微弱磁場に於ける鐵單結晶及び鐵 ニッケル合金の磁化曲線の研究

清水 與三 松*

Yosomatu Simizu : Studies on the Magnetization of Single Crystals of Iron, and Iron-Nickel Alloys, in Very Weak Fields. The magnetization of single crystals of iron, as well as nickel and iron-nickel alloys, in very weak fields, has not yet been measured. So the present writers prepared single crystals of iron having a large dimension ratio, such as 100, and used an astatic magnetometer of large sensibility for measuring the intensity of magnetization. At first, the magnetization of single crystals of iron in very weak fields was measured by a usual method of demagnetization by alternating fields. According to the result of measurement, the field-range of reversible initial susceptibility is very low, and the initial susceptibilities of iron single crystals in three principal directions are as follows:— $\kappa_0[100]=26.6$, $\kappa_0[110]=18.7$ and $\kappa_0[111]=13.9$, their ratio being $1 : \frac{1}{1.42} : \frac{1}{1.90}$. The effect of weak stress and that of dimension ratio on the initial susceptibility were also measured, and found that the stress affects to diminish $\kappa_0[100]$ and to increase $\kappa_0[110]$ and $\kappa_0[111]$ and so the anisotropy diminishes as a whole, and that as the dimension ratio decreases, the anisotropy of κ_0 also diminishes at first slowly and then rapidly, vanishing in a dimension ratio of about 10.

Next, the magnetization was measured by means of demagnetization by heating and found that the initial susceptibilities are three to four times greater than those obtained by the demagnetization by reversals, as shown below; $\kappa_0[100]=85.4$, $\kappa_0[110]=45.8$, $\kappa_0[111]=39.2$ and $\kappa_0[100] : \kappa_0[110] : \kappa_0[111]=1 : \frac{1}{1.82} : \frac{1}{2.24}$. This large difference in initial susceptibilities obtained by these two methods of demagnetization was found to be due to the diminution of number of unstable elementary magnets present in the boundaries of magnetic domains by gradually decreasing alternate fields, or briefly by agitating effect of magnetostriction due to the alternate fields. The change in the initial susceptibility caused by the alternate fields also differs in the directions of three principal axes of iron. It is large in a low temperature and diminishes as the temperature is raised, and vanishes at the critical temperature.

The temperature-dependency of the anisotropy of initial susceptibility of iron crystals mentioned above was found to diminish with the rise of temperature, and also with the latter the ratio of initial susceptibilities in three principal directions decreases, tending to 1 just below the critical temperature.

In the case of iron-nickel alloys containing 18.5% Fe, the magnetostriction of which is zero, the initial susceptibility is almost independent of temperature, and also the effect of alternate fields on the initial susceptibility is zero. The above complicated phenomena were successfully explained on the basis of Honda-Okubo's theory of magnetization.

(Received March 17, 1941)

I. 緒 言

強磁性金属、合金及びそれ等の單結晶の極めて低い磁場に於ける磁化曲線の測定即ち眞の可逆磁化の範囲に於ける初磁化率の精密なる測定は未だ行はれてゐない。(1) この可逆磁化率の範囲では、鐵單結晶の初磁化率の方向性が存在するか否かは實驗的には未だ決定されてゐない。若し存在するならば、これが温度によつてどう變化するか、又、臨界温度ではどうなるか、從來行はれた高い磁場に於ける磁化曲線からはこの問題は未だ解決されて

ゐない。また鐵の初磁化率 κ_0 は普通 20 前後とされてゐるが、この値が果して眞の初磁化率であらうか。又、鐵、ニッケル等に於ては可逆初磁化率の磁場範囲は一體どの程度のものであらうか。著者はこれ等の諸點を研究する爲に極めて低い磁場に於ける磁化曲線の測定を行つた。

上記の研究を行ふ爲に、著者は先づ大なる寸法比の試料、特に寸法比 100 以上の鐵單結晶を作ること努力した。また測定に使用した無定位磁力計の感度を上げることと鋭意努力した。斯くして始めて、地球磁場の數百分の一程度の極低磁場に於ける磁化曲線の測定を行ふことが出来た。可逆的初磁化率の磁場範囲は極めて低く、磁氣の強さにして 0.3 以下である。この範囲内では履歴現象は全然存在しない。この微弱磁場に於ける磁化曲線の研究によつて種々新しい現象が觀測された。以下順を逐ふて記述する。

* 東北帝國大學金屬材料研究所

(1) E. Kondorsky [Phys. Rev., 53 (1938), 319, 1022] 及び W. F. Brown [Phys. Rev., 55 (1938), 577.] の考へによれば Williams [Phys. Rev., 52 (1937), 747, 1004] が鐵單結晶試料 (5% の珪素を含む) に就て測定した磁化曲線は非可逆磁化に相當するもので眞の可逆磁化の範囲に於ける測定でないことを指摘して居る。

II. 単結晶の製作及び結晶軸方向の決定

鐵單結晶製作には炭素 0.1% のスエーデン鐵を取りこれを鍛鍊して直徑 4mm 長さ 40cm の針金に線引し、次にこの材料の炭素を完全に除去する爲約 60cm の均一度を有する爐中に入れ 1000° に 2, 3 週間熱し、これに斷えず水蒸氣を含有せる水素を送つた。斯くて十分脱炭した針金を試験機に依つて 3% 前後の伸張を與へた。次に材料を再び爐中に入れ水素氣中に於て⁽²⁾ A₃ 點の直下 880° に 2 晝夜間熱し約 15 時間で常溫まで冷却した。斯くして得られた材料の表面を 7% の硝酸にて腐蝕して長さ 30cm の結晶の存在することを確めた。この單結晶が歪を受けない様に切斷する爲に、切斷個所の狭い部分を残し、他は全部パラフィンを塗つてこれを稀硝酸中に浸してこの目的を達した。かくして得た多數の單結晶の試料から次に述べる簡単な方法で三主要軸の方向に極めて近い結晶軸を有する試料を選び出した。

Fig. 1 Apparatus for determining crystal orientations.

單結晶試料の結晶軸の方向は Fig. 1 に示す様に光學的方法で簡単に定めた。鐵の場合には硝酸を用ひて腐蝕⁽³⁾すれば (100) 面が現はれてゐるから簡単に検出することが出来る。S は弧光を用ひた光源、C の絞りを通過した光束は平行光線となり PQ なる衝立のピンホール P を通つて臺 OO' 上に置いた鐵單結晶に當る。このとき、單結晶を臺上にて適當に廻すときは圖に示す如く PQ 上にピンホールを中心とした明瞭な光の輪が現れる。この場合、單結晶に當つた光の方向と結晶棒の軸のなす角は結晶軸の方向を示す一つの方角餘弦の角を表はす。同様に單結晶を OO' 臺上で廻して他の二つの方角餘弦を求めることが出来る。多數の單結晶の中から、この方法で三主要軸に近いものを選出し、後にこの撰出した單結晶を普通の角度計 (goniometer) の試料支持臺に裝備して、前同様にして正確に方向餘弦 (l, m, n) を決定した。

Table 1 は實驗に使用した鐵單結晶を示す 第一組の

(2) 著者は水素氣中に於て焼鈍するも、眞空中に於て焼鈍するも、その單結晶の磁化曲線には殆んど影響の無いことを確めた。

(3) H. H. Potter, W. Sucksmith, Nature, 119 (1927), 924.

Table 1 Single Crystal of Iron.

Specimens	Crystal	Length (cm)	Diameter (mm)	Dimension ratio	Direction-Cosines		
					l	m	n
A	[100]	14.50	1.45	100	.0523	.1305	.9936
B	[110]	14.40	1.44	100	.0488	.6334	.7716
C	[111]	14.50	1.45	100	.5835	.5621	.6252
D	[100]	8.80	2.07	42.4	.0000	.2756	.9613
E	[110]	9.15	2.116	43.2	.1994	.6157	.7880
F	[111]	8.60	1.989	43.2	.5807	.5490	.6293
G	[100]	17.30	2.59	66.7	.0000	.2924	.9563

單結晶 A, B, C は夫々 [100], [110] 及び [111] 方向に近く、長さ 15cm 直徑 1.5mm 寸法比 100 を有し、同長同徑の圓棒棒に仕上げて、主として實驗に使用した。第二組 D, E, F の單結晶は磁化曲線に及ぼす寸法比の影響を見る爲に使用した。尙、D の單結晶はかなり [100] 方向から外づれてゐるから、その代りに G の試料をも使つた。また D, E, F の試料を用ひて磨擦による微小な歪

の磁化曲線に及ぼす影響をも調べた。Fig. 2 はこれ等單結晶試料の結晶軸の方向をステレオ投影法で示したものである。

Fig. 2 Positions of crystal axes of iron single crystals in stereographic projection.

鐵、ニッケル及び Fe-Ni 系合金の試料は何れも上記單結晶と同長、同徑で寸法比 100 のものを用ひた。合金試料に使用した電解鐵及び電解ニッケルの化學分析結果は次の様である。

電解鐵: C=0.04, Si=0.03, Mn=0.04, P=0.005, S=0.012.

電解ニッケル: C=0.004, Si=痕跡, Mn=痕跡, P=痕跡, S=0.01.

また試験に供した二種の Fe-Ni 合金の多結晶試片に就ての化學分析の結果を示せば

第一種 Fe-Ni 合金中の Fe: 19.80% Fe.

第二種 Fe-Ni 合金中の Fe: 41.07% Fe.

III. 装置及び測定方法

Fig. 3 a は實驗に使用した無定位磁力計の縦斷面圖を示してゐる。N₂S₂ 及び S₁N₁ なる上下 2 個の磁石は直徑 1mm、長さ 1cm の圓棒棒で K. S 磁石鋼で作り、磁氣能率の相等しいものを多數の中から撰出して用ひた。2 個の磁石は、直徑 1mm の中空硝子細管に 50cm の距離に於て同一平面内にある様に固定して、直徑 0.01mm 以下の極めて細く引いた石英線で吊してある。尙、圖に示すやうに直徑 1cm の鏡が細管に固定してある。これ等全體の吊系は更に外徑 1.8cm の硝子管中に裝備して氣流の影響を除いてある。またこの磁力計の振れを早く止め

Fig. 3a Astatic magnetometer.

Fig. 3b

る目的で、上下
兩磁石の周圍に
夫々厚さ 5mm、
長さ 6cm、外徑
3.4cm の 2 個の
銅製圓筒が取付
けてある。これ
等のものを眞鍮
製のスタンドで
支持してコンク
リート臺上に据
付け、更に太い
木柱から數個の
腕を出してスタ
ンドを支持して

振動を止めることに注意した。(Fig. 3b 参照)

Fig. 4 は測定の際の接続圖を示す。A, B 2 個の磁化コイルは、外徑 1.5cm 長さ 100cm の銅管に S.W.G. 21# 絹捲銅線を捲いたもので、コイル恒数は 137.7 である。この磁化コイルの兩端 8cm を除いては磁場は 1% 以内で均一である。圖の Sc は標準コイルで無定位磁力計の恒数を決定する場合に使用した。

Fig. 4 Connections for the measurement by astatic magnetometer.

棒状試片の磁氣の強さ I は次式より求められる。(4)

$$I = \frac{Ca^3}{2V \left[1 + \frac{1/2 L^2 - 3/4 l^2}{a^2} + \psi \left(\frac{a}{h} \right) \right]} \cdot \frac{e}{2A} \left[1 - \frac{5}{6} \left(\frac{e}{2A} \right)^2 \right]$$

茲に、 C =磁力計の恒数、 a =下の磁石の中心から試料の中心までの距離、 h =磁力計の下の磁石の兩極間の距離、 V =試料の體積、 $\psi(a/h)$ =磁力計の上の磁石に及ぼす作用の補正項、 e =磁力計の鏡のフレ、 A =望遠鏡の尺度と磁力計の鏡との距離。

磁力計の恒数 C は標準コイルを用ひれば次式によつて決定される。即ち

$$C = \frac{2r^2\pi n}{10 \cdot (a_1^2 + r^2)^{3/2}} \left[1 - \frac{3/4 l^2}{(a_1^2 + l^2/4)} + \psi \left(\frac{a_1}{h} \right) \right] = \frac{e}{2A} \left[1 - \frac{5}{6} \left(\frac{e}{2A} \right)^2 \right]$$

茲に r =標準コイルの半径、 i =標準コイルに通ずる電流をアンペアにて表はしたもの、 n =標準コイルの捲數、 a_1 =標準コイルの中心より磁力計の下の磁石の中心までの距離。

標準コイルは磁力計の東方或は西方に a_1 の距離に置いて測定し、その各位置に於て電流の方向を正或は逆にしてフレを読む。今電流の強さ $i=0.05A$ 、標準コイルの半径 $r=0.996cm$ 、標準コイルの捲數 $n=51$ 、 $h=50cm$ 、 $A=222.7cm$ として、磁力計の下の磁石の中心より標準コイルの中心までの距離 a を種々に變じて、これと磁力計のフレ e との關係を求むれば次の様になる。

a (cm)	e (cm)	C
$a_1=29.3$	$e_1=9.0$	$C_1=0.00316$
$a_2=31.8$	$e_2=7.05$	$C_2=0.00315$
$a_3=34.3$	$e_3=5.57$	$C_3=0.00315$
$a_4=36.8$	$e_4=4.50$	$C_4=0.00315$
$a_5=39.3$	$e_5=3.65$	$C_5=0.00314$

平均 $C=0.00315$

從てこの無定位磁力計の感度は Kohlrausch, Holborn(4) の作つた磁力計の感度の約 100 倍に相當する。

溫度を上げるには、直徑 5mm の石英管に直徑 0.5mm の白金線が無誘導的に捲いて 18cm の範圍にわたつて均一度を有する爐を作つた。尙この爐の外側に水を流す様に裝置して、爐の電流を切つた場合には速く冷却する様に作つた。而して長さ 15cm、直徑 1.5mm の試料は細い石英管中に眞空封入して、上記の爐中に入れて使用した。

IV. 測定結果

(A) 鐵及び鐵單晶

(i) 鐵及び鐵單結晶の磁化曲線

初めに、慣例的操作により、交流磁消を行つた試片に於て微弱な磁場に於ける磁化曲線の測定結果を述べる。この低磁場に於ける交流磁消の困難にして大なる努力と熟練を要することは云ふまでもない。Table 2~4 及び Fig. 5~8 は鐵單結晶の第一種試片 A, B, C の三主要軸方向に就て測定した結果を示してゐる。Fig. 5 の示す如く I と H の比例する直線的部分は極めて低い磁場に限られ、 I の値に於て云へば僅かに 0.3 以下である。例へば [100] の方向では磁場 0.0084, [110] の方向では 0.0128, [111] の方向では 0.018 エルステッドまでは I と H との關係は直線的で、これ等の磁場を越えれば上方に曲り、著しい履歴現象を示すことは Fig. 6~8 の 3 圖から明かである。從來の測定例へば Williams(5) の 5% 珪素を含有する鐵單結晶に就ての實測の結果を見るに三主要軸方向の初磁化率の比として $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}$ を與へて居るが、こ

(4) H. Geiger, Karl Scheel, Handbuch d. Physik, 16 (1927), 706.

(4) Kohlrausch, Holborn, Ann. Phys., 10 (1903), 287.

(5) W. J. Williams, Phys. Rev., 52 (1937), 747, 1004.

Table 2 Specimen A, [100]

mA	H _{ext}	H _{eff}	Deflection (mm)	NI	I
0.01	0.0014	0.0012	3.3	0.0002	0.030
0.02	0.0027	0.0024	6.6	0.0004	0.060
0.03	0.0041	0.0036	10.0	0.0005	0.091
0.04	0.0055	0.0048	13.5	0.0007	0.123
0.05	0.0069	0.0059	17.0	0.0009	0.155
0.06	0.0083	0.0072	20.5	0.0010	0.187
0.07	0.0096	0.0083	24.0	0.0013	0.219
0.09	0.0124	0.0105	35.0	0.0019	0.319
0.11	0.0151	0.0125	48.0	0.0026	0.438
0.13	0.0179	0.0144	60.0	0.0035	0.547
0.15	0.0207	0.0168	72.0	0.0039	0.657
0.17	0.0234	0.0187	86.0	0.0047	0.784
0.19	0.0262	0.0206	103.0	0.0056	0.939
0.21	0.0289	0.0224	120.0	0.0066	1.094
0.24	0.0331	0.0252	144.0	0.0079	1.313
0.26	0.0358	0.0269	162.0	0.0089	1.477
0.20	0.0275	0.0197	141.0	0.0077	1.286
0.15	0.0207	0.0142	118.0	0.0064	1.076
0.10	0.0138	0.0086	95.0	0.0052	0.866
0.06	0.0082	0.0043	72.0	0.0039	0.657
0.03	0.0041	0.0011	55.0	0.0030	0.502
0.00			36.0	0.0020	0.328

Table 3 Specimen B, [110]

mA	H _{ext}	H _{eff}	Deflection (mm)	NI	I
0.01	0.0014	0.0012	2.3	0.0001	0.022
0.02	0.0027	0.0025	4.6	0.0003	0.043
0.03	0.0041	0.0037	7.0	0.0004	0.066
0.04	0.0055	0.0049	10.5	0.0006	0.099
0.05	0.0069	0.0062	12.0	0.0007	0.113
0.06	0.0083	0.0074	14.5	0.0008	0.137
0.07	0.0096	0.0086	17.0	0.0010	0.161
0.08	0.0110	0.0108	20.0	0.0012	0.194
0.09	0.0124	0.0111	22.0	0.0012	0.208
0.11	0.0151	0.0135	27.0	0.0015	0.255
0.13	0.0179	0.0160	33.0	0.0019	0.312
0.15	0.0207	0.0184	40.0	0.0023	0.378
0.17	0.0234	0.0207	47.0	0.0027	0.445
0.19	0.0262	0.0231	54.0	0.0031	0.511
0.21	0.0289	0.0254	61.0	0.0035	0.577
0.23	0.0316	0.0277	68.5	0.0039	0.648
0.25	0.0344	0.0300	76.0	0.0043	0.719
0.20	0.0275	0.0236	67.0	0.0038	0.634
0.15	0.0207	0.0176	54.0	0.0031	0.511
0.10	0.0138	0.0115	40.0	0.0023	0.378
0.07	0.0096	0.0088	32.0	0.0018	0.303
0.00			9.0	0.0005	0.085

れは可逆的初磁化率の磁場範囲を越えてゐることは Kondorsky⁽⁶⁾ 及び Brown⁽⁷⁾ も既に指摘してゐる。後に述べるやうに、この比は温度によつて著しく変化するのみでなく、臨界温度直下で1になる。また加熱による磁消即ち熱磁消によつても多少変化する。吾々の測定の結果

Table 4 Specimen C, [111]

mA	H _{ext}	H _{eff}	Deflection (mm)	NI	I
0.01	0.0014	0.0013	2.0	0.0001	0.018
0.02	0.0027	0.0025	4.0	0.0002	0.035
0.03	0.0041	0.0038	6.0	0.0003	0.053
0.04	0.0055	0.0051	8.0	0.0004	0.071
0.05	0.0069	0.0064	10.0	0.0005	0.088
0.06	0.0083	0.0075	12.0	0.0006	0.106
0.07	0.0096	0.0089	14.0	0.0007	0.123
0.08	0.0110	0.0112	16.0	0.0008	0.141
0.09	0.0124	0.0114	18.0	0.0009	0.159
0.10	0.0138	0.0128	20.0	0.0010	0.176
0.11	0.0151	0.0139	22.0	0.0012	0.194
0.13	0.0179	0.0165	26.0	0.0014	0.229
0.15	0.0207	0.0191	31.0	0.0016	0.273
0.17	0.0234	0.0215	36.0	0.0019	0.317
0.19	0.0262	0.0240	41.0	0.0022	0.362
0.21	0.0289	0.0265	46.0	0.0024	0.406
0.23	0.0316	0.0289	51.5	0.0027	0.454
0.25	0.0344	0.0304	57.0	0.0030	0.503
0.20	0.0275	0.0245	55.0	0.0029	0.485
0.15	0.0207	0.0183	44.0	0.0023	0.388
0.09	0.0124	0.0108	30.0	0.0015	0.265
0.05	0.0068	0.0057	21.0	0.0011	0.185
0.00			7.0	0.0003	0.062

Fig. 5 Magnetization-curve of iron single crystals in three principal directions.

Fig. 6 Hysteresis-curve of iron single crystal in [100] direction.

果によれば可逆的初磁化率は $\kappa_{0[100]}=26.6$, $\kappa_{0[110]}=18.7$, $\kappa_{0[111]}=13.9$ で、その比は $1:\frac{1}{1.3}:\frac{1}{1.8}$ で、Kondorsky の理論値 $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{3}$ と著しく異なつてゐる。

次にこの實驗中に氣附いた二、三の事柄を述べよう。長く實測に使用した試片は Fig. 9 が示す如く、三主要軸方向の磁化曲線はかなり互に接近して居る。これは實驗中に試片の出入に際し摩擦によつて僅少の歪を受けたる爲ではないかと考へられたから、同一の試片を水素氣中で 850° に 3 日間焼鈍して後同一の測定を繰返した。

(6) E. Kondorsky, Phys. Rev., 53 (1938), 319, 1022.

(7) W. F. Brown, Phys. Rev., 55 (1938), 577.

Fig. 7 Hysteresis curve of iron single crystal in [110] direction.

Fig. 8 Hysteresis-curve of iron single crystal in [111] direction.

Fig. 9 Magnetization Curve of iron single crystals weakly stressed.

Fig. 10 Magnetization-curve of iron single crystals annealed in hydrogen-atmosphere.

Fig. 11 Magnetization curve of iron single crystals given a weak stress by artificial friction.

Fig. 10 はその結果で、三軸の方向の磁化曲線は始めの様に互に開いて居る。Fig. 11 は D, E, F の単結晶に就て焼鈍せるものと 50 回出し入れして摩擦を與へたるものにて實測し、その結果を示すものである。即ち摩擦によつて [100] 方向の κ_0 が減少し、[110], [111] の方向の κ_0 は増加して、主軸の方向に於ける

初磁化率の相違を少なくする傾向が明かで、吾々の豫想の正しきを裏書してゐる。

(ii) 三主要軸の初磁化率の比と試片の寸法比との關係磁區説に従へば若し試片内の磁區能率が 4 回軸の方

向に一樣に分布すれば三主要軸の方向に於ける初磁化率は同一であるべきである。例へば球狀試片或は太い橢圓體の場合には磁區能率は三つの 4 回軸の方向に一樣に分布するものと考へられるから三主要軸の方向の初磁化率は同一であるべきである。然るに前條に述べたるが如き細長い棒狀試片では磁區能率の方向は 4 回軸の方向に一樣に分布しないと考へられる。初磁化率が實際主要軸の方向に依つて異なるはこれが爲であらう。この考へを確むる爲同一の長い棒狀の鐵單結晶を酸によつて次第に切斷して種々の寸法比の試片を作つて測定した。試料は D, E, F の單結晶を用ひた。Fig. 12 はその結果を示す。

Fig. 12 Relation between initial susceptibility in three principal axes and dimension ratio of iron single crystals.

ものである。又 Fig. 13 は $I=0.143$ に於ける磁化率 κ_0 の差、即ち $\kappa_0[100]-\kappa_0[111]$, $\kappa_0[110]-\kappa_0[111]$ と寸法比との關係を示してゐる。磁化率は寸法比約 10 までは方向に無關係であるが、これを越えればその差急激に増加して寸法比 100 に於ては略一定の値に達する。この結果によれば寸法比 10 までは磁區能率の方向は三つの 4 回軸の方向に一樣に分布するもこれを越えればその分布は急に變化し始めて磁化し易い方向を取ることが確められた。而して磁化し易い方向は棒軸と 4 回軸の方向との關係によつて異なるべきである。棒軸と 4 回軸の一つの方

向とが一致する場合には磁区能率の方向が4回軸の方向と一致するか或は垂直となる場合に最も磁化し易いと考へられる。又棒軸の方向が[110]のそれと一致するとき

Fig. 13 Relation between the difference of initial susceptibility in principal directions (on the line of $I=0.143$) and dimension ratio of the specimens.

はこれに垂直な4回軸の方向か或はこれに最も近い二つの4回軸の方向が磁区能率の方向と一致するとき最も磁化し易い。又棒軸の方向が[111]のそれと一致すれば磁区能率の方向は4回軸間に様に分配さるべきであり、棒の磁化率は長さに無関係と考へられる。

(iii) 熱磁消による鐵及び鐵單結晶の磁化曲線

以上は何れも試片を磁化する前に最大約10エルステッドの磁場を生ずる交流を用ゐて完全に磁消したものに付て磁化せる結果であるが、次に熱磁消による測定の結果を述べる。熱磁消とは、試料を東西の方向に置いて地球磁場が長さの方向に作用しない様にし、臨界温度以上例へば 850° に約30分間熱して後徐々に常温まで冷却することを云ふ。熱磁消せる試片の磁化曲線の一例はTable 5及びFig. 14に示してある。ここに注目すべ

Table 5 [100]

	m A	H	def. (mm)	I
1. Demagnetization by heating, Rapid cooling (Cooling rate, 4 minutes $200 \rightarrow 20^{\circ}$)	0.04	0.0055	51	0.428
	0.07	0.0096	103	0.865
	0.11	0.0151	168	1.411
2. Demagnetization by reversals, Rapid cooling	0.05	0.0069	29	0.244
	0.07	0.0096	42	0.353
	0.11	0.0151	77	0.647
3. Demagnetization by heating, Slow cooling	0.04	0.0055	26	0.218
	0.08	0.0110	60	0.504
	0.12	0.0165	100	0.840
4. Demagnetization by reversals, Slow cooling	0.05	0.0069	17	0.143
	0.08	0.0110	40	0.336
	0.12	0.0165	71	0.596

きは、初磁化率 κ_0 が著しく増大して88.9の値を有することである。前記の交流磁消による場合の κ_0 は26.6であるが、これと比較すれば著しく大である。尚、加熱後、爐の電流を切れば8分間で常温にまで冷却する、これを急冷と名づける。又3時間位で常温まで冷却すれば、これを緩冷と名付ける。熱磁消せる場合の結果によれば、

緩冷せるものゝ初磁化率は急冷せるものに比して著しく減少する。この急冷及び緩冷せる試料を更に磁場磁消して測定して見ると同圖下部に示す様に、初磁化率は共に著しく減少してゐる。かく冷却速度によつて初磁化率の著しく減少する原因は後に説明する如く鐵中に存在する微量のFe Sの 130° に於ける變態によるものである。こ

の變態の影響を避けるには 200° 以下を急冷すれば宜しい。

上記の如く、熱磁消によつて初磁化率を求めれば著しくその値が増大し、交流磁消による値の4倍にも達する。從來研究者はこれに氣付かず、交流磁消法のみを採つてゐた。例へばアームコ鐵の κ_0 として20前後の小さい

Fig. 14 Magnetization-curve of single iron crystal in [100] direction demagnetized by heating or by field, the specimens of which were cooled rapidly or slowly.

値を眞の初磁化率とし、理論的計算に使用してゐる。熱磁消による鐵單結晶の磁化曲線を急冷によつて求むればTable 6~8及びFig. 15が得られる。この圖によれば、 $\kappa_0[100]=85.4$, $\kappa_0[110]=46.8$, $\kappa_0[111]=39.2$, で、 $\kappa_0[100]:\kappa_0[110]:\kappa_0[111]=1:\frac{1}{1.82}:\frac{1}{2.22}$ となる。これを前記、磁場磁消せる場合の初磁化率、 $\kappa_0[100]=26.6$, $\kappa_0[110]=18.7$,

Table 6 [100]

	m A	H	def. (mm)	I
1. Demagnetization by heating, Rapid cooling	0.04	0.0055	58	0.437
	0.08	0.0110	123	0.929
	0.12	0.0165	198	1.495
2. Demagnetization by reversals, max. field 1.2 Oerst	0.05	0.0069	56	0.423
	0.08	0.0110	99	0.747
	0.12	0.0165	162	1.223
3. Demagnetization by reversals, max. field 5.6 Oerst	0.04	0.0055	26	0.272
	0.08	0.0110	74	0.559
	0.12	0.0165	117	0.883
4. Demagnetization by reversals, max. field 9.6 Oerst	0.04	0.0055	26	0.196
	0.08	0.0110	54	0.408
	0.12	0.0165	86	0.649
5. Demagnetization by reversals, max. field 30 Oerst	0.04	0.0055	18	0.136
	0.08	0.0110	40	0.302
	0.12	0.0165	70	0.529
6. Demagnetization by reversals, max. field 217 Oerst	0.04	0.0055	17	0.128
	0.08	0.0110	41	0.309
	0.12	0.0165	65	0.491

Table 7 [110]

	mA	H	def. (mm)	I
1. Demagnetization by heating, Rapid cooling	0.04	0.0055	32	0.249
	0.08	0.0110	66	0.513
	0.12	0.0165	102	0.793
2. Demagnetization by reversals, max. field 1.2 Oerst	0.04	0.0055	27	0.209
	0.08	0.0110	56	0.435
	0.12	0.0165	86	0.668
3. Demagnetization by reversals, max. field 9.6 Oerst	0.05	0.0069	19	0.148
	0.08	0.0110	36	0.279
	0.12	0.0165	56	0.435
4. Demagnetization by reversals, max. field 22 Oerst	0.05	0.0069	16	0.124
	0.08	0.0110	32	0.249
	0.12	0.0165	49	0.381
5. Demagnetization by reversals, max. field 92 Oerst	0.04	0.0055	14	0.109
	0.08	0.0110	31	0.241
	0.12	0.0165	51	0.396

Table 8 [111]

	mA	H	def. (mm)	I
1. Demagnetization by heating, Rapid cooling	0.04	0.0055	28	0.202
	0.08	0.0110	59	0.426
	0.12	0.0165	90	0.650
2. Demagnetization by reversals, max. field 1 Oerst	0.05	0.0069	28	0.202
	0.08	0.0110	49	0.354
	0.12	0.0165	75	0.542
3. Demagnetization by reversals, max. field 5.6 Oerst	0.04	0.0055	17	0.123
	0.08	0.0110	33	0.238
	0.12	0.0165	50	0.361
4. Demagnetization by reversals, max. field 9.6 Oerst	0.04	0.0055	12	0.087
	0.08	0.0110	23	0.166
	0.12	0.0165	34	0.246
5. Demagnetization by reversals, max. field 109 Oerst	0.04	0.0055	8	0.058
	0.08	0.0110	17	0.123
	0.12	0.0165	26	0.188
6. Demagnetization by reversals, max. field 217 Oerst	0.04	0.0055	6	0.043
	0.08	0.0110	14	0.101
	0.12	0.0165	22	0.159

$\kappa_{0[111]} = 13.9$ 及び $\kappa_{0[100]} : \kappa_{0[110]} : \kappa_{0[111]} = 1 : \frac{1}{1.91}$ と比較すれば著しい相違がある。

(iv) 交流磁消による振幅の影響

前述の如く熱磁消して 200° 以下を急冷せる試料に、種々の強さの交流を通して磁消して磁化曲線を測定した。Table 6~8 及び Table 9 並びに Fig. 16~19 はその結果である。但し微小な振幅の交流は普通の交流メーターでは測定し得ないので Weston の熱電流計を用いた。先づ鐵單結晶の [100] 方向の初磁化率は交流振幅の増加するに従ひ 85.4~26.6 まで減少し、その後は變化しない。尚、交流振幅の小なる場合はその影響殊に著しい。[110] 方向では κ_0 は 46.8~22.8 まで減少し、その後は一定で

ある。又 [111] 方向では κ_0 は 39.2~9.6 まで減少し、その後更に減少する傾向を示してゐる。多結晶鐵の場合でも、 κ_0 は 46.9~16.1 まで減少してゐる。以上の如く磁

消交流の振幅の影響は單結晶に於ては、磁化の方向によつて異なる。

前條に於て、交流磁消と熱磁消とによつて初磁化率の著しく異なることを指摘したが、若し磁消交流の振幅が零となれば、 κ_0 の値は熱磁消の場合と一致することは注目しに値する。従来一般に交流磁消を行つてゐるから、初磁化率として著しく小さい値を出してゐる。

Fig. 15 Magnetization-curve for iron single crystals demagnetized by heating, the specimens of which were cooled rapidly from 200° to room temperature.

る。例へば、1 エルステッド位の振幅より始めて磁消すれば κ_0 は既に $\frac{1}{2}$ 位の値に減少する。上記二つの磁消法によつて κ_0 の値に著しい差を生ずるは、交流振幅の影響であることを確めたので κ_0 の値としては熱磁消法に依るべきことを知つた。この現象は後に説明するやうに磁消の際の磁歪による原子攪乱作用の爲磁区境界に存在する不安定な原子磁石数の減少によるものと考へられる。

Table 9 Poly-Crystal of iron.

	mA	H	def. (mm)	I
1. Demagnetization by heating, Rapid cooling	0.04	0.0055	31	0.260
	0.08	0.0110	61	0.512
	0.12	0.0165	96	0.806
2. Demagnetization by reversals, max. field 0.6 Oerst	0.04	0.0055	16	0.134
	0.09	0.0124	37	0.311
	0.12	0.0165	52	0.437
3. Demagnetization by reversals, max. field 1.34 Oerst	0.04	0.0055	14	0.118
	0.08	0.0110	28	0.235
	0.12	0.0165	44	0.370
4. Demagnetization by reversals, max. field 5.56 Oerst	0.04	0.0055	11	0.092
	0.08	0.0110	23	0.193
	0.12	0.0165	38	0.319
5. Demagnetization by reversals, max. field 18.2 Oerst	0.05	0.0069	13	0.109
	0.08	0.0110	23	0.193
	0.12	0.0165	37	0.311
6. Demagnetization by reversals, max. field 115 Oerst	0.04	0.0055	12	0.101
	0.08	0.0110	25	0.210
	0.12	0.0165	40	0.336

(v) 初磁化率に及ぼす温度の影響

磁化曲線が直線的で可逆的の範囲に於ける磁場 0.008 エルステッドを加へ、温度を臨界温度以上に上昇或は下降せしめて初磁化率の變化を觀測した。この場合に一方

鐵の初磁化率に及ぼす磁消法と不純物の變態の影響を避けるため試料の熱磁消を行ひ且 200° 以下を急冷した。また他方條件を同一にするため交流磁消を行ふ場合にも、上記の熱處理を施した後で、10 エルステッド位の振幅の磁場から始めて磁消した。この二つの磁消法による測定の結果は Fig. 20~23 に示してある。この場合に急冷と云つても 5 分間位の爐冷であるから FeS の變態は多少進行して居ると思はれ

Fig. 16 Effect of the maximum alternate fields on the magnetization-curves of iron single crystal in [100] direction.

Fig. 17 Effect of the maximum alternate fields on the magnetization-curves of iron single crystal in [110] direction.

Fig. 18 Effect of the maximum alternate fields on the magnetization-curves of iron single crystal in [111] direction.

Fig. 19 Effect of the maximum alternate field on the magnetization-curves of iron polycrystal.

Fig. 20 I-T curve of iron single crystal in [100] direction under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

Fig. 21 I-T curve of iron single crystal [110] direction under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

る。交流磁消による曲線が 130° 以下の温度で少し下方に曲つて居るのは上記變態の影響である。一般に交流磁消の場合は熱磁消のときよりも曲線の傾が急であるばかりでなく、單結晶では 500° 附近に小異常が現はれて居る。この異常は熱磁消の場合には現れない。初磁化率は一般に温度と共に急速に増大し、臨界點の直下より急激に減少する。例へば熱磁消の場合には、鐵の單結晶の [100] 方向に於ては $\kappa_0 = 85.4$ から臨界點の直下で 205.5 に増加し、交流磁消の場合には $\kappa_0 = 26.2 \sim 205.5$ となり、孰れも臨界點の直下で同一の値をとる。若し交流磁消の場合に振幅を微小にしても磁消し得ると假定するなれば、交流磁消と熱磁消による 2 曲線は互に一致すべきである。

Fig. 22 I-T curve of iron single crystal in [111] direction under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

Fig. 23 I-T curve of iron polycrystal under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

また圖に表してある如く、溫度を臨界點以上にあげて、後徐々に冷却すると歸の I-T 曲線は加熱の場合と別なものとなる。而して常溫に於ける I は著しく増加し、見掛の κ_0 も増大する。かく I は増加しても可逆的初磁化率は増加しない。例へば常溫、或は 500° に於て磁場を取去つたときの I の減少を測定すれば略々熱磁消による κ_0 に等しい値を與へる。かく歸の曲線に於て I が増加しても可逆初磁化率の値は決して増加してゐないことは注意すべき現象である。以上の特性は多結晶の場合でも大體同様である。

次に 130° 附近に於ける I-T 曲線の異常變化の原因に就て述べよう。この變化の特長は 200° 以下を數分以内で冷却すれば消失するも、極めて徐々に冷却すれば 130° 附近に明瞭なる異常變化を生ずることがある。種々實驗せる結果この變化は鐵中に微量に存在せる硫黃が鐵と硫化物 FeS を作り、これが 130° 附近に變態を有するに歸因することを明かにした。この硫化物は常磁性を有するも強磁性體でないが、加熱變態に際して著しく收縮し、冷却の際は逆に膨脹する。純鐵中に存在する硫黃の量は約

0.04% であるが實際は FeS として存在する故にその量は 0.24% となる。FeS は又鐵の 6% を固溶するものである。高温より冷却する際 FeS は 130° 附近にて著しく膨脹して應力を生じて鐵の弱磁場に於ける磁化率を減少する。然るに若し 200° 以下を比較的早く急冷すれば變態は阻止せられるから應力を生じないので鐵の磁化率は徐冷の場合のやうに減少しないのである。

Fig. 24 は 50% の FeS を特に加へた鐵に付て測定せる膨脹對溫度の曲線である。FeS の變態點に於ける膨脹收縮が如何に著しいかを示したものである。また Fig. 25 は 15% の FeS を加へた鐵に就て可逆的初磁化の範圍に屬する磁場 0.008 エルステッドを加へて、 I と溫度との關係を測定せるものである。即ち 130° に於ける收縮の爲に應力が減少するから初磁化率は急に増大して居る。

Fig. 24 Expansion-temperature curve of iron containing FeS.

Fig. 25 I-T curve of iron containing FeS, under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

以上の結果によれば鐵の初磁化率を求むるには全く硫黄を含有しない純鐵を用ゐるか或は 200° 以下を急冷するかである。

次に、各溫度に於ける磁化曲線を測定し、初磁化率と溫度との關係を求めよう。前條に述べたる如く交流磁消法は眞の可逆初磁化率を與へないから熱磁消法によつた。試料は緩冷せる試片に就て、各溫度に 1 時間ばかり保つて後測定を行つて、その結果を Table 10~12 の 3 及び Fig. 26~28 の 3 に掲げた。これ等の圖は夫々 [100], [110], [111] の方向に於ける 10°, 100°, 150°, 250°, 500°, 740° の磁化曲線を表す Fig. 29 はこれ等の曲線より求めた κ_0 と溫度との關係曲線である。この圖の三つの曲線は κ_0 對溫度の曲線である。又その 200° 以下の部分は急冷して測定したもので變態の影響を受けない純鐵の三主要軸の方向に於ける κ_0 曲線である。又 Fig. 30 は Fig. 29 より求めた各溫度に於ける $\kappa_{0[100]}/\kappa_{0[110]}$ 及び $\kappa_{0[100]}/\kappa_{0[111]}$ の比を表す曲線であり、絶對零度まで延長

してある。この圖によれば常溫に於ける三主要軸の方向の κ_0 の比は $1:\frac{1}{1.7}:\frac{1}{2.4}$ となり、臨界點の直下では $1:1:1$ となる。又絶對零度ではこの比は $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{3}$ となり、Kondorsky の値と一致することは興味ある事實である。

Table 10 [100]

	mA	H	def (m.m.)	I
1. The result observed at 740°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	135 259 390	1.019 1.956 2.945
2. The result at 500°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	118 224 336	0.891 1.691 2.536
3. The result at 250°	0.05 0.08 0.14	0.0069 0.0110 0.0190	112 176 294	0.846 1.329 2.219
4. The result at 150°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	65 130 205	0.491 0.982 1.548
5. The result at 100°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	48 99 153	0.362 0.747 1.155
6. The result at 10°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	26 60 100	0.218 0.504 0.840
7. The result at 10° rapidly cooled	0.04 0.07 0.11	0.0055 0.0096 0.0151	51 103 168	0.428 0.865 1.411

Table 11 [110]

	mA	H	def. (mm)	I
1. The result observed at 740°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	134 259 388	1.012 1.956 2.929
2. The result at 500°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	98 200 309	0.739 1.510 2.332
3. The result at 250°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	69 138 212	0.521 1.042 1.601
4. The result at 150°	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	56 111 171	0.423 0.838 1.291
5. The result at 10° rapidly cooled	0.04 0.08 0.12	0.0055 0.0110 0.0165	34 67 105	0.257 0.506 0.793

著者はまた高溫度に於ける磁消交流の振幅の影響を測定した。[110] 方向の鐵單結晶に就て一例を挙げれば Fig. 31 に示す通りであり、常溫に於ける影響は最も大で溫度の昇るに従ひ著しく減少し、臨界點の直下で零となる。

Table 12 [111]

	mA	H	def. (mm)	I
1. The result observed at 740°	0.04	0.0055	136	1.027
	0.08	0.0110	259	1.956
	0.12	0.0165	391	2.952
2. The result at 500°	0.04	0.0055	92	0.695
	0.08	0.0110	188	1.419
	0.12	0.0165	282	2.129
3. The result at 250°	0.04	0.0055	56	0.423
	0.08	0.0110	113	0.853
	0.12	0.0165	169	1.276
4. The result at 150°	0.04	0.0055	41	0.310
	0.08	0.0110	83	0.627
	0.12	0.0165	126	0.951
5. The result at 10° rapidly cooled	0.04	0.0055	25	0.189
	0.08	0.0110	50	0.378
	0.12	0.0165	74	0.559
	0.16	0.0220	101	0.763

Fig. 26 Magnetization-curves of iron single crystal in [100] direction at various temperatures.

Fig. 28 Magnetization-curves of iron single crystal in [111] direction at various temperatures.

Fig. 27 Magnetization-curves of iron single crystal in [110] direction at various temperatures.

Fig. 29 κ_0 -T curves of iron single crystals in three principal directions. Fig. 30 $\kappa_0[100]/\kappa_0[111]$ and $\kappa_0[100]/\kappa_0[110]$ at various temperatures.

Fig. 32 Magnetization-curves of nickel polycrystal at 330° and room temperature by the two methods of demagnetization.

Fig. 31 Magnetization-curves of iron single crystal in [110] direction at various temperatures by the two methods of demagnetization.

(B) ニッケル

交流磁消及び熱磁消によるニッケルの磁化曲線。

Fig. 32 及び Table

13はニッケルの場合に於ける測定結果を示す。但し交流振幅は10エルステッドである。

常温に於ける二つの方法によつて得られた磁化曲線は鉄の場合と同様であり、初磁化率は夫々 $\kappa_0 = 55.2$ と $\kappa_0 = 27.6$ となる。然るに 330° に於ける兩初磁化率の差は著しく小さく、磁気変態点の直下で零となる。

磁消交流の振幅と初磁化率との関係は Fig. 33 に示す如く、初磁化率 κ_0 は 55.2 より交流振幅の増大するに従ひ初めは急激に、後徐々に減少する。而して振幅 206 エルステッドに於ても尙減少の傾向を示してゐる。

次に温度によるニッケルの初磁化率の變化を述べよう。鉄の場合と同様、磁場 0.008 エルステッドを作用せしめて、交流磁消と熱磁消による I-T 曲線を求めた結果は Fig. 34 に示した。初磁化率は孰れも温度と共に上り、磁気変態点の直下より急に減少して零となる。ニッケルに於ては鉄の FeS に相當する變化は現はれない。

茲に注目すべき現象は臨界点より冷却する場合の I の増加の大なることである。而して常温に於ける磁化の増加は著しいが、磁場を取去れば、熱磁消する場合の初磁化だけ減少する。即ち見掛けの磁化率は増

大しても、眞の可逆的初磁化率は一定である。

Table 13 Nickel.

	mA	H	def. (mm)	I
1. The result observed at 20° demagne- tized by heating	0.04	0.0055	41	0.310
	0.08	0.0110	82	0.619
	0.12	0.0165	122	0.921
	0.16	0.0220	160	1.208
2. The result at 20° demagnetized by reversals	0.04	0.0055	21	0.159
	0.08	0.0110	43	0.325
	0.12	0.0165	60	0.453
	0.16	0.0220	82	0.619
3. The result at 330° demagnetized by heating	0.05	0.0069	94	0.710
	0.08	0.0110	167	1.261
	0.12	0.0165	248	1.872
	0.16	0.0220	320	2.416
4. The result at 330° demagnetized by reversals	0.04	0.0055	67	0.506
	0.08	0.0110	130	0.982
	0.12	0.0165	213	1.608
	0.16	0.0220

Fig. 33 Effect of the maximum alternating field on the magnetization-curves of nickel.

Fig. 35 Magnetization-curves of iron-nickel alloy containing 18.5% Fe at 500° and room temperature by two methods of demagnetization.

Fig. 34 I-T curves of nickel under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

(C) 18.5% Fe 及び 40% Feの鐵ニッケル合金

を行つて磁化曲線を測定した。常溫及び 500° に於ける結果は Fig. 35, 36 の兩圖に示し、又 Fig. 37, 38 の兩圖は I-T 曲線を示してゐる。Fig. 37 によれば、18.5% Fe を含む合金に於ては、兩磁消法による結果は約一致してゐる。又熱磁消による磁化は臨界點の直下まで始ど溫度

Fig. 36 Magnetization-curves of iron-nickel alloy containing 40% Fe at 500° and room temperature by two methods of demagnetization.

Fig. 37 I-T curves of iron-nickel alloy containing 18.5% Fe under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

に無關係であり、可逆的初磁化率は 209 である。

又この合金の磁歪は殆ど零であるが、交流磁消の振幅の影響も著しく小さい。然るに Fig. 38 に示す如く、40% Fe の合金では磁歪も大であるが交流振幅の影響も亦増大してゐる。要するに交流振幅の影響は磁歪の大小によるものと考へられる。

V. 結果の考察

(a) 初磁化度 I と磁場 H との關係を見るに $I-H$ 曲線は極めて低い磁場に於てのみ直線的で可逆的である。この事實は磁化が各磁區の磁化によるものと考へるには餘り小で

あるからこれを磁區の境界にある不安定なる原磁石群の微小な廻轉によるものと見做すことが寧ろ適當である。またこの考へは次に説明するが如く前記の種々複雑せる現象を解明するに便である。

(b) 前述の如く初磁化率は交流磁消の場合は熱磁消のときよりも著しく小である。尙交流振幅の増大するに従ひその差は初めは急激に、後徐々に増加して遂に一定

Fig. 38 I-T curves of iron-nickel alloy containing 40% Fe under a constant magnetizing field (0.008 Oerst).

の値に達する。又交流振幅の零の場合を外挿法によつて求むれば熱磁消の場合の磁化率と一致する。以上の事實は磁區境界に於ける不安定にして磁化し易き原子磁石の数が交流の攪亂作用の爲に磁區間に併吞せられて減少するによるものと考へられる。交流振幅が大で攪亂作用大なれば併吞せられる原子磁石の数を増加し、従て不安定なる原子磁石の数を減少して、磁化率の減少を來すものと説明することが出来る。故に攪亂作用のない場合即ち熱磁消の磁化率は眞の磁化率と與へるものと見るべきである。又實測によれば交流磁消の影響は磁歪の大小に關係する所大である。これは攪亂作用が原磁石の廻轉振動によるよりも磁歪による原子の直線振動の攪亂に基くことを示すものである。

(c) 今上記の如く初磁化率が磁區間の原子磁石によるものでなく、境界に於ける原子磁石群によるものとする。三主要軸の方向に於ける初磁化率 κ_0 の比は大體次の如く求めることが出来る。

今 κ_0 が磁區内の原子磁石の初めの廻轉によるものとすれば、各磁區能率の方向の磁化率は理論上これに垂直の方向の磁化率よりも著しく小なるべきであるが、若し初めの磁化が磁區境界層内にある不安定なる原子磁石によるものと考えれば磁區能率の方向が却てこれに垂直の方向よりも磁化し易いことは容易に諒解される (Fig. 39)。

例へば AA を二つの相隣れる磁區とし B をその境界にある原子磁石群を代表するものとする。B を初めの位置より少しく廻轉するとき B を初めの位置に戻さんとする偶力は始ど零であるから B は微小なる磁場 H の作用によつて容易に逆轉する。この場合に生ずる磁氣の變化は i を原子磁石 B の磁氣能率とすれば $2i$ となる。又磁場が AA に垂直に作用するとすれば B は直ちにこれに平行に向き磁氣の變化は i となる。故に磁區の境界に於ける原子磁石群に就ては磁場が磁區に平行に作用する場合の κ_0 は直角に作用する場合の κ_0 の 2 倍に等しい。扱て境界に於ける原子磁石の数が磁區の數に比例するものと假定すれば境界に於ける磁化の現象は磁區自身の磁化のそれと同様に取扱ふことが出来る。いま磁區能率の方向に於ける磁氣係数を $\kappa_{||}$ これに直角の方向に於ける磁氣係数を $\kappa_{\perp}$ とし、又棒狀試片の方向餘弦を l, m, n とし、鐵の 4 回軸の方向に於ける磁區數の分布を a, b, c とすれば

Fig. 39

又

$$\begin{aligned} I_x &= \{\kappa_{||} a + \kappa_{\perp} (b+c)\} H_x \\ I_y &= \{\kappa_{||} b + \kappa_{\perp} (c+a)\} H_y \\ I_z &= \{\kappa_{||} c + \kappa_{\perp} (a+b)\} H_z \end{aligned}$$

$$I = I_x l + I_y m + I_z n$$

$$= H \{ \kappa_{||} (al^2 + bm^2 + cn^2) + \kappa_{\perp} \{ a(m^2 + n^2) + b(n^2 + l^2) + c(l^2 + m^2) \} \}$$

$$\text{故に } \kappa_0 = \kappa_{||} (al^2 + bm^2 + cn^2)$$

$$+ \kappa_{\perp} \{ a(m^2 + n^2) + b(n^2 + l^2) + c(l^2 + m^2) \}$$

若し磁區方向の分布が一様であれば

$$\kappa_0 = \kappa_{||} + 2/3 \kappa_{\perp}$$

となり、方向に無關係となる。試片が球状の場合には a, b, c は互に異なる理由はないから初磁氣係数は方向に關係しない。然るに若し試片が夫々三主要軸の方向に向へる長い棒であれば磁區能率の方向は異なり得るのである。

$$\text{今 [100] 棒に於ては } \begin{cases} l=1, m=n=0, \\ a=1, b=c=0 \end{cases}$$

$$\text{[110] 棒に於ては } \begin{cases} l=\frac{1}{\sqrt{2}}, m=0, n=\frac{1}{\sqrt{2}} \\ a=c=\frac{1}{2}, b=0 \end{cases}$$

$$\text{[111] 棒に於ては } \begin{cases} l=m=n=\frac{1}{\sqrt{3}} \\ a=b=c=\frac{1}{3} \end{cases}$$

とすれば初磁化率の比は次の如くなる

$$\kappa_{[100]} : \kappa_{[110]} : \kappa_{[111]}$$

$$= \kappa_{||} : \frac{1}{2} (\kappa_{||} + \kappa_{\perp}) : \frac{1}{3} (\kappa_{||} + 2\kappa_{\perp})$$

$$= 1 : \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\kappa_{\perp}}{\kappa_{||}} \right) : \frac{1}{3} \left(1 + \frac{2\kappa_{\perp}}{\kappa_{||}} \right)$$

$\kappa_{||} = 2\kappa_{\perp}$ とすれば

$$\begin{aligned} \kappa_{[100]} : \kappa_{[110]} : \kappa_{[111]} &= 1 : \frac{3}{4} : \frac{2}{3} \\ &= 1 : \frac{1}{1.33} : \frac{1}{1.5} \end{aligned}$$

となり常溫に於ける比と多少異なるが 200° に於ける比と一致してゐる。

又無理な假定であるが $\kappa_{||} \gg \kappa_{\perp}$ とすれば

$$\kappa_{[100]} : \kappa_{[110]} : \kappa_{[111]} = 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}$$

となり外挿法による絶對零度の場合に於ける比と一致する。然し前記の計算は溫度に無關係であるからこの一致は偶然と考へられる。何れにしても上記の磁區能率の分布は近似的のものと考へるのが適當である。

(d) 次に初磁化率と溫度との關係を述べれば初磁化率は溫度の上昇と共に臨界點の直下まで増加して後急に減少し臨界點で零となる。一磁區に小なる磁場が作用すれば單に境界に於ける原子磁石のみならず磁區間の原子磁石も多少磁場の方向に向はんとして磁化される。磁區内の各原子磁石は初めは多少連續的に廻轉し、不安定とな

るに及んで急速な廻轉をして磁氣を増す⁽⁸⁾若し温度が上昇すれば或る磁区内の各原子磁石は熱的廻轉振動の爲に低温の場合よりも一層弱い磁場に於て急速廻轉をするものと考へられるから磁化率は温度と共に増加すべである。この熱的磁化の増加は全體の磁區を考ふれば温度に對して大體可逆的である。又一方磁區の大きさは温度の上昇と共に減少し全體として磁化し難くなる。この二つの相反する効果の爲磁化は實測の示すやうに温度の上昇するに従ひ始めは増加し臨界點の直下で極大に達して後急速に減少するのである。

次に一定の弱磁場に於て一旦變態點以上に熱して後徐々に冷却すれば I - T 曲線は變態點直下で急に増加しその後は略々一定の値をとる。若し冷却の途中で磁場を取去り或は再び加ふれば I は可逆的に變化する。この場合 I の減少は丁度熱磁消せるときの I の値に等しいことは注意すべき事實である。即ち冷却の際磁區は磁場の作用の許に熱的廻轉振動をなすため急速に廻轉して見掛上磁化の著しく増大するを見るが或る温度に於ける可逆的磁化率は熱磁消による加熱の場合と異ならない。換言すれば單に磁化の絶對値が熱的作用の爲に増加せるのみである。

終りに注意すべきは 18.5% Fe の Fe-Ni 合金の熱變化である。この合金は磁歪を有せず、且つその初磁化率は常溫に於ても極めて大で温度の上昇によつて餘り變化しない。これは磁區能率の方向が主に $[100]$ 軸と一致して容易に磁化される状態にあるによると考へられる。即ち常溫に於ける磁化率が既に著しく増大してゐるため温度が上昇するも更に増加し得ないと解せられる。

總 括

1. 微弱な磁場に於ける可逆初磁化率の研究は未だ行はれてゐない。よつて著者は大なる寸法比の試料、特に單結晶の寸法比 100 以上のものを作り、また無定位磁力計の感度を増して微弱磁場に於ける磁化曲線を測定した。

2. 初めに、一般に行はれて居る交流磁消法によつて鐵及び鐵單結晶 (寸法比 100) の磁化曲線を測定したが、その結果、初磁化率の可逆的磁場の範圍は非常に小で、 $[100]$ 方向では 0.008 エルステッド、 $[110]$ では 0.012、 $[111]$ では 0.018 以下である。また $\kappa_0[100]=26.6$ 、 $\kappa_0[110]=18.7$ 、 $\kappa_0[111]=13.9$ で、その比は $1:\frac{1}{1.42}:\frac{1}{1.79}$ である。尚、初磁化率は微小な歪によつても著しく變化することを示した。

3. 試片の寸法比が 10 以下になると、初磁化は磁化の方向に無關係であるが寸法比がこれを越えれば急に異方

性が現はれる。

4. 次に、熱磁消による鐵及び鐵單結晶の磁化曲線を測定したが、可逆初磁化率は交流磁消の場合に比して著しく大きく、その 3,4 倍にも達することを見出した。即ち、鐵單結晶に就ては、 $\kappa_0[100]=85.4$ 、 $\kappa_0[110]=46.8$ 、 $\kappa_0[111]=39.2$ で、その比は交流磁消の場合と多少違つて $1:\frac{1}{1.82}:\frac{1}{2.19}$ となつた。

5. 以上の二つの磁消法によつて初磁化率の値に著しい差異あることを見出した。即ち磁化率は交流の振幅に關係し、その振幅の零なる場合が熱磁消のときの磁化率に等しいことを見た。この交流振幅の減磁作用は磁歪的攪亂によつて磁區境界の不安定なる原子磁石の數の減少によるものと考へられる。

6. 交流の減磁作用は鐵の二主要軸 $[100]$ 、 $[110]$ の方向に於ては 30 エルステッド位まで減少してその後は不變なるも、 $[111]$ の方向に於ては交流振幅が 220 エルステッドに達しても尙多少減少の傾向を有つてゐる。ニッケルの多結晶の試片に就ても同様である。この現象は磁歪の攪亂作用に起因するのであるから磁歪の飽和値に達し易き $[100]$ 及び $[110]$ の方向では低磁場に於て磁化率は一定の値に達するも飽和値に達し難い $[111]$ の方向では 220 エルステッドの高磁場に達するも尙十分飽和しない。

7. 初磁化率の温度變化は交流磁消の場合には熱磁消の場合よりも急に増加するが兩者は臨界點の直下で合致する。又兩者の初磁化率の差は温度の高い程減少し臨界點の直下で零となる。

8. 三主要軸の方向に於ける鐵の棒狀試片の初磁化率は寸法比約 10 までは互に相等しく、これを越えればその差は急に増加し 70 以上では略一定の値をとる。熱磁消法によれば、例へば寸法比 100 の試片に於ては常溫のとき $\kappa_0[100]:\kappa_0[110]:\kappa_0[111]=1:\frac{1}{1.7}:\frac{1}{2.4}$ なるも、温度の上昇と共に著しく變化し、臨界點直下で $1:1:1$ となる。

9. 一定の微弱磁場の下に熱磁消による I - T 曲線を測定するに、冷却曲線は著しく加熱曲線の上にある。且つ或る温度まで冷却せるときの I は加熱の場合の I に比して著しく大であるが、磁場を取去るときの I の減少は可逆的でその温度に相當する加熱の場合の I に等しい。即ち加熱冷却せる試片の初磁化率は見掛上著しく變化してゐるが可逆初磁化率は加熱前と異ならない。この現象はニッケルに於て殊に著しい。

10. 磁歪を有しない 18.5% Fe の Fe-Ni 合金に於ては、初磁化率は常溫で既に大なる値 $\kappa_0=209$ を有し、温度の上昇によつて殆ど變化しない。

11. 一定の磁場に於ける I - T 曲線が加熱及び冷却の場合に 200° 以下に異常變化を呈するは不純物として鐵

(8) Honda & Ôkubo, Sci. Rep., 5 (1916), 153.

中に微量に存在する FeS の 130° に於ける變態に起因する。

終りに臨み終始御懇篤なる御指導を辱ふした本多光太

郎先生に對し謹みて厚く感謝の意を表する。又本實驗に熱心に援助された本郷澄男、奈良坂信夫兩君に對しても感謝の意を表する。

工具鋼の衝撃振り試験*

市 原 通 敏**

Mititosi Itihara: Impact Torsion Tests of Heat-Treated Tool Steels. This is the second report for the "Impact Torsion Test of Quenched and Tempered Tool Steels".⁽¹⁾ The Impact torsion values of heat-treated 10 kind tool steels were measured by changing tempering temperatures; the results are shown in Table I and Figs. 1 to 11. The impact values show some max. points between 150° and 200° in the tempering temperature, indicating that β -martensite is more tough than α . The amount of this toughness is generally small, except Cr-W steel as shown in Fig. 5. The max. values as reported by Luerssen and Green in America on carbon tool steels were not obtained for carbon steels, but Cr-W steel is found to be comparable with their result. The impact torsion test is a suitable method for measuring toughness of hard and brittle materials, the relation between Charpy Impact values being shown in Fig. 12.

(Received March 12, 1941)

I. 緒 論

本報告は前回報告せる衝撃振り試験に依る焼入焼戻工具鋼の粘り強さの研究⁽¹⁾の續報である。衝撃振り試験の方法及び特性について簡単に前回にのべた事を繰返してのべて置く。衝撃振り試験法は著者が前から行つてゐるのであるが、その方法としては径 7~10mm の試験片を用ひて高速に廻轉せしめ置いたはずみ車の慣性力で衝撃的に急に振り切るのであつて、その際測定するものは衝撃振り變形の Stress-Strain Diagram を主として測定する場合と、Diagram は測定せずに單にははずみ車の慣性力の變化から、試験片を振り切る際の勢力のみを測定する場合と二つある。この報告は後者であつて、焼入焼戻をした工具鋼の衝撃振りエネルギーを測定したものである。従つて Charpy 又は Izod 試験と似てゐる。然しそれと異なる點を挙げるならば、切欠のある試片では、硬い材料の有するところの僅かの粘さの區別は判別出来ないものであるが、本試験によるならばその點が好都合で、焼入工具鋼の如き非常に硬いがその粘さを求め度いと云ふ様な場合に適用して甚だ好結果を與へるのである。その理由は前回の報告にのべて置いたから省略する。前回の報告には二三の高炭素工具鋼について焼入して焼戻温度を種々變へた試験片の振り衝撃値を求めた。即ち焼戻

温度に對する粘さの曲線を求めて見た。その結果として焼戻温度 150~200° に粘さの山がある。然し米國の Luerssen 及び Green 兩氏の結果の様な非常な Toughness の山は得られなかつた。本報告は 10 種類の炭素並びに特殊工具鋼について、焼入して α 麻留田になつた試片を 50°, 100°, 150°... と高温度に焼戻したものについて振り衝撃値を測定して、焼戻温度に對する粘さの變化を求めたものである。

II. 實驗材料及び實驗の方法

實驗材料の種類分析等は Table 1 に示す通りである。2 種の瑞典炭素鋼、1 種の防彈鋼の他は安來製の工具鋼を用ひた。試験片の寸法は前回報告の通りで径 7mm × 平行部 17mm, 隅肉 $r=4$ mm に仕上げたものを用ひた。焼入爐は全部鹽浴爐を使用し、30 分間加熱した後食鹽水又は油中焼入を行つた。焼戻は水又は油煮を用ひた。

試験の方法を簡単に述べれば、上記の熱處理を終つた試験片を常溫で、前回の報告で詳しくのべたところの筆者の考案になる初打撃速度 1,000 r. p. m. にて 30 kg-m 式振り衝撃試験機に取りつけてから、はずみ車を 1,000 r. p. m. に廻轉を保ち、クラッチを引いて試片を振り切る。而してはずみ車の廻轉が初めの 1,000 から試片を切斷した爲 n r. p. m. に降下したとすればその時の振り衝撃値は次の式で計算出来る。

振り衝撃値 $= 0.005,48 I (1,000^2 - n^2) \text{ m} \cdot \text{kg}$
茲に I は、はずみ車の慣性能率である。

** 東北帝國大學工學部

* 本研究は昭和 13 年 10 月 29 日名古屋に於ける本學會第 4 回講演大會に發表。

(1) 本誌 2 (1938), 552.