

建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を
活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性
評価法の開発研究
(委託研究)

—令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Development of a Hybrid Method for Evaluating the Long-term Structural
Soundness of Nuclear Reactor Buildings Using Response Monitoring and
Damage Imaging Technologies
(Contract Research)

-FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
東北大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Tohoku University

March 2023

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の
原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究
(委託研究)

—令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉環境国際共同研究センター

東北大学

(2022年11月24日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という）を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、令和3年度に採択された「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」の令和3年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、高放射線量率と高汚染のため、現場への接近性が極端に限られるような事故を経験した原子炉建屋の長期構造健全性を見通しを得るために必要な評価手法を開発しようとするものである。

3ヵ年計画の初年度である令和3年度は、(1)地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発、(2)電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発、(3)損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発、(4)総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案、(5)研究推進の研究項目について具体的な研究方法を明確にして研究の方向付けを行うとともに、必要な諸準備を行い、一部の試験や活動を行った。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東北大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development of a Hybrid Method for Evaluating the Long-term Structural Soundness of Nuclear Reactor Buildings Using Response Monitoring and Damage Imaging Technologies

(Contract Research)

— FY2021 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development

Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Tohoku University

(Received November 24, 2022)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2021.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2021, this report summarizes the research results of the “Development of a hybrid method for evaluating the long-term structural soundness of nuclear reactor buildings using response monitoring and damage imaging technologies” conducted in FY2021.

The present study aims to develop an evaluation method necessary to obtain a perspective on the long-term structural soundness of accident-damaged reactor buildings, where accessibility to work sites is extremely limited due to high radiation dose rate and high contamination.

In FY2021, the first year of the three-year plan, the following research items were undertaken by clarifying specific research methods, setting research directions, making necessary preparations, and conducting some tests and other activities. (1) Method for evaluating the building by monitoring the response to earthquakes and other disturbances, (2) Damage detection technology for concrete structures using electromagnetic waves, (3) Evaluation method for concrete materials and structures based on damage detection information, (4) Comprehensive soundness evaluation method and a long-term maintenance plan, (5) Promotion of the research.

Keywords: Concrete Structure, Long-term Soundness, Degradation, Soundness Evaluation, Non-destructive Inspection and Monitoring, Acceleration and Gyro Sensor, Tera Hertz Wave, Maintenance Plan

This work was performed by Tohoku University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
付録 成果報告書	13

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
Appendix Result Report	13

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。)に係る研究開発を進めている。

また、平成29年4月にCLADSの中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後はCLADSを中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英共同研究）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

- 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
- 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
- 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
- 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (~R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1~)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島2・3号機ペダスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによるALPS沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (~R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1~)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~R2. 3. 31) 竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4. 7. 31) 村上 健太 (R4. 8. 1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー加速器研究機構
α / β / γ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・航空技術研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和3年3月16日～令和3年5月17日（課題解決型）
 令和3年4月13日～令和3年7月1日（国際協力型 日英共同研究）
 令和3年7月12日～令和3年8月18日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）、2 課題（日露）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英・日露共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (~R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1~)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

本報告書は、以下の課題の令和3年度の研究成果を取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録
成果報告書

This is a blank page.

令和 3 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

建屋応答モニタリングと損傷イメージング

技術を活用したハイブリッド型の

原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究

(契約番号 R03I136)

成果報告書

令和 4 年 3 月

国立大学法人東北大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」の令和3年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	viii
1. はじめに	1. 1-1
2. 業務計画	2. 1-1
2.1 全体計画	2. 1-1
2.2 実施体制	2. 2-1
2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法	2. 3-1
2.3.1 実施内容	2. 3-1
2.3.2 令和3年度の研究スケジュール	2. 3-3
3. 実施内容及び成果	3. 1-1
3.1 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発	3. 1-1
3.1.1 令和3年度実施内容及び成果	3. 1-1
3.1.2 まとめ	3. 1-30
3.2 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発	3. 2-1
3.2.1 令和3年度実施内容及び成果	3. 2-1
3.2.2 まとめ	3. 2-13
3.3 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発	3. 3-1
3.3.1 令和3年度実施内容及び成果	3. 3-1
3.3.2 まとめ	3. 3-25
3.4 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案	3. 4-1
3.4.1 令和3年度実施内容及び成果	3. 4-1
3.4.2 まとめ	3. 4-11
3.5 研究推進	3. 5-1
3.5.1 研究課題間の連携・調整	3. 5-1
3.5.2 国内外機関との連携などの推進	3. 5-5
3.5.3 プロジェクト推進・取りまとめ	3. 5-5
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

事業代表者	国立大学法人東北大学	教授	前田 匡樹
		特任教授	青木 孝行
		准教授	西脇 智哉
		助教	Hamood Alwashali
再委託先	学校法人芝浦工業大学	教授	田邊 匡生
	国立大学法人東京工業大学	准教授	西村 康志郎
	学校法人日本工業大学	助教	田中 章夫
	独立行政法人国立高等専門学校機構	木更津工業高等専門学校	
		准教授	藤井 翔
連携先	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	副ディビジョン長	上野 文義
		グループリーダー	菖蒲 敬久
		研究員	栗田 圭輔

表一覧

表 2.1-1	本提案の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法	2.1-1
表 2.1-2	本提案のコンクリート構造物損傷検知技術	2.1-2
表 2.1-3	本提案のコンクリート材料の経年劣化の推定法	2.1-2
表 2.3-1	令和3年度研究スケジュール	2.3-3
表 3.1-1	有限要素モデルの部材断面寸法一覧	3.1-14
表 3.1-2	有限要素モデルの材料特性一覧	3.1-14
表 3.1-3	使用した MEMS センサー一覧	3.1-18
表 3.1-4	卓越振動数での角速度スペクトル振幅の誤差率	3.1-23
表 3.1-5	装置卓越振動数での変位スペクトル振幅の誤差率	3.1-25
表 3.1-6	振動数 0.0 Hz での変位スペクトル振幅の誤差率	3.1-26
表 3.3-1	試験体のコンクリート調合	3.3-2
表 3.3-2	実験水準	3.3-5
表 3.3-3	コンクリートの調合計画	3.3-13
表 3.3-4	試験体水準	3.3-14
表 3.3-5	モルタル・コンクリートの計画調合	3.3-18
表 3.3-6	モルタル・コンクリート及び基準試験体の実験水準	3.3-18
表 3.4-1	損傷リスク重要度評価方法	3.4-8
表 3.4-2	事故炉廃止措置における原子炉建屋の長期保全計画（イメージ）	3.4-11
表 3.5-1	全体会議の開催実績	3.5-2
表 3.5-2	研究課題ごとのグループ会議の開催実績	3.5-3

図一覧

図 1-1	1F 廃炉支援基盤研究部門の位置付け	1. 1-1
図 1-2	原子炉廃止措置基盤研究センターの研究連携ハブ機能	1. 1-1
図 2. 1-1	テラヘルツ/サブテラヘルツ波によるコンクリート構造物の 探傷技術の概念	2. 1-2
図 2. 2-1	研究の実施体制	2. 2-1
図 3. 1-1	3 号機の立断面図	3. 1-1
図 3. 1-2	3 号機の平面図	3. 1-2
図 3. 1-3	3 号機の等価質点系解析モデル	3. 1-3
図 3. 1-4	平成 23 年東日本大震災で 3 号機のマット基礎で記録された加速度	3. 1-4
図 3. 1-5	平成 23 年東日本大震災の 3 号機での観測記録の地震応答スペクトル	3. 1-4
図 3. 1-6	質点系モデルの設定と仮定	3. 1-5
図 3. 1-7	損傷前と損傷後の解析モデルの質量・剛性分布の比較	3. 1-5
図 3. 1-8	EW 方向の固有振動モード	3. 1-6
図 3. 1-9	平成 23 年東日本大震災の観測記録による応答加速度の フーリエスペクトル	3. 1-6
図 3. 1-10	平成 23 年の観測地震動による損傷前後の 3 号機の EW 解析モデルの 地震応答の比較	3. 1-7
図 3. 1-11	線形補間法・モード形補間法による応答推定法の概念	3. 1-8
図 3. 1-12	センサの数・配置の検討対象モデル	3. 1-9
図 3. 1-13	非観測階の応答推定の手法による最大変位の推定値	3. 1-9
図 3. 1-14	センサの数による最大変位の推定値	3. 1-10
図 3. 1-15	センサが 2 個の場合のセンサの配置ケース	3. 1-10
図 3. 1-16	センサが 3 個の場合のセンサの配置ケース	3. 1-10
図 3. 1-17	センサの位置を変えた場合の誤差の推定	3. 1-11
図 3. 1-18	階の剛性低下を考慮した解析ケース	3. 1-11
図 3. 1-19	ケース 1 の剛性劣化を考慮した場合の応答推定誤差	3. 1-12
図 3. 1-20	ケース 2 の剛性劣化を考慮した場合の応答推定誤差	3. 1-12
図 3. 1-21	原子炉建屋を模した有限要素モデル	3. 1-13
図 3. 1-22	有限要素モデルの固有値解析結果 (PCV・RPV 要素有り)	3. 1-15
図 3. 1-23	有限要素モデルの固有値解析結果 (PCV・RPV 要素無し)	3. 1-16
図 3. 1-24	振動装置図	3. 1-17
図 3. 1-25	実験の様子	3. 1-17
図 3. 1-26	使用した MEMS センサ	3. 1-18
図 3. 1-27	加速度センサ A と変位計の変位の比較	3. 1-19
図 3. 1-28	ジャイロセンサと変位計による角速度の比較	3. 1-20
図 3. 1-29	ジャイロセンサと変位計による変位の比較	3. 1-21
図 3. 1-30	加速度センサ A の誤差率：誤差率 = {(センサ) - (変位計)} / (変位計)	3. 1-22
図 3. 1-31	ジャイロセンサと変位計による角速度スペクトルの比較	3. 1-23

図 3.1-32	ジャイロセンサと変位計による変位スペクトルの比較	3.1-25
図 3.1-33	鉄筋コンクリート梁試験体の加力方法と加速度センサの位置	3.1-26
図 3.1-34	変位算定に用いるたわみ曲線	3.1-27
図 3.1-35	加速度センサ A と変位計による梁中央変位の比較	3.1-28
図 3.1-36	加速度センサ A の多点観測による梁中央変位の誤差率	3.1-29
図 3.2-1	近距離による詳細診断を志向した周波数選択計測システムの設計図	3.2-1
図 3.2-2	近距離による詳細診断を志向した周波数選択計測システムの光学系	3.2-2
図 3.2-3	金属円板の反射／透過イメージング像	3.2-2
図 3.2-4	試験体のひび割れ幅とサブテラヘルツ波の透過及び反射の関係	3.2-3
図 3.2-5	ひび割れを解析するアルゴリズム	3.2-4
図 3.2-6	コア抜きサンプルの内部に水平分布するひびのテラヘルツ反射率測定	3.2-5
図 3.2-7	内部に亀裂が斜め方向に発生する試験体のテラヘルツ反射率測定	3.2-5
図 3.2-8	遠隔診断を志向した光学系の模式図（上）と外観（下）	3.2-6
図 3.2-9	測定した反射ならびに透過のイメージ像	3.2-7
図 3.2-10	塗膜材料のテラヘルツ時間領域分光測定結果	3.2-7
図 3.2-11	水蒸気のテラヘルツスペクトル	3.2-8
図 3.2-12	コンクリート試験体の CMOS カメラで取得した可視像（左）と 24 GHz でのサブテラヘルツイメージング像（右）	3.2-9
図 3.2-13	CMOS カメラの可視像とサブテラヘルツイメージング像の重ね合わせ	3.2-9
図 3.2-14	FDTD による計算モデルと伝搬による電界強度変化	3.2-10
図 3.2-15	試験条件決定に用いた試験体の図と測定結果	3.2-11
図 3.2-16	鉄筋コンクリート模擬試験体の仕様の概念図	3.2-12
図 3.2-17	中性子イメージング計測の自動化のイメージ図	3.2-13
図 3.3-1	試験体形状	3.3-2
図 3.3-2	テラヘルツ・サブテラヘルツ波の周波数帯域	3.3-3
図 3.3-3	反射波を用いた測定系の概要	3.3-4
図 3.3-4	ひび割れを模擬したスリット測定の模式図	3.3-5
図 3.3-5	鉄筋コンクリート試験体・健全部分	3.3-6
図 3.3-6	鉄筋コンクリート試験体・ひび割れ部分	3.3-6
図 3.3-7	材質の違い	3.3-7
図 3.3-8	埋設金属の深さ	3.3-8
図 3.3-9	埋設金属の深さ（差分）	3.3-8
図 3.3-10	スリット（ひび割れ）幅	3.3-9
図 3.3-11	スリット部の反射率変化	3.3-10
図 3.3-12	スリット部の反射率の推移	3.3-10
図 3.3-13	仕上げ材裏面のひび割れ幅	3.3-11
図 3.3-14	仕上げ材厚さの影響	3.3-11
図 3.3-15	高温加熱を経たコンクリートの応力-ひずみ曲線	3.3-12

図 3.3-16	加熱による性能低下（試験体厚さ 30 mm）	3.3-12
図 3.3-17	試験体作製状況	3.3-14
図 3.3-18	試験体の概要	3.3-14
図 3.3-19	腐食ひび割れの発生状況	3.3-15
図 3.3-20	付着試験方法の概要	3.3-16
図 3.3-21	積算電流値と腐食減少率の関係	3.3-17
図 3.3-22	積算電流値と付着応力度の関係	3.3-17
図 3.3-23	測定系の概要	3.3-19
図 3.3-24	水セメント比による影響【含水状態：絶乾】	3.3-20
図 3.3-25	フライアッシュの異なる添加量による影響【含水状態：絶乾】	3.3-21
図 3.3-26	含水率による影響	3.3-22
図 3.3-27	内部欠陥を模擬したコンクリートの観察結果【含水状態：絶乾】	3.3-24
図 3.4-1	本研究プロジェクトの各研究課題の位置付け	3.4-1
図 3.4-2	研究課題(1)の最終成果のイメージ	3.4-2
図 3.4-3	研究課題(2)の最終成果のイメージ	3.4-2
図 3.4-4	研究課題(3)の最終成果のイメージ	3.4-3
図 3.4-5	研究成果の社会実装のイメージ	3.4-3
図 3.4-6	安全リスクを考慮した廃止措置活動と設備保全活動	3.4-5
図 3.4-7	安全リスク管理の基本戦略	3.4-6
図 3.4-8	原子炉建屋の閉じ込め機能の構成要素	3.4-7
図 3.4-9	原子炉建屋の密閉機能の修復方法と保全	3.4-7
図 3.4-10	損傷リスク重要度による保全対象の優先順位付け	3.4-9
図 3.4-11	原子炉建屋の着目すべき箇所と検査・モニタリング方法	3.4-10

略語一覧

1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
CT	: Computer Tomography (コンピュータ断層撮影)
FE	: Finite Element (有限要素)
FEM	: Finite Element Method (有限要素法)
JAEA	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
JRR-3	: Japan Research Reactor No.3 (研究用原子炉 JRR-3)
MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems (微小電子機械システム)
PCV	: Primary Containment Vessel (原子炉格納容器)
RPV	: Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器)
TNRF	: Thermal Neutron Radiography Facility (熱中性子ラジオグラフィ装置)

概略

1. 本研究の背景

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、1F と略記。）では東北地方太平洋沖地震をきっかけに発生した事故の収束に向け、国の威信をかけてオールジャパン体制で中長期ロードマップに基づき廃止措置に取り組んでいる〔Ⅰ〕〔Ⅱ〕。

東北大学は東日本大震災からの復興・新生を先導することを歴史的使命であると考えており、平成 25 年に制定した全学ビジョン（里見ビジョン）の中でも「復興・新生の先導」を 2 大目標の 1 つとした〔Ⅲ〕。この目標を達成するため、震災直後に開始した 8 つの全学的プロジェクトと 100 を越える構成員提案型プロジェクトを継続的に推進するとともに、復興を加速するための新規プロジェクトを立案・開始することとした。その 1 つが本事業を位置付けている「福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置に向けた基礎・基盤研究と人材育成の推進」である。その後、平成 30 年に制定された新たな全学ビジョン（東北大学ビジョン 2030）においても重点戦略「震災復興から持続可能な社会創造を見据えた新たな課題解決型研究の展開」の中に位置付けて取り組んでおり〔Ⅳ〕、この活動は東北大学が掲げる SDG s である「社会にインパクトある研究」の 30 プロジェクトなどをさらに発展させ、新たに「Green Technology」、「Recovery & Resilience」、「Social Innovation & Inclusion」の 3 つの柱の下、グリーン未来社会の実現に貢献することを目的として本年 4 月に設置された「グリーン未来創造機構」の活動に位置付けられている〔Ⅴ〕。

以上のような経緯の中、東北大学は工学系を中心とした広範な分野の研究室が連携した全学横断組織である「原子炉廃止措置基盤研究センター（以下、CFReND と略記。）」を平成 28 年 12 月 1 日に設置し、廃止措置に関する基盤研究及びそれを担う人材の育成に取り組んでいる。本研究では、この CFReND を研究のプラットフォームとし、関係する本学教員に加え、学校法人芝浦工業大学、国立大学法人東京工業大学、学校法人日本工業大学、独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校（以下、木更津高専と略記。）及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と略記。）の専門家の協力を得て、本研究を実施する。

2. 令和 3 年度に解決すべき課題

最終的な研究成果を得るために、初年度である令和 3 年度は、具体的な研究方法を明確にして研究の方向付けを行うとともに、必要な試験などを実施するための諸準備を行い、本格的な研究を行うための諸条件を整える必要が有る。また、人材育成面においては、原子炉廃止措置に関する教育プログラムの準備を進める必要が有る。

3. 令和 3 年度の本研究の目的

令和 3 年度は、具体的な研究方法の検討や必要な試験などを実施するための諸準備を行い、本格的な研究を行えるよう諸条件を整えるとともに、一部の試験を実施し、所定の成果を挙げることを目的とする。

4. 令和 3 年度の研究の実施内容

令和 3 年度実施した内容を以下に示す。

(1) 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

① 動的応答・振動性状の観測及び評価

- ・ 東京電力ホールディングス株式会社（以下、東京電力と略記。）など専門家の協力を得て、1F 建屋の構造性能や解析モデルに関する情報を収集する。
- ・ 建屋構造の解析モデルを設定し、各層での高次の振動モードの影響を検討する。

- ・ 解析モデルによってセンサ位置のシミュレーションを行い、誤差が最小限となるように解析モデルを調整した上でセンサ非設置層の応答やセンサの最適な数と位置を評価する。その結果に基づき最小数の加速度センサの設置位置を提案する。
- ② 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）
- ・ 振動装置には 1 自由度の簡易な振動装置を作製して、対象建物に適用できる固有周期に調整する。
 - ・ 振動装置に加速度センサとジャイロセンサを取り付けて、振動時と静止時の回転角を測定する。同時に、変位計を用いた従来の方法でも回転角を測定し、計測精度を確認する。
 - ・ 得られた計測値のデータ処理方法を検討する。建物に適用するには多数の計測点が必要なので、必要なサンプリング周波数や容量を、ノイズ除去方法などを組み合わせながら検証する。
- (2) 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発
- ① テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）
- ・ サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数、可変のビーム径と偏光方向でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を得ることができる損傷検知システム（計測システム）を設計する。
 - ・ 中性子イメージングによりひび割れの位置と幅が規定された鉄筋コンクリート試験体をリファレンスに使用することを想定して、ひびのサイズと方向に対する電磁波の散乱度を複数の電磁波で理論的に多元解析できるアルゴリズムを検討するとともに、計測に適切な周波数を検討する。
- ② サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）
- ・ サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を任意のビーム径と偏光方向で得ることができる損傷検知システム（計測システム）を組み上げ、その動作を確認する。
 - ・ コンクリートの表層に形成されているモルタルやエポキシなどの各種塗膜に対する透過性を任意の厚さで系統的に評価するとともに、遠隔計測に適用する周波数を検討する。
 - ・ 従来から有る CMOS カメラの可視像も取り込み、建屋全体の損傷を広いレンジで可視化できる損傷検知のための技術基盤（画像処理）の枠組みを構築する。
- ③ 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証（連携先：原子力機構）
- ・ 令和 4 年度及び 5 年度で実施する JRR-3 における中性子イメージング実験の条件を検討し、決定する。
 - ・ 前項目で決定した使用に基づき、テラヘルツイメージング技術の検証に用いる鉄筋コンクリート試験体の仕様を東北大学などと検討し決定する。
 - ・ 中性子イメージング実験に必要なステージ・治具などの周辺機器と撮像系の仕様を決定する。

- ・ 前項目で決定した仕様に基づいて、周辺機器を設計し、製作を開始する。また、オフラインでの撮像系の試験を行う。

(3) 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

① コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

- ・ 1F 建屋で想定される環境的・力学的作用によるコンクリートのひび割れなどを導入したコンクリート及び鉄筋コンクリート試験体の作製を行う。コンクリートの表層部から内部のひび割れや剥離といった劣化を、載荷試験や模擬欠陥の埋設などにより与えた試験体を作製する。
- ・ 上記の試験体に対し、テラ（サブテラ）ヘルツ波での基礎的な測定を実施できる装置を整備する。

② 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）

- ・ 鉄筋腐食が発生し、内部欠陥（剥離などによる付着不良）が発生した鉄筋コンクリートの性状をテラ（サブテラ）ヘルツ波を用いて評価するため、鉄筋腐食を起し内部欠陥を有するコンクリート試験体を作製する。これにあたり、導入欠陥を制御可能な付着試験方法を検討する。また、含水率条件が異なるコンクリート試験体も作製する。
- ・ 作製した試験体にテラ（サブテラ）ヘルツ波を照射し、内部欠陥・含水率条件が異なる試験体を観察する。

(4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

- ・ 上記(1)～(3)でモニタリング、観測、評価を計画している建屋コンクリート構造物に対して、1F 建屋の構造性能健全性を効果的に評価するために、必要な部位・部材や検討すべき項目を抽出し、課題を整理する。
- ・ 建屋モニタリング研究(上記(1))に対しては、建屋全体の振動周期や地震応答変形に加えて、変形推定が必要な重要な部位・部材の情報を提供する。
- ・ 電磁波イメージング研究(上記(2))に対しては、建屋の構造性能劣化の評価・推定のために、必要なひび割れ損傷の情報を整理して提供する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で、各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（以下、CLADS と略記。）などとの連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議などを開催する。

5. 令和3年度の成果

前項目で述べた実施内容が計画通り実施され、当初想定していた成果が得られた。この成果により、今後予定している研究の準備が整うとともに、一部試験を実施しその成果も得られたので、令和4年度の研究が実施できる状況となった。

6. 令和4年度の見通し

前述のように、計画通り令和3年度の成果をあげることができたので、令和4年度はこれまでの計画に基づき下記を実施できる見込みである。

(1) 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

①-1 動的応答・振動性状の観測

- ・ 小型建屋模型を用いて振動実験を実施し、応答と振動特性に関するデータを収集する。
- ・ 損傷を想定して構造特性を変化させた小型建屋模型の振動実験を実施し、解析モデルの応答や振動性状と比較する。

①-2 動的応答・振動性状の評価（再委託先：岡山大学）

- ・ 小型建屋模型の振動実験と応答解析に基づいて、観測データを用いて限られた数のセンサで建屋の応答と振動特性を推定する方法を検討する。
- ・ 加速度センサによる観測データに基づき、解析モデルを修正して応答や振動性状を同定する方法を検討する。

② 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）

- ・ 鉄筋コンクリート壁試験体を用いた振動台実験を行い、加速度センサとジャイロセンサを用いて動的な変形性状を測定する。
- ・ 鉄筋コンクリート壁試験体を用いた静的加力実験を行い、振動台実験との結果と比較することで、動的な変形性状測定の基礎技術を開発する。
- ・ 原子炉建屋を模した有限要素法（以下、FEM と略記。）モデルを作成し、センサの取り付け位置を選定するための基礎的な手法を開発する。

(2) 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

① テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

- ・ 中性子イメージング技術で測定されたひび割れを有する鉄筋コンクリート試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波イメージングレーダを適用して得られる画像情報を補完処理し、検知精度を向上させる方法を検討する。
- ・ 鉄筋コンクリート中に含まれる水分や鉄筋の腐食生成物に対してサブテラ/テラヘルツ波の反射率がどのように変化するか解析し、内部損傷の検出精度を高める。

② サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

- ・ 構築している損傷測定システムを用いて、中性子イメージング技術で測定されたひび割れを有する鉄筋コンクリート試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波イメージングレーダで遠隔測定を実施する。
- ・ 従来から知られている腐食反応と分析化学手法との相関を補完するため、鉄筋コンクリート構造物内部の非接触検査に必要となる水分量や鉄筋の腐食状態を変化させた試験体に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術を適用し、その反射率を測定する。

③ 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証（連携先：原子力機構）

- ・ 令和3年度に決定した JRR-3 における中性子イメージング実験の条件及び鉄筋コンクリート試験体の仕様に基づき、JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィ装置（以下、TNRF と略記。）を使用した中性子イメージング実験により、テラヘルツイメージング技術の検証に用いる鉄筋コンクリート試験体内部のひび割れ位置とサイズを定量的に評価する。

(3) 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

① コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

- ・ 劣化（模擬ひび割れ）を導入したコンクリート試験体（令和3年度に作製済み）に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した劣化状態、及び、ひずみ応力曲線などの力学特性それぞれと測定結果の関係を整理し、キャリブレーション方法を検討する。
- ・ 上記の検討結果に基づき、下記③で実施する FEM 解析の条件を踏まえて劣化を導入したコンクリートの試験体を新たに作製し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術によるひび割れ量の測定を行い、マクロな情報として測定結果を解釈するための方法を検討する。

② 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）

- ・ 腐食グレード（内部ひび割れによる発生状況）の異なる鉄筋コンクリート試験体（令和3年度に作製済み）に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した腐食グレードと引抜時の力学特性（一体性）との関係を整理する。
- ・ 鉄筋腐食に関連するコンクリートの含水率について、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による評価方法を提案する。
- ・ 下記③で実施する FEM 解析の条件を踏まえて腐食グレードと含水率を変化させた鉄筋コンクリートの試験体を作製し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による鉄筋とコンクリートとの付着劣化特性の測定を行う。

③ 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（再委託先：大阪公立大学）

- ・ 鉄筋コンクリート造耐震壁に関する既往の実験研究を対象とした、3次元 FEM 解析を行い、構造特性及び破壊性状について実験結果との比較を通じて解析モデルの妥当性を検証する。
- ・ 耐震壁の損傷箇所及び損傷程度を任意に設定し、これらを変数としたパラメトリック解析を通して、部材の構造特性劣化に対しクリティカルな損傷条件を検討する。

(4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

- ・ 上記(1)～(3)でモニタリング、観測、評価を計画している建屋コンクリート構造物に対して、1F 建屋の構造性能健全性を効果的に評価するために、引き続き、検討すべき項目を抽出し、課題を整理する。
- ・ 複数の観測データに基づく建屋の構造健全性評価の枠組を検討する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で、各研究項目間ならびに CLADS などとの連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議などを開催する。

1. はじめに

東北大学は、東北地方における研究拠点として1Fの安全かつ着実な廃炉の推進に資するため、基礎・基盤的な研究と技術開発ならびに人材育成に努めてきた。この間、文部科学省『英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム』に平成26年から5年間取り組み、成果を挙げることができた。この事業で確立した基盤を活用し、それまでの活動をさらに発展させるとともに、廃炉に関する我が国の基礎・基盤研究をリードするため、全学を横断した災害復興新生研究機構の構成組織としてCFReNDを平成28年12月1日に設置し、その後、令和2年4月に「1F廃炉支援基盤研究部門」を設置して、学内の広範囲な学術と技術の結集による全学的な取り組みの推進を図ることで着実かつ安全な廃炉等に継続的に貢献する体制を整備するとともに、より効果的な1F廃炉への貢献が可能な体制を整備した（図1-1）。

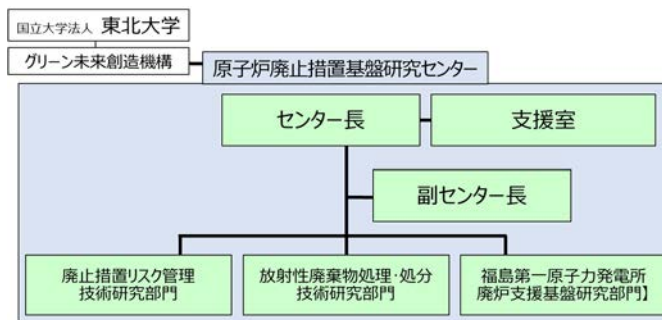


図 1-1 1F 廃炉支援基盤研究部門の位置付け

CFReND は、外部機関と本学をつなぐ橋渡し役として外部組織のニーズを咀嚼して学内へ伝え、学内のシーズや考え方を外部へ分かり易く伝えるインタープリター機能（ハブ機能）を果たすとともに（図1-2）、このような実践的研究の場を活用して廃炉を担う次世代人材の養成にも貢献することとしている。

今回、原子炉廃止措置の現場のニーズを踏まえた優先研究課題の1つとして、「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」に取り組む。本研究では具体的目標を設けて現場で役立つ技術の基盤となる成果の創出を目指す。

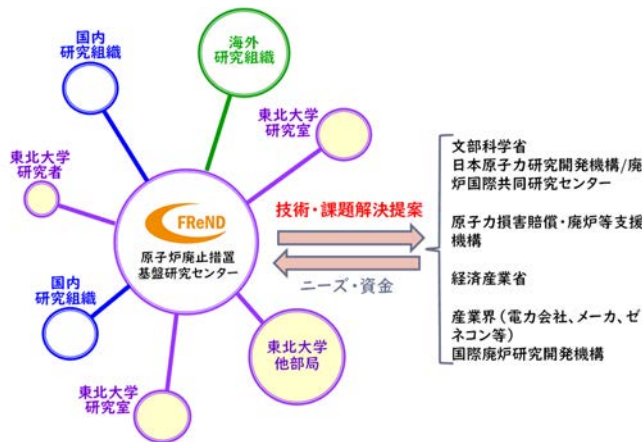


図 1-2 原子炉廃止措置基盤研究センターの研究連携ハブ機能

2. 業務計画

2.1 全体計画

1F 廃炉作業は数十年を要すると言われている燃料デブリ取り出し後も除染・解体撤去のため長期に亘って原子炉建屋の安全機能（特に構造強度）が期待されている事業であり、完了するまでの期間、継続的に建屋を直接検査・モニタリングし、その結果を用いて健全性を評価・確認するとともに、必要に応じて補修などを実施することによって安全機能を確保することは保全学が求める鉄則であり、困難な状況の中でもこれを可能な限り踏襲することが極めて重要である。そこで、本研究では、前述のような前例の無い特殊かつ困難な条件下で 1F 原子炉建屋の保全管理を実施することを想定して、戦略的かつ効率的・効果的な保全管理方法確立に向け、東北大学、東京工業大学、芝浦工業大学、木更津高専、日本工業大学、原子力機構が各組織の特徴と適性に沿って下記 4 つの課題に分担・連携して取り組み、1F 廃炉に貢献する。

- ① 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発
- ② 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発
- ③ 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
- ④ 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

研究課題① 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

課題①-1：一般建物の地震ヘルスマニタリング技術が有るが、1F 建屋では高放射線下で新たに設置できるセンサの設置箇所、数に大きな制約と困難が有る中で、設置可能な場所から効果的かつ最適な設置箇所を選定し、必要最小数で地震観測を行う技術を開発すること、観測データを用いて逐次解析モデルを修正し、解析結果と組み合わせる非観測部位の応答振動性状も推定するハイブリッド型応答・振動推定法を新たに開発する（表 2.1-1）。

表 2.1-1 本提案の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法

	既往のモニタリング	本提案
センサ設置位置	必要箇所	限定
センサの数	必要数	極めて少数
対象	地震のみ	地震+長期
解析モデル	設計モデル	逐次修正モデル

課題①-2：一般に動的振動応答の計測に使用される加速度センサ・ジャイロセンサを動方向の長期計測に適用するのは全く新しい発想で、これにより部材・建屋の長期変形性状を観測しようとする全く新しいモニタリング法を開発する。上記①-1 で得られる、多面的な振動性状、応答・変形性状の観測データを組み合わせる構造健全性を評価できるようにする。

研究課題② 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

課題②-1：従来のコンクリート構造物の損傷調査である目視・打音検査、コアサンプリングに代り、電磁波をコンクリート躯体に照射して、その反射波から表面のみならず内部のひび割れや鉄筋腐食、水分の存在を検知する、これまでに無い全く新しい非接触検査技術を開発する（表 2.1-2）。これは、異なる周波数レンジの電磁波を用いることで、探知するコンクリート躯体の領

域の広さ、深さを調整し、サブテラヘルツ波による1次調査（大まかな損傷の有無）からテラヘルツ波による詳細調査（損傷箇所）まで対応できる方法であり、コンクリート躯体表面に塗装や仕上げ材などが存在しても内部の損傷を透視できる技術である（図 2.1-1）。

表 2.1-2 本提案のコンクリート構造物損傷検知技術

	既往の損傷検知	本提案
方法	目視、打音、接触	電磁波
作業位置	×接近	○離れて遠隔操作可
遮蔽物	×不可	◎塗装、仕上げを透視 ○内部損傷
精度		使用する電磁波に依存

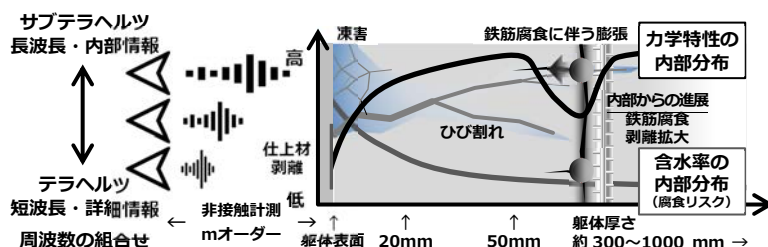


図 2.1-1 テラヘルツ/サブテラヘルツ波によるコンクリート構造物の探傷技術の概念

課題②-2: 中性子イメージング技術はコンクリートなどの内部欠陥の詳細な観察ができる。この技術により、テラヘルツ波イメージングの精度を検証し信頼性を高める。

研究課題③ 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

課題③-1: 1F 建屋は、地震後の津波、水素爆発などにより、コンクリート躯体に振動・衝撃、塩分、高温、放射線などの複合的な劣化要因が作用した。これらの既存の劣化要因の実験データと電磁波イメージング画像とを組み合わせ、コンクリートの材料（劣化）特性、鉄筋腐食推定、RC 部材の構造特性（荷重-変形特性）について、その現状及び長期経年劣化の推定方法を明確にする（表 2.1-3）。

表 2.1-3 本提案のコンクリート材料の経年劣化の推定法

	既往の材料特性・構造部材の劣化性能評価	本提案
コンクリート	熱、中性化、ひび割れなどの要因ごと	複合要因 イメージング・データの活用
鉄筋		イメージング・データの活用
部材	地震のみ	部材実験 イメージング・データの活用
建屋	無し	

課題③-2: イメージング画像からコンクリート内部の鉄筋腐食、付着劣化を定量評価するための試験・検討を実施する。

研究課題④ 総合的な建屋健全性評価手法の開発と長期保全計画の検討

課題①モニタリングで得られる、地震などの外乱発生時の建屋の振動性状（周期特性）、地震時の最大応答変形（非観測位置の推定値も含む）、長期観測による変形に基づいて、建屋の構造健全性に関わる異常の発生を速やかに探知する方法を開発する。必要に応じて検査を行い、課題②で電磁波イメージを取得し、課題③で劣化性能を推定することを想定している。1F 建屋の厳しい環境の中で、個々の要素技術で得られる情報は限られ、精度にも限界が有るが、これらを組み合わせて総合的に評価することで、1F に原子炉建屋の構造健全性評価に必要な精度を有するハイブリッド型構造健全性評価法の開発を目指す。

2.2 実施体制

本研究の実施体制を図 2.2-1 に示す。

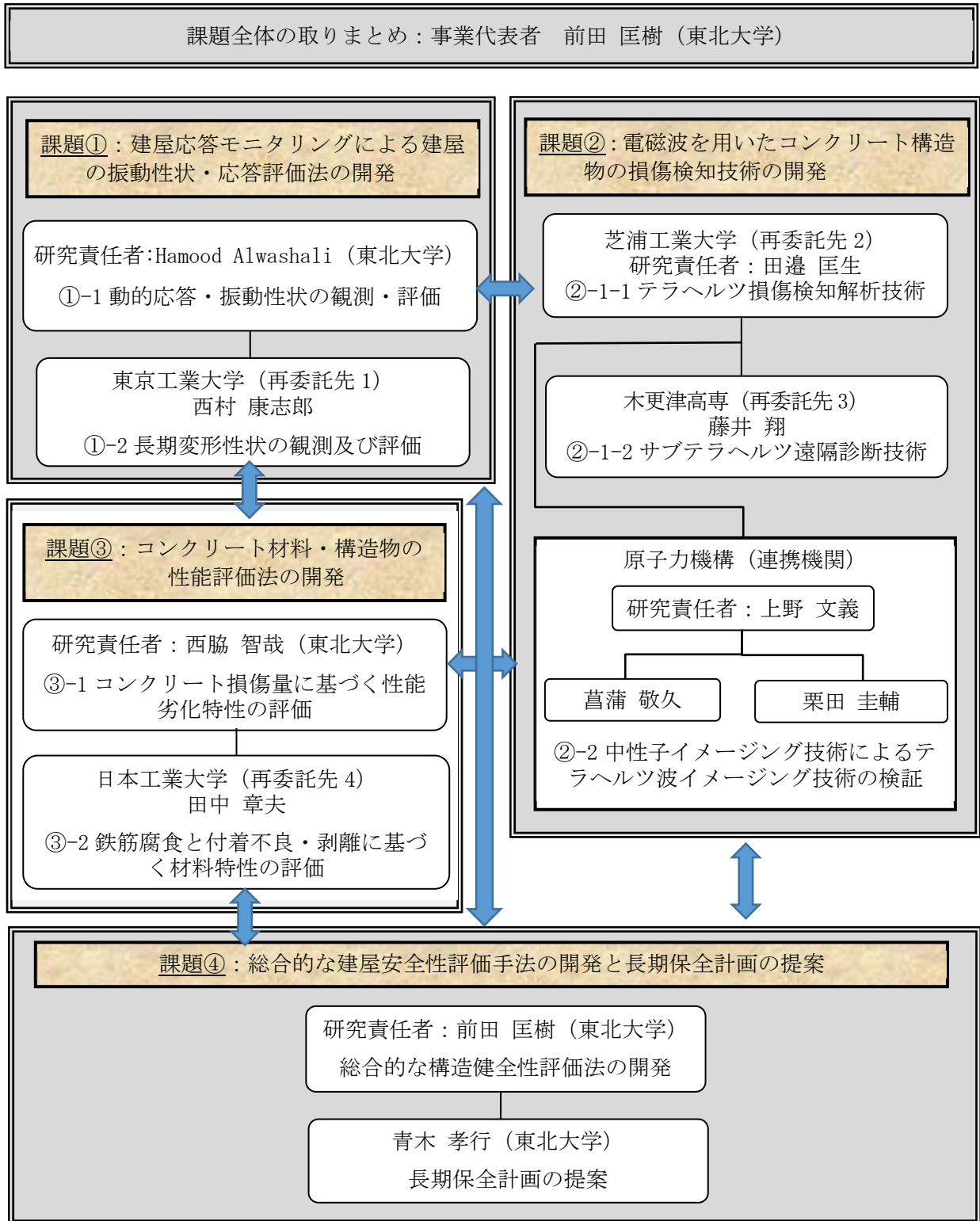


図 2.2-1 研究の実施体制

2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.3.1 実施内容

(1) 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

① 動的応答・振動性状の観測及び評価

- ・東京電力など専門家の協力を得て、1F 建屋の構造性能や解析モデルに関する情報を収集する。
- ・建屋構造の解析モデルを設定し、各層での高次の振動モードの影響を検討する。
- ・解析モデルによってセンサ位置のシミュレーションを行い、誤差が最小限となるように解析モデルを調整した上でセンサ非設置層の応答やセンサの最適な数と位置を評価する。その結果に基づき最小数の加速度センサの設置位置を提案する。

② 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）

- ・振動装置には1自由度の簡易な振動装置を作製して、対象建物に適用できる固有周期に調整する。
- ・振動装置に加速度センサとジャイロセンサを取り付けて、振動時と静止時の回転角を測定する。同時に、変位計を用いた従来の方法でも回転角を測定し、計測精度を確認する。
- ・得られた計測値のデータ処理方法を検討する。建物に適用するには多数の計測点が必要なので、必要なサンプリング周波数や容量を、ノイズ除去方法などを組み合わせながら検証する。

(2) 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

① テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

- ・サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数、可変のビーム径と偏光方向でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を得ることができる損傷検知システム（計測システム）を設計する。
- ・中性子イメージングによりひび割れの位置と幅が規定された鉄筋コンクリート試験体をリファレンスに使用することを想定して、ひびのサイズと方向に対する電磁波の散乱度を複数の電磁波で理論的に多元解析できるアルゴリズムを検討するとともに、計測に適切な周波数を検討する。

② サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

- ・サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を任意のビーム径と偏光方向で得ることができる損傷検知システム（計測システム）を組み上げ、その動作を確認する。
- ・コンクリートの表層に形成されているモルタルやエポキシなどの各種塗膜に対する透過性を任意の厚さで系統的に評価するとともに、遠隔計測に適用する周波数を検討する。
- ・従来から有る CMOS カメラの可視像も取り込み、建屋全体の損傷を広いレンジで可視化できる損傷検知のための技術基盤（画像処理）の枠組みを構築する。

③ 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証（連携先：原子力機構）

- ・令和4年度及び5年度で実施する JRR-3 における中性子イメージング実験の条件を検討し、決定する。
 - ・前項目で決定した使用に基づき、テラヘルツイメージング技術の検証に用いる鉄筋コンクリート試験体の仕様を東北大学等と検討し決定する。
 - ・中性子イメージング実験に必要なステージ・治具等の周辺機器と撮像系の仕様を決定する。
 - ・前項目で決定した仕様に基づいて、周辺機器を設計し、製作を開始する。また、オフラインでの撮像系の試験を行う。
- (3) 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
- ① コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価
 - ・1F 建屋で想定される環境的・力学的作用によるコンクリートのひび割れなどを導入したコンクリート及び鉄筋コンクリート試験体の作製を行う。コンクリートの表層部から内部のひび割れや剥離といった劣化を、載荷試験や模擬欠陥の埋設などにより与えた試験体を作製する。
 - ・上記の試験体に対し、テラ（サブテラ）ヘルツ波での基礎的な測定を実施できる装置を整備する。
 - ② 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）
 - ・鉄筋腐食が発生し、内部欠陥（剥離等による付着不良）が発生した鉄筋コンクリートの性状をテラ（サブテラ）ヘルツ波を用いて評価するため、鉄筋腐食を起し内部欠陥を有するコンクリート試験体を作製する。これにあたり、導入欠陥を制御可能な付着試験方法を検討する。また、含水率条件が異なるコンクリート試験体も作製する。
 - ・作製した試験体にテラ（サブテラ）ヘルツ波を照射し、内部欠陥・含水率条件が異なる試験体を観察する。
- (4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案
- ・上記(1)～(3)でモニタリング、観測、評価を計画している建屋コンクリート構造物に対して、1F 建屋の構造性能健全性を効果的に評価するために、必要な部位・部材や検討すべき項目を抽出し、課題を整理する。
 - ・建屋モニタリング研究（上記(1)）に対しては、建屋全体の振動周期や地震応答変形に加えて、変形推定が必要な重要な部位・部材の情報を提供する。
 - ・電磁波イメージング研究（上記(2)）に対しては、建屋の構造性能劣化の評価・推定のために、必要なひび割れ損傷の情報を整理して提供する。
- (5) 研究推進
- ・研究代表者の下で、各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

2.3.2 令和3年度の研究スケジュール

令和3年度の研究スケジュールを表2.3-1に示す。

表 2.3-1 令和3年度研究スケジュール

実施日程	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
項目												
(1)地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発												
①動的応答・振動性状の観測及び評価 (東北大学)							← 建屋の情報収集		→ センサーの配置の検討			
②長期変形性状の観測及び評価 (東京工業大学)							← 試験準備		→ 精度確認実験		→ 試験結果評価	
(2)電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発												
①テラヘルツ波イメージング技術の開発 (芝浦工業大学)							← 損傷検知システムの設計		→ 損傷検知解析法の検討		→ 周波数最適化	
②サブテラヘルツ波イメージング技術の開発 (木更津高専)							← 損傷検知システムの組み立て		→ 塗膜評価・周波数検討		→ 画像処理検討	
③中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証 (原子力機構)							← 試験準備、予備測定				→ 試験結果評価	
(3)損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発												
①コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価 (東北大学)							← コンクリート試験体の作製		→ 促進劣化		→ テラ(サブテラ)ヘルツ波による観測	→ 試験結果評価
②鉄筋腐食と付着不良・剥離に基づく材料特性の評価 (日本工業大学)							← 鉄筋コンクリート試験体の作製		→ 促進劣化含水率調整		→ テラ(サブテラ)ヘルツ波による観測	→ 試験結果評価
(4)総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案 (東北大学)												
									← 検討対象項目の抽出・課題整理			→
(5)研究推進												
									← 各研究課題の連携調整			→
								△ 全体会議				△ 全体会議
												← まとめ

3. 実施内容及び成果

3.1 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

3.1.1 令和3年度実施内容及び成果

(1) 動的応答・振動性状の観測及び評価

① 建物解析モデルのデータ収集

原子炉建屋の解析モデルを作成するために、必要なデータを収集した。このデータの一部は下記で一般に公開されている。

東京電力ホールディングス株式会社，福島第一原子力発電所事故の社内調査情報 https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_investigation/index-j.html (参照日：2022.3.31)。

その他必要なデータは、東京電力1Fの施設関係者との協力により提供されたものであり、その一部は未公開情報なので、本報告書には記載していない。

a) 平面図及び立面図

原子炉建屋3号機（地震被害の前）の南北（NS）と東西（EW）の構造躯体の立断面を図3.1-1に、平面図を図3.1-2に示す。下記のリンクの資料から取得した。

東京電力ホールディングス株式会社，福島第一原子力発電所事故の社内調査情報 https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_investigation/index-j.html (参照日：2022.3.31)。

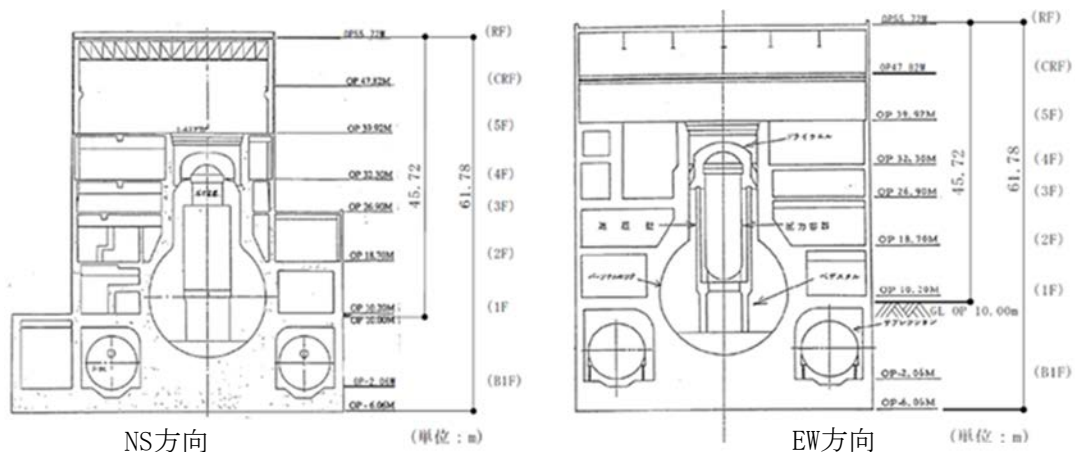


図3.1-1 3号機の立断面図

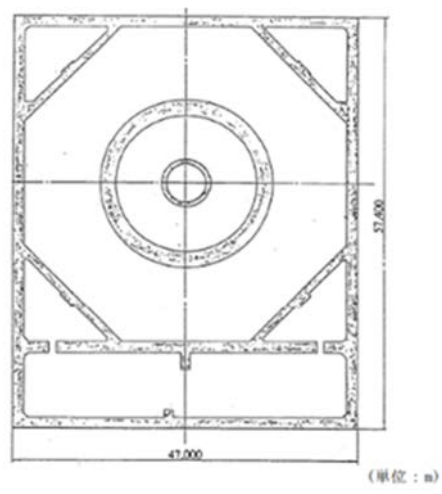


図3.1-2 3号機の平面図

b) 平成 23 年東日本大震災による損傷前の構造解析モデル

平成 23 年東日本大震災の発生前に東京電力が建屋の解析に使用した質点系の曲げせん断解析モデルを図 3.1-3 に示す。

解析モデルは、各階ごとの質量と剛性を縮約された等価質点系モデルである。それぞれの階の質量を各床レベルの質点にまとめ、各質点を各階のすべての構造部材の剛性を表すせん断剛性と曲げ剛性を持つばねによって接続した解析モデルである。地下階については、周辺地盤による変形拘束の効果を考慮するためスウェイばねと回転ばねも配置されている。

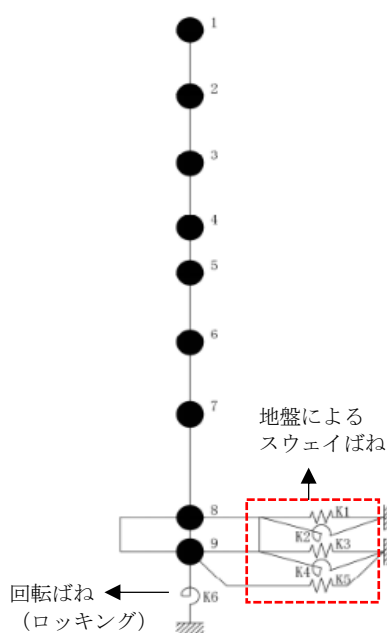


図 3.1-3 3号機の等価質点系解析モデル

c) 3号機で観測された平成 23 年東日本大震災での地震動と応答スペクトル

平成 23 年東日本大震災では、原子炉建屋 3 号機のマット基礎に取り付けられた加速度計によって地震動が観測された。

https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_investigation/pdf/120620j0306.pdf (参照日：2022.2.8) .

図 3.1-4 に示すように、観測された地震動の最大地動加速度（以下、PGA と略記。）は NS と EW でそれぞれ 322 gal (cm/s^2) と 507 gal (cm/s^2) であった。

地震応答スペクトルを図 3.1-5 に示す。応答加速度の最大値は、EW 方向は周期 0.3 秒付近 EW で約 1370 gal、NS 方向は、0.25 秒付近で約 920 gal に達した。3 号機の固有周期は、後の項目で説明するように、0.1~0.2 秒程度であった。

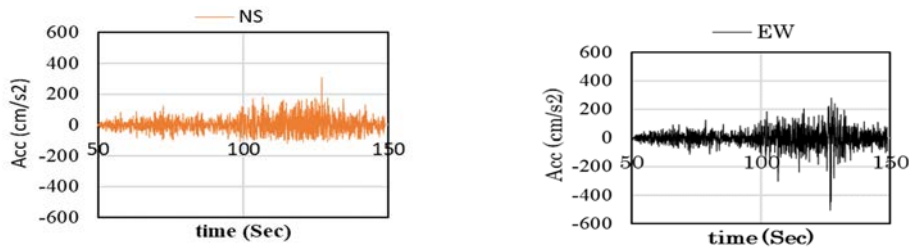


図 3.1-4 平成 23 年東日本大震災で 3 号機のマット基礎で記録された加速度

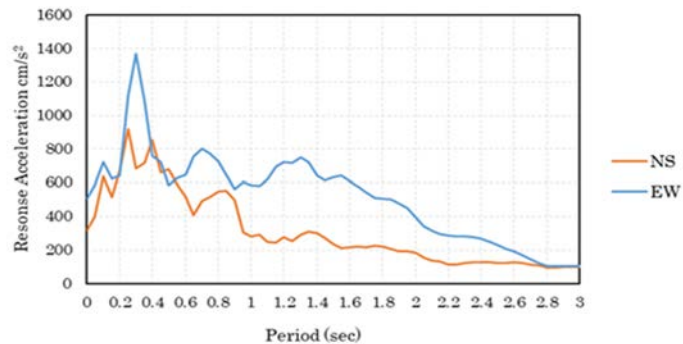


図 3.1-5 平成 23 年東日本大震災の 3 号機での観測記録の地震応答スペクトル
(減衰 $h = 5\%$)

② 水素爆発による損傷の影響を考慮した解析モデルの特性

a) 損傷後の解析モデルの設定

下記の東京電力のホームページから提供されたデータをもとに、水素爆発による損傷後
を想定した解析モデルを作成した。

https://www.tepco.co.jp/decommission/information/implementation/pdf/2_2_6.pdf
(参照日：2022.3.31)。

解析モデルの設定では、以下を考慮した。

- i) 3 及び 4 階は、外壁の損傷を考慮し剛性を低減する。
- ii) 5 階オペレーションフロア（以下、オペフロと略記。）より上は喪失しているため、
質点は設定しない。また、オペフロ瓦礫が撤去状態である。
- iii) 設置されている燃料取り出し用設備であるカバー重量・遮へい体の重量を付加する。

図 3.1-6 に示すように、なお、簡略化のために、以下の検討では、1 階床を固定し、地
下階及びスウェイばね・回転ばねは無視した解析モデルを使用することとした。

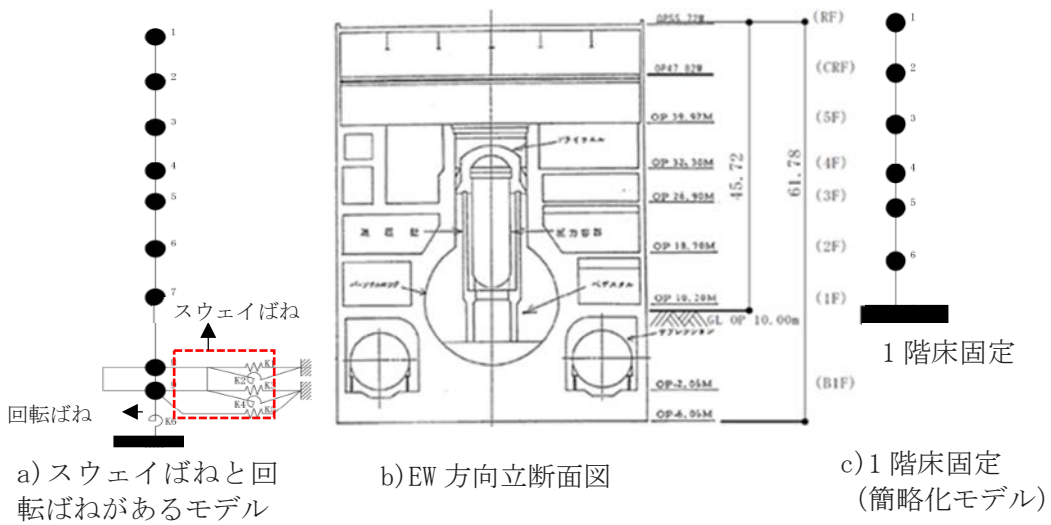


図 3.1-6 質点系モデルの設定と仮定

図 3-1-7 に、両モデル（平成 23 年震災における水素爆発による損傷前、損傷後）の質量と剛性の分布を示す。

図 3.1-7 に示すように、損傷前モデルは、質量・剛性ともに小さいオペフロより上層部の鉄骨架構、RC 壁が厚く剛性が大きい下層部、RC 躯体にも一部損傷が生じた中間部の 3 つの部分に大別できることが分かる。なお、損傷後モデルでは、爆発により完全に喪失した上層部は解析モデルに考慮しないこととした。

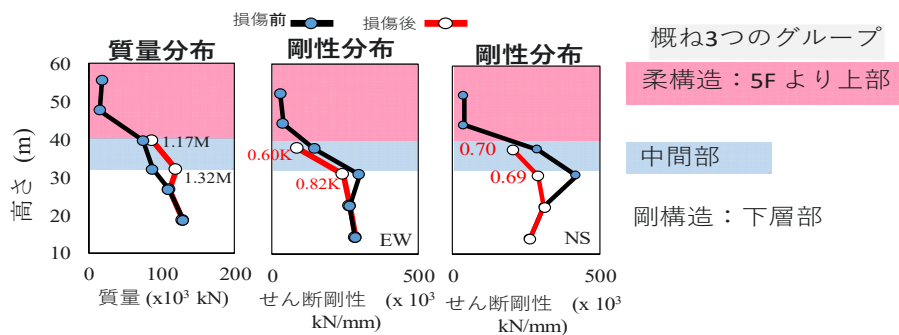


図 3.1-7 損傷前と損傷後の解析モデルの質量・剛性分布の比較

b) 解析モデルによる振動特性

図 3.1-7 に示した建屋の情報を用いて固有振動モードを分析した。解析には、解析プログラム SNAP Ver. 7[1]を使用した。等価質点系モデルは 6 質点で構成されており、図 3.1-8 に示す 6 つの振動モード形が得られた。

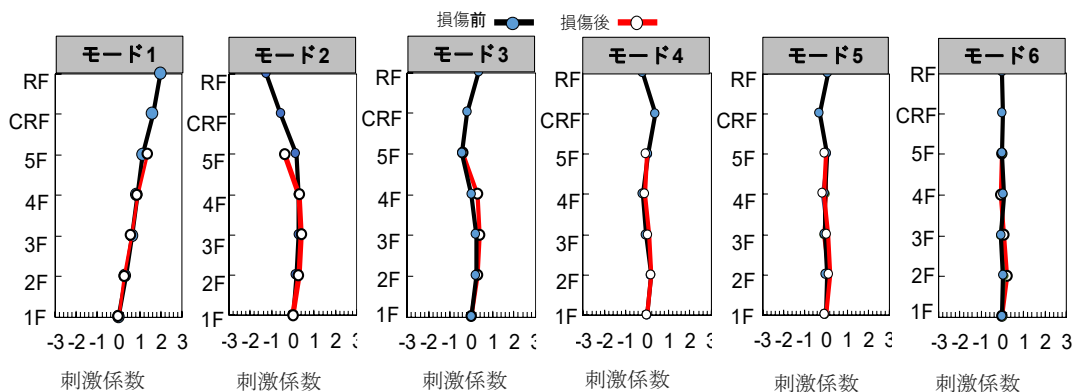


図 3.1-8 EW 方向の固有振動モード

解析モデルの 1 次振動モードの EW 方向の固有周期は 0.137 秒である。

平成 23 年東日本大震災での観測地震動を用いて、3 号機解析モデルの地震応答を求めた。EW 方向の応答加速度のフーリエスペクトルを図 3.1-9 に示す。スペクトルのピーク周期は、損傷前 (0.135 秒) から損傷後 (0.147 秒) と損傷の影響でやや固有周期が伸びていると考えられる。応答解析による最大応答加速度、応答速度、層間変形角の高さ方向の分布を図 3.1-10 に示す。損傷後モデルでは応答がやや大きくなる傾向が有るが、いずれも最大層間変形角は 0.02% (200 μ) 以下と小さく、建物は概ね弾性の範囲内に留まり、ひび割れは発生していない状態と考えられる。

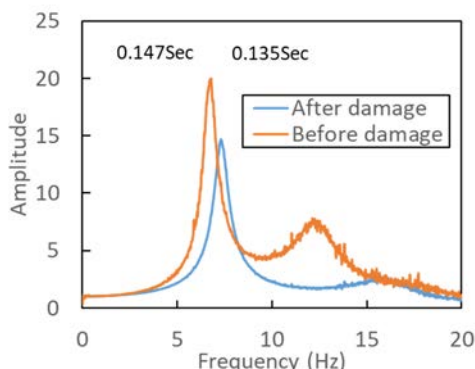


図 3.1-9 平成 23 年東日本大震災の観測記録による応答加速度のフーリエスペクトル

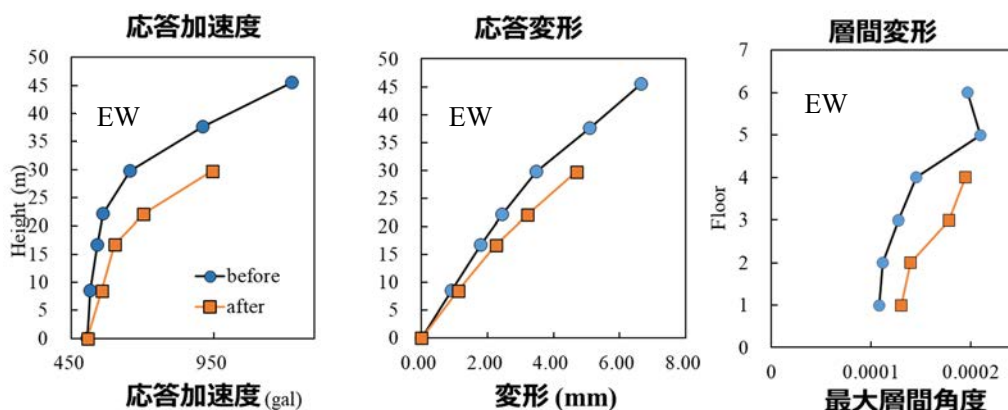


図 3.1-10 平成 23 年の観測地震動による損傷前後の 3 号機の EW 解析モデルの地震応答の比較

③ 効果的なセンサの配置や数の検討

建屋の地震時の応答を観測する際には、建屋全階にセンサを取り付け、さらに各階の床に数カ所取り付けることができれば、より高い精度が得られる。しかしながら 1F 建屋では、高放射線の厳しい環境の下、設置・観測のためのアクセスも限定・制限されるため、すべての階にセンサを配置することは困難であり、現実的ではない。そこで、1F 建屋に設置する限定されたセンサで応答をできるだけ正確に推定するための必要やセンサ数と最適な位置について解析的に検討した。

a) 応答推定の方法と基本仮定

以下の検討では、前述の通り設計した損傷前の解析モデル（等価 6 質点系）を使用した。地震応答解析により得られた応答加速度データを（低周波・高周波成分の）フィルタリングによりノイズを除去したのち、二重積分することで、各質点の応答変位が得られる。応答解析結果により、6 質点すべての応答変位が得られ、これを正解値と仮定して、これらのうち、いくつかの床に加速度センサが設置されている場合を考える。観測階では、加速度センサにより応答変位が分かる。これを用いて非観測階の応答を推定する。図 3.1-11 にこの方法の概念を示す。図 3.1-11 左では、最上階の観測がされ、応答変形が分かった場合を示す。非観測階の応答推定は、観測点と基礎を直線で結んで推定する線形補間法（図 3.1-11 中央）、観測点が 1 次振動モード形に一致するように係数倍して推定するモード形補間法（図 3.1-11 右）[2]などの方法が一般的に用いられている。

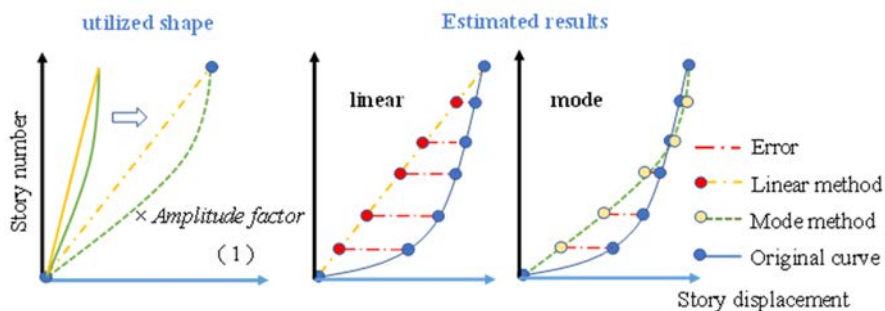


図 3.1-11 線形補間法・モード形補間法による応答推定法の概念

線形補間法は、質量と剛性の高さ方向にほぼ一様に分布する場合には、比較的良い推定結果を得られることが知られている。しかし、原子炉建屋のように、質量と剛性の分布に大きい変化が有る場合には、推定誤差が生じる。このような構造物では、振動モード形を用いたモード形補間法を用いることが適切であり、比較的良い推定結果が得られる傾向が有る。

b) センサ数の検討

以下では、平成 23 年東日本大震災による損傷前の解析モデルと観測記録の地震動 EW 方向成分 (図 3.1-4) を用いて、設置するセンサの数、配置を変化させたパラメトリックスタディを行い、応答推定の精度に関する検討を行った。

図3.1-6及び図3.1-12に示すように、剛性分布は1~3層、4層、5~6層の3つのグループに大別される。少数のセンサによる地震応答観測から非観測階の応答を精度良く推定するために必要なセンサの数と配置を検討した。センサの最適な位置は、剛性の異なる3つのグループ (層) 位置が関係すると考え、図3.1-12のように5つのパターンを検討した。

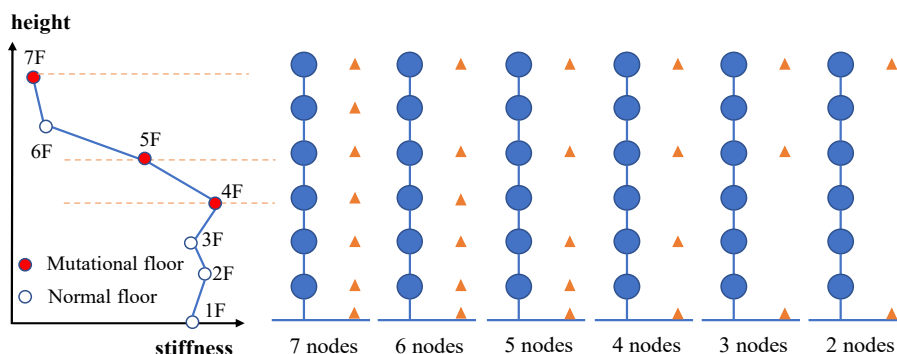


図 3.1-12 センサの数・配置の検討対象モデル

線形補間法とモード形補間法それぞれを用いて、非観測階床の応答変位を推定した。式(1)により応答変位の推定誤差を求めた。センサ数と推定誤差の関係の計算結果を図3.1-13に示す。

$$er'_n = \frac{|Es_n - Es_{n-1}) - (d_n - d_{n-1})|}{(d_n - d_{n-1})} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 er'_n : 誤差、 Es_n : 推定変位、 d_n : 正確な変位、 n : 層の番号

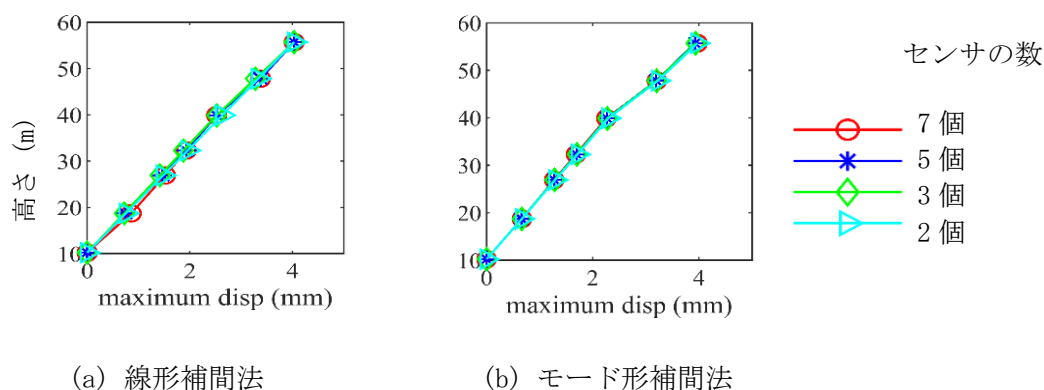


図 3.1-13 非観測階の応答推定の手法による最大変位の推定値

非観測階の推定応答変位の平均誤差を図3.1-14に示す。線形補間法では、センサの数が増えるにつれて、すなわち非観測階が減ると、誤差の平均値、標準偏差ともに減少しており、線形補間法の精度はセンサの数に大きく依存することが分かった。モード形補間法では、センサ数によらず誤差の平均値、標準偏差ともにほぼ一定(2%程度)であり、センサの数は推定精度に大きな影響を与えないことが分かった。さらに、センサ2個による推定誤差は線形補間法でも15%以下であり、実用的には使用できる可能性が有り、モード形補間法では、誤差2%程度と十分に小さい。したがって、必要なセンサ数として2個と3個を選択して、最適なセンサの位置について、次の項目で検討した。

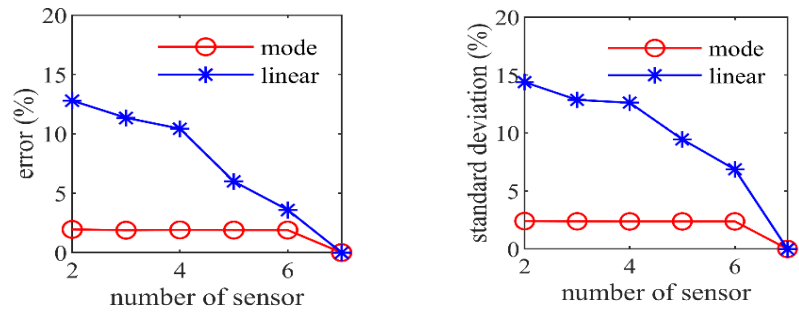


図 3.1-14 センサの数による最大変位の推定値

c) 最適なセンサ位置の検討

加速度センサを2個と3個配置して観測するケースについて、様々に位置を変化させた解析ケースを図3.1-15と図3.1-16にそれぞれ示す。センサの位置の仮定は、前述の高さ方向の剛性分布に基づいて仮定した。

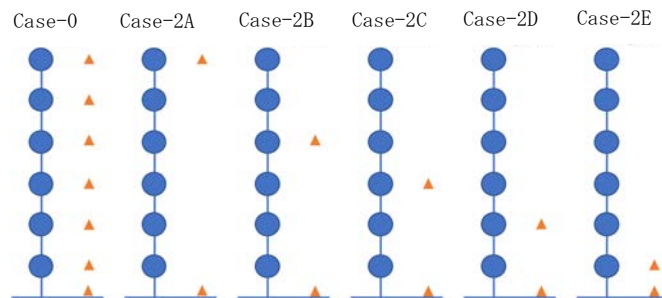


図 3.1-15 センサが2個の場合のセンサの配置ケース

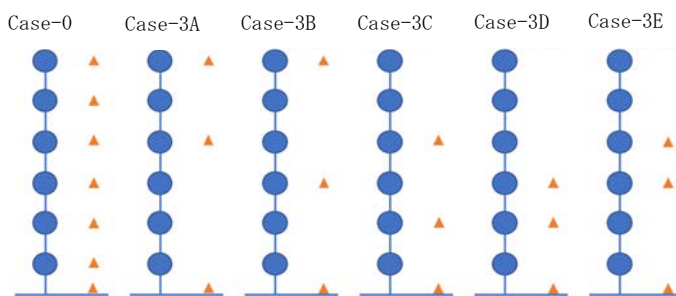


図 3.1-16 センサが3個の場合のセンサの配置ケース

これらのセンサの位置を変化させて線形補間法とモード形補間法を用いて応答推定を行った場合の誤差を図3.1-17に示す。モード形補間法では、すべての解析ケースにおいて誤差はほぼ2%程度で一定であり、十分な推定精度を持ち、構造物の弾性限界内であれば、モード形補間法は非常に有効であることが分かった。線形補間法では、ケース2.Aは中間階での誤差推定が大きいいため平均15%以上の誤差が有るが、中間階にセンサを取り付けた場合（ケース3.A、3.B）は、誤差が減少することが分かった。

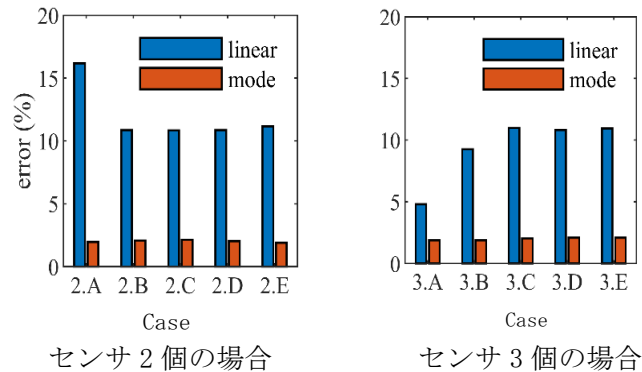


図 3.1-17 センサの位置を変えた場合の誤差の推定

以上の検討の結果、応答変形が弾性の範囲内で3号機建屋の応答推定をするためには、線形補間法の場合は、建屋最上階、中間階、1階の3個のセンサを用いること、モード形補間法では、最上階と1階の2個のセンサで最も誤差が小さくなり、比較的精度良く応答が推定できることが分かった。

以上から、ケース2.B、3.A、3.Bを最適な位置として選定し、以下の検討に用いた。

d) 剛性低下が発生した場合の応答推定精度の検討

損傷や長期劣化により建屋躯体の剛性低下が生じ剛性分布に変化が起きた時について、応答推定の精度と適用性を検討した。前節2.3で得られた最適なセンサの位置と数に基づき、図3.1-18に示すように、いくつかの剛性劣化のケース[3]を想定した。

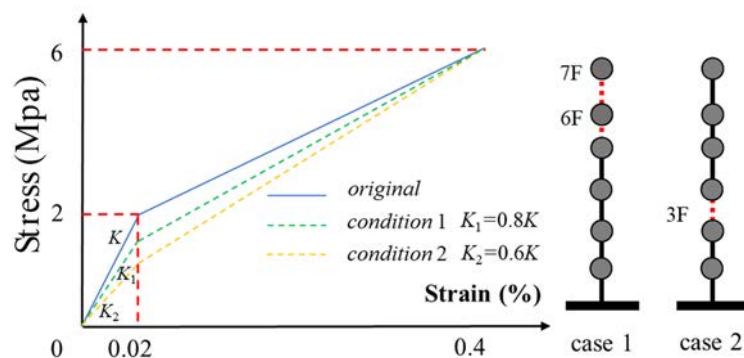


図 3.1-18 階の剛性低下を考慮した解析ケース

ケース 1 では 5~6 層、ケース 2 では 3 層、ケース 3 では 2 層の剛性のみ低下させた解析モデルを作成して検討した。剛性低下の割合は、80%と 60%の 2 種類を考えた。図 3.1-19 にケース 1、図 3.1-20 にケース 2 の応答推定誤差の比較を示す。一部の層に剛性低下が生じることで、振動モード形が変化することから、モード形補間による推定誤差は、前節 2.3 の 2%程度から 20%前後と大幅に増加し、精度が悪くなる。線形補間法でも、推定誤差が 10%以上となり、剛性低下を考慮しない前項目の結果よりやや推定精度が悪化する傾向が見られる。

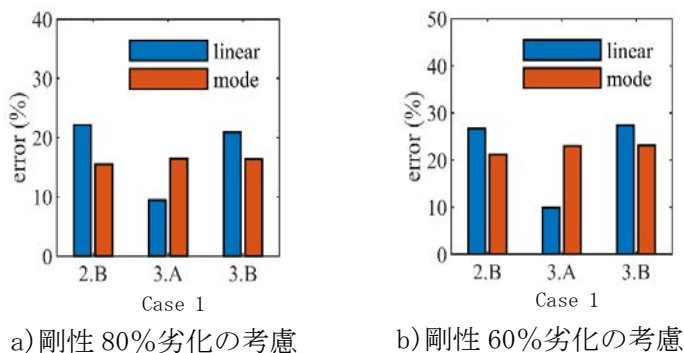


図 3.1-19 ケース 1 の剛性低下を考慮した場合の応答推定誤差

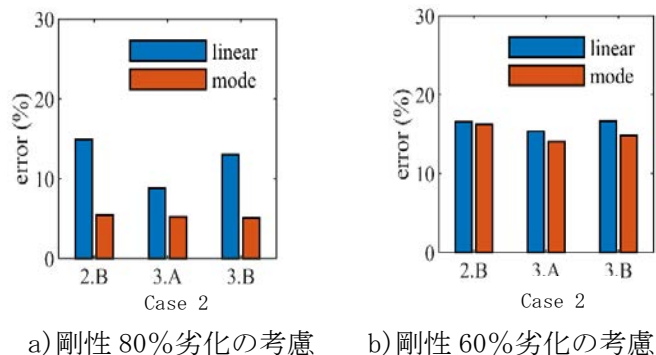


図 3.1-20 ケース 2 の剛性低下を考慮した場合の応答推定誤差

e) 効果的なセンサの配置・数の考察

剛性分布・振動モードの形状に基づいて建屋を高さ方向に 3 分割し、それぞれの分割域に加速度センサを設置した場合を想定して、推定精度を検討した。建屋が弾性範囲にある場合の応答推定は、2 個のセンサの場合、1 階と 5 階の床にセンサを設置することで、また、3 個のセンサの場合、1 階、5 階、7 階の床に設置することで誤差が小さくなることが分かった。加速度センサ非設置階の応答推定誤差はモード形補間法では 2%以下、線形補間法では 20%未満であった。

特定の階に新たな損傷や劣化が発生して、剛性低下した場合には、モード形補間法でも大幅に推定誤差が大きくなることから、モード形の修正などの検討が必要であることが分かった。

なお、現時点では、単純な団子モデルを使用しているため、ねじれの影響は考慮されていない。ねじれが有る場合、各階に3個以上のセンサを取り付ける必要が有る。剛性劣化が起きると、どちらの方法でも誤差が大きくなる。今後、より良い推定結果を得るために、センサによるモニタリングデータに基づく解析モデルの修正などの検討を行い、応答推定法の改良を行うことが必要である。

(2) 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）

① 振動装置の設計

a) FEMによる対象建物の固有値解析

振動装置の固有周期を定めるため、対象建物を模した構造体モデルの固有周期を調べる。参考とした建物は1F第3号機の原子炉建屋で、工事報告の文献[4]から材料特性や寸法の概略を読み取って3次元モデルを作成した。モデル図を図3.1-21に、部材断面リストを表3.1-1に、材料特性を表3.1-2に示す。モデルには、損傷・撤去された屋根部分は無く、5階床までのモデルとした。また、同規模の原子炉建屋であれば準用できるように、単純化したものを作成した。このモデルは令和4年度以降にセンサの設置位置の検討にも使用する予定で、許容し得る単純化の程度も検討事項の1つである。モデルは、基礎マットスラブをソリッド要素、耐震壁と遮蔽壁と地上階の床はシェル要素、柱と梁はビーム要素とした。図3.1-21に示すように、原子炉格納容器（以下、PCVと略記。）と原子炉圧力容器（以下、RPVと略記。）はシェル要素で円筒にモデル化した。PCVとRPVの円筒要素の要否を検討するため、円筒モデルを取り除いて重量のみを床スラブへ載せたモデルも作成し、両モデルの結果を比較した。

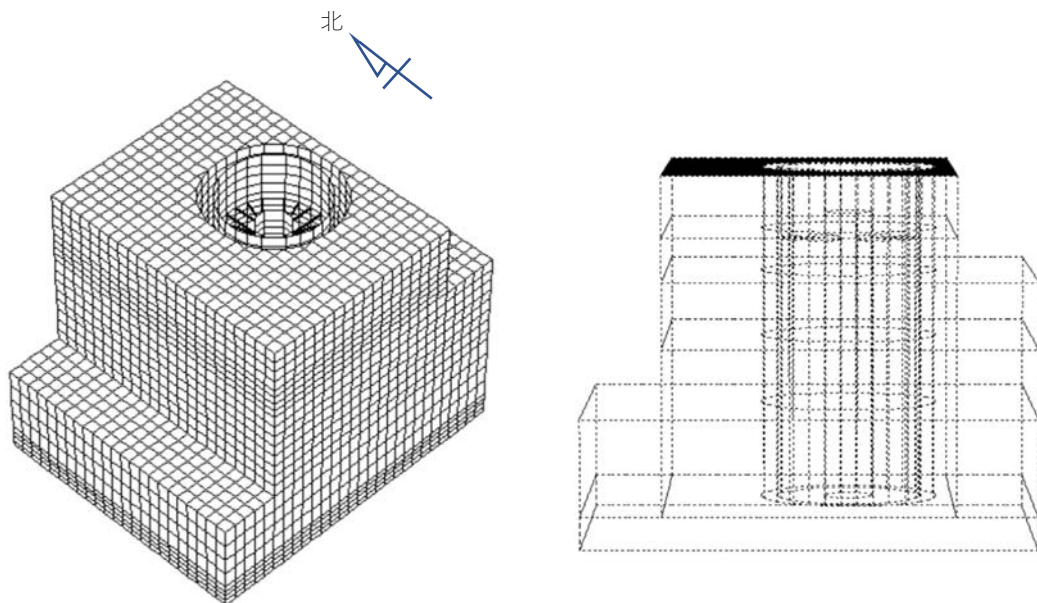


図 3.1-21 原子炉建屋を模した有限要素モデル

表 3.1-1 有限要素モデルの部材断面寸法一覧

面材	厚さ (mm)	線材	幅×せい (mm)
床(1階)	600	梁(南北方向)1階	950×2200
床(2階)	600	梁(南北方向)2階	950×2200
床(3階)	500	梁(南北方向)3階	950×2200
床(4階)	300	梁(南北方向)4階	600×1100
床(5階)	300	梁(南北方向)5階	600×1100
屋根(1階部分)	1000	梁(東西方向)1階	1200×2200
屋根(3階部分)	500	梁(東西方向)2階	1100×2200
内壁(地下1階)	1500	梁(東西方向)3階	950×2200
内壁(1階)	1000	梁(東西方向)4階	950×2200
内壁(2階)	1000	梁(東西方向)5階	1100×2200
外壁(地下1階)	1500	柱(南北面)地下1階	1200×1200
外壁(1階)	1500	柱(南北面)1階	1200×1200
外壁(2階)	1100	柱(南北面)2階	1000×1200
外壁(3階)	1100	柱(南北面)3階	1000×1200
外壁(4階)	500	柱(南北面)4階	1000×1000
遮蔽壁	2500	柱(東西面)地下1階	1200×1200
PCV	40	柱(東西面)1階	1200×1200
RPV(～2階)	300	柱(東西面)2階	1000×1200
RPV(2階～)	140	柱(東西面)3階	1000×1200
N/A	N/A	柱(東西面)4階	1000×1200

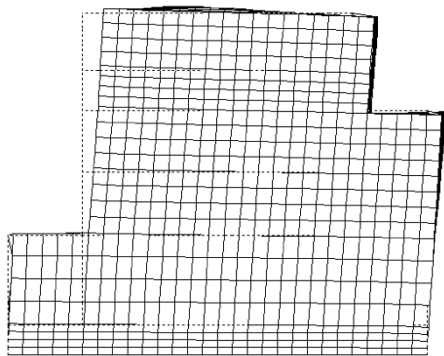
表 3.1-2 有限要素モデルの材料特性一覧

材料	ヤング係数	ポアソン比
コンクリート	22 900 N/mm ²	0.2
鋼	205 000 N/mm ²	0.3

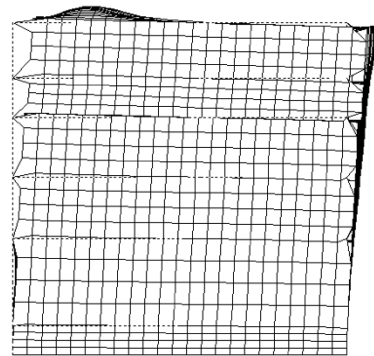
固有値解析は、基礎マットスラブの底面を固定とし、地下での地盤の側圧は含めずに行った。図 3.1-22 は PCV と RPV の円筒要素を有するモデルの結果、図 3.1-23 は PCV と RPV の要素は無く重量を床スラブに載せたモデルの結果である。図 3.1-22(a) と図 3.1-23(a) は東西方向の建屋の振動で、所謂、建屋の 1 次モードである。図 3.1-22 では PCV と RPV の円筒要素がより長い固有周期で振動するため、モデルの次数としては高くなっている。東西方向の建屋の振動は、いずれの固有周期も 0.19 秒で、PCV と RPV の円筒要素の有無の影響は無かった。設計時の解析では 1 次モードで 0.348 秒、2 次モードで 0.134 秒とされており [4]、本モデルは 5 階より上層が無いことを考慮すると妥当な簡略化と言える。

図 3.1-22(b) と図 3.1-23(b) は南北方向の建屋の 1 次モードで、固有周期は 0.18 秒であった。図 3.1-22(c) と図 3.1-23(c) は建屋のねじれモードで、固有周期は 0.10 秒であった。

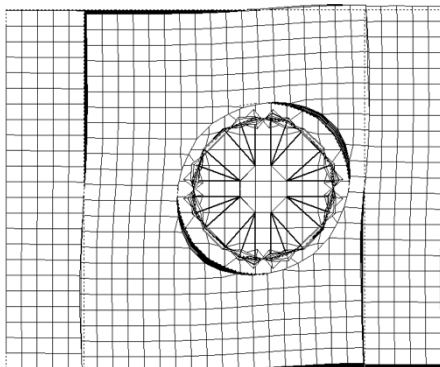
いずれも PCV と RPV の円筒要素の有無の影響は無かった。図 3.1-22(d)は PCV の円筒要素が振動するモードで、この図の表示倍率は、(a)図と(b)図の 1/50 倍となっている。つまり、PCV は建屋よりも長い固有周期で大きく振動することが分かる。しかし、この解析では PCV の振動は建屋の振動に影響しなかったため、建屋の挙動を把握するモデルとしては PCV と RPV の要素は不要と言える。また、図 3.1-23(d)に示すように、床や壁をモデル化することで、面材の振動モードも検出できる。この解析では、固有周期 0.14 秒で床と壁の振動が見られ、ねじれモードよりも長い固有周期であった。



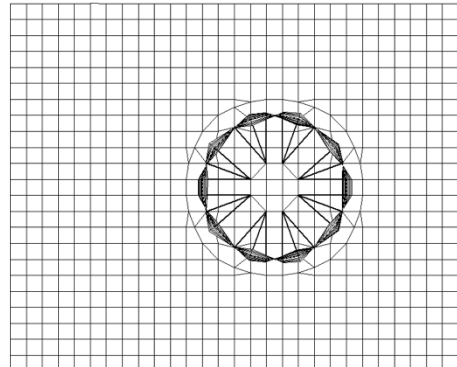
7 次モード：固有周期 0.19 秒
(表示倍率： 5.0×10^4)
(a) 東西方向の振動



9 次モード：固有周期 0.18 秒
(表示倍率： 5.0×10^4)
(b) 南北方向の振動

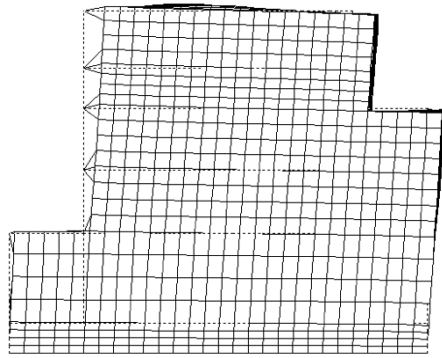


79 次モード：固有周期 0.10 秒
(表示倍率： 1.0×10^4)
(c) ねじれ振動

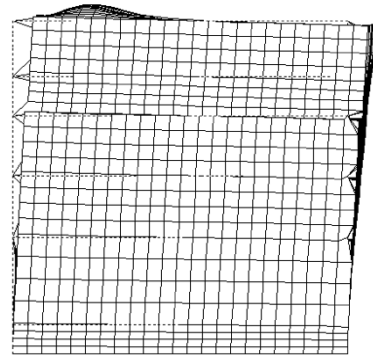


1 次モード：固有周期 0.23 秒
(表示倍率： 1.0×10^3)
(d) PCV の振動

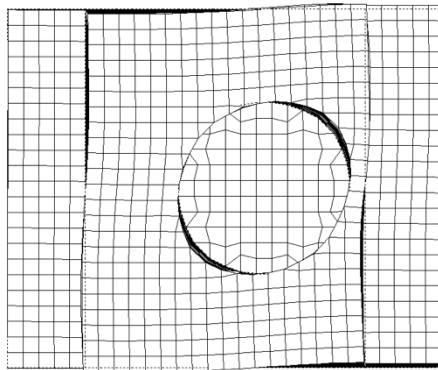
図 3.1-22 有限要素モデルの固有値解析結果 (PCV・RPV 要素有り)



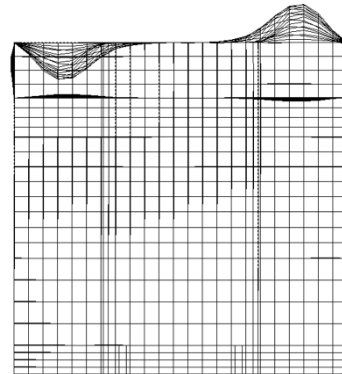
1次モード：固有周期 0.19 秒
 (表示倍率： 5.0×10^4)
 (a) 東西方向の振動



2次モード：固有周期 0.18 秒
 (表示倍率： 5.0×10^4)
 (b) 南北方向の振動



8次モード：固有周期 0.10 秒
 (表示倍率： 1.0×10^4)
 (c) ねじれ振動



4次モード：固有周期 0.14 秒
 (表示倍率： 1.0×10^3)
 (d) 床と壁の振動

図 3.1-23 有限要素モデルの固有値解析結果 (PCV・RPV 要素無し)

b) 振動装置

FEM を用いた対象建物の固有値解析により、建屋の弾性時の固有周期は 0.10～0.19 秒程度であることを確認した。建屋の損傷と劣化の進行により、これよりも固有周期は長くなる。鉄筋コンクリート部材では、ひび割れを生じると剛性が半分低下することが知られている。振動装置による実験では、0.2～0.4 秒の固有周期を目標に計画した。

振動装置は、単振動を起こす簡単なものを、鋼材を用いて作製した。装置図を図 3.1-24 に、振動実験の様子を図 3.1-25 に示す。鋼製の溝形鋼（以下、鋼製梁と略記。）を左端でピン支持し、右端を上部から支える構造とした。変位計を用いて右端の上下変位を測定し、左端ピンから測定位置までの距離 436.5 mm で除すことで、鋼製梁の回転角を計測できるようにしている。図 3.1-24(a)のように、静止時の回転角を測定する場合は右端をねじ棒

で支え、振動時の回転角を測定する場合は右端をばねで支えた。振動数は、ばねの強さと錘で調整した。加速度センサとジャイロセンサを鋼製梁に設置し、回転角を計測した。センサの設置は簡易な方法を採用し、底面を両面テープで鋼製梁に粘着させる方法とした。

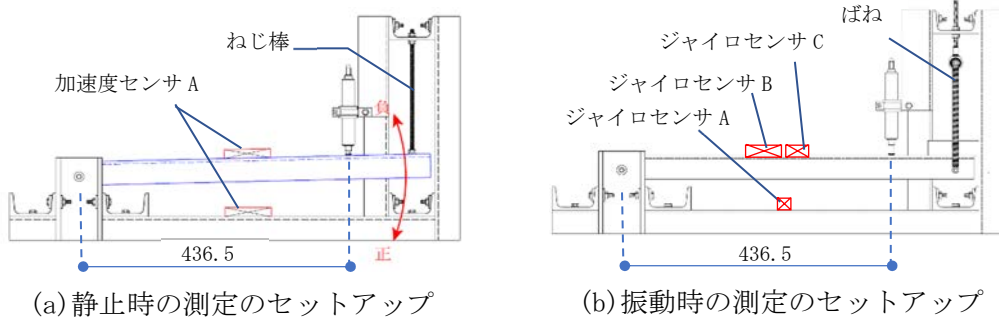


図 3.1-24 振動装置図



図 3.1-25 実験の様子

② 加速度センサとジャイロセンサを用いた回転角の測定

a) 実験方法

実験には、微小電子機械システムを用いたセンサ（以下、MEMS センサと略記）を採用した。使用した MEMS センサは表 3.1-3 と図 3.1-26 に示す 4 種類で、データ収集を無線で行う加速度センサ 1 種類、ジャイロセンサ 2 種類、データ収集を有線で行うジャイロセンサが 1 種類である。有線の加速度センサとジャイロセンサは振動装置の土台に設置されており、装置全体の回転を測定してキャンセルするために使用した。変位計と同じデータロガーで計測することで、土台のセンサと変位計の測定値は同期されている。無線のセンサは鋼製梁に設置して回転角を計測した。加速度センサは既往研究[5]で使用したもので、この既往研究では、鉄筋コンクリート実大構架の静的加力実験で、加速度センサによる多点観測を行い、柱や梁のたわみ曲線と同定することで、構架の変形を測定できることを

実証している[5]。ただし、定量的な精度評価は行われていなかったため、本実験で振動装置による加速度センサの測定精度を検証した。ジャイロセンサは振動時の回転角を測定するため、無線のジャイロセンサを2種準備した。これは、両面テープによる簡易な設置方法を採用したため、MEMS センサが格納された機器全体の大きさや重さも測定精度に影響するためである。

表 3.1-3 使用した MEMS センサー一覧

センサの呼び名	サンプリング周波数	レンジ	サイズ (mm) : 縦×横×高さ	重さ (g)
加速度センサ A	125 Hz	±2 G	53×68×16	34
ジャイロセンサ A	200 Hz	±900 dps	10×10×20	10
ジャイロセンサ B	200 Hz	±1500 dps	40×30×20	21
ジャイロセンサ C	200 Hz	±2000 dps	56×39×18	46



図 3.1-26 使用した MEMS センサ

b) 加速度センサを用いた静止時の回転角の測定

加速度センサによる静止時の測定は、鋼製梁を傾けて停止させた状態で行った。傾斜させた時の回転角は、部材試験での変形の範囲を参考に、0.001 rad から 0.03 rad の範囲で正負交番漸増の振幅で測定した。なお、装置全体の回転をキャンセルするための測定は、鋼製梁に設置した加速度センサと同じ種類のもの（加速度センサ A）を用いた。なお、変位計はサンプリング周波数 20 Hz で測定した。表 3.1-3 に示すように加速度センサのサンプリング周波数は 125 Hz である。鋼製梁を静止させた状態の 30 秒間の測定値の平均を用いて回転角を算定した。重力加速度に対するセンサの傾斜は、2 方向の加速度測定値から算出し、鋼製梁を傾けた状態の傾斜から実験開始時の傾斜（初期値）を差し引いたものを

回転角とした。図 3.1-27 は鋼製梁を正負交番漸増で傾斜させた時の測定結果で、各振幅のピーク時の結果について変位計と加速度センサによる測定値を比較している。巨視的には十分な精度を有していることが分かる。

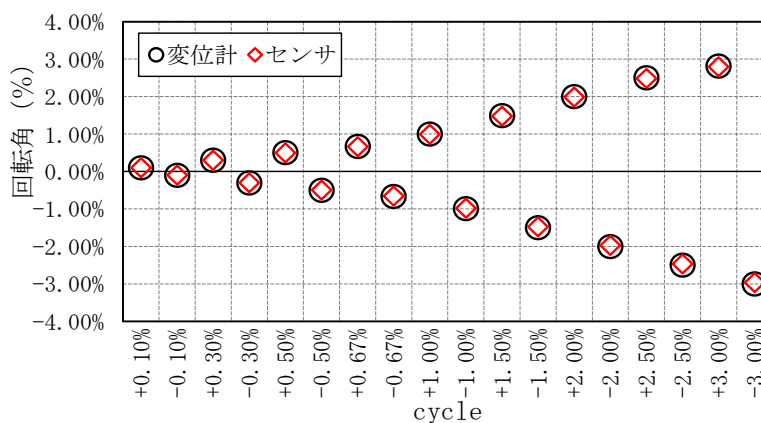


図 3.1-27 加速度センサ A と変位計の変位の比較

c) ジャイロセンサを用いた振動時の回転角の測定

ジャイロセンサによる振動時の測定は、手で鋼製梁を押し下げたのちに手を放し、自由振動させて行った。ばねの本数や強さを変えることで、固有周期が 0.2 秒、0.3 秒、0.4 秒になるような 3 種類のセットアップに調整した。鋼製梁には 2 個の無線ジャイロセンサを設置し、同時に測定した。なお、変位計はサンプリング周波数 200 Hz で測定した。振動時の測定では、鋼製梁から手を離れたあと、最初に正側で振幅のピークとなった点から 2 秒前を初期値とした。各ジャイロセンサと変位計の同期は、最初に正側で振幅のピークとなった点で行った。各ジャイロセンサのサンプリング周波数は表 3.1-3 の通りで、変位計のサンプリング周波数は 200 Hz である。

まず、ジャイロセンサで測定される角速度の精度を確認するため、変位計による測定値を微分して得られる角速度と比較した。前後の測定値の差をサンプリング周波数で除した値を、左端ピンから測定位置までの距離 436.5 mm で除すことで角速度を算出した。ジャイロセンサの角速度について、変位計から算出した角速度と比較した結果を図 3.1-28 に示す。ここでは、装置全体の角速度を変位計の角速度に加算することで補正している。ジャイロセンサ B の結果は (a)、(b)、(c) 図でそれぞれ固有周期別に示している。(d)、(e)、(f) 図は、ジャイロセンサ C の結果である。いずれも巨視的には一致している。

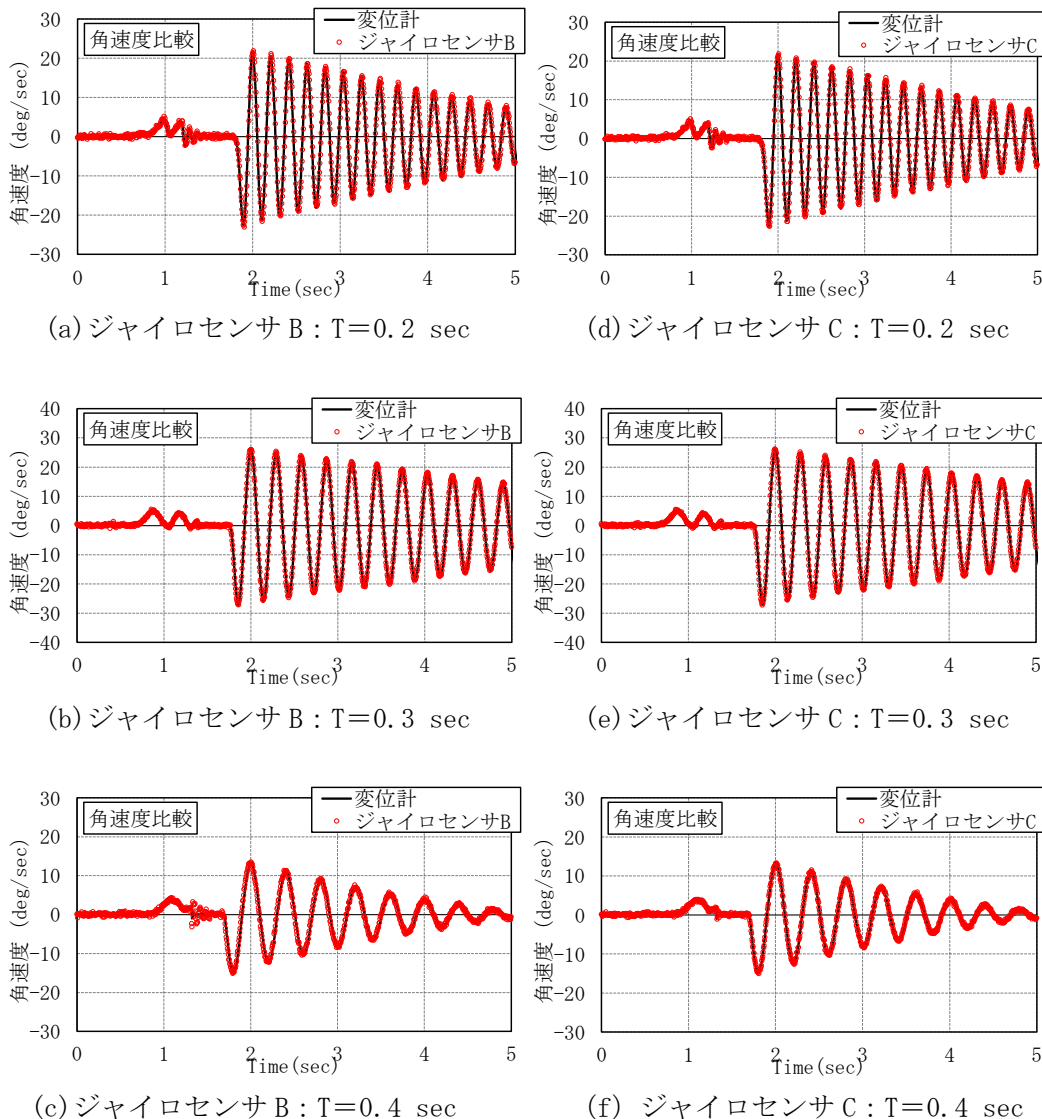


図 3.1-28 ジャイロセンサと変位計による角速度の比較

次に、ジャイロセンサで得られる角速度から回転角を得るための数値積分方法について検証する。数値積分は、角速度データの基線補正を行ったあと、角速度にサンプリング周期を乗じる方法とした。角速度データの基線補正は、全データの平均値を差し引く方法とした。ジャイロセンサの測定値を数値積分した回転角を変位計による回転角と比較した結果を図 3.1-29 に示す。図では回転角にアームの距離（設計値 436.5 mm）を乗じて変位で示している。ジャイロセンサ B の結果は (a)、(b)、(c) 図で固有周期別に示している。(d)、(e)、(f) 図は、ジャイロセンサ C の結果である。いずれも巨視的には一致している。

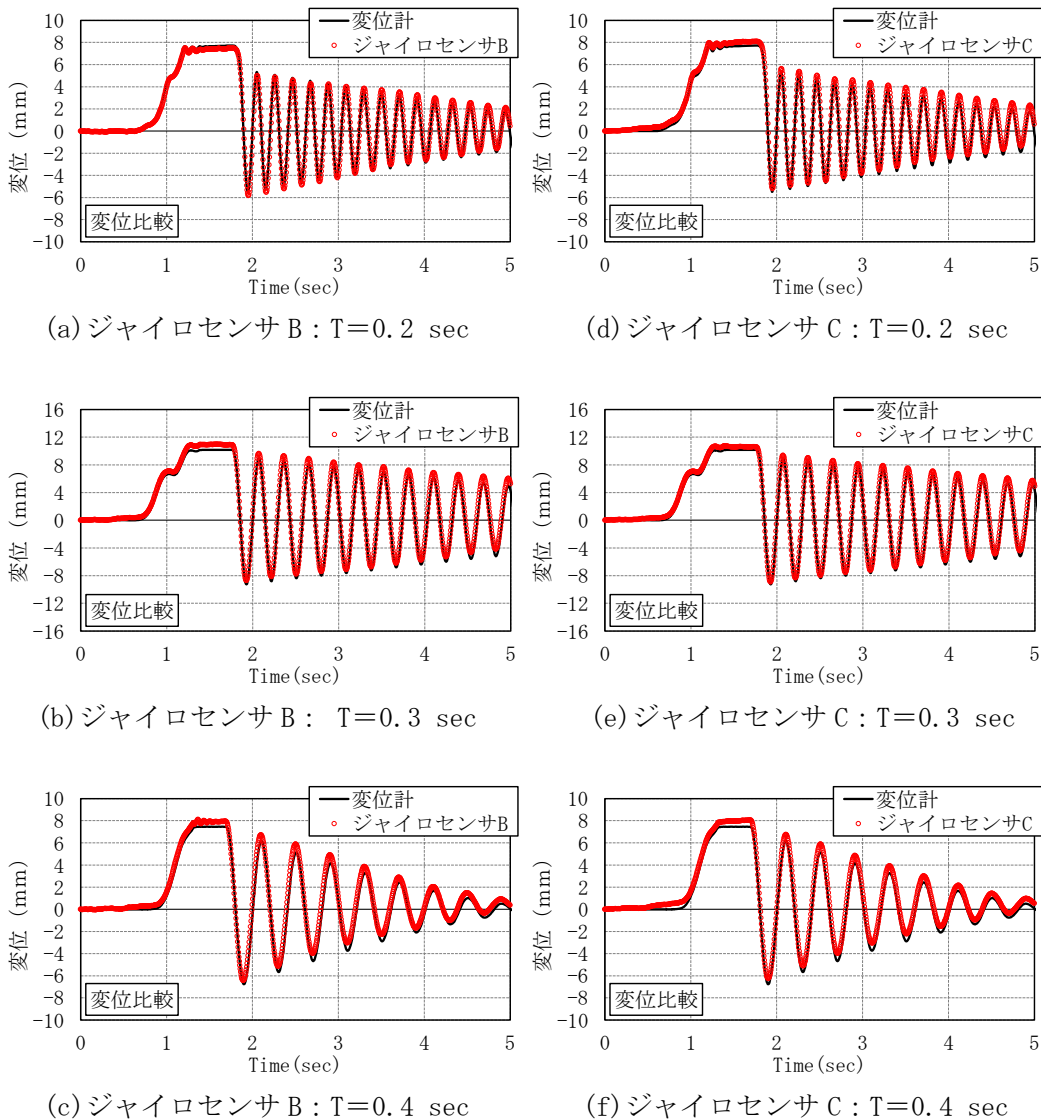


図 3.1-29 ジャイロセンサと変位計による変位の比較

③ データ処理方法と部材の変形算定方法

a) データ処理方法と測定誤差について

静止時の回転角を測定した図 3.1-27 の結果について、加速度センサの測定値の誤差を考察する。センサの測定値から変位計の測定値を差し引いた値を変位計の測定値で除したものを誤差率と定義し、図 3.1-30 に示す。誤差率は正方向の回転で負、負方向の回転で正となっており、センサによる回転角の大きさは若干小さいことが分かる。誤差率の大きさは、回転角が 0.001 rad の時で 3%、それ以降では 1.5%程度に収まる結果であり、部材の変形測定に十分な精度を有していることが確認できた。振動時のジャイロセンサの測定精度を確認するため、フーリエ変換を行った。

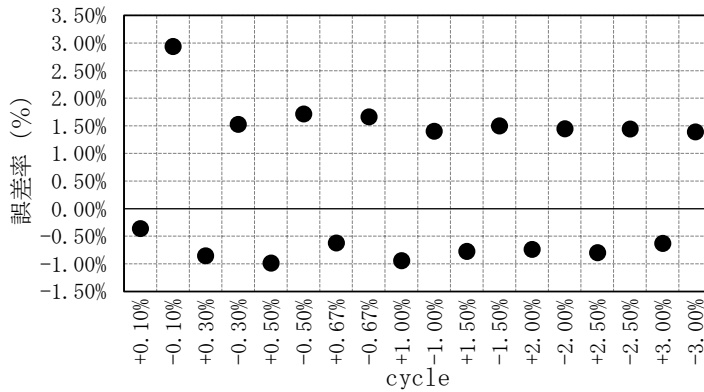


図 3.1-30 加速度センサ A の誤差率：誤差率 = {(センサ) - (変位計)} / (変位計)

図 3.1-31 は、図 3.1-28 に示した角速度の時刻歴データをフーリエ変換したスペクトルである。変位計の測定結果の卓越振動数は、固有周期 0.2 秒のセットアップで 4.8 Hz、固有周期 0.3 秒のセットアップで 3.4 Hz、固有周期 0.4 秒のセットアップで 2.5 Hz であった。ジャイロセンサの卓越振動数は変位計のものと一致した。つまり、固有周期 0.2~0.4 秒の振動では、サンプリング周波数は 200 Hz もあれば十分であることが確認できた。ジャイロセンサの測定精度は角速度の誤差率で検証する。

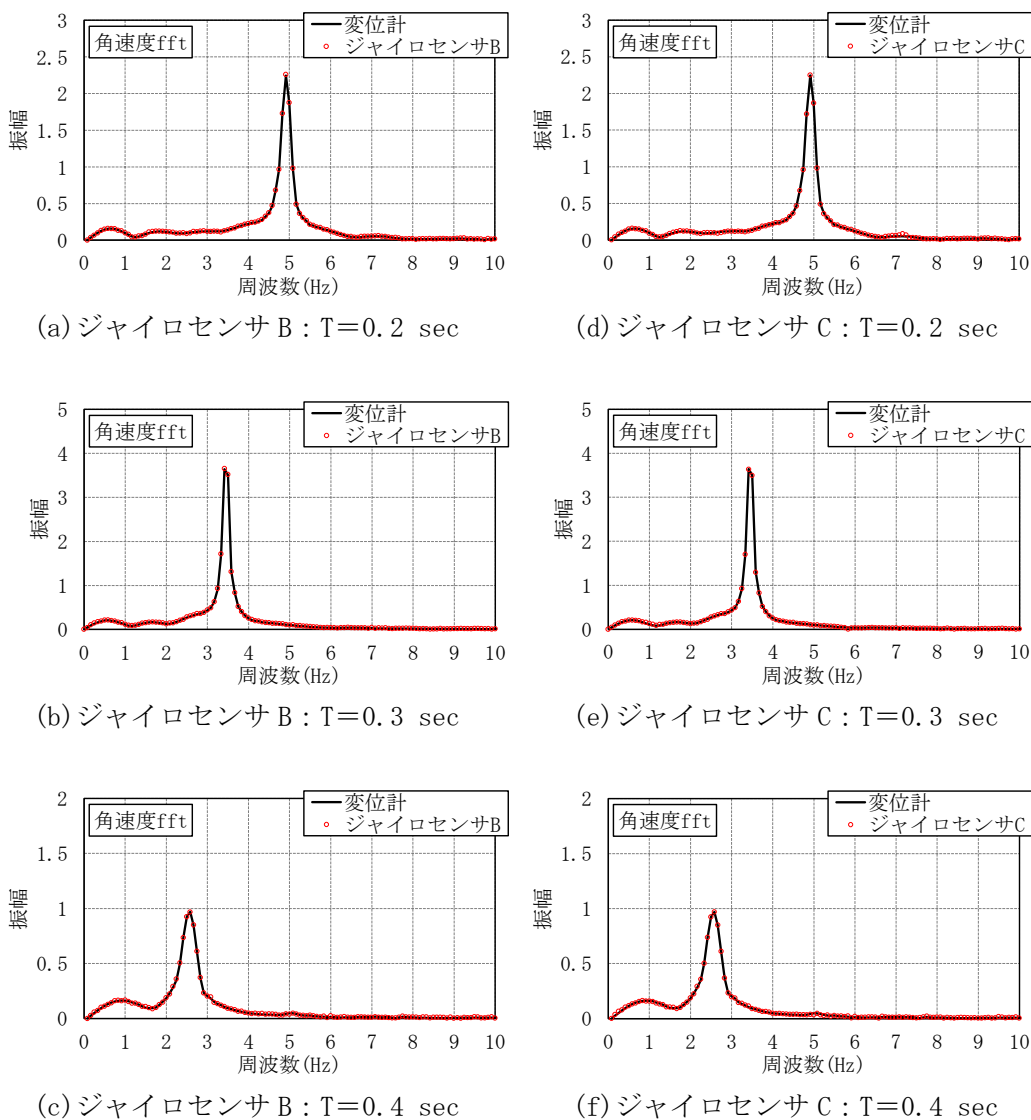


図 3.1-31 ジャイロセンサと変位計による角速度スペクトルの比較

誤差率は、前述と同様に、ジャイロセンサの値から変位計の値を差し引いたものを変位計の値で除して算出する。スペクトルの振幅の誤差率について、固有周期 0.2 秒、0.3 秒、0.4 秒のセットアップそれぞれの算出結果を表 3.1-4 に示す。両方のジャイロセンサで、いずれの固有周期においても誤差率の大きさは 1%以下で、十分な精度を有している。

表 3.1-4 卓越振動数での角速度スペクトル振幅の誤差率 (%)

	固有周期 0.2 秒	固有周期 0.3 秒	固有周期 0.4 秒
ジャイロセンサ B	0.55	0.34	-0.24
ジャイロセンサ C	0.10	-0.24	-0.18

図 3.1-32 は、図 3.1-29 に示した変位（回転角にアームの距離を乗じたもの）の時刻歴データをフーリエ変換したスペクトルである。横軸は振動数、縦軸は 2 乗和の平方根とした振幅である。角速度のスペクトルは装置の固有振動数でのみ卓越していたが、変位のスペクトルでは装置の固有振動数のほか、鋼製梁の押し下げる動作で低い振動数でも卓越していることが分かる。装置卓越振動数は、変位計や角速度の結果と等しかった。表 3.1-5 と表 3.1-6 に、装置卓越振動数と振動数 0.0 Hz の時のスペクトル振幅をそれぞれ示す。変位の誤差率は積分方法も含めた誤差率となる。装置固有振動数において、表 3.1-5 の変位の誤差率と表 3.1-4 の角速度の誤差率を絶対値で比較すると、ジャイロセンサ B はほぼ等しいのに対し、ジャイロセンサ C は変位の方が大きくなっている。これは積分する前に行った角速度の基線補正が影響していると考えられる。今回の基線補正方法には、角速度の全データの平均値を差し引く方法を採用しており、この方法では振動中の不連続な振動特性の変化には対応できない。つまり、ジャイロセンサ C は振動中に何らかの変化を生じた可能性があり、センサの大きさや重さに対して固定方法が十分でなかった可能性がある。ジャイロセンサ B は、誤差率は 1%以下で角速度の誤差率ともほぼ等しく、十分な精度を有している。ジャイロセンサ C に比べて一回り小さく重さも半分以下なので、底面を両面テープで粘着させる方法で十分な精度が得られたものと考えられる。一方、振動数 0.0 Hz の誤差率は、いずれのジャイロセンサも大きい。図 3.1-32 でも分かるように、鋼製梁を押し下げる動作に対応する低い周期帯では誤差が大きく、誤差を抑えるには、基線補正や積分方法を改良する必要がある。

以上より、静止時の回転角測定については、サンプリング周波数 125 Hz の加速度センサを用いて、静止状態で 30 秒間の測定値の平均を用いることで、建物の変形を測定するのに十分な精度を有することが確認できた。振動時の回転角測定については、サンプリング周波数 200 Hz のジャイロセンサを用いて角速度を測定し、角速度の全データの平均値を控除する方法で基線補正を行い、サンプリング周期を乗じて積分することで、建物の変形を測定するのに十分な精度を有することが確認できた。ただし、低振動数での誤差は大きく、基線補正や積分方法を改良する余地は有る。

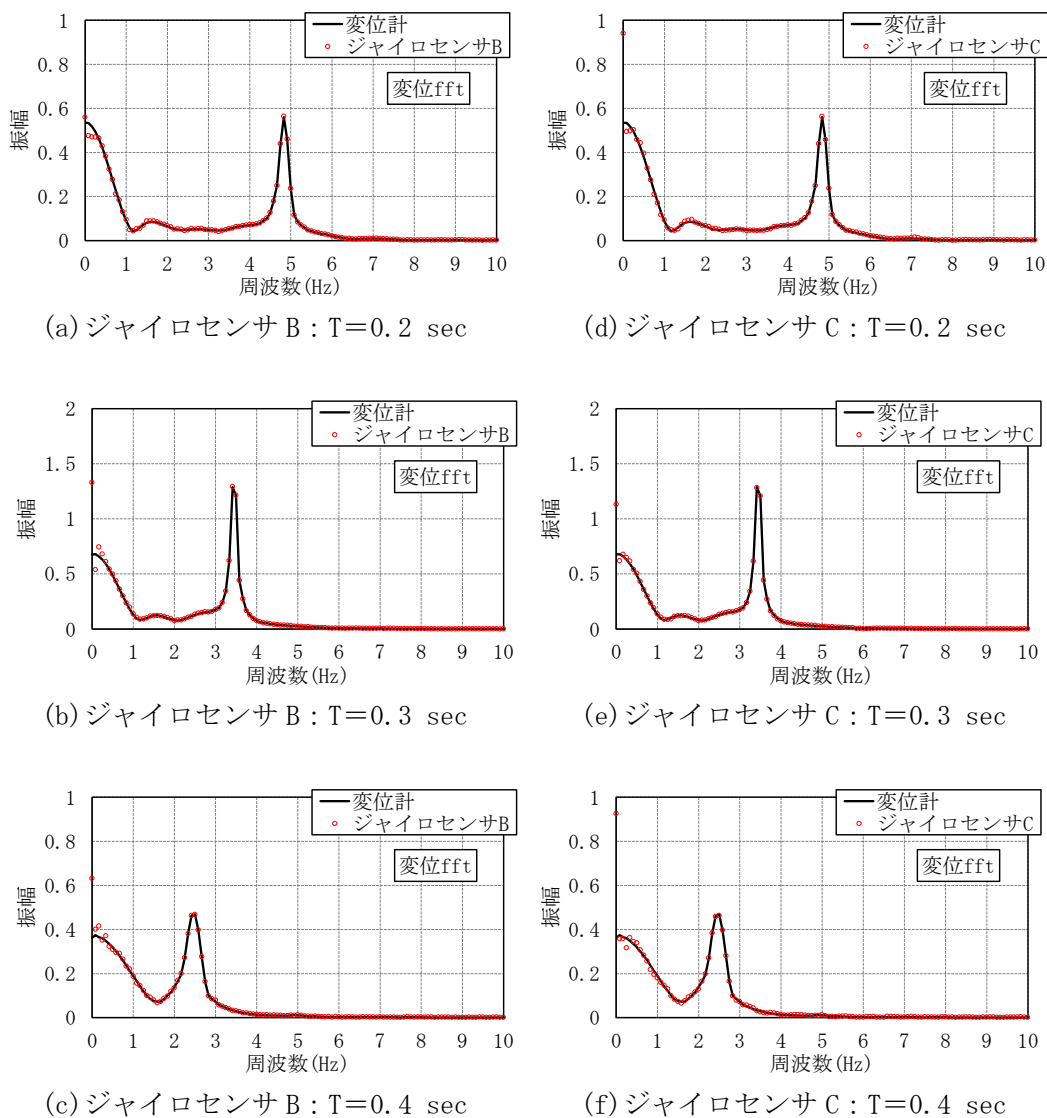


図 3.1-32 ジャイロセンサと変位計による変位スペクトルの比較

表 3.1-5 装置卓越振動数での変位スペクトル振幅の誤差率 (%)

	固有周期 0.2 秒	固有周期 0.3 秒	固有周期 0.4 秒
ジャイロセンサ B	0.55	0.34	-0.25
ジャイロセンサ C	0.38	-0.35	-1.35

表 3.1-6 振動数 0.0 Hz での変位スペクトル振幅の誤差率 (%)

	固有周期 0.2 秒	固有周期 0.3 秒	固有周期 0.4 秒
ジャイロセンサ B	4.75	96.72	74.25
ジャイロセンサ C	75.79	67.37	155.41

b) 静的载荷を受ける部材の変形算定方法

鉄筋コンクリート梁の破壊実験で加速度センサ A (表 3.1-3 参照) による多点観測を行ったので、得られたデータを用いて静止した状態の部材の変形算定の精度を検証した。実験は、鉄筋の重ね継手の性能を把握する目的で行われたもので、梁中央に重ね継手に設けている。加力方法は、図 3.1-33 に示す 4 点曲げの単調载荷で、変位計で梁中央のたわみを測定している。曲げモーメントは、支持点を境に曲げせん断区間と純曲げ区間に分かれる。加速度センサの設置位置は、曲げせん断区間で 3 点、純曲げ区間で 2 点とし、支持点の断面に生じる曲げひび割れによる不連続な変形に対応できるようにした。また、試験体全体の傾斜を測定するため、変位計を固定した測定治具に加速度センサと 1 点設置した。前述の振動装置による実験と同様に、変位計の測定値と加速度センサの測定結果を用いた算定値を比較することで精度を確認する。また、梁の変形の対称性を利用して、加速度センサの観測点数を減らせるかについても検討する。

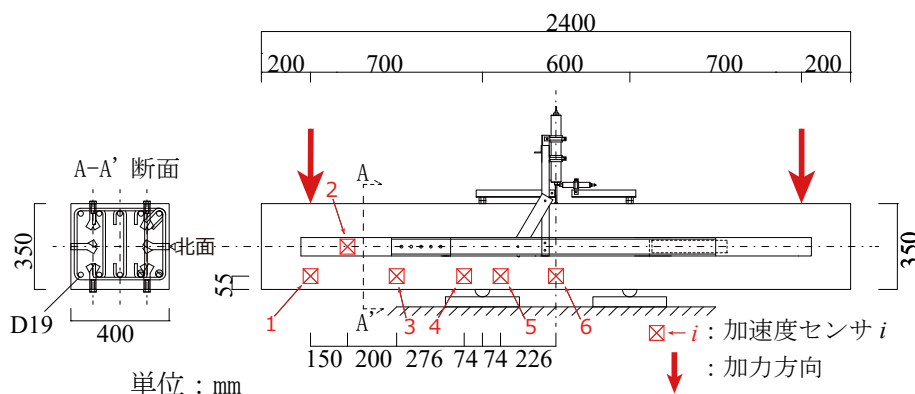


図 3.1-33 鉄筋コンクリート梁試験体の加力方法と加速度センサの位置

図 3.1-34 は、変形算定に用いるたわみ曲線で、加力点 ($x=0$) から梁中央まで示している。加速度センサは計 6 つ設置してあり (図 3.1-33 参照)、センサ i の設置位置を x_i 、回転角を ϕ_i とする。曲げせん断区間の $0 \leq x \leq \ell$ では、曲率がたわみの 2 階微分と等しい、せん断力が一定、曲げモーメントが曲率に比例、と仮定すれば、たわみ曲線は 3 次曲線となる。図 3.1-34 のように $y=f(x)$ を θ だけ回転させた $y=F(x)$ をこの区間のたわみ曲線とし、 $(0, 0)$ と $(\ell, \ell\theta)$ の 2 点を通ると仮定すれば、 ϕ_1 、 ϕ_3 、 ϕ_4 の回転角測定値でたわみ曲

線が同定できる。純曲げ区間の $0 \leq x \leq L$ でも同様に、曲率がたわみの 2 階微分と等しい、曲げモーメントが曲率に比例、と仮定すればたわみ曲線は 2 次曲線となる。ここでは、 $0 \leq x \leq L$ でたわみ曲線と同定する次の 2 つの方法を比較する。手順 1) 梁中央に対する対称性を利用してセンサを 1 つに減らす (梁中央を放物線の頂点と仮定してセンサ 5 のみ使用する)。手順 2) センサ 5、6 の 2 つを用いる。なお、試験体全体の回転をキャンセルするため、治具に取り付けたセンサ 2 の測定値で補正する。

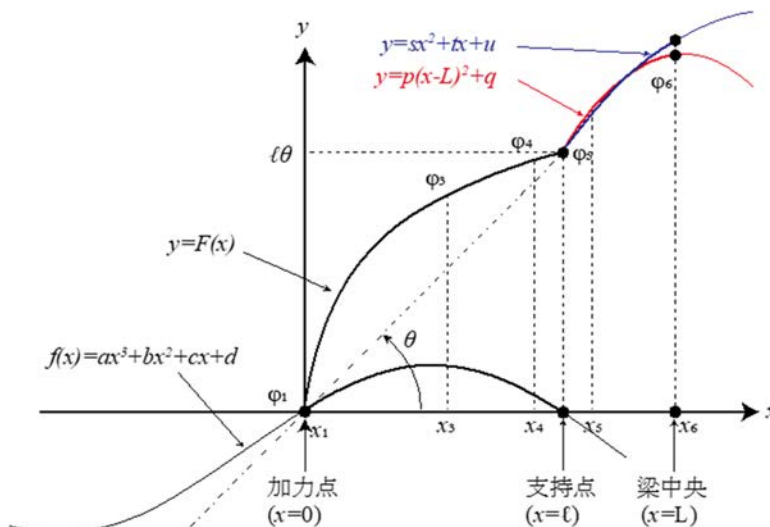
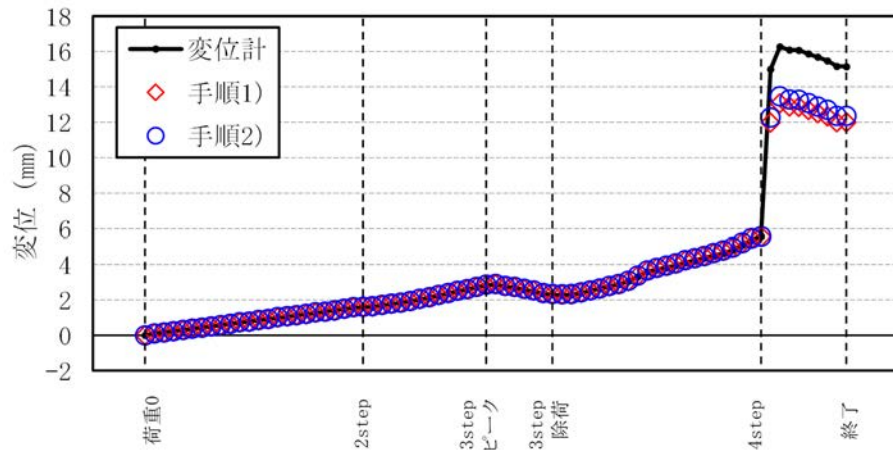
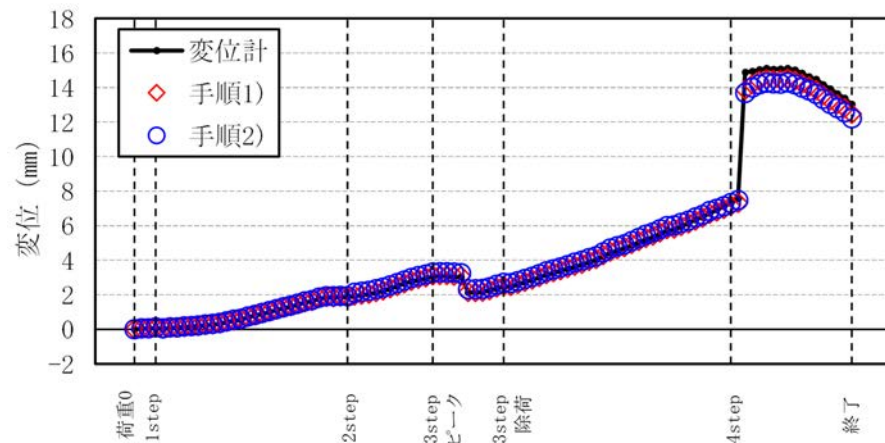


図 3.1-34 変位算定に用いるたわみ曲線

図 3.1-35 は、変位計と加速度センサによる梁中央たわみの測定値を比較したもので、(a) 図と (b) 図はそれぞれ梁試験体 No. 3 と No. 4 の結果である。2 つの試験体は重ね継手の方法が異なっており、試験体 No. 3 は横継手で材軸方向に左右対称の配筋、試験体 No. 4 は縦継手で左右非対称の配筋である。実験では、4step で梁中央の継ぎ手部分が破壊し、急激に耐力低下を起こした。図より、加速度センサによる値は、たわみ同定方法の手順 1) と手順 2)、ならびに配筋の異なる試験体 No. 3 と No. 4 のいずれにおいても、破壊する 4step まではほぼ一致していることが分かる。



(a) 梁試験体 No. 3



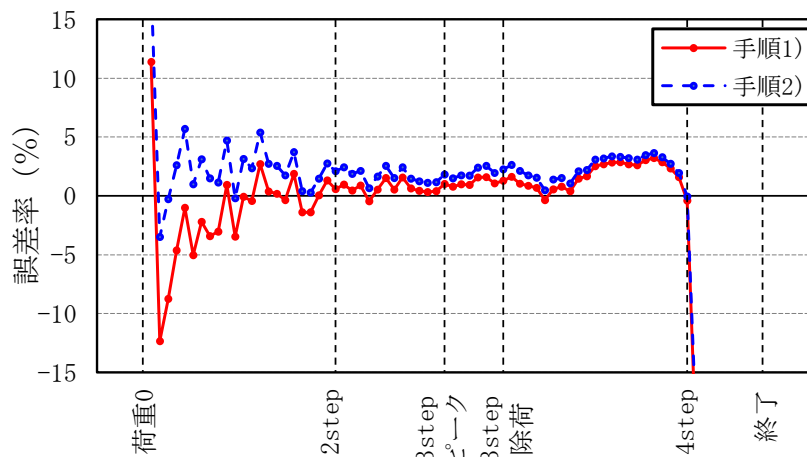
(b) 梁試験体 No. 4

図 3.1-35 加速度センサ A と変位計による梁中央変位の比較

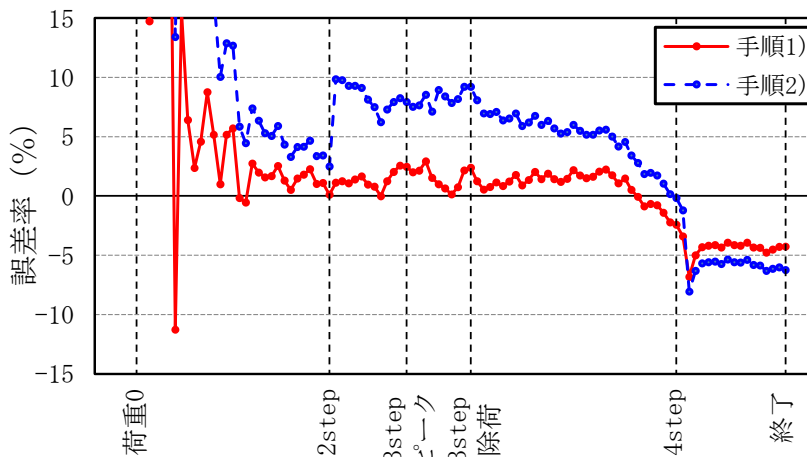
試験体 No. 3 と No. 4 について、変位計に対する加速度センサの測定値の誤差率をそれぞれ図 3.1-36 に示す。誤差率は、前述と同様に、加速度センサの値から変位計の値を差し引いたものを変位計の値で除して算出した。加力初期では誤差率が大きく変動しているが、これは加力装置と試験体の接触部の隙間が埋まる過程で生じたものと考えられる。破壊を生じた 4step では誤差率が大きく低下している。2step は長期荷重レベルの载荷で、試験体 No. 3 での手順 1)、2) ならびに試験体 No. 4 の手順 1) では、2step 手前から 4step 手前までの誤差率は、2~3%程度である。2step の時には曲げひび割れを生じており、試験体 No. 4 の手順 2) で誤差率が増加しているのは、左右非対称の配筋により、ひび割れ性状も左右非対称となったためと考えられる。つまり、巨視的な部材の変形を測定する目的では、対称性の利用でセンサの設置数を減らせる可能性が示された。また、センサの設置数を増やすことで、局所の損傷を検出できる可能性もある。なお、部材の変形測定では、2step 手前から 4step 手前までの誤差率は正数で加力方向と一致しており、前述の振動装置を用い

た加速度センサ単体の精度確認試験とは逆の結果となった。これは、センサ単体の回転角はやや小さいが、複数センサを用いたたわみ同定方法はやや大きい変位が算出されることを意味している。いずれにしても、部材変形を測定するのに十分な精度を有していることが確認された。

以上により、静止時の部材変形の測定については、鉄筋コンクリート梁の4点曲げ試験の結果より、加速度センサで多点観測を行い、たわみ曲線と同定することで、十分な精度で変形測定が可能であることが確認された。



(a) 梁試験体 No. 3



(b) 梁試験体 No. 4

図 3.1-36 加速度センサ A の多点測定による梁中央変位の誤差率

3.1.2 まとめ

(1) 動的応答・振動性状の観測及び評価

- ① 原子炉建屋の解析モデルを作成するために、東京電力との打ち合わせや連携により提供された資料から必要なデータを収集した。
- ② 東京電力から提供されたデータに基づいて 3 号機建屋の等価質点系解析モデルを作成して、剛性、振動モード、周期などの振動性状を把握することができた。具体的には、高さ方向の剛性分布は、3 つのグループに分類できることが分かった。
- ③ 設置するセンサの位置や数をパラメータとした地震応答解析を行い、誤差が最小限となるように解析モデルを調整した上でセンサ非設置層の応答推定の精度を検討した。剛性分布が、3 グループに分かれることから、応答が弾性範囲に留まる場合には、2 個または 3 個程度のセンサの応答観測データと振動モードを用いて、非観測階の応答も 2～20%程度 の誤差で推定できることが明らかとなった。

(2) 長期変形性状の観測及び評価

- ① 建屋の弾性時の固有周期は 0.15～0.20 秒程度であることを確認した。建屋の損傷と劣化の進行により、これよりも固有周期は長くなる。鉄筋コンクリート部材では、ひび割れを生じると剛性が半分低下することが知られている。これらを考慮し、振動装置は、鋼製梁が 0.2～0.4 秒の固有周期で振動するようにばねと錘で調整した。静止時の測定では、ばねをねじ棒に換えることで鋼製梁の傾斜を固定する方法を採用した。
- ② 静止時の回転角は、0.001 rad から 0.03 rad の範囲で正負交番漸増の振幅で鋼製梁を静止させ、加速度センサで測定した。振動時の回転角は、固有周期 0.2 秒、0.3 秒、0.4 秒のセットアップで鋼製梁を振動させ、ジャイロセンサで測定した。鋼製梁の回転角は変位計でも測定し、その結果と比較することで測定精度を検証した。静止時と振動時のいずれにおいても、巨視的には十分な精度を有していることを確認した。
- ③ 測定結果の誤差率を算出して定量的な検証を行った。その結果、静止時の回転角測定については、サンプリング周波数 125 Hz、レンジ 2 G の加速度センサを用いて、静止状態で 30 秒間の測定値の平均を用いることで、建物の変形を測定するのに十分な精度を有することが確認できた。振動時の回転角測定については、サンプリング周波数 200 Hz のジャイロセンサを用いて角速度を測定し、角速度の全データの平均値を控除する方法で基線補正を行い、サンプリング周期を乗じて積分することで、建物の変形を測定するのに十分な精度を有することが確認できた。ただし、低振動数での誤差は大きく、基線補正や積分方法を改良する余地は有る。静止時の部材変形の測定については、鉄筋コンクリート梁の 4 点曲げ試験の結果より、加速度センサで多点観測を行い、たわみ曲線と同定することで、十分な精度で変形測定が可能であることが確認された。令和 4 年度以降、この部材変形測定方法を振動時に応用する計画である。

3.2 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

3.2.1 令和3年度実施内容及び成果

(1) テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

① 損傷検知システムの設計

サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数、可変のビーム径と偏光方向でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を得ることができる損傷検知システム（計測システム）を設計した。

a) 光学系の構築と動作確認

損傷したコンクリートの詳細診断を目的とした設計した計測システムの光学系設計図は図 3.2-1 に示す通りであり、構築したシステムの外観は図 3.2-2 である。このシステムで得られた反射ならびに透過のイメージ像を図 3.2-3 に示す。金属円板を走査したイメージ像の検出強度が反転しており、反射と透過のイメージング像が取得できていることを確認できる。図 3.2-2 に示すようにレンズを変更することでビーム径を可変とする測定系（左図）と、精密回転ステージを用いて偏光を回転できる測定系（右図）を設計するとともに構築した。レンズと精密ステージは取り外しての組立を可能にしており、それぞれの機能を合わせた光学系での計測も可能である。これを用いることで、試験片に照射するテラヘルツ波をひび割れに対してスキャンすることだけでなく、ひび割れの異なる幅に対してテラヘルツ波のビーム径を調整して計測することが可能になった。右図の測定光学系についてサンプルステージが少し傾いているのはテラヘルツ波の干渉を防ぐためである。光路が左右非対称にもなっており、これも干渉を防ぐことができる。レンズの数が違うのは波長を考慮してのことである。検出強度を上げ、データの精度を保証するためである。

20～30 GHz のサブテラヘルツから数 THz まで周波数においても、光源と検出器を 1° 刻み回転ステージにデバイスを設置する治具を準備・使用することで、直径 4 mm 以下のビーム径で偏光を回転させながら、反射と透過のイメージ像を測定できる。

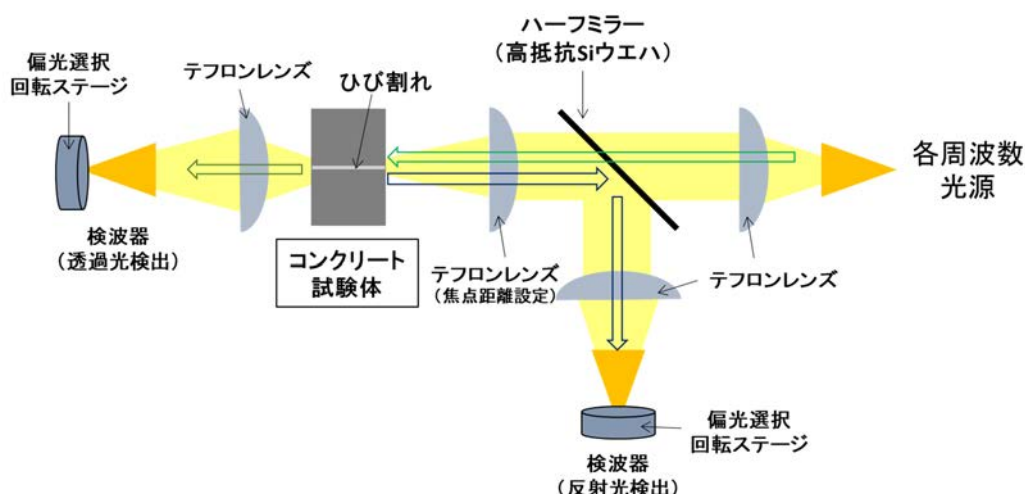


図 3.2-1 近距離による詳細診断を志向した周波数選択計測システムの設計図



図 3.2-2 近距離による詳細診断を志向した周波数選択計測システムの光学系
 (左) レンズ変更によるビーム径可変測定系、
 (右) 精密ステージを用いる偏光回転測定系

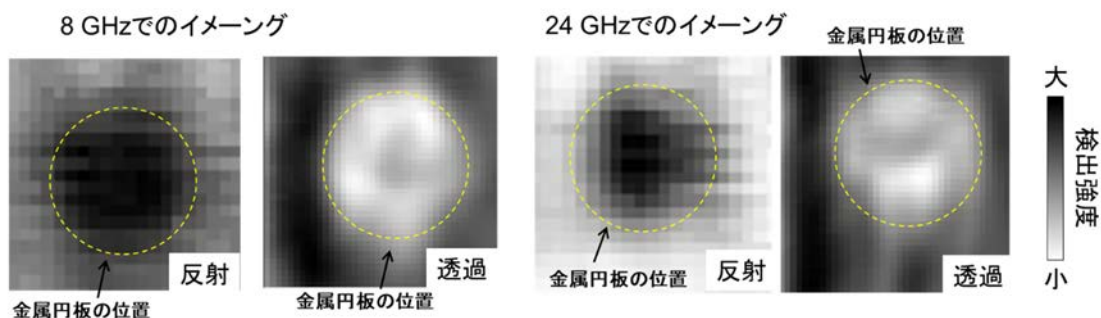


図 3.2-3 金属円板の反射／透過イメージング像
 (左) 8 GHz (右) 24 GHz

動作の確認を行うため、課題③のグループが作製した試験体ブロックを用いて計測した。コンクリート構造物の損傷としてひび割れに着目し、損傷が無い試験体ブロック間の隙間を調整することで疑似的なひび割れを再現した。

周波数 60 GHz (波長：～5 mm) を用いた計測結果を図 3.2-4 に示す。ひび割れ方向と偏光方向が平行である時 (図 3.2-4(a))、反射波はひび割れ幅 5 mm で 50%程度 of 信号の減少が見られたのに対し、透過波の信号はひび割れ幅 7 mm 以上から検出された。ひび割れ方向と偏光方向が垂直である時 (図 3.2-4(b))、反射波はひび割れ幅 5 mm で減少が見られたが、減少量は平行条件と比べて少なかった。透過波の信号はひび割れ幅 10 mm 以上から検出され、平行条件と比べて応答が悪かった。このことから、動作の確認が行われたとともに：ひび割れ方向に対してサブテラヘルツ波の偏光方向が敏感に応答することが示唆された。

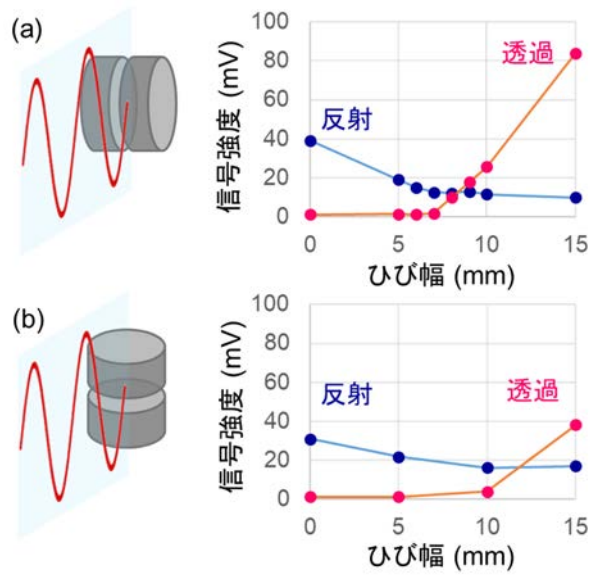


図 3.2-4 試験体のひび割れ幅とサブテラヘルツ波の透過及び反射の関係
 (a) 偏光方向とひび割れ方向が平行 (b) 偏光方向とひび割れ方向が垂直

② 測定条件とデータ解析の検討

中性子イメージングによりひび割れの位置と幅が規定された鉄筋コンクリート試験体をリファレンスに使用することを想定して、ひびの方向とサイズを規定できる偏光面をもつ電磁波の散乱度（透過率）を複数の電磁波で理論的に多元解析できるアルゴリズムを検討するとともに、計測に適切な周波数を検討した。アルゴリズムとしては図 3.2-5 に示す通り、ひび割れ方向は透過率が大きい偏光方向と平行であり、サブテラヘルツ波の透過率と反射率の変曲点からひび幅を見積もることができ、計測に最適な周波数は検出対象とするひび幅に対して同程度から半分の波長を有するサブテラヘルツであることが分かる。具体的には幅が 5 mm のひび割れを検出するには 5 mm の波長に対応する 60 GHz を含む周波数範囲での掃引が適切ということである。

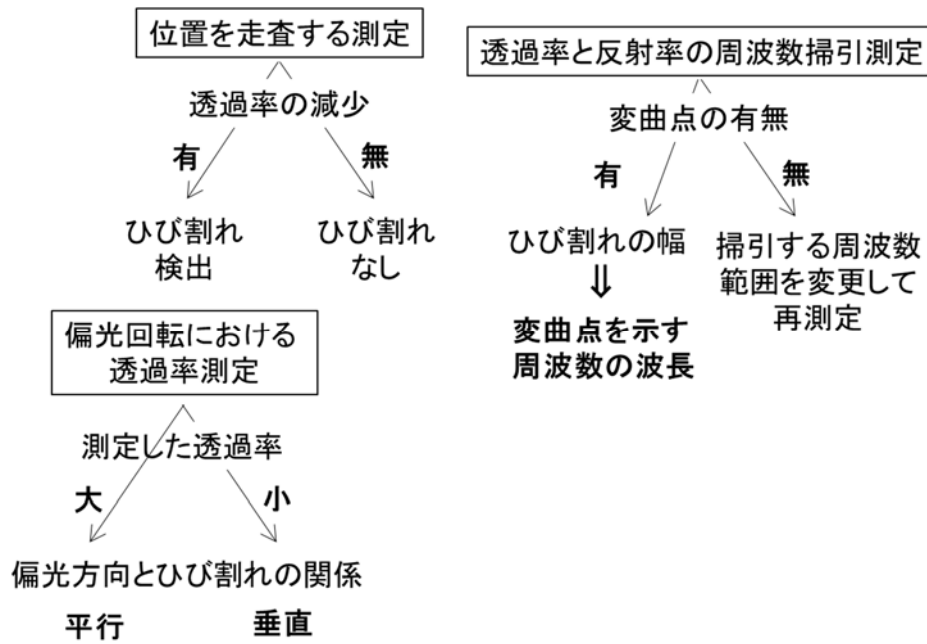


図 3.2-5 ひび割れを解析するアルゴリズム
(左) 位置と方向 (右) サイズ

a) 偏光計測とそのデータ解析

反射率と透過率の測定を1つの実験として、図 3.2-4 に示すように 60 GHz の周波数で行い、偏光方向がひび割れと平行の場合、波長程度のひび割れ幅において、反射率と透過率ともに変曲点をとることが分かった。偏光方向が垂直になると変曲点を示すひび割れ幅は広がる傾向が有り、測定周波数と偏光方向を変調させたイメージ像から、ひびのサイズと方向を解析できることが実験的に確認できた。その結果から、コンクリート内部にひび割れがあると、テラヘルツ波の偏光方向とひび割れ面方向に応じて反射応答が変化することから、テラヘルツ波の遠隔測定によるレベル付けに必要な判定基準データとしての活用ができる。

その確認として、図 3.2-6 に示すようなコア抜きサンプルのある深さに表面に水平に分布するひびを想定した測定において、図中の赤枠での測定周波数 (11.2 GHz) で隙間の存在による反射率の変化を明確に確認でき、かぶり深さ 40 mm にあるひび割れが検出可能であることが分かる。さらに、斜め方向 (45°) に発生する亀裂を模擬したサンプルに対しても同様な測定を行い (図 3.2-7) 、いずれの測定周波数でも表面から 45 mm のかぶり深さにある隙間の影響をテラヘルツ波の反射強度が反映していることを確認できた。

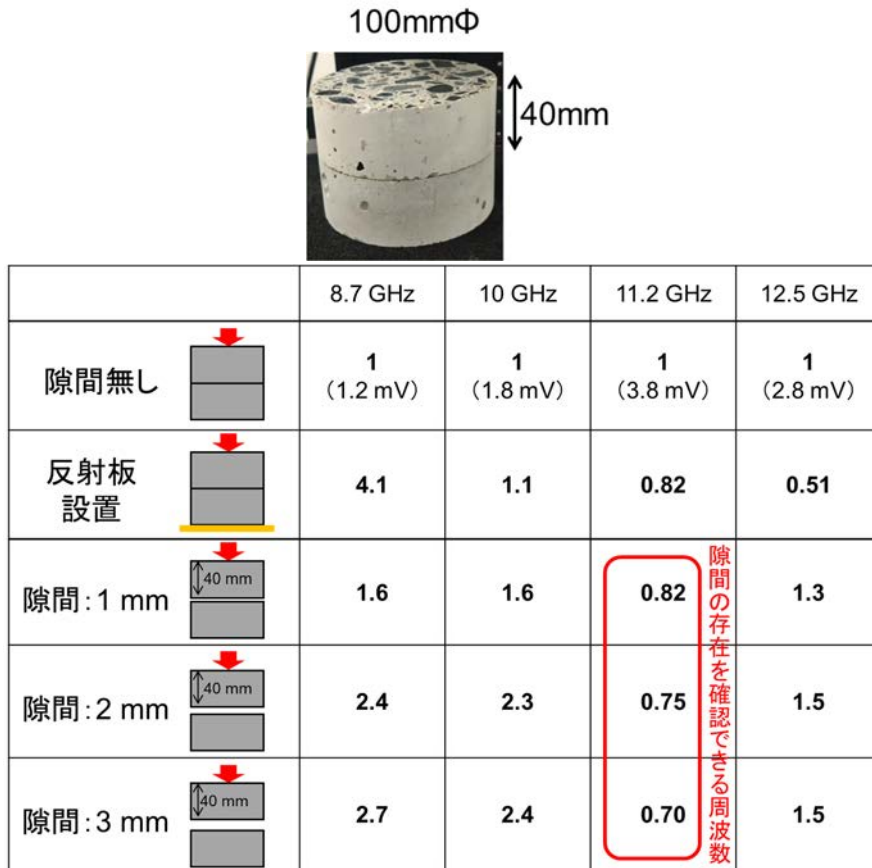


図 3. 2-6 コア抜きサンプルの内部に水平分布するひびのテラヘルツ反射率測定 (上) コア抜きサンプル画像 (下) 各条件における反射率


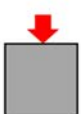



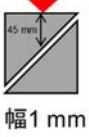
	8.7 GHz	10 GHz	11.2 GHz	12.5 GHz
 高さ78mm 	1	1	1	1
 高さ78mm  反射板設置	0.63	1.46	0.35	0.52
 高さ88mm  幅1mm	0.25	0.41	0.72	0.65

図 3. 2-7 内部に亀裂が斜め方向に発生する試験体のテラヘルツ反射率測定

(2) サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

① 計測システムの構築

サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を任意のビーム径と偏光方向で得ることができる損傷検知システム（計測システム）として、図 3.2-8 に示すものを組み上げ、その動作を確認した。測定サンプルに対して偏光方向を垂直および平行に設定し、90 GHz と 140 GHz で測定した反射ならびに透過のイメージ像を図 3.2-9 に示す。

a) 光学系の構築

遠隔診断を志向した光学系を図 3.2-5 に示す。周波数 30~95 GHz のサブテラヘルツ波と 140 GHz のテラヘルツ波を発生させる発振器及び検波器を設置した。レンズを用いて平行光を作り、遠隔計測に適用し得る設計にした。ハーフミラーを用いることで試験体に対するサブテラヘルツ波の反射と透過の情報を得られるようにした。光源は偏光特性を有しているため、発振器及び検波器の角度を変える、あるいは試験体の角度を変えることで偏光に関する情報を得ることが可能である。基礎データを得るために、サブテラヘルツ波を集光するレンズ、ビーム径を調整可能なアパーチャーを設計した。

距離可変ユニットを移動させ、動作確認を行った。特定の距離においては電磁波の干渉が生じたが、実験室レベルにおいては遠隔診断に向けた動作が確認できた。

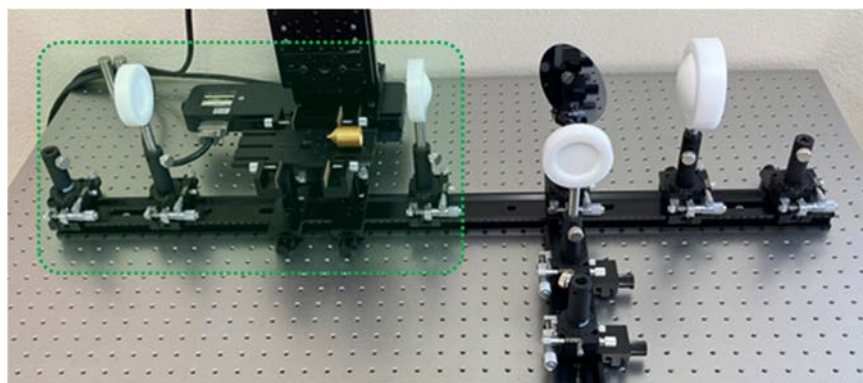
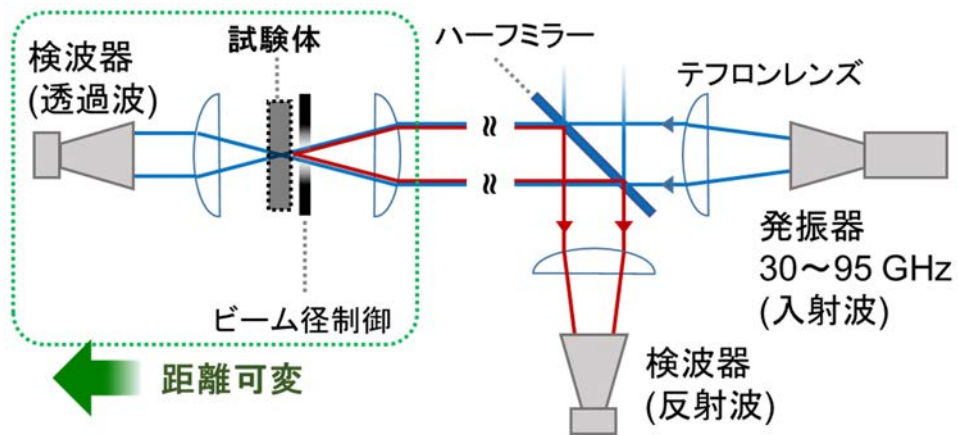


図 3.2-8 遠隔診断を志向した光学系の模式図（上）と外観（下）

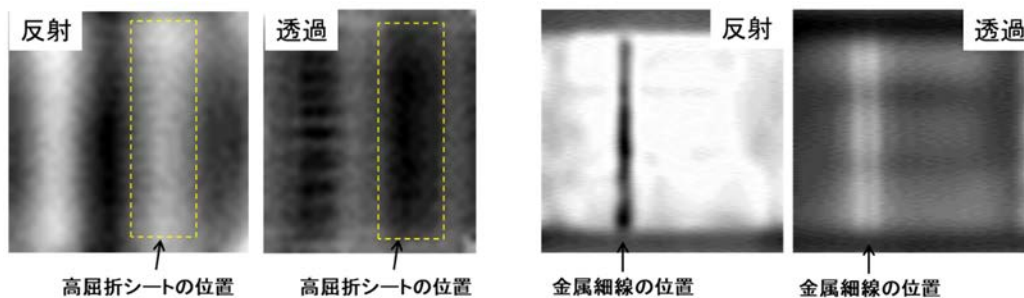


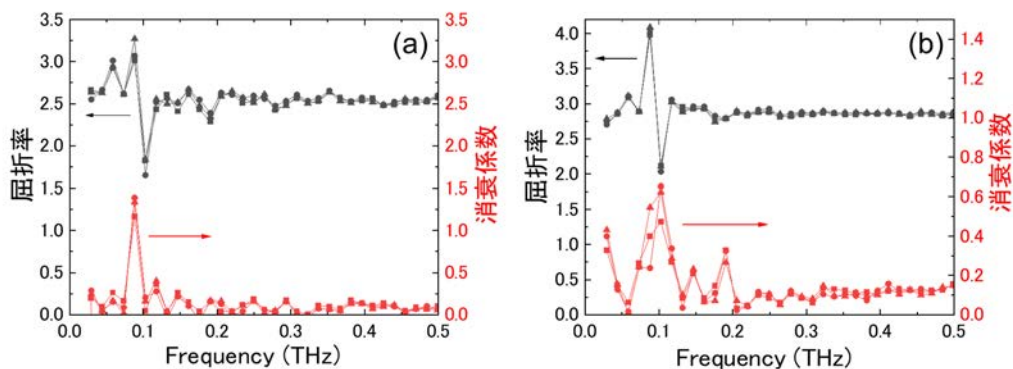
図 3.2-9 測定した反射ならびに透過のイメージ像
 (左) 90 GHz による高屈折シートの子テラヘルツイメージ像 (偏光面：垂直)
 (右) 140 GHz による金属細線のテラヘルツイメージ像 (偏光面：平行)

② コンクリート構造物の基礎物性調査と遠隔計測に適用する周波数の検討

コンクリートの表層に形成されているモルタルやエポキシ等の各種塗膜に対する透過性を任意の厚さで系統的に評価するとともに、遠隔計測に適用する周波数を検討した。

a) 塗膜材料の基礎物性

白色光源で構成されるテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) 測定により、2 種類の塗膜材質における任意の厚さに適用できる物性特性である複素誘電率の周波数特性を調べた。測定結果を図 3.2-10 に示す。各塗膜について 3 回測定を行い、再現性を確認している。サブテラヘルツ波の損失を示す赤線部に着目すると、100 GHz (0.1 THz) 前後にピークが見られた。材質によってピークの位置は異なるものの、25~60 GHz、125~500 GHz の周波領域においては損失が少なかった。すなわち、塗膜に覆われたコンクリートにおいて、サブテラヘルツ波が透過する周波数領域は 25~60 GHz、125~500 GHz であることが明らかとなった。



(a) 高せん断接着タイプ (b) 熱時高接着 (高温耐効) タイプ

図 3.2-10 塗膜材料のテラヘルツ時間領域分光測定結果

遠隔診断においてはサブテラヘルツ波が大気中を伝搬するため[6]、大気との相互作用を調べた。大気中の成分のうち、水蒸気との相互作用が大きいことが分かり、500 GHz~

1.5 THz において強い吸収ピークが有ることを図 3.2-11 に示すように実験的にも確認した。これらの結果から、遠隔計測に適用する周波数としては水蒸気によるサブテラヘルツの強い吸収ピークがなく、さらに塗膜材料に対して透過する 25～60 GHz が有効であることと言える。

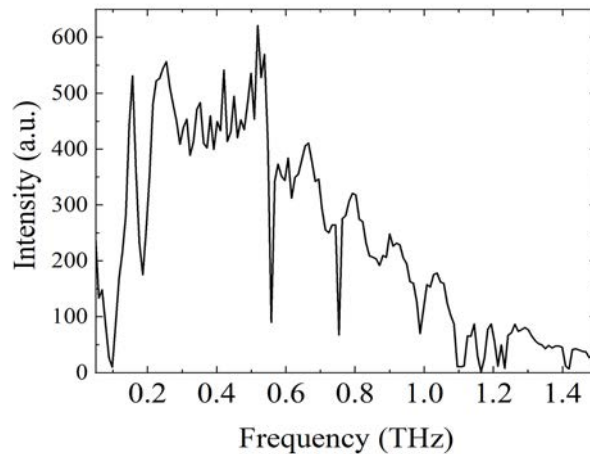
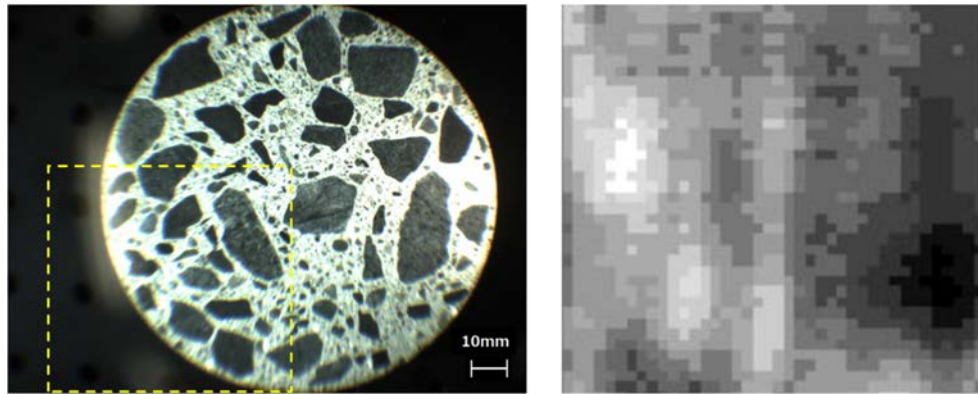


図 3.2-11 水蒸気のテラヘルツスペクトル

コンクリートに対しては低周波である方が高い透過率を示すことを考慮し、遠隔計測に適用可能な周波数領域を 60 GHz 以下と特定した。塗膜材料だけでなく、水蒸気：空気中ガスの影響を考慮することが可能となり、電磁波と物質の相互作用についての解析や数値計算を解析することで、遠隔で使用する光学系を設計、遠隔計測に適用する条件を探索できるようになった。

③ 建屋全体の損傷を可視化する技術基盤の構築

従来から有る CMOS カメラの可視像も取り込み、建屋全体の損傷を広いレンジで可視化できる損傷検知のための技術基盤（画像処理）の枠組みを構築した。図 3.2-12 は CMOS カメラで取得したコンクリート試験体の可視像と 24 GHz でのサブテラヘルツイメージング像である。損傷検知のための技術基盤（画像処理）として構築した枠組みは可視像とイメージング像を比較することで広い範囲で損傷を検出しやすくするものである。CMOS カメラの可視像とサブテラヘルツイメージング像を重ね合わせることで、広いレンジにおける損傷の可視化が実現できるようになる（図 3.2-13 参照）。



↑ イメージングの範囲

図 3.2-12 コンクリート試験体の CMOS カメラで取得した可視像（左）と 24 GHz でのサブテラヘルツイメージング像（右）

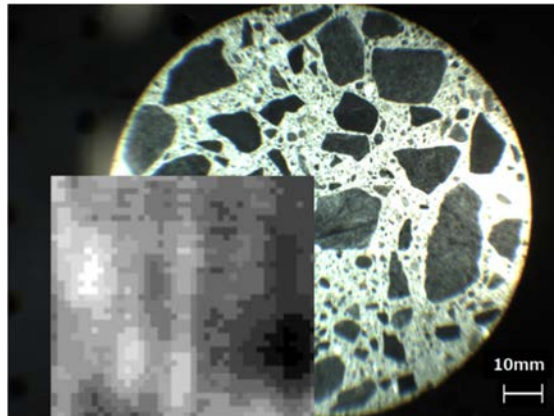


図 3.2-13 CMOS カメラの可視像とサブテラヘルツイメージング像の重ね合わせ

a) CMOS カメラ等の可視像とサブテラヘルツ波情報の統合

ビーム径を制御するアパーチャーを用いて、サブテラヘルツ波の点分析データの位置情報と可視画像の位置情報を結び付ける処理が、アパーチャーで位置を同一にすることが可能になった。アパーチャー径が 1 mm で中心位置を制御する時、分解能はその半分の 0.5 mm と理解できる。また、遠隔診断の検討として、有限差分時間領域（以下、FDTD と略記。）法による電磁界数値解析を基盤として、例えば図 3.2-14 のような解析のプロセスを確認した。

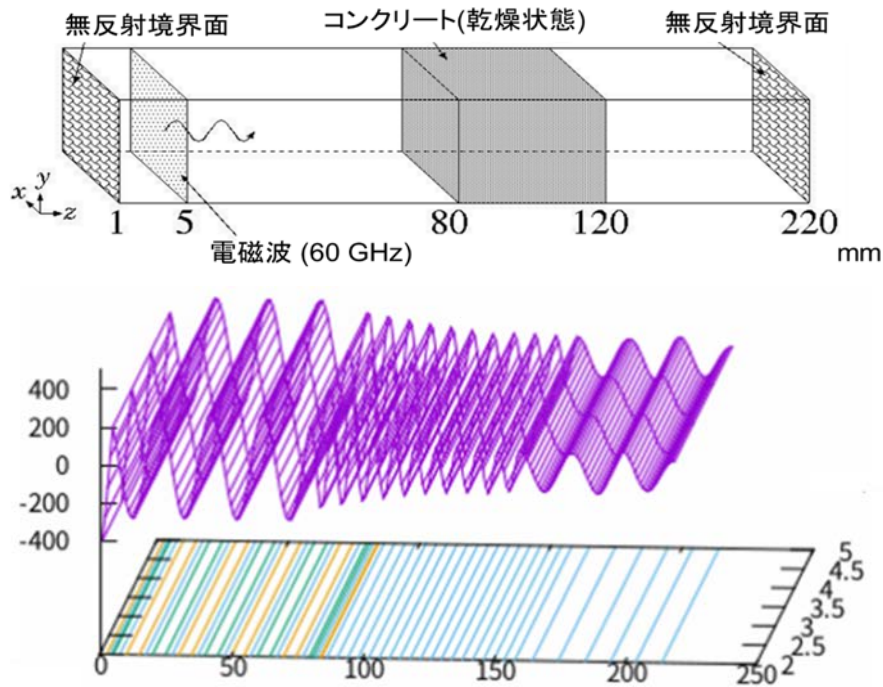


図 3.2-14 FDTD による計算モデルと伝搬による電界強度変化

以上の通り、サブテラヘルツ波を試験体に対して遠隔から照射し、図 3.2-8 に示す透過率と反射率が計測可能なシステムを設計するとともに、設置環境の計測システムでのサブテラヘルツ波の干渉が無い場合が条件であるが、FDTD 法の理論に基づきアパーチャーを活用して設計通りのビーム径 ($\phi 1\sim 4$ mm) に成形したサブテラヘルツ波の偏光を回転させながら、反射と透過のイメージ像を測定が可能である計測光学系であることが確認できた。また塗膜として 2 mm 厚さのモルタル表面に形成されるエポキシ膜について、サブテラヘルツ帯の周波数で広く透過することを確認し、遠隔計測に適用可能な周波数領域としては 60 GHz 以下と特定できる。サブテラヘルツデータの空間分解能である約 0.5 mm (サブテラヘルツ波の波長に対して小さい径のアパーチャーを活用することにより期待できるイメージング測定の分解能) に整合する可視像を取得できる画像処理が可能である。

(3) 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証 (連携先：原子力機構)

① 中性子イメージング実験条件の決定

令和 4 年度及び令和 5 年度において、テラヘルツ波イメージング技術の検証に資する鉄筋コンクリートの内部 3 次元分布を非破壊で取得するために、予備試験として JRR-3 の TNRF を使用した、鉄筋コンクリート内部 CT 画像取得の条件出しを実施した。

図 3.2-15 に示すように、コンクリートに欠陥を模擬した釘穴を設けた試験体を用いて中性子イメージング測定条件を検討した結果、図 3.2-15(a) に示す模擬的に空けておいた穴が、図 3.2-15(c) 及び(d) に示す画像再構成後の断面像においてははっきりと映っているこ

とが確認されたことから、測定条件は $0.75 \text{ sec}/0.3^\circ$ /枚を 600 枚撮像することで決定した。これにより測定時間は 1 時間で完了し、画像再構成の際に出現するアーチファクト（ノイズのようなもの）も発生せず、質の高い CT 画像取得が可能となる。また、この条件の内部欠陥の観測精度は 0.2 mm を得ることができた。

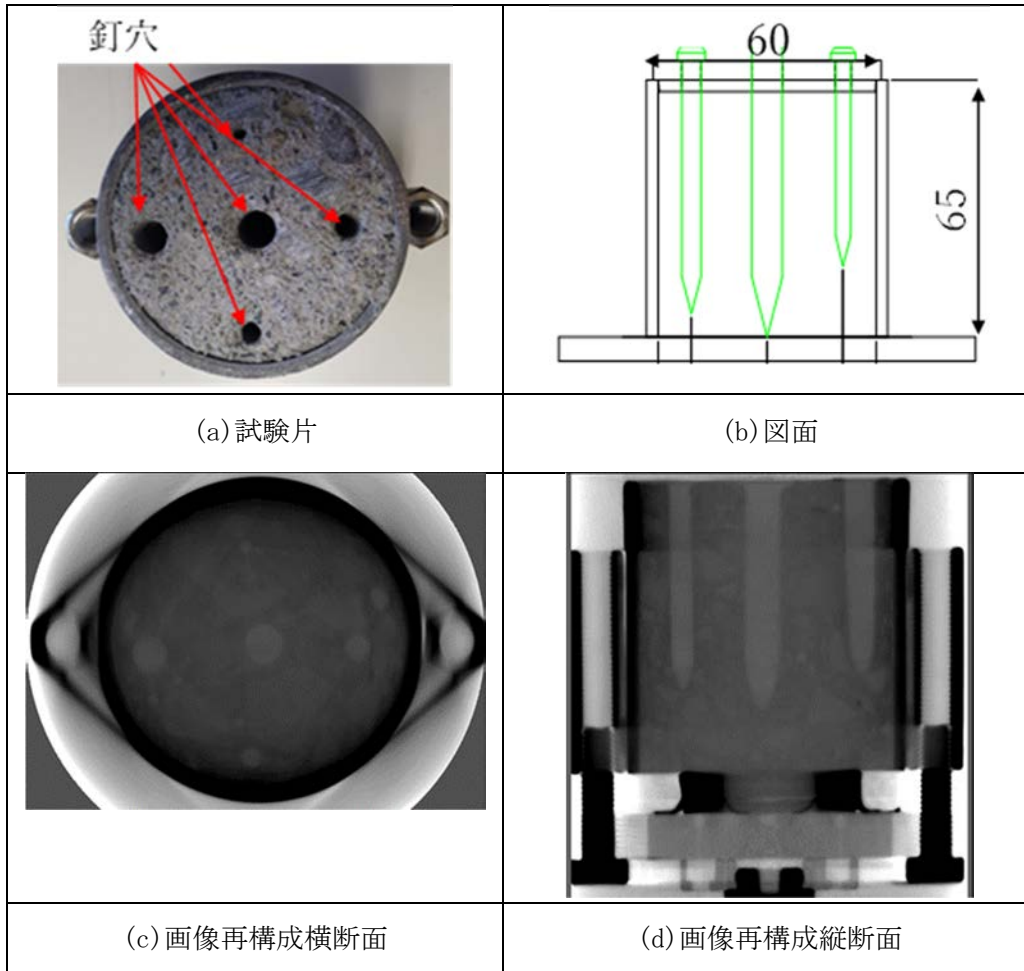


図 3.2-15 試験条件決定に用いた試験体の図と測定結果

② テラヘルツイメージング技術の検証に用いる鉄筋コンクリート試験体の仕様の決定

テラヘルツイメージング技術の検証材料としてまずは、簡単なモデルから実施することとした。具体的な鉄筋コンクリート試験体の仕様は、直径 100 mm 高さ 100 mm の円柱形を基本のブロックに切断面を入れて模擬ひび割れとしたものを製作して用いることとした。試験体の考え方については、電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発の担当者間で検討して決定した。具体的には、図 3.2-16 の上段に示すように 4 種類の一体物のコンクリート試験体（図中左上灰色、図中左中上濃灰色（中央切断）、図中右中上オレンジ色（30° 切断）、図中右上緑色（45° 切断））を用意し、切断面の隙間をコントロールすることで模擬ひびの間隔制御を図る。これらを、図 3.2-16 左下ののように、ブロックを組み合わせて様々な条件の模擬ひび割れを構成して用いる。これにより、大型構造物中のコンクリート内部を模擬することが可能となり、テラヘルツレーダ測定技術の検証に応用することができる。令和 4 年度以降、中性子イメージングにおける観測限界評価にも適用する。

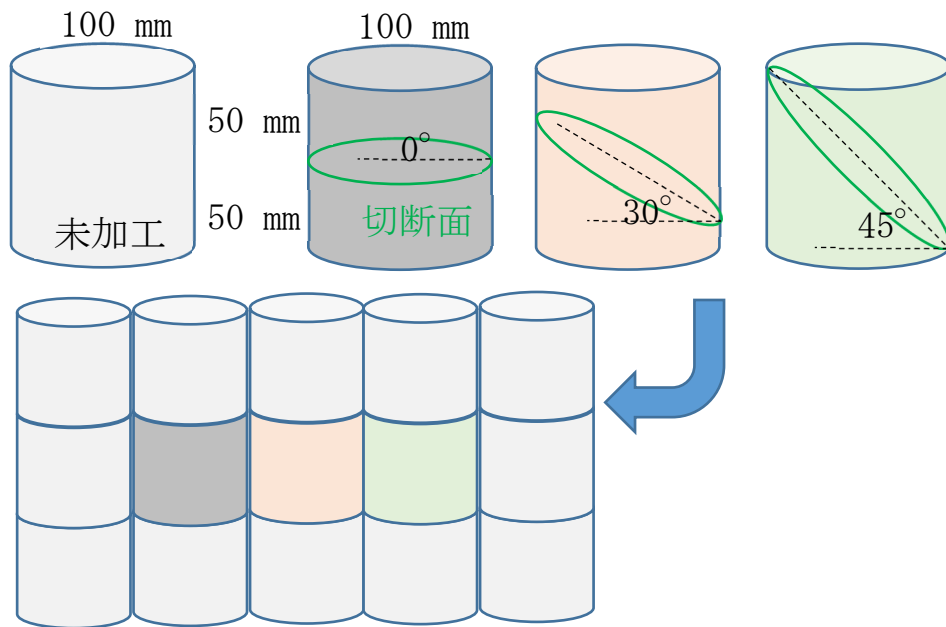


図 3.2-16 鉄筋コンクリート模擬試験体の仕様の概念図

③ 中性子イメージング計測システムの高度化

試料に中性子を照射すると放射化する。これは素材によりその性質、減衰速度が大きく異なるが、減衰した際の放射線量がある一定の数値を下回らなければ試料の取り出しができない。そのため、減衰待ちの間は中性子イメージング計測が不可能となり、この時間が非常に無駄になってしまう。そこで、中性子イメージング計測の自動化のための周辺機器を設計し製作を開始した。図 3.2-17 はイメージ図であり、具体的には、50 cm 程度の並進ステージ上に試料小型回転ステージを複数設置することで、試料を一度にセットすることを可能とした。また、これらをコンピュータ制御することにより連続的に中性子イメージング計測が可能であることをオフラインでの撮像系の試験により確認した。

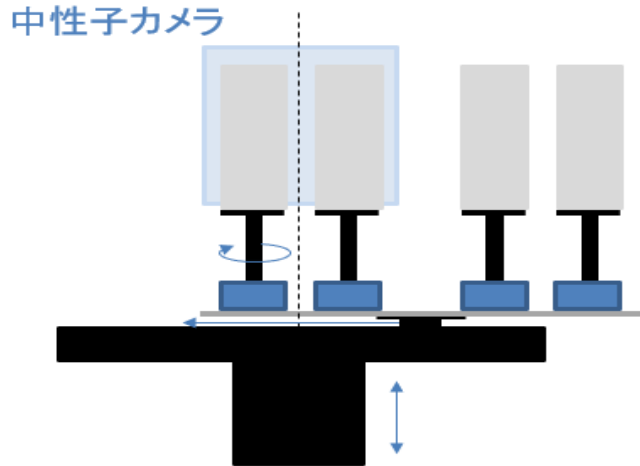


図 3.2-17 中性子イメージング計測の自動化のイメージ図

3.2.2 まとめ

(1) テラヘルツ波イメージング技術の開発

- ① 損傷検知システム（計測システム）を設計するとともに、サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数、可変のビーム径と偏光方向でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を得ることを確認した。
- ② 中性子イメージングによりひび割れの位置と幅が規定された鉄筋コンクリート試験体をリファレンスに使用することを想定して、ひびのサイズと方向に対する電磁波の偏光方向に基づく散乱度を複数の電磁波で理論的に多元解析できるアルゴリズムと検出するひびのサイズに対応する測定周波数を検討した。

(2) サブテラヘルツ波イメージング技術の開発

- ① 損傷検知システム（計測システム）を組み上げ、サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を任意のビーム径と偏光方向で得ることを確認した。
- ② 遠隔計測基盤の検討として、コンクリートの表層に形成されているモルタルやエポキシ等の各種塗膜に対する透過性を 2 mm 厚さで確認するとともに、遠隔計測に 60 GHz 以下の周波数帯が適当であることを確認した。
- ③ 建屋全体の損傷を可視化する技術基盤として、サブテラヘルツ波で得られる情報に合わせて、従来から有る CMOS カメラの可視像も取り込むことで、建屋全体の損傷を広い範囲で可視化する損傷検知のための技術基盤（画像処理）の枠組みを構築した。

(3) 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証

- ① 中性子イメージング実験の条件を検討し、決定した。
- ② テラヘルツイメージング技術の検証に用いる鉄筋コンクリート試験体の仕様を検討・決定した。
- ③ 中性子イメージング実験に必要なステージ・治具等の周辺機器と撮像系の仕様を決定した。
- ④ 周辺機器を設計し、製作を開始した。また、オフラインでの撮像系の試験を行った。

3.3 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

3.3.1 令和3年度実施内容及び成果

(1) コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

① はじめに

ここでは、1F 建屋で想定される環境的・力学的作用によるコンクリートのひび割れなどを導入したコンクリート及び鉄筋コンクリート試験体を作製した。これらの試験体に対し、コンクリートの表層部から内部のひび割れなどの劣化を、載荷試験や模擬欠陥の埋設等により与えた。このように得られた試験体に対して、テラ（サブテラ）ヘルツ波での基礎的な測定を実施するための装置を整備した。この基礎的な装置を用いて、テラ（サブテラ）ヘルツ反射波の測定結果を得た。後述の通り、コンクリート材料そのものや埋設鉄筋など、測定結果に影響を及ぼすと考えられる要因について基礎的なデータを取得した。

② 試験体の作製

a) コンクリート及び鉄筋コンクリート試験体の概要

ここでは、鉄筋コンクリート試験体を作製すると共に、より基礎的なデータを取得するためにコンクリート・モルタル・セメントペースト試験体を作製した。それぞれの試験体形状を図3.3-1に示す。鉄筋には直径6 mmの異形棒鋼を用いた。コンクリート部分の使用材料として、セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3 、比表面積 3140 cm^2 ）を用いた。細骨材には、砕砂（表乾密度 2.66 g/cm^3 ）及び陸砂（表乾密度 2.62 g/cm^3 ）を混合して用い、粗骨材には碎石（表乾密度 2.68 g/cm^3 、最大寸法20 mm）を用いた。また、混和剤として空気連行性（Air Entrained : AE）減水剤（密度 1.05 g/cm^3 ）を使用した。

鉄筋コンクリート試験体は、幅・高さ100 mm、長さ400 mmとし、2本の鉄筋を埋設した。コンクリート試験体は、直径100 mm、高さ200 mmの円柱試験体と、幅・高さ100 mm、長さ400 mmの角柱試験体から、図中に示す厚さにそれぞれ湿式コンクリートカッターにより所定の厚さに切断した。打込み後1日で脱型し、その後は材齢28日まで水中養生した。養生を終えたあとは、測定前に $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ・3日間の条件で乾燥させた。この他、含水率の影響を確認する試験体では、飽水状態と絶乾状態で試験を行った。

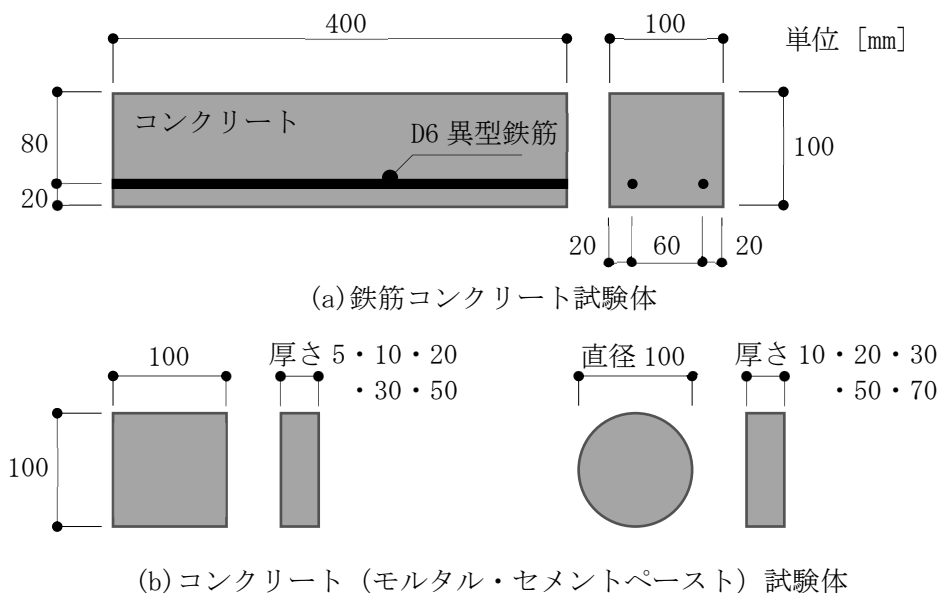


図 3.3-1 試験体形状

b) 使用材料とコンクリート調合

コンクリート・モルタル・セメントペーストの調合を表3.3-1に示す。水セメント比は、1Fでの調合を想定してすべて55%とした。コンクリートの練り混ぜには強制2軸ミキサー（容量60 L）を用いた。細骨材とセメントを投入し、空練りを1分行ったあと、水・減水剤を入れて2分練り、最後に粗骨材を入れて1分練り混ぜた。スランプの実測値は14 cm、練り混ぜ時の温度は16.3 °C、空気量は4.9%であった。モルタル・セメントペーストの練り混ぜにはオムニミキサー（容量5 L）を用いた。モルタルは空練り1分のあと、水を入れて3分練り混ぜた。練り混ぜ時のスランプフローは240 mm、空気量は7.4%であった。セメントペーストは30分ごとに練り返しを行い、ブリーディングが無くなったのちに打設した。

表 3.3-1 試験体のコンクリート調合

	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
コンクリート	168	306	790	1053	1.38
モルタル	301	547	1368		
セメントペースト	635	1154			

③ 測定系

a) テラヘルツ波

図3.3-2に、本検討で用いるテラヘルツ波・サブテラヘルツ波の帯域を示す。テラヘルツ波は周波数が概ね0.3~10 THzの電磁波を指す。エネルギーが小さく人体に安全でありながら、コンクリートを含む非極性物質に対する透過性が高い。一方で、水に代表される極

性物質に対する吸収性が高い。この特徴を活かすことで、事前検討として繊維補強セメント系複合材料の自己治癒効果をテラヘルツ透過波により評価可能であることを確認した[7]。また、サブテラヘルツ波（ミリ波）とは、周波数が概ね0.03~0.3 THzとテラヘルツ波よりも低い電磁波であり、テラヘルツ波と類似の性質を持ちながら、コンクリートなどへの透過性能がより高い。コンクリートを対象とした既往研究には、テラヘルツ波によるコンクリート内部欠陥の検出の可能性を示した研究[8]や、コンクリートの含水率や塩化物イオン濃度の影響を観測する研究[9][10]などがある。またサブテラヘルツ波による埋設鉄筋の腐食検出事例が有り、今後の活用が期待される[11]。

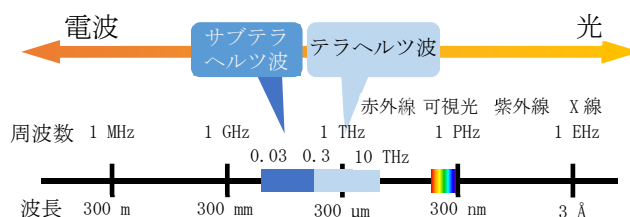


図 3.3-2 テラヘルツ・サブテラヘルツ波の周波数帯域

b) 測定系の概要

測定系の概要を図3.3-3に示す。ここでは、実構造物への適用性から、測定対象の両側に発信・受信装置を設置する必要のある透過波よりも、片側に設置できる反射波による計測系とした。照射したサブテラヘルツ波が、試験体から戻る反射波を計測する測定系とした。サブテラヘルツ波の光源には30、50 GHzのガンダイオードを使用した。ここで、図中に示すアパーチャーは空間分解能を向上させるための治具である。試験体の直前に設置することにより試験体表面に集光しない光をカットし、焦点の合う光のみを取り出すことができる。30 GHzでは直径8 mm、50 GHzでは直径6 mmのアパーチャーを使用した。これらの直径内の範囲の代表値が測定されると考えられる。測定範囲は試験体中央の50 mm×50 mm、測定ピッチは2 mmとした。測定データは試験体の反射強度からノイズ（試験体を置かない場合の反射強度）を引いた値を金属板の反射強度で除した反射率で評価した。

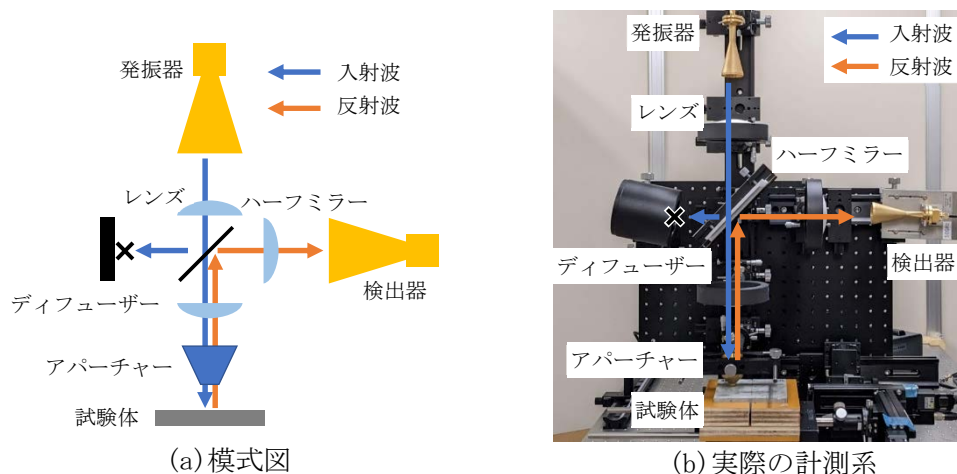


図 3.3-3 反射波を用いた測定系の概要

④ 測定系

a) 鉄筋コンクリート試験体

鉄筋コンクリート試験体に対して、4点曲げ試験を行ってひび割れを導入し、ひび割れを含む部分とひび割れのない健全な部分を対象に測定を行った。測定に当たっては、準備した測定系に設置できるようにするために、ひび割れを導入した後に、湿式コンクリートカッターによって試験体を長さ約150 mmに切断した。

b) コンクリート（モルタル・セメントペースト）試験体

鉄筋コンクリート試験体での測定結果では、後述のように骨材・セメントマトリックス部分からなる複合材料であるコンクリート自体、また、鉄筋およびひび割れが同時に存在し、これらの影響を切り分けて判断することが極めて困難であることが確認された。そのため、これらそれぞれの影響を要素ごとに分解して計測するために、パラメータを細分化した試験を実施した。ここで用いた実験水準を表3.3-2に示す。骨材の有無をパラメータとして、コンクリート・モルタル・セメントペーストを厚さ5 mmに切断した試験体について測定した。ここで、厚さを5 mmとしたのは、試験体裏面での反射を加味して骨材による反射率の違いを明確に評価するためである。次に、コンクリート中の鉄筋の影響を明確化するために、鉄筋を模擬する形でアルミテープを裏面に貼った試験体について測定した。裏面のアルミテープを検出可能な試験体厚さを検討するため、試験体厚さの異なる複数の試験体を用いて測定した。

また、ひび割れの影響をより明確にすることを目的に、一定のひび割れ幅として実験水準を制御するために、ひび割れを模擬したスリットを導入した試験体について測定した。図 3.3-4 に試験体概要を示す。検出可能なスリット幅の検討するため、スリット幅を0～5 mmまで変化させて測定した。加えて、仕上げ材を模擬した厚さ5 mmのモルタルをスリット上部に配置した場合について測定した。

この他、加熱によって力学性能を低下させた試験体の測定を行った。加熱は内外温度差による温度応力が生じないように、昇温・降温速度を0.3 °C/minとした。加熱温度を300、

600、900 °Cの3水準とし、これらの温度を24時間保持したのちに降温させた。測定は、加熱の前後で実施した。加えて、加熱後の試験体に対して圧縮試験を行った。載荷速度は毎秒0.2 N/mm²とし、3体の平均値として圧縮強度を算出した。

表 3.3-2 実験水準

試験項目	測定パラメータ	変数
アルミテープ	試験体厚さ [mm]	5、10、20、30、50
	アルミテープ幅 [mm]	10
	周波数 [GHz]	30、50
スリット	試験体厚さ [mm]	10、20、30
	スリット幅 [mm]	0、1、2、3、5
	スリット上面の被覆	なし、モルタル5 mm
	周波数 [GHz]	30、50
加熱	加熱温度 [°C]	300、600、900
	試験体厚さ [mm]	10、20、30、50、70
	測定周波数 [GHz]	30、50

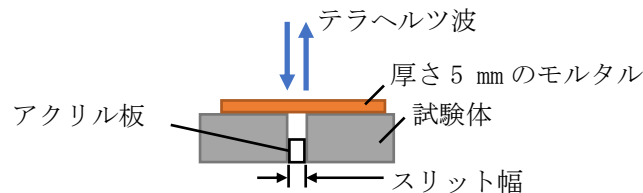


図 3.3-4 ひび割れを模擬したスリット測定の模式図

⑤ 試験結果及び考察

a) 鉄筋コンクリート試験体

鉄筋コンクリートでの測定結果を図3.3-5、図3.3-6に示す。図3.3-5は、ひび割れの生じていない健全と考えられる部分である。図3.3-6は、曲げひび割れによってかぶりコンクリートが剥落し、内部の鉄筋が確認できる部分である。それぞれ、試験体の光学写真とテラヘルツ反射波によるイメージング結果を示している。赤の破線で囲われた部分が計測範囲であり、白または黒の破線は埋設されている鉄筋の位置を示している。

コンクリート部分は健全であると考えられる図3.3-5において、テラヘルツ反射波のイメージング画像は必ずしも一樣にならず、また、明確な鉄筋位置も把握できない。これらの減少は、コンクリート内部の骨材の存在や可視化できるかぶり厚さの影響のためと考えられる。

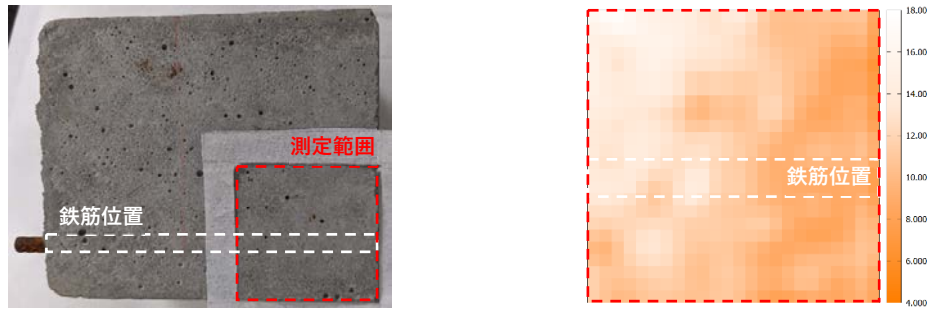


図 3.3-5 鉄筋コンクリート試験体・健全部分

ひび割れ部分を含む図3.3-6においても、コンクリートの剥落部分については計測される反射波の値が小さい領域として可視化される一方で、健全部での測定結果と同様に、明確な鉄筋位置は把握できない。

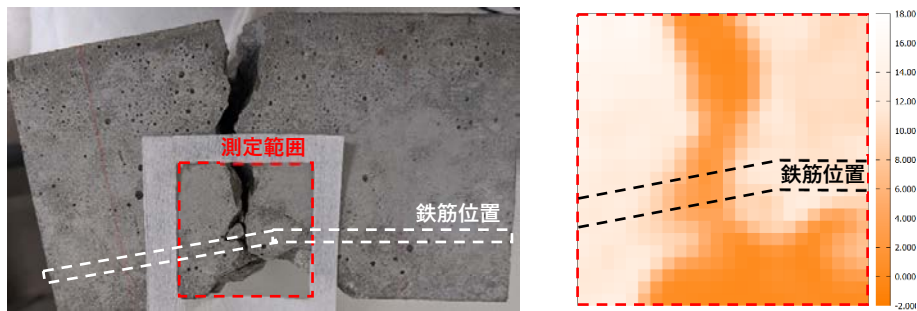


図 3.3-6 鉄筋コンクリート試験体・ひび割れ部分

これら鉄筋コンクリート試験体での結果を踏まえて、各種の影響因子を切り分けて検討するために、コンクリート試験体を用いて先述の表3.3-2に示す各実験水準により詳細な検討を実施する。

a) コンクリート（モルタル・セメントペースト）試験体

i) 材質の違い

コンクリート・モルタル・セメントペーストを測定した結果を図 3.3-7 に示す。モルタル・セメントペーストは反射率が場所によってほぼ変化せず、均質な材料として測定可能であることが画像からも確認できた。モルタル 30 GHz の画像左上の反射率の低い箇所は表面の空隙である。

コンクリートでは、セメントペースト・モルタルと比較すると反射率の低い領域が点状に存在している。これは粗骨材の存在によるものであり、モルタル部と比較して粗骨材で反射率が低下することが確認できた。このことから、モルタル部と比較して、粗骨材の方がサブテラヘルツ波の透過性が大きいと考えられる。

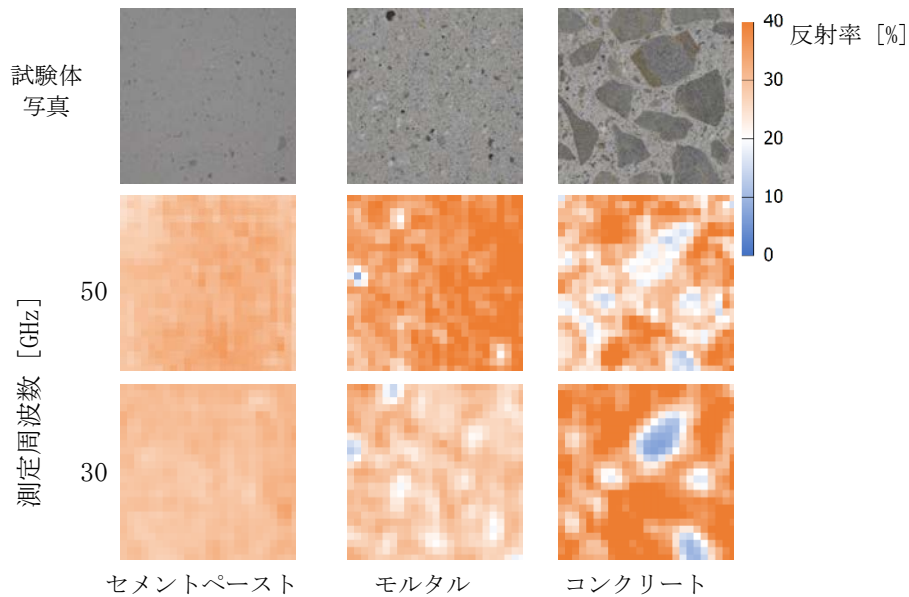


図 3.3-7 材質の違い

ii) 埋設金属の深さ

裏面にアルミテープを貼り付けたコンクリート試験体について、測定結果を図 3.3-8 に示す。50 GHz では厚さ 5 mm で、点線で示すアルミテープの範囲に反射率の低い青色の範囲が一部確認できた。これは、上述のように骨材部とモルタル部で反射率が異なるためと考えられる。試験体厚さ 10 mm より厚い場合は、アルミテープを貼った範囲と他の範囲で差が確認できなかった。30 GHz を用い、試験体厚さが 5、10 mm では、点線で示すアルミテープを貼った範囲に反射率の低い範囲が一部確認できた。しかし、厚さ 20 mm 以上ではアルミテープを貼った範囲と他の範囲で違いが明確ではない。このように、50 GHz では厚さ 5 mm、30 GHz では厚さ 10 mm までは、反射率が一部低下する範囲として、コンクリート中の鉄筋を模擬した試験体裏面のアルミテープを検出することが可能であった。

次に、アルミテープの有無による、反射率の差分を取った結果を図 3.3-6 に示す。ここで、アルミテープが有る場合の反射率から、アルミテープが無い場合の反射率を引いた値として、差分反射率を定義した。差分反射率とすることで、アルミテープの有無による変化のみを抽出した評価が可能となる。図 3.3-9 を見ると、点線で示すアルミテープ幅の幅と、その周囲に濃色で示されるエリアが確認できる。すなわち、差分反射率の絶対値が大きい範囲が検出できていることが分かる。アルミテープの無い範囲では、いずれの厚さにおいても淡色エリア、すなわち、差分反射率が 0 に近い値となっている。このことから、差分反射率として計測することで、①で示した骨材の影響など、アルミテープ以外の要因を排除できていることが分かる。アルミテープ幅の範囲で、差分反射率の絶対値が大きい理由は、上述のように粗骨材とモルタル部でサブテラヘルツ波の反射率が異なるためと考えられる。アルミテープの検出が可能な試験体厚さについては、30 mm 厚さのコンクリート裏面のアルミテープが 30、50 GHz の両方で検出できているこ

とが分かる。これは、アルミテープを貼った画像単独では判別できなかった厚さである。試験体厚さ 50 mm では、いずれの周波数でも検出ができなかった。2 つの周波数の違いを見ると、同じ試験体厚さでは 30 GHz の方が差分反射率の絶対値が大きく、明確に検出できた。一方で、50 GHz では差分反射率の絶対値が大きい範囲が点線で示すアルミテープ幅に同程度の幅で検出できた。このことから、周波数が低いほど高い透過性能が得られ、周波数が高いほど分解能が向上すると考えられる。また、周波数ごとに試験体の厚さが異なる情報を取得できることが確認された。

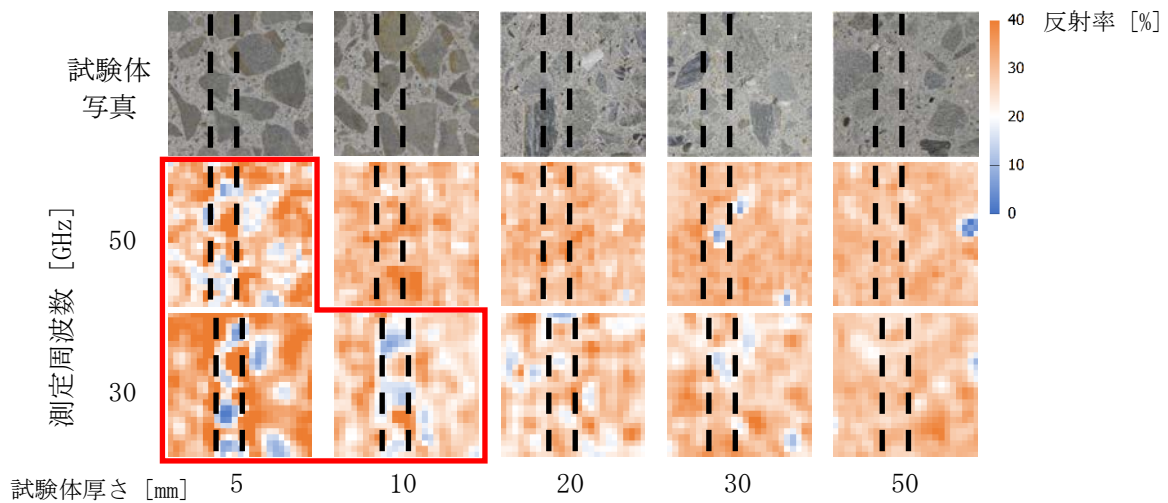


図 3.3-8 埋設金属の深さ

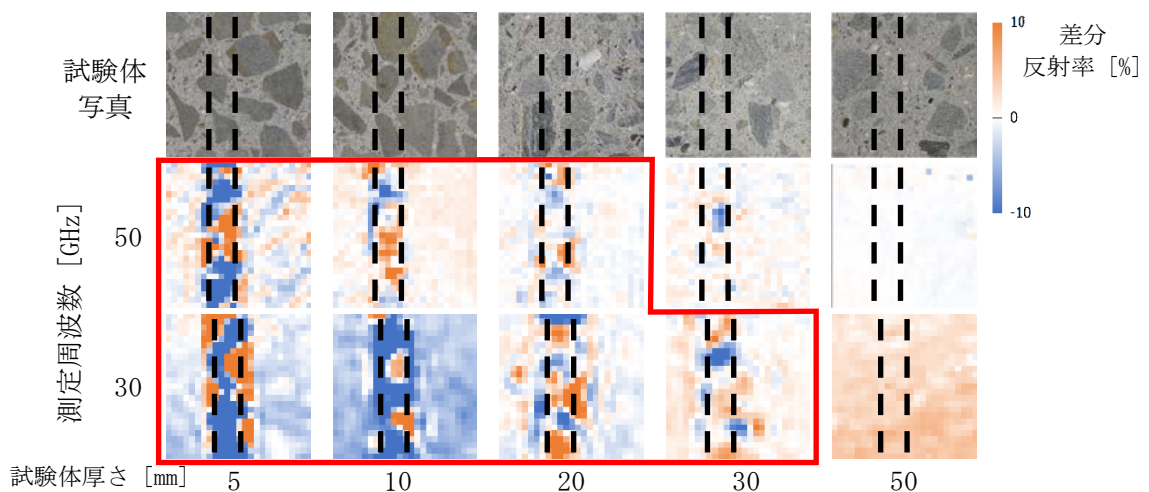


図 3.3-9 埋設金属の深さ (差分)

iii) スリット（ひび割れ）幅と表面被覆

図 3.3-10 に、スリット幅を変化させた試験体に対して、測定によって得られた画像を示す。スリット幅が大きいほど、中央の青い反射率の低い幅が広がること、いずれの周波数でも確認できた。スリット幅 1 mm の場合は、スリット部の反射率の変化は他の領域と比較してほとんど生じていないが、スリット幅 2 mm 以上の場合では、いずれの周波数でも明確にスリットを検出できた。また、スリット幅 2 mm では反射率の低い領域が、水平方向に 2 マス（4 mm 相当）、3 mm では 3 マス（6 mm 相当）、5 mm では 4 マス（8 mm 相当）とスリット幅が大きくなるにつれて反射率の低下する幅が拡大することが確認できる。このように測定ピッチ 2 mm の測定では、スリットとその周囲数 mm が反射率の低下した領域として検出が可能であることが確認された。

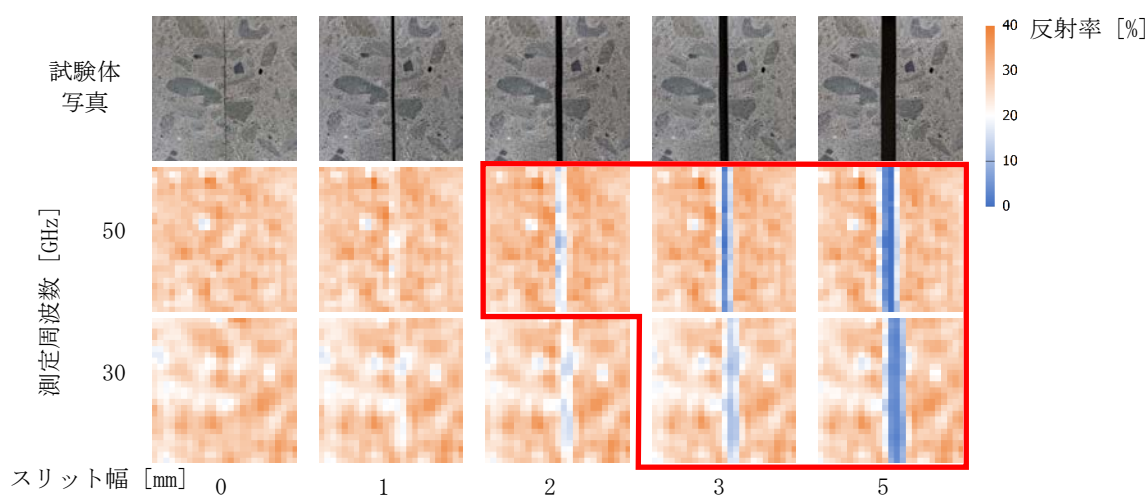


図 3.3-10 スリット（ひび割れ）幅

次に、周波数の違いがスリット（ひび割れ）の検出に及ぼす影響について考察する。スリットが有る場合でも、測定画像の鉛直方向（スリットと平行な方向）については測定値の変化がほとんど生じていないため、ここでは、鉛直方向 25 点の平均値で比較を行った。図 3.3-11 に、試験体厚さ 30 mm の場合の、スリット幅に応じた反射率の変化を示す。この図から、スリット幅が大きくなるほど、スリット部分の反射率が低下する傾向が確認できる。50 GHz と 30 GHz を比較すると、50 GHz の場合にスリット周囲の反射率の低下が顕著となる傾向が見られる。図 3.3-12 に、スリット部分の反射率の推移を、スリット幅 0 mm を 100 とした相対値で示す。この図から、50 GHz では 30 GHz よりも反射率の低下が顕著である。このことから、50 GHz の方がより微細なスリットについても検出が可能であると考えられる。

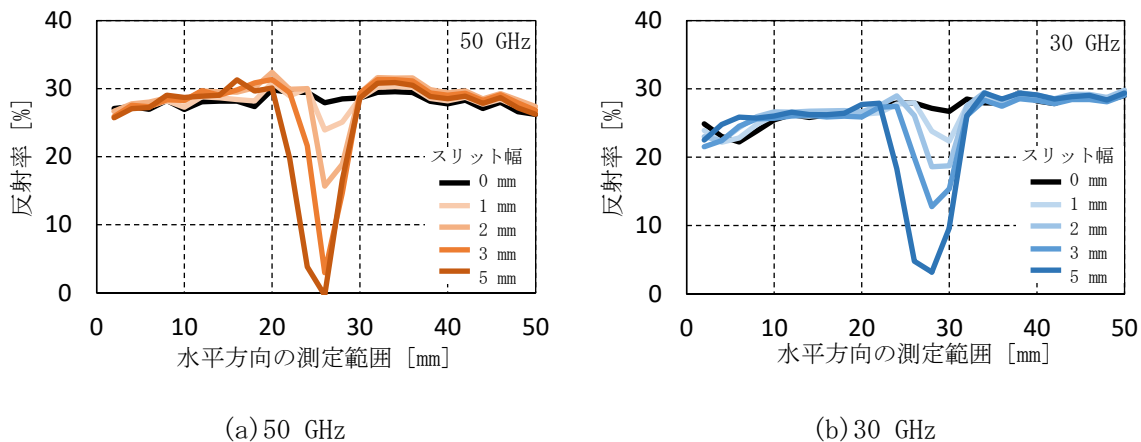


図 3.3-11 スリット部の反射率変化

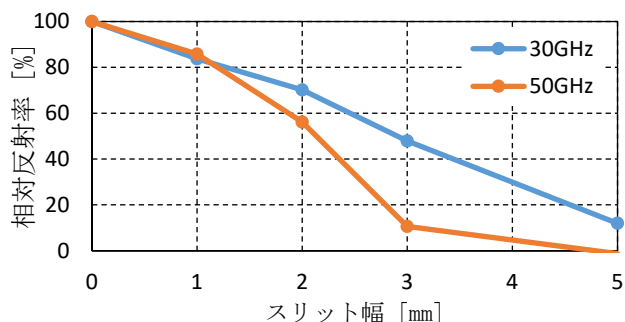


図 3.3-12 スリット部の反射率の推移

スリットを含む試験体の表面に、仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタルを設置した場合の測定結果を図 3.3-13 に示す。試験体写真には、測定時の状況を模擬して、スリットを含む試験体写真に、透かしたモルタル試験体の写真を重ねている。この図から、50 GHz ではスリット幅の大きさによらず測定画像が変化せず、仕上げ材裏面に有るスリットの検出が困難であることが分かる。一方で、30 GHz ではスリット幅 2 mm 以上で中央に反射率の高い範囲が確認でき、仕上げ材裏面のスリットを検出できていることが分かる。このように、30 GHz では仕上げ材裏面のひび割れを検出できる可能性が有ることが確認できた。さらに、スリット上部に配置するモルタル厚さを変化させた測定の結果について、図 3.3-14 に示す。ここでは厚さ 5 mm のモルタルを置いた場合にスリットの検出が可能であった周波数 30 GHz においてのみ実施し、スリット幅は 5 mm で固定とした。図から、厚さ 15 mm のモルタルまでは裏面の 5 mm 幅のスリットの検出が可能であるが、厚さ 20 mm のモルタル裏面の 5 mm 幅のスリットは検出できないと分かる。このように、周波数 30 GHz においては厚さ 15 mm の裏面の欠陥を検出できる可能性が示された。

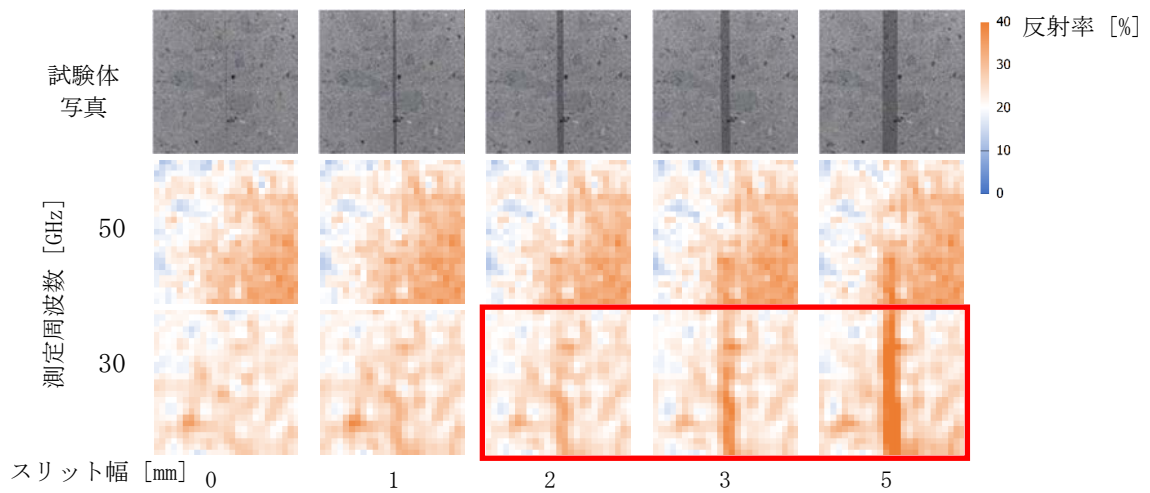


図 3.3-13 仕上げ材裏面のひび割れ幅

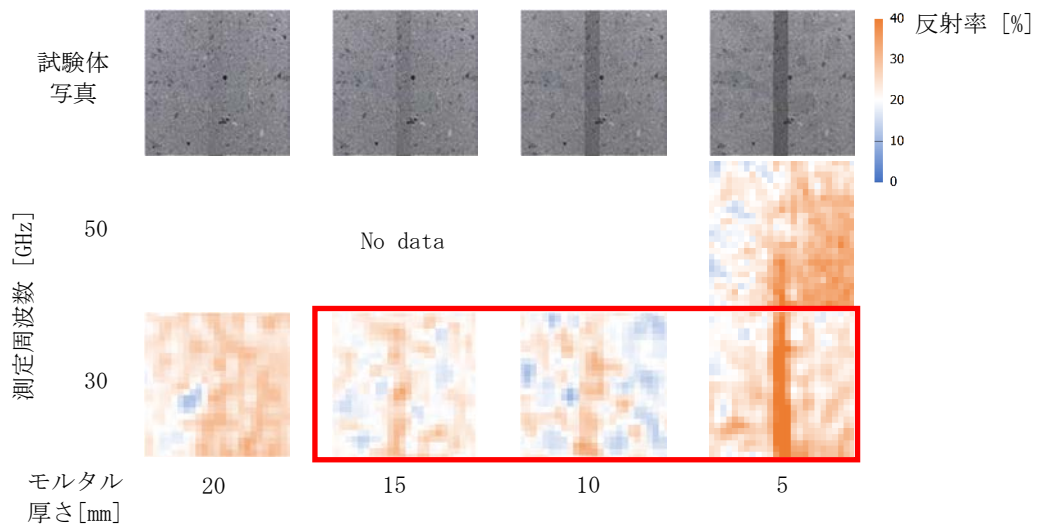


図 3.3-14 仕上げ材厚さの影響

iv) 加熱により力学性能を低下させた試験体の測定

コンクリート強度の変化を、サブテラヘルツ反射波による測定が可能であることを確認するため、高温加熱により強度低下が生じた試験体を用いての測定を行った。図 3.3-15 に、加熱水準ごとの応力—ひずみ曲線を示す。この図のように、加熱温度が大きくなるに従って圧縮強度は低下する傾向が見られる。図 3.3-16(a) に、加熱条件ごとの加熱前後での反射率の関係を示す。ただし、ここでは周波数 30 GHz での計測結果を示している。この図からは、加熱温度が大きく圧縮強度がより低下している場合に、加熱前後の

平均反射率の比も低下する傾向が確認できる。図 3.3-16 (b) に、加熱前後の反射率比と圧縮強度残存率の関係を示す。周波数 30 GHz に着目すると、約 20% の強度低下が生じた 300 °C での加熱条件の場合、反射率の比は約 98% と明瞭に検出できたとは言い難い。この一方で、より顕著な強度低下となった場合については、強度低下を加熱前後の反射率比の低下として検出できている。また、50 GHz の測定結果に着目すると、300 °C の加熱条件でも反射率の低下が確認されるとともに、より顕著な強度低下である 900 °C の加熱条件の場合に異なる傾向を示している。これらのことから、テラヘルツ反射波による測定から力学性能の低下を検出可能であることが示唆された。

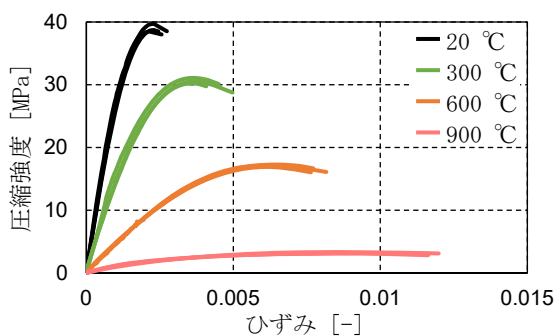
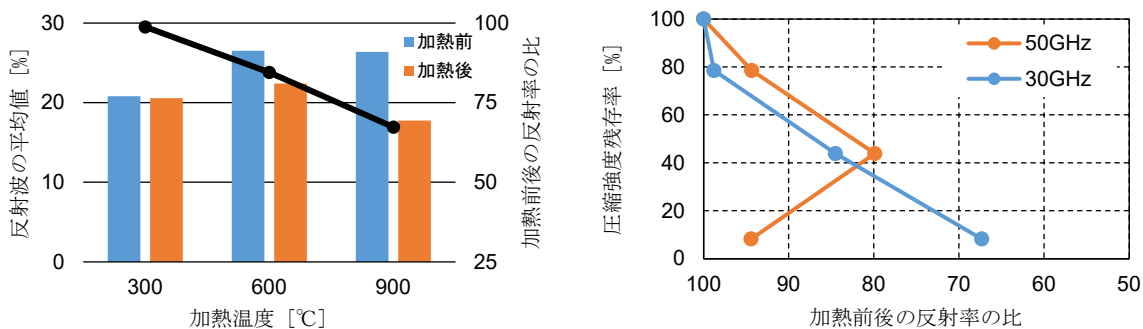


図 3.3-15 高温加熱を経たコンクリートの応力-ひずみ曲線



(a) 加熱温度と反射率の関係 (30 GHz)

(b) 加熱前後の反射率比と圧縮強度の関係

図 3.3-16 加熱による性能低下 (試験体厚さ 30 mm)

(2) 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価 (再委託先：日本工業大学)

① はじめに

鉄筋コンクリート構造物の限界状態は、鉄筋腐食の状態によって定義される[12]。鉄筋腐食はコンクリート材料に腐食せしめる因子が内部に無い限り、飛来塩分や降雨による水分供給等の作用によって発錆する。原子力発電所建屋等の重要構造物では、一般的な建築物に比べかぶり厚さが大きいいため、コンクリートが健全である限りコンクリート表面から第1層の鉄筋に劣化因子が到達することは容易ではない。しかし、コンクリートの乾燥収縮や地震等の力学的作用によってひび割れが発生している場合はこの限りではなく、この

時の鉄筋腐食は、鉄筋腐食因子がひび割れ部から鉄筋に到達することによって腐食が進行する。このような過程の中で鉄筋腐食が進行すると鉄筋に沿うひび割れが進展することが予想され、腐食程度により鉄筋とコンクリートの一体性が損なわれる可能性も懸念される。

鉄筋腐食を起こした鉄筋コンクリートの一体性の評価として、付着強度に着目した研究は付着強度とひび割れ幅等の関係について整理が行われている[13][14][15]。ただし、一般的な断面の構造物を対象としたものであり、原子炉建屋のような部材厚さによる拘束力を受けた条件下や鉄筋腐食の不均質性による整理は行われていないのが現状である。

そこで、一定の拘束を受けた鉄筋コンクリートにおける腐食による付着不良を評価するため、拘束を受け内部欠陥（鉄筋腐食）が発生した試験体を作成し、評価方法の検討を行った。

さらに、テラ（サブテラ）ヘルツ波を用いた付着不良領域の評価を検討するにあたり、内部欠陥を模擬した試験体を作製し、テラ（サブテラ）ヘルツ波による観察を行った。加えて、テラ（サブテラ）ヘルツ波に影響を及ぼす要因の1つであるコンクリート中の含水状態について、含水状態を調整した試験体を作製し、テラ（サブテラ）ヘルツ波による観察を行った。

② 拘束を受けた内部欠陥を有する鉄筋コンクリートの付着試験方法の検討

a) 試験体概要

表 3.3-3 にコンクリートの調合計画を示す。また、表 3.3-4 に試験体水準を示す。付着試験方法の検討に使用するコンクリートは、セメント比 50%のコンクリートとし、コンクリート中の塩化物イオン濃度を 1.2 kg/m^3 になるように塩化ナトリウムをコンクリートの計画調合の外割で添加し、図 3.3-17 に示す通りに試験体を作製した。

図 3.3-18(a) に付着試験用の試験体形状を示す。付着試験は JSCE-G503-2013 による試験方法に準拠し、試験体形状は $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ とした。埋設される鉄筋は D16 としテフロンシートにより非定着区間を 36 mm 設けた。また、コンクリート断面の拘束条件を模擬するため鉄筋を取り囲むように $\phi 6 \text{ mm}$ のスパイラル筋を設置した。さらにコンクリートを打設後、材齢 28 日まで標準養生を行った。

なお、フレッシュコンクリートは空気量 4.4 %、スランプ 19.5 cm であり、材齢 28 日強度は 36.2 N/mm^2 であった。

表 3.3-3 コンクリートの調合計画

W/C	S/a	単体量 (kg/m^3)				外割 (kg/m^3) Cl ⁻
		W	C	S	G	
50	49.0	172	344	851	912	1.2

【使用材料】

水 (W) : 上水道水

セメント (C) : 普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm^3

細骨材 (S) : 大井川水系陸砂 表乾密度 2.58 g/cm^3

粗骨材 (G) : 青梅産硬質砂岩砕石 1505 表乾密度 2.65 g/cm^3

塩化物イオン (Cl⁻) : 塩化ナトリウム

表 3.3-4 試験体水準

分類	試験体形状	ひび割れ幅	積算電流値	数量
健全	コンクリート：100×100×100 mm 鉄筋：D16（定着区間 64 mm）	なし	—	3 体
腐食①		0.2 mm	8 Ahr	3 体
腐食②		0.5 mm	12 Ahr	3 体
腐食③		1.0 mm	16 Ahr	3 体
腐食④		1.5 mm	21 Ahr	3 体



図 3.3-17 試験体作製状況

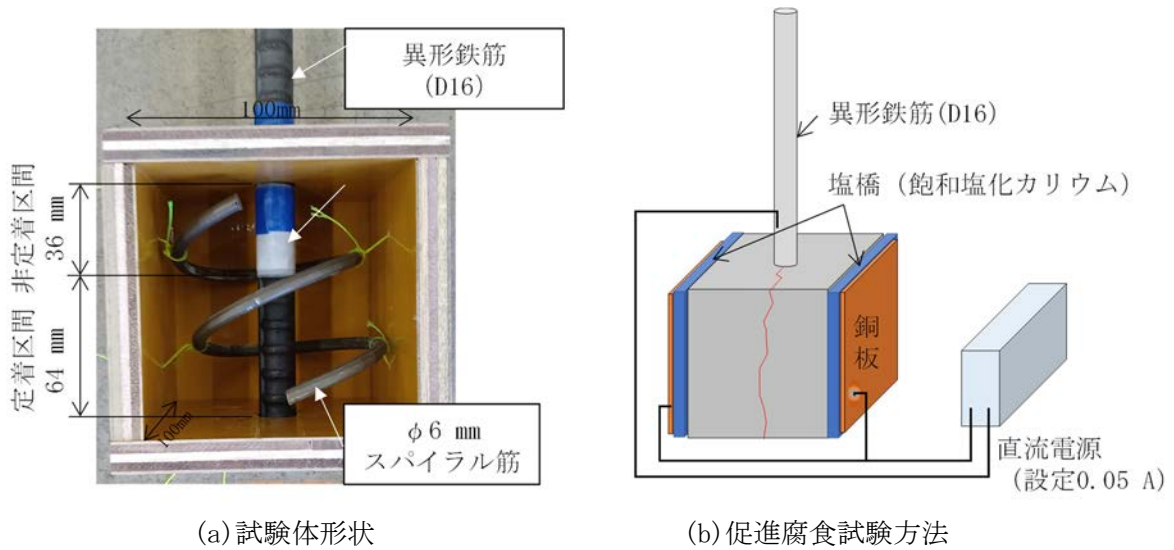


図 3.3-18 試験体の概要

b) 付着試験方法

促進腐食は、図 3.3-18(b)に示すように飽和塩化カリウム水溶液を用いた塩橋と直流電源（設定：定電流 0.05 A）を用いて、所定の積算電流値（8、12、16、21 Ahr）になるように通電して促進腐食を行い、図 3.3-19 に示す腐食状態の試験体を作製した。

腐食減量率（単位長さ当たりの腐食量）の確認は、促進腐食部の鉄筋を切り出し、40 °C、10 wt%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬させて除錆し、質量を計測した。除錆した鉄筋長さを小数点第 1 位まで測定し、D16 の単位長さあたりの質量 1.56 kg/m にかけることで健全時の質量を求め、式 3.3-1 に示す通りに腐食減少率を算出した。

付着試験は、図 3.3-20 に示す通り JSCE-G503-2013 によって試験を実施し、株式会社東京測器研究所社製ロガー（TS-960）及び高感度変位計（CDP-10）を用いて荷重・変位を計測した。



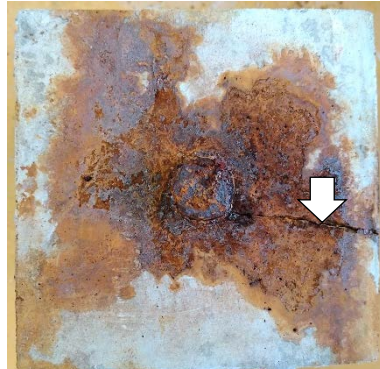
健全 ひび割れ幅なし



腐食① ひび割れ幅 0.2 mm



腐食② ひび割れ幅 0.5 mm



腐食③ ひび割れ幅 1.0 mm



腐食④ ひび割れ幅 1.5 mm

図 3.3-19 腐食ひび割れの発生状況（図中矢印：ひび割れ位置）

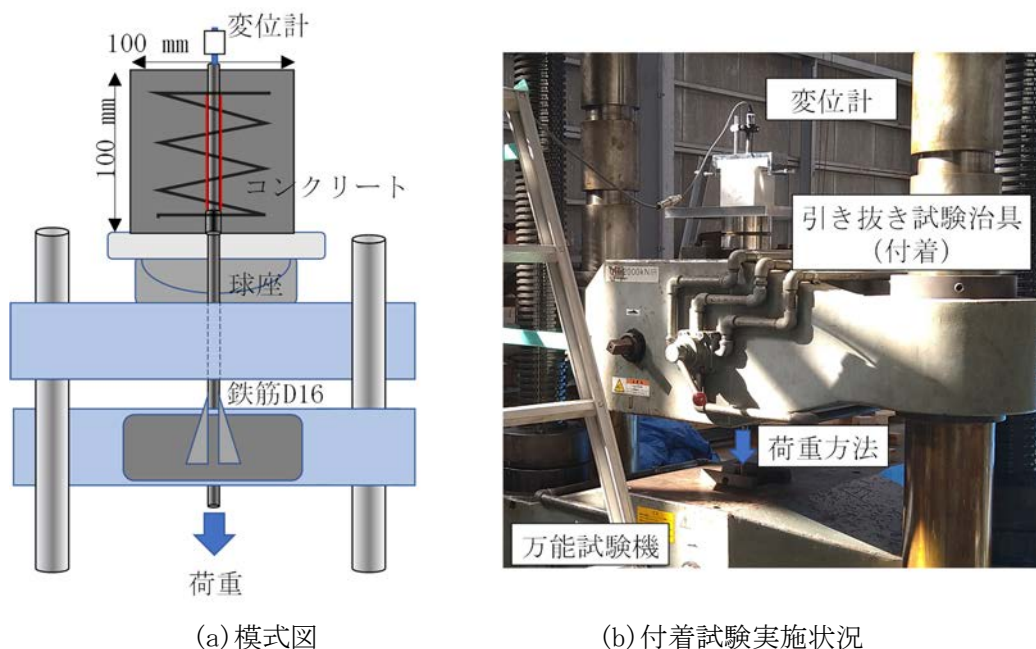


図 3.3-20 付着試験方法の概要

$$\text{腐食減少率} = \frac{(\text{健全時の鉄筋質量} - \text{除錆後の鉄筋質量})}{(\text{健全時の鉄筋質量})} \times 100 (\%) \quad \dots \text{式 3.3-1}$$

c) 実験結果及び考察

コンクリートの電気的手法による促進腐食は、積算電流値と腐食減少率に一定の関係性が有ることが示されているが、その多くの方法は塩水浸漬によるものが多い。塩水浸漬による方法は、腐食生成物が塩水に溶質するため、膨張に使用される腐食生成物が少なくなる可能性が考えられる。そこで本課題では、塩水に浸漬しない方法として飽和塩化カリウム水溶液を用いた塩橋によって促進腐食を行った。

図 3.3-21 に積算電流値と腐食減少率を示す。塩橋を用いた方法においても、積算電流値と腐食減少率の関係に一定の関係性が既往研究と類似した傾向が認められた。スパイラル筋による拘束を受ける本実験でも、積算電流値と腐食減少率に一定の関係が認められることから、拘束条件に応じた腐食量の制御が可能であると考えられる。

また、図 3.3-22 に積算電流値と付着強度の関係を示す。付着強度は、変位 0.002 D (D = 16 mm) 時と最大荷重時における強度を算出した。図より、積算電流値が 8 Ahr (ひび割れ幅 0.1~0.2 mm) まで付着強度が増加する傾向を示し、積算電流値 8 Ahr より積算電流値が増加すなわち腐食減少率が増加することによって、付着強度が低下することが認められた。

以上より、導入欠陥は塩橋を用いた促進腐食によっても制御可能であることが分かった。

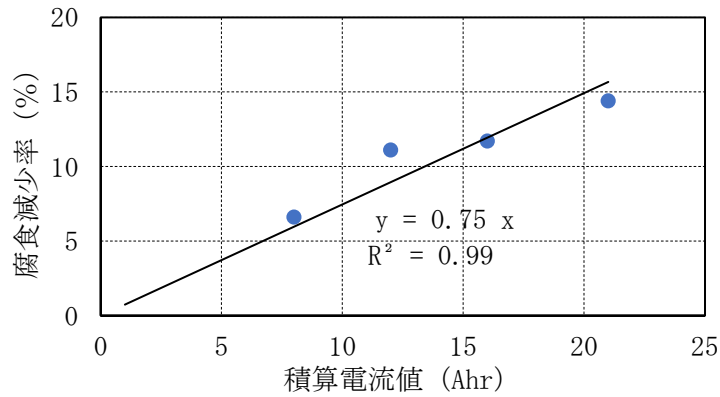


図 3.3-21 積算電流値と腐食減少率の関係

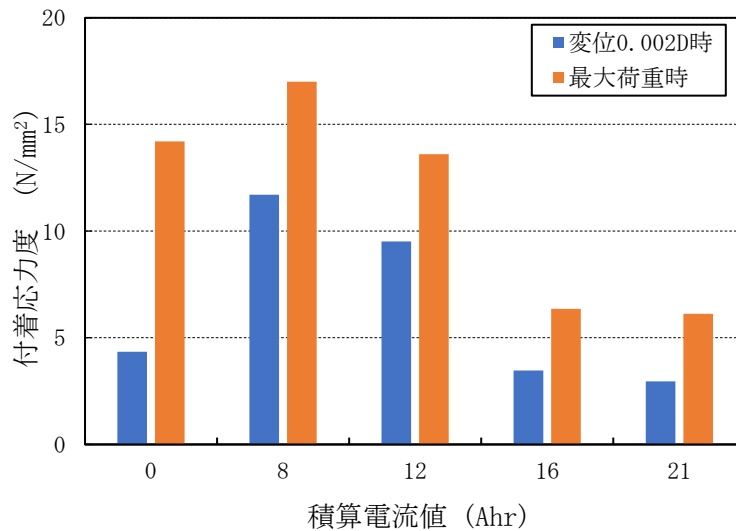


図 3.3-22 積算電流値と付着応力度の関係

③ テラ（サブテラ）ヘルツ波による内部欠陥・含水状態を調整した試験体の観察

a) 試験体概要

テラ（サブテラ）ヘルツ波による含水状態と内部欠陥の観察は、コンクリートとモルタル試験体によって実施した。表 3.3-5 にモルタル・コンクリートの計画調合を示す。使用材料は前述と同様であるが、原子力発電所等の一部ではフライアッシュを用いられるため、本実験においてもフライアッシュをセメントの一部として5～15%置換（記号：FA5、FA10、FA15）したモルタルを作製した。また、モルタル試験体では骨材の影響を同一にするため、ペースト量を一定とした調合にした。さらに、ブリーディング等の水分移動に伴う試験体の変化を最小限にするため、1時間練置きを実施し、打込みを行った。

表 3.3-5 モルタル・コンクリートの計画調合

種別	記号	W/(C+FA)	S/a	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	FA	S	G
コンクリート	コンクリート	50	49.0	172	344	-	851	912
モルタル	OPC30	30	-	255	750	-	1387	-
	OPC50	50	-	283	566	-	1387	-
	OPC65	65	-	311	478	-	1387	-
	OPC80	80	-	331	414	-	1387	-
	FA5	50	-	275	550	29	1387	-
	FA10	50	-	267	535	59	1387	-
	FA15	50	-	259	518	91	1387	-

表 3.3-6 にモルタル・コンクリート及び基準試験体の実験水準を示す。試験体形状は、コンクリート試験体は 100×100×100 mm とし、モルタル試験体は φ50×100 mm とした。打設後 1 日で脱型を行い、材齢 28 日まで水中養生を行った。養生終了後、コンクリートカッター等を用いて試験体厚さがコンクリート試験体 (10、20、30、50 mm)、モルタル試験体 (10、30、50 mm) に切断をした。

切断後、含水率状態を調整するため、全試験体を 50 °C、2 週間の乾燥を行い絶乾状態と定義した。次に所定の含水状態にするため、試験体を相対湿度 60 及び 100% に調整したデシケーターに静置し、気乾状態と湿潤状態を作製した。水中状態は、絶対状態後の試験体を水中に戻した。

表 3.3-6 モルタル・コンクリート及び基準試験体の実験水準

種別	検討項目	試験体種類	試験体厚さ (mm)	ひび割れ幅 (mm)	含水状態
モルタル	水セメント比の影響	OPC35、OPC50 OPC65、OPC80	10、30	-	絶乾
	フライアッシュの異なる添加量による影響	OPC50、FA5 FA10、FA15	30	-	絶乾
	含水状態による影響	OPC50	10、30、50	-	絶乾 気中 湿潤 水中
コンクリート	内部欠陥による影響	コンクリート	切断無し、 10、20、30、50	0、0.2、0.5 1、3	絶乾
アルミ	基準	アルミ板	-	-	-

b) テラ（サブテラ）ヘルツ波計測系

図 3.3-23 に測定系の概要を示す。ここでは、実構造物への適用性から、測定対象の両側に発信・受信装置を設置する必要のある透過波よりも、片側に設置できる反射波による計測系とした。照射したサブテラヘルツ波が、試験体から戻る反射波を計測する測定系とした。サブテラヘルツ波の光源には 7.5～12.5 GHz のガンダイオードを使用し、測定可能な全帯域を 0.01 GHz 間隔で観察した。また、全反射する試験体としてアルミ板の計測も併せて行った。測定データは試験体の反射強度による検討を行った。また、コンクリート試験体では、計測時に試験体の切断位置に 5×5 mm 以下の金属板を四辺に挟み込み、ひび割れ幅を 0、0.2、0.5、1、3 mm に調整し、観察を行った。

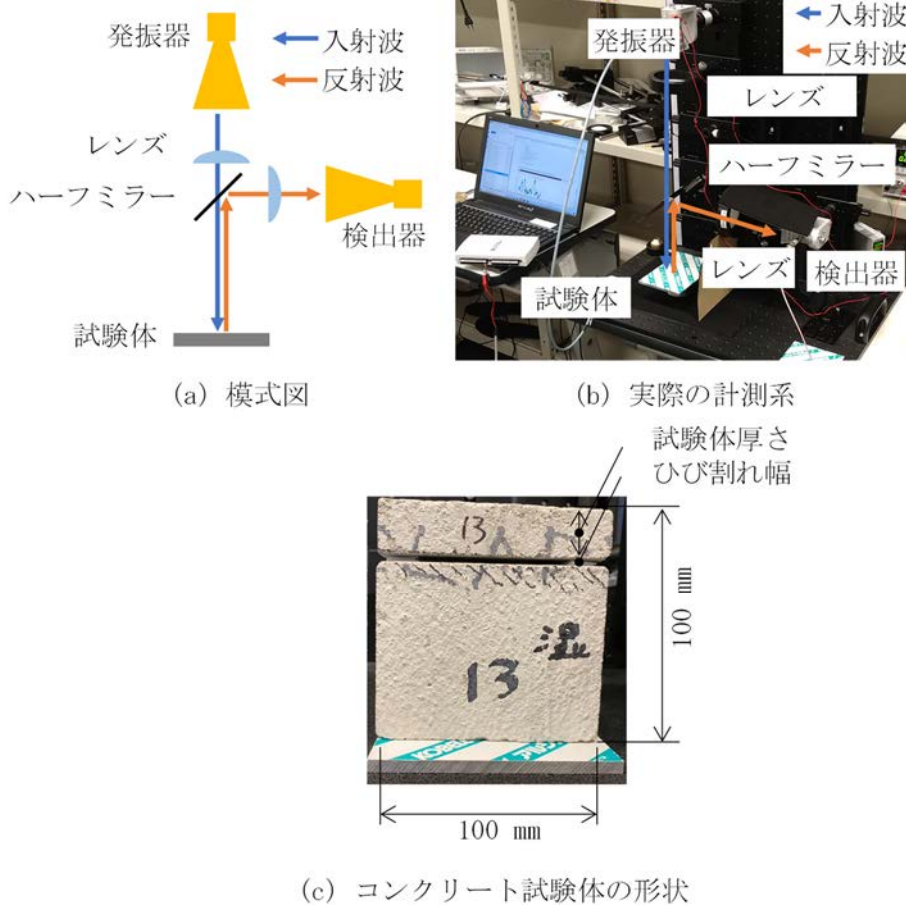


図 3.3-23 測定系の概要

c) 観察結果及び考察

i) 水セメント比による影響

図 3.3-24 に水セメント比による影響を示す。測定データがアルミ板の反射強度と同様の反射強度が得られるときは、試験体背面のアルミ板の反射によって、テラ（サブテラ）ヘルツ波が試験体を透過していることを意味する。測定データがアルミ板の反射強度よ

り低い値が得られるときは、テラ（サブテラ）ヘルツ波が試験体に吸収されていることを意味している。

これより、試験体厚さ 10 mm では、測定される周波数帯の一部にアルミ板とは異なる傾向を示しているが、どの周波数帯においても類似した反射強度を示していることから、試験体厚さ 10 mm は水セメント比によらずテラ（サブテラ）ヘルツ波は透過しているものと推測される。

試験体厚さ 30 mm では、試験体厚さ 10 mm と同様にアルミ板の反射強度と類似した傾向を示しており、7.5～10.6 GHz 付近の周波数帯は概ね透過しているものと推測される。また、OPC50 を除けば、水セメント比による明確な違いは認められない。このため、7.5～12.5 GHz のテラ（サブテラ）ヘルツ帯に及ぼす水セメント比の影響は小さいものと推測される。

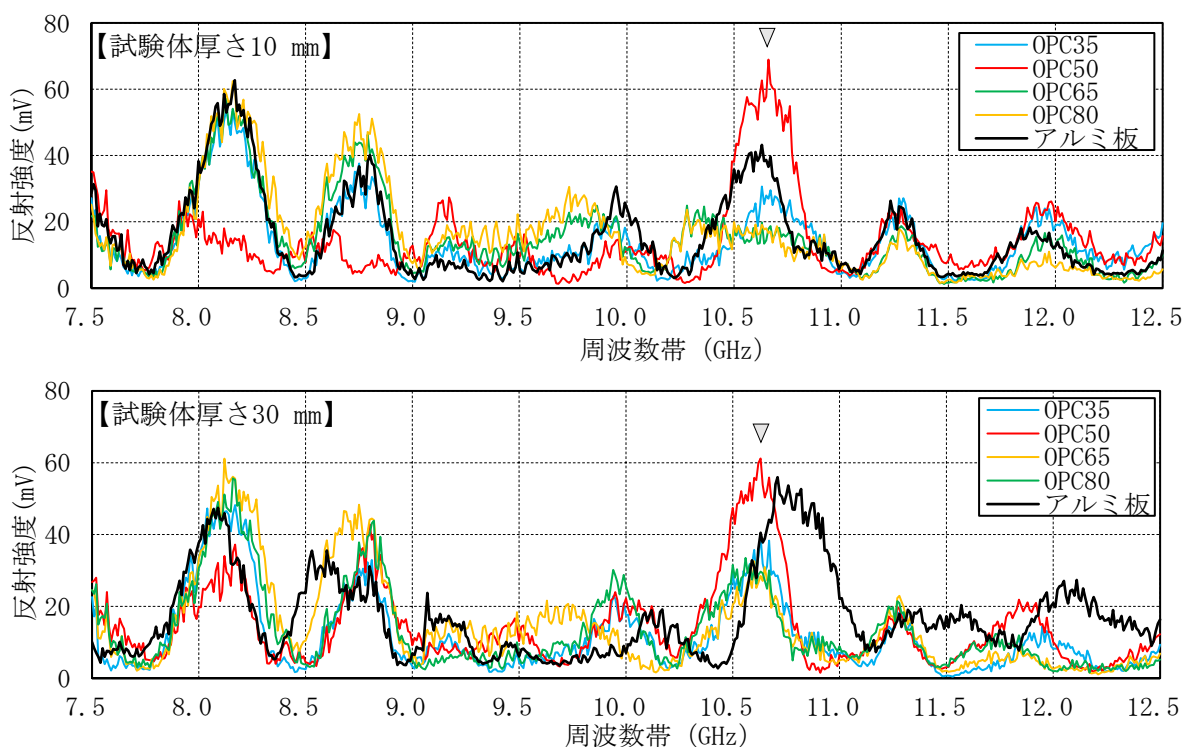


図 3.3-24 水セメント比による影響【含水状態：絶乾】

ii) フライアッシュの異なる添加量による影響

図 3.3-25 にフライアッシュの異なる添加量による影響を示す。普通ポルトランドセメント単体で作製したモルタル OPC50 を基準に、フライアッシュを 5～15%置換した FA5、FA10、FA15 を比較すると、一部の周波数帯（8.2 GHz、9.7 GHz 付近）で OPC50 に比べフライアッシュを添加した試験体の方が強い反射強度となっているものの、8.5～12.5 GHz 全体の周波数帯を見た時には、どの周波数帯においても明瞭な差がない。このため、普通ポルトランドセメントとフライアッシュ混和したモルタル及びコンクリートは、同様に評価できる可能性が推測される。

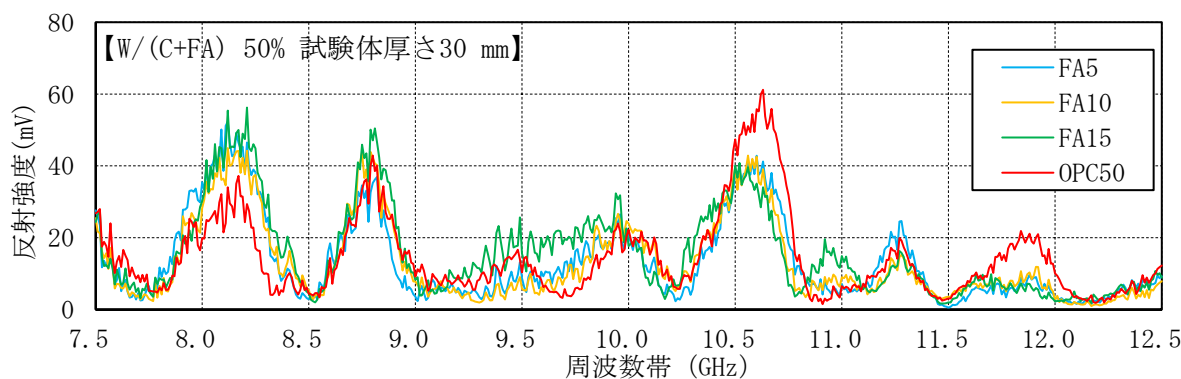


図 3.3-25 フライアッシュの異なる添加量による影響【含水状態：絶乾】

iii) 含水状態による影響

図 3.3-26 に含水率による影響を示す。図中▽印は、含水状態の影響が小さいと推測される周波数帯の特異点であることを示す。

試験体 10 mm での含水状態の影響は、周波数 8.2 GHz 付近では試験体中の水分が（気中<湿潤<水中）多くなるにつれて、反射強度が低下する傾向が認められた。

特異点（8.8 GHz、10.7 GHz、11.3 GHz、11.9 GHz 付近）以外では、含水状態によらずアルミ板の反射率と同様の値を示しており、試験体厚さ 10 mm は含水状態によらず概ねテラ（サブテラ）ヘルツ波を透過していると推測される。

原因は今後検討の必要が有るが、試験体厚さ 30 mm と 50 mm では、一部の周波数帯（例えば、8.5 GHz、11.0 GHz、11.5 GHz）において、アルミ板に比べてコンクリートの反射強度が大きく低下する箇所が認められた。一方、どの試験体厚さにおいても図中に示す特異点付近（8.1 GHz、8.8 GHz、11.5 GHz）において、アルミ板と同様の強い反射強度を得られる周波数帯が有ることが認められた。このことにより、周波数帯によって、コンクリート中の水分状態によって透過・吸収の傾向が異なることから、含水状態に依存せずコンクリート内部の劣化状態を測定したい場合は、含水率に依存しない周波数帯を選定し計測することが望ましいと考えられる。

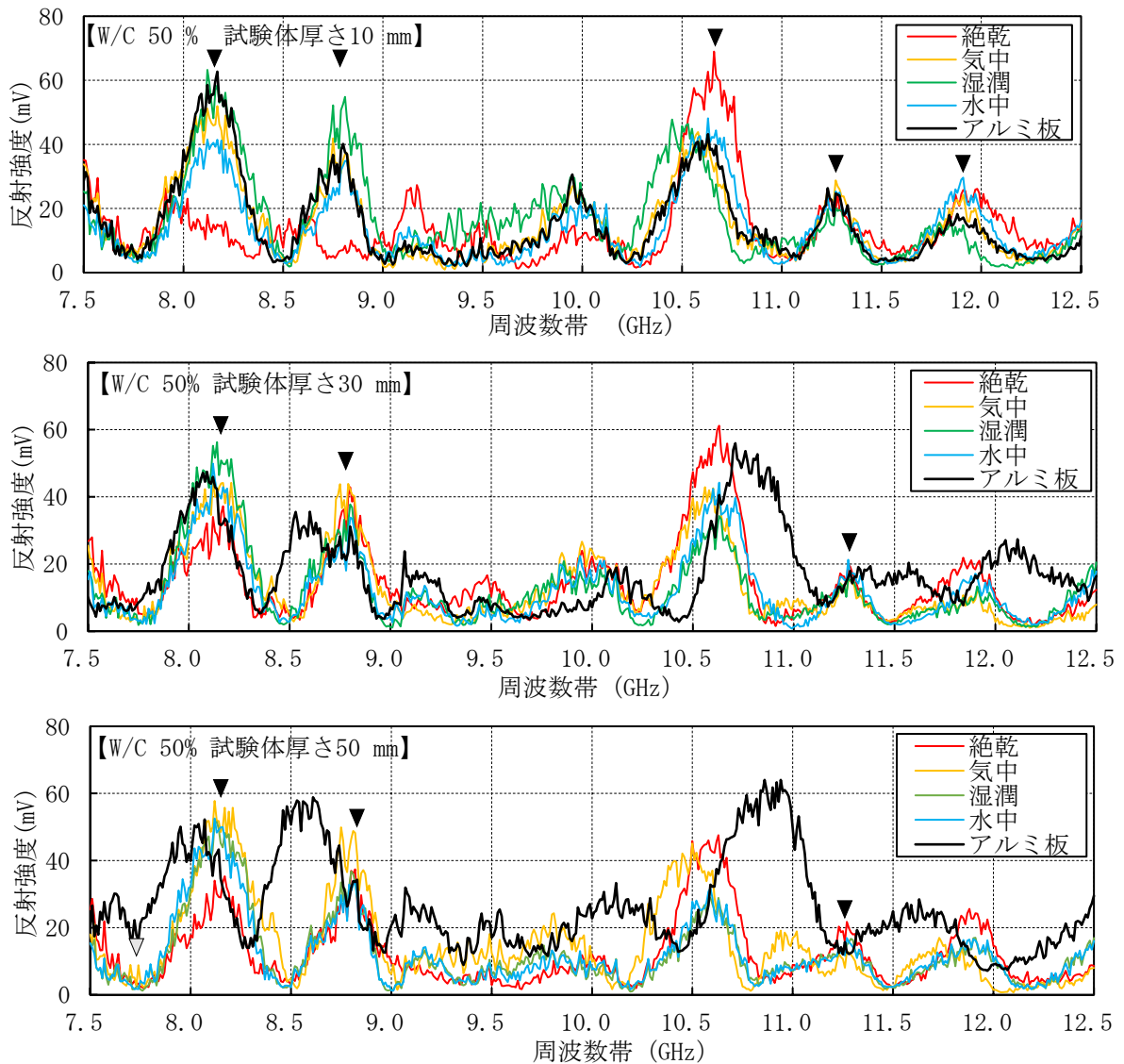


図 3.3-26 含水率による影響

iv) 内部欠陥による影響

図 3.3-27 に内部欠陥を模擬したコンクリートの観察結果を示す。内部欠陥を模擬したコンクリートの観察は、切断無しの試験体と比較した。

試験体厚さ 10 mm はどのひび割れ幅においても切断無しに類似した反射強度が得られた。これは、水セメント比による影響の厚さ 10 mm の結果と同様の傾向であり、厚さ 10 mm は総じてテラ（サブテラ）ヘルツ波が概ね透過しているものと推測される。

ひび割れ幅検知の可能性を示す特異点（10.5 GHz、12.3 GHz 付近）を図中に示す。今回の試験に限定される可能性は十分有るが、この特異点ではひび割れ幅の増加とともに反射強度が増加する傾向が認められた。また、明瞭ではないものの 8.3 GHz 付近においてもひび割れ幅に応じて、反射強度が低下する傾向が認められた。

試験体厚さ 20 mm においても、切断無しの反射強度と類似した反射強度を示していることから概ね透過していると推測されるが、図中に示す特異点（9.1 GHz、11.8 GHz 付

近) にひび割れ幅の増加とともに反射強度が増加する傾向が認められた。

試験体厚さ 30 mm は、図中に示す特異点 (10.4 GHz、12.4 GHz 付近) において、ひび割れ幅が大きくなるにつれて強い反射強度が得られることが分かった。

試験体厚さ 50 mm は、図中に示す特異点 (9.2 GHz、9.8 GHz、10.4 GHz、11.1 GHz、11.8 GHz、12.4 GHz 付近) において、ひび割れ幅に応じて強い反射強度が得られることが分かった。試験体厚さによって反射強度が強まる特異点の数が異なることから、強い反射強度が得られる特異点 (周波数) からひび割れ位置が推定できる可能性が推測される。

以上より、テラ (サブテラ) ヘルツ波はひび割れ位置やひび割れ幅によって反射強度の特性が異なることが分かった。特異的な周波数帯を選定し、健全部のコンクリートと比較することによって、ひび割れ幅やひび割れ深さを特定できる可能性を有していることが分かった。

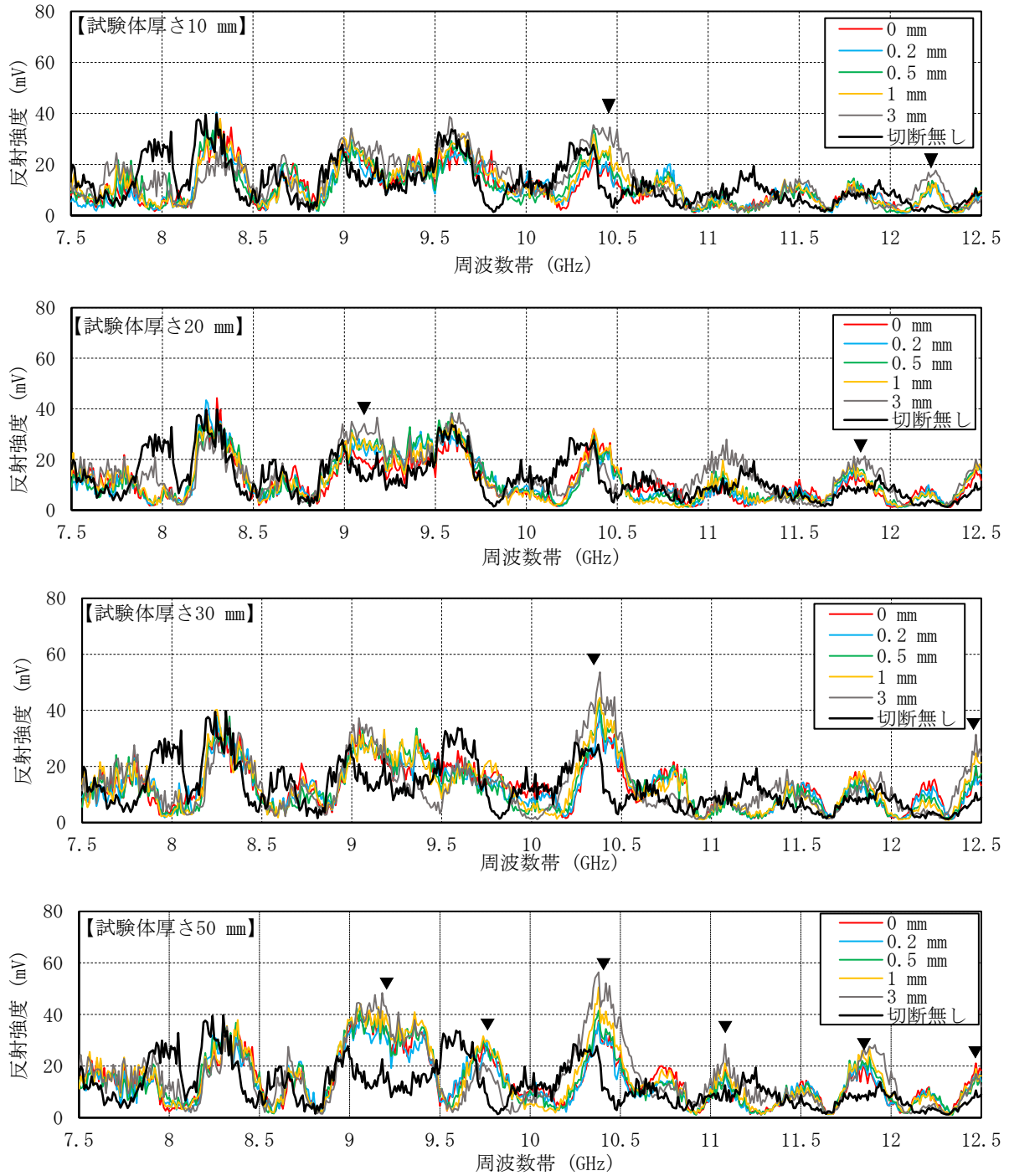


図 3.3-27 内部欠陥を模擬したコンクリートの観察結果【含水状態：絶乾】

3.3.2 まとめ

(1) コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

ここでは、サブテラヘルツ反射波を用いてコンクリート表面あるいは内部の埋設鉄筋や欠陥を模擬した測定を実施した。以下に得られた知見を示す。

- ① 周波数が30、50 GHzのサブテラヘルツ反射波を用いてコンクリート・モルタル・セメントペーストを測定した結果、骨材とモルタル部で反射率に違いが有ることを確認した。
- ② 差分反射率により評価することで、試験体厚さ30 mmまでの範囲では、埋設鉄筋を模擬して試験体裏面に設置したアルミテープの検出が可能であった。
- ③ ひび割れを模擬したスリットを有する試験体の測定では、2 mm以上のスリット幅について検出が可能であった。
- ④ 仕上げ材を模擬した厚さ5 mmのモルタルを試験体表面に設置した測定では、30 GHzを用いた場合にモルタル裏面のスリットを検出可能であった。
- ⑤ 加熱により力学性能を低下させた測定では、性能低下前後の反射率の比によって、圧縮強度の低下を評価できる可能性を示した。周波数 30 GHz において、より明確な相関を得た。

(2) 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価

鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価として、内部欠陥を有する鉄筋コンクリートの付着性能評価方法の検討とテラ（サブテラ）ヘルツ波を用いて内部欠陥を模擬して含水状態を調整した試験体の観察した結果から得られた知見を下記に示す。

- ① 導入欠陥は塩橋を用いた促進腐食によっても制御可能であることが分かった。既往の研究結果と比較し検討すると、鉄筋の拘束条件を変更することによって原子炉建屋等の大断面部材においても評価できる可能性を示した。
- ② 水/セメント比が7.5～12.5 GHz帯の測定結果に及ぼす明瞭な差は認められず、その影響は小さいものと推測される。
- ③ 含水状態が7.5～12.5 GHz帯の測定結果に及ぼす影響は、試験体厚さによって異なることが分かった。また、特異的な周波数帯を選定し検討することによって、含水状態の影響を最小限に測定できる可能性を示した。
- ④ 内部欠陥の検出性能は、試験体厚さ（剥離厚さ）によって異なり、試験体の厚さに応じた特異的な周波数帯が有ることが分かった。これにより、特定かつ複数の周波数帯を組み合わせた測定を行うことによって、ひび割れ幅や位置を検出できる可能性を示した。

3.4 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

3.4.1 令和3年度実施内容及び成果

(1) 総合的な建屋安全性評価手法の開発

① 安全性評価の部位・部材や検討項目の抽出と課題設定

本研究プロジェクトの実施項目と目標、研究課題(1)～(4)の関係を図3.4-1のように整理した。全体会議(令和3年10月5日、令和4年2月22日)を開催し、各課題の現在の技術の状況や問題点に関する意見交換、目標の設定を行い、プロジェクトに参画するメンバーの意識統一を行った。さらに、東北電力株式会社女川原子力発電所原子炉建屋の視察を行い、平成23年東北地方太平洋沖地震による建屋の損傷やその後の対策に関する状況を把握した(1Fの視察及び意見交換も計画したが、新型コロナウイルス感染拡大により令和4年4月8日に延期)。

これらの議論や視察などの結果から、1本研究で対象とする部位・部材をある程度絞り込み、1F建屋の構造性能健全性を効果的に評価するために、必要な情報を以下のように設定した。

- a) 建屋の振動周期・剛性、及び、地震時の応答変形(課題(1)モニタリングより)
- b) 部材・部位の損傷イメージ(課題(2)損傷検知より)
- c) 部材・材料の損傷に伴う構造性能の劣化情報(課題(3)性能評価より)

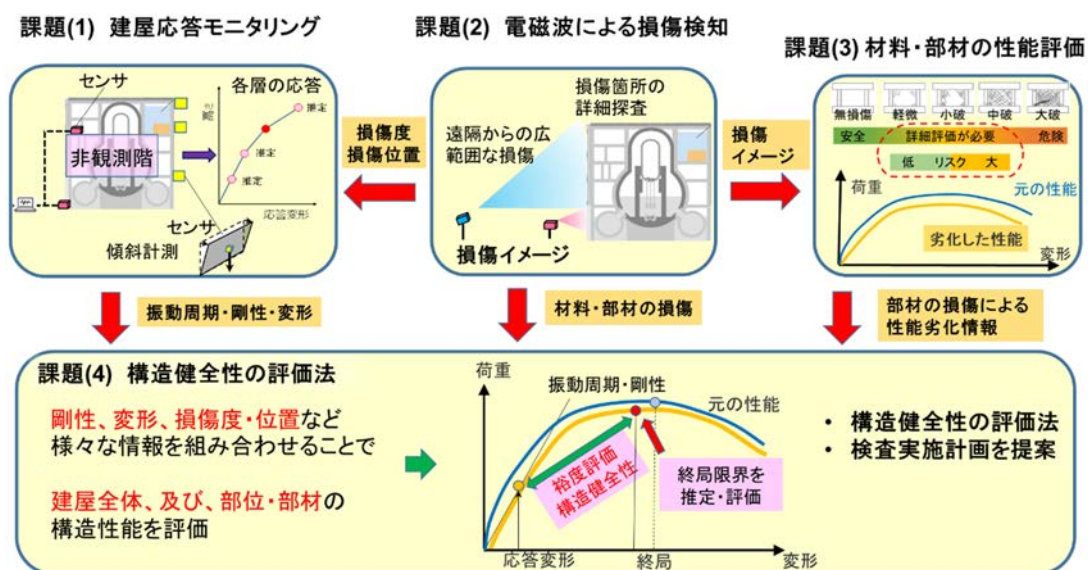


図3.4-1 本研究プロジェクトの各研究課題の位置付け

② 建屋モニタリング研究(研究課題(1))の課題抽出と最終成果イメージ

構造健全性評価の第1段階として、建屋全体挙動を把握することを主な目標として以下のように設定した(図3.4-2)。

a) 地震応答モニタリング

加速度センサによる地震観測データから、建屋の荷重-変形曲線、振動周期、また、各階の応答加速度・変形の分布角を求め、損傷の有無や位置などの状況を推定する。

b) 長期性状モニタリング

ジャイロセンサを用いて、部材の長期的な変形状を観測し、部材レベルの損傷の発生個所の推定や長期的な変形の進展をモニタリングする方法を検討する。

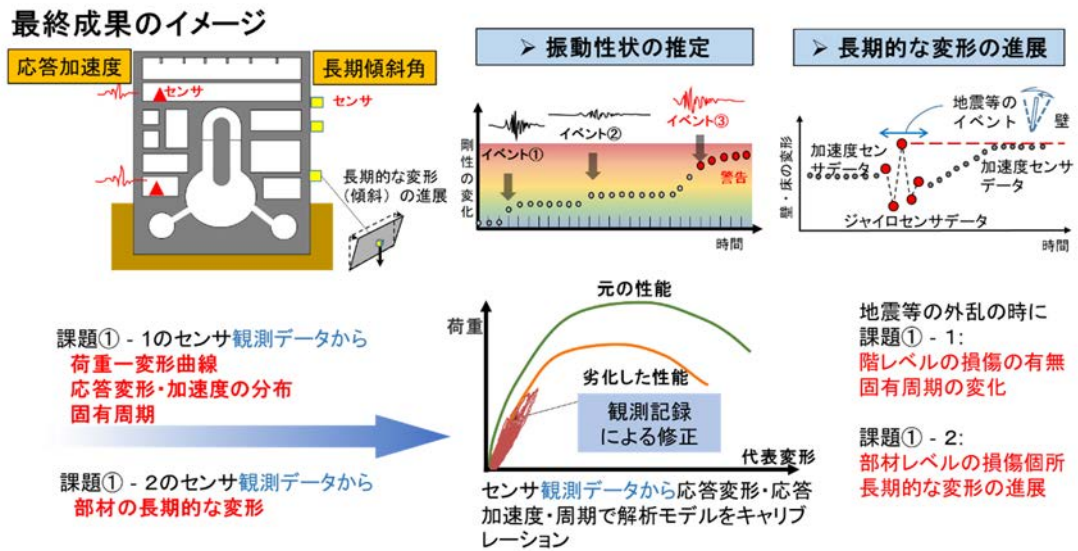


図 3.4-2 研究課題(1)の最終成果のイメージ

③ 電磁波イメージング研究 (研究課題(2)及び(3)) の課題抽出と最終成果イメージ

電磁波イメージング研究として、建屋全体挙動を把握することを主な目標として以下のように設定した。

a) 電磁波による損傷検知

建屋の耐震壁など鉄筋コンクリート部材の損傷検知としては、図 3.4-3 のように、[無損傷] ~ [大破] に至る 5 段階程度のひび割れ・損傷レベルが同定されることを目標とすること、ひび割れとしては幅 1 mm~数 mm 程度、長さ数十 cm~数 m オーダーのものが、テラヘルツ・サブテラヘルツ波による検知が主要なターゲットとなることを確認した。

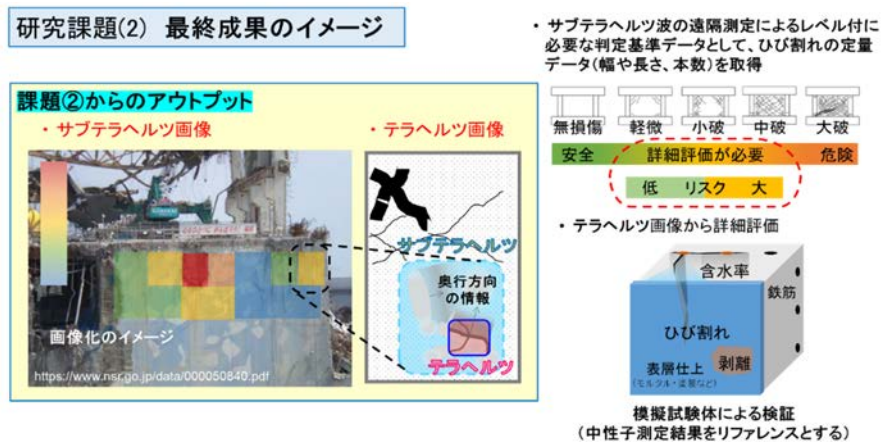


図 3.4-3 研究課題(2)の最終成果のイメージ

b) 材料・部材の性能評価

電磁波イメージングによる画像から損傷量を読み取り、コンクリートの応力度-ひずみ関係、鉄筋の付着応力度-すべり関係、部材のせん断力-変形関係など力学性状の変化、それに基づく部材の損傷度の定量的評価をすることを目標として設定した (図 3.4-4)。

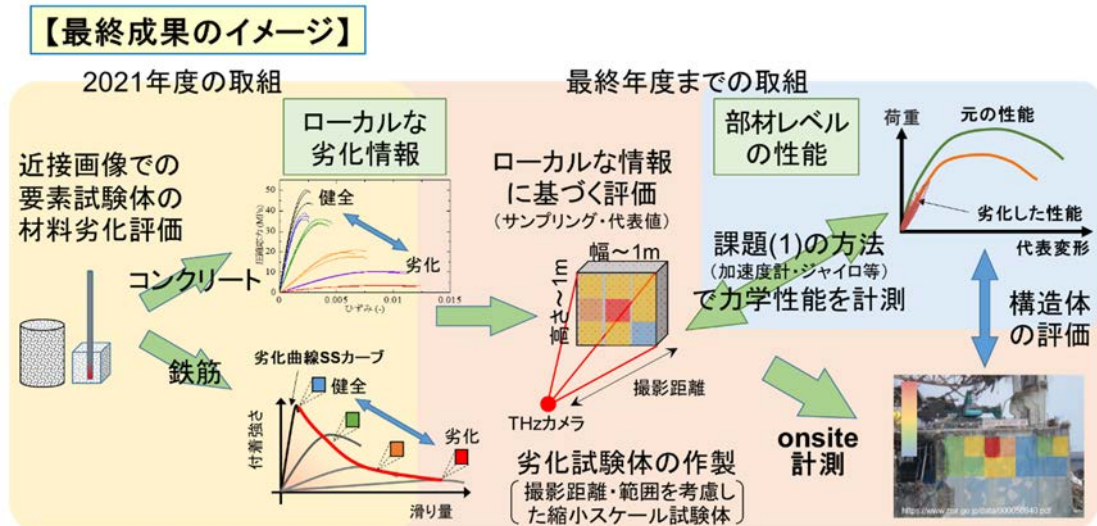


図 3.4-4 研究課題(3)の最終成果のイメージ

④ 1F 実機への実装

本研究の最終成果の 1F 建屋への適用・実装に関して、課題や道筋について議論し、本研究課題終了後に 5 号機、6 号機建屋での適用やキャリブレーション、電源やデータ収集のワイヤレス技術・ロボット技術の開発などを継続的に実施することも含めた 1F 建屋への実装のイメージを図 3.4-5 にまとめた。

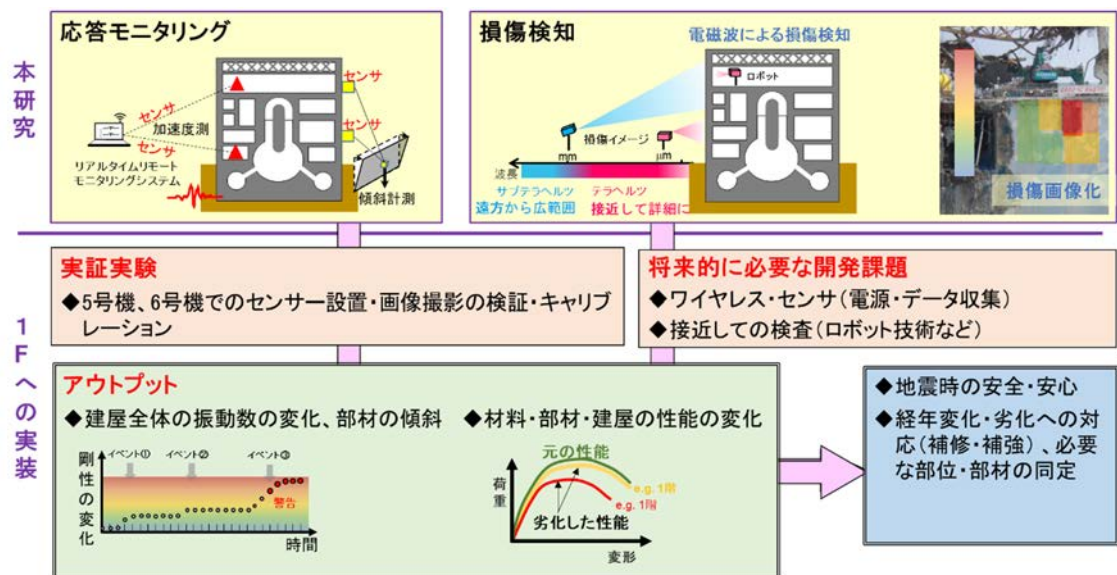


図 3.4-5 研究成果の社会実装のイメージ

(2) 長期保全計画の提案

一般に人工構造物は、時間の経過とともに劣化していく。その劣化は当該構造物の材質、作用する荷重（応力）、設置されている環境の3者によってその劣化モードと劣化速度が決まると言われている。原子炉建屋も同様である。したがって、原子炉建屋の安全機能を長期に亘る廃止措置期間中において常に確保するには、現時点だけではなく、長時間経過後の特定時期までの将来を視野に入れた検討を行い、その健全性を確認しながら設備運用していく必要が有る。これが設備の保全活動である。

人工構造物の保全は、検査・モニタリング技術、経年劣化評価技術、補修等の是正技術の3つの技術を駆使して合理的に行われる。すなわち、検査・モニタリングを実施し、人工構造物のその時点における状態を把握し、その結果に基づきその後どのように経年劣化が進展するかを評価した上で、必要に応じて是正措置を講じる。しかしながら、1F原子炉建屋は放射性物質による高放射線量率と高汚染で内部への接近性が極端に限定されている。また事故による損傷を受けており、安全機能（放射性物質の閉じ込め機能）が低下していると考えられる。このような条件下でいかに合理的に保全を実施していくか、その考え方、アプローチの仕方等を検討するのが本項での課題である。ここでは、原子炉建屋の閉じ込め機能を支えている構造保持機能（構造強度）と密閉機能（特に気密性）のうち、構造保持機能を確保するための保全計画について長期的観点から検討する。

① 事故炉廃止措置の特徴

高放射線量率と高汚染により極端に接近性が制限されている事故炉の廃止措置を考えた時、その特徴的な事項として下記が挙げられる。

- a) 高放射線量率と高汚染環境のため、主要設備・構造物への接近が困難であり、「検査」や「補修・補強等」の保全活動が大きく制約される。戦略的で、効率的・効果的な方法の導入や工夫が必要。
- b) 事故により、主要設備・構造物がダメージを受けていると考えられるが、その状態や現場の状況に不明確な点が多い。
- c) 主要設備・構造物が従来の設計想定範囲に無い特殊な環境に晒されている箇所が多々あり、経年劣化の発生・進展を予測するのが難しい。
- d) 事故炉の廃止措置は、このような制約の多い条件下で問題解決を図ろうとする、前例が無いプロジェクトである。

② 安全リスクの基本戦略

前述のように、事故炉の廃止措置は通常炉のそれと決定的に異なる点が多い。その中で特に重要なことは、放射性物質による高放射線量率と高汚染のため、原子炉建屋内部等への接近が困難であり、現場で実施しようとする事前調査や燃料デブリ取り出し作業等はことごとく強い制約を受け、容易に実施できないということである。このため、用意周到な計画や慎重な現場作業を必要十分な時間をかけて安全・着実に進めていく必要が有るが、その一方で用意周到かつ慎重に進めた結果、廃止措置活動が長引けば、その間、放射性物質の外部への追加放出リスクが比較的高い状態のまま維持され続けるだけでなく、事故によるダメージを受けた主要設備の経年劣化が進み、安全機能が徐々に低下することによってその安全リスクが増大していく。あるいは、汚染水の処理等により、2次的な放射性廃棄物の増加とその管理に起因する安全リスクが増大する。これらの安全リスクの増加を抑制・低減・管理

するために多額の費用を要することになり、経済リスクを増大させることにつながる。したがって、いつまでに燃料デブリを取り出す必要が有るか、時間軸を強く意識した対応が求められる。また、通常炉の場合であれば不明な点は現地調査等を通じてすべて解消した上で廃止措置計画を立案・実施できるが、事故炉の場合はそれが困難であるので、不明な点や不確定性を残したままプロジェクトを前へ進めざるを得ない場合が考えられる。したがって、これらの問題を少しでも克服するためには、廃止措置のリスク管理方法に特別なアイデアを取り入れた戦略的な取り組みや効率的・効果的な方法の導入が求められる。

事故炉廃止措置の基本戦略には次のような考え方が求められる。すなわち、事故炉廃止措置の初期におけるプラント状態は、比較的安定してはいるものの、安全リスクが“比較的高い状態”にあるが、その“比較的高い状態”をできるだけ早期に“安全に管理できる状態”、さらには“管理しなくても良い状態”へ低減するという戦略である（図 3.4-6）。これを実現し、廃止措置期間中における安全リスクの総和（積分値）を最小化することを常に追求する戦略であり、これを最優先することである。事故炉廃止措置とは、安全リスクを初期の“比較的高い状態”から“安全に管理できる状態”、さらには“管理しなくても良い状態”へ低減する事業であると言える。また、事故炉廃止措置に投入できるリソース（能力を有する要員、資機材等の、いわゆるヒト、モノ、カネ、情報、時間等）は無尽蔵ではなく、有限であるとの認識の下、投入するリソースが最小となるように効率的・効果的な方法を採用するといった戦略も必要となる。

以上については、参考文献[16][17]に詳細が論じられている。

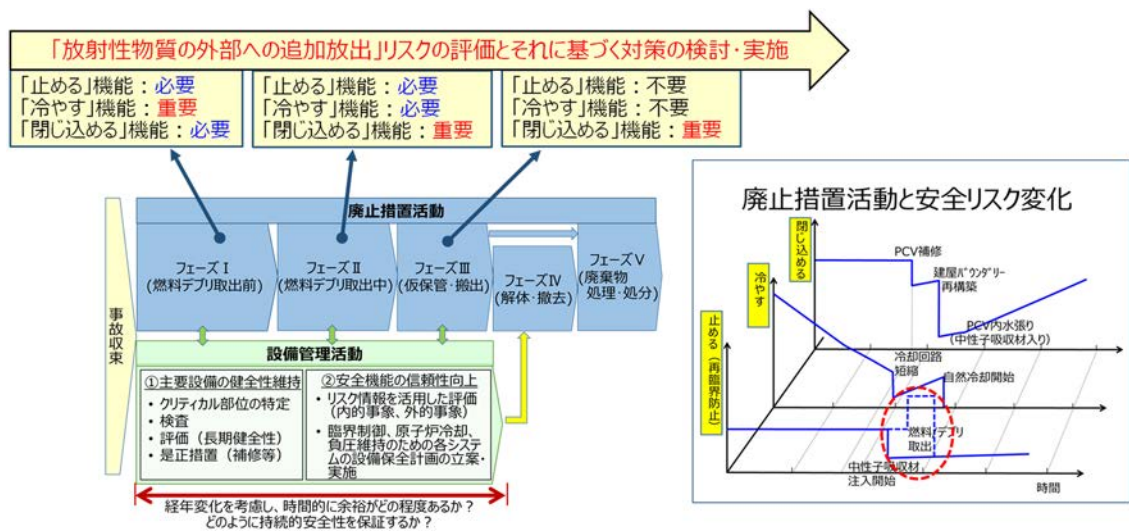


図 3.4-6 安全リスクを考慮した廃止措置活動と設備保全活動

③ 事故炉廃止措置のために必要な活動 — 廃止措置活動と設備保全活動 —

事故炉の廃止措置活動は、「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能の観点から全体を俯瞰すると、下記の5つのフェーズに大別できること（図 3.4-7）、またその進捗とともに要求される基本安全機能の重心が移り変わっていくことが前述の参考文献[17]で述べられている。

- ・フェーズⅠ（燃料デブリ取り出し前）
- ・フェーズⅡ（燃料デブリ取り出し中）
- ・フェーズⅢ（燃料デブリ仮保管・搬出）
- ・フェーズⅣ（解体・撤去）
- ・フェーズⅤ（処理・処分）

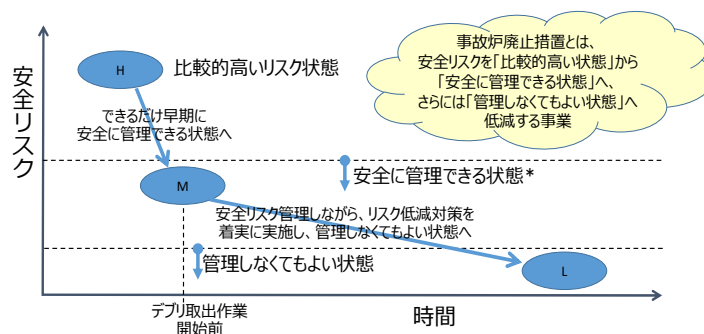


図 3.4-7 安全リスク管理の基本戦略

廃止措置活動は、既存の主要設備がある一定の健全性を有していることを前提としているので、その健全性を確保するための設備保全活動が必要となる。この廃止措置活動と設備保全活動の両者は、それぞれ影響し合い、関連し合う関係となっており、切り離すことができない。たとえば、前述のように、フェーズⅡ（燃料デブリ取り出し中）の期間は「閉じ込める」機能の重要性が高くなる時期であるので、それに見合った主要設備の設備保全活動で事前にその機能を確保しておく必要が有る。一方、安全機能を有する主要設備本体とそれに接続する動的機器等を含む全体システムは時間の経過とともに経年劣化するので、設備の状態を勘案しながら燃料デブリ取り出し等の廃止措置活動を実施する必要がある。廃止措置活動と設備保全活動の間にはこのような関係が有る。

④ 戦略的で効率的・効果的な設備保全計画の検討

a) 原子炉建屋の安全機能

原子炉建屋は、放射性物質の閉じ込め機能を有している。この閉じ込め機能は構造保持機能（構造強度）と密閉機能（気密性）から成っている（図 3.4-8）。本研究では、原子炉建屋の構造保持機能（構造強度）を長期的な観点からどう確認し、どう確保するか、その方法を研究することを検討対象としている。密閉機能については、燃料デブリ取り出し開始前に何らかの方法で現状を修復し、放射性物質の漏えい抑制バリアを構築することになると想定されるが（図 3.4-9）、その修復方法及び保全については検討対象としない。

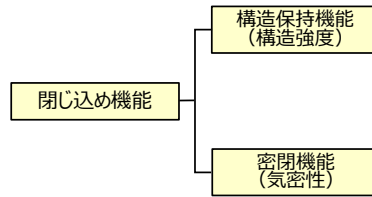


図 3.4-8 原子炉建屋の閉じ込め機能の構成要素

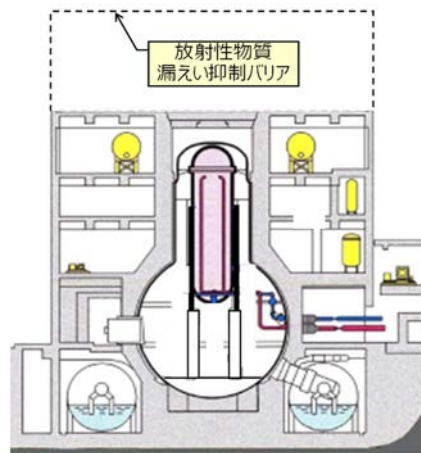


図 3.4-9 原子炉建屋の密閉機能の修復方法と保全

b) 戦略的で効率的・効果的な長期保全計画の検討

前述のように、事故炉の廃止措置は通常のプロジェクトとは異なる際立った特徴とそれに伴う制約がある。このため、戦略的で効率的・効果的な計画に基づいてプロジェクトを進めないと、その目的を達成できない。安全機能を有する主要設備の保全計画も同様である。

ここで言う長期保全計画とは、長期を要する事故炉廃止措置が完了するまでの間、安全機能を有する主要設備の保管理を合理的に行うための計画を意味している。そして戦略的で効率的・効果的な長期保全計画を立案するための考え方、立案方法等を検討するのが本節の目的である。

保全計画は、下記の3項目から構成されることが知られている[18]。

- i) 保全対象
- ii) 保全対象に対して行う保全タスク（検査・モニタリングと補修等の是正措置）
- iii) 保全実施時期（特定時期または周期）

前述のような大きな制約の有る事故炉廃止措置の条件下で設備保全を行うには、これら3項目の内容が最小となるように決定することが重要である。これを達成するための

戦略としては、上記 i) の保全対象を徹底して厳選し絞り込むこと、上記 ii) の保全タスクは保全対象として選定した箇所あるいは部位に適した効率的・効果的な保全方法（検査・モニタリング方法あるいは補修等の是正方法）を厳選すること、そして最後の上記 iii) の保全時期は、適切な経年劣化進展評価方法と破壊評価方法を適用し、過度な保守性を排除することである。特に、上記 i) の保全対象の絞り込みは、重要度の高い箇所/部位を選定する方法を考案し、それに基づき保全対象を特定する方法を導入することが効率的・効果的である。

ここで、原子炉建屋の構造保持機能（構造強度）を確保するための戦略的アプローチとして下記の2つのアプローチを考えてみたい。

アプローチ 1：損傷リスク重要度の高い躯体に保全リソースを重点投入する。

アプローチ 2：建屋の大きな損壊を回避するために必要な最小範囲の躯体に保全リソースを重点投入する。

アプローチ 1 は、構造強度の比較的低い箇所を特定し、そこに保全リソースを重点投入しようとする方法である。検討手順は下記の通りである。

- イ) 解析により、比較的低強度の低い「建屋階」「耐震壁・床」「壁・床の部位」の3段階で保全対象を特定し、その3つのそれぞれに対して検査・モニタリングを行う。
- ロ) この時、保全対象それぞれの設置環境（中性化・鉄筋腐食の観点から環境を評価）を考慮する。
- ハ) 上記イ) とロ) の組み合わせで損傷リスク重要度を評価し（表 3.4-1）、その重要度に応じて検査の優先順位付けを行う（図 3.4-10）。そして、重要度の高い「建屋階」「耐震壁・床」「壁・床の部位」に対してそれに適した検査・モニタリングを計画・実施する。

表 3.4-1 損傷リスク重要度評価方法

		中性化を促進する環境		
		水没部	濡れ部	大気中
構造強度	低	高	高	低
	中	中	中	低
	高	低	低	低

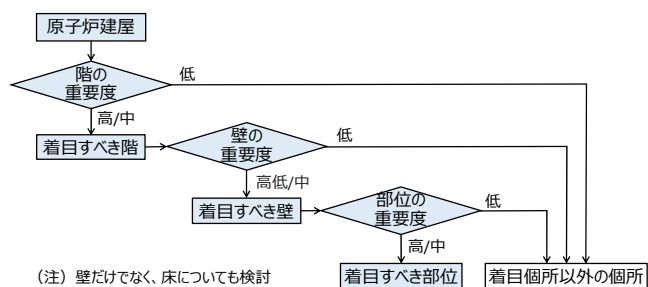


図 3.4-10 損傷リスク重要度による保全対象の優先順位付け

アプローチ 2 は、大きな損壊の発生を回避するのに有効な構造強度の高い耐震壁・床のうち、その範囲をできるだけ少なくなるように絞り込んだ耐震壁・床を保全対象として特定し、その健全性を確認しようとする方法である。検討手順は下記の通りである。

- ア) 東北地方太平洋沖地震を経験した原子力発電所の原子炉建屋の状況から損傷が少ないと考えられる躯体部分（たとえば、地下階～2 階の耐震壁・床と PCV 周辺遮へい壁）を特定し、それら躯体部分で原子炉建屋の構造強度が確保できることを解析で確認する。
- イ) 上記躯体部分に対して必要最小限の検査・モニタリングと解析で健全性を確認することを優先して実施する。特に腐食劣化する可能性の有る水没部及び高湿度/濡れ部を優先する。
- ウ) 上記ア) 以外の躯体部分（たとえば、建屋 3 階～4 階の耐震壁・床）のうち、構造強度の観点から重要度の高いと考えられる耐震壁・床の健全性評価確認を上記の次に優先して実施する。

以上のようなアプローチを取れば、投入する保全リソースは通常よりも格段に抑制しながら目的を早期に達成できると考えられる。

c) 長期保全計画の具体的イメージ

前述のように、保全計画は保全対象、保全タスク、保全実施時期の 3 者から成る。事故炉の原子炉建屋のように、接近性に大きな制約が有り、検査・モニタリングや補修等の是正措置を自由に行えない場合は、保全目的（本研究の場合は原子炉建屋の構造強度確保）を達成するための戦略を明確にして保全計画を立案する必要がある。

その 1 つ目が、保全目的を達成するために効率的・効果的な保全対象（検査・モニタリング対象箇所）を必要最小限の範囲に厳選することである。具体的には、アプローチ 1 あるいは 2 を用いて保全対象とする「建屋階」「耐震壁・床」「壁・床の部位」を厳選する方法が考えられる。すなわち、重要度の高い建屋階を検査・モニタリングと解析で特定し、その建屋階の耐震壁・床のうち、建屋の構造強度に大きな影響を与える耐震壁・床を検査・モニタリングと解析で特定し、さらに、その耐震壁・床のどの部位が建屋の

構造強度に大きな影響を与えるか解析で特定して当該部を検査モニタリングするといった方法である。

2つ目は、上記で特定した保全対象に対し、どのような保全タスク（検査・モニタリング、補修等の是正措置）を行うかである。ここでも、保全目的を達成するために効率的・効果的な保全タスクを厳選する必要がある。事故炉の場合は接近性に大きな制約が有り、自由に検査・モニタリングを実施することができないので、建屋レベルではどの建屋階に劣化傾向が見られるか、建屋階の部材レベルではどの耐震壁・床に劣化傾向が見られるか、耐震壁・床の部位レベルではどの部位に劣化傾向が見られるか、といった階層的、多角的な見方で検査・モニタリング技術を選定し、それらから得られるデータをすべて勘案して原子炉建屋全体の健全性あるいは構造強度を評価する必要がある(図3.4-11)。そして、検査・モニタリングの結果に基づき、必要に応じて補修等の是正措置を施す必要が有るが、ここでも保全目的を達成するために効率的・効果的な是正措置方法を厳選する必要がある。

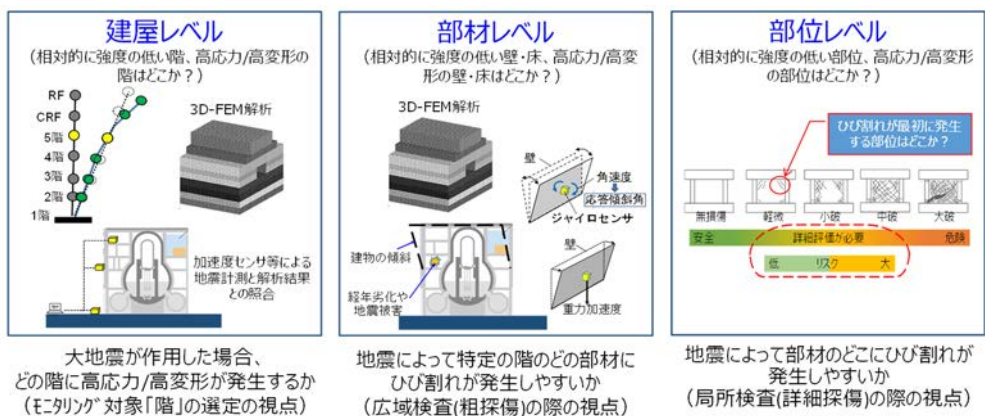


図 3.4-11 原子炉建屋の着目すべき箇所と検査・モニタリング方法

最後に3つ目の保全実施時期である。保全実施時期を定めるには、原子炉建屋の構造強度の経年劣化による低下を評価できる技術とともに、どこまで低下したら機能喪失(大破)するかを評価する評価技術が必要となる。これらの技術を用いて原子炉建屋の経年劣化を予測した上で適切な保全実施時期を決定する必要がある。ここでは保守性を十分に確保した建設段階で行う設計評価ではなく、建屋の実態を把握した上で実力を適切に評価できる技術が必要となる。

以上を踏まえ、長期保全計画のイメージを表3.4-2に示す。

表 3.4-2 事故炉廃止措置における原子炉建屋の長期保全計画（イメージ）

保全対象箇所	保全方法 (検査・モニタリングと補修等)	保全実施時期	検討評価の内容
建屋全体	① 加速度計による地震時振動モニタリング	地震発生時 (常時)	・地震時応答スペクトラム分析（周波数、強度、波形）と地震毎のトレンド評価 ・多質点系モデル解析による振動挙動分析と地震毎のトレンド評価 ・定点観測による建屋形状変化を捉える
	② レーザ/GPSによる建屋形状モニタリング	10年毎	
建屋外壁 (特定箇所)	① 加速度計による振動モニタリング ジャイロセンサによる外壁傾斜モニタリング	地震発生時 (常時)	・壁面傾斜度評価と地震毎のトレンド評価 ・損傷度評価と懸念箇所の抽出 ・懸念箇所の鉄筋とコンクリートの状態評価
	② サブテラヘルツ波による広域検査	10年毎	
	③ テラヘルツ波による特定部位検査	必要時	
地下階 (特定箇所)	① ②		
PCV外側周辺壁 (特定箇所)			
3階耐震壁床			
他耐震壁床			

戦略に基づき、対象箇所を厳選抽出

適用箇所に適した、効率的・効果的な方法を厳選

できるだけ保守性を排除して実力を評価できる技術を用いて経年劣化及び破壊評価を実施し、適切な時期を決定

イメージ

3.4.2 まとめ

令和3年度の研究成果は以下の通りである。

- (1) 研究課題(1)～(3)でモニタリング、観測、評価を計画している建屋コンクリート構造物に対して、1F建屋の構造性能健全性を効果的に評価するために、必要な部位・部材や検討すべき項目を抽出し、課題を整理した。
- (2) 建屋モニタリング研究（研究課題(1)）に対して、建屋全体の振動周期や地震応答変形に加えて、変形推定が必要な重要な部位・部材の情報を提供し、最終成果の目標を設定した。
- (3) 電磁波イメージング研究（研究課題(2)及び(3)）に対しては、建屋の構造性能劣化の評価・推定のために、必要なひび割れ損傷の情報を整理して提供し、最終成果の目標を設定した。
- (4) 原子炉建屋等への接近性が困難等の事故炉廃止措置の特徴を踏まえ、原子炉建屋の長期健全性を確認するための保全計画の在り方、考え方等を検討するとともに、研究課題(1)～(3)の検討状況を踏まえて長期保全計画のイメージについて検討した。

3.5 研究推進

3.5.1 研究課題間の連携・調整

(1) 全体会議の開催

研究代表者の下、各研究項目間で整合の取れた研究を進めるため、全体会議を開催して研究目標や関連情報、スケジュールなどを共有しながら連携して研究を進めた。特に、第1回全体会議において下記について意見交換し、今後、実行に移していくことを決定した。

- ・全体会議の継続実施
- ・専門家会議の実施
- ・1Fの視察
- ・東北電力株式会社女川原子力発電所原子炉建屋に関する東北地方太平洋沖地震の影響調査

令和3年度に実施した全体大会の会議実績は表3.5-1に示す。

表 3.5-1 全体会議の開催実績

	開催日	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第1回	令和 3. 10. 5	Web 会議	(東北大)前田、青木、西脇、Hamood、Benjamin、津田、堀 (東工大)西村 (芝浦工大)田邊 (木更津高専)藤井 (日本工大)田中 (大阪市立大学)鈴木 (JAEA)上野、菖蒲	(1) 事務手続き及び予算変更手続きを確認した。 (2) 課題全体の進め方について ・ 研究プロジェクトの概要と目的を再確認した。 ・ 全体ゼミ会議、各課題別会議の開催頻度などを確認した。 ・ 東北電力株式会社女川原子力発電所建屋ひび割れ勉強会および現場見学会を10月～11月に実施する提案があった。 (3) 研究課題④の長期保全計画について ・ 事故炉廃止措置時における安全リスク、安全機能確保上の重要部位抽出方法などの説明があった。 (4) 研究課題①-1の計画について ・ 課題②と③の材料特性劣化のフィードバックと解析モデルの修正をどのように行うか、より詳細な計画が必要とのコメントがあった。 (5) 研究課題①-2の計画について ・ 今後、課題①-1と課題②-2の振動実験、情報や資料の交換が必要とのコメントがあった。 (6) 研究課題②-1の及び計画について (7) 研究課題②-2の計画について ・ 系統的なデータ採取、検査精度に関する検討などの必要性についてコメントがあった。 (8) 研究課題②-3の計画について ・ 構造物の安全性のために、ひび割れ幅の検出精度がどの程度必要なのかについて議論した。 (9) 研究課題③-1の計画について ・ 課題③の目標(検査データに基づく材料や部材の物理的特性の定量化)にフォーカスした計画とするよう要望があった。 (10) 研究課題③-2の計画について ・ 試験体を作成するために1Fのコンクリート調合の情報が必要なこと、その入手方法について議論した。 (11) 今年度の全体スケジュールを確認した。
第2回	令和 4. 2. 22	Web 会議	(東北大)前田、青木、西脇、Hamood、Benjamin (東工大)西村 (芝浦工大)田邊 (木更津高専)藤井 (日本工大)田中 (大阪市立大学)鈴木 (JAEA)上野、菖蒲	下記についての現状を確認し、今後の進め方について意見交換した。 (1) 研究課題①-1の実施内容と成果 (2) 研究課題①-2の実施内容と成果 (3) 研究課題②-1の実施内容と成果 (4) 研究課題②-2の実施内容と成果 (5) 研究課題②-3の実施内容と成果 (6) 研究課題③-1の実施内容と成果 (7) 研究課題③-2の実施内容と成果 (8) 研究課題③-3の計画内容 (9) 研究課題④の長期保全計画に関する成果(考え方、内容など) (10) 事務手続き及び予算変更手続き

(2) 研究課題グループ会議及び研究課題グループ間会議の開催

研究課題ごとに、また関連する研究課題間で随時、会議を開催し、研究目標や関連情報、スケジュールなどを共有しながら連携して研究を進めた。令和3年度に実施した研究課題グループ会議及び研究課題グループ間会議の会議実績は表 3.5-2 に示す通りである。

表 3.5-2 研究課題ごとのグループ会議の開催実績 (1/2)

	開催日	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
研究課題①				
第1回	令和3.10.28	Web会議	東北大：前田、青木、Hamood、Benjamin、西脇 東工大：西村 大阪市立大学：鈴木	(1)課題①-1について センサ配置のための解析モデルのパラメータについて議論した。原子炉建屋全体の安全性に影響を与えるパラメータについて更に検討する必要がある。 (2)課題①-2について センサ配置のための実験、FEM解析と基本的な考え方について議論した。
第2回	令和3.11.29	Web会議	東北大：青木、Hamood、Benjamin 東工大：西村 大阪市立大学：鈴木	課題①-1及び課題①-2の解析モデル等の説明があり、センサから得られるデータの活用方法等について議論した。
第3回	令和3.12.23	Web会議	東北大：前田、青木、Hamood、Benjamin 東工大：西村 大阪市立大学：鈴木 木更津高専：藤井	(1)課題①-1について 建屋の多質点解析モデルやシミュレーション結果等の説明があり、議論した。 (2)課題①-2について 1自由度の簡易な振動装置を作製すること、加速度センサの精度を検証するために実施した実験の結果等の説明があり、議論した。
研究課題②				
第1回	令和3.10.11	対面会議	芝工大：田邊 木更津高専：藤井	サブテラヘルツならびにテラヘルツの計測に必要な計測機器と光学・電子部品を議論した。遠距離からの検査におけるテラヘルツビームの平行度を調整するレンズの仕様を明らかにした。
第2回	令和3.11.15	対面会議	芝工大：田邊 木更津高専：藤井	サブテラヘルツならびにテラヘルツの計測に必要なインフラ構造物を構築する各種材料を議論した。測定条件を満たすために環境も含めた想定が必要であることが分かった。
第3回	令和3.11.29	対面会議	芝工大：田邊 木更津高専：藤井	垂直に方向にひびがある試験体を手に取り、測定手法を議論した。ひびの幅がテラヘルツならびにサブテラヘルツの波長程度の時に反射強度もしくは透過強度が大きく変化することが分かった。
第4回	令和3.12.13	対面会議	芝工大：田邊 木更津高専：藤井	斜め方向にひびがあることを模擬する試験体の測定手法を議論。ひびが存在しない場所をリファレンスとして設定することが必要であることが分かった。
研究課題③				
第1回	令和3.10.28	Web会議	東北大：西脇・前田・青木・Hamood・Benjamin・清水 日本工大：田中 大阪市立大学：鈴木	(1)課題③の計画について ・課題②で開発するテラヘルツ装置を用いて力学性能の推定・コンクリート構成則、さらにRC構造物評価へ繋げる。 ・標本調査やひび割れ箇所などの結果から課題①と④へ提供する壁全体平均など部材性能を推定する。 ・必要な情報を整理して課題②に必要な装置の性能を要求する。 (2)課題①で必要な情報について ・質点系に用いる情報、鉄筋腐食改修の有無等耐久性判定も必要である。 ・部材レベルの破壊試験体をテラヘルツ波で測定してみる。部材試験体を測定するとともに、FEM解析と合わせて測定位置を検討する。 ・部材の損傷を検知できるテラヘルツカメラを課題②にお願いする。

表 3.5-2 研究課題ごとのグループ会議の開催実績 (2/2)

	開催日	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第2回	令和 3.12.1	日本工業 大学	東北大：西脇 日本工大：田中	測定装置・試験体の準備状況を確認し、12/8のP0中間フォロー向けの発表資料、特に成果のイメージを議論した。現在はローカルな劣化情報に注目してデータを得ている段階で、これをベースに課題①で用いる方法での力学性能とテラヘルツでの測定結果を結びつける検討を行う。
第3回	令和 3.12.23	東北大 未 来産業技 術共同研 究館	東北大：西脇、清水 日本工大：田中	東北大・未来産業技術共同研究館に設置の試験装置について確認するとともに、日本工大で準備した試験体の計測を行った。ここまでの結果を確認し、画像化のための測定ピッチや試験体条件、測定装置などのパラメータについて確認した。
課題②③合同				
第1回	令和 3.11.10	Web 会議	芝浦工大：田邊 木更津高専：藤井、 日本工大：田中 東北大：西脇、前田、青 木、Hamood、Benjamin JAEA：上野、菖蒲	(1)サブテラヘルツとテラヘルツで測定する試験片について 各サンプルに対する測定可能なパラメータを明確にすることにした。 (2)テラヘルツと中性子で測定する試験片について それぞれの測定で必要となる条件を共有することにした。
第2回	令和 3.11.25	Web 会議	芝浦工大：田邊 木更津高専：藤井、 日本工大：田中 東北大：西脇、前田、青 木、Hamood、Benjamin JAEA：上野、菖蒲	(1)テラヘルツと中性子で測定する試験片について 現状のひび割れを模擬する試験片の具体的な検討（製作と測定）を進めることとなった。ひびの方向を模擬する設計案を準備する。 (2)テラヘルツとサブテラヘルツの計測システムについて 評価する対象までの距離、計測時間、測定範囲を具体化するとともに、構造強度が評価できるデータを取得することを課題②と課題③で常に意識する。
第3回	令和 3.12.27	Web 会議	芝浦工大：田邊 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗 田 大阪市立大学：鈴木	(1)テラヘルツと中性子で測定する試験片について テラヘルツの反射強度を正確に議論するため、円柱から角柱に試験体の形状を変更することにした。中性子イメージングにおける強度を得るために 40×40×160 mmの形状をモルタル試験体とすることになった。 (2)課題③で構造強度を議論できるように、課題②で測定標準試験片とキャリブレーション方法を検討することが必要。
第4回	令和 4.2.15	Web 会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗 田	(1)課題②の進捗について 35～45 GHz の周波数帯を用いて課題③から提供のコンクリート供試体を計測。45 GHz 付近に特異な計測結果がある。ばらつきを含めた再現性の確認が必要で課題③へ適切な周波数帯のフィードバック等できるように検討する。 (2)課題②の進捗について 圧縮強度と反射率についての関係が得られている。試験体の様々なパラメータに測定結果が敏感に反応するため、ある程度解像度を制限することを考えている。鉄筋腐食を導入した試験体での結果が得られつつある。
第5回	令和 4.3.30	Web 会議	芝浦工大：田邊 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗 田 大阪市立大学：鈴木	(1)課題③の進捗について ヒビや含水率だけでなく、鉄筋位置も含めて、時間をパラメータとする試験体の調製とサブテラヘルツでの実験結果を議論するとともに、シミュレーションによるテラヘルツ波の挙動を議論した。 (2)課題②の進捗について 1F での現場測定を想定し、測定に必要なリファレンスの候補になりうる条件として、光源とサンプルの距離をはじめ、偏光活用も含めたデータ取得とその有用性を議論した。 (3)測定を共有するサンプルについて JAEA での中性子測定スケジュールについて、放射化後の取出しに要する期間も含めて確認するとともに試験体の形状だけでなく測定順序も検討した。

3.5.2 国内外機関との連携などの推進

CLADS などの国内機関との連携を密にして研究を効率的・効果的に推進できるよう努めた。令和3年度は下記を実施した。

- ① 東北地方太平洋沖地震による東北電力株式会社女川原子力発電所原子炉建屋のひび割れ状況ヒヤリング及び意見交換（令和3年10月27日実施）
- ② 東北電力株式会社女川原子力発電所視察と東北地方太平洋沖地震の影響調査及び本研究内容の意見交換（令和3年11月4日実施）
- ③ 1F 視察計画の検討と同社との調整
- ④ 第7回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC）の関係者への周知と参加勧誘

3.5.3 プロジェクト推進・取りまとめ

本研究全体の進捗状況を確認するとともに、達成目標や活動の方向性を確認し、共通の理解を持って事業を進めるため、下記について情報共有した上で研究内容について意見交換することによって全体を取りまとめるとともに、研究を推進した。

- ・全体スケジュール（今後の予定）
- ・原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）廃炉研究開発連携会議や原子力機構廃炉基盤研究プラットフォームなどの国内関連機関の動向
- ・本研究に参画している研究室及び再委託先の研究の現状とその後の進め方

また、前述した研究課題ごとのグループ会議及び研究課題間のグループ会議、全体会議などの他、事業全体に係わる活動を推進するとともに、取りまとめを行った。

学外においては、前述の通り、NDF廃炉研究開発連携会議や原子力機構廃炉基盤研究プラットフォームなどの国内関連機関の会議体に参加し、必要な情報を事業内の関係者と共有した。

4. 結言

本報告書は、令和3年度に英知事業の1つとして採択された「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」の令和3年度の研究成果について取りまとめたものである。

原子力事故を経験した原子力発電所は、高放射線量率のため、現場への接近性が極端に限られ、事故やその後の地震などの外乱による損傷などの情報収集、さらには、長期を要する廃炉が完了するまでの間、安全性を確保するための保全活動が極めて困難である。また、水没したひび割れ部などにおける経年劣化が進行すると、将来、修復に莫大な費用と時間を要し廃炉工程の遅延を招く恐れが有る。本研究は、そのような原子力発電所における原子炉建屋の長期構造健全性の見通しを得るために必要な評価手法を開発しようとするものである。

3ヵ年計画の初年度である令和3年度は、下記の研究項目について具体的な実施方法を明確にして研究の方向付けを行うとともに、必要な諸準備を行い、一部の試験や活動を行った。

- (1) 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発
- (2) 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発
- (3) 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
- (4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案
- (5) 研究推進

以上、令和3年度の研究は大きな障害・問題も無く、当初計画通り、成果を挙げる事ができた。令和4年度以降も当初計画に従って研究を進めていく。

参考文献

- [I] 原子力災害対策本部，東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議，東京電力(株)福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ，平成 25 年 6 月 27 日，http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130627/130627_01d.pdf (参照日：2022.3.31) .
- [II] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構，東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2015 ～2015 年中長期ロードマップの改訂に向けて～，平成 27 年 4 月 30 日，https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20150617_Technology_strategy_plan.pdf (参照日：2022.3.31) .
- [III] 東北大学，里見ビジョン (SATOMI VISION 2013) ，
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/president/01/president0101/SATOMI_VISION2013.pdf (参照日：2022.3.31) .
- [IV] 東北大学，東北大学ビジョン 2030 最先端の創造、大変革への挑戦，2018 年 11 月，
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/newsimg/tohoku_uni_vision2030.pdf (参照日：2022.3.31) .
- [V] 東北大学，グリーン未来創造機構，<https://www.ggi.tohoku.ac.jp/> (参照日：2022.3.31) .

3.1 節

- [1] 構造システム，SNAP Ver.7，2020，
<https://support.kozo.co.jp/download/index.php?p2=184> (参照日：2022.3.31) .
- [2] 田畑佑，藤田起章，三浦耕太，前田匡樹，加速度センサ記録に基づいた解析モデルの修正による RC 造建物の応答推定手法に関する検討，コンクリート工学年次論文，vol.42，no.2，2020，pp.679-684.
- [3] Hamood, A. et al., Residual Seismic Performance of Damaged Reinforced Concrete Walls, Engineering Structures, vol.243, 2021, pp.1-12.
- [4] 野村顕雄，田中宏志，白阪靖人，福島原子力発電所第 3 号機工事報告，コンクリートジャーナル，日本コンクリート工学協会，vol.12，no.6，1974，pp.72-81.
- [5] 原甲己，西村康志郎，伊山潤，八木尚太郎，福島佳浩，宮崎祥太，吉敷祥一，前田匡樹，非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験，その 8 加速度センサを用いた計測結果，日本建築学会大会学術講演，構造IV，2021，pp.621-622.

3.2 節

- [6] 鶴見剛也，黒野正裕，テラヘルツ電磁波発生技術の動向と課題，電力中央研究所報告書，R02006，2003，36p.

3.3 節

- [7] 清水耕史，西脇智哉，Riccardo Maddalena，田邊匡生，テラヘルツ透過計測および吸水試験による繊維補強セメント系複合材料の自己治癒性能評価，コンクリート工学年次論文集，vol.42，no.1，2020，pp.1276-1281.

- [8] Dash, J. et al., Non-Destructive Inspection of Internal Defects in Concrete Using Continuous Wave 2D Terahertz Imaging System, 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Sep. 2013, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665690.
- [9] Tripathi, S. R. et al., Measurement of Chloride Ion Concentration in Concrete Structures Using Terahertz Time Domain Spectroscopy (THz-TDS), Corros. Sci., vol.62, Sep. 2012, pp.5-10, DOI: 10.1016/j.corsci.2012.05.005.
- [10] T. Tanabe, T. Kanai, K. Kuroo, T. Nishiwaki, Y. Oyama, Non-Contact Terahertz Inspection of Water Content in Concrete of Infrastructure Buildings, World, J. Eng. Tech., vol.6, no.2, 2018, pp.275-281, DOI: 10.4236/wjet.2018.62016.
- [11] 田邊匡生, 小山裕, 見えないものを見るコンクリート構造物と絶縁被覆ケーブルのテラヘルツ透視診断, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), vol.139, no.2, 2019, pp.149-153, DOI: 10.1541/ieejeiss.139.149.
- [12] 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016, 273p.
- [13] 牧野誠太郎, 松島学, 横田優, 電触試験により発生したひび割れ幅が付着性能に及ぼす影響, 土木学会第57回年次学術講演集, V-560, 2002, pp.1119-1120.
- [14] 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也, 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, vol.13, no.2, 1991, pp.139-144.
- [15] 長岡和真, 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴, 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, vol.24, no.2, 2013, pp.29-42.

3.4 節

- [16] 青木孝行, 事故炉廃止措置時におけるリスク管理に関する検討, 日本原子力学会和文論文誌, vol.18, no.3, 2019, pp.119-134.
- [17] 青木孝行, 増子順也, 池田敦生, 根岸孝行, 事故炉廃止措置時における安全機能の信頼性評価とリスク管理に関する検討～閉じ込め機能の信頼性評価を踏まえて～, 日本原子力学会和文論文誌, vol.19, no.2, 2020, pp.85-109.
- [18] 日本保全学会, 原子力保全ハンドブック, I編 原子力基本工学, 7章 保全工学, ERC 出版, 2019.

This is a blank page.

