

永久磁石の安全率と自然減磁率

Safety Factor and Natural Demagnetizing Factor of Permanent Magnet

北 川 栄*
Sakae Kitagawa

内 容 梗 概

辻田博士が求められた永久磁石の保磁力および安全率と減磁率の関係について再検討を行い、原論文の趣旨をそこなぬ範囲で、不合理な点を批判し、その修正を行った。

保磁力 H_c 、安全率 S の数値さえ代入すれば、減磁率 δ (%) が計算できるよう次式を求めた。

$$\delta = \frac{64}{\left(\frac{H_c}{100}\right)^{3.6} \left(\frac{S}{10}\right)^{2.9}}$$

また、経年修正倍率という考え方を提案した。

1. 緒 言

計器に使用される永久磁石は従来まったく経験とかんによって設計が行われ、根拠となる理論や一貫した基準がなかった。辻田博士はこの分野を独自で切り開き、われらに基準を与えられ、計器工業に大きな貢献をされた。

筆者は絶縁抵抗計の長年経過後の性能変化に関する研究を行うにあたり、減磁に対する考察を行うことが必要になったが、原論文⁽¹⁾のままでは計算が不便であるので、再検討を行い不合理な点の批判とその修正を試みた。

2. 原論文⁽¹⁾の概要

辻田博士は電気試験所の吉沢、時田の両氏が電気試験所第一部い報に報告⁽²⁾されている積算電力計の寿命試験のデータをもとにして第1表を計算し、安全率 S と減磁率 δ の関係を両対数方眼紙に書くとはほぼ一直線上に乗ることをみつけ、次式を求められた。

$$\delta S^n = C \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $n = 2.9 \div 3$

次に上記の磁石は保磁力 $60 O_e$ (エルステッド) 内外のタングステン磁石、または、クローム磁石であるので、保磁力 $240 O_e$ および $500 O_e$ の磁石への拡張を次のごとく進められた。

前に保磁力 H_c と安全率 S の関係は

$$H_c S^m = K \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $K = 3,800$, $m = 0.763 \div 0.75$

で示され、保磁力 $60 O_e$ 、安全率 170 のタングステン磁石と、保磁力 $240 O_e$ 、安全率 32 の KS 磁石とは、耐久性に関しては等価であるというふうに考え、保磁力 H_c が H_c' に、安全率 S が S' になった場合を、(1)式と(2)式より求められた。

$$\delta S'^n = \frac{C}{\left(\frac{H_c'}{H_c}\right)^{\frac{n}{m}}} \dots \dots \dots (3)$$

以上により保磁力をパラメータにする自然減磁率 δ と安全率 S の関係を表わす第1図に示した平均直線群を求められた。

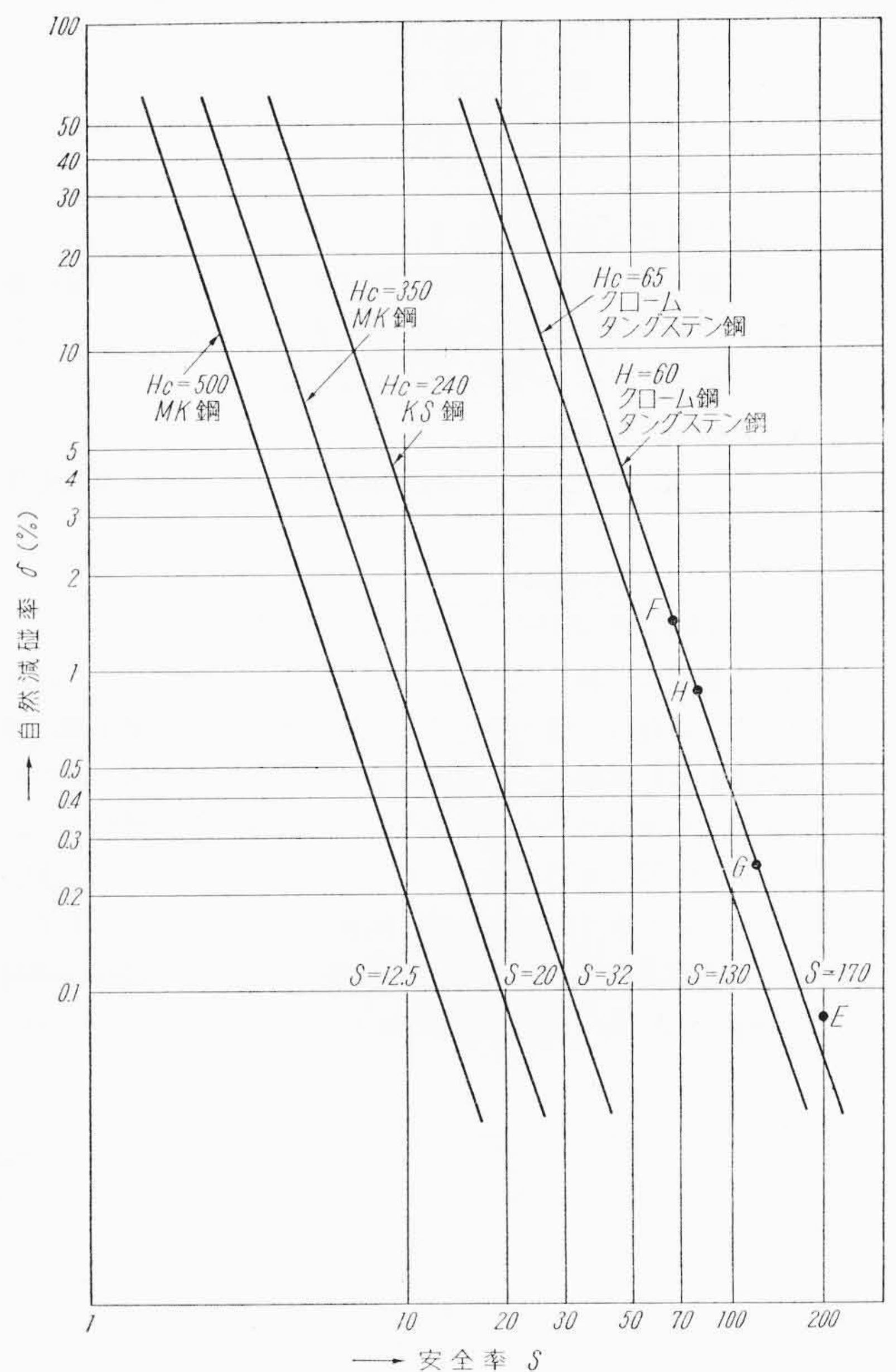
3. 減磁率の計算式

前章は辻田博士の原論文の概要である。以下これにつき検算および修正を試みる。

3.1 (1) 式の検算

第1表の数値 $S = 70, 82, 128, 200$ において $\delta = 1.5\%, 0.85\%$,

* 日立製作所日立研究所



第1図 安全率と自然減磁率の関係

0.25%, 0.1%以下を(1)式に代入し、 C を求める。

δ	S	$S^{2.9}$	C	C の平均
1.5	70	2.24×10^5	3.36×10^5	3.2×10^5
0.85	82	3.55×10^5	3.02×10^5	
0.25	128	1.29×10^6	3.23×10^5	
<0.1	200	$<4.71 \times 10^6$	$<4.71 \times 10^5$	

上記の $\delta = 1.5, 0.85, 0.25\%$ という数値は、吉沢、時田両氏の積算電力計の寿命試験の結果「計器の回転が各負荷を通じて、3, 1.7% および 0.5% 速くなった」というデータより出ている。すなわち、有効数字の少ないデータであることと、上記のように1割も C に幅

第 1 表 自然減磁率および安全率

計 器	自 然 減 磁 率 δ (%)	安 全 率 S
E	<0.1	102×2
F	1.5	70
G	0.25	128
H	0.85	82

備考：(イ) 文献(1)の第 1 表の一部である。
 (ロ) E, F, G, H は寿命試験した計器の分類で、異なる磁石が使用されている。原文には磁石の形状が記してある。
 (ハ) E 計器の安全率 102×2 は磁気分路があるため正確に安全率を計算できないので、200 として扱われている。
 (ニ) $S = \frac{lm Ag}{lg Am}$
 lm …………… 磁石の長さ
 lg …………… 空けきの長さ
 Am …………… 磁石の断面積
 Ag …………… 空けきの断面積

第 2 表 計算結果と原論文の数値との対比

H_c'	$(H_c')^{3.8}$	S'	$(S')^{2.9}$	δ (計算値)	δ (原論文)
60	5.714×10^6	170	2.86×10^6	0.111 %	0.1 %
240	1.107×10^9	32	2.32×10^4	0.071 %	0.1 %
500	1.803×10^{10}	12.5	1.52×10^3	0.067 %	0.1 %

があることは注意すべき事実である。

注：－ 積算電力計の円板の回転数は空けきの磁束密度の 2 乗に逆比例する。したがって円板の回転数が 3 % 速くなったことは、磁束密度がその半分である 1.5 % 減じたことになる。

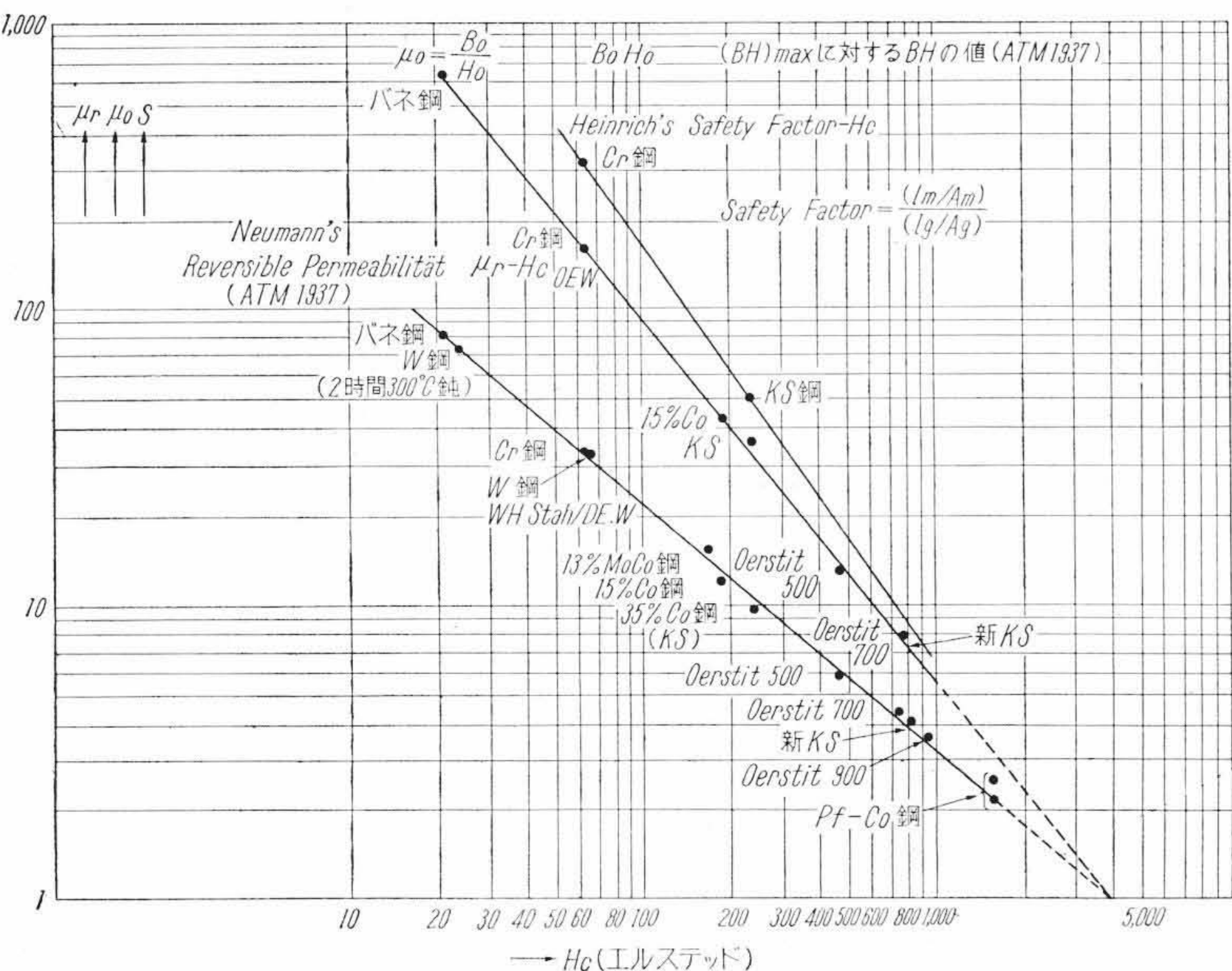
3.2 (2) 式の 検 算

(3) 式に $C = 3.2 \times 10^5$, $n = 2.9$, $m = 0.763$ を入れると次式をうる。

$$\delta = \frac{3.2 \times 10^5 \times 60^{3.8}}{(H_c')^{3.8} (S')^{2.9}} = \frac{1.83 \times 10^{12}}{(H_c')^{3.8} (S')^{2.9}}$$

この式に原論文中に論じられている値を代入して計算し、その計算結果を、もともになった値と対比すると第 2 表となり、第 1 図に等価として示されている値が大きく食い違っている。第 1 図を生かして、その計算式を求めるためには、なんらかの修正が必要である。

備考：－ $m = 0.763 \div 0.75$ となっているが、0.75 をとるとこの食い違いはさらに大きくなることは、同様の計算で確かめてある。
 しかし、安全率 S と保磁力 H_c 、初導磁率 μ_0 と H_c 、Reversible Permeability μ_r と H_c を両対数方眼紙上にかくと第 2 図のように



第 2 図 導磁率、安全率と保磁力の関係

いずれも直線になり、ともに S , $\mu_0 = 1$ にて $H_c = 3,800 \text{ Oe}$ の点に集めることは辻田博士が初めてみつけれ⁽³⁾、その後の研究進展に大いに役立った画期的な事項であるので、このことを生かし、かつ「 $H_c = 60$, $S = 170$ の磁石と $H_c = 240$, $S = 32$ の磁石とは耐久度に関して等価であるというふうに考える」と述べられていることをもとにして、修正を試みる。すなわち、

$$H_c S_m = 3,800$$

において、これらの値を入れて計算すると

$$\left. \begin{array}{l} H_c = 60, S = 170 \text{ ならば } m = 0.808 \\ H_c = 240, S = 32 \text{ ならば } m = 0.795 \end{array} \right\} \text{ 平均 } m = 0.8$$

となり、(2) 式のように $m = 0.763 \div 0.75$ とならない。原論文の趣旨を生かすためむしろ $m = 0.8$ と修正すべきと思う。

3.3 (3) 式の 検 算

(3) 式を求められ、その結果をすでに述べたとおり第 1 図にて示されているが、図示されていない H_c の値に対する計算をするためにはその数値を求めなければならない。

(3) 式中 $H_c = 60 \text{ Oe}$, $n = 2.9$, C および m は前節で求めた 3.2×10^5 および 0.8 を代入する。ただし、多少の誤差は覚悟して $n/m = 3.62$ を 3.6 として下記をうる。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(3.2 \times 10^5) \times 60^{3.6}}{(H_c')^{3.6} (S')^{2.9}} \\ &= \frac{8.03 \times 10^{11}}{(H_c')^{3.6} (S')^{2.9}} \end{aligned}$$

H_c' , S' は任意の保磁力および安全率であるので、以後このダッシュをとり、一般式とする。

$$\delta = \frac{8.03 \times 10^{11}}{H_c^{3.6} S^{2.9}} \dots\dots\dots (4)$$

次に $H_c = 100$ 以上, $S = 10$ 以上の数値を扱うときの便宜をはかるため、(4) 式を変形する。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{8.03 \times 10^{11}}{100^{3.6} \times \left(\frac{H_c}{100}\right)^{3.6} \times 10^{2.9} \times \left(\frac{S}{10}\right)^{2.9}} \\ &= \frac{63.7}{\left(\frac{H_c}{100}\right)^{3.6} \times \left(\frac{S}{10}\right)^{2.9}} \\ &\div \frac{64}{\left(\frac{H_c}{100}\right)^{3.6} \times \left(\frac{S}{10}\right)^{2.9}} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

念のため、この式に数値を代入して計算し、その結果を、もともになったデータや、辻田博士が耐久度に関して等価であるとして示されている数値と対比すれば、第 3 表のとおりで、第 2 表よりも計算値がもとのデータによく合っている。すなわち原論文の趣旨はそこなわれていないことが明らかである。

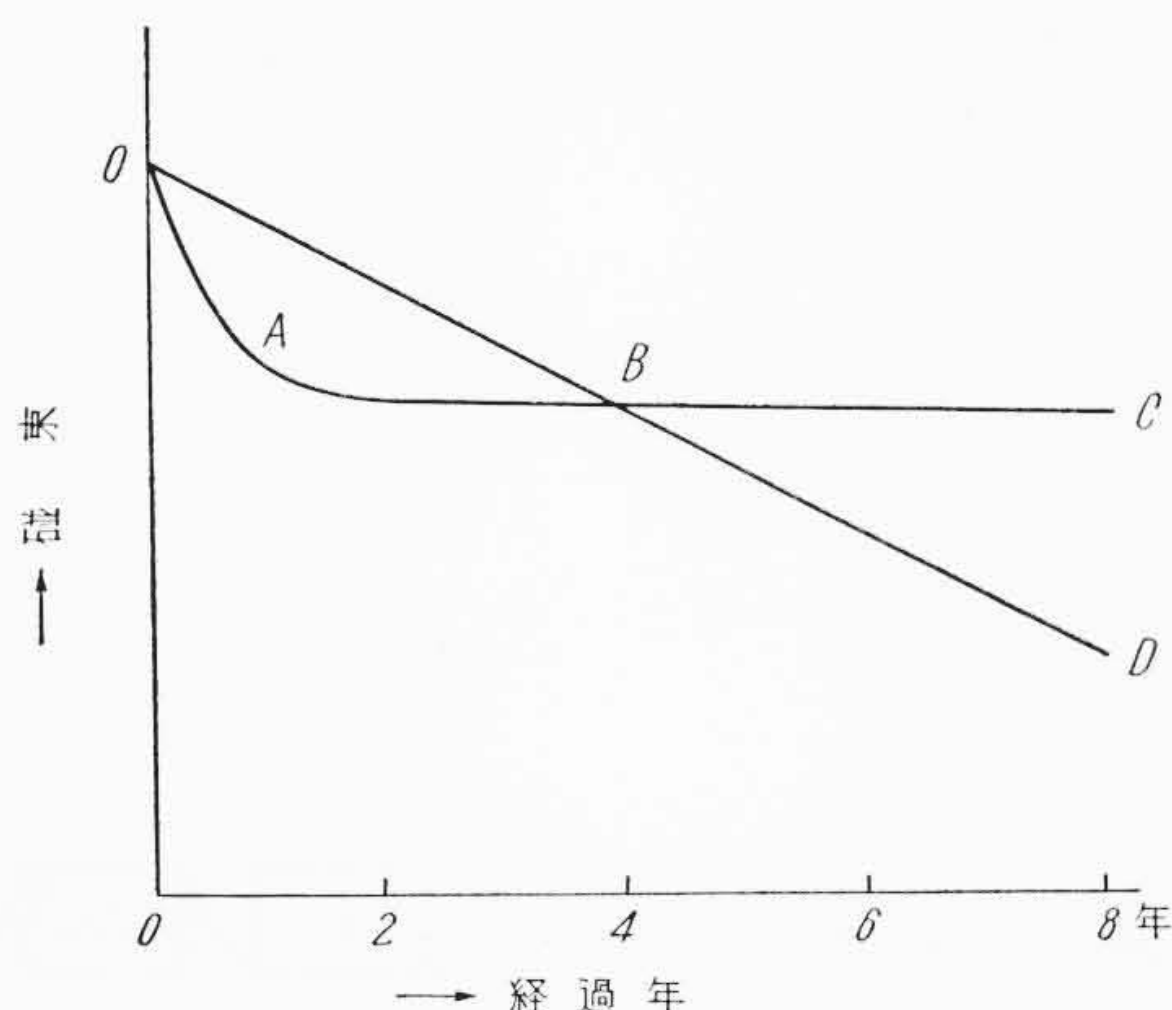
4. 経年修正倍率

辻田博士は「自然減磁の有様を観察すると、初めは比較的急激に、年月を経るにしたがってしだいに緩慢に減磁する。この究極の減磁量を最初の磁束量との比で表わしたものを自然減磁率と定義する」と述べられているが、上記の自然減磁率を求めた基本データは、最短 8 箇月、最長 4 年 11 箇月、平均 4 年 2 箇月であって、減磁を年ごとに記録したものではなく、その道程も不明である。後述するように自身で 10 箇月後の減磁を測定されているが、これもその道程およびその後の経過もない。測定しにくい値で、かつ、長年月かかる実験だけに不可能に近い。すなわち、4 年以上は減磁しないとの証明はないの

第3表 計算値と原論文の値との対比

項番	H_c	S	$\left(\frac{H_c}{100}\right)^{3.6}$	$\left(\frac{S}{10}\right)^{2.9}$	δ (計算値)	δ (原論文)
1	60	70	0.159	283	1.42	1.5
2	60	82	0.159	448	0.897	0.85
3	60	128	0.159	1,620	0.248	0.25
4	60	200	0.159	5,900	0.068	<0.1
5	60	170	0.159	3,700	0.109	0.1
6	75	130	0.355	1,700	0.106	0.1
7	240	32	23.5	29.2	0.093	0.1
8	350	20	80	7.5	0.107	0.1
9	500	12.5	330	1.95	0.100	0.1

備考：項番1～4がもとになったデータとの対比で、項番5～9は辻田博士が図中いずれも0.1%となり耐久度として等価であるとして示されている数値との対比である。



第3図 減磁過程の説明図

であるから前章で議論した減磁率を「究極の減磁率」と定義することは無理があることは明らかである。

辻田博士の定義は第3図のOABCのような曲線で、BC部分は水平線である。次にこの反対に図の直線OBDのように年々同じ割合で減磁すると考えるのはそれ以上に不合理で「しだいに緩慢に減磁する」と考えるほうが妥当である。実際はこの2線の間の経過をたどるであろう。

そこで筆者は次のことを提案する。

究極の減磁率 δ_∞ というものがあり、経年変化で指数関数的にこれに近づくと考える。すなわち、 t 年後の減磁率 δ_t を下式にて表わすことにする。

$$\delta_t = \delta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \dots\dots\dots (6)$$

この式では時定数 T の選び方で、経年変化の様相が異なってくる。 T を小にすれば辻田博士の考え方に近くなり、 T を大にすればOBD直線に近づくことは明らかである。

t 年後の減磁率は前章までに議論した減磁率 δ の幾倍になるかを修正倍率 α と名づけることにする。

$$\alpha = \frac{\delta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)}{\delta_\infty \left(1 - e^{-\frac{4}{T}}\right)} = \frac{1 - e^{-\frac{t}{T}}}{1 - e^{-\frac{4}{T}}} \dots\dots\dots (7)$$

いま、かりに $T=1$, すなわち時定数を1年と仮定すれば、修正倍率 α は下式のようなになる。

$$\alpha = \frac{1 - e^{-t}}{1 - e^{-4}} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式により経過年数に対する α の値を計算すると第4表を得る。

すなわち時定数を1年と仮定すると、4年後の減磁率は実際的には究極の減磁率と考えてよいということであって、辻田博士の趣旨はこの辺にあることと思われる。

第4表 時定数1年とした場合の経年修正倍率

経過年数 t	$1 - e^{-t}$	経年修正倍率 α
1	0.632	0.64
2	0.865	0.88
3	0.950	0.97
4	0.981	1.00
∞	1.000	1.02

第5表 計算による減磁率、修正減磁率と実験値で求めた減磁率との対比

保磁力 H_c	安全率 S	減磁率 (計算値) δ	経年修正倍率 α	修正減磁率 (計算値) δ_t	減磁率 (実験値) δ'
75	18	32.8 %	0.58	19 %	32%
180	18	1.4 %	0.58	0.81%	約1%
350	18	0.145%	0.58	0.08%	認められず

なお、本章で述べたことは、裏づけになるデータがなく、ただ考え方の一提案にすぎない。

5. 減磁率計算式の適用範囲

第1図および本報告で求めた計算式(5)はともに保磁力 H_c 、安全率 S を小さくすれば、減磁率 δ が100%以上になりうるものである。これは明らかに不合理である。

計算の基礎になった数値は $H_c=60$, $\delta=1.5$, 0.85, 0.25% および <0.1% の4点であって、求めたものは実験式であって、理論式ではないから、これらの点をはるかに超過する値を計算することが不可能であることを示すものである。

次に辻田博士はクロームタングステン $H_c=75 O_e$ 、低級KS磁石 $H_c=180 O_e$ 、MK磁石 $H_c=350 O_e$ 、安全率 $S=18$ の三磁石につき10箇月の実験により求めた結果を下記のようにチェックしておられる。

第1図によればクロームタングステン磁石では大幅に減磁して計器として使いものにならぬことは一見して予知できる。約40%減磁することになるが、実験によれば磁束2,500 マックスウェルであったのが、1,700 マックスウェルに減磁した。すなわち、32%の減磁である。MK磁石の場合には実験の精度内では減磁は認められず、KS磁石の場合は約1%の減磁が認められた。しかし、実験は吉沢、時田氏の平均4年という長年月に比し10箇月という短期間であり、また、測定の精度は磁束計によったから積算電力計の寿命試験の場合よりはるかに悪く、ただおおざっぱなチェックの程度である。

これは大きな減磁率にも適用を試み、その食い違いは経過年数と測定精度とで説明されているものと受け取れる。

この実験結果を(5)式と(8)式で計算してみると第5表のようなになる。

クロームタングステン磁石について、筆者の求めた計算式による減磁率 δ が修正した減磁率 δ_t よりも実験値によく合っているが、これゆえに数十%の減磁率まで適用できると考えることは前述した理由で筆者は反対である。

6. 総括および結言

以上の議論を総括すれば下記のとおりである。

(1) 辻田博士は保磁力 $H_c=60$, 75, 240, 350 および 500 O_e のものについて、減磁率 δ を計算した結果を図示しておられるが、計算数値を求めた道程に不明の点があるので議論の過程をたどり、修正を加え、任意の保磁力 H_c 、安全率 S に対応する減磁率 δ の計算に便なる式を求めた。

$$\delta = \frac{64}{\left(\frac{H_C}{100}\right)^{3.6} \left(\frac{S}{10}\right)^{2.9}}$$

ここに、 δ = 減磁率(%)

H_C = 保磁力(O_e)

S = 安全率(無名数)

上式はあくまで実験式であるから、この実験式を帰納したデータの近傍、すなわち計器として大切な数%以下の減磁率を計算するのに使用できるが、理論式でないから基礎になった実験の範囲をはるかに超える値の計算には大きな誤差が伴うものである。したがって計算で10%以上の大きな減磁率が出た場合は計器として使いものにならぬという判断のみをすべきで、その数値自身を重視してはならぬものである。

(2) 経過年による修正倍率 α という考え方を提案した。

$$\alpha = \frac{1 - e^{-\frac{t}{T}}}{1 - e^{-\frac{4}{T}}}$$

$$\delta_t = \alpha \delta$$

ここに、 t = 経過年(年)

T = 時定数(年)

δ_t = t 年後の減磁率(%)

δ = 総括(1)で計算した減磁率(%)

数年の実験をしなければ、この考え方がよいのか、時定数 T を何年にするのがよいのかはわからぬものであるが、 $T = 1$ 年とすると、辻田博士の論文の趣旨がそこなわれないものとなる。

終りに臨みこの考察を行うにあたり激励をいただいた日立研究所三浦倫義博士に対し厚く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 辻田：日立評論 30, 3 p. 114 (昭和23-6)
- (2) 吉沢，時田：電気試験所第一部報 8 巻 p. 25 (昭 8-3)
- (3) 辻田：日立評論 23, 6 p. 324 (昭和15-6)



新案の紹介



登録新案第522768号

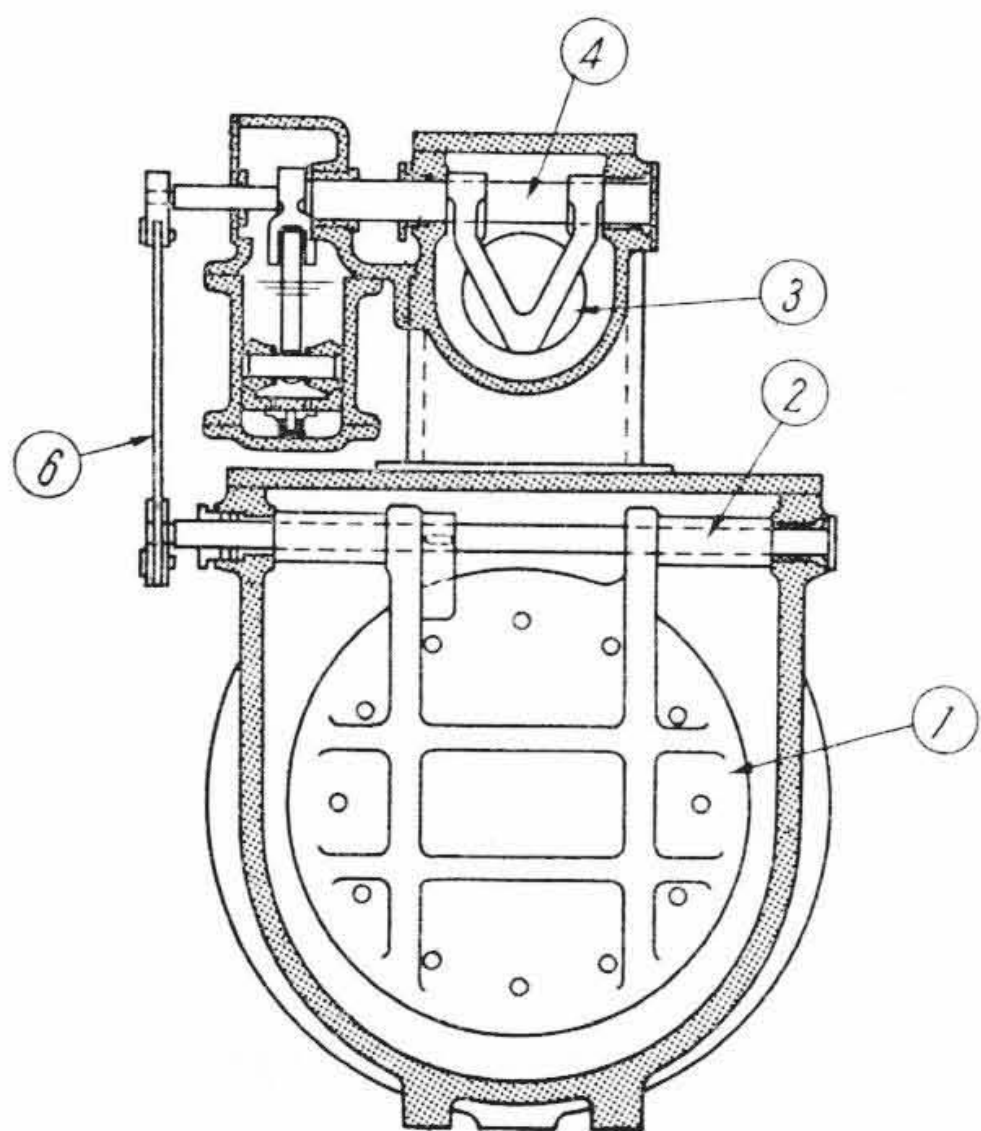
木暮健三郎・岸野俊雄

ウォーターハンマ防止装置付チェックバルブ

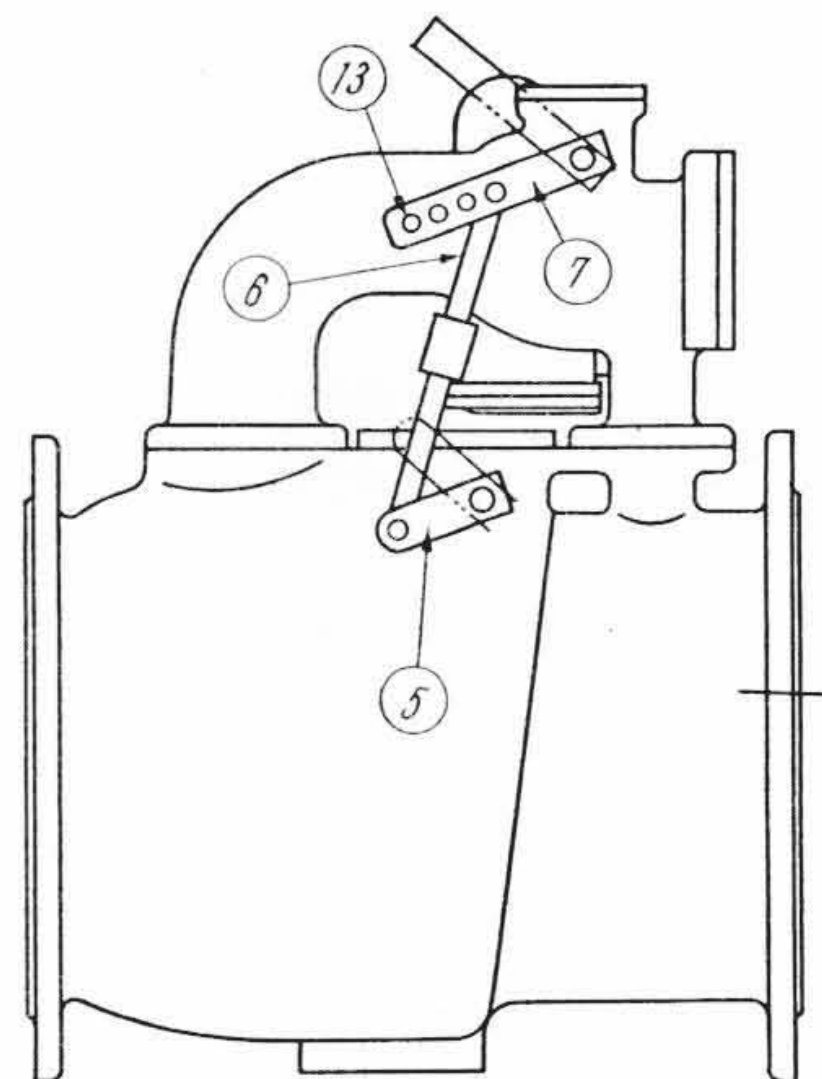
この考案は、主バルブ1のスピンドル2とバイパスバルブ3のスピンドル4とを連結するリンク機構の一方のリンク5または7に、他方のリンク6を連結するための孔13を任意数設け、バイパスバルブの最大開度(所要有効面積)を逆流量に応じて調整することができるようにしたものである。

この考案によれば、1個のバイパスバルブを使用条件に適応した

開度に調整することができるので、相異なる有効径のバイパスバルブを多数使用する場合と同一の効果を発揮させることができる。したがって、従来のように多数のバイパスバルブを準備する必要がなく、しかも使用条件の異なるたびにバイパスバルブを取りかえるはん雑を防止することができるから非常に経済的である。(野村)



第1図



第2図