

ASTER 画像を用いた地熱地域の抽出と影響因子の補正

Correction of the influence factors in the geothermal area extraction from ASTER images

○及川竜真*, 齊藤玄敏*

○Ryuma Oikawa*, Hiroyuki Saito*

*弘前大学大学院

*Hirosaki Univ.

キーワード： リモートセンシング (remote sensing), ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), 温度画像 (temperature image), 地熱 (geothermal)

連絡先： 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地 弘前大学大学院 理工学研究科 齊藤研究室
齊藤玄敏, Tel./Fax.: (0172)-39-3694, E-mail: saito@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災を機に原子力発電の安全性が問題視されており, 自然エネルギーを用いる発電方法が注目されている. その中で地熱エネルギーは枯渇や高騰の心配がない点で優れたエネルギー源といえる. また, 出力が変動する太陽光発電や風力発電とは異なり, 再生可能エネルギーの中でも地熱発電は安定した発電量が得られる¹⁾.

一方, 人工衛星搭載の各種センサを用いた地球の観測は, 広い地域を一度に観測可能であり, 地表面の反射率, 温度, 植生分布などを得ることが可能である. リモートセンシングは地熱地域を抽出するための有効な手段の一つである.

衛星画像から地熱地域を抽出する際, 未処理の画像では温度変化に関する影響因子により地熱地域を抽出することが難しい. Coolbaugh 等²⁾は ASTER の日中と夜間温度画像を用いて地熱地域の抽出を行った. ASTER とは EOS 計画

の衛星の一つである Terra に搭載され, 可視から熱赤外域までに 14 バンドを有する光学センサである. 彼らの解析は地熱活動に関係する地表面温度異常を ASTER の熱赤外画像を使って示し, 地下からの地熱の寄与を強調するために, 太陽による日中の加熱効果によって生じる温度変化が最小になるよう ASTER 画像を補正した. けれども, 解析地域は乾燥した環境で植生の少ない領域である.

本研究では日本の植生地域における地熱地域の抽出を行い, 標高, 地形効果, 熱慣性, 植生の影響について補正を行った.

2. 利用データと解析地域

解析地域は宮城県鬼首と秋田県川原毛周辺である. 両地域には鬼首地熱発電所 (発電出力 12.5 MW) や上の岱地熱発電所 (発電出力 28.8MW), 多数の温泉が存在する地熱地帯である. また, 両地域は植生に覆われている険しい山岳地帯で

ある。

利用データは日中 (2004 年 9 月 16 日) と夜間 (2011 年 9 月 27 日) の ASTER プロダクト (L2B03) の地表面温度画像を使用する。L2B03 は ASTER TES(Temperature and Emissivity Separation) アルゴリズムを用いて生成されたプロダクトである。これらの画像を補正するため ASTER プロダクト (L2B05) のバンド 2, 3 の地表面反射率を使用する。また, ASTER 全球三次元地形データ (ASTER GDEM) を利用する。ASTER GDEM は ASTER の可視近赤外域スペクトルバンドセンサー (VNIR) のバンド 3 のペアデータ (直下視と後方視) から作成されたものである⁴⁾。解析する画像サイズは 480 × 480 ピクセルで切り出したものをそれぞれ使用する。Fig.1 に日中における鬼首 (左) と川原毛 (右) の表面温度画像を示す。

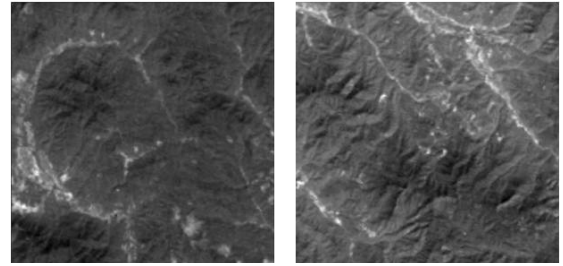


Fig. 1 日中における鬼首 (左) と川原毛 (右) の表面温度画像。

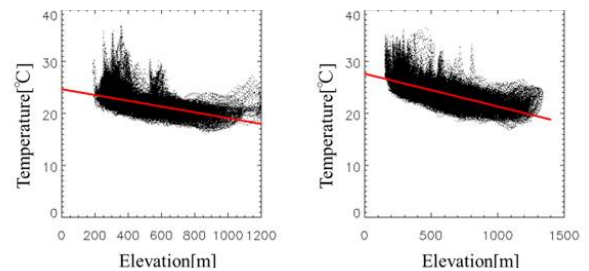


Fig. 2 鬼首 (左) と川原毛 (右) における日中の温度と標高の関係。

3. 影響因子の補正

3.1 標高補正

日中の温度画像は標高が上がるにつれて温度が下がるため標高補正の必要性がある。解析地域の鬼首, 川原毛の標高範囲はそれぞれ 200-1200m, 200-1400m である。そのため両解析地域ともに標高の影響を含む。

日中の温度画像と DEM(数値標高モデル) を使用し温度と標高の回帰分析を行った。標高はそれぞれの解析地域に対応する DEM から得る。Fig.2 に日中の鬼首と川原毛における温度と標高の関係と回帰直線 (赤い直線) を示す。Fig.2 の回帰分析の結果から標高の影響によって, 鬼首は $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 川原毛は $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 温度が下がっている。そのため, 回帰直線の傾きを平行にすることで標高による影響を取り除いた。

Fig.3 に夜間の温度と標高の関係を示す。夜間の標高による影響と放射冷却の影響を受けている。両地域ともに放射冷却の影響は標高 750m 以下が目立っている。しかし, 標高 750m 以上で

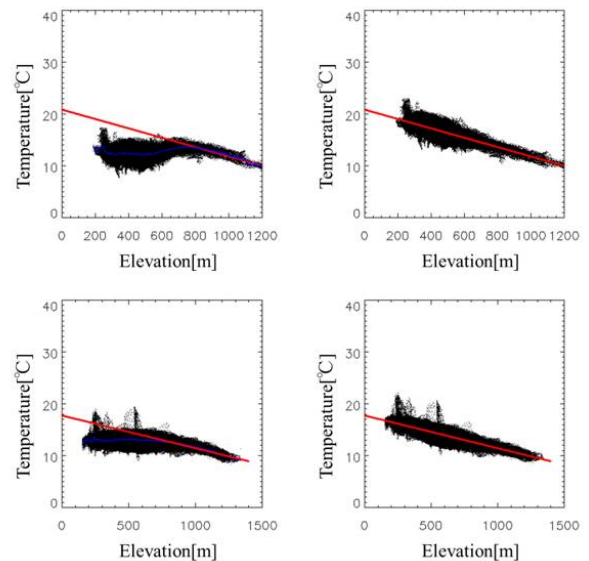


Fig. 3 夜間の温度と標高の関係。上: 鬼首の放射冷却の影響の補正前 (左) と補正後 (右)。下: 川原毛の放射冷却の影響の補正前 (左) と補正後 (右)

は放射冷却の影響は小さく, 標高による影響によって鬼首では $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 川原毛では $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 温度が下がっている。まず, Fig.3(右

側)のように放射冷却の影響を補正し、その後傾きを平行にすることで標高による影響を補正した。その後、日中と同様に標高による影響を取り除いた。

3.2 地形効果補正

日中の温度画像における太陽に面した斜面では温度が高くなり、山影の部分では太陽光が届かず温度が低く表示されている。そのためDEMを用いて直達日射照度画像を作成し、地形効果補正を行う。直達日射照度画像はDEMから求める地表面の斜度と傾斜方位、衛星画像のシステム情報から得られる太陽の高度角と方位角から計算したものである。地形の影響を除去するための式を以下に示す。

$$DN'' = DN - k \cos \beta' \quad (1)$$

ここに、 DN'' は補正後の温度、 DN は日中の補正前の温度、 k は $\sum |DN' - k \cos \beta'|$ が最小となる値、 $DN' = DN - DN$ の平均値、 $\cos \beta' = \cos \beta - \cos \beta$ の平均値である。

Fig.4に地形効果補正前後の画像を示す。鬼首、川原毛において、それぞれ $k = 3.5, 4.7$ の時、 $\sum |DN' - k \cos \beta'|$ の値が最小となった。Fig.4の左の図では、地形効果が目立って現れている。Fig.4の右の図では、ほとんどの地形効果を除去できている。

3.3 温度の植生依存

温度の植生依存を調べるために、正規化植生指数 (NDVI) を作成した。NDVIとは、植生の有無・多少・活性度を示す指数で、大きい値ほど植生が多いことを示している。以下にNDVIの式を示す。

$$NDVI = (IR - R)/(IR + R) \quad (2)$$

ここで、 IR は近赤外バンドの反射率 (band3)、 R は可視の赤バンド反射率 (band2) である。また、NDVIの値の範囲は-1~1である。

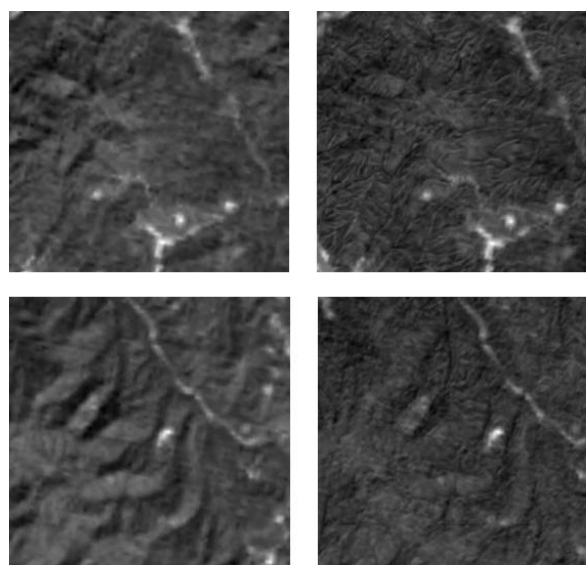


Fig. 4 地形効果補正前後の画像。上：鬼首の補正前(左)と補正後(右)。下：川原毛の補正前(左)と補正後(右)

両地域において作成したNDVIをFig.5に示す。また、ASTERのスペクトルライブラリ⁵⁾で公開されている分光反射率データを使用し、植生域(草地、針葉樹、落葉樹)のNDVIの値を計算した結果をTable1に示す。本研究では分光反射率から算出したNDVI値から、NDVIが0.76以上を植生域とする。また、Fig.4に示す画像で白に近い領域は植生域に対応する。

NDVIと日中の表面温度画像を用いて、横軸にNDVI、縦軸に地表面温度(T)をとったグラフ(VI-T図)を作成した場合、線状もしくは三角形に分布する。VI-T図の概略図をFig.6に示す。また、地表面温度は植生が増えて蒸発散が盛んになるほど低下する傾向がある。VI-T図の傾きはその地域が全体的に湿っていると、植生地や裸地でも蒸発散量の差が少なく、地表面温度は均一化し、傾きは小さくなる。一方、対象地域が全体的に乾いている場合、植生面は蒸散によって地表面温度が下がるが、裸地やアスファルトなどでは蒸発がなく地表面温度が上がりやすい。そのため、傾きが大きくなると考えられる⁶⁾。

鬼首、川原毛における日中の温度画像とNDVI

を用いて作成した VI-T 図を Fig.7 に示す。また、Fig.7 の赤線は各 NDVI に対する温度の平均値を示す。VI-T 図から植生域 (NDVI ≥ 0.76) では温度が低く、傾きが大きくなっている。また、非植生域 (NDVI < 0.76) では植生域と比べ温度が高く表示され、各 NDVI 値に対する温度のばらつきが大きくなっている。この原因として、非植生域には市街地や乾いた土壌、湿った土壌、水域などが含まれるため、熱慣性による影響が大きく温度がばらついていると考えられる。

また、夜間の表面温度と NDVI の関係を Fig.8 に示す。Fig.8 から夜間の表面温度は植生の違いに依存することなく、概ね一定であると考えられる。

3.4 熱慣性補正

日中の画像の市街地や裸地では太陽の加熱効果の影響により温度が高く、水域や湿っている領域では温度は上がりにくいと考えられる。特に太陽の加熱効果による温度異常は地熱地域の抽出を困難にするため、熱慣性補正の必要性がある。熱慣性補正を行うため、日中と夜間の表面温度画像から正規化熱慣性画像を作成した。以下に正規化熱慣性の定義式を示す。

$$TI_{norm} = \frac{T_{day} - T_{night}}{T_{day} + T_{night}} \quad (3)$$

ここに、 TI_{norm} は正規化熱慣性の値、 T_{day} は日中の温度、 T_{night} は夜間の温度である。

Fig.9 の正規化熱慣性画像では値が大きい (白い) ほど太陽光の加熱効果影響が大きく、小さい (黒い) ほど影響が小さいと考えられる。また、NDVI 画像 (Fig.5) と正規化熱慣性画像を比べると両者は白黒を反転させると概ね一致する。そのため、植生域では熱慣性の影響は少なく、非植生域では温度差が大きく、日中の太陽の加熱効果の影響を受けていると考えられる。

非植生域における熱慣性補正を行うために、以下の式を用いて補正を行う。

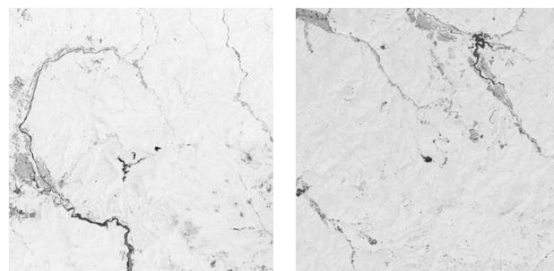


Fig. 5 NDVI.

Table 1 ASTER における植生域の NDVI 値.

	Grass	Conifer	Deciduous
NDVI	0.76~0.83	0.79~0.85	0.79~0.84

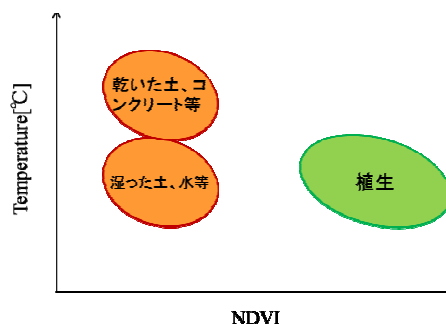


Fig. 6 日中の VI-T 図の概略.

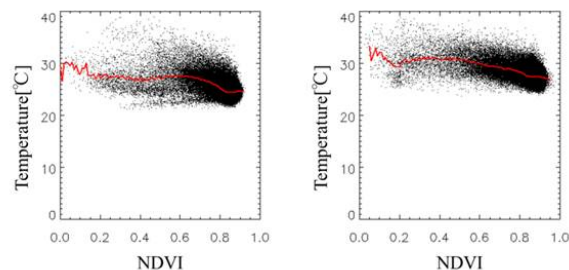


Fig. 7 鬼首 (左) と川原毛 (右) の日中の VI-T 図.

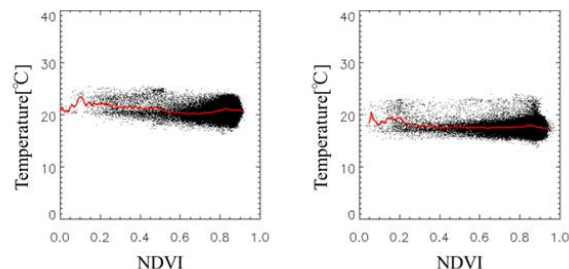


Fig. 8 鬼首 (左) と川原毛 (右) の夜間の VI-T 図.

$$T_{day.correct} = T_{day} - kTI_{norm} \quad (4)$$

ここに、 $T_{day.correct}$ は熱慣性補正後の温度、 k は $\sum |(T_{day} - T_{day}$ の平均値) - $k(TI_{norm} - TI_{norm}$ の平均値)| が最小となる値である。また、ここで用いる平均値は太陽の加熱効果の影響の少ない植生域の平均値とする。鬼首、川原毛において、それぞれ $k = 23, 20$ の時、 $\sum |(T_{day} - T_{day}$ の平均値) - $k(TI_{norm} - TI_{norm}$ の平均値)| の値が最小になった。

Fig.10 に熱慣性前後の画像を示す。Fig.10 の左図における赤の円内では、太陽の加熱効果の影響により温度異常となっていた個所を示している。Fig.10 の右図では、それらの影響を抑えることができている。また、Fig.11 には鬼首と川原毛における熱慣性補正後の VI - T 図を示し、赤線は平均値を示す。熱慣性補正を行うことにより、Fig.7 で各 NDVI 値に対し温度のばらつきが大きかったが、Fig.11 では各 NDVI 値に対する温度のばらつきが小さくなっているため、熱慣性による影響を補正できていると考えられる。

3.5 植生の影響の補正

Fig.11 に示した結果から、NDVIが増加するにつれて温度が下がっていることがわかる。地表温度は植生が増えて蒸発散が盛んになるほど低下する。植生が活発になるほど蒸発散の影響も大きくなると考えられるため、植生域 (NDVI ≥ 0.76) と非植生域 (NDVI < 0.76) において回帰分析を行った。

鬼首の植生域では NDVI が 0.1 増えるにつれて、温度が 0.43 °C 低くなり、川原毛の植生域では NDVI が 0.1 増えるにつれて、温度が 0.64 °C 下がっていた。一方、両解析地域の非植生域では NDVI が 0.1 増えるにつれて、それぞれ温度が 0.27 °C、0.35 °C とわずかにある植生の影響を受けていると考えられる。植生の影響の補正は回帰直線の傾きを平行にすることで補正を行った。

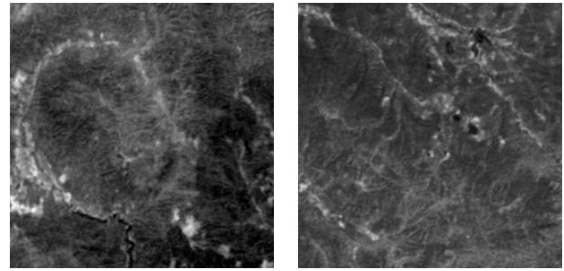


Fig. 9 正規化熱慣性画像.

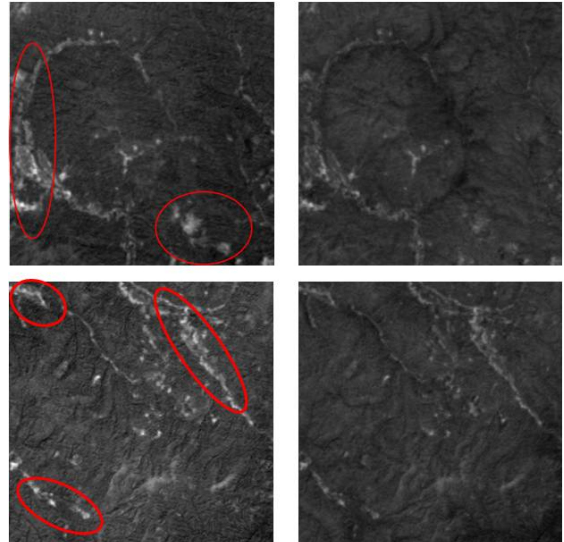


Fig. 10 熱慣性補正前後の画像. 上：鬼首の補正前(左)と補正後(右). 下：川原毛の補正前(左)と補正後(右).

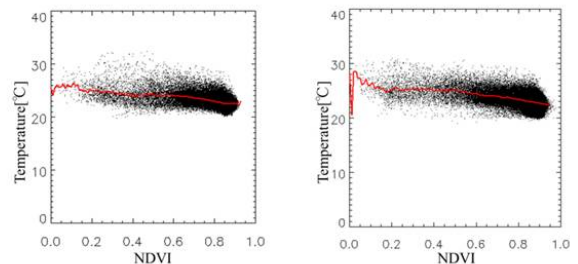


Fig. 11 鬼首(左)と川原毛(右)における熱慣性補正後の VI-T 図.

3.6 地熱地域の抽出

これらの補正を行い、植生域と非植生域に分けて地熱地域の抽出を行った。Fig.11 と Fig.12 に非植生域、Fig.13 と Fig.14 に植生域における地熱地域抽出の結果を示す。非植生域では地熱地域である鬼首地熱発電所や上の岱地熱発電所、

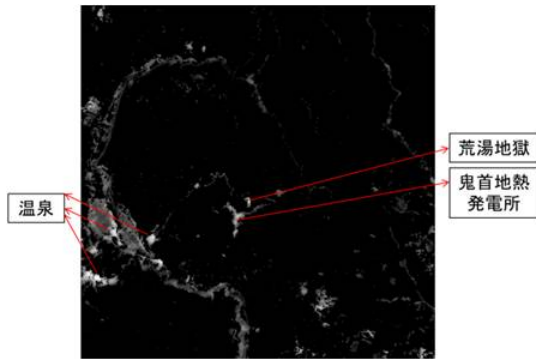


Fig. 12 鬼首の非植生域での地熱地域抽出画像.

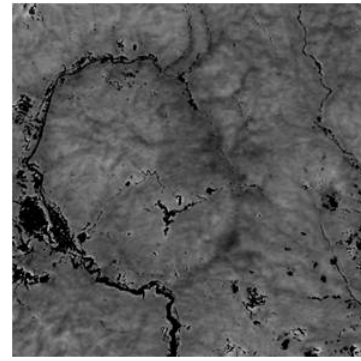


Fig. 14 鬼首の植生域での地熱地域抽出画像.

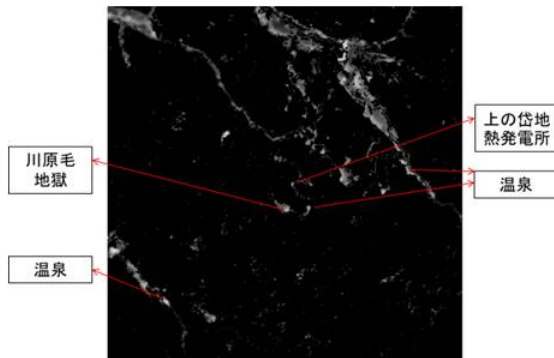


Fig. 13 川原毛の非植生域での地熱地域抽出画像.

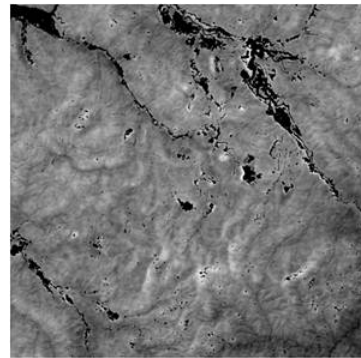


Fig. 15 川原毛の植生域での地熱地域抽出画像.

荒湯地獄や川原毛地獄，温泉といった地熱地域が明白に示されている。また，これらの領域は非植生域の平均値と比べ3℃程，温度が高く表示されている。植生域では，両地域ともに目立った温度異常はなく地下からの地熱寄与は少ないと考えられる。

4. 結言

本研究では，地熱地域を抽出するために，ASTERの地表面温度画像に対して，標高，地形効果，熱慣性，植生について補正を行った。処理した画像の結果から，影響因子に起因する温度の変動を除去することで，地熱異常を識別することが容易になった。今後の課題として，撮影日時までの日射量を考慮し，地形，熱慣性についての高精度な補正を目指す予定である。

参考文献

- 1) 河野順一: 地熱エネルギーの資源と利用, 開発工学, vol31, No.2, 2011
- 2) M. F. Coolbaugh, C. Kratt, A. Fallacaro: Detection of anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA, Remote Sensing of Environment, 106, 350-359.
- 3) ERSDAC:<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>
- 4) ASTER GDEM Readme file - ASTER GDEM
- 5) Baldridge, A. M., S.J. Hook, C.I. Grove and G. Rivera, 2009.. The ASTER Spectral Library Version 2.0. Remote Sensing of Environment, vol 113, pp. 711-715.
- 6) 西田顕郎, 樋口篤志, 近藤昭彦, 松田咲子: 分光植生指標と表面温度に基づく地表面過程のリモートセンシング手法の検討, J.Japan Soc.Hydrol Water Resour.Vol13,No.4