

技術論文



Technical Paper

レーザー超音波を利用した熱間圧延材の 板厚測定技術開発

布施直紀*

Development of Thickness Measurement System for Hot Rolled Steel with Laser Ultrasonic Wave Technology

Naoki Fuse

Synopsis

Laser-ultrasonic is the new technology for non-destructive and non-contact inspection.

It is specially expected to be applied to measuring thickness and inspecting metallographic structure or defects of hot rolled steels, measuring material temperature, and so on.

Though it can be applicable to many industrial fields, we have studied for the practical use, such as robustness of optical systems and safety measures for high-power laser.

The thickness measuring techniques for cold and hot rolled steels using laser ultrasonic were tested in our laboratory. The measuring accuracy was within 2% of thickness for cold steels and 4% for hot steels (compared with measured value by gauge).

The experimental system has been installed in the hot rolling process line and verified in terms of the measuring accuracy, resistance to environment and safety counter-measures.

The results are as follows;

- 1. Measuring accuracy is within 4% compared with X-ray system.*
- 2. Dust on optical devices is free due to air curtain and air jet nozzle for more than 5 months.*
- 3. Laser reflection has been shielded completely with fireproof metallic fiber curtain.*

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

1. 緒言

レーザ超音波検査法¹⁾は、従来のプローブ式超音波検査方法では困難であった高温物体、複雑形状物体、微小物体の寸法、内質、欠陥などの検査が可能な非接触非破壊検査手段である。多くの分野への適用が考えられるが^{2)~8)}、光学系の耐環境性、高出力レーザを使用することによる安全対策など、実用化に向けては多くの課題を有している。

本開発ではラボ実験において、冷間および熱間鋼片圧延材に対しレーザ超音波を利用した板厚測定を行い、冷間で2%、熱間で4%の測定精度（それぞれ、実測板厚、熱膨張を考慮した実測板厚を基準とした誤差）を得ている。現在、熱間圧延ラインではX線板厚測定方式で熱間板厚を測定しているが、レーザ超音波では将来的に表面キズ、内質などの検査も可能という拡張性を有している。そこで今回、まずは熱間板厚測定への早期適用を図るべく、実際の熱間圧延ラインに約5ヵ月間にわたり実験機を設置し、板厚測定精度検証、耐環境性対策、安全対策を重点に技術開発を行った。

2. 測定原理

2. 1 レーザによる超音波の発生

レーザによる超音波の発生原理としては、熱弾性効果によるものとアブレーションによるものがある。前者ではレーザを物体表面に照射したときの熱膨張による応力で超音波弾性波が発生する。一方後者では、前者よりも高強度、短パルスのレーザを物体表面に照射すると、表面の瞬間的な蒸発によりプラズマ衝撃波が発生しその衝撃波が物体中に超音波弾性波として伝播される。熱弾性効果よりもアブレーションのほうが発生する超音波信号強度は大きいので、われわれはアブレーションを採用した。

2. 2 レーザによる超音波の検出

ワーク中に伝播された超音波弾性波はワーク底面および表面で反射を繰り返しながら最終的には減衰する。ワーク表面に達した超音波弾性波は表面を微小振動させるため、この微小振動をレーザ干渉計により検出する。レーザ干渉計としてはスペックルパターン干渉方式^{9~11)}(Fig. 1)を採用している。ワーク表面にレーザ光を照射

したときに発生するスペックルパターンには振動発生前後で差が生じ、それらを演算処理することにより得られる干渉縞より微小振動量を算出できる¹²⁾(Fig. 2)。

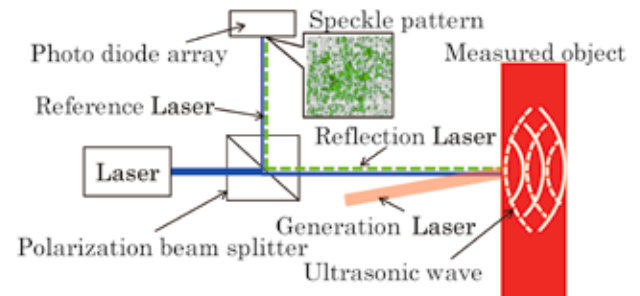
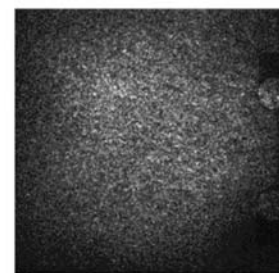
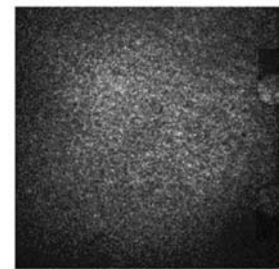


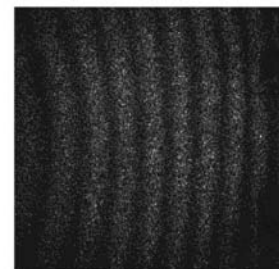
Fig. 1. Principle of laser interferometer.



a) Before vibration



b) After vibration



c) Difference between a) and b)

Fig. 2. Speckle scattering¹²⁾.

2. 3 板厚の算出

レーザにより励起された超音波弾性波が最初に底面に達し、再び表面に戻ってきたときを1回目の底面エコーとし、以降の繰返しを2回目、3回目、・・・n回 ($n \geq$

2) としたときの、 $n - 1$ 回目の底面エコー到達時間と n 回目の底面エコー到達時間の差がワーク板厚の往復時間 (Time of flight: ToF) となるため (Fig. 3, 4), 被測定対象の材質および温度を考慮した超音波伝播速度を V_p とすると、板厚 t は (1) 式で表わされる。

$$t = 0.5 * \text{ToF} * V_p \quad \dots \dots (1)$$

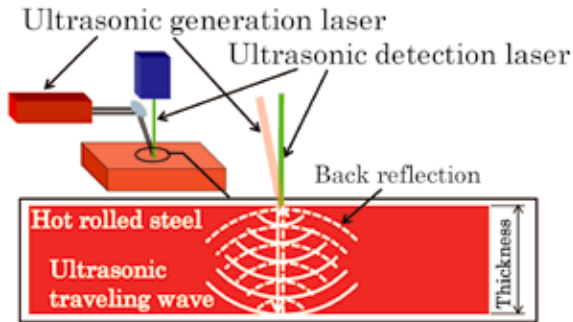


Fig. 3. Laser-ultrasonic propagation in hot steel.

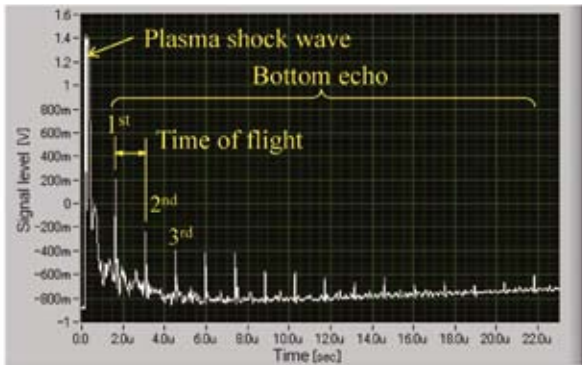


Fig. 4. Measuring time of flight.

3. 実験機の概要と安全対策

3. 1 装置設置場所

本実験機の設置場所を Fig. 5 に示す。圧延直後の板厚を測定するという目的で、板厚測定機の設置場所としては費用、設置の容易さを考慮し、ファーンスコイラーからおよそ 20 m 離れた位置とした (Fig. 6)。この位置でのワーク温度は 600 ~ 1000 °C であり、ファーンスコイラー間での温度に対しわずかに低い程度である。

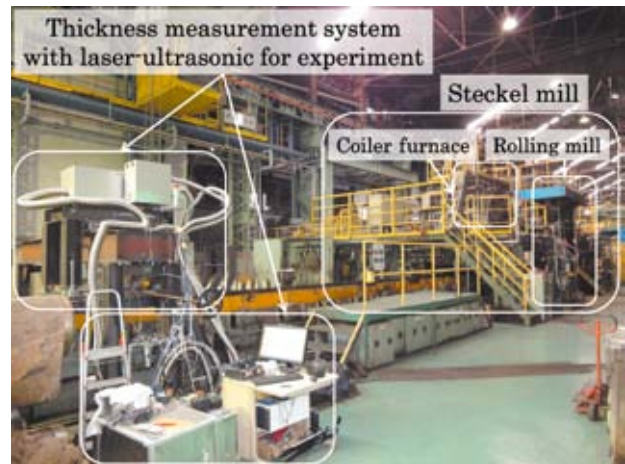


Fig. 5. Location of installed system.

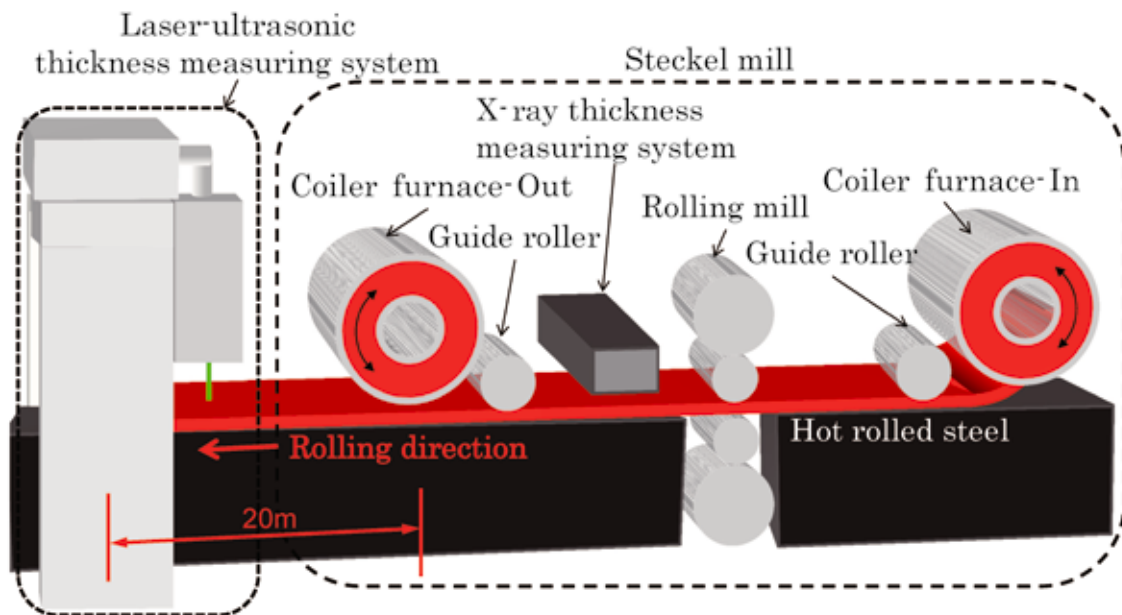


Fig. 6. Detailed arrangement.

3. 2 装置構成

装置構成としては、熱間ワークにアブレーションを発生させ超音波を励起させるための 1064 nm - YAG レーザ、熱間ワークを伝播する超音波エコー信号を検出する 532 nm - YAG レーザ干渉計とそれらの付帯設備からなっている (Fig. 7)。また、レーザ光学系を冷却するための水冷 / 空冷機構、およびウィンドウガラス防塵機構などを備えている。

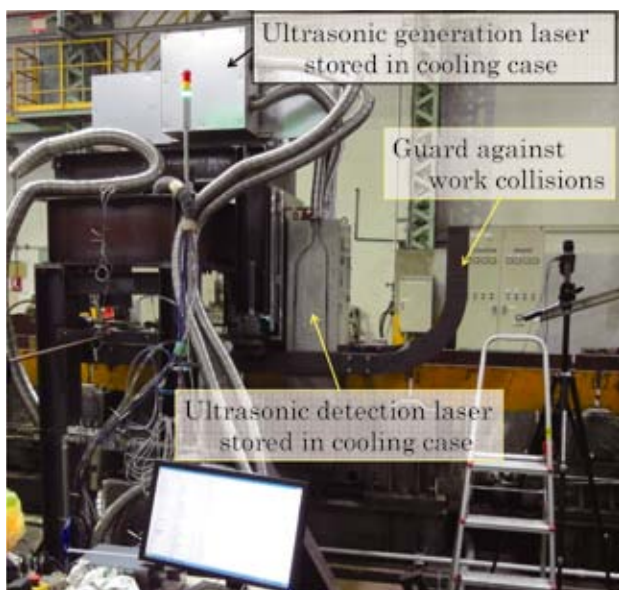


Fig. 7. Constitution of equipment.



Fig. 8. Ultrasonic generation laser¹³⁾.

3. 3 使用光学機器

使用した超音波励起レーザおよび検出レーザの主な仕様を Table 1, 2, Fig. 8, 9 に示す¹³⁾。

Table 1. Specification of ultrasonic generation laser²⁾.

Item	Specification
Type of oscillation	Nd:YAG
Oscillation wavelength	1064 nm
Oscillation power	450 mJ
Pulse width	10 nsec
Pulse period	10 Hz

Table 2. Specification of ultrasonic detection laser²⁾.

Item	Specification
Interferometry	Speckle
Type of oscillation	CW Nd : YAG
Oscillation wavelength	532 nm
Oscillation power	180 mW



Fig. 9. Ultrasonic detection laser¹³⁾.

3. 4 耐環境対策

熱間圧延ワークの直上にレーザ光学機器が配置されることから、耐熱、防塵などの対策を行うとともに、本実験を実施する期間は2月～6月と想定したため、同時期の環境温度を考慮した対策を行った。

3. 4. 1 超音波検出用レーザ

レーザ干渉計は3層構造のケースに収納され、ケース間には断熱材を充てんしている。本体は冷却と防塵のため圧縮空気を送風、ノズル近傍と下面パネルは高温ワークとの距離が200 mmまで近くなるため水冷している (Fig. 10)。環境温度が30℃以上にはならないと想定したため、レーザ発振器本体の冷却は空冷のみとしている。

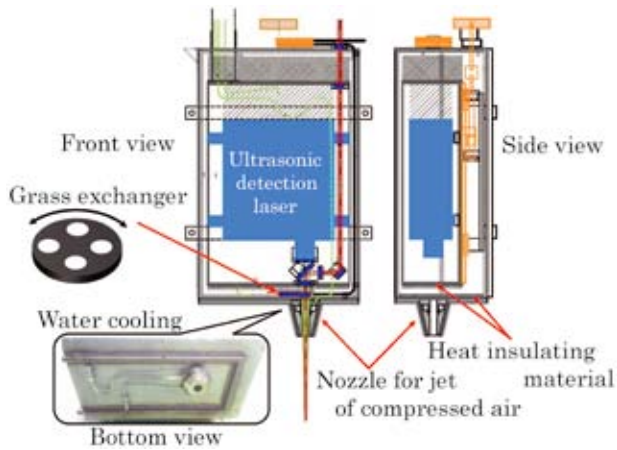


Fig. 10. Environmental measures for laser interferometer.

3. 4. 2 超音波励起用レーザ

超音波励起用レーザは2層構造のケースに収納され、ケース間には断熱材を充てんしている。レーザ本体はチラーにより水冷されており、防塵のため圧縮空気を送風している (Fig. 11)。

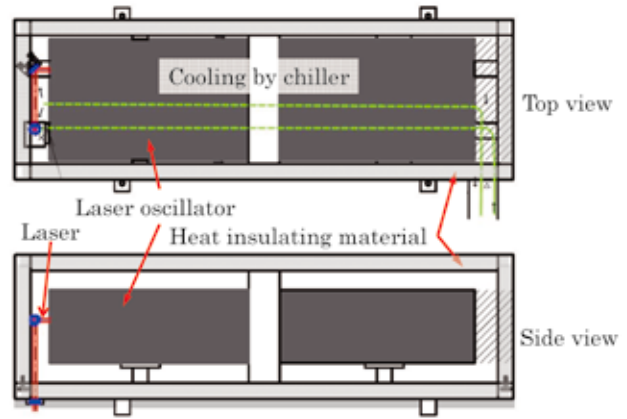


Fig. 11. Environmental measures for generation laser.

3. 5 安全対策

本実験ではクラスIVのレーザを使用するため、実験者および第三者への安全対策が重要である。対策方法はJIS規格C6802に準拠し、以下のような内容で実施した。

レーザ照射部近傍の四方エリアを不燃金属繊維：日本精線製ナスロン (耐熱温度：1150℃)¹⁴⁾で覆うことにより、ワークからのレーザ反射光をすべて遮光した (Fig. 12)。

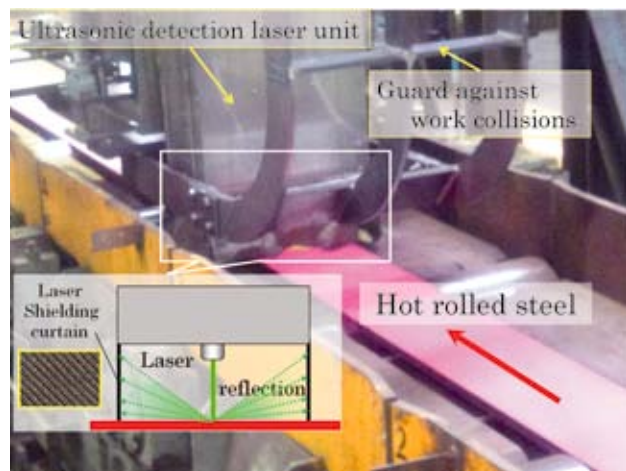


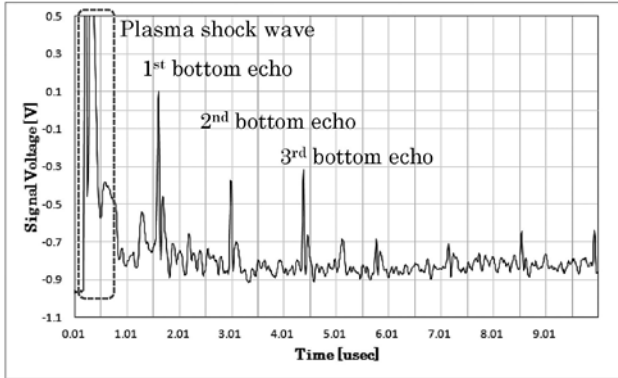
Fig. 12. Safety measures for shielding laser¹³⁾.

4. 実験結果

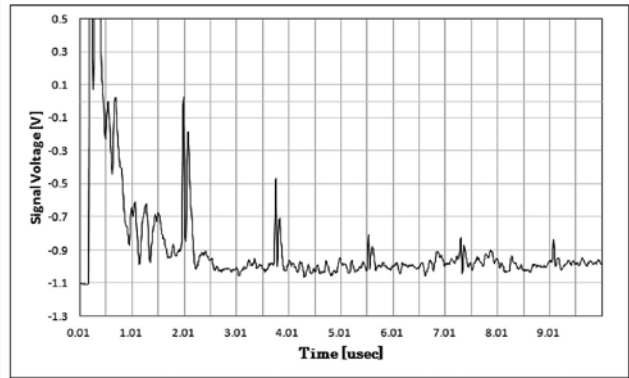
4. 1 ワーク温度vs.超音波伝播速度データベースの作成

ワーク表面温度を放射温度計により測定し、そのときのX線板厚測定装置の値を使い超音波伝播速度を算出

した。2鋼種に対する超音波信号検出例を Fig. 13, 超音波伝播速度の温度変化を Fig. 14 に示す。本結果より、熱間圧延ラインのワーク温度分布範囲内では、ワーク温度と超音波伝播速度の相関が高かったため直線近似が可能であった¹⁵⁾。

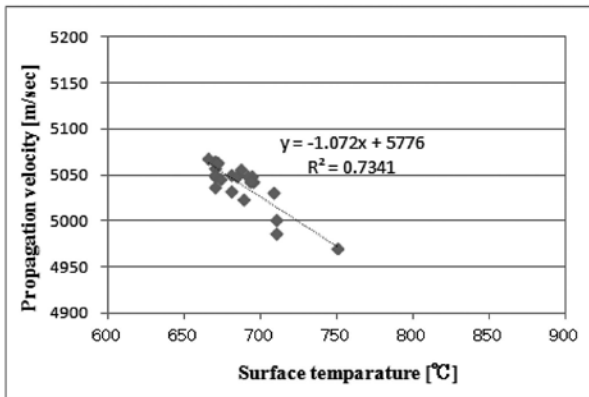


a) Steel:DF42N (Alloy, t3.5 mm,670 °C)

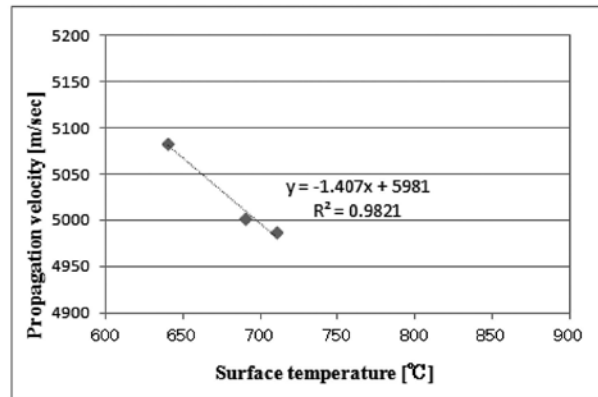


b) Steel:D38NR (High alloy, t3.5 mm,690 °C)

Fig. 13. Detected ultrasonic wave signal.



a) Steel:DF42N



b) Steel:D38NR

Fig. 14. Correlation between ultrasonic propagation velocity vs. temperature.

4. 2 関連データベースによる板厚測定

前項で作成したグラフにて対応した温度での超音波伝播速度を使用し、2.3節式(1)よりレーザー超音波にてワーク板厚を算出した。X線板厚測定装置の板厚との比較例をFig. 15に、各鋼種に対する板厚測定誤差幅をFig. 16に示す。Fig. 16の測定例では約400mの長さの圧延材に対し幅方向中心部の板厚を算出し、後方240m分および180m分の圧延方向の板厚プロファイルを示している。本結果よりレーザー超音波による板厚測定の誤差幅は4%以内であった。

必要な測定精度はラインでの使用状況によって異なるが、板厚のモニタリングのみを行う場合には誤差幅6%(板厚3.5mmで0.2mm)程度で十分である。

5. 考 察

5. 1 板厚精度への影響要因

板厚精度に影響のある主要因についてはラボ実験で検証済みであり、それらは主にスペックル方式レーザー干渉計の特性に起因するものである。レーザー干渉計の測定原理として、ワークに照射されたレーザー光の反射光を検出する必要があるという前提から、今回の測定環境にて最も測定精度に影響を与える要因は、ワーク表面状態、ワーク傾斜状態である。本報告では、この二要因についての検証結果とその他の要因について考察する。

5. 1. 1 表面状態の影響

同一鋼種、同一寸法(S50C, t15mm)で表面性状が異なる3水準の冷間ワークに対し、レーザー超音波による板厚測定を行った。表面状態の違いは、旋盤仕上げ面、粗研磨面、鏡面仕上げ面の3種類である(Fig. 17)。測定結果をFig. 18に示す。スペックル方式レーザー干渉計は原理的に鏡面に対しては測定困難であり、また旋盤仕上げ面ではレーザー光の乱反射が大きく、受光素子への入射量が大きく減少するためS/Nの低下、測定精度の低下を生じている。熱間圧延ラインでのワーク表面状態は圧延ロールの表面肌状態(主に使用頻度に起因)に大きく依存するため、測定精度への影響要因の一つとなっている。

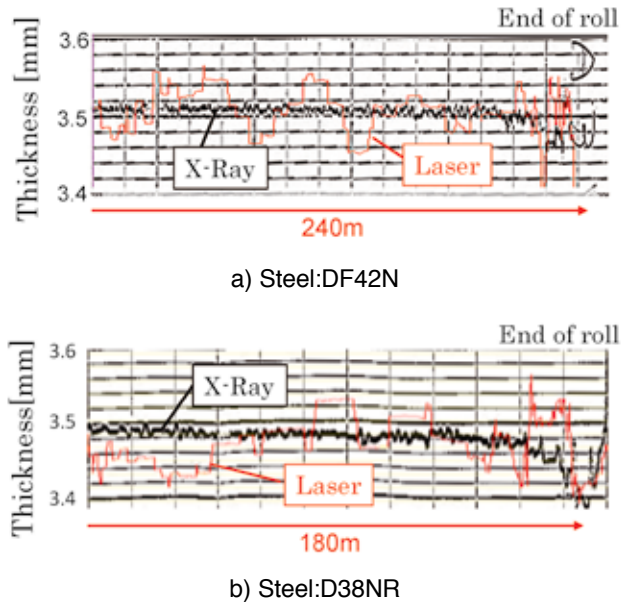


Fig. 15. Comparison of measured thickness with laser and X-ray.

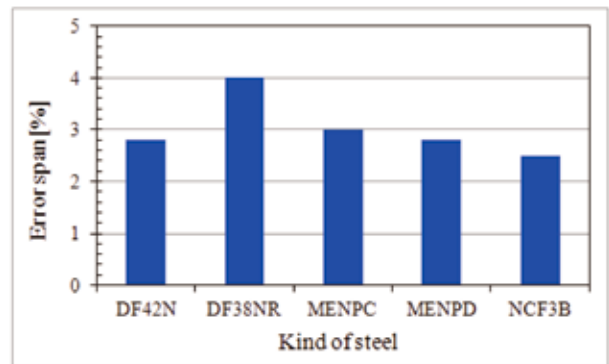


Fig. 16. Error span of measured thickness vs kind of hot rolled steel (alloy & High alloy).

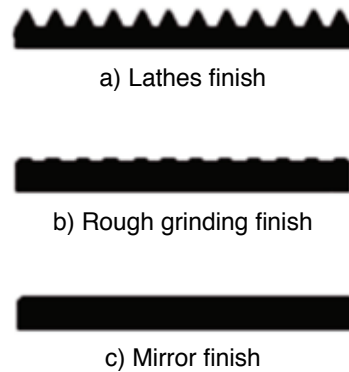


Fig. 17. Surface texture.

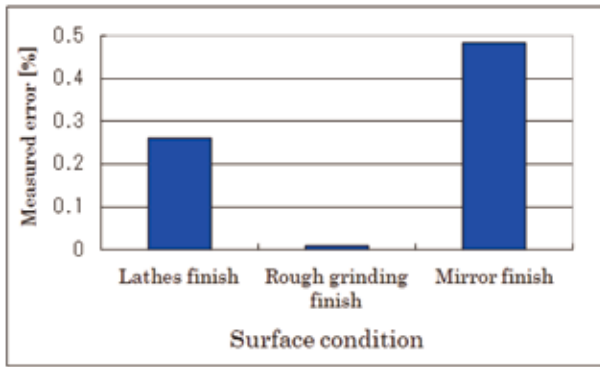
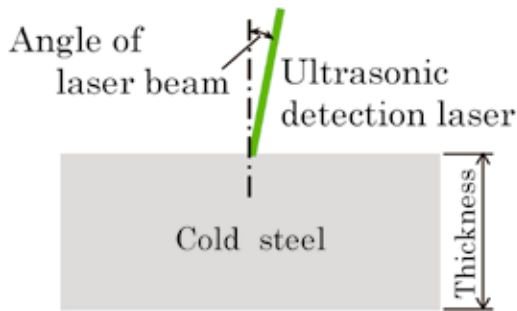


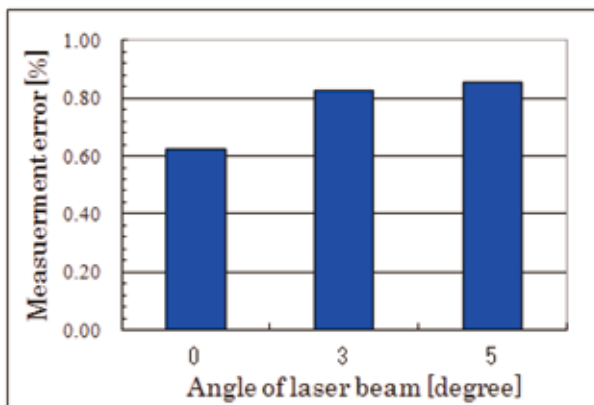
Fig. 18. Measured error vs. surface condition.

5. 1. 2 ワーク傾斜角度の影響

冷間で同一ワーク（鋼種：S50C，厚さ：20 mm，表面性状：旋盤仕上面）に対して干渉計のレーザ照射角度を変化させたときの，板厚測定精度を検証した．ワークに対するレーザ照射角度は0°，3°，5°の3水準である．結果を Fig. 19 に示す．本結果より，照射角度が大きくなるに従い，測定精度は悪化することがわかる．



a) Experimentation



b) Obtained results

Fig. 19. Measurement error vs. angle of laser beam.

照射角度が大きくなるとレーザ干渉計の受光素子に入射する反射光量が少なくなり，超音波信号のS/Nが低下，測定精度の低下が生じている．実際の圧延ラインでは圧延材の先端部，後端部はかなりの材料ばたつき，材料傾斜があることから測定精度への影響も大きくなる．これについてはX線方式も同様である．

5. 1. 3 再現性について

ラボ実験にて冷間および熱間各ワークの超音波伝播速度をレーザ超音波で算出し，再現性を検証した．ワークは7鋼種，板厚は10 mm～20 mmであり，表面肌は粗研磨仕上げとしている．熱間の場合は，シリコニット炉内で1100℃まで加熱したワークを取出し，1000℃になった時点で測定している．また，熱間板厚は冷間での実測値に対し各鋼種の熱膨張率を考慮し算出した．測定は各温度について5回行った．結果を Fig. 20 に示す．本結果より，超音波伝播速度のバラツキ幅(3σ)は冷間で2%以内，熱間で4%以内であった．

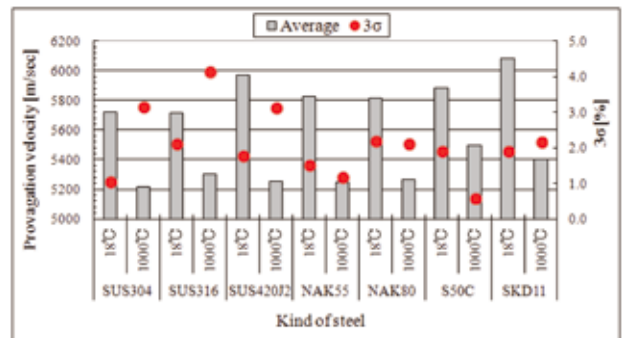


Fig. 20. Average and 3σ of ultrasonic propagation velocity at cold and hot steels (N=5 each).

5. 1. 4 板厚算出誤差要因について

前述までの結果よりラボ実験での熱間材および熱間圧延ラインでの板厚算出誤差幅はおおよそ4%以内であり，前項のラボ実験結果で検証した冷間での超音波伝播速度のバラツキよりも大きいものとなった．この原因については，前述の表面性状，ワーク傾斜に起因するバラツキ

他に、温度、鋼種などの要因が考えられる。温度要因については冷間と比較して熱間の超音波減衰が大きいため、超音波信号のS/Nにも影響する。また温度はワークの表面を測定しているが、厳密には板厚方向に温度分布を有している。たとえば Fig. 14 のグラフにて温度が 20℃異なる場合、0.5%程度の超音波伝播速度差が生ずるため、わずかではあるが板厚測定精度に影響する。さらに、温度測定では放射温度計を使用しており、あらかじめ定められた各鋼種での放射率の違いを補正してはいるものの、ワーク表面粗度などの影響で補正值に誤差が生ずる場合もある。

鋼種要因については冷間と熱間圧延時では結晶粒径にかなり差があるため、超音波伝播状態に影響を与える¹⁶⁾。これについては現在個別に調査をしている。

したがって、板厚誤差幅は冷間材で2%、熱間圧延材で4%であるため、ワーク表面性状、ワークばたつき、温度測定要因、鋼種要因などを含んだ誤差要因が2%程度あるものと判断できる。

5. 2 レーザ光学装置への環境温度影響

想定していた実験期間である2月～6月までは環境温度が30℃以下であり、工場エアによるレーザ干渉計本体への空冷効果は十分得られた。しかし、7月になると熱間圧延工場内の環境温度が35℃以上になる場合がほとんどであり、工場エア自体の温度上昇も伴って空冷効果は皆無となった。そのため、レーザ干渉計本体内部の温度が40℃程度に上昇すると超音波信号検出性能が極端に低下した。Fig. 21, Table 3に検出性能が低下した時のレーザ筐体内部の温度測定結果を示す。検出性能低下の原因は、使用している半導体レーザで温度上昇によりモードホッピング現象が生じ、干渉性能が低下したことである。対策としてレーザ照射用光学ヘッドと半導体レーザ本体を分離し、環境温度、輻射熱の影響を受けないようにすることを検討中である (Fig. 22)。

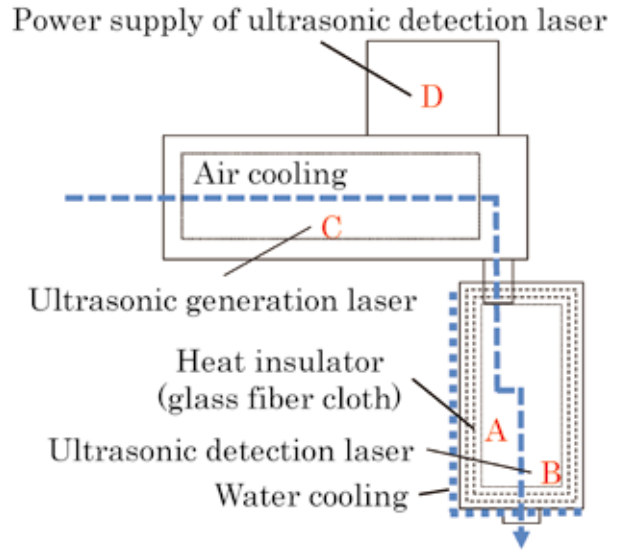


Fig. 21. Measuring locations of temperature.

Table 3. Temperature of each location.

Measured points	A	B	C	D
Temperature [°C]	39	41	40	36

Ambient temperature: 35 °C



Fig. 22. New line of laser interferometer with fiber optical head.

6. 結 言

熱間圧延ラインにレーザ超音波板厚測定実験機を設置し、下記の成果が得られた。

- 1) 板厚測定精度は各鋼種によってバラツキはあるものの、板厚の4%以内であった。誤差要因としてはレーザ超音波に起因するものが2%以内、ワーク表面性状、温度、鋼種などに起因するものが2%程度である。
- 2) 圧縮エアブローノズルとウインドガラスのエアカーテンによる防塵が有効であった。
- 3) 不燃金属繊維製カーテンによりレーザ反射漏えいを完全遮光し、第三者への安全を確保できた。
- 4) レーザ発振器本体の温度が35℃以上になると、半導体レーザが温度上昇によりモードホッピング現象を生じ、超音波信号検出性能が極端に悪化することが分かった。実用化時にはレーザ発振器本体と照射ヘッドを分離することにより、温度上昇の影響を排除するようなことが必要である。

今後も評価検証を継続し、測定精度に影響する要因を考察していく方針である。

(文 献)

- 1) Scruby C.B. and Drain L.E., "Laser-ultrasonics: Techniques and applications", eds Adam Hilger, Bristol, UK 1990.
- 2) 高坪純治: 物理探査, 54(6) 388-393, 2001年
- 3) 高坪純治: 検査技術, 15(1), 24-30, 2010年
- 4) 山中一司: 非破壊検査: 49(5), 292-299, 2000.
- 5) 落合誠: 東芝レビュー, 61(1), 44-47, 2006-01
- 6) 落合誠: 超音波 techno 20(6), 2008, 42-50
- 7) 落合誠: 非破壊検査, 57(1), 3, 2008-01-01
- 8) 落合誠: 塑性と加工 51(596), 2010, 846-850
- 9) Pouet B. et al., : QNDE 24, Vol.760(2005) 273-280.
- 10) Pouet B. et al., : QNDE 25, Vol.820(2006) 233-239.
- 11) Pouet B. et al., : QNDE 26, Vol.894(2007) 1668-1675.
- 12) 内野正和, 原田豊満, 永井誠, 小金丸正明: 研究報告, 福岡県工業技術センター, 2002
- 13) タレスジャパン(株) レーザ事業部
2012年度カタログ
- 14) 日本精線(株), 2012年度カタログ
- 15) 福地哲夫, 電力中央研究所報告, H06012, 2007年
- 16) 永田泰昭, 非破壊検査 49(6), 369-375, 2000-06-01