

SSPによる板波探傷システムの高性能化

永田 泰昭*・今野 雄介*・木野 敏治*²・廣渡 淳*²

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

Yasuaki NAGATA, Yusuke KONNO, Toshiharu KINO and Jun HIROWATARI

Synopsis : 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 (filter number 10, filter tap number 500, frequency range 2.1–2.4 MHz, algorithm : combination of minimization algorithm and polarity thresholding algorithm, S/N : about from 2 to 5 times improvement). 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.

Key words: nondestructive evaluation; ultrasonic testing; Lamb wave; signal processing; grain noise.

1. 緒言

薄鋼板のオンライン内部欠陥（気泡や介在物）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、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検出して欠陥の有無評価を行う装置である。1つのタイヤ探触子で、全幅方向の探傷を行うタイプや、2つのタイヤ探触子でおおの板幅の半分程度を探傷するタイプがある。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 の狭帯域バ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、適当な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バ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更に向上させて、より微小な

欠陥の検出を行うためには新しい技術の開発が不可欠であると考えられる。

そこで、検出能向上の方法として、(1) 送信波の周波数をより高くする、(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。送信波の周波数をさらにアップする事は、例えば1つのタイヤ探触子で全幅探傷を行う場合、板波の伝播距離が約3m前後になることもあり伝播減衰が現実的な大きな問題として残る。(2)については、材料内の欠陥の深さ・サイズを仮定して幾つかの板波モード毎の欠陥検出能について数値シミュレーションにより解析したり実験的検証が行われ、複数モードの使用により欠陥検出能の向上ができることが報告されている。したがってこの方法は今後有望であるが、オンラインの超音波探傷装置で実現する場合、複数モード使用のための探触子並列化などが必要となりコスト面などの問題をクリアしなければならない。そこで、今回は信号処理による検出能向上を図るために、粒界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。信号処理により検出能の向上が可能になれば、比較的低コストでオンラインの超音波探傷装置で実現する事が可能である。

SSPの具体的な手法としては、Minimization algorithm (以下 Min と略す)^{1,2)}、Polarity thresholding algorithm (以下 PT と略す)³⁻⁵⁾、この両者を組み合わせた方法

平成 16 年 2 月 17 日受付 平成 16 年 8 月 2 日受理 (Received on Feb. 17, 2004; Accepted on Aug. 2, 2004)

* 新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

* 2 新日本製鐵(株) 八幡製鐵所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

(以下 Min+PT と略す)⁶⁾, 更に 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。

板波探傷装置への SSP の適用については報告例が従来なく, 狭帯域の板波信号と同じ周波数を持つノイズが発生している場合, SSP の有効性が得られるか, また SSP のリアルタイム処理をどう実現するか等の検討を行ってきた。その結果, SSP パラメータの適切な選択により人工欠陥および自然欠陥を有するサンプル鋼板での欠陥検出性能の向上を確認し, 更に繰り返し周波数 500 Hz 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, Fig. 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 τ における $r_j(\tau)$ に対して非線形処理を行い最終出力 $y(\tau)$ とする。式 (1)~式 (3) に非線形処理の代表的な方法として 3 種類の処理を紹介する。SSP の原理は, 欠陥からのエコーの場合, n 個の波形データ $r_j(\tau)$ 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く, この差を利用したノイズ除去方法である。なお, SSP のパラメータとしては Fig. 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_j があり, 最適化の検討が必要である。

(1) Min

$$y(\tau) = r_k(\tau) \dots \dots \dots (1)$$

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

(2) PT

$$y(\tau) = r(\tau) \quad r_j(\tau) \text{ が全て正か負の場合} \dots \dots \dots (2)$$

$$y(\tau) = 0 \quad \text{その他の場合}$$

(3) Min+PT

$$y(\tau) = r_k(\tau) \quad r_j(\tau) \text{ が全て正か負の場合} \dots \dots \dots (3)$$

$$y(\tau) = 0 \quad \text{その他の場合}$$

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

SSP のリアルタイム処理について後述するため, ここでは周波数領域での処理ではなく, 時間領域での処理について述べる。まず, 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は式 (4) で表される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, $f_j = f_1 + (j-1)D_j$ である。

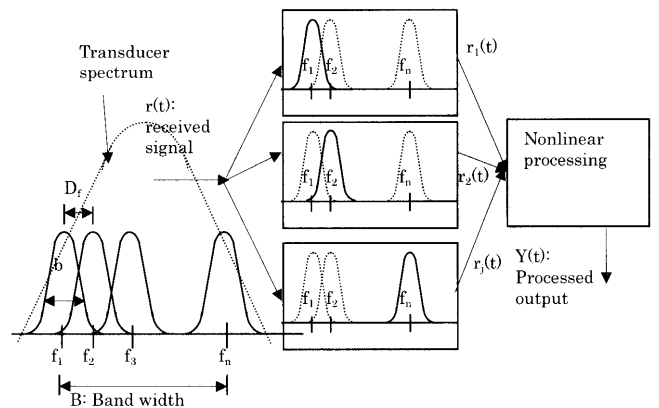


Fig. 1. Processing flow of SSP technique.

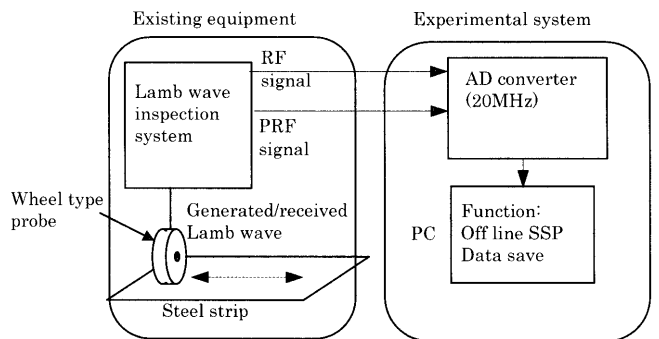


Fig. 2. Block diagram of experimental system.

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

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り, また k は整数である。

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

本実験で使用したオンライン板波探傷装置では, 周波数 2.25 MHz 程度のバースト波状送信波を用いて探傷を行っており, SSP 適用の有効性をまず調べた。Fig. 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 8 bit AD 変換を行いデジタルデータをパソコンに収録し, その後 SSP を実施した。なお, 周波数 2.25 MHz 程度のバースト波状送信波を収録する必要があるため, サンプリング周波数を 20 MHz とした。Fig. 3 は, 検出波形の例である。試験に用いた鋼板は, 830 mm 幅 \times 490 mm 長さ \times 3.0 mm 厚であり, 人工欠陥として直径 0.5 mm の貫通穴を加工しており, その欠陥から板幅方向に 620 mm 離れた箇所にタイヤ探触子

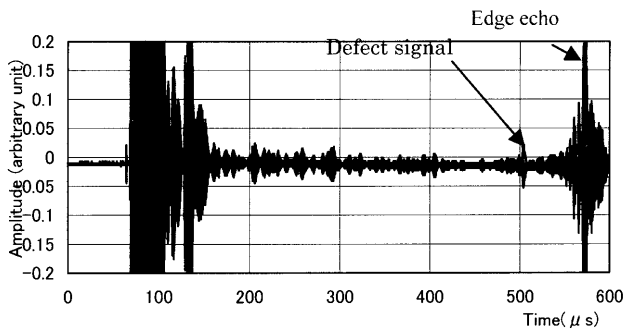


Fig. 3. Typical detected Lamb waves.

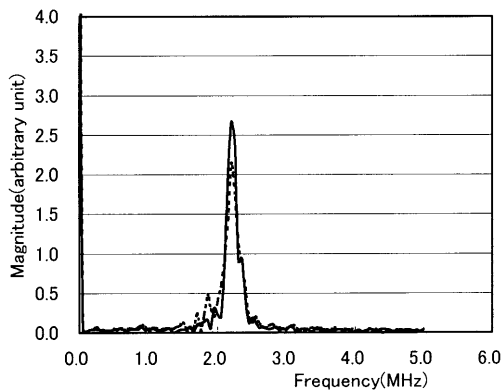


Fig. 4. FFT spectrum of the defect echo and the noise signal of the waveform in Fig. 3. (Solid line: defect signal, dashed line: noise signal.)

を配置して検出した波形であり、欠陥部からの反射エコーも観測されている事がわかる。Fig. 4は、Fig. 3の欠陥部からの反射波の部分と、その反射波より以前に観測されているノイズ信号の周波数特性をそれぞれプロットしたものであり、単純な線形フィルターではノイズ信号と欠陥信号を弁別する事は困難である事がわかる。

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。そこで、上記の人工欠陥入りの鋼板を用いて信号を収録し、SSPのパラメータを変化させてSN向上の程度を調べた。その結果の例をFig. 5に示す。なお波形のSN値に関しては、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/最大ノイズ振幅値を定義とした。不感帯は、あらかじめ装置により設定可能であり、Fig. 5の実験の場合、送信側がタイヤと鋼材との接触面での反射波を除去するために80 μ sに設定しており、エッジ部分は20 μ sに設定している。この結果から、以下の解析ではMin+PT法を用い、フィルター数を10、各フィルタータップ数を500で実施する事とした。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こととし、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⁾。

次に、幅830mm×長さ490mm×厚み1.5mmの評価用サンプル鋼板を準備し、鋼板の端から50mm、40mm、30mm、20mmの位置に直径0.5mmの貫通穴を加工し、Fig. 2のよ

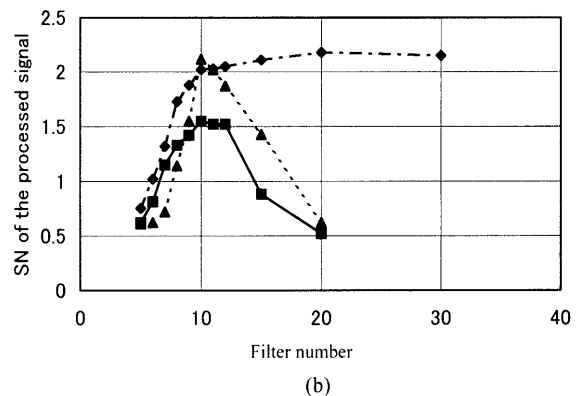
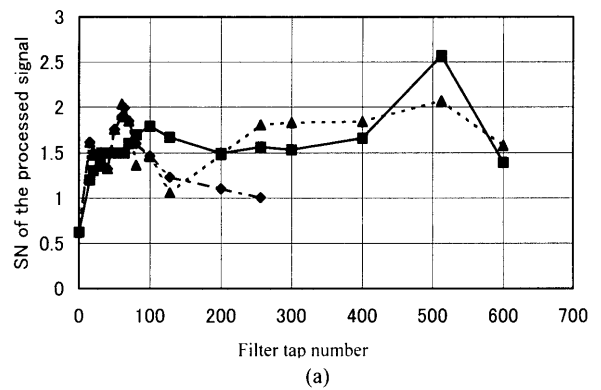


Fig. 5. SN characteristic of the processed signal for various SSP parameter conditions. (a) SN characteristic for various conditions of filter tap number, (b) SN characteristic for various conditions of filter numbers. (Solid lines: PT, dashed lines: Min+PT, dash-dot lines: Min.)

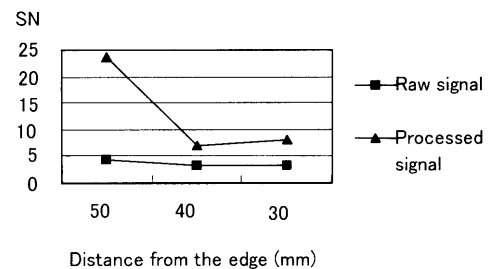


Fig. 6. SN values of raw signals and processed signals. (Each artificial defect is located at 50 mm, 40 mm and 30 mm apart from the strip edge, respectively.)

うにタイヤ探触子を欠陥の存在する板の端とは別の端側に、端から150mmの位置にセットし、長手方向に探触子を転がして板波を受信した。Fig. 6は、板の端から50mm、40mm、30mmの場合の生信号とSSP後のS/Nを示しており、この結果からSSPの有効性が確認できる。

3. 自然欠陥を有する鋼板への適用評価実験

人工欠陥と異なり、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するSSPの有効性を確認する必要がある実験を行った。使用した自然欠陥を有する鋼板の例をFig. 7に

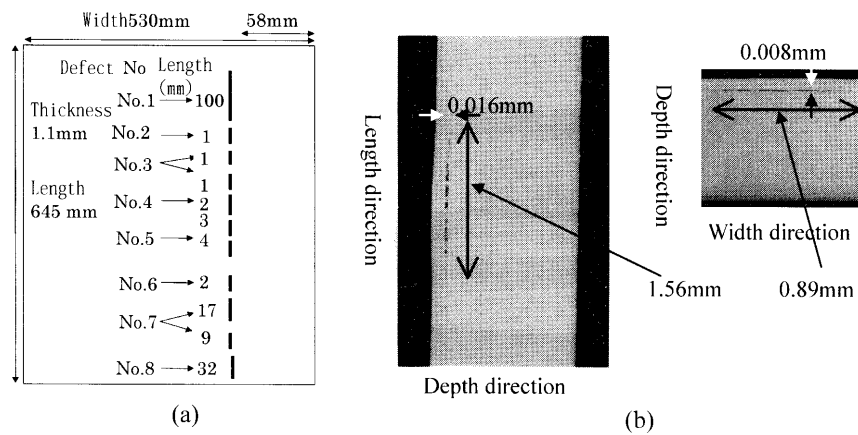


Fig. 7. Example of strip with natural defects. (a) Schematic diagram of top view of the strip, (b) cross-sectional photo of No. 2 natural defect.

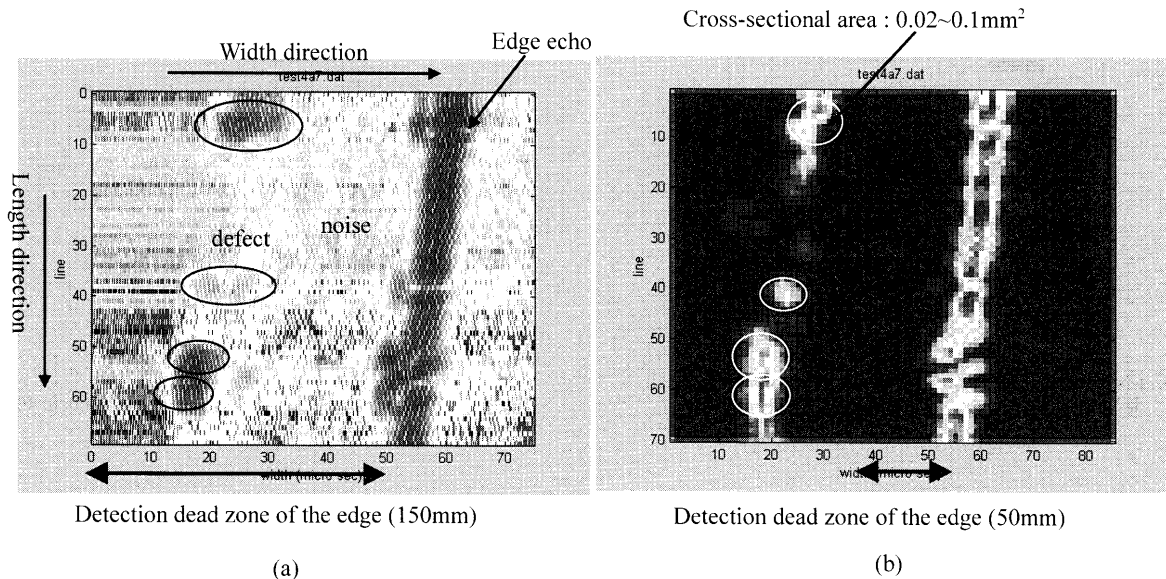


Fig. 8. Two-dimensional images of ultrasonic waveform amplitude values of strip shown in Fig. 7. (a) Image of raw signal, (b) image of signal after SSP for the same area of (a). (Horizontal and vertical directions correspond to the transverse and longitudinal directions of the strip. The displayed part corresponds to the lower part of the strip in Fig. 7 including from No. 5 to No. 8 defects.)

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。このように微小な欠陥は、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。Fig. 7(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。Fig. 7(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0.001 mm³のオーダーになる。

Fig. 8は、Fig. 7に示した鋼板において欠陥番号No. 5からNo. 8までが存在する箇所に対応した生信号とSSP処理後の信号を二次元表示した結果である。また、Fig. 9は、超音波生信号とSSP後の波形の例であり、Fig. 4に示した鋼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。これらの結果から明らかなように、SSPを施す事に

より、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。Fig. 10は、各欠陥部の生信号のSN値とSSP後のSN値を表示したものであり、SN計算の定義は前章記載と同じである。Fig. 10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

前章までのSSP適用評価実験の結果からその有効性が確認できたため、オンラインシステムの検討を行った。Fig. 1および式(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従来難しくオンライン探傷装置に組み込んだ報告はない。従来の報告では、板波探傷

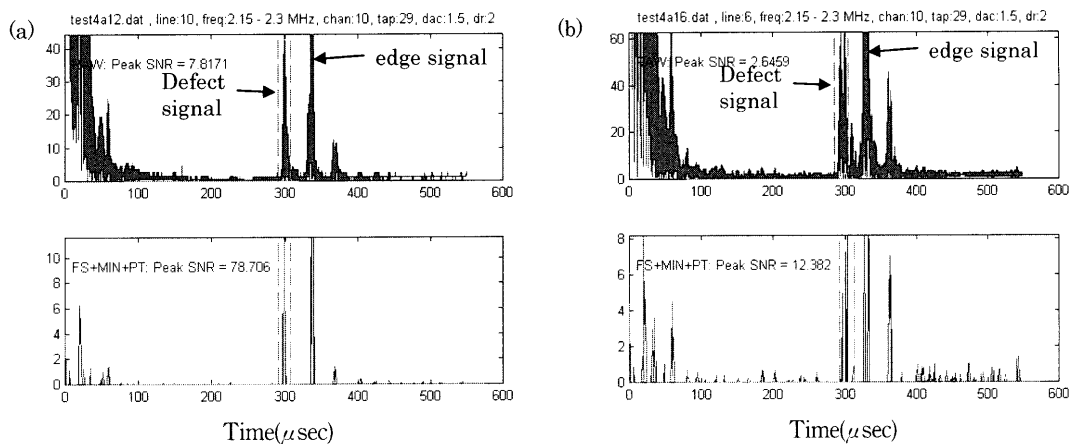


Fig. 9. Waveforms of raw and processed signals of No. 4 and No. 6 defects. (a) No. 4 defect, (b) No. 6 defect. (Upper: raw signal, lower: signal after SSP.)

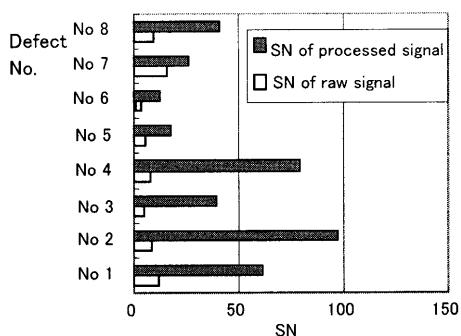


Fig. 10. SN values of raw and processed signals for each defect.

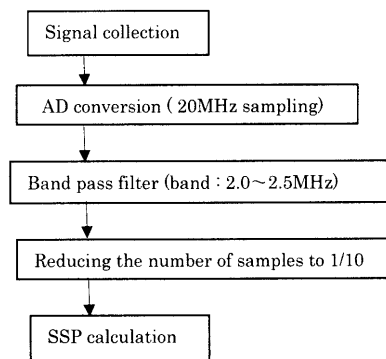


Fig. 11. Data processing before SSP calculation to realize real-time processing.

装置に各種の線形フィルタリングをソフトウェアで行った報告⁹⁾や、SSP演算をハードウェアにより行うシステムの提案がある⁸⁾。今回我々は、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リアルタイムSSPの実現を検討した。

まず、SSPの演算回数や必要なコンピュータ処理能力について検討した結果を示す。SSPのフィルタリングで使用するフィルタータップ数を $m (=2L+1)$ 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 は以下のようなになる。

$$A = n \times N \times (2m-1) \dots \dots \dots (6)$$

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、以下の式で表される。

$$N = 20 \times 10^6 \times 2L/V \dots \dots \dots (7)$$

式(6)と式(7)より、

$$A = 40 \times 10^6 \times n \times (2m-1) \times L/V \dots \dots \dots (8)$$

となり、例えば $L=1.5$ (m)、 $V=3000.0$ (m/s)、 $m=500$ 、 $n=10$ の場合、 $A=2.0 \cdot 10^8$ となり、探傷繰り返し周波数が 500 Hz の場合、演算速度 B は、 $B=A \times 500=99.9$ GOPS (Giga operation per second) が要求されることになる。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低減を行うために、Fig. 11に示すようなSSP演算前に行う前処理を考案した。既に述べたように、板波超音波探傷器では、もともと狭帯域パースト波状送信波(本装置では周波数2.25MHz程度)を用いて探傷を行っているが、Fig. 11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、サンプリング定理によると、 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事がわかる。この前処理は、狭帯域バースト波状の板波波形に限らず、帯域が決まった超音波探傷波形（あるいはバンドパスフィルター通過後の波形）にも適用可能であり、SSP演算の高速化に有効な手段となる。

$$A' = N \times (2m - 1) + n \times N \times (m/5 - 1) / 10 \dots \dots \dots (9)$$

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。更に処理能力の向上のために、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演算の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。Fig. 12はSSP演算や画像処理等の並列処理化の実現法に関する模試図、Fig. 13は開発システムの構成図、Fig. 14はSSPパラメータ設定用の画面の実用例である。

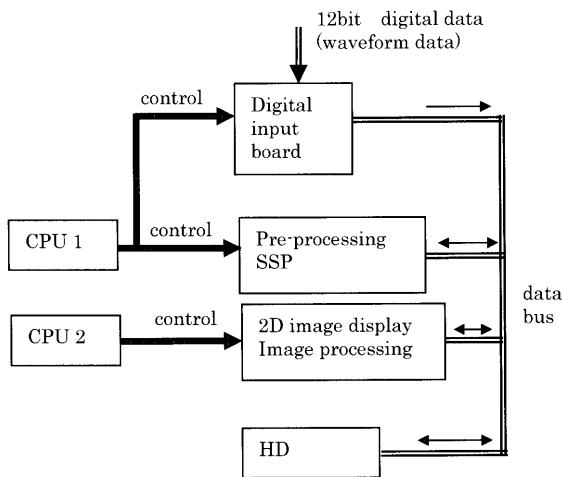


Fig. 12. Parallel data processing using 2 CPUs.

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、デジタルデータをパソコンに転送し、リアルタイムでSSP演算（計算機内の演算はすべて16bit）と二次元検出結果表示などを行う。またSSPのパラメータであるフィルター数 n 、各フィルター帯域 b 、中心周波数 f_c 、中心周波数間隔 D_f の設定や変更を容易に可能にするために、SSPパラメータの設定画面を備えており、探傷を行う鋼板の材質や板厚の通過に追従して二次元波形振幅値をリアルタイムで表示可能であり、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。現在、本システムは、鉄鋼生産プロセスにおける酸洗ラインのオンライン板波探傷装置に接続し利用している¹⁰⁾。

5. 結論

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、人工欠陥および自然欠陥を有するサンプル鋼材を準備し、板波波形に対

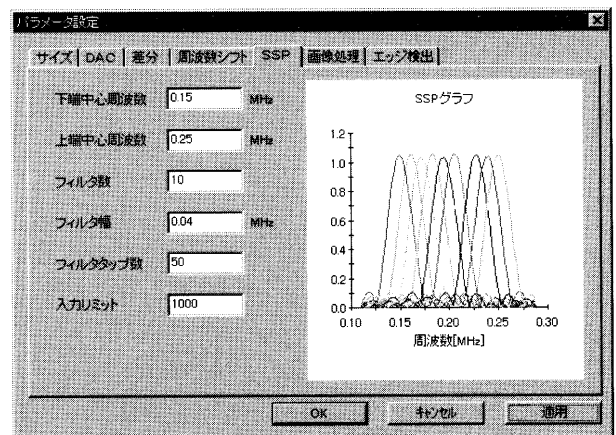


Fig. 14. Display image of control panel for SSP parameter setting.

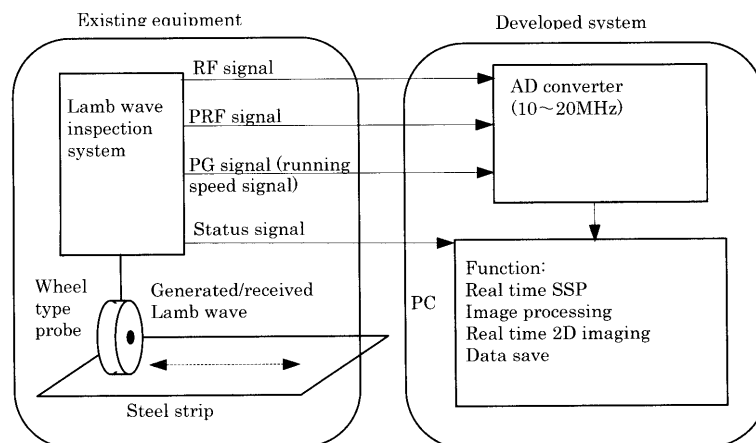


Fig. 13. Block diagram of the developed on-line system.

する SSP の適用および 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。更にリアルタイム 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 500 Hz で SSP を実行するシステムを開発した。

本稿に関する研究開発において、御協力・御教示を頂いた日鉄エレクトックス計測・検査システムソリューション事業センターの内藤修治部長、新日本製鐵八幡製鐵所設備部の久保田光利主任と関口修室長に感謝いたします。

文 献

- 1) V.L.Newhouse, N.M.Bilgutay, J.Saniie and E.S.Furgason: *Ultrasonics*, **20** (1982), 59.
- 2) P.Karpur, P.M.Shankar, J.L.Rose and V.L.Newhouse : *Ultrasonics*, **25** (1987), 204.
- 3) I.Amir : PhD Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA, (1986).
- 4) U.Benharit, J.L.Kaufman, N.M.Bilgutay and J.Saniie: Proc. 1986 IEEE Ultrasonics Symp., IEEE, New York, (1986), 1021.
- 5) N.M.Bilgutay, U.Bencharit, R.Murthy and J.Saniie : *Ultrasonics*, **28** (1990), 90.
- 6) J.L.Rose, P.Karpur and V.L.Newhouse : *Mater. Eval.*, **46** (1988), 114.
- 7) J.Xin, K.D.Donohue, N.M.Bilgutay and X.Li : *Mater. Eval.*, **49** (1991), 987.
- 8) J.-D.Aussel : *Ultrasonics*, **28** (1990), 229.
- 9) M.Nakamura, H.Yokoyama, M.Yamano and R.Murayama : *Nondestructive Characterization of Material VIII*, ed. by R.E.Green, Jr., Plenum Press, New York, (1998), 235.
- 10) Y.Nagata, Y.Konno, S.Naito, M.Kubota, T.Kino, O.Sekiguchi and J.Hirowatari : *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 898.