

異なる周波数の電流を重畳印加した場合の コールドクルーシブルにおける金属球の浮揚と昇温

櫻谷 和之*・渡邊 敏昭*・岩崎 智*・福澤 章*・山崎 素央*²・武 達男*³・藤田 満*³

Levitation and Heating of Metallic Ball in
Cold Crucible Simultaneously Supplied with Two Frequencies

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

Synopsis : The levitation forces working toward the metallic ball in the cold crucible and the temperature rise of the metallic ball were measured under supplying two different frequencies (3kHz and 30kHz) simultaneously with the object of the optimum operation of the cold crucible type levitation melting. The results obtained are as follows.

(1) The levitation forces supplied by two frequencies take additional values of 3kHz and 30kHz which are supplied independently.

(2) The behavior of temperature rise of the metallic ball in the case of supplying two frequencies are almost equivalent to additive behavior of 3kHz and 30kHz power supplying independently.

A new control technique for levitation melting where rather lower frequency is mainly allotted for levitation and higher frequency is mainly allotted for heating has been suggested by the above stated results.

Key words : levitation melting ; cold crucible ; electromagnetic force ; levitation force ; high frequency magnetic field.

1. 緒言

高周波電磁誘導によるコールドクルーシブル浮揚溶解法¹⁾²⁾では、コールドクルーシブルの形状、コイル形状、被浮揚物の形状及び材質、電源周波数などが浮揚状態と加熱挙動に大きく影響することが知られている^{3)~7)}。著者らは、最適な浮揚状態を得るための基礎的研究として、コールドクルーシブルについては、その分割数、スリット幅、高さを、コイルについては、コールドクルーシブルとの相対位置を、被浮揚物については、その材質、コールドクルーシブルとの距離を変化した場合の浮揚力への影響を報告した⁸⁾。

ある周波数の高周波電源を使用して浮揚溶解を行った場合、加熱のために必要な電力を投入すると、投入電力に比例して浮揚力が大きくなるため、密度の小さい金属や合金では、コールドクルーシブルから飛び出し、逆に加熱がしにくくなることがあった。また、より高い周波数の電源を使用した場合には、表面の加熱は十分行えるが、浮揚力が少ないためコールドクルーシブル壁に接触し、そこからの抜熱により昇温できないこともあった。このような経験から、浮揚と加熱の機能を分けて制御できるように、コールドクルーシブルに上下二つのコイルを配置し、下側のコイルで比較的低い周波数の電源により浮揚力を受け持たせ、上側のコイルで高い周波数の電源により加熱を受け持たせ

ることが可能ならば、安定した浮揚溶解の操業ができると考えた。

しかしながら、周波数重畳による浮揚溶解の操業条件に関しての詳細は知られていないため、その基礎的研究として、異なる周波数をもつ2電源を同時に印加したときの電源間の影響について検討し、2電源を同時に印加した場合のコールドクルーシブル内の金属球に働く浮揚力及びその昇温挙動について調べたので報告する。

2. 実験装置

2・1 高周波電源

実験には、最大出力100kW、周波数3kHzの電動発電機式と最大出力50kW、周波数30kHzのトランジスタ式の高周波電源を使用した。

2・2 コールドクルーシブル及び金属球

Fig. 1に2電源を使用したときの浮揚力の測定実験の概略を、Fig. 2に2電源を使用したときの金属球の昇温測定実験の概略を示した。二つの実験に使用したコールドクルーシブルは、スリット数24、スリット幅0.5mm、高さ70mm、外径96mm ϕ 、内径60mm ϕ である。

浮揚力測定に使用した金属球は、直径52mm ϕ の銅球でコールドクルーシブルとの距離は4mm一定とした。

平成6年9月28日受付 平成7年1月13日受理 (Received on Sep. 28, 1994; Accepted on Jan. 13, 1995)

* 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 (Electrotechnology Applications Laboratory, Chubu Electric Power Co., Inc.)

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

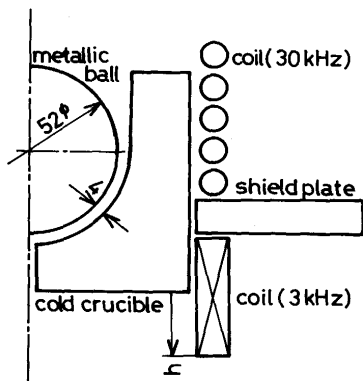


Fig. 1. Schematic view of the apparatus for measuring levitation force working toward metallic ball by supplying currents of two different frequencies.

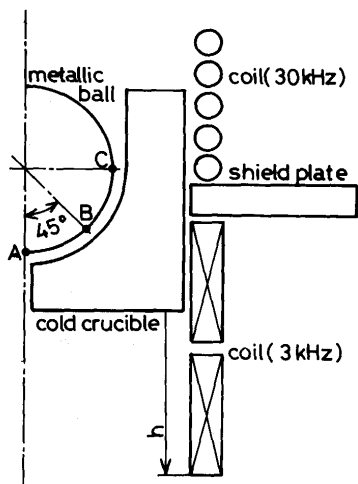


Fig. 2. Schematic view of the apparatus for measuring temperature of metallic ball by supplying currents of two different frequencies.

昇温挙動を測定した金属球は、直径52mmφのSUS304製で、コールドクルーシブルとの距離は4mm一定とした。Fig. 2に示すような球の表面の3点(A, B, C)の位置に直径0.16mmφのJIS-K(クロメル-アルメル)熱電対をスポット溶接で接合した。

2・3 シールド板

異なった周波数の電源を同時に印加する場合の問題点は、一方の周波数が負荷を通じて他方の電源に影響を及ぼし、電気回路が破壊されるおそれがあることである。これを避ける一般的な方法として、一方の電源にコンデンサ等を配して共振を避ける方法やシールド板を配する方法などが考えられる。この実験では、始めに、Fig. 1に示すように、二つのワークコイルの間にシールド板を挟み、電源相互の影響を少なくする方法をとった。試作したシールド板は外径190mmφ、内径100mmφ、厚さ3mmの銅板に外径8mmφの水冷銅管をろう付けしたものである。

また、このシールド板を取り去り、高周波出力を印加した場合の二つのコイルに発生する高周波波形を観測するこ

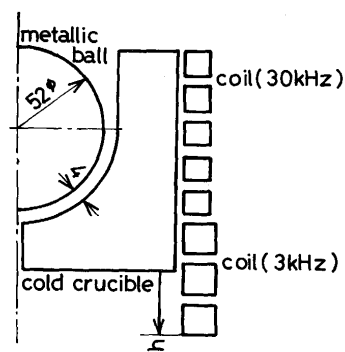


Fig. 3. Schematic view of the apparatus for measuring levitation force working toward metallic ball by supplying currents of two different frequencies in the case of without shield plate.

とにより、二つの電源相互の影響を調べ、シールド板を使用せずに運転できる条件についての検討も併せて行った。

2・4 コイル

30kHz用の水冷ワークコイルは、直径8mmφ、肉厚1mmの銅管を5巻したもので、その内径は100mmφで、高さは50mmである。3kHz用の水冷ワークコイルは、浮揚力測定に1巻を、昇温実験に2巻を使用し、いずれの断面形状も38mm×10mm、肉厚1mmで内径は100mmφである。

また、シールド板を使用しない実験に使用したコイルは銅製の角管で、Fig. 3に示すように、30kHz用には8mm角を5巻したもので、3kHz用には10mm角を3巻したもので、いずれも内径は100mmφ、肉厚は1mmである。上側の30kHz用と下側の3kHz用の二つのコイルの間隔は2mmで、全高は90mmである。

3. 実験方法

3・1 浮揚力の測定

浮揚力の測定方法は、前報⁹⁾と同じ手法に従った。始めに、単独周波数のときのシールド板の有無による浮揚力への影響を、コイルとコールドクルーシブルとの相対位置hを変えて調べた。ここでhは、クルーシブル下端を基準として各コイル下端までの距離で、二つのコイルを使用した実験では下側のコイルまでの距離である。シールド板は3kHzの場合、コイルの上部に、30kHzの場合は下部に配置した。

3・2 周波数重畳

次に、周波数重畳の影響をみるため、3kHzと30kHz電源より同じ出力を同時に印加した場合の浮揚力の測定を行った。更に、3kHz電源からの出力を一定にしておき、30kHz電源からの出力を増加した場合の浮揚力の測定を行った。

3・3 金属球の昇温測定

始めに、単独周波数のときのシールド板の金属球の昇温への影響をみるため、シールド板の有無による昇温挙動を

測定した。測定は、金属球とコールドクルーシブルとの距離を4mm一定になるよう固定し、それぞれの周波数について一定の電力を投入し、金属球の温度の時間変化を記録した。

次に、Fig. 2に示すようなコイルとシールド板の配置で、二つの電源から同じ出力を投入し、3kHzと30kHzの周波数を重畳して金属球の昇温を記録した。

3・4 シールド板を使用しない重畳実験

Fig. 3に示すシールド板を使用しないコイル、クルーシブル構成で、コイル位置を変化した場合の二つの電源からの周波数重畳による浮揚力の測定及び金属球の昇温を測定した。

4. 実験結果及び考察

4・1 シールド板を使用した重畳実験

4・1・1 シールド板の浮揚力への影響

Fig. 4, Fig. 5は、それぞれ、3kHz, 30kHzの場合のシ

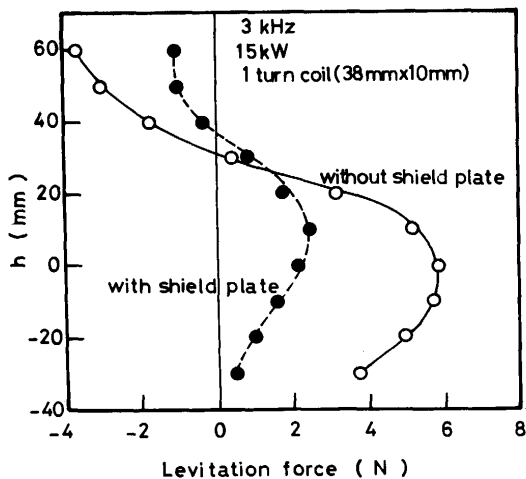


Fig. 4. Influence of shield plate on the levitation force. (3kHz)

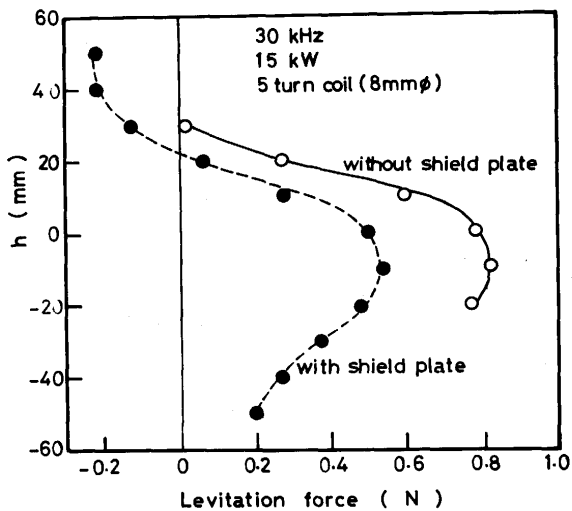


Fig. 5. Influence of shield plate on the levitation force. (30kHz)

ールド板の浮揚力への影響の例で、シールド板を使用しない場合と、コイルの上部(3kHz)あるいは下部(30kHz)にシールド板を置いた場合の比較を示している。いずれも出力は15kWの場合である。3kHz, 30kHz共に、コイルとクルーシブルとの相対位置関係hの増減により浮揚力は、極大値を示した。その値で比較すると、シールド板を置くことにより浮揚力は3kHzの場合には40%程度に、30kHzの場合には60%程度に減衰された。

4・1・2 周波数重畳による浮揚力

Fig. 6に二つの周波数をそれぞれ単独に印加した場合と、これらを重畳した場合の浮揚力を、 $h = -10 \sim -40$ mmについて示した。

コイルと金属球との位置関係より、この測定範囲では、3kHz電源からの浮揚力は常に正の値をとるが、30kHz電源では負から正の値をとる。3kHz電源からの浮揚力はhによって大きく変化し、 $h = -10$ mmのとき、35kWで最大の4.9Nを示すが、 $h = -40$ mmになると、0.9Nにまで減少する。一方、30kHz電源からの浮揚力は、同じ出力の場合の絶対値で比較すると3kHzに対して、1/10以下の値となっている。

二つの周波数を重畳した場合の浮揚力は、hの値によらず、また30kHz電源による浮揚力の値の正負にかかわらず、3kHz電源による浮揚力と30kHz電源による浮揚力を加えた値をとっている。

Fig. 7は、 $h = -20$ mmのとき、3kHz電源の出力を5kW

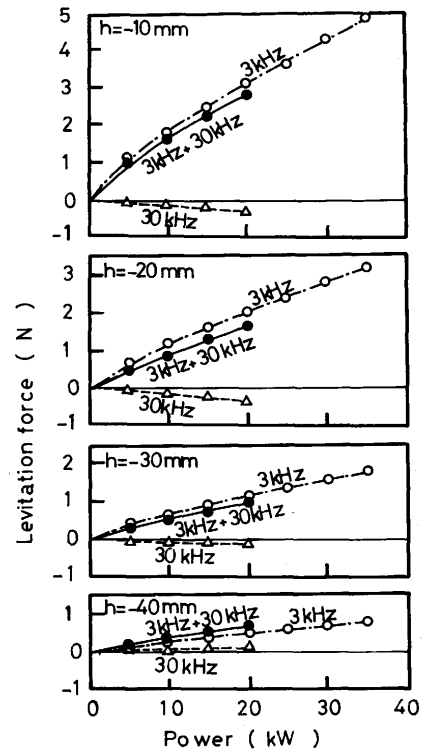


Fig. 6. Relation between electric power and levitation force at various coil positions with shield plate.

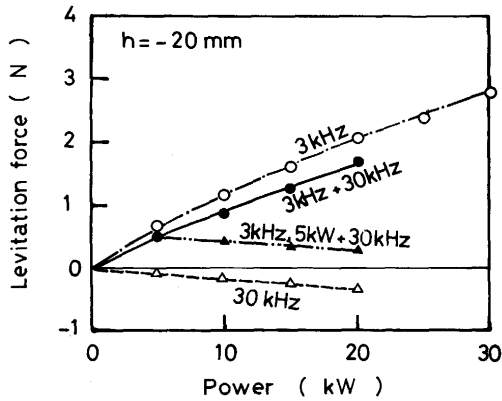


Fig. 7. Effect of supplying two frequencies on the levitation force. ($h = -20\text{mm}$)

一定にし、30kHz電源からの出力を5kWから20kWまで増加した場合の浮揚力を示したものである。3kHz電源による5kW出力時の浮揚力に、30kHzの電源出力による浮揚力（この場合は負の浮揚力）を加えた値になっている。

したがって、Fig. 6 及び Fig. 7 に示されるように周波数重畳による浮揚力は、それぞれの周波数を単独に印加したときに発生する浮揚力の和になっている。この結果は、適当なコイル位置を選択し、周波数の異なる二つの電源出力をそれぞれ調整することにより、幅広い浮揚条件が得られることを示唆している。

4.1.3 シールド板の金属球の昇温への影響

Fig. 8 にシールド板の有無による金属球の昇温挙動を示した。実験条件は、コイル位置が3kHzでは $h = -70\text{mm}$ 、30kHzでは $h = 20\text{mm}$ であり、シールド板は3kHzではコイルの上部に、30kHzでは下部に配置し3kHz、30kHzとも電源出力は25kWである。

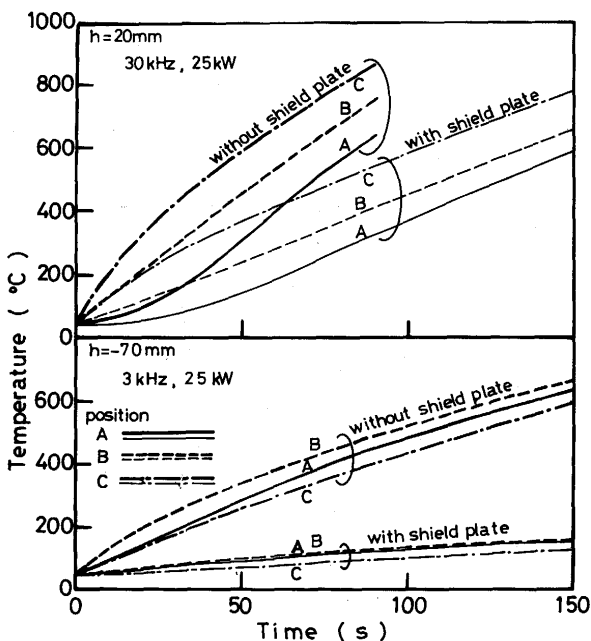


Fig. 8. Influence of shield plate on heating metallic ball.

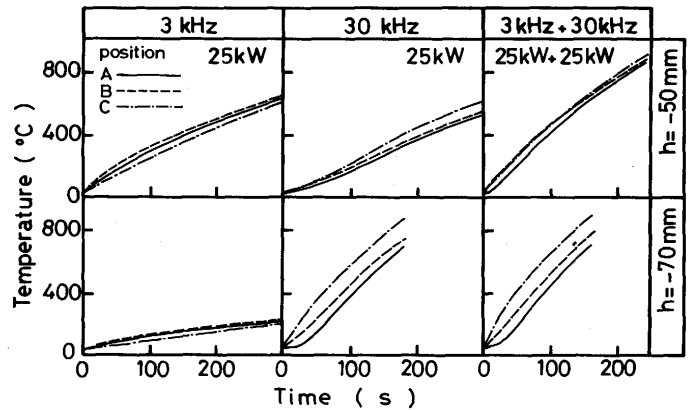


Fig. 9. Effect of supplying two frequencies on heating metallic ball with shield plate.

30kHz電源による各点での昇温速度は、A, B, Cの順で速くなっている。シールド板がない場合、C点では、90sで870°C、A点では同じ時間で640°Cで、230°Cの差があった。シールド板を置くことにより、各点での昇温速度は遅くなり、同じ時間でC点では545°C、A点では325°Cになっただけで、C点が870°Cになるためには180sを要した。

3kHz電源による各点での昇温速度は、30kHzの場合と異なりC, A, Bの順となり、各点の温度の差は狭まり、昇温速度も遅くB点でも870°Cになるのに240s要している。シールド板を置くことにより昇温速度は更に遅くなり、1000sを経過しても500°Cを越えなかった。

このように、30kHzの場合ではシールド板により昇温速度はおおよそ1/2に、3kHzの場合ではおおよそ1/10に減少している。

4.1.4 周波数重畳による金属球の昇温挙動

Fig. 9 に3kHz, 30kHzの周波数をそれぞれ単独及び重畳したときの金属球の昇温挙動を、コイル位置が $h = -70\text{mm}$ と $h = -50\text{mm}$ の場合について示した。3kHz, 30kHzともに電源出力は25kWである。

$h = -70\text{mm}$ の場合、重畳したときの各点の昇温速度は30kHz電源単独に3kHz電源単独の分を加算したものとなっている。30kHz電源単独に比べて3kHz電源単独による昇温速度は各点とも遅いため、重畳時の昇温に関しては、30kHz電源からの寄与が大きい。

一方、 $h = -50\text{mm}$ の場合でも、重畳したときの各点の昇温速度は30kHz電源単独に3kHz電源単独の分を加算したものとなっている。この場合は、3kHz電源単独と30kHz電源単独の各点の昇温速度はほぼ同じであるため、重畳時の昇温に対してはほぼ同じ寄与をしている。

このように、二つの周波数を重畳したときのA, B, C各点における温度制御がコイル位置と二つの電源の出力調節により、容易にできることが分かった。

4.2 シールド板を使用しない重畳実験

4.2.1 シールド板を使用しない周波数重畳方法

シールド板を使用した場合、電源出力は任意に調節できるが、出力のかなりの部分がシールド板に消耗されるため、浮揚と加熱の効率が低下することが分かった。実際に浮揚溶解を数種の金属・合金で試したところ、密度の大きい、あるいは高融点の金属は、シールド板を使用した場合うまく浮揚溶解できなかつた。効率を高めるには、シールド板を使用しない方がよいが、その場合には電源相互の影響を考慮する必要がある。そこで、シールド板を使用しないで周波数を重畳する方法を検討した。

シールド板がある場合とない場合について30kHz及び3kHz用コイルの端子電圧の波形をオシロスコープで観測したところ、30kHz電源の投入電力が20kWのとき、3kHzコイル端子電圧には、シールド板がある場合とない場合、それぞれ、1.7V、9.5Vの電圧が重畳され、また、3kHz電源の投入電力が50kWのとき、30kHzコイル端子電圧には、シールド板がある場合とない場合、それぞれ、9.6V、71Vの電圧が重畳された。このようにシールド板によって電源相互の影響が減少されていることがわかる。

高周波電源の故障の原因の多くは、電気回路中の半導体やコンデンサなどに耐圧以上の電圧がかかるための破壊である。重畳する場合、この実験に使用したトランジスタ式の30kHz電源の発振用半導体の方が耐圧の余裕が低いため、この電源を優先し、3kHz電源を後から投入し、投入電力

の値も30kHz電源の定格を考慮した値（この場合は50kW）以下とし、電源を切る場合も3kHz電源を先に落とすというように、30kHz電源を保護しながら操作することとした。このような電源の操作を行うことにより、シールド板を使用しないで周波数を重畳することが可能となった。

4.2.2 シールド板を使用しない場合の周波数重畳による浮揚力

Fig.10にシールド板を使用しない場合の周波数重畳による浮揚力を、30kHz、3kHzそれぞれ単独に印加したときの浮揚力とともに、 $h=20\sim 50\text{mm}$ について示した。シールド板を使用した場合と同様、3kHz用コイルと金属球の位置関係より、3kHz電源からの浮揚力は常に正の値をとっているが、その値は h によって大きく変化している。40kWの投入出力で比較すると、 $h=20\text{mm}$ のとき5.7Nを示し、 $h=0\text{mm}$ で最大の浮揚力8.3Nとなり、 h が減少するにつれて減少し、 $h=-50\text{mm}$ で1.30Nにまで減少する。一方、30kHz電源からの浮揚力は、 h の減少にともない負から正の値をとっている。40kWの投入電力で比較すると、 $h=20\text{mm}$ のとき-0.35N（金属球を押し下げる力）を示し、 $h=0\text{mm}$ のときほぼ0Nとなり、 $h=-40\text{mm}$ で最大の浮揚力1.43Nを示した後、 $h=-50\text{mm}$ で1.35Nに減少する。

二つの周波数を重畳した場合の浮揚力は、Fig. 6のシールド板を使用した場合と同様、それぞれの電源による浮揚力を加えた値となっている。

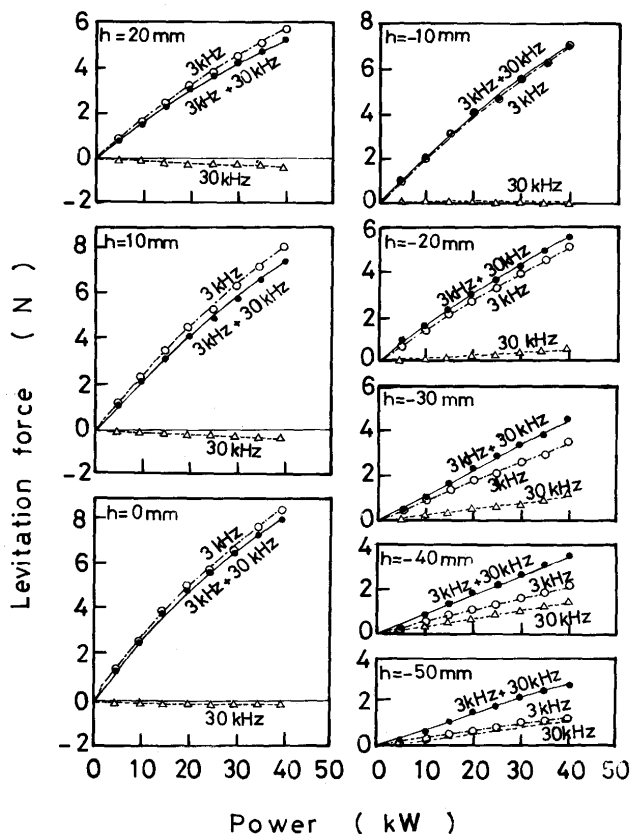


Fig. 10. Relation between electric power and levitation force at various coil positions without shield plate.

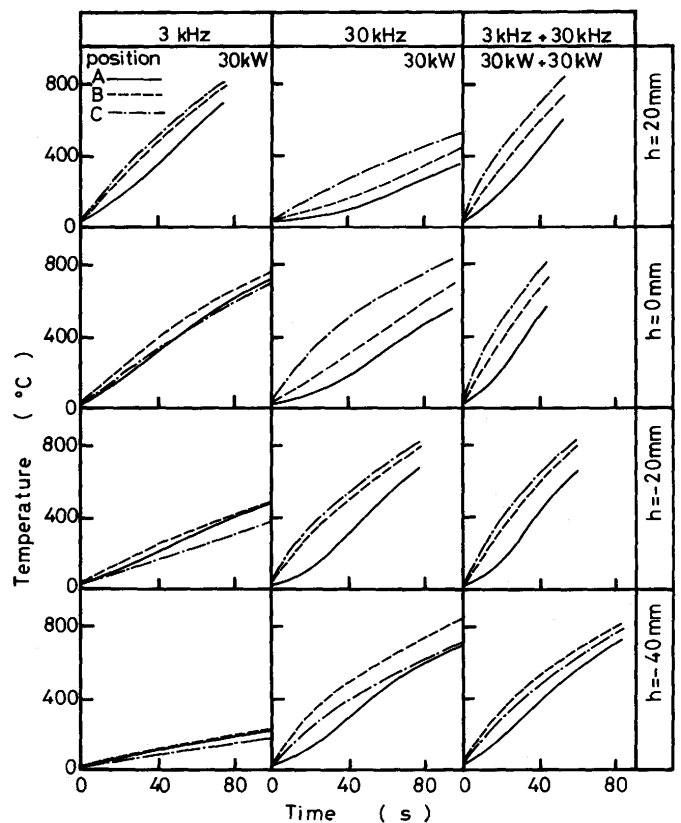


Fig. 11. Effect of supplying two frequencies on heating metallic ball without shield plate.

4・2・3 シールド板を使用しない場合の周波数重畳による金属球の昇温挙動

Fig.11にシールド板を使用しない場合の周波数重畳による金属球の昇温挙動を、3 kHz, 30kHzそれぞれ単独に印加したときの昇温挙動とともに、 $h=20\sim-40\text{mm}$ について示した。3 kHz, 30kHzともに電源出力は30kWである。3 kHz電源単独の場合、 h が20mmから-40mmになるのに従ってABC各点とも昇温速度が低下している。また、昇温の速い方からの順番も、 $C>B>A$ から $B>A>C$ に変化している。この変化が3 kHz用コイルの高さ方向の中心からABC各点間の距離の順番とも対応していることから、被浮揚物の加熱に関しては、コイルと被浮揚物との距離をできるだけ短くすることが有効といえる。

30kHz電源単独の場合、 h が20mmから-20mmになるのに従ってABC各点とも昇温速度が増加するが、 $h=-40\text{mm}$ になると低下し、その順番も $C>B>A$ から $B>C>A$ に変化している。この変化も3 kHzの場合と同様、30kHz用コイルの高さ方向の中心からABC各点間の距離の順番に対応している。

二つの周波数を重畳した場合の金属球の昇温挙動は、Fig. 9のシールド板を使用した場合と同様、一方の電源によるものに、他方の電源による分を加算したものにほぼなっている。

4・3 2電源重畳による浮揚溶解

以上の結果よりFig.12に示すように、コールドクルーシブルに上下二つのコイルを配置し、下側のコイルで比較的低

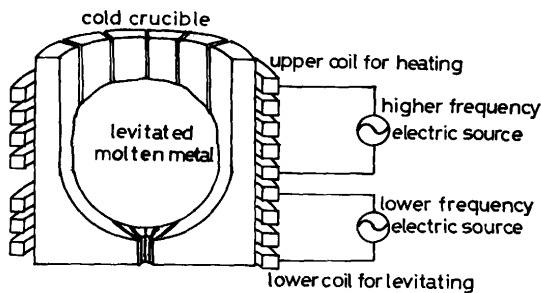


Fig. 12. A new conception of stable operation of cold crucible type levitation melting by using the magnetic field of two different frequencies.

い周波数の電源により主に浮揚力を受け持たせ、上側のコイルで高い周波数の電源により主に加熱を受け持たせ、浮揚と加熱の機能を分けて制御し、安定した浮揚溶解の操作方法を考案した。このような周波数の異なる2電源を同時に使用すれば、被浮揚溶解材料の溶解量、比重、融点、抵抗率等の変化に対応して、浮揚力と加熱を幅広く得ることができるため、安定した浮揚溶解操作を容易に行うことが可能となる。

5. 結言

二つの異なる周波数を同時に印加した場合のコールドクルーシブル内の金属球に働く浮揚力及びその昇温挙動についての影響を調べ以下のことがわかった。

(1) シールド板を使用することにより、二つの異なる周波数は同時に印加できるが、シールド板により浮揚力及び昇温速度は減衰される。

(2) 異なる周波数を同時に印加した場合のコールドクルーシブル内の金属球に働く浮揚力は、それぞれの周波数単独の場合の和になる。

(3) 異なる周波数を同時に印加した場合のコールドクルーシブル内の金属球の昇温挙動は、それぞれの周波数単独の場合の昇温速度の和になる。

以上の結果より、異なる周波数を同時に印加し、低いほうの周波数で主に浮揚を、高いほうの周波数で主に加熱を分担させることにより、最適浮揚溶解の制御ができることを見いだした。

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) G.H.Schippereit, A.F.Leatherman and D.Evers: J.Metals, **13** (1961), p.141
- 4) D.Delage, R. Ernst and J.Driole: Proc. Symp. IUTAM, Cambridge, (1982), p.108
- 5) A.Gagnoud, J.Etay and M.Garnier: Trans. ISIJ, **28** (1988), p.36
- 6) 岩井一彦, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, **79** (1993), p.152
- 7) 岩井一彦, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, **79** (1993), p.1053
- 8) 櫻谷和之, 渡邊敏昭, 岩崎 智, 福澤 章, 山崎素央, 武 達男, 藤田 満: 鉄と鋼, **80** (1994), p.693