研 究

強磁性金屬及び合金のヤング弾性率と その磁化に伴ふ變化(ΔE 効果) 第 8 報) 鐵-ニッケル合金の ΔE 効果*

山 本 美 喜 雄**

Mikio Yamamoto : Young's Modulus of Elasticity and Its Change with Magnetization (the ΔE -effect) in Ferromagnetic Metals and Alloys. Part VIII, The ΔE -effect in Iron-Nickel Alloys. The ΔE -effect (change of Young's modulus with magnetization) in annealed iron-nickel alloys has been measured in detail by the method of magnetostrictive oscillation. It was found that Young's modulus in alloys of the α -solid-solution range (0~28 percent nickel) was not affected by the weak magnetic field of several oersteds. The ΔE -effect in pure iron (Armco iron) and alloys containing 60~80 percent nickel shows a small, negative-minimum at the weak field where the magnetization curve shows an inflexion. Further, the ΔE -effect in pure iron and nickel (Mond nickel) and an alloy containing 80 percent nickel shows a secondary and somewhat conspicuous increase, while the effect in alloys containing 5, 30 and 90 percent nickel shows a slight decrease, both preceding to the saturation. The saturation values of the ΔE -effect were found to be all positive over the whole composition range of alloys, as expected from a theoretical consideration. These values are, at most, 0.3 percent in the α -solid-solution range, while they are generally of the order of several percent in the γ -solid-solution range (28~100 percent nickel).

(Received June 8, 1943)

I. 緒 論

本報告は強磁性金屬及び合金のヤング弾性率とそれの磁化に伴ふ變化 (ΔE 効果) に關する研究⁽¹⁾ の第 8 報であつて, 鐵-ニッケル合金の焼鈍状態に於ける ΔE 効果に就いて行つた動的測定の結果を記述するものである。本合金系の磁化しない状態に於けるヤング率に就いては既に第 5 報⁽¹⁾ に於て報告した。

鐵-ニッケル合金の ΔE 効果に就いては既に多數の研究が爲されて居る。その最初のものは恐らく 1906 年に發表された本多, 寺田⁽²⁾ 兩博士の研究であらう⁽³⁾。兩氏

は 28.7, 50.7 及び 70.3% Ni の 3 種の合金に就いて靜的な延伸法を用ひて測定し, 合金の組成及び試料に加へた張力の大きさによつて ΔE 効果の大きさが著しく異なることを見出した。その變化の様子は Fig. 1 に示す如くであつて⁽⁴⁾, 張力が大になると共に ΔE 効果の飽和値 ($\Delta E/E$)_∞ は著しく減少するが, 併し 51% Ni の合金の ($\Delta E/E$)_∞ は常に他の合金に於けるよりも大きい。その後, 1926 年に至つて本多, 田中⁽⁵⁾ 兩氏が, 靜的な撓曲法を用ひ, 本合金系 of 全組成範圍に互つて測定を行つた。この研究は本多-寺田の實驗から推知される ($\Delta E/E$)_∞ 對組成曲線の 50% Ni 附近に於ける極大の存在を一層確實にした外約 80% Ni を中心として極小が存在することを示し, 更に 15~25% Ni の組成範圍に於て負の小さな ΔE 効果を見出した (Fig. 2)。

** 東北帝國大學金屬材料研究所

* 昭和 18 年 4 月本會第 13 回東京大會に於て發表。

(1) 第 1 報, 東北帝大理科報告, 27 (1938), 115; 本誌, 2 (1938), 495; 第 2 報, 本誌, 5 (1941), 167; 第 3 報, 本誌, 6 (1942), 249; 第 4 報, 本誌, 6 (1942), 331; 第 5 報, 本誌, 6 (1942), 401; 第 6 報, 本誌, 6 (1942), 581; 第 7 報, 本誌, 7 (1943), 346。

(2) 本多, 寺田, J. Coll. Sci., Tokyo Imp. Univ., 21 (1906), Art. 4; Phil. Mag., 13 (1907), 36。

(3) 純鐵及び純ニッケルの ΔE 効果に就いては更に古くから研究がある。それ等の文獻に就いては第 1~3 報を参照されたい。

(4) 原論文は測定値として $\delta E/EH = (E_H - E_0)/E_H$, 即ちヤング率の變化の磁化された状態のヤング率に對する割合, を與へて居るが, 著者はこれを $\Delta E/E = (E_H - E_0)/E_0$, 即ち磁化零の状態のヤング率に對する割合, に換算した。尚, Fig. 1 の曲線は後の測定 (本研究を含む) に依つて確實にされた事實を考慮に入れて描記したものである。

(5) 本多, 田中, 東北帝大理科報告, 15 (1926), 1。

1930 年頃からは専ら動的な振動法を用いて測定が行はれる様になったが、まづ v. Auwers⁽⁶⁾ はパーマロイ⁽⁷⁾ の $(\Delta E/E)_\infty$ を電磁的勵振法によつて測定して 1.4% なる

Fig. 1 Early data of the ΔE -effect in iron-nickel alloys, obtained by Honda and Tanaka. Later data by Honda and Tanaka² are also shown for comparison.

多-田中の静的測定の結果と定性的に一致して居るが、併しそれ以下の組成範囲に於ては極めて著しい相違を示す。即ち、15~25% Ni の組成範囲に於て本多-田中が

Fig. 2 Saturation values of the ΔE -effect of iron-nickel alloys, measured statically by Honda and Tanaka and dynamically by Nakamura.

−0.005% 程度の負値を得たに對して中村は +0.5% 程度の正値を與へ、又 5% Ni に於ては前者の +0.4% に對

(6) O. v. Auwers, Ann. Physik, **17** (1933), 83.

(7) 正確な組成は不明であるが、恐らく 78% Ni に近いと思はれる (Fig. 20 参照).

(8) 中村, 東北帝大理科報告, **24** (1935), 303; Z. Phys., **94** (1935), 707; 應用物理, **4** (1935), 397.

して後者の −0.5% が對應する。Siegel 及び Rosin⁽⁹⁾ の簡単な報告によれば, 81% Ni の合金の $(\Delta E/E)_\infty$ は 0.26% である。又, v. Auwers と同様の方法を用いて, Engler⁽¹⁰⁾ は 93, 78.5, 50 及び 42% Ni の 4 種の合金の $(\Delta E/E)_\infty$ を測定してそれぞれ 7.8, 1.4, 7.8 及び 3.3% なる値を得た⁽¹¹⁾。最後に、極く最近 Williams, Bozorth 及び Christensen⁽¹²⁾ が壓電氣的勵振法によつて 68% Ni の合金の ΔE 効果を測定した結果によれば、その飽和値は 4.9% であり、そして低磁化範囲に於て −0.2% 程度の負の ΔE 効果を現はす。

以上, Fe-Ni 合金の焼鈍状態に於ける ΔE 効果に關する従來の研究結果の大要を述べたが、これ等の研究に於ける焼鈍は總て 1000° 程度の高溫に數時間加熱した後徐冷したものである。この様な條件の熱處理によつて得られる Fe-Ni 合金の組織は、約 28% Ni 以下の組成に於ては體心立方型の結晶格子をもつ α 固溶體であり、そしてそれ以上の組成に於ては面心立方型の γ 固溶體である⁽¹³⁾。又、上記の研究の中、本合金系の全組成範囲に互つて系統的に測定したものは僅かに本多、田中兩氏及び中村博士に依るもののみであつて、他は總て γ 固溶體範囲内の合金に就いて行はれたものである。従つて、従來の研究結果を綜合すれば、 γ 固溶體範囲の ΔE 効果に就いては比較的判然とした知識が得られて居るが、併し α 固溶體範囲のそれに就いてはそれ程確實でない。即ち、まづ確實な事實は約 30% Ni を除いた γ 範囲の ΔE 効果の飽和値は正であり、そしてそれが 50 及び 80% Ni の附近に於てそれぞれ極大及び極小を現はすことである。第 2 に、0~30% Ni の組成範囲に於ける ΔE 効果の飽和値は著しく小さく、高々 0.5% 程度の大きさを示すに過ぎないことはたしかであらう。併し乍ら、その符號は、前述の如く、本多-田中及び中村の測定結果に於て正或ひは負として現れて居る。

ところで、磁區概念を基礎とする ΔE 効果の説明に従へば、その飽和値が負となることはあり得ない。 ΔE 効

(9) S. Siegel, S. Rosin, Phys. Rev., **49** (1936), 863. これには測定方法に關する記述が全くない。併し乍ら、Siegel とその協同研究者に依る他の研究に於ては常に壓電氣的勵振法を用ひて居るから、この研究も恐らく同一方法に依るものであらう。

(10) O. Engler, Ann. Physik, **31** (1938), 145.

(11) 原著には測定値が $(E_\infty - E_0)/E_\infty$ の形で與へられて居るが、著者はこれを $(\Delta E/E)_\infty = (E_\infty - E_0)/E_0$ に換算した。

(12) H. T. Williams, R. M. Bozorth, H. Christensen, Phys. Rev., **59** (1941), 1005.

(13) 例へば, M. Hansen, Der Aufbau der Zweistofflegierungen, Berlin (1936), S. 696; 竹内, 本誌, **6** (1942), 361 参照。

果の直接の起因は磁歪, 乃至それが歪力によつて變化することにある。磁歪の歪力による變化は必ず歪力による弾性的歪を助長する様に起るが, 併しそれは磁区の磁化方向が固定される様な強磁場に於ては零となる。即ち, その様な強磁場に於ては歪力によつて通常の弾性的歪のみが起るが, 磁場がないか或はそれが弱い場合にはその外に附加的な歪が起り, 従つて全體の歪は磁場の強さ, 乃至磁化の強さ, によつて相違し, 而もそれは磁氣的飽和の状態に於けるよりも消磁された状態に於て大である。換言すれば, 弾性率は磁化によつて變化し (ΔE 効果が起り), そして磁氣的飽和状態に於ては消磁状態に於けるよりも大になる。即ち, ΔE 効果の飽和値は正でなければならない。實際に於て, これ迄 Fe-Ni 系以外の他の合金及び純金屬に就いて行はれた測定の結果によれば ($\Delta E/E$) $_{\infty}$ 乃至強磁場に於ける $\Delta E/E$ の値は常に正であり⁽¹⁴⁾, 又 Fe-Ni 系の約 30% Ni 以上の組成範囲に於ける ΔE 効果の飽和値も, 前述の如く, この例に洩れない。然るに, 本多・田中及び中村の兩測定は Fe-Ni 合金

の低ニッケル量に於てのみ負の ($\Delta E/E$) $_{\infty}$ を得たが, これは全くこの組成範囲に於ける如き小さな ΔE 効果 (高々 0.5% 程

度) を測定するにはそれ等の測定の正確度が不足して居つたことに原因すると考へられる⁽¹⁵⁾。従つて, 測定装置の感度が充分であれば, この組成範囲の合金の ($\Delta E/E$) $_{\infty}$ も總て正として観測されるものと豫想される。この豫想をたしかめて従來の測定結果の矛盾を明らかにするのが本研究の第 1 の主要目的である。

次に, 上述した ΔE 効果の説明によればその飽和値は必ず正であるべきであるが, 併しそれが飽和に達する迄の経過は必ずしも常に正である必要はない。例へば, ヤング率がまづ減少して (弱磁場に於て ΔE 効果が負となつて), 極小を現はした後に増加し, そして究局に於て初値以上の値に到達してもよい。この様な現象が實際に現はれることは既に古く本多・寺田⁽²⁾ のニッケルの ΔE 効果の静的方法による測定によつて知られて居るが, 最近著者は同じ現象が Ni-Cu 及び Fe-Co 系の或組成範囲並に純鐵に於ても認められることを動的 방법에依る測定に於て示した⁽¹⁶⁾。又, Fe-Ni 系に就いては, 前記の如く, Williams, Bozorth 及び Christensen⁽¹²⁾ が 68% Ni の合金に於て觀察して居る。この弱磁場に於ける負の ΔE

効果は, 現象論的に云へば, その磁場範囲に於て磁歪の符號或は磁化の強さの歪力係数の符號が歪力によつて變化することゝ相關關係をもつのであつて, 従つてそのデータから後者の現象を豫想或は計算し得る點に於て興味がある⁽¹⁷⁾。この現象が Fe-Ni 系に於ては如何に現はれるかを調べるのが本研究の第 2 の主要目的である。

II. 測定結果とその考察

(1) 測定方法及び試料

本研究に於て用ひた測定方法は, 前報⁽¹⁾ に於けると同様, 動的な磁歪振動法である。その原理, 實驗裝置, 測定の手続き, 等に就いては, 第 1, 2, 及び 4 報に説明を與へてあるからこゝには記述しない。

測定試料は 0, 5, 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 及び 100% Ni (何れも秤量組成) の 13 種類の純金屬及び合金で作つた直徑 4mm, 長さ 10cm の圓棒棒である⁽¹⁸⁾。これ等は Table 1 に示すところの組成をもつアームコ鐵とモンド・ニッケルとを配合し, タンマン爐を

Table 1 Chemical analysis (in weight percent) of the pure metals used.

Metal	Fe	Co	C	P	S	Si	Al	Mn	Cu
Armco iron	—	—	0.03	0.016	0.032	0.03	—	0.06	—
Mond nickel	0.10	Trace	0.037	Trace	0.019	0.006	Trace	Trace	0.013

用ひてアルミナの坩堝内で水素を通じ乍ら熔解混和し, 直徑 5mm の金型に鑄造した後旋盤によつて切削仕上したものであつて, その正確な寸法は Table 2 に掲げてある。熱處理としては, 始め水素氣流中に於て 1000° で 1 時間焼鈍し 後真空中に於て同一温度で 1 時間 40 分焼鈍した。従つて, 緒論に於て述べたところによつて, これ等の試料の中 0~20% Ni の組成範囲のものゝ組織は α 固溶體であり, そして 30~100% Ni の範囲のものゝそれは γ 固溶體である。

(2) 一般的な磁性

まづ, 上記試料の一般的な磁性を知る爲に, 初帯磁率と約 900 Oe 迄の磁場範囲に於ける磁化曲線を, 別々に, 弾動電流計法に依つて測定した。但し, Table 2 から知られる如く試料の寸法比が相當に小さいから (約 25), 初帯磁率の測定は餘り正確なものではない。初帯磁率 κ_0 及び最高測定磁場 $H_{\max}$ に於ける磁化の強さ $I_{\max}$ の測定値は Table 2 に掲げてあるが, それ等と組成との關係は Fig. 3 及び 4 に示す如くである。尙, 磁化曲線の経過か

(14) 本多, 田中⁽⁵⁾ 兩氏が純コバルトに就いて小さな負値を得たのが唯一の例外である。

(15) この結論に對しては種々の證據がある。

(16) 第 3 報 (Ni-Cu) 及び第 6 報 (Fe 及び Fe-Co)。

(17) 弱磁場に於ける負の ΔE 効果に就いては別の報告に於て詳しく考察する豫定である。

(18) これ等の試料の中, 純鐵のみは第 6 報に於ける Fe-Co 合金の試料と共通である。

Table 2 Composition and dimensions of specimens used, and miscellaneous measured data. $(\Delta E/E)_{\max}$ and $I_{\max}$ denote, respectively, the relative change of Young's modulus with magnetization and the intensity of magnetization at the highest magnetic field applied, $H_{\max}$. $(\Delta E/E)_{-}$ is the negative minimum value of the ΔE -effect at weak fields, κ_0 the initial susceptibility, and E Young's modulus at null magnetization. The data of saturation-magnetostriction, λ_{∞} , measured by Masiyama, are also tabulated.

Specimen No.	Composition % Ni	Length cm	Diameter cm	$(\Delta E/E)_{\max} \times 10^2$	$I_{\max}$ C. G. S.	$H_{\max}$ Oe	$(\Delta E/E)_{-} \times 10^2$	κ_0	$E \times 10^{-12}$ dynes/cm ²	$\lambda_{\infty} \times 10^6$
1	0	9.990	0.3939	0.2336	1674	844	-0.031	7.2	2.091	-8.8
2	5	10.010	0.3964	0.1589	1715	690	—	13	2.003	13.2*
3	10	10.015	0.3964	0.3044	1600	849	—	14	1.899	24.3
4	20	9.995	0.3968	0.1962	1481	701	—	5.2	1.703	32.8
5	30	10.020	0.3966	0.2499	284	909	—	32	1.443	—
6	35	10.010	0.3973	4.20	981	877	—	74	1.237	22.0*
7	40	10.010	0.3960	9.23	1254	865	—	1.9	0.9720	25.4
8	50	10.010	0.3963	9.31	1258	864	—	112	1.080	26.5
9	60	10.020	0.3969	5.35	1174	868	-0.18	82	1.310	22.6
10	70	10.025	0.3766	4.24	1047	878	-0.10	101	1.586	16.0
11	80	10.010	0.3878	0.959	858	884	-0.015	142	1.922	5.5
12	90	10.075	0.3878	2.774	684	892	—	52	1.982	-12.7
13	100	10.015	0.3972	11.82	480	900	—	22	1.749	-40.2

* An interpolated value.

Fig. 3 Relation between the initial susceptibility and composition of iron-nickel alloys.

Fig. 4 Relation between the intensity of magnetization at about 900 oersteds and composition of iron-nickel alloys.

ら見て⁽¹⁹⁾,これ等の $I_{\max}$ の値は總て飽和磁化 I_{∞} に實際上等しい。

α 固溶體範圍に於ける初帯磁率は小さく(14以下), 5~10 Ni の組成を中心として低く平な極大を現はす。 γ 固溶體範圍に入ると,初帯磁率はまづ急速に増大して 40~50% Ni の組成に於て第1の極大(140程度)に達するが,一旦 60% Ni を中心として極小を作り,續いて 80~85% Ni に於て第2の前よりも高い極大を示した後純ニッケルに至る迄急速に減少する (Fig. 3)。

次に,鐵の飽和磁化はニッケルの添加によつて一旦少しく増大した後減少し,更に α 及び γ の兩固溶體の境界に至ると共に急速に減少して,こゝに深い谷を作る。 γ 固溶體範圍に入つて急速に増大した飽和磁化は 40~50% Ni に於て極大に達した後次第に減少して純ニッケルに至る (Fig. 4)。

(3) ΔE 効果と磁場との關係

ΔE 効果に関する測定値は Table 3 に纏めて掲げてある。この表には磁場として外部磁場 H_{ex} が與へてあるが,併し本報に於て單に磁場 H と云ふ場合には總て有効磁場を意味する。まづ, ΔE 効果と磁場との關係に就いて述べよう。

(a) α 固溶體範圍

アームコ鐵並に 5, 10 及び 20% Ni の組成の合金の $(\Delta E/E-H)$ 曲線は纏めて Fig. 5 に示されて居る。これ等の金屬及び合金の ΔE 効果は,その経過の詳細に於てはそれぞれ異なるが,最初の數 Oe 程度の磁場範圍に於て零である點に於て互に一致して居る (特に Fig. 5

(19) 磁化曲線は示してないが, Table 3 に磁化の強さと外部磁場の關係を與へてある。

Table 3 Experimental data of the ΔE -effect in iron-nickel alloys. H_{ex} denotes the external magnetic field, $\Delta E/E$ the change of Young's modulus with magnetization, relative to that at null magnetization, and I the intensity of magnetization. The data for pure iron (No. 1) have previously been reported (this journal, 6 (1942), 581).

No. 2. 5% Ni-Fe			No. 3. 10% Ni-Fe			No. 4. 20% Ni-Fe			No. 5. 30% Ni-Fe		
H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.
1.54	0.0000	15	1.25	-0.0013	13	1.86	+0.0004	6	1.86	0.0046	27
2.15	0.0000	22	1.89	0.0000	21	2.47	0.0000	9	4.34	0.0155	68
2.77	0.0000	30	2.78	0.0009	30	3.38	-0.0004	12	5.54	0.0246	88
3.39	0.0009	39	3.69	0.0040	41	4.31	-0.0008	16	6.75	0.0385	99
4.30	0.0014	51	4.93	0.0065	59	5.56	+0.0004	22	9.22	0.0676	113
5.22	0.0014	64	6.16	0.0070	77	6.76	+0.0004	28	12.36	0.0980	127
6.18	0.0014	79	7.99	0.0083	104	8.61	-0.0004	39	15.50	0.1212	136
7.41	0.0014	100	9.22	0.0087	124	11.13	-0.0004	54	18.70	0.1384	146
8.92	0.0014	125	12.30	0.0104	178	13.41	+0.0023	69	24.72	0.1629	159
10.64	0.0014	157	15.38	0.0131	231	21.10	+0.0067	125	30.81	0.1849	169
12.30	0.0060	189	18.63	0.0174	289	24.85	+0.0082	159	36.90	0.1998	177
14.14	0.0083	224	22.14	0.0231	351	30.87	+0.0110	217	46.74	0.2195	186
16.11	0.0101	261	26.57	0.0296	427	36.47	+0.0114	277	61.5	0.2353	196
18.57	0.0129	313	31.36	0.0388	504	43.36	+0.0141	353	80.0	0.2421	205
21.89	0.0156	380	37.27	0.0527	598	53.01	+0.0231	454	98.4	0.2512	211
24.66	0.0198	434	43.66	0.0697	695	61.8	+0.0341	541	123.0	0.2576	218
27.74	0.0244	493	53.38	0.0976	825	73.9	+0.0428	657	153.8	0.2576	226
33.89	0.0294	612	61.5	0.1154	921	89.8	+0.0589	780	184.5	0.2596	231
39.36	0.0376	720	76.3	0.1529	1062	104.6	+0.0671	873	250.9	0.2645	241
43.05	0.0409	786	92.2	0.1812	1172	123.0	+0.0828	967	375.2	0.2583	253
49.51	0.0546	900	113.8	0.2069	1270	147.6	+0.1001	1067	492.0	0.2564	262
63.0	0.0679	1096	135.3	0.2221	1335	178.4	+0.1138	1153	615	0.2528	270
74.4	0.0840	1221	159.9	0.2360	1392	215.2	+0.1240	1225	769	0.2506	279
89.8	0.1157	1321	190.6	0.2470	1436	242.9	+0.1315	1263	922	0.2499	284
110.7	0.1322	1405	227.6	0.2586	1472	279.8	+0.1378	1303			
129.2	0.1377	1454	276.8	0.2648	1503	313.6	+0.1440	1335			
153.8	0.1487	1501	338.2	0.2761	1531	381.3	+0.1542	1379			
184.5	0.1524	1541	399.8	0.2852	1548	492.0	+0.1676	1423			
221.4	0.1607	1580	492.0	0.2922	1564	615	+0.1809	1456			
252.2	0.1625	1607	615	0.2983	1580	769	+0.1962	1481			
319.8	0.1616	1650	769	0.3018	1592						
375.2	0.1607	1676	922	0.3044	1600						
504.3	0.1598	1704									
615	0.1589	1711									
769	0.1589	1715									

No. 6. 35% Ni-Fe			No. 7. 40% Ni-Fe			No. 8. 50% Ni-Fe			No. 9. 60% Ni-Fe		
H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.
6.15	0.06	118	6.09	0.12	126	7.38	0.23	154	1.24	-0.03	20
9.22	0.10	179	9.35	0.17	197	8.67	0.28	182	1.84	-0.03	31
12.30	0.08	244	13.53	0.23	285	10.15	0.39	216	3.08	-0.05	52
15.99	0.14	315	16.05	0.30	338	13.22	0.50	285	4.62	-0.07	83
19.06	0.19	380	19.37	0.43	413	15.38	0.57	334	6.15	-0.13	114
25.22	0.26	492	25.22	0.67	538	18.45	0.86	399	9.29	-0.16	180
31.36	0.53	597	31.67	1.05	672	21.52	1.13	462	13.04	-0.18	260
37.52	0.75	687	37.52	1.94	789	25.22	1.67	543	15.19	-0.11	306
43.66	1.04	766	43.66	2.84	899	28.29	2.30	604	17.16	0.00	348
49.82	1.32	826	49.82	3.75	993	31.98	2.79	677	21.46	0.23	438
55.96	1.68	876	56.58	4.33	1077	36.90	3.69	763	25.22	0.56	513
62.1	2.10	909	64.6	5.21	1143	43.05	4.73	860	31.36	1.16	636
73.8	2.62	939	76.9	6.15	1190	52.28	5.84	986	36.28	1.78	724
86.1	2.94	951	92.2	7.12	1216	61.5	6.58	1074	43.05	2.53	832
104.6	3.32	961	107.6	7.52	1228	73.8	7.26	1147	52.89	3.40	958
123.0	3.53	965	123.0	7.78	1233	86.1	7.63	1179	61.5	3.91	1035
178.4	3.85	970	147.6	8.21	1239	104.6	8.14	1202	70.7	4.32	1089
209.1	3.95	972	178.4	8.58	1242	123.0	8.38	1212	95.3	4.72	1136
246.0	4.02	974	209.1	8.75	1246	153.8	8.59	1224	123.0	4.94	1151
313.6	4.09	976	246.0	8.84	1249	184.5	8.87	1229	181.4	5.18	1167
381.3	4.13	978	307.5	8.96	1251	215.2	8.93	1233	276.8	5.28	1173
461.2	4.17	979	369.0	9.08	1253	276.8	9.10	1241	369.0	5.32	1174
553.5	4.18	980	461.2	9.11	1254	369.0	9.16	1247	492.0	5.35	1174
676	4.20	981	553.5	9.16	1254	492.0	9.24	1253	615	5.36	1174
800	4.20	981	676	9.21	1254	615	9.28	1257	769	5.35	1174
922	4.20	981	800	9.22	1254	769	9.30	1258	922	5.35	1174
			922	9.23	1254	922	9.31	1258			

Table 3 (Continued)

No. 10. 70% Ni-Fe			No. 11. 80% Ni-Fe			No. 12. 90% Ni-Fe			No. 13. 100% Ni-Fe		
H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.	H_{ex} Oe	$\Delta E/E$ %	I C. G. S.
2.16	-0.03	43	2.16	-0.006	44	2.48	0.027	53	3.08	1.38	57
3.08	-0.03	63	3.10	-0.008	64	3.72	0.050	81	4.09	2.46	76
4.60	-0.06	98	5.17	-0.011	109	4.98	0.077	109	6.15	2.90	117
6.03	-0.06	129	6.89	-0.015	146	6.03	0.123	133	7.98	3.50	152
9.16	-0.10	199	8.80	-0.013	188	9.22	0.305	205	10.21	4.13	197
12.61	0.00	279	11.68	-0.009	251	12.92	0.615	284	11.68	4.50	220
15.38	0.10	343	15.38	0.035	333	15.99	0.867	342	13.28	5.25	249
18.45	0.34	411	18.45	0.098	400	19.06	1.148	400	15.38	5.80	282
24.60	0.86	546	21.52	0.147	468	22.76	1.466	456	18.45	6.79	319
30.75	1.49	671	25.83	0.241	560	25.22	1.603	488	21.52	7.51	344
36.16	2.09	770	28.90	0.335	621	31.36	1.943	551	23.92	8.09	357
44.28	2.82	881	32.60	0.436	681	36.90	2.135	585	30.75	8.87	379
54.74	3.31	968	38.13	0.543	739	43.05	2.276	610	38.74	9.37	396
73.2	3.73	1008	44.28	0.616	778	55.04	2.429	634	47.97	9.72	408
98.4	3.91	1022	55.35	0.664	808	73.2	2.555	651	60.27	10.01	419
123.0	4.01	1032	86.7	0.725	831	93.5	2.641	660	71.3	10.10	427
184.5	4.14	1041	123.0	0.747	842	123.0	2.692	668	84.9	10.19	435
246.0	4.16	1043	184.5	0.775	852	184.5	2.759	673	101.5	10.41	443
319.8	4.17	1044	246.0	0.784	855	246.0	2.770	676	123.0	10.49	451
430.5	4.19	1047	338.2	0.810	857	307.5	2.774	678	141.4	10.59	454
602.7	4.24	1047	430.5	0.850	858	399.8	2.786	680	159.9	10.80	462
769	4.24	1047	492.0	0.889	858	492.0	2.786	682	184.5	10.83	468
922	4.24	1047	553.5	0.919	858	615	2.790	683	215.2	11.15	470
			615	0.936	858	769	2.782	684	246.0	11.31	471
			713	0.950	858	922	2.774	684	276.8	11.45	472
			800	0.957	858				307.5	11.55	473
			922	0.959	858				369.0	11.63	474
									430.5	11.74	477
									522.8	11.76	478
									615	11.79	479
									707	11.81	480
									800	11.82	480
									922	11.82	480

Fig. 5 $\Delta E/E$ - H curves of iron-nickel alloys in the α -solid-solution range and of 30 percent nickel.

の附圖を見られたい). このことは, Fig. 6 に示した弱磁場範囲の磁化曲線から知られる如く, その初帯磁率が小であることに對應して居る.

まづ, アームコ鐵のヤング率は約 30 Oe 以下の磁場に依つては全く影響されないが, それ以上に磁場が増加するとまづ減少して, 負の ΔE 効果を現はし, 約 40 Oe の磁場に於て極小に達した後始めて急速に増大する. その後, 磁場が高くなるに従ひヤング率の増加の割合は次第に減少して, 約 400 Oe に於て ΔE 効果は一旦一定の値に接近するが, 併し引續き稍々著しい第 2 次の増加を示した後約 650 Oe に至つて始めて飽和する.

今述べた ΔE 効果の弱磁場に於ける負の極小及び飽和直前の第 2 次増加は 5% Ni の組成の合金に於て

Fig. 6 Magnetization curves at weak fields of iron-nickel alloys in the α -solid-solution range and of 30 percent nickel.

Fig. 7 $\Delta E/E-H$ curves of iron-nickel alloys containing 30, 35, 40 and 50 percent nickel.

Fig. 8 $\Delta E/E-H$ curves of iron-nickel alloys containing 60, 70, 80, 90 and 100 percent nickel.

は最早認められない。この合金のヤング率も約 30 Oe 以下の磁場に依つては殆ど全く變化しないが、それ以上に磁場が高くなると共に増大してゆく。併し乍ら、一旦増大したヤング率は磁場が約 200 Oe を超えると極めて僅か乍ら緩やかに減少して、約 500 Oe に至つて一定の値に達する。この中間磁場範囲に於ける ΔE 効果の減少は、後述する如く、 γ 固溶體範囲の 30 及び 90 % Ni の兩合金に於ても認められる。

10 % Ni の合金の ΔE 効果は約 1.5 Oe の比較的低い磁場から起り始めるが、併し又 900 Oe の高磁場に至つても猶僅か乍ら増加しつゝある。この ΔE 効果の飽和の困難は 20 % Ni の組成に於て一層著しく現はれるが、その上この合金のヤング率は最初 9 Oe の相當高い磁場に至る迄變化しない。

この二つの特徴は 20 % Ni の合金の磁化の飽和が比較的困難であること (Table 3 参照) 及び初帯磁率が特に小さいこと (Fig. 3 及び 6) と完全に對應する。

(b) γ 固溶體範囲

γ 固溶體範囲に屬する合金の ($\Delta E/E-H$) 曲線は Fig. 7 及び 8 に示されて居る。猶、その弱磁場範囲に於ける経過を別に Fig. 9 及び 10 に示した。これ等の曲線の経過は大體に於て相似であつて、 ΔE 効果は弱磁場に於て急速に増大した後磁場が増加すると共に次第に飽和値に近づくことを示す。この ($\Delta E/E-H$) 曲線の一般的経過は前述の α 固溶體範囲の合金に於ても全く同様である。たゞ、60, 70, 及び 80 % Ni の 3 種の合金に於ては弱磁場に於て小さな負の ΔE 効果が認められる (Fig. 10)。

30 % Ni の合金の ($\Delta E/E-H$) 曲線は別に Fig. 5 に擴大して示してある。その ΔE 効果は、 α 固溶體範囲の合金のそれに比較すると低い磁場に於て既に起り始めるが、併しその増大仕方は γ 固溶體範囲の他の合金の場合に比べては極めて緩やかである (Fig. 9)。これはその初帯磁率が γ 範囲の他の合金のそれに比べて小であることに對應する。更に、この合金の ΔE 効果の第 2 の特徴は弱磁場に

於て急速に増大した後中間磁場範圍に於て僅か乍ら減少して始めて飽和値に達することである。この ΔE 効果の中間磁場範圍に於ける減少は又 90% Ni の合金に於て極めて微小乍ら認められる (Table 2 参照)。

Fig. 9 $\Delta E/E-H$ curves at weak fields of iron-nickel alloys containing 30, 35, 40 and 50 percent nickel.

Fig. 1 $\Delta E/E-H$ curves at weak fields of iron-nickel alloys containing 60, 70, 80, 90 and 100 percent nickel.

Fig. 11 $\Delta E/E-H$ curve of iron-nickel alloy containing 80 percent nickel.

80% Ni の合金の $(\Delta E/E-H)$ 曲線は特別に Fig. 11 に擴大して示してある。この曲線は、既述の如く、弱磁場に於て小さな負の極小を現はすが、その上飽和前に於て第2次の稍々著しい上昇を示す。この ΔE 効果の第2次増加は純ニッケルに於て一層著しく現はれる (Fig. 8)。

既に第2及び3報に於て述べた如く、 ΔE 効果の飽和前に於ける第2次増加は、單結晶の種々の結晶學的方向に於ける ΔE 効果の飽和直前に於ける急激な増加が多結晶に於ては空間的に平均されて觀察される結果磁氣異方性の爲に廣い磁場範圍に亘つて現はれるものであると考へられる。然らば、磁氣異方性が小である程、即ち磁氣的飽和が低い磁場で起る程、この現象の起る磁場範圍は低磁場に移行すると共に狹小になる筈である。實際、それは Ni-Cu 合金に於て認められたところであり⁽²⁰⁾、又本研究に於ける純鐵と純ニッケルの $(\Delta E/E-H)$ 曲線と比較しても明らかである。従つて、本研究に於て純ニッケルに於て明瞭に現はれる ΔE 効果の第2次増加が 90% Ni の合金に於ては最早認められない事實 (Fig. 10) は磁氣異方性の著しい減少⁽²¹⁾ によつて説明され得る。然らば、磁氣異方性の一層小さい 80% Ni の合金に於てはこの現象が勿論認められない筈であるにも拘はらず、それが純ニッケルに於ける程著しくはないが併し高く廣い磁場範圍に亘つて現はれることは説明し難い。この矛盾に關聯して、90% Ni の合金に於ては第2次増加が現はれない代りに、前述の如く、緩徐な減少が飽和前に於て起ることに注目されるが、何れにしてもこの問題の解決は將來の研究に俟ちたい。

(4) ΔE 効果と磁化との關係

次に、磁化 I の函數としての ΔE 効果に就いて考察しよう。α 固溶體範圍に屬する合金の $(\Delta E/E-I)$ 曲線は Fig. 12 に、又 γ 範圍の合金の曲線は Fig. 13 に

Fig. 12 $\Delta E/E-I$ curves of iron-nickel alloys in the α-solid-solution range and of 30 percent nickel.

(20) 第3報。

(21) J. D. Kleis, Phys. Rev., 50 (1936), 1178.

示してある。尚、30 及び 80% Ni の合金の曲線は別にそれぞれ Fig. 12 及び Fig. 14 に擴大して示してある。これ等の ($\Delta E/E-I$) 曲線の一般的な経過は、前報に於ても述べた如く、磁化の増大と共に次第に急速に増大するのであるが、併しその詳細は組成によつて多様に異なる。

Fig. 13 $\Delta E/E-I$ curves of iron-nickel alloys in the γ -solid-solution range.

まづ、アームコ鐵に於ては前述した弱磁場に於ける負の ΔE 効果が約 700 C. G. S. 迄の磁化範囲に互つて負の極小として現はれて居る (Fig. 12)。同様に、負の極小は

Fig. 14 $\Delta E/E-I$ curve of iron-nickel alloy containing 80 percent nickel

猶、注目すべきは Fig. 14 に示した 80% Ni の合金の ($\Delta E/E-I$) 曲線の経過が特に判然とした 3 段階を成して居ることである。その第 1 はヤング率が僅か乍ら減少

60, 70, 及び 80% Ni の合金の曲線に於ても認められる (Fig. 13)。又、5 及び 30% Ni の合金の曲線が飽和磁化の直前に於て降下するのは前述した中間磁場範囲に於ける ΔE 効果の減少に対応するものであることは云ふ迄もない (Fig. 12)。

する段階であつて、0~250 C. G. S. の磁化範囲に互つて居る。第 2 段階はヤング率が次第に急速に増大するところの 250 C. G. S. から殆ど飽和磁化に至る範囲である。最後の段階に於ては磁化が殆ど飽和して居るにも拘はらずヤング率は猶増大するが、この段階は前述の ($\Delta E/E-H$) 曲線の第 2 次上昇に對應するものである。一體、磁區概念を基礎とする ΔE 効果の説明に従へば⁽²²⁾、磁區の自發磁氣の逆轉は磁歪の變化を伴はないから ΔE 効果を生ぜず、そして磁歪の變化を隨伴する横轉及び連續廻轉によつてのみ ΔE 効果が生ずる⁽²³⁾。而してこれ等の機械的歪力による自發磁氣の方向の變化はそれぞれそれ等が磁場に依つて起る磁化範囲に於て起ると考へられる。従つて、今最初の段階に於けるヤング率の微小な減少を無視すれば、その磁化範囲に於ては主として自發磁氣の逆轉が起

Fig. 15 Magnetization curve of iron-nickel alloy containing 80 percent nickel.

り、そして第 2 段階に對應する磁化範囲に於ては主として横轉と廻轉が生ずると考へられよう。然らば、これ等の段階の境目の磁化の強さは何等かの特別な意味をもつのではあるまいか。まづ、第 2 段階の終點は、前述から判る様に、飽和磁化である。又、第 1 及び第 2 段階の境界である 250 C. G. S. なる磁化の強さは Fig. 15 に示したこの合金の磁化曲線の inflexion point に相當する。従つて、一般に磁化曲線の inflexion point は自

(22) 緒論参照。

(23) 自發磁氣の逆轉とはその方向の 180° の變化を、そして横轉とは 180° 以外 (鐵單結晶の場合には 90°) の方向への變化を意味し、この 2 種の方向變化は共に一般に不連續的である。これに對して、自發磁氣の廻轉とはその方向の自由エネルギーが極小なる方向 (磁場のみが作用して居る場合には磁場の方向) への連續的な變移を意味する。而して、これ等の自發磁氣の方向變化は磁場に依つてのみならず、歪力に依つても起る。磁場のみが作用する場合には、主として弱磁場に於てまづ逆轉、次に横轉が生ずり、そして強磁場に於て始めて廻轉が生ずる。

發磁氣の逆轉の大部分が完了して横轉が始まる境目を意味するものであらうと考へられるが、このことに關して

Fig. 16 $\Delta E/E-I/I_{\infty}$ curve of an iron-nickel alloy containing 68 percent nickel, obtained by Williams, Bozorth, and Christensen. Curves of alloys containing 60 and 70 percent nickel, obtained by the present author, are also shown for comparison.

であつて何れも極めて小さい。緒論に於て述べた如く、Williams, Bozorth, 及び Christensen⁽¹²⁾は 68% Ni の合金に於て同程度の大きい負の ΔE 効果を認めたが、3氏が得た $(\Delta E/E-I/I_{\infty})$ 曲線は Fig. 16 に示す如くであつて、著者が得た 60 及び 70% Ni の合金の曲線と經過に於て全く一致して居る。猶、著者は Fe-Co 系の ΔE 効果の研究に於て、この ΔE 効果が負の極小を現はす磁場が

Fig. 17 a

微分的帶磁率が極大であるところの磁場、即ち磁化曲線が inflexion を示すところの磁場に等しいことを指摘したが⁽²⁴⁾、この對應は、Fig. 17 a~d に示す如く、Fe-Ni 系に於ても全

く同様に認められる⁽²⁵⁾。

Fig. 17 b

Fig. 17 c

Fig. 17 d

Fig. 17 Change of Young's modulus and magnetization at weak fields in pure iron and iron-nickel alloys containing 60, 70, and 80 percent nickel.

は別の機会に於て詳細に考察したいと思ふ。

(5) 弱磁場乃至低磁化範囲に於ける負の ΔE 効果

既述の如く、弱磁場乃至低磁化範囲に於ける負の ΔE 効果は純鉄及び 60~80% Ni の組成範囲に於てのみ認められた。その極小値 $(\Delta E/E)_{\min}$ は Table 2 に示す如く

(6) ΔE 効果の飽和値と組成との關係

最高測定磁場 $H_{\max}$ に於けるヤング率の相対的變化の

(24) 第 6 報参照。

(25) この對應は第 3 報に於て報告した Ni-Cu 系の場合にも認められる。

値 $(\Delta E/E)_{\max}$ は Table 2 に掲げてある。これ等の測定値は總て正であつて、而も前掲の $(\Delta E/E-H)$ 曲線 (Fig. 5, 7, 8, 及び 11) の経過から見て飽和値 $(\Delta E/E)_{\infty}$ に等しい。たゞ、20% Ni の合金の $(\Delta E/E)_{\max}$ のみは $(\Delta E/E)_{\infty}$ に稍々遠い。

$(\Delta E/E)_{\max}$ 乃至 $(\Delta E/E)_{\infty}$ を組成に對して描記すれば Fig. 18 に示す曲線が得られる。アームコ鐵に於て約

Fig. 18 Relation between saturation values of the ΔE -effect, $(\Delta E/E)_{\infty}$, and composition of iron-nickel alloys.

0.2% に達する ΔE 効果はニッケルの添加によつて始め少しく減少するが、間もなく恢復して約 15% Ni の組成を中心として平滑な極大 (約 0.3%) を現はした後、 α 及び γ の兩固溶體の境界に向つて緩やかに減少する。この境界、即ち 28% Ni の組成、に於ける ΔE 効果は殆ど零に等しいと思はれる。斯様に、 α 固溶體範圍に於ける ΔE 効果は高々 0.3% 程度の小さいものであるが、併しその飽和値は決定的に正である。即ち、この組成範圍に於ける $(\Delta E/E)_{\infty}$ の符號は理論から期待されるところと一致し、従つて緒論に於て述べた豫想がたしかめられた譯である。次に、 γ 固溶體範圍に入ると、 ΔE 効果はまづ急速に増大して約 45% Ni の組成に於て 10% 程度の大きさの極大を作る。その後、 ΔE 効果は急速に減少して 80% Ni を少し超えた組成に於て 1% 以下の低い極小を示すが、後再び急速に増大して純ニッケルに於ては約 12% の大きさに達する。

著者はさきに Ni-Cu 系及び Fe-Co 系の ΔE 効果の研究に於て、半理論半實驗式に依る $(\Delta E/E)_{\infty}$ の計算値と組成との關係が實測の結果と定性的に極めてよく、又定量的にもかなりの程度迄、一致することを示した⁽²⁶⁾。その計算に用ひた式は

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\infty} = C \cdot \frac{\kappa_0 \lambda_{\infty}^2 E}{I_{\infty}^2}$$

であつて、こゝに C は單なる數係數、 κ_0 は初帶磁率、 I_{∞}

(26) 第 3 及び 6 報。

は飽和磁化、 λ_{∞} は飽和磁歪、そして E は磁化岩に於けるヤング率である。今、この式に於て $C=0.6$ と置き⁽²⁷⁾、Table 2 に掲げた κ_0 、 I_{∞} 、 λ_{∞} ⁽²⁸⁾、及び E ⁽²⁹⁾ の値を用ひて $(\Delta E/E)_{\infty}$ を計算した結果は Fig. 18 に於ける點線の曲線で示される。この計算曲線は同圖に於ける測定曲線と定性的には極めてよく、又定量的にも相當の程度迄一致して居る。従つて、上式は少なくとも強磁性合金に於ける ΔE 効果の飽和値と組成の關係を豫測する爲に極めて有効であると云ひ得られるであらう。尚、磁化零に於けるヤング率は一般に組成によつてそれ程著しくは變化せず、又飽和磁化は著しく減少する様なことがあるが併しその場合には必ず飽和磁歪の著しい減少を伴ふから、従つて一般に ΔE 効果の飽和値は第 1 に飽和磁歪の大なる程、第 2 に初帶磁率の大なる程大であると云ふことが出来る。

次に、 ΔE 効果の飽和値に關する上述した著者の測定結果と從來のそれとの比較を Fig. 19 に示した。 α 固溶

Fig. 19 Comparison of available measured data for saturation values of the ΔE -effect of iron-nickel alloys.

尚、この組成範圍に於ける $(\Delta E/E)_{\infty}$ 對組成曲線が約

(27) Ni-Cu 合金の場合には $C=0.7$ 、又 Fe-Co 合金の場合には $C=0.75$ と置いたが、 C の値のこの程度の相違には意味がない。この事に就いては第 3 報及び 6 報を参照されたい。

(28) 増山、東北帝大理科報告、20 (1931), 574.

(29) 第 5 報参照。

體範圍に就いては既に緒論に於て述べた如く、本多、田中⁽⁵⁾兩氏及び中村博士⁽⁸⁾の測定は符號に於て相反した結果を與へ、而も兩者は特定の組成範圍に於て負の飽和値を得て居る。これに對して、著者はこの組成範圍の全部に互つて合理的な正の飽和値を得た。

15% Ni を中心として極大を示す點に於て著者と中村博士の測定結果は一致して居る。次に、 γ 固溶體範圍に就いては、前記の二つの測定も著者のそれも互に定性的に一致した結果を與へて居る。たゞ、中村博士が 30% Ni の合金に於て負の飽和値を得たことは理解し難い。この組成範圍に於ける $(\Delta E/E)_\infty$ 對組成曲線の極大は著者と中村博士の測定結果から見て約 45% Ni に位置し、又極小は著者と緒論に於て述べた Siegel, Rosin⁽⁹⁾ 兩氏の研究結果から考へて 81% Ni 或はそれを少し超えた組成にあると思はれる。この極大及び極小は著者の測定結果に於て最も著しく現はれて居るが、これに對して本多・田中の測定結果に於ては比較的平滑である。尙、著者、本多・田中、及び中村の測定結果のうち本多・田中の得た測定値は一般に極めて低い。

(7) 動的測定と靜的測定の結果の相違に對する考察

上述した測定結果の比較によれば、本多・田中、中村、及び著者の三つの測定の中全體として中村と著者の測定が近似した結果を與へて居ることが判る。本多・田中兩氏は靜的な撓曲法によつて測定を行つたが、これに對して中村博士及び著者は共に動的な磁歪振動法を用ひた。従つて、その様な測定結果の異同は第 1 に測定方法の相違といふよりは寧ろ測定條件の相違に因ると考へられる。一般に靜的方法による測定に於ては豫め試料に相當の大きいさの荷重を與へて置き、更に測定に際しては再び相當の大きいさの荷重を與へることを必要とする。これに對して、動的な方法による測定に於ては豫め荷重を與へる必要がなく、又測定時に試料に働らく歪力が極く小さい。言ひ換へれば、靜的測定は相當の大きいさの歪力の下に於て相當の大きいさの歪力範圍に於ける平均の ΔE 効果を測定し、動的測定は歪力零に於て極く小さな歪力範圍に於ける平均の ΔE 効果を測定する。この二つの測定條件の相違の中、豫め與へる歪力の大きいさが ΔE 効果に著しい影響を與へる事は既に古く本多、寺田兩博士⁽²⁾ が靜的な延伸法による ΔE 効果の測定に於て示したところである。兩博士が得たニッケルに就いての結果は Fig. 20 に示す如くである⁽³⁰⁾。即ち、豫め相當の大きいさの張力を與へられたニッケルの ΔE 効果は始め著しく減少して、弱磁場に於て負の極小値を示した後急速に増大し、そして強磁場に至ると共に正の飽和値に近づく。而も、その極小の絶対値及び飽和値は張力が増すと共に著しく減少する。この結果を著者の得たニッケルの $(\Delta E/E-H)$ 曲線 (Fig. 8) と對照すれば、豫め與へた歪力の大きいさがニッケルの ΔE 効果に對して如何に著しい影響を與へる

か判るであらう。同様の事實が 28.7, 50.7, 及び 70.3 % Ni の組成の Fe-Ni 合金に於ても認められることは既に緒論に於て述べた如くである (Fig. 1 参照)。又、一般

Fig. 20. $\Delta E/E-H_{\text{ext}}$ curves of nickel under tension, obtained by Honda and Terada.

に歪力が大になると共に ΔE 効果の大きいさが減少することは理論的にも、定性的にはあるが、云ひ得られる。これ等の事情を考へれば、本多・田中の靜的測定によつて得ら

れた γ 固溶體範圍に於ける $(\Delta E/E)_\infty$ が中村及び著者の動的測定の結果に比べて一般に著しく低いことは主として豫め與へた歪力に原因するものであると結論し得るであらう。

III. 總 括

鐵-ニッケル合金の全組成範圍に互つて、その焼鈍状態に於ける ΔE 効果 (ヤング弾性率の磁化に伴ふ變化) を磁歪振動法によつて詳細に測定した。測定磁場範圍は約 900 Oe 迄である。得られた結果を要約すれば、次の如くである：—

(1) α 固溶體範圍 (0~28% Ni) に屬する合金のヤング率は數 Oe 程度の弱磁場によつては變化しない。その ΔE 効果が零である磁場範圍は初帶磁率の小さい合金に於ける程大である。

(2) 純鐵 (アームコ鐵) 並に 60~80% Ni の組成範圍内の合金の ΔE 効果は弱磁場に於て負の極小を現すが、併しその極小値の絶対値は 0.2% 以下の大きいさを示すに過ぎない。この極小値の現はれる磁場は磁化曲線が inflexion を示す磁場に等しい。

(3) 純鐵、純ニッケル (モンド・ニッケル) 及び 80% Ni の組成の合金の ΔE 効果は飽和前に第 2 次の稍々著しい増加を示すが、これに對して 5, 30 及び 90% Ni の合金の ΔE 効果は飽和前に僅か乍ら減少する。

(4) ΔE 効果の飽和値は全組成範圍に互つて正であつて、理論から期待されるところと一致する。従つて、從來の測定結果によつて低ニッケル量範圍に於て得られた負の飽和値は測定装置の感度の不足に因るものであると結論される。

(5) ΔE 効果の飽和値は α 固溶體範圍に於ては高*

(30) この圖の横軸は外部磁場を表すが、併し測定試料の寸法比が大である (約 700) から有効磁場に殆ど等しいと看做し得る。

0.3% 程度の大きさを示すに過ぎないが、これに對して γ 固溶體範圍 (28~100% Ni) に於ては一般に數% に達し、そして最高値は純ニッケルに對する 12% である。

(6) ΔE 効果の飽和値と組成との關係は相當に複雑であるが、 $(\Delta E/E)_{\infty} = 0.6 \times \kappa_0 \lambda_{\infty}^2 E / I_{\infty}^2$ (κ_0 = 初帯磁率, I_{∞} = 飽和磁化, λ_{∞} = 飽和磁歪, 及び E = 磁化零に於ける

ヤング率) なる半理論半實驗式に依つて計算した結果と定性的に極めてよく、又定量的にもかなりの程度迄、一致する。

終りに、著者は本研究を懇切に指導された本多光太郎先生、種々の便宜を與へられた増本量教授、並に熱心に助力された遠藤和男君に對して厚く感謝するものである。

強冷壓延珪素鐵板の纖維組織*

今 堀 熙**

Hiromi Imahori: On the Fiber Structure of the Heavy Cold Rolled Silicon Steel. The heavy cold rolled silicon steel has the fiber structure of the type (011)[110] (rolled plane parallel to (001), rolling direction parallel to [110]). By annealing this material at high temperature, the [100] axis approaches to the rolling direction. The writer has measured the magnetic torque curves of this material in the process of recrystallization and considered the mechanism of the change of the crystal orientation by recrystallization. The heavy cold rolled silicon steel is rich in (001) [110] type crystal and mixed with mechanical twin whose twinning plane is (112). By annealing, this twin forms the nuclei for the recrystallization and the recrystallization structure has the (112) [411] type fiber structure. The fiber structure of the annealed samples are analyzed from the magnetic torque curves by the Akulov-Brüchatov's method. After 85% cold rolling, this material includes 30% (001) [110] type crystal and, after annealing at 1200°, includes about 78% (122) [411] type crystal.

(Received May 22, 1943)

I. 緒 言

金屬に強冷加工を施せば纖維組織を生ずることは X 線による測定からよく知られてゐる。例へば鐵の冷間壓延された板では (100) 面が壓延に平行、[110] 軸が壓延方向に平行である結晶粒が多い。かゝる板に再結晶を行はしめると再結晶組織が纖維狀を呈する場合と然らざる場合とあり今日までこの點に關して系統的の研究は充分には行はれて居ない。著者は Si 3% を含む珪素鐵で實驗を行ひ、再結晶組織が強い異方性を呈することを確かめたが、こゝに實驗結果を報告するとともに再結晶前後の纖維組織の關聯性に就いて考察を行つて見る。

II. 纖維組織の磁氣的測定法

纖維組織を定性的に決定するには X 線によることが便利であるが、これを定量的に決定するには Akulov-Brüchatov⁽¹⁾, Sixtus⁽²⁾ 等が行つた圓板試料の磁化回轉力測定による方法が便利である。

珪素數% を含む珪素鐵では磁化曲線は鐵と略々同様

の傾向を示し、[100] が容易磁化軸、[110] が中間磁化軸、[110] が困難磁化軸である。3.85% Si を含む珪素鐵單結晶の磁化曲線は Williams⁽³⁾ によれば第 1 圖の如くであ

第 1 圖 珪素鐵 (Si 3.85%) の磁化曲線

る。又單結晶を一樣磁場の中で飽和値まで磁化したときの磁氣異方性エネルギー E は次式で與へられる。

$$E = K_0 + K_1(S_1^2 S_2^2 + S_2^2 S_3^2 + S_3^2 S_1^2) + K_2(S_1^2 S_2^2 S_3^2) \quad (2.1)$$

** 日立製作所日立研究所

* 昭和 18 年本會第 13 回東京大會に發表

(1) N. S. Akulov, N. Brüchatov, Ann. Physik, **15**(1936), 876.

(2) K. J. Sixtus, Physics, **6** (1935), 105.

(3) H. J. Williams, Phys. Rev., **51** (1937), 1009.