

多元系化合物半導体融液の均一分散・混合化 (MARANGONI)

代表研究者： 平田 彰^{*1}

共同研究者： 今石宣之^{*2}、熊川征司^{*3}、早川泰弘^{*3}、岡野泰則^{*4}、
大坂敏明^{*1}、橘 正人^{*1}、西澤伸一^{*1}

^{*1} 早稲田大学 理工学部、^{*2} 九州大学 機能物質科学研究所、
^{*3} 静岡大学 電子工学研究所、^{*4} 静岡大学 工学部

In order to develop a new technique for uniform mixing of the compound semiconductors utilizing Marangoni convection due to the concentration difference on the free interface, and to clarify the real Marangoni convection induced by concentration gradient, to obtain counter molecular diffusivity of molten compound semiconductors, and to compare mixing by Marangoni convection with that by molecular diffusion only, 6 type of samples composed of In-Sb (M-1, D-1) and In-GaSb-Sb (M-2, M-3, M-3', D-2) were melted and cooled rapidly under normal and microgravity. In case of In-Sb system, for space grown samples, M-1 samples was almost sphere, and both M-1 and D-1 were mixed because of long dissolution time. On the other hand, D-1 samples grown on the ground, In concentration increased downward because of gravity segregation. It was confirmed that the crystal with uniform concentration distribution can be obtained under microgravity conditions. In case of In-GaSb-Sb system, for space grown samples, M samples became round although they were not complete sphere. The shape of Sb side was more shrunk compared with that of the In side. The concentration distribution in the crystal was almost uniform. On the other hand, the concentration distribution of D-2 samples grown in space was not uniform and diffusion process was on the way. It was pointed out that the utilization of Marangoni convection due to the concentration difference is very useful for the mixing of multicomponent compound semiconductor.

実験の目的・意義

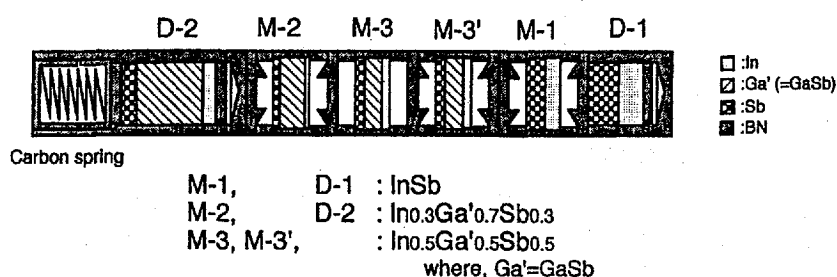
近年の電子産業の発展にともない、デバイス材料用単結晶の高品質化が強く求められている。宇宙の微小重力環境下においては、密度差により生じる重力対流および沈降がほとんど起こらないため、融液から材料を作製する際に密度の異なる成分元素やドーパント元素が不均一に凝固することがなく、高品質な化合物半導体単結晶、あるいは合金等の材料が作製できると期待される。そのためには、融液成分の均一分散化を達成する必要がある。分子拡散のみによって融液を完全に混合するにはかなりの長時間が必要であり、時間や電力、スペース等の限られたスペースシャトル、宇宙基地内では、完全に均一化した高品質な材料の作製は難しい。

本テーマでは、融液自由界面上の濃度差により発生するマランゴニ対流(界面張力差駆動流)を有効活用することにより、密度の異なるいくつかの元素からなる多元系化合物半導体融液の完全混合手法を確立することを目的として、全く重力対流の無い条件下で濃度差により発生する真のマランゴニ対流を明らかにし、化合物半導体融液の相互拡散係数

の値を求め、マランゴニ対流による混合の度合いと分子拡散のみによる混合の度合いとの比較を行うことを目的としたものであり、従来、材料作製時に結晶成長縞の発生や結晶内濃度の不均一分布、ドーパント物質の不均一分布等、結晶品質に悪影響を及ぼすことが指摘されてきたマランゴニ対流を、逆に材料作製に有効活用する手法を提案することを意図したものである。

実験の方法と試料

図1に、スペースシャトルに搭載した試料の概略を示す。溶融・凝固試料として実用混晶半導体材料である InGaSb 系を取り上げた。InGaSb は、組成比を変えることによって格子常数を変化させることができ、発光・受光波長を任意に変化させることができるため、将来の長距離通信用光ファイバー材料として重要な材料と期待されている。本実験においては、In、GaSb、Sb を各々円盤層状に加工成形し、2層または3層に積み上げ BN りつぽに封入している。これらの試料を高温加圧型電気炉を用いて均熱溶融、凝固させる。試料は大きく2種類に分けられ、一方は溶融時に自由界面を有し(Mグループ)、自由界面上の濃度差に基づく界面張力差により誘起される濃度差マランゴニ対流と分子拡散により分散混合プロセスが進行する。他方は、自由界面が存在しないよう完全密閉系内で溶融し(Dグループ)、分子拡散のみにより混合プロセスが進行する。図2に InGaSb 系での界面張力の濃度および温度依存性を示す。マランゴニ対流は自由界面上の界面張力差により駆動される流れであり、その駆動力は図2の傾きにより表される。図2の傾きの絶対値が大きいほど、速いマランゴニ対流が誘起される。例えば Ga-Sb 接触系における濃度差に基づく界面張力差は約 300 mN/m であり、In 融液上に 1000 °C の温度差を印加した場合に発生する界面張力差は約 100 mN/m である。このことから、わずかの濃度分布により極めて速いマランゴニ対流が誘起されることがわかり、実際の結晶成長プロセスにおいては温度差マランゴニ対流と比較して濃度差マランゴニ対流の影響が極めて大きく、重要であることが示唆される。



- Test sample : composed by pure components in layers
- 6 samples : divided into 2 groups
 - group 1 (4 samples) : kept with Marangoni convection induced by concentration gradients on free interface of melt
 - group 2 (2 samples) : kept under molecular diffusion only without any free interface

Fig.1 Sample Configuration

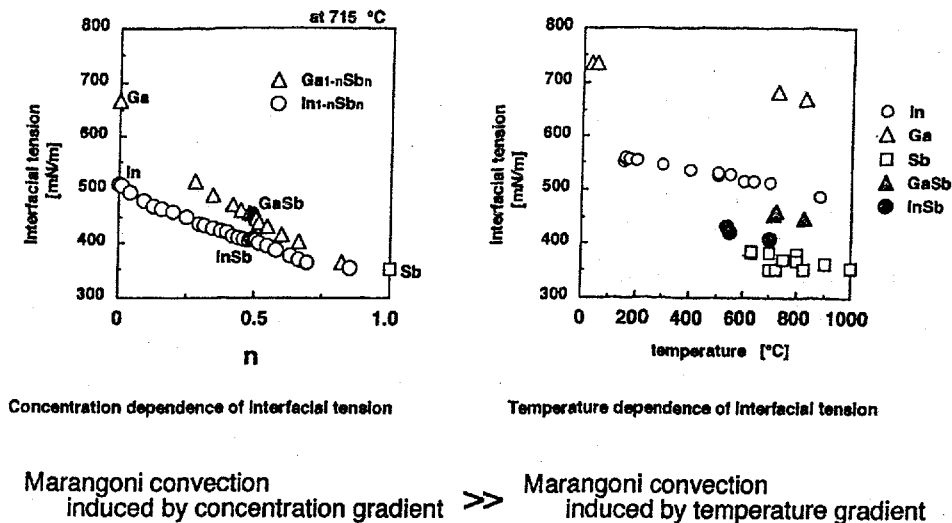


Fig.2 Interfacial Tension (In-Ga-Sb System)

微小重力環境下で凝固した試料は、回収後、各試料における結晶の形状、濃度分布、結晶粒界の大きさ・分布等様々な角度からの評価を行い、地上実験結果、数値解析結果と比較検討することにより、微小重力下での相互拡散係数、分子拡散による混合プロセス、濃度差マランゴニ対流の現象機構を明らかにし、さらに濃度差マランゴニ対流を活用した多元系融液成分の均一分散・混合化手法について提言が可能である。

フライト試料作製

マランゴニ対流に関する実験を行う上で、試料表面および試料内部の清浄性が極めて重要となる。例えば、FMPT (First Material Processing Test)における実験においても、化合物半導体単結晶を成長させた際に、自由界面上の酸化膜によりマランゴニ対流が抑制された結果が報告されている。この観点から、マランゴニ対流に関する実験を行う際には、特に試料および雰囲気からの酸素除去が重要となる。そのため、試料表面上の酸化物をエッチング等により化学的に除去する手法が用いられる。しかし、試料表面上の酸化物除去のみでは不十分である。例えば、地上において試料内部に酸素が含有される場合、試料熔融時に融液内部で生成された酸化物は、その密度が純粋融液よりも概して小さいため、融液内部を浮上し、やがては自由界面上に滞積し、界面汚染現象の要因となる酸化膜を生成し、マランゴニ対流を抑制する。そのため、試料前処理として、試料内部および表面上の酸素を充分に取り除く必要がある。本実験においては、バルク試料をカーボンつつぼを用いて長時間還元雰囲気下で熔融し、バルク中の酸素を除去した後、真空あるいは不活性ガス雰囲気下において化学エッチング・超純水エッチング処理を施し、試料表面上に滞積した酸化膜層を除去している。本処理により、今回の試料ではオージェ分光法で測定した結果、各種試料において表面酸化膜層厚みは1~2原子層厚みに抑えられている。

分子拡散定数の測定

図3に分子拡散による分散混合プロセスの一例として、地上においてキャピラリー管を使用して行った分子拡散による In-Sb 系での分散混合実験結果を示す。図3は、750°Cで3分間加熱した後の In の濃度分布を EPMA (Electron Probe Microanalysis) により実測した結果である。ここで得られた濃度分布を1次元純拡散モデルの数値解析結果と比較することにより各成分の相互拡散係数を求めた。その結果を表1に示す。

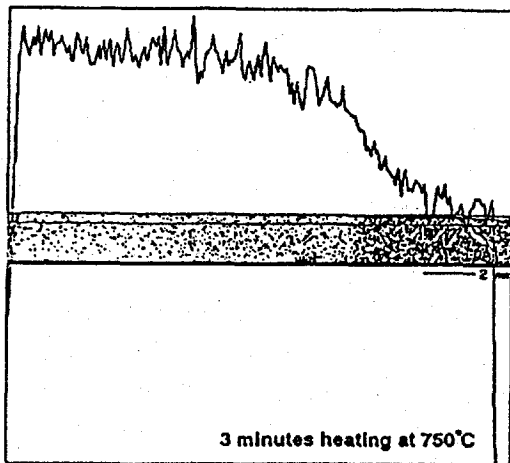


Fig.3 In Concentration in In-Sb System mixed by Molecular Diffusion Only (1-g Experiment)

Table 1 Diffusion Coefficient on the Ground

In-Sb	$1 \sim 3 \times 10^{-4}$	[cm ² /s]
GaSb-Sb	$2 \sim 5 \times 10^{-5}$	[cm ² /s]
GaSb-In	$1 \sim 1.7 \times 10^{-4}$	[cm ² /s]

数値シミュレーション

図4に分子拡散のみによる分散混合プロセスに関する数値解析結果として、各組成の濃度分布の時間変化の一例を示す。本数値解析結果より、分子拡散のみにより分散混合プロセスを行う場合、均一分散混合には少なくとも数1000秒という長時間が必要であることがわかる。図5に濃度差マランゴニ対流と分子拡散により分散混合プロセスを行う場合の数値解析結果の一例として In-GaSb 系での速度ベクトルおよび流関数の時間変化を示す。図5において、左は流関数の時間変化を、右は速度ベクトルの時間変化を示している。図5の数値解析においては、試料形状は円柱のまま変形しないものとし、円筒座標系により数値解析を行っている。本系においては、自由界面上の界面張力差(In > GaSb)に基づき、溶融後の初期段階において自由界面上を GaSb から In(図5において、自由界面上を上部から下部)に向かって数10 cm/s という極めて速いマランゴニ対流が誘起され、分散混合プロセスが進んでいく。また、時間経過とともに、自由界面上に濃度分布の反転が起こり、マランゴニ対流もその駆動力が反転し、流れ方向が逆転する(図5において、下部から上部)。この振動過程を繰り返しながら、融液内の均一分散混合化が促進され、濃度の均一化とともにマランゴニ対流の絶対値は減少し、完全に均一混合が達成された後、マランゴニ対流も停止し、均一混合状態が保持される。濃度差マランゴニ対流により分散混合プロセスを

行う場合には、数 10 秒で均一分散混合が達成され、分子拡散のみによる分散混合プロセスと比較して、極めて短時間で効率的に多元系融液の分散混合が行われることがわかった。

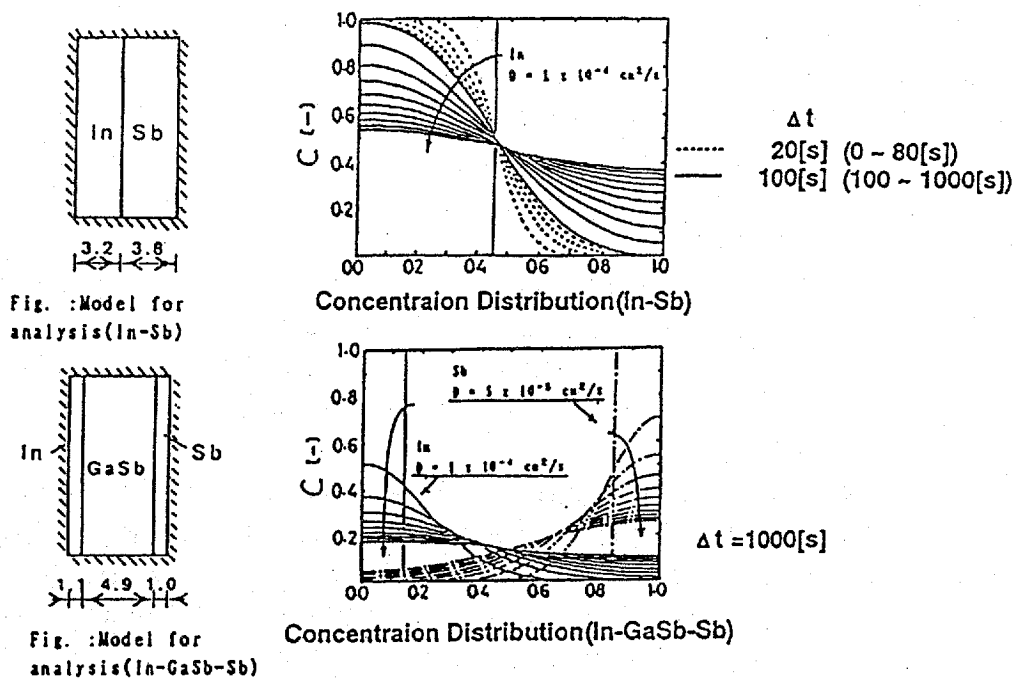


Fig.4 Concentration Distribution (Numerical Simulation)

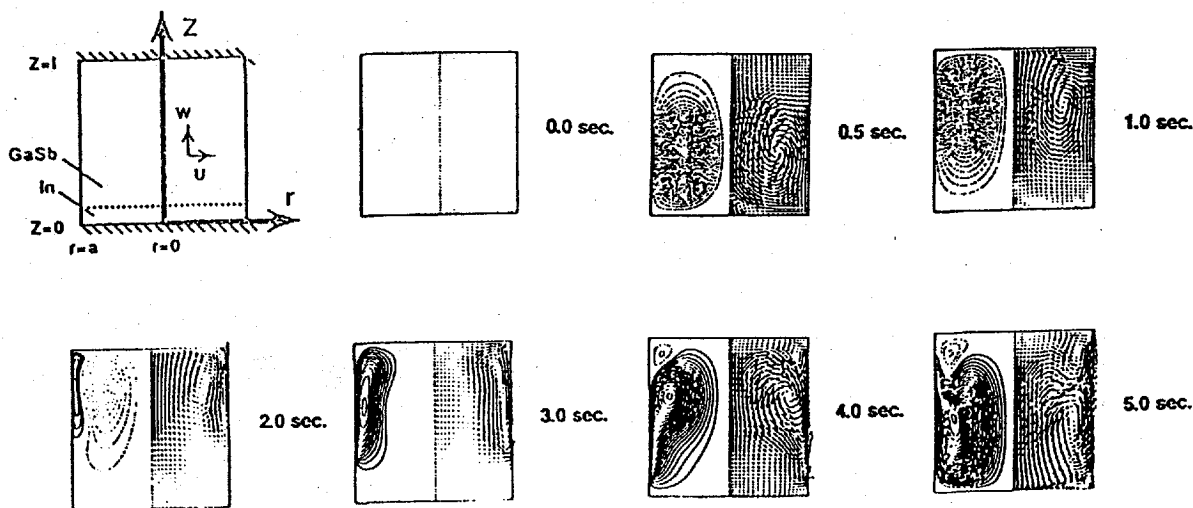


Fig.5 Velocity and Stream Function at Various Time (Numerical Simulation / Cylindrical Model)

飛行実験の結果

凝固試料外観形状

図6にフライト時の温度プロファイルを示す。計画した使用部推定温度プロファイルに対して、試料カートリッジ基部では昇温速度も遅く、最高到達温度 731℃、最高到達温度維持時間 1分といずれも低く、短かった。これは、アンブル内に封入した He ガスによる対流伝熱効果が予想値より小さかったためと考えられる。

図7に回収されたアンブルを通しての凝固試料の X線撮影像を示す。回収されたアンブルは Ta カートリッジの切断前後に X線撮影を行い、カートリッジ切断にともなう凝固試料の破損は無いことを確認した。凝固後の試料形状は、以下の通りである。

- 1) M1 試料：球状に凝固しており、自由界面を有した状態で溶融・凝固プロセスが行われたことが確認された。また、表面上に幾つかの突出物が観察された。これは、凝固過程において、初めに InSb が球外側から凝固し、引き続き内部が凝固するときに固化膨張のため一部分が外殻を突き破って出てきたものと考えられる。
- 2) M2、M3、M3' 試料：M2 試料は初期 In 側(図 7E)で滑らかな半球面を、初期 Sb 側(図 7B)で小さな半球面を形成している。また初期 Sb 側には、融液の突出と思われる突起部が多数存在した。この様に、両端部が半球面を呈しているのは、微小重力下で自由表面を有した状態で凝固が行われたためである。In 単体融液と Sb 単体融液とを比較したとき、In 単体融液の方が界面張力は大きいことから、本来ならば、In 側がより小さい球面状を呈すると予想される。しかし、宇宙での凝固試料の外観は、Sb 側の方がより小さい球面状を呈している。これは、以下のように考えられる。In が溶解したのち、

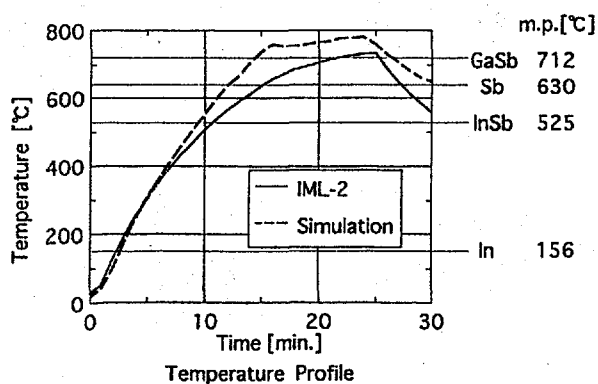


Fig.6 Temperature Profile of IML-2 Flight Experiment



Fig.7 X-ray Photograph of Flight Sample

In 溶媒中へ GaSb の融解が起こる。そのため、In 融液部分は、GaSb 上に極めて良く濡れていく状況を呈する。一方、Sb は融点が高く、融解後の溶融時間が短かったこと、また Sb 溶媒に対する GaSb の溶解度が小さいため、小さな球面になったものと考えられる。また、凝固後の外観形状からは、初期 GaSb 原料は融解せずに残っているように見受けられる。M3、M3' 試料に関しても、同様の結果が見られる。また、M2 と比較して M3 及び M3' が球形に近いことは、後者の初期 GaSb 量が少なく、相対的に In、Sb 融液へ溶解した GaSb の割合が多かったためと考えられる。

- 3) D1、D2 試料：D1 試料は、BN りつぼの外側まで、凝固試料がはみ出していた。これは、以下のように考えられる。まず、In、Sb が溶融、液化膨張を呈する。溶融混合時に InSb 融液が形成される際、InSb 融液の密度は、In、Sb 各々の単体融液の密度より小さいので、溶融混合により、さらに体積は増加する。引き続き凝固過程に移行した際、InSb は固化膨張を呈するため、さらに体積は増加する。これらの過程を考慮すると、最終凝固体積は、初期試料体積に対して約 1.2 倍となり、微小重力下で凝固した試料のはみ出し体積とほぼ一致した。このことから、D1 試料に関しては、溶融凝固時に自由表面は生じなかったものと考えられる。D2 試料は円柱状の BN りつぼ、さらにカーボンパネを利用した BN 円盤状のふたを使用して、自由表面の無い条件下で溶融凝固を行った。実験終了後、回収試料を BN りつぼから取り出す際には、極端に大きな力は必要ではなかった。このことは、溶融試料と BN りつぼとの濡れ性が、良くなかったことを示している。

凝固試料濃度分布

1) 2 元系

図 8 に凝固試料の切断面の研磨後の光学顕微鏡写真を示す。また図 9 に研磨面の濃度分布に関して、EDS による測定結果を示す。ここで EDS においては $1.2 \times 1.5 \text{ mm}^2$ の領域の平均組成を測定した。微小重力下で凝固した試料は、マランゴニ対流の有無に関わらず(自由界面の有無に関わらず)どちらの試料も、ほぼ均一な濃度分布となっていることが分かる。これは、In の融点が 156°C であり、実験の最高到達温度と比較して非常に低く、In 溶融後に、In 溶媒中に Sb が溶解し、結果的に総合溶融時間が長かったためと考えられる。一方、地上で凝固した試料は、D1 試料は凝固試料の上部では Sb の組成比が高く、下部では In の組成比が高くなっている。これは、溶融前の初期状態を反映していると考えられる。地上実験においは、重力効果による混合を抑えるため、比重の大きい In 元素を下部に、比重の小さい Sb 元素を上部となるように配置し、溶融凝固実験を行った。その結果、重力偏析の影響により、比重の大きい In は下部に残り、比重の小さい Sb は上部に残ったものと考えられる。M1 試料は、D1 試料と比較して均一に混合しているが、試料上部に観察された突起物部分で Sb の組成比が高くなっていることがわかる。これは、以下のように考えられる。まず、溶融時に、マランゴニ対流、自然対流、拡散により、混合プロセスが進行する。次に試料外側から凝固が進行する。その時、内部では In の組成比が大きい領域から凝固が進行していく。最後に残された Sb の組成比が大きい領域は、凝固時の固化膨張を緩和することができず、凝固に伴い、るつぼ壁面の影響のない試料上部に向かって突出する。

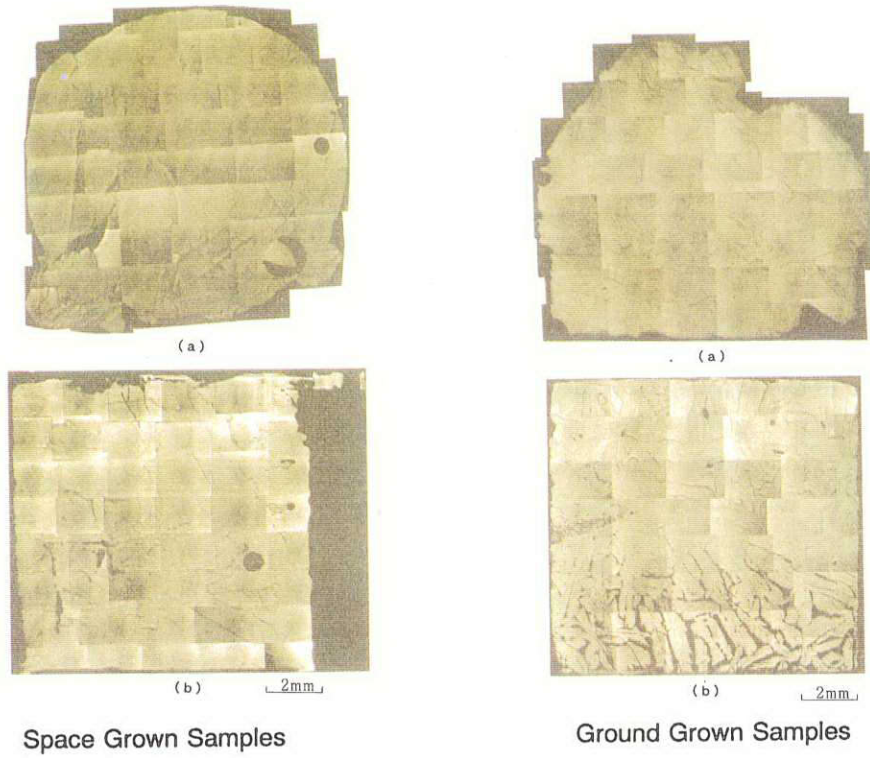


Fig.8 Morphologies of the Samples
a: M-1 b: D-1

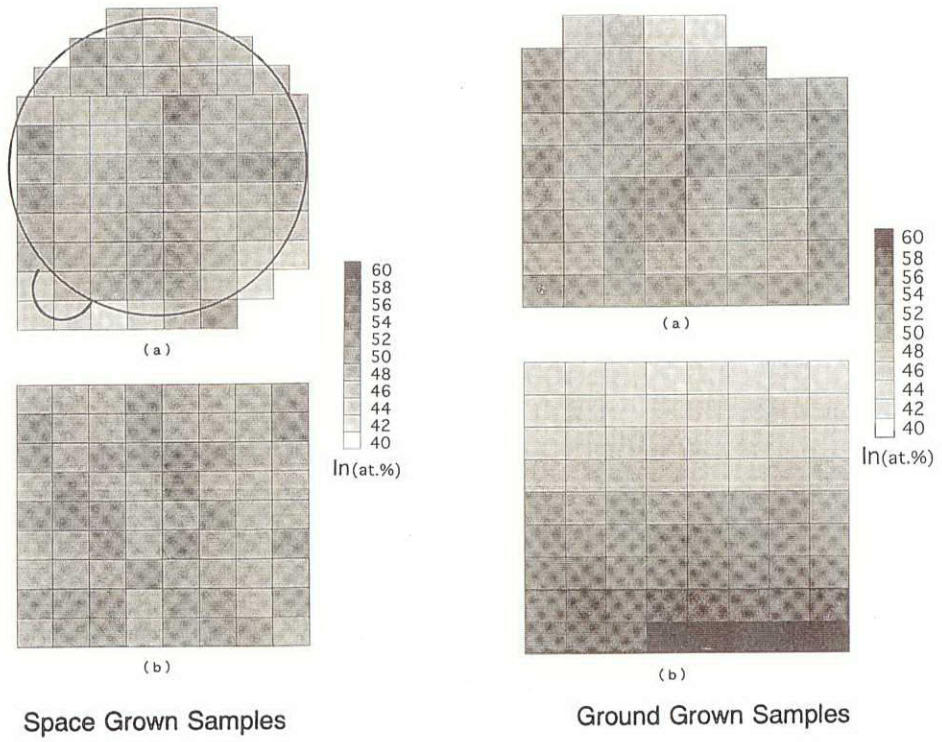


Fig.9 Concentration Distribution
a: M-1 b: D-1

2) 3元系

図 10 に D2 試料の外観の濃度分布を EDS により測定した結果を示す。EDS 測定は、前述と同様である。図 10 より、In の組成比は、初期 In 側から 12 mm の領域では平均 52 at% と高く、初期 Sb 側 6 mm では約 30 at% と低かった。一方、Sb の組成比は逆に、初期 Sb 側 6 mm では平均 63 at% と高く、初期 In 側では 10 at% と非常に低かった。Ga の組成比に関しては、両端で少ない分布となっていた。熔融前の試料組成、In = 15 at%、Ga = 35 at%、Sb = 50 at% と比較すると、凝固試料の外観部においては、In の組成比が非常に高く、逆に Ga の組成比が非常に少ない。これは以下のように考えられる。まず、156 °C で In が融解する。その際、In 単体は液化膨張を呈する。試料は横からカーボンバネで押さえられているため、膨張した In 融液は、BN るつぼと GaSb、Sb 原料との隙間を浸透していったと思われる。同様に、Sb が融解する過程においても、液化膨張した Sb 融液が BN るつぼと GaSb 材料との隙間を浸透していったと考えられる。試料外観部において、Sb の組成比が高い領域が 6 mm であり、初期 Sb 厚さ 2.76 mm と比較して大きいのはこのためと考えられる。図 11 に D2 試料中心軸上における濃度分布を示す。初期 In 側から 16 mm の広い領域において、Ga 組成比の高い針状結晶が In 組成比の高い母材結晶中に散在していた。また、初期 Sb 側 2 mm の領域でも In 成分は検出されている。この領域では、Sb 単体、GaSb、及び InSb が共存する混合相の様子を呈していた。図 11 より、In 元素が Sb 側方向に拡散していることがわかる。一方、Sb 元素も In 側方向に拡散しているが、Sb の融点が高く、融液となっていた時間が In に比べ短かったため、結果的に拡散長も短かったことがわかる。M2 試料に関しては、凝固後の In 成分は、中央部の GaSb 部分、さらに初期 Sb 側にも分布しており、マランゴニ対流の効果により分散混合過程が進んでいたことがわかった。なお、引き続き解析中である。

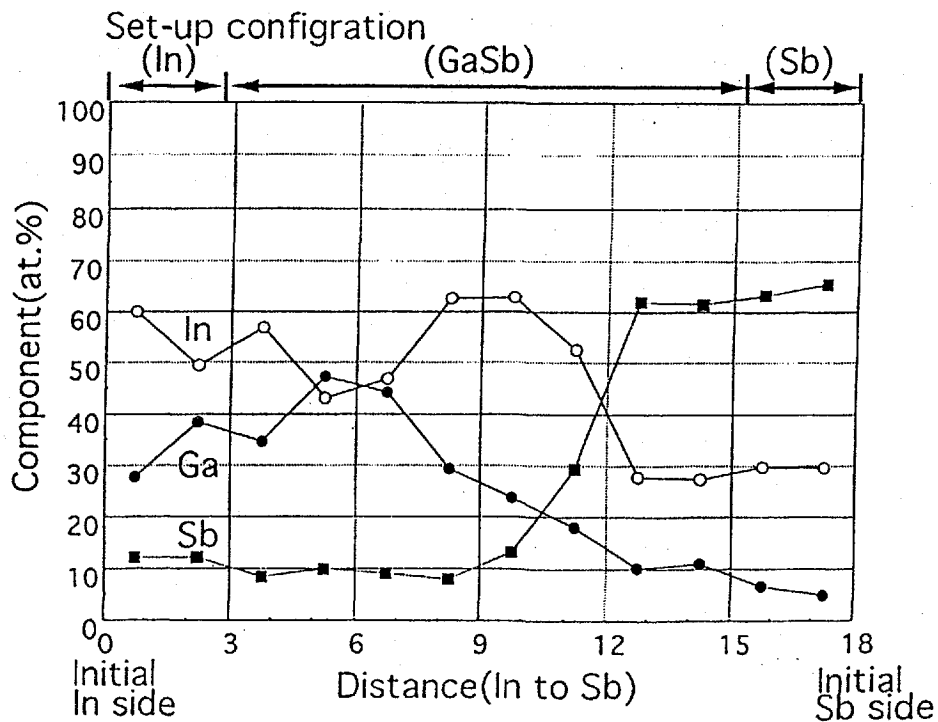


Fig.10 Concentraion Distribution at the Surface of D-2 Space Grown Sample

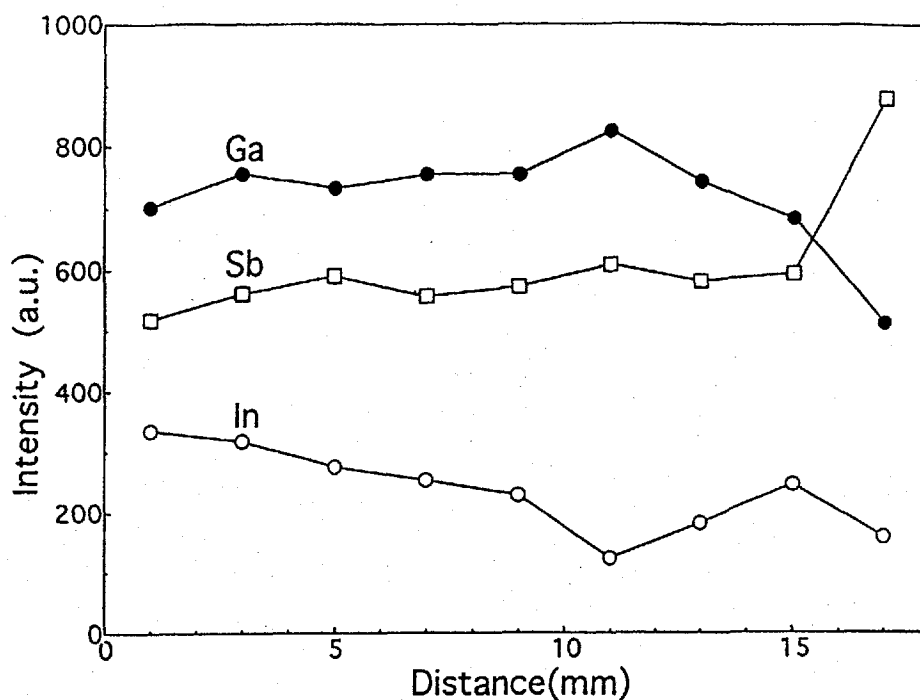


Fig.11 Concentraion Distribution at the Center in the Cut Surface of D-2 Space Grown Sample

結論

微小重力環境下において In-Sb 及び In-GaSb-Sb 試料を用いて、自由界面を有しマランゴニ対流及び分子拡散、及び自由界面が存在せず分子拡散のみにより分散混合プロセスが進行する条件下において、溶融凝固実験を行った。その結果、2元系試料(InSb系)においては、M 試料、D 試料ともに凝固後の濃度分布は比較的均一であり、これは低融点の In の溶融と同時に Sb の溶解が始まり、重力による偏析が無い状態で長く保持されたため、固液反応が十分に進行した結果であると考えられる。一方、地上で凝固した試料においては、重力偏析等の影響により濃度の分布が存在した。この結果から、微小重力下において比重の異なる成分の均一化が可能であることが検証できた。また、3元系試料(In-Ga-Sb系)においては、M 試料の中心軸上では、In、Ga、Sb ともにほぼ均一に混合していた。一方、D 試料においては、中央部の GaSb を挟んで、分子拡散により In、Sb が相互に拡散していたが、その混合速度は極めて遅かった。これらの結果から、濃度差マランゴニ対流を活用した場合は、分子拡散のみの場合に比べ混合プロセスが著しく進行し、微小重力下では濃度差マランゴニ対流を活用した均一分散・混合化が極めて有効であることが示された。

外部発表

論文、Proceeding

- 1) 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 熊川征司, 平田 彰, 大坂敏明, 橘 正人, 今石宣之, 岡野泰則. 数値解析による微小重力下 InGaSb 混晶成長過程. 第9回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1992). 68-70.
- 2) 平田 彰, 大坂敏明, 橘 正人, 西澤伸一, 今石宣之, 熊川征司, 早川泰弘, 岡野泰則. 多元系化合物半導体融液の均一分散混合に関する基礎的研究. 第9回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1992). 71-74.
- 3) 早川泰弘, 興津和彦, 山口十六夫, 熊川征司, 平田 彰, 橘 正人, 今石宣之. In-Ga-Sb 融液の均一分散混合の地上実験(1). 第10回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1993). 159-162.
- 4) Okitsu, K., Hayakawa, Y., Yamaguchi, T., Kumagawa, M., Hirata, A., Tachibana, M. and Imaishi, N. Preliminary Experiment on the Earth for InGaSb Growth under Microgravity and Numerical Analysis of Nucleus Generation. *The 3rd IUMRS International Conference on Advanced Materials, Tokyo (1993)*.
- 5) 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 熊川征司, 岡野泰則, 酒井 奨, 平田 彰, 西澤伸一, 藤原省悟, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦. 微小重力下における In-Sb の分散混合実験. 第12回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1995). 239-242.
- 6) 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 熊川征司, 岡野泰則, 酒井 奨, 平田 彰, 西澤伸一, 藤原省悟, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦. 微小重力下における In-GaSb-Sb の分散混合実験. 第12回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1995). 243-246.

研究会及び学術講演発表

- 1) 安廣祥一, 今石宣之, 平田 彰. 濃度差マランゴニ対流による混合促進. 化学工学会熊本大会(1994).
- 2) 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 熊川征司, 平田 彰, 大坂敏明, 橘 正人, 今石宣之, 岡野泰則. 微小重力下での InGaSb 結晶成長の数値解析. 第23回結晶成長国内会議, NCCG-23 (1992). 28aB7.
- 3) Hirata, A., Imaishi, N., Kumagawa, M., Hayakawa, Y., Osaka, T., Okano, Y., Tachibana, M. and Nishizawa, S. Mixing of Melt of Multicomponent Compound Semiconductor. *15th Space Station Utilization Workshop, Materials Science Subgroup Meeting (1992)*.
- 4) 興津和彦, 早川泰弘, 平田 彰, 今石宣之, 大坂敏明, 宗田孝之, 橘 正人, 西澤伸一, 岡野泰則, 山口十六夫, 熊川征司. 多元系化合物半導体融液の均一分散混合の地上実験(I). 第40回応用物理学関係連合講演会(1993). 1aZD3.
- 5) 平田 彰, 大坂敏明, 宗田孝之, 橘 正人, 西澤伸一, 今石宣之, 熊川征司, 早川泰弘, 岡野泰則. 多元系化合物半導体融液の均一分散混合に関する地上予備実験. 第10回宇宙利用シンポジウム, 東京, (1993).
- 6) 興津和彦, 早川泰弘, 平田 彰, 今石宣之, 橘 正人, 山口十六夫, 熊川征司. 多元系化合物半導体融液の均一分散混合の地上実験(II). 第54回応用物理学学会学術講演会(1993). 28aZQ7.
- 7) 興津和彦, 早川泰弘, 平田 彰, 今石宣之, 橘 正人, 山口十六夫, 熊川征司.

- In-Ga-Sb 溶液中の結晶核発生の数値解析. 第 54 回応用物理学会学術講演会 (1993). 28aZQ8.
- 8) 興津和彦, 早川泰弘, 平田 彰, 今石宣之, 橘 正人, 山口十六夫, 熊川征司. 多元系化合物半導体融液の均一分散混合の地上実験(III)-凝固過程の影響-. 第 41 回応用物理学関係連合講演会 (1994). 28pZ15.
 - 9) 興津和彦, 早川泰弘, 平田 彰, 今石宣之, 橘 正人, 岡野泰則, 山口十六夫, 熊川征司. In-Ga-Sb 融液の均一分散混合の地上実験. 第 25 回結晶成長国内会議, NCCG-25(1994). 20aA7.
 - 10) 興津和彦, 早川泰弘, 平田 彰, 今石宣之, 岡野泰則, 山口十六夫, 熊川征司. In-Ga-Sb 融液中の針状結晶の形状と成長. 第 55 回応用物理学会学術講演会 (1994). 20pME11.
 - 11) 興津和彦, 早川泰弘, 岡野泰則, 山口十六夫, 熊川征司, 平田 彰, 橘 正人, 今石宣之. In-Ga-Sb 融液の均一分散混合の地上実験. 化学工学会第 27 回秋季大会 (1994). V201.
 - 12) 平田 彰, 西澤伸一, 熊川征司, 早川泰弘, 岡野泰則, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦. 多元系化合物半導体融液の均一分散混合化. 第 72 期日本機械学会通常総会 (1995).
 - 13) 平田 彰, 西澤伸一, 熊川征司, 早川泰弘, 岡野泰則, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦. マランゴニ対流による InGaSb 融液の均一分散混合. 第 11 回宇宙ステーション講演会 (1995).
 - 14) 酒井 奨, 岡野泰則, 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 熊川征司, 平田 彰, 西澤伸一, 藤原省悟, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦. 微小重力環境下(IML-2)における融液混合実験(I). 第 56 回応用物理学会学術講演会 (1995).
 - 15) 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 酒井 奨, 岡野泰則, 平田 彰, 西澤伸一, 藤原省悟, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦, 熊川征司. 微小重力環境下(IML-2)における融液混合実験(II). 第 56 回応用物理学会学術講演会 (1995).
 - 16) 興津和彦, 早川泰弘, 山口十六夫, 酒井 奨, 岡野泰則, 平田 彰, 西澤伸一, 藤原省悟, 今石宣之, 依田真一, 大井田俊彦, 熊川征司. 微小重力環境下(IML-2)における融液混合実験(III). 第 56 回応用物理学会学術講演会 (1995).