

NIMS now 6

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No.

「びび」

大研究

人工^A知能^Iから
細菌まで

知っているようで知らない さびの正体

さびは「神が人類に与えた試練」

地球上に存在する元素の中で、酸素、ケイ素、アルミニウムに次いで4番目に多い「鉄」。金属材料の中で最も安価で、しかも、合金にすることでさまざまな特性を引きだせる鉄は、人類が最も深く親しんできた金属と言っていいだろう。

だが、鉄には大きな弱点がある。それは「さびる」ということだ。日本におけるさび研究の第一人者である篠原正はこう語る。「金属の中で鉄だけが、酸性でもアルカリ性でも中性でもさびる性質を持っています。私の大学時代の恩師の教授は、よく冗談交じりにこう言っていました。『我々が最も多く利用している鉄がここまでさびやすいのは、神が人類に与えた試練だ』と」

もともと鉄は、自然界では酸素と結びつき、「鉄鉱石」として存在する。ここから酸素を引きはがし、製鉄する。それによって鉄は優れた強度を獲得するのだが、化学的に安定な状態から酸素を無理やり奪われるのだから、元に戻ろうとする力が働くの

も無理はない。鉄が再び酸素と結合したものが、いわゆる「さび」である。

一般的なさびは主に4種類で、組成や結晶構造によって色合いもさまざま（p3写真）。実は、普段私たちが目にするさびは、これらが混ざり合ったものだ。

さびが好む条件

鉄はさびると、厚さが薄くなったり孔があいたりしてもろくなる。こうした状態は「腐食」と呼ばれ、さまざまな対策が練られてきた。近年、特に問題視されているのが、約50年前の高度経済成長期に大量につくられた橋梁やトンネル、道路、水道管などインフラの老朽化だ。構造材料として多用されている鉄骨や鉄筋がさびにより腐食し、強度の低下を引き起こしているのである。

「老朽化したインフラに効果的なさび対策を施すためには『環境と腐食との相関関係』を解明することが不可欠です。鉄は、その使用方法や周囲の環境によって、できるさびの種類や腐食のスピードが大きく異

なるからです」と篠原は語る。

腐食の引き金を引くのは「水分」だ。水が鉄表面につくと、鉄は電子を奪われて鉄イオンとなり、水中に溶けだす。この鉄イオンが水中で化学反応し、さびができる。加えて、「塩分」も腐食に大きな影響を及ぼす。塩分は大気中から水分を取りこみ、鉄に供給する役割を果たしてしまう。これにpHの値、温度などの条件が複雑に絡み合って、腐食の度合いが決まる。

「特に日本は、四方を海に囲まれ夏は高温多湿で、水分量と塩分量が多いため、鉄にとって極めて過酷な環境なのです」と篠原は言う。

鉄の使用方法ごとの課題とNIMSの最新研究

環境が腐食の度合いを左右するとなれば、当然、鉄の使用方法ごとに対策を講じなければならない。たとえば、橋梁などの鉄骨は大気に直接さらされるので、さびやすい。そのため、鉄骨の表面に亜鉛めっき

を施したり、塗料を塗ったりして、腐食の進行を防いでいる。しかし、めっき自体が腐食してしまったり、塗料が経年劣化で剥がれてしまったりと、対策は決して万全とは言えない。依然として、大気中の鉄の腐食は私たちの安全を脅かし続けている。

この問題への対策を考える上で“百聞は一見にしかず”、実際の腐食を現場で観察するのが一番だ。「実際、NIMSは約20年にわたり『大気暴露試験』に取り組んできました。これは、屋外に鉄の試験板を設置し、周囲の環境と腐食との関係を調べる試験です（p9参照）。これまで設置してきた場所は、北は北海道から南は宮古島まで、全国累計20箇所。鉄そのものから、めっきを施したもので、さまざまな材料を試験してきました」

その成果は世界に公開しており、国内のみならず、自然環境の似たアジアの国々においても対策の指針とされている。

「さらに今、NIMSでは大気暴露試験の“発展版”ともいえる研究に着手しています。実地試験で得た腐食データと、日本各

地の気象データを機械学習にかけ、腐食の進行を予測する人工知能の開発が進行中です（p6参照）」

また、鉄の代表的な使用方法のひとつに「鉄筋コンクリート」がある。鉄筋コンクリートは、外側を覆うコンクリートはほぼ劣化しないものの、内部の鉄筋の腐食による破断リスクを抱えている。

「内部の鉄筋の腐食が進むと、鉄筋の体積は2～5倍にも膨張し、コンクリートのひび割れを招きます。そして、ひび割れが生じると、そこから急速に水分や塩分が入りこみ、腐食が一気に加速してしまうのです。ただし、大気中とは異なり、コンクリートにひび割れを生じさせるほどの膨張は数十年かけてゆっくり起こります。実地試験の結果を待っていたのでは、今ある建造物への対策が手遅れになってしまうでしょう。そのため、NIMSでは『腐食加速試験』と呼ばれる評価手法の開発にも取り組んでいます」と篠原。

腐食加速試験とは、さびの化学反応を意図的に加速させ、鉄筋コンクリートの劣

化を実際よりも早く再現する手法のこと。NIMSでは、既存の試験よりも高速かつ正確に腐食を再現できる手法の開発に成功（p10参照）。今後のインフラ改修工事の優先順位を判断するのに役立つとして、期待を集めている。

加えて、鉄がさびる原因のうち、一般的にあまり知られていないのが「細菌」の存在だ。鉄をエネルギー源とする細菌が、海中を中心に生息していることが分かっている。つまり、島と島をつなぐ橋や、石油パイプラインといった海水に触れる鉄は、常に脅威にさらされているのだ。NIMSでは、この細菌が鉄をさびさせるメカニズムを詳細に解析。細菌によるさび対策に窮する現状を打破する成果が生まれている（p13参照）。

「得られた知見は、今後新しい建造物をつくる際の指針になります。今と未来を守る研究にこれからも尽力していきます」（文・山田久美）



篠原 正
Tadashi Shinohara

構造材料研究拠点 解析・評価分野
腐食特性グループ NIMS特別研究員



取材協力

片山 英樹

Hideki Katayama

構造材料研究拠点 解析・評価分野
分野長 / 腐食特性グループ グループリーダー

Research 1

人工知能で さびによる腐食を読む

鉄は環境の影響を複雑に受けて腐食するため、その進行の予測は極めて難しい。

実地試験を行えば良いが、候補地は膨大で、現実的ではない。

そんな中、気象データに基づきAIでさびによる腐食の進行を予測する

最先端の腐食予測技術が、成果を上げはじめている。

72万ある橋梁の どこから修繕すべきか

日本には現在、72万を超える橋梁がある。その半数が建設から50年以上経ち、一斉に修繕・再建築の時期を迎えている。とはいうものの橋の状態には環境が大きく影響するため、必ずしも使用年数と相関しない。修繕か再建築かを決めるには、それぞれの橋の状態を把握しなければならない。そのために点検作業が欠かせないが、そもそも点検できる技術者がいないという問題を抱える自治体もあり、十分に実施されているとは言い難い。また、NIMSでは「大気暴露試験 (p9参照)」という腐食の実地試験を行ってきたが、日本中すべての場所で行うのは困難だ。そこで「インフラの腐食や損傷の度合いと進行を予測し、点検業務を支援するツール」が求められている。

機械学習の“教師”に 農業用の気象データを活用

腐食特性グループの片山英樹グループリーダーは、腐食を促進させる原因を突きとめ、これを抑制しようと研究してきた。片山は「腐食と環境の相関関係は単純ではない」という。

「橋の材料である鉄鋼は、水と酸素があるとさびて腐食するため、雨や湿度が影響します。また、海からの塩分が付着したら腐食は促進されます。さらに温度、紫外線などの影響も考慮しなくてはなりません」

そこで片山が目にしたのが「機械学習」

だ。機械学習は大量のデータをもとに、複雑な関係の中に潜む法則を見出す手法として注目されている。片山はこれを用いて、知りたい地点の環境データを入力すれば腐食の進行予測ができる「腐食予測モデル」、すなわちAIをつくろうと考えた。ただし、これは前例のない挑戦的な取り組みだ。腐食予測モデルをつくるには、まず教師データとなる「腐食と環境の組み合わせデータ」を集めなければならない。

「NIMSはこれまで大気暴露試験によって、腐食と環境の組み合わせデータを大量に収集してきました。ですが、データ収集の間隔は短くて半年ごと。その間の環境因子が腐食に及ぼす影響は全体的に平均化されてしまうため、相関が見えにくいという問題があります。機械学習の教師データとして使うには、短期間ごとに細かく収集されたデータであるほど良いのです。幸いにも、私のグループには「e-ASIA」というプロジェクトにおいて国内6地点で1か月ごと、1年間収集した炭素鋼の腐食データがありました。大気暴露試験はNIMS以外でも複数の機関で行われていますが、これだけ短期間ごとに記録したデータの存在は稀で、今回の腐食予測モデルづくりに活用できると考えました」

プロジェクトで取得した腐食データの数は71点。これに、試験を行った6地点の環境データがそろえば機械学習にかけられるのだが、残念ながらこのプロジェクトではごく限られた環境因子しか調べていなかった。そこで片山が目つけたのが、農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）の「メッシュ農業気象データシステム」だ。

農研機構が独自に開発したアルゴリズムによって、日本全国の気象台間の気象データを1km四方ごとに埋めている。緯度と経度を設定すれば、その地点における過去から少し未来の気象データまで入手可能だ。そもそも、農家が収穫や種まきの時期を決めるためのもので、14種類の気象因子を提供している。片山はその中から、平均気温や降雨量など腐食に関係しそうな9種類の気象因子を選び、環境の教師データとして用いることにした。

ただし、農研機構のデータには腐食にとって重要な因子である「塩分量」が含まれていない。この点は「塩分量は風速の2乗に比例する」という過去の知見に基づき計算で代用。こうして71点の「腐食と環境のデータセット」がそろい、いよいよ機械学習にかけられる準備が整った。

予測精度を左右する アルゴリズム

「機械学習にはさまざまな学習法があります。ですが、多くの学習法において予測値を導く課程は“ブラックボックス”です。たとえば精度の高い予測値を得られても、構築したモデルに“平均最高気温が低いほど腐食が進みやすい”といった、腐食研究者としての経験からは想像しにくい相関が含まれていた場合、そのモデルの信頼性が失われることになってしまいます」

そこで片山は、いくつかの学習法について検証を行った。まず、用意した71点のデータセットのうち90%（63個）を教師データとして機械学習にかけ、相関モデ



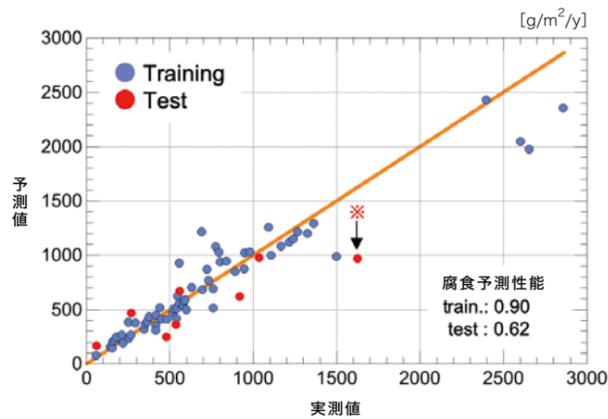


図1 「ランダムフォレスト法」により作成した腐食予想モデル
71点の腐食・環境データセットの90% (63個・青)を教師データとして機械学習にかけ、腐食と環境の相関モデルを作成(黄線)。残る10% (8個・赤)のデータセットがモデルに合うかどうかを検証した。*印で示した1点は、台風の影響があったため大きく予測値を外れ腐食予測性能は0.62となったが、その1点を除くと0.8以上という結果が得られた。

ルを作成。次に、残る10% (8個)の実地データがモデルで導き出した予測値と合致するかどうかを検証していった。そうした中、最も優れた結果を得られたのが「ランダムフォレスト」と呼ばれる学習法だったという。

「この学習法は『決定木』という分析手法がベースになっています。決定木とは、順番に与えられる条件をひとつずつ選びながら結論に向かっていく仕組みで、身近なところでは雑誌などで自分のタイプ診断をする際に使われています。今回のケースでは“気温が何度以上だと腐食する、しない”と条件づけを進めていくイメージです。ただ、これには最初に出てきた条件が支配的になってしまうという欠点があります。そこで、さらに『アンサンブル学習』という手法を組み合わせました。これはいわゆる“多数決”の原理で、設問の順序を入れかえたモデルを何パターンもつくり、その推定精度を比較させながら、どの因子がより重要かという重みづけを行っていくことができます。こうした一連の学習法が『ランダムフォレスト』です」

こうして完成した腐食予測モデルのAIを使ってみた結果、検証データによる腐食予測性能は0.8以上になることが確認された(図1)。

銚子市での検証に手ごたえ

こうしてできたAIは、実環境において本当に腐食を予測できるのだろうか。片山は銚子市役所の協力を得て検証を行った。まずは、開発したAIに銚子市の気象デー

タを入れこみ「腐食マップ」を作成(図2)。銚子大橋など市内4箇所における腐食の実地データと、マップの腐食予測値とを比較した結果、沿岸部では高い予測精度が得られた。一方、データが少なかった内陸部では、腐食予測値が実地データの2倍ほどと過大評価していた。とはいえ、銚子市側からは「これまで点検作業をしてきた自分たちの感覚と近い」と評価され、手ごたえを感じているという。

と同時に「まだ構築した腐食予測モデルの有用性を示した段階」と片山は気を引き締める。今回、71点と実地データが少ない中でもモデルは完成したものの、通常AIでの診断に信頼性を持たせるために必要なデータは1000点以上とも言われる。今後さらに実地データを増やすとともに、現在は計算で代用している塩分量を実地

データに置きかえることができれば、予測精度が低い地域の精度も次第に高まっていくだろう。実際に片山は、銚子市の橋梁において塩分量を定期的に計測するなど、実地データの収集を着実に進めている。

「腐食研究に機械学習を取り入れるというのは先駆的な取り組みです。インフラの腐食の問題は早晩どの国でも起こることですから、NIMSがこの分野をリードしていけたらと思っています。これからインフラを整備するアジアの国には、日本の高い建設技術に加え、こういう安全やメンテナンスに関する情報をセットにして提供することも私たちの責任ではないでしょうか」と片山。日本発のAIによる腐食予測が、世界中のインフラの安全を守っていく。

(文・池田亜希子/サイテック・コミュニケーションズ)

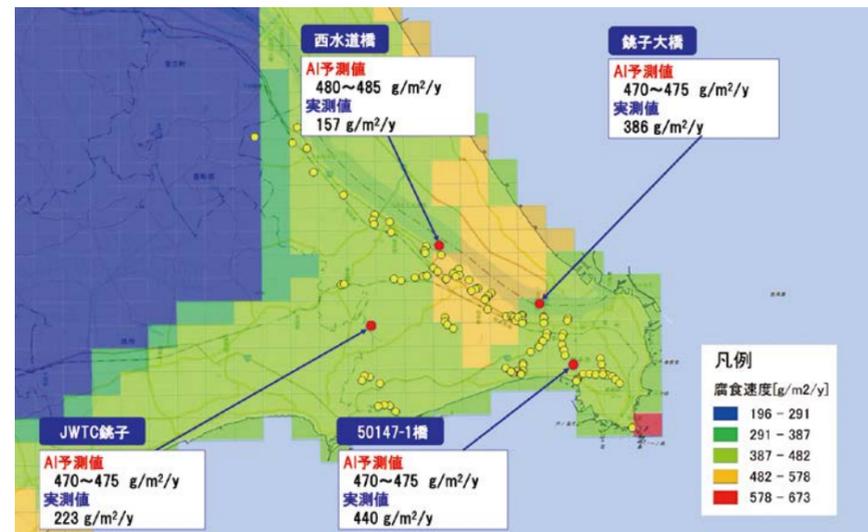


図2 銚子市の「腐食マップ」
腐食モデルのAIに環境データを入力し、1kmメッシュで腐食量を予測した。市内4カ所の実地データと予測値を比較したところ、沿岸部のデータほど予測精度が高かった。

COLUMN

NIMSの「大気暴露試験」

環境によって変わる金属材料の腐食しやすさ。これを予測するための国際標準規格がある*1。世界中で集められた腐食データと環境因子データ(たとえば温度・湿度・汚染物質など)をもとに材料の腐食度を定めているのだが、この規格による予測よりも、日本での腐食の実態の方がより深刻であることが分かっている。なぜなら、データを収集する試験はヨーロッパで行われることがほとんど。日本や東南アジアのような四方を海で囲まれた国々では、材料はさらに厳しい環境に置かれており、規格による予測の範囲を超えて腐食が進んでしまうからだ。日本のインフラを守っていくには、独自の調査が必

須といえる。そこで、NIMSで約二十年にわたり取り組んでいるのが「大気暴露試験」だ。屋外に金属の試験板(表紙写真)を並べ、大気中で環境因子の影響を受け腐食していく材料の変化を、時間を追って記録する試験である。NIMSでは構内(つくば市)をはじめ、現在、全国10箇所に試験架台を設置。その変化を追い続けてきた。試験期間は、ひとつの材料につき最短でも6ヶ月、ときには10年、20年と長期に及ぶ。その間、人手による地道な維持管理が欠かせない。試験板を設置する角度や方角といった条件はJIS規格*2で定められており、強風や大雨などによって変わ

てしまうことがないように、設置状況を常にチェック。また、試験中の材料は一種類につき複数枚設置しており、1年ごとに数枚ずつ取り外し、腐食量の変化を記録していく。

一定時間の暴露試験を終えた試験板は、洗浄し、さびを除去する。試験前後での重さを比較し、腐食度合いを定量化する。これに試験場で計測した環境因子データを合わせ、NIMSは“日本独自の腐食データベース”を築いてきた。これらはオンライン上で「腐食データシート」として発表、世界中に公開している*3。利用者登録をすれば誰でも閲覧が可能だ。

現在NIMSでは、環境データをもとにAIで腐食を予測するという挑戦的な研究に取り組んでいる(p6参照)。しかしその手法も、環境と腐食の実地データがあってこそ成り立つ。予測精度をより一層高めていくためにも、そして次々開発される新材料の基礎データを得るためにも、大気暴露試験が重要であることに変わりはない。日本のみならず、アジアの国々からも高い信頼を集めているNIMSの実地試験。これからも安心・安全に貢献していく。



NIMS 構内に設けられた試験場。

大気暴露試験の成果をまとめた「腐食データシート」。オンラインで閲覧可能だ。

*1 ISO 9223
*2 日本工業規格(JIS) Z 2381(大気暴露試験方法通則)
*3 NIMS腐食データシート
<https://smds.nims.go.jp/corrosion/>



Research 2

コンクリートの中で鉄筋を蝕むさびをいち早く知る

鉄筋コンクリートの劣化の主な原因である、内部の鉄筋のさび。

その進行は非常に遅い上、見た目には診断が難しい。

何十年もかけて気付かないうちに腐食が進行すれば、ある日突然の破断が起こりかねない。

では、人知れず進む腐食をどう知るか。

今、実際よりはるかに短時間で正確に腐食を再現できる

新開発の「腐食加速試験」への期待が高まっている。

鉄筋コンクリートの弱点

コンクリートは圧縮には強いが、引張りに弱い。鉄は引張りには強いが、圧縮には弱い。この2つの材料を組み合わせることで両方の弱点を補った「鉄筋コンクリート」は、建造物を強固に支える材料として重用されている。

しかし近年、橋梁やトンネルの老朽化対策が急がれる中であって、鉄筋コンクリート特有の問題が立ちだかっている。それは、鉄筋コンクリートの劣化の主な原因がコンクリート内に埋めこまれた鉄筋の腐食にあり、外見からはうかがい知れないことだ。

鉄筋は腐食しさびを形成すると、膨張する。膨張した鉄筋はコンクリートを内側から強く押し、徐々にひび割れを生じさせていく。何十年という月日をかけて成長したさびによって一旦ひび割れが起これば、大気や雨水などが大量に入りこみ、鉄筋コンクリート全体の劣化が一気に進んでしまう。今後も鉄筋コンクリートを安全に使いつづけていくために、“サイレントキラー”である内部の鉄筋の腐食が、いつコンクリートのひび割れを生じさせるのか、そしてどの時点でどのような対策を講じるべきなのか、判断するための術が欲しい。

そこで確立が急がれているのが「腐食加速試験」だ。コンクリート中の鉄筋の腐食を意図的に速め、現実より短期間で腐食度合いを検証しようというのである。この試験が確立されれば、鉄筋コンクリートの老朽化を防ぐための新材料開発にも役立つだろう。たとえば、近年開発が進むさびにくい耐食鋼や、コンクリートのひび割れを修復する補修材を使った試験体をつくり、効果をいち早く検証することが可能になる。

腐食加速試験は、すでにいくつかの方法が提案されている。だが、加速スピードや正確さの上で課題を抱えていた。そんな中、インフラの長寿命化に関する国家プロジェクトに参加していた土井康太郎は、実環境の約30倍ものスピードで、正確に腐食を再現する試験法を開発したという。一体どんな試験なのだろうか。

実環境をいかに再現するか。既存の「腐食加速試験」の壁

腐食加速試験では、コンクリート内部で起こる鉄筋の腐食プロセスを装置の中で再現する必要がある。

「コンクリートがアルカリ性であることにより、鉄筋の表面には『不動態皮膜』と呼ばれる薄くて緻密な酸化皮膜が形成されます。これが鉄筋の表面で鉄が溶解する反応を抑制するので、大気中に比べてずっとさびは生じにくい環境にあります。しかし、コンクリート中に雨水や海水が侵入してくると、そこに含まれる『塩分』が不動態皮膜を破壊してしまいます。皮膜が破壊されると、鉄は周囲に溶けだし、さびがで始めます。さびは少しずつ成長し、やがてコンクリートにひび割れを生じさせるのです」

このプロセスを再現しつつ、その化学反応を早めようと、これまでさまざまな腐食加速試験が行われてきた。代表的なものに『電食法』がある。鉄筋コンクリートの試験体をつくり、内部の鉄筋に電流を流して不動態皮膜を強制的に破壊していく方法だ。電食法は鉄筋の腐食量を電流の大きさで制御できる上に、腐食を大幅に加速できるというメリットを持つ。しかし近年、ある問題

点が明らかになった。

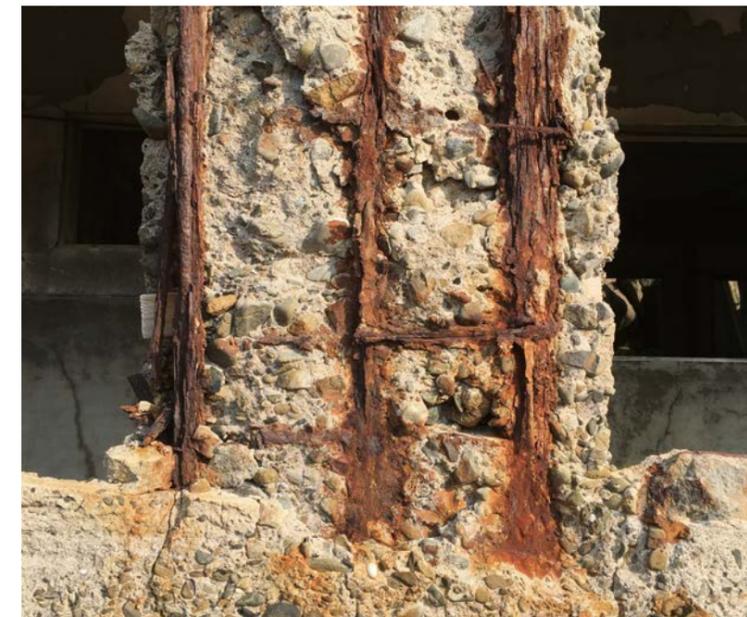
「2013年に、京都大学の高谷哲助教が重大な発見をしました。それは、電食法で生成したさびには、実環境で生成されない特殊な種類のさびが多く含まれるということです」と土井。

その最大の問題点は、電食法によるさびと、実環境によるさびを比べると、膨張率が大きく異なることにある。鉄筋コンクリートは鉄筋の腐食に伴う膨張によって劣化するのだから、これでは試験をしている意味がない。

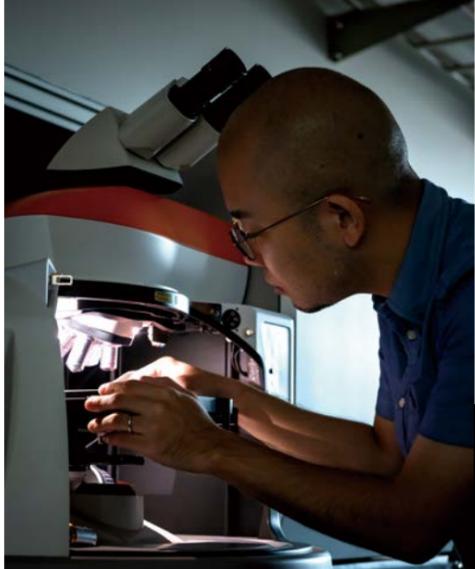
「実際に起こっている腐食のプロセスは非常に複雑で、単に不動態皮膜を破壊し鉄の溶解を加速するだけでは、現実には即していないことが明白になりました。他に何か、うまく再現できていない化学反応があるはず。そこで私が目をつけたのが“酸素”でした」

実環境のさびとピタリと一致！高精度な試験法を実現

土井は、酸素に着目した理由をこう語る。「より詳しく腐食プロセスを見てみると、不動態皮膜が破壊された後、鉄がコンクリート中に溶けだす、つまり電子を失いイオンになる『酸化反応』と、酸素が電子を取りこみ



鉄筋コンクリート内部で起こる鉄筋のさび。膨張し、コンクリートにひび割れを生じさせてしまう。



取材協力
土井 康太郎
 Kotaro Doi
 構造材料研究拠点
 独立研究者

Research 3

鉄をさびさせる 細菌の正体を暴く

鉄は水や酸素と反応してさびるが、原因はそれだけではない。実はさらに事態を深刻化させているのが、細菌の存在だ。その代表が「硫酸還元菌」。生命活動の過程でさびの一種「硫化鉄」を生成する。しかし、詳しいメカニズムは分かっておらず長年の謎となっていた。世界で初めてそれを解明したのが岡本章玄だ。

還元される『酸素還元反応』と呼ばれる2つの化学反応が同時に生じます。ところが、既存の腐食加速試験では酸化反応を促進するばかりで、酸素還元反応の促進が不十分でした。酸素還元反応を促進するためには、高圧の酸素ガスを供給し、鉄の周りの酸素濃度を高めてやれば良いと考えました」

そこで、機器メーカーと協力して、酸素を大量に高圧で供給できる装置を独自に開発(図)。コンクリートに塩水を練りこみ、あらかじめ不働態皮膜の破壊を促進しておいた鉄筋コンクリートの試験体を耐圧チャンパーの中にセットし、高圧で酸素を注入していった。そして生成された鉄さびを解析してみたところ、みごと実環境で生成されるさ

びのみが生成されていたのだ。「比較検証に用いたのは、長崎県の軍艦島のさびです。ここには日本で最も古い鉄筋コンクリートが現存していて、約100年前のものが今も残っています。それを分析すれば、実環境ではどのような種類のさびが生成されるのかがわかります。そこで私も軍艦島に行き、割れた鉄筋コンクリートからさびを採集してきました。そのさびと、今回開発した試験法を使って生成したさびの成分を分析してみたところ、種類がピッタリと一致したのです」と土井。

酸素の供給量は、実環境の約30倍。これを高圧で注入することで、実環境の約30倍もの早さで鉄筋コンクリート中の腐食を再現できるようになった。

土井いわく、この試験を他の試験と組み合わせることで、材料が使われるシチュエーションに応じた寿命予測が可能になるという。たとえば、鉄筋コンクリート製の高速度道路を劣化させる要因には、腐食だけでなく自動車の走行による振動がある。今回開発した試験と力学試験を組み合わせれば、高精度に老朽化度合いを予測できるようになるだろう。

「今、多くの人が大きな設備投資をすることなくこの試験を行えるよう、装置の簡易化を進めています。この試験法を鉄筋コンクリートの腐食評価試験のスタンダードにしたい」。土井は気持ちを新たにしている。(文・山田久美)

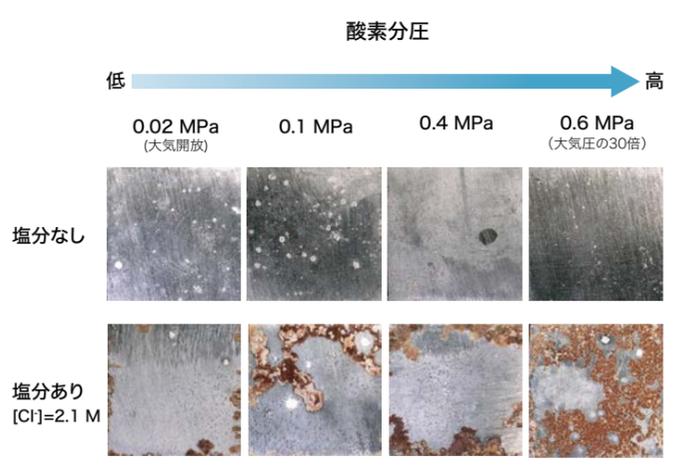
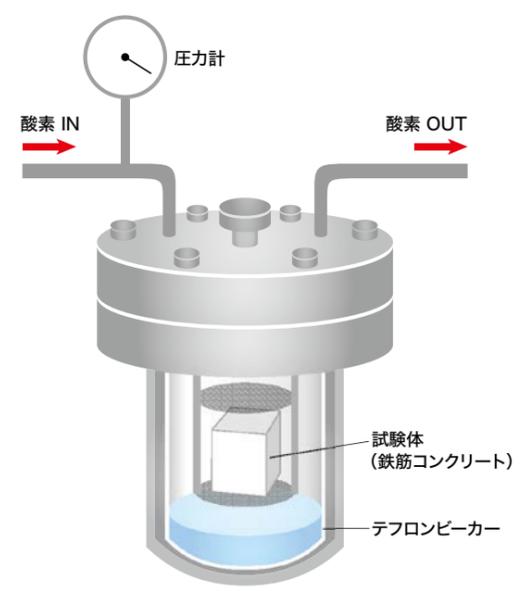
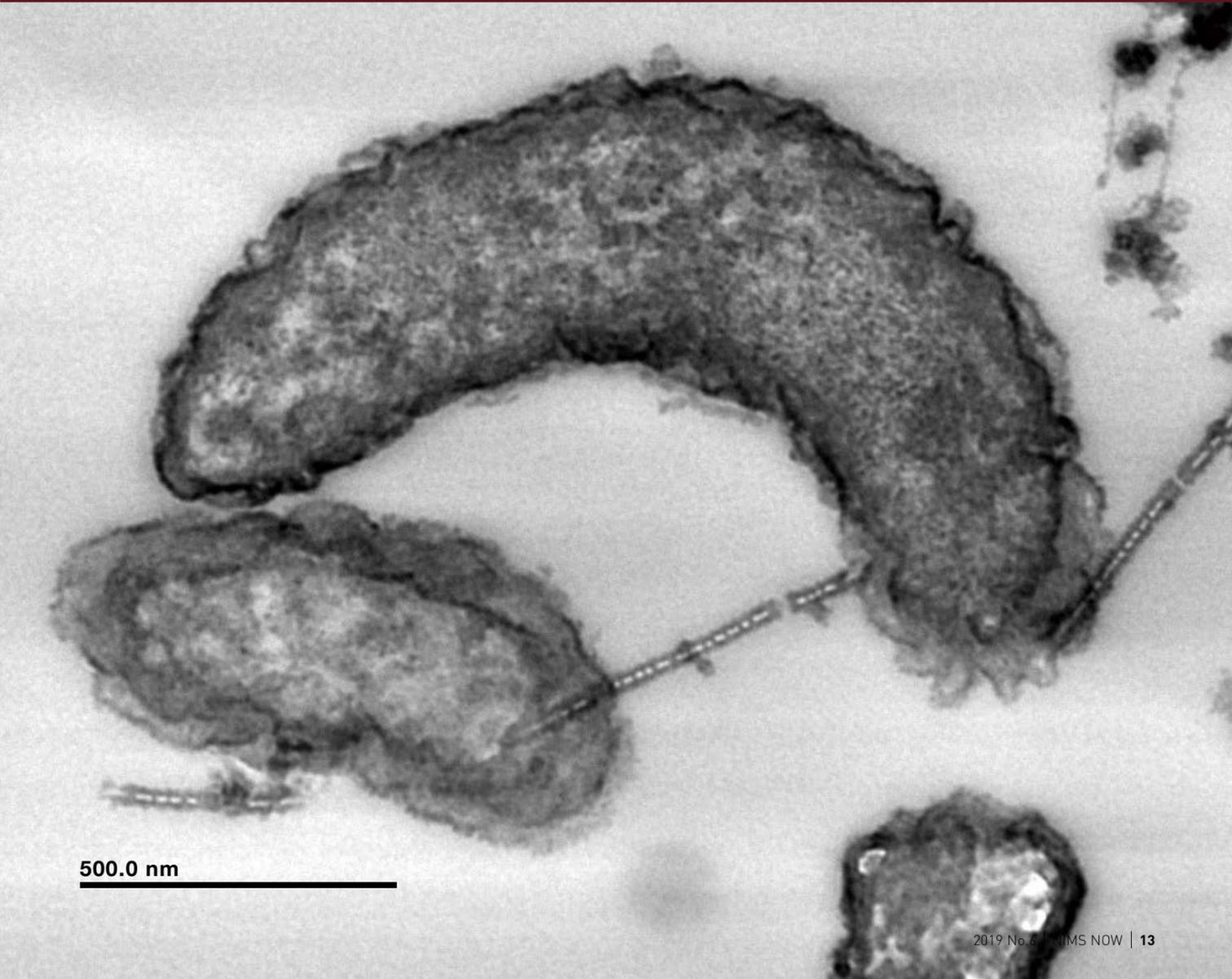


図 独自開発した「高酸素腐食促進試験装置」(左)と試験後の鉄試料表面の様子(右) 装置の心臓部、耐圧チャンパーの模式図。最大2 MPa (大気圧の100倍)もの高圧で酸素が供給できる。ビーカー内には、湿度を一定に保持するための溶液が入っている。試験方法は、内部の棚に鉄筋コンクリートの試験体を置き、高圧酸素を供給。そうして腐食を加速させた後、試験体から鉄筋を取りだし、生成したさびの組成をラマン分光装置(ページ上写真)で丹念に調べる。



鉄を腐食させる細菌

大気や土壌、水の中……日常のいたるところに潜む細菌は、発酵や製菓など人間の生活を豊かにする一方で、害をもたらす敵でもある。細菌がもたらす害の中でも意外と知られていないのが「金属をさびさせる」ということだ。

その影響がとりわけ深刻なのが、石油採掘用の鉄製のパイプラインである。産油国では、腐食によりパイプラインが破断し、石油が流出する事故が大きな問題となっている。その損害額は米国だけでも、年間300億から500億ドル。石油流出に伴う環境汚染も深刻だ。石油を大量に輸入している日本にとっても、決して他人ごとではない。

このパイプラインの腐食を引き起こす原因のひとつとして知られているのが『硫酸還元菌』と呼ばれる細菌である。硫酸還元菌は、周囲の硫酸イオンを取りこみ、硫化水素を発生させる。この硫化水素が鉄と反応し、鉄の表面が「硫化鉄」、通称「黒さび」に変化する。

止まらぬ腐食の謎

しかし、実はそれだけでは、太く頑丈なパイプラインが破断に至るほど腐食してしまうことの説明がつかない。学生時代より、材料科学の見地から細菌を研究してきた岡本章玄はこう説明する。

「本来、いったんさびで鉄の表面全体が覆われてしまえば、鉄と硫化水素が反応することはなくなるはず。ところが、その後も腐食の進行は止まりません。これが長年の大きな謎として、腐食研究者たちの間で常に議論的になってきました」

そうした中、謎の解明の糸口となり得る報告が1988年になされていた。ニューヨークの湖で「電気細菌」と呼ばれる細菌群が発見されたのだ。電気細菌とは、細胞外の物質と電子のやりとりを行い、電子を引きぬき、エネルギーにして生きる能力を持つ細菌の総称である。

「もし硫酸還元菌の中に電気細菌の能力を併せ持つものがあるとすれば、表面がさびで覆われた後もパイプラインの腐食が止

まらないことの説明がつかず。硫化鉄が電気を通すという性質を利用して、表面の硫化鉄ごしに内部の鉄から直接電子を引きぬくことで腐食が進むと考えられるのです。

ただし、それを立証するには、電気細菌が電子を引きぬくために不可欠な『膜酵素』を、硫酸還元菌もまた持っていることを実証しなければなりません。そして、そうした膜酵素は硫酸還元菌では、これまで一切見つかっていませんでした」と岡本。

一挙に腐食と細菌との関係を解き明かすと思われた電気細菌の発見は、腐食研究者による新たな議論の幕開けにすぎなかったのだ。だが2018年2月、岡本ららついに約30年にわたるこの議論に終止符を打ったのである。

ついに捉えた！ 電子を引きぬく姿

「硫酸還元菌は通常、自然界に豊富に存在する乳酸などの有機物をエネルギー源に、生命活動を営んでいます。硫酸還元菌がもし電気細菌としての能力を持つとしたら、電子はいわば、他のエネルギー源が乏しくなったときの“非常食”であるはず。それならば、電子を引きぬく様子だけを捉え、その働きを生み出す酵素を見つけ出すには、まず硫酸還元菌を“飢餓状態”に置き、余計な反応を抑制すればよい——そう考えて、乳酸などを取り除いた溶液で培養をスタートしました」

その際、岡本らがターゲットにしたのが、硫酸還元菌の一種「デサルフォピブリオ フェロフィラス IS5株（以下、IS5株）」だ。鉄を唯一のエネルギー源にして増殖するこの細菌は、硫酸還元菌の中でも電気細菌の候補として有力視されてきた。

IS5株を培養すること5日間。透過電子顕微鏡で詳細に観察を行った。

「すると細胞表面や細胞膜から『ナノワイヤー』と呼ばれる電気を流す細い線が伸びていることが確認されました。さらに、たんぱく質を染色する手法を施したところ、細胞膜やナノワイヤー上に高濃度の膜酵素が



取材協力

岡本章玄

Akihiro Okamoto

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)
独立研究者

培養中の硫酸還元菌。培地組成を変えたり、細菌に遺伝子改変を施したりと条件を変え、細菌が腐食に与える影響を調べている。底に溜まっているのが硫化鉄(黒さび)。



現れている様子をはっきり見てとれたのです(p13写真)。そして実際に電流を測定してみた結果、この膜酵素が高濃度に現れたときにだけ、IS5株が電極から電子を引きぬいていることを示す結果が得られました」

こうして、IS5株が確かに膜酵素を持ち、電子を引きぬく動きをする「電気細菌」の一種であることが確かめられた。これは、IS5株が有機物などのエネルギー源がない状況でも生き延びるために身に着けた術であると考えられる。

現在、産油国では、石油採掘用パイプラインの腐食を抑えるため、大量の化学殺菌剤を使って硫酸還元菌を殺菌しており、膨大なコストと環境汚染が問題視されている。「硫酸還元菌は殺してもすぐに耐性菌が生まれてしまい、イタチごっこを繰り返してきました。今後は、今回特定した膜酵素のみをターゲットにすることで、耐性菌の発生を抑制しつつより低コストで環境負荷の少ない薬剤の研究開発が可能になるでしょう」と岡本。その目は次の展開を見据えている。(文・山田久美)

Focus

“電気化学×細菌”で生命科学や医療にも貢献

もともと岡本は学生時代、細菌の触媒作用を活かした「人工光合成」を研究していた。以来、“電気化学を通じて生命を解き明かしたい”という思いを胸に研究を続けてきたという。その思いが実を結び、今回の膜酵素の発見は腐食分野にとどまらず、生命科学分野にも意義深い知見をもたらした。

IS5株が持つ膜酵素の遺伝子を詳しく解析したところ、これまで電気細菌が持つ膜酵素として知られていたものとは、機能は同じであるものの、遺伝子が大きく異なることが明らかになった。そしてこの膜酵素をコードする遺伝子を、深海に生息する「深海細菌」もまた広く保存していることが明らかになったのだ。「深海細菌はこれまで、水素をエネルギー源として生きていたと考えられてき

ました。ところが、深海細菌は電気細菌の性質も持っていて、深海に堆積している鉱物から電子を引きぬきエネルギー源にしている可能性が高いと分かりました。原始生物である深海細菌の生態が分かったことは、生命の歴史にも一石を投じる発見です」と岡本は胸を張る。

さらに現在、岡本はNIMSのセンサ・アクチュエータ研究開発センターにも在籍し、人間の体内に潜む病原菌をセンシングする技術の研究にも着手している。「病原菌は、人間の体内でイオンや電子をエネルギー源として増殖しています。そのメカニズムを逆手にとり、病原菌の増殖の度合いを電子の移動を測定することによってセンシングし、病気の早期発見につなげたいと思っています」

NIMSと「ピタゴラスイッチ」スタッフとの共同制作! 美しくも興味深い科学映像シリーズ

「未来の科学者たちへ」がDVDブックに!

「思わず試したくなる!ミニ実験」

厳選映像8本+撮り下ろし特典映像6本、さらに解説BOOK付き

先行予約スタート!

2020年2月19日発売

このスプーンは、 結構うるさい

科学映像
DVD-Book

物質・材料研究の最前線!



佐藤雅彦 + ユーフラテス
NIMS (物質・材料研究機構)

「ピタゴラスイッチ」のスタッフが作る、
楽しくも興味深い科学映像32分



——未来の科学者たちへ

第55回 科学技術映像祭
文部科学大臣賞 受賞

「予約はこちら」



先行予約
特典

「NIMS×ユーフラテス
オリジナル・元素周期表クリアファイル(A4)」付き

*無くなり次第終了となります。



NIMS NOW vol.19 No.6 通巻179号 2019年12月発行
国立研究開発法人 物質・材料研究機構



古紙配合率70%再生紙を
使用しています



植物油インキを
使用し印刷しています

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1 TEL 029-859-2026 FAX 029-859-2017 E-mail inquiry@nims.go.jp Web www.nims.go.jp

定期購読のお申し込みは、上記FAX、またはE-mailにて承っております。 禁無断転載 © 2019 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

表紙写真: 大気暴露試験により腐食した試験板 撮影: Nacása & Partners Inc.(表紙、p4-5)、石川典人(p3、p5の顔写真、p6、p10、p12、p14-15) デザイン: Barbazio株式会社