

令和 7 年度 特別研究テーマ報告書
欧州における非破壊検査技術の研究に関する実地調査

東北大学大学院 修士 1 年 國生梨花
市川優希
上谷幸太郎
村岡永寿

1. はじめに

1) 本調査の目的

非破壊検査の研究開発が活発に行われている欧州の研究機関を対象に、先進的な検査手法や実際に導入されている検査機器の調査を行う。

現地での見学やヒヤリング・ディスカッションを通じて、最新の技術や運用方法について深く理解し、得られた知見をもとに、非破壊検査研究の発展に向けた新たな方針を模索・提案する。

2) 行程

訪問先にはイタリア・オランダ・ベルギーの三か国を選択した。表 1 に示す 3 大学を訪問し、研究施設の見学や現地研究者とのディスカッションを行った。各訪問先は、申請者自身や申請者らの指導教員と交流のある大学を選択し、指導教員を交えて事前に訪問申請を行った。以下の表 1 に訪問先と日程を示す。

表 1：訪問先と訪問日程

訪問場所	日程
[1] Politecnico di Torino (トリノ工科大学) Dr. Paola Antonaci https://www.polito.it/en	2025 10/7,8
[2] Université Libre de Bruxelles (ブリュッセル自由大学) Dr. Didier Snoeck https://www.vub.be/en	2025 10/10
[3] Delft University of Technology (デルフト工科大学) Dr. Yuguang Yang https://www.tudelft.nl/en/	2025 10/13

2. 非破壊検査の状況

1) 日本

非破壊検査は、構造物などを破壊することなく内部欠陥や劣化状態を評価できる技術であり、日本の産業基盤および社会インフラの安全性・信頼性を支える重要な要素技術である。石油プラント、建築鉄骨、橋梁、鉄道、航空機など、多岐にわたる分野で活用されており、事故防止や構造物の長寿命化に不可欠な役割を果たしている。

日本では、高度経済成長期に整備されたインフラや産業設備の老朽化が進行しており、新設中心の社会構造から、維持管理・予防保全を重視する社会構造へと移行してい

る。この変化に伴い、非破壊検査には、従来の欠陥検出に加え、設備の健全性評価、余寿命評価、状態監視保全といった高度な役割が求められるようになっている。一方で、現場における非破壊検査の実態は、依然として定期点検型の検査が中心であり、IoTやデータ解析技術を活用した予兆保全やオンラインモニタリングの導入は限定的である。その背景には、新技術導入に伴う初期投資負担、国内規格・制度との整合、運用ノウハウ不足などの課題が存在する。

技術面では、超音波探傷試験、放射線透過試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験といった従来技術が広く用いられる。一方、フェーズドアレイ超音波探傷試験（PAUT）やTOFD、デジタル放射線検査などの高度化技術は徐々に普及しつつあるものの、海外と比較すると実装・標準化の進展は必ずしも十分とは言えない状況にある。

人材面においては、非破壊検査技術者の高齢化および人材不足が顕在化している。非破壊検査は資格制度に基づく専門職であり、高度な知識と技能が求められるが、作業環境の厳しさや処遇面の課題から、若年層の参入が限定的である。これにより、技術伝承や検査品質の維持が中長期的な課題となっている。

このような背景から、非破壊検査分野においては、①新技術の実用化・標準化、②人材育成および技能伝承の高度化、③データ活用による保全の高度化、④検査業務の省人化・効率化といった取り組みが喫緊の課題となっている。

2) 欧州

欧州においても、非破壊検査は社会インフラおよび産業設備の安全性・信頼性を支える基盤技術として位置づけられている。特に、老朽化インフラへの対応を背景として、非破壊検査技術の研究開発から実証、社会実装までを一体的に推進する体制が整備されている。

制度面では、EN規格やISO 9712に基づく統一的な資格・標準体系が整備されており、国境を越えた技術者の流動性や研究成果の共有が進んでいる。このような標準化環境のもと、大学や研究機関は検査会社やインフラ管理主体と連携し、実構造物を対象とした実証研究を行うことが一般的である。

また、研究開発においては、検査の自動化・高度化やデータ活用を重視した取り組みが進められている。例えば、オランダでは、検査の自動化レベル（Level of Automation）を段階的に整理する考え方が導入されており、研究成果を段階的に現場へ適用する枠組みが構築されている。イタリアにおいても、非破壊検査協会（AIPND）を中心に、研究者と実務者の継続的な議論と情報共有が行われている。

このように欧州では、非破壊検査を単なる点検技術としてではなく、インフラのライフサイクルマネジメントを支える中核技術として位置づけ、研究と実務を強く結びつけた取り組みが進められている。

欧州における非破壊検査（NDT）技術、とりわけAE法（アコースティック・エミ

ッション法)の研究開発は、世界をリードする水準にある。今回の視察を通じ、単なる学術的探求に留まらず、インフラの維持管理や新材料開発に直結した産学官連携の強固な研究体制が確認された。

欧州の研究体制における最大の特徴は、EU 全体での規格整備と技術の標準化が進んでいる点にある。AE 法に関しては EN 規格等に基づいた共通の評価基準が確立されており、これが基礎研究と社会実装を円滑に結びつけている。その結果、大規模構造物を中心に AE 法を用いた常時監視が実務レベルで定着しており、研究成果が速やかに現場へと還元される環境が整っている。

各大学の研究体制においても、最新の材料科学と AE 法の高度な融合が見られた。イタリアのトリノ工科大学やベルギーのブリュッセル自由大学では、次世代の「自己治癒コンクリート」の研究に AE 法を不可欠な評価ツールとして導入している。トリノ工科大学では、図 1 に示す微生物カプセルを埋め込んだ自己治癒コンクリートに関して、治癒過程を AE 信号で追跡・監視するという研究に取り組んでいる。また、ブリュッセル自由大学では、高吸水性ポリマー (SAP) を用いたコンクリートの損傷進展に対し、AE 法を用いて微細な破壊挙動をリアルタイムで捉えている。これらは、新材料開発と検査技術の高度化が一体となって進められている欧州らしいアプローチと言える。一方、オランダのデルフト工科大学では、実験室から現場までをシームレスにつなぐ体制が構築されている。図 2 のような、実験室で実物大の鉄筋コンクリート梁を用いたひび割れ進展の精密分析を行う一方、現場では実際の道路橋に対し、トラック等で載荷し AE 計測を行うなど、実環境下での健全性評価が行われている。

今後の展望として共有されている課題は、AE 法の運用上の制約の克服である。本手法は対象に負荷をかけた際のエネルギーを捉える性質上、能動的な負荷が必要な点が欠点となる。また、現状で得られる情報は二次元的なものが多く、これを三次元情報 (3D ソースロケーション) へと拡張し、探査深度を向上させることが求められる。



図 1：微生物カプセルを用いた
コンクリート試験体



図 2：実物大 RC 梁の載荷試験の様子

3. 今後の非破壊検査技術の展望

欧州視察を通じて得られた最大の知見は、AE 法が単なる「点検手法」の枠を越え、構造物の安全性を科学的に裏付ける「機能証明の基幹ツール」として確立されている点である。ディスカッションを通じて我々は、日本国内における非破壊検査技術のさらなる発展と社会実装を加速させるためには、以下の 3 つの取り組みを軸とした施策が必要であると考えている。

第一に、欧州で見られたような実構造物への AE 法適用の積極的な展開である。デルフト工科大学では、既存橋梁の評価プロセスの最終段階として、実荷重試験に AE 法を組み合わせた Structural Health Monitoring を実践していた。日本においては、従来の目視点検や試験体単位での載荷試験だけでなく、能動的に構造物本体へ負荷をかけて、構造物の耐力を直接評価する体制を構築すべきである。パッシブセンサーを用いたリアルタイムモニタリングや、3 次元的な損傷評価（パンチング破壊の予兆検知等）の実績を国内の現場で積み重ねることで、AE 法に対する信頼が向上する。

第二に、多角的な次世代材料に対して、実験室単位での適用事例を増やすことである。視察では、自己治癒コンクリート、硫黄コンクリート、SAP 添加材料など、多様な新材料の開発において AE 法が「微細な挙動を可視化する一つ的手段」として活用されていた。日本が得意とする環境配慮型材料やスマートマテリアルの研究においても、AE 法を機能評価の標準ツールとして導入すべきである。特に、信号システム（数理モデルによる情報抽出）を高度化し、ひび割れが「いつ、どこで、どの程度」発生し、それがどのように治癒したかを定量化する事例を増やすことで、材料開発のスピードと質を向上させることができる。

第三に、これらの技術を社会実装するための規格整備である。欧州で AE 法が普及している背景には、EN 規格のような EU 全体での標準化が寄与している。日本においても、センサーの設置方法（1m 間隔やグリスの使用等）や、周波数帯域に応じた探査深度の定義、AI を用いたノイズ除去プロトコルなどを、産学官が連携して規格化・標準化する必要がある。明確なガイドラインが存在することで、民間企業による新たな非破壊検査手法の導入が促進され、検査技術が「学術的な検討」から「インフラ管理の実務」へと昇華する。

結論として、日本における非破壊検査技術の発展は、個別の技術力向上に留まらず、実現場での実績、多様な材料への適用、そして制度的裏付けの 3 点を統合することにかかっている。AE 法を機能証明のツールとして再定義し、高度な信号処理システムと融合させることで、持続可能なインフラ管理社会の実現に寄与できると確信している。

4. 大学訪問・議論を通して

1) トリノ工科大学

トリノ工科大学への訪問では、自己修復モルタル試料の破壊メカニズムに関する最新の研究発表を拝聴した。具体的には、ポリウレタン樹脂を充填したマクロカプセルが亀裂形成時に自己修復機構を促進する仕組みや、格子離散要素法 (LDEM) を用いた数値シミュレーションによって、実験のみでは評価が困難な樹脂の破壊エネルギーを推定する手法について学んだ。さらに、自己修復試験片において放出される音響放射 (AE) エネルギーの増加に伴い破壊エネルギーが減少するという、靱性と AE 活性の相関関係についても理解を深めることができた。加えて、自身の研究テーマである建設用 3D プリンティング (3DCP) に関しても、材料の特性や補強方法など、今後考慮すべき課題について専門的な視点から有意義な意見交換を行った。

2) ブリュッセル自由大学

ブリュッセル自由大学を訪問し、同大学の学生が取り組んでいる「マイクロファイバーや PP 繊維を統合した 3D TRC (テキスタイル補強コンクリート)」や「硫黄コンクリート」に関する最新の研究をはじめ、「環境配慮型の新たな養生方法の開発」、「AE (アコースティック・エミッション) を用いた自己修復プロセスの経過観察」、「木材を用いた構造最適化」といった多岐にわたる研究テーマについて共有を受けた。これに対し、我々が日本で進めている研究内容についても発表を行い、双方の知見に基づいた活発な質疑応答を交わすことで学術的な交流を深めた。その後、実際にこれらの研究が行われている実験室の見学を行い、試験装置や測定デバイスの運用状況を直接確認するなど、非常に有益な知見を得る機会となった。

3) デルフト工科大学

デルフト工科大学では、同大学が推進する AE (アコースティック・エミッション) 法を用いた既存コンクリート橋の損傷評価技術についての講義および議論を行った。同大学の研究者との議論を通じて、実環境特有の背景ノイズから損傷に起因する有意な信号を抽出する高度な識別アルゴリズムや、抽出したデータを構造力学的な耐力推定モデルへと統合する最新の手法について、詳細な知見を得た。

AE 法が有する「広域的かつ動的な異常検知能力」と、サブテラヘルツ波が有する「局所的かつ精密な画像診断能力」を相補的に組み合わせた、インフラ維持管理体系の構築に向けて協議した。現在の技術的限界と課題を相互に共有し、今後の研究の方向性および指針を考えるための参考にすることができた。



図 3：トリノ工科大学でのミーティング



図 4：ブリュッセル自由大学の様子
(上：ミーティングの様子 下：実験設備)



図 5：デルフト工科大学でのレクチャー

5. まとめ

- 本視察を通じて、欧州における非破壊検査（NDT）および AE 法の研究が、基礎研究・実証研究・社会実装まで一体化した体制で推進されていることを実感し、研究が実務および社会課題の解決と強く結びついている点に大きな意義を感じた。
- 新材料開発と非破壊検査技術が不可分の関係として位置づけられ、評価技術が研究の「付加要素」ではなく「中核的手法」として機能している欧州の研究体制から、多くの示唆と学術的刺激を受けた。
- 特に三次元的評価に基づく健全性把握の概念は極めて魅力的であり、構造物や材料の形成・変形プロセスを時間軸と空間軸の統合的視点から捉える研究の重要性を強く認識した。
- 我々の研究室で取り組んでいる、コンクリート 3D プリンタの積層過程における積層体の異常検知や、テラヘルツ波を用いたコンクリート構造物の健全性評価の研究について、本視察で得られた知見および国際的な研究ネットワークを活かし、研究成果の実用化・社会実装を見据え、体系的な研究基盤として発展させていきたい。

6. 謝辞

本海外研修は、前田記念工学振興財団より多大なご支援を賜ったことにより実現いたしました。渡航費をはじめとする研修に必要なご助成を賜り、海外へ渡航し現地の大学を実際に訪問するという、極めて貴重な研修の機会を得ることができました。

国内にとどまっていたのでは決して得ることのできない、異なる研究体制に直接触れることで、コンクリート構造物への非破壊検査技術に対する視野を広げる契機となりました。

このような学びの場をご提供くださいました前田記念工学振興財団の関係者の皆様に、心より深く感謝申し上げます。また、ご多忙の中にもかかわらず訪問の機会を提供くださった大学関係者の皆様に、深く感謝申し上げます。本研修を通じて得られたご縁を今後も大切にしていきたいと思いをします。

We would like to express our deepest and most sincere thanks to the university who kindly agreed to visit us. We will cherish this relationship without ceasing.



図 6 : Antonaci 教授、
Fantilli 教授と共に

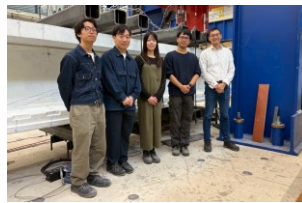


図 7 : Yang 教授と共に

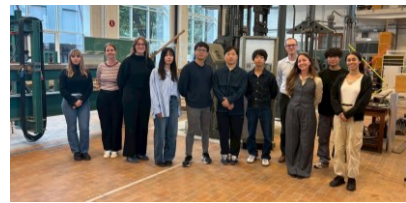


図 8 : Snoeck 教授、
研究室の学生らと共に

7. 参考文献

- 1) JSNDI : 産業課題マップ, <https://www.jsndi.jp/pdf/1906241031426.pdf>, 2019