ニューラルネットワークの鋼板表面きず検査 への応用研究

正員 中野 公明 (新日本製鐵)

正員 福谷 和彦 (新日本製鐵)

非会員 瀬野 聰 (新日本製鐵)

非会員 白川 芳幸 (新日本製鐵)

非会員 田中 宏幸 (新日本製鐵)

The Study of Neuralnetwork for Surface Inspection of Cold Rolled Sheet

Kimiaki Nakano, Member, Kazuhiko Fukutani, Member, Satoshi Seno, Non-member, Yoshiyuki Shirakawa, Non-member, Hiroyuki Tanaka, Non-member (Nippon Steel Corporation)

The steel industry is very interested in the high accurate inspection technique of cold rolling strip because of requirement of high quality products and high speed production.

Although a laser reflecting inspection system is generally used, the accuracy of inspection is not sufficient yet.

We have developed new approach for a inspection method used advanced neural network technology joined with a conventional laser inspection equipment.

In this paper, we show our proposed method, the performance through experiment with sample defects data and the comparison between proposed method and two conventional methods.

キーワード：きず検査，鋼板，ネットワーク，ニューラルネット

1. ま え が き

鋼板表面のきず検出精度は，自動車・家電などの需要家の意匠性向上などのニーズの高まりから，年々要求が厳しくなっている。

また，鋼板は品種により色彩，粗度，光沢などの表面状態が多岐にわたるうえに，きずの種類も介在物に起因するものや設備的に生じるきずなど豊富であり，検査は困難を極めている。

加えて，製造ラインの直結・連続化が進み，製造速度の高速化が進展しており，人間による検査に頼るには限界があり，検査の自動化が望まれている。

きずの検査は，きずの有無の検査ときずの程度・種類の検査に分かれる。本論文では第1ステップであるきずの有無検出に関する開発結果を報告する。

現在までに，渦流式，超音波，光学式の検査装置が様々な検討され適用が試みられてきた。なかでも，特に

レーザを使用した光学式の検査装置が，その制御性，微細検査可能性から注目されている。

レーザ検査装置は，一般には反射波形電圧がある一定値以上出力した場合にきず検出と判定している。

しかし，この電圧強度のみを用いる方式では鋼板地合レベルの電圧強度（雑音レベル）近傍にしきい電圧を設定すれば高検出性能が得られるが，実際には，鋼板表面状態の相違による雑音レベルの変化や設備の振動，対象鋼板のバツキなどの外的要因により余裕をもたせた設定をせざるを得ない状況である。また，微細なきずの中には強度的には雑音レベル以下の出力しか生じないが，波形上明らかに地合と異なる要素をもったきずもあり，このようなきずに対しては電圧強度のみでは検出が不可能である。

そこで本提案では，電圧波形から，きずを表し雑音レベルの変化に追従可能な複数の特徴量を抽出し，それらの特徴量ときずの有無との関連づけにネットワー

図 1 レーザ検査装置
Fig. 1. The laser inspection equipments.

ク法を用いた試みを行った。

特徴量と事象との関連付けの方法としては、ほかに線形結合の重回帰分析があるが、きず検査は連続した入力量（特徴量）に対して、出力はきずがあるかないかの離散量となるために、非線形要素の導入が必要であり、ネットワーク法の特徴を生かせると考えた。

本論文では、開発したきず検査用のネットワークおよび開発に至った経緯を紹介すると共に、実際の鋼板からレーザー検査装置で採取したデータに基づく性能評価結果を述べ、今後の実使用化の計画を示す。

2. レーザ検査装置

レーザー検査装置は種類の差こそあれ、鋼板上にレーザーを幅方向に走査（もしくはシリンジカルで広角化）させ、その反射光をフォトマル、CCDなどの受光装置で受けた電圧波形を検査対象としている。そして、その反射波形そのもの、もしくは反射波形の微分波形に対して、一定の電圧（しきい電圧）以上の出力が生じた場合にきずがあるという検査方法が主流である。

レーザーの検査装置は大別して

- (i) 簡易形：レーザーの反射光を受光素子で受け電圧波形化する
- (ii) 複合形：レーザーの反射光を集光し回折パターンを種々のマスクにより空間フィルタを施し光電変換する

の二方式に分かれる。簡易形では第1章に述べた課題が依然として残っており、複合形では集光レンズなどの光学系が複雑になり調整が難しいうえ、高額な装置となる欠点がある。

3. 提案法の考え

レーザー検査装置は高精度化を目指して装置が複雑に

図 2 検査概念図
Fig. 2. The concept of the inspection.

表 1 きず分類と検出目標
Table 1. Defects group and object.

きずグループ	内 容	検出目標 (%)
ハレンチきず	見逃し不可の大きなきず	95
微細きず	程度小および点状きず	60
超微細きず	レーザー法で検出困難なきず	30
過検出率		5%以下

なる傾向があるが、簡易形の検査装置でも機器構成が簡易なだけであり、投受光機器の性能などは複合形の装置に比べて遜色はないのが実状である。

確かに、簡易形では電圧強度のみを検査対象とするため、雑音レベル以下のきずに対しては見逃しが生じるが、そのようなきずでも波形の形は地合に比べて明らかに相違がある。そこで、情報量を増すために、ある範囲内にきずが存在するか否かを判定するシステムを考えなくてはならない。

また、雑音レベルの変動を吸収しうるシステムにしないでは現場調整が煩雑になり、実用化が難しい。

加えて、きず有無検出は連続した入力に対し、出力はきずがあるかないかの離散量となるため非線形の扱いが必要となる。

以上の観点から、以下の項目を開発の概念とした。

- (i) 簡易形の検査装置の信号から情報を抽出する。
- (ii) 強度情報に加えて波形の形状を表す特徴量を考案する(図2)。
- (iii) 板幅方向5mmごとのゾーン内を小検査区分(範囲A)とする(1,000mm幅であれば200ゾーンが検査対象)。
- (iv) オンライン変動要因に影響を受けないシステムとする。

① 地合の変化に追従可能とする。

② バタツキ・振動に堅牢とする。

③ 塗油材の検査可能とする。

(v) 複数特徴量ときず有無の関連をネットワーク法によりシステム化する。

(vi) 検出目標として表1のようなきずの分類で検出率、過検率を定めた。

図 3 実験装置構成
Fig. 3. The experimental system.

$$\text{検出率} = \frac{\text{検出きずサンプル数}}{\text{総きずサンプル数}} \times 100$$

$$\text{過検率} = \frac{\text{無きず過検サンプル数}}{\text{無きず総サンプル数}} \times 100$$

4. 実験装置の構成

特徴量の決定、ネットワーク作成、検出性能を評価するため必要なデータは、図3の装置構成による実験装置を用いて、きずデータはカットサンプルで、無きずデータはオンラインから採取した。

検査装置より $\pm 2\text{V}$ の電圧信号で反射光の微分波形を高速A/D装置に入力し、波形形状を再現できる変換レート(20 MHz, 50 ns)にて波形ディジタル化して記録装置(ディスク)に記録する。そのデータから特徴量を計算し、ニューラルネットシミュレータにて学習・判定を行うシステム構成となっている。

5. 特徴量の選択

入力すべき特徴量として大きく強度特徴量と波形の形状特徴量に分け、各々幾つかの特徴量を考えた。

(i) 強度特徴量

- ① 反射波形電圧最大値(GNDからのピーク強度)
- ② 反射波形電圧レンジ(正負のピーク強度差)
- ③ 微分波形電圧最大値(GNDからのピーク強度)
- ④ 微分波形電圧レンジ(正負のピーク強度差)

(ii) 形状特徴量

- 反射波形：⑤ 一次平均，⑥ 二次平均，⑦ 三次平均，⑧ 変動
- 微分波形：⑨ 一次平均，⑩ 二次平均，⑪ 三次平均，⑫ 変動

これらの特徴量に関して、きずおよび無きずデータを使用して、特徴量ときず有無との相関を調べた結果、

- ③ 微分波形電圧最大値(GNDからのピーク強度)
 $\text{MAX}(|V|)|\text{範囲} A$
- ④ 微分波形電圧レンジ(正負のピーク強度差)
 $\text{MAX}(V) - \text{MIN}(V)|\text{範囲} A$

表.2 入力特徴量の組合せ
Table 2. The group of input data.

組合せ	電圧最大値	電圧レンジ	二次平均
#1		○	○
#2	○		○
#3	○	○	○

図 4 範囲 A と範囲 B
Fig. 4. Region A and region B.

⑩ 微分波形二次平均

$\Sigma(V^2)/n|\text{範囲} A$ (n : 範囲 A 内のデータ数)
が適していることがわかった。ネットワークの作成時にこれらの三特徴量から表2の三つの入力値の組を作る。

6. 地合変動分の吸収と入力レンジ調整

<6・1> 地合変動分の吸収 鋼板の地合は鋼種、粗度、機械的振動などにより種々変化する。この変化は雑音レベルの電圧値の差異として現れ、従来のしきい値法では調整が煩雑になる原因となっていた。

そこで、地合変動分を補償するために、検査対象である範囲 A (5 mm 幅) 内で計算した特徴量を、範囲 A より大きな幅範囲 B (約 300 mm を採用) で計算した特徴量で規格化する。この規格化は三特徴量のうち、地合の変動分が蓄積される二次平均にのみ適用する。

$$\text{規格化二次平均}(X_2) = \frac{\Sigma(V^2)/n|\text{範囲} A}{\Sigma(V^2)/n_2|\text{範囲} B}$$

n : 範囲 A 内のデータ数, n_2 : 範囲 B 内のデータ数

<6・2> 入力レンジ調整 電圧最大値、電圧レンジの強度の二特徴量はネットワークへの入力レンジをほぼ 0~1 に入れるために、学習データから計算した標準偏差で規格化した。

$$\text{規格化強度量}(X_1) = \frac{\text{強度量}}{\sigma(\text{学習用データより計算})}$$

<6・3> 波形変動影響の加味 オンライン装置では、板の振動や装置の経時的変化により信号波形への影響が懸念される。例えば、板の振動によりレーザスポットが受光部からずれると信号レベルが減少する場合

合や、振動そのものが雑音となり信号の雑音レベルを増長させるなどのケースが考えられる。

これらの問題に対して、あらかじめそれらの状況を含んだ学習データでネットワークを学習させることにより、検出への影響をなくすることができるかどうかを検討した。

7. ネットワーク作成と検出性能評価

学習用データを使用して、第5章で得られた特徴量を計算し、入力値として表2の三とおりの組合せを採用し、中間層数を種々変化させBPN（バックプロパゲーション）にて学習させたネットワークを用いて、評価用データにて検出性能を評価した。

学習用データと評価用データの個数を表3、表4に示す。

表3 学習に用いたデータ
Table 3. The learning data.

きずグループ	内 容	データ個数
ハレンチきず	見逃し不可の大きなきず	2
微細きず	程度小および点状きず	12
超微細きず	レーザ法で検出困難なきず	1
無きず	塗油材含む	20

表4 評価に用いたデータ
Table 4. The recall data.

きずグループ	内 容	データ個数
ハレンチきず	見逃し不可の大きなきず	21
微細きず	程度小および点状きず	21
超微細きず	レーザ法で検出困難なきず	15
無きず	塗油材含む	115

表5 入力特徴量、中間層ノード数と検出率
Table 5. Input data and middle layer.

入力	ノード数	検出率	過検率	対象きず
#1	3	70.3	0.0	全きず対象
	4	73.7	0	
	7	71.9	0	
#2	3	60.4	0	
	4	65.2	0	
	7	70.2	0	
#3	3	55.0	0	
	4	60.3	0	
	7	64.2	0	
#1	4	96.4	0	ハレンチきず
		70.4		微細きず
		38.5		超微細きず

信号の変動を含んだ学習データを付与するために、学習用データには波形強度（絶対値）を一律+50%した無きずデータを四つ、一律-50%したきずデータを四つ加えた。

現状特徴量の選択やネットワークの設計には、基準データを用いたシミュレーションを実施するほかに簡便な方法がない。

学習は逆搬学習則により1,000回の学習を実施した。最終層の誤差積算値ではなく、学習回数で学習の打ち切りを判断した。

きずのサンプルを入力したときに1を、無きずのサンプルを入力したときに0を出力するように学習させた。

きず判定基準として、ネットワーク最終層からの出力は0~1の間の値をとるため、0.5以上の出力が出た場合きず判定とする。

表5に表2の入力条件と、ネットワーク中間層の組合せによる評価データを使用した検出性能の比較を示す。

入力特徴量として、④微分波形電圧レンジ、⑩微分波形二次平均を組合せ、ネットワークは中間層のノード数4の3層BPNが最も簡便なネットワークで検出性能に優れていることがわかる。

最終的には実ラインで全長リアルタイム検査が必要のため、計算負荷の面からネットワークは簡便であることが望ましく、上記ネットワーク構成を採用した。また、高速検査のために、各ノードにおける伝達関数のしきい値調整をバイアス層を付与することにより行っている。

2入力量ときず有無の出力の関係は、図5に示すように非線形関係をもっており、ネットワーク法の非線形性に適した問題であると考えられる。

また、同図上の学習により得られたネットワーク出力の分離曲線は、学習データの非線形性を満足したものであることがわかる。

図5 特徴量とネットワーク出力
Fig. 5. Two specific data and output of the obtained network.

図 6 得られたネットワーク
Fig. 6. The obtained network.

なお、超微細きずに分類したきずはレーザ検査装置のスポット径(1.8 mm×0.25 mm(幅)のだ円形)に対して分解能が得られないほど微小であるきず、または大きな曲率をもち微分信号が得られないきず種・程度を集めており、センサ側の測定可能範囲を超えているために良い検出性能を得られなかった。

8. 他手法とネットワーク法の比較

他手法として次の三手法を検討した。

〈8・1〉 しきい値法 微分信号の電圧波形の強度があるしきい値以上であればきずありと判定(一般的に使用される手法)。信号は2.0 V_{p-p}に電圧変換されている。

(1) しきい値の決定 無きずおよび塗油材で過検を起こさないしきい値を設定する。

しきい値=TL=0.17 V

〈8・2〉 特徴量しきい値法 第5章で得られた特徴量に対してある一定のしきい値により判定を行い、検出性能を評価。

- (1) ① 規格化二次平均(X_2)
- ② 規格化強度量(X_1)
- ③ ①と②のAND

を対象特徴量としたが、②の規格化強度量による結果が最も優れていた。

(2) きず判定しきい値決定 無きず学習データによる近似出力で過検が起こらない値をきず判定しきい値と設定。

規格化強度量しきい値=KTL=0.9

〈8・3〉 重回帰近似法 ネットワーク法に使用した学習データで計算した特徴量を用いて多項線形近似を行い、評価用データで検出性能を評価。

(1) 独立変数の選択 ネットワーク法で使用した二特徴量および各々の三次項までを独立変数として採用(四次以降は効果小、log関数も同様)。

(2) 学習用データ(ネットワーク学習と同一データ)による重回帰係数決定 得られた近似式(X_1 , X_2 は〈8・2〉節(1)参照)。

図 7 近似出力(無きず)
Fig. 7. The approximate output.

表 6 検出性能の比較
Table 6. The comparison of performance.

手 法	検出率			過検率
	ハレンチ	微 細	超 微 細	
ネットワーク法	96.4	70.4	38.5	0.0
特徴量しきい値法	96.4	68.7	38.5	0.0
重回帰近似法	94.1	68.7	38.5	0.0
電圧しきい値法	85.7	44.4	38.5	0.0

$$\begin{aligned} \text{出力} = & 0.0461854 \times X_1 + 0.5177745 \times X_2 \\ & - 0.023286 \times X_1 \times X_2 \\ & + 0.0000932 \times X_1^3 \\ & - 0.010316 \times X_2^3 \end{aligned}$$

(3) きず判定しきい値決定 無きず学習データによる近似出力で過検が起こらない値をきず判定しきい値と設定。

JTL=0.6 (図7参照)

〈8・4〉 検出性能の比較 ①しきい値法、②特徴量しきい値法、③重回帰近似法、④ネットワーク法の検出性能の比較を表6に示す。基本的なきずは頻発するものではないため、きずデータの数を増やすのは難しい。そこで、代表性のあるきず種・程度のきずを学習・評価用サンプルとして採用した。

④ネットワーク法は①しきい値法に比べ、特に微小きず側で低過検、高検出率を両立していることがわかる。②特徴量しきい値法と③重回帰近似法は、③ネットワーク法に比べ検出性能の差は小さいが、図8に示すように、近似出力は連続に幅広く分布するために、きず有無判定のしきい値の設定の仕方により検出性能が変化する危険がある。対して、③ネットワーク法は出力がきずなしの場合ほぼ0、きずありの場合はほぼ1と分離がはっきりしており、しきい値の調整が不要であるという特徴がある。この特徴により、設備状態、検査対象ごとに行っていた調整が不要となる可能性がある。

図 8 ネットワーク法と近似法の出力
Fig. 8. The output of network & approximation.

図 9 振動影響の比較
Fig. 9. The influence of vibration.

〈8・5〉 信号変動の影響と性能比較 図 9 に、評価用データを、無きずデータに関してはその電圧強度を一律に+50%したデータを、また、きずデータに関してはその電圧強度を一律に-50%したデータを使用して、①しきい値法、②特徴量しきい値法、③重回帰分析法、④ネットワーク法の各手法にて検出率、過検率を計算した結果を示す。

従来の①しきい値法に比べ、②特徴量しきい値法、③重回帰分析法、④ネットワーク法が信号変動を受けづらいことがわかる。これにより、今回選択した二特徴量の有効性が、この特性に関しても確認された。

9. ハード化と今後の計画

〈9・1〉 検査範囲と検査速度 連続鋼板処理設備は最大 6 feet (1,800 mm) 材の処理が必要であるため、検査範囲を最大 2,000 mm を検査幅とする。また、今回採用した簡易形レーザ検査装置は毎秒 3,000 回の走査を行っているため、幅方向 1 走査の検査時間を 300 μ s とした。

〈9・2〉 ハード化 ニューラルネット用チップも開発されているが、ほとんどが試作の段階であるため、今回要求される演算速度で特徴量の計算からネットワーク演算を行える汎用的な素子は発売されていない。そのため、専用ボードとして開発を行っている。

1 ボードで約 350 mm (A/D レートにより可変) の検査を可能とし、1 台のコントローラに最大 6 ボードまで拡張が可能である。現在、詳細設計・製作が終了しデバック、調整中である。

ネットワーク部の積和演算やシグモイド関数などの非線形処理をハードで高速に行う場合、下位ビットの誤差の蓄積による誤差の拡大が懸念され、詳細設計は困難を極めた。今後、汎用的な高速ニューラルネット素子の開発が強く望まれる。

10. ま と め

(1) 鋼板のレーザきず検査に反射波形の強度以外の特徴量を導入し、ネットワークできず有無を学習することによりシステムを構築する手法を開発した。

(2) 実きずデータおよび実ラインでの無きずデータを用いてその効果を確認した。

(3) 入力特徴量やシステム構成を変えせずに、学習により鋼種の変更や異なるラインへ適用できる可能性がある。

(4) きず検出には、従来法(しきい値、重回帰近似)に比べてネットワーク法の非線形処理が適していることが明らかになった。

(5) 今後、実ラインでのリアルタイム検査が可能なニューラルネット装置を製作し、オンライン評価を実施する。併せて、オンラインきずデータ自動採用システムを導入計画中である。

本研究に関し、東京大学計数工学科中野 馨助教授および森田殿に種々の貴重な助言をいただきました。ここに厚くお祈申し上げます。

(平成 2 年 6 月 14 日受付)

文 献

- (1) 合原：ニューラルコンピュータ，東京電機大学出版局
- (2) 麻生：ニューラルネットワーク情報処理，産業図書
- (3) B. Widrow & R. Winter: "Neural Nets for Adaptive Filtering nad Adaptive Pattern Recognition", *IEEE Computer*, 21, 25 (1988)
- (4) 中野：アソシエートロンー連想記憶のモデルと知的情報処理 (昭 54) 昭晃堂
- (5) 中野：「脳の認識機構とそのモデル化」，数理科学，No.269, 20 (昭 60)

中 野 公 明 (正員)

昭和 59 年 3 月早稲田大学電気工学科卒業。同 61 年 3 月同理工学研究科電気工学専攻修了。同年 4 月新日本製鐵(株)に入社。同社君津製鐵所にて計装機器関連の設備開発業務に従事。

福 谷 和 彦 (正員)

昭和 52 年 3 月熊本大学電気工学科卒業。54 年東京工業大学大学院電気工学科修士課程修了。同年 4 月新日本製鐵(株)に入社。同社君津製鐵所にて電気機器関連の設備開発に従事。

瀬 野 聰 (非会員)

昭和 63 年 3 月早稲田大学電気工学科卒業。同年 4 月新日本製鐵(株)に入社。同社君津製鐵所にて電気機器関連の設備開発・計画に従事。

白 川 芳 幸 (非会員)

昭和 53 年 3 月名古屋工業大学電子工学科卒業。55 年 3 月東京工業大学大学院修士課程修了。同年 4 月新日本製鐵(株)に入社。同社君津製鐵所にて計装機器関連の設備開発に従事。60 年よりイギリス・ハウエル研究所留学。62 年 6 月復職。

田 中 宏 幸 (非会員)

昭和 62 年 3 月京都大学機械工学科卒業。平成元年 3 月同応用システム科学科修了。同年 4 月新日本製鐵(株)に入社。同社君津製鐵所にて計装機器関連の設備開発業務に従事。