

研究責任者名 Name	木村 真明 Kimura Masaaki	所属機関 Affiliation	北海道大学理学部
受理番号 Proposal No.	大型-13/14-18	研究課題名 Program title	「反対称化分子動力学による中性子ハローと $\alpha$ クラスタ構造の研究」

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

#### 成果の概要 Abstract

(和文) KEK システム B を使用し、反対称化分子動力学を用いた核構造計算を実施し、原子核の変形現象と中性子ハローの研究を実施した。成果の概要は以下の通りである。

○ 核変形の対称性を仮定しない数値計算を行い、陽子過剰原子核  $^{56}\text{Ni}$  の励起スペクトルを調べた。その結果、低エネルギー状態に複数の異なった形状を持つ回転帯が存在することを明らかにした。さらに、よりエネルギーの高い領域には超変形状態が存在することを示した(学術論文 1)。

○ 安定核から中性子ドリップラインに至る Mg 同位体 ( $^{24}\text{Mg}$ – $^{40}\text{Mg}$ ) の基底状態における核子密度分布を反対称化分子動力学により導出した。その核子密度分布関数をインプットにし、Mg 同位体の反応断面積を求め、中性子数が 20 よりも大きな Mg 同位体の変形していることを示した。また  $^{37}\text{Mg}$  は中性子ハロー構造を持つことを指摘した(学術論文 2)。

○  $^{40}\text{Ca}$  近傍核の超変形状態およびそれに  $\Lambda$  粒子が束縛された超変形  $\Lambda$  ハイパー核の励起スペクトルを求めた。 $\Lambda$  粒子の付加によって、超変形状態の変形が僅かに小さくなること、 $\Lambda$  粒子の束縛エネルギーが超変形状態の変形の大きさに敏感であることを示した(学術論文 3)。

(英文) Using the system B at KEK, we have performed nuclear structure calculations based on the antisymmetrized molecular dynamics model and investigated shape coexistence phenomena and neutron-halo. Achievements in this year are as follows.

○ We have investigated the excitation spectrum of proton-rich nucleus  $^{56}\text{Ni}$  without any assumption on the symmetry of nuclear deformation. We have shown that there appear several rotational bands with different deformed shapes. Furthermore, the existence of the SD bands is predicted

○ Nucleon density distributions in the ground state of Mg isotopes ( $^{24}\text{Mg}$ – $^{40}\text{Mg}$ ) are calculated by antisymmetrized molecular dynamics. Using this density distribution, the reaction cross sections were derived. By the comparison with the experiment, it was found that all neutron-rich Mg isotopes with  $N \geq 20$  are strongly deformed. It is also shown that  $^{37}\text{Mg}$  has neutron-halo.

○ Superdeformed states (SD) in  $^{40}\text{Ca}$  and neighboring nuclei and in hypernuclei are calculated. It was shown that the  $\Lambda$  particle slightly reduces the deformation of SD and that the binding energy of  $\Lambda$  particle is sensitive to deformation

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	7	3	2	2

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program		
1. Y. Taniguchi, "16O + 16O + valence neutrons in molecular orbitals structures of positive- and negative-parity superdeformed bands in 34S", 3rd International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics", Yokohama, Japan, May 26-30, 2014.		
2. 谷口億宇, "S 同位体の励起状態の変形の変遷とクラスタ構造", 日本物理学会年次大会, 東海大学、平塚, 2014年3月27-30日.		
3. 谷口億宇, 須原唯広, "原子核の励起状態における変形及びクラスタ構造", 第5回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム, 筑波大学, つくば市, 2013年11月5-6日		
4. Y. Chiba and M. Kimura, "Collectivity and instability of the N=Z=28 shell gap in 56Ni", The 2nd Conference on "Advances in Radioactive Isotope Science" (ARIS2014), 2014/06/01-06		
5. Y. Chiba and M. Kimura, "Study of cluster structure in 13C with AMD+HON-constraint method", 3rd International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" (SOTANCP3), 2014/05/26-30		
6. M. Kimura, "Clustering aspects studied by antisymmetrized molecular dynamics", 3rd International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics" (SOTANCP3), 2014/05/26-30		
7. M. Kimura, "Erosion of N=28 Shell Gap and Triple Shape Coexistence in the Vicinity of 44S", The 2nd Conference on "Advances in Radioactive Isotope Science" (ARIS2014), 2014/06/01-06		
査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。		
Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)		
1	著者名 Author	Y.Chiba, M.Kimura
	タイトル title	"Collectivity and instability of the N=Z=28 shell gap and strongly deformed bands with g <sub>9/2</sub> configuration in <sup>56</sup> Ni"
	雑誌名	Phys.Rev. C 89, 054313 (2014)
	URL	<a href="http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.054313">http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.054313</a>
2	著者名	S.Watanabe, K.Minomo, M.Shimada, S.Tagami, M.Kimura, M.Takechi, M.Fukuda, D.Nishimura, T.Suzuki, T.Matsumoto, Y.R.Shimizu, M.Yahiro
	タイトル	"Ground-state properties of neutron-rich Mg isotopes"
	雑誌名等	Phys.Rev. C 89, 044610 (2014)
	URL	<a href="http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.044610">http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.044610</a>
3	著者名	M.Isaka, K.Fukukawa, M.Kimura, E.Hiyama, H.Sagawa, Y.Yamamoto
	タイトル	"Superdeformed $\Lambda$ hypernuclei with antisymmetrized molecular dynamics"
	雑誌名等	Phys.Rev. C 89, 024310 (2014)
	URL	<a href="http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.024310">http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.024310</a>
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。		
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)		
1.	著者名 Author	Y. Taniguchi and Y. Kanada-En'yo,
	タイトル title	"Separation of a Slater Determinant Wave Function with a Neck Structure into Spatially Localized Subsystems"
	雑誌名等	Few-Body Systems 54, 1617 (2013).
	URL	<a href="http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00601-013-0623-3">http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00601-013-0623-3</a>
2.	著者名	Y. Taniguchi
	タイトル	"Cluster correlations in largely deformed states"
	雑誌名等	Jour. Phys. Conf. Ser. 436, 012055 (2013).
	URL	<a href="http://iopscience.iop.org/1742-6596/436/1/012055">http://iopscience.iop.org/1742-6596/436/1/012055</a>
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (著者、タイトル、論文種別、URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
1. T. Baba, Y. Chiba, M. Kimura, 3alpha clustering in the excited states of 16C, submitted to Phys. Rev. C , <a href="http://arxiv.org/abs/1410.0789">http://arxiv.org/abs/1410.0789</a>		
2. 千葉陽平 ""Collectivity and instability of the N=Z=28 shell gap and strongly deformed bands with g <sub>9/2</sub> configuration in 56Ni"", 修士論文		
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)		

研究課題名 「反対称化分子動力学による中性子ハローと  $\alpha$  クラスター構造の研究」  
実施報告書

2014 年 12 月 1 日

## 1. 研究組織

	氏名	所属	身分
研究責任者	木村真明 <small>きむら まさあき</small>	北海道大学 理学院	准教授
研究従事者	谷口億宇 <small>たにくち やすたか</small>	筑波大学計算科学研究センター(3/31 まで) 日本医療科学大学(4/1 より)	助教
研究従事者	千葉陽平 <small>ちば ようへい</small>	北海道大学 理学院	修士 2 年

## 2. 実施報告

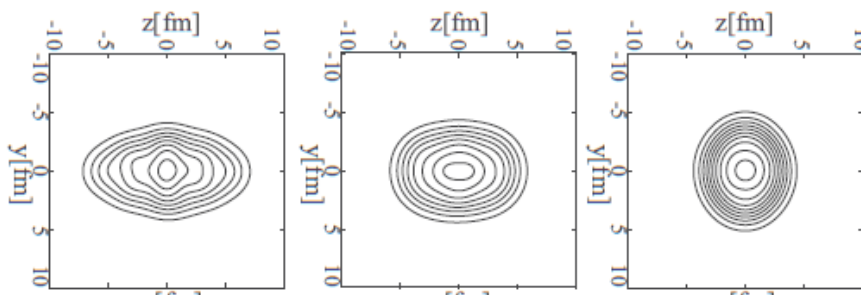
KEK システム B を利用し、以下の課題を実施した。

### 2.1 陽子過剰核 $^{56}\text{Ni}$ における変形共存現象の研究

$^{56}\text{Ni}$  は陽子・中性子共に魔法数 28 を持つ原子核であるが、陽子過剰であるため、魔法数 28 のエネルギーギャップが小さくなっており、その結果として低励起状態に様々な変形状態が共存している可能性が指摘されている。そこで、原子核の変形状態に制限を置かない(特定の対称性を仮定しない)数値計算を行い、 $^{56}\text{Ni}$  の励起スペクトルを求めた。

まず、反対称化分子動力学による変分計算を行い、その結果、図 1 に示す、様々な異なる変形構造を持つ状態の存在を確かめた。

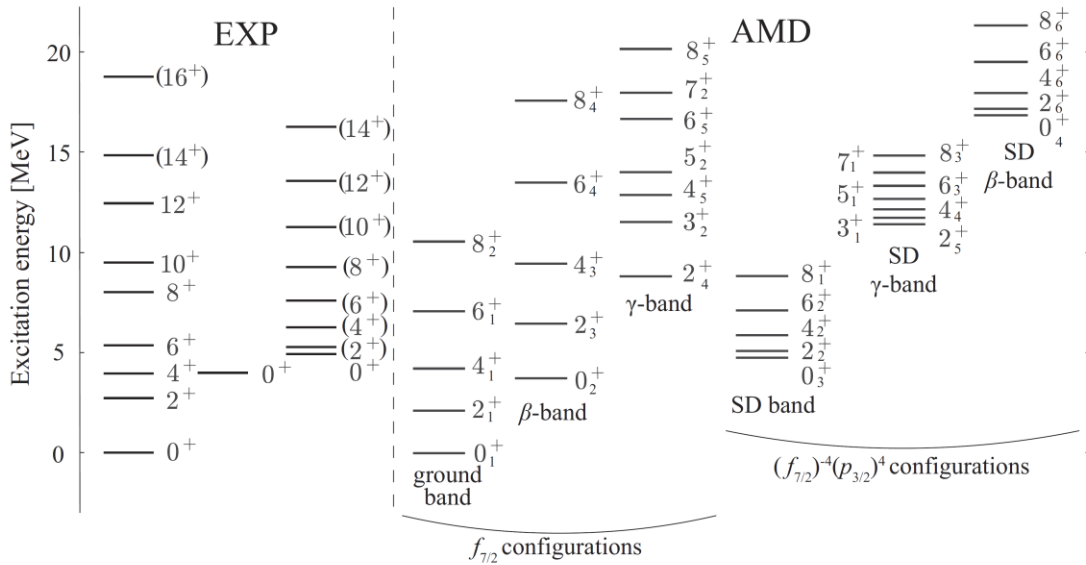
図 1 : 反対称化分子動力学による変分計算で求められた  $^{56}\text{Ni}$  の様々な状態に対応する密度分布。左から、超変形状態(SD),  $\beta$  振動状態, 基底状態にそれぞれ対応する



さらに、反対称化分子動力学モデルの波動関数を重ね合わせ、ハミルトニアンを対角化することで(生成座標法)、励起スペクトルを導出した。この過程で KEK システム B を使用した。その結果図 2 に示す励起スペクトルを得た。観測されているスペクトルを非常によ

く再現するだけでなく、魔法数 28 のエネルギーギャップが縮小することで様々な変形回転帯が現れる事が予言された。この成果は誌上論文として Phys. Rev. C89, 054313 (2014) に発表済みである。

図 2：生成座標法によって求められた  $^{56}\text{Ni}$  の励起スペクトルと実験との比較。

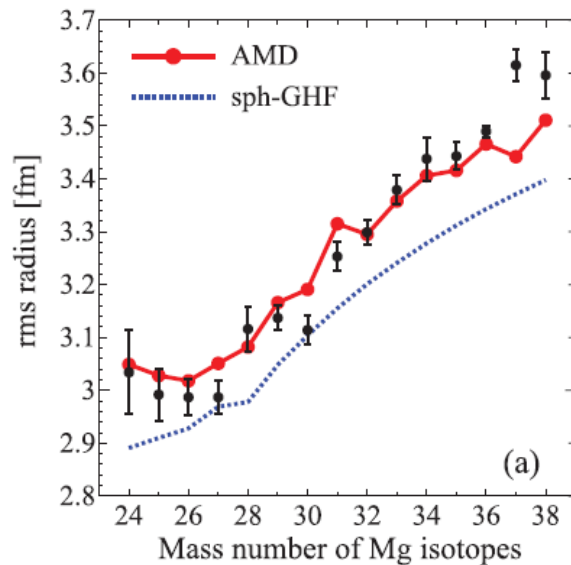


## 2.2 中性子過剰 Mg 同位体の変形、中性子ハロー構造と反応断面積の研究

中性子過剰な Mg 同位体の一つである  $^{32}\text{Mg}$  (陽子数 12, 中性子数 20) は、中性子数が魔法数であるにも拘わらず大きく変形しており、中性子過剰核は、安定核とは異なった魔法数を持つことがよく知られている。近年 RIBF の稼働によって更に中性子の多い同位体の性質が調べられるようになった。例えば、 $^{40}\text{Mg}$  は安定核での次の魔法数 28 を持つ。魔法数 20 から 28 の間に位置する  $^{32}\text{Mg} \sim ^{40}\text{Mg}$  が大きな関心を集めている。

原子核の変形を見るための一つの方法として、反応断面積を同位体に亘って系統的に見、変形核と球形核との系統性の違いを見る方法がある。そのため、反対称化動力学により求めた核子

図 3: 反対称化動力学(赤線)および球形ハートレーフォック計算(青線)によって求めた Mg 同位体の反応断面積。シンボルは実験値



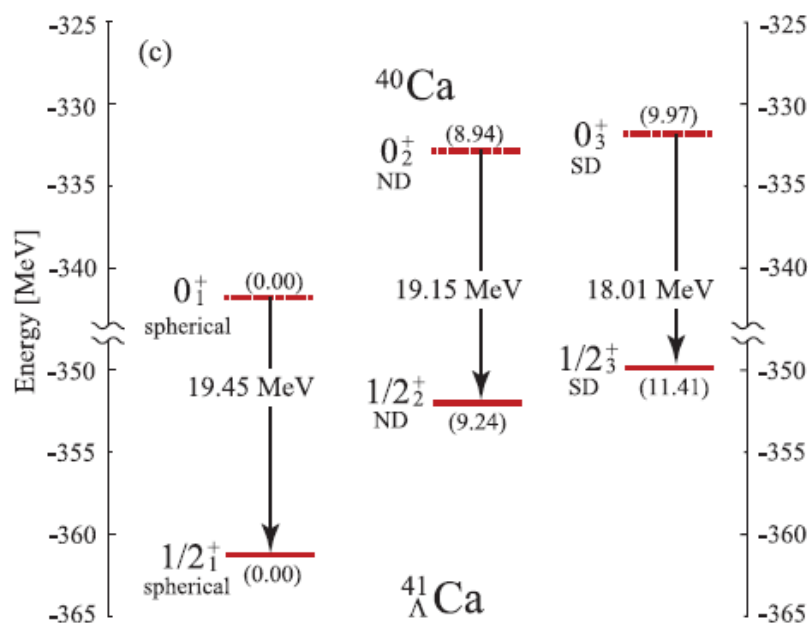
密度分布から反応断面積を求めた。原子核の形状を球形に限定したハートレーフォック計算および実験との比較を図3に示してある。反対称化分子動力学では、中性子過剰なMg同位体は軒並み変形しており、それから求めた反応断面積は実験データの傾向を良く再現する。その一方で、球形に限定したハートレーフォック計算は実験値を常に低く見積もっており、このことから中性子過剰なMg同位体の変形が確認できる。また、 $^{37}\text{Mg}$ の反応断面積は理論による予想よりもかなり大きくなっており、このことから中性子ハロー構造を持っている事が示唆される。反対称化分子動力学による数値計算を実行し、基底状態の核子密度分布を求める際に、KEKシステムBを使用した。この成果は誌上論文としてPhys.Rev. C 89, 044610 (2014)に掲載済みである。

### 3. $^{40}\text{Ca}$ 近傍のハイパー核における超変形状態の研究

2000年代に相次いで発見された $^{40}\text{Ca}$ 近傍核の超変形状態は、その変形の大きさや形状、また超変形魔法数に伴って現れる新しい励起モードの存在などが注目を集めている。本研究では、 $^{40}\text{Ca}$ 近傍核の超変形状態に、ハイペロンが付加した際に起こる構造変化および束縛エネルギーの変化に注目した。その結果以下を明らかにした

- ・ 強く変形した超変形状態の方が、 $\Lambda$ 粒子の束縛エネルギーが小さくなる。変形の度合いが大きいほど、束縛エネルギーの減少量は大きくなるため、束縛エネルギーの測定によって、超変形状態の変形の大きさをある程度決定することが可能である。反対称化分子動力学

図4:  $^{40}\text{Ca}$ の基底状態および超変形状態に $\Lambda$ 粒子が付与した際に起こる束縛エネルギーの変化。超変形状態の方が、 $\Lambda$ 粒子の束縛エネルギーが1.5MeV程度小さくなる



学による計算では、その減少量は  $^{40}\text{Ca}$  の場合約  $1.5\text{MeV}$  である。

・  $^{40}\text{Ca}$  の近傍核には系統的に超変形状態が存在している事を示した。従って、具体的な実験のためには  $^{46}\text{Ti}$  を標的として、電子非弾性散乱( $e,e'K^+$ )反応を行うのが良い。

これらの成果は、誌上論文として *Phys. Rev. C* 89, 024310 (2014) に掲載済み

#### 4. $^{16}\text{C}$ における直鎖クラスター状態の探索.

3つの $\alpha$ 粒子が直線上に並んだ構造を持つ、「 $3\alpha$ の直鎖状態」は50年代に提案されて以降、盛んに研究され、数多くの実験的探索が行われてきたにも拘わらず未だに発見されていない。理論的には、 $^{12}\text{C}$ 原子核の $3\alpha$ の直鎖配位は、直鎖配位からのズレ(鎖が折れ曲がる方向の運動)に大して非常に不安定であるため、理想的な直鎖配位は実現しないと予想されている。一方で、 $3\alpha$ の直鎖状態に余剰中性子が付け加わった場合、則ち中性子過剰な炭素同位体の場合には、余剰中性子が、鎖が折れ曲がる運動を妨げる働きをし、安定な直鎖状態が実現する可能性がある。

そこで、本研究では直鎖構造が実現しうる有力候補の一つである  $^{16}\text{C}$  の励起状態を反対称化分子動力学を用いて調べ、直鎖状態が励起状態に存在するかどうかを調べた。エネルギー変分計算に拘束条件を適用することで、極端に変形した状態の波動関数を求めたところ、実際に  $3\alpha$  の直鎖状態が実現していることが分かった(図5)。更に生成座標法によってスペクトルを求めることで、直鎖状態が回転バンドを形成し、その励起エネルギーは約  $15\text{MeV}$  であることを予言した(図6)。

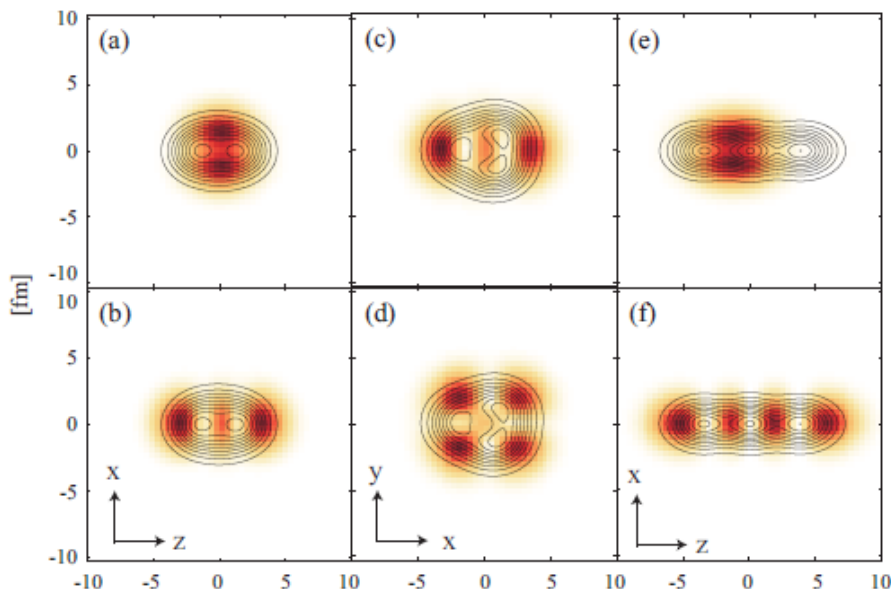
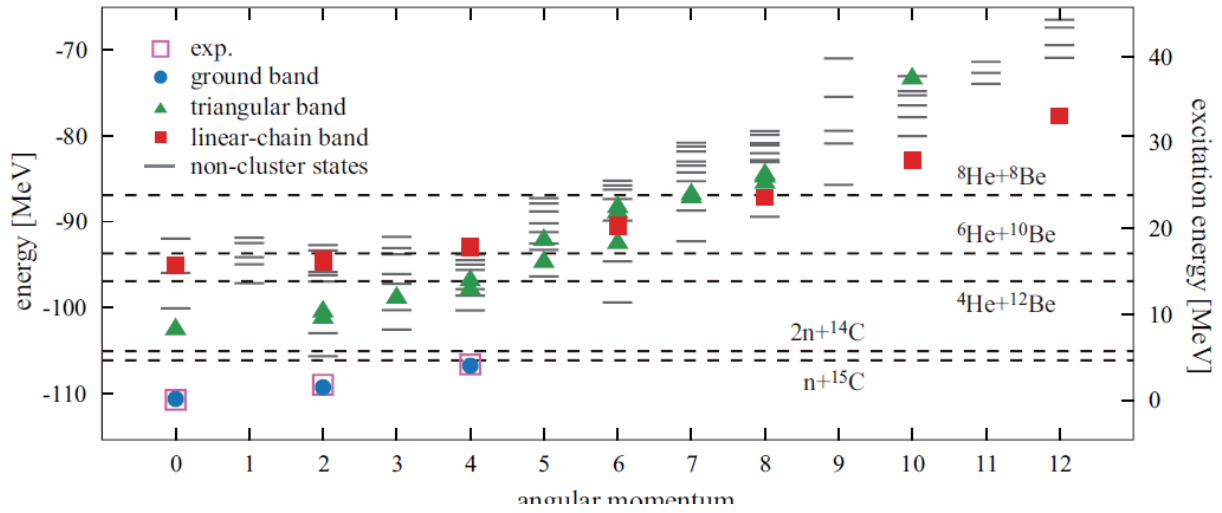


図5:  $^{16}\text{C}$  の様々な状態の密度分布。最も変形した(e)および(f)が直鎖状態を示す。実線は3つの $\alpha$ 粒子に対応する密度。カラープロットは余剰中性子の分布

図 6: 生成座標法によって求めた  $^{16}\text{C}$  の励起スペクトル。横軸を角運動量、縦軸をエネルギーとした。赤四角が直鎖状態に対応し、最もエネルギーが低いもので、約  $15\text{MeV}$  の励起エネルギーに相当する



これらの結果は Phys. Rev. C 誌に誌上論文として投稿中である。