

SSPによる板波探傷システムの高性能化

Performance Enhancement of On-line Lamb Wave Inspection System Using SSP Technique

永田 泰昭^{*(1)} 今野 雄介^{*(2)} 内藤 修治^{*(3)} 久保田 光利^{*(4)}
 Yasuaki NAGATA Yusuke KONNO Syuji NAITO Mitsutoshi KUBOTA
 木野 敏治^{*(5)} 関口 修^{*(6)} 廣渡 淳^{*(7)}
 Toshiharu KINO Osamu SEKIGUCHI Jun HIROWATARI

抄 録

薄鋼板のオンライン内部欠陥検出のために、タイヤ探触子型板波探傷装置が従来から利用されているが、結晶粒界からの超音波粒界散乱ノイズにより欠陥検出能が影響を受けるため、粒界散乱ノイズの低減方法として有効性があると期待される非線形信号処理法のSSP(Split Spectrum Processing)の適用を行った。板波波形に対しSSPのパラメータの最適化を図った結果、サンプル鋼板での欠陥検出性能の向上を確認できた。さらに、オンライン装置として十分な繰り返し周波数500HzでSSPをリアルタイム処理するシステムの開発に成功し、板波探傷装置の高性能化を図る事ができた。

Abstract

In order to improve the defect detectability of Lamb wave inspection system conventionally used for on-line detection of internal defects of steel strip, application of non-linear signal processing, SSP (split spectrum processing), to Lamb waves and the optimization of the SSP parameters were investigated. Sample strips with natural defects were used to evaluate the performance of SSP in this research. As a result, the improvement of the sensitivity of Lamb wave inspection was confirmed by optimum selection of SSP parameters. Furthermore, real-time processing of SSP was realized. Consequently, the newly developed Lamb wave can perform SSP at a 500 Hz repetition rate that is sufficiently high repetition rate for the on-line Lamb wave inspection system.

1. 緒 言

薄鋼板のオンライン内部欠陥(気泡, 非金属介在物)検出のために、タイヤ探触子を用いた板波探傷装置が従来から利用されている。これは、タイヤの中に探触子を封入し、鋼板に対して超音波を斜めに入射し鋼板の幅方向に板波を発生させて欠陥からの反射信号を受信し欠陥検出を行う装置である。現在、オンラインで使用されている板波探傷装置では、周波数が数MHzの狭帯域パースト波状送信波を用いて探傷を行っている。このように狭帯域の送信波を使用する理由は、特定モードの特定周波数の板波だけを使用して、板波の速度分散性の影響を排除して検出能を上げるためである。

オンライン装置の欠陥検出能は、結晶粒界からの反射エコーにより形成される粒界散乱ノイズと電気的ノイズにより大きく影響を受ける。そのうち電気的ノイズは、ハードウェアあるいはソフトウェアのフィルターにより除去可能であるが、粒界散乱ノイズは鋼材内部を超音波が伝播する際に生じる本質的なノイズである。板波探傷

装置は狭帯域パースト波状送信波を使用するので、受信信号に対してその帯域のみを通過させる帯域フィルターを適用すれば、粒界散乱ノイズも電気的ノイズもかなり低減する事は可能であるが、板波探傷装置の検出能をさらに向上させて、より微小な欠陥の検出を行うためには、さらに粒界散乱ノイズの低減が必要である。

そこで、検出能向上の方法として、(1)送信波の周波数をアップする、(2)板波のモードを複数併用して探傷に利用する、(3)信号処理による検出能向上を図る、などが考えられるが、本研究では信号処理による検出能向上を図るために、粒界散乱ノイズ除去の有効な手段として従来報告されているSSP(Split Spectrum Processing)に注目し適用を検討した。SSPの具体的な手法としては、Minimization algorithm(以下Minと略す)²⁾、Polarity thresholding algorithm(以下PTと略す)⁵⁾、この両者を組み合わせた方法(以下Min+PTと略す)⁶⁾、さらにgeometric mean filtering(GM)⁷⁾が従来提案されており、超音波波形に対する有効性について理論解析と実験的検証が報告されている。

*⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員 Ph.D.
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2787

*⁽²⁾ 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員

*⁽³⁾ (株)日鉄エレックス 計測・検査システムソリューション事業センター 部長

*⁽⁴⁾ 八幡製鐵所 設備部 システム制御技術グループ 主任

*⁽⁵⁾ 八幡製鐵所 設備部 システム制御技術グループ マネージャー

*⁽⁶⁾ 八幡製鐵所 設備部 八幡圧延整備室 室長

*⁽⁷⁾ 八幡製鐵所 薄板部 冷延メッキ工場 精整検査課 課長

板波探傷装置へのSSPの適用については報告例が従来ないため、狭帯域の板波信号に対してSSPの有効性が得られるか、SSPのリアルタイム処理をどう実現するか、などが大きな技術課題であり、検討を進めてきた。その結果、SSPパラメータの適切な選択により自然欠陥を有するサンプル鋼材での欠陥検出性能の向上を確認し、さらに繰り返し周波数500Hzで探傷を行うオンライン板波探傷装置に完全に同期し、SSPをリアルタイム処理するシステムの開発に成功したので、概要を報告する。

2. 板波に対するSSPの適用

SSPの手法では、図1に示すようにまず超音波受信信号 $r(t)$ を通過帯域が隣接する n 個のフィルターを通すことにより n 個の波形データ $r_j(t) (j=1, \dots, n)$ を得て、時刻 t における $r_j(t)$ に対して非線形処理を行い最終出力 $Y(t)$ とする。非線形処理の代表的な方法として式(1)~式(3)の3種類の処理がある。SSPの原理は、欠陥からのエコーの場合、 n 個の波形データ $r_j(t)$ は同一位相で波形の正負が同じになる確率が高いのに対して、粒界散乱ノイズなどのノイズ信号は、位相がそろわず正負が混在する確率が高いため、この差を利用したノイズ除去法と言える。なお、SSPのパラメータとしては図1に示すようにフィルター数 n 、各フィルター帯域 b 、第1フィルターの中心周波数 f_1 、中心周波数間隔 D_f があり、最適化の検討が必要である。

(1) Min
 $Y(t) = r_k(t)$ (1)
 但し $|r_k(t)| = \min\{|r_j(t)|, j=1, \dots, n\}$ である。

(2) PT
 $Y(t) = r_k(t) r_j(t)$ が全て正か負の場合(2)
 $Y(t) = 0$ その他の場合

(3) Min + PT
 $Y(t) = r_k(t) r_j(t)$ が全て正か負の場合(3)
 $Y(t) = 0$ その他の場合
 但し $|r_k(t)| = \min\{|r_j(t)|, j=1, \dots, n\}$ である。

SSPの時間領域での処理については、通過帯域が隣接する n 個のフィルターのインパルスレスポンスの式(4)でまず表される⁸⁾。ここではガウシアン型の帯域通過フィルターを仮定しており、 b がフィルター帯域、 f_j が j 番目のフィルターの中心周波数であり、 $f_j = f_1 + (j-1)D_f$ である。

$$h_j(t) = 2\sqrt{\pi}b e^{-(\pi b t)^2} \cos(2\pi f_j t) \quad \dots\dots(4)$$

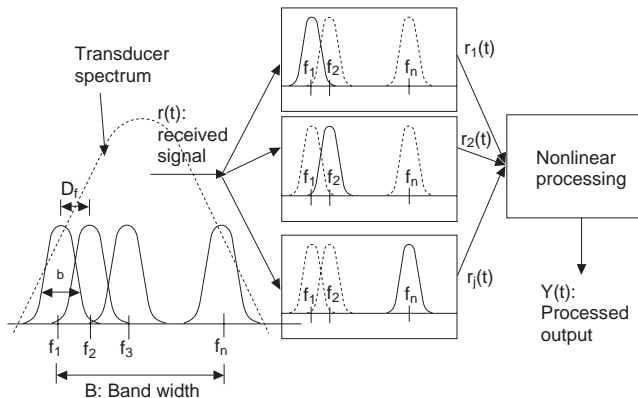


図1 非線形信号処理SSPの概要

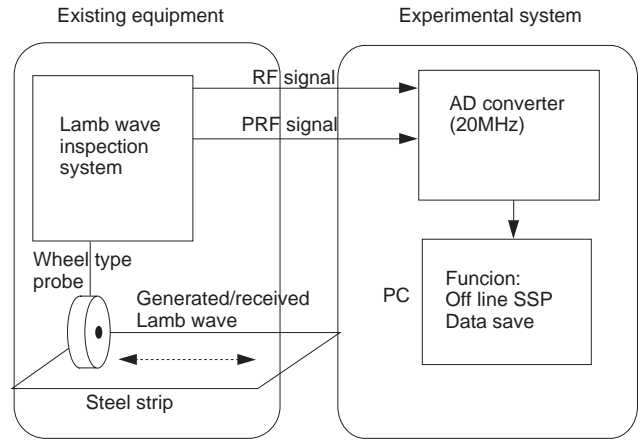


図2 オフライン評価実験システムのブロック図

実際にはサンプリング時間 T_s で離散化されたデジタル信号に処理を行うので、各フィルターを通過した後の信号は以下の式で表され、その後式(1)~(3)のような非線形処理を施して最終出力を得る⁸⁾。なおこの式は、式(4)の $h_j(t)$ を有限時間域で代表して、その関数をサンプリング時間 T_s でサンプリングし、 $-L$ 番目から L 番になるようにしたものである。また k は整数である。

$$r_j(kT_s) = \sum_{i=-L}^L 2\sqrt{\pi}b T_s e^{-(\pi b i T_s)^2} \cos(2\pi f_j i T_s) r((k-i)T_s) \quad \dots\dots(5)$$

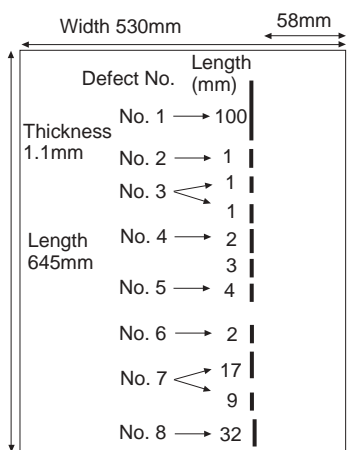
評価実験で使用するオンライン板波探傷装置は、周波数2.25MHz程度のパースト波状送信波を用いて探傷を行う。図2に示すように既設の板波探傷装置から板波信号、探傷繰り返し信号(PRF信号)等を取り出せるようにし、波形の8bit AD変換を行いデジタルデータをパーソナルコンピュータ(PC)に収録し、その後SSPを実施した。また、周波数2.25MHz程度のパースト波状送信波を用いていることから、対応するために20MHzでのサンプリングを実施した。

SSPの適用に際しては、各種パラメータの最適化を行う必要があるため、鋼材に人工欠陥として貫通穴を加工し、生信号を収録しパラメータを変化させてSSPによるSN向上の程度を調べた。その結果、Min + PT法でフィルター数 $n=10$ 、各フィルタータップ数=500で実施することが最適であったため、以下では本パラメータを適用した。なお、板波の送信周波数幅2.1~2.4MHzを10個のフィルターでカバーする事とし、各フィルター帯域 b と中心周波数間隔 D_f については、従来報告を参考にして $b=4D_f$ とした⁸⁾。

3. 自然欠陥を有する鋼板への適用評価実験

自然欠陥は欠陥形状が一定ではなく板厚み方向にも存在位置が多様であるため、自然欠陥を有する鋼板に対しSSPの有効性を確認する実験を行った。使用した自然欠陥を有する鋼板の例を図3に示す。内部に気泡が発生して、鋼板の表面がわずかに盛り上がっていたため、目視による検査でかろうじて検出できたサンプルである。このような微小な欠陥は、現状のオンライン板波超音波探傷器では検出が不可能である。図3(a)が鋼板の上面図模式図であり、長手方向に細長く気泡が発生し線状の欠陥群を形成している。図3(b)が(a)に示したNo.2自然欠陥の断面観察写真であり、この場合欠陥部の体積を計算すると、約0.001mm³のオーダーになる。

図4に超音波生信号とSSP後の波形の例を示す。図3に示した鋼



(a) Schematic diagram of the top side of strip

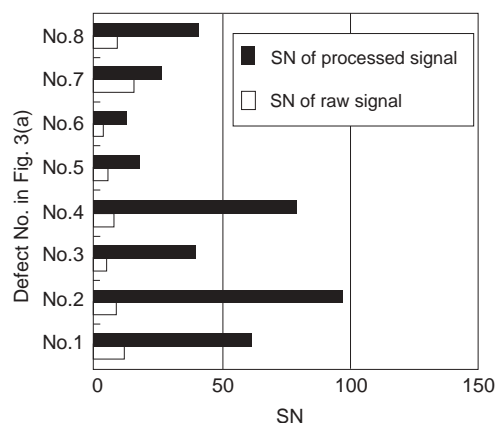
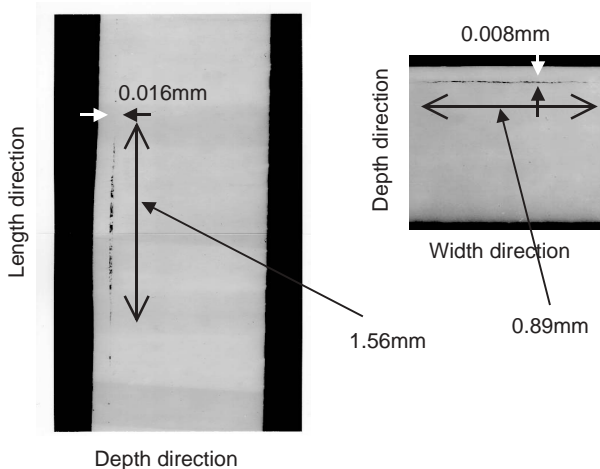


図5 SSP適用前後での波形のSN値の比較



(b) Photo of cross-sectional observation of No. 2 defect

図3 評価実験で使用した自然欠陥入り鋼板の概要

板の上部に存在する欠陥番号No. 4とNo. 6の場合の例である。波形例から明らかなように、欠陥部前後やエッジ部周辺からのノイズ信号を低減できており明瞭に各欠陥部を検出できることがわかる。SSPによるSN改善の程度をより定量的に示すために、各欠陥部の生信号のSN値とSSP後のSN値を計算し、その結果を図5に示す。SN

値は、1波形における超音波送信側とエッジ部分の各不感帯を除いた範囲での欠陥信号振幅値/最大ノイズ振幅値と定義して計算を行った。図5から、どの欠陥部においてもSSPによるSN向上が得られていることがわかる。

4. リアルタイムSSPの実現

次に、オンラインで使用できるシステムの検討を行った。図1及び式(5)から明らかなように、SSPは線形フィルタリング処理と非線形フィルタリング処理の組み合わせであり、リアルタイム処理化が難しくオンライン探傷装置に組み込んだ報告は従来ない⁹⁾。本研究では、SSPパラメータ設定の融通性を高くするためにソフトウェアによるSSPのリアルタイム処理化を図った。

SSPのフィルタリングで使用するフィルタタップ数を $m(=2L+1)$ とすると、式(5)の各フィルタリング処理の演算に、乗算 m 回、加算 $(m-1)$ 回の合計 $(2m-1)$ 回の演算が必要である。従って、サンプリングされたデータ数を N とすると、全演算数 A は、 $A = n \times N \times (2m-1)$ となる。次に、鋼板の板幅を $L(m)$ 、探傷時に使用する板波モードの位相速度を $V(m/s)$ とすると、鋼板エッジ部からの超音波反射エコーが到達するまでの時間 $T(s)$ は、 $T = 2L/V$ であることから、20MHzサンプリングの場合、サンプリングが必要なデータ数 N は、 $N = 20 \times 10^6 \times 2L/V$ となり、全演算数 A は以下の式になる。

$$A = 40 \times 10^6 \times n \times (2m - 1) \times L/V \quad \dots\dots(6)$$

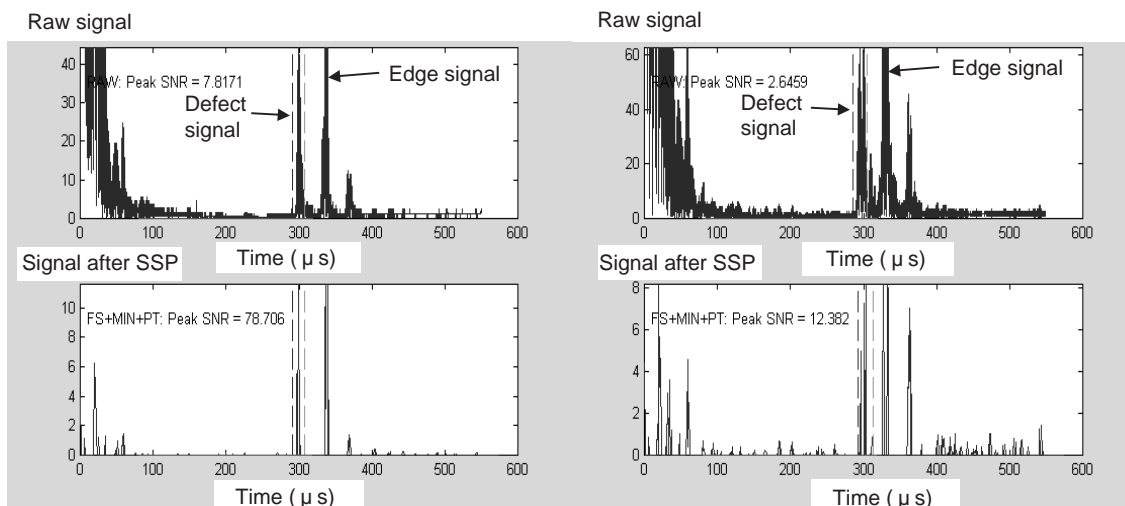


図4 SSP適用前の波形と適用後の波形の比較

例えば, $L = 1.5(\text{m})$, $V = 3000.0(\text{m/s})$, $m = 500$, $n = 10$ の場合, $A = 2.0 \times 10^8$ となる。従って, 探傷繰り返し周波数が500Hzの場合, 演算速度Bは, $B = A \times 500 = 99.0(\text{GOPs})$ が要求される事になる。なお, この場合の検討として, 式(3)のようなSSPの非線形処理の演算は含んでいない。

そこで, このように膨大な演算回数の大幅な低減のために, 図6に示すSSP演算前の前処理を考案した。図6に示すように, AD変換されたデータをパースト波信号の帯域を含むバンドパスフィルターに通し, 連続する10個のデジタルデータのうち1個の値のみを間引いて残す処理を行い, データ数 N とフィルタータップ数 m をそれぞれ1/10に低減した後にSSP演算を行うようにする。サンプリング定理によると, このような処理を行っても, 1/10に間引かれたデータは, パースト波信号の帯域内に含まれる元々の情報を保存している。つまり, M を整数, 周波数を f , サンプリング周波数を f_s , 信号のスペクトラムを $X(f)$ とし, エリアジングがない場合, $X(f) = X(f + Mf_s)$ の性質があり, $M = 2$, $f_s = 1\text{MHz}$, $0.0 \leq f \leq 0.5\text{MHz}$ の場合に対応している。この場合の演算数 A' は以下のようになり, 例えば $n = 10$, $m = 500$ の場合, A の約11%の演算数に低減できる。

$$A' = N \times (2m - 1) + n \times N \times (m/5 - 1) \times 10 \quad \dots (7)$$

なお, データサンプリング数を1/10に低減する処理については, コンピュータ上の処理時間が無視できることから演算数としては含んでいない。さらに処理能力の向上のために, 最新のCPUを2個以上搭載した高速なPCを使用し, 汎用的なフィルタリング処理をMMX (Multi Media Extension)により実装し, SSP演算と画像処理等の並列処理化と高速化を達成している。

このように演算数の大幅な低減や並列処理化と高速化を行い, 探傷繰り返し周波数500Hzでのリアルタイム処理を実現した。図7に開発システムの構成図を示す。このオンラインシステムでは, 既設の板波探傷装置からの超音波信号を, 最大20MHzサンプリングで12bit AD変換し, デジタルデータをPCに転送し, リアルタイムで

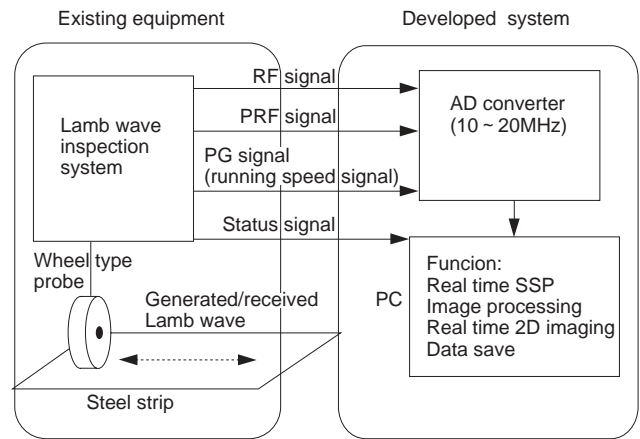


図7 リアルタイムSSP機能付きオンライン板波探傷装置のブロック図

SSP演算(計算機内の演算はすべて16bit)と2次元欠陥検出結果表示などを行う。またSSPパラメータの設定画面を備えており, パラメータ設定や変更は容易に可能である。さらに, 欠陥と判定した部分の波形記録(生波形とSSP後の波形)もリアルタイムで行われ, 後で再表示可能である^{10, 11)}。

5. 結 言

薄鋼板のオンライン内部欠陥検出のために従来利用されている板波探傷装置の検出能向上のために, 自然欠陥を有するサンプル鋼材を準備し, 板波波形に対するSSPの適用及びSSPパラメータの最適化検討を行い, 欠陥検出性能の向上を確認した。さらにリアルタイムSSP演算を実現するために, SSP演算数の大幅な低減と並列処理化を行い, オンラインシステムとして十分な繰り返し周波数500HzでSSPを実行するシステムを開発した。

参考文献

- 1) Newhouse, V. L., Bilgutay, N. M., Saniie, J., Furgason, E. S.: Ultrasonics. 20, 59 (1982)
- 2) Karpur, P., Shankar, P. M., Rose, J. L., Newhouse, V. L.: Ultrasonics. 25, 204(1987)
- 3) Amir, I.: Ph.D. Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA, June 1986
- 4) Benharit, U., Kaufman, J. L., Bilgutay, N. M., Saniie, J.: Proc. 1986 IEEE Ultrasonics Symp., 1986, p.1021
- 5) Bilgutay, N. M., Benharit, U., Murthy, R., Saniie, J.: Ultrasonics. 28, 90(1990)
- 6) Rose, J. L., Karpur, P., Newhouse, V. L.: Mater. Eval. 46, 114(1988)
- 7) Xin, J., Donohue, K. D., Bilgutay, N. M., Li, X.: Mater. Eval. 49, 987(1991)
- 8) Aussel, J. -D.: Ultrasonics. 28, 229(1990)
- 9) Nakamura, M., Yokoyama, M. H., Yamano, M., Murayama, R.: Nondestructive Characterization of Material VIII, edited by R. E. Green Jr., Plenum Press, New York, 1998, p.235
- 10) 永田泰昭, 今野雄介, 内藤修治, 久保田光利, 木野敏治, 関口修, 廣渡淳: 材料とプロセス. 12 (5), 898(1999)
- 11) 内藤修治, 永田泰昭, 今野雄介: J. Signal Processing. 3 (5), 325(1999)

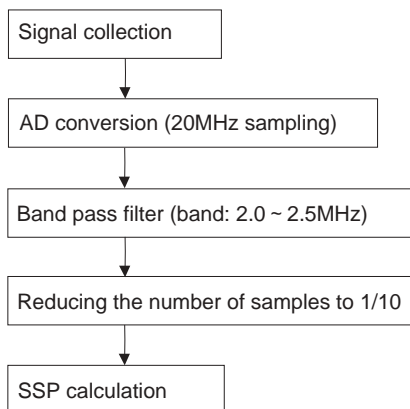


図6 リアルタイムSSP実現のためのデータ前処理フロー