交流磁界に於ける鋼の磁化

(昭和 7 年 10 月 28 日第 222 回講演會に於て講演)

正員 工学士 浅川 勇吉⁽¹⁾
 准員 工学士 津田 孝夫⁽²⁾
 准員 工学士 本間 光長⁽³⁾

On the Magnetisation of Steel in the Alternating Field

By Yûkichi ASAKAWA, *Kôgakusi, Member*Takao TSUDA, *Kôgakusi, Associate Member*Mitsunaga HOMMA, *Kôgakusi, Associate Member*

摘 要

交流磁界に各種の熱処理を施した鐵鋼の試片を挿入して二次コイル内に誘導される電流の波形を撮影し、其二次電流の種々なる特性を仔細に考察し、以て鐵鋼の交流磁界に對する性質を研究した。尙得た波形を波形分析器で分析し、高次係数の推移を求めて鐵鋼の諸性質と比較した。

1. 緒 論

従来直流磁界に於ける鐵鋼に關する磁気的研究は殆ど盡されて居るかの觀があるが、交流磁界に於ける結果は未だ殆ど見受けられない様である。

しかし電気諸機械器具の大半が交流を主體とする今日、之に對する材料の磁气的性質の研究は等閑に附すことの出来ぬ問題である。此處には先づ通常の鐵鋼に關して研究したものであるが、その結果は以下に記述するように従來の直流磁界に於ける諸性質とは頗る異なるのみならず、之等の事實は更に鐵鋼の金屬組織に對する一論據を與へ得るものである。

2. 實驗裝置及實驗方法

一次コイルの回路に 100 V, 50 サイクルの交流を通じて交流磁界を作り、二次コイル内に所定の熱処理を施した試片を入れ之を磁界中に挿入し發生すべき二次電流をオシログラフの回路内に入れ二次波形を撮影する。この波形を波形分析器で分析しフーリエ級数の高次係数⁽⁴⁾を求めると以下に示すやうに鋼の熱處理に對して説明が得られる。

この際一次電流と二次電流を同時に撮影する故兩者間に生ずる時間遅れ及磁气的履歴現象も得られるから鋼の磁气的研究に對して頗る便宜が多い。

尙この場合波形並びに波形振幅が含炭素量及びその熱處理に依り著しい變化があるから此方面よりも組織變化の内容に對して新らしい説明が得られる。

茲に使用した磁化コイルは全巻數 2,036 回、全長 39.7 cm、内徑 6.5 cm、從つてコイル定數は 51.3 である。二次コイルは内徑 1.2 cm の硝子管に絹巻 40 番線を 200 回捲いたものよりなる。寫眞撮影裝置としては横河製 3 エレメントのオシログラフを用ひガルバは A 型を使用した。波形の分析は野口式波形分析器⁽⁵⁾に依つて行つた。

又實驗に供した試片は直径 1 cm、長さ 14 cm の瑞典鋼丸棒で含炭素量は 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3% の 7 種である。

3. 實 驗 結 果

[a] 交流磁界に於ける各種炭素鋼の諸性質の研究

著者等は前述の含炭素量異なる 7 種の試片に就き圧延、焼入、400°, 600°C 焼戻及焼鈍の 5 種の狀況のものを作り以下の諸實驗を行つた。

1. 試片の種類並びに材質に依る二次電流の大きさ
 磁界の強さを 33 ガウスより 250 ガウスの間に變化さ

第 1 圖 熱處理と二次電流

(1) 日本大学工学部教授 (2) 三陽鐵工所員 (3) 並木製作所研究課員
 (4) $y = a_0 + a_1 \sin \theta + a_2 \sin 2\theta + a_3 \sin 3\theta + \dots$
 $+ b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta + b_3 \cos 3\theta + \dots$

(5) 本器の詳細は本誌大正 13 年 11 月「波形新分析機」に述べられてある。

せ以上の試片に依て得た電流を電流計で測定した。之等の内 33 ガウス及 250 ガウスの場合に就いて電流計の読みと熱処理の関係を圖示せば第1圖、第2圖の如くなる。

之等兩者を比較すると33 ガウスの場合は焼鈍組織が最大の読みを示すに反し 250 ガウスの場合は 400°C 焼戻状況のものが最大値を示す。又前者

に於て 0.1% C のものは各組織に於て最大の値を示したのに反し後者では却つて最小値を示すのは面白い現象で、之は後述するように交流に於ても直流に於けると同様に磁界の強さに依り材料の磁氣的性質が異なる事が分る。

又磁界の變化と各試片の誘導電流との関係を各含炭素量の焼入、圧延状況のものに就き求めると第3圖、第4圖の如く焼入試片では 0.1% C のものが 92 ガウス及 116 ガウスにて 0.3, 0.5% C を示す曲線と交叉し、圧延試片では 50 ガウス乃至 90 ガウスの間に 0.5, 0.7, 0.9% C を示す曲線と交叉する。

他の試片の場合に於ても大體 50 ガウス乃至 150 ガウスの間に於て斯

第2圖 熱處理と二次電流

第3圖 磁界と二次電流

第4圖 磁界と二次電流

變化を來すことを知つた(第6圖、第7圖参照)。

著者等は此事實を利用して磁界の強さを 15 ガウスに取り以上の試片に就きて二次電流の波形的振幅を求めた。

第5圖 試片と振幅

あるが、一般に他の組織のものに於ては振幅の大きさは含炭素量と反比例する。即含炭素量の多いもの程振幅が小さく 0.9% C を除いて振幅の大きさは焼鈍、圧延 600°, 400°C 焼戻、焼入状況の順序になつて居る。此等の結果よりせば交流磁界に於ても同一含炭素量の組織變化に對して常に一定の関係があるから、所謂磁氣硬度⁽⁶⁾と對比して甚だ興味深い所である。

ii. 波形分析

二次電流の波形は磁界の強さ 250 ガウス附近に至れば試片の種類に依り著しく相違するも、振幅の大きさは殆んど差違を認めないやうになる。その一例として 0.9% C 鋼の 780°C より水焼入及その焼鈍したものを第6圖、第7圖に示す。之を波形分析器にて分析しその高次係数を求めると第8圖、第9圖の如くなる。この結果を觀るに第二次、第四次等偶数次の係数は總て極めて小なる値を取つて居る。⁽⁷⁾ 従つて本實驗

(6) 松下博士「金属材料の研究」岩波發行 (1923)

(7) 片木久吉著

「交流理論」p. 435

る現象が認められる。

2. 二次電流の波形並びに之より得たる諸結果

i. 組織の變化と二次電流の振幅との關係

以上のようにして得た二次電流をオシログラフの回路に入れ波形を撮影したところ、小なる磁界に於ては、その波形には殆んど變化がないが振幅に著しい變化があり大なる磁界に於ては之と反對に波形に大なる

之より振幅と熱處理との關係を圖示すると第5圖の如くなる。圖に於て注目すべきは 0.9% C 鋼の焼入及 400°C 焼戻状況のものの振幅が 0.7% C のものより大きい事であるが、一般に他の組織のものに於ては振幅の大きさは含炭素量と反比例する。即含炭素量の多いもの程振幅が小さく 0.9% C を除いて振幅の大きさは焼鈍、圧延 600°, 400°C 焼戻、焼入状況の順序になつて居る。此等の結果よりせば交流磁界に於ても同一含炭素量の組織變化に對して常に一定の関係があるから、所謂磁氣硬度⁽⁶⁾と對比して甚だ興味深い所である。

第 6 圖

第 7 圖

第 8 圖 波形分析結果

第 9 圖 波形分析結果

第 10 圖 熱処理と第三次係数

第 11 圖 熱処理と第三次係数

に於ては主として第一次、第三次の係数を取扱った。

同様に各種の鋼の場合に於て分析する時は各含炭素量異なる試片に於ても熱処理に依りて各次の係数が夫々同様の變化を辿る事が

第 12 圖 熱処理と各係数

圖に於て明なように各係数の變化は熱処理の如何を問はず各種炭素鋼を通じて全然同一な傾向を示すものである。即第一次正弦係数は含炭素量の多くなるに伴ひ僅に増加して居る。

次に第一次餘弦係数は含炭素量の増加に従ひ負より正に推移するが特に焼入状況のものに此の傾向の著しい事が認められ

分る。

唯含炭素量 1.1% 以上の試片に於て第三次正弦係数が餘弦係数の變化に對して顯著な變化を示さぬ事は超共析鋼に於ける游離セメントイトの存在と對比して興味あるものである。その一例として 0.5% C, 1.1% C 鋼を比較したものを第 10 圖、第 11 圖に示した。

更に焼戻に依る各係数の變化を詳細に知るため含炭素量 0.9% の試片を取つて、之を 780°C より水焼入をした後、順次 100°C 毎に焼戻を行ひその波形を分析した。第 12 圖はその結果で、第一次正弦係数の變化に應じて他の係数が之と同一或は反對の變化を然も大きくなして居る。第一次正弦係数は元來材料の磁化の強さを表すものであるから、之と相反する傾向を辿る第一次餘弦係数は少なくとも磁化の強さに反對の効果と關係せるものと考へられる。又第三次正弦係数は波形の尖度を左右し、同餘弦係数は主として波形の傾き及び時間遅れの變化を支配する。而も之等第三次兩係数は後述の交流磁氣的履歴現象に於ける殘留磁氣、頑磁力、輪道面積に大なる關係を有して居る。(iii) に於て後述する如くこの第三次兩係数が共に正值を取る時は之等三者の値は小となり、負値となる時は之と反對に大となる。第 12 圖から明に上記三者の値が 400°C 焼戻で比較的小なる事を推察し得られる。

更に之等各種鋼の焼入、400°C、600°C 焼戻、焼鈍及圧延の異なる状況のものに就き各係数が如何なる變化を取るかを第 13 圖乃至第 17 圖に示す。

第 13 圖 炭素量と係数との關係

第14圖 炭素量と係数との関係

第15圖 炭素量と係数との関係

第16圖 炭素量と係数との関係

第17圖 炭素量と係数との関係

る。又第三次正弦係数は含炭素量の増加に伴ひ次第に負の値を増加するが焼入状況のものに於ては 0.1%C より 0.5%C の間に急激な減少を示し以下 1.3%C まで大體同一の値を示す。此の結果は炭素含有量 0.3%C 迄は實際に於て焼入効果の少ない事實と對照して注目せらるべきものである。第三次餘弦係数は焼入状況のものを除いて 0.1%C より 0.9%C 迄は大體に於て同一の値を有するも 1.1%C 以上は激甚なる減少を示す。然も 400°C, 600°C 焼入のものでは 0.1~0.9%C の鋼に於てその係数が 0.5 に近き値を示して居り他の組織のものでは認められない。之れはソルバイト、トルスタイト組織即 α -鐵の微細な結晶狀況に對應する點である。從つて 0.9%C 以上に於て急激の減少を示す事實は游離したセメントイトの存在に依るものである。

第 18 圖

iii. 磁氣的履歴現象

著者等は以上の如き諸現象を更らに他方面より攻究する目的で、交流磁界に於ける磁氣的履歴現象を求めた。

今茲に二つの單弦運動を縦横兩軸上に取つて之を合成すると兩者の相が一致する時は一つの直線を決し、一致せぬ時は楕圓又は円を描く。

此の事實を應用して一次及二次電流の大きさを夫々縦横兩軸上に取つて之を合成すると一次電流の正弦波に對する二次電流の歪み即材料の磁氣的性質に應じて種々の形を異にした閉曲線が得られる。

即第 18 圖に示すやうに各試片より得た波形にて或瞬間に於ける一次及二次電流の波高を夫々 a, b として之を横軸及縦軸上に取交點 P を求め、以下同様にして一周期の間に斯る點を結べば一つの閉曲線を得る。第 19 圖、第 20 圖は其の一例で 0.9%C 鋼の焼入及焼鈍狀況のものより得たものである(第 6 圖、第 7 圖参照)。この閉曲線は交流磁界に於ける一種の磁氣的履歴現象と認められる。之は直流に於て求め

た履歴現象とは趣を異にするが磁化エネルギーを論ずる時は之に或定数を乗ずる事に依り直流

第 19 圖

第 20 圖

の場合と同様に論じ得られる。⁽⁸⁾ 又残留磁氣及頑磁力の大きさは直流の場合と同様の意味を有すると考へる。

斯くして得たる閉曲線の注目すべき點は熱處理に依り著しく形を異にする事である。第 19 圖、第 20 圖の如く

焼入組織のものでは曲線の頭部が垂直方向を向き、焼鈍組織のものでは水平方向を向く。且又 400°C, 600°C 焼入状況のものは同様に頭部は水平方向

第 21 圖 熱處理と残留磁氣、頑磁力及輪道面積

(8) $\Phi = Ki$

を向くが曲線全體として夫々特徴ある形を示す。尙此の状況は含炭素量異なる材料に就ても同様の結果を示すものである。次に諸試片の履歴現象より残留磁気、頑磁力及輪道面積を求め之等と含炭量及熱處理に依る影響を求めこの内 0.9% C 鋼に就いて得た結果を第 21 圖に示す。即 600°C 焼戻状況に於て残留磁気、頑磁力及輪道面積が最小なことを示すのは上記の波形分析に於て推察した結果と一致する。尙各種炭素鋼に就て三者の値を求めると第 22 圖乃至第 24 圖の如く何れも 600°C 焼戻に於て最小なことが認められる。

第 22 圖 含炭素量と残留磁気

第 23 圖 含炭素量と頑磁力

第 24 圖 含炭素量と輪道面積

(iv) 磁界の強さと残留磁気、頑磁力及輪道面積との關係
扱て磁界の強さと上記三者が如何なる關係を有するかを見るために著者等は 0.9% C 鋼の焼入及 400°C 焼戻状況のものを取り之を 67 ガウスより 250 ガウスの間に磁界を變じてその履歴現象より三者の値を求めた。之を圖示すれば第 25 圖の如く輪道面積を表す曲線は 150 ガウス附近にて交叉し又残留磁気を表すものは 200 ガウス附近にて交叉する。即この

第 25 圖 磁界の強さと残留磁気、頑磁力及輪道面積

事實はこの磁界の上下に於ては材料の磁氣的性質が反對現象を示すもので之は前述の (1) 結果と一致する。

[b] 鐵鋼の焼入焼戻作用

1. 焼入温度の影響に就いて

鐵鋼が焼入温度に依つて如何に磁氣的性質を變ずるかを研究する爲に、著者等は 0.9% C 鋼の試片を以て温度 780°C, 850°C, 900°C, 1,000°C, 1,100°C より水焼入を行ひ、250 ガウスの磁界にて前同様にして二次電流を求め同時に得た波形を分析した。

第 26 圖 焼入温度と残留オーステナイト

第 26 圖 (イ) は彈動電流計より得た結果を示すもので 1,000°C 焼入に於てその値が最小を示す。又同圖 (ロ) は波形分析に依つて求めた第一次餘弦係数⁽⁹⁾の値を示すものであるが、此の温度に於いても亦極大を取る事が分る。即ち以上兩者の結果は等しく 1,000°C 焼入に於いて磁気感應度が最小値を取る事を示し残留オーステナイトの量が他の焼入温度のものに比して割合に多いことを意味する。⁽¹⁰⁾

2. 焼戻効果

以上焼入温度を異にした試片を 100°C より順次に焼戻作用を行ひその効果を研究した。第 27 圖は彈動電流計に依る結果で、全試片を通じて焼入状況より 300°C 焼戻の間に於て急激なる増加を示す。この場合の波形分析の結果は第 28 圖に示すように焼入状況より 300°C 焼戻の間に於て著しく増加して居る。然も兩者共焼入温度異なるにも係らず總て 300°C

(9) 前述せる如く該係数は感應度に逆比例するものと考へられる。

(10) 金屬の研究 昭和 6 年 11 月 田丸、關博士「焼入炭素鋼の残留オーステナイト」

第 27 圖 熱處理と二次電流

第 28 圖 熱處理と第三次餘弦係數

焼戻に於て磁気感應度が最大なる事を示す。この事實を説明するために上記第 17 圖を見るに、第三次餘弦係數は焼入状況より 300°C 焼戻迄に於て著しき増加を示して居る。この事實は明に焼戻に際して生ずべき β -マルテンサイトが分解して α -鐵とセメンタイトになり、而もこのセメンタイト分

子が不規則に集合しその數比較的少く、未だセメンタイト本來の性質を表はさぬ故全體として α -鐵の影響著しく、即第三次餘弦係數の増加を來すものと考へる。

この事實は直流彈動法にて得た結果とよく一致するを見る。(11)

4. 結 論

元來直流の磁界に於て通常測定されてゐる各種の磁氣的性質は、その測定の性質上所謂慣性の極めて大なる場合に得たものと見做されるから一般に磁氣的性質の變化並びにその内容に關する研究に於ては勿論尙現在高周波工学の進展に對しては此種の研究は極めて緊要である。殊に Barkhausen 效果⁽¹²⁾の如く磁氣的諸性質は機械的振動と相反的關係にあるもの故從來等閑に附せられてゐた上のやうな解析的研究も重要な一項目たるを失はないものである。

(11) 金屬の研究 昭和 3 年 11 月 田丸博士「兩り焼入鋼の性質に就て」

(12) Physical Zeits. 20, 401, 1919