

火星の大気圧は地球の0.7%程度しかなく、通常はミュオンが生成されない状況にあるが、中間子のフラックスがハドロン反応長の計算から火星の水平方向の大気のコラム密度のおよそ80%で最大値をとるため、水平方向のミュオンを利用するラジオグラフィーにとっては大気による減衰がない分、地球よりもよい環境にある。現在の火星の火山活動の有無についての見解は大きく分かれ、特に小規模の火山活動に関しては可能性が示唆されている。このような小規模の火山にターゲットをあて、次々回の火星ミッションに火星でのミュオンラジオグラフィー観測をのせるべく、NASA-JPLとの共同研究を継続している。2012年度はミュオグラフィーと、既存の火星の構造探査手法(ガンマ線, 中性子, 地中レーダー)との比較検討を行い、有利性, 不利性の議論を行った。有利性は(特に惑星ミッションで重要となる)パッシブである(大電力が不要)ということ, 不利性はランディング(惑星周回衛星では観測できない)が必要であるということと結論された。また、火星の小規模な火山を模した地球上の小規模火山において、乗用車からの周回観測を行い、地形に関する先験情報が無くても、山頂に隠れる火口の存在を検出できる方法を開発し、検証した。火口の存在を検出できるということは、山体内部に同様な密度異常があれば、検出できることを示している。この技術はリアルタイムに地形が変形するような地球上の火山(たとえば成長中の溶岩ドームなど)にも応用可能である。

3.8.3 国際活動

2012年4月22-27日に開かれたEGU学術総会2012では、パリ国立地球物理学研究所(IPGP), リヨン原子核物理学研究所(INFL)と共同で、セッション“Geophysical tomography with high-energy particles: recent developments and applications”のコンビーナーを務めた。

2012年12月3-7日に開かれたAGU年会2012では、NASA-JPL(IPGP)と共同で、セッション“Cosmic Ray Muon and Neutrino Imaging: Emerging Tools for Earth and Planetary Sciences”のコンビーナーを務めた。

2012年10月27-28日には、フランスで開催された国際シンポジウムInternational Workshop on Muon and Neutrino Radiography 2012でChair of International Advisory Committeeを務めた。

国外における共同研究は、2で述べたように、イタリア・ストロンボリ島及びスペイン・カナリア諸島において実施した。相手方は、それぞれナポリ大学及びInstituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER)である。

3.9 巨大地震津波災害予測研究センター

教授	堀宗朗(センター長), 佐竹健治(兼務), 古村孝志(情報学環, 兼務), 佐藤慎司(工学系研究科, 兼務)
准教授	市村強, ラリス・ウイジャラットネ
特任研究員	田中聖三
外来研究員	等々力賢, パディ・シマンチャル, 森太志
大学院生	竹本帝人(D3), Fangtao Sun(D3), 野中翔(D1), 藤田航平(D1), Aguilar Melgar Leonel(D1), Jayasinghe Supun(D1), Pal Mamendra(D1), 杉田恵(M2), 古宇田剛史(M2), Suarez Torres Harold(M2), Wei Xiaodong(M2), 縣亮一郎(M1), 田中貴大(M1), 依田貴大(M1), Vasquez Angel(M1), Nabeel Muhammad(M1), Jacob Stephen(M1)
研究生	Wang Sheng
学部学生	水迫覚信

巨大地震津波災害予測研究センターは、東日本大震災を契機として2012年4月に設立された研究センターである。「想定外」というキーワードに象徴されたように、2011年東北地方太平洋沖地震は我が国観測史上最大の地震であり、この地震が引き起こした東日本大震災はさまざまな被害をもたらした。従来の科学では予測が難しかった巨大地震・津波とその被害を減らすためには、理工学の連携強化が重要課題となっている。そして大規模数値計算を利用した地震・津波と災害の予測研究が課題解決の方法である。巨大地震・津波と災害の予測に関する新しい計算科学の研究領域を開拓するために、情報学環・工学系研究科と地震研究所が本センターを設置した。

新しい計算科学の研究領域は、解析手法の開発・利用による情報生成と各種解析結果の情報統合という分野である。情報統合は観測・実験等の融合強化も含む。また大規模数値計算を基盤とした理工学連携を進めることで、巨

大地震・津波と災害の予測研究分野での新しい人材育成に貢献することも本センターは目指している。具体的な研究課題は次の 3 点である。

1. 「京」計算機を有効利用できる巨大地震・津波と災害の予測に関する大規模数値解析手法を開発する。
2. 巨大地震・津波と災害の各数値解析の結果を統合し、包括的な災害情報を生成する研究を実施する。
3. 巨大地震・津波に関する観測と災害に関連する実験と巨大地震・津波と災害の予測の数値計算の研究の融合を強化する。

全国共同利用研究所である地震研究所の研究センターとして、巨大地震津波災害予測研究センターには、理工学連携強化の他、シミュレーション研究統合という役割が考えられている。これは、地震・津波・災害の計算プラットフォームを構築・維持することで、京計算機を頂点に各大学の大型計算機で利用できる解析手法・モデルを提供することを目的とする。解析手法・モデルの共有は、さまざまな計算が必要な地震・津波・災害のシミュレーションには有効であるが決して容易ではない。シミュレーション研究統合は、情報統合分野の重要な研究課題として位置づけている。

巨大地震津波災害予測研究センターセンターのミッションは、大規模数値計算を使った巨大地震・津波と災害の予測研究である。このために、情報生成と情報統合の 2 つの分野を設け、理工学連携強化とシミュレーション研究統合を進めている。センターのスコップは、地震・津波・災害という対象に限定されるものではなく、新しい計算科学という手法も含んでいる。観測・実験の融合のための計算科学手法の研究開発や、火山噴火に関わる大規模数値計算の研究開発も進められている。

3.9.1 強震動予測の高度化と想定巨大地震による長周期地震動の予測シミュレーション

(1) 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション

2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) では、関東平野、濃尾平野、大阪平野などにおいて周期 3 ~ 10 秒程度の長周期地震動が強く発生し、超高層ビルが 10 分以上にわたって長く揺れたことが社会問題となった。しかし、1944 年東南海地震 (M7.9) における東京の地震計記録や 2004 年紀伊半島南東沖の地震 (M7.6) における大阪の地震計記録を調べると、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動のレベルは必ずしも大きなものではなく、これら過去地震時のレベルと同程度にすぎなかった。M9.0 地震の長周期地震動のレベルが小さかった原因を確認するために、日本列島周辺の 3 次元地下構造モデルを用いた長周期地震動の波動伝播シミュレーションを実施し、南海トラフの地震ではフィリピン海プレート上面の柔らかい堆積物 (付加体) が長周期地震動を強く励起し、かつ付加体に沿って関東平野に誘導する効果を持つことを確認した。いっぽう、太平洋プレートが急角度で沈み込み、付加体が存在しない日本海溝の地震では、震源の深さがやや深く (20 ~ 50km) 表面波の励起が小さいことや伝播経路で増幅も起きないことから、長周期地震動の生成レベルは相対的に小さくなることを確認した。したがって、東海・東南海・南海地震の連動のように、M8.6 ~ 8.7 クラスの巨大地震による関東平野の長周期地震動は、東北地方太平洋沖地震の時の 33 倍、また大阪平野では 5 倍程度大きくなることが考えられる。また、東海・東南海・南海地震の数分の時間差発生により、長周期地震動の継続時間が 10 ~ 20 分以上に長くなる恐れがあり、被害予測と対策には揺れの強さだけでなく継続時間についても十分な注意が必要になる。

(2) 京コンピュータを用いた大規模地震波伝播シミュレーションコードの開発

強震動予測の高度化に向けて、これまで地球シミュレータを用いて開発した地震波伝播・強震動シミュレーションコード (Seism3D) を、京コンピュータに移植するとともに、京コンピュータのスカラ型 CPU に適合するように性能チューニングを行った。また、1Hz 以上の高周波数地震動から周期 10 秒以上長周期 (周波数 0.1Hz 以下の低周波数) 地震動を含む広帯域の地震動計算を目的に、広い帯域をカバーする非弾性減衰モデルの導入や、地表、海底面の境界条件の高度化、PML 吸収境界条件の採用など、計算コードの高度化も同時に進めた。さらに、多数の CPU を用いた並列計算を考慮して、従来の 3 次元 (x,y,z) 領域分割から 2 次元 (x,y) 領域分割へとアルゴリズムを変更し、分割領域間での計算負荷バランスを均一化することにより並列化効率を高め、数万個の CPU を用いた超大規模並列計算を可能にした。本計算コードを用いて東北地方太平洋沖地震の地震波伝播シミュレーションを実施し、24,576CPU を用いた並列計算により、641 TFLOPS の実効性能 (CPU 性能比 20.4%) を得た。

(3) 没入型 VR 装置を用いた南海トラフ地震の地震波伝播・長周期地震動生成過程の可視化

大地震における伝播経路での長周期地震動の成長と平野での強い増幅の物理過程の理解を深めるために、神戸大学の陰山聡教授らのグループと共同で没入型可視化システム (π -CAVE) を用いた地震波伝播・強震動の3次元可視化の研究を進めた。本システムを用いて1707年宝永地震の長周期地震動シミュレーション結果の可視化を行い、南海トラフに低角度で沈み込むフィリピン海プレート上面の震源破壊により放射された地震波が、プレート上面に厚く覆う付加体を伝わり伝播し、人口の集まる平野に強く長い揺れを生み出すまでの一連の物理過程を、時間を追って理解するための可視化教材を作成した。

3.9.2 計算地震工学分野での大規模数値解析手法の開発に関する研究

(1) 断層-構造系システムの大規模数値解析手法の開発

断層-構造系システムとは、対象とする断層と構造物から成る地殻と構造物のモデルである。断層から生成される強震動と、その強震動に対する構造物の地震応答を計算するために使われる。開発されてきた独自のマルチスケール解析手法を改良し、大規模化・高速化を実現し、断層-構造系システムの解析を行っている。なお、大規模化・高速化の結果、従来の手法を凌駕する時間・空間分解能で、断層から伝播する地震動に対する構造物の地震応答を計算することに成功した。

断層-構造系システムの根幹である地震波動の計算では、数値分散が精度を下げる大きな障害となっている。数値分散発生メカニズムを純数理的な観点から解明し、数値分散を低減させる効率的なアルゴリズムを考案してきたが、これをマルチスケール解析手法の計算コードに実装した。実装に際して並列化性能を上げることに成功した。断層-構造系システムの大規模数値解析手法の開発では、このように基礎的な数理研究と計算科学研究にも重点が置かれている。

断層-構造系システムの具体的な例は、大規模地下トンネルや原子力発電所といった実際の大規模構造物である。実構造物に忠実な大自由度の解析モデルを構築し、改良されたマルチスケール解析手法を適用し、地震応答を計算している。構造物の特性を理解するためには、民間企業等の協力が必須である。計算地震工学研究会という名称の研究グループを作り、共同研究を進めている。

(2) 構造物の地震応答過程の解析手法の開発

地震工学の大きな課題である、地震動による構造物の損傷・破壊過程を再現・予測する数値解析手法の開発を継続している。基本的なコードは開発済みであり、verification (解析解の再現等によるコードそのものの検証) は終了している。現在、validation (コードが解析するモデルの妥当性やパラメータの合理性) を行っている。

今年度は鉄筋コンクリート構造物の損傷・破壊過程の再現を重点的に行っている。これは大型トンネル構造物の地震動による損傷・破壊を対象としたものである。鉄筋とコンクリートを厳密にモデル化することで、コンクリートや鉄筋-コンクリートの境界に発生する亀裂を再現することに成功した。解析モデルの自由度は100万を超えるものであり、現有の大型PCクラスタやT2Kを利用した計算を行っている。

本研究は、理化学研究所の京計算機のプロジェクトと防災研究所のE-Defenseのプロジェクトに関わっている。数値解析理論の構築と基本的なコードの開発が役割分担である。京計算機のプロジェクトでは、鉄骨構造超高層ビル-地盤システムや鉄筋コンクリート橋脚群-地盤システムの非線形地震応答解析を進めている。1億自由度を超える精緻な解析を使ったもので、京計算機の性能を活かす大規模数値が進められている。E-Defenseのプロジェクトでは、構造物内の設備の地震時挙動や地盤構造物を対象とした解析手法の拡張を進めている。大規模数値解析手法へのチューニングは民間企業との密接な協力も進めている。

(3) 統合地震シミュレーションの開発

統合地震シミュレーションとは、断層から都市各地点までの地震波伝播過程、各種構造物の地震応答過程、そして地震被害に対する人・組織の行動をシームレスに計算するものである。地理情報システムに蓄積された都市データを利用して構築された大規模都市モデルに対し、地震学・地震工学・人間工学の分野で開発されたさまざまな数値解析手法を利用して、大規模計算を行う。3次元の地盤構造を考慮した地震動分布、都市内の全構造物の非線形応答、そして避難・復旧過程の対応行動が組み込まれている。

統合地震シミュレーションは、上記の構造物の地震破壊過程のシミュレーション手法とともに、「京」計算機の戦略分野3「防災・減災に資する地球変動予測」の課題の一つとして取り上げられている。統合地震シミュレーションに基づく次世代ハザードマップの作成コードの開発が目的となっている。これは、地震シナリオに応じた都市全域の災害・被害・対応行動の計算結果を、疎から密までの空間分解能で図示・動画化するコードである。

高知市・仙台市を対象として都市モデルを構築し、, 統合地震シミュレーションを行っている。複合災害として重要な課題であることが再確認された津波に対して、新しい解析手法を構築し、都市モデルに適用することを試みている。この解析手法も「京」計算機で利用することも予定しており、並列化性能の検討を重ねている。津波から円滑な避難を進めることは大きな課題である。避難過程のエージェントシミュレーションを高度化し、有効な避難行動の分析や円滑化を検討している。このエージェントシミュレーションも「京」計算機で利用する予定である。

3.9.3 シミュレーション室の運営

計算科学と地震学・火山学の融合を促進するため、シミュレーション室の運営を担当している。シミュレーション室は、計算理論の構築と計算手法の開発とともに、地震・火山に関わる現象を大規模計算を使ったシミュレーションによって再現・予測することを研究する。昨年度の GPU 計算機に続き、今年度もインテルファイ計算機を購入し、高速化・大規模化のためのアルゴリズム開発を進めた。

3.9.4 全学自由研究ゼミナールの開催

本センターの教員を中心に、2011 年と 2012 年度の冬学期に「東日本大震災の科学」という全学自由研究ゼミナールを開催した。情報学環・工学系研究科と地震研究所の教員、計 8 名が担当したゼミナールである。ゼミナールの成果の一つとして、「東日本大震災の科学」(佐竹健治・堀宗朗編)が 2012 年に東大出版会から発刊された。

3.10 地震火山噴火予知研究推進センター

教授	森田裕一(センター長), 三浦 哲, 吉田真吾, 中田節也(兼務)
准教授	飯高 隆, 加藤尚之
助教	福田淳一, 加藤愛太郎
特任研究員	光藤哲也
学術支援専門職員	西山昭仁(地震火山情報センター ~ 2012 年 11 月)
客員教授	井口正人, 高橋浩晃
大学院生	松山諒太郎 (M1)

全国の 14 大学 17 部局及び行政機関、研究開発法人が参加して実施している「地震及び火山噴火予知のための観測研究」は、地震や火山現象の科学的理解に基づいた地震発生や火山噴火の予測の実現を目指した全国共同研究である。この共同研究計画は、地震や火山の分野の研究者の意見を取り入れて策定され、平成 20 年 7 月に科学技術・学術審議会において文部科学大臣及び関係大臣に建議され、平成 21 年度～平成 25 年度の 5 ヶ年の予定で実施してきた。しかし、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、現行の研究計画に加えて新たな研究を開始する必要性が生じたため、平成 24 年 11 月に研究計画の見直しを行い、超巨大地震に関する研究を開始した。本センターは、地震研究所に設置された地震・火山噴火予知研究協議会の企画部として、全国の研究者が連携・協力して推進するこの共同研究の企画、計画の策定、研究の進捗状況の把握、研究成果の取りまとめなどを行っている。また、平成 24 年度に行われた総括的自己点検評価書の作成や、その外部有識者による評価作業のための資料作成等の実務を担い、この共同研究の推進に大きく貢献している。

このようなサイエスマネージメントを行う他、本センターに所属する個々の教員は地震及び火山噴火予知研究の研究課題に取り組んでいる。教員の多くは、地震予知または火山噴火予知研究センター等と兼務しており、当該教員の研究成果の一部は、他の研究センターの成果として記載されている。ここでは、当センターが行っている地震・火山噴火予知のための観測研究の推進についてと、所属する教員が実施している研究のうち、他のセンターと重複しない研究成果について取り上げる。

3.10.1 地震及び火山噴火予知のための観測研究の推進

(1) 地震及び火山噴火予知のため観測研究計画(建議)