

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02900

研究課題名(和文) 高エネルギー原子核衝突反応の統合モデルの構築とQGP物性物理

研究課題名(英文) Development of unified model for high-energy nuclear collisions and physics of quark gluon plasma

研究代表者

平野 哲文 (HIRANO, TETSUFUMI)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40318803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の開闢"ビッグバン"直後、約10マイクロ秒後に存在していた超高温物質「クォークグルーオンプラズマ」の物性を研究する目的で、高エネルギー原子核衝突実験が行われている。この衝突反応は複雑なステージを経るため、そのステージ毎に適切なモデル化を行い、反応全体を記述する動的モデルを構築することが肝要である。

本研究課題では衝突反応の全体を記述し、クォークグルーオンプラズマ流体の熱揺らぎが測定量に及ぼす影響を明らかにした。また、新たにコア-コロナ描像に基づくイベントジェネレータの構築を行い、陽子同士のような小さい衝突系におけるクォークグルーオンプラズマ流体の生成割合を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当該分野においては、クォークグルーオンプラズマの物性を明らかにすることが大きな目標の一つである。その中で、特にずれ粘性などの輸送係数と密接に関連がある流体揺らぎに着目した解析を行い、初めて実験結果を解釈する上での役割を明らかにした。今後、クォークグルーオンプラズマの物性を精査していく上で新たなアプローチを示した。また、コア-コロナ描像に基づいた反応の記述したことで、どの程度の割合で対象とするクォークグルーオンプラズマが生成されたかと定量的に導出することが可能になった。このことはより精密にクォークグルーオンプラズマ物性を引き出す上での新たなベースラインとなるアプローチと言える。

研究成果の概要(英文)：High-energy nuclear collision experiments have been performed toward understanding of deconfined nuclear matter "quark gluon plasma (QGP)" which existed 10 micro seconds after the Big Bang. Because the reaction of high-energy nuclear collisions undergoes highly complicated processes, it is anticipated to model each stage of reactions through a proper picture and to unify them as a dynamical model.

In this reseach, we describe the space-time evolution of high-energy nuclear collisions using a unified dynamical model based on hydrodynamic picture of the QGP. We first revealed the role of hydrodynamic fluctuations in observables. We next developed a new class of dynamical model based on the core-corona picture which contains equilibrated and non-equilibrated components. Using this new model, we quantified the fraction of the QGP fluids for each collision system and found it is smoothly changing as increasing the number of produced hadrons regardless of collision system nor energy.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：クォークグルーオンプラズマ 高エネルギー原子核衝突反応 相対論的流体力学 流体揺らぎ コア-コロナ描像

1. 研究開始当初の背景

クォークやグルーオンのダイナミクスを記述する基礎理論は量子色力学である。量子色力学は色荷(カラー)に対する非可換ゲージ理論であり、エネルギースケールの増加と共に結合定数が減少する(漸近的自由性)。一方、色荷を持ったクォークやグルーオンは単体で発見されたことはなく、通常はカラー三重項であるハドロンとして存在する(カラーの閉じ込め)。ハドロンとして束縛されたクォークやグルーオンの超高温プラズマ状態を創り出し、その物性を探求する超高エネルギー原子核衝突実験がブルックヘブン米国立研究所(BNL)の RHIC や欧州原子核共同研究機構(CERN)の LHC といった加速器において行われている。この物質はビッグバン直後、10数マイクロ秒後に我々の宇宙全体を満たしていたとされており、「クォークグルーオンプラズマ(QGP)」と呼ばれる。

当初、漸近的自由性のためにプラズマを構成するクォークやグルーオンはほぼ相互作用のしない理想気体のような状態になると考えられてきた。この予想に反し、超高エネルギー原子核衝突実験によって見つかった QGP は完全流体のように振る舞い強結合性を示すことが明らかになった。この原子核衝突実験で得られた実験結果を解析するツールがこの「QGP の強結合性」を明らかにする上で重要な役割を果たしてきた。この発見に後押しされ、QGP の物理は単に新物質発見のステージからその物性物理を展開するステージへと昇華され、より成熟した分野になりつつある。一方、原子核衝突反応の様相は、強結合性のために基礎理論である量子色力学から直接解析することは未だ困難であり、現象論的手法が必要不可欠である。今後は実験結果とその現象論的解析を通して、精密化する方向に向けて、多角的な視点から QGP 物性研究を進める必要があった。

このような QGP 流体は重イオン同士の衝突だけでなく、陽子などの小さい原子核が関わる衝突系においても生成が示唆されていた。果たして、流体のようなマクロな描像がどこまで小さい衝突系にも適用するのか？また、適用可能であればその機構は何であるのか？も重要な課題となっていた。このことは、陽子同士の衝突のような小さい衝突系から、鉛同士の衝突のような大きい衝突系までを、一つの枠組みで統一的に記述することの重要性を示唆している。

2. 研究の目的

本研究課題では、高エネルギー原子核衝突反応を統合的に記述する枠組みを構築し、それを用いて下記の課題を遂行することを当初の目的としていた。

(1) QGP の流体揺らぎから解き明かす輸送係数の精密決定

QGP の物性量の代表的な物理量の一つに輸送係数がある。流速の勾配によって引き起こされる応力の大きさに関わるのがずれ粘性係数、系の膨張に対する圧力の補正に関わるのが体粘性係数である。揺動散逸関係を通して現れる因果的な流体揺らぎを取り入れた流体力学に基づく数値シミュレーションを行い、QGP の流れに関わる物理量の解析から、QGP 物性の中心的な物理量である輸送係数の温度依存性を決定する。

(2) QGP 流体中を通過するジェットが引き起こす波動現象を用いた QGP 物性の解析

QGP 中を光速近いジェット(大きなエネルギーを持ったクォークやグルーオンの束)が通過すると QGP 中を伝播する音波の干渉として衝撃波「マッハコーン」が現れる。このマッハコーンが観測にどのように現れるかを予言し、実験グループへ提案する。このマッハコーンは音速(音速の2乗は圧力をエネルギー密度で微分したもの)の情報を持つため、実験結果の解析から QGP の最も基本的な物性量の一つである状態方程式の情報を引き出す。

(3) カイラル磁気効果に代表される QGP の電磁場に対する応答現象の発見に向けた理論的解析

光速近くに加速された正の電荷を持つ原子核は、衝突軸に垂直な面内に強い電磁場を作る。近年、QGP 中のクォークのカイラリティが不釣り合いになると(右巻きクォークと左巻きクォークの数に差が現れると)この強い磁場に沿って散逸の全くない電流が流れる(カイラル磁気効果)ことが分かってきた。通常の散逸を伴う電気伝導を含め、QGP の電磁場に対する応答を統一的に記述し、この新奇な現象を発見するための観測量の提案を行う。

3. 研究の方法

(1) 高エネルギー重イオン衝突反応を記述するための相対論的流体力学に基づく統合的動的模型は代表者の平野や分担者の奈良を中心に構築されてきた。当初は QGP 流体を完全流体として記述していたが、本研究課題で雇用した博士研究員の村瀬によって QGP 流体の記述は、いわば第3世代の流体である「揺らぎ流体」に拡張された。本研究課題では、この揺らぎ流体を取り入れた統合的動的模型を基に、高エネルギー重イオン衝突反応の解析を行った。また、「揺らぎ」の重要性に着目し、衝突軸に垂直な平面における QGP 流体の初期空間分布の揺らぎに関しては、分担者の奈良らによって構築されたモンテカルログラウパー模型を取り入れた。また、衝突軸方向の初期空間分布の揺らぎは代表者らによってイベントジェネレータ PYTHIA とモンテカルログラウパー模型を拡張したモンテカルロ BGK 模型として取り入れた。

揺らぎ流体に基づく統合的動的模型の構築は、この科研費によって雇用した博士研究員の村瀬によって行われた。この模型によるシミュレーションと計算結果の解析は主に研究協力者であり、代表者の研究室の学生であった坂井によって行われた。また、QGP 流体の衝突軸方向の分布に対する揺らぎを記述する模型の構築は、研究協力者であり代表者の研究室の学生であった川口によって行われた。全体的な統括は、この科研費によって雇用した博士研究員の村瀬と代表者の平野によって行われた。

(2) QGP 流体背景中を通過するジェットは、QGP 流体との相互作用を通してエネルギー損失を起こし、背景流体の膨張ダイナミクスに影響を与える。エネルギー運動量保存則を解く流体力学の立場では、湧き出し項を含む相対論的流体方程式を用いて記述することができる。この枠組みは分担者の橋によって構築されたものを用いた。研究期間中に、この枠組みが衝突初期の QGP 流体を動的に生成する機構に適用できることを見出した。イベントジェネレータ PYTHIA で生成されたパートンから、時々刻々、それらのパートンが存在する場所ごとに QGP 流体を生成するという全く新しい初期条件に基づく流体模型を構築した。これを「動的初期化模型」と呼んでいる。本来、初期値問題として、ある初期時刻に空間全体で流体場の初期条件を課す従来の流体模型とは一線を画すものである。さらに、動的初期化に対して、流体を作るもとなるパートンの空間的な密度や、個々のパートンの軌跡、運動量の大きさも考慮に入れた「コア - コロナ描像に基づく動的初期化模型」の構築も行った。ここではコア成分は QGP 流体のような局所平衡化にある物質を、コロナ成分は QGP 流体では記述できない非平衡パートンを表している。

QGP 流体中を通過するジェットのシミュレーション、および、動的初期化模型の構築は、研究協力者である代表者の研究室の学生であった岡井によって行われた。また、コア - コロナ描像を取り入れた動的初期化模型の構築は、研究協力者であり代表者の研究室の学生である金久保によって行われた。全体的な統括は、代表者の平野と分担者の橋により行われた。また、分担者の奈良も模型の構築において多くの助言を行うとともに、比較的エネルギーの低い重イオン衝突反応の解析を中心的に行った。

(3) 高エネルギー重イオン衝突反応における電磁場の応答は、まずは加速された重イオンが周りに作る電磁場を外場として扱うことで取り入れ、それに対する応答として、カイラル磁気効果を含む構成方程式を合わせて解いた。ただし、この課題は発展が目覚ましく、先行研究を超える模型の構築が困難であったため、研究期間中の大きな発展は見られなかった。そのため、以下の研究成果では特に触れていない。

4. 研究成果

それぞれの研究課題における成果は以下のようにまとめられる。

(1) QGP の流体揺らぎから解き明かす輸送係数の精密決定

QGP 流体の初期空間分布の衝突軸方向における揺らぎを取り入れるべく、イベントジェネレータ PYTHIA でハドロンを生成したのち、個々のハドロンが流体の源となる仮定で相対論的流体方程式の初期条件を構築した。その際に衝突初期の原子核効果を取り入れるため、BGK 模型を採用したところ、衝突軸方向の運動量分布であるラピディティ分布の形状が非常によく再現できることが分かった。このことは、イベントジェネレータ PYTHIA と BGK 模型を組み合わせたモンテカルロ BGK 模型が衝突初期のエントロピー生成の様子を非常によく捉えていることを示している。

揺動散逸関係を通して、ずれ粘性はそれに付随する流体揺らぎを伴う。この流体揺らぎを通して、QGP 流体の輸送係数に迫るべく、これを取り入れた統合的動的模型を用いて、CERN の大型ハドロン衝突型加速器 LHC における鉛相互衝突反応を解析した。ずれ粘性に敏感な物理量と言われている楕円型フローを解析したところ、流体揺らぎの影響はそれほど大きくはなかった。一方、衝突軸方向に関する楕円型フローの相関を調べてみると、完全流体、粘性流体では相関が保たれる傾向にあったが、流体揺らぎを取り入れた計算では衝突軸方向の運動量である(擬)ラピディティの差が大きくなるにつれて相関が破れ、実験結果の振る舞いと同様の傾向が見られた。このことは、この相関量を通して、QGP 流体の輸送係数を精査できる可能性を示している。

(1) - の解析を踏まえ、この相関量をより精密に再現するために、(1) - で構築した模型を利用して、生成された QGP 流体の初期空間分布が衝突軸方向に揺らぐ影響を取り入れた。流体揺らぎと空間分布の揺らぎはそれぞれ異なる中心度(衝突反応の起こり具合)依存性を持つことが分かり、結果として、この両者の揺らぎが協奏し、実験結果の振る舞いを再現することが分かった。

(2) QGP 流体中を通過するジェットが引き起こす波動現象を用いた QGP 物性の解析

QGP 流体中を多数のミニジェットがランダムな方向に通過することで引き起こす流速の揺らぎを解析した。完全に等方的に膨張する QGP 流体を用意し、その中を多数のミニジェットが通過することでランダムな擾乱が与えられる。これによって引き起こされた膨張の非等方性を解析するために、非等方フロー係数と呼ばれる方位角方向のフーリエ級数を導出した。本来、このような非等方性は、衝突反応における QGP 流体の初期空間分布の揺らぎから引き起こされると考えられてきたが、多数のミニジェットが QGP 流体を通過する際に引き起こす擾乱も、有限な非等方フローの源となりえることを示した。

QGP 流体を通過するジェットを記述するために用いられてきた湧き出し項を含む相対論的流体方程式の枠組みを、衝突初期の QGP 流体生成に適用した。(1) - で構築した模型を用い

て衝突直後のパートンの位相空間分布関数を計算し、QGP 流体が真空から湧き出す源とみなすことで、QGP 流体シミュレーションを実行した。他の模型と比較して、この動的初期化模型の有利な点は、QGP 流体の初期条件に衝突反応によって作られたパートンのエネルギーと運動量を直接反映させることができる点にある。これにより、ランダムな方向を持つ初期のパートンの運動量分布の帰結として、生成された QGP 流体の初期横フローの揺らぎを、衝突初期のパートン生成ダイナミクスに基づき導入することができた。また、QGP 流体の初期の形状だけでなく、衝突直後のパートンの運動量も非等方フローに影響を与えることから、自然な形で衝突軸に垂直な運動量方向の非等方フローの相関とその破れを議論することができるようになった。この課題で、初めて「動的初期化模型」の提唱を行った研究とみなすことができる。

(2) - で構築した動的初期化模型のアイデアを、衝突エネルギーにして核子対あたり数ギガ電子ボルト程度の反応に適用した。衝突エネルギーがそれほど大きくない場合、衝突する原子核は十分にローレンツ収縮しておらず、超高エネルギーの衝突反応のような一瞬ではなく有限の時間をかけて互いの原子核をすり抜ける。そのため衝突によって生成されたハドロン座標空間分布は、空間方向だけでなく時間方向にも広がっている。そのため、初期時刻に流体方程式の初期条件を与える枠組みでは、「いつ」流体をスタートさせるかという不確実性があったが、動的初期化模型を適用することで、時々刻々、流体を作ることができるようになり、この衝突エネルギー領域における新しい時空発展の描像を築き上げることができた。また、コア - コロナ描像を簡易な模型で取り入れ、粒子比の衝突エネルギー依存性を解析したところ、実験結果の振る舞いとよく一致した。非等方フロー係数など、すべての物理量において、良い一致が見られたわけではないが、粒子比という基本的な物理量においてコア - コロナ描像がこの衝突エネルギーにおける粒子比と言ったバルクの物質に関わる現象をよく捉えていることを示した。

(2) - で構築した動的初期化模型に対して LHC のような超高エネルギーの衝突反応においてもコア - コロナ描像を取り入れるために、模型の拡張を行った。動的初期化模型の段階では、単に生成されたパートンがその時々刻々の運動量に比例した運動量を失って流体に流し込んでいた。この比例係数には、パートンが密なところでは大きく、疎なところでは小さく、また、エネルギーが大きいところでは小さく、小さいところでは大きく、といった流体化で期待される物理現象を取り入れた。これにより、陽子同士衝突から鉛同士衝突までを一つの枠組みで記述し、マルチストレンジハドロンとパイ中間子の粒子比の実験結果の振る舞いをよく再現することができた。この物理量は、系が完全に熱化学平衡にあっても、完全に非平衡にあっても、一定値を取ると考えられている。一方、実験結果は生成粒子数の関数として連続的に増加している。この課題によって、系が部分的に QGP 流体になり、その割合が生成粒子数とともに増加することで、実験結果の振る舞いを記述できることが分かった。

(2) - で構築した模型を使い、模型パラメータの二乗推定を行うことで、生成されたハドロンパイ中間子に対する粒子比の解析を詳細に行った。また、陽子同士衝突や鉛同士衝突だけでなく、陽子鉛衝突やキセノン同士の衝突といった異なる衝突系にも適用し、粒子比が衝突系によらず生成粒子数の関数として滑らかに増加することを示した。また、アメリカのブルックヘブン国立研究所(BNL)の相対論的重イオン衝突型加速器 RHIC における金同士衝突の解析、CERN の将来計画の一つである Future Circular Collider における陽子同士衝突の解析も行い、粒子比は衝突エネルギーにも依らず、生成粒子数の関数として滑らかに振る舞うことも示した。このことは、コア成分である QGP 流体が衝突反応によってどの程度作られたかは、衝突系や衝突エネルギーに依らず、生成粒子数で決まることを示している。

(2) - の解析を行うことで、大きく分けて2つの問題点が明らかになった。一つは最終状態のハドロン間の相互作用が欠如しているため、陽子とパイ中間子の比に見られる非単調な振る舞いを記述できないこと、もう一つはジェットにおけるシャワーパートンのように、軌跡は交わらないが、空間的に近いパートン同士が「密」とであると判定され想定以上にコア成分が作られてしまうことである。前者の問題は、QGP 流体の時空発展が終わったあとに、流体超曲面上でハドロンサンプリングを行い、それを初期条件としたハドロンカスケードシミュレーションを行った。生成粒子数が多い、すなわち、生成陽子数も生成反陽子数も大きい衝突事象で終状態に陽子 - 反陽子対消滅反応が起こりやすくなり、結果として陽子とパイ中間子の粒子比の非単調な振る舞いを再現することができた。後者は、コア - コロナ描像に基づく動的初期化の模型の大幅な改良を行った。毎時刻ステップに、パートンの軌跡を計算することで、注目しているパートンと衝突しうるパートンのみを考慮し、距離が近くても軌跡が交わらないパートン同士は動的初期化には関与しないという描像を取り入れた。これにより、本来、動的初期化の影響を受けるべきではない陽子同士衝突反応における大きな横運動量を持ったジェット（一方向に放出されるハドロン粒子の束）が、シミュレーションの中で生き残ることが確認できた。これにより、コア - コロナ描像に基づいて、生成粒子の数だけでなく、その運動量依存性も記述することができるようになった。特に、重イオン衝突反応では低横運動量領域でコア成分が優勢、高横運動量領域ではコロナ成分が優勢という望ましい結果が得られた。従来の模型では、コア成分とコロナ成分を別々に組み込み、低横運動量から高横運動量までを記述していたが、本研究では一つの枠組みの中で衝突エネルギーという制限のもとで、模型自身がコア成分とコロナ成分の分別を動的に行った意義は大きい。また、生成粒子数の関数として、終状態に測定されるハドロンのうち、コア起源のコロナ起源の割合を導出することが可能になった。従来はコア成分である QGP 流体のみで記述されていた重イオン衝突反応の中心度でも、無視できない程度のコロナ成分が

存在していることが判明した。一方、QGP 流体ができているかどうかは依然として多くの議論を呼んでいる陽子同士衝突でも、(全事象の上位 1%程度の)多重度の大きい中心度クラスでは、最終的に測定されるハドロンのうち、50%が QGP 流体によるコア成分を起源としていることも判明した。衝突系や衝突エネルギーに依らず、中心ラピディティ付近における荷電ハドロンの生成粒子数が 20 程度に達して初めて、QGP 流体であるコア成分が優勢になることも分かった。従来の研究では、系全体が QGP 流体、すなわちコア成分であると想定して、ベイズ推定などの統計的手法に基づき QGP 流体の輸送的性質が導出されてきたが、平衡に達していないコロナ成分による非等方フロー係数への補正が 10~30%程度に達することが判明したことで、QGP 物性論の構築におけるコア - コロナ描像の重要性が明らかになった。

本研究におけるイベントジェネレータ PYTHIA のように、衝突初期を記述するモデルの結果から流体モデルの初期条件を生成する場合、系の横エネルギー(衝突軸に垂直な方向の単位ラピディティあたり放出されるエネルギー)の時間発展の振る舞いが重要な役割を果たすことを見出した。例えば、すでに実験結果の生成粒子数を再現しているイベントジェネレータをそのまま流体モデルの初期条件に入れても、終状態の生成粒子数は大きく減少してしまう。衝突初期を記述するモデルのパラメータは、衝突後に起こるダイナミクスをすべて反映して決められたものであり、衝突後のダイナミクスが変われば、当然、衝突初期のパラメータも変わるはずである。特に、PYTHIA のようなハドロン弦破碎モデルを用いると、衝突によって生成されたパートン間に弦が張られることで、パートン間に終状態のハドロンが生成されることになる。このことを横エネルギーの言葉で記述すれば、時間発展とともに、横エネルギーは増加することを意味している。一方、流体方程式の衝突初期条件として置かれた横エネルギーは、衝突軸方向の膨張に伴い、圧力が仕事をを行い、結果として、時間発展とともに減少することを意味している。したがって、この衝突反応における横エネルギーの時間発展は系のダイナミクスを色濃く反映することが分かる。横エネルギー自体は 20 年以上前に頻繁に議論されてきたが、近年はそれほど注目されなかった。横エネルギーのダイナミクスが新たな文脈で重要視されるきっかけとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Yuuka Kanakubo, Yasuki Tachibana, Tetsufumi Hirano	4. 巻 105
2. 論文標題 Interplay between core and corona components in high-energy nuclear collisions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024905-1 - 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.105.024905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuuka Kanakubo, Yasuki Tachibana, Tetsufumi Hirano	4. 巻 1005
2. 論文標題 Unified description from small to large colliding systems within dynamical core-corona initialisation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 121937-1 - 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2020.121937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kanakubo Yuuka, Tachibana Yasuki, Hirano Tetsufumi	4. 巻 101
2. 論文標題 Unified description of hadron yield ratios from dynamical core-corona initialization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 24912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.024912	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Murase Koichi, Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Hirano Tetsufumi, Kitazawa Masakiyo, Morita Kenji, Nara Yasushi, Nonaka Chiho, Ohnishi Akira	4. 巻 26
2. 論文標題 Dynamically Integrated Transport Approach for High-Energy Nuclear Collisions at High Baryon Density	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 24016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.024016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Azumi, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 26
2. 論文標題 Rapidity Decorrelation from Hydrodynamic Fluctuations and Initial Fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 31022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.031022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanakubo Yuuka, Okai Michito, Tachibana Yasuki, Hirano Tetsufumi	4. 巻 26
2. 論文標題 Strangeness Enhancement in $p + p$, $p + Pb$, and $Pb + Pb$ Collisions at LHC Energies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 31021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.031021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 平野哲文	4. 巻 62-2
2. 論文標題 小さい衝突系における集団的な振る舞い	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 41 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Hirano Tetsufumi, Kitazawa Masakiyo, Morita Kenji, Murase Koichi, Nara Yasushi, Nonaka Chiho, Ohnishi Akira	4. 巻 98
2. 論文標題 Dynamically integrated transport approach for heavy-ion collisions at high baryon density	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024909-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.024909	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanakubo Yuuka, Okai Michito, Tachibana Yasuki, Hirano Tetsufumi	4. 巻 2018-12
2. 論文標題 Enhancement of strange baryons in high-multiplicity proton-proton and proton-nucleus collisions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 121D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirano Tetsufumi, Kurita Ryuichi, Murase Koichi	4. 巻 984
2. 論文標題 Hydrodynamic fluctuations of entropy in one-dimensionally expanding system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 44 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2019.01.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Azumi, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 982
2. 論文標題 Rapidity decorrelation from hydrodynamic fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 339 ~ 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.08.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okai Michito, Kawaguchi Koji, Tachibana Yasuki, Hirano Tetsufumi	4. 巻 95
2. 論文標題 New approach to initializing hydrodynamic fields and mini-jet propagation in quark-gluon fluids	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.95.054914	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hongo Masaru, Hirono Yuji, Hirano Tetsufumi	4. 巻 775
2. 論文標題 Anomalous-hydrodynamic analysis of charge-dependent elliptic flow in heavy-ion collisions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 266 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2017.10.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Azumi, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 967
2. 論文標題 Hydrodynamic fluctuations in Pb + Pb collisions at LHC	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 445 ~ 448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2017.05.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawaguchi Koji, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 967
2. 論文標題 Multiplicity fluctuations and collective flow in small colliding systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 357 ~ 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2017.07.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawaguchi Koji, Murase Koichi, Hirano Tetsufumi	4. 巻 141
2. 論文標題 Analysis of flow observables in small systems using an integrated dynamical model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 1009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201714101009	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirano Tetsufumi、Tachibana Yasuki、Okai Michito	4. 巻 141
2. 論文標題 Interplay between collective expansion and Mach cone	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 5002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201714105002	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計28件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Hydrodynamics and jets
3. 学会等名 The space-time structure of jet quenching: theory and experiment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野哲文
2. 発表標題 重イオン衝突の物理概観
3. 学会等名 チュートリアル研究会 「高エネルギー重イオン衝突の物理：基礎・最先端・課題・展望」 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Fluctuations in hydrodynamic models
3. 学会等名 New development of hydrodynamics and its applications in Heavy-Ion Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Dynamical core-corona initialization and its application to hadron chemistry
3. 学会等名 Symposium on Contemporary QCD Physics and Relativistic Nuclear Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Effects of hydrodynamic fluctuations in high-energy nuclear collisions
3. 学会等名 Zimanyi School (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野哲文
2. 発表標題 ソフト、小さい系から
3. 学会等名 post Quark Matter 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Nara
2. 発表標題 Hydrodynamic quantum molecular dynamics approach in JAM
3. 学会等名 International Workshop on Partonic and Hadronic Transport Approaches for Relativistic Heavy Ion Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Nara
2. 発表標題 Relativistic quantum molecular dynamics with scalar and vector interactions
3. 学会等名 The 36th Heavy Ion cafe "Dynamics of high energy nuclear collisions" at Sophia University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Nara
2. 発表標題 Relativistic molecular dynamics approach for heavy-ion collisions at high baryon region
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奈良寧
2. 発表標題 流体量子分子動力学 (HyQMD) 模型による集団フローの解析
3. 学会等名 日本物理学会 第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奈良寧
2. 発表標題 Do we understand the dynamics of pp, pA, and AA collisions? Status of theoretical QGP simulations
3. 学会等名 29-th workshop Heavy Ion Pub (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奈良寧
2. 発表標題 デルタマターとバリオン数高次揺らぎ
3. 学会等名 日本物理学会 第 75 回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Dynamical modeling of high-energy nuclear collisions: From small to large colliding systems
3. 学会等名 Recent Developments in Quark-Hadron Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Heavy Ions, theory
3. 学会等名 International Conference on High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Dynamical core-corona initialization in hydro models
3. 学会等名 PROBING THE QUARK-GLUON PLASMA WITH COLLECTIVE PHENOMENA AND HEAVY QUARKS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Dynamics of nuclear collisions at relativistic energies
3. 学会等名 Hadron structure and interaction in dense matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Dynamics of Nuclear Collisions at Relativistic Energies
3. 学会等名 Nucleus Nucleus Collisions 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Dynamical core-corona initialization in high-energy nuclear collisions
3. 学会等名 XXV Cracow EPIPHANY Conference on Advances in Heavy Ion Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Integrated dynamical approach from small to large colliding systems
3. 学会等名 International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Nara Yasushi
2. 発表標題 JAM:an event generator for high energy nuclear collisions
3. 学会等名 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions at Nagoya University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Nara Yasushi
2. 発表標題 K/pi ratios from a dynamically integrated transport approach
3. 学会等名 YITP long-term workshop New Frontiers in QCD 2018 - Confinement, Phase Transition, Hadrons, and Hadron Interactions - (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Nara Yasushi
2. 発表標題 Dynamically integrated transport model for heavy ion collisions at J-PARC-HI
3. 学会等名 Experimental and Theoretical Hadron Physics: Recent Exciting Developments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Collectivity in proton-proton, proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions
3. 学会等名 The Fifth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 Tetsufumi Hirano
2. 発表標題 Dynamical initialization of QGP fluids
3. 学会等名 Phase of Quantum Chromodynamics (QCD) and Beam Energy Scan Program with Heavy Ion Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 平野哲文
2. 発表標題 重イオン衝突反応で探る高密度QCD物質
3. 学会等名 J-PARCエネルギー領域重イオン衝突のダイナミクス (招待講演)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Recent topics in relativistic heavy ion collisions and QGP
3. 学会等名 Workshop of Recent Developments in QCD and Quantum Field Theories (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 平野哲文
2. 発表標題 高エネルギー原子核衝突の物理
3. 学会等名 ハドロン・原子核物理の理論研究最前線 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 Hirano Tetsufumi
2. 発表標題 Dynamics of heavy ion collisions at J-PARC energy
3. 学会等名 J-PARC-HI Collaboration Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	奈良 寧 (NARA YASUSHI) (70453008)	国際教養大学・国際教養学部・教授 (21402)	
研究分担者	橘 保貴 (TACHIBANA YASUKI) (60877760)	国際教養大学・国際教養学部・助教 (21402)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------