

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007 年度～2010 年度

課題番号：19340054

研究課題名（和文） コズミックバリエーションを超越した次世代精細宇宙論の研究

研究課題名（英文） Precision cosmology beyond the cosmic variance

研究代表者

横山 順一 (YOKOYAMA JUN' ICHI)

東京大学大学院理学系研究科・教授

研究者番号：50212303

研究成果の概要（和文）：ビッグバン後わずか 38 万年の宇宙の物質密度にどのようなムラがあったかを示す宇宙背景放射の温度ゆらぎの観測データから、宇宙開闢時に起こったインフレーション中に生成した密度ゆらぎの様相を探った。その結果、標準宇宙論では 1 万分の 1 以下の確率でしか起こらないズレを発見し、それが宇宙年齢や物質密度等の推定に及ぼす影響を明らかにし、PLANCK 等の次世代の観測にはそのようなズレまで考慮する必要があることを示した。

研究成果の概要（英文）：Anisotropies in the temperature of the cosmic microwave background radiation exhibit density inhomogeneity in the early Universe of age 380kyr. We have probed generation of primordial fluctuations during cosmic inflation which seeded these temperature anisotropies from their observations and discovered a modulation in their spectrum which is realized with the probability less than one in ten thousand and clarified its effects on determination of cosmological parameters to show that it is mandatory to take the modulation into account to analyze the data of PLANCK.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4000000	1200000	5200000
2008 年度	3900000	1170000	5070000
2009 年度	2900000	870000	3770000
2010 年度	2900000	870000	3770000
年度			
総計	13700000	4110000	17810000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

2003 年 2 月に発表された宇宙背景放射全天探査衛星 WMAP の初年度データによって精細観測的宇宙論が幕開けを告げました。その結果、(ほぼ)スケール不変な断熱揺らぎから出発した宇宙項入りコールドダークマターモデル (Λ CDM モデル) が大枠として正しいことが示され、温度・偏光相関の解

析から、初期宇宙にインフレーションが起こり、そのとき密度揺らぎが生成したことが検証されました。さらにマルコフチェーンモンテカルロ法を用いることにより、各種宇宙論的パラメタの値が誤差まで含めて定量的に与えられるようになりました。その反面、初期ゆらぎのスペクトルに単純なべき乗則からのズレ、すなわちスペクトル指数のスケ

ル依存性（ランニングと呼ばれる）が見られたり、再イオン化が予想以上に早く起こったことが判明したため早期天体形成が必要となった、などの新しい謎が加わりました。観測から示唆されたスペクトル指数のスケール依存性は、通常のスローロールインフレーションモデルでは実現できないような大きなものであったため、研究代表者らはこの結果を受けて直ちに、これを実現するインフレーションモデルの構築に取り組みました。その結果、インフレーションが続けざまに2回起これば観測を説明できることを見出し、超重力理論のもとで、これを自然に実現する素粒子モデルを構築することに成功しました。その後、このランニングの値についてはさまざまな混乱が見られましたが、結局誤差がまだ大きく、1年目データのもとでは断定的な結論を得るに至らず、データの蓄積が待たれていました。

2006年3月に発表された3年分の解析データでは、偏光の精度が上がったため、再イオン化時期をより正確に決定できるようになり、以前指摘された早期天体形成の必要性はなくなりました。しかし、スペクトル指数のランニングについては、誤差の減少はほとんど見られず、1年目より有意性は増したものの、依然として 2σ レベルにとどまっています。これは、WMAPの観測誤差は、見込む角度の逆数に対応するマルチポール $l=400$ 程度までは、測定法や解析法を原因とする誤差よりも、観測できる宇宙が一つしかないことに起因するコズミックバリエーション（宇宙論的バラツキ）によるものの方が大きく、今後観測技術がどんなに進歩しても、これ以上の誤差の減少は見込めないところまで来ているためでした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、初期密度ゆらぎのスペクトルとして、単純なべき乗則、またはランニング入りのべき乗則というような簡単なモデルを仮定するのではなく、私たちの住む宇宙自体の持っていた初期状態を逆算し、それに基づいて宇宙の初期状態と宇宙の進化を表す宇宙論パラメータとを包括的に求める方法を開発し、実行することです。

同時に、これまでも示唆されている、単純なインフレーションでは説明できないような密度・温度ゆらぎのスペクトルに関するさまざまな観測データを説明するインフレーションモデルを構築します。そして、これと上述の観測的研究と併せて、初期宇宙の素粒子的進化の時代から宇宙背景放射による観測的宇宙論の時代まで、宇宙の進化を総合的に明らかにすることが目標です。

3. 研究の方法

当初の研究計画では、宇宙背景放射の温度ゆらぎの観測データから初期曲率ゆらぎのパワースペクトルを再構築する方法として、われわれが既に関与したCosmic Inversion法を用い、宇宙の初期状態と宇宙論的パラメータの関係を考察することにしていました。

しかしながら、本研究の手始めとして、より直接的に観測データから初期ゆらぎを再構築する方法として、尤度関数を最大化するという条件の下で行列反転によってこれを求める方法を導入（実はこの方法も研究代表者が発案したのですが、文献を調べているうちに、既にTochini-Valentiniらによってほぼ同様の方法が提唱されていたことが判明し、これについてのプライオリティを主張することはできませんでした）し、Cosmic Inversion法とともに、そのパフォーマンスを疑似データに基づいて比較しました。その結果、最大尤度行列反転法の方がより正確にスペクトルのフィーチャーを再現することがわかりましたので、爾後はこれも用いることとしました。

これらの方法で再構築した初期曲率ゆらぎのパワースペクトルは観測データから再現可能なすべての波数域において値を持つ連続曲線となりますが、各波数での値は統計的に独立ではありません。われわれは、銀河分布からそのパワースペクトルを再現する手法を参考に、誤差のフィッシャー行列を計算し、それを対角化することによって、宇宙背景放射から再構築した初期ゆらぎのパワースペクトルの統計的に独立な成分を取り出す方法を構成し、バンドパワー分割することにしました。それによって、どの波数域に単純なべき乗則からのズレがあるか、統計的に独立に解析することが可能になります。

ここまでの解析は、逆問題としての方法論を用いるものですが、次に、その結果に基づいて、ズレが見られるスケールを中心に、パワースペクトルのフィーチャーを再現し得るテスト関数を各種用意し、今度は正問題として問題を再定義します。すなわちテスト関数から出発した宇宙で得られる温度ゆらぎ・温度偏光相関を計算し、観測データと比較して、マルコフチェーンモンテカルロ法によってテスト関数のパラメータと宇宙論的パラメータを双方同時に決定するのです。これによって、われわれの宇宙がどのような初期状態から始まったか、単純なべき乗則からコズミックバリエーションを超えるフィーチャーを持って生まれたかがわかります。さらに、このようなフィーチャーの有無によって宇宙論的パラメータの決定がどのように影響を受けるかも解析することができます。

以上は温度ゆらぎと温度とEモード偏光の相関に基づいた研究ですが、このほか今後有

望な観測量として、宇宙背景放射のBモード偏光を挙げることができます。これは密度ゆらぎではなく、テンソルゆらぎすなわち重力波モードから生成するものであるため、テンソルゆらぎの研究も重要です。

本研究ではこのことにも留意し、観測的に示唆される初期宇宙進化の理論を総合的な見地から構築します。その際、インフレーション理論の持つパラメタとしては、インフレーション中のスカラー場の一様成分のダイナミクスのスローロールパラメタと共に、ゆらぎの伝播速度である音速が重要であることが近年指摘されています。そこで、音速を新たな自由度として取り入れ、理論的な考察を行います。

4. 研究成果

(1)まず、宇宙背景放射の温度揺らぎの角度パワースペクトルから初期揺らぎのパワースペクトルを再構築する研究に関しては、はじめに、これまでに開発した Cosmic Inversion 法によって再構築した初期曲率揺らぎのパワースペクトルについて、誤差のフィッシャー行列を計算し、それを対角化するような、統計的に独立なモードを求める手法を作り、実行しました。その結果、再構築したパワースペクトルには、図のように単純なべき乗則から統計的に有意にずれている部分があることを見出しました。

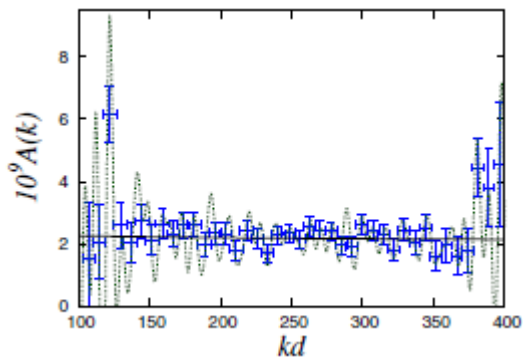


図1 Cosmic Inversion 法によって再構築した曲率ゆらぎのパワースペクトル 横軸は波数でdは最終散乱面までの距離、縦軸は波数の3乗込みパワースペクトル

次に、この再構築の問題に関し、尤度関数が最大になるパワースペクトルを変分原理によって求める手法を用い、同様な解析を行い、図2のように $kd=125$ 付近に有意なズレを見出しました。

このズレの位置は、Cosmic Inversion 法で現れた位置とずれていますが、このずれ方は疑似データによるテスト計算の結果と無矛盾であり、最大尤度行列反転法の方がより正確な値を与えています。

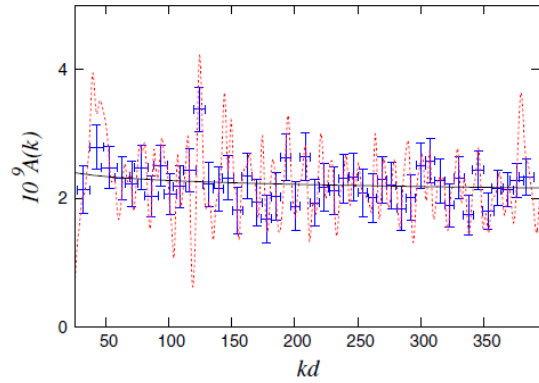


図2 最大尤度行列反転法によって再構築した曲率ゆらぎのパワースペクトル

以上の結果に基づいて、今度は正問題としてのアプローチを行いました。 $kd=125$ 付近に変調を入れたパワースペクトルのさまざまなモデルに基づいてマルコフチェインモンテカルロ法の計算を行い、図3のように、温度揺らぎの観測をよく再現するスペクトルを宇宙論的パラメタの値と共に求めました。その結果、観測が単純なべき乗則のパワースペクトルから得られている確率は1万分の1以下に過ぎないことを見出しました。また、このような変調を取り入れるか否かで、宇宙論的パラメタの推定が PLANCK で予想される精度以上にずれてしまうことを明らかにし、次世代の観測では単なるべき乗則を超えたパワースペクトルを考慮することが必須であることを明らかにしました。本研究結果は **科研費ニュース** に紹介されました。

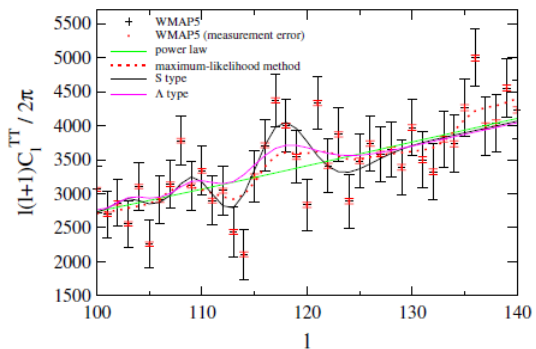


図3 マルコフチェインモンテカルロ法で求めたスペクトルと温度揺らぎの観測の比較 横軸は角度マルコフポール 縦軸は温度パワースペクトル

さらに、このスケールにおいて温度揺らぎの3点相関を観測的に求め、同様な変調が見られるかどうかを現在解析中です。3点相関はパワースペクトルと比べて大きな誤差を持つため、有意な結果を得るのは困難ですが、べき乗則からのズレがある方がフィットが

良くなるのは事実のようです。現在論文を執筆中です。

こうして、初期密度ゆらぎのパワースペクトルに変調が見られるとなると、それを理論的に再現することが大きな課題となります。その一つの可能性として、インフレーション中に音速が変化した場合の曲率ゆらぎのパワースペクトルを求めました。図4のように変調は見られるものの、一カ所だけに大きな変調を作るのは容易ではありません。

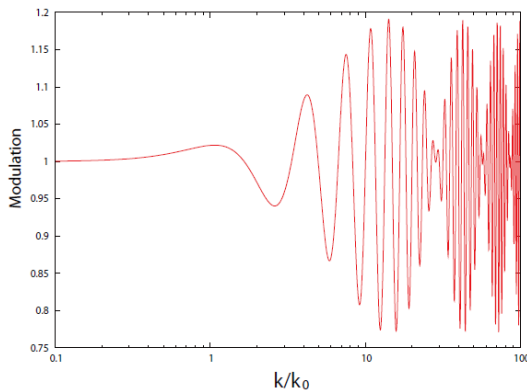


図4 インフレーション中に音速が突然変化した場合のパワースペクトルの変調の例

一方インフラトンと結合した重い場がインフレーション中に崩壊する場合に得られる変調は観測とよく一致することを見出し、これについては論文を執筆中です。

(2)このほか、インフレーションの実現機構とその周辺の素粒子的宇宙の研究としては、以下のような成果が得られました。

①インフレーション中に原始磁場が生成する条件を、超重力理論に基づいて一般的に解析しました。

②インフレーションの素粒子モデルとして、標準理論のヒッグス機構が働かない場合、どのような可能性があるか検討し、重力定数がスカラー場の期待値として与えられるモデルに於いてうまくいく実例を与えました。

③ガリレオン対称性を用いた新たなインフレーションモデルを提唱し、得られるテンソルゆらぎが近い将来宇宙背景放射の偏光として観測可能であることを示しました。

④このガリレオン相互作用を用いると、標準モデルのヒッグス場によってインフレーションを引き起こすことができることを示しました。

⑤インフレーションは密度ゆらぎのほか、Bモード偏光の種になるテンソルゆらぎを生成しますが、そのスペクトルはインフレーション後の再加熱温度に依存した形状を持つため、これを偏光と重力波探査機DECIGOとで観測すると、宇宙の熱史を明らかにできることを示しました。

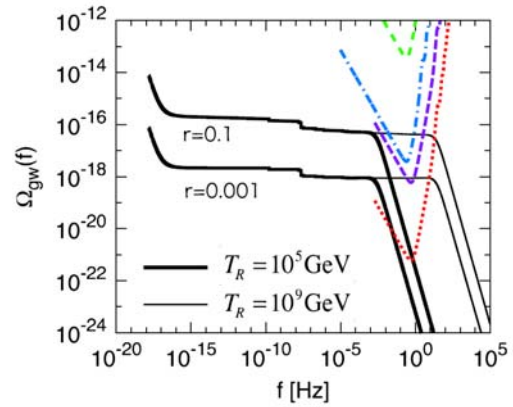


図5 再加熱温度とテンソル・スカラー比の値をかえて描いたテンソルゆらぎのスペクトル

⑤素粒子物理のモジュライ問題について、モジュライ場がもたらす等曲率ゆらぎから宇宙論的に強い制限が得られることを示しました。

⑥バリオン物質の起源に関する研究として、超対称性理論のスカラーポテンシャルの平坦方向が複数共存する場合を考察し、正しい物質質量が得られる条件を求めました。

⑦宇宙背景放射の温度ゆらぎの非等方性から、宇宙の晴れ上がり時から現在までに微細構造定数がどの程度変化しても良いか、その制限を求めました。特定のストリングモデルを用いることにより、陽子・電子の質量比の変化も併せて考察することにより、強い制限が得られることを示しました。

⑧密度ゆらぎが特定のスケールに大きなピークを持つような場合、特定の質量の原始ブラックホールができます。このとき2次摂動論によってテンソルゆらぎである重力波も同時に生成します。われわれはブラックホールの質量とその生成量と重力波のスペクトルを比較することにより、重力波の観測から原始ブラックホールの存在量に強い制限が得られることを示しました。

⑨加速膨張宇宙のモデルである $f(R)$ 重力理論における宇宙パラメタの挙動と密度ゆらぎの発展を数値的に求め、この理論の問題であった、小スケールの密度ゆらぎの異常成長がニュートリノ質量の導入によって回避されることを示す一方、この理論の方が Λ CDM モデルよりも観測によく合う可能性を指摘しました。

⑩非線形摂動論を用いて、インフレーション中にインフラトン場が静止する際に、従来減衰モードに起こると考えられていた密度ゆらぎの発散は、問題を引き起こさないことを示しました。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 33 件)

中島正裕、齊藤遼、高水雄一、横山順一

“The effect of varying sound velocity on primordial curvature perturbations”
Progress of Theoretical Physics 125
(2011) 1035-1052

高水雄一、横山順一 “Full nonlinear growing and decaying modes of superhorizon curvature perturbations” Physical Review D83(2011) 043506

鎌田耕平、小林努、山口昌英、横山順一
“Higgs G-inflation” Physical Review D83
(2011) 083515

小林努、山口昌英、横山順一 “Inflation driven by the Galileon field” Physical Review Letters 105(2010)231302

本橋隼人、A.A.Starobinsky、横山順一
“Phantom boundary crossing and anomalous growth index of fluctuations in viable f(R) models of cosmic acceleration”
Progress of Theoretical Physics 124
(2010) 887-902

齊藤遼、横山順一 “Gravitational-Wave Constraints on Abundance of Primordial Black Holes” Progress of Theoretical Physics 123 (2010) 867-886

Barnard Carr, 郡和範, 仙洞田雄一, 横山順一
“New cosmological constraints on primordial black holes” Physical Review D81 (2010) 104019

市來淨與、永田竜、横山順一 “Cosmic Discordance: Detection of a modulation in the primordial fluctuation spectrum” Physical Review D81 (2010) 083010

L.Lorenz, J.Martin, 横山順一
“Geometrically Consistent Approach to Stochastic DBI Inflation” Physical Review D82 (2010) 023515

本橋隼人、A.A.Starobinsky、横山順一
“Matter power spectrum in f(R) gravity with massive neutrinos” Progress of Theoretical Physics 124(2010) 541-546

鎌田耕平、横山順一 “On the realization of the MSSM inflation” Progress of Theoretical Physics 122(2010)969-986

中山和則、横山順一 “Gravitational Wave Background and Non-Gaussianity as a Probe of the Curvaton Scenario” JCAP 1001 (2010) 010 (17pages)

中島正裕、市川和秀、永田竜、横山順一
“Constraining the time variation of the coupling constants from cosmic microwave background: effect of Λ_{QCD} ” JCAP 1001

(2010) 030 (22pages)

齊藤遼、横山順一 “Gravitational wave background as a probe of the primordial hole abundance” Physical Review Letters 102 (2009) 161101 (4pages)

M.Lemoine, J.Martin, 横山順一

“The moduli problem at the perturbative level” Europhysics Letters 89 (2010) 29001(5pages)

M.Lemoine, J.Martin, 横山順一

“Constraints on moduli cosmology from the production of dark matter and baryon isocurvature fluctuations” Physical Review D80(2009)123514 (40pages)

高橋智、山口昌英、横山順一、横山修一郎
“Gravitation Dark Matter and Non-Gaussianity” Physics Letters B678
(2009) 15-19

本橋隼人、A.A.Starobinsky、横山順一

“Analytic solution for matter density perturbations in a class of viable cosmological f(R) models” International Journal of Modern Physics D18 (2009) 1731-1740

永田竜、横山順一 “Band-power reconstruction of the primordial fluctuation spectrum by the maximum likelihood reconstruction method” Physical Review D79 (2009) 043010

中島正裕、永田竜、横山順一 “Constraints on the time variation of the fine structure constant by the 5-year WMAP data” Progress of Theoretical Physics 120 (2008) 1207-1215

永田竜、横山順一 “Reconstruction of the primordial fluctuation spectrum from the five-year WMAP data by the cosmic inversion method with band-power decorrelation analysis” Physical Review D78(2008)123002

中山和則、齊藤俊、諏訪雄大、横山順一
“Space laser interferometers can determine the thermal history of the early Universe” Physical Review D77 (2008) 124001

中山和則、齊藤俊、諏訪雄大、横山順一
“Probing reheating temperature of the universe with gravitational wave background” JCAP 0806(2008)020

N.Kaloper, L.Sorbo, 横山順一

“Inflation at the GUT scale in a Higgsless Universe” Physical Review D78 (2008) 043527

鎌田耕平、横山順一 “Affleck Dine leptogenesis via multiple flat directions” Physical Review D78 (2008) 043502

辻川信二 K.Uddin, 水野俊太郎, R.Tabakol

横山順一 “Constraints on scalar-tensor models of dark energy from observational and local gravity tests” Physical Review D77(2008)103009
永田竜、横山順一 “Band-power reconstruction of primordial perturbation spectrum from CMB anisotropy” Modern Physics Letters A23 (2008) 1478-1488
J. Martin, 横山順一 “Generation of large-scale magnetic fields in single-field inflation” JCAP 0801(2008)025 (pp1-32)
千葉剛、姫本宣朗、山口昌英、横山順一 “Effective search templates for a primordial stochastic gravitational wave background” Physical Review D76 (2007) 043516 (pp1-7)
須山輝明、山口昌英 “Non-Gaussianity in the modulated reheating scenario” Physical Review D77(2008)23505(pp1-8)
門田健司、山口昌英 “D-term chaotic inflation in supergravity” Physical Review D76(2008)103522(pp1-5)
小林洗、向山信治、木下修一郎 “Constraints on warped DBI inflaton in a warped throat” JCAP 0801(2008)28
木下修一郎、仙洞田雄一、向山信治 “Instability of de Sitter brane and horizon entropy in 6D braneworld” JCAP 0705(2007)23505

[学会発表] (計 13 件)

横山順一 “G-inflation” Beyond Standard Models and Dark Sides of Our Universe 上海交通大学 2010 年 11 月 19 日
横山順一 “Gravitational wave constraints on the abundance of primordial black holes” 11th Asia Pacific Physics Conference 上海光大会展中心 2010 年 11 月 16 日
横山順一 “Gravitational waves as a probe of the early Universe” Gravitational Waves 2010, University of Minnesota, 2010 年 10 月 15 日
横山順一 “ m_ν and w_{eff} in $f(R)$ gravity” The observational pursuit of dark energy, California Institute for Technology, 2010 年 10 月 8 日
横山順一 “Cosmological constraints on time variation of the fundamental constants” Fundamental Physics using Atoms 2010 大阪大学 2010 年 8 月 8 日
横山順一 “Phantom crossing and anomalous growth index of density fluctuations in $f(R)$ gravity” Hot topics in modern cosmology, Cargese, France 2010 年 5 月 10 日

横山順一 「インフレーションと重力波」日本物理学会年次大会 2010 年 3 月 22 日 岡山大学
横山順一 “Cosmology with stochastic gravitational waves” CosPA 2009 メルボルン大学 オーストラリア 2009 年 11 月 20 日
横山順一ほか DECIGO チーム 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (21) サイエンス 1」日本物理学会秋期大会 甲南大学 2009 年 9 月 10 日
横山順一 “Gravitational waves and the early Universe” PASCOS2009 DESY, Germany 2009 年 7 月 9 日
横山順一 “What can we learn about cosmology by observing only one Universe?” RESCEU symposium on astroparticle physics and cosmology 東京大学 2008 年 11 月 13 日
横山順一 “Primordial fluctuation spectrum: anomaly found from CMB temperature and polarization data” CosPA 2008 韓国 APCTP 2008 年 10 月 29 日
横山順一 「宇宙から素粒子へ」日本物理学会北海道大学 2007 年 9 月 22 日

[図書] (計 3 件)

横山順一 「電磁気学」講談社 2009 年 278 ページ
佐藤勝彦、二間瀬敏史、横山順一ほか 「宇宙論 I 宇宙の始まり」日本評論社 2008 年 246 ページ
横山順一、竹内薫 「宇宙の向こう側」青土社 2008 年 198 ページ

[その他]

ホームページ等
<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山順一 (YOKOYAMA JUN'ICHI)
研究者番号: 50212303

(2) 研究分担者

山口昌英 (YAMAGUCHI MASAHIDE)
研究者番号: 80383511 (初年度)
向山信治 (MUKOHYAMA SHINJI)
研究者番号: 40396809 (初年度)

(3) 連携研究者

山口昌英 (YAMAGUCHI MASAHIDE)
研究者番号: 80383511 (2 年目以降)
向山信治 (MUKOHYAMA SHINJI)
研究者番号: 40396809 (2 年目以降)