

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2009～2014

課題番号：21107001

研究課題名（和文）超深度掘削が拓く海溝型巨大地震の新しい描像

研究課題名（英文）New perspective of great subduction-zone earthquakes from the super deep drilling

研究代表者

木村 学（Kimura, Gaku）

東京大学・理学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：80153188

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 59,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本領域の「海溝型巨大地震の新しい描像」を、超深度の掘削を含んだ統合的手法によって得るという目的は、海溝近傍でのプレート境界断層の高速すべりによる地震津波発生性破壊の存在や高速ではすべての断層は弱化するという断層すべり特性の新しい特徴、それへの水の関与など多くの科学的成果によって達成された。これらは従来の地震学、地球物理学的観測に地質学、地形学、地球化学、岩石力学などの手法を加え、統合することによって得られた。この手法の総合も大きな成果である。超深度の掘削によって、地震発生深度を直接観測するという前人未だの新しい技術の導入が科学的成果へつながった。大きな技術的成果である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project to gain “new perspective of great subduction zone earthquakes by the super-deep drilling has been accomplished through the following results of investigation; high velocity slip is possible along the plate boundary even near the trench, all the fault forming materials are weakened under the high velocity slip, and the fluid is quite key material to understand the fault mechanisms and earthquake mechanisms. These new perspectives were obtained from an integrated research of traditional seismology, geophysics with geology, geomorphology, geochemistry, rock and soil mechanics and others. Such an integration is also an important aspect of this project. New technology of super-deep drilling for science also contributed a lot to develop the new perspective of the earthquake in subduction zone.

研究分野：テクトニクス、構造地質学

キーワード：固体地球物理学 地震 大深度地下 地球変動予測 地質学 南海トラフ 付加体 断層

1. 研究開始当初の背景

海溝付近の沈み込みプレート境界で起こる巨大地震と津波は、歴史上数々の甚大な災害をもたらしてきた。日本の南西沖に横たわる南海トラフでも、巨大地震の繰り返しが記録されている。すなわち、1944年南海地震など、マグニチュード8クラスの巨大地震が100年～200年周期で発生しており、また来る30年以内の地震発生確率50～70%、今世紀中の地震発生確率はほぼ100%と予想されており、警戒が強められている。近年、このような遠地物理観測主体の手法に、巨大地震断層直接掘削・観測物質科学を融合させた全く新しい地震研究が日本を中心に展開されつつある。世界最初の掘削研究は、1995年兵庫県南部地震を起こした野島断層で行われた。また第二例は1999年台湾において集々地震を起こした車籠埔断層である。これらの研究により、地震発生後の断層の強度回復過程、断層発熱冷却過程、多様なすべり弱化メカニズムの解明など、大きな成果が得られた。

しかし、これらはいずれも地震発生域より浅く、地震発生後の掘削であることから、地震前にどのような過程が進行したかは未解明のままである。

これに対し、地震発生域の深度まで掘削を実施中なのが、北米西岸の横ずれプレート境界であるサンアンドレアス断層である。2005年7月に深度約3,000mのところで地震断層を貫通し、2007年9月には断層試料の回収に成功している。現在、この掘削孔での連続観測が開始されようとしている。

一方、沈み込みプレート境界の海溝型巨大地震発生帯に達する超深度への掘削実施例はこれまでになく、2003年に発足したIODP(22カ国参加)においても最大の科学的課題とされた。そして、「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削計画がIODPにより承認され、2007年から開始された。南海トラフ地震発生帯掘削計画では、2012年までに地震発生帯の巨大分岐断層とプレート境界断層の超深度掘削(海底下約6km)が行われる予定である。このような超深度掘削によって地震準備・発生過程を総合的に解明しようとする本領域研究は、海溝型巨大地震準備・発生過程研究の最先端に位置づけられる。

2. 研究の目的

研究領域の目的は、海溝型巨大地震が繰り返され、今後も起こると想定される南海トラフにおいて、前人未到の沈み込みプレート境界の巨大地震断層を直接掘削し、試料採取・分析を行い、更に掘削孔内で計測・観測を行うことによって、海溝型巨大地震準備・発生過程の解明に迫ることである。

3. 研究の方法

本領域では、「海溝型巨大地震の新しい描像」を得るという目的達成のために、方法に準拠し3つの研究項目を設けた。それぞれの研

究項目は相補的な2つの計画研究から構成される。総括班がそれらを総括し、目的達成を促すこととした。

研究項目A: 南海トラフ地震発生帯の大同構造の把握と海底面変動の理解

計画研究A01: 巨大地震断層の3次元高精度構造と物性の解明、計画研究A02: 高精度変動地形・地質調査による巨大地震断層の活動履歴の解明

研究項目B: 断層の物質と力学的・水理学的性質の理解

計画研究B01: 巨大地震断層の力学的・水理学的特性の解明、計画研究B02: 巨大地震断層の物質科学的研究によるすべりメカニズムの解明

研究項目C: 地震準備発生過程のモデル構築と検証

計画研究C01: 孔内実験・計測による地震準備過程の状態・物性の現場把握、計画研究C02: 海溝型巨大地震の地震準備・発生モデル構築

4. 研究成果

本領域では以下の主要な成果を得た。

(1) 南海トラフのみならず、2011年東北地方太平洋沖地震の津波発生断層(日本海溝付近のプレート境界断層)の回収に成功した。プレート境界断層のごく浅部において、高速(地震性)滑りの痕跡が発見された。断層は粘土鉱物から構成され、本質的に摩擦抵抗が極めて小さいことが実験的にも検証された。更に高速滑りにより間隙水が熱圧化し有効摩擦がほとんどなくなり、海溝域まで滑り抜け津波を発生するに至ったことが判明した。

(2) 地球上のどの海溝においても超巨大地震・津波が発生する可能性があることが明らかとなり、日本列島全域、および世界中で最大マグニチュードの見直しが必要、という認識に対する科学的根拠を与えた。

(3) 南海トラフプレート境界断層の上盤孔内観測により、水平最大応力場の方向がプレートの相対運動方向と平行であり、かつその一部は鉛直応力を上回るなど、巨大地震の歪エネルギーが蓄積されていることが判明した。断層近傍では逆断層型の応力場になると予想される。

(4) 下盤プレートの観察・観測、実験、理論を統合した研究により、プレート境界におけるゆっくりすべりと巨大地震との関連への理解が飛躍的に進んだ。今後の連続観測が一層期待される。

(5) 断層帯は、破断によって極めて複雑な変形をしていることが物理探査からも予想されるが、陸上化石地震断層の分析から、そこでダイナミックな岩石・流体反応が起こり、滑りメカニズムを支配していることが明らかとなった。間隙水圧の変化や間隙水の化学的变化の連続観測などが一層期待される。

総括班では、これらの研究成果を推進するために領域内外の研究交流を活発化させたための

活動を実施した。領域全体の研究集会を毎年度末に、また独自の国際集会を2回実施した。内外の学会で領域名と同じ研究集会を主催もしくは共催した。たとえば5年間にわたり連続的に実施した日本地球惑星科学連合大会でのセッション（うち2回は国際セッションとして実施）は、大会での最大規模のものとなった。また、アメリカ地球物理学連合（AGU）大会、アジアオセアニア地球科学会（AOGS）などのセッションも積極的に開催、研究成果の普及交流に務めた。

研究成果の一部は総括班が主導して海外から共同ゲスト編集者を招き、を国際雑誌 *Tectonophysics* (21 編) 及び *Earth, Planets and Space* (33 編) に領域名を冠した特集を組み成果の普及を促した。

Tectonophysics 特集号

Ide S, Aochi H, Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

Ito Y, Hino R, Kido M, Fujimoto H, Osada Y, Inazu D, Ohta Y, Iinuma T, Ohzono M, Miura S, Mishina M, Suzuki K, Tsuji T and Ashi J, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

Aso N, Ohta K and Ide S, Tectonic, volcanic, and semi-volcanic deep low-frequency earthquakes in western Japan.

Kameda J, Yamamoto Y, Hamada Y, Fujimoto K and Kimura G, Progress of illitization along an imbricate frontal thrust at shallow depths in an accretionary prism.

Tsuji T, Kodaira S, Ashi J and Park J-O, Widely distributed thrust and strike-slip faults within subduction oceanic crust in the Nankai Trough off the Kii Peninsula, Japan.

Takahashi M, Azuma S, Uehara S-i, Kanagawa K and Inoue A, Contrasting hydrological and mechanical properties of clayey and silty muds cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism.

den Hartog SAM and Spiers CJ, Influence of subduction zone conditions and gouge composition on frictional slip stability of megathrust faults.

Yamamoto Y, Lin W, Oda H, Byrne T and Yamamoto Y, Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the vasement basalt and overlying sediments.

Wu HY, Chan CH, Kinoshita M and Saito S, Stress field observation and modeling from the NanTroSEIZE scientific drillings in the Nankai Trough system, SW Japan.

Moore JC, Barrett M and Thu MK, Fluid pressures and fluid flows from boreholes

spanning the NanTroSEIZE transect through the Nankai Trough, SW Japan.

Hammerschmidt S, Davis EE and Kopf A, Fluid pressure and temperature transients detected at the Nankai Trough Megasplay Fault: Results from the SmartPlug borehole observatory.

Hashimoto Y, Doi N and Tsuji T, Difference in acoustic properties at seismogenic fault along a subduction interface: Application to estimation of effective pressure and fluid pressure ratio.

Sibson RH, Stress switching in subduction forearcs: Implications for overpressure containment and strength cycling on megathrusts.

Kinoshita M and Tobin H, Intersismic stress accumulation at the locked zone of Nankai Trough seismogenic fault off Kii Peninsula.

Yoshioka S and Masuoka Y, Interplate coupling along the Nankai Trough, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data: Effects of subducting plate geometry and spacing of hypothetical ocean-bottom GPS stations.

Hyodo M and Hori T, Re-examination of possible great interpolate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations.

Kame N, Fujita S, Nakatani M and Kusakabe T, Effects of a revised rate- and state-dependent friction law on aftershock triggering model.

Kame N, Fujita S, Nakatani M and Kusakabe T, Earthquake cycle simulation with a revised rate- and state-dependent friction law.

Suzuki T, Damage-tensor-based nondimensional parameters governing secondary faulting behavior.

Rodnikov AG, Sergeeva NA and Zabarinskaya LP, Ancient subduction zone in Sakhalin Island.

② Gratier JP, Thouvenot F, Jenatton L, Tourette A, Doan ML and Renard F, Geological control of the partitioning between seismic and aseismic sliding behaviours in active faults: Evidence from the Western Alps, France.

Earth, Planet and Space 特集号

Akuhara T, Mochizuki K (2014) Application of cluster analysis based on waveform cross-correlation coefficients to data recorded by ocean-bottom seismometers: results from off the Kii Peninsula.

Aochi H, Ide S, Ground motions characterized by a multi-scale heterogeneous earthquake model.

Ashi J, Sawada R, Omura A, Ikehara K, Accumulation of an earthquake-induced extremely turbid layer in a terminal basin of the Nankai accretionary prism.

Boston B, Moore GF, Nakamura Y, Kodaira S, Outer-rise normal fault development and influence on near-trench décollement propagation along the Japan Trench, off Tohoku.

Fukuchi R, Fujimoto K, Kameda J, Hamahashi M, Yamaguchi A, Kimura G, Hamada Y, Hashimoto Y, Kitamura Y, Saito S, Changes in illite crystallinity within an ancient tectonic boundary thrust caused by thermal, mechanical, and hydrothermal effects: an example from the Nobeoka Thrust, southwest Japan.

Hamada Y, Sakaguchi A, Tanikawa W, Yamaguchi A, Kameda J, Kimura G, Estimation of slip rate and fault displacement during shallow earthquake rupture in the Nankai subduction zone.

Hamahashi M, Hamada Y, Yamaguchi A, Kimura G, Fukuchi R, Saito S, Kameda J, Kitamura Y, Fujimoto K, Hashimoto Y, Multiple damage zone structure of an exhumed seismogenic megasplay fault in a subduction zone - a study from the Nobeoka Thrust Drilling Project.

Hashimoto Y, Yamano N, Geological evidence for shallow ductile-brittle transition zones along subduction interfaces: example from the Shimanto Belt, SW Japan.

Hino R, Tsuji T, Bangs NL, Sanada Y, Park J-O, Huene Rv, Moore GF, Araki E, Kinoshita M, Q P structure of the accretionary wedge in the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, revealed by long-offset walk-away VSP.

Hyodo M, Horii T, Ando K, Baba T, The possibility of deeper or shallower extent of the source area of Nankai Trough earthquakes based on the 1707 Hoei tsunami heights along the Pacific and Seto Inland Sea coasts, southwest Japan.

Idehara K, Yabe S, Ide S, Regional and global variations in the temporal clustering of tectonic tremor activity.

Ishikawa T, Hirono T, Matsuta N, Kawamoto K, Fujimoto K, Kameda J, Nishio Y, Maekawa Y, Honda G, Geochemical and mineralogical characteristics of fault gouge in the Median Tectonic Line, Japan: evidence for earthquake slip.

Kame N, Nagata K, Nakatani M, Kusakabe T, Feasibility of acoustic monitoring of

strength drop precursory to earthquake occurrence.

Kameda J, Kawabata K, Hamada Y, Yamaguchi A, Kimura G, Quartz deposition and its influence on the deformation process of megathrusts in subduction zones.

Koge H, Fujiwara T, Kodaira S, Sasaki T, Kameda J, Kitamura Y, Hamahashi M, Fukuchi R, Yamaguchi A, Hamada Y, Ashi J, Kimura G, Friction properties of the plate boundary megathrust beneath the frontal wedge near the Japan Trench: an inference from topographic variation.

Kogure T, Raimbourg H, Kumamoto A, Fujii E, Ikuhara Y, Subgrain boundary analyses in deformed orthopyroxene by TEM/STEM with EBSD-FIB sample preparation technique.

Lin W, Fulton PM, Harris RN, Tadai O, Matsubayashi O, Tanikawa W, Kinoshita M, Thermal conductivities, thermal diffusivities, and volumetric heat capacities of core samples obtained from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST).

Maekawa Y, Hirono T, Yabuta H, Mukoyoshi H, Kitamura M, Ikehara M, Tanikawa W, Ishikawa T, Estimation of slip parameters associated with frictional heating during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake by vitrinite reflectance geothermometry.

Nakamura Y, Kodaira S, Cook BJ, Jeppson T, Kasaya T, Yamamoto Y, Hashimoto Y, Yamaguchi M, Obana K, Fujie G, Seismic imaging and velocity structure around the JFAST drill site in the Japan Trench: low Vp, high Vp/Vs in the transparent frontal prism.

Namiki Y, Tsutsumi A, Ujiie K, Kameda J, Frictional properties of sediments entering the Costa Rica subduction zone offshore the Osa Peninsula: implications for fault slip in shallow subduction zones.

②Nishiyama S, Ohnishi Y, Ito H, Yano T, Mechanical and hydraulic behavior of a rock fracture under shear deformation.

②Sawai M, Hirose T, Kameda J, Frictional properties of incoming pelagic sediments at the Japan Trench: implications for large slip at a shallow plate boundary during the 2011 Tohoku earthquake.

③ Schumann K, Behrmann JH, Stipp M, Yamamoto Y, Kitamura Y, Lempp C, Geotechnical behavior of mudstones from the Shimanto and Boso accretionary complexes, and implications for the Nankai accretionary prism.

④Sugihara T, Kinoshita M, Araki E, Kimura T, Kyo M, Namba Y, Kido Y, Sanada Y, Thu M, Re-evaluation of temperature at the updip limit of locked portion of Nankai megasplay

inferred from IODP Site C0002 temperature observatory.

②⑤Takahashi M, Azuma S, Ito H, Kanagawa K, Inoue A, Frictional properties of the shallow Nankai Trough accretionary sediments dependent on the content of clay minerals.

②⑥Takeshita T, Yamaguchi A, Shigematsu N, Stress reversal recorded in calcite vein cuttings from the Nankai accretionary prism, southwest Japan.

②⑦Tanikawa W, Mukoyoshi H, Lin W, Hirose T, Tsutsumi A, Pressure dependence of fluid transport properties of shallow fault systems in the Nankai subduction zone.

②⑧Toki T, Higa R, Ijiri A, Tsunogai U, Ashi J, Origin and transport of pore fluids in the Nankai accretionary prism inferred from chemical and isotopic compositions of pore water at cold seep sites off Kumano.

②⑨Tsuji T, Ashi J, Ikeda Y, Strike-slip motion of a mega-splay fault system in the Nankai oblique subduction zone.

③⑩Yabe S, Ide S, Yoshioka S, Along-strike variations in temperature and tectonic tremor activity along the Hikurangi subduction zone, New Zealand.

③⑪Yamada Y, Shibanuma J, Small-scale stress fluctuations in borehole breakouts and their implication in identifying potential active faults around the seismogenic megasplay fault, Nankai Trough, SW Japan.

③⑫Yamaguchi A, Ishikawa T, Kato Y, Nozaki T, Meneghini F, Rowe CD, Moore J, Tsutsumi A, Kimura K, Fluid-rock interaction recorded in black fault rocks in the Kodiak accretionary complex, Alaska.

③⑬Yamano M, Kawada Y, Hamamoto H, Heat flow survey in the vicinity of the branches of the megasplay fault in the Nankai accretionary prism.

また、ニュースレターを毎年発行、研究成果の普及に努めた。ホームページの充実とアウトリーチ活動も積極的に展開、日本地球惑星科学連合大会でのブース展示、各地への出前講演などを多く実施した。

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0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantoro/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

木村 学 (KIMURA, Gaku)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：80153188

(2)研究分担者

朴 進午 (PARK, Jinu)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：70359199

芦 寿一郎 (ASHI, Juichiro)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・

准教授

研究者番号：40251409

金川 久一 (KANAGAWA, Kyuichi)

千葉大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：40185898

木下 正高 (KINOSHITA, Masataka)

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・所長

研究者番号：50225009

井出 哲 (IDE, Satoshi)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90292713

斎藤 実篤 (SAITO, Saneatsu)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋掘削科学研究開発センター・グループリーダー

研究者番号：40292859

(3)連携研究者

倉本 真一 (KURAMOTO, Shinichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部探査センター・次長

研究者番号：30211890

江口 暢久 (EGUCHI, Nobuhisa)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部探査センター・グループリーダー

研究者番号：20626204