

2019.6

特集号



(題字：櫻井克年学長)

# 国立大学法人 高知大学学報

## 高知大学学位授与記録第百号

総務課広報係発行

本学は、次の者に博士（理学）の学位を授与したので、高知大学学位規則第14条に基づきその論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

\*\*\*\*\*  
 \*  
 \*  
 \*  
 \*  
 \*  
 \*  
 \*\*\*\*\*

# 高知大学学報

本学は、次の者に博士（理学）の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）第8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

## 目 次

学位記番号	氏 名	学 位 論 文 の 題 目	ページ
甲総科博第32号	石川 優羽	非弾性ひずみ回復 (ASR) 法による海洋底堆積物の応力評価	1
甲総科博第33号	松岡 宏哲	Study of the Nambu-Jona-Lasinio model with tensor-type interaction (テンソル型相互作用を含む南部・ヨナラシニオ模型の研究)	4

ふりがな	いしかわ ゆう
氏名(国籍)	石川 優羽(千葉県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第32号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与年月日	平成31年3月22日
学位論文題目	非弾性ひずみ回復(ASR)法による海洋底堆積物の応力評価
発表誌名	In-situ Stress Analysis Using the Anelastic Strain Recovery (ASR) Method at the First Offshore Gas Production Test Site in the Eastern Nankai Trough, Japan Marine and Petroleum Geology, 66, 418-424 (2015)
	<p style="text-align: center;">審査委員</p> <p style="text-align: right;">主査 教授 富士原敏也 副査 教授 岩井 雅夫 副査 教授 近藤 康生 副査 京都大学大学院教授 林 為人</p>

### 論文の内容の要旨

天然エネルギー資源の乏しい我が国にとって、日本近海で豊富な存在が確認されている海底資源であるメタンハイドレートは、有望な天然エネルギー資源と成り得る。海底下の数百メートル以浅の砂層に賦存するメタンハイドレートの調査と開発に不可欠となる原位置応力の評価手法の確立とともに、東部南海トラフ第二渥美海丘のメタンハイドレート海洋産出試験の行われる地点の応力状態を明らかにすることを目的として、当該地点付近において非弾性ひずみ回復(Anelastic Strain Recovery、略称 ASR)法を、世界で初めて未固結堆積層の掘削コア試料に用い、その地点の現在応力状態の測定に成功した。また、当該地点から採取された実際の未固結堆積物を用いて行った室内検証実験により、未固結層に適用した ASR 法による主応力方向の精度を定量的に評価したとともに、その評価手法を確立した。

原位置応力は、掘削孔の坑壁安定性や海底地盤の安定性評価、また、減圧法による産出効率の予測、生産中の出砂予測および対策にも必要となる重要なパラメータのひとつであり、メタンハイドレートの調査および開発、そして生産過程において欠かせない情報である。しかしながら、必要となる全ての原位置応力情報を正しく精度良く測定する方法は存在せず、複数の手法を組み合わせる評価するのが一般的である。特に未固結堆積層の応力評価に適用できる手法は少なく、そのような手法の開発と確立が急務である。ASR法は、コア試料を用いて応力を評価するコア法と呼ばれる応力測定法のひとつであり、コアリングによってコア試料が原位置応力から解放される際、瞬間的に発生する弾性ひずみのあとに時間をかけて回復する非弾性ひずみを測定し、試料を線形等方粘弾性体と仮定することで主応力の方向と大きさを評価する手法である。ASR 法は従来固結度の高い岩石試料にのみ適用されてきているが、本研究において世界で初めて未固結堆積層への適用に成功した。

一般的に、岩石の非弾性ひずみは弾性ひずみと比べると非常に小さく、コア試料が原位置の応力から解放されたのち、できるだけ速やかに計測を開始する必要がある。そのため、本研究ではコアリング作業を行った地球深部探査船「ちきゅう」の船上に測定機器を持ち込み、非弾性ひずみの計測を実施した。コア試料の表面に計 18 チャンネル分のひずみゲージを貼付し、温度と湿度を一定にコントロールした状態で約 2 週間程度ひずみの回復過程を測定する手法を採用した。力学的影響などを受けやすい未固結堆積物であるために、ひずみゲージの貼付けやその後のコア試料の取扱いに十分留意して測定を行った結果、4 つのコア試料全てにおいて非弾性ひずみの測定に成功した。

また、船上で行った非弾性ひずみの測定が終了したコア試料のひずみゲージを取り除き、整形し直した円柱状の試料に実験室で既知の応力（有効土被り圧相当の軸方向応力）を側方変形のない状態（K0 状態）で、約 3 週間連続的に載荷し、その除荷後に非弾性ひずみを測定する検証実験を行った。その結果、未固結層に適用した ASR 法による主応力方向の測定精度を定量的に評価することに、世界で初めて成功した。よって、未固結堆積層の応力測定手法として、ASR 法が適用できることを確認したとともに、その応力測定結果の検証する手法についても確立したことは言える。

船上で測定したコア試料の非弾性ひずみデータならびに古地磁気によるコアの定方位データを総合した三次元応力解析の結果、東部南海トラフ第二渥美海丘の測定地点では水平応力の異方性が小さい正断層型の応力場であるという結論に至ることができた。本研究で測定された原位置応力の結果は、東部南海トラフ第二渥美海丘のメタンハイドレート海洋産出試験において掘削孔の坑壁安定性や海底地盤の安定性評価のほか、当該プロジェクトで発生した出砂問題のメカニズムの解明に用いられるなど、当該産出試験の実施と総括に大きく貢献した。ASR 法による応力測定の結果は、本研究の測定地点に近い場所で過去にブレイクアウト法で測定された二次元の応力結果と整合的であった。したがって、ASR 法は、ブレイクアウト法と比べると、単独で三次元の原位置応力の測定ができるという優位性を有するとともに、未固結堆積層にも適用可能であることが示された。

以上のことから、本研究において ASR 法が未固結の海洋底堆積物にも適用可能であり、応力評価手法として有用であることが示された。それに加えて ASR 法はコア試料が入手できる環境では比較的安価に実施できる応力測定手法であることから、今後メタンハイドレート開発のみならず、原位置応力の情報を必要とする現場において適用の機会が増えることが期待される。

## 論文審査の結果の要旨

本博士論文では、海底掘削で採取された未固結堆積物のコア試料を用いて、非弾性ひずみ回復を測定し（以下 ASR 法）、その地層の原位置応力状態を評価した。ASR 法を未固結堆積物に適用し、原位置応力の測定に成功したのは、世界で初めての事例である。また、その同一試料を用い、既知の応力を負荷した室内検証実験を行って、未固結堆積物に適用した ASR 法の妥当性を確認するとともに、ASR 法による主応力方向の測定精度を定量的に評価し、その評価手法を提起した。それらにより、応力評価手法としての特性、有用性を明らかにした。

本論文は全 7 章から構成される。第 1 章には、有望天然エネルギー資源であるメタンハイドレート調査と開発に不可欠となる、深度が浅く固結の弱い堆積層の応力評価手法の開発が急務であるという、研究の背景と目的が述べられている。

第 2 章は各種応力計測手法をレビューし、第 3 章は本研究で適用する ASR 法の現状と課題が述べられており、学位申請者が研究を行うための問題設定能力、学識を有していることを示している。

第4章には、研究海域、コア試料の採取方法、定方位決定、コア試料の基礎物性が記載され、測定手順、未固結堆積物を測定するため学位申請者が行った創意工夫について、詳細に述べられている。今後、本研究手法を適用するための有用な情報が含まれている。

第5章では、研究で用いたコア試料に既知の応力を負荷する室内検証実験を行うことにより、ASR法による主応力方向の測定精度を定量的に評価したことが述べられている。

第6章では、本研究海域においては他の手法、既往の研究による応力計測結果が参照されており、妥当な結果を得たと議論されている。ASR法が未固結の海洋底堆積物にも適用可能であり、応力評価手法として有用であることが示されている。また、統計的データ解析により、ひずみの測定データから導かれる原位置応力の結果の信頼性を評価する方法が新たに提起されている。今後、未固結堆積物へのASR法の適用事例が増えたとき、それぞれの結果の比較基準として、その方法の有用性が証明できるのではないかとと思われる。第7章は結論である。

ASR法はコア試料が入手できる環境では比較的安価に実施できる応力測定手法であることから、原位置応力の情報を必要とする現場において適用の機会が増えることが期待される。本研究は、未固結堆積物の応力評価の先駆的な研究として重要な知見を得たものとして評価される。本論文の一部は、原著論文として査読付きの国際有力学術雑誌に1編（主著、英文、参考論文）、レビュー論文として国内の学術雑誌に1編（共著）が公表済みであり、さらに論文1編（国内学会で本人筆頭で口頭発表済み）が投稿準備中である。以上のことから、学位申請者、石川（長野）優羽は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	まつおか ひろあき
氏名(本籍)	松岡 宏哲 (高知県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第33号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与年月日	平成31年3月22日
学位論文題目	Study of the Nambu-Jona-Lasinio model with tensor-type interaction (テンソル型相互作用を含む南部・ヨナラシニオ模型の研究)
発表誌名	Spin polarization and color superconductivity in the Nambu-Jona-Lasinio model at finite temperature Physical Review D 95, Issue 5 (2017), 054025 (9 pages)
	審査委員 主査 教授 津江 保彦 副査 教授 飯田 圭 副査 教授 福間 慶明

#### 論文の内容の要旨

陽子や中性子といった素粒子を構成する基本粒子であるクォークの振る舞いを記述する量子色力学(QCD)の相構造を明らかにする目的で、QCDの低エネルギー有効理論であるNambu-Jona-Lasinio(NJL)模型にクォーク間テンソル型相互作用を追加した模型を用いて、低温・高密度領域でのクォーク物質の振る舞いについて考察している。

まず初めに、クォークに質量を生成させるクォーク-反クォーク凝縮(カイラル凝縮)と、テンソル型相互作用に起因したテンソル凝縮との関係を調べている。平均場近似の範囲内で熱力学ポテンシャルを場の理論の処方に基づき導出し、熱力学ポテンシャルの極値を数値的に求めることで実現する相を検討し、かつ相転移の次数を求めた。テンソル相互作用の強さを変化させたところ、採用したモデルパラメータの範囲では、低温かつ十分高密度ではカイラル凝縮によるカイラル対称性の破れがなく、テンソル凝縮で対称性を破る領域でテンソル凝縮相のみが実現することを示した。

その知見を基に、次いで、高密度で実現することが期待されているカラー超伝導と、今回導入されたテンソル凝縮の関係を調べている。平均場近似の範囲内ではあるが、カイラル凝縮、カラー超伝導ギャップ、テンソル凝縮を同時に扱って熱力学ポテンシャルを導出し、上記と同様な考察を行っている。結果としてカラー超伝導とテンソル凝縮が共存する相が存在することを含め、高密度でのクォーク物質の相構造をNJL模型の或るモデルパラメータの範囲内で明らかにした。

続いて、クォークの他に電子を考え、u、dクォークと電子間の $\beta$ 平衡及び荷電中性の条件を課して、より現実的なクォーク物質を考察している。カイラル凝縮とテンソル凝縮のみに注目して、テンソル凝縮相が生じる様相を、 $\beta$ 平衡と荷電中性の条件を満足する状況の下で明らかにした。引き続き、中心がクォーク物質、外側がハドロン物質となっているコンパクトな星であるハイブリッド

星をテンソル凝縮まで含めて考察している。ハイブリッド星の中心部ではクォーク物質が実現する程度に密度が高いとし、u、dクォークと電子が存在するとして、 $\beta$ 平衡と荷電中性条件の下で得られたテンソル凝縮相を含むクォーク物質を考え、クォーク物質の状態方程式を与えた。一方、コンパクト星の外縁部では密度が低く、通常の核物質になっているとして、核物質を記述するNL3 $\omega\rho$ モデルと呼ばれるモデルを用いて核物質の状態方程式を得た。クォーク物質、核物質の各相で、状態方程式を用いて一般相対性理論のTolman-Oppenheimer-Volkoff方程式を数値的に解くことにより、ハイブリッド星の質量-半径の関係を与えた。観測されている太陽質量の2倍の質量を持つ星は構成できなかったものの、ハイブリッド星が安定に存在できる領域を与え、さらにはテンソル凝縮がもたらす自発磁化により、コンパクト星の持つ非常に強い磁場を発生させ得るという結論を導いた。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、「Study of the Nambu-Jona-Lasinio model with tensor-type interaction (テンソル型相互作用を含む南部・ヨナラシニオ模型の研究)」と題され、有限温度・有限密度のクォーク物質で実現可能な相として、テンソル凝縮相の存在可能性とその効果について明確にしようとする目的のもとでなされた研究である。クォーク間の強い相互作用は量子色力学(QCD)により支配されているが、QCDから直接クォーク・グルオンの動力学を導くことは困難であるので、QCDの有効モデルである南部・Jona-Lasinio(NJL)モデルを用いて考察している。本研究ではu、dクォークの2フレーバーの範囲内で考察している。まず第1に、QCDが持つ対称性のもとでNJLモデルにテンソル型のクォーク間4点相互作用を導入し、カイラル対称性の破れの秩序変数であるカイラル凝縮と、クォーク・スピン偏極に導くテンソル凝縮を同時に扱い、有限温度・密度の領域での実現可能な相、相転移の次数の決定を熱力学ポテンシャルを用いて行っている。現実的な相互作用定数の値では、カイラル凝縮相とテンソル凝縮相は共存せず、QCD相図では低温低密度ではカイラル凝縮相、低温高密度ではテンソル凝縮相となることを示した。第2に、低温高密度クォーク物質ではカラー超伝導相の存在可能性が指摘されているので、低温高密度領域でテンソル凝縮とカラー超伝導相に導くクォーク対凝縮を同時に扱い、可能な相、相転移の様相を明らかにした。クォーク密度の中間領域ではクォーク対凝縮とテンソル凝縮が同時に存在する共存相が現れ得ること、より高密度ではテンソル凝縮相のみが実現し得ることを初めて示した。第3に、テンソル凝縮相の存在が中性子星などの現実のコンパクト星に与える影響について詳細に検討している。荷電中性と $\beta$ 平衡の両条件を課した下で、コンパクト星の内部はクォーク物質、外へ向かってある密度にまで下がった後は核物質となるハイブリッド星を想定し、Tolman-Oppenheimer-Volkoff方程式を数値的に解くことで、星の質量-半径の関係を導いた。星内部のクォーク物質にテンソル凝縮相が存在する場合はコンパクト星の質量は2倍の太陽質量を支えるまでには至らないという結果を得ている。さらに、テンソル凝縮に導かれて現れるスピン偏極の効果で生じる星の中心部での磁気エネルギー密度は $10^{19}$  G(ガウス)にまで達することを計算により指摘している。以上の研究成果は3編の査読付き国際誌に掲載されているとともに、2017年2月に開催された国際会議「Quarks and Compact Stars」において口頭発表され好評を博したのをはじめ、その他学会等で4回報告されている。

以上のことから、本研究は、低温・高密度でのクォーク物質についてテンソル凝縮相の存在可能性を研究したものであり、従来のカラー超伝導相に加えてテンソル凝縮相が存在する可能性がある

こと、テンソル凝縮相がハイブリッド星の構造、質量 - 半径の関係及び星の磁場の生成等に及ぼす影響について明確にしたことなど、重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者、松岡宏哲氏は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。