

エリアセンシング手法を用いた 知能化設備異常診断

Intelligent Anomaly Diagnosis for Steel Works by Using Area Sensing

^{神戸大学} 大学院システム情報学研究科 教授 Hisashi Tamaki JFEスチール (株) スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 部長

飯塚幸理 Yukinori lizuka

し はじめに

「適応的エリアセンシング手法を用いた知能化設備異常診断」研究会 I は、日本鉄鋼協会 平成27年度 研究会 I として 採択され、製鉄所の異常予兆監視技術の高度化を目的とし て、2016年3月から2019年2月まで3年間の活動を行った。

日本国内の製鉄所は、建設されてから概ね40年~50年が 経過し、老朽化が進んでいる。主要な生産設備については定 期的な老朽更新がなされてきているが、原料コンベアや各種 配管、クレーンなどの基盤インフラ設備については対象範囲 が非常に広く、老朽更新を行うにしても大きな投資と期間を 要するため、現状では監視を強化しながら部分的な補修や更 新が行われている。原料ヤードを例にとると、その面積は数 km²、コンベアの数は100以上におよび、その監視負荷は非常 に大きい。このため、監視範囲の拡大・高密度化が喫緊の課 題となっている。また、「監視」結果から「異常」やその「予兆」 を検出することも必要となる。

このような背景のもと、日本鉄鋼協会「計測・制御・シス テム工学部会」では、基盤インフラ設備を対象として、効率 良くかつ精度良く監視できる技術開発の検討を、計測フォー ラム、制御フォーラム、システムフォーラムの3フォーラム 合同で進め、本研究会の提案に至ったものである。本研究会 では、センシングから異常予兆の検出と判断まで3分野を統 合したトータルシステムを念頭に置き、要素技術として、(1) カメラによる微小変位高精細エリアセンシング、(2)設備老 化モデルによる設備の老化と病気の峻別、(3) データ学習に よる時系列データの変化点検出、を研究開発項目として研究 会活動を進めた。以下、本研究会の概要と成果について紹介 する。



2.1 製鉄所の診断ニーズと手法

老朽化した設備の診断においては構造物の減肉や疲労の 有無と程度を把握することが重要である。減肉は超音波探傷 によって定量的な検査ができるが、本研究会で対象とした基 盤インフラ設備はその範囲が非常に広大な領域にわたり、ス ポット的な手法では検査できる空間と時間は極一部に限定さ れる。このため現状でも目視検査の役割は大きいが、領域と 頻度を増やすには監視負荷が増大するという課題がある。振 動測定やひずみ測定は構造物の損傷を常時監視する手法とし て期待されているが、既存手法はいずれも点測定である。そ こで、本研究会では画像を用いることで振動とひずみを面測 定可能な手法に着目し、研究に取り組むこととした。Table1 に、監視対象と現状のセンシング技術、研究会で目指す範囲 を示す。

センシングの次に必要なことは、センシングデータから異 常予兆を検出し、それが異常であると判断することである。従

Objects	Conventional	Problem	The research	
	method		consortium	
Vibration	Accelerometer	Point	Mirror-drive	
		monitoring	High-speed	
Motion	Visual	Monitoring	Active Vision	
	monitoring	load		
Displacement	Strain gauge	Point	Sampling Moire	
-		monitoring	Method	
	Laser Doppler	Point		
	Vibrometer	monitoring		
	Digital image	Responsiveness		
	correlation	-		
	method			
Thinning	Visual	Monitoring	Estimate by the	
Crack	monitoring	load	above method	
	Ultrasonic	Point		
	testing	monitoring		

Table1 Monitoring objects and sensing method.

来は、しきい値を定め、それを越えた場合に異常と判断するといった方法が一般的である。しかしながら、設備診断において 異常が起きることは稀なため、未知の異常を検出しなければ ならず、しきい値を定めることが難しい。このためのアプロー チとして、本研究会ではモデルベースでのアプローチとデー タ学習によるアプローチの2手法で取り組むこととした。

Fig.1に、本研究会で目指すトータルシステムの概念を示 す。画像による振動・変位のエリアセンシングデータを取得 し、モデルベースアプローチおよびデータ学習アプローチで 未知の異常を検出する。本研究会ではこのようなトータルシ ステムを念頭に各要素技術の研究を実施した。

2.2 研究会の体制と活動

Table2に、研究会の体制を示す。計測・制御・システム の3グループ体制で各要素技術の研究を進め、全体研究会で 相互の議論を行った。主査は玉置久(神戸大学)、代表幹事は 佐々木純(新日鐵住金、~2016年9月)、飯塚幸理(JFEスチー ル、2016年10月~)、幹事(副)中川繁正(新日鐵住金、2016 年10月~)である。

全体研究会は製鉄所の見学も含め、計14回実施し、鉄鋼協 会の講演大会において4回の討論会を開催した¹²⁰⁾。研究成果 は、鉄と鋼の特集号 (Vol. 106 (2020), No. 2)²¹⁻²⁴⁾ で公開され ている。

3 カメラによる微小変位高精細 エリアセンシング

振動モニタリングは構造物の損傷を検知する手段の一つで あり、従来から加速度センサなど接触型のセンサが適用され ている。しかしながら、接触型のセンサで全体の計測を行う ためには複数の場所にセンサを設置する必要があり、設置コ ストや工事期間がかかる問題があった。遠隔から測定する手 法としてレーザー振動計があるが、点測定の課題がある。こ れに対し、近年は動画解析による振動計測手法が進展してき ており、非接触での面測定の研究が進展している。本研究会 ではこの手法に着目し、特にサブmmオーダーの微小変位、 数10Hzオーダーの振動の遠隔エリアセンシングの実現を目 指し、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」と「サンプリ ングモアレ法による時系列変位計測」の研究を進めた。

3.1 カメラによる微小変位高精細エリアセンシング21)

Fig.2に、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」の測定 概念を示す。高速USBカメラ(1440×1080画素、273fps)、望 遠レンズ(150-600mm、F5-6.3)、2自由度ガルバノミラー、制 御用PCから構成される。ガルバノミラーは望遠レンズの前 に配置され、制御用PCからの電圧指令によりパン軸・チル ト軸に対応して角度制御可能なミラーでカメラ視点を最大 40度変えることができる。切り替え時間は10度以内であれ ば、1ms以内である。

撮影と処理の流れはFig.2に示す通りである。(1)まず、ミ ラー操作によりパノラマ画像を生成する。(2)次に振動計測 を行うべき対象を定め、その部分の動画撮影を行うパン・チ

Table 2 F	Research	item and	members
-----------	----------	----------	---------

グループ	研究項目	委員
計測	カメラによる微小変	石井抱 (広島大)
	位高精細エリアセン	藤垣元治(福井大)
	シング	松田浩(長崎大)
		鳥越一平(熊本大)
		伊藤友彦(JFE スチール)
		岡本陽(神戸製鋼所)
制御	設備老化モデルによ	浅井徹(名古屋大)
	る設備の老化と病気	金子修(電通大)
	の峻別	北村章(鳥取大)
		津田和呂(JFE スチール)
		岸真友(新日鐵住金)
システム	データ学習による時	倉橋節也(筑波大)
	系列データの変化点	小野功(東工大)
	検出	玉置久(神戸大)
		森田彰(新日鐵住金)



Fig.1 Concept of the intelligent anomaly diagnosis system.



Fig.2 Concept of Mirror-drive High-speed Active Vision.

ルト角をN個設定する。(3) N個の位置を対象に、高フレー ムレートで動画を撮影する。(4) 各動画像にて、画像相関法 (DIC) などのアルゴリズムにより微小変位を求める。さらに その変位に対してFFTによる周波数解析を行う。

この手法を用いて、製鉄所内の稼働中ベルトコンベアに 対して振動測定を行った。測定装置を、制御用PCも含めて 可動ワゴンの机面に固定し、ベルトコンベア正面から5m離 れた位置に設置した。望遠レンズの焦点距離を150mmとし た。5m先において、16.4×12.3cmの範囲に対する解像度が 0.114mm/画素となる(1440×1080画素)。時間間隔6.25ms、 走査ステップ角 $\Delta_{\theta,pan}$ =1.88度、 $\Delta_{\theta,tilt}$ =1.41度のミラー走 査により、水平22視点×垂直29視点の計638枚の画像を撮影 し、31,680×31,320画素のパノラマ画像に合成した。Fig.3 (a) にパノラマ画像を示す。さらに、この画像に含まれている5 本のローラー支柱 (No.1, No.2, No.3, No.4, No.5) 付近を高 フレームレート撮影すべき領域として指定し、160fpsで動画 撮影を行った。一例として、No.1支柱付近の撮影例をFig.3 (b) に示している。

さらに、解析結果の一例として、Fig.4に、No.1支柱付近に 対する結果を示す。水平方向および垂直方向いずれも振幅 0.05mm前後の振動が観測され、ピーク周波数が10Hzおよび 26Hz前後に観測されている。このうち、26Hzのピークは稼働 ワゴンに設置された制御用PCからの振動であることがその後 のラボ実験で確認されており、10Hzのピークがコンベア支柱 の振動を捉えているものと考えられる。この他にコンベアベル トの位置や厚みなどの動的挙動の計測にも成功している。



(a) Panoramic image and selected positions to be observed



(b) Captured high-frame-rate image to be observedFig.3 Panoramic image and high-frame-rate image.

3.2 サンプリングモアレ法による時系列変位計測²²⁾

サンプリングモアレ法は、2次元格子の画像からx方向とy 方向の位相分布を求める手法である。Fig.5に画像処理の流 れを示す。(a)まず二次元格子画像を撮影する。(b)・(c)次



Fig.4 The results of a field test.

に、x方向、y方向それぞれ一方向に平滑化を行った画像を生成する。(d)・(e) 格子の画素数に近い整数Nで間引き処理 を行う。この際、間引く位置を1画素ずつ変化させることに よって、N枚のモアレ画像を得る。(f)・(g) これらに対し、位 相シフト法を適用し、位相分布を求める。求めた位相差から、 以下の式により変位が求められる。

$$d_{x} = \frac{p_{x}}{2\pi} \Delta \phi, d_{y} = \frac{p_{y}}{2\pi} \Delta \phi_{y} \quad \dots \qquad (1)$$

ここで、 d_x , d_y は変位、 p_x , p_y は格子ピッチ、 ϕ_x , ϕ_y は位相差である。

以上の処理をリアルタイムに実行可能とするのが、サン プリングモアレカメラである。このサンプリングモアレカ メラは、CMOS撮像素子、FPGA (Field Programmable Gate Array)、メモリー、USBインターフェース、電源ユニットで 構成され、本研究で用いたものは、2048×2048pixelsの最大 サイズのとき14fps, 128×128pixelsの小サイズのとき230fps の速度で位相差分布をリアルタイムに出力することができる ものである。

サンプリングモアレ法で得られる変位の分布を微分するこ とによって、ひずみや回転角を得ることができる。カメラの 向きや収差による影響を考慮し、i方向の角度 $\alpha_i \ge j$ 方向の角 度 α_j をそれぞれ変位 d_y のxによる偏微分、 d_x のyによる偏微 分として求め、それらの平均値として回転角が求められる。

Fig.6に、製鉄所内の稼働中ベルトコンベアに対して測定 を行った際の配置を示す。対象としたベルトコンベアは、前 節3.1で述べたものと同じである。2本の支柱に対してピッチ 2.0mmの二次元格子を貼り付け、約5m離れた位置からそれ



(a) Original 2-D grating image



(b) Grating image obtained after smoothing process in the y-direction



(d) Phase-shifted sampling moire images produced from (c)



(c) Grating image obtained after smoothing process for the *x*-direction



(e) Phase-shifted sampling moire images produced from (d)



(g) y-directional moire phase distribution

Fig.5 Phase analysis for 2-D grating with sampling moire method.

ぞれの支柱を撮影するようにサンプリングモアレカメラを左 右2台設置した。レンズの焦点距離400mm、露光時間1ms、



Fig.6 Setup for a field test.

フレームレート 80fpsで撮影を行ない、撮影された画像のうち、領域サイズ 416×416 画素を抽出して変位の解析を行なった。

Fig.7に、測定例としてコンベアの荷重が連続的な場合の 支柱1のy変位およびその周波数解析結果を示す。0.1mm程 度の振幅変化があり、「ミラー駆動型高速アクティブビジョ ン」の測定結果でも見られた10Hzのピークが観察された。荷 重が断続的な場合は0.4mm程度の変位があり、Fig.8に示さ れるように、左右2本の支柱がわずかに回転していることが 観察された。両者の挙動の違いは梁の位置から支柱までの距 離によって説明できるものである。



センシングデータから異常を検出する方法に関し、本研究 会ではモデルベースによるアプローチとデータ学習によるア プローチで研究を進めた。本章では前者のモデルベースアプ ローチについて述べる。

データから異常を検出する方法として、何らかのしきい値 を設けて観測値がそれを越えるかどうかの判定を行う手法が 一般的である。あるいは、カルマンフィルターの出力におけ る事前推定値と観測値との間の差の急激な変化などを検出 する方法もある。これらの手法で観測値の変化に敏感に反応 するように検出システムを設計すると、設備の経年劣化など の事前に想定される変化(老化)に対して頻繁にアラームを 発生させることになる。一方、変化に対して鈍感になるよう に設計すると、本当に検出したい異常(病気)を見逃すリス



Fig.7 The result of a field test.



Fig.8 Measured rotating angles while two loads were carried intermittently.

クが高くなる。そこで、本研究では、事前に想定される変化 をモデルに組み込むことで、観測値から想定外の変化の存在 を検出する手法に関する研究を行った。設備の診断において は、対象が動的システムとなるので、任意の時間区間のデー タを用いて診断する際には初期状態の推定も必要となる。そ こで、初期状態・パラメータ・入力を同時に推定する手法が 提案されている。

Fig.9に、本検出法の枠組みを示す。事前に想定される変化 も含め、対象となる設備のモデルを構築する。実際の設備か



Fig.9 Framework of the diagnosis using model sets.



Spring-mass-damper system used as the numerical Fig.10 example.

ら得られる出力が想定領域Ymに属していれば設備は正常で あり、そこから外れていれば想定していない変化が生じてい ると判断される。この枠組みを実現するため、初期状態・パ ラメータ・入力を推定対象として、モデルの出力誤差の最小 化問題を考える。具体的には、出力データy,とモデル出力y との間の誤差:

$$e = \left\{ e \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}, \dots, e \begin{bmatrix} N-1 \end{bmatrix} \right\} \tag{2}$$

$$e[k] = y[k] - y_r[k](k = 0, ..., N - 1)$$
(3)

の大きさを以下の評価関数/

$$J(x_{e}, q_{e}, u_{e}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left\| e[k] \right\|^{2}$$
 (4)

で評価し、状態変数 x_e 、パラメータ q_e 、入力 u_e をガウスニュー トン法に基づいて求める方法を提案している。

本手法の有効性を検証するため、Fig.10に示す2慣性系の バネ定数推定の数値計算を行った。Fig.11 (a)の実線で示さ れる外乱を入力し、その出力 (Fig.11 (b)) から、上記の手法 で推定を行った。このときの入力の推定結果がFig.11 (c)の





(a) True input for the system and the initial input for optimization

Fig.11 The result of a numerical simulation.

ようになっており、与えた外乱と良く一致ししていることが わかる。ここで、出力データを生成する際のバネの自然長と バネ定数を変化させて評価関数Jを求めた結果を、Fig.12(下 側の曲面)に示す。この結果から、バネ定数k₁(ここでは変 化することが想定されるパラメータ:老化)の変化に対して Jが変化しないのに対し、自然長101(異常として変化:病気) に対しては大きく変化している。このことから、評価関数J を観察することによって、想定外の変化が生じていることの

検出が可能であることがわかった。

本手法は、出力データにノイズが乗る場合についても考察 され、誤差eにローパスフィルタを適用するとともに、入力 に帯域制限をかける推定方法が示された。Fig.12(上側の曲 面)に示されるように、ノイズがない場合よりも推定精度が 鈍るものの、自然長に対して評価関数値が増大しており、変 化を検出できていることが確認できた。

5 データ学習による時系列データの 変化点検出²⁴⁾

本章では、データ学習アプローチによる異常検出手法につ いて述べる。

時系列データから異常検知を行う計算手法は種々の例があ り、ガウス混合分布などを用いて外れ値を検出する方法や、 異常変数の選択手法に対応したマハラノビス=タグチ法、時 系列上の急激な変化を観測する変化点検出などが一般的に適 用されている。また、隠れマルコフモデル(Hidden Markov Model;HMM)を利用した異常検知技術も発展してきてお り、正常・異常状態の背後にある真の状態を推定することが できる点で優れているが、周波数帯域や分布モデルなどのハ イパーパラメータの最適化に課題があった。そこで、本研究会 では、隠れマルコフモデルを利用した異常検知技術について、 新たなモデル評価基準の提案と実データでの検証を行った。

隠れマルコフモデルは、時系列データの特徴パターンをモ デル化する手法の一つである。このモデルの基盤となってい るマルコフ連鎖モデルは、未来の状態が現在の状態の値だけ で決定される独立なものと考えるモデルだが、現在の状態が 直接観測可能であるという前提がある。一方、隠れマルコフ モデルでは状態は直接観測される必要はなく、確率事象だけ が観測されることをモデル化している。式(5)およびFig.13 に、隠れマルコフモデルの表現および時系列データを対象と した一般的な構成をそれぞれ示す。

$$p(S|\pi, A) = p(s_1 | \pi) \prod_{n=2}^{N} p(s_n | s_{n-1}, A)$$
 (5)

ここで、SおよびAは、それぞれ状態変数 (ベクトル) および 状態遷移確率行列である。また、πは初期状態S₁を定めるパ ラメータである。

コンベア設備の振動データなどの場合、振動発生源や固有 振動数によって観測される周波数が異なってくることが予想 されるが、事前にどの周波数領域が怪しいのかを特定するこ とは困難である。そこで、本研究では長時間継続する時系列 データを連続的に周波数解析ができるウェーブレット解析 手法(ウェーブレット変換)を適用し、それぞれの解像度波 形に対して隠れマルコフモデルを適用することにおよって、 未知の異常データの検出を行なう方法を提案している。その 際、多重解像度解析の解像度レベルや隠れマルコフモデルに 用いる分布の形状と分布の数など、多くのハイパーパラメー タが存在するため、以下の式(6)を評価関数として、変数・ ハイパーパラメータの推定を行うようにしている。

$$eval = \max_{i,j\in S, i\neq j} \frac{p(i,j)}{p(i,i)}$$
(6)

ここで、Sは状態の集合、p(i,j)は状態iからjへの遷移確率である。

本手法の有効性を確認するため、製鉄所のコンベアの振動 を「サンプリングモアレカメラ」で測定したデータを用いた (Fig.14)。Fig.14の時系列データにおいて、前半は在荷、後半 は空荷で、上から変位、速度、加速度である。このデータから



Fig.12 Values of the objective function for each k1 and lo1.



Fig.13 Hidden Markov Model.



Fig.14 Vibration data (load/empty), displacement (above), velocity (middle), acceleration (lower).

隠れマルコフモデルの状態遷移図を求めたものをFig.15に示 す。変位と加速度データについては、在荷の前半と空荷の後半 の状態をほぼ正確に推定することができていることがわかる。

この結果は、事前に2状態が存在するという情報を得た上 でのモデル化であるが、実際には状態が分からない中で監視 を行う必要がある。このような状況に対して、正常であるこ とが分かっている時系列データから作成したモデルと、未知 の時系列データから作成したモデルとの状態遷移確率の違い を見ることによって、未知の正常ではない状態を発見するこ とができることも示された。

6 おわりに

「適応的エリアセンシング手法を用いた知能化設備異常診 断」研究会の概要と成果について述べた。エリアセンシング については、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」、「サン プリングモアレ法による時系列変位計測」によって、サブmm オーダー、10Hz台の微小振動・変位を5m離れた遠隔から検 出できることが確認された。センシングデータから異常検出 する手法については、モデルベースアプローチとデータ学習 によるアプローチの2手法で取り組み、「想定される変化を含 むモデルの初期状態・入力・パラメータを同時に推定する手 法」により老化と病気を峻別できる可能性を確認し、「ウェー ブレット変換を適用した隠れマルコフモデル」により時系列 データから未知の異常データを検出できる見込みを得た。

今後、製鉄所での実用技術としていくために、エリアセン シング技術については小型可搬な装置の開発と揺らぎなどの



Fig.15 The result of HMM analysis. displacement (above), velocity (middle), acceleration (lower).

外乱に対する対策、振動データから構造損傷を検出するため の3D形状データに基づくモデルベースアプローチおよび/ あるいはデータベースアプローチによる診断技術の開発、さ らにはトータルシステムの構築が課題として挙げられる。こ れらの課題に取り組むべく、日本鉄鋼協会「制御技術部会」 からの推薦により研究会II「エリアセンシング技術による製 鉄所設備診断(主査:石井抱・広島大、副主査:伊藤友彦・ JFEスチール(株))」が2019年度から3年間の計画でスター トしている²⁵⁾。

このような技術開発を通して製鉄所全域スマートモニタ リングが実現されれば、現行の目視点検あるいは部分的なセ ンシングから、より広範囲で高密度な診断ができるようにな る。原料コンベアや各種配管、屋外のクレーン、煙突などの 老朽化部位を、足場を組むことなく遠隔から診断できるよう になれば、診断コストが大幅に削減されるとともに、より多 くの箇所の診断が可能になる。また高所での作業を削減でき れば安全面でのメリットも得られる。さらに基盤インフラ設 備だけでなく、圧延機やテーブルローラなどの生産設備への 適用も考えられ、今後の進展が期待される。

最後に、本研究会の活動にあたって、計測・制御・システム 工学部会をはじめ制御技術部会・設備技術部会など多くの技 術者・研究者の方々から、また鉄鋼協会事務局の皆様方から 多大なご支援とご指導を頂きましたことお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 玉置久: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 466, CD-ROM.
- 2)石井抱: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 467, CD-ROM.
- 3)金子修: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 471, CD-ROM.
- 4) 浅井徹: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 473, CD-ROM.
- 5)小野功, 倉橋節也: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 474, CD-ROM.
- 6) 玉置久: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 470, CD-ROM.
- 7) 松田浩, 山口浩平, 西川貴文, 木本啓介, 河村太紀, 西行 健: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 471, CD-ROM.
- 8) 浅井徹: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 475, CD-ROM.
- 9) 倉橋節也, 小野功, 戸田浩司: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 477, CD-ROM.
- 10) 藤垣元治, 中嶋友朗: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 481, CD-ROM.
- 11) 玉置久: CAMP-ISIJ, 31 (2018), 421, CD-ROM.
- 12) 藤垣元治, 中嶋友朗: CAMP-ISIJ, 31 (2018), 422, CD-ROM.

- 13) 石井抱, 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健: CAMP-ISIJ, 31 (2018), 426, CD-ROM.
- 14) 浅井徹: CAMP-ISIJ, 31 (2018), 429, CD-ROM.
- 15) 小野功, 倉橋節也: CAMP-ISIJ, 31 (2018), 431, CD-ROM.
- 16) 玉置久: CAMP-ISIJ, 32 (2019), 412, CD-ROM.
- 17) 石井抱, 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健: CAMP-ISIJ, 32 (2019), 413, CD-ROM.
- 18) 藤垣元治, 中嶋友朗: CAMP-ISIJ, 32 (2019), 415, CD-ROM.
- 19) 浅井徹: CAMP-ISIJ, 32 (2019), 418, CD-ROM.
- 20) 小野功, 倉橋節也: CAMP-ISIJ, 32 (2019), 420, CD-ROM.
- 21) 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健, 石井抱, 古賀掲維, 松田浩:鉄と鋼, 106 (2020) 2, 61, https://doi.org/10.2355/ tetsutohagane.TETSU-2019-059.
- 22) 藤垣元治, 中嶋友朗: 鉄と鋼, 106 (2020) 2, 71, https:// doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-081.
- 23) 浅井徹,山川雅文,奥田真由,津田和呂,金子修,岸真友, 東俊一,有泉亮:鉄と鋼,106 (2020) 2, 80, https://doi. org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-061.
- 24) 倉橋節也,小野功:鉄と鋼,106 (2020) 2,91, https:// doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-066.
- 25) 石井抱: CAMP-ISIJ, 33 (2020), 535, CD-ROM.

(2021年2月12日受付)