

# 固体金属球の磁気浮揚に及ぼす コールドクルーシブル形状の影響

櫻谷 和之\*・渡辺 敏昭\*・岩崎 智\*・福澤 章\*・山崎 素央\*<sup>2</sup>・武 達男\*<sup>3</sup>・藤田 満\*<sup>3</sup>

Effect of Cold Crucible Shape on Levitation Force Working to Solid Metallic Ball

Kazuyuki SAKURAYA, Toshiaki WATANABE, Satoshi IWASAKI, Akira FUKUZAWA, Motoo YAMAZAKI,  
Tatsuo TAKE and Michiru FUJITA

**Synopsis :** An experimental device which enables to measure the electromagnetic force working toward the metallic ball in the cold crucible was invented to obtain the basic data on the installation and the operation for the optimum levitation melting. The levitation force at the arbitrary position of metallic ball could be measured directly under supplying the electric power. By this device, levitation forces were measured using balls made of different kind of metals under various shapes of cold crucibles. The results obtained are as follows.

- (1) Levitation forces depended upon the electric resistivity of metallic ball. Low resistivity metals such as copper could be levitated easily but ferromagnetic substance such as iron could not be levitated below Curie temperature.
- (2) Levitation forces varied considerably with metallic ball position and coil position, and these behavior were influenced by the number of slits that regulated both magnetic flux and eddy current.

**Key words :** levitation melting ; cold crucible ; electromagnetic force ; levitation force ; electric resistivity ; magnetic flux ; eddy current.

## 1. 緒言

電磁気力を利用して金属や合金を、るつぼから浮揚させて非接触の状態で溶解できるコールドクルーシブル溶解法<sup>1)</sup>は、るつぼからの不純物による汚染がなく、るつぼ材質の選択が不要となるので、化学的に活性あるいは高融点の金属・合金の溶解法として優れた方法として注目されてきた。しかし、現状の装置<sup>2)</sup>では、浮揚溶解量は数十グラム程度であり、実用的な規模の装置の開発が強く望まれている。

浮揚状態に影響する装置、操業条件としては、コールドクルーシブルの形状、コイル形状、溶解材料、電源等の因子が挙げられる。これらの因子に関しては、磁場解析のような基礎研究はMADYLAMの研究者<sup>3,4)</sup>及び藤ら<sup>5,6)</sup>の報告はあるものの、浮揚溶解装置に関しての試作機による系統的な研究に関する報告<sup>7)</sup>は少ない。

どのように浮揚力が働けば、熔融金属が最適な浮揚状態を保持できるかは重要な点であるが、熔融状態の金属に働く力を実測することは難しい。そこで、浮揚力に関しての基礎的研究として、コールドクルーシブル内の熔融金属を固体の金属球に置き換え、この金属球に働く浮揚力を直接測定できる装置を考案した。この装置を用いていろいろな

条件下での浮揚力を測定すれば、電磁場解析によって算出される浮揚力との対応も行え、電磁場解析手法の妥当性の判定も可能になる。ここでは、コールドクルーシブル形状、コイルとコールドクルーシブルとの相対位置、金属球の材質等を変化した場合の、それぞれの因子の浮揚力への影響について報告する。

## 2. 装置及び実験方法

### 2・1 コールドクルーシブル及び金属球

実験に使用したコールドクルーシブルは、Table 1に示す7種類で、その断面形状をFig. 1に示す。No. 5 (スリット数N=1)を除いて、どのクルーシブルでもスリットは中

Table 1. Dimensions of cold crucibles.

| No. | number of slits N | slit width s mm | hole dia. D mm $\phi$ | height H mm |
|-----|-------------------|-----------------|-----------------------|-------------|
| 1   | 12                | 0.5             | 5                     | 70          |
| 2   | 12                | 0.5             | 5                     | 100         |
| 3   | 6                 | 0.5             | 2                     | 70          |
| 4   | 6                 | 0.5             | 10                    | 70          |
| 5   | 1                 | 0.5             | —                     | 70          |
| 6   | 12                | 1               | 5                     | 70          |
| 7   | 24                | 0.5             | 5                     | 70          |

平成6年2月8日受付 平成6年6月3日受理 (Received on Feb. 8, 1994; Accepted on June 3, 1994)

\* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305)

\* 2 中部電力(株)電気利用技術研究所 (Chubu Electric Power Co., Inc.)

\* 3 (株)富士電機総合研究所 (Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.)

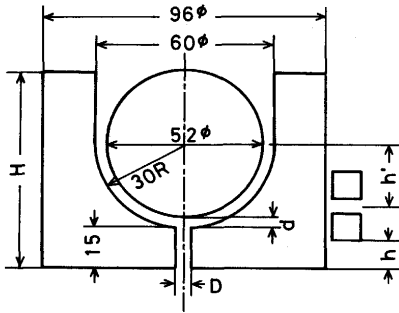


Fig. 1. Vertical section of cold crucible and metallic ball.(h is coil position against lower end of the cold crucible. h' is coil position against center of the metallic ball.)

心軸に対して対称となっている。

コールドクルーシブルは銅製で、これを構成する各セグメントは電氣的に互いに絶縁され、それぞれに冷却水の流入口、流出口を設けた。

浮揚力測定用の金属球の材質は、電気抵抗率と磁氣的性質を考慮して、銅、アルミニウム、ステンレス鋼(SUS304)及び鋼を用いた。金属球の直径はいずれも52mmφで、重量は、それぞれ、653g, 192g, 577g, 565gであった。

## 2・2 コイル及び電源

高周波電流を流し、浮揚させるための電磁気力を与えるワークコイルは水冷の銅製で、その巻数は2巻、内径は100mmφ、断面は10mm×10mm、肉厚は1mm、コイルの間隔は5mmである。

高周波電源は、最大出力100kW、周波数3kHzの電動発電機で、電源とワークコイルの間に整合トランスを介し、コイルに大電流を流せるようにした。

## 2・3 浮揚力測定装置

Fig. 2に浮揚力測定装置の概略を示す。金属球は、金属球とコールドクルーシブルの垂直方向の中心軸が一致するように、6mmφのステンレス鋼製パイプを介して、ステンレス鋼製の棒につり下げた。金属球に働く上向きの力は3個のピンを介して、この原理で下向きの力として電子天秤に表示される。この天秤は差動トランスを使用しているので、天秤への荷重による皿の位置の上下方向の移動がほとんどない(3kgの荷重に対しても0.1mm以下)のため、浮揚力による金属球の移動がなく、定位置で出力に応じた浮揚

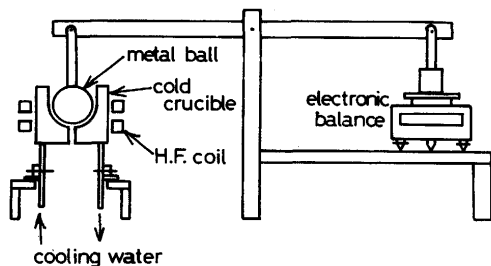


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

力の測定が可能である。また、天秤上のウェイトを調整することにより、金属球に下向きに働く力も測定できる。金属球がコールドクルーシブルの垂直方向(z方向)の軸上にあるので、金属球に働く半径方向(r方向)の力は、コールドクルーシブルの対称性により相殺される。したがって、金属球には見掛け上z方向の力のみ働く。

浮揚力の測定は、Fig. 1のh(コールドクルーシブルの下面からコイル下面までの距離)とd(コールドクルーシブル内の底面から金属球の最下部までの距離)を所定の位置に調整し、コイルに通電し、電子天秤に表示される浮揚力を読み取った。出力を増すに従って誘導電流が流れ金属球の温度が上昇し、これによる金属球の電気抵抗が変化することを避けるため、測定は短時間に行うように努め、金属球は測定の際に水で常温まで冷却した。

高周波電流による電子天秤への影響が考えられたが、コイルと天秤との距離(900mm)が大きいため、この実験を行った最大出力55kWの範囲では、影響は認められなかった。

## 3. 実験結果及び考察

### 3・1 金属球の材質と浮揚力の関係

標準型(No. 1)による金属球の材質と浮揚力の関係をFig. 3に示した。測定条件はコイル位置h=15mm、金属球位置d=4mmである。銅球では、50kWの電力を投入すると12.7N、ステンレス鋼球では4.7N、アルミニウム球では、35kWで8.3Nの浮揚力が測定された。したがって、金属球の重量より銅、アルミニウムは容易に浮揚できるが、ステンレス鋼は浮揚させにくいことがわかる。

出力が大きくなると各材質の球とも直線からずれる傾向があるのは、金属球の加熱により電気抵抗率が増加したためと思われる。

Fig. 4に鋼球(JIS-SCM435, 1%Cr-0.5%Mo-0.35%C)

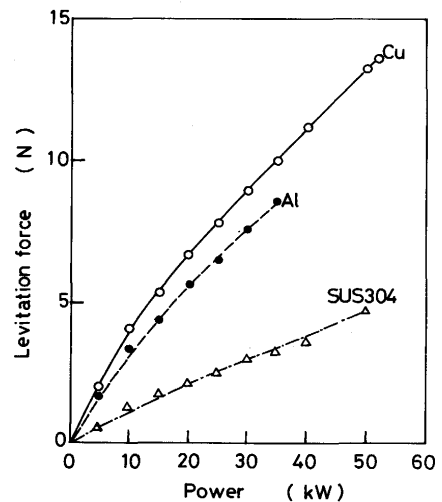


Fig. 3. Relation between electric power and levitation force of metallic balls with different material.(N=12, h=15mm, d=4mm)

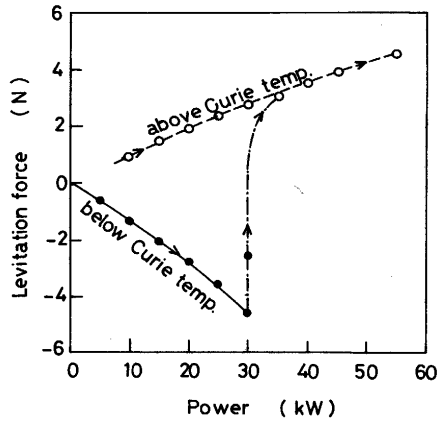


Fig. 4. Relation between electric power and levitation force working to the steel ball above and below Curie temperatures.(N=12, h=15mm, d=4mm)

の場合の浮揚力を示した。このときの測定条件はFig. 3に示したものと同じで、h=15mm, d=4mmである。鋼球は、出力を上げるに従って図中の実線で示されるような下向きの力が増加する。30kWで約4.9Nの負の浮揚力を生じるが、30kWの出力を一定のまままで保持すると、鋼球の加熱が始まり赤熱される。赤熱が始まると同時に、図中の一点鎖線で示すように負の浮揚力が減少し、キュリー温度を越えると正の浮揚力に変化する。赤熱した状態で出力を増加すると、浮揚力は図中の破線のように磁性のない材料と同様の挙動を示す。この結果から、強磁性体の金属(鉄、ニッケル、コバルト)では、キュリー温度以下の温度ではそのまま浮揚させることはできないが、ある一定以上の出力をかけ材料表面近傍にうず電流を流し、加熱が開始されたのち浮揚する可能性があることがわかった。

Fig. 5に金属球に使用した材料のデータブック<sup>6)</sup>に記載されている電気抵抗率と浮揚力の関係を出力が10, 20, 30kWの場合について示した。ここで鋼については、赤熱状態での値である。

単位面積あたりに投入できる電力Q [W/m<sup>2</sup>] と単位面積

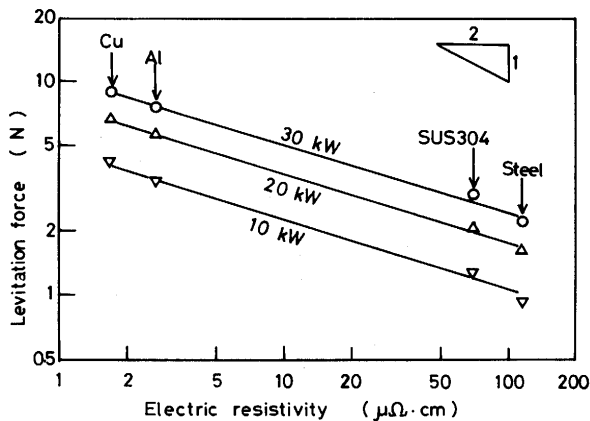


Fig. 5. Relation between electric resistivity of metallic balls and levitation force.

当たりの磁気圧P<sub>m</sub> [N/m<sup>2</sup>] との間には、

$$P_m = Q \sqrt{\frac{\mu}{2 \omega \rho}} \dots \dots \dots (1)$$

の関係がある<sup>9)</sup>。ここで、μ：透磁率[H/m], ω：角周波数[Hz], ρ：電気抵抗率[Ωm]である。金属球で消費される電力が、電源出力に比例し、更に、磁気圧の垂直成分の総和が金属球に働く浮揚力となるため、電源の出力と周波数が一定ならば、浮揚力は電気抵抗率の-1/2乗に比例することになる。(1)式よりFig. 5の直線の傾きは-1/2になるはずであるが、測定値では-0.33となっている。この理由は、銅、アルミニウム球の抵抗率の値<sup>8)</sup>は、純度の高い材料についての値を使用しているが、実験に使用した材料は市販品を機械加工したため、材料中の不純物や加工によって抵抗率が実際にはもっと高いことも一因として考えられる。

3・2 金属球の位置と浮揚力の関係

スリット数、スリット幅の異なった4個のコールドクルーシブルを用いた場合の、金属球の位置と浮揚力との関係をFig. 6に示した。コイル位置、電源出力は一定で、それぞれh=10mm, 30kWである。なお、d=0mmの場合は、銅球とクルーシブルの間に薄い雲母はくを挟み込んで、絶縁をはかった。なお、この実験以降の浮揚力測定には、すべて銅球を用いて測定を行った。

スリット数が1の場合は、d=1mmで最大の浮揚力5.4Nを示し、d=14mmまでは急激に減少するが、d=14mmからd=44mmまではほぼ一定の値を示し、金属球の最下部がコールドクルーシブル上端から出る位置のd=54mm以上になると浮揚力はほとんど見られなくなる。

スリット数が12の場合は、d=1mmで最大の浮揚力を示すのは同じであるが、その値はスリット数が1に比べて2倍以上となっている。また、dの増加に伴い、浮揚力の減少が見られるが、その傾きはスリット数が1に比べて緩やかであり、浮揚力の値も全般的に大きい。スリット数を12から24の2倍に増加した場合でも、スリット幅を0.5mmから

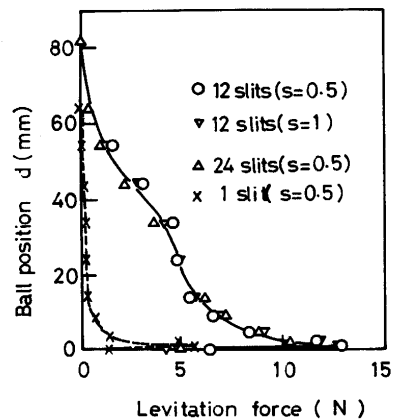


Fig. 6. Relation between levitation force and ball position at various cold crucibles which have different slits.(h=10mm, 30kW)

1 mmにしてスリットの断面積を2倍にした場合でも、これらの浮揚力の曲線はほとんど変化しなかった。

金属球に働く浮揚力を、①セグメントの内側に誘起されるうず電流に起因するものと、②スリットや中心穴から流入する磁束に起因するものとに分けて考える。スリット数が1の場合には、①の浮揚力と1箇所のスリットからの②の浮揚力の和となるが、スリットの金属球への投影断面積が小さいことを考慮すると、①の浮揚力が主となると考えられる。逆にスリット数が増加し、スリットの金属球への投影断面積が増加すれば、②の寄与が相対的に増大する。Fig. 6にみられるように、①の浮揚力は金属球がクルーシブルに近いときのみ働き、遠くなると急激に減衰すること、また②の浮揚力は、金属球がクルーシブル底部から遠ざかるにつれて漸減することがわかる。

### 3・3 コールドクルーシブルの高さの浮揚力への影響

Fig. 7にコールドクルーシブルの高さの浮揚力への影響を示した。No. 2 (H=100mm)のコールドクルーシブルはNo. 1 (H=70mm)の内側壁の高さが30mm高いだけで、他の形状はまったく同じ(N=12, s=0.5mm)である。浮揚力測定時の金属球位置はd=4mm, コイル位置はh=15mmである。

H=100mmのコールドクルーシブルでは、H=70mmのものに比較して同じ投入電力に対して浮揚力は25%程度低くなっている。これは、うず電流の流れる部分が、H=100mmのコールドクルーシブルでは多くなるため電流が分散し、表面近傍のうず電流の流れ方が変わったためと考えられる。

### 3・4 コールドクルーシブルの中心穴径の浮揚力への影響

Fig. 8にコールドクルーシブルの中心穴径の浮揚力への影響を示した。使用したコールドクルーシブルはNo. 3, No. 4で、スリット数6, スリット幅0.5mm, 高さ70mmで中心穴径以外は同じである。スリット数6を選択した理由は、このクルーシブルのスリットの総断面積が少なく、中心穴から流入する磁束に対してスリットからの磁束の割合が小

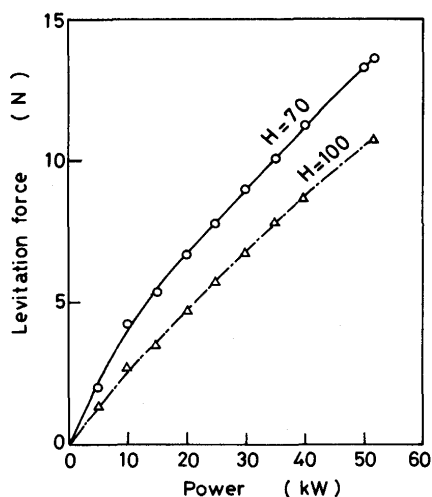


Fig. 7. Comparison of cold crucible height in the relation between electric power and levitation force.(N=12, h=15mm, d=4mm)

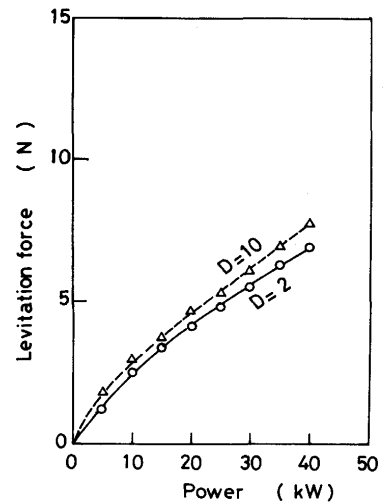


Fig. 8. Influence of center hole diameter of the cold crucible in the relation between electric power and levitation force.(N=6, s=0.5mm, h=15mm, d=4mm)

さくなるため、中心穴径の影響が顕著になると考えられるためである。測定条件は、金属球位置d=4mm, コイル位置h=15mmである。中心穴径D=2mmとD=10mmを比較すると、金属球へのスリット及び中心穴の投影総断面積は、約2倍の141mm<sup>2</sup>に増加している。

Dを2mmから10mmに増加し、金属球への投影総断面積を2倍にしたにもかかわらず、浮揚力は増加するがその増加は12%程度にすぎなかった。このことは、中心穴径を拡大して金属球への投影総断面積を増加しても、ここを通過する磁束量は必ずしも比例して増加するわけではないことを意味している。

### 3・5 コイル位置と浮揚力の関係

Fig. 9にNo. 1 (N=12)のコールドクルーシブルを使用したときのコイル位置と浮揚力の関係を、電源出力10, 30,

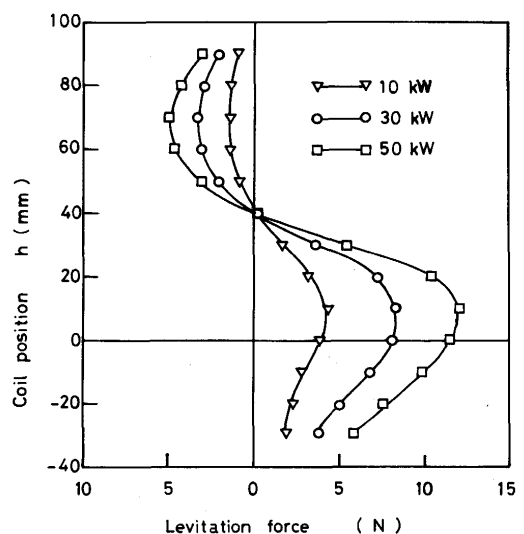


Fig. 9. Relation between levitation force and coil position in the case of 12 slits cold crucible. (d=4mm, s=0.5mm)

50kWの場合について示した。金属球の位置は $d = 4 \text{ mm}$ である。各出力とも同じ傾向を示し、コイル位置をコールドクルーシブルに対して下方の位置から上方へ移動すると、浮揚力は増大し、 $h = 10 \text{ mm}$ 付近で最大値をとる。更にコイル位置を上昇すると、浮揚力は減少し、 $h = 40 \text{ mm}$ で浮揚力はほとんど0となり、次いで浮揚力は負の値、すなわち金属球には下向きの力が働く。この下向きの力は、コイル位置がクルーシブル上端( $h = 70 \text{ mm}$ )付近にあるときに最大となり、更にコイル位置を上昇するとこの下向きの力は減少していく。

Fig.10にNo. 5 ( $N = 1$ )のコールドクルーシブルを使用したときのコイル位置と浮揚力の関係を、電源出力10, 30kWの場合について示した。金属球の位置は $d = 4 \text{ mm}$ である。浮揚力は、Fig. 9の測定結果と比較すると全体的に小さな値となっている。コイル位置がクルーシブルに対して下方にあるとき、コイル位置が $h = 0 \text{ mm}$ に近づくにつれて浮揚力が増加しているのはスリット数12の場合と同じ傾向にある。しかし、スリット数12の場合 $h = 10 \text{ mm}$ で最大値をとり、 $h = 40 \text{ mm}$ で浮揚力がほぼ0になるのに対し、この場合は、 $h = 10 \text{ mm}$ から $h = 40 \text{ mm}$ までがほとんど同じ値で留まっており、 $h = 50 \text{ mm}$ で減少しはじめるが $h = 60 \text{ mm}$ でもまだ正の浮揚力を保っている点が異なっている。

Fig.11は電源出力を30kW一定の場合のコイル位置と浮揚力の関係を示したものである。使用したコールドクルーシブルは、 $N = 1, 12, 24$ の3種類と、比較のためコールドクルーシブルの無い場合についても示してある。この図では、比較を同一の条件にするため、コイルの高さ方向の中心位置と金属球の中心位置の差を、縦軸のコイル位置 $h'$ とした。クルーシブルの無い場合、コイル位置が金属球に対して

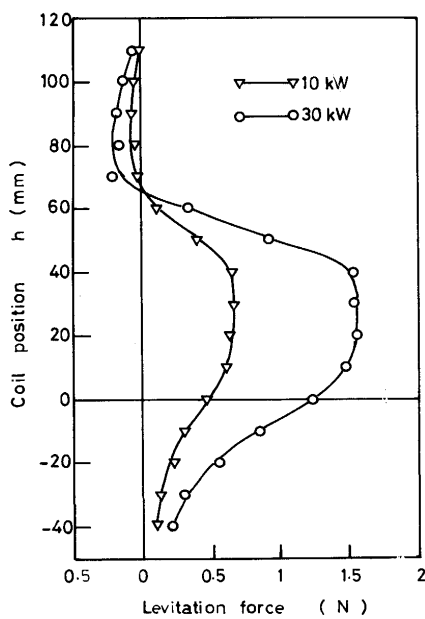


Fig. 10. Relation between levitation force and coil position in the case of 1 slit cold crucible. ( $d = 4 \text{ mm}$ ,  $s = 0.5 \text{ mm}$ )

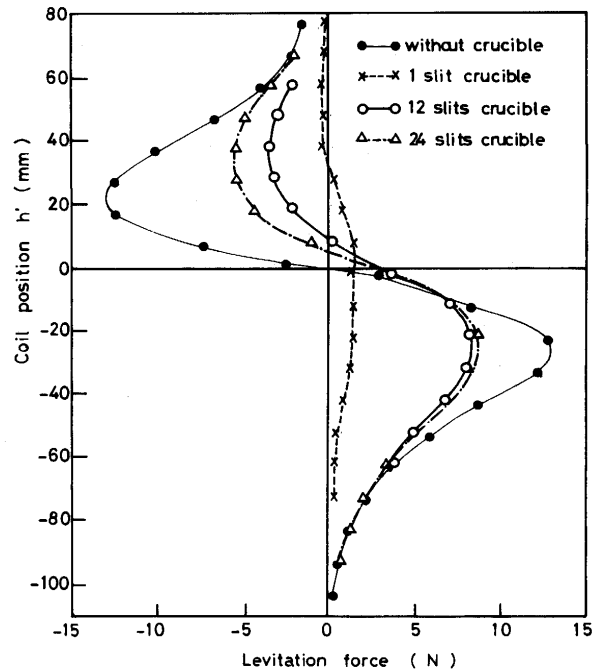


Fig. 11. Relation between levitation force and coil position in the presence of the crucible with the parameter of the slit number and in the absence of the crucible.(30kW)

下方( $h' < 0$ )にあるときには、浮揚力は $h'$ の増加に伴って増加し、 $h' = -25 \text{ mm}$ 付近で最大値をとり、更に、 $h'$ が増加すると減少し $h' = 0 \text{ mm}$ で浮揚力は無くなる。逆に、コイル位置が金属球に対して上方( $h' > 0$ )にあるときには負の浮揚力を示し、 $h'$ の増加に伴って負の浮揚力は増加し、 $h' = 25 \text{ mm}$ でこの最大値を示し、更に $h'$ が増加すると減少し、0に漸近する。また、浮揚力と負の浮揚力の最大値も絶対値では同じ値をとっており、浮揚力の曲線は、原点( $h' = 0 \text{ mm}$ )に対して完全な対称性を示すS字曲線となっている。

これに対し、スリット数1の場合は、 $h'$ の増加と共に浮揚力は増加するが $h' = -20 \text{ mm}$ から $10 \text{ mm}$ まではほぼ一定の値を示し、 $h' > 10$ では減少し $h' = 35$ で0になり、更に、 $h'$ が増加すると負の浮揚力を示す。また、負の浮揚力の絶対値も正の浮揚力に比べて小さく、対称性も示していない。

一方、スリット数12及び24の場合は、 $h' > 0$ における負の浮揚力の値の大小を除くと、いずれの曲線も同じ傾向を示している。コイル位置が下方にあるとき浮揚力は $h'$ の増加に伴い増加し、 $h' = -25 \text{ mm}$ 付近で最大値をとり、更に $h'$ が増加すると減少するが、この場合には $h' = 10 \text{ mm}$ で浮揚力が0となり、これより $h'$ が増加するにつれ負の浮揚力を示す。負の浮揚力は $h' = 35 \text{ mm}$ 付近で最大値をとり、これより $h'$ が増加すると0に漸近する曲線となっている。また、負の浮揚力の最大値の絶対値は、正のそれよりも小さい値を示し、全体としての曲線の対称性は、スリット数1の場合よりはかなり高いが、クルーシブルの無い場合に比べると低い。

以上の結果より、①セグメント内側に誘起されるうず電流による浮揚力と、②スリットを通過する磁束による浮揚

力の寄与を考えると以下のようなになる。スリット幅が無限小でスリット数1の場合が①によるものであり、クルーシブルの無い場合、すなわちスリット幅が無限小でスリットが無限にある場合が②に相当する。スリット数12の場合は、全体的に見るとスリット数1の場合よりもクルーシブルの無い場合の曲線に近いことから、また、分割数24の場合には更にクルーシブルの無い場合に近いことから、この程度のスリット数の場合には浮揚力は②による寄与が大きく働いている。

#### 4. 結言

コールドクルーシブル内の固体金属球に働く浮揚力を、形状の異なるコールドクルーシブル及び材質の異なる金属球を使用して測定し、以下の結果が得られた。

(1)浮揚力は電気抵抗率に依存し、銅、アルミニウムのような電気抵抗率の小さい金属は容易に浮揚できる。また、鉄のような強磁性体の金属は、常温では浮揚することはできないが、キュリー温度以上になれば浮揚可能である。

(2)金属球に働く浮揚力は、①セグメント内側に誘起され

るうず電流によるものと、②スリットから流入する磁束によるものがあり、①は金属球がセグメントに近いときのみ寄与し、遠くなると②が支配的になる。

(3)コールドクルーシブルに対するコイル位置と金属球位置が一定の場合、クルーシブル高さが大になると浮揚力は減少し、中心穴径が増えると浮揚力は増加する。

(4)コイル位置に対応して、浮揚力は零から正、正から負、負から零と変化するが、変化の挙動はクルーシブルの有無とスリット数に依存する。

#### 文 献

- 1) ドイツ特許, No.518499(1931)
- 2) B.A.Smith and B.Denton: J. Mater. Sci., **15** (1980), p.2515
- 3) D.Delage, R.Ernst and J.Driole: Proc. Symp. IUTAM, Cambridge, (1982), p.108
- 4) A.Gagnoud, J.Etay and M.Garnier: Trans. ISIJ, **28** (1988), p.36
- 5) 藤 健彦, A.Gagnoud and M.Garnier: 材料とプロセス, **4** (1991), p.5
- 6) T.Toh, H.Toshino and E.Takeuchi: Proc. 4th Int. ISEM Symp., Nagoya, (1992), p.241
- 7) 出向井登, 一柳信吾, 芝田智樹, 宮谷仁志: 電気製鋼, **62** (1991), p.12
- 8) 金属データブック改訂3版(日本金属学会編), (1993), p.13
- 9) 浅井滋生: 第129・130回西山記念技術講座, (1989), p.51