

気象衛星画像の赤外画像と水蒸気画像から計算する 高層のオプティカルフロー

杉村 敦彦 *1 · 長 篤志 *2 · 三池 秀敏 *2

Optical Flow Estimation of Upper Air Current from Meteorological Satellite Image Sequences

Atsuhiko SUGIMURA *1, Atsushi OSA *2 and Hidetoshi MIIKE *2

ABSTRACT

Estimating upper air current velocity is important to fix the initial values in numerical weather forecasting. We tried to estimate optical flow of upper air current from infrared images and water vapor images in meteorological satellite (GMS-5) image sequences. An originally developed gradient-based method is adopted to evaluate optical flow under non-uniform and non-stationary illumination. The method combines a spatiotemporal local optimization and a stabilization method using reliability indices of optical flow. Through comparison between optical flows estimated from water vapor images and from infrared images, we confirmed that vapor images well-reflected upper air current. Upper air current is estimated from a processed sequence of infrared images by eliminating gray values at respective pixels having a lower gray-level (higher temperature) than a threshold. We confirmed a high correlation between optical flows excepting for winter season. We found that a periodic temperature variation from day to night brought an artifact in optical flow evaluation, especially on a continent. Compensation of the periodic temperature variation brought a higher correlation between optical flows. A possible method is discussed to separate lower air current from upper air one using infrared satellite image sequences.

Key Words : Optical Flow, Meteorological satellite images, Image sequence processing

1. まえがき

気象衛星 (GMS-5) 画像から雲をトレーサとして風ベクトルを推定するには、パターン追跡や時空間微分法 (グラディエント法) などによる PIV (Particle Image Velocimetry) による方法が用いられている¹⁾⁻³⁾。これらの手法では、画像中で雲のない部分は風ベクトルを計算できない。また、赤外画像の各画素の輝度値から上層の雲だけを切り出した場合、雲のない部分はさらに多くなり、計算できない領域は増加する。なお、気象衛星から得られる画像は、1時間ごとであり、時間分解能が粗く、空間的にも数 km/pixel と粗い。このような画像に対して、オプティカルフローの計算に従来のグラディエント法を用いると、計算精度が悪くなる。しかし、従来のグラディエント法に空間的、時間的な照明の不均一項を取り入れ、さらに信頼性指標により滑らかにする方法により、比較的滑らかなオプ

ティカルフローが計算できる⁴⁾。この計算方法により、取り出した高層の雲だけから画像全体で比較的滑らかなオプティカルフローを計算することができた。このようにして求めたオプティカルフローと、気象庁のレーウィンゾンデの観測結果⁶⁾との比較を行った。使用した画像は、高知大学のウェブサーバに保存されている、赤外画像 (10.5~11.5 μm) と水蒸気画像 (6.5~7.0 μm) である⁵⁾。また、比較的高層の大気の動きを反映していると思われる水蒸気画像から計算したオプティカルフローと高層の雲だけを切り出した赤外画像から計算したオプティカルフローの比較も行った。その結果、赤外画像から高層の雲だけを切り出す場合、冬期は陸地表面温度の 24 時間周期振動が悪影響を及ぼすことが分かった。そのため、赤外画像からオプティカルフローを計算する前に、全画素の時間方向の DFT と IDFT 処理により、周波数領域で 24 時間周期振動を第 3 高調波まで除去した。これにより、

*1 情報電子工学科

*2 山口大学

陸地表面温度の24時間周期振動による悪影響は改善されることが分かった。このように、気象衛星画像から各層における画像全体のオプティカルフローが計算できると、数値計算による気象シミュレーションの初期値などへの応用が可能と考える。なお、次期の気象衛星においてもGMS-5と同様の観測チャンネルが予定されているため、本手法によるオプティカルフローの計算方法が有効である。

2. オプティカルフローの計算方法

2.1 グラディエント法の基本式と信頼性指標

画像の濃淡値を画像関数 $f(x, y, t)$ で表現すると、グラディエント法の基本式は以下ようになる。

$$f_t = -f_x u - f_y v \quad (1)$$

ここで、 u, v は、オプティカルフローの x 成分、 y 成分であり、 f_t, f_x, f_y は、それぞれ画像関数の t, x, y の偏微分である。速度成分 u, v は $L \times M$ (pixels)の局所領域では一定だと仮定し、その値を次式の値が最小になるようにして求めることができる。

$$E = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} (f_x u + f_y v + f_t)^2 \quad (2)$$

太田は、画像のテクスチャに関するオプティカルフローの信頼性指標を提案した⁷⁾。オプティカルフロー(u, v)は大きさ A と角度 θ を持つとすれば、以下のように表せる。

$$u = A \cos \theta \quad (3)$$

$$v = A \sin \theta \quad (4)$$

上式を用いると、式(1)は次のように変形できる。

$$f_t = -f_x A \cos \theta - f_y A \sin \theta \quad (5)$$

局所領域 $L \times M$ (pixels)における f_t の積分、 F_t は次のようになる。

$$F_t = -A \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} (f_x \cos \theta + f_y \sin \theta) \quad (6)$$

太田は、オプティカルフローは F_t のノルム、 $\|F_t\|$ で決定されるため、同じ A のもとでは、より大きな $\|F_t\|$ の方がオプティカルフローが決定されやすいことを示した。そのため、決定したオプティカルフローの信頼性は、 $\|F_t\|$ の A に対する比で評価することができる。

$$R = \frac{\|F_t\|}{A} \quad (7)$$

2.2 照明の不均一と信頼性指標を用いた安定化処理

Zhangらは、式(1)に照明の不均一項を追加し、以下のように拡張した⁸⁾。

$$f_t = -f_x u - f_y v + f w \quad (8)$$

ここで、 $w(x, y, t)$ は、未知の照明項である。この式をZhangらは時空間局所最適化法における拡張した拘束式(ESTO)とした。

長らは、前述の太田の信頼性指標をESTO法に拡張した⁹⁾。その方法について、概略を以下に紹介する。ESTO法における u, v, w は、ベクトル V_{ESTO} の要素として表すことができる。 B が V_{ESTO} の大きさと、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が V_{ESTO} とそれぞれとの角度のとき、 u, v, w は次のように表せる。

$$u = B \cos \theta_1 \quad (9)$$

$$v = B \cos \theta_2 \quad (10)$$

$$w = B \cos \theta_3 \quad (11)$$

今、局所領域を $L \times M$ (pixels) $\times N$ (frames)とし、その中では速度ベクトルは同じとすると $\|F_t\|$ は以下のようになる。

$$\|F_t\| = \|B \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (f_x \cos \theta_1 + f_y \cos \theta_2 - f \cos \theta_3)\| \quad (12)$$

このとき、 R と R^2 は次のようになる。

$$R = \frac{\|F_t\|}{B} \quad (13)$$

$$R^2 = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (f_x \cos \theta_1 + f_y \cos \theta_2 - f \cos \theta_3)^2 \quad (14)$$

$$= [\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3] \begin{bmatrix} a & d & e \\ d & b & h \\ e & h & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(15)中の記号は以下のものを表す。

$$\begin{aligned} a &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_x^2, & b &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_y^2 \\ c &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^2, & d &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_x f_y \\ e &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_x f, & h &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_y f \end{aligned} \quad (16)$$

式 (15) は次のように変形できる。

$$R^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

ここで、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$) は係数配列の固有値で、 e_1, e_2, e_3 はそれぞれ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ に対応する単位長固有ベクトルである。ここで、以下のパラメータ r_1, r_2, r_3 を信頼性指標として用いる。

$$r_1 = \sqrt{\lambda_1} e_1 \quad (18)$$

$$r_2 = \sqrt{\lambda_2} e_2 \quad (19)$$

$$r_3 = \sqrt{\lambda_3} e_3 \quad (20)$$

r_1 は直交座標系で最も信頼できる方向を示し、 r_3 は最も信頼できない方向を示す。これらの信頼性指標 r_1, r_2, r_3 を用いて ESTO 法で推定した V_{ESTO} を修正することにより、安定化する。画像平面 V の中で最小化される誤差関数 E_s を次のように定義する。

$$E_s(u, v, w) = S_r + \beta S_{s1} + \gamma S_{s2} \quad (21)$$

β と γ は定数である。 S_r はペナルティ関数で、 S_{s1}, S_{s2} は安定化関数であり、次の式で表される。

$$S_r = \int_V (r_1 \cdot \Delta v)^2 + (r_2 \cdot \Delta v)^2 + (r_3 \cdot \Delta v)^2 dx dy \quad (22)$$

$$S_{s1} = \int_V \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (23)$$

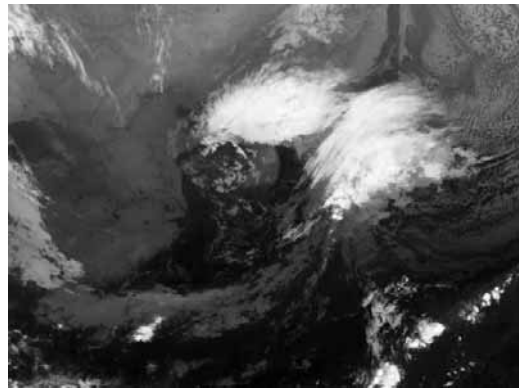
$$S_{s2} = \int_V \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (24)$$

$$\Delta v = (u - u', v - v', w - w') \quad (25)$$

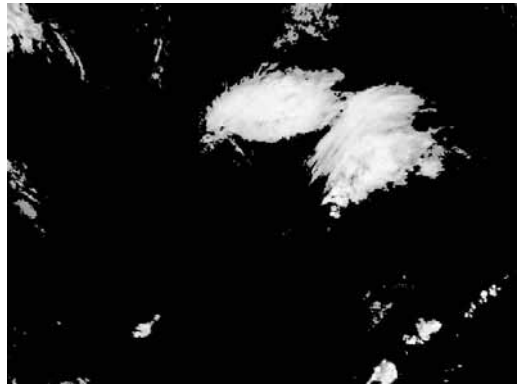
u', v', w' は ESTO 法によってあらかじめ決定され、変分法を用いて u, v, w を求める。

3. 赤外画像からの切り出しとオプティカルフローの計算

赤外画像は、波長 $10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$ のデータを元に構成されている。そのため、夜間でも雲の様子が分かると同時に、雲の温度も反映している。この波長は熱赤外線とも呼ばれ、温度が低いと放射量が減り、温度が高いと放射量が増える。赤外画像は白黒濃淡画像 (256 階調) で、この波長の放射量の少ない部分が明るく (高輝度)、放射量の多い部分が暗く (低輝度) になっている。そのため、赤外画像では、低層にある雲は雲頂温度が



(a) Original image



(b) Intensity 150-255

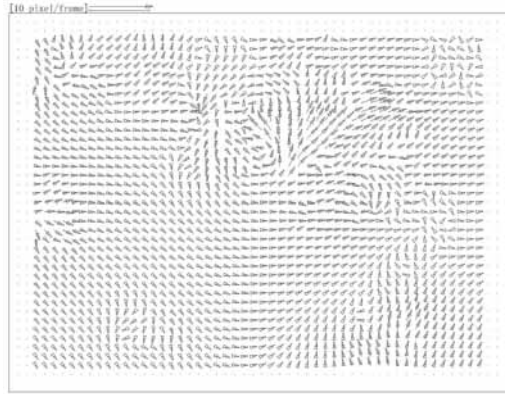
図-1 赤外画像 (2001年10月10日6:00)

比較的高いため暗く見え、高層にある雲の雲頂温度は低いため明るく (白く) 見える。そこで、ある輝度値を閾値として設定し、それ以下の値の部分と、それ以上の部分に分けることにより、低層の雲と高層の雲の画像に分離することが可能である。このようにして切り出した画像から、高層の雲の動きを計算した。図 1 に 2001 年 10 月 10 日午前 6 時の赤外画像から切り出した様子を示す。同様にして切り出した同日の午前 2:00~10:00 の 9 枚の画像から計算したオプティカルフローを図 2 (b) に示す。利用した画像の大きさは、 160×120 (pixels) である。なお比較のために、図 2 (a) に従来の局所最適化法で計算したオプティカルフローを示す。

同様にして求めた 9:00 のオプティカルフローと、気象庁のレーウィンゾンデの観測との比較を表 1 と、図 3 に示す。風向を示す数字は、北を 0 として、時計まわりに増加し、一周すると 360 である。オプティカルフローの風向は、観測地近傍の 9 点のデータを平均した値である。レーウィンゾンデの風向は高度約 $5000 \sim 10000\text{m}$ の平均とした。その結果、風の安定し



(a) Spatiotemporal local optimaization



(b) New method

図-2 オプティカルフロー (輝度値 150 以上)

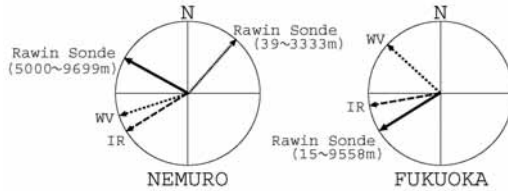


図-3 レーウィンゾンデとの風向の比較

ている福岡ではよく一致し、風が乱れている根室でも比較的よい一致がみられる。なお、このとき、根室においては、高度 3000m までの風向の平均は 41.18 と、5000m 以上の風向とは大きく異なっていた。

4. 水蒸気画像から計算したオプティカルフローとの比較

水蒸気画像は、ジェット気流の動きが見えることなどから、比較的高層の大気の動きを反映していると考えられる。そこで、高層の雲を取り出した赤外画像から計算したオプティカルフローと水蒸気画像から計算

表-1 2001 年 10 月 10 日 9:00 の風向

NEMURO		
Rawin Sonde	41.18	(39~3333m)
	299.54	(5000~9699m)
Infrared	238.33	
Water Vapor	252.22	

FUKUOKA		
Rawin Sonde	238.17	(15~9658m)
Infrared	260.54	
Water Vapor	312.57	

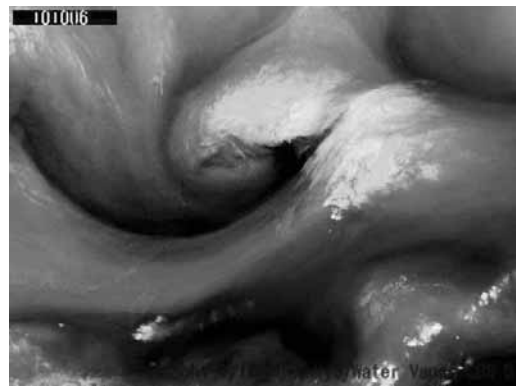


図-4 水蒸気画像

したオプティカルフローの比較を行った。前述の赤外画像と同じ 2001 年 10 月 10 日 6:00 の水蒸気画像を図 4 に示す。高知大学のウェブサーバが提供している水蒸気画像は、カラーの陸地データが重ねられている。その陸地データはオプティカルフローを計算する際に悪影響を及ぼす場合がある。そのため、提供されている水蒸気画像を白黒濃淡画像に変換し、さらに重畳されている陸地データを差し引いた画像が、図 4 である。陸地データは、一年間の水蒸気画像の各画素において、最低の値を求めることで推定した。同様の処理を行った画像を用いて計算したオプティカルフローを図 5 に示す。

次に、水蒸気画像から計算したオプティカルフローと、高層の雲だけを取り出した赤外画像から計算したオプティカルフローの類似性について評価した。評価において、特にその方向に注目し、次の式を用いて対応する個々の画素におけるオプティカルフローの類似性を数値化した。

$$\frac{\vec{v}_{IR} \cdot \vec{v}_{wv}}{\|\vec{v}_{IR}\| \|\vec{v}_{wv}\|} \quad (26)$$

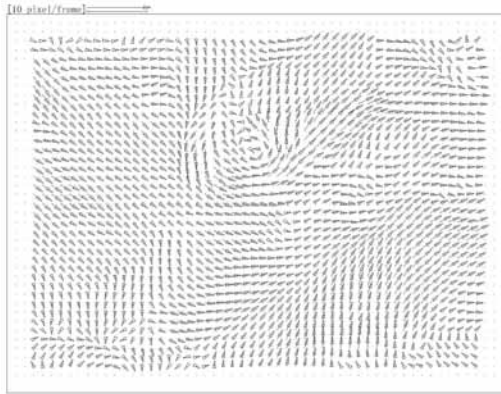
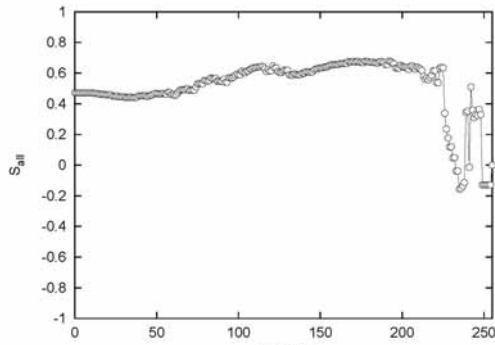
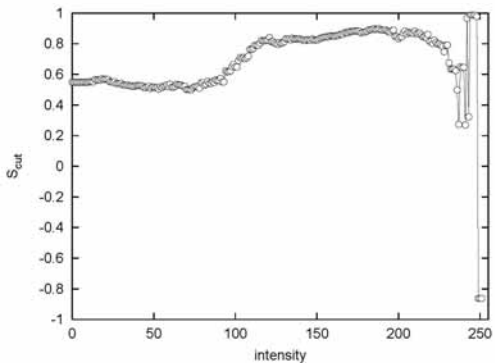


図-5 水蒸気画像から計算したオプティカルフロー



(a) An entire image



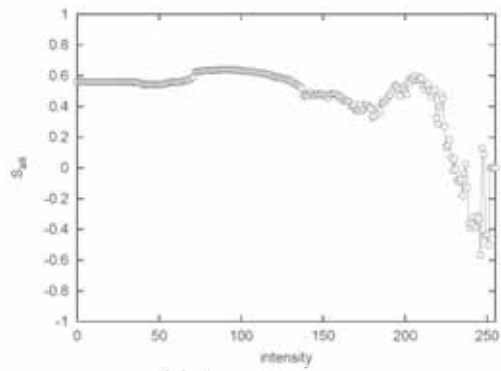
(b) Extract parts

図-6 類似性 (2001年10月10日)

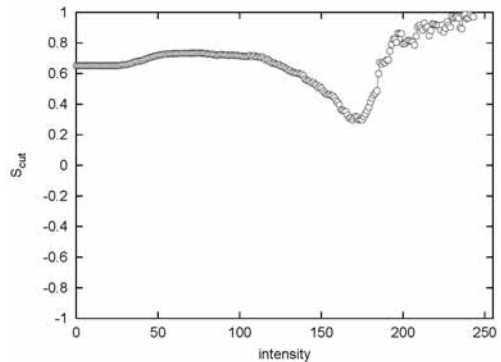
\vec{v}_{IR} :赤外画像から計算した速度

\vec{v}_{WV} :水蒸気画像から計算した速度

式 (26) は、二つの速度ベクトルの内積を計算するもので、方向が完全に一致していれば、1になる。この式で、各画素の速度ベクトルの類似性を計算し、全画素の値を合計し、最大値で正規化した値を S_{all} とする。この S_{all} を赤外画像から切り出す閾値を 0~255 のすべての場合について評価を行った。その結果を



(a) An entire image



(b) Extract parts

図-7 類似性 (2001年12月10日)

図 6 (a)、図 7 (a) に示す。また、画像全体ではなく、赤外画像から切り出した部分だけの評価も同時に行った。これは、切り出した画像中で実際に雲のある部分で比較を行うためである。この場合、閾値によって切り出される画素数が異なるため、総合計を切り出した画素数で割った値 S_{cut} を評価に用いた。その結果を図 6 (b)、図 7 (b) に示す。

10月においては、切り出す閾値を大きくするに従って赤外画像から計算したオプティカルフローと水蒸気画像から計算したものと類似性が高くなっている。特に切り出した部分だけの比較では、150~200 で良い結果を得ている。なお、200 を越えると赤外画像から切り出される画素数が極端に少なくなるため、データとしての信頼性は低くなる。以上のことは、高層の雲を切り出した赤外画像から計算したオプティカルフローと、水蒸気画像から計算したものがよく一致することの現れであると考えられる。この傾向は、10月だけではなく、他の月でも同様の傾向が見られた。しかし、12月~2月の冬期においては、異なった現象が見られる。図 7 を見ると、150~200 の間で、逆に類似性が悪くなっている。特に切り出した部分だけの評価でそ

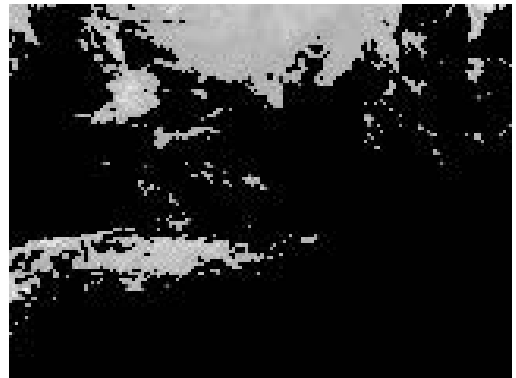
の現象が強く見られる。これは、切り出した赤外画像から計算したオプティカルフローと水蒸気画像から計算したものの類似性が悪いことを示している。その原因は、陸地表面の温度変化にある。赤外画像は地表や海面からの熱放射も反映している。そのため、冬の夜間に陸地表面温度が極端に下がると、赤外画像では白く見え、高層の雲と区別ができなくなる。さらに、日中太陽光によって地表の温度は南側から上昇をはじめ、温度上昇は徐々に北側へ移動する。その様子を図8に示す。この雲の動きとは関係ないオプティカルフローが検出されるため、水蒸気画像から計算したものの類似性が悪くなる。

5. 陸地表面の24時間周期振動の除去

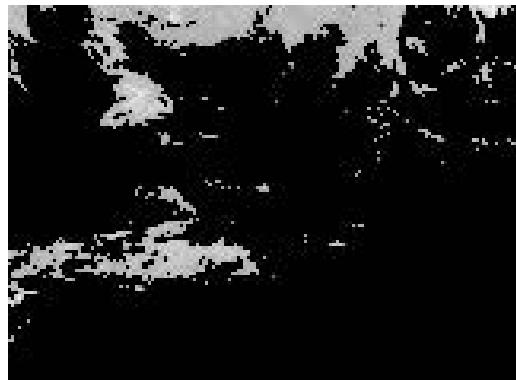
冬期は、陸地表面(特に大陸北部)の温度が低くなり、赤外画像において、雲と同程度の輝度となって画像中に現れる。さらに、夜間に低温となった部分は日中は暖かくなり、低温部分が、南から北へと狭くなる。陸地表面のこの温度変化は、各画素で時間方向に見れば24時間の周期を持っている。図9に2001年12月1日の赤外画像を示す。画像中に白の矢印と点で示した画素の10日間の輝度値変化を図10に示す。同じ場所の8月の輝度値変化を図11に示す。

8月にも、24時間周期の輝度値変化は見られるが、その値が低いため、150以上で切り出す場合には問題ない。しかし、12月においては、150~170にかけて切り出す場合、陸地表面の温度変化の付近と重なってしまう。そこで、赤外画像から切り出す前に、前後9日間の画像を用いて、各画素の時間変化をDFTとIDFTにより、24時間の周期を、第3高調波まで取り除く処理を行った。図10が、9日間の時間変動で、図12が、DFTの結果である。図13は、24時間周期の基本波と第2、第3高調波で構成される信号である。図14は、24時間周期を第3高調波まで除去した結果である。

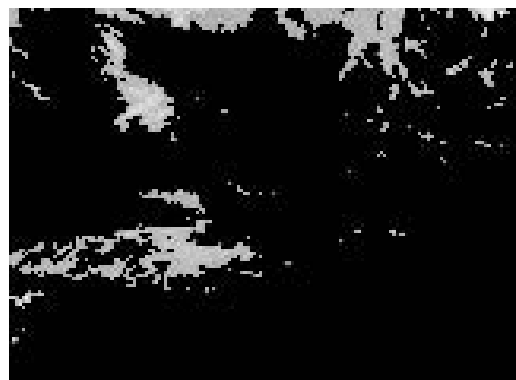
地表温度の24時間周期振動を取り除いた赤外画像を用いて計算したオプティカルフローと水蒸気画像から計算したものの比較を図15に示す。図15(a)が画像全体で評価したもので、図15(b)が、赤外画像で切り出した部分だけで評価したものである。○がDFT、IDFT処理をしていない画像で計算した結果で、●が処理した画像を用いた場合である。その結果、類似性が改善することが確認できた。なお、図15(a)において、閾値200以上で相関が逆に悪くなっている部分がある。これは、閾値200以上では、赤外画像から切り出される雲の画素数が極端に少なくなるため、切り出した赤外画像から計算するオプティカルフローの信



(a)9:00



(b)10:00



(c)11:00

図-8 輝度値170以上(2001年12月10日)

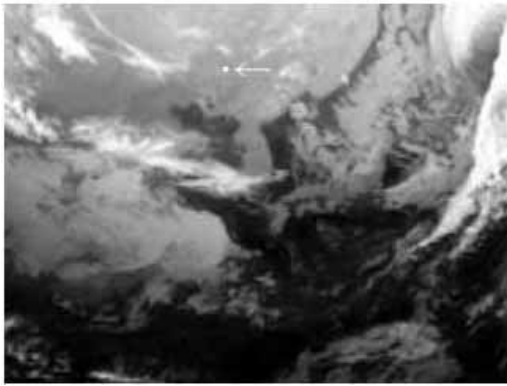


図-9 2001年12月1日 0:00

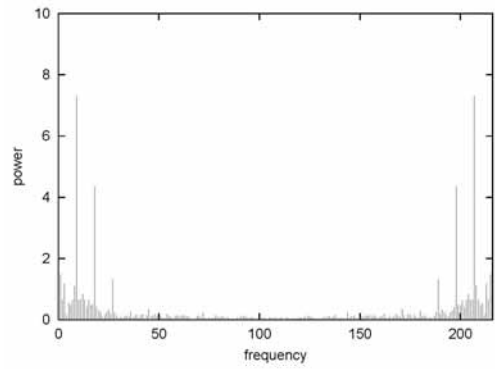


図-12 DFTの結果

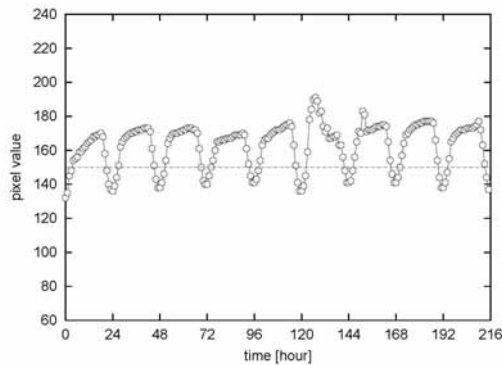


図-10 2001年12月2日 14:00~11日 13:00

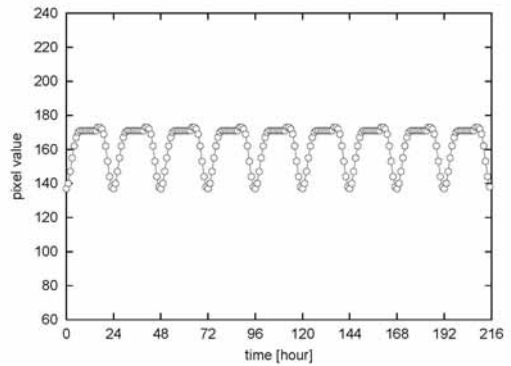


図-13 24時間周期の基本波、第2、第3高調波の合成

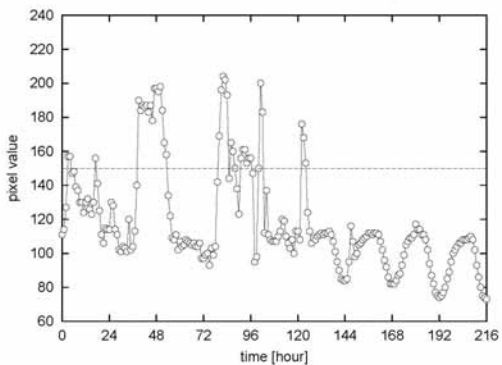


図-11 2001年8月2日 14:00~11日 13:00

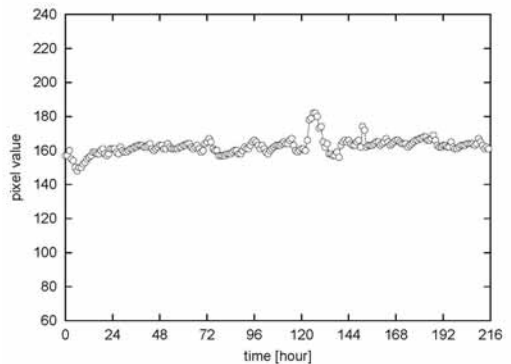


図-14 第3高調波まで除去した結果

頼性が無いためと考える。また、この24時間周期振動は、低層のオプティカルフローを計算する際には、冬期以外でも悪影響を及ぼすことが予想される。

6. おわりに

従来のグラディエント法に空間的、時間的な照明の不均一項を取り入れ、信頼性指標により滑らかにする方法により、気象衛星画像から比較的滑らかなオプティカルフローを求めることができた。その中でも、

赤外画像においては、ある輝度値で切り出すことによって、高層のオプティカルフローを画像全体において求めることができた。なお、赤外画像における陸地表面温度の24時間周期振動による悪影響は全画素の時間方向のDFTとIDFTによる処理で改善できることが分かった。以上のことから、赤外画像を利用して低層から高層の各層において画像全体のオプティカルフローが計算できる可能性が広がったといえる。

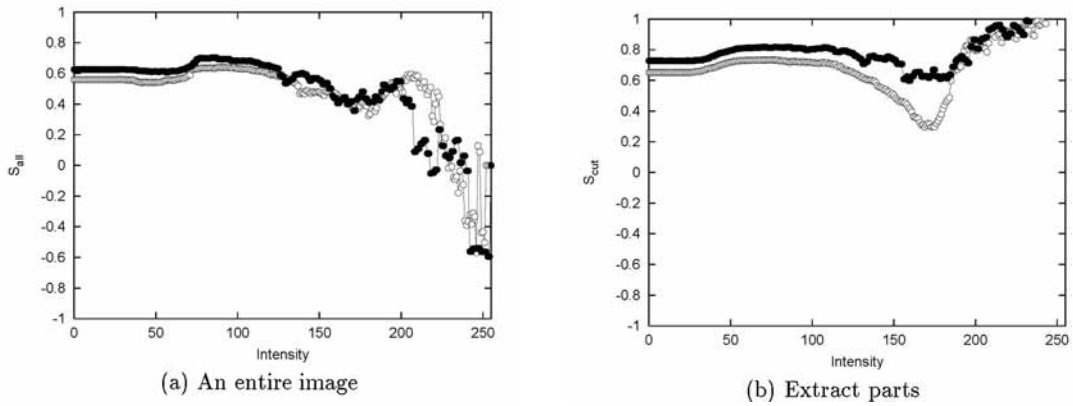


図-15 類似性 (2001年12月10日)

文献

- 1) 井戸健敬, 村井祐一, 山本富士夫: 3時刻時空間微分法による Gray Scale Image の PIV 処理の高速・高精度化, 可視化情報学会誌, Vol.18, Suppl. No.1, pp.71-74, July 1998.
- 2) 山本富士夫, 村井祐一: コンピュータで流れを見る・知る, 日本機械学会誌, Vol.101, No.961, pp.866-867, Dec. 1998.
- 3) 香山尚澄, 井上義雄, 加賀昭和, 近藤 明, 山口克人: 大規模風場推定における気象衛星雲画像からの雲移動ベクトルの利用可能性の検討, 可視化情報学会誌, Vol.20, Suppl. No.1, pp.539-542, July 2000.
- 4) 長 篤志, 張 林, 三池秀敏: 時空間不均一照明下における速度場推定の高精度化, 可視化情報学会誌, Vol.21, Suppl. No.2, pp.27-28 Sept. 2001.
- 5) 高知大学気象情報項
<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>
- 6) (財) 気象業務支援センター発行: 高層気象観測年報 2001年版
- 7) N.Ohota: Image movement detection with reliability indices IEICE Trans., Vol.E74, No.10, pp.3379-3388, 1991
- 8) L. Zhang, T.Sakurai, and H. Miike: Detection of motion fields under spatio-temporal non-uniform illumination, Image and Vision Computing, Vol.17, pp.307-318, 1999
- 9) A.Osa, H.Miike: An Accurate Determination of Motion Field and Illumination Conditions, IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E87-D, No.9, pp.2221-2228, 2004

(2004.9.6 受理)