鐵及び炭素鋼のヤング彈性率の磁化に伴ふ變化

山本 美喜雄*

Mikio Yamamoto: The Change of Young's Modulus of Elasticity by Magnetization in Iron and Carbon Steels. The change of Young's modulus of elasticity by magnetization, $\Delta E/E$, in annealed Armco iron and various carbon steels was measured by the method of magnetostrictive oscillation. Main results obtained are as follows:— Young's modulus of elasticity in these materials increases by magnetization, and the amount of increase is of the order of 10^{-3} . The rate of increase is large in weak magnetic fields, and becomes gradually less as the field increases. For a given magnetic field, $\Delta E/E$ decreases continuously as the carbon content increases. Every $\Delta E/E$ vs. intensity of magnetization curve consists of three stages. Akulov and Kondorsky's theory was confirmed for the total change of elasticity in Armco iron. The initial susceptibility plays an important rôle in the change of Young's modulus of elasticity by magnetization in iron and carbon steels.

(Received May 28, 1938)

1. 緒 論

強磁性體のヤング彈性率の磁化に伴ふ變化(所謂 ΔE 効果)に就ては相當古くから研究が爲されて來たが⁽¹⁾ 系統的な研究としては本多, 日下部兩博士及び清水學士⁽²⁾ に依るものが最初である。三氏は撓みの方法に依つてヤング彈性率 E の磁化に伴ふ變化の割合 $\Delta E/E$ を測定したが, 有効磁場 400 〇に於て軟鐵は 1~3%, 鋼は 0.3~0.4% の變化を示した。又本多, 寺田兩博士⁽³⁾ は示差伸長計の方法を用ひて瑞典鐵の ΔE 効果を測定し, 外部磁場 400 〇に於て 0.3% の變化を見た。炭素鋼に就て本効果を系統的に研究したものとしては本多博士及び田中學士⁽⁴⁾ の撓みの方法に依る測定が過去に於ける唯一のものである。その結果に依れば, 炭素量の多寡に拘はらず (0.10~1.48% C), $\Delta E/E$ の値は始めは急速に後徐々に増加して漸近値に近づく。而して一定の強さの磁場に於ては $\Delta E/E$ の大いさは炭素量の増加と共に連續的に減少し, 有効磁場 400 〇に於けるその値は 0.10% 炭素鋼に對する約 0.5% から 1.48% 炭素鋼に對する約 0.2% に亘る。

v. Auwers⁽⁵⁾ は電磁石の吸引力を高周波交流に依つて變化させ試料に強制振動を惹起する方法を用ひて ΔE 効果を測定した。その結果に依れば, 軟鐵のヤング率の磁化に伴ふ變化は非常に小であつて, $\Delta E/E$ の飽和値と雖も 1% より遙かに小であると言ひ得るに止まり, 又鋼のそれに至つては判然とは檢知し得ない程度である。中村

博士⁽⁶⁾ は磁歪に依つて試料に強制振動を惹起する方法に依つて電解鐵に就て測定したが, ヤング率の磁化に依る變化を殆んど認めなかつた。木村學士⁽⁷⁾ は中村博士のそれと同様の測定方法を用ひて鐵及び二三の炭素鋼の ΔE 効果を研究した。その結果に依れば, 外部磁場 600 〇に於ける $\Delta E/E$ の値は鐵, 0.2% 炭素鋼及び 1.4% 炭素鋼に就て夫々大體 0.5, 0.2 及び 0.1% である。最近 Cooke 並に Brown⁽⁸⁾ は試料に水晶振動子を接合してそれに強制振動を惹起する方法に依つて, アームコ鐵の ΔE 効果を詳細に研究した。その結果に依れば, 有効磁場約 500 〇に於ける $\Delta E/E$ の値は焼鈍試料に對して約 0.3%, 非焼鈍試料に對して約 0.2% である。

鐵の ΔE 効果の理論的研究としては Akulov 及び Kondorsky⁽⁹⁾ に依るそれが現在の所唯一のものである。

彼等は近似的計算に依つて $\Delta E/E$ と磁化の強さとの關係を表はす二つの公式を得たが, その中兩者の飽和値の間の關係を表はすものは Cooke 及び Brown の測定結果に依つて大體に於てたしかめられた。

扱て上述の實驗結果から次の事が結論され得る: (1) 鐵及び炭素鋼のヤング彈性率は磁化に伴つて増加する, 即ち之等の物質に對して ΔE 効果は正である, 及び (2) その増加の最大値は 10^{-3} の order である。所で此處に注意しなければならない事は測定方法の相違である。一體 ΔE 効果の測定方法には靜的及び動的(振動)の二種の方法がある。靜的方法に於ては必ず試料に相當の大いさ

* 東北帝國大學金屬材料研究所。

(1) ΔE 効果に關する古い文獻に就ては, 本多, 清水, 日下部, Phil. Mag., (6) 4 (1902), 459 及び本多, 寺田, Phil. Mag., (6) 13 (1907), 36 を見よ。

(2) 本多, 清水, 日下部, 上掲: Phys. Z., 3 (1902), 380。

(3) 本多, 寺田, Phys. Z., 6 (1905), 622; 上掲。

(4) 本多, 田中, 東北帝大理科報告, 15 (1926), 1。

(5) O. v. Auwers, Ann. Physik, 17 (1933), 83。

(6) 中村, 東北帝大理科報告, 24 (1935), 303; 應用物理, 4 (1935), 397。

(7) 木村, 應用物理, 4 (1935), 214。詳細な報告は未發表である。

(8) W. T. Cooke, W. F. Brown, Phys. Rev., 50 (1936), 1158, 1165。

(9) N. Akulov, E. Kondorsky, Z. Phys., 78 (1932), 801; 85 (1933), 661。尙 W. T. Cooke, W. F. Brown, 上掲 參照。

の歪力が掛り、又動的の方法に於ては磁氣的表皮効果 (magnetic skin effect) が伴ふから、此の二つの方法に依つて測定される量は決して同じ状態に於ける量ではなく、従つて之等を直ちに比較する譯にはゆかない。(10) 然るに動的の方法に依る鐵の ΔE 効果の正確な測定としては木村學士と Cooke 及び Brown のそれがあるのみであり、炭素鋼に就ての系統的な實驗的研究としては本多博士及び田中學士の靜的方法に依るもの以外にはない。又理論的研究に至つては Akulov 及び Kondorsky の鐵に關する理論があるのみであるが、これも未だ完全なものではない。しかも Cooke 及び Brown に依るもの以外の測定は $\Delta E/E$ と磁化の強さとの關係を與へて居らぬから、此の唯一の理論の結果をたしかめる事に役立たない。兎に角、此の現象に就ては未だ研究の餘地が多く残されてある。依つて著者は動的方法を用ひ、鐵及び炭素鋼のヤング彈性率の磁化に伴ふ變化に就て正確な測定を行つた。

2. 測定方法及び装置

測定方法は所謂「磁歪振動の方法」(11) である。その大體の原理は次の如くである：— 定常磁場に小振幅の高周波交番磁場を重疊させて、圓棒狀の試料に磁歪縦振動を強制し、其振動数を連續的に變化して共鳴を起させ、試料の固有振動数を求める。然らばこの棒の固有振動数、寸法及び密度に依つてヤング彈性率が計算される。そして上の手續きを定常磁場の強さを變へて行ふ事に依つて磁化に伴ふヤング率の變化が求められる。

圓棒のヤング彈性率 E とその自由縦振動の基本振動数 f との關係は、Rayleigh の補正項(12)を省略すれば、次式に依つて與へられる。

$$E = 4l^2 \rho f^2 \dots \dots \dots (1)$$

此處に l は棒の長さ及び ρ はその密度である。従つて磁化に伴ふヤング率の變化の割合 $\Delta E/E$ は

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta f}{f},$$

或ひは

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta v}{v} + 2 \frac{\Delta f}{f} \dots \dots \dots (2)$$

で表はされる。此處に v は棒の比容積である。(2) 式の右邊に於ける第 1 項は縦磁歪を、又第 2 項は容積磁歪を表はすが、兩者は共に第 3 項、即ち磁化に伴ふ基本振動数の

(10) 此事はニツケルの ΔE 効果の測定結果に於て最も明瞭である。中村、上掲 参照。

(11) E. Giebe, E. Blechschmidt, Ann. Phys., **11** (1931), 905; 中村、上掲; 木村、上掲。

(12) Lord Rayleigh, Theory of Sound, Vol. 1, 2nd ed., (1926), p. 251.

變化の割合に比較して小であるから、(13) 之等の項を省略すれば (2) 式は

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta f}{f} \dots \dots \dots (3)$$

となる。

定常磁場に重疊する高周波交番磁場を作る高周波交流は真空管發振器に依つて供給される。然らば試料棒の基本固有振動数は共鳴の際に於ける高周波交流の周波數に等しい。(14) 従つて磁化に伴ふ棒の固有振動数の變化は定常磁場の強さの變化に伴ふ高周波交流の「共鳴周波數」の變化に依つて與へられる。今真空管發振器の周波數 f_{osc} が次の公式に依つて表はされるものとする：

$$f_{osc} = 1/2\pi\sqrt{L(C+C_d)} \dots \dots \dots (4)$$

此處に L , C 及び C_d は夫々振動回路の、自己誘導係數、可變蓄電器の容量及び分散容量である。今自己誘導係數を一定にし可變蓄電器の容量を變へて真空管發振器の周波數を變化させる時には、高周波交流の「共鳴周波數」の變化の割合は

$$\frac{\Delta f_{osc}}{f_{osc}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C+C_d} \dots \dots \dots (5)$$

に依つて與へられる、但し周波數の變化に伴ふ分散容量の變化は無視した。従つて (3) 式に於て $\Delta f/f = \Delta f_{osc}/f_{osc}$ と置けば、結局

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{\Delta C}{C+C_d} \dots \dots \dots (6)$$

となる。斯くして磁化に伴ふヤング彈性率の變化は真空管發振器の振動回路の容量の變化より簡単に計算される。尙 (4) 式に依つて高周波交流の「共鳴周波數」即ち試料棒の固有振動数を求めれば、これを (1) 式に代入して試料のヤング率の絶対値が得られる。

Fig. 1 は測定装置の配置を示す。真空管發振器より供給される高周波交流は一旦増幅された後、試料棒の兩側に捲かれた 2 個の勵振コイルを通つて、之等のコイル内に高周波交番磁場を作る。試料はその中央に於て 2 個の眞直ぐなナイフ・エツヂに依つて固定せられ、勵

(13) 鐵の縦磁歪及び容積磁歪は夫々 10^{-6} 及び 10^{-7} の order の量である (増山、東北帝大理科報告, **20** (1931), 574)。又炭素鋼の縦磁歪も 10^{-6} の order の量である (H.G. Dorsey, Phys. Rev., (1) **30** (1910), 698)。その容積磁歪の側定値は文献に見當らないが、恐らく鐵のそれと同じ order の量であらう。此等に對して $\Delta f/f$ 乃至 $\Delta E/E$ は鐵及び炭素鋼に就て共に 10^{-3} の order の量である。

(14) 試料棒の固有振動数を求める爲には、その高調波振動の共鳴を利用する事も亦可能である。然し實驗上の便宜の爲に、本實驗に於ては常に基本振動の共鳴を用ひた。

(15) 此周波數公式は最も一般的のものであるが、後述の如く、本實驗に用ひた真空管發振器の周波數も此公式に依つて表はされる。

正されてある。波長計の共振回路に誘起される電圧をインピーダンス結合一段増幅器に依つて増幅してから、真空管電圧計に通して、共振状態を検した。此の波長計の

Fig. 5. Connection Diagram of the Dynatron Wavemeter.

較正には水晶發振器の高調波を用いた。その共振回路の周波数公式は、前述の真空管發振器のそれと同様、(3)

式に依つて與へられる；即ち

$$f_{osc} = 1/2\pi\sqrt{L(C+C_d)}$$

であつて、 L 及び C_d の値は次に示す通りである：

$$L = 0.0015366 H \text{ 及び } C_d = 0.0011337 \mu F.$$

以上の装置の各部分——發振器、増幅器、檢波器、波長計、蓄電器及び抵抗器等は總て接地された銅板製の箱の中に入れて遮蔽されてある。尙交流電橋は Fig. 1 に示す E 點を接地して良好な結果を得た。

實驗の手續きは次の通りである：先づ磁化コイルに一定の大いさの電流を通して試料棒を磁化する。次に勵振コイルに高周波交流を通して、試料棒の固有基本振動數に近い周波數に於て交流電橋を平衡させた後、真空管發振器の可變蓄電器の容量を徐々に變化させ乍ら、檢波器につながれたミリ電壓計或ひはマイクロ電流計のフレを読む。試料棒の縦振動が共鳴を起すと、交流電橋の平衡が破れ、ミリ電壓計乃至マイクロ電流計のフレは Fig. 6

Fig. 6. Typical Resonance Curve.

に示す如くに變化する。此の共振曲線の極小點に相當する真空管發振器の可變蓄電器の容量が試料棒の固有振動數に對應する。従つて此の手續きを定常磁場の強さを變へ

て反覆すれば、それに伴ふ發振器の可變蓄電器の「共鳴容量」の變化、即ち (6) 式に於ける ΔC が求められ、更に (6) 式に依つて磁化に伴ふヤング彈性率の變化が計算される。

3. 測定結果

本實驗に用いた試料はアームコ鐵及び 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 及び 1.4% C の 6 種類の炭素鋼 (瑞典鋼) である。之等の試料は總て旋盤に依つて圓筒型の棒に仕上げら

れ、真空爐内で焼鈍された後徐冷されて、測定に供された。焼鈍温度及び時間、及び試料棒の長さ及び直径は Table 1 に示された通りである。試料の成分に就ては化學分析

Table 1. Heat Treatment and Dimensions of the Specimens.

Specimen	Heat treatment		Dimension	
	Temperature	Time hour	Length cm	Diameter cm
Armco Iron	930°	1	10.000	0.3011
0.1 % C-Steel	910	"	9.995	0.3004
0.3 % C- "	880	"	10.000	0.3005
0.6 % C- "	790	"	10.005	0.3011
0.9 % C- "	800	"	10.000	0.3007
1.2 % C- "	930	"	10.000	0.3010
1.4 % C- "	1030	"	9.990	0.3024

を行はなかつたが、必要な測定を全部終了した後、試料棒の一端の面を磨き、顯微鏡に依つてその炭素量をたしかめ、且その組織を調べた。1.4% 炭素鋼以外の總ての試料は標準組織を示し、且その炭素量は 0.1% C 以内の正確度を以て上記の値に一致して居る。只 1.4% 炭素鋼に於ては、Fig. 7 より判る如く、そのセメントライトが一部黒鉛

Fig. 7. Microscopic Photograph of the Structure of the Specimen of 1.4 % C-Steel.

化してゐて、その炭素量を組織の顯微鏡觀察に依つて判斷する事は困難である。

磁化に伴ふヤング彈性率の變化の測定は、大凡 0~600 〇の有効磁場の範圍に於て、常に標準磁化曲線に沿ふて且基本振動⁽¹⁸⁾の共鳴を利用

して行はれた。上述の装置に依つて $\Delta E/E$ 對外部磁場の關係を求め、別に彈動電流計の方法に依つて磁化曲線を測定し、⁽¹⁹⁾ 此二つの關係より $\Delta E/E$ 對磁化の強さの關係を得た。測定値は Table 2 に示されある。此處に H は有効磁場の強さを、又 I は磁化の強さを表はす。

一般にアームコ鐵及び炭素鋼のヤング彈性率は、Fig. 8 より明らかな如く、磁化に伴つて増加する、即ち之等の物質に對して ΔE 効果は正である。 $\Delta E/E$ 對 H 曲線の形は大體に於て磁化曲線のそれに似てゐる；即ちヤング率の増加の割合は弱磁場に於ては大であるが、磁場

(18) 試料棒の縦振動の基本固有振動數は總て 26,000 cycle/sec の近傍にある。

(19) 反磁場係數としては B. Schuddemagen (Phys. Rev., 31 (1910), 165) のそれを用いた。

Table 2. Data of the Intensity of Magnetization and the Variation of Young's Modulus with Magnetization.

Armco Iron			0.1% C-Steel		
H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$	H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$
0.75	241	0.014	1.56	248	0.014
0.78	406	0.030	1.72	376	0.024
1.01	631	0.056	2.50	650	0.056
0.30	887	0.092	3.44	952	0.104
2.8	1138	0.130	5.98	1134	0.141
8.1	1260	0.168	9.8	1208	0.172
19.2	1321	0.222	22.1	1296	0.241
33.2	1356	0.270	36.6	1347	0.310
52.0	1397	0.294	49.8	1372	0.346
83.6	1443	0.316	85.2	1427	0.378
130.0	1494	0.333	125.8	1473	0.396
203.2	1556	0.346	198.8	1540	0.410
301.3	1619	0.352	301.9	1604	0.418
400.0	1661	0.356	450	1664	0.427
599	1694	0.362	605	1677	0.436

Table 2. Continued.

0.3% C-Steel			0.6% C-Steel		
H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$	H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$
1.45	185	0.008	2.69	110	0.004
2.08	364	0.018	4.72	275	0.012
2.87	571	0.038	7.00	465	0.022
6.81	873	0.080	11.19	791	0.052
10.86	1038	0.106	18.7	1040	0.083
25.0	1189	0.160	41.5	1213	0.130
38.1	1263	0.202	65.6	1276	0.156
60.0	1332	0.239	95.2	1321	0.173
83.8	1373	0.256	133.9	1366	0.186
132.0	1434	0.274	231.6	1441	0.204
200.1	1496	0.287	369.8	1501	0.219
298.4	1554	0.300	484	1531	0.227
447	1600	0.312	613	1549	0.234
601	1627	0.321			

Table 2. Continued.

0.9% C-Steel			1.2% C-Steel		
H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$	H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$
7.07	197	0.004	6.09	130	0.004
9.56	380	0.008	8.39	286	0.010
11.05	530	0.012	10.54	414	0.014
16.04	796	0.028	13.87	569	0.018
24.8	1002	0.048	21.49	781	0.026
36.8	1104	0.067	30.8	936	0.034
55.5	1180	0.090	47.6	1044	0.046
87.6	1244	0.118	68.3	1121	0.060
135.8	1304	0.142	99.3	1186	0.077
211.8	1369	0.159	137.8	1237	0.086
352.7	1439	0.176	231.3	1318	0.102
458	1469	0.186	334.7	1373	0.116
595	1497	0.198	482	1424	0.133
			611	1449	0.147

Table 2. Continued.

1.4% C-Steel			1.4% C-Steel		
H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$	H Ø	I C. G. S.	$\frac{\Delta E}{E} \times 10^2$
5.62	144	0.004	92.6	1232	0.062
9.48	346	0.008	140.5	1299	0.084
13.83	532	0.012	208.7	1359	0.097
19.51	707	0.016	341.6	1426	0.109
31.8	928	0.024	466	1460	0.119
57.0	1117	0.040	606	1484	0.130

Fig. 8. The Relation between $\Delta E/E$ and the Intensity of Magnetic Field.

が大になると共に漸次小になる。本測定に於ける最大の磁場 600 Ø に於て、アームコ鐵に對する $\Delta E/E$ は大體一定値に達してゐるが、炭素鋼に對する $\Delta E/E$ は未だ飽和するに至らない。此事は特に 1.2% 炭素鋼に對して著しく現はれて居るが、之は恐らくセメントタイトの彈性に依るのであらう。而して 1.4% 炭素鋼に對する $\Delta E/E$ 對 H 曲線が却つて亞共析鋼に對するものに類似してゐるのは、既述の如くそのセメントタイトの一部が黒鉛化してゐる爲であると考へられる。結局、アームコ鐵、亞共析鋼及び超共析鋼の $\Delta E/E$ 對 H 曲線の強磁場に於ける傾斜はセメントタイトの量と共に増加する。Fig. 9 に示す如く、 $\Delta E/E$ の値は、アームコ鐵を除けば、炭素量の増加と共に殆んど連續的に減少する。此處に於てアームコ鐵が例外をなす事は、アームコ鐵と瑞典鋼とがその製造法を異にし、從つて含有する不純物の種類及び量を異にする爲であらう。(20) この $\Delta E/E$ 對炭素量の關係は本多博士及び田中學士(4) の靜的方法に依る測定結果と定性的に一致する。比較の爲に、磁場 400 Ø に對する兩者の $\Delta E/E$ 對炭素量曲線を Fig. 9 に示してある。兩曲線の形はよく一致してゐるが、一般に著者の測定値は本多、田中兩氏のそれ等よりも相當に小である。此の相違は大部分

(20) 後述に於て明らかな如く、アームコ鐵は尙ヤング彈性率及び密度對炭素量曲線に於ても異常を示す。

兩者の用いた試料の相違に、又一部分は兩者の測定方法の相違に依るものと思はれる。磁場 600 γ に於ける $\Delta E/E$ の値は、Table 3 第 2 欄より明かな如く、何れの物質に就

Fig. 9. The Relation between $\Delta E/E$ and the Carbon Content.

ても 0.45% よりは小である。アームコ鐵に對するその値は 0.362% であるが、此値はCooke及びBrown⁽⁸⁾がアームコ鐵に就て得た最大値 0.308% に比較して幾分大である。

Fig. 10 は $\Delta E/E$ 對磁化の強さの關係を示す。之等の曲線は互ひに相似の形を持つ。而して之等の曲線の増加し方で飽和値まで至るものゝ様である。

アームコ鐵の ($\Delta E/E - I$) 曲

Fig. 10. The Relation between $\Delta E/E$ and the Intensity of Magnetization.

線はCooke及びBrown⁽⁸⁾の得たそれとよく似てゐるが、然し後者に於ては、磁化の強さの測定範圍が小である爲、第三階段は明瞭に現はれて居ない。

尚注意すべき事は、($\Delta E/E - I$) 曲線を夫々對應する磁化曲線 (Fig. 11) と對照する事に依つて知られる如く、

Fig. 11. The Magnetization Curves.

Fig. 12. The Relation between the intensity of Magnetization and the Carbon Content.

化の強さは如何なる磁場に於ても直線關係から期待される値より大である。然し乍ら此事は、既述の如く、そのセ

大體に於て前者の第一階段は後者の急峻部に、第二階段は曲部に、そして第三階段は残りの飽和に至る部分に夫々對應してゐる事である。此の事實は ΔE 効果なる現象の機構を考察する上に重要な意味を持つものであらうと考へられるが、これに就ては他日の研究に依つて明かにするつもりである。

Fig. 12 より明かな如く、一定の磁場に於ける磁化の強さは炭素量の増加と共にほぼ直線的に減少する。但し 1.4% 炭素鋼は此の關係より偏倚し、その磁

Table 3.

Specimen	$\Delta E/E \times 10^2$ at $H=600\gamma$	I C. G. S. at $H=600\gamma$	κ_0	ρ g/cm ³	$E \times 10^{-12}$ dyne/cm ²	$(\Delta E/E)_{\infty}$ calc. $\times 10^2$
Armco iron	0.362	1695	17	7.864	2.110	0.19
0.1% C-Steel	0.435	1679	48	7.932	2.144	0.58
0.3% C- "	0.321	1626	30	7.946	2.153	0.40
0.6% C- "	0.233	1547	16	7.850	2.117	0.22
0.9% C- "	0.198	1499	11	7.816	2.097	0.16
1.2% C- "	0.146	1447	8	7.801	2.076	0.13
1.4% C- "	0.129	1485	7	7.703	2.029	0.10

メントイトの一部が地鐵と黒鉛とに分解してゐる事に依つて諒解される。尙磁場 600 γ に於ける磁化の強さは Table 3 第 3 欄に示してある。

更に、總ての試料に就て初帯磁率 κ_0 を測定した。その測定値は Table 3 第 4 欄に掲げてある。Fig. 13 に示さ

れてある如く、初帯磁率は、アームコ鐵を除けば、炭素量の増加と共に連続的に減少する。此處に於てアームコ鐵が例外をなす事は既に $\Delta E/E$ 對炭素量の關係に於て述べた理由に依つて期待された所である。此の初帯磁率對炭素量曲線が $\Delta E/E$ 對炭素量曲線と相似の形を持つ事は注意すべき事である (Fig. 13 参照)

最後に、Archimedes の原理に依つて試料の密度 ρ を測定し、一方に於て磁化されぬ状態に於ける試料の基本固有振動數 f に對應する「共鳴容量」 C を外挿に依つて決定した。更に之等の値を用ひて、(1) 式及び (4) 式に依つて磁化されぬ状態に於けるヤング彈性率 E を計算した。斯様にして得られた密度及びヤング率の値は夫々 Table 3 第 5 欄及び第 6 欄に示されてある。又ヤング率及び密度對炭素量曲線は Fig. 13 に示す如くである。本多博士及び田中學士⁽⁴⁾ が靜的方法に依つて測定して得たヤング率對炭素量曲線は著者のそれと同様の形を持つ。

Akulov 及び Kondorsky⁽⁹⁾ の理論に従へば、鐵の多結晶試料の彈性率の磁化に伴ふ變化の飽和値 $(\Delta E/E)_\infty$ は

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_\infty = \frac{3}{5} \cdot \frac{\kappa_0 \lambda_{100}^2 E}{I_\infty^2} \dots\dots\dots (7)$$

に依つて與へられる、此處に κ_0 は初帯磁率、 E は磁化されぬ状態に於けるヤング率、 I_∞ は飽和磁化、及び λ_{100} は單結晶の [100] 方向に於ける飽和磁歪である。本實驗に用ひたアームコ鐵に對しては、Table 3 に掲げられてある如く、 $\kappa_0 = 17$ 及び $E = 2.110 \times 10^{-12}$ dyne/cm² であつて、又 $I_\infty = 1700$ である。⁽²¹⁾ 此等の値及び $\lambda_{100} = 16.2 \times 10^{-6}$ ⁽²²⁾ を用ひて (7) 式に依つて $(\Delta E/E)_\infty$ を計算すると、0.19% なる値を得る。これに對して磁場 600 γ に於る測定値は、Table 3 第 2 欄に示してある如く、0.362% であるが、理論の近似の程度を考慮すれば両者は相當によく一致するものといへよう。尙ほ Akulov 及び Kondorsky は I/I_∞ の小なる範圍に對して

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{153}{70} \cdot \frac{\kappa_0 \lambda_{100}^2 E}{I^2} \left(\frac{I}{I_\infty}\right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

なる關係を與へて居る。然し乍ら磁化の強さの小なる範圍に於てはそれに伴ふヤング率の變化も小であり、從つて測定の正確度も劣るので、此の公式の當否に就て云々する事は出来ない。

最後に、既述の如く、 $\Delta E/E$ 對炭素量曲線と初帯磁率對炭素量曲線とは全く相似の経過をとる (Fig. 13)。從つてアームコ鐵及び炭素鋼の彈性率の磁化に伴ふ變化に對

Fig. 13. Relations between the Observed and Calculated Data and the Carbon Content.

して初帯磁率が重要な意味を持つと考へられる。此の事實は既に鐵及びニッケルに就て、實驗的には Cooke 及び Brown,⁽⁸⁾ 及び Giebe 及び Blechschmidt⁽¹¹⁾ に依つて、又理論的には Akulov 及び Kondorsky⁽⁹⁾ に依

つて確定されてゐる。そこで此の事實を上掲の Akulov 及び Kondorsky の公式 (7) に依つて確めてみた。Table 3 に掲げられてある κ_0 、 E 及び I の $H=600\gamma$ に對する値を用ひて $(\Delta E/E)_\infty$ を計算すれば、Table 3 第 7 欄及び Fig. 13 に示す如き結果を得る。但し λ_{100} としては先にアームコ鐵に就ての計算に於て用ひた値を其儘用ひた。此の計算に依つて得た $(\Delta E/E)_\infty$ calc 對炭素量曲線が實驗に依つて得たそれ ($H=600\gamma$ に對するもの) とよく一致する事は寧ろ驚くべきである。兎に角此事に依つても鐵に於けるのみならず炭素鋼に於てもヤング彈性率の磁化に伴ふ變化に對して初帯磁率が重要な役割を演ずる事が諒解される。

4. 總 括

焼鈍されたアームコ鐵及び種々の炭素鋼のヤング彈性率の磁化に伴ふ變化 $\Delta E/E$ を磁歪振動の方法に依つて測定した。尙、上の測定に附隨して、磁化の強さ、初帯磁率、密度及びヤング彈性率の測定を行つた。實驗結果を總括すれば次の如くである。

(1) アームコ鐵及び炭素鋼のヤング率は總て磁化に伴つて増加する。其の増加の割合は弱磁場に於ては大であるが、磁場が増加すると共に漸次小になる。而して其の増加の大きさは總て 10^{-3} の order である。

(2) 一定の磁場に於ては、 $\Delta E/E$ は炭素量の増加と共に連続的に減少する。其の減少の割合は低炭素量に於ては大であるが、炭素量が増加すると共に漸次小になる。

(3) $\Delta E/E$ 對磁化の強さの曲線の経過は三階段より成る。その第一階段に於ては彈性率は磁化に伴つて始め緩やかに後次第に速かに増加し、第二階段に於ては急速に増加するが、後稍々その増加の割合は小になり、そして最後の階段に於て再び速かに増加する。

(4) 磁化の強さ、初帯磁率、密度及びヤング彈性率は總

(21) 飽和磁化の値は別に測定して求めた。

(22) 此値は本多、増山兩博士、東北帝大理科報告、15 (1926), 755) の測定値の平均値である。

て炭素量の増加と共に減少する。

(5) アームコ鐵に對する強磁場に於ける $\Delta E/E$ の測定値を Akulov 及び Kondorsky の理論に依る計算値と比較して、両者がよく一致する事を見出した。

(6) 鐵及び炭素鋼の初帶磁率が ΔE 効果に對して重要な意味を持つ事を知つた。

最後に、著者は本研究を親切に指導された東北帝國大

學總長本多光太郎博士、常に深甚の興味を以て實驗の遂行を激勵された増本量教授、測定法に就いて教示された木村録一氏及び實驗の準備に助力された石野芳二氏に對して厚く感謝する。尙實驗費用の一部は齋藤報恩會の援助に依るものである事を此處に附記して、以て同會に對して深甚の謝意を表する次第である。

銅—アンチモン系平衡狀態圖

第4報 合金のX線的研究

大澤 與美* 柴田 仁作*

Atomi Ōsawa and Nisaku Shibata: The Equilibrium Diagram of the Copper-Antimony System. Fourth Report: An X-Ray Investigation of Cu-Sb Alloys. Careful X-ray analyses and specific gravity measurements of all the phases in this alloy system have been carried out, the results of which are summarized in tabular form as follows:

Solid Solution Phases	Chemical Formula	Composition (wt.% Cu)	Crystal Class	Lattice Constant			Number of Atoms in Unit Cell	Specific Gravity	Note
				a (Å)	c (Å)	c/a			
α	—	100-95.3	Face-centered cubic	Cu=3.6079 ₂ Å 95.3%Cu=3.6413Å			4	8.92~8.542	{ Separation of η and δ in the cooling is extremely slow.
β	Cu ₅ Sb ₂	56.71	Body-centered tetragonal	9.01 ₄	8.57 ₄	0.951 ₂	2n	≈8.9	{ Measurement of β phase at high temperature is difficult on account of volatilization of antimony. On quenching, an intermediate phase β' is formed.
γ	Cu ₂ Sb	51.08	Simple tetragonal	5.62 ₁	6.07 ₄	1.081	12	8.446	{ There is a solid solubility range (about 1%) of which heretofore undetected.
δ	Cu ₉ Sb ₂	70.14	Hexagonal	10.836 ₀	8.611 ₂	0.794 ₇	12	8.878	{ Superstructure of hexagonal close packed lattice.
η	Cu ₁₁ Sb ₂	74.17	Orthorhombic	9.28 ₅	8.62 ₉	6=8.17 ₉	49	8.909	{ Deformed structure of hexagonal.
θ	Cu ₁₁ Sb ₄	58.95	Hexagonal	5.494 ₇	8.686 ₃	1.580 ₉	15	8.617	{ Superstructure of hexagonal close packed lattice.
ϵ	—	Sb	Hexagonal	4.290 ₁	11.237 ₅	2.619 ₄	6	6.68	{ Antimony does not seem to dissolve copper at room temperature.

(Received June 4, 1938)

1. 緒 言

先に著者の一人⁽¹⁻³⁾は村上博士と共に本系合金の平衡狀態圖を研究して Fig. 1 の如き結果を得た。Fig. 1 に

依ると此系には5種の金屬間化合物即ち Cu₁₁Sb₂ (η), Cu₉Sb₂ (δ), Cu₅Sb₂ (β), Cu₁₁Sb₄ (θ) 及び Cu₂Sb (γ) が存在する。此内常溫で存在するのは δ , θ 及び γ 相の三

* 東北帝國大學金屬材料研究所。

(1) 村上, 柴田, 金屬の研究, 13 (1936), 445.

(2) 柴田, 本誌, 2 (1938), 108.

(3) 村上, 柴田, 本誌, 2 (1938), 365.