

建築材料をミクロ・マクロで測る

東京理科大学 創域理工学部 建築学科 教授 かねまつ まなぶ 兼松 学

1. はじめに

私の研究テーマは建物を長持ちさせることで、主に鉄筋コンクリート造の建物を対象とし、特に建築材料学的観点から研究をしています。建物を長く使うことは、豊かな都市資産の形成・継承においても重要な役割を果たすだけでなく、もちろん環境問題にも大きく貢献すると考えられます。

耐久性の研究とひとくちに言っても幅広く、材料や素材のミクロな現象から実建物レベルのマクロな現象まで幅広く扱います。特に、建築材料を物理化学的な視点でミクロから分析する技術の進歩は目覚ましく、世界的な研究トレンドとなっています。私の研究室でも、SPring-8 や J-PARC, JRR-3 といった世界先端の大型供用施設を用い、数Åオーダーの分子構造を相手にした研究を実施しています【写真1】。その一方で、100 m を超える実構造物を対象とする研究も実施しており、有名な建物では、旧国立霞ヶ丘競技場（国立競技場）や西洋美術館、軍艦島の構造物群などを含む、多くの建物において耐久性の実態を明らかにするための研究を進めています。実構造物でできることは限られていますが、サンプルを採取する形での測定を行う一方で、実構造物のおかれる環境測定（温湿度や二酸

化炭素）を行ったりもします。また、最近では建物調査にドローンを用いた検討なども進めています。

少し前置きが長くなりましたが、建築材料学は、ミクロからマクロまで幅広い現象を多角的にとらえ、現象を理解し・制御しようとする学問といえると思います。そのすべてをここで紹介することはできませんので、今回は、「建物の状態を測る」ことに絞って話題提供させていただきます。

2. 建物の状態を測る

皆さんは、TBSのドラマの「海に眠るダイヤモンド」をご覧になったでしょうか？ 端島を舞台とする骨太のドラマで、最後まで目の離せない見ごたえのあるドラマでした。このドラマの舞台となった端島は、通称軍艦島と呼ばれるかつて炭鉱を中心として栄えた島【写真2】で、その炭鉱施設は世界遺産「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」の構成遺産に位置づけられています。1974年1月に閉山し住民の完全撤退が終わり、炭鉱関連施設の解体作業が終了して以降は完全な廃墟となっており、現在も上陸観光ルート（2009年解禁）となる島の一部を除いてほぼ全島が立入禁止となっています。同島は、中央の岩山を軸に東側が生産施設（炭鉱工場）、西側に居住施設が配置されており、島の過酷な環境から、居住施設の多くは当時最先端の鉄筋コンクリートを用い堅牢に造られました。

私が同島に関わるようになったのは世界遺産登録を目前とした2011年からで、島の構造物の適正な保全の可能性を見極めるべく、鉄筋コンクリートの耐久性の専門家として調査に参加しました。その後10年超にわたり同島での調査活動を進めており、ここでは「建物の状態を測る」ことについて、軍艦島を題材に、そこで実施される最先端のセンシング技術を含む様々な調査について紹介したいと思います。

3. 構造安全性評価

私が軍艦島に関わり始めた2011年当時は、世界遺産の暫定リストへの記載が決まり、世界遺産登録に向



BLX22 (SPring-8)

TAKUMI (J-PARC)

【写真1】ミクロな世界視点で建築材料を測定する技術の例
SPring-8 や J-PARC など X 線や中性子線を用いる最先端の科学施設での測定は、分野に多くの知見をもたらしてくれます。巨大な施設の測定装置に埋もれ僅か数 mm から数 10 cm の試験体の測定を行います。



【写真2】端島全景

創業時はクレーンや煙突が立ち並び軍艦のような形状をしていたことから軍艦島と呼ばれるようになりました。現在は観光船により一部エリアのみ立ち入ることができます。

けて軍艦島の文化財指定が議論されている状況でした。長崎市からの委託により、2011年から日本建築学会に「軍艦島コンクリート構造物劣化調査ワーキンググループ」が設置され、軍艦島の劣化状態を把握することからスタートしました。しかしながら、当時既に無人島となっておよそ40年が経過しており、荒れるままに放置され劣化の進行した軍艦島の建物群は、通常の劣化の範囲を超えており、いったいどの程度の構造性能を有しているのかを評価する方法がありませんでした。そこで、地震で損傷を受けた建物の評価方法（被災度区分判定法）を準用して、劣化した構造物の耐震性能の残存率と被災度が測定されました。

健全な建物はもちろん設計当初の十分な構造性能を有しているのですが、大きな地震により強い力が加わり、ひび割れが入ったり、柱や梁が大きく変形したりするとその構造性能が損なわれます。そのため、震災を受けた建物の構造性能（安全性）に関しては多くの研究が行われ、その評価方法が確立されています。しかしながら、軍艦島の構造物群は、経年による劣化によって鉄筋が腐食し（錆びる）、コンクリートがひび割れて脱落し構造性能を失っている状況でしたので、地震での損傷による性能低下と経年劣化による性能低下の関係を整理し、新たな評価方法が開発されました。

その測定方法はセンシングといったものでは全く無く、研究者や学生を大量投入しての人海戦術により全部材の劣化度を評価し、それを総合値化することで耐震性能の残存率を判定するといったものでした。結果、30号棟や65号棟【写真3】を含む5棟が「大破」と判定され、当時のニュースをにぎわすこととなりました。その後、2015年5月に世界遺産登録されると前後して、長崎市からの再度の委託で日本建築学会に「軍艦島コンクリート系建築物の健全度調査小委員会」が立ち上がり、島の建物の健全度の調査が実施されました。この際は、前述する評価の有用性を前提に、全棟調査が実施されたのです。

なお、ご紹介が遅れましたが、これら調査に理科大関係者も大きく貢献しており、私の研究室に加え、工学部 今本啓一教授と研究室メンバー、国土技術政策総合研究所 向井智久博士（創域理工学部 客員教授）同建築研究所 宮内博之博士（同 客員教授）が様々な形で継続的に参画されています。

4. その他の調査

全棟の構造調査と前後して、様々な手法によりモニ



【写真3】30号棟（左：2025年撮影）と65号棟（右：2022年撮影）
日本最古の鉄筋コンクリート造集合住宅である30号棟（1916年）と、島内最大の鉄筋コンクリート造集合住宅の65号棟（1945年）、映画やドラマなどでの利用も多い。

タリング・センシングが行われました。その一部も含め、少し紹介したいと思います。

① 強度試験

強度試験は建物を評価する上で最も重要な基本的指標の一つであり、2012年までに一定量のサンプル採取が行われ、強度試験が実施されています。

② 飛来塩分量調査

軍艦島の環境を過酷たらしめているのは海から供給される塩分であり、この塩分がコンクリート中の鉄筋を錆びさせ、表面のコンクリートを破壊し、部材をぼろぼろにする要因となっています。そこで、飛来する塩化物イオンの測定が実施されています。

飛来塩分を収集するボックスを置いておく方法や、特殊な飛来塩分補集装置を用いたりして飛来塩分の状況を把握しています。島内の高さ方向には飛来塩分の分布があることがわかりましたが、建物内の局所的な塩分環境までは把握できませんでした。

③ ひび割れ調査

時々刻々と劣化が進行する構造物では、ひび割れも徐々に大きくなったり長くなったりするものと考えられます。そのため、ひび割れの経時変化を測定するタグを島内の複数個所に設置してモニタリングすることとなりました。

④ 常時微動測定

30号棟は「日本最古の高層鉄筋コンクリート集合住宅」と称され、たびたびメディアでも取り上げられている建物です。建設年が最も古いこともあって島内の構造物の中でも劣化が激しく、その劣化動向に注目が集まりました。その構造特性をモニタリングする目的で、常時微動センサが各所に取り付けられました。電源は太陽光発電により供給し、携帯電話回線を介して遠隔から監視するシステムが構築され、一定の成果を挙げました。しかしながら経年によるスラブ（床）の崩壊などにより一部センサが破壊されるなどとともに、建物自体が立入禁止となったことから装置の保守もできなくなったため、現在はその役割を終えてい



【写真4】 活躍する様々なドローン
市場に安価で多機能なドローンが日進月歩で投入されるなかで、島内では最先端のドローンが投入されています。見た目はおもちゃのようですが高級車が買えるような機体ばかりです。

ます。

⑤ 衛星によるセンシング

常時微動のセンシングが難しくなる前後から、30号棟については衛星によるセンシングも行われています。向井智久博士の率いる建築研究所のチームは、東京大学地震研究所などとともに衛星によるモニタリングをスタートしており、現在、崩壊前夜の30号棟の変形をモニタリングしています。このシステムを用いることで数mmオーダーの変形を捉えることが可能であり、台風の前後などに生じる崩壊に伴う変形をオンタイムで観測することに成功しています。この調査により、構造物の崩壊は、雨水の作用により組織が緩み、水の重さが加わった雨後に起こることが多いことが示されています。

5. 失われてゆくアクセシビリティとセンシング

島内のセンシング・モニタリングを長期に行う上で最大の課題は、調査個所へアクセスできなくなることです。アクセスできなくなる理由は様々ですが、床が抜けたり経路がふさがれて内部へ入れない、対象物ががれきなどに埋もれて直接見ることができない、安全管理上の理由でアクセスが禁止されている、などが考えられます。そのため、電池の交換などの作業や、現地での実測操作が必要な測定は長期的には実施できるかわかりません。特に劣化の激しい30号棟は、一般の調査結果などを踏まえて完全に立ち入りを禁止しており、ここ数年はアクセシビリティが失われてしまっています。

そこで、まずは島内建物のアクセシビリティを調査しました。一連の調査を分析した結果、対象となる構造物群の約15%に対するアクセスが失われていることが明らかになりました。島の構造物群へのアクセシ



【写真5】 クローラーロボット“Onix”¹⁾
クローラー型のロボットは踏破力に優れ、瓦礫をものともせず内部調査を行うことができます。

ビリティが時間の経過とともに悪くなっていくのは必定ですので、今後、アクセシビリティの失われた建物をいかにモニタリング・センシングするかが課題なのです。

アクセシビリティの低下に危機感を抱いていた我々は、改めて最先端のセンシング技術の活用により、島内の建物の状況を把握する方法がどのようなかを検討することとしました。中でも、ドローンはこの状況を踏まえると極めて有益な手段のひとつで、様々な形でセンシングに利用されてきました。

2023年度には建築振興協会に長崎市の委託により「長崎市・軍艦島に残存する建物の劣化状態・構造耐力の評価委員会」が設置され、私はドローンWGの主査としてチームを率い、既にアクセシビリティが失われていた30号棟のセンシングにチームでトライしました。なお上記アクセシビリティ調査も、同委員会の活動の一環として実施したものです。

さて、ドローンにも様々あって**【写真4】**、大きいものから小さいものまであります。大きいものはペイロードも大きく様々な測定器を搭載でき、飛行の安定感がある一方で、建物内部での活動は難しく外部の調査にとどまることが多いです。内部に適用可能なドローンとして、マイクロドローンと呼ばれる小型で高性能なドローンの利用も試みられました。このマイクロドローンは、その後の能登半島の地震調査や八潮の崩落調査などで活躍することとなります。

屋外における測定精度の向上のためには、RTK（リアルタイムキネマティック測位）と呼ばれるGNSS（GPSなどの衛星測位技術）を用いた高精度測位情報が用いられます。その一方で、屋内の調査ではGNSS情報が使えない場合が多いため、カメラの映像から自律的に位置情報を取得する機能（Visual SLAM）を利用することとなります。そのうえで操縦者は遠隔でドローンから送られる映像を2次元のモニターやヘッドマウントディスプレイを介して取得し、操縦する高度な技術が求められます。

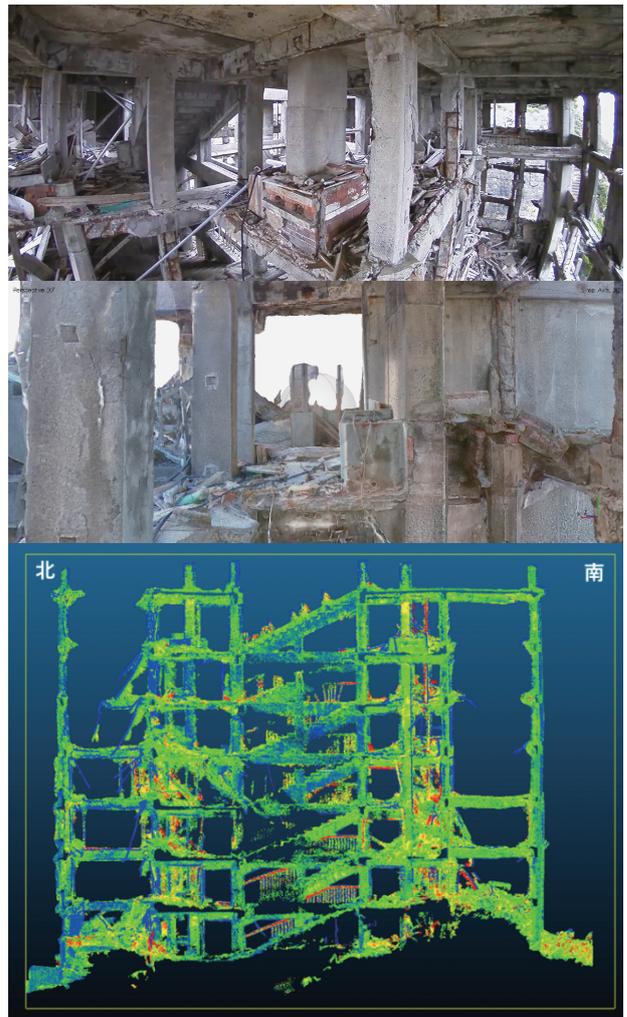
一方、東北大チームは、地上からアクセスするクローラー型のロボットを用いて情報収集を行っており、入れなくなった30号棟に侵入し内部の様子を撮影などに成功しています【写真5】。このロボットの最大の武器は各種センシングに加え、遮蔽物の除去やサンプルリターンが可能な点にあり、危険なエリアでの人に代わる作業の実施が期待されます。

これらドローンやロボットに搭載されるセンシング技術も様々で、アクセスできない箇所の2次元画像や動画の取得は勿論のこと、360度画像や動画、赤外線やレーザー情報(LiDAR)など様々な形態で対象物の情報をもたらします【図1】。また、それらで得られた情報は単なる2次元画像としてだけでなく、点群データや3Dモデリングデータなどに変換して利用されることとなります。特に、アクセスの失われた建物においてこれらの情報取得の有用性は明らかで、建物内部の状態がどのようになっているか、何が起きているのか?をビジュアルで知ることができます。

例えば360度カメラによる画像情報や動画はいわゆるVR情報として利用することが可能であり、調査者はストリートビューのように実際の建物調査と同様に自由に内部を移動して必要な調査を実施することが可能となります。対してLiDARで得られた情報は、オリジナルの図面情報が失われてしまった建物の寸法情報を取得したり、任意の断面を切り取ることで内部の構造のゆがみなどを判断することを可能とします【図1下】。このようにセンシングした3次元情報を用いることで、危険な建物に長期に滞在することなく、任意の時期にバーチャルに詳細な調査を実施することが可能となります。そのため、現在、学術利用を想定した全島の建物のデジタルアーカイブ化【参考：図2】も進められています。

6. まとめ

1990年ごろから、コンピューターサイエンスの発展にあやかり、ミクロからマクロまでの現象をシミュレーションにより再現しようとする、いわゆるマルチスケールモデリングの考え方が発展しました。そのスケールは0.1nm~100mとすると実に 10^{12} に及ぶので、耐久性に関わる現象を一気通貫にシミュレーションするのはまだまだ容易ではありません。その一方で軍艦島のような実証フィールドは科学技術の進展に大きく貢献するもので、崩壊が進みアクセシビリティが失われてゆく同島においては、状態測定やモニタリング、デジタルアーカイブといった様々な観点で、セン



【図1】ドローンによるセンシング結果の例
上：30号棟屋内状況，中：3Dモデルの一例，
下：LiDAR スキャニング結果の断面図²⁾



【図2】学術利用とは別のデジタルアーカイブの一例
長崎市の提供するストリートミュージアムでは、操業当時の様子をVRで見ることができる(左は現在の様子)。

シング技術が活躍しています。

【参考文献】

- 1) 大野 和則, 兼松 学ほか：作業アームを有するクローラロボットを利用した軍艦島の建物の劣化調査, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2024
- 2) 渡辺 一生, 宮内 博之, 兼松 学：軍艦島建物内部の劣化状況確認のためのドローン活用の可能性, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 1207-1208, 2024