

Fe-Ni-Mn 整磁鋼の研究

Study on Magnetic Shunt Steel of Fe-Ni-Mn Alloy

根本正* 早取初蔵**
 Tadashi Nemoto Hatsuzô Hayatori

要 旨

積算電力計の温度補償用整磁合金として、低透磁率で広い使用温度範囲をもつ材料が必要である。しかし周知の Fe-Ni 合金は低透磁率になると室温付近に Ar₃ 変態があり、この変態が生ずると整磁性能が失われるので不適當である。また Ni-Cu 系合金は温度係数が小さいので適當でない。筆者らは Fe-Ni 合金に第三元素 Mn を添加することにより、Ar₃ 変態温度を低温側に移行することを企図し、Ni 約 26~34%、Mn 約 8% 以下の Fe-Ni-Mn 合金の磁気特性を詳細に究明した結果、所期の目的に適合する整磁鋼を見いだした。

1. 緒 言

一般に電気機器に使用されている磁石は、温度の上昇に伴い磁力が減少するので、機器の精度を保持するには温度の変化による磁性の変動を補償する必要がある。そのためには普通、磁極間の空げきの一部に温度の上昇により透磁率の著しく減少する磁性合金を置く。この合金は温度の低いときは空げきの磁束を強く吸収し、温度の高いときは弱く吸収するので、相手方磁石の温度変化に適合するものを選択すれば、温度変化に関係なく磁極間の磁場を一定に保持することができる。このような目的で使用される合金が整磁合金である。整磁合金には成分上より大別して2種類あり、その一つは Ni-Cu 系合金で、Ni 70~80%、Cu 30~10%、そのほか Fe あるいは Mn を含有するもの⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が知られている。ほかの一つは Fe-Ni 系合金で、Ni 約 30% の Fe-Ni 合金に少量の Cr、Mn を含有するもの⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、あるいは Ni 30~60%、Cr 1~18% を含む MS 合金⁽⁶⁾⁽⁷⁾ などがある。

前述したように、整磁合金に要求される特性は、相手方機器に使用される磁石の温度変化に左右されるので、それぞれに適合するものを選択する必要がある。対象機器例としては自動車用カーボンパイル電圧調整器⁽⁸⁾および積算電力計の温度補償の問題があるが、本報では主として後者を目的に開発した Fe-Ni-Mn 整磁鋼⁽⁹⁾の磁気特性について述べる。

2. 積算電力計の温度補償機構

積算電力計は周知のように消費電力を自動計量するもので、その機構の要点は図1に示すように、消費電力回路に90度の位相差をもつ電圧コイルと電流コイルを接続し、その間に自由に回転できるようにした非磁性で比重の小さい電気の良導体(たとえばアルミ板)の回転円板を置き、両コイルより発生する磁束の相互作用により生じた回転磁界により円板は回転トルクを受け駆動される。さらに、この円板はほかの部分に設置された磁石の磁極間にはさまれているので、回転すると磁極間の磁束と円板に生ずる「うず電流」の相互作用により制動トルクを受けて制動される。この駆動トルクと制動トルクが平衡状態にあるとき、円板は一定の速度で回転し、その回転速度は回路の消費電力に比例するようになっている⁽¹⁰⁾。したがって駆動部の両コイルより発生する磁束は与えられた電力に対応して一定であること、また制動磁石の磁束は常に一定であることが望ましいが、これらの磁束は温度変化により変動するので、計器の精度を保持するためこれを補償する必要がある。そのためには普通図1に示すように駆動部は電圧コイル鉄心の一部に、制動磁石は磁気分路

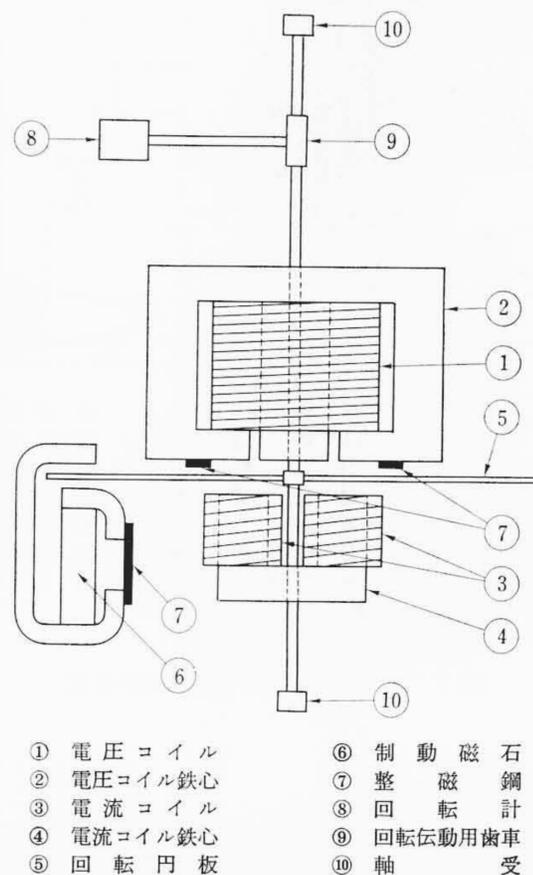


図1 積算電力計の整磁鋼による温度補償法の一例

の一部に整磁合金を装着し、それぞれの磁束変化を補償するのが通例である。

積算電力計は用途により形式を異にし、したがって整磁合金に要求される磁気特性も多種であるが、本研究の目標は次のようである。

磁化力 150 Oe において

$$(1) \mu_{20} : 40 \pm 5, \alpha_{20} : 0.3 \sim 0.4$$

$$(2) \mu_{20} : 11 \pm 3, \alpha_{20} : 0.2 \sim 0.3$$

ここに、 μ は透磁率、 α は温度係数を表わし、右下の数字は温度を示す。また α_{20} は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 間の μ の変化割合で、次式より求める。

$$\alpha_{20} = \frac{\mu_{15} - \mu_{25}}{10}$$

3. 実験方法

3.1 磁気測定法

磁気測定は弾動検流計法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾により、磁化力 150 Oe における磁束密度を測定し、透磁率を求めた。

3.2 温度調節法

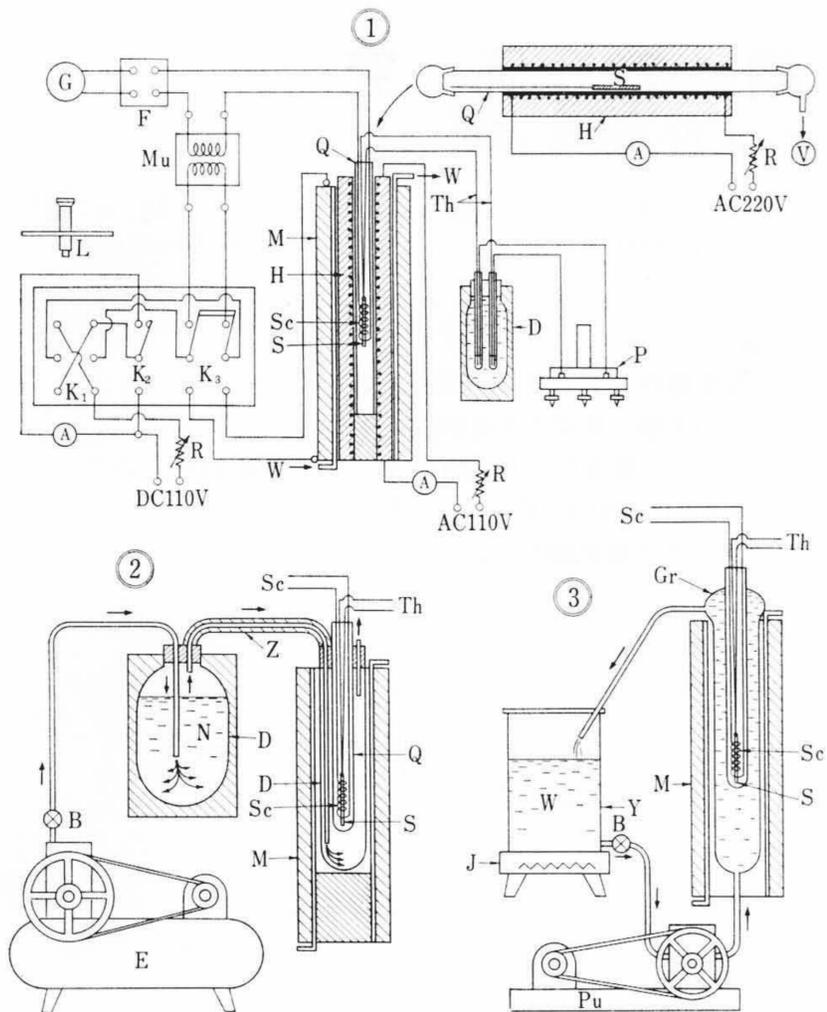
温度と磁気との関係は次の方法によった。

$$(1) 900^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{磁気測定}} 400^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{磁気測定}} \text{室温}$$

$$(2) \text{室温} \xrightarrow{\text{磁気測定}} -140^\circ\text{C}$$

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立研究所



- G: 検流計
- F: 分流器
- Mu: 標準コイル
- L: ランプスケール
- M: 磁化コイル
- K₁, K₂, K₃: スイッチ
- A: 電流計
- R: 可変抵抗器
- Sc: サーチコイル
- S: 試料
- Th: 熱電対
- H: 加熱炉
- Q: 石英管
- W: 水
- D: 魔法瓶
- V: 真空ポンプ
- Pu: 送水ポンプ
- E: コンプレッサ
- B: 調節バルブ
- N: 液体窒素
- Z: 断熱材
- J: 電熱器
- Y: 水槽
- P: 温度計
- Gr: ガラス

図2 磁気測定時の温度調節装置

(3) 3°C $\xrightarrow{\text{磁気測定}}$ 80°C

これらの測定に用いた温度調節装置を図2に示す。図中①は前記(1)法に用いたもので、900°Cで30分間真空焼鈍した試料を、磁化コイル内に設置され、あらかじめ400°Cに保持された電気炉中のサーチコイルにそう入し、炉温の調節により400°C→室温、折返し室温→400°Cの磁気の変化と可逆性を測定した。また②の装置は(2)法に用いたもので、磁化コイル内に魔法瓶を置き、これにサーチコイルにそう入した試料を納め、魔法瓶中に液体窒素中を通過した空気を除々に送入して室温→-140°C、折返し室温までの磁気を測定し、その変化と可逆性を求めた。さらに③の装置は室温付近の小温度範囲の磁気測定に用いたもので、磁化コイル内に図示したようなガラス容器を置き、初め氷水を満たした水槽の水を循環させ、次第に水温を上昇させながら試料の温度を調節した。この方法では約3°C→80°Cの測定が可能である。これらの3法により400°Cから-140°Cの温度範囲の磁気測定を行なった。

3.3 試料の調製

試料は電解鉄、電解NiおよびフェロMn(電解鉄と電解Mnで自製)を用い、高周波電気炉によりアルゴンガス中で溶製し、厚さ0.8mmの板に加工後、幅5mm×長さ150mmの試験片を採取し、800°Cで30分間水素ガス中で焼鈍して実験に供した。それぞれの化学成分については後述する。

4. 実験結果とその検討

4.1 Fe-Ni 整磁鋼の磁気特性

Fe-Ni合金は図3の状態図⁽¹³⁾よりわかるように、910°C以下でFe

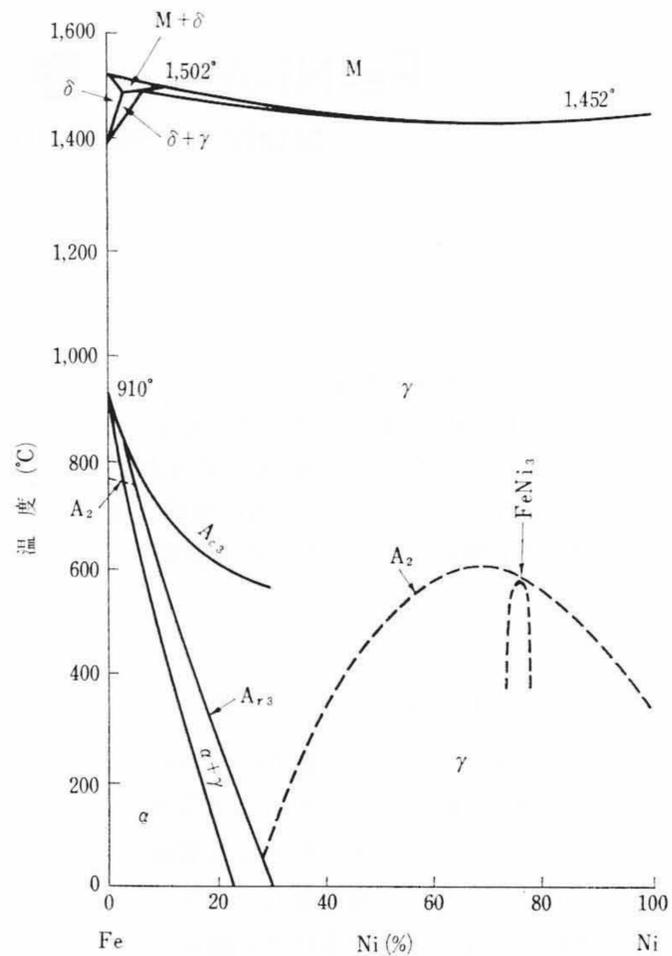
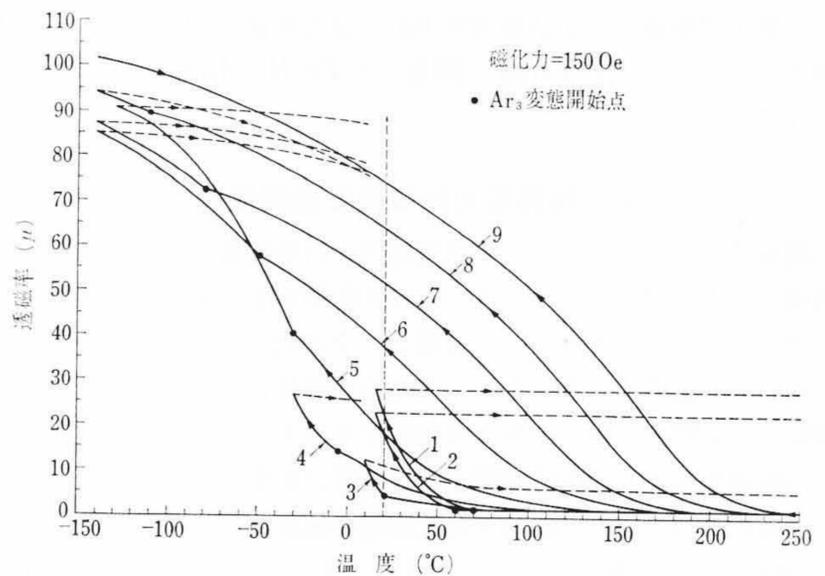


図3 Fe-Ni合金状態図(浜住)

表1 試料の化学成分 (%)

試番	Ni	Mn	Si	T. C	P	S	Co	Fe
1	26.52	0.21	0.03	0.02	0.003	0.004	0.14	残
2	27.05	0.20	0.02	0.01	0.003	0.004	0.14	残
3	28.18	0.25	0.02	0.01	0.004	0.005	0.14	残
4	29.02	0.25	0.03	0.02	0.003	0.004	0.15	残
5	29.87	0.26	0.02	0.02	0.003	0.004	0.14	残
6	30.83	0.24	0.03	0.01	0.003	0.004	0.18	残
7	31.87	0.22	0.03	0.02	0.004	0.005	0.18	残
8	32.94	0.25	0.02	0.01	0.003	0.004	0.18	残
9	33.81	0.24	0.02	0.01	0.003	0.004	0.21	残



(Ni 26.52~33.81%, 磁化力 150 Oe)

図4 Fe-Ni合金のmu-T曲線

側にA₃変態, Ni側にA₂変態を有し, Ar₃変態とA₂変態温度はNi約30%で常温付近まで降下する。A₃変態はNi約8%以上では冷却時のγ→α変態(Ar₃)と加熱時のα→γ変態(Ac₃)とは不可逆である⁽¹⁴⁾。このA₃変態については多くの研究^{(15)~(21)}がなされているが、磁氣的に究明したものは少ない。Fe-Ni整磁鋼はNi約30%付近でA₂変態温度以下のγ相区域を利用するもので、使用温度範囲においてAr₃変態が生ずると磁気の可逆性が失われるので問題と

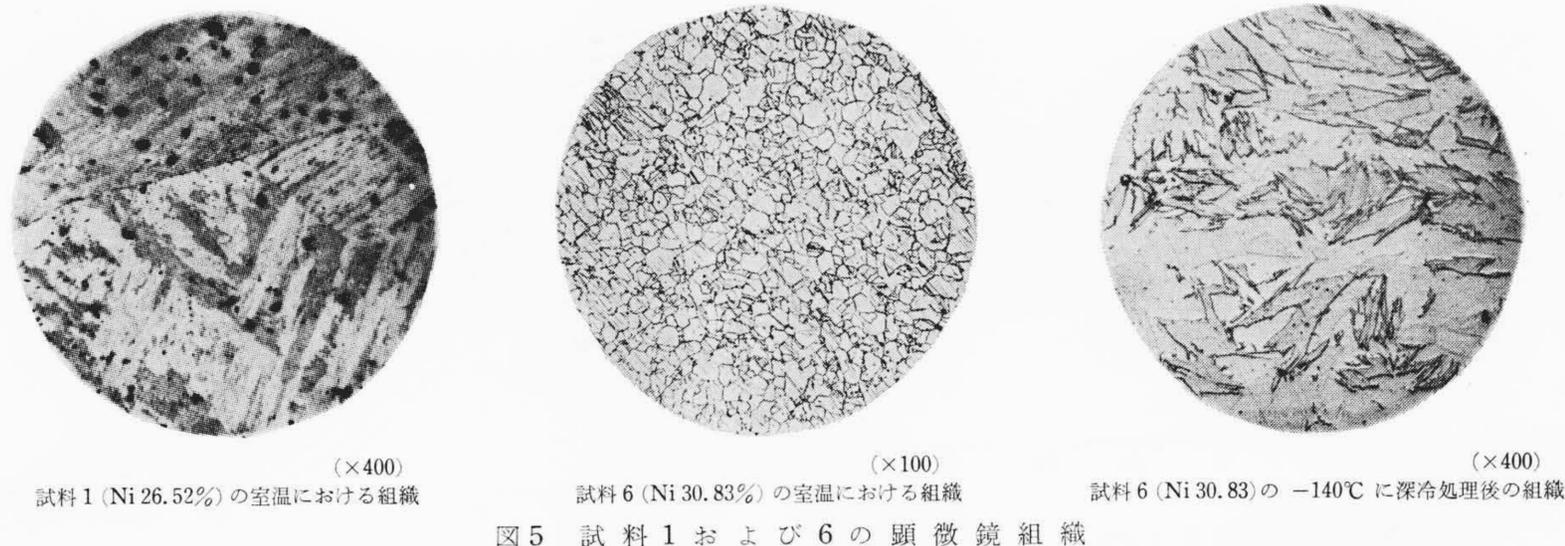


図5 試料1および6の顕微鏡組織

表2 試料の変態温度および μ_{20} , α_{20}

試 番	Ni (%)	A ₂ 変態温度 (°C)	Ar ₃ 変態温度 (°C)	μ_{20}	α_{20}
1	26.52	—	70	22.0	1.00
2	27.05	—	60	18.5	1.00
3	28.18	80	20	4.5	0.37
4	29.02	110	-5	8.6	0.22
5	29.87	140	-30	17.8	0.37
6	30.83	170	-50	37.8	0.37
7	31.87	200	-80	52.3	0.27
8	32.94	230	-110	63.9	0.26
9	33.81	250	-140以下	74.3	0.25

表3 試料の化学成分 (%)

試 番	Ni	Mn	試 番	Ni	Mn
30-0	29.87	0.26	33-0	32.94	0.25
30-1	29.93	0.97	33-1	32.86	0.67
30-2	29.83	1.79	33-2	32.89	1.54
30-3	29.91	2.60	33-3	32.89	2.50
30-4	29.87	3.56	33-4	32.88	3.40
30-5	29.92	4.02	33-5	32.91	4.40
			33-6	32.89	5.06
31-0	30.83	0.24	33-7	32.91	6.32
31-1	30.91	0.81	33-8	32.90	6.99
31-2	30.92	1.55	33-9	32.89	7.87
31-3	30.87	2.59			
31-4	30.92	3.48	34-0	33.81	0.24
31-5	30.94	4.52	34-1	33.83	0.63
31-6	30.98	5.68	34-2	33.96	1.40
31-7	30.90	6.83	34-3	33.87	2.25
31-8	30.94	7.68	34-4	33.86	2.91
			34-5	33.90	4.50
32-0	31.87	0.22	34-6	33.85	5.52
32-1	31.94	0.87	34-7	33.83	6.03
32-2	31.86	1.64	34-8	33.90	6.95
32-3	31.90	2.75	34-9	33.83	7.87
32-4	31.98	3.27			
32-5	31.90	3.91			
32-6	31.89	5.46			
32-7	31.87	6.14			
32-8	31.90	6.71			
32-9	31.93	7.23			

なる。したがってまず Ni 約 30% 付近の Fe-Ni 合金の磁気特性を究明した。

表1はそのために溶製した試料の化学成分であり、Ni量26.52%~33.81%の範囲で約1%おきに変化させた。またMnは加工性を与えるため約0.3%添加したが、そのほかの成分は溶解原料そのほかから混入した不純物である。図4は磁気測定により得られた透磁率-温度曲線(以下 μ -T曲線と称す)である。すなわち、非磁性 γ 相より冷却された試料がA₂変態温度に達すると帯磁を開始し、温度の降下に従がい次第に磁気を増し、Ar₃変態温度を過ぎると強磁性 α 相の生成により急激に磁気が増加し、 μ -T曲線の可逆性が失われる。これからわかるように、Ni量が増すとA₂変態温度は上昇し、Ar₃変態温度は降下するが、試料1および2(Ni27.05%以下)においてはAr₃変態のみが生ずるようである。図5はこれらの試料の中で試料1(Ni26.52%)および試料6(Ni30.83%)の室温における顕微鏡組織ならびに試料6の-140°C深冷処理後の組織を示したものであるが、試料1は室温においてすでにAr₃変態を起こしているが、試料6は室温ではオーステナイト組織であり、深冷処理後は明瞭なAr₃変態が認められる。また試料6の変態組織は典型的なマルテンサイトであるのに対し試料1のそれは炭素鋼のベイナイトに似たWidmanstätten組織である。Ni量の異なるFe-Ni合金のAr₃変態組織については詳細な研究⁽¹⁸⁾があり、その相異についても述べられているので、ここではこれらの試料のAr₃変態の確認にとどめる。

これらの結果から各試料の変態温度および μ_{20} , α_{20} を求めると表2のようで、これを前述した積算電力計用整磁合金の目標特性と照合すれば、 μ_{20} :40±5, α_{20} :0.3~0.4に対しては試料6が該当し、 μ_{20} :11±3, α_{20} :0.2~0.3には試料4が該当する。ここで試料6はAr₃変態温度が-50°Cであるから、気温の変化を考えた場合はほぼ心配ないが、試料4のAr₃変態温度は-5°Cで問題である。Ni量を増して μ_{20} が14付近となる成分にすればAr₃変態温度は多少降下し、約-10~-15°Cとなるであろうが、それでも十分安心ではない。また量産におけるわずかの成分変動による磁性の変化を考慮した場合、目標の幅をあまりせざることは量産を困難にするので思わし

くない。ここに新材料開発の必要が生ずる。

4.2 Fe-Ni-Mn 整磁鋼の磁気特性

低透磁率で適当な温度係数を有し、かつ広い温度範囲にわたり μ -T曲線の可逆性を失わない整磁合金の開発にあたり、まず考えられるのはNi-Cu系合金であり、この合金は相変態をもたないので μ -T曲線の可逆性に対する点では有利であるが、温度係数が前述の条件よりも小さく不適当である。次いで考えられるのはFe-Ni合金に第三元素を添加し、磁気特性を改善することである。すなわち使用温度範囲以下にAr₃変態温度をもつFe-Ni合金に、透磁率を減少させる元素を添加し、目標の透磁率までもちきたすことで、そのためにはA₂変態温度を降下させる元素が必要である。FeおよびNiそれぞれに及ぼす各種元素の影響に関する研究⁽²²⁾⁽²³⁾によれば、FeのA₂変態温度を降下させるものとしてMn, Si, AlおよびCrなどがあり、さらにNiに対してはMo, Cr, Si, Al, Zn, Mn, CuおよびPdなどがあげられている。これら諸元素の中から磁性および加工性に及ぼす影響を勘案し、Fe-Ni合金への第三添加元素としてMnを採択し、Ni約30~40%, Mn8%以下の範囲で45種の試料を溶製し、その磁気特性を詳細に究明した。

表3は試料の化学成分であるが、不純物は表2の場合とほぼ同様であるので省略された。図6~10は磁気測定によって得られた全試料の μ -T曲線である。これよりNiおよびMn量とA₂およびAr₃変

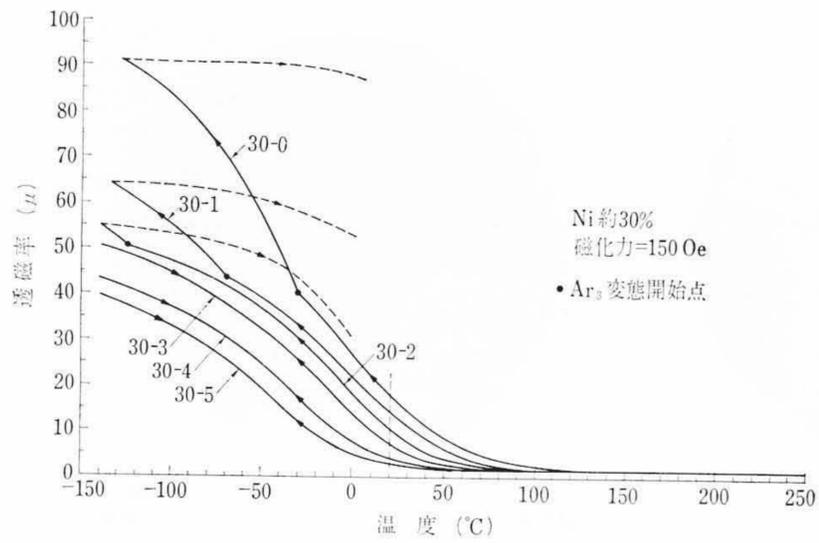


図6 Fe-Ni-Mn合金のμ-T曲線

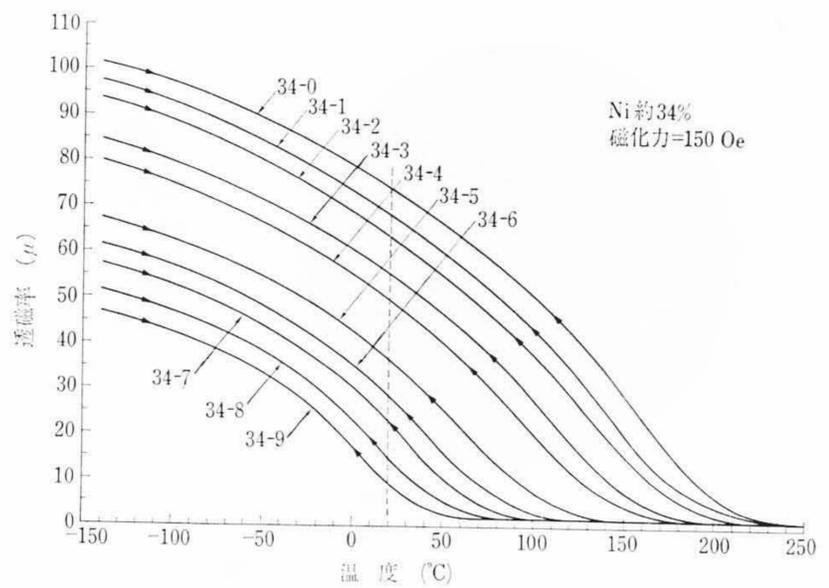


図10 Fe-Ni-Mn合金のμ-T曲線

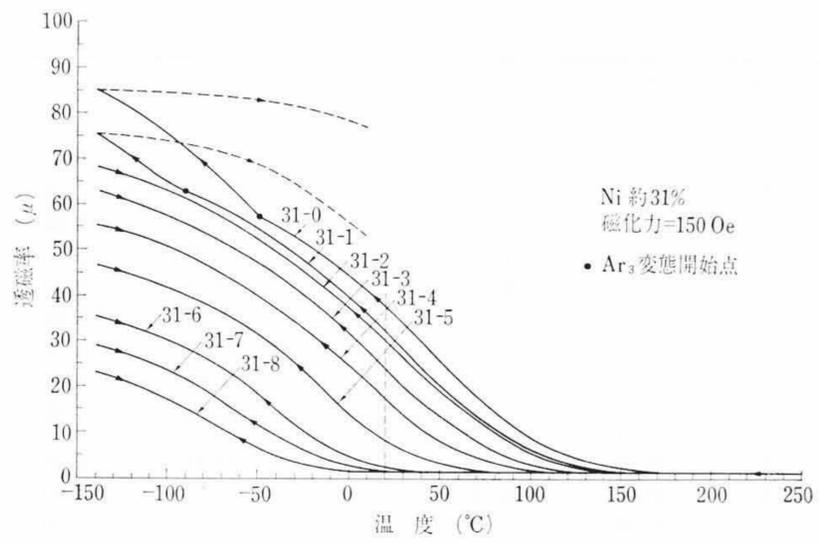


図7 Fe-Ni-Mn合金のμ-T曲線

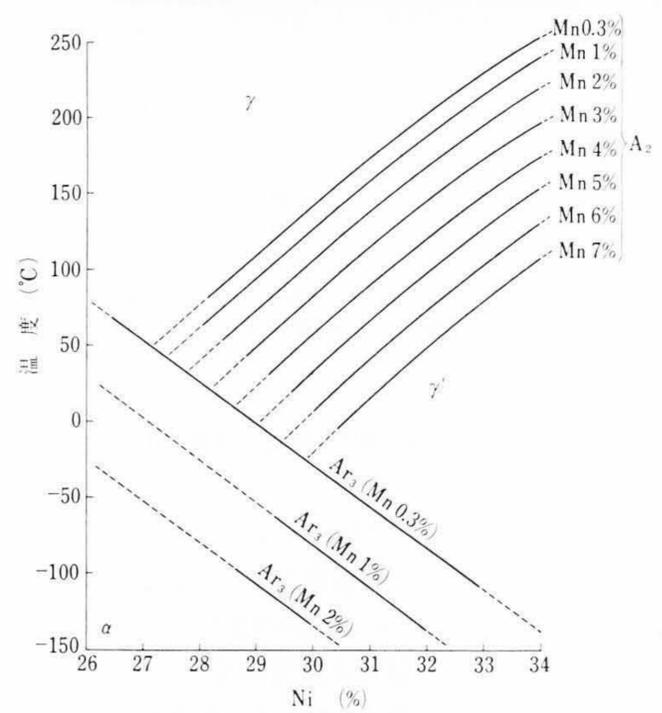


図11 Fe-Ni-Mn合金のA₂およびAr₃変態温度とNiおよびMn量との関係

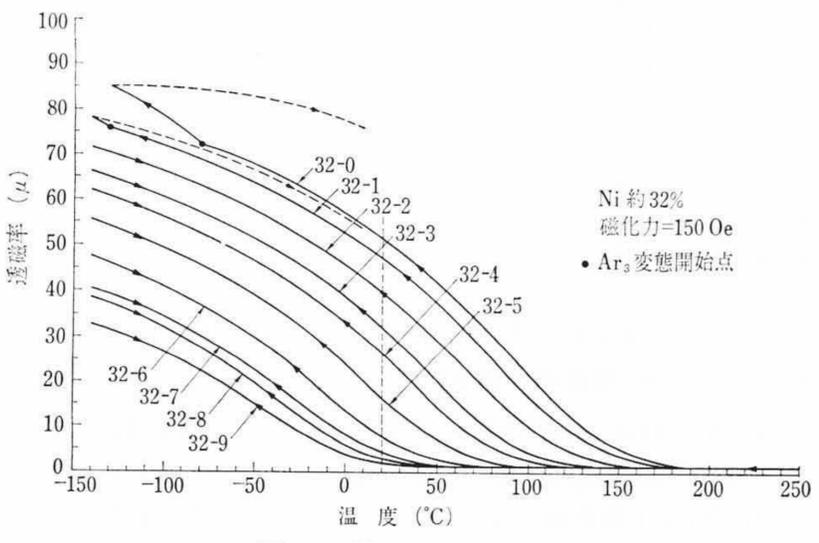


図8 Fe-Ni-Mn合金のμ-T曲線

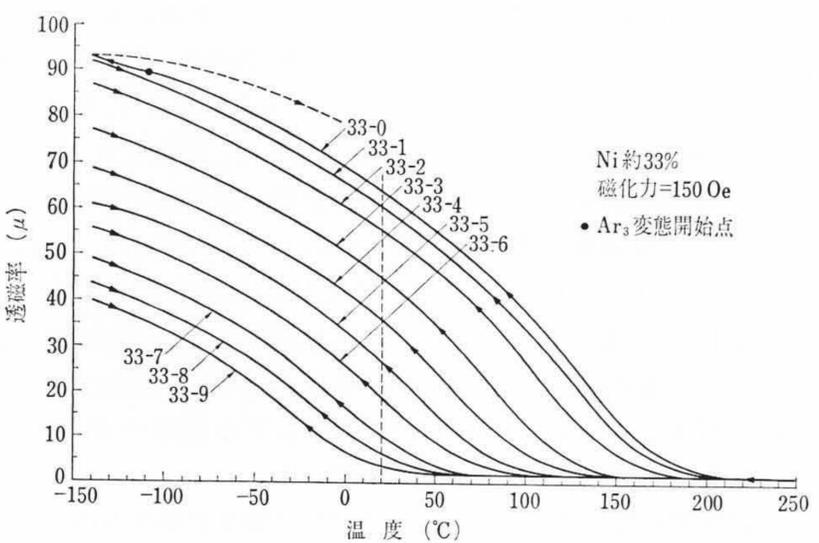


図9 Fe-Ni-Mn合金のμ-T曲線

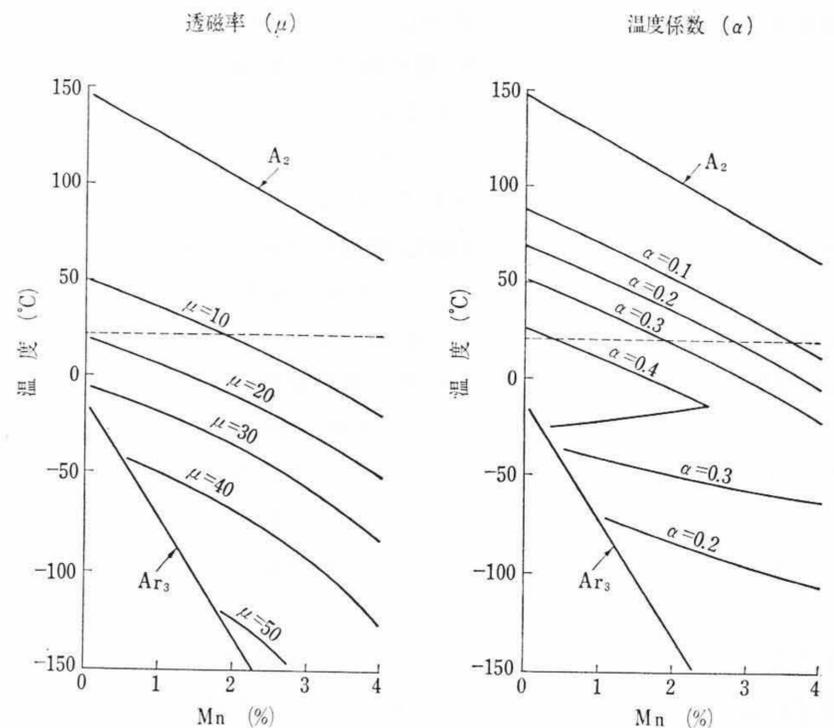


図12 Fe-Ni-Mn合金の透磁率および温度係数の分布

態との関係を求めると図11のようになる。すなわちFe-Ni合金においてNi約27%以下はγ相よりの冷却過程でAr₃変態のみが生じ、それ以上のNi量ではA₂変態を経てAr₃変態が生ずる。またその変態温度はAr₃がNi26%で約80%、Ni34%で約-140°Cであ

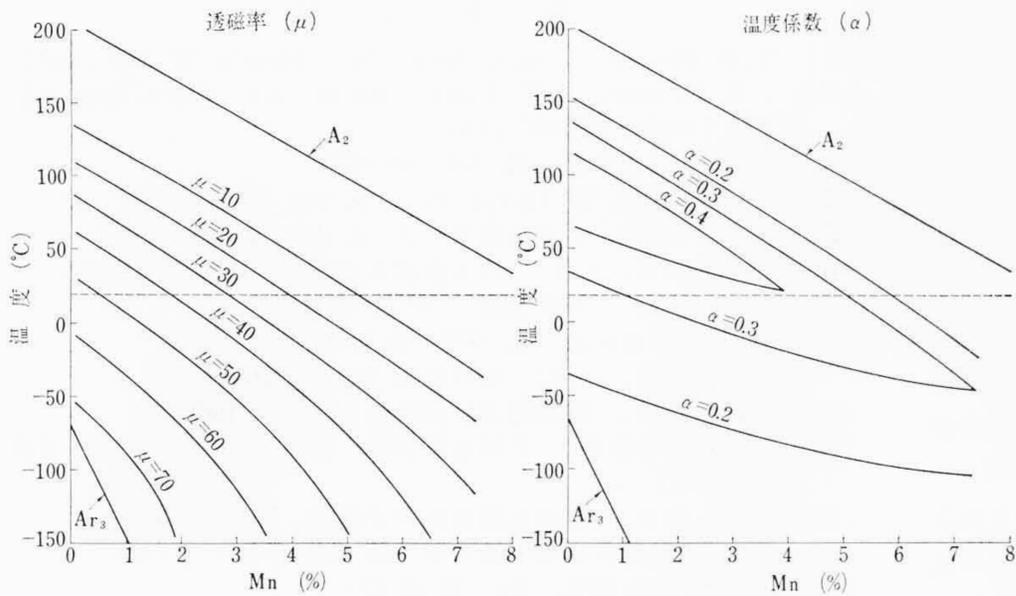


図13 Fe-Ni-Mn合金の透磁率および温度係数の分布

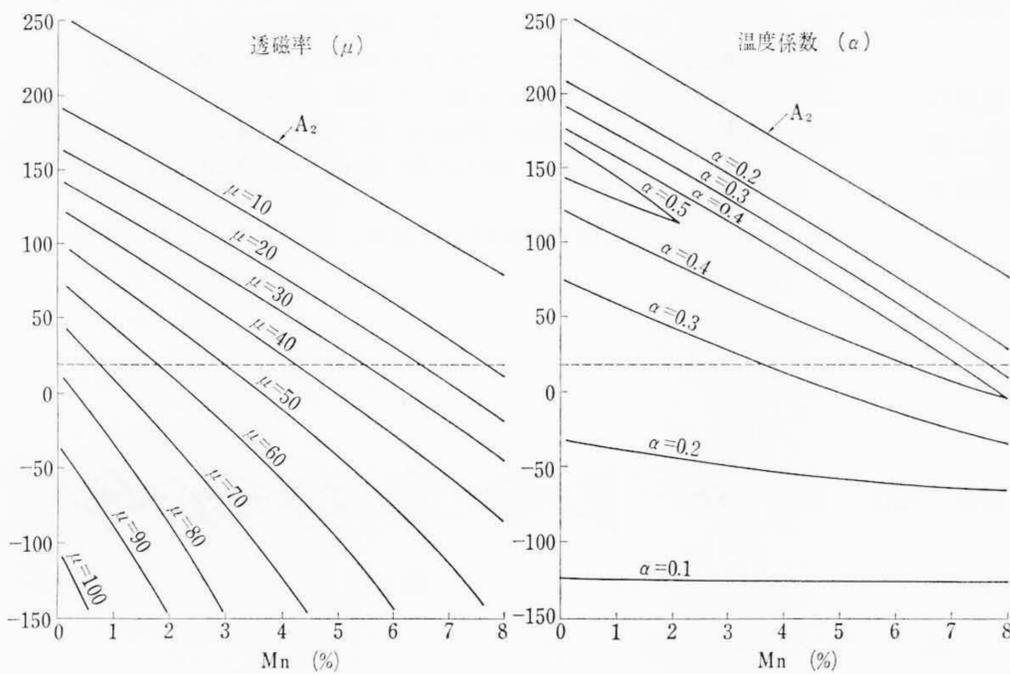


図14 Fe-Ni-Mn合金の透磁率および温度係数の分布

表4 目標の磁気特性に該当する成分

目標の磁気特性	Ni (%)	Mn (%)	Ar ₃ 変態温度 (°C)
(1) μ ₂₀ : 40±5 α ₂₀ : 0.3~0.4	31	0.8以下	-40~-110
	32	1.3~2.3	-140以下
	33	2.5~3.5	-140以下
	34	3.6~4.5	-140以下
(2) μ ₂₀ : 11±3 α ₂₀ : 0.2~0.3	30	1.6~2.4	-100~140以下
	31	4.1~4.5	-140以下
	32	4.9~5.4	-140以下
	33	6.2~6.6	-140以下

り、さらにA₂はNi 28%で約80°C、Ni 34%で約260°Cであって、それぞれほぼ直線的に変化する。これにMnを添加すると両変態温度はともに降下するが、A₂に比べAr₃に及ぼす影響のほうが大きい。したがってMnの添加はμ-T曲線の可逆範囲を拡大することになり、整磁鋼としては有利である。

さらに図12~14はそれぞれNi約30%、32%、34%の群におけるμおよびαの分布状態に及ぼすMnの影響を示したもので、一般的傾向としてNi等量の場合Mn量が増すに従い一定温度におけるμは減少するが、αはμ-T曲線のある温度に極大があり、その温度はMnの増加に伴い低温側に移る。この傾向はそのほかのNi群31%、33%においても同様である。

また図15は各Ni群におけるμ₂₀およびα₂₀に及ぼすMnの影響

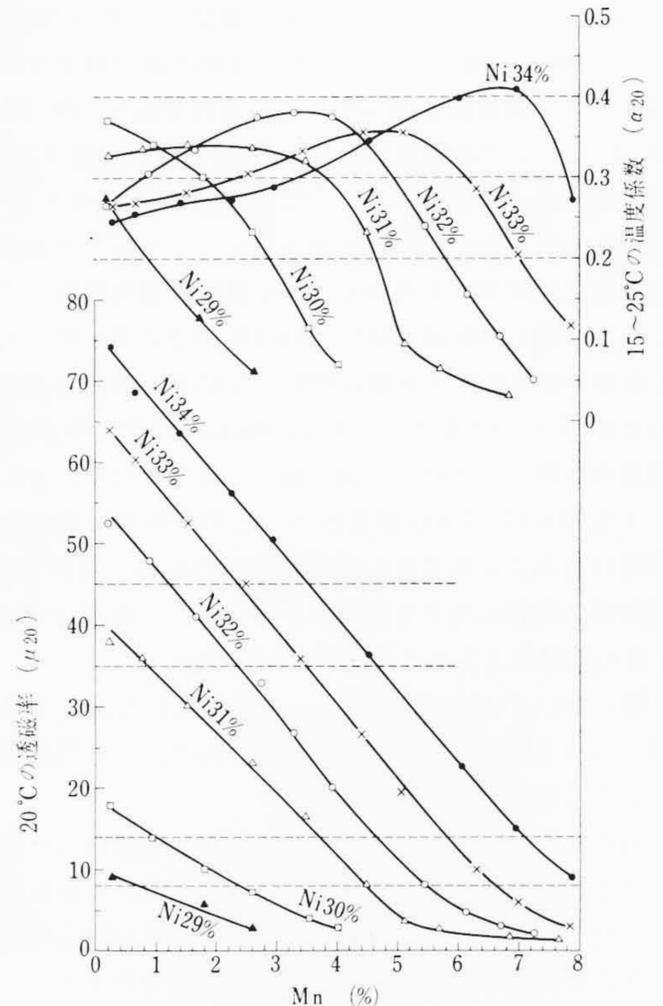


図15 Fe-Ni-Mn合金のNiおよびMn量とμ₂₀およびα₂₀との関係

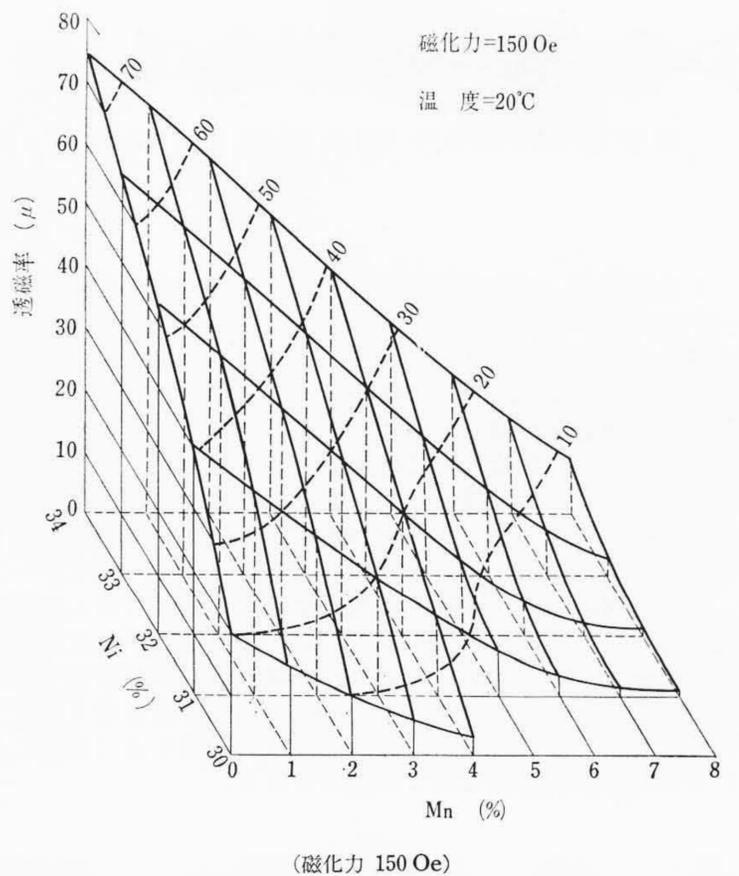


図16 Fe-Ni-Mn合金のμ₂₀とNiおよびMn量との関係

を示し、図16はμ₂₀とNiおよびMn量との関係を示したもので、これらより所望の磁気特性を得るための合金成分を知ることができる。すなわち本報の目標とする磁気特性に該当する成分を抽出すれば表4のようであるが、これらの中でNi量の少ないものを採択したほうが経済的である。

5. 結 言

以上、積算電力計の温度補償用整磁合金として与えられた磁気特性目標の磁化力150 Oeにおいて (1) μ₂₀: 40±5, α₂₀: 0.3~0.4

(2) $\mu_{20} : 11 \pm 3$, $\alpha_{20} : 0.2 \sim 0.3$ を満足し、使用温度範囲において μ -T 曲線が可逆的である材料を求めた研究結果を要約すると、Ni-Cu 系合金は温度係数が小さく不適當であり、Fe-Ni 二元合金は目標(1)については該当成分があるけれども目標(2)に対しては使用温度範囲に Ar_3 変態があり、この変態が生ずると μ -T 曲線の可逆性が失われるので整磁鋼に適さない。したがって筆者らは Fe-Ni 合金に第三元素 Mn を添加し、 Ar_3 変態を使用温度以下に移行させることを企図し、Ni 26~34%, Mn 8% 以下の Fe-Ni および Fe-Ni-Mn 合金の磁気特性を詳細に究明した結果、数種の適合成分を見いだしたが、その中でも Ni 約 30%, Mn 1.3~2.3% の Fe-Ni-Mn 合金が前述の目標(2)に対し最適であると考えられる。また目標(1)に対しても Mn 0.5~1.0% 程度添加した Fe-Ni-Mn 合金を用いたほうが低温特性および加工性の改善に有効である。なお Mn は Ni に比べ透磁率の変化に対する影響が小さいので、量産上の成分調整は Mn 量の調節によるほうが安定性がある。

本報においては μ_{20} および α_{20} を目標にしたが、さらに広い温度範囲における適合性を考慮する必要があり、この問題に関する研究については後報する予定である。

終わりに本研究を行なうに当たりご協力を賜わった元、日立製作所多賀工場計器設計部、崇像氏および関係のかたがたならびにご指導をいただいた元、日立研究所小野博士、また熱心に実験に従事された日立研究所小野寺久吉氏に深甚の謝意を表す。

参考文献

- (1) T. D. Yensen: Trans. Amer. Soc. Metals, 27, 797 (1937)
- (2) J. E. Kinnard, H. T. Fans: Amer. Inst. Elect. Eng. 44, 275 (1925), 49, 949 (1930)
- (3) 小山: 日立評論, 23, 327 (昭 15-6)
- (4) F. Stäblien: Z. Techn. Phys, 9, 145 (1928)
- (5) 榛葉, 青柳: 日本金属学会誌, 6, 444 (1942)
- (6) 増本, 白川, 大原: 日本金属学会 B 誌, 15, 376 (1951)
- (7) 白川, 大原: 特許公報 (昭 21-6101)
- (8) 森岡: 日立評論, 40, 979 (昭 33-8)
- (9) 小野, 根本, 早取: 特許公報 (昭 33-2763)
- (10) 飯田, 萩原: 積算電力計の理論と取扱 (1962)
- (11) 日本金属学会篇: 新制金属講座, 物理冶金測定法, II, 211 (昭 34-7)
- (12) 阿部, 井形: 応用金属物理学実験法, 151 (昭 36-4)
- (13) 浜住: 軌近非鉄金属及合金, 15 (昭 15-1)
- (14) 浜住: 新金相学, 180 (昭 36-12)
- (15) 津谷: 日本金属学会誌, 19, 612 (1955)
- (16) 西山, 清水, 佐藤: 日本金属学会誌, 20, 325 (1956)
- (17) F. Förster, E. Scheil: Z. Metallk, 32, 165 (1940)
- (18) 竹内, 本間, 鈴木: 日本金属学会誌, 21, 51 (1957)
- (19) 本間: 日本金属学会誌, 21, 122 (1957)
- (20) 今井, 泉山, 花田: 日本金属学会誌, 31, 898 (1967)
- (21) 西山: 日本金属学会々報, 7, 497 (1967)
- (22) P. V. Marian: Les Points de Curie Ferromagnetiques et la Saturation Absolue de Quelques Alliages de Nickel (1937)
- (23) 日本金属学会篇: 新制金属講座, 磁性材料, 24 (1954)

特許の紹介

特許第491953号 (特公昭41-15660号)

遠藤輝雄・古徳康雄

ヘリカルアンテナ

この発明は、無指向性アンテナとして UHF 帯に使用されているヘリカルアンテナの改良に関するものである。従来は金属パイプ 1 の中心にある給電点 2 よりパイプ両端に対称的に向かって絶縁体 3 をらせん状に設け、さらに絶縁体 3 を支持物としてらせん状導線 4 を設ける構造を採用している。しかしながら導線 4 を絶縁体 3 の高さまで引き上げた給電点 2 付近は、別個の仮想ダイポールアンテナが存在したような状態となり、このため不要な電波を放射させ、隣接導線へ影響を与えアンテナの水平面指向特性は不均等になるという問題があった。

この発明においては図 1 に例示するように、らせん状導線 4 の中間に沿ってらせん状金属帯 5 を設けて、給電点 2 付近における仮想ダイポールアンテナから放射される電波および伝送波を阻止して前記技術的問題を解消したものである。上記の金属帯 5 としては、銅、アルミニウムなどが用いられ、肉厚および幅を適宜調整してアンテナの特性が最良となるように設計される。

このように構成する本発明のアンテナによると、給電点 2 付近の仮想ダイポールアンテナによって放射される電波および伝送波は、前記金属帯 5 により阻止され、互いに隣接するらせん導線 4 に影響を及ぼすことはなくなり、特に伝送波は抑制されて給電点 2 付近からの不要な電波放射を阻止するという特異な効果が得られる。図 2 はこの発明のアンテナによる水平指向特性図であって、その曲線はほぼ真円に近い良好な特性を示し、改善の効果が顕著である。

(斎藤)

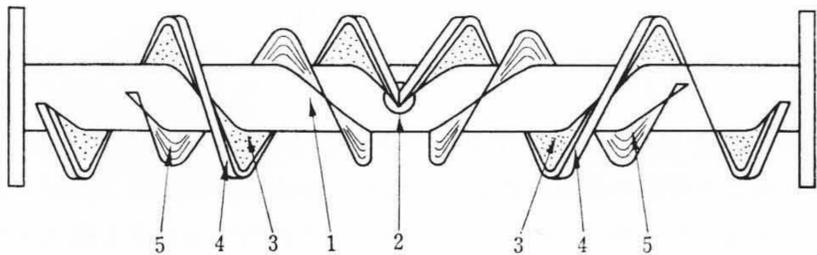


図 1

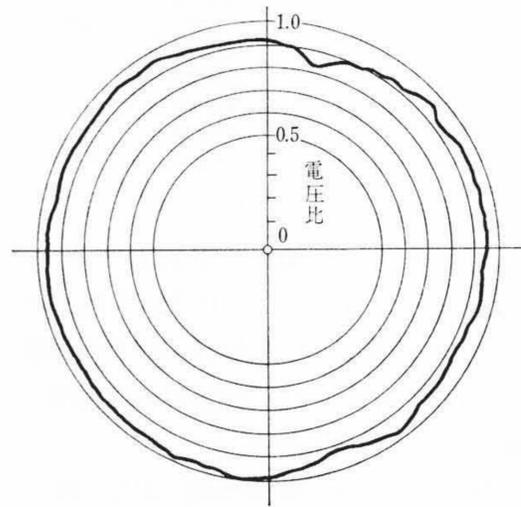


図 2