

委託研究成果報告書

活動的カルデラにおける観測データの情報整備

平成 26 年 2 月

(独)防災科学技術研究所

○研究目的

火山災害の原子力施設への影響評価において、活動的カルデラの噴火可能性を把握することが重要となる。そのためには観測データの評価や数値シミュレーション等による事前評価が有効な手段となる。

本研究ではこれらについて、世界各地の活動的カルデラにおける研究の現状を把握し、観測データ等の情報を整備することにより、今後の火山モニタリング評価における指標策定に資することを目的とする。

○委託研究内容

(1) 研究目標

世界のカルデラにおける観測事例(地震・地殻変動・火山ガス等)及びそのデータについて、観測データに異常が検知された際のカルデラ活動の判定事例を中心に収集すると共に、カルデラ噴火のシミュレーション構築に資する情報を取得し、活動的カルデラにおける観測データの情報を整備する。

(2) 研究計画

ロングバレー、イエローストーン(米国)、カンピ・フレグレイ(イタリア)など、世界の活動的なカルデラにおける観測データ評価の現状及び観測データと連携した数値シミュレーション等の活動評価手法について、一部外部に委託し、文献等を調査する。また、熊本・鹿児島においてカルデラの現地調査を行い、想定シミュレーションのための地理的条件仮定のための情報を取得する。調査結果に基づき、防災科研にて火山モニタリングを評価するためのシミュレーション実施手法について検討し、報告書を作成する。

1. 文献調査

本調査は、世界各地の活動的カルデラにおける研究の現状を把握し、観測データ等の情報を整備することにより、今後の火山モニタリング評価における指標策定に資することを目的とするものである。ロングバレー(米国)、カンピ・フレグレイ(イタリア)、イエローストーン(米国)、小笠原硫黄島(日本)、タウポ(ニュージーランド)、ラグナ・デ・マウレ(チリ)を対象とし、観測データ評価の現状及び観測データについて、文献等の調査を行った。

ロングバレー(米国)	17 編
カンピ・フレグレイ(イタリア)	16 編
イエローストーン(米国)	17 編
小笠原硫黄島(日本)	5 編
タウポ(ニュージーランド)	8 編
ラグナ・デ・マウレ(チリ)	2 編

収集した文献は、著者名、発行年、論文名を記載するとともに、文献において記載されている火山モニタリングの対象・現象(地震活動、地殻変動、重力、地下構造、火山ガス、温泉水・河川水、噴気活動等)に応じて分類し、各文献における主な解析内容を整理した。

また、収集した文献のうち、火山モニタリングによる観測データの時空間分布及び時間変化の観点から、火山活動の現状が検討・評価されている文献を対象として、それらの記載内容(モニタリングの目的・結果、観測点分布・観測項目、モニタリング結果図(分布図・時間変化図)、特徴)を文献帳票に整理した。

○ロングバレー

ロングバレーにおける観測データ, 及びに観測データに基づく現状の活動評価に関する下記文献の記載内容を第 1.2-1 表～第 1.2-6 表に整理した。

[LV-1]

Ji, K. H., Herring, T. A. and Llenos, A. L. (2013) :

Near real-time monitoring of volcanic surface deformation from GPS measurements at Long Valley Caldera, California, *Geophysical Research Letters*, **40**, pp.1054–1058.

[LV-6]

Feng, L. and Newman, A. V. (2009) :

Constraints on continued episode inflation at Long Valley caldera, based on seismic and geodetic observations, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B06403.

[LV-7]

Tizzani, P., Battaglia, M., Zeni, G., Atzori, S., Berardino, P. and Lanari, R. (2009) :

Uplift and magma intrusion at Long Valley caldera from InSAR and gravity measurements, *Geology*, **37**, 1, pp.63–66.

[LV-10]

Hill, D. P. (2006) :

Unrest in Long Valley Caldera, California, 1978-2004, *Geological Society, London, Special Publications*, 269, pp.1–24.

[LV-11]

Hill, D. P. and Prejean, S. (2005) :

Magmatic unrest beneath Mammoth Mountain, California, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **146**, pp.257–283.

[LV-12]

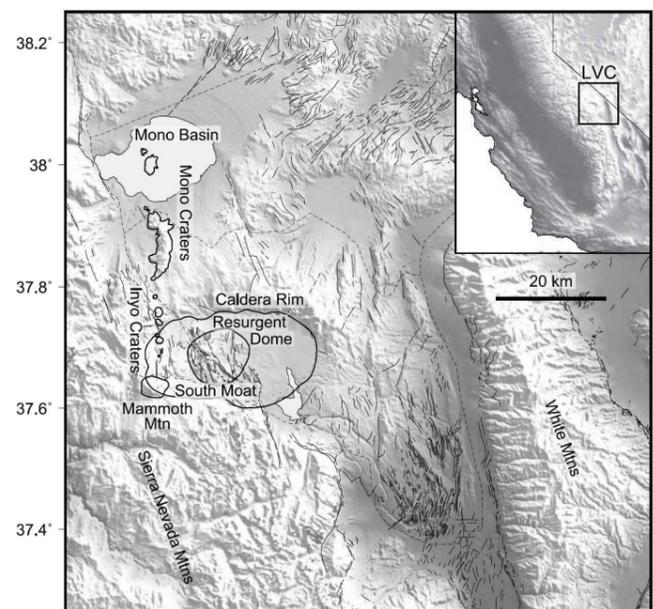
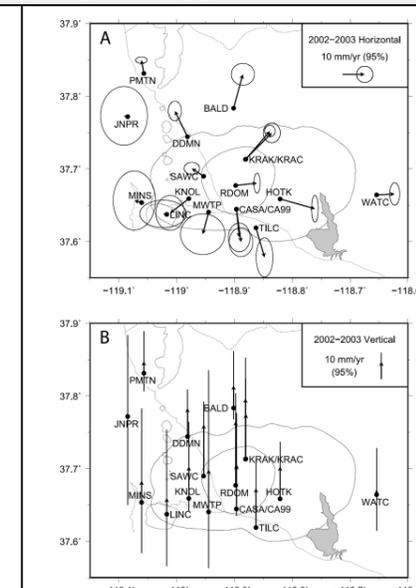
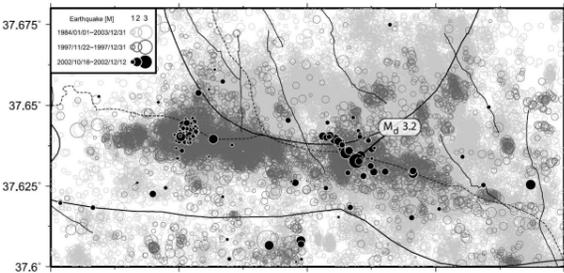
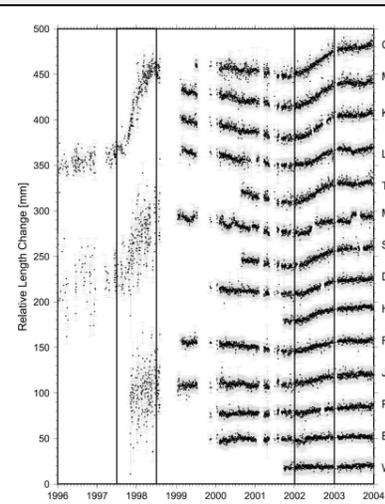
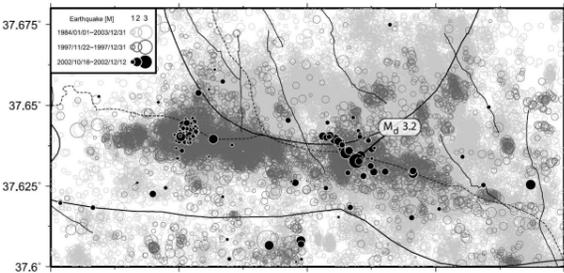
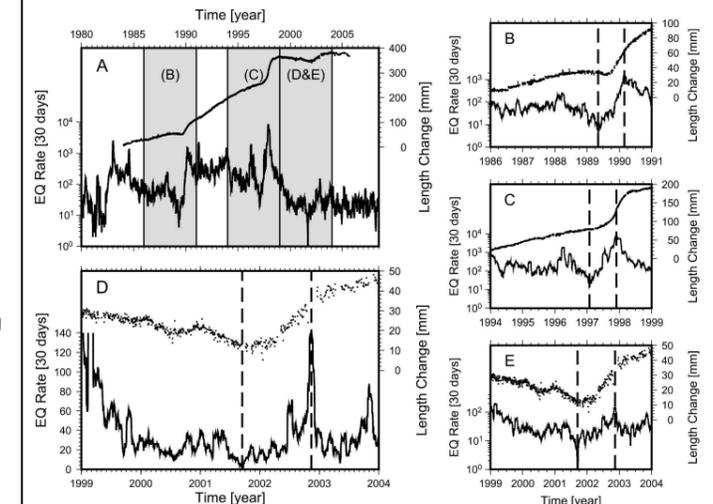
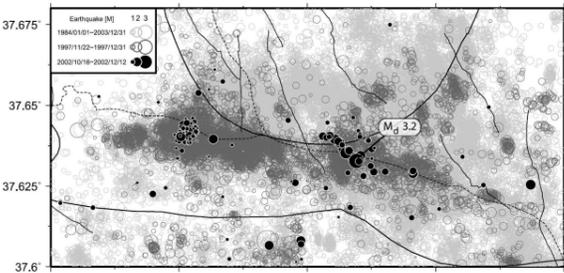
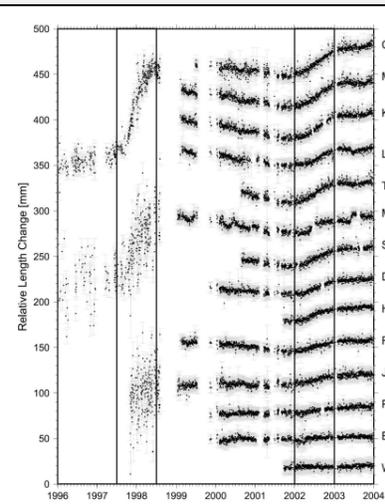
Battaglia, M., Segall, P. and Roberts, C. (2003) :

The mechanics of unrest at Long Valley caldera, California. 2. Constraining the nature of the source using geodetic and micro-gravity data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **127**, pp.219–245.

第 1.2-1 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-1)

ロングバレーカルデラ (Long Valley)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
LV-1	Ji, K. H. et al.	2013	Near real-time monitoring of volcanic surface deformation from GPS measurements at Long Valley Caldera, California	Geophysical Research Letters, 40, pp. 1054-1058			●																
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																				
Targeted Projection Operator (TPO) と呼ばれる簡便で準リアルタイム観測が可能な射影法を用いた GPS 観測によって, 2011 年以降に開始・継続する膨張運動を把握する。			TPO 解析によって, ロングバレーカルデラにおける 2007 年~09 年の隆起, 2009 年~10 年の沈降, 2011 年以降の膨張に係る地表変動の詳細を示した。2011 年以降の隆起は, 2007 年~09 年イベントよりも 4 倍の速さを有し, 0.009km ³ の体積変化を有する膨張源が再生ドーム下の深さ 6.6km に推定される。TPO 解析は, 多くの GPS 地点によるデータ解析を要するものに比べて, 簡便で準リアルタイムなモニタリング技術である。																				
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴					
<p>Figure 1. (a) Map of the Long Valley Caldera region. The spatial pattern from a principal component analysis (black vectors) and the velocity estimates with data after 2011.75 (blue vectors) represent a radial deformation pattern from the resurgent dome. The sites with white squares are not used in the analysis. Scales are shown above the inset map. The PCA amplitude is a fraction of the amplitude of the TPO time series shown in Figure 1b. The error ellipses of the observed velocities indicate 95% confidence interval. (b) TPO time series (dots) and 1-sigma uncertainties (gray error bars). The black and blue two-sided arrows indicate, respectively, the intervals in which the PCA pattern was calculated, and the observed velocity field was calculated. Note the significant inflation that started in the late 2011. (c) Values of chi-square per degrees of freedom (χ^2_{dof}; gray). The black lines are 30 day averages. χ^2_{dof} has increased since 2011, suggesting increasing misfits in projection.</p>			GPS 解析			<p>Figure 2. (a) Horizontal and (b) vertical observed velocities (black vectors) with 95% error ellipses and calculated velocities (gray vectors) from a Mogi model. The station ID can be found in Figure 1a. The Mogi model is located beneath the resurgent dome (black star) at about 6.6 km depth with a rate of 0.009 km³/yr volume change. The Mogi model well represents most of the observed velocities within 95% confidence interval ($\chi^2_{dof} = 1.55$), even though the vertical velocities are somewhat underestimated. The blue and green circles indicate the Mogi models of the 2002-2003 inflation from Feng and Newman [2009] and Liu et al. [2011], respectively, and the red circle indicates the Mogi model of the 2007-2009 inflation from Liu et al. [2011]. These models suggest that the deformation sources have little variation in horizon. Note the different scale between horizontal and vertical velocities.</p>															<p>TPO 解析等によれば, 2007 年~09 年はゆっくりとした隆起 (2008 年頃のゆっくりとした沈降含む) の後, 2009 年中頃~2010 年中頃の沈降を経て, 2007 年~09 年イベント前のレベルに戻る。そして, 2011 年後半から隆起イベントが開始し, 2012 年中頃の低下後, 再度隆起速度が増加する。</p> <p>χ^2 分布では, 2007 年~2008 年中頃と 2011 年以降では, ターゲットと異なる変動パターンを示すことから, ばらつきが大きくなる。</p>		
[観測項目 (解析項目)]			<p>・GPS : 83 基準点 (35° N~40° N, 123° W~114° W)</p> <p>※水平変動 : 0.1mm/年, 上下変動 : 0.3mm/年を除く 25 地点を対象</p> <p>※基本となる地表変動パターンとの比較</p>																				
論文概要			再生ドームの南縁付近において, 最大変位速度として, 水平 10.1±1.9mm/年, 上下 19.9±3.9mm/年が得られる。																				
			モンテカルロ法により, 変動源は, 再生ドームの深さ約 6.6km (体積変化 0.9×10 ³ m ³ /年) と求められるが, 上下方向の変位量は遠方で調和的でない。																				

第 1.2-2 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-6)

ロングバレーカルデラ (Long Valley)																																																									
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																																																				
LV-6	Feng, L. and Newman, A. V.	2009	Constraints on continued episode inflation at Long Valley caldera, based on seismic and geodetic observations	Journal of Geophysical Research, 114, B06403	地震活動	地表変動							重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動																																	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計	潮位計		地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ																																	
					●		●	●																																																	
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																																																						
地表変動及び地震活動に基づき, 1970 年代以降継続する隆起異常の特徴について検討する。			13 地点の GPS 連続解析により, 1979 年~80 年, 1983 年, 1989 年~90 年, 1997 年~98 年イベントに引き続き, 2002 年~03 年に急速な隆起現象を確認した。2002 年~03 年イベントの膨張源は, 再生ドームの西方 3km 以内で, 最大隆起量は 1997 年~98 年イベントの 1/3 規模 (~3.5±0.8cm) である。膨張源は, その形状 (球状/偏重) により, 深さは 7.5km~13.5km, 体積変化は 0.01km ³ ~0.03km ³ の幅を有する。2002 年~03 年イベントは, 1989 年~90 年より 1997 年~98 年イベントよりも大きな隆起速度を示すが, 地震活動は全体に低調である。一方, すべてのイベントは, 地震活動の静穏化後間もなく開始する特徴を有しており, 2002 年~03 年イベント後の Mono-Inyo 火山列の拡大は, 二つのマグマ供給系間のマグマ流体の相互作用に関連することを示唆する。																																																						
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																	特徴																																					
 <p>Figure 1. Shaded relief map of Long Valley Caldera and Mono-Inyo volcanic chain. Thick lines outline the caldera topographic rim, the resurgent dome, the Mono-Inyo craters, and Mammoth Mountain. Thin lines show the major faults in and around the Long Valley area. Dashed lines are roads. Inset shows the location of Long Valley Caldera in central eastern California.</p>			 <p>Figure 2. Locations of 17 continuous GPS stations in and near Long Valley Caldera. Arrows show the estimated (a) horizontal and (b) vertical velocities between 2002 and 2003 for all the 17 stations. Ellipses represent 95% confidence error including white noise, flicker noise, and random walk noise.</p>																	<p>2002 年始め~03 年始めにかけて, ほとんどの基線長データに大きな変化がみられるが, 1997 年~98 年イベントに比べて隆起量は 1/3 程度である。</p> <p>再生ドームの西側では, ロングバレー下の圧力源の存在を反映して, 放射状の水平変位を示す。カルデラ外の 4 つの基準点 (PMTN, JNPR, MINS, LINC) はこのパターンから外れ, 基盤岩の影響を受けている。</p> <p>2002 年~03 年の最大隆起量は約 3.3±0.8cm (RDOM: 再生ドーム中央部に近接) である。</p> <p>Mogi モデルによる解析より, Yang モデルの方が標準偏差が小さく, Yang モデルでは, 変動源は, 偏重 0.76 の楕円球体で, 深さ 11km で, ~0.02km³/年の体積変化が求められる。</p>																																					
<p>Figure 9. Black lines are 30-day centrally averaged earthquake rates in the larger South Moat Seismic Zone (SMSZ). Black dots are normalized EDM baselines between CASA and KRAK. (a) In 1980-2006. Gray boxes highlight the periods for Figures 9b, 9c, 9d, and 9e. (b) In 1986-1991. (c) In 1994-1999. (d and e) In 1999-2004 (linear and log earthquake rates). The first dashed line in Fig 9b, 9c, 9d, and 9e indicates seismic quiescence immediately prior to inflation, while the second dashed line indicates the peak in seismic activity during the maximum rate of uplift.</p>																				<p>1989 年~90 年, 1997 年~98 年及び 2002 年~03 年のイベントにおける CASA-KRAK 間 (Mono-Inyo 火山列間) の基線長と地震活動 (South Moat Seismic Zone) を比較した結果, 2002 年~03 年イベントでは, 基線長増加時に長期的な地震活動の増加はないが, 最大隆起期間における明瞭な地震活動のピークがみられる。</p> <p>2002 年~03 年イベントでは, SMSZ の地震活動は低調であり, Mono-Inyo 火山列の活動が示唆される。</p>																																					
<p>Figure 10. Seismicity in the larger SMSZ area between 1984 and 2003. Dark gray open circles represent earthquakes during the seismic peak of the 1997-1998 episode. Black solid circles indicate earthquakes during the seismic peak of the 2002-2003 episode. Light gray circles are other earthquakes in 1984-2003.</p>																																																									
<p>Figure 3. Relative GPS baseline length changes between the reference station, KRAK, and other GPS stations. Most stations show a clear rapid extension during the 2002-2003 period right after a short-term contraction. CASA, MINS, and JNPR, established before 1999, also display a much larger length increase during the 1997-1998 episode.</p>																																																									
<p>Table 1. Summary for Models Including 95% Likelihood Range as Determined by Bootstrap^a</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Model</th> <th>ndf</th> <th>χ^2</th> <th>χ^2</th> <th>Longitude (deg)</th> <th>Latitude (deg)</th> <th>Depth (km)</th> <th>ΔV (km³)</th> <th>b/a</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>No model</td> <td>33</td> <td>1534.55</td> <td>46.50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mogi</td> <td>29</td> <td>56.72</td> <td>1.96</td> <td>-118.930</td> <td>37.678</td> <td>11.7</td> <td>0.023</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>-118.935 to -118.908</td> <td>37.672-37.687</td> <td>7.5-13.5</td> <td>0.010-0.030</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Yang</td> <td>28</td> <td>52.83</td> <td>1.89</td> <td>-118.931</td> <td>37.678</td> <td>10.6</td> <td>0.022</td> <td>0.76</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>-118.936 to -118.910</td> <td>37.672-37.686</td> <td>9.2-12.2</td> <td>0.015-0.027</td> <td>0.55-0.99</td> </tr> </tbody> </table> <p>^aHere ndf is number of degrees of freedom.</p>			Model	ndf	χ^2	χ^2	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Depth (km)	ΔV (km ³)	b/a	No model	33	1534.55	46.50						Mogi	29	56.72	1.96	-118.930	37.678	11.7	0.023						-118.935 to -118.908	37.672-37.687	7.5-13.5	0.010-0.030		Yang	28	52.83	1.89	-118.931	37.678	10.6	0.022	0.76					-118.936 to -118.910	37.672-37.686	9.2-12.2	0.015-0.027	0.55-0.99	
Model	ndf	χ^2	χ^2	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Depth (km)	ΔV (km ³)	b/a																																																	
No model	33	1534.55	46.50																																																						
Mogi	29	56.72	1.96	-118.930	37.678	11.7	0.023																																																		
				-118.935 to -118.908	37.672-37.687	7.5-13.5	0.010-0.030																																																		
Yang	28	52.83	1.89	-118.931	37.678	10.6	0.022	0.76																																																	
				-118.936 to -118.910	37.672-37.686	9.2-12.2	0.015-0.027	0.55-0.99																																																	
<p>Figure 10. Seismicity in the larger SMSZ area between 1984 and 2003. Dark gray open circles represent earthquakes during the seismic peak of the 1997-1998 episode. Black solid circles indicate earthquakes during the seismic peak of the 2002-2003 episode. Light gray circles are other earthquakes in 1984-2003.</p>																																																									
<p>Figure 9. Black lines are 30-day centrally averaged earthquake rates in the larger South Moat Seismic Zone (SMSZ). Black dots are normalized EDM baselines between CASA and KRAK. (a) In 1980-2006. Gray boxes highlight the periods for Figures 9b, 9c, 9d, and 9e. (b) In 1986-1991. (c) In 1994-1999. (d and e) In 1999-2004 (linear and log earthquake rates). The first dashed line in Fig 9b, 9c, 9d, and 9e indicates seismic quiescence immediately prior to inflation, while the second dashed line indicates the peak in seismic activity during the maximum rate of uplift.</p>																																																									
<p>Figure 10. Seismicity in the larger SMSZ area between 1984 and 2003. Dark gray open circles represent earthquakes during the seismic peak of the 1997-1998 episode. Black solid circles indicate earthquakes during the seismic peak of the 2002-2003 episode. Light gray circles are other earthquakes in 1984-2003.</p>																																																									
<p>Figure 3. Relative GPS baseline length changes between the reference station, KRAK, and other GPS stations. Most stations show a clear rapid extension during the 2002-2003 period right after a short-term contraction. CASA, MINS, and JNPR, established before 1999, also display a much larger length increase during the 1997-1998 episode.</p>																																																									
<p>Table 1. Summary for Models Including 95% Likelihood Range as Determined by Bootstrap^a</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Model</th> <th>ndf</th> <th>χ^2</th> <th>χ^2</th> <th>Longitude (deg)</th> <th>Latitude (deg)</th> <th>Depth (km)</th> <th>ΔV (km³)</th> <th>b/a</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>No model</td> <td>33</td> <td>1534.55</td> <td>46.50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mogi</td> <td>29</td> <td>56.72</td> <td>1.96</td> <td>-118.930</td> <td>37.678</td> <td>11.7</td> <td>0.023</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>-118.935 to -118.908</td> <td>37.672-37.687</td> <td>7.5-13.5</td> <td>0.010-0.030</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Yang</td> <td>28</td> <td>52.83</td> <td>1.89</td> <td>-118.931</td> <td>37.678</td> <td>10.6</td> <td>0.022</td> <td>0.76</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>-118.936 to -118.910</td> <td>37.672-37.686</td> <td>9.2-12.2</td> <td>0.015-0.027</td> <td>0.55-0.99</td> </tr> </tbody> </table> <p>^aHere ndf is number of degrees of freedom.</p>			Model	ndf	χ^2	χ^2	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Depth (km)	ΔV (km ³)	b/a	No model	33	1534.55	46.50						Mogi	29	56.72	1.96	-118.930	37.678	11.7	0.023						-118.935 to -118.908	37.672-37.687	7.5-13.5	0.010-0.030		Yang	28	52.83	1.89	-118.931	37.678	10.6	0.022	0.76					-118.936 to -118.910	37.672-37.686	9.2-12.2	0.015-0.027	0.55-0.99	
Model	ndf	χ^2	χ^2	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Depth (km)	ΔV (km ³)	b/a																																																	
No model	33	1534.55	46.50																																																						
Mogi	29	56.72	1.96	-118.930	37.678	11.7	0.023																																																		
				-118.935 to -118.908	37.672-37.687	7.5-13.5	0.010-0.030																																																		
Yang	28	52.83	1.89	-118.931	37.678	10.6	0.022	0.76																																																	
				-118.936 to -118.910	37.672-37.686	9.2-12.2	0.015-0.027	0.55-0.99																																																	

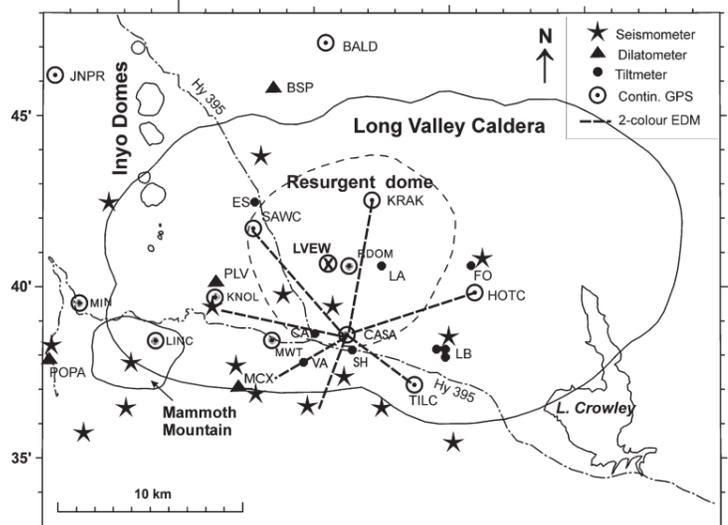
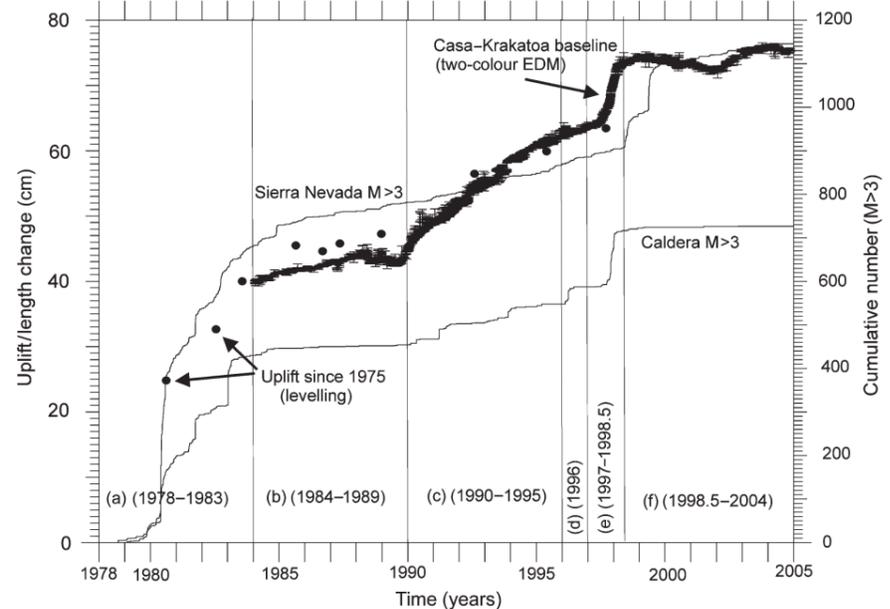
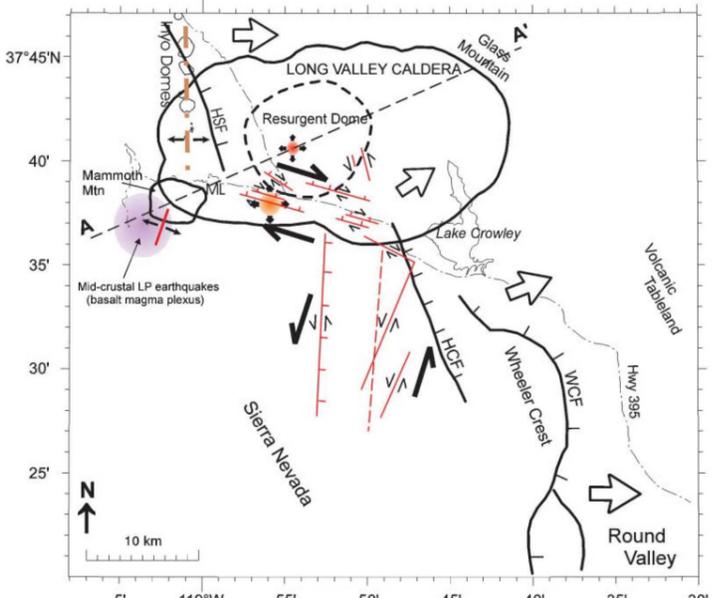
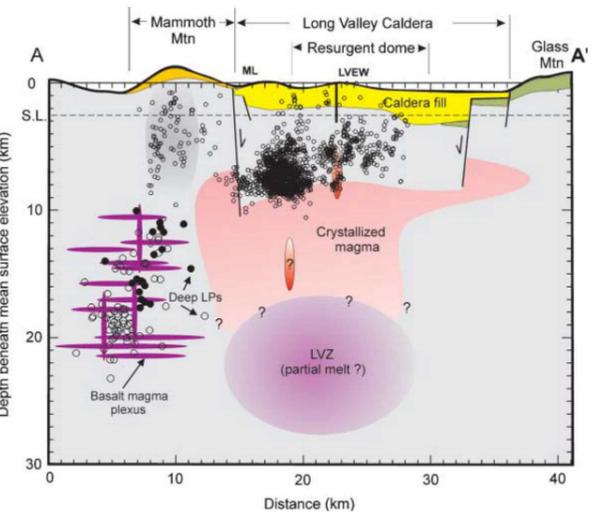
第 1.2-3 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-7)

ロングバレーカルデラ (Long Valley)																																																																											
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																																																																					
						地表変動					重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動																																																					
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR		ひずみ計	潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ																																																			
LV-7	Tizzani, P., et al.	2008	Uplift and magma intrusion at Long Valley caldera from InSAR and gravity measurements	Geology, 37, 1, pp83-88		●	●	●																																																																			
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																																																																								
InSAR, 水準測量, GPS, 光波測距及び微小重力に基づき, ロングバレーカルデラの噴火未遂事象の原因とその変動源の特性 (InSAR を用いた 1992 年~2000 年の地表変動, 多数の光波測距に基づく変動源評価, 変動源の形状) について検討する。			InSAR 解析及び光波測距より, 1992 年~2000 年の変動源は再生ドーム直下の深さ 6.6km~8.7km に傾いた楕円体が推定される。一方, 地表変動と重力データに基づくインバージョン解析により, 貫入岩の密度は 2509kg/m ³ と求められ, 1982 年~99 年にかけての地表変動は玄武岩~珪長質マグマの貫入によると考えられる。																																																																								
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																	特徴																																																							
<p>Figure 1. Shaded relief map of Long Valley caldera and monitoring sites. Brown—caldera; yellow—resurgent dome. Coordinates are in UTM NAD27. Inset in upper right corner shows location of study area. EDM—two-color electronic distance meter; GPS—global positioning system.</p>			<p>Figure 2. Vertical deformation along Highway 395 leveling route (Fig. 1). This route runs across Long Valley caldera resurgent dome. Symbols correspond to elevation differences from 1975 for specified time intervals (Dzurisin, Cascades Volcano Observatory, 2008, personal commun.).</p> <table border="1"> <caption>TABLE 1. BEST-FIT STATISTICS AND PARAMETERS</caption> <thead> <tr> <th>Data sets (1992-1999)</th> <th>Weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SAR 1992-1999 (points)</td> <td>12,678</td> </tr> <tr> <td>EDM 1992-1999 (baselines)</td> <td>70</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <caption>Best-fit statistics</caption> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th>Value</th> <th>Null solution</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Final cost (χ²)</td> <td>1.34</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SAR data: RMS (cm)</td> <td>0.90</td> <td>7.8</td> </tr> <tr> <td>EDM data: RMS (cm)</td> <td>2.06</td> <td>7.2</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <caption>Best-fit parameters</caption> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th>Value</th> <th>Search interval</th> <th>95% bounds</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Semi-major axis a (m)</td> <td>969</td> <td>10-3000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Axis ratio b/a</td> <td>0.660</td> <td>0.000-1.000</td> <td>0.56-0.94</td> </tr> <tr> <td>Depth (km)</td> <td>7.643</td> <td>3.000-9.000</td> <td>6.6-8.7</td> </tr> <tr> <td>Strike angle (°)</td> <td>216</td> <td>0-360</td> <td>196-302</td> </tr> <tr> <td>Dip angle (°)</td> <td>63</td> <td>0-90</td> <td>30-77</td> </tr> <tr> <td>Source center E (UTM)</td> <td>332764</td> <td>330000-336000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Source center W (UTM)</td> <td>4172754</td> <td>4169000-4173000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Volume change (km³)</td> <td>0.068</td> <td>10⁻⁴-0.800</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Note: SAR—synthetic aperture radar; EDM—two-color electronic distance meter; RMS—root mean square.</p>																	Data sets (1992-1999)	Weight	SAR 1992-1999 (points)	12,678	EDM 1992-1999 (baselines)	70	Parameter	Value	Null solution	Final cost (χ ²)	1.34		SAR data: RMS (cm)	0.90	7.8	EDM data: RMS (cm)	2.06	7.2	Parameter	Value	Search interval	95% bounds	Semi-major axis a (m)	969	10-3000		Axis ratio b/a	0.660	0.000-1.000	0.56-0.94	Depth (km)	7.643	3.000-9.000	6.6-8.7	Strike angle (°)	216	0-360	196-302	Dip angle (°)	63	0-90	30-77	Source center E (UTM)	332764	330000-336000		Source center W (UTM)	4172754	4169000-4173000		Volume change (km ³)	0.068	10 ⁻⁴ -0.800		<p>再生ドーム直下の深さ 6.6km~8.7km に, 水平方向から 63° 傾いた楕円球体 (長短軸比: 0.56~0.84) が推定される。</p>	
Data sets (1992-1999)	Weight																																																																										
SAR 1992-1999 (points)	12,678																																																																										
EDM 1992-1999 (baselines)	70																																																																										
Parameter	Value	Null solution																																																																									
Final cost (χ ²)	1.34																																																																										
SAR data: RMS (cm)	0.90	7.8																																																																									
EDM data: RMS (cm)	2.06	7.2																																																																									
Parameter	Value	Search interval	95% bounds																																																																								
Semi-major axis a (m)	969	10-3000																																																																									
Axis ratio b/a	0.660	0.000-1.000	0.56-0.94																																																																								
Depth (km)	7.643	3.000-9.000	6.6-8.7																																																																								
Strike angle (°)	216	0-360	196-302																																																																								
Dip angle (°)	63	0-90	30-77																																																																								
Source center E (UTM)	332764	330000-336000																																																																									
Source center W (UTM)	4172754	4169000-4173000																																																																									
Volume change (km ³)	0.068	10 ⁻⁴ -0.800																																																																									
<p>Figure 3. Modeling of deformation at Long Valley caldera by fitting a spheroidal source in an elastic homogeneous half space (see Table 1 for parameters). (A) 1992-1999 synthetic aperture radar interferometry (InSAR) data, (B) model, and (C) residual. We used a nonlinear inversion algorithm based on Levenberg-Marquardt least-squares approach (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). Coordinates are in UTM NAD27.</p>			<p>地表変動と重力データに基づくインバージョン解析により, 貫入岩の密度は 2509kg/m³, 周辺基盤岩の密度は 2192kg/m³~3564kg/m³ と求められる。1982 年~99 年の地表変動は, 玄武岩~珪長質マグマの貫入によると考えられる。</p>																																																																								
<p>[観測項目 (解析項目)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ERS SAR データ (1992 年 6 月~2000 年 8 月) 水準測量 (1982 年~1999 年) 光波測距 (1982 年~2000 年) 重力測定 																																																																											

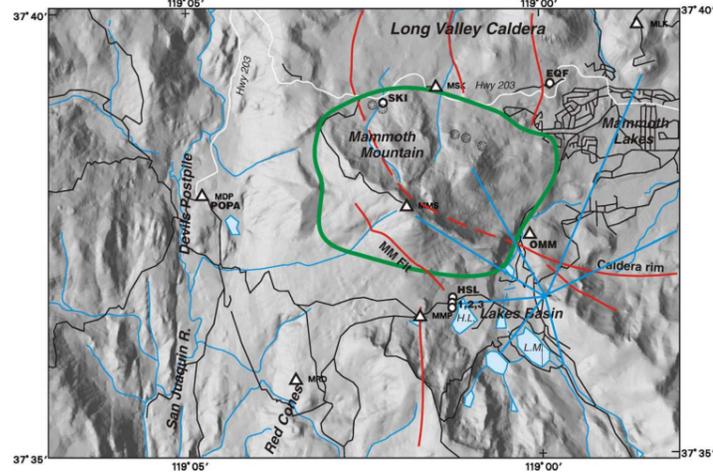
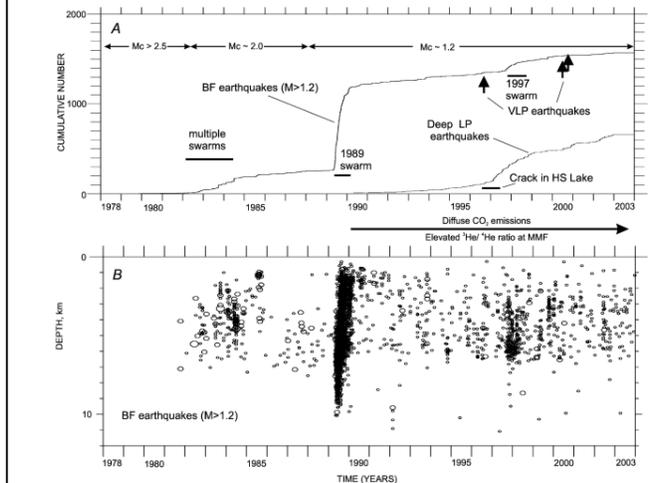
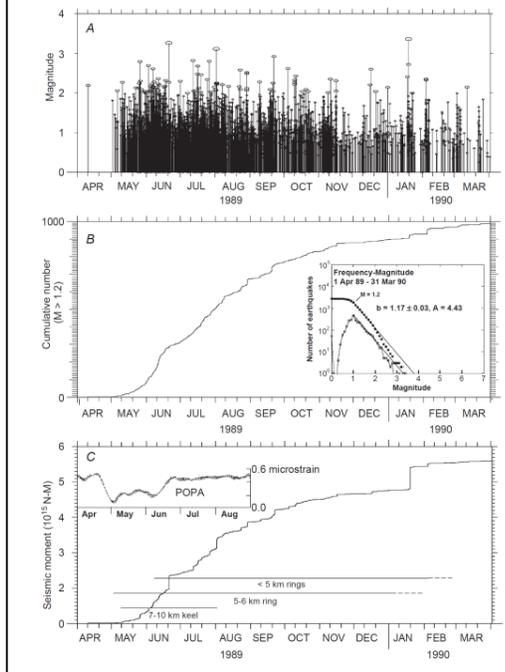
第 1.2-4 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-10) (1)

ロングバレーカルデラ (Long Valley)																										
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																					
LV-10	Hill, D. P.	2006	Unrest in Long Valley Caldera, California, 1978-2004	Geological Society, London, 269, pp.1-24	地震活動	地表変動								重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計	潮位計	地震波速度構造		比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ		
					●	●	●	●					●													
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																							
ロングバレーカルデラにおける噴火未遂事象(1970 年以降継続)の変化と、その構造運動とマグマプロセスとの関連性について着目する。			ロングバレーカルデラでは、1970 代後半以降継続する噴火未遂事象において、群発地震の繰り返し発生、再生ドームの約 80cm の隆起、カルデラ南西縁の Mammoth Mountain 斜面におけるマグマ性二酸化炭素の放出、その他の上部・中部地殻でのマグマ移動に係る兆候が発生している。噴火未遂事象を引き起こす原因となる Mammoth Mountain と Inyo Mono 火山列と、カルデラ下の中部～上部地殻内に存在するマグマ源の位置、大きさとその関連性、並びに、これらのマグマ源が下部地殻や上部マントル内のマグマ供給系とどのような経路でつながるかについて検討した。																							
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																		特徴					
論文概要	<p>Fig. 2. Generalized geological map of the Long Valley Caldera-Mono Domes volcanic field, showing the principal volcanic units (after Bailey <i>et al.</i> 1976). Heavy black lines are major range-front faults. FLF, Fern Lake Fault; HCF, Hilton Creek Fault; HSF, Hartley Springs Fault; LVF, Lee Vining Fault; RVF, Round Valley Fault; and SLF, Silver Lake Fault. Small circles are $M > 2$ earthquakes for 1978-2004. WC is Wheeler Crest.</p>			<p>Fig. 4. (a) Seismicity patterns in Long Valley Caldera and the adjacent Sierra Nevada block defined by $M \geq 1.5$ earthquakes for 1978-2004. Epicenters within the caldera are projected on to section A-A' and those in the Sierra Nevada block on to section B-B' for the space-time plots of Figure 5. Earthquake magnitudes are scaled by circle size from the smallest ($M=1.5$) to the largest ($M=6.2$). (b) Dominant seismicity clusters for the same period. Numbered circles are epicenters for the May 1980 $M > 6$ earthquakes numbered in order of occurrence (1-3 on 25 May, and 4 on 27 May). Abbreviations: CL-MM, Convict Lake-Mount Morrison; DLPs, deep long-period earthquakes (epicenters not plotted in (a)); HC-DR, Hot Creek-Doe Ridge; LC, Laurel Creek; MC, McGee Creek; MM, Mammoth Mountain; SMSZ, south moat seismic zone with E (east) and W (west) lobes; SE-RD, southeast resurgent dome; SW-RD, southwest resurgent dome; TF, Tobacco Flat. Heavy solid lines are major range-front faults; HCF, Hilton Creek Fault; HSF, Hartley Springs Fault; RVF, Round Valley Fault. ML is Mammoth Lakes and TP is Tom's Place.</p>		<p>Fig. 5. Space-time plots with $M \geq 2$ earthquakes within the caldera projected on to profile A-A' and those within the Sierra Nevada block on to profile B-B' (Fig. 4a). Circle size scaled with magnitude from $M=1.5$ to the largest circles for the four $M 6$ earthquakes of 25-27 May 1980. The dashed line in mid-1982 indicates when the locally dense, telemetered seismic network became operational with the capability of systematically locating all $M \geq 1.5$ earthquakes (prior to 1982, this completeness threshold was $M=2.5$).</p>		(記載なし)																		
	<p>Fig. 7. Temporal variations in the cumulative number of $M \geq 3$ earthquakes in Long Valley Caldera and the Sierra Nevada block for 1978-2004, together with the uplift history for the centre of the resurgent dome based on levelling surveys (solid circles) and extension of the Casa-Krakatoa EDM baseline (heavy black line - see Fig. 6 for baseline location). Time intervals (a) to (f) correspond to interval seismicity maps in Figure 8. The earthquake catalogues for this area are complete for $M \geq 3$ earthquakes throughout the 1978-2004 interval.</p>			地震活動		地震活動 水準測量 光波測距 (1)		<p>1978 年～83 年： 前兆現象の増加</p> <p>1984 年～88 年： カルデラ前兆現象及び周辺の地震活動の低下</p> <p>1989 年： Mammoth Mountain 群発地震、長期にわたる地震活動及び二酸化炭素の放出</p> <p>1990 年～95 年： カルデラ内での噴火未遂事象の再発</p> <p>1996 年 3 月～4 月： South-moat 群発地震</p> <p>1997 年～98 年中期： カルデラ内における顕著な噴火未遂事象</p> <p>1998 年中期～98 年： カルデラ内の鎮静化と Sierra Nevada block における $M > 5$ 地震の発生</p> <p>1999 年： 隆起速度の変化</p> <p>2000 年～2005 地表変動の鎮静化</p>																		
[観測項目(解析項目)]																										
<ul style="list-style-type: none"> 地震観測 水準測量 光波測距 																										

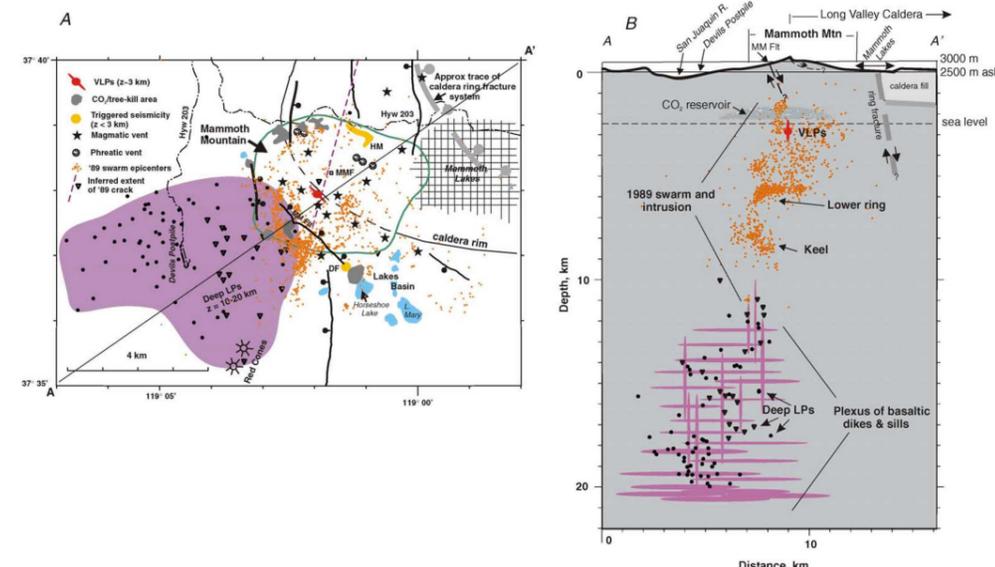
第 1.2-4 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-10) (2)

観測点分布図／観測項目	結果図 (平面分布図・時間変化図等)	特徴
 <p>Fig. 6. Map showing instrument sites for seismic and deformation monitoring networks established beginning in the spring of 1982 (see Appendix D in Hill <i>et al.</i> 2002a). The heavy dashed line is the Casa-Krak 2-colour EDM (electronic distance meter) baseline. Length changes in this baseline closely track elevation changes at the centre of the resurgent dome (Fig. 7).</p>	<p>地震活動 水準測量 光波測距 (2)</p>  <p>Fig. 7. Temporal variations in the cumulative number of $M \geq 3$ earthquakes in Long Valley caldera and the Sierra Nevada block for 1978–2004, together with the uplift history for the centre of the resurgent dome based on levelling surveys (solid circles) and extension of the Casa-Krakatoa EDM baseline (heavy black line – see Fig. 6 for baseline location). Time intervals (a) to (f) correspond to interval seismicity maps in Figure 8. The earthquake catalogues for this area are complete for $M \geq 3$ earthquakes throughout the 1978–2004 interval.</p>	<p>特徴</p> <p>カルデラ内及び Sierra Nevada ブロック内の M3 以上の地震は、平均 2 年～数年程度のカルデラ内の地表変動と密接な関連性を有する。</p>
<p>論文概要</p>	<p>深部 地下構造</p>  <p>Fig. 11. A schematic representation of basic kinematic relations between dominant seismogenic and magmatic sources contributing to unrest within the caldera and the Sierra Nevada block to the south for the period 1978–2004. Profile A-A' indicates orientation of the cross-section in Figure 12. Thin red lines are inferred faults based on the high-resolution hypocentral locations and focal mechanisms of Prejean <i>et al.</i> (2002). The dashed red lines are lineations defined by the 1982–1995 seismicity (Fig. 7 (a) to (c)). Opposing half-arrows indicate relative sense of strike-slip displacement. Hash marks are in a down-dip direction on faults with dip-slip displacement components. (Note that the inferred faults depicted in Figure 9 have no clear surface expression as is common for faults associated with $M = 6$ or smaller earthquakes.) Orange circles with radial arrows indicate inflation centres with the resurgent dome inflation source centred at a depth z of $c. 6-7$ km and the SMSZ inflation source somewhere in the depth range z of $c. 10-15$ km. The purple pattern overlies the volume of mid-crustal LP earthquakes and the inferred plexus of basaltic dykes and sills. A thick red line beneath Mammoth Mountain indicates the seismicity keel ($z = 7-10$ km) that developed during the 1989 swarm, with arrows indicating the T-axis (extension direction). The thick brown dash-dot line indicates the position of the silicic dyke that fed the $c. 650$-ka Inyo Domes eruptions. Large open arrows indicate regional variation in the extension direction with respect to a fixed Sierra Nevada block based on the stress inversion of Prejean <i>et al.</i> (2002).</p>  <p>Fig. 12. Schematic cross-section A-A' through Long Valley Caldera (see Fig. 9) illustrating depth relations between the structural and magmatic elements contributing to caldera unrest. Geological units adopted from Bailey (2004). LVEW is the 3-km-deep well in the centre of the resurgent dome. Small circles are hypocentres for $M \geq 2$ earthquakes within the caldera and beneath Mammoth Mountain for 1978–2004 within 5 km of the cross-section. Large circles are mid-crustal LP earthquakes. Filled circles indicate LP events with hypocentres constrained by a dense, temporary seismic network deployed in 1997 (Foulger <i>et al.</i> 1998). Orange ellipsoids indicate inflation sources inferred from deformation data (Langbein 2003). The source centred 6–7 km beneath the resurgent dome is behind (north of) the SMSZ seismicity, which shallows to less than 6 km beneath the resurgent dome. The structure in the upper $c. 10$ km is generally well resolved by multiple seismological, geophysical and geological studies. Deeper structure (> 10 km) is less certain, but includes evidence from teleseismic tomographic studies for a volume of low P-wave velocities (LVZ) in the 15–30-km depth range (e.g. Dawson <i>et al.</i> 1990; Weiland <i>et al.</i> 1995).</p>	<p>1978 年～2004 年の噴火未遂事象から推定されるマグマ源：</p> <ul style="list-style-type: none"> 再生ドームの中央部の深さ 6km～7km の小さな膨張源 その下位には、カルデラ内の SMSZ の西側ローブ下のどこかに膨張源が存在 Mammoth Mountain び南斜面下の深さ 10km～20km における中部地殻内で発生する低周波地震と網状の玄武岩質岩脈もしくはシル 地震波トモグラフィ解析より、深さ 15km～30km に P 波速度領域が存在 <p>1978 年～2004 年の噴火未遂事象によって、再生ドーム下の深さ 6km～7km 付近に 0.3km^3 (径 1km～2km 以上) の物質が付加したと考えられる。</p>

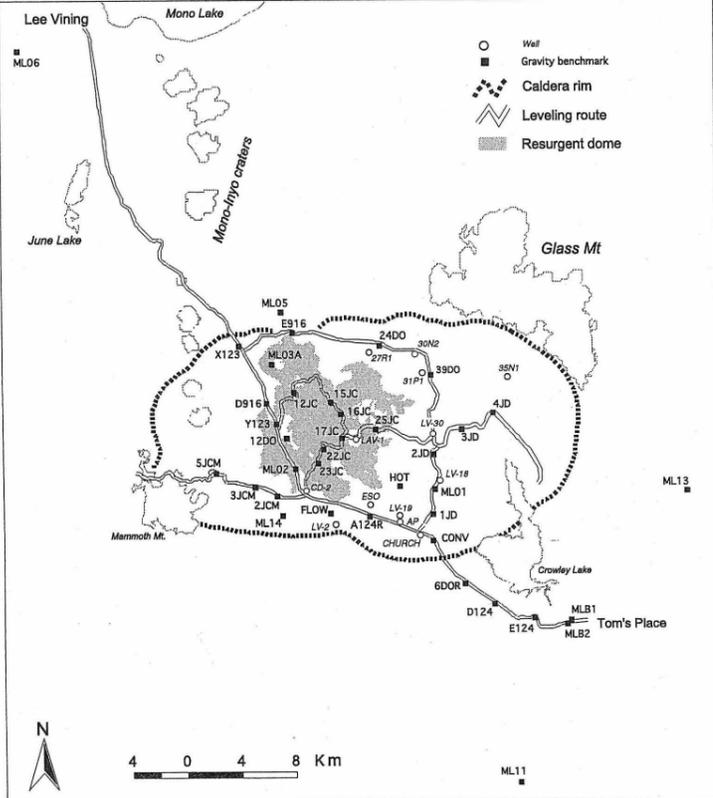
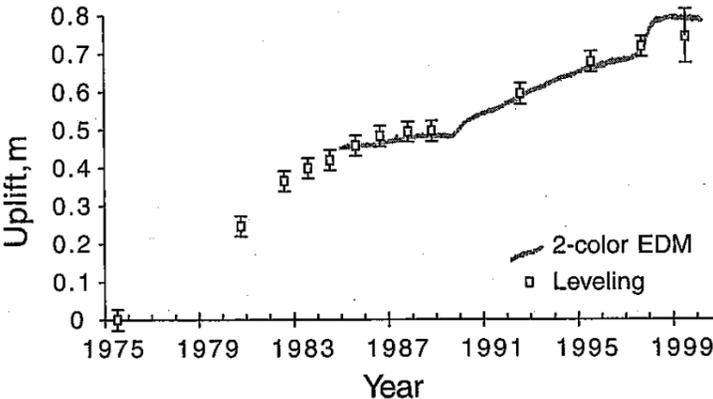
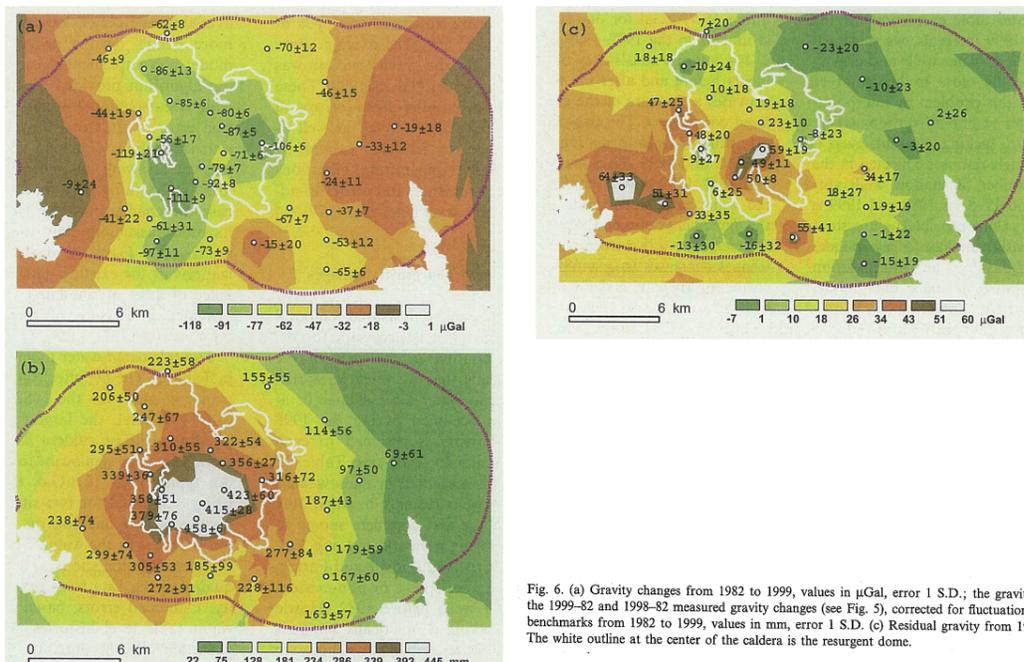
第 1.2-5 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-11) (1)

ロングバレーカルデラ (Long Valley)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
LV-11	Hill, D. P. and Prejean, S.	2005	Magmatic unrest beneath Mammoth Mountain, California	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 146, pp.257-283	●	●		●			●						●						
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																				
モニタリング結果をもとに, Mommothe Mountais における噴火未遂事象でのマグマプロセスについて検討する。			地震メカニズムとその他のモニタリング結果の時空間的關係より, Mammoth Mountain における噴火未遂事象は, 深さ 10km~20km の中部地殻内の網状玄武岩質岩脈やシル上部から運搬された CO ₂ に富んだマグマ性流体の多量放出によるものと考えられる。流体の上昇の際には, 群発地震が発生し, 1989 年の 11 ヶ月間の群発地震では, 地表変動とともに CO ₂ の放出を伴った。このシステムの継続下においては, Mammoth Mountain における将来の火山活動は, 水蒸気爆発を含む, 小規模な玄武岩質のストロンボリ式噴火, ハワイ式噴火になると考えられる。																				
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴					
 <p>Fig. 2. Shaded relief map of Mammoth Mountain and vicinity. Green outline encompasses the extent of major dacite flows erupted from Mammoth Mountain vents. Solid red lines are mapped faults and dashed red line is the topographic margin of the caldera floor. Circles with inner hash marks are ~700 years BP phreatic explosion craters. Triangles indicate seismic stations (with 3-letter station names). Circles indicate continuous CO₂-monitoring stations. The borehole dilatometer POPA is co-located with the seismic station MDP. Blue lines indicate 2-color EDM baselines. H.L.=Horseshoe Lake, L.M.=Lake Mary.</p>			<p>地震活動 (1)</p>  <p>Fig. 4. Time history of Mammoth Mountain unrest from 1978 through 2003. (A) Cumulative number of M>1.2 brittle failure (BF) earthquakes and deep long-period (LP) earthquakes. Mc indicates the completeness threshold for brittle-failure earthquakes located in the vicinity of Mammoth Mountain (the NCSN catalog contains virtually all earthquakes with magnitudes M≥Mc within the specified area and time interval). Labeled bars flag noteworthy episodes, and arrows indicate times of very-long-period (VLP) earthquakes beneath the summit of Mammoth Mountain. (B) BF earthquake focal depths with time. Circle size proportional to magnitude in three steps: 1.2≤M≤1.9, 2.0≤M≤2.9, and 3.0≤M≤3.9.</p>															<p>Mammoth Mountainの噴火未遂事象は, M3 以下の群発地震(パースト的地震, 低周波地震, 超低周波地震)と, 地表変動, マグマ性二酸化炭素の放出で特徴づけられる。</p> <p>過去 25 年間では, Mammoth Mountain とロングバレーカルデラの噴火未遂事象は関連するが, これらの二つの事象は, 1997 年~98 年事象を除き, 相関性を有しない。</p> <p>1978 年~88 年地震活動: ・最初の噴火未遂事象 1989 年: ・群発地震, 中部地殻内の低周波地震, CO₂ ガス放出 1989 年以降: ・中部地殻内の低周波地震 ・マグマ性 CO₂ の放出 ・He 同位体比の上昇</p>					
			<p>地震活動 (2)</p>  <p>Fig. 7. Time history of the 1989 Mammoth Mountain earthquake swarm from April 1989 through March 1990. (A) Earthquake magnitudes with time. (B) Cumulative number of M>1.2 earthquakes. Inset: frequency-magnitude plot for M>1.2 earthquakes. Solid squares in inset indicate cumulative number of earthquakes with magnitudes greater than M, open squares indicate number of events in each 0.1-magnitude interval. (C) Cumulative seismic moment for M>1.2 earthquakes. Bars indicate approximate activity durations for successively shallower seismicity clusters (see Figs. 8 and 9). Inset: Time history of dilatational strain at POPA through a high-pass filter with a corner at T=5.2×10⁶ s (~2 months).</p>															<p>1989 年~90 年初めにかけて, Mammoth Mountain 南西斜面の深さ 6km 以浅において, M2 より小さな地震が多発する。時間とともに, 震源フロントは浅くなる (~0.4km/月)。</p> <p>地震活動の低調領域は, Mammoth Mountain の山頂を含む径 2.5km のリング状で, 5km~6km の間隔で分布する。</p> <p>水準測量及び光波測距より, Mountain から Inyo 火口に向けて 3km 伸びた深さ 2km~12km に 10cm 未満の開口が求められる。また, ひずみ測定により, 深さ 7km 及び 10km に地震活動領域がみられる。</p>					
[観測項目(解析項目)]			<ul style="list-style-type: none"> 地震観測 水準測量, 光波測距 ひずみ測定 																				

第 1.2-5 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-11) (2)

観測点分布図／観測項目	結果図 (平面分布図・時間変化図等)	特徴
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">論文概要</p>	<p style="text-align: center;">深部 地下構造</p>  <p style="font-size: small;">Fig. 9. Double-difference hypocentral locations (orange dots) for brittle-failure earthquakes in the 1989 earthquake swarm in relation to other key structures associated with Mammoth Mountain unrest. Solid dots are hypocenters for a subset of deep LP earthquakes from 1990 to 1999 clearly recorded on a minimum of 10 nearby stations in the NCSN seismic network with root-mean-square travelt ime residuals <math>< 0.3\text{ s}</math>. (Pitt et al., 2002). Inverted triangles are high-quality hypocentral locations for deep LP earthquakes recorded during the summer and fall of 1997 by a temporary array of 3-component digital seismic stations (Foulger et al., 1998). Purple area outlines epicentral distribution of deep LP earthquakes and inferred plexus of mid-crustal dikes and sills (see depth section, B). (A) Map view showing outline of Mammoth Mountain (closed green line), local faults (heavy black lines), approximate trace of caldera ring-fracture system (dashed, thick gray line) and lakes of the Lakes Basin. MMF—Mammoth Mountain fumarole, DF—seismicity triggered by the 2003 Denali Fault earthquake, HM—seismicity triggered by the 1999 Hector Mine earthquake. Also see key in map legend. (B) Depth section A-A' perpendicular to dominant northwest-striking structural trends spanning the mountain. Opposing double arrows indicate sense of slip on fault surfaces. Gray hemisphere section just above sea level is hypothesized shallow CO₂ reservoir (Sorey et al., 1998). Inferred plexus of dikes and sills coincident with deep LP earthquakes indicated by orthogonal pattern of elongate purple ellipses.</p>	<p>深さ 1km~3km にかけて、リング状を呈する震源分布が認められ、下位ほど拡がって分布する。1989 年群発地震の上部発生領域(深さ 6km)は、1978 年~2003 までの活動域と一致する。</p>
	<p style="text-align: center;">深部 地下構造</p>	<p>深さ 1km~3km にかけて、リング状を呈する震源分布が認められ、下位ほど拡がって分布する。1989 年群発地震の上部発生領域(深さ 6km)は、1978 年~2003 までの活動域と一致する。</p>

第 1.2-6 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-12) (1)

ロングバレーカルデラ (Long Valley)																								
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																		
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計		地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
LV-12	Battaglia, M. et al.	2003	The mechanics of unrest at Long Valley caldera, California. 2. Constraining the nature of the source using geodetic and micro-gravity data	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 127, pp.219-245		●		●					●											
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																					
測量結果及び微小重力データをもとに, ロングバレーカルデラの膨張源のモデル化を行う。			ロングバレーカルデラにおける膨張源は, 再生ドームの深さ 5.9km に位置し, 1982 年~99 年の体積変化は 0.136km ³ (密度約 1700kg/m ³) と求められる。一方, 異なる手法では, 0.105km ³ ~0.187km ³ (密度 1180kg/m ³ ~2330kg/m ³) の体積変化が求められ, 噴火未遂事象の要因として珪長質マグマの貫入によるものと考えられる。 ※圧力源を楕円体とした仮定しない場合では, 深さは 2.9km, 体積変化 0.019km ³ , 密度 1200kg/m ³ と求められる。																					
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																	特徴				
 <p>Lee Vining, Mono Lake, Mono-Inyo craters, Glass Mt, June Lake, Mammoth Mt., Crowley Lake, Tom's Place.</p> <p>Legend: Well (○), Gravity benchmark (■), Caldera rim (---), Leveling route (---), Resurgent dome (---).</p> <p>Scale: 0, 4, 8 Km.</p>			 <p>Uplift, m</p> <p>Year</p> <p>2-color EDM □ Leveling</p>																	<p>GPSによれば, 1980 年に比べて, 0.74±0.07m の隆起がみられる。しかし, 光波測距によれば, 1998 年中頃に僅かな沈降が認められ, 再生ドーム下へのマグマ貫入等の要因が考えられる。</p>				
<p>Fig. 4. Gravity stations occupied in Long Valley caldera in July 1998 and July 1999 (see Table 1). The network base station is MLEQB2 (Tom's Place). MLE06 (Lee Vining), MLEQ11 (Rock Creek) and MLEQ13 (Benton Crossing) are the network control stations. Only 13 shallow wells of the hydrologic monitoring network have been surveyed both in 1982, 1998 and 1999.</p>			 <p>(a) Gravity changes from 1982 to 1999, values in μGal, error 1 S.D.</p> <p>(b) Uplift at gravity benchmarks from 1982 to 1999, values in mm, error 1 S.D.</p> <p>(c) Residual gravity from 1982 to 1999, values in μGal, error 1 S.D.</p>																	<p>1982 年~99 年にかけて重力はわずかに減少し, 特に再生ドームで最も低下する。フーリエ補正を加えた重力変化では, 再生ドームの頂部では増加変化を示す。</p>				
[観測項目 (解析項目)]			<ul style="list-style-type: none"> ・水準測量, 光波測距 ・重力測定 																					

論文概要

第 1.2-6 表 ロングバレーの観測データ・評価に係る文献帳票 (LV-12) (2)

観測点分布図/観測項目

結果図 (平面分布図・時間変化図等)

特徴

重力変化

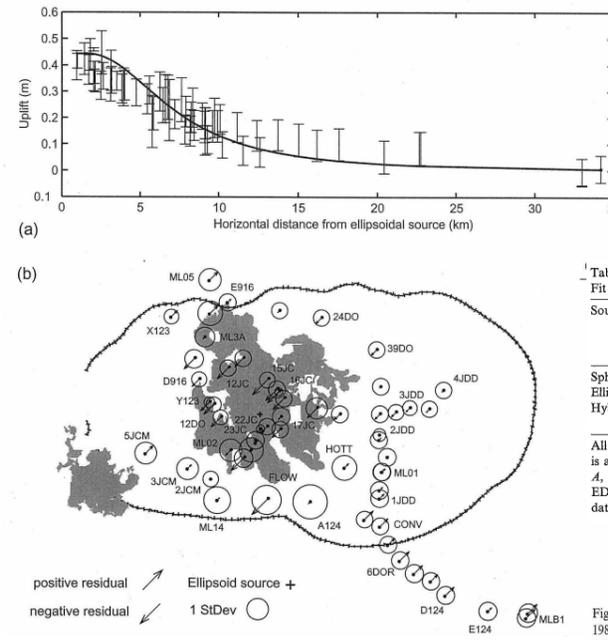


Table 6
Fit of single and hybrid sources to geodetic and residual gravity (Res G) data

Source	A	d (km)	Geodetic data (1985-99)			Geodetic and gravity data (1982-99)								
			ΔV (km ³)	χ^2	R ²	ΔV (km ³)	ΔM (kg)	MU (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	χ^2	Uplift Res G	Uplift Res G		
Spherical	1	8	0.12	228	239	0.08	0.98	0.13	0.38	2900	61	36	0.99	0.67
Ellipsoidal	0.48	5.9	0.09	67	267	0.73	0.98	0.14	0.23	1700	65	34	0.99	0.68
Hybrid Fluid	1	6.4	0.03	124	753	0.50	0.94	0.04	0.03	700	114	48	0.98	0.55
Melt	1	7.4	0.05					0.07	0.17	2400				

All sources have the same position: (332188, 4172064) in UTM (NAD27) coordinates. The average density for the hybrid source is around 1800 kg/m³.
A, aspect ratio; d, depth; ΔV , volume change; ΔM , mass change; ρ , density; EDM, horizontal displacement from two-color EDM data; Res G, residual gravity; R², goodness of fit; if R²=1, the model is able to explain all variation in the observed data, if R²=0, the model is not able to explain the observed data.

Fig. 8. Fit of ellipsoidal source (depth=5.9 km, volume change=0.136 km³, $ba=0.475$) to uplift in Long Valley caldera from 1982 to 1999. (a) Comparison between observed (error bars) and predicted (solid line) uplift at gravity and geodetic benchmarks. (b) Residual distribution (observed-predicted uplift) at gravity benchmarks.

水準測量に基づく上下変動と、重力変化に基づき、変動源として楕円体を想定した場合、体積変化 0.136km³(密度 1700kg/m³)の貫入を想定するケースで最も適合性が良い。

Efrom and Tibshirani(1986)を適用した場合は、体積変化 0.105km³ ~ 0.187km³(密度 1180kg/m³ ~ 2330kg/m³)の貫入が求められる。

貫入モデル

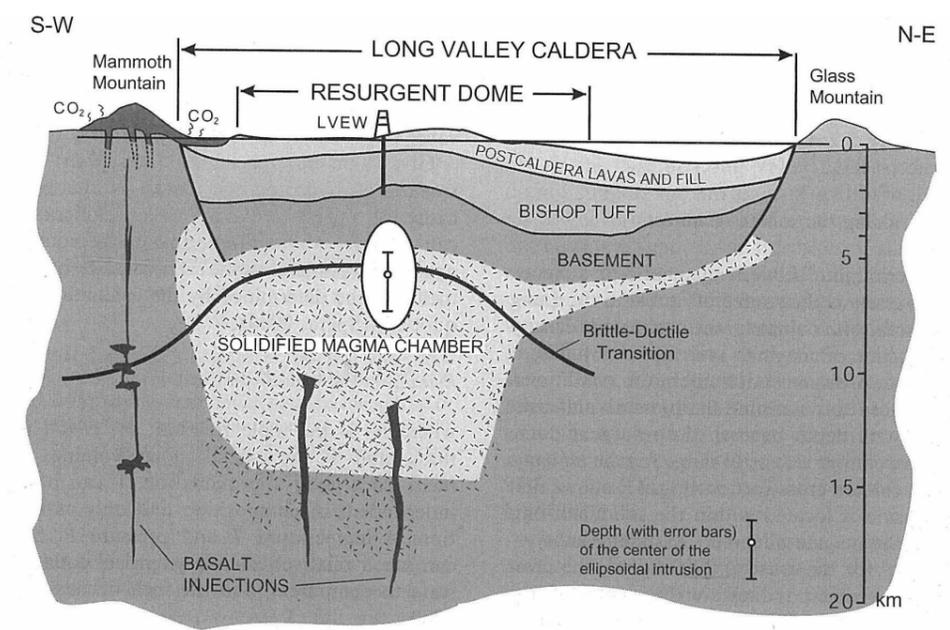


Fig. 11. Cross-section of Long Valley caldera (modified from Sackett et al., 1999) showing the location of the intrusion. LVEW marks the location of the Long Valley exploratory well. The present-day shallow hydrothermal system consists of several relatively thin zones of hot water, flowing laterally from west to east at depth of less than 1 km (Sorey, 1985; Sorey et al., 1991). The dimensions of the ellipsoidal intrusion are speculative and based on an overpressure $\Delta P \approx 1$ Gpa and shear modulus $\mu \approx 30$ GPa.

固結した残存マグマ溜りに貫入物が位置するモデル

論文概要

○カンピ・フレグレイ

カンピ・フレグレイにおける観測データ, 及び観測データに基づく現状の活動評価に関する下記文献の記載内容を第 1.3-1 表～第 1.3-3 表に整理した。

[CF-2]

Luca D' Auria, Giudicepietro, F., Martini, M. and Lanari, R. (2012) :

The 4D imaging of the source of ground deformation at Campi Flegrei caldera (southern Italy), *Journal of Geophysical Research*, **117**, B08209.

[CF-6]

Manconi, A., Walter, T. R., Manzo, M., Zeni, G., Tizzani, P., Sansosti, E. and Lanari, R. (2010) :

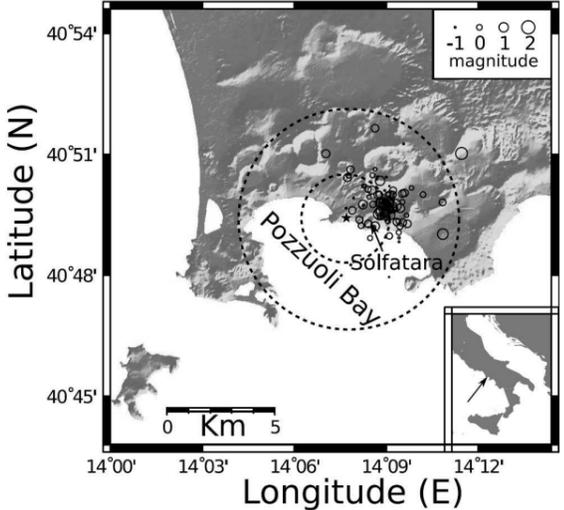
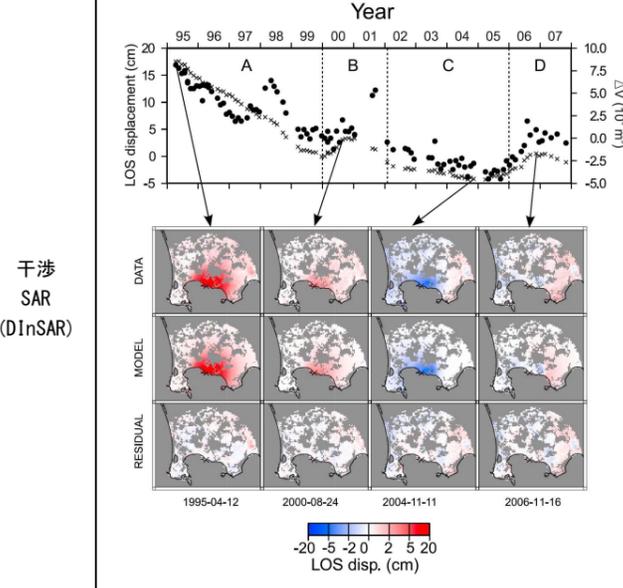
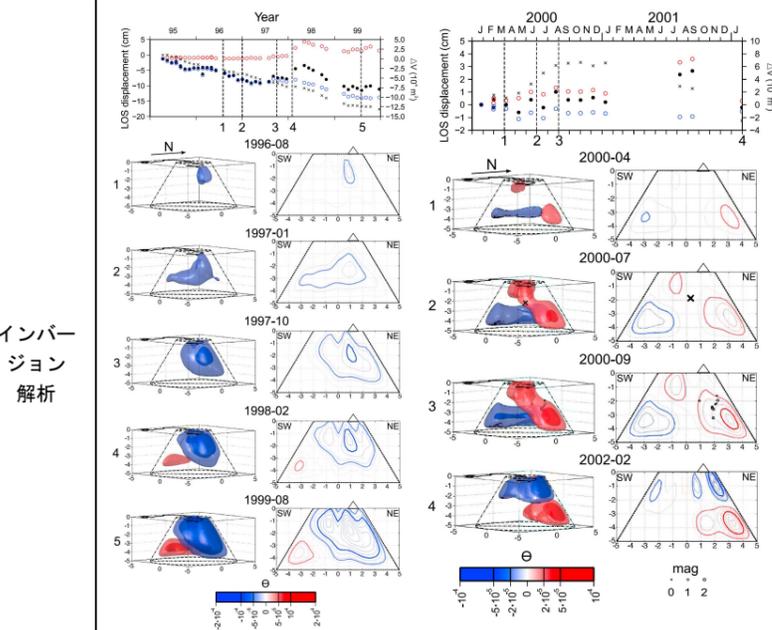
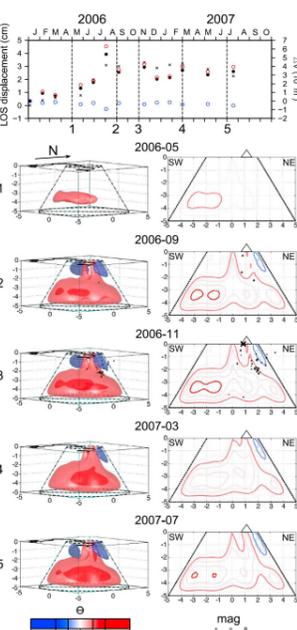
On the effects of 3 - D mechanical heterogeneities at Campi Flegrei caldera, southern Italy, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**, pp. 1-11.

[CF-11]

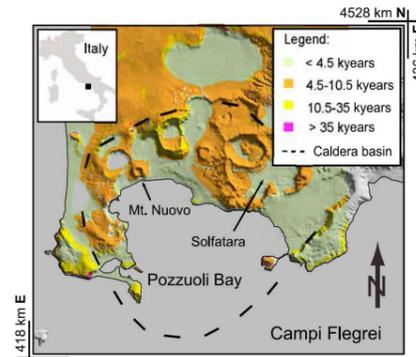
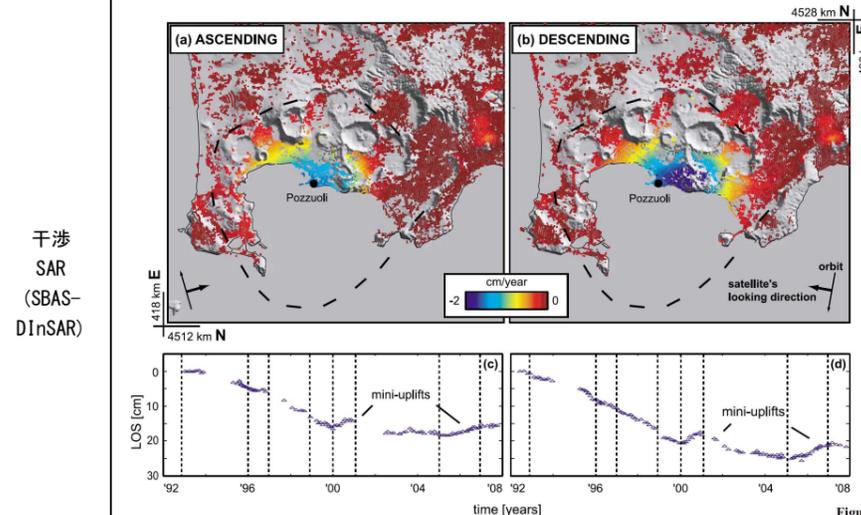
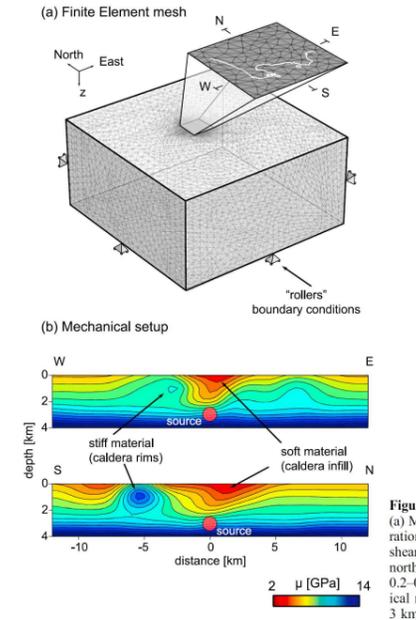
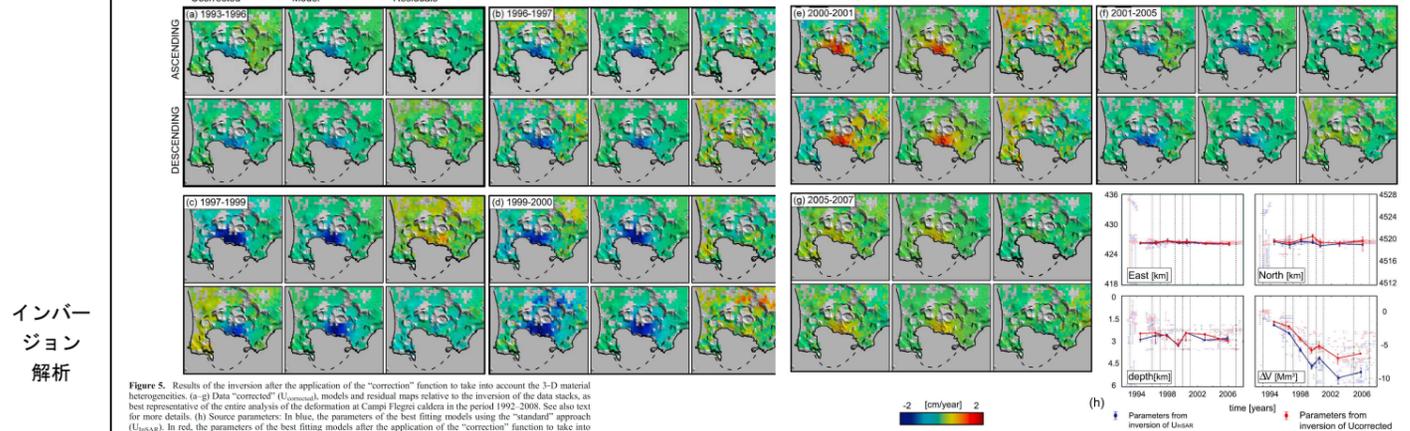
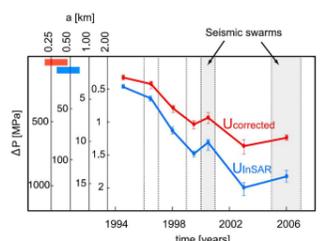
G. De Natale, Troise, C., Pingue, F., G. Mastrolorenzo, Pappalardo, L., Battaglia, M. and Boschi, E. (2006) :

The Campi Flegrei caldera: unrest mechanisms and hazards, *Geological Society, London, Special Publications*, **269**, pp.25-45.

第 1.3-1 表 カンピ・フレグレイの観測データ・評価に係る文献帳票 (CF-2)

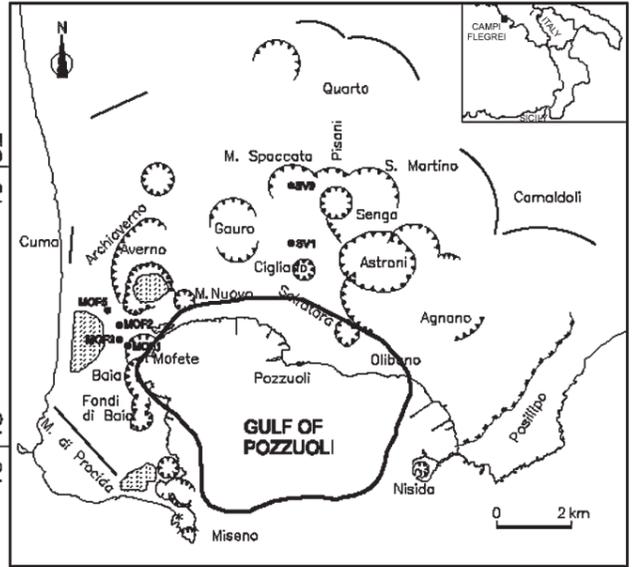
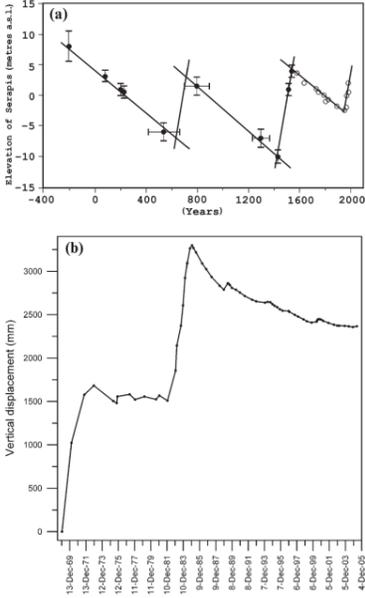
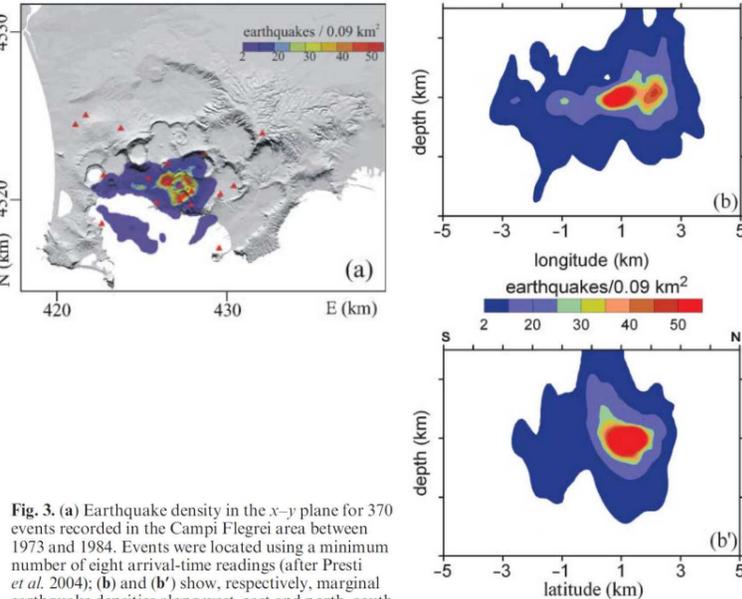
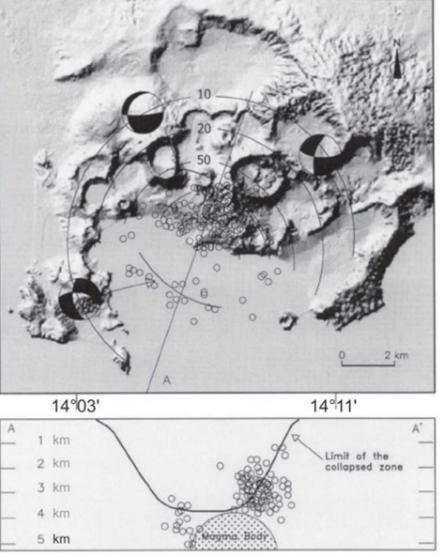
カンピ・フレグレイカルデラ (Campi Flegrei)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
CF-2	Luca D'Auria et al.	2012	The 4D imaging of the source of ground deformation at Campi Flegrei caldera (southern Italy)	Journal of Geophysical Research, 117, B08209						●													
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検出した噴火未遂事象等)																				
DInSAR の逆解析によるイメージ技術を用いて, カンピ・フレグレイカルデラにおいてみられた過去 20 年間の複雑な地表変動の要因となった変動源の形状を決定する。			深さ 5km 以浅に変動源を検出し, それが時空間的に複雑に変化することを初めて確認した。変動源は, 2000 年と 2006 年に膨張・上昇し, 熱い流体が地熱貯留層底部に貫入したことによると解釈される。1997 年にも貫入エピソードがあったと考えられる。これらは, 地表には到達・噴出せず側方へと拡がった。カンピ・フレグレイカルデラにおける多種のモニタリングネットワークは, このカルデラの地熱システムモデルに対して新たな枠組みを提示するものである。																				
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴					
 <p>Figure 1. Map of the Campi Flegrei area. The geographic location of Campi Flegrei is indicated by an arrow in the lower right inset. Small circles represent earthquake epicenters for the period 1995–2007. Their size is proportional to their magnitude as indicated in the upper right inset. The black star represents the center of the reference system described in section 3. Its coordinates are 40°49'28"N and 14°07'42"E. The position of the Solfatara crater is indicated by the arrow. The two dashed circles represent the surface projection of the domain volume boundaries described in section 3.</p>			 <p>Figure 2. Results of the inversion of the DInSAR data set. (top) Small crosses represent the plot of the observed line-of-sight (LOS) displacement in correspondence of the domain center (star in Figure 1). Black dots are the total volumetric variation ΔV. The total interval is divided into 4 sub-intervals (A, B, C, D) delimited by vertical dashed lines. These intervals are discussed in section 4. (bottom) Comparison of data, synthetic model and residuals for 4 selected maps.</p>															<p>1997 年～2007 年の地表変動は, 4 つの期間に区分される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・A (1995 年 4 月～2000 年 1 月) : 単調な沈降 ・B (2000 年 1 月～02 年 1 月) : 隆起 ・C (2002 年 1 月～05 年 12 月) : 一定な沈降 ・D (2006 年 1 月～07 年 10 月) : 隆起 					
<p>【観測項目 (解析項目)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・SAR イメージ (ERS/ENVISAT) : 103 シーン (1995 年 4 月 12 日～2007 年 11 月 1 日) ・differential SAR interferometry (DInSAR) 解析 ・Vasco et al. (2002) に基づくインバージョン技術 			 <p>Figure 3. Volumetric strain patterns for the interval 1995–1999 (A interval in Figure 2). (top) A zoom of the graphics shown in Figure 2 for this interval. Red circles represent ΔV while blue circles $\Delta V'$. (bottom) Strain patterns for 5 selected times (indicated as vertical lines in the top panel). Left panels represent 3D views of isosurfaces of constant θ (the view is from SE). The arrow on the top left indicates the North. The values used for the isosurfaces are indicated as black lines on the palette below the panels. Right panels show contours of θ across a SW-NE cross-section, outlined with dash-dot lines in the left panels. Thin contours are spaced of 2×10^{-2}. Thick contours corresponds to the isosurface values of the left panels. The triangle marks the approximate position of the Solfatara area (see Figure 1) on the section.</p>															<p>A : 単調減少の地表変動中にも体積変化がみられる。1997 年 7 月～99 年 3 月には $6 \times 10^4 \text{m}^3$ の体積増加がみられる。1995 年 5 月～97 年 7 月では, 収縮源は Solfatara 地域の深さ 2km, 1996 年～97 年ではやや西側の深さ 3km に拡大した。一方, 1997 年末には, 深さ 3.5km 付近に膨張源がみられる。</p> <p>B : 西側の深さ 3.5km 付近に収縮源, 北東側の深さ 3.5km, 中央付近の深さ 0.75km に膨張源がみられる。2000 年 7 月にこれらの体積増加がみられ, 膨張源の結と低周波地震を伴う。8 月と 9 月には膨張・収縮パターンが逆転する。</p> <p>C : 記載なし</p> <p>D : 南側 (Pozzuoli Bay) の深さ 3.5km 付近に膨張源が発生し, 5 月以降隆起が開始し, 中央部の 1 つは地表付近に達する。この際, 150 の地震と 870 の低周波地震 (深さ地表付近) を伴う。</p>					
論文概要			 <p>Figure 4. Volumetric strain patterns for the interval 2006–2007 (D interval in Figure 2). The meaning of the plots is the same as for Figure 3. The spacing of thin contours on the right panels is 10^{-2}.</p>																				

第 1.3-2 表 カンピ・フレグレイの観測データ・評価に係る文献帳票 (CF-6)

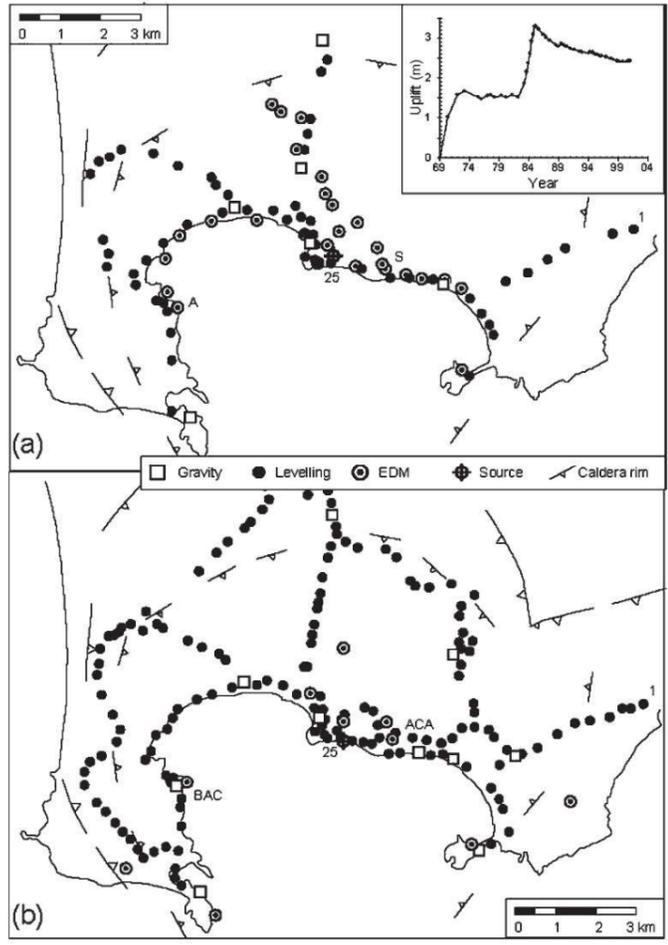
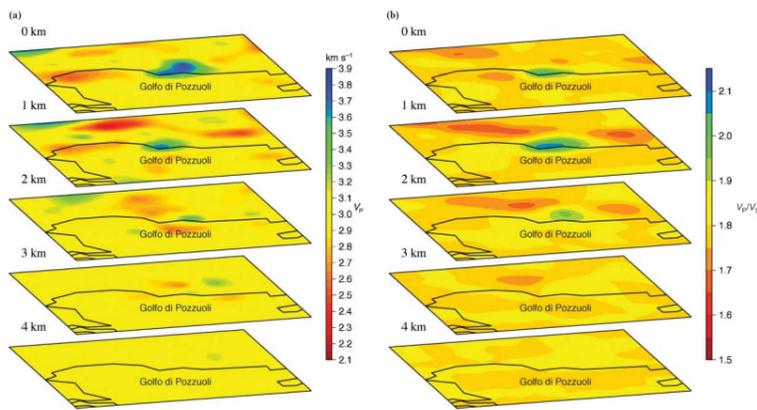
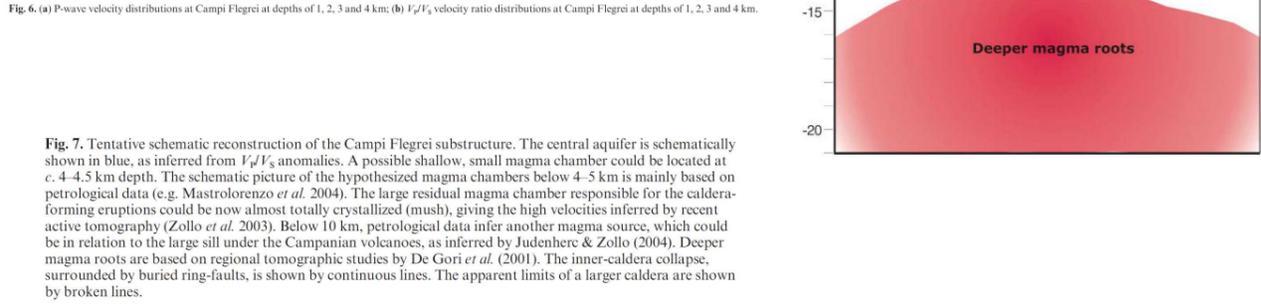
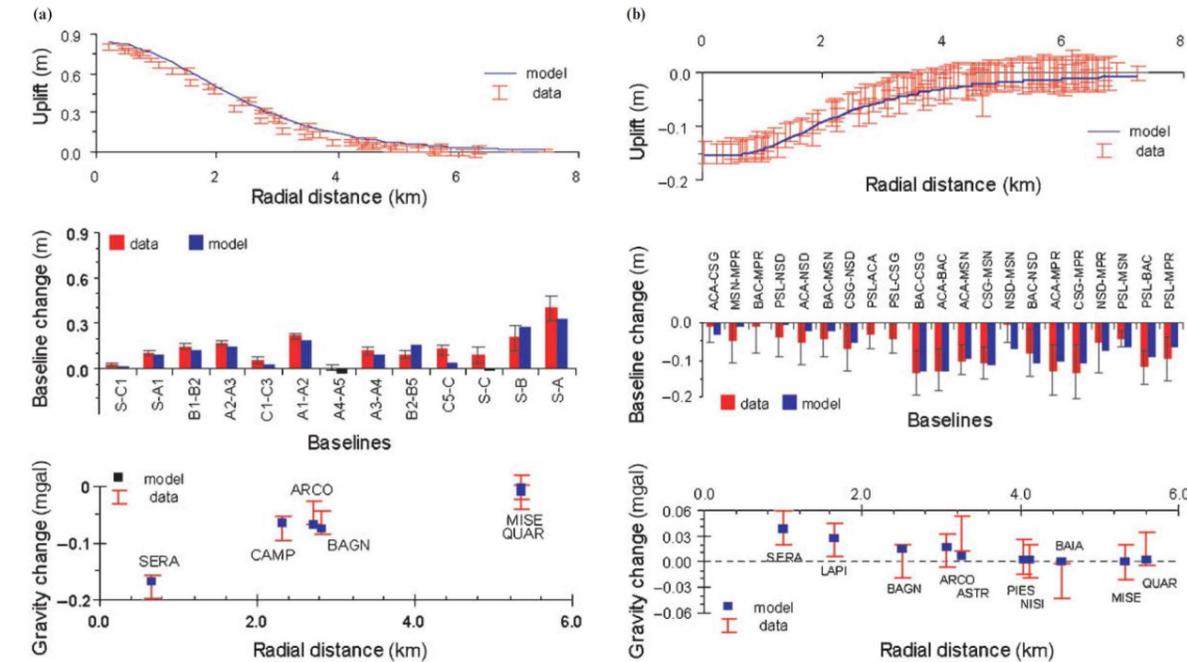
カンピ・フレグレイカルデラ (Campi Flegrei)																																																																																																																																																																																																																					
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																																																																																																																																																																																																															
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動																																																																																																																																																																																														
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ																																																																																																																																																																																													
CF-6	Manconi, A. et al.	2010	On the effects of 3-D mechanical heterogeneities at Campi Flegrei caldera, southern Italy	Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 115, pp.1-11.						●																																																																																																																																																																																																											
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																																																																																																																																																																																																																		
地震波速度構造をもとに, 不均質性を考慮した詳細な 3D モデルを用いて, カンピ・フレグレイカルデラの地表変動を及ぼす変動源の位置と強度について, より現実的な評価を行う。			カンピ・フレグレイカルデラの起源を評価するために, 3D の不均質効果を考慮した均一な反無次元モデルに対して過去 16 年以上の DInSAR による地表変動を適用した結果, 地表変動の力学的不均一性の効果に対する定量的評価が可能となった。インバージョン解析の結果, SBAS-DInSAR で得られた 1992 年~2008 年の地表変動は, カルデラ中心の約 3km の深さに位置する小さな膨縮源の変動と関連しており, 熱水溜り内で生じる静水圧の変動に関連して, 隆起期間中に群発地震が誘発されたと考えられる。																																																																																																																																																																																																																		
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																	特徴																																																																																																																																																																																																	
 <p>Figure 1. Sketch of the geological map superimposed on the digital elevation model of the Campi Flegrei caldera. The inner caldera basin (dashed black line) is composed mostly of Quaternary soft materials and young volcanic deposits.</p>			 <p>Figure 4. Mean deformation velocity maps superimposed on the digital elevation model of the Campi Flegrei caldera. The deformation field is computed by means of the SBAS-DInSAR technique on (a) ascending and (b) descending images acquired between 1992 and 2008 (see text for more details). (c) and (d) Time series relevant to the two pixels where the largest velocities are measured for the ascending (Figure 4c) and descending (Figure 4d) orbits. Both time series clearly show a sub-linear subsidence trend (1992-2000) interrupted by two uplift phases in 2000-2001 and 2004-2006.</p>																	<p>カンピ・フレグレイカルデラにおける 16 年間の平均的沈降速度は 2cm/年以上と推定される。しかし, 地表変動は単調ではなく, 2000 年と 2004 年~06 年の隆起がみられる。</p>																																																																																																																																																																																																	
 <p>Figure 2. Setup of the 3-D finite element models (3DHET). (a) Mesh and boundary conditions. (b) Mechanical configuration of 3DHET represented here by the distribution of the shear modulus (μ) along two profiles, west-east and south-north, respectively. Poisson's ratios (ν) vary in the range of 0.2-0.4. A positive volume (1 Mm^3) is imposed to a spherical reservoir located in the center of the caldera basin at 3 km depth (see text for more details).</p>			 <p>Figure 5. Results of the inversion after the application of the "correction" function to take into account the 3-D material heterogeneities. (a-g) Data "corrected" ($U_{corrected}$) models and residual maps relative to the inversion of the data stacks, as best representative of the entire analysis of the deformation at Campi Flegrei caldera in the period 1992-2008. See also text for more details. (h) Source parameters: In blue, the parameters of the best fitting models using the "standard" approach (U_{SAR}). In red, the parameters of the best fitting models after the application of the "correction" function to take into account the 3-D mechanical heterogeneities of the area ($U_{corrected}$). In the background, shaded, result relative to the stepwise inversion of the cumulative displacements, case 1. In the foreground, result relative to the inversion of the data stacks, case 2. See text for details. Error bars represent the range of values that the parameters assumed within the 10% of the minimum cost. Note that easting, northing and source depth are similar in both cases, while the volume changes are smaller when the "correction" for the 3-D material heterogeneities is considered.</p>																	<p>変動源の位置はほぼ一定だが, 深さは 2.5km~3.5km である。体積変化は, 隆起沈降変化と調和的だが, 変動源の深さは無関係である。</p> <p>1992 年~2008 年において, 約 3km の深さで発生する圧力変化には, 体積変化との間に関係性がみられる。</p> <p>圧力源は, 非常に小さく, 主要なマグマ供給系とは関係ない。地表変動は, 深部マグマの活動と連動したカルデラ下の熱水溜りに関係し, ガスと流体の過剰圧で満たされた岩石によるものと考えられる。</p>																																																																																																																																																																																																	
<p>【観測項目(解析項目)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 3D モデル (200km×200km×100km) 不均質性を考慮した物性モデル (3DHET) : 剛性率, ポアソン比 1992 年~2008 年の 165 セットの ERS, 62 セットの ENVISAT SAR イメージを対象とした SBAS-DInSAR 解析及びインバージョン解析 			<p>インバージョン解析</p>																																																																																																																																																																																																																		
<p>Table 2. Inversion U_{SAR}</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>Min</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>93-96</td> <td>426.3</td> <td>426.6</td> <td>4519.1</td> <td>4519.6</td> <td>2.5</td> <td>3</td> <td>-0.49</td> <td>-0.46</td> <td>0.12</td> <td></td> </tr> <tr> <td>96-97</td> <td>426.3</td> <td>426.5</td> <td>4518.7</td> <td>4519.4</td> <td>2.7</td> <td>3.2</td> <td>-0.74</td> <td>-0.65</td> <td>0.26</td> <td></td> </tr> <tr> <td>97-99</td> <td>426.6</td> <td>427.3</td> <td>4519.2</td> <td>4520</td> <td>2.6</td> <td>3</td> <td>-1.05</td> <td>-0.88</td> <td>0.33</td> <td></td> </tr> <tr> <td>99-00</td> <td>426.4</td> <td>426.8</td> <td>4519.5</td> <td>4520.2</td> <td>3.4</td> <td>3.5</td> <td>-1.3</td> <td>-1.25</td> <td>0.27</td> <td></td> </tr> <tr> <td>00-01</td> <td>426.3</td> <td>427.2</td> <td>4518.9</td> <td>4519.1</td> <td>2.5</td> <td>3</td> <td>0.53</td> <td>0.7</td> <td>0.31</td> <td></td> </tr> <tr> <td>01-05</td> <td>426.2</td> <td>426.7</td> <td>4519</td> <td>4519.4</td> <td>2.6</td> <td>3</td> <td>-0.7</td> <td>-0.63</td> <td>0.16</td> <td></td> </tr> <tr> <td>05-07</td> <td>425.9</td> <td>426.5</td> <td>4519</td> <td>4519.2</td> <td>2.8</td> <td>3</td> <td>0.31</td> <td>0.32</td> <td>0.12</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*Source parameters obtained by the inversion of the Campi Flegrei deformation assuming the standard approach.</p>			Period	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	93-96	426.3	426.6	4519.1	4519.6	2.5	3	-0.49	-0.46	0.12															96-97	426.3	426.5	4518.7	4519.4	2.7	3.2	-0.74	-0.65	0.26															97-99	426.6	427.3	4519.2	4520	2.6	3	-1.05	-0.88	0.33															99-00	426.4	426.8	4519.5	4520.2	3.4	3.5	-1.3	-1.25	0.27															00-01	426.3	427.2	4518.9	4519.1	2.5	3	0.53	0.7	0.31															01-05	426.2	426.7	4519	4519.4	2.6	3	-0.7	-0.63	0.16															05-07	425.9	426.5	4519	4519.2	2.8	3	0.31	0.32	0.12																																		
Period	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max																																																																																																																																																																																															
93-96	426.3	426.6	4519.1	4519.6	2.5	3	-0.49	-0.46	0.12																																																																																																																																																																																																												
96-97	426.3	426.5	4518.7	4519.4	2.7	3.2	-0.74	-0.65	0.26																																																																																																																																																																																																												
97-99	426.6	427.3	4519.2	4520	2.6	3	-1.05	-0.88	0.33																																																																																																																																																																																																												
99-00	426.4	426.8	4519.5	4520.2	3.4	3.5	-1.3	-1.25	0.27																																																																																																																																																																																																												
00-01	426.3	427.2	4518.9	4519.1	2.5	3	0.53	0.7	0.31																																																																																																																																																																																																												
01-05	426.2	426.7	4519	4519.4	2.6	3	-0.7	-0.63	0.16																																																																																																																																																																																																												
05-07	425.9	426.5	4519	4519.2	2.8	3	0.31	0.32	0.12																																																																																																																																																																																																												
			<p>Table 3. Inversion $U_{corrected}$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>Min</th> <th>Max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>93-96</td> <td>426.5</td> <td>426.6</td> <td>4520</td> <td>4520.2</td> <td>2.5</td> <td>3</td> <td>-0.35</td> <td>-0.28</td> <td>0.12</td> <td></td> </tr> <tr> <td>96-97</td> <td>426.2</td> <td>426.9</td> <td>4519.5</td> <td>4520.7</td> <td>2.5</td> <td>3.1</td> <td>-0.45</td> <td>-0.37</td> <td>0.26</td> <td></td> </tr> <tr> <td>97-99</td> <td>426.8</td> <td>427.3</td> <td>4520.1</td> <td>4520.8</td> <td>2.6</td> <td>2.9</td> <td>-0.68</td> <td>-0.59</td> <td>0.31</td> <td></td> </tr> <tr> <td>99-00</td> <td>426.6</td> <td>427</td> <td>4520</td> <td>4520.9</td> <td>2.9</td> <td>3.4</td> <td>-0.92</td> <td>-0.83</td> <td>0.30</td> <td></td> </tr> <tr> <td>00-01</td> <td>426.5</td> <td>427.2</td> <td>4519</td> <td>4520.2</td> <td>2.5</td> <td>3</td> <td>0.3</td> <td>0.48</td> <td>0.31</td> <td></td> </tr> <tr> <td>01-05</td> <td>426.2</td> <td>426.7</td> <td>4519.2</td> <td>4519.7</td> <td>2.6</td> <td>3</td> <td>-0.47</td> <td>-0.39</td> <td>0.14</td> <td></td> </tr> <tr> <td>05-07</td> <td>426.1</td> <td>426.7</td> <td>4518.6</td> <td>4520.5</td> <td>3</td> <td>3.2</td> <td>0.21</td> <td>0.29</td> <td>0.12</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*Source parameters obtained by the inversion of the SBAS-DInSAR data "corrected" for the 3-D heterogeneities effects. See also Figure 5.</p>																	Period	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	93-96	426.5	426.6	4520	4520.2	2.5	3	-0.35	-0.28	0.12															96-97	426.2	426.9	4519.5	4520.7	2.5	3.1	-0.45	-0.37	0.26															97-99	426.8	427.3	4520.1	4520.8	2.6	2.9	-0.68	-0.59	0.31															99-00	426.6	427	4520	4520.9	2.9	3.4	-0.92	-0.83	0.30															00-01	426.5	427.2	4519	4520.2	2.5	3	0.3	0.48	0.31															01-05	426.2	426.7	4519.2	4519.7	2.6	3	-0.47	-0.39	0.14															05-07	426.1	426.7	4518.6	4520.5	3	3.2	0.21	0.29	0.12															 <p>Figure 6. Pressures changes (ΔP) of a spherical source located at about 3 km depth beneath CF caldera between 1992 and 2008. ΔP has been calculated with relation (A2) (see Appendix A) considering the ΔV resulting from the inversion of the SBAS-DInSAR data set for the "standard" approach (blue solid line) and after the "correction" procedure (red solid line) for a shear modulus (μ) of 7 GPa. Since ΔP depends also from the source radius, the range $0.25 a \leq 2 \text{ km}$ has been evaluated, thus the vertical axis is scaled accordingly. Among the source radii considered, the values consistent with ΔP range of 10-30 MPa, thus explaining the seismicity observed at Campi Flegrei during the 2000-2001 uplift phase (Bianco et al., 2004), are shown by the blue and red bars in the top left corner. See also text for more details.</p>		
Period	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max																																																																																																																																																																																															
93-96	426.5	426.6	4520	4520.2	2.5	3	-0.35	-0.28	0.12																																																																																																																																																																																																												
96-97	426.2	426.9	4519.5	4520.7	2.5	3.1	-0.45	-0.37	0.26																																																																																																																																																																																																												
97-99	426.8	427.3	4520.1	4520.8	2.6	2.9	-0.68	-0.59	0.31																																																																																																																																																																																																												
99-00	426.6	427	4520	4520.9	2.9	3.4	-0.92	-0.83	0.30																																																																																																																																																																																																												
00-01	426.5	427.2	4519	4520.2	2.5	3	0.3	0.48	0.31																																																																																																																																																																																																												
01-05	426.2	426.7	4519.2	4519.7	2.6	3	-0.47	-0.39	0.14																																																																																																																																																																																																												
05-07	426.1	426.7	4518.6	4520.5	3	3.2	0.21	0.29	0.12																																																																																																																																																																																																												

論文概要

第 1.3-3 表 カンピ・フレグレイの観測データ・評価に係る文献帳票 (CF-11) (1)

カンピ・フレグレイカルデラ (Campi Flegrei)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
CF-11	G. De Natale et al.	2006	The Campi Flegrei caldera: unrest mechanisms and hazards	Geological Society, London, Special Publications, 289, pp. 25-45.	●	●		●				●	●	●									
モニタリング目的					モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																		
これまでの観測データ及び最近の観測データをもとに, 新たな分析・解釈を行い, 火山活動に警戒すべき点 (地下構造の一時的再配置, 前兆現象シナリオのモデル化, 爆発的噴火災害に対する確率的予測) についてレビューする。					カンピ・フレグレイカルデラの火山活動 (噴火未遂事象) の特徴と推移は, その構造的特徴やマグマと熱水との相互作用の存在に特徴づけられる。カルデラ内の大きな隆起量・速度, 及び部分的な沈降は, 熱水系内に保存されたマグマの注入, 及び水の流出による段階的収縮 (深さ 2km に収縮源) に起因することで説明される。マグマ溜りは 5km~8km と 11km~15km にあると考えられる。																		
観測点分布図/観測項目					結果図 (平面分布図・時間変化図等)													特徴					
 <p>Fig. 1. Schematic map of Campi Flegrei caldera showing the main structural features (redrawn from De Natale et al. 1991).</p>					 <p>Fig. 2. (a) Schematic history of vertical movements at Macellum in Pozzuoli, known as Serapis Temple (after Bellucci et al., 2006, paper 8 of this volume, pp. 141-157). Black circles represent the constraints found from radiocarbon and archaeological measurements by Morhange et al. (1999); white circles (post-1538) represent inferences by Dvorak & Mastrolorenzo (1991); (b) Vertical ground displacements as recorded at Pozzuoli harbour by levelling data in the period 1969-2005 (Macedonio & Tammaro 2005; Del Gaudio et al. 2005).</p>													<p>ローマ時代以降の平均沈降速度は 1.1cm/年~1.7cm/年だが, 現在までに 3 回 (中世, 1538 年噴火前の 40 年間, 1960 代年終りの沈降現象の中断がみられる。</p> <p>1960 年代終わりに, 急激な隆起が開始され, 1969 年~72 年で約 1.7m 生じたが, 1982 年までの 10 年間ではほとんど上下変動はみられない。また, 1984 年には 2m 以上の隆起がみられる。</p>					
					<p>水準測量 驗潮計</p>					 <p>Fig. 3. (a) Earthquake density in the x-y plane for 370 events recorded in the Campi Flegrei area between 1973 and 1984. Events were located using a minimum number of eight arrival-time readings (after Presti et al. 2004); (b) and (b') show, respectively, marginal earthquake densities along west-east and north-south sections centred at the crater axis (after Presti et al. 2004).</p>													<p>地震活動</p>
<p>[観測項目 (解析項目)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水準測量, 驗潮記録 (参照資料) ・地震活動 (参照資料) ・地震波トモグラフィ解析: 331 地震 (1973 年~1984 年) ・重力測定 (1980 年, 1983 年, 1990 年, 1994 年) ・水準測量・光波測距: 1980 年~1995 年 (13 基線: 1980 年~83 年, 21 基線: 1991 年~95 年) 					 <p>Fig. 4. Map of geophysical observations at Campi Flegrei during the 1982-1984 unrest episode. Contours of vertical displacements (in cm) and earthquake epicentres are shown; the projection of the collapsed zone as modelled from gravity anomalies is superimposed on the depth section of the hypocentres. Composite focal mechanisms computed for the different seismic zones are indicated (De Natale et al. 1995). Also shown is the location of the possible magma chamber, as inferred by Ferrucci et al. (1992) (after De Natale et al. 2001).</p>													<p>1982 年~84 年の噴火未遂事象では, 1984 年 3 月~4 月の間にほとんどの地震が発生している。(4 月 1 日だけで 550 地震)</p>					

論文概要

観測点分布図／観測項目	結果図 (平面分布図・時間変化図等)	特徴
 <p>Figure 8 consists of two maps, (a) and (b), showing the distribution of monitoring points around the Campi Flegrei caldera. Map (a) shows data from 1980-1983, and map (b) shows data from 1990-1995. Points are marked with different symbols for Gravity (squares), Levelling (circles), EDM (circles with a dot), and Source (crosses). A legend at the bottom identifies these symbols. An inset graph in (a) plots Uplift (m) on the y-axis (0 to 3) against Year on the x-axis (69 to 04), showing a peak in uplift around 1980-1983. A scale bar from 0 to 3 km is provided for both maps.</p>	<p>地震波トモグラフィ解析</p>  <p>Figure 6 shows two columns of cross-sectional plots, (a) and (b), representing velocity distributions at depths of 0, 1, 2, 3, and 4 km. Column (a) shows P-wave velocity in km s⁻¹, with a color scale from 2.2 to 3.9. Column (b) shows the V_p/V_s ratio, with a color scale from 1.5 to 2.1. The plots show a central high-velocity zone (blue) and a surrounding lower-velocity zone (red/yellow). A caption below reads: "Fig. 6. (a) P-wave velocity distributions at Campi Flegrei at depths of 1, 2, 3 and 4 km; (b) V_p/V_s velocity ratio distributions at Campi Flegrei at depths of 1, 2, 3 and 4 km."</p>  <p>Figure 7 is a schematic cross-section of the Campi Flegrei substructure. It shows a central aquifer (blue) at the top, followed by a "Mush" chamber (red) at approximately 4-5 km depth. Below this is a "Magma sill" and "Deeper magma roots" extending to 20 km depth. The diagram also indicates "Larger caldera rim" boundaries. A caption below reads: "Fig. 7. Tentative schematic reconstruction of the Campi Flegrei substructure. The central aquifer is schematically shown in blue, as inferred from V_p/V_s anomalies. A possible shallow, small magma chamber could be located at c. 4-4.5 km depth. The schematic picture of the hypothesized magma chambers below 4-5 km is mainly based on petrological data (e.g. Mastrolorenzo et al. 2004). The large residual magma chamber responsible for the caldera-forming eruptions could be now almost totally crystallized (mush), giving the high velocities inferred by recent active tomography (Zollo et al. 2003). Below 10 km, petrological data infer another magma source, which could be in relation to the large sill under the Campanian volcanoes, as inferred by Judenher & Zollo (2004). Deeper magma roots are based on regional tomographic studies by De Gori et al. (2001). The inner-caldera collapse, surrounded by buried ring-faults, is shown by continuous lines. The apparent limits of a larger caldera are shown by broken lines."</p>	<p>Pozzuoli 周辺の深さ 0km~3km では、平均より V_p が大きく、V_p/V_s は極端に大きい。Pozzuoli は破碎され水に飽和した円筒状の直径 1km の浅部滞水層を覆う。</p> <p>人工地震探査では、深さ 3.5km ~4.0km において、マグマもしくは熱い塑性領域の存在が示唆されるが、地震波トモグラフィ解析では、低速度領域は認められず、カルデラ中心部の深さ 4km~5km に高速度領域がみられる。一般的に、カルデラ下の巨大マグマ溜りは捉えられず、巨大噴火による残存マグマが強く結晶化したもの (mush) と考えられる。</p> <p>Mofete 孔の観測結果より、最も浅いマグマは深さ 4km~6km に深にあり、一部メルト状を示す。ほとんどのマグマは脱ガスして、結晶化しているものと考えられる。岩石学的データより、深さ 5km~8km と深さ 10km~15km にマグマが残存するものと考えられる。</p>
<p>水準測量 光波測距 重力変化</p>  <p>Figure 9 contains four plots. The top row shows Uplift (m) vs Radial distance (km) for (a) a horizontal penny-shaped crack model and (b) a vertical prolate spheroid model. The bottom row shows Baseline change (m) vs Baselines and Baseline change (mgal) vs Radial distance (km) for the same models. Data points are shown with error bars, and model fits are shown as solid lines. A caption below reads: "Fig. 9. (a) Fit between the data and the horizontal penny-shaped crack model (see Table 1 for source parameters). Error bars are two standard deviations. Levelling: January 1981 to September 1983; EDM: September 1980 to September 1983; gravity changes Δg from February 1981 to September 1983. No major deformation episode was detected between September 1980 and January 1981. The average deformation rate between 1974 and 1981 was 0.001 ± 0.002 m a⁻¹ (after Battaglia et al. 2006). (b) Fit between the data and the vertical prolate spheroid model (see Table 1 for source parameters). Error bars are two standard deviations. Levelling, June 1990 to January 1994; EDM: November 1991 to June 1995; gravity changes Δg from June 1991 to January 1995. The subsidence rate was 0.015 ± 0.006 m a⁻¹ in 1990-1994, and 0.012 ± 0.006 m a⁻¹ in 1991-1995 (after Battaglia et al. 2006)."</p>	<p>隆起期間 (1980 年 ~83 年) 中には、Pozzuoli 付近の深さ 2.5km~3.5km に膨張源 (体積変化 0.021km³~0.027km³, 密度 142 kg⁻³~1115kg⁻³) がみられる。一方、沈降期間 (1990 年~94 年) においては、深さ 1.9km~2.2km に収縮源 (体積変化 0.005km³~0.006km³, 密度 902 kg⁻³~1015kg⁻³) がみられる。</p> <p>インバージョン解析より、マグマ溜りの下面深さは 3.5km~4km, 上面深さは 1.8km~2.4km において最も良く求められる。しかし、隆起源と沈降源の形が大きく異なる。</p>	

○イエローストーン

イエローストーンにおける観測データ, 及び観測データに基づく現状の活動評価に関する下記文献の記載内容を第 1.4-1 表～第 1.4-4 表に整理した。

[YS-6]

Mohamed H. A. and Elizabeth S. C. (2011) :

Spatio-temporal evolution of Yellowstone deformation between 1992 and 2009 from InSAR and GPS observations, *Bulletin Volcanology*, **73**, 9, pp.1407-1419.

[YS-8]

Chang, W. L., Smith, R. B., Farrell, J and Puskas, C. M. (2010) :

An extraordinary episode of Yellowstone caldera uplift, 2004-2010, from GPS and InSAR observations. *Geophysical Research Letters*, **87**, L23302.

[YS-13]

Chang, W. L., Smith, R. B., Wicks, C., Farrell, J. M. and Puskas, C. M. (2007) :

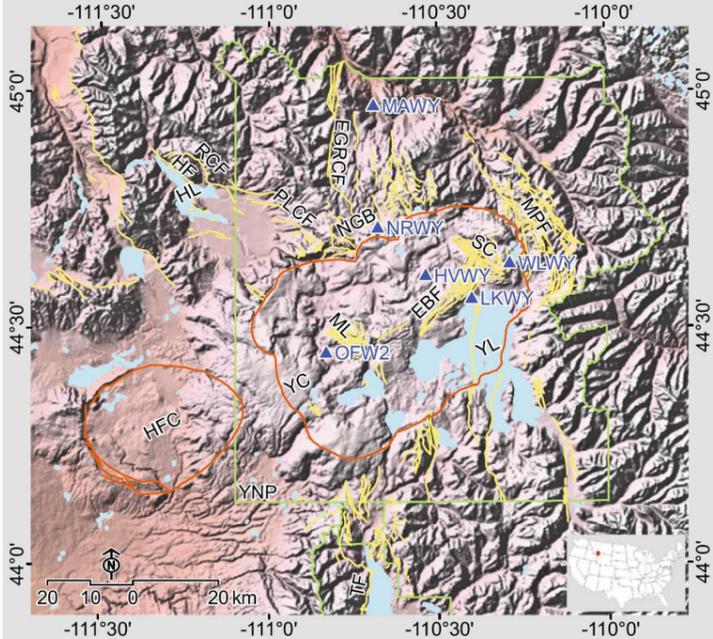
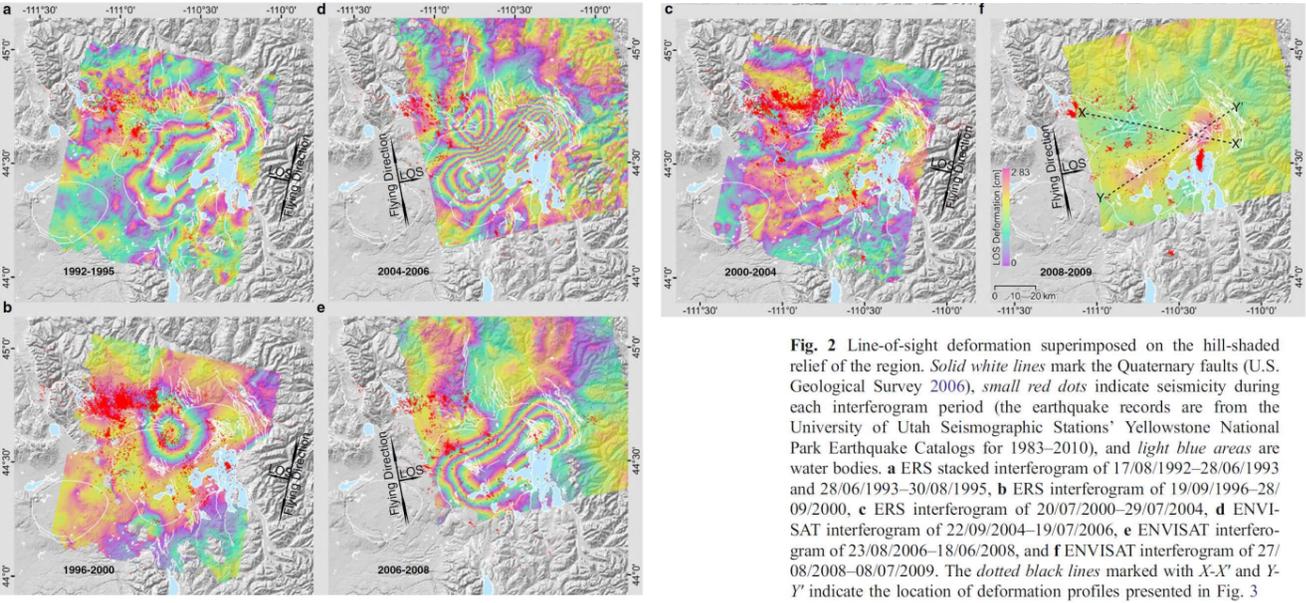
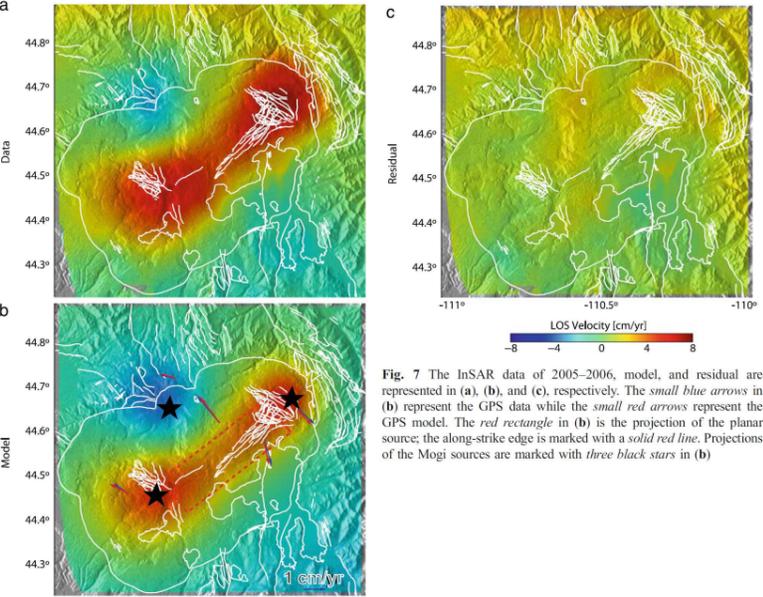
Accelerated Uplift and Magmatic Intrusion of the Yellowstone Caldera, 2004 to 2006, *Science*, **318**, pp.952-956.

[YS-16]

Wicks, C. W., Thatcher, W., Dzurisin, D. and Svarc, J. (2006) :

Uplift, thermal unrest and magma intrusion at Yellowstone caldera, *Nature*, **440**, pp.72-75

第 1.4-1 表 イエローストーンの観測データ・評価に係る文献帳票 (YS-6)

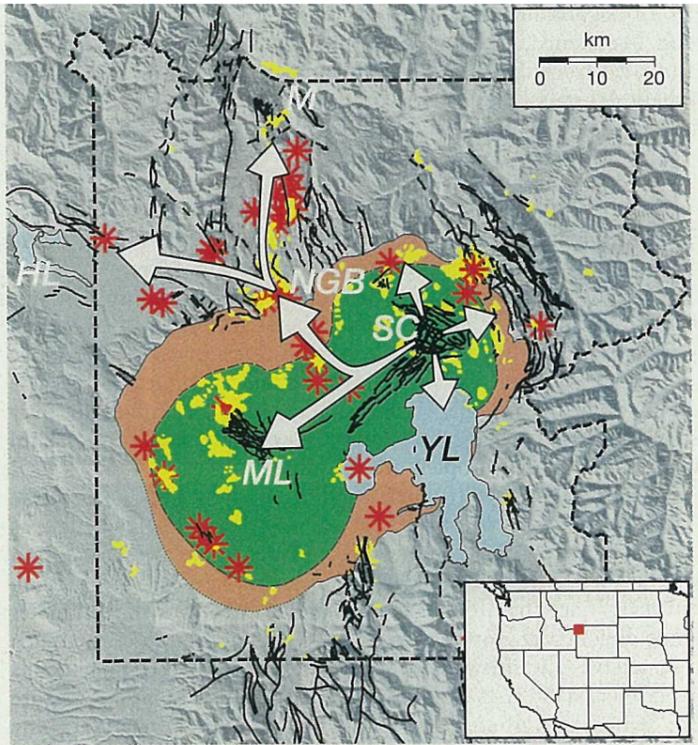
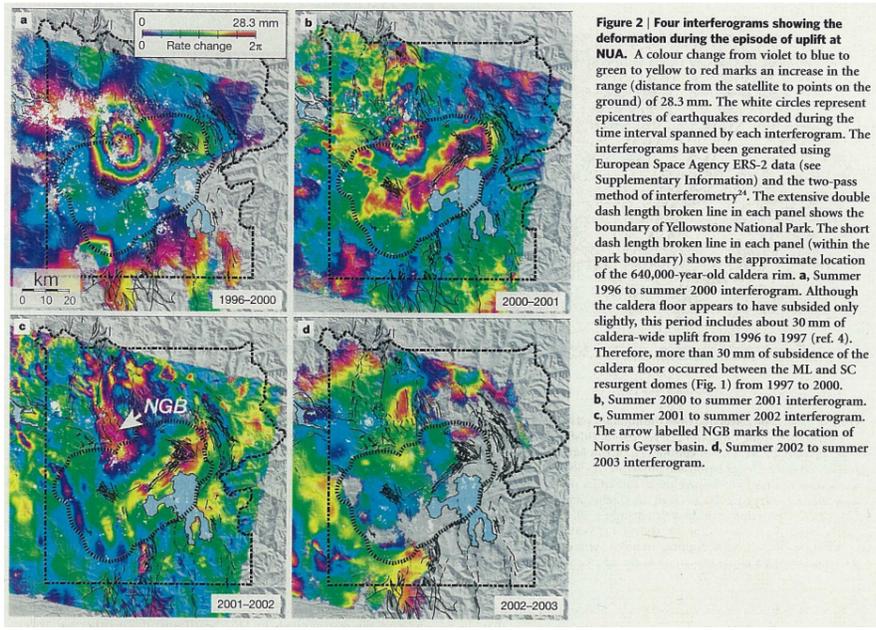
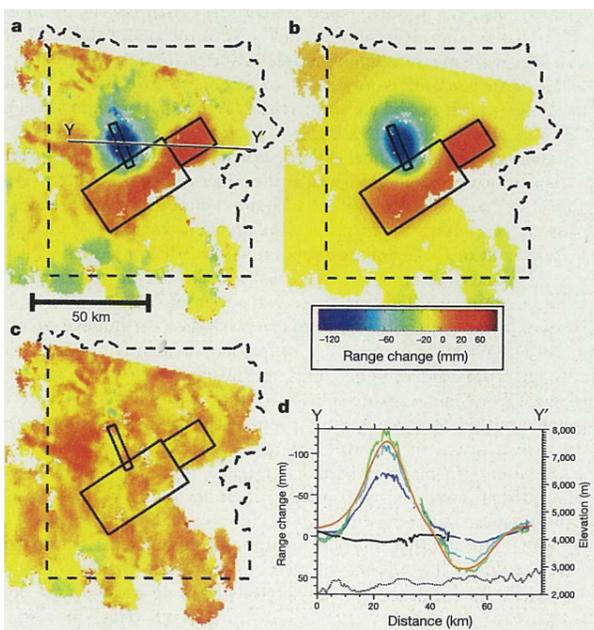
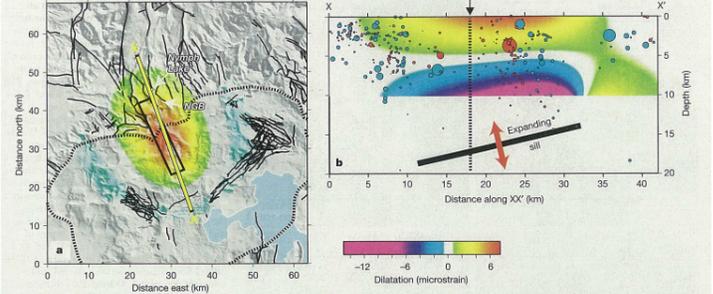
イエローストーンカルデラ (Yellow Stone)																								
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																		
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉・河川		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計		地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
YS-6	Mohamed H. A. and Elizabeth S. C.	2011	Spatio-temporal evolution of Yellowstone deformation between 1992 and 2009 from InSAR and GPS observations	Bulletin Volcanology, 73, 9, pp. 1407-1419			●			●														
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																					
干渉 SAR 解析, GPS によるモニタリングによって, 1992 年~2009 年にかけてのイエローストーンの地表変動の時空間変化を検討する。			イエローストーンカルデラの地表変動は, 1992 年~95 年の沈降 (2.7cm/年), 1996 年~2000 年の沈降 (0.5cm/年:局所的隆起 (1.7cm/年) 伴う), 2000 年~04 年の沈降 (0.7cm/年:局所的隆起 (0.6m/年) 伴う), 2004 年~09 年の隆起 (3cm~8cm/年:局所的沈降 (1cm~4cm/年) 伴う) に区分される。2005 年~06 年夏の間で, 上下方向で 3cm~7cm/年, 水平方向で 3cm~7cm/年の変位がみられる。一方, カルデラ南西部でも 0.2cm/年の変位が発生しており, 再生ドーム下に 2 つの変動源の存在を示唆する。一方, カルデラを横断する断層帯では, 1992 年~2009 年にかけて変位がほとんどないことから, 地表変動はイエローストーンカルデラ及び Norris Geyser Basin (NGB) 下のマグマや熱水活動に起因するものと考えられる。																					
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴						
 <p>Fig. 1 Hill-shaded relief of the greater Yellowstone region. The light blue areas are water bodies and the yellow lines mark the Quaternary faults (U.S. Geological Survey 2006). Orange represents topographic margins of the Yellowstone caldera and the Henrys Fork caldera, and green represents the boundary of Yellowstone National Park. HF indicates Hebgen fault, RCF Red Canyon fault, PLCF Post-Lava Creek fault, ESRCF East Gallatin-Reese Creek fault, MPF Mirror Plateau fault, EBF Elephant Back fault, TF Teton fault, HL Hebgen Lake, YL Yellowstone Lake, YC Yellowstone caldera, SC Sour Creek resurgent dome, ML Mallard Lake resurgent dome, HFC Henrys Fork caldera, NGB Norris Geyser Basin, YNP Yellowstone National Park. The small blue triangles indicate the locations of continuous GPS stations (OFW2, WLWY, HWWY, NRWY, LKWY, and MAWY).</p>			 <p>Fig. 2 Line-of-sight deformation superimposed on the hill-shaded relief of the region. Solid white lines mark the Quaternary faults (U.S. Geological Survey 2006), small red dots indicate seismicity during each interferogram period (the earthquake records are from the University of Utah Seismographic Stations' Yellowstone National Park Earthquake Catalogs for 1983-2010), and light blue areas are water bodies. a ERS stacked interferogram of 17/08/1992-28/06/1993 and 28/06/1993-30/08/1995, b ERS interferogram of 19/09/1996-28/09/2000, c ERS interferogram of 20/07/2000-29/07/2004, d ENVISAT interferogram of 22/09/2004-19/07/2006, e ENVISAT interferogram of 23/08/2006-18/06/2008, and f ENVISAT interferogram of 27/08/2008-08/07/2009. The dotted black lines marked with X-X' and Y-Y' indicate the location of deformation profiles presented in Fig. 3.</p>															<p>エピソード 1: 1992 年~95 年 (a) カルデラで最大 8cm 沈降 (2.7cm/年), NGB は隆起 (0.8cm/年)</p> <p>エピソード 2: 1996 年~2000 年 (b) カルデラ北西縁で最大 6.8cm 隆起, カルデラ底で 2cm 沈降</p> <p>エピソード 3: 2000 年~04 年 (c) カルデラで最大 2.8cm 沈降 (再生ドーム上で隆起), NGB は最大 2.6cm 隆起</p> <p>エピソード 4: 2004 年~09 年 (d~f) 2004 年~06 年ではカルデラ底で最大 7cm/年隆起, NGB で最大 4cm/年沈降</p> <p>2006 年~08 年では, カルデラで 5cm~4cm/年の隆起, NGB で 1cm/年以下の沈降</p> <p>2008 年~09 年では, カルデラで 3cm/年隆起, NGB では沈降が停止する。</p>						
<p>論文概要</p>			<p>干渉 SAR 解析</p>															<p>特徴</p>						
<p>モデル解析</p>			 <p>Fig. 7 The InSAR data of 2005-2006, model, and residual are represented in (a), (b), and (c), respectively. The small blue arrows in (b) represent the GPS data while the small red arrows represent the GPS model. The red rectangle in (b) is the projection of the planar source; the along-strike edge is marked with a solid red line. Projections of the Mogi sources are marked with three black stars in (b).</p>															<p>2005 年~06 年においては, Sour Creek と Mallard の再生ドームと NGB の深さ 10.36km, 17.27km, 16.62km に変動源が求められる。</p> <p>※板状モデルでは, 再生ドーム下に 10.5km×33.1km の開口幅 0.09m が求められる。</p>						
<p>【観測項目 (解析項目)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 干渉 SAR 解析: <ul style="list-style-type: none"> 1992 年~2004 年: ERS-1 (2 ペア), ERS-2 (2 ペア) 2004 年~2009 年: ENVISAT (4 ペア) GPS: 6 か所 																								

第 1.4-3 表 イエローストーンの観測データ・評価に係る文献帳票 (YS-13)

イエローストーンカルデラ (Yellow Stone)																								
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																			
YS-13	Chang, W. L. et al.	2007	Accelerated Uplift and Magmatic Intrusion of the Yellowstone Caldera, 2004 to 2006	Science, 318, pp. 952-956	地震活動	地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉・河川		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ
					●	●	●			●														
モニタリング目的					モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																			
イエローストーンカルデラの地表変動の新しい測定法を通して, 最も最近のカルデラ噴火未遂事象に寄与したマグマ源の時間変化を評価する。					GPS 解析及び SAR 解析によって, イエローストーンカルデラの 2004 年中頃からの隆起エピソードでは, 以前の隆起エピソードにおける隆起速度の 3 倍を超える 7cm/年の隆起速度が求められた。モデル解析の結果, カルデラの深さ 10km には, 最大 1200km ² のシルが広がっていると考えられ, 地殻内のマグマ溜りを示す地震活動域の頂部と一致する。マグマ供給速度は 0.1km ³ /年と求められ, カルデラで観測される高い熱流量の供給する上で必要となるマグマ貫入量に類似する。このことは, マグマ蓄積が隆起速度の増加の要因であることを示唆する。																			
観測点分布図/観測項目					結果図 (平面分布図・時間変化図等)																			
					<p>水準測量 干渉 SAR GPS 解析</p>																		<p>特徴</p> <p>水準測量, GPS 測量及び干渉 SAR 解析により, カルデラ内の 2 つの再生ドームやカルデラ底において最大 1 cm/年~2cm/年の隆起速度が得られる。Norris Geyser Basin では沈降がみられる。これらのイエローストーンにおける噴火未遂事象の時空間変化は, 地震活動, 熱水活動の変化とも調和的である。</p>	
					<p>モデル解析</p>																		<p>モデル解析により, カルデラの深さ 6km~14km, Norris 地域の深さ 6km~16km に, それぞれ 0.10km³/年~0.12km³/年, -0.005km³/年~-0.015km³/年の体積変化を及ぼす膨張・収縮源が求められる。</p> <p>カルデラ隆起の解釈として, マグマ性流体(水・ガス)が, これを遠くない岩石下に付加することが挙げられる。</p>	
<p>[観測項目(解析項目)]</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震活動: 水準測量: 1923 年~2004 年 GPS: 1997 年~2007 年 干渉 SAR 解析: 2004 年~06 年 (ENVISAT IS1, IS2) 																								

論文概要

第 1.4-4 表 イエローストーンの観測データ・評価に係る文献帳票 (YS-16)

イエローストーンカルデラ (Yellow Stone)																								
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記事事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																		
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉・河川		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ
YS-16	Wicks, C. W. et al.	2006	Uplift, thermal unrest and magma intrusion at Yellowstone caldera	Nature, 440, pp.72-75		●	●			●					●									
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検出した噴火未遂事象等)																					
イエローストーンカルデラの地表変動の新しい測定法 (InSAR) を通して, 玄武岩質マグマの動きに関連する隆起・沈降パターンを観察する。			1996 年~2002 年にかけて, イエローストーンカルデラ全体に及ぶ地表変動が認められた。																					
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																		特徴			
 <p>Figure 1 A map of structural, thermal and volcanic features in and around Yellowstone caldera. (Map taken from Christiansen¹.) The red symbols mark volcanic centres that erupted after the caldera-forming event 640 kyr ago. The areas of known past or present thermal activity are coloured yellow. The ring-fracture zone of the caldera is shown green, and the slumped zone between the ring-fracture zone and the best estimate of the caldera rim is shown salmon. The park boundary is the dashed black line. Faults active in the Quaternary are marked with black lines. The labelled features are Norris Geyser basin (NGB), Mammoth Hot Springs (M), Sour Creek dome (SC), Mallard Lake dome (ML), Hebgen Lake (HL) and Yellowstone Lake (YL). The white arrows show interpreted magma migration paths. The red square in the inset map (bottom right) shows the location of the study area.</p>			 <p>Figure 2 Four interferograms showing the deformation during the episode of uplift at NUA. A colour change from violet to blue to green to yellow to red marks an increase in the range (distance from the satellite to points on the ground) of 28.3 mm. The white circles represent epicentres of earthquakes recorded during the time interval spanned by each interferogram. The interferograms have been generated using European Space Agency ERS-2 data (see Supplementary Information) and the two-pass method of interferometry²⁴. The extensive double dash length broken line in each panel shows the boundary of Yellowstone National Park. The short dash length broken line in each panel (within the park boundary) shows the approximate location of the 640,000-year-old caldera rim. a, Summer 1996 to summer 2000 interferogram. Although the caldera floor appears to have subsided only slightly, this period includes about 30 mm of caldera-wide uplift from 1996 to 1997 (ref. 4). Therefore, more than 30 mm of subsidence of the caldera floor occurred between the ML and SC resurgent domes (Fig. 1) from 1997 to 2000. b, Summer 2000 to summer 2001 interferogram. c, Summer 2001 to summer 2002 interferogram. The arrow labelled NGB marks the location of Norris Geyser basin. d, Summer 2002 to summer 2003 interferogram.</p>																		<p>カルデラ北縁部: ・1996 年~2000 年: 大規模な地表変動(隆起) ・2002 年まで地表変動継続 カルデラ: ・1997 年後半~98 年前半: 再生ドームの隆起から沈降への変化 2002 年には地表変動が停止</p>			
 <p>Figure 3 Observed and modelled uplift at NUA and subsidence of the caldera floor. The black outlines are the surface projections of a north-northwest-trending expanding sill, and two northeast-trending contracting sills. The dashed line is the outline of Yellowstone National Park. a, A stacked interferogram formed by summing unwrapped versions of the interferograms in Fig. 2a-c. b, Synthetic interferogram from best-fit model. c, Residual interferogram formed by subtracting the synthetic interferogram (b) from the observed interferogram (a). d, Deformation profiles from Y to Y'. The colours denote: blue, 1996-2000 deformation; cyan, 1996-2001 deformation; green, 1996-2002 deformation; black, 2002-2003 deformation; and red, deformation from best-fit model (b). Elevation along the profile is shown by the black dotted line.</p>			 <p>Figure 4 Dilatation calculated from the inflating sill in Fig. 3. (Calculations were performed using Coulomb 2.5; ref. 25.) a, Dilatation at the surface resulting from the NUA uplift episode. The arrow labelled 'NGB' marks the location of Norris Geyser basin, and the arrow labelled 'Nymph Lake' marks the location of the newly formed line of fumaroles near Nymph Lake. The black lines are mapped faults active in the Quaternary. The black rectangle shows the approximate location of the 640,000-year-old caldera rim. b, Cross-section through X-X' in a resulting from the uplift episode. The peak dilatation is just under 7 microstrain at the surface. The cyan circles show earthquakes greater than $M = 0.0$ that occurred before the uplift episode (1 January 1992 through to 31 December 1997) and the red circles show earthquakes greater than $M = 0.0$ that occurred during the uplift episode (1 January 1998 through to 13 August 2003). Earthquakes 10 km each side of the X-X' line are projected onto the cross-section. Size of circles is scaled to earthquake magnitude. Note that for better visualization, this scaling is different for the red and cyan circles; for two earthquakes with the same magnitude (one cyan, one red), the red circle plots at twice the diameter of the cyan circle.</p>																		<p>NUA の膨張量: $0.06\text{km}^3 \sim 0.1\text{km}^3$ NUA に隆起ピーク, 並びに再生ドーム(カルデラ底)に沈降ピークがみられる。 モデル解析によれば, NUA の上部地殻内に拡大面 (~30mm~50mm) を有する膨張源が求められる。</p>			
[観測項目(解析項目)]			<ul style="list-style-type: none"> 干渉 SAR 解析: 1996 年~2003 年(ERS-2) 水準測量 GPS 解析 																					

論文概要

○小笠原硫黄島

小笠原硫黄島における観測データ，及び観測データに基づく現状の活動評価に関する下記文献の記載内容を第 1.5-1 表～第 1.5-3 表に整理した。

[OI-2]

Ozawa, T., Ueda, H., Ukawa, M. and Miyazaki, S. (2007) :

Temporal change in crustal deformation related to volcanic activity of Iwo-jima observed by PALSAR/InSAR, *Proc. The First Joint PI Symp. ALOS Data Nodes for ALOS Sci. Prog. in Kyoto*, DIS10.

[OI-3]

小澤 拓・上田英樹・島田政信・村上 亮・飛田幹男・矢来博司・和田弘人・雨貝知美・藤原みどり・藤田英輔・鶴川元雄 (2007) :

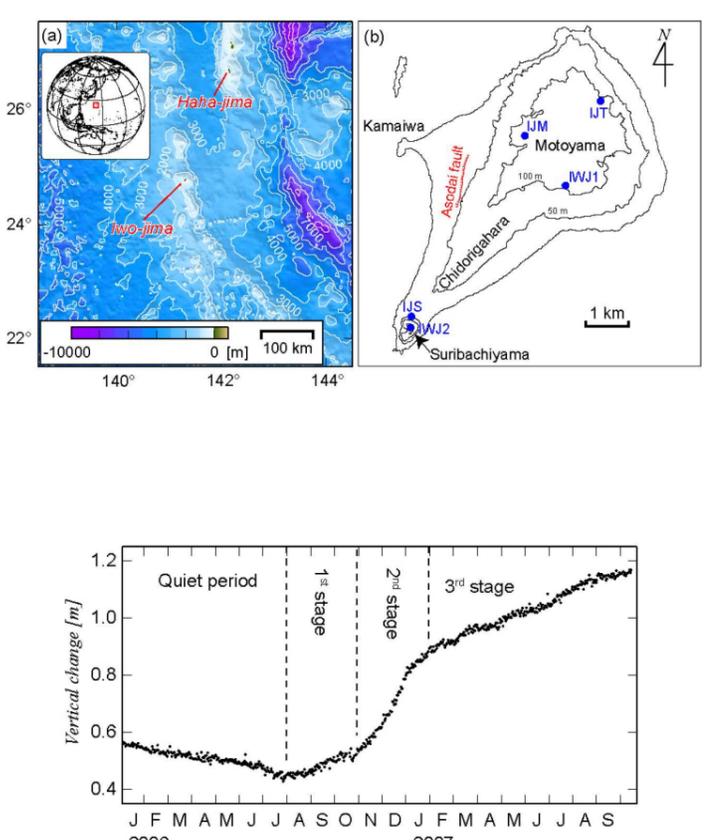
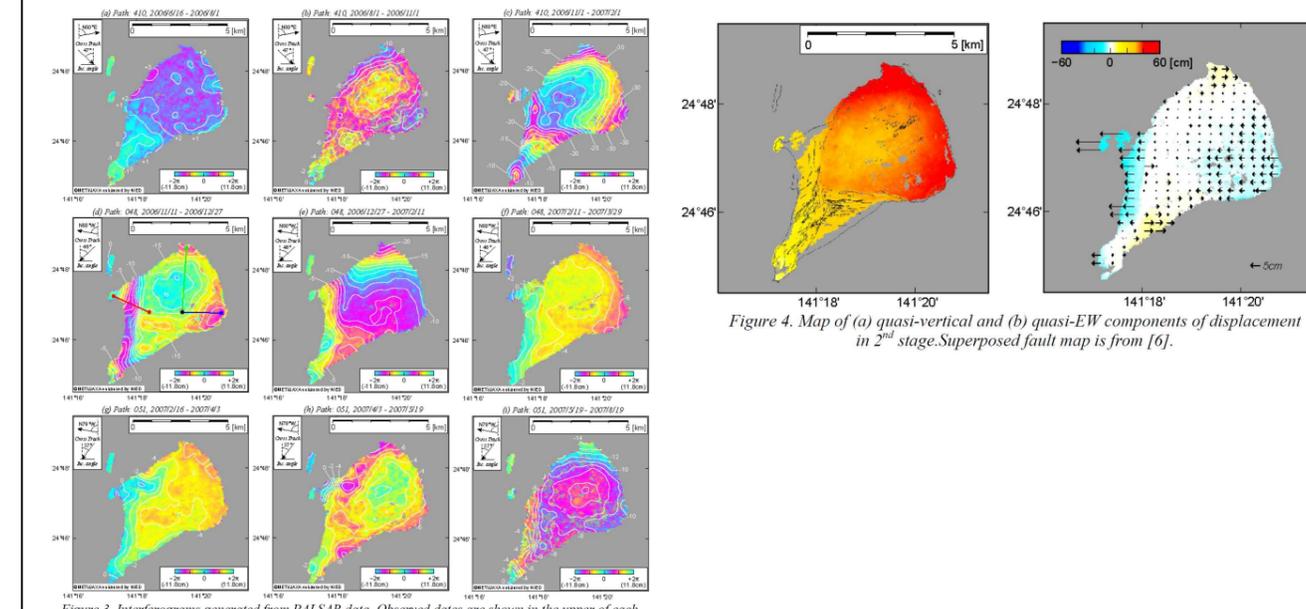
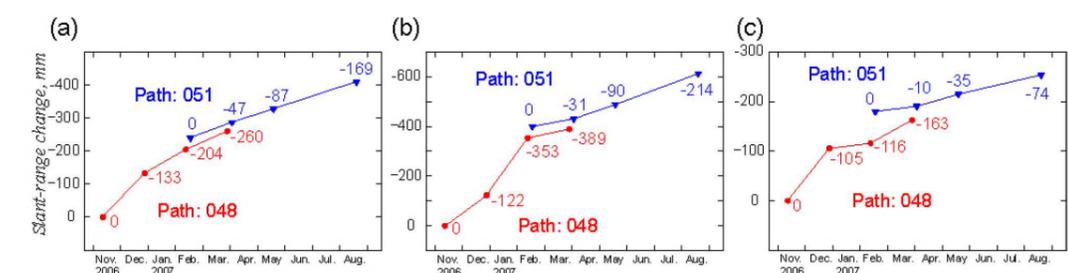
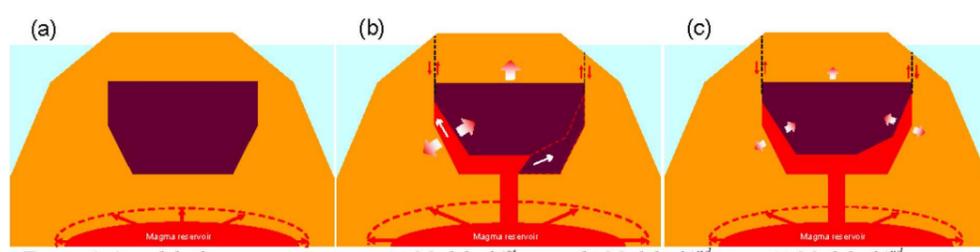
PALSAR/InSARにより得られた小笠原硫黄島の2006年火山活動活発化に伴う地殻変動(速報), 防災科学技術研究所研究報告, **71**, pp. 11-22.

[OI-4]

矢来博司・村上 亮・森 克浩・宮本純一 (2005) :

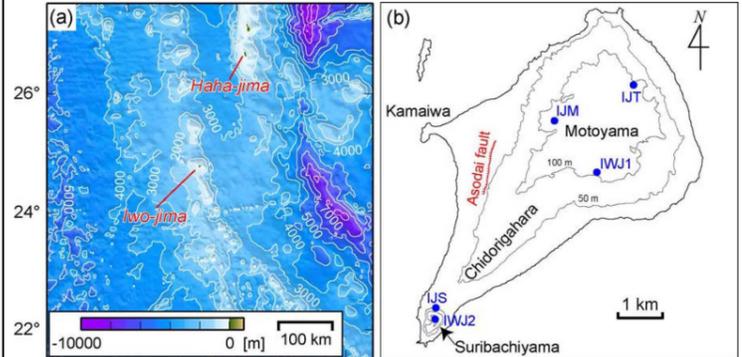
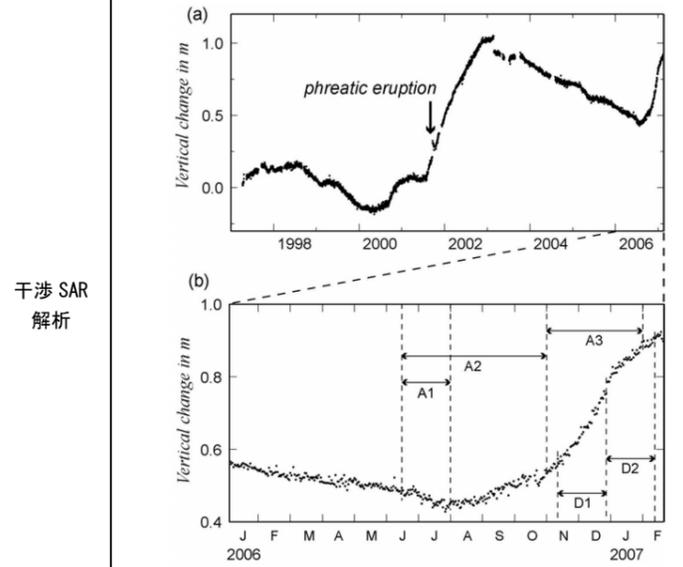
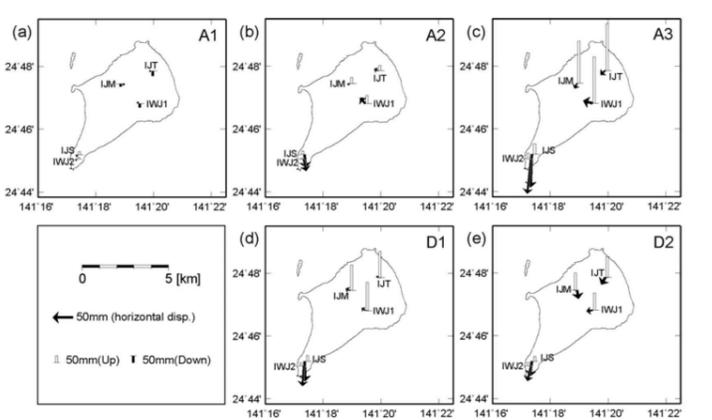
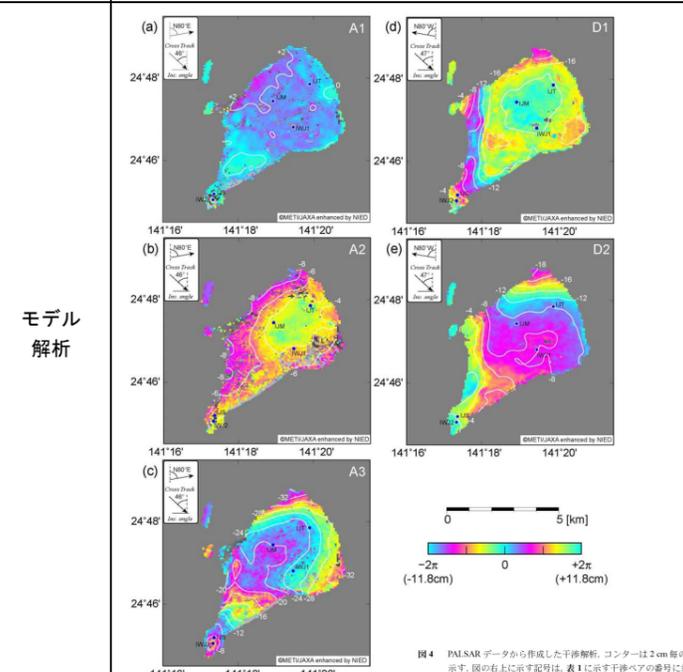
GPS 繰り返し観測により捉えられた硫黄島の地殻変動, 国土地理院時報, **106**, pp. 51-55.

第 1.5-1 表 小笠原硫黄島の観測データ・評価に係る文献帳票 (01-2)

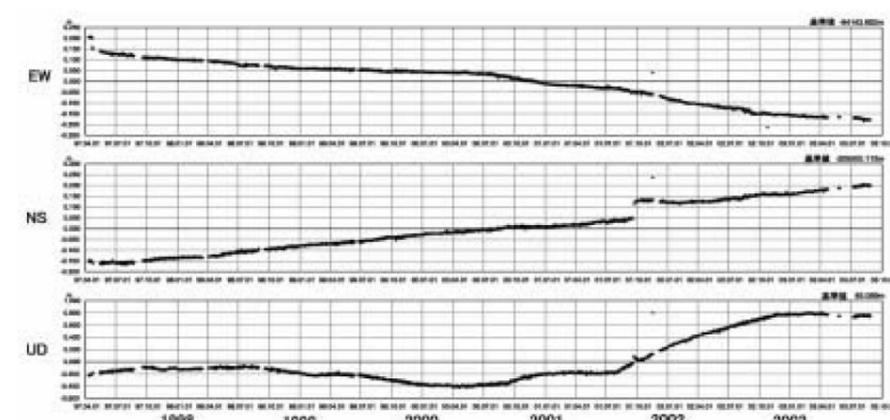
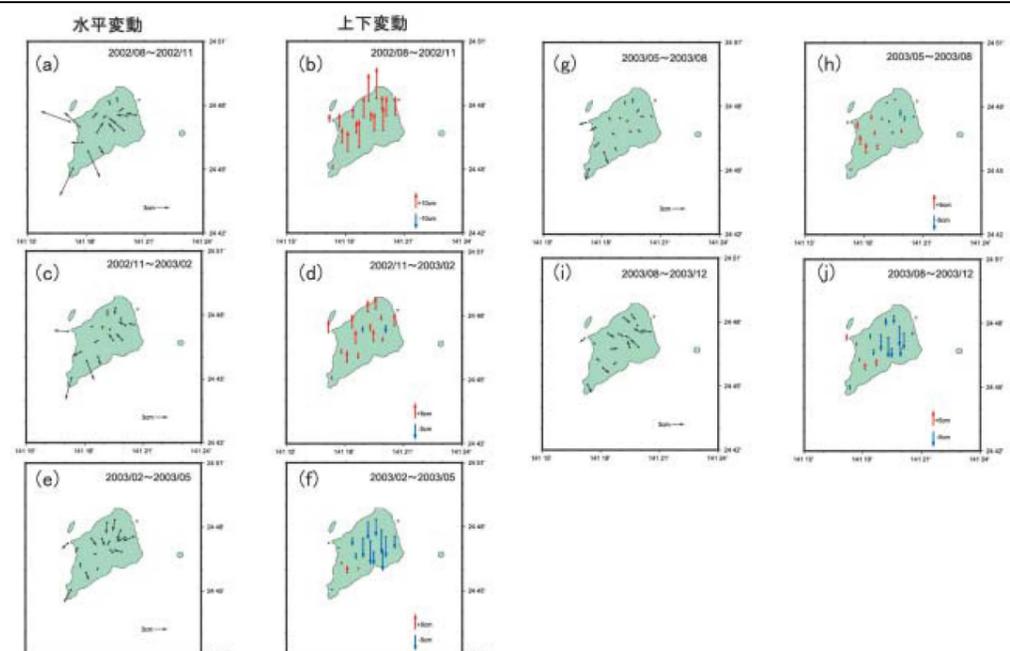
小笠原硫黄島 (Iwojima)		記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																						
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ
01-2	Ozawa, T. et al.	2007	Temporal change in crustal deformation related to volcanic activity of Iwo-jima observed by PALSAR/InSAR	Proc. The First Joint PI Symp. ALOS Data Nodes for ALOS Sci. Prog. in Kyoto, DISTO.			●		●			●												
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検出した噴火未遂事象等)																					
干渉 SAR 解析をもとに, 硫黄島カルデラの地表変動データを取得するとともに, マグマの移動モデルを検討する。			ALOS/PARSAR 解析により, 硫黄島カルデラの活動度に増加に関連した地表変動の時間変化を抽出し, その変化過程を図示した。しかし, 地表変動パターンは非常に複雑で, 今後より詳細な調査と観察が必要である。																					
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																		特徴			
 <p>Figure 2. Time series depicting vertical movement of IWJ1 relative to Haha-jima</p>			 <p>Figure 3. Interferograms generated from PALSAR data. Observed dates are shown in the upper of each figure. Contour lines represent slant-range change at 2cm intervals.</p> <p>Figure 4. Map of (a) quasi-vertical and (b) quasi-EW components of displacement in 2nd stage. Superposed fault map is from [6].</p>																		<p>1st ステージ: 静穏期 (a) 緩やかな沈降傾向だが, わずかな隆起がみられる。膨張源は 2km 以深と 10km 以浅に求められる。</p> <p>2nd ステージ: (c)-(e) 隆起と地震活動の増加がみられるが変位方向に変化がみられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・西海岸の阿蘇台断層沿い (上下約 5cm) ・元山ブロック ・末期に隆起傾向鈍化 <p>3rd ステージ: (d)~(i)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・元山隆起 (海岸との基線長伸び) 			
[観測項目 (解析項目)]			モデル解析																		<p>重力測定及び地表変動のモデル解析により,</p> <ul style="list-style-type: none"> ・元山の深さ 1km~2km にじょうご型のプール (空隙) が存在する。 ・1st ステージ: より深いマグマ溜りで膨張が発生 ・2nd ステージ: 浅部マグマ溜り底部へのマグマの上昇, それに伴う浅部マグマ溜りからのマグマ上昇が発生。それに伴う元山の隆起と浅部マグマ溜り外側沿いにマグマの貫入による, 阿蘇台断層・海岸沿いの隆起 (時間的に不規則) ・3rd ステージ: マグマの継続的供給に伴う浅部マグマ溜り外側沿いのマグマ注入・膨張 			
			 <p>Figure 5. Temporal slant-range change calculated from comparison between two points shown by (a) red (Asodai Fault), (b) green (north coast), and (c) blue (south east coast) lines of Fig. 3(d).</p>																		 <p>Figure 6. A model of magma movements. (a) Model of 1st stage (b) Model of 2nd stage (c) Model of 3rd stage.</p>			

論文概要

第 1.5-2 表 小笠原硫黄島の観測データ・評価に係る文献帳票 (01-3)

小笠原硫黄島 (Iwojima)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動					重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉・河川		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR		ひずみ計	潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
01-3	小澤 拓 他	2007	PALSAR/In SARにより得られた小笠原硫黄島の2006年火山活動活性化に伴う地表変動(速報)	防災科学技術研究所 研究報告 71, pp.11-22			●			●													
モニタリング目的			モニタリングの結果(検出した噴火未遂事象等)																				
ALOS/PALSAR データを用いた干渉 SAR 解析により, 2006 年 8 月頃から火山活動の活性化が観測された硫黄島を調査する。			隆起に転じてから 11 月までの期間は, 比較的深部に位置する力源の膨張によって島全体が隆起する。最も活動的な 11 月以降では, 元山に近づくほど隆起量が大きくなり。島北端では約 40cm の隆起がみられる。西側の断層帯では, 拡大かつ西落ちの上下変動が検出され, 阿蘇台において変形の集中がみられる。また, 東西方向に延びる断層においても, 元山側が隆起する方向の急激な変形がみられ, 元山がブロック状に隆起しているように見える。これらの地表変動は, 比較的浅部に力源があると考えられる。																				
観測点分布図/観測項目			結果図(平面分布図・時間変化図等)															特徴					
論文概要	 <p>図 1 (a) 小笠原硫黄島周辺の海底地形図 (ETOPO2 を用いて描画)。コンターは 1,000 m ごとの深度を示す。(b) 小笠原硫黄島の地図。青丸は GPS 観測点。赤線は阿蘇台断層を示す。</p>		干渉 SAR 解析	 <p>図 2 (a) 電子基準点「硫黄島 1」の上下変位を示す時系列。基準点は電子基準点「母島」である。(b) 2006 年以降の拡大図。矢印は, 本研究で解析した干渉ペアの期間を示す。矢印と共に示す番号は, 表 1 に示す干渉ペア番号に対応する。</p>															<p>2003 年以降, 継続的な沈降が観測される。2006 年 8 月頃から隆起に転じる変化がみられる。</p> <p>A1 : 2cm~4cm 沈降 A2 : 南端で 0cm~3cm 隆起, 中央部で 6cm。元山付近で若干の西進, 南端付近で 3cm を超える南進 A3 : 元山で 30cm 以上隆起, 摺鉢山周辺で約 9cm の南進</p>				
	 <p>図 3 GPS によって観測された各干渉ペアのデータ取得間に生じた地殻変動。図の右上に示す番号は, 表 1 に示す干渉ペア番号に対応する。</p>			モデル解析	 <p>図 4 PALSAR データから作成した干渉解析。コンターは 2 cm 毎のスラントレンジ変化量を示す。青丸は GPS 観測点を示す。図の右上に示す記号は, 表 1 に示す干渉ペアの番号に対応する。左上の挿入図はレーダ照射方向を示す。</p>															<p>A1 : 元山周辺における 2cm 程度のスラントレンジ伸長; それまでの収縮変形と異なる。 A2 : 島全域で 3cm~8cm のスラントレンジ短縮, 北西-南東方向でスラントレンジの変化がみられる。 ※比較的浅部に位置する膨張源に起因する地表変動 A3 : 摺鉢山で 8cm のスラントレンジ短縮, 元山付近で 30cm の変化がみられる。 ※新たな力源の活動 南北方向に延びるスラントレンジ伸長パターン(阿蘇台断層を含むグラーベン構造), 元山付近では収縮変形パターン, 摺鉢山では目玉状のスラントレンジ伸長パターンがみられる。 D1/D2 : 西海岸において, 水平変位を伴う上下変動みられる。島北端において, スラントレンジ短縮パターン(4cm, 8cm)がみられる。</p>			
[観測項目(解析項目)]			<ul style="list-style-type: none"> 干渉 SAR 解析: PALSAR (ALOS) GPS 解析: 島内 2 箇所 																				

第 1.5-3 表 小笠原硫黄島の観測データ・評価に係る文献帳票 (01-4)

小笠原硫黄島 (Iwojima)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
01-4	矢来博司 他	2005	GPS 繰り返し観測により捉えられた硫黄島の地表変動	国土地理院時報 106, pp.51-55			●																
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																				
GPS 繰り返し観測により, 硫黄島の地表変動及びその時間変化の特徴を明らかにする。			GPS 繰り返し観測の結果, 硫黄島全体の隆起, 島東部の元山を中心とする地表変動, 南西部の千鳥ヶ原を中心とする拡大が捉えられた。地表変動の特徴から, 変動源が複数存在することが明らかになったが, 時間的・空間的に複雑な硫黄島の地表変動のモデル化のためには, さらなる調査・観測が必要である。																				
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴					
論文概要	 <p>図-2 硫黄島の地形。等高線は20m間隔。白丸は GEONET観測点の位置, 赤三角は2001年9月及び10月の噴火地点を示す。</p>			<p>GPS 解析</p>  <p>図-3 GEONET連続観測より得られた硫黄島の地殻変動。母島を基準とした硫黄島1の座標変化の時系列グラフ。上から東西, 南北, 上下方向の変動を示す。東西, 南北については一目盛り5cm, 上下については一目盛り20cm。2001年7月末から隆起が始まり, 1年間でほぼ1m隆起したことがわかる。2001年9月21日の噴火に伴う変動は明瞭であるが, 10月19日の噴火ではほとんど変動は見られない。</p>															<p>非常に大きな地表変動が捉えられる。2001年9月噴火に伴う地表変動が捉えられる。</p>				
	<p>[観測項目(解析項目)]</p> <ul style="list-style-type: none"> GPS 連続, 繰り返し観測: 7回(2002年8月~2004年6月) 			<p>モデル解析</p>  <p>図-4 GPSキャンペーン観測より得られた硫黄島の地殻変動。フィリピン海プレートの移動量をSella et al. (2002) のプレート運動モデル (REVEL) を用いて補正し, フィリピンプレートに対する相対変位ベクトルを求めた。 (a)(b) 2002年8月~11月 (c)(d) 2002年11月~2003年2月 (e)(f) 2003年2月~5月 (g)(h) 2003年5月~8月 (i)(j) 2003年8月~12月</p>															<p>2002年8月~11月(a, b)</p> <ul style="list-style-type: none"> 島全体の隆起(約20cm) 元山を中心とする収縮と千鳥ヶ原を中心とする拡大(約7cm) <p>2002年11月~03年2月(c, d)</p> <ul style="list-style-type: none"> 島全体の隆起量低下 それまでの傾向の継続, 千鳥ヶ原の拡大低下 <p>2003年2月~5月(e, f)</p> <ul style="list-style-type: none"> 元山を中心とする収縮・沈降 千鳥ヶ原の拡大更に低下 <p>2003年5月~8月(g, h)</p> <ul style="list-style-type: none"> 元山の収縮なし, 千鳥ヶ原でわずかな拡大 隆起ほとんどなし <p>2003年8月~12月(i, j)</p> <ul style="list-style-type: none"> 元山の収縮・沈降 <p>※2003年2月~5月と類似 →千鳥ヶ原の隆起・拡大は時間とともに変動量減少, 元山の収縮・沈降は一定速度ではない。 →変動源が複数存在する可能性(比較的浅部の収縮源, 深部での膨張源の存在)がある。</p>				

○タウポ

タウポにおける観測データ，及び観測データに基づく現状の活動評価に関する下記文献の記載内容を第 1.6-1 表～第 1.6-4 表に整理した。

[TP-2]

Samsonov, S., Beavan, J., Gonzalez, P. J., Tiampo, K. and Fernandez, J. (2011) :
Ground deformation in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, observed by ALOS
PALSAR interferometry, *Geophysical Journal International*, **187**, pp.147-160.

[TP-6]

Peltier, A., Hurst, T., Scott, B. and Cayol, V. (2009) :
Structures involved in the vertical deformation at Lake Taupo (New Zealand)
between 1979 and 2007: New insights from numerical modelling, *Journal of
Volcanology and Geothermal Research*, **181**, pp. 173-184.

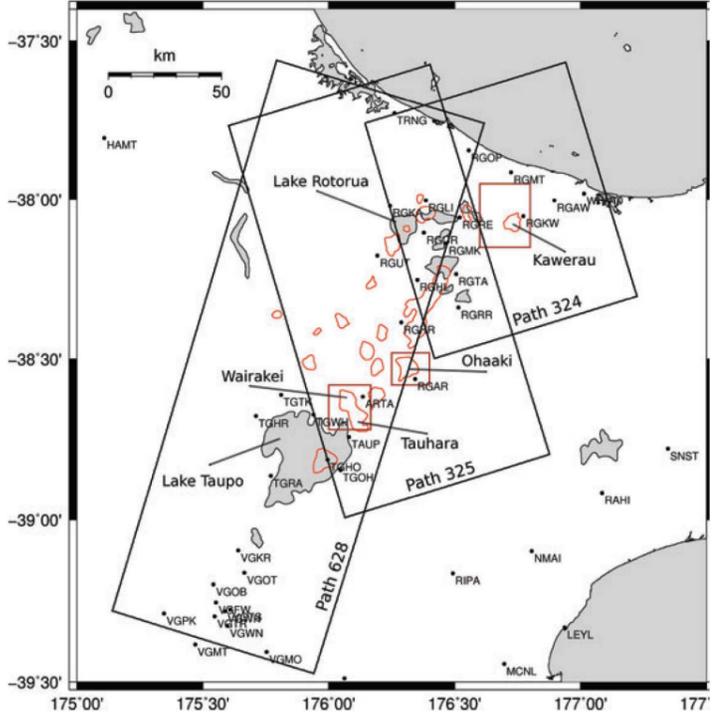
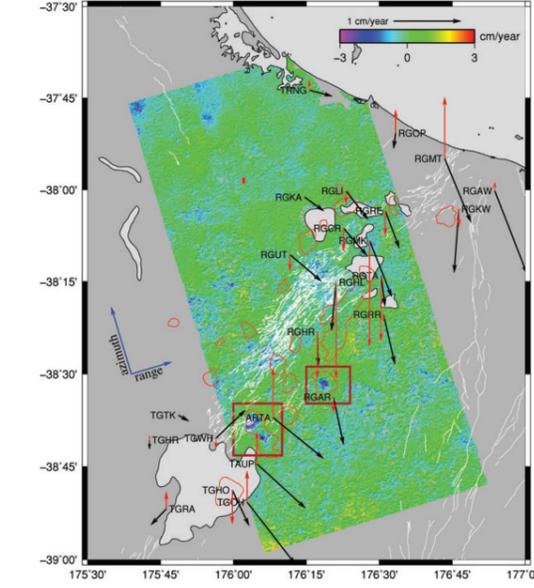
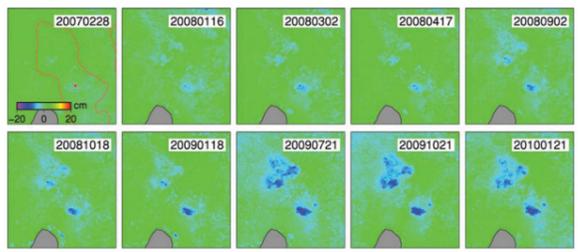
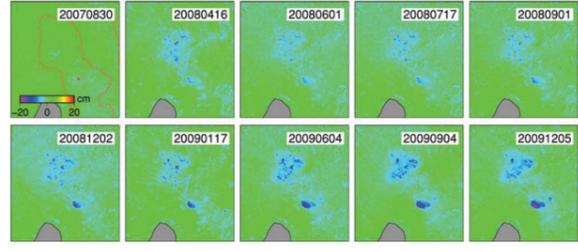
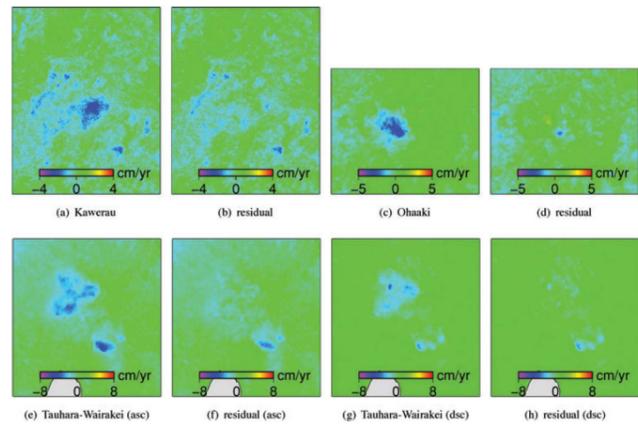
[TP-7]

Hole, J. K., Bromley, C. J., Stevens, N. F. and Wadge, G. (2007) :
Subsidence in the geothermal fields of the Taupo Volcanic Zone New Zealand from
1996 to 2005, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **166**, pp.125-
146.

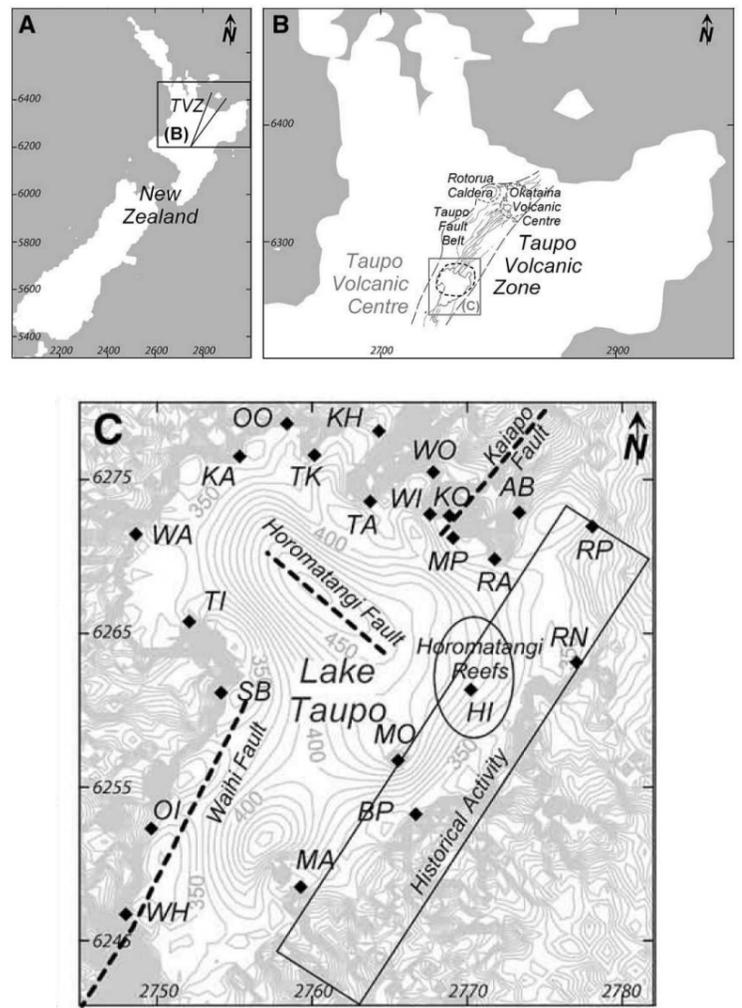
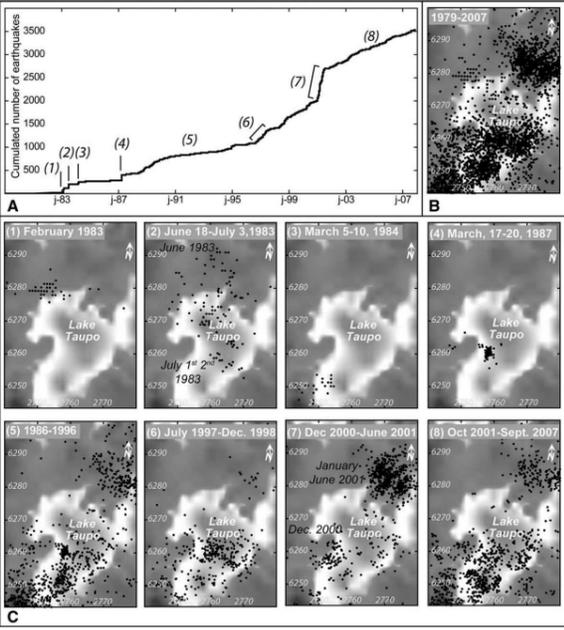
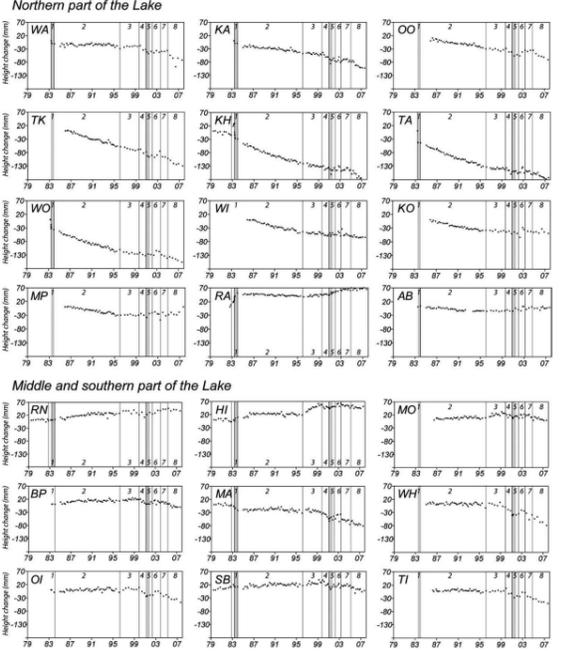
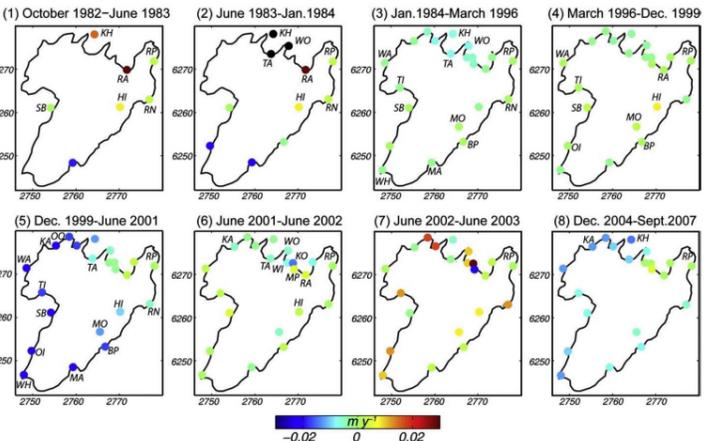
[TP-8]

Darby, D. J., Hodgkison, K. M. and Blick, G. H. (2000) :
Geodetic measurement of deformation in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand: The
north Taupo network revisited, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*,
43, pp.157-170.

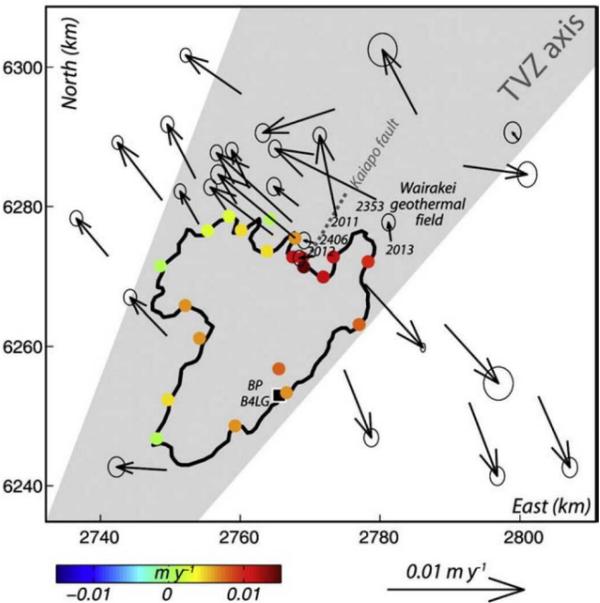
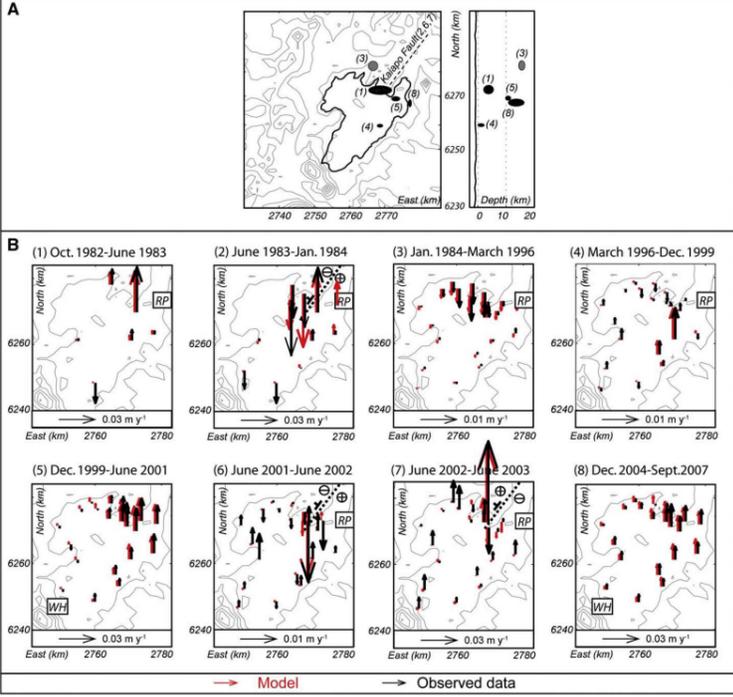
第 1.6-1 表 タウポの観測データ・評価に係る文献帳票 (TP-2)

タウポカルデラ (Taupo)																																																																				
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																																																														
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動																																													
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉SAR	ひずみ計		潮位計		地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ																																											
TP-2	Samsonov, S. et al.	2011	Ground deformation in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, observed by ALOS PALSAR interferometry	Geophysical Journal International, 187, pp.147-160			●			●																																																										
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																																																																	
ALOS/PALSAR を用いた DInSAR 解析により, 2006 年 12 月~2010 年 1 月の地表変動量を求める。			DInSAR 解析による地表変動は, GPS による解析結果と調和的である。また, タウポ火山地域の各地熱地帯では局所的な沈降し, 各変動源における体積変化量を求めた。																																																																	
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴																																																		
 <p>Figure 1. Location map showing Taupo Volcanic Zone and footprints of ALOS images used in this study (ascending paths 324-325 and descending path 628). Geothermal fields are outlined in red (modified from Bibby et al. 1995; Hole et al. 2007).</p>			 <p>Figure 3. Line-of-sight displacement rates calculated by fitting linear trend to time series for ALOS PALSAR ascending path 325. GPS velocities are plotted as described in Fig. 2. Red square shows reference region used in SBAS processing. Brown rectangles outline subsidence at Ohaaki (top panel) and Tauhara-Wairakei (bottom panel) geothermal systems.</p>															 <p>Figure 7. Time series of line-of-sight displacement at Tauhara-Wairakei geothermal system from ALOS PALSAR ascending path 325 starting from 20070113 (date in YYYYMMDD format). Coordinates of TL and BR corners are (-38.58N, 176.00E) and (-38.72N, 176.17E). Red star shows region of fastest subsidence.</p>			 <p>Figure 8. Time series of line-of-sight displacement at Tauhara-Wairakei geothermal system from ALOS PALSAR descending path 628 starting from 20070115 (date in YYYYMMDD format). Coordinates of TL and BR corners are (-38.58N, 176.00E) and (-38.72N, 176.17E). Red star shows region of fastest subsidence.</p>			<p>Pnth325 と Pnth628 の解析では, Tauhara-Wairakei 地熱地帯では, 5cm/年~6cm/年の明確な沈降がみられる。</p>																																												
<p>論文概要</p>			<p>GPS 干渉 SAR 解析</p>															<p>モデル解析</p>																																																		
<p>[観測項目 (解析項目)]</p> <ul style="list-style-type: none"> SAR 解析: 2006 年~2010 年 (ALOS/PALSAR) <ul style="list-style-type: none"> path324: 20061227~20091119 path325: 20070113~20100121 path628: 20070715~20091205 GPS: 約 30 基準点 			 <p>Figure 13. Results of modelling with ellipsoidal sources (Yang et al. 1988) and tabular source (Okada 1985). Top row—observed (a) and residual (b) linear displacement rates for Kawerau [coordinates of TL and BR corners are (-37.95N, 176.60E) and (-38.15N, 176.80E)] and Ohaaki [observed (c) and residual (d), coordinates of TL and BR corners are (-38.48N, 176.25E) and (-38.58N, 176.40E)]. Bottom row—results of modelling with tabular source (Okada, 1985) for Wairakei and ellipsoidal (Yang et al. 1988) source for Tauhara (coordinates of TL and BR corners are (-38.58N, 176.00E) and (-38.72N, 176.17E)). Observed (e) and (g) and residual (f) and (h) linear displacement rates for Tauhara-Wairakei geothermal system from ascending and descending orbits.</p>															<p>Table 2. Best-fitting parameters of ellipsoidal sources for Kawerau, Ohaaki and Tauhara geothermal fields.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kawerau</th> <th>Ohaaki</th> <th>Tauhara</th> <th>Wairakei</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Longitude (° ± km)</td> <td>176.698 ± 0.20</td> <td>176.306 ± 0.43</td> <td>176.084 ± 0.13</td> <td>176.08</td> </tr> <tr> <td>Latitude (° ± km)</td> <td>-38.055 ± 0.15</td> <td>-38.524 ± 0.19</td> <td>-38.676 ± 0.09</td> <td>-38.62</td> </tr> <tr> <td>Depth (km)</td> <td>1.3 ± 0.2</td> <td>1.5 ± 0.3</td> <td>0.4 ± 0.2</td> <td>0.5^a</td> </tr> <tr> <td>ΔV^a, × 10⁶ m³</td> <td>-0.13 ± 0.05</td> <td>-0.27 ± 0.09</td> <td>-0.07 ± 0.03</td> <td>-47.1</td> </tr> <tr> <td>Strike (°)</td> <td>60 ± 84</td> <td>125 ± 103</td> <td>-63^b ± 18</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dip (°)</td> <td>32 ± 25</td> <td>28 ± 25</td> <td>0^c</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ϵ</td> <td>0.24</td> <td>0.78</td> <td>0.89</td> <td></td> </tr> <tr> <td>RMS</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>^aParameter determined as $\Delta V = \frac{\Delta P}{\rho} \pi a b^2$ (Tiampo et al. 2000). ^bConstrained to the range [-75, -30] (positive degrees N-to-E, clockwise). ^cFixed during the inversion. ϵ is eccentricity parameter.</p>				Kawerau	Ohaaki	Tauhara	Wairakei	Longitude (° ± km)	176.698 ± 0.20	176.306 ± 0.43	176.084 ± 0.13	176.08	Latitude (° ± km)	-38.055 ± 0.15	-38.524 ± 0.19	-38.676 ± 0.09	-38.62	Depth (km)	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.3	0.4 ± 0.2	0.5 ^a	ΔV^a , × 10 ⁶ m ³	-0.13 ± 0.05	-0.27 ± 0.09	-0.07 ± 0.03	-47.1	Strike (°)	60 ± 84	125 ± 103	-63 ^b ± 18		Dip (°)	32 ± 25	28 ± 25	0 ^c		ϵ	0.24	0.78	0.89		RMS	0.2	0.2			<p>Tauhara では, 深さ 0.4km において 0.07×10^{-6} km³/年の変動がみられる。</p> <p>Wairakei では, 深さ 0.5km において 47.1×10^{-6} km³/年の変動がみられる。</p>		
	Kawerau	Ohaaki	Tauhara	Wairakei																																																																
Longitude (° ± km)	176.698 ± 0.20	176.306 ± 0.43	176.084 ± 0.13	176.08																																																																
Latitude (° ± km)	-38.055 ± 0.15	-38.524 ± 0.19	-38.676 ± 0.09	-38.62																																																																
Depth (km)	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.3	0.4 ± 0.2	0.5 ^a																																																																
ΔV^a , × 10 ⁶ m ³	-0.13 ± 0.05	-0.27 ± 0.09	-0.07 ± 0.03	-47.1																																																																
Strike (°)	60 ± 84	125 ± 103	-63 ^b ± 18																																																																	
Dip (°)	32 ± 25	28 ± 25	0 ^c																																																																	
ϵ	0.24	0.78	0.89																																																																	
RMS	0.2	0.2																																																																		

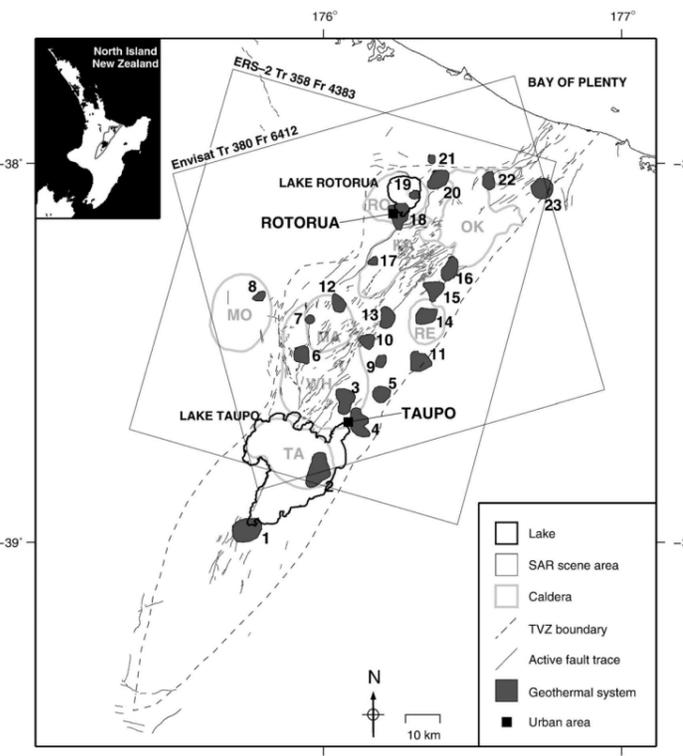
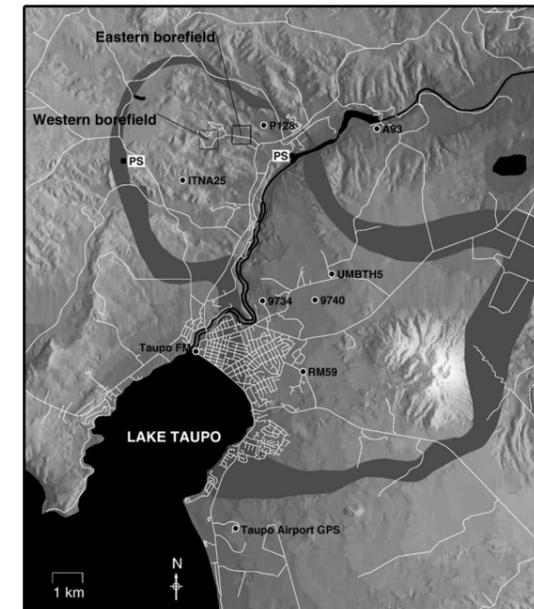
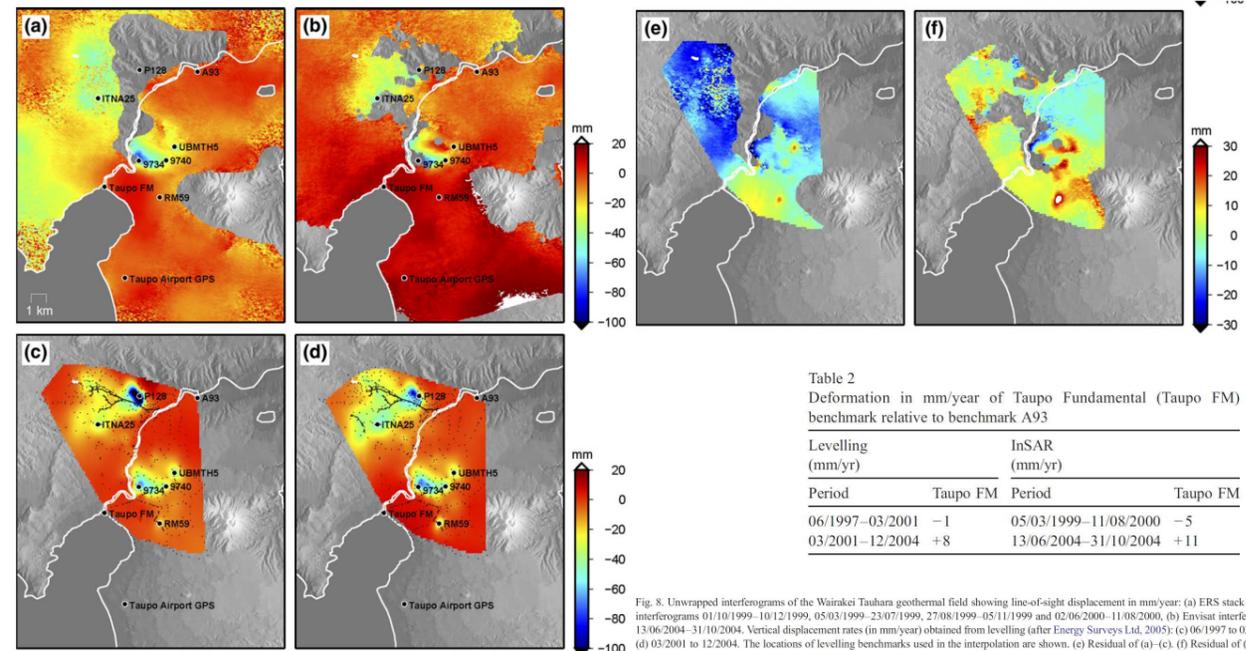
第 1.6-2 表 タウポの観測データ・評価に係る文献記載整理 (TP-6) (1)

タウポカルデラ (Taupo)																										
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																					
TP-6	Peltier, A. et al.	2009	Structures involved in the vertical deformation at Lake Taupo (New Zealand) between 1979 and 2007: New insights from numerical modelling	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 181, pp.173-184	地震活動	地殻変動								重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動	
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計	潮位計	地震波速度構造		比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ		
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検出した噴火未遂事象等)																							
1979 年から 2007 年にかけての上下変動より, 地表変動の変動源と構造の位置と起源について検討する。			1979 年以降のタウポ湖周辺の湖面水位変化は, 局所的要因 (熱水・マグマ系活動, 断層運動) と広域的要因 (拡大構造運動) に係る地表変動に支配されており, 湖北部における長期的沈降 (3mm/年~7mm/年) は地殻拡大・収縮源に起因する。この長期的変動は, 地熱地帯で発生する流紋岩質マグマの移動・形成や, 流紋岩質マグマの結晶化に伴う揮発性物質の熱水溜りへの付加に起因する局所的で強力な隆起 (1 年~3 年) によって乱される。この際には, 群発地震や非地震性のクリープ運動を伴う。																							
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴								
 <p>Figure 1. (A) Location of the Taupo Volcanic Zone (TVZ). (B) Location of the main structures of the TVZ (the main calderas are underlined by dotted circles). (C) Location of lake levelling sites (diamonds), Waahi, Horomatangi and Kaiapo fault traces (dotted lines) and historical activity (NNE-SSW rectangle, after Wilson et al., 1984). Coordinates are in New Zealand Map Grid Projection (km).</p>			地震活動			 <p>Figure 2. (A) Cumulative number of shallow earthquakes (<6 km depth) recorded between January 1979 and December 2007. (B) Location of the shallow seismicity epicentres recorded between January 1979 and December 2007 in the Lake Taupo area, and (C) recorded during specific time periods: (1) February 1983, (2) June 1983, (3) 5 to 10 March 1984, (4) 17 to 20 March 1987, (5) 1986-1996, (6) July 1997 to December 1998, (7) December 2000 to June 2001, (8) October 2001 to September 2007. Data are from http://magnum.geonet.org.nz/resources/quakesearch and from Webb et al. (1986) for the 1983 seismic swarms. Coordinates are in New Zealand Map Grid Projection (km).</p>												<p>タウポ火山地域においては, 深さ 8m 以下を震源とする M2~M4 の浅い地震で特徴づけられる。</p> <p>タウポ湖においては, 1979 年~2007 年の間で, 深さ 5 ±2km を震源とする浅い地震が湖中央部・東部・南部の 4 地域 (Scenic Bay 東部 (SB), Horomatangi Reef area, Motuopa 近傍 (MA), Taupo 断層帯) で発生している。一方, 北部においては低調である。</p> <p>地震発生分布は, 不規則で群発的に地震が発生する。浅部群発地震として, (1) 1983 年 2 月, (2) 1983 年 6 月~7 月, (3) 1984 年 3 月, (4) 1983 年 7 月, (6) 1997 年 7 月~1998 年 12 月, (7) 2000 年 12 月~2001 年 6 月がある。</p>								
<p>【観測項目 (解析項目)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震観測: 1979 年~2007 年 湖水位観測: 1979 年 4 月~2007 年 9 月 GPS 繰り返し解析: 2005 年~2007 年 干渉 SAR 解析: 2003 年~2006 年 (Envisat ASAR) 			湖水水位			 <p>Figure 3. Height changes relative to RP (mm) recorded on each site between April 1979 and September 2007 at Lake Taupo. The lines highlight changes in the global deformation trend and numbers refer to the distinct deformation periods described in the text. Grey areas represent periods of strong seismic activity below the lake.</p>												<p>水位変動は, その傾向変化により以下の期間に区分される。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1982 年 10 月~83 年 6 月 1983 年 6 月~84 年 1 月 1984 年 1 月~96 年 3 月 1996 年 3 月~99 年 12 月 1999 年 12 月~2001 年 6 月 2001 年 6 月~02 年 6 月 2002 年 6 月~03 年 6 月 2004 年 12 月~07 年 9 月 <p>1994 年~96 年の地震活動静穏期では, タウポ湖北部で長期的な沈降傾向がみられる。地震活動・断層活動 (1982 年 10 月~83 年 6 月, 1996 年 12 月 3 月~99 年 12 月, 1999 年 12 月~2001 年 6 月, 2001 年 6 月~02 年 6 月, 2002 年 6 月~03 年 6 月) に伴って, 湖東岸で短期的な隆起 (西側への傾斜) がみられる。</p> <p>Kaiapo 断層両側の地震活動 (1983 年 6 月~84 年 1 月, 2001 年 6 月~02 年 6 月, 2002 年 6 月~03 年 6 月) に関連した上下変動がみられる。</p>								
論文概要			 <p>Figure 4. Vertical deformation rates relative to RP (in $m\ yr^{-1}$) for the eight separate periods: (1) October 1982 to June 1983, (2) June 1983 to January 1984, (3) January 1984 to March 1984, (4) March 1984 to December 1984, (5) December 1984 to June 1999, (6) June 1999 to June 2001, (7) June 2001 to June 2002, (8) June 2002 to June 2003, and (9) December 2004 to September 2007. The labels refer to the sites mentioned on the text. Coordinates are in New Zealand Map Grid Projection (km). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)</p>																							

第 1.6-2 表 タウポの観測データ・評価に係る文献記載整理 (TP-6) (2)

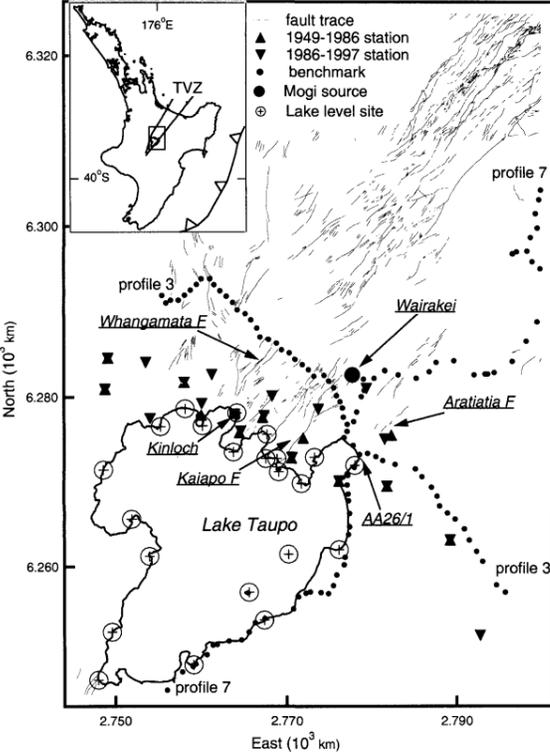
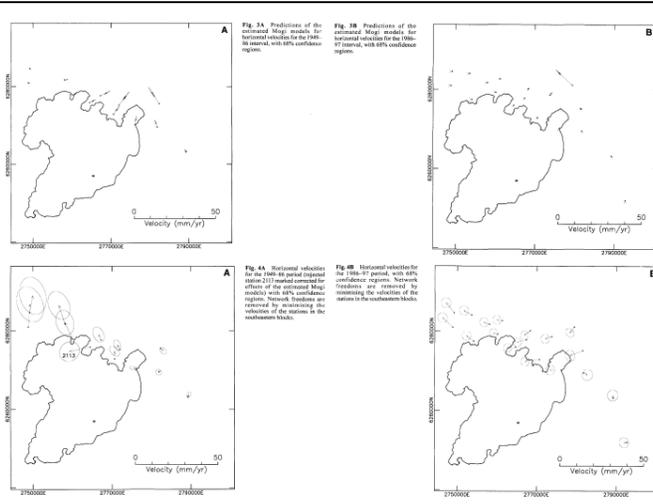
観測点分布図／観測項目	結果図 (平面分布図・時間変化図等)	特徴
	<p>GPS 解析</p>  <p>Fig. 6. Comparison between vertical displacements (coloured circles) recorded by levelling data (relative to BP) and horizontal displacements (arrows) recorded by GPS (relative to B4LG) between February 2005 and February 2007. Coordinates are in New Zealand Map Grid Projection (km). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)</p>	<p>GPS 解析によれば、 タウポ湖火山帯をはさんで、 タウポ湖から離れる方向に、約 8mm/年の変動がみられる。 ※2353 及び 2013 サイトは、 Wairakei 地熱地帯の沈降の影 響を受けている。</p> <p>干渉 SAR 解析によれば、 タウポ火山帯の西側(タウポ市 街)で 10.9mm/年の沈降、西側 (AB サイト)で隆起がみられる。</p>
<p>論文概要</p>	<p>解析 モデル</p>  <p>Fig. 8. (A) Location and geometry of the pressure sources modelled for the eight periods (in black: overpressurized source, in grey: underpressurized source): (1) October 1982 to June 1983, (2) June 1983 to January 1984, (3) January 1984 to March 1996, (4) March 1996 to December 1999, (5) December 1999 to June 2001, (6) June 2001 to June 2002, (7) June 2002 to June 2003, (8) December 2004 to September 2007. (B) Comparison between observed (black) and calculated (red) height changes relative to the origin represented as vectors. The dotted line represents the Kaipo fault, RP and WHI represent the location of the origin. Coordinates are in New Zealand Map Grid Projection (km). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)</p>	<p>モデル解析により、各期間の圧 力源・断層変動の位置を求めら れる。</p> <p>[浅部膨張源]</p> <p>(1) 1982 年 10 月～83 年 6 月 ・湖北部の深さ 3.7±0.9 km</p> <p>(4) 1996 年 3 月～99 年 12 月 ・Holomatangi Reef 地域の 深さ 1±0.4 km</p> <p>(5) 1999 年 12 月～2001 年 6 月 ・深さ 11±3 km</p> <p>(8) 2004 年 12 月～07 年 9 月 ・深さ 13±4km</p> <p>[深部収縮源]</p> <p>(3) 1984 年 1 月～96 年 3 月 ・湖の北方の深さ 15±5km</p> <p>[断層運動]</p> <p>(2) 1983 年 6 月～84 年 1 月 (6) 2001 年 6 月～02 年 6 月 (7) 2002 年 6 月～03 年 6 月</p>

第 1.6-3 表 タウポの観測データ・評価に係る文献帳票 (TP-7)

タウポカルデラ (Taupo)																							
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																	
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉・河川水		観測井		噴気活動
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ
TP-7	Hole, J. K. et al.	2007	Subsidence in the geothermal fields of the Taupo Volcanic Zone New Zealand from 1996 to 2005	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 166, pp.125-146		●				●													
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																				
タウポ火山地域における地熱開発によって引き起こされた沈降の測定, 将来の沈降のモニタリングの改善に対する干渉 SAR 解析の有効性について検討する。			Cバンドの干渉解析により, Wairakei-Tauhara の地熱地帯では 1996 年~2005 年にかけての沈降が認められた。タウポ火山帯に対する InSAR 解析の有用性については, 大きな沈降勾配の評価に対する脆弱性に加え, 一時的な非相関性を有することが問題として挙げられる。したがって, 地熱地帯の地表面現象をスナップ解析に対しては有効だが, モニタリング手法としての運用には困難を伴う。																				
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴					
 <p>Fig. 1. Location map showing the geothermal fields in the TVZ (from Bibby et al., 1995), 1—Tokaanu, 2—Lake Taupo, 3—Wairakei, 4—Tauhara, 5—Rotokawa, 6—Mokai, 7—Ongaroto, 8—Mangakino, 9—Ngatamariki, 10—Orakeikorako, 11—Ohaaki, 12—Atia-muri, 13—Te Kopia, 14—Reporoa, 15—Waiotapu/Waikite, 16—Waimangu, 17—Horohoro, 18—Rotorua, 19—East Rotorua, 20—Tikitike/Rotoiti 21—Tabeke 22—Rotoma/Tikorangi, 23—Kawerau. The locations of the calderas and the TVZ boundary are after Wilson et al. (1995), TA—Taupo, MO—Mangakino, WH—Whakamaru, MA—Maroa, KA—Kapenga, RO—Rotorua, RE—Reporoa, OK—Okataina. The current active fault locations are from the New Zealand Active Faults database (GeoNET, 2006a). The average footprints of the SAR images used in this study are shown.</p>			 <p>Fig. 6. Location map of Wairakei-Tauhara geothermal field showing lakes and rivers (black), road outlines (white), resistivity boundary (grey) (after Bromley et al., 2000), the locations of the power stations (PS) and selected benchmarks discussed in the text.</p>															<p>[Wairakei-Tauhara 地域] 1950 年代以降, 地熱流体抽出のために, 西側・東側の 2 箇所においてボーリング掘削が行われている。</p>					
<p>[観測項目 (解析項目)] ・干渉 SAR 解析: 24 イメージ (1996 年~2003 年: ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR)</p>			 <p>Fig. 8. Unwrapped interferograms of the Wairakei-Tauhara geothermal field showing line-of-sight displacement in mm/year: (a) ERS stack of four interferograms 01/10/1999-10/12/1999, 05/03/1999-23/07/1999, 27/08/1999-05/11/1999 and 02/06/2000-11/08/2000, (b) Envisat interferogram 13/06/2004-31/10/2004. Vertical displacement rates (in mm/year) obtained from levelling (after Energy Surveys Ltd, 2005): (c) 06/1997 to 03/2001, (d) 03/2001 to 12/2004. The locations of levelling benchmarks used in the interpolation are shown. (e) Residual of (a)-(c). (f) Residual of (b)-(d).</p>															<p>[ERS] 1999 年 3 月~2000 年 8 月 (a) [ENVISAT] 2004 年 6 月~10 月 (b)</p> <p>1997 年~2001 年 (c) 36mm/年沈降増加 (ITNA25) 2001 年~04 年 (d) 52mm/年沈降増加 (ITNA25)</p> <p>1997 年~2001 年 (e) 2001 年~04 年 (f) 1997 年に小さい沈降 (RM59) 明確な沈降 (9740)</p> <p>2001 年~2004 年の傾斜変動 0.46mm/m/年~0.56mm/m/年</p>					

論文概要

第 1.6-4 表 タウポの観測データ・評価に係る文献帳票 (TP-8)

タウポカルデラ (Taupo)																																		
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																												
						地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動											
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR	ひずみ計		潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ										
TP-8	Darby, D. J. et al.	2000	Geodetic measurement of deformation in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand: The north Taupo network revisited.	New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 43, pp.157-170		●	●	●				●																						
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																															
タウポ湖北部付近の測量データに基づく地表変動状況を整理する。			水位変化及び測量結果を Mogi モデルをもとに解析した結果, タウポ湖北部のタウポ火山帯をばさんで $8 \pm 2\text{mm}$ の拡大 (1949 年~86 年及び 1986 年~97 年) が求められ, 上下変動ではモデル解析に対して 30 倍の変動量が得られたが, 同地域における地震活動によって説明される。タウポ火山帯の外側では $0.12 \pm 0.01 \mu\text{rad/年}$ の傾きがあるが, 火山帯内では拡大と傾きが複雑にみられる。																															
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)															特徴																
 <p>Fig. 1 The NW-SE and NE-SW routes of benchmarks comprise profile 3 and part of profile 7 as discussed in the text. Some 1949-86 and 1986-97 horizontal geodetic stations are identical (overlapping symbols), some are in close proximity, and some are distinct. Lake-leveling stations, and the centre of subsidence of the Wairakei geothermal field are also shown. The fault traces are from the Institute of Geological & Nuclear Sciences 1:50 000 active fault database. The Whangamata and Aratiatia Fault Zones mark the western and eastern boundaries of the young Taupo Fault Belt (Villamor & Berryman in press). <i>Inset:</i> The location of the TVZ within the North Island of New Zealand in relation to the Hikurangi subduction front (saw-toothed) and the region covered by the main diagram (rectangle).</p>			<p>水俵測量</p> <p>Table 2 Mogi source and horizontal strain models for the eastern North Taupo Network*.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1949-86†</th> <th>1986-97‡</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$u_2(0) f^2$ (mm km²/yr)</td> <td>-620 ± 260</td> <td>-66 ± 11</td> </tr> <tr> <td>Depth f (km)</td> <td>0.55 ± 0.28</td> <td>fixed at 0.55</td> </tr> <tr> <td>Shear γ_1 (10^{-6}/yr)</td> <td>-0.46 ± 0.54</td> <td>-0.24 ± 0.17</td> </tr> <tr> <td>Shear γ_2 (10^{-6}/yr)</td> <td>-0.24 ± 0.33</td> <td>0.46 ± 0.15</td> </tr> </tbody> </table> <p>*Confidence bounds correspond to 1 standard error. †Vertical profile 3 data 1976-83; profile 7 data 1950-76; horizontal data 1949-86. ‡Horizontal data only; Mogi source depth and location fixed at 1949-86 values.</p>																1949-86†	1986-97‡	$u_2(0) f^2$ (mm km ² /yr)	-620 ± 260	-66 ± 11	Depth f (km)	0.55 ± 0.28	fixed at 0.55	Shear γ_1 (10^{-6} /yr)	-0.46 ± 0.54	-0.24 ± 0.17	Shear γ_2 (10^{-6} /yr)	-0.24 ± 0.33	0.46 ± 0.15	<p>速度断面の特徴として, Wairakei 地熱地帯における 1960 年代の地熱開発に起因する深い極小部が存在する。</p> <p>1949 年~86 年と 1986 年~97 年の地表変動に対する Mogi モデルによる解析結果と比較すると, 両期間とも観測値の極小よりも小さいが, 大きくは変わらない。</p>	
	1949-86†	1986-97‡																																
$u_2(0) f^2$ (mm km ² /yr)	-620 ± 260	-66 ± 11																																
Depth f (km)	0.55 ± 0.28	fixed at 0.55																																
Shear γ_1 (10^{-6} /yr)	-0.46 ± 0.54	-0.24 ± 0.17																																
Shear γ_2 (10^{-6} /yr)	-0.24 ± 0.33	0.46 ± 0.15																																
<p>[観測項目 (解析項目)]</p> <ul style="list-style-type: none"> 水準測量: 1950 年~1986 年 水位測定: 1986 年~1996 年 			<p>モデル解析</p>  <p>Fig. 3 Predictions of the horizontal velocities for profile 3, with 80% confidence region.</p> <p>Fig. 4 Horizontal velocities for the 1949-86 period (profile 3) and the 1986-97 period (profile 7) for the eastern North Taupo Network. Network boundaries are indicated by sketching the boundaries in the southern block.</p> <p>Fig. 5 Vertical velocities for profile 3, corrected for the Mogi source model (as in Fig. 2), and lake-leveling vertical rates with an arbitrary vertical offset, for comparison. Subsidence attributed to the Tauhara geothermal field is indicated, and the regional tilt is represented by sketched line segments. The lower panel shows the location of the modern Taupo Fault Belt and a schematic representation of the deformation of the network subdivisions. Upright and inverted triangles show projected positions of the 1949-86 and 1986-97 geodetic stations defining the subdivisions. Horizontal arrows show extensional deformation on the azimuth 130° of the projection, and vertical arrows show the orthogonal deformation on azimuth 220°, both in mm/yr relative to the southeastern block.</p>															<p>Mogi モデル解析により, 1946 年~86 年の水平変位速度は約 $8 \pm 2\text{mm/年}$, 1986 年の水平変位速度は $<2\text{mm/年}$ と求められる。</p> <p>1949 年~86 年の水平変形モデルは, 断層帯に準平行な相対的短縮で支配される。</p>																

○ラグナ・デ・マウレ

ラグナ・デ・マウレにおける観測データ，及び観測データに基づく現状の活動評価に関する下記文献の記載内容を第 1.7-1 表及び第 1.7-2 表に整理した。

[LM-1]

Feigl, K. L. and Ali, S. T. (不明) :

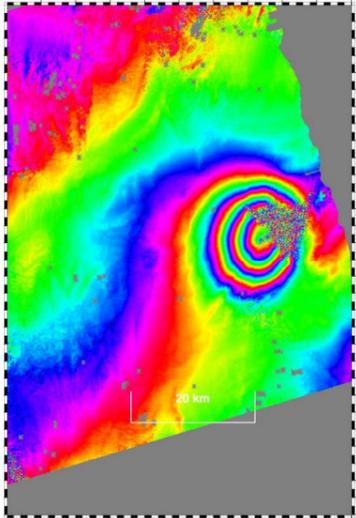
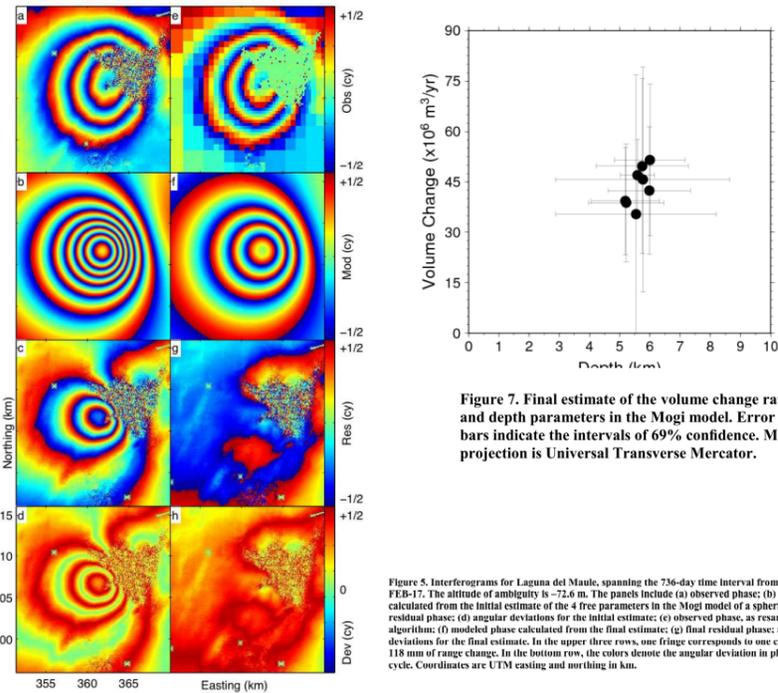
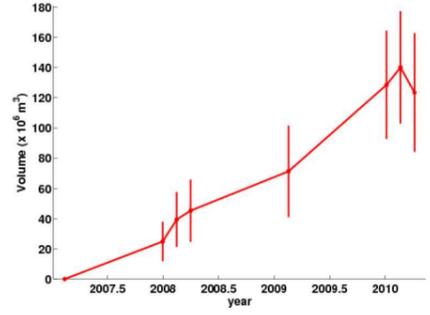
Rapid uplift in Laguna del Maule volcanic field of the andean southern volcanic zone (Chile) measured by PALSAR interferometry, PI No 092, pp.1-6.

[LM-2]

Fournier, T. J., Pritchard, M. E. and Riddick S. N. (2010) :

Duration, Magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation event: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **11**, 1, pp.1-29.

第 1.7-1 表 ラグナ・デ・マウレの観測データ・評価に係る文献帳票 (LM-1)

ラグナ・デ・マウレ (Laguna del Maule)																																																																																																
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																																																																																											
					地震活動	地表変動						重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動																																																																									
水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉SAR		ひずみ計	潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度		化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ																																																																											
LM-1	K.L. Feigl and S.T. Ali	(不明)	Raid Uplift in Laguna del Maule Volcanic Field of the Andean Southern Volcanic Zone (Chile) Measured by Palsar Interferometry	(不明) PI No 092, pp. 1-6						●																																																																																						
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																																																																																													
InSAR データを用いた逆解析手法 (GIPhT: General Inversion of Phase Technique) により, ラグナ・デ・マウレ火山の地表変動モデルを検討する。			InSAR 観測によれば, 2007~2008 年の隆起速度は 180mm/年であり, 2008 年~11 年も急激な隆起が継続している。InSAR データを説明可能な地表変動モデルは次の 2 つである。 ① 2007 年以降, 深度 5km 以浅のシルが 2,000 万 m ³ /年で貫入する。② 2007 年以降, 2010 年にかけて湖の水位が 20m/年で減少することによる地殻への荷重の除荷 観測データにより整合しているモデルは①の地表変動モデルである。																																																																																													
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																	特徴																																																																												
 <p>Figure 1. Photo of Laguna del Maule, taken 2007-08-17 by Nancy Nangel, showing recent shorelines exposed by lowering water level.</p>			干渉 SAR			 <p>Figure 4. Interferogram for Laguna del Maule, spanning the 736-day time interval from 2007-FEB-12 (ALOS orbit number 5602) to 2009-FEB-17 (ALOS orbit number 16338). The path number is 113. The frame number is 6450. The altitude of ambiguity is -72.6 m. One fringe corresponds to one cycle of phase change, or 118 mm of range change. The incoherent area corresponds to the water surface in the lake.</p>																	2007 年 2 月 12 日と 2009 年 2 月 17 日の SAR 解析結果 (論文中に記載なし)																																																																									
<p>Table 2. Interferometric pairs analyzed in path number is 113 and frame number 6450.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>---DATE1---</th> <th>---DATE2---</th> <th>ORBIT1</th> <th>ORBIT2</th> <th>HAMB.m</th> <th>DTDAY</th> <th>DYEAR1</th> <th>DYEAR2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2007 FEB 12</td><td>2009 FEB 17</td><td>5602</td><td>16338</td><td>-72.6</td><td>736</td><td>2007.1151</td><td>2009.1288</td></tr> <tr><td>2007 FEB 12</td><td>2010 JAN 05</td><td>5602</td><td>21035</td><td>71.7</td><td>1058</td><td>2007.1151</td><td>2010.0110</td></tr> <tr><td>2007 FEB 12</td><td>2010 FEB 20</td><td>5602</td><td>21706</td><td>55.4</td><td>1104</td><td>2007.1151</td><td>2010.1370</td></tr> <tr><td>2007 DEC 31</td><td>2010 JAN 05</td><td>10299</td><td>21035</td><td>-57.3</td><td>736</td><td>2007.9973</td><td>2010.0110</td></tr> <tr><td>2008 FEB 15</td><td>2010 JAN 05</td><td>10970</td><td>21035</td><td>-57.7</td><td>690</td><td>2008.1229</td><td>2010.0110</td></tr> <tr><td>2008 FEB 15</td><td>2010 FEB 20</td><td>10970</td><td>21706</td><td>-75.7</td><td>736</td><td>2008.1229</td><td>2010.1370</td></tr> <tr><td>2008 FEB 15</td><td>2010 APR 07</td><td>10970</td><td>22377</td><td>-239.7</td><td>782</td><td>2008.1229</td><td>2010.2630</td></tr> <tr><td>2008 APR 01</td><td>2010 APR 07</td><td>11641</td><td>22377</td><td>-76.0</td><td>736</td><td>2008.2486</td><td>2010.2630</td></tr> </tbody> </table>			---DATE1---	---DATE2---	ORBIT1	ORBIT2	HAMB.m	DTDAY	DYEAR1	DYEAR2	2007 FEB 12	2009 FEB 17	5602	16338	-72.6	736	2007.1151	2009.1288	2007 FEB 12	2010 JAN 05	5602	21035	71.7	1058	2007.1151	2010.0110	2007 FEB 12	2010 FEB 20	5602	21706	55.4	1104	2007.1151	2010.1370	2007 DEC 31	2010 JAN 05	10299	21035	-57.3	736	2007.9973	2010.0110	2008 FEB 15	2010 JAN 05	10970	21035	-57.7	690	2008.1229	2010.0110	2008 FEB 15	2010 FEB 20	10970	21706	-75.7	736	2008.1229	2010.1370	2008 FEB 15	2010 APR 07	10970	22377	-239.7	782	2008.1229	2010.2630	2008 APR 01	2010 APR 07	11641	22377	-76.0	736	2008.2486	2010.2630	インバージョン解析			 <p>Figure 7. Final estimate of the volume change rate and depth parameters in the Mogi model. Error bars indicate the intervals of 69% confidence. Map projection is Universal Transverse Mercator.</p>  <p>Figure 8. Temporal adjustment of the volume of the Mogi source using the minimum-length solution of Berardino et al. [16].</p>																	2007 年 2 月 12 日と 2009 年 2 月 17 日の SAR 解析結果 ※Mogi モデルによる解析 (論文中に記載なし) ・膨張源の深さ: 5km~6km ・体積変化速度: 約 35km × 10 ⁶ m ³ /年 ~約 55km × 10 ⁶ m ³ /年	
---DATE1---	---DATE2---	ORBIT1	ORBIT2	HAMB.m	DTDAY	DYEAR1	DYEAR2																																																																																									
2007 FEB 12	2009 FEB 17	5602	16338	-72.6	736	2007.1151	2009.1288																																																																																									
2007 FEB 12	2010 JAN 05	5602	21035	71.7	1058	2007.1151	2010.0110																																																																																									
2007 FEB 12	2010 FEB 20	5602	21706	55.4	1104	2007.1151	2010.1370																																																																																									
2007 DEC 31	2010 JAN 05	10299	21035	-57.3	736	2007.9973	2010.0110																																																																																									
2008 FEB 15	2010 JAN 05	10970	21035	-57.7	690	2008.1229	2010.0110																																																																																									
2008 FEB 15	2010 FEB 20	10970	21706	-75.7	736	2008.1229	2010.1370																																																																																									
2008 FEB 15	2010 APR 07	10970	22377	-239.7	782	2008.1229	2010.2630																																																																																									
2008 APR 01	2010 APR 07	11641	22377	-76.0	736	2008.2486	2010.2630																																																																																									
[観測項目(解析項目)] ・ALOS/PALSAR: 8 ペア (2007 年 2 月~2010 年 4 月)																																																																																																

論文概要

第 1.7-2 表 ラグナ・デ・マウレの観測データ・評価に係る文献帳票 (LM-2)

ラグナ・デ・マウレ (Laguna del Maule)																																																																																												
番号	著者	発行年	論文名	雑誌名, 巻・号・頁	地震活動	記載事項 (既存情報として引用・参考とされているものも含む)																																																																																						
						地表変動					重力構造	地殻構造			火山ガス			温泉水・河川水		観測井		噴気活動																																																																						
						水準測量	GPS	光波測距	傾斜計	干渉 SAR		ひずみ計	潮位計	地震波速度構造	比抵抗構造	ひずみ構造	温度	化学成分	放出量	温度	化学成分	温度	可視カメラ	赤外線カメラ																																																																				
LM-2	Fournier, T. J. et al.	2010	Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis.	Geochemistry Geophysics Geosystems, 11, 1, pp.1-29						●																																																																																		
モニタリング目的			モニタリングの結果 (検知した噴火未遂事象等)																																																																																									
ALOS の長波長レーダーによって, ラテンアメリカの異なる季節, 異なる期間で干渉性が得られるかを評価するとともに, 火山モニタリング能力に対してどの程度に違いが得られるかを調査する。			L バンドデータは, 植生繁茂地域では, C バンドデータよりも優れており, 46 日間隔の観測で, 良好な基線が得られるのであれば観測上問題ない。マグナ・デ・マウレ火山の解析では, Envisat の C バンド (2003 年 3 月~04 年 2 月) の解析では干渉画像が得られないが, ALOS/PALSAR の L バンド (2007 年 1 月~08 年 1 月) の干渉画像によれば, 最大約 18.5cm/年の膨張率がみられる。																																																																																									
観測点分布図/観測項目			結果図 (平面分布図・時間変化図等)																																																																																									
<p>Figure 2. Interferometric coherence from ALOS for the volcanic arcs of Latin America draped over shaded topography. (a) Central America and México, (b) the northern Andes, (c) the southern Andes, and (d) the Caribbean. The time period for most interferograms is 1 year, and the baseline is about 1 km, although in a few cases (especially the Caribbean), only shorter time periods are available. For a complete list of interferograms used, see Tables S1-S4. Coherence is calculated in a 5 × 5 pixel moving box. Large triangles with black outlines are volcanoes from the Smithsonian Institution (Global volcanism report, available at http://www.volcano.si.edu), and yellow triangles show volcanoes mentioned in the text. (e) A reference map of the study area.</p>			<p>干渉 SAR 解析</p> <table border="1"> <caption>Table 2. Model Results From Deforming Volcanoes in the Andes^a</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">Dates</th> <th colspan="3">Maule</th> </tr> <tr> <th>Jan 2007 to Jan 2008</th> <th>Feb 2007 to Dec 2007</th> <th>joint</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Model form</td> <td>sill</td> <td>sill</td> <td>sill</td> </tr> <tr> <td>MSE</td> <td>1.03</td> <td>1.40</td> <td>1.39</td> </tr> <tr> <td>Longitude^d</td> <td>-70.492</td> <td>-70.504</td> <td>-70.556</td> </tr> <tr> <td>Latitude^d</td> <td>-36.081</td> <td>-36.079</td> <td>-36.072</td> </tr> <tr> <td>X position^d (km)</td> <td>8.3</td> <td>7.2</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>Y position^d (km)</td> <td>-6.7</td> <td>-6.5</td> <td>-5.8</td> </tr> <tr> <td>Depth^d (km)</td> <td>5.3</td> <td>8.5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>ΔV (10⁶ m³)</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Length (km)</td> <td>9.4</td> <td>6.8</td> <td>8.3</td> </tr> <tr> <td>Width (km)</td> <td>2.8</td> <td>6.3</td> <td>5.7</td> </tr> <tr> <td>Dip (deg)</td> <td>-21</td> <td>31</td> <td>-17</td> </tr> <tr> <td>Strike (deg)</td> <td>19</td> <td>11</td> <td>-172</td> </tr> <tr> <td>Open/slip (m)</td> <td>0.9</td> <td>0.8</td> <td>0.6, 0.5</td> </tr> <tr> <td>Static shift (cm)</td> <td>2.4</td> <td>14</td> <td>1.7, 14</td> </tr> <tr> <td>x ramp (cm/km)</td> <td>-0.02</td> <td>-0.23</td> <td>0.01, -0.24</td> </tr> <tr> <td>y ramp (cm/km)</td> <td>-0.01</td> <td>0.23</td> <td>-0.01, 0.24</td> </tr> </tbody> </table> <p>Figure 3. At Laguna del Maule in southern Chile. (a) an Envisat image spanning March 2003 to February 2004 shows no deformation, but (b) and (c) recent ALOS images show inflation. Both of the ALOS interferograms are used to model the deformation source as an inflating sill like structure (Table 2). (d) The residual from the image spanning January 2007 to January 2008 and (e) the model prediction for that image. The surface projection of the model is drawn as a black rectangle with the updip edge of the sill shown in bold (Figure 3e). (f) The model prediction for February 2007 to December 2007. The black line shows the Chile-Argentina border. White triangles show Holocene volcanoes (Smithsonian Institution, Global volcanism report, available at http://www.volcano.si.edu), while black triangles are from the catalog of [Gonzalez-Ferran, 1995]. The line of sight (LOS) between the satellite and the ground is shown by the arrow. The interferograms have been unwrapped and then rewrapped at different intervals to highlight different magnitudes of deformation.</p>																			Dates	Maule			Jan 2007 to Jan 2008	Feb 2007 to Dec 2007	joint	Model form	sill	sill	sill	MSE	1.03	1.40	1.39	Longitude ^d	-70.492	-70.504	-70.556	Latitude ^d	-36.081	-36.079	-36.072	X position ^d (km)	8.3	7.2	2.5	Y position ^d (km)	-6.7	-6.5	-5.8	Depth ^d (km)	5.3	8.5	5	ΔV (10 ⁶ m ³)	-	-	-	Length (km)	9.4	6.8	8.3	Width (km)	2.8	6.3	5.7	Dip (deg)	-21	31	-17	Strike (deg)	19	11	-172	Open/slip (m)	0.9	0.8	0.6, 0.5	Static shift (cm)	2.4	14	1.7, 14	x ramp (cm/km)	-0.02	-0.23	0.01, -0.24	y ramp (cm/km)	-0.01	0.23	-0.01, 0.24
			Dates	Maule																																																																																								
Jan 2007 to Jan 2008	Feb 2007 to Dec 2007	joint																																																																																										
Model form	sill	sill	sill																																																																																									
MSE	1.03	1.40	1.39																																																																																									
Longitude ^d	-70.492	-70.504	-70.556																																																																																									
Latitude ^d	-36.081	-36.079	-36.072																																																																																									
X position ^d (km)	8.3	7.2	2.5																																																																																									
Y position ^d (km)	-6.7	-6.5	-5.8																																																																																									
Depth ^d (km)	5.3	8.5	5																																																																																									
ΔV (10 ⁶ m ³)	-	-	-																																																																																									
Length (km)	9.4	6.8	8.3																																																																																									
Width (km)	2.8	6.3	5.7																																																																																									
Dip (deg)	-21	31	-17																																																																																									
Strike (deg)	19	11	-172																																																																																									
Open/slip (m)	0.9	0.8	0.6, 0.5																																																																																									
Static shift (cm)	2.4	14	1.7, 14																																																																																									
x ramp (cm/km)	-0.02	-0.23	0.01, -0.24																																																																																									
y ramp (cm/km)	-0.01	0.23	-0.01, 0.24																																																																																									
<p>モデル解析</p> <p>Figure 3. At Laguna del Maule in southern Chile. (a) an Envisat image spanning March 2003 to February 2004 shows no deformation, but (b) and (c) recent ALOS images show inflation. Both of the ALOS interferograms are used to model the deformation source as an inflating sill like structure (Table 2). (d) The residual from the image spanning January 2007 to January 2008 and (e) the model prediction for that image. The surface projection of the model is drawn as a black rectangle with the updip edge of the sill shown in bold (Figure 3e). (f) The model prediction for February 2007 to December 2007. The black line shows the Chile-Argentina border. White triangles show Holocene volcanoes (Smithsonian Institution, Global volcanism report, available at http://www.volcano.si.edu), while black triangles are from the catalog of [Gonzalez-Ferran, 1995]. The line of sight (LOS) between the satellite and the ground is shown by the arrow. The interferograms have been unwrapped and then rewrapped at different intervals to highlight different magnitudes of deformation.</p>			<p>特徴</p> <p>2003 年 3 月~04 年 2 月 : 変形認められない。</p> <p>2007 年 1 月~08 年 1 月 : 最大約 18.5cm/年の膨張速度 マグマ溜りの膨張, 熱水流体の貫入による地表変動と考えられる。</p> <p>Mogi モデルによる解析 : 地下浅部で緩く傾くシルの存在が最も適合性がよい。 ・深さ 5km, 傾き~20°, ・開口速度 : 60cm/年</p>																																																																																									
<p>[観測項目(解析項目)]</p> <p>・ SAR 解析 : 2007 年 1 月~08 年 1 月 (ALOS:L バンド) 2003 年 3 月~04 年 2 月 (Envisat:C バンド)</p>			<p>解析データとモデルの間の二乗平均平方根のエラー (RMSE) は, 干渉 SAR 解析におけるノイズ (~1cm~2cm) に収まる。</p>																																																																																									

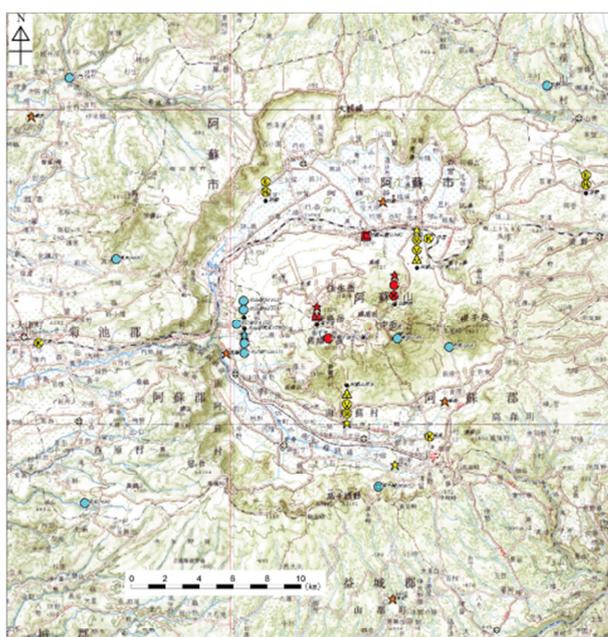
論文概要

2. 現地調査

大規模カルデラ噴火の典型例として、阿蘇山および桜島の調査を行った。カルデラ噴火に先行する地殻変動をシミュレーションする視点から、地震・地殻変動観測点や地理形状を把握した。

○阿蘇山

地表におけるカルデラ地形分布、および、深さ 10-24 km 付近に低速度領域を持つ地下構造であることから、カルデラの地殻変動計算対象領域は、東西 40km x 南北 50km x 深さ 30km の領域とする。なお、地殻変動の検証となるべき観測点は図 2-1 に示すとおりである。



国土地理院発行の 20 万分の 1 地勢図(大分、熊本)

凡		例	
● 気象庁	(国土地理院)	○ 防災科学技術研究所	(京大火山研究所)
● 地震計(短周期)	★ GPS	○ V-net(短周期)	● 地震計(短周期)
● GPS		● V-net(広帯域)	● 地震計(広帯域)
● 空撮計		▲ V-net(傾斜計)	★ GPS
● 遠望カメラ		● Hi-net	
● 空磁力計		● K-NET	(自治体)
		● KIC-net	● 震度計
		★ GPS	

図 2-1: 阿蘇山カルデラ位置および観測点分布(日本活火山総覧第 4 版)



図 2-2: 竹田の阿蘇火砕流堆積物

3. シミュレーション実施手法の検討

カルデラ噴火に先行する現象として期待されるものの一つが、広域における地殻変動である。1. 文献調査でも、カルデラの活動評価について InSAR、GPSや水準測量といった地殻変動観測の事例が数多く報告されている。大規模カルデラ噴火発生の事例はなく、これらはカルデラ内の小規模噴火やカルデラ地下での噴火未遂を反映しているものであるため、一概に大規模カルデラ噴火の可能性評価のための指標となるものではない。しかし、仮想の大規模カルデラ噴火に先行する現象としての地殻変動パターンを数値的にあらかじめ把握しておくことが重要である。

カルデラ形成に先行して、マグマたまり中の増圧あるいは減圧が発生し、カルデラ壁の部分に断層が発生する。この断層を Ring fault (あるいは Ring dike) とよぶ。マグマたまりの増減圧に伴う弾性的な地殻変動、および、断層の生成についてモデル化し、評価を行うこととする。

カルデラ壁を形成する Ring fault は、特にその dip angle が急傾斜であるという特徴を持つ。また、tectonic な断層と異なり、形状もさることながら、変位量が大きいという特徴を持つ。Dip の観点から大きく二つのパターン、すなわち、outward-dipping (図 3-1a,b) と inward-dipping (図 3-2a,b) に分類される。前者の場合、Ring fault は opening が促進され、周辺は張力場となる。一方、inward dipping の場合、周辺は圧縮場となり Ring fault では摩擦大となる。

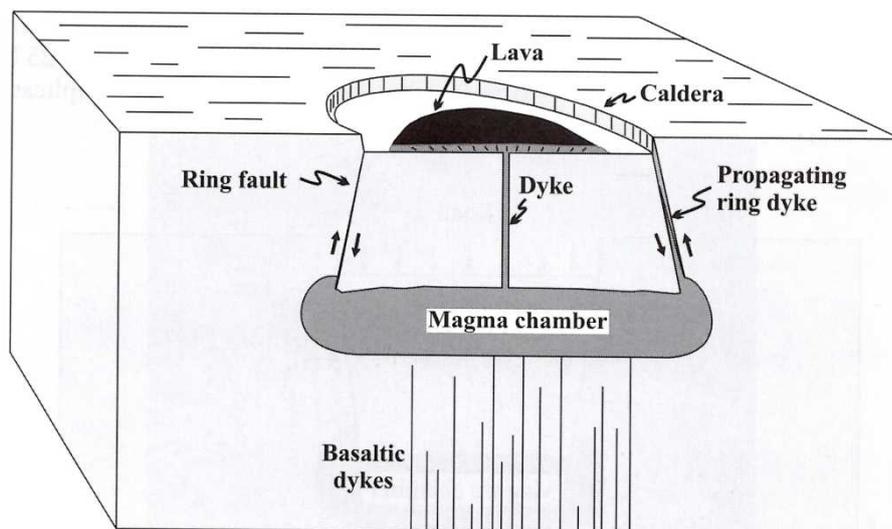


図 3-1a: Outward dipping によるカルデラ生成 (Gudmundsson, 2008)

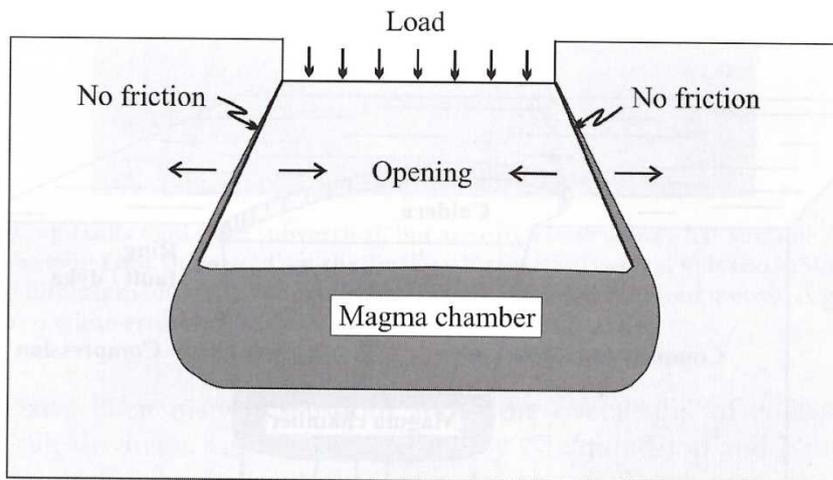


図 3-1b: Outward dipping によるカルデラの応力場と摩擦

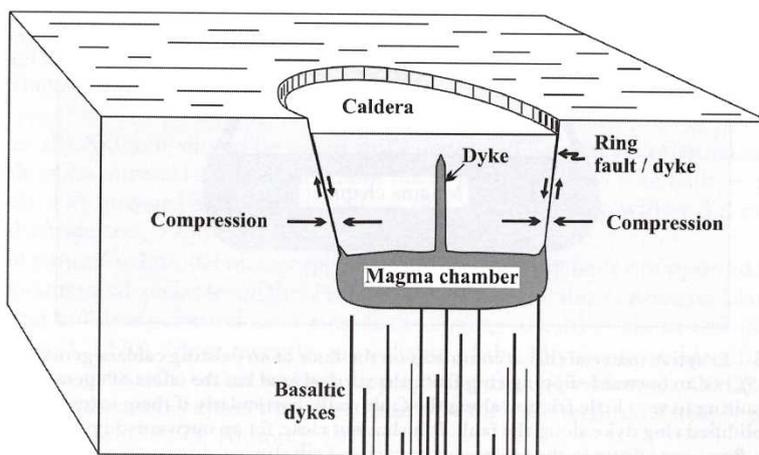


図 3-2a: Inward dipping によるカルデラ生成

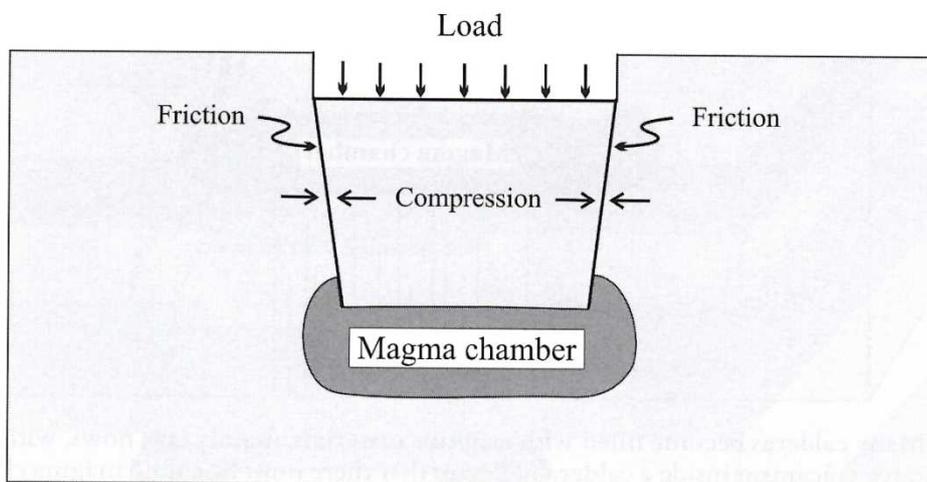


図 3-2b: Inward dipping によるカルデラの応力場と摩擦

マグマたまりの圧力変動から Ring fault を生成するための破壊の開始および応力場の変化・パターンについて (Folch and Marti, 2000) などにより報告されている。マグマたまりの geometry と深さに依存し、この Ring fault のパターン、すなわち normal (Outward dipping) になるか (図 3-3b の REGION A)、reverse (inward dipping) になるか (図 3b の REGION B) になるかが決定される。

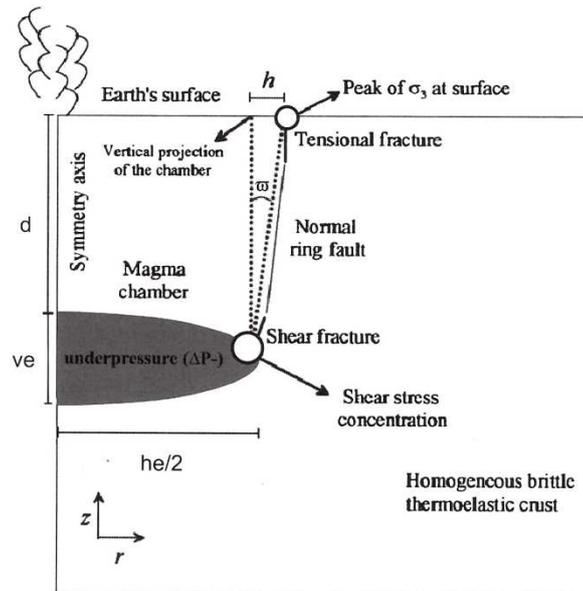


図 3-3a: マグマたまりと断層の geometry model (J. Marti et al., 2008)

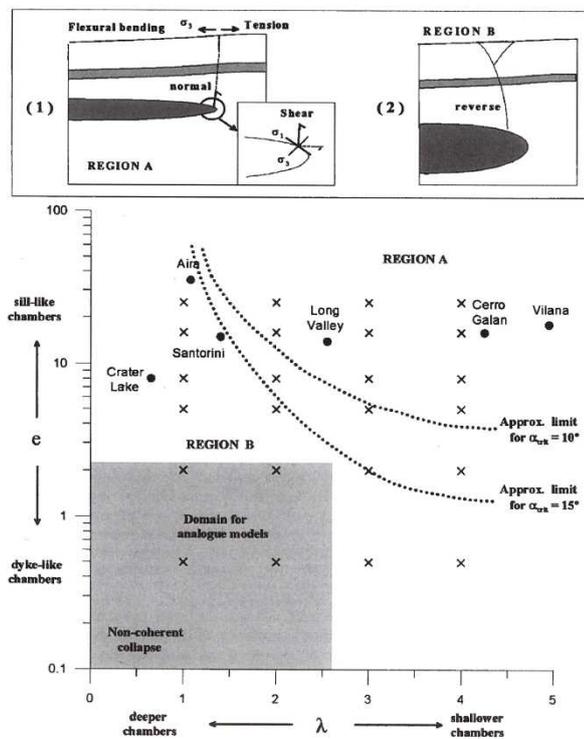


図 3-3b: Ring fault の成長条件

これらのモデル化および考察を踏まえ、今後の火山モニタリングを評価するためのシミュレーション実施手法について、下記方針により開発を進めるべきと考える。

- 粒子法(個別要素法)によるカルデラ生成および地殻変動シミュレーション
 - マグマたまりの増減圧による弾性的(あるいは粘弾性的)地殻応答、および、Ring fault の生成(断層破壊)を定量的・統一的にシミュレーションするために、粒子法を用いる。
 - 第1段階として、3次元水平成層構造での応答を計算する。その後、DEMを用いて地形情報を取り込み、実際の火山を模式化する
 - 特にカルデラ周辺の応力場に着目し、評価を行う。
 - Ring fault の運動に伴う現象として、火山性地震の発生とその分布について検討を行う。

4. まとめ

本研究では、代表的な活動的カルデラであるロングバレー、カンピ・フレグレイ、イエローストーン、小笠原硫黄島、タウポ、ラグナ・デ・マウレを対象とした文献調査に基づき、各カルデラにおける火山モニタリング研究の現状、及びモニタリング結果による活動評価について調査を行った。地震・地殻変動をはじめとする地球物理観測、火山ガス観測など、各火山での観測例や異常検知について体系的に把握でき、今後の指針となった。観測網の充実による小規模噴火の把握や噴火未遂現象の把握についての進捗が見られている。ただし、これらは大規模カルデラ噴火との関連性は未解決である。モニタリングによるデータは、最大でも数十年の活動を見ているにすぎず、カルデラ火山の活動の時間スケールとしては長期(数万年以上)から中期(数百年～数千年)による評価が重要であり、地質学的・岩石学的研究成果による制約条件を鑑みて、モデリングを行う必要がある。また、熱学的知見からの評価がほとんどされていないのが現状である。これらを取り込んだうえで、異なる時間スケールにおけるそれぞれの現象評価を行うことが必須である。

[参考文献]

日本活火山総覧(第4版), 2013, 気象庁.

A. Gudmundsson, 2008, Magma-Chamber Geometry, Fluid, Transport, Local Stress and Rock Behavior During Collapse Caldera Formation, 313-349, in CALDERA VOLCANISM (eds. Gottsmann and Marti), Developments in Volcanology, 10, Elsevier.

J. Marti, A. Geyer, A. Folch and J. Gottsman, 2008, A Review on Collapse Caldera Modelling, 233-283, in CALDERA VOLCANISM (eds. Gottsmann and Marti), Developments in Volcanology, 10, Elsevier.