

歪付加材の磁気特性

Magnetic Characteristic of Strain Metal Materials

職業能力開発総合大学校 水上 祥次 Shoji MIZUKAMI Non-member
 職業能力開発総合大学校 小坂 大吾 Daigo KOSAKA Member
 職業能力開発総合大学校 橋本 光男 Mitsuo HASHIMOTO Member

In a nuclear power plant, when external stresses such as huge earthquake are added, residual strain may have occurred in the structure. In this research, SUS316L and SS400 which applied the stress and added residual strain, are created, and the possibility of diagnosing of the residual strain nondestructively from the magnetic characteristic of test pieces are examined. The basic magnetic characteristics were measured by a coil wound up the specimen directly, and the nondestructive measurements were carried out by a coil wound up the yoke. In addition, Barkhausen noises are measured and evaluated.

Keywords: SUS316L, SS400, residual strain, Barkhausen noise

1. 緒言

現在、柏崎刈羽原子力発電所は新潟県中越沖地震の影響の安全確認作業中のため運転を停止している。この地震により配管や炉内金属構造物に応力が塑性領域に入り、残留歪が発生している可能性も考えられる。原子力発電所は地震などによって応力が加わった場合、機器や構造物の損傷が健全性に問題がない確証が得られなければ運転の再開、継続ができなくなっている。そこで残留歪による金属の磁気的変化の有無を電磁非破壊検査によって診断することによって材料の健全性の評価を行うことを検討した。本報は、残留歪をパラメータとした SUS316L と SS400 について磁気特性による評価を行なったので報告する。

バラつきを調べるため、各試験片で同じ残留歪のものを3枚ずつ作製した。

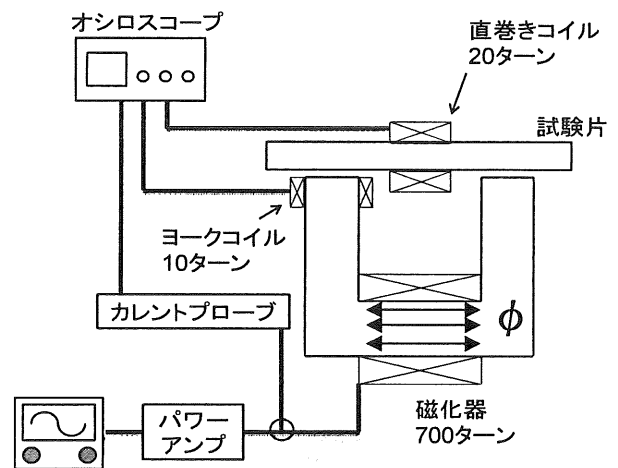


Fig. 1 回路図

2. 磁気特性評価原理

Fig. 1 に今回の実験に使用した回路図を、Table 1 に各試験片の残留歪と形状を示す。回路は、磁化コイルにより交流磁束を発生させ、磁化器と試験片で磁気回路を構成している。磁気回路中の磁束を測定するために試験片に直接コイルを巻き特性を調べた。しかし実機で適用する際、鋼材にコイルを直接巻くことはできない。よって、非破壊的に計測するためにヨークに巻いたコイルにより測定を行なった。試験片は、SUS316L と SS400 を作製した。SUS316L は 0~50%、SS400 は 0~10%の残留歪を付与している。

Table 1 歪試験

SUS316L 残留歪[%]	SS400 残留歪[%]
SUS1-1	SS1-1
SUS1-2	SS1-2
SUS1-3	SS1-3
SUS2	SS2
SUS3	SS3
SUS4	SS4
SUS5	SS5
SUS6	SS6
SUS7	SS7
SUS8	SS8
SUS9	SS9
SUS10	SS10
SUS11	SS11
SUS12	SS12
SUS13	SS13
SUS14	SS14
SUS15	SS15
SUS16	SS16
SUS17	SS17
SUS18	SS18
SUS19	SS19
SUS20	試験片形状 縦：70mm 横：70mm 厚さ：3mm
SUS21	
SUS22	
SUS23	
SUS24	
SUS25	

3.1 SUS316L における直巻きコイルによる磁気特性評価

直巻きコイルを用いた時の SUS316L において磁気特性の測定を行なった。磁化電流周波数は 10Hz、101Hz で行なった。10Hz のときの最大磁束密度を Fig. 2 に、残留磁気を Fig. 3 に、保持力を Fig. 4 に示す。なお、保持力は磁界ではなく磁化電流となっている。Fig. 2、3 をみると共に残留歪と良い相関が得られている。この様に最大磁束密度や残留磁気が増加する原因は、応力が加わった事により、強磁性体であるマルテンサイトが発生したことが考えられる。しかし Fig. 4 の保持力は、同じ残留歪のものでもバラつきがあり、全体としては減少する傾向にはあるが保持力と残留歪の間に良い相関が得られなかった。これらの結果、図中における近似直線の傾きから 10Hz の最大磁束密度が最もバラつきも少なく良い相関が得られることが分かった。

3.2 SS400 における直巻きコイルによる磁気特性評価

次に SS400 について SUS316L と同様の実験を行なった。Fig. 5 に 10Hz における最大磁束密度、Fig. 6 に残留磁気、Fig. 7 に保持力を示す。この保持力についても磁化電流の値となっている。最大磁束密度と残留磁気は歪と良い相関が得られた。保持力も近似直線は他の 2 つと同じ傾向にあるが、バラつきが見られた。以上の結果から、SUS 材の実験と同様に 10Hz の最大磁束密度が最も残留歪と良好な相関を得る事が出来た。

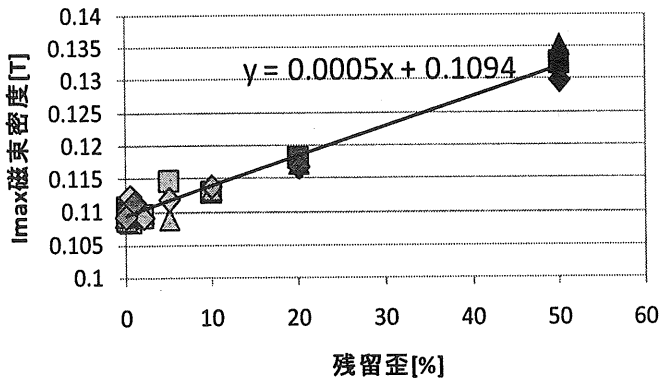


Fig. 2 10Hz SUS 残留歪試験片の最大磁束密度

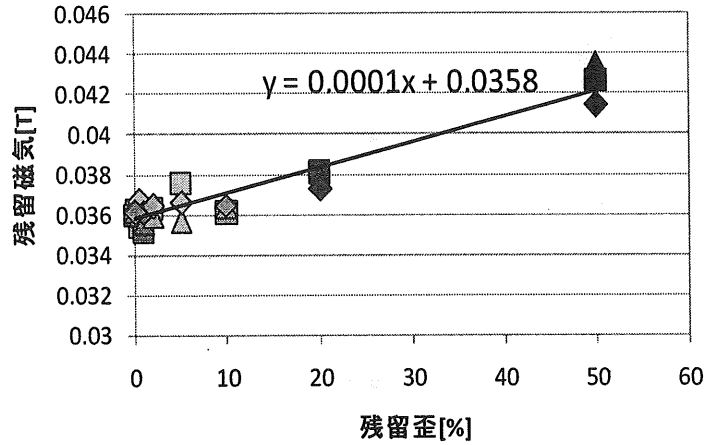


Fig. 3 10Hz SUS 残留歪試験片の残留磁気

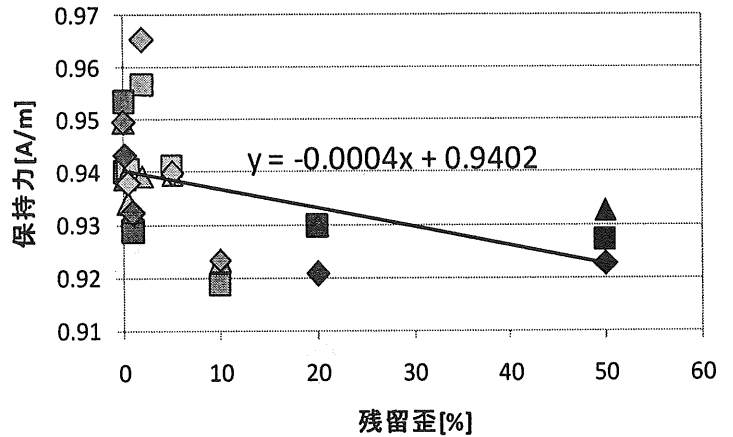


Fig. 4 10Hz SUS 残留歪試験片の保持力

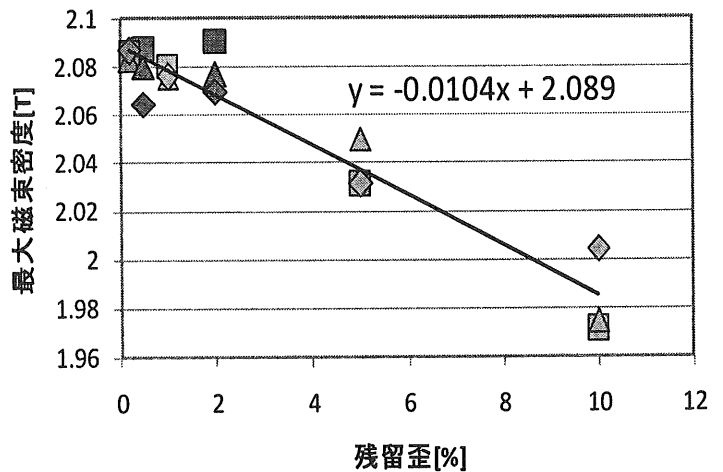


Fig. 5 SS 材 10Hz 各残留歪試験片の最大磁束密度

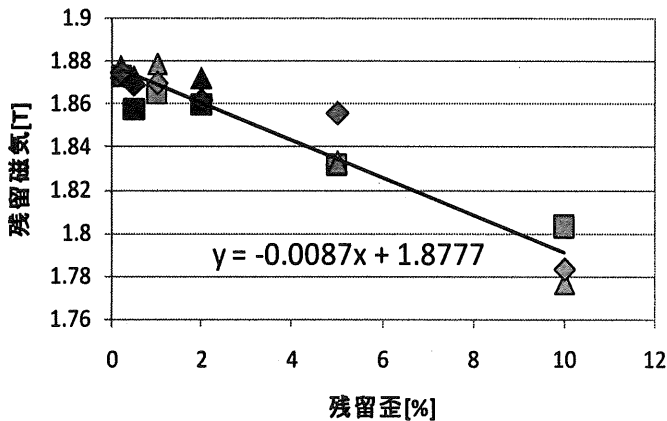


Fig. 6 SS材 10Hz 各残留歪試験片の残留磁気

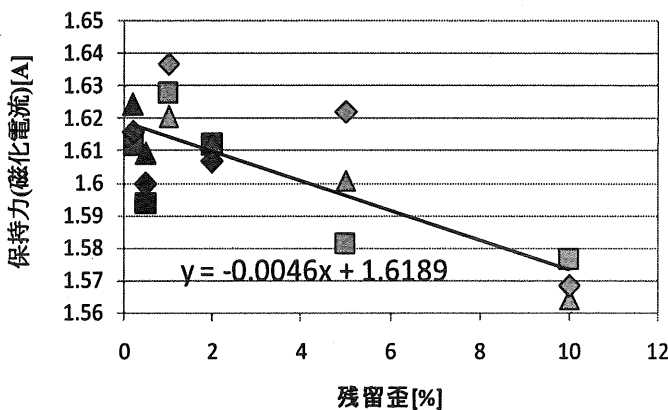


Fig. 7 SS材 10Hz 各残留歪試験片の保持力

3.3 SUS316L におけるヨークコイルによる非破壊的検査手法の検討

今までの実験は試験片に直接コイルを巻いて実験を行ない、その特性を評価してきた。しかし、実機で歪診断を行なう場合は、検査対象物にコイルを巻いて測定をすることはできない。そこで、ヨークにコイルを巻いて、非破壊的に診断を行なえる可能性を検討した。

試験片は SUS316L を用いて、Fig. 1 のヨークに巻いてあるコイルで実験を行なった。その時の最大磁束密度、残留磁気、保持力を Fig. 8~10 に示す。直巻きコイルとは違い、どのグラフにおいても残留歪との明確な相関は見られず、また同じ歪でもバラつきが見られた。しかし、歪を付与しないデータを除くと Fig. 8、9 には相関がみられる。これは受入

材の特性のバラつきによるものと考えられる。炉内では熱時効を長期間受けていると考えるとこのバラつきは少なくなっていると考えられる。

3.4 SS400 におけるヨークコイルによる非破壊的検査手法の検討

同様の実験を SS400 について行なった。10Hz のときのヨークコイルの最大電圧を Fig. 11 に示す。この図から、残留歪との相関が得られていることが分かる。しかし、歪が大きくなるに従いバラつきが大きくなっている。10%の歪材において、局所的に歪が大きかった可能性もある。

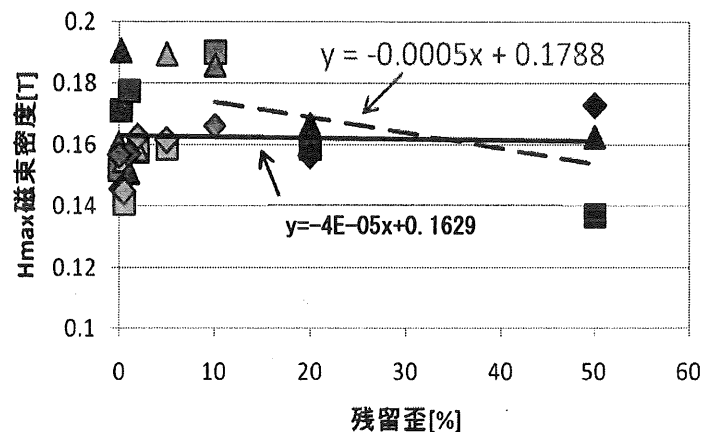


Fig. 8 10Hz SUS 残留歪試験片の最大磁束密度
ヨークコイル

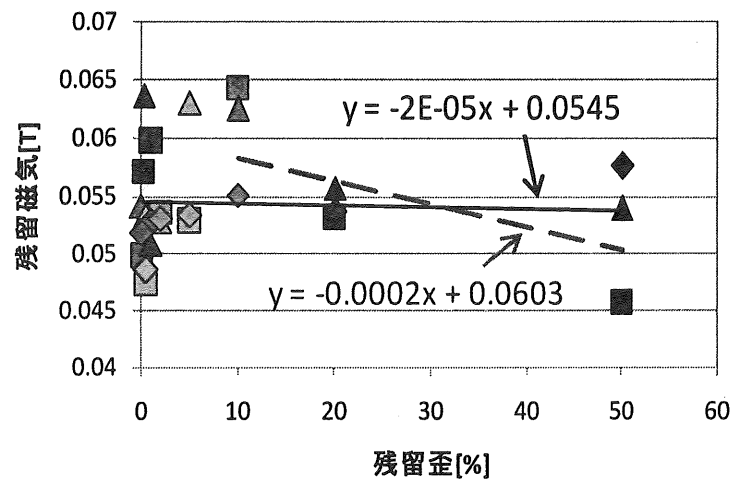


Fig. 9 10Hz SUS 残留歪試験片の残留磁気
ヨークコイル

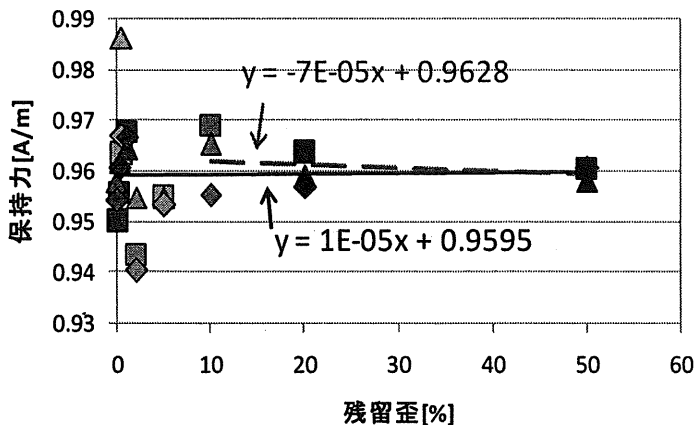


Fig. 10 10Hz SUS 残留歪試験片の保持力
ヨークコイル

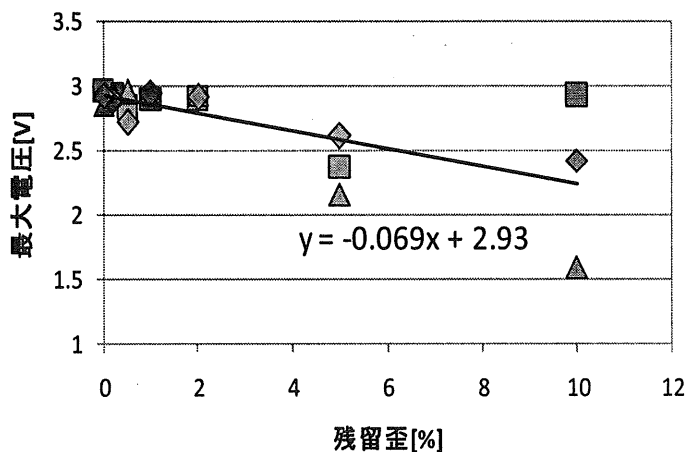


Fig. 11 10Hz SS 残留歪試験片の最大電圧
ヨークコイル

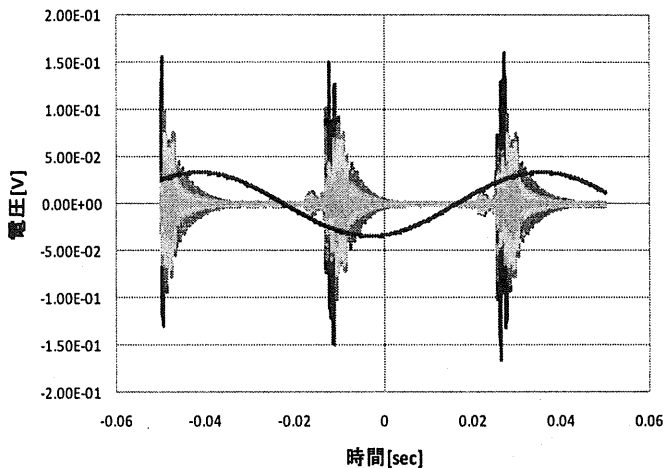


Fig. 12 10Hz SS バルクハウゼンノイズ ヨークコイル

3.5 SS400 におけるバルクハウゼンノイズによる非破壊的検査手法の検討

3.4の実験で得られたヨークコイル電圧をハイパスフィルターに通すことにより、磁壁が不連続に移動する際の磁気の乱れであるバルクハウゼンノイズを検出し比較を行なった。磁化電流を10Hzのときハイパスフィルターを1kHzとして得たバルクハウゼンノイズをFig. 12に示す。また、その時の最大電圧をFig. 13に示す。Fig. 12には磁化電流波形も併せて示している。この様に電流の正負が入れ替わるたびにバルクハウゼンノイズが発生している。Fig.

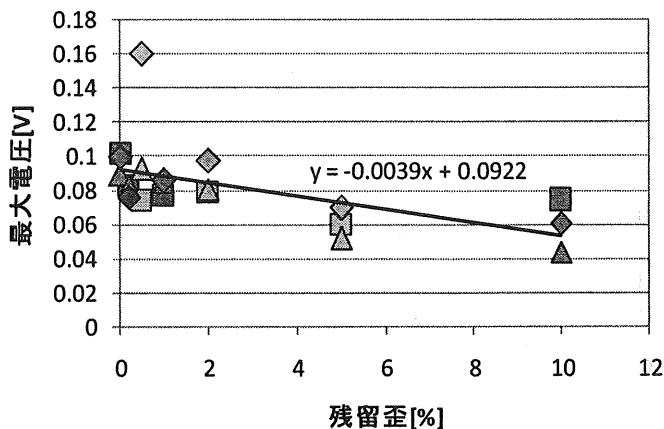


Fig. 13 最大バルクハウゼンノイズ

13では最大電圧と残留歪に相関がみられ、Fig. 11と比較してもバラつきが一部を除き無くなっていることが分かる。

次に、このバルクハウゼンノイズにFFT処理を施した。そのグラフをFig. 14に示す。このグラフから2000Hz以降で分布が各残留歪で違っていることが分かる。そこで、3つの周波数領域に分割し、それらを積分して各歪試験片を比較した。500~1400HzをFig. 15に、1400~2300HzをFig. 16に、2300~3200HzをFig. 17に示す。これらの結果を見ると、どれも残留歪と相関関係にあるが周波数の低い領域ほど同じ歪試験片でもバラつきが見られる。しかしFig. 17はバラつきが少なく良好な相関が得られた。

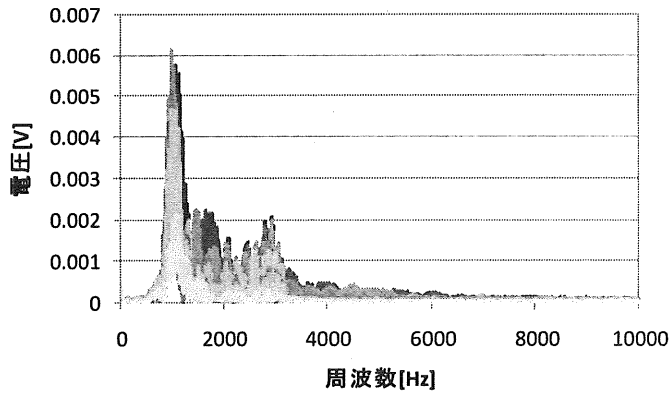


Fig. 14 バルクハウゼンノイズ FFT ヨークコイル

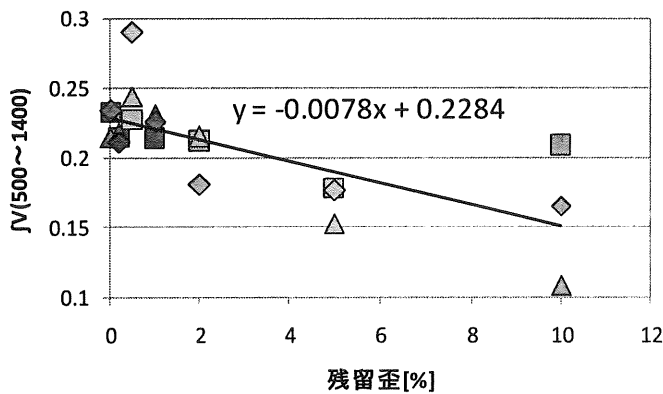


Fig. 15 積分領域 500~1400Hz

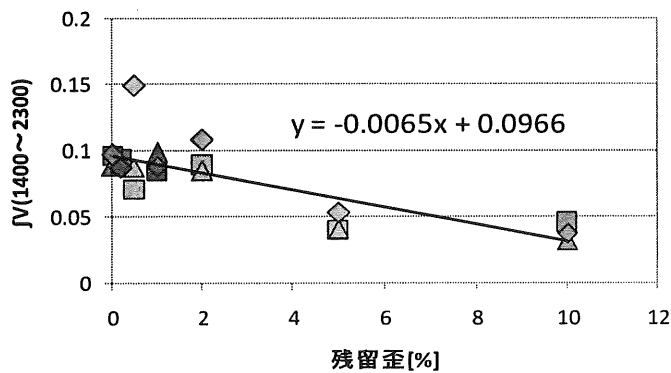


Fig. 16 積分領域 1400~2300Hz

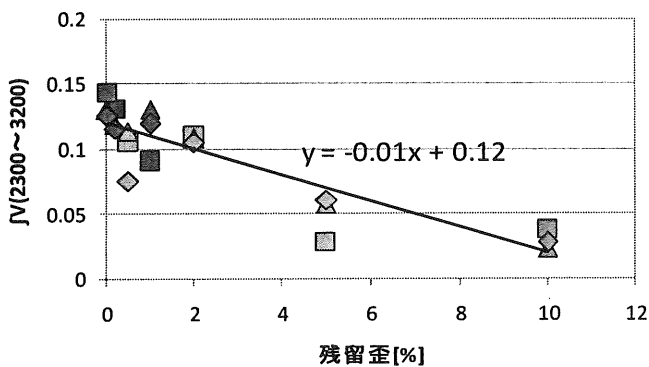


Fig. 17 積分領域 2300~3200Hz

4 まとめ

残留歪が SUS316L と SS400 に与える特性の変化を調べ、非破壊的に残留歪を検出できる可能性の検討を行なった。

直に試験片に巻いたコイルを用いれば SUS316L、SS400 は共に残留歪と良い相関関係を得る事が出来た。しかし、ヨークに巻いたコイルで計測を行なった場合 SUS316L については、相関を得ることはできなかった。しかし、受入材の特性のバラつきが考えられ、5%以下の残留歪の少ないものを除けば、一定の相関が得られた。SS400 の場合は最大電圧と残留歪に相関が得られたが、歪の大きいものはバラつきが大きくなった。しかし、バルクハウゼンノイズの最大値を計測した結果、バラつきが減少し、一定の相関が得られた。また、バルクハウゼンノイズを FFT 処理し、周波数領域で分割し積分した。その結果、2300~3200Hz の領域で積分した結果が最も良い相関を得る事が出来た。

SS400 については、残留歪の非破壊検査の可能性が得られた。