

© 1991 ISIJ

論 文

音速を用いた冷延作動ロールの硬化
深度測定方法

田 中 秀 秋*・大久保 吉 雄*

Hardened Depth Measurement Technique by Using Sound Velocity for
Work Rolls of Cold Strip Mill

Hideaki TANAKA and Yoshio OKUBO

Synopsis :

In order to measure the hardened depth of quenched work rolls non-destructively, a technique using sound velocity distribution in the rolls was studied.

The sound velocity can be measured by ultrasonic transducers, which are set on a roll surface so that the ultrasonic sound travels on a polygonal beam path in the roll. The velocity is average one in a certain range of depth.

The sound velocity at each depth can be calculated using the average velocity on the transferring route, and then the sound velocity distribution from outer surface to internal portion is obtained.

It is well known that there is a linear relationship between sound velocity and hardness. The sound velocity and hardness of the rolls are influenced by quenching temperature and residual stress. Therefore, if we want to estimate the hardened depth of a roll, we have to know the relationship between sound velocity and hardness of a test block cut out from a roll at first as an original data. And then, the hardened depth of a roll can be estimated using the relationship of the test block.

The accuracy of the estimation of hardened depth is within ± 3 mm.

Key words : work roll; hardening; martensite; hardened depth; ultrasonic; sound velocity.

1. 緒 言

近年、圧延プロセスの高効率化と経済性から、冷延用作動ロールの高硬化深度化が進められている。この硬化深度深さとしては、外表面から 50 mm におよぶ場合がある。高硬化深度化への対処は、ロール合金組成と焼入方法の改善によって行われているが、一方、硬化深度を測定し硬化層の深さを保証することも重要な課題となりつつある。

硬化深度を非破壊的に測定する方法としては、電気的方法、磁気的方法、超音波による方法が報告されている。

電気的方法は、焼入れによる空孔の増加を電気抵抗の変化として測定する方法で、抵抗率は焼入深さが深いほど高い値を示す¹⁾²⁾。磁気的方法には、電磁誘導における導電率の変化を計測する方法³⁾、磁気異方性センサーを用いた焼入れによる磁気異方性の減少を測定する方法⁴⁾、磁気特性の保磁力の増加を測定する方法⁵⁾等がある。超音波による方法には、表面波の伝搬速度の周波数

依存性を求める方法等がある⁶⁾。

これらの方法の内冷延作動ロールに適用していると報告されたものは、磁気特性の保持力を測定する方法のみであり、他の方法は測定できうる硬化深度が極表層部であるため冷延作動ロールには適さない。しかし、磁気的方法でも測定可能な深度は、十数 mm 程度までであるため、ここで目的としている硬化深度深さまでには至っていない。

このため、本研究では非破壊的手法で、かつ、外表面から深さ 50 mm に及ぶ硬化深度を測定する方法として、焼入れによる超音波音速の変化に着目し⁷⁾⁸⁾、外表面から内部に至る音速分布を求める方法を検討し、さらに、求められた音速分布と硬さ分布の関係について調査したので、その結果を報告する。

2. 音速分布の測定

2.1 音速分布の計測方法

材料の音速は⁹⁾、密度と弾性率によって与えられ、横

平成元年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 4 月 4 日受付 (Received Apr. 4, 1990)

* (株)日本製鋼所室蘭製作所 (Muroran Plant, The Japan Steel Works Ltd., 4 Chatsumachi Muroran 051)

波音速の場合は

$$\text{横波音速} = (\text{剛性率}/\text{密度})^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられることが知られており、弾性定数と音速には密接な関係がある。

密度に影響を与える因子としては焼入れによる空孔濃度の増加が考えられ²⁾、弾性定数に影響を与える因子としては温度、圧力、合金化、相変態、結晶の不完全性が考えられる¹⁰⁾。焼入れにおいてはマルテンサイト化に伴う相変態の影響が最も大きく、密度・弾性定数のいずれにも影響し、音速の変化の要因となっている。

また、硬さは弾性定数と関係のあることが知られており、音速から硬さを求めることができると推定される。

焼入れを施した外径 $\phi 539.4$ mm、胴部長さ 1200 mm の冷延作動ロールを、長さ 327 mm の円盤状に切断し、その端面の組織調査及び硬さ測定を行った。このロールは、Fig. 1 の硬さ分布図に示すように、表層部はマルテンサイト組織で内部にいくに従ってベイナイトが増加していることがわかる。深さ 40 mm 頃からは、パーライトが現出し、深さ 60 mm 以上はほとんどがパーライトとなる。硬さはマルテンサイト組織では高い値を示すがベイナイト、パーライトの現出と共に低下し、特にパーライトが現出するとその低下は著しくなる。

Fig. 1 から、硬化深度は（注：ここではショア硬さ Hs 90 以上が得られる深さとした）深さ 20 mm であり、また深さ 70 mm までは焼入れによる熱影響を受けていることがわかる。

切断したロールの一方の端面に送信探触子、他方に受信探触子を保持し、ロールの軸方向に伝搬する超音波の

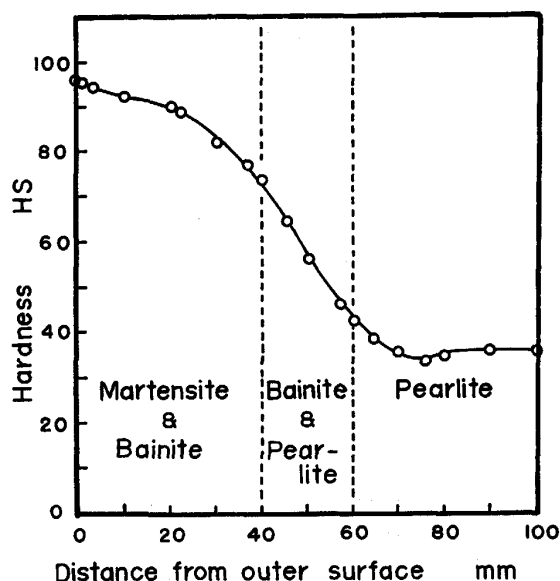


Fig. 1. Results of hardness measurement on the section of a roll.

横波音速を測定すると、Fig. 2 に示すように中心部は焼入れの影響を受けないため、焼入れ前と同じ 3300 m/s で、焼入れされた表層部では 3210 m/s と、著しく音速が低下していることがわかる。

このように、焼入れによる組織的变化が超音波音速に変化を与えることから、焼入れされた材料の断面における音速分布を求めることにより、組織的变化・硬さの変化の推定が可能になると予想された。

一般的に断面における音速分布を求める方法としては、トモグラフィの手法である多方向の音速測定結果から求める方法があるが、ここでは、Fig. 3 に示すように外周の一点で超音波の送受信を行い、超音波を送受信する探触子の角度を制御することによって、円柱材に内接する正 n 角形（4～16 角形）に伝搬する超音波を形

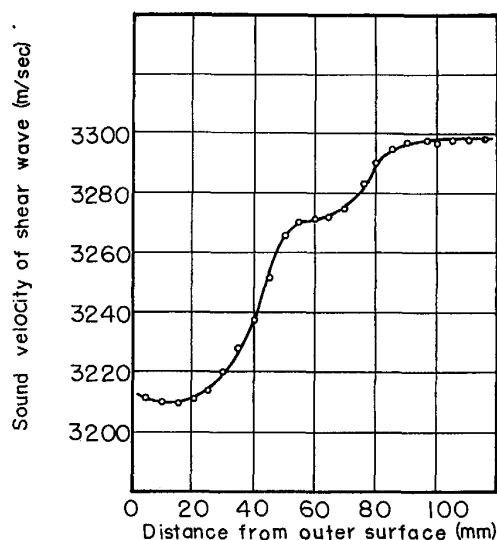


Fig. 2. Results of sound velocity measurement in axial direction of the section roll.

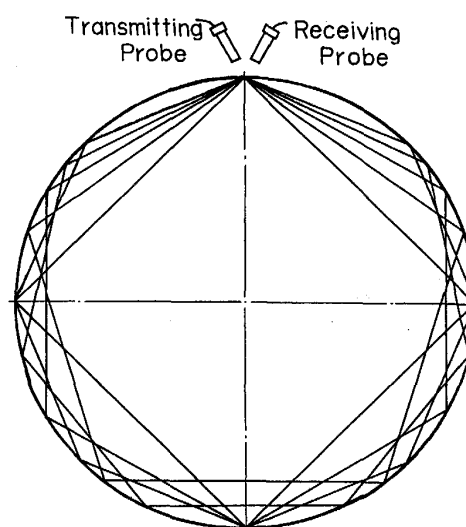


Fig. 3. Beam path in a work roll.

成し、その正 n 角形のそれぞれの伝搬経路における伝搬距離と伝搬時間から音速を測定している。この方法で計測される音速は、各経路における平均音速である。また、計測可能な最大深さは、Fig. 3 に示すように屈折角 45° からの使用となるため直径の 15% となる。例えば直径 $\phi 600$ mm では深さ 90 mm までの音速分布を得ることができる。

音速測定の誤差は、超音波を送受信する探触子の位置精度と、測定材料の真円度、外径測定精度、超音波を送信して受信するまでの時間の測定精度、受信超音波の立ち上がり特性等によって決まる。送受信探触子の位置精度が ± 0.1 mm で音速に与える影響は、 $\pm 0.01\%$ であり外径測定精度が ± 0.01 mm で、音速に与える影響は $\pm 0.002\%$ である。また、伝搬時間を測定する装置としては、ここでは探傷器にプラグインして肉厚測定を行う、音速測定モジュールを用いており、その音速の測定精度は各正 n 角形に周回する音波の路程間では $\pm 0.02\%$ である。

これらの総合的な精度としては、各経路間の測定誤差で ± 1 m/s となる。

Fig. 4 に音速測定を行うのに必要な装置を示す。この装置は、超音波探傷器とそれにプラグインする音速測定モジュール、および探触子角度制御装置から構成される。計測された値は計算処理され、音速分布として表示される。

探触子は、局部水浸タンクの中で超音波の送受信点を中心にもつ半円形のリングで保持することによって、伝搬経路を変化させるために送受信角度を変えても超音波の入射点は変化しない構造となっている。超音波の受信

エコーは、ビームの拡散により一度に数角のエコーが検出されるが、角度制御装置で制御している角度で計測を行う。

2.2 音速分布の計算処理方法

測定によって求められた音速は、各伝搬経路における平均音速であるため、各深さ位置における音速値を求める必要がある。ここでは、伝搬経路の隣り合った二つの平均音速の比較から、各経路ごとに表面側、中心側の 2 点の音速を求めている。

比較する超音波の伝搬経路をそれぞれ M, L とすると、Fig. 5 において表面側 B 間の中心点 BP 点の音速は M を通過する平均音速と等しく、内部 A 間の中心点 AP 点の音速は L を通過する平均音速から B 間の音速 (M を通過する音速と等しい) を差し引いた残りの平均音速と等しいとすることができ、中心側 P 点の音速は、BP 点、AP 点の深さと音速の関係から、近似的に求めることができる。これら求められた深さと音速値の各点の値を高次の回帰式で近似曲線を求め、外表面から内部に至る音速分布としている。

Fig. 6 には、Fig. 2 に示す冷延作動ロールの端面から軸方向に音速分布を測定した結果と、外周面における円周の 1 点から円周方向に測定した音速分布をもとに、計算処理した音速分布を比較した結果を示す。深さ 50 mm までは、両者が良く一致した結果が得られた。深さ 60~80 mm では音速測定結果に違いが見られるが、測定深度が深くなると外周からの音速分布測定では、測定ピッチが粗くなるのが原因である。

音速測定に用いた探触子はいずれも広帯域型で、端面からは 5 MHz, $\phi 12.5$ mm の横波探触子を用い、外周からは 3.5 MHz, $\phi 12.5$ mm の水浸探触子を用いている。

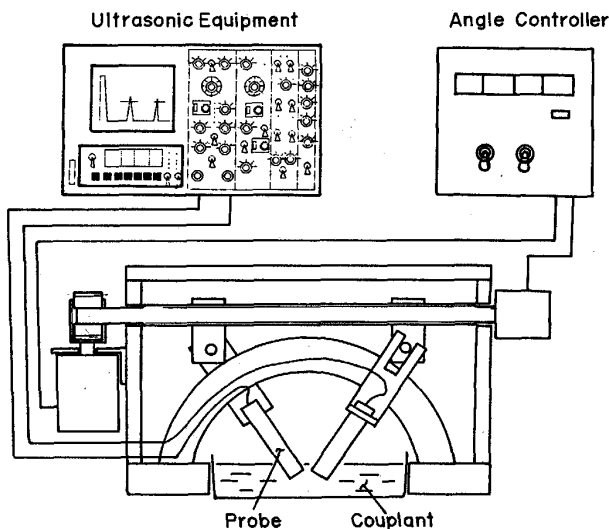


Fig. 4. Equipment for control angle of ultrasonic beam and measurement of sound velocity.

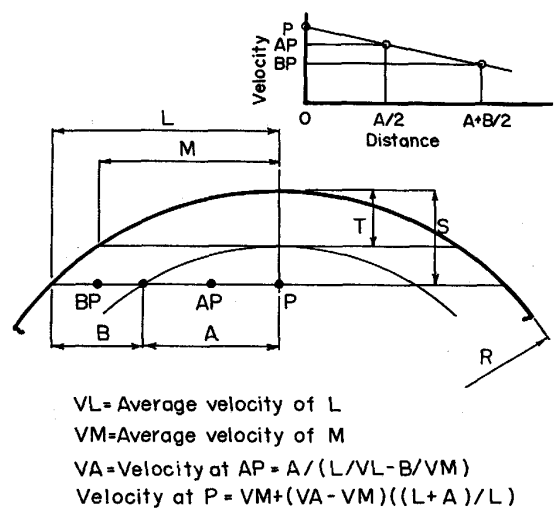


Fig. 5. Calculation of sound velocity.

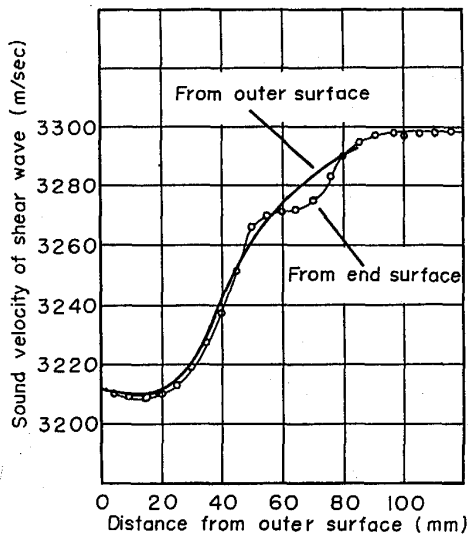


Fig. 6. Comparison of sound velocity measured from outer surface and from end surface.

円周方向への超音波の伝搬においては、外周面にて超音波がモード変換せず全反射し、入射点へ戻ってくる必要があるため、横波を用いている。超音波を送受信するための局部水浸タンクでは、入射角を 19° ~ 27° とし、水から鋼材への入射による屈折によって、ロール内での屈折角は、 45° ~ 78° としている。また、屈折角が大きくなると受信超音波の立ち上がりが不鮮明になるため、減衰の影響を受けない範囲でできるだけ高い周波数と、波形の立ち上がりが鮮明な広帯域の振動子を選択している。

3. 硬化深度の推定

3.1 音速分布と硬さ分布の関係

切断した冷延作動ロールの硬さ測定結果と、音速分布の測定結果を比較すると、Fig. 1 の硬さ分布図および Fig. 6 の音速分布図に示すように表層から 12 mm までは音速の低下と共に硬さが低下し、12 mm 以降は逆に音速の増加と共に硬さが低下している。この時の焼入条件における焼入れ時の温度分布は、Fig. 7 に示す a 試料であり、焼入温度のピーク位置と音速の最低位置とは一致している。このことから、表層部と内部で音速-硬さの関係が逆転している原因は、低周波焼入れによって、表面よりも表面下の内部に焼入れのピーク温度があるため、音速は焼入温度の影響を受け、温度の高いほど音速が低下していることと、表面近くの硬さは急冷の影響で高い値を示すためと考えられる。

焼入条件が異なる他の実機サイズのロールに所定の焼入れを施し、焼入れ後の音速分布と外表面からバンド状研磨にて彫り込みながら硬さ分布を測定した結果でも、

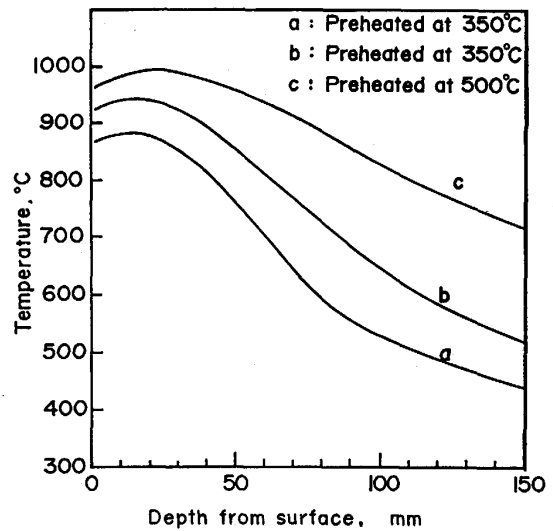


Fig. 7. Distribution of peak temperature.

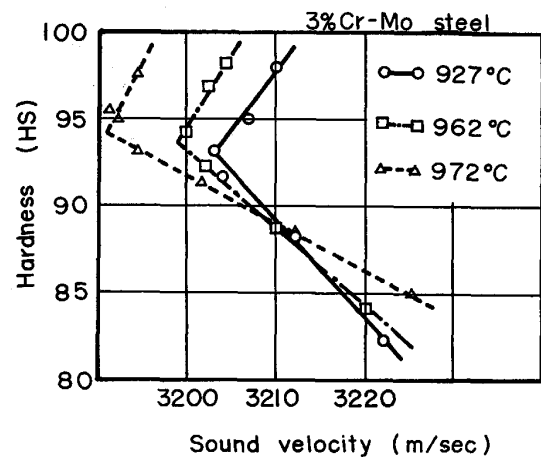


Fig. 8. Relationship between hardness and sound velocity.

同様の結果となっている。

3.2 音速-硬さに影響を与える因子

音速-硬さの関係は、焼入温度、焼もどし温度、残留応力、残留オーステナイトが、影響を与える因子として上げられる。

Fig. 8 は、同一材質の実機サイズのロールで焼入温度を変えて、焼入温度による音速-硬さの関係の違いを調査した結果である。硬さ-音速の関係は焼入温度によって変化し、焼入温度が上昇すると音速ピークの最低音速は、逆に低くなり、音速と硬さの関係の傾きは、表層部では硬さ当たりの音速変化量が少なくなる傾向にあり、内部では逆に硬さ当たりの音速変化量が増加する傾向にある。

Fig. 9 は、焼入温度と硬さの関係を示し、焼入温度が 940°C 以上では、硬さはほぼ一定となっているが、

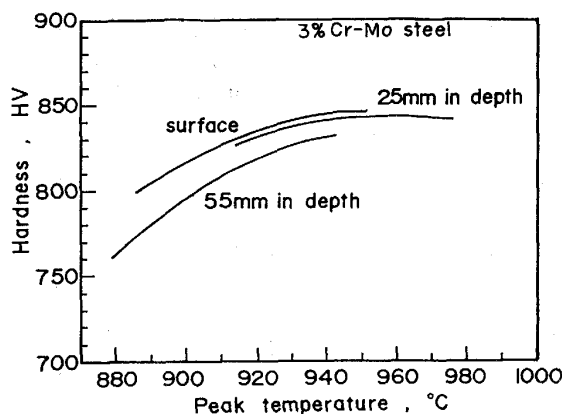


Fig. 9. Hardness at several depth.

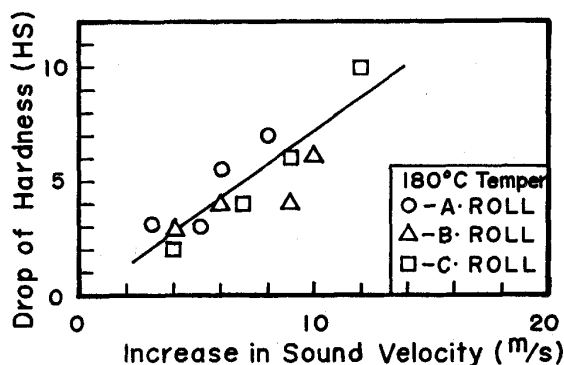


Fig. 10. Relationship between increase of sound velocity and drop of hardness due to tempering.

焼入温度と音速の関係では 940°C 以上でも温度が上昇すると音速が低下する関係を示しており、硬さと音速の関係では絶対的關係ではなく、各焼入条件における表面硬さと表面の音速を基にした、相対的關係があると考えられる。

Fig. 10 は、焼もどしによる硬さ低下と音速の関係を示し、その間には、ほぼ比例した関係が認められる。このため、焼もどしによる硬化深度の低下は、焼もどし前後における表面硬さと音速分布の変化量をもとに、推定することが可能である。

焼もどし温度による硬さと音速の関係では、碓井ら⁸⁾の実験結果、焼もどし温度に関係なく、焼もどしによる硬さ低下と音速増加とに比例関係が求められており、また、縦弾性係数も焼もどし温度にほぼ比例した関係のあることが知られている¹¹⁾。しかし、その変化割合は炭素量と焼入残留応力の影響を受けるため、焼入条件が異なるとその程度も異なる。したがって、焼もどしによる音速の増加量も、焼入条件と材質によって、それぞれ計測されたデータをもとに推定する必要がある。

残留応力と音速の間には、比例した関係のあることが

知られている。ここでは横波を用いており、応力 σ の作用している材料中の音速 V_{r2} と、作用していない材料中の音速 V_{r0} の関係は¹²⁾

$$V_{r2} = V_{r0} - CA(-\sigma) \cdot V_{r0} \dots \dots \dots (2)$$

CA: 音弾性定数

で与えられる。

ロールの音速分布を求める音速測定に与える影響は、使用している横波の振動方向が、ほとんど半径方向成分で、焼入れが施されたロールの残留応力はほとんど周方向および軸方向に内在しているため、影響は少ない。

円筒材料を用い、残留応力の代わりに水圧による内圧を加え、Fig. 3 に示す円周方向への超音波の伝搬による音速測定で応力と音速分布の変化を測定すると、半径方向応力に比例して音速分布が変化する。この場合、音速は弦方向に伝搬する横波であるため、振動方向がほとんど半径方向となり、振動方向と異なる内圧によって発生した周方向および軸方向の応力の影響は受けない。

Fig. 11 は、水圧による内圧で発生した半径方向応力と周方向の多角形に伝搬して得られた音速分布から求めた音速変化の測定結果である。

焼入れされたロールの半径方向の残留応力はほとんどが 100 MPa 以下であることから音速分布へ与える影響は 2 m/s 以下である。

残留オーステナイトが音速に与える影響は少ないことが予想されるので、本方法では考慮から除外した。

3.3 音速分布から硬化深度を求める方法

音速分布と硬さの関係には、これまで述べてきたように材質のみならず焼入温度も影響を与える。また、同一材質であれば、音速分布パターンは同じでも、絶対値は熱処理条件等で相対的に上下する。このため、内部硬さ

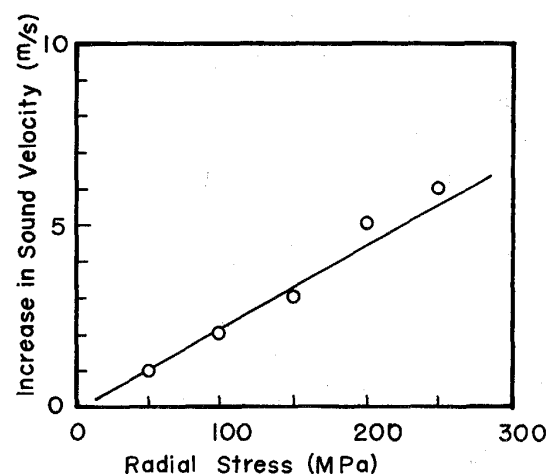


Fig. 11. Changing of sound velocity due to radial stress.

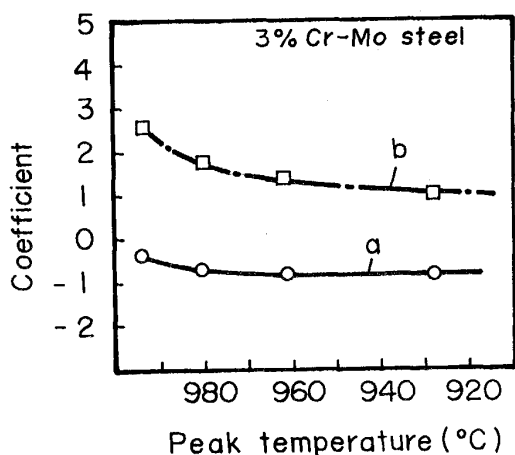


Fig. 12. Modification factor for peak temperature.

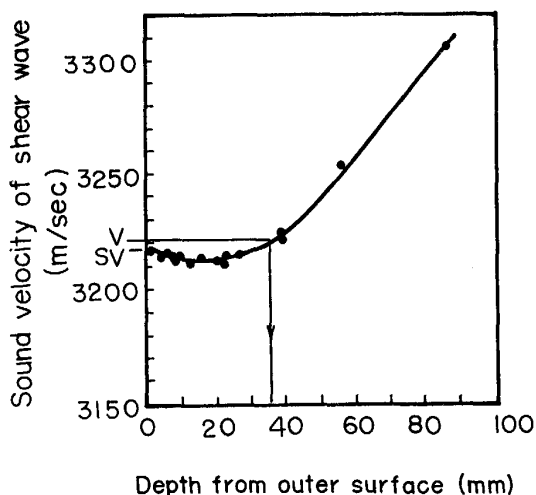


Fig. 13. Determination of hardened depth with sound velocity.

分布は、表面の硬さを基準に、音速分布を用いて求めた相対的な変化として捉える必要がある。

測定された音速分布から硬化深度を求めるには、表面硬さから硬化深度の下限硬さを差し引いた硬さ量に相当する音速量だけ、音速の低下した深さを求める方法を用いているが、Fig. 8 に示すように焼入温度によって表層側と内部で音速-硬さ特性が異なることから、Fig. 12 に示すように表層側を a 、内部を b とした 2 種類の補正係数を用いて計算している。この補正係数 a, b は 3% Cr-Mo 鋼による焼入れされたロールの場合であり、他の材質の場合は、この補正係数が異なる。表面の音速を SV 、求める硬化深度の音速を V とすると

$$V = SV + (D + E \cdot (\text{補正係数 } a)) \cdot (\text{補正係数 } b) \quad \dots\dots\dots (3)$$

D = 表面硬さ - 硬化層硬さ

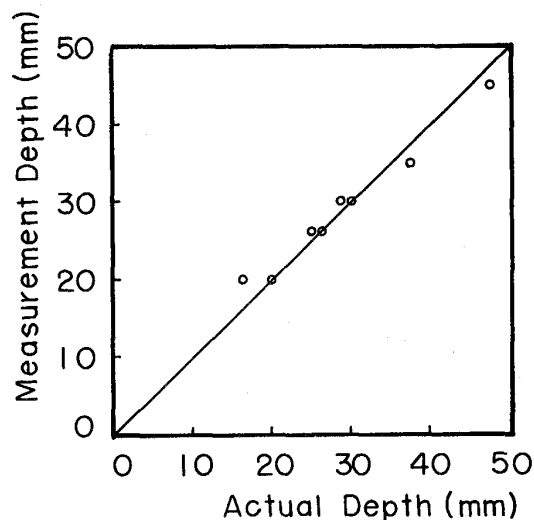


Fig. 14. Accuracy of measurement of hardened depth.

E = ピーク音速 - 表面での音速

となり、音速分布図 Fig. 13 では Fig. 12 の補正係数を用い、硬化深度は 38 mm となる。

このように、実機サイズのロールに、焼入条件を変えて焼入れを施し、音速分布と硬さの相関を求めた結果を利用して、実機ロールでの硬化深度の推定を行った。

Fig. 14 は、焼入れ後の音速分布から推定した硬化深度とバンド状に研削で彫り込み硬さ分布を求めた結果の推定精度である。

4. 結 言

音速と硬さの関係を利用することにより、冷延作動ロールの硬化深度を非破壊的に計測することが可能になった。

音速分布は、外周の一点で超音波を送受信し、超音波を周方向に伝搬させ、円筒に内接する正多角形の音波から、多角形に伝搬するそれぞれの音速を求め、各経路の伝搬深さの違いから求めた。

音速は焼入れによるマルテンサイト変態の影響を最も大きく受け、音速分布と硬さ分布では相関は見られるが、音速値は硬さの絶対値を与えるものでないことから、音速分布から硬さ分布を推定する場合には、各焼入条件における音速-硬さ補正係数を用いて行う必要がある。

切断調査結果等から得られた音速-硬さ換算補正係数を用いて推定した硬化深度の推定精度は、 ± 3 mm であった。

文 献

- 1) 非破壊検査協会検査便覧 (日本非破壊検査協会編) (1978), p. 787 [日刊工業新聞社]

-
- 2) 幸田成康: 金属物理学序論 (1976), p. 89 [コロナ社]
 - 3) 渦流探傷試験 B (日本非破壊検査協会編) (1984), p. 207
 - 4) 山田 一, 山田芳生, 脇若弘之: 非破壊検査, **30** (1981), p. 86
 - 5) 神田喜美雄, 小野邦男: 非破壊検査, **24** (1975), p. 116
 - 6) 平尾雅彦: 表面波による表面硬化層の評価, NDI 資料 No. 2944 (1982), p. 15
 - 7) J. KRAUTKRÄMER and H. KRAUTKRÄMER: Ultrasonic Testing of Materials Second Edition (1977), p. 526
 - 8) 碓井孝之, 阿部干幹, 加藤 寛, 吉川敬治: 非破壊検査, **35** (1986), p. 660
 - 9) 超音波探傷法 (日本学術振興会製鋼第 19 委員会編) (1974), p. 12 [日刊工業新聞社]
 - 10) 比企能夫: 弾性・非弾性, 材料科学シリーズ 4 (1972), p. 75
 - 11) 技術資料 金属材料の弾性係数 (日本機械学会編) (1980), p. 28
 - 12) 福岡秀和: 材料科学, **19** (1982), p. 144
-