大気中に含まれる水蒸気量分布の移動速度と海上風の相関について

鈴木敏夫

大気圏下層における水蒸気量分布の移動速度と海上風の相関に関する研究

A study on the correlation between the sea surface wind velocity and the moving velocity of precipitable water distribution

大阪大学　鈴木敏夫(SUZUKI Toshio)、竹見哲也(TAKEMI Tetsuya)
石川島播磨重工業（株）　緒方　輝久(OGATA Teruhisa)

Remote-sensing technology is very useful for observation of a vast surface of ocean in real time, and it has been utilized widely. In this paper, the simple algorithm of measurement for water vapor content of the lower troposphere over the ocean from the 11 and 12 μm (split window) channel on the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) on the GMS-5. A new method of measurement for ocean wind from optical flow of precipitable water distributions are described. The algorithm is applied to time series of VAS split window radiances over tropical Pacific Ocean during 17 June 1999 to 26 June 1999. The algorithm for precipitable water shows good agreement with that of radiosonde measurement. Ocean wind velocity and direction are analyzed by present method agree that of radiosonde measurements.

キーワード；リモートセンシング，海上風，可降水量，画像解析
Key words; Remote sensing, Ocean wind, Precipitable water, Image analysis

1.緒言

海上風や波高、波長などの海上の気象情報は、船舶の安全航行上、大変重要である。一般に波浪と海上風との間には、吹送距離・時間等が長い場合ははっきりとした相関関係がある。このことから、海上風の計測が波浪発達予測に重要であることがわかる。

実際に海洋情報を船舶の安全航行などに役立てる場合、リアルタイムで広範囲な空間の情報である必要がある。しかし、従来のブイによる計測では正確ではあるが、広範囲な海洋の計測は不可能であり、近年注目されている極軌道衛星からのリモートセンシングでは、ブイの計測よりは広範囲な面計測が可能にはなったが、定時性にかけるという欠点がある。

本研究では、より広範囲で定時性に優れた静止軌道衛星から海上風を求める方法について提案するとともに、その信頼性についての考察することを目的とする。

手法としては、ラジオゾンデ等による計測結果のある海域において人工衛星からのリモートセンシングにより推定される大気中の水蒸気量分布の移動速度と海上風の相関を調べることにより、海上風の予測を行う。

2.水蒸気量の推定

本研究での対流圏下層水蒸気量(可降水量)の推定は、スプリットウィンドウ法[1)]と呼ばれる方法を用いる。その概要は、海面温度 T_{sfc}[K]、一様な気温 T_{air}[K]、一様な水蒸気量 PW[g/cm^2]で放射している1層の気層があるとき、波長ν[μm]で衛星が測定した輝度温度を T_ν[K]とすると、次式の放射伝達方程式が成立する。

$$T_\nu^* = T_{sfc}\tau_\nu + T_{air}(1-\tau_\nu) \qquad (2.1)$$

ここで透過率 τ_ν は、$\tau_\nu = \dfrac{T_\nu^* - T_{air}}{T_{sfc} - T_{air}}$ で表される。

いま、11μm 及び 12μm のスプリットウィンドウの透過率の比をとると、式(2.1)における地表面温度 T_{sfc} が消去され、

$$\frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} = \frac{T_{12}^* - T_{air}}{T_{11}^* - T_{air}} \qquad (2.2)$$

となる。

また、透過率 τ_ν は、水蒸気量 PW の関数として次式で表される。

$$\tau_\nu = \exp\left[-\sec(\theta)\left(\kappa_\nu + \alpha_\nu PW + \beta_\nu PW^2\right)\right] \qquad (2.3)$$

θ は衛星の天頂角、α_ν、β_ν は水蒸気の吸収を表す係数、κ_ν は CO_2 の吸収に及ぼす温度の影響を表す係数である。(2.3)式において、波長 11μm、12μm を適用し、(2.2)式に代入すると、

$$\begin{aligned}
&\frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} = \exp\left[-\sec(\theta)\left(\Delta\kappa + \Delta\alpha PW + \Delta\beta PW^2\right)\right] \\
&\Delta\kappa = (\kappa_{12} - \kappa_{11}) \\
&\Delta\alpha = (\alpha_{12} - \alpha_{11}) \\
&\Delta\beta = (\beta_{12} - \beta_{11})
\end{aligned} \qquad (2.4)$$

(2.4)を PW について解くと、次式を得る。

$$\begin{aligned}
&PW = \frac{-B + \left(B^2 - 4AC\right)^{1/2}}{2A}, \\
&where \\
&A = \Delta\alpha, B = \Delta\beta, C = \Delta\kappa + \frac{1}{\sec(\theta)}\ln\left[\frac{T_{12}^* - T_{air}}{T_{11}^* - T_{air}}\right]
\end{aligned} \qquad (2.5)$$

本研究で用いたパラメターは

$$\alpha_{11} = 0.0684,\ \alpha_{12} = 0.1579,\ \Delta\alpha = 0.0895$$
$$\beta_{11} = 0.01582,\ \beta_{12} = 0.01673,\ \Delta\beta = 0.00091$$
$$\kappa_{11} = 0.00589,\ \kappa_{12} = 0.0370,\ \Delta\kappa = 0.03111$$

とし、この吸収係数において、T_{air} は、試行錯誤の結果、次のような簡単な式で表現した。

$$T_{air} = T_{12} - 2.8\,[K]$$

3．　速度場の解析

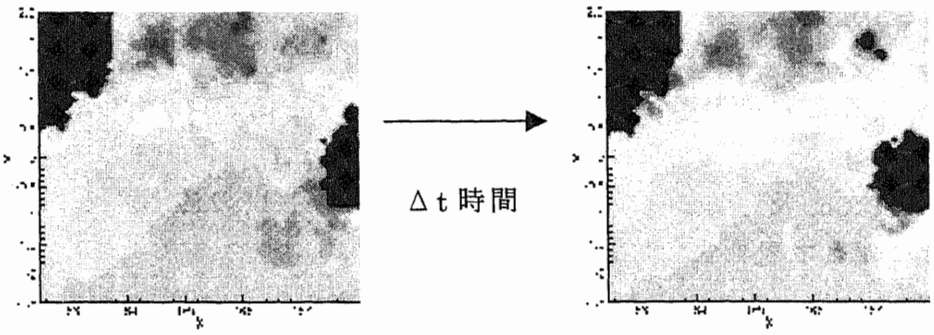

Fig.1

Fig.1 のように得られた水蒸気量分布画像について、ある場所(x, y, t)の、2 章の手法により求められた水蒸気量の値を f(x, y, t) とする。いま、時刻 t から t+Δt の間に水蒸気が風に流され (Δx, Δy)だけ移動したとき,移動前後の水蒸気量の変化は式(3.1)のようにあらわされる。

$$\begin{aligned} &f(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) - f(x, y, t) \\ &= \Delta g(x, y, t) \end{aligned} \tag{3.1}$$

ここで、Δg は時間的な水蒸気量の増加量(蒸発量)であり水蒸気の蒸発量(もしくは降水量)を示す。さて、水蒸気量の変化が滑らかであるとすると、f(x, y, t) は Taylor 展開可能となり、式(2.2.2)のようにあらわされる。

$$\begin{aligned} &f(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) \\ &= f(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial f}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial f}{\partial t}\Delta t + O(\delta^2) \end{aligned} \tag{3.2}$$

また、(Δx, Δy)はΔt の間における水蒸気量の移動量であるので、風速 **u**(u,v) を用いて次のように表現できる。

$$\begin{aligned} \Delta x &= u(x,y)\Delta t + O(\delta^2) \\ \Delta y &= v(x,y)\Delta t + O(\delta^2) \end{aligned} \tag{3.3}$$

ここで、式(3.3)を式(3.2)に代入してΔt→0 の極限における水蒸気量の変化を考えると、次式を得る。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u\frac{\partial f}{\partial x} + v\frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta g(x,y,t)}{\Delta t} \tag{3.4}$$

着目点周りで速度 **u** が一定であるとすると、式(3.4)がその領域内のいたるところで成り立つ。このような点が 2 点以上集まれば、最小 2 乗法を用いて速度ベクトル(u,v)を求めることができる。

本研究では時空間微分法のひとつである、局所最小2乗法[2)]による速度場の推定を行った。まず、「着目点近傍において速度場はほぼ一定と近似でき、かつ湧き出し(蒸発量、降水量)を無視する」ことを仮定し、この近傍内のデータを連立して1個の速度を求める。この領域をΓと置くと、Γ内のいたるところで、

$$uf_x(x,y)+vf_y(x,y)+f_t(x,y)=0 \tag{3.5}$$

が成立していなければならない。Γ内で式(3.5)を連立させて未知数 u,v を解くことは、Γ内の N 個のデータについて最小2乗法により未知数を求めることに帰着できる。そこで式(3.5)の左辺をΓ内で2乗積分し最小化すると、

$$J \overset{d}{=} \iint_\Gamma \left\{uf_x+vf_y+f_t\right\}^2 dxdy = \min \tag{3.6}$$

式(3.6)を u,v に関して微分して0と置くと正規方程式

$$\begin{cases} uS_{xx}+vS_{xy}+S_{xt}=0 \\ uS_{xy}+vS_{yy}+S_{yt}=0 \end{cases} \tag{3.7}$$

が得られる。サフィックス付きの S はそれぞれ

$$S_{ij} \overset{d}{=} \iint_\Gamma f_i(x,y)f_j(x,y)dxdy \tag{3.8}$$
$$i,j=x,y \ \ or \ \ t \ \ derivative$$

で計算される微分の積の積分値を表す。これらの値を式(3.7)に代入して解くと速度ベクトル(u,v)は次のように求まる。

$$u=\frac{S_{yt}S_{xy}-S_{xt}S_{yy}}{S_{xx}S_{yy}-S_{xy}{}^2}$$
$$v=\frac{S_{xt}S_{xy}-S_{yt}S_{xx}}{S_{xx}S_{yy}-S_{xy}{}^2} \tag{3.9}$$

以上の時空間微分法で留意すべき点は、

- 画像の空間変化、時間変化が滑らかであること
- 画像の移動が微小であること

が挙げられる。本研究では、最初に得られた水蒸気画像を空間的にメディアンフィルタ、さらに時間的にメディアンフィルタをかけることで画像の空間変化、時間変化を滑らかにした。さらに、元画像の 3pixel×3pixel(0.3°×0.3°)を 1pixel×1pixel に平均化して速度を求めた。また本研究における時間変化Δt は1時間である。

4.考察と結果

● 可降水量について

本法による水蒸気量と、ラジオゾンデで観測された水蒸気量の比較は、Fig2

に示す。大局的には良い相関を示すことが分かった(相関係数 0.587)。

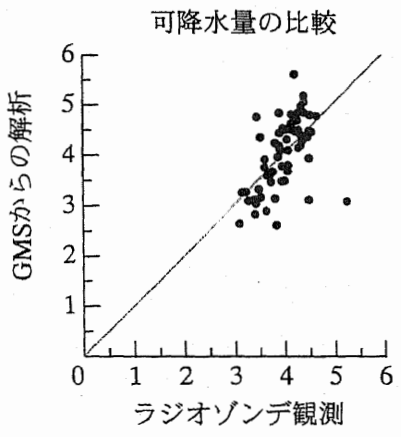

Fig.2

本研究で提案した海洋上での可降水量推定のアルゴリズムによって、ラジオゾンデからのデータのない海域での可降水量の推定ができるようになったといえる。

● 速度場について

ある期間に限定した場合は良い結果が得られるが、全体的にはよい相関は得られていないが、大局的に速度変動はとらえることができたと考える。誤差要因としては大気や海洋の流れはそのスケールが大きいと共に、時間的変動もかなり認められ、もとデータの平滑化に問題があったのかもしれない。一般にリモートセンシングによる水蒸気量のデータは絶対値を精度良く計測できるまでに至っていいないこと、時間遅れがあること等による誤差があり、水蒸気量の時間変動をうまく追跡できていないことが考えられる。また、本手法により解析した速度場の一例を Fig.4 に示す。解析を行なった熱帯太平洋域では、東からの風が卓越しているという観測事実があるが、この図ではそれを良く表現しているといえる。

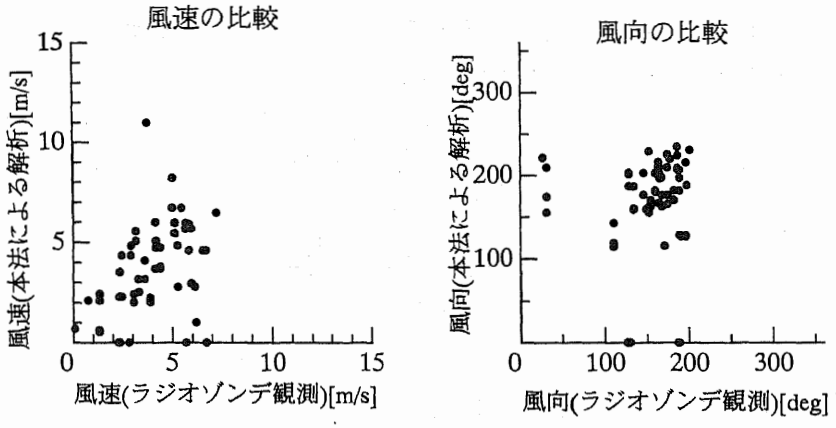

Fig.3

5．結言

- 本研究により、従来ラジオゾンデなどでしか計測できなかった対流圏下層水蒸気量の海洋上での推定ができるようになった。
- 条件付ではあるが、本法による風ベクトルの計測は海上風と良い相関を示した。よって、本研究のアルゴリズムで海上風の計測は可能であるといえる。

6．今後の課題

今後の課題として、

1. 可降水量を求める際の、T_{air}の拘束式をさらに細かくして可降水量の推定の精度をあげる。

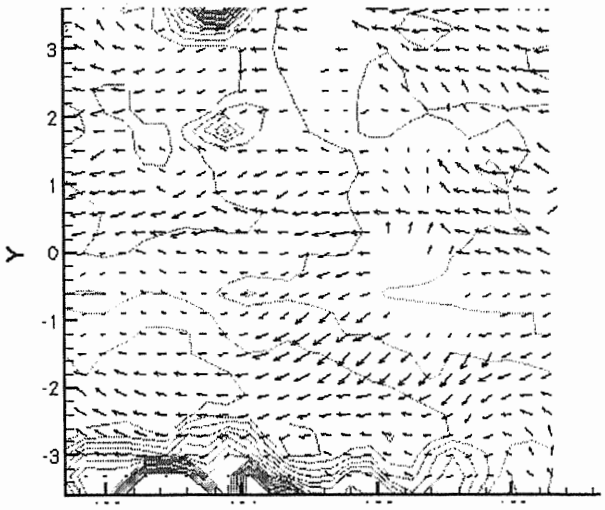

Fig.4

2. 水蒸気画像の時間変化を正確に得るための画像処理法の確立が必要である。
3. 今回は比較する点が1点のみだったが、この点数を多くしさらに精度を高める必要がある。
4. 本法をリアルタイムで利用できるように速度場の計測法についての検討が必要である。

なお、本研究で使用した「ひまわり5号」のデータは、京都大学防災研究所および千葉大学環境リモートセンシング研究センターにて受信されたものを使用した。
また、ラジオゾンデのデータは、海洋科学研究所センター（JAMSTEC）所有の海洋地球研究船「みらい」により取得されたものである。関係各位に感謝します.

参考文献

1) Dennis Chesters and Louis Uccellini, 1983: Low-Level Water Vapor Fields from the VISSR Atmospheric Sounder (VAS) "Split Window" Channels, J. Climate. Appl. Meteor., Vol.22 pp725-pp743

2) 安藤繁：画像の時空間微分法を用いた速度ベクトル分布計測システム、計測自動制御学会論文集、Vol.22, No.12,1986.12