

領域略称名：S F 地震学

領域番号：21A203

令和6年度  
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」  
に係る中間評価報告書

「S l o w - t o - F a s t 地震学」

領域設定期間

令和3年度～令和7年度

令和6年6月

領域代表者 東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授・井出 哲

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	8

## **研究領域全体に係る事項**

4	研究領域の目的及び概要	12
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	14
6	研究の進展状況及び主な成果	16
7	研究発表の状況	30
8	研究組織の連携体制	35
9	若手研究者の育成に係る取組状況	36
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	37
11	研究費の使用状況・計画	38
12	今後の研究領域の推進方策	39
13	総括班評価者による評価	41

**研究組織**

(令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

**1 総括班及び総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	JP21H05200 「Slow-to-Fast 地震学」の推進と支援	井出 哲	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授	10
A01 計	JP21H05201 Slow-to-Fast 現象の物理化学プロセス解明	濱田 洋平	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員	7
A02 計	JP21H05202 Slow-to-Fast 地震発生帯の構造解剖と状態変化究明	山口 飛鳥	東京大学・大気海洋研究所・准教授	9
A03 計	JP21H05203 世界の沈み込み帯から:Slow と Fast の破壊現象の実像	伊藤 喜宏	京都大学・防災研究所・准教授	8
B01 計	JP21H5204 Slow-to-Fast 地震現象の詳細把握へ向けたマルチスケール観測技術の開発	田中 愛幸	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授	10
B02 計	JP21H5205 情報科学と地球物理学の融合による Slow-to-Fast 地震現象の包括的理解	加藤 愛太郎	東京大学・地震研究所・教授	10
B03 計	JP21H5206 時空間マルチスケールモデルからの予測：大規模計算と Slow-to-Fast 地震学	松澤 孝紀	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・主任研究員	7
<b>総括班及び総括班以外の計画研究 計 7 件（廃止を含む）</b>				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：「Slow-to-Fast 地震学」の推進と支援

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	井出 哲	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授	領域総括
分担	濱田 洋平	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門（高知コア研究所）・主任研究員	A01 班代表・地質学連携
分担	山口 飛鳥	東京大学・大気海洋研究所・准教授	A02 班代表・社会連携
分担	伊藤 喜宏	京都大学・防災研究所・准教授	A03 班代表・国際企画
分担	田中 愛幸	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授	B01 班代表・測地学連携
分担	加藤 愛太郎	東京大学・地震研究所・教授	B02 班代表・地震学連携
分担	松澤 孝紀	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・主任研究員	B03 班代表・広報企画
分担	竹尾 明子	東京大学・地震研究所・助教	事務局・若手企画
分担	北 佐枝子	国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・主任研究員	ダイバーシティ企画
分担	波多野 恭弘	大阪大学・理学研究科・教授	物理学連携
合計 10 名			

研究項目：A01

研究課題名：Slow-to-Fast 現象の物理化学プロセス解明

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	濱田 洋平	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門（高知コア研究所）・主任研究員	含水摩擦実験：摩擦実験流体下での断層強度回復試験の環境構築と予備実験の実施

分担	波多野 恭弘	大阪大学・理学研究科・教授	レオロジー理論・実験：断層滑りによって間隙水圧が動的に変化する効果を系統的かつ端的に理解するためのプロトタイプモデルの構築
分担	野田 博之	京都大学・防災研究所・准教授	数値実験：計算用ワークステーションの導入と2次元動的地震サイクルシミュレーションの実施
分担	山下 太	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波防災研究部門・主任研究員	長大岩石摩擦試験機：予備実験による感度調整と震源核形成のデータ取得
分担	山口 哲生	東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・准教授	粉体-流体混相系の単純せん断破壊試験：同軸二重円筒型試験機のセットアップと人工粒子などを用いた混相系のレオロジー特性の調査
分担	堤 昭人	京都大学・理学研究科・准教授	低速・中～高速摩擦試験：実験装置環境整備と、模擬断層物質を用いた予備実験実施
分担	藤内 智士	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・講師	砂箱実験：3D-DIC 非接触ひずみ変位解析システムの構築と予備実験実施
合計 7 名			

## 研究項目：A02

### 研究課題名：Slow-to-Fast 地震発生帯の構造解剖と状態変化究明

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	山口 飛鳥	東京大学・大気海洋研究所・准教授	統括・浅部物質研究・深部物質研究
分担	北 佐枝子	国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・主任研究員	深部観測研究
分担	新井 隆太	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門（地震発生帯研究センター）・副主任研究員	浅部観測研究・深部観測研究
分担	Wallis R. Simon	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授	深部物質研究
分担	橋本 善孝	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授	浅部物質研究・浅部観測研究
分担	辻 健	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授	浅部観測研究
分担	利根川 貴志	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門（地震発生帯研究センター）・主任研究員	浅部観測研究
分担	大坪 誠	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合	浅部観測研究

		センター・研究グループ長	
分担	仲田 理映	東京大学・地震研究所・助教	浅部観測研究
合計 9 名			

**研究項目 : A03**

**研究課題名 : 世界の沈み込み帯から:Slow と Fast の破壊現象の実像**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	伊藤 喜宏	京都大学・防災研究所・准教授	総括・海底圧力記録解析・スロースリップ活動比較
分担	宮崎 真一	京都大学・理学研究科・教授	GNSS 解析・プレート形状モデル化
分担	前田 裕太	名古屋大学・環境学研究科・講師	火山性地震・傾斜記録解析
分担	吉岡 祥一	神戸大学・都市安全研究センター・教授	温度構造・脱水分布モデル化
分担	石川 剛志	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・研究所長代理	地球化学調査・比較
分担	矢部 優	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員	浅部破壊モデル化
分担	氏家 恒太郎	筑波大学・生命環境系・教授	地質調査・比較
分担	望月 公廣	東京大学・地震研究所・教授	海底地震記録解析・地下構造比較
合計 8 名			

**研究項目 : B01**

**研究課題名 : Slow-to-Fast 地震現象の詳細把握へ向けたマルチスケール観測技術の開発**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	田中 愛幸	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授	総括・重力観測
分担	吉田 真人	東北大学・電気通信研究所・准教授	レーザ光源開発
分担	新谷 昌人	東京大学・地震研究所・教授	重力計開発

分担	横田 裕輔	東京大学・生産技術研究所・准教授	海底測地計測器開発
分担	大久保 慎人	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・准教授	地震・地殻変動計測
分担	塩原 肇	東京大学・地震研究所・教授	海底地震計開発
分担	荒木 英一郎	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・グループリーダー	ファイバ計測機器開発
分担	葛西 恵介	東北大学・電気通信研究所・准教授	レーザ光源開発
分担	青木 陽介	東京大学・地震研究所・准教授	地震・地殻変動計測
分担	板場 智史	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員	地震・地殻変動計測
合計 10 名			

## 研究項目：B02

### 研究課題名：情報科学と地球物理学の融合による Slow-to-Fast 地震現象の包括的理解

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	加藤 愛太郎	東京大学・地震研究所・教授	総括・地震カタログ構築・DAS 観測
分担	武村 俊介	東京大学・地震研究所・助教	地震波伝播シミュレーション
分担	矢野 恵佑	統計数理研究所・統計基盤数理研究系・准教授	地震・測地イベント検出
分担	中野 優	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・グループリーダー代理	地震・火山性低周波地震解析
分担	松田 孟留	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	統計モデリング
分担	内田 直希	東北大学・理学研究科・准教授	繰り返し地震解析
分担	内出 崇彦	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・上級主任研究員	深層学習・スペクトル解析

分担	三井 雄太	静岡大学・理学部・准教授	地殻変動解析
分担	小寺 祐貴	気象庁気象研究所・地震津波研究部・主任研究官	機械学習
分担	竹尾 明子	東京大学・地震研究所・助教	広帯域地震観測・スロー地震検出・統計解析
合計 10 名			

**研究項目：B03**

**研究課題名：時空間マルチスケールモデルからの予測：大規模計算と Slow-to-Fast 地震学**

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	松澤 孝紀	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・主任研究員	総括・マルチスケールモデリング・地震予測・カタログ構築
分担	堀 高峰	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・センター長	マルチスケールモデリング・地震予測
分担	井出 哲	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授	マルチスケールモデリング・地震予測・統計モデリング
分担	金子 善宏	京都大学・理学研究科・准教授	地震予測・マルチスケールモデリング
分担	野村 俊一	早稲田大学・商学学院(会計研究科)・准教授(任期付)	地震予測・統計モデリング
分担	廣瀬 仁	神戸大学・都市安全研究センター・准教授	カタログ構築・マルチスケールモデリング
分担	齊藤 竜彦	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波防災研究部門・主任研究員	地震予測・マルチスケールモデリング
合計 7 名			



### 3 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
公	22H05294 資源工学的視点の室内岩石実験による間隙水圧と Slow 地震の関連性解明	令和4年度 ～ 令和5年度	椋平 祐輔	東北大学・流体科学研究所・助教	1
公	22H05295 沈み込み帯における岩石-流体反応の溶液依存性と水理学的応答	令和4年度 ～ 令和5年度	岡本 敦	東北大学・環境科学研究科・教授	1
公	22H05309 BK モデルと熱・流体・空隙相互作用に基づくゆっくり・高速地震遷移の解析	令和4年度 ～ 令和5年度	鈴木 岳人	青山学院大学・理工学部・助教	1
公	22H05319 Slow to Fast すべり再現実験からスロー地震と巨大地震の関連性を探る	令和4年度 ～ 令和5年度	廣瀬 丈洋	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・研究所長代理	1
公	22H05320 剪断応力制御式二面剪断摩擦実験による沈み込み帯巨大地震のスロー地震誘発説の検討	令和4年度 ～ 令和5年度	谷川 亘	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員	1
公	22H05296 地化学機械学習による Slow-to-Fast 地震発生帯のシリカ輸送量の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	宇野 正起	東北大学・環境科学研究科・助教	1
公	22H05301 深部スロー地震断層のレオロジー不均質性に対する岩石・流体相互作用の影響	令和4年度 ～ 令和5年度	平内 健一	静岡大学・理学部・准教授	1
公	22H05302 炭酸ガスを含む水流体によるマンツルの加水反応はスロー地震の分布を説明するか？	令和4年度 ～ 令和5年度	川本 竜彦	静岡大学・理学部・教授	1
公	22H05303 断層内流体流動を決定づける岩石物理モデルの開発	令和4年度 ～ 令和5年度	澤山 和貴	京都大学・理学研究科・助教	1
公	22H05308 石英脈微小流体包有物の直接化学分析によって解き明かす地震発生帯流体の起源と挙動	令和4年度 ～ 令和5年度	井尻 暁	神戸大学・海事科学研究科・准教授	1
公	22H05314 紀伊半島の広域野外調査による地震発生帯の内部構造復元とその形成様式の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	志村 侑亮	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・学振特別研究員	1

公	22H05316 深部スロー地震発生域での地質構造・力学場に与える海山沈み込みの影響	令和4年度 ～ 令和5年度	宮川 歩夢	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員	1
公	22H05304 ブルカノ式噴火の Slow-to-Fast 理解のための火砕物噴出率推定法の開発	令和4年度 ～ 令和5年度	中道 治久	京都大学・防災研究所・准教授	1
公	22H05317 地動の歪・回転成分を用いたゆっくり地震解析：非せん断破壊成分の推定と新しい震源像	令和4年度 ～ 令和5年度	今西 和俊	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・総括研究主幹	1
公	22H05326 高空間分解能歪速度分布によるプレート衝突帯における定常・非定常地殻変動の検出	令和4年度 ～ 令和5年度	道家 涼介	神奈川県温泉地学研究所・研究課・主任研究員	1
公	22H05323 スロースリップ時空間遷移の実態把握の高精度化に向けた開発研究	令和4年度 ～ 令和5年度	町田 祐弥	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・研究員	1
公	22H05306 内陸スロー地震の光ケーブルによる測定と動的誘発過程を利用した発生過程の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	宮澤 理稔	京都大学・防災研究所・准教授	1
公	22H05307 Slow 地震活動を予測・定量化する新たな統計モデルの構築	令和4年度 ～ 令和5年度	西川 友章	京都大学・防災研究所・助教	1
公	22H05300 島弧-海溝結合系の超大規模モデルで迫る日本列島のマルチスケール地震準備-発生過程	令和4年度 ～ 令和5年度	安藤 亮輔	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授	1
公	24H01011 石英脈は地震発生帯の流体圧変動を記録するか？－人工石英脈からの検証－	令和6年度 ～ 令和7年度	岡本 敦	東北大学・環境科学研究科・教授	1
公	24H01036 流体反応実験と変形実験の融合による沈み込み帯の地震発生機構の新展開	令和6年度 ～ 令和7年度	奥田 花也	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・研究員	1
公	24H01027 微小弾性波の高度解析で明らかにする岩石への流体圧入で生じる Slow 地震の発生過程	令和6年度 ～ 令和7年度	直井 誠	京都大学・防災研究所・助教	1
公	24H01010 間隙水圧と Slow 地震の関連性解明のための室内岩石実験の完遂	令和6年度 ～ 令和7年度	椋平 祐輔	東北大学・流体科学研究所・助教	1

公	24H01021 テクトニック微動の伝播パターンに影響を及ぼす地下構造要因の解明	令和6年度 ～ 令和7年度	悪原 岳	東京大学・地震研究所・助教	1
公	24H01039 地震波速度構造の物質科学的実態の解明：空隙率の不均質性とスケールの効果	令和6年度 ～ 令和7年度	赤松 祐哉	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・特別研究員 (PD)	1
公	24H01013 Slow-to-Fast 地震発生領域のシリカシーリング過程と流体圧変動時間スケールの解明	令和6年度 ～ 令和7年度	宇野 正起	東北大学・環境科学研究科・准教授	1
公	24H01026 スラブ起源流体組成下の高温高压変形実験から探るスロー地震断層の運動像	令和6年度 ～ 令和7年度	平内 健一	静岡大学・理学部・准教授	1
公	24H01025 繰り返し地震の網羅的検出による群発地震発生域の非地震性すべりの時空間発展の解明	令和6年度 ～ 令和7年度	中島 淳一	東京工業大学・理学院・教授	1
公	24H01031 湧水の複数元素同位体から地震に関わる流体の起源や動きを探る	令和6年度 ～ 令和7年度	西尾 嘉朗	高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・准教授	1
公	24H01028 摩擦実験と数値実験の連成解析から紐解く断層物性・流体挙動モニタリング	令和6年度 ～ 令和7年度	澤山 和貴	京都大学・理学研究科・助教	1
公	24H01020 新しいデータ駆動型震源検出法による Slow-to-Fast 地震遷移現象の探索	令和6年度 ～ 令和7年度	奥脇 亮	筑波大学・生命環境系・助教	1
公	24H01017 繰り返し地震の破壊過程の解像による地震の複雑性の支配要因の研究	令和6年度 ～ 令和7年度	吉田 圭佑	東北大学・理学研究科・助教	1
公	24H01041 分布型音響センシングの歪波形に基づく地震の発震機構解推定手法の開発	令和6年度 ～ 令和7年度	馬場 慧	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・ポストドクトラル研究員	1
公	24H01040 機器特性・環境擾乱にも耐えられる水晶振動式圧力データ解析手法の開発	令和6年度 ～ 令和7年度	有吉 慶介	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・グループリーダー	1

公	24H01042 南海トラフ3次元速度構造モデルに基づく走時計算ニューラルネットワークの構築・公開	令和6年度 ～ 令和7年度	縣 亮一郎	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・研究員	1
公	24H01019 浅部スロースリップイベントはデータ同化でどの程度予測できるのか?	令和6年度 ～ 令和7年度	加納 将行	東北大学・理学研究科・助教	1
公	24H01022 島弧-海溝結合系の超大規模モデルで迫る日本列島のマルチスケール地震準備-発生過程	令和6年度 ～ 令和7年度	安藤 亮輔	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授	1
公	24H01044 What controls the thrust vergence in subduction zones? – Acquiring insights from lubrication-model-enhanced numerical sandbox experiments	令和6年度 ～ 令和7年度	Chen Jian	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(数理科学・先端技術研究開発センター)・副主任研究員	1
公募研究 計 38 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

## 研究領域全体に係る事項

### 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

日本は狭い国土に地球上の地震の1割以上が集中する地震国である。地震と震災が社会のあり方を変えてきた歴史があり、近未来には南海トラフの巨大地震や首都直下地震がほぼ確実に発生する。地震の理解と予測能力向上に対する社会からの期待は高く、世界最高水準の地震研究が行われている。それでも地震研究の歴史で見逃されていた現象、**Slow 地震**が我が国で発見され、精力的に研究されるようになったのは21世紀からである。Slow 地震は、地震と同じように地下の岩盤を変形させ地殻変動を引き起こすが、地震のように強烈な揺れを伴わない。発見直後は新奇な現象の特徴を解明する研究が盛んであったが、次第にその普遍性が明らかになるにつれて、巨大地震を含む普通の地震現象、いうなれば**Fast 地震**との関係がより重視されるようになってきた。Fast 地震についての研究も、地震研究を根本的に見直す契機となった東日本大震災から10年で大きく進歩した。現在では、超巨大地震から中小規模までの系統的な研究によって、標準的な地震現象の姿が明らかになってきた。今こそ**Slow 地震と Fast 地震の総合的包括的な理解によって地震学を再構築し、将来の地震発生についての定量的な予測を目指す**ときである。そのために提案されたのが、学術変革領域研究**Slow-to-Fast 地震学**(SF 地震学)である。

本研究は「当該学問分野の強い先端的な部分の発展・飛躍的な展開などが期待できる基礎的研究」に相当し、2016年度から2020年度まで実施された新学術領域研究「スロー地震学」(以下前研究と呼ぶ)を引き継ぐものである。前研究では Slow 地震の発生様式、発生環境、発生原理を理解することを目標に、100人近い研究者が融合的研究を行い、Slow 地震を体系的に取り扱うための基本的な理解が得られた。同時に多彩かつ密接な国際共同研究や研究集会によって、国際的学術ネットワークにおける主導的役割を果たしてきた。本研究は、この「学問分野の強い先端的な部分」を発展させ、飛躍的な新展開へ導くことを目指す。一方で前研究の5年間には、計測工学、計算工学、情報科学などの分野で革新的な技術進展があった。例えば光計測、人工知能、High Performance Computing (HPC)などであり、それら先端技術の地震研究への有効活用が視野に入ってきた。この状況をふまえ、本領域研究では、**理学関連分野間での融合を一層進めつつ、工学や情報科学分野の知見や技術を導入することで変革をもたらし、Slow-to-Fast 地震現象の理解から地震学を再構築するとともに、予測や科学的助言の能力を飛躍的に向上させる**ことで人間社会への貢献を果たす。

研究目的は前研究の Slow 地震現象単体についての理解から、巨大地震を含む Fast 地震と Slow 地震をまとめた、Slow-to-Fast 地震現象の総合的かつ包括的な理解へと発展させる。この点で、**これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる**研究計画といえる。総合的かつ包括的な理解によって、将来の地震についての予測能力や社会に対する科学的助言能力を飛躍的に向上させるとともに、地震以外の Slow プロセスと Fast プロセスを持つ様々な現象の理解も変革する。その目的実現のため、具体的研究計画を2つの方向性に沿って策定する。一つは**前研究で形成された分野融合をさらに実質的なものにする**こと(融合熟成)、もう一つは**新たな分野と連携を深め、さらに広い分野融合を進める**こと(先端展開)である。そして融合熟成系3件、先端展開系3件、計6件の計画研究を構成し、それぞれに新しい研究目的を設定している。

融合熟成系の計画研究は、学問分野ごとに分けるのではなく、研究の進め方によって新編成する。【A01

**実験物理班**は、物理学と地質学の融合による新たな「物質科学」によって、室内実験を中心に Slow と Fast が混在するプロセスの素過程を明らかにする。**【A02 構造解剖班】**は物理学的探査と地質学的観察によって、南海トラフをホームグラウンドとして、Slow-to-Fast 地震の発生帯の状態や構造を明らかにする。**【A03 国際比較班】**は、地震学、火山学、測地学、地質学という多様な切り口で世界中の地震発生帯の比較研究を行い、Slow 地震と Fast 地震の振る舞いを支配する要因を明らかにする。融合熟成を促進するために、各計画研究の分担者が他の計画研究にも協力することを推奨する。

先端展開のために、本研究では工学や情報科学との連携を進める。**【B01 新技術観測班】**は計測工学分野で急速に進歩している光ファイバ計測技術やロボット計測技術を取り入れ、機器開発に関わる企業も巻き込んで、前研究では見えなかった Slow-to-Fast 地震の信号を検出する。**【B02 情報科学班】**は情報科学分野の研究者と協力して、機械学習や人工知能などの技術を用いて、大量データから Slow-to-Fast 地震の特徴を抽出する。**【B03 モデル予測班】**では計算工学分野の富岳をはじめとした HPC プロジェクトと連携しつつ、Slow-to-Fast 地震の現在過去未来をモデル化、現実的予測に取り組む。これら他分野の新技術を導入することは、**Slow-to-Fast 地震の理解に貢献するだけでなく、技術自体の発展へもフィードバックが期待される**。例えば量子光計測の光格子時計や、富岳コンピュータは、技術が先端すぎるために適用対象を選ぶ。Slow-to-Fast 地震現象を新たな適用対象とすることで、先端技術開発に新しい方向性を提供できる。

現在、多くの人が Slow 地震に強い関心を持つのは、純粋理学的な興味と同時に、Slow 地震が巨大地震を含む Fast 地震と関係があり、より直接的には巨大地震準備プロセスの一部だとわかってきたからである。2011 年の東北沖地震をはじめ、2014 年チリ、2016 年ニュージーランド、2017 年メキシコの地震の際に、巨大地震と Slow 地震の関係について多くの研究がなされた。それら Slow 地震の理解の深化とともに、地震の予測に対する関心も再燃しつつある。例えば米国科学アカデミーの地震関連部会において、地震前兆現象としての Slow 地震の研究を強化すべきだという提案がなされている。Slow 地震単体から、複合的な Slow-to-Fast 地震現象への研究の進展は世界的な潮流である。

19 世紀以来、我が国の地震研究は地震の多い自然環境と高度な地震観測システムをもとに、常に世界の最先端を開拓してきた。それは 21 世紀からの Slow 地震研究においても続いている。本領域代表者井出や、B02 代表の加藤愛太郎によるレビュー論文(Beroza and Ide, 2011, AREPS; Obara and Kato, 2016, Science)は、全世界の研究者・学生が Slow 地震について学ぶ際の必読文献となっている。これまでの研究成果による本領域の国際的な優位性、その独創性と新規性は明らかである。但し、Slow 地震研究は国際的にも発展しつつある。Slow 地震は世界中、主に環太平洋で観察される普遍的なものであり、米国、カナダ、ニュージーランド、メキシコなどを中心に研究者は多く、ヨーロッパの研究者も急増中である。世界的に高まる関心のなか、今後数十年にわたって我が国の優位性が保たれる保証はない。また技術革新も看過できない。特に AI や機械学習を用いた地震研究では、これまでの大学や公的研究機関に加えて、Google のような情報産業の参入によって、今までにないタイプの研究が出現している。但し我が国にも情報科学、計算工学の強固な基盤があり、トップレベルの光計測や高速計算機の開発技術がある。これらの技術と地震研究の高い実力を結びつけることで、国際的優位性をさらに高めることが可能である。

政府の**統合イノベーション戦略 2020**（2020 年 7 月閣議決定）では「自然災害などに対する安全・安心に関する科学技術の強化」を掲げている。また 2017 年には直前地震予知の旗を降ろした一方で「南海トラフ地震に関連する情報」の提供を制度化した。この制度に Slow 地震の情報をいかに役立てるかという検討は、地震研究にとっての科学的助言の試金石になる。相当な不確実性を認めたくて、将来の地震の予測能力を向上させ、社会にとって有益な情報発信を行う。この難問に対するチャレンジは世界に先駆けて地震国日本で進めるべきものであり、本研究にはその一翼を担うという我が国固有の使命もある。

## 5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 審査結果の所見

本研究領域は、地震の2大形態であるSlow地震とFast地震の包括的な理解を目指すものであり、「地震＝地殻の破壊」というこれまでの概念を根本的に変革しようとするものである。この変革は他の固体地球科学分野にも大きな波及効果をもたらす事が期待される。また、これまでのSlow地震に関して先端的研究成果を上げてきた研究者が集結し、さらに物質科学・計算科学などの研究者も参加する研究組織が提案されており国際的にも優位性が認められる。加えて、甚大な被害をもたらすFast地震について、Slow地震と併せた統一的な地震像を構築することは、地震大国日本の社会に対しても大きなインパクトを与える。以上の点から、本研究領域は、学術変革領域研究にふさわしいものである。

一方で、いわゆる地震予知に対する社会的な期待が大きいことを考慮すると、本研究領域の進展によって、**Slow地震をFast地震の前兆現象として地震予知が可能になるという誤解が生じないような配慮**は必要である。もちろん本研究領域の進展によって地震予知が可能となれば喜ばしいが、革新的な地震学の確立が最大の目標であることは強調すべきである。

### 領域の対応状況

審査結果の所見の前半部分では、本研究領域が固体地球科学分野に大きな波及効果を及ぼす可能性が高いこと、また参加する研究者の実績は十分で国際的な優位性が高いことが指摘され、本研究領域の学術変革領域としての妥当性が述べられている。一方で、後半部分では本領域の研究と地震予知との関わりに懸念が示されている。本領域では、この所見を重視し地震予知との関係に気を使いつつ領域研究を進めている。なお、地震予知という言葉の使い方には注意が必要である。ここでは、社会的に通じる定義として、「特定地域で比較的短時間（＜普通数日、せいぜい数か月）の将来に、災害を及ぼす大規模な地震が発生することを高い確率で示すこと」、もしくはそれをかみ砕いた「巨大地震の警報を出せるレベルの正確な予測」を用いる。一方、将来の地震（Slow地震や小さな地震も含む）について、その発生確率を算出することは現在でも可能で、実際に大地震の確率予測結果は、政府（地震調査研究推進本部）からも公表されている。このような確率的地震予測は、地震予知とは切り離して考える。

現時点で地震予知は不可能であり、近い将来についてもきわめて困難だという認識は、多くの地震研究者に共有されている。この認識は国際地震学地球内部科学協会(IASPEI)で世界中の地震研究者から支持され、日本地震学会でも現在、地震予知の体制確立を目指すような取り組みは行われていない。本領域の研究者の多くは、日本に生きる一社会人として、地震予知ができれば良いという期待は共有しているが、現実的科学的目標としては、革新的な地震学の確立を目指すことが優先される。

本領域研究が始まってからも、Slow地震がFast地震と関連して発生するという観察事実は増え続けている。特に2024年には国内で重要な事例が続けて発生した。

元旦の能登半島地震(M7.6)の発生以前から、震源地域において水・流体なども関与するゆっくりした変形が起きている可能性が指摘されていた。ただし、それらの観察から、地震予知が可能になるという見込みはない。能登半島地震の発生直後には、多数の領域関係者がマスメディアなどで、先行するゆっくりした変形の解説も含めて地震の解説をした。その際にもこのような誤解が生じない配慮は十分なされていた。これらの解説に用いられたデータや研究成果は、地震予知とは関係ないが、この地震についての政府の報告書に大きく貢献している。これは本領域の目指す、社会や行政への科学的助言の実践の一例である。

3月には房総半島でスロースリップイベント（SSE）が発生し、M5を超える地震も発生した。このSSEは本領域の対象とするSlow地震そのものであり、その活動が群発地震を引き起こすことも良くわかっている。政府から直後にSSEと群発地震について解説がなされたが、これはこれまでのSlow地震についての研究成果を踏まえたものであった。SSEと群発地震の因果関係は明らかで、その確率予測は本領域の目指す革新的な地震学の確立によって、より正確になることが期待される。それでも地震予知とは結びつかない。

4月17日に豊後水道で発生したM6.6の地震は、政府によって南海トラフ地震臨時情報が発出される条件に近い地震だった。地震の場所は豊後水道のSSEが繰り返し発生する場所に近く、本領域にとっても重要な研究対象地域である。SSEによって地震発生様式が変化することを発見したことは、本領域A02の重要な成果であるが、これも地震予知に直接結びつくものではない。この地震も含め、Fast地震とSlow地震の関連について事例研究を積み重ね、将来予測を改善していくことが、現実的目標である。

以上のように、Slow地震とFast地震について、多くの興味深い観察事実が科学的な進展をもたらすものの、それは地震予知にすぐに結びつくものではないことは、領域内でよく認識されている。そこで、より積極的に、本領域研究が革新的な地震学の確立を目指すものであり、地震予知を目指すものではない、ということを一一般社会に対して明確にするために、本領域では一般向けのリーフレットを作成した（図1）。リーフレットではSlow地震の研究がなぜ重要かという説明とともに、「地震の予測とスロー地震」という項目では、朱書きで「いわゆる地震予知、巨大地震の警報を出せるレベルの正確な予測は現在できません」と明記し、誤解を予防している。

**スロー地震とは?**

地震は、地下の岩盤の「すべり」です。普通の地震ではすべりが急激に起きるのに対し、スロー地震は「ゆっくり」すべるので、地面はほとんど揺れません。そんなスロー地震が世界中で見つかってきました。

①プレート境界の各段の状態

① 各段はプレート間が固着し（くっつき）、隣のプレートが引きずり込まれ、ひずみが蓄積する。

② ファスト地震（普通の地震）

② ひずみが限界に達すると、断層面で急激なずれが起きる。このとき、地震動や津波が生じる。

③ スロー地震

③ スロー地震もふつうの地震と同様にひずみが限界に達したときに起きる。ただしすべりはとてもゆっくり進む。そのため揺れや津波も生じない。

**どこで起きているのか?**

スロー地震もファスト地震も、原動力は地球上のプレートの動きです。だから世界中のプレート境界の近くで発生します（下図）。日本周辺では南海トラフ、日本海溝などのプレート沈み込み帯で、よく発生しています（右図）。

**世界のスロー地震とファスト地震**

過去100年10大地震: M9.0 アラスカ (1959年), M9.0 カスケード (1992年), M9.0 カリフォルニア (1906年), M9.0 日本 (2011年東北沖), M9.1 台湾 (2004年スマトラ), M9.0 メキシコ (1992年), M9.0 コスタリカ (1990年), M9.0 エクアドル (1996年), M9.0 ニューゼーランド (1960年), M5.5 チリ (2011年)

**南海トラフと日本海溝周辺のスロー地震とファスト地震**

過去の主なファスト地震の震源の範囲

様々なスロー地震の震源の範囲

2011年M9

行来の巨大地震? 南海トラフ

**地震の予測とスロー地震**

いわゆる地震予知、巨大地震の警報を出せるレベルの正確な予測は現在できません。

「数十年間に起きる確率」というように、不確かさを含んだ予測が現実的です。より正確な現象の理解によって、不確かさを減らし、将来予測の力を高めることを目指しています。

例えば巨大地震の前には、何らかの準備プロセスがあり、それはスロー地震と関係あると考えられています。巨大地震の前にスロー地震がどのように発生するか、突きとめることはとても重要です。2011年東日本大震災では、M9の巨大地震の数週間から数日前に、プレート境界で、ゆっくりしたすべり（スロー地震）が2度起きていました。このようなことがいつも起きるのでしょうか？

本震時に大きく滑った領域（～20m以上）

本震の破壊領域

本震の破壊開始点

2度のゆっくり滑りの伝播

日本海溝

北米プレート

太平洋プレート

本震やゆっくり滑り時のずれの向き

プレート境界

Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program  
Kato et al. (2012)を元に作成

図1：Slow-to-Fast地震学リーフレット 日本語版より



## 6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

### 計画研究 X00 「Slow-to-Fast 地震学」の推進と支援 (総括班)

#### (1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

**【概要】** 本領域研究は 2016-2020 年度に実施された新学術領域研究「スロー地震学」(以下、前研究と呼ぶ)を引き継ぐ。前研究においては Slow 地震の発生様式、発生環境、発生原理を理解することを目標に、地球科学や物理学の多数の研究者が融合的研究を行い、同時に多彩かつ密接な国際共同研究によって、Slow 地震を体系的に取り扱うための基本的な理解が得られた。本領域研究においては、これまでに得られた Slow 地震についての基本的理解を踏まえて、通常地震(Fast 地震)も含めた地震関連現象の総合的包括的理解を進め、これまでの地震学を Slow-to-Fast 地震学として再構築することを目指している。本計画研究(総括班)は、様々な企画の運営主体となって、研究の流れを注意深く調整する。前計画で行った企画やマネジメント方法の長所を継承するとともに、時代変化に対応したアップグレードを行い、研究領域の推進に貢献する。

**【中間評価実施時までの進展】** 本領域では前研究より進行しつつある理学関連分野の融合研究を一層深めつつ(融合熟成)、新たに工学や情報科学分野の知見や技術を導入する(先端展開)。この融合熟成系 3 課題(A01, A02, A03)および先端展開系 3 課題(B01, B02, B03)、計 6 課題の計画研究を立ち上げた。研究開始とともに、それぞれの計画研究(班)とともに、班間の調整を行う総括班、事務局および、国際的展開、若手育成、広報活動を行う体制を構築した。

総括班では、領域ウェブサイトや、メーリングリスト、Slack など様々な情報流通手段を確立し、ニュースレターを年一度、メールニュースを季刊発行する連絡体制を整えた。領域のロゴマーク(図2)とともに各課題のシンボルアイコンを作成し利用している。公募研究は 2022-2023 年および 2024-2025 年で募集し、採択された研究を上記 6 課題に取り込み、領域内の共同研究を促進してきた。

総括班では、中間評価実施時までには毎年の国際研究集会におけるトピックの選定、データベースの運営、Slow-to-Fast 地震に関する用語集作成などを通して、領域全体に大局的な研究進展の方向性を示しつつ、自由な議論を促進するために、様々な研究集会、学会特別セッションの運営を行ってきた。領域内での互いの研究を詳細に知るために 2023 年 4 月に成果集を作成した。また領域内の若手の自由な意見交換を促進するための企画や巡検を通じた研究者交流の機会も用意した。これらの活動は、実際には領域内にとどまらない国内外の研究者をも巻き込む波及・相乗効果をもたらした。特に国内外で展開した巡検では、訪問地の地質について学ぶことはもちろん、研究対象を目前にして議論することで、参加者間の相互理解を深め、共同研究を促進する効果が高かった。国際的には日本の地震研究の主要グループとして、リーダーシップを発揮し、ネットワークを構築することを目標としてきた。実際に、押しかけワークショップや国際学会での特別セッション運営を行うことで、当領域の国際的な認知度は確立されつつある。また広報においては、領域ウェブ、リーフレット、ニュースレターを中心とした広報活動を行うとともに、ジオパークとの協働による社会貢献活動なども行い、科学的助言の実践の場とした。



図2：ロゴマークの一例

## (2) 得られた成果

**国際合同研究集会：**“International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes”を2022年奈良市(図3)、2023年東京都で開催し、2024年は別府市での開催準備を進めている。毎回3つのトピックを取り上げ、領域の大局的な方向性を示すとともに、ブレイクアウトセッションにより、ボトムアップ的な議論を促進した。集会後の巡検の場でも活発な議論が行われた(図4)。詳細は「7 研究発表の状況」を参照。



図3：2022年国際研究集会

**押しかけワークショップ：**既存の国際協力関係を軸として、新たに共同研究の芽を育てるためのワークショップを台湾およびメキシコで主催、フランスのサマースクールを共催した。詳細は「7 研究発表の状況」を参照。本年度もフランスのサマースクールとチリでのワークショップを予定している。



図4：2023年国際研究集会後の巡検

- ・2023年3月“Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan”台湾台南市ほか
- ・2023年10月“Cargèse 2023 School on Subduction Zone Processes”仏コルシカ島 Cargèse
- ・2024年2月“International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes in Mexico”CDMX, Mexico(図5)



図5：メキシコ押しかけワークショップ

**国内学会における活動：**国内最大の地球科学系研究集会、日本地球惑星科学連合大会 JpGU において、領域名と同じセッション“Science of Slow-to-Fast Earthquakes”を、英語を主言語とする国際セッションで開催している。発表数は2022年50件、2023年90件、2024年91件。JpGUのなかでも、ほぼ最大規模となる大型セッションで活発な議論が行われた。大会期間中には領域ブースを運営し、領域内外の情報流通を促進するとともに、領域集会、懇親会、若手イベントなどで領域メンバーの交流を促進した。

**海外学会における活動：**世界最大の地球科学系研究集会、米国地球物理連合大会 AGU において、国際班 A03 を中心に、海外研究者と共同で、特別セッションを開催している。発表数は2022年93件、2023年74件、2024年も開催予定。2023年はヨーロッパ地球惑星科学連合 EGU においても特別セッションを開催した。

**Slow Earthquake Database 運営：**前研究で作成・公開した“Slow Earthquake Database”の運用と拡充を続けてきた。カタログ数は、本研究開始時の80から137まで拡充した。北米、中南米、台湾、ニュージーランド、トルコのカタログを含む国際的データベースとなっている。関連論文(Kano et al., 2018)は68回(Google Scholar)引用されている。引用の1/3が海外からであり、国際的にも良く利用されている。

**Slow & Fast 地震の用語集作成：**Slow地震研究の進展に伴い多くの新語が作成された結果、学生や他分野の研究者にとって、多様な用語が理解の壁となることが判明した。そこで、Slow地震に関してよく使われる用語を中心に用語集を作成することにした。用語集検討集会などを経て対象用語を選定、第一弾では23語に関し簡単な解説文(日本語と英語)をまとめ、領域ウェブサイトにて公開した。

**その他：**若手研究者支援活動については「9 若手研究者の育成に係る取組状況」に、領域の広報活動については、「10 アウトリーチ活動に係る取組状況」にまとめた。

## 計画研究 A01 Slow-to-Fast 現象の物理化学プロセス解明

### (1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

**【概要】** A01 実験物理班では、力学実験と物理モデリングを両輪とした新たな「物質科学」の創出から、Slow-to-Fast 地震を支配する物理化学プロセスの解明と、そのプロセスの地震予測モデルへの組み込みを目指している。本研究では以下の 3 つのサブグループ(SG)を整備し、公募研究と協同してこの目標に対して取り組んできた。

**水-断層系のレオロジーSG:** 地震発生現場同様の含水条件下での断層すべりはじめ-すべり中-すべり後に至る物性と構造、化学変化を追跡し、その物理化学プロセスを明らかにする。

**空間拡張試験 SG:** 長大岩石摩擦試験機と機械式大型粉粒体圧縮装置を用いた断層すべり過程の再現により、Slow-to-Fast 地震におけるスケールとマクロな構造不均質の影響を明らかにする。

**素過程物理モデル SG:** 明らかとなった素過程を地震モデルに組み込み、より高精度で現実的なモデリングを行うための非平衡・連続体物理モデル化と数値実験を行う。スケールの異なる様々なすべり現象において摩擦力がどう変化するか、特に岩石摩擦の長さスケール依存性について理解を進展させ、室内摩擦実験の天然断層への適用可能性を吟味、アップスケールの方法について検討する。

**公募研究:** 上記 3 つの SG で行う研究の連携・補完を重視し、地震発生環境における変形様式やスケール・形状効果を考慮した岩石・アナログ物質実験、非平衡状態の物理モデル化に向けた理論構築などの Slow-to-Fast 現象の物理化学プロセス解明に資する研究を公募した。

**【中間評価実施時までの進展】** 既存試験機を用いた力学試験の開始とデータ取得、また、非接触ひずみ変位システムと大型実験用 AE 計測プリアンプ、数値計算用ワークステーションの新規導入、スケール・形状効果を定量化する実験環境の整備と予備実験の実施を計画した。各力学・数値実験ともに実験環境の整備とデータの取得は実施済みであり、計画通りに研究は進行している。

**水-断層系のレオロジーSG:** 水圧-トルク制御式摩擦試験、低-中-高速摩擦試験、同軸二重円筒によるせん断実験の 3 種の試験を行い、それぞれ流水環境下におけるすべりはじめの摩擦試験とトルク制御機構の整備、天然試料を用いた回転式せん断試験による沈み込み帯浅部断層における断層すべり過程解明、模擬物質（岩塩）を用いた粉体のせん断・破壊実験の実施まで進行している。

**空間拡張試験 SG:** 特にスケール依存性が指摘される岩石の摩擦特性の要因とメカニズム、大規模構造形成時の応力変動過程の解明に注力する。現時点において、長大岩石摩擦試験では大型の岩石試料を用いた摩擦実験を実施により、ゆっくりすべりに伴って発生する前震の解析を通して原位置での力学的パラメータを精度良く抽出することに成功した。大型粉粒体圧縮装置では新規導入したデジタル画像相関法(DIC)によって大規模構造形成時の構造発達過程によって解析する手法を導入・予備実験を実施した。

**素過程物理モデル SG:** 数値実験環境の整備を終え、二次元的弾性体における断層面について、摩擦特性の不均質性を取り入れた準静的すべりダイナミクスのコードを実装した。不均質性について簡単な分布を仮定した上でシミュレーションを実行した。また、摩擦発熱による熱弾性不安定が摩擦実験時の試料サイズ依存性に寄与している可能性を見出し、現時点で本機構の数値計算手法の開発とプログラムの作成が完了した。

**公募研究:** 計画研究で用いる摩擦試験との連携として、原位置の水圧環境を模した臨界条件での摩擦実験（廣瀬）、断層転移減少とスロー地震の誘発仮説の検証を目的とした二面せん断試験（谷川）の 2 課題が採択・実施された。また、計画研究でカバーされていない力学試験や化学分析、数値実験として、以下の 3 課題も採択・実施された。地下の間隙水圧分布条件、地殻応力条件を再現した資源工学的な注水環境を模擬した試験機によってスロー地震の発生メカニズムを検証する実験的研究（椋平）、スロー地震発生場における物質移動・体積変化を伴う反応の素過程を明らかにする岩石学的解析、水熱反応実験研究

(岡本)、スローから高速すべりへの遷移をバネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用の下で解析し、どの物性パラメーターがすべり遷移において重要な役割を果たすのかを精査した数値実験(鈴木)

## 2) 得られた成果

**水-断層系のレオロジーSG:** 水圧-トルク制御式摩擦試験により、流体の流れがあるときには、見かけ上断層の強度が回復せず、ひずみが蓄積しない可能性を提示した。また同軸二重円筒によるせん断実験をもとに、岩塩粒子同士の摩擦によって生成した微小粒子が粒子間隙に堆積することで、有効法線応力が減少する理論モデルの構築が行われた(Chang et al., submitted)。低-中-高速摩擦試験では、非排水条件下では有効応力の減少により断層強度が低下すること、巨視的断層すべりに移行するまでの間隙流体圧上昇量が、すべり時の間隙流体圧上昇量と同程度であること、すべり時の間隙圧上昇によってすべり弱体化距離が顕著に小さくなることなどが明らかになった。凹凸(バンプ)をもつソフトポリマーゲルを用いた摩擦実験からは媒体の弾性変形、バンプの摩擦変化、バンプ位置の不規則性などの影響により高速から低速へのすべりへの遷移が生じることを説明した(Yamaguchi et al., 2024)<sup>A03</sup>。

**空間拡張試験 SG:** 大型岩石試料を用いた長大試験機の運用を開始した(Yamashita et al., 2021)。断層面にあらかじめ円形状にガウジ物質を配置した実験により、前震の破壊域の大きさと形状を制御し、応力降下量や破壊エネルギーを精度良く推定することに成功した。さらに、メートルスケールのガウジ摩擦実験で観察されたゆっくりとした荷重振動を、速度-状態依存摩擦則によって説明し、その摩擦パラメーターを推定した。大型粉粒体圧縮試験では、粉粒体を用いたクーロンウェッジの形成過程をDICで解析する実験装置を構築し、砂層の初期充填率によって、一つの剪断帯の変位期間、剪断帯同士の間隔、ウェッジ内での歪局在化パターンが異なることを見出した(藤内ほか, 2024)。

**素過程物理モデル SG:** 速度強化と速度弱化的領域がランダムに分布している系では、両者の割合が拮抗している場合に複雑なすべり挙動が生じることを確認した。例えば、局所的な遅いすべりが断層面の異なる場所で交互に発生する様子が再現できる。他方、速度強化・弱化的の面積割合がどちらかに偏っている場合、空間分布はすべりの安定性に対して本質的な影響を及ぼさず、「多数派」によって断層面のすべり特性が決定されることが分かった。また動的な地震サイクル計算では、多孔質弾性論の導入とその断層挙動への影響を評価した。沈み込み帯浅部プレート境界近傍の脱水反応を考慮した定常的間隙水圧分布モデルを作成、局所的な異常高間隙水圧域は、流体の湧出地点の局在化ではなく、小さな透水係数の局在化が重要であることを示した。クリープの加速挙動に摩擦則の状態遷移則が現れ、これがVoightの破壊予測則と対応する事を示した。熱弾性不安定による垂直応力不均質の効率的な計算手法を開発、不安定化するすべり速度が試料サイズに反比例し一般的な実験条件と合致する事を指摘した(Noda, 2023)。

**公募研究:** Fast地震のような高速のスライド-ホールド-スライド試験から、高速すべり後の強度回復速度が低速すべりの場合と比べて1~2桁速いことが明らかとなった。また、ラマン分光法による断層面分析からは、断層表面の化学結合特性が変化していることが示された(Bedford et al., 2021)。近接する2面の弱面を含む断層帯を模擬した試験装置を作成、電磁誘導式アブソリュートエンコーダーによる両面のすべり量・すべり速度の高精度推定に成功した。間隙水圧分布を考慮した注水によるせん断実験にAEの連続計測が可能な計測システムを導入した。フィールドにおける注入誘発地震について、原位置応力との相関と透水性との関係性(Mukuhira et al., 2023)やb値変動のメカニズム(Mukuhira et al., 2024)を論じた。三波川帯の蛇紋岩体の解析、水熱実験、岩石-流体の熱力学的計算から、特に温かい沈み込み帯のマントルウェッジ深度において、地殻からマントルへのSi輸送と、マントルから地殻へのMg輸送が同時に起こり、滑石と緑泥石という力学的に弱い境界層を形成することを明らかにした(Okamoto et al., 2023)。スリップフロント伝播速度(SFP)の決定因子を解析的、数値的に検討した結果、SFP挙動は線形化された摩擦則によって十分に表現されることが判明した(Suzuki et al., 2022)。

## 計画研究 A02 Slow-to-Fast 地震発生帯の構造解剖と状態変化究明

### (1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

**【概要】** 本領域応募時において、Slow 地震の地球物理学的な観測と、その実態である地質学的観察・物質科学の間にはギャップがあり、統一的な理解に及んでいなかった。また、Slow 地震は Fast 地震の準備過程と考えられるが、その具体的な道筋も不明な点が多かった。これらの原因として、地球物理学的に観測可能な時間・空間の範囲（数年まで・数 km 以上）と、地質学的な観察が可能な時間・空間の範囲（数百万年間の積分・数百 m 以下）にスケールのギャップがあることが考えられる。このギャップの解決のためには、同じテストフィールドを対象に地球物理学（観測）と地質学（物質）のアプローチを行うことが不可欠であったことから、領域設定期間内の学術的問いを以下のように設定した。

- ・ Slow 地震と Fast 地震の発生場所を決める要因は何か？ [発生場所を決める要因]
- ・ Slow 地震と Fast 地震の発生する領域では、地震の発生に向けて岩石中の流体移動・化学反応・岩石破壊が時間とともにどのように発展していくのか？ [地震発生までの各種パラメータの時系列変化]
- ・ Slow 地震と Fast 地震の遷移領域をかつてない高空間解像度で解剖すると、Slow/Fast 地震は物質/流体のどのような挙動と対応づけられるのか？ [Slow 地震と Fast 地震の空間的遷移領域]

これらの問いに挑戦するために、計画研究中の小課題を、対象（浅部/深部）と専門（地球物理観測/物質科学）という区分により、4つの小課題（浅部観測・浅部物質・深部観測・深部物質）に分けて遂行する。また、これらの計画研究と協働する公募研究として、観測と実験の時間スケールをつなぐ研究と、紀伊半島・熊野灘にフォーカスを当てた研究を募集した。

**【中間評価実施時までの進展】** 中間評価実施時まで、各自が高精度なデータ収集を行い、期間の後半にデータを統合して解析・解釈を行うことを予定していた。この目標は順調に達成されており、班内外での共同研究や、モデリングを主とする公募研究の進展により、統合的研究を前倒しで実施している状況である。上記の学術的問いに対する現時点での解答状況は以下の通り。

**発生場所を決める要因**として、Slow 地震は岩石中に流体が多く存在し、海山などのプレート境界面の凹凸が多い箇所が発生することが、南海トラフ浅部の観測研究から明らかになった。また、プレート境界面の凹凸が流体の経路を形成することが、日向灘の詳細な構造探査により判明した。プレート境界面の凹凸が沈み込み帯の大構造形成に与える影響について、アナログモデル実験および数値計算によりシミュレーションした。

**地震発生までの各種パラメータの時系列変化**では、南海トラフ浅部において、微動や、反射波の振幅の時間変化を用いたモニタリングを行い、地層の固化・脱水プロセスに関係すると考えられる弾性波速度の変化を捉えるとともに、反射波振幅の時間変化からプレート境界近傍の流体の動きがわかりつつある。流体移動は陸上付加体の地質学的研究からも、地震サイクル内での流体圧の変化や、地震前後の変動量として定量的に求められている。また、スラブ内地震とスロー地震との連動性を南海トラフの紀伊半島・豊後水道・東海地方で確認した。

**Slow 地震と Fast 地震の空間的遷移領域**について、深部スロー地震とウェッジマントルの変形、スラブ起源流体との関係について班内の共同研究により地質学的研究を進め、変形微細組織と変形機構を天然・実験から明らかにするとともに、深部スロー地震発生域の差応力を推定した。

また 2022-2023 年度の A02 構造解剖班に関連する公募研究は、領域内で最多の 7 件採択された。これらは特に計画研究の物質科学的な面を補強している。

### (2) 得られた成果

**浅部観測研究：** 南海トラフを対象に班内の共同研究を進めている。反射法地震探査結果を用いて Slow 地震発生場の詳細な地質構造・断層構造を明らかにした (Hashimoto et al., 2022, Kimura et al., 2022)。微動

を用いて地下構造のモニタリングを高い時間解像度で実施する手法を開発した。これを用いてプレートの沈み込みに伴う地層の固化プロセスまたは脱水プロセスに関係すると考えられる弾性波速度の変化を捉えることに成功した。また反射波振幅の時間変化を用いることで、Slow 地震発生時のプレート境界近傍の流体移動を可視化した(Tonegawa et al., 2023)。波形インバージョン解析によって、日向灘の Slow 地震発生域の構造イメージングに成功し、沈み込む九州パラオ海嶺によって作られた流体経路を発見した(Arai et al., 2023)。さらに、Slow 地震発生域と Fast 地震発生域に対応して沈み込むプレートの構造（地殻の厚さとプレート上面の凸凹）が異なることを明らかにした（Arai et al., 2024）。

**浅部物質研究：** 四万十帯についての A01 班・A03 班との共同研究によって、間隙流体圧と鉍物脈の間隔の関係が明らかになってきた。地質学的観察から間隙流体圧の時間変化や Slow 地震のサイズを推定する手法を開発した。プレート境界断層近傍で形成された鉍物脈の古応力解析、温度圧力履歴、岩石破壊理論を組み合わせ、地震前後の流体圧比の変動を定量化した(Hosokawa and Hashimoto, 2022)。浅部付加体の物質を用いた摩擦実験を行い、浅部スロー地震域と巨大地震発生帯では摩擦特性が変わること、沈み込む海洋地殻が海水と反応してできる曹長石が、巨大地震の発生に寄与している可能性を指摘した(Okuda et al., 2023)。海山沈み込みのアナログモデル実験を行い、地形の効果に加えて沈み込む海山表面の摩擦が付加体内部の断層構造に大きく影響することを明らかにした(Okuma et al., 2022)。

**深部観測研究：** A03 班・B02 班との共同研究として、南海トラフの紀伊半島、豊後水道、東海地方において、短期的・長期的スロースリップとスラブ内地震が連動して発生していることを確認した。特に紀伊半島下では詳細な震源分布と応力場の時空間データ解析から、流体の移動がスロースリップとスラブ内地震の連動発生に関わることを示した。これに繰り返し地震活動との比較を加えることで、海溝型巨大地震の前のひずみ蓄積過程に、スロースリップやスラブ内地震の活動に関わる可能性も示した(Kita et al., 2021)。

**深部物質研究：** 領域内の共同研究として三波川帯の地質学的調査を進めた結果、現在の西南日本沈み込み帯と類似する条件で変形が生じており、深部スロー地震が発生する応力条件は 30–80 MPa であることを推定した(Koyama et al., 2022)。また、深部スロー地震の特徴との関連性を議論できる、延性変形・脆性変形が同時に起きた岩石記録を見出した。

**公募研究：** 澤山は、岩石力学的見地から地震波速度・電気比抵抗と亀裂浸透率を関連付ける物理量を明らかにし、亀裂の透水性の変化を予測するモデルを構築した(Sawayama et al., 2023)。平内は深部 Slow 地震発生域に相当するマントル物質の構造を精査した。その結果、高間隙水圧のもとで岩石に引張破壊と剪断破壊の両方が発達した後に鉍物沈殿により亀裂が閉塞されることが繰り返しており、これが Slow 地震の発生サイクルに相当する可能性を指摘した。地球化学的見地から、川本はプレート境界のさまざまな深度で変形した岩石中に含まれる流体包有物の塩濃度を測定し、西南日本弧のプレート境界の深さ 10–20 km 付近に海水に近い塩濃度を持つ水が存在したという説を提案した。一方、井尻は断層近傍の石英脈の酸素同位体比分析を行い、水の起源が含水鉍物に含まれる水であることを示した。志村は、紀伊半島の広域的・高密度な野外地質調査を行い、プレート境界断層帯の厚さの深度変化、沈み込むプレートの地形による地震発生帯の構造変化を見出した(Shimura et al., 2021)。宮川は、沈み込み帯の浅部から深部にかけての構造変形と力学場の時空間発展のモデル化を行い、プレート境界深部において異なる物質が共存する「ブロックインマトリックス構造」を再現した。この構造の力学的時間発展を精査することで、Slow 地震に与える影響を検討中である。宇野は、現在の海洋底の堆積物の化学組成をコンパイルし、機械学習により、5 種の微量元素の比から流体移動に伴うシリカ(SiO<sub>2</sub>)の移動量が決定できることを示した(Matsuno et al., 2021)。

## 計画研究 A03 世界の沈み込み帯から：Slow と Fast の破壊現象の実像

### (1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

**【概要】** 本研究計画では、世界の沈み込み帯に着目して、その比較研究を進めることで、「どこで」「どのように」Slow から Fast に現象が変化するか、すなわち Slow から Fast に至る空間分布とその特徴の解明に取り組む。特に、流体と断層の幾何形状の視点から、Slow から Fast に「どこで」「どのように」変化するかを、世界の沈み込み帯を調査対象とした「比較沈み込み帯学」の視点から Slow と Fast の破壊現象の理解を目指す。特に、領域設定期間内の学術的問いを以下のように設定した。

1. Slow 地震の発生を支配する地震学的または地質学的構造とは？
2. 流体と断層すべりの相互作用が Slow-to-Fast 地震に及ぼす影響とは？
3. Slow 地震の発生場を特徴づける流体-岩石化学反応とは？

これらの問いに答えるための研究を、地震観測研究、地質学的研究、地球化学的研究、数値モデル研究、火山研究と分けて実施する。またこれらと有機的に連携して研究できる公募研究課題を募集する。

### 【中間評価実施時までの進展】

**地震観測研究：** 地震の Slow から Fast への破壊遷移を理解するためには、地震波速度構造の把握が必須であり、特に海域下での S 波速度構造の推定が重要だが未確立だった。このため、我々は海底および陸上の地震記録から S 波速度を推定する新手法を開発した。今後、ニュージーランドやメキシコの沈み込み帯に適用する。また、Slow と Fast 地震の震源を高空間分解能で得ることも重要である。ニュージーランド北島沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯で高頻度に発生するスロースリップイベント (SSE) と断層すべりを高密度の海域地球物理観測網を用いて詳細に観測した。今後は、プレート境界の構造と断層すべりの特徴を明らかにし、プレート境界における多様なすべりの要因の解明を目指す。

**地質学的研究：** Slow 地震の発生を支配する地質学的構造の理解に向けて、南海トラフに代表される若くて暖かいプレートの沈み込み帯で形成された長崎・西彼杵変成岩と石垣島・トムル変成岩を対象とした陸域アナログ研究を領域設定期間で進める。これまでにマントルウェッジ付近のプレート境界に沿って発達した変成岩を解析した結果、交代作用による化学反応がスロースリップに相当する粘性剪断を促進する可能性が示された。

**地球化学的研究：** Slow と Fast の破壊現象に関連する流体岩石反応についての研究も行なった。その結果、沈み込み帯プレート境界における Slow と Fast の破壊現象に関連する流体の化学的特徴づけ、および Slow 地震に関連する岩相境界での流体岩石反応の検出に成功した。

**数値モデル研究：** 流体と断層すべりの相互作用が Slow-to-Fast 地震に与える影響の理解に向けて、スロー地震域の流体と断層破壊の関係のモデル化を進めた。これまでに、モホ面より浅い領域で発生する深部スロー地震の発生機構についてモデル化に成功した。また、沈み込み帯の温度場の理解のために、3次元温度構造を行う。これまでに、アラスカ、中部～南部チリ、インドネシアの解析を対象とした温度構造のモデリングが完了した。今後さらにアリューシャンとコスタリカで温度構造を得たのち、脱水分布と Slow-to-Fast 地震との比較を行い、その普遍性や地域性の解明を目指す。

**火山研究：** 火山噴火には様々な様式があり、噴火に際して Slow から Fast に至る様々な変動現象が観測される。ここでは、火山噴火直前の傾斜変動について世界各地の活火山を対象に同一の手法・条件で解析・比較して、Slow to Fast もしくは Fast to Slow な傾斜変動を生じる物理過程の解明を領域設定期間の目標とした。これまでに国内 10 火山で検知した 3749 の噴火前傾斜変動波形が類似度に基づいて分類された。加えて、火山現象の Fast-to-Slow 過程の理解に最適な爆発地震を対象として、特にスロー地震の周期帯に着目した波形インバージョン解析を実施し、噴火に至る過程の理解を深めた。

### (2) 得られた成果

**地震観測研究：** ヒクランギ沈み込み帯の中間部には明瞭な固着強度境界が存在し、これがスロースリップイベント（SSE）の発生領域の深度と発生間隔に空間的な大きな変化をもたらしている。この地域で行われた海域地球物理観測により、固着強度境界を跨いで直接の SSE 観測に成功した。観測された SSE の断層すべり分布とテクトニック微動の活動分布が、プレート間固着強度分布の境界と一致していることから、断層すべりの様式が固着強度の変化によって支配されている可能性が示唆された。

**地質学的研究：** 変成岩を対象としたから、3つの主な成果が得られた。①マントルウエッジコーナー付近で発生する深部スロースリップは、交代作用に伴って緑泥石ーアクチノ閃石片岩に沿った粘性剪断で説明できること(Ujii et al., 2022)。②深部微動発生域における高流体圧発生は、少なくとも上限付近では海洋地殻の脱水ではなく堆積物の脱水に起因し、③深部テクトニック微動発生域は、プレート境界に沿った厚さ数十～数百メートル幅を持つ石英脈の破壊連鎖で特徴づけられること(Ujii et al., 2024)。

**地球化学的研究：** 西南日本前弧域に湧出している深部流体のリチウム同位体分析に基づき、有馬型塩水が沈み込むフィリピン海プレート起源のスラブ流体であること、東部紀伊半島下の深部スロー地震発生場にも存在している可能性があることが明らかにされた(Uman et al., 2022)。また、四万十付加体楨峰メランジュの陸域アナログ試料の微量元素・同位体分析により、深部スロー地震発生域で生じたと考えられる流体岩石相互作用の検出に成功し、反応帯が塩水系スラブ流体の流路に沿って発達していることを示唆する知見が得られた。

**数値モデル研究：** 2次元確率的セルオートマトンモデルを用いたスロー地震のモデル化が進められた。従来は空間的スケールの情報が不明であったが、ここでは、陸上アナログ研究により得られた流体と破壊の痕跡（石英脈濃集帯）の空間的スケールを導入した。結果、陸上露頭で観察された破壊の特徴と、観測されるテクトニック微動の波形の特徴が定量的に関連づけられることを示した。さらに、沈み込み帯の温度構造の比較研究に向けて、アラスカ、中部～南部チリ、伊豆—小笠原、中米、バヌアツにおいて3次元温度構造モデリングを実施し、温度構造と脱水分布を推定した(Iwamoto et al., 2022)。また、日本の SSE やプレート間固着に関連した GNSS データの解析、東北地方太平洋沖地震や 2010 年マウレ地震の粘弾性応答解析、三宅島噴火に伴う地殻変動解析やメキシコの火山のマグマ貫入過程のモデリングなど、Slow-to-Fast 地震に関連する幅広い分野の研究を進めた。

**火山研究：** 火山における Slow と Fast の破壊現象の理解に向けて、噴火前傾斜変動を検知するアルゴリズムを開発した。これまでに、噴火日時が既知で連続波形を入手可能な国内全火山・全噴火にアルゴリズムを適用して噴火前傾斜変動を網羅的に検知した。その結果、噴火頻度によらず多くの火山で約半数の噴火に傾斜変動が先行すること、Slow to Fast なものが最も多いが Fast to Slow なものも少なくないこと、傾斜変動先行率には噴火タイプにより僅かだが有意な差異があること、傾斜変動振幅と継続時間が相関することなどが明らかになった(Maeda, 2023)。

**公募研究：** 桜島の爆発地震について、広帯域地震波形記録の周期 1 秒から 15 秒の波に着目した波形インバージョン解析を行い、爆発地震の震源は既往研究で推定されている深度よりも格段に浅い火口直下の数 100 m に位置すること、メカニズム解は水平開口亀裂とシングルフォース成分で説明できること、火砕物やガスの噴出過程に特徴的な波形が説明できることを示した。伊豆衝突帯北東縁部の高空間分解能の歪速度場の解析から、その剪断変形帯の内部において、複数の変形集中域の存在を示した(本多他, 2023)。これらは、同地域における活断層や活火山周辺における変形の集中を示唆する。2023 年に観測された非定常的な地殻変動は、足柄平野下で 1 ヶ月間継続するスローな断層すべりとして説明され、箱根火山の浅部の地殻変動を誘発した可能性が示された。2023 年 2 月から愛媛県内に展開された広帯域地震計アレイ観測を用いて、豊後水道や日向灘で発生した複数の M4 を超える地震の観測に成功し、S/N の良好な地動回転成分の抽出に成功した。さらに、ひずみ地震動と回転成分を加えた場合のモーメントテンソル解析手法も開発した。



## 計画研究 B01 Slow-to-Fast 地震現象の詳細把握へ向けたマルチスケール観測技術の開発

### (1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

**【概要】** 本計画研究では、時空間分解能の高い観測を実現するため、「重力計測」、「ファイバ計測」、「海底計測」の3グループで開発を実施する。それぞれのグループの5年間の目標は以下の通り。

**重力計測：** 通信波長帯レーザー（1550 nm）を用いた遠隔・多点同時重力計測手法を開発し、地殻流体移動に関わる重力変化を複数地点で同時に捉える。

**ファイバ計測：** 低速～高速現象を継ぎ目なく捉えられる分布型センシング手法を開発するとともに、温度変化の補償手法を開発する。海陸のケーブルを用いて観測を行い、Slow-to-Fast 現象を詳細に捉える。

**海底計測：** 水深 6000m 以深の超深海で計測可能な広帯域海底地震計及び無人・準常時観測可能とした海底地殻変動観測手法を開発し、海溝付近の Slow-to-Fast 現象検出へ向けた初の実観測実験を行う。

3グループとも5年間の前半で機器開発を、後半でフィールドでの実証試験を行う。開発と実証試験を着実に進めるため、領域外プロジェクトなどとも連携し、開発機器を用いた共同研究を効率的に推進する。

**【中間評価実施時までの進展】** 機器開発は順調に進み、ファイバ計測と海底地殻変動計測においては、予定より早く実現象の観測に成功した。3グループとも国際学会や国際WSで招待講演者として、当該研究開発の成果を発表した。より詳細な進捗状況は、下記(2)グループ毎の研究成果に記載した。

領域外プロジェクトなどとの連携による効率的な開発、実証試験規模の拡大は顕著である(11.「研究費の使用状況・計画」参照)。また、2022年夏には、開発したファイバ計測機器による室戸沖海底ケーブルでの試験観測に領域外・関連企業も含む国内研究者約30名が集合し、ファイバ計測に関わるコミュニティを結成し、翌年の地球惑星科学連合大会(JpGU2023)でファイバ計測のセッションを立ち上げた(田中・宮澤・荒木, 2023)。2023年2月には、3グループの代表が台湾各地の研究機関で講演を行い(e.g., Araki 2023)、台湾南部の泥火山地域での重力観測や琉球～台湾にかけての海域観測に関する国際共同研究の検討を開始した。能登半島において2022年頃からB01、B02班が連携してファイバ計測と重力計測を実施し、2023年、2024年の地震に伴う変動を検出した(EPS誌能登半島地震特集号に投稿準備中)。A03国際班とB01班の重力グループが共同で、重力波及びP波到達前シグナルの検出を目指す東アジア国際重力観測ネットワークの立ち上げに地震の専門集団の立場から参画し、共同研究を開始した(Son et al., 2024で構想発表)。

2022-2023年公募研究は1件、スロースリップ時空間遷移の実態把握の高精度化に向けた開発研究(町田)が採択された。

今後、計測技術を切り口とした領域拡大のための1つの取り組みとして、海底計測技術に関する国際WSへの参加や、民間企業開発者も交えたレーザーやファイバに関する理工連携技術セミナーを開催する。

### (2) 得られた成果

**重力計測：** 通信波長帯レーザーを入力して重力を計測するシステム1台が完成し、遠隔制御したレーザーによる計測実験に成功した(新谷ほか, 2023)。2台目の重力計もほぼ完成した。2024年度からレーザー信号を共有した2台同時重力観測の基礎実験を東北大で行う。開発機器を用いた実際のフィールドでの観測に先立って、流体挙動が引き起こす重力変化の理解や、重力計測の時空間分解能の改善をもたらす地震学的知見を明らかにするための研究も行った。Sakamoto and Tanaka (2022)は、スロー地震(微動)は潮汐で誘発されるが、流体が存在すると誘発のタイミングに位相遅れが生じることを理論的に解明し、微動の観測から流体の流れやすさに関する情報を定量化できることを示した。Tanaka et al. (2023)は、継続期間の比較的短い石垣島のスロースリップに伴い重力変化が生じていることを、時間分解能を改善した重力計を用いることで発見した。能登半島での重力観測から、地震時に流体移動が生じた可能性が考

えられることが分かった（特集号執筆中）。ただし、流体移動の詳細を知ることはできず、現在開発を進めているような多点観測可能な重力計が流体移動把握に不可欠であることを再認識した。

**ファイバ計測：** 開発の第一段階では、低速現象を測る機器を 2021 年度に開発した。それを用いて陸海のフィールドで試験観測を行い、データを蓄積中である。陸上の試験観測は、当初予定していた神岡鉱山だけでなく能登半島でも機動的に行い、海底では室戸沖ケーブルに加え初島沖でも観測を実施した（松本ほか, 2021）。試験観測の手法についても、他プロジェクトと連携することで、より現実に即した効果的な手法（例えば観測船や海底ボアホールを利用して実際の海底環境で試験を行うもの）を実現している（Araki, 2022）。開発の第二段階では、2023 年度には大地震による高速現象と低速現象の両方を測れる機器の開発に成功した。2024 年度には、ソフトウェアを大容量データに対応させた上で上記の試験観測や公募研究に合流させることで、マルチスケール観測の精度評価を進める。

ファイバ計測の最も重要な課題である温度と歪の分離を実現するため、無人探査機「かいこう」によって海底ケーブルの近傍に温度計・流速計を設置し、海底面の温度変化の計測を行い比較・温度の影響の補正を行った。さらに、海底で光ファイバへの水圧・歪・温度の機械的カップリングをコントロールすることにより、水圧・歪・温度を同時に分離・観測が行える展張光ファイバケーブルを開発し、2023 年 2 月より初島沖でこのケーブルを用いた試験観測を開始した。この試験観測の結果、温度と歪の分離の目的が立った。Gomberg and Ariyoshi et al. (2021)は、米国との国際共同研究により、海底ケーブル式地震津波観測網 (DONET)の温度計で取得した海底水温上昇のデータを用いて、遠地地震に伴う乱泥流の検知に成功した。今後、南海トラフにおけるファイバ計測に、上記の温度・歪の分離手法を実装していく。

Baba et al. (2023)は、2022 年 1-2 月に生じたスロー地震を DAS で初めて観測した (A02, A03, B03 との共同研究)。Ariyoshi (2022)は、余効すべり伝播速度と摩擦特性との関係式が、超低周波地震などの移動過程にも適用できることを数値シミュレーションで示した。これにより、観測された移動速度から特徴的すべり量および応力降下量の範囲を岩石実験とは独立に推定することに成功した。

開発した機器を用いたマルチスケール観測と比較するための、地震・地殻変動データの解析手法の高度化も進めている。板場ほか (2021) は陸域の高精度歪観測により海域の紀伊半島沖のスロースリップを検出した。Itoh et al. (2022)は、GNSS の解析手法を高度化することで北米西海岸カスカディアのスロースリップの時空間発展を、従来よりも高時間サンプリングで詳細に求めた。また、関連する技術研究開発を Itoh & Aoki (2022)で実施した。Okubo et al. (2023)は、様々なノイズの重ね合わさったデータからスロー地震が持つ広帯域なシグナルを抽出する解析手法を、重力波天文学で用いられる経験的モード分解法に基づいて開発した。

**海底観測：** 海底地震計開発では、既存機器の弱点を克服し超深海で運用可能な観測機器が完成した (Shiobara et al., 2023)。2024 年度以降、実地機能試験・試験観測を行う。海底地殻変動計測では、Unmanned Aerial Vehicle(UAV)の着水・陸水を安全に行うための姿勢制御手法が完成し、近海 (相模湾)でのデータ取得に成功した (Yokota et al., 2023)。現在、遠海での観測へ向けた機器の改良を行っている。2024 年度以降、遠洋試験などの実用化へ向けた開発とともに、ファイバ計測の行われている海域でのスロースリップの検出を目指した観測を継続する。Yokota et al. (2022; 2024)は、ノイズとなる海中音速場の影響を低減する手法を開発した。また、Yoshizumi et al. (2024)は機器依存性の原因を特定した。現在、機器依存性の低減による精度向上を目指したデータ補正手法を開発中である。

**公募研究：** 町田は分担者の板場と共同で、ファイバ歪計と既存の歪計の高精度比較を行うための準備を進めた。地下深くの静謐なボアホール内で同時比較観測を行うための光ファイバケーブルの仕様とボアホールへの安全な設置手法を確定した。これにより互いの計測手法の弱点をカバーしあうことで、より高精度な歪観測が可能となる。

(1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

**【概要】** 領域設定期間内には、地震・測地データに最適なデータ駆動型解析手法（機械学習や人工知能など）を新たに開発し、データに潜む Slow 地震・Fast 地震のシグナルの網羅的な検出や活動様式・震源特性を明らかにするとともに、大規模且つ長期間にわたる地震ビッグデータを活用して、Slow 地震・Fast 地震のモニタリング手法を情報科学技術に基づいて刷新し、Slow 地震・Fast 地震活動のカタログ構築および統計科学的特徴を明らかにすることが目的である。具体的な目標として、(A) データ駆動型解析手法を新たに開発して地震・測地データに適用すること、および (B) モニタリング手法の刷新とそれに基づく Slow 地震・Fast 地震のカタログ構築を設定した。

**【中間評価実施時までの進展】** 情報科学と地球物理学の融合を通して、日本海溝・南海トラフ沿いにおける微動の分類や連続波形記録からの微動の抽出、四国西部におけるスロースリップイベント(SSE)の検出、駿河トラフ沿いの未知の SSE の検知など、Slow 地震・Fast 地震のシグナルの網羅的な検出に向けての堅牢なイベント検出技術の開発研究が進展した。地震ビッグデータの解析に関しては、機械学習を用いた P 波・S 波の自動読み取りやテンプレートマッチング手法の高速化に基づいて Slow 地震・Fast 地震活動のカタログを構築するとともに、震源の移動方向の網羅的抽出、微動のクラスタリング、多重スペクトル解析など Slow 地震・Fast 地震の統計科学的特徴を明らかにした。超稠密地震観測の DAS については、様々なテクニク環境におけるデータセットの取得に成功し、プレート境界深部の低周波地震や通常地震、地殻内の反射波を対象に、空間的にシームレスな波動場としての可視化が可能となり、Slow 地震・Fast 地震のカタログの高品質化に繋がることが期待される。

以上の通り、データ駆動型解析手法の開発と地震ビッグデータへの適用により、Slow 地震・Fast 地震のシグナルの検出・カタログ構築、活動様式・震源特性の解明を遂行しており、計画は当初の予定どおり順調に進展している。

(2) 得られた成果

(A) データ駆動型解析手法の新たな開発と地震・測地データへの適用

地震波スペクトログラムを用いて微動・通常地震・ノイズを分類する畳み込みニューラルネットワークを開発するとともに、シグナルの周波数特性の違いをイベント分類の主な根拠としていることも明らかにした (Takahashi et al. 2021<sup>B03</sup>, Nakano et al. 2022)。さらに、グラフ理論に基づき検出結果を取りまとめる観測点クラスタリング手法を新たに開発し、東北沖の S-net 海底地震観測網の波形データに適用することで微動検出の誤検知が低減できることを実証した。また、教師なし学習モデルに基づいて連続波形記録から微動を自動的に分類する手法を新たに開発し、紀伊半島沖の海底地震計で観測されたデータに適用したところ、手動カタログと比較して 8 割を超える検知率で浅部微動の検出ができた。同手法を複数観測点に拡張することで、ノイズや微動のラベル付けを自動的に行えることも実証した。さらに、2014 年の阿蘇山周辺で取得された波形データにベイズ振動子分解を適用したところ、約 11 秒周期の振動子をデータ駆動的に検出し、先行研究によって経験的に検出されていた火山性長周期微動への統計学的裏付けを与えた。

測地データに対して区分線形関数による関数フィッティングを行うことで SSE を自動的に検出可能な新たな手法を開発し、四国西部域の GNSS データに適用することで、SSE の検出に成功した (Yano & Kano 2022<sup>B03</sup>)。また、微動発生時の地震波形の特徴量から GNSS データの変位速度を予測するモデルを作成し、既往研究では未報告の SSE を見出した。また、B03 班との共同研究により、駿河トラフ浅部における未報告の SSE が発生していた可能性がある時期を GNSS データから推定し、すべり量分布を求めた。さらに、短い継続期間の SSE を検出するための基礎実験として、ハイレート GNSS データのノイズ

特性解析を進めた。

## (B) モニタリング手法の刷新とそれに基づく Slow 地震・Fast 地震のカタログ構築

陸域地震観測網や S-net 海底地震観測網で取得された波形データに機械学習を用いた P 波・S 波の自動読み取り手法を適用することで、従来に比べより多くの微小地震を検出できることを示した。さらに、機械学習によって認定された地震イベントを用いて、高速化したテンプレートマッチング手法を適用することで、2020 年後半から活発化した能登半島における群発地震活動やその後の M7.6 にともなう地震活動の詳細な時空間発展を明らかにした (Kato 2024)。特に、M7.6 の地震発生直前に活発化した地震活動 (前震) が 2023 年に発生した M6.5 の震源断層深部で起きていたことを明らかにするとともに、前震活動における流体の関与を指摘した。

広帯域地震観測網 F-net による網羅的なテンプレートマッチングと相対震央決定により、南海トラフ沿いの浅部超低周波地震の震源時間関数、活動の時空間変化、震源物理特性の地域変化を明らかにした (Takemura et al. 2021; 2022a; 2022b)。地震波伝播シミュレーションを活用し、超低周波地震の検知率の下限を評価するとともに (Takemura et al. 2024)、微動解析へ向けた高周波数地震動の付加体内における伝播特性を調べた (Takemura et al. 2023a)。また、南海トラフ沿いの浅部プレート境界で発生する浅部スロー地震の分野間共通理解をまとめ、レビュー論文として出版した (Takemura et al. 2023b<sup>A01A02B03</sup>)。テンプレートマッチング手法により、南海トラフ沿いの深部低周波地震のカタログを更新し、約 17 年間に発生した約 74 万個の深部低周波地震の時空間発展を明らかにした。大規模 SSE には、拡散過程によって制御される時間的にクラスター化した小規模スケールの SSE が多数含まれていることを見出し、スロー地震の階層性に関する知見を深めた。

Hough 変換に基づくクラスタリング手法を Slow 地震および群発地震の震源移動現象に適用することで、両現象の時空間的な特徴を網羅的に調査した。震源の移動速度と活動継続時間の関係性から、どちらの現象も拡散過程に従うものの、拡散係数の値が 1 桁以上異なることが明瞭になり、両現象を支配する物理メカニズムの理解に繋がる興味深い成果が得られた。また、ニュージーランドの情報統計学研究グループとの共同研究を通して、隠れマルコフモデルを用いた Slow 地震のクラスタリング処理結果に対して地震学的な考察を行い、適切なクラスター数を決める基準を提案した (Buckby et al. 2023)。さらに、多重スペクトル解析により、Fast 地震の複雑性を日本全国の小地震について調べ、地震ごとに複雑性は大きく異なるが、複雑性の分布に地域差があまり見られないことが分かった。

DAS による超稠密地震観測に関しては、四国中央部において 2 本の異なる光ファイバケーブルを用いた観測を実施し、低周波地震活動の波動場の観測に初めて成功するとともに、測線近傍における SN の高い微小地震の波形を取得した。また、鹿児島県沖の海底下に位置する鬼界カルデラにおいて、光海底ケーブルを用いた観測を実施し、約 4 か月の観測期間中にカルデラ周辺で発生した数十個の地震の波動場を観測した。これらの DAS データに、機械学習モデルを適用して P 波・S 波の読み取りを実施した。

区分線形関数による関数フィッティングと、ベイズ振動子分解のプログラムを公開するとともに、繰り返し地震探索プログラムに関しては、世界の任意の地域における波形データのダウンロードおよび繰り返し地震判定を継ぎ目なく行えるプログラムを作成し、公開に向けて準備を進めている。

**公募研究：** スロー地震活動を記述する数理モデルの構築を目指して、先行研究によって提唱されているモデルを融合することで、低周波地震活動の新たな統計モデルを構築した (Nishikawa 2024)。低周波地震の余震発生レートを記述する経験式を初めて得るとともに、新たな統計モデルの予測から大きく乖離する低周波地震活動が発生していることを突き止めた。また、近畿北部における DAS 観測の実施により、通常地震の後続波として、低周波地震が発生する下部地殻で反射する顕著な信号を、空間的に連続して検出することができた。反射構造は低速度帯として北側に低角で傾斜し、低周波地震の震源域に達している点が再確認され、スラブ由来の流体の通り道を表している可能性が考えられる。

## 計画研究 B03 時空間マルチスケールモデルからの予測：大規模計算と Slow-to-Fast 地震学

### (1) 期間全体の目標とこれまでの進捗状況

【概要】本計画研究は「Slow 地震、Fast 地震という 2 つの時空間的にマルチスケールなすべり現象はどのようにモデル化できるか？両者の関係性と遷移過程はどのようなものであるか？」および「Slow-to-Fast 現象をモデルから説明し、将来を予測することはどの程度可能か？どのような形で可能であるか？」という科学的問いに対し、大規模フォワード計算と多様なモデル化を通じた議論を行う①時空間マルチスケールモデリング、多面的な予測の試行を実施する②先鋭的予測研究、大規模計算・モデルの構築・検証に資するための③モデリングのための解析・データ整備、の 3 つの課題と④公募研究により構成される。

### 【中間評価実施時までの進展】

#### ①時空間マルチスケールモデリング

中～大規模 Fast 地震の発生サイクルについて、摩擦パラメータの空間的な階層的不均質性が地震のすべり分布・過程や繰り返し間隔などに与える影響を評価するために、4 階層のマルチスケールの準動的計算環境を構築した。また、Slow 地震から大きな Fast 地震発生までの包括的なマルチスケールモデルを将来 HPC 環境で展開するため、マルチノード GPU 環境で実行可能な準動的計算コードを開発した。

Slow 地震、特にテクトニック微動の予測に不可欠な数理モデルを開発するために、更新過程を用いた微動発生標準モデルを開発し、プロトタイプを完成、その予測への有用性を検証した。またスロー地震と普通の地震の本質的な違いについて、スケール法則に基づく考察を進め、普通の地震こそが地球内部の変形としては異常な現象であるという、視点の転換をもたらした。

#### ②先鋭的予測研究

地震活動の統計的推測理論と予測理論を構築するためのアプローチとして、過去の前震活動から学習した、現在進行中の地震群が前震である確率を評価するモデルを構築した。より現実的な地震活動予測手法開発およびその物理的背景の理解を目指して、A01 班山下らの摩擦実験内の地震に対する予測手法の検討を行い、機械学習手法を適用することで実際に短期予測が可能であることを示した。

巨大地震の発生ポテンシャルを、エネルギーバランスに基づく地震発生理論で評価するため、歪みエネルギー蓄積の直接的原因となるプレート間の力学的固着を推定する手法を新たに開発した。手法を南海トラフ適用し、歪みエネルギーの蓄積量を推定し、多様な地震破壊シナリオを作成した。

#### ③モデリングのための解析・データ整備

沈み込み帯の構造と Slow 地震発生地域のケーススタディとして、臨時海底地震計データにアジョイントトモグラフィ法を適用し、ニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯における詳細な地震波速度構造モデルを構築した。機械学習を含む様々な新しい GNSS データ解析手法を開発し、実際のデータから新たに SSE を検出した。より長期のモデル作成のためのデータ期間拡大を目指して、新たなアナログ波形記録の解析手法を開発し、3 日分のデータに対して試験的な微動位置の推定に成功した。

#### ④公募研究

2022-2023 年度公募研究では、島弧―海溝結合系の応力場と地震発生の物理モデル化（安藤）が採択された。この研究では、プレート境界と内陸への応力蓄積と地震発生の過程を、準動的に計算し、観測と整合的な応力場の空間分布と時間変化の再現に成功した。

### (2) 得られた成果

#### ①時空間的マルチスケールモデリング

大規模フォワード計算として、準動的地震発生サイクルシミュレーションを実施し、東北沖地震のような M9 クラスの地震サイクルにおける M7 以上の宮城県沖地震の発生間隔の変化を明らかにし(Nakata

et al., 2023)、地震モーメントで3桁程度の幅での階層性の影響を評価することに成功した。

地震の規模と頻度のスケール則(ゲーテンベルク・リヒター則)の傾き(b値)について、b値が大地震の発生前に減少する現象が報告されている。これを、比較的単純な断層摩擦不均質性を伴う動的地震サイクルシミュレーションを用いて再現することに成功した(Ito & Kaneko, 2023)。b値の減少は、スロー地震の領域において、地震破壊のバリアとなる効果が減少することに起因するという説を提案した。これは、Slow地震がFast地震のマルチスケールの挙動に影響するという新たな視点を与えるものである。

断層の速度強化領域における流体起源のSSEサイクルのモデルを構築し、観測と比較した結果、モデル化されたSSEの特徴と観測結果が整合的であることが分かった(Perez-Silva et al, 2023)。この結果は、断層面上の間隙流体圧の時間変化がスロー地震の発生に重要な役割を果たす可能性を示唆する。

大地震における断層近傍の強震動は、大きな振幅と長い持続時間の速度波形で特徴づけられるが、その生成原因は明らかでなかった。断層近傍の観測データが存在する2016年の熊本地震と2022年の台東地震に対して、震源断層の動的破壊モデルを構築し、特徴的な地震動の再現に成功し、その物理的なメカニズムを明らかにした(Kaneko & Goto, 2022)。これらの結果は、断層近傍の地震動の生成メカニズムや予測の向上に繋がる。

モデリングによるアプローチに関する成果としては、スロー地震のスケール法則を16年ぶりに見直し、より完全なものとして再構築した(Ide & Beroza, 2023)。さらにスロー地震の孤立性(Toh et al., 2023)や広帯域性(Masuda & Ide, 2023)を明らかにする研究、または普通の地震の動的震源核についての理論研究(Uemura et al., 2023)を通じて、スロー地震と普通の地震の本質的違いを解明した。更新過程を用いたテクトニック微動発生の標準モデルを構築し、それを西南日本に適用し、沈み込み速度や微動サイズが標準モデルのパラメーターに影響することを示した(Ide & Nomura, 2022)。

## ②先鋭的予測研究

統計的手法に関する成果として、前震活動とその他の地震活動との時空間的集中度やマグニチュード差の傾向の違いにより、本震発生前にリアルタイムで前震活動を確率的に識別する統計モデルを構築した(Nomura & Ogata, 2023)。動的な計算結果から得られた前震のカタログに機械学習を適用し、数十年から数分の幅広い時間スケールで本震前の残り時間を高精度で予測できた(Norisugi et al., 2024)。

GNSSデータ解析によるプレート間の力学的固着域の新たな解析手法を開発し、推定された南海トラフの歪エネルギー蓄積量から、同地域で発生しうる巨大地震の予測シナリオを作成した(Saito & Noda, 2022)。この手法を関東地域に適用し、過去2回の関東地震および房総沖SSEを引き起こす力学固着域を特定した。予測シナリオを作成し、大正関東地震で破壊しなかった固着域の周辺に、現在Mw7.9の大地震を引き起こすことができる歪みエネルギーが蓄積していることを指摘した(Saito & Noda, 2023)。

## ③モデリングのための解析・データ整備

GNSS時系列データから短期的SSEを自動的に検出する手法を新たに開発し、独自に展開した観測点を含むGNSS観測データから、日向灘などSSEが未検出だった地域を含む284イベントを検出した(Okada et al., 2022)。また同データに基づき、豊後水道で発生した2つのSSEのすべり域を推定し、微動発生域へのSSEすべりの進展と微動活動の間の相関を明らかにした(Hirose et al., 2023)。また、既存観測網のデータに別プロジェクトによる臨時観測のデータを追加することで、四国東部での高精度な微動の分布と紀伊水道をまたぐ活動の間の相関を明らかにした(Ohta et al., 2023)。

## ④公募研究

動的破壊計算において、格子H行列法を導入することにより、高速に計算する手法を開発した(Ozawa et al., 2023)。A03班の氏家らとの共同研究によりレオロジーに基づくFast地震・Slow地震の深さによる分布の違いを説明するモデルを提案した(Ando et al., 2023)。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

以下、研究代表者に二重下線、研究分担者に一重下線、公募研究代表者・研究協力者に破線下線を付した

### 雑誌論文（査読有 316 篇）

#### 計画研究 A01 班（査読有 61 篇）

- \*Yamaguchi, T., Himeno, Y., Yabe, S. (2024). Fast to slow slip transition in stick-slip friction of polymer gels with artificial roughness, *Journal of the Physical Society of Japan*, 10.7566/JPSJ.93.044801
- \*藤内智士・松元日向子・橘隆海・他 (2024). 多様な地層変形を簡単に作るモデル実験装置の開発, *地学教育*, 10.18904/chigakukyoiku.76.3\_23
- \*Noda, H. (2023). Thermoelastic instability on a frictional surface and its implication for size effect in friction experiments, *Earth, Planets and Space*, 10.1186/s40623-023-01820-9
- \*Bedford, J. D., Hirose, T., Hamada, Y. (2023). Rapid fault healing after seismic slip, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2023JB026706
- \*Yamashita, F., Fukuyama, E., Xu, S. et al. (2021). Two end-member earthquake preparations illuminated by foreshock activity on a meter-scale laboratory fault, *Nature Communications*, 10.1038/s41467-021-24625-4

#### 計画研究 A02 班（査読有 110 篇）

- \*Arai, R., Miura, S., Nakamura, ..., Mochizuki, K., Nakata, R., ..., Hashimoto, Y., Hamada, Y. et al. (2023). Upper-plate conduits linked to plate boundary that hosts slow earthquakes, *Nature Communications*, 10.1038/s41467-023-40762-4
- \*Okuda, H., Niemeijer, A.R., Takahashi, M., Yamaguchi, A. et al. (2023). Hydrothermal friction experiments on simulated basaltic fault gouge and implications for megathrust earthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2022JB025072
- \*Kimura, G., Nakamura, Y., Shiraishi, K., ..., Tsuji, T., Fukuchi, R., Yamaguchi, A. (2022). Nankai forearc structural and seismogenic segmentation caused by a magmatic intrusion off the Kii Peninsula, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10.1029/2022GC010331
- \*Hashimoto, Y., Sato, S., Kimura, G., ..., Miyakawa, A., ..., Nakano, M., Shiraishi, K., & Yamada, Y. (2022). Décollement geometry controls on shallow very low frequency earthquakes, *Scientific Reports*, 10.1038/s41598-022-06645-2
- \*Tonegawa, T., Takemura, S., Yabe, S. et al. (2022). Fluid migration before and during slow earthquakes in the shallow Nankai subduction zone, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2021JB023583
- \*Kita, S., Houston, H., Yabe, S., Tanaka, S., Asano, Y. et al. (2021). Effects of episodic slow slip on seismicity and stress near a subduction-zone megathrust, *Nature Communications*, 10.1038/s41467-021-27453-8

#### 計画研究 A03 班（査読有 64 篇）

- \*Ujiie, K., Nishiyama, N., Yamamoto, H. et al. (2024). Duplex Underplating, Sediment Dehydration and Quartz Vein Mineralization in the Deep Tremor Source Region, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2023JB027901.
- \*Maeda, Y. (2023). A systematic survey for precursory tilt changes at all monitored eruptions in Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 10.1016/j.jvolgeores.2023.107831.
- \*Nishiyama, N., Ujiie, K., Noro, K. et al. (2023). Megathrust slip enhanced by metasomatic actinolite in the source region of deep slow slip, *Lithos*, 10.1016/j.lithos.2023.107115.
- \*Wang, W., Savage, M.K., Yates, A., ..., Mochizuki, K. et al. (2022). Temporal velocity variations in the northern

- Hikurangi margin and the relation to slow slip, *Earth and Planetary Science Letters*, 10.1016/j.epsl.2022.117443.
- \*Ujiie, K., Noro, K., Shigematsu, N. et al. (2022). Megathrust shear modulated by albite metasomatism in subduction mélanges, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10.1029/2022GC010569.
- \*Umam, R., Tanimizu, M., Nakamura, H., ..., & Ishikawa, T. (2022). Lithium isotope systematics of Arima hot spring waters and groundwaters in Kii Peninsula, *Geochemical Journal*, 10.2343/geochemj.GJ22015.
- \*Iwamoto, K., Suenaga, N., & Yoshioka, S. (2022). Temperature distribution for interplate seismic events in the southcentral Alaska subduction zone based on 3-D thermomechanical modeling, *Tectonophysics*, 10.1016/j.tecto.2022.229604.

### 計画研究 B01 班 (査読有 18 篇)

- \*Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S. et al. (2024). Representation and interpretation about underwater sound speed gradient field in the GNSS-A observation, *Geophysical Journal International*, 10.1093/gji/ggae083
- \*Yokota, Y., Kaneda, M., Hashimoto, T. et al. (2023). Experimental verification of seafloor crustal deformation observations by UAV-based GNSS-A, *Scientific Reports*, 10.1038/s41598-023-31214-6
- \*Baba, S., Araki, E., Yamamoto, Y. et al. (2023). Observation of shallow slow earthquakes by distributed acoustic sensing using offshore fiber-optic cable in the Nankai Trough, southwest Japan, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2022GL102678
- \*Tanaka, Y., Klemann, V., Martinec, Z. (2023). An estimate of the effect of 3D heterogeneous density distribution on coseismic deformation using a spectral finite-element approach, *International Association of Geodesy Symposia*, 10.1007/1345\_2023\_236
- \*Itoh, Y., Aoki, Y. & Fukuda, J. (2022). Imaging evolution of Cascadia slow-slip event using high-rate GPS, *Scientific Reports*, 10.1038/s41598-022-10957-8
- \*Ariyoshi, K. (2022). Extension of aseismic slip propagation theory to slow earthquake migration, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2021JB023800
- \*Sakamoto, R., & Tanaka, Y. (2022). Frictional and hydraulic properties of plate interfaces constrained by a tidal response model considering dilatancy/compaction, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2022JB024112
- \*Gomberg, J., Ariyoshi, K., Hautala, S. et al. (2021). The finicky nature of earthquake shaking-triggered submarine sediment slope failures and sediment gravity flows, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2021JB022588

### 計画研究 B02 班 (査読有 28 篇)

- \*Kato, A. (2024). Implications of fault-valve behavior from immediate aftershocks following the 2023 Mj6.5 earthquake beneath the Noto Peninsula, central Japan, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2023GL106444
- \*Takemura, S., Hamada, Y., Okuda, H., ..., Akuhara, T., Noda, A., & Tonegawa, T. (2023). A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough. *Earth Planets Space*, 10.1186/s40623-023-01920-6
- Buckby, J., \*Wang, T., ..., Takeo, A. et al. (2023). Finding the number of latent states in hidden Markov models using information criteria, *Environmental and Ecological Statistics*, 10.1007/s10651-023-00584-5
- \*Takemura, S., ..., & Matsuzawa, T. (2022b). Source characteristics and along strike variations of shallow very low frequency earthquake swarms on the Nankai Trough shallow plate boundary, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2022GL097979
- \*Yano, K., & Kano, M. (2022). L1 trend filtering-based detection of short-term slow slip events: Application to a GNSS array in Southwest Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2021JB023258
- \*Nakano, M., & Sugiyama, D. (2022). Discriminating seismic events using 1D and 2D CNNs: applications to volcanic and tectonic datasets, *Earth Planets Space*, 10.1186/s40623-022-01696-1
- \*Takahashi, H., Tateiwa, K., Yano, K., & Kano, M. (2021). A convolutional neural network-based classification of local earthquakes and tectonic tremors in Sanriku-oki, Japan, using S-net data, *Earth Planets Space*, 10.1186/s40623-021-01524-y



## 計画研究 B03 班 (査読有 35 篇)

- \*Norisugi, R., Kaneko, Y., & Rouet-Leduc, B. (2024). Machine learning predicts earthquakes in the continuum model of a rate-and-state fault with frictional heterogeneities, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2024GL108655
- \*Saito, T. & Noda, A. (2023). Mechanically coupled areas on the plate interface in the Kanto region, Central Japan, generating great earthquakes and slow-slip events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 10.1785/0120230073
- \*Ide, S. & Beroza, G. C. (2023). Slow earthquake scaling reconsidered as a boundary between distinct modes of rupture propagation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 10.1073/pnas.2222102120
- Ito, R., & \*Kaneko, Y. (2023). Physical mechanism for a temporal decrease of the Gutenberg-Richter b-value prior to a large earthquake, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2023JB027413
- \*Perez-Silva, A., Kaneko, Y., Savage, M. et al. (2023). Characteristics of slow slip events explained by rate-strengthening faults subject to periodic pore fluid pressure changes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10.1029/2022JB026332
- \*Hirose, H., Matsushima, T., Tabei, T. et al. (2023). Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, *Earth Planets Space*, 10.1186/s40623-023-01833-4
- \*Nomura, S., & Ogata, Y. (2023). Cluster-based foreshock discrimination model with flexible time horizon and mainshock magnitudes, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10.1186/s40645-023-00548-0
- \*Ide, S., Nomura, S. (2022). Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10.1186/s40645-022-00523-1

## 公募研究 (査読有 15 篇)

- \*Mukuhira, Y., Fehler, M.C., Bjarkason, E.K. et al. (2024). On the b-value dependency of injection-induced seismicity on geomechanical parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 10.1016/j.ijrmms.2023.105631
- \*Nishikawa, T. (2024). Comparison of statistical low-frequency earthquake activity models, *Earth Planets Space*, 10.1186/s40623-024-02007-6
- \*Ando, R., Ujii, K., Nishiyama, N., & Mori, Y. (2023). Depth-dependent slow earthquakes controlled by temperature dependence of brittle-ductile transitional rheology, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2022GL101388
- \*本多亮・安部祐希・道家涼介 (2023). 伊豆衝突帯とその周辺における地殻構造と地震テクトニクス, *地震 2*, 10.4294/zisin.2023-9S.
- \*Nishikawa, T., Ide, S., & Nishimura, T. (2023). A review on slow earthquakes in the Japan Trench, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10.1186/s40645-022-00528-w
- \*Sawayama, K., Ishibashi, T., Jiang, F., & Tsuiji, T. (2023). Relationship between permeability and resistivity of sheared rock fractures: The role of tortuosity and flow path percolation, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2023GL104418
- \*Suzuki, T. (2022). Deriving the slip-front propagation velocity with slip-dependent and slip-velocity-dependent friction laws via the use of the linear marginal stability hypothesis, *Physical Review E*, 10.1103/PhysRevE.106.015002
- \*Okamoto, A., & Oyanagi, R. (2023). Si- versus Mg-metasomatism at the crust–mantle interface: Insights from experiments, natural observations and geochemical modeling, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10.1186/s40645-023-00568-w
- \*Shimura, Y., Tokiwa, T., Mori, H. et al. (2022). Deformation characteristics and peak temperatures of the Sanbagawa Metamorphic and Shimanto Accretionary complexes on the central Kii Peninsula, SW Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, 10.1016/j.jseaes.2021.104791
- \*Uno, M., Koyanagawa, K., Kasahara, h., Okamoto, A. et al. (2022). Volatile-consuming reactions fracture rocks and self-accelerate fluid flow in the lithosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, <https://doi.org/10.1073/pnas.2110776118>

### 学会発表 (810 件、招待講演 77 件)

#### 計画研究 A01 班 (143 件、招待講演 13 件)

Okamoto, A., Mass transport and metasomatic reactions at crust-mantle interfaces induced by CHO fluids, 招待講演, Serpentine Days, 2023/6/6

波多野恭弘, 坂本龍之輔, Triggering of unstable slip of granular matter by weak acoustic waves, 招待講演, 3rd International Conference on Materials Genome, 2024/2/23

岡本敦, マントル岩石における二酸化炭素固定—そのメカニズムと地球科学的重要性—, 招待講演, 粘土科学討論, 2023/9/12

Kaneki, S., & Noda, H., Depth variation of effective normal stress in subduction zones based on hydraulic modeling, 招待講演, 日本地質学会第 130 年学術大会, 2023/9/17

波多野恭弘・水嶋遼, 速度・状態依存摩擦法則のための安定な発展法則, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2023/5/24

Hamada, Y., Diversity of slip behavior and fluid distribution at the shallow portion of subduction plate boundaries, 招待講演, Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan, 2023/3/3

山口哲生, 超広帯域すべり速度におけるソフトマターのトライボダイナミクス: 準静的, 亜音速から超音速まで, 招待講演, 日本トライボロジー学会トライボダイナミクス研究会, 2022/2/24

#### 計画研究 A02 班 (260 件、招待講演 29 件)

Nakata, R., Kinoshita, M., Hashimoto, Y., Hamada, Y., Drilling and monitoring in Hyuga-Nada: Unveiling effects of ridge subduction on slow earthquakes, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2021/6/1

Kita, S., Houston, H., Yabe, S. et al., 紀伊半島下のゆっくりすべり, スラブ内地震と内陸地震, 招待講演, 日本鉱物科学会 2021 年年会・総会, 2021/9/17

Arai, R., Kodaira, S., Henry, S., ..., Mochizuki, K. et al., Seismic anisotropy structure of the northern Hikurangi margin, New Zealand, and its significance for subduction fault systems, 招待講演, EGU General Assembly, 2022/5/25

Yamaguchi, A., Yamamoto, I., Nakamura, Y. et al., Conglomeratic sandstone-derived mylonite discovered from a highly metamorphosed Cretaceous accretionary complex, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2022/5/26

Okuda, H., & Yamaguchi, A., Laboratory friction experiments for understanding fault slip behavior in the shallow Nankai subduction zone, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2022/5/26

木村学・橋本善孝・山口飛鳥, Set-up timing of the dextral oblique subduction in the Nankai Trough, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2022/5/23

Tsuji, T., Explore pore pressure and its dynamic behavior through ocean drilling and recent geophysical approaches, AGU Fall Meeting 2023, 2023/12/14

#### 計画研究 A03 班 (70 件、招待講演 6 件)

Ito, Y., Application of ocean bottom pressure data to detect fast and slow earthquakes, The 1st Workshop on Earthquake Early Detection Using Superconducting Gravimetry, 2023/11/17

Yoshioka, S., Suenaga, N., & Iwamoto, K., Illuminating slow earthquakes: an approach from thermal modeling, 日本地球惑星科学連合大会, 2022/5/27

Ito, Y., 2022, コロナ禍での国際研究プロジェクト—メキシコにおける地震・津波災害軽減に向けた学際的研究の推進—, 日本地球惑星科学連合大会, 2022/5/22

#### 計画研究 B01 班 (81 件、招待講演 7 件)

横田裕輔・金田政太・橋本武憲・他, UAV による GNSS-A 海底地殻変動観測の実証実験, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2023/5/22

Tanaka, Y., Terrestrial and satellite gravity observations of earthquake-related phenomena -an overview, 招待講演, 1st Workshop on Earthquake Early Detection using Superconducting Gravimetry, Jeongsun, Korea. 2023/11/17

田中愛幸・宮澤理稔・荒木英一郎, 光ファイバーケーブルを用いた能登半島群発地震の DAS 観測, 招待

講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2023/5/21

Araki, E., Yokobiki, T., Baba, S., ..., Machida, Y. et al., Shallow slow slip and associated VLFE observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough, 招待講演, AGU Fall Meeting 2022, 2022/12/14

伊東優治, Socquet, A., Radiguet, M., Largest aftershock nucleation driven by afterslip during the 2014 Iquique sequence, 招待講演, 日本地球惑星科学連合大会, 2023/5/24

Yokota, Y., Ishikawa T., Watanabe S. et al., Observation accuracy of GNSS-A seafloor geodetic observation array (SGO-A) in 2022, 招待講演, AGU Fall Meeting 2022, 2022/12/12

### 計画研究 B02 班 (105 件、招待講演 9 件)

Takemura, S., Slow earthquakes around shallower extension of megathrust zone in Nankai, 招待講演, AGU Fall Meeting 2023, 2023/12/15

Kato, A., Slow slip and earthquake cycles behavior on the Japan and Nankai Trench, 招待講演, MTMOD (Megathrust Modeling Framework) Summer School 2023, 2023/8/7

Kato, A., Foreshock sequence prior to the 2024 M7.6 Noto-Hanto earthquake, Japan, EGU Annual Meeting, 2024/4/16

### 計画研究 B03 班 (151 件、招待講演 13 件)

Ide, S., Scaling fast and slow earthquakes, 基調講演, Cargese 2023 School on Subduction Zone Processes, 2023/10/11

Noda, A., Stress accumulation on the plate interface in the Kanto region and rupture scenarios for great thrust-type earthquakes, 基調講演, International Symposium on the Centennial of the 1923 Kanto Earthquake, 2023/10/24

Ide, S., Physics of fast and slow earthquakes, 招待講演, 9th International Tribology Conference, 2023/9/28

### 書籍 (3 件)

#### 計画研究 A01 班 (2 件)

藤内智士, 変動が作る岩石たちの関係, 2023 年, 南の風社

鈴木岳人, 問題を解くことで学ベクトル解析—楽しみながら解くことを意識して—, 2023 年, コロナ社

#### 計画研究 A03 班 (1 件)

氏家恒太郎, 震源域の物質から探る巨大地震とスロー地震の発生メカニズム, 科学 2022 年 10 月号, 岩波書店

### 主催シンポジウム

International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes in Mexico, メキシコ国立自治大学, メキシコシティ, メキシコ, 2024/2/26-2/27 (研究集会), 2/28-3/1 (巡検), 68 名参加 (日本人 22 名)

International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023, 伊藤国際謝恩ホール, 東京都, ハイブリッド開催, 2023/9/13-9/15 (研究集会), 9/16 (巡検), 参加者 229 名 (現地参加者 158 名)

Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan, 国立成功大学, 台南市, 台湾, 2023/3/13-3/14 (研究集会), 3/15-3/17 (巡検), 参加者 127 名 (日本人 39 名)

International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022, 春日野国際フォーラム豊, 奈良市, ハイブリッド開催, 2022/9/14-9/16 (研究集会), 9/17-9/18 (巡検), 参加者 276 名 (現地参加者 134 名)

### 学会表彰

日本地震学会 若手学術奨励賞 竹尾明子(2022), 矢部優(2022), 久保久彦(2022), 西川友章(2024)

日本地質学会 ナウマン賞 片山郁夫(2022), 柵山雅則賞 宇野正起(2022)

日本測地学会 坪井賞 加納将行(2022), 三井雄太, 瀬戸賞 伊東優治(2023)

日本統計学会 小川研究奨励賞 矢野恵佑(2022), 松田孟留(2023)

日本保険・年金リスク学会 学会奨励賞 野村俊一(2022)

American Geophysical Union, Asahiko Taira International Scientific Ocean Drilling Research Prize, 辻健(2023)

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本研究の目標は、Slow-to-Fast 地震現象の総合的包括的な理解を通じた地震学の再構築である。そのために物理学・地質学・地球物理学・地球化学の**分野間融合を熟成**させるとともに、様々な理工分野の**先端技術による新展開**を目指す。領域体制は、この明確な目的を持つ計画研究（班）からなる。まず領域内を分野間融合の熟成のための A 系と、先端技術による新展開のための B 系に分け、さらに6つの班の目的を実験 (A01) と観測(B01)による一次情報取得、観測データや観察情報の分析 (A02 と B02)、空間(A03)と時間(B03)にまたがる総合化包括化と位置付けた(図 6)。それぞれの班では定期的に班内集会を開催、情報交換によって新たな共同研究の可能性を探っている。公募研究は研究手法の性質から大型のものど小型のもの2枠で公募し、2022-2023 年度に 19 件、2024-2025 年度に 19 件採択した。各公募研究が属する班内での連携はもちろん、領域内の様々な研究集会への参加を通じて、領域外も含む広い連携を促進している。各班には明確な目的があるので、新規参加者を含むすべての領域参加者が、円滑に共同研究の相手を探すことができる。

領域全体を統括する総括班は、領域代表者、計画研究代表者と、数名の研究協力者からなる。総括班内に事務局を設置、学術支援職員を雇用し事務手続きを進めている。総括班では毎月 2 回定例のオンライン会議を実施し、領域全体の運営方針を決定し、計画研究にフィードバックしている。総括班会議では、研究領域を活性化させるための企画や、国際的リーダーシップを強化するための企画、若手・ダイバーシティ推進のための企画など、以下のような企画を立案し実行している。

**融合企画**：国際研究集会、国内学会特別セッション、巡検集会、国内プロジェクト連携など

**国際企画**：押しかけワークショップ、国外学会特別セッション、海外プロジェクト連携、研究者招聘など

**若手育成・ダイバーシティ企画**：若手の会集会、若手研究者海外派遣、学会時の託児所運営など

領域の公式情報はウェブページとニュースレターで領域内外に伝えられる。一方で領域内に限った情報伝達は、主にメーリングリストで行われている。また季刊のメールニュース、Slack や Google Drive など目的に応じて利用されている。総括班から参加者へだけでなく、参加者からの成果や業績についての情報もこれらの手段を用いて総括班へ集められる。成果や業績については、中間評価にあわせて領域として総括した成果集を作成している。

年一度発行のニュースレターは、すべての班を横断する若手研究者主体の編集委員会によって編集されている。またスロー地震データベースの運営もアルバイトの学生を含む若手主体で運営している。これらの活動を通じて、若手が主体的に領域運営に関わることを促進している。

ニュースレターや成果集の内容は、分野外にもわかるレベルとし、相互理解による新たな共同研究が生まれやすくしている。またアウトリーチ活動としては、Slow 地震を紹介するリーフレット (p15 図 1) を作成したり、南紀熊野ジオパークとの連携により、社会に対する科学的助言の実践を行ったりしている。

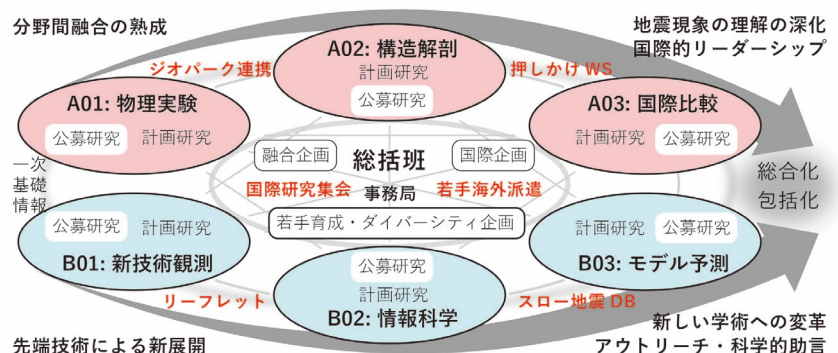


図 6：領域内の研究項目間、計画研究、公募研究との連携図

## 9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

### 若手研究者の定義

本領域ではさまざまな若手研究者育成のための企画を行っており、それぞれの企画の目的や状況に応じて異なる若手研究者の定義を用いている。学生は常に若手に含まれるが、「若手の会」の活動では、領域開始時点で博士号取得から5年以下を若手とする一方、議論レベルの高い海外研究者との対談では、40歳程度までの中堅までを対象としている。海外派遣プログラムやサマースクールの旅費支援では明示的に年齢制限しないが、若年を優先とした結果として30代前半までの研究者が対象となっている。

### 若手の育成の取り組み状況

領域では、若手の会を組織して、研究集会などの際に独自の企画を行っている。また若手研究者を対象として海外派遣プログラムを運営している。さらに押しかけワークショップの一環として海外のサマースクールの共催、日本地震学会とともに地震学夏の学校の共催を行っている。他にも領域内外で学生や若手研究者を中堅・シニアの研究者と結びつける活動なども行っている。本領域を中心としつつも、領域外への波及相乗効果も意識した次世代育成のための活動を行っている。以下にそれぞれ説明する。

**若手の会活動：** 毎年の国際研究集会では前日に若手の会のイベントを開催している。2022年には、互いに知り合うための自由な議論、2023年には中堅研究者による講義とポスター発表会、2024年でも開催を予定している。また若手の会のメーリングリストやSlackチャンネルを運営し情報交換を行っている。

**海外派遣プログラム：** 領域では毎年1月と7月に若手研究者海外派遣プログラム参加者を募集し、毎回1-2名を採択、往復航空券と現地滞在費を支援している。これまでの派遣者の派遣時期と対象期間は以下の通り。大学院生、ポスドク、若手の助教までが利用している。

2022年4月～7月 米国 Stanford Univ., 2022年10月～2023年2月 米国 Caltech, 2023年2月 シンガポール南洋理工大学, 2023年5月～6月 米国 Purdue Univ., 2023年6月～7月 フランス ENS, 2024年1月～3月 米国 UC Santa Cruz 他

**サマースクール：** 2023年10月にフランスコルシカ島で開催された”Cargese 2023 School on Subduction Zone Processes”を押しかけワークショップのひとつとして共催した。このサマースクールに参加する若手研究者を領域内で募集し、5名を選抜して派遣した。2024年10月には”Cargese school on earthquakes”が開催予定であり、再び若手研究者を派遣する準備をしている。また2024年9月には日本地震学会と共催で「地震学夏の学校2024」の開催を予定し、領域内からの参加を促進する。

**その他：** 2022年、オンラインでランダムなグループを作って議論する「ランダムグループイベント」を開催した。シニアと若手研究者が偶然にグループ化されることで、世代を超えた議論を促進した。また若手研究者からの要望にこたえて、(1)ワークライフバランスに関する情報交換イベント、(2)海外の著名研究者と1対1でオンライン対話する場を設けた。後者は若手研究者の国際人脈形成に役立ち、その後の海外渡航につながった例もある。若手研究者向けの海外渡航情報の共有のための会合を開催したり、日本地球惑星科学連合大会特別セッション「コロナ禍での在外研究・留学」を開催したりしている。

本領域で直接雇用している若手研究者としては、科研費雇用のポスドクが毎年約5名、RAが約4名いる。これらの研究者も含め、領域に関与したポスドク・RAで、研究者として就職する者は毎年7-8名程度いる。若手研究者が成長し、順調にキャリアを築いていることの証である。

## 10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域のアウトリーチ活動は領域全体の活動と、領域参加者による活動に分かれる。領域の活動をさらに分けると、日常的広報活動、南紀熊野ジオパーク連携、そして押しかけワークショップを軸にした国際広報の3つに分かれる。以下にそれぞれ説明する。

### 【領域全体の活動】

**日常的広報活動：** 総括班では領域ウェブページを作成し、日本語と英語で情報を掲載している。また領域活動のニュースレターを年1回発行、これまでに Vol1, 2, 3 と発行している。それぞれ日本語版と英語版がある。印刷版を作成して、研究集会や一般向けイベントで配布するとともに、領域ウェブページに pdf 版を掲載して自由にダウンロードできるようにしている。これまでのニュースレターでは、各研究計画の特筆すべき成果の紹介や、領域が行っている研究集会などの活動報告、領域の研究者が使用している機器・装置の紹介などを掲載している。また本領域の研究対象 Slow 地震について、一般にわかりやすく示したリーフレット (p15 図1) を作成し、一般向けイベントで配布している。このリーフレットは日本語版と英語版、それからメキシコでの押しかけワークショップに合わせてスペイン語版も用意した。すべて pdf 版が領域ウェブページからダウンロードできる。

**南紀熊野ジオパーク連携：** Slow 地震活動が活発で将来の南海トラフの巨大地震の震源に近い紀伊半島は A02 の重点研究地域である。A02 の研究協力団体の南紀熊野ジオパークは、和歌山県串本町潮岬の南紀熊野ジオパークセンター（地方自治体による組織）を中心に様々な一般広報を行っている。本領域では、上述のニュースレターやリーフレットの展示、ジオパークの展示内容や講演会（下記）への協力により、連携した一般向けアウトリーチ活動を行っている。イベントに関連して、多くのマスコミ報道も行われた。紀伊半島での巡検はジオパークのスタッフの全面協力のもと実施し、本領域研究者はジオパーク内の断層の地質学的解釈について助言を行うなど、インタラクティブな領域活動の場となっている。

- ・2022年10月-11月 特別パネル展 最先端の地震の研究をのぞいてみよう
- ・2023年1月16日 講演会 北佐枝子, スロー地震とスラブ内地震と海溝型巨大地震
- ・2024年1月15日 講演会 井出哲, 地震の予測とスロー地震

**国際広報：** 台湾とメキシコで開催した押しかけワークショップでは、研究者同士の交流で大きな成果が得られたうえに国際広報的にも意義があった。それぞれのワークショップは、日本の研究者と現地研究者の共同研究活動として、現地の一般向け報道で取り上げられた。台湾では巡検も含むワークショップの全期間、テレビ局が同行取材しており、その様子を編集したムービーがテレビとネットで公開された。メキシコでも開催地の大学の広報が取材をして、ムービーをネットで公開した。日本の地震研究の先進性をアピールできた。

### 【領域参加者による活動】

領域の研究者は、様々なアウトリーチ活動を行っている。一例を以下に挙げる。

**一般講演会：** 日本科学未来館、川崎市民アカデミー、三陸鉄道、珠洲市日置ハウスなど。

**出前授業：** 帝塚山学院高校、掛川西高校、愛南町立御荘中学校、四万十町立十川小学校など。

**マスコミ報道：** 研究成果は積極的にプレスリリースしており、マスコミに取り上げられることも多い。大地震や Slow 地震に関連した取材も多い。特に2024年1月の能登半島地震、3月の房総 SSE に伴う群発地震、4月の台湾地震などの際には、ニュース (NHK、読売テレビ、毎日放送、テレビ朝日ほか) や新聞 (朝日新聞、毎日新聞、読売新聞、日経新聞ほか) で領域研究者の見解や活動が取り上げられた。

## 11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 総括班研究課題の活用状況

事務局運営経費と研究集経費が支出の大きな割合を占める。毎年本領域が主催する**国際研究集会**は”International Joint Workshop”とすることで、他のプロジェクトから経費的協力も受けている。実際に、毎年東大地震研・京大防災研共同利用研究からの協力を受け、関連分野の研究者を巻き込む大きな研究集会を可能にしている。例えば、2023年度の集会では、領域からの参加者約140名に対して領域外からの参加者は約90名であった。これら集会の経費には、会場費、参加者旅費、巡検費用などが含まれる。**押しかけワークショップ**は現地カウンターパートの協力によって会場費を大きく抑えている。領域では主に参加者の旅費と巡検費用を負担し、旅費支給は若手研究者を優先している。集会関係の旅費の一部は若手研究者**海外派遣プログラム**や**研究者招聘プログラム**とも連携支給している。その他、世界中のSlow地震に関するカタログを収集し、**スロー地震データベース**として統一されたフォーマットで公開している。この活動のためのサーバ運営経費も総括班で支出している。また、領域内外の研究者間の情報流通と交流のための**ニュースレター**や**成果集**の作成や、さまざまな**巡検企画**にも経費支出している。

### 研究費の使用状況と効果的使用の工夫

領域内では新たな装置・機器を開発導入するとともに、データを含めて効率的な共有を進めている。

**A02**： 海洋プレートの曲がりを再現することで、付加体の形成や断層帯の発達といった大スケールの地質構造形成とSlow地震・Fast地震の発生を統合して実験することが可能な**砂箱実験装置**を導入した。地質体がプレート境界のどの深度にあったかを推定するために**ラマン分光分析装置**を導入した。**微小部蛍光X線分析装置**は、これまでmmスケール以下でしか行われてこなかった岩石の化学組成マッピングを、最大20cmの試料まで可能にする装置であり、この装置を用いてSlow地震・Fast地震の記録を残すさまざまな断層岩や変形岩の解析が行われている。**掘削試料**など、物質系研究に必要な研究試料の調達には、**高知コアセンター**や**東京大学大気海洋研究所の施設利用・共同利用の枠組み**を活かしている。

**B01**： 2021年度に**低速現象を測るファイバ測器**を開発しデータ取得に成功した。得られたデータは現在B01、B02班で解析中であり、また今後領域内で大容量データを共有する準備を進めている。ファイバ回線の設置・借用、観測船などの大規模な実験設備は、他のプロジェクトと連携することで経費を大幅に削減した。2023年度には**高速現象と低速現象の両方を測るファイバ測器**を開発した。また**海底観測用の基準局**をSlow地震活動が活発な海域に設置し、上記のファイバ計測機器との比較を可能にした。これらのファイバ機器は複数地域で使用するとともに、領域内でのデータ共有を進める。機器の試験のための**水槽施設**を東大、JAMSTEC、海上保安庁が共用することで、共同開発・実験データの利活用を促進している。**UAV**の開発はセコム科学財団のプロジェクトと共同で実施しており、実験成果を共有することで社会実装を見据えた効率的な研究開発を行っている。**重力計**開発においては、過去の科研費研究で開発した構成要素を利用して全体の製作コストを低減した。重力計は将来的に地震研究所の共同利用機器に登録することで、領域外の研究者も含め、様々な地域で活用することを目指している。機器の性能評価を、NICT・東北大学電通研との共同プロジェクトとして実施し、ファイバ網を共有することで、実フィールドでの遠隔計測実験を効率よく実施している。

**B02**： 大容量DASデータ共用のための**大規模データサーバ**を導入しB01、A01班と共用している。

**B03**： 小規模グループで共用する**中規模計算サーバ**を導入し、大規模数値計算プログラムの開発や予備試験、大容量データの一時的な保存・処理に用いることで、効率的にモデル予測研究を進めている。

## 12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

### 領域全体の推進方策

今世紀はじめに Slow 地震が発見されてから、四半世紀が過ぎた。その発見の時代は過ぎ、現在は理解の時代といえる。発見の時代を通じて研究者が学んだことは、**Slow 地震はさまざまに、かつ極めて普遍的に発生する**という事実である。この認識をもとにして現在、地震学の再構築が進んでいる。

明治維新後に、我が国で始まった近代地震学は、被害を起こすような大地震をはじめ、中小規模までの地震一般を理解しようと研究してきた。これらは我々があえて普通の地震、もしくは Fast 地震と呼ぶ現象である。しかし Slow 地震が普遍的現象ならば、地震を含む地球内部の変形を理解するには、Slow 地震を標準としたほうが考えやすい。Slow 地震は、さまざまな期間に、さまざまな場所で、さまざまなスケールで起きている。プレートテクトニクスを駆動する主役も実は Slow 地震であろう。すると、これまで普通だと思っていた、**Fast 地震はむしろ、地球内部の変形としては異常な現象**として見直される。ここに Fast 地震を中心に、その他を関連現象として扱うのでは見えてこない本質がある。この Fast 地震中心の視点から、Slow 地震を中心とした視点への転換が、今まさに地震学という学術の体系や方向を大きく変えつつある。この**地震学の変革を先導する**のが本領域にほかならない。

この変革に拍車をかけているのが、年々明らかになってきた**流体**（もしくは水）の関与である。地震と流体との関連は、古くから示唆されてきたものの、2010年頃からシェールガス採掘などの産業に伴って、その相互作用が具体的で確実なものとなってきた。そして地震と流体の相互作用には、Slow 地震も関係することが判明した。Slow 地震を中心とする地震学では、流体の役割はより重要になる。2024年能登半島沖地震は、まさに皆が地下流体に注目しているなかで発生した。その理解は流体と Slow 地震と大地震の関係を解明する手掛かりとなる。本領域では、この地震を今年の国際ワークショップの中心テーマとして深く討議するとともに、今後の領域研究の重要なテーマとして扱っていく。

今後の領域研究では**スケール**がもう一つの重要なキーワードになる。Slow 地震の発見によって、Fast 地震中心の地震学では扱わなかった、さまざまな時空間スケールの地球内部変形現象を統一的に理解する必要性が明らかになった。一方で、物理探査・地質観察・室内実験などの研究手法はそれぞれ対象とする時空間スケールが異なるために、現象のスケールに合わせて融合的に活用しなければならない。このスケール依存性を克服し、幅広いスケールの現象を Slow 地震中心に理解することで、地震学の再構築からより広い固体地球科学の再構築へ、先導するのも本領域の役目である。

### 各研究計画の推進方策

上記の領域の推進方策を前提として、各研究計画では以下の具体的な研究推進方策を掲げる。

A01: 力学・数値実験によるスケール変化と形状・流体効果を考慮に入れた物理モデルへの統合

A02: 流体と元素の移動解析・モデリングを中心とした Slow 地震のスケール普遍性とその限界の検証

A03: Fast 地震中心の比較沈み込み帯学から Slow 地震の普遍性と特異性に基づく比較収束帯学の構築

B01: 機器開発の進化、および新旧計測手法を混合したフィールドでのマルチスケール観測と精度評価

B02: データ駆動型解析や DAS 解析による Slow 地震・Fast 地震の震源特性、活動様式、構造特性解明

B03: 多面的大規模数値シミュレーションによる Slow-to-Fast 過程の統一的モデリングと予測の試行

これらの計画研究と公募研究（下記）の成果を最大限にし、Slow 地震を中心とした地震学の再構築を促進するために、総括班では国際ワークショップ開催、国際ネットワーク構築（下記）、国内外学会企画開



催、共用データベースの運営、領域関連用語集などの整備、アウトリーチを含む広報活動を進めていく。

### 今後実施する公募研究の役割

2022-2023 年の 19 件に引き続き、2024-2025 年も 19 件の公募研究課題を採択している。この中には流体に関する課題が 8 課題、スケールに関する課題が 3 課題含まれる。上記領域の推進方策は、新たに領域に参加する公募研究参加者にも共有されており、これらの課題は自然と Slow 地震を中心とした地震学の再構築に貢献する。また、各研究計画における公募研究の役割は、以下のように期待されている。

A01: 工学的注水実験、水-岩石系物理化学実験、弾性波測定実験などによる広範な現象の素過程解明

A02: 流体の移動解析・モデリングや地球化学的研究と高精度なデータ収集との統合

A03: 地域的な Fast と Slow 地震の規模分布・空間分布を利用した比較収束帯学の構築

B01: 既存の歪計測と新しいファイバセンシングとの同時比較観測による不確定性評価、信頼性向上

B02: 高精度な震源分布と詳細な構造モデルとの直接比較による Slow 地震発生域の構造特性の把握

B03: 個別要素法による動的破壊過程のシミュレーション研究など多面的なアプローチの開発

### 国際的なネットワークの構築

本領域は国際的な地震研究のリーダーシップを発揮するために、国際的ネットワークを構築してきた。

領域主体の活動として、2022 年度の台湾、2023 年度のメキシコにつづき、2024 年度にはチリ、2025 年度にも **押しかけワークショップ** を予定している。これらの二国間ワークショップで築いた緊密なネットワークを生かして国際共同研究を展開していく。また 2023 年度に仏コルシカ島で共催した **国際サマースクール** では、世界の若手研究者育成に貢献し、海外の多数の研究者に日本の地震研究の先進性を印象付けることに成功した。2024 年度にもサマースクールを共催予定であり、今後も同様な国際的な若手育成活動へ貢献する。

既存の国際ネットワークを利用した活動も推進する。毎年恒例の 2 万人以上が参加する超大型学会、**米国地球物理学会** では、A03 代表伊藤を中心に海外研究者とともに 2022 年、2023 年と連続して特別セッションを開催した。セッションは領域内外から多数の講演を集め、学会全体の中でも屈指の規模であった。2024 年度以降も特別セッションを開催する。2023 年度から米国主導で始まった、全世界的な **沈み込み帯研究ネットワーク SZNet** は、各国の研究者ネットワークを結ぶネットワークである。当領域は日本を代表して定期的なオンライン会合に参加し情報交換している。2024 年度のチリ押しかけワークショップを、SZNet 主催の研究集会と連続開催し、それぞれの集会を充実させる。

国際的ネットワークが不可欠な研究活動として、掘削船を用いた国際的プログラム、**国際深海科学掘削計画** が挙げられる。掘削は断層近傍での観測および断層物質採取に有効な手段であり、本計画は本領域の研究推進にとって極めて重要である。また本計画は 2025 年から、米国の掘削船の引退に伴い日本と欧州が主導する新しいフェーズに入る。2024 年春の新国際深海掘削計画キックオフ集会では、A02 代表山口がジオハザード分野の代表世話人を務めるとともに、本領域から多くの研究者が参加し議論をリードした。今後も本計画に積極的に関与し、沈み込み帯の海洋観測における日本のプレゼンスを示す。

これらの国際的ネットワーク構築活動が実って、2024 年度から米国地球物理学会の発行する学術誌、Journal of Geophysical Research を中心とした **3 学術誌合同特集号企画** ”Slow to fast earthquakes and the geology, structure, and rheology of their host subduction zones”が始まった。この企画はタイトルが示す通り、本領域が主導するもので、領域代表井出が責任編集者、A03 代表伊藤が総括企画責任者を務める。これから約 2 年間、本領域からの成果はもちろんのこと、世界各国の様々な Slow-to-Fast 地震研究の成果を集めて出版することで、世界レベルの学術の体系や方向の転換を主導する。

## 13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域では領域発足以来、鳥海光弘（国立研究開発法人海洋研究開発機構、海域地震火山部門、招聘上席研究員）氏に総括班評価者を依頼している。評価者には領域のメーリングリストなどを用いて、日常的に領域の活動について連絡している。今回中間評価に際して、報告書の原案を読んでもらうとともに、領域関係者と追加の情報交換も踏まえて、下記のように評価コメントを提供していただいた。

本研究領域は、地震学の学問的領域を基礎的な範疇から、理工学における先進的学理の構築と社会的展開を目指して、世界的な規模で開発が進行しつつある、情報数理と計測技術の融合による、新機軸の超大規模、超微細な、観測と実験技術を基盤にして、学術領域を再構築する大規模プロジェクトである。

今世紀になって、我が国からのいくつかの重要な新発見が地震学の分野であった。それは、微動、リピーター地震、超低周波地震、スロー地震（スリップ）である。これらは、固体地球内部の閉じられた領域に起こる、不連続面形成（断層面）とその運動を表し、その時空スケールは、 $10^{-1}\sim 5\text{m}$ 、 $10^{-1}\sim 5\text{sec}$ に及ぶ。地震学における新発見の観測的事象は、ナノスケールの結晶物性のスケール則と接続すると、 $10^{-9}\sim +5\text{m}$ というスケール不変性を示し、その理解こそが地震学的事象に対する統一的な物理的描像の獲得に必要となっている。

本研究領域の主要な任務は、広大な時空スケールで起こる、固体地球内部の不連続面形成とその運動および発生する地震動に関する包括的理解と、そのための学理を構築することにあるだろう。合わせて、その観測および実験技術の他分野への移転、および社会展開が期待される。そして、学理の継続的発展に必要な若手研究者の育成、国際的協力体制、さらには広く、情報数理学分野、物性科学分野、非線型科学分野、地球化学分野、地質学分野などとの連携が重要な任務となろう。

本研究領域には総括班がおかれ、学理構築、若手研究者の育成、国際連携、そして他分野との連携の中軸になる。そして、そのもとに、A01班、物理実験班、A02班、構造解剖班、A03班、国際比較班、B01班、新技術観測班、B02班、情報科学班 B03班、モデル予測班が置かれる。それぞれの研究班の名称は、やや内容が分かりにくい面があるが、各班を構成する研究者群のテーマからは、意欲的な包括的学理構築の意志が強く感じられる、この企画の成功が十分に期待されよう。このような視点から中間的な成果について評価を行う。

総括班の活動：意欲的に国際展開、社会広報、若手育成、ダイバーシティ活動などを結合して、独創的な国際的押しかけワークショップを複数回行い、大成功を収めている。また、国際的なテーマに対する盛り上がりから、国内 JpGU、米国 AGU などでの特別セッションの開催とそこでの研究交流で多くの若手研究者を含む国際的研究ネットワークが展開され、大いに当該研究計画の進展に貢献したことは高く評価される。また、これらの機運を効果的に盛り上げるために、国際研究集会を 2022、2023 年に開催し、22 年は、現地参加 134 名、オンライン 142 名、海外から 20 名の現地参加、23 年は、現地参加 158 名、オンライン参加 71 名、海外参加 44 名となり、本研究テーマに関する世界的に高い関心が引き起こされたことも大いに評価される。また、2024 年にも本テーマに関する重要な国際研究集会が企画され実行されようとしていることも大いに評価される。

物理実験班では、中型、大型岩石スリップ実験による特徴的滑り長さにスケール依存性が確認され、スリップ特性のスケール則と破壊速度との関係に新たな視点が必要となった。バンプを持つ滑り面でのスリップ実験では、その分布特性に依存した滑り遷移が見出された。関連して、公募研究で、スロー地震帯に新たに短時間継続の微動の発見は重要である。広い範囲のスケールでのスリップ特性に、多様な分布様式を持つ場合の特徴的なスケール則の発見が期待されよう。

構造解剖班では、反射波振幅の時間変化からプレート境界近傍の流体移動を可視化することに成功し、また、プレート上面の凹凸によるスロー地震と fast 地震との発生域の差異が生じていることも発見され、それらのスリップと破壊様式の差異が重要な意味を持つと判断される。南海トラフではスロー地震、スロースリップとスラブ内部の fast 地震とが連動しているのが発見され、プレート境界地震が、スロースリップとスラブ内部の変形との結合と流体移動、さらには境界の凹凸とスロー地震から微動、低周波地震などの破壊とスリップとのモード連結に新たな視点を提供したと言えよう。

国際比較班では、世界的な規模で、スロー地震から fast 地震のスペクトルに関心が集まる中、本研究班によって、ニュージーランド、ヒクラングではスロー地震と微動分布がプレート間固着強度境界に集中していることが見出され、プレート境界滑りを担う巨大剪断クラックの先端部の歪み集中域における流体移動と先端移動が想起されよう。

新技術観測班では、新基軸の研究観測可能な、多点同時測定可能な小型絶対重力計のレーザー結合システムの技術開発とそれに伴う、観測理論の研究は一定の成果を上げており、すでに単独の小型装置でのスロー地震に伴う流体移動は検出されていることは、今後のスロー地震から fast 地震に伴う流体移動の直接観測に期待が持てる。また、新技術としてファイバーセンシングによるスペクトルの広いスロースリップから fast 地震の時間的關係、同時性などの重要な発見が今後期待される。さらに発展しつつある DAS による高密度測定技術の展開はさまざまなスリップや地震破壊の微細構造を検出する上で重要な貢献が期待される。

情報科学班では、GNSS による短期的スロースリップの検出が可能となり、短期的微動との関係性の解明が期待される。大域的スロースリップには拡散的なクラスターとなった小規模スロースリップが多数発見され、スロー地震との階層構造の発見につながると期待される。

モデル予測班では、マルチスケールモデルを大規模スリップ現象に適用し、スロー地震、スロースリップが基本的な現象であり、fast 地震などの高周波破壊伝播は特異な現象であるとの、理論モデルからの推論が成り立つとの考えの転換は、今後の広大なスペクトルを持つ不連続面（クラック）の動力学を建設する上で重要である。

以上の極めて高いレベルの研究内容と新技術開発、そしてデータ駆動科学に基づく新基軸の研究は、本中間報告に対し、大変に高い評価を報告せざるを得ない。（了）