

# 人工衛星データを用いた 2001(平成 13)年箱根群発地震活動における 地面温度変化と地殻変動検出の試み

棚田俊收\*、渡辺英久\*<sup>2</sup>

An attempt to detect ground temperature and crustal movement changes during the  
2001 Hakone earthquake swarm activity, using satellite imagery

by

Toshikazu TANADA\* and Hidehisa WATANABE\*<sup>2</sup>

## 1. はじめに

2001(平成13)年6月12日から約4ヶ月に渡り、群発地震が箱根カルデラ中央火口丘を中心に発生した。地震発生回数はマグニチュード0以下も含めると6月12日から11月未までに15,816回に達した。最大地震は7月21日11時40分大涌谷付近の深さ1kmで起こり、そのマグニチュードは2.9であった(棚田ほか、2002)。

この群発地震に伴い箱根山とその周辺では、山体膨張を示唆する地殻変動や温泉温度の上昇、新たな噴気地帯の発生などの火山活動に関わる現象が認められた。

たとえば、温泉地学研究所では、代田ほか(2002)が箱根カルデラ内の3ヶ所と箱根外輪山2ヶ所計5ヶ所で傾斜計データが同時期に複数の観測点で傾斜変動したことから、この変化は群発地震活動に伴う変化と判断している。さらに、駒ヶ岳傾斜データは、群発地震活動の発生する約3週間前の5月23日ごろから0.5 $\mu$ rad程度の変化が生じている可能性を示した。

丹保、棚田(2002)は、年周変化や季節変化の補正をおこない光波およびGPS測量データに含まれる群発地震活動に伴う地殻変動(数mm~1cm程度)を検出することに成功している。

国土地理院(2002)は2001(平成13)年8月7日、GPS観測の結果から1994(平成6)年の観測開始以来、初めて箱根山中央火口丘を中心とした約1cmの膨張を検出し、箱根町仙石原にGPS観測点を1点増設した。

小田原市和留沢や湯河原町鍛冶屋に設置された気象庁の体積歪計にも、群発地震に伴う地殻変動が観測されている(気象研究所、2002;気象庁地震予知情報課、2002)。産業技術総合研究所地質調査総合センターでは、斎藤ほか(2002)によって箱根火山中央部の局所的な地殻変動の

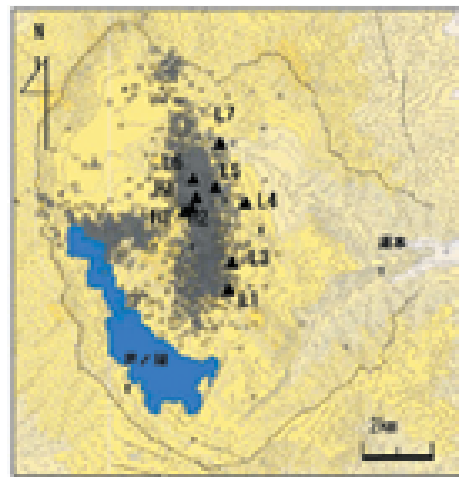


図1 箱根火山における温度観測地点(印)と2001(平成13)年箱根群発地震の震央分布(灰色丸印)

表1 利用した人工衛星データ一覧

ASTER	プロダクト種別 : L1B, 2B01, 2B03, 2B04, 2B05	画像データ : 4 シーン
	GRANULE ID=	
	ASTL1B 0107220141330109260020	取得日 : 2001/07/22
	ASTL1B 0111110137540203091181	取得日 : 2001/11/12
	ASTL1B 0210040140480210270004	取得日 : 2002/10/04
	ASTL1B 0211050140450211190073	取得日 : 2002/11/05
	ASTL1B 0211121249000301220062	取得日 : 2002/11/01
Landsat7 ETM+	プロダクト種別 Level 1G	画像データ : 2 シーン
	Path/Raw = 107/36	2001/06/04
	Path/Raw = 107/36	2001/07/22
地球観測衛星 ERS-2	プロダクト種別 Level 0	画像データ : 3 シーン
	Orbit/Frame = 32178/2889	取得日 : 2001/06/16
	Orbit/Frame = 32679/2889	取得日 : 2001/07/21
	Orbit/Frame = 33180/2889	取得日 : 2001/08/25

\* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

\*<sup>2</sup> 三井金属資源開発株式会社 環境事業部 〒259-1292 東京都品川区大崎 1-11-1  
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第35巻, 9 - 16, 2003.

表2 地球観測衛星 ERS-2 の差分干渉処理データ組み合わせ

No.	処理	組み合わせ	軌道間隔(垂直)	回帰日数
1	変動検出	2001/06/16-2001/07/21	475 m	35 日
2	変動検出	2001/07/21-2001/08/25	47 m	35 日

表3 地球観測衛星 ERS-2 データ取得日の気象状況

No.	日付	天気	雲量	気温(°C)	湿度(%)	降水量mm
1	2001/06/16	曇り	10	14.9	97	4.1
2	2001/07/21	雨	10	26.0	73	-
3	2001/08/25	晴れ	7	23.2	81	0.0

表4 温度測定的位置座標

測定地点番号	緯度(度分秒)	経度(度分秒)	地表状況
H1(大涌谷下部)	N 35 13 05.83	E 139 2 13.64	熱水変質地域
H2(大涌谷中部)	N 35 13 30.47	E 139 2 17.81	熱水変質地域
H3(大涌谷上部)	N 35 14 25.56	E 139 2 32.65	熱水変質地域
L1(駒ヶ岳登り口駐車場)	N 35 14 39.75	E 139 1 58.79	砂利, 土
L3(湯ノ花沢)	N 35 14 47.49	E 139 1 34.48	砂利, 土, 周辺草, 低木
L4(強羅、ヘリポート)	N 35 14 17.93	E 139 1 24.87	アスファルト
L5(強羅、スケート場跡)	N 35 14 30.88	E 139 1 37.40	アスファルト
L6(上湯場)	N 35 14 21.29	E 139 1 32.46	芝生
L7(水土野)	N 35 15 20.99	E 139 2 04.57	砂利, 土, コケ, 周辺アスファルト

有無を調べるために2001(平成13)年8月より臨時的GPS観測を継続している。

また、温泉の温度変化としては、石坂ほか(2002)が、強羅および二の平の2源泉で、群発地震活動の前の5月24~26日にかけて泉温が各々3~5 上昇したと報告している。

辻内ほか(2003)は、大涌谷周辺部で群発地震発生後に新たな蒸気が発生している場所を4カ所見つけた。また、火山ガス監視システムが設置されたことを報告している。

このように2001(平成13)年群発地震活動に伴い、いくつかの火山活動の活発化が確認された。しかし、これらの報告は、必ずしも箱根山全域を把握しているわけではない。そこで、広域の観測データの把握に有利な人工衛星データを用いて、2001(平成13)年箱根群発地震活動に伴う地表面の温度変化と地殻変動検出を試みた。なお、本報告は(財)資源・環境観測解析センターにより実施された平成14年度石油資源遠隔探知技術の研究開発に関わる研究における「火山防災と観光資源保全に関する研究」の一部成果に対し、温泉地学研究所保有の実観測データを用いて考察を加えたものをまとめたものである。

## 2. 人工衛星データによる検出手法

### 2.1. 衛星観測地表面温度の検出

解析には、地球観測衛星TERRAに搭載されているASTERセンサのデータを用いた。ASTERとは、Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometerの略称である。ASTERセンサは、可視近赤外放射計と短波長赤外放射計、熱赤外放射計で構成されており、可視パ

ンドから熱赤外バンドまでの14スペクトラムチャンネルを有する高性能光学センサで、地球の様々な分野の科学的、実用的な価値のあるデータを提供できるように設計されている。

2001(平成13)年箱根群発地震活動の前後における地表面の温度変化を把握するために、温度変化を検知しやすいASTER可視・近赤外・熱赤外データを用いた。解析には、まず植生被覆率を算出し、植生の影響を除去した地面温度の推定方法を検討し、群発地震発生時期前後の地面温度分布図を作成した。解析に利用したASTERデータならびにASTERデータとの比較のための米国Landsat 7衛星ETM+データは表1にまとめた。

### 2.2. 地殻変動の検出

2001(平成13)年箱根群発地震活動における地殻変動を面的に評価するために、合成開口レーダのデータによる差分干渉SAR(Synthetic Aperture Radar)を用いた。群発地震の活動時期に、合成開口レーダ観測をおこなっていたのは欧州宇宙機関の地球観測衛星ERS-2のみであった(表1)。表2には、差分干渉処理の組み合わせと、その軌道間隔を示した。また、地球観測衛星ERS-2データ取得日の気象状況は箱根町立仙石原中学校のデータ(<http://www2.famille.ne.jp/~sentyuu/>)を使用させていただいた(表3)。

## 3. 衛星観測地表面温度の検出

### 3.1. 現地調査

地面温度の算出方法の検証をおこなう目的で、植生被

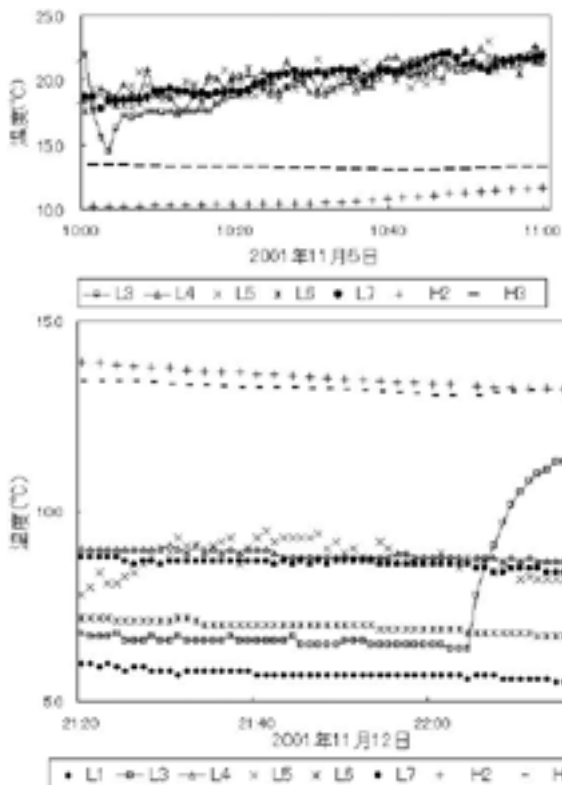


図2 2001年温度観測地点データ

覆の異なる場所での地面温度測定とASTERセンサーによる観測との同時観測を2002(平成14)年11月5日(昼間)および11月12日(夜間)の2回おこなった。

調査地点は、群発地震の震源が集中する大涌谷を南北に縦断する範囲から選定した(表4、図1)。現地での温度測定はエスペックミック社製のRT-11(測定精度±0.3)とJMS社製のSR-1 PLUSデータロガー(分解能0.1)を用いた。また、日置電機社製の2次元放射温度計(分解能0.1)も利用した。

RT-11とSR-1 PLUSデータロガーのセンサー部分は、直接地表に接触もしくは1cm程度埋め込んで、衛星通過前後約1時間の連続温度測定を実施した。放射温度計は、衛星通過前後約1時間の間に調査点を回って適宜測定を実施した。なお、RT-11とSR-1 PLUSデータロガーの測定器については、事前に室内実験によりセンサーの温度校正をおこなった。

各調査点の観測状況を表5に示す。調査点H1とL1については、データロガーの不調のためデータが記録されていなかった。各調査点の地面温度測定結果を図2に示す。

### 3.2. 地面温度観測手法の検討

衛星画像中の地表面温度には、植生や土壌、岩石、人工物等の温度がすべて含まれている。そのため、ここでは単純化して、土壌や岩石などの地質学的影響と植生の影響との2種類に分ける。次に、植生と地質学的物質の

面積比を1: ( : 緑被率 0.0 < 1.0)とすると、衛星観測地表面温度は式(1)で表せる。

$$T_o = (1 - \alpha)T_s + \alpha T_v \quad (1)$$

ただし、 $T_o$ は衛星観測地表面温度、 $T_s$ は地面温度、 $T_v$ は植生温度とする。また、画素の温度は各温度の面積平均値に等しいと仮定した(Matsunaga, 1994)。

対象地域は火山地帯であるので、地面温度 $T_s$ は衛星観測地表面温度 $T_o$ よりも、より火山熱源の分布状況を反映していると仮定した。その仮定にもとづき、衛星観測地表面温度 $T_o$ から植生温度 $T_v$ を除いて地面温度 $T_s$ を推定した。

ASTERデータの場合の衛星観測地表面温度 $T_o$ は、ASTER地上データシステムによって、ASTER/2 B 03プロダクトとして作成される。しかし、Landsat 7 ETM+データの場合には、衛星観測地表面温度 $T_o$ としての成果物(プロダクト)は作成されていない。そこで米国航空宇宙局の"Landsat 7 Science Data User Handbook: Chapter 11 - Data Products([http://1tpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_htmls/chapter11/chapter11.html](http://1tpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html))"で公開されている方法を利用して、衛星観測地表面温度 $T_o$ を作成した。

緑被率については、Hirano *et al* (2002)が提案している正規化植生指標(NDVI)をもとに推定した。ASTERデータの反射率は、ASTER地上データシステムにて作成されるASTER/2 B 05プロダクトに相当する。しかし、Landsat 7 ETM+の場合には、反射率を算出するプロダクトは無い。そこで米国航空宇宙局のWeb(前出)で公開されている方法を利用して、地表、大気混合反射率の算出した。算出に必要なLandsat 7 ETM+のパラメータを表5に示す。

地面温度 $T_s$ の解は(1)式を変形した(2)式で表される。しかし、未知数2つに対して、式は1つであるので、一意に $T_s$ を求めることは難しい。そこで、解の範囲を限定した最適化問題として $T_s$ を推定する手法を導入する。この方法は、未知数が式よりも多い劣決定の連立方程式の解として、解(未知数)のノルムが最小となる場合の解を最適なものとして採用する(Menke, 1984; 柳谷、塚田、1997)。

$$T_s = \frac{1}{1 - \alpha} (-\alpha T_v + T_o) \quad (2)$$

ただし、2次関数となるので、非線形計画法の準ニュートン法を使用する。また、解の存在範囲を絞るために2つの制約条件( $T_s$ 、 $T_v$ の温度差は10以内、 $T_o$ と $T_s$ 、 $T_v$ それぞれの温度差は5以内)を設ける。準ニュートン法から求めた $T_s$ がこの条件内に入らない場合には、 $T_s$ のは

ずれている方向に応じて、最適解として制約条件の最大値もしくは最小値を採用する。

上記の手順で処理したLandsat 7 ETM+ データから推定した地表面温度分布図( To )を図3に、またASTER データの衛星観測地表面温度分布図( To )と地面温度分布図( Ts )を図4に示す。

(1) 衛星観測地表面温度( To )の妥当性について

ASTER/2 B 03 プロダクツおよびLandsat 7 ETM+ センサー前面温度の妥当性を評価するために、ほぼ黒体と見なせる水域( 芦ノ湖、相模湾 )の水温を比較した。芦ノ湖の水温は、環境科学センターがまとめた1987年～1998年の湖尻における旬別平均水温を参照した。相模湾の海水温の分布は、東京都水産試験場がほぼ毎日発行する「都三県漁海況速報」(<http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/Kaikyozu/1to3ken.asp>)を、日別の定地水温観測は東京都水産試験場の大島(<http://www.fish.metro.tokyo.jp/>)、神奈川県水産総合研究所の三崎(<http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/top.asp>)を参照した。

また樹冠の表面温度は気温に近いことが指摘されているので( 萩島ほか、1999 )、植生域と気温を比較した。気温および湿度は、箱根町立仙石原中学校で行われている気象観測( 前出web )を参照した。芦ノ湖と大島、三崎における温度比較グラフを図5に示す。

ASTERデータの場合

ASTER/2 B 03 プロダクツの衛星観測地表面温度( To )と相模湾海水温とを比較すると、差異は2～3℃以内であり概ね良い一致であった。芦ノ湖の水温においても、衛星観測地表面温度( To )は、旬別平均と比較すると非常に良く一致している。植生域樹冠温度は2001( 平成13 )年11月11日観測データを除いて、気温+3℃前後と概ね良い一致を示している。これら黒体と見なせる地域の温度が地上観測値に近いことから、ASTER/2 B 03 プロダクツは信頼できるデータ精度と考えた。

Landsat 7 ETM+ の場合

Landsat 7 ETM+ センサーから推定した温度と、2001( 平成13 )年06月04日および同年07月22日観測データの海水温、湖水温、植生域樹冠温とを比較すると、各々約-4℃のオフセットがあることがわかった。2001年07月22日観測データに4℃加えた場合の植生域の温度分布は、ASTER/2B03プロダクツの温度分布とかなり等しい値になった。

(2) ASTER/2 B 03 プロダクツと衛星観測地表面温度測定との比較

同期観測を行った2002( 平成14 )年11月05日観測データの衛星観測地表面温度( To )は、現地測定放射温度計より平均約7.0℃、接触温度計より平均約7.6℃も低い。空

表5 各測定地点の温度観測結果

測定日	11/5									11/12								
	H1	H2	H3	L1	L3	L4	L5	L6	L7	H1	H2	H3	L1	L3	L4	L5	L6	L7
放射温度計	-	-	-	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RT-11	-	-	-	▼	○	○	○	○	○	-	-	-	○	○	○	○	○	○
SR-1PLUS	▼	○	○	-	-	-	-	-	-	▼	○	○	-	-	-	-	-	-

○：測定，▼：測定不良

表6 算出に必要な Landsat 7 ETM+ のパラメータ

取得日	Gain				Zenith angle
	1	2	3	4	
6/4	High	High	High	Low	23.3
7/22	High	High	High	Low	26.0

表7 衛星観測地表面温度差分組み合わせ

No	差分比較観測日	期間	植生域平均温度差	温度評価範囲
1	02/11/05 - 02/11/12	1週間	1.35℃	0.0 - 15.0℃
2	02/10/04 - 02/11/05	1ヶ月	13.96℃	0.0 - 25.0℃
3	01/11/11 - 02/11/05	1年	2.80℃	0.0 - 15.0℃
4	01/07/22 - 02/11/05	1年4ヶ月	16.18℃	0.0 - 25.0℃
5	01/07/22 - 02/10/04	1年3ヶ月	2.22℃	0.0 - 15.0℃
6	01/07/22 - 01/11/11	4ヶ月	13.38℃	0.0 - 25.0℃

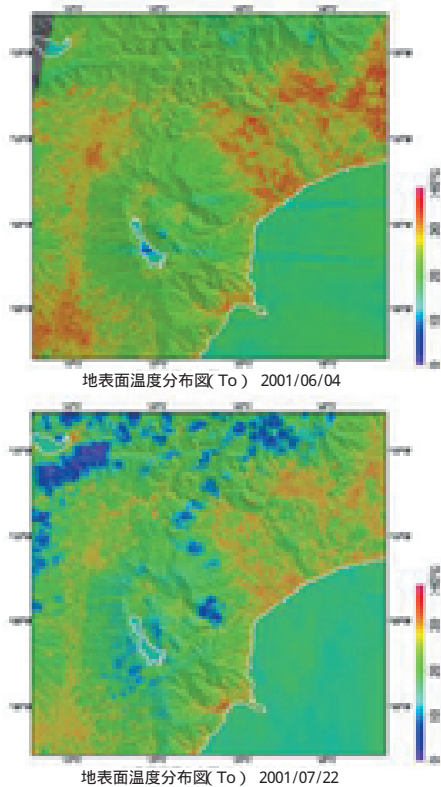


図3 Landsat7 ETM+ データから推定した地表温度分布図

間分解能が90mと粗いために、地面露出が少ないとその温度はほとんど反映されない可能性が高い。観測が昼間であったことから、植生の蒸発散により潜熱フラックスが増加して、衛星観測地表温度が低下する効果に吞まれてしまっている可能性も考えられる。他方、2002(平成14)年11月12日観測データの場合には、衛星観測地表温度( $T_o$ )は、接触温度計との差は1 未満に収まっており、大変良い一致を示している。

地面温度推定については、緑被率が高いほど植生域の温度は低下して算出された。しかし、実際の地面温度は上記のように衛星から算出される温度より高いので、推

定を行う前処理を検討する必要があると考えられる。

#### 4. 地殻変動検出手法の検討

地球観測衛星ERS - 2は2001(平成13)年1月に姿勢制御用ジャイロに不具合が発生し、以降現在に至るまでジャイロの機能が無い状態で衛星運用が行われている旨が宇宙航空研究開発機構から公表されている。地球観測センターの処理設備のソフトウェアを改修することにより、データ精度の向上を図っている。しかし、根本的な解決には至っていない。今回使用したデータはこの不具合を含んだものであるが、2001(平成13)年夏の群発地震発生期間にデータを取得したSAR衛星は他には無いので、あえて使用を試みた。衛星の姿勢を示すヨー角誤差情報は、以下の通りで、その値は衛星進行方向に向かって左が正の値、右が負の値となる。

観測日2001 / 06 / 16のヨー角誤差	+ 4.547°
観測日2001 / 07 / 21のヨー角誤差	- 1.918°
観測日2001 / 08 / 25のヨー角誤差	- 1.883°

ヨー角がずれているために、干渉処理をする上で次の問題が発生した。第一に、各画像内の幾何歪が異なるので、衛星画像のピクセル(画素)を正確に合わせることに(レジストレーション)が難しかった。第二に、干渉処理の中で最も重要である軌道決定で、地球観測衛星ERS - 2が持つ精度の良い軌道情報が利用できなかった。

干渉組み合わせの照射方向のずれは、組み合わせNo.1(2001 / 06 / 16 - 2001 / 07 / 21)で6.465°、No.2(2001 / 07 / 21 - 2001 / 08 / 25)で0.035°である。組み合わせNo.1はレジストレーションができず、処理不能であった。組み合わせNo.2は、ヨー角のずれが揃っていたので照射方向がほぼ一致し、レジストレーションをおこなえた。軌道推定は難航したが、組み合わせNo.2は干渉処理がおこなえた。その結果を等変動線図として図6に示した。

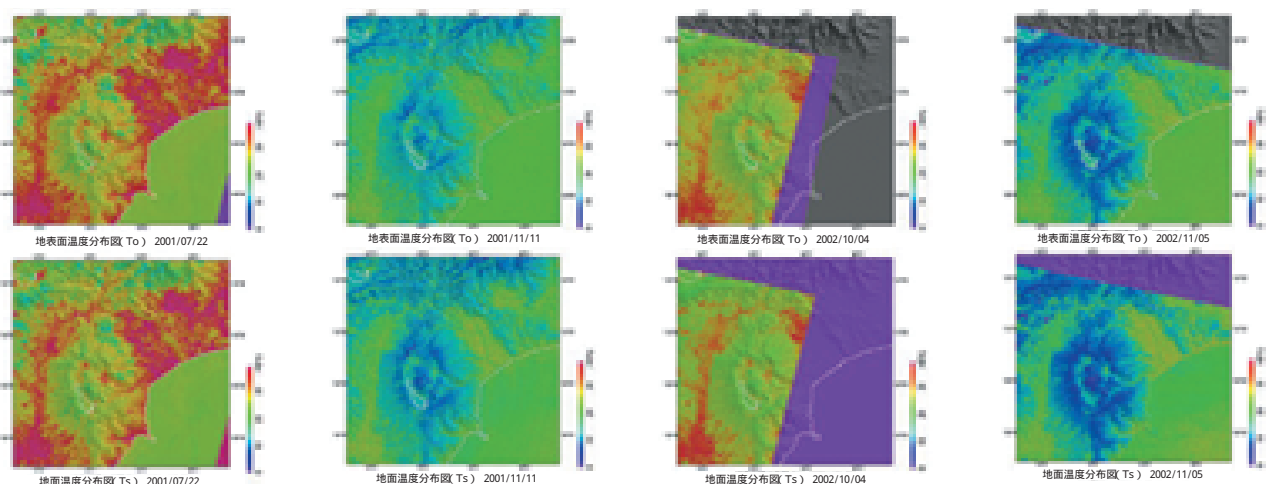


図4 ASTER データから推定した地表温度分布図

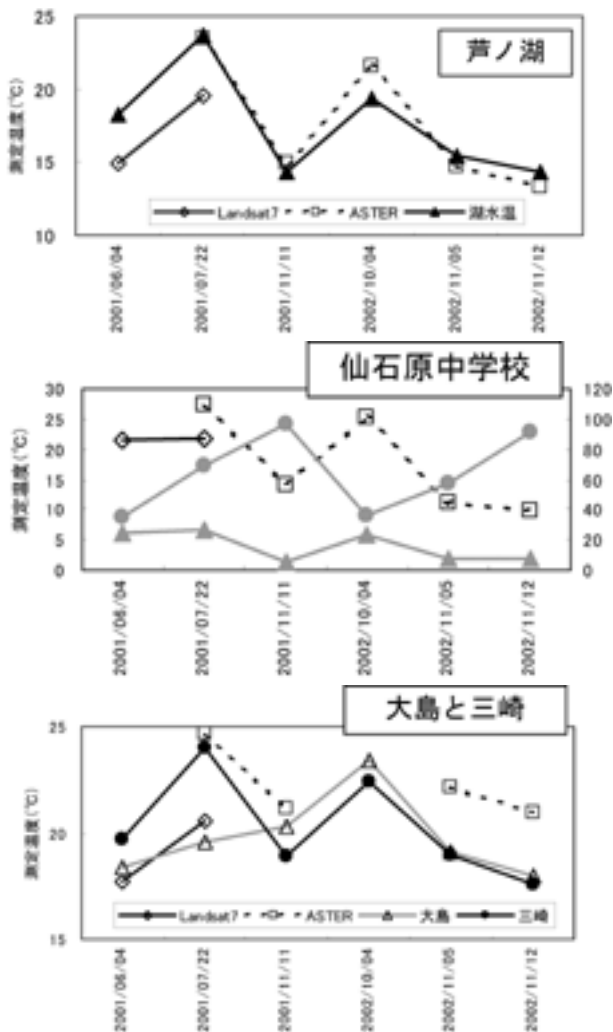


図5 ASTER/2B03 温度評価グラフ

## 5. 結果および考察

### 5.1. 衛星観測地表面温度について

ASTER/2B03 プロダクツをもとに、群発地震発生時期とその後の温度変化を際立たせるために、相対的な温度差分布図を作成した。表7に差分比較の組み合わせを示す。

まず、箱根中央火口丘を中心とした地域において、昼夜の差分から日射の影響で地表温度が気温より上昇する可能性がある箇所を特定した。データセットNo.1は比較期間が約1週間と短く、気象条件も類似している。昼夜の差分の結果、データセットNo.1では、市街地や大涌谷、ゴルフ場などの低緑被率地帯が温度上昇域として現れている(図7)。一方、神山や駒ヶ岳頂上部では、昼夜の温度差が明瞭には表れなかった。また、比較期間が約1ヶ月と長いNo.2では、特定の温度上昇域は認められない(図7)。これは気象条件等の違いを反映していると思われる。

次に、2001(平成13)年箱根群発地震発生時期における温度比較の差分結果(データセットNo.3~6)を図7に示す。データセットNo.3は、2001(平成13)年11月11日と2002(平成14)年11月5日とを比較したものである。2001(平成13)年11月11日から約1年経つことで、神山や駒ヶ岳頂上部、駒ヶ岳南西および北西方向の山間部、強羅の南長尾地区にスポット状の温度上昇域が認められる。データセットNo.4は、2001(平成13)年7月22日と2002(平成14)年11月5日とを比較したものである。2001(平成13)

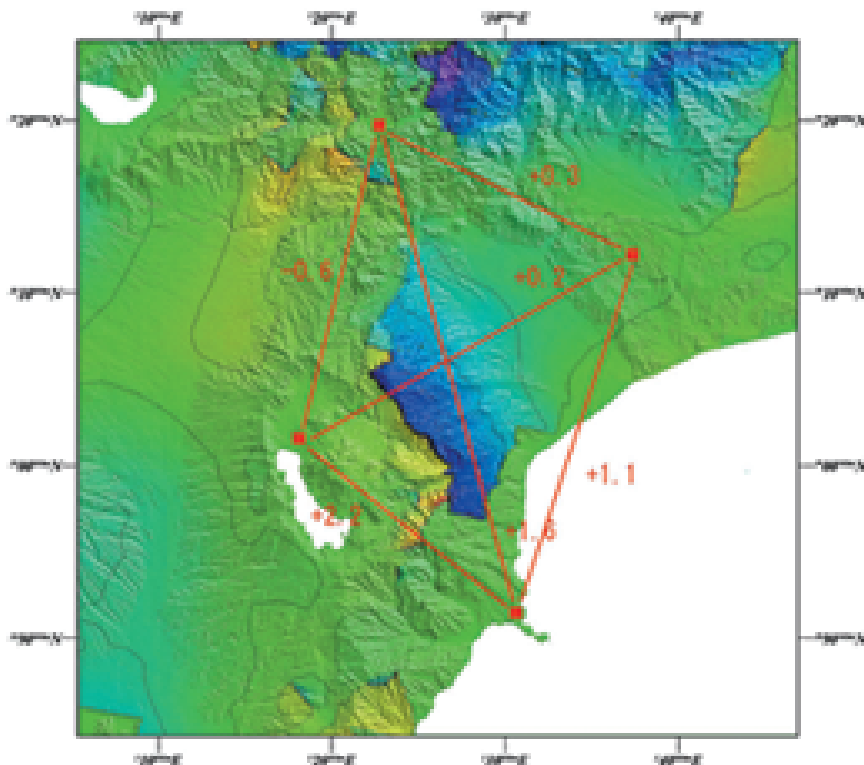


図6 地球観測衛星 ERS-2 データを用いた SAR による等変動線画像と GPS 変化量 (赤線)

年7月22日から約1年4ヶ月経つことで、駒ヶ岳山頂から大涌谷や早雲山や強羅地域にかけての広範囲で温度上昇が認められた。データセットNo. 5は、2001(平成13)年7月22日と2002(平成14)年10月4日とを比較したものである。2001(平成13)年7月22日から約1年3ヶ月後では、顕著な温度差は認められない。データセットNo. 6は、2001(平成13)年7月22日と2001(平成13)年11月11日とを比較したものである。2001(平成13)年7月22日から約4ヶ月では、大涌谷および早雲山周辺に高温域が広がっている。

ASTER衛星データの空間分解能が90m×90mであることから、もし群発地震活動全域で温度が上昇していれば、十分に検知できるはずである。しかしながら、全データセットからは、群発地震活動全域に相当するような広域な温度変化は認められなかった。

一方、スポット状の温度上昇域は、データセットNo. 3~4と6に表れた。この温度上昇域の一部は、温泉温度の上昇した源泉場所(石坂、2002)や新たな噴気地帯(辻内ほか、2003)に対応するものであった。しかし、データセットNo. 5のようにスポット状の温度上昇域が検出で

きない場合もあることがわかった。このような温度上昇域の消長がデータセットの選定に問題があるのか、現段階では、このスポット状の温度上昇域の消長が群発地震活動の推移とどのように関連しているかは不明である。

## 5.2. 地殻変動について

差分干渉SARのデータセットNo. 2の処理結果(図6)を見ると、箱根外輪山東斜面にかけて広範囲の沈降もしくは西向きの変位(約3cm)が認められる。しかし、この沈降もしくは西向きの変化はGPS等の結果(丹保、棚田、2002)とは逆方向である。さらに、外輪山の尾根を境として位相の反転が生じている。このような現象は、群発地震活動に伴う変動ではなく、むしろデータ不良に起因する異常と考えられる。その主因は地球観測衛星ERS-2のジャイロの不具合による軌道推定の不確かさのためであろう。また、植生による位相相関度の低下が有り、さらにマスター画像の取得日(7月21日)は激しい降雨があったので、位相に影響が出ていることも考えられる。

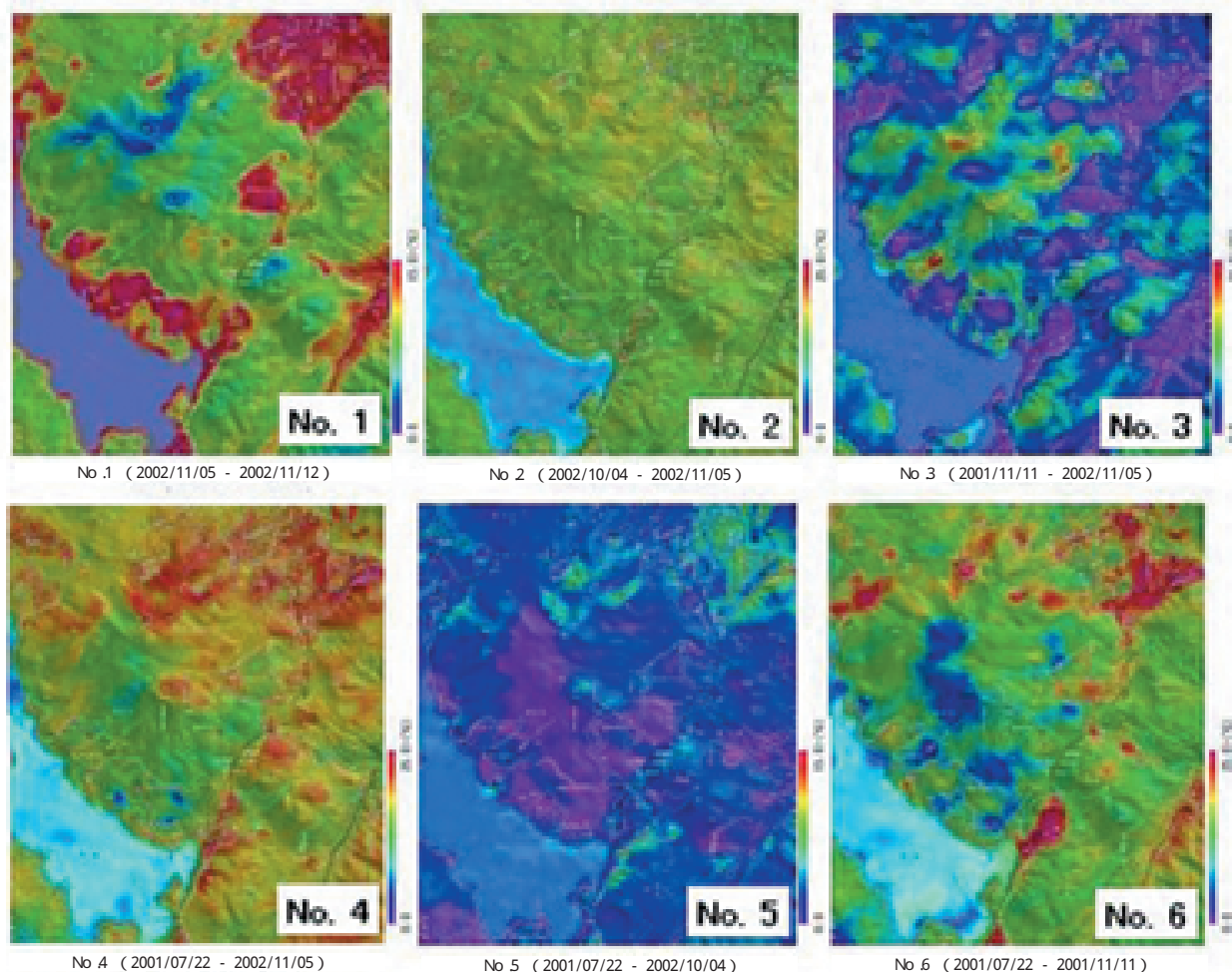


図7 期間別差分温度画像

## 6. まとめ

人工衛星データを用いて、2001(平成13)年箱根群発地震活動の前後で地表面の温度変化と地殻変動検出を試みた。

衛星観測地表面温度の推定には、ASTER可視・近赤外・熱赤外データを用いた。解析には、まず植生被覆率を算出し、植生の影響を除去した地面温度の推定方法を検討し、群発地震発生時期前後の地面温度分布図を作成した。さらに、2001(平成13)年7月～11月の群発地震活動発生時期とその約1年後とのASTERデータの温度差分から、地下温度の上昇を検討した。

解析の結果、群発地震活動発生から約1年経過したデータからは、群発地震活動全域に相当するような広域な温度変化は認められなかった。また、温度差分の期間組み合わせによっては、スポット状の温度上昇域が、温泉温度の上昇した源泉場所(石坂、2002)や新たな噴気地帯(辻内ほか、2003)に対応する場合もあった。しかし、差分期間の組み合わせによっては検出できないこともあり、現段階では、このスポット状の温度上昇域の消長が群発地震活動の推移とどのように関連しているかは不明である。

一方、地殻変動に関しては、今回は残念ながら地球観測衛星ERS-2のジャイロ不具合が主因で良好な結果を出すことができなかった。今回用いたCバンドの解析は植生等の影響を受けやすいのでLバンドSAR衛星の利用を検討する必要がある。しかしながら、地震や火山活動時の合成開口レーダの有用性と信頼性は高く、箱根火山活動に伴う地殻変動があらわれた場合には、次世代の日本地球観測衛星やカナダ地球観測衛星RADARSATのデータを利用することは今後とも有効であろう。

## 参考文献

代田 寧、棚田俊收、伊東 博 (2002) 2001(平成13)年箱根群発地震活動に関連した地殻傾斜変動, 温地研報告, 34, 35-44.

HIRANO, Y., YASUOKA, Y. and SHIBASAKI, R. (2002) Pragmatic Approach for Estimation of Vegetation Cover Ratio in Urban Area Using NDVI, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 22(2), 163-174.

石坂信之、板寺一洋、菊川城司 (2002) 箱根群発地震と温泉温度等の変化, 第55回日本温泉学会大会講演集, 19.

気象庁地震予知情報課 (2002) 箱根山付近の地震・地殻活動(2001年6月中旬からの変化), 地震予知連絡学会会報, 67, 104-107.

気象研究所 (2002) 箱根の微小地震活動(2001年6月～)に伴う歪変化, 地震予知連絡学会会報, 67, 108-114.

国土地理院 (2002) 箱根山とその周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会, 80, 34-40.

MATSUNAGA, T. (1994) A Temperature - Emissivity Separation Method Using an Empirical Relationship between the Mean, the Maximum, and the Minimum of the Thermal Infrared Emissivity Spectrum, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 14(3), 28-39.

Menke, W. (1984) Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, Academic press, 260.

萩島理、片山忠久、林徹夫、谷本潤 (1999) 樹木の放射温度分布に関する実測, 街路樹のある街路の温熱環境予測 その1, 日本建築学会計画系論文集 No. 516, 79-86.

棚田俊收、代田 寧、伊東 博、袴田和夫 (2002) 2001(平成13)年箱根火山の群発地震活動について, 温地研観測だより, 52, 1-4.

丹保俊哉、棚田俊收 (2002) 2001(平成13)年箱根群発地震活動に伴う光波・GPSの変化, 温地研観測だより, 52, 5-12.

辻内和七郎、鈴木征志、粟谷徹 (2003) 箱根大涌谷で2001(平成13)年に発生した蒸気井の暴噴事故とその対策, 温地研観測だより, 53, 1-12.

斎藤英二、萬年一剛、宇都浩三 (2002) 2001(平成13)年箱根群発地震活動に伴う箱根火山の臨時GPS観測, 温地研観測だより, 52, 21-24.

柳谷 俊、塚田和彦 (1997) 離散インバース理論 逆問題とデータ解析, 古今書院, 287.