

## ■ 新しい高温・超遠心機の開発と 超重力場物質制御研究

超重力場物質制御研究グループ ■ 真下茂、長壁豊隆、黄新勝、小野正雄、伊原博隆、毛利信男 ■

### Development of a New High-Temperature Ultracentrifuge and the Future of Mega-Gravity Materials Science

Tsutomu MASHIMO, Tsyotaka OSAKABE, Xinsheng HUANG, Masao ONO, Hiroataka IHARA, Nobuo MORI  
Research Group for Mega-Gravity Materials Science

Ultra-strong gravitational field (Mega-gravity field) can induce the sedimentation of atoms or isotopes, and is expected to change the molecular or crystalline state in multi-component condensed matter. Our group intend to exploit a new field of materials processing and extreme-condition physics using mega-gravity field. An ultracentrifuge apparatus, which could generate an ultra-strong gravitational field of even  $>1,000,000$  (1 million) G ( $1\text{ G}=9.8\text{ m/s}^2$ ) in a wide temperature range up to  $>500^\circ\text{C}$ , was developed. The long-time and high-temperature ultracentrifuge experiments using the 80 mm-diam rotors with rotational speeds of up to 160,000 rpm at temperatures of even over  $200^\circ\text{C}$  for 100 hours were successfully performed, where the maximum gravitational field at sample was  $>1,000,000$  G. The potential energy and sample volume were increased by the factors of  $>2$  and  $>10$ , respectively, compared with the Kumamoto University's one. The large composition changes by sedimentation of substitutional atoms were realized on some alloys or organic compounds using the apparatus. The topical results are reviewed, and the future of mega-gravity materials science is discussed.

#### 1. はじめに

微小重力場 ( $10^{-6}\sim\text{G}$ ) を利用する研究が盛んに行われているが、これと対をなす強い重力場 ( $\sim 10^6\text{G}$ ) (超重力場) を利用する物質研究は世界的に未踏の分野として残っている。100万Gレベルの重力場を用いると固体中でも原子を動かすことができるので、同位体の濃縮、原子スケールの傾斜構造・複合構造形成をはじめ、強制固溶、界面制御、分子・基の配列・配向、結晶成長などナノスケールの新しい物質プロセス法として応用できる可能性がある。また、たんぱく質、DNAなど生体物質や微生物などへの分子レベルの効果もまだ未知数である。さらに、超重力場下で分子・結晶状

態をその場観察することにより新しい物性分野を切り開く可能性を持っている。本グループは、超重力場下の凝縮物質の物理・化学現象を解明して、新しい物質プロセス、極限物性分野を開拓することをめざしている。

本グループでは、物質プロセス研究を本格的に進めるためにH12年度より大容量型高温・超遠心機の開発を行ってきた。約2年間の試行錯誤を経て、100万Gレベルの重力場を $500^\circ\text{C}$ 以上までの広い温度領域で、熊大装置<sup>1)</sup>に比べて最大2倍以上のエネルギーと10倍以上の試料容量で100時間以上の長時間安定して発生することができる世界最高性能の高温・超遠心機を完成させた<sup>2)</sup>。限られた時間でこれまでに類のない極限

装置を開発するには様々な困難が伴ったが、関係者の懸命な努力と幸運にめぐまれて平成14年度からルーチンな長時間の高温・超重力場実験が可能になり、ようやく新しい成果が得られるようになった。本稿では本装置の開発について紹介し、それを用いた超重力場実験の現状と今後の展望について述べたい。

## 2. 大容量型高温・超遠心機の開発<sup>2)</sup>

図1、2に今回試作した装置の概略図と写真を示す。本装置の動力であるタービンモーターはボールベアリング付きタービンフォイル二つから成り、それらを逆方向に回転することにより精密な制御を可能にしている。安定した回転を保障するためにダンパーセクションが不可欠であるが、本装置のダンパーでは摩擦速度を下げるために異なる材料からなる二重構造のブッシングを採用することによって20万rpmまでの回転が可能となった。ロータは径70-160mmのチタン合金製で、軸穴のない無垢の構造を採用することにより、軸穴ロータにくらべて1.5倍以上の重力場の発生を可能にした。試料チャンパーは $10^{-2}$ torr以上まで減圧され、試料は放射加熱により500℃以上の温度まで加熱することが可能である。放射板をヒーターまたは高周波加熱によって加熱し、赤外放射温度計を用いてPID制御で温度をコントロールする。

これまでに直径80mmのチタン合金製ロータを用い、100万G以上、260℃、100時間、および、80万G以上、300℃、100時間の高温の長時間運転に成功している。また、直径70mmのチタン合金製ロータを用いて、短時間ではあるが最大19万rpmまでの高速回転で120万G以上の重力場の発生も確認した。図3に102万G、260℃、100時間の高温・長時間の実験記録を示す。回転数と温度のバラツキは100時間の間それぞれ0.1%以下、2-3度以下に収まり、極めて安定した性能を示している。ロータ径が大きいために最大エネルギー値は熊大の試作機<sup>1)</sup>と比べて2倍以上を達成した。インコネル製ロータを用いることにより600℃以上の温度までの加熱が可能である。

## 3. 合金系の高温・超高重力場実験

これまでに低融点の合金系を中心に超重力場実験を

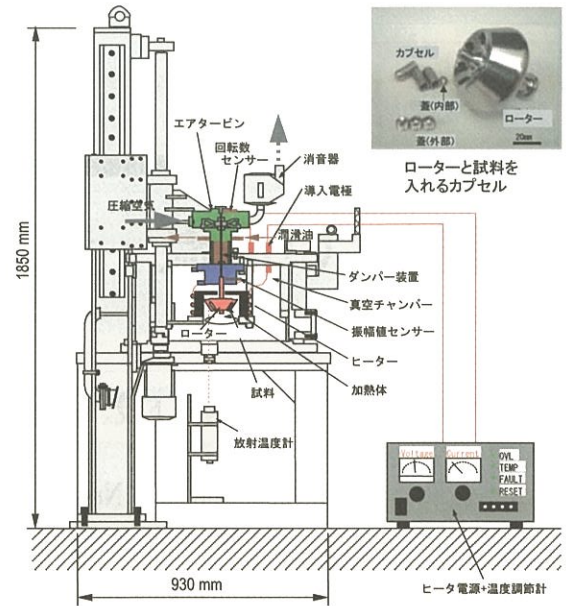


図1 開発した高温・超重力場発生装置の概念図<sup>2)</sup>

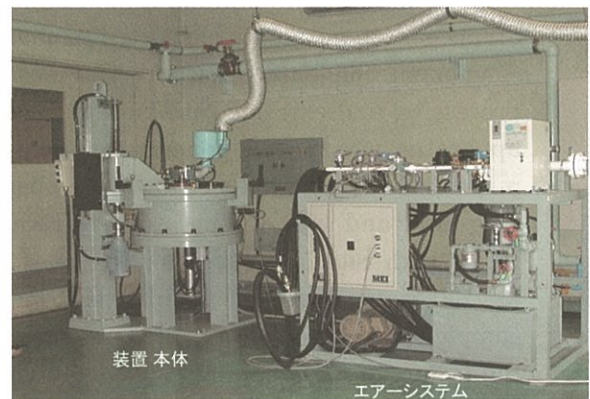


図2 開発した高温・超重力場発生装置の写真

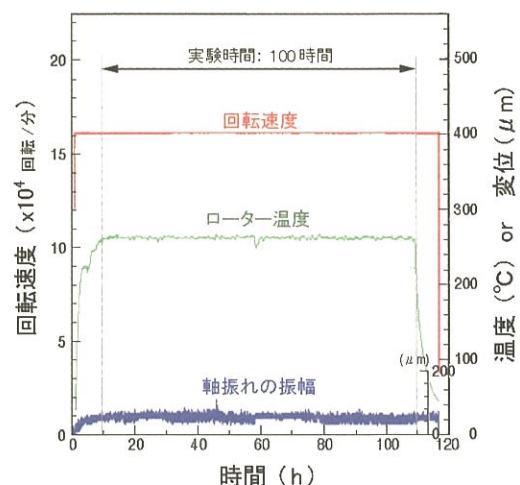


図3 102万G、260℃、100時間の長時間の高温・超重力場実験の記録

実施した。ここでは、Bi-Sb、In-Pb系の結果を紹介しよう。図4にBi-Sb全率固溶系(70:30モル%)で最大102万G、260°C、100時間の処理した試料断面の顕微鏡写真、EPMA観察結果を示す。この図で原子量の大きなBiの濃度がその方向に向かって増加し、原子量の小さなSbが減少している。Aの領域で原子濃度の変化が著しく、Sbでは2桁以上に達している。ちなみに、AとBの境界付近のSbとBiの位置エネルギーの差は熱エネルギーに匹敵している。顕微鏡写真によると、Aの領域では結晶が重力方向とほぼc軸方向に大きく成長しており、重力場の結晶成長への効果を示唆している<sup>3)</sup>。格子定数が連続的に変化することからこの組成傾斜が原子スケールで、置換型溶質原子の沈降によることを示している。この結果は以前熊大の装置を用いて行った(76-96万G、220-240°C、85時間)結果(図5-a)<sup>4,5)</sup>と比べると、組成変化は2倍程度になり、位置エネルギーが2倍に向上した本装置の威力を示している。

図5-bにBi-Sb系の場合(出発原料のモル比:Bi:Sb = 70:30、体積比:  $\alpha = v_{Bi}/v_{Sb} = 1.44$  ( $v_{Bi}$ と $v_{Sb}$

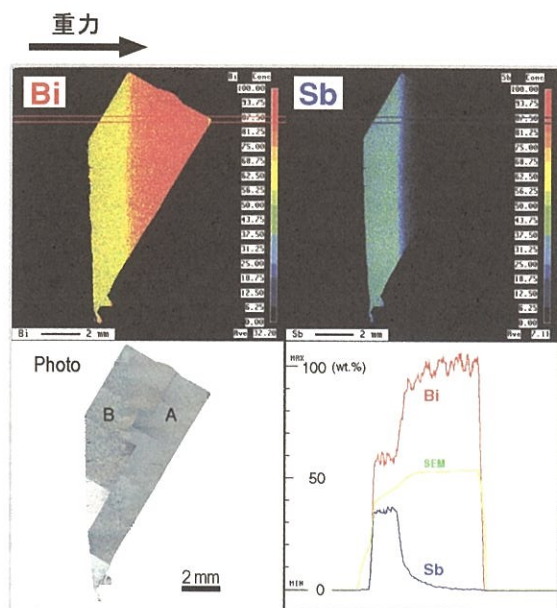


図4 新型装置を用いたBi-Sb系合金(70:30モル%)での超重力場処理試料(102万G( $r = 35\text{mm}$ )、260°C、100時間)の顕微鏡写真とEPMA観察結果

はBiとSb原子の原子容)、 $Q = D_{i1}/D_{i2} = 1 + \ln \gamma / \ln c = 1/20$  ( $\gamma$ は活動度係数、 $c$ は濃度である))で、沈降プロセスのシミュレーション結果<sup>6)</sup>を示す。シミュレーションによると $Q = 1/20$ で時間が十分経たなかった場合の結果が実験結果とほぼ一致している。85時間ではまだ定常状態に達していないと考えられるので、沈降の拡散係数が化学ポテンシャルによる拡散係数に比べて20倍以上であることを示している。さらに、この

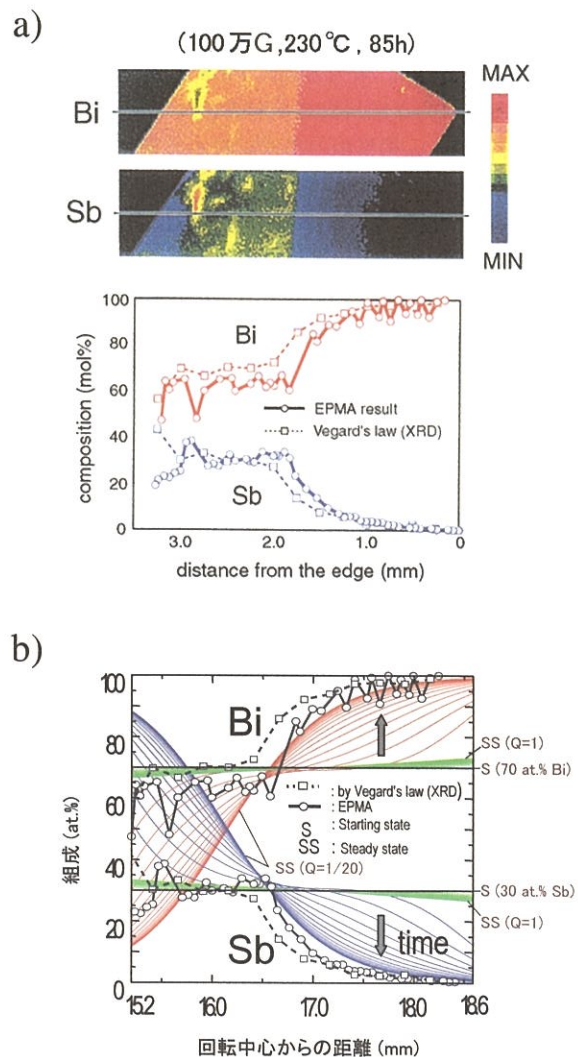


図5 熊大装置を用いたBi-Sb系合金(70:30モル%)での超重力場処理試料(79-96万G( $r = 18.5\text{mm}$ )、220-240°C、85時間)の組成分析結果(a)<sup>6)</sup>と同条件での沈降プロセスのシミュレーション結果(b)<sup>4)</sup>

シミュレーションから得られた沈降の拡散係数の絶対値はSbの自己拡散係数 $< 10^{-18} \text{cm}^2/\text{s}$ に比べて10桁以上大きいことが明らかとなってきた。この結果は超重力場下の置換型溶質原子の沈降が空孔機構と異なった拡散メカニズムによることを示唆しており、今後、さらに明らかにしていきたいと考えている。

In-Pb系合金は、組成によりIn相(Tetragonal)、 $\alpha$ 中間相(F.C.Tetragonal)、Pb相(F.C.C.)の3つの結晶構造を持つ。図6は中間相の $\alpha$ 相単相(In:Pb = 80:20at.%)を出発状態とした場合の超重力場処理試料(最大82万G、150°C、100時間)のEPMA組成分析結果である<sup>7)</sup>。重力方向にPbが増加、逆に、Inが減少する連続的な傾斜構造が形成されている。また、X線回折から、 $\alpha$ 相単相の出発試料から重力側にPb相(area A)、反対側にIn相(area C)が出現し、相変態を伴っていることがわかった。さらに、格子定数が連続的に変化しており、置換型溶質原子であるInとPb原子の沈降によるものであることが確認された。その相境界も標準状態から移動している。

ちょっと恥ずかしいことであるが、筆者は液体中の原子の沈降は生化学分野で暗黙のうちに用いられてき

たと思っていた。しかしながら、DNAの分子量の決定などで使われる密度勾配法は水の中のRbClなどの分子の沈降によるものであり、液体も含めた凝縮物質の構成原子の沈降は我々の実験が初めてであったことを最近認識した。

#### 4. 今後の超重力場研究の展望

本グループは、この他、半導体、金属間化合物、分子性結晶、有機物などで原子や分子の沈降、分解反応などを観察しており、温度の条件さえ整えば、金属に限らず多くの系で原子の沈降が起こることがわかってきた。100万Gレベルの超重力場下では各原子間のポテンシャルエネルギーの差は熱エネルギーに匹敵し、物質にもよるが $10^{-2}$ から $10^{-1}$ eVレベルになる。これは100T(テスラ)の超強磁場では最大 $10^{-2}$ eV程度、10GPaの超高压力では最大 $10^{-1}$ eVレベルのエネルギーに対応することを考慮すると、物質によっては重力場が、組成だけでなく、化学結合、結晶構造、電子構造をも変化させると期待される<sup>8,9)</sup>。また、原子の変位と関連して分子・基の配列・配向、結晶成長なども考えられる。事実、Bi-Sb系では結晶成長が観察されており、また、最近、有機物では配向性の向上を確認した<sup>10)</sup>。新しい装置が完成したので、今後温度範囲をさらに広げ、様々な物質系で研究を進めていく計画である。

また、原子の沈降は寸法によらないので、ナノ、マイクロ薄膜中でも傾斜構造やユニークなナノ構造界面の形成が期待され、時間的にも有利になる。今後、メッキや蒸着法によって作製したキレイな界面を持つ薄膜試料を用いて、薄膜の傾斜化や界面での強制固溶、非平衡な反応なども探ってみたいと考えている。

同位体の沈降は本グループの重要なターゲットの一つである。図5-b)の沈降プロセスの解析結果によると、合金系の沈降は、 $Q = 1$ (活動度係 $\gamma = 1$ )すなわちガスのような原子・分子間の相互作用がない理想系と比較すると格段に大きな変化が実現しており、同位体の研究は今後大きな課題となってくるであろう。

一方、超重力場下では高压下と異なり、一軸的なポデーフォースによってユニークな分子・結晶状態が実現するはずである<sup>11)</sup>。本グループでは、現在、分子動力学によるシミュレーションを行う一方、その場観察

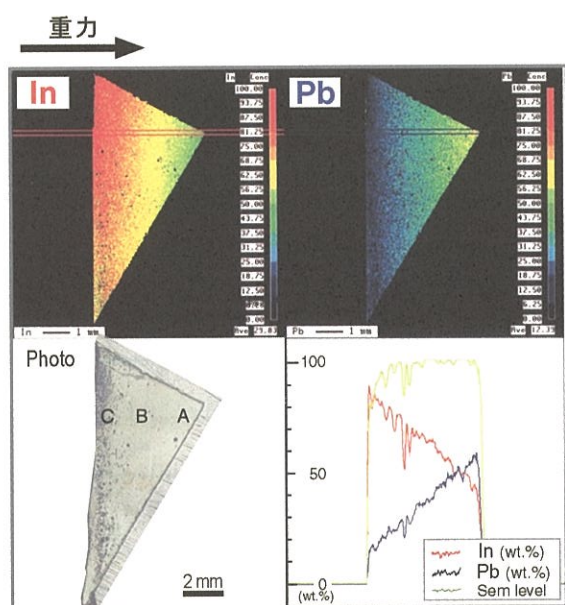


図6 In-Pb系合金での超重力場処理試料(82万G( $r = 35\text{mm}$ ), 150°C、100時間)の顕微鏡写真とEPMA観察結果(原子スケールの傾斜構造に加え、重力側にPb相、反対側にIn相が析出している。)

実験をめざして準備を進めている。

超重力場下の物質研究は全くゼロから始めたのでいまだ世界的にオンリーワンであることを自負しているが、オンリーワンというのも競争者がいない点では楽であっても孤独なものである。トップランナーとしてサイエンスの最前線に貢献できるような普遍的で新しい成果をめざしたいものである。

## 謝辞

大容量型高温・超遠心機の開発は丸和電機㈱との共同研究として進められている。ここに記して謝意を表します。

## 文献

- 1) T. Mashimo, S. Okazaki and S. Shibasaki: *Rev. Sci. Instr.* **67**, 3170-3174 (1996).
- 2) T. Mashimo, X. S. Huang, T. Osakabe, M. Ono, M. Nishihara, H. Ihara, M. Sueyoshi, K. Shibasaki, S. Shibasaki and N. Mori: *Rev. Sci. Instr.* **74**, 160-163 (2003).
- 3) X. S. Huang, T. Mashimo, M. Ono, T. Tomita, T. Sawai, T. Osakabe and N. Mori: *Advances in Space Research*, in press.
- 4) T. Mashimo, S. Okazaki and S. Tashiro: *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L498-500 (1997).
- 5) T. Mashimo, T. Ikeda, and I. Minato: *J. Appl. Phys.* **90**, 741-744 (2001).
- 6) M. Ono and T. Mashimo: *Philos. Mag.* **A82**, 591-600 (2002).
- 7) T. Mashimo, M. Ono, T. Kinoshita, X. S. Huang, T. Osakabe and H. Yasuoka: *Phys. Mag. Lett.* in press.
- 8) T. Mashimo: *Phys. Rev.* **A38**, 4149-4154 (1988).
- 9) T. Mashimo: *Philos. Mag.* **A70**, 739-760 (1994).
- 10) M. Nishihara, K. Teramoto, T. Sakurai, M. Takafuji, T. Mashimo and H. Ihara: *Polymer Journal*, **35**, 276-279 (2003).
- 11) 真下 茂; 先端基礎研究センター基礎科学ノート, Vol. 7, No. 234-37 (2000).

