Fig. 5 $\frac{1}{E(s)}/\frac{1}{E(100)}$ Against the Orientation Function A. at Room Temperature B. at 466°.

m, n) に対して減少する傾向は見られる。(20)の示すようにヤング率の異方性は温度に無関係であり臨界温度の近くにおいても同じ異方性をもつ。Reinhart の実験によれば Fig. 5 に明かなように T_c 近くにおいても常温附近とあまり違はない異方性がある。この理論並に Rinehart の実験は Webb⁽¹⁴⁾ の豫想すなはち T_c 近くになると異方性は減少し略々等方的になるであろうとの豫想と反対の結果

(14) W. Webb. Phys. Rev. 55 (1939), 297.

Rinehart⁽⁴⁾ の実験結果を示す。Rinehart の結果はよく (15) に一致している。この理論の結果は [110] 方向に於て稍々一致するが [111] 方向では不一致が少し大きく直線関係は示さないが方位函数 $F(l, m, n)$

になる。(20)の結果はこの理論の根底となつてゐる假定を考慮するならば実験結果と相当一致していると考へてよからう。

V 結 論

金属中の原子間の相互作用を二つの原子間のポテンシャルエネルギーで表現しようとするのは無理であろうが一つの近似としてこの立場をとり、しかもその相互作用は最近接原子間のみに作用すると假定し β 眞鍮の結晶格子に横の短縮のない伸びを與えたとき伸びの方向に直角な格子面の間の假想断面を擧げてその兩側の部分相互の間に作用する力からヤング率を求めた。Cu-Zn 合金の凝集力について量子力學的に問題が解かれていない現在、かくして計算されたヤング率は一つの近似として認められるであろう。 β 眞鍮の異常比熱を Bragg-Williams 及び Bethe の近似よりもよく説明出来るようなポテンシャルエネルギーの曲率の比 $\xi_{AA} : \xi_{BB} : \xi_{BA}$ のある値に對してこのようにして求められたヤング率もまた Rinehart や Köster の實驗値と可成りよく合ふこと及びヤング率の異方性についても或る程度定性的に説明出来ることを示した。

終りにこの研究に對し懇篤なる御指導を賜つた文部省科學研究費による研究「金属及び合金の靜的及び動的彈性率について」の共同研究者たる袋井教授及び討議して頂いた片山、渡邊兩助教授に深く感謝の意を表す。

強磁性材料の高温における磁氣的性質 (第1報) センパームの弱磁場における高温の磁氣的性質

山本達治* 千葉久喜* 美山悌二郎*

Tatsuji Yamamoto, Hisayoshi Chiba and Teijiro Miyama : On the Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials at High Temperatures (1st Report). On the Magnetic Properties of Iron-Silicon-Nickel Alloys "Senperm" in Weak Field at Various Temperatures : The magnetic properties of Iron-Silicon-Nickel alloys in weak field has been measured at various temperatures. The result show that the alloy containing about 10% Si, about 16% Ni and balance Fe, namely, Senperm region, shows an abnormal change of magnetic properties at near 300°C and 550°C, and any alloys except the Senperm region of Fe-Si-Ni system has no abnormality, at near 300°C.

It is expected that in this abnormality, the former (near 300°C) is intimately connected with the formation of superlattice and the latter (near 550°C) is Hopkinson effect.

(Received February 15, 1949)

I 緒 言

高温の弱磁場における磁氣的性質の研究は、Hopkinson⁽¹⁾が二三の純金属について研究して以來、その後 1929 年 G. W. Elmer⁽²⁾ 及び、1936 年本多、仁科兩博士⁽³⁾が

Fe-Ni 合金パーマロイについて測定し、また 1941 年 Zeimovsky⁽⁴⁾が Ni, Mo-permalloy 及び Fe-Si-Al 系合金について研究している。しかし磁性合金に關するこの方面の研究は割合少い。Zaimovsky その他の研究者の結果から知

* 東北金属工業株式會社

** 昭和22年11月京都大會に發表

(1) Hopkinson, Phil. Trans., Series A, 180 (1889), 443; Proc. Roy. Soc., 45 (1889), 318.

(2) G. W. Elmer, J. Frank. Inst., 207 (1929), 583; Bull. System Tech. J., 8 (1929), 435.

(3) K. Honda, T. Nishina, Z. S. F. Phys., 103 (1936), 728.

(4) A. S. Zeimovsky, Jour. of Phys., 4 (1941), 569.

られる如く Mo-permalloy 及び Sendust 等の高導磁率合金に於ては温度に對してその導磁率に異常性が見受けられるので著者等は規則格子生成の各種磁性合金につき、その高温における磁氣的性質を測定し規則格子と磁氣的性質との相互關係を究明する目的にて本研究を開始した。さて著者等の中一人は Fe-Si-Ni 系合金中約 8~12% Si, 約 14~18% Ni を含有する Fe 合金は、Fe-Co-Ni 系合金 Perminvar (5) と類似の特性、すなはち磁場に對してその導磁率が變化せず、しかも数千ガウスの最大磁氣感應度を有するヒステリシス環線が原點において著しく收斂することを 1942 年發見し、この合金に「仙臺恒導磁率合金」(Sendai Perminvar (略して Sen Perm)) (6) なる名稱を與へた。センバームの熱處理による磁氣的性質、比電氣抵抗組成と磁歪効果、及び磁場冷却効果等の測定結果よりセンバーム範圍に規則格子が生成されている。よつて今回は先づ Fe-Si-Ni 系合金 センバームの高温導磁率の測定を行った。

II. 試料の製法

試料の作成には、日本電解製鐵所製の電解鐵金屬 Si 及び電解 Ni を使用した。その分析結果は Table 1 の通りである。

Table 1 Results of Chemical Analysis of Metals Used.

Metals	Fe(%)	C(%)	P(%)	S(%)	Mn(%)	Al(%)	Mg(%)
Elect. Iron	—	0.020	0.03	0.015	Trace	—	—
Elect. Nickel	0.022	0.006	0	0.013	Trace	—	—
Met. Silicon	0.220	—	—	—	0.35	0.17	0.46

先づ所要金屬を適當な割合に調合し、これを高周波誘導電氣炉によつて熔解した。次にこれを適當な環狀鑄型に注入し、グラインダーにて外徑 77mm, 内徑 52mm, 厚さ 4mm, に仕上げ最後にこれを眞空電氣炉にて 930° 24 時間加熱し次に電流を遮断して 700° 迄冷却し、700° より常溫迄は 1 時間約 10° の割合で冷却した。熱處理を終つた試料には Ni 線を用ひて一次及び二次 Coil をそれぞれ 200 回宛捲いた。各線間の絶縁を充分にするために先づマイカを使用し更に水ガラスとタルクを 1:1 の割合に混合したものゝ表面に塗布しこれを約 100° に數時間保持して充分乾燥した。實驗には絶縁抵抗數 メグオーム以上のものを用ひた。

III. 磁性測定裝置及び測定法

磁性の測定には彈動電流計法を採用した。試料の Coil は導線で彈動電流計に接續され、試料は石英管の中に眞空に保持される。しかして加熱には温度分布の一樣なる無誘導

電氣炉を使用した。これに試料を保持する石英管を挿入しその一方をゴム管を通して眞空ポンプに連結する。温度測定には白金熱電對を用ひその調節には電位差計式温度調節機を使用した。なお試料を測定すべき温度に約 2 時間保持し、磁性が安定状態に達した後測定を行った。

IV. 磁氣的性質に及ぼす温度及び組成の關係

Fe-Si-Ni 系合金の全系に互つて實驗を行う前に先づ約 16.5% Ni を一定として Si 含有量を變化した場合について測定を行った。實驗に供した試料の組成並に磁性は Table 2 に示してある。斯様な合金の高温における磁氣的性質は次の通りである。

(1) 磁化曲線：今代表的な合金として No. 1075 (9.99% Si, 16.58% Ni, 残余 Fe) について記述しよう。Fig. 1 は常溫から Curie 點迄の各温度における磁化曲線である。25° における磁化曲線は飽和磁氣感應度約 10,000 Gauss を有する普通の曲線で、260° 迄は絶對値に多少の變化があるのみで曲線の傾向に特別の變化は認められない。然るに漸次温度を上昇し約 230° になると曲線の形狀が變化し 250° になると磁氣感應度は 0.3 Oe 附近から急激に上昇し、約 1.0 Oe おいて飽和に達する。更に温度が 270° に上昇するとその曲線は 0.3 から急激に上昇し、直ちに飽和に達してゐる。

更に温度上昇に伴ひ漸次磁氣感應度は減少し、曲線の形狀も 400° から再び普通の形狀に戻り 590° では 270° に比し飽和磁氣感應度は僅かに 1.3 程度に減少する。センバーム範圍の合金はいずれも上述と大同小異の特性を呈する。斯くの如く特定の温度

Table 2 Permeability of Some Alloys Containing about 17% Ni in Fe-Si-Ni System.

Specimen No.	Composition		Result of Chemical Analysis		Permeability	
	Si%	Ni%	Si%	Ni%	μ_0	μ_m
1008	8.0	16.0	8.40	15.91	100	260
1071	9.5	16.0	9.50	16.32	430	3530
1075	10.0	16.5	9.99	16.58	400	3100
1122	10.5	16.5	10.22	16.92	380	2000
1095	11.0	16.0	10.82	16.46	280	2110
1010	12.0	16.0	10.92	16.61	80	2600
1010-2	13.0	16.0	12.23	16.78	80	1000
1015	10.0	18.0	—	—	100	600
108	Al=13.9%		Al=12.05%		460	2800

に於いて磁化曲線が急峻になることは、これらの温度で初導磁率は變らないが最大導磁率は非常に増加し、頑磁力が著しく減少することを意味する。センバーム範圍外の合金即ち No. 1008 (8.40% Si, 15.91% Ni) 合金の 24 Oe 迄の磁化曲線を各温度について書いてみると、磁氣特性は非常に悪く 24 Oe でも未だに飽和に達せず且つセンバームに認める如き異常變化は認められない。

(5) G. W. Elmer, J. Frank. Inst., 206 (1928), 317; Elect. Engin., 54 (1935), 1262; B. S. T. J., 15 (1936), 113.

(6) 山本, 電氣學會論文集, 5 (1944), 269; 5 (1944), 415; 電氣學會雜誌, 67 (1947), 12; 67 (1947), 33.

Fig. 1 The at Constant Temperatures Magnetization Curves of "Senperm"

Fig. 2 The Magnetization-Temperature Curves of Senperm.

(2) 磁化の強さ I と温度との関係: Fig. 2 には No. 1075 (9.99%Si, 16.58%Ni) 合金の磁化の強さ I と温度との関係を Fig. 1 より求めて書いた。圖より明らかな如くに 0.05 Oe の磁場の曲線には殆んど變化が認められない。然るに 0.3 Oe の磁場に於ける I になると 200° 附近に小さな極小を呈し 240° 附近から急激な上昇を開始し 280° の極大の約 640 を経て温度上昇と共に減少し 370° に約 40 の極小となり、更に温度が上昇し 450°~570° 附近に平滑な約 250 の極大を示し 600° の磁気變態點に達して零になる。0.5 Oe の曲線は、0.3 Oe の場合と殆んど同一の傾向を辿るが 3.0 Oe の磁場になると極大、極小の差は極めて少くなる。センパーム範圍の合金はいずれもこれと大同小異の傾向を有する。

(3) 導磁率と温度との関係: No. 1075 合金について 0.05, 0.3, 0.5 及び 3.0 Oe の各磁場における導磁率對温度曲線を書けば Fig. 3 の通りである。即ち 0.05 Oe の曲線では 570° に小さな極大を有するのみであるが、0.3 Oe では 250° 附近から導磁率は急激な増大を示し 280° に約 27000 の極大値を示し、温度上昇と共に減少して 370° に於ける約 2,000 の極小を経て再び温度上昇と共に増加し、550° において約 11,000 の極大を経て Curie 點に達する。0.5 Oe の磁場に於ては 0.3 Oe の場合程異常性は顯著でない

が大體同一傾向を有してゐる。3.0 Oe に於ては何等變化は顯れない。なお圖に $H=15$ Oe における磁氣感應度を示したが特筆すべき變化は認められ無い。次に No. 1008 (8.4% Si, 15.91%Ni) 合金の導磁率對温度曲線を Fig. 4 に示した。圖から知られる如く何れの磁場に於いても導磁率 μ は Curie 點直前に極大を示すのみで、且つその値は僅かに 800 に満たない。すなはちセンパーム組成外になると異常性は認められなくなる。

(4) 各温度におけるヒステリシス環線: 著者等は更に各温度におけるヒステリシス環線を測定し興味ある結果を得た。Fig. 5 は No. 1075 合金について各温度にお

Fig. 3 The Permeability-Temperature Curves of Senperm.

Fig. 4 The Permeability-Temperature Curves of an Alloy in Fe-Si-Ni System.

けるヒステリシス環線を書いたものである。(圖において B 及び H の目盛は 25~250, 370~330° 及び 360~560° でそれぞれ異つた尺度で書いてある)。圖より明らかな如く、ヒステリシス環線は 25° に於て蛇狀形を呈するが、その形状は温度上昇と共に漸次消失し 230° に至り垂直となる。360° 迄環線はこの状態を續け 400~440° で再び變化し菱形となり 470° からは殆んど普通の磁性材料の環線になる。なお圖中 300° 及び 330° の環線は最大磁氣感應度 $B_m=10,000$

Fig. 5 The Hysteresis loops of "Senperm" No. 1075 [9.99%Si, 16.58%Ni] at Various Temperatures.

Gauss に於いて測定せるも、これは磁化曲線が急峻になる温度範囲で $B_m = 5000$ Gauss からの測定は困難であつた爲である。環線の形状変化と共にその履歴特性値 (Wh , Br , H_c) が変化することは勿論である。斯くの如く温度と共にその環線の顯著なる変化は Perminva 以外には余り見受けられない現象である。

(5) 残留磁気 Br 並に頑磁力 H_c と温度との関係: Fig. 6 は No. 1075 合金の温度に対する H_c と Br の変化を畫

Fig. 6 The Relation Between the Temperature and the Residual Induction and the Coercive Forces of Senperm, No. 1075 [9.99%Si, 16.58%Ni, Bal, Fe]

いた曲線である。Fig. 6 に於いて H_c は初め温度と共に減少し、250~300°で約 0.3 Oe の極少となる。この極小温度は Br の極大範囲と一致して居り且つ導磁率極大温度とも一致している。この温度範囲でヒステリシス環線は垂直角形となる。300°以上の温度になると H_c 及び Br 共に漸次減少を示し Curie 點に至つて消失する。

(6) 組成と磁氣的性質の關係: 次に Fe-Si-Ni 系合金の高温における磁氣的性質と組成の關係について記述しよう。Ni=16% として Si 量を變化せる各組成 (Table 2 参照) の合金について、常温、300° (Fig. 3 に於て導磁率の極大を示す温度)、350° (同じく極少を示す温度)、及び 550° (Curie 點直前の極大を示す温度) に於ける 0.3 Oe の導磁率値を Si 含有量に對して畫くと、Fig. 7 の通りであ

る。圖より明らかなように何れの温度においても 10.5% Si 附近で導磁率は極大を呈する。而して導磁率値は 300° の場合が最も高く次いで 550°, 350° 及び常温の順に小さくなって居る。

V. 實驗結果に對する考察

センバーム並に Fe-Si-Ni 系合金の高温に於ける磁氣的性質は、以上述べられた通りであるがこれらの實驗結果中、導磁率對温度曲線の Curie 點直前に顯れる導磁率極大は所謂 Hopkinson 効果によつて生じたものでこれについては既に、Kondorsky 及び Kersten⁽⁷⁾等により理論式を與へて説明されて居る。然るにセンバーム範圍

Fig. 7 The Permeability ($H=0.3$ Oe) Concentration (Si) Curves for Fe-Si-Ni Alloys at Constant Temperatures.

においては 300°附近に導磁率異常性を呈する。若しかような異常性が規則格子生成に基づくものであると假定すれば他の規則格子合金に於いても、同様の異常現象が期待出来る筈である。そこで著者等は Fe_3Al 規則格子合金についてセンバームの場合と同様の實驗を行つた。今 Fig. 8 の 12.05% Al 合金 [(Fe_3Al をねらつて (13.9%Al) 熔溶したのであるが、分析の結果は 12.05% Al であつた)] の導磁率對温度曲線から知られる如く、3Oe. を除く何れの磁場でも初め導磁率は温度と共に増大し約 300°附近で極大となり約 470°附近の極小を経て再び増大し 610°附近に於て零になる。かような極大及び極小の温度範囲は、センバームの場合と大分相違するが曲線の傾向は相似である。又 Sykes & Evans⁽⁸⁾ の Fe_3Al 合金の磁氣對温度曲線で

(7) Kondorsky, Phys. Z. S. & Sowjetunion., 11 (1937), 597.

Fig. 8 The Permeability-Temperature Curves for Fe_3Al Alloy.

は、不規則格子が冷却に際し 520° で規則格子に変化することを示して居り、規則格子の Curie 点は 490° 、不規則格子の Curie 点は 560° となつて居る。すなはち Fig. 8 における 470° 附近の導磁率極小が規則格子から不規則格子に変化する現象であるから、センバーム範囲において認められる 350° 附近の極小もまた規則-不規則状態に起因するものと考へられよう。なおこれと類似の現象は、G. W. Elmen (2) によつて測定された Ni_3Fe 合金の初導磁率対温度曲線においても認められる。すなはち Ni_3Fe 型規則格子合金の規則-不規則状態温度 490° において初導磁率は極小を呈している。なお Fig. 9 に $\text{Ni} \approx 16\%$ とし Si 含有量を變化せる Fe-Si-Ni 系合金の導磁率と油焼入温度の關係を示して置いた。この曲線を高温における導磁率対温度曲線 (Fig. 2) と比較すれば非常に相似である。すなはち $9.72\% \text{Si}$, $16.15\% \text{Ni}$ 合金は焼入に依り 350° 及び 550° に最大導磁率の極大及び約 450° の極小は特に著しく相似である。

(8) C. Sykes, H. Evars, Jour. on Iron Steel Inst., 31 (1935), 225.

Fig. 9 The Relation between the Maximum Permeability and the Quenching Temperature for Fe-Si-Ni Alloys.

は著しく變化して 300° 附近では垂直角型となる。(iv) 残留磁氣の極大及び頭磁力の極小共に 300° 附近に表れ、導磁率極大温度と一致する。

(2) Si 及び Ni 含有量を變化し、センバーム範囲外の Fe-Si-Ni 系合金を測定した結果、磁氣的性質に異常性は認められない。

(3) センバームの高温の磁氣的性質の異常性原因を確める意味で Fe_3Al 合金の磁性も測定した。その結果センバームの導磁率対温度變化と相似である。

(4) センバームの高温における導磁率対温度曲線は導磁率対油焼入温度曲線と對稱的である。

VI. 結 言

以上の研究結果を總括すると次の通りである。

(1) Fe-Si-Ni 系合金中センバーム範囲の組成について、弱磁場における高温の磁氣的性質を測定した。

(i) 磁化曲線は 300° 附近において異常性を呈し曲線の形状が急峻になつて来る。(ii) 導磁率は 300° 附近及び Curie 点直前の二ヶ所に極大を、 350° 附近に極小を呈する。しかしこの異常性は、磁場 0.3 Oe. において最も顯著である。(iii) ヒステリシス環線は常温において蛇狀形のものが、温度上昇と共にその形状

は著しく變化して 300° 附近では垂直角型となる。(iv) 残留磁氣の極大及び頭磁力の極小共に 300° 附近に表れ、導磁率極大温度と一致する。

(2) Si 及び Ni 含有量を變化し、センバーム範囲外の Fe-Si-Ni 系合金を測定した結果、磁氣的性質に異常性は認められない。

(3) センバームの高温の磁氣的性質の異常性原因を確める意味で Fe_3Al 合金の磁性も測定した。その結果センバームの導磁率対温度變化と相似である。

(4) センバームの高温における導磁率対温度曲線は導磁率対油焼入温度曲線と對稱的である。

強磁性材料の高温に於ける磁氣的性質 (第2報) 焼入せるセンバーム合金の弱磁場に於ける高温の磁氣的性質

山本達治* 美山悌二郎* 千葉久喜*

Tatsuji Yamamoto, Teijiro Miyama and Hisayosi Chiba : On the Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials at High Temperatures (2nd Report). On the Magnetic Properties of Oil Quenched "Senperm" in Weak Field at Various Temperatures : In the first report, the magnetic properties of Fe-Si-Ni alloys in weak field had been measured at various temperatures. Now, the same measurements were carried out for the specimens quenched in oil from 550° and 350° . The results are similar with those of the previous experiments, but abnormality at about 320° shifts to low temperature at about 80° and 30° respectively. In consequence, the minimum points on the curves of coercive force various temperature shift by same degree. However, the specimen out of "Senperm" range exhibits no abnormality at any temperature except for Hopkinson's effect as in the previous experiment.

(Received February 15, 1949)