

## 特別講演

### 空間反転対称性の破れがもたらす新しい電子状態

播磨 尚朝

神戸大学大学院理学研究科物理学専攻

物理学のほとんどの基礎方程式は時間反転や空間反転に不変であり、その存在を特に断らない場合がある。結晶の電子状態を考える場合には、時間反転対称性については従来の教科書にも記述が多く、クラマース (Kramers) 縮退などで知られている。結晶の並進対称性の既約表現のラベルである  $\mathbf{k}$  は時間反転で  $-\mathbf{k}$  に変わるので、電子のスピン状態を  $(\uparrow, \downarrow)$  で表すと、時間反転対称性がある時の電子のエネルギーは  $E(\mathbf{k}, \uparrow) = E(-\mathbf{k}, \downarrow)$  というクラマース縮退が残る。結晶の空間反転対称性が破れていると、一般にはこれ以上の縮退は残らない。しかしながら、従来の固体電子論の多くの教科書では、結晶の空間反転対称性 ( $E(\mathbf{k}, \uparrow) = E(-\mathbf{k}, \uparrow)$ ) を暗に仮定しているので、結果として「 $\mathbf{k}$  空間の電子状態はスピン自由度で二重に縮退している」状態から議論を始めている。

空間反転対称性が破れている場合は、結晶内の一電子状態のスピン自由度による縮退は解けており、金属の場合はフェルミ面が  $\mathbf{k}$  に依存したスピン構造を示す。ただし、時間反転対称性がある場合は全体の磁気モーメントはゼロになり、磁化は生じない。結晶の空間反転対称性が破れていることに起因する現象は、外部磁場や電流を加えたりして、時間反転対称性を破った時に現れる。その現象は空間対称性に応じた電子状態のスピン構造と時間反転対称性の破り方に依存しており、その大きさはスピン自由度による縮退の解ける大きさに依存していると予想することができる。

空間反転対称性の破れに伴うスピン自由度による分裂は、ラシュバ (Rashba) 分裂と呼ばれることが多い。ラシュバ分裂は自由空間から鏡映面が失われたただけの場合なので、現実の物質に適用するには単純すぎる。また、その分裂の起源についても、鏡映対称性を破る電場によるものであるという誤解が蔓延している。

本講演では、相対論的なスピン軌道結合[1]と、そこから導かれるスピン軌道相互作用[2,3]を明確に分けて解説する。また、空間反転対称性が破れた場合の新しい現象として、フェルミ面のスピン構造に起因する磁場中の量子振動における軌道交差[4]や、磁気秩序することで反転対称性を破り電流誘起磁化が生じる UNi<sub>4</sub>B[5]の例などを紹介する。

参考文献

- [1] D D Koelling and B N Harmon, J. Phys. C: Solid State Phys. **10** 3107 (1977).
- [2] 柳瀬陽一・播磨尚朝、「スピン軌道相互作用と結晶中の電子状態」(その1～その3)、固体物理 **46-5**, 229 (2011); **46-6**, 283 (2011); **47-3**, 101 (2012).
- [3] 播磨尚朝、「群と結晶」、数理物理 (特集: 群と物理学) **601** 34 (2013).
- [4] N. Kimura, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 114708 (2018).
- [5] H. Saito, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033702 (2018).

## A-a01

### ゲージ・ヒッグス統一模型におけるヒッグス3点結合の解析

富山大理 柿崎充、<sup>o</sup>鈴木慎

Analysis of the Triple Higgs Boson Coupling in a Gauge-Higgs Unification Model

Univ. of Toyama M. Kakizaki, <sup>o</sup>S. Suzuki

ゲージ・ヒッグス統一模型は TeV スケールで階層性問題を解決する新物理模型として注目されている模型の一つである。この模型では TeV スケールの余剰次元を導入することでヒッグス場をゲージ場の余剰次元成分に埋め込んでいる。これによりヒッグスセクターについてもゲージ原理で記述することができるが、同時にいくつかの工夫も必要となる。ヒッグスセクターに関して特に注意しなければならないのは余剰次元のスケールとヒッグス場の質量に関する制限であり、これはゲージ・ヒッグス統一模型のヒッグスポテンシャルがゲージ対称性のために古典的に禁止されることと関係している。そのため、模型を構築する上でヒッグスポテンシャルの持つ役割は重要であり、これまでに多くの研究が行われてきている。その一方でポテンシャルの三階導関数によって与えられるヒッグス3点結合に関してはあまり注目されてこなかった。そこで本研究ではヒッグス3点結合を用いたゲージ・ヒッグス統一模型の検証可能性について考察した。

本発表では現実的なゲージ・ヒッグス統一模型として、最も簡単な5次元 SU(3) モデルの拡張を考える。この拡張モデルは、5次元 SU(3) モデルの問題点であるヒッグス質量とトップクォーク質量の再現を“5次元ローレンツ対称性を破るパラメーター”の導入によって可能にしている。まずはこの拡張モデルで1ループレベルでのヒッグスポテンシャルを計算し、特に問題となる余剰次元スケール、トップ質量、ヒッグス質量に関する現在の制限を回避可能であることを示す。その後、このモデルのヒッグス3点結合に関して標準理論からのズレを解析し、ヒッグス3点結合を用いた ILC などの将来実験におけるモデルの検証可能性について紹介する。

## A-a02

### Two Higgs doublet model における two-step 電弱相転移の可能性

金沢大理工 <sup>o</sup>澁谷紘人, 小松嵩宗

The possibility of a two-step electroweak phase transition in two higgs doublet models

Grad. Sch. of Natural Science & Technology Kanazawa Univ <sup>o</sup>H. Shibuya, T. Komatsu

電弱バリオン数生成は宇宙のバリオン非対称性を説明する上で理論的に有望であり、かつ実験で検証できるシナリオである。電弱バリオン数生成が起こるためには電弱相転移が強い1次相転移となる必要があるが、数々の素粒子実験で正しさが認められている標準模型では2次相転移となってしまう。また、標準模型を拡張した two higgs doublet model (THDM) においては、電気双極子モーメントの実験から one-step の相転移では現在の宇宙に存在するバリオン数を説明する事は難しいと分かっている。しかし、THDM において two-step の相転移はほとんど調べられていない。つまり、この two-step の相転移によって電弱バリオン数生成を実現出来る可能性が残っている。本研究では、簡単のため CP 対称性が破れておらず、 $Z_2$  対称性を持つ THDM について two-step の相転移が起こるかを調べた。調べる手段として public code である cosmoTransitions を用い、上記の THDM についてパラメータ領域を探索した。その結果、多くのパラメータで two-step の相転移を起こす事が分かった。

## A-a03

### 古典的スケール不変な素粒子拡張模型に基づくインフレーション

金沢大自然 富田 克樹

Cosmic inflation based on a classically scale invariant extended standard model

Kanazawa Univ. K. Tomita

2012年にLHC実験により、標準模型によって予言されていたヒッグス粒子の存在が確かめられた。標準模型においてヒッグス場は自身の真空期待値でもって他の場に質量を与える役割を持つが、電弱スケールの真空期待値を持つために、同じく電弱スケールのヒッグス場の負の質量項の存在が単に仮定されている。この質量項に関連する問題として階層性問題がある。これは、ヒッグス場と相互作用し、電弱スケールより極端に大きい質量を持つ場が模型内に存在すると、ヒッグス場の質量がその大質量の影響を受けてしまい、ヒッグス場の質量を電弱スケールに留めようとすると微調整が必要になる、という問題である。また、質量項を単に仮定しているため、その質量、あるいは電弱スケールの起源は説明できない。標準模型で説明できていない種々の素粒子現象を説明するには一般に新たな場を導入する必要があるが、その際に、上記の問題が発生する可能性がある。

[1]にて、新たな対称性として古典的スケール不変性を課すことで階層性問題を解決した上で、同時にダークマターの存在と電弱スケールの起源を説明する模型が提案されているが、主にTeVスケール以下の物理のみが議論されていた。TeVスケールより高いエネルギースケールの物理の一つとして、我々はこの模型をさらに拡張した模型において、ユニタリティを破ることなく、また、真空の不安定性も引き起こさず、CMBの観測結果とも矛盾しないインフレーションの実現可能性について議論する。また、再加熱のシナリオや再加熱温度についても議論を行う。

[1] M. Holthausen, J. Kubo, K. S. Lim, and M. Lindner, JHEP 1312, 076 (2013), [arXiv:1310.4423 [hep-ph]]

## A-a04

### 多成分暗黒物質を伴う輻射シーソー模型によるインフレーション

金沢大数物, 金沢大自然<sup>A</sup> 青木真由美、<sup>o</sup>楊錦波<sup>A</sup>

Inflation by Multicomponent Dark Matter in a Radiative Seesaw Model

Kanazawa Univ. Mayumi Aoki, <sup>o</sup>Jinbo Yang

ニュートリノ質量を説明する機構の一つとして輻射シーソー機構が挙げられる。これは量子効果によってニュートリノ質量を説明する機構であり、これまでに様々な模型が提案されている。一方、インフレーションモデルについても色々な可能性が議論されているが、その中でも、ヒッグス場をインフラトンとするインフレーションモデルは、新スカラー場を必要とせずにインフレーションを実現できる最小な模型である。ヒッグスインフレーションモデルでは、ヒッグス場が重力と非最小結合をするため、観測データと矛盾しないインフレーションパラメーターが導かれる。同様の機構を用いて、近年、ヒッグス場の代わりに、暗黒物質でインフレーションを起こす模型も提案されている。例えば、Borah et.alの論文(Phys.Rev.D99,055012)では、ニュートリノ質量と暗黒物質を同時に説明できる輻射シーソー模型において、Inert doublet スカラー場をインフラトンとして重力と非最小結合をするインフレーションモデルが構築され、再加熱過程により Inert doublet の自己結合の強さに制限が与えられた。

本講演では、 $Z_2 \times Z'_2$  対称性を課すことによって複数の暗黒物質を予言する輻射シーソー模型に注目し、その枠組みでインフレーションが実現される可能性について議論する。特に、暗黒物質の一つとなるスカラー場をインフラトンとして重力と非最小結合をするインフレーションモデルを考え、インフレーションパラメーター等について議論する。また、インフレーション終了後の再加熱についても考察する。

## A-a05

### $A_4$ 対称性の下でのハイブリッドシーソー機構

金沢大数物, 金沢大自然<sup>A</sup> 青木真由美, °金子大毅<sup>A</sup>

Hybrid seesaw mechanism in the  $A_4$  symmetry

Kanazawa Univ. M. Aoki, °D. Kaneko

ニュートリノ振動の観測により、素粒子標準模型では厳密に質量を持たないとされているニュートリノに質量が存在することが明らかになった。これまでの観測結果から、ニュートリノの質量は非常に小さいことが知られており、その小ささを説明することができる機構としてツリーレベルのシーソー機構や、量子効果を用いる輻射シーソー機構が提案されている。輻射シーソー機構では、模型に離散対称性である  $Z_2$  対称性を課すことにより、軽いニュートリノの質量を説明すると共に暗黒物質を予言する模型も提案されている。また、標準模型ではニュートリノの世代間の関係を決定することは出来ないが、フレーバー対称性を課した模型では決定することが可能であり、中でも  $S_3, A_4, S_4$  などの対称性は tri-bimaximal mixing を導く対称性として知られている。しかしながら、現在の観測結果から世代間の関係は tri-bimaximal mixing からわずかにずれていることが明らかになっている。

$A_4$  対称性の下で、tri-bimaximal mixing からのずれを導くニュートリノの質量行列は先行研究 [1] によって 4 種類のフレーバー構造を持つ質量行列の和によって表せることが分かっている。そこで本研究では Type-I シーソー機構と輻射シーソー機構の二つの機構を用いることにより  $A_4$  対称性の下でこの 4 つのフレーバー構造を実現する模型を考える。また、 $A_4$  対称性がその部分群に自発的に破れることにより安定なスカラー粒子が暗黒物質になることから、ニュートリノの質量と暗黒物質の検証可能性の関連性についても議論する。

[1] Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto, and Atsushi Watanabe. Breaking Tri-bimaximal Mixing and Large  $\theta_{13}$ . Prog.Theor.Phys.,126:81-90,2011.

## A-a06

### 自己相互作用を持つ暗黒物質の対消滅によるニュートリノフラックス

金沢大自然, 金沢大理工<sup>A</sup> Idham Syah Alam, °橋本剛, 末松大二郎<sup>A</sup>

Neutrino flux from pair-annihilation of dark matter with self-interaction

Kanazawa Univ. I. S. Alam, °T. Hashimoto, D. Suematsu

宇宙に存在するとされている暗黒物質の探索方法として、暗黒物質と核子との衝突を直接観測する方法と、暗黒物質由来のガンマ線やニュートリノを観測することで暗黒物質を間接的に検出する方法がある。暗黒物質の間接探索においては、銀河中心や太陽、超新星などの天体に着目する。天体の内部でハロー中の暗黒物質と天体中の核子が衝突することで、暗黒物質がエネルギーを失い天体の重力により天体中に捕獲される。その後捕獲された暗黒物質が対消滅し、生成された光子やニュートリノといった信号を地上の検出器で観測することで暗黒物質の存在を間接的に探索することが出来る。暗黒物質が自己相互作用を持つ場合には、核子との散乱のみならず、既に天体中に捕獲されている暗黒物質にハロー中の暗黒物質が衝突し、通常の捕獲の機構と同様にして天体中に捕獲される場合がある [1]。

Scotogenic 模型 [2] は、現在確立している標準模型に暗黒物質の候補となるイナート二重項と右巻きニュートリノを加え、暗黒物質の存在と共に左巻きニュートリノの小さな質量を説明することができる。本研究では Scotogenic 模型の拡張模型において、暗黒物質が強く自己相互作用をする場合にニュートリノフラックスの解析を行う。拡張模型として、Scotogenic 模型に更に暗黒物質の自己相互作用を増大させうる 1 重項の実スカラー場の導入を考える。このスカラー場の暗黒物質の自己相互作用への寄与によって天体に捕獲される暗黒物質の量への影響、及びこの暗黒物質の対消滅により生じるニュートリノのフラックスについて調べる。

[1] A. R. Zentner, Phys. Rev. D80 (2009) 063501

[2] E. Ma, Phys. Rev. D73 (2006) 077301

## A-a07

### ニュートリノ観測による使用済み核燃料中の組成測定の見直し

福井大学・工 西川侑志 中島恭平 玉川洋一

Study of the Spent Fuel Composition Measurement by Neutrino Observation

Univ. of Fukui Yushi Nishikawa Kyohei Nakajima Youichi Tamagawa

使用済み核燃料から発生する反電子ニュートリノを検出し、ニュートリ数およびエネルギーを観測することによって燃料組成 (U/Pu) の算出を試みる「使用済み核燃料のニュートリノモニター」技術について、その実現可能性を検討する。

原子炉が稼働している際、U と Pu の核分裂によるエネルギーを利用して発電を行なっているが、U と Pu の核分裂による生成量に差がある核種がある。このうち、 $\beta$ 崩壊しかつ半減期が数日以上とある程度長い核種に着目する。さらに、 $\beta$ 崩壊によって発生する反電子ニュートリノは逆 $\beta$ 崩壊を用いて観測するため、 $\beta$ 崩壊の Q 値が閾値の 1.8MeV 以上である必要がある。

以上の条件を満たす核種として、使用済み核燃料中の Ru、Ce が候補に上がった。一般的な商用炉において使用済み核燃料量が発生した場合を想定し、Ru と Ce 起因のニュートリノフラックスを計算した。さらに、検出器のサイズと使用済み核燃料からの距離を仮定し、どの程度のニュートリノ反応数が得られるか試算した。本講演ではこれらの見積もりについて述べ、使用済み核燃料のニュートリノモニターが現実的に可能であるかを説明する。

## A-a08

Top quark mass study from leptonic observables in the di-lepton channel at the LHC

Kanazawa Univ. °Lalu Zamakhsyari

Top quark mass is a fundamental parameter of the Standard Model, and its precise measurement is one of the goals in LHC. Numerous observables and methods have been employed to measure the top quark mass theoretically/computationally. In this research however, a different theoretical study is employed. Most notably is the full assesment of possible Feynman diagrams at Leading Order from QCD point of view on the di-lepton channel of top quark production  $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow e^+\nu_e\mu\bar{\nu}_\mu b\bar{b}$ . This assesment refers to the inclusions of doubly-, singly- and non resonant contribution of top quark and  $W$  boson.

After that, various leptonic observables' differential distributions are used to determine the sensitivity to the top quark mass variations. These observables are the invariant mass of lepton pair ( $M_{ll}$ ), transverse momentum of lepton pair ( $p_{T,ll}$ ), transverse momentum of individual leptons with its average ( $p_{T,l_1}, p_{T,l_2}, p_{T,l}$ ) and rapidity of the leptons ( $y_{l_1}, y_{l_2}, y_l$ ). Then the top quark mass extraction is done and the results are compared to standard observables: invariant mass of the top pair ( $M_{t\bar{t}}$ ) and invariant mass of the lepton-bottom pair ( $M_{bl}$ ). The end result has shown that the best result for extracting the top quark mass is achieved by using the  $p_{T,ll}$ .

## A-a09

### 2次元イジング模型の逆くりこみ群による配位生成

金沢大数物, 金沢大自然<sup>A</sup> 青木健一, °三浦弘太郎<sup>A</sup>

Configuration generator based on reverse renormalization group in 2-dimensional Ising model

Kanazawa Univ., NST, Kanazawa Univ.<sup>A</sup> Ken-Ichi Aoki, °K. Miura<sup>A</sup>

本研究では、イジングモデルのくりこみ群変換を用いた解析より、その粗視化の過程を遡ることでマクロな系からそれに物理的に対応するミクロな系の配位を確率的に生成することを試みた。配位生成の過程は独立なものであり、モンテカルロ法のようなサンプル同士の自己相関の問題は存在しない。サンプル平均と期待値の理論値との比較をし、その配位生成器の評価を行う。

先行研究では、この方法によって外部磁場無しの1次元最近接相互作用イジングモデルと長距離相互作用イジングモデルについての配位生成が行われた。本研究では、以上のモデルに外部磁場を加えたモデルと、2次元イジングモデルの外部磁場無しの場合の配位生成を行った。2次元イジングモデルのくりこみ解析は近似的なものであり、この配位生成法によってその近似に対応した系の配位が生成されることが期待される。

この配位生成手法はくりこみ群変換による粗視化に基づいた解析が知られている統計系に一般に適用できると考えられる。

## A-a10

### 非等方テンソルくりこみ群におけるボンド入れ替えコストの削減

金沢大理工 大羽秀明

Cost reduction of swapping bonds part in anisotropic tensor renormalization group

Grad. Sch. of Natural Science & Technology Kanazawa Univ. H. Oba

非等方テンソルくりこみ群 (ATRG) は、任意次元古典格子模型に対して分配関数を近似的に求めるアルゴリズムである。一回の粗視化にかかる ATRG の計算コストおよびメモリコストのうち、テンソルのボンドを入れ替える部分が最も大きく、それぞれ  $O(\chi^{2d+1})$ ,  $O(\chi^{2d})$  である。ここで、テンソルの低ランク近似で採用する次元の数を  $\chi$ 、模型の次元を  $d$  とする。ボンド入れ替え部分を我々の提案手法に変更することで、当該箇所の計算コスト  $O(\chi^{\max(d+3,7)})$  に、アルゴリズム全体のメモリコストを  $O(\chi^{\max(d+1,6)})$  に削減できる。四次元イジング模型を用いて、オリジナルの ATRG および提案アルゴリズムで数値実験を行った。その結果、2つのアルゴリズムによって求めた自由エネルギー密度の精度は同程度であることが分かった (図1)。一方で、提案アルゴリズムが計算時間を大幅に削減することも確かめた (図2)。また、高次テンソルくりこみ群 (HOTRG) とも比較を行った。その結果、提案アルゴリズムは HOTRG と同じ計算時間で、自由エネルギー密度の値が低くなること分かった (図3)。

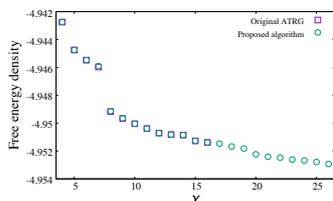


図1: ATRG と提案アルゴリズムの自由エネルギー密度

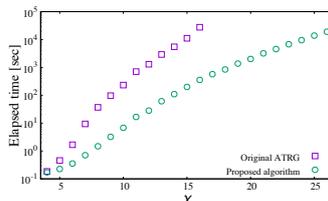


図2: ATRG と提案アルゴリズムの実行時間

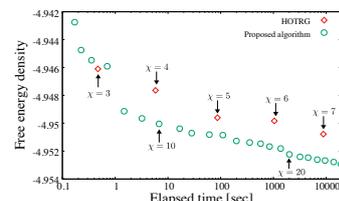


図3: HOTRG と提案アルゴリズムの自由エネルギー密度

## A-a11

### 離散ハイゼンベルグ群における自己同型群の構造 奇数格子の場合

福井大工 田中溪太, 橋本貴明

Structure of automorphism of discrete Heisenberg group for odd lattice case

Fac. of Eng., Univ. of Fukui K.Tanaka, T.Hashimoto

Wigner 関数  $\mathcal{W}(q, p)$  を  $\mathcal{W}(q, p) = \text{Tr}(\rho \Delta(q, p))$ ,  $\rho = |\varphi\rangle\langle\varphi|$  と記述したとき, その状態によらない構造的な部分である演算子  $\Delta(q, p)$  は, Fano 演算子と呼ばれる. この演算子を古典的ハミルトニアン  $H(q, p)$  に掛けて積分することにより, 正準量子化されたハミルトニアン演算子  $\hat{H}(\hat{q}, \hat{p})$  を得ることができる.

$$\hat{H}(\hat{q}, \hat{p}) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} dq \int_{-\infty}^{\infty} dp H(q, p) \Delta(q, p)$$

この量子化は Weyl 量子化と呼ばれている. Fano 演算子は連続空間上, 奇数格子上で群論的に構成できることが知られており, 具体的には Fano 演算子は Weyl 演算子を用いて書かれる. この Weyl 演算子は古典位相空間の対称群からハイゼンベルグ群へのシンプレクティック共変な断面として定めることができ, このときハイゼンベルグ群の自己同型群の構造が重要な役割を果たす. また, 偶数格子の場合, Weyl 量子化が適用できるかどうかはわかっておらず, 偶数格子上で Fano 演算子を決める必要がある. もし偶数格子上でも Weyl 量子化が適用できることが証明されれば奇数格子上の場合と合わせて, 離散系での量子化が Weyl 量子化によって可能となる. 今回は偶数格子上で議論の先駆けとして, 奇数格子上で離散ハイゼンベルグ群の自己同型群の構造を調べた.

## A-p01

### 自己符号化器による配位生成 RBM の可能性

金沢大数物, 金沢大自然<sup>A</sup> 青木健一, 堀海斗<sup>A</sup>

Restricted Boltzman machine optimized by the auto-encoder for configuration generator

Kanazawa Univ., NST, Kanazawa Univ.<sup>A</sup> Ken-Ichi Aoki, K. Hori<sup>A</sup>

ニューラルネットワークを利用した次元削減のモデルとして自己符号化器がある. これは教師なし学習の一つで, 入出力が同一の訓練データ  $(x_n, x_n)$  を作成して, 出力が元の入力値を再現するようなモデルである. 一般的な自己符号化器は砂時計のような形をしている. このニューラルネットワークの学習により, データの本質をできる限り残し, 次元を圧縮した表現を得ることができる. 本研究では, 2次元イジング模型のサンプルを自己符号化器に入力し, 隠れ層での表現を調べることにより相転移や臨界現象についての理解を深めることを目的としている. さらに機械学習とくりこみ群の関係性を自己符号化器を用いて考察していきたい.

## A-p02

### 深層学習による干渉計観測データ内の重力波候補の探索

金沢大数物, 金沢大自然<sup>A</sup> 青木健一, °高原将多<sup>A</sup>

Detection of gravitational waves in the raw data of interferometer by using the deep learning method

Kanazawa Univ., NST, Kanazawa Univ.<sup>A</sup> Ken-Ichi Aoki, °S.Takahara<sup>A</sup>

重力場を記述する Einstein 方程式から、時空の歪みが光速の波として伝わる重力波が予言される。そして現代になって実験の精度が向上したことにより、実際に重力波の観測が始まった。そして、2015年9月15日にレーザー干渉計型重力波検出器 LIGO が初めて重力波を検出することに成功した。この時に用いた解析方法は、「マッチドフィルタリング」というものであった。これは、得られた波形からノイズを除去したものと、あらかじめ用意してある重力波形のテンプレートを比較してその一致具合を測る手法である。そして最近、計算機の処理能力の発展により機械学習の一部である深層学習が盛んに研究され、物理学でも用いられている。深層学習とは、人間の脳の仕組みを元に考案されたもので、情報の特徴を機械が学ぶことで分類・予測などを行うシステムである。そこで、重力波の解析手法として従来のマッチドフィルタリングではなく深層学習を用いて解析を行い、精度の向上を図るのが本研究の目的である。深層学習のシステムとして、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: 通称 CNN) を用いた教師あり学習を採用する。CNN とは、与えられた情報の中から特徴量を抽出し、かつ情報量を削減するシステムのことである。教師あり学習とは、学習させる情報が予めラベル付けされているものである場合の学習法である。すなわち、重力波ありの波形と重力波なしの波形を与えて、重力波とはどのようなものかをシステムに学習させるということである。この手法ならば、ノイズも学習しているために観測データからノイズを除去せずとも解析が可能であることと共に、解析速度の速さも期待されている。さらに、精度が向上すれば人間の目では分からない、ノイズに紛れているような重力波も検出できるのではないかと考えている。今回は、実際に重力波を初めて観測した 2015年9月15日 Hanford で得られたデータを用いて行った解析を紹介する。

## A-p03

### 水素ハイドレート内の水素分子の高速拡散に関する分子動力学シミュレーション

金沢大院自然, Tanjungpura 大理<sup>A</sup>, 金沢大理工<sup>B</sup>

原田 明日華, Yudha Arman<sup>A</sup>, 三浦伸一<sup>B</sup>

### Molecular Dynamics Simulation of Fast Diffusion of Hydrogen Molecules in Hydrogen Hydrates

Fac. of Eng., Univ. of Fukui; Fac. of Sci., Tanjungpura Univ.<sup>A</sup>; Fac. of Math. Phys., Kanazawa Univ.

A. Harada, Y. Arman<sup>A</sup>, S. Miura<sup>B</sup>

水分子が低温高圧の条件下で他のガス分子と共に存在する場合、水分子がガス分子を包み込んだ構造の「ハイドレート」と呼ばれる物質が形成される。包み込まれる分子はゲスト分子と呼ばれ、その種類によってハイドレートの名称が変わる。ゲスト分子がメタンの場合はメタンハイドレート、水素の場合は水素ハイドレートと呼ばれる。その中でも水素ハイドレートは燃料として消費した際に水しか発生しないため、次世代のクリーンエネルギーの有力な候補と考えられている。

水素ハイドレートには、クラスレートハイドレートと充填氷 (Filled-ice) の 2 種類がある。クラスレートハイドレートは、水分子でできたかごのような構造の中に水素分子を包み込んでできる包接水和物である。クラスレートハイドレートにさらに高い圧力をかけると、氷の構造の中に水素分子が入り込んだ充填氷と呼ばれる構造に相転移する。様々な氷の構造の中で、水素分子が入り込むことのできる空隙を持つものは氷 Ih、氷 II、氷 Ic の 3 種類である。比較的低压で生成することができる氷 Ih への水素の充填率は圧力をあげても 11%程度が限界であり、充填氷を作ることはできない。さらに圧力を上げると、0.7GPa で氷 II の中に水素分子が存在する水素充填氷 II、約 2GPa で氷 Ic の中に水素分子が存在する水素充填氷 Ic が作られる。

最近の実験で、水素充填氷 II と水素充填氷 Ic 中の水素分子が 1 つの空隙に局在しているのではなく、非常に速い速度で空隙間を移動していることが明らかになった。拡散係数の値は固体としては異常に大きく、グリセリン等の粘度の高い液体並みの値である。また、講演者のグループの予備的な研究により、水素の速い拡散には水素分子が存在しない空隙が必要であることがわかっている。

本研究では、水素充填氷 II と水素充填氷 Ic において分子動力学法を用いてシミュレーションを行い、水素分子の拡散について計算を行った。解析結果は当日示す。

## A-p04

### 分子動力学シミュレーションによる固体表面付近におけるイオン液体の構造の解析

福井大工 原田 滉平, 古石 貴裕

#### Structural Analysis of Ionic Liquids near Solid Surfaces by Molecular Dynamic Simulation

Fac. of Eng., Univ. of Fukui K. Harada, T. Koishi

イオン液体はアニオンとカチオンで構成されている液状の塩である。一般に無機塩を液体にするには高温にしなければならないが、有機塩の中にはイオン液体のような常温でも液体の塩がある。また、イオン液体の特徴として、蒸気圧がほとんどゼロ、難燃性、低粘性などがある。よって、これらの特徴から潤滑剤やキャパシタの電解質への応用が期待されている。どちらも固体表面付近のイオン液体構造が重要なので、固体表面付近におけるイオン液体の分子レベルでの構造を調べるために分子動力学シミュレーションを行った。

今回の研究では 10 種類のイオン液体を用い、カチオンのアルキル鎖長を変えた場合とアニオンを変えた場合のイオン液体の構造を調べた。カチオンは 1-エチル-3-メチルイミゾタリウムおよびその炭素鎖の長さを増やしたものであり炭素数はそれぞれ 2, 4, 6, 8, 10 とし、アニオンは  $\text{NO}_3$  と  $\text{PF}_6$  を用いた。

まず、立方体のセルにイオン液体を配置し圧力一定で平衡化を行った。平衡化が終わったら右図のようにイオン液体の上下にグラファイト板を配置した。ここで、周期境界条件による z 方向イメージセル内における原子との相互作用が働かないようにするため立方体のセルの z 方向の長さを 3 倍にした。この系で分子動力学シミュレーションを実行し、固体表面付近でのそれぞれの原子分布やカチオンの向き、濃度、電気的構造を調べた。

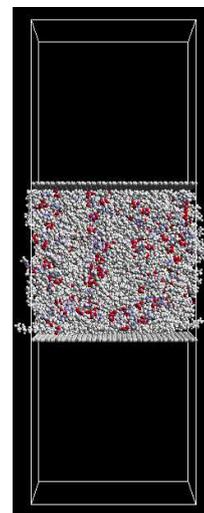


図:グラファイト板間に配置したイオン液体のスナップショット

## A-p05

### 分子動力学シミュレーションを用いた陰溶媒モデルにおける高分子の構造の解析

福井大工 小山魁斗, 古石貴裕

#### Structural Analysis of Polymers with Implicit Solvent Model by Molecular Dynamics Simulation

Fac. of Eng., Univ. of Fukui K. Koyama, T. Koishi

高分子材料は近年、様々な分野で使われており、その性質を調べるため多くの研究が行われている。実験では分子レベルの構造、性質の解析が難しいため、本研究では分子動力学シミュレーションを用いて、 $\Theta$  状態における高分子の構造の解析を行った。 $\Theta$  状態とは対象の高分子が理想鎖のように振る舞う状態のことである。また  $\Theta$  状態を実現するために用いる溶媒を  $\Theta$  溶媒という。対象とする高分子には図 1 に示すポリスチレン (PS) を用いた。

シミュレーションでは  $\Theta$  溶媒中の PS に含まれる原子間の相互作用のみならず、PS と溶媒分子との相互作用に加え、溶媒分子間の相互作用も計算するため、計算量が膨大になり、実行時間が長くなる。

そこで本研究では、溶媒分子を使用せず、分子間相互作用であるレナード・ジョーンズポテンシャル、クーロンポテンシャルのパラメータを調整することにより、疑似的に  $\Theta$  溶媒中での PS の広がりを再現する陰溶媒モデル (図 2) を用いて、計算の効率化を行った。このモデルを用いることで PS の  $\Theta$  状態における広がりを再現できるが、詳細な分子構造を再現できるかどうか分からないため、陰溶媒モデルと実際に  $\Theta$  溶媒を用いたときの PS の構造の違いについて調べた。

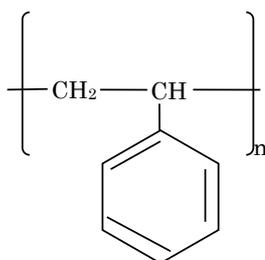


図 1 PS の構造式

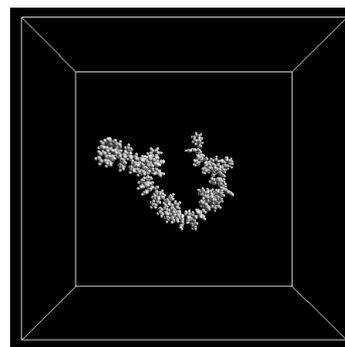


図 2 陰溶媒モデルでの PS

## A-p06

### 背景揺れを伴う立体映像が体平衡系に与える影響とその数理モデル

福井大工, 富山県立大工<sup>A</sup> 橋梅 佑宜, 高田 宗樹, 平田 隆幸, 木下 史也<sup>A</sup>

The effect of equilibrium function and mathematical model while viewing a 3D object in a moving background  
Fac. of Eng., Fukui Univ.; Fac. of Eng., Toyama Prefectural Univ.<sup>A</sup> Y. Hashiura, H. Takada, T. Hirata, F. Kinoshita<sup>A</sup>

立体映像を視聴する機会の増加に伴い、動揺病症状の発症率が報告されている。しかし、映像酔いの原因は未だ解明に至っていない。一方、映像酔いを定量的に評価する方法の一つとして重心動揺検査が挙げられる。この方法は、負荷時及びその後における体平衡系への影響の度合いを計測できる。そこで本研究では、立体映像の視認時において自然視時との差異が大きい周辺視野に着目し、視指標と背景揺れとの関係が体平衡系に与える影響について検討を行った。被験者は、22-25歳(平均±標準偏差: 23.05±0.76)の健康な若年男性計19名を対象とし、実験に用いた立体映像はSky Crystal(オリンパスメモリーワークス)をもとに、同社の許可を得て再構築したものを使用した。本研究では、視標の運動の有無、背景揺れの有無の条件を組み合わせた4種類の映像を用いた。重心動揺計測にはWiiBalance Board(Nintendo)を用い、サンプリング周波数は20Hzとした。各映像視認時に記録された、身体の左右をx軸、前後をy軸とするxy平面上に描かれる動揺図から各解析指標を算出し、視標の静動条件及び、背景揺れ条件を因子とする反復測定二元配置分散分析を行った。その結果、総軌跡長を解析指標としたとき、開眼時において背景揺れ条件に主効果(p<0.01)がみられた。また、疎密度S2を解析指標としたとき、閉眼時において視標静動条件に主効果(p<0.05)がみられた。

重心動揺を記述する数理モデルとしてxy成分間で独立性な以下の式が提案され、広く受け入れられている。

$$\dot{x} = -\text{grad}U(x) + \mu_x w_x(t), \quad \dot{y} = -\text{grad}V(y) + \mu_y w_y(t)$$

$$U(x) = -\frac{1}{2} \mu_x^2 \log \frac{g(x)}{C_x}, \quad V(y) = -\frac{1}{2} \mu_y^2 \log \frac{g(y)}{C_y}$$

ここで、 $C$ は積分定数である。実験により得られた頻度分布 $g(x)$ 、 $g(y)$ から時間平均ポテンシャル $U$ 、 $V$ をそれぞれ推定算出した。本研究では、これらの非線形性を考慮して四次多項式のグラフで回帰した。また、ピンクノイズ(平均±標準偏差:0±1)を生成して $w(t)$ に入れて上述した確率微分方程式系の数値解析を行った。Double Wayland アルゴリズムを用いて並進誤差を算出して数値解を評価して、最適なノイズ振幅 $\mu$ および時間ステップを得たので、講演にて報告する。

## A-p07

### ガウス型統計集合とレプリカ交換法を結合した新規シミュレーション手法の開発と一次相転移を示す系への適用

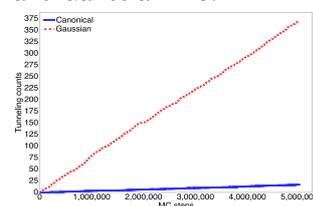
金沢大院自然 鈴木 大介, 三浦 伸一

Development of a novel simulation method combining Gaussian statistical ensemble with replica exchange method and application to a system showing first order phase transition

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, D. Suzuki, S. Miura<sup>A</sup>

レプリカ交換法は特定のパラメーター空間をレプリカがランダムウォークすることにより効率の良いサンプリングを実現する。現在ではカノニカル分布を生成するシミュレーション手法と組み合わせ温度空間を広くサンプルする手法が標準的に用いられている。しかしながら、一次相転移を示す系に対しては相転移温度付近での交換確率が大幅に抑制されるためにレプリカ交換法の威力を十分発揮することができない。この問題の要因はカノニカル分布の性質にある。つまり相転移温度付近では秩序相と無秩序相のエネルギー分布の間に大きなギャップがあり、レプリカ間のエネルギー分布の重なりを十分大きく取ることができないことによる。相転移温度付近でのサンプリング問題を解決する方法の一つとしてガウス型統計集合が挙げられる。この統計集合は熱浴のサイズを制御することによりマイクロカノニカル分布とカノニカル分布を補間する役割を果たすことができる。相転移点付近ではマイクロカノニカル分布寄りにチューニングすることにより、秩序相と無秩序相のエネルギーの中間領域にも分布を持たせることができる。本研究では、ベンチマークとして状態数10の20×20のPottsモデルに対し、ガウス型統計集合を生成するMC法とレプリカ交換法を組み合わせた手法を適用した。比較のため従来のカノニカルMC法とレプリカ交換法を組み合わせた手法による計算も行った。図にそれぞれの手法におけるトンネリング回数を示す。本研究で開発した手法は従来の手法と比べて大幅なトンネリング回数の増加をもたらしていることが見て取れる。

Fig. Number of tunneling times of replica exchange method combined with canonical MC and Gaussian MC.



## A-p08

### マルチカノニカル法と液体の積分方程式理論を結合した新規シミュレーション手法の開発と水和生体高分子への適用

金沢大院自然 堀 智也, 三浦 伸一

#### Development of a novel simulation method combining the multicanonical method with the integral equation theory of liquids with applications to hydrated biomolecules.

Graduate School of Natural Science and Technology, Univ. of Kanazawa T. Hori, S. Miura

生体高分子などの複雑な自由エネルギー地形で特徴付けられるシステムは、高いエネルギー障壁で隔たれた多数のエネルギー極小状態を持つことが知られている。このようなシステムを従来の温度一定の MC 法や MD 法でシミュレーションを行うと、限られたエネルギー極小状態にトラップされてしまい、現実的な時間では正しい分布を得ることが困難である。マルチカノニカルアンサンブルは、ポテンシャルエネルギーに対する確率分布が広い領域で一定値を取る人工統計集合であり、エネルギー空間上でのランダムウォークを可能とするため効率の良いサンプリングが実現される。

本研究では、当研究グループが開発したマルチカノニカル一般化ハイブリッドモンテカルロ (MUGHMC) 法と液体の積分方程式理論を結合した新しいシミュレーション手法を開発し、水和生体分子に適用した。MUGHMC 法は、計算の効率化のために溶媒効果を連続体モデルで記述し実行した。その後、得られた軌跡に沿って積分方程式計算を行い、溶媒和自由エネルギーを用いて Reweighting することにより積分方程式理論と整合するカノニカル分布を生成し、その解析を行った。

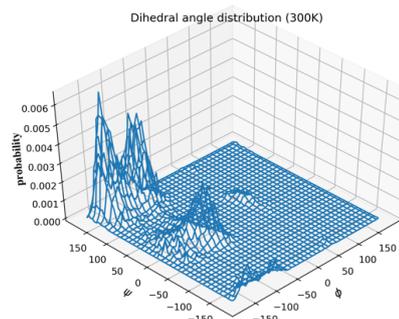


図: 液体の積分方程式により溶媒効果を考慮した際のアラニンジペプチドの二面角分布

## A-p09

### 一般化ハイブリッドモンテカルロ法の高効率化とアラニンジペプチドへの適用

金沢大理工<sup>A</sup> 鈴木 大輔, 金沢大理工<sup>A</sup>, 三浦 伸一

#### Efficiency improvement of generalized hybrid Monte Carlo method and application to alanine dipeptide

College of Sci. and Eng., Kanazawa univ.<sup>A</sup>, D. Suzuki, College of Sci. and Eng., Kanazawa univ.<sup>A</sup>, S. Miura

生体高分子のダイナミクスを理解する上でコンピュータシミュレーションは強力な手法を提供するが、そのダイナミクスの階層性を反映してマイクロ秒からミリ秒程度の長時間のシミュレーションが必要となる。しかし通常の分子動力学(MD)計算を行う際には、生体分子中の水素原子を含む原子間の結合振動が非常に短い周期を持つため、時間ステップを大きく設定できないという問題がある。この問題を解決して通常の MD よりも大きな時間ステップを設定するための方法として、一般化ハイブリッドモンテカルロ法 (GHMC 法) という手法がある。この方法では運動方程式を用いてモンテカルロの試行配位を生成するために自然な時間相関は失われるが、MD と比べて配位空間でのサンプリング効率を大きく向上させる可能性を秘めている。

本研究では、GHMC 法及びレプリカ交換 GHMC 法に対して HMR 法、r-RESPA 法を適用することでサンプリング効率のさらなる向上を図り、生体分子の一つであるアラニンジペプチドに対してベンチマークを行うことでその手法の有効性を調べた。HMR 法とは水素原子の質量を通常より大きく設定する手法であり、水素原子を含む結合振動の周期を長くすることで時間ステップを大きく設定することができる。r-RESPA 法とは相互作用の種類ごとに異なる時間ステップを用いる多重時間ステップ手法であり、計算精度を保ったまま計算効率を向上させることができる。図 1 は従来の GHMC 法と HMR 法及び r-RESPA 法を用いた GHMC 法の二つの手法で計算を行い、時間ステップと試行配位のアクセプタンスを比較した図である。この結果からわかるように、本研究の手法ではアクセプタンスを保ったまま従来の GHMC 法よりも時間ステップを大きく設定することが可能である。

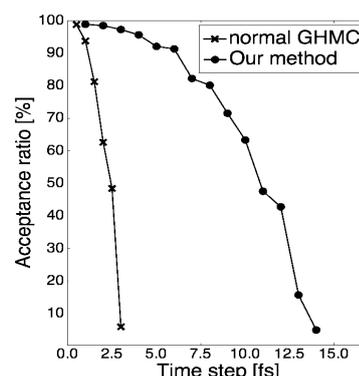


図 1: アクセプタンスの比較

## ベイスンホッピング法を用いた希ガスクラスターのエネルギー地形探索

金沢大理工<sup>A</sup> 吉森 匠, 金沢大理工<sup>A</sup>, 三浦 伸一

### Energy Landscape of Noble Gas Clusters Explored by Basin-Hopping Method

Fac. of Sci. and Eng., kanazawa Univ.<sup>A</sup> T. Yoshimori, Fac. of Sci. and Eng. kanazawa Univ.<sup>A</sup>, S. Miura

効率的な大域的最適化手法は、分子系の最小エネルギー構造を見つけるという一般的な問題を解くために古くから関心を持たれている。例えば、タンパク質の天然状態は、そのポテンシャルエネルギー面の大域的なエネルギー最小構造と関係している。一般に多自由度系のポテンシャルエネルギー面は重なりあわない複数のベイスン領域に分割することができ、ベイスン内の任意の状態から出発し最急降下経路を考えることにより、そのベイスンを特徴づけるエネルギー極小構造をひとつ割り当てることができる。

ベイスンポッピング法はポテンシャルエネルギー面を変換し、大域的なエネルギー最小構造まで効率的に緩和するよう設計されている最適化手法である。配位空間内の任意の状態を、その状態が属するベイスン領域のエネルギー極小構造にマップすることにより、高い障壁が存在する領域をポテンシャルエネルギー地形から効率的に取り除くことができる。一般にポテンシャルエネルギー面を変換する上での問題は、変換後の大域的最小が元のポテンシャルエネルギー面の大域的最小にマップされる保証がないことである。ベイスンポッピング法によるポテンシャルエネルギー面の変換は、大域的最小や極小でのポテンシャルエネルギー値が変わることはなく、上述の問題はない。

本研究ではベイスンホッピング法をレナードジョーンズクラスターに適用し、その方法の有効性をテストすることにより、タンパク質への応用を念頭においたアルゴリズムの改良を検討する。レナードジョーンズクラスターは、大域的最適化手法のテストシステムの1つであり、そのポテンシャルエネルギー地形はこれまで詳細に調べられているために本研究の目的に適している。

## B-a01

### 重力波望遠鏡 KAGRA におけるレーザー強度安定化システムの開発

富山大 黒宮 勇樹, KAGRA Collaboration

Development of the laser intensity stabilization system for the gravitational wave telescope KAGRA

Univ. of Toyama Y. Kuromiya, for the KAGRA Collaboration

1916年、Albert Einstein は一般相対性理論から重力波の存在を予言した。その予言からおおよそ100年後となる2015年9月にアメリカの重力波望遠鏡 LIGO は初の重力波観測に成功している。日本でも重力波の観測を目指し、岐阜県神岡町で重力波望遠鏡 KAGRA を建設し、現在、重力波観測のための最終調整が進められている。欧米の LIGO、Virgo とともに同時観測をすることでより正確な重力波の情報を得ることが期待されている。

KAGRA は両腕に共振器長 3km の Fabry-Perot 共振器をもつ Michelson 干渉計型の重力波望遠鏡である。重力波が到来すると両腕の長さがわずかに変化し、光検出器が受ける光量に変化が生じる仕組みである。ただし、重力波の振幅は非常に小さいため、検出するためには様々な雑音を取り除く必要がある。その雑音の中にレーザーの強度揺らぎがある。干渉計の鏡はレーザー光によって輻射圧を受け、鏡の位置がわずかに変化する。レーザーの強度揺らぎは干渉計の非対称性から両腕の鏡に異なる輻射圧を与え、光検出器で雑音として検出されてしまう。我々はこの強度揺らぎを低減させるシステムの開発を行っている。

強度安定化システムはビームの一部を光検出器で電圧信号として取り出し、Servo 回路でその信号を適切な周波数特性をもつようにフィルタリングして音響光学素子 (AOM) にネガティブフィードバックする制御システムである。安定度の評価は制御ループから独立した光検出器から強度雑音を測定して行う。今回参加する Observation 3 で KAGRA が運転するための要求値は相対強度雑音が  $1 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$  とされている。本発表では現在までの成果と今後の展望について発表する。

## B-a02

### 重力波望遠鏡 KAGRA における補助ロックシステムの開発 III

富山大 杉本 良介, KAGRA Collaboration

#### Development of Auxiliary Locking System in Gravitational Wave Telescope KAGRA III

Dept. of Phys. Univ. of Toyama

Ryosuke Sugimoto, for the KAGRA collaboration

重力波とは天体などの運動で生じる時空の歪が伝播する現象である。重力波は電磁波と比べ非常に透過力が高く散乱されにくいいため従来の観測では得られない知見の獲得が期待される。2015年には米国の検出器 LIGO が初検出に成功しており、日本でも岐阜県神岡で重力波望遠鏡 KAGRA が観測に向け最終調整中である。KAGRA は 2019 年内の観測開始を目指しており上述の LIGO、欧州の検出器 Virgo などと共に重力波検出ネットワークへの参加が期待される。

KAGRA は 2 本の 3km 主共振器を始めとする複数の干渉計や共振器から成る複雑な光学系である。観測開始時にはそれらを構成する全ての懸架鏡が適切な動作点に制御、保持される必要がある。KAGRA ではこの制御のために主レーザー (1064nm) とは別に補助レーザー (532nm) を導入し、多数ある鏡間の長さ自由度の制御を段階的に実現する。KAGRA の主共振器 1 本を用いて行われた実験ではこの補助ロックシステムを用いて補助レーザーから主レーザーへ共振を引き渡せることを実証すると同時に安定性の評価を行なった。

補助レーザーはレーザールームから長さ約 60m の光ファイバーにより伝送され干渉計にその中央部のビームスプリッター裏側から入射される。補助ロックシステムに関して各ノイズの見積もりを行なったところ、この光ファイバーが外乱を受けることで生じるレーザー位相ノイズが支配的であることが分かった。ファイバーノイズ低減のため今年 8 月には PZT ミラーを用いたノイズキャンセレーションシステムの KAGRA への導入が完了し実際にノイズ低減効果が確認された。

本講演では補助ロックシステム及びそのノイズ低減技術について主にファイバーノイズキャンセレーションシステムを中心に現状と将来の展望について報告を行う。

## B-a03

### 重力波干渉計 KAGRA におけるレーザーの輻射圧を用いた校正

富山大理, 国立中央大学<sup>A</sup> 伊藤光希, 森脇喜紀, 井上優貴<sup>A</sup>

Calibration using a laser beam radiation pressure in gravitational wave interferometer KAGRA

Univ. of Toyama, National Central Univ.<sup>A</sup> K. Ito, Y. Moriwaki, Y. Inoue<sup>A</sup>

重力波とは、ブラックホールなどの大質量かつ高密度の天体が加速度運動することにより発生する時空の歪みが波となって光速で伝播する現象である。日本には重力波望遠鏡 KAGRA が岐阜県神岡町の池ノ山の地下に建設されており、重力波の検出に向けてプロジェクトが進んでいる。

重力波信号強度は、物理パラメーターを決定するために重要である。LIGO、Virgo、および KAGRA では、レーザー光の輻射圧により鏡に変位を与えることで、絶対変位を校正する Photon Calibrator(PCal)を採用している。ここで重要なのはレーザーパワー測定の精度である。PCalでは光検出器(PD)が取り付けられた積分球を標準として用いる。NISTのレーザーパワー標準によって校正された積分球と比較することで Working Standard KAGRA(WSK)積分球を校正する。その後 WSK を富山大学に運び、WSK を用いて富山大学にある積分球を校正する。この富山大学の積分球が KAGRA での標準となる。さらに、この富山大学の積分球で校正された積分球と PCal に設置された積分球を校正することで PCal レーザーパワーを測定する。この手順で、NIST のレーザーパワーの校正を PCal の絶対校正精度を向上させ、O3 での重力波観測の精度向上にもつながってくる。積分球を用いた PCal レーザーパワーの測定について報告する。

## B-a04

### 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA におけるパラメトリック不安定性

富山大理, 東京大理<sup>A</sup> 開発 輝一, 森脇 喜紀, 山元 一広, 道村 唯太<sup>A</sup>

Parametric Instability of KAGRA large scale cryogenic gravitational wave telescope

Univ. of Toyama, Univ. of Tokyo<sup>A</sup> K.Kaihotsu, Y.Moriwaki, K.Yamamoto, Y.Michimura<sup>A</sup>

現在、岐阜県飛騨市神岡町に建設された大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、年内の観測運転に向け最終調整を行っている。KAGRA は基線長 3 km の干渉計で、使用するサファイア鏡を約 20 K にまで冷やすことで熱雑音を下げる。また地面振動の小さい地下に設置することで、より良い観測感度を実現する。

KAGRA を含む干渉計型重力波望遠鏡では Michelson 干渉計を基本とし、その両腕に Fabry-Perot cavity を内蔵した形式が採用されている。この共振器に光を共振させ重力波への感度を高める。Cavity の中には最大 1 MW 程度の光が蓄積される。このとき問題となるのがパラメトリック不安定性 (Phys. Lett. A 287 (2001) 331) である。鏡の弾性振動モードによって、入射した光とは異なる共振器の光学モードが励起される。この光学モードは鏡に輻射圧を与え、鏡の弾性振動モードを励起させる。このような循環により、安定的に干渉計を運用することが困難になる。

パラメトリック不安定性はアメリカの重力波望遠鏡 LIGO で実際に生じており (Phys. Rev. Lett. 114, 161102 (2015)), LIGO では既に対策がなされている。

2008 年に KAGRA のパラメトリック不安定性について既に検討されている (Journal of Physics: Conference Series 122 (2008) 012015)。しかし、その後サファイア鏡などの設計変更などがあり、再度検討が必要である。そのためにまず、どのようなモードで不安定性が問題になるか、鏡の弾性振動についてシミュレーションを行った。本講演では、その結果について紹介する。

## B-a05

### 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA における鏡の反射膜の熱雑音低減

富山大理, 東京大宇宙線研<sup>A</sup> 森有紀乃, 中山遙太, 服部幹太, 牛場崇文<sup>A</sup>, 森脇喜紀, 山元一広

Thermal noise reduction of the mirror reflection coating for Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope KAGRA

Univ. of Toyama, ICRR Univ. of Tokyo<sup>A</sup> Yukino Mori, Y.Nakayama, K.Hattori, T.Ushiba<sup>A</sup>, Y.Moriwaki, K.yamamoto,

1916年にアインシュタインによって予言された重力波は、欧米に建設された aLIGO, Virgo によって直接観測が可能となり、新たに重力波天文学が始まった。国際観測ネットワーク拡大のため、日本では岐阜県神岡鉱山地下に基線長 3km の大型低温重力波望遠鏡 KAGRA が建設された。KAGRA は年内観測開始を目指し、現在最終調整が行われている。重力波検出器の観測周波数帯域の感度は鏡内部の弾性モードの熱振動(熱雑音)によって制限されるため、今後の重力波望遠鏡にとって鏡の熱雑音低減が重要課題の 1 つとなる。

鏡は高い反射率(99.9%以上)を実現するために、鏡の表面に誘電体多層膜( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ) からなる反射膜が施されている。この反射膜による熱雑音の寄与は、鏡基材より大きい。反射膜の熱雑音を低減する方法は主に 2 つあり、鏡を冷却すること [1] 及び反射膜の機械的散逸の抑制である。前者は既に KAGRA で取り入れられている。さらなる感度向上のためには後者が課題となり、反射膜の機械的散逸を低温で正確に測定する装置が必要である。

この反射膜の機械的散逸を 4 K 以上で測定するために、現在富山大学では実験装置立ち上げを行っている。KAGRA の鏡基材と同じ材質(サファイア)の円盤に反射膜を施し、共鳴振動を励起し減衰時間を測定する。反射膜が施されていない円盤との比較を行い、反射膜による機械的散逸を見積もる。

今講演では、実験装置立ち上げの現状と今後の予定について説明する。

[1] K.Yamamoto et al., PHYSICAL REVIEW D 74, 022002 (2006)

## B-a06

### HDO のテラヘルツ帯での分光

富山大理 高見 周征, 鷲見 樹, 松島 房和, 小林 かおり, 森脇 喜紀

#### Terahertz spectroscopy of HDO

Department of Physics, Faculty of Science, Univ. of Toyama  
Shusei Takami, Tatsuki Sumi, Fusakazu Matsushima, Kaori Kobayashi, Yoshiki Moriwaki

水の同位体である HDO 分子は特に星形成領域で多く検出されている。このような重水素化した分子の検出は星形成において重要な手がかりとなると考えられている。我々はこれまでの測定を拡張し、遠赤外領域における HDO 分子の純回転スペクトルを測定を行った。本研究では遠赤外領域の測定に波長可変遠赤外分光計(Tunable Far InfraRed(TuFIR))分光計を用いた。TuFIR 分光計は、非線形素子を用いて周波数  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  の 2 本の炭酸ガスレーザーとマイクロ波スイーパーから出力されるマイクロ波  $\nu_3$  を合成し、得られる  $|\nu_1 - \nu_2| \pm \nu_3$  の遠赤外光を分子に当て、吸収の様子を観測する装置である。

HDO 遷移の測定は JPL catalogue の予測値 [1] から強度が大きく、大気中の水に遠赤外光が吸収されないことが期待される周波数帯のものを選び、2.9 ~ 4.8 THz の範囲で 14 本のスペクトルを観測した。Watson's A-reduced Hamiltonian を用いた解析結果も合わせて報告する。

#### 参考文献

[1] H. M. Pickett, *Journal of Molecular Spectroscopy*, **148**, 371-377 (1991).

## B-a07

### N-メチルホルムアミド-(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> 錯体のフーリエ変換マイクロ波分光

金沢大学 理工 梅谷 祐矢, 藤竹 正晴

#### Fourier transform microwave spectroscopy of the N-methylformamide-(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> complex

College of Science and Engineering Kanazawa Univ. Y. Umetani, M. Fujitake

N-メチルホルムアミド(CH<sub>3</sub>-CONH<sub>2</sub> 以下 NMF)は、ペプチド結合の一端にメチル基を持つ分子であり、ペプチド鎖(タンパク質)の最小構成単位のモデルである。NMFのメチル基の内部回転ポテンシャル障壁の高さ $V_3$ はペプチド鎖の柔軟性に対応している。生体内のタンパク質の機能発現は、H<sub>2</sub>Oとの水素結合が深く関与していると考えられる。これまで、NMF-H<sub>2</sub>O錯体の回転遷移の帰属と解析については報告されている[1]。本研究では、NMFにH<sub>2</sub>Oが2つ水素結合したNMF-(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>の純回転スペクトルの測定、帰属を行った。実験では十字スリットノズルを用いたパルス超音速ジェット・フーリエ変換マイクロ波分光器を用いて、8-25GHzの純回転スペクトルを測定した。発表では、NMF-(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>の実測純回転スペクトルに見られたメチル基内部回転分裂、超微細構造分裂に加えて、観測された新たな分裂(図2)の原因について議論する。

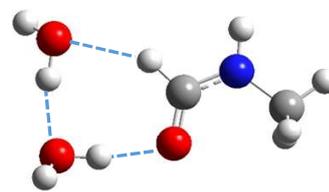


図1: N-メチルホルムアミド-(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>

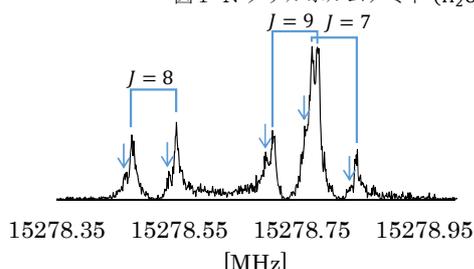


図2: 8<sub>08</sub>-7<sub>17</sub> A 対称種 実測純回転スペクトル

[1] W. Caminati et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010, **12**, 10230 – 10234

## B-a08

### N-メチルホルムアミド…ホルムアミド(<sup>15</sup>N)錯体のフーリエ変換マイクロ波分光

金沢大院自然 矢部 岳史, 藤竹 正晴

#### Fourier transform microwave spectroscopy of N-methylformamide…Formamide(<sup>15</sup>N) complex

Graduate School of Natural Science & Technology Kanazawa-Univ. T. Yabe, M. Fujitake

N-メチルホルムアミド (CH<sub>3</sub>-CONH<sub>2</sub>: NMF) は、ペプチド結合と1つのメチル基を持つ分子であり、メチル基の位置によりシス型とトランス型が存在している。このメチル基の内部回転ポテンシャル障壁の高さ $V_3$ はペプチド鎖の柔軟性に対応している。本実験で用いた NMF はトランス型であり、すでに monomer ( $V_3=56$  cm<sup>-1</sup>) [1]と水錯体の複数の conformer (最安定なもので  $V_3=211$  cm<sup>-1</sup>) [2]の研究が報告されている。本研究ではペプチド結合を持つ分子を配位させた際の $V_3$ への影響を調べるため、ホルムアミド(<sup>15</sup>N) (HCO<sup>15</sup>NH<sub>2</sub>: FA(<sup>15</sup>N)) を用いて測定を行った。観測スペクトルには窒素原子による超微細構造分裂が現れ、それに伴い強度が低下する。複数の窒素原子が存在するとそれに伴って分裂が増加し解析も複雑になる。そのためホルムアミドに関して<sup>15</sup>N 同位体を用いることで、超微細構造分裂を減らすと共にスペクトル強度の低下を抑えた。

NMF…FA 錯体は当研究室の梅谷が発表する NMF…(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> 錯体の水分子の配位の仕方と類似点も存在する。発表では結果と共に $V_3$ の変化について議論していく。

[1] Y. Kawashima et al., *Acc. Chem. Res.*, 2006, **39**, 216

[2] W. Caminati et al. *phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010, **12**, 10230-10234

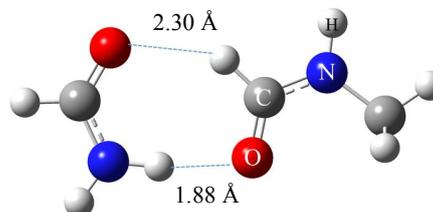


Fig. 1 tNMF…FA(<sup>15</sup>N)錯体

Table 1: 決定した分子定数の一部

$A$ /MHz	6641.631(34)
$B$ /MHz	949.5271(19)
$C$ /MHz	835.7309(23)
$V_3$ /cm <sup>-1</sup>	52.36719(17)
$I_a$ /uÅ <sup>2</sup>	[3.157]
$\chi_{aa}$ /MHz	1.9171(66)
$\chi_{bb} - \chi_{cc}$ /MHz	5.6704(76)
$r.m.s.$ /MHz	0.0012
帰属本数	188本

## B-a09

### 水素結合錯体における非対称二極小異性化ポテンシャル中の振動エネルギー準位構造の研究

金沢大院 自然 佐藤 夏紀、藤竹 正晴

#### Vibrational energy level structure in an asymmetric double minimum isomerization potential of hydrogen-bonded complexes

Graduate School of Natural Science and Technology Kanazawa-Univ. N.Sato, M.Fujitake

水素結合錯体では反転運動や内部回転など様々な運動がみられる。さらにエネルギー的に近い複数の conformer が存在することが予想される。また、conformer 間の異性化のポテンシャル障壁が低いことが多く、conformer の一方のみが観測される要因として、より低い極小へ自然に異性化が起きているためであると仮定されることが多い。この仮定を議論するには、振動エネルギー準位構造を考える必要がある。本研究の目的は、観測されたスペクトルと量子化学計算の結果から振動エネルギー準位構造を求めることで、水素結合錯体のふるまいを定量的に判断する目安を設けることである。本研究ではグリコール酸メチル(CH<sub>3</sub>OCOCH<sub>2</sub>OH...H<sub>2</sub>O)錯体(以下MG...H<sub>2</sub>O)の、非対称な二極小異性化ポテンシャル中の振動エネルギー準位構造の計算を行った。計算には量子化学計算で求めた原子座標とポテンシャルエネルギーを用い、換算質量の振動座標依存等を考慮し、M.A.Harthcockらの論文で示されている計算方法<sup>[1]</sup>を採用した。発表では詳細について報告する。

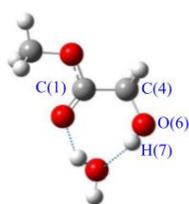


図1: MG...H<sub>2</sub>O

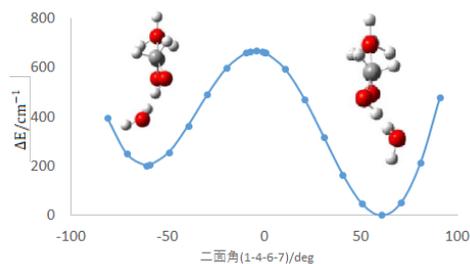


図2: MG...H<sub>2</sub>Oの異性化ポテンシャルと振動エネルギー準位

[1] M.A.Harthcock et al. *J. Phys. Chem.* 1985, 89, 4231-4240

## B-a10

### 非共有結合相互作用のグリコール酸メチル...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>の安定性への影響の研究

金沢大院 自然 ブロイヤー 健司マキシミアン、藤竹 正晴

#### Study on the Effects of non-covalent Interactions on the Stability of Methyl Glycolate...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> Complexes

Graduate School of Natural Science & Technology Kanazawa-Univ. K.-M. Breuer, M. Fujitake

水素結合錯体の安定性には、分子間の非共有結合相互作用が大きく関わっている。非共有結合相互作用による安定化は、分子間の水素結合力、双極子-双極子相互作用、分子構造の歪みの3つの効果による安定化エネルギーの合計で近似できると考えられるが、それぞれの効果の厳密な数値を求めることは困難である。当研究室では、グリコール酸メチル(CH<sub>3</sub>OCOCH<sub>2</sub>OH: MG)の分子内水素結合(O(2)...H(10))に水分子が割り込んだ挿入型錯体(MG...H<sub>2</sub>O)の2つの Conformer 間の異性化に対する ab initio 計算を行い、その結果を用いて非共有結合相互作用による安定化エネルギーを見積もったところ、双極子-双極子相互作用が安定性の違いを決めていることがわかった<sup>[1]</sup>。

本研究では、上記の方法を応用して、さらに1つの水分子が挿入されたグリコール酸メチル...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>(MG...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>)の異性化について、非共有結合相互作用を見積もった。MG...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>には、ab initio 計算より4つの挿入型 Conformer が存在することが予想されている。発表では、見積もりに採用したモデル、見積もりの結果、及び MG...H<sub>2</sub>O と MG...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>の比較検討についての詳細を報告する。

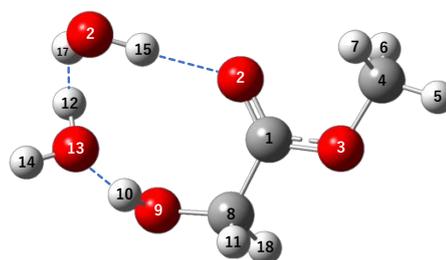


図1 MG...(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>の最安定 Conformer

[1] ブロイヤー 健司マキシミアン、藤竹 正晴、2018年度日本物理学会北陸支部

## B-a11

### 低波数ラマン測定による TMAO 水溶液中の水素結合相互作用の研究 (II)

岡崎 大志, 大塚 大, 谷 正彦, 古屋 岳, 山本 晃司, 那須 達郎<sup>A</sup>, ダイアン マリーナ<sup>A</sup>, 佐藤 春実<sup>A</sup>

福井大学 遠赤外領域開発センター,<sup>A</sup> 神戸大学大学院 人間発達環境学研究所

#### Hydrogen Bonding Interaction in TMAO Aqueous Solution by Studied by Low-Frequency Raman Measurement (II)

Hiroyuki Okazaki, Hiroshi Otsuka, Masahiko Tani, Takashi Furuya, Kohji Yamamoto,  
Tatsuro Nasu<sup>A</sup>, Marlina Dian<sup>A</sup>, Harumi Sato<sup>A</sup>

FIR-UF, <sup>A</sup>Graduate School of Human Development and Environment Kobe University

我々の研究グループはテラヘルツ (THz) 領域のコヒーレントラマン分光法 [1] およびラマン分光法を用いて、水溶液中の水素結合ネットワークの働きを調べる研究を行っている。THz 領域では分子間振動や生体分子と水との弱い相互作用に関する情報が得られると期待される。前回の報告 [2] では、ラマン分光装置を用いて両親媒性分子として知られる TMAO の水溶液について、低波数領域のラマンスペクトルの濃度依存を報告した。今回、その再現性を確認すると共に、コヒーレントラマン分光により同じ試料についてコヒーレントラマン分光法による測定も行ったので、その結果を合わせて報告する。ラマン分光測定では、中心波長 830 nm のレーザー光を試料に照射し、その後方ラマン散乱光を検出器で検出した。観測された  $760\text{cm}^{-1}$  付近の TMAO のラマンスペクトルピーク値がモル濃度に比例するとして規格化を行い、右図のような結果を得た。この結果は前回報告した TMAO のモル濃度の増加につれて、水分子の緩和に由来する  $300\text{cm}^{-1}$  以下の低波数ラマン信号強度が増加する傾向を再現しているが、ばらつきが大きく定量的な解析は難しい。そこで、低波数領域でより検出感度が得られるコヒーレントラマン分光装置を用いて同様な TMAO 水溶液の濃度依存測定を行った。講演では、その結果を報告するとともに 2 つの測定法による違いを議論する。

[1] M. Tani, *et al*, Appl. Phys. Express 3, 072401 (2010).

[2] 大塚大, 他, 2018 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 講演番号 B-p9.

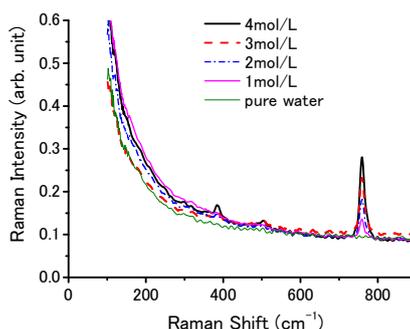


図. 規格化した TMAO 水溶液のラマンスペクトル

## B-p01

### レーザーイオン化法を用いた Ca 同位体濃縮の回収率向上に向けて

福井大・工, 松村賢一, 新木陽介, 小川泉, 仁木秀明

#### Development of the laser ionization method to enrich <sup>48</sup>Ca isotope

Fac. of Eng., Univ. of Fukui; K.Matsumura, Y.Shinki, I.Ogawa, H.Niki

ニュートリノのマヨラナ性の検証を目的として、<sup>48</sup>Ca のニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の探索を行っている。<sup>48</sup>Ca は  $0\nu\beta\beta$  崩壊核の中で最大の Q 値 (4.27MeV) を持っていることから BG に強く、高い SN 比の測定を実現可能だが、一方で天然存在比が小さい (0.18%) ため、濃縮して標的核を増やす必要がある。Ca は室温で気体の化合物が未発見であることから、遠心分離法等の従来法を用いることが出来ない。そのため、我々はレーザーイオン化法を用いて同位体濃縮を行っている。レーザーイオン化法とは、標的 isotopes の共鳴波長を持つ選択励起光源 (半導体レーザー) と励起された同位体をイオン化する光源 (色素レーザー) を Ca の原子蒸気に照射することで、図に示した経路で標的 isotopes のみをイオン化し、電場で分離する方法である。レーザーイオン化法による <sup>48</sup>Ca の濃縮では、最大で約 90% までの濃縮を確認できた。一方で、パルスレーザーを使用していることから、その回収率は充分ではない。そのため、現段階では回収率向上に向けた研究を進めている。その一環として、色素レーザーのエネルギー密度の変化から光イオン信号量を取得し、その関係からイオン化断面積の導出を行っている。

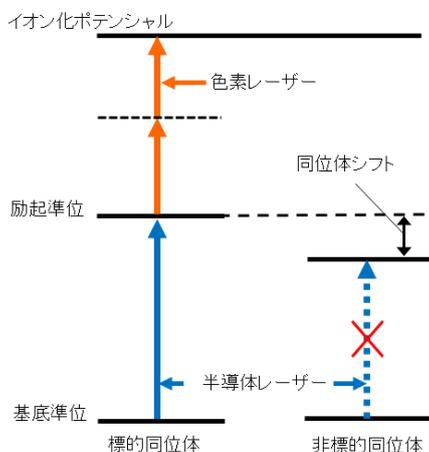


図: イオン化経路図

## B-p02

### ミリ波ジャイロトロンを励起光源としたガス分子からの自由誘導減衰測定

福井大遠赤セ, 大阪大レーザー研<sup>A</sup> 森祐揮, 古屋岳, 眞田洋希, 堂野孝暉, 林哉汰, 北原英明<sup>A</sup>, 石川裕也, 光藤誠太郎, 谷正彦

#### Free induction decay measurement from gas phase molecule by using millimeter wave gyrotron

FIR Center, Univ. of Fukui; ILE Osaka Univ.<sup>A</sup> Y. Mori, T. Furuya, H. Sanada, K. Dono, K. Hayashi, H. Kitahara<sup>A</sup>, Y. Ishikawa, S. Mitsudo, M. Tani

ジャイロトロンはテラヘルツ領域で高出力を有する数少ない光源であり、ホールバーニングなど非線形分光などへの応用が期待されている。しかし、発振周波数が離散的であることや、マイクロ秒以下の短パルス化が困難であることから高分解能分光などへの応用は進んでいない。近年、後進波を用いることによる数 GHz にわたる周波数の連続可変の報告[1]や、半導体シャッターによる電磁波の短パルス化技術の確立[2]により、様々な分光応用への期待が高まっている。本研究ではミリ波帯ジャイロトロンを励起光源に使用し、ガス分子を励起、自由誘導減衰を測定することで高分解能な分光手法の開発を目的とする。本研究で用いたジャイロトロンは周波数固定であったため、発振周波数帯に吸収線を持つアセトアルデヒドを測定対象とし、予備実験としてテラヘルツ時間領域分光法でスペクトルを測定した。サンプルの有無による信号比を図に示す。この結果から、ジャイロトロンが発振周波数帯である 154 GHz に吸収線があることを確認した。講演ではジャイロトロンを励起光としたガス分子の自由誘導減衰の測定結果についても議論する予定である。

[1] Tatematsu *et al.*, 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, RA2.2 (2017)

[2] S. Mitsudo *et al.*, 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Th-P1-4-2 (2018)

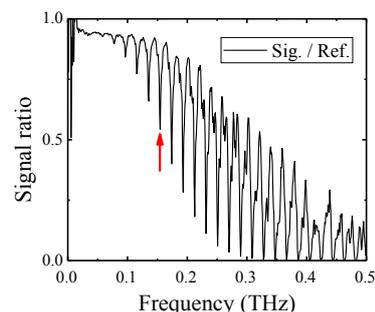


図: アセトアルデヒドの吸収スペクトル

## B-p03

### ジャイロトロンを用いた高強度テラヘルツ波励起による Fe ドープ InP からの第二高調波発生

福井大遠赤セ, Institute for Physics of Microstructures of RAS<sup>A</sup>

中川弥, 古屋岳, V. Morozov<sup>A</sup>, 小野義泰, 福成雅史, 立松芳典, 神谷亮汰, 岡本瞭太郎, 谷正彦

#### Second harmonic generation from Fe-doped InP

#### by high-intensity terahertz wave excitation using a gyrotron

FIR UF; Institute for Physics of Microstructures of RAS.<sup>A</sup>

W. Nakagawa, T. Furuya, V. Morozov<sup>A</sup>, Y. Ono, M. Fukunari, Y. Tatematsu, R. Kamiya, R. Okamoto, M. Tani

我々の研究グループでは高強度のテラヘルツ波にも耐えられる非線形光学結晶を用いた効率的な第二高調波発生(SHG)技術の開発を目指している。SHG 効率は基本波の強度、基本周波数、非線形光学結晶の非線形感受率および長さの二乗に比例する。InP 結晶は GaAs などに比べて非線形感受率が大きく、効率的な SHG が期待できる[1]。本研究では少量の Fe をドープした InP 結晶 (伝搬長 1cm, 7mm, 2.5mm) を用意した。励起光源として発振周波数 265GHz のジャイロトロンを用い、入射パワー4~700W の範囲で変化させた。InP 結晶を金属導波路構造に挿入し、入射波と直交する SHG の偏光成分をワイヤグリッド偏光子を用いて検出した。図は各伝搬長試料に対する検出器の出力信号の入射パワー依存性である。出力信号は伝搬長とジャイロトロン出力強度のほぼ二乗に比例していることから、SHG が得られていると考えられる。講演では実験の詳細と解析結果を報告する。

[1] Vladimir V Romyantsev, *et al.* EPJ Web of Conferences **195**, 02010(2018)

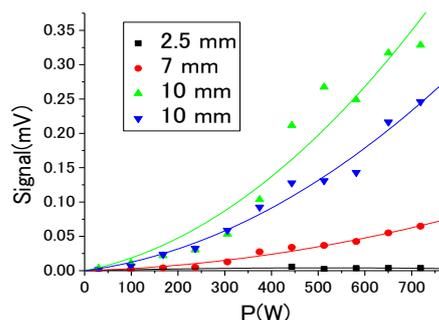


図: 各伝搬長の InP からの信号の入射パワー依存

## B-p04

### Cherenkov 位相整合と平行平板導波路を用いたテラヘルツ波のヘテロダイン電気光学サンプリング

福井大学遠赤センター, 大阪大学<sup>A</sup>

竹内宏樹, 椎原正基, 江崎晃弘, 北原英明<sup>A</sup>, 古屋岳, 谷正彦

#### Heterodyne Electro-Optic Sampling of Terahertz Waves

#### Using Cherenkov Phase Matching and Tapered Parallel Plate Waveguides

FIR UF, Osaka University<sup>A</sup>

Hiroki Takeuchi, Akihiro Esaki, Masaki Shihara, Hideaki Kitahara<sup>A</sup>, Takashi Furuya, Masahiko Tani

我々の研究グループではテラヘルツ波の検出技術の高感度・広帯域化を目標として、テラヘルツ波の電気光学サンプリング(EOS)を Cherenkov 位相整合[1]を用いて行い、プローブ光の位相遅延ではなく、強度変化を直接検出するヘテロダイン EOS[2]を提案、実証してきた。今回は非線形光学結晶へ入射するテラヘルツ波の強度を、テーパ付きの平行平板導波路(TPPWG)を用いることで増強し、その効果を検証した。今回、非線形光学結晶として GaAs を使い、その上下に金を蒸着した基板を TPPWG に挟み込み、Cherenkov 位相整合によるヘテロダイン EOS を行った。ポンプおよびプローブ光に中心波長 1.55  $\mu\text{m}$ 、パルス幅 50fs のレーザーパルス光を、エミッタにはダイポール型光伝導アンテナを用いた。観測されたテラヘルツ波の時間波形は右図のようになった。講演では TPPWG の信号増強効果や、ZnTe 結晶を用いた場合との比較について議論し、GaAs 結晶の優位性と TPPWG の有効性を検証する。

[1] M. Tani, *et al*, Opt. Exp.19, 19901 (2011).

[2] M. Tani, *et al*, Opt. Exp.21, 927 (2013).

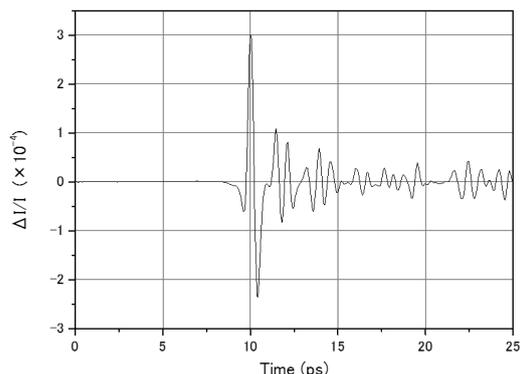


図. 得られたテラヘルツ波の検出波形

## B-p05

### 金属スピントロニック素子によるテラヘルツ波放射の材料依存

福井大工, Kaiserslautern Photonic Center<sup>A</sup>, Universität Kaiserslautern<sup>B</sup>, 佐賀大理工<sup>C</sup>,

大阪大学<sup>D</sup>, 国立研究開発法人 物質・材料研究機構<sup>E</sup>, 館岡 千椰佳, 谷 正彦,

Valynn Mag-usara, Miezal Talara, Garik Torosyan<sup>A</sup>, René Beigang<sup>B</sup>, 齊藤 勝彦<sup>C</sup>,

郭 其新<sup>C</sup>, Jessica Afalla, 古屋 岳, Mary Clare Escaño, 北原 英明<sup>D</sup>, 中嶋 誠<sup>D</sup>,

Dmitry Bulgarevich<sup>E</sup>, 渡邊 誠<sup>E</sup>

#### Material Dependence of THz Emission of Spintronic THz Emitters

Fac. of Eng., Univ. of Fukui, Photonic Center Kaiserslautern<sup>A</sup>, Universität Kaiserslautern<sup>B</sup>, Saga University<sup>C</sup>,

Osaka University<sup>D</sup>, National Institute for Materials Science<sup>E</sup>, C.Tachioka, M.Tani, V.Mag-usara, M.Talara,

G.Torosyan<sup>A</sup>, R.Beigang<sup>B</sup>, K.Saito<sup>C</sup>, Q.Guo<sup>C</sup>, J.Afalla, T.Furuya, M.Escaño, H.Kitahara<sup>D</sup>, M.Nakajima<sup>D</sup>,

D.Bulgarevich<sup>E</sup>, M.Watanabe<sup>E</sup>

強磁性体金属薄膜 (FM : Ferromagnetic Metal) と非磁性体金属薄膜 (NM : Non-Ferromagnetic Metal) のヘテロ構造からなる金属スピントロニック素子 (FM/NM 素子) によるテラヘルツ (THz) 波放射効率は、FM や NM に使用される金属や金属薄膜の厚さによって異なる [1], [2]。右図は、Fe/Pt 素子と Co/Pt 素子からの THz 波を光伝導アンテナで検出した時間領域波形である。放射効率は金属薄膜の厚さ、作成方法によって異なるが、Fe/Pt 素子は Co/Pt 素子よりもテラヘルツ波発生効率が大変良いことが読み取れる。金属の種類に依存した放射効率のほか、厚依存、基板の違いについても議論する。

[1] G. Torosyan, *et al.*, Scientific Reports 8, 1311 (2018).

[2] H.S. Qui, *et al.*, Optics Express 26, 15248 (2018).

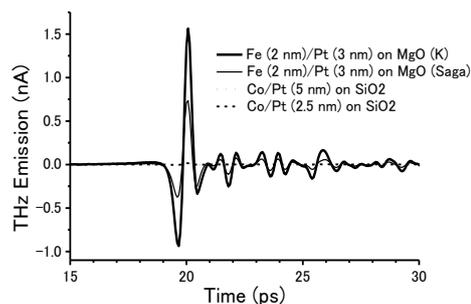


図: THz Emission from spintronic THz Emitters at 800-nm with 20-mW optical excitation

## B-p06

### 液体 He 中でレーザーアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップ X

富山大理, 福井大院工<sup>A</sup>, 阪大院基礎工<sup>B</sup>

佐々木照太, 直井惇, 高宗雅人, 近藤大聖, 熊倉光孝<sup>A</sup>, 芦田昌明<sup>B</sup>, 森脇喜紀

### Magnetic Trapping of Superconductor Particles Produced by Laser Ablation in Liquid Helium X

Univ. of Toyama, Univ. of Fukui<sup>A</sup>, Osaka Univ.<sup>B</sup>

S. Sasaki, J. Naoi, M. Takamune, D. Kondou, M. Kumakura<sup>A</sup>, M. Ashida<sup>B</sup> and Y. Moriwaki

超流動 He 中におけるレーザーアブレーションによりサブミクロンサイズの球状の微粒子を生成することが出来る。その微粒子が超伝導性を持つ場合には完全反磁性を利用して四重極磁場の中心にトラップできることがわかった [1]。

我々は微粒子の光学物性、超伝導物性、磁気トラップの特性に興味を持ち、超流動 He の光透過性、低温、低粘性、高熱伝導などの物理的性質を利用していくつかの実験を行っている。これまでに In や Re の超伝導微粒子は粒径によって転移温度が変化するとわかった。特に、Re 微粒子ではバルクに比べて転移温度が 2.5 倍以上高いことがわかり、この点は他の手法で作成された Re の転移温度の上昇と比べても非常に興味深い結果である [2][3]。また、レーザー照射に伴いトラップ微粒子の位置が移動するということがわかってきた。この現象を利用してレーザー照射後のトラップ微粒子の磁場中での運動を時間的に追跡することで、超流動 He の粘性率に関するデータが得られる [4]。現在、Mie 散乱による粒径測定を試みており、この手法と変位解析を組み合わせることによって超流動 He の粘性データの取得を目指している。

[1]Y. Takahashi et al., Appl. Phys. Express 10, 022701 (2017).

[2]M. Mito et al., Sci. Rep., 6, 36337 (2016).

[3]D. P. Pappas et al., Appl. Phys. Lett., 112, 182601 (2018).

[4] 直井惇, 日本物理学会北陸支部 2018, 液体 He 中でレーザーアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップ VIII.

## B-p07

### 光励起を利用した CdSe/ZnS 半導体量子ドットの誘電泳動

福井大院工 下村 昂之, 浅野 理貴, 野末 悟郎, 山本 城緑, 守安 毅, 熊倉 光孝

### Dielectrophoresis of CdSe/ZnS Quantum Dots under Photoexcitation

Grad. Sch. of Eng., Univ. of Fukui T. Shimomura, R. Asano, G. Nozue, K. Yamamoto, T. Moriyasu, M. Kumakura

原子や  $\mu\text{m}$  サイズの微粒子に対し、光や電場を用いた運動操作が実現されている。しかし、常温の媒質中での数 nm サイズの粒子に対しては、体積が小さいことや環境の熱エネルギーなどから、運動操作は未だ困難である。 $\mu\text{m}$  サイズの粒子に対しては誘電泳動の有効性が明らかにされているが、ナノ粒子に対しては印加できる電場勾配の制約などから、常温での運動操作は難しい。誘電率  $\epsilon_p$  を持つ半径  $r$  の球状粒子は静電場  $E$  中で

$$\varphi_{\text{DEP}} = -2\pi\epsilon_m r^3 K(0) |E|^2$$

のポテンシャルエネルギーを受ける。ここで  $\epsilon_m$  は溶媒の誘電率、 $K(0)$  は Clausius-Mossotti 関数で、 $K(0) = (\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_p + 2\epsilon_m)$  である。これまでに我々は、大きな比誘電率を持つとともに、電気分解などが生じにくい非プロトン性極性溶媒である炭酸プロピレンを用いることで、従来よりも大きな電場勾配を印加可能な実験系を考えたが、数 nm サイズの半導体量子ドットの泳動には不十分であった。そこで我々は、光励起による励起状態のシュタルク効果を利用する方法を新たに考案した。

実験装置を図 1 に示す。試料である直径 6 nm 程度の CdSe/ZnS 半導体量子ドットを炭酸プロピレンに溶かした溶液をガラスキャピラリーに封入し、電極間に配置した。電極の間隔は 8 mm で、23 kV の電位差を加えた。量子ドットの移動は、蛍光を CCD カメラで観測し、蛍光強度分布の変化としてモニターした。励起光と印加電場が共存する場合、量子ドットの高電場領域への移動が確認された。また、励起光を切ると、均一な粒子分布に戻ることも確かめられた。熱平衡状態における粒子分布から実効的な  $K(0)$  を見積もったところ、基底状態で期待される  $K(0) \approx 1$  に比べて、40 倍ほど大きな値に相当することが分かった。

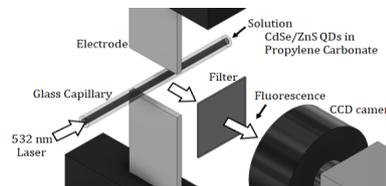


図 1 : 実験装置

## B-p08

### PbO 分子の $X0(v''=0) \rightarrow A0(v'=6)$ 遷移の高分解能分光 富山大学理 白石聖、高島涼汰、鈴木雄大、寺元一馬、干場麻美、榎本勝成

#### High-resolution spectroscopy of the $X0(v''=0) \rightarrow A0(v'=6)$ transition of PbO

Faculty of science, Univ. of Toyama

S. Shiraishi, R. Takabatake, T. Suzuki, K. Teramoto, M. Hoshiba, K. Enomoto

我々は、これまでにヘリウムバッファガス冷却による低温低速分子ビームを用いた高分解能分光の研究を行ってきた。原子の共鳴線によって較正された超低膨張エタロン[1]の共鳴周波数と比較することで、一酸化鉛(PbO)分子の  $B1(v'=3-6)$  状態の高分解能分光を 10 MHz の絶対周波数精度で行った[2]。

この過去の研究では液体ヘリウム温度で測定を行っていたため、低い回転量子数状態からの遷移しか観測できなかった。そこで、液体窒素温度でより高い回転遷移を測定することにした。また、励起地点を試料セル外部から内部へと変更した。これにより、スペクトル線幅は広がったものの観測できる分子の数が増え、以前は測定できなかった遷移の測定ができるようになった。

この新しいシステムを用いて  $B1(v'=5)$  状態で未測定の状態を 30 本、また報告例のない  $A0(v'=6)$  状態の遷移を 34 本測定した。右図では下のグラフがエタロンの透過光信号を、上のグラフが分子の蛍光の信号を表す。エタロンの副目盛りとして電気光学素子によるサイドバンドを用いている。本講演では、これらの状態の分子定数などについて報告する予定である。

[1]K. Enomoto et. al., Appl. Phys. B **122**, 126 (2016)

[2]K. Enomoto et. al., J. Mol. Spectrosc, **339**, 12 (2017)

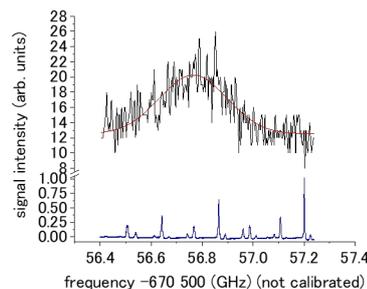


図  $X0(v''=0) \rightarrow A0(v'=6)$  R(4) の励起スペクトルとエタロンの共鳴信号

## B-p09

### CaH の可視光領域での $^2\Delta$ 状態の初測定および同定

富山大理 八倉巻翔太、古田仁、渡辺響平、谷伊織、森脇憲紀、小林かおり

First Identification of a  $^2\Delta$  State of CaH in the Visible Region.

Fac. of Sci., Univ. of Toyama. S. Yaguramaki, J. Furuta, K. Watanabe, I. Tani, Y. Moriwaki, K. Kobayashi

CaH は可視領域に多くのスペクトルがあり、分光学、天文学において長い歴史をもつ分子である。このスペクトル領域に複雑なポテンシャル曲線 (図 [1]) があり、我々はそれらの間の相互作用に興味をもっている。

富山大学ではレーザー誘起蛍光法を用いた CaH の可視および紫外領域での振動回転スペクトルの測定に取り組んでいる。B/B' 状態のダブルミニマムポテンシャルのエネルギー障壁を超えた領域において 12 帯の新しいバンドの帰属を決定した [2,3]。また量子化学計算によって予測されていたバンド間隔の不規則性 [4] を実験的に検証し、詳しいスペクトル解析の結果、この不規則性は B/B' 状態および D 状態間の相互作用によるものであると結論づけた。

本研究では  $19000 \text{ cm}^{-1}$  付近に、 $^2\Delta-X$  および  $^2\Delta$  状態に属する新しいバンドを同定し、引き続き精密測定を行なっている。今学会では我々の実験の現状と将来展望についても概説する。

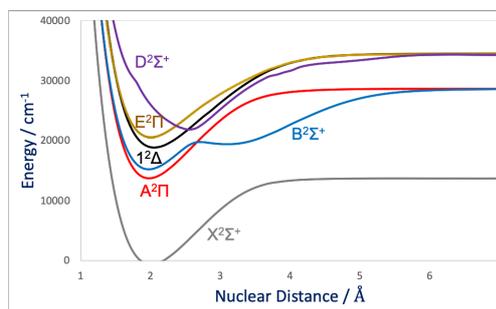


図 1 CaH ポテンシャル曲線 [1]

#### References

- [1] A. Shayesteh et al. Chem. Phys. Lett. 667, 345 (2017). [2] K. Watanabe et al. Chem. Phys. Lett. 657, 1 (2016). [3] K. Watanabe et al. Chem. Phys. Lett. 710, 11 (2018). [4] C. Carlsson-Levin et al. Phys. Scripta 65, 306 (2002).

## C-a01

### RIrSi (R = La, Ce)及び LaRhSi の単結晶育成の試み

富山大理、富山大学院理<sup>A</sup> 村松和馬、松本裕司<sup>A</sup>

#### Attempt of single crystal growth of RIrSi (R = La, Ce) and LaRhSi

Fac. of Sci., Univ. of Toyama, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Univ of Toyama<sup>A</sup> K. Muramatsu and Y. Matsumoto<sup>A</sup>

空間反転中心と鏡映面を結晶に持たないキラル結晶は近年注目されており、キラルソリトン格子やスキルミオンなどの特異な磁性を示すことや、パウリリミットの効かない超伝導を示すことなどが期待されている。CeIrSi, LaIrSi 及び LaRhSi は立方晶 CeIrSi 型(空間群:P2<sub>1</sub>3, No. 198)に属しているキラル結晶である[1]。CeIrSi は 0.3K までは磁気秩序しないこと[2], LaIrSi, LaRhSi はそれぞれ 2.3K, 4.35K で超伝導を示すことが報告されているが、これらはすべて多結晶での研究である[3]。今回、希土類フラックス法により単結晶育成を試み、物性測定を目指すことを目的として研究を行った。

CeIrSi の育成は、Ce:Ir:Si=10:1:1 で秤量し、石英管中に真空封入した。その後 1000℃まで上げて、次に 600℃まで徐冷を行い、最後は自然冷却した。試料評価は、電子線プローブマイクロアナライザ(EPMA)と粉末 X 線回折法を用いた。図に粉末 X 線回折の結果を示す。試料評価の結果、CeO<sub>2</sub> と Ce<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> が得られたことが分かった。その後、仕込み比や温度プログラムの徐冷時間を変えて、育成を試みたが、目的の CeIrSi は得られなかった。同様に、LaIrSi と LaRhSi の育成を試みたところ、それぞれ La<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> が得られただけで目的の試料は得られなかった。

【参考文献】

[1] B. Heying *et al.*, *Monatsh. Chem.* **135**, 1335 (2004). [2] F. Kneidinger *et al.*, *Phys. Rev. B.* **100**, 134442 (2019). [3] B. Chevalier *et al.*, *Solid State Commun.* **41**, 801 (1982).

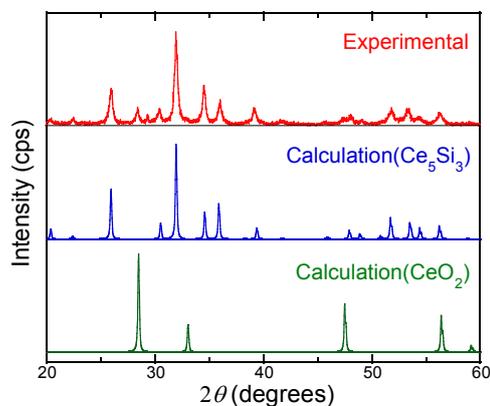


図. CeIrSi の粉末 X 線回折の結果と Ce<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> と CeO<sub>2</sub> の計算値

## C-a02

### La<sub>3-x</sub>Ca<sub>x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> の焼結条件とその磁性

金沢大自然, スミダコーポレーション<sup>A</sup>, 金沢大理工<sup>B</sup>

廣川 脩祐, 安達 悠人, 流 雅樹, 小林 慶士郎, 大塚 努<sup>A</sup>, 大橋 政司<sup>B</sup>

#### Sintering Condition and Magnetic Properties of La<sub>3-x</sub>Ca<sub>x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University,

Institute of Science and Engineering, Sumid Co.Ltd<sup>A</sup>, Kanazawa University<sup>B</sup>

Syusuke Hirokawa, Yuto Adachi, Masaki Nagare, Keisiro Kobayashi, Tsutomu Otsuka<sup>A</sup>, Masashi Ohashi<sup>B</sup>

単相斜方 Ruddlesden-Popper 型マンガン酸化物である Ca<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> は、ネール温度 T<sub>N</sub>=123K の反強磁性体であり、110K 以下の低温状態ではヒステリシスループを生じ、弱い強磁性を示す[1]。しかし、この系の Ca を La で希釈すると強磁性相互作用が誘起され、正方晶の強磁性体となる。La<sub>x</sub>Ca<sub>3-x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> について、x=1, 1.2, 1.4, 1.5 の系ではそれぞれキュリー温度 T<sub>C</sub>=250K[2], 242K[3], 270K[4], 215K[5]を示すことが先行研究により報告されている。一方で、La<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> は優れた酸化還元特性を示す触媒として知られているが[6]、磁気特性に関する報告は無い。我々はこの系を系統的に調べるため、様々な組成や結晶構造の La<sub>x</sub>Ca<sub>3-x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (x=0~3) を作製し、組成比と磁気特性の相関を調べている。

試料は一般的な焼結法によって作製した。XRD の結果、x=1~1.5 の試料はすべて正方晶であった。格子定数を算出した結果、x=1.0 では a=3.8062Å, c=18.9801Å, x=1.4 では a=3.8332Å, c=19.1058Å となり、Ca が La に置換されることで格子定数がわずかに大きくなっていることが分かったが、先行研究[4]と比較するとやや小さい値を示した。また、x=1.4 の試料に関して磁化測定を行ったところ T<sub>C</sub>≒200K を示し、先行研究よりも低い結果となった。格子定数の違いが磁気特性に影響を与えたのではないかと考えられる。

[1] P. Sahlot, A. M. Awasthi : arXiv:1901.04778 (2019)

[2] M. A. Green *et al.* : *Chem Mater.* **12**, 90 (2000)

[3] K. V. Kamenev *et al.* : *Physical Review B* **56**, R12688 (1997)

[4] E. Tasarkuyu *et al.* : *Journal of Alloys and Compounds* **509**, 3717 (2011)

[5] H. Asano *et al.* : *Appl. Phys. Lett.* **68**, 3638 (1996)

[6] X. Du *et al.* : *J. Mater. Chem. A*, **1**, 8411 (2013)

## C-a03

### $RT_2$ ( $R$ =希土類; $T$ =Al,Ni) 系金属間化合物の熱伝導率

金沢大理工, NIMS<sup>A</sup>

熊澤 直哉, 渡辺 祥太, 小松 俊介, 二塚 和美, 松本 宏一

神谷 宏治<sup>A</sup>, 大吉 啓司<sup>A</sup>, 竹屋 浩幸<sup>A</sup>, 沼澤 健則<sup>A</sup>

#### Thermal conductivities of $RT_2$ ( $R$ =rare earth; $T$ =Al,Ni) series

Kanazawa Univ., NIMS<sup>A</sup>,

N. Kumazawa, S. Watanabe, S. Komatsu, K. Futatsuka, K. Matsumoto

K. Kamiya<sup>A</sup>, K. Oyoshi<sup>A</sup>, H. Takeya<sup>A</sup>, T. Numazawa<sup>A</sup>

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した水素液化磁気冷凍に用いる磁性材料を研究している。磁気熱量効果は磁性体の転移点近傍で大きくなるため、水素液化温度領域に適した転移温度を持つ磁性体が必要となる。我々がこれまでに研究を行ってきた  $RT_2$  ( $R$ =希土類;  $T$ =Al,Ni) 系金属間化合物は転移温度で常磁性-強磁性転移を伴い、選択する希土類元素  $R$  もしくは金属  $T$  によって転移温度が調整できる。これにより水素液化温度領域である 20K-80K 近傍での磁気相転移が可能となるため、本研究での磁性材料として有用である。磁性体の熱伝導率は実用化の点から非常に重要である。今回、 $RT_2$  ( $R$ =希土類;  $T$ =Al,Ni) 系金属間化合物として、アーク溶解と放電加工により  $3 \times 3 \times 20$ mm の直方体に加工された  $ErAl_2, DyAl_2, GdNi_2$ , 及び、 $DyNi_2$  の熱伝導率の測定を行った。測定には定常法を使用し、0T での測定に加え、実際の冷凍機での使用を想定して磁場中でも測定した。 $ErAl_2$  の 0, 5T における熱伝導率を図に示す。測定の結果、0T については過去に報告があり、一致することが確認できた[1]。また磁場印加時においても熱伝導率の変化が小さいため、実際の冷凍機運転時でも磁場による影響を受けることなくサイクルを行うことができると考えられる。講演では他の試料についての熱伝導率測定結果や実験の詳細、解析方法も含め評価したので報告する。

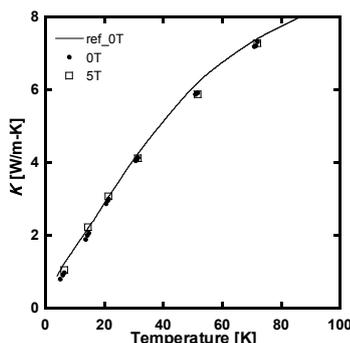


図:  $ErAl_2$  の熱伝導率

[1] E Bauer, E Gratz and G Adam, "Thermal conductivity of  $REAl_2$  compounds ( $RE$ =rare earth)", J. Phys. F: Met. Phys. 16(1986) 493-506.

## C-a04

### 金属間化合物 $RT_2$ ( $R$ = Gd, Dy, Er ; $T$ = Al, Ni) の熱膨張、磁歪測定

金沢大, NIMS<sup>A</sup> 二塚 和美, 渡辺 祥太, 小松 俊介, 熊澤 直哉, 松本 宏一,

神谷 宏治<sup>A</sup>, 大吉 啓司<sup>A</sup>, 竹屋 浩幸<sup>A</sup>, 沼澤 健則<sup>A</sup>

#### Measurements of Thermal Expansion and Magnetostriction of Intermetallic compounds $RT_2$ ( $R$ = Gd, Dy, Er ; $T$ = Al, Ni)

Kanazawa Univ., NIMS<sup>A</sup>

K. Futatsuka, S. Watanabe, S. Komatsu, N. Kumazawa, K. Matsumoto,

K. Kamiya<sup>A</sup>, K. Oyoshi<sup>A</sup>, H. Takeya<sup>A</sup>, T. Numazawa<sup>A</sup>

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した水素液化磁気冷凍機に用いる磁性材料について研究している。磁気熱量効果は磁性体の転移点近傍で大きくなるため、その温度領域に適した磁性体が必要となる。水素液化磁気冷凍用の磁性材料としては、転移温度で常磁性から強磁性への二次相転移を伴う  $RT_2$  ( $R$ = Gd, Dy, Er ;  $T$ = Al, Ni) 系ラーベス相金属間化合物が有望視されている。これらの磁性体が温度や磁場変化により壊れ微粉化すると、熱交換器のつまりなどの冷凍機の故障の原因となる。そのため、事前に磁性体の熱膨張率、磁歪を知ることが重要であるが、これまで報告がなかった。

本研究では、 $DyAl_2, GdNi_2, DyNi_2, ErAl_2$  をアーク溶解で合成後、放電加工により  $3 \times 3 \times 3$ mm の立方体に加工し、キャパシタンス法を用いて各試料の熱膨張と磁歪を測定した。図には、 $DyAl_2$  の熱膨張率と磁歪の測定結果を示す。室温から 4K までの温度範囲で、熱膨張率は  $10^{-3}$  オーダーであり、通常金属材料と同程度である。5T での磁歪は  $10^{-4}$  程度であった。さらに、5T での磁歪の測定結果を熱膨張率のグラフにプロットすると両者はおおよそ一致するため、測定の整合性が確認できた。講演では、4 つの試料の測定結果の詳細や文献値と比較した結果について報告する。

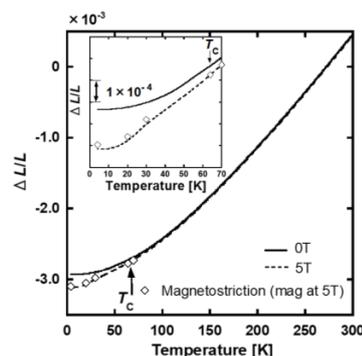


図:  $DyAl_2$  の熱膨張率と磁歪

## C-a05

### 1.8K 以下での精密磁化測定用 $^3\text{He}$ インサートとガスハンドリングシステムの製作

金沢大数物、金沢大総合技術<sup>A</sup>、金沢大教育<sup>B</sup>、九大工<sup>C</sup>

輪島 裕樹, 島村一利<sup>A</sup>, 辻井宏之<sup>B</sup>, 阿部聡, 松本宏一, 河江達也<sup>C</sup>, 吉田靖雄

### Development of $^3\text{He}$ Insert and Gas Handling system for Precise Magnetization Measurement below 1.8K

Dept. Phys., Kanazawa Univ., Tech. Supp., Kanazawa Univ.<sup>A</sup>, Fac. Edu., Kanazawa Univ.<sup>B</sup>, Dept. Quan.

Phys., Kyuhu Univ.<sup>C</sup>

H. Wajima, K. Shimamura, H. Tsujii, S. Abe, K. Matsumoto, T. Kawae, Y. Yoshida

SQUID 磁束計 MPMS(Magnetic Property Measurements System)は非常に広い温度、磁場の範囲において高い精度で磁性の測定を行うことができる装置であり、世界中で広く利用されている。しかし、その最低温度は 1.8 K であり、より低い温度で実験を行うためには、何らかの工夫が必要となる。九大の河江グループでは、MPMS に取り付け可能な  $^3\text{He}$  インサートを開発し、360 mK までの精密磁化測定を実現している[1]。我々は、この  $^3\text{He}$  インサートを金沢大の極低温実験室に導入すべく実験を開始した。しかし、金沢大が所有する MPMS が 1.8 K を長時間保てないタイプの装置であったため、 $^3\text{He}$  ガスを十分に液化することができないという問題があった。一方で、3 K では 10 時間以上温度が保たれることが分かった。 $^3\text{He}$  を 3 K で液化するためには、 $^3\text{He}$  ガスを大気圧程度まで加圧する必要がある。そこで、我々は  $^3\text{He}$  ガスを加圧できる高圧対応のガスハンドリングシステムの製作を行った。活性炭を詰めた Dipsitck を液体ヘリウムで冷却することによって  $^3\text{He}$  ガスを吸着し、室温に戻すことでガスを放出し、加圧することができる。発表では、装置開発の詳細と、この装置を用いた 1.8 K 以下での精密磁化測定の結果について説明する。

[1] Y. Sato *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 106702.

## C-a06

### 一次元反強磁性体 $\text{CuBr}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$ 単結晶の ESR 測定

福井大工 野作 一生, 西首 時夫, 浅野 貴行, 菊池 彦光

### Single Crystal ESR Study of One-dimensional Antiferromagnet $\text{CuBr}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$

Fac. of Eng., Univ. of Fukui I. Nosaku, T. Nishikubi, T. Asano, and H. Kikuchi

$\text{CuX}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$  ( $X=\text{Cl}, \text{Br}$ ) [ $\gamma\text{-pic}=4\text{-Methylpyridine}$ ] は、理想的な一次元反強磁性体として知られている。これまで粉末試料による磁化率や強磁場磁化測定から、 $X=\text{Cl}$  では交替ボンド鎖 (鎖内反強磁性相互作用:  $J/k_B = 13 \text{ K}$ , 交替ボンド比:  $\alpha = 0.6$ , エネルギーギャップ:  $\Delta/k_B = 14 \text{ K}$ )、 $X=\text{Br}$  では一様鎖 ( $J/k_B = 20 \text{ K}$ ,  $\alpha = 1.0$ ) の磁気的性質が報告されている[1]。しかし、この両者の大きく異なる磁気的性質の原因は、未だ明らかにされていない。

そこで、より詳細な物性の情報を得るため、物性測定が実施可能な大きさの単結晶合成を行っている。これまでに  $\text{CuCl}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$  単結晶の電子スピン共鳴 (ESR) 測定を行い、結晶学的単位胞内に磁気的主軸が 2 つ存在すること明らかにし、鎖間相互作用の大きさを見積った [2]。

今回、 $\text{CuBr}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$  の極微小な単結晶試料を用いた ESR 測定を行ったので報告する。右図は、 $\text{CuBr}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$  の  $T = 2 \text{ K}$  における鎖軸 ( $b$  軸) を含む面内での ESR シグナルの角度依存性である。 $b$  軸に平行 ( $\theta = 0^\circ$ ) 及び垂直 ( $\theta = 90^\circ$ ) に磁場を印加した際は一本のシグナルであるが、角度変化に伴い二本のシグナルが観測された。この詳細な解析結果や  $\text{CuCl}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$  との比較については、当日発表する予定である。

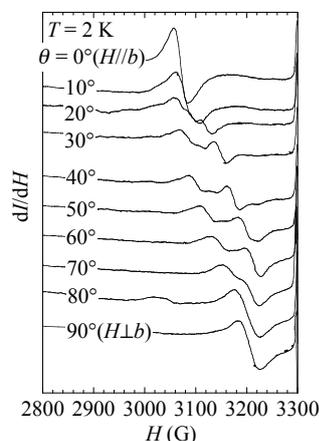


図 1:  $\text{CuBr}_2 \cdot (\gamma\text{-pic})_2$  の  $T = 2 \text{ K}$  における ESR 角度依存性

[1] Y. Ajiro *et al.*, Physica B329-333 (2003) 1004.

[2] 西首時夫 *et al.*, 2018 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会講演予稿集 C-p2.

## C-a07

### $S = 1/2$ 三角スピクラスタ RbBa<sub>3</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>V<sub>7</sub>O<sub>28</sub> の磁性

福井大工, 九大院工<sup>A</sup>, 阪大先端強磁場<sup>B</sup> 尾花 直輝, 浅野 貴行, 稲垣 裕次<sup>A</sup>,  
河江 達也<sup>A</sup>, 鳴海 康雄<sup>B</sup>, 萩原 政幸<sup>B</sup>, 菊池 彦光

#### Magnetic Property of the $S = 1/2$ Triangular Spin Cluster RbBa<sub>3</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>V<sub>7</sub>O<sub>28</sub>

Fac. of Eng., Univ. of Fukui; Fac. of Eng., Kyushu Univ.<sup>A</sup>; AHMF, Osaka Univ.<sup>B</sup> N. Obana, T. Asano,  
Y. Inagaki<sup>A</sup>, T. Kawae<sup>A</sup>, Y. Narumi<sup>B</sup>, M. Hagiwara<sup>B</sup>, and H. Kikuchi

三角格子やカゴメ格子、パイロクロア格子を有する幾何学的フラストレートスピ系は、基底状態が高度に縮退するために興味深い物性が示すことが知られている[1]。これらのスピ系の最小単位は、頂点に磁性イオンが配置された三角形や四面体である。

本研究で着目する RbBa<sub>3</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>V<sub>7</sub>O<sub>28</sub> は、室温での結晶構造から磁性イオンである Cu<sup>2+</sup> ( $S = 1/2$ ) が正三角形の頂点の位置に存在し、その正三角スピ間は、他のイオンによって大きく隔てられていることから理想的な三角スピクラスタのモデル物質として期待される[2]。

図 1 は、RbBa<sub>3</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>V<sub>7</sub>O<sub>28</sub> の  $T = 1.4$  K における強磁場磁化過程の測定結果である。最高印加磁場  $H = 55$  T において  $M = 0.95 \mu_B/\text{f.u.}$  であることから、三角スピクラスタ内の相互作用は、反強磁性的であると思われる。

当日は、同様の結晶構造を有する KBa<sub>3</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>V<sub>7</sub>O<sub>28</sub> の磁気的性質[3]と比較して議論する予定である。

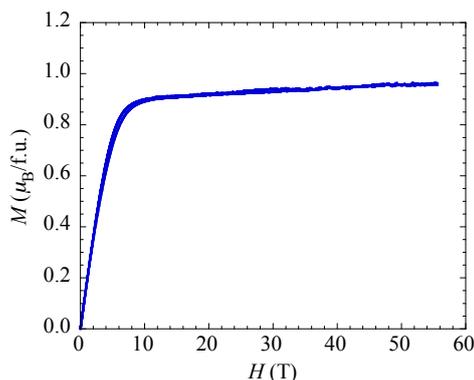


図 1: RbBa<sub>3</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>V<sub>7</sub>O<sub>28</sub> の  $T = 1.4$  K における磁化過程

[1]山下正廣, 小島憲道 編著「金属錯体の現代物性化学」三共出版 (2008) .

[2]M.von Postel *et al.*, *J. Alloys Comp.* **200** (1993) 165.

[3]H. Sakurai *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 664.

## C-a08

### $S=1/2$ 一次元反強磁性体 D-F<sub>5</sub>PNN の単結晶の <sup>19</sup>F-NMR

福井大遠赤セ, 産総研<sup>A</sup>, 京大人環<sup>B</sup> 大浦拓実, 笈田智輝, 大見謝恒宙, 藤井裕,  
石川裕也, 泉小波<sup>A</sup>, 酒井尚子<sup>B</sup>, 田熊邦郎<sup>B</sup>

#### <sup>19</sup>F-NMR of Single Crystal of Spin-1/2 One-Dimensional Antiferromagnet D-F<sub>5</sub>PNN

FIR Center, Univ. of Fukui; AIST<sup>A</sup>; Kyoto Univ<sup>B</sup>. T. Oura, T. Oida, T. Omija, Y. Fujii, Y. Ishikawa,  
K. Izumi<sup>A</sup>, N. Sakai<sup>B</sup>, K. Taguma<sup>B</sup>

有機ラジカル磁性体 F<sub>5</sub>PNN は、 $S=1/2$  一次元反強磁性体であり、NMR 等から磁場中での量子臨界的な振る舞い(朝永-Luttinger 液体(TLL)状態)が観測されている[1]。またこのモデルが特徴的なのは、フラストレーションをもたらす次近接相互作用の存在のために低温で支配的なスピ揺らぎのモードが入れ替わる可能性が指摘されていることである。しかし、F<sub>5</sub>PNN は TLL を観測できる数 K 領域で構造相転移が起きるため詳細な議論が難しかった。しかし F<sub>5</sub>PNN の重水素化試料 D-F<sub>5</sub>PNN は約 0.9 K までは構造相転移がない為[2]、低温での振る舞いを観測しやすい。

我々は単結晶の D-F<sub>5</sub>PNN 試料を用いた <sup>19</sup>F-NMR 測定を最低温度 2 K まで行った。磁場方向に対して NMR スペクトルの変化を測定し、hyperfine テンソルを実験から明らかにした(図 1)。また、磁場方向と磁場強度によって核磁気緩和の温度変化に定性的な違いが現れることがわかった。これらから、磁場の印加方向や強度によって、それぞれのスピ揺らぎのモードの寄与の大小を変化させることが可能と示唆される。

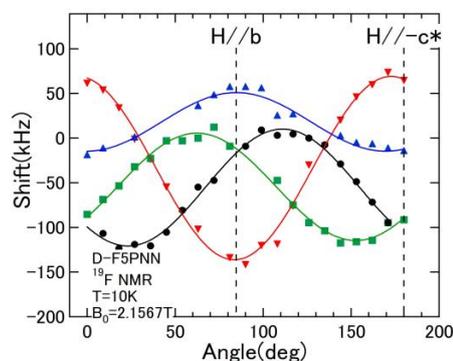


図 1 a 軸に垂直な面内で磁場方向を変化させたときの共鳴線のシフトの変化

[1] K. Izumi *et al.*: *Physica B*, **329-333** (2003) 1191, [2] Y. Inagaki *et al.*: *JPSJ* **86** (2017) 113706.

## C-a09

### DNP-NMR 測定に向けた円筒型共振器による ESR

福井大工遠赤セ, 佐藤 丈賀, 林 哉汰, 堂野 亨暉,  
石川 裕也, 藤井 裕, 古屋 岳, 光藤 誠太郎

#### ESR using with cylindrical resonator toward to DNP-NMR measurements

FIR Center Univ. of Fukui; T. Sato, K. Hayashi, K. Dono,  
Y. Ishikawa, Y. Fujii, T. Furuya, S. Mitsudo

我々は、電子スピン共鳴(ESR)と核磁気共鳴(NMR)双方による動的核偏極(DNP)効果を用いた希薄スピン系の NMR(DNP-NMR)や電子-核二重共鳴(ENDOR)を目指し、超低温・高磁場領域で使用可能な磁気共鳴装置装置開発を行っている。これまでに我々は、球面ミラーと平面ミラーを対に並べた Fabry-Pérot 型共振器を中心とし ESR/NMR 共用共振器の開発を行ってきた。しかしながら、この共振器では設置可能な試料量が限られるため、NMR の高感度化は困難である。NMR 感度を向上させるため Fabry-Pérot 型共振器に比べて共振器内に挿入する試料の量を増加させることが可能な円筒型共振器に着目し、NMR 測定感度の増大させることを目的にミリ波帯における二重磁気共鳴用円筒型共振器を開発した[1]。

今回、製作した二重磁気共鳴用円筒型共振器を用いて以下の試料について 130 GHz 近傍、3 K -60 K の温度範囲において測定を行った。試料は安定なラジカルをもつ ESR の標準試料として知られる COAL、DPPH、BDPA (100 mM) の 3 種類である。COAL の ESR 信号強度の温度依存性を図に示す。30 K において 1 本の ESR 吸収線を観測し、温度の低下に伴い信号強度が増加することがわかった。本講演では、測定に用いた円筒型共振器及び測定した 3 種類の試料による ESR 測定結果について報告する。

[1]大矢健太:2017 年度福井大学工学研究科修士論文。

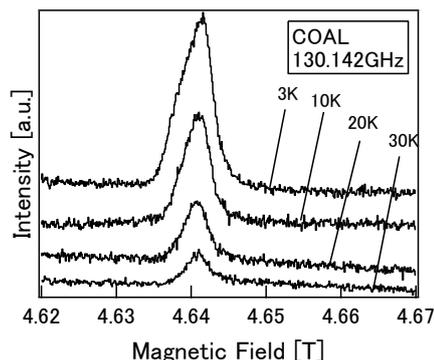


図: ESR 信号強度の温度依存性

## C-a10

### ESR/NMR 二重磁気共鳴測定のための平面型コイルの最適化

福井大遠赤セ, 福井大工<sup>A</sup> 橋本 樹, 笈田 智輝, 大見謝 恒宙, 大浦 拓実,  
石川 裕也, 藤井 裕, 光藤 誠太郎, 小林 英一<sup>A</sup>, 菊池 彦光<sup>A</sup>

#### Optimization of flat NMR coils for ESR/NMR double magnetic resonance measurements

FIR-Center., Univ. of Fukui; Fac. of Eng., Univ. of Fukui<sup>A</sup> I. Hashimoto, T. Oida, T. Omija, T. Oura,  
Y. Ishikawa, Y. Fujii, S. Mitsudo, E. Kobayashi<sup>A</sup>, H. Kikuchi<sup>A</sup>

我々は超低温・高磁場領域で、電子・核二重共鳴 (ENDOR) 法や動的核偏極 (DNP) を用いて、核スピンの希薄な系における核スピン状態を検出することを目指し、ミリ波 ESR/NMR 二重磁気共鳴の装置を行っている。これまでに我々は球面-平面ミラーを対に並べた Fabry-Pérot 型共振器内にヘルムホルツ型 NMR コイルを設置することを目指し、ESR/NMR 共用共振器の開発を行ってきた。しかしながら、共振器内に形成するミリ波定在波を妨げず、試料近傍に NMR コイルを設置することは困難であり NMR 感度の向上が見込めないことがわかった。そこで、Meanderline コイルと呼ばれる蛇型の平面コイル[1]を Fabry-Pérot 型共振器の下側平面ミラー部に組み込むことで、共振器内のミリ波共振モードを乱すことなく、RF コイルを試料に限りなく近づけることを可能にした。これにより、薄型の試料に対し RF 振動磁場を効率良く入射することができ、NMR 信号の高感度検出が可能となった[2]。今回この meanderline について、コイルのクリアランス  $c$  及びコイルの太さ  $s$  を変えた数種類のコイル特性を調べ、最適な形状パラメーターを探索した。本講演では、meanderline の特性とその最適なパラメーターについて報告する。

[1] M. L. Buess *et al.*: J. Magn. Reson, **92**, (1991) 348.

[2] 石川ら :日本物理学会 2019 年秋季大会, 10aPS-69, (2019).

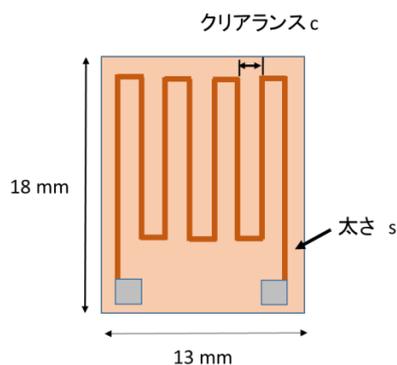


図: meanderline の概要図

## C-a11

### ジャイロトロンを用いた Pulsed-ESR 装置による希釈 BDPA ラジカルの FT-ESR

福井大遠赤セ 堂野彦暉, 林哉汰, 石川裕也, 佐藤丈賀, 藤井裕, 古屋岳, 光藤誠太郎

#### FT-ESR of diluted BDPA radicals with a Pulsed-ESR apparatus using a gyrotron

FIR Center, Univ. of Fukui; K. Dono, K. Hayashi, Y. Ishikawa, T. Sato, Y. Fujii, T. Furuya and S. Mitsudo

パルス電子スピン共鳴(Pulsed Electron Spin Resonance: Pulsed-ESR)は、数十 ns 程度の時間間隔においてミリ波をパルスの試料に照射し、電子スピンの緩和過程を観測する測定手法である。この応答をフーリエ変換(Fourier transform: FT)することで、連続波(Continuous wave: CW)-ESR よりも高い分解能を有する FT-ESR スペクトルが得られる。しかし、100 GHz 以上の周波数で強度の高いパルス系列を生成することは困難であり、この事実が高周波 Pulsed-ESR におけるボトルネックとなっている。この問題に対し、ミリ波・サブミリ波帯においてキロワットクラスで発振可能なジャイロトロン[1]を光源とすることで、高周波 Pulsed-ESR が可能である。遠赤外領域開発研究センターで開発された Gyrotron FU CW VII B (周波数 154.43 GHz, 出力約 150 W)を用いて、我々は研究室レベルで利用可能な Pulsed-ESR 装置の開発を進めている。

今回我々はポリスチレン中に 100 mM の濃度で希釈した BDPA ラジカルの自由誘導減衰(Free Induction Decay: FID)信号を観測し、得られた時間軸波形をフーリエ変換することで FT-ESR スペクトル(図参照)を得ることに成功した。得られたスペクトルは左右非対称で両端が切り立った形となっている。これは粉末試料による  $g$  値の異方性がある場合のパウダーパターン[2]に似通っており、CW-ESR に比べより高い分解能を有したスペクトルの観測に成功したことが示唆できる。

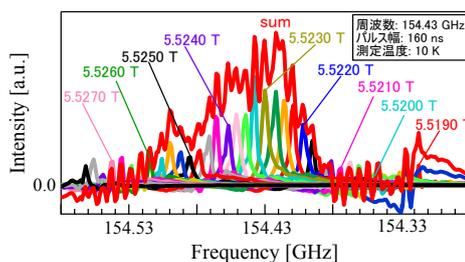


図: BDPA の FT-ESR スペクトル

[1] S. Mitsudo *et al.*, International Journal of Infrared and Millimeter Waves **21**, 661 (2000).

[2] 山内淳: “磁気共鳴 ESR—電子スピンの分光学—”, サイエンス社, pp.100-101 (2006).

## C-p01

### CeCoSi における多極子秩序相の理論研究

富山県立大工: 田中 拳太郎, 三本 啓輔, 谷田 博司

Theoretical Study of Multipole Ordered Phase in CeCoSi

Toyama Prefectural University: K. Tanaka, K. Mitsumoto, H. Tanida

CeCoSi は空間群が  $P4/nmm$  の希土類正方晶化合物であり、多結晶を用いた実験により  $T_N=9.4$  K で反強磁性秩序を示すことが分かっていた。最近、谷田らにより単結晶の育成が可能となり、詳細な実験により、 $T_0 \sim 12$  K でも相転移を示し、静水圧力下では 1.5 GPa において 40 K にも増大することが明らかにされた[1, 2]。しかしながら、その起源は未解明である。

そこで、本研究ではまず磁化などの基礎物性を再現する  $Ce^{3+}$  の結晶場を求め、 $\Gamma_7^{(1)}$  基底状態 (0 K) -  $\Gamma_6$  第一励起状態 (90 K) -  $\Gamma_7^{(2)}$  第二励起状態 (>200 K) であることが分かった。さらに平均場の範囲内でイジング的な反強磁性相互作用 ( $\sim 4$  K) を考慮すると、図に示すように 10 K で反強磁性秩序を示すことが分かった。本講演では多極子秩序相における物性について議論する予定である。

[1] H. Tanida *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 023705 (2018).

[2] H. Tanida *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 054716 (2019).

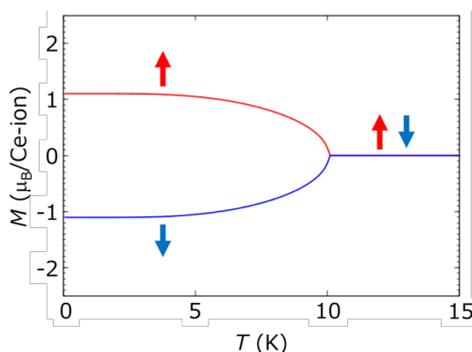


図 正方晶結晶場にイジング的な反強磁性相互作用を考慮した時の磁化の温度依存性

## C-p02

### 熱膨張測定による CeCoSi の逐次相転移の研究

富山大理, 富山県立大工<sup>A</sup> 小島 隆志, 田山 孝, 谷田 博司<sup>A</sup>

#### Successive Phase Transitions in CeCoSi Studied by High-Resolution Thermal Expansion Measurements

Fac. of Sci, Toyama, Univ.; Fac. of Eng., Toyama, Prefe. Univ. T. Kojima, T. Tayama, H. Tanida<sup>A</sup>

CeCoSi は正方晶 CeFeSi 型構造で空間群は P4/nmm であり、Ce サイトに関して局所的に空間反転対称性が破れている。この物質は常圧において  $T_N=9.6\text{K}$  で反強磁性転移を示すが、2013 年の圧力下の電気抵抗測定においては  $T_N$  以上の温度で圧力誘起相転移 (PIOP 転移) が現れることが報告されている[1]。しかし最近の単結晶試料を用いた磁化測定によると、常圧下においても圧力誘起相転移と似た相転移が  $T_0=12\text{K}$  で観測されており、その転移温度の磁場依存性から反強四極子 (AFQ) 転移の可能性が提唱されている[2]。しかしこの常圧での  $T_0$  の存在については他の実験でまだ確認されておらず、他の物性測定での検証が必要とされている。そこでまだ実験が行われていない低温熱膨張測定を実施したので、その結果について報告する。

[1] E. Lengyel, *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 155137 (2013).

[2] H. Tanida, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 054716 (2019)

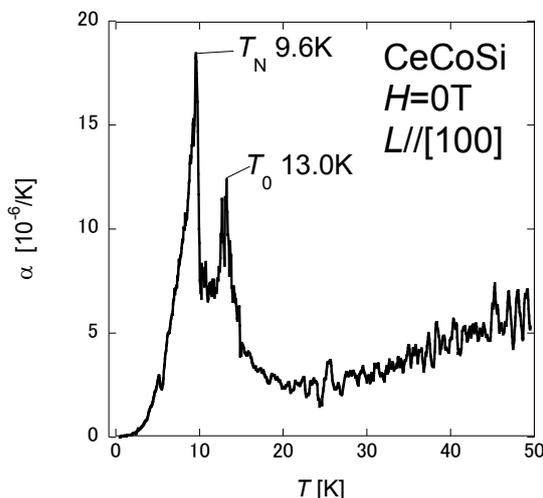


図 : CeCoSi の線膨張率  $\alpha$  の温度依存性

## C-p03

### Ce<sub>0.7</sub>La<sub>0.3</sub>Al<sub>2</sub> の低温高圧物性

金沢大自然, 東北大学金属材料研究所<sup>A</sup>, 東京大学物性研究所<sup>B</sup>, 金沢大理工<sup>C</sup>  
稲森庸介, 安達悠人, 流雅樹, 小林慶士郎, 白崎謙次<sup>A</sup>, 郷地順<sup>B</sup>, 上床美也, 大橋政司<sup>C</sup>

#### Low-temperature and high-pressure properties of Ce<sub>0.7</sub>La<sub>0.3</sub>Al<sub>2</sub>

Graduate School of Natural Sci and Tech, Kanazawa Univ, Institute of Sci and ENG, Institute for Materials Research, Tohoku Univ<sup>A</sup>, The Institute for Solid State Phys, the Univ of Tokyo<sup>B</sup>, Kanazawa Univ<sup>C</sup>

Y. Inamori, Y. Adachi, M. Nagare, K. Kobayashi, K. Shirasaki<sup>A</sup>, J. Gouchi<sup>B</sup>, Y. Uwatoko, M. Ohashi<sup>C</sup>

CeAl<sub>2</sub> は、立方晶の C15 型ラーベス化合物で、電子比熱係数  $\gamma=135\text{ mJ/mol}\cdot\text{K}^2$ 、ネール温度  $T_N=3.8\text{ K}$  の反強磁性体である。  $T_N$  は加圧すると減少し、2.5 GPa より高圧で消失する。また、2.7 GPa 付近で通常の金属的な振る舞いとは異なる非フェルミ液体的な挙動が示唆された[1]。一方で、Ce<sub>x</sub>La<sub>1-x</sub>Al<sub>2</sub> では、Ce 濃度が希薄になるにつれて  $T_N$  も減少する[2]。本研究では、Ce<sub>0.7</sub>La<sub>0.3</sub>Al<sub>2</sub> に着目し、低温高圧下での物性を調べることを目的とした。キュービックアンビル高圧装置を用い、8.0 GPa までの高圧、約 2 K までの極低温での電気抵抗測定を行った。

図 1 は、1.5~8.0 GPa での電気抵抗の温度依存性を示している。1.5 GPa と 2.5 GPa のみ 20 K 以下で電気抵抗の上昇が確認された。3.5 GPa と 4.5 GPa では、50 K 近傍ではっきりとしたピークが見られる。さらに圧力を加えていくとピークが見えなくなる。

[1] H.Miyagawa, G.Oomi, M.Ohashi, I.Satoh, T.Komatsubara, M.Hedo, Y.Uwatoko, Phys. Rev. B **78**, 064403(2008).

[2] Y.Onuki, Y.Furukawa, T.Komatsubara, J. Phys. Soc. Jpn. **53**, 2734 (1984)

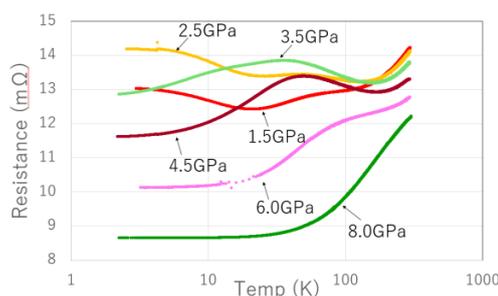


図 1. 高圧下での電気抵抗の温度依存性

## C-p04

### ゾル-ゲル法による $\text{CuMoO}_4$ の粒径制御の試み

福井大工, 福井大産学官<sup>A</sup>, 福井大遠赤セ<sup>B</sup> 鈴木 ひかり, 浅野 貴行,  
西村 文宏<sup>A</sup>, 光藤 誠太郎<sup>B</sup>, 菊池 彦光

#### Attempt on the Control of Grain Size in $\text{CuMoO}_4$ using Sol-gel Process

Fac. of Eng., Univ. of Fukui; HISAC, Univ. of Fukui<sup>A</sup>; FIR, Univ. of Fukui<sup>B</sup> H. Suzuki, T. Asano,  
F. Nishimura<sup>A</sup>, S. Mitsudo<sup>B</sup>, and H. Kikuchi

モリブデン酸銅 ( $\text{CuMoO}_4$ ) は、温度と圧力を変化させることにより結晶構造が変化し、それと同時に色も変化するクロミズムの性質を有する大変興味深い物質である[1]。これまでの  $\text{CuMoO}_4$  に関する実験的研究において、結晶粒径が磁気的性質に多大な影響を及ぼすことが明らかとなった。

そこで、固相反応法により  $\text{CuMoO}_4$  の粒径の異なる粉末試料の合成を遊星ボールミル[2]やマイクロ波加熱[3]を使用することにより試みてきた。

今回、液相法である共沈法やゾル-ゲル法により  $\text{CuMoO}_4$  の粉末試料の合成を行ったので報告する。特に、ゾル-ゲル法により合成した前駆体の各種焼成時間による粒径制御や前駆体合成時におけるマイクロ波照射の影響についても報告する予定である。

図 1 は、ゾル-ゲル法で合成した  $\text{CuMoO}_4$  前駆体における  $500^\circ\text{C}$  までの熱重量 (TG) 測定の結果である。約  $440^\circ\text{C}$  において前駆体の重量変化が停止したことにより、 $\text{CuMoO}_4$  が合成できたと考えられる。

[1]M. Wiesmann *et al.*, J. Solid State Chem. **132** (1997) 88.

[2]浅野貴行 *et al.*, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年) 概要集 p.951.

[3]平野隆宗 *et al.*, 2017 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会講演予稿集 p.23.

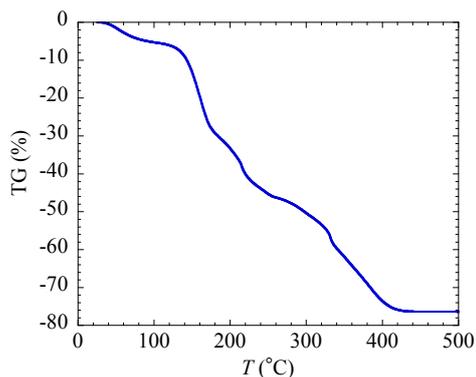


図 1:  $\text{CuMoO}_4$  前駆体の酸素雰囲気下における熱重量 (TG) の温度依存性

## C-p05

### 立方晶 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ( $Tr = \text{Ti}, \text{V}$ ) の Al サイトの Si および Ge 置換系の物性

富山大院理工, 富山大理<sup>A</sup>

木村駿介, 犬飼春陽<sup>A</sup>, 桑井智彦

#### Low-Temperature Properties of Si- and Ge-Substituted System on Al-Site of Cubic $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$

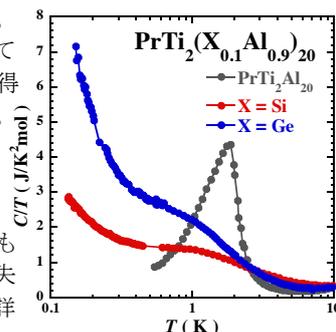
Graduate School, Science and Engineering, Depart. Phys.<sup>A</sup>, University of Toyama S. Kimura, H. Iunukai, and T. Kuwai

立方晶  $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$  ( $Tr = \text{Ti}, \text{V}$ ) は  $4f$  電子の四極子自由度が関与した興味深い低温物性を示すことで知られている  $\text{Pr-Al}$  1-2-20 系である。それぞれ 2 K, 0.6 K で四極子転移 QPO を示し、さらに低温で非 BCS 型の超伝導転移を発現する。さらに  $Tr = \text{V}$  の系では 20 K 以下の電気抵抗の  $T^{1/2}$  温度依存性により、四極子近藤効果 QPKE の存在が期待されている。しかしながら、QPO と QPKE は競合すると考えられ、転移温度以下では QPKE の特徴は観測されなくなってしまう。よって、QPO を抑制できれば、QPKE の様相が極低温まで観測できる。

最近、 $\text{Pr-Zn}$  1-2-20 系の Zn を一部 Sn で置換した系で四元化合物  $\text{Pr-Zn}$  1-2-2-18 が新たに作製できることが報告された。そこで、我々のグループでは  $\text{Pr-Al}$  1-2-20 では置換系の作製が可能かを調べることにして、試料の作製を試み、 $\text{PrTi}_2(\text{Si}_{0.1}\text{Al}_{0.9})_{20}$  の単結晶試料を得たことを昨年度の北陸支部講演会で発表した。その後も試料作製を続け、置換元素として Ge も加え、単結晶試料を育成し、その物性を調べたので結果を報告する。

$Tr = \text{Ti}, \text{V}$  に対してそれぞれ 10% の Si, Ge 置換をした 4 種の試料を作製した。組成比を 1:2:2:18 からわずかにずらして準備した母材を、アーク炉で溶融して得られたボタン状試料を  $645^\circ\text{C}$ , 2 週間真空中でアニールして多結晶試料を得る。その後、これを母材として Al 自己フラックス法にて単結晶試料を得た。XRD によって、多結晶、単結晶共に Si や Ge 単体の痕跡はなく、 $\text{CeCr}_2\text{Al}_{20}$  型の単相試料であることを確認した。物性測定として 0.1~30 K の比熱と 0.1~300 K の熱電能測定などを行った。

$\text{PrTi}_2(\text{X}_{0.1}\text{Al}_{0.9})_{20}$  ( $X = \text{Si}, \text{Ge}$ ) の比熱  $C$  を温度  $T$  で割った  $C/T$  を  $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$  とともに図に示す。 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$  で見えていた 2 K の四極子転移がどちらの置換系も消失し、二段階の  $C/T$  の増大が観測された。熱電能や  $Tr = \text{V}$  の置換系の結果など詳細を報告する。



## C-p06

### PrTr<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> (Tr = Ti, V) の Al サイトの In 置換系単結晶の作製と低温物性

富山大院理工 羽土航 木村駿介 桑井智彦

#### Preparation and Low-Temperature Properties of Singlecrystalline PrTr<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> Partially Substituted by In on Al-site

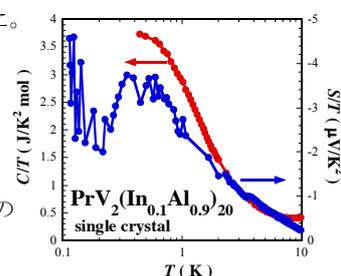
Graduate School, Science and Engineering, University of Toyama

W. Hazuchi, S. Kimura, and T. Kuwai

立方晶 PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> は四極子近藤効果を示す系として知られている。16 K 以下の電気抵抗率に  $T^{1/2}$  温度依存性を示すことがその根拠とされる。また 0.05 K で非 BCS 型の超伝導を示すなど非常に興味深い物性が報告されているが、比熱を温度で割った  $C/T$  には、0.6 K で生じる四極子転移が影響して、四極子近藤効果の特徴である対数発散のふるまいが明確には確認できないという難点をもつ。我々はこの点に着目し、四極子近藤効果と競合する四極子転移が抑えられた系が得られれば、四極子近藤効果の様相が絶対零度近傍まで観測でき、四極子近藤効果の物理を深く探求できると考えた。そのような系を探索することが本研究の目的である。我々の研究グループで昨年より着手していた先行研究を参考にしながら、本研究では、まずは Al を 10 % の In で置換した PrTr<sub>2</sub>(In<sub>0.1</sub>Al<sub>0.9</sub>)<sub>20</sub> 系の作製を試み、物性を調べることにした。

Pr:Ti(V):In:Al を 1:2:2:18 から少しずつ変えて秤量し、Al 自己フラックス法により単結晶試料を得ることができた。次いで我々が最も関心を持つ比熱  $C$  と熱電能  $S$  の温度依存性を測定した。 $C$  は PPMS を用いて 0.4 K まで、 $S$  は自作測定系を ADR オプションに搭載し、0.1 K まで測定を行った。

$C/T$  と  $S/T$  の温度依存性を図に示す。 $C/T$  では 0.4 K までで四極子転移の兆候は観測されないが、飽和の傾向が見える。一方、20 K 以下で負値となる  $S/T$  では、絶対値で見ると 0.4~0.5 K にピークを示し、さらに低温では極小値をとり、最低温度領域で再び増大に転じる。このふるまいは、我々がこれまで研究してきた Pr 1-2-20 系に共通したふるまいであり、両物理量が示す特徴は、4f 電子の四極子自由度に起因した共通の起源により伝導電子系の異常が引き起こされたものと解釈できる。



## C-p07

### 純良単結晶 TmTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> の電子物性

富山大院理工 松本悠輝, 並木孝洋, 西村克彦

#### Electronic properties of high quality single crystalline TmTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>

Grad. School Sci. & Eng., Univ. of Toyama

Y. Matsumoto, T. Namiki, K. Nishimura

RT<sub>2</sub>X<sub>20</sub> (R = 希土類, T = 遷移金属, X = Al, Zn) は、立方晶 CeCr<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> 型の結晶構造を持ち、R イオンが 16 個の X 原子で形成されたカゴ状物質である。TmTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> は先行する研究から  $T_N = 0.7$  K の反強磁性体であり、結晶場基底状態は  $\Gamma_5$  三重項であることが報告されている [1]。そこで本研究では異方性まで含めた、より詳細な基礎物性測定を行ったので報告する。

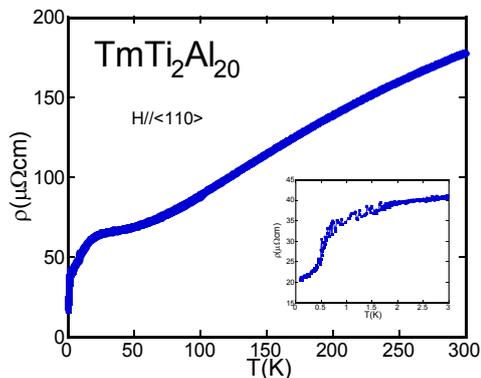
試料は目的の組成比 Tm : Ti : Al = 1 : 2 : 20 で秤量をし、アーク溶解を行ったのち Al を追加した Al フラックス法により単結晶を作成した。作成した単結晶は粉末 X 線回折測定により目的の試料ができていることを確認し、背面ラウエ反射法で方位を特定した後、磁化・比熱・電気抵抗測定を行った。

図に電気抵抗測定の結果を示す。高温では金属的に単調減少し、 $T = 40$  K 付近で肩構造を観測した。また  $\sim 0.7$  K の電気抵抗率の急激な減少は反強磁性磁気転移 ( $T_N = 0.7$  K) に起因するものと考えられる。残留抵抗比は  $\sim 9$  であった。

磁化測定では逆磁化率の振舞が直線的であることからキュリー・ワイス則に従っていることを確認できた。算出した有効磁気モーメント、キュリー・ワイス温度は各々  $7.32 \mu_B$ ,  $-2.72$  K となり Tm<sup>3+</sup> であることを示唆している。

講演では以前から報告されている結果との再現性も含めてより詳細な結果について発表する。

[1] N. Kase et al.: J. Phys. Soc. Jpn. **592** (2015) 012052.



電気抵抗率の温度依存性

## C-p08

### 立方晶 $\text{PrCr}_2\text{Al}_{20}$ の Al サイトの Ge 置換効果

富山大理 富山大院理工<sup>A</sup>

神西優希, 木村駿介<sup>A</sup>, 桑井智彦<sup>A</sup>

#### Effect of Ge-Substitution on Al-Site of Cubic $\text{PrCr}_2\text{Al}_{20}$

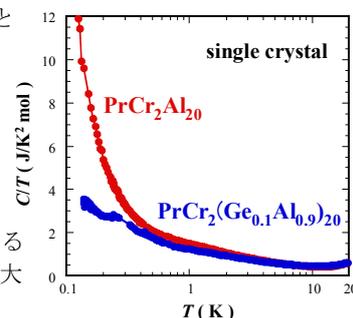
Depart. Phys., Graduate School, Science and Engineering<sup>A</sup>, Univ. of Toyama Y. Jinzai, S. Kimura<sup>A</sup>, and T. Kuwai<sup>A</sup>

立方晶  $\text{PrCr}_2\text{Al}_{20}$  は 2012 年に東大物性研グループにより基礎物性が初めて報告された。  $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$  ( $Tr = \text{Ti}, \text{V}$ ) と同様に励起状態の近藤効果に特徴的な  $-\log T$  依存性 ( $T$ : 温度) とピークをもつ電気抵抗率のふるまいを見せる。また、0.5 K 以下で比熱  $C$  には降温に伴い鋭い立ち上がりをもつ。この立ち上がりの起源は四極子転移の前兆のように見えるが、現時点でははっきりわかっていない。

我々のグループでは、この物質をはじめ、Pr を La で希釈した系の極低温領域の  $4f$  電子比熱  $C_{4f}$  と熱電能  $S$  の測定により四極子近藤効果 QPKE の研究を行ってきた。  $S$  は伝導電子が受け取る異常を鋭敏にとらえることができ、QPKE を介して  $4f$  電子のエントロピーを伝導電子が受け取ると大きな絶対値を低温で持つ。  $Tr = \text{Ti}$  と  $\text{V}$  はそれぞれ 2 K, 0.6 K で QPKE と競合する四極子転移を示すため、それより低温で QPKE はアクティブでなくなり、非フェルミ液体に特徴的な  $C/T$  の対数的増大の異常が観測されなくなる。そこで我々は、四極子転移を Al サイトの他元素置換により抑制し、QPKE の様相を明確に捉えることを試みている。本研究では、  $Tr = \text{Cr}$  の Al サイトを Ge で一部置換し QPKE の詳細を調べることを目的とした。

試料は  $\text{Pr:Cr:Ge:Al} = 1:2:2:18$  からわずかにずらした組成でアーク溶解を行った後、645°C、2 週間のアニールを施し単相多結晶試料を作製し、その後これを母材に Al 自己フラックス法で単結晶育成を行った。(111)面が見える単結晶試料を得ることができ、XRD によって  $\text{CeCr}_2\text{Al}_{20}$  型の結晶構造を持つ単相試料であることを確認した。

$\text{PrCr}_2\text{Al}_{20}$  とともに  $\text{PrCr}_2(\text{Ge}_{0.1}\text{Al}_{0.9})_{20}$  の  $C/T$  を図に示す。  $\text{PrCr}_2\text{Al}_{20}$  で見える 0.5 K 以下の急峻な立ち上がりが Ge 置換系では消失し、緩やかな対数的増大が最低温まで続いていることがわかる。詳細は講演で報告する。



## C-p09

### 立方晶 $\text{NdV}_2\text{Al}_{20}$ の Al サイトの Ge 置換効果

富山大理 富山大院理工<sup>A</sup>

土屋有沙, 木村駿介<sup>A</sup>, 桑井智彦<sup>A</sup>

#### Effect of Ge-Substitution on Al-Site of Cubic $\text{NdV}_2\text{Al}_{20}$

Depart. Phys., Graduate School, Science and Engineering<sup>A</sup>, Univ. of Toyama A. Tsuchiya, S. Kimura<sup>A</sup>, and T. Kuwai<sup>A</sup>

立方晶  $\text{NdV}_2\text{Al}_{20}$  は 1.8 K において反強磁性を示す Nd-Al 1-2-20 系である[1]。20 ~ 5 K 付近にかけて降温に伴い温度  $T$  に関して対数的に上昇する電気抵抗率が観測され、近藤効果を示す極めて新奇な Nd 化合物として関心を集めている。また、ごく最近に基底二重項をもつ立方晶の Nd 化合物で 2 チャンネル近藤効果 TCCE が現れる可能性が理論的に議論されており、Nd 1-2-20 系がその候補物質に挙がっている。

我々のグループでは、極低温領域の電子比熱と熱電能の相関関係を利用して、Pr-Al 1-2-20 系において四極子近藤効果の様相を調べている。数年前に石川らにより、これまで合成できなかった  $\text{NdCo}_2\text{Zn}_{20}$  の Zn を一部 Sn で置換した新四元化合物  $\text{NdCo}_2\text{Sn}_2\text{Zn}_{18}$  単結晶の育成に成功し[2]、さらに Pr-Zn 1-2-20 系ができるものについても 1-2-2-18 系が育成できることも報告された[3]。そこで本研究では、これらをヒントにして  $\text{NdV}_2\text{Al}_{20}$  の Al を 10% Ge で置換した系の作製に挑み、その物性を調べることを目的とした。

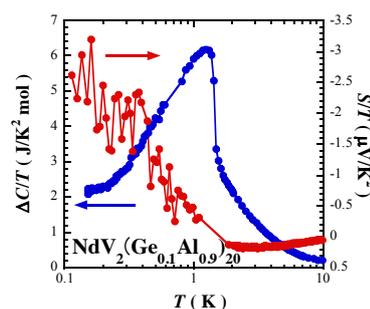
$\text{Nd:V:Ge:Al} = 1:2:2:18$  からわずかに組成をずらした母材をアーク溶解にてボタン状試料にしたのち、これを母材として Al 自己フラックス法にて単相の単結晶試料を得ることができた。

図に  $\text{NdV}_2(\text{Ge}_{0.1}\text{Al}_{0.9})_{20}$  の  $4f$  電子比熱を  $T$  で割った  $\Delta C/T$  と熱電能  $S$  を  $T$  で割った  $S/T$  の温度依存性を示す。転移温度は 1.8 K から 1.3 K に低下するが、1-2-20 のものと比べ、転移に伴う  $\Delta C/T$  の立ち上がりの鋭さはほとんど変わらない。また、 $S/T$  は転移温度付近より低温で負値へ符号を変え、最低温度で大きめの絶対値を持つことがわかった。

[1] T. Namiki et al.: JPSJ **85** 073706-1-4 (2016).

[2] Y. Isikawa et al.: JPSJ **84** 073704-1-11 (2015).

[3] K. Wakiya et al.: JPSJ **87** 094706-1-6 (2018).



## D-a01

### XAFS による液体 Se-Te の構造解析

富山大学理学部<sup>A</sup>, 弘前大学理工学部<sup>B</sup> 山口真輝<sup>A</sup>, 池本弘之<sup>A</sup>, 宮永崇史<sup>B</sup>

#### XAFS analysis of the structure of liquid Se-Te mixtures

Fac. of Sci., Univ. Toyama<sup>A</sup>, Fac. of Sci. and Tech., Hiroasaki Univ.<sup>B</sup> M. Yamaguchi<sup>A</sup>, H. Ikemoto<sup>A</sup>, T. Miyanaga<sup>B</sup>

VI 族に属する Se と Te は、2 配位共有結合から成る 3 回螺旋鎖が基本構造で、この螺旋鎖が平行に配置したトリゴナル相が安定相である。鎖間相互作用は、共有結合に比べて弱く、物性や構造に大きく影響する。液体 Se-Te 混合系では、温度上昇あるいは Te 濃度の増加に伴い半導体-金属転移を示し、転移温度領域において体積収縮が起こる。本研究の目的は、半導体-金属転移と構造変化の関係を調べることである。

300[ $\mu\text{m}$ ]の X 線窓を有する石英ガラスセルに液体 Se-Te 試料を封入して、Te-K 吸収端と Se-K 吸収端の X 線吸収微細構造(XAFS)測定を PF-BL10B で行った。

Te-K 吸収端の XAFS 解析により得た、Te と Te の最近接原子間距離  $r(\text{Te-Te})$  の温度変化を図に示す。半導体-金属転移が起こる温度領域を実線で示しており、いずれの組成でも転移領域で  $r(\text{Te-Te})$  の伸びが大きい。Se 濃度が増えると、転移領域は高温側にシフトし、そこでの振る舞いは組成によらず同じであった。密度変化の温度微分を用いて、半導体領域で 0、金属領域で 1 となる、半導体-金属転移係数を定義し、 $r(\text{Te-Te})$  との相関を調べた。この係数と  $r(\text{Te-Te})$  をプロットすると、組成によらずほぼ同じ変化を示す。 $r(\text{Te-Te})$  は転移係数が 0.5 以下では約 2.77[ $\text{\AA}$ ]と一定で、0.5 以上になると一気に結合長は伸びはじめ、最終的に 2.87[ $\text{\AA}$ ]程度にまで伸びた。一方、最近接の Te と Se の原子間距離  $r(\text{Te-Se})$  と、最近接の Se と Se の原子間距離  $r(\text{Se-Se})$  は、組成ごとに異なり、また温度変化を示さない。

以上の結果により、液体 Se-Te 系の半導体-金属転移には  $r(\text{Te-Te})$  が深く関わっていると考えている。講演時には、中距離構造を反映する X 線吸収端近傍構造スペクトル(XANES)についても併せて報告する。

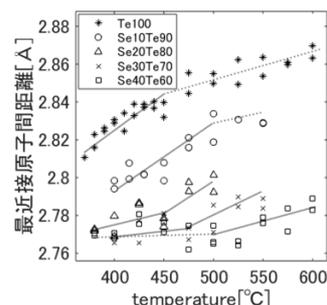


図:最近接の Te-Te の原子間距離

## D-a02

### カーボンナノチューブに包摂された Te 鎖の構造

富山大理<sup>A</sup>, 弘前大理工<sup>B</sup> 加藤彰悟<sup>A</sup> 池本弘之<sup>A</sup> 宮永崇史<sup>B</sup>

#### Structure of Tellurium chain included in the Carbon Nanotube

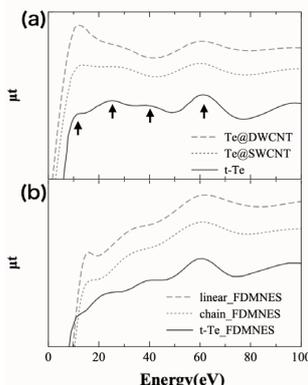
Fac. of Sci., Uni. of Toyama.<sup>A</sup>, Fac. of Sci. and Tec., Hiroasaki Univ.<sup>B</sup> S. Kato<sup>A</sup>, H. Ikemoto<sup>A</sup>, and T. Miyanaga<sup>B</sup>

第 16 族元素である Te の安定相は、トリゴナル相 (t-Te) である。t-Te では、Te 原子は共有結合で結ばれて 3 回螺旋鎖 (直径約 5.2 $\text{\AA}$ ) を形成し、鎖間相互作用による Te 鎖が並行に配列している。本研究では、単層カーボンナノチューブ (SWCNT: 有効内径 10 $\text{\AA}$ )、二層カーボンナノチューブ (DWCNT: 有効内径 6 $\text{\AA}$ ) に包摂された Te (それぞれ、Te@SWCNT、Te@DWCNT) の構造を XAFS(X-ray Absorption Fine Structure)解析により明らかにすることが目的である。

XAFS 関数のフーリエ変換では、鎖内最近接のピークは、t-Te とほぼ同じ高さで残存しているが、鎖間最近接相関のピークは消失している。鎖間相関の消失、および Te 鎖の直径と CNT 内径の比較から、CNT 中には孤立した Te 鎖が形成されると考えられる。また Te@CNT の共有結合長は、t-Te に比べて 0.06 $\text{\AA}$  程度短縮している。これは、鎖間相互作用消失による共有結合の強まりを反映していると考えられる。

t-Te、Te@SWCNT、Te@DWCNT の XAFS の波数  $k$  が小さい領域である XANES(X-ray Absorption Near Edge Structure) を、図(a)に示す。t-Te では 10、25、40、60eV にピークが見られる。これに対し、Te@SWCNT、Te@DWCNT では、20~50eV のピークがひとつになっている。また、10eV 付近のピークは、持ち上がっており、特に Te@DWCNT で顕著である。Te の 1 本鎖のモデルとして 3 回螺旋鎖、直線鎖を用いた、理論コード FDMNES シミュレーション結果を図(b)に示す。いずれの孤立鎖モデルにおいても、15、35、60eV 付近にピークが現れた。10eV 付近のピークにおいては、直線鎖モデルの方がより持ち上がっている。

以上の解析により、SWCNT には孤立した 3 回螺旋鎖、DWCNT には孤立した直線鎖が包摂されていると考えている。DWCNT 中で直線鎖になったのは、Te の 3 回螺旋鎖が入る十分なスペースがないからであると考えている。



## D-a03

### 深層学習を用いた GISAXS 実験データの分類分け

富山大理, 富山県立大工<sup>A</sup> 山下 大輔, 山本 和司<sup>A</sup>, 唐山 英明<sup>A</sup>, 池本 弘之

#### Classification of GISAXS experimental data using deep learning

Fac. of Sci. Univ of Toyama. Fac. of Eng. Toyama Pre. Univ.<sup>A</sup> D. Yamashita, K. Yamamoto<sup>A</sup>, H. Touyama<sup>A</sup>, H. Ikemoto

基板上あるいは界面にあるナノ粒子の形状やサイズを調べる斜入射小角 X 線散乱(GISAXS)では、基板すれすれの微小角で X 線をあて、その小角散乱を 2 次元的に観測する。GISAXS 解析では、X 線強度を粒子の形状や分散状態などのモデルに基づいた関数で、非線形最小二乗法を行って構造パラメーターを得る。本研究では、画像認識に優れた深層学習を、モデルの決定に応用することが目的である。

GISAXS パターンに最も影響するのは粒子の形状であるので、8 種類(クラス)の粒子形状で分類分けを行った。計算負荷の軽減のために、ナノ粒子の粒径などは単分散とした。それぞれのクラスに対して、343 枚のシミュレーションパターンを準備し、教師データとテストデータに分けて深層学習を行った。GISAXS ではそれぞれのピーク強度が大きく異なるので、強度の常用対数で GISAXS パターンを作成している。また、画素数は 90×70 である。シミュレーションデータは、FitGISAXS をベースにした Fortran プログラムで作成し、深層学習には Google の Tensorflow を用いた。使用したコンピューターは Corei7 4core, GPU 不搭載である。

下記の深層学習を用いたところ、図 1, 2 に示す正答率と損失関数を得た。

畳み込み層 (フィルター数:32 枚 フィルターサイズ:4×4 スライド:4)

プーリング層 (MAX プーリング フィルターサイズ:4×4)

畳み込み層 (フィルター数:64 枚 フィルターサイズ:4×4 スライド:4)

プーリング層 (MAX プーリング フィルターサイズ:4×4)

ニューラルネットワーク (レイヤー:4 層 ノード数:512 学習率:10<sup>-4</sup> バイアス補正:Adam)

正答率は、1500step(17.5epoch)で 90%を超え、最終的には 95%ほどに達した。教師データとテストデータに対する正答率は、全てのステップでほぼ同じである。また、正答率の上昇に呼応して損失関数の値は下がり、最終的には画像一枚あたり 0.05 に達した。これらのことから、この深層学習では過学習は生じていないと考えている。

実際のナノ粒子では、粒径などの分散があるので、分散を考慮した教師データでの深層学習に取り組んでいる。講演の際には、実際の実験データを解析した結果を併せて報告する。

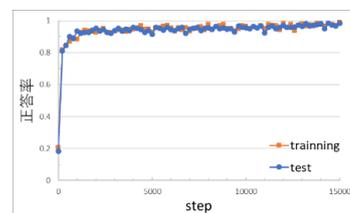


図 1. 正答率の変化

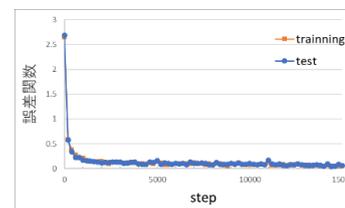


図 2. 損失関数の変化

## D-a04

### 四面体臓器モデルを用いた放射線医療シミュレーションの開発

富山高専 小笠原舜斗, 阿蘇司

#### Development of Tetrahedral Organ Geometry in Particle Therapy Simulation Framework

NIT Toyama collage

S. Ogasawara, T. Aso

放射線医療における線量計算のシミュレーションでは、患者の臓器形状をはじめとする照射対象物を三次元モデルで表現する必要がある。この照射対象物モデルの構築には、これまで様な直方体を規則的に積み上げる方法であるボクセルモデルが広く用いられてきた。しかし、照射対象物を四面体を用いて構築する四面体モデル<sup>[1]</sup>は、斜面や薄い組織、変形可能な形状を表現することにおいてボクセルモデルに比べ優位性が期待できる。本研究では、モンテカルロ法による放射線シミュレーションツールキット Geant4<sup>[2]</sup>を基盤とする放射線医療シミュレーションフレームワーク PTSIM<sup>[3]</sup>において、四面体モデルによる臓器形状をシミュレーション空間上に構築し、シミュレーションする機能を実装した。また、シミュレーション結果の信頼性を評価するため、四面体とボクセルのシミュレーション結果をそれぞれ比較した。

四面体モデルのデータセットは、モデルを構成する全四面体の頂点座標および各四面体の組織密度(CT 値)で構成される。開発した PTSIM の四面体モジュールは、このデータセットに従って四面体を配置する。さらに、別に与えられる材質のリストと組織密度対応表を参照し、四面体に材質と組織密度を割り当てることで照射対象物モデルを構築する。

シミュレーション結果の評価のため、単純な立方体の照射対象物をボクセルおよび四面体で構築した。それぞれの照射対象物に対し同条件で陽子線照射シミュレーションを実行し、得られた付与エネルギー分布を比較した結果を報告する。

[1] H. Chang, T. Chao et al., master thesis (2016)

[2] J. Allison, et al., Nuclear Inst. Meth. A, 835: 186-225; (2016)

[3] T. Akagi, T. Aso et al., Prog. Nucl. Sci. Technol. Vol. 4; 896-900; (2014)



## D-a05

### Geant4 を用いた陽子線照射による即応 $\gamma$ 線の解析

富山高専, 東京女子医大<sup>A</sup> 桶 大樹, 阿蘇 司, 西尾禎治<sup>A</sup>

#### Analysis of prompt gamma rays in proton beam irradiation using Geant4

National Institute of Technology, Toyama College, Tokyo Women's Medical University<sup>A</sup>  
H.Oke, T.Aso, T.Nishio<sup>A</sup>

陽子線治療は、陽子線の特徴であるブラッグピークを利用して、がん腫瘍に線量を集中させてがんを治療する方法の 1 つである。安全な治療には体内の線量分布の把握が必要だが、体内の線量分布の直接測定は困難である。そこで、入射陽子が体内の原子と起こす原子核反応によって生成される同位体や脱励起によって放出されるガンマ線を利用した、陽子線の照射領域の可視化が試みられている。

本研究では、モンテカルロ法を用いたシミュレーションツールキットの Geant4<sup>[1]</sup>を基盤として開発された PTSIM<sup>[2]</sup>を用いて、水に対して陽子線を照射するシミュレーションを行った。

検出したガンマ線エネルギースペクトルを基に、核種ごとに照射領域の画像再構成を行った(図 1)。可視化手法や物理プロセスの選択の違いによって生じる、再構成画像への影響について調べた結果を報告する。

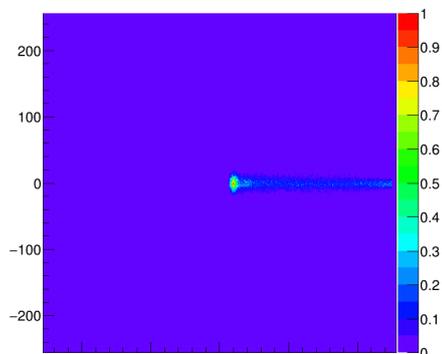


図 1  $^{12}\text{C}$  エネルギー領域の再構成画像

[1] S. Agostinelli et al., "Geant4-a simulation toolkit", Nucl. Instr. Meth., A506(2003) 250-303

[2] T.Akagi, T.Aso et al., "Geant4-based particle therapy simulation framework for verification of dose distributions in proton therapy facilities", Prog. Nucl.Sci.Technol. Vol. 4 (2014) 896-900.

## D-a06

### Geant4-DNA を用いた DNA 損傷モデル評価のためのシミュレーション開発

富山高専電情 阿蘇 司, 岡本雅生

#### Development of Geant4-DNA Based Simulation Software to Study DNA Strand Break Model

Elec. Comp. Eng., NIT Toyama College T. Aso, M. Okamoto

放射線による生物学的影響は、これまで生存率と吸収線量を対応付ける経験的な Linear-Quadratic (LQ) model<sup>[1]</sup>が用いられてきた。LQ model には、2 つの係数( $\alpha, \beta$ )が含まれており、線質と細胞の種類に応じて個別に求める必要がある。放射線医療の重粒子線治療分野では、microdosimetric kinetic model (MKM)<sup>[2]</sup>が開発されて適用されているが、この場合にも基準となる X 線照射実験による影響測定が必要となる。生物学的影響は、物理過程、化学過程、DNA 損傷過程、生化学的過程、細胞過程、臓器影響へと連鎖する多くの過程が含まれており、それぞれの領域において研究が必要とされている。

本研究では、DNA スケールでの物理過程ならびに水の放射化学をシミュレーション可能な Geant4-DNA<sup>[3]</sup>を利用して、物理過程と化学過程に起因する DNA 損傷を調査するためのシミュレーション開発を目指している。本報告では DNA 損傷評価に必要なとされる機能ならびにその解析方法を検討してシミュレーション開発を行い、そのシミュレーションデータを用いて DNA 損傷を引き起こす直接作用ならびに間接作用による局所的なエネルギー吸収量とラジカル生成量に関する解析を行った結果について報告する。

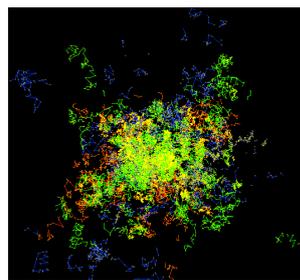


図:1keV 電子による水中でのラジカル生成

[1] L. Jones et al. Aust. Phys. Eng. Sci. Med. 24(3)(2001)132-46.

[2] Y.Kase et al., Phys. Med. Biol. 53(2008) 37-59.

[3] S.Incerti et al. Med.Phys. 45(2018)e722-e739, M.A.Bernal et al., Phys. Med. 31(2015)861-874, S.Incerti, Int. J. Model. Simul. Sci. Comput. 1(2010)157-178.

## D-a07

### アンドロイドはジェスチャーで感情を表現できるか？

福井大工 滝野 凌大, 高田 宗樹, 小越 康宏, 平田 隆幸

#### Can an Android show emotions by gesture?

Fac. of Eng., Univ. of Fukui; R. Takino, H. Takada, Y. Ogoshi, T. Hirata

21世紀に入り、人型ロボット（アンドロイド）の研究が盛んにおこなわれるようになってきた。その進歩は非常に早く、これまで我々が漫画や映画で目にしてきた人間とアンドロイドが共に暮らす社会が誕生するまでそう遠くない。現在、アンドロイドはいまだ特定の役割を与えられていないが、人間と会話が可能でアンドロイドについては介護の現場での活躍が期待される。この場合に課題となるのは、人間とアンドロイドのコミュニケーションである。本研究では、アンドロイドの非言語コミュニケーションに着目した。図1に示すアンドロイド Nao を用い、アンドロイドの非言語コミュニケーションによる感情の表出に対して、人間がどう感じるかを調査した。ここでは、「喜」「怒」「哀」の3つの感情について、Nao にジェスチャー動作にて表現させることで、その動画を見た被験者がどう感じるかをアンケートで回答をさせた。講演では Nao の感情ジェスチャーとそれをどのように感じたかに関するアンケート結果について議論していく。



図1: アンドロイド Nao

#### 参考文献

[1] 日本人の基本6感情の表情は「エクマン理論」に従うか？

-人工知能を用いて検証,

<<https://academist-cf.com/journal/?p=10185>>

(2019年3月19日)

## D-a08

### 一致率からみた藤井聡太の将棋

福井大工 高津 和紀, 高田 宗樹, 平田 隆幸

#### Sota Fujii's shogi from the viewpoint of the rate of coincidence between human move and computer

Fac. of Eng., Univ. of Fukui K. Takatsu, H. Takada, T. Hirata

藤井聡太は、史上最年少でプロ棋士としてデビューして以降、目覚ましい活躍を続けている。例えば、全棋士参加の棋戦である朝日杯将棋オープン戦を2連覇している。藤井は現在17歳であり、成長を続ける藤井の将棋にはどのような特徴がみられるのだろうか。プレイヤーの将棋の特徴をみる方法に将棋AIを使用した棋譜解析がある。将棋AIを使用した棋譜解析とは、将棋AIによって、プレイヤーの指し手を解析することである。本研究では、将棋AIによる棋譜解析を行い、藤井の指し手と将棋AIの示す候補手との一致率に着目した。そして、藤井の将棋の特徴や変化について議論する<sup>[1]</sup>。図1は、藤井の月別平均一致率である。ここでは、将棋AIとして技巧を使用した。また、一致率は、将棋AIの示す最善手のみとの一致とした。なお、将棋AIの示す指し手が真の最善手とは限らない。そのため、最善手のみだけでなく、第3候補手までなどの複数候補手との指し手の一致をみる方法もあることに注意しよう。図1から、藤井の最善手のみとの一致率は55%から65%に収まることが多いことが分かる。ここから、最善手のみとの一致率では、藤井の短期間で棋力の成長をみることができなかった。講演では、より広い一致率という観点から藤井の将棋について解析したので報告する。

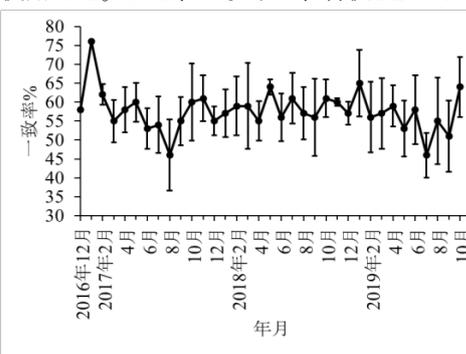


図1:最善手のみとの一致率(技巧)

#### 参考文献

[1] 高津和紀, 高田宗樹, 平田隆幸:複数の将棋AIからみた藤井聡太の将棋の特徴, 福井大学大学院工学研究科研究報告第68巻 (2019).

## D-p01

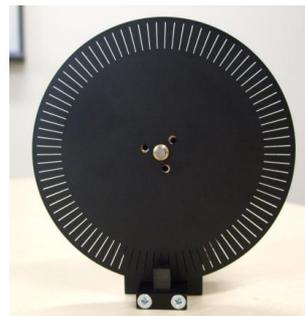
### 宇宙背景ニュートリノ崩壊光子探索実験のための STJ 検出器性能評価用パルス光源の開発

福井大工, 中部大工<sup>A</sup>, 福井大遠赤セ<sup>B</sup>, 筑波大数理<sup>C</sup>  
浅胡武志, 鈴木健吾, 竹下勉, 木村碧海, 若林凜, 吉田拓生, 岡島茂樹<sup>A</sup>, 中山和也<sup>A</sup>,  
古屋岳<sup>B</sup>, 金信弘<sup>C</sup>, 武内勇司<sup>C</sup>, 飯田崇史<sup>C</sup>, 他 COBAND 実験メンバー

#### A pulsed light source for evaluating the STJ detectors used in cosmic-background-neutrino decay-photon search experiments

Univ. of Fukui, Chubu Univ.<sup>A</sup>, FIR Univ. of Fukui<sup>B</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>C</sup>  
T. Asaebisu, K. Suzuki, T. Takeshita, T. Kimura, R. Wakabayashi, T. Yoshida, S. Okajima<sup>A</sup>,  
K. Nakayama<sup>A</sup>, T. Furuya<sup>B</sup>, S.H. Kim<sup>C</sup>, Y. Takeuchi<sup>C</sup>, T. Iida<sup>C</sup>, for COBAND collaboration

ニュートリノは電荷を持たず、他の物質とほとんど反応しないため、検出が難しく、その質量すら未だに決定されていない。そこで、ニュートリノの質量を求めることを目的としたプロジェクトとして、COBAND (Cosmic Background Neutrino Decay Search) 実験が立ち上がった。この実験は、宇宙背景ニュートリノが崩壊する現象を捉えようという実験である。ニュートリノ崩壊現象とは、質量の大きなニュートリノが、遠赤外領域の光子を放出して、質量の小さいニュートリノに崩壊する現象であり、このときに放出される光子(ニュートリノ崩壊光子)のエネルギーを測定することによって、ニュートリノの質量を求めることができる。我々は、ニュートリノ崩壊光子のエネルギーを測定する装置として、超伝導トンネル接合素子(Superconducting Tunnel Junction, STJ)検出器の開発を行っているが、この検出器の性能評価や較正を行う必要があり、その光源として、福井大学遠赤外領域開発研究センターのCO<sub>2</sub>レーザー励起の遠赤外分子レーザー装置を用いることにした。本講演では、このレーザー装置が発振する連続波を高速チョッパーによってパルス化する方法と、その必要性について述べる。



図：高速チョッパーのディスク

## D-p02

### ニュートリノ崩壊光子検出器較正用光学系の設計と評価

福井大工, 中部大工<sup>A</sup>, 福井大遠赤セ<sup>B</sup>, 筑波大数理<sup>C</sup>  
若林凜, 鈴木健吾, 浅胡武志, 竹下勉, 木村碧海, 吉田拓生, 岡島茂樹<sup>A</sup>,  
中山和也<sup>A</sup>, 古屋岳<sup>B</sup>, 金信弘<sup>C</sup>, 武内勇司<sup>C</sup>, 飯田崇史<sup>C</sup>, 他 COBAND 実験メンバー

#### Design and evaluation of an optical system for calibrating neutrino-decay-photon detector

Univ. of Fukui, Chubu Univ.<sup>A</sup>, FIR Univ. of Fukui<sup>B</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>C</sup>  
R. Wakabayashi, K. Suzuki, T. Asaebisu, T. Takeshita, T. Kimura, T. Yoshida, S. Okajima<sup>A</sup>  
K. Nakayama<sup>A</sup>, T. Furuya<sup>B</sup>, S.H. Kim<sup>C</sup>, Y. Takeuchi<sup>C</sup>, T. Iida<sup>C</sup>, for COBAND collaboration

スーパーカミオカンデ等の実験により、ニュートリノは質量を持つことが判明したが、その質量は正確には測定されていない。質量の大きいニュートリノは、50 $\mu\text{m}$ ~80 $\mu\text{m}$ の遠赤外領域の波長を持つ光子を放出して質量の小さいニュートリノに崩壊することが予測されていて、この光子(ニュートリノ崩壊光子)のエネルギーを測定することでニュートリノの質量を決定することができる。しかし、ニュートリノの崩壊確率は極めて低いため、ニュートリノ崩壊光子を検出するには大量のニュートリノが必要となる。そこで我々は、宇宙に大量に存在すると考えられている宇宙背景ニュートリノを利用する実験、COBAND(Cosmic Background Neutrino Decay)実験を計画している。そしてニュートリノ崩壊光子のエネルギーを正確に測定するために、STJ(Superconducting Tunnel Junction)検出器の開発を行っている。その開発研究の中で我々は、福井大学遠赤外領域開発センターの遠赤外分子レーザーを用いて STJ 検出器の性能評価を行うことにした。しかし、このレーザーはニュートリノ崩壊光子と同じ遠赤外領域の光を連続波として発振するため、STJ 検出器のパルス応答を評価するには、その連続波をパルス化する必要がある。今回は、回転ミラーを用いたパルス化光学系の設計について講演を行う。



図：回転ミラーの外観

## D-p03

### 冷却 CaF<sub>2</sub>シンチレータにおける n/γ 粒子弁別能の研究

福井大・工 渡辺大貴 戸澤理詞 小川泉

筑波大数理物質系 飯田崇史

#### Study of the pulse shape discriminator capability in a cooled CaF<sub>2</sub> scintillator

Fac. of Eng, Univ. of Fukui D.Watanabe M.Tozawa I.Ogawa

Fac. of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tsukuba T.Iida

宇宙・素粒子物理学上の問題を解明する研究として、ダークマター探索実験が挙げられ、これらの実験において CaF<sub>2</sub>シンチレータが検出器として用いられている。ダークマター探索実験においては、ダークマターの候補である WIMPs と原子核反跳(N.R.)を起こしやすい原子核として、<sup>19</sup>F がスピンに依存する反応断面積が大きい原子として用いられる。この発見により、宇宙の大規模構造形成の理解が大きく進展すると考えられている。

WIMPs による原子核反跳は非常に稀な現象であるため、低バックグラウンド(BG)での観測が必要となる。その為関心イベント(N.R.)と BG (α線,β線)となるイベントの粒子弁別を行うことで、低 BG 環境での測定の実現を目指している。粒子弁別の方法として、CaF<sub>2</sub>を含むある種のシンチレータでは入射粒子に対して信号の波形が異なることが分かっている。この特性から Shape Indicator 法という2つの波形の差に重みを付けてイベントを弁別する手法を用いて信号波形の弁別能の評価を行う。先行研究によって CaF<sub>2</sub>シンチレータの冷却を行うことで α/γ 粒子弁別能が向上することが実証されているので、N.R./α 粒子弁別能の向上も期待して CaF<sub>2</sub> の冷却実験を行う予定である。

現在 CaF<sub>2</sub> 冷却下での測定に向けて、室温での N.R./α 粒子弁別能測定を行っている段階である。本講演では測定 SN 比を向上させるために検討している測定方法、現検出器が原因で生じる問題点と改善方法について論ずる。

## D-p04

### 原子炉ニュートリノモニター開発のための波形弁別能を有する液体シンチレータの開発

福井大・工 池山佑太 中島恭平 玉川洋一

#### Development of liquid scintillator with pulse shape discrimination for reactor neutrino monitor development

Univ. of Fukui Yuta Ikeyama Kyohei Nakajima Yoichi Tamagawa

原子炉ニュートリノモニターは、原子炉から発生する反電子ニュートリノを観測することにより、原子炉内部の稼働や炉内の核分裂性同位体量の監視を試みる技術である。先行研究[1]では、検出器を原子炉建屋内のテンドンギャラリーと呼ばれる地下空間に設置して、宇宙線とそれに起因するγ線や中性子を低減した環境で測定していたが、測定の安全性や監視の独立性といった観点から、建屋外の地上に検出器を設置することが望ましい。地上測定における PANDA 実験[2]ではバックグラウンド (BG) がニュートリノ事象に比べて2桁程度高くなることが予想されており、目的を達成するためには BG 事象を低減する必要がある。反電子ニュートリノの検出には逆β崩壊を用いて、反電子ニュートリノとターゲット物質 (シンチレータ LS) 中の陽子との反応から生成される中性子と陽電子を遅延同時計数法で観測する。また、BG として単一のγ線と中性子で波形弁別を行い排除する。

本研究では、LS に DIN ベースの有機溶剤 (Ultima Gold-F、以下 UG-F) を添加させることで波形弁別能を持たせ、中性子検出感度を上げるために Gd を添加する。特に今回は波形弁別に部分積分法と Shape Indicator (SI) 法の2つの方法で評価し UG-F の量を決定した。本講演では、波形弁別能を有する Gd 含有液体シンチレータの開発の現状を報告する。

[1] N. S. Bowden et al., "Observation of the isotopic evolution of pressurized water reactor fuel using an antineutrino detector", Journal of Applied Physics 105, 064902 (2009)

[2] S. Oguri, Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method: Nucl. Phys. A757, (2014) 33-39

**Ce:GAGG シンチレータを用いた  $0\nu\beta\beta$  崩壊観測実験  
に向けたバックグラウンド事象の低減とエネルギー分解能の向上**

福井大・工 小澤 健太 林 長宏 小川 泉 中島 恭平 玉川 洋一

**Reduction of background events and improvement of energy resolution for  $0\nu\beta\beta$  decay  
observation experiment using Ce: GAGG scintillator**

Univ. of Fukui Kenta Ozawa Takehiro Hayashi Izumi Ogawa  
Kyohei Nakajima Yoichi Tamagawa

ニュートリノの性質を決定するために有力な実験として二重 $\beta$ 崩壊観測実験がある。 $^{160}\text{Gd}$ は $0\nu\beta\beta$ をおこす核種の1つであり、我々の実験グループでは、その $^{160}\text{Gd}$ を含んでいるCe:GAGG結晶を用いて $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測を目指している。しかし、二重 $\beta$ 崩壊は非常に稀な現象であるため、多くのバックグラウンド事象に埋もれてしまい、観測が難しいため、バックグラウンド事象の削減やエネルギー分解能を向上させることが必要不可欠である。そこで、本研究ではバックグラウンド事象の低減、エネルギー分解能を向上させるための研究を行った。地下1000メートルの深さにある神岡地下観測所で約40日間測定を行い、測定したデータに対して波形弁別をすることで、 $\alpha/\gamma$  ( $\beta$ ) との分離を行った。分離の結果から二重 $\beta$ 崩壊を起こすエネルギー $Q$ 値付近のバックグラウンドイベント数をどれほど減少させることが出来るか評価を行った。

## E-a01

### 大電流パルス放電を用いた高圧力水中衝撃波の圧力評価

富山大工 稲垣 陽介, 大澤 恭平, 山田 拓歩, 伊藤 弘昭

#### Pressure measurement of underwater shock wave by large current pulsed discharge

Fac. of Eng., Univ. of Toyama Y. Inagaki, K. Osawa, T. Yamada, H. Ito

衝撃波とは、媒質中を音速よりも速く伝搬する圧力の波である。現在、水中衝撃波は材料加工への利用や結石破壊などの医療への利用、さらに水中衝撃波によって発生したキャビテーションが細菌や微生物の殺菌に利用されるなど、様々な分野で応用がなされている。水中衝撃波の応用のためにも、さらなる高圧力の水中衝撃波の発生が必要となる。水中衝撃波の発生方法として、火薬による爆轟や放電を用いたものなど様々な方法があり、放電による発生方法は火薬と比べて生成圧力は劣るが、安定性、制御性に優れ、繰り返し水中衝撃波を生成することができる。

本研究では、マルクス発生器と同軸伝送線路を用いることによって大電流(数十 kA)で短パルス(数十 ns~数百 ns)の放電によって、高圧力水中衝撃波を発生させる。図 1 にマルクス発生器の出力電圧 120kV、電極間距離 6mm での放電時の電流電圧波形を示す。電圧が立ち上がり、ある時刻で絶縁破壊を起こし、電流が流れ出しているのがわかる。発生した水中衝撃波の伝搬速度、圧力分布を測定するため、シュリーレン法と高速度カメラを用いて実験を行った。図 2 に撮影したシュリーレンの画像を示す。シュリーレン法は観測対象に干渉することなく撮影することができるので、ピエゾ素子など圧力測定器では観測できない放電部付近の衝撃波の特性を評価することができる。撮影した衝撃波波面から得られた伝搬模様や伝搬速度、圧力分布の評価を講演にて発表する。

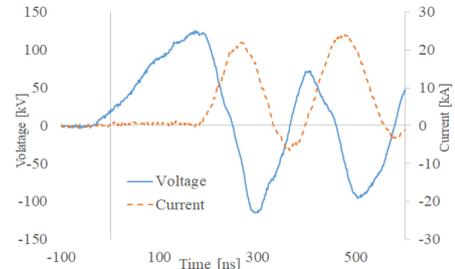


図 1: 放電時の電流電圧波形

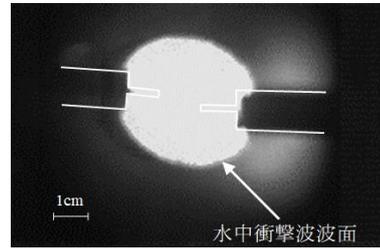


図 2: シュリーレン法による水中衝撃波画像

## E-a02

### 両極性パルス加速器におけるパルス重イオンビームの特性評価

富山大工 寺田 匡志, 石田 治康, 伊藤 弘昭

#### Characteristic evaluation of pulsed heavy ion beam in bipolar pulse accelerator

Fac. of Eng., Univ. of Toyama M. Terada, H. Ishida, H. Ito

高強度パルス重イオンビームの産業応用、例えば表面改質やイオン注入などの材料プロセス分野において、高強度・高純度のパルス重イオンビームが必要である。本研究では、イオンビームを多段加速させると同時にイオン純度の向上が可能である両極性パルス加速器 (Bipolar Pulse Accelerator : BPA) を開発し、窒素イオンビームを用いて BPA の実証実験を行ってきた。本研究では、トムソンパラボラ分析器を用いてパルス重イオンビームの特性を評価したので報告する。BPA の動作原理としては、イオン源より放出されたイオンをドリフト管に印加する負・正極性の両極性パルス電圧によって 2 段階加速させる。このとき、イオンの質量、価数の違いより生じる走行時間差を利用して、目的のイオンのみを効率よく加速させ、不純物イオンを除去し、相対的にイオンビームの純度を向上させることができる。実験ではイオン源であるガスバンプラズマガンに窒素を封入し、マルクス発生器の出力電圧を 210 kV、レールギャップスイッチに封入する絶縁気体 SF<sub>6</sub> を 0.28 MPa とし、初段加速と二段加速のイオンビームのエネルギーを比較するため、同じ条件で分析器の設置場所を変えて測定を行った。図 1 に二段加速を測定した検出器の写真を示す。図 1 の左下の丸で囲った点は電界、磁界により偏向されない中性粒子であり、磁界軸方向にあるトラックパターンは磁界にのみ偏向されたイオンである。これらを基準として偏向量を理論値と比較すると、窒素イオンの 1 価と 2 価が観察出来た。電界偏向された距離からエネルギーを算出すると、1 価数当たり約 260 keV 以上であり、印加した両極性パルス電圧を考慮するとこの窒素イオンは二段加速されていると考えられる。

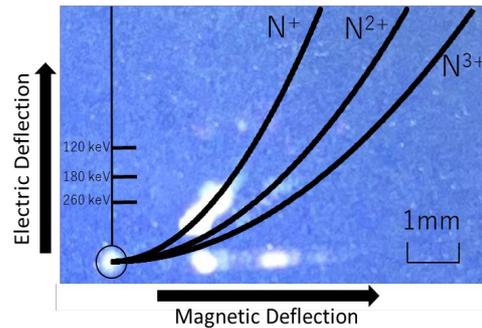


図 1.検出器で観測されたトラックパターン

## E-a03

### 水素注入型キャピラリー放電プラズマ導波路に関する研究

富山大工 松本 亮太, 伊藤 弘昭

#### Study on a Hydrogen Filled Capillary Discharge Waveguide

Fac. of Eng., Univ of Toyama. R. Matsumoto, H. Ito

プラズマとレーザーの相互作用の応用として、紫外線光源の開発やレーザープラズマ加速器などがある。また、レーザープラズマ加速器の実現によって、テーブルトップの加速器が実現でき、医療分野における X 線装置の小型化などが期待できる。しかし、これらの装置では、レーザー強度を強くするためにレンズで集光しているため、プラズマとレーザーの相互作用長はレイリー長程度に制限されてしまい、相互作用長の長尺化が課題となっている。本研究ではレーザーとプラズマの相互作用長を長尺化するためのガイドとして、キャピラリー放電プラズマ導波路の形成に関する実験を行った。キャピラリー放電プラズマ導波路とは、キャピラリーと呼ばれる細管内のガスをパルス放電によってプラズマ化し、その膨張過程においてプラズマ密度分布が図 1 に示すように中空状分布になる。この時プラズマの屈折率は式(1)となるので、キャピラリー内部の屈折率分布は図 1 のように光ファイバーと同様な屈折率分布を形成され、レーザーとプラズマの相互作用長の長尺化が可能となる。ここで、 $N$  はプラズマの屈折率、 $n_p$  はプラズマ密度、 $n_c$  は電磁波のカットオフ密度である。

本実験で使用するキャピラリーは、内径 0.4 mm、外径 5 mm、長さ 5 mm となっている。キャピラリー内には電磁弁を用いて水素ガスを注入する。パルス電圧源として MOSFET を用いたパルス電源を製作し、繰返し周波数 10 Hz、出力電圧 10 kV を確認した。本発表ではキャピラリー内に He-Ne レーザーを入射し、パルス放電前後のレーザー出力を比較することでレーザーガイディングを評価したので発表する。

$$N = \sqrt{1 - \frac{n_p}{n_c}} \quad (1)$$

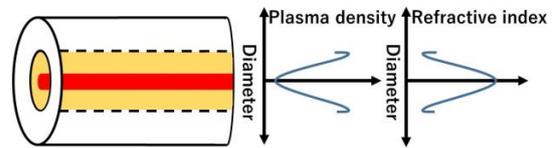


図1 キャピラリー内の電子密度分布と屈折率分布

## E-a04

### 多相交流グロー放電の等価回路の検討

金沢大 理工 佐藤芳樹、安藤利得、松本和憲

#### Equivalent circuit of multi-phase AC glow discharge

Kanazawa Univ. Yoshiki SATO, Ritoku ANDO, Kazunori MATSUMOTO

多相交流放電によるプラズマ発生法は位相が異なる複数の交流電源を用いて放電を行う方法である<sup>1</sup>。

多相交流放電では一般的に、最大の正の電圧を持つ電極がたった 1 つの陽極になりそれ以外の電極が陰極となる。また、電圧には正弦波を印加しても、電流波形は正弦波にならない(図 1 参照)。本研究では、この多相交流放電の電流波形を再現するような等価回路を考えた。そして、その等価回路の電圧・電流波形と実験で得られた波形の比較を行った。

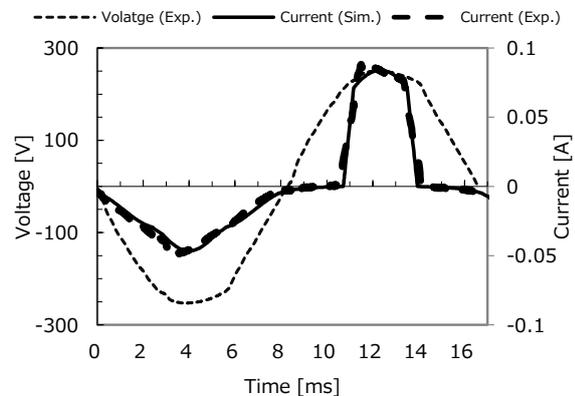


図 1 電圧、電流(実験)、電流(等価回路)の比較 (6相・60 Hz)

<sup>1</sup> K.Matsumoto, Plasma Source Sci. Technol. 5 (1996) pp.245-253.

## E-a05

### 二重同軸セラミックス管構造を用いた層流型大気圧プラズマジェットの特

富山大工 西村 理来, 石橋 一斗, 渡辺 和樹, 伊藤 弘昭,

### Characteristics of laminar gas-fed atmospheric plasma jet with double coaxial ceramic tube

Fac. of Eng. Univ. of Toyama R. Nishimura, K. Ishibashi, K. Watanabe, H. Ito,

大気圧プラズマジェットは、大気圧下にてパルス放電を行うことでイオン及び中性粒子は低温のままであるのに対し、電子のみ高温になるという特徴を持ち、化学反応性が高い。これはヒドロキシラジカルなどの活性種やイオン種が寄与しているためで、これらの発生確率が大きくなる条件を見つけることが重要となる。本研究室では、活性種やイオン種の増加を目的に図1に示すような二重同軸管構造ガラス管を用いた大気圧プラズマジェットの実験を行ってきた。しかし、プラズマジェットを導電性の材料に照射した際、誘電体であるガラス管が破損する事例が生じたので、ガラス管を耐熱性、耐久性のあるセラミックス管に変更してプラズマジェットの特性を評価した。二重同軸管構造は3つのセラミック管から構成されており、主ガスであるヘリウムと、副ガスである窒素を層流で流し混合させる。図2に主ガス He:7L/min、副ガス N<sub>2</sub>:4L/min、印加電圧 7kV、周波数 20kHz での典型的な分光測定結果を示す。管先端を距離の基準点として光が観測できなくなる点まで測定を行った。本発表では、スペクトル分光とビュレットの測定を行い、従来のガラス管と比較したので、その結果について述べる。

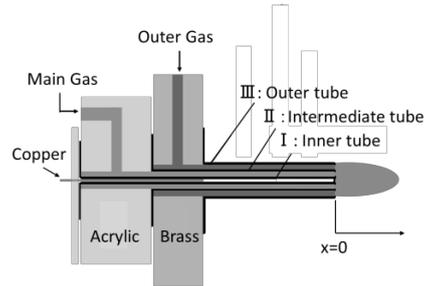


図1 実験装置の概略図

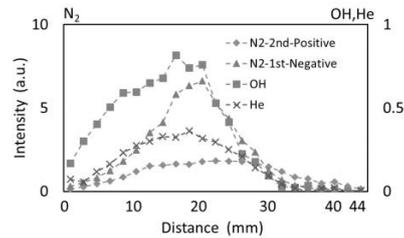


図2 典型的な分光測定結果

## E-a06

### ジャイロトロンを用いたミリ波誘起寒天ジェットの高速度カメラ計測

岡本 瞭太郎, 福成 雅史, 神谷 亮汰, 伊藤 慎悟, 中川 和輝,

山口 裕資, 立松 芳典, 齊藤 輝雄

福井大学 遠赤外線領域開発研究センター

### High-speed Camera Measurement of an Agar Jet Induced by a Millimeter Wave Beam Irradiated from a Gyrotron

R. Okamoto, M. Fukunari, R. Kamiya, S. Ito, K. Nakagawa, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

寒天は生物応用の分野における細菌の培地や臨床応用のファントムとして使用される。近年、ミリ波帯の生物応用研究にてミリ波を寒天に照射する試験が行われるようになった。その際、寒天への高強度ミリ波照射により破裂音が生じ表面にクレータ状の爆発痕が発生することがわかった。そこで本研究では、高強度ミリ波を寒天に照射する実験を行った。ミリ波光源として福井大学遠赤センターで開発されたモード変換器搭載の Gyrotron FU CW GV を用いた。実験では、波長 1.85 mm のミリ波を焦点距離 80 mm の平凸レンズで集光した。集光点ではビーム半径 3 mm のガウシアン分布である。ここに寒天を配置してパルス幅 12 ms の単パルスを照射した。ミリ波は出力 1.2 kW、平均フルエンス  $5 \times 10^4 \text{ J/cm}^2$  である。フレームレートは 10000 fps の高速度カメラを用いて現象を観察した。図のように、ミリ波照射により寒天表面に微細なバブルが発生し、微粒子が噴出することがわかった。撮影した動画から見積もられた噴出粒子の平均直径は 0.1 mm、平均速度は 10 m/s である。また、寒天表面に生じた爆発痕をガウシアン分布で近似して求めた噴出粒子群の体積より、噴出によって生じた運動エネルギーは  $3 \times 10^{-4} \text{ J}$  と見積もられた。

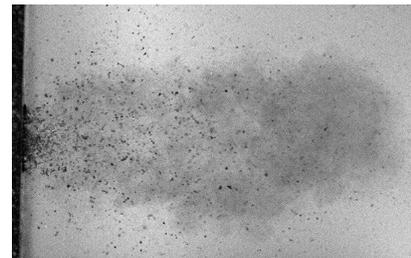


図 寒天から噴出する煙・微粒子群

## E-a07

### 非対称電極を用いた反射三極管型仮想陰極発振器におけるマイクロ波特性の評価

富山大工 田中 稜大, 春木 亮太郎, 伊藤 弘昭

#### Evaluation of microwave oscillation generated in reflective triode virtual cathode oscillator with asymmetric electrodes

Fac. of Eng., Univ. of Toyama R. Tanaka, R. Haruki, H. Ito

仮想陰極発振器は、高強度電子ビームを用いて高出力マイクロ波（High Power Microwaves : HPM）を発振できる装置である。本装置は、他のマイクロ波発振源と異なり外部磁界を必要とせず、陰極とメッシュ状の陽極の単純な構造で構成される。陽極に正の高電圧パルスを印加すると電界放出により陰極から電子が放出し、電子ビームが発生する。電子ビームが陽極を通過してドリフト空間の空間電荷制限電流を超えると仮想陰極が生成され、後続電子は仮想陰極と陰極間で往復運動しマイクロ波が発振する。また、仮想陰極が空間的・時間的に振動することでもマイクロ波が発振する。仮想陰極発振器は他のマイクロ波源と比較して高出力マイクロ波を発振できる利点があるが、電力変換効率が著しく低い点が課題として挙げられる。そのため、電極の材料や形状の変更、共振器の導入などによる変換効率向上に関する研究が行われている。本研究では、三極管型において、以前から用いられてきた円形電極とは異なり、マイクロ波の放射方向に非対称な形状である楕円電極を用いて、装置の動作特性とマイクロ波発振特性の評価を行った。マイクロ波の測定は導波管の出力窓から 120cm 離れた位置に設置した方形導波管変換器で受信し、信号強度とその信号の FFT 解析によって評価を行った。右図は、導波管の軸方向と径方向における、マイクロ波強度の電極間距離依存性である。電極間距離が 5mm のとき、マイクロ波の強度は最大となった。詳細な実験結果と考察に関しては、発表にて報告する。

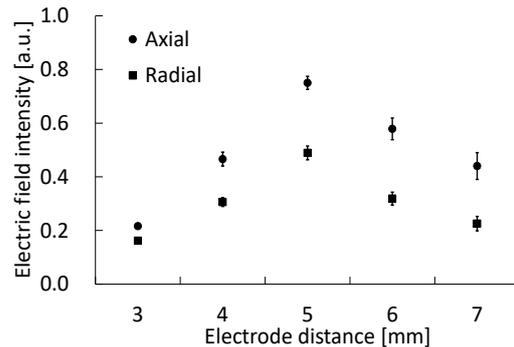


図: マイクロ波強度の電極間距離依存性

## E-a08

### Gyrotron FU CW GVII におけるジャイロトロン管軸位置調整による発振出力の向上

伊藤慎悟, 上山達也, 中川和輝, 岡本瞭太郎, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 斉藤輝雄  
福井大学 遠赤外線領域開発研究センター

#### Improvement of the oscillation power of the Gyrotron FU CW GVII by adjusting the gyrotron axis location

S. Ito, T. Ueyama, K. Nakagawa, R. Okamoto, M. Fukunari, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito  
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

福井大学遠赤外線領域開発研究センターでは、一基で複数の二次高調波発振が可能な Gyrotron FU CW GVII (以下, GVII と表記) を開発した。当初の発振試験では、9 つの発振候補モードの内、7 つのモードの発振が確認され、GVII の設計中心モードである TE<sub>6,5</sub> モードの発振出力は 17 W であった[1]。本研究では、更なる発振出力の向上を目指した。ジャイロトロン管の中心軸 (以下, 管軸と表記) と磁場コイルの中心軸 (以下, 磁気軸と表記) にズレがあると発振出力が低下するため、出力向上には管軸と磁気軸を合わせ結合係数が高い位置に電子を入射させることが必要である。このため、新たに導入した XY ステージを用いて、ジャイロトロン管を水平方向に移動させつつ発振出力強度を測定した (図)。原点は、ジャイロトロン管を動かす前の管軸位置である。管軸位置調整により、TE<sub>6,5</sub> モードの発振出力が 77 W に向上した。また新たに TE<sub>5,4</sub> モードの単独発振を確認した。

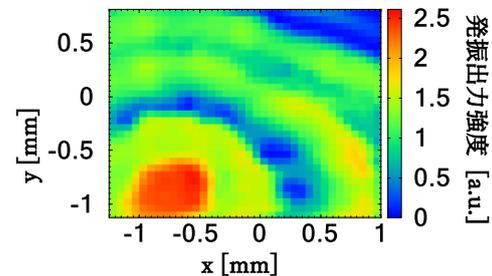


図. 発振出力強度の軸位置依存

[1] 中川和輝他, 2018 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, A-a5.

## E-a09

### 二次高調波 TE<sub>8,3</sub>/TE<sub>8,5</sub> モード複合共振器ジャイロトロンが発振試験

渡邊将翔<sup>1</sup>, 小椋大聖<sup>1</sup>, 福成雅史<sup>1</sup>, 山口裕資<sup>1</sup>, 立松芳典<sup>1</sup>, 斉藤輝雄<sup>1</sup>, 内山裕二<sup>2</sup>, 青山直樹<sup>2</sup>  
 福井大学遠赤外領域開発研究センター<sup>1</sup>, 福井大学工学部技術部<sup>2</sup>

### An Experiment on Second Harmonic TE<sub>8,3</sub>/TE<sub>8,5</sub> Mode Oscillation of a Complex Cavity Resonator Gyrotron

M. Watanabe<sup>1</sup>, T. Ogura<sup>1</sup>, M. Fukunari<sup>1</sup>, Y. Yamaguchi<sup>1</sup>, Y. Tatematsu<sup>1</sup>, T. Saito<sup>1</sup>, Y. Uchiyama<sup>2</sup>, N. Aoyama<sup>2</sup>  
 Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui<sup>1</sup>  
 University of Fukui Technical Division<sup>2</sup>

ジャイロトロンはミリ波サブミリ波帯の大電力光源である。本研究は連続周波数可変性を持つ 400 GHz 帯二次高調波発振ジャイロトロンを開発を最終目標としている。二次高調波は要求される磁場強度を抑えることができるが、基本波と比べて発振効率が低くモード密度が高いため、特に基本波との競合が問題となる。そこで本研究では複合共振器を用いて競合基本波の抑制を試みた。複合共振器は、半径の異なる共振器を同軸に組み合わせた共振器であり、図中の第一共振器と第二共振器で同時に共鳴させることによって、モード競合を抑制し、設計モードを強く励起させることができる。設計モードは TE<sub>8,3</sub>/TE<sub>8,5</sub> モードペア、設計発振周波数は 394.6 GHz である。複合共振器の機能を得るためには、共振器半径に対し 3 μm 以下の加工精度が必要と指摘されている[1]。そのため、運転領域外の磁場範囲においてそれぞれの共振器から発振する基本波の周波数を計測する予備実験により、製作した共振器の加工誤差を 1 μm 程度と見積もった。さらに二次高調波発振試験を行い TE<sub>8,3</sub>/TE<sub>8,5</sub> モードの発振を探索した。発振試験の結果、競合基本波を抑制することができ、TE<sub>8,3</sub> モードの発振は観測できたが、設計モードとは別の二次高調波 TE<sub>3,5</sub> モードとの競合が発生した。

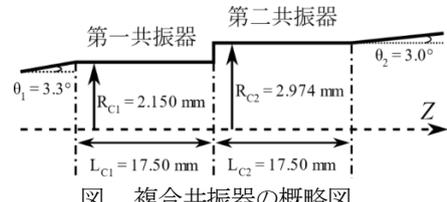


図. 複合共振器の概略図

[1] Maria M. Melnikova et al., IEEE Trans ED, Vol. 64, (2017).

## E-a10

### 二段共振器搭載ジャイロトロンにおける 200-400 GHz 帯の二次高調波超多周波数発振

三ツ本涼太、山口裕資、小椋大聖、福成雅史、渡邊将翔、金子大輝、  
 上山達也、神谷亮汰、中川和輝、立松芳典、斉藤輝雄  
 福井大学 遠赤外領域開発研究センター

### Second Harmonic Super Multi-Frequency Oscillations in 200-400 GHz Band with a Complex Cavity Gyrotron

R. Mitsumoto, Y. Yamaguchi, T. Ogura, M. Fukunari, M. Watanabe, D. Kaneko,  
 T. Ueyama, R. Kamiya, K. Nakagawa, Y. Tatematsu and T. Saito  
 Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

テラヘルツ帯ジャイロトロンへの応用研究が進む中、周波数可変機能の向上を狙い、二段共振器の研究を行っている。図 1 に示す二段共振器は、径の異なる円筒形空洞を連結したもので、各共振器を独立に駆動する事が可能である。これまで基本波発振において、非常に多くのモード（周波数）での発振を観測している [1]。この結果を受け、本研究では、二次高調波の超多周波数発振の可能性を模索した。

二段共振器搭載ジャイロトロンを用いた二次高調波発振実験の結果、単一共振器では得られない合計 16 のモードの発振を観測した (図 2)。また基本波発振の場合と比べて狭いが、周波数の連続可変領域がある事も判った。多くの場合、競合する基本波発振が同時に観測されるが、二次高調波発振が単独で存在する場合もあった。単独で二次高調波発振する場合の出力を調べた結果、1 W 以上を得られた。

以上の結果より、基本波発振および二次高調波発振を利用する事で、更なる超多周波数発振ジャイロトロンの実現が可能であると言える。また二次高調波発振は、基本波発振に比べて出力が低下するが、ワットオーダの出力があれば、様々な目的への応用が可能である。

[1] 山口裕資他, 日本物理学会第 74 回年次大会, 15aK309-2 (2019)



図 1. 二段共振器

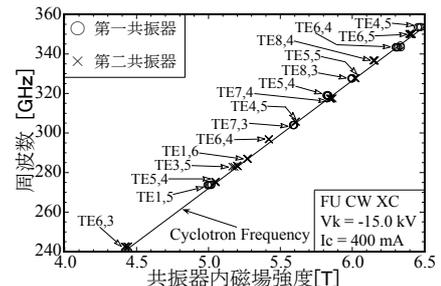


図 2. 観測された二次高調波発振

## E-a11

### 28GHz ジャイロトロンを用いたグラフェン-アルミナ複合セラミックスのミリ波焼結

福井大学遠赤センター, ハルオレオ大学

縄手知樹, Fitriani AhmarA, 山本悠太, 石原雅弘, La AgusuA, 光藤誠太郎

### Millimeter wave sintering of alumina-graphene composite ceramics by 28Ghz Gyrotron

FIR-Center Univ. of Fukui, University of Halu Oleo.A

T. Nawate, F.AhmarA, Y.Yamamoto, M.Ishihara, L.AgusuA, S.Mitsudo

アルミナ(酸化アルミニウム)を材料とするセラミックスは、硬度・耐熱性・耐食性などに優れ、これらの性能を利用して多様な用途に用いられている。しかし、破壊靭性は低く脆いという欠点がある。

破壊靭性を高めるための方法として、セラミックスに繊維や粒子などを組み合わせることがあげられる。こうした複合セラミックスには、アルミナに酸化マグネシウムやジルコニア(酸化ジルコニウム)などを添加したものが存在する。また、アルミナに対してグラフェンを容積比 0.8%添加し、SPS 法で焼結することで、破壊靭性が約 25%向上することが報告されている。

本研究では、SPS と同様に高速焼結ができ、グラフェンの分解が少なく破壊靭性値の向上が見込める 28 GHz ジャイロトロンを用いた電磁波焼結により、アルミナ-グラフェン複合セラミックスの開発を行った。焼結温度、グラフェンの添加量の変化に対する破壊靭性値を図に示す。アルミナに対する容積比 0.5%~2%のグラフェンを添加した焼結温度 1600°Cのセラミックスでは、高純度アルミナのセラミックスに比べ破壊靭性値が 18~22%向上する結果が得られた。また、焼結温度 1650°Cでは測定に十分なき裂が得られず測定不能だったため、より高い破壊靭性値が期待できる結果となった(図には測定可能な最大値を示す)。

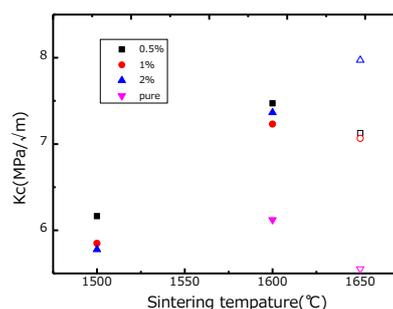


図: 焼結温度に対する破壊靭性値の変化

## E-p01

### マイクロ波蒸留法を用いたヨモギ精油の抽出

福井大遠赤セ, Halu Oleo Univ. A

山本 悠太, 縄手 知樹, H.P.KusumahA, 光藤 誠太郎

### Extraction of essential oils of Artemisia by microwave distillation method

FIR-Center, Univ. of Fukui, Halu Oleo Univ. A,

Y. Yamamoto, T. Nawate, H.P.KusumahA, S. Mitsudo

近年、マイクロ波蒸留法(MD)は他の抽出法と比べて植物から抽出した精油中の成分が異なるなどの理由から注目されている。精油は精神強壮、抗炎症などの薬理効果が報告されていることから、我々はマイクロ波が蒸留に与える効果を調べる目的で MD/HD で精油を蒸留することができる装置を開発した。ヨモギは古くから食材や万能薬として様々な場面で用いられ、特にヨモギに熱水蒸留法(HD)を用いて得られる精油は青色を呈することが知られており、MD で得られるヨモギ精油の特徴を調べるためそれぞれの蒸留法でヨモギ精油を抽出した。HD を用いて得られた精油は報告の通り青色を呈したが、MD を用いて得られた精油は緑色を呈した。得られた精油を GC/MS を用いてそれぞれ分析した結果得られたそれぞれのクロマトグラムを右図中に示す。図から、精油に含まれる成分が HD,と MD とで異なることが分かった。MD, HD とともに得られた精油の主成分は Caryophyllene, Elemene であることがわかった。これは先行研究の報告にあるヨモギの主成分と同じである。また右図より、それぞれのオイルに含まれる成分が異なることがわかった。MD では特に、HD で検出されなかった低いリテンションタイム(5 min.~10 min.)の成分が検出されている。これらの成分についての薬理成分等の詳細については当日発表する。

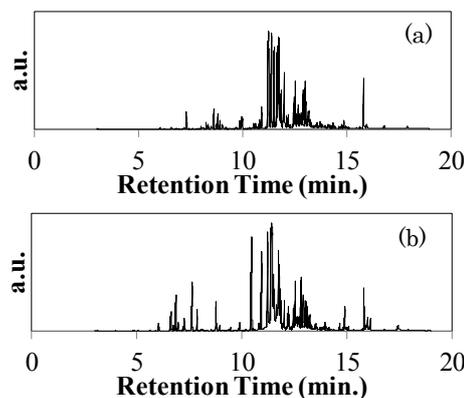


図: 抽出したヨモギ精油のクロマトグラム((a)HD, (b)MD).

## E-p02

### 高周波ジャイロトロン出力制御に向けた流水負荷の製作

金子大輝、山口裕資、福成雅史、立松芳典、齊藤輝雄  
福井大学 遠赤外領域開発研究センター

#### Development of a Water Load for Accurate Measurement of a Sub-THz Gyrotron Power

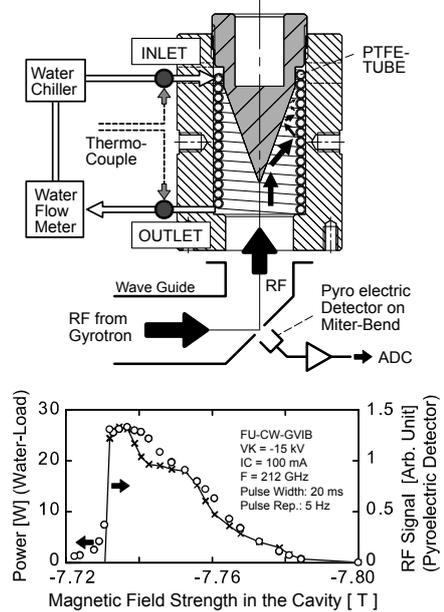
D. Kaneko, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, Y. Tatematsu and T. Saito  
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

ジャイロトロンは、テラヘルツ帯で高出力かつ定常発振可能な電子管である。ジャイロトロンは、核融合プラズマの制御や診断計測用の電磁波源として利用されているほか、近年では物質・生命科学の研究などへの応用も増えている。その応用に際し、周波数のみならず出力も幅広くかつ高精度に調節する機能の実現が必要とされている。[1]

出力を制御するためには、高精度の出力測定が必要となる。本研究では、ジャイロトロン出力を高精度に常時計測可能な流水負荷装置を設計、製作した。右図の上部に、製作した水負荷を示す。図中の矢印の方向へ入射した電磁波を円錐面で散乱させ、内壁に配置した螺旋状 PTFE 管 (内径 3 mm) 内の水に全吸収させる。円錐を鋭角とすることで電磁波の戻りを抑制する。吸収される電磁波による温度上昇を、水の入口と出口で銅-コンスタンタン熱電対を用いて高精度に測定する。

212-GHz で発振可能なジャイロトロン FU CW GVIB に対し出力測定実験を行った。右図の下部に、流水負荷を用いて測定した出力 (○印)、また焦電素子で検出した出力信号 (×印) の、共振器磁場依存性を示す。流水負荷と焦電素子では、磁場に対する出力変化の測定結果が異なっている。流水負荷による測定は全出力を反映するが、焦電素子による測定は局所値のみを反映している。従って、この測定結果の違いは、共振器磁場の変化により出力される電磁波の空間構造が変化している事を示唆している。

[1] 若林優次 他, 「ジャイロトロン電子ビーム電流制御における PID ゲイン最適化実験」(2018 日本物理学会北陸支部 定例学術講演会 A-a6)



## E-p03

### ビーム速度を有する純電子プラズマの早い緩和機構の検討

金沢大自然 山村 泰昭, 曾我 之泰, 朴 英樹, 上田 隼也, 佐藤 政行

#### Examination of fast relaxation mechanism of pure electron plasma with beam velocity

Kanazawa Univ. Y. Yamamura, Y. Soga, Y. Park, J. Ueda, M. Sato

我々は、荷電粒子ビームのパルス圧縮操作で生じるエネルギー輸送現象を解明することを最終目標とし、その素過程である純電子プラズマの緩和過程について実験検証を行っている。一様な磁場と静電ポテンシャルを利用して閉じ込められる純電子プラズマは、閉じ込め初期の状態では磁場に沿ってビーム速度で静電ポテンシャル間を往復運動する。先行研究において、軸方向エネルギー解析を行った結果、純電子プラズマが初期に持つビームエネルギーが、ビーム速度まわりの熱広がりにより緩和していく様子が観測された。図に軸方向エネルギーのピークの時間発展を、ビーム入射時の加速電圧を制御パラメータとして表す。2つの異なる時定数を持つ緩和が存在すること、及び早い緩和では入射ビームエネルギーが高いほど緩和時間 (e-folding time) が長いことを示している。

本研究では、クーロン衝突では説明できない早い緩和の物理機構を解明することを目的として、2流体不安定性がこの緩和に寄与している可能性を1次元 PIC シミュレーションにより検討した。実験から得られたビーム速度・密度を初期条件として計算した結果、2流体不安定性が生じ、その時間スケールは実験と一致した。しかし、緩和の結果生じるエネルギー分布は異なることが判明した。

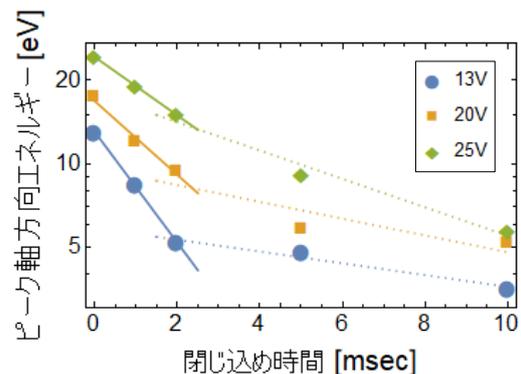


図: ピーク軸方向エネルギーの時間発展

## E-p04

### ビーム入射で生成された純電子プラズマの早い緩和過程に対する閉じ込め電位の影響

金沢大理, 長岡技科大<sup>A</sup> 石井 宏, 曾我之泰, 朴英樹, 菊池崇志<sup>A</sup>, 鈴谷のぞみ<sup>A</sup>

#### Effect of Confinement Potential on the Fast Relaxation Process of Pure Electron Plasmas Produced by Beam Injection

Fac. of Sci., Kanazawa Univ; Nagaoka University of Technology. <sup>A</sup> H. Ishii, Y. Soga, Y. Park, T. Kikuchi <sup>A</sup>, N. Suzutani <sup>A</sup>

一様な磁場と静電ポテンシャルを利用して純電子プラズマを長時間閉じこめることが可能となる。これにより様々な時間スケールで純電子プラズマのエネルギー緩和過程を観測することができる。我々は、荷電粒子ビームのパルス圧縮操作で生じるエネルギー輸送現象を解明することを最終目標とし、その素過程である純電子プラズマの緩和過程について実験検証を行っている。純電子プラズマの緩和はクーロン衝突や中性粒子衝突などが原因で引き起こされるが、衝突では説明できない電子ビーム入射直後(数 $\mu$  sec)の早い時間スケールでの緩和が実験で観測された。シミュレーションによると、この早い緩和はプラズマ端の閉じ込め電位の影響で生じ、その電場が小さいほど緩和が促進されると示唆された[1]。このシミュレーション結果を制御実験により検証し、電子ビーム入射直後に起こる緩和の物理機構を解明することが本研究の目的である。

閉じ込め電位を制御パラメータとして電子ビーム入射後  $1\mu$  sec に観測した純電子プラズマのエネルギー分布関数を図に示す。軸方向端の閉じ込め電位が $-80$  V の場合は入射ビームエネルギーである  $13$  eV にピークがあるのに対し、閉じ込め電位 $-20$  V の場合はピークが低エネルギー側にシフトし分布が広がっており緩和が進んでいる。この結果は純電子プラズマの早い緩和過程が閉じ込め電位に依存することを明確に示しており、その傾向はシミュレーションと定性的に一致した。シミュレーションによると、閉じ込め電位が浅いほど電子が軸方向深くまで入り込み、電子が端付近で長く滞在することで電子密度が上昇する。これにより密度勾配が生じ、電子が加速され続けることによって緩和が進むと理解できる。

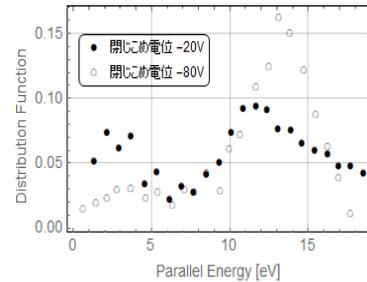


図: 電子群入射後  $1\mu$  sec のエネルギー分布

[1] 菊池崇志 他, “軸方向磁場印加空間へ入射した電子群緩和過程での軸方向端静電ポテンシャルの影響”, 10pK22-8, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学

## E-p05

### 1 shot 画像計測による純電子プラズマのエネルギー分布関数の導出

金沢大自然 上田隼也, 朴英樹, 曾我之泰

#### Derivation of Energy Distribution Function of Pure Electron Plasmas by Single-Shot Image Measurement

Kanazawa Univ. J. Ueda, Y. Park, Y. Soga

軸方向一様磁場と静電ポテンシャルを利用した Malmberg-Penning Trap で捕捉した純電子プラズマのエネルギー分布関数は、その緩和現象の解明などにおいて重要な情報の一つである。既存のエネルギー分布測定方法は、閉じ込め配位から出口側の静電ポテンシャルを短時間で変化させ、それを乗り越えられるエネルギーを持つ電子数を測定することでエネルギー分布関数を得るというものである。しかしこの方法では 1 つの分布関数を得るために数十回、同一のプラズマ生成が必要であり長時間を要する上、再現性が低いプラズマでは使用できないなどの問題点があった。これらの問題を解決するため、本研究では 1 回の測定によりエネルギー分布を導出する方法を新たに開発した。これは出口ポテンシャルを長時間かけて開き、 $E \times B$  ドリフト運動により回転運動する純電子プラズマのエネルギー分布を直接実空間上に展開する方法である(図 1)[1]。この方法は原理的に電子プラズマのエネルギー分布形状によらず測定可能で、既存のもの比べて格段に早い時間で測定することが可能である。新たな方法で導出した閉じ込め時間  $1\mu$  sec の紐状電子プラズマのエネルギー分布を、既存の解析方法によるものと比較したところ、同等の結果が得られた(図 2)。この結果は新しい測定方法の妥当性を強く支持している。

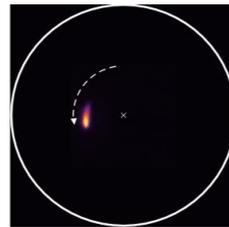


図 1: 新測定方法で観測された電子プラズマ画像

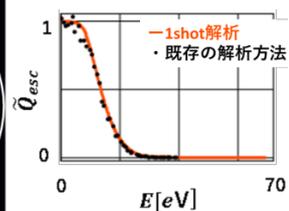


図 2: 既存のエネルギー分布

[1] Y. Park, Y. Soga, M. Sato, N. Suzutani and T. Kikuchi, Plasma and Fusion Res. 14, 1201046, (2019).