

インフラ維持管理のための 構造材料技術の開発

土谷 浩一¹

¹物質・材料研究機構 (NIMS)

NIMSは、第1期SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に参画し、腐食促進試験法、腐食モニタリング、耐食鉄筋、高分子系・セメント系補修材料、コンクリート内部の塩分、pH、酸素濃度、腐食抵抗を同時に長期モニタリングできるコンクリート内部環境センシングシステム、箱状のプロブとノートPCだけで鉄筋の腐食程度を判別できる電磁波非破壊検査システム等、インフラ構造物の維持管理に資する材料技術を開発してきた。また、インフラ構造材料に関する研究拠点として、約40機関の企業とアカデミアが参画した異業種・大学研究機関のネットワークであるインフラ構造材料クラスターを構築した。この活動はSIP終了後もNIMSインフラ構造材料パートナーシップとして開発技術の社会実装を目指し活動を継続している。NIMSは今後もインフラ構造物の予防保全に資する材料技術開発の取り組みを進める。

Key Words: *infrastructure maintenance, materials science, preventive maintenance*

1. 概要

図-1は、我が国におけるインフラの老朽化の現状と将来予測を示したものである。建設後50年を超える施設の割合は、今後ますます増え、2022年度の終わりには橋梁の約4割が該当する。さらに10年が経つと、約63%が建設後50年を超える。下水道管きよは、2022年度末には約8%だが、今後急激に増えてくると予想される。その理由は下水道、特に市町村で下水道を多く造った時期が他のインフラよりも遅く2000年度くらい

だからだ。

インフラ老朽化問題は10年以上前から社会問題として顕在化しており、特に笹子トンネル崩落事故以降は社会的関心が非常に高くなった。この問題に対処するために、2014年から2018年に、第1期SIPで「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（プログラムディレクター 藤野陽三 東京大学教授(当時)）という国家プロジェクトが実施された(図-2)。物質・材料研究機構(以下「NIMS」という)は構造材料・劣化機構・補修・補強技術の領域に参画した。

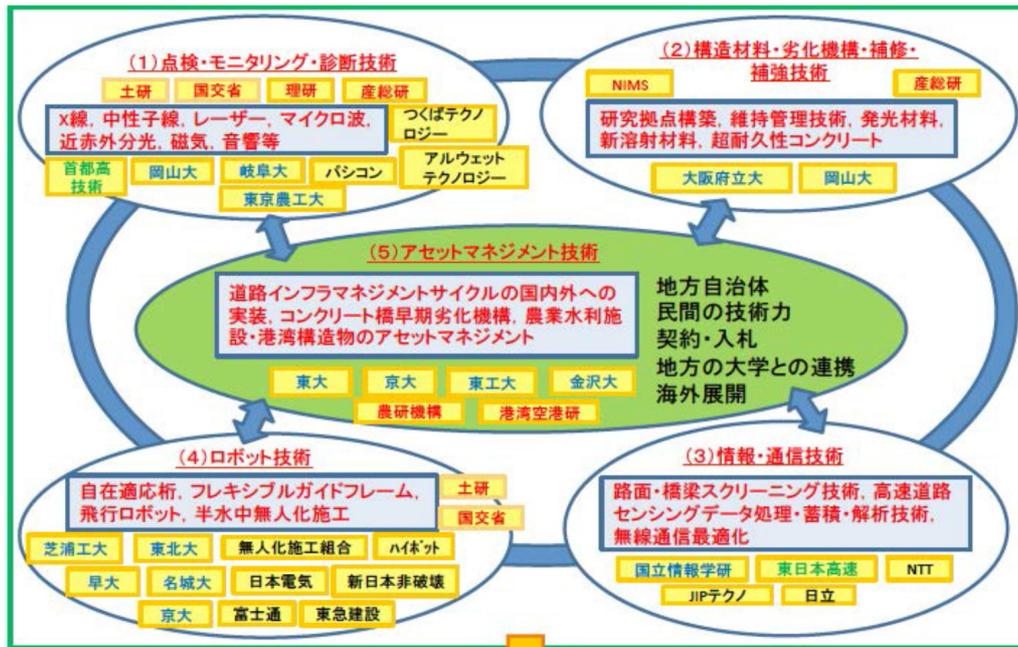
NIMSは、材料に特化した唯一の国立研究開発法人(国研)であり、鉄鋼材料、半導体、電子材料、有機材料、バイオ材料など、あらゆる材料に関する研究を行っている。しかし、コンクリート構造物の劣化に関する研究は新しい挑戦であり、京都大学 宮川豊章教授、東京工業大学 坂井悦郎教授らから様々なご指導を頂きながら、5年間研究を行った。

当時の研究テーマは「鉄筋コンクリート構造物の劣化機構の解明と効率的維持管理技術の開発」である。RC構造物の塩害に着目して、様々な周辺技術や、劣化機構の解明に関する基礎的な研究等を行ってきた。

具体的に開発したのは、腐食促進試験法や腐食モニ

	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 ※約73万橋 (橋長2m以上)	約25%	約39%	約63%
トンネル (約1.1万本)	約20%	約27%	約42%
河川管理施設(水門 など) ※約1万施設	約32%	約42%	約62%
下水道管きよ ※総延長:約47万 km(注)	約4%	約8%	約21%
港湾岸壁 ※約5千施設	約17%	約32%	約58%

図-1 建設後50年を超える施設の割合¹⁾



インフラストラクチャ
道路、鉄道、港湾、空港、農業水利施設、上水道(地下構造物)、河川堤防、のり面・斜面、ダム

※「(1)点検・モニタリング・診断技術」には、この他、国土交通省主管の「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会」と連携して実施している以下の研究実施機関を含む。
研究実施機関：パスコ、大阪市立大、三井住友建設、大成建設、オムロンソーシャルソリューションズ、日本電気、応用地質、中央開発、朝日航洋、国土技術研究センター、国際建設技術協会、モニタリングシステム技術研究組合、五洋建設、川崎地質、東北大、アルファ・プロダクト、NTTアドバンストテクノロジー、東大

図-2 SIP “インフラ維持管理・更新・マネジメント技術”

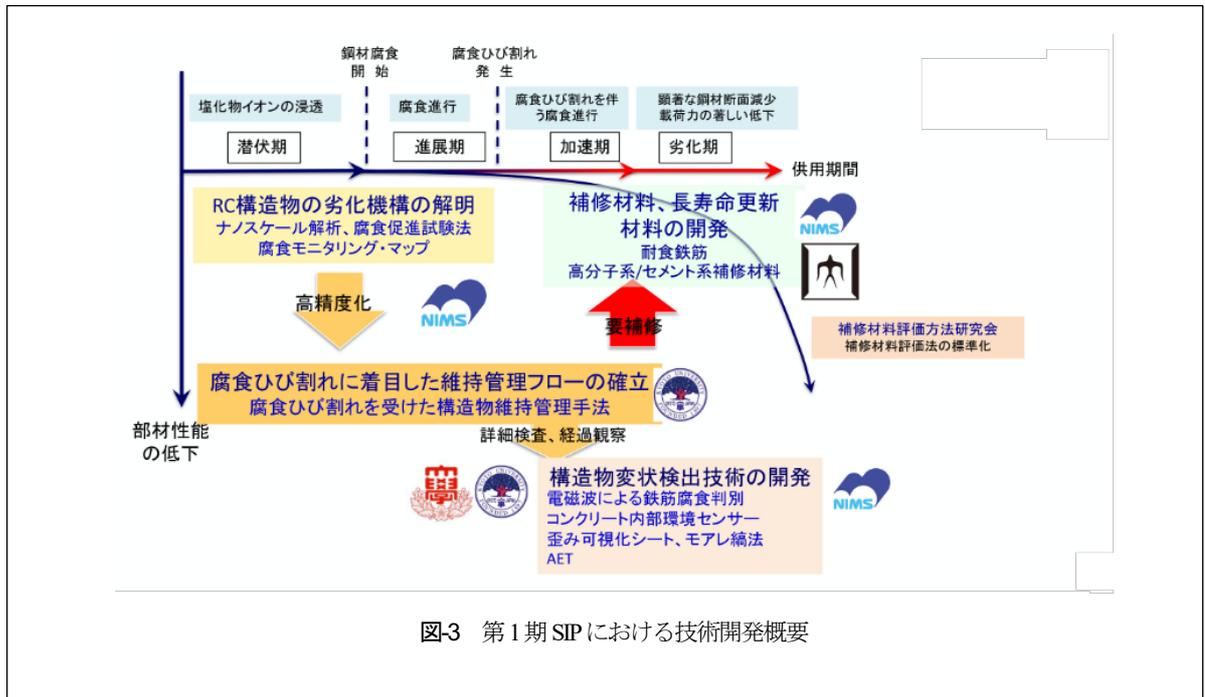


図-3 第1期SIPにおける技術開発概要

タリング、耐食性の高い鉄筋の材料開発、高分子系やセメント系の補修材料開発等である。また、変状検出技術に関して、電磁波による非破壊検査、鉄筋腐食の判別の照合、コンクリートの内部の環境センサ等を開発した。さらに、ひび割れの可視化技術として、歪み可視化シートやモアレ縞法等も開発してきた。京都大

学では、腐食ひび割れに着目した維持管理のフローの確立、Acoustic Emission Tomography の研究も共同で行った。(図-3)。AET 解析に関しては後に日本大学にも参画を頂いた。

SIPにおけるもう一つの課題が、インフラ構造材料の研究拠点を構築することであった。これに関しては約

40 機関の企業、アカデミア（大学・公的研究機関）からなる異業種・産官学ネットワークである”インフラ構造材料クラスター”を構築した。

SIP2 年目からは、個別のテーマに特化した図4のようなワーキンググループ活動に取り組んだ。シーズ技術ごとに興味を持った企業・大学・研究機関が参画して研究を進めた。特に企業には現場実験の場を提供してもらうなどのご協力を頂き、非常に研究が進捗した。

また、SIP 開始前の 2013 年 7 月には、土木研究所と NIMS との間で MOU を締結し、協働してきた。

SIP 終了後の 2018~2021 年においても、土木研究所の先端材料資源研究センター（iMaRRC）と共同で、NIMS が開発したシーズ技術を現場でどう適用するかにフォーカスして共同研究を行った。モアレ縞によるひび割れ幅検出の研究やコンクリート内部の塩化物イオ

ン濃度測定センサの動画は土木研究所のウェブサイト²⁾に掲載されている。

2. SIP における技術開発

以下では SIP で開発した技術とその後の展開等について、センサ関係を中心に紹介する。

(1) コンクリート内部環境センシングシステム

コンクリート内部環境センシングシステムは、構造物に小さな穴を開け、細い針金上のセンサを入れて基準極との電位差を測り、それを解析することでコンクリートの内部の塩分濃度、pH、酸素濃度、腐食抵抗等をモニタリングするシステムである。図5 下は、土木

NIMSシーズと会員ニーズのマッチングに関するアンケート結果に基づき、2016年度から少数メンバーによる開発加速に向けた現場適用案の検討と現場適用実験を展開



図4 インフラ構造材料クラスター：WG活動

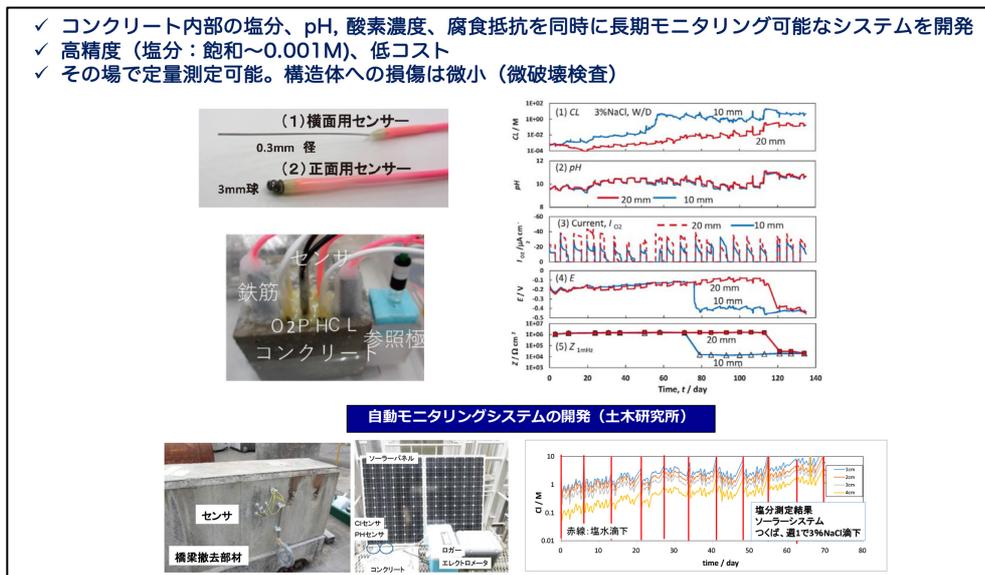


図5 コンクリート内部環境センシングシステム (1)

研究所との連携で、太陽電池をつないで長期のモニタリングを行った結果である。

また、前述のインフラ構造材料クラスターの活動として、NEXCO東日本、JR西日本などに現場を提供していただき、橋梁等のモニタリング実験を行った(図-6上)。

図-6 左下は、北陸地方整備局との共同で、富山湾の新港地区にあるリプレイサブル栈橋にセンサを何機か埋め込んだ実証実験である。これに関しては最近3年間の継続モニタリングが終了し、データの解析を行っている。

塩分センサについては最近、商品化の話が出ている。すでに、株式会社ケミカル工事が製品レベルの塩分センサをつくっている。

従来、コンクリート構造物の中の塩分を測る場合、

通常はコア抜きでサンプルを採取し、実験室で粉々にして塩分を測る。この方法では時間とコストがかかるため、現場で結果が得られる方法が求められている。この内部環境センサーではそれが可能になる。

図-7の写真は最近ケミカル工事(株)によって製品化された塩化物イオンセンサである。右下の先に付いているコイル状のものが、AgとAgClの混ざった電極で、これをコンクリート表面に押しつけ、基準極との電位差を測る。原理的にはこのセンサと基準極、デジタルボルトメータ(電圧計)だけあれば測定が可能である。

コンクリートには、直径5.5mm、深さ3mmの穴をドリルで開ける。その際に気をつけるべきことは表面の水分量で、表面がある程度濡れている必要があるが、濡れすぎていると塩分が薄くなってしまう。そのため、

新潟県親不知海岸道路橋での内部塩分濃度測定 (NEXCO東日本)



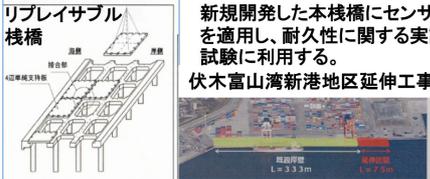
その場で塩分の深さ方向分布を測定可能
橋梁部位ごとの差異を明確化

山陽新幹線高架橋でのモニタリング (JR西日本)



再アルカリ化施工後の追跡調査にpHおよび塩分センサを利用 (H30年1月~)。

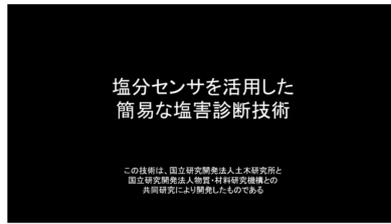
伏木富山湾新港地区リプレイサブル栈橋 (北陸地方整備局)



新規開発した本栈橋にセンサーを適用し、耐久性に関する実証試験に利用する。
伏木富山湾新港地区延伸工事

土木研webへの動画掲載

<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/activity/movie.html>



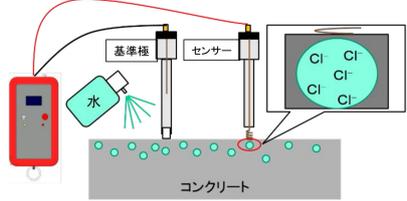
塩分センサを活用した簡易な塩害診断技術

この技術は、国立研究開発法人土木研究所と国立研究開発法人物質・材料研究機構との共同研究により開発したものである

- センサー提供実績200セット以上
- 土木研新技術ショーケース2018で技術紹介、webに動画掲載
- センサーの大量供給に向けて企業への技術移転進行中

図-6 コンクリート内部環境センシングシステム (2)

- ✓ コンクリート中の塩化物イオン量の測定方法の規格であるJIS A1154 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法：電位差滴定法、硝酸銀滴定法など)では、試験室での試料の調整および測定となるため、時間と労力が必要とする。
- ✓ ドリル削孔粉を用いた簡易な測定方法や蛍光X線分析、近赤外分光法も検討されているが、特殊な機器や器具が必要であったり、狭い部での測定が困難であったり、現場で簡易に測定する方法は確立されていない。
- ✓ 現場で即時に塩化物イオン量が推定できる”技術として塩分センサを商品化

- ✓ ドリルで5.5mmφx深さ3mmの穴を削孔
- ✓ センサーを押しつけて基準極との電位差を測定
- ✓ 表面の水分量に注意(浮き水無い状態)

土木学会第77回学術講演会 2022/9/16 CS9-57, VI-850
アップグレードシンポ 2022/10/13~14

図-7 塩分センサの商品化

浮き水のない程度に濡れた状態で測定する。

このセンサに関しては、2022年9月の土木学会・第77回学術講演会、同年10月の日本材料学会・アップグレードシンポジウムでも発表された。

塩分センサの活用方法は様々考えられるが、例えばスクリーニングによる面的調査およびはつり面の残存塩化物イオン量の推定に有用であろう。補修した後、その箇所に塩分が残っていないかを、穴をいくつか開けて測定すればその場で確認できる。また、鉄筋コンクリートのかぶり深さ方向でどれだけ塩化物のイオンが残っているかという推定にも使えるだろう。

(2) 電磁波による鉄筋腐食程度の非破壊検出

次に、電磁波を使った鉄筋腐食程度の非破壊検出(図-8)について紹介する。

システムはノートPCと、17cm×6cm×8.5cmの箱型

プローブのみからなる。プローブの電源はUSBでPCから供給されるので、発電機なども必要がなく、これだけで鉄筋の腐食程度を判別することができる、小型で可搬性に優れたシステムである。

プローブの中には励起コイルと検出コイル、アンプ類が入っている。原理としては、励起コイルから80kHzのAC波を出し、構造物から返ってくる電磁波を検出コイルで測る。鉄筋がもし腐食しているとその表面には錆があるが、錆と鉄筋では電気伝導度や透磁率の性質が異なるため、それを利用して鉄筋の表面に腐食生成物がどのくらいあるかを検出するという手法である。励起コイルと検出コイルの大きさを変えるなどすれば、かぶりの厚さや検出できる範囲を変えることができるため、様々な状況に対応できる。

図-9は、実際に、腐食程度の違ういろいろな鉄筋に対して測定した事例である。左上の「測定に用いた鉄

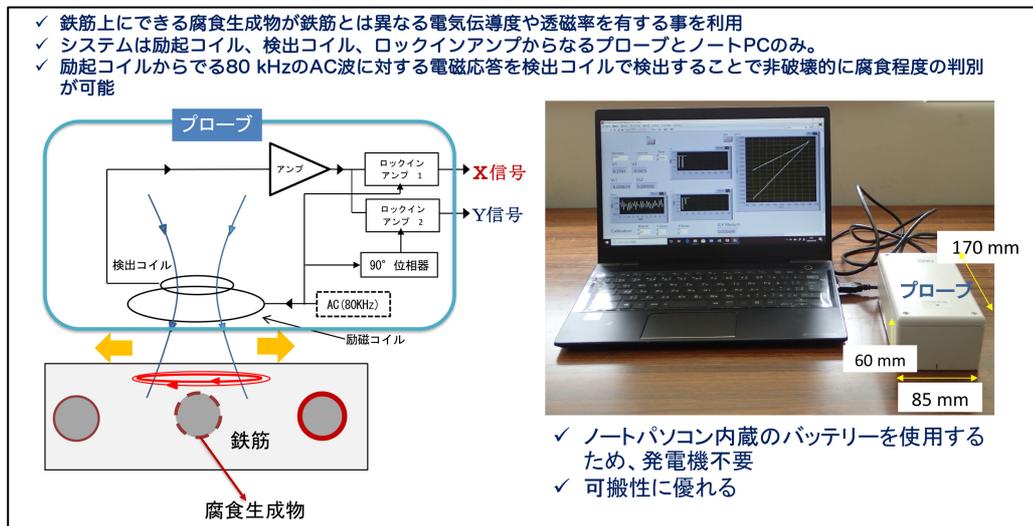


図-8 電磁波による鉄筋腐食程度の非破壊検出 (1)

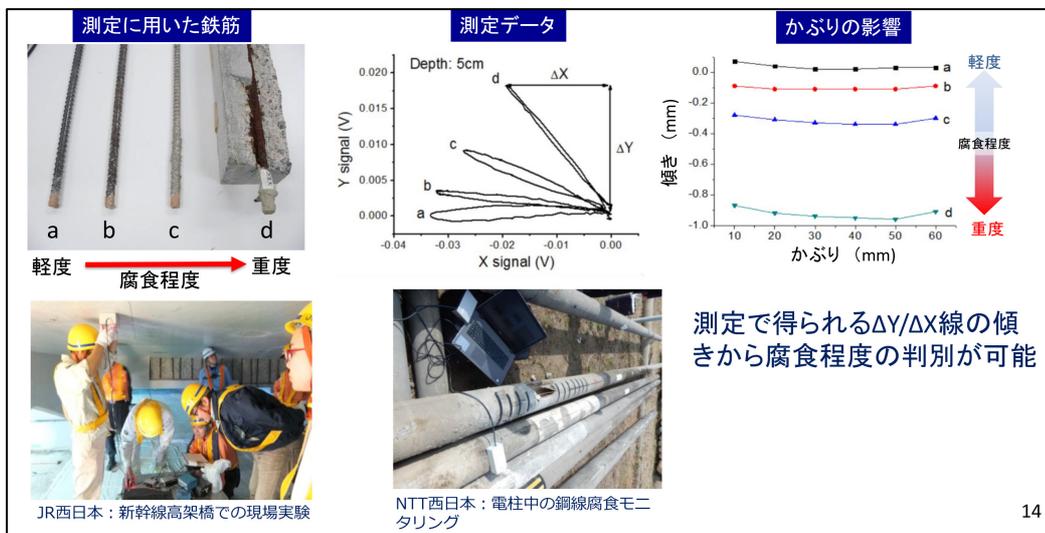


図-9 電磁波による鉄筋腐食程度の非破壊検出 (2)

筋」を含む構造物表面をプローブでスキャンすると、「測定データ」のようなループを描いたデータとなる。測定データの X が導電率を、Y が磁性の影響を強く受ける成分に対応し、この曲線の傾きから腐食の程度が分かる。腐食の程度が軽い場合には傾きが小さくなるが、腐食が進むと傾きが大きくなる。この図はかぶりに見立てたアクリル板の厚さをを 1 cm から 6 cm まで変えて測定したデータであるが、このように 6cm のかぶりであっても鉄筋の腐食の程度を簡便に判断することができる。

図-9 左下の写真は、JR 西日本の新幹線の高架橋現場で実証実験を行っている様子、その右は、NTT 西日本との協力で電柱の中の鋼線腐食をモニタリングしている実証実験の様子である。

また、コンクリート構造物以外に転用された事例もある(図-10)。本州四国連絡橋 3 路線のメンテナンス

に斜張橋のケーブルの腐食検出への応用に関する共同研究を行った。

斜張橋やエクストラード橋のケーブルは、長期間使っていると腐食が生じる可能性がある。ただ、ケーブルにはポリエチレンの被覆があることが多く、その中に熔融亜鉛メッキをした鋼線が何本か入っているため、内部を調べることは難しい。被覆を開けるとそこから水が入って腐食するという問題があるからだ。そのため、大規模な損傷を防ぐためにできるだけ非破壊で危険箇所を検知し、よりの確に被覆下のケーブルの変状を点検できる技術が必要なのである。

図-11 は斜張橋ケーブル模型試験体を用いたラボ実験である。実際の斜張橋に使われているケーブルとほぼ同じで、被覆の中に鋼線が約 200 本入っているが、1ヶ所に 5mm 程度の軽微な腐食がある。

そのケーブルの上面・側面・下面を測定した結果が、

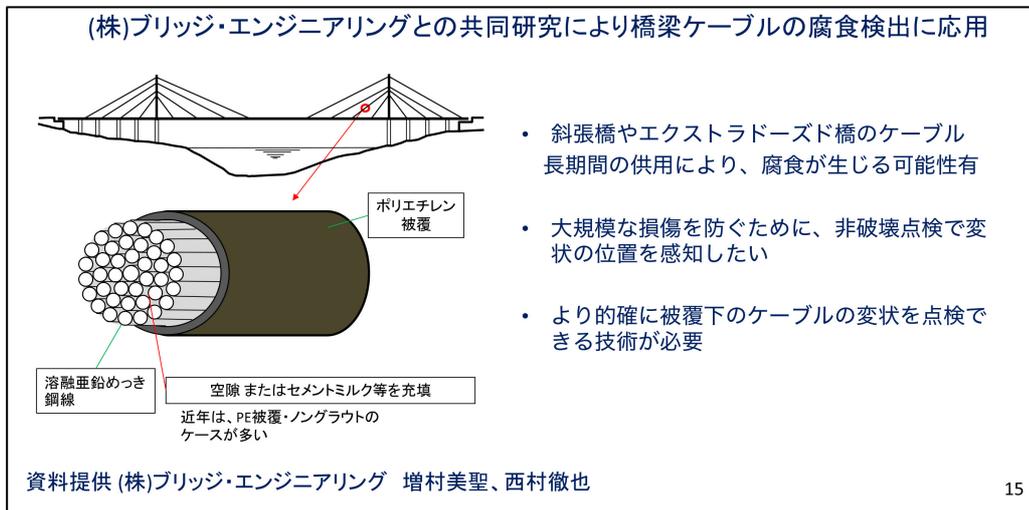


図-10 斜張橋ケーブル腐食検出への応用

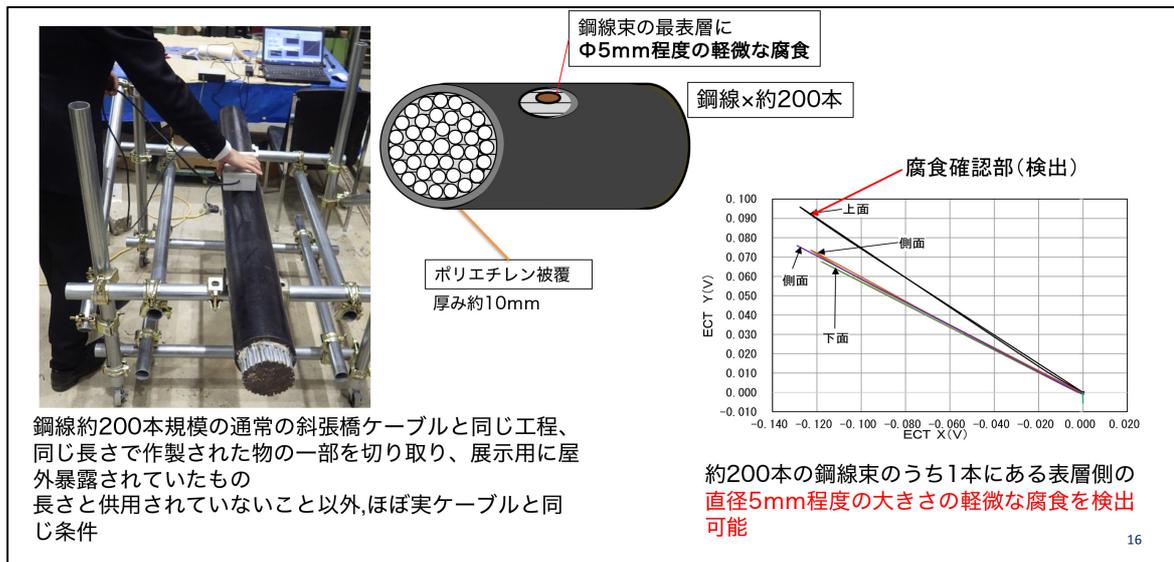


図-11 斜張橋ケーブル模型試験体を用いたラボ実験

をしている株式会社ブリッジ・エンジニアリングと共 図-11 の右グラフである。すると、側面・下面に比べて、

腐食のある上面は傾きが急になっている。このように、非常に軽微な腐食であっても、差異を検出できた。

さらに、鉄筋の何層目まで検出できるかという実験も行った。すると、約 200 本規模のケーブルにおいては、重度の腐食であれば 3 層目まで検出可能であることが分かった (図-12)。

株式会社ブリッジ・エンジニアリングでは北海道から沖縄まで、歩道があり、その歩道から手が届く位置にケーブルがある橋梁約 30 橋について、本装置で測定を行った。

図-13 は、供用 40 年のある橋梁の測定結果である。腐食のない場合はケーブルの上面でも下面でも、側面(東側)でもほぼ同じ傾きだが、腐食がある場合は上面の傾きが違うというデータが得られている。この橋梁は腐食している可能性が高いと思われる。ただし、

実際のケーブルの中を開けて調べたわけではない。

(3) 腐食環境モニタリング

腐食の環境モニタリングシステムも開発している。これには、腐食環境センサと言われる、金属の丸い板を樹脂に埋めたような簡単な構造のセンサを用いる。このセンサに流れる腐食電量を測ると、どこにいつ雨が降り、そこに水滴が付いて腐食がどう進むかといったことが分かる。

すでにこれまで NEXCO 中日本が、トンネル内の様々な標示物や掲示版などトンネルの中にぶら下がっているものに付けて、どのくらいの腐食が進むかを測定した。また、わりと雪の積もる北海道石狩市でも、腐食環境のモニタリングをやっている。前述したリプレイサブル栈橋にもこのセンサが入っていて 3 年間の

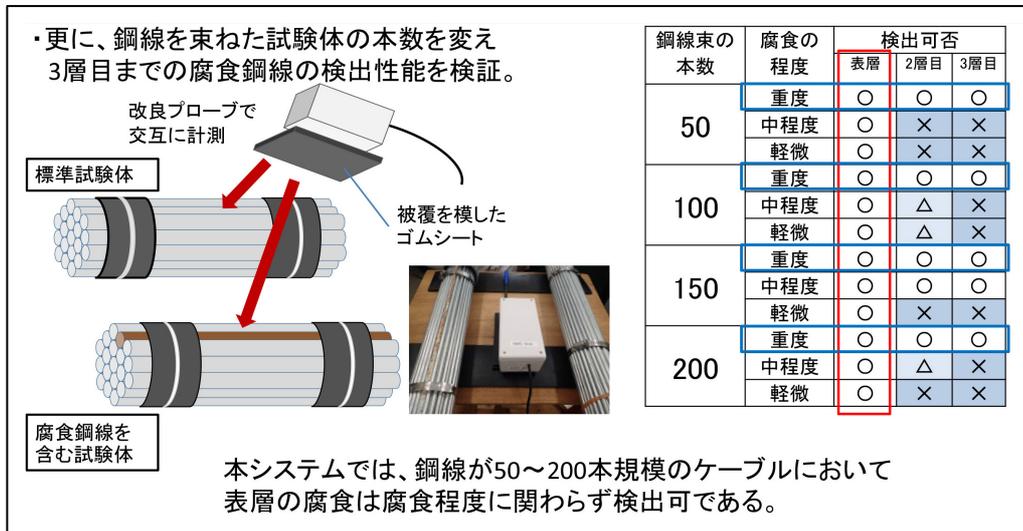


図-12 鋼線腐食検出性能の検証

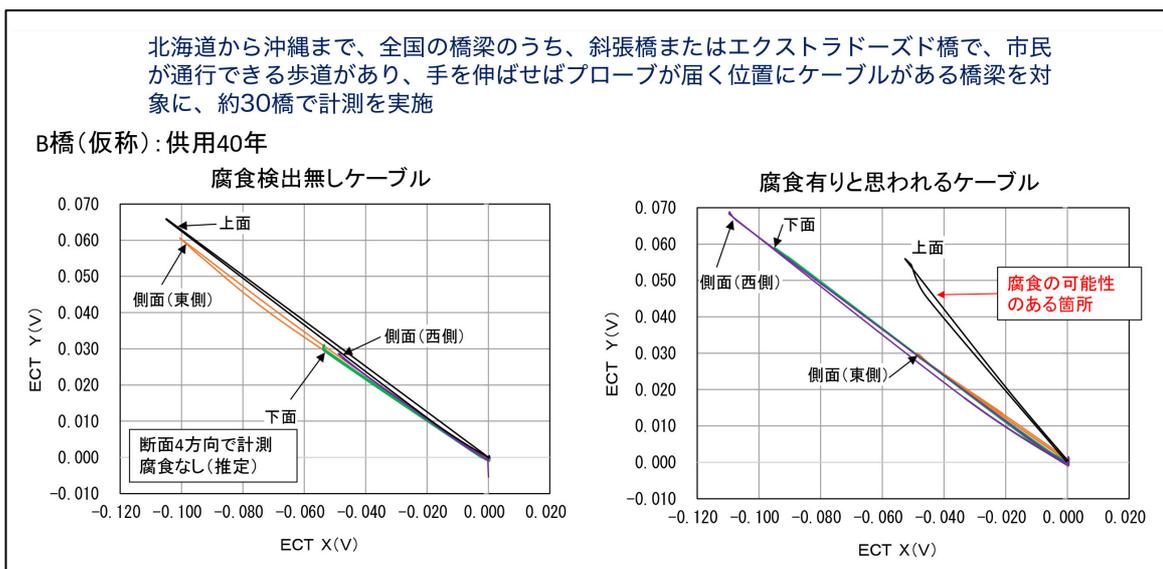


図-13 実橋調査

測定を続けた。

(4) 腐食予測マップ

片山らは機械学習を活用して腐食予測マップを作る研究を行った³⁾。2013年から2014年の腐食量の実測データと、農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）が公開している1 kmメッシュという非常に細かい気象のデータのマップを使い、機械学習で腐食予測マップを構築した。

4 地点で機械学習の予測結果と実際の腐食の状況と比べると、沿岸部では非常に予測量が良好である一方、内陸部では少し過大評価になった。また、台風が来るとその影響を受けるなどの問題があるものの、かなり高い精度で場所ごとの腐食の予測ができることを示した。この詳細については土木学会の論文集で発表されている。

(5) 付着生物模倣型高分子系補修材料

貝が船底や岩に張り付くことがある。そのように水中でも硬化する、貝の出す接着性タンパク質をヒントに、接着剤を開発した。それが、付着生物模倣型高分子系補修材料の開発である。水に濡れた状況でもプライマー（下塗り）がきれいにできるという特徴がある。この材料はすでに企業に技術移転されている。

(6) 耐食鉄筋

高耐食性を示し、JIS規格の機械的特性を満たす耐食鉄筋も開発した。開発にあたっては、沖縄でコンクリートに模擬鉄筋を入れ、2年間暴露試験をした。普通の炭素鋼の鉄筋材料ではひどく錆びたが、耐食鉄筋は全然錆びなかった。曲げ加工、溶接、圧接、各種暴露試験も行い、溶接や圧接により通常の炭素鋼鉄筋と接

合が可能であり、補修用としても利用可能であることが分かった。今後、企業との連携による社会実装が期待される。

3. 予防保全に向けた NIMS の取り組み

(1) 制震材料

SIP とは別に NIMS が中心になって開発した地震の振動を吸収し、建物への損傷を最小にするための制震材料について紹介する。

2011年の東日本大震災では長周期地震動が非常に話題になった。震源地は宮城県沖だったにもかかわらず、大阪や九州などの遠方にある高層ビルでは非常に振幅の大きいゆっくりとした揺れが長時間観測された。これはビルの構造上、非常に危険である。これに対応するために長周期地震動の振動を吸収する鉄系合金を用いた制震ダンパーを開発した。これは淡路マテリアル、竹中工務店と NIMS の共同研究の成果である。2014年にはこの合金を用いた剪断パネル型制震ダンパー16基が、名古屋駅のすぐ近くにある JP タワー名古屋という超高層ビルの低層階に設置された。

さらに最近、愛知県のセントレア空港にある Aichi Sky Expo（愛知県国際展示場）に、溶接性を改善した第2世代合金を使ったブレース型のダンパーが実装された⁴⁾。今後は橋梁などの土木構造物への適用も期待される。

(2) NIMS インフラ構造材料パートナーシップ

前述のインフラ構造材料クラスターの活動は、第1期 SIP が終わったことで一旦終了したが、「NIMS インフラ構造材料パートナーシップ」（図-14）と名前を変えて現在も活動を継続している。目的は、SIP で開発し



図-14 NIMS インフラ構造材料パートナーシップ

たものを含む NIMS で開発したインフラ構造材料技術を実装につなげるための異業種・異分野連携の議論の場である。すでに企業、大学、公的研究機関に参画していただき、様々な活動をしている

現在の会員は、企業が 16 社、そのほか特別会員とアカデミア会員が参画している。企業からは 1 社 10 万円/年の会費をいただいて活動費に充てているが大学や公的研究機関の方は無料で参画できる。

新型コロナウイルス感染拡大のため、ここ 2 年ほどはもっぱらオンラインでの研究会となっているが、1 回あたりおよそ 70~80 名の方に参加していただいている。また、インフラ構造材料サマースクールなども行っている。興味のある方はウェブサイト⁹⁾をご覧ください。

SIP インフラ構造材料クラスターラボ (図-15) には、特に SIP のプロジェクトで導入した、インフラ構造材料の研究に適した様々な分析装置等を導入している。それらはパートナーシップに参画すると使えるようになる。例えば、水分を含んだ材料も観察可能な環境 SEM や、微量な物質の質量分析ができる機器、腐食生

成物の解析やセメントの解析に役立つラマン顕微鏡も導入している。かなり高機能な装置群があるので、是非、活用して頂きたい。

(3) まとめ：事後保全から予防保全へ

今後は予防保全が重要である。予防保全をすることによって、インフラ維持管理コストが事後保全の半分以下に抑えられるという国土交通省の予測がある (図-16)。それを実現するためには、おそらく変状検出のためのセンサ類が重要だろう。また信頼性の高いデータベースを AI などと組み合わせる診断をする技術の開発が急務である。さらに難しいのは診断の部分である。センサで得られるデータ群から構造物の健全性をどのように診断するかは非常に難しいだろうが、その部分に AI を活用すればかなりよい技術となるのではないかと。また、「ここが危ない」と分かたら補修または更新しなければならないが、その時には従来とは異なる新材料を用いる事も必要である。前述の耐食鉄筋のような新材料を適用すれば構造物の延命に非常に有効であり、維持管理コストの低減につながる。この様な新



図 15 SIP インフラ構造材料クラスターラボ

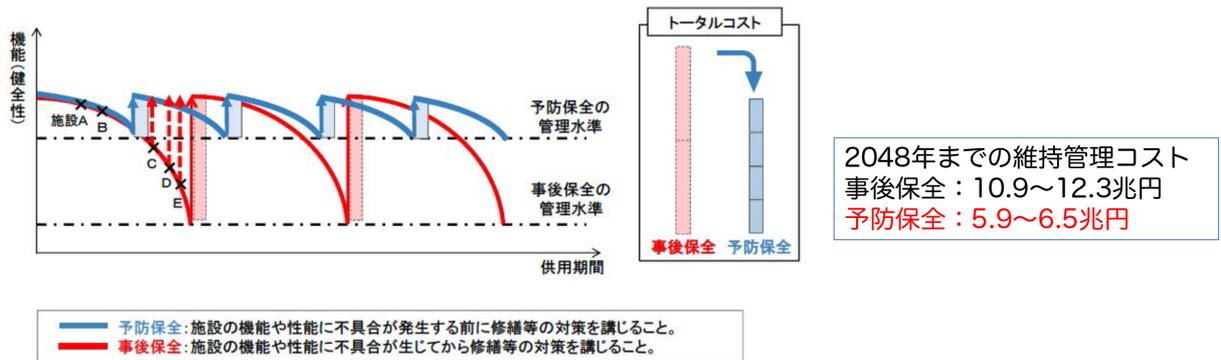


図-16 事後保全と予防保全のメンテナンスサイクル⁹⁾

しい材料技術を積極的に発信するために、今後もインフラ構造材料パートナーシップの活動に力を入れたいと考えている。

REFERENCES

- 1) 国土交通省インフラメンテナンス情報ウェブサイト：https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
- 2) 国立研究開発法人土木研究所先端材料資源研究センターウェブサイト：
<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/activity/movie.html>
- 3) 松波 成行, 柳生 進二郎, 篠原 正, 片山 英樹, 須藤 仁, 服部 康男, 平口 博丸, 土木学会論文集 1 (構造・地震工学), Vol. 75, No. 2, 141-160, 2019.
- 4) NIMS プレスリリース
<https://www.nims.go.jp/news/press/2021/03/202103100.html>
- 5) NIMS インフラ構造材料パートナーシップウェブサイト：<https://nims-inframats.com/>
- 6) 国土交通省「予防保全によるメンテナンスへの転換について」：<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001375673.pdf>

(Received August 31, 2022)
(Accepted October 31, 2022)

Development of material technology for infrastructure maintenance

Koichi TSUCHIYA

National Institute for Materials Science (NIMS) joined Infrastructure Maintenance, Renovation and Management of Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP) and developed corrosion acceleration testing method, corrosion monitoring, new materials for corrosion-resistant rebar, and polymer or cement repair materials. In addition, sensing system for concrete interior environment and non-destructive inspection method for rebar corrosion. NIMS is continuously working toward establishment of preventive maintenance.