純鐵及び Fe-Co 系合金の振動板特性に關する二, 三の研究

一戸英敏* 藤田黎明** 山本達治***

T.Yamamoto, H. Ichinohe and T.Fujita : Some Problems on the Receiver-diaphragm Characteristics of Pure Iron and Fe-Co-V System. . The improvement of present telephone receiver depends chiefly on its magnetic circuit, and above all on the diaphragm. We have deduced the "goodness of a diaphragm G from electric-power sensibility, which, is proportional to the flux density B_0 and to the square root of reversible permeability at the using state. When G is compared on various magnetic materials, pure iron, Si-steel, 45 permalloy and Fe-Co-V alloy, the last one is excellent. Pure iron is used nowadays as diaphragm, we showed its diaphragm characteristics at various heat treatments, and best results are obtained by annealing at about 550° .

G is proportional to factor A , as A determines the goodness of diaphragm also. A increases with the decrease of gap length between diaphragm and pole piece, but because of magnetic saturation, drops again after a maximum.

The best values of A shows also Fe-Co(50%)-V(2%) alloy.

(Received February 24, 1950)

I 緒 言

現在の技術的及び経済的見地に立つて実現可能は電話器を用いた場合、特に國語傳送のための基礎的條件は周波数帯域 300~2500 cycl/sec の範圍で受話音 ラウドネス が 65 ホン以上で且つ綜合感度偏差 ± 5 db であることが最近明らかにせられた⁽¹⁾。但し雑音及び非直線歪は殆んど含まれぬとした場合である。以上の條件は従來の電話器の満足し得

ぬところであり、これが終戦後電話復興事業の一つとして新しい型の受話器の出現が要望せられて來た所以であるが、最近電氣通信省電氣通信研究所を中心とした研究陣が遂にこれを工業的研究に成功した。電話器の場合機械的音響系と電磁系との両者の改善が考えられるが電磁系について見るならば特に受話器の磁氣回路が最も改善の余地を残した分野であることが判つた。即ちこの分野の一つとして改善すべき重要な要素は受話器振動板材料であるので著者等は先ず純鉄振動板を研究し最適の熱処理温度を決め、次で Fe-Co 系合金の圧延加工に関する研究を行い遂に工業的の量産化に成功した。本報においては受話器の「振動板の良さ」なる量を導出し各種磁性材料を比較し、Fe-Co 系

* 岩手大学工学部

** 浪速大学工学部

*** 千路工業大学

(1) 電氣試験所通信部 6 研究係電話用送信器の研究, 26 (1947).

合金の優秀さを明らかにしたものである。

II. 振動板の良さに関する理論的考察⁽²⁾

受話器の感度を考察するために先ず電力感度を考える。電力感度は音響負荷中に発生する音圧 P を電力入力 I の平方根で除したものであるから感度 Q は

$$Q = \frac{P}{I \sqrt{Z}} = \frac{P \sqrt{Z}}{E} = \frac{\rho_0 C^2}{V w_0^2} \cdot \frac{S \cdot A}{m_0 \sqrt{Z}} u(w)$$

ここに I は音声線輪電流, E は端子電圧, Z は入力インピーダンス, ρ_0 は空気密度, C は空気中の音の傳播速度, V は音響負荷容量, w_0 は振動板の共振角周波数, S は実効面積 m_0 は実効質量, A は力係数である。

$U(w)$ は機械系常数によつて決まる訳であるから受話器の良さとしては $\frac{SA}{m_0 \sqrt{Z}}$ を考えられるが, 周波数の影響を除くために音声線輪のインダクタンス L を考えれば, 受話器の良さを G とすると,

$$G = \frac{SA}{m_0 \sqrt{L}} \quad (1)$$

とおくことが出来る。

いま振動板の質量係数を K_1 , 面積係数を q_1 とすれば上式上の m_0 及び S はそれぞれ

$$m_0 = K_1 \rho \cdot \pi h b^2, \quad S = \frac{Q}{L_1} \pi b^2 \quad (2)$$

上式の ρ は振動板材料の密度, h はその厚さ, b は振動板材料の振動部分の半径である。

M_0 : magnetizing force.

n_1 : No. of turn

a : area of magnetic pole

Fig. 1 Magnetic Circuit of Telephone Receiver.

$$f = \frac{2}{8\pi a} (\phi_0 + \phi_1)^2$$

但しこの場合漏洩磁束はないものと仮定する。

いま M_0 による磁気回路の reluctance を R_0 , n_1 線輪による起磁力に対する reluctance を R_1 とすれば,

$$\phi_0 = \frac{M_0}{R_0}, \quad \phi_1 = \frac{4\pi n_1 i_1}{R_1}$$

従つて

$$f = \frac{1}{4\pi a} \left\{ \frac{M_0^2}{R_0^2} + \frac{2M_0(4\pi n_1 i_1)}{R_0 R_1} + \frac{(4\pi n_1 i_1)^2}{R_1^2} \right\}$$

となる。上式の第1項は直流磁場による変化, 第3項は省略し得る値で, 結局振動板を振動させる項は第2項で, これを $F(w)$ で表わせは

$$F(w) = \frac{2n_1 M_0}{R_0 R_1 a} I(w)$$

力係数 (Force factor) A は

$$\therefore A = \frac{F(w)}{I(w)} = \frac{2n_1 M_0}{R_0 R_1 a} = 2n_1 B_0 P_1$$

$$\text{ここに } B_0 = \frac{M_0}{R_0}, \quad \frac{1}{a} = P_1 = \frac{1}{R_1}$$

漏洩磁束を無視し得ぬ場合には P_1 を $P_{1,2}$ と示すと

$$A = 2n_1 B_0 P_{1,2} \quad (3)$$

いま n_1 線輪の自己誘導係数を L_1 とすると,

$$L_1 = \frac{\phi_1}{i_1} n_1 = \frac{4\pi n_1^2}{R_1} = 4\pi n_1^2 P_1 \quad (4)$$

有効磁束を $\phi_{1,2}$ とし漏洩係数を k とすれば $\frac{\phi_{1,2}}{\phi_1} =$

$$\frac{P_{1,2}}{P_1} = 1 - k \quad \text{であるから}$$

$$L_1 = \frac{4\pi n_1^2 P_{1,2}}{1 - k} \quad (4)$$

(1)式を受話器の良さ G に (2), (3) 及び (4) 式を代入すると

$$G = \frac{q_1}{K_1 \rho h} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{1 - k} \cdot B_0 \sqrt{P_{1,2}} \quad (5)$$

$$\frac{q}{K_1 \rho h} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{1 - k} = K \quad \text{と置けば } G \text{ は}$$

$$G = K \cdot B_0 \sqrt{P_{1,2}} \quad (6)$$

となる。

振動板の reluctance を R_a , 空隙の reluctance を R_g , 磁極より磁石側を見た reluctance を R_b とすれば

$$P_{1,2} = \frac{1}{R_i + R_a + R_g}$$

であるが一般に $R_i \ll R_a + R_g$ であるから

$$P_{1,2} \approx 1 / (R_a + R_g)$$

振動板を空隙で置換したときのその部分の reluctance を R_b とし, その可逆導磁率を μ とすれば,

$$P_{1,2} \approx \frac{1}{R_g + \frac{R_b}{\mu}} \quad (7)$$

(6)式に(7)式を代入すれば

$$G = \frac{KB_0}{\sqrt{R_g + \frac{R_b}{\mu}}} = \frac{K}{\sqrt{R_g}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\mu} \cdot \frac{R_b}{R_g}}$$

$$\frac{R_b}{R_g} = \delta \quad \text{と置けば}$$

$$G = \frac{K}{\sqrt{R_g}} \cdot \frac{B_0}{\sqrt{1 + \frac{\delta}{\mu}}} \quad (8)$$

の式で μ をパラメーターに取つたとき, 若し導磁率 μ が一

Fig. 2 Reversible Permeability (Iron) (By R. Gans⁽²⁾).

定ならばこれは直流磁束密度 B_0 に対して原点を通過する直線である。しかるに一般に可逆導磁率は Fig. 2 に示す如く磁束密度に対して導磁率が単調に減少する。即ち最初は殆んど一定であるが数 Gauss 附近より急激に減少して遂に零に近づく。従つて振動板の良さ G も最初は殆んど原点を通過する直線であるが B_0 の増

(2) R. Gans, Ann. Phys., 33 (1910), 1065.

加と共に僅少なる導磁率の減少があるのみで少し宛下方に曲り導磁率が急激する附近から大なる曲率をもつて彎曲し上方に凸な曲線となり極大値を経てその後は比較的速かに零に近づく。

但し $\delta=0$ の場合は導磁率に無関係であるから直線である。この場合一般に可逆導磁率は $B_0 \rightarrow 0$ の極限で初導磁率 μ_0 と一致するがその大小は G 曲線の原点における傾斜に関係し、 μ_0 の大なるもの程傾斜が大である。

III. 純鉄振動板の長さ G と熱処理との関係

試料は 100 K.V.A の高周波電気炉で報國砂鉄を原料として熔解して得た 20kg 鋼塊を 1000~1200° で鍛造後 500 HP の熱ロールで約 800~1000° にて熱圧延し、これを 700~750° で数時間焼鈍し酸洗後ロールし再び 700~750° の再結晶温度で焼鈍後再酸洗し 0.18mm まで冷ロールしたものである。Table 1 にその分析結果を示す。かかる試料を外径 45mm 内径 33mm の環状に打抜き 20 枚重ね合せこれ

Table 1 Composition of Pure Iron for Diaphragm.

Element	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%
%	0.03	0.08	0.15	0.007	0.012	0.02

を 500~850° に焼鈍後それぞれ一次及び二次線輪を 200 国宛捲きわれわれの研究室常備の弾動電流計にてその磁性を測定した。

Fig. 3 a, b は種々焼鈍温度における磁気感應度曲線で、何れも焼鈍温度の増加と共に垂直形となり、その変化は変

Fig. 3-a Relation between Annealing Temperature and Magnetic Character for Pure Iron (F_0) (Ann. 2 hr in H_2).

Fig. 3-b Relation between Annealing Temperature and Magnetic Character for Pure Iron (F_0) (Ann. 2 hr in H_2).

態点直前まで続いている。

次に水中種々の温度に焼鈍してその機械的性質、伸び、抗張力及び硬度を測定した。その結果を示すと Fig. 4 の通りで焼鈍温度の上昇と共に伸びは 550° の再結晶温度より急激に増加し 700° 以上にて極大となる。抗張力及び硬度は 550° 附近より急激に減少し約 600° より一定となる。さて振動板は磁気回路の一部であると共に音響系の一素子である故 stiffness が常に重要な問題で従つてその焼鈍温度の決定は極めて重要な事項となる。即ち上記 Fig. 3, 4 より知られる如く再結晶温度附近より内部歪は

除去せられ、磁性は向上するが同時に軟質となり、僅かな衝撃によつても容易に磁極に接着するようになり、受話器の調整との他に困難を生ずる。よつて著者等は厚さ 0.17 mm, 径 44.5mm の標準振動板の寸法について受話器の感度及び明瞭度を測定した。同様に用いた試料は打抜いた

Fig. 4 Relation Between Annealing Temperature and Mechanical Properties. Pure iron: annealed 1 hr in H_2 gas.

の距離 0.28mm にした場合の振動板特性で純鉄振動板の焼鈍温度は 550° 附近が受話器の感度及び明瞭度が最良である。更に振動板の優劣を決めるに磁場に対する磁気感應度の測定の外に振動板の長さ G を測定した。こゝに用いた振動板材料は純鉄 (F_0 , F_0) 3.2% Si 鋼, 4.5% パーマロイ及び 50% Co, 2% V, Fe 合金を 0.18mm に薄板としたものをそれぞれ熱処理したものである。

Fig. 5 a, b, c, d, e は δ (0, 100, 300, 500, 700 及び 1000) を一定にした場合の振動板の長さ G と磁気感應度 B との関係を示すものである。即ち $\delta=0$ の場合は G は B 対し直線的であるが δ の増加するに従い G

は段々と減少する。例えば $\delta=300$ の場合 $B=12000$ Gauss の際純鉄の G は 6000, Si steel 5500, 45% パーマロイは 9000, 50% Co, 2% V-Fe 合金は 9500 である。しかるに同じ $\delta=300$ でも $B=16000$ Gauss になると純鉄, Si Steel G は漸く極大を経て急減している程度であるが磁気飽和値の低いパーマロイ

Fig. 5-a Relation between $\frac{B_0}{\sqrt{1+\frac{\delta}{\mu}}}$ and Flux Density. (Pure iron F_0).

の G は殆んど認められない。ところが 50%Co, 2%V-Fe 合金になると, G は益々増加せんとする傾向にあり, G は 13000 に達せんとしている。即ち磁気飽和値の高い材料程振動板の良さが高い訳である。また G - B 曲線の初傾斜が

大であれば, G もそれだけ大きく得る可能性もあるから同時に可逆導磁率が成可く大きい程よい。

R. Gans⁽³⁾ によれば可逆導磁率は初導磁率と磁気飽和値によつて決定されるから結局磁気飽和値が高くてかつ初

Table 2 Characteristics of Pure Iron (F_0) for Diaphragm at Various Annealing-temperature.

Heat Treatment Characteristics	Ann. temp. Ann. hours. Sample No.	Annealing												No Annealing
		650°			580°			550°			450°			
		5 hrs			3 hrs			2 hrs			2 hrs			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Thickness of Diaphragm (mm)		0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Shore Hardness of Diaphragm		18	17	16	20	20	20	21	21	21	23	23	23	23
Magnetic Flux of C Type Magnet in Maxwell		1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1300	1300	1300	1500
Gap Length between Diaphragm and Pole Piece (mm)		0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30	0.30	0.30	0.28
Sensibility of Receiver (db)		30	29	26	28	27	27	31	29	28	28	29	30	28
Intelligibility of Speech (%)		70	73	74	75	75	73	76	75	72	77	73	77	79
Resonance Frequency (cycles/sec)					980	985	945

Fig. 5-b Relation between $\frac{B_0}{\sqrt{1+\frac{\delta}{\mu}}}$ and Flux Density (Pure iron F_3).

Fig. 5-c Relation between $\frac{B_0}{\sqrt{1+\frac{\delta}{\mu}}}$ and Flux Density (3.2% Si-steel).

Fig. 5-d Relation between $\frac{B_0}{\sqrt{1+\frac{\delta}{\mu}}}$ and Flux Density (45-Permalloy).

Fig. 5-e Relation between $\frac{B_0}{\sqrt{1+\frac{\delta}{\mu}}}$ and Flux Density (Co(50)-V(2)-Fe alloy).

導磁率の大なるものが多い。導磁率の大きいことは漏洩磁束を少なくすることである。

なお上述に用いた試料の増分導磁率を測定すると Fig. 6 の通りである。即ち 45% Permalloy の増分導磁率は大きであるが磁気飽和値は非常に低い。50% Co,

Fig. 6 Relation between Incremental Permeability and Magnetic Flux Density ($t=0.16$ mm).

2%V Fe 合金の増分導磁率は850°であるが磁気飽和値が非常に大である。図には純鉄、硅素鋼板も比較してあるが純鉄及び硅素鋼板の増分導磁率はそれぞれ約 200 及び約 550 である。Fig. 5, 6 を比較すれば振動板の良さ G の関係が明瞭とな

(3) 電気通信研究所, 電話器の概要, 4 号 (新型), (1949), 151.

る。

IV. 振動板の力係 (Force Factor)

著者等が振動板材料を研究しその本質を知るため上記の如き増分導磁率及び振動板の良さをそれぞれ測定したが、これ等の測定は複雑で手数を要するので簡単に測定の出来る力係数を振動板の良さと見做してこれを測定した。

その測定法は次の通りである。即ち標準受話器回路における振動板と磁極間の空隙 (Fig. 1 参照) を微小なる距離だけ急に变化せしめると永久磁石によつて生じている磁束が増減する。従つて磁極に捲かれてある音声コイルを弾動檢流計に接続することにより、この磁束の変化を測定することが出来る。力係数は磁束の変化を空隙距離の変化で除せば得られる。空隙距離の変化は $1/100\text{mm}$ 程度が適當である。

Table 3 は純鉄, 50%Co, 2% V, Fe 合金の実際に振動板として使用した場合の力係数の測定結果である。Table

Table 3-a Force Factor of Pure Iron and FeCo Alloy.

Materials	Thickness mm	Gap Length between Diaphragm & Pole Piece mm	Force Factor C. G. S.	Heat Treatment
Fe-Co (50)-V	0.27	0.2	$10 \sim 14 \times 10^6$	After heat treatment
〃	〃	〃	4.4×10^6	No heat treatment
〃	〃	〃	$7 \sim 9 \times 10^6$	Annealing at 500°
Pure Fe			$6 \sim 8 \times 10^6$	〃
Pure Fe			$5 \sim 6 \times 10^6$	〃
45%Ni- Fe Alloy			$2.4 \sim 2.5 \times 10^6$	〃

Table 3-b Relation between Force Factor and Thickness.

Materials	Thickness mm	Gap Length between Diaphragm and Pole Piece	Force Factor C.G.S.
Fe-Co-V (2%)	0.277	0.1	18×10^6
〃	0.285	0.1	20×10^6
Pure Fe	0.325	0.1	14×10^6
Fe 〃	0.33	0.1	17.5×10^6

3-a の結果より知られる如く力係数は Fe-Co(50%)-V (2%) 系合金においては未熱処理の場合は 4.4×10^6 であるがこれを 500° で焼鈍すると $7 \sim 9 \times 10^6$ となり更に 850° 4

時間焼鈍すると $10 \sim 14 \times 10^6$ となる。なお表には純鉄並びに N. C 合金 (45%Ni) を比較したが F_0 純鉄が最良である。更に Table 3-b は厚さを変えた場合で力係数は厚い程力は大である。その様子を Fig. 7 に示した。次に Table 4-c には Pale Piece の Gap と力係数との関係を示して

Table 3-c Relation between Force Factor and Gap Length.

Materials	Receivers Type	Gap Length between Dia- phragm and Pole Piece mm	Dimension		Force Factor (per unit turn) C. G. S.	Heat Treatment
			Thickness mm	Diameter mm		
Fe-Co-V (2%)	O Type	0.2	0.3	44	10×10^6	850° in H_2 annealing
〃	N 〃	〃	〃	37	18×10^6	
〃	Western	〃	〃	37	16.6×10^6	
Pure Iron		〃	0.18		7.1×10^6	
Fe-Co-V (2%)	O Type	0.3			14.4×10^6	
〃	N 〃	〃			14.4×10^6	
〃	Western	〃			12×10^6	
Pure Iron		〃			4.6×10^6	

Table 3-d Relation between Force Factor and Annealing Temperature.

Heat Treatment		Maximum Value of Force Factor	$\mu.A.C.$ 1000~, $H_A c.$ = 0.01 Oe
Tempe- rature	hrs		
750°	4	24×10^6	545
850°	4	27×10^6	661
950°	4	12.5×10^6	260

Table 3-e Relation between Force Factor and Co Percentage.

Co Per- centage	Thick- ness mm	Gap Length between Dia- phragm and Pole Piece mm	Force Factor Thickness C.G.S.	Heat Treatment
50%Co	0.17	0.15	76×10^4	850° 4hr H_2 anneal
40%Co	0.26	〃	71×10^4	
30%Co	0.28	〃	50×10^4	

Reference : 1. Pole piece is 45% Ni-Fe alloy of $10 \times 2\text{mm}^2$. 2. Electromagnet was used for bias magnetic field, and the flux was varied by controlling the current of electromagnet. 50% Co alloy showed maximum force factor at the flux of 600 maxwell, and 30%Co alloy was far below.

あるが同じ電話器の種類でも Pale Piece と振動板の Gap の大なる場合ほど Force-Factor が大である。更に Table 3-d に 50%Co, 2%V, Fe 合金について焼鈍温度と Force Factor との関係を求めてあるが 850° 4 時間焼鈍した場合が最高である。最後に Co 量を 30, 40, 50% と変化した場合の Force Factor を測定して Table 3-e に掲げてあるが 50% Co の場合が最高の Force Factor を呈する。

既に Table 3-e に示した如く Gap が力係数に変化を與

えることが知られたので次にこれにつき系統的実験を行った。

Fig. 8-a は厚さ 0.26mm の 30%Co 及び 0.15, 0.32mm 厚さの 50% Co, 2%V, Fe 合金につき種々の空隙距離と力係数との関係を示すもので日立製作所における測定結果である。空隙距離の減少に伴い力係数が極大を経て急減するのは磁気飽和のためである。図において、②は①に比して厚いために大なる空隙距離の所で飽和に達し、極大を示すがその絶対値は同程度である。極大を経て空隙距離が更に減少すると (3) 式から得られる力係数の式

Fig. 7 Relation between Force Factor and Thickness (50% Co 2%V Alloy).

$$\frac{2n_1B_0}{R_g} \left/ 1 + \frac{\delta}{\mu} \right.$$

から飽和による μ の減少のために厚さの大なる②の方が力係数は下がって来る。30%Co の③の場合を考えると、受話器の場合空隙距離が磁場の

Fig. 8-a Comparison of Force Factor of 50% Co and 30% Co Alloys. (By Hitachi Seisaku-Sho).

強さの measure であるが磁化曲線においては 30% Co に比し 50% Co の場合、殊に $B=15000$ Gauss 前後で急激な傾斜をもつので、空隙距離の大なるに従つて磁場が小さい所から既に 30% Co は力係数が低い。30% Co 合金は飽和

に大なる磁場を要するので力係数の極大を興える空隙距離も比較的小ではあるが、飽和磁気の強さそのものは 50% Co に比し、劣るものではないので、厚さを大にしてやれば力

Fig. 8-b Comparison of Force Factor of Fe-50%Co-2%V Alloy and Pure Iron Fo. (by Nihon Elect. Com. Ltd).

極大値そのものはどうしても劣つて来る。

Fig. 8-b は日本電気における測定結果であつて純鉄と Fe-Co 合金との比較を示したものである。この場合は両者で定性的にも磁化曲線に相違があるので、a の場合とは又異なる差異がある。即ち磁場の強さが約 1~3 Oe で従つて磁束密度で 3000~15000 Gauss の附近の磁化曲線の様子は大体のところ同様であるので力係数も大なる空隙距離の所から図で 15×10^{-3} cm 附近まで略々等しい。更に空隙距離を小にすると Fe-Co 合金はまだ磁化曲線が上昇するのに純鉄では廻轉範囲に入つてしまふので、前者は力係数を増し、後者は幾何もなくして極大を経て減少するに至る。従つて前者はその極大値が大でかつ空隙距離の小なところにある。可逆導率の低いことも極大値を小ならしめる。

V. 結 言

以上の研究結果を総括すると次の通りである。

(1) 振動板の良さ G を引用し純鉄振動板の処理の及ぼす感度及び明瞭度を測定した。Stiffness を考慮して 550° 焼鈍すると受話器の感度の最高は 31db、明瞭度は 76% である。(2) 振動板の良さ G は磁気感應度の飽和値並びに空隙に関係する。50%Co, 2%V, Fe 合金は純鉄、硅素鋼、4%パーマロイに比し最良の特性を呈する。(3) 振動板の力係数を測定した。振動板の厚さ並びに材料によつて変化し、50% Co, 2%V, Fe 合金を 80° 4 時間焼鈍した場合が最高の力係数が得られる。

本報告は電気通信研究所始め各通信機会社の御援助の許に行つたもので、茲に改めて深謝の意を表する次第である。