

持続可能な鉄道を目指すインフラ分野の基礎研究

軌道技術研究部長
片岡 宏夫



1.はじめに

鉄道のインフラは膨大な資産を抱え、日々の安全な列車運行を支えるために、そのメンテナンスに多くの労力を要している。

持続可能な鉄道を支えるためのインフラの研究開発として、

- ①安全性を支えるための研究開発
- ②地震や豪雨などの自然災害に対して強靱化を図るための研究開発
- ③メンテナンスの省人化や低コスト化を図るための研究開発

がある。

軌道・構造物は耐用期間が長く、特に構造物では設備の老朽化対策が重要である。インフラの各分野の共通の課題として、検査・診断・補修の省力化・省人化があり、今後の労働力不足を踏まえこれらの推進が急務となっており、また一層の低コスト化を図っていくことが求められている。

本稿では軌道と構造物を対象としてメンテナンスに係わる基礎研究について紹介する。

2.インフラの劣化事象とデジタル技術を活用したメンテナンス

2.1 インフラの劣化事象とメンテナンス

鉄道構造物ではトンネル、高架橋、鋼橋、駅設備など様々な形式の設備を有している。軌道ではバラスト軌道、直結系軌道に大別される。

こういった構造形式により図1に示すように、様々なインフラの劣化事象が生じる。レールは傷や摩耗、バラストの細粒化による支持機能の低下、コンクリート構造物のはく落の進行、トンネルでは地山の変状など、設備やそれが置かれている供用条件で劣化の要因・進行速度は様々である。

したがって、そのメンテナンスも多岐にわたり、設備・事象やその劣化特性に応じた管理が必要となる。

インフラのメンテナンスは図2に示すように4つの

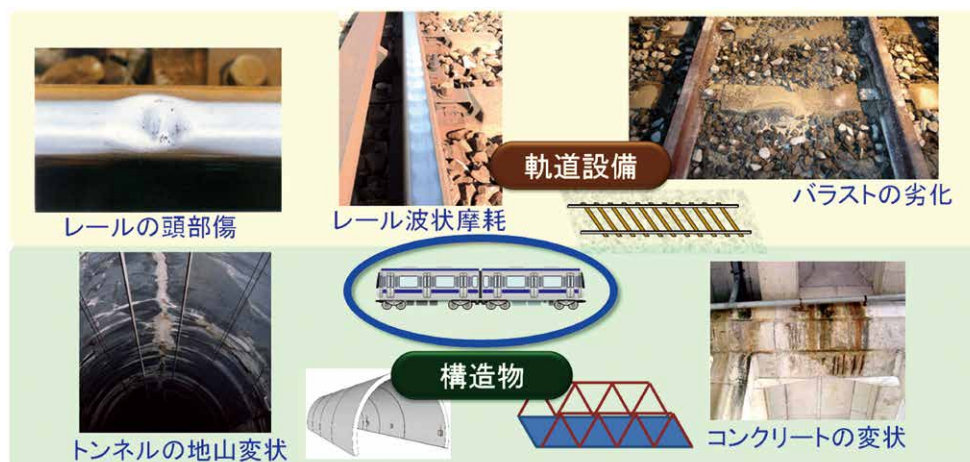


図1 軌道・構造物の劣化事象の例

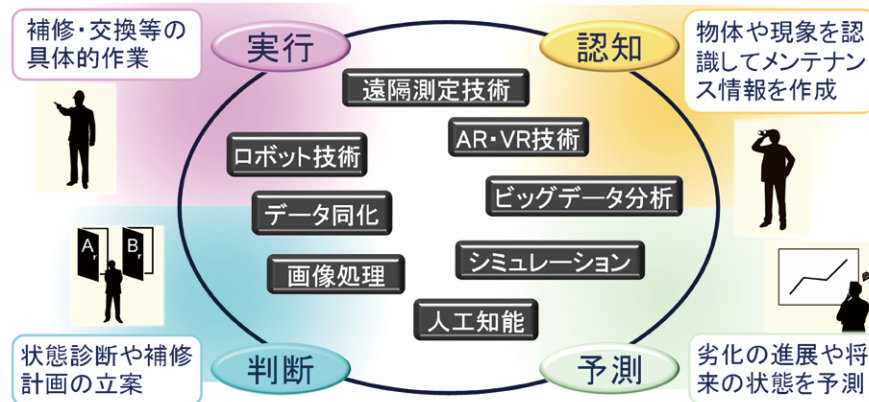


図2 メンテナンスへのデジタル技術の活用

フェーズからなる。すなわち、設備の状況の把握である「認知」。次に劣化・変状の進行を推定する「予測」。現状値および予測値から診断し、診断結果に応じて、補修計画を立案する「判断」がある。最後に補修・交換等を具体的に実行する。このように4つのフェーズを繰り返し、継続的に実施されるループを構成する。

これらに対し、現在図2に示すようにデジタル技術を活用した業務の改革が進められている。

例えば軌道変位の管理においては、検測車を定期的に走行させることにより全線のデータが取得でき、軌道保守管理データベースシステムLABOCSを用いてこれを時系列で比較できるようになっている。そのため、場所ごとの推移を把握でき、データに基づく予測と補修計画が導入しやすい。また、最近では営業車検測による高頻度測定も一部の会社で実施されており、データに基づく異常予測技術の開発も進められている。

鉄道設備の特徴としては、路線延長が長いことが挙げられる。また、構造物は橋梁、トンネルなど個別の構造ごとに全般検査、必要により個別検査を行っている。これらのすべてにセンサを取り付けて状態を監視していくのは難しく、設備の重要度に応じたセンシングを行う必要がある。

そのため、デジタル技術の導入を推進していくための課題として、限られたデータから劣化の予測や、診断を行う技術を開発していくことも重要である。

2.2 デジタル化における基礎研究の役割

上に述べた予測・診断の確立には、現象の法則・理論を見出すことにより、信頼性を向上させることが有効である。すなわち、劣化メカニズムの理解に裏付けることにより、高い信頼性で予測・診断することが可能とな

表1 劣化事象の予測・診断に関する基礎研究の例

対象	研究事例
レール	頭部傷の進展予測 腐食レールの寿命評価 波状摩耗の発生機構
バラスト ロングレール	破碎・細粒化の予測 現地条件に則した評価手法
コンクリート 構造	RC構造物の変状予測 エトリングタイトの遅延生成による劣化 車上データを活用した共振検知
トンネル 土構造	地山の変状の予測 斜面の風化進行度の予測

る。これにより、速やかに「判断」のフェーズに移行できる。

また、機械学習やビッグデータ分析においては、何らかの答えが出てくるが、それが本当に信頼してよいのか、という問題が生じる場合がある。このような場合に、現象の法則・理論が完全にわかっていなくても、ある程度まで裏付けがとれればその予測の信頼性を上げることができ、「判断」への移行の難易度を下げられる。

さらに、現象を理解することにより、有効な予測をするために逆にどんなパラメータを「認知」すればよいのかを見つけることができる。

以上より、デジタル化を推進するための基礎研究を「現象の法則・理論を見出し予測・診断の信頼性を向上させる」として位置づけることができる。

3. デジタル化を推進するための基礎研究の例

表1に劣化事象の予測・診断に関して取り組んでい

る基礎研究の例を示す。本章では、前章で述べたように現象の法則・理論に基づき予測・診断法を開発し、デジタル技術の活用につなげていく事例を述べる。

3.1 RC 構造物の変状予測に基づく維持管理手法の開発¹⁾

鉄筋コンクリート構造物は、日々劣化していくため、定期的な検査から劣化の進行状況を見極め、適切な時期に修繕していく必要がある。この適切な時期を数値化して事前に知ることができれば、合理的に構造物の安全性を確保していくことができる。

ここでは、鉄筋コンクリート構造物の劣化現象のひとつである鉄筋の腐食に着目して、画像から得られた情報を基に鉄筋コンクリート構造物の劣化を定量的に予測する方法を紹介する。

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋の腐食による劣化を定量的に予測するには、鉄筋周辺のコンクリートの中性化の進み具合や水の供給程度、塩分量、かぶり（コンクリート表面と鉄筋の距離）を測定して、これらの影響を考慮した鉄筋腐食速度を求め、将来どの程度鉄筋が腐食し、いつコンクリートにひび割れやはく落が発生するのかを予測する必要がある。従来は、コンクリート中の鉄筋腐食速度を推定するには、鉄筋のはつり出しによって、鉄筋腐食の進み具合を測定するなど詳細な調査が必要であり、多くの労力を要していた。

鉄筋コンクリート構造物の一連の劣化を数理でモデ

ル化したものが図3である。①どの程度中性化が進んだら腐食が顕著に進むか、②鉄筋腐食速度、③どの程度鉄筋が腐食したらはく落が生じるか（はく落発生時の鉄筋腐食深さ）を数式で表す必要がある。これらは、現地調査や実験、解析などにより、定式化がなされている。これらのうち、鉄筋腐食速度は、中性化残り、水、かぶりなどが主要因であることがわかっているものの、その他、温度、湿度、日射、風などの環境の影響、コンクリートの品質などの材料の影響、養生や締め固めなどの施工の影響を受けて、構造物ごとのばらつきが大きくなる。

かぶりや鉄筋径によって腐食の開始時期、はく落が生じる鉄筋腐食量は概ね得られる。そこで、この変状モデルに基づき、目視で得られるはく落面積と簡易な点検データを用いて予測したはく落面積を比較し、鉄筋腐食速度を推定する方法を考案した。すなわち、図4に示すように腐食速度（図3中の傾き）をパラメータとしてこれを変化させ、現地のはく落面積と一致するまで解析を行う。一致したときのその腐食速度を現地の値として同定することができる。

得られた腐食速度を用いることにより、その先のはく落を予測することができる。図5は、推定した鉄筋腐食速度を用いて劣化を予測した例である。調査したときの状況から、10年後、20年後とはく落の範囲を推定していくことができる。このように、どの箇所がいつどのくらい劣化するかをあらかじめ把握することができるので、計画的に修繕を行うことができる。

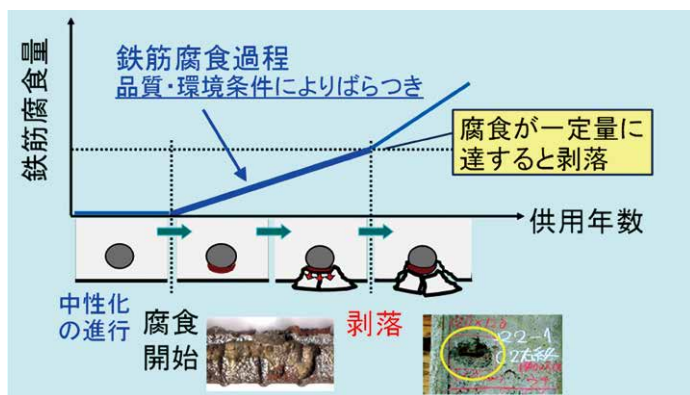


図3 コンクリートのはく落の変状モデル

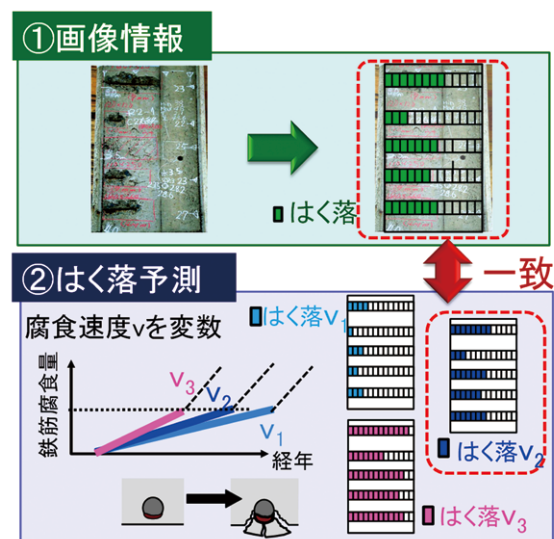


図4 画像情報に基づく腐食速度の推定

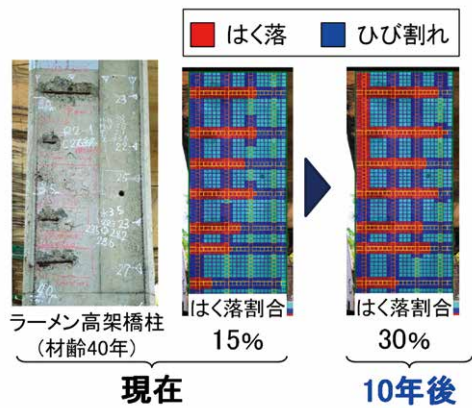


図5 画像情報に基づくはく落の予測例

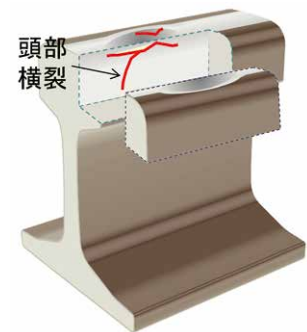
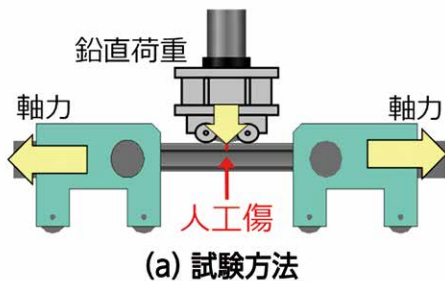


図6 レールの頭部損傷



(a) 試験方法



(b) 破断面

図7 レール頭部横裂の進展試験

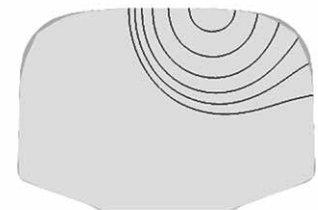


図8 レール頭部横裂の進展予測解析

今後の課題としては、水の影響があり、これを鉄筋腐食速度に取り入れることによりさらに精度を向上させることができる。

本手法は、劣化の進行を表す特性曲線を定式化し、主要なパラメータに着目することで、はつり出しによる鉄筋腐食量の計測を行うことなく腐食速度を推定したところに特徴がある。

3.2 レール頭部横裂の進展予測による管理²⁾³⁾

列車の荷重を直接支持するレールは、深刻な損傷を起こさないために、適切に保守管理する必要がある。レールの傷の中で、頭部損傷は主要な交換要因の一つとなっている。

レールの頭部損傷の概要を図6に示す。繰返しの列車走行によりレール頭部には水平裂が発生することがあり、さらにき裂がレール底部方向へ分岐し、(以下、「横裂」という)レール折損に至る可能性がある。主要線区では超音波探傷車と現場の2次探傷による定期的な検査を実施し、管理値を定めてこれを越えた場合に

レール交換を実施している。

こういった交換の管理値や保守周期は列車の走行条件や線区の重要度によって定められているが、経験的な部分も多く、供用条件による違いを考慮して傷の進展予測ができればより実態に即した交換計画を立てられ、コスト削減につなげることができる。

横裂の進展には、列車荷重による変形のほかに、レールの中に内在する残留応力、季節の温度変化に伴い生じるレール内部の軸力が寄与するため、これらの影響を定量化する必要がある。

このうちレール内部の残留応力については過去より研究がなされているが、今回MIRS法という手法によりレール頭部内の連続的な残留応力分布を明らかにした。

また、レール軸力の影響については、図7に示すように横裂を模擬した人工傷を設置した実レールに対し、レール長さ方向に引張りを与えた状態で鉛直の繰返し載荷をする試験を行い、解析の検証を行った。

これらの結果を用いて、図8に示す営業線の各種条件下における横裂進展を予測するための解析モデルを構築

した。この解析モデルにより、列車荷重の特性や軌道条件、また、温度の変動による熱応力を考慮して横裂が発生した場合のレールの余寿命を推定することができる。

また、このような損傷の検知手法として非接触空中超音波による車上式のレール損傷検知システムを検討しており、現在は破断検知システムとして開発を進めている。これは無線式列車制御システムの導入に際し信号回路に代わり車上でレール破断を検知することを目指したものである。

本技術は、図9に示すように空中超音波をレール長さ方向に入力し、レールの破断があれば超音波が遮断される原理を利用している。実際に、試験線で30km/hまでの走行で開口部を検出できることを確認しており、さらに高い速度域の検証を進めている。

通常の超音波探傷車では水平裂にさえぎられて横裂がみえないことがあるが、本技術の適用により車上からの横裂検知による管理の省人化、また状態監視への移行が進むことが期待される。

3.3 車上計測による共振橋梁の抽出⁴⁾

列車通過時の鉄道橋の共振は、橋梁の過大なたわみや電柱を介した電車線損傷をもたらす場合がある。しかし、共振の有無を把握するには多大な手間をかけて地上側から測定する必要があった。

本研究では、共振する橋梁の特徴を利用し、走行車両上で計測したデータを用いて共振橋梁を検知する手法の開発を行った。

図10に示すように、共振橋梁先頭を通過するとき編成車両が通過するとき、振動が徐々に増大し、先

頭にくらべて最後尾車両では大きなたわみが生じた桁を通過するため、応答が大きくなる。この現象に着目し、先頭に対する最後尾車両上で測定された上下加速度や軌道変位の相違度を増幅係数として検知指標にした。

この現象を解明するために、実橋梁の変位や加速度の分析を行い、さらに車両と橋梁の動的相互作用解析プログラム DIASTARS III を用いて検証を行った。

その結果、共振時には車両長25mに対応した振動が卓越することが確認でき、これを強調する独自のフィルタ処理法を開発し、検知感度向上を図ることができた。これにより、図11に示すようにフィルタ処理を行った最後尾と先頭の差分を指標として共振橋梁を抽出することが可能となった。

なお、この実橋梁を対象とした解析においては、データ同化という手法を用いており、橋梁の物理特性を仮定しながらシミュレーションを繰り返して、実測値と最も一致する物理特性の組み合わせを探索することで橋梁の現状の特性を再現可能としている。

本成果はすでに営業車、検測車に設置された加速度計や慣性正矢軌道検測装置を利用し、軌道保守管理データベース LABOCS 上で網羅的に共振橋梁を1次スクリーニングできる。

ただし、検測車を用いる場合や車両長が営業車と異なることや、加速度を用いた場合の車体振動の影響除去などは課題となっている。

本研究では共振する橋梁で車両動揺が変わるという着眼点から、これを実測およびシミュレーションにより検証し、診断するための評価指標を新たに提案したところに特徴がある。

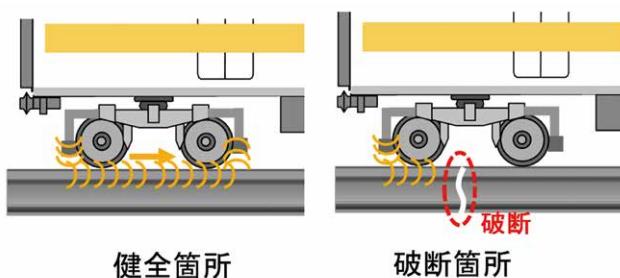


図9 車上式のレール損傷検知システム

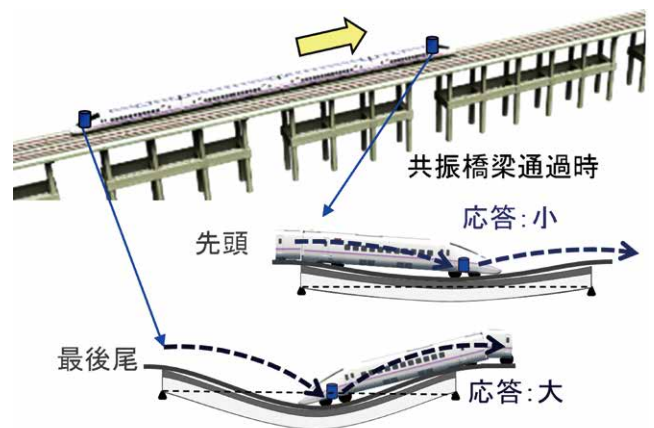


図10 共振橋梁の列車通過時の応答

部を透過する音を用いて劣化の程度を検査する手法を考案した⁶⁾。

基礎試験を重ね、特定の周波数帯域で劣化に伴い音の通りが悪くなることを把握し、さらに乾湿や密度の影響によらず、劣化を示す細粒度含有率と安定した関係が得られることがわかった。これにより、現地の道床状態を簡易に定量的に診断することが可能となっている。

このようにバラスト劣化の定量化と予測法を開発することにより今まで目視でしか判断できなかったバラストの残存寿命予測による交換計画策定も可能となってくる。

4.2 5Gを活用したメンテナンスのデジタル化の取り組み

デジタル技術をインフラのメンテナンスに活用する

ためには、基盤となるネットワークの構築が重要である。鉄道総研では、各系統のデータを統合し、有機的に分析し新しいメンテナンス技術を生み出すことを目標としており、その一環として、5Gを鉄道で活用するための基本技術の確立を目指した研究を行っている。

5Gネットワークの活用イメージとしては、図14に示すように超大容量を活かした車上地上・設備の動画や大量の計測データの伝送や、超低遅延を活かした作業機械の遠隔操作、また多数同時接続を活かした車上や沿線の機器・センサーの接続などがある。

しかし、実際に適用するとなったときの性能は未知数であり、メンテナンス業務への適用性評価や、各分野のデータ収集基盤の整備を行うために、所内試験線を用いて実証試験を進める予定である。具体的には、電車線のデータや車両、軌道のデータをリアルタイム

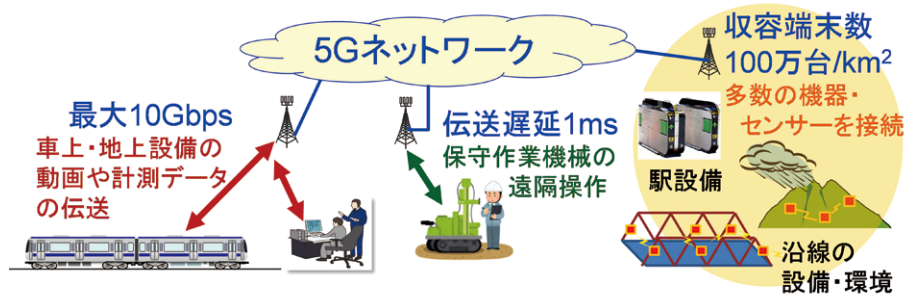


図 14 5Gの特徴とメンテナンスでの活用イメージ



図 15 予測・診断の高度化とデジタル情報に基づくメンテナンスの向上

で所望の場所に伝送する技術を開発するとともに、分野横断でのデータ利活用を可能とするデータサーバの構築を行っていく。

4.3 基礎研究による予測・診断の信頼性向上

インフラのメンテナンスの向上を図るためにはデジタル技術の活用が不可欠であり、そのためには冒頭に述べたように現象の法則・理論に基づく予測・診断の信頼性の向上が必要である。

今後取り組んでいく課題として図15に示すようなものがあり、3章で上げた事例以外にも、様々な劣化事象に対して現象解明を進める。これを踏まえ、現地試験や室内試験で検証を重ねつつ、シミュレーション技術や車上データの活用により予測法や診断法の高度化を進めていく。

それらにより、デジタル情報に基づく効率的な保守計画に結び付け、新たなメンテナンス技術を創出していきたいと考えている。

5.おわりに

インフラのメンテナンスについて基礎研究に基づくデジタル技術の活用について概説した。現象解明は技術開発の基盤になるものであり、引き続き力を注いでいきたい。メンテナンスの省力化は急務であり、他にもメンテナンス性に優れた新材料や新構造の開発、新しいセンシング技術の開発など、様々なアプローチからメンテナンスの革新につながる技術開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 轟俊太郎, 角野拓真, 松下将士, 田所敏弥: 鉄筋コンクリート構造物の劣化を予測し安全性を確保する, RRR, Vol.71, No.9, 2018.9
- 2) 細田充, 水谷淳: レールの損傷の発生・進展速度を予測する, RRR, Vol.76, No.10, 2019.10
- 3) 細田充, 相澤宏行, 山本隆一: 非接触空中超音波および軸箱加速度を利用したレール破断検知手法の検討, 日本鉄道施設協会誌, Vol.58, No.10, 2020.10
- 4) 松岡弘大, 渡辺勉, 上半文昭: 車上計測による共振橋梁の検知手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.8, 2019.8

- 5) 中村貴久, 福中力也, 桃谷尚嗣, 木次谷一平, 石川達也: バラストの破碎・細粒化メカニズムと残存寿命予測に関する基礎検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.24, 2020.7
- 6) 福中力也, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平, 北川敏樹, 宇田東樹: 音の透過特性を用いた道床バラストの健全度評価方法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.24, 2020.7