

2. 研究報告

2.3. 研究終了報告

2.3.1. 特別研究

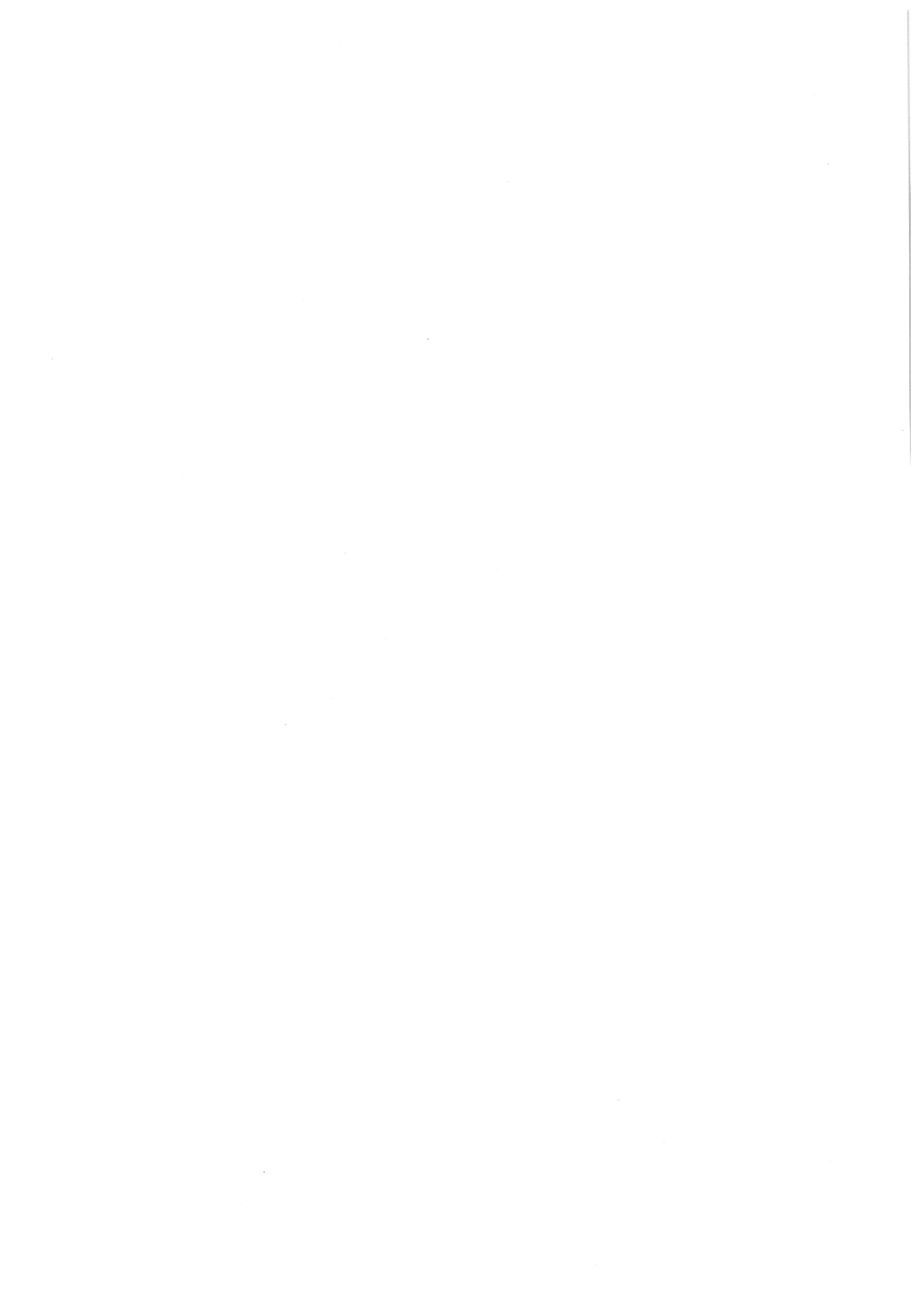
- ・地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生 の推定精度向上に関する研究

2.3.2. 経常研究

- ・エアロゾルの放射効果の実態解明とモデル化に関する研究
- ・複合リモートセンサーを用いた観測手法に関する研究
- ・地殻及びマントルのダイナミクス
- ・地震発生機構と活動推移に関する基礎的研究
- ・地震発生準備過程における地殻変動に関する研究
- ・海水中の炭素循環に係る化学成分の動態に関する研究

2.3.3. 地方共同研究

- ・東北地方における降水量予測に関する研究



地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究

研究期間：平成 11 年度～平成 15 年度

研究代表者：吉田明夫¹⁾、濱田信生²⁾（地震火山研究部長）

課題構成及び担当者

地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究

(1) 地震活動評価手法の開発・改良

伊藤秀美¹⁾、横山博文³⁾、牧 廣篤⁴⁾、高山博之⁵⁾、中村雅基、黒木英州⁵⁾、石川有三、吉川澄夫、上河内修⁷⁾、中村浩二⁷⁾、干場充之⁷⁾、小林昭夫⁵⁾、山本剛靖（地震火山研究部）

(2) 地殻変動データ解析手法の高度化

吉川澄夫、山本剛靖、上河内修⁷⁾、内藤宏人⁷⁾、岡田正美⁷⁾、中村浩二⁷⁾、干場充之⁷⁾、小林昭夫⁵⁾、高山寛美⁵⁾、青木 元⁵⁾（地震火山研究部）

(3) 三次元数値モデルによる地震発生シミュレーション

石川有三、上河内修⁷⁾、干場充之⁷⁾、中村浩二⁷⁾、谷岡勇市郎⁸⁾、神定健二⁸⁾、藤原健治⁷⁾、内藤宏人⁷⁾、橋本徹夫⁹⁾、吉田康宏、青木 元⁵⁾、山崎 明⁶⁾、長谷川洋平⁴⁾、林 豊⁴⁾、中村雅基、高山博之⁵⁾、黒木英州⁵⁾（地震火山研究部）、勝間田明男⁵⁾（気象大学校）、中村浩二⁵⁾（気象庁地震火山部地震津波監視課）

研究の目的

東海地域は、マグニチュード 8 クラスの巨大地震が発生し、重大災害をもたらす可能性が高いと考えられており、大規模地震対策特別措置法により地震防災対策強化地域に指定されている。また、気象庁は、この「東海地震」の前兆現象を捉えるべく常時監視体制を敷き、予知をすることが求められている。本研究では、最近の地震学の発展に伴う知見を踏まえ、地震発生過程の詳細なモデリングを行い、この東海地震発生の推定精度を向上させることを目的とする。

研究の概要

地震発生のシミュレーションを二次元から三次元の数値モデルへ発展させ、物理法則に則ったモデルで計算を行う。また、歪データ・検潮データ・GPS データを融合し総合的な解析を行うことで、この地域における地殻変動の現況と推移を明らかにする。さらに、過去資料調査や海底地震観測等により、震源域の絞り込みと震源の再決定を行い、地殻・プレートの精密な形状を求める。また、地震活動の客観的評価手法に評価指標を取り入れる。

研究成果の要約

地震・地殻変動データの解析により、想定震源域の境界の推定、自己浮上海底地震計による観測結果を用いた東海沖海域の震源決定精度向上、プレート境界固着域下方の低強度領域の推定、潮位データにおける 1946 年南海地震の前駆の上下変動の検出などの成果を得た。このほか、地殻変動監視のため、逆解析プログラム、降水補正法、GPS3 時間値の精度向上など変動解析ツールの整備を行った。地震・地殻変動データに基づいて東海地震の想定震源域を対象とした三次元力学モデルを構築し、地震発生サイクルの数値シミュレーションにより、プレート境界固着域の縮小の様子や予想される地殻変動の特徴を調べ、スロースリップなど周囲の変動が東海地震に与える影響を評価した。

今後に残された問題点

2000 年 10 月頃から GPS により東海地域でスロースリップが観測されるようになった。東海地域の現在の地殻活動を評価する上でこの現象の推移が懸念されるが、地殻岩石歪計にはまだ検出されておらず、GPS と地殻岩石歪計の中間の帯域をカバーする新しい測器の開発が必要である。地震発生の数値シミュレーションの精

1) 平成 11 年度～平成 13 年度, 2) 平成 14 年度～平成 15 年度, 3) 平成 14 年度, 4) 平成 15 年度, 5) 平成 12 年度～平成 15 年度, 6) 平成 13 年度～平成 15 年度, 7) 平成 11 年度, 8) 平成 11 年度～平成 14 年度, 9) 平成 12 年度～平成 13 年度

度を更に高めるためには東海地震の震源域に隣接する南海トラフ沿いで今世紀半ばに発生が予想される東南海・南海地震との連動の可能性を評価する必要がある。このような意味から東南海・南海地域のプレート・地殻の詳細構造の解明は、シミュレーションを行う上ばかりでなく、同地域の地震発生に関する監視能力を高める上でも不可欠であり、今後の重要な課題として残されている。

研究成果の活用に対する意見

本研究で開発された地震発生の数値シミュレーションの結果や地震・地殻変動観測データの解析手法は研究期間内においても直ちに監視業務に利用されており、判定会における地殻活動の評価などにも役立てられている。今後は地震発生のシミュレーションモデルをさらに精密化し、東海地震発生に至るシナリオのさらなる精緻化を図ることが重要である。南海トラフ沿いの巨大地震発生の中長期予測という観点から、この研究で培われた海域の地殻・プレート構造の推定手法の改良と共にモニタリング技術の高度化を図り、地殻活動の客観的評価のための手法の高度化をさらに進めていくことが重要である。

成果発表状況

- ・論文発表件数 20 件
- ・口頭発表件数 83 件

(1) 地震活動評価手法の開発と改良

研究の方法

陸上の地震観測網と海底地震観測のデータを統合し、東海地域の3次元速度構造を求め、この構造に基づいて震源の再決定を行い、地殻・プレートの精密な形状を求め地震活動の急激な活発化・静穏化の客観的評価手法の改良とその評価指標化と視覚化手法の開発を行う。

また、東海地域の過去地震の再評価を行い、駿河湾、銭州付近から潮岬沖までの海域および沿岸域で過去に発生した地震の資料を収集し、破壊域の絞り込みと破壊過程の推定を行う。

研究の結果

- ・東海地域の地殻・プレート詳細構造の解明

東海沖における地震活動を詳細に把握し、精度の高い震源を求めるため、自己浮上式海底地震計（以下、OBS）による観測を気象庁と共同して実施した。1999年以降の5年間に計7回のOBS観測を行った結果、気象庁カタログに掲載されていない地震を多数震源決定することができた。銭州海嶺付近で比較的地震活動が活発である一方、トラフより陸側海域では地震活動が低調であることが確かめられた。気象庁のルーチン作業で決定された震源（JMA震源）とOBS震源を比較した結果、特に銭州海嶺付近のJMA震源は実際よりかなり深く決まりすぎており、実際の東海沖の震源の全体的な深さ分布はフィリピン海スラブに沈み込みに沿っていると推定された。OBS震源と同様な速度構造及び観測点補正を用いて1979年以降のJMA震源を再決定した結果、再決定震源は全体的に海底地震計観測点に近づく傾向が見られるとともに、全体的に震源の深さは浅くなり、フィリピン海スラブの沈み込みに沿うような分布となった。

- ・東海地域の3次元速度構造の調査

中部日本地域におけるP波およびS波の3次元速度構造を地震波走時トモグラフィーを用いて求めた結果、沈み込むフィリピン海プレートと思われる高速度域が、例えば $34^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ の深さ20~50kmに見られる。これまで、フィリピン海プレートの深さ分布について、様々なモデルが提案されており、これらのモデルではフィリピン海プレートはほぼ一定の角度で沈み込んでいることが一般的な見方であったが、これらと比較すると、 $34^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 付近に見られるフィリピン海プレートの沈み込み始めは少し高角度で、その後なだらかになっている様子が見いだされた。さらに、東海地震の固着域の北西隣には、プレート間カップリング強度が低い領域が見いだされた。

- ・地震活動評価手法の改良

静岡地方気象台周辺で発生した地震についてS-P時間の時間差に着目することにより、地震活動が長期的に変化したかどうかを調査した。過去約60年間の地震活動を調査した結果、長期的な地震活動は必ずしも一定ではなく、1940年代に地震活動が比較的活発だったこと、1965年頃から地震回数が明瞭に減少していることなどがわかった。特に1940年代の地震活動については、1944年東南海地震（M7.9）に誘発されて静岡

周辺でも地震活動が活発化したこと、逆に東南海地震の直前には、同域で地震活動の静穏化が生じていたことが新たに見つかった。また、1965年の静岡地震を境にした地震回数の減少は、同時期の験測基準の変更を考慮しても、人為的な原因によるものだけだったとは考えられず、実際に活動が低下したことを示している可能性が高いことがわかった。

- 地震時の応力変化量の時間空間分布特性の調査

地下の応力状態を推定するため、東海地域で起きている地震時の応力降下量 ($\Delta\sigma$) の空間・時間変化を調査した。空間的な分布を調べた結果、地殻内で起きた地震に比べてフィリピン海プレート内で起きた地震の $\Delta\sigma$ が大きくなる傾向が見られた。これは1つにはフィリピン海プレートに比べて地殻内は破砕が進んでいるため岩石の強度が弱くなっていることが考えられる。しかしながら地殻内地震がフィリピン海プレート内部の地震より浅いところで起こっているため、深いほど静水圧が大きくなって地震破壊強度が上がり、 $\Delta\sigma$ が大きくなっているのかもしれない。 $\Delta\sigma$ の時系列変化を調べた結果、本震に比べて余震と思われる地震の $\Delta\sigma$ が小さくなっていることが分かった。これらはいずれもフィリピン海プレート内部の地震である。プレート内地震で余震よりも本震の $\Delta\sigma$ が大きくなる理由として以下のことが考えられる。プレート内には弱面があまり発達しておらず、破壊を起こすためにはかなり応力が集中しなければならない。このため本震の $\Delta\sigma$ は大きい、1度弱面が形成されるとその後は破壊が起きやすく、 $\Delta\sigma$ が小さくなっていく。 M_w と $\Delta\sigma$ の関係を調査した結果、モーメントマグニチュード M_w の大きな地震ほど $\Delta\sigma$ が大きくなる傾向にあることが分かった。

- 低周波地震に関する調査

東海地域から西日本のフィリピン海プレートの沈み込み帯で起きている非火山性の低周波地震・微動について調査を行い、発生場所がマントル・ウェッジより上部であることを明らかにすると共に、低周波地震・微動の原因として考えられている水の存在が岩石の脱水反応に起因するというモデルを提案した。東海地域から西日本のフィリピン海プレートの沈み込み帯で起きている深部低周波微動・地震には、震央が帯状分布をしているもの（主として微動、西日本に存在）と孤立して分布しているもの（主として地震）がある。帯状分布の深部低周波微動を引き起こしているものは、スラブ本体上部の玄武岩中にある緑泥石の脱水分解及び単斜輝石の形成による水の解放であると考えられる。解放された水がスラブの上にある陸側の地殻に上昇していく過程で、低周波微動を発生させていると考察される。スラブがさらに沈み込んでいくと、スラブの上にはマントル・ウェッジが覆い被さるようになり、放出された水はこの温度圧力条件下のマントル・ウェッジ中で安定な蛇紋石を形成して固定される。このため、これより先では低周波微動が発生せず、帯状分布の北縁が形成されることが考えられる。

- 1944年東南海地震の津波波源域調査

津波波形のインバージョンの方法により1944年東南海地震のすべり分布を推定した。津波波形から推定された1944年東南海地震のすべり分布は、約3.3mの最大すべりが志摩半島沖のプレート境界で起こったことを示した。この大きなすべりは強震動データや測地データから得られた結果と一致する。渥美半島の下のプレート境界での約1.5mのすべりは、津波波形を説明するために必要であるが、強震動の解析ではこの領域での地震モーメントの解放がないと推定されていることから、その領域でのすべりがゆっくりした破壊であったことが推測される。以上の結果は、1854年の地震によって破壊された東海地域の下で南海トラフの北東端のプレート境界を1944年東南海地震が破壊しなかったことを示している。またこの結果は過去に指摘された地震空白域の存在を支持するものである。

研究の成果

東海地震の想定震源域の海域で自己浮上式海底地震計による観測を行い、この周辺の詳細な地震活動を調べた。その結果、気象庁カタログでは陸域からトラフに向かって深くなっている地震活動が実際にはトラフから陸域に向かって深くなっており、フィリピン海プレートの沈み込み帯に対応している活動であることがわかった。中部日本地域におけるP波およびS波の3次元速度構造を地震波走時トモグラフィーを用いて求めた結果においては、トラフから少し高角度で沈み込み始めた後ならかに沈み込んでいるフィリピン海プレートと思われる高速度域が検出された。さらに、東海地震の固着域の北西隣には、プレート間カップリングが弱い領域が見いだされた。

S-P時間の違いを利用して1941年から1995年までの期間における静岡市周辺域の地震活動度の変化を調査した結果、1944年東南海地震直前の地震活動の静穏化が見いだされた。1965年の静岡地震の前後にも地震活動度の変化が見いだされ、この方法の有効性が改めて確かめられた。

東海地域で起きている地震の応力降下量の空間・時間変化を調査した結果では、長期的に見て応力降下量の変化は見られなかったが、応力降下量の地域性と深さ依存性が明らかになった。特に、スラブ内地震については本震の応力降下量が最も大きく、余震では比較的小さいということが明らかになった。東海地域から西日本のフィリピン海プレートの沈み込み帯で起きている非火山性の低周波地震・微動について調査から、発生場所がマントル・ウェッジより上部であることを明らかにすると共に、低周波地震・微動の原因として考えられている水の存在が岩石の脱水反応に起因する可能性が示された。

津波波形インバージョンによる 1944 年東南海地震のすべり分布の推定の結果、そのすべり領域が 1854 年の地震で破壊された東海地域にまで広がっていなかったことを明らかにした。この結果は、平成 13 年（2001 年）の東海地震想定震源域の見直しに貢献した。

(2) 地殻変動データ解析手法の高度化

研究の方法

地震の発生過程の中で生起すると予想される地殻変動を効果的に捉えて、予知の確度向上に資するデータ解析手法の高度化を図る。具体的には、東海地方に既設の深部埋設地殻岩石歪計の利点を最大限に活用するため、気象擾乱の影響や季節的変動等の特性をさらに詳細に解析し、前兆現象検出能力を高めたデータ解析手法の開発を行う。また、GPS 観測結果と歪計観測データを融合し、両者の長所を生かした総合的な歪場の解釈を可能とする解析手法の開発を行う。

さらに、東海地域の検潮データを地殻の上下変動データとして有効に活用するため、GPS との並行観測を行い、特別研究「南関東」で開発した海象等の影響除去手法の高度化を図り、この地域での変動推移を明らかにする。

研究の結果

・GPS 観測データの誤差の評価及び補正手法の開発

東海地域で東海地震予知のために国土地理院と気象庁で平成 10 年度から開始された GPS 東海地域 3 時間解析の座標値について、そのノイズの特徴について調査し、より精度の高い監視を行うための手法について検討した。3 時間解析ではある一定範囲の観測点が同じ方向に同じ大きさで見かけの変動をしていたり、逆に近接した観測点でもばらつき具合が異なっていたりすることに注目し、それぞれ相関の高い観測点を連鎖的に関連づけてみたところ、解析時のクラスターと観測点のアンテナ・架台タイプに対応して明瞭に 6 つのグループに分けられることを見いだした。このようなばらつきに共通して含まれる成分を除去することにより、標準偏差が補正前のほぼ半分にできた。なお、アンテナ・架台タイプ別の位相特性モデルの導入を含む解析システムの改良が平成 13 年 7 月に行われ、これによりアンテナ・架台タイプの違いに起因する誤差が期待通り縮小したことを確認した。

国土地理院の GPS 全国観測網の座標データは広く一般に公開されており、広域の地殻変動調査にとって極めて有用なデータとなっているが、今のところ原因が明らかではない年周的な季節変動が含まれており、1 年より短い時間間隔で精密な地殻変動調査を行うことを難しくしている。このことから年周的な季節変動の特徴について調べた。この結果、変動の様相が 2000 年頃を境にしてその前後で異なることが判った。この変化は実際の地殻変動によるものではなく、なんらかの観測・解析上の原因によるものと考えられ、適切に考慮しなければ地殻変動解析に影響を及ぼす。東海地域においてその影響量を見積もったところ、水平成分で数 mm となり、後述する東海スロースリップによる数ヶ月間の変位量に相当することが判った。

・検潮、GPS、水準データを活用した地殻上下変動の解析

東海地域とその周辺に設置されている内浦（沼津市）、清水港、御前崎、舞阪、岡田（伊豆大島）、布良（館山市）の各検潮所、及びつくばの気象研究所構内の 7 ヶ所で 1 日 24 時間連日の GPS 観測を行った。精密な GPS 衛星軌道情報を用い、対流圏伝搬遅延量も座標と同時に推定するなど国土地理院の全国観測網で行われているものと同様解析手順に従って解析した結果、座標の上下成分は日々のばらつきにして約 20 mm の幅で求められた。観測期間内の GPS 上下変動を潮位データから得られた上下変動と比較するため、検潮所間の相対変動をとった。その組み合わせは、海況変動の共通性を考慮して、清水港-内浦、御前崎-内浦、舞阪-御前崎、及び岡田-布良とした。2001~2003 年の 3 年間における内浦に対する清水港の平均変動は GPS 観測からは -1.9 mm/年、潮位観測からは -0.8 mm/年、御前崎は GPS 観測からは -5.8 mm/年、潮位観測からは -4.0 mm/年の沈降となった。GPS 観測による沈降速度の方が 1~2 mm/年ほど大きい、傾向は概ね

一致している。御前崎に対する舞阪の平均変動は GPS 観測からは 22 mm/年、潮位観測からは 24 mm/年となり、隆起量はほぼ一致している。2000 年より前の期間において潮位観測から計算した平均変動は 8.2 mm/年であり、東海スロースリップに伴う浜名湖東側を中心とした隆起傾向を反映した結果が見いだされたものと考えられる。

1944 年東南海地震、1946 年南海地震前後の潮位記録について解析し、地震直前に前兆的地殻変動が存在したかどうか、地震後の余効変動の範囲や時間的な経過がどうであったかを調査した。潮位記録から上下方向の地殻変動を推定するためには、気圧、風、海流や海水密度など、気象および海況の変化による潮位の変化を取り除かなければならない。しかし、当時の海況に関するデータはほとんどないため、潮汐気圧補正後に 2 つの検潮所間の潮位差をとるという単純な方法によって、相対的な潮位変化を上下方向の地殻変動として把握することにした。

1944 年東南海地震前の地殻変動については、震源域に近い鳥羽と他の観測点との潮位差を中心に調べた。地震前数日間に鳥羽の潮位が他の地点に対して相対的に 10 cm 余り上昇しているが、地震前 2 ヶ月間のデータがある鳥羽と洲本の潮位差や鳥羽と土佐清水の潮位差を見ると、同程度の大きさの変化が他にも何回か見られ、とりたてて大きな変化は生じていなかったと判断された。

1946 年南海地震直前の潮位変化については、浦神と下津の潮位差で地震の 2~3 日前に潮位差が明らかに変化している。また、浦神と内浦の潮位差でも変化が見られるが、下津と内浦、下津と神戸の潮位差では地震直前に相対的な変化が見られない。以上のことから、地震の 2~3 日前からの潮位変化は浦神の付近で発生していたと結論される。

1946 年南海地震後の余効変動について潮位差を用いて検討したところ、地震後の 4 年間では浦神は約 40 cm 地盤隆起、下津は 15 cm 程度沈降、また神戸は数 cm 沈降したと見積もられ、浦神の隆起の時定数は 4~5 ヶ月であった。また、地震時に顕著な地殻変動が見られなかった四国北部で、地震後に地盤が沈下したことが知られ、高松では地震後の 9 年間で約 20 cm 地盤が沈降し、時定数は数年だった。このことから、南海地震の余効すべりの領域は時間の経過とともに変化していった可能性が考えられる。

掛川-浜岡間では 1970 年代から国土地理院によって水準測量が繰り返し実施されており、掛川に対して浜岡が最近 30 年間に約 15 cm 沈降したという結果が得られている。時系列データをゆっくりと変動するトレンド成分、季節変動、不規則成分の 3 つに分離することができるベイズ型季節調整法 (BAYSEA) をこの水準測量データに適用してトレンド成分を取り出し、その変化について調べた。水準測量がほぼ定期的に年 4 回実施されるようになった 1982 年 1 月以降の期間では、1988 年から 89 年にかけて及び 2000 年以降の 2 つの期間における沈降速度の加速が特徴的であることが判った。沈降速度の変化が b 値の時間変化と良く似ていることに加え、沈降速度が鈍化した時期に地震活動が活発化し、加速した時期に静穏化する傾向が見られた。これはスラブ内の起震応力がプレート間カップリングの強化によってむしろ小さくなると考えることによって説明できる。

・ 2000 年伊豆諸島北部の地震・火山活動（伊豆諸島北部イベント）に伴う地殻変動

伊豆諸島北部イベントに伴って、東海地域に設置されている歪計では御前崎・榛原・藤枝観測点で縮みトレンドから 2000 年 7~8 月にほぼ横ばいへと変化し、石廊崎・土肥観測点でトレンドが同時期に横ばいから伸びに変化したことが観測された。国土地理院の GPS データを用いてイベント前後の 3 ヶ月間の非定常変位を南北、東西成分別に調べた結果、伊豆諸島北部イベント時およびそれ以後の地殻変動が、関東地方から東海・中部地方までの広い範囲に及んでいたこと、その時間的な推移には場所による違いが見られることが明らかになった。伊豆諸島北部海域にダイク、主な地震、クリーブ的な横ずれ断層を変動源として置いたインバージョン解析を行った。2000 年 5~8 月より 1 ヶ月ずつ期間をずらし、7~10 月までの各 3 ヶ月間の非定常変位を説明するように、ダイクの開口量と右横ずれ断層の変位量を求めた。このインバージョン解析によって得られた変動源による変位場と実際に観測された変位場との差は東海地方で目立ち、6~9 月の期間は東向きの、7~10 月の活動後期には南向きの残差が存在する。この残差は、東海地域のプレート間カップリングの変化を考え、東海地域直下のプレート境界のスロースリップ開始時期を早めることにより説明できた。

・ 東海スロースリップによる地殻変動

GPS で観測された変位を歪に換算することにより東海スロースリップの影響に関する歪解析を行った。東海スロースリップが観測されるようになった 2000 年以降の非定常的な歪変化について空間分布を調べたところ、浜名湖周辺では伸長歪、渥美半島と御前崎周辺においては収縮歪が出現した。スロースリップに伴う歪の時間変化はそれぞれの地域の歪変化においても確認することができ、2000 年末頃を境に御前崎と渥美半島周辺における収縮歪の加速化が顕著である。GPS データから求められた 1999 年以前の歪変化速度は他

の測地学的手法により求められている歪変化速度と同程度であり、GPS の長期的時間スケールにおける観測の信頼性に対して一つの目安を与える事が明らかになった。インバージョンにより推定されたプレート境界面上の滑り分布からスロースリップが浜名湖付近直下で生じていることが改めて確認された。このような浜名湖直下のプレート境界における滑りは御前崎付近における ΔCFF （クーロン破壊応力）を増加させている可能性がある。

体積歪計の観測データに対してMR-AR法を適用し、長時間スケールにおける降水の影響を除去する方法を検討すると共にスロースリップに伴う歪変化の検出を試みた。解析の結果によると、東海スロースリップ出現後、御前崎、浜岡の両観測点における1999年以降の歪変化は収縮が次第に緩慢になっており、GPSデータから換算された面積歪に反して徐々に伸長傾向が現れていることを示した。一方、収縮が予想される蒲郡観測点では時期がやや不明瞭ながらも収縮傾向を示す。これに対して、浜名湖に近い三ヶ日観測点では伸張傾向が顕著である。このようなGPSと体積歪計における歪変化の比較の結果、東海スロースリップが顕在化した地域にある11ヶ所の体積歪計観測点で両者の傾向に一応の対応が認められたのは三ヶ日・蒲郡観測点の2ヶ所に過ぎず、他の9ヶ所では検出できないか、もしくは相反する結果になった。

研究の成果

GPS観測データの精度と誤差の評価を行い、データ品質の改善手法を検討した結果、東海地域のGPS3時間解析の座標値については、ばらつきの相関が高いグループが解析クラスターとアンテナ・架台タイプに対応しており、グループ間の補正によりばらつきが半減することを明らかにした。GPS全国観測網の1日解析値については、そのデータに見られる年周期的な季節変動のパターンが2000年頃を境に変化していることから、単純な年周変動除去方法では見かけの変動を引き起こす恐れがあり、地殻変動解析の際には期間に応じた適切な補正が必要であることがわかった。

東海地域の検潮所に独自のGPS観測点を設置して観測を行い、GPS観測で得られた上下変動と潮位データから得られた上下変動を比較して両者が整合的であることを確認すると共に、2000年秋頃からの東海スロースリップによるとみられる傾向変化を明らかにした。潮位データを用いて1946年南海地震前後の地殻上下変動を調べ、地震直前の前兆すべりを示す可能性のある潮位変化と共に、地震後の地域ごとに時定数の異なる余効変動を見出した。掛川-御前崎間の水準路線及び駿河湾西岸域の水準路線網のデータを時系列解析プログラムによって解析した結果、掛川に対する御前崎の沈降が1988-89年と2000年以降に加速していることがわかった。ただし、前の期間には駿河湾西岸の北部で沈降が目立ったが、後の期間では西岸域全体で沈降が大きくなっていることから、沈降の原因は異なると考えられる。

観測データに本研究を通じて改良された様々な解析手法を適用することによって、研究期間中に発生した地殻変動事例について検討を行った。2000年伊豆諸島北部の地震・火山活動に伴う地殻変動について解析した結果、伊豆諸島北部に置いた変動源では説明できない変位が中部地方にあること、その変位が東海地域直下のプレート境界のスロースリップ開始時期を早めることにより説明できる可能性のあることを示した。このようなスロースリップに対して降水補正を含めた歪解析を行ったところ、浜名湖とその周辺での伸長歪と渥美半島と御前崎周辺における収縮歪の出現が明らかになった。プレート境界におけるすべりは御前崎付近における ΔCFF （クーロン破壊応力）を増加させている可能性がある。これらの地殻変動の原因推定をより容易に行う上で、インバージョン機能を追加した地殻変動解析支援プログラムが威力を発揮した。

(3) 三次元数値モデルによる地震発生のシミュレーション

研究の方法

室内実験で得られた岩石の摩擦法則を適用することにより、プレート境界での大地震発生のモデル化を行った。特に、すべり速度/状態依存摩擦法則(rate- and state- dependent friction law)を用いると、大地震発生サイクルの説明が可能となる。本研究では、東海地震の予知により実際的に役立てるために、東海地域をモデル領域とし、プレートの幾何学的な形状を取り入れた3次元半無限弾性体によるシミュレーションを行い、地表面における長・中・短期の地殻変動を面的に評価する。

研究の結果

均質媒質では解析解を用い、不均質媒質では有限要素解を用いることにより、地殻の応答関数（ある地点での単位すべりを与えた場合の任意の場所での応力場）を求めた。ここで求めた均質媒質での応答関数で用い、

運動方程式を数値的に解くことにより、以下のシミュレーションを行った。

媒質を単純な均質弾性体と仮定し、プレート形状のみを考慮にいて、東海地域におけるプレート沈み込みの初期3次元モデルを構築した。プレート形状データの作成にあたっては、気象庁の一元化震源を基にした。不安定領域はプレート面の深さ10~30 kmに存在するとして摩擦パラメータを与え、プレートがトラフ軸から沈み込む場合と伊豆半島東方沖から沈み込む場合の2通りについてシミュレーションを行った。その結果、地震前の結合域が主にプレート等深線の緩やかなモデル領域南西側に存在すること、地震直前の滑りが結合域の周辺、特にその南西側で生じること、その際に地表付近で観測される歪変化が近傍の観測点でも 10^{-8} ~ 10^{-7} 程度で地震直前には時間的に加速することが明らかになった。ここで得られた歪変化量は、摩擦パラメータの初期設定の不確実性などから絶対値そのものの信頼性が必ずしも高いわけではないが、同一のパラメータを用いた2次元シミュレーションの結果より1~2桁小さい。

次に、モデルの改良を行った。格子サイズの粗い初期モデルでは巨大地震を挟む期間に計算上特異な滑りを起こすことが見られたが、計算格子を細かくする改良を行うことによって全体として滑らかな変化が得られるようになり、より正確なシミュレーションが可能になった。初期モデルでは一方向に固定していた滑り方向をプレート面内で2次元的に変わりうるようにしてシミュレーションを行ったが、プレート境界面上での滑り方向は時間によってほとんど変化せず、応力の蓄積状況もほとんど同じであった。

シミュレーション結果の妥当性を検討するために、地殻変動観測データと比較した。掛川-浜岡間の水準測量で得られている掛川に対する浜岡の沈降速度とシミュレーション結果はおおむね一致した。変位についてGPS観測結果と比較すると、駿河湾西岸の上下変位には良い一致が見られた。さらに、シミュレーションで得られた変位・応力の時空間変化が実際に観測可能な量であるかどうか検討するため、地表付近の歪、地殻・スラブ内の発震機構及びクーロン破壊関数の時空間変化について調べた。その結果、プレスリップの検出には歪変化については体積歪よりも3成分歪を監視する方が有利であること、発震機構は時間的にあまり変化せず、直前監視にもあまり有効ではないことが判った。また、クーロン破壊関数の変化からは、微小地震活動の変化として、地震の数十年前に震源域周辺で静穏化が見られ、地震直前の2~3年前に場所により静穏化・活発化することが推測される。

研究期間中の平成13年（2001年）に行われた東海地震の想定震源域の見直しに対応するとともに、2000年10月から浜名湖直下で起きているスロースリップ現象についてシミュレーションによる再現をおこなうため、渥美半島まで含むようにモデル領域を西へ拡大した。スロースリップを再現するためには、摩擦パラメータの深さ方向に不均質性を取り入れる必要があった。スロースリップを再現したシミュレーションから得られた御前崎で観測される体積歪の時間変化の計算で設定したパラメータの条件下では、地震発生間隔はほぼ周期的（約450年）となり、歴史地震の繰り返し間隔に近い発生間隔は得られていない。スロースリップは摩擦パラメータに不均質性を与えた場所で発生する。発生回数は各地震サイクルで同じ4回となり、大きさは後のものほど大きくなる傾向（ M_w 6.7~7.0/年）が見られた。スロースリップの継続時間は各回ともほぼ同じ（13~15年）となる。5回目のスロースリップで地震の発生に至る。この際の空間的な変化は、不均質領域でスロースリップが起こることで浅いところに応力が集中し、その近傍で高速破壊が開始して地震に至ることが明らかになった。プレスリップとスロースリップとの違いは、プレスリップのモーメント放出率がスロースリップイベントに比べ10倍から100倍と大きいこと、プレスリップの方が加速性が顕著であることである。

周辺域巨大地震の発生の影響による東海地震震源域の応力を変化させてその影響を調べた。その結果、1891年の濃尾地震では将来の東海地震の発生を約1年から約27年遅らせ、1923年の関東地震では約1年早め、1944年の東南海地震では数年早める方向に作用することが分かった。また、2000年10月から浜名湖下で起きているスロースリップイベントの東海地震への影響については、現在のすべり速度が続く限り東海地震をほとんど誘発しないという結果が得られた。

研究の成果

室内実験で得られた岩石の摩擦法則（すべり速度/状態依存摩擦法則）をフィリピン海プレートの境界面上に適用した三次元数値モデルによって地震発生のシミュレーションを行い、地震サイクルの過程及び東海地震の直前にどのような地殻活動が見られるか調べた。その結果、地震直前の歪変化量は 10^{-8} ~ 10^{-7} となり、同一のパラメータを用いた2次元モデルに比べると1~2桁小さくなった。掛川-浜岡間の水準測量結果とシミュレーション結果はおおむね一致し、シミュレーション結果からは地震が起こる数年前に御前崎の沈降が隆起に転じるので、数年単位の中期的な監視に役立つことが期待できる。プレスリップによって地表付近で生じる歪変化の検出には体積歪よりも3成分歪を監視する方が有利であることが判った。クーロン破壊関数の変化から推測

される微小地震活動の変化として、地震の数十年前に震源域周辺で静穏化がみられること、直前2～3年前に場所により静穏化、活発化することが推定されたことは、地震活動の監視をする上での指標となる。周辺域巨大地震の次の東海地震への影響をモデルに与えてシミュレーションしたところ、1891年の濃尾地震では次の東海地震を遅らせ、1923年の関東地震、1944年の東南海地震では次の東海地震を早める方向に作用する結果が得られた。スロースリップをシミュレーションによって再現できるか調べた結果、摩擦パラメータの深さ方向の不均質性の存在がこの現象を再現する上で有効であることが判った。プレスリップのモーメント放出率がスロースリップイベントに比べ10倍から100倍と大きく、プレスリップの方が加速性が顕著であるという知見は、今後の監視に役立つと考えられる。

成果発表一覧

(1) 地震活動評価手法の開発・改良

(論文)

- Ito, H.M., H. Kuroki, K. Nakamura and A. Yoshida, 2000 : Earthquake cycle—an example of nonlinear dynamics of defects in continua, *Trends in Statist. Phys.*, 3, 75-86
- Ito, H.M., H. Kuroki and A. Yoshida, 2001 : Introduction to Mathematical Modeling of Earthquakes, in Modeling Complex Systems, *American Institute of Phys.*, 574, 70-84
- Kuroki, H., H.M. Ito, and A. Yoshida, 2002 : A 3-D simulation of crustal deformation accompanied by subduction in the Tokai region, central Japan. *Phys. Earth Planets. Inter.*, 132, 39-58
- H. Kuroki, H.M. Ito, A. Yoshida, 2003 : Strain and stress changes in the Tokai region of central Japan expected from a 3D subduction model, Elsevier, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 135, 231-252

(口頭発表)

- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 1999 : 3次元加藤・平澤モデルによるプレート運動のシミュレーション, 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 1999 : プレートの幾何学的な形状を取り入れた 3次元加藤・平澤モデルのシミュレーション, 日本地震学会 1999 年度秋季大会
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2000 : 粘弾性を考慮した 3次元加藤・平澤モデルのシミュレーション, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 中村浩二, 原田智史, 伊藤秀美, 2000 : 汎用有限要素ソルバーを用いた断層運動に伴う地殻変動の計算, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2000 : ベクトル型 3次元加藤・平澤モデル, 日本地震学会 2000 年度秋季大会
- Kuroki, H., Ito, H. and Yoshida, 2000 : A., 3-D simulation of the seismic cycle at the plate interface in the Tokai region, central Japan
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2001 : シミュレーションから予想される東海地域の中・長期的地殻変動, 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会, 平成 13 年 6 月
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2001 : 周辺域大地震の東海地震の発生時期への影響—シミュレーションモデルによる評価—, 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2002 : 地震サイクルシミュレーションプログラム ECSP の開発, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2002 : 東海地域におけるベクトル型 3次元地殻変動シミュレーション, 日本地震学会 2002 年度秋季大会
- Kuroki, H., H.M. Ito, and A. Yoshida, 2002 : A 3-D simulation of crustal deformation accompanied by subduction in the Tokai region, central Japan. 4th joint meeting of U.S.-Japan Natural Resources Panel on Earthquake Research,
- 黒木英州, 伊藤秀美, 高山博之, 吉田明夫, 2003 : すべり速度/状態依存摩擦法則による東海地域のスロースリップの 3次元シミュレーション, 地球惑星科学関連学会合同大会, 講演予稿集
- H. Kuroki, H.M. Ito, H. Takayama, A. Yoshida, 2003 : A three-dimensional simulation of crustal deformation accompanied by subduction of the Philippine Sea plate in the Tokai region, central Japan, IUGG2003, *Abstract*
- 黒木英州, 高山博之, 牧 廣篤, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2003 : 東海地域における地殻変動シミュレーション, 気象研究所研究成果発表会

(出版物)

- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2001 : 地震サイクルのモデル化と東海地震, 海洋出版, 月刊地球, 号外 33, 139-145
- 黒木英州, 伊藤秀美, 吉田明夫, 2003 : 浜名湖下のスロースリップが東海地震に及ぼす影響—3D シミュレー

ションによる評価一，月刊地球，号外 41，26-34

(2) 地殻変動データ解析手法の高度化

(論文)

- 小林昭夫，松森敏幸，1999：埋込式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理，気象庁，験震時報，62，17-41
- 小林昭夫，2000：体積歪計観測網による東海地震の前兆すべりの検知能力，気象庁，験震時報，63，17-33
- 小林昭夫，真砂礼宏，吉田明夫，2002：1946年南海地震直前の浦神の潮位変化，日本測地学会，測地学会誌，48，1-12
- 小林昭夫，真砂礼宏，吉田明夫，檜垣将和，2002：1944年東南海地震前の潮位変化と当時の潮位資料，気象庁，験震時報，65，1-44
- Takayama, H. and A. Yoshida, 2002：Temporal change of the vertical crustal movement on the western coast of Suruga Bay, central Japan, Elsevier, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132, 21-38
- 小林昭夫，山本剛靖，畑中雄樹，丸山一司，竹中 潤，緒方 誠，2002：GPS 東海地域 3 時間解析値のグループ化と補正，気象研究所，気象研究所研究報告，53，75-84
- 小林昭夫，吉田明夫，真砂礼宏，2003：潮位記録から推定される 1946 年南海地震時およびその後の地殻変動，日本測地学会，測地学会誌，48，259-270
- 小林昭夫，山本剛靖，高山寛美，吉田明夫，2003：2000 年伊豆諸島北部の地震・火山活動時およびその後の中部・関東地域の地殻変動，日本測地学会，測地学会誌，49，121-133
- 吉川澄夫，2004：GPS データで見られる東海スロースリップに伴う歪の時空間変化，東京大学地震研究所，地震研究所彙報，78，255-267

(口頭発表)

- 上垣内修，澤田可洋，福留篤男，1999：1986 年伊豆大島噴火と前後して気象庁伊豆大島体積歪計で観測された潮汐振幅の変化（その 2），地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会
- 真砂礼宏，小林昭夫，吉田明夫，1999：1946 年南海道地震直前の浦神の潮位変化，地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会
- 宮岡一樹，小久保一哉，吉田明夫，1999：石井式三成分歪計で観測された磁気擾乱に伴う歪変化とその補正，地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会
- 岡田正実，上垣内修，山本剛靖，干場充之，尾台正信，1999：南関東の上下変動—GPS と検潮の複合観測—，地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会
- 竹中 潤，宮越憲明，吉田明夫，1999：東海地域体積歪観測点のノイズレベルを越える異常変化，地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会
- Kobayashi, A., J. Takenaka, T. Koizumi, T. Narita and T. Imakiire, 1999：A quasi-real time monitoring of GPS data in and around Tokai Area, International Symposium on GPS
- Okada, M., O. Kamigaichi and T. Yamamoto, 1999：GPS observation at tide gauge stations for earthquake prediction, International Symposium on GPS
- 上垣内修，内藤宏人，山本剛靖，吉川澄夫，小久保一哉，宮岡一樹，1999：気象庁石井式歪計の応答特性解析，日本地震学会 1999 年度秋季大会
- 山本剛靖，吉川澄夫，吉田明夫，1999：東海地域バックスリップ分布の考察，日本地震学会 1999 年度秋季大会
- 小林昭夫，吉田明夫，真砂礼宏，2000：検潮記録による 1946 年南海地震の余効変動，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 小林昭夫，高山寛美，吉田明夫，2000：検潮記録から見た駿河湾周辺域の地殻変動，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 高山寛美，吉田明夫，2000：駿河湾西岸域の水準データから推定される長期的な地殻変動の変化，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- Takayama, H., A. Kobayashi and A. Yoshida, 2000：Change in the subsiding rate on the western coast of Suruga Bay and its relationships with seismicity change, 2000 Western Pacific Geophysics Meeting

- 竹中 潤, 吉田明夫, 2000 : 三ヶ日体積歪観測点における歪み変化と地下水位変化の関係, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 小林昭夫, 吉田明夫, 真砂礼宏, 2000 : 検潮記録による東南海・南海地震前後の地殻変動, 日本測地学会第 94 回講演会
- 小林昭夫, 山本剛靖, 吉川澄夫, 吉田明夫, 露木貴裕, 2000 : 三宅島・神津島近海の地震・火山活動に伴う東海地域の地殻変動, 日本測地学会第 94 回講演会
- 小林昭夫, 山本剛靖, 吉川澄夫, 吉田明夫, 露木貴裕, 小山卓三, 2000 : 三宅島から新島・神津島近海の地震火山活動に伴う東海・南関東地域の地殻変動, 日本地震学会 2000 年度秋季大会
- 小林昭夫, 吉田明夫, 小沢慎三郎, 2001 : 月平均潮位から見た駿河湾周辺地域の地殻変動, 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会
- 小林昭夫, 吉田明夫, 海津優, 小沢慎三郎, 吉野泰造, 2001 : 2000 年三宅島から新島・神津島近海の群発地震活動に伴う時間遅れの地殻変動, 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会
- 高山寛美, 吉田明夫, 2001 : PS データから推定される地殻変動と水準データとの比較, 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会
- 小林昭夫, 山本剛靖, 畑中雄樹, 丸山一司, 竹中 潤, 緒方 誠, 2001 : GPS 東海地域 3 時間解析値のグループ化と補正, 日本測地学会第 96 回講演会
- 小林昭夫, 高山寛美, 山本剛靖, 吉田明夫, 2002 : 2000 年伊豆諸島の地震火山活動に伴った広域地殻変動, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 小林昭夫, 高山寛美, 山本剛靖, 吉田明夫, 2002 : 2000 年伊豆諸島の地震火山活動後の地殻変動の拡大, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 高山寛美, 吉田明夫, 2002 : Geonet データを用いた地殻変動解析 (1) —東北日本—, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 高山寛美, 吉田明夫, 2002 : Geonet データを用いた地殻変動解析 (2) —西南日本—, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 吉川澄夫, 山本剛靖, 小林昭夫, 2002 : GPS と体積歪計データに見られる東海地域西部における最近の歪変化, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 小林昭夫, 吉田明夫, 2002 : 1946 年南海地震後に見られる複数の余効変動, 日本測地学会第 98 回講演会
- 小林昭夫, 真砂礼宏, 吉田明夫, 2002 : 潮位から見えてくる地殻上下変動, 気象研究所研究発表会
- 小林昭夫, 吉田明夫, 2002 : 1946 年南海地震後に見られる複数の余効変動, 日本地震学会 2002 年度秋季大会
- 吉川澄夫, 山本剛靖, 2002 : 東海スローイベントに伴う歪変化, 日本地震学会 2002 年度秋季大会
- 小林昭夫, 2003 : 潮位から見えてくる地殻上下変動, 平成 14 年度気象庁施設等期間研究報告会
- 吉川澄夫, 2003 : 東海スローイベントに伴うひずみの時空間変化について, 地震研究所平成 14 年度共同利用研究会「地震震源モデル: 運動学的モデルから動力学的モデルへ」
- 小林昭夫, 吉田明夫, 2003 : 1946 年南海地震前後の宇和島潮位, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会
- 吉川澄夫, 2003 : 歪計による東海スローイベント検出の試み, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会
- 吉田明夫, 小林昭夫, 竹中 潤, 2003 : 三ヶ日体積歪計観測点で見られる地下水位変化を伴う歪変化, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会
- 吉田明夫, 小林昭夫, 山本剛靖, 塚越利光, 細野耕司, 2003 : 地殻変動と地震活動から推定される東海地方におけるプレート間カップリングの変化, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会
- Kobayashi, A., H. Takayama, T. Yamamoto and A. Yoshida, 2003 : Crustal deformation in the Kanto-Chubu district at and after the 2000 seismo-volcanic event in the northern Izu Islands, IUGG 2003
- Yoshikawa, S., and T. Yamamoto, 2003 : Variation of strain promoted by the slow slip event in the Tokai region revealed by the converted strain from GPS data, IUGG2003
- 小林昭夫, 2003 : GPS 東海地域 3 時間値の面的監視, 日本測地学会第 100 回講演会

(出版物)

- 上垣内修, 竹中潤, 宮越憲明, 小山卓三, 吉川澄夫, 小林昭夫, 山本剛靖, 2000 : 2000 年 6 月 26 日からの三宅島～新島・神津島周辺の地震・火山活動と気象庁体積歪データ, 海洋出版, 月刊地球, 22, 757-767

- 上垣内修, 竹中 潤, 宮越憲明, 小山卓三, 山本剛靖, 2001 : 気象庁における東海及びその周辺地域の地震活動・地殻変動監視, 海洋出版, 月刊地球, 号外 33, 14-21
- 高山寛美, 吉田明夫, 2001 : 御前崎の沈降速度変化の解析・評価, 海洋出版, 月刊地球, 号外 33, 78-88
- 吉川澄夫, 2003 : 歪変化に見られる東海スロースリップの影響, 海洋出版, 月刊地球, 号外 41, 36-41
- 山本剛靖, 2003 : GEONET 座標データの年周パターン変化と東海スロースリップイベント解析に及ぼす影響, 海洋出版, 月刊地球, 号外 41, 71-76

(3) 三次元数値モデルによる地震発生シミュレーション

(論文)

- Tanioka, Y. and K. Satake, 2001 : 2001, Detailed coseismic slip distribution of the 1944 Tonankai earthquake estimated from tsunami waveforms, American Geophysical Union, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1075-1078
- 青木 元, 吉田明夫, 2001 : 静岡地方気象台の地震観測記録から推定される静岡市周辺域での長期的な地震活動の変化, 日本地震学会, 地震 2, 53, 373-384
- Harada, S. and Yoshida, 2002 : A., Configuration of the Philippine Sea slab and seismic activity in the Tokai region, central Japan, Terra Sci. Pub. Co., Tokyo, Seismotectonic in Convergent Plate Boundary, Eds. Fujinawa, Y. and Yoshida, A., 237-246
- 中村雅基, 吉田康宏, 趙 大鵬, 吉川一光, 高山博之, 青木 元, 黒木英州, 山崎貴之, 笠原順三, 金沢敏彦, 佐藤利典, 塩原 肇, 島村英紀, 仲西理子, 2002 : 中部日本の 3 次元速度構造, 気象研究所, 気象研究所研究報告, 53, 1-28
- Katsumata, A., N. Kamaya, 2003 : Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan, American Geophysical Union, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1020
- 青木 元, 吉田康宏, 原田智史, 山崎 明, 石川有三, 中村雅基, 田中昌之, 松田慎一郎, 中村浩二, 緒方誠, 白坂光行, 2003 : 自己浮上式海底地震計観測による駿河・南海トラフ沿いの地震活動—気象庁一元化震源との比較—, 地震 2, 55, 429-434
- Iidaka, T., T. Iwasaki, T. Takeda, T. Moriya, I. Kumakawa, E. Kurashimo, T. Kawamura, F. Yamazaki, K. Koike, and G. Aoki, 2003 : Configuration of subducting Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1219

(口頭発表)

- Yoshida, A., N. Kato, S. Matsumura, S. Noguchi, T. Sagiya, S. Wiemer, 1999 : Toward prediction of the Tokai earthquake, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)
- Harada, S. and A. Yoshida, 1999 : Configuration of the Philippine sea plate under the Tokai region, southern coastal area of central Japan and the seismicity in the slab, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)
- 谷岡勇市郎, 1999 : アメリカで記録された 1854 年安政南海地震津波の解析, 歴史地震研究会
- 中村雅基, 1999 : 発震機構解析処理の高度化に向けて～P 波・S 波初動極性を用いた解析処理プログラムの開発～, 日本地震学会 1999 年度秋季大会
- 谷岡勇市郎, 1999 : 津波記録からみた 1944 年東南海地震のすべり量分布, 日本地震学会 1999 年度秋季大会
- Ishikawa, Y., 1999 : Present stage of earthquake prediction, SFT1999
- 青木 元, 吉田明夫, 2000 : 静岡周辺における長期的な地震活動の変化, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 吉田明夫, 原田智史, 高山博之, 細野耕司, 塚越利光, 青木 元, 高山寛美, 小林昭夫, 2000 : 東海地震の想定震源域に現れた地震活動の静穏化, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会
- 原田智史, 吉田康宏, 青木 元, 石川有三, 中村浩二, 2000 : 駿河・南海トラフ沿いの海底地震計観測, 日本地震学会 2000 年度秋季大会
- 吉川一光, 吉田明夫, 小林昭夫, 2001 : 2000 年新島一神津島群発地震活動の前後の周辺海域における地震活動の変化, 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会
- 石川有三, 2001 : 西南日本のテクトニクス, 京都大学防災研究所研究集会「フィリピン海スラブの沈み込みと島弧背弧の地球物理」

- 細野耕司, 上野 寛, 高山寛美, 吉田明夫, 2001: 地震活動と地殻変動から見た東海地域におけるフィリピン海プレートの沈み込み形態, 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 青木 元, 吉田康宏, 山崎 明, 石川有三, 中村雅基, 原田智史, 2001: 駿河・南海トラフ沿いの海底地震計観測 (その 2), 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 中村雅基, 吉田康宏, 趙 大鵬, 吉川一光, 高山博之, 青木 元, 黒木英州, 山崎貴之, 笠原順三, 金沢敏彦, 塩原 肇, 島村英紀, 仲西理子, 2001: 中部日本の 3 次元速度構造, 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 東海・中部陸域地震探査研究グループ, 2001: 東海・中部地方における陸域深部地殻構造探査, 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 勝間田明男, 鎌谷紀子, 2001: 火山から離れたモホ面付近で発生している低周波地震, 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 石川有三, 2001: スラブに乗った西南日本, 日本地震学会 2001 年度秋季大会
- 石川有三, 2001: 西南日本弧の謎, 京大防災研研究集会 13G-2「官民学の会」
- 吉田康宏, 2002: 東海地域で起きた地震の応力降下量, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 山崎 明, 神定健二, 吉田明夫, 2002: レシーバ関数法による東海地方の地殻・上部マンツルの構造, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 青木 元, 山崎 明, 吉田康宏, 石川有三, 谷岡勇市郎, 田中昌之, 阿部正雄, 秋山加奈, 松田慎一郎, 2002: 御前崎沖での海底地震計観測, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 飯高 隆, 武田哲也, 岩崎貴哉, 蔵下英司, 河村知徳, 森谷武男, 山崎文人, 小池勝彦, 青木 元, 2002: 東海から中部地方にかけての深部地殻構造, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 勝間田明男, 鎌谷紀子, 2002: フィリピン海プレートの沈み込み帯の低周波微動の発生深さと発生要因, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- Ishikawa, Y., 2002: Overslip toward trench induced forearc slide in island arc, WPGM2002
- 小池勝彦, 山岡耕春, 山崎文人, 森谷武男, 熊川郁哉, 岩崎貴哉, 飯高 隆, 武田哲也, 蔵下英司, 河村知徳, 青木 元, 2002: 東海中部構造探査実験による地殻構造の推定, 日本地震学会 2002 年度秋季大会
- 青木 元, 山崎明, 吉田康宏, 石川有三, 阿部正雄, 眞坂精一, 竹内 新, 2003: 東海沖での海底地震計観測—2002 年観測結果—, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会
- 上野 寛, 中村浩二, 吉田康宏, 伊藤秀美, 2003: 2003 年 1 月 19 日東海道沖で発生した地震 (M 5.3) と余震の深さ推定, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会
- Aoki, G., A. Yamazaki, Y. Yoshida, Y. Ishikawa, M. Abe, S. Masaka, H. Takeuchi, 2003: Seismicity off Tokai district observed by pop-up type ocean bottom seismographs, IUGG2003
- Yoshida, Y., 2003: Stress drop of earthquakes in and around Tokai region, IUGG2003
- 青木 元, 山崎 明, 吉田康宏, 石川有三, 阿部正雄, 眞坂精一, 竹内 新, 2003: 海底地震計観測による東海沖の地震活動—気象庁一元化震源の再決定と 2003 年観測結果—, 日本地震学会 2003 年秋季大会

(出版物)

- 吉田明夫, 2001: 東海地方におけるフィリピン海プレートの形状と東海地震, 海洋出版, 月刊地球, 号外 33, 104-113
- 安藤雅孝, 浅田 昭, 池田隆司, 石川有三, 金田善行, 村上 亮, 2001: 特集「次の南海トラフ巨大地震に備えて」—まえがき—, 東京地学協会, 地学雑誌, 110, 467-470
- 谷岡勇市郎, 2001: 津波波形から推定された 1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震のすべり量分布の解釈, 東京地学協会, 地学雑誌, 110, 491-497
- 石川有三, 2001: フィリピン海スラブの形状, 東京地学協会, 地学雑誌, 110, 592-601
- 吉田明夫, 2001: 東海地震の予知を目指して, 東京地学協会, 地学雑誌, 110, 784-807
- 石川有三, 2002: 西南日本とアムールプレート, 海洋出版, 月刊地球, 号外 38, 20-30

エアロゾルの放射効果の実態解明とモデル化に関する研究

研究期間：平成 11 年度～平成 15 年度

研究代表者：浅野正二¹⁾、内山明博²⁾（気候研究部）

研究担当者：真野裕三³⁾、山崎明宏、戸川裕樹⁴⁾、倉賀野連⁵⁾、浅野準一⁶⁾（気候研究部）

研究の目的

地球の気候がどのようにして決まるのかを考えると、地球の放射収支がどうなっているか、何によって決まるかを明らかにすることは重要な課題である。地球の放射収支に影響を与える要素として、雲、エアロゾル、吸収ガス等がある。エアロゾルは、それ自身が放射を散乱・吸収することにより、あるいは雲の凝結核となり雲の光学特性を変えることにより、地球-大気系の放射収支に大きな影響を及ぼすと考えられている。しかし、実際のエアロゾルの放射収支効果（放射強制力）の定量的把握は実態の複雑さのゆえに十分になされていない。また、その空間分布、時間変動、光学特性がよく分かっておらず、気候モデルに適正に組み込まれていない。

エアロゾルの光学特性と直接的放射効果（放射強制力）などの実態を把握し、気候モデルなどに用いるエアロゾルの放射過程のモデル化を図ることを目的とする。

研究の方法

太陽放射の分光測定、地表面直達日射量、散乱日射量等の研究観測データや衛星観測データ等を用いて、エアロゾルの光学特性（光学的厚さ、粒径分布、光吸収係数など）とそれが地表面放射収支に及ぼす効果を調べ、気候モデル等のためのエアロゾルの放射過程のモデル化を図る。エアロゾル特性の調査は、大都市近郊の混濁大気（つくば）、清澄な海洋性大気（南鳥島、宮古島）の代表的 2 地点を中心として行う。

観測は、地表面での全天放射量、分光太陽直達光、太陽周辺光分布をそれぞれ、全天日射計、赤外放射計、サンフォトメーター、スカイラジオメーターで測定した。全天日射計は、全波長域と近赤外域（ここでは 715 nm 以上）で測定した。また、太陽直達光と散乱光を分離して測定した。サンフォトメーターとしては、分光方式として回折格子を用いた分光光度計を使い行った。これら以外に気象要素として気温、湿度、風向・風速、雨量も合わせて測定した。雲の状態を監視するため、全天カメラを取り付けてある。太陽光の測定では、大気全体のエアロゾルの特性しか分からないので、地上でネフェロメーターと吸収率計でエアロゾルの散乱係数と吸収係数の測定、光学式のパーティクルカウンターによる粒径分布の測定を行った。

放射観測の精度を維持するため、全天日射計は測器試験検定センターで比較データを取り、日射計の角度特性、温度特性、直達光と散乱光の比率を考慮して検定できるようにした。直達分光日射計は、定期的に乗鞍、マウナ・ロアで検定データを取得して校正を行った。

観測点はつくばと宮古島で行った。つくばは、大都市近郊の混濁大気の状態を知るため、宮古島は海洋上の清澄な大気の状態を知るために選んだ（南鳥島での観測を計画したが、平成 15 年度にようやく可能になった）。このように、気候に特徴のある地点を選定し観測を行っている。

研究の結果

・つくばデータの解析

気象研究所構内の放射観測実験棟では、継続的に全天日射量（全波長域と近赤外域）、サンフォトメーター（干渉フィルター型、波長 369、499、675、778、862、938、1050 nm）による測定を行いデータが蓄積していたので、1997 年 4 月から 1999 年 3 月までのデータから快晴時のデータを選び解析を行った。

晴天日は、日射計のデータから判断して選び、計 68 日（3～5 月が 13 日間、6～8 月が 5 日間、9～11 月が 27 日間、12～2 月が 23 日間）選んだ。これらのデータから、地表面でのエアロゾルによる直接的放射効果と複素屈折率、粒径分布の推定を行った。

放射効果は、Aerosol forcing efficiency (β) の値（波長 500 nm の光学的厚さ 1 の変化対する、放射強制力の変化）を調べた。その結果、 β は、季節によって違いがあり、可視域で -134～-180、近赤外域で -16～-39 であった。これは、つくばでは、季節によってエアロゾルの組成に違いがあることを反映したものである。

1) 平成 11 年度～平成 14 年度, 2) 平成 15 年度, 3) 平成 11 年度, 4) 平成 11 年度～平成 12 年度, 5) 平成 13 年度～平成 15 年度

複素屈折率、粒径分布についても調べた。解析方法は、まず、サンフォトメーターの光学的厚さから、複素屈折率を仮定して粒径分布を推定する。次に、仮定した複素屈折率と粒径分布から1次散乱量を計算する。その1次散乱量に基づき地表面での散乱日射量を計算する。これを観測日射量と比較して、最小の誤差を与える複素屈折率を最適な値とする。このようにして、複素屈折率、粒径分布、single scattering albedo (= 散乱消散係数/全消散係数) を推定した。

推定された季節毎の平均の体積スペクトル分布を図1に示した。夏季は、半径 $0.5\mu\text{m}$ 以下の小粒子が卓越した一山分布をしていた。これは、人為起源の物質に起因する硫酸塩等の物質が多く含む可能性がある。冬季は、山分布が卓越していた。春、秋は、平均的には二山型の分布であるが、一山型、二山型の両方の型のもが見られた。図2に single scattering albedo の値を示した。Single scattering albedo が小さいときエアロゾルは、吸収性のものからなっていることを示している。図2から、冬季の期間に吸収が非常に大きく single scattering albedo が $0.6\sim 0.7$ である。また、夏季には、 0.9 程度である。

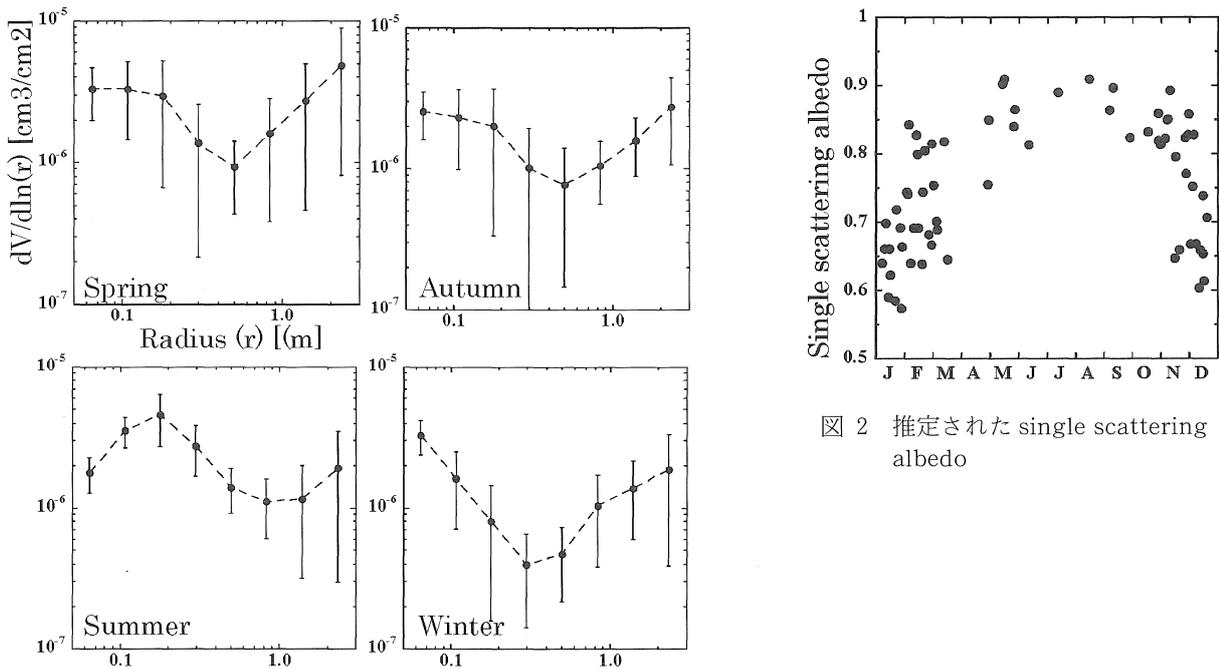


図1 サンフォトメーターから推定した粒径分布の季節変化

図2 推定された single scattering albedo

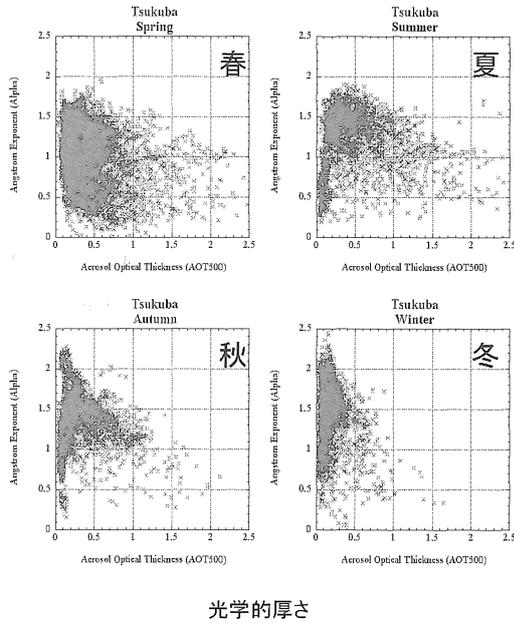
・スカイラジオメーターデータの解析

気候研究部第3研究室では、経常研究以外の課題においてもスカイラジオメーターを各地に設置し観測を行っている。スカイラジオメーターは、太陽直達光と太陽周辺の放射輝度分布を測定する放射計である。スカイラジオメーターのデータを解析することによって、光学的厚さ、粒径分布を推定することができる。本研究では、つくば、宮古島、南鳥島に設置し観測を行った。

図3につくばに設置したスカイラジオメーターから推定した光学的厚さ (500 nm) とオングストローム指数の散布図をしました。ここでは図示しなかったが、光学的厚さの時系列は、冬に小さく、夏に大きいという季節変化を示している。それに対応して、夏には光学的厚さが大きいデータが見られ、冬のデータは、ほとんどが光学的に薄いデータである。サンフォトメーターの解析結果は、夏に小さい粒子が卓越する一山分布であったが、それに対応して夏のデータは、オングストローム指数が 1.5 のあたりにデータが集中している。春にオングストローム指数が小さく ($0.0\sim 0.5$)、且つ光学的に厚いデータが見られるが、これは黄砂に対応したものである。

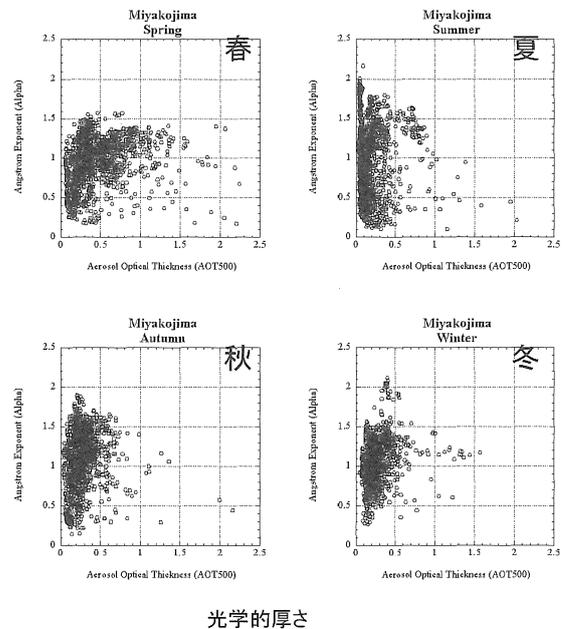
図4に宮古島に設置したスカイラジオメーターから推定した光学的厚さ (500 nm) とオングストローム指数の散布図をしました。全般に、どの季節も光学的に薄いデータ多いことがまずわかる。これは、宮古島が海に囲まれた島であるためである。しかし、一方で、どの季節もオングストローム指数が 1 を超えるやや大きめの値が観測されている。海洋性の高気圧に覆われる夏季においてもオングストローム指数が、 1 を超えている。この値は、海洋性のエアロゾルとすれば、やや大きめの値で、どの季節においても、大陸の影響を

オングストローム指数



光学的厚さ

図 3 つくばの光学的厚さとオングストローム指数の散布図



光学的厚さ

図 4 宮古島の光学的厚さとオングストローム指数の散布図

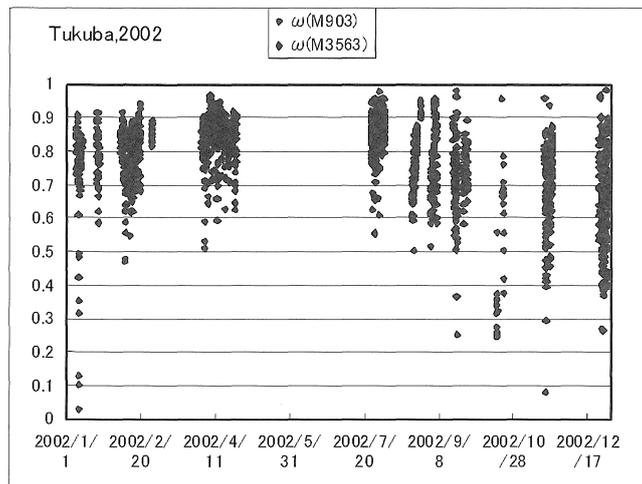


図 5 つくばにおける 2002 年の single scattering albedo

受けていることを示している。また、春季には、オングストローム指数が大きく、光学的に厚いケースが観測されている。これは、低緯度からの空気塊が入り、植物燃焼起源のエロゾルを観測していることを示している。

・ エロゾル散乱係数・吸収率

地上での放射観測の解析を補助するために、地上でエロゾルの光学特性の直接測定を行った。測定は、約 500 nm 付近だけであるが、散乱消散係数（Radiance Research 製ネフェロメーター M903 または、TSI 製 M3653）と吸収消散係数（Radiance Research 製 PSAP）を測定した。

図 5 に single scattering albedo（散乱消散係数/（散乱消散係数+吸収消散係数））を示した。冬から夏にかけて値が大きくなっている。冬に 0.75~0.85、春に 0.80~0.90、夏に 0.85~0.95 である。秋から冬にかけて、値が小さくなり、0.6 よりも小さい値もある。冬に小さく、夏に大きい傾向は、サンフォトメーターと日射計（可視域）のデータの解析からも示された傾向と同じである。定量的には、1 月の値は、直接測定の方が大きい値を示している。冬季に吸収が大きくなる傾向は、すす等の燃焼時に発生する吸収性の高いエロゾルが冬季期間の方が多いためと思われる。

研究成果の要約

広帯域の日射計のデータとサンフォトメーターのデータを使って、エアロゾルの放射効果（放射強制力）を評価することができた。Aerosol forcing parameter には、組成の違いを反映して季節毎に違うが、 $-134 \sim -180$ の範囲にあり、大都市近郊の混濁大気のエアロゾルの状態を反映しているものと思われる。また、エアロゾルの粒径分布の、エアロゾルの吸収特性には、季節変化があった。

スカイラジオメーターや日射計などの放射計を設置して、そのデータ解析からエアロゾルの光学特性を把握できる観測システムが構築された。これによって、地域ごとのエアロゾルの特性を連続で観測、監視できるようになった。このシステムによって、黄砂や森林火災の検知ができる。

地上だけであるが、エアロゾルの光学特性の直接測定を行った結果、定性的には日射計とサンフォトメーターの解析と同じ結果が得られた。すなわち、夏には single scattering albedo が $0.85 \sim 0.95$ であり、冬季には、 0.6 を下回るような値が測定されている。定量的には、違いのある季節もあり、測定データの再検定、補正が必要かもしれない。

今後に残された問題点

放射フラックスの見積もりをより良くしていくために、鉛直分布の影響、一次散乱量の測定と放射場の対応、湿度と光学的厚さ、湿度と粒径分布の関係についての調べる必要がある。さらに、エアロゾルを構成粒子の組成と光学特性の関係、組成と湿度特性の関係等を明らかにして放射フラックスの見積もりを改善していく必要がある。また、輸送モデルの検証用データとして観測値を用い、全球での放射強制力に結びつける研究も必要である。

研究成果の活用に対する意見

計画どおりに進捗しなかった部分もあり、成果は必ずしも十分でないところもあった。しかし得られた観測データや解析結果は貴重であり、平成 16 年度から実施予定の所内プロジェクト「放射過程の高度化のための観測的研究」において活用されることが期待される。

成果発表状況

- ・論文発表件数 7 件
- ・口頭発表件数 33 件

取得した知的財産（特許、実用新案など）

なし

成果発表一覧

（論文）

- S. Asano, A. Uchiyama, Y. Mano, M. Murakami, Y. Takayama, 2000 : No evidence for solar absorption anomaly by marine water clouds through collocated aircraft radiation measurements, American Geophysical Union, *J. Geophys. Res.*, 105, D11, 14761-14775.
- K. Masuda, T. Takashima, Y. Kawata, A. Yamazaki, M. Sasaki, 2000 : Retrieval of aerosol optical properties over the ocean using multispectral polarization measurements from space, Elsevier Science Inc., *Appl. Math. Comput.*, 116 (2000), 103-114.
- Y. Kawata, T. Izumiya, A. Yamazaki, 2000 : The estimation of aerosol optical parameters from ADEOS/POLDER data, Elsevier Science Inc., *Appl. Math. Comput.*, 116 (2000), 197-215.
- J. Michalsky, P. Kiedron, J. Berndt, S. Asano, A. Uchiyama, A. Yamazaki, et al., 2002 : Broadband shortwave calibration results from the Atmospheric Radiation Measurement Enhanced Shortwave Experiment II, *J. Geophys. Res.*, 107, D16, 10.1029/2001JD001231
- J.-F. Gayet, S. Asano, A. Yamazaki, A. Uchiyama, 2002 : Two case studies of winter continental-type water and mixed-phase stratocumuli over the sea 1. Microphysical and optical properties, *J. Geophys. Res.*, 107, D21, 4569, doi : 10.1029/2001JD001106
- S. Asano, A. Uchiyama, A. Yamazaki, J.-F. Gayet, M. Tanizono, 2002 : Two case studies of winter continental-type water and mixed-phase stratocumuli over the sea 2. Absorption of solar radiation, *J. Geophys. Res.*, 107, D21, 4570, doi : 10.1029/2001JD001106
- T. Nishizawa, S. Asano, A. Uchiyama, A. Yamazaki, 2004 : Seasonal variation of aerosol direct radiative forcing and optical properties estimated from ground-based solar radiation measurements, American Meteorological Society, *J. Atmos. Sci.*, 61, 57-72

（口頭発表）

- 浅野正二, 松原廣次, 金戸 進, 高尾俊則, 1999 : 気象庁南極観測隊によるサンフォトメータ測定からのエアロゾル光学特性, 平成 11 年度日本気象学会春季大会
- 山崎明宏, 内山明博, 浅野正二, 1999 : 南鳥島での Sky radiometer を用いたエアロゾルの光学特性観測, 平成 11 年度日本気象学会春季大会
- 只石 彰, 内山明博, 内山明博, 浅野正二, 久世宏明, 竹内延夫, 1999 : 衛星データとライダー観測による雲高度の比較, 平成 11 年度日本気象学会春季大会
- 内山明博, 1999 : 「地球・大気系の放射過程とリモートセンシングに関するセミナー」第一部 大気放射の基礎：放射伝達の理論, 地球・大気系の放射過程とリモートセンシングに関するセミナー
- 久慈 誠, 岡田 格, 内山明博, 高村民雄, 1999 : スプリットウィンドウデータによる大陸規模での可降水量の推定, 平成 11 年 11 年度日本気象学会秋季大会
- 浅野正二, 谷園雅代, 内山明博, 山崎明宏, 2000 : エアロゾルが層積雲の放射特性に及ぼす効果：JACCS 航空機観測による事例解析, 平成 12 年度日本気象学会春季大会
- 塩原匡貴, 山崎明宏, 長田和雄, 2000 : 乗鞍山岳観測で見られたエアロゾルの粒径分布の日変化の違いについて, 平成 12 年度日本気象学会春季大会
- 谷園雅代, 浅野正二, 内山明博, 山崎明宏, 2000 : 分光反射率・吸収率による雲層内のエアロゾルの推定, 平成 12 年度日本気象学会秋季大会
- 吉田幸生, 浅野正二, JACCS 上層雲観測チーム, 2000 : 巻層雲の放射特性のゾンデ観測, 平成 12 年度日本気象学会秋季大会
- A. Uchiyama, 2001 : APEX-E1 Aircraft Observation, 3rd APEX International Workshop
- 内山明博, 石坂 隆, 畠山史郎, 山崎明宏, 戸川裕樹, 高見昭憲, 2001 : APEX-E1 航空機観測, 平成 13 年度日本気象学会春季大会
- 浅野正二, 谷園雅代, 内山明博, 山崎明宏, 2001 : 層積雲の放射特性に及ぼすエアロゾルの効果に関する研究, 平成 13 年度日本気象学会春季大会
- 久慈 誠, 内山明博, 2001 : 近赤外リモートセンシングデータを用いた可降水量の推定, 平成 13 年度日本気

象学会春季大会

- 浅野正二, 朽木勝幸, 内山明博, 山崎明宏, 2001: 雲の「日射異常吸収」をめぐる ARM-JACCS 協同観測 (ARESE-II 解析速報), 平成 13 年度日本気象学会春季大会
- 西沢智明, 浅野正二, 内山明博, 山崎明宏, 2001: 地上放射観測によるエアロゾルの直接放射強制力の評価, 平成 13 年度日本気象学会春季大会
- A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Togawa, 2001: Stratocumulus observed on April 27 in the period of APEX-E2: cloud microphysical structure and radiative property, 4th APEX International Workshop
- 石坂 隆, 風間 亮, 深谷純子, 民田晴也, M. Adhikari, 鈴木和司, J. Jensen, 内山明博, 山崎明宏, 2001: 九州南方海上におけるガス・エアロゾルと CCN 濃度の関係, 平成 13 年度日本気象学会秋季大会
- 石坂 隆, 風間 亮, 深谷純子, 民田晴也, M. Adhikari, 鈴木和司, J. Jensen, 趙 春生, 内山明博, 山崎明宏, 2001: 九州南方等海上における CCN と雲粒に関する航空機観測, 平成 13 年度日本気象学会秋季大会
- 内山明博, 山崎明宏, 戸川裕樹, J.B. Jensen, 2001: APEX-E2/ACE-Asia 期間中に航空機観測した粒径分布, 平成 3 年度日本気象学会秋季大会
- 山崎明宏, 内山明博, 戸川裕樹, 高村民雄, 2001: APEX-E2/ACE-Asia 期間中の宮古島での地上放射観測, 平成 13 年度日本気象学会秋季大会講演
- 中島 孝, Yi Liu, 日暮明子, 増永浩彦, 中島映至, 高村民雄, 内山明博, 2001: ACE-Asia 期間中の衛星による雲・エアロゾル観測, 平成 13 年度日本気象学会秋季大会
- 朽木勝幸, 浅野正二, 内山明博, 山崎明宏, 2001: 雲の「日射異常吸収」をめぐる ARM-JACCS 共同観測 (ARESE-II の日射収支解析), 平成 13 年度日本気象学会秋季大会
- 戸川裕樹, 内山明博, 山崎明宏, 高村民雄, 2002: Nephelometer と PSAP を用いたエアロゾルの光学特性の測定, 平成 14 年度日本気象学会春季大会
- 西沢智明, 浅野正二, 内山明博, 山崎明宏, 2002: 地上放射観測によるエアロゾルの直接放射強制力の評価 (II), 平成 14 年度日本気象学会春季大会
- 久慈 誠, 内山明博, 平沢尚彦, 山内 恭, 2002: NOAA/HRPT データを用いた南極域における雲変動の研究, 平成 14 年度日本気象学会春季大会
- 久慈 誠, 内山明博, 2002: 近赤外リモートセンシングデータを用いた可降水量の推定手法, 平成 14 年度日本気象学会秋季大会
- A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Togawa, J. Asano, 2002: Data status of aircraft measurements, The Fifth APEX International Workshop
- 内山明博, 2002: 雲・エアロゾル・放射収支, 第 27 回不均一反応研究会
- 内山明博, 2002: 大気中の放射過程について, 第 2 回成層圏プラットフォーム気象環境検討委員会作業部会
- 内山明博, 山崎明宏, 戸川裕樹, 浅野準一, 2003: APEX-E1, E2 の航空機で観測したエアロゾルの湿度特性, 平成 15 年度日本気象学会春季大会
- A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Togawa, J. Asano, 2003: APEX-E3 B200 MRI data, The APEX-RIHN Joint International Workshop for Aersols and Clouds (6th APEX International Workshop)
- 山崎明宏, 内山明博, 戸川裕樹, 浅野準一, 2003: ADEC-IOP2, APEX-E3 でのスカイラジオメーター観測, 平成 15 年度日本気象学会秋季大会
- H. Togawa, A. Uchiyama, A. Yamazaki, J. Asano, 2004: Ground-based Measurements of Optical Properties of Atmospheric Aerosol in Tsukuba and Miyako-Island, the 3rd Workshop on Aeolian Dust Experiment on Climate Impact

複合リモートセンサーを用いた観測手法に関する研究

研究期間：平成 11 年度～平成 15 年度

研究代表者：小林隆久¹⁾、高谷美正²⁾（気象衛星観測システム研究部）

研究担当者：松浦和夫³⁾、福田正人⁴⁾、足立アホロ、笹岡雅宏、山内 洋⁵⁾（気象衛星・観測システム研究部）

研究の目的

近年の目ざましい観測技術の発展により、各種気象要素のリモートセンシング装置が開発されてきた。これらは単独でも有用なデータを提供するが、複数の装置を観測システムとして組み合わせ、その観測結果を複合化することでデータ利用の一層の高度化が可能となる。本研究では、ウィンドプロファイラー（境界層レーダーを含む）、散乱計、アメダスデータまた衛星観測データ等を用いた雲、降水、乱流量などの物理量抽出アルゴリズムを開発すると共に大気現象・物理量の解析手法の研究を行う。また、境界層レーダーの性能をハード/ソフト面から検証する。

これらの研究を通じて気象メカニズムの解明並びに将来の観測システムの構築・予報精度向上など気象業務の発展に資する。

研究の方法

リモートセンシングデータの高度利用化手法についての研究について、以下の 2 つのサブテーマとして実施した。

- (1) 複合リモートセンサーを用いた物理量抽出アルゴリズムの開発、それを用いた大気現象の解析手法の開発、及び、同時観測データを用いた開発結果の検証

400 MHz 帯ウィンドプロファイラーと 1.3 GHz 帯ウィンドプロファイラー（境界層レーダーともいう）を中心に、散乱計や衛星データなど、リモートセンサーを複合的に用いて雲、降水、乱流量などの物理量抽出アルゴリズムの開発を行う。

ウィンドプロファイラーは、大気中の電波屈折率の乱れによるブラッグ散乱を利用して、風の鉛直分布を測定することを目的として設計されたレーダーである。しかし、大気からの反射波以外にも雲、降水粒子等からの反射波も受信することができることを利用して、雲や降水粒子の粒径分布などの情報を得る手法をスペクトル解析等を用いて開発する。また、大気からの反射波の強さが大気中の水蒸気量の高度変化と関係があることを利用して、大気中の水蒸気量の鉛直分布の推定手法の開発を行う。

開発結果の検証のため、開発された個々の手法を前線等の大気現象の解析に応用し、これらのセンサーによる同時観測データを用いて、物理量の抽出並びに大気現象の解析を行う。

- (2) 1.3 GHz 帯ウィンドプロファイラー（境界層レーダー）の観測性能の検証

1.3 GHz 帯ウィンドプロファイラーは、境界層レーダーとも呼ばれるように、大気下層から 3～6 km 程度までの風の観測が可能である。400 MHz 帯などのより長い波長を用いたウィンドプロファイラーに比較して、観測可能高度が低い、降水の影響を受けやすいという短所はあるものの、アンテナが小さくできることなどから、機器が小型にできることから、設置の自由度が高く、コストパフォーマンスも良いことから、野外観測や現業展開に適していると考えられている。気象庁が、2001 年 4 月から開始した局地的気象観測網（WINDAS）でも、1.3 GHz 帯のウィンドプロファイラーが採用されている。本研究においては、スペクトル情報や反射強度の情報を用いて、より精度の高い風の推定を行うアルゴリズムの開発、大気中の水蒸気量を推定する手法の開発を論及び観測データへの適用を通して行い、実際の境界層レーダーによる観測データを高層データ、地上気象観測データなどを用いて検証する。

研究の結果

- (1) 複合リモートセンサーを用いた物理量抽出アルゴリズムの開発、それを用いた大気現象の解析手法の開発、及び、同時観測データを用いた開発結果の検証

1) 平成 11 年度～平成 14 年度, 2) 平成 15 年度, 3) 平成 11 年度, 4) 平成 11 年度～平成 12 年度, 5) 平成 13 年度～平成 15 年度

(ア) 降雨の粒径分布情報の抽出

ウィンドプロファイラーは、大気の流れからの反射波を受信し、風の鉛直分布を測定することができるように設計されている。しかし、ウィンドプロファイラーは降水時には、大気の流れからの反射波以外にも降水粒子からの反射波も同時に受信されるため、このことを利用すると、降水の発達過程の理解やレーダーによる降水強度推定精度向上にとって重要な雨滴の粒径分布情報を得ることができる。

降水強度がある範囲内であるとき、ウィンドプロファイラーによる鉛直方向のビームで観測した受信波のドップラースペクトラムは、降水粒子による反射波と大気の流れによる反射波による2つのピークを示し、それらから降水粒子の落下速度と大気の流れ速度が判る。このことと、降水粒子の終端落下速度が粒径に依存性することを用いて、ドップラースペクトラムから雨滴の粒径分布の鉛直分布を非線形最小自乗法により求めるプログラムを開発した。

開発したプログラムを気象研究所 400 MHz 帯ウィンドプロファイラーのデータに適用し、1997年7月31日午後につくば上空を通過した積乱雲について解析を行った。図1に、鉛直ビームによるデータから推定された雨滴の粒径分布の高度変化の様子を示す。6 mm 以上の大きな雨滴粒子が 3.25 km 付近より上空で観測され、2.75 km 以下ではこのような大きな雨滴粒子はなく、1.5 mm 以下の粒子が卓越しているようすが判る。この雨滴粒径分布の高度分布の変化の様子は、大きな直径の雨滴粒子が分裂する現象を観測したものと考えられる。大きな雨滴粒子が大気中で分裂することは理論的に期待されており、室内実験でも認められているが、大気中で観測された例はほとんど知られていない。本事例解析は、本手法を用いることでプロファイラーが降水雲中での微物理過程の研究などの基礎的なツールとなることを示したものである。

また、このプログラムを使うことで、大気の流れ速度と粒径分布が得られることから、プロファイラー上空に限られるものの降水強度の精度良い推定が原理的に可能である。降水強度について実データに基づき TRMM による推定値とウィンドプロファイラーによる推定値の鉛直分布を比較し、有意な差があることを示した。一般的に気象レーダーの Z-R 法による降水強度推定や TRMM の雨量推定アルゴリズムの精度には、粒径分布情報が重要であり、その精度向上のために、プロファイラーによる観測を複合的に使うことも考えられる。

(イ) 降水粒径分布情報を用いた水平風の補正手法の開発

ウィンドプロファイラーは、非降水時の場合には大気の流れ屈折率の乱れを散乱体として風を観測できる。降水時の場合には降水粒子も散乱体となる場合があるが、風と落下速度が合成されたものが観測可能であるため、水平風の観測が可能である。しかし、ウィンドプロファイラーは、天頂や天頂から約 15 度程度傾けた 2 又は 4 方向に電波をビーム状に発射し、これら 3~5 方向の各ビームにおけるドップラー速度（視線速度）から風を算出するため、散乱体の速度が観測時間内に各高度で一定であるという仮定を使用している。この仮定は、非降水時、及び、降水時でも層状性の降水の場合には、ほぼ成立し、水平風の鉛直分布を観測することができるものの、対流性降水時などにはこの仮定が成り立たない。この問題に対して、降水粒子の鉛直速度について、ドップラースペクトラム分布から 3 次のモーメントである skewness という統計量を計算して補正を行うことで、水平風の精度を向上させるアルゴリズムを開発した。

一般に大きい雨滴を含む降水の場合にスペクトル分布の非対称性が大きくなる傾向がある。数値実験により、降水の粒径分布がマーシャルパルマー分布や変形ガンマ分布などの代表的な雨滴粒径分布の場合に、skewness と降水の平均落下速度とがほぼ線形関係となることを示した。この関係を使い、各ビーム毎に skewness から落下速度を推定し、ビーム間の降水粒子の落下速度の不均一の影響を補正するアルゴリズムを作成した。本手法を実際の対流性降水の事例に適用し、この事例では通常処理手法による風に比べ、ゾンデの観測に風により整合した風が求まることを確認した。本手法ではデータ量の多いスペクトルそのものではなく、skewness のみを扱えば良いため、メモリや処理速度の負荷が軽く、リアルタイム処理にも適用可能と考えられる。

(ウ) ウィンドプロファイラー、RASS 等を用いた事例解析

ウィンドプロファイラーに音波源を付加したシステム（RASS : Radio Acoustic Sounding System）は、ウィンドプロファイラーによる風向風速の観測に加え、気温に関するデータの鉛直分布の測定ができる。本経常研究では、境界層レーダーを中心に、使える場合には鉄塔データや RASS 等も使用して観測事例を用いて実際の気象現象の解析を行った。

局地前線は、総観スケールのメソ気象現象とカップリングして局地的な豪雨をもたらす場合があるものの、降水を伴わないものは衛星や気象レーダーによる観測はできない。1997年12月30日に、関東地方を

局地前線（メソ寒冷前線）が通過した。つくばを通過した際の境界層レーダーを用いた RASS、気象研究所の気象観測鉄塔を用いて得られた温位及び風の時間変化・高度断面図から、1 時頃に、厚さ 100~150 m の冷気が通過していること、150 m 以下は北よりの風となっていることが判る。この冷気は、アメダスによる観測から、関東平野の山間部で放射冷却により発達したものと推定される。局地前線の通過前は、気温 5~7°C、東~南よりの風であり、通過後は、気温 2~3°C となった。この冷気は、13 時頃までの約 12 時間続き、厚さも 400 m 近くまで達した。降水を伴わない局地前線の観測には、連続的に風・温位の鉛直分布を観測できる RASS が有効であった。

また、メソ現象の解析のため、通常は高々 5 方向程度のビームしか使用しない境界層レーダーを用いて、RHI 観測を行う手法をテストした。降水粒子が存在する場合はドップラーレーダーによる三次元的な風の測定が有効であるが、降水の開始以前や雲の周囲において気流の情報を得ることはできない。境界層レーダーで、RHI 走査を行うことで、雲の内外の風に関する鉛直断面における情報を得ることが可能である。境界層レーダーを用いて実現するもので、位相制御により天頂から±45°の範囲で観測可能なことを理論的に確認し、2000 年 9 月の実際の対流性降水に適用した。同時観測を行ったドップラーレーダーのデータと比較して、降水域内ではほぼ同等な結果を得た。

また、この例以外にも、陸風による重力流、北陸不連続線、線状降水系等の解析を実施し、境界層レーダー等の測器の複合利用が、メソスケール現象の構造を解析に有効であることを示した。

(エ) 衛星搭載機器による観測アルゴリズムの提案

衛星搭載の可視・赤外の放射計を組み合わせることで地表面特性を求めるアルゴリズム、及びこれにミリ波レーダーを組み合わせ、雲と降水を識別するアルゴリズムを開発した。

ミリ波レーダーを衛星に搭載し、温暖化予測の精度向上を目指す観測システム（EARTH CARE 衛星）の実現に向けて、その有用性や観測手法を検討し、ミリ波レーダーと放射計の複合観測により単独では不可能な雲と降水を区別して観測するアルゴリズムを開発して提案中。具体的には、雲水と降水粒子の粒径分布の違いに起因する落下速度分布を基に、両者を分離するものである。

(オ) ウィンドプロファイラーを用いた湿度の推定手法

ウィンドプロファイラーの受信電力は、大気からの反射の場合、大気中の電波屈折率の鉛直勾配の大きさにほぼ比例することが知られている。このことを利用して、境界層レーダーを用いて湿度（あるいは比湿 q ）を抽出する方法の改良・開発を行い、検証した。地上気象データとゾンデデータを時間内挿して連続的に湿度を推定する手法に加えて、晴天時日中の観測精度の向上を図るため、対流境界層に関するモデル（0 次ジャンプモデル）と対流境界層高度の推定値を用いて、気温及び大気中の屈折率の符号のプロファイルを用いて湿度を推定する手法を開発した。気温及び大気中の屈折率の符号の情報を使うことで、地上における比湿 q_0 を参照して、連続的に水蒸気プロファイルを算出できる。8 月と 10 月に係留気球等を用いた連続観測を実施し、対流境界層が日中発達していく過程における水蒸気プロファイル算出を行い、推定した水蒸気プロファイルと係留気球観測・ゾンデ観測（地上 10 分平均値と鉄塔 150 m ステージの 10 分平均値も含む）とが良く一致することを示した（図 3）。

(カ) 散乱計の製作

波長 1064 nm のレーザー光を用いて大気中の微小水滴（霧や雲粒子）、エアロゾルなどの散乱情報を得るための装置として、散乱計を製作した。

(2) 1.3 GHz 帯ウィンドプロファイラー（境界層レーダー）の観測性能の検証

(ア) 検証用ツールの整備

プロファイラーのスペクトルデータを解析・描画を行うための基本的な解析ツールを作成・整備した。このツールは、境界層レーダーデータの品質管理から描画まで行うことができるもので、前経常計画におけるデータ処理を（準）リアルタイム処理できるように実装している。この解析ツールは、検証用として用いられたほか、前項の降水粒子の粒径分布を推定アルゴリズムの開発や事例解析に用いられた。

(イ) 風の測定精度についての検証

i) ゾンデ、係留気球による検証

境界層レーダー、高層ゾンデ、係留気球の同時観測を実施して、境界層レーダーによる側風精度の検証を行った。境界層レーダーの 30 分平均した風のデータを高層気象台のゾンデデータと比較した。1998 年 1~8 月の期間内の 60 日分 400 観測のゾンデデータを使った検証では、バイアスはほとんど無く（風速差 0.3 m/s、風向差 1.5°）、標準偏差は風速 1.8 m/s、風向 15°程度であるとの結果を得た。

ii) 鉄塔による検証

パルス圧縮を行う境界層レーダーでは、最低高度はパルス圧縮に用いる符号長に比例しており、低高度の風の測定は従来困難であった。この困難の解決法として、提案された Spano らの新符号（1996年）は、境界層レーダーで使用可能となっていることから、低高度における性能について、気象研究所の 213 m の鉄塔データを使用した比較検証を行った。鉄塔と境界層レーダーとは約 300 m の至近距離にあり、鉄塔の高度 213 m、境界層レーダーの高度 202 m (±30 m) の 30 分平均風で比較した。1997 年夏季の 19 日間約 1000 データから、バイアスはほとんど無い（風速差 0.2 m/s、風向差 1.4° 以下）こと、標準偏差が風速 1.5~1.8 m/s 程度の結果を得た。風速と風向の差について、それぞれ平均で 0.2 m/s、1.4°、標準偏差で 1.1 m/s、24° との結果を得た。

iii) 境界層レーダーの風の推定精度向上のためのアルゴリズムの開発

境界層レーダー等のウィンドプロファイラーによる風の推定精度に悪影響を与えるクラッターノイズのうち、グランドクラッター、鳥、飛行機など、特定の原因のものについては原因の特性を考慮した種々の（しかし個別の）対処手法が考案されている。しかし、不特定のクラッターについて適用可能な手法は確立されてはいない。本研究では、ドップラースペクトルのモーメントの推定に際して、不特定のクラッターの影響を除去できる新しい手法を開発した。この手法はニューラルネットワークの格子モデルを用いたもので、ドップラースペクトル中の大気信号が、レンジ及び周波数に対して、概ね連続的に変化するという特徴を有していることに注目し、自己組織化のアイデアを取り入れることによりドップラースペクトルのデータから自動的に大気信号を抽出できる。

実際に観測されたクラッターが混在するドップラースペクトルデータに、この手法を適用して非常に滑らかな視線速度の鉛直プロファイルを得た。この視線速度から算出した水平風の風向風速は、標準的なモーメントから計算するよりも、空間的にも時間的にも連続に変化し、かつ風向シアが存在する場合にはそれを明瞭に示した（図 4）。更に、高層ゾンデデータと比較した境界層レーダーの風向風速の検証では良い結果を得た。

※なお、本経常研究では、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明」の 1.3 GHz ウィンドプロファイラーのデータを使用させていただいた。

研究成果の要約

以下の成果を得た。

- (1) 複合リモートセンサーを用いた物理量抽出アルゴリズムの開発、それを用いた大気現象の解析手法の開発、及び、同時観測データを用いた開発結果の検証

ウィンドプロファイラーで観測した受信波のドップラースペクトラムから、降水時に雨滴の粒径分布の鉛直分布を非線形最小自乗法により求めるプログラムを開発した。このプログラムを実際の降水雲のデータに適用し、観測例がほとんど無かった、降水粒子の分裂の様子をとらえることができた。粒径分布の情報は、降水雲中での微物理過程の解明、気象レーダーによる降水強度推定精度向上に有効と考えられる。

ウィンドプロファイラーの降水時の水平風推定の精度向上のため、降水粒径分布の三次モーメント (skewness) を用いた補正手法を開発し、適用した実際の対流性降水の事例について良好な結果を得た。

ウィンドプロファイラー、RASS 等を用いて、局地前線や陸風による重力流、北陸不連続線、線状降水系等の解析を実施し、境界層レーダー等の測器の複合利用が、メソスケール現象の構造を解析に有効であることを示した。

衛星搭載機器による可視・赤外放射計、ミリ波レーダーを組み合わせ、雲と降水を識別するアルゴリズムの開発を行った。

ウィンドプロファイラーの受信電力のデータから、境界層レーダーを用いて湿度（あるいは比湿 q）を抽出する方法の改良・開発を行った。特に、日中の境界層への適用可能な手法を開発し、ゾンデ観測データにより検証し、良く一致していることを示した。

- (2) 1.3 GHz 帯ウィンドプロファイラー（境界層レーダー）の観測性能の検証

境界層レーダーの検証のための基本的なツールを作成した。

ゾンデ及び鉄塔を用いた比較検証を行った。その結果、バイアス、標準偏差とも小さいこと（風速差

2. 研究報告

経常研究（基礎研究費：気象衛星・観測システム研究部）

で 0.3 m/s 程度、標準偏差も 1.1～1.8 m/s 程度以下）が判った。

不特定のクラッターノイズの影響を除去できる、新しいドップラースペクトルのモーメント（ドップラー速度）の推定法をニューラルネットワークの手法をベースに開発した。実データに適用し、良好な結果を得た。

今後に残された問題点

本経常計画は、各種のリモートセンサーのデータを複合して利用することで、データ利用の一層の高度化を可能とすることを目的とした。研究期間内には、主としてウィンドプロファイラー（境界層レーダーを含む）を核とした研究を行い一定の成果を得ることができた。しかし、各種のセンサーが複合的な利用の点、大気乱流量などの物理量の抽出はできていないものがある。

研究成果の活用に対する意見

開発された手法の中には、ウィンドプロファイラーによる風推定精度向上のためのアルゴリズムや大気中の水蒸気量の推定を可能とするアルゴリズムなど、数値予報等への波及効果も想定されるなど、将来的に気象業務への応用が可能である。なお、気象庁で平成 11 年度の WINDAS の導入際して、本経常研究での知見を活かした技術的支援ができた。

成果発表状況

- ・論文発表：5 件
- ・口頭発表：32 件

取得した知的財産（特許、実用新案など）

なし

成果発表一覧

（論文）

- Kobayashi, T., K. Masuda, A. Uchiyama, 1999 : Enhanced visible radiance near clouds in the OTCS measurements, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 12, 218-221
- Kobayashi, T., K. Masuda, M. Sasaki, 2000 : Monte Carlo simulation of enhanced visible radiance in clear-air satellite fields of view near clouds, American Geophysical Union, *Journal of Geophysical Research*
- Kobayashi, T., A. Adachi, 2002 : Measurements of raindrop breakup by using UHF wind profiler, American Geophysical Union, *Geophysical Research Letters*, 28, 4071-4074
- 笹岡雅宏, 2003 : 集合化アルゴリズムを用いた境界層レーダーの風観測推定精度の改善, 日本気象学会, 天気, 50, 161-174
- Adachi, A., T. Kobayashi, T. Kato, 2004 : Dual wind profiler observation of a line-shaped convective system in southern Kyushu, Japan, Meteorological Society of Japan, *J. Met. Soc. Japan*, 82.

（口頭発表）

- 小林隆久, 足立アホロ, 福田正人, 1999 : ウィンドプロファイラーによる雨滴 break up の観測, 平成 11 年度日本気象学会春季大会
- 足立アホロ, 福田正人, 小林隆久, 1999 : 梅雨前線の観測における境界層レーダーの利用, 九州における梅雨特別観測に関するワークショップ
- 足立アホロ, 小林隆久, 1999 : 重力流によるメソ寒冷前線の解析, 平成 11 年度日本気象学会秋季大会
- Kobayashi, T., A. Adachi, K. Masuda, 2000 : A potential of cloud profiling radar for measurements of cloud and precipitation, The 1st International Workshop on Spaceborne cloud profiling radar
- Adachi, A., T. Kobayashi, 2000 : Radar wind profiler with RASS observation of gravity current, 9th International Workshop on technical and scientific aspects of MST Radar combined with COST-76 final profiler workshop
- 足立アホロ, 小林隆久, 2000 : 境界層レーダーによる降雨の RHI 観測手法の開発, 平成 12 年度日本気象学会春季大会
- 福田正人, 2000 : L バンド境界層レーダー観測による Cn2 の季節変化, 平成 12 年度日本気象学会春季大会
- 小林隆久, 足立アホロ, 2000 : ウィンドプロファイラーによる対流性降水中の雨滴サイズの観測, 平成 12 年度日本気象学会秋季大会
- 小林隆久, 2000 : 雲レーダーを用いた降水の観測ポテンシャル, 日本リモートセンシング学会第 28 回学術講演
- 小林隆久, 足立アホロ, 2001 : 境界層レーダーによる風向・風速観測結果の検証, 平成 13 年度日本気象学会春季大会
- 足立アホロ, 小林隆久, 2001 : 境界層レーダーによる風向・北陸不連続線の観測, 平成 13 年度日本気象学会春季大会
- Adachi, A., T. Kobayashi, 2001 : RHI observation of precipitation with boundary layer wind profiler, 30th Conference on Radar Meteorology
- Kobayashi, T., A. Adachi, 2001 : UHF wind profiler technique for measurement of raindrop breakup, IAMAS2001
- 足立アホロ, 2001 : 境界層レーダーにおける線状降水系の観測, 気象擾乱に関する研究集会
- 小林隆久, 足立アホロ, 笹岡雅宏, 2001 : 降水時におけるウィンドプロファイラーの風観測改善手法, 平成 13 年度日本気象学会秋季大会
- 小林隆久, 2001 : UHF ウィンドプロファイラーによる TRMM PR の検証, TRMMPI 研究成果中間報告会
- 小林隆久, 足立アホロ, 笹岡雅宏, 2002 : ウィンドプロファイラーのポテンシャル, 平成 14 年度日本気象学会春季大会
- 足立アホロ, 小林隆久, 2002 : 陸風による重力流の構造, 平成 14 年度日本気象学会春季大会
- 笹岡雅宏, 小林隆久, 2002 : モーメント法の改良による境界層レーダーの風観測手法, 平成 14 年度日本気象

学会秋季大会

笹岡雅宏, 小林隆久, 2002 : ファジィ理論を用いた境界層レーダー・データの品質管理, 平成 14 年度日本気象学会秋季大会

花房龍男, 小林隆久, 2002 : ウィンドプロファイラーの観測値について, 平成 14 年度日本気象学会秋季大会

Adachi, A., T. Kobayashi, T. Kato, 2002 : An observation of a line-shaped convective cloud system with boundary layer wind profiler, 1st COST 720 workshop

Kobayashi, T., M. Sasaoka, 2002 : Raindrop size retrieval using UHF wind profiler for TRMM PR validation, TRMM International Science Conference

Kobayashi, T., A. Adachi, Y. Ishimoto, 2002 : Retrieval of drizzling cloud properties from radar and passive multi-spectral radiometer, 2nd International Workshop on Spaceborne cloud profiling radar/lidar

小林隆久, 足立アホロ, 増田一彦, 2002 : ミリ波レーダー, 放射計, プロファイラーによる drizzling cloud の複合的観測, 平成 14 年度日本気象学会秋季大会

足立アホロ, 2002 : ウィンドプロファイラーによる気象現象の解明, 第 1 回英弘シンポジウム「リモートセンシングによる気象観測」

小林隆久, 2002 : UHF ウィンドプロファイラーによる TRMM PR の検証, TRMM 研究成果中間報告会

Adachi, A., 2003 : Wind profiler and tower observation of gravity current and related solitary wave, 10th International Workshop on technical and scientific aspects of MST Radar

Sasaoka, M., 2003 : A grouping algorithm for estimating wind speed in Doppler spectra, 31st Conference on Radar Meteorology

Kobayashi, T., M. Sasaoka, T. Adachi, 2003 : Evaluation of TRMM PR estimate using profiler measurements of raindrop size distribution, 31st Conference on Radar Meteorology

笹岡雅宏, 2003 : エントレインメント速度と水蒸気鉛直フラックスの推定, 平成 15 年度日本気象学会春季大会

笹岡雅宏, 2003 : 対流境界層における水蒸気プロファイルの推定, 平成 15 年度日本気象学会秋季大会

(講演)

小林隆久, 1999 : 大気放射過程における雲, 地球・大気系の放射過程とリモートセンシングに関するセミナー

(出版)

小林隆久, 2000 : 可視, 近赤外域における大気～地表面放射伝達 (不均質雲), 日本リモートセンシング学会, 日本リモートセンシング学会誌.

小林隆久編集・執筆, 足立アホロ, 笹岡雅宏分担執筆, 2004 : ウィンドプロファイラー, 日本気象学会, 気象研究ノート第 205 号

地殻及びマントルのダイナミクス

研究期間：平成 13 年度～平成 15 年度

研究代表者：高山寛美（地震火山研究部第一研究室長）

研究担当者：吉田康宏、山本哲也、山崎 明、神定健二¹⁾（地震火山研究部）

研究の目的

地殻の構造・物性およびダイナミクスが地震発生、火山噴火に密接に関係することは議論されているが、その詳細は明らかではない。地殻のダイナミクスにはプレートおよびマントルのダイナミクス、特に水の存在が大きく寄与することも明らかであるが、その詳細も解明されているとはいえない。国内に高密度に展開された強震計や高感度地震観測網、プレートサブダクション域である日本やインドネシアおよび海洋域である南鳥島や南太平洋に展開された広帯域地震観測網のデータから、これらの地域の地殻および上部マントルの詳細を解明することにより、またサブダクションに伴って取り込まれる水の存在を調査することにより、マントルダイナミクスおよび地殻・上部マントルでの地震発生、火山噴火機構の解明を試みる。

研究の方法

国内の地震観測網、南鳥島および北西太平洋の広帯域地震観測網データや地球電磁氣的観測データをコンパイルし、主として地震の実体波解析から、サブダクションプレート境界、マントル遷移層から地殻内にいたる物性およびダイナミクスを解明する。コンパイルデータを用いて、レシーバ関数法、エンベローブ解析法や実体波の走時解析法を適用して、地殻および上部マントルの詳細構造を明らかにする。

研究の結果

コンパイルデータから、実体波 P についてのレシーバ関数を求めて地殻および上部マントルにおける地震波速度不連続面を求めた。サブダクションプレートが滞留する北西太平洋地域では、410 km マントル遷移層境界が浅く、660 km 境界が平均より深く求められた。つまり、この地域でのマントル遷移層の厚さが厚いことが確認された。

P 波コードのエンベローブ解析から、プレートサブダクション地域である日本及び西太平洋地域の上部マントルに不均質性の存在することが明らかになった。

Hi-net に併設された 500 点以上の傾斜計に記録された ScS 波多重反射データの解析から、日本列島に沈み込むスラブと 410 km および 660 km マントル不連続面の分布を求め、西南日本下では 410 km 不連続面の深さはスラブの中央で約 15 km 上昇するとともに、振幅 20-30 km の短波長の凸凹があることがわかった。410 km 不連続面上の凸凹は滞留するスラブの組成やダイナミクスと密接な関係があることを示唆している。

南鳥島における地磁気観測値の長周期変化を調査するために必要な補正が、センサー温度については $-1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ 、筐体温度については $-0.1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ 程度であることがわかった。

研究成果の要約

国内の地震観測網、南鳥島および北西太平洋の広帯域地震観測網データや地球電磁氣的観測データをコンパイルした。

コンパイルデータにレシーバ関数解析および走時解析を適用して、西南日本の地殻底部の深さやマントル遷移層 410 km, 660 km の深さ分布を求めた。

P 波コードのトランスバース成分の散乱強度を求め、日本列島を含む西太平洋地域の上部マントルの不均質性の空間分布を明らかにした。

Hi-net に併設された傾斜計および F-net に記録された ScS 波多重反射データの解析から、日本列島に沈み込むスラブと 410 km および 660 km マントル不連続面の分布を求めた。

南鳥島における地磁気観測値の長周期変化を調査するために必要な補正が、センサー温度については $-1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ 、筐体温度については $-0.1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ 程度であることがわかった。

1) 平成 13 年度～平成 14 年度

今後に残された問題点

地球内部の構造・物性・ダイナミクスを解明するためには地震波データを蓄積し、様々な解析手法を適用する事に大きく依存しなければならない。そのために本研究が行われた3年という機関は必ずしも十分とはいえない。幸いにも、近年日本国内には高性能の地震観測装置が高密度に設置され、様々なデータが蓄積されつつある。しかしながら、地球内部を全体的に考察するためには海域を含めた地表全体に広く設置された地震計による質の高いデータの蓄積が必要である。本研究の終了によって、気象研究所による南鳥島での観測は本年度で終了するが、引き続き観測は継続すべきと考える。

研究成果の活用に対する意見

南鳥島での地震・地磁気観測は順調に実施された。それを含む国内外のデータに基づいて種々の手法を用いて地殻及びマントルの構造を推定し、その不均質性を明らかにするとともに、水の存在や物性との関連について考察が行われた。本研究は地殻活動の原因を地表からマントルまでのダイナミクスの中で捉えようとするものであり、今後の発展が大いに期待される。データの蓄積と解析手法の開発によって構造の推定精度の向上が期待され、地震発生や火山噴火との関連も議論できるようになると考えられる。本研究の終了によって、気象研究所による南鳥島での観測は本年度で終了するが、地震火山業務の中での将来の役割等も考慮すると、観測が継続されるよう方策がとられることが望ましい。

成果発表状況

- ・論文発表件数 2件
- ・口頭発表件数 6件

取得した知的財産（特許、実用新案など）

なし

成果発表一覧

（論文）

T. Nishimura, K. Yoshimoto, T. Ohtaki, K. Kanjo, I. Purwana, 2002 : Spatial distribution of lateral heterogeneity in the upper mantle around the western Pacific region as inferred from analyses of transverse component of teleseismic P-coda, AGU, *Geophys. Res. Lett.*

Tono, Y., T. Kunugi, Y. Fukao, S. Tsuboi, K. Kanjo, K. Kasahara, J. Tromp, and D. Komatitsch 2004 : Contortion of the 410- and 660-km boundaries beneath the Japanese island. *Nature*

（口頭発表）

山崎 明, 神定健二, 吉田明夫, 2002 : レシーバ関数法による東海地方の地殻・上部マントル構造, 地球惑星科学関連学会合同大会

西村太志, 吉本和生, 神定健二, 大滝壽樹, I. Purwana, 2002 : 遠地 P コーダ波のエンベロープインバージョンから推定される西太平洋地域の上部マントルの不均質構造, 地球惑星科学関連学会合同大会

山崎 明, 神定健二, 吉田明夫, 2002 : レシーバ関数法による東海地方の地殻・上部マントルの構造, 地球惑星科学関連学会合同大会

西村太志, 吉本和生, 神定健二, 大滝壽樹, Ibnu Purwana, 2002 : 遠地 P コーダ波のエンベロープインバージョンから推定される西太平洋地域の上部マントルの不均質構造, 地球惑星科学関連学会合同大会

東野陽子, 功刀 卓, 深尾良夫, 坪井誠司, 神定健二, 笠原敬司, Jeroen Tromp, Dimitri Komatitsch, 2003 : 日本列島下に沈み込むスラブと 410 km および 660 km マントル不連続面の分布, 平成 15 年度日本地震学会秋季大会

神定健二, 吉田康宏, 山本哲也, 山崎 明, 高山寛美, 2003 : 地震波が示すマントル遷移層の厚さ, 上部マントルの不均質および地殻底部の構造, 平成 15 年度気象研究所研究成果発表会

地震発生機構と活動推移に関する基礎的研究

研究期間：平成 11 年度～平成 15 年度

研究代表者：石川有三（地震火山研究部第二研究室長）

研究担当者：吉田康宏、青木 元¹⁾、山崎 明²⁾、干場充之³⁾、原田智史⁴⁾、上垣内修⁵⁾（地震火山研究部）

研究の全体目的

本研究では、大地震の発生までに至る物理過程の解明、地震の破壊過程の解析、地震活動推移の評価手法の開発をはかる。平成 11 年度から始まった第 8 次地震予知計画の立案にあたって全国の地震研究者が議論し提案したものの中に、地震発生に至る全課程の物理的解明の研究という項目がある。この研究はその要請に応える内容を取り込んだものである。

また、日本では被害地震や群発地震などの例を出すまでもなく地震予知に対する社会的な要望は特に大きく、そのための基礎的研究として本研究は地震発生とその活動推移の解明を目指すものである。

研究の方法

既存の国内外の地震データを用いて地震活動や震源過程と活断層、重力分布、速度構造、地震波減衰構造、応力場などの地球物理データとの関連性を解明し、地震発生を支配する要素を調べる。また、地震活動についても時系列評価を行い、地震活動の推移を客観的に評価する手法を改良・開発する。このため必要に応じて、現地調査や地震観測などを実施する。

地震活動と活断層、重力異常の分布、地震波速度構造及び地震波減衰構造などの地殻構造がどのような関係を持っているかを検証する。その後地震活動と地殻構造の関連性を説明するようなモデルの構築を試みる。また、地震活動の時間的、空間的な変化を客観的に評価する手法の開発改良を行う。

今日までになされた震源過程の解析手法や解析結果について資料を収集し、解析方法の検討を行う。次に震源過程と地殻構造の関連性を明らかにするために地震断層面上のすべり量分布などから破壊強度や応力降下量分布などのその場の物理量を推定する手法を開発する。その後、破壊強度分布など実際の地震波形データを用いて求められた物理量と地殻構造の関連性を求める。

既存の観測網などから得られた地震波形データを用い、屈折波、反射波などの走時や振幅を基に不連続面などの形状を推定する。また地震波の散乱および減衰の度合いから地殻及びマントル上部内の不均質構造の推定を試みる。

研究の結果

地震活動と地殻構造、地殻内地震の震源過程については 2000 年 5 月下旬から多発した三宅島、神津島近海の地震を対象とした。活動移動や時間的活動度の変化を調べたところ、地震活動の移動が見られた。個々に群をなす地震活動の空間的水平移動速度は約 0.4～1.3 km/h であることがわかった。また、群的活動の水平変位も見られ、この速度は 0.1 km/h であった。今回の地震活動のパターンはこの地域を支配している NE-SW 方向の広域応力場が作り出したと考えると説明が付き、三宅島の下から上昇してきたマグマの西方移動によって下方のマグマが北西へ吸引されることによって引き起こされたという説を提出した。過去のフィリピン海プレート北端部の地震活動から NE-SW の張力歪は 1990 年頃から蓄積されたことを明らかにした。一方この活動が始まってからにより関東地方東部から東海地域を震源とする地震が増えてきており、神津島地域の張力場が解放されることによって東海地域の圧縮歪が高まったと思われる。このように地震活動から歪場を推定し、その後の地震活動予測ができることを明らかにした。

地震発生場の特徴を明らかにするため、各種地球物理データと震源分布の関係・特徴を調べてきた。まず地殻の熱構造と震源分布を比較を行った。

地殻の熱構造は地震の発生場所と密接に関連していると思われる。過去の研究において地震発生層の厚さは地殻熱流量の大きさと逆相関があるということが明らかになってきたが、定量的な議論をした研究は少ない。そこで東北地方の震源の水平分布ではなく鉛直分布の特徴と地殻熱流量・地温勾配との関係を調べた。図 1 は東北地方の脊梁地帯を南北に切り出し、地殻熱流量、地温勾配のデータに対して、震源の深さ分布の空間的变化を見たものである。（最上段の△は火山の位置を示す）震源の深さ分布が、地温勾配に対応していることがはっきり分かる。もう少し、定量的に見ると、地表から数えて全体の 90% の地震が起きている地震層の深さで

は一部高地殻熱流量地域を除いて温度が 200°C から 500°C に対応している。これは、地殻深部で岩石が脆性破壊条件から外れ塑性変形を始める温度にはほぼ対応している。以上のことより地震発生層の厚さは地温条件によって決まっていることが明らかになった。

次に活断層と地震活動の比較を行った。従来は地震活動と密接に関係してくる地殻構造の代表格として活断層が挙げられていた。しかし地殻内震源分布と活断層の位置についてはこれまで多くの研究がなされ、M7 級の地殻内地震であっても必ずしも明瞭な活断層が対応しているわけではないことが示されている。実際に解析を行った結果、地震活動の特性を知るには地表に現れている活断層を評価しては不十分であることがわかった。

内陸大地震発生後の周辺の大規模地震の発生状況を続発性と拡散性に焦点を当てて 1926 年以降の気象庁カタログを調査した。M5 クラス以上の地震に注目すると以下の 3 つの特徴がわかった。内陸大地震の周辺 50 km 以内では直後 5 年間の地震発生率が高い、50~100 km の領域では直後より 5~10 年後のほうが活発化している、10 km/年程度で地震活動が拡散している。これは応力場の拡散によるものと考えられる。また、1500 年以降の 500 年間の日本内陸の地震活動を調べたところ、1891 年濃尾地震の前約 20 年間、中部地方を中心にその周辺域まで相当に広域で地震活動が低下したことがわかった。以上の事実は地震活動推移を評価する上での重要な知見である。一方 M3 以下の微小地震について気象庁 M の再評価を行った結果、数にして 5% 程度地震が M が 0.1 程度大きく決まっていることがわかった。これは活動評価を行う上で M 再調査の必要性を示したものと見える。

地震時における破壊量の分布はその周辺の地殻構造の影響を強く受けてきていると言われている。そこで 2000 年神津島近海で起きた地震のうち、M6 以上の 3 個のイベントについて加速度計の記録を用いて震源過程のインバージョンを行い、これらの地震が海洋科学技術センターによって行われた構造探査と海底地形調査の結果とどのような関係があるかを調べた。得られた断層面上のすべり量分布は震源付近に大きく、破壊が北西から南東に伝播したことがわかった。また、構造探査によってこの海域では顕著な反射面が同定されたが、すべり量分布が大きい地域の北西端でこの反射面が終わっており、海底地形調査では亀裂が発見された。以上のことより、地震による破壊域は構造が不連続になる場所で止まっており、それより北西の神津島側には広がっていないことが明らかになった。つまり構造の不連続がある場所では応力変化が伝わりにくく、地震破壊伝播のバリアーになっている。上のことは地殻構造を明らかにすれば将来その地域で起こる地震の破壊様式をある程度推定できる可能性を示している。

上の解析で用いた震源過程インバージョンの方法を改良し、地震のメカニズム解が時間変化する場合にも適用できるようにした。この解析によって、メカニズム解から地震の主応力軸を求めることができるということより、震源においてどのような応力変化があったかを明らかにすることができ、地震発生場の性質を知る上で大切な情報を与えてくれる。開発したプログラムを 2002 年 8 月に八丈島で起きた火山性の低周波地震に適用して解析を行い、体積変化を伴う減衰振動であることを明らかにした。

近年技術の発展により、GPS でタイムスケールが数年の地殻変動から数秒の地震時の変動まで捉えることが可能になった。そこで GPS データを高速サンプリング (20Hz) し地震計の記録と比較することにより、短周期においても GPS が精度良いデータを取得できるかどうかを検証した。起震車の天井に GPS 受信機と比較のためのサーボ型加速度計及び固有周期 1 秒の強震型速度計を設置し、サンプリング周波数 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz と幾つかの場合を試した。実験の結果、いずれのサンプリング周波数でも水平成分については約 1 cm 以上の変位があると GPS で地震計と遜色ない記録が得られることがわかった。しかしながら上下成分の場合はノイズレベルが水平成分の数倍あるので 3~4 cm の変位がないとノイズの中に信号が隠れてしまう。ただし 20 Hz サンプリングにすると受信衛星の数が減少した時にデータの欠落を生じることがわかった。また、フーリエ変換をしてスペクトルを比較したところ、周期が 0.5 秒より短いところでは GPS データのノイズレベルが地震計に比べて大きくなっていることがわかった。以上のことより変位が 1 cm を超えるような地震については GSP を変位地震計のかわりに使用することが可能であることがわかった。但し、周期 0.5 秒より短周期の部分についてはノイズレベルが高いので信頼度はかなり低くなる。これは GPS 受信機のみで年単位の変動から周期 1 秒の地震波までかなり広い周期帯域を記録できることを示しており、地殻変動、スロースリップ、地震波すべての帯域をカバーできることになる。

地殻構造の研究では地震波の散乱と減水の度合いから地殻及びマントル上部の不均質構造の推定を試みた。まず地震波の散乱および減衰の度合いを求める方法に改良を加えた。これまでの地震波の散乱および減衰を求める方法では、地震波速度が空間的に一様であると仮定せざるをえなかったが、本研究により速度構造に深さ依存性がある場合のも適応可能になった。この方法を日本と同様のプレート沈み込み帯であるチリのデータに

適用したところ、地殻および上部マントルでは吸収は散乱と同程度か、あるいは大きいことがわかった。この結果は、定性的には地震波速度が空間的に様な構造をしていると仮定した場合と同様の結果であるが、仮定する速度構造によって散乱減衰や吸収の定量的な見積もりは影響を受けることが示された。

マグネットテロリック法（MT法）により、南極大陸地下数10 kmまでの比抵抗構造を明らかにした。地殻比抵抗は地震波速度と並んで地殻の構造を与える基本的物性であり、速度構造とは独立に求まり、異なる物性から地殻構造を捉えることができる意味において重要である。近年、地震発生の際において地殻中の水の関与がクローズアップされてきているが、比抵抗は水に敏感な物性であることから、地殻の比抵抗構造とそのモニタリングが注目されている。他方、MT探査を世界各地で行い、さまざまな地域での地殻比抵抗構造を求めておくことは、地球科学の進展の上で重要なテーマとなっている。実際にMT探査を行ったのは東南極アムンゼン湾の東縁に位置するリーセルラルセン山周辺である。これは南のアダムスフィヨルドや西のアムンゼン湾等の海域から数キロメートルの距離にあり、これら海域の影響を強く受けている可能性がある。海洋の影響を推定するため調査地域の周辺海域の海深をモデリングし、陸と海の比抵抗コントラストで3次元MTのフォワード計算を行い、観測地点周辺での周期0.01秒から100秒までの電磁レスポンスを計算した。その結果は海洋の影響が非常に大きいことを示している。今後4方を海で囲まれている日本において探査を行うために注意しておかなくてはならないことである。解析結果、ナピア岩体の大局的な比抵抗構造は、地下8 kmまでの高比抵抗層、8 km～30 kmの低比抵抗層、30 km以深の高比抵抗層の3層構造になっているものと推定された。このような地殻上部が高比抵抗で地殻中部に低比抵抗層が出現するような構造は北米などの安定大陸地殻においてしばしば見られる構造で、原因としてコンラッド面上に存在する水の影響であろうと解釈されている。

研究成果の要約

2000年に起きた神津島近海群発地震の活動推移を調べたところ、地震活動の移動が見られた。これはNE-SW方向に張力が働いている広域応力場を考えれば説明がつくことを明らかにした。つまり地震活動の推移から応力場の推定ができるということがわかった。また、地震発生場の特徴を明らかにするために地震活動と地殻の熱構造の関係を東北地方について調べた。その結果、地震発生層のだいたいの下限は地温が200°C～500°Cに当たっていることを明らかにした。これは岩石が脆性から塑性に移る温度を示しており、地震の破壊様式の物理を考察していく上で重要な情報であると思われる。地震発生時の拡散性を調べ、大地震が起きた後の地震活動の拡散は10 km/年であることを明らかにした。この結果は応力が地下でどのように拡散していくかについての情報を与えてくれ、地震の発生予測をするモデルを作成する上で重要である。

2000年に起きた神津島近海群発地震でM6以上の地震について震源過程を求めたところ、破壊領域の端がちょうど地殻構造が不連続に変化している部分に対応していることを明らかにした。これは詳細な地殻構造を求めて、不連続面を同定できれば、地震破壊が停止する場所をある程度推定できることを示しており、大地震の強震動予測にも役立てることができるとと思われる。また、GPSが変位地震計として使えることを示し、GPS1台で地殻変動から地震波解析まで行えることが明らかになった。

地震波速度が深さ方向に変化している場合でも地殻内の散乱・減衰構造を求められるように改良し、プレート沈み込み帯で実際に解析を行った結果、散乱と減衰の度合いは同程度であることが明らかになった。南極においてMT探査を行い、地殻内部の比抵抗構造を求めた。また、海が解析結果に強い影響を与える可能性があることが明らかになった。

今後に残された問題点

活断層、熱構造、震源過程など個々の項目と地震活動の関係について研究を行ってきたが、まだ関連性を定量的に説明するモデルを構築するに至っていない。また、個々の項目だけに注目するのではなく、これらすべてを視野に入れた総合的なモデルを作成する必要がある。

M6クラス以上の地震についてはインバージョンにより震源過程を求めることができるようになり、断層面上の詳細なすべり量分布がわかるようになった。しかしながら地殻構造との直接比較をするためには、すべり量よりも断層面の強度分布を知る必要があるが、今回はそこまで解析する手法を開発できなかった。

ゆるやかに変化する地殻構造を求める手法は開発したが、これでは地震波速度不連続面など急激に構造が変化する面は同定できない。しかしながらプレート境界や断層面の詳細な位置を知るためには不連続面を同定する手法が必要となってくるので、今後の課題としたい。

研究成果の活用に対する意見

地震活動推移、震源過程、地殻構造など個々の課題について、地震発生に至るまでの物理過程を知る上で重要な結果が得られている。今後は今までの結果を個々にみるのではなく、全体として整合性のとれるモデルが構築できるように解析を進めて欲しい。

成果発表状況（研究期間を通じた集計値）

- ・論文発表件数 15 件
- ・口頭発表件数 41 件

取得した知的財産（特許、実用新案など）

なし

成果発表一覧

（論文）

- T. Sato, G. Fujie, S. Koresawa, J. Kasahara, K. Tanaka, S. Honda, T. Yokota, K. Nakamura, H. Naito, Y. Ishikawa, T. Hirasawa, 1999 : Seismic observations at a seismic gap in the eastern margin of the Japan Sea using ocean bottom seismometers, *Tectonophysics*, 302, 1-7.
- M. Hoshiya, 2000 : Large Fluctuation of Wave Amplitude Produced by Small Fluctuation of Velocity Structure, *Elsevier Science, Physics of Earth and Planetary Interiors*
- M. Hoshiya, A. Rietbrock, F. Scherbaum, H. Nakahara, C. Haberland, 2000 : Scattering Attenuation and Intrinsic Absorption Using Uniform and Depth Dependent Model —Application to Full Seismogram Envelope recorded in Northern Chile—, Kluwer Science, *Journal of Seismology*
- 石川有三, 2000 : 地震活動と火山噴火のテクトニクス, 月刊地球
- 石川有三, 高橋道夫, 石原和彦, 2001 : 韓国気象局地震観測データを用いた気象庁震源の改善, 験震時報, 65 巻, 154-157
- 石川有三, 2002 : 気象庁地震観測網と処理システムの変遷, 日本地震学会ニュースレター, vol 13, No 5, 30-33
- 吉田康宏, 神定健二, 原田智史, 藤原健治, 大滝壽樹, 田中明子, 金嶋 聡, 末次大輔, 神谷眞一郎, 石原靖, 竹中博士, 齊田智治, 藤井雄士郎, 2001 : 広帯域地震計設置のための埋設法の比較観測, 地震 2, 54 巻, 9-16
- M. Funaki, P. Dolinsky, T. Matsuda, N. Ishikawa, A. Yamazaki, 2001 : Meta-BIF collected from the Mt. Riiser Larsen area, Amundsen Bay, *Polar Geoscience*
- P. Dolinsky, M. Funaki, A. Yamazaki, N. Ishikawa, T. Matsuda, 2001 : The results of magnetic survey at Mt. Riiser-Larsen, Amundsen Bay, Enderby Land, East Antarctica, by the 42nd Japanese Antarctic Research Expedition, *Polar Geoscience*
- M. Hoshiya, A. Rietbrock, F. Scherbaum, H. Nakahara, C. Haberland, 2001 : Scattering attenuation and intrinsic absorption in northern Chile using full seismogram envelope, *Journal of Seismology*, vol 5, 157-179
- 干場充之, 2001 : 輻射伝達理論およびモンテカルロシミュレーションによるコーダエンベロープの記述, 地震 2, 54 巻, 109-125
- 青木 元, 吉田明夫, 2002 : 内陸地震活動の統計的性質—活動期と静穏期及び大地震の続発性—, 地学雑誌, vol 111, 200-211
- 吉田明夫, 青木元, 大地震の前に日本海沿岸の広域に現れた地震活動の静穏化, 地学雑誌, vol 111, 212-221
- Tanaka, A. and Y. Ishikawa, 2002 : Temperature distribution and focal depth in the crust of the northeastern Japan, *Earth Planets Space*, 54, 1109-1113
- Hoshiya, M., Fluctuation of wave amplitude even when assuming convolution of source, path and site factors—Effect of rupture directivity—. *Phys. Earth Planet. Inter.*, in press

（口頭発表）

- 干場充之, 吉田康宏, 勝間田明男, 前田憲二, 石川有三, 1999 : 南関東地域で観測された S 波から推定される震源特性・伝搬経路特性および観測点近傍の増幅特性, 地球惑星科学関連学会合同大会
- 干場充之, A. RIETBROCK, F. SHERBAUM, 中原 恒, C. HABERLAND, 1999 : 深さ依存性を持つ構造での散乱減衰と内部減衰の分離推定—チリで観測された地震波形への適用—, 平成 11 年度日本地震学会秋季大会
- 吉田康宏, 干場充之, 石川有三, 1999 : GPS は変位地震計として使えるのか?, 平成 11 年度日本地震学会秋季大会
- 原田智史, 石川有三, 中村浩二, 藤原健治, 1999 : 緊急震源情報活用システムの開発 (その 2), 平成 11 年度日本地震学会秋季大会
- 中村恭之, 澁谷拓郎, 石川有三, 中村浩二, 1999 : 日本海における上部マントル地震波速度構造, 平成 11 年度日本地震学会秋季大会

- 吉田康宏, 2000 : 気象庁の CMT 解, 東京大学地震研究所「リアルタイム地震情報システムによる地震源及び強震動の研究」セミナー
- 原田智史, 石川有三, 中村浩二, 藤原健治, 2000 : 緊急震源情報活用システム, 東京大学地震研究所「リアルタイム地震情報システムによる地震源及び強震動の研究」セミナー
- 石川有三, 2000 : 三宅島・神津島・新島近海の地震とそのテクトニックな意味, 平成 12 年度日本地震学会秋季大会
- 青木 元, 吉田明夫, 2001 : 日本列島内陸部の地震活動の長期間にわたる変化, 平成 13 年度地球惑星科学関連学会合同大会
- Tsunami forecast and earthquake observation system in Japan, Yuzo Ishikawa, 2001 : Interna. WS “The recent trend for earthquake/tsunami observation and researches”
- 石川有三, 中村浩二, 2001 : 日本列島の応力場と歪場, 平成 13 年度日本地震学会秋季大会
- 宇平幸一, 吉田康宏, 小平秀一, 鶴 哲郎, 徐 垣, 2001 : 2000 年神津島近海の地震の震源過程について, 平成 13 年度日本地震学会秋季大会
- Tanaka, A., Y. Ishikawa, 2001 : Temperature distribution and focal depth in the crust of the northeastern Japan, International Symposium of slip and flow processes in and below the seismogenic region, 2001
- 石川有三, 2001 : 山陰地方の地震活動と地震空白域
- 石川有三, 2001 : 地震発生準備過程の物理と観測—最近の成果と今後の課題—
- 山崎 明, Peter Dolinsky, 船木 實, 松田高明, 石川尚人, 小川康雄, 2001 : リーセルラルセン山周辺地域での MT 探査, 第 21 回南極地学シンポジウム
- P. Dolinsky, M. Funaki, A. Yamazaki, N. Ishikawa, T. Matsuda, 2001 : The results of Magnetic Survey at Mt. Riiser—Larsen, Amundsen Bay, Enderby Land, 第 21 回南極地学シンポジウム
- 船木 實, 石川尚人, 松田高明, 山崎 明, Peter Dolinsky, 2001 : JARE42 による南極, アムンゼン湾, リーセルラルセン山地域の地学調査, 第 21 回南極地学シンポジウム
- 船木 實, Peter Dolinsky, 石川尚人, 松田高明, 山崎 明, 2001 : 南極, エンダービーランド, リーセルラルセン山地域の岩石の磁氣的性質, 第 21 回南極地学シンポジウム
- 松田高明, 船木 實, 石川尚人, 山崎 明, Peter Dolinsky, 2001 : 東南極リーセルラルセン山地域の磁鉄鉱含有層の産状 : 非堆積性起源の証拠, 第 21 回南極地学シンポジウム, 講演予稿集
- 石川有三, 2002 : 南関東のテクトニクスに関するコメント, 地震研究所共同利用・研究集会「関東周辺地域の地殻構造と強震動予測」
- 浜田信生, 吉川一光, 近藤さや, 鎌谷紀子, 明田川保, 松浦律子, 鈴木保典, 2002 : 気象庁震源カタログの延伸と部分改訂 (1923 年 8 月から 1964 年 12 月まで), 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 石川有三, 中村浩二, 2002 : 日本列島の応力場と歪場 その (2), 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 吉田康宏, 2002 : 東海地域で起きた地震の応力降下量, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 石川有三, 2002 : 東アジア地震データベースの構築 その (1), 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 青木 元, 吉田明夫, 2002 : 内陸大地震の続発性と拡散性, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 山崎 明, Peter Dolinsky, 船木 實, 石川尚人, 小川康雄, 2002 : 東南極リーセルラルセン山周辺における MT 探査, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- Funaki, A., Peter Dolinsky, N. Ishikawa, A. Yamazaki, 2002 : Meta-BIF collected from the Mt. Riiser-Larsen, Amundsen Bay, East Antarctica, 2002 Joint Meeting for Earth and Planetary Science
- 干場充之, 岩田知孝, 澤田純男, 2002 : 地震波エンベロープの統計的特徴の抽出, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- Hamada, N., 2002 : Recent development of earthquake monitoring in Japan, The second Kazakhstan-Japan workshop on destructive earthquake disaster prevention
- Hamada, N., 2002 : Importance of regional earthquake catalog in earthquake disaster preparedness, The second Kazakhstan—Japan workshop on destructive earthquake disaster prevention
- Ishikawa, Y., 2002 : Earthquake prediction in Japan, International Workshop on the earthquake monitoring and prediction in Cheju
- 山崎 明, 2002 : 東南極ナピア岩体の比抵抗構造, 第 22 回南極地学シンポジウム
- 山崎 明, 2002 : 東南極ナピア岩体の比抵抗構造, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会

2. 研究報告

経常研究（基礎研究費：地震火山研究部）

- 石川有三, 2002: 地震活動から見た活断層の問題点, 日本地震学会 2002 年秋季大会
西南日本地殻構造研究グループ 2002: 西南日本横断地殻構造探査, 日本地震学会 2002 年秋季大会
干場充之, 斉藤竜彦, 2002: 地震波の減衰, 散乱とエンベロープ, 日本地震学会 2002 年秋季大会
浜田信生, 2003: 気象庁の煤書き記録—記録の現状と今後—, 研究集会「南海地震の研究—古い地震波形記録の意義と保存—」
石川有三, 2003: 新しい沈み込み帯の提案, 日本地震学会 2003 年秋季大会
Aoki, G. and A. Yoshida, 2004: Decay and diffusion of enhanced seismicity after inland large shallow earthquake, IUGG 2003
本間基寛, 武尾 実, 吉田康宏, 西前祐司, 2003: 1994 年三陸はるか沖地震の初期破壊過程, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会

(報告)

- 石川有三, 2002: 中国チベット高原でマグニチュード 8 の巨大地震, なるふる, No. 30, p 3
高梨成子, 大西一嘉, 石川有三, 2002: 中国の地震防災対策, 月刊地球, vol 24, No. 8, 531-533
石川有三, 大西一嘉, 高梨成子, 2002: 中国の地殻活動観測網, 月刊地球, vol 24, No. 8, 561-567
高梨成子, 石川有三, 大西一嘉, 2002: 中国の地震予知と対応, 月刊地球, vol 24, No. 8, 568-575

(出版物)

- 石川有三, 2002: 秋田沖地震はいつ発生するか, アエラムック「地震がわかる」, p18-21
石川有三, 2002: 日本海東縁の地震活動から見た歪み集中帯, 151-165, 大竹・平・太田編, 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会

地震発生準備過程における地殻変動に関する研究

研究期間：平成 11 年度～平成 15 年度

研究代表者：吉川澄夫（地震火山研究部第三研究室長）

研究担当者：小林昭夫、山本剛靖（地震火山研究部）

研究の目的

地震発生に至るまでの準備過程の地殻活動に関する法則性を見いだすことにより、地殻活動の現況把握のための基礎的技術と地震予知のための地殻変動観測データ評価手法の高度化を図る。平成 10 年 8 月の測地学審議会の建議「地震予知のための新たな観測研究計画の推進」では、地震予知のための観測研究を推進することの必要性が認められ、地震発生に至る地殻活動の解明及び地殻活動モニタリングシステム高度化のための観測研究の必要性がうたわれている。

地震発生に至る各段階の法則性を見いだすためには、地震発生に至るまでの準備過程の地殻活動に関する総合的な把握と理解が必要である。このため地震発生前の地殻状態を長期的視野で把握し評価を行うための基礎的研究として、地震発生準備過程に関する理論的研究と地殻活動に関する観測的研究を併せて行っていく必要がある。

研究の方法

この研究では、数値実験を行い地震発生までの全過程に関する物理法則を把握すると共に地震発生までに観測されるべき地殻変動を予測・評価する。このような地殻変動を捕捉するための各種地殻変動観測（GPS、三成分歪計、二層式歪計など）に関する解析手法の向上をはかる。そして色々な地域における各種地殻変動観測の結果と予測・評価された地殻変動との比較により、現況把握を行うための基礎的技術の向上をはかる。

・地殻変動観測

小田原観測点における二層式歪、本庁湯河原体積歪観測点における地下水位・地下水温、笹神・敦賀・今津における三成分歪・傾斜の各観測を行い、解析手法の改良を行う。

・地殻変動データ解析

上記各観測点周辺の本庁・他機関の地殻変動データを総合的に解析し、各地域の地殻活動の現況把握を行う。

・地震発生準備過程の理論的解析

断層運動に関する法則性を定式化し数値実験を行うことによって、地震発生までの全過程において現れる変動を評価する。

研究の結果

小田原観測点における二層式歪計、本庁湯河原体積歪計観測点における地下水位・地下水温の各観測を行った。小田原二層式歪計は設置から 10 年以上経過し、上下の歪計が共に安定した挙動を示すようになった。この間の上下歪計観測値について潮汐解析を行い、それぞれの潮汐振幅と気圧応答係数及びその時間変化を調べた。歪計の安定化傾向に対応するような潮汐振幅と気圧係数の時間変化は見られなかったが、潮汐振幅は上部歪計の方が大きく、気圧応答係数は下部歪計の方が大きいという違いが見られた。3次元軸対称モデルを用いて有限要素解析を行い、歪計の水平・垂直応力場における歪感度（外部の歪変化に対する歪増幅率）と応力変化係数（外部の応力変化に対する歪変化の割合）は共に周辺媒質のヤング率によって大きく影響を受け、歪計周辺媒質のヤング率が大きいほど歪感度は大きく、応力変化係数は小さくなるという結果を得た。この結果から観測された二層式歪計の潮汐応答と気圧応答係数が周辺の岩盤の力学的性質の違いに起因することが推定された。また、下部歪計の方が早く安定化が進んだことが判り、設置深度を大きくすることが歪計の安定化や観測データの質の向上に貢献することが示された。

湯河原観測点における水位及び水温の観測値に見られる降水応答を解析した。水位変化に含まれている降水時の変化や季節変化は、累積降水量の長期トレンドを除去した残差成分の変化と概ね対応する。また、水温変化の年周的变化も降水による変化を表していると考えられる。特に水温の観測値に関しては、降水の影響を除去することにより平成 10 年頃からの上昇傾向が見いだされた。

平成 13 年 6 月から箱根付近で発生した群発地震活動に伴う歪変化が、小田原・湯河原両観測点において観

測された。図1の第1段と第2段に小田原と湯河原の歪計の歪変化を示す。両者とも地震活動（第4段）の開始に伴い顕著な膨張を示した後、活動が終息するに従って収縮に転じている。第3段に示した箱根を囲むGPS基線（裾野-小田原-湯河原）から求めた面積歪変化も同様の膨張を示す。膨張量は、小田原二層式歪計が上下とも約 0.3×10^{-6} strain、湯河原歪計が約 1×10^{-6} strain、GPS面積歪が約 3×10^{-6} strainであった。このように歪計とGPSとで観測された歪量が同程度の大きさを示した例はあまり知られておらず、特筆に値する。

新潟県笹神村、福井県敦賀市、滋賀県今津町において三成分歪・傾斜の観測を実施し、観測された歪データについて潮汐、気圧、降水、地下水との相関解析を行って、それらに対する応答を調べた。敦賀及び今津観測点の歪データについて観測期間を90日ごとに区切って潮汐解析を行い、M2、O1分潮の振幅と位相の時間変化について調べたところ、観測期間内に有意な変化は見られず、この間の観測が安定して行われていたことを確認した。敦賀観測点の歪データに見られる振幅 $0.1 \sim 0.6 \times 10^{-6}$ strainで数十日程度の時定数をもつ変動について調べたところ、降水量変化との対応が認められた。また、今津観測点の歪データに見られる振幅 $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ strainの年周期的な季節変動は地下水位変化との対応が認められた。これらの影響を除去して長期的な歪変化の傾向を調べた結果、広域的な歪場と調和的な歪が求められた。

国土地理院のGPS全国観測網（GEONET）の座標データは広く一般に公開されており、広域の地殻変動調査にとって極めて有用なデータとなっている。このGPS座標データには今のところ原因が明らかではない年周期的な季節変動が含まれており、1年より短い時間間隔で精密な地殻変動調査を行うことを難しくしている。この年周期的な季節変動の特徴について調べた。変動パターンを平成10～11年と平成13～14年のそれぞれの期間について求めて比較したところ、それぞれの振幅の間に明瞭な差が見いだされた。前者の期間に対して後者の期間には、南北座標成分で全体として南北方向に夏に伸び、冬に縮みとなる変化を示す一方、東西座標成分で全体として東西方向に夏に縮み、冬の伸びとなる変化を示すことが明らかになった。その振幅差の空間変化率を経緯度の1次式で近似して求めたところ、南北成分、東西成分とも約 0.2 mm/度であった。季節変動パターン変化の大きさが全国観測網全体にわたって系統的に変化しているという特徴から、この変化が実際の地殻変動によるものとは考えにくく、なんらかの観測・解析上の原因によるものと考えられる。このような変化を見いだしたことにより、この変化を考慮した補正を加えたGPSデータセットを作成して、より詳細な地殻変動調査を行うことを可能にした。

地下の断層運動によって周辺の地殻内や地表面上でどのような変動が生じるかということはある程度定式化されている。このことを利用することによって、逆に観測された地殻変動データから変動源を推定すること（インバージョン）ができる。この推定を容易に行えるようにするためのインバージョン用ソフトウェアを開発した。このソフトウェアは、変位データを入力量とし、設定された複数の点力源及び矩形断層のすべての未知のソースパラメータを推定する機能、及び断層運動のうちすべり分布を詳細に調べることのできる機能の2つを兼ね備える。さらに、このソフトウェアはインバージョンの実行に必要な各種パラメータの設定を簡便なユーザインタフェースで行ったり、観測値と計算値との比較などを即座に図示したりするなど、変動源の推定作業を支援する様々な機能を有する。以下では、このソフトウェアを、前述した箱根付近の群発地震に伴う地殻変動の解析に適用した例を示す。図2は、周辺のGPS観測点における変位観測値から変動源を求めたものである。震源最深部に置いた球状圧力源とその上部に置いた開口型クラックの重ね合わせによって観測値がほぼ説明できることを示している。図3は、得られた変動源から計算した周辺の歪変化分布を示しており、計算結果は小田原・湯河原両観測点で観測された $0.3 \sim 1 \times 10^{-6}$ strainの膨張と概ね整合していることが判り、本ソフトウェアの有効性が確認できた。

研究成果の要約

小田原二層式歪計によって観測された歪の潮汐・気圧応答の解析結果と有限要素法によるシミュレーションの結果との比較から、歪計周辺媒質の力学的性質が潮汐・気圧係数に対応していることを見いだした。また、その係数の時間変化から下部歪計の方が上部歪計より早く安定化したことが確認できた。湯河原体積歪計の観測孔内において水温観測を継続し、その降水応答を調べてデータの補正を行うことにより、長期の歪み変化傾向に対応すると見られる水温上昇傾向を見いだした。これらのデータ解析手法の改良により、平成13年夏の箱根付近の微小地震活動の際には、小田原二層式歪計と湯河原体積歪計でこれに伴う膨張変化を検出することができた。

笹神・敦賀・今津に設置した三成分歪計によって観測された歪について、潮汐、気圧、降水、地下水等に対する応答を詳しく調べた結果、このように比較的短い周期の現象に対する変動特性に関し重要な基礎データを取得することができた。

国土地理院のGPS観測データの精度について調査し、GPSデータに含まれている年周期的な季節変動の様相が平成12年頃を境に変化していること、その変化が全国的に系統性をもって分布していることを見いだした。この系統誤差を補正することで、より微小な地殻変動を検出できるようデータセットを作成した。

観測された地殻変動データから変動源の推定を理論的に行うソフトウェアの開発を行った。1つの手法は断層運動に関するすべてのパラメータを未知とするものであり、もう1つの手法は断層運動のうちすべりの分布を詳細に調べるものである。このソフトウェアは前出の箱根群発地震活動に伴って観測された地殻変動の解釈など、多くの実際例に適用された。

今後に残された問題点

地殻変動観測に及ぼす降水・地下水位変化の影響は、数日から数週間の周期帯の成分についてはある程度除去できるようになったものの、数週間から数ヶ月の周期帯の成分については必ずしも十分ではなく、様々な時間的特徴を有する地殻変動をより精密に検出するためには、引き続き地殻変動と地下水位を並行して観測し、この周期帯における相関解析を行っていくことが必要である。

GPSデータなどの他機関データを活用することは広域地殻変動を調べる上で不可欠であり、今後ともその活用手法について研究調査していく必要があるとともに、その活用のためには事前に十分な精度評価を行うことも依然として重要である。

地殻変動源の推定は、地震活動に伴うような先験的情報を得やすい事例ではパラメータの初期設定が容易であるが、地殻変動以外の現象が見られないような事例では推定に困難が伴う。今後はそのような事例に対しても適用可能な手法を開発する必要がある。

研究成果の活用に対する意見

本研究で得られた三成分歪計に関する知見は、本庁地震火山部と静岡県により東海地域において同型式の多成分歪計による観測を開始する際、機器の安定性向上や観測データの解析手法確立の面で非常に参考となった。GPSデータの精度向上は地殻変動を詳細に検討する上で必要不可欠なものである。その意味において本研究によりノイズ補正が行われたGPSデータセットは地震予知研究ばかりでなく一般の地球物理学上の研究を行う上でも有用なものとなることが期待される。地殻変動データから変動源を推定するソフトウェアは特別研究「地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究」を行う上で成果を上げたばかりでなく、地震防災対策強化地域判定委員打合せ会席上において東海スローイベントの状況を評価する上で現在も貢献している。

成果発表状況

- ・論文発表件数：2件
- ・口頭発表件数：18件

取得した知的財産

なし

成果発表一覧

（論文）

- 内藤宏人, 吉川澄夫, 1999 : 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, 日本地震学会, 地震 2, 第 52 巻 1 号
- S. Yoshikawa, T. Yamamoto, O. Kamigaichi, H. Naito, 2001 : Strain Measurement by Double Coaxial Bore hole Strainmeters at Odawara, Japan, The Geodetic Society of Japan, *J. Geod. Soc. Japan*, Vol. 47, No. 1

（口頭発表）

- 上垣内修, 内藤宏人, 山本剛靖, 吉川澄夫, 小久保一哉, 宮岡一樹, 1999 : 気象庁石井式歪計の応答特性解析, 日本地震学会 1999 年秋季大会
- 山本剛靖, 吉川澄夫, 吉田明夫, 1999 : 東海地域バックスリップ分布の考察, 日本地震学会 1999 年秋季大会
- 内藤宏人, 上垣内修, 山本剛靖, 吉川澄夫, 石川有三, 1999 : 地震空白域における地殻変動連続観測—近畿地方北部の長期トレンド—, 日本地震学会 1999 年秋季大会
- 吉川澄夫, 山本剛靖, 内藤宏人, 上垣内修, 1999 : 小田原 2 層式歪計に見られる最近の安定化傾向について, 日本地震学会 1999 年秋季大会
- 吉川澄夫, 山本剛靖, 上垣内修, 内藤宏人, 2000 : 神奈川県西部における最近の地殻活動について, 平成 12 年度地球惑星科学関連学会
- 小林昭夫, 吉田明夫, 砂 礼宏, 2000 : 検潮記録による 1946 年南海地震の余効変動, 平成 12 年度地球惑星科学関連学会
- 小林昭夫, 高山寛美, 吉田明夫, 2000 : 検潮記録から見た駿河湾周辺域の地殻変動, 平成 12 年度地球惑星科学関連学会
- H. Takayama, A. Kobayashi, A. Yoshida, 2000 : Change in the subsiding rate on the western coast of Suruga Bay and its relationships with seismicity change, 2000 Western Pacific Geophysics Meeting
- T. Yamamoto, O. Kamigaichi, H. Naito, S. Yoshikawa, Y. Ishikawa, 2000 : Strain Observations at Tsuruga and Imazu Stations, Northern Kinki District, Japan, The 14th International Symposium on Earth Tides
- S. Yoshikawa, T. Yamamoto, O. Kamigaichi, H. Naito, 2000 : Strain Measurement by Double Coaxial Borehole Strainmeters at Odawara, Japan, The 14th International Symposium on Earth Tides
- 小林昭夫, 山本剛靖, 吉川澄夫, 吉田明夫, 露木貴裕, 2000 : 三宅島・神津島近海の地震・火山活動に伴う東海地域の地殻変動, 平成 12 年度日本測地学会
- 山本剛靖, 吉川澄夫, 小林昭夫, 石川有三, 上垣内修, 内藤宏人, 2000 : 地震空白域における地殻変動連続観測—歪計の降水・地下水位変化応答—, 平成 12 年度日本測地学会
- 小林明夫, 山本剛靖, 吉川澄夫, 吉田明夫, 露木貴裕, 小山卓三, 2000 : 三宅島から新島・神津島近海の地震火山活動に伴う東海・南関東地域の地殻変動, 平成 12 年度日本地震学会
- 吉川澄夫, 山本剛靖, 小林昭夫, 内藤宏人, 島村英紀, 古屋逸夫, 二瓶信一, 小泉岳司, 2000 : 湯河原観測点の歪・地下水連続観測に見られる最近の変化傾向, 平成 12 年度日本地震学会
- 吉川澄夫, 山本剛靖, 小林昭夫, 2001 : 湯河原観測点の最近の水温と歪の変化傾向について, 平成 13 年度地球惑星科学関連合同大会
- 吉川澄夫, 小林昭夫, 山本剛靖, 2001 : 2001 年 6 月下旬からの箱根の地震活動と周辺観測点の歪・地下水変化, 日本地震学会 2001 年秋季大会
- 山本剛靖, 2002 : GEONET 座標データに見られる年周パターンの変化, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会
- 山本剛靖, 2003 : GEONET 座標データに見られる年周パターンの変化 (2), 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会

（報告）

- 気象研究所, 1999 : 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, 地震予知連絡会報第 62 巻

2. 研究報告

経常研究（基礎研究費：地震火山研究部）

- 気象研究所，1999：今津観測点石井式3成分歪計で観測された3月16日滋賀県北部の地震のコサイスミックスステップ，地震予知連絡会報第62巻
- 気象研究所，1999：小田原2層式歪計による地殻変動観測，地震予知連絡会報第62巻
- 気象研究所，1999：内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測，地震予知連絡会報第62巻
- 気象研究所，2000：小田原2層式歪計による地殻変動連続観測，地震予知連絡会報第64巻
- 気象研究所，2001：内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測，地震予知連絡会報第66巻
- 気象研究所，2001：箱根の微小地震活動（2001年6月～）に伴う歪変化，地震予知連絡会報第67巻
- 気象研究所，2002：内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測，地震予知連絡会報第68巻
- 気象研究所，2002：GEONET座標データの年周パターンの変化，地震予知連絡会報第68巻
- 気象研究所，2003：内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測，地震予知連絡会報第69巻

（出版物）

- 上垣内修，竹中潤，宮越憲明，小山卓三，吉川澄夫，小林昭夫，山本剛靖，2000：2000年6月26日からの三宅島～新島・神津島周辺の地震・火山活動と気象庁体積歪データ，月刊地球，22巻，11号
- 山本剛靖，2003：GEONET座標データの年周パターン変化と東海スローイベント解析に及ぼす影響，月刊地球号外41号

海水中の炭素循環に係る化学成分の動態に関する研究

研究期間：平成 11 年度～平成 15 年度

研究代表者：廣瀬勝己（地球化学研究部第二研究室長）

研究担当者：青山道夫、吉川久幸¹⁾、宮尾 孝²⁾、石井雅男、松枝秀和、時枝隆之、根本和宏³⁾（地球化学研究部）

研究の目的

温暖化を含む地球規模の環境変化の実態をとらえ、その原因を解明し、将来予測をすることは気象庁の重要な業務となっている。特に気候温暖化に係わる二酸化炭素は海洋内の物質循環によって調節されていると考えられるが、そのような諸過程に関する知識は断片的に知られているに過ぎない。海洋の炭素循環の中核を担う栄養塩に代表される親生物元素循環では、物理的循環に加え、海洋内部の生物地球化学的諸過程が深く関わっている。そのような諸過程を解明することを目的として、以下の方針に従って研究を推進する。

(1) 海水中の栄養塩の動態の研究

海水中の全炭酸、リン酸塩、硝酸塩の過去に得られたデータの評価、解析を行う。今後、数 10 年のスケールの分析値が比較可能となる海水を用いた栄養塩の標準物質の検討を行う。

(2) 海水中の微量化学成分の分析法の開発

微量金属元素と有機物との相互作用に関連した有機配位子の性質の解明を行う。また今後、海水中の物質変動の指標となる微量化学成分の分析法の開発を行う。

研究の方法

(1) 海水中の栄養塩の動態の研究

1-1 海水ベースの栄養塩標準の作成

海水中の栄養塩分析に関して、繰り返し精度 0.2% 以下、トレーサビリティ 1-2% 以下の目標を達成するために、海水ベース（媒体が同じにすることによって、操作を最少にすることにより標準試料としての安定性を確保できる）の標準の作成を行う。作成の基本は、有効な滅菌法の開発とクリーンルームでの操作からなる。滅菌法として、オートクレーブ、放射線照射、化学物質による滅菌が現実的な方法としてあるので、それぞれについて検討する。標準試料の品質の確認として、抜き取り検査による試料の均質性の確認、繰り返し精度の確認、時間変化の有無の確認が必要である。

1-2 栄養塩の鉛直分布を実現する単純なモデルの開発

生物地球化学過程のうち、栄養塩の生成と消滅のみを含む過程と、単純な物理過程から成る一次元モデルの開発を行う。さらに、モデルが適用可能海域を明らかにする。

1-3 海水中栄養塩データベースの活用

海水中栄養塩データベース（World Ocean Atlas、JMA data）を利用して、変動の範囲等を明らかにする。

(2) 海水中の微量化学成分の分析法の開発

海水の粒子状物質中の強い配位子の定量法の確立を行う。粒子状物質中の強い配位子濃度の時間空間変動の範囲を明らかにする。海水の粒子状物質中の強い配位子と相互作用する微量金属の種類と性質を明らかにする。さらに、海水の粒子状物質中の強い配位子の生態学的役割について考察を進める。

海水中の塩分の標準の各ロットについて精密測定を継続して実施する。

研究の結果

(1) 海水中の栄養塩の動態の研究

海洋中の栄養塩（硫酸塩、リン酸塩）の分布と変動については、比較的古くから研究されてきている。また、気象庁の海洋観測の重要な観測項目の一つでもある。これらの栄養塩は海洋の植物プランクトンによる一次生産に密接に関連しており、ひいては表層から深層への炭素の輸送を担う生物ポンプの駆動に重要な役割を果たすと考えられている。従って、海水中の栄養塩の時間変動や空間変動を明らかにし、その変動要因を解明することが求められている。しかし WOCE で得られた栄養塩の分析結果を評価したところ、同一

1) 平成 11 年度～平成 13 年度, 2) 平成 13 年度～平成 14 年度, 3) 平成 12 年度～平成 13 年度

海域の深層水の各観測間で分析値の有意の差が存在することが分かった。この原因は標準物質がないことに起因するとされた。従って、自然界で起こる変動を検出し解明するには、各観測について分析値のトレーサビリティを確保することが不可欠となっている。そのためには安定的な標準試料が必要であるが、海水を使用する必要があること、そのことから高度の滅菌が必要とされることなどの理由により、まだ信頼性のある標準試料は実現されていなかった。

本研究では、海水ベースの標準試料作成のため各種の滅菌法を検討した。滅菌法として、オートクレーブ、放射線照射、化学物質による滅菌が現実的な方法としてあるので、それぞれについて検討した結果、放射線照射は、効果的に海水中の微生物を分解することができるが、溶存有機物まで分解が進み、低濃度域の標準の作成ができない、化学物質は、それ自体が有毒であり取扱いが煩雑であり、標準液の廃棄処理は簡単ではないなどの不都合があることが判明した。したがって、最も単純なる過とオートクレーブ処理の組み合わせにより栄養塩標準試料を作成した。作製された海水標準試料について同一ロット内での均一性と4年以上の保存が可能であることを確認することができた。この方法で作成された海水ベースの試料が標準溶液の要件を満たすことについて目処がたった。さらに、標準試料として海洋学の分野に流通させるためには、多量の同一ロット試料（1ロット当たり、2000本）を作る必要がある。この点では、特性のオートクレーブ（100リットル以上のタンク中の海水を加圧加熱処理が可能）を有する関西総合環境センターの協力を得て、栄養塩標準試料の作成の目処がたった。この成果に基づき、多量の標準試料（5種類の異なる濃度について1ロット当たり200本）の作成し、各海洋気象台に標準試料を送付し分析を行った。さらに、分析結果の比較検討を行い、分析データの品質管理について標準物質の有効性を確認した。この結果、標準物質を分析時にもちいると、1-2%の範囲で各分析間のトレーサビリティの確保が可能なが分かった。この成果をもとに世界の定評のある分析機関へ標準試料を送付し国際相互検定を実施し、標準物質の値付けが可能であることを示すことができた。実際に、2003年に実施された「みらい」の航海に、栄養塩標準を活用して、現在世界で実現できる再高精度の栄養塩データを求めることができた。

簡単なモデルを用いて海水中の栄養塩の鉛直分布を支配している要因について解析しまとめた。基本的には、生物地球化学過程のうち、栄養塩の生成と消滅のみを含む過程と、物理過程として一定の湧昇速度から成る一次元モデルが黒潮再循環域で成立していることが分かった。この海域はメソスケール渦の存在で特徴付けられる。その成果として、栄養塩の鉛直分布から東経137度の測線について、移出フラックスを評価することができた。黒潮および黒潮再循環域は比較的高い炭素移出フラックスを示すが、北赤道海流域の炭素移出フラックスは極めて低いことが分かった。海洋の栄養塩データについて、検索、図化が可能になるように、全球でのデータベース化の作業を行った。

(2) 海水中の微量化学成分の分析法の開発

海水中の微量金属元素は、近年、生物生産と密接に関連している場合があることが分かってきた。例えば、表層で栄養塩が枯渇していないにもかかわらず、クロロフィル濃度が低い海域が存在し、そこでは微量金属の鉄濃度が制限因子になっていると考えられている。従って、海洋におけるこれらの微量成分の分布や変動を支配する要因の解明が求められている。これらの微量金属元素は配位子を接点として有機物と化学的に結合している可能性がある。海水中の溶存有機物ないし粒子状物質中で、金属イオンと相互作用し得る配位子の起源や化学的性質、生物地球化学的役割を解明することが重要な課題となっている。この配位子は酸性溶液でトリウムと選択的に反応することが分かっている。この性質を利用して、トリウムを用いて粒子状物質中の配位子濃度の定量を可能とした。

海水の粒子状物質中の配位子が、海水中でどのような金属元素と反応するかを調べた。その結果、粒子状物質中のトリウム、ウラン、プルトニウムと配位子濃度が良い相関を示すことが分かった。この相関が成立する条件は化学平衡論モデルに基づき説明することが可能であり、さらに各金属元素について条件安定度定数を推定することができた。

海水の粒子状物質中の配位子の役割として、極微量濃度の金属元素を効果的に結合でき海水中の生物の生金属の摂取に関連していることに加えて、カルシウムイオンを介在して会合体を形成するという仮説を提出した。この場合、粒子が小さいほど、会合体が形成され易くなることが推定される。

海水の粒子状物質に含まれる配位子の海域別の濃度分布を調べた。親潮海水中の有機配位子の分布を明らかにするために、気象庁凌風丸で採取した海水を採水、ろ過を行い、粒子状物質を採取した。粒子状物質に含まれる配位子濃度を測定した結果、表層で高く1000m以深ではほぼ一定の値を示すことが確認できた。海洋表層の粒子状物質に含まれる配位子濃度を測定した結果、亜熱帯域では濃度が低く、亜寒帯域で濃度が高いことが分かった。ただし、時間的には変動している可能性が高い。

海水の塩分の標準物質（標準海水）について、新規発売のロットについて精密測定を継続して行った。塩分標準海水については、1/1000の桁で変動があることが分かっているが、その原因が、ロット間のオフセットによるものか、時間による変化にあるのか不明であった。今までの、精密測定の結果、変動の原因が、ロット間のオフセットにあることを明らかにすることができた。そして、ロット間のオフセット表を作成した。このオフセット表を利用して補正すると、過去10年以上にわたる塩分データの変動が、塩分1/1000の精度で検出できることを明らかにできた。

研究成果の要約

海水中の栄養塩の時間的変動を検出するために栄養塩分析のトレーサビリティを確保する目的で、分析手法及び資料の収集に基づき、実海水を用いた標準物質を整備した。製造された栄養塩標準物質の品質評価をするため、実試験を行った。その結果、4年以上にわたり安定で、試料間のばらつきが目的精度内であることが確認できた。栄養塩の鉛直分布について栄養塩の変動解析に利用できるモデルを開発した。このモデルを利用して炭素の移出フラックスの空間分布を求めることができた。

海水の粒子状物質中に含まれる有機配位子が、トリウム、ウラン、プルトニウムなどと結合できることを明らかにした。有機配位子濃度が、これらの元素の粒子状物質中濃度を支配していることが分かった。

海水の粒子状物質中の有機配位子が、カルシウムイオンを介して粒子の結合に寄与するモデルを提案した。

海水の塩分の標準物質について、ロット間のオフセットがあることを明らかにした。オフセットを補正すると、過去10年以上にわたる塩分データの変動を、塩分1/1000で検出できる。

今後に残された問題点

海水を用いて栄養塩標準試料として1ロット当たり1000本まで、高品質で作成できるようになった。今後は、1ロット当たり2000本の商業ベースで作成可能にすることが求められている。値付けについては、国際相互比較を行い、値付けが可能であることが確認できた。この成果は、米国地球物理連合の海洋連合会で公表され、外国から高い評価を得られた。さらに、標準物質の商業ベース化の目処が付いた点は、予想以上の進展である。なお、商業ベースの試料について値付け及び成果の論文公表が、今後の課題である。

海水中の栄養塩の変動は、海洋生態系に直接影響を及ぼすことから、その変動の有無、変動機構の解明が求められている。今回確立した解析モデルを利用することによって、時間方向の栄養塩変動の検出が可能となることは、想定していた以上の成果である。今後は、特徴的な海域を選んで、栄養塩鉛直分布の時間方向の変動を調査する必要がある。

海水中の有機化合物のうち、有機配位子が海洋生態系で最も重要な役割を果たしている可能性が高いこと（必須微量元素の摂取、海洋生物体の大きさなど）を明らかにすることができた。今後は南太平洋などデータのない海域で、このような有機配位子がどのような空間分布をしているかの解明が求められている。

海水の塩分のオフセットテーブルについては高い評価が得られている。これに関連して、印刷された論文は、最近のネイチャーの論文にも引用された。今後も、新しいロットについてオフセットテーブルの確立が求められている。

研究成果の活用に対する意見

今回開発した海水を用いた栄養塩標準試料については、国際相互比較を行い、値付けが可能であることが確認できた。この成果は、外国からも高い評価を得ている。商業ベース化の目処が付いたので、国際的なプロジェクト等で、さらに使用実績を上げ、実用化に向けて努力して欲しい。また海水の塩分のオフセットテーブルについても、海外で高い評価を得ている。今後も、新しいロットについてオフセットテーブルを確立していくことが必要である。これらの成果は、海洋気象業務における西部北太平洋海域の海洋観測や国際的な観測プロジェクトにおいて、海洋における物質循環の解明や、海洋の長期変動に係わる観測研究に十分寄与するものである。

海水中の栄養塩の変動は、海洋生態系に直接影響を及ぼすことから、その変動の有無、変動機構の解明が求められている。今回確立した解析モデルを利用して、時間方向の変動を検出できるようになったこと。あるいは海水中の有機配位子が、海洋生態系で最も重要な役割を果たしている可能性が高いこと（必須微量元素の摂取、海洋生物体の大きさなど）を明らかにしたこと等は、より精緻な海洋物質循環モデルの構築に寄与すると考えられる。

成果発表状況

- ・論文発表：17件
- ・口頭発表：26件

取得した知的財産（特許、実用新案など）

なし

成果発表一覧

（論文）

- K. Hirose, E. Tanoue, 1999 : Strong organic ligands in marine organisms, *Fresenius J. Anal. Chem.*, 363, 531-533
- K. Hirose, 2000 : Strong Organic Ligands in Seawater : Peculiar Functional Groups in Oceanic Organic matter-Synthesis, *Dynamics and Characterization of Marine Organic matter*, 339-382
- T. Kawano, M. Aoyama, Y. Takatsuki, 2000 : Inconsistency in the conductivity of the standard KCl solution made from the different high-quality chemicals, *International WOCE Newsletter*, 40, 23-25
- 河野 健, 高槻 靖, 青山道夫, 2000 : 最近の IAPSO 標準海水の比較について, *海洋調査技術*, 12 (2), 49-55
- K. Hirose, E. Tanoue, 2001 : Strong ligands for thorium complexation in marine bacteria, *Marine Environmental Research*, 51, 95-112
- 河野 健, 高槻 靖, 今井 淳, 青山道夫, 2001 : 最近の標準海水の比較及びボトル型標準海水の品質について, *海洋調査技術*, 13 (2), 11-18.
- 河野 健, 高槻 靖, 青山道夫, 2002 : 塩化カリウム標準液のロット依存性—標準海水の初期オフセット成因について—, *海洋調査技術*, 14 (1), 1-9
- K. Hirose, M. Aoyama, 2003 : Chemical speciation of plutonium in seawater, *Analytical Bioanalytical Chemistry*, 372, 418-420, 2003.
- M. Aoyama, T.M. Joyce, T. Kawano, Y. Takatsuki, Standard seawater comparison up to P129, *Deep-Sea Research*, I, 49, 1103-1114
- K. Hirose, 2003 : Implication of POC/234Th ratios in oceanic particulate matter : an approach to particle aggregation, *Papers of Meteorology and Geophysics* 53, 4, 109-118
- K. Hirose, H. Kamiya, 2003 : Vertical nutrient distributions in the western North Pacific Ocean : simple model for estimating nutrient upwelling, export flux and consumption rates, *Journal of Oceanography*, 59, 149-161
- K. Hirose, 2004 : Chemical Speciation of Thorium in Marine Biogenic Particulate matter, *TheScientificWorldJOURNAL*, 4, 67-76

（口頭発表）

- C.I. Mordy, M. Aoyama, L.I. Gordon, G.C. Johnson, R.M. Key, A.A. Ross, J.C. Jennings, J. Wilson, 1999 : Deep Water Comparison Studies of the Pacific WOCE Nutrient Data Set, 2000 Ocean Sciences Meeting OS43
- M. Aoyama, T. Kawano, C. Saito, J. U. Plicht, M. Katagiri, 1999 : Radiocarbon Measurements in southern Philippine Basin Water along WOCE WHP PR15, PR23 and PR24, WOCE-AIMS TRACER WORK SHOP
- M. Aoyama, M. Ishii, T. Miyao, K. Hirose, 1999 : Radiocarbon measurements along WOCE WHP P9, P24 and Japan Sea, WOCE-AIMS TRACER WORK SHOP.
- 広瀬勝己, 1999 : トリウム同位体の乾性沈着と湿性沈着について, 日本地球化学会年会
- K. Hirose, K.O. Buesseler, 2000 : Particle Aggregation : An Approach From POC/Th-234 Ratios in Oceanic Particulate Matter, 2000 Ocean Sciences Meeting
- 青山道夫, 太田秀和, 増田真次, 斉藤千鶴, 2001 : 栄養塩測定標準溶液作成の試み, 日本海洋学会創立 60 周年記念大会 (2001 年度日本海洋学会秋季大会)
- 河野 健, 高槻 靖, 青山道夫, 深沢理郎, 2001 : 標準海水のバッチ間の差と海洋観測結果への応用について, ブルーアースシンポジウム (第 5 回みらいシンポジウム)
- H. Ota, M. Kimura, H. Tubota, M. Aoyama, 2002 : Preparation of Reference Material for Nutrients in Seawater (RMNS) on the Seawater Base, 2002 Ocean Science Meeting
- M. Aoyama, H. Ota, H. Kamiya, S. Masuda, N. Nagai, K. Saito, S. Iwano, 2002 : Reference Material for

Nutrients in Seawater : Results of Long-term Storage Experiments and how to and who Certify it ?, 2002 Ocean Science Meeting (2001 年海洋科学集会)

T. Kawano, Y. Takatsuki, M. Aoyama, M. Fukasawa, 2002 : The offset table of IAPSO standard seawater and Its application to the observational results, 2002 Ocean Science Meeting (2001 年海洋科学集会)

Takatsuki, Y., T. Kawano, T.M. Joyce, M. Aoyama, 2002 : IAPSO SSW comparison experiments through 2002 and future, WOCE and Beyond—Achievements of the World Ocean Circulation Experiment—

青山道夫, 永井直樹, 斉藤一浩, 高野宏之, 大門秀志, 清水隆郎, 村田昌彦, 2003 : 栄養塩測定標準溶液の実サイズ検証実験, 2003 年度 日本海洋学会春季大会

青山道夫, 2003 : 栄養塩測定標準物質とそれを使った世界一周航海一時空間変動を確実に見出すための努力一, 海洋理工学会 平成 15 年度春季大会

青山道夫, 太田秀和, 2003 : 海水中栄養塩測定用の標準物質の研究と国際比較実験, 第 64 回 分析化学討論会

太田秀和, 青山道夫, 2003 : 栄養塩測定のための海水ベース参照物質の開発, 第 64 回 分析化学討論会

青山道夫, 2003 : 栄養塩測定における標準溶液と国際比較実験, 2003 年度 日本海洋学会秋季大会

廣瀬勝己, 2003 : 北太平洋表面水中の粒子状トリウムについて, 2003 年度 日本海洋学会秋季大会

河野 健, 青山道夫, 内田 裕, 深澤理郎, 高槻 靖, 2003 : 最近の標準海水比較実験結果および Offset table の適用例, 2003 年度 日本海洋学会秋季大会

太田秀和, 青山道夫, 2003 : 栄養塩測定のための海水ベース参照物質の品質管理, 日本分析化学会 第 52 年会

青山道夫, 太田秀和, 2003 : 海水中栄養塩測定用標準物質の研究と国際比較実験 その 2, 日本分析化学会 第 52 年会

青山道夫, 浜中純子, 久保麻子, 大坪有希, 佐藤憲一郎, 安田 愛, 横川真一郎, 2004 : 栄養塩標準物質を使った BEAGLE 南太平洋レグにおける栄養塩の分析—速報, 第 20 回しんかいシンポジウム・第 7 回みらいシンポジウム

M. Aoyama, T. Kawano, Y. Takatsuki, T.M. Joyce, 2004 : Standard seawater comparison up to the latest batch P143 for more accurate salinity history in the world ocean, 2004 Ocean Sciences Meeting

T. Kawano, M. Aoyama, H. Uchida, Y. Takatsuki, M. Fukasawa, 2004 : An application of batch-to-batch difference table of standard seawater to the observational dataset, 2004 Ocean Sciences Meeting

M. Aoyama, J. Hamanaka, A. Kubo, Y. Otsubo, K. Sato, A. Yasuda, S. Yokogawa, 2004 : More Accurate Nutrients Measurements Along Reoccupied P06 Section Using Reference Material of Nutrients in Seawater, 2004 Ocean Sciences Meeting

青山道夫, 2004 : 海洋における長期変動の研究とその研究に必要な計測標準および分析用標準の開発管理, 栄養塩標準物質と栄養塩時空間変動の研究, 2004 年度 日本海洋学会春季大会 シンポジウム E

青山道夫, 清水隆郎, 盛山栄一, 五藤大仁, 笹野大輔, 2004 : 東シナ海 PN 線における栄養塩, 植物色素量, プランクトンの長期変動 1973-2002, 2004 年度 日本海洋学会春季大会

(出版物)

廣瀬勝己, 2004 : 化学とレーザーを利用した海洋変動の研究, 測候時報第 71 巻特別号別刷, 71, S81-S86.

廣瀬勝己, 2004 : 物質循環など世界の海洋化学の最近の動向—1980 年以降の海洋化学について, 測候時報第 71 巻特別号別刷, 71, S67-S73

清水隆郎, 盛山栄一, 五藤大仁, 笹野大輔, 青山道夫, 2004 : PN 線における生物・化学成分 (栄養塩, 植物色素量, プランクトン) の季節変動と長期変動, 測候時報第 71 巻特別号別刷, 71, S35-S45

青山道夫, 2004 : 海洋化学/生物データから検出された変動—非定常それとも分析による人工の産物—, 測候時報第 71 巻特別号別刷, 71, S75-S79

青山道夫, 2004 : 栄養塩測定標準物質とそれを使った世界一周航海一時空間変動を確実に見出すための努力一, 海洋と生物, 147, 25 (4), 253-258

東北地方における降水量予測に関する研究

研究期間：平成 14 年度～平成 15 年度

研究代表者：小関 榮¹⁾、松原竹男²⁾（仙台管区気象台）

研究担当者

白川栄一¹⁾、小松英樹¹⁾、阿部富男、村上雅則、工藤淳也、相澤功、安久津俊幸、木立芳行、太田琢磨²⁾（仙台管区気象台）、香川岳宏、岩本美代喜¹⁾、太田克則、渡邊好範²⁾（青森地方気象台）、永岡利彦¹⁾、金野由行、鳴海敏光²⁾（盛岡地方気象台）、竹川元章、吉田 繁²⁾（秋田地方気象台）、小林 剛、菊池一浩（山形地方気象台）、安久津俊幸、板谷宏之¹⁾、小畑英樹、吉田 薫²⁾（福島地方気象台）

研究の目的

気象審議会第 21 号答申を受けて、防災気象情報を適切なタイミングと内容で提供し、部外関係機関の活動を効果的に支援するため、防災気象情報の改善・高度化が進められている。その具体化として平成 13 年度には NAPS の更新、ウインドプロファイラの本格運用などにより実況・予想資料の高分解能化と精度向上が図られると共に、地方官署でも非静力学モデルによる調査研究が進められている。

これまでなされた多くの調査研究を踏まえ、最新の観測予報ツールを用いて、防災情報において最も重要な項目のひとつである時間・空間的に細かな降水量予測の精度向上を目指すことを目的とする。

研究方法

管内の過去（10 年～15 年）の調査や文献等から降水量予測に関連する既存のワークシート、メソ天気系概念モデル、事例解析の報告等を収集し、その中から降水量予測に利用可能なものを再評価対象として選定した。

また、再評価に必要な気象データ（数値予報 GPV、天気図、高層・アメダス等）を収集した。再評価作業の利用ソフトとして「アメダス・高層切り出しツール」「GPV 切り出しツール」のプログラムを作成し、これらのツールと気象データを管内に公開して、研究の促進を図った。選定した再評価対象ごとに新しい観測資料を用い、適用条件、量的予想法を決め独立資料により精度を検証した。

仙台管区気象台及び管内の各地方気象台では以下の事例を再評価した。

仙台管区気象台「東北地方降水量予測の改善」「寒冷前線に伴う宮城県の降水」

青森地方気象台「青森県に大雪をもたらす南下型小擾乱の概念モデル」

秋田地方気象台「秋田県における日本海低気圧による大雨の検証」「高層資料による秋田県における短時間強雨の予測」

盛岡地方気象台「太平洋沿岸を北上する擾乱による降水及び降雪」

山形地方気象台「暖域内での大雨についての検証」

福島地方気象台「不安定性降水ガイダンス予測の検証」

研究の結果

具体的な数事例について要旨を述べる。

「東北地方降水量予測手法の改善」（仙台）

「東北地方降水量予測」は風向別降水量予測係数（RSM 予想降水量と実況降水量の比）を用いて、RSM 予想降水量を修正している。解析雨量や 850・925 hPa の風向・風速を用い新しい予測係数を作成し、降水量予測手法の改善を行なった。

東北地方降水量予測と本庁の最大降水量ガイダンスとの精度比較では、事例抽出のしきい値を低くした場合の東北地方降水量予測 3 時間降水量の階級一致率は、各予想時刻を平均すると 76 パーセントである。対する本庁の最大降水量ガイダンスは 71 パーセントである。このことから、事例抽出のしきい値を低くして風向別降水量予測係数を作成した場合、東北地方降水量予測の方が本庁の最大降水量ガイダンスよりもやや精度が高い結果となった。

じょう乱別は事例数の多い南岸低気圧と日本海低気圧について風向別予測係数を作成した。南岸低気圧における東北地方降水量予測の階級一致率が 73 パーセントで、日本海低気圧の階級一致率 70 パーセントより

1) 平成 14 年度、2) 平成 14 年度

やや精度が高いが、じょう乱別でない場合の精度比較その1の階級一致率76パーセントを比べると、特にじょう乱別の降水量予測係数が有効という結果は得られなかった。事例抽出のしきい値を高くすると、抽出できる事例数が減少し、係数を作成できない格子が出てくるなどの影響があった。精度比較その1の仕様が現在のところ最も運用に適している結果となったが、じょう乱別は、実用に向け事例数を蓄積するなどさらなる工夫をしていく必要がある。

「冬型が緩む過程で青森市付近に現れるライン状エコーの持続」（青森）

青森市付近に大雪をもたらす要因については、寒気場内に北海道西岸に発生する小擾乱の南下によるものなど、過去にさまざまな研究や調査が行われている。青森県の五所川原-青森-野辺地を結ぶ地域には、ライン状のエコーが発生・停滞し、青森市や野辺地町に注意報・警報級の大雪をもたらすことが一冬に2~3度はある。

今回は、現行の予測資料では予測が不十分と思われる、冬型が緩む過程での下層収束によるライン状エコーの持続について、過去の調査資料で指摘されたことも踏まえて注意報・警報および予報作業の支援資料作成を目的として調査整理した。

青森市に大量の降雪をもたらすには、上空の寒気流入による大気的不安定化、いわゆる気温の鉛直勾配が増加することが必要条件であるが、降雪をもたらす雪雲の雲頂は、津軽地方では地上から2,000mから3,000mと低いと言われており、事例解析からライン状エコーの動向について下層風の影響を受けやすいことが確認できた。

ライン状エコーの振舞いを予測するには、どこの層に収束が形成されるかを予測する必要があり、五所川原-青森-野辺地のライン状エコーが停滞するには、津軽平野から下北半島の付け根にかけて下層風（特に850 hPa）がある程度の強さで西から東に吹き抜け、地上からごく下層の収束により発生した雪雲を次々流し、更なる対流活動を維持することが必要であると考え。また、500 hPa面の流れは東西流が卓越していることも必要である。

ライン状のエコーが停滞した3つの事例を見ると、850 hPaの風速が概ね30 ktから40 ktの間で、それより下層での収束が維持されているようである。なお、850 hPaの風が30 kt以下または50 kt以上ではライン状エコーは出現しないようである。この風速の目安は、昭和53年03月仙台管区気象台がまとめた「日本海北部における寒冷渦及び季節風の状況下の降雪機構」の中で、「函館レーダー特別観測による青森県の大雪特性では、対流セルは50から60 km/hの速さで東に移動する」としており、今回の調査で目安とした850 hPa面で30 ktから40 kt前後とおおむね一致するとも考えられる。

「不安定性降水ガイダンス予測の検証」（福島）

福島県では、夏型の気圧配置における不安定性降水の発生頻度が高く、短時間雨量基準により、大雨注意報や大雨警報に至るケースがあり、重要な予報要素のひとつとなっている。RSMやガイダンスでは、夏型の熱雷の表現が十分ではなく、府県で修正するためのガイダンスを1999年業務改善プロジェクトで「不安定性降水予測ガイダンス（モデル予想と当日高層観測による判定）」として開発し、現在活用している。本稿では、このガイダンスの活用により、どのようなことが可能か（予報文への反映や注意報警報の判断材料など）を調査した。

不安定性降水ガイダンスについて、RSMの12Z初期値のGPV及び高層観測実況により強雨（解析雨量30ミリ以上）との対応性について検証した。結果は、全34例中、可能性有りと判定したのは27例で実際に30ミリ以上の解析雨量を観測したのは18例となり、67%の的中率だった。この府県ガイダンスでは、RSMや降水ガイダンスの苦手とする熱的不安定による降水を良い精度で予測することが可能であり、熱的不安定性降水を予報に反映させるには大変有効な手段であるといえる。

カテゴリー予報に反映させる方法としては、

- ・朝予報においてはGPVから不安程度等を計算する方式で「不安定性降水あり」と判定された場合は「午後所により雷を伴い一時激しく降る」との表現が可能であり、予報文を用いて予め午後には雷や短時間の激しい雨の可能性を報じることができる。
- ・次に、09時の高層観測データが入電後となる午前予報においては、高層実況から不安程度等を計算する方式により、「総合判定あり」と判定された場合は、「夕方から宵の内雨（もしくは夕方一時雨など）、所により雷を伴い激しく降る」といった「晴れ一時雨」のテロップを用いることができる。

不安定性ガイダンス作成のためのGPVは、現在はRSMの他に、さらに格子間隔（格子間隔10キロ）が

狭く、配信間隔（6時間毎）も短いMSMが配信されており、RSMのかわりにMSMを用いることにより、更なる精度の向上も考えられる。

また、今回の調査結果から、夕方の時間帯の不安定性降水の発生しやすい場所と宵の内に不安定性降水の発生しやすい場所は違うことがわかっており、降水域の予測では、夕方用ガイダンスと宵の内用ガイダンスを開発することにより、より細かい表現が可能となると考えられる。

研究成果の要約

- (1) 「東北地方降水量予測手法の改善」については、新しい予測係数を作成して降水量予測の改善を行い、本庁ガイダンスである最大降水量ガイダンスとの精度比較の結果、しきい値を低くして予測係数を作成した場合やや精度が高く、本庁ガイダンスを必要に応じ修正することが可能である。今後、予報支援システムの防災時系列を修正する地方ガイダンスとして位置づけ利用することが課題である。
- (2) 「冬型が緩む過程で青森市付近に現れるライン状エコーの持続」については、青森市に大量の降雪をもたらすには、上空の寒気流入による大気的不安定化、いわゆる気温の鉛直勾配が増加することが必要条件であるが、降雪をもたらす雪雲の雲頂は、津軽地方では地上から2,000mから3,000mと低いと言われており、下層風の影響を受けやすいことが確認できた。ライン状エコーの振舞いを予測するには、どこの層に収束が形成されるかを予測する必要がある。青森市付近に停滞するライン状エコーが発生・持続するかの目安としてワークシートの作成を試みた。
今回は風向・風速に視点を置き、今まで経験的に行われていた下層収束によって強化される対流雲の持続性について整理してみたが、今後の降雪量予測に発展させるためには、大気の成層状態や移流を詳細に調査する必要がある。また、日本海やむつ湾内の海水温（蒸発の程度）なども考慮に入れることも考えられ、今後の課題である。
- (3) 「不安定性降水ガイダンス予測の検証」については、RSMや降水ガイダンスの苦手とする熱的不安定による降水を良い精度で予測することが可能であり、熱的不安定性降水を予報に反映させるには大変有効である。また、夕方の時間帯の不安定性降水の発生しやすい場所と宵の内に不安定性降水の発生しやすい場所は違うことがわかっており、降水域の予測では、夕方用ガイダンスと宵の内用ガイダンスを開発することにより、より細かい表現が可能になると考えられる。
- (4) 地方気象台においては、量的予測までは不十分ではあるが、府県ガイダンスの改善やワークシートを作成しており、警報・注意報の目安として利用可能である。

今後残された問題点

現在、予報作業において、本庁ガイダンスである最大降水量ガイダンスが降水量の予想に主に使われている。最大降水量ガイダンスは、予報作業支援システムにおいても警報・注意報の発表に直結する防災時系列データとして位置付けられている。今回の共同研究により、改善された「東北地方降水量予測」を発展させ、本庁の最大降水量ガイダンスを必要に応じて修正する地方ガイダンスとして、完成させることが課題である。

また、地方気象台においては、府県ガイダンスやワークシートを、より現業で利用できるよう更なる改善を進める必要がある。

研究成果の活用に対する意見

仙台ではこれまで仙台管内で開発された予測手法の中から、降水量予測に関するものを選び、最新の資料を利用した上で、精度向上と予報作業支援システムに適用できるように改良を試み、結果の再評価を行った。ある程度目標を達成したものもあるが、さらに検証を重ね、有効性を確認しながら利用してほしい。

成果発表状況

- ・論文発表：0件
- ・口頭発表：25件

取得した知的財産（特許、実用新案など）

なし

成果発表一覧

(口頭発表)

- 吉田 薫, 久慈文男, 2002: 青森市付近で発生する大雪, 青森地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 近藤 満, 2002: 青森県における雷雨と解析雨量の関係, 青森地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 倉橋 永, 2002: 太田琢磨, 岩手県内陸平野部の冬型における降水量の特徴, 盛岡地方気象台, 2 仙台管区調査研究会資料
- 井上真吾, 田中光一, 畠山純子, 2002: 平成 14 年 1 月末の南岸低気圧による大雪について, 盛岡地方気象台, 2 仙台管区調査研究会資料
- 畠田康子, 加藤 廣, 2002: 宮城県の大雪, 仙台管区気象台, 2 仙台管区調査研究会資料
- 白川栄一, 2002: NHM による雷, 仙台管区気象台, 2 仙台管区調査研究会資料
- 高内寛義, 安久津俊幸, 2002: 不安定ガイダンス (福島府県ガイダンス) と強雨の対応性, 福島地方気象台, 2 仙台管区調査研究会資料
- 一井知子, 安久津俊幸, 板橋宏之, 2002: NHM による福島県の夏季強雷雨の予測, 福島地方気象台, 2 仙台管区調査研究会資料
- 小畑英樹, 2002: 冬型における局地降雪現象の NHM における検証, 福島地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 阿部修嗣, 小畑英樹, 2002: NHM による中通りの局地的降雪の予測実験, 福島地方気象台, 2 仙台管区調査研究会資料 (報文)
- 佐川振一, 齊藤重隆, 2002: 2001 年 1 月会津地方に見られる大雪, 若松測候所, 2 東北技術だより
- 香川岳宏, 岩井広樹, 村田一則, 岡本博之, 2003: 平成 14 年 1 月 27 日~28 日の南岸低気圧による三八上北の大雪, 青森地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 渡邊好範, 2003: 2002 年 8 月 7 日津軽地方の強雨について, 青森地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 金野由行, 山中 力, 小笠原敦, 2003: 過去の大雨に関する事例解析, 盛岡地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 小田島秀明, 森 浩俊, 砂子幸弘, 2003: 2003 年 3 月 8 日岩手県沿岸北部の大雪, 宮古測候所, 仙台管区調査研究会資料
- 中村修二, 高橋幸由, 渡辺文孝, 2003: 高層資料による短時間強雨の予測, 秋田地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 石鳥和幸, 工藤則安, 2003: NHM 統合環境を用いた地形性降水の再現, 秋田地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 朽木勝幸, 2003: 山形県における冬型時の降雪の特徴, 山形地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 藤井政志, 2003: 南岸低気圧にける仙台での雨雪判別の検証, 仙台管区気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 工藤淳也, 2003: 宮城県の寒冷前線通過時の降水, 仙台管区気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 村上雅規, 阿部富男, 木立芳行, 工藤淳也, 太田琢磨, 2003: 風向別降水量予測係数を用いた東北地方降水量予測の改善, 仙台管区気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 小山田一夫, 2003: 平成 15 年 9 月 11 日中通りと会津の短時間強雨の事例解析, 福島地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 高内寛義, 小畑英樹, 2003: 不安定降水ガイダンス (福島府県ガイダンス) 予測の検証, 福島地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 萩野眞司, 近江克也, 2003: 寒冷前線通過時の中通り・浜通りの降水について, 福島地方気象台, 仙台管区調査研究会資料
- 笹本 豊, 2003: 南岸低気圧に伴う福島県への降雨の影響について, 福島地方気象台, 仙台管区調査研究会資料