

2.3. 研究終了報告

本節には、気象研究所が実施し、平成 22 年度に終了した研究課題のうち気象研究所予算による下記課題について、課題毎に計画と研究成果等を掲載した。

2.3.1. 重点研究

- ・ マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究 121

2.3.2. 地方共同研究

- ・ 吾妻山における圧力源モデルに基づく監視手法の高度化 130
- ・ 強雨の発生要因と構造の解明 134

マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究

研究期間： 平成 18 年度～平成 22 年度
 研究代表者： 伊藤秀美¹⁾、森 滋男²⁾、吉川澄夫³⁾（地震火山研究部長）

課題構成及び研究担当者：

副課題 1 地殻変動に基づく火山活動度判定手法の開発

伊藤秀美¹⁾、森 滋男²⁾、吉川澄夫³⁾、山里 平、福井敬一、北川貞之¹⁾、高木朗充⁴⁾、坂井孝行⁵⁾、新堀敏基⁶⁾、安藤 忍⁷⁾、鬼澤真也⁶⁾（地震火山研究部）、加藤幸司⁸⁾、平松秀行⁹⁾、近澤 心¹⁰⁾（気象庁地震火山部火山課）

副課題 2 マグマ上昇シナリオに基づく火山活動評価手法の開発

副課題 1 の担当者と同じ

研究の目的

気象庁では、全国の火山監視・情報センターにおいて火山観測を実施し、火山活動を評価して、火山防災のため火山情報を発表してきた。平成 19 年 12 月からは、噴火予報及び警報の発表を開始するとともに、火山への防災対応をより円滑に進めるために、29 の火山について「噴火警戒レベル」を導入し、発表している（平成 22 年度末現在）。噴火警戒レベルは、今後、さらに他の火山への導入が計画されているところである。

火山における地殻変動は地下のマグマの動きを直接的に反映するものである。火山監視業務に、現行の地震活動等による監視に加えて、新たに地殻変動の精密な解析を取り入れることにより、火山活動をより確実かつ迅速に判断し、近い将来にどのような火山活動が起こり得るかを示すことが可能となる。

気象研究所では火山監視業務の高度化に資するため、火山の観測技術や活動評価手法の開発に取り組んできており、研究の成果は気象庁の火山監視業務に活用されてきた。特に平成 13 年度からは特別研究「火山活動評価手法の開発研究」に取り組み、この中で開発した有限要素法を用いた数値シミュレーションによる地殻変動計算手法及びそれを活用した解析支援システム（MaGCAP-V）は、火山監視業務（火山活動の評価）を高度化するために有用なツールとなっており、現在各火山監視・情報センターにおいて活用されている。

本研究では、火山活動度の評価において重要となる地殻変動の変化をより効果的に検知する観測手法を導入し、それによって得られる観測データに、これまでに開発した有限要素法による数値シミュレーション手法を適用することにより、地殻変動を物理的に評価し、地下のマグマの動きを定量的に把握することで、噴火警戒レベルの判断に資する火山活動度の判定の高度化を図り、防災に貢献することを目的とする。

研究の目標

（課題全体の目標）

活動的火山を対象とした地殻変動をはじめとする詳細な観測によって、当該火山の精密なマグマ供給系を推定して、地殻変動からその火山活動の評価を定量的に行う手法を開発するとともに、マグマ上昇シナリオに基づく地殻変動シナリオから火山活動を評価する手法を開発する。

（副課題ごとの目標）

副課題 1 地殻変動に基づく火山活動度判定手法の開発

伊豆大島などの活動的火山を対象として、地殻変動をはじめとする詳細な観測を行い、得られたデータから当該火山の精密なマグマ供給系を推定し、想定されるマグマ上昇に伴う地殻変動を計算することにより、地殻変動からその火山活動の評価を定量的に行う手法を開発する。

¹⁾ 平成 18 年度、²⁾ 平成 19 年度、³⁾ 平成 20～22 年度、⁴⁾ 平成 18～21 年度、⁵⁾ 平成 18～21 年度（平成 21 年度は気象庁地震火山部火山課所属）、⁶⁾ 平成 21～22 年度、⁷⁾ 平成 19～22 年度、⁸⁾ 平成 19～20 年度、⁹⁾ 平成 21 年度、¹⁰⁾ 平成 22 年度

副課題2 マグマ上昇シナリオに基づく火山活動評価手法の開発

マグマの上昇の理論的な機構や、いろいろな火山における地殻変動に関する観測データに基づいて、マグマ上昇シナリオに基づく地殻変動シナリオを作成し、地殻変動から火山活動を評価する手法を開発する。

主な研究成果

(課題全体の研究成果の概要)

研究対象火山として、噴火準備過程にあると考えられる伊豆大島を選び、観測で得られたデータを解析することにより、伊豆大島で膨張と収縮の地殻変動が繰り返されていることが明らかになるとともに、その圧力源の位置及びその時間変化についてある程度明らかにすることができた。

活動が活発化した浅間山も研究対象火山に加えて解析した結果、活動期・静穏期の地殻変動の圧力源の時間変化を明らかにした。

SAR 干渉解析によって、いくつかの火山において火山活動に伴う地殻変動を検出するとともに、圧力源の位置や膨張量の推定を行った。

これまでいろいろな火山で観測された地殻変動を系統的に整理することによって、膨張レートは同時に発生する地震活動規模とよい相関があることなどがわかった。

(副課題ごとの研究成果)

副課題1 地殻変動に基づく火山活動度判定手法の開発

- 有限要素法による地殻変動解析手法について、各種の圧力源による地殻変動計算手法を確立した。その中で、楕円体圧力源に関しては、従来用いられてきた計算式に誤りがあることを発見し、経験式に基づく新たな地殻変動計算式を提案した。また、並列計算機と有限要素法並列化ソフトの導入による効率化により、計算速度は約 10 倍、解析可能なモデルサイズも約 30 倍になり、伊豆大島島内各観測点における地殻変動を十分な精度で求めることができる精密な有限要素モデルを用いた計算が可能となった。
- 伊豆大島における地殻変動の連続観測によって、伊豆大島は、長期的に膨張する中で、2~4 年周期で膨張と収縮を繰り返していることを明らかにした。その圧力源はカルデラ北部地下 6~8km にあり、相対的に収縮期はカルデラ西寄り深く、膨張期はカルデラ北寄りやや浅くなる傾向があること、膨張-収縮量は、 $10^6 \sim 10^7 \text{m}^3$ のオーダーであることを明らかにした。
- 伊豆大島の精密重力観測によって、カルデラ北部で最大 0.015mgal/年 の重力の経年変化を検出した。GPS 等で得られた圧力源とはその水平位置は近いが、単純なマグマ蓄積による体積膨張では説明できないことがわかった。
- 全国を対象として陸域観測技術衛星「だいち」の SAR データを用いた干渉画像解析を行い、十勝岳、樽前山、吾妻山、雲仙岳、霧島山（新燃岳）等において火山性地殻変動を検出することに成功し、その他にも海外を含め約 10 の火山で地殻変動を検出した。そのうち、樽前山、吾妻山、霧島山（新燃岳）については、副課題 2 で新たに開発した干渉 SAR データ解析機能を用いて、地下の圧力源の推定を行った。しかし、主たる研究対象火山である伊豆大島及び浅間山では、地殻変動量が小さすぎるため、SAR 干渉解析では地殻変動を検出できなかった。
- 平成 23 年 1 月下旬からの霧島山（新燃岳）の活動において、陸域観測技術衛星「だいち」の SAR データの解析により、新燃岳山頂火口における火口湖の消滅、溶岩の出現、蓄積、圧密という状況の変化をとらえた。また、溶岩蓄積後、火口内に新たに出現した小火孔を検知した。
- 2006~2007 年御嶽山の微噴火を伴う地殻変動を検知し、海拔下約 2500m 付近にある深部圧力源の他、山頂直下ごく浅部（海拔付近）の圧力源が水蒸気爆発に先駆して膨張したことを明らかにし、それは熱水の膨張であると推定した。
- 浅間山を研究対象として、GPS 連続観測及び光波測距観測を行い、火山活動の消長に伴う数年周期の 10^6m^3 オーダーの西山麓深部の膨張・収縮に加え、山頂火口直下ごく浅部でもほぼ同時に $10^3 \sim 10^4 \text{m}^3$ オーダーの膨張と収縮が繰り返されていることを明らかにした。

副課題2 マグマ上昇シナリオに基づく活動評価手法の開発

- ・ マグマ内の揮発性物質の気泡成長に起因する浮力による理論的なマグマ上昇計算から、マグマ上昇速度は、揮発性物質の濃度、粘性などのマグマの物理的性質、ダイクの厚みなどの上昇形態によって、きわめて多様に変化することがわかった。
- ・ 霧島山新燃岳の GPS 繰り返し観測により捉えられた地殻変動についてモデリングを行い、火口地形の影響を評価した結果、変動源は帯水層下部、2008年8月噴火時に発生した群発地震の震源域の上部に位置することがわかった。また、地下構造推定のための重力探査を実施し、重力異常を明らかにした。
- ・ マグマ上昇シナリオの作成に向け、国内で近年観測された様々な火山性地殻変動について、その膨張量や深さ等について系統的に整理したところ、膨張量や膨張レートには大きなものから小さなものまで6桁もの幅をもって分布すること、膨張レートの大きい事象のほとんどがマグマ貫入によると考えられる現象であること、膨張レートは同時に発生する地震活動規模とよい相関があることなどがわかった。また、副課題1で検出された、御嶽山の水蒸気爆発に先駆けた浅部の $10^3 \sim 10^6 \text{m}^3$ オーダーの熱水膨張は、霧島山等他の多くの火山でも観測されており、それらの多くにおいて、水蒸気爆発に至らずとも噴気の活発化等何らかの表面現象をその後に伴っていること、そして規模が小さい場合、微小地震活動をほとんど伴わずに発生することがわかった。
- ・ 以上の結果をもとに、異常未経験火山の活動評価に資するため、火山活動が進行していく中で観測される地殻変動について、一般的な地殻変動に関するシナリオを作成し、それぞれの段階でどのような観測によりどの程度の異常が検知できるかについてとりまとめた。
- ・ 気象研究所で開発した火山用地殻活動解析支援ソフトウェア (MaGCAP-V) をバージョンアップし、本研究で成果として得られた楕円体モデルの推定機能及びマグマ蓄積による重力変化の解析機能、光波測距データ及び干渉 SAR データの解析ができる機能、モデルの時間変化を自動解析・表示できる機能を取り入れた。

当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

- ・ 浅間山の火山活動が活発化したため、融合型経常研究「火山観測データの気象補正等による高精度化に関する研究（平成18～20年度）」で実施していた GPS 連続観測、光波繰り返し観測を平成21年度以降も継続し、本研究にでの地殻変動モデルの研究に活かした。
- ・ SAR 干渉解析については、研究対象火山のみならず、全国の火山を対象とするとともに、海外の火山についても解析を適宜実施した。
- ・ これまでの内外のマグマ内の揮発性物質の気泡成長に起因する浮力によるマグマ上昇に関する研究結果を取り込んだ数値計算によって、マグマ上昇速度は様々なパラメータによってきわめて多様に変化することがわかったため、それをそのままマグマ上昇シナリオに用いるのではなく、過去の気象研究所及び気象庁、大学や研究機関が実施した様々な火山における地殻変動のモデリング研究結果の整理を行って、現実に近い地殻変動シナリオを構築することとした。

成果の他の研究等への波及状況

SAR 干渉解析を「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震」に際して震源付近で生じた地殻変動の解明に向けた解析にも適用した。その結果、地震の発生前後での地殻変動の面的分布を明らかにすることができた。SAR 干渉解析は、面的に地殻変動を捉えることができるため、地震前後のペアにおける解析によって、地震による地殻変動の及んだ範囲が把握でき、地震の断層モデル推定の際の強力なツールとなることがわかった。なお、SAR 干渉解析の結果は、気象庁から報道発表され（平成21年6月26日）、気象庁技術報告にも掲載された。その後も、地震調査研究推進本部の地震調査委員会「衛星データ解析検討小委員会」において国内外の大地震についての SAR 干渉解析結果を報告した。

今後に残された課題

伊豆大島の地殻変動のモデリングについては、静穏期に観測されている膨張と収縮について、その圧

力源を求めるところまで達成した。しかし、現段階では、静穏期に観測されている膨張と収縮から具体的なマグマ上昇あるいは蓄積のモデリングはできていない。観測強化が完了した3年度目以降、顕著な変動がみられていなかったが、研究最終年度の平成22年5月頃から、膨張期に入り顕著な変動がみられるようになったことから、強化した観測網による地殻変動データの解析と有限要素法モデルを用いた再解析を、今後行う必要がある。膨張期には、カルデラ内や周辺の地震活動が活発化することから、臨時地震観測によって今後得られるデータをもとに、地震活動についても、詳細な解析を進める必要がある。

伊豆大島の精密重力観測に関しては、カルデラ北部地下に変動があることは見えてきたが、その実態はよくわかっておらず、今後も観測を継続する必要がある。

SAR 干渉解析では、多くの火山で地殻変動を検出するのに成功しているが、研究対象である伊豆大島をはじめ、いくつかの活動的な火山では検出できていない。気象補正等によって S/N 比の向上を図る必要がある。これについては、重点研究「気象観測技術等を活用した火山監視・解析手法の高度化に関する研究」において、数値予報モデルデータを用いた補正手法の開発に着手したところである。

霧島山の地殻変動に関しては、火口地形の影響を加味した圧力源推定は行ったが、今後、重力探査により得られる地下構造を取り込んだ有限要素モデルによってより正確な圧力源の位置を明らかにする必要がある。

近年観測された様々な火山性地殻変動について、その変動量や深さ等について系統的に整理した成果から、これまでの経験則による噴火警戒レベル判断を補う地殻変動シナリオを作成したが、シナリオの高度化に資するためには、地殻変動以外のデータ、例えば、噴火に先駆する微小地震の規模なども含めた整理が将来必要である。

また、平成23年1月の霧島山新燃岳噴火の際には過去にあまり例のない貴重な観測データが得られており、地殻変動シナリオの高度化に資するためにそれらを用いた検証を行っていく必要がある。

研究成果及びその活用に関する意見（終了時評価の総合所見）

本研究課題については、継続する研究課題を平成23年度から実施することから、終了年度である平成22年度に、気象研究所評議委員会評価分科会（地震火山分野）において終了時評価を実施した。終了時評価の総合所見については、143ページを参照。

成果発表状況

- ・印刷発表件数 26 件
- ・口頭発表件数 66 件

成果発表一覧

（1）査読論文

1. 山崎 明, 坂井孝行, 2006: 地形の影響を考慮した茂木モデルによるピエゾ磁気効果, *気象研究所研究報告*, 57, 21-36.
2. 及川 純 ほか, 2007, 富士山における人工地震探査・観測および走時の読み取り, *地震研究所彙報*, 81, 71-94.
3. 宮下 誠, 中禮正明, 宇平幸一, 林 豊, 湯山弘明, 藤井敏嗣, 村上 亮, 鶴川元雄, 白土正明, 山里 平, 横田 崇, 2007: 富士山の火山活動の監視—宝永噴火シナリオと火山情報—, *富士火山(荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編)*, 山梨県環境科学研究所, p.441-449.
4. 坂井孝行, 山本哲也, 福井敬一, 藤原健治, 高木朗充, 中禮正明, 2007: 有限要素法による火山性地殻変動の計算精度の確立—茂木・山川モデルの再現—, *気象研究所研究報告*, 58, 1-15.
5. 坂井孝行, 山本哲也, 福井敬一, 藤原健治, 高木朗充, 中禮正明, 2007: 深さに比して相対的に大きな半径を有する球圧力源による地表面変位—有限要素法による計算—, *気象研究所研究報告*, 58, 17-30.
6. 山本哲也, 高木朗充, 福井敬一, 大和田 毅, 2008: 安達太良山の火山活動の総合的観測と推定される熱水活動, *気象研究所研究報告*, 59, 39-64.
7. 青木陽介 ほか, 2008: 浅間山における人工地震探査: 探査の概要と初動の走時について, *地震研*

究所彙報, 83,1-26.

8. 高木朗充, 2009: 1988年雌阿寒岳の噴火活動に伴う地震活動の特性, *北海道大学地球物理学研究報告*, 72, 331-352.
9. Aoki, Y. et al., 2009: P-wave velocity structure beneath Asama Volcano, Japan, inferred from active source seismic experiment, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 272-277.
10. Aoyama, H., S. Onizawa, T. Kobayashi, T. Tameguri, T. Hashimoto, H. Oshima and H. Y. Mori, 2009, Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 203-217.
11. 高木朗充, 福井敬一, 小司禎教, 2010: 火山周辺でのGPS観測における数値気象モデルを用いた対流圏補正, *火山*, 55, 1-12.
12. 高木朗充, 福井敬一, 新堀敏基, 飯島 聖, 2010: 光波測距の数値気象モデルに基づく大気補正—浅間山への適用—, *火山*, 55, 41-51.
13. 高木朗充, 福井敬一, 山里 平, 藤原健治, 加治屋秋実, 2010: 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定, *気象研究所研究報告*, 61, 1-11.

(2) 査読論文以外の著作物(翻訳、著書、解説)

1. 山崎 明, 坂井孝行, 2007: ピエゾ磁気効果への地形の影響について—茂木モデルの場合—, *CA研究会2007年論文集*, 175-181.
2. Tsukui, M., Y. Kawanabe, K. Kazahaya, H. Yamasato and K. Niihori, 2007: Active volcanoes on the Izu Arc: Izu-Oshima and Miyakajima, *Cities on Volcanoes 5 conference Filed trip guidebook*, A2:1-23.
3. 地震火山研究部, 2008: 火山活動評価手法の開発研究, *気象研究所技術報告*, 53, 303p.
4. 山里 平, 2008: 日本の火山防災体制, *火山の事典*(下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明・中田節也編), 朝倉書店, 417-425.
5. 山里 平, 2008: 日本噴火災害資料, *火山の事典*(下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明・中田節也編), 朝倉書店, 558-562.
6. 気象研究所, 2009, だいち/PALSARの干渉SARでみた雲仙岳溶岩ドームの変形, *火山噴火予知連絡会会報*, 99, 97-98.
7. 気象研究所, 2010, だいち/PALSARを使った桜島の噴火前後における地殻変動および火砕流の検出, *火山噴火予知連絡会会報*, 100, 95-98.
8. 山里 平, 2010, *火山工学入門*(土木学会地盤工学委員会火山工学研究小委員会編), 5-6, 39-45, 60-69.
9. 気象研究所, 2010, 2006年2月1日07h44m霧島山新燃岳で発生した火山性微動に対応した傾斜変動, *火山噴火予知連絡会会報*, 100, 122-125.
10. 気象研究所, 2010, だいち/PALSARの干渉SARによる十勝岳62-2火口の地殻変動, *火山噴火予知連絡会会報*, 101, 25-27.
11. 気象研究所, 2010, だいち/PALSARの干渉SARでみた吾妻山の地殻変動, *火山噴火予知連絡会会報*, 101, 33-35.
12. 山里 平, 福井敬一, 高木朗充, 坂井孝行, 安藤 忍, 北川貞之, 2009: ALOSデータを用いた離島火山のモニタリング, *火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究 成果報告書*, 25-33.
13. 安藤 忍, 2010, 地殻変動, *気象庁技術報告132号「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震調査報告」*, 20-27.

(3) 会議・学会等発表

① 国際会議・学会等での発表
(口頭発表)

1. Yamasato, H., 2010: Characteristics of ground deformations associated with volcanic activities in Japan and their evaluation. ISTC JAPAN WORKSHOP "International

Workshop on Progress of Research for Disaster Mitigation of Earthquakes and Volcanic Eruptions in the North Pacific Region", Conference Hall, Hokkaido University, Sapporo, Japan.

2. Ando, S. and H. Ueno, 2010: The Crustal Deformation and Damage area Caused by the M7.0 Earthquake in Haiti detected by ALOS/PALSAR, The 8th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management, Tokyo, Japan.

(ポスター発表)

3. Takagi, A., K. Fukui, H. Yamasato, T. Sakai, S. Andou, K. Kato and M. Churei, 2007: Estimation of magma supply system of Izu-Oshima volcano using by high density GPS and EDM network. 12-P-21, Cities on Volcanoes 5 Conference, Shimabara, Japan.
4. Kazahaya, K., M. Ohwada, T. Mori, J. Hirabayashi, H. Yamasato, M. Miyashita, Y. Ueda, S. Onizawa, T. Mori, T. Shuto and H. Kagesawa, 2007: Monitoring of sulfur dioxide flux from Asama volcano, Japan. 12-P-53, Cities on Volcanoes 5 Conference, Shimabara, Japan.
5. Fukui, K., S. Kitagawa, A. Takagi, T. Yamamoto and T. Sakai, 2007, Volcano deformation modeling by using FEM simulation database. 11-P-73, Cities on Volcanoes 5 Conference, Shimabara, Japan.
6. Sakai, T., T. Yamamoto, K. Fukui, K. Fujiwara, A. Takagi and M. Churei, 2007, Calculations of fundamental pressure source models by FEM. 11-P-74, Cities on Volcanoes 5 Conference, Shimabara, Japan.
7. Kitagawa, S., S. Ando, K. Fukui and A. Takagi, 2007: Lava dome deformation at Unzen volcano as viewed from ALOS PALSAR interferometry. 12-P-76, Cities on Volcanoes 5 Conference, Shimabara, Japan.
8. Ando, S., S. Kitagawa, T. Yamamoto, T. Shimoyama and K. Miyaoka, 2008: Crustal deformation of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 by using ALOS/PALSAR interferometry, 7th General Assembly of Asia Seismological Commission, Y2-233, Tsukuba, Japan.
9. Yamasato, H., E. Fujita, M. Ukawa, J. Miyamura, K. Kato and A. Takagi, 2008, Characteristics of Low Frequency Earthquakes beneath the Summit Caldera of Miyakejima Volcano, Japan, 7th General Assembly of Asia Seismological Commission, Y3-040, Tsukuba, Japan.
10. Fukui, K., T. Sakai, K. Torisu, T. Koeda, A. Takagi, 2008: Volcano deformation detected by GPS observation on the crater rim of Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan and estimation of pressure source by FEM, IAVCEI General Assembly 2008, 2-c-P07, Reykjavik, Iceland.

② 国内会議・学会等での発表

(口頭発表)

1. 北川貞之, 福井敬一, 高木朗充, 2006: JERS-1 コヒーレンス画像を用いた溶岩流の検出, 平成 18 年度東京大学地震研究所共同利用研究集会 (課題番号: 2006-W-02) 「新世代の干渉 SAR」.
2. 福井敬一, 北川貞之, 高木朗充, 山本哲也, 坂井孝行, 2006: 有限要素法シミュレーション結果データベースを用いた地殻変動モデル推定手法の開発, 日本火山学会 2006 年秋季大会, 予稿集 2006, 67.
3. 高木朗充, 2006: 圧力源の形状は地表面変位からどの程度識別できるか, 日本火山学会 2006 年秋季大会, 予稿集 2006, 68.
4. 坂井孝行, 山本哲也, 福井敬一, 藤原建治, 高木朗充, 中禮正明, 2006: 深さに比して相対的に大きな半径を有する球圧力源による地表面変位—有限要素法による数値計算—, 日本火山学会 2006 年秋季大会, 予稿集 2006, 69.
5. 山崎明, 坂井孝行, 2006: 地形の影響を考慮した茂木モデルによるピエゾ磁気効果, 日本火山学

- 会 2006 年秋季大会, 予稿集 2006, 144.
6. 北川貞之, 福井敬一, 高木朗充, 2007: ALOS PALSAR の干渉 SAR で見た雲仙岳溶岩ドームの変形, 平成 18 年度京都大学防災研究所共同研究 (研究集会 18K-07) 「宇宙測地・リモートセンシング技術による地殻変動研究の発展」.
 7. 北川貞之, 福井敬一, 高木朗充, 2007: JERS-1 干渉 SAR で見た 1996 年 12 月ニアムラギラの噴火, 平成 18 年度京都大学防災研究所共同研究 (研究集会 18K-07) 「宇宙測地・リモートセンシング技術による地殻変動研究の発展」.
 8. 青木陽介, 武尾実, 青山裕, 藤松淳, 松本聡, 宮町宏樹, 中道治久, 大倉敬宏, 大湊隆雄, 及川純, 棚田理絵, 筒井智樹, 山本圭吾, 山本希, 山里平, 山脇輝夫, 2007: 浅間山における人工地震構造探査, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 予稿 CD-ROM, V156-020.
 9. 山里平, 藤田英輔, 鶴川元雄, 宮村淳一, 高木朗充, 2007: 三宅島カルデラ直下で発生している地震のスペクトルの性質, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 予稿 CD-ROM, V156-029.
 10. 北川貞之, 福井敬一, 高木朗充: 2007: ALOS PALSAR の干渉 SAR で見た雲仙岳溶岩ドームの変形, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 予稿 CD-ROM, D203-002.
 11. 小島秀基, 甲斐玲子, 高木朗充, 石原和彦, 谷口貴康, 宮村淳一, 横田崇, 2007: 気象庁の火山監視における GPS 解析精度改善に向けた取り組み, 日本火山学会 2007 年秋季大会, 予稿集 2007, B14.
 12. 安藤忍, 北川貞之, 高木朗充, 福井敬一, 2008: ALOS PALSAR の干渉 SAR で見た雲仙岳溶岩ドームの変形 (続報), 平成 19 年度京都大学防災研究所特別教育研究経費 (拠点形成) 研究集会 「衛星搭載型合成開口レーダーを用いた地震・火山災害ポテンシャル評価手法の高度化・効率化」.
 13. 高木朗充, 山里平, 福井敬一, 坂井孝行, 安藤忍, 加治屋秋実, 加藤幸司, 2008: GPS 時間変化から推定する圧力源パラメータ 伊豆大島への適用, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 予稿 CD-ROM, V151-024.
 14. 北川貞之, 安藤忍, 福井敬一, 2008: リモートセンシング技術を用いた火口形状等の変化検出—桜島の事例—. 平成 20 年度東京大学地震研究所共同利用研究集会 「SAR・赤外センサによる地震・火山・地盤変動の監視・解析」 (2008-W-02).
 15. 安藤忍, 北川貞之, 高木朗充, 福井敬一, 2008: ALOS/PALSAR で捉えた吾妻山の地殻変動, SAR Workshop 2008.
 16. 北川貞之, 福井敬一, 安藤忍, 2008: リモートセンシング技術を用いた火砕堆積物量の推定—桜島の事例—, 日本火山学会 2008 年秋季大会, 予稿集 2008, A10.
 17. 福井敬一, 坂井孝行, 鳥巢啓多, 小枝智幸, 高木朗充, 2008: 地殻変動源推定への火口地形の影響—霧島山新燃岳山頂部における GPS 観測を事例に, 日本火山学会 2008 年秋季大会, 予稿集 2008, B22.
 18. 山崎伸行, 近江克也, 高木朗充, 2008: 吾妻山の地震活動に伴う地殻変動, 日本火山学会 2008 年秋季大会, 予稿集 2008, B25.
 19. 坂井孝行, 福井敬一, 高木朗充, 山里平, 2008: 回転楕円体圧力源による変位を表す経験式 (第 2 報) —FE 解析結果に最小二乗法を適用しての係数決定—, 日本火山学会 2008 年秋季大会, 予稿集 2008, B31.
 20. 安藤忍, 2009: 気象研究所における ALOS 利用状況と ALOS/PALSAR および ALOS-2 への期待, ALOS-2 利用ワークショップ.
 21. 山里平, 宮村淳一, 2009: 近年の様々な火山地殻変動—異常未経験火山における活動評価に向けて—, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, V159-016.
 22. 安藤忍, 2009: InSAR 解析によるトゥングラワ火山噴火に伴う地殻変動, 京都大学防災研究所拠点形成研究集会 「高分解能レーダー・リモートセンシングによる災害観測の革新」.
 23. 高木朗充, 福井敬一, 山里平, 安藤忍, 坂井孝行, 新堀敏基, 加治屋秋実, 藤原健治, 黒木英州, 山本哲也, 2009: 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定, 日本火山学会 2009 年秋季大会, 予稿集 2009, 66.
 24. 坂井孝行, 福井敬一, 高木朗充, 山里平, 2009: Prolate 楕円体圧力源による変位を正確に表す

- Newman の解, 日本火山学会 2009 年秋季大会, 予稿集 2009, 65.
25. 松島喜雄, 西祐司, 高倉伸一, 鬼澤真也, 長谷英彰, 石戸経士, 2009: 伊豆大島における自然電位連続観測(2), 日本火山学会 2009 年秋季大会, 予稿集 2009, 88.
 26. 安藤忍, 桜井利幸, 2009: ALOS「だいち」からみた Sarychev Peak 火山—2009 年 6 月噴火—, 日本火山学会 2009 年秋季大会, 予稿集 2009, 118.
 27. 安藤忍, 2010: 縞模様から探る火山活動 ~人工衛星がとらえる地殻変動~, 科学未来館友の会イベント.
 28. 山里平, 2010: マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究, 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」成果報告シンポジウム.
 29. 安藤忍, 小山寛, 田村慎, 福井敬一, 伏谷祐二, 2010: だいち/PALSAR により検出された樽前山ドームの隆起, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, STT072-02.
 30. 山里平, 新堀敏基, 小枝智幸, 片岡義久, 末峯宏一, 加藤幸司, 坂井孝行, 藤原善明, 山内博, 2010: 霧島・新燃岳の水蒸気爆発に伴う空気振動, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 予稿集 3A-14.
 31. 高木朗充, 藤原健治, 白坂光行, 安藤忍, Baloloy Alejo, Laguerta Eduardo, Sincioco Jme S., 2010: GPS 観測によるマヨン火山 2009 年噴火活動前後の地殻変動, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 予稿集 1-B11.
 32. 安藤忍, 2011: 陸域観測技術衛星「ALOS/だいち」から見る地殻変動—干渉 SAR 技術を使った火山地殻変動の検出—, 平成 22 年度気象庁施設等機関研究報告会.
- (ポスター発表)
33. 北川貞之, 福井敬一, 高木朗充, 2006: 干渉 SAR コヒーレンス画像を用いた溶岩流の検出—ニアムラギラ火山の例, 日本火山学会 2006 年秋季大会, 予稿集 2006, 155.
 34. 高木朗充, 北川貞之, 宮村淳一, 2007: GPS で捉えられた御嶽山の地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 予稿 CD-ROM, V156-P002.
 35. 福井敬一, 鳥巢啓多, 小枝智幸, 坂井孝行, 高木朗充, 2008: 霧島山新燃岳山頂部における GPS 観測で捉えられた地殻変動と有限要素法を用いた変動源推定—変動源推定への火口地形の影響—, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 予稿 CD-ROM, V151-P020.
 36. 安藤忍, 北川貞之, 福井敬一, 2008: 干渉 SAR 画像でみた全国の活火山, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 予稿 CD-ROM, D205-P009.
 37. 安藤忍, 北川貞之, 2008: 干渉 SAR で見た東北地方の活火山周辺における地殻変動, 日本火山学会 2008 年秋季大会, 予稿集 2008, P56.
 38. 気象研究所, 2009: 地殻活動観測による火山活動評価手法の開発研究. 平成 20 年度地震・火山噴火予知成果報告シンポジウム, ポスター発表資料集, 321-325.
 39. 小上慶恵, 中村雅基, 高木朗充, 藤原健治, 鶴川元雄, 渡辺秀文, 2009: 富士山周辺の実体波 3 次元速度構造, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, V159-P004.
 40. 藤原健治, J. S. Sincioco, E. Laguerta, 高木朗充, 安藤忍, 白坂光行, 福田信夫, 2009: フィリピン, マヨン火山における予備的な地殻変動観測について, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, V159-P014.
 41. 高木朗充, 飯島聖, 前川和宏, 舟崎淳, 2009: 数値気象モデルを用いた対流圏補正により明かされた 2008 年からの浅間山の地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, V159-P032.
 42. 安藤忍, 上野寛, 林元直樹, 2009: ALOS/PALSAR により検出されたニューギニア付近の地震に伴う地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, D108-P020.
 43. 安藤忍, 北川貞之, 福井敬一, 2009: 干渉 SAR 画像でみた全国の活火山(2), 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, D109-P009.
 44. 気象研究所, 2010, マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究, 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」成果報告シンポジウム.
 45. 山里平, 宮村淳一, 小久保一哉, 2010: 近年の様々な火山地殻変動—異常未経験火山における活動評価に向けて(2), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, SVC063-P07.

46. 鬼澤真也, 高木朗充, 福井敬一, 山里平, 安藤忍, 新堀敏基, 加治屋秋実, 黒川和誠, 2010: 伊豆大島火山における地殻変動観測, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, SVC063-P10.
47. 藤原健治, 森脇嘉一, J. S. Sincioco, E. P. Laguerta, A. Baloloy, 高木朗充, 安藤忍, 白坂光行, 松島功, 宮下芳, 2010: フィリピンマヨン火山 2009 年噴火前後の地殻変動について, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, SVC063-P12.
48. 安藤忍, 福井敬一, 斉藤誠, 2010: SAR 干渉画像でみた全国の活火山(3), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, STT072-P12.
49. 福井敬一, 安藤忍, 高木朗充, 鬼澤真也, 新堀敏基, 山里平, 大須賀弘, 2010: 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発(3)ーEDM, InSAR データ解析機能, 簡易版動的解析機能の組み込み, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, SSS014-P02.
50. 上野寛, 碓井勇二, 福満修一郎, 迫田浩司, 山内崇彦, 安藤忍, 2010: 2010 年 1 月 12 日(GMT)にハイチで発生した地震の概要と震源過程, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿 CD-ROM, SSS011-P09.
51. 加藤幸司, 山里平, 小枝智幸, 末峯宏一, 松末伸一, 2010: 2010 年新燃岳の噴火活動について, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 予稿集 P55.
52. 山里平, 新堀敏基, 加藤幸司, 小枝智幸, 片岡義久, 末峯宏一, 坂井孝行, 藤原善明, 山内博, 宇平幸一, 2010: 桜島火山の C 型微動に伴う超低周波音(2), 日本火山学会 2010 年秋季大会, 予稿集 P50.
53. 安藤忍, ALOS「だいち」からみたエイヤフィヤトラヨークトル火山ー2010 年噴火ー, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 予稿集 P58.
54. 鬼澤真也, 高木朗充, 福井敬一, 安藤忍, 新堀敏基, 山里平, 2010: 霧島火山新燃岳・御鉢における重力探査, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 予稿集 P54.
55. 山里平, 2011, マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究, 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」平成 22 年度成果報告シンポジウム.
56. 福井敬一, 2011, 気象研究所における新燃岳噴火対応, 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」平成 22 年度成果報告シンポジウム.

吾妻山における圧力源モデルに基づく監視手法のモデル化

研究期間： 平成 21 年度～平成 22 年度
研究代表者： 関根一男（仙台管区気象台技術部 火山防災情報調整官）
研究担当者： 山里 平、高木朗充、福井敬一、安藤 忍、鬼澤真也（地震火山研究部）、関根一男、巻 和男¹⁾、庄司哲也²⁾、佐々木貴史¹⁾、武田清史¹⁾、近江克也²⁾、高橋 忠¹⁾、石井邦男¹⁾、西田 誠、舟越 実、内田 東²⁾、吉田友香¹⁾（仙台管区気象台技術部）

研究の目的

吾妻山は、福島県・山形県境に位置する活火山である。近年では 1977 年に小規模な噴火を起こし、その後も数年おきに地震活動が活発化するなど継続した火山活動が見られる。仙台管区気象台火山・監視情報センターでは、吾妻山の活動を地震計、GPS、空振計、遠望カメラで 24 時間の連続監視を行い、噴火警報・噴火警戒レベルの発表を行っている。

吾妻山では、今までの地震観測データと GPS 観測データから、地震活動活発化に同期した地殻変動が観測されている。本研究では、これらのデータから地下の圧力源の詳細なモデリングを行い、今後の火山活動の活発化に応じた監視体制を検討する。

研究の目標

- ① 過去の地震活動データ、連続及び繰り返し GPS 観測データをもとに吾妻山の圧力源モデルを作成し、過去 2 回の地震活動活発化とそれに同期した地殻変動（2003～2004 年、2006～2007 年）が発生した際に地下で起きた現象を詳細に解明する。
- ② ①で作成したモデルをもとに、将来、再び活動が活発化した際に発生すると思われる現象を推定し、その現象をリアルタイムかつ定量的に把握するために、監視項目（地震計、GPS 等）の再検討と観測点の再配置等の検討を行い、今後の火山活動の活発化に応じた監視体制案を作成する。

主な研究成果・目標の達成状況

- ① GPS データ等から推定した圧力源モデル解析
 - ・ 過去の GPS 繰り返し観測データ（連続観測データも含む）の電離層・対流圏補正を行った。その結果、標高差の大きな観測点間の基線変化に重畳していた季節変動ノイズが除去され、上下成分の精度が向上した。
 - ・ 精度が向上した上下成分を含めた 3 成分の GPS データを用いて、等方圧力源モデル（茂木モデル）による圧力源の推定を行った結果、従来の水平成分のみを用いた圧力源推定よりもやや深めに推定されることがわかった。
 - ・ 2003 年秋～2004 年秋（膨張）、2004 年秋～2006 年春（収縮）、2006 年春～2007 年春（膨張）の圧力源は、いずれの期間においても大穴火口付近の地下 300～700m に求められ、全磁力観測によって推定されている熱消磁域よりもやや深い場所にあるという結果となった。
 - ・ 噴気活動の活発化がみられた 2008 年の夏から秋にかけての膨張について圧力源を推定した結果、これまでで最も深部の地下 1000m に求められた。ただし、繰り返し観測データによる結果である（連続観測データによる結果ではない）ため、膨張期間の全容を捉えていない可能性がある。
 - ・ 2003 年 9 以降の震源について精度のよいものだけ抽出すると、これらは大穴火口付近の地下 500～2000m 程度に分布しており、GPS データにより推定される圧力源よりやや深部に位置していることがわかった。
- ② 監視手法の検討
 - ・ 圧力源が、現在より浅部へ移動する場合を想定し、圧力源の深さを変化させて、現在の GPS 観測網でどのような変化が捉えられるかを火山用地殻活動解析支援ソフトウェア（MaGCAP-V）を用いて検証した。その結果、以下のことがわかった。
 - ・ 圧力源が地下 100m といったごく浅い位置にあった場合、大穴火口周辺でのみ大きな変位が予想される。
 - ・ 火口から距離を置いた場所にも GPS 観測点を追加することで、圧力源の深さをより精度良く見積もることができる。

- 本研究で推定した圧力源モデルを用いて、平成 22 年度に傾斜計を設置した大穴火口から約 600m 東にある浄土平での傾斜変化を計算したところ、過去と同規模の膨張イベントがあった場合、傾斜計で検出可能な傾斜変化（数十 μrad ）が期待される。ただし、傾斜量は圧力源の深さに大きく依存する。
- 検証結果から、現状の観測網について以下の課題があることがわかった。
 - 現在、大穴火口周辺の北側、東側、南側には繰り返し及び連続 GPS 観測点があるが、西側に限り大穴火口から最も近い所でも 1 km 以上離れている。大穴火口から 500~700m 程度離れた場所であれば検出可能な大きな変動が現われることが計算結果から予想されるため、西側の酸ガ平付近に観測点を設置することによって、大穴火口を囲む観測網となり、圧力源による地殻変動を検出するのに有効なものとなる。
 - さらに圧力源の深さを精度よく見積もるためには、圧力源（火口）から 2~3km はなれた位置にも四方を囲むように観測点を追加する必要がある。大穴火口南側には高山、東側には吾妻小富士東の観測点があるので、北側の家形山、及び西側の谷地平に観測点を追加することで理想的な観測網を構築することができる。
 - 圧力源がより浅部へ移動する場合は、大穴火口付近の地殻変動の監視がより重要となる。また、噴火が切迫する可能性が高まるので繰り返し観測の実施が不可能となる場合も考えられる。したがって、火口付近の観測点を連続観測化、隔測化して、より早くより精度良く変動を検知できる体制が必要である。
 - 今後は新設の傾斜計のデータも含めた監視・評価が非常に重要である。
- さらに、噴火によって観測点が被災することを想定した対処についても考察した。噴火警戒レベル 2 に相当する噴火の場合、火口から 500m 以内に噴石が飛散することが予想され、影響があると考えられるのは GPS 蓬莱山東と一切経山南山腹である。一切経山南山腹は連続観測点であるが、繰り返し観測点である蓬莱山東に近づくことは危険を伴うことが想定されるため、噴石の飛散経路等活動状況にもよるが、観測不能となる可能性が高い。それ以外の観測点は影響が及ばないため、特段の対処は必要ないと考えられる。レベル 3 規模の噴火になると、火口から 4km 以上離れた GPS 広域連続観測網（高湯温泉、幕川温泉、板谷）を除き、被害を受ける可能性がある。ただし、レベル 3 規模の噴火に至った場合でも、広域の観測網が無事であれば、今後の活動の動向（活発化・沈静化）を判断するにあたって注目すべき深部からの新たなマグマ供給の有無について、必要最低限の監視は可能と考えられる。

当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

- GPS データを見ると、2008 年の夏から秋にかけても膨張が認められるため、この期間についても圧力源モデルを推定した。
- 平成 21 年度の補正予算により傾斜計を設置したことから、傾斜計を設置した地点で期待される傾斜変化を圧力源モデルを用いて計算し、圧力源の深さによりどの程度傾斜変化量が変わるかを見積もった。

成果の他の研究等への波及状況

吾妻山での地殻変動圧力源推定結果は、重点研究「マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究」における火山性地殻変動モデルの系統的な整理において、規模の小さな浅い膨張イベントのひとつの代表例としてその解析に取り入れられた。いくつかの火山で吾妻山と同規模の浅部膨張が観測されているが、その多くで水蒸気爆発や噴気異常を伴うことがわかっており、熱水の活動と関連した現象と推定されており、本研究の成果は、水蒸気爆発に先駆する地殻変動についての地殻変動シナリオを構築する上で重要な知見を提供した。

今後に残された課題

圧力源モデルをもとに、大穴火口近傍に設置された傾斜計による監視の有効性を検討し、本研究で対象とした程度の小規模な地殻変動も検出できる可能性が高いことがわかった。傾斜変化量は圧力源の深さに大きく依存することから、今後、圧力源モデルの推定に傾斜計のデータも取り込み、モデルと監視手法の精度を高めていくことが重要である。また、圧力源変動の監視に傾斜計を十分活用するため、傾斜計のデータを蓄積したうえで、ノイズレベルの把握や検出可能な変動範囲の検証が必要である。

本研究では、近年観測されている浅部膨張の圧力源推定をもとにしたため、監視手法の検討において、

深部での膨張（マグマ貫入）を想定した評価は十分実施していない。現在よりも火山活動がさらに発展してマグマ噴火を想定するような事態になった場合の監視手法の検討においては、深部膨張についても定量的な評価を実施することが必要である。

吾妻山での地震活動活発化に同期した地殻変動について、本研究により推定した圧力源モデルと地震や全磁力等の観測結果との精査は行ったものの、これらをふまえて吾妻山の地下で発生した現象のメカニズムを十分説明するまでには至らなかった。今後、各観測結果について、より高時間分解能での時系列変化についての解析等を行い圧力源モデルの精緻化を進め、吾妻山の地下で発生している現象のメカニズムの理解を目指すことが重要である。

研究成果及びその活用に関する意見（気象研究所研究課題評価委員会による終了時評価）

（評価結果）

優れた研究であった。

（総合所見）

この研究は、地震活動活発化に同期した地殻変動が捉えられている吾妻山について、圧力源モデルの精緻化と監視手法の高度化を目的として実施されたものである。地殻変動に基づいて火山体で起きている現象を推定するという、近年急速に進展しつつある方法論を用いて社会的にも関心の高い吾妻山を考察したもので、時期を得た研究であった。

目標の達成度については、従来の圧力源モデルの精緻化を一步進め、それに対応して観測網の再構築を提言したことにより、着実に研究を進め、当初の研究目標を概ね達成したと評価できる。しかし、圧力源の詳細な解明という点と、作成したモデルをもとに現象をリアルタイムかつ定量的に把握する手法の検討については、十分達成したとは言えない。また、監視項目や観測点再配置の検討も、当初計画にあった既存観測点の再配置が検討されなかったことや、地磁気等の他の観測データとの比較・検証が不十分に終わったことから、目標設定がやや高すぎたのではないかという指摘があることにも留意すべきである。

成果については、従来より高精度で圧力源を推定して局所的膨張がみられる火山における現象の理解が進んだこと、圧力源の深さが変化した場合の観測手法の検討を行ったこと、新たに導入された傾斜計から期待される変化量を評価したことなどは評価できる。監視方法などの具体的な改善点が見出されるなど、今後の監視において十分有用なものであることから、社会的意義についても高く評価できる。一方、GPS 3成分の解析により明らかになった圧力源について、従来の結果に比べ深い位置に推定され、全磁力観測によって推定されるものより深く推定されたこと、反対に地震の震源分布より浅く推定されたことが何を意味するかは重要な事柄であるが、この点の検討が不十分な点が惜まれる。

実施手法について、近年気象研究所で開発された補正手法を用いて GPS データの高精度解析を可能にしたことは、同種の観測データの解析技術のレベルアップにつながることを期待され、評価できる。ただし、2年という比較的短い期間の研究であったことを考えると、精密なモデルの作成や定量的な評価や監視体制案の作成といった高い目標を設定して研究を進めていく手法より、様々な噴火シナリオに対してどのような観測データが期待されるのかの調査といった、より具体的な当面の目標を設定して研究を進め、さらにその後の研究につなげることで段階的に研究を積み重ねていく手法の方がより望ましいのではないかと思われる。

研究体制については、作成したモデルを利用して監視手法や観測網の再点検を行うという意欲的な課題を、業務に携わる仙台管区气象台と気象研究所との共同研究により行うことで、研究と業務の連携を実現しており評価できる。

今後は、本研究での課題を踏まえ、研究および業務改善をさらに推進していただきたい。「地下で起きた現象の総合的な解明」は、かなり挑戦的な目標設定であり、今後も気象研究所において研究を進めていただくことを期待したい。類似の特性を有する他の火山に対しても同様の手法で研究を行い、さらには、この手法の一般化として、観測網が同程度の他の火山に本成果を容易に適用するためのフローチャート化を行い、今後の観測網の整備における最適化のツールとして、幅広く防災政策に適用することが望ましい。研究成果については査読論文誌に投稿しており、今後の実利用のための基礎資

料となると期待されるが、本研究期間内で少なかった学会発表等を行うなどのさらなるアピールが必要と考える。

成果発表状況

- ・印刷発表件数 なし
- ・口頭発表件数 2件

成果発表一覧

(1) 査読論文

なし

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）

なし

(3) 口頭発表

1. 吉田友香, 舟越実, 西田誠, 近江克也, 高木朗充, 2010: 吾妻山における圧力源モデルに基づく監視手法の高度化, 宮城地区調査研究会.
2. 吉田友香, 舟越実, 西田誠, 近江克也, 高木朗充, 2010: 吾妻山における圧力源モデルに基づく監視手法の高度化, 東北地区調査研究会.

強雨の発生要因と構造の解明

研究期間： 平成 21 年度～平成 22 年度

研究代表者： 江崎雄治（大阪管区气象台 技術部気候・調査課 調査官）

研究担当官署： 大阪管区气象台気候調査課、大阪管区气象台予報課、神戸海洋气象台、広島地方气象台、松江地方气象台、高松地方气象台、高知地方气象台、気象研究所予報研究部

研究の目的

大阪管区内で観測された大雨・強雨の事例について、観測データによる解析や、非静力学モデルを用いた再現実験による解析を行い、大雨・強雨発生の要因や構造を明らかにし、知見を深めることにより、今後、同様な事例が発生した場合の注・警報作業が円滑に行えるようにする。

研究の目標

- ① 大阪管区内で警報級の大雨の起きた事例を選び、観測データによる解析を行うことにより、各事例の発生要因や構造を明らかにする。
- ② 非静力学モデルによる再現実験を行い、その結果により各事例の発生要因やより精緻な立体構造を確認する。
- ③ 同様な事例が発生した場合に注・警報作業を円滑に行えるように、ポイントとなる実況資料や数値予報資料の活用方法と作業の流れをまとめる

主な研究成果・目標の達成状況

各参加官署では、警報級の降水をもたらした大雨・強雨の事例を数事例ずつ選択し、現業データほかに GPS 可降水量やドップラーレーダ動径風などの新しい観測データ、JRA-25 やメソアンサンブル予報、動径風などをデータ同化した解析値などを初期値に使用した非静力学モデルの実験結果を用いて解析を行い、大雨・強雨の構造や維持機構に関する知見を得た。また、警報級の大雨・強雨になったものと、その事例に似ているが大雨・強雨にならなかったものの予報を比較したり、アンサンブル予報のメンバーの予報を比較したりして、大雨・強雨の発生要因及びメカニズムの知見を得た。以下に、各参加官署の代表的な解析結果を紹介する。

- ・ 気象研究所では、局所アンサンブル変換カルマンフィルター、メソ S V 法、週間アンサンブル予報の摂動を規格化して与える手法などを用いてメソアンサンブル予報を行い、参加官署に提供した。また、2008 年 9 月 5 日に堺市で発生した 93.5mm/h の雨量を観測した局地豪雨について、上記の各手法で得られたアンサンブル予報を比較するとともに、メソアンサンブルで得られた予報値に、さらにドップラーレーダの動径風などを同化し、それらが局地豪雨予測に与えるインパクトを通して、強雨の要因を調べた。その結果、この事例については、メソ S V 法では強雨の発生する領域以外に摂動を与えることがあって適切でないこと、動径風の同化や対流スケールの水蒸気分布の導入により、観測された場所に強い降水を再現することができ、強雨の成因として、下層の収束が重要であることがわかった。
- ・ 大阪管区气象台気候調査課も、2008 年 9 月 5 日に堺市で発生した局地豪雨を取り上げた。関西国際空港と大阪国際空港のドップラーレーダ動径風を用いた気流解析では、豪雨を引き起こした雷雨の発達時に、大阪平野に紀伊水道からの南西よりの気流と伊勢湾からまわり込んできた北東風によって、強い収束が高度 2km まで及んでいたことがわかった。大阪平野の北東風の重要性を示すために、モデル上で大阪平野の北東部分に人為的に山地を作って北東風を流れ込まないようにする感度実験を行うと、降水が弱まった。また、メソアンサンブル予報の各メンバーに、ドップラーレーダの動径風を同化して得られた解析値から予報を行い、強雨の要因を調べた。アンサンブル予報と同化で得られた解析値には、強雨を再現できたもののほかに、強雨とならなかったものがある。そのメンバー間の差異を調べると、可降水量や K-index と共に、下層の水蒸気量の収束が大きいメンバーで降水量が大きく、水蒸気量の収束が強雨を決める要因であることがわかった。この結果は、地形を変えた感度実験の結果とも調和的であった。この事例に似た事例で大雨とならなかったものとして、2010 年 8 月 5 日の雷雨をドップラーレーダ等のデータを用いて調べた。暖かく湿った気流が紀伊水道と伊勢湾から流れ込み、大阪湾付近で収束した点は 2008 年 9 月 5 日と同じであったが、大気の状態がそれほど不安定ではなかったことが、降水量が少な

かった原因と考えられる。

- 大阪管区気象台予報課では、2010年7月7日の東部大阪付近の大雨事例について、2008年9月5日の堺市の大雨事例と比較した解析を行った。メソアンサンブルデータを用いて現業作業で利用するための考察を行い、実況の気象状況と比較してメンバーを絞ることにより、迅速に大雨警報を発表することができる可能性が見出された。しかしながら、実際の予報現場でメンバーの絞り込みを行うには時間的制約もあるため、メソアンサンブルデータの効率的な利用手法を考えていく必要があることもわかった。
- 神戸海洋気象台では、大きな被害をもたらした2008年7月28日の都賀川豪雨、2009年8月9日の佐用町豪雨を取り上げた。都賀川豪雨では、豪雨発生時に兵庫県南部を東西にのびる発達した降水帯がゆっくりと南下していたが、その降水帯の形成には、地形の効果よりも、中国地方から移動してきた湿った気塊が瀬戸内海からの気流と収束して持ち上げられたことが本質的であったこと、また、都賀川の豪雨を引き起こした対流は、その降水帯からの冷気流が到達すると急激に発達していたことがわかった。佐用町豪雨については、アンサンブル予報で最も再現が良いメンバーの出力を用いて、豪雨時の特徴を調べた。佐用町豪雨の場合、内陸にあった冷気塊が南からの暖気によって山地に吹き付けられ厚みを増し、南側の暖気をより上方に持ち上げることが降水形成の要因の一つと考えられることがわかった。
- 松江地方気象台では、2008年8月16日、2010年7月11-12日、1983年7月22日、1988年7月15日の4つの事例を取り上げた。2008年8月16日の浜田の事例では、アンサンブル予報の複数のシナリオから、大雨の要因を調べた。その結果、高度800m以下に相当温位350K以上、高度1000mの水蒸気量が15g/kg以上の気塊の流入が維持されていることが重要で、この条件下では風速が弱い場合も大雨になりうるということがわかった。2010年7月11-12日の梅雨前線による大雨事例は、メソ解析の解析値を初期値にして実験を行ってテーピング状の雲域をもつシステムを再現し、前線の強化は900hPa以下で顕著であり、強化部分は東部分と西部分の二つに分かれており、合流やシア変形による効果が大きいことがわかった。1983年7月22日（昭和58年7月豪雨）と1988年7月15日の事例（浜田）では、JRA-25からのダウンスケール予報や非静力学モデル（NHM）用の3次元変分法同化システム（JNoVA0）を用いた同化実験を行った。豪雨を起こした降水系は、ダウンスケールのみでは再現できなかったが、さらに得られた予報値にJNoVA0を用いて地上データや高層データ等を同化すると、降水域をより実況に近づけることができた。今後、得られた実況に近い解析値を用いて詳細に解析する予定である。
- 広島地方気象台では、2008年8月29日、2009年7月24-25日、2010年7月16日の3つの事例を取り上げた。2008年8月29日の福山付近の大雨事例では、メソ解析値による解析の結果、大雨の表現が十分ではなく、4次元変分法同化システム（JNoVA）を適用し、降水の再現実験を行ったところ、位置や時間的なずれがあるものの再現性がよくなった。2009年7月24-25日の呉・東広島の大雨事例では、週間アンサンブルモデルの摂動を規格化して与えたメソアンサンブル（格子間隔10km）の出力から2kmにネスティングし、流跡線などを使った暖湿気の流入方向などの解析を行った。この事例は「梅雨前線北上に伴う前線本体の大雨」、「暖域内のメソ低気圧からのびるシアラインによる大雨」の2つに分けることができ、実況に近い初期値を採用したことから、前者の再現はできたが、後者については現象スケールが小さいことから、表現が弱く課題を残した。2010年7月16日の庄原市の局地的豪雨について、新たな解析事例として2kmにネスティングしたアンサンブルモデルによる調査を開始した。
- 高松地方気象台では、2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯の事例を取り上げた。アンサンブル予報の結果から、950hPa以下の豊後水道へ南からの暖湿流入が、局地的な低圧部の発生に寄与していたことがわかった。また、メソアンサンブルは「どのグループを選択するか」が重要であり、適切なサンプルを選択することは容易ではないが、最悪のシナリオの作成に有効であることがわかった。また、発生時間、継続時間に関する誤差については、予報作業時に実況監視を行い、人的な修正が必要であることもわかった。
- 高知地方気象台では、2006年5月19日に高知県中部で大雨をもたらした線状降水帯について、アンサンブル予報を用い、大雨を再現したメンバーを使って解析を行うとともに、メンバー間で振る舞いの異なる降水帯の比較から、大雨の要因を調べた。この事例では、局地的気象監視システム（WINDAS）の観測地点である「清水」と「高知」から得られる風の収束が大きい場合に、大雨になる可能性が大きいことがわかった。

当初計画からの変更点（研究手法の変更点等）

地方官署では、大雨事例と似ていて警報級の大雨とならなかったような事例の代わりに、メソアンサンブルで実況を再現できなかったメンバーを利用した。アンサンブル予報は解析誤差の範囲内の摂動を与えた初期値からの予報であることから、実際に起こりうる可能性のあるばらつきの範囲内での予報を同時に多数得ることができる。予報の現場での判断にも利用しやすい資料であることから、アンサンブル予報のメンバーを積極的に利用することとした。

成果の他の研究等への波及状況

本研究では、GPS データやメソアンサンブル予報の出力を解析データとして使用した。これらのデータ等を地方共同研究の資料として用いることにより、GPS データの検証、アンサンブル予報の有効性や限界に関する知見を参加した各官署で共有・確認することができた。

今後に残された課題

本研究で扱った事例について、その構造や維持機構に関する知見を多く得ることができたが、例えば、佐用町（兵庫県）の豪雨事例では、他の場所でも豪雨が発生しても不自然ではなく、どうして佐用町だけで豪雨になったのか、など疑問が残っている。今後も引き続き、疑問の残る事例について解析を進めるとともに、事例数を増やして知見を増やすことが必要である。

研究成果及びその活用に関する意見（気象研究所研究課題評価委員会による終了時評価）

（評価結果）

非常に優れた研究であった。

（総合所見）

本研究は、平成 19～20 年度に行われた地方共同研究「強雨をもたらす線状降水帯の形成機構等の解明及び降水強度・移動速度の予測に関する研究」を発展させた研究であり、市町村警報の発表開始により、地方官署職員が大雨をもたらす降水系の構造や発生要因について理解を深めることがますます重要になっているという状況において、良い研究課題であった。

目標の達成度については、気象官署によって多少のレベルの違いはあるものの、初期の目標をほぼ達成したと判断できる。ただし、総じて研究目標の設定が高く、事例抽出の客観性や大雨にならない事例との比較が不十分となったという指摘、さらには、下層収束、成層不安定、冷氣塊の存在などが強雨の成因として挙げられているが、この段階に留まったのでは新規性に乏しいという指摘があることには留意すべきである。

成果については、業務の面からは、担当者の気象現象に対する理解の促進とともに、注警報作業の円滑化に直接結び付く成果が得られたものと評価する。また、学術的な面からは、モデル・観測データを用いてよく解析しており、概ね想定された成果を挙げたと判断できる。また、大雨の構造と維持機構に関して先端の成果が得られたことにより、わが国のメソ降水気象学の体系化に貢献するものと思われる。また、多くの気象官署の職員が学会支部研究会等で多数の発表を行ったこと、日本気象学会誌への投稿も行ったことは特筆できる。その他の研究についても、今後なるべく論文としてまとめなどしてより完成度を高めてもらいたい。

実施手法については、前回の地方共同研究の総合評価で出された意見を反映した、気象研究所における最先端の解析・予測手法による再現実験からの基本資料の作成及びそれをもとにした大阪管内官署による大雨・非大雨事例の形成・構造の解明の 2 段階の調査解析になっていると認められ、高く評価できる。また、メソアンサンブル予報に着目したのは合理的である。

研究体制については、平成 19～20 年度の地方共同研究に基づいて、その資産を有効に活用できる枠組みで実施されたことは高く評価できる。地方官署では通常入手できない、精度の高い初期値を気象研究所で作成して提供し、それらを使って再現実験をするなど、気象研究所と地方気象官署との連携がうまく行われ、研究が効率的に進められた。多くの関係部門をまとめ上げ、組織的かつ計画的に実行したことは評価できる。

今後は、本研究の成果を活かし、例えば兵庫県佐用町における豪雨事例の解析を進めるなど、引き続き大雨発生要因や構造の解明を進めていただきたい。また、メソアンサンブル予報で再現メンバが

存在する事例を対象に、予報と実況を逐次照合することにより、現在の観測ネットワークで得られた実況データからどれくらい事前にメンバを絞り込めるものなのかについても明らかにしてほしい。さらに、本研究の各解析結果を整理・統合して、大雨に発達するキーププロセスやその条件（しきい値や指標の設定）の定量化につなげてほしい。研究成果の取りまとめは、「気象研究所技術報告」のみならず、より多くの研究者の目に触れる学術雑誌への投稿についても期待する。得られた成果は、予報現場での作業マニュアルとして取りまとめるとのことであり、現業への貢献が期待される。今後、成果を本庁や地方官署間で共有するとともに、さらに他の地方での同様な研究の実施を期待する。

成果発表状況

- ・印刷発表件数 5件
- ・口頭発表件数 2件

成果発表一覧

(1) 査読論文

1. 草開浩, 金森恒雄, 小山芳太, 瀬古弘, 2011: 2008年7月28日近畿地方を南西進した線状降水帯と都賀川での大雨について, *天気*, **58(5)**, 395-412.
2. 瀬古弘, 2010: 中緯度のメソβスケール線状降水帯の形態と維持機構に関する研究, *気象庁技術報告*, **62**, 1-74.

(2) 査読論文以外の著作物（翻訳、著書、解説）

1. Seko, H., K. Saito, M. Kunii and T. Miyoshi, 2009 : Data assimilation experiment of the Kobe thunder storm by using NHM-LETKF, *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **39**, 1.37-1.38.
2. 「2008年7月28日六甲山の南ろくで発生した大雨」調査研究グループ, 2010: 2008年7月28日六甲山の南ろくで発生した大雨, *神戸海洋気象台彙報*, **225**, 15-25.
3. 「2009年8月9日兵庫県佐用町付近で発生した集中豪雨」調査研究グループ, 2010: 2009年8月9日兵庫県佐用町付近で発生した集中豪雨, *神戸海洋気象台彙報*, **225**, 27-49.

(3) 口頭発表

1. Seko, H., K. Saito, M. Kunii and T. Miyoshi, 2009 : Data Assimilation Experiment of the Kobe Thunderstorm by using NHM-LETKF, *Symposium on Radar and Modeling Studies of the Atmosphere*, 2009.11. 10-13, 2009, Kyoto University.
2. Seko, H., K. Saito, T. Miyoshi and M. Kunii, 2010: Data assimilation experiments of the local intense rainfall using LETKF, *First International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*, 2010.9.29-10.1, Kyoto University.
3. 瀬古弘, 斉藤和雄, 川畑拓矢, 三好建正, 家藤敦章, 2009: 都市部に大雨をもたらした雷雨のLETKFを用いたアンサンブル予報実験, *日本気象学会 2009年度秋季大会*, 講演予稿集 P128.
4. 瀬古弘, 斉藤和雄, 国井勝, 原昌弘, 三好建正, 金森恒雄, 2009: LETKFを用いた日本域の豪雨再現実験, *日本気象学会 2009年度春季大会*, 講演予稿集 P161.
5. 瀬古弘, 国井勝, 斉藤和雄, 川畑拓矢, 三好建正, 2010: アンサンブルと同化手法を用いた局地豪雨再現実験, *日本気象学会 2010年度春季大会*, 講演予稿集 P406.
6. 小西誠二, 栗原佳代子, 秋山孝三, 金森恒雄, 草開浩, 小山芳太, 2009: 2006年8月22日の大雨の再解析（豊中豪雨）, *平成21年度大阪管区気象研究会誌（兵庫県）*.
7. 甲田浩行, 金森恒雄, 畝田栄作, 秋山幸三, 竹下誠, 2009: 2009年8月9～10日に発生した大雨の総観解析, *平成21年度大阪管区気象研究会誌（兵庫県）*.
8. 岡垣和憲, 畝田栄作, 金森恒雄, 草開浩, 2009: 2009年8月9～10日に発生した大雨の解析, *平成21年度大阪管区気象研究会誌（兵庫県）*.

9. 岡垣和憲, 甲田浩行, 栗原佳代子, 小西誠二, 畝田栄作, 金森恒雄, 草開浩, 小山芳太, 2009: 2009年8月9日兵庫県佐用町付近で発生した豪雨のメカニズム, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(兵庫県).
10. 金森恒雄, 岡垣和憲, 甲田浩行, 栗原佳代子, 小西誠二, 畝田栄作, 草開浩, 小山芳太, 瀬古弘, 2010: 2009年8月9日兵庫県佐用町付近で発生した豪雨のメカニズム, 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 120, 23-26.
11. 水野善夫, 谷口典史, 田中滋司, 依岡幸広, 2009: 2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯について, 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 118, 1-4.
12. 水野善夫, 谷口典史, 田中滋司, 依岡幸広, 2009: 2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯について(JMANHM再現実験), 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 118, 5-8.
13. 谷口典史, 水野善夫, 田中滋司, 依岡幸広, 2009: 2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯について, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(香川県).
14. 田中滋司, 水野善夫, 谷口典史, 依岡幸広, 2009: 2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯について(JMANHM再現実験), 平成21年度大阪管区気象研究会誌(香川県).
15. 谷口典史, 水野善夫, 田中滋司, 依岡幸広, 2009: 2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯について, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(四国地区).
16. 田中滋司, 水野善夫, 谷口典史, 依岡幸広, 2009: 2006年9月6日の高知県沿岸に発生した線状降水帯について(JMANHM再現実験), 平成21年度大阪管区気象研究会誌(四国地区).
17. 川端康弘, 新道義孝, 三井秀夫, 関谷博, 有吉正幸, 2009: 2006年5月19日高知県中部での大雨の事例解析, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(高知県).
18. 今野暁, 畝田栄作, 金森恒雄, 2009: 2009年7月22日の線状降水帯のメカニズム, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(高知県).
19. 竹田智博, 岡本美沙子, 家藤敦章, 朝原信長, 牧田広道, 2009: 2008年9月5日大阪府堺市における局地的大雨の発生機構～実況解析編～, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(大阪府).
20. 朝原信長, 岡本美沙子, 竹田智博, 家藤敦章, 牧田広道, 2009: 2008年9月5日大阪府堺市における局地的大雨の発生機構～数値実験編～, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(大阪府).
21. 岡本美沙子, 家藤敦章, 朝原信長, 竹田智博, 牧田広道, 瀬古弘, 2009: メソアンサンブルデータの利用方法について(2008年9月5日の事例), 平成21年度大阪管区気象研究会誌(大阪府).
22. 朝原信長, 竹田智博, 岡本美沙子, 家藤敦章, 牧田広道, 2009: 2008年9月5日大阪府堺市における局地的大雨の発生機構, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(近畿地区).
23. 東克彦, 神例孝典, 瓜生由明, 2009: 2009年7月24日から25日にかけての広島県南部を中心とした大雨(平成21年度地方共同研究関連), 平成21年度大阪管区気象研究会誌(広島県).
24. 草開浩, 金森恒雄, 栗原佳代子, 2009: CGIで操作する流跡線解析ソフト, 平成21年度大阪管区気象研究会誌(大阪府(航空)).
25. 東克彦, 2009: 2008年8月29日の福山付近の大雨について, 日本気象学会関西支部、例会講演要旨集, 119, 5-8.
26. 岡本美沙子, 江崎雄治, 坂田賢志, 金森恒雄, 楠田和博, 小山芳太, 2010: 2008年9月5日大阪府堺市における局地的大雨の発生機構(その2), 平成22年度大阪管区気象研究会誌(大阪府).
27. 小山芳太, 楠田和博, 金森恒雄, 江崎雄治, 岡本美沙子, 坂田賢志, 2010: 平成22年7月7日の大雨について～メソアンサンブルデータの利用～, 平成22年度大阪管区気象研究会誌(大阪府).
28. 坂田賢志, 江崎雄治, 岡本美沙子, 金森恒雄, 楠田和博, 小山芳太, 2010: 2010年8月3日の

- 大阪府北部の降水メカニズム, 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (大阪府) .
29. 小山芳太, 金森恒雄, 草開浩, 瀬古弘, 2010: 2009 年 8 月 9 日兵庫県佐用町で発生した大雨について, 日本気象学会関西支部 2010 年度関西支部年会講演予稿集, 45-48.
 30. 岡本美沙子, 家藤敦章, 牧田弘道, 金森恒雄, 朝原信長, 竹田智博, 瀬古弘, 2010: 2008 年 9 月 5 日の大阪府堺市における局地的大雨の発生機構, 日本気象学会関西支部 2010 年度関西支部年会講演予稿集, 49-52.
 31. 小山芳太, 金森恒雄, 草開浩, 瀬古弘, 2010: 2009 年 8 月 9 日兵庫県佐用町で発生した大雨について, 日本気象学会 2010 年度秋季大会講演予稿集, P355.
 32. 足立誠, 栗山佳之, 川口純, 依岡幸広, 2010: JRA-25 と 3 次元変分法 (JNoVA0) を用いた島根県西部の大雨の再現実験, 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (島根県) .
 33. 栗山佳之, 川口純, 依岡幸広, 足立誠, 2010: LETKF を用いた大雨時の物理量の比較, 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (島根県) .
 34. 田中基裕, 東克彦, 穂山数之, 佐伯亮介, 寺尾克彦, 2010: 2010 年 7 月 16 日広島県庄原市での大雨について, 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (広島県) .
 35. 田中基裕, 東克彦, 穂山数之, 佐伯亮介, 寺尾克彦, 2010: 2010 年 7 月 16 日広島県庄原市での大雨について, 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (中国地区) .
 36. 田中滋司, 水野善夫, 宇野田隆司, 2010: 実況と JMANHM を用いた再現実験結果との比較について (2006 年 9 月 6 日の高知県沿岸に発生した線状降水帯), 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (香川県) .
 37. 山岡和弘, 水野善夫, 濱田浩一, 田中滋司, 宇野田隆司, 2010: メソアンサンブル (LETKF) メンバーの比較調査 (2006 年 9 月 6 日の高知県沿岸に発生した線状降水帯), 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (香川県) .
 38. 濱田浩一, 水野善夫, 山西大輔, 田中滋司, 山岡和弘, 2010: メソアンサンブル (MSV 法) メンバーの比較調査 (2006 年 9 月 6 日の高知県沿岸に発生した線状降水帯), 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (香川県) .
 39. 田中滋司, 水野善夫, 福原正明, 宇野田隆司, 2010: 実況と JMANHM を用いた再現実験結果との比較について (2006 年 9 月 6 日の高知県沿岸に発生した線状降水帯), 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 122.
 40. 山岡和弘, 水野善夫, 濱田浩一, 田中滋司, 山西大輔, 福原正明, 2010: メソアンサンブル (MSV 法) メンバーの比較調査 (2006 年 9 月 6 日の高知県沿岸に発生した線状降水帯), 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 122.
 41. 梅津浩典, 西本章, 重岡昌嗣, 三井秀夫, 吉田克己, 2010: 「2006 年 5 月 19 日 高知県中部での大雨の事例解析 その 2」, 平成 22 年度大阪管区気象研究会誌 (高知県)