

サブテラヘルツ波を用いたコンクリートのかぶり厚さ および含水状態予測の深層学習による高度化

DEEP LEARNING-BASED PREDICTION OF COVER THICKNESS AND MOISTURE CONTENT IN CONCRETE USING SUB-TERAHERTZ WAVES

小山 颯
Ken KOYAMA

To apply current non-destructive and non-contact testing using sub-terahertz waves to real structures, further advancement is essential. In this study, deep learning was employed to analyze the measured data obtained by sub-terahertz camera. The results demonstrated that high-accuracy predictions are possible even when visual discrimination is difficult. Furthermore, by constructing a multi-label model that simultaneously predicts two parameters, we successfully captured the characteristics of abnormal indexes calculated by the model with high fidelity. These results suggest that the interpretation from features established in this study may remain effective even when the number of variables is expanded.

Keywords : Deep learning, Multi-label, Cover thickness, Moisture content, Unsupervised learning, Sub-THz waves

深層学習, マルチラベル, かぶり厚さ, 含水率, 教師なし学習, サブテラヘルツ波

1. はじめに

デジタル技術の発展に伴い、様々な場面で人工知能・深層学習の活用が検討されている。深層学習の導入により、人間には判断不可能な微細な特徴量を抽出できる¹⁾だけでなく、従来の煩雑な解析工程を簡略化し、コスト削減をもたらすことが期待される²⁾。適用先の一つとして構造物の非破壊検査が挙げられる³⁾が、その背景には、国内で加速的に増加する老朽化インフラへの対策と、労働人口の減少が挙げられる。こうした状況下で、迅速かつ効率的な維持管理手法が求められており、赤外線法をはじめとするさまざまな非破壊・非接触検査技術の開発が進められている。しかし、赤外線法は日光を要するため検査可能な区域に制限があるなど、既存の各技術には特有の課題が残されている。こうした背景から、測定環境に影響を受けない、迅速かつ効率的な検査方法の必要性が高まっている。

そこで、未踏領域の電磁波として、サブテラヘルツ波を活用した非破壊・非接触検査が注目を集めている。サブテラヘルツ波を活用することで、コンクリート中の内部鋼材をリアルタイムで検出可能である⁴⁾ほか、電磁波特有の性質を利用した含水状態の影響による評価が可能^{5),6)}である。これまで、実構造物を模擬したコンクリート内部の鋼材探査に関する検討が行われてきた。これらの検討では、試験体を十分に乾燥させることで、電磁波の伝播に強く影響する水分の影響を排除してきた。しかし、実構造物への適用においては、降雨等の影響によりコンクリートの含水状態が必ずしも乾燥した状態にあるとは限らない。こうした内部鋼材と水分が共存する条件下

におけるサブテラヘルツ波の反射特性については、未だ十分に検討されていない。さらに、これら反射成分の複合的な関与は測定結果の解釈は困難にするが、深層学習の活用により、複雑なデータからの有意な情報を識別できる可能性がある。

以上の背景から本研究では、サブテラヘルツ波を用いた非破壊・非接触検査に対して深層学習を適用することで、当該検査技術の高度化を図る。具体的には、コンクリート内部の鋼材のかぶり厚さおよび含水率に着目し、これらを教師なし深層学習により予測することを目標とする。

2. サブテラヘルツカメラによる測定概要

本章では、3章で詳述する深層学習による解析に使用するためのデータの取得方法について述べる。

2.1 試験体の作製および調湿

コンクリートの作製には、セメントとして普通ポルトランドセメント、細骨材として砕砂および陸砂、粗骨材として碎石、混和剤としてAE減水剤を使用した。これらの材料を使用して作製した試験体の調合表を表1、試験体の概要を図1に示す。高さ100 mm、長さ400 mmの梁型試験体に用いられる型枠を使用することで、鋼板を埋設した試験体（以下、鋼板試験体）を作製した。内部の鋼板は、かぶり厚さを試験体ごとに変化させながら埋設した。これらの試験体の作製を、打設日を分けて行うことで、かぶり厚さごとに4体の試験体を作製した。試験体を打設後、28日間の水中養生を行った。

次に、作製した試験体に対して、内部の水分の分布を均一にする

ために調湿を実施した。これは、後述するサブテラヘルツ波が水分の影響を強く受ける特性を考慮し、測定条件を一定に整えるためである。調湿は、飽水、湿潤、乾燥、絶乾の4段階で実施した。飽水は28日間の水中養生後も水中保管を継続した。湿潤は、JIS A 1475を参考に、75%RHの環境で恒量になるまで静置した。乾燥は、105°C・144時間の乾燥を行い、その後恒量になるまで静置した。絶乾は、105°Cのオープンで恒量になるまで乾燥を継続した。ここで恒量とは、24時間ごとの質量測定において、以下の式(1)に示す質量変化率が、3回連続して0.1%以下となることを指す。各調湿段階における含水率を図2に示す。調湿によって、段階ごとに1~2%の差異が生じた。

$$\text{質量変化率} = \left| \frac{N \text{ 回目の試験体の質量} - N+1 \text{ 回目の試験体の質量}}{N+1 \text{ 回目の試験体の質量}} \right| \times 100 \quad (1)$$

2.2 サブテラヘルツ波について

サブテラヘルツ波とは、周波数が0.03~0.3 THzの電磁波を指す。コンクリートを含む非極性物質に対する透過性が高く、電磁波レーダ等に使用されるミリ波に比べて高い直進性を有する⁷⁾。

2.3 サブテラヘルツカメラによる測定方法

サブテラヘルツ波を使用した測定系を図3に示す。サブテラヘルツ波の発振にはマイクロ波発生装置、および通倍器を採用した。また、テフロンレンズを用いて試験体表面および検出器へ集光するように、各装置の位置および角度を調整した。さらに本研究では、検出器として、サブテラヘルツ帯に適性を持つ16×16の256個の素子を2.4 cm四方の中に1.5 mm間隔で搭載したサブテラヘルツカメラを使用した。また、測定時の周波数依存性も考慮するために、30~50 GHzの周波数域を1 GHzずつ連続的に変化させた。

図4に試験体の測定位置を示す。鋼板試験体について、試験体のY軸方向の中央部分からZ軸方向に5 mm間隔で、計5箇所測定を行った。複数点の測定によって、コンクリート表面の微細な欠陥や

骨材の配列による測定結果のばらつきを考慮した。同時に、鋼材を含まない箇所においても測定を行った。

2.4 測定水準

本研究では、鋼材のかぶり厚さ、含水率を変数とした。具体的には、かぶり厚さを10、20、30、40 mmの4水準、コンクリートの含水状態を飽水、湿潤、乾燥、絶乾の4条件とした。

3. 深層学習による解析

3.1 作成したデータセット

2章で詳述した方法を採用することによってデータを取得し、それらからデータセットを構築した。結果として、鋼材のかぶり厚さの予測に用いるデータセットは14280個、含水率の予測に用いるデータセットは2688個のデータからなるデータセットをそれぞれ構築した。モデルの学習用には、これらの測定画像の中から、反射強度のばらつきが小さいデータを「正常」なものとして選択して用いた。このデータセットを使用することで、次節で詳述する深層学習による教師なし学習による予測モデルを構築した。

3.2 構築した深層学習モデル

本研究では、コンクリート材料の分野において有効性が確認されているニューラルネットワーク(NN)を採用し、オートエンコーダによる異常検知モデルを構築した。基本とした教師なし学習のモデルを図5に示す。先の測定で得られた測定結果を画像として画像入力層に入力した。同時に、測定結果が使用した周波数に依存するという特性から、周波数の数値を周波数入力層に入力した。これらに対し、空間的な特徴量の抽出を得意とする畳み込み層を適用することで、特徴量の抽出を行った。その後、逆畳み込み層を経て、誤差関数に二乗誤差を用いることでモデルを最適化し、入力画像に対する復元画像を出力として得た。本手法では、入力画像と復元画像の画素値における差分を異常値として算出した。先述の通り、反

表1 コンクリートの調合表

セメント	水	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
340	180	810	954	1.7

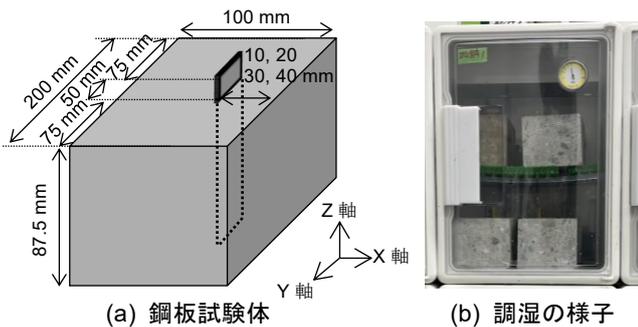


図1 作製した試験体

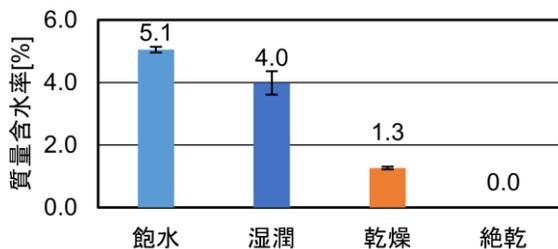


図2 各調湿段階の質量含水率

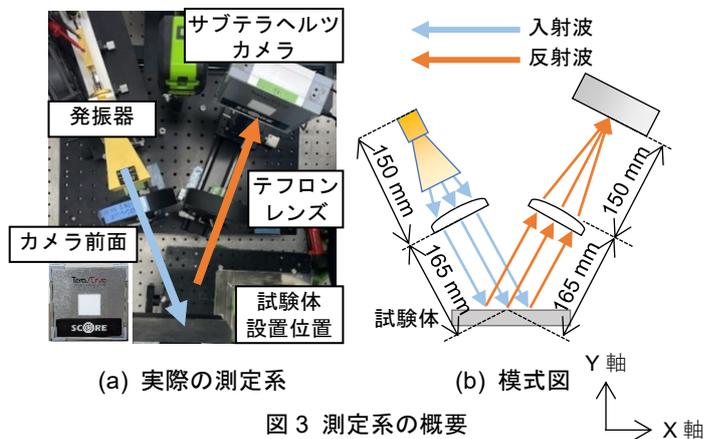


図3 測定系の概要

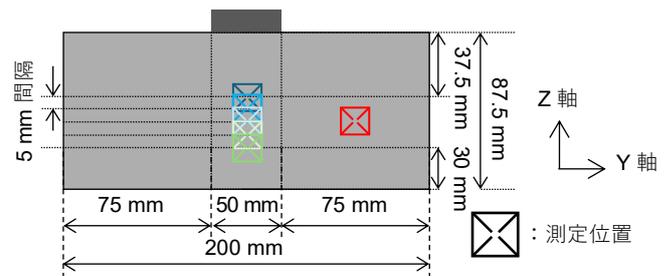


図4 試験体の測定位置

射強度のばらつきが小さい「正常」と定義されるデータをモデルの学習用に用いた。このため、正常データには鋼材や水分に起因する反射成分の変動が少ない一方、反射成分が大きく増加するデータについては「異常」として検知するように設定した。

本研究では、1つの目的変数に対して個別にモデルを構築するシングルラベルモデルと、2つの目的変数に対して1つのモデルを構築するマルチラベルモデルの検討を行った。シングルラベルモデルでは、絶乾状態における鋼材のかぶり厚さ、およびコンクリートの含水率をそれぞれ予測対象とした。マルチラベルモデルでは、これら2つの変数の同時予測を試みた。各モデルの学習用データおよび試験用データには、それぞれ異なる試験体から取得したデータを用いることで、モデルの汎用性の向上を図った。

4. 測定結果および深層学習による解析結果

4.1 サブテラヘルツカメラによる測定結果

図 6(a)に絶乾状態の鋼板試験体における鋼板を含む位置での測定結果の一部を 10 GHz ごとに示す。かぶり厚さ 10 mm では、鋼材の反射に由来する反射強度の増減が確認された。かぶり厚さ 20, 30 mm においても、一部の周波数でコンクリート表面と鋼材による反射が干渉を起こしたことによって、鋼材の同定が認められた。以上の結果から、絶乾状態における鋼板の目視による認識は、最大でかぶり 30 mm 程度まで可能であると予想される。

次に、図 6(b)に鋼板を含まない位置において、含水状態を変化させた場合の測定結果の一部を 10 GHz ごとに示す。試験体が湿潤状態に進行するほど、反射強度が大きくなる結果が得られた。これは、コンクリート中の水分が膜上に作用することによって、反射特性が変化するためであると推察される。

以上の結果から、サブテラヘルツ波はコンクリート中の鋼板および含水状態の影響を顕著に受けることが確認された。しかし、一部のパラメータには鋼材や水分に由来する反射成分が含まれているものの、目視による判別が困難なケースも存在する可能性がある。そこで深層学習による特徴量抽出を行い、同定可能範囲の拡大を図る。

4.2 深層学習による解析結果（シングルラベル）

先述の通り、教師なし学習によって、各かぶり厚さおよび各含水率に対する異常値を得ることができる。はじめに、絶乾状態の試験体における鋼材のかぶり厚さごとの異常値を算出した結果を図 7 に示す。横軸は、各かぶり厚さのデータ（各 420 点）を順に配列した

ものである。また、各かぶり厚さにおける異常値の平均を算出した結果を併せて示し、その近似曲線によって、本研究における実験水準以外（例えば、かぶり厚さ 15 mm）への適用可能性も検討した。結果として、鋼材のかぶり厚さの減少に伴い、異常値も減少する傾向が最大で 40 mm まで確認された。これは、かぶり厚さが大きくなるほどデータに含まれる鋼材由来の反射成分が減衰することに起因すると推察される。この傾向は、本研究で設定した異常・正常の判定条件とも一致する。このような強い相関関係が確認されことは、本研究で設定した条件以外のかぶり厚さ（例えば、かぶり厚さ 25 mm や 35 mm）に対しても、予測が有効である可能性を示唆している。

次に、含水状態（図中では含水率）ごとに異常値を算出した結果を図 8 に示す。横軸は、各含水状態のデータ（各 336 点）を順に配列したものである。また、各かぶり厚さにおける異常値の平均、およびその近似曲線を示し、本研究における実験水準以外（例えば、含水率 2.5%）への適用可能性も検討した。含水率の増加に伴い、異常値の増加が確認された。これは、水分の増加によってサブテラヘルツ波による反射成分が増加したことが起因すると考えられる、この傾向は、前述と同様に、本研究で設定した異常・正常の判定条件とも一致する。以上の結果から、含水率と異常値に強い相関が認められたことによって、本研究で設定していない含水率に対しても、本モデルによる予測が適用可能であることを示唆している。

4.2 深層学習による解析結果（マルチラベル）

マルチラベルモデルによって算出した異常値の平均、およびその近似曲面を図 9(a)に示す。このとき、近似曲面の算出には、以下の式(2)を用いた。シングルラベルモデルで観測された指数関数的な変化に対応するため、2変数2次関数の一部に指数項を導入した。

$$z(x, y) = \left(1.29 (5.3 - y) \exp\left(-\frac{x}{15}\right) + 0.37 \exp\left(\frac{x}{3}\right) - 0.09 xy + 0.55 x + 1.99 y - 2.63\right) \times 10^{-3} \quad (2)$$

ここで、 x : かぶり厚さ[mm]、 y : 含水率[%]、 z : 異常値の平均[-]である。

上記の近似曲面による決定係数は 0.93 と高い値を示した。曲面上では、かぶり厚さ 10 mm、含水率 0%における異常値が最も高い値となった。この傾向は、本研究で定義した異常の条件を反映しているものであると捉えられる。ここで、近似曲面の精度を検証するため、各パラメータにおける実測値（異常値の平均）と近似値の一致

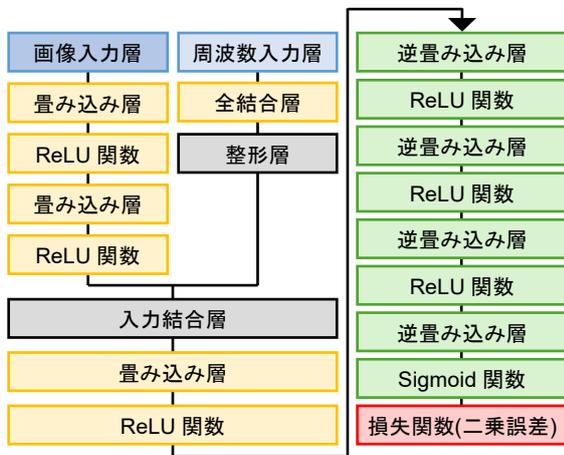


図 5 教師なし深層学習のモデル構造

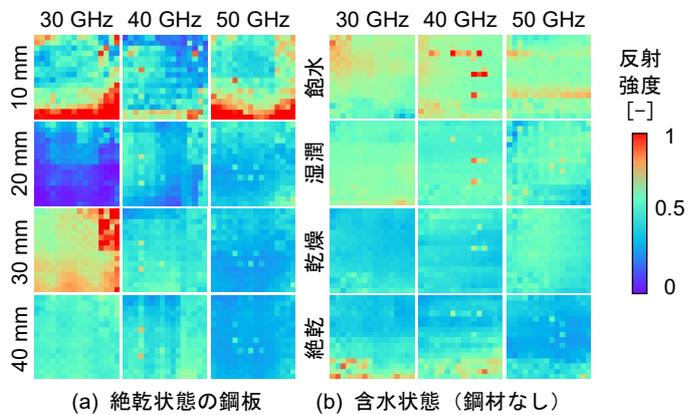


図 6 サブテラヘルツカメラによる測定結果

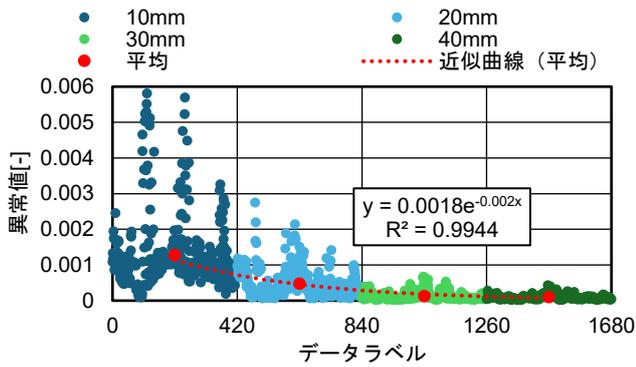


図7 かぶり厚さと異常値の傾向 (シングルラベル)

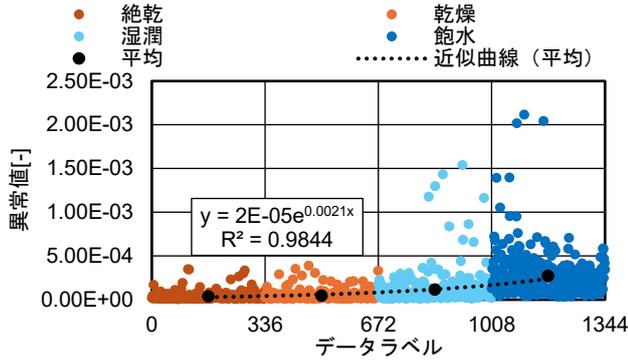


図8 コンクリートの含水率と異常値の傾向 (シングルラベル)

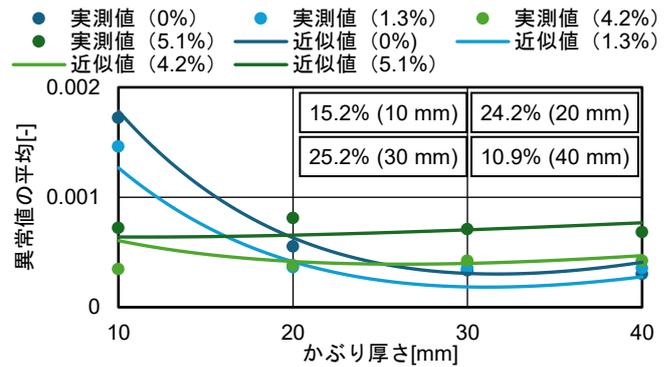
度を確認した。具体的には、3次元近似曲面のかぶり厚さまたは含水率のいずれか一軸を固定し、各変数の変化に対する異常値の平均の挙動を比較した。結果を図9(b)、(c)に示す。各図中には、各パラメータにおける実測値に対する近似値の誤差をパーセントで示している。かぶり厚さの変化に対する一致度を確認すると、いずれの含水率においても、実測値の変化を近似値が良好に再現できていると言える。同様に、含水率の変化に対する一致度を確認すると、近似値は実測値を良好に追従していると判断できる。

以上の結果から、本研究で構築したマルチラベルモデルから算出される異常値の傾向は、実測値に対して良好に追従していると推察できる。したがって、本研究で対象としたかぶり厚さおよび含水率以外の任意の値の予測、さらには、変数を拡張した場合においても、同様の手法により特徴量の解釈が可能であると結論付けられる。

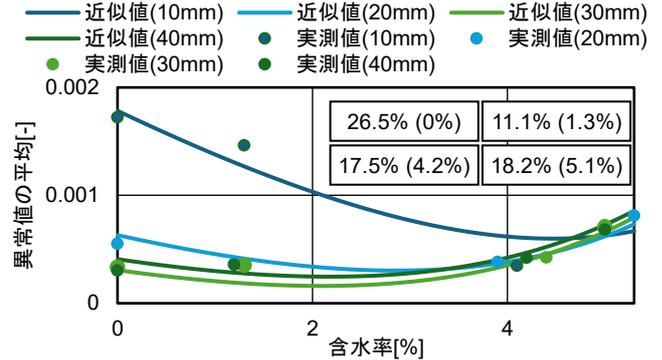
5. まとめ

本研究では、水分と鋼材の影響が複合的に作用することため解釈が困難であったサブテラヘルツ波の測定結果に対し、深層学習を適用することで定量的な評価指標を導入し、非破壊検査の高度化を図った。以下に、得られた知見を示す。

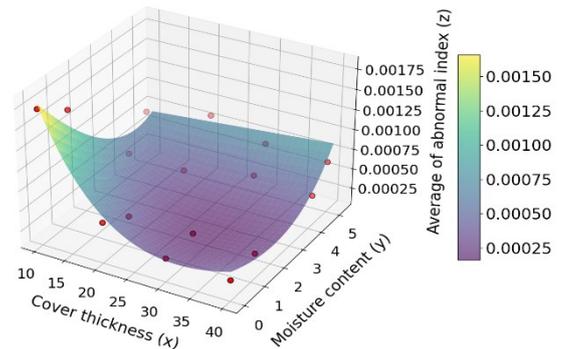
- 1) サブテラヘルツカメラを用いた測定結果に教師なしを適用することによって、鋼材のかぶり厚さおよびコンクリートの含水率について、それぞれ同定可能な範囲の拡大が確認され、従来は解釈が困難であった含水状態と鋼材が共存する条件下でも、有効な指標になり得ることが示唆された。
- 2) 鋼材のかぶり厚さおよび含水率を同時に予測するマルチラベルモデルを構築し、得られた異常値に基づき近似曲面を導出した。この近似曲面は実測値を良好に再現しており、本モデルが高い精度で各パラメータを予測可能であることを確認した。



(c) 鋼材のかぶり厚さと異常値の関係 (含水率を固定)



(b) 含水率と異常値の関係 (かぶり厚さを固定)



(a) かぶり厚さと含水率による近似曲面全体

図9 マルチラベルモデルにおける異常値の平均の傾向

参考文献

- 1) Sathya, R. et al.: Comparison of Supervised and Unsupervised Learning Algorithms for Patter Classification, International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, Vol. 2, No. 2, pp. 34-38, 2013.2
- 2) 根本 充貴: 特集/教師なし・弱教師あり学習の最新の研究動向とその医療分野, Medical Imaging Technology, Vol. 39, No. 4, pp. 133-134, 2021.9
- 3) 杉崎 光一ほか4名: インフラメンテナンスの生産性向上のためのAI活用とユースケース, 土木学会論文集 AI (構造・地震工学), Vol. 76, No. 2, 197-211, 2020.
- 4) Kobayashi, C. et al.: Non-destructive testing of reinforced concrete structures using sub-terahertz reflected waves, Developments in the Built Environment, Vol. 18, 100423, 2024.4
- 5) 岸原 充佳ほか1名: マイクロ波化学を楽しもう! 第五章-電氣的加熱減少, マイクロ波誘電加熱と物質の電子状態, 海洋科学研究, Vol. 35, No.1, pp.30-33, 2022.4
- 6) 有田 剛ほか2名: 遠距離測定に向けたサブテラヘルツ波による内部欠陥検出の基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 1450-1455, 2023.7
- 7) 田邊 匡生: ギガヘルツ測定システムの構築と鉄筋コンクリート内部の非破壊検査への応用, 鉄と鋼, Vol. 110, No. 12, pp. 912-917, 2024.5