

第11章 サイエンスプラン

新たなサイエンスプラン策定の経緯：1999年版および2009年版の将来計画とその中に掲げられたサイエンスプランは、いずれも「10年間程度の計画」として策定された。2011年東日本大震災を受け、2014年にかけて計画の一部改訂が行われて以来、約10年が経過し、新たな将来計画を策定することとなった。

新たな計画を策定するにあたり、将来計画委員会では昨年度以降、以下のような調査やレビューを行ってきた。

- 1) これまでの将来計画・サイエンスプランの内容および策定過程や背景の確認（1999年と2009年策定の内容と背景、及びそれ以前の地震研の歴史・組織変遷など）
- 2) 現行のサイエンスプランである「2009年計画とその改訂版（2009R）」に対する達成状況等のレビュー
- 3) 2009年計画とその改訂版（2009R）の計画に対応する外部評価コメントの確認と、指摘された重要点の洗い出し
- 4) 国内外の固体地球科学関連の諸機関や部署の計画や動向の調査

に加えて

- 5) 現行のサイエンスプラン（2009年版）の骨子は、1999年時の策定に根差しており、2009年策定計画は、その更なる具体化・効率的な実施体制の構築に重点が置かれたものとなっていること
- 6) 約20年間のサイエンス・技術の進展および大学の研究教育をとりまく環境の劇的な変化があり、かつ現在も急速に変化していること

に鑑み、サイエンスプランの骨子を見直すべく「地震研究所のミッションを進めるために重要な科学的課題（Scientific Grand Challenges）」を達成年限や実現可能性に関わらず洗い出してはどうか、と議論された。その結果、将来計画委員会の中に設けた担当班（GC班）で原案を作成し、原案をもとに所全体のシンポジウムを2回開催した。それらを踏まえて全所から意見・アイデアを出して頂き、SGCを作成した。

Scientific Grand Challenges（SGC）の将来計画における位置づけ：

現行のサイエンスプランである「サイエンスプラン2009および2009R」に関するレビュー（令和3年度4月教授会資料3-09）において、「今後の展開：分野間連携研究を中心として」が議論・提示された。これまでに達成できた課題と未達成課題、および外部評価コメントでも繰り返し指摘されている分野間連携の重要性を考慮して議論・提示されたものである。この提示内容を新しい将来計画に取り入れることは、従来から指摘されている問題点の改善・解決、および現在行っている研究の継続性・発展を担保する上で重要である。

一方、SGCは、現行のサイエンスプランとは独立に「地震研究所のミッションを進めるために重要な科学的課題」を達成年限や実現可能性に関わらず洗い出すことによって、現行のサイエンスプランとその継続・発展要素を含む上記の提示内容に対して、大きな方向性を与え、新しい要素を加える役割をはたす、と位置付けられる。以上を考慮し、

(A) GC班での検討および所全体でのセミナーを介してさまざまなアイデア、課題、コンセプトを募り、これらを要素として、包括的に重要課題を抽出し、SGCを作成した。

(B)「サイエンスプラン 2009 および 2009R に関するレビュー」に整理されている継続・発展を目指す課題および未達成課題などを要素とし、SGC により与えられる大きな方向性や新たな要素を考慮して、新しい中期的サイエンスプランを作成した。

次期サイエンスプランは、両者（SGC と中期的サイエンスプラン）の足し算あるいは掛け算により、重要課題にアプローチしようとするものであり、両者一体のものとして策定された。したがって、今回提示する「サイエンスプラン」は、従来の 10 年程度の中期的プランよりも長期的、かつ広範なテーマやスコープを含んだ包括的なものである。

東大規則（第 67 号，平成 16 年議決）の規定，および地震研究所のミッションステートメント（地震研ホームページ）には，本研究所は，地震及び火山噴火の現象の解明及び予知並びにこれらによる災害の防止及び軽減に関する研究を行うことを目的とし（東大規則），予知についての体系的研究の推進，災害の軽減につながる基礎的研究の推進，地震・火山現象の根源となる地球内部のダイナミクスの解明など，地震・火山現象について先端的かつ多面的研究を推進する研究所（ミッションステートメント）と掲げられている。ミッションステートメントに地球内部も含めた多面的研究の推進が掲げられていることは，地震研究所設立の経緯とも深く関わっている：関東大震災の悲惨な状況を前に，わが国における地震学の再構築が差し迫った問題となったとき，長岡半太郎，寺田寅彦らが，「振動工学や物理学，地球物理学等の立場から地震現象を理解するべきだ」と主張したことに根差している（「地震研ホームページ／地震研究所のあゆみ」に基づく）。近年の科学的進歩や社会構造の変化に鑑みても，上記の経緯や目的は，現在もなお重要である。

11.1 地震研究所 Scientific Grand Challenges (SGC)

東京大学地震研究所の長期的な目標は、

- 惑星「地球」のダイナミクスの定量的理解
- 地震発生・火山噴火を含む変動現象の科学的理解と予測
- 変動現象にともなう災害の定量的な予測と対策

の3項目に整理されよう。これらは相互に関連し、本来シームレスにつながる。地震や火山は地球ダイナミクスの現れの一部であり、物質・力・エネルギーの源とそれらが変動現象を引き起こす仕組みこそが、地震・火山現象の根幹的機構である。この機構の理解、および現象に即したモニタリング、データ解析、数値シミュレーションに基づいて地震発生・火山噴火・地表変動を高精度に再現・予測できれば、災害の予測や効果的対策につながる。同時に、災害対策の高度化は観測・解析に新たなニーズをもたらし、根幹的機構のさらなる理解へと循環する。

本節は、地震研究所が上記の目標を達成する上で推進すべき重要な科学的課題(Scientific Grand Challenges; SGCs)を提示する。まず、SGCを考える上で柱となる視点(A)~(G)を挙げて重要課題を網羅する。次に、重要課題の中でも特に意識すべき挑戦的課題を取りあげ、最後に、それらを意識した上で各視点に沿って強化すべき方向性を示す。

- (A) 地球内部の構造・状態の解明
- (B) グローバルダイナミクスの理解
- (C) 地震・火山噴火とそこに至るプロセスの理解と予測
- (D) 災害メカニズムの理解と予測
- (E) 観測・計算技術の高度化
- (F) (A)~(D)をつなぐプラットフォームと統合モデル化
- (G) 意図せぬ発見のための仕組みの構築

(A)~(D)が科学的テーマを示しているのに対し、(E)~(F)はそれらを達成するためのアプローチであり、両者は縦横につながり相互に関連する。ここではまず、(A)~(D)のつながりを強調しつつ重要課題を網羅する。

惑星「地球」の振る舞いを対象とする地球科学では、不均質な地球の中で何がどこにどのような分量で存在するのか、また、どのような物理状態(温度・流体圧・応力など)にあるのかを知ること(A)が本質的な重要性をもつ。(A)に要求される分解能は対象を支配するプロセスの性質によって様々であるが、(B)や(C)で構築されたダイナミクスモデルにおいてシステム挙動の要素敏感性を評価することで判明する。

グローバルダイナミクス(B)は地震や火山噴火に至るプロセス(C)の駆動源であり、両者は本来シームレスであるが、主要なプロセスや時空間スケールは大きく異なる。(B)は、物性の巨視的な(決定論的に記述できる)不均質を含めて連続体力学の枠組みで記述できる。モデルの妥当性は主に、現在のマントル対流やプレートテクトニクスに至るまでの地球の構造進化をどれだけ説明できるかで検証され、そのためには(A)において、地球内部の構造や状態、あるいは変動現象の起き方が地球進化に伴ってどう変遷したかを知る必要がある。他の惑星のテクトニクスを研究し地球と比較することも(B)の理解を深める上で重要である。いっぽう(C)は、地震や噴火の繰り返しシーケンスから地震時の断層滑りや噴火時のマグマ噴出まで、(B)に比べてずっと短い時間スケールに関するもので、断層や火道といった局在的な構造が本質的な役割を果たす。とりわけ、地震や火山噴火のイベント時には、複雑な構造中での破壊や発泡など、極度に不連続・非線形な変化がダイナミクスを支配する。(C)のモデルの妥当性は、イベント中の詳細履歴からインターイベント期の物質移動や状態変化のモニタリング、イベント発生間隔の変動まで様々な時間スケールでの観察事実との比較によって検証される。

過去の変動現象の履歴を解明することは、(D)へのインプットとして必要なハザード評価に対する地球科学からの重要な貢献でもある。(D)ではさらに、変動現象による影響の伝播機構や、被害を受ける側である構造物等の応答特性を組み入れて事前に被害予測や減災対策を立て、また、イベント発生後には迅速な対応のために被害の即時的な予測を行う。

(A)～(D)を実現するためには、観測・実験データと解釈の手法を拡張あるいは新規に開拓・開発する必要がある。科学と技術は一体となって進歩するものであるから、観測・実験及び解析・シミュレーションの技術(E)については、既存技術の改良に加えて革新的な観測・計算技術の創出にも継続的に取り組むべきである。モデルが現実のプロセスを正しく反映していることを検証するためには、観測・実験窓(独立情報)の拡大・確度向上と、大規模で多様なデータの同時かつ効率的解析・再現方法の追求が欠かせない。さらに、(A)～(D)におけるプロセスがシームレスであること、同じ観察が複数の構造・プロセスに関わり、かつ構造・プロセスの確かな推定には異なる項目の観察が必要であることに鑑みれば、異分野間連携のプラットフォーム(F)を形成する必要がある。このプラットフォームは、観察・データ解析・モデリングを(A)～(D)全体として共有あるいは統合して行うことを可能にし、個々の分野の深化と全体の理解が同時にかつ飛躍的に進むと期待される。

以上(A)～(F)の視点を導入するにあたっては、地球進化から地震・火山災害までを物理・化学の法則に従うプロセスの組み合わせとしてモデル化し、観察事実と比較して検証する演繹的アプローチを念頭においた。しかし、科学革命の多くが全く予想外の事実の発見から始まったことに鑑みれば、現象やデータを眺めて未知の相関関係を探る帰納的なアプローチも重要である。とりわけ、多種にわたる観察を地道に蓄積し、それを眺めて自由に考えを巡らす余裕を研究者がもつことは「意図せぬ発見」を導く上で絶対的な必要条件である。そのような研究環境の確保を含め、意図せぬ発見を促す仕組みの構築(G)が重要である。

ここからは、地球に対する我々の理解の現状を批判的に俯瞰して、(A)～(G)の視点で強化すべき方向性を検討する。50年後、100年後の地球科学を展望するとき、冒頭に掲げた目標に近づくために避けては通れない科学的挑戦、とりわけ意識して注意を向けなければ永遠に放置されかねない困難な課題に注目することは重要であり、まずそのような挑戦的課題を3つ取りあげる。

課題1) ダイナミクスのキーパラメタ(物質・温度・絶対応力・流体圧・強度)の測定

プレート運動は大規模な固体対流の現れであり、島弧マグマティズムは沈み込みから派生する物質移動、地震はプレート運動が脆性域を载荷しておきる急激な剪断破壊であるという理解は、これまでの多様な観察を統一的に説明できている。しかしながら地震発生・火山噴火の予測は、例えば天気予報に遠く及んでいない。物理ベースのモデルで天気予報ができていないのは、気圧・温度・湿度をほぼ全系にわたって観測できているからである。いっぽう、地震・噴火に至るダイナミクスのキーパラメタである固体地球内部の物質・温度・絶対応力・流体圧・強度は、地表観測データからの推定が難しく、また、直接測定も数 km を超える掘削が困難なため、比較的浅部の断層や火道などにおいてさえよく分かっていない。革新的な技術の創出が要求される難しい課題ではあるが、物理モデルに取りこむべきプロセスを決めるためには、ground truth(礎となる事実)として、これらの信頼できる値を所要所で確保することが必要である。

課題2)過去の履歴の解明

(B)でも(C)でも、ダイナミクスモデルの妥当性を検証するためには、地球の過去の振舞いを正しく知る必要がある。(B)に関しては、島弧-背弧系の発達や地球史スケールのグローバルな進化など、地球の冷却にともなう不可逆な、場合によってはただ一度だけ起きた変化の解明が必要であり、地球物理的なモデリング、地質学的、物質科学的、あるいは比較惑星学のアプローチなど多角的な視点から史実を紛れなく解明することが重要

である。いっぽう、(C)に関しては、地球史の中の一定の期間、一定の場所で繰り返し起きた地震や噴火のイベント履歴を知る必要がある。最も望ましいのは、同一システムにおける履歴をなるべく長期間にわたって多数回、詳細に知ること、現状の調査の限界を打ち破る画期的な手段を創る必要がある。そのような努力と並行して、調査対象を全世界に広げ観測空白域をなくして経験事例を増やすために、国際協力をさらに推進すべきである。

課題3) 物理学のフロンティア

地震発生・火山噴火の重要プロセスには、既存の物理法則で適切に扱えないものがある。断層破壊においては、破壊の進展とともに単位面積あたりの破壊成長抵抗が増加することが観察されている。これは、破壊が完了して地震の大きさが定まるまで破壊成長抵抗がわからないことを意味し、破壊成長抵抗が事前に定まっていることを前提とする既存の破壊力学では断層破壊のダイナミクスを記述できない。地震のサイズを支配する物理条件を解明することは地震発生論の大きな課題であり、マルチスケールな複雑構造をもつ断層の破壊を、開始から停止まで計算できるフラクタル破壊力学の創出が必要である。

火山噴火においては、減圧や冷却に伴う相変化によりマグマの粘性や浸透率が何桁にもわたり急激に変化することや、速度や状態に依存してマグマの変形・破壊の様式が大きく変わることが、多様な表面現象や噴出物を生み出す要因になっている。このような状態遷移を捉えることのできる構成則は確立されておらず、地殻浅部から地表に至るまでのマグマの振る舞いを記述できる物理の枠組みを、天然の火山システムの観察・実験・理論を組み合わせる必要がある。

最後に、以上の課題1)～3)を踏まえて、地震研究所が取り組むべき地球科学の重要問題を(A)～(G)の視点より見直し、将来研究において強化すべき方向性を提示する。

(A)地球内部の構造・状態の解明、および(B)グローバルダイナミクスの理解

下部地殻以深の流動的ダイナミクスは、物質組成・組織と温度分布が決まれば連続体の運動・状態方程式と反応進行式で記述でき、さらに浅部の脆性圏の長期的テクトニクスまでを包括的な物理システムとして扱うことができる。ここでのゴールは、地球内部構造やテクトニクスの長期的な進化に関わる多様な観察事実(課題2)を説明できる物質・状態の分布を見つけることである。そのための新たな方向性としては、物質・温度・絶対応力などのキーパラメータに対して高い感度をもつ測定手段の創造による ground truth の確保(課題1)、および包括的なマルチフィジックスシミュレーションを用いたパラメータ拘束力の強化が挙げられる。モデルの恣意性を抑えるには、少なくともマントル下部までモデル系に含めるべきである。

(A)地球内部の構造・状態の解明、および(C)地震・火山噴火とそこに至るプロセスの理解と予測

断層を動かす応力の絶対レベルはいまだに大きな謎であり、断層近傍での絶対応力・間隙流体圧を測定する(課題1)必要がある。地震発生深度だけでなく、直接的な载荷源と目される延性剪断帯までの測定が必要である。さらに、断層近傍での稠密測定によって応力不均質のスペクトル情報を得れば、フラクタル破壊力学の創出(課題3)とあわせて地震の予測可能性に関する理解が大きく進展することが期待される。

地震サイクルのうちインターサイクミックなプロセスについては、断層周辺の複雑な応力状態や不均質な流体・物性分布も含めて連続体力学で記述し、モニタリングとあわせたデータ同化によって時間発展の追跡・予測を目指すことが重要である。これは、天気予報でいえば気温・気圧・水蒸気量分布の物理ベース予測に相当する。いっぽう、地震時の動的破壊については基礎科学レベルでの問題(課題3)が残っているが、仮にこれが解けたとしても物理的状況が複雑すぎて演繹モデルで決定論的に記述・予測することは難しい。天気予報においてさえ、気温・気圧・水蒸気量分布までは物理ベースのデータ同化で予測するが、最終的な降水予報は統計

によっていることを踏まえれば、地震イベントの予測には帰納的アプローチを併用する必要があるだろう。

噴火に向かう準備過程を支配するのはマグマ・流体の移動と相変化であるが、上昇経路や蓄積場の実体は解明されていない。これらの位置や形状、大きさを知るためには従来の探査の分解能を凌駕する技術革新が必要である。さらに、噴出物に記録されたマグマの履歴を高精度に余す所なく解読する(課題 2)手法の開拓も必要である。噴火の際には、比較的短時間に起きる大量の高温物質の移動や相変化を反映した顕著な変化が期待され、実際に様々な前駆現象が知られている。噴火の準備過程から終息まで、マントルからのマグマの移動、上部地殻マグマ溜りの過剰圧、上昇マグマの温度・揮発性成分の種類と飽和度、固気液分率を高い時空間分解能でモニタできるようになれば、マグマの状態遷移の理解(課題 3)や噴出物分析にもとづくアプローチとあわせて、マグマ・流体挙動や噴火プロセスの物理モデルがより確かで定量的になり、火山噴火のメカニズム理解や短期的な推移予測が大きく進歩すると期待される。

(D)災害メカニズムの理解と予測

事前の災害危険度評価や耐震対策においては、視野を幅広く持って見落としを防ぐことが重要な方向性である。断層・地震・津波や火山活動の長期履歴(課題 2)を充実させて低頻度ではあるが甚大な災害をもたらす変動現象を捉えることに加え、様々な複合災害や、過去に経験されていなくても理論的に予期される、現状では十分認知されていないタイプの災害についても可能性を定量的に評価すべきである。

地震に関しては、地震動、断層変位、津波、地盤・建物・インフラの損傷が主な予測対象である。震源の運動が災害を引き起こす物理機構は比較的よく理解されており、今後は、社会的な有用性が格段に高まるレベルまで災害予測の信頼性を向上させることが目標となる。そのためには、建物・地盤特性などの効率的な収集による事前の被害予測の精緻化に加えて、イベント発生後の迅速な対応のために、リアルタイムのデータ同化による波動場の即時予測、インフラの状況の即時把握など、技術的な質・量のイノベーションが課題である。

噴火では、火砕流・噴煙という複雑な高速混相流が被害原因であり、さらなるプロセスの理解のために内部状態の観察手段を得ること(課題 1)が重要である。また、大規模な噴火は気水・生物圏に長期にわたる影響を及ぼすため、物質や熱などの放出の事前評価および即時的追跡を高度化し、関連分野と連携して影響を評価することが必要である。

(E)観測・計算技術の高度化、(F)(A)～(D)をつなぐプラットフォームと統合モデル化、および(G)意図せぬ発見のための仕組みの構築

観測技術については、(A)～(D)の要請に応じて、地球圏外を含めた未踏・極限環境への進出や、新たな観測量の導入による観測窓の拡大、観測の密度や精度・確度の向上に挑戦していかなければならない。数値計算技術については、観測技術の革新によって得られる稠密かつ多様なデータを同時に満足するように物質の状態や運動を高分解能で推定し、現象理解と予測につなげるアプローチを意識する必要がある。強化すべき方向性としては、大領域・長時間においてローカルな現象を解像できる大規模詳細解析を超高速に実現する計算科学・計算機科学手法、観測データの不確実性を考慮しつつモデルパラメータを効率的に推定するデータ同化などの数理科学・情報科学手法、これらの計算を高速に実行できる計算機アーキテクチャの開発、災害前後の社会科学シミュレーション手法の開発が挙げられる。同時に、これらの技術は(A)～(D)をシームレスに繋ぎ、統合的な地球モデルの構築(F)へと昇華させるために必須である。

多彩で自由な実験・観測が意図せぬ発見(G)の源泉であることは論を待たない。これに加えて、時間スケールが長いプロセスを扱う地震・火山科学ではデータの長期・安定的蓄積が本質的に重要であり、これらを集積する共通プラットフォーム(F)は、人間がデータを俯瞰する力を増幅して予期せぬ発見の可能性を高めるのにも役立つ。データ利活用のアプローチとしては、人間の物理的直感を使わないデータサイエンスを積極的に用

いた帰納的な事象相関の探求が挙げられる。また、演繹的なシミュレーションにおいても、データ駆動型の同化モデリングにより物理法則を推定するような、帰納と演繹を組み合わせたアプローチを考慮すべきだろう。予期せぬ発見は新たな科学的課題を産み、新たな観測・実験データの取得へ循環すると期待される。

11.2 中期的サイエンスプラン

(A) 地球内部の構造・状態の徹底解明

地球の構成物質やその物理化学状態(温度・流体圧・応力など)を知ることは、地球内部のプロセスを理解する上で本質的な重要性をもつ。要求される分解能はプロセスの性質によって様々であり、相平衡や反応を支配する原子スケール、断層内部の微細構造やマグマ発生時の固液の分布形態といったマイクロな構造から、地震・火山活動の場としての沈み込み帯やプレート・マントル深部の運動といった全地球規模の構造にまで及ぶ。地震研は固体地球科学の多様な分野の研究者が、観測・分析・実験・理論・掘削直接観測などの異なる方法を用いてこれらの問題に取り組んでいる。しかし、固体-液体を含むマイクロからグローバルまでのダイナミックレンジの広い構造・状態を把握するには、多様な分野・手法を融合させ、様々な角度から制約を与える必要がある。例えば、マグマや流体の分布を捉えるためには、地震学的制約に加えて、電気伝導度や溶岩・深部流体の物質情報の統合が不可欠である。

これまで約10年間のサイエンスプランにおける課題であった「分野間連携」を推進し、上記のような統合的アプローチによる地球内部の構造・状態の徹底解明を目指す。例えば、以下の具体的課題を推進する。グローバルダイナミクスの分野では、太平洋アレイなどの国際共同研究を含む多元的広帯域海陸機動観測により、海洋マントルおよび沈み込み帯・地震発生域を含む上部マントルから遷移層に至る地震波速度・減衰・電気伝導度、異方性などの構造を解明する。多元的データに基づき、リソスフェア・アセノスフェアシステムの実態と挙動、マントル内部の水や溶融の分布をとらえ、室内実験等による地殻・マントル物質の変形や非弾性の理解、物質分析に基づく組成・化学状態の解明に基づき、沈み込み帯およびグローバルスケールの物質循環やダイナミクス、地球の進化を議論する。

地震・火山分野では、地震発生や火山噴火を引き起こす場の物理化学状態の時空間変化を把握するため、地震活動・断層滑り・応力場・変形場・温度場・重力場・地震波速度構造・減衰構造・電気伝導度構造や、熱流量・流体-ガス湧出の時空間発展を、基盤的観測網、機動的稠密観測網、孔内観測、およびリモートセンシングなどを活用して高い解像度でとらえることを目指す。また、地震発生場や火山の地下深部から浅部にいたる構造を地質学、物質科学、地球物理の融合的手法によって定量的に把握し、地震・火山現象の多様性・複雑性を生み出す本質的な素過程を焙り出す。特に、断層系・断層内部の微細構造とそれらの発達・成長様式や摩擦・変形特性、断層への応力载荷過程と流体圧変化、およびマグマの生成・蓄積場(マグマだまりの実態)・マグマを含む流体の上昇・移動経路・地下水系の分布などに注目する。

(B) グローバルダイナミクス

現在の地球の構造や状態、変動は、地球誕生以来の熱的・物質的な進化を経た結果としてあらわれており、地球進化の履歴が残されていると考えることができる。構造・状態や変動の源となる地球内部ダイナミクスの理解を深めるためには、これまで行われてきた観測機器開発を含む観測科学、物質科学、物性科学、計算機科学の統合的アプローチによる、マイクロからグローバルまでのマルチスケールダイナミクスの解明は引き続き重要であり、個々の研究をさらに融合させた研究を進展させる。マントル深部までを含めたグローバルスケールダイナミクスによって出現する構造や状態を広域の場と捉えると、沈み込み帯はその一部をなす。また、広域の場は、島弧系にとって、地震・火山噴火現象のようなカタストロフィック現象の背景場・駆動力となる。グローバルから島弧系のダイナミクスの理解を試みるとともに、(F)の一部として実施される地球ダイナミクス

の総合的な研究に向けた礎を構築する。また、他の惑星の変動現象との比較も視野に入れて、固体地球と大気・海洋とのカップリングを含めた地球システム全体の変動現象の理解を試みる。

国際共同による大規模な多元的広帯域海陸域機動観測と上部マントル条件におけるマントル物質の変形や非弾性に関する室内実験を引き続き推進し、これらを融合することにより、新たな海洋マントルダイナミクスモデルの創出とこれに基づいた海洋マントルに関する理解の質的な変革を試みる。ダイナミクスの空間変化を明らかにするとともに、履歴情報をもとに時間変化の解明も試みる。沈み込み帯をリソスフェア・アセノスフェアシステムが沈み込むマントル対流の入り口としてとらえ、全マントルおよび沈み込み帯の物質循環を統合的に研究するとともに、構造やダイナミクスの理解の改善を試みる。例えば日本列島及び大陸棚地域に展開されている定常観測網に加え、アウターライズ側をカバーする大規模海底機動観測を検討する。このような観測により得られる現在の構造、運動形態とそこに至る進化過程を、水・物質学的知見と地殻・マントルダイナミクスモデリングに基づいて議論し、新たな観測対象・要素を見出し、地球物理・物質科学・地球化学などに基づく多元的検証を試みる。長期にわたる地球熱史の研究を継続・発展させ、マントル-核システムの進化という観点から惑星としての地球とそのダイナミクスの理解を深化させる。

海洋マントルシステムおよび海陸の非対称性を制約するとともに、海溝に沿った物質沈み込みの不均質性と地震・火山活動の非一様性の対比などから、沈み込み帯における地震・火山活動を俯瞰的に議論する。沈み込み帯から背弧域までを一つの島弧システムとして捉え、広域かつ深部から浅部までの変動現象の統合的把握を試み、長期間・大規模な時空間スケールにおける島弧ダイナミクスと流体循環に関する知見の深化につなげることも目指す。

(C) 地震・火山噴火とそこにいたるプロセスの理解と予測

地震・火山噴火は、項目(B)に比べて短い時間スケールで進行し、イベントの進展は断層や火道などの局在的且つ複雑な構造・状態に強く依存する。その結果、不連続性・非線形性の極めて高い変化が重要となる。地震・火山噴火現象を理解して予測するためには、イベントの多様性・複雑性を徹底的に明らかにし、それらを生み出す本質的な素過程を抽出することで、汎用性の高い地震発生・火山噴火モデルを構築することが重要である。

地震にいたるプロセスを理解する上で、断層がどのようにして動き出し、動的破壊過程へと遷移するのかを明らかにする必要がある。そのために、震源域で進行する異なる時空間スケールの断層滑り・変形を把握し(項目A)、マルチスケール性を包摂した地震発生物理モデルに立脚して、観測される多様な断層滑り現象や複雑な動的破壊過程のモデル化を進める。地震の発生予測を高度化するためには、断層の応力状態と強度を把握することが重要である。海陸の基盤的観測網に加え、機動的稠密観測網や掘削孔を活用し、断層とその近傍での応力状態・間隙流体圧およびその時空間変化をモニタリングし(項目A)、それらを地震活動(スロー地震も含む)や断層滑りと直接対比することにより、地震発生を促進する素過程を焙り出す。さらに、モニタリング結果と物理モデルをデータ同化によって組み合わせ、断層滑りの時空間発展やスロー地震の予測を試みる。また、震源域の構造・状態と地震活動との関連性に着目することで、地震活動の統計解析モデルの高度化を進める。

火山噴火にいたるプロセスを理解するためには、比較的浅部(上部地殻～火山体)におけるマグマ・流体の状態遷移を明らかにする必要がある。火道で進行するマグマ・流体の粘性率や相変化等の噴火を律速するパラメータを把握し、物理モデルの構築に加え、観測・実験・シミュレーション等による検証を同時に進める。観測値との比較が可能な段階に達している噴煙柱モデルや火道内マグマ上昇モデルの更なる高度化を図るとともに、火砕流など他の表層現象に関するモデル構築にも着手する。より深部に関しては、マグマ溜まりからのマ

マグマ上昇を経て噴火に至るまでの統合モデルを構築する。このためには、マグマの上昇・噴火の力学的側面と、マグマの組成・物性や温度・圧力変化に伴う相変化に関する制約が不可欠であり、先端的な観測や分析技術を積極的に導入しつつ、地球物理学と物質科学の融合的アプローチを試みる。

地震・火山噴火の発生予測や物理モデルの精度検証のためには、長期間にわたる地震・火山噴火の規模・発生履歴が必要である。国内外の過去の地震・火山噴火に対応する地質学的・史料考古学的なデータの蓄積を継続するとともに、近年の観測データ・知見との融合を行う。さらに、過去のイベントの認定・評価手法の刷新を進め、カタログ構築におけるイベント検出率の効率化・均質化を目指す。また、より時空間スケールの大きな変動やプロセスの解明には、「島弧ダイナミクス」(項目 B, F) との連携を通して、震源域や火山周辺における変形-応力場・温度場とその時間変化、およびマグマ・流体分布等を明らかにする必要がある。

(D) 災害メカニズムの理解と予測

地震・火山噴火による災害メカニズムの理解と災害軽減に向け、災害発生前、発生直前、発生直後、および発生後の長期的影響など、時間軸を意識した予測が必要である。高精度・稠密な海陸観測データに基づいて、物理に基づき災害発生メカニズムを詳細に理解し、現代社会に脅威となる地震・津波・火山ハザードを事前把握する。発災時には、事象の発生と規模を速やかに把握して、これから起こる災害の予測および長期的な社会影響評価をリアルタイムに行う災害予測システムの開発を進める。

陸域稠密観測データに加え、DONET/S-net 等の海域観測データや DAS 等の新たな観測データを活用し、地震・津波・火山現象の物理機構と災害発生機構の理解の深化を図る。特に、2016 年熊本地震で再認識された断層ごく近傍強震動の成因解明に向け、稠密地震観測と動力学シミュレーションによる評価を進める。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の巨大津波を引き起こしたプレート境界浅部の歪み蓄積・滑り一動的破壊過程と津波の発生、及び境界深部の強震動生成域の構造・状態との関係を明らかにする。火山噴火に伴う降灰・噴石・溶岩流・火砕流・泥流・山体崩壊など、多様な災害の発生機構を、観測・実験・シミュレーションにより総合的に評価する。マグマ供給系や火山の内部構造を把握して災害が発生しやすい場所を特定し、モニタリング(項目 A) によるマグマの蓄積状態・移動・上昇の把握、および噴火の時期や規模の予測を目指す。連続観測による平時-災害発生時-災害発生後の推移のデータを長期的に保存・活用するためのデータアーカイブ作りを組織的に進める。

社会の環境変化と構造物の多様化に即して、地盤災害を引き起こす極短周期地震動、永久変位を含む断層極近傍強震動、木造家屋を倒壊させるパルスの波群、超高層ビルを大きく揺する長周期地震動など、広帯域強震動を予測可能な、強震動シミュレーション手法および震源・地下構造モデルを統合開発する。現状の距離減衰式に基づく経験的強震動予測手法に代わるシミュレーションベースの予測により、観測データが少ない断層極近傍の強震動予測に貢献する。震源物理と構造不均質性の知見に基づいて、予測の不確実性を定量評価し、耐震設計に資する予測技術を開発する。

リアルタイム観測データと高速シミュレーションとの同化により、地震・火山噴火直後に全体像を把握し、数分〜数日後の予測をリアルタイムに行う。シミュレーションとデータサイエンスを活用した多様なシナリオに基づき、空振りや見逃しのない災害予測を目指し、即時性と信頼性を担保した実用的な災害推移予測技術を開発する。さらに、重力変化を用いた地震早期検知や、大気重力波等を用いた遠地津波の発生予測の実現に向けた、新たな観測と解析技術開発を進める。発災直後の構造物と年単位の被害分布の即時把握のために、構造物センサーや UAV などの新技術を用いた即時被災判定システムを開発する。火山噴火中の観測データと、地下で進行中の現象を結びつけるモデルを介した火山活動の推移予測を目指し、観測の強化と解析手法開発を進

める。また、海底噴火による軽石被害、津波、さらには大気振動による遠地の気象津波など、全球スケールの影響を評価する。

(E) 観測・計算技術の高度化

地球科学は観測に基づいた学問であり、先端的な観測データの重要性はますます高まっている。地震研究所はこれまでに技術開発の方向として、「1. 従来にない高精度・高感度な観測技術開発」、「2. 新しい観測技術による新たな領域への観測展開」、「3. 新しい観測量による革新的観測」の3つを示しており、この方向性を今後も維持する。すなわち、引き続き新しい観測・計測を固体地球科学の研究と位置づける。

近年、膨大な量の観測データを用いることで新たなサイエンスが切り開かれている。さらに、先端的な計算科学・計算機科学・情報科学・数理科学を活用した革新的数値解析技術が開発され、計測技術と解析技術の融合が行われている。今後は「4. 新たな観測に資する革新的解析計算技術開発」の方向性を加えて、革新的シミュレーション手法に留まらず、シミュレーションに不可欠な大量の観測データ取得及び解析、観測・計測システムのモジュール化、解析ソフトのパッケージ化、観測データ流通の高度化なども含むこととする。それぞれについて、具体的な課題例を以下にあげる。

1. 従来にない高精度・高感度な観測技術開発
 - ・光計測を用いた地殻ひずみ、重力、地動の観測技術開発
 - ・強震動、微小地震動などの広帯域、高 S/N 比で高サンプリングでの取得
 - ・ミュオグラフィ技術、衛星データを用いた観測手法などの統合的な火山研究への適用
2. 新しい観測技術による新たな領域への観測展開
 - ・海域や活動的火山などの極限環境における観測空白域をなくすための観測技術開発
 - ・計測出来ていない物理量を含む多種多様な海域観測技術の開発
 - ・ドローンなど飛行体を用いた観測技術開発
 - ・惑星探査などによる探査・分析技術の地上遠隔観測・化学分析への応用
3. 新しい観測量による革新的観測
 - ・ミューオン等高エネルギー素粒子を用いた地球内部の密度構造およびその変動観測
4. 新たな観測に資する革新的解析計算技術開発
 - ・光ファイバー計測などの稠密連続リアルタイム観測データの活用
 - ・最適化手法、超高詳細物理モデルに基づく数値シミュレーション手法の開発
 - ・現時点では実現困難と考えられるレベルでの革新的シミュレーション手法開発
 - ・機械学習やデータ同化との協働による地震微動検測と地下構造モデリングの技術革新

新しい知見を得るために必要な観測計算技術については、開発に携わる研究者・技術者、所内研究者と連携して発展させることが重要であり、技術開発を迅速かつ効率的に遂行する体制の整備を行う。また、開発手法を活用する所内連携・実装を促進する。さらに数理計算科学に基づく多分野間連携の促進を図るとともに、地震・火山・津波研究の社会実装につながる、関連事象（経済損失・風水害等）の研究との連携も検討する。

(F) (A)～(D)をつなぐプラットフォームと統合モデル化

(A)～(D)において、ある特定の観察が複数の構造・プロセスに関わり、かつ構造・プロセスの確かな推定には多様な観察が要請される。このため、分野間連携のプラットフォームやフレームワークを構築し、観察・データ解析・モデリングを(A)～(D)全体として共有あるいは統合して行う必要がある。その結果、個々の分野の

深化と全体の理解が同時にかつ飛躍的に進み、またオープンサイエンスに向けた基盤となることが期待される。項目(E)と連携して系統的かつ効率的に大容量・多元的データを取得し、共有・解析するまでのプラットフォームの構築は、(A)～(D)のいずれにも関わる。特に、適切なネットワークや計算・ストレージ環境のもとに、リアルタイムあるいは迅速に変動をとらえ、事象の発生予測、データ同化による現象予測、ベイズ推定などに基づく統計的評価をシームレスに行うことは、理学－工学－防災の連携実現に向けて重要かつ有効である。

火山体や火山下の構造ならびに噴火・マグマ活動については、衛星-測地-地震波-電磁気-重力-熱流量-ミュオンなどの地球物理学的観測、噴火ダイナミクスやマグマ生成・上昇のシミュレーション、岩石とマグマ・流体の物性、化学・同位体組成、および先端的な物質分析やデータ解析など、さまざまな手法により多様なデータや解釈が得られるようになってきた。しかし、これらの多様なデータを、個別に解析・解釈するだけでは、マグマ生成・上昇・噴火に至るプロセスや災害の予測を十分な精度で行うことは難しい。例えば、マグマが地下のどこにどれだけ存在するか、マグマだまりの実体をとらえるためには、地震波の解析だけでは不十分であり、上記の多様な観測や物質データを「一つのプラットフォーム」の上で統合解釈する必要がある。これは火山の下にマグマに限らず、水溶液流体や超臨界流体を含む断層などの構造についても同様である。

このようなプラットフォームは、日本列島におけるマグマ生成・上昇から噴火にいたるまでのプロセス、地殻変動・地震発生の場合、さらには日本列島の形成・進化までを一体のものとして記述する「島弧ダイナミクス」統合モデルの構築にも不可欠である。沈み込むプレート-沈み込まれる島弧-背弧全体を「島弧ダイナミクス」の枠組みでとらえ、深部から浅部に至るまでのプロセスの統合的理解を目指す。このために、グローバルな構造やプロセスの理解、例えばリソスフェア・アセノスフェアシステムを正確にとらえ、プレート運動をダイナミクスとして再構築することや、水などの物質循環に着目した地殻・マンツルのダイナミクスモデリングによる変動現象の予測と地球物理・地球化学観測による検証を進める。

さらに、このプラットフォームの構築により、地震研の理学・工学研究と、災害軽減に求められる工学的要請及び社会的要請とのギャップを埋めることを目指す。所内の広い研究分野からの参画、および総合防災情報研究センター、災害・復興知連携研究機構などの学内連携、京大防災研との拠点間連携を通じて、例えば、震源物理から強震動・津波予測・災害軽減までの様々な研究分野を横断する学際的な研究、構造物の即時被災度判定を可能とする革新的な観測・解析技術システムの開発・社会実装を行うことなどを目指す。

(G) 意図せぬ発見のための仕組み

優れた研究は、個人の卓越した観察力と発想力に根ざすことが多い。想定外の発見は、新たな発想に基づいた試行錯誤や、意図した研究活動から偶発的に見いだされる。近年の学術研究における DX（デジタルトランスフォーメーション）の進展は、大量の観測データ処理や加工済データから情報を抽出する手法の深化により、意図して抽出する情報以外にも意図せぬ帰納的な事象探求を可能にするなど、研究者のデータ収集能力を飛躍的に高めている。(F)で開発されるプラットフォームと統合モデルは、モデリング-検証型の演繹的研究における分野間連携を促進するとともに、そのデータ収集・解析・表示機能が我々の認知能力を拡張し、データサイエンスのような帰納的研究にも活用される。研究者は自ら余裕のある研究環境を確保し、画期的・独創的成果を生み出すよう積極的にその環境を活用する心がけが必要であり、挑戦的な個人レベルの課題を立案し、失敗するリスクを冒しても挑戦し続けることを積極的に促すことが望まれる。

研究者間の意見交換が新たな研究に繋がることは明らかであり、複数分野・異分野研究者との議論は、ある分野の課題の解決に直結することがある。このような意見交換の仕組みとして SGC セミナーを継続的に開催する。固体以外の地球科学や他分野の観測技術や解析手法を固体地球科学に応用することで、固体地球分野進

展の新たな方向性が見いだされる場合がある。近接する分野間での観測資源の共用化や国際共同観測による新技術の移植とデータ共有は、効率的な資源の運用と協業による研究者の「余裕」と研究者間の「競争」を生み出し、あらたな発見へと繋がる機会が増えるだろう。

(E)で目指す、従来の精度・感度を超える観測技術開発、「いつでも」「どこでも」観測可能な技術革新、新たな観測量による革新的観測は、意図せぬ発見のための王道であり、これら方針は堅持される。また、(A)~(D)で掲げられる固体地球科学の研究課題は、将来の意図せぬ発見のための苗床であり、追求され続ける。