

ISS・きぼう利用ミッション  
「微小重力下における TLZ 法による均一組成 SiGe 結晶育成の研究(Hicari)」  
研究成果報告書  
代表研究者;木下恭一(日本宇宙フォーラム)  
平成 29 年 2 月

## 1. 緒言

本研究の目的は、均一組成のバルク混晶製造方法を微小重力環境を利用して開発することである。均一組成のバルク混晶半導体結晶の製造は、Shockley が接合型トランジスタを発明した 1951 年の 10 年後には早くも盛んに研究されるようになった[1]。その理由は、組成によってバンドギャップエネルギーと格子定数を制御することができ、エレクトロニクスや光エレクトロニクス分野の新機能デバイス製造が可能になり、大幅に応用の可能性が広がるためである。それ以来、50 年以上が経過しているが、いまだに均一組成の大型バルク混晶単結晶は製造されていない。大口径・高品質なバルク混晶単結晶の新しい製造方法を開発することができれば、学術的貢献のみならず、産業界特に半導体産業への貢献は大である。また、混晶を使った新しい製品が開発されれば、私達の社会生活への波及効果も大きく、本研究の意義は極めて大きいと考えられる。

均一組成のバルク混晶単結晶の製造が困難な理由は、結晶化の際に液体の組成と結晶(固体)の組成が異なる偏析と呼ばれる現象と、液体中の対流とが組み合わされ、結晶成長の進行とともに組成が連続的に変化してしまうためである。液体中の対流を抑制して、拡散律速定常状態の結晶成長が可能になれば、均一組成の結晶が取得できることは既に解析されている[2]。そのため、液体中の対流抑制に様々な方法が試みられてきた。その方法の1つに、磁場によるローレンツ力を利用して対流を抑制する方法がある[3]。この方法は、Si 結晶中の酸素濃度を均一に制御するのに目覚ましい成果を上げたが、大口径バルク混晶製造までには至っていない。

液体中の対流を抑制する他の方法として、微小重力環境の利用がある。1973~74 年にかけての SkyLab 計画の中で Witt らは InSb への不純物 Te の添加実験を行い、不純物濃度が均一になることを報告した[4]。この報告を契機として、微小重力環境を利用して液体内の比重差に起因する対流を抑制して均一組成のバルク混晶を育成しようとする気運が高まり、その後多くの微小重力下バルク混晶育成実験が行われることとなった。日本では  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ [5] や  $In_{1-x}Ga_xAs$ [6] の結晶成長実験が毛利宇宙飛行士による我国初の宇宙実験「ふわっと'92」の中で行われた。 $Pb_{1-x}Sn_xTe$  の結晶成長実験で得られた結果を図 1 に示す。部分的な均一組成領域(緑色部分)は得られたものの、拡散律速定常状態によって得られる赤線で示すような均一組成は実現しなかった[5]。この理由として、スペースシャトルで実現可能な  $10^{-4}$  G の微小重力ではまだ不十分で、もう1桁ないし2桁小さな微小重力環境の必要性が指摘された[7, 8]。NASA の研究者達もノイズの少ない良質な微小重力環境の必要性に気付き、US-MP2 (1994 年)や US-MP3(1996 年)の中で結晶成長軸を地球方向に向けて残留重力の影響の低減を図ったり、宇宙飛行士が寝ている間に結晶成長実験を行ったりして、均一性の向上に努力したが、いずれの実験も思ったような成果は得られず[9, 10]、やがて NASA は微小重力環境を利用した結晶成長実験から手を引くことになった。

時を前後して宇宙開発事業団 (NASDA)の依田らは、人任せの宇宙実験では独創的な成果は生まれないので自分達の手で宇宙実験を行わなければならないという方針を掲げ、NASDA 内に宇宙実験を専門に手掛ける組織「宇宙環境利用研究システム」を作り、宇宙実験成果の最大化を図っていくことを推進した。木下は結晶研究チームの代表研究者として招かれ、独創的な成果の創出が求められた。

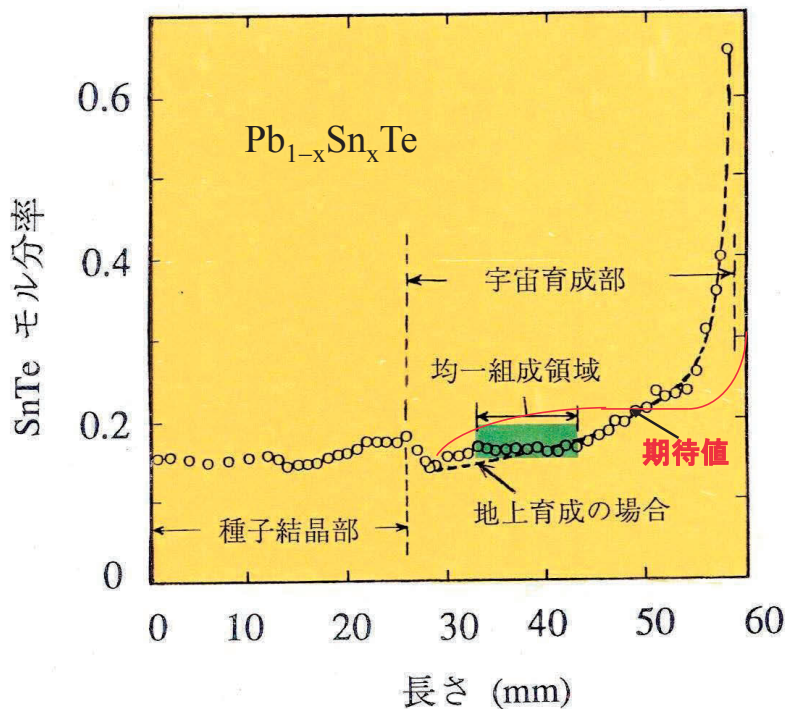


図 1. 「ふわっと'92」実験で得られた  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  結晶の組成分布 (○が宇宙育成, 赤線が期待値)

「ふわっと'92」実験結果を基に, 新しい結晶成長方法を発明すべく,  $10^{-4}$  G 程度の微小重力下でも均一組成を達成する方法を種々検討した. その中で, 出発原料に傾斜組成を持たせ, 原料を部分的に融かす方法を考案した(特許第 4239065 号). その新しい結晶成長方法では結晶成長の開始時点で, 拡散律速定常状態の溶質濃度勾配が溶融帯(メルトゾーン)内に実現しており, 均一組成の混晶製造に適した方法であることを見出した. またこの方法では,  $10^\circ\text{C}/\text{cm}$  程度の低い温度勾配の下で溶融帯を形成するため, 溶融帯幅が狭い場合は溶融帯全体がほぼ飽和濃度になっていることから, 「飽和溶融帯移動法, 英文名: Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法」と名付けた[11-13].

以上のような経緯で開発された新しい結晶成長方法 TLZ 法は溶液法の一つで, 溶液中の物質輸送が拡散支配であることを前提としている. 対流がある場合は溶液中の溶質濃度分布が乱されるため, 適用できない. 地上で TLZ 法を適用しようとすると, 直径 2 mm 程度の細い結晶(この場合は直径 20 mm 結晶に比べ対流の駆動力は液体の粘性により  $1/1000$  になるので TLZ 法は適用可)に限定されるか, あるいは大口径結晶では長さが 10 mm 程度にしか成長しないという問題点があった. そこで, 実用に供される大口径・長尺の結晶成長においても, TLZ 法結晶成長の原理が適用可能か否かを確認すること, および径方向の成長速度を詳細に調べ, 二次元結晶成長モデルを評価し, TLZ 法をさらに進化させること, ならびに地上製造への応用の知見を獲得することを目的として宇宙実験を提案した.

当初は, InAs と GaAs の混晶で, 波長  $1.3 \mu\text{m}$  帯の光通信用半導体レーザ基板として有望な  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  の均一組成バルク単結晶育成を目指したが, スペースシャトル・コロンビア号の事故等で国際宇宙ステーション(ISS)の建造が遅れ, その間に地上で板状にして溶液中の対流を抑制して InGaAs 結晶製造を行う実験が進展したため, Si と Ge の混晶である SiGe を対象とした実験に変更した. SiGe は Si に代わる次世代高速電子デバイス用基板材料として, あるいは  $800^\circ\text{C}$  以上の高温での熱電変換素子用材料として, また赤外線領域のレンズや窓材として大変有望であり, 均一組成の混晶製造が渴望されており, かつ InGaAs よりも大量に使用される可能性のある材料である.

## 2. 研究計画

### 2.1 研究目標

研究目標は、TLZ 法の原理検証が中心になるので、まず本研究の中で考案した TLZ 法の原理について記述する。図 2 は SiGe 混晶育成の場合を例に取り、TLZ 法の原理を模式的に示したものである [11-14]。出発原料として固体の Si 種結晶、固体 Ge、および Si 原料を用意し、それらをルツボ内に挿入し、酸化防止のために石英アンプルに真空封入する。その石英アンプル封入試料を温度勾配炉中で 1000~1250°C、温度勾配 10°C/cm 程度に加熱し、融点の低い Ge(融点 938°C)を融かし、溶融帯(メルトゾーン)を形成する。Si の融点は 1414°Cであるので固体のままであるが、Ge 融液に接する所では Si が溶かされ、Ge 融液に溶け込んでいく。十分時間が経った後では、Si 固体と Ge 融液が接する界面、すなわち種結晶と Ge 融液の界面および Ge 融液と Si 原料の界面では Si が飽和濃度に達するとともに、Ge 融液全体の Si 濃度もほぼ飽和に達する。この場合、注目すべき点は、液相線上では温度が与えられると組成は一義的に定まるので、メルトゾーン全体をほぼ飽和濃度にするには、温度勾配により濃度勾配が制御できるようになったことを意味する。これが TLZ 法の特長で、外部から制御可能な温度勾配により、メルト中に所望の溶質濃度勾配を形成させた点にある。過去の宇宙実験で均一組成の混晶育成に成功しなかったのは、融液の一方向凝固法で拡散律速定常状態の実現を狙ったため、定常状態に達するまでに長い遷移領域を経なければならなかったことと、長尺のメルトを固化させるために残留重力の影響を受け易かったことによる [7, 8]。TLZ 法では温度勾配により濃度勾配が制御できるため、最初から拡散律速定常状態の溶質濃度分布が実現できること、および帯状に融かすために残留重力の影響を受け難いメリットがある。

TLZ 法はゾーンメルト法的一种であるが、従来のゾーンメルト法と異なる点は、10°C/cm 程度の低い温度勾配の下でゾーンが形成される点にある。従来法では急峻な温度勾配を利用して狭い領域だ

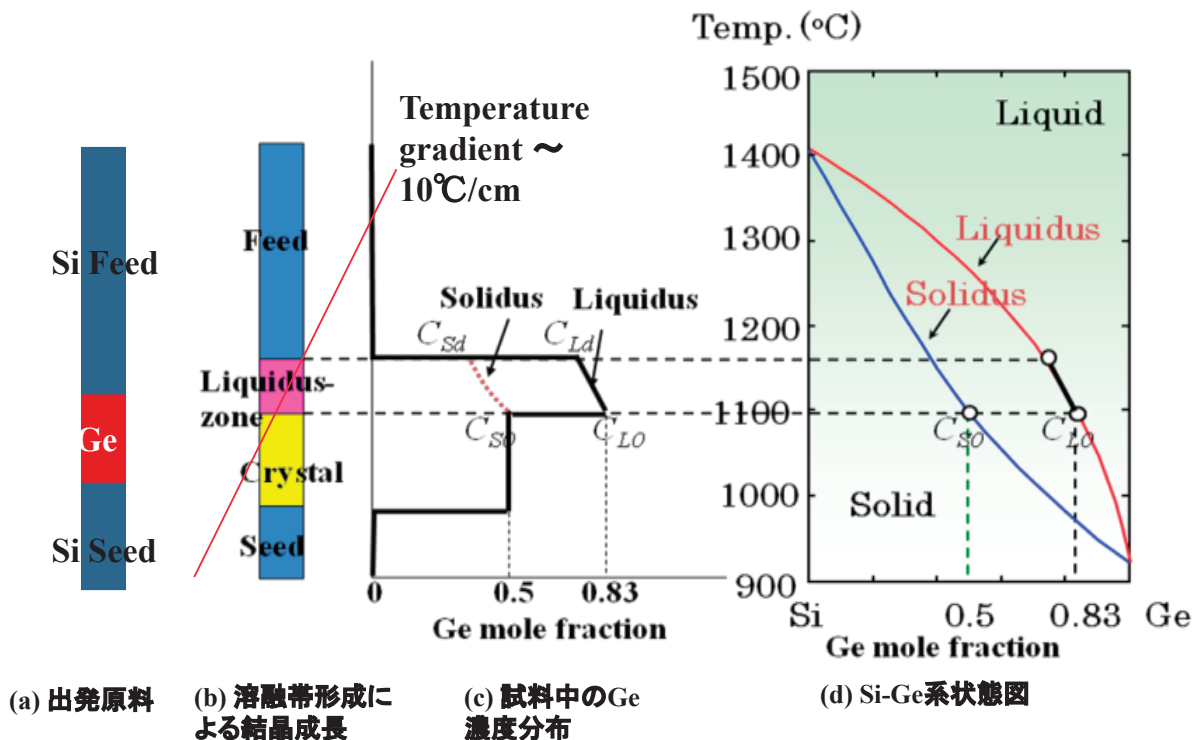


図 2. TLZ 法原理を示す模式図 (SiGe 結晶育成の場合)



けを融かす方法であるが、TLZ 法では融点の高い材料の間に融点の低い材料が挟まれた構成になっているので、 $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  程度の低い温度勾配の下でも狭いメルトゾーンの形成が可能になる。

図 2 に示すように、結晶成長界面温度を約  $1100^{\circ}\text{C}$  に制御し、種結晶側が低温となるよう温度勾配を付けた状態を保っておくと、図 2 (c) に示されるような Ge の濃度勾配が融液(メルト)中に形成される。この濃度勾配により Ge は高濃度の結晶成長界面から低濃度な原料側に拡散によって輸送される。すると成長界面では Ge が少なくなって Si 過飽和状態となり、 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  組成の結晶が成長してくる。融液組成の  $\text{Si}_{0.17}\text{Ge}_{0.83}$  が  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  組成の結晶となるので、約 6 割の Ge は結晶中に取り込まれず、融液中に排出される。この排出された Ge は拡散によって高温側(低 Ge 濃度側)へ輸送され、Si 原料を溶かす。このように溶液中の濃度勾配による拡散を駆動力として結晶成長が自発的に進む。ゾーンは高温側へ移動して行くので、結晶成長に合わせて容器を下方へ移動させるか、あるいはヒータを上方へ移動させるかして成長界面温度を常に約  $1100^{\circ}\text{C}$  に保つようにすると、 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  一定組成の結晶が成長し続けることになる。以上が TLZ 法の原理の概要である[11-14]。

一定組成の結晶を得るには、上で述べたゾーンの移動速度を見積もり、移動速度に合わせて試料とヒータの相対位置を変化させることが重要である。速度の計算には、結晶化(固化)に際して排出される Ge の量と拡散によって運び去られる Ge の量がバランスするという拡散律速定常状態が基礎となる。最も単純な一次元モデルで考えると、(1)式が成立する。

$$(C_L - C_S)R = -D \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (1)$$

ここで、 $C_L$  は成長界面での Ge の液相線(リキダス)濃度、 $C_S$  は固相線(ソリダス)濃度、 $R$  は成長速度、 $D$  は Si-Ge 相互拡散係数、 $C$  は溶液中の Ge 濃度、 $Z$  は成長界面からの距離を表す。濃度勾配  $\partial C/\partial Z$  は微分の連結則により

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{\partial C}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (2)$$

に置き換えられるので、(1)式から速度  $R$  は以下のように与えられる。なお、 $\partial C/\partial T$  は液相線の勾配の逆数、 $\partial T/\partial Z$  は温度勾配である。

$$R = -\frac{D}{(C_L - C_S)} \frac{\partial C}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (3)$$

(3)式から、成長させる結晶の組成を固定すると、 $D$ 、 $C_L$ 、 $C_S$ 、 $\partial C/\partial T$  は一定であるので、成長速度は温度勾配  $\partial T/\partial Z$  に比例することとなる。またこの式は、結晶成長速度  $R$  が外部から与えられた温度勾配によってアクティブに定められることを示すもので、TLZ法の真髄をなすものである。この式を TLZ 法一次元モデル式と呼ぶ。 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  の場合、 $D = 9.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、および状態図[15]から得られる  $C_{L0} = 0.831 \text{ mol}$ 、 $C_{S0} = 0.50 \text{ mol}$ 、 $\partial C_L/\partial T = -1.53 \times 10^{-3} \text{ mol}/\text{K}$  を用いて温度勾配  $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  に対して自発成長速度を計算すると  $0.16 \text{ mm}/\text{h}$  が得られる。

以上は一次元とみなせる細い結晶での成長速度であるが、大口径結晶では軸方向の成長速度の他に径方向成長速度を考慮する必要がある。結晶を軸対称とみなすと、二次元の成長速度式(4)が求まる[16]。なお、(4)式においては、軸方向および径方向ともに溶質の飽和濃度が維持されていることを前提としている。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{D}{(C_L - C_S)} \frac{\partial C}{\partial T} \left( \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r} \right) \quad (4)$$

ここで、 $\partial f/\partial t$  は成長界面の移動速度、 $\partial T/\partial r$  は径方向温度勾配、 $\partial f/\partial r$  は界面形状の径方向変化率を表す。

以上述べたように、TLZ 法では、融液(メルト)中の物質輸送が拡散支配であることを前提としている。対流がある場合は融液中の溶質濃度分布が乱されるため、(3)式および(4)式の適用は不可能になる。そこで、液体中の対流を抑制し、長尺にわたる TLZ 法結晶成長原理の適用性を確認すること、および径方向の成長速度を詳細に調べ、二次元結晶成長モデル式(4)を評価し、径方向組成均一達成条件を明らかにすることを目的として微小重力下実験を提案し、表 1 に示す目標とサクセスクライテリアを設定した。

なお、国際 AO 採択時の実験計画書初版では、InGaAs を対象とし、TLZ 法の一次元モデル式(3)の検証と、TLZ 法の適用限界を明らかにすることを目的としていたが、地上実験の進展により(3)式は直径 2 mm の試料を用いることにより検証できるようになったため、地上実験では検証できない二次元モデル式(4)の検証に目標を設定し直した。表 1 に実験計画書の初版と最終版の目標の違いも対比して示す。

表 1. 実験目標とサクセスクライテリア

サクセスレベル	クライテリア(計画書初版)	クライテリア(計画書最終版)
Minimum Success	In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As 単結晶の成長速度と温度勾配の関係を通じて TLZ 法一次元モデルを検証する。	1本の温度調整実験と、温度勾配あるいは成長距離を変えて実験した 2 本の Hicari カートリッジ(合計 3 カートリッジ)を所定の実験条件で実施し、TLZ 法二次元モデル式の二次元性指標について温度勾配あるいは成長距離依存性が検証出来ること。
Full Success	上記に加えて、均一組成を実現する熔融帯幅の限界と組成的過冷却を防止する熔融帯幅の限界を調べることにより、TLZ 法の適用限界を把握する。	上記に加えて、温度勾配か成長距離を変えて残り 1 本の Hicari カートリッジで結晶成長実験を実施し、TLZ 法二次元モデル式における二次元性指標の温度勾配依存性と成長距離依存性の両方の算出により、実験と二次元モデル式との定量的な比較が出来ること。
Extra Success	—	—

以下、サクセスクライテリアの内容に関して補足する。Minimum Success における TLZ 法二次元モデル式の二次元性指標とは(4)式中の  $\frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r}$  のことであり、界面形状  $\frac{\partial f}{\partial r}$  と径方向温度勾配  $\frac{\partial T}{\partial r}$  の積で表される値を指す。Full Success における TLZ 法二次元モデル式と定量的な比較ができることの意味は、二次元モデル式で計算される成長速度と界面位置の変化から測定される実際の成長速度とを比較し、両者の差を成長距離あるいは成長時間の関数として求めることである。

## 2.2 体制

研究チームの体制を表2に示す。国際AOに応募し、採択された2001年度以降の担当者と分担をまとめた。二重線より上が、フライト期間中の研究チームの体制である。実験準備も含めて長期間にわたっており途中で担当者の交代があったが、実験提案、実験準備、宇宙実験の運用、飛行後解析、成果の取り纏め、および広報までJAXA組織としての分担およびJAXAの支援体制は十分であった。

表2. 研究チームの体制(2001年以降)

分類	氏名	所属	役割分担	期間(西暦)
代表研究者	木下 恭一	宇宙航空研究開発機構	研究提案, 全般	01~16
コーディネータ	荒井 康智	宇宙航空研究開発機構	宇宙実験計画詳細化	08~16
共同研究者	稲富 裕光	宇宙航空研究開発機構	理論	08~16
共同研究者	塚田 隆夫	東北大	シミュレーション	10~16
支援研究者	島岡 太郎	日本宇宙フォーラム	実験計画支援	08~14
支援技術者	吉川 淳一	有人宇宙システム(株)	運用計画支援	09~14
コーディネータ	越川 尚清	宇宙航空研究開発機構	宇宙実験計画詳細化	02~06
支援技術者	岡 利春	(株)IHIエアロスペース	供試体製造	10~11
支援技術者	酒井由美子	(株)IHIエアロスペース	供試体製造	08~09
支援技術者	曾根 武彦	有人宇宙システム(株)	運用計画支援	08~09
支援技術者	田中 涼太	(株)エイ・イー・エス	地上予備実験支援	07~12
支援技術者	宮田 浩旭	(株)エイ・イー・エス	地上予備実験支援	04~10
共同研究者	植田 稔晃	三菱マテリアル(株), 出向	実験技術	06~07
共同研究者	緒方 康行	三菱マテリアル(株), 出向	実験技術	02~05
支援研究者	桜井 直子	日本宇宙フォーラム	実験計画支援	05~06
支援研究者	木暮 和美	日本宇宙フォーラム	実験計画支援	02~04
共同研究者	足立 聡	宇宙航空研究開発機構	熱解析, 容器設計	01~09
共同研究者	前川 透	東洋大	シミュレーション	01~03
支援技術者	鶴 哲也	(株)エイ・イー・エス	地上予備実験支援	01~06
支援技術者	村松 裕治	(株)エイ・イー・エス	地上予備実験支援	01~08
支援技術者	兼子 稔	石川島ジェットサービス	地上予備実験支援	01~08
支援技術者	岩井 正行	(株)エイ・イー・エス	地上予備実験支援	01~03
共同研究者	花上 康宏	三菱マテリアル(株), 出向	実験技術	01
共同研究者	中村 裕彦	(株)三菱総研, 出向	理論	01
共同研究者	龍見 雅美	住友電工(株)	実験技術	01
共同研究者	山田 正良	京都工繊大	試料評価	01

## 2.3 スケジュール

国際AOにおける採択から実験後の試料回収までの主なスケジュールを表3にまとめて記す。スケジュールに大きなインパクトを与えたのは、2003年2月のスペースシャトル・コロンビア号の事故により国際宇宙ステーションの建設が凍結され、それに伴い温度勾配炉(GHF)の開発が2004年に凍結されたこと、および打ち上げたGHFのヒータの短絡やターボ分子ポンプの故障であった。提案から実験の実施まで長期間を要したが、研究の意義が減じることのないようフライト直前まで研究内容を最新化し、実験計画書を更新した。なお、当初計画では1本目の試料から4本目の試料まで連続して実験を行うことになっていたが、1本目の実験の組成分布解析結果を反映させて2本目の実験を実施し、2本目の結果を反映させて3本目、3本目の結果を反映させて4本目の実験というように変更したことであり、良い成果を得る上で、大変有効であった。

表 3. 主なスケジュール

項目	実績スケジュール	開発段階移行時計画
国際 AO 採択	2002 年 1 月	
実験計画書初版作成	2003 年 9 月(実験試料 InGaAs)	
温度勾配炉(GHF)開発凍結	2004 年	
温度勾配炉(GHF)凍結解除	2007 年 9 月	
実験計画書改訂版作成	2008 年 8 月(実験試料を SiGe)	
システム定義審査 (SDR)	2008 年 8 月	
試料カートリッジ安全審査(SAR)	2008 年 8 月	
試料カートリッジ基本設計審査(PDR)	2008 年 11 月	
プロジェクト移行審査	2008 年 11 月	
試料カートリッジ詳細設計審査(CDR)	2009 年 8 月	2009 年 4 月
カートリッジ出荷前審査 (PQR/PSR)	2010 年 6 月	2010 年 1 月
NASA による安全審査 (PSRP)	2010 年 6 月	
実験計画書最終版作成	2010 年 12 月	
GHF および試料カートリッジ打上	2011 年 1 月	2010 年 7 月
Hicari 1 本目実験	2013 年 2~3 月	2010 年 10 月
Hicari 1 本目回収	2013 年 4 月 (SpX-2)	2010 年 12 月
Hicari 2 本目実験	2013 年 7~8 月	2011 年 1 月
Hicari 2 本目回収	2013 年 12 月 (Soyuz TMA-09M)	2011 年 3 月
Hicari 3 本目実験	2014 年 2~3 月	2011 年 4 月
Hicari 3 本目回収	2014 年 5 月 (SpX-3)	2011 年 6 月
Hicari 4 本目実験	2014 年 6~7 月	2011 年 7 月
Hicari 4 本目回収	2014 年 10 月 (SpX-4)	2011 年 9 月
飛行後解析完了	2017 年 3 月	2014 年 3 月

### 3. 実験準備・運用

#### 3.1 実験条件決定

一番時間を割いたのが、宇宙での結晶成長条件を詳細に決定する地上予備実験であった。宇宙実験用温度勾配炉(GHF)は温度勾配が  $150^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  まで設定可能なように、3つの加熱室から構成されている。そのため、各加熱室の幅が狭く、急峻な温度勾配の設定には適しているが、長い均熱領域を設定したり、TLZ 法実験のように温度勾配を一定に保とうとしたりすると、各加熱室の温度を細かく調整する必要が生じる。加熱室と試料の相対位置が少し変化しただけで、温度が変化してしまうためである。Hicari 実験では、温度勾配  $22^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  以上では結晶品質の低下が判明していたので、温度勾配  $8^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  および  $16^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  の実験を計画し、目標の温度勾配が 20 mm 以上の移動に対しても保たれる加熱条件を実験により取得した。合計 17 回の結晶成長実験を地上実験用電気炉(BBM 炉)を使用して行った。

#### 3.2 宇宙実験用試料作製

作製した結晶成長実験用試料の概念図を図 3 に示す。Si および Ge は表面酸化物をエッチングで取り除き、融液押圧用のカーボンバネとともに、窒化ホウ素(boron nitride, BN)製のルツボ内に挿入し、石英アンブル(図示せず)中に  $1 \times 10^{-5}$  Pa で真空封入されている。石英アンブルは金属カートリッジの先端に挿入され、電子ビーム溶接で蓋が閉じられ、万が一石英アンブルが破損しても融けた試料が外に漏れ出さないようになっている。なお、試料の直径は 10 mm, 全長約 100 mm である。

#### 3.3 クルー訓練

GHF の加熱やヒータ移動等は地上からのコマンドで実施出来るが、カートリッジの GHF への装着、取り外し、帰還に向けてのカートリッジ先端の分離や試料の梱包は宇宙飛行士に行ってもらわなければならない。実験の科学的意義を説明するとともに、カートリッジの取扱等を実際に経験してもらった。



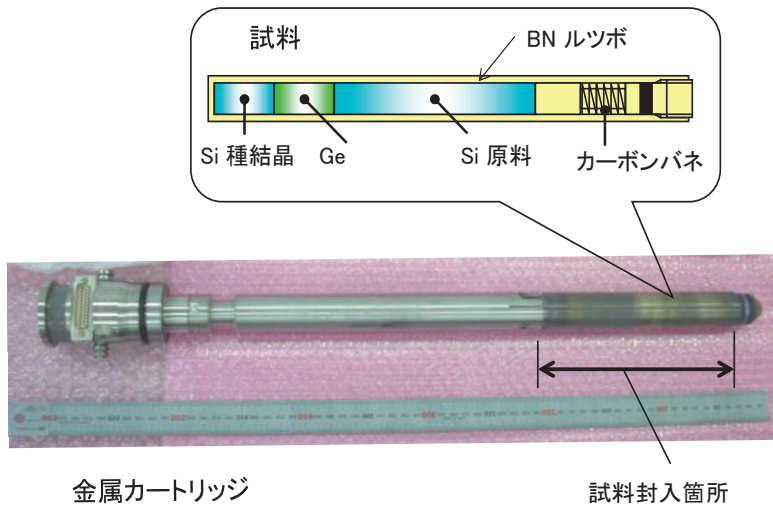


図 3. 試料構造(模式図)とカートリッジ外観

### 3. 4 GHF の運用

GHF の真空排気系の故障で、ヒータの温度上昇速度を落とさざるを得ず、1250°Cに到達するまでに 5 日間以上の長時間を要する事態になったが、実験目的やサクセスクリテリアは変更の必要はなかった。電気炉運用担当者(GOLEM)には真空度を見ながら少しずつ温度上昇させるという長期間の実験にもかかわらず、粘り強く支援していただき、実験は成功裏に終了した。

## 4. 実験結果および成果

### 4. 1 実験条件および微小重力環境

合計 4 回の微小重力実験を実施した。全ての実験が目標の結晶成長条件で実施でき、試料も全て無事回収することができた。結晶成長条件と主な結果をまとめて表 4 に示す。

表 4. 宇宙実験条件と主な結果

No.	目標値				達成値			
	温度勾配	ヒータ移動速度	成長距離	組成	温度勾配	ヒータ移動速度	成長距離	組成(平均値)
1	8°C/cm	0.1mm/h	15mm	Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub>	9°C/cm	0.1mm/h	17.2mm	Si <sub>0.515</sub> Ge <sub>0.485</sub>
2	8°C/cm	0.1mm/h	10mm	Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub>	9°C/cm	0.1mm/h	9.2mm	Si <sub>0.502</sub> Ge <sub>0.498</sub>
3	8°C/cm	0.1mm/h	15mm	Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub>	9°C/cm	0.1mm/h	14.5mm	Si <sub>0.506</sub> Ge <sub>0.494</sub>
4	16°C/cm	0.2mm/h	10mm	Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub>	18°C/cm	0.2mm/h	11.4mm	Si <sub>0.521</sub> Ge <sub>0.479</sub>

MMA (Microgravity Measurement Apparatus)で測定された温度勾配炉ラックの実験中における微小重力環境は、液体の流れに大きな影響を及ぼす 1Hz 以下の低周波領域で  $7 \times 10^{-5} G$  以下であり、かつ実験中に突発的な重力ノイズの発生もなく、良好な環境であった。

### 4. 2 試料外観

1 回目の実験後回収した試料の外観を図 4 に示す[17]。試料を入れる BN ルツボおよび真空封入用石英アンブルも併せて示す。試料には割れや欠けなど無く、打ち上げおよび回収時の衝撃による損傷は認められなかった。Si 種結晶、SiGe 成長結晶、急冷された融液(メルト)部分、Si 原料の境界が容易に判別される。これは、Si と Ge で反射する光の波長が異なっているためと思われる。Si 原料の表面に液



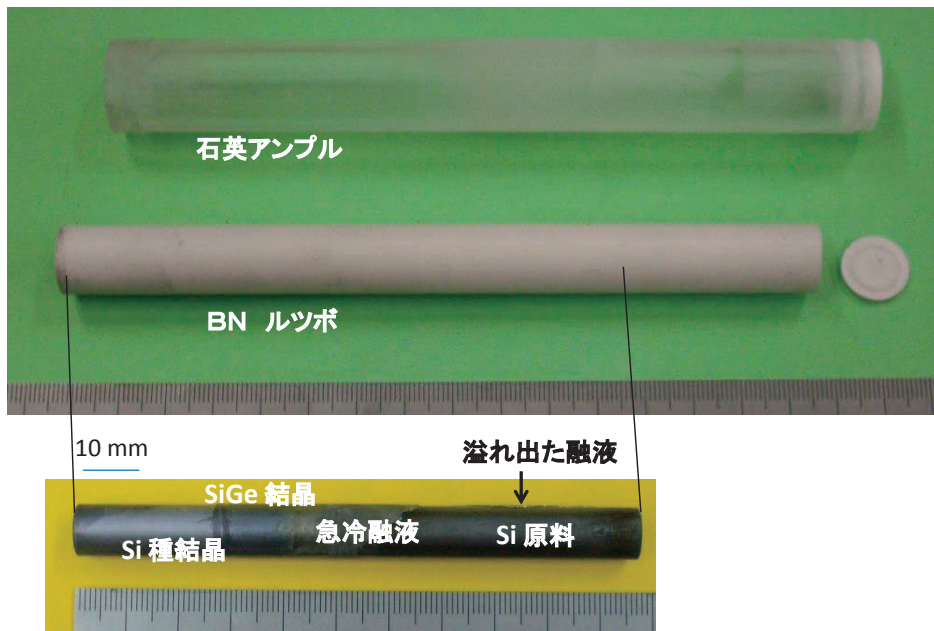


図 4. 第 1 回目実験後の回収試料外観

体が這ったような跡が観察されるが、これは Ge リッチな融液がカーボンバネの押圧力により原料側へ押し出された結果である。これは、カーボンバネが有効に働き、液体の自由表面が防止されたことを示す。よって、結晶成長実験中のマランゴニ対流(表面張力差に起因する対流)は発生しなかったと判断される。SiGe 成長結晶の長さは、計画長 15 mm に対し 17.2 mm であった。式(3)で述べたように、成長速度は温度勾配に比例する。計画より 2.2 mm 長く成長していたことから、温度勾配は計画では  $8^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  の予定であったが、実際は 1 割強増しの約  $9^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  になっていたことが判明した。これは、対流による熱輸送がなくなり、その分だけ温度分布の平均化が少なくなったためである。微小重力下での温度勾配の上昇は「ふわっと'92 実験」で観測されていたので[5]、第 1 回目の実験は地上と微小重力下での熱環境の違いを明らかにすることに主眼を置いて実施された。第 2 回目から 4 回目の実験においては、このような熱環境の変化を考慮して実験が行われた。

#### 4. 3 軸方向組成分布

第 1 回目の実験で得られた軸方向 Ge 濃度分布を図 5 に示す[17]。測定には EPMA (Electron Probe Microanalyzer)を使用した。測定精度は  $\pm 0.02\text{at}\%$  である。種

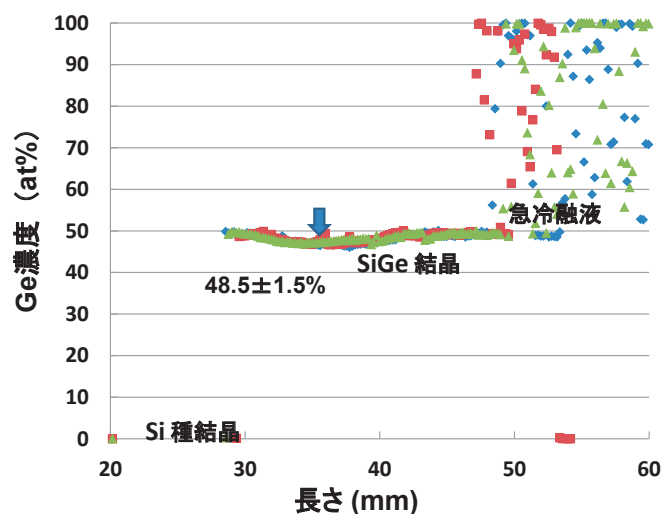


図 5. 軸方向 Ge 濃度分布(図中赤が中心軸、緑と青は中心から 4 mm 離れた位置での軸方向測定値、長さは種結晶先端からの距離)

結晶の Ge 濃度 0 at% からいきなり目標の Ge 濃度約 50 at% が得られており、途中で濃度の遷移領域が無いのが TLZ 法の特長である。これは先に述べたように、TLZ 法では温度により濃度が制御でき、結晶成長の開始から融液中の Ge 濃度を拡散律速定常状態の濃度に設定できるからである。17.2 mm の成長距離にわたって、 $48.5 \pm 1.5$  at% の均一組成が得られた。直径 10 mm の SiGe 結晶で、このような長尺の均一組成が得られたのは初めてであり、TLZ 法の有効性が示された。それと同時に、 $10^{-5}$  G という微小重力環境が地上では製造困難であった直径 10 mm の長尺均一組成実現を可能にしたという点において、微小重力効果も認められたと言える。なお、図中青色矢印部分で Ge 濃度の低下が認められるが、シミュレーションの結果、これは金属カートリッジの表面が加熱により酸化されて黒化し(図 3 参照)、カートリッジ表面の放射率が変化したためであることが判明した[18]。図 6 にシミュレーション結果を示す。本シミュレーションでは、カートリッジ表面に取り付けられた 5 本の熱電対の測温値から、結晶成長開始時から 405 分後にカートリッジ表面の放射率が 0.28 から増加し始め、1700 分後には 0.40 で一定になったと見積り、まず GHF の総合熱解析を行い、炉内の温度分布を求めた後、この結果に基づき TLZ 法の原理をモデル化した詳細解析により結晶成長による組成変化を解析したものである。放射率一定の場合、Ge 濃度の低下は認められないが、放射率を変化させた場合は、成長途中で Ge 濃度が V 字型に低下しており、組成変化の傾向が実験と良く合っていることが分る。実験では新品の金属光沢のあるカートリッジを使用したためこのような現象が起こった。今後提案される実験では、予め表面を酸化させるなどして、加熱中に放射率の変化が起こらないように留意すべきである。

第 3 回目の実験(#3)と第 4 回目の実験(#4)の軸方向組成分布を比較して図 7 に示す[19]。それぞれ中心軸に沿って測定されたものである。#3 試料は、成長距離 14.5 mm で、Ge の平均濃度は 49.4 at%，標準偏差 2.0 at% であった。一方、#4 試料は 11.4 mm の成長で、Ge 濃度  $47.9 \pm 1.9$  at% であった。結晶成長時の温度勾配は、#3 の  $9^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  に対し、#4 は 2 倍の  $18^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  であった。実験結果は、温度勾配が 2 倍違っても組成変動は  $\pm 2$  at% 以内に納まっており、均一性にはほとんど影響がないことを示している。#4 の実験ではヒータを 2 倍の速度で移動させており、この結果は温度勾配 2 倍の実験では、結晶成長速度が 2 倍になったことを意味し、軸方向成長速度に関する(3)式の有効性を示す。

大口径結晶での TLZ 法原理の適用が実証された点は、TLZ 法による大型

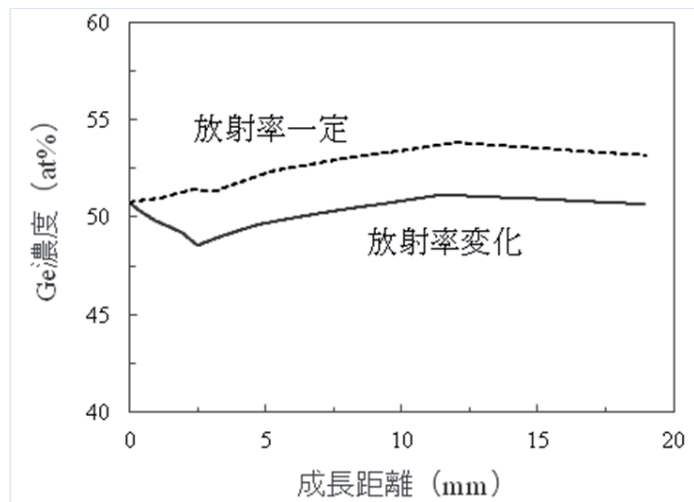


図 6. 軸方向 Ge 濃度分布のシミュレーション結果

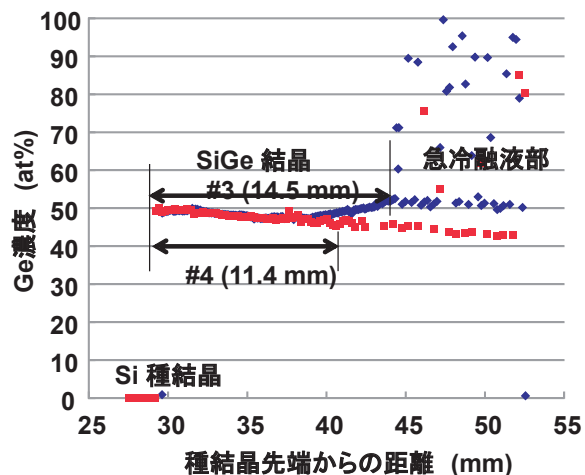


図 7. 軸方向 Ge 濃度分布の #3 と #4 の結晶の比較

結晶製造の可能性を高めるものである。宇宙実験成果を活かした大口径結晶の地上製造に着手し、既に直径 50 mm 径で、結晶性に優れた SiGe 結晶の製造に成功している(4. 12 項参照)。

#### 4. 4 成長距離

第 1 回目の実験で 17.2 mm 成長した結晶が得られ、第 3 回目の実験で 14.5 mm 成長した結晶が得られたが、地上では直径 10 mm では、12 mm 以上の長さの結晶は得られていない。その理由を考察するために、第 1 回目の実験で得られた結晶の縦断面の Ge 濃度分布図を地上で最も長く成長した結晶の濃度分布図と比較して図 8 に示す。宇宙育成の場合は、17.2 mm 成長した後もメルトゾーンが明瞭に残っているのに対し、地上育成の場合は 11.2 mm の成長距離にも関わらずメルトゾーンは Si 原料の方から伸びてきた固体で覆われてしまっている。これは、後述の図 25 に示すように、地上では対流により高濃度 Si が原料側から運ばれてきて、溶解界面で組成的過冷却を起こしてしまったためと考えられる。微小重力下では対流が抑制されるので、メルト内には原料から伸びてきた固体は存在しない。17.2 mm の長さの結晶を成長させたこの実験から、対流が抑制されれば、TLZ 法原理による成長がメルトが無くなるまで続くことが実証されたと言える。この成果は、地上でも磁場を印加するなりして対流をある程度抑制できれば長尺結晶製造が可能となることを示すもので、TLZ 法応用上の波及効果が期待される。

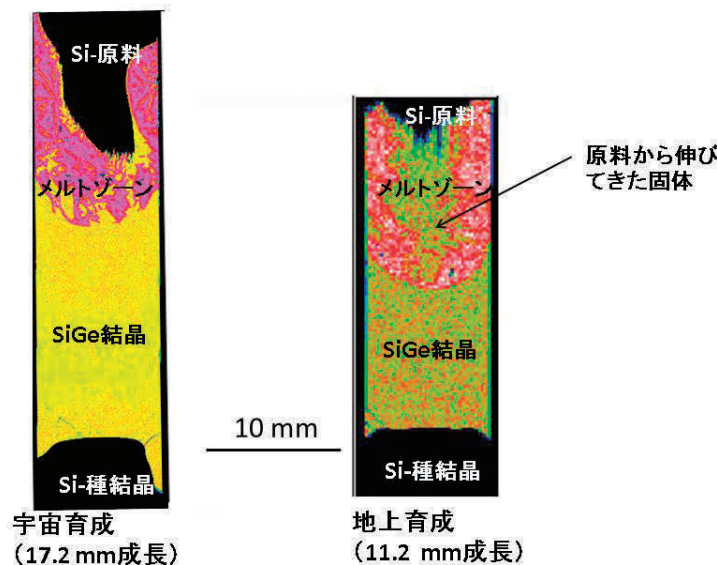


図 8. 宇宙育成結晶と地上育成結晶の縦断面の Ge 濃度分布の比較

#### 4. 5 界面形状

界面形状の一部は、図 8 で観察されるように、急冷されたメルトと成長結晶の境界からその形を観察することは可能である。しかし、この観察方法で観察されるのは、種結晶と成長結晶の境界の形状と成長結晶とメルトとの境界の 2 点の形状に限られる。幸いなことに、第 3 回目の実験において、図 9 に示す 1°C のステップ状温度変化を印加したところ、成長縞が明瞭に観察された[20]。温度ステップは成長中に 41 回印加している。成長縞の観察結果を図 10 に示す。図は反射電子像であるが、Si と Ge の反射電子強度が異なるため(Ge は Si の約 2 倍)、組成の情報も含んでいる。Si 濃度が高くなる程反射電子強度が弱くなるので、黒っぽく観察される。図で黒い縞の部分は、周囲に比べ Si 濃度が約 0.2 at% 高くなっていることが判明したが、これは、状態図[15]から読み取った 1°C の温度変化に伴う Si の濃度変化に対応している。この対応関係を図 11 に示す。成長縞を横切った Si 濃度変化の測定値と、温度変化



に伴う Si 濃度変化の数値解析結果が良く一致している。即ち、図で示された縞は従来観察されてきた不純物縞と異なり、結晶組成の変化に対応して見えるようになった縞である。このような結晶組成を変化させたことによる成長界面のマーキングは世界初と言え、成長界面の組成情報を含んでいる点において学術的価値の高いものである。

界面形状は、成長初期は種結晶周囲への融液のもぐり込みを反映してメルト側に凸の形状をしている。結晶成長が進むにつれて形状は平坦に近づいている。なお、界面形状が明瞭に見えるのは単結晶の領域で、約 7 mm 成長した所までである。多結晶領域では粒界の所で界面が不連続になっていたり、成長方位の違いによる界面の傾きなどがあつたりして不明瞭になっている。地上実験の場合は、メルト内対流による温度変動があるため、特にステップ状温度変化を与えなくとも成長縞が観察された。その様子を図 12 に示す。地上育成の場合、成長界面はメルト側に向かって大きく窪み、成長が進むにつれて中心部の湾曲度は増加している。

今回形成された成長縞は、界面形状の観察だけでなく、成長速度の正確な測定と、メルト

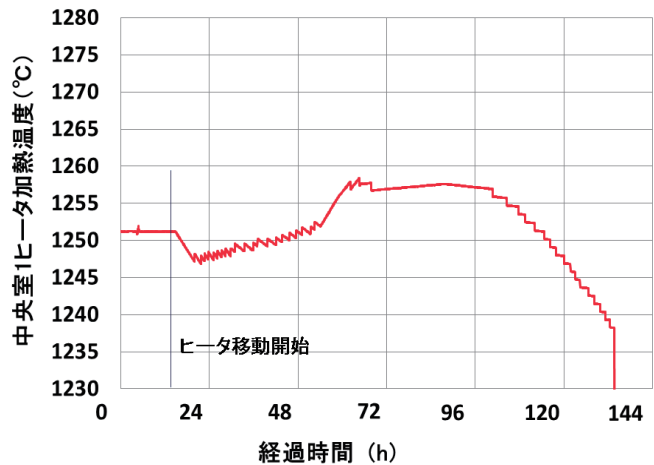


図 9. 中央室 1 ヒータ温度と経過時間

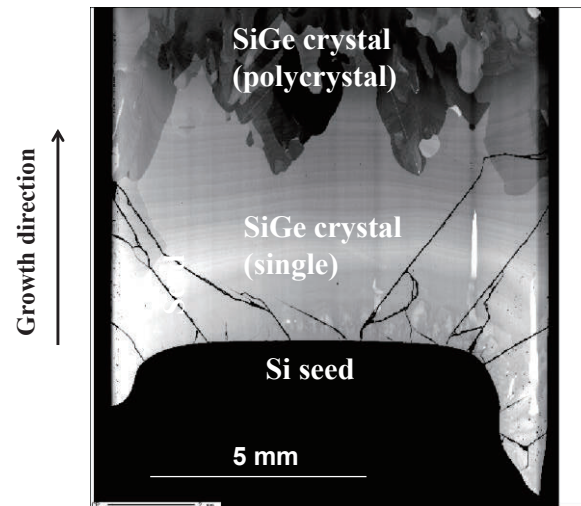


図 10. 1°Cのステップ状温度変化によって導入された成長縞(白い横縞)

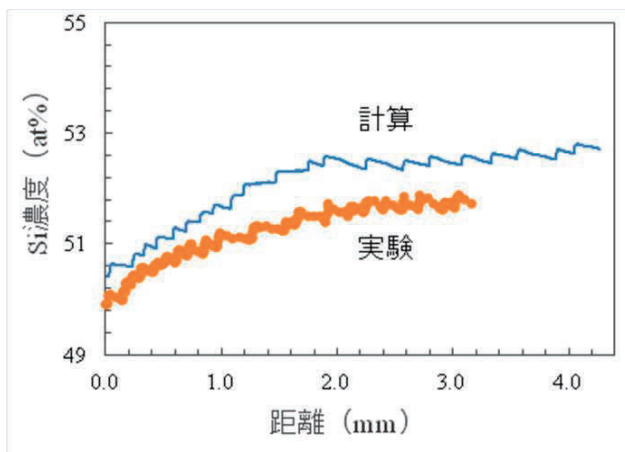


図 11. 成長縞を横切る Si 濃度変化(実験値と計算値の比較)

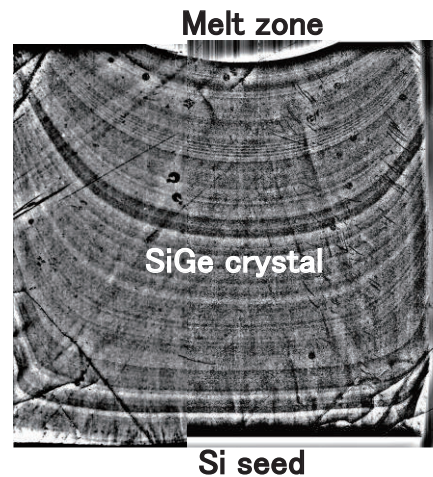


図 12. 地上育成の場合の成長縞



内の径方向の温度勾配の測定も可能にする, 何故ならば, 成長速度は成長縞の間隔と温度変化の時間間隔から求められる. さらに, 成長縞上組成から固化温度を読み取ることが出来るので, 界面上は同一時刻位置でもあることから, 成長縞上に 2 点を取り, その間の軸方向距離と径方向距離を測れば, 軸方向成長速度から求められる軸方向温度勾配と併せると, 径方向温度勾配が求まるからである. 先に求めた界面形状と併せれば, 式(4)における二次元性指標が計算でき, TLZ 法二次元成長モデルの定量的な評価が可能となる. これに関しては, 後に述べる「4. 9 結晶成長速度(二次元モデル解析)」の項で詳述する.

その他, 図 10 から多くの情報を読み取ることが出来る. 図に単結晶領域と多結晶領域が示されている. 単結晶は種結晶の方位を引き継いで, 種結晶から 5~7 mm の位置まで成長しているが, その先で結晶の中心部から多結晶化が生じている. この多結晶化はルツボ壁面からの核生成などによるものではなく, 組成的過冷却によることが第 4 回目実験試料の多結晶化位置や多結晶化した結晶粒の組成測定から結論づけられた. また, 図から種結晶との界面近くに白いモヤモヤとした不安定成長の領域が存在することが判る. 白い領域は Ge 過剰な領域であることから, これはセル成長[21]した跡と考えられる. このような不安定成長は地上実験では観察されたことがなく, 微小重力下実験特有の現象である. まだ結論づけられていないが, 種結晶が Ge 融液によって溶かされる時に凹凸を生じ, その凹凸の中心や近傍で溶質の濃度ムラが誘起されて出来たと考えられる. 対流が存在するとメルトは攪拌され, メルト中の溶質の濃度ムラは解消されるので, このような現象は観測されない. 図ではまた, 種結晶に続く SiGe 結晶中に多数の小さなクラックが生じていることが判る. このクラックは種結晶 Si と成長した SiGe 結晶の熱膨張率の違いによって冷却中に発生するものと考えられる.

#### 4. 6 径方向組成分布

大口径結晶を製造するためには, 成長軸方向の組成均一性だけでなく, 径方向の組成均一性も重要である. 図 13 に第 2 回目の育成結晶[22]における 7.5 mm 成長位置での径方向組成分布を, 同様な加熱条件で地上で育成した場合の 7 mm 成長位置での径方向組成分布と比較して示す. 宇宙育成の方は測定によるバラツキはあるものの,  $\pm 0.2$  at%以内の変動に納まっている. 一方, 地上育成の方は中心部で Ge 濃度が 1 at%程度増加している. 宇宙育成の方が, 径方向の組成均一性に優れていることが分る. これは融液(メルト)内の対流が抑制された効果である. 対流抑制による径方向組成均一性向上も TLZ 法応用上重要な発見である.

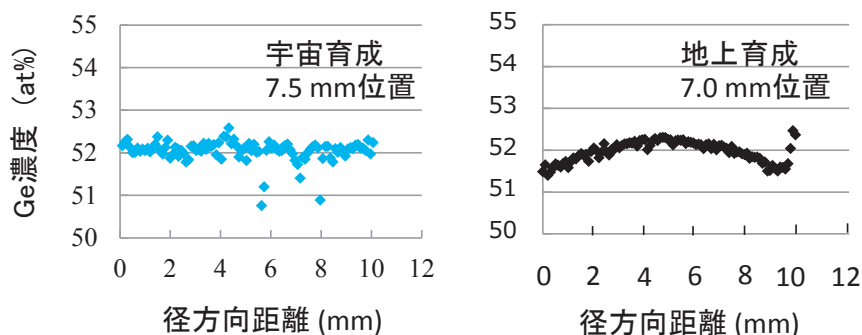


図 13. 径方向 Ge 濃度分布の宇宙育成と地上育成の場合の比較

#### 4.7 温度勾配の効果

第4回目の実験では第1~3回目の実験に比べて2倍の温度勾配の下で結晶成長実験を行った[19]. TLZ法一次元モデル式(3)によれば, 温度勾配が2倍になると成長速度も2倍になる. この関係が成立することは, 図7に示されているように, 温度勾配を2倍にした時, ヒータ移動速度を2倍にすることによってほぼ同じ軸方向の組成分布が実現することからも明らかである. 地上では検証出来なかった大口径でのTLZ法一次元モデル式の妥当性が示されたと言える.

以上, 結晶成長速度の2倍に応じて試料とヒータの相対位置変化速度を2倍にすることによって組成分布に及ぼす温度勾配の影響が無いようにすることが出来たが, 結晶性には大きな影響を及ぼすことが判明した. 図14に3回目の実験で得られた結晶と4回目の実験で得られた結晶の方位解析結果を示す[19]. 方位解析はEBSD (Electron Backscatter Diffraction)により行った. 方位解析精度は $\pm 2^\circ$ である. 方位は色の変化によって示されているが, 図の右わきの凡例に示されているように, 赤色部分が種結晶と同じ $\langle 100 \rangle$ 方位を示している. したがって, 種結晶の方位を引き継いだ単結晶領域は, 赤色で示された領域である. 温度勾配の低い第3回目育成結晶では, 長い所で約7mmの単結晶領域が得られている. 一方, 温度勾配の高い第4回目の育成結晶では, 中央部で約1mm成長した所から早くも多結晶化が始まっている. 多結晶化した結晶粒の組成分布解析やその他の解析から, 温度勾配が高くなると組成的過冷却が発生し易くなることが判明した. 組成的過冷却に関しては, 後の4.10項「組成的過冷却」で詳しく考察する.

#### 4.8 結晶成長速度(一次元モデル解析)

式(3)で与えられるTLZ法一次元モデルの妥当性は, 第4回目の実験により, 温度勾配が2倍になると成長速度が2倍になることにより示されたが, 第3回目の実験で観察された成長縞の間隔と温度変化の間隔からより定量的な議論が可能となる. 図15は, 中心軸 $r=0$ ( $r$ は径方向距離)および表面近く( $r=\pm 4$  mm)の軸方向結晶成長速度を算出したものである. 横軸は成長時間で示されているが, 成長開始から終了までの時間である. この図で特徴的なことは, 成長開始に通常の約4倍もの速い成長速度が認められる点である. 図10において, 種結晶との界面近くに白いモヤモヤとした不安定成長の領域が存在し, セル成長[21]した跡と考えられ, このような不安定成長は地上実験では観察されたことが

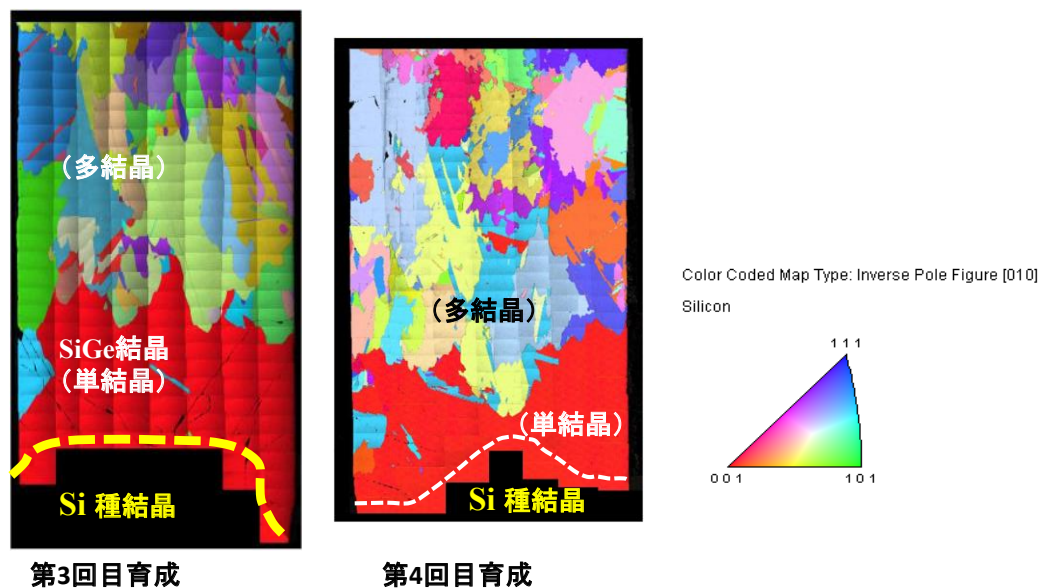


図14. 宇宙育成結晶の方位解析結果(左は#3結晶, 右は#4結晶)

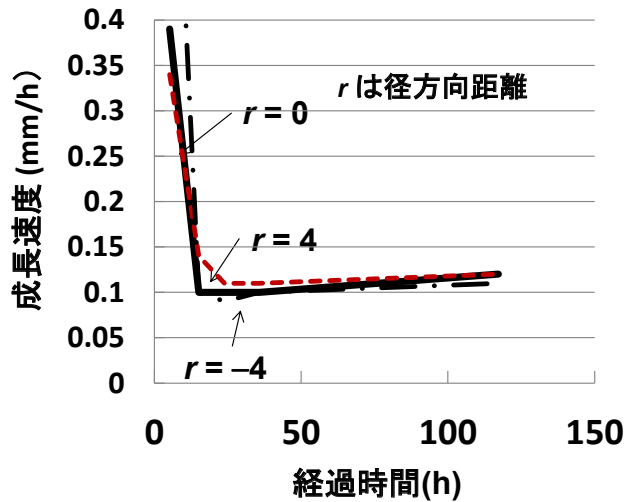


図 15. 軸方向成長速度(中心軸  $r=0$ , および周辺  $r=\pm 4$  mm で比較

なく、微小重力下実験特有の現象であるということを述べたが、この領域では成長速度が約 4 倍になっていることが判明した[20]。不安定成長はこのような速い成長速度の下で生じたと考えられる。この領域を除いてはほぼ一定な成長速度を示し、一次元モデル式(3)の計算結果と一致する。なお、後半で成長速度がやや増加しているが、これはヒータ温度の降下速度を速めたためである。また、この図から、中心軸  $r=0$  と結晶周囲  $r=\pm 4$  mm とで成長速度に大きな差がなく、一次元成長に近いことも認められる。この点に関しては、後の二次元モデル式の項で詳しく論じる。

もう一つ大切な点は、結晶成長初期の不安定成長領域においても組成変動は 0.2 at%以内でかつ単結晶が成長している点である(図 14 参照)。速い成長速度の下でも均一組成単結晶が得られた点は魅力的である。何故なら、SiGe バルク単結晶を実用化するためには、生産性も重要になってくるからである。微小重力下でのみ観察される上記のような速い成長の原因究明とベンチマークとなり得るより高品質な SiGe 単結晶製造を狙いとして、平成 28 年度きぼう利用フィジビリティスタディテーマに応募し、採択されている。

#### 4.9 結晶成長速度(二次元モデル解析)

図 16 に成長縞のプロットから得られた結晶右半分の界面位置  $f(r, Z)$  を示す。この  $f(r, Z)$  を  $r$  で偏微分すれば、 $\partial f / \partial r$  を計算することができる。その一例を図 17 に示す。径方向温度勾配は以下のようにして求めた。まず、それぞれの成長縞上の組成を測定する(図 18 参照)。組成は固相線温度を反映していることから、成長縞上での温度分布に変換できる。成長縞上での Ge 濃度差は最大でも 0.2 at%程度であり、温度換算では  $1^{\circ}\text{C}$  程度であるため、成長縞(ストリーション)上はほとんど等温度とみなせることが判明した。図 19 は、組成差を考慮して、等温度境界線を描いたものである。成長縞上は同一時刻にあることから成長縞上の 2 点の温度  $T_1, T_2$  と、径方向温度勾配との関係が(5)式のように定まる。

$$T_2 - T_1 = \frac{\partial T}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial T}{\partial r} \Delta r \quad (5)$$

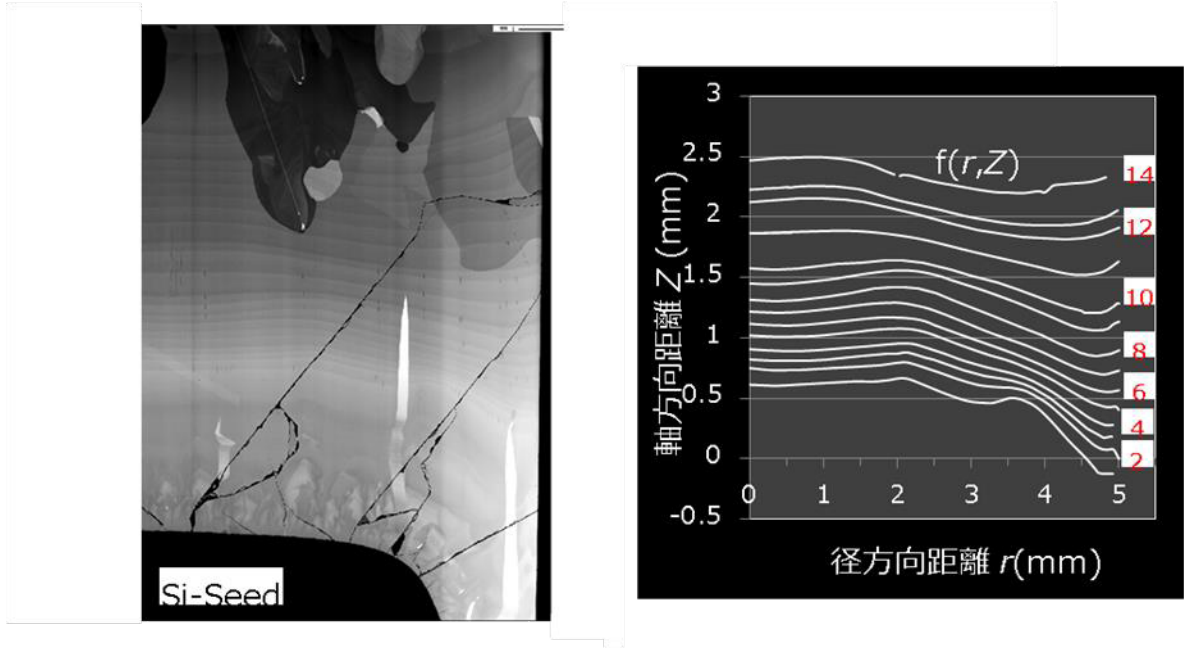


図 16. 成長縞とそのプロット(#3 結晶の右半分)

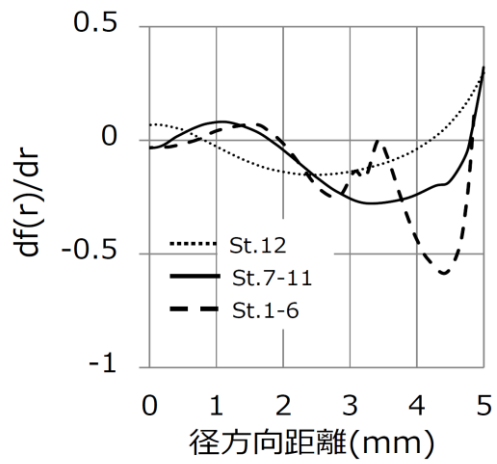


図 17. 成長界面の傾き  $df/\partial r$

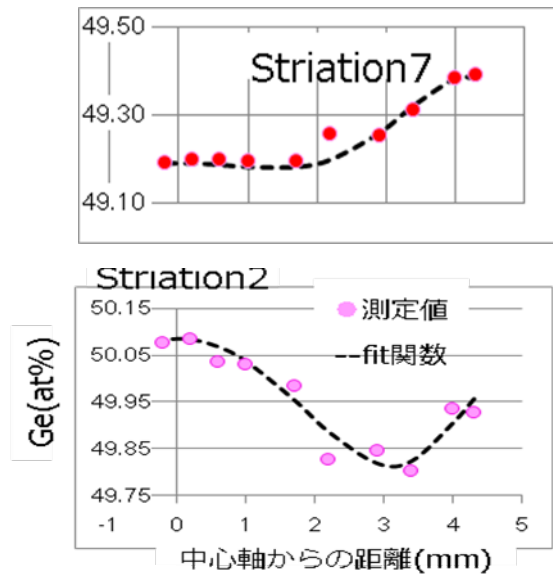


図 18. 成長縞上の組成分布測定例

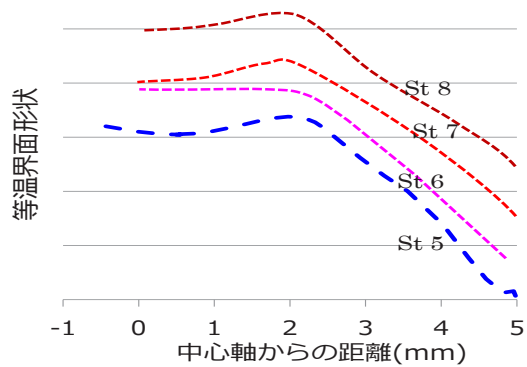


図 19. 等温界面形状



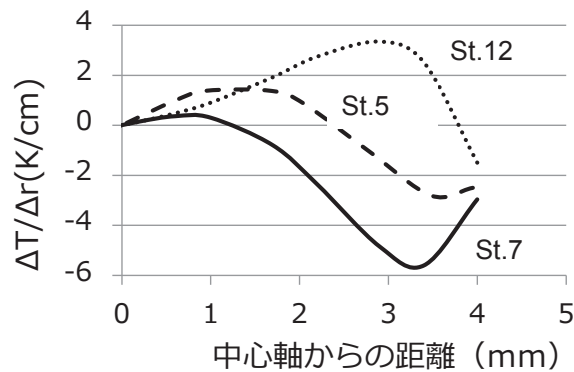


図 20. ストリーション上の温度(組成)変化から求めた径方向温度勾配

等温度線上では  $T_1 = T_2$  の関係から、 $\frac{\partial T}{\partial z} \Delta z = -\frac{\partial T}{\partial r} \Delta r$  が成立する。軸方向温度勾配は径方向依存性が微小と仮定して界面形状から  $\Delta z$  と  $\Delta r$  を測定して式に代入すれば、 $\partial T / \partial r$  が求められる。このようにして求めた  $\partial T / \partial r$  ( $0 < r < 4$  mm) を図 20 に示す。

界面形状の変化率  $\frac{\partial f}{\partial r}$  と径方向温度勾配  $\frac{\partial T}{\partial r}$  が求めたので、二次元性指標  $\frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r}$  が計算できる。計算結果を図 21 に示す。この二次元性指標と軸方向成長速度を組み合わせたのが、TLZ 法二次元モデル式(4)である。各ストリーションについて計算することができ、実験と二次元モデル式との定量的な比較が可能になった。図 22 と図 23 にその一例を示す。特徴的な点は、成長距離 2.3 mm では二次元モデル式は実験と良く合っているが、成長距離 3.3 mm では大きくずれていることである。この理由は以下のように考えられる。結晶成長の初期は種結晶から溶け出した Si が成長界面近傍に分布しているので、軸方向および径方向ともに溶質濃度飽和という二次元 TLZ 法モデル式的前提条件が成立している。結晶成長が進につれて偏析により成長界面で排出された Ge は、拡散により軸方向および径方向へ輸送されるが、前方の原料側へ輸送された Ge は Si 原料を溶かし再び飽和になるが、径方向へ輸送された Ge は端はルツボ壁であり、Ge の濃度を薄めて飽和とする Si 原料がない。そのため、径方向には溶質濃度飽和という前提が崩れる。これが、成長が進につれて二次元モデル式が成立しなくなる理由であると考えられるが、さらに検討を進めたい。なお、第 4 回目の実験で温度勾配を 2 倍にした結晶成長実験を行った結果、固液界面形状は温度勾配が低い場合とほとんど変化がなかった。このことから、二

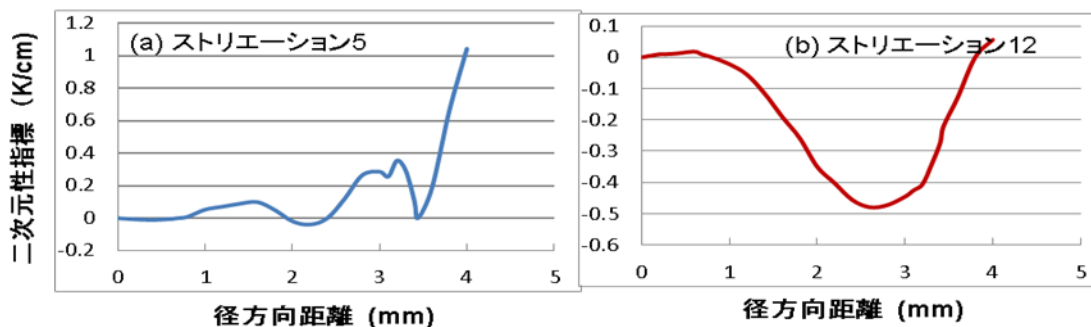


図 21. 二次元性指標の計算例 ストリーション 5 上(a)およびストリーション 12 上(b)

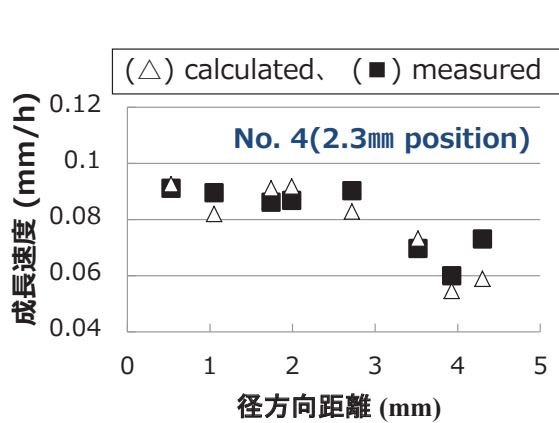


図 22. 2.3 mm 成長位置での実験値と計算値の比較

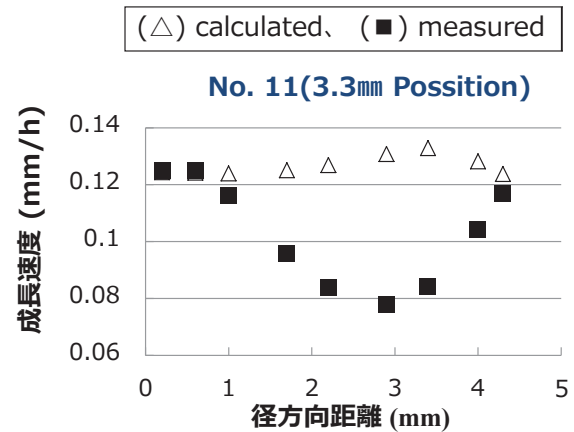


図 23. 3.3 mm 成長位置での実験値と計算値の比較

次元性指標は、軸方向温度勾配に比例して変化することが明らかになった。つまり、軸方向温度勾配を2倍にすると、径方向温度勾配も2倍になる傾向にあると言える。今回は、右半分の成長縞の解析結果を記述したが、左半分も同様に解析した。図10から分かるように、種結晶の右側は融液の潜り込みが大きい。その影響と思われるが、成長縞は左右対称ではなく、左の方がより平坦性が高い。実験で得られた成長速度と二次元モデル式での計算値の比較を行ったところ、右半分と同じ傾向を示した。すなわち、結晶成長が進む程、実験値と二次元モデル式の計算値とのずれが大きくなった。

成長縞(ストリーション)上の組成分布測定の結果、成長縞上では $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度で同一温度になっていることが判明したが、この事実は径方向組成均一性達成の観点から重要である。なぜならば、成長界面形状の湾曲度に関わらず、もし中心軸の組成が一定ならば、界面温度一定条件下では径方向の組成も一定になるからである。大口径均一組成のSiGe結晶製造に役立つ有益な知見である。

図15で示したように、一次元モデルの成長速度が結晶成長終了まで成立することから、TLZ法における結晶成長速度は、一次元モデルでほぼ記述できることが判明した。ただし、一次元モデルでは成長界面は平坦としてしか扱えない。成長界面の湾曲度を考慮すれば、直径1mm程度の細い結晶の集合体として軸方向成長のみを取り扱い、径方向へは種結晶と成長結晶の界面形状に合わせて細い結晶の成長開始位置を変化させて並べた一次元モデルの束として扱うのが最も適切であると考えられる。

上述したように、実験結果を基にメルト中の径方向温度勾配を正確に見積り、径方向成長速度を算出したのは世界初である。また、界面上の組成分布測定を通して、径方向の組成均一性に関する知見が得られたことは、大型結晶製造の実用化の観点から非常に有益である。

#### 4.10 組成的過冷却

##### (a) 温度勾配と組成的過冷却

TLZ法ではほぼ飽和濃度の溶液からの成長であり、成長速度は(3)式のように定まる。一方、組成的過冷却防止の指標とされているTillerらの式(6)は次の通りである[2]。

$$\frac{G}{R} \geq \frac{m(1-k_0)C_0}{Dk_0} \quad (6)$$

この式を成長界面で成立する  $C_L = C_0/k_0$ ,  $C_S = C_0$  を用いて整理し直すと(7)式ようになる。ここで,  $G$  は温度勾配,  $m$  は液相線の傾きの逆数で  $k_0$  は平衡偏析係数である。

$$\frac{G}{R} \geq \frac{m(C_L - C_S)}{D} \quad (7)$$

(7)式の逆数を取り両辺に  $G$  を掛けると, (8)式ようになり, 組成的過冷却防止に必要な速度  $R$  の関係式が得られる。

$$R \leq \frac{D}{m(C_L - C_S)} G \quad (8)$$

(8)式の速度と(3)式を比較すると, (3)式の成長速度は温度勾配と等号の関係にあり, 組成的過冷却を引き起こすか否かの境界となっていることが分る。なお, (8)式と(3)式で異なる表記が使われており, 両式の比較では  $\partial T/\partial z$  と  $G$  および  $\partial C/\partial T$  と  $-m$  を同一とみなして比較する必要がある。

以上述べたように, TLZ 法では成長速度は必然的に組成的過冷却との境界の速度になるため, 融液中の Ge 濃度のわずかなずれが組成的過冷却の原因となる。そこで, 温度勾配と融液中の Ge 濃度の関係を考察する。TLZ 法では成長界面および溶解界面では溶質濃度は飽和であり, 対流が存在しない拡散による物質輸送の場合, 成長界面前方融液中の Ge 濃度は(9)式のように与えられる。

$$C_L(R) = \frac{C_L(T) - C_L(T + \Delta T) \exp\left(-\frac{R}{D} Z\right) + \frac{C_L(T + \Delta T) - C_L(T) \exp\left(-\frac{R}{D} d\right)}{1 - \exp\left(-\frac{R}{D} d\right)}}{1 - \exp\left(-\frac{R}{D} d\right)} \quad (9)$$

ここで,  $d$  はメルトゾーンの幅,  $T$  は成長界面の温度,  $\Delta T$  は成長界面と溶解界面との温度差,  $Z$  は成長界面からの距離である。温度勾配により成長速度  $R$  が変化するので, Ge 濃度分布も変化することになる。図 24 に温度勾配の高い場合と低い場合の, 融液中の Ge 濃度分布を比較して示す。温度勾配が高い場合,  $R$  が大きくなるので,  $\exp(-RZ/D)$  の湾曲度が大きくなり, 直線からのずれが大きくなる。図 2 の相図からも明らかのように, Ge 濃度が低くなるとその組成での平衡温度が高くなるので, 組成的過冷却を生じる。Ge 濃度変化の  $\pm 10\%$  程度に対して液相線は直線とみなせるので, 直線から低濃度側へのずれの大きな高温勾配程, 組成的過冷却度が大きくなる。以上が, TLZ 法において, 高温勾配で組成的過冷却が生じやすくなる理由である [19]。引上げ法やブリッジマン法などその他の結晶成長の場合, TLZ 法とは異なり, 結晶成長速度が温度勾配と独立して自由に決められるので, (6)式が示す通り高温勾配で成長速度が小さい程, 組成的過冷却は生じ難くなる。TLZ 法特有の高温勾配での組成的過冷却の生じ易さは, 実は一次元モデル式(3)で示された成長速度が温度勾配に比例して定まる点から生じていると言える。TLZ 法固有の組成的過冷却状態は, 従来の結晶成長方法では観測されなかった学術的インパクトのある

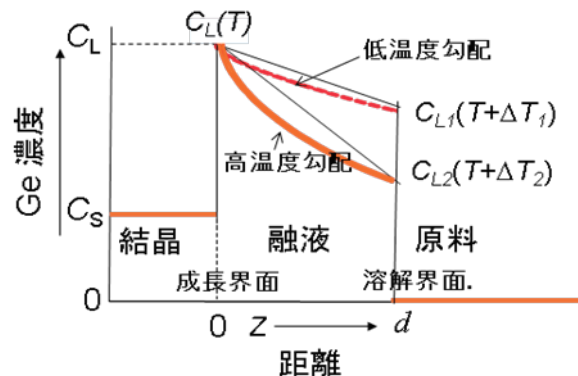


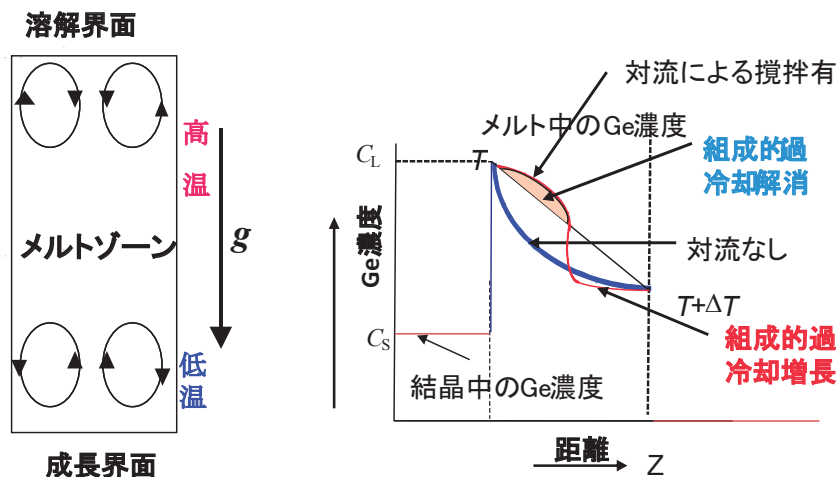
図 24. 融液中の温度勾配と Ge 濃度分布の関係

発見である。

### (b) 対流と組成的過冷却

宇宙実験を通して対流と組成的過冷却の関係把握にも進歩があった。上述したように、成長界面で Ge 濃度が直線から低濃度側にずれると組成的過冷却が生じる。メルトゾーン中の対流は、図 25(a)に示すように、成長界面と溶解界面で渦を生じさせることが数値解析の結果、明らかになっている。このようなメルト中の対流は、図 25(b)に示すように、溶解界面に高濃度 Si を輸送してくるので、溶解界面で組成的過冷却が生じ易くなり、組成的過冷却が生じると原料が供給されなくなり、結晶成長が止まる(図 8 参照)。このように考えると、地上で直径 10 mm を超える径で長尺の結晶が得られないのは、メルト中の対流が引き起こす組成的過冷却のせいであることが理解できる。一方、図 25(b)から言えることは、メルト内に対流がある場合、Ge が対流により成長界面へ輸送されて来るため、中心軸近くでは Ge 濃度が上昇し(すなわち平衡温度が低下し)、組成的過冷却は起き難くなる。成長界面で組成的過冷却が防止されることは、単結晶成長に有利である。地上育成結晶においては、時々成長距離の約 10 mm 全体が単結晶になっている場合があった。宇宙実験では 4 回ともに単結晶長さで 10 mm を超えることはなかったので、単結晶化という点からは、地上育成が有利である。この発見は貴重である。今後 SiGe 単結晶を実用化していく場合に、地上での製造に希望をもたらしてくれるものと言えよう。

ただし、注意しなければならないことは、図 12 に示したように、対流によって運ばれてくる Ge は界面形状を湾曲させる弊害も併せ持つことである。従って、対流をある程度抑制することが重要になると考えられる。現段階では、対流をある程度抑制するという、定性的な表現しか出来ないが、今後磁場を印加したりして対流の抑制レベルを変化させた実験を行い、抑制レベルが定量的に定義できるようになれば、SiGe バルク単結晶の製造が進み、実用化の域に近づくとと思われる。今後の研究の進展に期待したい。



(a) メルトゾーン内対流パターン (b) Ge濃度分布

図 25. メルトゾーン内対流パターン(a)と溶質(Ge)濃度分布(b)

### 4.11 サクセスクライテリアと達成状況

表 5 にサクセスクライテリアと宇宙実験成果、および達成状況をまとめて示す。TLZ 法二次元モデル式における二次元性指標を実験データから算出し、結晶成長速度の実験値と二次元モデル式での計



算値との定量的な比較を行うことができたので、Full Success を達成したと判断する。さらに、宇宙実験を通して、サクセスクライテリアに記載した項目以外に多くの有益な成果が得られた。その点を考慮すると、今回の宇宙実験は Extra Success の部類に入ると判断している。

表 5. サクセスクライテリアと達成状況

サクセスレベル	クライテリア (計画書最終版)	宇宙実験成果	達成度
Minimum Success	1本の温度調整実験と、温度勾配あるいは成長距離を変えて実験した2本のHicariカートリッジ(合計3カートリッジ)を所定の実験条件で実施し、TLZ法二次元モデル式の二次元性指標について温度勾配あるいは成長距離依存性が検証出来ること。	3本の実験が目標の実験条件で実施できた。また、TLZ法二次元モデル式の二次元性指標について、成長距離依存性が検証出来た。	○
Full Success	上記に加えて、温度勾配か成長距離を変えて残り1本のHicariカートリッジで結晶成長実験を実施し、TLZ法二次元モデル式における二次元性指標の温度勾配依存性と成長距離依存性の両方の算出により、実験と二次元モデル式との定量的な比較が出来ること。	上記に加えて、温度勾配を変えて残り1本のHicariカートリッジで結晶成長実験が実施できた。TLZ法二次元モデル式における二次元性指標を算出し、成長速度に関し実験値と二次元モデル式計算値との定量的な比較を行うことができた。	○
Extra Success	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・組成変化を利用した成長界面のマーキングに世界で初めて成功した。</li> <li>・地上実験では観測されない微小重力下特有の、結晶成長初期の約4倍の成長速度を観測し、高速度でのSiGe結晶製造の手掛かりを得た。</li> <li>・成長界面組成の測定により、径方向組成均一性向上の指針を得て、大口径均一組成達成条件を明らかにすることができた。</li> <li>・高温勾配下で組成的過冷却が生じやすくなる現象は、従来の常識では考え難い現象であるが、TLZ法結晶育成における普遍性を宇宙実験結果の解析から明らかにすることができた。</li> </ul>	◎

#### 4.12 地上製造への応用

##### (a) SiGe 結晶

宇宙実験成果の地上製造への応用は、宇宙実験成果を役立てる点において非常に重要である。その観点から、地上製造への応用にも力を注いでいる。まず、SiGe結晶に関しての進捗状況を報告する。SiGe結晶は既述したように、Siに代わる高速電子デバイス用基板として、あるいは800°C近傍の高温領域での熱電変換素子用材料として、さらには赤外線領域のレンズや窓材として有望である。本研究

では、主に高速電子デバイス用基板への応用と赤外線領域のレンズや窓材としての応用を念頭に、SiGe バルク結晶の製造を行っており、現在も継続中である。

### (i) 結晶の大口径化

電子デバイスの製造工程で使われる結晶基板は現在 2 インチ(約 50 mm)が最小の大きさである。SiGe 結晶基板を製造工程に乗せるために、2 インチ径への結晶の大型化を試みた。一気に直径 50 mm まで大口径化するのは無理なので、まず直径 30 mm 結晶を育成し(図 26a)、それが成功した後に直径 50 mm の結晶育成に着手した。現在は、直径 50 mm で、単結晶成長距離約 5 mm の製造に成功している[23]。宇宙実験により、対流は完全に抑制できなくてもある程度抑制することが重要であることが判明したが、まだその臨界値を把握するまでには至っていない。対流を抑制するという観点から、温度勾配を低くし、熱膨張によるメルトの比重差を小さくして対流抑制を試みた。実験での温度勾配は約 5°C/cm であった。得られた結晶の外観を図 26(b)に示す。結晶の軸方向組成分布を図 27に、また径方向組成分布を図 28 に示す。径方向に関しては、図 29(b)に示すように、直交する 2 方向について測定している。Ge 濃度分布は  $50 \pm 1\text{at}\%$  と、軸方向、径方向ともに均一性は良好である。直径 50 mm にわたり、1at%以下の組成変動が達成出来たことはこれまでなかった。図 29(a)に面内の結晶方位を示す。直径 50 mm の全面が赤色を呈しているが、これは結晶方位が種結晶と同じ $\langle 100 \rangle$ であることを示しており、単結晶であることが分る。なお、方位観察においては、100 倍以下の低倍率での観察が不可能なため、写真をつなぎ合わせており、エッジ効果のため写真の縁が少し黒ずんで格子が並んだように見えるが、これは結晶方位のずれやモザイク構造の存在を示すものではない。

地上での SiGe 製造の課題は、長尺化である。今回、直径 50 mm の単結晶育成には成功したが、成長距離が図 26(b)からも判るように 5 mm 程度と短い。この成長距離の短さは、「4. 4項 成長距離」で触れたように、融液中の対流が原因である。対流を抑制するために、温度勾配 5°C/cm を更に低くするのは生産的でないので、磁場を印加して融液中の対流を抑制してみたいと考えている。後述するように、InGaAs 混晶育成の場合は薄い板状にしてメルト中の対流抑制に成功しているが、SiGe 結晶は実用化されれば InGaAs よりはるかに大量に使われるので、板状結晶育成は実用的ではないと判断している。

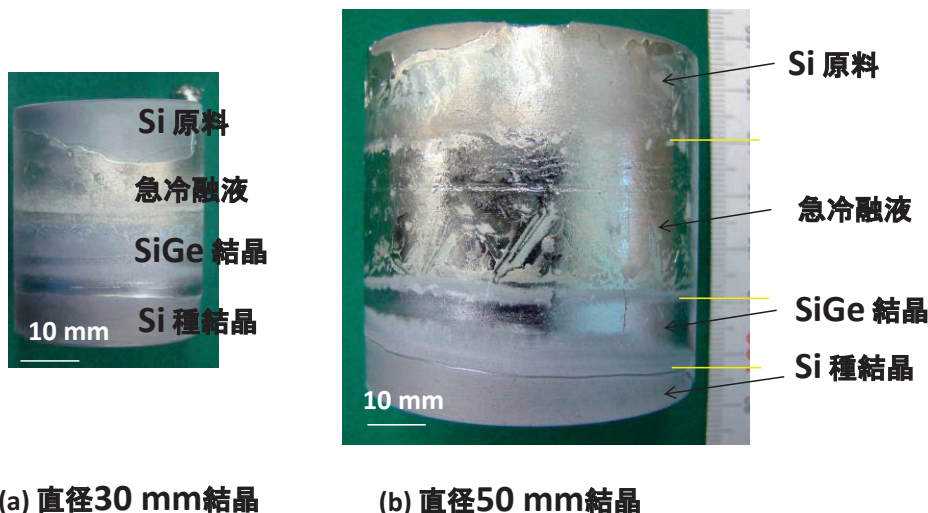


図 26. 地上製造直径 30 mm 結晶(a)と直径 50 mm 結晶(b)

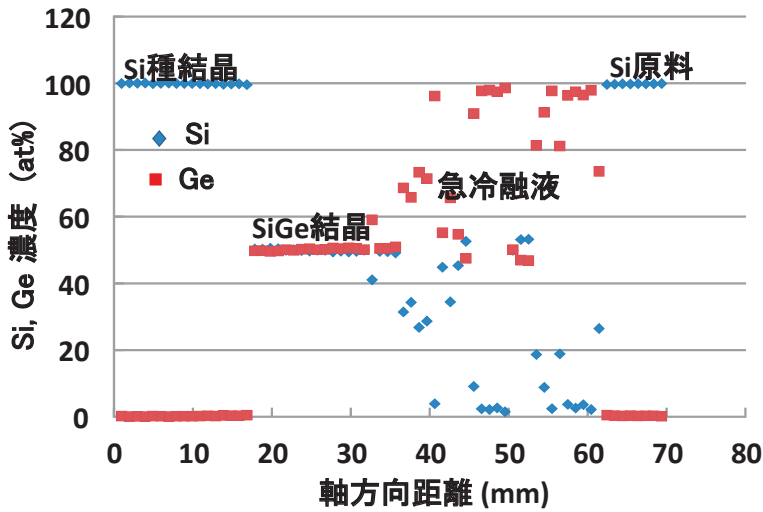


図 27. 直径 50 mm 結晶の軸方向組成分布

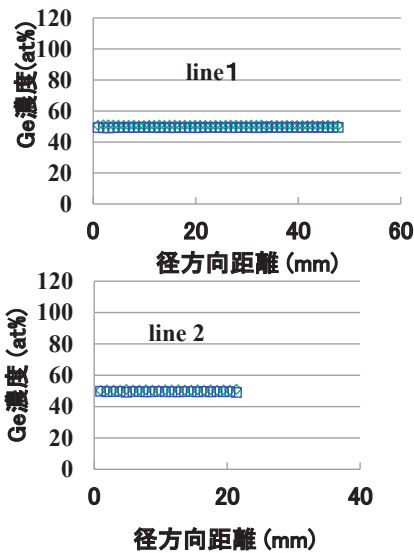
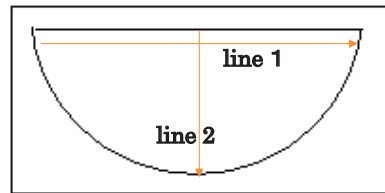


図 28. 半円板試料の Ge 濃度分布(測定方向は図 29(b)に示す通り)



(a) 結晶方位解析結果



(b) 分析方向

図 29. 半円板試料の結晶方位解析結果(a)と組成分布測定方向(b)

(ii) 結晶の電気的特性

基板として応用するためには、結晶の電気的特性の把握が重要である。地上育成直径 30 mm、および 50 mm 結晶について、Hall 測定を実施したところ、キャリアの型は p 型で  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  程度不純物がドーピングされていることが判明した。これは、BN ルツボを使用したため、ホウ素(B)がルツボ壁から混入するためと判断した。ホウ素のルツボ壁からの混入を避けるために、石英ルツボでの結晶成長実験に切り替えたところ、キャリア濃度が  $10^{14} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$  に制御された、高品質  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  混晶が製造できた。産業技術総合研究所(AIST)との共同研究で、種々の組成とホウ素ドーピング量の  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  混晶について Hall 測定を行った結果を図 30 に示す[24]。図中●と○が今回の測定結果で、図では 1960 年代に測定された SiGe 結晶の電気的特性(赤○)と比較している。図にはキャリア濃度が示されていないが、同程度のキャリア濃度で比較すると、TLZ 法育成結晶の方が 2 倍以上の高移動度を有していることが判った。長い

間, Busch と Vogt のデータ[1]が SiGe 結晶移動度の標準値とみなされてきたが, 今回の結果は従来のデータ特に合金散乱(図中の実線 Alloy に相当)に関して, 再考を促すものである. また, TLZ 法育成 SiGe 結晶の高品質性を示すものでもある. TLZ 法育成結晶では, キャリアの散乱要因となる結晶欠陥が減少していることを示しているからである. Hall 測定で求めたキャリア濃度は, SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry)によって測定したホウ素の含有量の約半分の値で, ドープされた不純物全部がイオン化しているのではなく, 約半数がイオン化していることが判明した.

(iii) 転位密度と結晶性

Si 基板は現在, 無転位の結晶が使われている. Si に代わる基板として使われるためには, 結晶の転位密度も重要な指標となる. SiGe 結晶育成には Si の種結晶を使用しているため, 成長結晶と種結晶の格子不整合が問題となる. 格子不整合による転位の発生状況を調べるため, 種結晶と成長結晶の境界領域の TEM 観察を行った. 結果を図 31 に示す. 成長結晶と種結晶の界面ではやはり多くの転位が発生していた. 入射電子ビームの方位を変えた観測から, 転位の多くは 60° 転位であることが判明した. TEM 観察では観察できる範囲が狭いので, 厳密な転位密度測定は困難であるが, 転位密度は  $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  と推定された. 転位密度はまた, 成長するにつれて減少し, 約 4 mm 成長した所では TEM の視野内に 1 個ないしは 0 個しか観察されなくなった(図 32). したがって, この領域では転位密度は  $10^5 \text{ cm}^{-2}$  程度に減少したと推定される. この転位密度は, Si 基板上に成膜された高品質 SiGe 薄膜の転位密度  $10^7 \text{ cm}^{-2}$  と比較して, 2 桁程度小さな値であるが, Si と比較すればまだまだ大きな値である.

結晶性の評価は, X 線回折スペクトルのピークの鋭さからも評価できる. ピークが鋭い程結晶の方

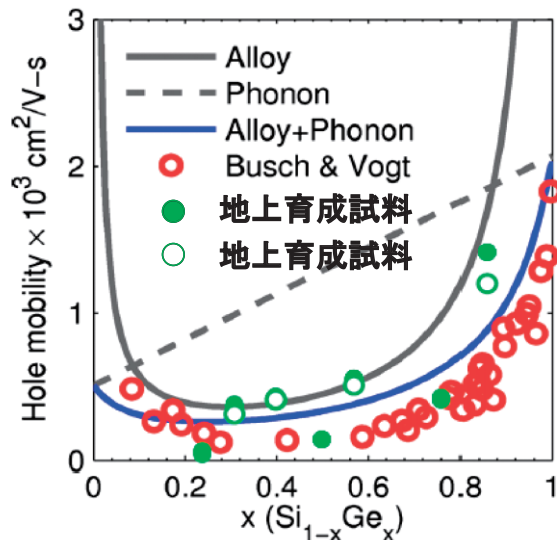


図 30. 正孔移動度の Busch らのデータとの比較

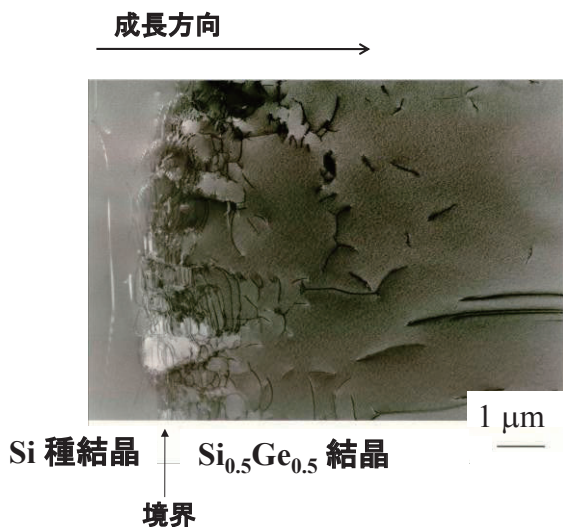


図 31. Si 種結晶界面近傍 TEM 像



図 32. 4 mm 成長箇所 TEM 像



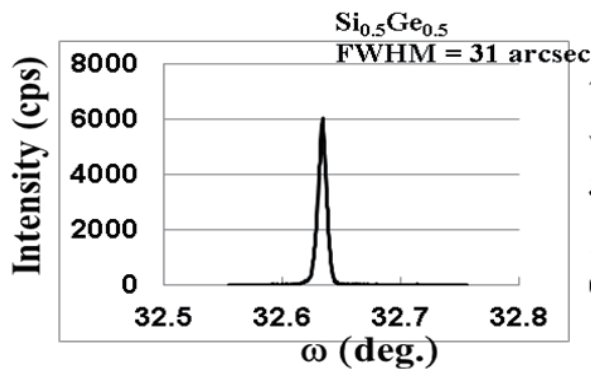


図 33.  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  結晶 004 回折スペクトル  
X 線ロッキングカーブ

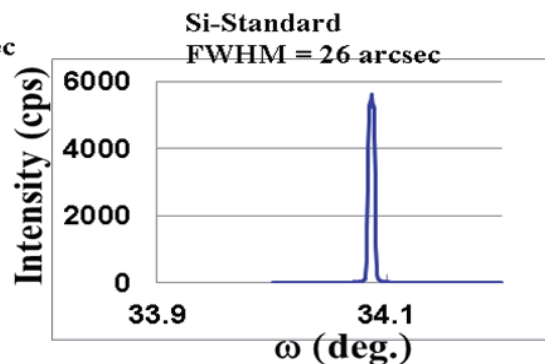


図 34. 標準 Si 結晶 004 回折スペクトル  
X 線ロッキングカーブ

位が揃っており、方位に傾きがあるとピークはブロードになる。004 回折スペクトルのロッキングカーブ測定結果を図 33 に示す。スペクトルの半値幅(FWHM)は 31 arcsec で、標準 Si の半値幅 26 arcsec (図 34)と比較しても遜色のない小さな値を示した。このことから判断すると、SiGe 結晶の方位は良く揃っており、モザイク的な小傾角粒界は非常に少ないと思われる。

#### (iv) 高純度化

SiGe 結晶を赤外線領域で使用するためには、赤外線に対して透過する必要がある。不純物が結晶中に存在すると、不純物吸収を起こすので、赤外線領域の用途には、半導体の基板としてよりも更に高純度であることが要求される。高純度化のためには、まず原料の高純度性が求められる。また、結晶成長に使用するルツボからの不純物の混入を避けなければならない。Si 原料として電気抵抗率  $2\text{M}\Omega\text{m}$  以上の高純度品を用いるとともに Ge 原料も 6N 以上の高純度品を用い、高純度カーボン材のルツボを使用して結晶成長実験を行ったところ、赤外線領域での透過特性測定可能な結晶が得られた。透過特性の一例を図 35 に示す。

反射防止膜はコートしていないので透過率は低い、透過率が平坦な  $1500\sim 3500\text{ cm}^{-1}$  の波数域では純 Si と同程度の透過率である。場所による透過率のバラツキが観測され、まだ結晶内の不純物濃度が一定でないことを表している。不純物濃度も含めた意味での組成均一性の向上が今後の課題である。

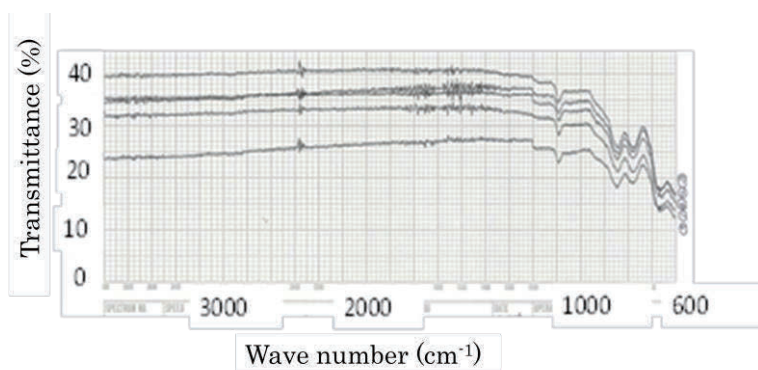


図 35.  $\text{Si}_{0.35}\text{Ge}_{0.65}$  結晶の赤外線透過特性

#### (b) InGaAs 結晶

$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  を基板として使用すれば、キャリアを深い量子井戸に閉じ込めておくことが可能になり、高温でも安定に発振する波長  $1.3\mu\text{m}$  帯の半導体レーザの製造が可能なのは、20 年以上前から知られていた[25]。しかしながら、高品質なバルク  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  基板の製造が困難なため、光通信に使える高性能なレーザはまだ作製されていなかった。そのような理由から本研究で、最初に研究対象としたのは

均一組成  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  バルク結晶であった。

(i) 板状結晶の育成

TLZ 法の考案により、均一組成バルク混晶の育成が可能になった。地上で対流を抑制するために、厚さを 2 mm 程度に制限した板状単結晶の育成を行った。厚さを制限することにより、融液の粘性を利用した対流抑制が可能となるためである。一方で、半導体レーザは 0.2 mm 角程度と非常に小さいので、板状結晶育成でも実用化の際の供給量に応えられると判断した。

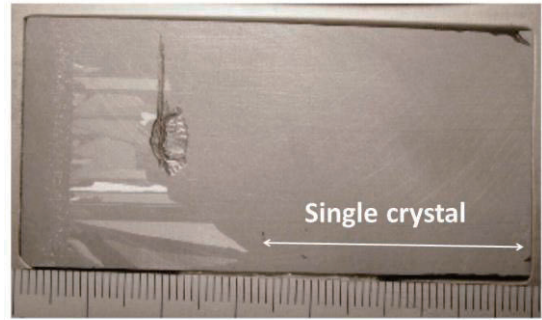


図 36. 幅 30 mm の板状  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  結晶

最初は、幅 10 mm の板状結晶育成から出発して、幅 30 mm の  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  単結晶が再現性良く育成できるようになった。製造した 30 mm × 50 mm の板状結晶の外観を図 36 に示す。30 mm × 30 mm 以上の領域で単結晶が得られている。この結晶の軸方向 In 濃度分布を図 37 に示す。中心軸と、中心から左右 10 mm 離れた周辺軸方向で比較して示し

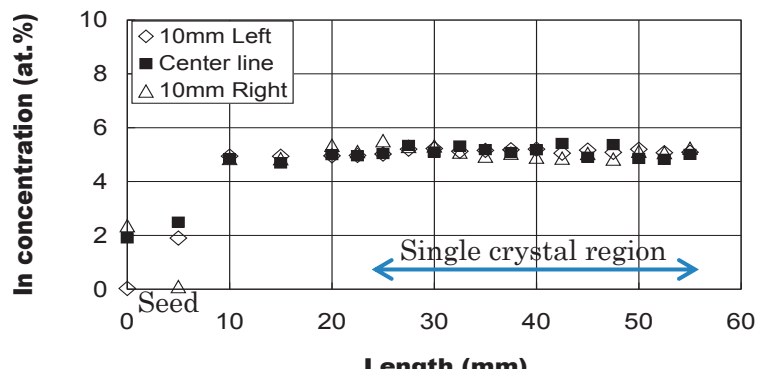


図 37. 幅 30 mm 板状結晶の軸方向 In 濃度分布

てある。In 濃度の変化は、±0.2 at%以内で軸方向の組成均一性は良好である。また、周辺軸方向の組成分布から判断すると、径方向の組成均一性も保たれている。現在は、図 38 に示すように、50 mm 幅の板状  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  単結晶育成に成功している。なお、板状結晶の製造は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて、フルウチ化学(株)と共同で行ったものである。

(ii) 半導体レーザの試作

板状  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  単結晶が製造できるようになったので、 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  結晶を基板とする半導体レーザの試作を NTT フォトニクス研究所と共同で行った。本試作も新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託研究で行ったものである。当初は  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  基板を使用する予定であったが、NTT 研究所の薄膜製造技術が進化したため、 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  結晶が基板として使えるようになった。 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  結晶の方が  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  結晶よりも製造が容易である。半導体レーザの構造を図 39 に示す[26]。リッジ型構造をしている。図に示すように、リッジの幅を 1.7 μm の細さまで加工することによ

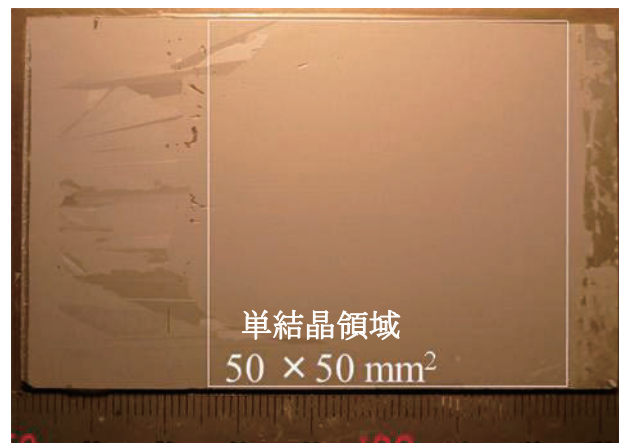


図 38. 幅 50 mm の板状  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  結晶

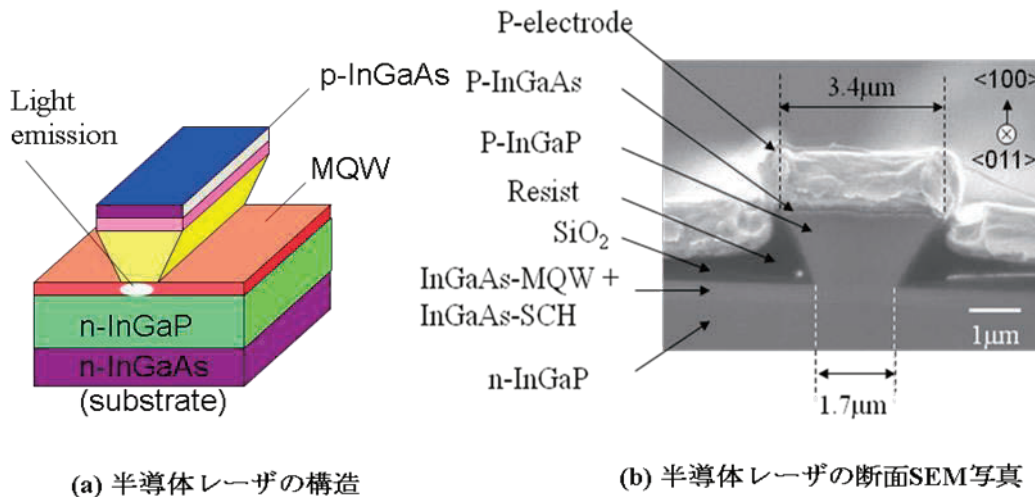


図 39. 試作した半導体レーザの構造(a)と断面 SEM 写真(b)

て、単一モードで発振するようになった。発振スペクトルを図 40 に示す。発振波長は光通信で主に近距離のメトロネットワークに使用される 1.3 μm 帯である。

このレーザの出力の温度依存性を図 41 に示す。150°Cの高温でも閾値電流 60 mA 程度で出力が急速に立ち上がり連続発振(CW 発振)しており、目指していた出力の温度依存性の小さな半導体レーザが実現できた。このレーザを 10 Gbit/s で変調した場合の信号波形の重なり度を調べたところ、図 42 に示すように開口部のはっきりしたアイパターン (Eye Pattern) が得られた。開口部が広い程、信号波形は変形を受けず重なっていることを表しており、このような明瞭なアイパターンが得られたことから、試作した半導体レーザの変調特性は光通信に使用できる性能を有していることが判明した。アイパターンの明瞭性はビットエラーレートにも反映され、10 G bit/s 変調信号の 10 km および 20 km の長さの光ファイバ伝送時のビットエラーレートは、図 43 に示すように、受光強度 -19 dBm (0.013mW) でもエラーレートは 10<sup>-6</sup> 以下と小さかった。

以上のように、目指していた高温でも出力の低下の小さな 1.3 μm 帯高性能光通信用半導体レーザの試作に成功したが、まだ量産には至っていない。課題は In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 結晶

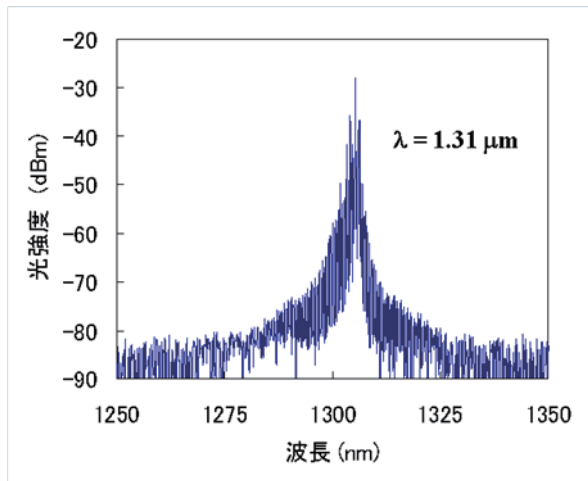


図 40. 試作したレーザの発振スペクトル

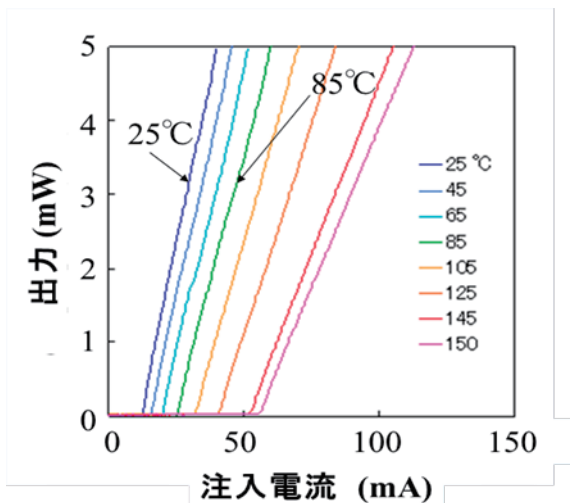


図 41. 出力特性 (温度をパラメータ)

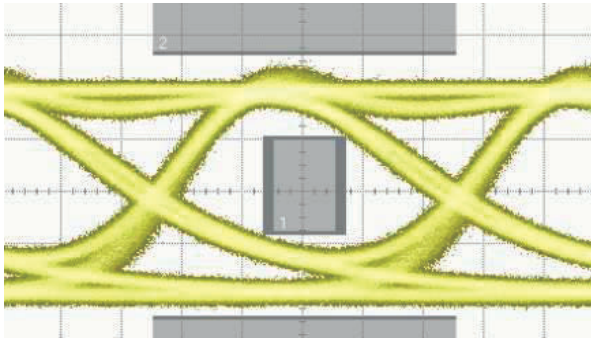


図 42. 伝送信号の Eye Pattern

基板の製造コストである。板状結晶ではやはり生産性に劣るので、Si のように大口径で長尺の結晶が再現性良く製造できるように、TLZ 法の改良と高度化を図る必要がある。

なお、「TLZ 法開発と均一組成バルク混晶育成への応用」に関し、2010 年に第 27 回日本結晶成長学会論文賞を受賞した。

## 5. 結言

ISS・きぼう利用ミッション「微小重力下における TLZ 法による均一組成 SiGe 結晶育成の研究 (Hicari)」により、以下の成果が得られた。

- (1) Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法という新しい混晶結晶成長方法を考案した。
- (2) 微小重力下実験により TLZ 法成長原理が確認でき、大口径・長尺の SiGe 結晶製造条件を把握することができた。
- (3) 1°Cのステップ状温度変化により 0.2 at%の組成変化を生じさせ、成長界面のマーキングに成功した。
- (4) 成長縞の間隔および成長縞上の組成測定により、軸方向成長速度に加え径方向温度勾配を正確に見積ることに成功し、二次元性指標の成長距離依存性を算出した。
- (5) TLZ 法二次元成長モデル式と実験値の定量的な比較を行い、二次元モデル式の検証を行った。成長距離 2.3 mm までは両者は良く合ったが、成長が進むにつれて乖離が大きくなった。
- (6) 対流抑制による成長界面の平坦化が確認でき、径方向均一組成達成条件を把握することができた。
- (7) 地上実験では観測されなかった、結晶成長初期の約 4 倍の高速成長という新しい事象を発見した。
- (8) TLZ 法における結晶成長時の組成的過冷却防止条件を明確にし、単結晶育成条件を明らかにした。
- (9) 地上実験との比較により、完全に対流ゼロの状態より少し対流のある方が単結晶成長に良いことが判明し、宇宙実験成果の地上製造への応用の途を拓いた。

## 参考文献

- [1] G. Busch and O. Vogt, *Helv. Phys. Acta*, **33** (1960) 437.
- [2] W. A. Tiller, K. A. Jackson, J. W. Rutter and B. Chalmers, *Acta Metall.*, **1** (1953) 428.

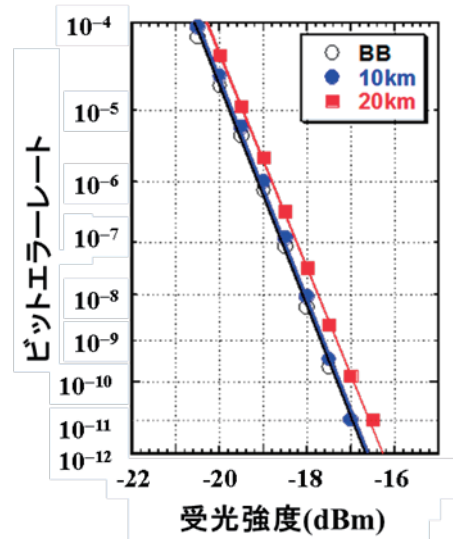


図 43. 受光強度とビットエラーレート



- [3] H. A. Chedzey and D. T. J. Hurl, *Nature*, **210** (1966) 933.
- [4] A. F. Witt, H. C. Gatos, M. Lichtensteiger, M. C. Lavine and . C. J. Herman, *J. Electrochem. Soc.*, **122** (1975) 276.
- [5] K. Kinoshita and T. Yamada, *J. Crystal Growth*, **147** (1995) 91.
- [6] S. Fujiwara, T. Araki, M. Tatsumi, M. Irikura, K. Matsumoto, S. Murai, and T. Shirakawa, *J. Crystal Growth*, **167** (1996) 357.
- [7] K. Kinoshita and T. Yamada, *J. Crystal Growth*, **99** (1990) 1276.
- [8] R. J. Naumann, *J. Crystal Growth*, **142** (1994) 253.
- [9] B. P. Matisak, A. X. Zhao, R. Narayanan and A. L. Fripp, *J. Crystal Growth*, **174** (1997) 90.
- [10] D. C. Gillies, S. L. Lehoczy, F. R. Szofran, D. A. Watring,, *J. Crystal Growth*, **174** (1997) 101.
- [11] K. Kinoshita, H. Kato, M. Iwai, T. Tsuru, Y. Muramatsu and S. Yoda, *J. Crystal Growth*, **225** (2001) 59.
- [12] K. Kinoshita, Y. Hanaue, H. Nakamura, S. Yoda, M. Iwai, T. Tsuru and Y. Muramatsu, *J. Crystal Growth*, **237–239** (2002) 1859.
- [13] H. Nakamura, Y. Hanaue, H. Kato, K. Kinoshita and S. Yoda, *J. Crystal Growth*, **258** (2003) 49.
- [14] H. Miyata, S. Adachi, Y. Ogata, T. Tsuru, Y. Muramatsu, K. Kinoshita, O. Odawara and S. Yoda, *J. Crystal Growth*, **303** (2007) 607.
- [15] C. D. Thurmond, *J. Phys. Chem.* **57** (1953) 827.
- [16] S. Adachi, K. Kinoshita, M. Takayanagi and H. Miyata: *J. Crystal Growth*, **334** (2011) 67.
- [17] K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, S. Adachi, H. Miyata, R. Tanaka, J. Yoshikawa, T. Kihara, H. Tomioka, H. Shibayama, Y. Kubota, Y. Warashina, Y. Sasaki, Y. Ishizuka, Y. Harada, S. Wada, C. Harada, T. Ito, M. Takayanagi and S. Yoda, *J. Crystal Growth*, **388** (2014) 12.
- [18] K. Abe, S. Sumioka, K. Sugioka, M. Kubo, T. Tsukada, K. Kinoshita, Y. Arai and Y. Inatomi, *J. Crystal Growth*, **402** (2014) 71.
- [19] K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, H. Miyata and R. Tanaka, *J. Crystal Growth*, **455** (2016) 49.
- [20] K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, H. Miyata, R. Tanaka, J. Yoshikawa, T. Kihara, H. Tomioka, H. Shibayama, Y. Kubota, Y. Warashina, Y. Ishizuka, Y. Harada, S. Wada, T. Ito, N. Nagai, K. Abe, S. Sumioka, M. Takayanagi, S. Yoda, *J. Crystal Growth*, **419** (2015) 47.
- [21] S. R. Coriell, G. B. McFadden, and R. F. Sekerka, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **15** (1985) 119.
- [22] K. Kinoshita, Y. Arai, T. Tsukada, Y. Inatomi, H. Miyata and R. Tanaka, *J. Crystal Growth*, **417** (2015) 31.
- [23] K. Kinoshita, Y. Arai, O. Nakatsuka, K. Taguchi, H. Tomioka, R. Tanaka and S. Yoda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** (2015) 04DH03.
- [24] T. Maeda, H. Hattori, W. H. Chang, Y. Arai, and K. Kinoshita, *Appl. Phys. Lett.*, **107** (2015) 152104.
- [25] H. Ishikawa, *Appl. Phys. Lett.*, **63** (1993) 712.
- [26] M. Arai, W. Kobayashi, T. Fujisawa, M. Yuda, T. Tadokoro, K. Kinoshita, S. Yoda and Y. Kondo, *Appl. Phys. Express*, **2** (2009) 022101.

テーマ名(略称) : 微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成の研究 (Hicari)

代表研究者(所属) : 木下恭一 (JSF)

### 1. 宇宙実験成果の論文発表

論文タイトル	掲載誌	巻・号・頁	年	著者	備考
1 Growth of a $\text{Si}_{10.5}\text{Ge}_{0.50}$ crystal by the traveling liquidus-zone (TLZ) method in microgravity	Journal of Crystal Growth (1.693) *( )内数値はimpact factor	Vol. 388, p. 12-16	2014	K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, S. Adachi, H. Miyata, R. Tanaka, J. Yoshikawa, T. Kihara, H. Tomioka, H. Shibayama, Y. Kubota, Y. Warashina, Y. Sasaki, Y. Ishizuka, Y. Harada, S. Wada, C. Harada, T. Ito, M. Takayanagi, S. Yoda	
2 Numerical simulations of SiGe crystal growth by the traveling liquidus-zone method in a microgravity environment.	Journal of Crystal Growth (1.693)	vol. 402, p. 71-77	2014	K. Abe, S. Sumioka, K.-I. Sugioka, M. Kubo, T. Tsukada, K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi	
3 Compositional uniformity of a $\text{Si}_{10.5}\text{Ge}_{0.5}$ crystal grown on board the international space station	Journal of Crystal Growth (1.693)	Vol. 419 (2015) p. 47-51	2015	K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, S. Adachi, H. Miyata, R. Tanaka, J. Yoshikawa, T. Kihara, H. Tomioka, H. Shibayama, Y. Kubota, Y. Warashina, Y. Ishizuka, Y. Harada, S. Wada, T. Ito, N. Nagai, K. Abe, S. Sumioka, M. Takayanagi and S. Yoda	
4 SiGe crystal growth aboard the international space station	Journal of Crystal Growth (1.693)	Vol. 417 (2015) p. 31-36	2015	K. Kinoshita, Y. Arai, T. Tsukada, Y. Inatomi, H. Miyata and R. Tanaka	
5 SiGe Crystal Growth by the Traveling Liquidus-Zone Method aboard the International Space Station	Int. J. Microgravity Sci. Appl.	Vol. 33 (2016) p.,330213-1 ~5	2016	K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, H. Miyata, R. Tanaka, K. Abe, S. Sumioka, M. Kubo and S. Baba	
6 Effects of temperature gradient in the growth of $\text{Si}_{10.5}\text{Ge}_{0.5}$ crystals by the traveling liquidus-zone method on board the International Space Station	Journal of Crystal Growth (1.673)	Vol. 455 (2016) p.49-54.	2016	K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, T. Tsukada, S. Adachi, H. Miyata and R. Tanaka	

## 2. 関連論文発表表

	論文タイトル	掲載誌	巻・号・頁	年	著者	備考
1	InGaAsの濡れ性評価	日本マイクログラフィティ応用学会	Vol. 14, No. 4, p.304-309	1997	早坂裕二・牧村一弥・岩井正行・小野川直孝・木下恭一	
2	Application of Glass Sealing Technique to High Temperature Diffusion Experiments	J. Jpn Soc. Microgravity Appl	Vol. 15 Suppl. II, p.354-357	1998	J. Yu, M. Natsuisaka, T. Masaki, K. Kinoshita, H. Kato and S. Yoda	
3	Constitutional Supercooling during Solidification of $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ Melt	J. Jpn Soc. Microgravity Appl	Vol. 15 Suppl. II, p.509-513	1998	H. Kato, K. Kinoshita and S. Yoda	
4	Growth of homogeneous semiconductor crystals in microgravity	J. Jpn Soc. Microgravity Appl	Vol. 15 Suppl. II, p.505-508	1998	K. Kinoshita, H. Kato and S. Yoda	
5	Crystal growth of a binary semiconductor of uniform composition	Adv. Space Res (1.238)	Vol. 24, No. 10, p.1279-1282	1999	S. Matsumoto, T. Maekawa, H. Kato, S. Yoda and K. Kinoshita	
6	Wettability and surface tension of molten InGaAs	J. Jpn Soc. Microgravity Appl	Vol. 16, No. 4, p.295-299	1999	T. Nagashima, H. Kato, Y. Saita, T. Satoh and K. Kinoshita	
7	Single crystal growth of compositionally graded $In_xGa_{1-x}As$	Mater. Sci. Eng (2.122)	Vol. B75, p.143-148	2000	H. Kato, M. Iwai, Y. Muramatsu, K. Kinoshita and S. Yoda	
8	Single crystalline bulk growth of $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ on GaAs seed using the multi-component zone melting method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 208, p.165-170	2000	S. Kodama, Y. Furumura, K. Kinoshita, H. Kato and S. Yoda	
9	Directional solidification of $In_xGa_{1-x}As$	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 210, p.471-477	2000	K. Hashio, M. Tatsumi, H. Kato and K. Kinoshita	
10	Growth of homogeneous $In_{1-x}Ga_xSb$ crystals by the graded solute concentration method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 216, p.37-43	2000	K. Kinoshita, H. Kato, S. Matsumoto and S. Yoda	
11	Numerical Analysis of Crystal Growth of an InAs-GaAs Binary Semiconductor under Microgravity Conditions	J. Phys. D: Appl. Phys. (2.521)	Vol. 33, No.19, p.2508-2518	2000	Y. Hiraoka, K. Ikegami, T. Maekawa, S. Matsumoto, S. Yoda and K. Kinoshita	
12	InAs-GaAs interdiffusion measurements	J. Jpn Soc. Microgravity Appl	Vol. 17, No.2, p.57-63	2000	K. Kinoshita, H. Kato, S. Matsumoto, S. Yoda, 他13名	
13	Studies on molten glass sealing in diffusion coefficient measurement using shear cell technique	Rev. Sci. Instrum (1.23)	Vol. 71, p.2111-2116	2000	J. Yu, M. Natsuisaka, H. Kato, S. Matsumoto, K. Kinoshita, T. Itami and S. Yoda	
14	Homogeneous $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ crystal growth by the traveling liquidus zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 225, p.59-66	2001	K. Kinoshita, H. Kato, M. Iwai, T. Tsuru, Y. Muramatsu and S. Yoda	
15	Numerical modelling and analysis of binary compound semiconductor growth under microgravity conditions	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 229, p.605-609	2001	T. Maekawa, Y. Hiraoka, K. Ikegami and S. Matsumoto	
16	Growth of homogeneous mixed crystals of $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ by the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 237-239, p.1859-1863	2002	K. Kinoshita, Y. Hanaue, H. Nakamura, S. Yoda, M. Iwai, T. Tsuru and Y. Muramatsu	
17	Nondestructive measurement of resistivity in bulk $In_xGa_{1-x}As$	Materials Sci. Eng. (2.122)	Vol. B91-92, p.376-378	2002	M. Fukuzawa, M. Yoshida, M. Yamada, Y. Hanaue, K. Kinoshita	

18	Micro-Raman Characterization of Starting Material for Traveling Liquidus Zone Growth Method	Jpn. J. Appl. Phys. (1.057)	Vol. 41, p.991-995	2002	M. R. Islam, P. Verma, M. Yamada, M. Tatsumi and K. Kinoshita
19	Crystal growth of a Binary Compound Semiconductor under Microgravity Conditions	Adv. Space Res (1.238)	Vol. 29, p.553-556	2002	Y. Hiraoka, K. Ikegami, T. Maekawa, S. Matsumoto, S. Yoda and K. Kinoshita
20	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による均一組成 $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ 単結晶育成	日本結晶成長学会誌	Vol. 29, p.349-356	2002	木下恭一, 緒方康行, 越川尚清, 足立聡, 松本聡, 岩井正行, 鶴哲也, 村松祐治, 中村裕彦, 前川透, 依田真一
21	A one-dimensional model to predict the growth conditions of $In_xGa_{1-x}As$ alloy crystals grown by the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 258, p.49-57	2003	H. Nakamura, Y. Hanaue, H. Kato, K. Kinoshita and S. Yoda
22	Numerical analysis of crystal growth of an InAs-GaAs binary semiconductor by the travelling liquidus zone method under microgravity conditions	Int J Heat Mass Transfer (2.522)	Vol. 47, p.4535-4546	2004	Y. Sugiki, T. Maekawa, S. Matsumoto, S. Adachi, S. Yoda and K. Kinoshita
23	Convection influence on mass transport in the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 267, p.417-423	2004	S. Adachi, Y. Ogata, N. Koshikawa, S. Matsumoto, K. Kinoshita, M. Takayanagi and S. Yoda
24	A new crystal growth method for growing homogeneous mixed crystals of $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ : the traveling liquidus-zone (TLZ) method	Adv. in Astronautical Sciences (0.33)	Vol. 117, p.865-872	2004	K. Kinoshita, Y. Ogata, S. Adachi, N. Koshikawa, S. Yoda, H. Miyata and Y. Muramatsu
25	Numerical analysis of growth rates in the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 270, p.42-49	2004	S. Adachi, Y. Ogata, N. Koshikawa, S. Matsumoto, K. Kinoshita, I. Yoshizaki, M. Takayanagi, S. Yoda, A. Kadowaki, T. Tsuru, H. Miyata and Y. Muramatsu
26	Latent heat effect on growth rate in the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 271, No. 1-2, p.22-28	2004	S. Adachi, Y. Ogata, N. Koshikawa, S. Matsumoto, K. Kinoshita, I. Yoshizaki, M. Takayanagi, S. Yoda
27	Improvement of compositional homogeneity in $In_{1-x}Ga_xAs$ bulk crystals grown by the travelling liquidus-zone method	Int. J. Materials and Product Technology (0.282)	Vol. 22, p.95-104	2005	K. Kinoshita, Y. Ogata, N. Koshikawa, S. Adachi, S. Yoda, M. Iwai, T. Tsuru and Y. Muramatsu
28	Homogeneous SiGe crystals grown by using the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 280, p.372-377	2005	S. Adachi, Y. Ogata, N. Koshikawa, S. Matsumoto, K. Kinoshita, I. Yoshizaki, T. Tsuru, H. Miyata, M. Takayanagi and S. Yoda
29	Excellent Compositional Homogeneity in $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ Crystals Grown by the Traveling Liquidus-Zone (TLZ) Method	Microgravity Science and Technology (0.648)	Vol. XVI-1, p.71-73	2005	K. Kinoshita, Y. Ogata, S. Adachi, N. Koshikawa and S. Yoda
30	Investigation of polycrystallization mechanism at initial interface in $In_xGa_{1-x}As$ bulk crystals on lattice mismatched seeds	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 292, p.286-289	2006	H. Miyata, S. Adachi, Y. Ogata, T. Tsuru, Y. Muramatsu, K. Kinoshita, O. Odawara and S. Yoda



31	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ single crystal growth by dispersing local misfit stress	Physica Status Solidi (a) (1.525)	Vol. 203, No. 11, p.2674-2679	2006	H. Miyata, S. Adachi, Y. Ogata, T. Tsuru, Y. Muramatsu, K. Kinoshita, O. Odawara and S. Yoda
32	Convection effects on crystallinity in the growth of $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ crystals by the traveling liquidus-zone method	Ann. New York Acad. Sci. (4.383)	Vol. 1077, p.161-171	2006	K. Kinoshita, Y. Ogata, S. Adachi, S. Yoda, T. Tsuru, H. Miyata and Y. Muramatsu
33	Crystallographic investigation of homogeneous SiGe single crystals grown by the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 303, p.607-611	2007	H. Miyata, S. Adachi, Y. Ogata, T. Tsuru, Y. Muramatsu, K. Kinoshita, O. Odawara and S. Yoda
34	High-Characteristic-Temperature 1.3micrometer-Band Laser on an InGaAs Ternary Substrate Grown by the Traveling Liquidus-Zone Method	IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics (3.465)	Vol. 13, p.1295-1300	2007	M. Arai, T. Watanabe, M. Yuda, K. Kinoshita, S. Yoda and Y. Kondo
35	10-Gbps Direct Modulation Using a 1.31mm Ridge Waveguide Laser on an InGaAs Ternary Substrate	Appl. Phys. Express (2.567)	Vol. 2, p.022101	2009	M. Arai, W. Kobayashi, T. Fujisawa, M. Yuda, T. Tadokoro, K. Kinoshita, S. Yoda and Y. Kondo
36	Homogeneous $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ crystal growth by the traveling liquidus-zone (TLZ) method	Advances in the Astronautical Sciences (0.33)	Vol. 138, p.647-653	2010	K. Kinoshita, S. Adachi, Y. Inatomi, H. Miyata, R. Tanaka, Y. Arai and S. Yoda
37	Growth of homogeneous semiconductor mixed crystals by traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 318, p.1026-1029	2010	K. Kinoshita and S. Yoda
38	Growth of SiGe crystals by the traveling liquidus-zone method -Preliminary experiments on the ground	J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.	Vol. 28, p.55-58	2011	K. Kinoshita, Y. Arai, H. Miyata, R. Tanaka, T. Sone, J. Yoshikawa, T. Kinara, H. Shibayama, Y. Inatomi, M. Takayanagi and S. Yoda
39	Numerical analysis of two-dimensional model of the traveling liquidus-zone method	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 334, p.67-71	2011	S. Adachi, K. Kinoshita, M. Takayanagi and H. Miyata
40	Homogeneous SiGe crystal growth in microgravity by the travelling liquidus-zone method	J. Phys. Conf. Ser. (0.54)	Vol. 327, p.012017	2011	K. Kinoshita, Y. Arai, Y. Inatomi, H. Miyata, R. Tanaka, T. Sone, J. Yoshikawa, T. Kihara, H. Shibayama, Y. Kubota, T. Shimaoka, Y. Warashina, K. Sakata, M. Takayanagi and S. Yoda
41	Homogeneous $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ Bulk Crystal Growth as Substrates for Strained Ge Thin Films by the Traveling Liquidus-Zone method	Thin Solid Films (1.867)	Vol. 520, p.3279-3283	2011	K. Kinoshita, O. Nakatsuka, S. Yoda and S. Zaima
42	Growth of $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ single crystals by the traveling liquidus-zone method and their structural characterization	Procedia Engineering (0.61)	Vol. 36, p.404-410	2012	A. Oda, K. Kinoshita, S. Yoda, H. Katsumata and S. Uekusa
43	微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶の育成	日本結晶成長学会誌	Vol. 39, p.17-22	2012	木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 塚田隆夫
44	$\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ bulk single crystals with uniform composition	J. Crystal Growth (1.693)	Vol. 349, p.50-54	2012	K. Kinoshita, H. Miyata, R. Tanaka, T. Ueda, Y. Arai and S. Yoda

45	Increase of $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ bulk single crystal size as substrates for strained Ge epitaxial layers	Jpn J. Appl. Phys (1.057)	Vol. 52, p.04CH02 1-3	2013	K. Kinoshita, O. Nakatsuka, Y. Arai, K. Taguchi, R. Tanaka, H. Tomioka and S. Yoda	
46	Characterization of Crystalline Structures of SiGe Substrate Formed by Traveling Liquidus-Zone Method for Devices with Ge/SiGe	Thin Solid Films (1.867)	Vol. 557, p. 129-134	2014	T. Yamaha, O. Nakatsuka, N. Taoka, K. Kinoshita, S. Yoda, and S. Zaima	
47	Hole Hall mobility of SiGe alloys grown by the traveling liquidus-zone method	Appl. Phys. Lett. (3.515)	Vol. 107, p. 152-104	2015	T. Maeda, H. Hattori, W. H. Chang, Y. Arai, and K. Kinoshita	
48	Growth of Two Inch $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ Bulk Single Crystals	Jpn J. Appl. Phys (1.057)	Vol. 54, p. 04DH03 1-4	2015	Kyoichi Kinoshita, Yasutomo Arai, Osamu Nakatsuka, Keisuke Taguchi, Hiroshi Tomioka, Ryota Tanaka and Shinichi Yoda	
49	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Bulk Single Crystals for Substrates of Electronic Devices	Mater. Sci. Semi. Pro. (2.264)	Vol. 70, p. 12-16	2017	Kyoichi Kinoshita, Yasutomo Arai, Tatsuhiro Maeda and Osamu Nakatsuka	

### 3. 著書

	著書タイトル	出版社	頁	年	著者	備考
1	Numerical Modeling of Crystal Growth of Binary Compound Semiconductors, in: Modeling of Transport Phenomena in Crystal Growth	Modeling of Transport Phenomena in Crystal Growth, Ed. J.S. Szmyd, WIT Press.	Chapter 4	2000	T. Maekawa and S. Matsumoto	分担執筆
2	Homogeneous semiconductor crystal growth	Studies on Crystal Growth Under Microgravity, Edited by Y. Hayakawa.	p.81-101	2005	K. Kinoshita, S. Adachi and S. Yoda	分担執筆
3	High quality $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x: 0.1 - 0.13$ ) Crystal Growth for Substrates of $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ Laser Diodes by the Travelling Liquidus-Zone Method	Modern aspects of bulk crystal and thin film preparation, Edited by Nikolai Kolesnikov and Elena Borisenko, Publisher: InTech	Chapter 8, p.163-186	2011	K. Kinoshita and S. Yoda	分担執筆

### 4. 解説、その他

	論文タイトル	掲載誌	巻・号・頁	年	著者	備考
1	微小重力下の半導体結晶成長	材料科学	Vol. 35, p.60-72	1998	木下恭一	
2	g-ジッターの周波数に対する影響について	日本マイクログラフィティ応用学会	Vol. 16, No. 4, p.263-271	1999	木下恭一	

3	g-jitterにより誘起される半導体溶液中の流速、温度、濃度変動	日本マイクログラフィティ応用学会	Vol. 16, No. 4, p.255-262	1999	松本聡・前川透		
4	組成傾斜原料を用いた均一高In組成化合物半導体混晶(In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As; x=0.2)単結晶育成に関する研究	博士論文(東京工業大学)		2000	加藤浩和		学位論文
5	半導体材料	JSUP宇宙利用の展望	平成12年度版, p.1-15	2001	木下恭一		
6	混晶系結晶成長における過冷却と過飽和	日本マイクログラフィティ応用学会	Vol. 21, p.212-	2004	木下恭一, 緒方康行, 足立聡, 依田眞		
7	TLZ法によるIn <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As単結晶育成中の対流効果	日本マイクログラフィティ応用学会	Vol. 24, p.176-182	2007	木下恭一, 足立聡, 植田稔晃, 荒井康智, 依田眞一		
8	化合物半導体バルク結晶成長における格子不整合に起因した多結晶化メカニズムの解明	博士論文(東京工業大学)		2008	宮田浩旭		学位論文
9	Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法により成長するバルクInGaAsの単結晶化機構の研究	修士論文(筑波大学)		2009	金子将士		修士論文
10	Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法により成長するバルクInGaAsの単結晶化初期状態の観察	日本マイクログラフィティ応用学会	Vol. 26, p.95-99	2009	金子将士, 木下恭一, 末益崇, 小田原修, 依田眞一		
11	微小重力環境を利用した半導体の結晶成長	未来材料	2009年2月号, p.38-44	2009	木下恭一		
12	Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法を用いたSi0.5Ge0.5単結晶の作成と構造解析	修士論文(明治大学)		2012	小田敦		修士論文
13	混晶結晶	日本電子材料技術協会会報	Vol. 43, p.2-7	2012	木下恭一		
14	Traveling Liquidus-Zone法によるSiGe単結晶成長時のクラック抑制	修士論文(早稲田大学)		2014	永壽伴寛		修士論文
15	国際宇宙ステーションを利用した均一組成SiGe結晶の育成(1)Hicariプロジェクト総括	Int. J. Microgravity Sci. Appl.	Vol. 34, pp. 340090-1-4	2017	荒井康智, 木下恭一, 稲富裕光, 塚田隆夫		
16	国際宇宙ステーションを利用した均一組成SiGe結晶の育成(2)Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法による育成実験と微小重力効果	Int. J. Microgravity Sci. Appl.	Vol. 34, pp. 340100-1-9	2017	木下恭一, 荒井康智, 稲富裕光, 塚田隆夫		

## 5. 学会発表、シンポジウム講演など

	発表タイトル	発表先	開催場所	年	発表者	備考
1	結晶育成時の濃度勾配緩和に及ぼす重力加速度の影響	第29回化学工学会秋季大会		1996	松本聡, 前川透, 中村裕彦, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一	
2	宇宙での結晶成長についての展望	ibid.		1996	木下恭一	
3	結晶育成時の濃度勾配緩和に及ぼす重力加速度の効果に関する数値解析	第57回応用物理学会学術講演会		1996	松本聡, 前川透, 中村裕彦, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一	
4	溶液内の溶質濃度勾配緩和に及ぼす重力加速度の影響	第12回マイクロログラビティ応用学会		1996	松本聡, 前田浩二, 前川透, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一	
5	均質組成化合物半導体単結晶育成法の検討	第12回マイクロログラビティ応用学会		1996	木下恭一, 加藤浩和, 依田真一	
6	Growth of compound semiconductor crystals in microgravity	Proc. Joint Xth European and Vith Russian Symposium on Physical Science in Microgravity	St. Petersburg, Russia	1997	K. Kinoshita, H. Kato and S. Yoda	
7	InGaAs bulk crystal growth in microgravity – ground experiments	Proc. Joint Xth European and Vith Russian Symposium on Physical Science in Microgravity	St. Petersburg, Russia	1997	S. Kodama, K. Nakajima, K. Kinoshita, H. Kato and S. Yoda	
8	Velocity, temperature and concentration fluctuations induced by $g$ -jitter under microgravity	Proc. Joint Xth European and Vith Russian Symposium on Physical Science in Microgravity	St. Petersburg, Russia	1997	S. Matsumoto, K. Maeda, T. Maekawa, H. Kato, S. Yoda and K. Kinoshita	
9	Growth conditions of avoid cincentrational supercooling for semiconductor mixed crystals with pseudo binary phase relations: a numerical study	Proc. Joint Xth European and Vith Russian Symposium on Physical Science in Microgravity	St. Petersburg, Russia	1997	S. Matsumoto, K. Maeda, T. Maekawa, H. Kato, S. Yoda and K. Kinoshita	
10	Preliminary study of crystal growth of compound semiconductors in microgravity	7th Int. Space Conf. Of Pacific-Basin Societies	Nagasaki, Japan.	1997	H. Kato, K. Kinoshita and S. Yoda	
11	Convection instability induced by gravitational fluctuation in semiconductor solution	Proc. Transport Phenomena in Thermal Science and Process		1997	K. Maeda, T. Maekawa, S. Matsumoto, H. Kato, S. Yoda and K. Kinoshita	
12	Crystal growth of PbSnTe and InGaAs under microgravity	Proc. IIT International Symposium on Materials Synthesis under Microgravity Circumstances for Industrial Application	Sapporo, Japan.	1997	K. Kinoshita	
13	重力加速度によって半導体溶液中に誘起される濃度変動	第34回日本伝熱シンポジウム		1997	前田浩二, 前川透, 松本聡, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一	
14	微小重力を利用した均質組成化合物半導体結晶の育成	第34回日本伝熱シンポジウム		1997	松本聡, 福田守, 前川透, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一	



15	Concentration fluctuation induced in a semiconductor solution by gravity fluctuation	日本機械学会創立100周年記念講演会熱工学シンポジウム	1997	前田浩二, 前川透, 松本聡, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
16	微小重力場における均質組成InGaAsの育成	日本機械学会創立100周年記念講演会熱工学シンポジウム	1997	松本聡, 福田守, 前川透, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
17	均一組成半導体結晶成長	第45回応用物理学関係連合講演会	1997	木下恭一, 加藤浩和, 依田真一
18	溶液内の速度場、濃度場、温度場に及ぼす重力変動の影響	第44回応用物理学関係連合講演会	1997	前田浩二, 前川透, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
19	均質組成化合物半導体単結晶育成法の検討	第44回応用物理学関係連合講演会	1997	木下恭一, 加藤浩和, 依田真一
20	化合物半導体InGaAsの結晶成長解析	第44回応用物理学関係連合講演会	1997	松本聡, 福田守, 前川透, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
21	The constitutional supercooling behavior during directional solidification of $In_xGa_{1-x}As$	1st. Pan-Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences	1998	H. Kato, K. Kinoshita and S. Yoda
22	Influence of g-jitter on diffusion coefficient measurements in international space station	1st. Pan-Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences	1998	S. Matsumoto and S. Yoda
23	Growth of homogeneous semiconductor crystals in microgravity	1st. Pan-Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences	1998	K. Kinoshita, H. Kato and S. Yoda
24	Crystal growth of a binary semiconductor of uniform composition	32nd COSPAR scientific assembly	1998	S. Matsumoto, T. Maekawa, H. Kato, S. Yoda and K. Kinoshita
25	微小重力場における均質組成InGaAsの結晶育成	第14回マイクロ重力応用学会	1998	平岡良章, 前川透, 松本聡, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
26	InAs-GaAs相互拡散係数測定時における砒素抜け防止対策	第14回マイクロ重力応用学会	1998	木下恭一, 加藤浩和, 余建定, 松本聡, 依田真一, 夏井坂誠, 正木匡彦, 越川尚清, 中村裕広, 中村富久, 小川豊秋夫, 天野真一, 後藤一将, 荒井義人, 深沢智晴, 兼子稔
27	Single crystal growth of compositionally graded $In_xGa_{1-x}As$	IUMRS-ICAM '99	1999	H. Kato
28	Numerical analysis of InGaAs crystal growth of a uniform composition under microgravity conditions	SPIE's 44th annual meeting and exhibition	1999	S. Matsumoto, Y. Hiraoka, T. Maekawa, H. Kato, S. Yoda and K. Kinoshita
29	Determination of spatial variation of molar fraction in $In_{1-x}Ga_x$ bulk crystal using micro-Raman scattering	第47回応用物理学関係連合講演会	1999	P. Verma, M. Yamada, M. Tatsumi, H. Kato, M. Iwai and K. Kinoshita
30	微小重力場における化合物半導体InAs-GaAsの結晶成長に関する数値解析	第36回日本伝熱シンポジウム	1999	平岡良章, 前川透, 松本聡, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
31	傾斜濃度法による均一組成 $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ 単結晶の育成	第60回応用物理学学会術講演会	1999	木下恭一, 加藤浩和, 松本聡, 依田真一
32	InGaAs結晶成長に及ぼす温度勾配の影響	第60回応用物理学学会術講演会	1999	岩井正行, 村松祐治, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一

33	化合物半導体InGaAsの結晶成長に及ぼす重力変動の影響	第60回応用物理学学会学術講演会		1999	平岡良章, 池上圭介, 松本聡, 前川透
34	InAs-GaAs相互拡散係数の測定	第20回熱物性シンポジウム		1999	加藤浩和, 木下恭一, 松本聡, 余建定, 夏井坂誠, 依田真一, 正木匡彦, 越川尚清, 中村裕広, 中村富久, 小木曾秋夫, 天野真一, 後藤一将, 荒井義人, 深沢智晴, 兼子稔
35	傾斜濃度法による均一組成In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As単結晶の育成 —地上予備実験—	第15回マイクロ重力ラビティ応用学会		1999	木下恭一, 加藤浩和, 松本聡, 依田真一
36	微小重力場における二元系化合物半導体の結晶成長解析	第12回計算力学講演会		1999	平岡良章, 前川透, 松本聡, 加藤浩和, 依田真一, 木下恭一
37	傾斜組成帯溶融法による均一組成In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As単結晶の育成	第47回応用物理学関係連合講演会		1999	加藤浩和, 岩井正行, 鶴哲也, 村松祐治, 木下恭一, 依田真一
38	Directional solidification of In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	Spacebound 2000		2000	M. Tatsumi
39	In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As seed crystal preparation for microgravity experiments aboard the international space station	Spacebound 2000		2000	S. Kodama
40	Numerical study of directional solidification of InAs-GaAs binary semiconductor	Spacebound 2000		2000	S. Matsumoto
41	Homogeneous In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As crystal growth by the graded solute concentration method	Spacebound 2000		2000	K. Kinoshita
42	Crystal growth of a binary semiconductor under microgravity conditions	33rd COSPAR scientific assembly	Warsaw, Poland	2000	Y. Hiraoka
43	Numerical study on melt growth of InAs semiconductor under microgravity and on the earth	12th American conference on crystal growth and epitaxy		2000	S. Adachi
44	Homogeneous In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As crystal growth	First international symposium on microgravity research & applications in physical sciences and biotechnology		2000	K. Kinoshita
45	Crystal growth of a binary semiconductor under microgravity conditions	First international symposium on microgravity research & applications in physical sciences and biotechnology		2000	Y. Hiraoka
46	Bulk growth of single crystalline In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As on GaAs seed by the multi-component zone melting method using in process synthesized InGaAs source	The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology	Sendai, Japan	2000	S. Kodama
47	Micro-Raman analysis of molar fraction in polycrystalline In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As material	The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology	Sendai, Japan	2000	P. Verma
48	Directional solidification of In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As by the vertical Bridgman method	The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology	Sendai, Japan	2000	M. Tatsumi

49	Numerical modeling and analysis of crystal growth of binary compound semiconductor	Sendai, Japan	2000	T. Maekawa	
50	傾斜組成部分溶融法による均一組成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ s 結晶の育成		2000	鶴哲也	
51	傾斜組成部分溶融法による $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 均一組成結晶成長のモデル		2000	中村裕彦	
52	傾斜組成部分溶融法による $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 均一組成単結晶の育成		2000	花上康宏	
53	宇宙実験における私の成功と失敗		2000	木下恭一	
54	単結晶成長のための界面形状制御に関する計算		2000	足立聡	
55	均一組成A-B 混晶に対する凝固過程の数値解析		2000	中村裕彦	
56	Growth of homogeneous $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ crystals by the traveling liquidus zone method	Pasadena	2001	K. Kinoshita	
57	Nondestructive characterization of $\text{In}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$ mixed compound crystal using Raman scattering	Pasadena	2001	M. Yamada, M. R. Islam, P. Verma, M. Tatsumi, K. Kinoshita and Y. Hanaue	
58	Raman characterization of compositionally-graded bulk $\text{InGaAs}$ crystal		2001	P. Verma, M. R. Islam, M. Fukuzawa, M. Yamada, Y. Hanaue and K. Kinoshita	
59	Growth of homogeneous mixed crystals of $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ by the traveling liquidus-zone method		2001	K. Kinoshita	
60	Micro-Raman analysis of molar fraction in polycrystalline $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ for traveling liquidus zone method		2001	M. R. Islam, P. Verma, M. Yamada, M. Tatsumi and K. Kinoshita	
61	Nondestructive measurements of resistivity in bulk $\text{InGaAs}$ crystals		2001	M. Fukuzawa, M. Yoshida, M. Yamada, Y. Hanaue and K. Kinoshita	
62	The influence of residual strain on Raman scattering in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ single crystals		2001	M. R. Islam, P. Verma, M. Yamada, S. Kodamai, Y. Hanaue and K. Kinoshita	
63	Nondestructive mapping of composition in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ bulk crystals using photoluminescence technique		2001	M. Fukuzawa, M. Suzuki, M. Yamada, Y. Hanaue and K. Kinoshita	
64	Traveling liquidus-zone 法による均一組成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 結晶の育成		2001	鶴哲也	
65	フォトルミネッセンス法による $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ バルク結晶の組成分布マッピング		2001	鈴木将	
66	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ バルク結晶における抵抗率の非破壊マッピング		2001	福澤理行	

67	TGZM法による均一組成結晶育成条件の解析	第62回応用物理学学会学術講演会		2001	中村裕彦
68	結晶成長実験における試料内部温度分布測定	第17回マイクログラフィティ応用学会		2001	花上康宏
69	微小重力環境を利用した混晶半導体 $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ の均一組成単結晶育成条件の検討	第17回マイクログラフィティ応用学会		2001	花上康宏
70	回転振動法による $InGaAs$ 融液の粘性率測定	第22回熱物性シンポジウム		2001	林義雄
71	レーザーフラッシュ法による $InGaAs$ 融液の熱拡散率測定	第22回熱物性シンポジウム		2001	弓削定義
72	Photoluminescence and Raman characterization of polycrystalline $In_xGa_{1-x}As$ feed material for traveling liquidus zone method	Proc, 6th China-Japan Workshop	Dunhuang, China	2002	P. Verma
73	Growth of a binary compound semiconductor of uniform compositions by the Traveling Liquidus Zone method under 1g conditions	The 34th Committee on Space Research (COSPAR)		2002	Y. Sugiki
74	Effects of convection in the growth of homogeneous $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ crystals by the traveling liquidus-zone method	Proc, 6th Japan-Canada Workshop	Hamamatsu, Japan	2002	K. Kinoshita, Y. Ogata, N. Koshikawa, S. Adachi, S. Yoda, M. Iwai, T. Tsuru and Y. Muramatsu
75	Reliability of Numerical Analysis and Numerical Estimation of Temperature Gradient in the Traveling Liquidus Zone Method	Proc, 6th Japan-Canada Workshop	Hamamatsu, Japan	2002	S. Adachi
76	Traveling Liquidus Zone法による均質組成二元系化合物半導体の成長解析	第39回日本伝熱シンポジウム		2002	杉木喜洋
77	微小重力場を利用したTraveling Liquidus Zone法による二元系化合物半導体の成長解析	日本流体力学会年会		2002	杉木喜洋
78	Traveling Liquidus-Zone法による均一組成 $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ 単結晶	第32回結晶成長国内会議		2002	木下恭一
79	飽和溶融帯移動法による混晶半導体 $In_xGa_{1-x}As$ 均一組成制御(II)	第63回応用物理学講演会		2002	鶴哲也
80	$In_xGaAs$ 結晶成長のための熱物性の測定	日本マイクログラフィティ応用学会第18回学術講演会		2002	船井睦
81	TLZ法における数値解析の信頼性検討と温度勾配の推定	日本マイクログラフィティ応用学会第18回学術講演会		2002	足立聡
82	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法混晶系化合物半導体 $In_xGa_{1-x}As$ 高精度組成制御	日本マイクログラフィティ応用学会第18回学術講演会		2002	鶴哲也
83	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による混晶系化合物半導体 $In_xGa_{1-x}As$ の高精度組成制御	第50回応用物運合講演会		2002	鶴哲也
84	A new crystal growth method for growing homogeneous mixed crystals of $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ : the traveling liquidus-zone (TLZ) method	10th International Space Conference of Pacific-basin Societies	Tokyo, Japan	2003	K. Kinoshita
85	$In_xGa_{1-x}As$ 結晶成長における組成的過冷却	第33回結晶成長国内会議		2003	木下恭一



86	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 均一組成成長のモデル検証	第64回応用物理学講演会	2003	鶴哲也
87	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による均一組成 $\text{SiGe}$ の結晶成長	日本マイクログラフィティ応用学会 第19回学術講演会	2003	宮田浩旭
88	TLZ法による $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 均一組成単結晶育成条件の詳細検討	第20回宇宙利用シンポジウム	2003	木下恭一
89	数値解析による飽和溶解帯移動法のためのフライトカートリッジにおける2次元性の検討	第20回宇宙利用シンポジウム	2003	足立聡
90	微小重力場を利用した均一混晶半導体単結晶育成技術	日本学術振興会「結晶成長の科学と技術第161委員会」第38回 つくば	2003	木下恭一
91	Excellent Compositional Homogeneity in $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ Crystals Grown by the Traveling Liquidus-Zone (TLZ) Method	The International Symposium on Physical Sciences in Space Toronto, Canada	2004	K. Kinoshita
92	飽和溶解帯移動法における成長速度の数値解析	第34回結晶成長国内会議 東京	2004	足立聡
93	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 結晶成長における過冷却と過飽和	第34回結晶成長国内会議 東京	2004	木下恭一
94	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法における $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 均一組成単結晶成長とその評価	第65回応用物理学学会学術講演会 仙台	2004	鶴哲也
95	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 板状結晶の育成	日本マイクログラフィティ応用学会 第20回学術講演会 福井	2004	木下恭一
96	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による均一組成 $\text{Si}_{105}\text{Ge}_{05}$ 単結晶成長	日本マイクログラフィティ応用学会 第20回学術講演会 福井	2004	宮田浩旭
97	TLZ法による $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 基板用結晶作製	第21回宇宙利用シンポジウム 東京	2004	木下恭一
98	飽和溶解帯移動法における二次元性低減に関する検討	第21回宇宙利用シンポジウム 東京	2004	足立聡
99	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 単結晶成長の育成	第52回応用物理学関係連合講演会 埼玉	2004	鶴哲也
100	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ PLATE CRYSTAL GROWTH FOR SUBSTRATES BY THE TLZ METHOD	The 207th Meeting of The Electrochemical Society Quebec, Canada	2005	K. Kinoshita
101	CONVECTION EFFECTS ON CRYSTALLINITY IN THE GROWTH OF $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ CRYSTALS BY THE TRAVELING LIQUIDUS-ZONE (TLZ) METHOD	Interdisciplinary Transport Phenomena in Microgravity and Space Sciences IV Portugal	2005	K. Kinoshita
102	Investigation on Polycrystallization Mechanism at Initial Interfaces in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Bulk Crystals on Lattice Mismatched Seeds	The 3rd Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-3) Beijing, China	2005	H. Miyata
103	Japan's Space Experiments - Achievements, Experience and Lessons Learned	Sixth Japan-China Workshop on Microgravity Sciences Saga, Japan	2005	H. Inokuchi
104	Convection Effect on Mass Transport in the Traveling Liquidus-zone Method	Sixth Japan-China Workshop on Microgravity Sciences Saga, Japan	2005	S. Adachi
105	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Single Crystal Growth by Dispersing Local Misfit Stress	15th International Conference on Ternary and Multinary Compounds Kyoto, Japan	2005	H. Miyata, S. Adachi, Y. Ogata, T. Tsuru, Y. Muramatsu, K. Kinoshita, O. Odawara and S. Yoda

106	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As 板状結晶の育成と基板としての品質評価	第35回結晶成長国内会議	広島	2005	木下恭一
107	飽和溶融帯移動法(TLZ法)結晶成長における融液内対流抑制の重要性	日本機械学会2005年度年次大会	東京	2005	木下恭一
108	飽和溶融帯移動法における二次元性低減に関する検討	日本機械学会2005年度年次大会	東京	2005	足立聡
109	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法によるIn <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As均一組成単結晶の育成	第66回応用物理学会学術講演会	徳島	2005	鶴哲也
110	板状In <sub>0.1</sub> Ga <sub>0.9</sub> As結晶成長とIn <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As/In <sub>0.1</sub> Ga <sub>0.9</sub> As歪量子井戸の形成	第21回日本マイクログラフィティ学会学術講演会	札幌	2005	緒方康行
111	TLZ法によるIn <sub>0.1</sub> Ga <sub>0.9</sub> As基板作製とPL測定による評価	第22回宇宙利用シンポジウム	東京	2005	木下恭一
112	PLATE-SHAPED In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As CRYSTALS GROWN BY THE TRAVELING LIQUIDUS ZONE METHOD WITH REDUCED CONVECTION IN A MELT	The 25th International Symposium on Space Technology and Science	Kanazawa, Japan	2006	K. Kinoshita
113	Thermal conduction influence on homogeneous InGaAs crystal growth under microgravity	COSPAR	Beijing, China	2006	S. Adachi
114	1.3 μm-Band Laser with a High Characteristic Temperature (T <sub>0</sub> =130K) on an InGaAs Ternary Substrate Grown by the Traveling Liquidus-Zone Method	Int. Semicon. Laser Conf.	Hawaii, USA	2006	M. Arai, T. Watanabe, M. Yuda, K. Kinoshita, Y. Ogata, S. Yoda and Y. Kondo
115	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> Asバルク結晶成長におけるTraveling Liquidus-Zone (TLZ)法を応用した組成制御	第67回応用物理学会学術講演会	草津	2006	宮田浩旭
116	低In組成InGaAs基板上高歪量子井戸レーザーの温度特性	第67回応用物理学会学術講演会	草津	2006	荒井昌和
117	TLZ (Traveling Liquidus-Zone)法による直径2mmSi <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> 均一組成単結晶成長と結晶学的特性の評価	第22回日本マイクログラフィティ学会学術講演会	東京	2006	宮田浩旭
118	GHF炉による半導体混晶育成	第23回宇宙利用シンポジウム	東京	2006	木下恭一
119	Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法で成長するInGaAsバルク結晶の単結晶化メカニズムの研究	第54回応用物理学会関係連合講演会	東京	2006	金子将士
120	In <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> Asバルク結晶成長における格子不整合による多結晶化	第54回応用物理学会関係連合講演会	東京	2006	宮田浩旭
121	Growth of Platy InGaAs Single Crystals and Fabrication of 1.3 μm Laser Diodes	19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials	Matsue, Japan	2007	K. Kinoshita, T. Ueda, S. Adachi, T. Masaki, S. Yoda, M. Arai, T. Watanabe, M. Yuda and Y. Kondo
122	Highly strained InGaAs quantum well with GaAs strain compensating layer on InGaAs ternary substrate for 1.3 μm laser	19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials	Matsue, Japan	2007	M. Arai
123	Homogeneous composition Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> crystals grown by the traveling liquidus-zone method	Third International Symposium on Physical Sciences in Space	Nara, Japan	2007	T. Ueda
124	Investigation on Single Crystallization Mechanism in InGaAs Bulk Crystal Growth by the Traveling Liquidus-Zone Method	Third International Symposium on Physical Sciences in Space	Nara, Japan	2007	M. Kaneko

125	TLZ法で作製したInGaAs基板上高歪量子井戸レーザーの1.3 μm 発振	第68回応用物理学会学術講演会		2007	荒井昌和
126	GHF炉を利用した半導体混晶育成	第24回宇宙利用シンポジウム		2007	木下恭一
127	InGaAs基板上1.3 μmリッジレーザーの動特性評価	第55回応用物理学会関係連合講演会	千葉	2007	荒井昌和
128	Traveling Liquidus-Zone (TLZ)法で成長するInGaAsナノバルク結晶の単結晶化メカニズムの検討 (II)	第55回応用物理学会関係連合講演会	千葉	2007	金子将士
129	High Quality InGa1-xAs (x: 0.1 - 0.13) Platy Crystal Growth for Substrates of 1.3μm Laser Diodes	20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials	Versailles, France	2008	K. Kinoshita
130	A 1.31 μm ridge waveguide laser for 10 GBPS direct modulation on an InGaAs ternary substrate	20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials	Versailles, France	2008	M. Arai
131	微小重力環境を利用した結晶成長	高分子学会東海支部講演会	名古屋	2008	木下恭一
132	InGaAs基板上1.3 ミクロン帯リッジレーザーによる10Gbps直接変調動作	レーザー・量子エレクトロニクス研究会 (LQE2008-47)	仙台	2008	荒井昌和
133	InGaAs基板上リッジレーザーの85°C、10Gbps動作	第69回応用物理学会学術講演会	愛知	2008	荒井昌和
134	混晶育成における組成均一性と組成的過冷却	第23回日本マイクログラビティ応用学会学術講演会	京都	2008	木下恭一
135	Traveling Liquidus-Zone法で成長するバルクInGaAsの単結晶化メカニズムの検討	第23回日本マイクログラビティ応用学会学術講演会	京都	2008	金子将士
136	GHF炉を利用した均一組成混晶育成	第25回宇宙利用シンポジウム		2008	木下恭一
137	TLZ法による大型InGaAs単結晶の育成と半導体レーザーへの応用	第24回日本マイクログラビティ応用学会学術講演会	沖縄	2009	木下恭一
138	TLZ法による均一組成Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> 単結晶の育成	第78回バルク結晶成長分科会	仙台	2009	木下恭一
139	微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成の研究	第26回宇宙利用シンポジウム		2009	木下恭一
140	Growth of large platy InGaAs crystals and fabrication of semiconductor laser diodes	22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2010)	Takamatsu, Japan	2010	K. Kinoshita
141	Homogeneous Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> crystal growth by the traveling liquidus-zone (TLZ) method	12th International Space Conference of Pacific-basin	Montreal, Canada	2010	K. Kinoshita
142	Growth of homogeneous semiconductor mixed crystals by traveling liquidus-zone method	The 16th International Conference on Crystal Growth	Beijing, China	2010	K. Kinoshita
143	Growth of SiGe crystals by the traveling liquidus-zone method -Preliminary experiments on the ground-	8th Japan-China-Korea Workshop, Microgravity Sciences for Asian Microgravity	Sendai, Japan	2010	K. Kinoshita

144	TLZ法の開発と均一組成バルク混晶育成への応用	日本結晶成長学会第40回結晶成長国内会議、第27回論文賞受賞記念講演	北京	2010	木下恭一
145	1.3ミクロン帯半導体レーザ基板用大型InGaAs単結晶の製造	レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE2010-123)	東京	2010	木下恭一
146	SiGe結晶成長の地上準備実験	第27回宇宙利用シンポジウム		2010	木下恭一
147	Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> 単結晶作製とその結晶性の評価	第58回応用物理学関係連合講演会		2010	小田敦
148	Homogeneous SiGe crystal growth in microgravity by the travelling liquidus-zone method	4th International Symposium on Physical Sciences in Space	Bonn, Germany	2011	K. Kinoshita
149	Homogeneous Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> Bulk Crystal Growth as Substrates for Strained Ge Thin Films by the Traveling Liquidus-Zone Method	7th International Conference on Si Epitaxy and Heterostructures (ICSE-7)	Leuven, Belgium	2011	K. Kinoshita
150	Growth of Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> single crystals by the traveling liquidus-zone method and their structural characterization	International Union of Materials Research Societies - 12th International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2011)	Taipei, Taiwan	2011	A. Oda
151	TLZ法によるSi <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> 単結晶作製とその結晶性の評価 (II)	第72回応用物理学学会学術講演会	山形	2011	小田敦
152	微小重力を利用した混晶成長技術	日本結晶成長学会、第35回結晶成長討論会	下妻	2011	木下恭一
153	TLZ法による均一バルク混晶の育成と応用	日本電子材料技術協会第48回秋期講演大会	東京	2011	木下恭一
154	微小重力下でのSi <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> 結晶成長実験計画	日本マイクログラフィティ応用学会第25回学術講演会、28B04	横浜	2011	木下恭一
155	SiGe結晶宇宙実験条件の精密化	第28回宇宙利用シンポジウム	東京	2011	木下恭一
156	Increase of Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> bulk single crystal size as substrates for strained Ge epitaxial layers	2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012)	Kyoto, Japan	2012	K. Kinoshita
157	Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> Bulk Single Crystal Growth by the Traveling Liquidus-Zone Method	2012 Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG 2012)	Orlando, U.S.A.	2012	K. Kinoshita
158	TLZ法によって育成したSiGe単結晶の組成均一性評価	第42回結晶成長国内会議	福岡	2012	富岡浩
159	TLZ法育成SiGe結晶大口径化の課題	日本マイクログラフィティ応用学会第26回学術講演会	福岡	2012	木下恭一
160	微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成の研究(その1)	日本マイクログラフィティ応用学会第27回学術講演会	東京	2013	木下恭一
161	微小重力環境下でのTLZ法によるSiGe結晶成長プロセスの数値シミュレーションに関する研究	日本マイクログラフィティ応用学会第27回学術講演会	東京	2013	住岡沙羅
162	TLZ法による微小重力下SiGe結晶成長実験(その1-実験概要)	日本結晶成長学会第43回結晶成長国内会議	長野	2013	木下恭一



163	TLZ法による微小重力下SiGe結晶成長実験(その2-実験結果考察)	日本結晶成長学会第43回結晶成長国内会議	長野	2013	木下恭一
164	TLZ法による微小重力下SiGe結晶成長実験(その3-TLZ法の数値解析)	日本結晶成長学会第43回結晶成長国内会議	長野	2013	杉岡健一
165	TLZ法による微小重力下SiGe結晶成長実験(その4-数値解析による考察)	日本結晶成長学会第43回結晶成長国内会議	長野	2013	住岡沙羅
166	Numerical simulations of SiGe single crystal growth by TLZ method in ISS	International Symposium on Chemical Environmental Biomedical Technology 2013	仙台	2013	K. Abe
167	Numerical simulations of TLZ crystal growth process of SiGe under microgravity	5th International Symposium on Physical Sciences in Space	Orlando, U.S.A.	2013	K. Abe
168	Homogenous SiGe crystal growth experiment in the International Space Station	5th International Symposium on Physical Sciences in Space	Orlando, U.S.A.	2013	Y. Arai
169	微小重力下におけるTLZ法によるSiGe単結晶成長プロセスの数値シミュレーション	化学工学会第45回秋季大会	岡山	2013	阿部敬太
170	Numerical simulation of heat and mass transfer in traveling liquidus-zone crystal growth process of SiGe under microgravity	17th International Conference of Crystal Growth and Epitaxy	Warsaw, Poland	2013	K. Abe
171	Epitaxial Growth of Strained Ge Layer on Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> Substrate Formed with Traveling Liquidus-Zone Method	8th International Conference on Si Epitaxy and Heterostructures	Fukuoka, Japan	2013	T. Yamaha
172	InGaAs Crystal Growth and its Application	2nd Annual World Congress of Advanced Materials	Suzhou, China	2013	K. Kinoshita
173	微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成の研究(その2)	日本マイクログラフィティ応用学会第28回学術講演会	姫路	2014	木下恭一
174	微小重力環境下でTLZ法により成長したSiGe結晶内組成分布の数値解析	日本マイクログラフィティ応用学会第28回学術講演会	姫路	2014	住岡沙羅
175	TLZ法による微小重力下SiGe結晶成長実験	日本結晶成長学会第44回結晶成長国内会議	東京	2014	木下恭一
176	微小重力下でTLZ法により成長したSiGe結晶の詳細な軸方向・径方向組成分布計測	日本結晶成長学会第44回結晶成長国内会議	東京	2014	荒井康智
177	微小重力下でTLZ法により成長したSiGe結晶の軸方向・径方向組成分布の数値シミュレーション	日本結晶成長学会第44回結晶成長国内会議	東京	2014	住岡沙羅
178	Homogenous SiGe Crystal Growth Experiment in the International Space Station	10th Asian Microgravity Symposium	Seoul, Korea	2014	Y. Arai
179	Numerical study on transport phenomena in SiGe crystal growth process by traveling liquidus-zone method under microgravity	10th Asian Microgravity Symposium	Seoul, Korea	2014	K. Abe
180	Growth of two inch Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> bulk single crystals	Int. Conf. on Solid State Devices and Materials	Tsukuba, Japan	2014	K. Kinoshita
181	SiGe crystal growth aboard the International Space Station	E-MRS	Liele, France	2014	K. Kinoshita

182	宇宙環境を利用した均一組成SiGe結晶育成実験	第75回応用物理学会秋季学術講演会	札幌	2014	荒井康智	
183	微小重力下でのTLZ法によるSiGe結晶成長プロセスの数値解析並びに結晶内組成均一化条件の提案	第51回日本伝熱シンポジウム	浜松	2014	阿部敬太	
184	微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶成長条件の数値解析的検討	化学工学会第46回秋季大会	伊都	2014	住岡沙羅	
185	SiGe Crystal Growth by the Traveling Liquidus-Zone Method aboard the International Space Station	6th International Symposium on Physical Sciences in Space	Kyoto, Japan	2015	K. Kinoshita	
186	A numerical study on SiGe crystal growth process by the TLZ method under microgravity condition	6th International Symposium on Physical Sciences in Space	Kyoto, Japan	2015	T. Tsukada	
187	Hole Hall mobility of SiGe alloy by the traveling liquidus-zone (TLZ) method	9th International Conference on Si Epitaxy and Heterostructures (ICSEI-9)	Montreal, Canada	2015	Maeda	
188	宇宙ステーションで育成した均一組成SiGe結晶の成長機序の解析	第76回応用物理学会秋季学術講演会	名古屋	2015	荒井康智	14p-2K-16
189	New Crystal Growth Method for Homogeneous Bulk Crystals of Solid Solution	BIT's 4th Annual Conference and EXPO of AnalytiX-2015	Nanjing, China	2015	K. Kinoshita	
190	微小重力下でTLZ法により育成したSiGe結晶分析	日本結晶成長学会第45回結晶成長国内会議	札幌	2015	荒井康智	
191	ISSにおけるTLZ法によるSiGe結晶成長時の偏析現象の数値シミュレーション	日本結晶成長学会第45回結晶成長国内会議	札幌	2015	馬場睦登史	
192	Two Inch Homogeneous Si <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> Bulk Crystal Growth as Substrates for Strained Ge Thin Films	World Congress of Smart Materials	Busan, Korea	2015	K. Kinoshita	
193	微小重力下におけるTLZ法による均一組成SiGe結晶育成	第29回宇宙環境利用シンポジウム	相模原	2015	木下恭一	
194	微小重力環境を利用した均一組成バルク混晶の育成と地上への応用	第62回応用物理学会春季学術講演会	平塚	2015	木下恭一	
195	宇宙環境を利用した均一組成SiGe結晶育成実験	第62回応用物理学会春季学術講演会	平塚	2015	荒井康智	
196	TLZ法によるSiGe結晶育成中のメルト内対流効果	第77回応用物理学会秋季学術講演会	新潟	2016	木下恭一	14p-A25-10
197	TLZ法によるSiGe結晶育成	第77回応用物理学会秋季学術講演会	新潟	2016	荒井康智	14p-A25-9
198	Homogeneous bulk SiGe crystals grown on board the International Space Station	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	Nagoya, Japan	2016	Y. Arai	ThP-T02-2
199	Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> Bulk Single Crystals for Substrates of Electronic Devices	7th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces/ International SiGe Technology and Device	Nagoya, Japan	2016	K. Kinoshita	

200	TLZ法を利用した均一組成ハルルクSiGe結晶(1)大口径化講演会	東京	2016	木下恭一	20p-H112-11
201	TLZ法を利用した均一組成ハルルクSiGe結晶(2)移動度評価講演会	東京	2016	前田辰郎	20p-H112-12
202	国際宇宙ステーションを利用した均一組成SiGe結晶の育成ウム	相模原	2017	木下恭一	G-04
203	TLZ法による高純度SiGe結晶育成術講演会	横浜	2017	木下恭一	

## 6. 受賞、競争的資金獲得、知的財産権

名称		詳細情報	
1	日本結晶成長学会論文賞	受賞者:木下恭一 表彰年月日:平成22年8月 受賞案件名:TLZ法開発と均一組成ハルルク混晶育成への応用	
2	日本マイクログラビティ応用学会、毛利ポスターセッション最優秀賞	受賞者:住岡沙羅 表彰年月日:平成25年11月 受賞案件名:微小重力環境下でのTLZ法によるSiGe結晶成長プロセスの数値シミュレーションに関する研究	
3	科研費基盤研究C	研究課題名:均一組成ハルルクSiGe結晶成長による飽和溶融帯移動法の普遍性の検証 代表研究者名:足立 聡 研究期間:平成15年～16年 配分総額:3,000,000円	
4	NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発	研究課題名:温度制御装置を必要としない光通信用半導体レーザーの研究開発 代表研究者名:依田眞一 研究期間:平成15年～17年 配分総額:169,603,200円	
5	NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発	研究課題名:省エネ性に優れた光通信用半導体レーザーの実用化開発 代表研究者名:依田眞一 研究期間:平成18年～20年 配分総額:51,243,150円	
6	NEDO 省エネルギー革新技術開発事業	研究課題名:極限CMOSの研究開発 代表研究者名:木下恭一 研究期間:平成21年～23年 配分総額:201,378,450円	
7	JST A-STEP [探索フェーズ]	研究課題名:超高速CPU開発に向けた高品質SiGe結晶基板製造方法の研究 代表研究者名:荒井康智 研究期間:平成26年12月～27年12月 配分総額:1,700,000円	
8	科研費基盤研究C	研究課題名:最高速CPU開発に向けた高品質ハルルク混晶SiGe単結晶育成方法の確立 代表研究者名:荒井康智 研究期間:平成26～28年 配分総額:3,900,000円	
9	JSTマッチングプログラム「探索試験」	研究課題名:高性能赤外線カメラ開発に向けた次世代レンズ用SiGe結晶の製造技術確立 代表研究者名:荒井康智 研究期間:平成27年10月～28年10月 配分総額:1,699,000円	
10	公開番号:特開2003-238287 登録番号:特許第4239065号	発明の名称:固溶体単結晶の製造方法 出願人:宇宙航空研究開発機構 出願日:平成14年12月 3日	
11	公開番号:特開2008-024562 登録番号:特許第4883614号	発明の名称:固溶体単結晶の製造方法 出願人:宇宙航空研究開発機構 出願日:平成18年 7月24日	

12	公開番号: 特開2008-209863	発明の名称: 半導体変調器 出願人: 日本電信電話株式会社	出願日: 平成19年 2月28日
13	公開番号: 特開2011-029213	発明の名称: 光半導体素子 出願人: 宇宙航空研究開発機構	出願日: 平成21年 7月 2日
14	公開番号: 特開2011-169489	発明の名称: 可変温度勾配式マルチゾーン型電気炉 出願人: 宇宙航空研究開発機構	出願日: 平成22年 2月17日
15	公開番号: 特開2014-084254 登録番号: 特許第6037380号	発明の名称: 固溶体単結晶の製造方法 出願人: 宇宙航空研究開発機構	出願日: 平成24年10月24日
16	公開番号: 特開2015-101492	発明の名称: 固溶体単結晶製造用容器およびそれを用いた固溶体単結晶製造方法 出願人: 宇宙航空研究開発機構	出願日: 平成25年11月21日
17	公開番号: 特開2015-224176	発明の名称: 固溶体単結晶の製造方法 出願人: 宇宙航空研究開発機構	出願日: 平成26年5月29日

7. 報道発表等

報道発表媒体		詳細情報	
1	JAXA広報による発表 JAXA webへの掲載 取り上げた新聞社等: 日刊工業新聞, 日経マイクロデバイス, メディアアジャム, マイコミジャーナル	発表タイトル: 出力の温度安定性に優れた1.3μm帯半導体レーザーの開発 発表日: 平成21年6月17日	
2	日経新聞	発表タイトル: 半導体の新材料宇宙空間で試作 報道日: 平成24年1月28日	
3	半導体産業新聞	報道タイトル: 微小重力下でSiGe単結晶を育成 報道日: 平成26年3月12日, 第2082号	
4	半導体産業新聞	報道タイトル: SiGe単結晶宇宙での育成に成果 報道日: 平成26年3月19日, 第2083号	
5	日刊工業新聞	報道タイトル: 基板用の高性能結晶作製 報道日: 平成28年7月25日	
6	yahooニュース(IT・科学欄) Web報道	報道タイトル: JAXAがスマホ処理性能が最高10倍になる半導体の高性能単結晶—ISSでの宇宙実験の成果を応用 報道日: 平成28年7月25日(日刊工業新聞の記事を引用)	
7	日刊工業新聞	報道タイトル: 宇宙発イノベーション—進む産業応用—SiGe均一結晶化 報道日: 平成28年7月29日	