



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## ニッケル製環状磁歪振動子の工業的製造法における熱処理について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-05-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 二木, 治郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3012">http://hdl.handle.net/10258/3012</a>

# ニッケル製環状磁歪振動子の工業的製造法における熱処理について

二 木 治 郎

## On the Heat Treatment of the Nickel Radial Magnetostriction Vibrator

Jiro Futatsugi

### Abstract

As for the nickel magnetostriction vibrator, insulation film of its element sheets has hitherto been made by means of the heat treatment.

In this paper, the present writer explains not only the relation between the oxidized insulation film of the nickel surface and the magnetostriction sensibility of the nickel vibrator, but the heat treatment of the element sheets of the efficient nickel transducer as well.

### I 緒 言

水中超音波送受波用として用いられる磁歪振動子の材料としては、従来磁歪効果の大きいこと、薄板がえられること、などのために主として純ニッケルが用いられている。純ニッケル板より打ち抜かれた素子板は、壓延および打抜きなどに原因する内部歪を除去するため熱処理を施すことが必要である。熱処理された素子板を、必要に応じて適当な厚さに積層して振動子を作るのが普通である。素子板を積層するに當つては、渦流損を減少せしめるため、そのおのおのを絶縁する。絶縁の方法には、一般の積層磁性芯のごとく塗料をぬる方法と、熱処理のさいにことさらに適当量の空気を送り込んで、ニッケル表面に所要の絶縁度を有する酸化物被膜を生成せしめる方法とがある。前者は爐中にて空気を断つて熱処理した後、数回の塗装工程を要する上に、熱処理の結果甚だしく軟化したニッケル板に、再び機械的歪を與えるおそれが多い。これに反し後者は、表面酸化物被膜のため磁歪感度は多少損うのであるが、絶縁のための塗装工程を省くことができ、且つニッケル酸化物被膜は水に侵され難いので、振動子を水中において用いる場合に對しては、特に有利な點となる。なお素子板は一般に多量の枚数を要することからも、前の方法は手数が多くかかり不利である。

今回はニッケル製磁歪振動子の工業的製造法の基礎を興えるため、ニッケル素子板の熱処理時における表面絶縁被膜の生成と磁歪感度の関係を詳細に実験測定し結果を得たので報告する次第である。

## II 磁歪振動子の測定理論

ニッケル薄板より打抜きした環状磁歪振動子の素子板を第 1 圖に示す。

(a) 材質 純ニッケル

(Ni 98.96% Si 0.42% Fe 0.07%

Al 0.14% 残 0.41%)

(b) 厚さ 0.125 mm

(c) 重量 6.9 gr

素子板を種々の条件のもとで熱処理したものについて、磁歪感度を比較するには磁歪活性度  $k\Gamma^2$  を用いる<sup>1)</sup>。すなわち一般に電気音響変成器として電氣的勢力と音響的勢力とを相互に授受する場合の機器の感度を表現する量として

$$W = \frac{|\dot{A}_1 \dot{A}_2|}{Rd} \dots \dots \dots (1)$$

が用いられる。ただし  $Rd$  は制動インピーダンスの実数部を示し、 $\dot{A}_1$ 、 $\dot{A}_2$  は力係数である。例えば共振周波数における電気音響変換能率  $\eta_0$  は

$$\frac{1}{\eta_0} = \frac{Rd + |Zmo| \cos 2 \angle k}{|Zmo|} \cdot \frac{r}{r_0} = \left( \frac{r}{W} + \cos 2 \angle k \right) \times \frac{r}{r_0}$$

となり  $\eta_0$  は  $W$  で決定される。ここに  $|Zmo|$  は動インピーダンス円の直径、 $\angle k$  は複素磁化率の位相角、 $r$ 、 $r_0$  はそれぞれ機械抵抗および輻射抵抗を示す。(1) 式の力係数  $\dot{A}_1$ 、 $\dot{A}_2$  は環状振動子においては

$$\dot{A}_1 = \dot{A}_2 = 2\pi s \cdot \frac{4\pi k\Gamma}{l}$$

であるから<sup>2)</sup>、(1) 式は (2) で表わされる。

1 菊池：磁歪率に関する研究，通信誌 229 215 (1942)

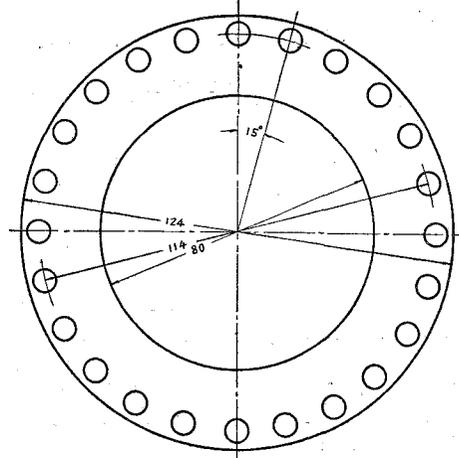


Fig. 1. The element sheet of the nickel magnetostriction vibrator.

$$W = \frac{1}{Rd} \left( 2\pi S \frac{4\pi N}{l} \right)^2 \kappa \Gamma^2 = \frac{1}{|Zd| \sin \angle \kappa} \left( 2\pi S \frac{4\pi N}{l} \right)^2 \kappa \Gamma^2 \dots (2)$$

ただし  $S$  は有効断面積,  $\kappa$  は複素磁化率,  $l$  は磁路長,  $N$  は捲回数で, 感度は磁歪活性度  $\kappa \Gamma^2$  によつて表わされる。又磁歪定数  $\dot{K}$  は,  $\dot{S}$  を磁歪性駆動力の變化量,  $\dot{H}$  を磁場の變化量とすれば, 次式で表わされる。

$$\dot{K} = \frac{\dot{S}}{H} = \frac{\dot{M}}{H} \cdot \frac{S}{M} = \kappa \Gamma$$

但し  $\dot{M}$  は磁化の變化量である。従つて, 同じ寸度の環状振動子の感度を比較する場合には, 渦流電流による磁気遅相の影響は同一であるから, 磁歪定数  $\dot{K}$  によつてもよいことは勿論である。

### III 實 験

#### 1) 資料の製作

振動子を製造するには, その素子板の表面絶縁被膜が強くて取扱い中に破れるおそれがなく, かつその感度も充分良いことが要求される。絶縁度と感度は相反するので, 必要な性能を有する素子板を得るための熱処理法を決定することが必要となる。この目的のために, 次のような熱処理法を採り, 熱処理中に電気爐に流入する空気の量を調節することによつて, 表面酸化度の異なる 9 組の資料 (1 組の數量は便宜上 6 枚とした) を作り, 各組について特性を測定してその結果を比較した。

熱処理法: 急熱 900°C にて 17.8 分間熱し内部歪を除去する → 700°C まで急冷しこの間において表面酸化を行なう → このまま 700°C に 30 分間保ち熱歪を除去する → これを 2.5 時間の間に 200°C まで徐冷する。

尚熱処理温度と磁歪定数  $\kappa \Gamma$  の関係を示せば第 2 圖の通りである。

これは純ニッケルの薄板から非常に隣

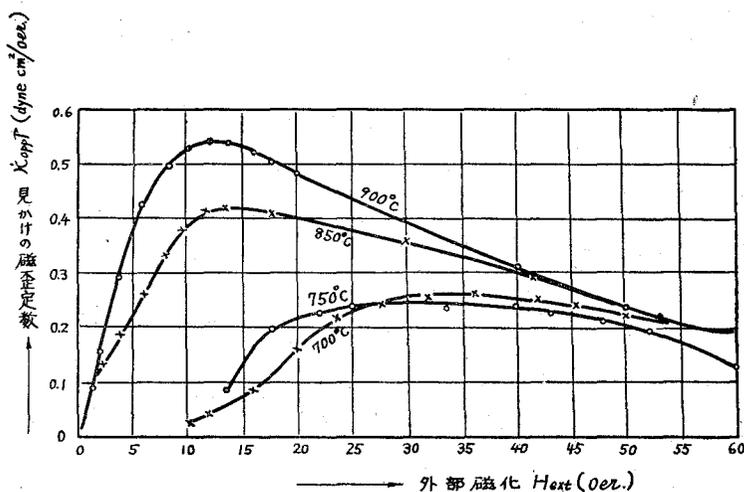


Fig. 2. Relation between the magnetostriction constant and the external magnetization.

2 脚註 1 参照  
3 脚註 1 参照

接して切りとつた短冊型資料を、空気を断つて、各枚にそれぞれ 900°C, 850°C, 800°C, 750°C 及び 700°C で熱処理をして、感度と磁化の關係を示したものである。

(2) 測定法

上のようにして得られたそれぞれ表面酸化度のことなる 9 組の資料の特性を測定するには、それぞれの組の 6 枚の素子

板を重ねて第 3 圖のように 2 枚の同形の薄いベークライト板の間に入れ捲線を施し、これを水平において資料が自由に磁歪振動を行なえるようにした。なお資料

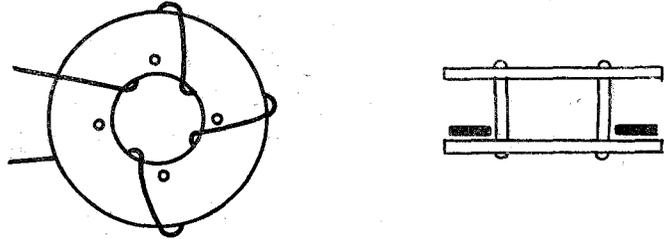


Fig. 3. Holder of nickel sheets.

が振動中制動されるのを防ぐために支柱の部分にふれないように直してやる必要がある。捲線は直流偏倚電流により熱せられると實効抵抗に變化を來すから、この點に注意する必要がある。

9 組の資料について第 4 圖に示す測定回路により電源の周波數を漸次變化してバランスを求め、各周波數に對する資料の入

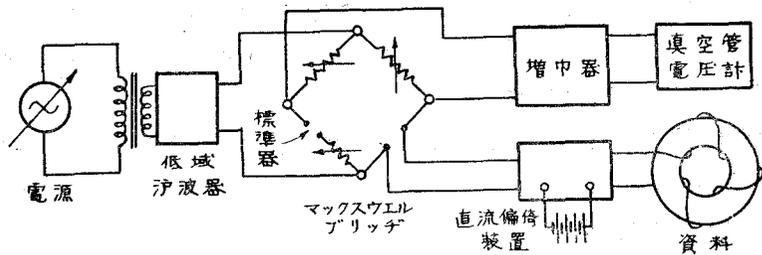


Fig. 4. Maxwell bridge for measuring the input impedance of the nickel sheets.

力インピーダンスをリアクタンスと實効抵抗に分離して求め、その結果および (3), (4) 式により磁歪定數  $kI$ , 磁歪活性度  $kI^2$ , 複素磁化率  $k$ , および磁歪率  $I$  を算出した<sup>4)</sup>。

$$kI = \frac{R}{2\sqrt{2\pi} \cdot SN} \sqrt{\Delta f \cdot m \cdot Z_{m0} \times 10^9} \text{ dyne/cm} \cdot \text{oer.} \dots\dots(3)$$

$$k = \frac{R}{8\pi SN^2} \cdot \left( Ld - L_0 + \frac{Rd - R_0}{j\omega} \right) \times 10^9 \text{ e.m.u.} \dots\dots(4)$$

ここに  $R$  は資料の平均半径 (4.7 cm),  $S$  は有効斷面積 (0.1136 cm<sup>2</sup>),  $m$  は重量 (4.2 gr),  $\Delta f$  は象限周波數差 (サイクル),  $Rd$  および  $Ld$  は資料を制動したときの電氣端子の抵抗 ( $\Omega$ ) およびインダクタンス ( $H$ ),  $R_0$  および  $L_0$  は同形同大のトロイダル捲線の空芯の場合の抵抗

4 菊池：磁歪の測定について、電氣の友 (昭和 15. 5 別冊)

およびインダクタンスで、 $R_0=6.2 \Omega$ 、 $L_0=1.02 \times 10^{-3} H$  である。それらの測定結果を示せば、第 5 圖および第 6 圖の通りである。曲線に附記した数字は資料番號を示す。

(3) 測定結果

まず各資料の感度を第 6 圖又は第 5 圖について比較すると、No. 2 は偏倚磁化 10 エルステツドにおいて磁歪定数が

$0.5 \times 10^6$  で最もわるく、No. 7 は偏倚磁化 3 エルステツドにおいて磁歪定数が  $1.4 \times 10^6$  を超え No. 2 の 3 倍にも達し、9 組の中最も優れている。前者は急冷の操作において、ことさらに空気を送り込んで表面酸化を促進させたものであり、後者は密閉した薄鉄板製の筐に資料を納めて空気の流入を断つて酸化を極度に制限したものである。他の 6 組の資料は鐵筐の壁にそれぞれ大きさおよび數量の異

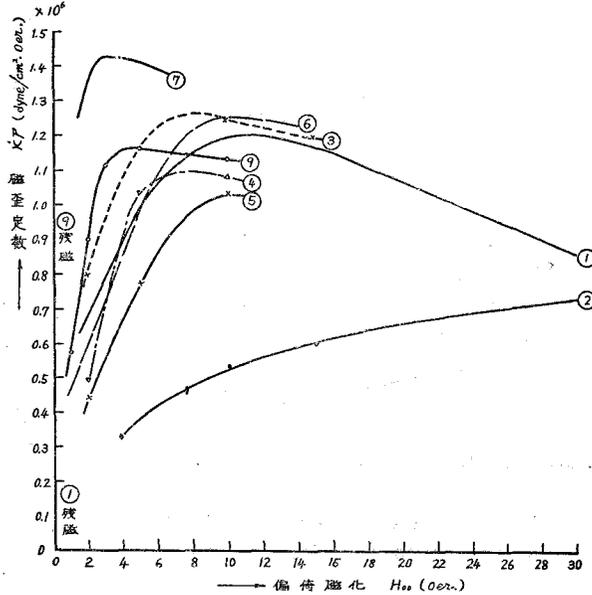


Fig. 5. Effect of various operating conditions of the heat treatment on the magnetostriction constant of the nickel.

なる小孔をすることによつて流入する空気の量を調節したものである。

次に各資料の表面酸化物被膜の絶縁度あるいは被膜の厚さおよび表面の色調について調べると、それらはそれぞれ異つているので、被膜の厚さをダイヤルゲージで測定しその結果を 16 段階に分類し、絶縁度と色調ならびに共振周波数の關係を求めた。これを表にしさらに 9 組の資料の位置を併せ示したのが第 1 表である。

第 1 表を見ると、まず被膜の厚さが  $0.4 \sim 0.7 \times 10^{-3} mm$  より次第に厚くなるに従つてその色調は重、青、緑、黄、橙および赤の単色より次第に變わり、これらの縞模様を経て灰白色、薄緑、薄墨、青黒青銅色と變化しそれと共に絶縁被膜の機械的強さも次第に大きくなつてい

る。9 組の資料の中 No. 7 は被膜が最もうすく絶縁は弱い。これに反し No. 2 は被膜が最も厚く両面で  $0.02 mm$  におよび素材厚の 16% に達し絶縁被膜の強度は最も大きい。被膜の厚さと共振周波数の關係を見るに、共振周波数は被膜の厚さと共に高くなり No. 7 の 13.9 KC より No. 2 の 14.7 KC に及んでいる。また各資料の stiffness は被膜の厚さと共に増

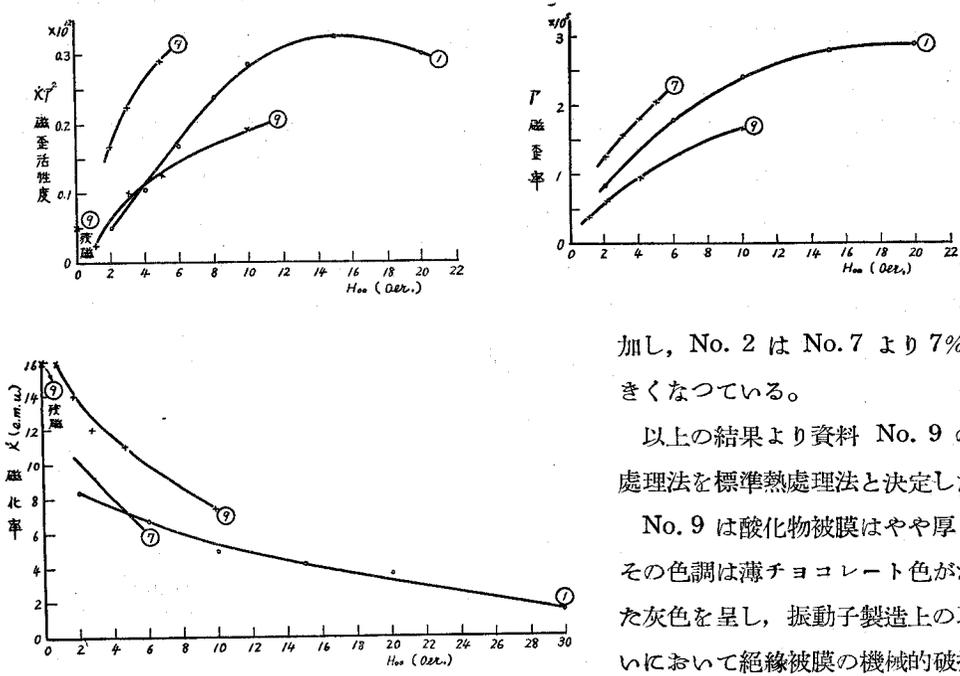


Fig. 6. Diagram showing the relation between the magnetostriction characteristics and the external magnetization.

加し, No. 2 は No. 7 より 7% 大きくなっている。

以上の結果より資料 No. 9 の熱処理法を標準熱処理法と決定した。

No. 9 は酸化物被膜はやや厚く, その色調は薄チョコレート色がかった灰色を呈し, 振動子製造上の取扱において絶縁被膜の機械的破損のおそれも殆んどなく感度も No. 7 より僅か下がるだけである。ことに小

さな偏倚磁化における感度は他のものより良く, 又瞬間勵磁による残留磁化を偏倚磁化として用いた場合の感度も高く, 10エルステツ F の連続偏倚磁化を與えた場合に比べて幾分下がるだけである。こ

第 1 表

酸化物被膜の厚さ	x/10 <sup>3</sup> mm																	
段階番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
色 調		干渉縞				淡い干渉縞	灰白色	灰白色	薄チョコレート	薄チョコレート	灰 (偏 濁)	薄茶色	暗茶色	暗茶色	暗茶色	暗茶色	暗茶色	青黒トロン
共振周波数 (KC)						13.9	14.14	14.26	14.35	14.45							14.74	
絶 縁 度	劣	劣	劣	劣	劣	良	被膜弱	被膜弱	被膜弱	良	良	良	良	良	良	良	被膜極めて強し	

これは振動子を受波器として用いた場合特に有利な点となる。

IV 熱処理の實際ならびに振動子の製造

以上述べたように 9 組の資料にそれぞれ異なつた表面酸化を施し, その結果より最適の表面絶縁物生成熱処理法を定めたのであるが, この方法を用いて第 1 圖の素子板を以て積厚 7 cm

の 1 組の水中超音波送受波用振動子を製造する場合の実際について述べる。

(1) 電気爐

温度の調節と素子板の取扱いの便宜上電気爐は比較的小型のものを用い、その寸法は内径横 120 mm, 縦 200 mm, 奥行 300 mm で電力容量 8 KW, 単相 220 V のものを用いた。温度計はアルメル・ク  
ロメル熱電對を爐の後部より挿入して用い、尙光學的高溫計を併用した。熱電對はあらかじめ鉛、アルミニウムおよび銅の融點で校正した。熱処理 1 回分の素子板の數量は取扱いの便宜上 200 枚とし、これらを内部にバラ掛けにし、且つ流入する空氣の量を一定にするため第 7 圖に示すような壁に小孔を開けた薄鐵板製の筐を用いた。尙筐内の温度分布を一様ならしめるため筐の内部前面にアスベスト板をおいた。

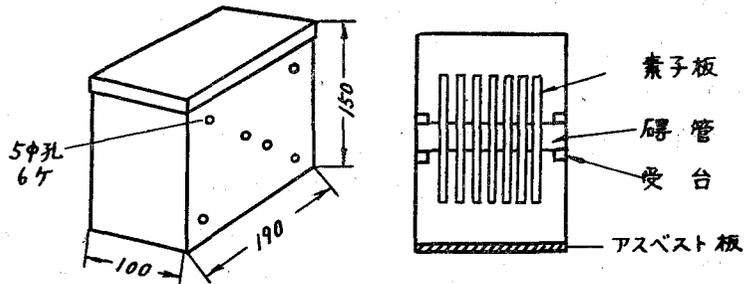


Fig. 7. Views of the iron case used for the heat treatment.

融點で校正した。熱処理 1 回分の素子板の數量は取扱いの便宜上 200 枚とし、これらを内部にバラ掛けにし、且つ流入する空氣の量を一定にするため第 7 圖に示すような壁に小孔を開けた薄鐵板製の筐を用いた。尙筐内の温度分布を一様ならしめるため筐の内部前面にアスベスト板をおいた。

(2) 素子板熱処理および組合せ

電気爐の電源を入れ温度が 950°C に上つたとき予め用意した素子板を納めた筐を爐中に入れる。この際の實際の處理の一例を第 8 圖に示す。

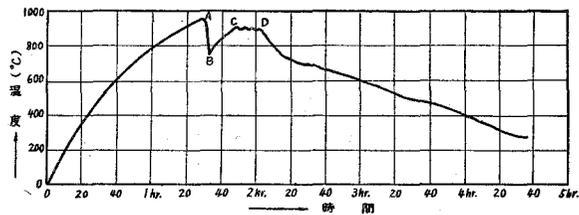


Fig. 8. Heat treatment characteristic curve of nickel sheets.

圖中 A は鐵筐挿入直前を示し爐の温度は 950°C でありここで電源を切る。B で爐の扉を開き鐵筐を入れ電源を閉じる。C D の間適當に電源を開閉して約 17.8 分間 900°±20°C に保つ。D で電源を切り扉を全開し E で閉じる。E から F まで扉の僅かな開閉により 700°C に保つ。F で更に扉を開き扉の調節によつて 200°/hr の割合で温度を下げる。鐵筐を爐から取り出す温度は 500°~200°C 間であり、この間の温度の相違は磁歪効果に殆んど影響を與えない。熱處理後の素子板は極めて軟かく機械的歪を受けやすいので取扱いには特に注意を要する。

この處理によつてできた素子板の中少数をとり (2) の測定法により測定した結果、その特性は第 5 圖の No. 9 の曲線に示されるものと充分一致していた。なお筐内の温度分布が均一でないか、あるいは各素子板表面の酸化に與つた空氣の量が一樣でない場合には、そのために

熱処理された 200 枚の素子板の性能は各板毎に若干のむらを生じ、その結果振動子の感度を劣化させることになるので、各板

毎の性能を確かめるため第 9 圖に示すような簡易測定法によつて、共振周波数ならびに感度を測定した。この測定法は各板の感度および共振周波数の値を求める代りに、既知の感度および共振周波数を有する素子板を基準にとり、これと比較して性能を測定するものであり、素子板に捲線を施すことなく簡単に測定を行なうことができるものである。その測定法は圖に示す 2 枚のペークライト板の間に素子板を 1 枚ずつ挿入し、電源の周波数を變えて 2 次捲線端子の出力を真空管電圧計で讀むものである。測定の結果 1 回の熱処理分の性能は充分な均一性を有することがわかつた。

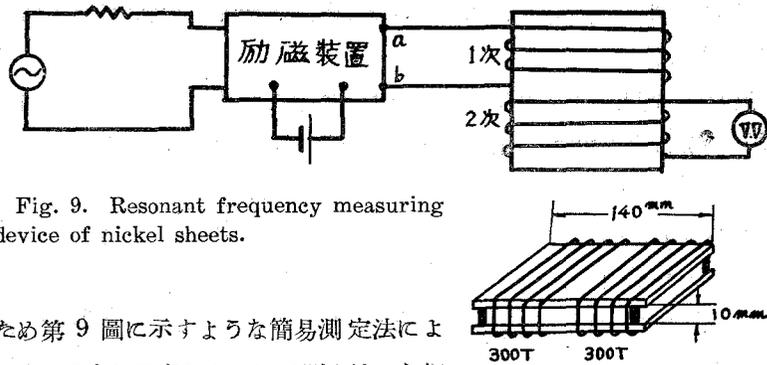


Fig. 9. Resonant frequency measuring device of nickel sheets.

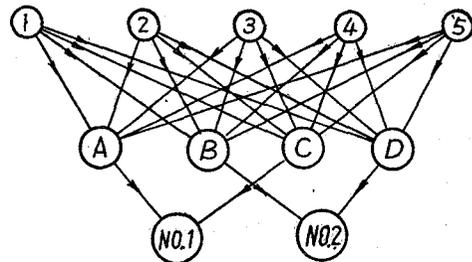


Fig. 10. An example of the method to mix up the sheets.

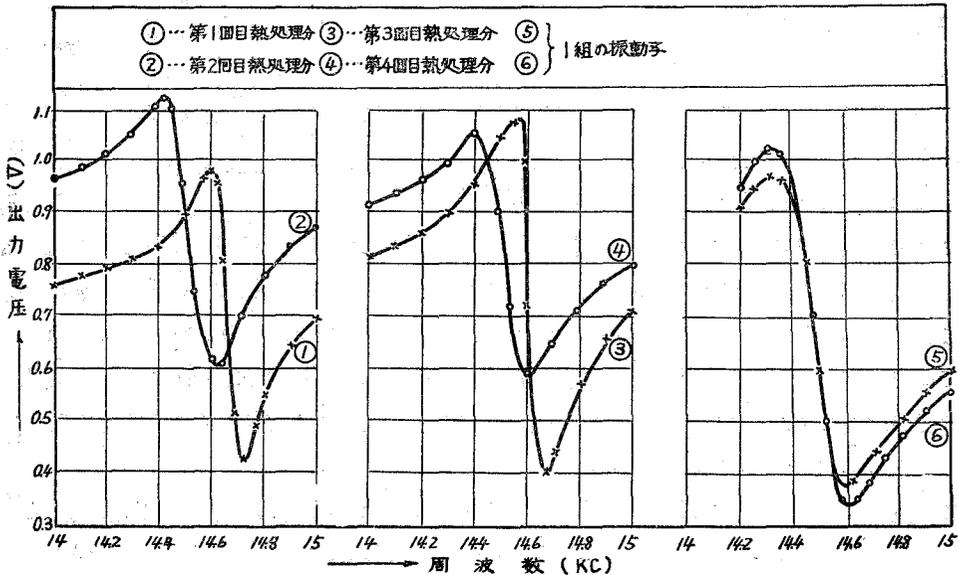


Fig. 11. Curves showing the resonant frequency of vibrators.

つぎに1組の振動子の所要素子板数は1000枚であるから、この熱処理を完了するには5回の操作を必要とするのであるが、各回の処理毎の素子板の性能は測定の結果実用上必要な均一性を有しているが、これらを組合せて1組の振動子とした場合のおおのの磁歪感度ならびに共振周波数をよく一致させるため、各回毎の素子板を互に組合せて1組分の素子板とする。その

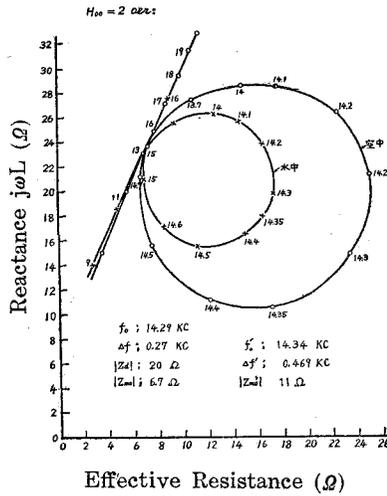
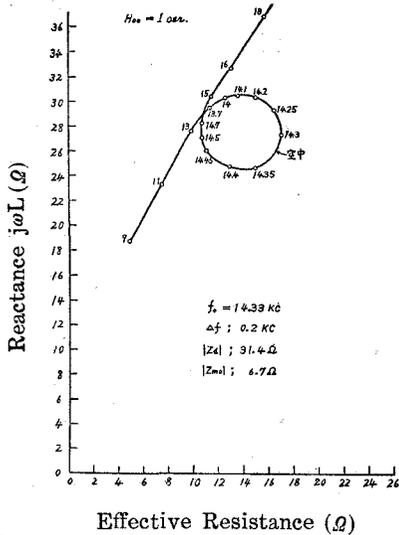


Fig. 12 b.

Fig. 12 a. Impedance characteristics of the Nickel magnetostriction vibrator.

組合せの方法を第10圖に示す。すなわちまず①より1枚ずつとつてA,B,C,Dとおき、次に②よりとつてその上に重ね、順次③④からとつてこれを繰り返す。最後にAとCを重ねて1箇所とし、BとDを他の1箇所と

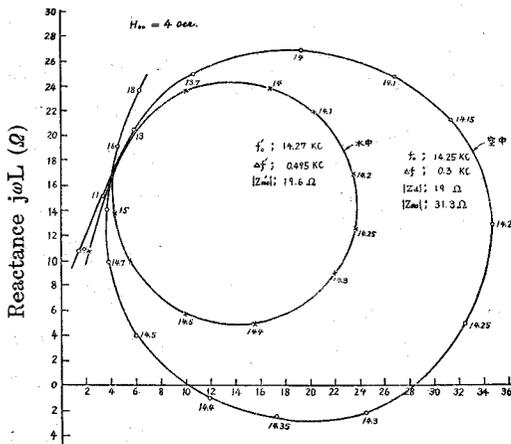
第 2 表

	直 流 偏 倚 磁 化 (Oer.)	1	2	3	4	5	7	10	残 磁
$f_0$	共 振 周 波 数 (KC)	14.33	14.29	14.26	14.25	14.19	14.17	14.12	14.26
$Z_d$	制 動 イ ン ピ ー ダ ン ス ( $\Omega$ )	31.5	26.5	22	19	17	13	10.2	24.6
	$\angle Z_d$	20°	17°	13.6°	13°	12.1°	11°	10°	16°
$ Z_{m0} $	動 イ ン ピ ー ダ ン ス 圓 直 徑 ( $\Omega$ )	6.7	19.0	27.1	31.3	34.5	36.0	33.7	24.5
$\Delta f$	象 限 周 波 数 差 (KC)	0.2	0.27	0.305	0.3	0.37	0.338	0.3305	0.2715
$k\Gamma$	磁 歪 定 数 $\times 10^6$ (dyne/cm <sup>2</sup> Oer)	0.27	0.53	0.668	0.712	0.768	0.812	0.777	0.60
	$\angle k\Gamma$	42°	34°	26.4°	26°	23.4°	17.4°	15°	32°
$k\Gamma^2$	磁 歪 活 性 度 $\times 10^{12}$	0.00665	0.0297	0.057	0.0736	0.096	0.1235	0.1435	0.0408
$\Gamma$	磁 歪 率 $\times 10^5$	0.246	0.56	0.852	1.036	1.274	1.52	1.87	0.68
$ k $	複 素 磁 化 率	11.3	9.48	7.85	6.86	6.03	5.34	4.15	8.82
	$\angle k$	20.45°	17.5°	13.5°	12.5°	12.25°	10.5°	10.2°	16°
$\eta_{ea}$	電 氣 音 響 變 換 率		27%		32%		27.6%		24%

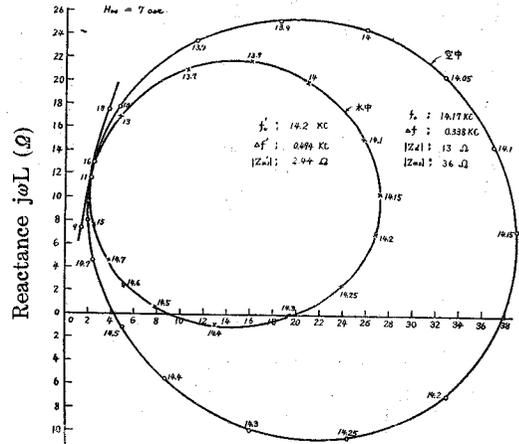
する。各1箇分の素子板を積層して絶縁ワニスで焼成し、捲線を施し振動子とする。組合せの結果2箇の振動子の共振周波数は第11圖の曲線⑤⑥のようによく一致する。なお圖中の曲線①②③および④はそれぞれ組合せ前の振動子の特性を示す。

(3) 振動子の定數

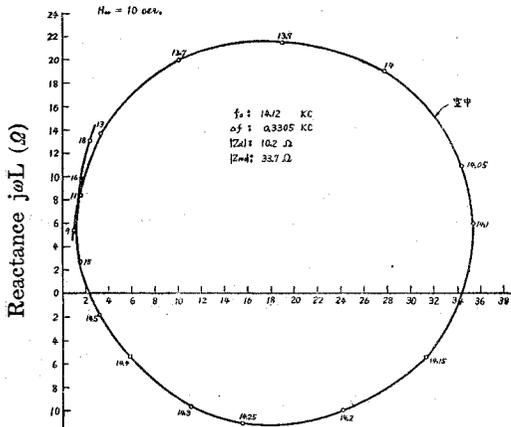
以上により製造した振動子につきその特性を測定した結果を第12圖(a)乃至第12(f)に示す。第2表はそれらより求めた定數を表にしたもの、第13圖はこれを曲線に描いたものである。尙振動子の定格は次の通りである。



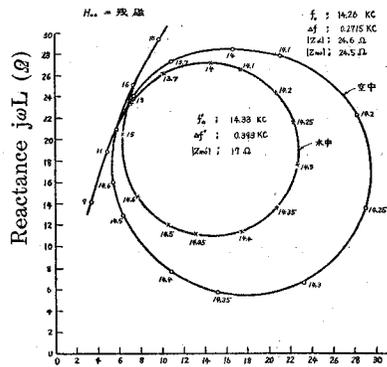
Effective Resistance.  
Fig. 12 c.



Effective Resistance.  
Fig. 12 d.



Effective Resistance (\Omega)  
Fig. 12 e.



Effective Resistance (\Omega)  
Fig. 12 f.

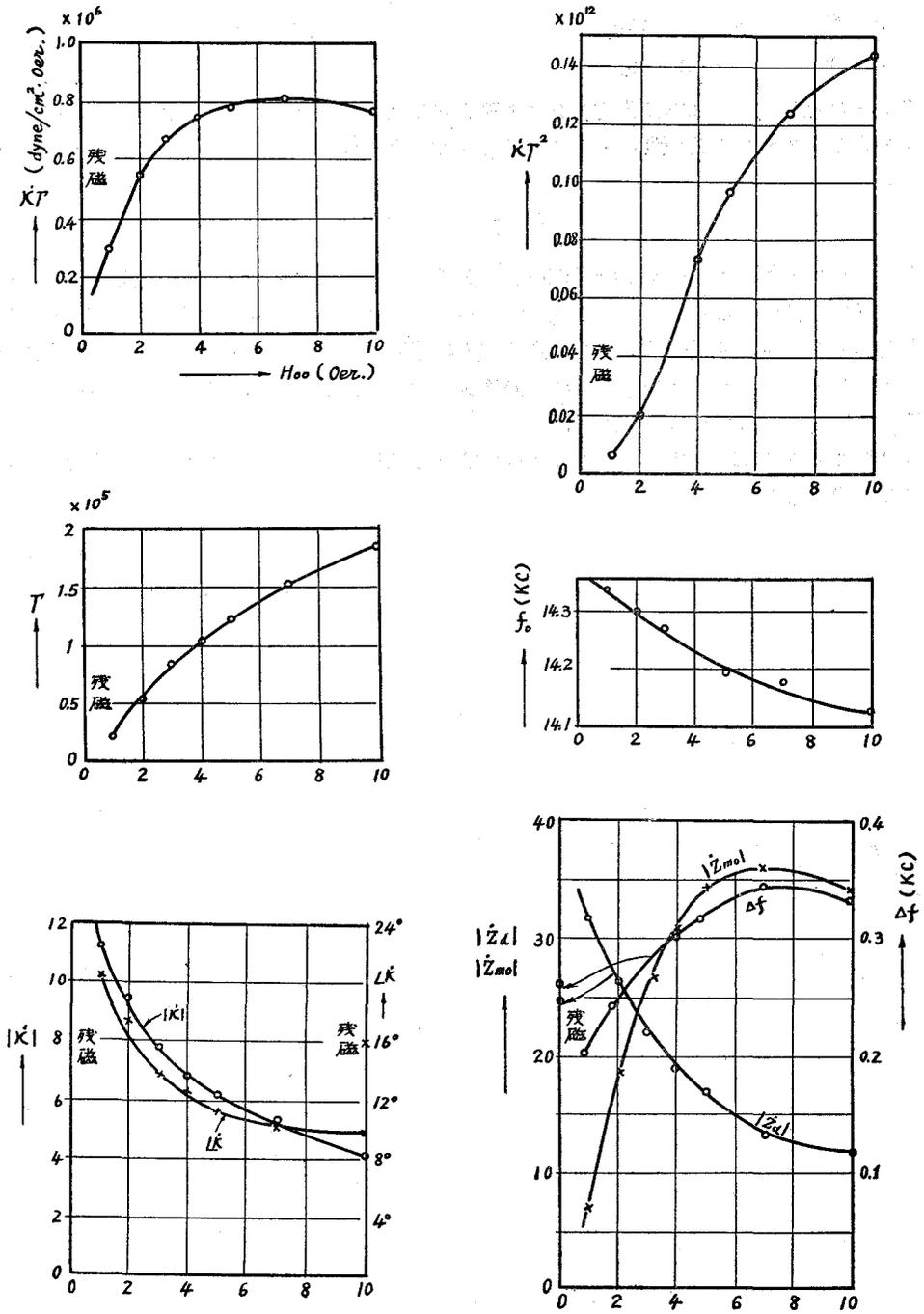


Fig. 13.

- (a) 材 質：純ニッケル                      (b) 素 材 厚：  $0.125 \pm 0.025$  mm  
(c) 積 厚：70 mm                              (d) 素子板數量：500 枚  
(e) 重 量：3.4 kg

第2表を見るに、最適偏倚磁化における磁歪定数は  $0.777 \times 10^6$ ，磁歪活性度は  $0.1435 \times 10^{12}$  の値を示しニッケルの磁歪性能として充分満足すべきものである。

## V 結 言

薄ニッケル素材より打抜きした環状磁歪振動素子板の絶縁法として表面酸化熱処理法をとり、表面酸化度の異なる9組の資料を作りその表面絶縁度と磁歪感度の関係を求めた。その結果絶縁度あるいは酸化被膜の厚さと磁歪感度の関係が完全に明瞭となり、磁歪振動子製造上必要な性能を有するニッケル素子板の表面絶縁熱処理法が決定され、満足すべき性能を有する振動子を製造する基礎が與えられた。

本研究に當つては終始東北大學菊池教授の懇切な御指導を得たのでここに厚く感謝の意を表する次第である。

(昭和28年4月22日受付)