磁気コンパスの性能試験

——低温領域における運動性能について——

白井 靖幸*, 斎藤 清隆**, 鈴木 裕**

Performance Test on Magnetic Compasses

——About the Motion of Magnetic Compass Cards
in Low Temperature Area——

Yasuyuki SHIRAI*, Kiyotaka SAITO** and Hiroshi SUZUKI**

Abstract

ISO 449 specifies that magnetic compasses shall operate satisfactorily within the temperature range -30° to $+60^{\circ}\text{C}$. We aimed at the performance of compasses in a condition of low temperature. A few experiments were made on compasses having a compass liquid of which viscosity differs with the concentrations 40%, 50% and 60% of alcohol in distilled water about the swirl error and damping characteristics within the temperature range -30° to $+20^{\circ}\text{C}$.

We showed a theory of swirl error to apply easily in designing magnetic compasses which agreed well with the experimental results and obtained some motion characteristics of a directional system in low temperature.

1. はじめに

磁気コンパスの性能試験についての研究は、今までにもいくつか報告⁽¹⁾がなされている。現在、ISO⁽²⁾では、磁気コンパスの性能について、低温の領域においては、 -30°C でもコンパスは十分に作動しなければならないと規定されている。そこで著者等は、この規定を考慮し、低温領域における性能を把握し、今後の磁気コンパスの性能改善への一助とするために、現在多くの磁気コンパスでコンパス液として使用されている、アルコール水溶液の粘度に着目して、濃度の異なったアルコールを使った既製の磁気コンパスを使用し、低温より常温に至る温度範囲で、旋回誤差と制振特性についての性能試験を実施した。特に旋回誤差については、旋回時のコンパスボウルと指北装置間の運動を、単純な平行平板間の流体運動による粘性トルクと指北力と関係として理論式を導き、観測値との比較を行った。

2. 実験について

旋回誤差、制振特性の実験は、温度調整、人工磁界装置の整った磁気室内において、水平磁界、旋回速度等を、必要に応じ変化させて、次の実験項目について実施した。表1に実験に使用した磁気コンパスを掲げる。

ここでは便宜上 C. G. S. 単位系を用いた。

2.1 実験項目

(1) 各種のコンパスについて、 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ の温度下で、旋回速度 ω を $1.5^{\circ}/\text{s}$ とし、水平磁界 H を変化させたと

表1 実験に使用した磁気コンパス

種類と形式	カード径	コンパス液濃度	磁気能率
R 165	165mm	40% (-20° 用)	2400 C.G.S. emu
R 165	165mm	50% (-30° 用)	2600 C.G.S. emu
T 125	125mm	40%	900 C.G.S. emu
R 190	190mm	40%	3200 C.G.S. emu

*正会員 千葉工業大学

(〒275 習志野市津田沼2-17-1)

**正会員 東京水産大学

(〒108 東京都港区港南4-5-7)

きの旋回誤差の測定

- (2) 温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、水平磁界 H を 0.18Oe とし、旋回速度 ω を変化させたときの旋回誤差の測定
- (3) R165 (-20°C 用)、R165 (-30°C 用)の温度変化にともなう旋回誤差と制振特性の測定
- (4) 40%、50%、60%の濃度(容積率)のアルコール水溶液の温度変化にともなう粘度の測定

2.2 実験方法

表1に掲げた磁気コンパスを用い、旋回速度としては、 $6^\circ/\text{s}$ 、 $3^\circ/\text{s}$ 、 $1.5^\circ/\text{s}$ 、水平磁界は 0.075 、 0.15 、 0.18 、 0.3 、 0.6Oe と変化させトランシットによる読み取りと、磁界測定器による変位量の記録を同時に行なった。特に今回の測定では、低温領域における性能試験に主眼をおいたためR165形コンパスを中心とする測定を実施した。R165形コンパスの温度による変化を測定するに際しては、 -20°C 用では -20°C 以下、 -30°C 用では -30°C 以下まで十分に冷却し、その後、コンパス液の状態変化の観測と、旋回誤差、制振特性の実験を温度が上昇していく過程において行った。温度上昇の変化は、測定時間に対し、十分に小さいのでこの方法を採用した。

コンパス液の粘度の測定は、使用したコンパスと同濃度のアルコール水溶液を用い、各液温における粘度を測定した。

3. 旋 回 誤 差

3.1 コンパス液の粘度

図1 コンパス液の温度変化にともなう粘度

図1は、濃度の異なったアルコール水溶液の温度変化にともなう粘度を示す。粘度の測定には、低温領域における高粘度のものを測定するのに適した回転粘度計を使用した。液の状態について述べると、濃度(容積率)40%のものは、 -24°C 以下では、シャーベット状となり、粘度は回転粘度計の性質上、多少誤差を含んでいるものと思われるが、急激に粘度が上昇していることがわかる。50%のものについても、 -30°C 程度以下では同様な状態にあった。また、60%のものは、 -38°C 以下でその傾向が見られた。3種類とも、 0°C から常温までは、ほとんど粘度は一致しているといっても差しつかえない。ただし、実際のコンパスではそのコンパス液の状態がボウルに封入された状態にあるので、諸条件を考慮に入れると、これらの実験値とまったく同一であると言えないが、その値はほとんど一致しているものと思われる。

図2 旋回誤差の記録例

3.2 実験結果

図2に旋回誤差の測定記録の一部を示す。次に図3は旋回速度を $1.5^\circ/\text{s}$ とし、水平磁界を変化させたときの旋回誤差である。各々コンパスの形式は違っているが、旋回誤差が水平磁界に反比例していることがよくわかる。

図3 水平磁界の変化にともなう旋回誤差

図5 コンパス液の温度変化にともなう旋回誤差

いては、 -20°C 程度でカードがボウルについて動き、ボウル内においては部分的な氷結状態があったものと思われる。カードが自由に動き始めた温度は、 -17°C 程度からであった。 -30°C 用コンパスは、 -30°C でカードは動くことは動くが、旋回誤差が 90° 以上になってしまい測定不可能であった。 -28°C 程度より旋回誤差の測定が可能になった。

図6は粘度の変化にともなう旋回誤差であるが、 25cP 以上ではその旋回誤差が急激に大きくなっている。これは、すでに述べたとおり、コンパス液の粘度が 25cP 以上になるような温度では、液自体が部分的に凍ったりシャーベット状になり不均一な状態であり、正常な高粘度の流体として取り扱えなくなってしまうからである。

図4 旋回速度の変化にともなう旋回誤差

図4は水平磁界が 0.18Oe における旋回速度と旋回誤差との関係であるが、各々のコンパスの形式による旋回誤差の大きさの違いはあるが、それぞれその旋回誤差が旋回速度に比例していることがわかる。

図5はR165形(-30°C 用)のコンパスの低温領域から常温に至る旋回誤差である。同形の -20°C 用コンパスにお

図6 粘度の変化にともなう旋回誤差

以上の結果より旋回誤差は、水平磁界の大きさ H に反比例し、旋回速度 ω 、コンパス液の粘度 μ に比例していることがわかる。

3.3 旋回誤差の理論

旋回誤差の理論についてはすでに報告⁽³⁾されているが、ここでは、今まで述べてきた関係をふまえ、今後の磁気コンパスの設計において一つの指針となるよう単純な式で理論を組み立ててみた。

次の図7のようにフロートは単純な円筒とみなし、フロート下部についている磁石は、ここでは無視した。この単純化したコンパスの中に粘度 μ [Poise] の液体が封入されておりボウルが回転速度 ω [rad] で一定回転しているときの各面間の流体の流れを単純な平行平板間の流れとして考えた。それぞれの速度分布は直線分布であるとして、ボウルが ω で回転しているときに働くカード部、フロート部の粘性トルクを T とすれば、その T による回転力とコンパス指北力とが釣り合う角度 θ をその時の旋回誤差であるとした。

(1) カード面上の粘性トルク T_1

ボウルは角速度 ω で回転するから、 r におけるボウルの周速は $r\omega$ である。またカードの r における周速は0と考えこの間速度分布が直線分布であると仮定すると、半径 r における y 方向の速度分布は、

図7 理論に使用したコンパスの諸要素

図A

図B

$$u_1 = \frac{r\omega}{h_{21}} y_1 \quad (\text{上部}) \quad u_2 = \frac{r\omega}{h_{22}} y_2 \quad (\text{下部})$$

となる。したがって、カード半径 r の面上の環状面積 $2\pi r dr$ に作用する粘性トルク T_1 は

$$dT_1 = 2\pi r \cdot dr \cdot \mu \left(\frac{du_1}{dy_1} \Big|_{y_1=0} + \frac{du_2}{dy_2} \Big|_{y_2=0} \right) \cdot r$$

ここで

$$\frac{du_1}{dy_1} \Big|_{y_1=0} = \frac{r\omega}{h_{12}}, \quad \frac{du_2}{dy_2} \Big|_{y_2=0} = \frac{r\omega}{h_{22}}$$

であるから

$$dT_1 = 2\pi\mu\omega \left(\frac{1}{h_{12}} + \frac{1}{h_{22}} \right) r^3 dr$$

ゆえに、カード上下面に作用する粘性トルク T_1 は、

$$T_1 = \int_{r_1}^{r_2} dT_1 = \frac{1}{2} \pi \mu \omega \left(\frac{1}{h_{21}} + \frac{1}{h_{22}} \right) (r_2^4 - r_1^4)$$

(2) フロート上下面に作用するトルク T_2

T_2 は T_1 と同様に考えて

$$T_2 = \frac{1}{2} \pi \mu \omega \left(\frac{1}{h_{11}} + \frac{1}{h_{12}} \right) r_1^4$$

(3) フロートの側面に作用する粘性トルク T_3

ボウル側面との関係であるから、半径 r における円周方向の速度分布 v は直線分布であると仮定し、

$$v = \frac{r_3 \omega}{r_3 - r_1} (r - r_1)$$

$$\frac{dv}{dr} = \frac{r_3 \omega}{r_3 - r_1}$$

ゆえに

$$T_3 = 2\pi r_1 d_1 \mu \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=r_1} \cdot r_1 = 2\pi r d_1 \mu \omega \frac{r_1^2 r_3}{r_3 - r_1}$$

(4) カード端面に作用する粘性トルク T_4

T_3 と同様に

$$T_4 = 2\pi r d_2 \mu \omega \frac{r_2^2 r_3}{r_3 - r_2}$$

となる。

(5) 指北装置に働くトルク T

全体のトルクとみなし

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$$

で表わされる。

ゆえに求める旋回誤差 θ は、コンパスの指北力と粘性トルク T とが等しくなったときであるから、

$$M \cdot H \cdot \sin \theta = T$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{T}{MH}$$

となる。

3.4 旋回誤差と各クリアランスとの関係

図5の破線は図1で求めた粘度の数値を使用して理論式を計算した結果を示したものである。

磁気能率 M : 2,600 C. G. S. emu

水平磁界 H : 0.18 Oe

粘度 μ : 5.2 cP

旋回速度 ω : 1.5°/sec

$d_1 = 4.25\text{cm}$ $h_{11} = 0.35\text{cm}$

$d_2 = 0.10\text{cm}$ $h_{12} = 2.00\text{cm}$

$r_1 = 3.45\text{cm}$ $h_{21} = 2.50\text{cm}$

$r_2 = 8.25\text{cm}$ $h_{22} = 4.00\text{cm}$

$r_3 = 10.45\text{cm}$

この結果より見る限り、この理論式がコンパスの性能を知る上で、十分に実用できるものと考えられる。

次に各々、上面間、側面間、下面間のクリアランスと旋回誤差の関係を各々測定に使用したコンパスの諸要素をもとに計算したのが図8である。カード径とフロートの大き

さを一定としたとき、各クリアランスの変化にともなう旋回誤差への影響がよくわかる。破線で示してあるのが実験に使用したコンパスボウルの大きさである。この結果をみると、上面、下面のクリアランスの影響が大きいということがわかる。

図5において、コンパス液がボウル中に封入されており、低温領域では液の状態も均一でないと考えられるので、温度が低くなるほど、粘度に比例しているとする理論値と実験値との間にはその差が開く傾向にある。

図8 理論式による各クリアランスと旋回誤差との関係

4. 制振特性について

4.1 制振特性

I S O, J I S等では, コンパスの性能を表わす1つの要素として, 振揺試験の周期をあげている。ここでは, カードの北を磁北から一方に 40° 偏らせて放したとき, カードの北が磁北を最初に横切る瞬間から, 次にまた磁北を横切る瞬間までの時間, いわゆる半周期と, その時の行き過ぎ角について, トランシットによる観測と磁界測定器とつながれた記録計による記録とを同時に行ない, それぞれの制振曲線を描かせ, その制振特性から, コンパスの性能を調べてみた。ここでは, その半周期と, 行き過ぎ角について, 水平磁界の変化, 液温の変化にともなう測定を行ったので述べる。

4.2 実験結果

各温度における半周期の時間を測定したものが図9である。 -20°C 用のコンパスでは -15°C でまだ制動のかなりすぎた状態で, 無周期となり, 元の方位を指示するまでに4分以上もかかる。 -30°C 用コンパスでは, -30°C で指北装置は動く状態にあるが, -20°C 用と同様に元にもどるまでかなりの時間を要した。

図9 コンパス液の温度変化にともなう半周期

図10 水平磁界の変化にともなう半周期

図10は水平磁界の変化にともなう半周期を表わしたものであり, 温度 20°C における測定である。 -20°C 用, -30°C 用の R165 形コンパスには多少磁気能率に差はあったが, 粘度の差はなく, 半周期と水平磁界の関係が $-2/3$ 乗の比例関係になっていることがわかる。

図11は -30°C 用コンパスの制振特性を各々の温度における行き過ぎ角で表わしたものであり, P_1, P_2, P_3 は第1, 第2, 第3行き過ぎ角である。この図から, $-27 \sim 28^\circ\text{C}$ で行き過ぎ角が生じなくなり, また 0°C 以下では第3行き過ぎ角を生じていないことがわかる。

5. ま と め

この報告では, 磁気コンパスの性能試験について, 特に低温領域の旋回誤差を中心に述べて来た。実際に回転粘度計を使って測定した粘度から求められた理論値と測定された旋回誤差との間に低温になるほど差が大きくな

図11 コンパス液の温度変化にともなう行き過ぎ角

るのは3.2実験結果でも述べたように, ボウル内でのコンパス液の状態が不均一であることからきていると思われる。半周期についても同様なことがいえる。コンパスがその性能を -30°C でも十分に発揮するためには, もしそのコンパス液にアルコールを使うならばその濃度として50%以上は必要であることがわかった。しかしながら濃度の大きい液を使用する場合, 塗料, 材質等に与える影響を考慮しなければならない。

この論文における旋回誤差の理論は、磁気コンパスの設計において、その性能を知る上では、この程度で十分に使えるであろう。

磁気コンパスの性能についてはまだ考えなければならない点も数多くあるので、今後もこの研究を続け、報告したいと思う。

最後にこの研究に協力いただいた、大阪布谷精器(株)布谷伊光氏、山崎俊和氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 熊凝, 石井, 鈴木: 磁気羅針儀の制振特性について, 日本航海学会誌, 第9号, P 5 ~18, 1953
- 2) ISO 449 Shipbuilding-Magnetic compasses and binnacles, class A
- 3) 熊凝, 川崎: 磁気羅盆の随伴角に就いて, 日本航海学会誌, 創刊号, P 18~23, 1949

質 疑 応 答

林 尚吾: 『ISOでは低温領域においては、 -30°C でも十分に作動しなければならない』とありますが、その場合に旋回誤差はどの程度あれば良いとお考えですか。

齊藤 清隆: 少なければ少ない方が良いと思うが、現実には何度とはいえない。