

Thu. Nov 4, 2021

Room A

Symposium

[2Ap01-12] Symposium

Chair:Yuki Araki(Ritsumeikan University)

1:30 PM - 4:45 PM Room A (Udon)

[2Ap01] The optical measurement of planetary atmosphere and plasmas

*Kazuo Yoshioka¹ (1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

1:30 PM - 2:00 PM

[2Ap03] Development of high precision wolter mirror for X-ray telescopes

*Hidekazu Mimura¹ (1. School of Engineering, The University of Tokyo)

2:00 PM - 2:30 PM

[2Ap05] Lunar science based on radiation spectroscopy

*Masayuki Naito¹, Nobuyuki Hasebe² (1. National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 2. Waseda University)

2:30 PM - 3:00 PM

[その他] Break time

3:00 PM - 3:15 PM

[2Ap08] Visualizing Crystal Growth Process in Microgravity

*Katsuo Tsukamoto¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

3:15 PM - 3:45 PM

[2Ap10] Crystal growth mechanism revealed by space experiments

*Hitoshi Miura¹, Yoshinori Furukawa², Yoshihisa Suzuki³ (1. Graduate School of Science, Nagoya City University, 2. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 3. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University)

3:45 PM - 4:15 PM

[2Ap12] Graviresponses of unicellular protists

*Azusa Kage¹, Yoshihiro Mogami² (1. Department of Physics, Gakushuin University, 2. Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University)

4:15 PM - 4:45 PM

Fri. Nov 5, 2021

Room A

Symposium

[3Aa01-11] Symposium

Chair:Hirokazu Fukidome(Tohoku University)

9:00 AM - 12:00 PM Room A (Udon)

[3Aa01] Explanation of aim

*Hirokazu Fukidome¹ (1. RIEC, Tohoku University)

9:00 AM - 9:15 AM

[3Aa02] HEMTs for millimeter- and terahertz-wave wireless communications, and its applications in Beyond 5G

*Issei Watanabe¹ (1. National Institute of Information and Communications Technology)

9:15 AM - 9:45 AM

[3Aa04] Development trend of GaN-HEMT for post-5G application

*Yasunori Tateno¹ (1. Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

9:45 AM - 10:15 AM

[その他] Break time

10:15 AM - 10:30 AM

[3Aa07] Resonant-tunneling-diode terahertz sources and applications

*Masahiro Asada¹, Safumi Suzuki² (1. Tokyo Institute of Technology, Institute of Innovative Research, 2. Tokyo Institute of Technology, Dept. Electrical & Electronic Eng.)

10:30 AM - 11:00 AM

[3Aa09] Terahertz functional devices using semiconductor two-dimensional plasmons and their applications to the next-gen beyond 5G wireless communications

*Taiichi Otsuji¹ (1. Tohoku University)

11:00 AM - 11:30 AM

[3Aa11] Beyond 5G R&D Strategy of Japan for the next generation platform

*Yasushi Furukawa¹ (1. echnology Policy Division, Global Strategy Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications(MIC), Government of Japan)

11:30 AM - 12:00 PM

Symposium

[2Ap01-12] Symposium

Chair: Yuki Araki (Ritsumeikan University)

Thu. Nov 4, 2021 1:30 PM - 4:45 PM Room A (Udon)

[2Ap01] The optical measurement of planetary atmosphere and plasmas*Kazuo Yoshioka¹ (1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

1:30 PM - 2:00 PM

[2Ap03] Development of high precision wolter mirror for X-ray telescopes*Hidekazu Mimura¹ (1. School of Engineering, The University of Tokyo)

2:00 PM - 2:30 PM

[2Ap05] Lunar science based on radiation spectroscopy*Masayuki Naito¹, Nobuyuki Hasebe² (1. National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 2. Waseda University)

2:30 PM - 3:00 PM

[その他] Break time

3:00 PM - 3:15 PM

[2Ap08] Visualizing Crystal Growth Process in Microgravity*Katsuo Tsukamoto¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

3:15 PM - 3:45 PM

[2Ap10] Crystal growth mechanism revealed by space experiments*Hitoshi Miura¹, Yoshinori Furukawa², Yoshihisa Suzuki³ (1. Graduate School of Science, Nagoya City University, 2. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 3. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University)

3:45 PM - 4:15 PM

[2Ap12] Graviresponses of unicellular protists*Azusa Kage¹, Yoshihiro Mogami² (1. Department of Physics, Gakushuin University, 2. Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University)

4:15 PM - 4:45 PM

惑星大気・プラズマの光学観測

○吉岡 和夫¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

The optical measurement of planetary atmosphere and plasmas

○Kazuo Yoshioka¹

¹The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences

1. 宇宙機を用いた大気・プラズマの観測

惑星を取り巻く大気や、そのさらに上空に分布するプラズマは様々な波長の光を発している。例えば地球大気に含まれる酸素分子や OH 分子は、高度約 100km の上空において振動・回転準位の遷移に伴う光を紫外から赤外にかけて発している（大気光）。さらに、高度 1000km を超えるとヘリウム原子や水素原子の密度が上昇し、またそれらの一部は電離してプラズマ化し、特に紫外領域において複数の輝線を発している。

これらの輝線を撮像もしくは分光観測することで、大気密度分布や動的描像、さらにエネルギー構造などを遠隔的に把握できる。しかし天体を観測する際に地上からアプローチできる光は、いわゆる“大気の窓”と呼ばれる波長域に限られてしまう。一方、宇宙空間に出れば大気吸収やゆらぎの影響を気にすることなく、天体から発せられる様々な波長（もしくはエネルギー）の光を観測できるという大きなメリットがある。

2. 宇宙機搭載の光学観測装置

宇宙機に搭載する観測装置は本質的に小型・軽量化が求められる。しかし遠方の天体から到来する光は大抵の場合は微弱であり、良質な（S/N の高い）データを取得するために装置開発の工夫が不可欠である。

その例として、光検出器の感度向上や鏡の反射率向上が挙げられる。通常、波長 30-150nm の極端紫外と呼ばれる波長域の光の観測には、微小な光電子増倍管を集約した二次元検出器（Micro Channel Plate）を用いる。この素子の表面に仕事関数の高い物質を蒸着して量子効率を向上させる手法があり、経時変化や耐環境性の有無という観点も含めた開発課題になっている[1]。また、可視光領域とは異なり、極端紫外光に用いる鏡の反射率は 10%を下回ることも多く、その表面加工技術を駆使した高効率化が進められている。



Fig. 1. 打ち上げ前のひさき衛星

3. 惑星分光観測衛星「ひさき」

2013 年 9 月に JAXA は惑星分光観測衛星「ひさき」を打ち上げた (Fig.1). この衛星は、地球周回軌道（高度約 1000km）から、木星周辺のプラズマや、金星や火星の大気など、様々な天体を極端紫外波長で分光観測している[2-4]. 「ひさき」に搭載されている分光装置には、先述の量子効率向上技術や鏡の表面加工技術が用いられている。また、観測装置の劣化を防ぐために、装置の完成から打ち上げの直前（約 3 時間前）まで排気装置を接続して真空環境を維持するなどの運用上の工夫が施されている。

本発表では、「ひさき」を始めとするいくつかの宇宙機ミッションの装置開発を例にとり、宇宙機を用いた惑星観測の科学的な意義に加えて、様々な制約の下での装置の最適化に関して、設計から開発、運用、および成果創出に至る一連の過程を追いながら紹介する。

文 献

- 1) K. Yoshioka et al., *Rev. Sci. Instr.* 83, 083117 (2012).
- 2) K. Yoshioka et al., *Planet. Space Sci.* 85, 250 (2013).
- 3) K. Yoshioka et al., *Science* 345(6204), 1581 (2014).
- 4) K. Yoshioka et al., *Space Weather* 19, 002611 (2021)

*E-mail: kazuo.yoshioka@edu.k.u-tokyo.ac.jp

X線望遠鏡用高精度ウォルターミラーの開発

○三村秀和

東京大学大学院工学系研究科

Development of high precision wolter mirror for x-ray telescopes

○Hidekazu Mimura

School of Engineering, The University of Tokyo

蛍光X線分析などと同様、X線により天体観察を行うと様々な元素などの情報が得られる。X線により天体観察を行うためには宇宙空間に望遠鏡を打ち上げる必要がある。可視光と比べるとX線はミラー表面に対してすれすれの角度でしか反射せず、さらに結像条件を満足するために、図1に示すように双曲面と楕円面から構成されるミラーとなる。Wolter が 1952 年に提案したことから、このタイプのミラーをウォルターミラーと呼ぶ。高い分解能のX線望遠鏡で用いられる高精度なウォルターミラーは日本では実現されておらず、これまでヨーロッパもしくは米国で製造されていた。

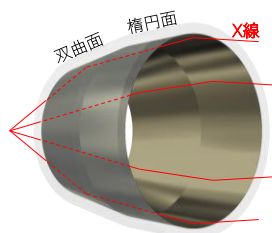


Fig. 1. X線望遠鏡用ウォルターミラー

東京大学の当研究室では、放射光施設などで用いられるX線顕微鏡用のφ10mm、長さ40mm程度の小型のウォルターミラーを開発してきた。精密電鍍法に基づく製造プロセスにより高精度化を実現し、世界で初めて、ミラー光学素子により、波長1nmの軟X線を100nmレベルまで集光することに成功するなど、実用化レベルのウォルターミラーを開発した¹⁾。本研究ではX線顕微鏡用に開発した製造プロセスを大型化しX線望遠鏡へ展開することで、わが国ではじめて高空間分解能を持つウォルターミラーの実現を目指した研究である。

当面の対象は、FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) と呼ばれるX線による太陽観察を目的とした

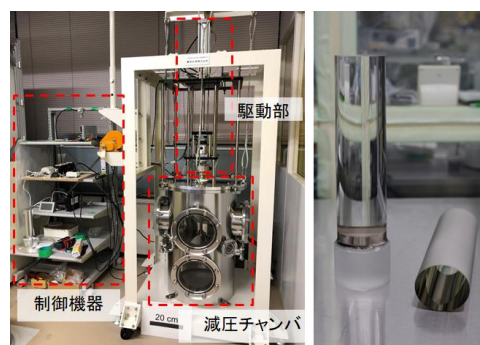


Fig. 2. 大型室温電析装置およびマンドレルと電鍍ミラー

ロケット型のX線望遠鏡である²⁾。これまで3回の実験がすでに行われており、太陽の軟X線分光イメージングに成功している。搭載されるウォルターミラーのサイズはφ60mm、長さ200mmであり、小型X線ミラーに比べて大幅にサイズが大きくなる。

図2の左の写真は大型ウォルターミラーの作製のため開発した電析装置であり、右の写真は、作製したウォルターミラーと電鍍で使用したマンドレルである。この2年で、6枚のウォルターミラーを作製しており、徐々にミラーの形状精度を向上してきた。また、SPRING-8などでのX線による評価も同時に進めている。

ウォルターミラーの形状精度からの性能予測やX線による評価結果は、作製したウォルターミラーが高い性能を持つことを示しており、すでに海外製のミラー性能に到達したと考えている。

本発表では、FOXSI4プロジェクトの概要、X線顕微鏡から、X線望遠鏡への開発に至った経緯、本プロジェクトの現状について発表する予定である。

文 献

- 1) H. Mimura et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 093104 (2018).
- 2) <https://phoenix-project.science/foxsi-4>

*E-mail: mimura@edm.t.u-tokyo.ac.jp

放射線計測に基づく月科学

○内藤 雅之^{1*}, 長谷部 信行²¹量子科学技術研究開発機構, ²早稲田大学

Lunar science based on radiation spectroscopy

○Masayuki Naito^{1*} and Nobuyuki Hasebe²¹National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, ²Waseda University

宇宙空間は水素核・ヘリウム核を主成分とした銀河宇宙線や太陽粒子線が飛び交う放射線環境である。これらの粒子が月や火星などの大気の薄い天体に入射すると、核破砕反応によって中性子を生成する。中性子と原子核の相互作用によって放出されるガンマ線は天体の元素情報を反映する。従って、ガンマ線スペクトルを計測することで天体表面約1 km以内の元素濃度を取得できる。また、中性子を熱・熱外・高速エネルギー領域に弁別して計測することで、地中の水素濃度が測定可能である。これらの放射線計測は米月探査 Lunar Prospector や日本月探査「かぐや」でも行われ、元素組成の観点から月地殻進化が議論されてきた。^{1, 2)}

例えば、鉄は溶岩の結晶化過程で存在量を大きく変化させ、終期に結晶化する深成岩ほど存在量が多い。カリウム、トリウムは天然放射性元素であり、熱源として溶岩の最終残留液に残る。最終残留液中に濃集する元素は KREEP と呼ばれ、カリウム(K)、希土類元素(REE)、リン(P)に富んだ岩石として表出する。これらの月表層での濃集は隕石衝突による地殻の掘削や火成活動による深層物質の噴出の痕跡と考えられる。局所的な元素濃度と地形・鉱物分布の比較から、月表面での火成活動は南極エイトケン盆地(SPA)を形成した隕石衝突を一因とすることが示唆されている(Fig. 1)。²⁾

近年では、月は惑星科学としての側面だけでなく宇宙資源として再び注目を集めている。特に重要視されているのは水素である。水素は月周辺での有人活動に必要な水源としてだけでなく、深宇宙探査用の燃料としての利用も期待される元素である。月面水素は極域での濃集が計測によって示唆されている³⁾。これは主に太陽粒子起源の水素核が月表層のレゴリス中に捉えられ、月面上で熱的な輸送を繰り返すことで低温環境な永久影領域に集積したためと考えられている。月面水素を資源として利用するためには、その存在量と形

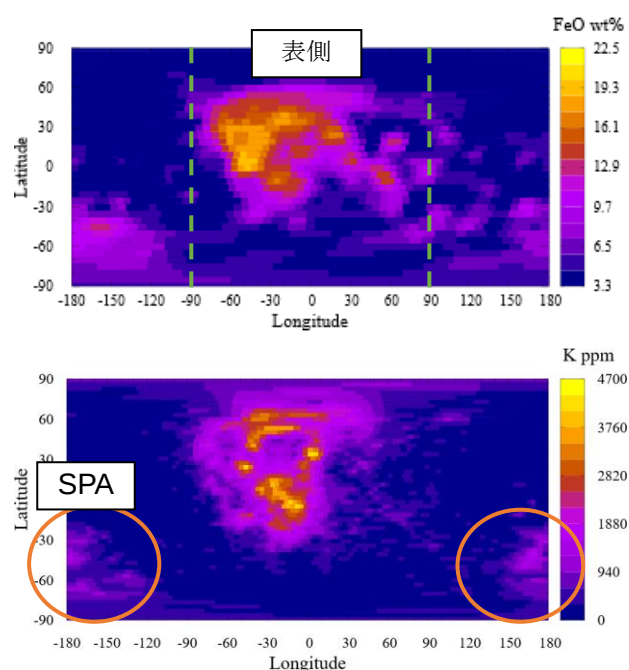


Fig. 1. かぐやによって計測された FeO(上, 空間分解能 150 km)と K(下, 100 km)の濃度分布。

態(-OH, H₂O など)を知ることが不可欠である。日本でも月極域の水素探査を目的とした国際共同計画が進められている。また、欧州では深成岩中の REE やイルメナイト(FeTiO₃)中に保持されるヘリウム-3を月資源として期待する動きも見られる。

本講演では、これまでの月面放射線計測によって明らかになった月科学と、将来の月・惑星探査向けの開発について発表する。

文 献

- 1) T.H. Prettyman et al.: J. Geophys. Res. **111**, E12007 (2006).
- 2) M. Naito et al.: J. Geophys. Res. **124**, 2347 (2019).
- 3) W.C. Feldman et al.: J. Geophys. Res. **106**, 23231 (2001).

*E-mail: naito.masayuki@qst.go.jp

3:00 PM - 3:15 PM (Thu. Nov 4, 2021 1:30 PM - 4:45 PM Room A)

[その他] Break time

無重力での結晶成長を観る

○塚本勝男

東北大学大学院・理学研究科/大阪大学大学院・工学研究科

Visualizing Crystal Growth Process in Microgravity

○Katsuo Tsukamoto

Tohoku Univ./Osaka Univ.

1. はじめに

無重量で結晶をつくと高品質の結晶ができると言われて久しい。その真偽はもとより、なぜ、そうなるかの研究が皆無であった1980年ころのことである。その当時、私たちは結晶の、特に、溶液から成長する結晶の成長メカニズムに興味をもっていた。結晶の成長は環境相である溶液と接する表面が最前線である。そのため、結晶表面の観察は成長メカニズムを明らかにする上で不可欠であり光学的方法で、結晶表面だけでなくその近傍の温度濃度分布も併せて“その場”観察をしていた。光学観察といっても、専用に開発した位相シフト干渉計や微分干渉顕微鏡など、位相に敏感な方法を使ったために、一分子の高さの成長ステップが明瞭に“その場”観察できていた¹⁾、Fig. 1。これはAFMで結晶表面の“その場”観察がされ始める以前のことであった。

一方、宇宙環境をつかった結晶成長の研究は、当時はデモ的な実験が主流であった。つまり、スペースシャトル内で結晶をつくって地上に持ち帰り、主にX線回折による研究で無重力での結晶品質が素晴らしいというような結果を得ていた。ただ、例外のほうが多くて、なぜ、そうなるのかに関しての研究はほとんどなかった。

そこで、私たちが考えたことは、“宇宙で結晶をつくるなら、その過程を観たい”、しかも、“地上の実験室のレベルと同等の測定をしたい”。レーザー干渉計を使った研究は、重い光学ベンチの上に設置するのが常である。それを、1グラム1万円の費用がかかる宇宙実験に使用するのは不可能であった。そのため、宇宙で結晶成長の“その場”観察を実現させるには、斬新な装置開発も必要であった。その時のスローガンは、“より小さく、より速く短時間に”であった。

これまで、小型ロケット、航空機、落下実験施設、

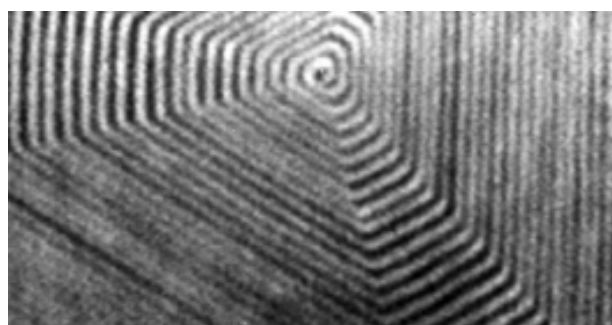


Fig. 1. 溶液中で成長しているCdI₂結晶のらせんステップ。このらせんステップがグルグル回転しながら結晶は厚みを増やして大きくなる。ステップの高さは1.4nm。

ロシアの回収衛星、スペースステーション (ISS) を利用して、結晶の核形成速度、成長速度、成長メカニズム、結晶の完全性などを調べた。使用した結晶はLiNb₃、CdI₂、Ba(NO₃)₂、リゾチーム (タンパク質結晶) など様々である。

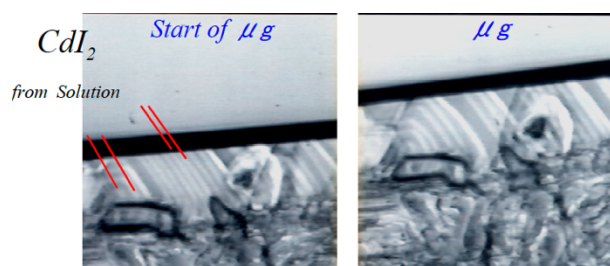


Fig. 2. 重力下ではらせんステップは等間隔に移動するが、無重力になった途端、間隔が広くなり乱れる。

一例としてFig. 2に、Fig. 1に示した単分子ステップの挙動が重力下と無重力下でどう違うかを示した。講演ではこれらの例のなかで、タンパク質結晶の無重力での結晶成長メカニズムの研究を簡単に紹介する。

1) Katsuo Tsukamoto, In-situ observation of crystal growth and the mechanism,
DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.005

*E-mail: katsuo.tsukamoto.d6@tohoku.ac.jp

宇宙実験によって明かされる結晶成長の仕組み

○三浦 均^{1*}, 古川 義純², 鈴木 良尚³

¹名古屋市立大学大学院理学研究科, ²北海道大学低温科学研究所, ³徳島大学大学院社会産業理工学研究部

Crystal growth mechanism revealed by space experiments

○Hitoshi Miura^{1*}, Yoshinori Furukawa², and Yoshihisa Suzuki³

¹Graduate School of Science, Nagoya City University, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,

³Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University

1. 結晶成長の仕組みを調べるには

例えば力学は、ニュートンの運動方程式が表すように、物体に与えた作用（外力）に対して、物体の運動（加速度）がどのように決まるのかを論じる学問である。一方、結晶成長学は、結晶化を促す作用（過飽和度など）に対して、結晶成長の速さ（成長速度）がどのように決まるのかを論じる学問である。従って、結晶成長の仕組みを解明するためには、成長条件と成長速度の関係を精密に求めることが必要である。

2. なぜ宇宙実験か？

結晶の成長は、周囲の温度や組成の変化、すなわち、密度の変化を伴う。そのため、重力の作用が無視できない地上では密度差による対流が発生し、結晶の成長環境が乱されてしまう。一方で、宇宙では重力の作用がほぼ無視できるため、成長環境の乱れの影響を抑えることができる。近年、国際宇宙ステーションにおける結晶成長“その場”観察実験により、地上と宇宙では結晶の成長速度が異なることが明らかとなった。例えば、不純物を含む溶液から成長したタンパク質結晶の成長は、同条件において、宇宙のほうが地上よりも速かった¹⁾。また、不純物を含む過冷却水からの氷結晶の成長実験では、地上では確認されていなかった、成長速度が周期的に変動する現象が観察された²⁾。このように、宇宙での結晶成長実験では、地上実験では成長環境の乱れに覆い隠されていた現象が白日の下に晒されることがある。

3. 結晶成長の数値モデル

宇宙実験で得られた結果は、結晶の成長速度というマクロな物理量である。一方で、結晶成長の本質は、結晶の成長単位である原子や分子が結晶表面においてどのように振る舞い、結晶格子に組み込まれていくか

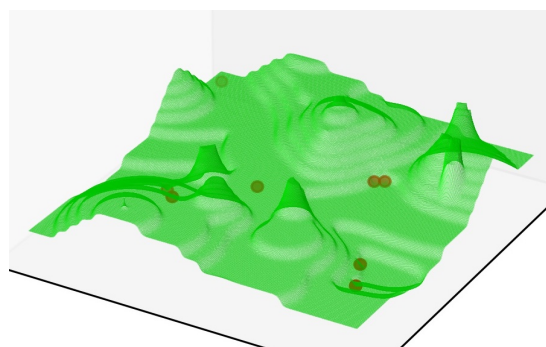


Fig. 1. 成長する結晶表面の数値計算の一例。緑の面が結晶表面の原子スケールの構造を、赤点が結晶表面に吸着した不純物を表す。

という、ミクロな素過程である。従って、宇宙実験の結果から結晶成長の仕組みを解明するためには、ミクロな原子・分子取り込み過程を理論的に扱い、実験結果と比較する必要がある。

我々は、成長する結晶表面のダイナミクスを理論的にモデル化し、ミクロな素過程が結晶の成長速度に及ぼす影響を調べている³⁾。特に、結晶の表面に吸着する不純物分子の影響に着目し、結晶成長において観察されるヒステリシスを世界で初めて数値的に再現するといった成果を挙げている⁴⁾。

本講演では、宇宙ステーションでの氷結晶成長実験²⁾ (Ice Crystal 2 project) の成果を中心に、宇宙と地上での結晶成長の違いや、その理論的解釈について紹介する。

文 献

- 1) Y. Suzuki, et al.: Cryst. Growth Des. 15, 4787 (2015).
- 2) Y. Furukawa, et al.: Sci. Rep. 7, 43157 (2017).
- 3) H. Miura and R. Kobayashi: Cryst. Growth Des. 15, 2165 (2015).
- 4) H. Miura: Cryst. Growth Des. 20, 245 (2020).

*E-mail: miurah@nsc.nagoya-cu.ac.jp

単細胞原生生物の重力応答

○鹿毛 あずさ^{1*}, 最上 善広²

¹学習院大学理学部物理学科, ²お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科

Graviresponses of unicellular protists

○Azusa Kage^{1*} and Yoshihiro Mogami²

¹Gakushuin University, ²Ochanomizu University

1. 序論

生物は重力に応答する。低レイノルズ数環境に生きる体長 10-100 μm オーダーの単細胞の原生生物も例外ではなく、多くの原生生物には負の重力走性¹⁾といって重力の反対方向、すなわち上に向かって泳ぐ性質がある。さらに、負の重力走性と重力そのものに駆動される自己組織化現象として生物対流²⁾がある。原生生物が液中に高密度で存在する時、負の重力走性と重力

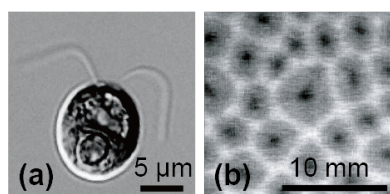


Fig. 1. Protists and bioconvection.

(a) A cell of *Chlamydomonas reinhardtii*,
(b) bioconvection of *C. reinhardtii*, top view.

の作用によって原生生物 1 個体の体長より 100 倍以上大きい規則的な濃淡のパターンが生じる。これが生物対流であり、自然界では赤潮の中で起こっていると考えられる (Fig. 1)。

本講演では、単細胞緑藻クラミドモナスの負の重力走性メカニズム³⁾と生物対流の微小重力実験⁴⁾⁵⁾について論じる。

2. クラミドモナスの負の重力走性

鞭毛運動のモデル生物である単細胞緑藻クラミドモナスの負の重力走性の力学的メカニズムとして、密度非対称性⁶⁾と形態非対称性⁷⁾が理論的に提唱されていた。密度非対称性モデルはクラミドモナス (Fig. 1a) を球体近似し、重心が後ろに偏っていて上に回転すると考える。形態非対称性モデルでは遊泳のための突起である鞭毛の形態を考える。これらのメカニズムの寄与を実験的に直接比較するため、脱鞭毛した細胞と、鞭毛があるが動きを止めた細胞の回転落下を比較し

た。鞭毛のある細胞は脱鞭毛した細胞より数倍速く回転するため、クラミドモナスの負の重力走性において形態非対称性が優勢であることがわかった。

3. 生物対流現象とその重力応答

それぞれの原生生物は異なる泳ぎの特性を持っているが、生物対流パターンが維持されるメカニズムは種を超えて共通なのだろうか？ 航空機微小重力実験を行い、単細胞緑藻クラミドモナスと繊毛虫テトラヒメナのどちらにおいても、生物対流パターンは微小重力下で消失することを実証した。さらに、細胞の重力応答には重力の大きさの閾値がある⁸⁾。集団になった時にこの閾値は変わるのだろうか？ 繊毛虫テトラヒメナの生物対流において、同じく航空機を用いて低重力実験を行い、重力応答の閾値を調べた。集団になることで個体の重力応答の閾値が明確に変わっている証拠は見出せなかったが、0.6 g までの低重力領域で生物対流パターンの消失が起こることがわかった。

4. 結論

単細胞原生生物の重力走性と生物対流現象について、地上実験と航空機実験を行ってきた。これらの実験を通して、重力生物学の一分野としての原生生物の重力応答の重要性を明らかにできたと考えている。

文 献

- 1) D.-P. Häder et al.: "Gravity and the behavior of unicellular organisms" (Cambridge University Press, 2005).
- 2) J. R. Platt: *Science* **133**, 1766-7 (1961).
- 3) A. Kage et al.: *J. Exp. Biol.* **223**(Pt 5), jeb205989 (2020).
- 4) A. Kage et al.: *Zool. Sci.* **28**, 206-14 (2011).
- 5) M. Yokoyama, M. Senoo, A. Kage, Y. Mogami: *Zool. Sci.* **36**: 159-166 (2019).
- 6) J. O. Kessler: *Nature* **313**, 218-220 (1985).
- 7) A. M. Roberts: *Biol. Bull.* **210**, 78-80 (2006).
- 8) M. Krause et al.: *Protoplasma* **229**, 109-116 (2006).

*E-mail: azusa.kage@gakushuin.ac.jp

Symposium

[3Aa01-11] Symposium

Chair:Hirokazu Fukidome(Tohoku University)

Fri. Nov 5, 2021 9:00 AM - 12:00 PM Room A (Udon)

本シンポジウムの趣旨（ダウンロード画面が開きます）

[3Aa01] Explanation of aim*Hirokazu Fukidome¹ (1. RIEC, Tohoku University)

9:00 AM - 9:15 AM

[3Aa02] HEMTs for millimeter- and terahertz-wave wireless communications, and its applications in Beyond 5G*Issei Watanabe¹ (1. National Institute of Information and Communications Technology)

9:15 AM - 9:45 AM

[3Aa04] Development trend of GaN-HEMT for post-5G application*Yasunori Tateno¹ (1. Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

9:45 AM - 10:15 AM

[その他] Break time

10:15 AM - 10:30 AM

[3Aa07] Resonant-tunneling-diode terahertz sources and applications*Masahiro Asada¹, Safumi Suzuki² (1. Tokyo Institute of Technology, Institute of Innovative Research, 2. Tokyo Institute of Technology, Dept. Electrical & Electronic Eng.)

10:30 AM - 11:00 AM

[3Aa09] Terahertz functional devices using semiconductor two-dimensional plasmons and their applications to the next-gen beyond 5G wireless communications*Taiichi Otsuji¹ (1. Tohoku University)

11:00 AM - 11:30 AM

[3Aa11] Beyond 5G R&D Strategy of Japan for the next generation platform*Yasushi Furukawa¹ (1. echnology Policy Division, Global Strategy Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications(MIC), Government of Japan)

11:30 AM - 12:00 PM

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

趣旨説明

○吹留博一^{1*}¹東北大学電気通信研究所

Explanation of aim

○Hirokazu Fukidome^{1*}¹Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

表面真空科学は Needs-oriented な側面が強い学問であり、社会問題解決の過程において新分野を開拓してきた。例えば、真空管開発における「表面電子回折」¹⁾、食糧難を解決する研究過程における「触媒化学」²⁾、トランジスタ発明過程における「半導体表面界面科学」¹⁾、などの創始が挙げられる。高電子移動度トランジスタ (HEMT) は、三村・冷水らが分子線エピタキシー (MBE) などの表面真空技術を駆使して実現した。HEMT は当初より電波天文や衛星放送に応用され、最近では車載レーダや携帯電話基地局に使用されるなどマイクロ波・ミリ波無線通信の時代を切り拓くとともに、ナノテクノロジーのさきがけとなっている。

第五世代移動通信システム (5G) に続く次世代移動通信システム「Beyond 5G」は来るべき Society 5.0 の基盤インフラとなるものである。Society 5.0 は SDGs を下支えするものであるため、Beyond 5G は SDGs 達成に必要な不可欠であると言える。Beyond 5G デバイスは、IoT などネットワークを通じてサーバーやクラウドサービスに接続され、高信頼性・極低電力で大容量の情報を相互に超高速伝送することを可能にすることが求められている。しかも、Beyond 5G デバイスの総数は、近い将来全世界で一兆個程度にも達し得る。ゆえに、地球環境の持続可能性を担保しつつ、物質のポテンシャルを極限まで引き出す物質・デバイス科学の創成が希求される。

上述の歴史的背景や社会的要請を踏まえると、Beyond 5G は表面真空科学において新たな萌芽を生み出す土壌になると考えられる。しかし、コロナ禍に伴う社会変容にとって 5G は不可欠なものと認識されるようになっているが、Beyond 5G は未だ全容がはっきりしているわけではない。そのため、学会員の方々の多くは Beyond 5G の重要性を認識しているものの、具体的なイメージをもてないのが現状であると推察される。

本シンポジウムでは、Beyond 5G の総論および推進戦略をご紹介していただき、Beyond 5G 研究開発に大きく貢献している研究者や企業の方に講演していただく。本シンポジウムを契機として、Beyond 5G に対する理解が進み、表面真空科学の新分野が切り拓かれることを期待したい。

文 献

- 1) John Gartner : “The Idea Factory: Bell Labs and the Great Age of American Innovation” (Penguin books, 2013)
- 2) Daniel Charles : “Master Mind: The Rise and Fall of Fritz Haber, the Nobel Laureate Who Launched the Age of Chemical Warfare”(HarperCollins, 2009).

*E-mail: 責任著者のメールアドレスを記載してください

ミリ波・テラヘルツ波帯無線通信向け HEMT と Beyond 5G 応用

○渡邊 一世

国立研究開発法人情報通信研究機構

HEMTs for millimeter- and terahertz-wave wireless communications, and its applications in Beyond 5G

○Issei Watanabe

¹National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

1. はじめに

2000 年代に入り, InGaAs 系高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) の電流利得遮断周波数 (f_T) は 400 GHz を超え, 2002 年にはゲート長 (L_g) 25 nm で $f_T = 562$ GHz が, 2007 年には 1 THz を超える最大発振周波数 (f_{max}) がそれぞれ報告されている^{1,2)}。一方, GaN 系 HEMT も 2000 年代後半から特性が向上し, 現在は約 600 GHz の f_{max} と 450 GHz を超える f_T が報告されている³⁾。これら報告は, InGaAs や GaN などの III-V 族化合物半導体電子デバイスが, ミリ波・テラヘルツ波帯 (30 GHz~3 THz) を用いた高速無線通信, 高感度なセンシングやイメージングを実現可能な電子デバイスであることを示している。今回, Beyond 5G 応用としてのミリ波・テラヘルツ波帯無線通信向け HEMT の高速・高周波化について報告する。

2. HEMT の高速・高周波化

HEMT の高速・高周波化には, 高い電子移動度や電子飽和速度をもつ半導体エピタキシャル結晶の設計・成長だけでなく, 作製プロセス・条件や HEMT 素子構造の最適化, 特にゲート電極の寸法 (L_g , ゲート幅 W_g) やソース・ドレイン電極間の距離 (L_{SD}) の短縮は必要不可欠である。我々は電子線(EB)リソグラフィにより素子全体を微細化(スケーリング)し, 1 μm 以下の L_{SD} (Fig. 1) や 50 nm 以下の L_g をそれぞれ実現している。また結晶表面の保護やショットキー界面の安定化のため三層絶縁膜 SiN/SiO₂/SiN 構造 (Fig. 2) を開発・導入した結果, $L_g = 45$ nm の GaN 基板上 MES 型 GaN-HEMT において国内最高の $f_{max} = 287$ GHz ($V_{ds} = 3.0$ V, $V_{gs} = 0.4$ V) を達成した^{4,5)}。また GaN 基板上 MIS 型 GaN-HEMT ($L_{SD} = 1$ μm , $L_g = 45$ nm, $W_g = 100$ μm) において, 出力電力密度 0.75 W/mm 以上を周波数 70 GHz で確認した。

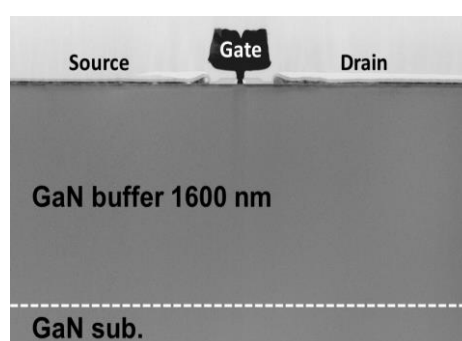
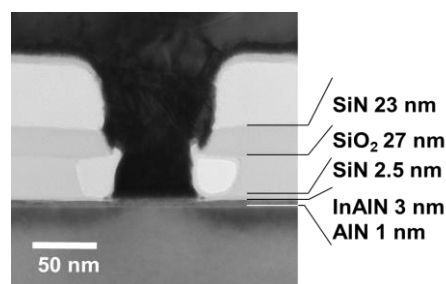


Fig. 1. GaN 基板上に作製された InAlN/AlN/GaN-HEMT

Fig. 2. T 型ゲート電極 ($L_g = 70$ nm) のフット部

謝辞

本研究開発の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」により実施された。

文 献

- 1) Y. Yamashita *et al.*, IEEE Electron Device Lett., vol. 23, no. 10, pp. 573-575 (2002).
- 2) R. Lai *et al.*, IEDM Tech. Dig., pp. 609-611 (2007).
- 3) K. Shinohara *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 60, no. 10, pp. 2982-2996 (2013).
- 4) A. Endoh *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 4B, pp. 3364-3367 (2006).
- 5) 山下他, 第 63 回応用物理学会 春季学術講演会, no. 20p-P9-2 (2016).

*E-mail: issei@nict.go.jp

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Post-5G に向けた高周波 GaN-HEMT の開発動向

○舘野 泰範¹

¹住友電気工業株式会社

Development trend of GaN-HEMT for post-5G application

○Yasunori Tateno¹

¹Sumitomo Electric Industries, Ltd.

窒化ガリウム (GaN) が持っている優れた材料物性を利用した高周波 GaN-HEMT は、2005 年に実用化・製品化に成功し、その後、マイクロ波帯通信用途や携帯電話基地局用、各種レーダー用途など、着実に応用範囲を拡大している。

近年では、より高い周波数領域で高出力・高効率が要求されるアプリケーションを目指した研究開発が精力的に行われており、post-5G 用のデバイスとしても大いに期待されている。

本講演では、一層の高周波化を実現する上での課題を整理し、それらの課題への取り組み状況をまとめる。また、各研究機関における GaN-HEMT の研究動向についても紹介したい。

*E-mail: 責任著者のメールアドレスを記載してください

10:15 AM - 10:30 AM (Fri. Nov 5, 2021 9:00 AM - 12:00 PM Room A)

[その他] Break time

共鳴トンネルダイオードによるテラヘルツ光源とその応用

○浅田雅洋^{1*}, 鈴木左文²

¹東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所, ²東京工業大学 工学院 電気電子系

Resonant-tunneling-diode terahertz sources and applications

○Masahiro Asada^{1*} and Safumi Suzuki²

¹Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology

²Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

周波数およそ 0.1~10THz のテラヘルツ (THz) 帯は様々な応用が期待され盛んに研究されている。通信においても 5G に続く次世代の通信システムでの活用が見込まれている。コンパクトな固体の THz 光源はそのための重要なデバイスである。ここでは、我々のグループが進めてきた共鳴トンネルダイオード (RTD) による光源¹⁾ について報告する。

2. RTD による THz 発振器

我々が THz 発振器に用いている RTD のポテンシャル構造を Fig. 1 に示す。主要部分は InGaAs/AlAs の二重障壁構造で、高電流密度化と電子の遅延時間短縮のために極薄の障壁と量子井戸を用いている。THz 発振は、印加電圧の増加とともに電流が減少する微分負性コンダクタンス領域を用いる。動作電圧低減のために深い量子井戸とステップエミッタ構造を導入している。

Fig. 2 にこの RTD を用いた THz 発振器の構造を示す。RTD には共振器と放射器を兼ねたスロットアンテナが集積され、出力は基板側から Si レンズを通して取り出される。発振は RTD の微分負性コンダクタンスが放射損失や導体損失を打ち消したときに起こり、発振周波数はスロットアンテナと RTD からなる共振回路の共振周波数で決まる。

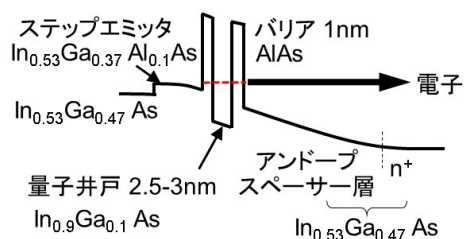


Fig.1 RTD のポテンシャル構造

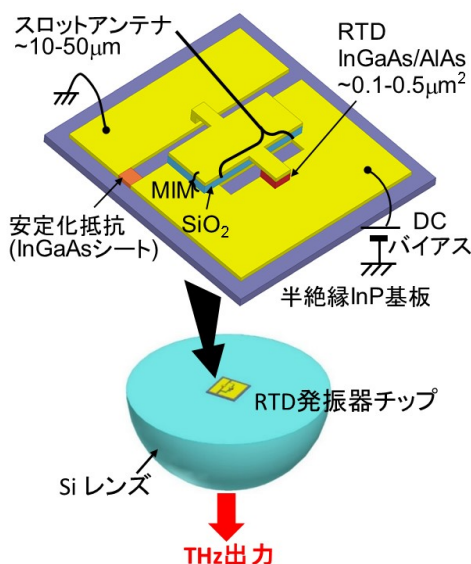


Fig.2 RTD を用いた THz 発振器の構造

高周波発振を行うために、RTD の高電流密度化、遅延時間の短縮、アンテナ損失の低減を行い、現在までに室温電子デバイスで最高の 1.98THz の発振が得られている。高出力化では 89 素子アレイの電力合成により、1THz において 0.73mW が得られている。より高い周波数や高出力の発振が可能な素子構造、および、簡略化した素子構造の作製も進められている¹⁾。

RTD 発振器の応用では、小型で簡易な構成が可能という特長を生かして、バイアス電圧に信号を重ねる直接変調を用いた大容量 THz 無線通信、同じく直接変調信号の位相や周波数を利用した THz レーダーや 3D イメージングなどの基礎実験が行われている¹⁾。

文 献

- 1) M. Asada and S. Suzuki, Sensors, **21**, 1384 (2021).

*E-mail: asada@pe.titech.ac.jp

半導体二次元プラズモンを利用したテラヘルツ機能デバイスとその 次世代 Beyond 5G 無線通信への応用

○尾辻 泰一*

東北大学電気通信研究所

Terahertz functional devices using semiconductor two-dimensional plasmons and their applications to the next-gen beyond 5G wireless communications

○Taiichi Otsuji *

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

1980 年代初頭に自動車電話が世に登場して以来、半導体集積回路・量子エレクトロニクス技術の目覚ましい発展に支えられ、インターネット技術の普及・発展と足並みを揃えて移動体無線通信技術は長足の進歩を遂げている。昨年 2020 年にはいよいよ第 5 世代 5G サービスの商用化が開始された。5G のハイエンドサービスでは、搬送周波数として 28 GHz 帯が我が国では使用されている。従来よりも 1 桁高い周波数帯を利用することで、より高速・大容量・多接続の無線通信サービスが実現し、2020 東京オリンピックでもその臨場感あふれるダイナミックな映像配信が注目された。しかしながら、コロナ禍での困難な‘くらし’を経てニューノーマルな社会への変革が求められる中、スマホ利用のユースケースは従来の想像をはるかに超えるほどに多様化し、ひとびとの「より高速で、より大容量で、より多接続」を可能とする無線通信技術への要求は留まるところを知らない¹⁾。

そのような背景のもとに、移動体通信のトラフィック量増大に対応するため、次世代 Beyond 5G (B5G) の研究開発が盛んに行なわれている²⁾。5G に続く第 6 世代の 6G、さらにその先の第 7 世代の 7G が技術開発ロードマップの指標となる。B5G はそれらを総称した呼称である。B5G の無線周波数帯は、ミリ波テラヘルツ波帯が中核となる²⁾。周波数がミリ波からテラヘルツ波へと向上するにつれて電磁波の大気減衰が強くなる。遠距離の無線伝送にはより高出力な送信デバイスとより高感度な受信デバイスの実現が求められる。しかしながら、トランジスタをはじめとする電子デバイスもレーザーダイオードをはじめとするフォトニックデバイスも、本質的な物理限界によってテラヘルツ帯での動作は困難を極めている^{3,4)}。

かかる‘テラヘルツギャップ’を克服するブレークスルーとして、半導体二次元プラズモンを新たな動作原理とするテラヘルツ機能デバイスの研究動向が注目されている^{5,6)}。最近著者らのグループは、グラフェンを利得媒質とするレーザートランジスタを試作し、100K の低温下ながら単一モードレーザ発振の実証⁷⁾や、グラフェンプラズモンの不安定性に由来する室温下でのテラヘルツ波の誘導増幅の実証⁸⁾に成功するなどの成果を挙げている。本稿では、半導体二次元プラズモンを新たな動作原理とするテラヘルツ機能デバイスの最先端研究動向を紹介するとともに、その B5G 無線通信への応用の可能性について論ずる。

文 献

- 1) 寶迫, “6G に向けたテラヘルツ波通信技術の動向,” ITU ジャーナル, vol. 51, no. 5, pp. 22-25, May 2021.
<https://www.ituaj.jp/?download=24728>
- 2) 総務省, B5G 推進戦略懇談会 提言, June 2020.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000696612.pdf
- 3) M. Tonouchi: Nat. Photon. **1**, 97-105 (2007).
- 4) K. Sengupta, T. Nagatsuma, and D.M. Mittleman, Nat. Electron. **1**, 622-635 (2018).
- 5) T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, IEEE Trans. Thz. Sci. Technol. **3**, 63-71 (2013).
- 6) V. Ryzhii, T. Otsuji, and M.S. Shur, Appl. Phys. Lett. **116**, 140501 (2020).
- 7) D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe, J. Mitsushio, Y. Tobah, K. Sugawara, A.A. Dubinov, A. Satou, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, Nanophoton. **7**, 741-752 (2018).
- 8) S. Boubanga-Tombet, W. Knap, D. Yadav, A. Satou, D.B. But, V.V. Popov, I.V. Gorbenko, V. Kachorovskii, and T. Otsuji, Phys. Rev. X **10**, 031004 (2020).

(最終アクセス 2021 年 9 月 3 日)

*E-mail: otsuji@riec.tohoku.ac.jp

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

未来を拓く Beyond 5G 研究開発の戦略的推進について

○古川 易史¹¹総務省国際戦略局技術政策課

Beyond 5G R&D Strategy of Japan for the next generation platform

○Yasushi Furukawa^{1*}¹Technology Policy Division, Global Strategy Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications(MIC),
Government of Japan

2030年代のあらゆる産業・社会基盤として期待される5Gの次の無線通信技術 Beyond 5G(いわゆる 6G)について、我が国の国際競争力強化等の観点から戦略的な推進が必要である。総務省では、令和2年6月、Beyond 5G 推進戦略を発表し、特に研究開発戦略については、2025年頃から順次要素技術確立するため、2020年から最初の5年間で「先行的取組フェーズ」として先端技術への集中投資を行うこととした。この一環として、令和2年度第3次補正予算により Beyond 5G 実現に資する公募研究開発のための基金を創設し、国内外・産学官の多様なプレイヤーの叡智を結集した戦略的な研究開発を推進するとともに、知財・標準化活動の加速化を進めている。令和4年度以降も引き続き我が国の国際競争力を強化し、激化するグローバル開発競争を勝ち抜くため、これらの取組を推進することとしている。本講演では、政府における科学技術戦略や ICT 戦略の概要とともに、Beyond 5G をとりまく現状と戦略の方向性について概説する。

*E-mail: y-furukawa@soumu.go.jp