保磁力による鋼材強度計測

——片面ヨーク法の適用とその限度——

吉 谷 豊*・大 野 二 郎**

Measurement of Steel Strength by Coercive Force

——Applications and Their Limitation of One Side York Method——

Yutaka YOSHITANI* and Jiro OHNO**

The strong correlation between the strength and the coercive force of steel has been observed by many scholars of magnetism. The non-destructive measurement of steel strength by this correlation has been taken up from time to time by several students. However, the use of this measurement of steel strength has not been found practical in steel mills. Needs for such measurement of steel strength have been increasing in the steel industry because of the increasing processing speeds and the adoption of continuous process.

The aim of this paper is to confirm the limitation and applicabilities of this measuring principle. The paper presents important design considerations for different grades and shapes of steel products.

1. ま え が き

鉄鋼生産は、年々連続化、高速化が進み、工程内での迅速な材料判定技術の確立が、工程管理の迅速化上求められている。これまで、鋼材のもつ磁気特性を活かした材質判定については、散発的に行われてきたが、工程内での実用化はほとんどなされていなかった¹⁾。鋼材の強度と保磁力 H_c と強い相関のあることは、鋼材の強化機構と、強い磁石を作る機構と類似していることから、原理的にもうなずけることである²⁾。しかし、強度と磁性は異質の量であり、当然種々の鋼材に対し、共通した強度と保磁力の関係はない。限定された条件の中で、強度と保磁力に再現性のある相関があるので、対象に応じた適正な利用のしかたを考え

る必要がある。

工程内で、簡便に保磁力を測る方法として、たとえばU字型のヨークを用い、鋼材面に接触し計測し、この値から強度を推定する方式が考えられる。この場合、ヨークと鋼材間に磁気的不連続を生ずるので、境界に反磁界が生ずること、また、正しい保磁力を求めるためには鋼材が十分磁氣的に飽和している必要がある。同時に、磁化、減磁に際し、渦電流の影響を少なくするよう注意しなければならない。すなわち、測定した鋼材の形状、材質に応じ、保磁力計測用ヨークの設計を妥当なものにする必要がある。本研究は、鋼材の面を通し、励磁ヨークにより、保磁力を計測し、強度の推定について研究を行った。

2. 鋼材強度と保磁力

保磁力は非可逆的磁壁の移動の難易を示すもので、これを大きくするために炭化物などの析出物を析出させたり、焼入れにより組織に歪を加える方法がとられている。これは、鋼材の強化機構と共通しており、保磁力 H_c と強度は類似した性格があり、相互に相関のあることはうなずける。すでに、鋼材の性状と磁性の関連は、磁性材料研究の面で多くの計測がなされ、保磁力と強度は強い相関のあることが示されている³⁾。一方、現在利用されている鋼材の引張強度はマクロ的尺度であり、物理的意味は必ずしも明確ではない。鋼材強度を支配する要因は多様であり、ミクロ的要因に支配されているから同一鋼材でも引張強度の再現性は良いものでなく、精度は1%程度である⁴⁾。規格で試験片の形状、試験条件が定められているが、実際には40~80 kg/mm²の引張強度範囲で ± 1 kg/mm²程度の精度である。したがって現状の機械試験の代用として利用しうるためには、強度測定精度が ± 1 kg/mm²以下であればよい。ロット内の鋼材強度管理に用いる場合は、必ずしも絶対精度は必要でなく、相対的なも

* 長岡技術科学大学 長岡市上富岡町

** 新日本製鉄(株)基礎研究所 川崎市中原区井田 1618

* The Technological University of Nagaoka, Nagaoka

** Fundamental Research Laboratory, Nippon Steel Co., Ltd., Kawasaki

(Received January 11, 1980)

(Revised June 9, 1980)

Fig. 1 Relation between coercive force and tensile strength of ring steel sample

Fig. 2 Example of cross-sectional hardness distribution of steel plate

ので十分である。

検討に先立ち、5種の鋼材に対し、保磁力の正統な計測法によって、保磁力と強度の関係を調べた。板厚10~20 mmの厚板からリング試料を切り出し、直流磁化試験装置により、 H_c の計測を行った。Fig. 1に示すごとく、 H_c と引張強度は $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ の範囲にあり、かなり良い相関があることがわかる。この変動は、鋼材の熱間圧延条件の相違により鋼材強度の方向性などによる変動にも起因している。厚板は厚み方向にもFig. 2に示すごとく、強度分布をもっていること、また、加工により磁性の変動も考えられる。この結果から $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ の精度で強度予測をしようには、保磁力計測は、 $\pm 10 \text{ AT/m}$ ($\pm 0.13 O_e$)の精度が得られれば良いことになる。

3. 片面ヨーク法による保磁力計測の問題点

保磁力の正しい計測は上記のごとく、閉磁路を形成するリング試料を用い、試料を飽和に達するまで磁化し、渦電流による誤差を生じない程度にゆるやかに減磁し、磁束密度 B が零の時の磁界 H_c を計測することにより得られる。リング試料では破壊試験になり、早い計測はできない。迅速に測るためには、鋼材の面を通じ、外部ヨークを通じ磁束を鋼材に流し、閉磁路を形成しなければならない。たとえば、Fig. 3に示すごとくU字型ヨークにより、保磁力を測ることにな

Fig. 3 Dimension of experimental U shape York

る。この場合、ヨークの材質としては、鋼材の H_c より H_c の低いもので、ヨークの磁気抵抗が鋼材内の磁気抵抗に比し十分小さいことが必要である。

$$l_Y H_{cY} \ll l_s H_{cs} \quad (1)$$

ただし、 l : 磁路長、 H_c : 保磁力、 Y : ヨーク、 s : 鋼材

片面ヨーク法で保磁力を正しく計測するためには、先に述べた三つの問題点を解決しなければならない。これら問題点を解明するため、Fig. 3に示すヨークを用い実験した。

3.1 磁気飽和

保磁力は非可逆磁壁異動が終了すれば、計測可能である。共通鋼SS-41の磁気飽和特性は、Fig. 4に示すごとく、最小磁化強度2400 AT/m ($30 O_e$)である。Table 1に示すごとく、飽和磁束密度 B_s と最小磁束密度 B_m との比 R は、普通鋼の成分範囲ではおおよそ0.67近傍にあり、鋼種にはあまり関係しない。最小

Fig. 4 Magnetic saturation characteristic of common steel

Table 1 Measured values of H_m , B_m , and R for various steel grade

Steel grade	H_m (AT/m)	B_m (T)	R
SS-41	2385	1.46	0.68
SM-50	"	1.40	0.65
X-52	"	1.50	0.70
X-60	"	1.46	0.68
X-65	"	1.42	0.66

($30 O_e$)

Fig. 5 Difference in magnetic excitation between thin and thick steel sample

磁束密度は比較的小さく、片面ヨーク法で磁束が鋼材内で拡大しても、鋼材内の磁束の通る中心が 2380 AT/m (30O_e) あれば、十分飽和していると考えられる。リング試料での H_c と B_m の関連は、 B_m が 1600 AT/m (20O_e) 以上で一定値に達している。

3.2 鋼材内の磁束分布

鋼材内の磁束分布は計測できないので、表面に表われる磁界から内部を類推せざるを得ない。測定対象の板が薄い場合は、裏面にかなりの洩漏磁束が現われる。模式的に Fig. 5 に示すごとく、厚みによりかなり異なってくる。薄い鋼板の場合は厚み方向には飽和せず、励磁ヨークも飽和していないと考えられる。この飽和しない理由は反磁界によるもので、またヨークが磁化しないのは、大気中の磁気抵抗が大なためである。任意の磁束に対し、ヨーク内磁界 H_1 は、鋼板内磁界 H_2 または外部磁界 H_3 より著しく小さい。これに対して板厚が厚くなると、 $H_1, H_2 \ll H_3$ の状態になる。このような状況では、計測値に板厚依存性が出てくる。起磁力の関係から、

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 \quad (2)$$

が成立するから、磁界を電流 I で求める場合、 $H_2 l_2$

Fig. 6 Effect of B-coil position

Fig. 7 Difference of B-H curve between wide and narrow samples

が、 $H_1 l_1, H_3 l_3$ に対し十分大きいことが必要である。このためには、鋼材内を通じ形成される閉磁束管内で計測することが大切である。事実、Fig. 6 に示すごとく、磁束検出用 B コイルをヨーク内側につけた場合と、外側の場合で板厚依存性が著しく相違した結果が得られた。

このことから、U字ヨーク法では B コイルの埋込み位置が重要なことがわかる。

計測対象は板のように拡がりをもったものから、棒線のような小断面のものもある。計測上は、磁束が拡がらないほうがよく、Fig. 7 に示すごとく、大板の場合とヨーク幅と著しい幅をもった試験片と比較すると、大板のほうが B-H 曲線が拡がり、磁束の拡大が生じていることがわかる。このことから、線材や棒のほうが精度良く測れることがわかる。

磁束の分布は、Fig. 8 に示すごとく、ヨーク周辺端部で最も拡大するので、計測は磁束が整流される中央部を利用することがよいことは当然である。このことからヨークを 3 分割して、中央のヨークで計測する方式も考えられる。

3.3 反磁場の影響

一般に、磁界 H に不連続な場所があれば、そこに磁極が生じ反磁界が発生する。 H_r を反磁界とすれば、有

Fig. 8 Flux saturation in yoke and steel plate

Fig. 9 Relation between normalised coersive force ΔH_c and steel thickness

効磁界 H_{eff} は反磁界 H_r を差し引いたものになる。反磁界は、板厚の小さなほど増大し、板厚の逆数に比例する。U字ヨークでの H_c と板厚の関係を次式のごとく正規化し、2種の鋼種でのデータをプロットすると、Fig. 9 に示すごとく、同一線上にのり、(4)式の曲線とよく一致する。

$$\Delta H_c = \frac{H_c(t) - H_c(\infty)}{H_c(0) - H_c(\infty)} \quad (3)$$

$$\Delta H_c = \frac{1}{1 + \alpha t^2} \quad (4)$$

ただし、 t : 板厚

したがって、 H_r は主として、ヨークとの間の幾何学的要因に依存している。しかも $H_c(\infty)$ の値が、先

Fig. 10 Flux saturation vs. yolk width and steel thickness ratio

Fig. 11 Effect of eddy current on coersive force

に示したリング試料によって得られた、 H_c の値と一致することから、 H_c の計測値の板厚依存性は、主として反磁場の影響と考えられる。もちろん、反磁界の影響は単純に板厚のみで整理すべきではないが、ヨークの寸法を変え、磁束比、 $\Phi_{max}(\text{鋼材})/\Phi_{max}(\text{ヨーク})$ をプロットすると、Fig. 10 に示すごとく、板厚とヨーク厚み比が 0.5 以上で飽和することから、板厚がヨークの厚みの 1/2 以上あれば厚みの影響は少なくなる。

渦電流の影響を見るため、励磁速度を変え、これによる H_c の増加を測定した結果が Fig. 11 に示すごとくであり、電磁気の理論から予想される結果と一致している。これらの結果から、この種のヨークでは、測定時間は 30 秒以上あれば渦電流による影響は無視しうる。

4. 片面ヨーク法による、その他の問題点

ヨークと鋼材間にすき間があれば、これにより磁気抵抗が増加し誤差を生ずる。すでにこの原理を用いた、膜厚計が市販されているように、すき間による影響は大きい。ヨークと鋼材の間に紙を挿入し、すき間の影響を調べた結果が Fig. 12 である。これはヨークと鋼材間に紙を挿入し、すき間の大きさを変え測ったもので、1 mm のすき間にに対し、 H_c の計測値は 15% 変動する。 H_c を ± 10 AT/m の範囲に計測するためには、すき間は 0.1 mm 以下に保つことが必要である。これは計測時に圧力をかけることにより、この程度に保つことは実用上さほど困難なことではない。実際の鋼材では、酸化膜のついた状態で計測することが多いが、酸化鉄は、磁性を有するため影響は少ない。これらの点からも U 字ヨークでの計測は、表面状態の良い、熱延、冷延ストリップ、棒鋼、線材、鋼管に利用が限定される。また、条件の一定している対象では、相対的管理には利用できる。

工程中の計測では、鋼材が熱間圧延後十分に冷却さ

Fig. 12 Effect of gape between yolk and steel sample

Fig. 13 Effect of sample temperature on coercive force

れぬ状態で計測する場合があります。鋼材温度が変動する可能性がある。保磁力と鋼材温度の関係は、Fig. 13に示すごとく、200°Cの範囲内では、直線的で、温度係数は一定とみなしうる（温度係数、2.4 AT/m°C）。

5. 片面ヨーク法の工程管理への適用

保磁力計測から、鋼材の強度管理の可能性を調べるため各種の熱延鋼材について計測したが、先に述べたごとく、表面状態の良い、かつ圧下率の大で比較的均質な、線材、ホットコイルについては良い相関が得られたが、厚板については、十分実用にしうるデータは得られなかった。これは、造塊条件、圧下率、仕上り温度にかなりの幅があり、微量成分の変動等もあり相関が悪くなったものと思われる。代表的な例として、線材の H_c と引張強度の関係は、Fig. 14に示すごとく、かなり炭素成分の幅があるにもかかわらず、良い相関が得られている。Fig. 15は、1本の線材の長手方向の H_c の変化と抗張力の変化を示したものであるが、相互に良く対応している（同一の溶製された鋼についての熱処理条件を変えた場合の H_c と強度は、非常に良い相関がある）。Fig. 16は厚板の一例であるが、幅広い範囲では、一応、相関はあるものの、同一鋼種内でも圧延条件の相違によりかなり変動する。すでに H_c を用いた焼入深度計が市販されているが⁽⁵⁾、

Fig. 14 Correlation of H_c vs. tensile strength of wire rod

Fig. 15 Example of lengthwise distribution of wire rod tensile strength and H_c

Fig. 16 Correlation of H_c vs. tensile strength of steel plate

熱処理の管理には有効な方法である。

6. 結 言

鋼材の保磁力を片面から励磁する方式で、強度の推定のしうる条件、実用の限界について示した。保磁力は、鋼材強度と相関のあるものの、異質の量であり、保磁力からすべての鋼材の強度を求めることは困難である。U字ヨークによる方式は、迅速に強度を測定する方式としては有効であるが、現行の引張試験とはカンプリング条件、試験条件が異なるため、これを置き換える性質のものではない。むしろこの使い方としては、あくまでも絶対値を計測するという方向でなく、工程内の強度変動を相対的尺度として、変動を迅速に検出する目的に利用すべきである。同時に適用対象に応じヨークの設計を妥当に選択することが大切である。

本研究に際し、新日本製鉄(株)広畑製鉄所、釜石製鉄所、および基礎研究所を始め多くの方々のご支援をいただいたことに、深く感謝致します。

参 考 文 献

- 磯野英二：鉄と鋼，55-10，16/31（1969）
- 成田賢二：磁性工学入門，コロナ社（1965）
- 加藤哲男：金属材料，9-8，56/60
- 引張試験：JIS-Z-2241
- 特許：特許公報，41-2435（焼入深度計）