テンポラル熱赤外面像からの見かけ上の 温度変化パターンの除去[†]

稲 村 実*・豊 田 弘 道*・藤 村 貞 夫*

Removal of the Pattern of Apparent Temperature Change from Remotely Sensed Temporal Thermal Infrared Images

Minoru INAMURA*, Hiromichi TOYOTA* and Sadao FUJIMURA*

The temporal change of thermal environment caused by weather conditions or by waste heat is one important index of environmental information. A temporal change of temperature is formally given by the difference between the thermal infrared images collected at the times t_1 and t_2 . However, objects having different thermal infrared emissivities and temperatures are taken simultaneously into a pixel of remotely sensed multispectral and multitemporal images, and the proportions of different objects in the pixel change with time. Therefore, for two temporal thermal infrared images, one cannot distinguish between the true temporal change of the surface temperature and the apparent change of it caused by the temporal change of the proportions of the objects in the pixels.

The exterior product image processing by using the image information of the visible channels removes the apparent temporal change of surface temperature caused by the changes of the proportions on the two thermal infrared images. Consequently, the temperature change on the processed image gives the true temporal temperature difference pattern which is independent of the proportions of the various objects on the earth's surface.

1. は じ め に

気象条件の変動や排熱などによって生ずる熱的環境の変動は、都市においては熱エネルギーの利用状況やその効率などの調査・研究に、また地方においては農

作物の温度環境管理などに密接に関連した重要な環境情報の一つである。

リモートセンシングによって得られた熱赤外面像から、その地域での温度変化を求めるのには、時点 t_1 で収集した画像データと時点 t_2 で収集した画像データを比較すればよいはずである。ところが MSS センサの瞬間視野の地上での大きさは、航空機リモートセンシングで数 m から十数 m 平方となり、LANDSAT の場合ならば約 80 m 平方という大きさとなる。したがって、このような画像データにおいては、地上の大半が複数カテゴリーの混在領域とみなさなければならない。しかもそれらの各カテゴリーは放射率や温度も異なっているので、それらの混在比が t_1 と t_2 との間に変化した場合にも見かけ上の温度変化を生ずる。それゆえ、熱赤外面像から得られる熱放射エネルギーについての単なる比較だけでは、真の温度変化と混在比が変化したことにより生ずる見かけ上の温度変化とは区別がつかない。しかもこのようにして生じた見かけ上の温度変化はわれわれの欲しい情報ではなく、カテゴリーの混在比の変動に関して修正された温度変動の情報が必要なのである。

そこで本論文では、温度、放射率、反射率などの放射特性を異にする対象はそれぞれ別のカテゴリーに属するものと考え、熱赤外面像データと同時に収集されている可視画像データを積極的に利用することにより、上述のようにして生じた見かけ上の温度変化を除去し、真の温度変化の成分のみを抽出するための処理法を提案する。

2. 基本事項の定式化

まず、問題の所在とここでの目的を明確にするため、始めに基本事項の定式化を行う。

時点 t_1 における熱赤外面像と時点 t_2 における熱赤外面像の地点 X または画素 (l, m) での、単位時間当

† 第 5 回リモートセンシングシンポジウムで発表 (昭 55・11)

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received February 19, 1980)

(Revised November 4, 1980)

りの熱放射エネルギーの差 ΔE_{lm} は

$$\Delta E_{lm} = E_{lm}^{t_2} - E_{lm}^{t_1} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $E_{lm}^{t_i}$ ($i=1, 2$) は、地点 (l, m) における、時点 t_i での、単位時間当りの熱放射エネルギーである。この ΔE_{lm} が地点 (l, m) における真の温度変化によって生じたものであるならば問題は無いのであるが、1章でも述べたように、 ΔE_{lm} の生ずる要因としては温度変動のみではない。

まず単純に、地点 (l, m) が単一のカテゴリーのみで覆われているとした場合には、(1)式の右辺 $E_{lm}^{t_i}$ ($i=1, 2$) は

$$E_{lm}^{t_i} = \varepsilon_{lm}^{t_i} \alpha (T_{lm}^{t_i})^\beta, \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

となる。ここに

$\varepsilon_{lm}^{t_i}$ は地点 (l, m) における、時点 t_i での放射率
 α, β は赤外フィルタの特性および観測温度範囲によって決まる定数

$T_{lm}^{t_i}$ は地点 (l, m) における、時点 t_i での温度である。

ところが、地点 (l, m) は n 種類のカテゴリー ($W_1, \dots, W_n$) の混在領域であるとするならば、時点 t_i におけるそれらの混在比を $a_{t_i}^1, \dots, a_{t_i}^n$ として、(2)式は(3)式となる。

$$E_{lm}^{t_i} = \sum_{j=1}^n a_{t_i}^j \varepsilon_{t_i}^j \alpha T_{j t_i}^\beta, \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

ここに

$\varepsilon_{t_i}^j$ はカテゴリー W_j の、時点 t_i における放射率
 $T_{j t_i}$ はカテゴリー W_j の、時点 t_i における温度である。ここで簡単のため

$$E_{t_i}^j = \varepsilon_{t_i}^j \alpha T_{j t_i}^\beta, \quad (i=1, 2; j=1, \dots, n) \quad (4)$$

と置けば、(3)式は(5)式のように書ける。

$$E_{lm}^{t_i} = \sum_{j=1}^n a_{t_i}^j E_{t_i}^j, \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

一方、可視チャネルの分光画像データを n チャネルだけ用意する。時点 t_i において、カテゴリー W_j からの反射光の分光強度ベクトルを $\tilde{x}_{t_i}^j$ ($i=1, 2; j=1, \dots, n$) とすれば、時点 t_i での各カテゴリーの混在比が $a_{t_i}^j$ であるから、地点 (l, m) の分光強度ベクトル $\tilde{p}_{lm}^{t_i}$ は

$$\tilde{p}_{lm}^{t_i} = \sum_{j=1}^n a_{t_i}^j \tilde{x}_{t_i}^j, \quad (i=1, 2) \quad (6)$$

となる¹⁾。ここで、記号 $(\sim)$ はこれらのベクトルが可視チャネルのみの成分からなる n 次元ベクトルであることを意味させた。

つぎに、(5)式と(6)式は、それらの係数 (混在比 $a_{t_i}^j$) が等しいことから、(5)式を(6)式の第 $(n+1)$ 成分に加えることができ、そのようにした $(n+1)$ 次

元ベクトルとしても、(6)式同様の次式が、混在領域 (l, m) について成立する。

$$\mathbf{p}_{lm}^{t_i} = \sum_{j=1}^n a_{t_i}^j \mathbf{x}_{t_i}^j, \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

ここに

$$\mathbf{p}_{lm}^{t_i} = \begin{pmatrix} \tilde{p}_{lm}^{t_i} \\ E_{lm}^{t_i} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}_{t_i}^j = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{t_i}^j \\ E_{t_i}^j \end{pmatrix}$$

である。

(7)式より、2時点 t_1, t_2 間の差は

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{p}_{lm} &= \mathbf{p}_{lm}^{t_2} - \mathbf{p}_{lm}^{t_1} \\ &= \sum_{j=1}^n (a_{t_2}^j \mathbf{x}_{t_2}^j - a_{t_1}^j \mathbf{x}_{t_1}^j) \end{aligned} \quad (8)$$

となるが、ここで

$$\Delta \mathbf{a}^j = a_{t_2}^j - a_{t_1}^j, \quad \Delta \mathbf{x}^j = \mathbf{x}_{t_2}^j - \mathbf{x}_{t_1}^j \quad (9)$$

と置けば、(8)式は

$$\Delta \mathbf{p}_{lm} = \sum_{j=1}^n a_{t_1}^j \cdot \Delta \mathbf{x}^j + \sum_{j=1}^n \Delta \mathbf{a}^j \cdot \mathbf{x}_{t_2}^j \quad (10)$$

となる。

(10)式右辺第一項は、時点 t_1 と t_2 の間に各カテゴリーの分光反射特性の変化や照明光 (太陽光および天空光) の変化、そして温度変化による熱放射エネルギーの変化 (第 $(n+1)$ 成分) である。右辺第二項は、地点 (l, m) での各カテゴリーの混在比の変化に起因する変化分である。すなわち、右辺第二項の $(n+1)$ 成分 (熱赤外チャネル) が、混在比の変化によって生ずる見かけ上の熱放射エネルギーの変化 (したがって、見かけ上の温度変化) に対応する項である。

そこで

$$\Delta \mathbf{TP}_{lm} = \sum_{j=1}^n a_{t_1}^j \cdot \Delta \mathbf{x}^j, \quad \Delta \mathbf{aP}_{lm} = \sum_{j=1}^n \Delta \mathbf{a}^j \cdot \mathbf{x}_{t_2}^j \quad (11)$$

と置けば、(10)式は

$$\Delta \mathbf{p}_{lm} = \Delta \mathbf{TP}_{lm} + \Delta \mathbf{aP}_{lm} \quad (12)$$

となり、変化量 $\Delta \mathbf{p}_{lm}$ の中で真に変化したのは $\Delta \mathbf{TP}_{lm}$ であり、 $\Delta \mathbf{aP}_{lm}$ は混在比 $\mathbf{a}_{t_i} = (a_{t_i}^1, \dots, a_{t_i}^n)$ の変化に起因する見かけ上の変化となる。

以上より、本論文の目的は $\Delta \mathbf{p}_{lm}$ の第 $(n+1)$ 成分 ΔE_{lm} の中から、どのようにして $\Delta \mathbf{TP}_{lm}$ の第 $(n+1)$ 成分 $\Delta T E_{lm}$ のみを、しかも簡単に取り出すことができるであろうか、といい変えることができる。

3. 見かけ上の温度変化の除去法

3.1 必要とするいくつかの条件

ここで提案する手法は可視画像データを利用して熱赤外画像データを修正するものであるが、可視の画像にも、時点 t_1 と t_2 の間では多くの変動が生じている。

したがって、時点 t_1 と t_2 の可視画像をそのまま使用しても未知の変動成分が追加されるだけで、熱赤外画像を修正することはなおさら不可能となる。そのため、主に可視画像に対して、本手法を適用する際にあまり大きな制限とはならない範囲で、いくつかの条件を要求することにする。

【条件1】 対象とする地域に存在するカテゴリーの数はせいぜい n 種類 ($W_1, \dots, W_n$) であるとし、これは時点 t_1 と t_2 において変わらないものとする。ここに n は、熱赤外画像を除いた多重分光画像のチャンネル数でもある。

【条件2】 各カテゴリー W_j の可視における分光反射特性 $R_{t_i}^j(\lambda)$ は時点 t_1, t_2 では同一の特性であるとする。すなわち、 $\tilde{R}_{t_i}^j (i=1, 2; j=1, \dots, n)$ を時点 t_i におけるカテゴリー W_j の分光反射率のベクトル表現として

$$\tilde{R}_{t_1}^j = \tilde{R}_{t_2}^j \equiv \tilde{R}^j, \quad (j=1, \dots, n) \quad (13)$$

であるとする。このことは $\Delta \tilde{x}^j$ (Δx^j の可視成分) に含まれている、時点 t_1 と t_2 の間のこの地域への照明光の変動が修正できることを意味する。

すなわち、 $\tilde{I}_{t_i}$ をこの地域を時点 t_i に照明している光の分光強度ベクトルとすれば、各カテゴリーから反射される光の分光強度ベクトルが $\tilde{x}_{t_i}^j$ であるから

$$\tilde{x}_{t_i}^j = \tilde{R}_{t_i}^j \tilde{I}_{t_i}, \quad (i=1, 2; j=1, \dots, n) \quad (14)$$

が成立する。もちろん $\tilde{x}_{t_i}^j$ は可視の画像データとして与えられるものである。

さて、時点 t_1 と t_2 の間の照明光 $\tilde{I}_{t_i}$ を修正するとは

$$\tilde{I}_{t_2} = \tilde{L} \tilde{I}_{t_1}, \quad \tilde{L} = (L_k) \quad (15)$$

なる n 次の正方対角行列 $\tilde{L}$ を決定することである。そこで、 $\tilde{L}$ の n 個の対角要素 L_k を (13), (14) 式に基づいてすべてのカテゴリーのデータを使った最小2乗法によって決定しよう。

(13)~(15) 式より

$$\tilde{x}_{t_2}^j = \tilde{R}_{t_2}^j \tilde{I}_{t_2} = \tilde{L} \tilde{R}_{t_1}^j \tilde{I}_{t_1} = \tilde{L} \tilde{x}_{t_1}^j \quad (16)$$

$$\therefore \tilde{x}_{t_2}^j = \tilde{L} \tilde{x}_{t_1}^j, \quad (j=1, \dots, n) \quad (17)$$

すなわち (17) 式の第 k 成分は

$$x_{t_2}^{kj} = L_k x_{t_1}^{kj}, \quad (j, k=1, \dots, n) \quad (18)$$

となる。そこで、 z_k を

$$z_k = \sum_{j=1}^n \{x_{t_2}^{kj} - L_k x_{t_1}^{kj}\}^2 \quad (19)$$

と置けば、これを最小とするような L_k は

$$\partial z_k / \partial L_k = 0$$

より

$$\sum_{j=1}^n \{L_k (x_{t_1}^{kj})^2 - x_{t_1}^{kj} \cdot x_{t_2}^{kj}\} = 0$$

$$\therefore L_k = \frac{\sum_{j=1}^n x_{t_1}^{kj} \cdot x_{t_2}^{kj}}{\sum_{j=1}^n (x_{t_1}^{kj})^2}, \quad (k=1, \dots, n) \quad (20)$$

により与えられる。

【条件3】 カテゴリー W_j の放射率 $\varepsilon_{t_i}^j$ は、時点 t_1 と t_2 では等しいものとする。すなわち

$$\varepsilon_{t_1}^j = \varepsilon_{t_2}^j \equiv \varepsilon^j, \quad (j=1, \dots, n) \quad (21)$$

なる条件を仮定する。

さて、上記の条件 [2], [3] は時間区間 $\Delta t = t_2 - t_1$ が短い場合には成立しているとしてよいが、逆に短い Δt の時間区間内では、地点 (l, m) の混在比の変化 $\Delta \alpha = (\Delta \alpha^1, \dots, \Delta \alpha^n)$ は、ほとんど零であると考えられる。したがって、この場合の熱放射エネルギーの差 ΔE_{lm} は真の温度変化に対応した量であると考えてよいので本手法を適用するまでもない。

一方、自然界の変化は一年を周期としているから

$$t_2 \equiv t_1 + r t_c, \quad (t_c = 1 \text{ year}; r = 0, \pm 1, \dots, \pm r_0) \quad (22)$$

なる時点 t_1, t_2 は同季節となっている。したがって、このような関係にある2時点に対しては、植物を含むほとんどの地上対象物について上記条件 [2], [3] の成立が期待できる。しかもこのような時間区間の場合には、時間間隔が大きいために $\Delta \alpha = 0$ の成立は考えにくいのが普通であるから、 $\Delta \alpha$ に関する修正が要請される。すなわち、本手法が有効に適用できるのは、特に人工建造物の多い地域でないならば、(22) 式で与えられるような時点 t_1, t_2 に収集された画像データに対してであることがわかる。

3.2 外積演算による見かけ上の温度変化の除去法

(20) 式により得られた対角行列 $\tilde{L} = (L_k)$ を使えば、時点 t_1 に収集された画像データ $\mathbf{p}_{lm}^{t_1}, \mathbf{x}_{t_1}^{t_1}$ は、そのときの可視光の照明 $\tilde{I}_{t_1}$ を時点 t_2 での照明に合せた場合の画像データ $\mathbf{p}_{lm}^{t_2}, \mathbf{x}_{t_2}^{t_2}$

$$\mathbf{p}_{lm}^{t_2} = \tilde{L} \mathbf{p}_{lm}^{t_1}, \quad \mathbf{x}_{t_2}^{t_2} = \tilde{L} \mathbf{x}_{t_1}^{t_1} \quad (23)$$

へと変換できる。ここに $\tilde{L}$ は

$$\tilde{L} = \begin{pmatrix} \tilde{L} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

なる $(n+1)$ 次の対角行列である。

このようにして、時点 t_1 における画像データを $\mathbf{p}_{lm}^{t_1}$ の代りに照明光に関して (23) 式のように変換された画像データを使用するならば、(8), (9) 式で与えたそれぞれの差は

$$\Delta \mathbf{p}_{lm} = \mathbf{p}_{lm}^{t_2} - \mathbf{p}_{lm}^{t_1} = \mathbf{p}_{lm}^{t_2} - \tilde{L} \mathbf{p}_{lm}^{t_1} \quad (25)$$

$$\Delta \mathbf{X}^j = \mathbf{x}_{t_2}^{t_2} - \mathbf{x}_{t_1}^{t_1} = \mathbf{x}_{t_2}^{t_2} - \tilde{L} \mathbf{x}_{t_1}^{t_1} \quad (26)$$

となる。これらより (10)~(12) 式はそれぞれつぎのよ

うに変更される。まず

$$\Delta \mathbf{P}_{lm} = \sum_{j=1}^n a_{t_1}^j \cdot \Delta \mathbf{X}^j + \sum_{j=1}^n \Delta a^j \cdot \mathbf{x}_{t_2}^j \quad (27)$$

ここで

$$\Delta \mathbf{rP}_{lm} = \sum_{j=1}^n a_{t_1}^j \cdot \Delta \mathbf{X}^j \quad (28)$$

と置けば、(27)式は

$$\Delta \mathbf{P}_{lm} = \Delta \mathbf{rP}_{lm} + \Delta \mathbf{aP}_{lm} \quad (29)$$

となる。

さて、(17)、(26)式より

$$\Delta \tilde{\mathbf{X}}^j = 0, \quad (j=1, \dots, n) \quad (30)$$

$$\therefore \Delta \mathbf{rP}_{lm} = 0 \quad (31)$$

であることがわかる。すなわち $\Delta \mathbf{rP}_{lm}$ は

$$\Delta \mathbf{rP}_{lm} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \Delta T E_{lm} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

となっている。ここに $\Delta T E_{lm}$ は、[条件3]の仮定より

$$\begin{aligned} \Delta T E_{lm} &= \sum_{j=1}^n a_{t_1}^j \cdot \Delta E_{t_1}^j \\ &= \sum_{j=1}^n a_{t_1}^j \varepsilon^j \alpha (T_{j t_2} - T_{j t_1}) \end{aligned} \quad (33)$$

である。すなわち、 $W_j (j=1, \dots, n)$ が混在している地点 (l, m) での、各カテゴリーの真の温度変化に起因する熱放射エネルギーの総和の時点 t_1, t_2 に対する変化量が $\Delta T E_{lm}$ であり、通常はこれを温度に換算した大きさで、地点 (l, m) の真の温度変化としている。

一方、 $\mathbf{P}_{lm}$ の混在比の変化に起因する変化量 $\Delta \mathbf{aP}_{lm}$ は(11)式から明らかのように、 $\Delta \mathbf{a} = (\Delta a^1, \dots, \Delta a^n)$ を係数とした $(n+1)$ 次元ベクトル $\mathbf{x}_{t_2}^j (j=1, \dots, n)$ の1次結合により与えられていることがわかる。したがって、(27)式または(29)式の両辺に $\mathbf{x}_{t_2}^1 \wedge \dots \wedge \mathbf{x}_{t_2}^n$ を外積^{2), 3)} することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}_{lm} \wedge (\mathbf{x}_{t_2}^1 \wedge \dots \wedge \mathbf{x}_{t_2}^n) \\ &= \Delta \mathbf{rP}_{lm} \wedge (\mathbf{x}_{t_2}^1 \wedge \dots \wedge \mathbf{x}_{t_2}^n) \\ &= \Delta T E_{lm} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge \mathbf{x}_{t_2}^1 \wedge \dots \wedge \mathbf{x}_{t_2}^n \end{aligned} \quad (34)$$

$$\therefore \Delta T E_{lm} = \frac{\Delta \mathbf{P}_{lm} \wedge \mathbf{x}_{t_2}^1 \wedge \dots \wedge \mathbf{x}_{t_2}^n}{\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge \mathbf{x}_{t_2}^1 \wedge \dots \wedge \mathbf{x}_{t_2}^n} \quad (35)$$

すなわち、地点 (l, m) の真の温度変化によって生じた熱放射エネルギーの変化量は(35)式に示した外積演算によって求めることができる。

(35)式によって求めた熱放射エネルギーの時間 t_1 ,

t_2 での変化量 $\Delta T E_{lm}$ を対応する温度変化にまでもとずには、放射率を知らなければ正確な温度変化の算出はできない。もちろん、おのおのの地点の放射率が未知であることがこのような処理法を必要とするのであったから、正確な温度変化の大きさは得られない。しかし、温度変化を定性的に評価するような場合には $\Delta T E_{lm}$ をパターンとして表示しただけでも実用上十分であることが多く、広域環境のパターンによる表示がリモートセンシングのもつ大きな特徴であることを考えれば、必ずしも温度差にまで変換したパターンでなければならないことはない。このことについては、次章に示した実験例からも理解されることであろう。

4. 実験例

3章に述べた理論に基づいて実際のデータ処理を行う。ただし、現実には収集されたりリモートセンシング多重分光画像データに本理論を適用しても、検証に十分耐えうるグラントルースによる地上データなどを得ることが困難なため、ここでは以下に述べるようなモデル実験を行った。

まず、放射率の異なるいくつかの対象物として、アルミ板、銅板、およびそれらのカラー塗装板を準備し、これらをヒーターにより加熱することで、空間的温度パターンの時間的変化を起した。

Fig. 1 は時点 t_1, t_2 において実際に設定した温度パターンであり、横軸がリモートセンシング画像のある走査線に対応する。Fig. 1 に示した対象表面温度 $T_{ca t_1}, T_{ca t_2}$ はクロメル・アルメルのシート状熱電対を用いて直接測定したものであるから、真の温度パターンである。(ただしこの図面では、区間 A, B の境界で t_1 と t_2 において設定した温度パターンが混乱しないように、わずかにずらしておいた)。

一方、時点 t_1, t_2 における各区間 (A, B, C) の放射率は

$$\begin{aligned} \text{時点 } t_1: & \quad \varepsilon_{A t_1} = 1 \quad \varepsilon_{B t_1} = 1 \quad \varepsilon_{C t_1} = 0.3 \\ & \quad (\text{カラー塗装}), (\text{カラー塗装}), (\text{アルミ板}) \\ \text{時点 } t_2: & \quad \varepsilon_{A t_2} = 0.3 \quad \varepsilon_{B t_2} = 1 \quad \varepsilon_{C t_2} = 1 \\ & \quad (\text{アルミ板}), (\text{カラー塗装}), (\text{カラー塗装}) \end{aligned}$$

のように設定した。

温度および放射率を以上のように設定した対象を、MSS センサの熱赤外チャネルとみなしたポータブル放射温度計で測定した表面温度パターンが Fig. 2 に示した $T_{ir t_1}, T_{ir t_2}$ である。

つぎに、Fig. 1, Fig. 2 より、時点 t_1, t_2 における真の温度変化パターン $\Delta T_{ca} = T_{ca t_2} - T_{ca t_1}$ 、および放射温度計による測定から得られた見かけ上の温度変化

Fig. 1 True surface temperature patterns at t_1 and t_2 (measured by a sheet type CA thermocouple sensor)

Fig. 2 Remotely sensed surface temperature patterns at t_1 and t_2 (measured by a portable type infrared thermometer)

Fig. 3 Difference patterns between patterns at t_1 and t_2

$\Delta T_{ir} = T_{ir}^{t_2} - T_{ir}^{t_1}$ を求めると、Fig. 3 のようなパターンとなる。

すなわち放射温度計が示した、時点 t_1, t_2 間の温度変化は、区間 A では時点 t_1 から t_2 にかけて大きな温度上昇があったにもかかわらず、大きな温度変化はなかった（または多少、温度が低下した）と教えている。区間 B も区間 A と同様の変化であり、ほぼ温度変化なしと教えているが、実際には大きく温度が低下

Fig. 4 Irradiance patterns calculated from Fig. 2

した区間である。区間 C は、真の温度変化が温度下降であるにもかかわらず、放射温度計による測定結果は大きな温度上昇があった区間となっている。

このように、放射温度計が示した温度変化はすべての区間でまったく見当違いの結果を示しているだけでなく、正反対の結果を示すこともありうる。結局、単純な差を求めても、対象の温度変化についての確実な情報は得られず、何らかの修正を行わなければ、温度変化を定性的に評価することさえ不可能であることが理解されるであろう。

そこで、これらのデータを本手法により修正するのであるが、一般にリモートセンシング熱赤外面像のデータがセンサに入射したエネルギーで与えられることや本理論では熱放射エネルギーで定式化していることから Fig. 2 に示した実測温度パターンを対応する熱放射エネルギーへと変換したのが Fig. 4 に示した $E_{ir}^{t_1}, E_{ir}^{t_2}$ のパターンである。すなわち、これらは MSS が観測する放射照度に対応している。

つぎに、すでに示したように本手法は可視チャンネルの画像データが重要な役割をする。MSS による画像データの収集では、可視と熱赤外の画像データは同時に収集されるが、この実験では分光反射率計を用いて、チャンネルを切換えながら必要回だけ対象を走査させて可視パターンを測定した。Fig. 5 (a), (b) はそれぞれ時点 t_1, t_2 における可視チャンネルの測定値である。

このようにして得られた熱赤外および可視の、時点 t_1, t_2 における多重分光画像データの単純な差を求めたのが Fig. 6 のパターンであり、(25), (27) 式の ΔP_{im} である。Fig. 6 における ΔE_{im} は ΔP_{im} の第

Fig. 5 Visible patterns measured by a portable Spectroradiometer
(a) Visible patterns at t_1
(b) Visible patterns at t_2

Fig. 6 Difference patterns of visible and irradiance patterns calculated from Fig. 4, Fig. 5 (a) and (b)

$(n+1)$ 成分であるが、これは熱放射エネルギーの、単なる t_1, t_2 間の差のパターンであるから、このパターンが与える情報はすでに述べた Fig. 3 の ΔT_{ir} と ΔT_{ea} の関係と同じである。

そこで各カテゴリーの分光ベクトル $x_{t_i}^j$ を定め、(35)式の計算によって得られたパターンが Fig. 7 の $\Delta T_{E_{lm}}$ である。すなわち、時点 t_1, t_2 間の真の温度変化パターン ΔT_{ea} に対して、Fig. 7 の ΔE_{lm} は単に差を求めただけのパターンであり、 $\Delta T_{E_{lm}}$ は本理論によって補正したパターンである。これらの3パターンを比較すれば明かなように、 $\Delta T_{E_{lm}}$ のパターンは真の温度変化の情報を正しく与えており、 ΔT_{ea} と

Fig. 7 Difference patterns —original and reformed—

ΔT_{ir} のパターンの間に見られたような相違はまったくないことが確認されよう。

5. おわりに

時間的な温度変化の情報は重要な熱的環境情報の一つであるが、熱赤外面像の単なる差の画像を求めても正しい情報が得られるとは限らない。それどころか、条件によってはモデル実験でもみたように、真の温度変化とは正反対の情報を得てしまうことにもなりかねない。しかも、熱赤外面像だけでは、その温度差パターンの真偽は明らかにできない。

そこで本論文では、外積演算による温度差画像の修正法を提案し、実験により本手法の妥当性と有効性を確認した。ただし、現実のマルチテンポラル多重分光画像データに適用した場合の有効性は、本手法が要求している諸条件がどれだけ満たされているかに依存することになる。それゆえ、これらの条件が現実にはどれだけ満足されているか、また、実際の熱赤外面像データを本理論によって処理した結果を確認するためのグランドトゥースをどのように行うか⁴⁾、そして、適用条件をもっとゆるめることはできないかなど、今後に残された検討事項も多いと考えている。

一方、本手法の特徴としては、(35)式からもわかるように、各画素ごとに異なる複数カテゴリーの混在比やその時間的な変化をまったく知る必要がないことである。このことは、処理時間の短縮に関係するもので、大量のデータ処理を必要とする画像処理においては実用上からも重要な事項である。また本理論は可視の多重分光画像データを活用しているのも特徴の一つである。従来は、熱的情報を得る場合に可視の画像データ

はほとんど利用されていなかったが，ここでは，画像の物理的内容の異なるこれらの画像の混合演算処理から，物理的な意味も明瞭でしかも有意義な画像を得ている．

参考文献

- 1) 稲村，豊田，藤村：多重分光画像のベクトル表現とその演算処理，計測自動制御学会論文集，14-5，598/603 (1978)
- 2) W. Greub; Multilinear Algebra, 2nd ed., 96/147, Springer-Verlag (1978)
- 3) 横沼：テンソル空間と外積代数，岩波基礎数学講座，(1977)
- 4) 藤村，他：熱赤外面像からの温度推定における問題(2)，第5回リモートセンシング・シンポジウム資料，35/38 (1979)