

衛星画像による環境評価手法に関する研究(Ⅰ) —多時期データ間の放射量補正—

A Study on Environmental Evaluation Method Using the Satellite Image —Radiation quantity adjustment of multi-temporal data—

小泉 俊雄*・萩原 圭一**・山下 幹夫**・國分 修一**

Toshio KOIZUMI, Keiichi HAGIHARA

Mikio YAMASHITA and Shuichi KOKUBUN

Abstract: This paper deals with the way of adjustment radiation quantity to develop a unified evaluation method of multi-temporal data as part of an environmental evaluation method using the satellite image. The proposed method is intended to automate reading of training data used for radiation quantity adjustment by extracting common class area during image, following the principle of post-classification comparison, based on land cover classification map produced under the supervised maximum likelihood classification method. Also, it adopted the way of adjusting the frequency distribution of the brightness information and that adjustment is made with threshold value. The effectiveness was shown as follows; it used LANDSAT/TM image. The difference occurring among multi-temporal data decreased, and it proved that the reference image and the comparison became possible relatively.

1. はじめに

近年、地球温暖化や森林破壊など地球規模での環境変化が問題となっている。そこで、より広い地域を対象とした経済社会システムと自然生態系を含む循環を基本とする環境負荷の少ないメカニズムの構築を目指すためには、その環境のモニタリングも重要な要素の一つでもある。現在、この広域モニタリングの一手法として周期性と広域情報量から衛星画像データ(以下、画像データと称す)を利用することが注目され、多面的な研究がなされている。しかしながら画像データは、同一の波長特性や属性データを持っている画像データであっても空間的な分類結果や時間的な変化解析結果が安定しないと云った問題が生じている。その原因の

一つに、同一の土地被覆であっても地域的・時間的な相違によって成分要素が異なることの影響が起因しているものと考えられる。この問題を解決し、多時期の画像データによる環境評価およびモニタリングを実現する重要な要素の一つに放射量補正がある。放射量補正とは、輝度情報に含まれる成分要素等の相違によって生じた放射輝度の歪を取り去ることである。画像データとして得られる物体や土地被覆の輝度情報には、固有の放射輝度以外に、①地形効果(光の反入射)の影響、②大気の散乱による影響、③気象状況の影響などの成分要素が含まれている。これまでに空間的な分類解析において地形起伏の激しい山岳では、①～③の成分による影響が大きいとして、太陽の位置および斜面との位置関係によって斜面の角度の影響を取り除く方法^{1)~3)}やバスマラディアンズなどのオフセット成分の影響を除去^{4),5)}する実用的な補正法が提案されており、その成果が蓄積されている。

また、多時期の画像データによる時間的な変化解析においては①～③の成分要素に加え、観測雑音やセンサー感度状況などの成分の影響が起因する経時的な同一箇所の物体や土地被覆で生ずる絶対放射量の相違の補正という観点が必要になる^{4),5)~8),10),12),13)}。

* 千葉工業大学工学部建築都市環境学科
Department of Architecture and Civil Engineering,
Chiba Institute of Technology
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1

** 開発コンサルタント株式会社
Kaihatsu Consultant CO., LTD.
〒170-0005 東京都豊島区南大塚3-20-6

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 42, NO. 4, 2003

また、これらの成分要素は観測時期によって一様の成分量とは限らず、季節や環境の差異によって放射輝度に不変し影響を与える。仮に熱環境や植生バイオマスなどの量的解析を目的とする環境要素においては、多時期の解析データが矛盾のある感度で求められ定量的に不整合が生じる原因となる。同じ条件下（同等成分）で観測された画像データであればこのような問題は生じないが、実際問題その入手は不可能であり、一般に自然変動の解析は土地被覆分類処理によって変化箇所を抽出することが広く用いられている。一方で、量的解析を目的とした環境要素のモニタリングを実現するためには、多時期データを定量的統一し輝度情報ベースでの安定化を図ることの必要性が考えられる。この放射量の補正に関するこれまでの研究例を挙げると、海域や湖、飛行場と言った局所の物体の放射量から太陽の位置と太陽高度から求める入射値を減じて補正する方法⁶⁾が提案されている。また、対象地域が広範囲に及び複数の土地被覆や物体が混在するときは、経時無変化箇所から数箇所のトレーニングデータを抽出して、統計的手法によって補正する方法^{7)~9),12),13)}が広く用いられ、実用的にその成果が蓄積されている。この統計的手法の多くは、図1に示すように放射量の統一化を図るために多時期の画像データのうち1画像データを基準画像としてY軸におき、その他の画像データをX軸においたときに求められる線形回帰式 $Y=aX+b$ で補正する。

しかし、対象地域に存在する同一の土地被覆の輝度情報には絶対的な特徴量は存在しない¹²⁾こと、面積的には極少数を占めるトレーニングデータで補正関係を求めることから、実用において以下のようなことが懸念される。

- (1) 土地被覆は、目視判読の比重が大きいいため、対象地域が広範囲に及ぶ場合はそれをすべてカバーすることが困難であるとともに、重要なトレーニング

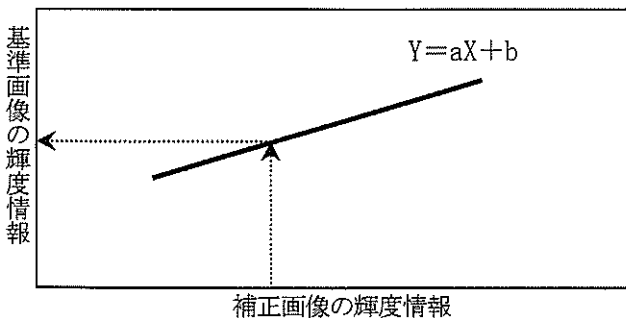


図1 線形回帰式による補正モデル

データが欠落することが生ずる。

- (2) 対象地域に分布している同一土地被覆の輝度情報は、地域特有の成分要素が含まれており、トレーニングする箇所によって異なるので、目視判読法では、一義的に定まった補正関係を求めることが困難である。また、線形回帰式を用いた場合は、高い相関関係が要求されるため、解析者の能力によってはトライアル回数が増大し作業効率が低下¹³⁾することがしばしば生ずる。

これらに対しては、変化が起こっていない箇所から多くのトレーニングデータによって補正関係を求め信頼性を高めること、トレーニングデータ判読作業をある程度自動化し解析者の識別能力差や作業効率低下を補う必要が考えられる。従来のような局所的あるいは線的な現地調査による環境評価は、面的としての評価再現性は低い。そこで著者らは、生活環境要素や自然生態系等の面的評価およびモニタリングの一手法として、画像データの有用性に注目している。今後は、画像データと現地サンプリングデータとの情報関係を解明していき、面的な環境評価手法の一つとして研究展開していく予定である。以上のことを踏まえて、本論文では、画像データによるモニタリングに必要な不可欠な多時期データの放射補正法に対して、対象地域が広範囲に及ぶ場合に実用面で懸念される作業効率を補うことに着目し、トレーニングデータ判読手法と統計的手法に対して検討を加えたものである。

2. 放射量補正の考え方

2.1 基本的事項

本論文で試みた放射量補正は従来から広く用いられている手法と同様に、多時期の画像データのうち、1画像データの放射輝度を基準にして他の画像データを補正する。その際に土地被覆ごとの放射特性も考慮して検討した。補正関係を求めるトレーニングデータは、経時無変化箇所から抽出することを基本とした。また、分類結果比較法¹³⁾の原理を適用しある程度の判読作業を自動化することを試みて、統計的手法による補正法に対して検討を加えた。

2.2 トレーニングデータ判読の自動化手法

- (1) 分類結果比較法の原理による応用

分類結果比較法とは、画像データごとに教師付最尤

法やクラスター分類法などによって土地被覆分類処理を行い、その結果を直接比較する変化分析法である。さらに、観測時期に不変する成分要素などの影響は、個別に分類結果の精度を確認することで補い、経時的な変化箇所あるいは無変化箇所を分析するものである。

本論文では、この分類結果比較法の原理を応用して、多時期の放射量補正に必要なトレーニングデータの判読を試みたものである。また、土地被覆分類の処理法としては教師付最尤法を用いた。教師付最尤法は、各クラスからサンプリングした教師データの共分散行列の散布状態から統計的特徴を求め確率的に分類するものであるが、面積的には対象地域の中の極少数を占める教師データの統計量をもとに対象地域全域を分類するので、土地被覆クラスの面積占有率に対して、ある絶対的な量を想定することはかなり困難¹²⁾であり、分類精度は一般に60数%程度であると言われている。しかし、対象地域が広範囲に及ぶ場合に全体の60数%程度の経時無変化箇所が抽出可能ならば、従来の目視判読によって抽出するサンプル数よりもかなり多数のトレーニングデータで放射量補正の関係を求められることが期待できるものと考えられる。また、分類結果比較法の原理から抽出される箇所の概念を図2に示し、ここでは、当該箇所を画像間共通クラスエリアと称した。

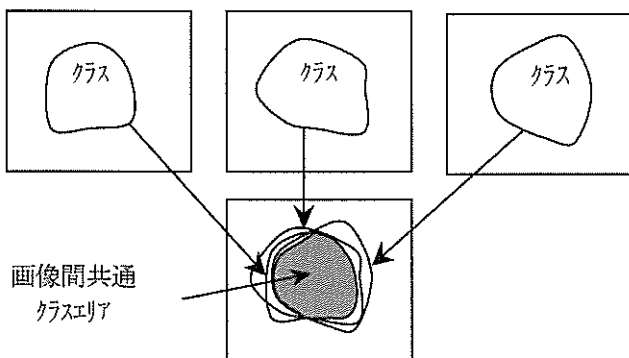


図2 画像間共通クラスエリアの概念図

(2) 画像間共通クラスエリア抽出の考え方

画像間共通クラスエリアの自動化処理過程の手法とその考え方を以下に示す。

画像データごとに教師付最尤法によって作成した土地被覆分類図から各土地被覆を隔離して考える。土地被覆部分には1、その他の部分には0の疑似的な画素値を与え、各画像を加算し新たに画像を生成する。仮に、3時期の画像データを例に挙げると、図3のよう

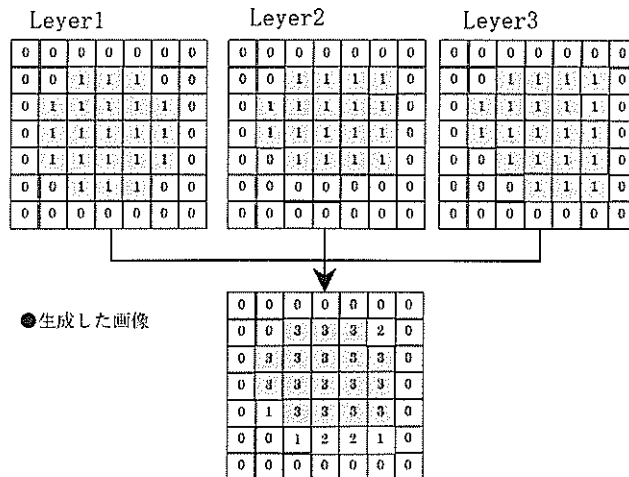


図3 画像間共通クラスエリアの生成方法

に生成した画像には、0、1、2、3の画素値が与えられることになる。生成した画像において画素値が3となった部分は、画像データ間で同じ土地被覆として分類されたピュアピクセルとなり、この部分が、画像間共通クラスエリアとして抽出される。なお、生成した画像において、画素値が1、2となった部分は、判別関数の相違などによって、画像データ間では同じ土地被覆として分類されなかった箇所であり、画像間共通クラスエリアからは除外される。

2.4 補正に用いた統計的手法

画像データにおける輝度情報の分布特性は頻度分布で表現できる。これは、土地被覆ごとの輝度情報の分布から構成され、土地被覆の占有面積の分布と等価な関係を持つことになる。したがって、対象地域のスペクトル空間での頻度分布を土地被覆ごとに一致させることによって、土地被覆固有のスペクトル特性を無視することなく、放射量補正が行えると考えられる。それは図4に示すように、絶対放射移動量(A)と標準偏差による輝度情報の分布量(B)の補正に着眼した。その補正においては、Ingramら¹⁰⁾によって提案された補正式をベースに行った。この方法は、平均値との差により絶対放射移動量を補正し、平均値を基準とした分布量を標準偏差の比によって補正するものである。また、これまでに頻度分布を累積度数として表し最頻値を基準に補正¹¹⁾するなどの補正法も提案されており、統計的手法においては、様々な側面から統計的特徴を捉え検討することの必要性が認識される。そこで、本論文では、頻度分布において代表的な統計要素の一つでもある最頻値をIngramらが提案した補正式に適用し若

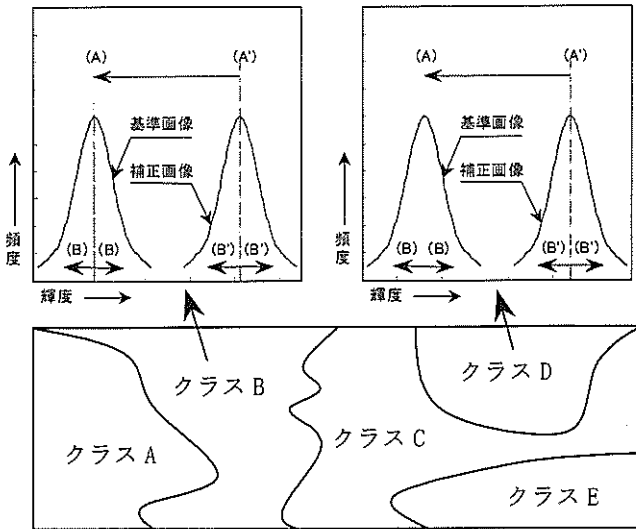


図4 頻度分布による補正モデル

干の検討を加え補正することを試みた。その関係式は以下のようである。

補正画像データの絶対放射移動量(A)は最頻値の差に着目する。また、頻度分布における分布量(B)は、ここでは、最頻値を基準とした分布量を双方の標準偏差の比で補正し補正後の輝度情報を次式によって求める。

$$\lambda(n) = m_1 + \frac{\sigma_1(X - m_2)}{\sigma_2} \quad (1)$$

ここで、 λ は補正後の輝度情報、 m_1 は基準画像データの最頻値、 m_2 は補正画像データの最頻値、 X は補正画像データの輝度情報、 σ_1 は基準画像データの標準偏差、 σ_2 は補正画像データの標準偏差である。

3. 放射量補正の検討

3.1 対象地域

本論文で提示する多時期の放射量補正法を長野県埴科郡坂城町に適用し実験的に検討した。平成12年10月

1日現在の総面積は53.64km²である。町の中心を1級河川の千曲川が南方から北方に流れ、東部には標高1,300m程度の浅間山から続く山岳地域が、西部には標高800m程度の山岳地域が分布しており、山林が全体面積の約50%を占め自然が豊かに現存している地域である。町東部の山岳麓には上信越自動車道が建設されて平成8年11月に開通するとともに近年は市街化も進んできている。

3.2 画像データ

使用した画像データはLANDSAT 5号TM (パス-ロウ:108-36)を用いた。観測時期は1985年7月25日、1990年8月8日、1999年8月1日の画像で、9時30分~10時00分の間で観測されたバルク補正画像である。また、観測時における太陽方位は東から南へ向かって約26°、太陽高度は約57°であり、観測変動は3時期の画像データで小さいと考えられる。その他の観測変動要因は大気中における光の散乱吸収等の不確定要因と考える。

3.3 土地被覆分類

対象地域の土地被覆は主として、山林、畑、田、市街地(道路、鉄道を含む)、水域が多く分布している。また、判読することが困難な裸地や荒地などの小面積が混在している箇所が点在しているため、これらを「その他」の土地被覆として集約して、幾何学的補正後に3時期で同じ箇所から教師データを抽出し最尤法によって図5に示すように6分類の土地被覆分類図を作成した。分類画像の平面的な分布を土地利用図と比較して分類精度を確認し、坂城町役場より入手した土地利用面積データ¹⁴⁾(以後、既存資料と称す)をもとに、表1に示すような土地被覆分類ごとの面積占有率の適

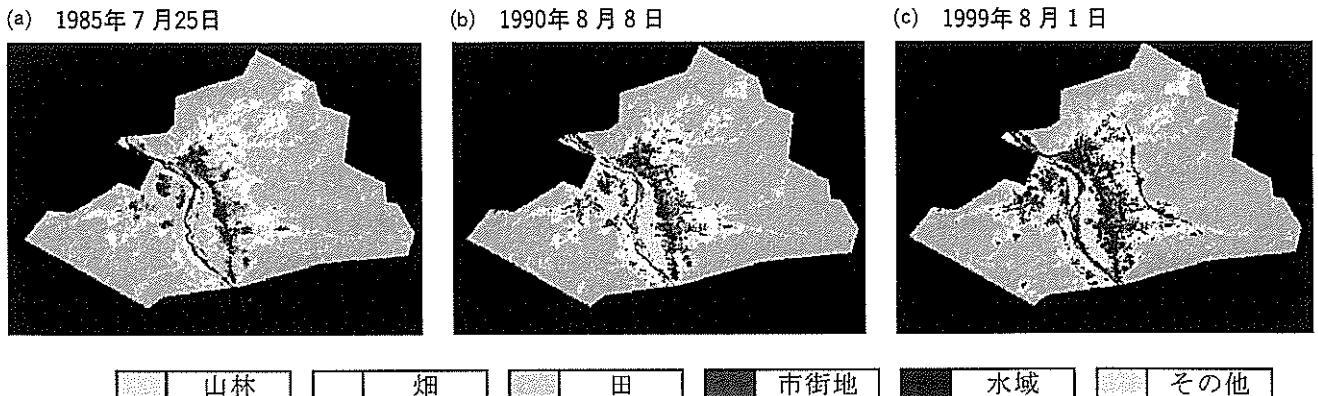


図5 教師付最尤法による土地被覆分類図

表1 面積占有率の比較

(a) 1985/7/25

土地被覆	土地被覆分類図		既存資料		占有率の増減①-②	面積占有率の適合率
	面積(km ²)	①占有率	面積(km ²)	②占有率		
山林	31,541	61%	25,941	50%	11%	82%
畑	8,870	17%	7,201	14%	3%	82%
田	7,452	14%	3,058	6%	8%	43%
市街地	2,398	5%	2,835	5%	0%	100%
水域	632	1%	626	1%	0%	100%
その他	1,239	2%	12,659	24%	-	-
合計	52,132	100%	52,320	100%	-	(平均)81%

(b) 1990/8/8

土地被覆	土地被覆分類図		既存資料		占有率の増減①-②	面積占有率の適合率
	面積(km ²)	①占有率	面積(km ²)	②占有率		
山林	33,388	64%	25,569	48%	16%	75%
畑	7,663	15%	6,889	13%	2%	87%
田	5,832	11%	2,913	5%	6%	45%
市街地	3,443	7%	3,081	6%	1%	86%
水域	535	1%	626	1%	0%	100%
その他	1,312	2%	14,562	27%	-	-
合計	52,172	100%	53,640	100%	-	(平均)80%

(c) 1999/8/1

土地被覆	土地被覆分類図		既存資料		占有率の増減①-②	面積占有率の適合率
	面積(km ²)	①占有率	面積(km ²)	②占有率		
山林	30,286	58%	25,260	47%	11%	81%
畑	9,526	18%	6,189	12%	6%	67%
田	2,819	5%	2,576	5%	0%	100%
市街地	6,002	11%	3,725	7%	4%	64%
水域	535	1%	626	1%	0%	100%
その他	3,143	7%	15,264	28%	-	-
合計	52,310	100%	53,640	100%	-	(平均)79%

合率で分類精度を評価した。面積占有率は式(2)、その適合率は式(3)で求めた。

$$S = (S_b / S_a) \times 100\% \quad (2)$$

ここで、

S ; 土地被覆の面積占有率(%)

S_a ; 解析対象地域の全体面積

S_b ; 土地被覆の面積

$$T = 1 / (S_1 / S_2) \times 100\% \quad (3)$$

ここで、

T ; 面積占有率の適合率(%)

S₁ ; 分類図の各土地被覆面積占有率(%)

S₂ ; 既存面積の土地被覆面積占有率(%)

土地被覆分類図による各土地被覆の面積占有率をみると、「その他」の土地被覆を除いては、3時期とも既存資料より増加する結果となった。特に山林の面積占有率をみると、既存資料では47%~50%であるのに対して、土地被覆分類図では58%~64%であり11%~16%増加した。一方、「その他」の土地被覆をみると、既存資料では24%~28%であるのに対して、土地被覆分類図では2%~7%と反して減少した。それらの適合率は、対象地域に主として存在している土地被覆の平均では3時期とも79%~81%であった。また、土地被覆ごとの適合率をみると、田では43%~100%、市街地では64%~100%となっており、総じて画像データごとのクラス適合率および多時期の画像データ間での同一クラスの適合率が異なる結果となった。これは、独立したスペクトル空間を形成している画像データごとに一意的に分類されたからである。すなわち、たとえ3時期の画像データにおいて、同じ箇所からサンプリングした教師データでも、得られる判別関数は一義的なものではないことを意味しており、また、教師データが変われば分類結果も変わってしまう¹²⁾ことを意味しているものと考えられる。分類結果比較法は、このような独立した判別関数で分類された結果を用いて分析するので、画像データごとの分類精度が、そのまま分析精度に影響を及ぼす特徴を有している。それに対して、ここでの結果は、対象地域に主として存在する土地被覆は、一般的に言われている分類精度を満足していることを踏まえて、次項以降に、この結果をもとに画像間共通クラスエリアを抽出して放射量補正の処理を試みた。

3.4 画像間共通クラスエリアの抽出

土地被覆分類図から抽出した各土地被覆のうち山林、畑の画像間共通クラスエリアを図6に示し、土地被覆分類図における各土地被覆の面積と土地被覆ごとの画像間共通クラスエリアの面積を比較したものを表2に示す。これによると最も占有面積が大きい山林においては、画像間共通クラスエリアから除外された面積の減少率が最も低く3時期の画像データで9%~13%であるのに対して、「その他」の土地被覆においては3時期とも99%の減少率でほとんど抽出されない結果となった。これは輝度情報に含まれている成分要素の影響、多時期データ間における放射量の相違などの

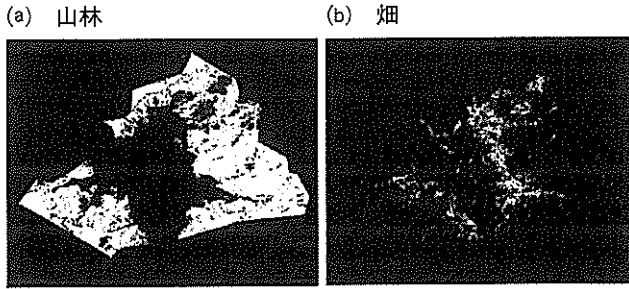


図6 画像間共通クラスエリア

影響に加えて、占有面積が小さい荒地や裸地等を一つの土地被覆として集約して絶対量を想定したために曖昧な判別関数となったことが原因であるものと考えられる。結果として山林：27,543km²、畑：2,767km²、田：1,409km²、市街地：1,769km²、水域：184km²、その他：17km²、計33,688km²から多くのトレーニングデータを抽出して放射量補正の関係を求めることになった。

3.5 画像データの補正処理

画像の補正処理に用いた1985/7/25および1990/8/8の画像データにおける土地被覆の同定は、画像間共通クラスエリアから抽出したスペクトルレンジとした。これは、表2のように画像間共通クラスエリアの面積は、当該土地被覆の総面積に対して、かなりの面積を占めていることから、土地被覆固有の分布特性として把握できることを期待して行ったものである。この補正処理例を以下に示す。

図7は1985/7/25画像において山林の画像間共通クラスエリアから抽出したスペクトルレンジである。ある画素のバンド1の輝度情報を補正する場合、それが85~106の範囲で、かつバンド2が29~43、バンド3が

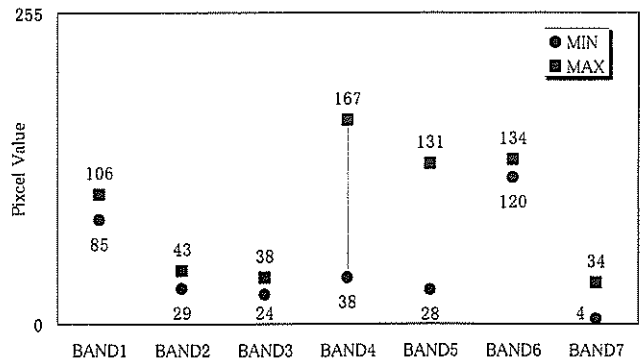


図7 画像間共通クラスエリアのスペクトルレンジ(山林)

24~38、バンド4が38~167、バンド5が28~131、バンド6が120~134、バンド7が4~34の間の輝度情報をもつ画素であれば補正することとしている。なお、画像間共通クラスエリアから抽出されたスペクトルレンジに含まれない情報やスペクトルレンジが他の土地被覆と重複するような場合は、補正の対象とはせず補正外エリアとして取り扱ったものであり、補正画像の面的な評価としての観点では若干課題を残していることを加えておく。

3.6 不整合の低減効果

本論文で試行した放射量補正の妥当性は、多時期における同一土地被覆での放射輝度が統一化されたか否かで行うこととした。そこで、補正処理後における不整合の低減効果を調べるために、各画像データにおいて明らかに経年的変化が起こっていない箇所から輝度情報をサンプリングし、図8に示すように基準画像データに対する補正画像データの輝度値の誤差を求めた。

表3はこれをもとに、輝度値の差の加重平均を求め

表2 各土地被覆の面積比較

土地被覆	1985/7/25		1990/8/8		1999/8/1		共通クラスエリア 面積① (km ²)
	面積④ (km ²)	減少率 1-①/④(%)	面積③ (km ²)	減少率 1-①/③(%)	面積② (km ²)	減少率 1-①/②(%)	
山林	31,541	13%	33,388	18%	30,286	9%	27,543
畑	8,870	69%	7,663	64%	9,526	71%	2,767
田	7,452	81%	5,832	76%	2,819	50%	1,409
市街地	2,398	26%	3,443	49%	6,002	71%	1,769
水域	632	71%	535	65%	535	65%	184
その他	1,239	99%	1,312	99%	3,143	99%	17
合計	52,132	35%	52,172	35%	52,310	36%	33,688

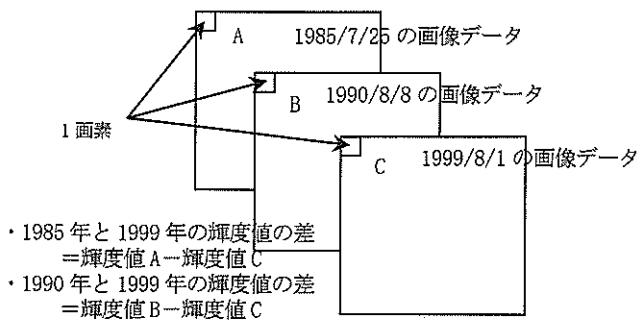


図8 輝度情報の誤差算出モデル

たものである。この輝度値の差は誤差と見ることができるので、補正処理前後の誤差を比較することによって不整合の低減効果を把握した。これによると、全体的に補正処理後における誤差は減少していることがわかる。また、1985/7/25の画像データでは最大、バンド1で66から4に、1990/8/8の画像データでは最大、バンド4で54が11まで誤差が減少した。このことは、確実に輝度値の不整合を低減させ、本補正法の有効性を示していると考えられる。

3.7 補正処理前後のNDVIの比較検証

多時期の画像データ間においてバンドごとでの放射情報の一貫性は前述のように明らかに示した。次に複数のバンド間の情報が適切な関係を示しているか検証

した。ここでは、NDVI(正規化植生指標: Normalized Difference Vegetation Index)を例に挙げて補正処理前後で比較することで検証した。NDVIは、植生活性を調べる代表的なアルゴリズムの一つで、植生のクロロフィル吸収分光特性にあたる赤色の可視域波長(バンド3)と水分吸収分光特性にあたる近赤外域波長(バンド4)を用いて求める値であり、値が大きいほど植生活性が高いことを示すものである。なお、対象地域の山林地域においては、1985年~1999年の14年間で局所地域を除き広範囲で枯死や病虫害を受けた実例は発生しておらず、14年間の植生健全度は全体的には変わっていない^{14),17)}。

NDVI画像の補正処理前後を比較したものが図9である。山林が分布している地域のNDVIを見ると、基準とした(c)1999/8/1では0.6~0.8の値が多く分布しているのに対して、補正処理前の(a)1985/7/25では0.3~0.5程度の値が、(b)1990/8/8では0.4~0.6程度の値が多く分布している。いずれも観測時では、それなりのNDVIが観測されているものの、それぞれを単に比較すると経年的に矛盾ある感度を示していることがわかる。

図9の(a')1985/7/25および(b')1990/8/8は補正処理後の輝度情報で算出したNDVI画像である。補正処理前と同様に山林が分布している地域のNDVIを

表3 輝度値の差(誤差)の加重平均

単位: 輝度誤差

項目	年次	山林		畑		田		市街地		水域		その他		平均	
		補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後
BAND 1	1985年	33	2	29	9	36	7	26	9	39	9	66	4	38	7
	1990年	10	2	10	7	14	7	10	10	12	8	27	4	14	6
BAND 2	1985年	13	1	10	5	13	4	10	5	15	6	32	4	15	4
	1990年	4	2	4	4	6	4	4	4	5	5	13	4	6	4
BAND 3	1985年	12	1	9	8	14	7	8	7	16	10	48	7	18	7
	1990年	3	1	7	8	10	7	6	6	8	8	25	6	10	6
BAND 4	1985年	12	10	14	12	11	11	12	8	15	12	50	11	19	11
	1990年	9	8	14	14	11	10	7	7	13	13	54	11	18	11
BAND 5	1985年	18	7	14	13	18	12	15	10	21	15	12	11	16	11
	1990年	6	6	11	11	12	7	8	8	18	16	8	6	11	9
BAND 6	1985年	9	1	14	3	11	5	16	2	9	3	6	3	11	3
	1990年	2	2	4	2	3	3	5	3	4	3	8	3	4	3
BAND 7	1985年	3	3	14	8	8	6	8	8	7	7	20	6	10	7
	1990年	2	2	7	7	8	6	8	8	8	8	15	5	8	6

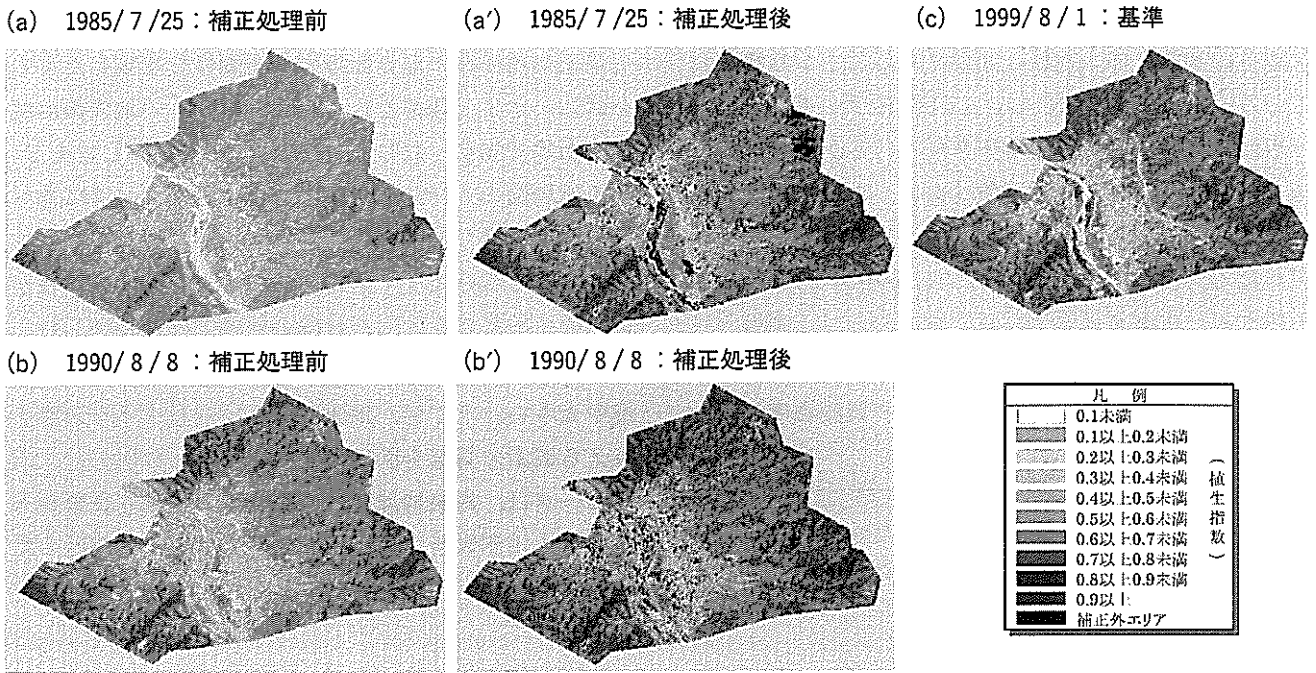


図9 補正処理前後のNDVI画像

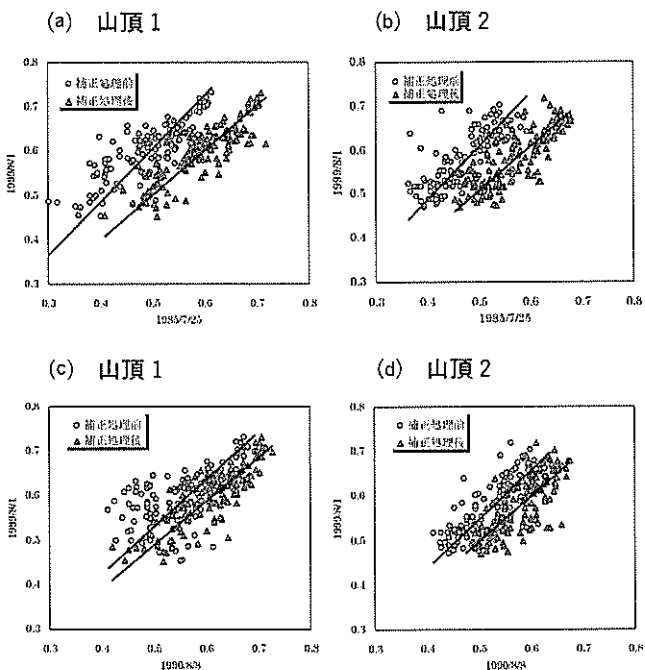


図10 NDVIの相関図

見ると、局所的に土地被覆が変化した箇所を除いては3時期において同値を示している。また、代表的な2つの山から日射の陰陽となる地形を含むように山頂を中心とした480m×480mの範囲からNDVIを抽出した1999/8/1のNDVIと1985/7/25および1990/8/8のNDVIの相関関係を図10に示す。補正処理前の相関係数はNDVIを抽出した箇所や画像データによ

て大きく異なり0.246~0.748である。一方、補正処理後の相関係数は0.775~0.823であり安定した良い相関を示し、回帰直線の傾きがほぼ $Y=1.0X$ の関係を示していることがわかる。このことから、試行した放射量補正においてバンド3とバンド4の関係は同等な関係を持って統一化されているものと考えられる。加えて、多時期の輝度情報を統一化することで経年的にNDVIを同じ感度で把握できることが伺われる。なお、図9において点状している黒い部分は補正の対象から外れた除外エリアであり、各画像データとも全体面積の約4%程度であった。それは、対象地域の一部に存在している雲の他、ミクセルな情報が生じやすい土地被覆の間の境界付近で見られた。

3.8 補正処理前後の地表面温度分布の比較検証

LANDSAT TMのバンド6は熱赤外域波長を観測した情報である。熱赤外波長を観測する他の画像データに比べて地上分解能が高く、地表面の温度分布を調査するために良く利用されていることから、補正処理後の画像データがどのような地表面の温度分布を表現するのか興味の対象となる。そこで、バンド6の輝度情報から観測輝度温度を推定して、3時期の地表面温度分布画像を補正処理前後で比較した。

バンド6の輝度情報から観測輝度温度への推定は、NASAから公表された関数で求めることが可能であ

るが、この関数で求められた観測輝度温度は、従来から地上観測値との一致性に問題があることが指摘されている^{15),16)}。また、NOAA/AVHRRデータとの相関分析によって補正値が提案¹⁶⁾されているが、これは、海域を対象に検討された補正値であり、本解析地域のような内陸部に対しては適用することはできないものと思われる。そこで、対象地域周辺に分布する荒川ダム、大門ダム、広瀬ダムおよび諏訪湖において、画像データ観測時と同時に観測された水温データ¹⁷⁾を入手しバンド6の輝度情報との相関関係により観測輝度温度を

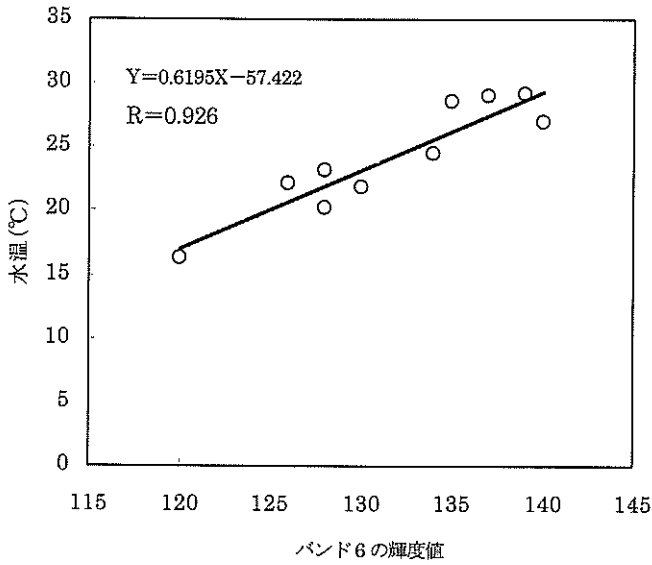


図11 相関図

推定するものとした。この結果を図11に示す。

補正処理前後の地表面温度分布画像を比較したものを図12に示す。基準とした(c)1999/8/1の地表面温度は市街地で36℃~42℃、山林地域で23℃~29℃である。補正処理前の(b)1990/8/8では基準画像データに比べ若干低い温度であるのに対し、(a)1985/7/25では全体的に著しく低い温度である。熱赤外光の場合は波長が長いので散乱の影響はそれほど重要ではない¹⁸⁾。むしろ地表面温度が異なる原因は観測時期の気象条件の相違が大きい。そこで、地表面温度に対し大きな影響を与える要素の気温を図13のように整理し分析した。気温データは、対象地域に最も隣接する気象庁長野地方気象台上田測候所で観測された画像データ観測時の時系列である。

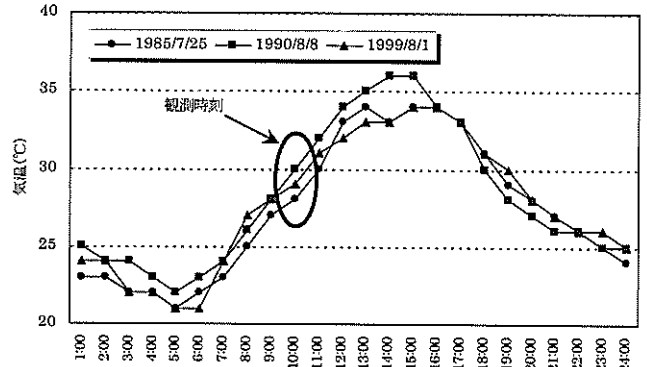
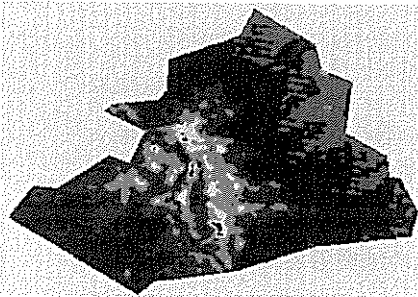
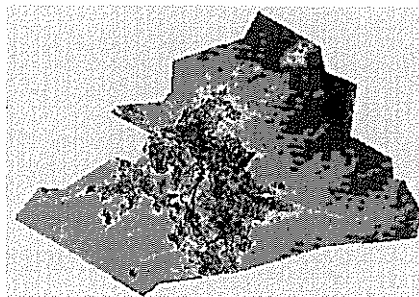


図13 画像データ観測時の気温

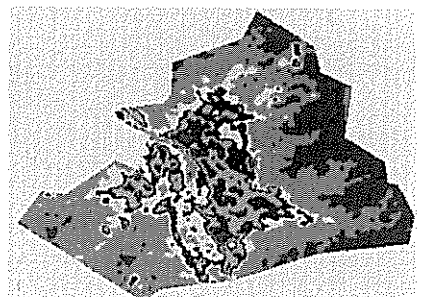
(a) 1985/7/25: 補正処理前



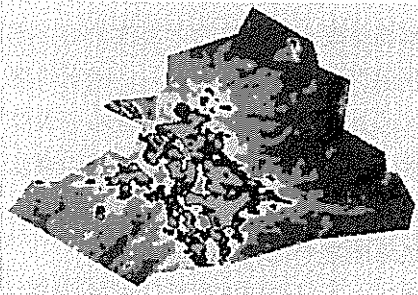
(a') 1985/7/25: 補正処理後



(c) 1999/8/1: 基準



(b) 1990/8/8: 補正処理前



(b') 1990/8/8: 補正処理後

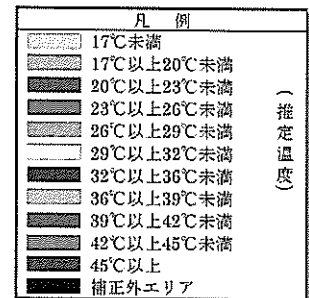
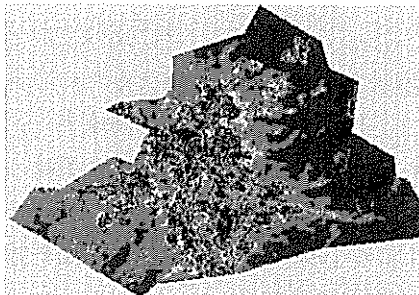


図12 補正処理前後の地表面温度分布画像

表4 気温の累積変化 単位：℃

年次 \ 時間	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00
1985/7/25	21	43	66	91	118	146
1990/8/8	22	45	69	95	123	153
1999/8/1	21	42	66	93	121	150

各画像データの観測時刻の気温は1℃～2℃程度の差が見られ、1985/7/25では28℃、1990/8/8では30℃、1999/8/1では29℃であり、この気温の違いが地表面温度の絶対量の違いを裏付けることは難しい。しかし、熱赤外域の波長帯を有する電磁波は、物体に吸収されて温度を上昇¹⁸⁾させることから観測前からの余熱の程度も影響する。観測前の時間変化をみると概ね5:00から上昇傾向にある。物体の余熱に気温が与える影響を踏まえて5:00からの気温の累積変化を表4にまとめた。これによると1985/7/25は他と比べて時系列的に低く8:00以降に違いが顕著に見られるので、3時期の地表面温度が異なる原因の一つに気温の相違の影響も伺われる。

図12の(a')1985/7/25および(b')1990/8/8は、補正処理後の地表面温度分布画像である。土地被覆ごとで見られる地表面温度は基準とした(c)1999/8/1の地表面温度相当に分布していることがわかる。特に、1985/7/25では補正処理前後を比較すると大きな成果が得られていることがわかる。これらの結果から、多時期の画像データは、試行した放射量補正によって同じ条件で観測した地表面温度相当の画像へ変換できることが伺われる。

4. 処理時間

本補正法は一般的な教師付最尤法で作成する土地被覆分類図に要する時間に加えて、画像間共通クラスエリアの抽出、補正係数の算出、画像データの補正処理作業が生じた。実用化への適応において作業に要する処理時間は重要な要素となる。画像処理に使用したパーソナルコンピュータは、ディスク容量；20GB、CPU；Pentium III667、メモリ；256MB程度で、アプリケーションソフトは米国ERDAS社IMAGINE™ 8.4を用いた。

6分類した土地被覆における画像間共通クラスエリア抽出に要する時間と補正係数の算出に要するコネク

ト時間はほとんど発生せず5分程度、CPU処理時間も20秒程度であった。また、参考までに本論文で試行した画像データの補正処理に要した時間は、コンピュータに土地被覆ごとの閾値を入力する時間を1画像データあたり20分程度、CPU処理時間も1画像あたり10秒程度であった。したがって、画像間共通クラスエリア抽出および補正係数算出の約5分と1985/7/25および1990/8/8の2画像データの補正処理約40分を合計すると概ね50分程度の処理時間であった。これまでに放射量補正に関して様々な手法が提案されているが、処理に要する時間は詳述されていないので、他の手法と比較することはできないが、本補正法の処理時間は、実用的な観点からも許容される範囲であるものと考えられる。

5. 結論

本論文では、多時期に不変する放射輝度の補正に対して、解析対象地域が広範囲に及ぶ場合に懸念されるトレーニングデータ判読の作業効率を向上すること、多くのトレーニングデータによって補正関係を求めることに着目し多時期データによる解析結果を安定させるための放射量補正法に検討を加えた。前者については分類結果比較法の原理を応用する方法を試みた。後者については、バンドごとに頻度分布を一致させる方法を用いて、LANDSAT/TM画像を使用し長野県坂城町を対象に補正結果の精度の検証を行い下記の結論を得た。

- (1) 画像データ間において、変化が起こっていない箇所の輝度誤差が、各バンドとも全般的に低減することが認められた。特に最大バンド1において60以上の輝度誤差を減少することが確認でき、その有効性を示す結果を得た。
- (2) 補正処理前後における多時期のNDVI画像を作成し補正前では、観測時期の相違によって矛盾のある感度で求められることを確認するとともに、補正後においては経年的に同じ感度のNDVIが求められることの有効性を得た。
- (3) バンド6の輝度情報においても同一条件で観測された地表面温度分布と見なせる画像が作成され、経年的に定量化された分布状況が確認できることの有効性を得た。
- (4) 作業効率率は、一般的な教師付最尤法による土地被

覆分類の作業に加え、トレーニングデータを判読する画像間共通クラスエリアの抽出、補正係数の算出、画像データの補正処理などの作業で要した時間は50分程度であり、実用的に許容される範囲であることが確認できた。また、アプリケーションソフトにおいて処理過程をライブラリー化することによって、より時間短縮は可能と考えられる。

- (5) 本補正法の大きなメリットは、多時期の放射量補正を画像間共通クラスエリアにおける多くのトレーニングデータによって求めることが可能であり、分類結果比較法の原理を応用しある程度の判読作業を自動化することで、解析者の判読能力の違いによる誤差を極小化することが可能である。

6. おわりに

6.1 考察

現在、多時期の画像データによる解析結果を安定させるための様々な放射量補正法が提案されている。多時期の画像データにおける放射量補正は時系列分析において重要な要素として位置付けられるし、輝度情報ベースの安定化の面からも必要不可欠な作業と言える。実用面で放射量補正に求められる基本的な要件は、効果的に補正できることのほか、解析者の判読能力によって補正精度が偏らないことと、作業効率の高いことが挙げられる。本論文は、特に解析対象地域が広範囲に及ぶ場合に実用面で懸念される事項に着目して、このような要件に対し、分類結果比較法の原理を応用することによってトレーニングデータ判読をある程度自動化すると言った新しい視点から放射量補正法に検討を加え、その検証を行った。その結果、多時期データで生じた放射輝度の誤差を確実に解消し定量的に統一化できることの結果を得た。また、処理時間も実用面で許容される範囲であると言った利点を確認できた。加えて、今後の多時期の画像データを用いた解析に対し、実用的なアプローチとして先鞭を示すことができたと考える。

6.2 今後の課題

本補正法の課題は下記のようなことが挙げられる。

- (1) 分類結果比較法による土地被覆の抽出法は、画像データごとで分類した精度がそのまま分析精度に影響する。したがって、画像データごとのクラス判別

関数の相違やミクセルの影響を踏まえて、他の地域や他の観測時期での検討が必要である。

- (2) 本論文で用いた画像全体の補正処理では、その処理過程において補正外エリアが発生するため、画像間共通クラスエリアからのトレーニングデータ抽出とともに補正処理に必要な閾値の設定手法の検討を加える必要はある。
- (3) 著しく正規化しにくい分布への頻度分布を一致させる補正法の適用は、補正精度の低下が懸念されるので、他の統計的手法による補正法の検討も加える必要はある。

(受付日2002.11.18, 受理日2003.7.8)

参考文献

- 1) 妹尾俊夫：①森林のデータ特性－輝度補正－，日本リモートセンシング学会誌，Vol.10, No.3, pp.42-46, 1990.
- 2) 大貫仁人：Landsat データの地形条件の差による電磁的歪の補正法とその効果，日林論92, pp.147-148, 1981.
- 3) 村上拓彦，寺岡行雄，今田盛生：標高データを用いた衛星リモートセンシングデータの輝度補正，日林九支研論集，No.49, pp.29-30, 1996.
- 4) 飯倉善和，横山隆三：ランドサット TM 画像の大気および地形効果の補正，日本リモートセンシング学会誌，Vol.19, No.1, pp.2-16, 1999.
- 5) Stefan Sandmeier, Klaus I. Itten: A Physically-Based Model to Correct Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain, IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 3, pp.708-717, 1997.
- 6) 景山陽一，西田 眞：時系列衛星データにおける輝度情報補正の検討，平成11年度電気関係学会東北支部連合大会，1A8, p.8, 1999.
- 7) Xiaojun Yang, C.P. Lo: Relative Radiometric Normalization Performance for Change Detection from Multi-Data Satellite images, Photo. Eng & Remote Sensing, Vol. 66, No. 8, pp.967-980, 2000.
- 8) Christopher D. Elvidge, Ding Yuan, Ridgeway D. Weerackoon, Ross S. Lunetta: Relative Radiometric Normalization of Landsat Multispectral Scanner(MSS) Data Using an Automatic Scatter-

- gram-Controlled Regression, Photo. Eng & Remote Sensing, Vol. 61, No. 10, pp.1255-1260, 1995.
- 9) Singh A.: Digital change detection techniques using remotely-sensed data, International Journal or Remote Sensing, Vol. 10, No. 6, pp.989-1003, 1989.
- 10) Ingram K., Knapp E., Robinson J.W.: Change detection technique development for improved urbanized area delineation, technical memorandum CSC/TM-81/6087, Computer Sciences Corporation, Silver Springs, Maryland, USA, 1981.
- 11) John A. Richards, Xiuqing Jia: Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, Springer-Verlag, Berlin, pp.102-104, 1999.
- 12) 竹内章司: 時系列データの最尤法分類における分類結果の安定化手法, 日本写真測量学会写真測量とリモートセンシング, Vol.31, No. 2, pp.11-22, 1992.
- 13) 大林成行, 小島尚人: 最新実務者のためのリモートセンシング, pp.336-390, 2002.
- 14) 坂城町役場住民環境課資料, 2001.
- 15) 矢野利明: 都市の熱環境解析のためのリモートセンシングによる地表面温度の算出とその問題点, 日本リモートセンシング学会 平成5年度秋季講演会テキスト, pp.81-86, 1993.
- 16) 稲永麻子, 竹内章司, 杉村俊朗, 吉村充則: NOAA/AVHRRの観測輝度温度に基づくLANDSAT/TMの観測輝度温度誤差の補正, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 16, No. 4, pp.10-20, 1996.
- 17) 長野県生活環境部資料, 2001.
- 18) 土屋 清; リモートセンシング概論, pp.170-172, 2001.