚊絶滅マットは蚊繁殖抑制能力に即効性があることが分かった.
・蚊絶滅マットの耐久性を確認するためマット 5 年経過比較実験を行った.
その結果、蚊絶滅マット 5 年経過比較実験では設置から５年経過した後も HD マット状に極細砂を超えるゴミが残るものの、その排水能力には変化がないことを確認した. また、HD マット、カールマット共に目詰まりしておらず、極細砂を超える堆積物がないことも確認した. HD マット、カールマットの形状維持能力に変化が変化がないことも確認できた.
・また、マットを実際に公園に設置し経過観察を行った
設置前後の比較実験において、マットを設置した 1 年後の雨水桝は落ち葉などの堆積物がないため、良好な排水状態にあると言える. しかし、マットを設置していない雨水桝は落ち葉が溜まり、雨水の排水の障害となっていることがわかった.
1 年経過後、HD マットの変形を確認したが、カールマットの形状に変化は無かった. U 字溝においても蚊絶滅マットを敷設することで落ち葉などが堆積せず、水の流れる底面が確保できることがわかった.

蚊絶滅マットは開口部 30×30 cm、深さ 45 cm の雨水桝に設置するために約 27,000 円のコストがかかる[10]が、一度設置すると上層部に溜まったゴミを年に一度清掃するだけで良く、且つ 10 年以上の長期間に亘って持続的な効果を発揮することが期待できる.
さらに、雨水の集排水路内の堆積物もなくなることから、下水道処理場の負担も軽減される.
蚊絶滅マットは殺虫剤や成長抑制剤とは異なる物理的な蚊の防除方法となり得る可能性があり、また、雨水桝及びU字溝に堆積するゴミ処理対策としても一考の余地があるものである. 今後は、さらなる長期的な経過観察と現地での蚊の発生抑制効果に関する実証

謝 辞
本研究の遂行にあたり，一般社団法人産学技術協会から貴重なデータを頂いた. 記して謝意を表す.

参考文献

1) 大前比呂思，石川洋文：気候変動と寄生虫症　ーマラリアに焦点を当ててー　特集　気候変動と感染症　資源環境対策　44: 29-33.　2008
2) 国立感染症研究所：2019 年，蚊媒介感染症の診療ガイドライン（第 5 版），https://www.niid.go.jp/niid/images/epi/dengue/Mosquito_Mediated_190207-5.pdf
3) 国立感染症研究所：病原微生物検出情報（IASR）Vol. 36，pp37-38，2015
4) Mayer, S. V., Tesh, R. B. and Vasilakis, N. 2017. The emergence of arthropod-borne viral diseases: A global prospective on dengue, chikungunya and zika fevers. Acta Trop., 166: 155–163.
5) 環境省：地球温暖化と感染症，https://www.env.go.jp/earth/ondanka/pamph_infection/full.pdf.
6) 東京都福祉保健局：施設管理者向け蚊の発生防止策対策，https://www.fukushihoken.metro.tokyo.lg.jp/kankyo/eisei/baikaikataisaku/boushi_gekkann.files/R2kapanhu.pdf
7) 秦和寿，栗原毅：1982.　都市の雨水ますに発生する蚊，衛生動物 Vol.33 No.3，pp247-248，1982.
8) 砂原俊彦：雨水桝への蚊絶滅マット（分別集水マット）の設置が蚊の個体群に与える影響，衛星動物 Vol70 No.3，pp147-152.
9) 東京都下水道局：豪雨対策下水道緊急プラン https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/business/pdf/infn0787_pdf02.pdf
10) 産学技術協会：2018. 蚊絶滅マット（分別集水マット），https://sangaku.org/p2018.06.04.pdf

既設滑走路の予防保全と被災時の安全性の検証についての一考察

A STUDY OF PREVENTIVE MAINTENANCE AND SAFETY VERIFICATION IN DISASTER FOR EXISTING RUNWAYS

國武　正大*
KUNITAKE Masahiro

＊　航空自衛隊 航空支援集団司令部　防衛事務官（〒183-0001 東京都府中市浅間町 1-5-5）

キーワード：予防保全，コンクリート舗装，路盤支持力，コーン貫入試験
（ *preventive maintenance, concrete pavement, bearing capacity of base course, cone penetration test* ）

1. はじめに

コンクリート舗装は、飛行場の滑走路やエプロンなどに使われており、高耐久性を有し、ライフサイクルコストの低減に繋がり、環境に優しいといった長所が挙げられる。しかしながら、コンクリート舗装は維持や修繕を目的とした補修の実施に際し、工法や補修材料の適用方法が不明確なために補修が困難だと考えられていることや、交通開放に時間を要するなどの課題が存在する。

供用中のコンクリート版は、航空機荷重等により発生する曲げ応力による疲労が蓄積し、コンクリート版の底面からひび割れが生じ、荷重支持性能が低下する。

また、路盤の経年変形によるコンクリート版の支持力低下は、版に発生する応力を増大させ、疲労破壊を早める要因となることも考えられる。

現在のところ、供用中のコンクリート舗装に対して、構造的な健全性を定量的に評価する手法が明確には定まっていないことから、路盤強度の観点からの評価の方法について、考察したものである。

2. 施設の維持管理

2.1　予防保全の観点

我が国では、高度経済成長期以降に整備した社会資本の老朽化が進んでおり、例えば、道路橋では、15 年後には建設後 50 年以上経過するものが 6 割を超えることになる。2018 年 11 月、国土交通省は，経済財政諮問会議のワーキングにおいて、所管するインフラの今後 30 年後までの維持管理・更新費の推計の結果を示した。

インフラに不具合が生じてから対策を行う事後保全型の維持管理・更新から、不具合が生じる前に対策を行う予防保全型の維持管理・更新に移行することにより，30 年間の維持管理・更新費の合計費用が，約 3 割縮減される推計結果となった。

2.2　災害を想定した事前の備えの意義

2019 年の大阪サミットにおいて「Ｇ２０開発作業部会サイドイベント 防災アジェンダの達成に向けた展望」の議長サマリーでは、「災害後の緊急対応・復旧よりも、事前の防災投資の方が費用対効果が高く、持続可能な開発に資することが確認された。災害の復旧・再建・復興段階については、その備えを発災前に準備しておく必要があり、さらに、国やコミュニティを災害に対して強じんなものとしつつ、『防災の主流化』を開発施策に取り込むことなどを通じて、『より良い復興』を行う重要な機会とすることが必要である」と提言された。

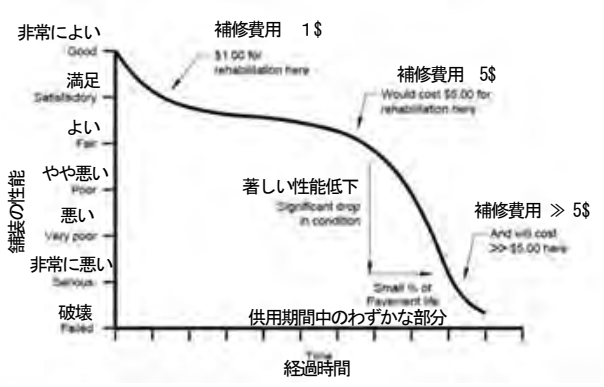
仮に、自衛隊施設に事前の防災投資として、予防保全型の維持管理・更新をすることは、地域の防災力が高まり、防災拠点やサプライチェーンなどが確保されることにより「社会の価値」が創出され、持続可能な都市の促進と管理能力の強化が期待できる。このため、自衛隊施設の「社会の価値」が高まることは、その地域に存在する企業の「企業の価値」が高まることにつながり、副次的に SDG s の「目標 11 住み続けられるまちづくり」に寄与することができるものと考える。

2.3 飛行場の舗装について

舗装は供用後、なだらかに経年劣化をしていき、供用中の大部分を良好な性能を維持しているものの、限界状態に到達すると、急激に劣化する。

図－1 は、供用後の舗装の劣化の状態と舗装の劣化の状態の補修コストを相対的に示したものである。

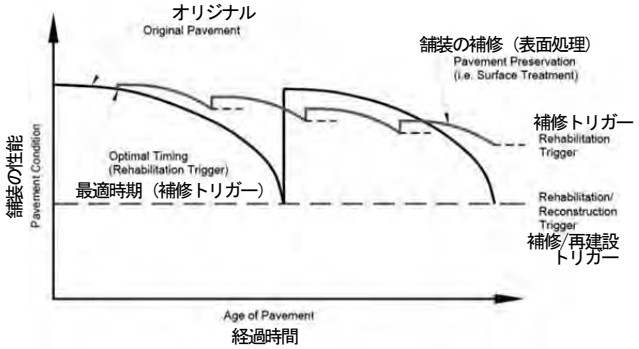
劣化する舗装を良好な状態に維持・補修するコストは、よいからやや悪い状態の舗装の維持・補修の 4 から 5 倍の縮減となり、耐用年数を伸ばすことになる。舗装の劣化までの期間は、舗装の種別・品質、舗装の使用状況、気候、メンテナンスなどのいくつかの要因により異なる。



図－1　舗装の性能が低下する状況　（参考文献 3）

航空機の荷重による性能劣化速度は、環境の要因のみの劣化よりも速い傾向にある。環境の要因により劣化した舗装は、舗装表面に亀裂などの損傷があったとしても、構造的には健全な状態である。しかし、航空機の荷重により亀裂などの損傷があった場合は、劣化の初期段階であることがあり、試験により判定する必要がある。

図－2 は、供用中の早い段階で維持補修を行う保全の概念を示している。適切な時期に恒常的に補修することは、費用対効果が高く、舗装の良い状態が保たれるため、滑走路の閉鎖を短期間で済ませることができる。



図－2　舗装の保全の概念（参考文献 3）

3　コンクリート舗装の劣化

3.1　コンクリート舗装について

コンクリート舗装は一般的に寿命が長いため、設計期間は 20 年以上と長くとることができる。

コンクリート舗装は基本的には適切に設計・施工し、適切に目地のシールを行えば極めて高い耐久性を示す。しかし、予期しない気象・交通条件などの発生により、供用中に舗装が破損し、路面の性能を保持するための補修が必要となることがある。

3.2　劣化の要因について

3.2.1 コンクリート舗装の劣化

コンクリート舗装の劣化の要因については、凍害融解などの環境因子や、アルカリ骨材反応や中性化などの化学因子のほかに、荷重による劣化がある。

荷重による劣化は、供用期間中に航空機等による荷重応力と温度応力が同時に何回も繰返し作用することで、これらの応力がコンクリートの強度に比べて小さな応力であっても数多く繰り返されると破壊し、コンクリート版にひび割れが発生する。これを疲労ひび割れという。

コンクリート舗装の変状の形態と主な要因は表－1 のとおり示されている。

表－1　コンクリート舗装の変状の形態と主な要因
（参考文献 7）

変状の分類	変状の形態	主な要因
①ひび割れ	縦断・横断方向の線状ひび割れ、隅角部ひび割れ	路床・路盤の支持力低下、目地構造の破損、地盤の不同沈下、コンクリートの劣化、コンクリートの中性化
②変形	縦断方向の凹凸	路床・路盤の支持力低下、地盤の不同沈下
③段差	目地部・構造物付近の凹凸	路床・路盤の転圧不足、地盤の不同沈下、ポンピング現象、ダウエルバー・タイバーの機能の不完全
④座屈（ブローアップ）	版の持ち上がり	コンクリート版の温度膨張、目地構造・機能の不完全
⑤摩耗	すり減り（ポリッシング）	コンクリート版表面の劣化、摩耗
	剥がれ（スケーリング）	コンクリート版表面の劣化、摩耗
⑥目地部の破損	目地材・目地縁部の破損	目地板の劣化、注入目地材のはみ出し・劣化・硬化・脱落、コンクリートの破損、目地構造・機能の不完全
⑦表面の異常	穴あき・きず	骨材の欠損、舗装表面に対する外的な衝撃
	版の持ち上がり・そり	コンクリート舗装下の凍上

3.2.2 路盤の劣化

コンクリート版は、路床や路盤への負担を軽減する役割がある一方、路床と路盤はコンクリート版を支えるという重要な役割を担っている。コンクリート版にひび割れが発生や目地部のシールが機能していない場合には、路盤に水が浸透して、路盤の劣化を引き起こすことになる。

特に、コンクリートの横目地部の劣化は、目地のシールが比較的早く喪失し、目地から水によりダウエルバーが腐食し、最終的には破断する。荷重伝達が失われるとたわみが増大して路盤の塑性変形を促し、コンクリート版と路盤との間に空洞が形成され、目地部の路盤の支持力がなくなり、コンクリート版の疲労が加速し、ひび割れが発生する。

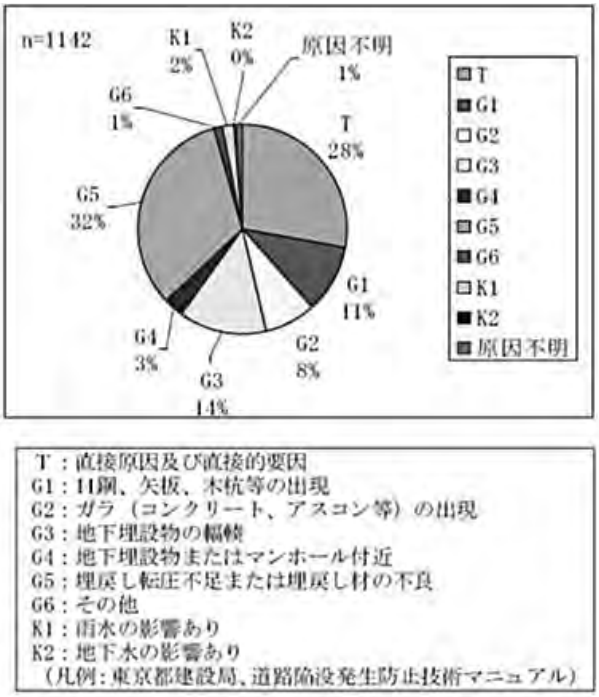
また、従来の設計法では、K 値は設計耐用期間内では変化しないとされている。しかし、路盤は、コンクリート版に繰り返し載荷されることで、路盤の K 値が低下され、コンクリート版の支持力低下により、コンクリート版に発生する応力を増大させ、疲労破壊を早める原因となるとの研究もなされている。

3.2.3 路面下の空洞について

東京都の平成１３年度から平成２１年度までの調査によれば、路面下の空洞は、「埋戻し転圧不足または埋戻し材の不良」の３２％と、地下埋設物に起因する「直接要因及び直接的要因」（下水道等の地下埋設物の破損により、破損部に土砂が流入することで空洞が発生する要因）が２８％、「埋設物の輻輳」が１４％、「埋設物またはマンホール付近」が３％と合わせて、全体の約７７％を占める。

滑走路等は、一般の道路と比較すると、舗装構造等で同一ではないが、路面下に着目すると、道路と同様に、埋戻し転圧不足・埋戻し材の不良・地下埋設物が空洞の発生の大きな要因となることが推測される。

このため、飛行場施設の維持管理については、滑走路等の直下にある地下埋設物の位置図を確認して、点検することが必要であると考える。



T：直接原因及び直接的要因
G1：矢板、木杭等の出現
G2：ガラ（コンクリート、アスコン等）の出現
G3：地下埋設物の輻輳
G4：地下埋設物またはマンホール付近
G5：埋戻し転圧不足または埋戻し材の不良
G6：その他
K1：雨水の影響あり
K2：地下水の影響あり
（凡例：東京都建設局、道路陥没発生防止技術マニュアル）

図－3 空洞発生要因別の割合（参考文献 8）

また、東日本大震災のとき、宮城県では、地中レーダによる空洞調査で異常信号を検出した箇所の約７割が下水道施設等の地下埋設物周辺であった。このことから、ハザードマップで施設の場所における液状化の危険度を把握するとともに、地震時においては、路面下の地下埋設物の近傍を重点的に点検することは重要である。

滑走路等の路面下における空洞調査については、航空機の運用を阻害させないために、地中レーダ探査などの非破壊試験を行うことは有効である。しかしながら、コンクリート舗装における地中レーダによる空洞の確認は、精度などにおいて課題がある。このため、滑走路等の空洞調査は、まずは表－１で示すひび割れ・変形・段差を目視により点検し、異常地点の経過観察をすることが重要であると考える。

4. 既設滑走路の安全点検について

4.1 点検

国土交通省では、飛行場施設を下表の項目について定期的に点検を行い、点検結果を航空機の運航への影響度を考慮して、健全や応急処置若しくは修繕などの対策を判断している。

表－2 重要度区分（参考文献 7）

重要度区分	エアサイドの影響度区分
1	影響度Ａ：航空機事故、重大インシデントの要因となる施設 影響度Ｂ：航空機の運航に制限（影響の程度が大）がある施設
2	影響度Ｃ：航空機の運航に制限（影響の程度が中）がある施設
3	影響度Ｄ：航空機の運航に制限（影響の程度が小）がある施設 影響度Ｅ：航空機の運航に制限がない施設

表－3 対応区分の判定（参考文献 7）

区分	対策区分（措置）の内容
Ⅰ	健全又は変状の程度が軽微。必要に応じて経過観察等を行う。
Ⅱ	応急処置又は詳細点検を行う。
Ⅲ	修繕等（応急処置又は詳細点検を実施した後の修繕工事等を含む。）を行う。重要度区分１の場合には、直ちに修繕等（応急措置を含む。）を行うことが望ましい。

表－4 コンクリート舗装の変状と対策区分の判定（例）（参考文献 7）

点検項目	変状の分類	変状の種類	変状の指標	変状のレベル	重要度区分による対策区分の判定 1	2	3	備考
舗装の状況	ひび割れ	縦断・横断方向のひび割れ、隅角部のひび割れ（鋼材の腐食に対するひび割れ幅）	ＮＣ版のひび割れ幅	Ａ：0～0.005C以下（C：かぶり（mm））	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	表中の変状のレベルの数値は鋼材腐食に対する限界の一般値を示したものである（舗装標準示方書参照）。ひび割れ幅の限界値は、環境条件等を考慮して設定することが望ましい。
				Ｂ：－	－	－	－	
				Ｃ：0.005Cを超える（C：かぶり（mm））	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	
			ＣＲＣ版のひび割れ幅	Ａ：0.5mm～0.6mm以下	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	
				Ｂ：－	－	－	－	
				Ｃ：0.6mmを超える	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	
			ＰＣ版のひび割れ幅	Ａ：0～0.004C以下（C：かぶり（mm））	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	
				Ｂ：－	－	－	－	
				Ｃ：0.004Cを超える（C：かぶり（mm））	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	
	変形	縦断方向の凹凸	凹凸量	Ａ：概ね10mm未満	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	変状の要因分析、対策方法の検討等のための詳細点検を実施する必要がある。
				Ｂ：－	－	－	－	
				Ｃ：概ね10mm以上	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	
	段差	構造物付近の段差、コンクリート版間の段差	段差量	Ａ：概ね5mm未満	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	
				Ｂ：概ね5mm以上10mm未満	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	
				Ｃ：概ね10mm以上	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	
	座屈	ブローアップ	コンクリート片の剥がれの有無	Ａ：－	－	－	－	
				Ｂ：－	－	－	－	
				Ｃ：あり	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	
	摩耗	剥がれ（スケーリング）	コンクリート片の剥がれの有無	Ａ：－	－	－	－	
				Ｂ：－	－	－	－	
				Ｃ：あり	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	

※ 上表に記載のない変状の種類（すり減り、目地材の破損、目地縁部の破損、版の持ち上がり等）の対策実施の要否は、当該空港の特性、航空機の運航等への影響の有無、変状の程度等を総合的に判断し、判定する。

4.2 緊急点検

国土交通省では、震度4以上の地震や台風等による自然災害などが生起した場合、緊急点検として、上記項目について点検を行うこととなっている。

【東日本大震災の時の松島基地の安全性の検証】

東北防衛局は、2011年3月11日に発生した東日本大震災において、被災した航空自衛隊松島基地の滑走路の安全検証のため、13日に現地に入り、14日未明から15日までの間、調査を実施した。

○調査の考え（当時）

調査については、航空機の走行性と航空機荷重の照査として路盤支持力について点検を行った。

走行性能については、舗装表面のすべり抵抗値と平坦性が大きく関わっている。すべり抵抗値は、地震発生前の状態を正常と考えた。平坦性については、現地がコンクリート版であることから、空港舗装設計要領（国土交通省航空局）に基づき、段差量の規格値を１０mm未満として点検を行った。路盤支持力については、重量車両を走行させ、たわみの有無を確認した。

調査内容	調査結果
平坦性	・主滑走路は段差を確認されず ・副滑走路は段差量１０mmが１カ所確認されたので、部隊で補修
路盤支持力	・たわみは確認されず

○当時を振り返り

筆者は、点検後、基地の指揮所に赴き、滑走路の使用が可能であることを伝えたところ、目視確認による点検であったこと、米軍が動的コーン貫入試験を行っていたことなどを踏まえ、安全性について追及された。点検結果のほか、コンクリート舗装や現地地盤の特性について説明し、飛行場の運用に至った。なお、後日、滑走路等は、開削して平板載荷試験を行い、力学的検証を行った。

災害時などによる滑走路等に安全性の確認については、操縦士等への理解を得るため、応急的であったとしても、点検項目に力学的な試験を用いて、客観性のある適否の判断が必要であると考える。

5. 大規模地震における滑走路の安全性の確保について

5.1 路盤についての検証

被災時のコンクリート舗装の緊急点検については、点検項目と適否の目安が示されているものの、舗装版の状況であり、路盤については指標が示されていない。

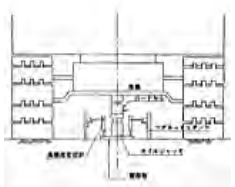
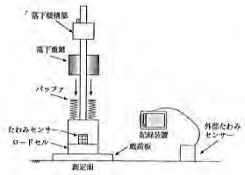
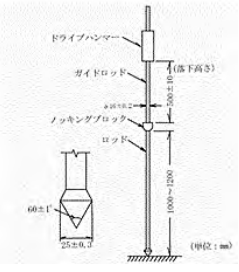
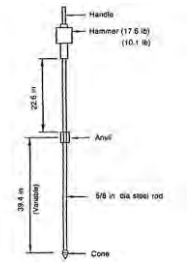
従来の設計法では、K値は設計耐用期間内では変化しないとされているものの、路盤は経年変形と被災時の外力により、設計時の支持力が確保されているとは言い切れない。

5.2 既設滑走路の検証

5.2.1 路盤支持力の確認について

既設滑走路の路盤の強度を評価するため、下図の試験方法がある。飛行場の設計に用いられるK値を計測する平板載荷試験のほか、反力となる重機が必要としない小型FWD試験や簡易動的コーン貫入試験（DCP）がある。

大規模震災等において、早急に滑走路等の運用の適否の判断が求められる場合、直ちに技術者の確保や各種試験器や反力となる重機などを調達することは困難になることが想定される。このため、平素から、応急的な適否の判断を行える能力を保有することが必要であると考える。

	日本			米軍
試験方法	平板載荷試験	小型FWD	簡易動的コーン貫入試験（DCP）	The dual-mass DCP
試験器具				
試験方法	路盤などに剛な載荷板を介して、段階的に荷重を加え、荷重の大きさと沈下量との関係から地盤反力を求める	小型FWD本体の重錘を自由落下させ、そのとき発生する衝撃荷重と変位量を荷重計、加速度計を用いて測定	５キログラムのドロップ　ハンマーでの貫入深さ１０ｃｍの打撃回数から貫入度を測定	１７．６ポンドのハンマーの１打撃あたりの貫入度を測定し、相関式にてCBR値を算出
評価指標	地盤反力係数	地盤反力係数	Nd値	CBR値

図－4 路盤の支持力確認の試験方法

5.2.2 滑走路等安全性の適否の評価方法の一案

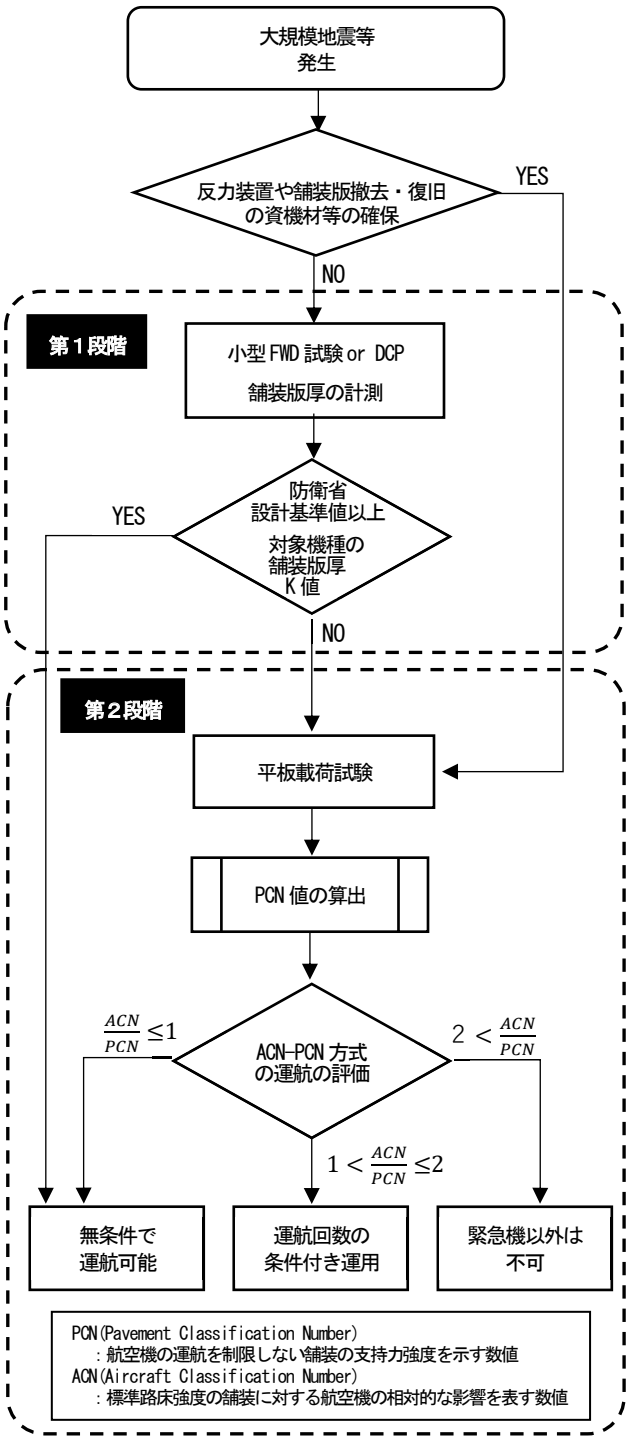
緊急時は、交通網の途絶、十分な機資材の確保や技術的支援などが困難な状況が生起されるものと想定される。

これらの状況下において、可及的速やかに滑走路等の安全性の評価を行うための路盤調査としては、

第１段階：簡易的に、反力が不要な小型FDWやDCPを用いて得られたK値を、防衛省の設計基準の対象機種の基準値と比較して評価

第２段階：平板載荷試験を行い、PCN 値を算出し、ACN-PCN方式（参考文献 9）で評価

の段階的な方法を提案する。



図－5　安全性の適否の評価方法フロー（案）

5.3 路盤支持力の実証試験について

2020年9月30日に、八雲基地で実施した飛行場応急復旧隊（CRT）教育訓練に合わせ、既設舗装の路盤支持力の試験の検証を行った。

5.3.1 路盤支持力の確認について

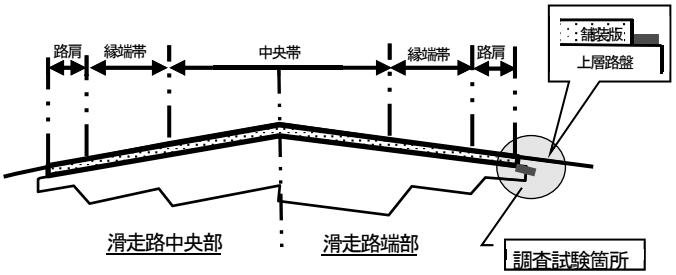
既設滑走路の路盤支持力を確認するためには、試験範囲のコンクリート版を開削する必要がある。

しかしながら、空港の運用が中断できない場合や、防衛省所管以外の空港、発災後に試験装置などの必要資機材の確保が困難な場合など、舗装版を撤去する必要がある平板載荷試験を実施することは現実的でない。

このため、本試験においては、試験が容易で、米軍の調査方法である、DCPを行うこととした。ただし、DCPは、地盤工学会の基準に則った。

また、DCPを行うにあたっては、滑走路中の厚い着陸帯の舗装版に削孔することなく、容易に試験を行うため、舗装版の縁部の路盤の張り出し部分に着目した。

本試験では、滑走路版の路肩部を掘削し路盤を露出させ、その地点でDCPを行い、路盤支持力を測定した。



図－6　調査地点の断面図

図－7 調査状況

5.3.2 DCPの測定値におけるK値の算出方法

DCPで求められたNd値をK値に求めるために、図－8の土建式簡易貫入試験（以下、土建式）のCBRとの相関を活用することとした。

ここで、DCPと土建式の先端コーンの直径は、DCPが25mmと土建式が30mmと異なる。地盤に先端コーンが貫入するエネルギーは、先端コーンの断面積に反比例することが考えられるため、理論上、土建式の値(N_{10})は、Nd値の$30^2/25^2$=1.44倍、式で示すとN_{10}=1.44Ndとなる。今回の

試験では、安全側をとって、N_{10}=Nd として検証した。

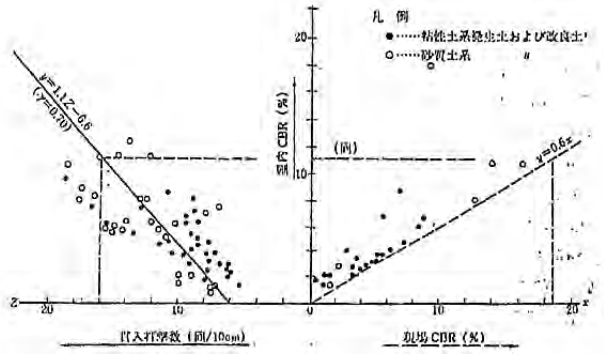
図－8 の Nd 値と CBR の換算式は、次式のようになる。

$$現場\,CBR = 5/3 \times (1.1 \times Nd - 6.6) \quad (1)$$

K 値と現場 CBR については、実測値から次式が用いられている。

$$K_{75} = 9.8 \times (1/4 \times 現場\,CBR + 1) \quad (2)$$

評価にあたっては、既設路盤が経年変形していることを想定し、1 地点あたり、5 回試験をしてその平均値を設計路盤支持力係数（K 値）とした。



図－8 室内 CBR と現場 CBR、N_{10} の関係
（土建式貫入試験）

5.3.3 評価の結果

DCP の結果については、舗装版の際の路肩部路盤を DCP で路盤強度を確認した。5 回打撃したうち、1 回だけ特異な高数値となったことから、その分を棄却した。換算 K 値の平均値は、69.9MN/m^3 となり、防衛省の設計基準での対象機種の K 値以上であったことから、航空機の運航が可能であると判断した。

表－5 試験結果

番号	打撃回数 N回	貫入量 ⊿h= h_n-h_{n-1} cm	Nd= 10N/⊿h	現場ＣＢＲ (1)式 %	K_{75} (2)式 MN/m^3
1	10	8.5	11.8	10.6	35.8
2	10	6	16.7	19.6	57.8
3	10	7.5	13.3	13.4	42.6
4	10	1.8	55.6	90.9	232.5 (棄却)
5	10	2.8	35.7	54.5	143.3
				K_{75} の平均値	**69.9**

5.3.4 各種試験の関係性の検証の必要性

今回の調査は DCP のみで路盤支持力を確認したものであり、DCP の換算 K 値と平板載荷試験との評価が得られていない。したがって、今後、次の事項については、検証する必要があると考える。

〇各種試験器の相関性の検証

- 現在工事中の飛行場エプロン部の路盤などを活用し、品質管理で行われた平板載荷試験の試験と、DCP・小型 FWD 試験器等との相関性を検証

〇既設舗装の路盤検証

- 既設滑走路の地盤強度を DCP・小型 FDW 試験器等の試験にて検証
- 路肩部と舗装版下の路盤支持力を計測し、路肩部での試験の妥当性を検証

〇空洞・剥離の調査の検証のデモンストレーション

- レーダ探査機などの非破壊試験を用いた、舗装版の直下の空洞・剥離の調査の有効性の検証
- 滑走路等の打ち替え時に、かかる範囲内で既設舗装面上に非破壊試験を行い、空洞・剥離の疑いのある異常箇所の舗装版を撤去して、試験精度を検証

5.3.5 考察

- 本試験で得られた換算 K 値の平均値では、対象航空機の運用には支障がないとの判断に至った
- 今後、平板載荷試験を小型 FWD・DCP 等への代替、路肩と舗装版下の路盤強度の相関性、路肩計測の妥当性、舗装版下の空洞の検証をしていきたい
- 各基地は、路盤支持力の測定機器、測定・評価する能力を保有し、平素からの滑走路などの点検に活用することも一案である
- 防衛施設学会で技術的な研究をすることを提案

参考文献

1) （一財）企業活力研究所：「SDGs 達成に向けた企業が創出する『社会の価値』への期待」に関する調査報告書
2) 国土交通省：国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計
3) Airport Pavement Management Program (PMP), Advisory Circular 150/5380-7B, FAA, 2014
4) 竹内康,小梁川雅,西澤辰男,木村慎:路盤の経年変形がコンクリート舗装の疲労破壊に及ぼす影響
5) 西澤辰男,若林由弥,内田雅隆,藪雅行:コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発
6) 日本道路協会：コンクリート舗装に関する技術資料
7) 国土交通省航空局:空港舗装維持管理マニュアル（案）
8) 迫間マキ、大石雅登、内山博文:災害時における路面下空洞や道路陥没の発生状況調査について
9) 国土交通省航空局空港部技術企画課：舗装強度の告示方法について
10) （公社）地盤工学会：地盤調査の方法と解説
11) 北海道土木技術会 土質基礎研究委員会:土質・基礎に関する Q&A 集

防衛施設学会令和２年度年次研究発表会（2021 年 4 月）

大型水槽の側壁のひび割れ制御

CRACK CONTROL OF LARGE WATER TANK WALL

伊藤朋紀*, 堅田茂昌*, 綾部信吾**, 山﨑真一***, 小川清澄****
ITO Tomoki, KATADA Shigemasa, AYABE Shingo, YAMAZAKI Shinichi, OGAWA Kiyosumi

* 株式会社安部日鋼工業（〒500-8638 岐阜県岐阜市六条大溝 3-13-3）
** 防衛装備庁艦艇装備研究所（〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1）
*** 三井造船特機エンジニアリング株式会社（〒706-8651 岡山県玉野市玉 3-1-1）
**** 岩国生コンクリート協同組合（〒741-0092 山口県岩国市多田 1 丁目 109-10）

キーワード：大型水槽，低熱ポルトランドセメント，温度応力解析，N 式貫入試験，鉛直打継目
（*Large water tank, low heat Portland cement, thermal stress analysis, N type penetration test, vertical joint*）

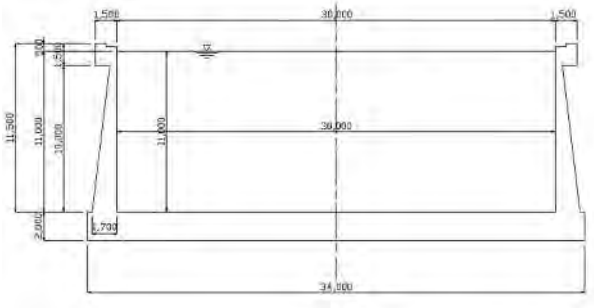
1. はじめに

本物件は実験用大型水槽で，側壁下端の部材厚は 1700mm であるためマスコンクリートに分類される。そのため，本物件では温度ひび割れ対策として側壁コンクリートに低熱ポルトランドセメントを使用し，事前の温度解析により調合の妥当性を確認することとした。その際，側壁下端を想定した実物大試験体モデルを作成し，コンクリート打設後に試験体各部の温度履歴を計測し，計測結果と温度解析結果を比較することにより，使用するコンクリートの温度特性を求めた。その後，得られた温度特性を用い大型水槽の温度応力解析を実施し，調合の妥当性確認と補強鉄筋量の算出をした。これらの事前検討の妥当性を確認するため，実構造物の側壁コンクリートの温度を測定し，解析結果との比較検討を行なった。

また，壁状構造物の温度ひび割れに対する施工方法の対策として，打設区分の大型化により拘束応力の低減を図る方法があり，1 回に施工する高さ H と，施工長さ L の比 L/H を小さくすることが有効である[1]。そのため，本物件では壁高さ 11.0m を 2 段に分け，長さ方向に 3 分割して L/H を小さくする施工区分とした。その結果，鉛直打ち継ぎ目を設ける必要が出てきた。水平打ち継ぎ目は，従来通りの施工方法でしっかり締め固めることで水密性は確保できる。しかし，文献[2]には「鉛直打ち継ぎ目は，その上部における水密性の低下が避けられない」との記載がある。また，同文献には，「漏水した供試体の原因として新コンクリート中の水が打ち継ぎ面に沿って上昇しやすく，多数の水みちが発生し，打継目の導水抵抗がほとんどなくなった」との記載がある。このような水みちを防止するには再振動が有効と考えられるが，コンクリート標準示方書施工編[3]では，「再振動を行う適切な時期は，締固めによって流動性が戻る状態の範囲で，できるだけ遅い時期がよい･･･中略･･･再振動を行う場合は，締固めが可能な時間をあらかじめ確認し，その時期を適切に定めておく必要がある。」と記述されている。そのため，使用するコンクリートの凝結開始時間の確認実験（N 式貫入試験）を行い，その結果を施工管理に反映させた。

2. 対象とする大型水槽の概要

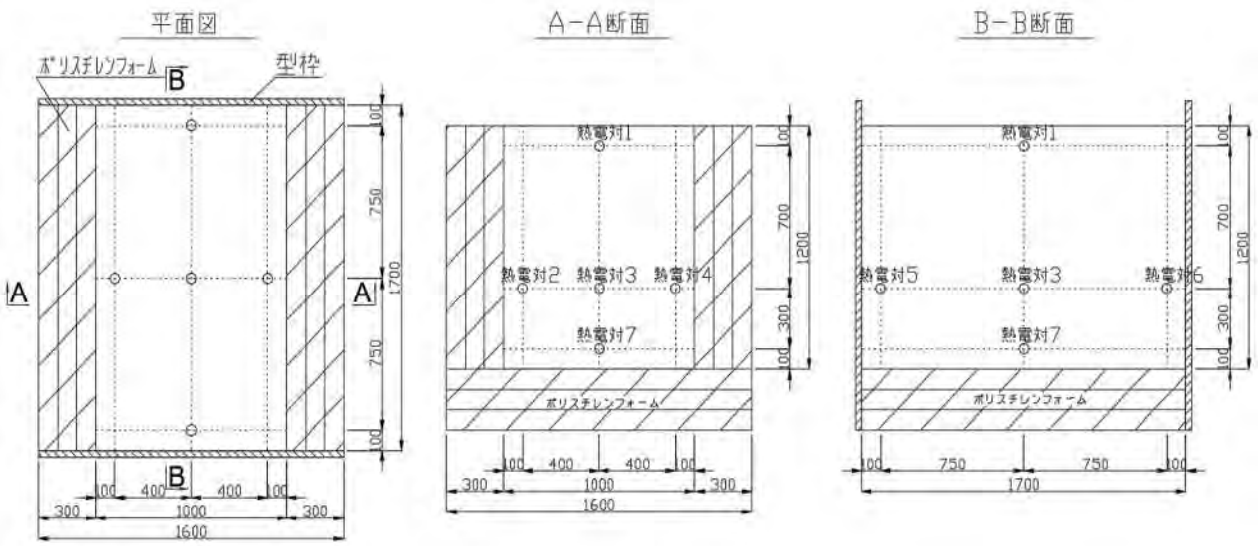
対象とする大型水槽は，内面が東西方向 35m，南北方向 30m，水深 11m の長さの直方体形状の水槽である。大型水槽形状の概要を**図－１**に示す。



図－１　大型水槽形状の概要（単位：mm）

長期間の使用に耐え，努めて水の入れ替えが不要な構造とする必要があったため，水槽の壁は予め圧縮力を与えたプレストレストコンクリート構造として水密性と耐久性を確保した。底版部は鉄筋コンクリート構造である。耐震設計は容器構造設計指針・同解説[4]に準じ，供用期間中に発生する確率は低いが，大きな強度を持つ地震動に対応できるものとしている。

水槽部内面の 4 側面に吸音材を，水槽部内面の底面に空中重量 70ton の駆動装置の設置を配慮した構造とし，また，水槽部上面に，トラバーサ走行レールを設置でき，トラバーサ走行台車が水槽部外まで作動範囲を確保できる構造となっている。さらに，水槽部上面の 4 辺のうち 2 辺については，試験器材を一時的に設置できる構造である。



図－２　試験体の寸法および温度測定位置（単位：mm）

3. コンクリートの物性確認試験

3.1 実物大試験の概要

本物件は事前に温度応力解析を実施し，調合の妥当性，施工分割，鉄筋追加の必要性などを確認する計画であるが，その際には施工現場に即した条件でのコンクリートの温度特性値を用いる必要がある。温度ひび割れ対策として側壁コンクリートに低熱ポルトランドセメントを使用することとしたが，マスコンクリートのひび割れ制御指針改訂調査委員会報告書[5)]によると，低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇特性式の係数の標準値は，更に精査する必要があると記載されている。したがって，低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートの物性確認試験を実施した。

低熱ポルトランドセメントを用いた実構造物と同じ調合のコンクリートを用いて，側壁下端部を想定した実物大試験体を作成し，コンクリート打設後に試験体各部の温度履歴を計測した。その後，計測結果と温度解析結果を比較することにより，使用するコンクリートの断熱温度上昇特性と型枠面・打設面の熱伝達率を求めた。試験体の大きさは，断面 1.0×1.7m，高さ 1.2m とし，側壁の内外面を想定した面には実施工に用いる木製の型枠を使用した。また，側壁断面の側面と下面は，断熱境界を表現するため，厚さ 30cm のポリスチレンフォームを型枠とした。コンクリートの温度履歴は熱電対により測定した。作成した試験体の寸法および温度測定位置を**図－２**に示す。本試験で用いたコンクリートの調合表を**表－１**に示す。

コンクリートは設計基準強度 36N/mm^2，スランプ 12cm，粗骨材の最大寸法 20mm でセメントの種類は低熱ポルトランドセメントである。強度を保証する材齢は調合 1 が 28 日，調合 2 が 56 日で，混和剤は調合 1 が高性能 AE 減水剤，調合 2 が AE 減水剤である。

表－１　コンクリートの調合表（単位：kg/m^3）

	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
調合1	410	164	800	979	2.87 ※1
調合2	354	170	844	963	2.83 ※2

セメント：低熱ポルトランドセメント
細骨材：砕砂+砂
粗骨材：砕石
混和剤：※1高性能AE減水剤、※2AE減水剤

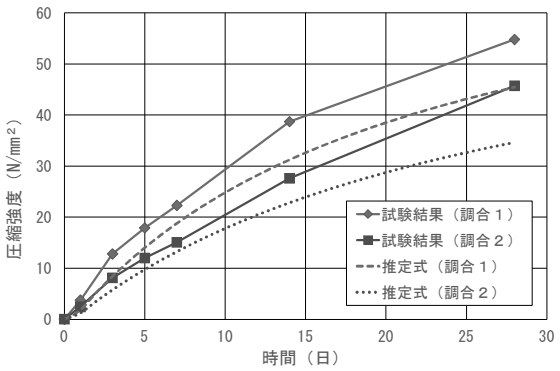
3.2 試験結果

(1) コンクリートの強度特性

材料試験の結果を**表－２**に示す。また，圧縮試験結果とコンクリート標準示方書の推定式より算出した圧縮強度の履歴を**図－３**に示す。

表－２　材料試験結果（単位：N/mm^2）

種類	試験項目	σ1	σ3	σ5	σ7	σ14	σ28
調合1	圧縮強度	3.8	12.8	17.9	22.3	38.7	54.8
	引張強度	-	-	-	2.44	3.69	4.39
	ヤング係数	-	-	-	27,300	32,700	37,100
調合2	圧縮強度	2.5	8.1	12.0	15.1	27.6	45.7
	引張強度	-	-	-	1.69	2.95	3.95
	ヤング係数	-	-	-	24,300	30,200	35,000

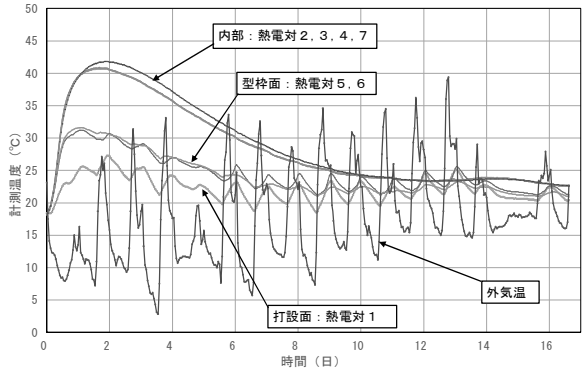


図－３　圧縮強度履歴

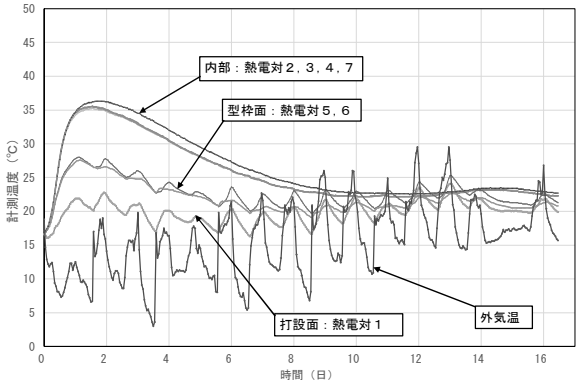
図より，本試験のコンクリートは示方書の推定式で算出した圧縮強度より大きい値を示し，温度応力解析で示方書の推定式を使用した場合，安全側の評価となる。また，引張強度の試験値は示方書の推定式を用いて圧縮強度から算定した値より若干高い値を示し，ヤング係数の試験値は推定値とほぼ一致した。

(2) コンクリートの発熱特性

試験により得られた計測温度履歴を**図－４**に示す。コンクリート内部およびポリスチレンフォーム付近の熱電対 2，3，4，7 と木製型枠付近の熱電対 5，6 は，それぞれほぼ同じ温度を示した。普通コンクリートを使用した事前解析では，最高温度は 71℃であったが，調合 1 では 42℃，調合 2 では 36℃と，低熱ポルトランドセメントを使用する効果が確認できた。



（ａ）調合 1：28 日強度保証

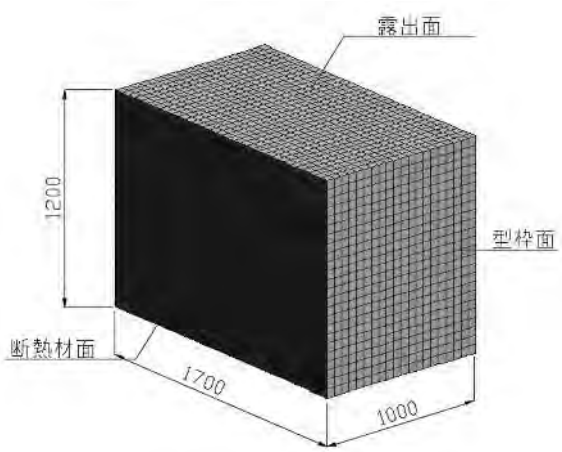


（ｂ）調合 2：56 日強度保証

図－４　計測温度履歴

3.3 解析条件および解析モデル

試験により計測された温度履歴を解析で再現できるよう，試験体のコンクリート部分のみを再現したモデルを作成した（**図－５**）。熱伝達率は，型枠面を 8W/m^2℃，打設面（露出面）を 14W/m^2℃，ポリスチレンフォーム面は断熱境界とし，外気温に実測値を用いた。また，コンクリートの熱伝導率は 2.6W/m℃，比熱は 1.125J/g℃，密度は 2400 kg/m^3 と標準的な値とした。



図－５　実物大試験解析モデル（単位：mm）

コンクリートの断熱温度上昇量は，使用するセメントの種類，単位セメント量，打ち込み温度から式(1)により評価できる。

$$Q(t)=Q_\infty[1-exp\{-r(t-t_0)^s\}] \qquad (1)$$

ここに，t：材齢（日）
$Q(t)$：材齢 t 日までの断熱温度上昇量（℃）
Q_∞：終局断熱温度上昇量（℃）
r：断熱温度上昇速度に関する係数
t_0：発熱開始材齢（日）
s：断熱温度上昇速度に関する係数

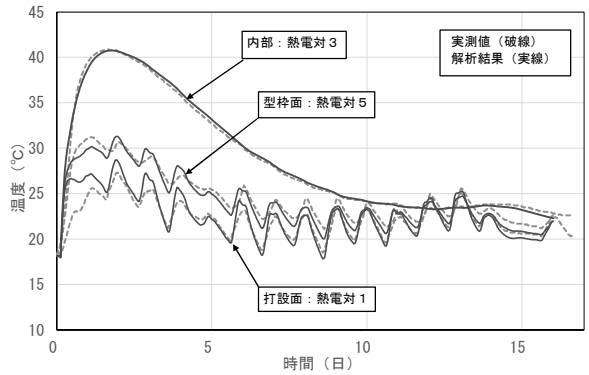
今回の試験では単位セメント量は調合 1 が 410kg/m^3，調合 2 が 354 kg/m^3，コンクリートの打ち込み温度は調合 1 が 18.1℃，調合 2 が 16.9℃であった。これらの値から，断熱温度上昇特性式の諸係数の算定値は，**表－３**の左の通りとなる。

表－３　断熱温度上昇特性に関する各係数

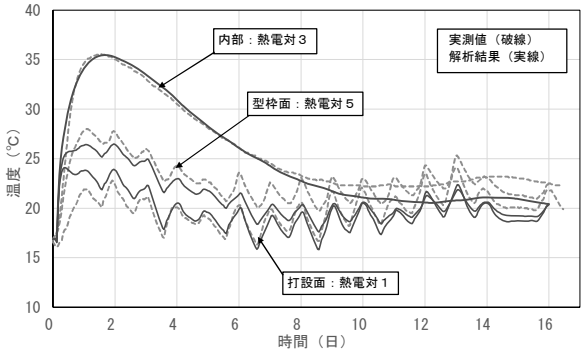
各係数	コンクリート標準示方書に基づく算定値		検討結果	
	調合1	調合2	調合1	調合2
Q_∞	50.1	45.1	42.5	39
r	0.75	0.65	0.75	0.65
s	0.62	0.59	0.5	0.45
t_o	0.29	0.34	0.15	0.15

3.4 解析結果

試験で計測された温度履歴を再現できるよう，コンクリートの終局断熱温度上昇量および温度上昇速度を逆解析により求めた。**表－３**の右に求められた数値を示す。今回の試験結果では終局断熱温度上昇量は Q_∞は推定式より若干小さい値であった。**図－６**に試験体コンクリートの打設面，内部，型枠面にそれぞれ対応する熱電対 1，熱電対 3，熱電対 5 の実測温度履歴と，解析により得られた同位置の温度履歴を示す。とくに最高温度を示す内部において、解析値は実測値とほぼ同じ温度履歴を再現している。



（ａ）調合 1：28 日強度保証



（ｂ）調合 2：56 日強度保証

図－６　実測と解析結果の温度履歴

3.5 コンクリートの熱膨張係数

コンクリートの熱膨張係数は温度解析結果に大きな影響を及ぼすパラメータであるため，使用するコンクリートの線膨張係数を測定し，一般的な値と比較した。

線膨張係数を測定する方法について，基準化した方法はないため，圧縮強度用試験体の中央に熱電対付きひずみ計を配置し，この試験体の温度を変化させながらひずみを測定し，熱膨張係数を求めた。試験体には調合 1 と調合 2 のコンクリートを使用し，試験体はそれぞれ 2 体ずつ作成し，線膨張係数を測定した。試験はコンクリートの水和反応および自己収縮の影響が少なくなるよう，材齢約 1 ヶ月後に実施した。

試験体はラバーヒーターにて加熱し，20℃から 60℃まで上昇させ，その後放置して 20℃まで下降させた。これを 3 回実施し，温度とひずみから線膨張係数を算出した。試験により得られた線膨張係数を**表－４**に示す。

表－４　線膨張係数測定結果（単位：$\times 10^{-6}$）

	熱膨張係数（／℃）	
	温度上昇時（20℃→60℃）	温度下降時（60℃→20℃）
調合1	7.83	8.47
調合2	7.74	8.39

試験の結果，温度上昇時と温度下降時で若干の差がみられるが熱膨張係数は平均で 8.11×10^{-6}／℃となった。これは一般の場合（10×10^{-6}／℃）に比べると小さな値である。したがって，本件のコンクリートは，温度により発生するひずみが一般の場合に比べ小さくなり，マスコンクリートの温度ひび割れに限って言えば，有利な材料といえる。

4. 大型水槽のひび割れ制御

4.1 ひび割れ制御における目標性能

容器構造設計指針・同解説では，「4 章水槽 4.2.2（1）鉄筋コンクリート構造の鉄筋およびプレストレストコンクリート構造における鉄筋の長期許容応力度は，ひび割れ幅などを考慮して適切に定める」と記述されている。一方，コンクリート標準示方書では，**表－５**の通り示されている。

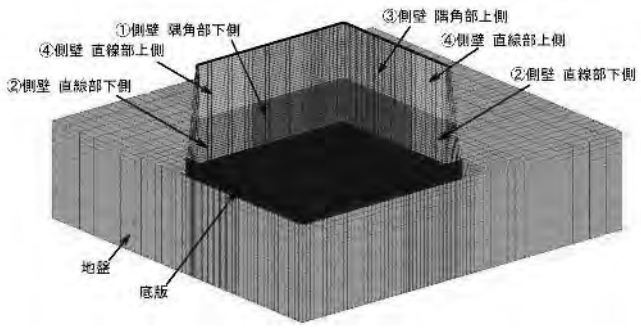
表－５　水密性に対するひび割れ幅の設計限界値の目安（mm）

要求される水密性の程度		高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する断面力	軸引張り力	全断面圧縮状態	0.1
	曲げモーメント	0.1	0.2

これらを考慮し，外部拘束応力のように部材断面に引っ張りが卓越する温度応力に対して，ひび割れの制御の目標値を 0.1mm とした。

4.2 温度応力解析

実物大試験で得られた熱特性を用いて温度応力解析を行い，側壁のひび割れ幅を推定した。解析対象は水槽の側壁で，地盤および水槽底版・側壁をモデル化し，対称性を考慮して 1/4 モデルとした。解析モデルおよび施工分割は**図－７**に示す通りである。



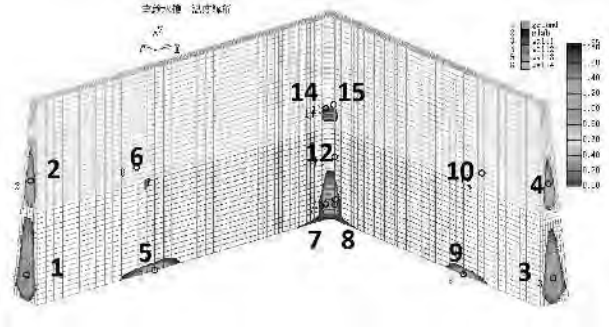
図－７　解析モデル

工期への影響等を考慮して，下段隅角部には 56 日強度保証調合，上段および下段直線部には 28 日強度保証調合，最上段（直線部のみ）には早強セメント調合を適用した。外気温は過去 3 年間の当現場直近の観測点の日平均気温を使用した。コンクリートの打設時の温度は，外気温に 5℃加えたもの

とした。本解析では安全性を踏まえて，コンクリートの圧縮強度に推定式を使用し，熱膨張係数は一般の値（10×10^{-6}／℃）を採用した。

4.3 追加鉄筋によるひび割れ制御

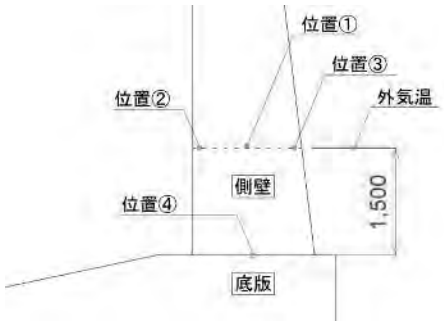
温度応力解析の結果，隅角部打設部に底版の拘束（外部拘束）により大きな温度応力が発生し，最小ひび割れ指数は 0.57 となった（**図－８**）。このとき，ひび割れ幅を 0.1mm 以下とするために必要な鉄筋比は，コンクリート標準示方書 [3]の温度ひび割れ指数とひび割れ幅の関係式より，0.86%と算定された。そのため，現場では隅角部ハンチ部の水平方向鉄筋と鉛直方向鉄筋を追加した。



図－８　最小ひび割れ指数分布図

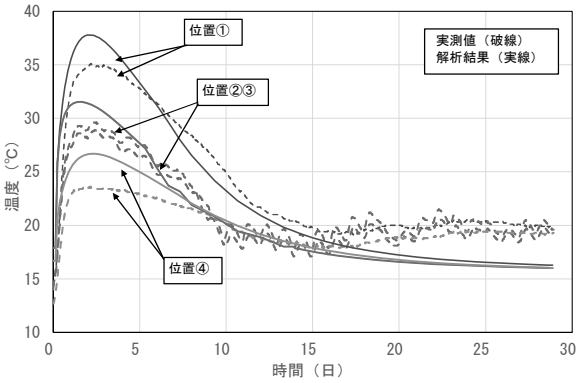
5. 解析の妥当性確認

これらの事前検討の妥当性を確認するため，実構造物の側壁コンクリートの温度を測定し，解析結果との比較検討を行うこととした。温度計測は側壁１段目の隅角部コンクリート打設時に実施した。計測位置を**図－９**に示す。

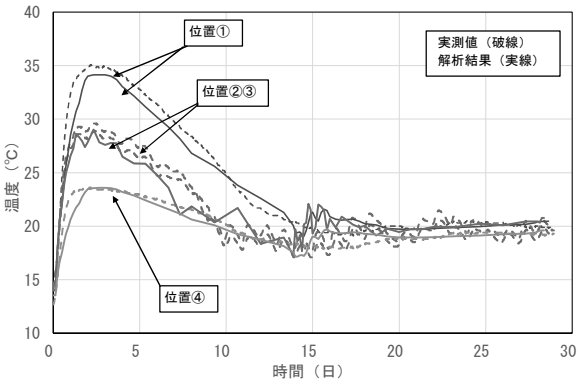


図－９　計測位置断面図（単位：mm）

解析値と実測値の温度履歴を**図－10** に示す。実測値が解析値より一様に小さな値を示した。これは，コンクリートの打ち込み温度が解析では 17.9℃であるのに対し実測では 14.0℃であり，また外気温も平均気温と実気温に差があったためと考えられる。そこで，施工時のコンクリート打ち込み温度と外気温を入力条件として再解析を行った結果を**図－11** に示す。断面中央部とコンクリート打設面付近は，ほぼ一致する結果となり，実物大試験で求めた熱物性値で，実構造物の温度を精度良く再現できることが分かる。したがって，本手法により温度解析を実施する場合，実施工時のコンクリート打ち込み温度と外気温の予測が重要となる。



図－10　解析と実測の温度履歴

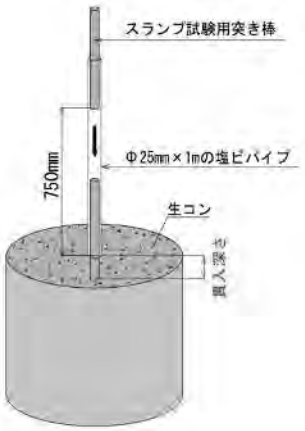


図－11　再解析と実測の温度履歴

6. 鉛直方向打継目の水密性の確保

施工上の温度ひび割れ対策として打設区分の大型化を図った。その結果生じた鉛直打継目の水密性向上のために，現場にて凝結開始時間の確認実験（N 式貫入試験）を行った。N 式貫入試験は，深さ 350mm 程度のポリバケツ内に打設したコンクリート打ち上がり面に対し，内径 25mm×長さ 1m の塩ビ管を鉛直に立て，これをサヤ管としてスランプ試験に使用する突き棒を鉛直方向に 750mm 自由落下させ，コンクリートへの突き棒貫入量を測定する方法で，現場で簡便に実施できる手法である。**図－12** に N 式貫入試験の概念図を示す。

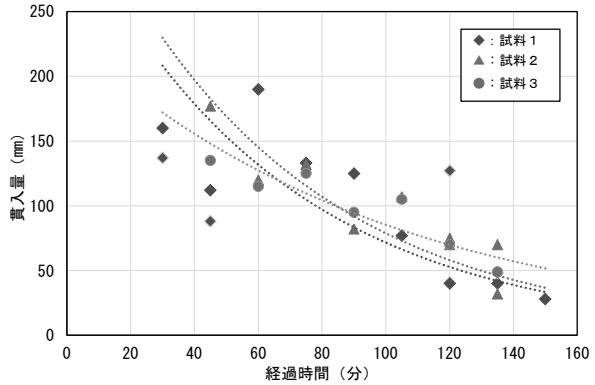
N 式貫入試験は 28 日強度保証のコンクリートに対し 2 回実施した。1 回目は事前に経過時間と貫入量の関係を把握するために実施し，2 回目は実際に鉛直打継目がある箇所にコンクリートを打設



図－12　N 式貫入試験の概念図

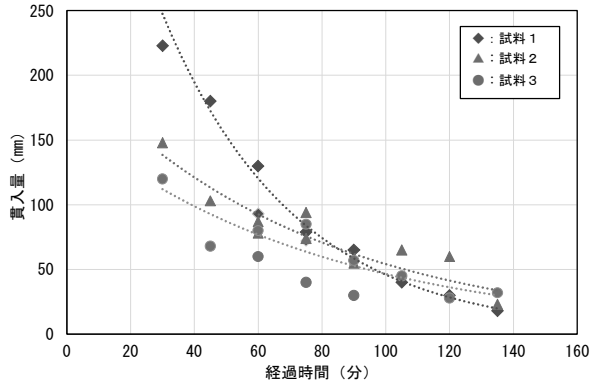
する当日に，再振動の施工管理のために実施した。

試験は現場のコンクリート打設に合わせて実施し，試料を 3 体採取した。コンクリートをバケツ内に投入後，1 回目は突き棒と木づちで締め固めて試験体を作成した。1 回目の試験結果ではばらつきが大きく，本来であれば時間の経過とともに貫入量は低下するが，時間経過の途中で貫入量が上下する結果となった（**図－13**）。



図－13　N 式貫入試験の結果（1 回目）

そのため，2 回目は入念にコンクリートを締め固めた試験体を作成した。2 回目の試験では時間の経過とともに貫入量は低下し良好な結果が得られた（**図－14**）。



図－14　N 式貫入試験の結果（2 回目）

各種文献では，プロクター貫入試験では 0.1N/mm^2，N 式貫入試験では 100mm が再振動を行うタイミングとしているものが多く [6]，本件でも N 式貫入試験にて 100mm の結果が得られた時間を再振動のタイミングとした。**図－14** より，再振動をコンクリート打ち込み開始から 60 分後に実施することとし，写真の通り現場にて管理を行った（**写真－1**）。

7. まとめ

実験用大型水槽の側壁の温度ひび割れ対策として，低熱ポルトランドセメントを使用し水和熱の低減を図るとともに，打設区分の大型化により拘束応力の低減を図った。その際，実物大試験体モデルによる試験に基づく温度応力解析，実構造物

写真－1　現場での時間管理

の温度計測，鉛直打継目の水密性向上のために，現場にて N 式貫入試験を行い，打継目の水密性の向上を図った。これらの対策を実施し，次の結論を得た。

(1) 本件の低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_∞は，示方書で示される値より小さい値となった。今後さらなる精査が必要である。

(2) 本件に使用したコンクリートの熱膨張係数は 8.11×10^{-6}／℃となった。これは一般の場合（10×10^{-6}／℃）に比べると小さな値である。

(3) 試験により求めた熱特性値を用い，実際のコンクリートの打ち込み温度と外気温を入力値として温度解析を実施すると，精度良く温度が求められる。本手法により温度解析を実施する場合，実施工時のコンクリート打ち込み温度と外気温の予測が重要となる。

(4)鉛直打継目の水密性を確保ために再振動が重要であることを示し，再振動のタイミングを現場で簡便に測定できる N 式貫入試験の結果に基づき施工を行なった。今後，試験の精度の向上を目指す。

謝辞：本対策を行うにあたり，ご協力いただきました艦艇装備研究所および三井造船特機エンジニアリング（株）の関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018，2018.7
2) 村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計，技報堂出版，2002.5
3) 土木学会：コンクリート標準示方書［設計編］，2017 年制定
4) 日本建築学会：容器構造設計指針・同解説，2010.3
5) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針改訂調査委員会報告書，2014.6
6) 佐藤悠士朗，櫨原弘貴，添田政司，山田浩嗣：再振動締固め時期の違いがコンクリートの長期品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol40，No.1，2018 など

AIを用いた打音法技術について

INSPECTION OF STRUCTURES BY IMPACT ACOUSTIC METHOD USING AI TECHNOLOGY

歌川紀之*，黒田千歳**，安永守利***，西敏臣****，古賀美智恵****，黒田一郎*****
UTAGAWA Noriyuki，KURODA Chitose，YASUNAGA Moritoshi，NISHI Toshiomi，KOGA Michie
And KURODA Ichirou

* 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 上席研究員（〒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）
**** 株式会社九検 （〒849-0932 佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝166-35）
***** 博（工）防衛大学 システム工学群 教授（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）

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

打音検査は、コンクリート構造物の浮きや剥離を調べるために重要な検査手法である。打音検査は構造物をハンマで叩いて、その音から、浮きなどの欠陥の有無を調べる技術である。現状は、点検者の聴覚による判定能力に結果が委ねられ、客観的な検査技術にはなっていない。

このような課題を解決するために、打音法が開発されている。打音法はハンマなどによる打撃音をマイクロフォンで収録分析し、欠陥の有無や規模を調べる技術である。打音法では、どのように叩き、どのように収録し、それをそのように分析するかを決定して、システムを作ることになる。これまで、筆者らは、フード付マイクロフォンとインパクトハンマからなるシステム[1]により、曲げ板の理論を用いた厚さ評価[2]（物理的な評価）、AI的な技術を用いた評価[3]などの分析手法を行っている。

AIを用いた打音法は、検査で得られた音圧波形を健全部の音圧波形と欠陥部の音圧波形に分類する技術である。したがって、事前に学習のため、健全部で発生する音と欠陥部で発生する音を収集する必要がある。学習データの収集のためには、打音では現地のデータを使う場合と模擬欠陥を有する試験体のデータを使う場合がある。現地のデータを使う場合でも、試験体を使う場合でも、完全な学習（すべての欠陥を網羅するような）は難しく、さらに、叩き方や収録方法の差異もあり、すべての欠陥に対し、対応することは難しい。

ここでは、市販されている2種類のAIを用いた打音法、試験体の学習データを用いるタイプである「マルチ打音法システム[3]」と現地の健全部で学習するタイプである「AI打音チェッカー[4),5)]」により、空洞試験体に対し、どの程度の探査性能があるのかを調べ、それぞれの使い方について検討したものである。

2. 2種類のAIを用いた打音技術

2種類の打音システムについて、探査性能（欠陥、健全部を判別）を比較した。それぞれのシステムを表－1に示す。

マルチ打音法システムでは、コンクリート面の振動音に着目し、フード付マイクロフォンで音を収録している。システムはPCとADコンバータ、インパクトハンマとフード付マイクロフォンからなり、学習用のデータ収録にも用いることが可能である。

AI打音チェッカーでは、一般的な叩き点検と同様に人が聞く音に着目し、空中音を収録している。また、システムは、マイクロフォンと収録分析装置が一体型で、ハンディになっている。ハンマは点検用の球形ハンマである。以下にAIによる判定方法について説明する。

2.1 マルチ打音法システムの判定方法（SOM）

マルチ打音法システムでは、いくつかのAI評価から、総合的に評価をするが、ここでは、SOMの結果のみを

用いる。また、学習する範囲を健全部と欠陥の 8 種類に限定し、それ以外の欠陥についても判定可能かを調べた。なお、用いた学習データは、音圧 FFT データ（0～2.4kHz,512 個）をインパクトハンマの加力値の最大値（周波数領域）で除した 512 次元のベクトルである。

学習結果である自己組織化マップを図-1 に示す。合計約 1600 個の欠陥部とその周辺の健全部（8 種類×（100 個健全部＋100 個欠陥部）の打音データを取得し，自己組織化マップのサイズを 30×30 とし，学習を 2 万回行なった。図-3 に示すように、自己組織化マップの上で、健全部と 8 種類の欠陥部に領域が色別されていることが分かる。検査データがこの領域上でどこの領域に入るか（図中星印）で、欠陥や健全の判別や欠陥種別の判別をすることが可能になる。また、健全部（白）と欠陥部の領域の境界に検査結果がある場合は、それぞれの領域の中間的な位置付けとなる。ここでは欠陥規模については着目せず、欠陥か健全かの判別に着目する。

2.2 AI 打音チェッカーの分析方法（LOF）

AI 打音チェッカーでは、局所外れ値因子法 LOF を用いる。LOF では、健全部の学習データの領域からはずれている検査データ（スコアが大きい）を欠陥、領域内にある検査データ（スコアが小さい）を健全とする手法である。図-4 を用い、説明する。用いた周波数ベクトルは、音圧の FFT データ（0.5～10kHz,381 個）を長さ 1 のベクトルに基準化したものである。

①例えば、健全部の学習を 3 点で行い。それぞれのベクトルを HA,HB,HC とする。
②健全ベクトル間の距離を DAB,DAC,DBC とする。その平均距離を Dave とする。
③検査するベクトルを T とする。
④T と最も近い健全学習ベクトルを HA とする。
⑤T と HA の距離を TA とする。
⑥スコアは TA/Dave となる。
⑦スコアと閾値を比較し、健全か欠陥を判別する。

SOM では、周波数ベクトルのそれぞれの周波数振幅に着目して分類しているのに対し、LOF では周波数ベクトルの健全部学習ベクトルとの距離に着目して分類する手法である。類似する方法として、K 近傍法は、2 値以上（例えば健全と欠陥）の分類をする方法になる。LOF では 1 値（健全部）からの離れで分類する方法になるので、経験的、統計的な手法に頼ることになる。

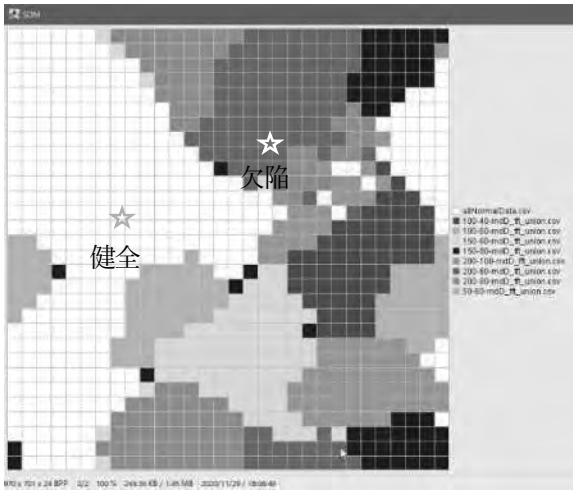
閾値を推奨のスコア 2 とした場合と健全部をいくつか叩いた場合の最大スコア 1 を閾値とした場合で比較した。

表－1　2 つの AI 打音法システムの比較

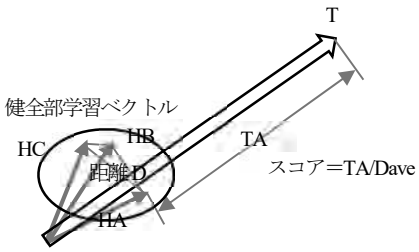
	マルチ打音法システム（図-1）	AI 打音チェッカー（図-2）
打撃	インパクトハンマ(250g)	打診用球型ハンマ（150g）
収録	フード付マイクロフォン	マイクロフォン（空中）
使用データ	厚さ評価：音圧時系列、ハンマ加力値時系列 AI 評価：音圧 FFT、ハンマ加力値 FFT	音圧（FFT）
分析	厚さ評価、AI 評価 （自己組織化マップ[6] SOM(self-organizing map)、サポートベクトルマシン[7] SVM、マルチレイヤパーセプトロン MLP）	局所外れ値因子法 LOF (local outlier factor)[8]
長所	欠陥の規模（広さ、剥離までの深さ）を推定できる	学習が簡単（現地の健全部 3 点） 機器が軽量である。
短所	学習数が必要。	健全に近い欠陥の判別 ノイズの影響を受ける

図－1　マルチ打音法システム

図－2　AI 打音チェッカー



図－3　SOM の学習結果



図－4　LOF の手法

3. 円形空洞欠陥試験体

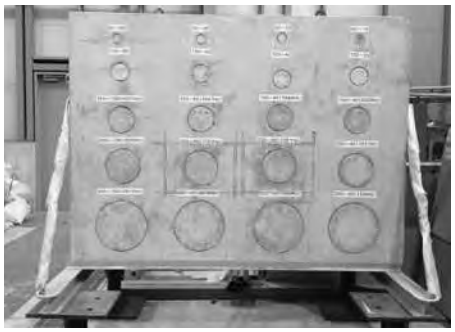
今回の探査性能の確認を行った欠陥試験体（2000mm×1500mm×300mm）を図－5 に示す。円形空洞は 2.5cm 厚さの円柱形状の発泡スチロールでモデル化した、その直径と埋設深さ（表面から埋設物の距離）は

空洞直径 50, 100, 150, 200, 300(mm)

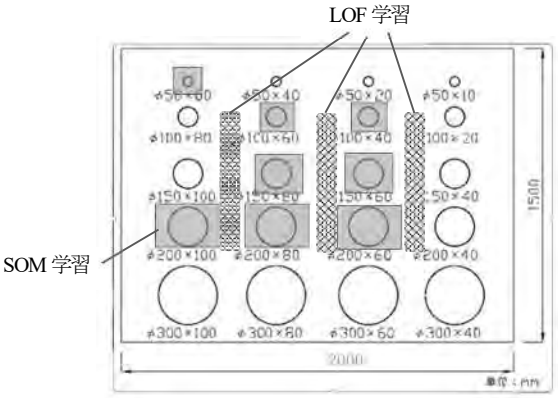
埋設深さ 10, 20, 40, 60, 80, 100(mm)

である。これらを組み合わせた 20 種類の円形空洞が埋め込まれている。以下、欠陥の名称は空洞直径と深さで、φ300×40 などで示す。

それぞれの学習箇所を図－6 に示す。



図－5　欠陥試験体



図－6　学習箇所

4. 円形空洞試験体を用いた探査性能の評価

判定は、表－2 に示す 15 種類の欠陥および周辺の健全部に対し、探査性能の評価を行った。ここで、水色部分は SOM で学習した欠陥である。それぞれの欠陥に対し、20～50 回の測定を行い、欠陥を欠陥として評価したか、健全として評価したかを比較する。SOM では、学習したどの欠陥に当たるかも評価した（欠陥種別評価）。

表－2　判定に用いた欠陥

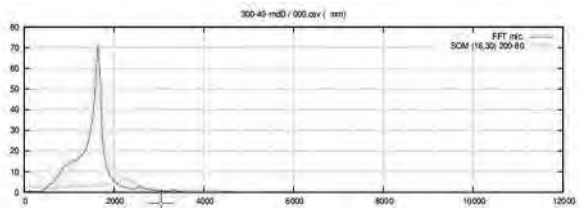
	深さ 20	深さ 40	深さ 60	深さ 80	深さ 100
φ300		○	○	○	○
φ200		○	○	○	○
φ150		○	○	○	
φ100	○	○	○		
φ50			○		

4.1 SOM（マルチ打音法システム）による評価結果

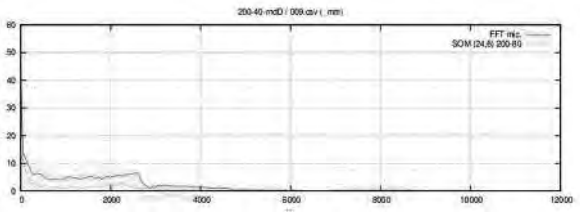
評価結果を表－3 に示す。SOM では、各種陥を細かく学習するため、健全に近い欠陥を判別することが可能となる。また、事前に学習している欠陥については、φ100×40、φ100×60 を除き、ほぼ欠陥種別評価もできていることが分かる。また、学習していない欠陥についても、欠陥の判別が可能であることが分かった。参考までに、測定結果と最も近いと判別された学習結果を図-7 に比較する。学習していない欠陥は、健全部に比較すると他の欠陥に似ており、欠陥と判定されることが分かる。

表－3　SOM による評価結果(水色は学習済の欠陥)

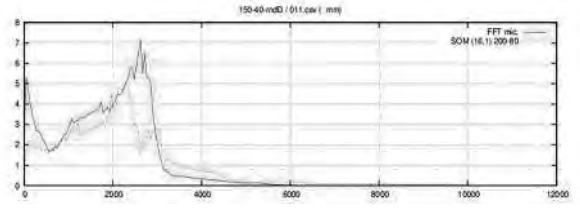
種別＼判定	200_60 欠陥部	200_80 欠陥部	200_100 欠陥部	150_60 欠陥部	150_80 欠陥部	100_40 欠陥部	100_60 欠陥部	50_60 欠陥部	健全部
300_40 欠陥部	1	34							
300_60 欠陥部	1	19							
300_80 欠陥部	20								
300_100 欠陥部	19						1		
200_40 欠陥部		20							
200_60 欠陥部	14	6							
200_80 欠陥部		19	1						
200_100 欠陥部			20						
150_40 欠陥部		20							
150_60 欠陥部				20					
150_80 欠陥部					20				
100_20 欠陥部	1	18		1					
100_40 欠陥部				8		11		1	
100_60 欠陥部				1	8	4	2	5	
50_60 欠陥部								20	
0_0 健全部								1	47



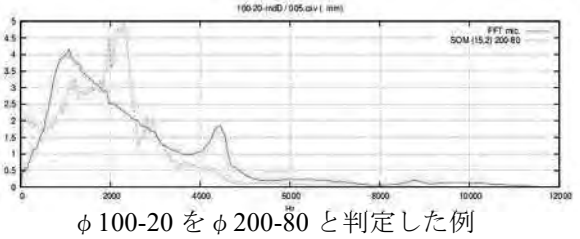
ϕ300-40 を ϕ200-80 と判定した例



ϕ200-40 を ϕ200-80 と判定した例



ϕ150-40 を ϕ200-80 と判定した例



ϕ100-20 を ϕ200-80 と判定した例

図－7　学習していない欠陥の判別

4. 2 LOF(AI 打音チェッカー)による評価結果

表－4（閾値 1)、表－5（閾値 2）に LOF による評価結果を示す。また、参考までに、得られたスコアの分布を欠陥の直径ごとに、健全部と比較し、図－8 に示す。

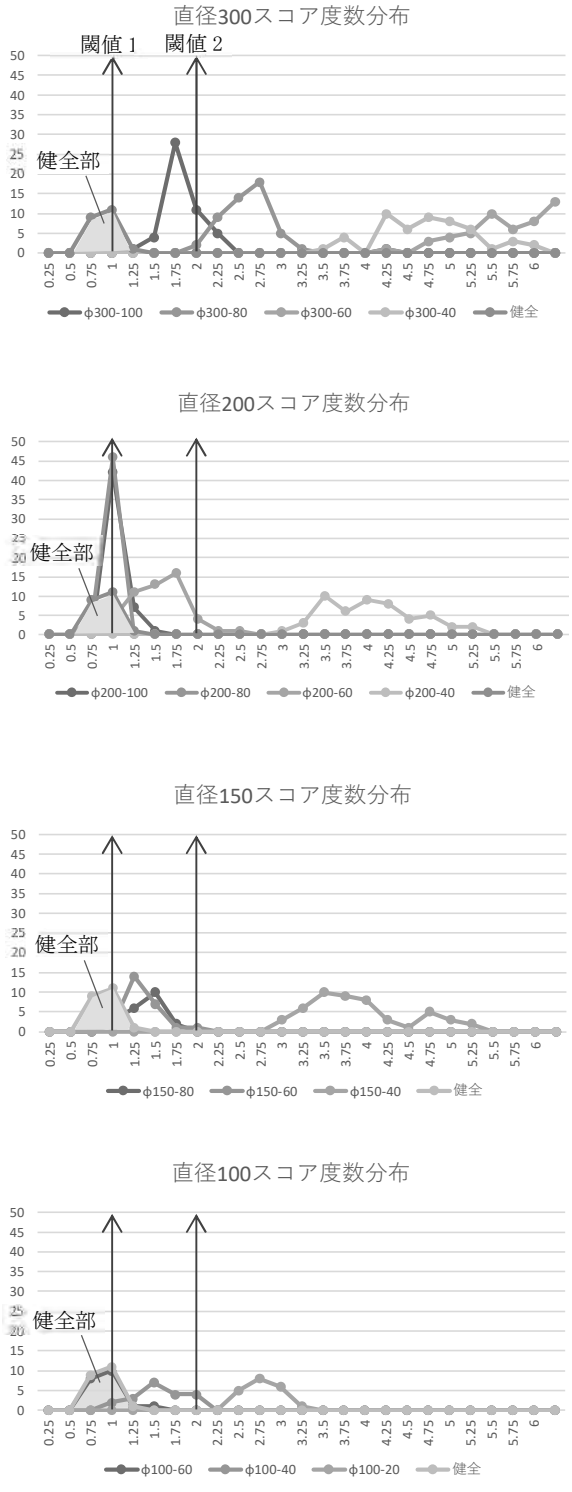
LOF は、学習した健全ベクトルとの違いを調べる方法で、明らかに健全部と異なる欠陥部（広く、薄い欠陥）である ϕ300×40、ϕ300×60、ϕ300×80、ϕ200×40、ϕ150×40、ϕ100×20 は判別できるが、健全部の波形と近い欠陥部（狭く、厚い欠陥）の判定が難しいことが分かる。

表－4　LOF による評価結果（閾値 1）

閾値 1	欠陥	健全
300_40 欠陥部	50	0
300_60 欠陥部	50	0
300_80 欠陥部	49	0
300_100 欠陥部	49	1
200_40 欠陥部	50	0
200_60 欠陥部	35	15
200_80 欠陥部	0	50
200_100 欠陥部	1	49
150_40 欠陥部	50	0
150_60 欠陥部	9	16
150_80 欠陥部	12	9
100_20 欠陥部	20	0
100_40 欠陥部	15	5
100_60 欠陥部	1	19
50_60 欠陥部	0	20
0_0 健全部	0	21

表－5　LOF による評価結果（閾値 2）

閾値2	欠陥	健全
300_40 欠陥部	50	0
300_60 欠陥部	50	0
300_80 欠陥部	38	11
300_100 欠陥部	1	49
200_40 欠陥部	50	0
200_60 欠陥部	1	49
200_80 欠陥部	0	50
200_100 欠陥部	0	50
150_40 欠陥部	50	0
150_60 欠陥部	0	25
150_80 欠陥部	0	21
100_20 欠陥部	20	0
100_40 欠陥部	0	20
100_60 欠陥部	0	20
50_60 欠陥部	0	20
0_0 健全部	0	21



図－8　各欠陥のスコア度数分布

図－8 の各欠陥のスコア分布から以下のことが分かる。

・健全部は 0.5～1.25 の分布であり、その分布がある程度有意であれば、その最大値 1 を閾値にすることは可能である。できるだけ、欠陥を見つけるため

にはこの閾値を用いることができる。（健全部でデータが取れる場合）
・推奨の閾値 2 は健全部と欠陥部が重ならないので、欠陥を欠陥と判定するためには有効な手法と考えられる。（健全部でデータが取れない場合）

4. 3 2 つの方法の評価結果の比較

SOM では、各欠陥を細かく学習するため、健全に近い欠陥を判別することが可能となる。また、学習していない欠陥についても、欠陥の判別が可能であることが分かった。

一方、LOF では、学習した健全部との違いを調べるのみなので、明らかに健全部と異なる欠陥部（広く、薄い欠陥）は判別できるが、健全部の波形と近い欠陥部（狭く、厚い欠陥）の判定が難しいことが分かる。ただし、健全部については健全部と判定することが可能となる。

人の判別と比較すると、LOF はやや劣り、SOM はやや優れた判別能力があることが分かる。この原因は、LOF では健全部との違いをベクトルの距離で評価するためと考えられる。一方、SOM では、欠陥部の学習とともに、フード付マイクロフォンを用いていることから、ノイズの影響が少なく、直接、コンクリートの振動音を捉えているためと考えられる。

表－6　評価結果のまとめ

	深さ 20	深さ 40	深さ 60	深さ 80	深さ 100
ϕ 300		◎	◎	◎	○
ϕ 200		◎	○	△	△
ϕ 150		◎	△	△	
ϕ 100	◎	○	△		
ϕ 50			△		

黄色：人が欠陥と判定
◎SOM,LOF（閾値 2）,LOF(閾値 1)で欠陥判定
○SOM,LOF(閾値 1)で欠陥判定
△SOM で欠陥判定

5. まとめ

2 つの異なる打音法を異なる空洞規模（広さ、空洞のかぶり）を有する欠陥試験体に用い、それぞれの判別能力を調べた。その結果、AI 打音チェッカーでは、鉄筋のかぶり程度に生じた 15cm 程度の直径を有す剥離欠陥については判別できる。マルチ打音法システムでは、鉄筋のかぶり程度に生じた 5cm 程度の直径を有す剥離欠陥でも判別できることが分かった。また、学習をしていない欠陥に対しても、欠陥と判定ができることも分かった。

したがって、現地の構造物を対象とする際に、まずは軽量で機動性がある「AI 打音チェッカー」で、50cm 程度の荒いメッシュで大きな欠陥を調べ、欠陥が見つかった場合は、その周辺を細かいメッシュ 10cm 程度に切り、「マルチ打音法システム」で調べる方法がよいものと思われる。ただし、今後を考えると、位置情報などを同時に得られるようにシステムの改良を行い、位置情報を同時に取得し、CAD データに反映できるようにすることが必要と考えられる。また、着目するコンクリート構造物の剥離や浮きがどの程度の規模で生じているかの基礎データを取りながら、学習方法も変えていくことが必要と考えられる。

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) 歌川紀之，黒田千歳，安永守利：マルチ打音システムを用いた構造物の診断，防衛施設学会令和元年度年次研究発表会（2021 年 2 月）
4) 佐伯駿実，勝木　太，日比野克彦：機械学習を利用した打音法によるコンクリート浮き部検出に関する基礎研究,土木学会第 72 回年次学術講演会（平成 29 年 9 月）
5) 佐伯駿実，勝木太，日比野克彦：機械学習を利用した打音法によるコンクリート浮き部検出精度に関する研究,土木学会第 73 回年次学術講演会（平成 30 年 8 月）
6) Teuvo Kohonen，:Self-Organizing Map (Second Edition)，Springer-Verlag Berlin Heidelberg，1995.
7) Comparing support vector machines with Gaussian kernels to radial basis function classifiers，IEEE Trans. Signal Processing，Vol.45，No.11，pp.2758-2765，1997.
8) C. Aggarwal: Outlier Analysis, Springer-Verlag Berlin Heidelberg,2013, ISBN 978-1-4614-6395-5

逆 T 型 PC 板を用いた合成スラブの開発

DEVELOPMENT OF SYNTHETIC SLAB USING INVERTED T-TYPE PC PLATES.

小田将太郎*，濵本哲嗣*，八木沼宏己*
ODA Shotaro and HAMAMOTO Tetsuji and YAGINUMA Hiromi

＊　株式会社富士ピー・エス　関東支店（〒136-0071 東京都江東区亀戸２丁目 26-10 立花亀戸ビル 2F）

キーワード：PC 合成床スラブ，逆 T 型，無支保工架設
（*PC synthetic slab, inverted T-type, construction without support*）

1. はじめに

PC 合成床板は工期短縮や意匠設計の自由度を高めるため、事務所ビルやタワーマンションなど高層建築物の一般階で用いられているが、最下階床では工程の問題などを理由に現場打コンクリートで構築されることが一般的である。

しかし、最下階床の直下にある設備配管のためのピットの施工にあたっては、狭小空間での型枠や支保工などの撤去作業の効率の悪さや、将来において型枠大工などの労働力不足が懸念されることから、最下階床の PC 化を望む声が大きくなってきている。

本報では上記諸問題を解決すべく、スパン 6m 程度まで無支保工架設を可能とする逆 T 型合成床スラブの開発を行った際の実験概要について報告する。

2. 実験の目的

6m程度まで無支保工での施工を可能とし、支保工作業の軽減化，工期短縮，労働不足対策を目的とし、PC 合成床板の実験を行った。

無支保工架設の PC 合成床スラブは、一般的に施工時が最も厳しい荷重条件となる。

本実験では適応スパン拡大を図ることからコンクリートの許容引張応力度を、施工時は曲げ引張強度(5/3・0.07Fc)まで許容し、長期設計荷重時は引張応力度を(0.07Fc)とすることを想定した。施工時のコンクリート引張応力度まで許容することから、PC 板にはひび割れが発生する可能性がある。従って、PC 板単体および PC 合成床スラブのひび割れ後の繰り返し載荷によって剛性に支障がないことを確認し、実験による結果と計算値を比較し、許容値の妥当性を確認する。

3. 実験概要

3.1 試験体形状

試験体断面図を図-1 に示す。

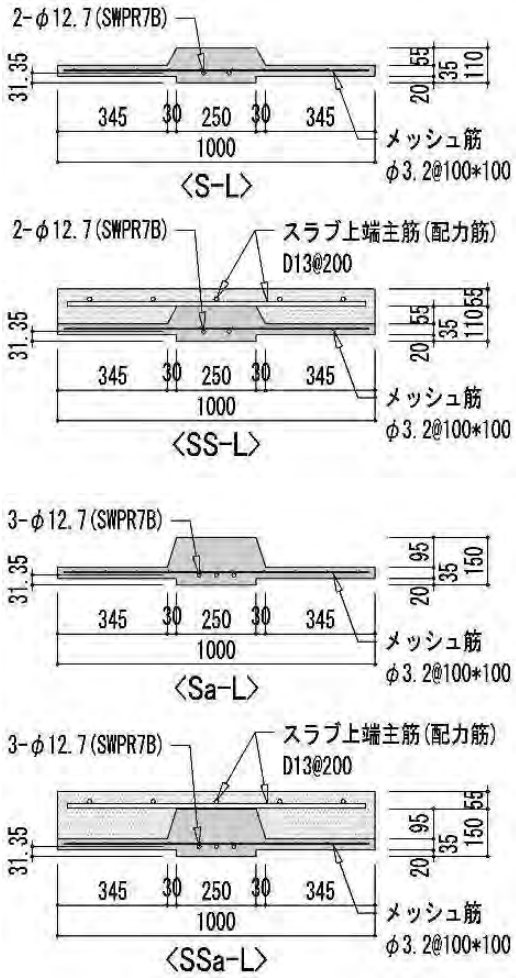


図-1　試験体断面図

試験体一覧とコンクリートの材料特性を**表-1** に、PC 鋼材の材料特性を**表-2** に示す。試験体のスパンは 4m, 5.9m の 2 種類とし、それぞれ PC 板単体 1 体, PC 合成床スラブ 1 体の計 4 体である。PC 板の断面形状は板幅 1000mm, 薄肉部の厚さ 35mm とし設計スパンに応じたリブせいを有する逆 T 型断面である。リブ内には各スパンに応じて PC 鋼線 φ12.7(SWPR7B)を配線し、プレテンション方式で規格降伏強度の 80%のプレストレスを導入している。各試験体のリブせい，鋼線本数はスパン 4m でリブせい 110mmPC 鋼線 2 本, スパン 5.9m でリブせい 150mm, PC 鋼線 3 本となっている。SS-L および SSa-L は合成スラブとするためリブ天端より厚さ 55mm のトッピングコンクリートを打設している。

3.2 実験方法

載荷装置を**図-2** に実験時の様子を**図-3** に示す。試験体は単純支持とし、載荷方法はスパン 3 等分点 2 点を集中載荷とする。**表-3** には載荷荷重一覧(ロードセル測定値)を示す。載荷サイクルは長期設計荷重(合成断面のみ)→引張荷重→曲げ引張荷重→ひび割れ発見荷重(目視によってひび割れを確認時)→終局荷重の順とし、各サイクル荷重に達した時点で一度除荷を行い、次のサイクルに移行した。ただしひび割れ発生荷重に関しては、最初にひび割れを発見した時の荷重で計 3 サイクルの繰り返し載荷を行った。計測方法はスパン中央および両端の鉛直変位を変位計で測定し、スパン中央のコンクリート表面のひずみは、ひずみゲージによって測定した。

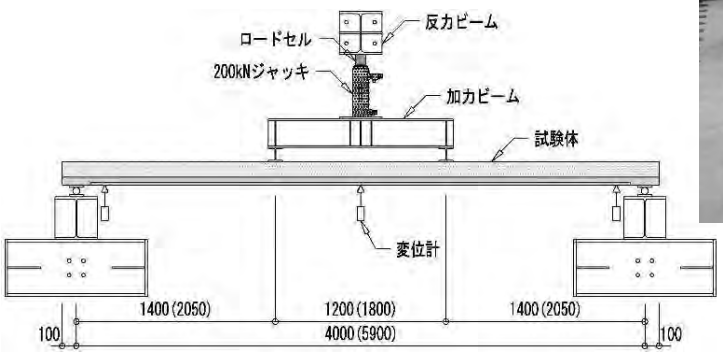


図-2　載荷装置

図-3　実験時の様子

表-1　試験体一覧とコンクリート材料特性

試験体符号	断面形状	スパン (m)	PC板コンクリート Fc50					トッピングコンクリート Fc24		
			リブせい (mm)	PC鋼材 φ12.7 (本)	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
S-L	単体	4.0	110	2	50	69.5	30.0	–	–	–
SS-L	合成							36	28.2	21.1
Sa-L	単体	5.9	150	3	46	54.3	23.5	–	–	–
SSa-L	合成							28	23.4	18.7

表-2　PC 鋼材の材料特性

径	断面積 (mm^2)	引張耐力※ (kN)	降伏強度※ (kN)	弾性係数※ (kN/mm^2)
φ12.7	98.71	193	179	197

※ミルシートより

表-3　載荷荷重一覧(ロードセル測定値)

試験体名	S-L	SS-L	Sa-L	SSa-L
長期設計荷重(kN)	–	0※	–	0.57
引張荷重(kN)	4.50	29.09	10.45	33.91
曲げ引張荷重(kN)	7.04	38.04	14.13	43.84
ひび割れ発見荷重(kN) (目視により確認)	10.90	43.50	23.00	50.00
終局荷重(kN)	21.74	42.43	34.89	51.52

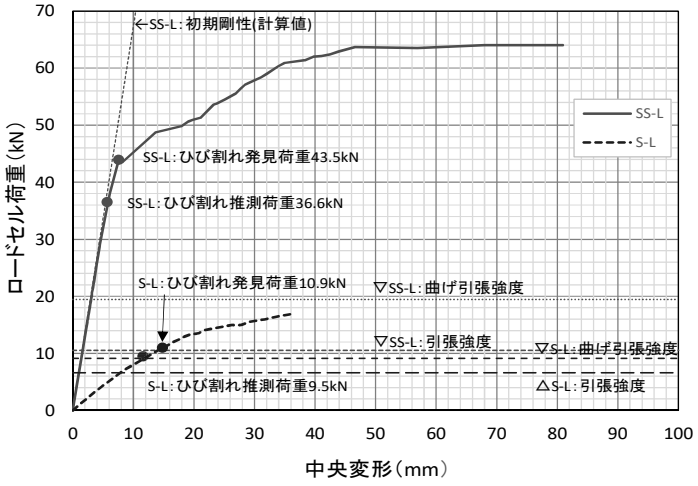
※載荷装置を載せた時点で長期設計荷重を超えるため

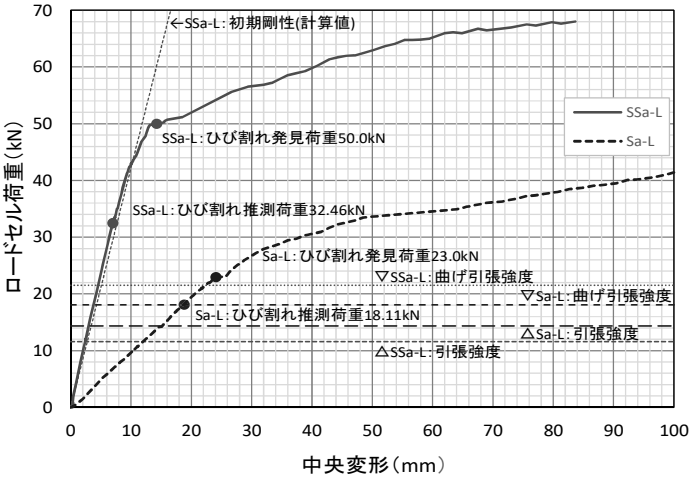
4．実験結果

4.1 荷重変形関係

表-4 に実際の施工段階を考慮し、かつプレストレス有効率を1.0とした場合の引張強度および曲げ引張強度の計算値を示す。次に、**図-4** には各試験体の荷重－変形関係の包絡線を示し、図中には、各試験体のひび割れ発見荷重のプロットを加え、荷重－変形関係より勾配が変化した時点をひび割れ推測荷重としてプロットしている。また、**図-5** には試験体下面の最終ひび割れ図を示す。

S-L の載荷では，引張荷重および曲げ引張荷重のサイクルではひび割れは確認できず、除荷後の残留変位は0.36mm となった。その後のひび割れ発見荷重のサイクル





(2) Sa-L，SSa-L

図-4 荷重—変形関係

表-4 引張強度および曲げ引張強度計算値

試験体名	S-L	SS-L	Sa-L	SSa-L
引張強度(kN)	6.62	10.49	14.37	11.58
曲げ引張強度(kN) （ひび割れ計算値）	9.15	19.45	18.05	21.51

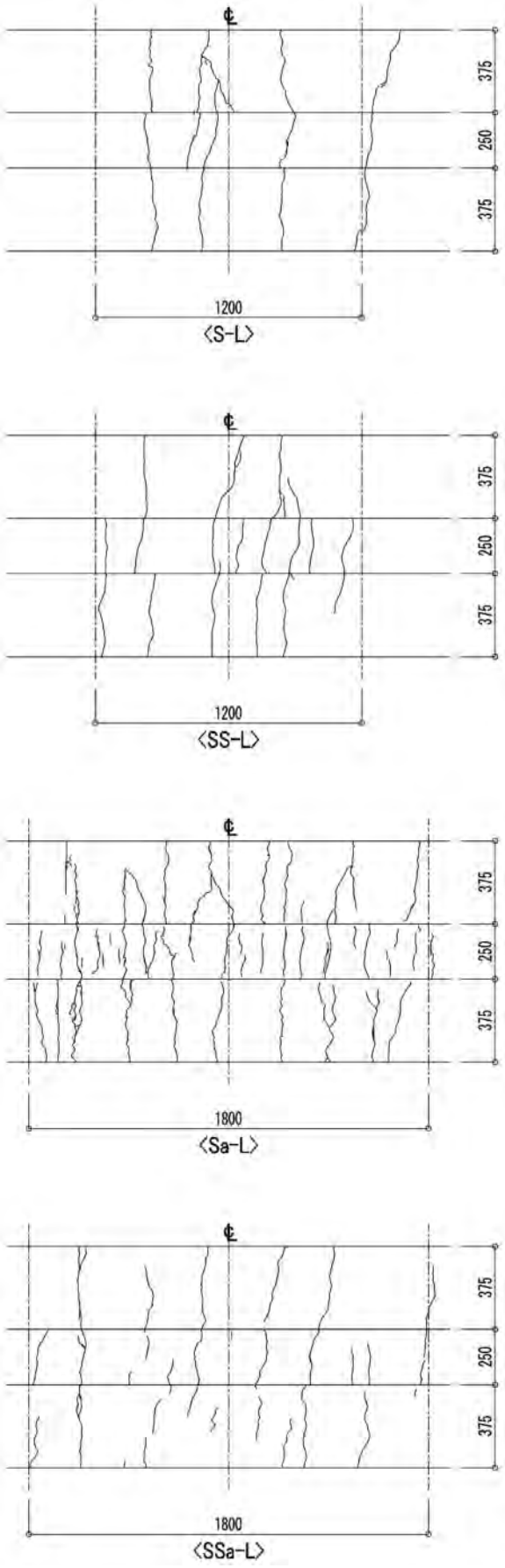


図-5 最終ひび割れ図(試験体下面)

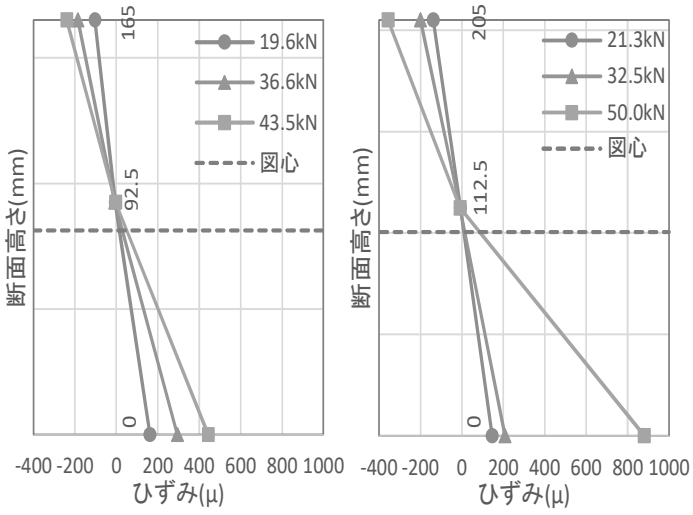
では、荷重 10.9kN でスパン中央付近の薄肉部側面に微細なひび割れを発見した。ひび割れ発見荷重 10.9kN に対する計 3 サイクルの繰り返し載荷では、除荷後の残留変位が 0.82mm，0.88mm，0.92mm とわずかに進展が見られたが、剛性はほぼ初期剛性のまま推移した。終局荷重のサイクルでは、ひび割れ発見荷重を超えると、剛性低下を伴いながら荷重が増加し、荷重 16.99kN，変位 36.60mm に達した時点で変位計を取り外した。その後、荷重が 27.0kN まで上昇した時点で載荷を終了した。

SS-L の載荷では、引張荷重および曲げ引張荷重のサイクルにおいてひび割れは確認できず、除荷後の残留変位は 0.56mm となった。ひび割れ発見荷重のサイクルでは、荷重 43.5kN でスパン中央付近の薄肉部側面および下面にひび割れを発見した。ひび割れ発見荷重 43.5kN に対する計 3 サイクルの繰り返し載荷では、除荷後の残留変位が 0.74mm，0.80mm，0.83mm とわずかに進展したが、剛性はほぼ初期剛性のまま推移した。終局荷重のサイクルでは、ひび割れ発見荷重を超えると、剛性低下を伴いながら荷重は 63.7kN(変位 45.98mm)まで増加し、その後は降伏変形に至った。最大荷重は 64.0kN であった。

Sa-L の載荷では、引張荷重および曲げ引荷重のサイクルではひび割れは確認できず、除荷後の残留変位は 0.78mm となった。ひび割れ発見荷重のサイクルでは、荷重 23.0kN でスパン中央付近のリブ下面に微細なひび割れを発見した。ひび割れ発見荷重 23.0kN に対する計 3 サイクルの繰り返し載荷では、除荷後の残留変位が 1.82mm，2.12mm，2.18mm とわずかに進展が見られたが、剛性はほぼ初期剛性のまま推移した。終局荷重のサイクルでは、ひび割れ発見荷重を超えると、剛性低下を伴いながら荷重は増加し、荷重 46.8kN，変位 170.35mm に達した時点で載荷を終了した。

SSa-L の載荷では、引張荷重および曲げ引張荷重のサイクルにおいてひび割れは生じず、除荷後の残留変位は 0.41mm となった。その後のひび割れ発見荷重のサイクルでは、荷重 50.0kN でスパン中央付近のリブおよび薄肉部下面に微細なひび割れを発見した。ひび割れ発見荷重 50.0kN に対する計 3 サイクルの繰り返し載荷では、除荷後の残留変位が 0.68mm，0.93mm，1.01mm とわずかに進展したが、剛性はほぼ初期剛性のまま推移した。終局荷重のサイクルでは、ひび割れ発見荷重を超えると、剛性低下を伴いながら荷重 68.0kN，変位 83.65mm に達した時点で載荷を終了した。

また、**図-5** の各試験体のひび割れは 200～300mm 間隔でリブ下から薄肉部まで連続して発生しており、PC 板の全幅で外力に引張抵抗していることがわかる。



(1) SS-L　　(1) SSa-L

図-6　スパン中央断面のひずみ分布

4.2 スパン中央断面のひずみ分布

図-6 には合成断面である SS-L および SSa-L の 3 荷重段階におけるスパン中央断面のひずみ分布を示す。SS-L，SSa-L ともにひび割れ推測荷重(SS-L：36.6kN，SSa-L：32.5kN)までは直線的なひずみ分布を示し、ひび割れ発見荷重(SS-L：43.5kN，SSa-L：50.0kN)にいたると、直線分布からの乖離が見られる。またひび割れ推測荷重までは、全断面有効として求めた図心と実験値が近似しており、合成断面が一体となって外力に抵抗していることが分かる。

4.3 実験値と計算値の比較

表-5 に実験値と計算値の比較を示す。

表-5　実験値と計算値の比較

試験体名	実験値			計算値			実験値/計算値		
	初期剛性 (kN/mm)	ひび割れ推測荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	初期剛性 (kN/mm)	ひび割れ推測荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	初期剛性 (kN/mm)	ひび割れ推測荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
S-L	-	9.50	27.00	-	9.15	21.74	-	1.04	1.24
Sa-L	-	18.11	46.80	-	18.05	34.89	-	1.00	1.34
SS-L	6.46	36.60	64.00	6.72	19.45	42.43	0.96	1.88	1.51
SSa-L	4.74	32.46	68.00	4.22	21.51	51.52	1.12	1.51	1.32

単体試験体である S-L および Sa-L の実験値と計算値の比較では、ひび割れ荷重については、それぞれ 1.04，1.00 と計算値と良く一致している。また最大荷重については、それぞれ 1.24，1.34 となり安全側の結果となった。

合成断面の SS-L および SSa-L の初期剛性の実験値は、PC 板のヤング係数 E_{PC}=36,000N/mm2，トッピングコンクリートのヤング係数比 0.6 として剛性評価した計算値と比較して、それぞれ 0.96，1.12 とほぼ一致している。ひび割れ荷重については、それぞれ 1.88，1.51 となり計算値よりかなり安全側の結果となった。これは、試験体製作においてトッピングコンクリート打設による PC 板単体の変形を、側枠が若干拘束したことが要因と推察される。また最大荷重はそれぞれ、計算書の 1.51 倍，1.32 倍となり安全側の結果となった。

4.4 実験結果のまとめ

試験体の S-L および Sa-L のひび割れ推測荷重は，プレストレス有効率を 1.0 とした場合の計算値と良く一致した。合成断面の SS-L および SSa-L のひび割れ推測荷重は、十分安全側の結果となった。またすべての試験体で、最大荷重は実験値が計算値を上回った。

ひび割れ発見後の繰り返し載荷に対しては、各試験体ともに微小な残留変位はあるものの、剛性に大きな変化は見られなかった。

5. 初の施工例

初の施工状況を**図-7** に示す。

逆 T 型 PC 板を用いた合成スラブの施工手順は、まず、基礎梁, 梁の打設を行う。次に、工場で断熱材を製作時に打ち込んだ PC 床板を搬入する。その際、PC 床板とリン木が接する箇所には断熱材を入れられない為、現場にてリン木箇所断熱材を張り付ける。その後、PC 床板の両端部を梁に乗せるように敷設する。上端筋，開口補強筋の配筋を行い、最後に、トッピングコンクリートの打設を行い PC 板と後打ちコンクリートを一体化させた。

逆 T 型 PC 床板搬入

逆 T 型 PC 床板搬入（リン木位置）

下面に予め工場で断熱材を打ち込んだ逆 T 型 PC 板

逆 T 型 PC 床板敷設

図-7　施工状況

6. まとめ

地下ピット階の施工にあたって、狭小空間での型枠，支保工の撤去の作業効率の改善や工期短縮を目的として、スパン 6m 程度まで無支保工架設を可能とする逆 T 型合成床スラブの開発を行った。

実験では、PC 板単体の S-L および Sa-L のひび割れ推測荷重は，プレストレス有効率を 1.0 とした場合の計算値と良く一致した。合成断面の SS-L および SSa-L のひび割れ推測荷重は，十分安全側の結果となった。またすべての試験体で，最大荷重は実験値が計算値を上回った。

ひび割れ発見後の繰り返し載荷に対しては，各試験体ともに微小な残留変位はあるものの，剛性に大きな変化は見られなかった。

また、実物件において施工を行い、型枠や支保工などの撤去，断熱材吹き付け作業を削減することができ、作業環境が大幅に改善されることを確認できた。

参考文献

1) 小森清司，堤信賢，田中恭哉：逆 T 型の PC 埋設型枠を用いた合成スラブの載荷実験，日本建築学会九州支部研究報告，第 32 号，p257-260，1993.3
2) 小森清司，岸川匡秀：PC 板埋設型枠を用いた鉄筋コンクリート床スラブの短期載荷実験(その 1 実験概要と破壊性状)，日本建築学会大会学術梗概集(北陸)，p1969-1970，1983.9
3) 小森清司，岸川匡秀：PC 板埋設型枠を用いた鉄筋コンクリート床スラブの短期載荷実験(その 2 荷重たわみ特性とひび割れ変化)，日本建築学会大会学術梗概集(北陸)，p1971-1972，1983.9

謝辞

最後に本報を作成するにあたり，御指導頂いた関係者各位に深く感謝の意を表します。

ジオセルの材料特性と適用例

Material properties and applications of Geocell

川俣さくら*，原田道幸*，大山亮貴*，宮本慎太郎**
KAWAMATA Sakura , HARATA Michiyuki , OYAMA Ryoki and MIYAMOTO Shintaro

*　東京インキ株式会社（〒114-0002 東京都北区王子 1-12-4TIC 王子ビル）
** 防衛大学校講師　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：ジオセル，ジオシンセティックス，地盤補強，材料特性，適用例
（*Geocells, Geosynthetics, Soil reinforcement, Material property, Application example*）

1. はじめに

ジオセルは、蜂の巣状に複数のセルを配置した立体構造の地盤補強材である（参：**図－1**）。セル内に現地発生土や砕石等を充填して締固めることで, 高い安定性を確保できる。1970 年代に U.S. Army Corps of Engineers によって開発され[1]、以来、軟弱地盤、地山斜面や盛土のり面などへの適用が検討されてきた。近年では、日本国内の適用例も増えており、公共工事や民間工事に加え、災害復旧等にも活用されている。本論文では、ジオセルの基本的な特性を把握した結果と近年の適用例を報告する。

2. 性能試験の概要と方法

性能試験には、**図－1** に示すような高密度ポリエチレン製のジオセルを使用した。まず、ジオセルの製品強度、耐候性、耐薬品性を調べるための引張試験を行った[2)-5)]。さらに、施工性を把握するための原位置締固め試験、ジオセルー中詰土の力学特性を把握するための一軸圧縮試験を行った。以下、各試験の概要を示す。

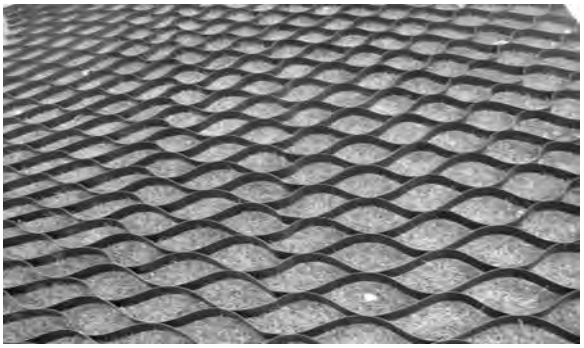
2.1 引張試験

引張試験は JIS K 7113 を基準とし、引張速度 1 %/min の単調引張条件で行った。引張試験の状況を**図－2** に示す。今回の試験では、弱部となりやすい溶着部が含まれる供試体に対して試験を行うものとした。供試体は、高密度ポリエチレン製のシートに穴があるものと穴がないものを用い、シートの種類は、厚さ 1.3mm×幅 100mm と厚さ 1.0mm ×幅 150mm の 2 種類を使用した。

耐候性と耐薬品性を調べる場合の供試体条件を**表－1** と**表－2** にそれぞれ示す。耐候性はサンシャインウェザーメーターを用いた促進暴露条件で 500、2000 時間経過後の引張強度を評価した。耐薬品性は水素イオン濃度（pH）の異なる水溶液に供試体を浸漬し、浸漬時間 250、500、750、1000 時間での引張強度を評価した。

2.2 現位置締固め試験

原位置締固め試験は、ジオセルを擁壁工として活用する場合を想定し、擁壁壁面をジオセルとしたケースと鋼製枠としたケースで試験を行った。試験の概要を**図－3** に、試



図－1　ジオセルの展開状況

図－2　引張試験の状況

表－1 促進耐候性試験の試験条件

項　目	内　容
試験機	サンシャインウェザー試験機
促進暴露条件	室温：63℃ 1 サイクル：120 分 （散水：18 分　照射：102 分）
引張試験	プラスチックの引張試験 （JIS K 7113 準拠）
促進暴露時間	0、500、2000　時間

表－2 耐薬品性試験の試験条件

項　目	内　容
使用薬品	蒸留水 塩化ナトリウム（3%） 水酸化カルシウム（飽和） 水酸化ナトリウム（10%） 塩酸（10%） 硫酸（10%）
浸漬温度	50±2℃
引張試験	プラスチックの引張試験 （JIS K 7113 準拠）
浸漬時間	250、500、750、1000　時間

表－3 現位置締固め試験の試験ケース

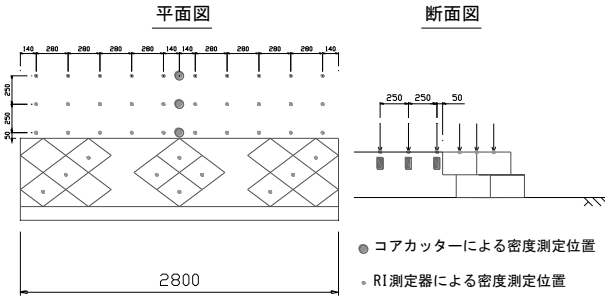
壁面材の種類	締固め方法	締固め厚さ
ジオセル	ハンドガイドローラー	200mm
鋼製枠	プレートコンパクタ	100mm
鋼製枠	人力	100mm

表－4 原位置締固め試験に使用した盛土材料

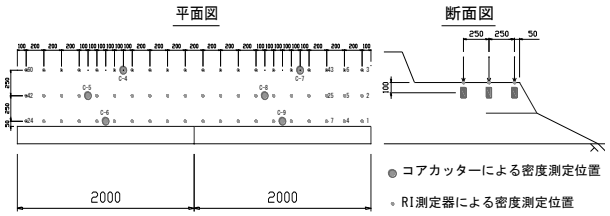
土質名称		山砂
締固め	土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.700
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.696
	最適含水比 w_{opt} (%)	16.3
粒度	細礫分 (%)	0.7
	砂分 (%)	88.8
	シルト分 (%)	8.0
	粘土分 (%)	2.5

験ケースを**表－3**に示す。ジオセルは高さ 200mm を 2 段、鋼製枠は高さ 600mm を 1 段設置した。締固め方法はハンドガイドローラー（600kg 級）とプレートコンパクタ（60kg 級）、人力による踏み固めの 3 方法とした（参：**図－4**）。

ジオセルの中詰材は**表－4** に示す山砂を使用した。含水比を最適含水比付近となるように調整した後、1 層の締固め厚さをジオセルの場合は 200mm、鋼製枠の場合は 100mm とした。締固め後、RI 試験とコア採取により締固め度を測定した。測定箇所は壁面側から 50、300、550mm 離れた 3 箇所を測定した。



（a） 壁面材：ジオセル



（b） 壁面材：鋼製枠

図－3 現位置締固め試験の概要

（a） ハンドガイドローラーによる締固め

（b） プレートコンパクタによる締固め

図－4 現位置締固めの状況

2.3 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、ジオセルに中詰材を充填した供試体に対して行った。一軸圧縮試験の状況を**図－5**に示す。一連の試験では、中詰材は砕石を用いてセルの寸法を変化させたケースとセルの寸法は同じで中詰材を砕石、砂質土、粘性土としたケースを検討した。セルの寸法は、セルの内径を M タイプ（320×289mm）、S タイプ（256×228mm）、セルの高さを 100, 150mm として，それぞれの組合せ 4 種類を検討した。

図－5 一軸圧縮試験の状況

表－5 ジオセルの引張強度

シートの穴		なし		あり	
シート厚さ(mm)		1.3	1.0	1.3	1.0
シート幅(mm)		100	150	100	150
引張強度 (kN/m)	1	21.6	17.9	14.8	11.2
	2	21.3	17.2	14.7	12.5
	3	23.1	17.2	15.6	12.6
	4	22.4	18.3	14.4	11.9
	5	22.0	15.5	15.2	11.5
	平均	22.1	17.2	14.9	11.9

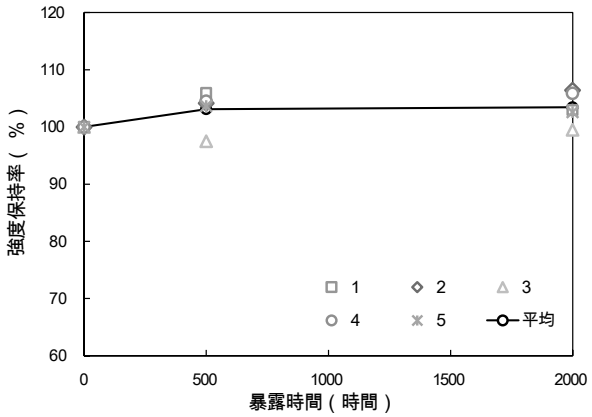
3. 性能試験の結果と考察

3.1 引張試験

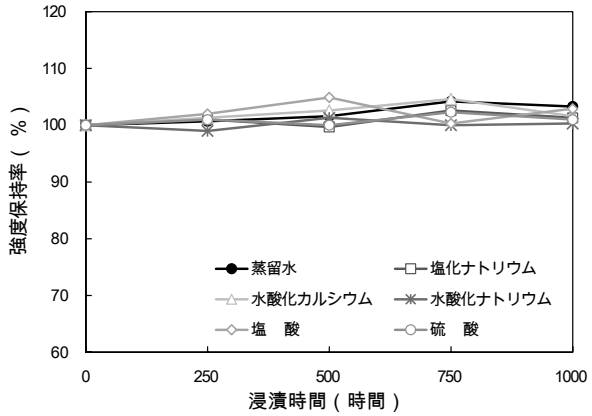
ジオセルの製品強度を調べた結果を**表－5** に示す。

ジオセルに使用されるシートに穴がない供試体は、シートの厚さ 1.3mm×幅 100mm の場合で引張強度は平均 22.1 kN/m、シートの厚さ 1.0mm×幅 150mm の場合で引張強度は平均 17.2 kN/m であった。ジオセルに使用されるシートに穴がある供試体は、シートの厚さ 1.3mm×幅 100mm の場合で引張強度は平均 14.9 kN/m、シートの厚さ 1.0mm ×幅 150mm の場合で引張強度は平均 11.9 kN/m であった。シートの穴の有無によらず, シート厚さが約 23% (0.3mm) 薄くなることで、引張強度は約 20%低下する結果を示した。また, シートに穴があることで、引張強度は 30%以上の低下を示した。以上の結果より、シートの原料が同質の場合、引張強度はシート厚さにほぼ比例して変化すること、シートの開孔率が製品強度に影響を及ぼすことを確認できた。

ジオセルの促進耐候性試験の結果を**図－6**、耐薬品性試験の結果を**図－7** に示す。両結果とも、製品強度に対する強度保持率を評価した。促進耐候性試験では、500 時間、



図－6 促進耐候性試験の結果



図－7 耐薬品性試験の結果

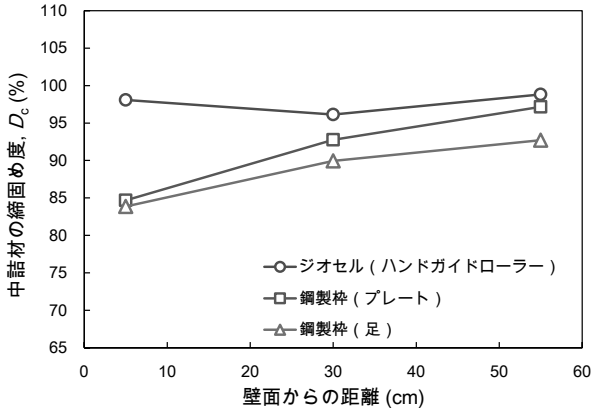
2000 時間後ともに強度保持率 100%を保持した。300 時間を 1 年の耐候性として換算すると 6 年半は紫外線による劣化に対して十分な耐候性を有している結果が得られた。しかし、製品が屋外に露出された状態で使用される場合においてはまだ不十分な経過時間であるため、今後も試験を継続する予定である。実際に急勾配斜面に適用されているジオセルにおいては 15 年以上経過してもジオセルの劣化による被害は報告されていない。また、同材質の製品では 50 年相当に該当する試験結果も報告されており、ジオセルにおいても同等以上の結果が得られると考えている。

耐薬品性試験では、いずれの酸・アルカリ性水溶液においても強度保持率 100%を保持した。高密度ポリエチレン製のジオセルは化学的安定性を有しており、中詰材に酸性土やアルカリ性土を使用しても十分な耐久性を発揮できると考えられた。ジオセルは、目的に応じて中詰材を選択でき、海岸付近や温泉地帯の大気中においても劣化や錆びることが無く、安定した状態を維持できるといえる。

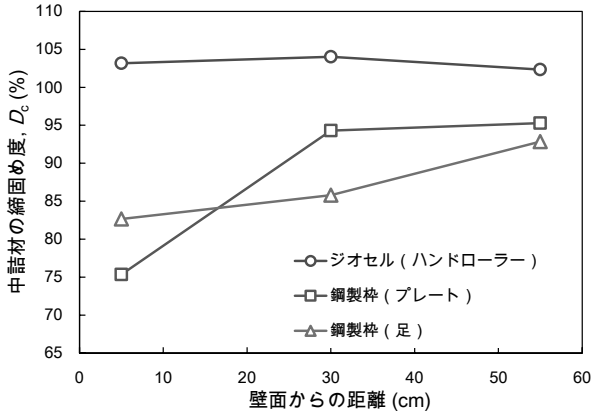
3.2 現位置締固め試験

原位置締固め試験の結果として、RI 試験よる結果と、コア採取による結果を**図－8** に示す。

RI 試験による結果はジオセルをハンドガイドローラーで締固めた場合、全ての測点において締固め度 95%以上

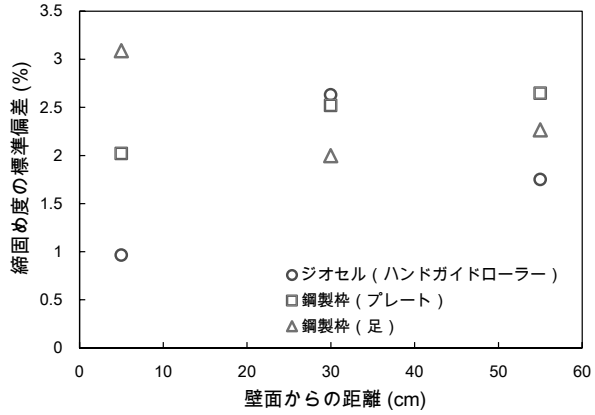


（a） RI 試験



（b） コア採取

図－8 現位置締固め試験の結果

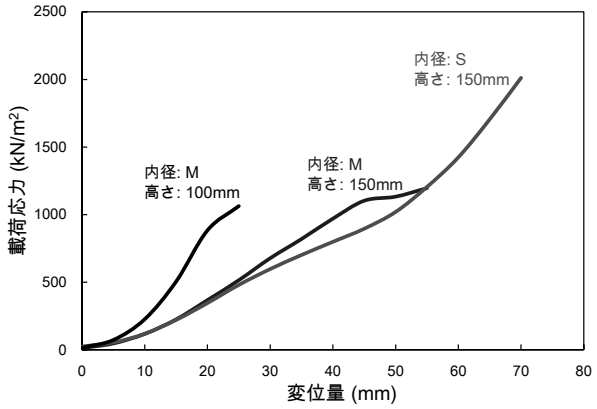


図－9 締固め度のばらつき（RI 試験）

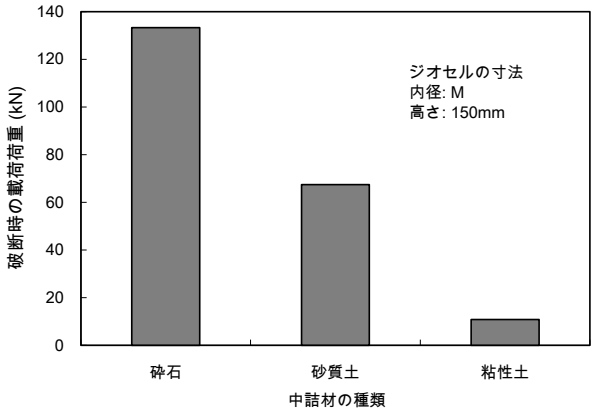
の値を得られた。鋼製枠を用いてプレートコンパクタと人力による踏み固めで締固めた場合は、壁面付近では 90%以下の値を示した。

コア採取による試験結果は、RI 試験と同様の傾向を示したが、鋼製枠を用いてプレートコンパクタで締固めた場合、壁面付近の値が 80%以下となった。これはコア採取の際に供試体に支障があったためであり、本来は RI 試験と同じ傾向を示すものと考えている。

RI 試験による結果より、各ケースでの標準偏差を求めた。標準偏差と壁面からの距離の関係を**図－9** に示す。結果より、ジオセルとハンドガイドローラーの組み合わせで



図－10 セル寸法が一軸圧縮強度に及ぼす影響



図－11 中詰材の種類が一軸圧縮試験強度に及ぼす影響

最もばらつきの小さくなる結果を示した。壁面側から 300mm 離れた箇所は少し標準偏差が大きくなったが、これは測点がハンドガイドローラーの端に位置したことによる誤差であると考えている。また、締固め度のばらつきとともに、施工時間もジオセルとハンドガイドローラーの場合が最も短かったことを記しておく。

3.3 一軸圧縮試験

中詰材に砕石を用いてセルの寸法を変化させた結果として、載荷応力と変位量の関係を**図－10** に示す。セルの内径が M タイプでセル高さ 150mm と 100mm のケースを比較すると、セル高さ 100mm 方が大きな載荷応力を発揮した。セル高さ 150mm でセルの内径が S, M タイプのケースを比較すると、載荷応力に大きな違いはなかった。既往の研究でみられるように、今回の試験でもセル高さの影響が大きく現れる結果となった。

セルの寸法は同じで中詰材を砕石、砂質土、粘性土と変化させた試験では、ジオセルが破断するまで試験を行い、破断時の最大荷重を評価した。結果を**図－11** に示す。結果より、砕石の場合に最も大きな荷重を示し、粘性土の場合に最も小さな荷重を示した。破断に至るそれぞれの最大荷重は砕石で約 130kN、砂質土で約 60kN、粘性土で約 10kN となり、一軸圧縮強度は中詰材に大きく依存した。

図-12 急勾配のり面への適用例

砕石の場合、破断荷重に至るとジオセルが一気に破断したが、粘性土の場合、変形に伴い徐々にジオセルが破断した。

4. ジオセルの実務への適用例

4.1 盛土・切土のり面への適用

ジオセルは、急勾配、緩勾配両方の斜面に適用することが可能であり、盛土のり面の保護や擁壁としての適用例が増えている。急勾配斜面では、ジオセルを階段状に段積みすることで土構造のもたれ式擁壁を構築する[6]。施工に特殊作業を必要とせず、容易に早くできるため、災害で崩落した斜面復旧や切土のり面の保護に使用されている（参：**図－12**）。緩勾配斜面では、ジオセルを平面的に展開・敷設することで、のり面の侵食防止や表層すべり防止として使用されている（参：**図－13**）。植生を施すことも容易であり、環境保全としての適用も期待されている。また、施工完了後にジオセルは土中に埋設されるため、施工時に生じる引張力に耐えるものであれば、現在の製品規格値を下げられることが分かってきている。いずれも中越震災の災害復旧を機に日本国内で多くの実績がある。

さらに現在では、ジオセルを壁面材とし、ジオグリッドを補強材とした併用技術を提案されており、急勾配盛土の構築に適用されている[7]。補強盛土としての適用例を**図－14** に示す。ジオセルを壁面材としているため、一般的なジオグリッド補強土壁と比較して、締固め度の品質向上や凍上、塩害に対する耐久性に優れている。また、既設盛土の安定性向上を目的として、ジオセルと地山補強材の併用

図-13 緩勾配のり面への適用例

図-14 ジオセルージオグリッド併用の補強盛土

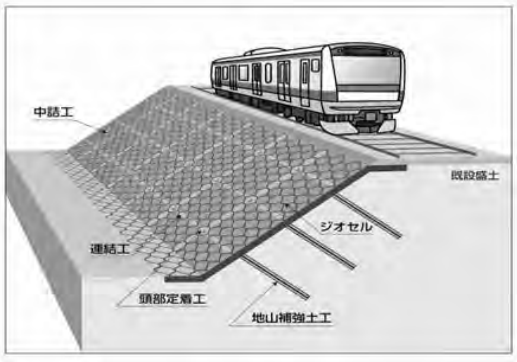


図-15 既設盛土の補強への適用例

技術も提案されてきている（参：**図－15**）[8]。

4.2 軟弱地盤への適用

ジオセルを開発した U.S. Army Corps of Engineers は、軟弱地盤での車両走行性確保のためにジオセルを適用した。そのため、路盤補強としての適用例も多い。日本国内では、農村道や市町村道、工事用道路等の未舗装路において、轍掘れや不等沈下、砕石の側方流動を軽減するためにジオセルが適用されている[9]。路盤補強での適用性検証として、実大実験により耐久性を確認している状況を**図－16** に示す。さらに現在では、基礎地盤の支持力不足を改善するための適用例も増えている[10]。擁壁やボックスカルバートといった構造物を支えるための支持力が不足した際に用いられ、従来の砕石置換工法と比較し、置換えの必要深度が浅く、残土処理も少なくできる（参：**図－17**）。いずれ

図-16 路盤補強への適用性検証試験

図-17 基礎地盤への適用例

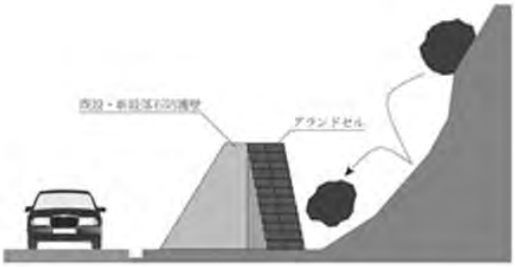


図-18 落石防護工への適用例

においても、ジオセルには大きな圧縮荷重が作用するため、十分な圧縮強度を確保する必要がある。

4.3 その他の適用

盛土のり面や基礎地盤への適用の他に、最近では、緩衝体としての適用が検討されている。適用例を**図ー18** に示す。ジオセルを落石防護補強土壁の緩衝体（落石衝突面）に用いることで最大 4500kJ の落石エネルギーを吸収できることが確認されている [11]。

5. まとめ

本論文では、ジオセルの基本的な材料特性と適用例を整理した。以下に得られた知見を示す。

1) ジオセルの製品強度は、用いるシートの材質、シート厚さ、シート穴の開孔率の影響を受けることを明らかにした。
2) ジオセルの耐候性、耐薬品性を確認し、十分な耐久性を有していることを明らかにした。
3) ジオセルをハンドガイドローラーで転圧する方法で、高い締固め度を確保できることを確認した。
4) ジオセルの一軸圧縮強度は、セル高さ、中詰材の違いの影響を大きく受けることを明らかにした。
5) ジオセルの日本国内の適用例を整理した。盛土・切土のり面、軟弱地盤、落石防護工など幅広く適用されていることを確認した。

謝辞

本研究をまとめるにあたって、防衛大学校：宮田喜壽教授にご助言とご協力をいただいた. 文末ながらここに記して深く謝意を申し上げます.

参考文献

1) Webster, S.L.: Investigation of beach sand. -Trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concept. Report GL-79-20, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1979.
2) ジオテキスタイル普及委員会: ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, 土木研究センター, 2013.
3) 原田道幸, 林豪人: ジオセルを壁面に用いた補強土工法の盛土材の締固め特性, 第53回地盤工学研究発表会, pp1669-1670, 2018.
4) 矢澤一樹, 大森英治, 金子賢治, 堀江征信, 熊谷浩二: ジオセル補強土の力学特性に与える充填地盤材料の影響, ジオシンセティックス論文集, 第 21 巻, pp31-36, 2006
5) 米良有玄, 清田隆, Han Xinye, 片桐俊彦: 振動台模型実験による改良型ジオセル補強盛土の耐震性の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp813-814, 2014.
6) 加賀宗彦, 清川伸夫, 原田道幸: タイプの異なった補強土壁面の変形の調査と共振周波数の予測の試み, ジオシンセティックス論文集, 第 25 巻, pp9-14, 2010.
7) 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 山下聡, 小林歩, 佐々木貴, 林豪人,安達謙二, 雨宮盛児, 原田道幸: 寒冷地に構築した補強土壁の凍結融解挙動, ジオシンセティックス論文集, 第 29 巻, pp147-154, 2014.
8) 原田道幸, 矢崎澄雄, 小島謙一, 横田弘一, 清川伸夫, 田村幸彦, 佐藤武斗, 伊藤正博: ジオセルと地山補強材による地山安定化工法の開発, ジオシンセティックス論文集, 第 31 巻, pp23-30, 2016.
9) 宮本慎太郎, 宮田喜壽: 移動載荷条件におけるジオセルの地盤補強効果と変形解析法, 第 45 回土木学会関東支部技術研究発表会, Ⅲ-27, 2018.
10) 川俣さくら, 原田道幸, デュッティン アントワン, 清田隆: ジオセルを用いた補強基礎地盤の支持力改善効果に関する実物大実験, ジオシンセティックス論文集, 第34巻, pp191-196, 2019.
11) 瓦井智貴, 小室雅人, 大山亮貴, 宮本大介: 重錘衝突を受ける単粒度砕石ジオセル緩衝体の動的応答解析, ジオシンセティックス論文集, 第 32 巻, pp125-132, 2017.

土壌洗浄による枯葉剤由来ダイオキシン汚染土壌の効率的な浄化・減容化処理

APPLICATION OF SOIL WASHING TO THE REMEDIATION AND THE VOLUME REDUCTION OF AGENT ORANGE/DIOXIN CONTAMINATED SOILS

毛利光男*・馬場直紀*・青木陽士*・平澤卓也*

MOURI Mitsuo, BABA Naoki, AOKI Yoji, and HIRASAWA Takuya

*清水建設株式会社 エンジニアリング事業本部 土壌環境事業部（〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1）

キーワード：枯葉剤由来ダイオキシン，土壌洗浄，土壌浄化，減容化，サイクロン，フローテーション
(*Agent Orange/Dioxin, Soil Washing, Soil Remediation, Volume Reduction, Hydrocyclone, Flotation*)

1. はじめに

ベトナム国内には，ベトナム戦争時の枯葉剤(Agent Orange)の空中散布，保管，漏洩などに由来するダイオキシン汚染土壌が多く残存している．戦争時に利用されていたダナン(Da Nang)，フーカット(Phu Cat)，ビエンホア(Bien Hoa)の各空港とその周辺をはじめとして多数の高濃度汚染地域(hot spot)が存在している．散布された枯葉剤には，不純物として毒性の高いポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシン(Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)の2,3,7,8-TCDDのダイオキシンが含まれていた．ダイオキシン類は，水溶解度が非常に小さいこと，土壌や底質のような粒子状物質の表面に強く吸着しやすいこと，分解されにくいこと等の特性を有しているため，長期にわたって土壌や底質に残留する．現状のダイオキシン汚染土壌の処理法は，(a)焼却やアルカリ触媒分解のようにダイオキシン類を分解・無害化する処理法と(b)土壌洗浄や加熱脱着のようにダイオキシン類の分解は行わないが，汚染物質を分離することによって土壌浄化と減容化を行なう処理法に大別される．日本の環境省の「ダイオキシン類基準不適合土壌の処理に関するガイドライン」では，ダイオキシン汚染土壌の浄化処理法として(1)洗浄処理，(2)焼却処理，(3)溶融処理が記載されている．浄化処理コストは溶融処理が最も高く，洗浄処理が最も安い．

筆者らは，ダイオキシンの無害化処理までを視野に入れた場合，**図-1**に示すような土壌洗浄(soil washing)と熱処理(thermal treatment)，中でも焼却(incineration)との組合せが，他の処理法に比べて費用対効果が高く，周辺環境への影響が最小と考えている．汚染土壌の大半を占める低～中濃度汚染土壌については，処理コストの安い土壌洗浄によって浄化・減容化処理を行なう．高濃度汚染土壌と土壌洗浄処理によって発生する濃縮残渣(sludge cake)については，処理コストが高いがダイオキシンを確実に分解できる焼却によって無害化処理を行なう．土壌洗浄と焼却を組合せることによって，汚染土壌中のダイオキシンの大部分を比較的安価に無害化することが可能となる．

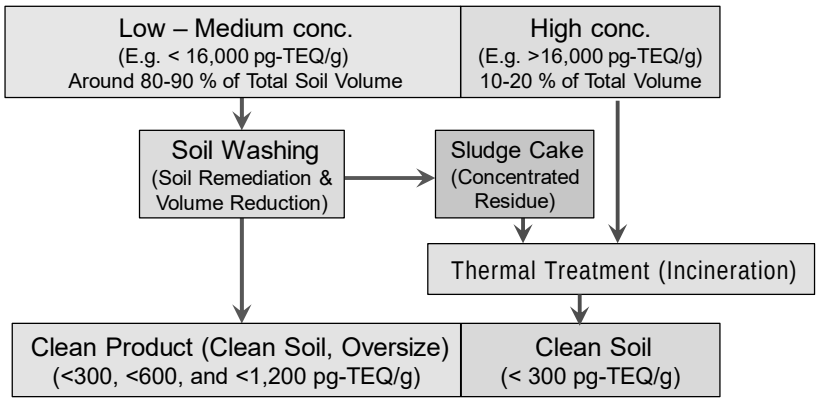


図-1　土壌洗浄と熱処理(焼却)の組合せによるダイオキシン汚染土壌の無害化処理

当社の土壌洗浄は鉱山技術と化学工学を基にした物理的分級(physical separation)を主軸としている．ダイオキシン，農薬，鉱物油，重金属類などの幅広い汚染物質に対して適用可能であり，今までに約260万tonの処理実績がある．この土壌洗浄法と熱処理の組合せによって枯葉剤由来ダイオキシン汚染土壌を効率的かつ安価に無害化できることを実証するため，ビエンホア空港内に設置したパイロットプラントを用いて一連の実証試験を実施した．

本報告は，土壌洗浄によってダイオキシン汚染土壌の効率的な浄化・減容化ができることを示した土壌洗浄の実証試験の概要とその優れた浄化・減容化効果について報告するものである．ベトナム国内のダイオキシン汚染土壌に対するパイロットプラント規模の土壌洗浄の実証試験は，おそらく世界でも初めての試みである．

2. 土壌洗浄と実証プラントの概要

当社の土壌洗浄法では，汚染物質の多くが砂～粗砂分よりも細粒分(粘土，シルト)に付着しやすいという性質を利用して，土壌から汚染物質を含有する細粒分を分離，除去することによって土壌の浄化を行なう．土壌粒子と汚染物質を含有している粒子との物理的な特性(粒子径，比重など)の違いや化学的性質の違いを利用して，分級と洗浄のプロセスを段階的に適用することによって，汚染物質を濃縮残渣に分離，濃縮する．これによって，焼却による無害化処理の対象量が汚染土壌の全量(100%)から濃縮残渣の量(10～35%)へ大幅に減量できるため，低コストの浄化処理が可能となる．当然の事ながら，濃縮残渣の発生量は対象土壌の粒度構成に依存している．

当社の土壌洗浄法は，洗剤を用いて汚染物質を水へ溶出させる土壌洗浄法(surfactant-enhanced soil washing)とは全く異なり，汚染物質が水へ溶出しないように配慮している．このため，適切な水処理を行なうことによって汚染物質を含まない清浄な処理水を得ることができるので，処理水の循環利用が可能である．実証試験の土壌洗浄のフローを図-2に示す．本土壌洗浄システムは，主に2段湿式フルイとハイドロサイクロンによる分級プロセスと，スクラバーとフローテーションによる化学的な洗浄プロセスから構成されている．主要なプロセスであるハイドロサイクロン，スクラバー，およびフローテーションの概要を図-3に示す．今回の実証試験では40 ton/hrの処理能力を有するオンサイト型洗浄プラント(図-4)を使用した．汚染土壌はシャワー水と解泥機によって解泥された後，2段湿式フルイ(図-5(a))によって2mm以上の礫などの粗粒分が取り除かれる．2mm以下の土壌スラリーは，図-3(a)と図-5(b)に示すハイドロサイクロン(50%分級径: 63μm)によってアンダーフロー(UF, 63μm～2mmの砂分)と

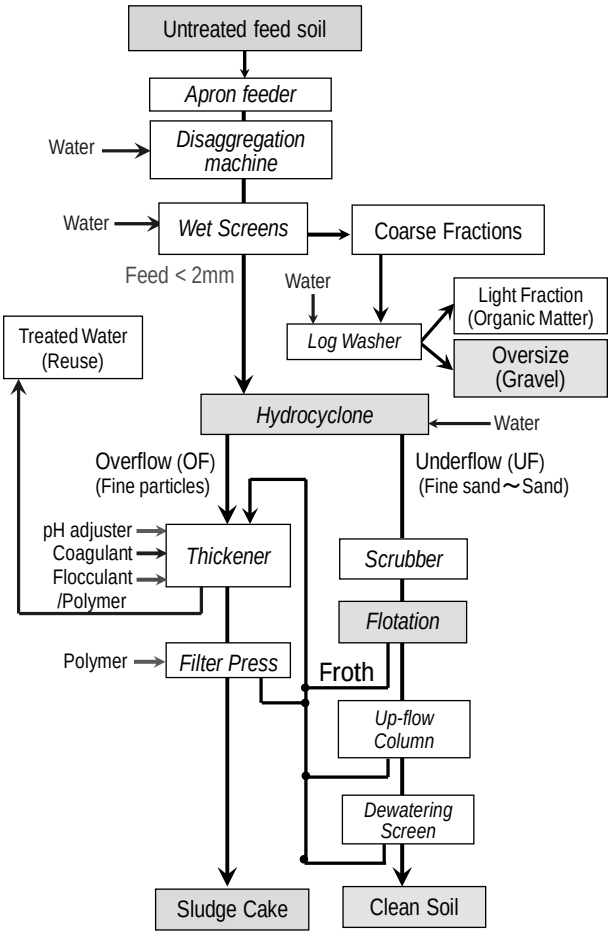
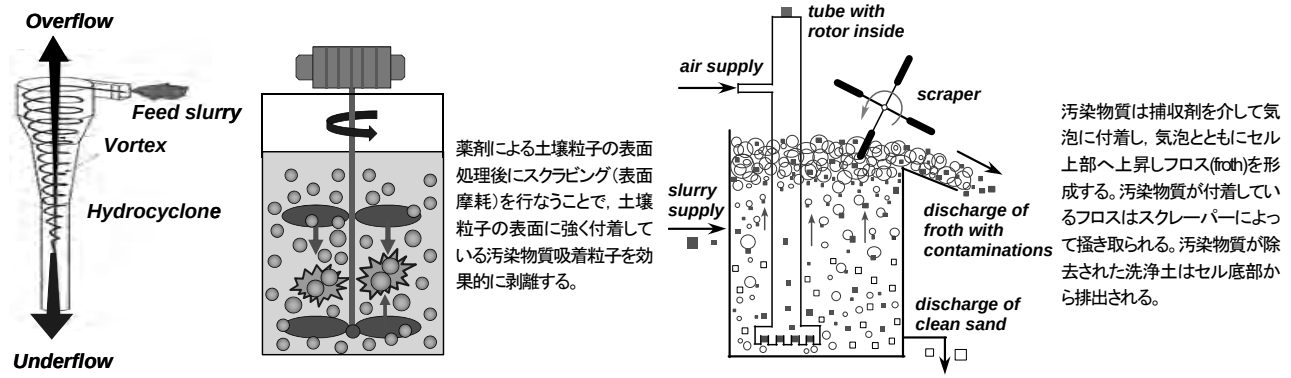


図-2　実証試験での土壌洗浄フロー



(a)　ハイドロサイクロン　　(b)　スクラバー　　(c)　フローテーション

図-3　ハイドロサイクロン，スクラバー，およびフローテーションの概要

オーバーフロー(OF, 63μm以下の細粒子分)に分離される．汚染物質はその多くが細粒分に存在しているため，ハイドロサイクロンによって細粒分を分離することで汚染物質の60～80%を除去することができる．アンダーフローは，図-3(b)と図-5(c)に示すスクラバーにおいて複数の浮選薬剤とよく馴致された後，フローテーションプロセスに入る．図-3(c)と図-5(d)に示すフローテーションでは，清浄な土壌粒子との表面性状の違いを利用して汚染物質を含有する粒子を選択的に気泡に付着させてフロスとして分離する．フローテーションで洗浄された砂分はアップフローカラムに入り，ここで植物片や腐植質などの軽質の有機物が浮上分離される．これらの工程によって汚染物質の除去率を90～98%へ向上することが可能となる．一連の工程によって浄化された砂分は，脱水工程を経て浄化土となる．この浄化土(clean soil)と礫などの粗粒分(oversize)が浄化産物(clean product)として再利用が可能となる．オーバーフローやフロスとして分離された汚染物質を含有する細粒分は，凝集沈殿(図-5(e))とフィルタープレス脱水(図-5(f))を経て濃縮残渣(脱水ケーキ)となる．

実証試験においては，ダイオキシン汚染土壌は重機によってエプロンフィーダーへ投入されるが，投入作業は図-6(a)に示すように水を噴霧をし粉塵発生を防止しながら行なった．前述したようにダイオキシンの多くは粘土・シルトの細粒分に存在している．このため，投入作業において細粒分の粉塵発生を防止することは，作業員の健康を守る上で非常に重要である．また，作業員は保

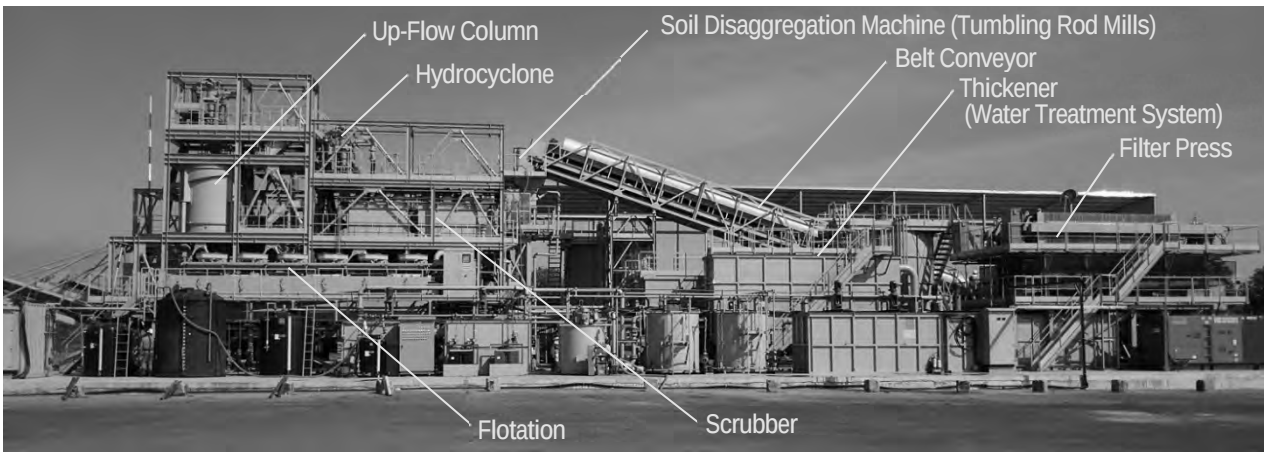
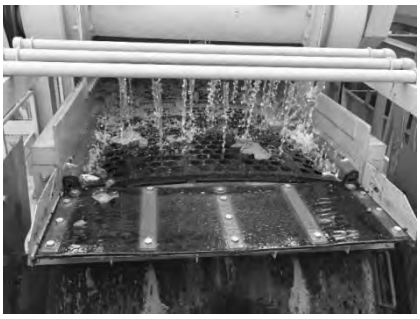


図-4　土壌洗浄パイロットプラントの全景



(a) Wet Screens

(b) Hydrocyclone

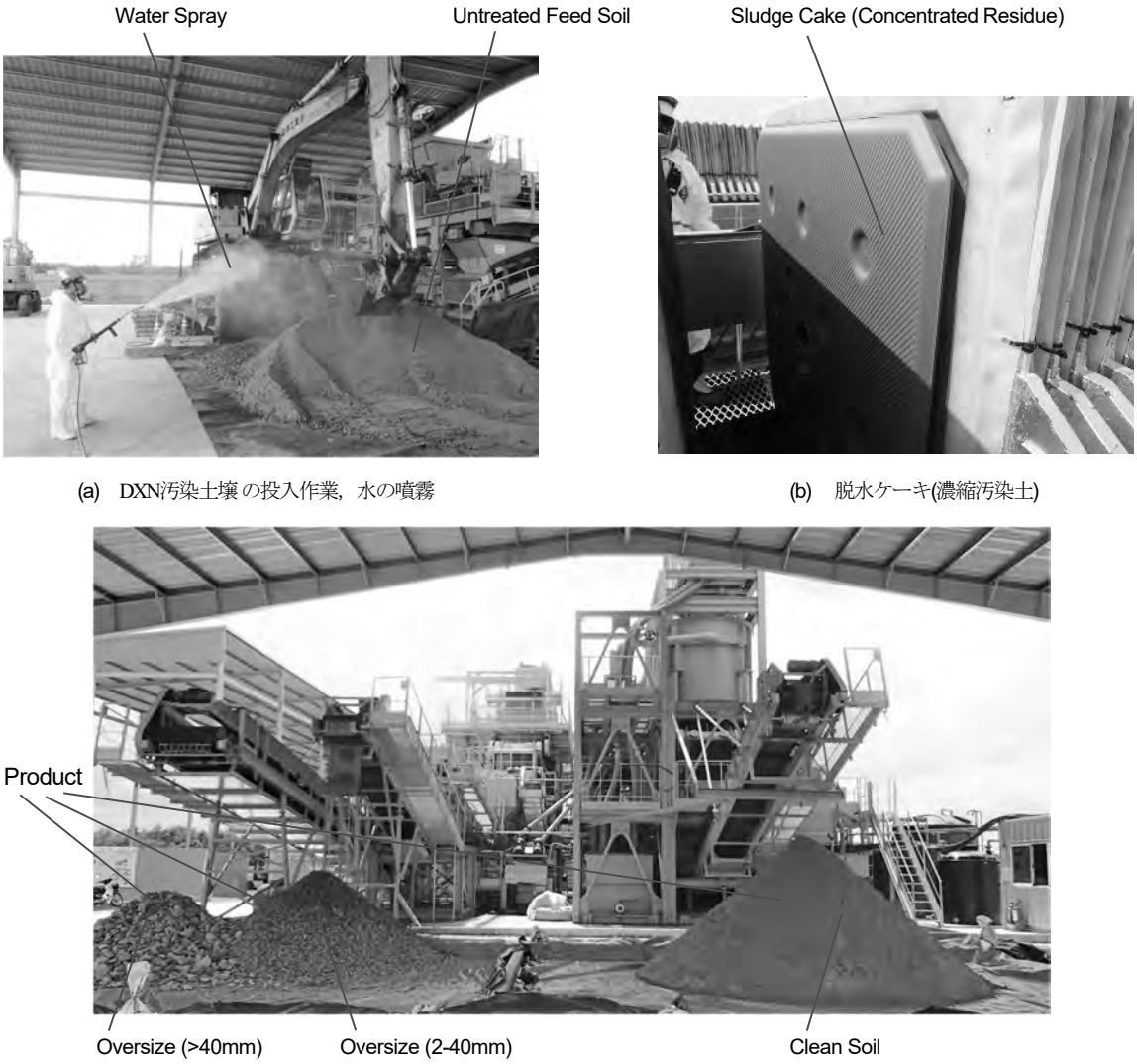
(c) Scrubber

(d) Flotation

(e) Thickener (Water Treatment System)

(f) Filter Press

図-5　土壌洗浄パイロットプラントの主要機器



(a) DXN汚染土壌の投入作業，水の噴霧

(b) 脱水ケーキ(濃縮汚染土)

(c) 浄化産物(浄化土，粗粒分(礫))

図-6 ダイオキシン汚染土壌，脱水ケーキ，および浄化産物(浄化土，粗粒分(礫))

護具(保護眼鏡，防塵マスク，タイベック防護服，手袋，長靴)の着用が義務付けられている．エプロンフィーダー以降の工程では，汚染土壌は常に湿式で処理され粉塵が一切発生しないため，土壌洗浄による汚染土壌の浄化・減容化は安全な作業環境下で行なうことができる．

ビエンホア空港内の高濃度汚染地域の12地点からそれぞれ約100 tonの汚染土壌を重機で掘削，攪拌・混合を行ない掘削地点別に計12山の土壌試料を作成した．人頭大の礫やコンクリートガラは攪拌・混合時に除去した．この12山の汚染土壌をそれぞれ70～80 ton，計約900 tonをプラントヤードへ運搬し実証試験に供した．12山の土壌試料は低濃度(1,200 pg/g)から高濃度(20,000 pg/g)まで幅広く分布していた．12山の土壌試料に対して洗浄試験をそれぞれ2回繰り返し実施し，汚染土壌(**図-6(a)**)，サイクロンUF，浄化土(**図-6(c)**)，濃縮残渣(**図-6(b)**)のサンプルを採取，分析を行なった．このため，同一の山であっても元土壌のDXN濃度が異なる場合があった．実証試験は概ね14 ton/hrの処理量で行なった．

3. 実証試験結果と考察

Soil-AからSoil-Lまでの12山の土壌試料に対して各2回繰り返し行なった洗浄試験における汚染土壌(feed soil)，サイクロンUF(cyclone underflow)，浄化土(clean soil)，濃縮残渣(sludge cake)のダイオキシン濃度の一覧を**表-1**に示す．**表-1**では浄化土がベトナムのダイオキシン環境基準(住宅地(300)，緑地・公園(600)，商業地・工業地(1,200))を満足しているか否かの判別も行なった．**表-1**より，約6,000 pg/gまでの濃度であれば住宅地基準を，約11,000 pg/gまでの濃度であれば緑地・公園基準を，約16,000 pg/gまでの濃度であれば商業地・工業地基準を満足する浄化土を産出できることが判明した．洗浄プロセスのダイオキシン除去率と濃縮残渣のダイオキシン濃縮倍率を**表-2**に示す．ハイドロサイクロンまでのプロセスの除去率は平均79.2% (67.6～86.7%)であり，全プロセスの除去率は平均93.7% (91.1～96.7%)であった．サイクロンによる分級処理に加えて，フローテーションによる洗浄処理を行なう

ことによって概ね94%という高い除去率を達成できることが確認された．水処理等の浄化処理全般に共通する事であるが，目標除去率が高いほどより高度な浄化技術が必要となる．ダイオキシン除去に効果のあるフローテーション技術をさらに改善することによって，平均95%以上の除去率を達成することも十分可能と考えている．

洗浄試験毎に計測した浄化産物(浄化土，粗粒分(礫))と濃縮残渣の重量割合を**図-7**に示す．浄化土は40.2~52.9%，粗粒分(>40mm)は3.6~20.5%，粗粒分(2-40mm)は5.7~15.6%，濃縮残渣は25.8~41.1 %であった．以上を整理すると**図-8**に示すように，100 tonの汚染土壌(<16,000 pg/g)から浄化土が40~53 ton，粗粒分(礫)が10~31 ton，すなわち両者を併せた再利用可能な浄化産物が平均65 ton産出できること，無害化処理が必要となる濃縮残渣が平均35 ton発生することになる．**図-7**を見て明らかなように，この浄化産物と濃縮残渣の割合は対象土壌の粒度構成に依存

表-1 汚染土壌，サイクロンUF，浄化土，濃縮残渣のダイオキシン濃度

Soil Name	Dioxin Content (pg-TEQ/g)						
	Untreated Feed Soil	Cyclone Uderflow	Clean Soil	Dioxin Criteria, Vietnam			Sluge Cake
				Urban Land (300 or less)	Recreational (600 or less)	Commercial/ Industry (1,200 or less)	
Soil-B (1st)	1,900	---	110	Yes	Yes	Yes	2,000
Soil-B (2nd)	1,200	340	96	Yes	Yes	Yes	2,400
Soil-A (1st)	2,400	560	130	Yes	Yes	Yes	3,700
Soil-A (2nd)	2,500	---	150	Yes	Yes	Yes	4,300
Soil-K (1st)	2,300	---	170	Yes	Yes	Yes	8,000
Soil-K (2nd)	3,500	520	190	Yes	Yes	Yes	8,200
Soil-L	3,700	1,200	310	No	Yes	Yes	9,700
Soil-H (1st)	5,300	1,100	290	Yes	Yes	Yes	14,000
Soil-H (2nd)	6,000	---	200	Yes	Yes	Yes	14,000
Soil-C (1st)	6,200	1,100	550	No	Yes	Yes	16,000
Soil-C (2nd)	6,500	1,300	380	No	Yes	Yes	11,000
Soil-J (1st)	6,800	---	450	No	Yes	Yes	20,000
Soil-J (2nd)	6,500	1,600	430	No	Yes	Yes	19,000
Soil-I (1st)	11,000	2,100	540	No	Yes	Yes	26,000
Soil-I (2nd)	12,000	2,000	710	No	No	Yes	27,000
Soil-D (1st)	12,000	1,900	610	No	No	Yes	17,000
Soil-D (2nd)	12,000	1,600	680	No	No	Yes	16,000
Soil-E (1st)	14,000	3,000	730	No	No	Yes	46,000
Soil-E (2nd)	15,000	3,600	1300	No	No	No	57,000
Soil-G (1st)	16,000	3,600	1100	No	No	Yes	39,000
Soil-G (2nd)	16,000	---	1100	No	No	Yes	39,000
Soil-F (1st)	20,000	4,300	910	No	No	Yes	60,000
Soil-F (2nd)	17,000	3,000	1300	No	No	No	51,000

表-2 洗浄プロセスのDXN除去率と濃縮倍率

Soil Name	Cyclone Underflow	Clean Soil	Sludge Cake
Soil-B (1st)	---	94.2%	1.05
Soil-B (2nd)	71.7%	92.0%	2.00
Soil-A (1st)	76.7%	94.6%	1.54
Soil-A (2nd)	---	94.0%	1.72
Soil-K (1st)	---	92.6%	3.48
Soil-K (2nd)	85.1%	94.6%	2.34
Soil-L	67.6%	91.6%	2.62
Soil-H (1st)	79.2%	94.5%	2.64
Soil-H (2nd)	---	96.7%	2.33
Soil-C (1st)	82.3%	91.1%	2.58
Soil-C (2nd)	80.0%	94.2%	1.69
Soil-J (1st)	---	93.4%	2.94
Soil-J (2nd)	75.4%	93.4%	2.92
Soil-I (1st)	80.9%	95.1%	2.36
Soil-I (2nd)	83.3%	94.1%	2.25
Soil-D (1st)	84.2%	94.9%	1.42
Soil-D (2nd)	86.7%	94.3%	1.33
Soil-E (1st)	78.6%	94.8%	3.29
Soil-E (2nd)	76.0%	91.3%	3.80
Soil-G (1st)	77.5%	93.1%	2.44
Soil-G (2nd)	---	93.1%	2.44
Soil-F (1st)	78.5%	95.5%	3.00
Soil-F (2nd)	82.4%	92.4%	3.00
Average	79.2%	93.7%	2.40
Minimum	67.6%	91.1%	1.05
Maximum	86.7%	96.7%	3.80

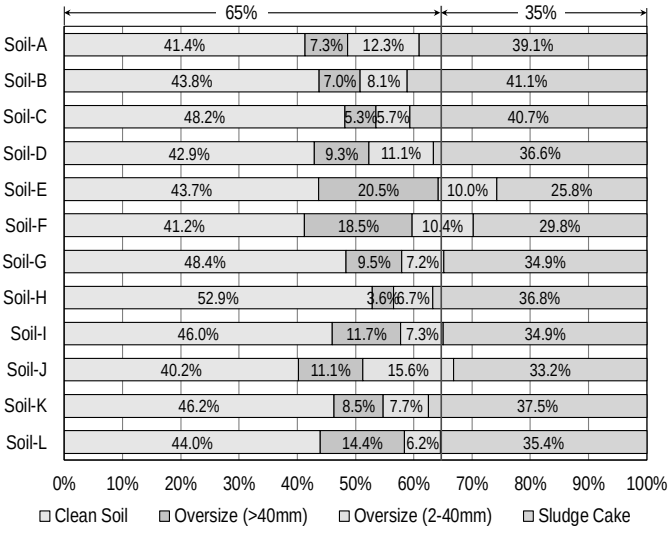


図-7 浄化産物(浄化土と粗粒分(礫))と濃縮残渣の重量割合

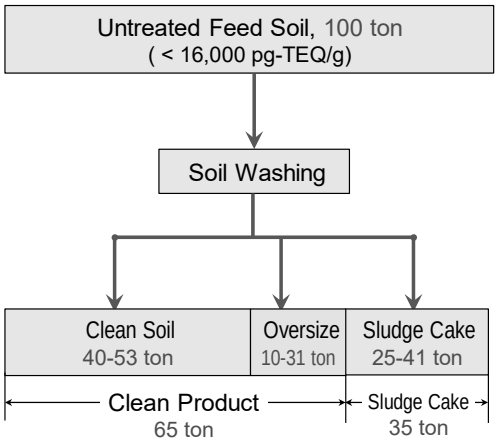


図-8 土壌洗浄によるDXN汚染土壌の浄化・減容化効果

している．**表-2**に示したように，濃縮残渣のダイオキシン濃縮倍率は平均2.4倍であった．元土壌が6,000, 11,000, 16.000 pg/gの場合は濃縮残渣はそれぞれ約14,000, 26,000, 39,000 pg/gとかなりの高濃度となる．濃縮残渣は細粒分で構成されているため，乾燥が進んだ場合に高濃度ダイオキシンを含有する粉塵が発生することが懸念された．このため，実証試験においてはフィルタープレスで脱水された濃縮残渣はプレス機から排出された後，速やかにフレコンバックに詰め込んで封をした状態で保管した．

ビエンホア空港はベトナム南部に位置し熱帯モンスーン気候のため，1年中真夏のような場所である．プラントを稼働していない期間にベルトコンベア等のプラント機器のゴム部材の一部が，強い直射日光のため劣化した．熱に弱い部材の保護対策を強化する必要がある．

4. まとめ

当社の土壌洗浄は鉱山技術と化学工学を基にした物理的分級(physical separation)を主軸としており，ダイオキシン，農薬，鉱物油，重金属類などの幅広い汚染物質に対して適用可能である．分級と洗浄のプロセスを段階的に適用し汚染物質を濃縮残渣に分離，濃縮することによって，焼却による無害化処理の対象量が汚染土壌の全量(100%)から濃縮残渣の量(10～35%)へ大幅に減量できるため，低コストの浄化処理が可能となる．洗剤を用いて汚染物質を水へ溶出させる洗浄法(surfactant-enhanced soil washing)とは全く異なり，汚染物質が水へ溶出しないように配慮している．適切な水処理を行なうことによって汚染物質を含まない清浄な処理水を得ることができるため，処理水の循環利用が可能である．

累計約260万tonの様々な汚染土壌を処理した経験とノウハウを基に，枯葉剤由来ダイオキシン汚染土壌の洗浄実証試験を行なった．主要な結果と知見を以下に記す．

1) ダイオキシン汚染土壌は重機によってエプロンフィーダーへ投入する作業は水を噴霧をし粉塵発生を防止しながら行なった．ダイオキシンの多くは粘土・シルトの細粒分に存在しているため，投入作業において細粒分の粉塵発生を防止することは，作業員の健康を守る上で非常に重要である．エプロンフィーダー以降のプロセスでは，汚染土壌は常に湿式で処理されるため，粉塵は一切発生しないため，土壌洗浄による汚染土壌の浄化・減容化は安全な作業環境下で行なうことができる．
2) 約6,000 pg/gまでのDXN土壌であればベトナムの住宅地基準(300)を，約11,000 pg/gまでの濃度であれば緑地・公園基準(600)を，約16,000 pg/gまでの濃度であれば商業地・工業地基準(1,200)を満足する浄化土を産出できることが判明した．
3) ハイドロサイクロンまでのプロセスの除去率は平均79.2% (67.6～86.7%)であり，全プロセスの除去率は平均93.7% (91.1～96.7%)であった．サイクロンによる分級処理に加えて，フローテーションによる洗浄処理を行なうことによって概ね94%という高い除去率を達成できることが確認された．
4) 実証試験の結果を整理すると，100 tonのDXN汚染土壌(<16,000 pg/g)から浄化土が40~53 ton，粗粒分(礫)が10~31 ton，すなわち両者を併せた再利用可能な浄化産物が平均65 ton産出できること，無害化処理が必要となる濃縮残渣が平均35 ton発生することになった．但し，この浄化産物と濃縮残渣の割合は対象土壌の粒度構成に依存している．
5) 濃縮残渣のダイオキシン濃縮倍率は平均2.4倍であった．元土壌が6,000, 11,000, 16.000 pg/gの場合は濃縮残渣はそれぞれ約14,000, 26,000, 39,000 pg/gとかなりの高濃度となる．濃縮残渣は細粒分で構成されているため，乾燥が進んだ場合に高濃度ダイオキシンを含有する粉塵が発生することが懸念された．このため，実証試験においてはフィルタープレスで脱水された濃縮残渣はプレス機から排出された後，速やかにフレコンバックに詰め込んで封をした状態で保管した．
6) プラントを稼働していない期間にベルトコンベア等のプラント機器のゴム部材の一部が，強い直射日光のため劣化した．1年中暑い熱帯モンスーン気候では，熱に弱い部材の保護対策を強化する必要がある．

参考文献

1) 毛利光男，馬場直紀，土田充，中嶋卓磨：土壌洗浄による放射性 Cs 汚染土壌の浄化･減容化処理の物質収支と性能評価，土木学会論文集 G, Vol. 71, No. 4, pp. 112-124, 2015.
2) 毛利光男，馬場直紀，土田充，保坂幸一，佐藤大樹，中嶋卓磨：ログウォッシャーによる粗粒子分からの軽質分の効果的な分離，第 21 回地下水･土壌汚染とその防止に関する研究集会, S2-20, pp. 185-190, 2015.
3) 毛利光男，石鍋誠一：フローテーションによる水銀･農薬･ダイオキシン･鉱物油汚染土壌の浄化，第 23 回地下水･土壌汚染とその防止に関する研究集会, S6-07, pp. 713-716, 2017.
4) 毛利光男，青木陽士，設樂和彦，石鍋誠一，平澤卓也，清水優：土壌洗浄を用いた枯葉剤由来ダイオキシン汚染土壌の効率的な浄化・減容化処理，第 24 回地下水･土壌汚染とその防止に関する研究集会, S3-07, pp. 331-334, 2018.
5) 毛利光男：フローテーションを用いた土壌洗浄法の処理性能評価，土木学会論文集 G, Vol. 74, No. 2, pp. 67-78, 2018.

DDT 含有土を対象とした現地処理方法の開発

DEVELOPMENT OF ON-SITE TREATMENT METHOD FOR DDT-CONTAINING SOIL

日野良太*，西川直仁*，緒方浩基**
HINO Ryota, NISHIKAWA Naohito and OGATA Hiroki

* 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：DDT，現地処理，生物処理，化学処理，鉄粉
（*Dichlorodiphenyltrichloroethane, On-site treatment, Bioremediation, Chemical Treatment, Iron Nanoparticles*）

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、2020 年時点で土壌調査及び対策工事の件数が年間6,700 件程度に及んでいる[1)]。ここで、国内において法の対象物質が基準不適合土壌として検出される一般的な事例として、工場跡地での揮発性有機化合物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が挙げられる。一方、法の対象物質以外の化学物質による土壌汚染の事例も国内各所で報告されている。例えば、返還された米軍基地跡地においては、今回の検討対象としているジクロロジフェニルトリクロロエタン（以下、DDT）等の難分解性農薬等による汚染が報告されている[2),3)]。

本研究の対象物質である DDT 類（後述）は、2001 年に制定された残留性有機汚染物質（POPs）に関するストックホルム条約の対象物質の一つであり、同条約の付属書 B により製造・使用、輸出入の制限に指定されている。一方、日本国内では、1971 年の農薬登録の失効まで農薬や駆除剤として用いられており、1981 年に化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律で第一種特定化学物質に指定され、すべての用途で製造、販売、使用が規制された[4)]。

DDT 含有土は、法の対象ではないが、環境省の埋設農薬調査・掘削等マニュアルにおいて、埋設された農薬周辺における土の汚染状態に応じて対応を行う[5)]。同マニュアルでは、DDT 含有土に対して指針値（溶出量）が 0.026mg/L、指針値（含有量）が 50mg/kg、無害化処理指針値として 0.26mg/L で設定されている。開発等により掘削された DDT 含有土を処理しようとした場合、指針値を超える DDT 含有土は最終処分場への搬出する方法であり、無害化処理指針に不適合な場合は、最終処分場への持ち込みができないため、濃度を低減するための熱処理を求められる。これらの方法による環境負荷低減と処理コストの削減のためには、難分解性有機物である DDT 含有土を現地で処理する方法の開発が必要である。

本研究では、DDT を含有した実現場の土を用いて、掘削した DDT 含有土の現地処理（オンサイト処理）について検討した。オンサイト処理は、後述する DDT の性状を参考に生物処理、化学処理、鉄粉処理を実施した。本稿では、室内試験で確認した各処理方法について報告する。

2. DDT の基本性状

DDT は、化学品名が 1,1,1-トリクロロ-2,2-ビス(4-クロロフェニル)エタンであり、ジクロロジフェニルトリクロロエタンは別名で呼称されている[4)]。DDT は、塩素の結合位置により、p,p'-DDT、o,p'-DDT、o,o'-DDT の異性体がある。例として、p,p'-DDT の構造式を図-1 に示す[4)]。化学特性は、20℃で白色の固体であり、融点は 109℃、沸点は 260℃程度、溶解度は 20℃の水に 0.001mg/L と難溶性である。また、環境中での残留性も懸念される。

製品 DDT の一般的な組成は、85%の p,p'-DDT、15%の o,p'-DDT、微量の o,o'-DDT を含む[6)]。DDT の分解生成物として、ジクロロジフェニルジクロロエタン（以下、DDD）とジクロロジフェニルジクロロエチレン（以下、DDE）があり、環境省では DDT、DDD、DDE の化合物における p,p'と o,p'の 2 異性体の 6 物質を DDT 類と呼称する[7)]。

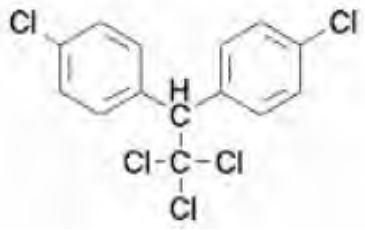


図-1 p, p' -DDT の構造式

3. DDT 含有土の処理方法

3.1 概要

DDT 含有土の生物処理について、Mansouri らは嫌気分解と好気分解の複数の分解経路があることを示した[8]。分解経路を**図-2** に示す。図中の点線矢印が嫌気分解、実線矢印が好気分解である。本研究では、嫌気環境と好気環境の両方で分解効果を確認することとした。

化学処理は、酸化剤とアルカリ剤を使用し、鉄粉処理は、0 価の鉄粉を使用した。化学処理と鉄粉処理は、酸化力や還元力によって塩素結合や芳香環の化学結合を分解する可能性について検討した。本研究では、生物処理および鉄粉処理を行うにあたって、微生物栄養剤や鉄粉の単独利用だけでなく、土から DDT を効率的に剥離させるために界面活性剤などの併用を検討した。

3.2 試料土の性状

今回の試験で使用した試料は、実現場の DDT を含有した土である。実現場の DDT を含有した土の性状を**表-1** と**表-2** に示す。表中の「<」は、定量下限値未満を示す。試料土 No.1 は、DDT 類で含有量 1,900mg/kg と溶出量 0.012mg/L であり、表層付近の埋土であるため有機物含有量や一般細菌数が高い。一方、試料土 No.2 と No.3 は、DDT 類で含有量 50mg/kg～84mg/kg と溶出量<0.002mg/L であり、地表面から 3m 以上の深度で採取された土であるため有機物含有量や一般細菌数が少ない。分析方法は、DDT 類が農薬等の環境残留実態調査分析法の GC/MS 法、pH が JGS 0211-2000、EC が JGS 0212-2000、強熱減量が底

表-1　実現場の DDT 含有土（DDT 濃度）

項目		単位	試料土No.		
			1	2	3
含有量	o,p'-DDT	mg／kg	190.0	3.7	1.5
	p,p'-DDT		730.0	46.5	20.0
	o,p'-DDE		9.1	0.2	0.1
	p,p'-DDE		44.0	1.6	0.3
	o,p'-DDD		230.0	2.0	0.9
	p,p'-DDD		690.0	30.5	25.5
	DDT類		1900.0	84.0	48.5
溶出量	o,p'-DDT	mg／L	0.003	<0.001	<0.001
	p,p'-DDT		0.003	0.002	<0.001
	o,p'-DDE		<0.001	<0.001	<0.001
	p,p'-DDE		<0.001	<0.001	<0.001
	o,p'-DDD		0.003	<0.001	<0.001
	p,p'-DDD		0.004	0.001	<0.001
	DDT類		0.012	<0.001	<0.001

表-2　実現場の DDT 含有土（物理性状）

項目	単位	試料土No.		
		1	2	3
pH	—	8.0	4.7	4.9
EC	mS/m	42.0	14.0	7.2
強熱減量	%	5.8	4.5	2.5
有機物含有量	%	1.4	0.12	<0.05
一般細菌	個／g	3.9×10^6	8.8×10^4	2.5×10^3

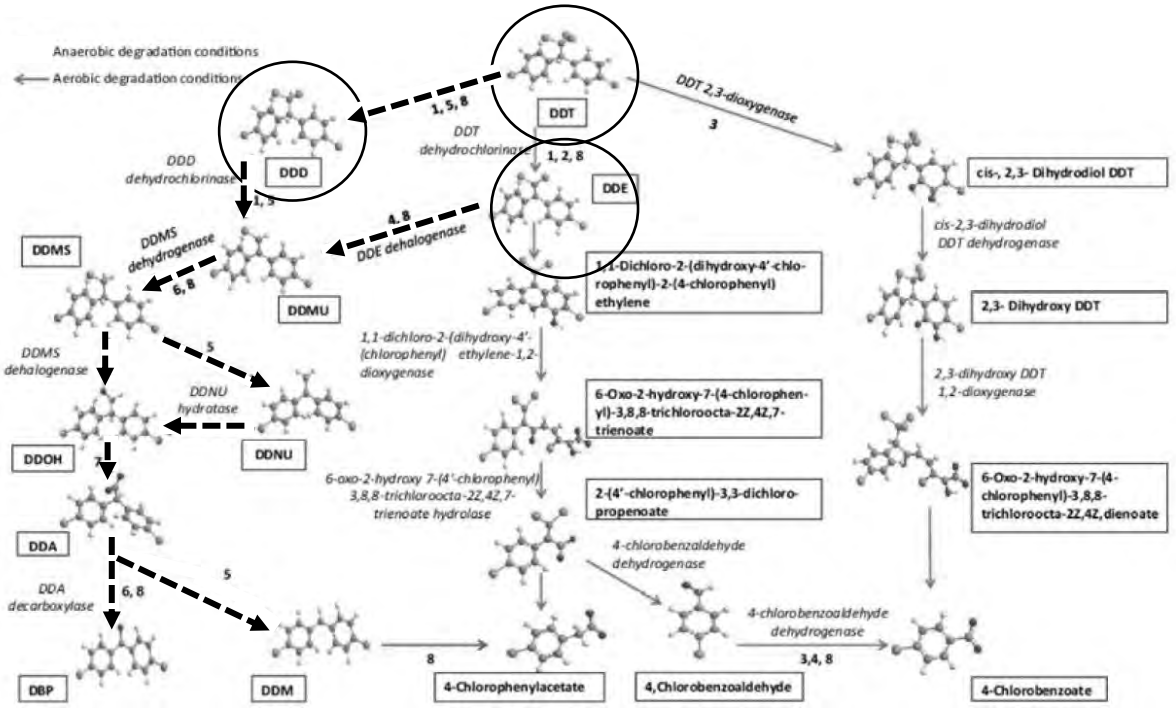


図-2　DDT における生物処理の分解経路（図中の黒丸が今回対象の DDT 類）

質調査法の 600℃加熱減量法、有機物含有量が JGS 0231、一般細菌が土壌環境分析法の希釈平板法である。

3.3 生物処理の試験方法

100ml 容のガラス瓶に試料土（**表-1** の試料土 No.1 と No.2）40g を入れ、水 60mL と各資材を添加・混合し、室温 22℃か恒温槽 40℃の温度条件で養生を行った（**写真-1**）。試験では、微生物の栄養剤と土に吸着した DDT 類を溶液に移行させるための資材を添加した。微生物の栄養剤は、当社が開発したカルボン酸塩（食品添加物）を用いた材料を土量に対して 0.015g 添加し、その他に界面活性剤や増粘剤を土量に対して 3%添加した。養生は、嫌気環境で 10 週間行なった後に好気環境において 6 週間の合計 16 週間実施した。また、いずれのケースに対しても試験開始の 6 週間後に微生物の栄養剤を追添加した。分析は、試験開始の 4 週間後、10 週間後、16 週間後に DDT 類の含有量を測定した。

生物処理の試験ケースを**表-3** に示す。ここで、微生物の栄養剤以外に添加した資材の特性として、界面活性剤の HLB（hydrophilic lipophilic balance）は、非イオン性（ノニオン）の水の溶解性を示す指標であり、値が大きいほど水溶性が高くなる。陰イオン性（アニオン）は、代表として 1 ケースを検討した。土に含有した物質を界面活性剤の作用によって溶液に移行する既往研究[9]として、油含有土の処理にも使用される事例がある。増粘剤は、土を液体上で分散させるために添加した。

3.4 化学処理の試験方法

100ml 容のガラス瓶に試料土（**表-1** の試料土 No.2）40g を入れ、酸化剤かアルカリ剤を添加・混合し、室温（22℃）か恒温槽 40℃の温度条件で養生を行った。酸化処理を行うために使用した酸化剤は、10%の溶液（ナトリウム系の薬剤 A とカリウム系の薬剤 B）を土量に対して 1%～2%添加した。一方、アルカリ処理を行うために使用したアルカリ剤は、20%の水酸化ナトリウム（以下、NaOH）を土量に対して 2%～10%添加した。養生は、酸化処理で 8 日間、アルカリ処理で 2 週間として、養生後に DDT 類の含有量を測定した。

化学処理の試験ケースを**表-4** に示す。ここで、酸化処理に関しては、酸化剤の処理効果の向上を期待して、各薬剤の 1%添加ケースに対して追加で NaOH や生石灰、硫酸第一鉄を添加した。

3.5 鉄粉処理の試験方法

100ml 容のガラス瓶に試料土（**表-1** の試料土 No.1 と No.3）40g を入れ、水 60mL と各資材を添加・混合し、室温（22℃）の温度条件で養生を行った。資材は、鉄粉と生物処理と同様に界面活性剤を添加した。鉄粉は、溶解した鉄を高圧の水で精錬し、一定の粒度分布を要する市販品を使用した。添加量は、鉄粉を土量に対して 4%として、界面活性剤を土量に対して 3%とした。養生は、試料土 No.3 を 2 週間、No.1 を 3 週間後に資材を追添加した後に 7 週間の合計 10 週間とした。

鉄粉処理の試験ケースを**表-5** に示す。ここで、界面活性剤は、生物処理と同様に異なる HLB のノニオンを使用し、土に含有した DDT 類を溶液に移行させることに適した HLB の検討を行った。試料土 No.1 に対しては、浄化効果が高い HLB、資材の粘性などの取り扱いが容易な界面活性剤（ノニオン F）を使用した。

写真-1　試験状況

表-3　試験ケース（生物処理）

No.	養生温度	試料土	栄養剤	添加資材	
				製品	HLB
1	22℃	No.2	なし	－	－
2			あり	－	－
3				ノニオンA	7.9
4				ノニオンB	9.7
5				ノニオンC	16.9
6				アニオン	－
7	40℃	No.2	なし	－	－
8			あり	－	－
9				ノニオンA	7.9
10				ノニオンB	9.7
11				ノニオンC	16.9
12				アニオン	－
13				増粘剤	－
14		No.1		－	－
15				ノニオンA	7.9
16				ノニオンB	9.7

表-4　試験ケース（化学処理）

No.	養生温度	試料土	酸化剤		添加資材	
			酸化剤 アルカリ剤	添加量 (%)	資材名	添加量
17	22℃	No.2	―	―	―	―
18			10%薬剤A	1.0	―	―
19				2.0	―	―
20				1.0	1mol/L水酸化ﾅﾄﾘｳﾑ	0.17mL
21				1.0	生石灰粉体	2g
22				1.0	9.2%硫酸第一鉄7水和物	1.02mL
23	40℃	No.2	―	―	―	―
24			10%薬剤B	1.0	―	―
25				2.0	―	―
26				1.0	1mol/L水酸化ﾅﾄﾘｳﾑ	0.17mL
27				1.0	生石灰粉体	2g
28				1.0	9.2%硫酸第一鉄7水和物	1.02mL
29	22℃	No.2	―	―	―	―
30			NaOH	2.0	―	―
31				5.0	―	―
32				10.0	―	―

表-5　試験ケース（鉄粉処理）

No.	養生温度	試料土	鉄粉	界面活性剤		
			添加量(%)	製品	添加量(%)	HLB
33	22℃	No.3	―	―	―	―
34			4.0	―	―	―
35				ノニオンD	3.0	8.1
36				ノニオンE		10.5
37				ノニオンF		13.6
38				ノニオンG		15.3
39				ノニオンH		16.9
40	22℃	No.1	―	―	―	―
41			4.0	―	―	―
42			4.0	ノニオンF	3.0	13.6
43			4.0	ノニオンF	6.0	
44			2.0	ノニオンF	3.0	
45			6.0	ノニオンF	3.0	

4. 試験結果

4.1 生物処理の試験結果

図-3 から**図-6** に生物処理の DDT 類含有量と養生温度の違いと一部試験ケースの異性体の違いによる経時変化の試験結果を示す。生物処理では、養生温度によって DDT 類含有量の処理能力が異なる結果となった。

養生温度 22℃の場合、対照区と栄養剤のみの試験ケースでは、初期から 16 週目までに値の変動はほとんど見られなかった。一方、界面活性剤を追加した試験ケースでは、ノニオン B の試験ケースにおいて試験期間中の 16 週目までに初期から 32%の濃度低減が確認された。ノニオン B の初期から 10 週目までの嫌気環境に 58%の濃度低減が確認され、その後の好気環境で濃度が増加している。これは、養生条件によって DDT 類の異性体が変化するためであることを確認した。**図-4** に異性体毎の濃度の経時変化を示す。ノニオン B は、初期から 10 週目までの嫌気環境で p,p'-DDT と p,p'-DDD の濃度低減が確認され、嫌気環境の 10 週目から好気環境の 16 週目までに p,p'-DDT の濃度が低減し、p,p'-DDE の濃度が増加した。これは、生物処理の分解経路（**図-2**）の好気環境で DDT から DDE が分解することと一致している。ノニオン B 以外の界面活性剤を添加したケースでは、ノニオン A とアニオンで初期から 10%の低減があり、ノニオン C はほとんど変化しなかった。

養生温度 40℃の場合、対象区で初期から 16 週目までに値の変動がほとんど確認されなかった。一方、栄養剤のみを添加した試験ケースと界面活性剤などを添加した試験ケースでは、濃度低減が確認された。いずれの試験ケースも初期から 4 週目までに濃度が増加した後に 10 週目までに濃度が低減し、その後の好気環境でさらに低減した。濃度の低減は、初期から 16 週目までに 15%～44%であった。例えば、ノニオン B の試験ケースでは、初期から 16 週目までに 30%の低減が確認された。アニオンが、初期から 16 週目までに 44%低減しており、栄養剤のみでも 30%の低

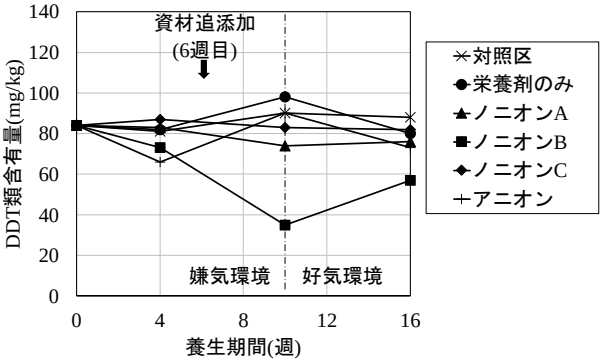


図-3 生物処理結果（試料土 No. 2、温度 22℃）

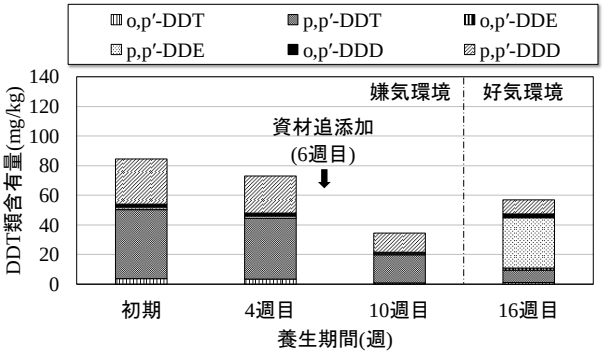


図-4 生物処理結果（試験ケース No. 4 異性体変化）

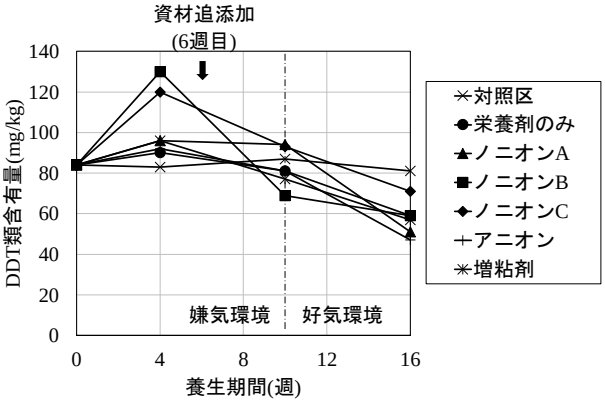


図-5 生物処理結果（試料土 No. 2、温度 40℃）

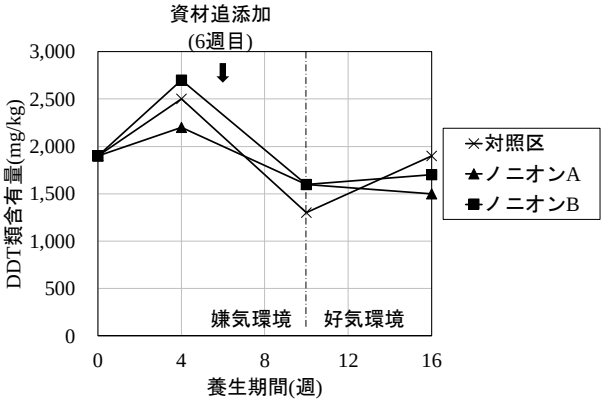


図-6 生物処理結果（試料土 No. 1、温度 40℃）

減を確認した。また、一部の試験ケースでは指針値 50mg/kg まで処理可能であることも確認された。

高濃度の DDT 含有土を使用した試験ケースでは、試料土 No.2 の低濃度と異なり、対照区の濃度変化が大きく、初期から 10 週目までに 32%の低減となり、好気環境で濃度が増加した。一方、界面活性剤を添加した試験ケースでは、初期から 16 週目までに 11%～21%の低減となった。試料土 No.1 を使用した試験ケースでは、初期性状の一般細菌数が試料土 No.2 や No.3 よりも 2 オーダー程度高い値となっているため、対照区でも生物活動が活発であると考えられる。しかしながら、高濃度の DDT 含有土に対しては、生物処理のみで指針値 50mg/kg まで処理が困難であると想定される。

4.2 化学処理の試験結果

図-7 から**図-9** に酸化処理とアルカリ処理の試験結果を示す。酸化処理では、薬剤 A の単独 1%添加で 39%の低減、薬剤 B の単独 2%添加と生石灰混合で 27%の低減となった。一方、NaOH と硫酸第一鉄の添加に関しては、薬剤単独よりも処理効果が低下している傾向があった。また、生石灰の混合ケースでは、p,p'-DDT から p,p'-DDE の分解も確認された。しかしながら、生物処理と異なり指針値 50mg/kg までの処理効果を確認できなかった。

アルカリ処理は、NaOH を 10%添加することで 20%の濃度低減となり、2%と 5%添加ではほとんど濃度低減が見られなかった。しかしながら、酸化処理と同様に指針値 50mg/kg までの処理効果を確認できなかった。また、酸化処理の生石灰混合と同様に p,p'-DDT から p,p'-DDE の分解も確認された。そのため、アルカリ環境にすることで p,p'-DDT から p,p'-DDE の分解が促進する可能性も考えられるが、今後の課題とする。

4.3 鉄粉処理の試験結果

図-10 から**図-12** に鉄粉処理の試験結果を示す。**図-10** の異なる HLB の界面活性剤を用いて適正な HLB の界面活性剤を選定する試験では、鉄粉のみに比べて界面活性剤を添加することで DDT 類含有量が低減した。対照区と比較して、鉄粉のみで 64%、ノニオン D で 84%、ノニオン E からノニオン H は 95%程度まで低減した。そのため、鉄粉処理を行う上で処理効果を向上させる界面活性剤の HLB は 10.5 よりも高い値が望ましいことを確認した。ただし、実際に使用する際には、HLB が高くなるに連れて高い粘性の液体もしくはゲル化するため施工方法などに応じて使い分けが必要となる。

図-11 の高濃度の試料土 No.1 を用いた試験では、鉄粉と界面活性剤（ノニオン F）を所定量添加して DDT 類含有量の経時変化を確認した。試料土 No.1 の DDT 類含有量が 2,000mg/kg 程度と非常に高濃度であるため、試験を

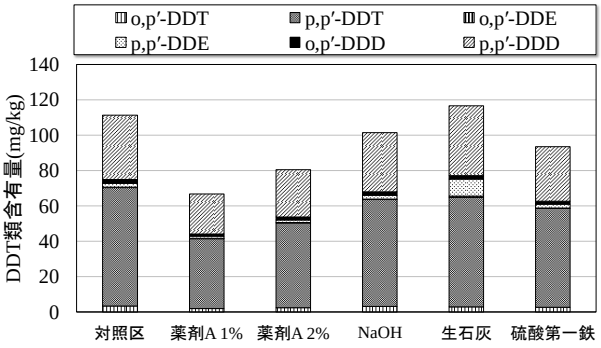


図-7 化学処理結果（温度 22℃）

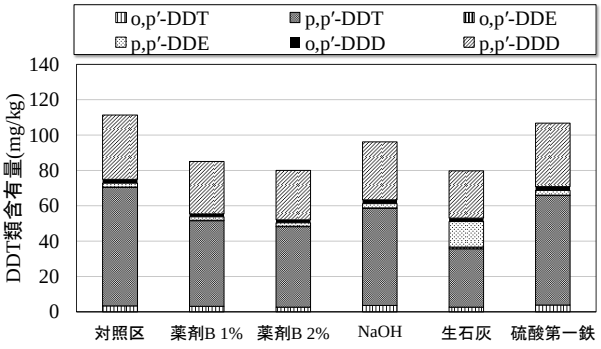


図-8 化学処理結果（温度 40℃）

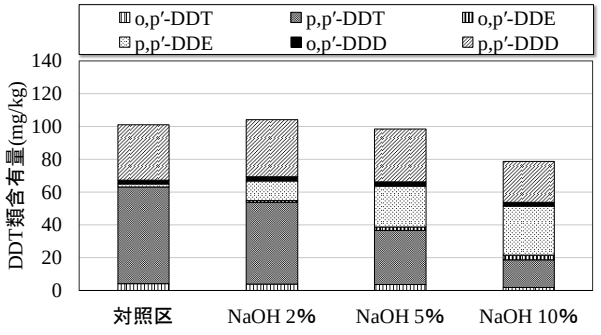


図-9 化学処理結果（アルカリ剤使用）

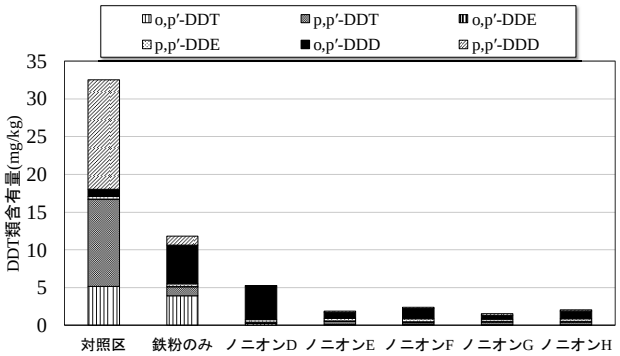


図-10 鉄粉処理結果（試料土 No. 3、温度 22℃）

開始してから 3 週目に鉄粉と界面活性剤を追加で添加した。その結果、鉄粉 4%（追添加を考慮すると 8%）では、初期から 10 週目で 11%の低減となった。一方、鉄粉と界面活性剤を混合することで濃度の低減効果は大きくなっ

た。鉄粉 4%と界面活性剤 6%を混合することで初期から 10 週目で 81%の濃度低減となった。他の試験ケースでも初期から 10 週目で 45%～63%の低減となった。また、鉄粉と界面活性剤の添加量が多くなるにつれて濃度の低減効果も高くなることを確認した。

図-12 は、初期から 10 週目における DDT 類の異性体毎の結果である。鉄粉に界面活性剤を加えることで p,p'-DDT と p,p'-DDD の濃度が大きく低減していることを確認した。一方、o,p'-DDT と o,p'-DDD の濃度低減が小さいことに関しては、今後の課題である。

5. まとめ

現状の DDT 含有土の処理方法は、熱処理もしくは埋立処分である。そこで、本稿では、埋立処分場への場外搬出による環境負荷の低減とコスト低減を目的として、現地処理（生物処理、化学処理、鉄粉処理）を検討した。

生物処理では、嫌気環境と好気環境を組み合わせることによって DDT 含有土の分解が可能であることを確認した。微生物の栄養剤に加えて土から溶液に移行するための材料として界面活性剤や増粘剤などを添加することで処理能力が高まった。その結果、初期に対して試料土 No.2 の 22℃養生で 20%～43%、40℃養生で 29%～53%、試料土 No.1 の 40℃養生で 11%～21%の濃度低減となった。

化学処理では、酸化処理とアルカリ処理の可能性を検討した。酸化処理では、ナトリウム系とカリウム系の薬剤と生石灰などの助剤を追加した場合の処理効果を確認した。一方、アルカリ処理では、NaOH を大量に添加した場合の処理効果を確認した。その結果、酸化処理では、薬剤単独の 1～2%添加か生石灰を混合することで 27%～39%の濃度低減となった。

鉄粉処理では、鉄粉に界面活性剤を添加することで処理能力が高まり、初期に対して試料土 No.3 は概ね 90%以上の濃度低減を確認した。さらに、他の方法では処理困難であった高濃度の試料土 No.1 に対しても鉄粉と界面活性剤を併用することで、初期から 10 週目に最大 81%の濃度低減を確認できた。使用する界面活性剤は、HLB によって処理能力が異なり、HLB が 10.5 以上の水に溶解しやすい材料が適していることを確認した。

今回実施した 3 種類の処理方法の試験結果より、DDT 類の浄化効果が高い方法は、界面活性剤を併用した鉄粉処理であることを確認した。鉄粉処理によって低濃度の試料土 No.3 と高濃度の試料土 No.1 を初期に比べて 80%以上の濃度低減が可能であることを確認した。

今後の課題としては、各処理方法に対して異なる土質や施工方法を考慮した試験方法による処理効果の検討などが挙げられる。さらに、米軍基地跡地等では DDT 以外の農薬や TNT（トリニトロトルエン）等の火薬による土壌汚染も懸念されることから、それらの土に対しても適用できる処理方法を検討する必要がある。

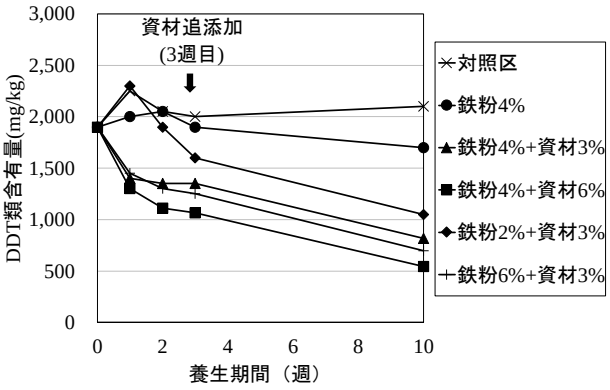


図-11 鉄粉処理結果
（試料土 No. 1、温度 22℃ 、経時変化）

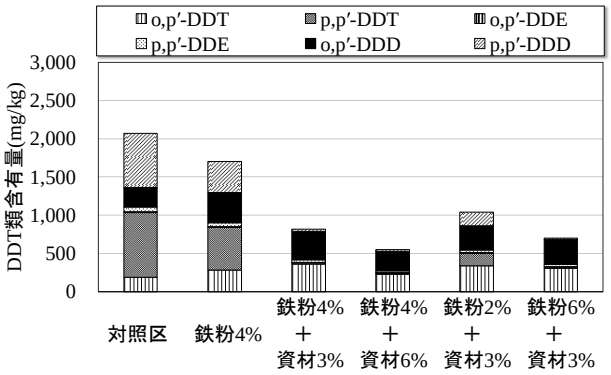


図-12 鉄粉処理結果
（試料土 No. 1、温度 22℃、異性体変化）

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/press30.htm, 2020.12.28 参照.
2) 沖縄タイムズ：2016 年 1 月 9 日記事, https://www.okinawatimes.co.jp/articles/-/22574
3) 沖縄防衛局：2019 年 8 月 22 日 お知らせ, https://www.mod.go.jp/rdb/okinawa/07oshirase/kanri/kanri-info/290822oshirase.pdf
4) 環境省：化学物質の環境リスク評価 第 1 巻, pp.254-265, 2002.
5) 環境省：埋設農薬調査・掘削等マニュアル, pp.1-92, 2012.
6) Simi Sudharshan et al.：DDT remediation in contaminated soils: a review of recent studies, Biodegradation, 23, pp.851-863, 2012.
7) 環境省 HP 化学物質と環境：https://www.env.go.jp/chemi/kurohon/2019/shosai.html, 2020.12.28 参照.
8) Mansouri et al. : The environmental issues of DDT pollution and bioremediation, pp.309-339, 2017.
9) 日野良太ほか：油含有細粒土を対象とした洗浄処理工法の開発, 第 14 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.365-372, 2020.

UAV からの音波照射加振を用いた遠距離浅層地中探査技術の研究

STUDY OF LONG-DISTANCE SHALLOW UNDERGROUND EXPLORATION TECHNOLOGY USING ACOUSTIC IRRADITATION INDUCED VIBRATION FROM UAV

杉本恒美*，杉本和子**，中川裕***，上地樹***，高木均*****，坂本憲昭**，
歌川紀之*****，黒田千歳******
SUGIMOTO Tsuneyoshi, SUGIMOTO Kazuko, NAKAGAWA Yutaka, UECHI Itsuki,
TAKAGI Hitoshi, SAKAMOTO Noriaki, UTAGAWA Noriyuki, KURODA Chitose

* 博（工）桐蔭横浜大学 大学院 教授（〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614）
** 博（工）桐蔭横浜大学 大学院 研究員（〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614）
*** 修（工）桐蔭横浜大学 大学院 研究員（〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614）
***** 工学士 桐蔭横浜大学 大学院 研究員（〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614）
***** 博（工）佐藤工業㈱技術研究所 上席研究員（〒243-0123 神奈川厚木市森の里青山 14-10）
****** 工学士 佐藤工業㈱技術研究所 上席研究員（〒243-0123 神奈川厚木市森の里青山 14-10）

キーワード：音波照射加振，浅層地中探査，非接触音響探査，レーザドップラ振動計，UAV
（*Acoustic Irradiation Induced Vibration, Shallow Underground Exploration, Noncontact Acoustic Inspection, Laser Doppler Vibrometer, Unmanned Aerial Vehicle*）

1. はじめに

地中探査の手法としては、レーダ探査、磁気探査、電気探査および弾性波探査などが、既に開発されている。しかしながら、どの手法も計測用機材を地表面に接触もしくは近づける必要があるため、 遠隔から非接触で探査を行うことは困難であった。また、深さ約 300 mm 以内の非常に浅い地中領域では、反射波や表面波の影響を受けやすいため、探査が困難な領域であった。このような浅層領域の探査が可能な手法としては、第 2 種縦波を用いた Acoustic-to-seismic 法 [1] が知られている。この方法は主として地雷探査のために開発されたが、第 2 種縦波を発生させるための機材配置の関係から遠距離測定は困難であった。

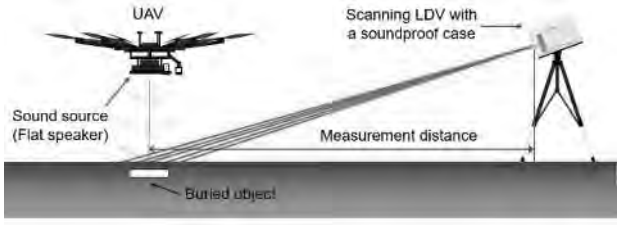
一方で、音波照射加振を用いた非接触音響探査（NCAI : NonContact Acoustic Inspection）法を用いれば、5 m 以上の遠隔からでもコンクリート構造物の表面近くにある亀裂欠陥等が探査可能である。この手法は、音波照射加振により、欠陥部で発生するたわみ共振振動をレーザドップラ振動計(LDV:Laser Doppler Vibrometer)で検出するというものである。今までに、検出原理がたわみ共振であること [2,3] を明らかにし、欠陥検出アルゴリズムの構築 [4,5] 、空間スペクトルエントロピー [6] を用いた欠陥部とレーザヘッドの共振周波数の識別が可能である事等を明らかにしている。また、S/N 比の高い計測を実現するためのトーンバースト波 7) も考案している。 さらに、実際の 30 m を超える高さの高架橋の床版 [8] および計測面が不陸な地下空洞の吹付けコンクリート [9] での検証実験が行われ、ハンマー点検と同様な結果が得られることを確認している。ただし、遠距離から音波を照射する場合には、大型の音源が必要となり、環境騒音の発生が避けられないという問題点があった。

しかしながら、無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）から音波照射加振が行えれば、測定面に近づけるため、小さな音源でも探査が可能となる。すなわち、従来の NCAI 方式の問題点を解決しながら、音源位置を自由に設定できるため、探索範囲を非常に広くすることが可能となることを意味している。実際に、UAV からの音波照射加振により、タイル外壁供試体の広域探査が可能であることおよび、飛行中の音波照射による探査も可能 [10] であることを明らかにしている。この UAV からの音波照射加振を用いた NACI 法では、測定面の振動速度分布を計測できれば良いので、遠隔からでも非接触で浅層地中探査ができる可能性がある。そこで、今回は実際に UAV からの音波照射加振により浅層地中探査が可能かどうかについて、音源を固定台に載せた状態での基礎的な検証実験を実施した。

2. 音波照射加振による浅層地中探査

2.1 基本セットアップ

UAV からの音波照射加振による浅層地中探査の基本概念図を図－1 に示す。この手法では最初に埋設物の真上から音波照射加振を加えて、埋設物自体に振動エネルギーを与える。そして、地表面に伝搬した埋設物自体の振動をレーザドップラ振動計(LDV：Laser Doppler Vibrometer)により面的に捉えて映像化を行うというものである。音源としては、UAV への搭載を考慮して、平面スピーカのような小型軽量の音源を用いる。また、距離が離れるほど、レーザ入射角が小さくなるため、LDV による計測は困難となることが予測されるが、近年の赤外線レーザを搭載した LDV は感度が格段に向上しており、10 m 以上の遠距離計測が可能になることが期待される。



図－1　UAV からの音波照射加振と LDV を用いた遠距離非接触浅層地中探査の概念図

2.2 振動エネルギー比

埋設物の形状によっては、広い帯域幅を持つ振動スペクトルが観測される場合がある。そこで、埋設物の規模を明確にするために、以下のような振動エネルギー比(VER：Vibrational Energy Ratio)[3] を導入した。

$$[VER]_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{each}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{min}) df} \qquad (1)$$

ここで、PSD_{each} は各測定点のパワースペクトル密度、PSD_{min} はすべての測定点のパワースペクトル密度の最小値である。 f_1 と f_2 は周波数積分範囲を示し、通常は加振動音波の周波数範囲と同じである。

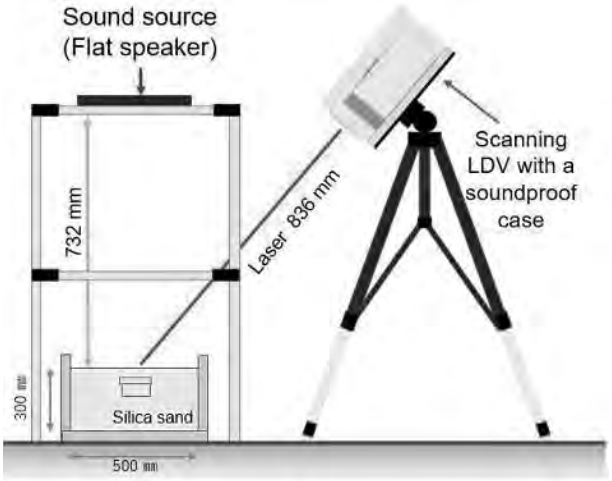
2.3 トーンバースト波

使用する LDV は高感度のため、反射散乱音の影響も考慮する必要がある。したがって、測定は、反射波が LDV に到達する時間前に実施する必要がある。そのため、LDV の測定可能な時間帯を効果的に使用し、同時に励起力を得ることができるトーンバースト波 [7] を考案して使用している。

3. 珪砂を用いた基礎実験

3.1 実験セットアップ

最初は、実験の再現性を重視して、粒径分布が比較的均一と思われる珪砂 7 号（粒度範囲約 0.05～0.3 mm）を埋設用土壌として用いた。図－2 に実験セットアップ例を示す。小型砂槽(500×500×300 mm^3)に埋設された中空円形容器に対して、平面スピーカ(FPS Corp., FPS2030M3P1R)から音波照射加振を行い、スキャニング振動計（SLDV：Scanning LDV、 Polytec Corp., PSV400-H4）を用いて砂表面の 2 次元的な振動速度分布を計測した。埋設物としては、直径約 100 mm と 160 mm の市販の円形容器（本体部：ステンレス、蓋部：ポリエチレン）を用いた（どちらも中空で、重量はそれぞれ 52.8 g と 115.8 g であった）。振動を観測しやすいように、蓋部を上側として設置した。また、砂の圧力により蓋自体が外れてしまわないように、蓋の縁から、本体の側面までを養生テープで貼り付けた状態で埋設している。なお、実験に先立ち、砂袋(26 kg)を用いて約 24 時間の加圧を行った。



図－2　珪砂を使用した実験セットアップ

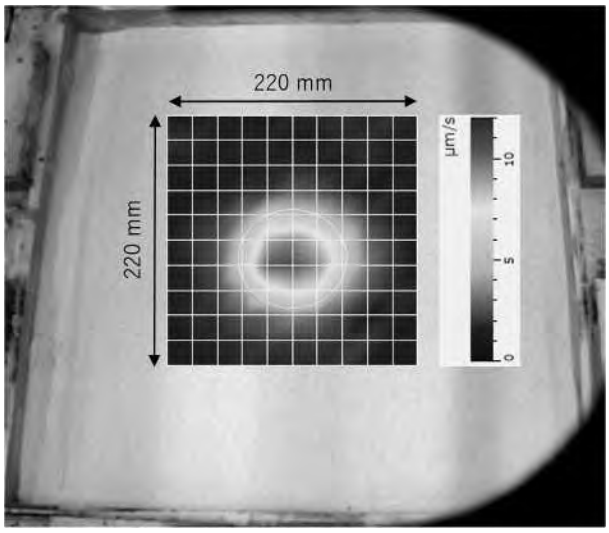
3.2 埋設物の大きさ・深さと検出周波数

深さ 50 mm に埋設した直径 100 mm の円形容器に対し

て周波数範囲 100～1000 Hz の音波を照射した時の振動速度分布（149Hz）を図－3 に示す。砂表面の音圧は約 90 dB である。白線の丸は埋設物の位置と大きさを示している（この場合は 100 mm）。測定点数は 121(11×11)点で、測定点間隔は縦横約 22 mm である。図より埋設物上の珪砂が周囲より振動しやすい周波数がある事が確認できる。なお、この映像例は砂槽に対してやや斜めに設置した SLDV の CCD カメラ画像のため、埋設物の検出位置が、画面中央よりやや下寄りになっている。埋設物の大きさや深さを変化させた場合の検出周波数の変化を表－1 および表－2 に示す。ここでは、埋設物の形状および位置と一致した振動速度分布が得られた周波数を検出周波数とした。表より検出周波数が埋設物の大きさに反比例して変化することを確認した。一方、埋設物の深さを変えても検出周波数はあまり変化しなかったが、これは観測されている現象が埋設物とその上の砂層からなるたわみ共振現象ではなく、埋設物（容器自体）の振動が捉えられていることを意味していると思われる。

3.3 レーザの照射角度

遠距離から土壌表面の振動を測定するため、LDV の設置する距離をどのくらい遠くにできるか（レーザ照射角度を小さくできるか）の基礎検討を、深さ 50 mm に埋設した直径 100 mm の中空円形容器を対象として行った。実験セットアップは前節とほぼ同じである。なお、埋設物を設置した後、測定前日から砂袋で加圧を行った。平面音源を砂槽上方の約 1 m に設置し、珪砂表面の振動を測定する SLDV としては赤外線レーザの PSV-500 Xtra (Polytec Corp.)を使用した。レーザの照射角度については垂直入射を 90 度（真上）としてデジタルアングルメーター(シンワ測定株式会社製)を用いて測定した。加振用音波はシングルトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100～300 Hz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 200 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 1 s である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 90 dB とした。図－4 にレーザの照射角度を 60、45、30 および 20 度に変更した場合の埋設物上の測定点の振動速度分布を示す（レーザと砂槽中心部の距離は約 1 m）。図より埋設物の影響と思われる周囲より振動速度の値が高くなる傾向は、実験を行った全ての角度において確認できることがわかる。ただし、レーザの照射角度が 60 度より小さくなると測定エリア上部の振動速度がわずかに周囲より高くなる傾向が出ている。これは砂槽の大きさの関係で壁面からの反射波による振動による影響であると思われる。



図－3　直径 100 mm の中空円形容器（深さ 50 mm）の 149 Hz における振動速度分布

表－1　埋設物の直径と検出周波数（深さ 100mm）

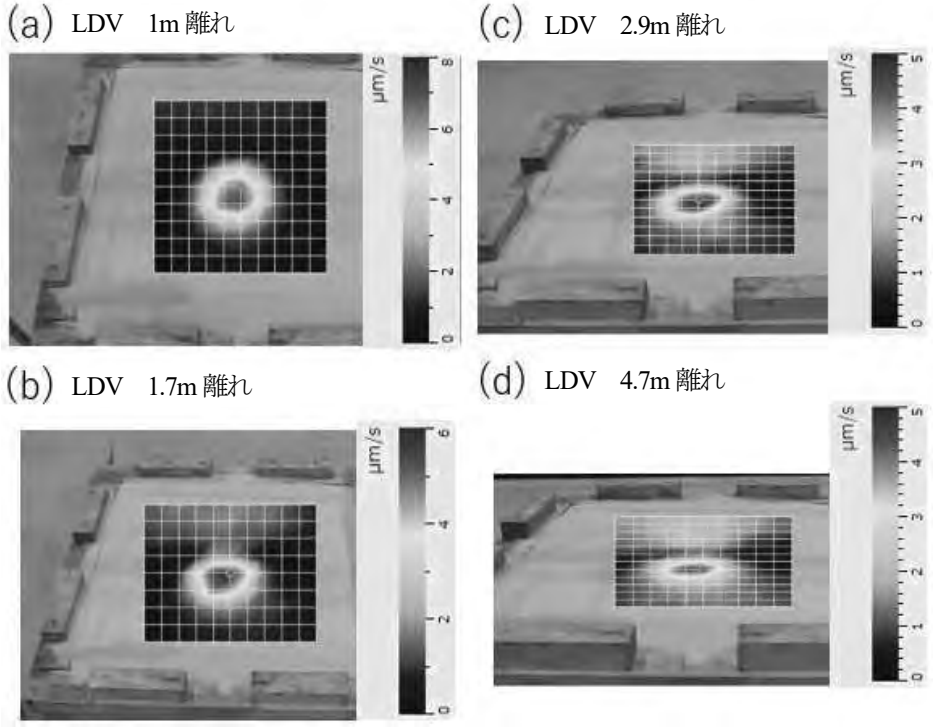
直径(mm)	検出周波数(Hz)
100	149
160	110

表-2　埋設物の深さと検出周波数（直径 100mm）

深さ(mm)	検出周波数(Hz)
50	149
100	167
150	167

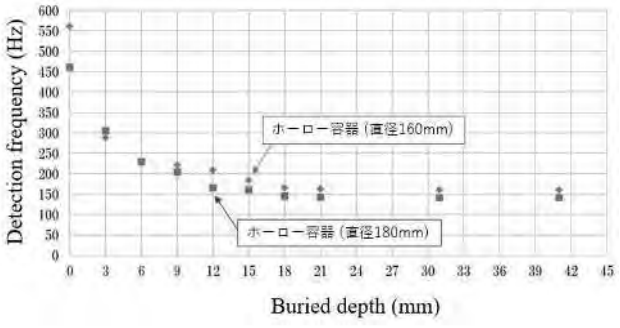
3.4 埋設物の深さと検出周波数の関係（浅い埋設物深さ）

3.2 に比較し、埋設物を浅く（50mm 以下）配置し、埋設物の深さに対して検出周波数がどのように変化するかを確認するための実験を行った。埋設物としては直径 160 mm と 180 mm のホーロー容器を用い、容器底面が上を向くように設置した。これは埋設深さが浅くしていくと、蓋部の振動で砂を吹き飛ばしてしまうのを避けるためである。実験セットアップは前節のものと同じで、埋設物の深さを 3 mm 毎に微調整した。砂表面近くの最大音圧は約 95 dB で音波としては周波数範囲 100～1000 Hz、パルス幅 10 ms のシングルトーンバースト波を使用した。実験結果を図－5 に示す。この図より深さ 0～21 mm までは検



図－4　レーザ入射角を変更時の振動速度分布(152Hz)
(a)60 度, (b)45 度, (c)30 度, (d)20 度

出周波数の減少傾向があること、および、21 mm 以降はほぼ一定になることが確認できる。このことから、砂の荷重がかかることにより、砂の厚さが変化した砂と容器からなるたわみ共振から、砂の荷重の影響を受けない容器自身の共振へと遷移することが明らかになった。



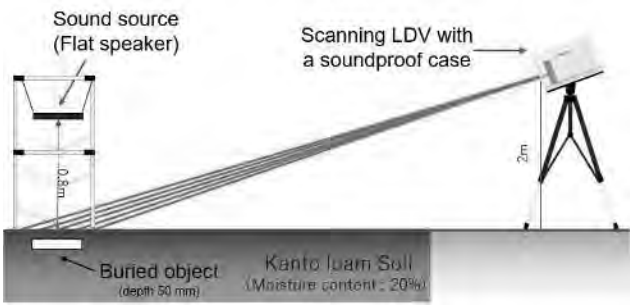
青菱形：直径 160 mm のエナメル容器
赤四角：直径 180 mm のエナメル容器

図－5　埋没深度と検出頻度の関係

4. 関東ローム土を用いた遠距離計測

4.1 実験セットアップ

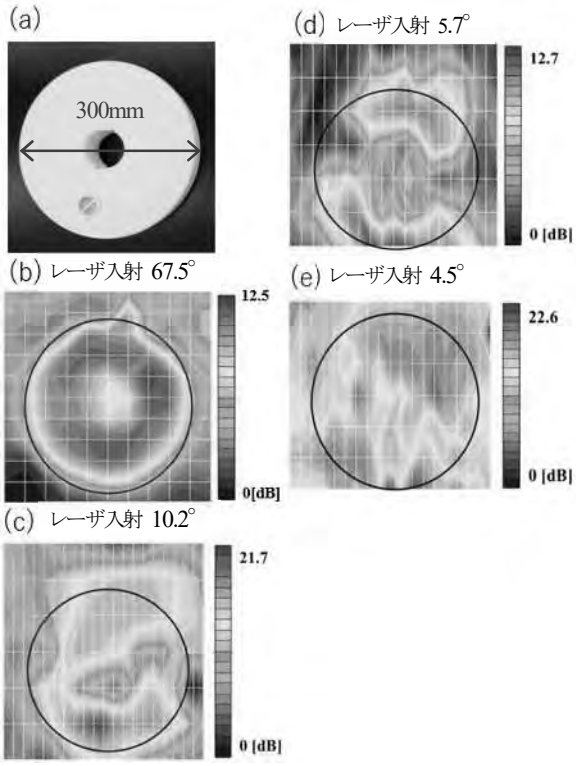
関東ローム土を実際の砂質土として検証実験を行った。実験時の土壌の含水率は約 20%であり、関東ローム土壌では非常に乾燥していた。図－6 に実験のセットアップを示す。使用した機器は前節と同じである。 LDV と埋設物との測定距離は約 1、10、20、30 m であった（各距離でのレーザ入射角は、67.5、10.2、5.7、4.1 度）。 3.4 に比較し、LDV の位置を遠くに配置した。埋設物には、図－7(a)に示す直径 300 mm の中空プラスチックポールベース（PE 製、中心に直径約 60 mm の穴のあるドーナツ型、高さ約 60 mm）を使用した（埋没深度は 50 mm）。加振波形は、LDV からの距離が 1 m の場合のみシングルトーンバースト波を使用し、それ以外の距離ではマルチトーンバースト波を使用して測定時間を短縮した。これらのトーンバースト波のパラメータはほぼ同じで、周波数範囲は 50～200 Hz、変調周波数は 25 Hz、パルス間隔は 200 ms、パルス幅は 20 ms であった。波形全体の時間のみが異なり、シングルトーンバースト波は 1400 ms、マルチトーンバースト波は 200 ms であった。なお、表面付近の音圧は約 90 dB（最大 Z 特性）とした。



図－6　遠距離計測の実験セットアップ

4.2 実験結果

図－7(b)～(e)に、LDV からの測定距離を 1、10、20、30 m に変更した場合の振動エネルギー比の分布を示す。図中の黒線円は、埋設物の大きさと位置を示している。 この図から、距離が長くなるにつれて地表面へのレーザ入射角が小さくなると、探査結果が悪化することがわかる。ただし、ドーナツ状の中央穴の振動は円周部分の振動よりも小さく、任意の距離での埋設物の形状を反映していることが確認できる。 この結果は、土壌の含水率が 20%と非常に低い場合に得られたものであり、含水率約 40%の適度に圧縮された状態では、遠方からでも鮮明な可視化が可能となった。 さらに、レーザの入射角は、レーザヘッドの高さに依存する。今回は高さ約 2 m であったが、大型車に搭載することによりレーザヘッドの位置を上げることができれば、角度も大きくなり、より遠い距離からの測定が可能となる。



(a)埋設物の写真, (b)1 m, (c)10 m, (d)20 m, (e)30 m

図－7　遠距離測定による埋設物周辺の
振動エネルギー比分布(50～200 Hz)

5. まとめ

浅層地中内の埋設物を遠方から非接触で探査する目的で、音響照射加振と LDV を組み合わせた方法の基本的な検証を行った。

最初に珪砂を用いた実験から、ある埋設深さ以上では埋没物の検出周波数は大きさに反比例するが、深さ方向にはあまり変化しないことが明らかになった。これは、発生している物理現象が、曲げ共振現象ではなく、埋設物自体の振動が地表に伝わっているためと考えられた。そこで、埋設物の深さを 50mm 以下の実験を行い、21 mm 以上の深さで検出周波数が一定になることを確認した。また、垂直入射を 90 度とした場合、約 20 度のレーザ光の入射角（2m 高さで距離 4.7m 離れ）でも問題なく埋設物を検出可能であることを確認した。

次に、関東ローム土を用いた実験では、含水率 20%と極めて乾燥した状態であったが、深さ 50 mm に埋め込まれた直径 300 mm の中空円形容器を、約 20m の測定距離でも検出可能であった。ただし、土壌含水量を増やすことで、より明確に検出できる可能性がある。また、LDV ヘッドの位置を高くすることで、より遠距離の埋没物検出が期待できる。

これらの基礎実験結果から、小型音源を搭載した UAV を用いた浅層地中探査が可能であることが明らかになった。そのため、今後は音源搭載型 UAV を用いた実験が実施される予定である。

謝辞

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

参考文献

1) N.Xiang and J.M.Sabatier : An experimental study on antipersonnel landmine detection using acoustic-to-seismic coupling, *J. Acoust. Soc. Am.,* Vol.113, No.3, pp.1333-1341, 2003.
2) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and K.Katakura : Proposal of non-contact inspection method for concrete structures, using high-power directional sound source and

scanning laser Doppler vibrometer, *Jpn.J.Appl. Phys.*, 52, 07HC12, 2013.
3) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto and N. Utagawa : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, *Jpn. J. Appl. Phys.,* 53, 07KC15, 2014.
4) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda, K.Katakura : Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, 2015.
5) 杉本恒美, 杉本和子, 川上明彦, 歌川紀之: 遠距離音波照射加振を用いた非接触探査法の欠陥検出アルゴリズム, コンクリート工学年次論文集,Vol.39, No.1, pp.1849-1854, 2017.
6) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa and C. Kuroda : Detection of resonance frequency of both the internal defects of concrete and the laser head of a laser Doppler vibrometer by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection, *Jpn. J. Appl. Phys.,* 58, SGGB15, 2019.
7) T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Kosuge, N.Utagawa and K.Katakura, "High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave", *Jpn. J. Appl. Phys.,* 56, 07JC10, 2017.
8) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 川上明彦: インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法,-マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証-, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.149-154, 2017.
9) 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 森岡宏之 : 非接触音響探査法による吹付けコンクリートにおける欠陥検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1707- 1712, 2018.
10) 杉本恒美, 杉本和子, 上地樹, 歌川紀之 : 外壁検査のための音源搭載型 UAV を用いた高速非接触音響探査法, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1901-1906, 2019.

鉄、コンクリートの再生・延命に関する研究

STUDY ON REGENERATION AND PROLONG LIFE DURATION OF IRON AND CONCRETE

松岡歩実　関口有佳里　吉武敏雄
MATSUOKA Ami , SEKIGUCHI Yukari and YOSHITAKE Toshio

株式会社染めQテクノロジィ　（〒306-0313　茨城県猿島郡五霞町元栗橋 5971 番地 31）

キーワード：再生、延命、コンクリート、鉄、スレート、錆、補修、補強
（*Regeneration , prolong life duration , Concrete , Iron , slate , Rust , Repair , Reinforcement*）

1. はじめに

建物、道路、トンネル、橋梁、線路、鉄塔、電柱等は、コンクリートや鉄で造られているものが殆どで、それらは長い年月と共に老朽化し、大きな社会問題となっている。2019 年の台風による鉄塔倒壊や堤防決壊が記憶に新しい。コンクリートは収縮することによるひび割れ、鉄は錆が発生することが老朽化の主な原因とされている。現在、これらを改修する最適な工法は確立されておらず、建物を取り壊し、新しく建て替えることが余儀なくされている。しかし、建て替える際にかかる巨額の費用、大量の産業廃棄物による環境汚染等の問題から簡単に建て替えることが難しく、放置せざるを得ない状況にある。

本報告では、強固な塗膜を形成する弊社開発の新規材料による補修が建物の再生、延命の最適な工法の一つとなる可能性について、論述する。

2. 塗膜性能評価 [1)]

日本工業規格（JIS）では品質管理を目的とした塗料・塗膜に関する試験方法が規格化されている。JIS K 5600-1999 塗料一般試験方法では塗膜の視覚特性、機械的性質、化学的性質、長期耐久性などの試験方法が規定されている。代表的な試験方法として表-1 に示す。

開発した材料を付着性、耐衝撃性、耐摩耗性、耐揮発油性、耐液体性試験の 5 種類の試験を行った。なお、試験方法に関しては JIS で規格化されている試験方法に準拠した。試験結果を表-2 に示す。

表- 1 塗膜性能評価

塗膜の視覚特性	塗膜の機械的性質
・隠ぺい力 ・色の目視比較 ・測色 ・鏡面硬度	・耐屈曲性 ・耐カッピング性 ・耐おもり落下性 ・ひっかき硬度 ・付着性 ・耐摩耗性
塗膜の化学的性質	塗膜の長期耐久性
・耐液体性 ・耐加熱性	・耐中性潜水噴霧性 ・耐湿性 ・耐候性 ・屋外暴露耐候性 ・促進耐候性 ・サイクル耐食試験

表-2 塗膜性能試験データ

試験項目	結果	試験内容
付着性	11.3N/mm2	JIS K 5600-5-7 プルオフ法　ブラスト鋼板
耐衝撃性	異常なし	JIS K 5600-5-3 1kg鋼球 高さ1m 10回以上
耐摩耗性	21mg	JIS K 7204 摩耗輪CS-17、1kg荷重、1000回転
耐揮発油性	異常なし	JIS K 5600-6-1 試験用揮発油 1号及び2号にそれぞれ 24 時間浸漬
耐液体性 酸性 アルカリ性	異常なし	JIS K 5600-6-1 5%硝酸溶液 480時間浸漬 5%水酸化ナトリウム溶液 480時間浸漬

3. コンクリートにおける補修剤としての可能性 [2)]

強化コンクリートで打設された高層ビルは老朽化によりひび割れが生じる。こうしたひび割れに対して補修をする際、モルタルやエポキシ樹脂が選択されるが、問題が生じる。これらの補修剤は圧縮力には強い一方、引っ張る力、曲げる力には弱い性質がある。補修した際、すでにあるコ

ンクリートの収縮によって引っ張られてすぐに割れてしまう。そのため、コンクリートの補修には一定の圧縮強度、追従性が求められる。開発した新規材料がコンクリートの補修剤として有用であるか確かめるため、実際の建築物で発生している応力状態をよりよく再現できる「圧縮軸ひずみ追従試験」「除載荷軸ひずみ追従試験」を用いて評価した。

3.1 圧縮軸ひずみ追従試験

圧縮軸ひずみ追従性試験は、圧縮時のコンクリート躯体の変形に対する補修剤の追従性から接着一体性を判定し、相対ひずみによる剥離のしやすさを評価するための試験方法である。試験体と試験概要を図-1 に示す。

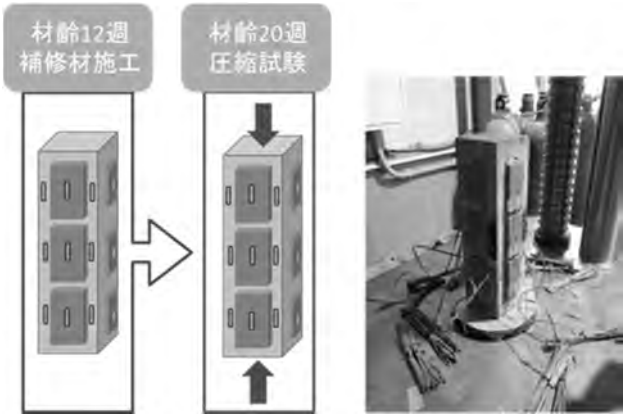


図-1 圧縮軸ひずみ追従性試験概略

当社開発の新規材料を M1、市販品の補修剤を M2 とした。また、補修剤の施工時期は母材コンクリートの収縮が進展する材齢 12 週とし、載荷試験は母材コンクリートの材齢 20 週前後で実施した。 載荷試験の結果より、コンクリートひずみと補修剤ひずみとのひずみ追従性能を評価する。ひずみ追従性評価は、コンクリートのひずみに補修剤ひずみが追従できなくなった点を破壊ひずみとして評価することとした。なお、母材強度 80N/mm^2 のコンクリートは圧縮破壊するまで、120N/mm^2 のコンクリートに対してはコンクリートにひずみを十分に導入できる 95N/mm^2 まで、それぞれ加圧した。各試験水準の 6 か所に施工したそれぞれの補修剤の圧縮軸ひずみ追従性試験の 80MPa の結果を図-2 に示す。なお、コンクリートひずみは各補修剤の補修剤施工面のコンクリートひずみとした。また、補修剤ひずみが追従しなくなった点(破壊点)より破壊ひずみを、コンクリートと補修剤のひずみの測定値よりひずみ伝達率を算出し、整理した結果を表-3 に示す。

M1 において、母材コンクリートと補修剤ひずみが 1:1 に近い挙動（ひずみ伝達率が 1 に近い）を示し、かつ補修剤ひずみが急激に進展する傾向が比較的少なかった。M2 ではひずみ伝達率が高い傾向にあるが、母材コンクリートに-1000μ 前後のひずみを与えた際に補修剤ひずみが追従できなくなる破壊ひずみが顕著に確認された。M1 で母材コンクリートに-2500μ 程度のひずみが与えられても、はっきりとした破壊ひずみは見られず、ひずみ追従性を維持していることが確認できた。80MPa と 120MPa の試験結果を比較した場合、ひずみ伝達率などのひずみ追従性に関しては大きな差異は見られなかった。

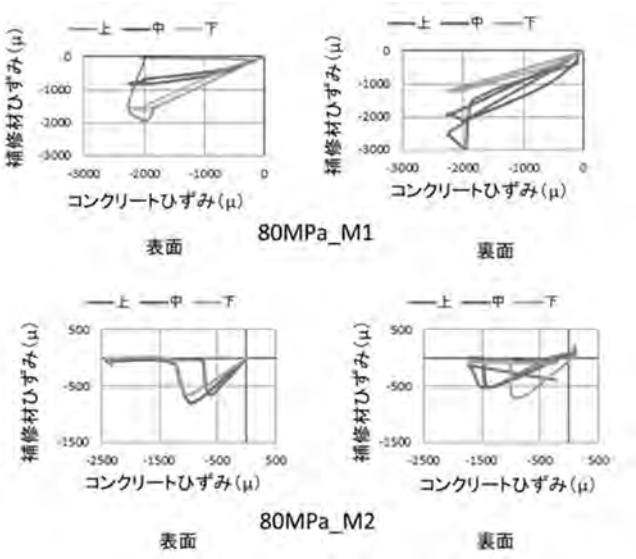


図-2 圧縮軸ひずみ追従試験結果

3.2 除載荷軸ひずみ追従試験

除載荷軸ひずみ追従試験は、除載荷時のコンクリート躯体の変形に対する補修剤の追従性から接着一体性を判定し、相対ひずみによる剥離のしやすさを評価するための試験方法である。試験概要を図-3 に試験体の概要を図-4 にそれぞれ示す。補修剤の施工箇所については圧縮軸ひずみ追従試験と同じである。

表-3 ひずみ伝達率と破壊ひずみ（圧縮軸破壊ひずみ追従試験）

試験水準		ひずみ伝達率(－)						破壊ひずみ(μ)					
		表面			裏面			表面			裏面		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
M1	80MPa	0.8	0.84	0.84	1.12	0.92	0.58	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず
	120MPa	0.75	0.79	0.79	0.71	0.96	0.65	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず
M2	80Mpa	1.18	0.92	0.72	0.18	0.34	0.94	-634.1	-963	-1023.1	-1457.2	-1391.4	-888.5
	120MPa	1.18	1.02	0.82	0.37	0.66	0.87	-838.5	-1008.2	-1264.4	-1376.9	-1128.8	-1271.2

母材コンクリートと補修剤の硬化及び乾燥収縮を考慮し、材齢 8 週目に母材コンクリートに圧縮力を導入し、材齢 12 週目に補修剤を施工し、材齢 20 週に圧縮力を除荷することで引張荷重を与え、母材と補修剤表面のひずみを測定する。

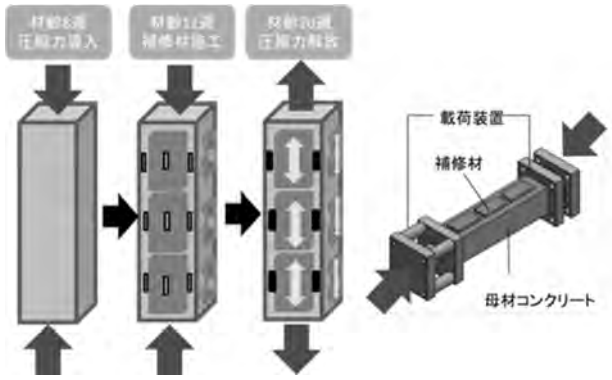


図-3　除載荷軸ひずみ追従性試験

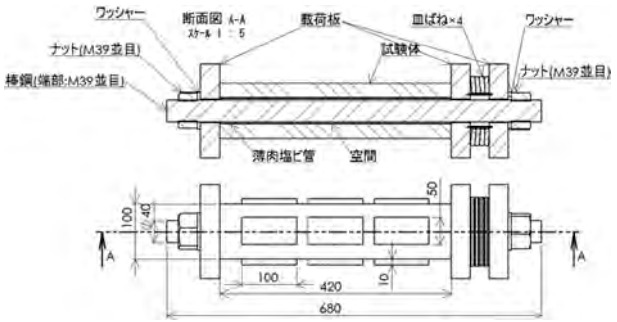


図-4 除載荷軸ひずみ追従性試験・試験体概要図

初期に母材コンクリートに導入するひずみは 500μ とした。これは、軸力を受ける柱様 RC 構造物の躯体表面における層間変形角 1/100 rad 程度の変形に相対するひずみ値であり、建築基準法において定められている層間変形角を 1/200 rad 以内とするという規定と比べて大きく、タイル・補修剤の剥離・剥落を想定した部材に生ずる変形としては十分と考えられる。また繰り返し載荷を実施し、接着性能の低下についても試験した。繰り返し載荷重は 500μ 以上の十分にひずみが導入できる 57.2N/mm^2 に設定し、繰り返し回数は 10 回とした。

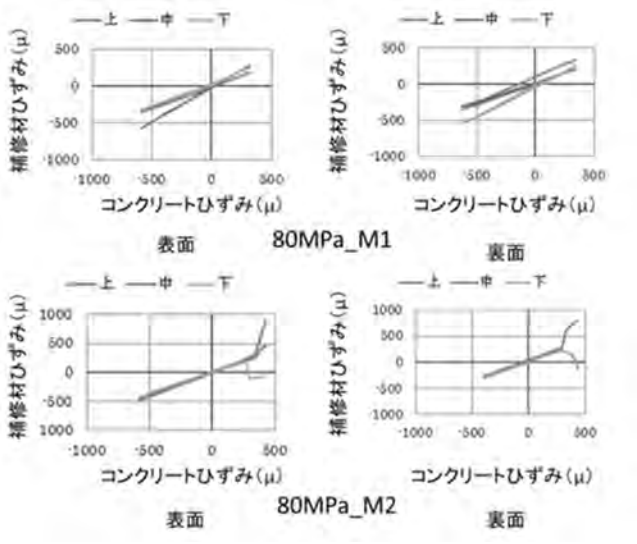


図-5 除載荷軸ひずみ追従性試験結果

各試験水準において、6 か所に施工したそれぞれの補修剤の除載荷軸ひずみ追従性試験の結果を図-5 に示す。なお、コンクリートひずみは各補修剤の補修剤施工面のコンクリートひずみとした。また、補修剤ひずみが追従しなくなった点(破壊点)より破壊ひずみを、コンクリートと補修剤のひずみの測定値よりひずみ伝達率を算出し、整理した結果を表-4 に示す。なお、母材コンクリートひずみが 500μ まで到達しなかったため、εc＝200μ とし、ひずみ伝達率を算出した。

圧縮軸ひずみ追従性試験と同様に、M1 は母材コンクリートと補修剤のひずみが 1:1 に近い挙動（ひずみ伝達率が 1 に近い）を示し、M2 は、圧縮軸ひずみ試験同様に全ての試験体で破壊ひずみが確認され、M1 の補修剤と比較し、ひずみ追従性が低いといえる。圧縮軸ひずみ追従性同様、80MPa と 120MPa の試験結果を比較した場合、ひずみ伝達率などのひずみ追従性に関しては大きな差異は見られなかった。

3.3　除載荷軸ひずみ追従性試験（繰り返し載荷）

除載荷軸ひずみ追従性試験を実施した後、10 回の載荷・除載荷の繰り返し試験を実施した 80MPa の結果を図-6 に示す。また、10 回目の除載荷時のひずみ伝達率の結果を表-5 に示す。なお、除載荷軸ひずみ追従性試験で破壊に至ったものに関しては「破壊」と表記した。

表-4　ひずみ伝達率と破壊ひずみ（除載荷軸ひずみ追従試験）

試験水準		ひずみ伝達率(－)						破壊ひずみ(μ)					
		表面			裏面			表面			裏面		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
M1	80MPa	0.54	0.84	0.85	1.23	0.65	0.64	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず
	120MPa	0.33	0.69	1.05	1.77	0.6	0.23	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず	破壊せず
M2	80Mpa	0.87	0.74	0.97	1.02	0.85	0.79	338.0	338.0	268.3	295.2	295.2	325.0
	120MPa	0.9	0.68	0.53	0.94	0.88	0.75	250.0	306.7	223.6	388.5	235.1	321.2

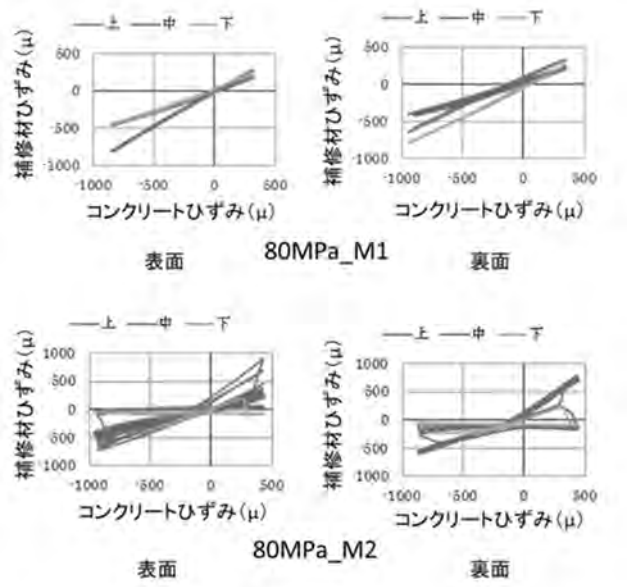


図-6 載荷・除載荷繰り返し試験結果

表-5 ひずみ伝達率（載荷・除載荷繰り返し試験）

試験水準		ひずみ伝達率(ー)					
		表面			裏面		
		上	中	下	上	中	下
M1	80MPa	0.63	0.92	0.85	1.15	0.81	0.67
	120MPa	0.29	0.56	0.92	1.51	0.42	0.25
M2	80Mpa	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊
	120MPa	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊

M1 は、繰り返し載荷・除載荷による線形の値のばらつきは少なく収束する結果となったが、全体的に 10 回目の除載荷では 1 回目の除載荷よりもひずみ伝達率が小さくなる傾向が観察された。M1 における伝達率の低下は小さく、繰り返しサイクル後も追従性を維持していた。

4. 鉄に対する補修剤としての可能性 [3)]

折板屋根は鋼板、ガルバリウム鋼板でできており、加工のしやすさや価格の安さなどから駅、工場、倉庫など様々な場所で使用されている。紫外線や雨水などの外的要因を受けやすく、腐食による穴あきや折板屋根全域に広がる錆の発生が問題になっている。また、このため、補修剤として活用できる条件としては腐食による穴をふさぐことができること、錆の上からでも塗装が出来ること、躯体の劣化に対し十分な強度をもたすことが出来ることなどがあげられる。折板屋根の補修剤として有用であるか確かめるため、曲げ耐力試験を行った。また、複合サイクル試験による腐食性の評価を行った。

4.1 曲げ耐力試験

屋根はアンテナやソーラーパネルの取り付けで人が上がる際踏み割れない強度が求められている。この強度示す基準が JIS 規格の曲げ破壊強度である。曲げ耐力試験とは製品に曲げ破壊が生じる条件で直接載荷する試験方法である。測定項目としてひび割れ幅、変位、曲率などを選ぶことができる。

テストベッドに鋼製柱及び桁を用いて組み立てた試験装置を使用した 4 点曲げ耐力試験を行った。

試験体は腐食が見られる折板屋根を用いた。塗装する際のケレン仕様による曲げ耐力の比較を行う。試験に用いた塗装要領を表-6 に示す。腐食孔のある塗板についてはファイバーガラスクロスを使用したのち、他の塗板と同様の塗装を行った。試験方法は JIS A 6514 に準拠した。試験体は折板屋根（鋼板製）及び構成部品（タイトフレーム、ボルト、ナット、固定金具）を用いてテストベッドに組み立てた。試験体は 5 体とし、前面には幅 50 mm、厚さ 1.6 mm の断面変形防止鋼材を 620 mm 間隔に計 6 枚取り付けた。支点は山留工で使用する主材 H- 30×3000 を 3,150 mm 間隔で平行に 2 段に重ね、その上方に溝形鋼 200×80 ボルト接合し、さらにタイトフレームを溶接接合したものとした。タイトフレームと試験体はボルト接合により固定した。加力装置は主桁（H 形鋼 200×200）及び副桁（溝形鋼 200×80）を介して 100kN 油圧ジャッキを用いて加力する装置とし、加力方法は 3 等分 2 点荷重とした。載荷点間隔は、支点間距離を 3 等分して 1000 mm とした。試験体の耐力による区分を 3 種とした。中央最大曲げモーメント Mmax が生じる荷重は P=4962N とし、1 サイクル目では P に達した時点でいったん除荷し、2 サイクル目で最大荷重 Pmax を確認するまで載荷した。さらに耐力の低下が認められ、中央の鉛直変位が D2=40mm に達するまで載荷したのち終了した。試験状況を図-7 に示す。最大荷重 Pmax における試験体中央の鉛変位を表-7 に荷重 P-鉛直変位関係を図-8 に示す。

表-6 曲げ耐力試験塗装要領

	板金材	ケレン	塗装	備考
試験体①	無腐食	ケレンなし	なし	基準試験体
試験体②	無腐食	塩ビ塗膜全面除去	あり	
試験体③	無腐食	塩ビ塗膜谷部のみ残置、その他除去	あり	
試験体④	腐食孔	塩ビ塗膜全面除去	あり	谷φ20程度
試験体⑤	腐食孔	塩ビ塗膜谷部のみ残置、その他除去	あり	谷φ20程度

表-7 最大荷重 Pmax における試験体中央の鉛直変位

試験体No.	最大荷重 Pmax (N)	試験体中央の鉛直変位(mm)		
		D1	D2	D3
試験体①	5345	19.27	22.94	20.52
試験体②	6301	14	15.73	13.39
試験体③	5712	13.4	15.5	16.4
試験体④	6546	16.57	17.28	15.1
試験体⑤	6448	16.08	16.54	14.53

図-7 曲げ耐力試験全景

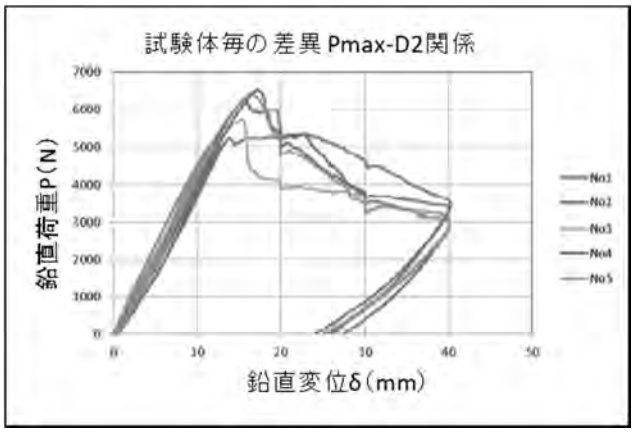


図-8 最大荷重 Pmax までの荷重―鉛直変位 D2 関係

最大荷重 Pmax は試験体②～試験体⑤の方が試験体①を上回った。試験体中央の鉛直変位 D2 は試験体①が最も大きく D2=22.94mm であった。鉛直変位は試験体②～試験体⑤の方が試験体①より小さい値を示した。

4.2 複合サイクル試験

複合サイクル試験は塗料や塗膜、めっき、金属材料の腐食状態を装置内で塩水噴霧、乾燥、湿潤のサイクルを繰り返すことで腐食の促進性を高めることができ、対象材料の腐食性を短時間で評価可能な試験である。塩水噴霧試験と比べ、サイクルの組合せにより実環境下に近い腐食性の評価が可能で、近年では自動車業界を中心に製品、材料の寿命推定にも用いられている。

試験塗板は腐食がみられる塗装板金屋根材 375 mm×375 mm × 120 mm を用い、曲げ耐力試験と同様に、塗装する際のケレン仕様による腐食評価の比較を行う。塗装要領を表-8 に示す。また、塗板の一部にクロスカットを鋼材素地に達するように施した。JASO M609、610 に規定されているサイクル［噴霧 35°C-2h（50±5g /L NaCl 水溶液 pH 6.5～7.2 ）→乾燥 60°C-25%RH-4h →湿潤 50°C-99%RH-2h］を 1 サイクルとし、135 サイクル後の評価を行った。結果を図 9 に示す。

表-8 複合サイクル試験塗装要領

	ケレン	塗装
試験体①	塩ビ塗膜全面除去	あり
試験体②	塩ビ塗膜谷部のみ残置、その他除去	あり
試験体③	塩ビ塗膜谷部のみ残置、その他除去	なし

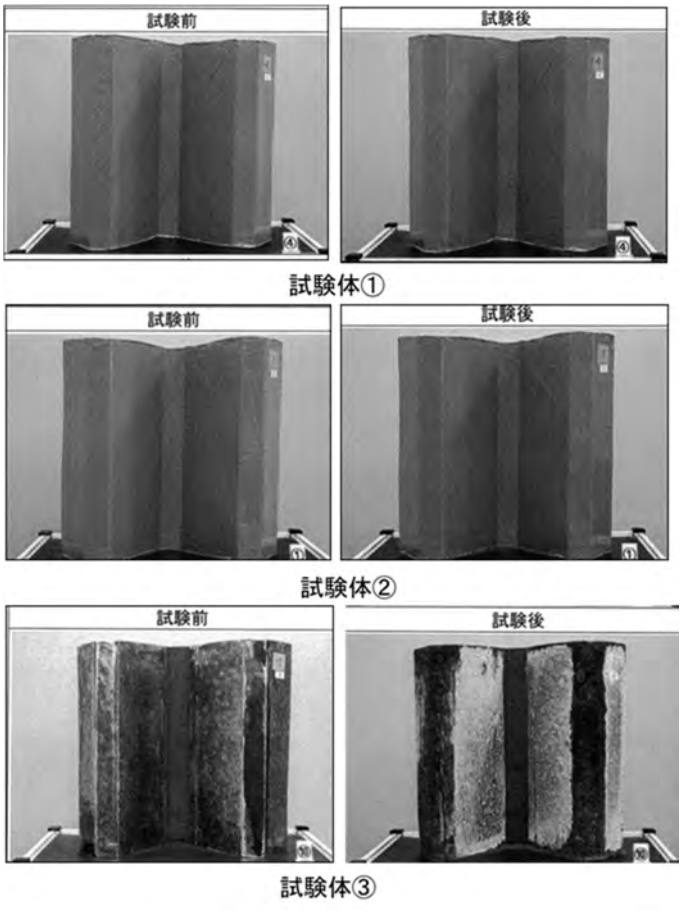


図-9 複合サイクル試験結果

試験体①は 135 サイクル後、特に目立った腐食は認められなかった。試験体②はクロスカットラインに白錆が認められたものの、腐食の進行は認められなかった。試験体③は山の部分は赤錆が、斜めの部分には白錆が認められた。

5, スレートにおける補修剤としての可能性 [4)]

スレートはセメントと繊維素材から出来ており、折板屋根と同様に加工のしやすさ、価格の安さ、耐震性が高いこと、不燃性から多くの施設の屋根で使用されている。高度経済成長期に建てられたスレート屋根は経年劣化により補修を必要としている。補修方法として葺き替え工法やカバー工法があげられるが、産業廃棄物の処理による巨額の費用や、躯体の著しい劣化により補修が行えない問題が発生している。特に、高度経済成長期に建てられたスレート屋根はアスベストを含んでいる物が多く、環境汚染等から産業廃棄による問題も発生している。そのため、塗装による補修を行うことができれば、躯体の状態に左右されず、

アスベストを封じ込めることで環境にも配慮を行うことが可能である。スレートの補修剤として有用かどうか確かめるため、一般強度試験（曲げ試験）を行った。

各試験体は幅を全幅の 1/2 とし、未塗装を試験体①、塗装を施したものを試験体②とした。一般強度試験は JIS A 5430 曲げ試験に準拠した。結果を表-9 に示す。

表-9 スレート小波の曲げ試験結果

	曲げ破壊荷重（N）
試験体①	758
試験体②	1802

曲げ破壊荷重（N）は試験体②の方が試験体①を上回っており、塗装を施すことで試験体の曲げ破壊荷重の向上が窺える。

6. まとめ

本報告では、当社で開発した新規材料がコンクリート、スレート、鋼板に対して補修剤の役割を果たすのか確認することを目的として、圧縮ひずみ追従試験、除載荷軸ひずみ追従性試験、繰り返し載荷試験、一般強度試験、曲げ耐力試験、複合サイクル試験を行った。本試験で得られた知見を以下に示す。

(1) 当社開発の新規材料の変形追従性は従来品と比較して極めて高いことが確認された。このことから、補修剤施工後の外力変形に起因する再劣化を抑制することで、コンクリートにおける補修剤として有用である可能性が示唆された。

(2) 腐食のある鉄に対し塗装仕様を施すことにより試験体の曲げ耐力、曲げ剛性の向上、錆の進行を抑制する効果が認められた。このことから、劣化した鉄に対し当社開発の新規材料は補修剤として有用である可能性が示唆された。また、ケレン仕様による腐食評価に大きな差がなかったことから、大規模なケレンを行うことなく塗装ができるため、補修の際、作業性の効率化が考えられる。

(3) 塗装を行うことで、スレートへの曲げ破壊荷重が未塗装より 2 倍以上の高い値を示し一般強度の向上が窺えた。このことから、劣化したスレートに対し当社開発の新規材料は補修剤として有用である可能性が示唆された。

本試験結果において、当社で開発した新規材料を用いて塗装を行うことにより、劣化した躯体に対して一定以上の強度、追従性、防錆力を持たせることが出来ることを示した。そのため、劣化した躯体を改修する工法の一つとなることが考えられる。

我々は塗装をすることで劣化した躯体を再生、延命出来るこの新しい技術を「塗着補強」と定めることとする。

7. 謝辞

コンクリートにおける研究についてご協力、ご指導をいただいた東京理科大学理工学部 兼松学教授、ならびに、鉄・スレートにおける研究についてご協力、ご指導をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

8. 参考文献

1）Tiri News 2009 vol. 041 5
2）補修剤ひずみ追従性試験報告書　東京理科大 兼松学 2019 年 3 月
3）2018 年度研究開発折板屋根の雨漏れ防止塗装板金屋根耐力試験報告書　2019 年 3 月
4）スレート小波一般強度試験成績書 2019 年 3 月

ポリウレアによる防爆緩和試験と耐震構造

Blast MitigationEarthquake-resistant structure by Polyurea

緒方修一
SHUICHI OGATA
一般社団法人ポリウレア普及協会会長（〒162-0802 東京都新宿区改代町２６－１三田村ビル２階）
Polyurea Promotion Association（PPA）Chairman SHUICHI OGATA

キーワード：ポリウレア,防爆,アラミド繊維,ケブラー,耐震,コンクリート強度向上
（Polyurea, Blast Mitigation, Aramid fiber, Kevlar, Earthquake-resistant, concrete strength improvement）

1. はじめに

2005 年２月,Rhino Linings USA は,耐爆弾道性の強化データに基づく防爆試験（UL テスト 6）を New Mexico Tech 社に委託し実施した。商業施設や政府機関など構造物の爆破テロ対策として,莫大なコストを投じているという課題を Rhino Linings 社が受け,インフラや設備の爆破による構造物の弱点緩和をテーマとし,ポリウレアによる低コストで高パフォーマンスな防爆試験を実施したという背景がある。

このポリウレアの活用は,日本では爆破テロ対策というよりも南海トラフ地震などの災害対策の為にコンクリート構造物や木造住宅の耐震性を高める材料として需要が見込まれ,これまでにライノジャパン株式会社が Rhino Linings 社のピュアポリウレアであるエクストリームを提供し東京理科大学の高橋治研究室、関東学院大学の渡辺研究室とともに共同研究を行いポリウレアとアラミド繊維を融合し耐震試験を行った。

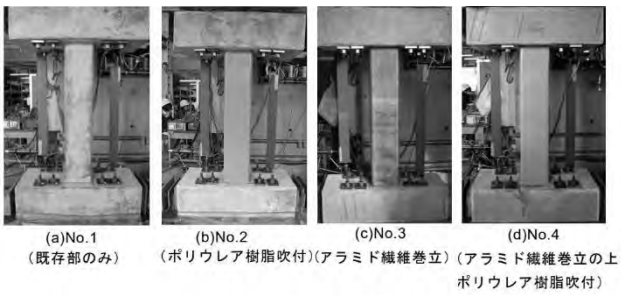
以下に,関東学院大学によるコンクリート構造物の耐震試験,東京理科大学によるブロック塀構造物の耐震試験,米国ライノライニングス社による防爆試験の内容を紹介したい。

２. 関東学院大学による剥落防止 RC 造柱実験の概要

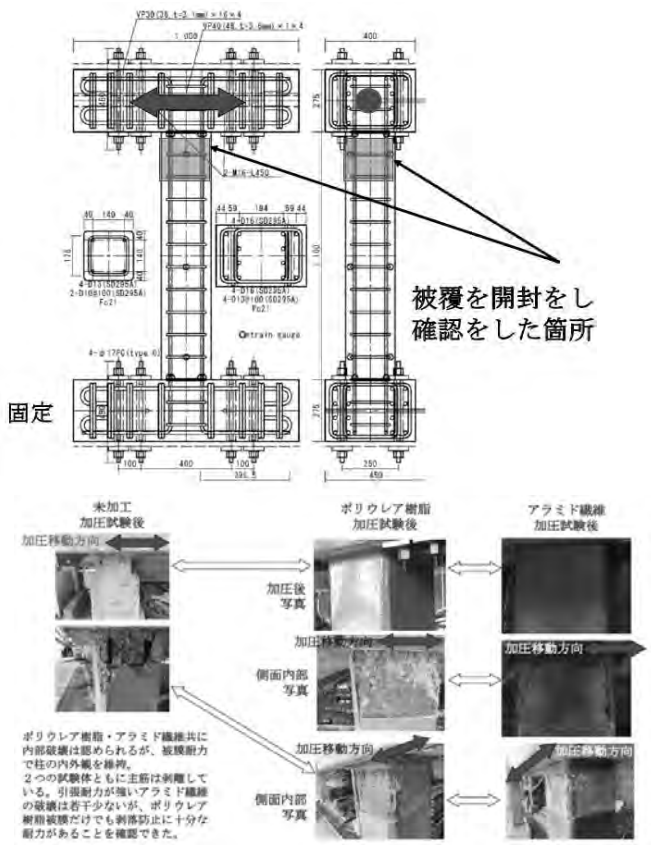
鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）造建築物の地震時の居室内等の安全を確保するため,RC 造柱のコンクリート剥落防止を目的として，ポリウレア樹脂吹き付け及び連続繊維シート巻き立てによる補強が施された RC 造柱，総数４体について，地震による水平荷重を想定した実験を，関東学院大学金沢八景キャンパス内構造実験室において 2018 年 10 月～12 月に行った。

図 1 に実験で用いた試験体外観, 図２に既存部配筋詳細を示す。試験体は，実物大の 11/30 スケール程度を想定した RC 造柱梁からなる総数 4 体(No. 1～4) である。RC 造による既存部は共通しており,No. 1 は既存部のみ, No. 2～4 は既存部と補強部からなり，補強方法を変数とした。ここで，補強要素を連続させる観点から，実際の補強対象として，柱補強の範囲を柱梁接合部を含む範囲とされることもあるが，ここでは梁上から梁下の範囲を補強対象とした。

No. 1 は RC 造による既存柱,
No. 2 はポリウレア樹脂吹き付け補強 RC 造柱,
No. 3 はアラミド繊維 2 層巻き立て補強 RC 造柱,
No. 4 はアラミド繊維 2 層巻き立ての上ポリウレア樹脂吹き付け補強 RC 造柱とした。



図－1　試験体外観



図－２　既存部配筋詳細（No. 1～4）

結果として,ポリウレアとアラミド繊維による RC 造柱のコンクリート補強は予想を超える強度を示した。

３. 東京理科大学によるブロック塀の組積造壁崩落防止

大阪府北部地震によってブロック塀が崩落し女児が下敷きになり,その後このブロック塀は違法で危険な塀であったと発覚した。東京理科大学高橋研究室では,既存の組積造の建築物に対して崩落を防止する補強方法を探求するため,既存コンクリートブロック塀と組積造壁の崩落防止としてポリウレア塗装とアラミド新素材を用いた補強に関する研究を 2019 年 12 月と 2020 年 9 月に行った。

図 3 に実験で用いた試験体概要を示す。図 4 に試験体外観と試験状況を示す。

【試験体概要】

390×190×100 のブロックを水平方向に 2 つ,鉛直方向に 6 個積み上げで作成する。

コンクリートブロック塀にアラミドシート,ポリウレア,アラミド繊維ポリウレアシート,鋼棒を用いた 6 個の試験体を作成する。

CB-1 は鋼棒補強なしでポリウレアを塗る。

CB-2 は鋼棒補強なしでアラミドを付け,ポリウレアを塗る。

CB-3 は鋼棒補強なしでアラミド繊維ポリウレアシートを用いる。

CB-4 は鋼棒 1000mm を用いて中腹に補強し,アラミドを付け,ポリウレアを塗る。

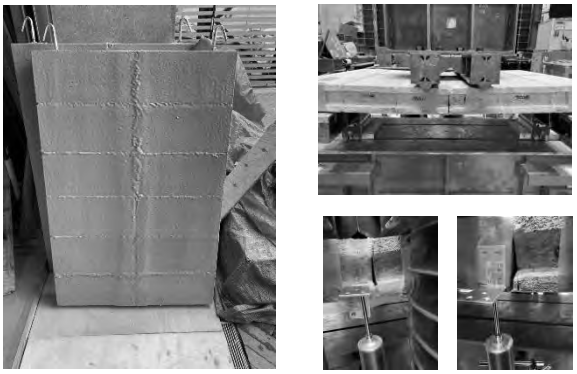
CB-５は鋼棒 1000mm を用いて中腹に補強し,ポリウレアを塗る。

CB-6 は鋼棒 1000mm を用いて中腹に補強し,アラミド繊維ポリウレアシートを用いる。

各試験体のパラメータは以下である。

試験体	鋼棒補強(800mm)	ポリウレア	アラミド	アラミード繊維ポリウレアシート
試験体1		○		
試験体2		○	○	
試験体3				○
試験体4	○	○	○	
試験体5	○	○		
試験体6	○			○

図－３　試験体概要



図－４　試験体外観と試験状況

図５に示すように,2000ｋN アムスラー試験機により 2 点載荷を行う。変位計を試験体の真ん中のところに付け,試験体中央部のたわみを計測する。

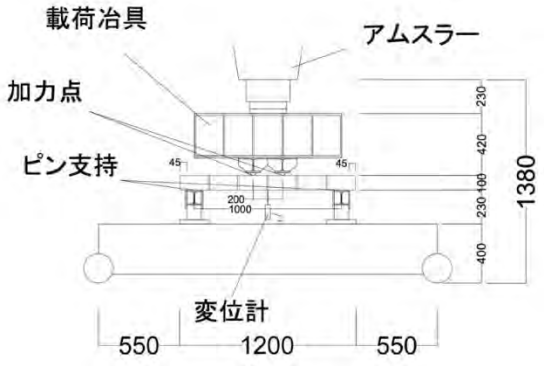


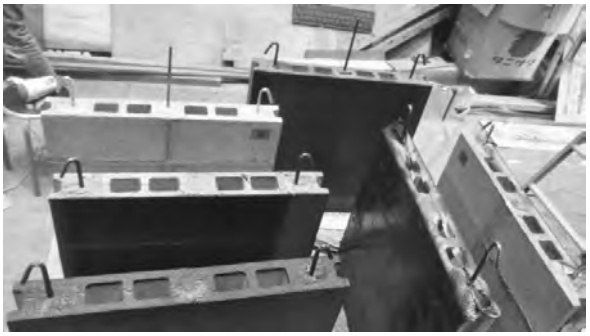
図-５　加圧方法

アラミド繊維とポリウレアと鉄筋の補強がある試験体は最大荷重が最も大きいと分かった。表１による最大荷重は 43.688KN である。

表－１　試験体外観と試験状況

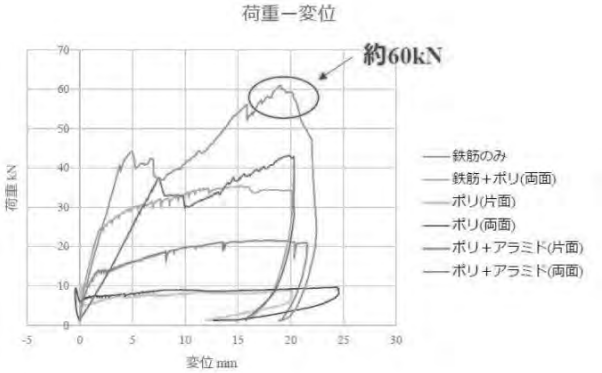
	最大荷重	最大荷重に対する変位	最大変位	最大変位に対する荷重
試験体1	5.364	20.305	20.385	3.988
試験体2	38.312	40.26	40.335	35.956
試験体3	4.848	9.18	17.9	-0.016
試験体4	43.688	34.82	35.36	40.356
試験体5	17.6	18.385	39.815	11.052
試験体6	11.128	13.115	39.83	7.32

コンクリートブロック塀と組積造壁の崩落防止の試験体の写真を図６に示す。



図－６　コンクリートブロック塀試験体

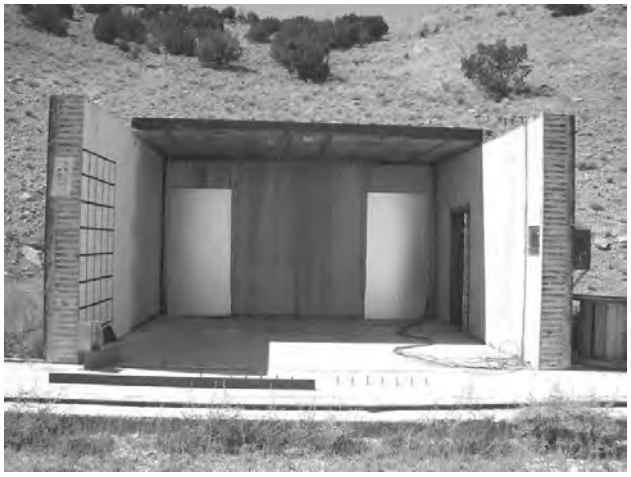
コンクリートブロック塀と組積造壁の崩落防止の試験結果を図７に示す。鉄筋のみの荷重は約 20kN であるのに対しポリウレアとアラミド織り込みの荷重は約 60kN と鉄筋の３倍の数値を示し,ポリウレアとアラミド織り込みの試験体が最も良い結果となった。



図－７　コンクリートブロック塀崩落防止試験結果

4. Rhino Linings による爆試験

組積造壁テストプログラムの一部としてのすべてのテストは,北部で実施した。この構造は,比較テストのために特別に設計された。構造が異なる石積み,スチールスタッドなど多層の重力荷重ベアリングと充填物が異なる構造の壁である。試験体製作過程の写真を図 8 に示す。



図－８ 防爆試験体製作過程写真

完成した試験体構造を図 9 に示す。2 つの同一の 8 インチ厚石積みの壁は,幅 8 フィート×高さ 11 フィートの構造。

図－９ 防爆試験体写真

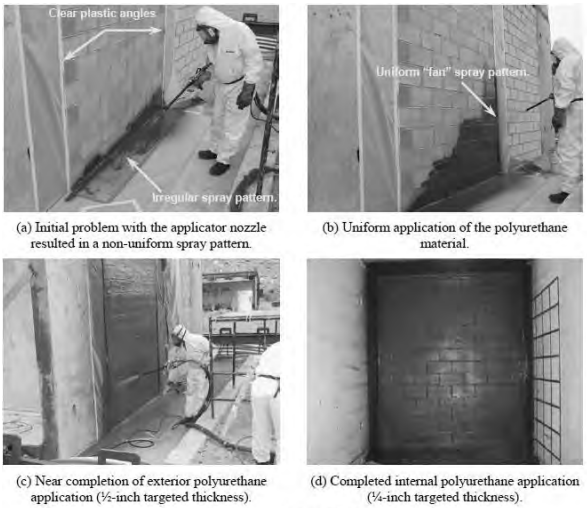
4-1 爆発緩和試験体および使用材料の説明

防爆壁システムは Rhino Linings によって設計および設置され,テスト工程は 2005 年 1 月 26 日の 1 日で合計 2 回実施。改造の設計と実装は Rhino Linings によって提出された。ライニングは,1/2 インチ（1.27 センチ）の厚さの「Tuff Stuff」Rhino Linings 製ポリウレアである。プライマー塗布とポリウレア吹付作業を図 10 に示す。

名称	材料の説明	方法
BEHR® Concrete Bonding Primer #880	透明な水性エポキシの接着プライマーでセメント	インテリアに適用され,外部は CMU 壁面
Tuff Stuff® タフスタッフ Rhino Linings	2 成分,100％固体（VOC,溶媒なし）のエラストマー	CMU 壁面の外装および内装に½インチ,¼インチ厚層で適用

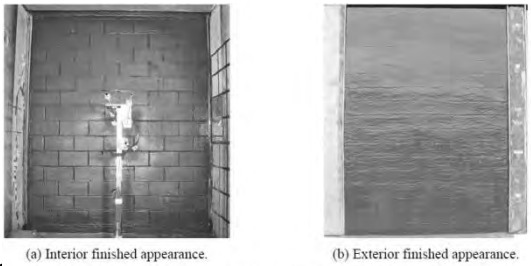
(a) Application of Concrete Bonding Primer to the exterior wall surface.
(b) Removal of residual mortar on the interior concrete floor surface.
(c) Application of Concrete Bonding Primer to the
(d) Masking of adjacent walls & surfaces to protect

Tuff Stuff 塗布（ポリウレア）作業



(a) Initial problem with the applicator nozzle resulted in a non-uniform spray pattern.
(b) Uniform application of the polyurethane material.
(c) Near completion of exterior polyurethane application (½-inch targeted thickness).
(d) Completed internal polyurethane application (¼-inch targeted thickness).

Figure 2-6. Application of Rhino Linings Tuff Stuff® polyurethane liner.



(a) Interior finished appearance.
(b) Exterior finished appearance.

Figure 2-7. Completed retrofit appearance Test 6.

4-2

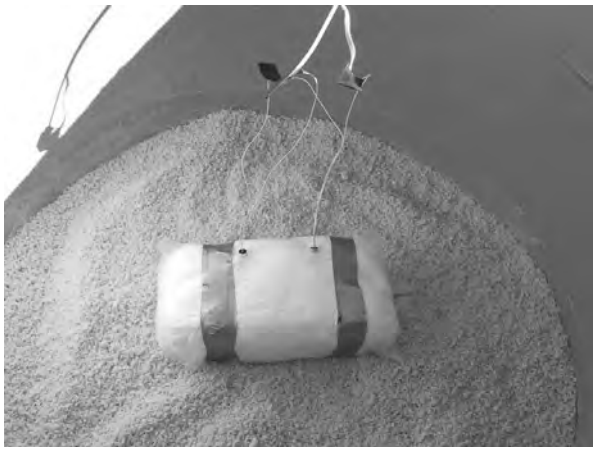
図－10 プライマー塗布とポリウレア吹付作業

テスト6のための爆発規模は,東側壁,西側壁ともに220ポンド（100kg）のTNTであった。TNT爆弾の設置を図11に示す。壁とTNTの距離は33フィート（10m)。このテストプログラムである 33 フィートで 220 ポンドのTNT による爆破テストは多くの軍隊のデザインマニュアルと一致している。また,この規定は典型的なテロリスト自動車爆弾のサイズであるので,その結果としてこの距離とTNT爆弾の規格が選ばれた。

(a) Placement of flake TNT explosive。

(b) Five-pound C-4 booster charge atop flake TNT。

Figure 2-9。 Test 6 explosive charge。



図－11 TNT爆弾の設置

4-3 爆発緩和試験アクティブセンサーの説明

テスト6では,計11チャネルのアクティブな計装機器が使用された。反射圧力センサーは,センサーの間に固定された長方形の鋼柱に設置。3つの入射圧力センサーが北,西,東に配置。中心からチャージセンサーまでの距離は水平距離で33フィート。3フィートの高さ（チャージセンターの高さに等しい)。2つの変位計は改修された壁の中央にある反応構造の内側に設置した。最後に改装された壁のすぐ後ろの部屋に入射圧力計を設置。内部の環境を定量化するために床の中心に設置された。アクティブセンサーの説明を図12に示す。

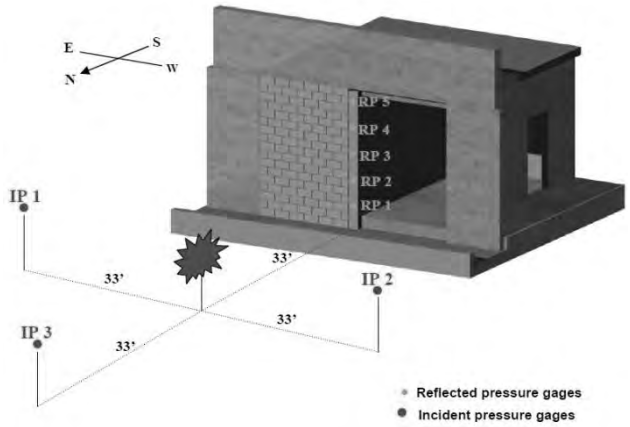
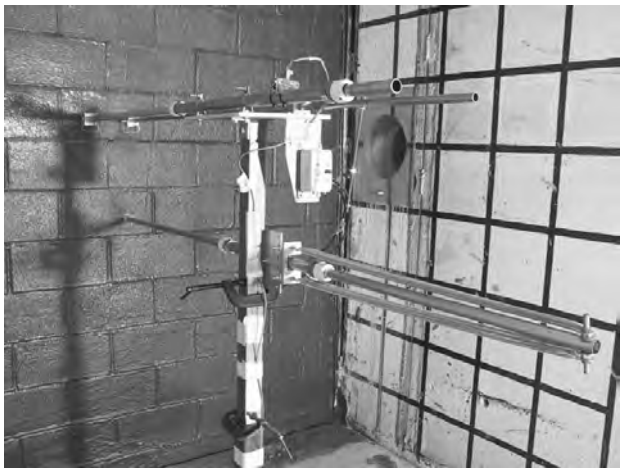


Figure 3-1. External sensor positions (only one test wall shown for clarity).

(a) Displacement gages (behind retrofitted wall)



(b) Internal pressure sensor。

図－12 アクティブセンサーの説明

4-4 爆発緩和試験高速デジタルカメラの設置

テスト6のために合計4つの高速なデジタルカメラを設置し,2つのカメラで全体のテストベッドが記録され,3つ目のカメラが内部の状況を記録した。

最後のカメラはポリウレア塗布のテスト壁のすぐ後ろに置かれた

図13は高速な外部の全体の反応を記録した写真である。

(a) Test bed camera, view 1。

(b) Test bed camera, view 2。

Figure 3-3。 External high-speed cameras, Test 6。

図－13 TNT 爆弾爆発写真

4-5 爆発緩和試験結果

テスト 6 は 2005 年 2 月 2 日 12 時 30 分に実施。図 14 は,事前テストと事後テストを示す。ポリウレア塗布の改装された壁（左）と無制御壁（右）の写真。ポリウレア塗布の改装された壁の破壊はなかった。破片が構造体に侵入するのを阻止している。塗布されたポリウレアの外面には目に見える損傷は確認できなかったが,壁が内外に曲がっていた。構造体の壁自体の内部部分（CMU）の壁には外側に残留たわみが見られた。

無制御壁（右）は完全に崩壊し,明らかに室内の居住者を保護することはできない。爆発により直径約 120 インチのクレーターが生成され,図 4-1 および 4-2 に示すように,最大深さ 26 インチのクレーターが発生。図 4-3 に拡大図を示す。

テスト後の両方の壁の外観。図 14 は,これらの 2 つの追加ビューを示す。

(a) Pretest view. (b) Posttest view.

Figure 4-1. Before and after views of test bed articles, Test 6.

Figure4-2。 View showing proximity of blast, Test 6。

(a) Retrofitted wall. (b) Control wall.

Figure 4-3. Close posttest views of wall exteriors, Test 6.

(a) Southeast view. (b) Southwest view.

Figure 4-4. Exterior debris field, Test 6.

図－14 TNT 爆弾爆発試験後の試験体写真

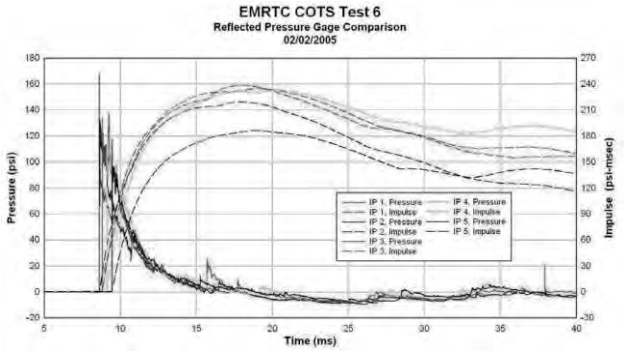
4-6 爆発緩和試験計測結果

テスト6でフィールドされた11チャンネルすべてが正常に記録された。表2にピークを示す。すべてのゲージの圧力と衝撃の値、詳細については,図15を参照。

表－2　圧力計のテスト結果

Gage ID	Pressure Type	Peak Pressure* (psi)	Peak Impulse* (psi-msec)
IP 1	Incident	36.5	67.6
IP 2	Incident	40.9	64.8
IP 3	Incident	38.0	68.9
IP 4	Incident	1.28	29.0
RP 1	Reflected	118	238
RP 2	Reflected	168	219
RP 3	Reflected	134	235
RP 4	Reflected	117	233
RP 5	Reflected	118	186

*Value represents the first recorded peak value.



図－15 TNT 爆弾爆発試験後の数値

4-7 爆発緩和試験の結論

Rhino Linings によって設計および設置されたスプレー塗布したポリウレアのレトロフィット（既存のものを改良することによって存続させること）は,壁の破片が North MOUT 反応構造に侵入するのを防ぐことに成功した。

ポリウレア塗布の壁は,一度に約 12 インチの最大内向きにたわみを確認。

110 ミリ秒 高速ビデオの調査により,壁がほぼ均一な曲げを示していることがわかった。

壁の内部では,破壊や壁の表面にいくつかの亀裂が発生したが,図 16 に示すように，破片が壁内部のテスト構造に入るほどの破損はなかった。

図－16 TNT 爆弾爆発試験後の壁内部

Rhino Linings は,1/2 インチの厚さあたり 12 ドル/ SF の設置コストと厚さ¼インチあたり 9 ドル / SF,素材の状態に応じて 2-3 ドル / SF の変動材料を適用し,これにより,おおよその設置コストの費用が計算できる。今回,テスト 6 の改造に 1350～2400 ドルの費用となった。

Rhino Linings の防爆試験の結果,商業施設や政府機関がテロリスト攻撃に対処するために,莫大なコストを投じているテロ対策のために,ポリウレアによる低コストで高パフォーマンスな提案を行うことを証明するには十分満足できる試験結果であった。

同様に日本における南海トラフ地震などの災害対策の為にコンクリート構造物や木造住宅の耐震性を高めるための実証試験に関しても,東京理科大学・高橋治研究室と関東学院大学・渡部洋研究室のポリウレアとアラミド繊維による耐震試験により実証されたと考えられる。

謝辞

本発表は 2019 年,2020 年に東京理科大学 高橋研究室による「既存コンクリートブロック塀と組積造壁の崩落防止としてポリウレア塗装とアラミド新素材を用いた補強」に関する研究を東京理科大学内にて実施した実験および,ライノジャパン株式会社が東京都中小企業振興公社による助成金により実行した 2018 年から 2019 年まで関東学院大学にて実験を行った「コンクリート剥落防止ＲＣ梁柱補強施工法（ポリウレア樹脂吹付試験）」,2005 年 New　Mexico Tech 社による Rhino Linings USA,Inc. の Blast Mitigation Test に基づき作成しております。

試験の結果を提供いただきました東京理科大学 工学部 建築学科 高橋治教授と関東学院大学 建築･環境学部 渡部洋教授,Rhino Linings USA をはじめ,実験にご協力いただきましたライノジャパン株式会社関係者に御礼申し上げます。

参考文献

1) 関東学院大学 渡部洋研究室:バサルト繊維とポリウレア樹脂により併用補強されたコンクリートの圧縮特性に関する実験研究報告書
2) 東京理科大学 高橋研究室:既存コンクリートブロック塀と組積造壁の崩落防止としてポリウレア塗装とアラミド新素材を用いた補強に関する研究: 高橋研究室 村山桃美,鈴木恵太,王穎露
3) 関東学院大学 渡部洋研究室：剥落防止 RC 造柱に関する実験研究書

機械学習を用いた打音スペクトルの分析による鉄筋腐食の判定

Judgement of reinforcement corrosion by sound spectrum analyses using machine learning

黒田一郎†，鈴木大地*，西敏臣**
Ichiro KURODA, Daichi SUZUKI and Toshiomi NISHI

†博(工)，防衛大学校教授，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）
*防衛大学校本科学生，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）
**株式会社九検（〒849-0932 佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝 166-35）

This paper deals with a corrosion judgement technology based on machine learning method. The primary focus of this study is put in the judgement of re-bar corrosion in initial symptoms. In experiments subjected to reinforced concrete specimens with re-bars corroded by direct current energization, hitting sound spectra caused by steel ball drop weight collids on concrete surface are applied using with the Local Outlier Factor (LOF) method which is one kind of machine learning method to evaluate re-bar corrosion. Availability of this judgement method is investigated from the view point of accurancy and precision.

Key Words: Nondestructive inspection, Reinforced concrete, Re-bar corrosion, Machine learning, Local outlier factor, Hitting sound
キーワード：非破壊検査，鉄筋コンクリート，鉄筋腐食，機械学習，局所外れ値因子法，打音

1. はじめに

防衛施設は，現在，多くの老朽化した鉄筋コンクリート構造物を抱えているが，それらの健全な状態での維持管理は，我が国の防衛力維持のために欠かせない．しかし，限られた予算範囲内での効率的な維持管理のためには，管理対象の鉄筋コンクリート構造物が健全な状態にあるのか，それとも何らかの劣化が始まっているのかを日頃から把握できる日常的な点検技術の整備が必要である．

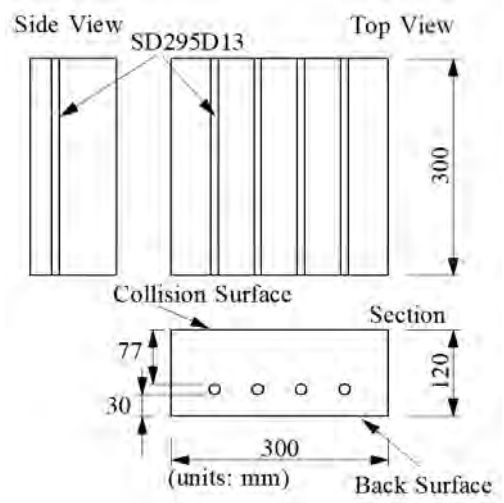
しかしながら，セメントという一種の接着剤を用いて構成される鉄筋コンクリートは，機械，装置のように分解して内部を調査することは勿論，鋼構造物のように内部に観察デバイスを侵襲することすら不可能であり，点検は必然的に非破壊的な手法に限定される．鉄筋コンクリートを対象とした非破壊検査は様々な手法が確立しているが，部隊に負荷をかけない日常的な点検技術としては，高価な器材を導入することなく簡便に実施できて，しかも結果の判定に高度な技術を要しないことが必要条件である．

そこで，本研究は，手軽に実施可能な検査手法として打音を用いた手法に着目しこれを用いて，鉄筋コンクリートにとって重大な脅威である鉄筋腐食を判定する技術に取り組むものである．打音を用いた診断は以前は熟練作業員の耳に頼った技能的な検査手法が主流であったが，近年は，衝撃弾性波法[1),2),3)]のように，計測と判定を器材に任せることによって実施者の技能・技量に依存せずに検査結果の評価まで辿り着ける手法が編み出されている．これらの手法は，主にコンクリート部材内部の欠陥，欠損，空隙を探査することを目的として発展してきたが，鉄筋の腐食は腐食膨張圧によって鉄筋周辺のコンクリートに腐食ひび割れを生じさせるため，この腐食ひび割れを検知することによって腐食の判定に結びつけることができる可能性を有している．一方で，検査データの処理は，周波数や減衰の評価による手法から，最近は，コンピュータを援用した機械学習[4)]による判定手法によってその精度を高める余地が見出されている．

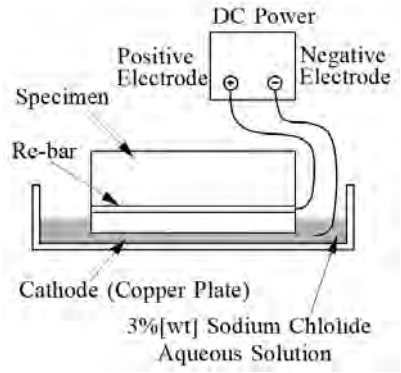
以上を鑑み，本研究においては，破壊に至らない衝撃を与えた際の打音を機械学習によって分析し鉄筋腐食の判定を目指す手法を提案し，その有用性を，電食によっ

表－１ Specified mixture for concrete

Maximum aggregate size G_{max} (mm)	Water cement ratio W/C (%)	Amount of air (%)	Weight per Unit Volume (kg/m^3)				
			Water W	Cement C	Sand S	Gravel G	AE agent A
20	60	3.0	175	292	680	1060	3.5



図－１ Reinforced concrete specimen



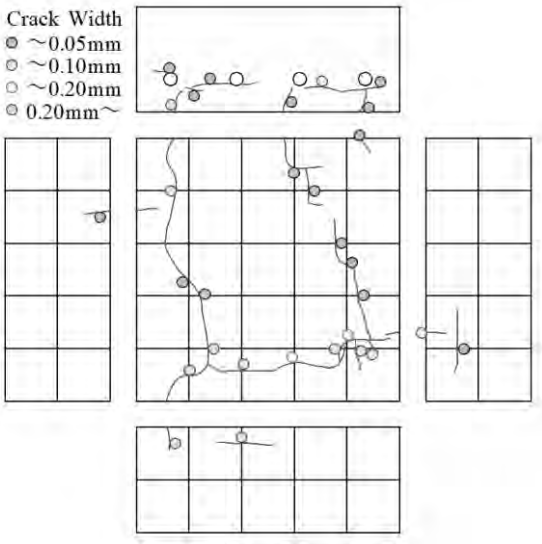
図－２ Re-bar corrosion equipment by direct current

て人為的に鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリート供試体を対象とした実験によって確認する.

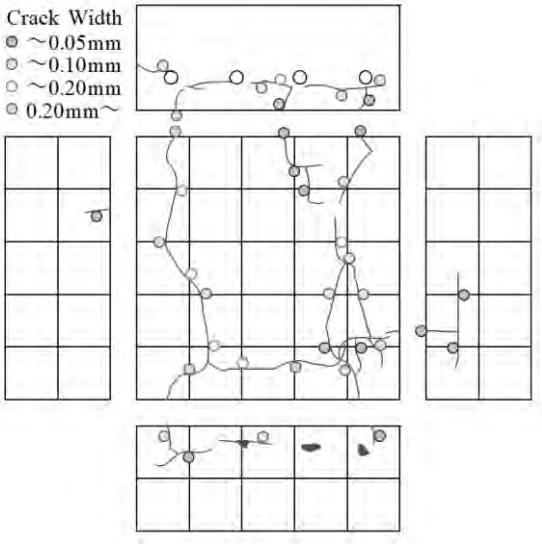
2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は，鉄筋コンクリート壁の一部を切り出した形状を模しており，図－１に示すように，300mm×300mmの正方形で，厚さは120mmである．内部には4本のD13SD295A鉄筋が63mmのあきで平行に並べられており，そのかぶりは，衝突面（図－１のCollision Surface）側が77mmで, その反対側の裏面（Back Surface）側が30mmである. 表－１に, 使用したコンクリートの示方配合を示す. コンクリート打設後1か月の水中養生の後に気乾状態で



(a) Corrosion ratio 3%

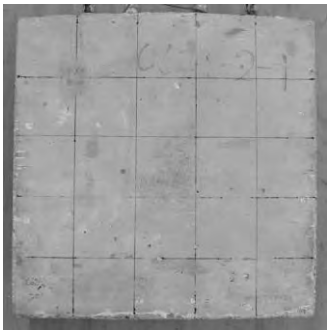


(b) Corrosion ratio 6%

図－３ Crack distributions (Specimen C1)

充分乾燥させてから実験に供した.

鉄筋の腐食は，電食（図－２参照）によって行ない，目標とする腐食率は，文献5)を参考として電流と通電時間で管理した. 電食に使用した溶液は3%塩化ナトリウム水溶液，カソードは銅板であり，電食の操作中は供試体は水槽中で溶液に浸潤した状態にある．最終的な腐食率は6%と設定した．供試体の総数は8体であり，その内の4体（C1～C4）を電食に供して，残りの4体（N1～N4）は比較



写真－１　Collision Surface

のために電食しない管理供試体である．

図－３に，C1 供試体の腐食率 3%および 6%時の腐食ひび割れ分布を，写真－１に衝突面(Collision Surface)の様子をそれぞれ示す．かぶりが 30mm と小さかった側の表面(Back Surface)は，ここに示すように腐食ひび割れがコンクリート表面で観察されたが，反対側のかぶりが 77mm と大きかった衝突面には腐食ひび割れが観察されなかったので，この図－３では衝突面は示していない．また，腐食率 1%ではいずれの供試体においても腐食ひび割れは観察されなかった．

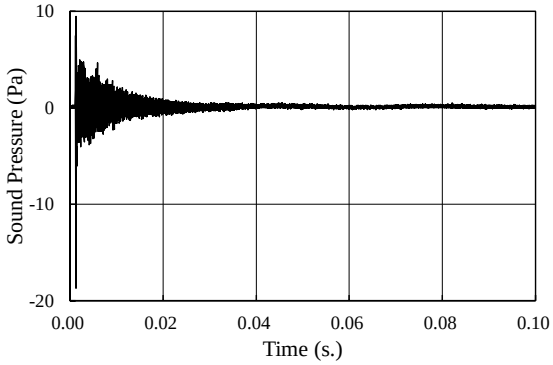
2.2 衝撃の入力と打音収録

鋼球を自由落下によって衝突させることによって供試体に衝撃を入力し，その際の打音を収録した．現場での測定を念頭に置くならば，鋼球の落下衝突よりもハンマによる打撃の方が実用性が高いが，本実験では実験の再現性を重視し，衝撃を一定とするために，鋼球を設定された高さから自由落下させて衝突させることとした．使用した鋼球の直径は20mmで，落下高さは810mmとした（表－２）．供試体は，衝突面が上になるように床面に静置し，鋼球の衝突はこの衝突面の中心に対して行なった．このように設定した狙いは，腐食ひび割れが目視観察できない側を検査対象として鉄筋腐食を判定し得るかどうかを確認するためである．供試体の支持条件が実験結果に与える影響を排除するために，供試体と床面の間には厚さ60mmの発泡スチロール板を敷き詰めている．

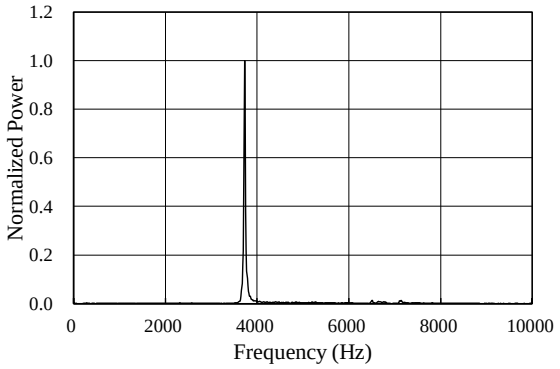
衝撃入力時の打音はマイクロフォンを用いて収録した．マイクロフォンの位置は衝突面の直上300mmである．マイクロフォンから電圧として出力された音圧はA/D変換され，サンプリング速度毎秒10万回(100kSample/s)のデータロガーにて時刻歴として収録している．収録した音圧時刻歴の一例を図－４に示す．音圧時刻歴は，概ね 0.05s (50ms)で収束に至っている．音圧の収録は，電食前，腐食率1%，腐食率3%，腐食率6%の計4回実施した．図－２の電食の操作では塩化ナトリウム水溶液に浸潤させていて供試体が濡れた状態にあるので，音圧の収録の度に水槽(2.1節)から供試体を取り出し，気乾状態で乾燥させてから音圧の測定に供した．

表－２　Specification of steel ball drop weight

Diameter	Drop Height	Mass	Kinetic Energy	Momentum	Collision Velosity
(mm)	(mm)	(g)	(J)	(kgm/s)	(m/s)
20	810	31	0.246	0.124	3.98



図－４　Example of sound pressure time-history



図－５　Example of normalized power spectrum of sound pressure

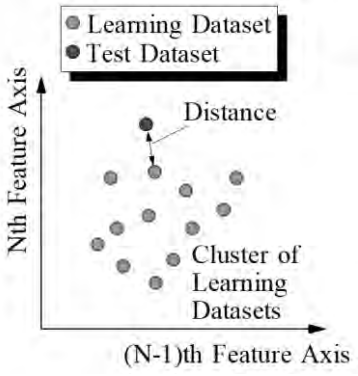
2.3 局所外れ値因子法

収録された音圧時刻歴波形はフーリエ変換によってパワースペクトルに変換した．図－５にその一例を示す．パワースペクトルはその最大値が1.0になるように正規化処理が施されている．このパワースペクトルを特徴量として，機械学習の一種である局所外れ値因子法を用いた腐食の有無の判定[4),6),7)]を試みる．

図－５に折れ線で示された離散化されたパワースペクトルは，N個の値からなるデータセットとみなせるので，これはN次元のデカルト座標上の一つの点（即ちベクトルデータ）として表現可能である．その上で，局所外れ値因子法では腐食の有無の判定を次のように行なう．即ち，電食させる前に収録した音圧時刻歴から得られたパワースペクトルのベクトルデータの集合（教師データクラスタ）に対して，腐食後のパワースペクトル（テストデータ）のデカルト座標上の位置を比較し，テストデータが教師データクラスタに包含されるとみなされるので

あれば，そのテストデータは教師データクラスタと同様に腐食無しと判定され(Predicted Negative)，包含されるとみなせないのであれば腐食有りと判定される(Predicted Positive)．

図－６はその概念を説明したものである．テストデータと教師データクラスタの各点の距離を求めて平均したものをテストデータと教師データクラスタのなす距離の代表値D_{TL}とし，これを各教師データ間の距離の代表値D_{LL}で除することによって無次元化する．この無次元化距離D_N (= D_{TL} / D_{LL})が閾値T_hを下回っているテストデータは教師データクラスタに包含されると判断した．ここでの距離としてはユークリッド距離を採用している．また，教師データクラスタはその分布がいびつな形状であるかも知れず，分布域が飛び地を形成している可能性もあるため，教師データクラスタに含まれる全ての教師データを分析対象とするのは合理的でない．そこで，上述のD_{TL}, D_{LL}の算出の際には，テストデータから最も近傍のN_T個の教師データだけを選抜し，D_{TL}はそれらN_T個の教師データとテストデータの距離の平均，D_{LL}はそれらの全ての組み合わせ($_{NT}C_2$通り)の距離の平均として求めることとした．尚，本研究の検討では教師データクラスタからの選別数



図－６　Concept of the local outlier factor method

N_Tは8と設定している．

教師データクラスタは，電食する以前の全ての供試体8体（C1～C4およびN1～N4）を用いて，各8回ずつ収録した音圧時刻歴のパワースペクトルで構成され，都合8体×8回の64個のデカルト座標上の点（データセット）から成る．テストデータは，1%，3%および6%の3段階の腐食率毎に，8体の供試体（内訳：腐食有り4体，無し4体）に対して8回ずつ収録した64個（×腐食率3通り）である．腐食有り供試体（C1～C4）と腐食無し供試体（N1～N4）の数がどちらも4体で同じなので，64個のテストデータの内丁度半分の32個がC1～C4供試体からなる「実際に腐食有り(Actual Positive)」，残りの32個がN1～N4供試体の「実際に腐食無し(Actual Negative)」のテストデータである．

2.4 混合行列と評価指標

局所外れ値因子法では，判定結果は，腐食有りと判定するPredicted Positiveと，無しと判定するPredicted Negativeの2つであり，64個のテストデータは全てどちらかの判定が下される．判定には誤診が避けがたいので，これらのPredicted PositiveおよびPredicted Negativeは，実際の腐食の有無Actual PositiveおよびActual Negativeとは相互に一致しないため，テストデータは表－３に示す混合行列(Confusion Matrix)中の4つのカテゴリTrue Positive，False Negative，False Positive，True Negativeの何れかに分類される．

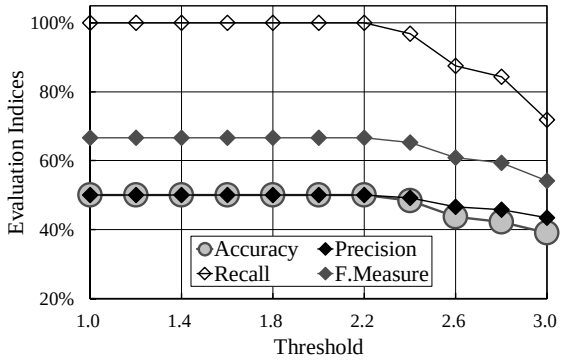
True Positive (TP)は，実際に腐食有り(Actual Positive)だったテストデータを正しく腐食有りと判定(Predicted Positive)したカテゴリであり，判定結果は正解(True)である．同様に，実際に腐食無し(Actual Negative)を腐食無しと判定(Predicted Negative)したTrue Negative (TN)も正解の判定である．それに対して，False Negative (FN)は，実際に腐食有り(Actual Positive)だったテストデータを誤って腐食無しとした判定であり，所謂仮説検定における第

表－３　Confusion matrix of corrosion conditions

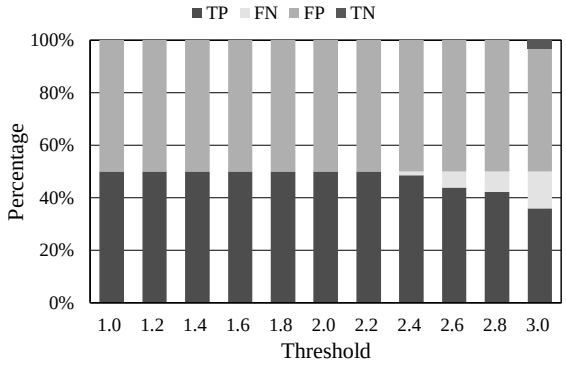
		Actual Conditon	
		Actual Positive (Actual Corroded Condition)	Actual Negative (Actual Sound Condition)
Predicted Condition	Predicted Positive (Predicted Corroded Condition)	True Positive TP	False Positive FP
	Predicted Negative (Predicted Sound Condition)	False Negative FN	True Negative TN

表－４ Evaluation indices

Indices	Symbols	Definition
Accuracy	Acc	Acc = (TP +TN) / (TP + FN + FP +TN)
Precision	Pre	Pre = TP / (TP + FP)
Recall	Rec	Rec = TP / (TP + FN)
F. Measure	Fm	Fm = (2 x Pre x Rec) / (Pre + Rec)



図－７　Judgement results using power spectrum



図－８ Judgement results using power spectrum (Categories of conditions)

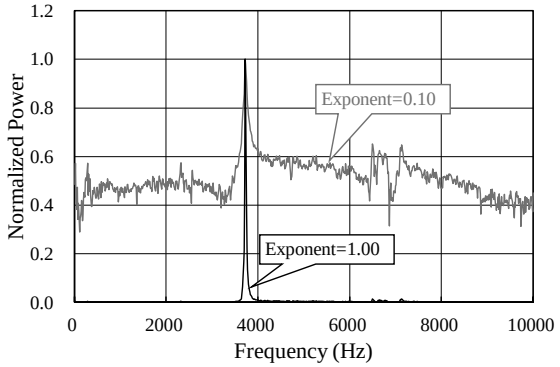
二種過誤であり不正解，そして，False Positive（FP)は，その逆の誤った判定であり，第一種過誤である．

以上を踏まえ，本研究での腐食判定結果の評価では，表－４に挙げる機械学習の評価指標としては一般的な4種類の評価指標，正解率Accuracy（Acc)，適合率Precision（Pre)，再現率Recall（Rec)，F値 F. Measure（Fm)を用いることとする．正解率は，正解であったテストデータTPおよびTNが全体に占める割合であり，判定結果の妥当性を表わす分かりやすい指標である．適合率は，腐食有りと判断(Predicted Positive)されたテストデータの中に正解がどれだけ含まれていたかを表わし，再現率は，実際に腐食有り(Actual Positive)のテストデータの内どれだけが正解したかを表わす．閾値を大きくすれば必然的に適合率は向上し，反対に小さくすれば再現率は向上し，即ち適合率と再現率はトレードオフの関係にあるので，両者を合わせて評価する指標として両者の調和平均であるF値を導入した．

3. 実験結果

3.1 パワースペクトルによる判定

図－７，図－８に，パワースペクトルを用いて腐食判定した結果を示す．腐食率は6%である．音圧時刻歴をサンプル長さ（L_S）80msで切断してからフーリエ変換して



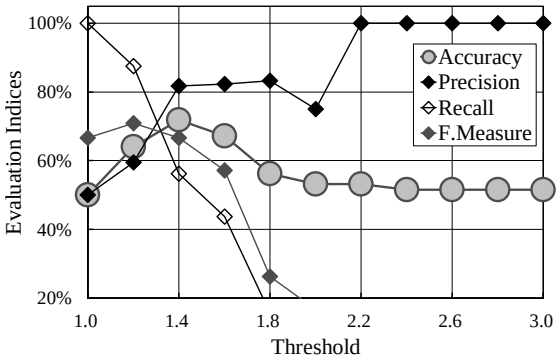
図－９　Power processed power spectrum

いるのでパワースペクトルの周波数間隔は12.5Hzである．高周波の音圧はSignal/Noise比が低くなることが懸念されたので，10000Hzを遮断周波数F_{CO}としてそれより高い周波数成分を特徴量から取り除いているため，一つのデータセットが持つ特徴量の個数はおよそ800個である．いずれの閾値T_hにおいても正解率Accuracyは50%程度であり，テストデータの丁度半分が「実際に腐食有り」であったことを鑑みれば，この判定結果はランダムに腐食有無を示すのと同じ価値しか持ち得ていない．再現率Recallがほぼ100%なのは，全ての「実際に腐食有り」のテストデータを漏れなく腐食有りと判定しているからであり，図－８に示す各カテゴリの内訳を見れば，ほぼすべてのテストデータがTPとFPに，即ち，実際の腐食の有無に関わらず「腐食有りと推定」されてしまった結果であり、このことが一方での正解率Accuracyの低減を招いた．これは一概に閾値T_hが小さ過ぎたことが原因である．図－８で右へ遷移して閾値T_hを大きくしていくと不正解であるFPの一部が正しい判定であるTNに変化するのは良い傾向であるが，TNの増加数よりも多くのTPが不正解であるFNに移行してしまうので，正解率Accuracyは向上せず，適合率Precision，再現率Recallとともに右下がりに低下していく（図－７）．以上を敷衍すれば，閾値を操作してもこの条件での判定では正解率の向上は望めないと言える．

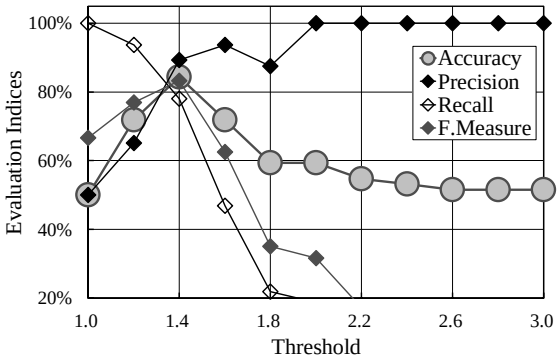
3.2 冪処理による評価指標の向上

前節3.1での検討によれば，パワースペクトルを用いた場合，正解率の向上が望めないことが明らかになった．そこで，図－５の例示されたパワースペクトルに注目すると，4000Hz弱の周波数で固有振動周期と思われるスパイク状の突起が認められ，その周波数以外の帯域ではパワーの値が若干の上下は示すもののほぼ0であることに気づく．それを踏まえて，10000Hz以下の周波数帯域で約800個の特徴量があるにも関わらず，4000Hz近傍の僅かな数の特徴量だけが，ユークリッド距離の算出に影響していて，それ以外の多数の特徴量が寄与していないのが，正解率が向上しない原因なのではないかと考えた．

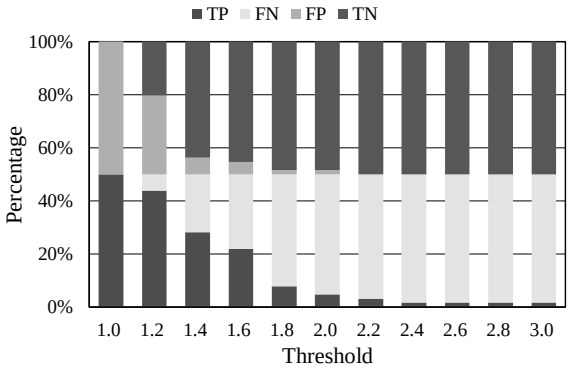
そこで，パワーの値を1.0より小さい冪指数で冪処理す



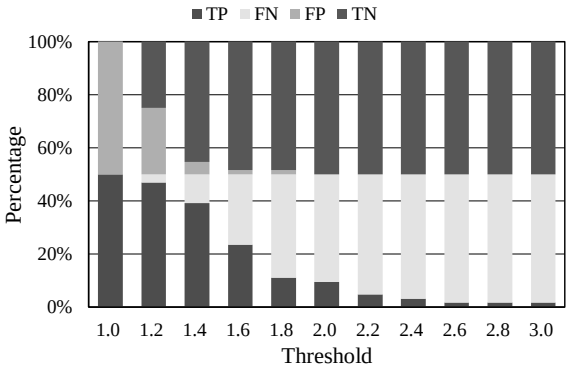
図－１０(a)　Judgement results using power processed power spectrum (exponent = 0.1)



図－１１(a)　Judgement results using power processed power spectrum (exponent = 0.01)



図－１０(b)　Judgement results using power processed power spectrum (exponent = 0.1)
(Categories of conditions)

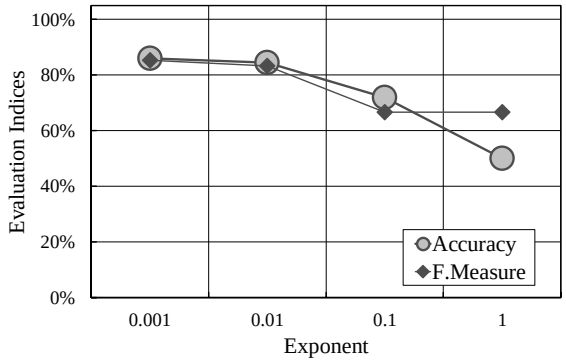


図－１１(b)　Judgement results using power processed power spectrum (exponent = 0.01)
(Categories of conditions)

ることによって，ほぼ0であった大多数のパワーの値を0.0～1.0の範囲に分布させ，これらもユークリッド距離の算出に寄与させることを試みた．これは即ち，元のパワースペクトルが$P(f)$であった場合，冪指数eで冪処理を施した$P(f)^e$でパワースペクトルを代替する操作である．図－９に，冪指数(Exponent) 0.1で冪処理したパワースペクトルの例を示す．冪処理したことによって，4000Hzのスパイク部以外の周波数帯域でのパワーの値がグラフの横軸から離れて0.0～1.0の間に広く分布している．

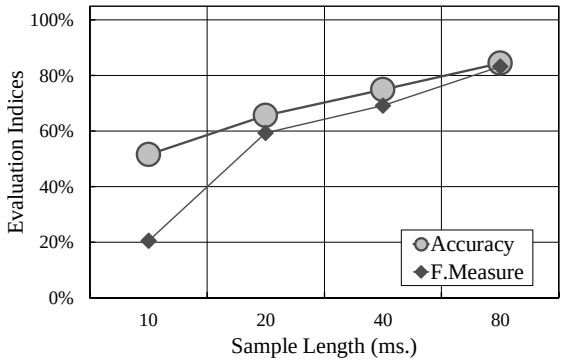
図－１０(a)，(b)，図－１１(a)，(b)に冪処理したパワースペクトルによる判定結果を示す．冪処理することによって，正解率Accuracy，F値F.Measureともに大きな値を示すようになっている．これらは，概ね閾値Thresholdが1.4の時に最大値となり，その際の冪指数Exponentと正解率，F値の関係(図－１２)では，冪指数が0.01および0.001において，正解率，F値ともに80%を超える数値を示している．

各カテゴリーの内訳を(図－１０(b)，図－１１(b))を見れば，閾値Thresholdが1.0, 1.2と小さい範囲では，実際に腐食している(Actual Positive)のに腐食無しと判定(Predicted Negative)されてしまった第二種過誤FNの割合が小さく，このことが再現率Recallの向上に繋がっている

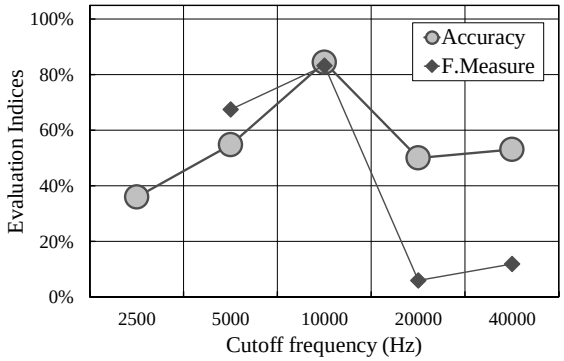


図－１２　Relationship between evaluation indices and exponent

が，実際に腐食無し(Actual Negative)を腐食有りと判定(Predicted Positive)してしまう第一種過誤FPの割合は大きいので適合率Precisionの方は振るわない(図－１０(a)，図－１１(a))．反対に閾値が大きくなると，FPが0に近づいて適合率が向上する一方でFNが増加して再現率は減少する．機械学習の判定結果の一般的な評価においては，第一種過誤を避けたければ適合率を重視してその向上を目指し，第二種過誤を避けたければ再現率を重視すれば



図－１３　Relationship between evaluation indices and sample length



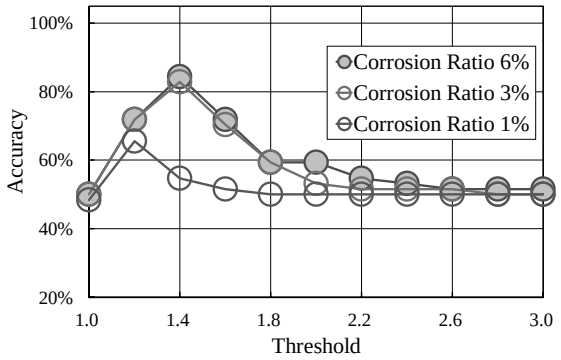
図－１４　Relationship between evaluation indices and cutoff frequency of low-pass filter

よいが，本実験の腐食有無の判定においては閾値の増減によってその調整が可能となることが確かめられる．

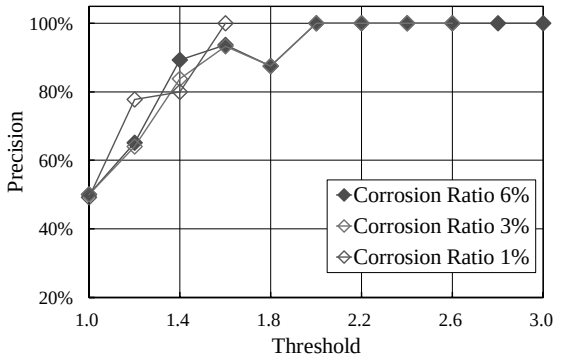
以上のようにパワースペクトルに冪処理を導入することによって判定結果の評価指標を向上させることが可能であることが示された．そこで，次に，前述した別のパラメータ（サンプル長さL_S，および遮断周波数F_{CO}）を変化させた場合の評価指標への影響を検討する．

図－１３は，冪指数を0.01，遮断周波数を10000Hzと固定して，サンプル長さL_Sを10～80msに変化させた場合の正解率とF値である．サンプル長さが短くなると両方の評価指標が低減している．サンプル長さが短くなるとスペクトルの周波数間隔が反比例して大きくなるので，遮断周波数が同じ，即ちスペクトルの帯域幅が同じならば，特徴量の個数がサンプル長さに比例して減少する．このことが判定結果の劣化につながったのではないかと考えられる．

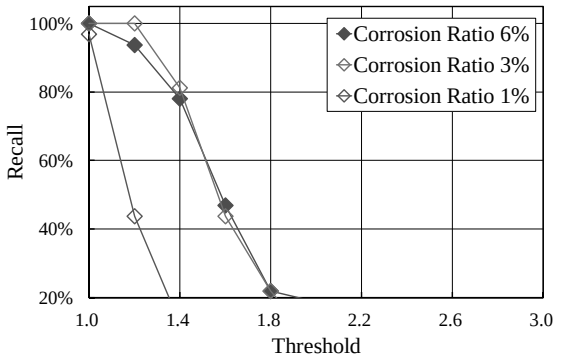
次に，図－１４に，冪指数を0.01，サンプル長さを80msに固定したままで，遮断周波数F_{CO}を2500～40000Hzの範囲で変化させた場合の正解率とF値を示す．なお，本実験でのサンプリングレートに対応するNyquist周波数は50000Hzである．遮断周波数が小さくなると，周波数帯域が狭まって特徴量の個数が減る．反対に遮断周波数が大きくなると特徴量の個数は増えるものの特徴量が増える



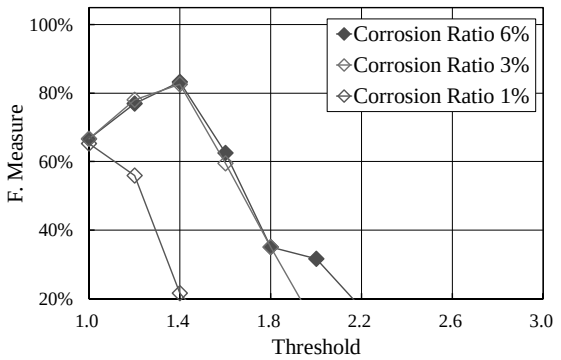
図－１５　Influences of corrosionratio to accuracy



図－１６　Infruences of corrosion ratio to precision



図－１７　Influences of corrosion ratio to recall



図－１８　Influences of corrosion ratio to F. measure

のはNyquist周波数に近い領域であるため信号としての質の劣化が懸念される．図－１４では，本実験では10000Hzの遮断周波数が正解率とF値の向上のためには最適であるという結果が示されている．

3.3 腐食率の影響

前節3. 2は，本実験で最大の腐食率6%での検討である．非破壊検査としてはより小さい腐食率で良好な判定が可能であることが望ましいので，腐食率3%と1%のテストデータに対しても正解率とF値の検討を試みる．

図－１５～図－１８は、腐食率が異なる場合の各評価指標の変化をまとめたものである．いずれも，冪指数0.01，サンプル長さ80ms，遮断周波数10000Hzに固定している．正解率，F値ともに，腐食率1%では腐食率6%と比べて低減が著しいが，腐食率6%と3%の違いはほとんど無く，本実験の条件では，3%の腐食率があれば正解率，F値ともに80%以上の成績で判定可能であることが確かめられた．適合率は腐食率が異なってもほぼ同じ値を示している．腐食率1%の再現率は，腐食率3%，6%と比べて，全ての閾値の範囲で低い値を示した．

4. まとめ

本研究では，機械学習の一種である局所外れ値因子法を用い，鋼球の衝突時の音圧スペクトルを分析することによって，電食で腐食させた鉄筋の腐食判定を試みた．以下にまとめを示す．

(1) 音圧のパワースペクトルを特徴量として局所外れ値因子法を用いて腐食判定を行なう際には，フーリエ変換で得られたパワースペクトルを使用するのではなく適切な冪指数を用いた冪処理を行なうことによって正解率，F値の向上を図ることが期待できる．

(2) 音圧時刻歴のサンプル長さ，またパワースペクトルの遮断周波数は，正解率とF値に影響を与える．

(3) 本実験では，3%以上の腐食率であれば，腐食判定の正解率，F値はともに80%を超えることが可能である．

参考文献

1) 大野健太郎：弾性波を利用したコンクリートの劣化領域の可視化技術，コンクリート工学，Vol.53，No.5，pp.452-457，2015.

2) 服部晋一，鎌田敏郎，内田慎哉，朝倉響，寺澤広基：弾性波の入力方法とPCグラウト未充填部の検出能力との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集E2，Vol.73，No.2，pp.239-250，2017.

3) 岩野聡史，内田慎哉，麓隆行，小澤満津雄：衝撃弾性波法による火害を受けたコンクリートの劣化評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.28，pp.35-45，2017.

4) 佐相聡実，勝木実，日比野克彦：機械学習を利用した打音法のコンクリート浮き部検出への適用性に関する基礎研究，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集，Vol.6，pp.201-206，2018.

5) 田森清美，丸山久一，小田川昌史実，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988.

6) 佐相聡史，勝木太，日比野克彦：機械学習を利用した打音法によるコンクリート浮き部検出に関する基礎研究，土木学会第72回年次学術講演会，2017.

7) 佐相聡史，勝木太，日比野克彦：機械学習を利用した打音法によるコンクリート浮き部検出精度に関する研究，土木学会第73回年次学術講演会，2018.

Conclusions and Remarks

In this study, we tried corrosion judgement of re-bars in reinforced concrete by analyzing hitting sound using with the Local Outlier Factor Method which is one kind of the machine learning method, to establish simple nondestruction test method for initial corrosion symptoms. With adoption of power process in transaction of power spectrum transferred from hitting sound pressure time-history, the evaluation indices of corrosion judgement results are improved comparing with the results from unprocessed power spectrum. In addition, it can be said 3% of corrosion ratio is required to judge corrosion by the condition of the experiment in this study.

爆発による鋼材の損傷とその評価

Fracture characteristics and damage evaluation of steel subjected to explosion

市野宏嘉*，別府万寿博**，萱森陽一***，吉井健一****
ICHINO Hiroyoshi, BEPPU Masuhiro, KAYAMORI Yoichi, YOSHII Ken-ichi

*博（工）防衛大学校准教授，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）
**博（工）防衛大学校教授，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）
*** Ph.D.，日本製鉄株式会社，鉄鋼研究所（〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1）
****日本製鉄株式会社，厚板技術部（〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1）

キーワード：爆発，鋼材，スポール，走査型電子顕微鏡(SEM)
(*explosion, steel, spall, scanning electron microscope(SEM)*)

1. 序言

爆破テロによる被害は、標的となった施設はもとよりその周辺の広い範囲に被害を及ぼす点で極めて深刻な問題である。爆破テロの標的となる施設は、政治、経済の中枢を担う施設から観光、商業等の民間の施設、交通インフラまで多岐に及び、これらの中には防衛に関連するもの、また自衛隊の活動の基盤となるものも含まれる。

テロ行為による脅威の増大に鑑み、各種の構造物に対する爆破行為への対処への関心が高まりつつある。爆薬と部材の距離が比較的近い場合、爆発荷重が極端に集中して部材に作用することがある。この時、部材にはクレータ（表面破壊）、スポール（裏面剥離）等の局部損傷が発生する。構造物の耐爆設計にあたり、局部損傷に対しては部材全体の変形等に関する照査とは別の照査が必要となる。特に、コンクリートは引張強度が圧縮強度に比して極端に小さいためスポールの発生が顕著であることから、コンクリート部材が爆発を受けた際の局部損傷に関する研究が多々行われてきている[例えば 1)-5)]。これらの研究から、コンクリート部材の局部破壊に対する耐爆性の評価がなされるとともに、耐爆性向上のための方策が提案されてきている。

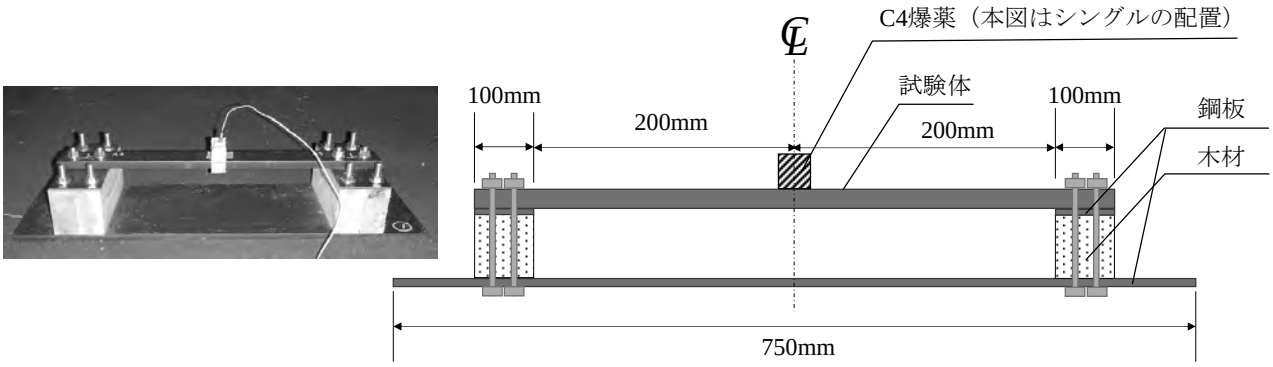
一方で、鋼材はコンクリートと並び構造物の主要な材料であるにもかかわらず、爆発時の損傷についての検討例は極めて少ない。わずかに大野ら[6)]により、鋼製タンクの耐爆防護を念頭に置いた鋼板の貫通限界条件の予測法に関する実験的研究や、爆発を受ける吊橋のケーブル、床版等の挙動の解析的研究[例えば 7)]が知られているにとどまる。したがって、爆発により鋼材が破壊に至る機構は詳細には検討されておらず、爆発による鋼構造物の損傷の評価にも至っていない現状にある。すなわち、爆発による損傷機構を考慮した合理的な鋼材ないし鋼構造物の耐爆防護法は確立されていない。

本研究では、将来的な鋼構造物の耐爆防護法の確立のためのごく基礎的な段階として、鋼材に対する接触爆発実験を行い、その損傷性状を調べた。その際、走査型電子顕微鏡（以下、「SEM」と呼ぶ。）を用いた破面の観察も行った。さらに、爆発を受ける鋼材の損傷評価に資するため、鋼材の板厚および爆薬量による鋼材の損傷マップを作成し、ある破断性状を与える板厚と爆薬量の関係について考察した。

2. 構造用鋼材に対する接触爆発実験

2. 1 実験の概要

本実験は、防衛大学校火薬類実験施設の大型爆発ピット（以下、「爆発ピット」と呼ぶ。）内で行った。この爆発ピット内に JIS G 3101 に規定される一般構造用圧延鋼材 SS400 の平鋼（鋼材検査証明書に記された引張強さは 446～469N/mm^2）をスパン 400mm のはり状に設置して爆破した。試験体の設置状況を**図－1** に示す。水平に整地された爆発ピットの地盤面に厚さ 12mm の鋼板を設置した。平鋼の支持具となる角材（90mm 角）と鋼板には 6 箇所のボ



図－1　試験体の設置状況

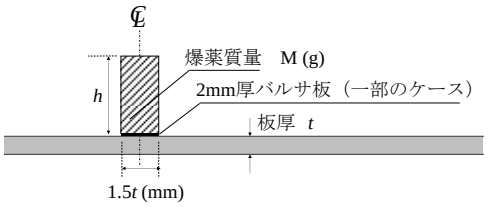
ルト穴を穿孔し、うち左右 2 箇所ずつで平鋼とともにボルト留めした。試験体の板厚および爆薬量等を変化させて平鋼試験体を爆破し、その損傷性状を調べた。

2. 2 爆薬設置要領

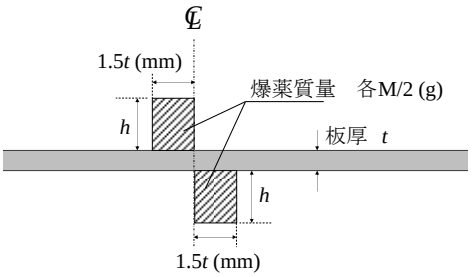
試験体に対する爆薬設置要領は、**図－2**(a)に示すように鋼材の上下いずれかの一面に質量 *M* の爆薬を貼り付けて爆発させる方法（以下「シングル」と呼ぶ。）および、**図－2**(b)に示す質量 *M* の爆薬を質量 *M*/2 の直方体の爆薬 2 個に分けて支点間中央を挟んではりの上下両面に互い違いに固定する方法（以下「ダブル」と呼ぶ。）の 2 種類とした。シングルでは爆発位置を中心として爆発面の反対方向に凸となる大きな曲げ変形が生じる可能性がある。一方でダブルでは、曲げ変形を抑制しつつ爆薬と爆薬の間で局所的に最大せん断力が生じ、はりを破断するような効果が得られると推察される。このため、破壊目的での爆破においては、所望の位置で、かつ変形による影響範囲を限定しつつ部材を破断できるダブルが用いられることがある。

2. 3　実験ケース

表－1 に実験ケースを示す。実験の主要なパラメータは爆薬の質量（爆薬量）*M* と試験体の厚さ（板厚）*t* である。試験体の厚さは *t*=9、12 および 16mm とし、幅は *w*=50mm とした。爆薬量は同一断面の試験体について変化させた。表中の「記号」は、左から厚さ *t*(mm)、爆薬量 *M*(g)の各値およびダブル（D）とシングル（S）の別を示す。シングルの一部のケースでは、爆発からの防護のための被覆処置の開発への応用を念頭に置き、試験体と爆薬との間に厚さ 2mm のバルサ板をスペーサーとして設置して爆発させる実験を行った。**表－1** 中の「損傷性状」の欄の見方は後述する。



(a) シングル



(b) ダブル

図－2　爆薬の設置方法

2. 4 爆薬およびその起爆

実験では成型が容易で熱や衝撃に対して比較的鈍感な C-4 爆薬を使用した。爆薬は起爆、設置等の取り扱いの容易性を考慮し、1.5*t*×*w*×*h* の直方体に成型した。爆薬量は高さ *h* の増減により調整した。爆薬の起爆には 6 号電気雷管を用いた。成型後の爆薬には雷管を挿入するために穿孔し、その孔に雷管を挿入して雷管が脱落しないように油粘土で固定した。この爆薬を粘着テープで試験体に固定した。ダブルの実験での起爆回路は並列とし、電気発破器を用いて 2 発を同時起爆した。

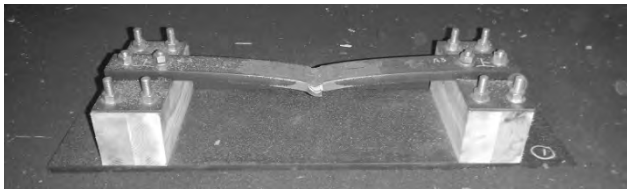
2. 5　損傷性状の判定と評価

各実験ケースの損傷性状については「変形」、「変形・亀裂／剥離」、「破断」の 3 段階で評価した。「変形」は、爆発によって鋼材が変形しているが、試験体の上下面に亀裂や剥離が確認できない状態を、

表－1　実験ケース

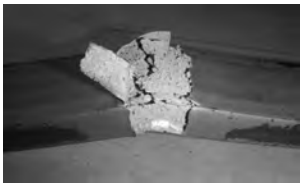
記号	厚さ t (mm)	爆薬量 M (g)	爆薬設置	爆発の条件	損傷性状
9-14S	9	14	シングル	接触爆発	変形・亀裂／剥離
9-18S	9	18	シングル	接触爆発	破断
9-14D	9	14	ダブル	接触爆発	変形・亀裂／剥離
9-18D	9	18	ダブル	接触爆発	破断
12-18S	12	18	シングル	接触爆発	変形・亀裂／剥離
12-24S	12	24	シングル	接触爆発	破断
12-30S	12	30	シングル	接触爆発	破断
12-40S	12	40	シングル	接触爆発	破断
12-18D	12	18	ダブル	接触爆発	変形・亀裂／剥離

記号	厚さ t (mm)	爆薬量 M (g)	爆薬設置	爆発の条件	損傷性状
12-24D	12	24	ダブル	接触爆発	破断
12-30D	12	30	ダブル	接触爆発	破断
12-40D	12	40	ダブル	接触爆発	破断
16-24S	16	24	シングル	接触爆発	変形・亀裂／剥離
16-32S	16	32	シングル	接触爆発	破断
16-24D	16	24	ダブル	接触爆発	変形
16-32D	16	32	ダブル	接触爆発	破断
16-40S-2mm	16	40	シングル	2mmスペーサー設置	変形
16-54S-2mm	16	54	シングル	2mmスペーサー設置	変形・亀裂／剥離



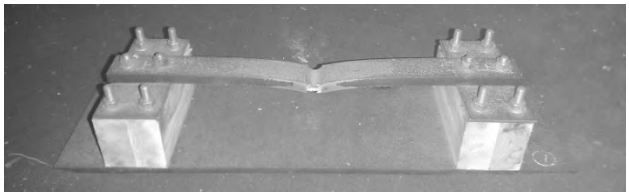
(a) 全景

(b) 爆発面



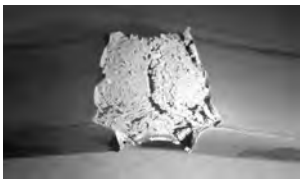
(c)爆発面の反対側

図－3　試験体 16-24S の外観



(a) 全景

(b)爆発面



(c)爆発面の反対側

図－4　試験体 16-32S の外観

「変形・亀裂／剥離」とは、試験体の上下面に剥離や亀裂のいずれかまたは両方が認められるものの試験体の分断には至らない状態を、「破断」とは、爆発により試験体が 2 つに分断されている状態を、それぞれ示す。なお、爆発により実験の直後には完全には分断されていなかったものの、その後の試験体の取り扱い時に容易に分断され得たものは「破断」とした。

2. 6　破面の観察

試験体に破断が生じた場合のマクロ破面を目視で観察するとともに、代表的なケースについては SEM（日本電子製 JSM-7200F）によりミクロ破面を観察した。金属の破断面を SEM により観察すると、破壊の様式に応じて各種の特徴的なミクロ破面が認められ、破壊に至る機構を知る手がかりとなる。

3.　接触爆発による鋼材の損傷性状の特徴

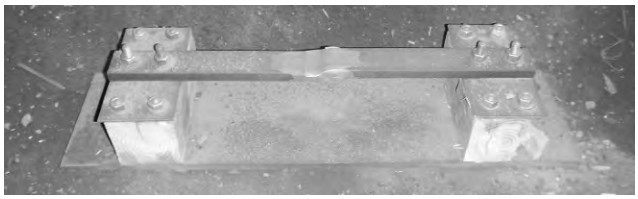
各ケースの損傷性状を**表－1** に示す。爆薬量や試験体の断面寸法等の条件に応じて損傷性状が変化する。同一の厚さであれば爆薬量が大きくなるほど損傷が顕著となり、破断しやすくなる。爆薬量と板厚が損傷に及ぼす影響、およびスペーサーによる影響は 4. で再度検討する。

以下、破面の観察を通じて、接触爆発による鋼材の損傷性状について考察する。

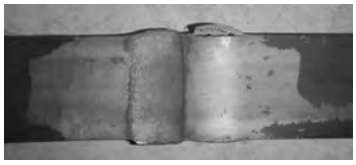
3. 1　試験体の変形とマクロ破面の性状

爆薬の配置がシングルの場合の代表例として、16-24S の爆発後の写真を**図－3** に示す。試験体には下方向に曲げ変形が生じている。本ケースでは試験体は破断に至っていないが、試験体の側面、および爆発面と反対側では爆薬の幅にほぼ等しいか、やや広い範囲で剥離破壊が生じていた。爆発面では爆薬に接触していた部分は円弧状の凹部が生じており、爆薬の爆発により極めて大きな圧縮力を受けたものと推察される。

16-24S から爆薬量を 8g 増加させた 16-32S の爆発後の写真を**図－4** に示す。**図－4** より、爆発面の反対側から見た損傷の状態は 16-24S と大差はないが、爆発面と反対側に生じた亀裂は爆発面側にまで達し、試験体は破断された。破面は凹凸が著しく、その一部が薄片状となっている。ただし、鋼材の表面に近い部分は金属光沢を有する鋭利な刃物状を呈してい



(a) 全景



(b) 爆薬設置面

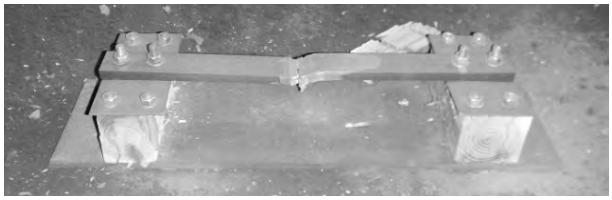
図－5　試験体 16-24D の外観

る。

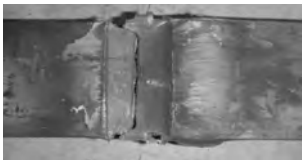
爆薬の配置がダブルの場合の代表例として、16-24D の爆発後の状態を**図－5** に示す。試験体は、はり全体としてはほぼ直線の形状を保ったまま爆薬を設置していた付近のみ変形が生じている。本ケースでは鋼材の破断は生じておらず、爆発面を含めて試験体の上下面には裂傷や剥離は生じていない。爆薬に接触していた部分は円弧状の凹部が生じており、爆薬の爆発により極めて大きな圧縮力を受けたものと推察される。また、くぼみの外縁部には高さ 1mm 程度の段差が生じているが、これは爆発によりごく局所的なせん断力が生じたためと考えられる。この段差は試験体の内部には進展していない。

図－6 に、16-24D から爆薬量を 8g 増加させた 16-32D の爆発後の状態を示す。この実験では試験体が破断された。ただし、破断面は支点間の中央、すなわちせん断力が最大となる点ではなく、2 個配置した爆薬のいずれかの爆薬の爆発面の反対側から生じた。本ケースでは、上面に配置した爆薬の直下（**図－6(a) (b) (c)** では左側）から破断した。本ケースの破面を**図－6(d)** に示す。断面の外縁部の 1～2mm 程度の範囲は金属光沢をもった破面であり、鋭利な刃物状となっている。断面の内側の部分は凹凸が著しい破面で、一部が薄片状となっている。

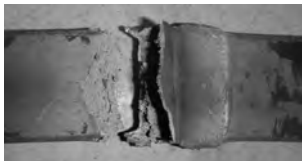
破面のマクロ性状と破断が生じた位置から判断すると、本実験における鋼材の破断は、まず爆発によってスポールにより鋼材が剥離損傷を生じ、さらに爆風により長軸方向への引張が作用して生じたと考えられる。これは、爆薬の設置位置がシングル、ダブルの場合のいずれにも共通する。なお、スポールとは、材料が爆発や衝突などの衝撃的な作用を受けた際に、材料の裏面（作用を受けた面の反対側）が剥離破壊する現象であり、スキャビングまたは裏面剥離とも呼ばれる。



(a) 全景



(b) 上面から



(c) 下面から

(d) 破面を拡大

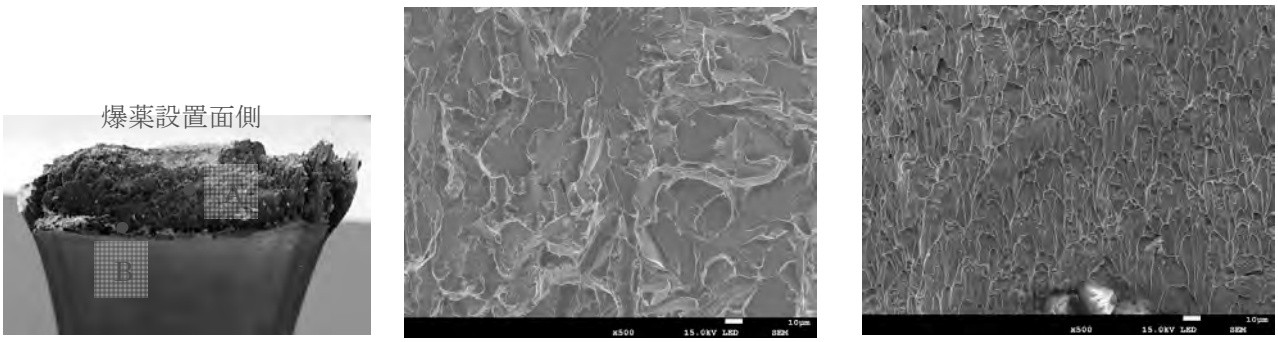
図－6　試験体 16-32D の外観

3. 2　ミクロ破面の性状

図－7 は 12-24S の破面で、(b) (c) が SEM 像による微視的様相である。**図－7(b)** は破面上の凹凸が著しく薄片状を呈する部分（図中 A）を上面（爆薬設置面）に対して垂直に撮影した SEM 像、**図－7(c)** は鋼材外縁部の金属光沢を有する刃物状の部分（図中 B）を上面と平行に撮影した SEM 像である。**図－7(b)** では、画面の全域にわたって平坦なへき開ファセットとリバーパターンと呼ばれるいくつかの並列した段差裂が認められる。これらは、塑性変形をほとんど生じることなく鋼材が破壊された際に生起される [8]。すなわち本観察点の近傍では、鋼材はスポールによって脆性的に破壊されたと考えられる。一方、**図－7(c)** では、画面のほぼ全域でディンプルが生じている。これは図中の上下方向に引き伸ばされた伸長ディンプルであり、せん断や引き裂きによる延性的な破壊が生じた際の特徴的な性状である [8]。

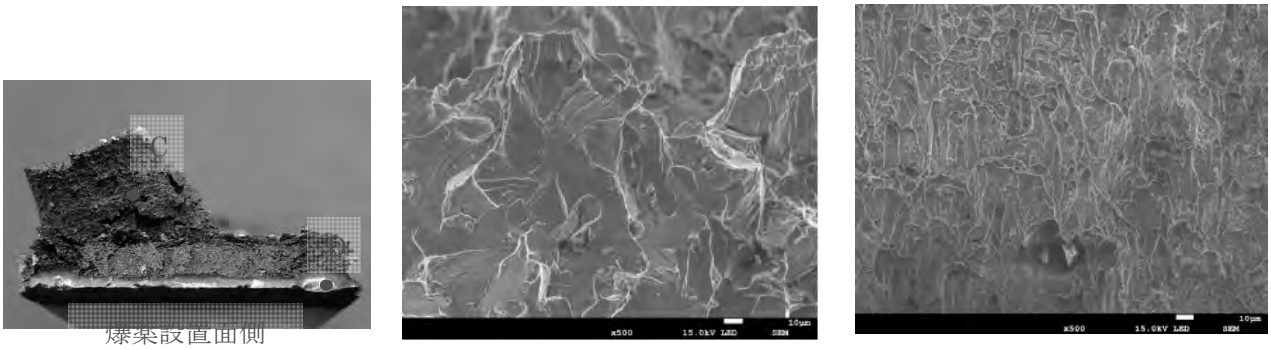
したがって、本実験においては、スポールによる脆性的な破壊とその後の爆風による延･脆性的な破壊で試験体が破断に至ったと考えられる。

図－8 は 12-24D の破面で、(b) (c) が SEM 像による微視的様相である。**図－8(b)** は破面のうち、凹凸が著しい薄片状を呈した部分（図中 C）を下面（爆薬設置面）と平行に撮影したもの、**図－8(c)** は鋼材外縁部の金属光沢を有する刃物状の部分（図中 D）を下面側と平行に撮影したものである。**図－8(b)** で



(a)巨視的様相　　(b) 点 A の SEM 像　　(c) 点 B の SEM 像

図－7　試験体 12-24S の破面



(a) 巨視的様相　　(b) 点 C の SEM 像　　(c) 点 D の SEM 像

図－8　試験体 12-24D の破面

は図のほぼ全域でへき開割れが認められ、脆性的な破壊、特にスポールによる破壊であったことが示唆される。一方、**図－8(c)**では図の上下方向に引き伸ばされた伸長ディンプルが認められ、スポールによる損傷を受けた試験体は、さらに爆風が作用することにより、爆薬設置面付近で延性的に引き裂かれて完全な破断に至ったことがうかがえる。

ここまでの検討から、試験体が接触爆発を受けた際にはシングル、ダブルの別を問わずスポールによる脆性的な破壊とその後の爆風による延･脆性的な破壊で試験体が破断に至ったと考えられる。

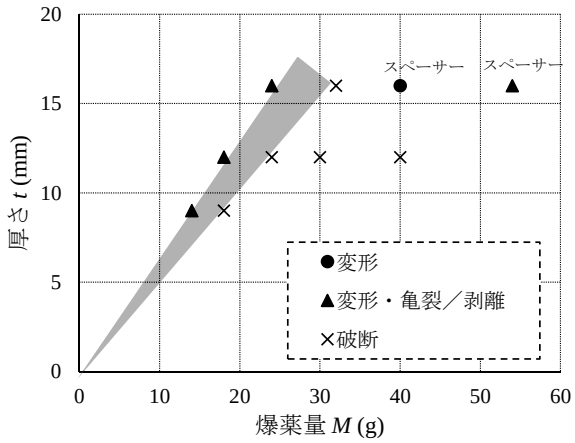
4. 損傷マップ

ここでは、鋼材が接触爆発を受ける場合において、爆薬量、鋼材の厚さが損傷性状に及ぼす影響を評価する。前章での検討により、接触爆発時の鋼材の損傷は主にスポールに起因することがわかった。スポールは、爆源から部材に入射した強力な圧縮応力波が部材の自由端で反射し、引張応力を生じさせることにより引き起こされる [9]。その応力波は伝播距離に対して非線形的に減衰され、材料の厚さの影響が極めて顕著である。そこで、縦軸に試験体の厚さ t(mm)を、横軸に爆薬量 M(g)をとり、本実験結果をプロットし、**図－9** の損傷マップを得た。

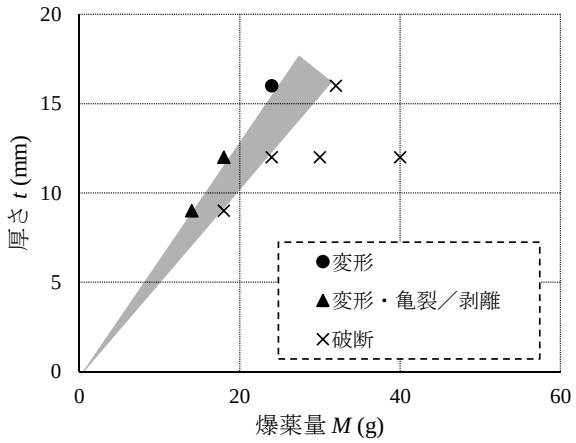
図－9 より、シングル、ダブルのそれぞれにおいて、破断の限界となる厚さと爆薬量の関係（以下、「破断限界」と呼ぶ。）が得られ、おおよそ図中に網掛けで示した範囲となる。この範囲は、本実験の条件においてシングル、ダブルの間で大きな差異はない。シングルでは爆薬 1 個の爆薬量がダブルの倍であるため、スポールのみで破断すると考えた場合はシングルの方が破断に要する爆薬量が少なくなると考えられるが、実際の結果はこれとは異なる。ダブルの場合は、破断しなかった側に配置されていた爆薬も破断に寄与していると考えられる。

破断限界は本実験の条件では一次式で表すことができるように見受けられるが、応力波の減衰は厚さに対して非線形の傾向があることを考慮すると、**図－9** から直ちに一次式の関係を見出すことには一考を要する。さらに板厚が大きい領域を中心としてデータを蓄積すれば、破断限界等の定式化が可能と考えられる。

なお、**図－9(a)**においてスペーサーを使用した場合は、使用しない場合と同じ損傷性状を与える爆薬量がかなり増大する。例えば、t=16mm で「変形・亀裂／剥離」に要する爆薬量はスペーサーがない場



(a) シングル



(b) ダブル

図－9　損傷マップ

合 24g 前後であるが、スペーサーを使用した場合は少なくとも 40g を上回り、実験では 54g で変形・亀裂／剥離となった。これは、バルサ材でできたスペーサーが、試験体に入射する応力波を緩和したことによると考えられる。

5. 結言

本研究では鋼材に対する接触爆発実験を行い、その損傷性状を調べるとともに、鋼材の断面寸法および爆薬量による鋼材の損傷マップを作成した。本実験で得られた主要な知見は以下のとおりである。

(1) 平鋼試験体が接触爆発を受けた際には、スポールが発生して試験体内部から爆発面と反対側の表面近傍にかけて脆性的に破壊されて剥離を生じ、その後に爆風の作用によって延・脆性的な破壊が複合的に生じて破断に至ると考えられる。
(2) 損傷マップにより破断限界を与える板厚と爆薬量との関係が示された。シングル、ダブルの間で破断限界に大きな差異はない。
(3) 厚さ 2mm のバルサ材でできたスペーサーを介して爆発を作用させた場合は、スペーサーがない場合と比較して同じ損傷性状を与えるために要する爆薬量がかなり増大する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K04962 の助成を受けたものです。本研究にあたり、防衛大学校火薬類実験施設の使用に際して、防衛大学校　甲賀誠教授、伊達新吾准教授のご協力をいただいた。実験の実施およびデータの処理にあたり、陸上自衛隊　森山源太氏、カンボジア王国陸軍　ペン・ダラポポール氏のご助力をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) Transportation Research Board: NCHRP Report 645 Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines, 2010.
2) Li, J. and Hao, H.: Numerical study of concrete spall damage to blast loads, International Journal of Impact Engineering Vol.68, pp.41-55, 2014.
3) Yan, B., Liu, F., Song, D. Y. and Jiang, Z. G.: Numerical study on damage mechanism of RC beams under close-in blast loading, Engineering Failure Analysis Vol.51, pp.9-19, 2015.
4) Shi, Y., Chen, L., Dang, Z. and Zhang, Z.: Field Tests on Spalling Damage of Reinforced Concrete Slabs Under Close-in Explosions, International Journal of Protective Structures Vol.6, No.2, pp.389-401, 2015.
5) 森下政浩，田中英明，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.
6) 大野友則，橋本 進，中村 弘：接触・近接爆発に対する SS400 鋼板の貫通限界厚さの推定，構造工学論文集 Vol.59A，pp.1048-1055, 2013.
7) Tang, K.C., and Hao, H.: Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations, Engineering Structures Vol. 32, pp. 3180-3192, 2010.
8) 吉田亨：破断面の見方－破面観察と破損解析，日刊工業新聞社, pp.57-61, 2005.
9) 林卓夫，田中吉之助：衝撃工学，日刊工業新聞社, p.146, 1988.

年次フォーラム 2021　令和 2 年度年次研究発表論文集

発行所　一般社団法人　防衛施設学会
160-0003　東京都新宿区四谷本塩町 14 番 5 号　大井ビル 2F
TEL：03-6273-0328　　FAX：03-3292-1485
E-mail：gakkai@jsdfe.org
http://www.jsdfe.org/

印刷所　株式会社大應
〒101-0047　東京都千代田区内神田 1 丁目 7 番 5 号
TEL：03-3292-1488

ISBN 978-4-907956-52-3
当該出版物の内容を転載する場合は，必ず（一社）防衛施設学会の許可を得て下さい.