日本金屬學會誌

第 12 卷 第 7-12 號

研 究

Fe-Al 系合金の静磁歪並に新磁歪合金

「アルフェル」について**

本 多 光 太 郎* 増 本 量*

白 川 勇 記* 小 林 猛 郎*

Kōtarō Honda, Hakaru Masumoto, Yūki Shirakawa and Takeo Kobayashi :
On the Magnetostriction of Iron-Aluminium Alloys and a New Alloy "Alfer". The magnetostriction of iron-aluminium alloys has been measured by an apparatus designed by the present investigators in various longitudinal fields of less than 1200 Oersteds. The positive magnetostriction of iron gradually increases by the addition of aluminium, while the negative one decreases. All the alloys containing more than 5.90 percent of aluminium have only a positive magnetostriction, and especially in the case of alloys containing more than 8.80 percent aluminium the magnetostriction always increases with the magnetizing field or the intensity of magnetization ; showing no maximum. The magnetostriction at a constant field of 1100 Oersteds shows a negative value, in the range of less than 5.3 percent aluminium content, while a positive value in the aluminium content above this percentage. And in the range of the aluminium content 11.5~13.2 percent the magnetostriction is very high ; its highest value being 40×10^{-6} of 13.14 percent aluminium alloy. These alloys may be excellent magnetostriction materials for a supersonic oscillator and have been called "Alfer" by the present investigators.

(Received November 19, 1945)

I. 緒 言

従来膨脹計法で磁歪を測定する場合一番困るのは、同じ試料を用いても常に同じ値が得られないのと、外部からの振動によつて尺度の讀取りが難しいことである。よつて従来多くの研究者は振動の影響を避けるために夜間測定を行つたり又特に振動の少い場所を選んで装置を据付けたりした。然し常に同じ値が得られるといふ装置の改良は未だ充分に行はれてゐないやうに思はれる。よつて著者等は以前よりこれ等の缺點を除くべく努力を拂ひ、遂に普通の實驗室に於ける振動には何等の支障もなく、常に殆ど同じ値が

得られ且つ取扱ひの極めて簡単な新装置を考案した。

已に周知の如く、金屬及び合金に關する従來の測定結果は非常にまちまちで殆ど一致して居ないので、著者等は目下この新装置を用ひて更に一般金屬及び合金につき磁歪の測定を繰返してゐる。本論文に於ては Fe-Al 系合金に關する磁歪の測定結果を報告する。

Fe-Al 系合金の磁歪に就ては既に A. Schulze⁽¹⁾の研究がある。彼は 0.52%, 1.04%, 2.17%, 3.19%, 5.66% 及び 10.52% の Al を含有する合金の磁歪につき外部磁場 372 Oe まで測定した。その結果によると 10.52% Al の合金の磁歪は外部磁場 350 Oe に於て 33.8×10^{-6} に達し相當

大なる値を示して居る。然し彼は有効磁場を求めて居ないので、磁歪と有効磁場との関係が判然としない。よつて著者等は強磁性 Fe-Al 系合金の全般に亘り磁歪と有効磁場との関係を詳細に研究するため、Al を 16.56% まで含有する 17 種の合金につき最高磁場 1200 Oe まで測定を行った。

II. 測定装置、測定方法及び試料

従来我々の実験室で使用して居る測定装置⁽¹⁾では試料が 2 本の長い支柱に橋渡しになつてゐるため振動が激しく、晝間は殆ど測定不可能である。又装置には轉子が 1 ケだけしか用ひてないので之を挟む上下の金屬面を常に平行に保つことが出来ず、同じ試料でも取付ける度毎に観測値が異なる。よつて著者等は種々研究の結果、上述の長い支柱を除いて試料の振動を無くし、且つ 2 ケの同じ太さの轉子を用ひ上下の金屬面を常に平行に保つて何時も正確な値が得られる様な新測定装置を考案した。

Fig. 1 はその装置の略圖である。先づ相當に大きな質量を有する眞鍮臺にはその左側に長い眞鍮腕が出て居り、そ

Fig. 1 Magnetostriiction-Measuring Apparatus.

の腕の左端の上部にある尖端は試料 S の左端の中央に接觸してゐる。又眞鍮臺の上に突出して居る二つの小さな支臺 B₁ 及び B₂ はその上面が平滑に仕上げられて居り、その上にそれぞれ鏡を有する轉子 R₁ と鏡を有しない轉子 R₂ とが載せてある。更にこれ等二つの轉子の上には、下面が平滑に仕上げてある眞鍮角棒 A が置いてあり、その左端の穴には石英管が封臘を以て固く嵌め込んである。而して石英管の左端は丸味を帶び試料 S と比較的小面積を以つて接するやうにしてある。次に A と B₂ との間に取付けてあるスプリングは A を下方に押して二つの轉子との接觸をよくし、且つ A を左方に押して試料の両端の接觸をよくする。又縦割にされた半分の硝子管は圖の如く眞鍮腕の上面に臘を以て取付けられ、その中に試料 S が置いてある。この装置の製作に當つて特に注意を要することは、二つの轉子の直径を出来るだけ等しくし、且つ試料 S の左

右兩接觸點を結ぶ線が A の下面及び B₁, B₂ の上面に平行になるやうにすることである。かやうにすれば轉子に接する上下兩面は常に平行に保たれ、測定の際轉子が這り起さないから常に正確な値が得られる。又試料は従来の装置の如く長い支柱に橋渡しされてゐないから、振動は殆ど無く何時でも測定することが出来る。尙この装置では従来の如く試料の兩端に銅片を半田付けしたり、これを更に封臘で石英管に固着したりする必要なく、唯試料を上下に出し入れするのみであるから、取扱ひが極めて簡単である。

次に試料 S の磁化曲線を求めるためには、試料の直径より稍々太く試料と同じ長さを有する二次線輪を別に準備して置く。磁化コイルはレール上に動き容易に試料に均一磁場が與へられるやうになつてゐる。その長さは 40 cm, 内径は 6 cm で、定数 $4\pi n$ は $62.2/A$ である。

磁歪の測定方法は次の通りである。先づ磁化コイルに交流を通じ普通の方法で試料を消磁する。次に試料に発生した熱の消失するのを待つて、磁化コイルに一定の直流を通ずる。この時試料は一般に膨脹或は收縮して鏡を有する轉子 R₁ が迴轉する。而して尺度及び望遠鏡を用ひその迴轉角に相當する尺度上の読みを求めれば次式によつて磁歪が計算される。

$$\frac{\delta l}{l} = \frac{rn}{lD}$$

ここに l は試料の長さ、 δl は磁化による長さの變化、 $\frac{\delta l}{l}$ は磁歪、 r は轉子 R₁ の半径、 n は尺度の読み、 D は鏡と尺度との距離である。著者等の場合には $r=0.372\text{mm}$, $l=10\text{cm}$, $D=97\text{cm}$ であるから $n=0.1\text{mm}$ に對し $\frac{\delta l}{l}$ は 0.383×10^{-6} となる。

磁化の測定は彈動電流計法

により磁歪の測定と同一條件の下に行つた。外部磁場 H_0 から平均有効磁場 H を求めるには次式を用ひた。

$$H = H_0 - NI$$

ここに I は平均の磁化の強さ、 N は平均反磁場係数である。 N の値としては R. Mann⁽²⁾ の測定結果を用ひた。

次に試料を作るに用ひた金屬は日本電解製鐵所製の電解 Fe, Alcoa 製の Al 及び 2 種の電解 Ni で、その分析結果は Table 1 に示す通りである。

試料を作るには先づこれ等の金屬の適當量を内径 2.5cm のアルミナ坩堝に入れ、水素を通じながらタンマン爐にて熔解した。この熔融物は充分攪拌した後、アルミナ坩堝に入

(2) 本多, 木戸, 東北帝大理科報告, 9 (1920), 221;

本多, 増山, 東北帝大理科報告, 15 (1926), 755.

(3) R. Mann, Disert., Berlin. (1895).

Table 1 Results of Chemical Analysis of Metals Used.

Metals	Fe(%)	Co(%)	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Al(%)	Zn(%)
Electrolytic Iron	—	—	0.05	0.00 ₄	0.00 ₈	0.000 ₅	0.00 ₃	None	0.02	—
Aluminum (Alcoc)	0.48	—	0.02	0.00 ₈	0.01 ₀	Trace	0.00 ₂	None	—	0.02
Electrolytic Nickel (Katanga Co.)	0.01	0.34	0.02	0.00 ₀	0.00 ₆	0.000	0.00 ₀	—	—	—
Electrolytic Nickel (Nihon-Soda Co.)	0.11	0.23	0.05	0.00 ₀	0.00 ₆	—	0.00 ₄	—	—	—

つた鑪爐よりとり出し常温空气中で凝固させた。次にこれを鍛造して約5mmの丸棒とし、最後に旋盤で直径4mm、長さ10cmの試料に仕上げた。試料は更に高温真空中で1000°に1時間加熱し鑪中で冷却した。

なほ試料のAl含有量は化学分析によつて決定した。

III. 測定結果

Fe-Al系合金の測定結果はTable 2並にFig. 2(a)~(r)に示してある。圖に於て横軸に有効磁場 H (Oersted) 及び磁化の強さ I (C.G.S. 単位) をとり、縦軸に磁歪 $\frac{\delta l}{l}$ 及び磁化の強さをとつて $\frac{\delta l}{l} - H$, $I - H$ 及び $\frac{\delta l}{l} - I$ の曲線を描いた。尚 500e 以下に於ける磁場の目盛を擴大して弱磁場に於ける曲線を明瞭に示した。

Table 2 Magnetostriction and Intensity of Magnetization.

10.67% Al			11.47% Al			11.86% Al		
H	$\frac{\delta l}{l} \times 10^6$	I	H	$\frac{\delta l}{l} \times 10^6$	I	H	$\frac{\delta l}{l} \times 10^6$	I
1.8	0.2	170	1.3	0.2	179	0.7	0.4	189
3.4	0.4	243	2.3	0.8	263	1.1	1.1	282
5.0	1.1	318	3.7	2.3	340	2.0	3.4	368
7.6	2.6	387	6.8	5.7	490	4.5	7.1	528
13.6	7.9	577	11.4	10.6	616	9.1	11.6	654
19.9	11.7	676	17.5	14.7	718	16.1	16.1	741
40.1	18.8	848	39.1	22.6	870	39.0	22.9	873
64.9	22.5	949	66.2	26.4	935	77.1	26.3	922
92.3	25.5	1008	95.5	29.4	963	95.5	28.9	965
120.6	26.7	1053	123.8	31.3	1008	125.0	30.4	991
180.0	28.2	1097	184.4	32.8	1034	185.6	32.3	1016
240.2	29.3	1130	245.2	33.9	1057	246.6	33.4	1035
300.7	29.7	1150	306.4	34.9	1071	308.4	34.2	1042
363.5	30.1	1167	369.8	35.4	1085	431.2	34.8	1067
547.9	30.4	1183	553.3	37.0	1102	555.1	35.6	1075
671.8	30.8	1191	677.2	37.3	1111	679.3	36.8	1079
857.7	31.2	1202	863.3	37.7	1120	865.2	37.2	1092
981.4	31.6	1207	987.0	37.9	1124	988.6	37.2	1100
1043.3	31.6	1208	1048.8	38.1	1127	1050.4	37.4	1103

12.68% Al			13.14% Al			14.35% Al		
H	$\frac{\delta l}{l} \times 10^6$	I	H	$\frac{\delta l}{l} \times 10^6$	I	H	$\frac{\delta l}{l} \times 10^6$	I
1.1	0.3	183	0.7	0.4	189	1.5	0.4	173
1.7	0.8	273	1.3	1.1	279	8.1	4.9	364
2.7	2.6	356	11.0	13.5	624	26.2	13.6	571
5.1	7.2	517	28.1	19.5	747	52.4	18.5	648
10.1	11.7	637	49.2	24.8	808	80.0	21.1	704
17.9	15.5	712	71.8	27.0	844	139.0	23.4	753
41.5	22.7	831	100.7	29.7	880	199.9	24.5	774
69.7	26.5	878	130.7	31.2	897	261.2	26.4	789
98.0	29.1	923	251.8	34.6	952	322.7	26.6	810
127.1	30.2	954	375.2	36.8	967	445.6	27.2	822
188.1	32.1	975	560.5	37.6	987	568.9	28.3	840
249.6	33.6	985	860.4	38.7	1006	692.9	29.1	847
310.9	34.4	1000	1180.7	39.8	1016	879.2	29.4	852
434.8	35.5	1008	—	—	—	1189.9	29.8	857
559.2	36.8	1011	—	—	—	—	—	—
682.5	37.4	1026	—	—	—	—	—	—
869.0	37.8	1027	—	—	—	—	—	—
992.8	38.0	1031	—	—	—	—	—	—
1179.1	38.2	1042	—	—	—	—	—	—

Fig. 2 Magnetostriction and Magnetization Curves of Fe-Al Alloys.

Fig. 2 Magnetostriction and Magnetization Curves of Fe-Al Alloys. (continued)

Fe の $\frac{\delta l}{l}$ (Fig. 2 (a)) は従来測定されたものと大同小異である。即ち $\frac{\delta l}{l}$ は H の増加と共に初めは増加するが、 $H=170\text{Oe}$ に於ける極大値 0.9×10^{-6} を経て後は減少し、 $H=70\text{Oe}$ に於て零となる。磁場を更に増加すると $\frac{\delta l}{l}$ は負の値をとり、その値は初め急に増加するが、漸次増加の割合を減じ $H=1200\text{Oe}$ に於て -11.7×10^{-6} となる。Fe の磁化曲線も従来測定されたものと殆ど同様である。次に $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線を見ると、Fe の $\frac{\delta l}{l}$ は磁化の強さの増加と共に始めは殆ど現はれないが、 $I=200\text{ C. G. S. 単位}$ を越えると現はれ始め、徐々に増加して $I=950\text{ C. G. S. 単位}$ に於て極大に達する。次にこの極大値を越えると比較的急激に減少して $I=1100\text{ C. G. S. 単位}$ に於て零となる。更に磁化の強さが増加すると $\frac{\delta l}{l}$ は負の値をとり、その値は比較的急激に増加する。

0.64% Al の合金の $\frac{\delta l}{l} - H$ 及び $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線 (Fig. 2 (b)) には Fe の曲線に比較して正の極大がなく、 $\frac{\delta l}{l}$

は負の値のみをとる。1.66%~4.81% の Al を含む合金の $\frac{\delta l}{l} - H$ 及び $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線 (Fig. 2 (c)~(e)) は何れも Fe のそれに類似して居り、唯その絶対値が異なるのみである。5.90%~7.63% の Al を含む合金の $\frac{\delta l}{l} - H$ 及び $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線 (Fig. 2 (f)~(h)) は上述の曲線と同様に或る磁場及び或る磁化の強さに於て一つの正の極大を示すが $\frac{\delta l}{l}$ が負の値をとることはない。

次に 8.80%~16.56% の Al を含む合金の $\frac{\delta l}{l} - H$ 曲線 (Fig. 2 (i)~(r)) は何れも互に類似して居る。 $\frac{\delta l}{l}$ は磁場の弱い間は殆ど現はれないが、或る磁場に達すると急に増加し始め、高磁場に於ては漸次その増加の割合を減ずる。又これ等合金の $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線も磁区の急速廻轉範圍に於ては同様互によく類似して居り $\frac{\delta l}{l}$ は磁化の強さが大體 100 C. G. S. 単位 まで殆ど現はれないが、これを越えると急に増加し始める。然し磁区の連続廻轉範圍に於ける曲線は合金によつて複雑な形を示して居る。

次に Fig. 2 の諸曲線から 10, 50, 150 及び 1100 Oe の磁場に於ける $\frac{\delta l}{l}$ 及び I を求め、これを濃度に対して描けば Fig. 3 の如くなる。圖に見る如く 10, 50, 150 及び 1100 Oe の磁場に於ける磁歪は一般に Fe に Al の加はるに従ひ始め僅か減少し約 0.6% Al の極小値を経て後は徐々に増加し、約 6% Al 附近から急に増加し始める。次で磁場の大きな場合には 11.5~13.2% Al に於ける最大部分に達し、これを越えると急に減少する。又磁場の小なる場合には大體二つの極大値と一つの極小値を示す。

次に Fe の磁化の強さは磁場の大きな場合には Al の加はるに従ひ始めは小なる極小値及び極大値を示すが、後には Al 量と共に漸次減少する。又磁場の小なる場合には多くの極大値、極小値が現はれるが、磁場の増加と共に漸次消滅して行く。

IV. 新磁歪合金「アルフェル」

Fe-Al 系中最大の磁歪を有する 13.14% Al 合金の磁歪及び磁化の曲線を Ni のそれ等と比較する爲に Ni に関する測定結果を Fig. 4 に示して置いた。圖によると 13.14% Al 合金の磁歪及び磁化の飽和値は何れも Ni のそれより大であるが、 $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線の傾きは 13.14% Al 合金の方が Ni より小である。なほ 2

Fig. 3 Magnetostriction and Magnetization-Concentration Curves of Fe-Al Alloys.

13.14% Al Alloy-Mark ○
Electrolytic Nickel (Katanga Co.)-Mark Δ
Electrolytic Nickel (Nihon-Sōda Co.)-Mark □

Fig. 4 Magnetostriction and Magnetization Curves of Nickel and 13.14% Al Alloys.

種の Ni に就て比較すると、磁化曲線は餘り變らないが磁歪は日曹社製の方がカタンガ製のものより遙かに小さい。

超音波振盪の電気響勢力変換能率は近似的にはその $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線の傾き及びヤング弾性率の自乗並に複素導磁率に比例する⁽⁴⁾。従つて $\frac{\delta l}{l} - I$ 曲線の傾きから云へば Ni の方が遙かに大きい理であるが、尙これと同時にヤング弾性率及び複素導磁率をも考慮に入れねばならぬので、上述の結果のみを以て兩者の変換能率を比較する譯にはゆ

- (4) 菊地、第4回日本工學大會電氣部會豫稿 (1939), 35.
(5) 沖電氣株式會社研究部長小林勝一郎博士によつて爲されたもので、同博士の御厚意に對し深く感謝の意を表する。

かぬ。然し實際超音波振盪としての測定結果⁽⁵⁾によれば、11.5~13.2% Al の合金の変換能率は Ni のそれに近い値を示す。よつてこれ等の合金は超音波振盪として利用し得る譯で、著者等はこれにアルフェル (Alfer) なる名稱を與へた。

V. 總 括

Al を 16.56% まで含有する 17 種の Fe-Al 系合金につき室温に於て約 1200 Oe までの磁歪を新しい装置により測定し、同時に磁化の強さ I を同一條件のもとに測定して次の結果を得た。

(1) Fe の測定結果は從來得られたものと殆ど同値で、その磁歪は或る磁場又は或る磁化の強さに於て一つの正の極大を示すが、更に高い磁場又は磁化の強さに於ては負の値をとる。

(2) Fe に Al を添加すると磁歪の極大値は一般に漸次増加するが、負の値は減少する。而して 5.90% 以上の Al を含む合金に於ては磁歪は正の値のみとなる。又 8.80% 以上の Al を含む合金の磁歪は極大を示さず磁場或は磁化の強さと共に増加するのみである。

(3) 1100 Oe の一定磁場に於ける磁歪は Al 5.3% 以下に於ては負の値を示し、これ以上に於ては正の値を示す。而して 11.5~13.2% Al に於ては一つの大なる最大部分を現はす。

(4) 1100 Oe の一定磁場に於ける磁化の強さは Al の増加するに従ひ大體に於て漸次減少する。

(5) 13.14% Al の合金は 1200 Oe の磁場に於て 40×10^{-6} の如き大なる磁歪を示し、超音波振盪として好適である。著者等はこれに「アルフェル」なる名稱を與へた。

終りに臨み實驗を援助された河野達夫助手に對し厚く謝意を表する。又この研究の一部は齋藤報恩會並に文部省科學研究費よりの補助によつてなされたもので、こゝに同會に對し深謝する。

外 國 文 獻 紹 介

熔融高爐鑄滓の電氣傳導度 [A. E. Martin and G. Derge, A.I.M.E. Technical Pub. No. 1569. Metals Technology, (1943) Feb.] CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系で高爐組成範圍の鑄滓の電導度、電解に關し組織的實驗を行い鑄滓が熔融狀態でイオン化して居ることを確認し鑄滓は電氣的中性分子のみから成ると見做され勝ちだつた從來の考え方の不備を指摘した。先づ著者等はこのイオン存在を是認する現在迄の諸文獻を簡単に紹介し次いで實驗に就き報告した。高純度の氣流中で黒鉛坩堝の中で前記三元の人工鑄滓を密閉式誘導爐で熔解し鑄滓中に平行に挿入した黒鉛棒間の抵抗をホイートストン橋で測定して電導度を求めた。電

解實驗も同一操作で 6V 蓄電池を使用、電流は 1.4A とした。熔融鑄滓は $10^{-1} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 程度の大きい電導度を正の電導係數を持ち高度イオン化を示す事を確認した。三元狀態圖上に等電導度曲線を圖示し、最大値に三元共晶組成の近くにあることを知つた。電導度は鹽基度、脱硫能と相關關係にあること及びそれらよりイオン化の程度を論じた。電解實驗の肉眼的觀察、分析結果から電解中珪素は負の帶電群 Ca は正の帶電群と共に移行する事を知り珪素はシリケートイオンとして Ca は Ca⁺⁺ として存在する事を認めた。最後に本研究結果並びに最近のガラス構造理論を參照し鑄滓構造の理論を論じた。(大谷正康)