

衛星データによる海洋エネルギーのモニタリング (海面温度、海上風速、水蒸気量の推定)

新井康平*¹

Ocean Energy Monitoring from Space (Estimation of Sea-Surface-Temperature: SST, Wind-Speed: WS, Significant-Wave-Height: SWH and Sea-Level: SL)

Kohei ARAI*¹

*¹ Saga University, Dept. of Information Science
1 Honjo, Saga, 840-8502 Japan

Saga University Persistent Earth's environment Research Institute Of Remote sensing: Superior has aim to provide ocean energy related information and data observed with remote sensing satellite data. Sea Surface Temperature (SST) is estimated with Thermal Infrared and Microwave radiometer data while Wind Speed (WS) is retrieved with Microwave radiometer data. Geoids or Sea Level (SL) as well as Significant Wave Height (SWH) are estimated with altimeter data. The data acquisition system situated in Saga University has a capability of receiving data of Terra/MODIS, Aqua/MODIS (visible to thermal infrared radiometer) and Aqua/AMSR (microwave radiometer). From these data, SST, WS are estimated while SWH and SL are downloaded from the NASA/JPL site.

Key Words : Satellite remote sensing, Ocean energy exploration, Sea surface temperature, Wind speed, Significant wave height, Geoids, Sea level

1. 緒 言

佐賀大学持続可能地球環境リモートセンシング研究施設 (Saga University Persistent Earth's environment Research Institute Of Remote sensing: Superior)[1]は、海洋エネルギー研究に資する時空間的データとして人工衛星に搭載された熱赤外放射計、マイクロ波放射計、レーダ高度計等のデータに基づき、佐賀大学を中心とした直径約 5,000km の範囲内の海面温度、海上風速、有義波高、海面高度等の情報を提供している。併せて Superior は地球環境、地域環境・災害監視の役割を担っており、これらに関する情報、データを発信している。

熱赤外放射計データを用いる海面温度推定手法に係る研究成果は既に報告している[2],[3],[4]。本稿では特にマイクロ波放射計データを用いる海上風速の推定手法に関する研究成果の一端を紹介する。基本的には海面からのマイクロ波放射が海面粗度(海上風向、風速)、放射率(海面温度、泡等)に依存する輝度温度を観測するため、観測輝度温度から海上風向、海面温度、泡等

の影響を除けば海上風速が推定できる。これら影響のうち海面粗度には海面の幾何学モデルが必要である[5],[6]。非対称ガウス関数等が代表的モデルであるが、現実の海面幾何学的形状との一致性は高くはない。また、観測輝度温度の風向依存性を考慮する海上風速の推定法の提案もあるが、精度が不十分である。海面温度、泡の影響についても実験的モデルがいくつか提案されているが[7],[8]、現実の海面を表現し得ているとは言い難い。

本稿はマイクロ波放射計データを用いた海上風速の推定に係る精度向上を目的として、海面の物理モデル(海上風速を含む)に基づく大気上端における海面温度と観測輝度温度との二乗誤差を最小にする海上風速を求める手法を提案する。また、この時、最小二乗誤差の意味で最適な大域的最適解を求める方法としてシミュレーテッドアニーリング法を適用する。従来手法と比較して十分な精度向上が図られることを確認したのでここに報告する。

2. 提案手法

AQUA 衛星搭載のマイクロ波放射計(AMSR) のアルゴリズムドキュメント (ATBD) のバージョン 2 は AMSR

*¹ 佐賀大学 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄 1 番地)
E-mail: arai@is.saga-u.ac.jp

海プロダクツ生成アルゴリズム (AOA) を記述している。海面温度 (SST)、風速 (WS)、大気中の水蒸気 (WV) 含有量と雲水 (CL) (Wentz, F., 2000) [9] について記述している。海洋関連物理量推定アルゴリズムは、(1) 線形重回帰アルゴリズム、(2) 非線形の反復のアルゴリズムと (3) 回帰アルゴリズムの3つのタイプが提案されている。最後のものはまったく純粋に統計上のアルゴリズムであり、物理的でない。放射伝達モデルが、最初の2つのアルゴリズムには適用されている。特に、2番目のアルゴリズムは仮定した SST、WS、WV と CL を用いて放射伝達式を解き、輝度温度を推定し、AMSР データから得られた実際の輝度温度との間の相違を最小にする物理的なアルゴリズムである。ATBD によれば、線形重回帰アルゴリズムの推定誤差の一応の概算が海面温度に対して 0.58 (K)、海上風速で 0.86m/s、水蒸気にて 0.57mm、また、雲水量にて 0.017mm とされている。輝度温度と物理量の間非線形性があるため、線形重回帰アルゴリズムではこれ以上の推定精度の向上は期待できない。一方、非線形の反復のアルゴリズムを使うことによって推定精度を向上させることは期待できる。ATBD はそのひとつの方法としてニュートンの繰り返しアルゴリズムを使うことを推奨している。しかし、ニュートン法に代表される最急降下法は、局所解に陥ることが懸念され、大域的最適解に到達することを保証するものではない。その点、シミュレーテッドアニーリングは学習に多くの時間を要するが、大域的最適解を保証する。シミュレーテッドアニーリングを使うことによって、AMSР によって得られた観測輝度と仮定した物理量と放射伝達モデルによって推定された輝度温度の間の二乗偏差を最小にする物理量を推定物理量とする方法を提案する。仮定する物理量と輝度温度を結ぶ関係式は海面モデル、大気モデル、放射伝達モデルに基づき構築する。以下に海面モデル、大気を含む放射伝達モデルおよび提案手法について説明する。

2.1 海面モデル

物理学的なパラメータにより大気上端にてマイクロ波放射計により観測される輝度温度を推定することは可能である。まず、このパラメータの内、海面に関するものをして海面粗度および誘電率により決定され放射率に関するモデルを紹介する。

静かな海面の誘電率は海面温度、塩分 (導電率) で決定される。誘電率から、海面の反射率および放射率が決定される (Debye, 1929, Cole and Cole, 1941)。また、海面粗度を考慮するモデルとして Cox and

Munk, 195、Wilheit and Chan, 1980) が知られている。Wilheit モデルによれば、平均された海面に対しての傾斜角度がガウス分布によって表現される。また、海上風速が 7m/s 以上になるとホワイトキャップ (気泡) の影響により放射率が変化する。この泡の放射率に対する影響は実験式が示され、海上風速の関数として気泡の面積比率が求められ、この面積比率に応じて気泡の放射率と海面の放射率との重み付き線形和として放射率が決定されるとしている。さらに、大気上端輝度温度を求める際に、海面の放射・反射は重要な要素である。すなわち、フレネルの反射則から反射率を導出し、海面が不透明媒質であると仮定し、放射率を決定するものとした。一方、大気中の酸素分子、水蒸気、雲水等によるマイクロ波放射および吸収に関し、Water, 1976 のモデルがよく知られている。

本研究では、Wentz の海面モデルを用いて、物理量推定を行う。Wentz の海面モデルは Wilheit のモデル [10] に基づき、センサの観測輝度と実測海面温度との間で重回帰分析を行い、作成した回帰式に基づき作成されている。Wilheit の海面モデルでは、海面上で起こる2つの現象を考慮する。

①海面に波が立ち、傾斜ができる場合、

→波の傾きの分布は正規分布を仮定し、分布の係数は経験式(実験値)を用いる

②海面に泡ができ、海面を覆う場合、

→海表面が泡に覆われる割合は、周波数および風速に応じた経験式(実験値)を用いる。

風の影響がない海面では Fig.1 に示すように放射・反射・透過が一様に起こる。

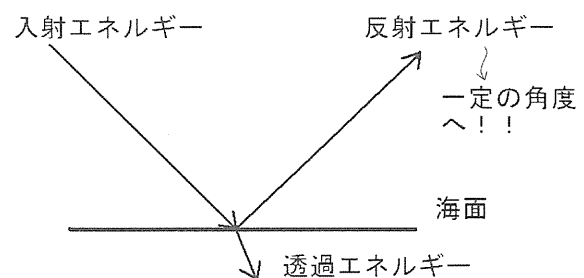


Fig.1 Penetration, reflection of microwave radiance at calm sea surface

一方、風の影響がある海面では Fig.2 に示すように泡により海面放射率 ϵ が変化する。海面放射率は式(1)のフレネル反射係数を 1 から引いたものとして表せる。フレネル反射係数は、衛星の視角 θ 、海面の複素比誘電率 ϵ を考慮した反射係数である。

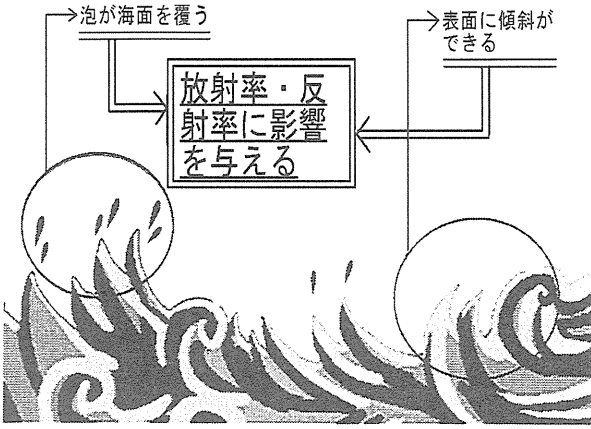


Fig.2 Emissivity of the sea surface with forms or white caps when wind speed exceeds 7m/s.

$$\rho_v = \frac{\zeta \cos \theta - \sqrt{\zeta - \sin^2 \theta}}{\zeta \cos \theta + \sqrt{\zeta - \sin^2 \theta}}$$

$$\rho_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\zeta - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\zeta - \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

添字の v, h は垂直および水平偏波を表す。

また、放射率は、海上風速と海面温度の関数として表現され、それらは実験式として以下のように示されている。

$$\epsilon_{HW} = 3.474 \times 10^{-4} WS^2 + 2.906 \times 10^{-3} WS + 0.301 \quad (2)$$

$$\epsilon_{VW} = 1.468 \times 10^{-4} WS^2 - 0.638 \times 10^{-3} WS + 0.603 \quad (3)$$

$$\epsilon_{HT} = 1.274 \times 10^{-5} T^2 - 7.343 \times 10^{-3} T + 1.361 \quad (4)$$

$$\epsilon_{VT} = 2.129 \times 10^{-5} T^2 - 1.226 \times 10^{-2} T + 2.345 \quad (5)$$

2.2 放射伝達式

大気上端輝度温度は式(6)により表せる。

$$T_{B_i} = T_{BU} + \tau[\epsilon_j T_S + T_{B\Omega_j}] \quad (6)$$

左辺は大気上端輝度温度 (衛星の観測輝度温度)、右辺の第1項は大気の上向き輝度温度、第2項は海面からの放射と大気の下向き輝度温度が海面で反射する成分(i : バンド(周波数帯域)、 j : H(水平偏波)or V(垂直偏波))である。マイクロ波放射計では、大気の影響によるエネルギーの減衰などを考慮する必要がある。 τ は

大気透過率、また、 $T_{B\Omega}$ は下向き大気放射の海面反射成分を表す。

$$\tau(h_1, h_2, \theta) = \exp[-\sec \theta \int_{h_1}^{h_2} \alpha(h) dh] \quad (7)$$

$$T_{BU} = \sec \theta \int_0^H \alpha(h) T(h) \tau(h, H, \theta) dh \quad (8)$$

$$T_{BD} = \sec \theta \int_0^H \alpha(h) T(h) \tau(0, h, \theta) dh \quad (9)$$

大気分子自身の放射を考え、その放射を上向きと下向きに分け、上向き放射輝度 T_{BU} 、下向き放射輝度 T_{BD} とそれぞれ定義する。大気分子のエネルギーの吸収を考える。本研究では酸素、水分子による吸収(周波数帯を 1GHz から 60GHz に限定している)を考慮する。また、海表面からのエネルギーが衛星に到達するまでのエネルギーの透過を考える。これら大気組成分子によるマイクロ波放射および放射輝度の大気組成分子による等価吸収の様子を Fig.3 に模式的に示す。

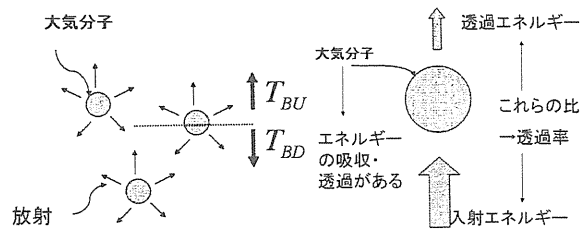


Fig.3 Atmospheric emission and transparent and absorption of microwave radiance through the atmosphere

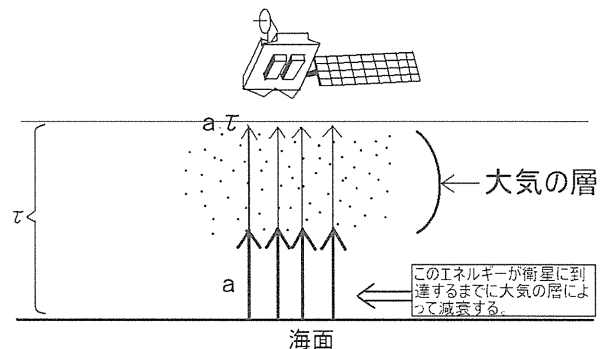


Fig.4 Top of the Atmospheric (TOA) radiance or brightness temperature received at sensor onboard satellite from the ocean surface through the atmosphere

これら大気による放射、透過、吸収を受けたマイクロ波放射輝度が大气上端に達し、Fig.4 に示すように衛星に搭載されたマイクロ波放射計にて受信される。

2.3 提案手法

大气上端輝度温度関数 T_{Bi} と実観測データ T_B との差の2乗を評価関数 $f(T_s, W, V)$ として、以下に示す評価関数(コストファンクション)を最小にするシミュレーテッドアニーリング: SA を用いる。

$$f(T_s, W, V) = |T_B - (T_{BU} + \tau[\epsilon T_s + T_{B\Omega}])|^2 \quad (10)$$

すなわち、評価関数が最小になる T_s, W, V は、最良な海面温度、海上風速、水蒸気量の推定値であると考えている。ここで右辺第2項の () 内は2.1 および2.2 の海面、大気および放射伝達モデルにより推定した大气上端輝度温度であり、第1項は観測輝度温度である。SA は非線形最適化手法の一種で、局所解に陥らず、大域的最適解を探索する有効な手段である。SA の入力パラメータ設定は、以下の通りである。

K: 繰り返し回数、 ΔE : エネルギーの変化量

① 徐冷関数: 減衰振動関数

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{\log k + 2} \cdot \cos \theta \quad (11)$$

② 受理行列:

$$1/(1 + \exp \Delta E / T_k) \quad (12)$$

③ 終了条件: $\Delta E < 0.001$

④ パラメータ可変範囲:

T_s : [270~303](K), W : [0~20] (m/s),

V : [0~70](mm)

この徐冷関数はボルツマン分布から導出されるものと異なる。状態遷移確率を振動させることにより、準最適解に到達する速度を速めるために工夫したものである。したがって、大域的最適解に到達することは保証の限りではないが、収束条件として設定した許容誤差内に解が収まったときに学習は収束する。誤差が大きいときには遷移確率は何度も上下を繰り返し、局所解に陥ることから脱出できるようになっている。今後、これを改良 SA と呼ぶ。

2.4 従来手法

(1) 最小二乗法

モデル関数がパラメータに対して線形な場合は、連立一次方程式を解くことで最小二乗解を得ることができる。

非線形な場合は線形な場合と違い、単純に連立方程式を解くだけで、未知パラメータを求められるわけではない。主な非線形最適化手法はニュートン法等の最急降下法、共役勾配法、共役方向法、シミュレーテッドアニーリング(SA)法等の反復法である。

最小二乗法とは、測定値とモデル関数から得られる理論値の差の2乗和が最小となるようなモデルのパラメータを決定する手法である。

測定値: M 、モデル関数: $f(x)$ とすると、

$$|M - f(x)|^2 \rightarrow \min \quad (13)$$

となるような x を求めることである。

(2) 重回帰分析

Frank, J, Wentz の提案した回帰式は以下のようになる。

$$P_j = c_{0j} + \sum_{i=1}^l c_{ij} \cdot T_{Bi} \quad (14)$$

ここで、 i : AMSR-E の観測周波数 (6.9H, 6.9V, 10.65H, ...) j : パラメータ ($1=T, 2=W, 3=V$) であり、 C は回帰係数である。すなわち、観測輝度温度とそのときの正解 P に基づき、重回帰係数をあらかじめ求め、その後、未知の輝度温度を式(5)に代入することによって求める物理量(海面温度、海上風速、水蒸気量等)を推定するものである。

Wentz の提案するアルゴリズムは、

$$P_i = c_0 + \sum_{j=1}^N a_j t_j + \sum_{k=1}^N b_k^2 t_k^2 \quad (15)$$

であり、全ての海域で同一の回帰係数を用いる。また、2次式による回帰だけでは精度に限界があると考えられる。

3. 実験

3.1 使用データ

AQUA 衛星搭載 AMSR-E データを使用する。以下に観測諸元を示す。

観測周波数: 6.93, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 GHz

偏波: 水平および垂直

使用データ: Level 1-B (輝度温度変換データ)

日付: 2002年4月25日 AM6:00

海域範囲: N15°・E125° ~ N30°・E135°

使用バンド: 6.93, 10.65, 18.7, 23.8GHz (H&V)

各物理量に適したバンドを使用した。すなわち、

海面温度: 6GHz 付近 (6.93GHz)

水蒸気量: 22GHz 付近 (23.8GHz)

海上風速: 水、酸素の共鳴吸収線がある 22, 60GHz 付近以外の周波数 (10.65GHz, 18.7GHz) (海面温度、海上風速、水蒸気量 etc.) とした。また、偏波は H, V 両偏波を用いた。

本研究では、GDA(Global Data Assimilation System) とは全球データ同化システムである) データを物理量推定の際の正解データとする。

日付、使用範囲は AMSR-E と同じものを使用した。この解像度は 1° メッシュで、全球の気象データがある。使用した GDAS データの平均・分散を Table 1 に示す。また、海域付近の GDAS データの一例として海面温度のデータを Fig.5 に示す。

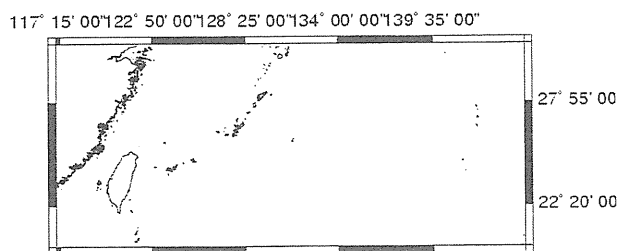
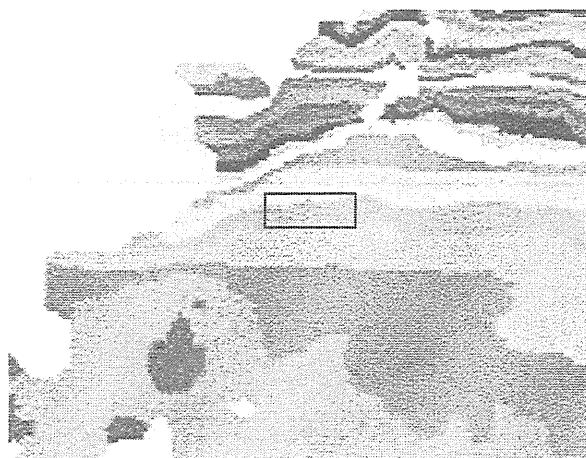


Fig.5 Sea surface temperature of GDAS data at the intensive study area

3.2 重回帰分析

重回帰分析の結果としての重回帰誤差を Table2、回帰係数を Table3 にそれぞれ示す。

また、この時の正解値(GDAS)と推定値(重回帰分析による推定値)との散布図を海面温度、海上風速、水蒸気量の順に Fig. 6,7,8 にそれぞれ示す。

Table 1 Mean and variance of GDAS data

パラメータ	平均	分散
海面温度	298.7[K]	6.1
海上風速	6.0[m/s]	2.5
水蒸気量	24.4[mm]	29.9

Table2 Regressive error

物理量	RMS error
海面温度	0.530(K)
海上風速	0.754(m/s)
水蒸気量	0.899(mm)

Table 3 Regressive coefficients

海面温度	海上風速	水蒸気量
C01:178.15	C02:102.21	C03:-176.88
C11:0.7413	C12:-0.4719	C13:0.3383
C21:-0.2994	C22:0.4831	C23:-0.2257
C31:-0.7920	C32:0.1768	C33:-1.6291
C41:0.2522	C42:-0.5609	C43:0.8949
C51:2.5049	C52:-0.0124	C53:5.6032
C61:-1.2528	C62:0.2142	C63:-2.8837
C71:-1.5317	C72:-0.4605	C73:-2.8433
C81:0.8166	C82:0.2954	C83:1.4401

Estimated Sea Surface Temperature by regressive analysis

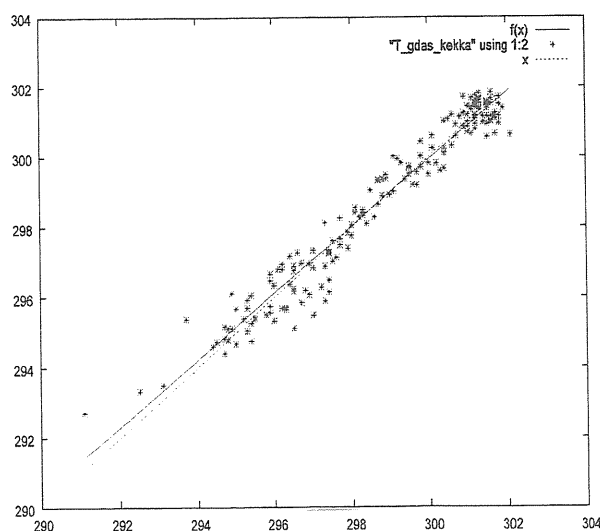


Fig.6 Scatterogram of SST

GDAS SST

Estimated Wind Speed by regressive analysis

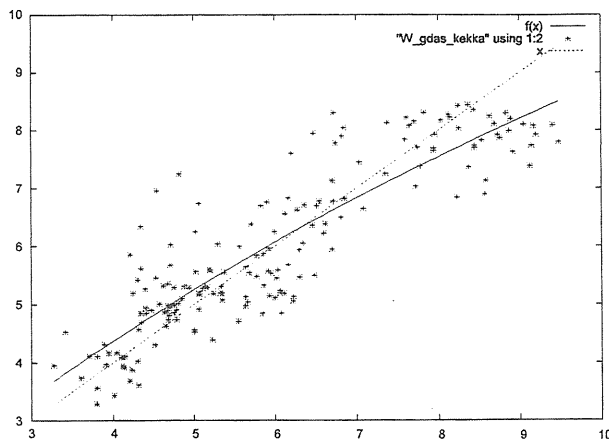


Fig.7 Scattergram of Wind Speed GDAS WS

Estimated Water Vapor by regressive analysis

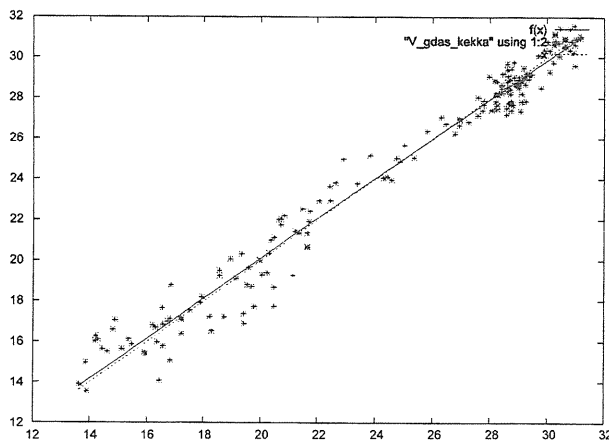


Fig.8 Scattergram of Water Vapor GDAS WV

正解値として用いたGDASの分散を見れば分かるように分散の大きな物理量に対する回帰誤差は大きい。したがって、水蒸気、海上風速、海面温度の順に回帰誤差が大きい結果となっている。また、海上風速の推定結果では海上風速が大きい場合に少なめに推定してしまうという系統的な誤差が生じている。

3.3 シミュレーテッドアニーリング (SA)

SAによる推定結果を Table4 に示す。また、海面温度、海上風速、水蒸気のそれぞれの散布図を Fig.9,10,11 にそれぞれ示す。この時、シミュレーテッドアニーリングの残差の時間経過、すなわち、学習過程は Fig.12 のようになっており、いずれの場合も初期段階において急に残差が少なくなり、その後、学習が進まなくなる傾向がある。

ATBDによれば、線形重回帰の推定精度は、海面温度に対して0.58(K)、海上風速で0.86m/s、水蒸気にて0.57mmであり、また、同じデータセットについておこなった重回帰分析の結果も海面温度に対して0.53(K)、海上風速で0.754m/s、水蒸気にて0.899mmであることから提案手法は水蒸気を除けば精度向上が期待できることが分かった。

Table4 Root Mean Square error for the proposed Simulated Annealing

物理量	RMS error
海面温度	0.373(K)
海上風速	0.731(m/s)
水蒸気量	0.787(mm)

Estimated Sea Surface Temperature

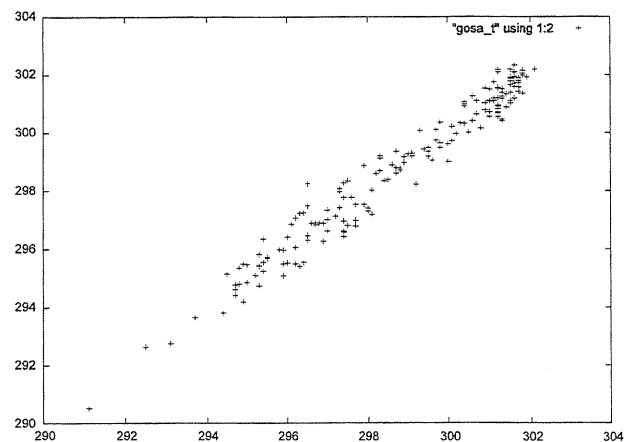


Fig.8 Scattergram of SST GDAS SST

Estimated Wind Speed by SA

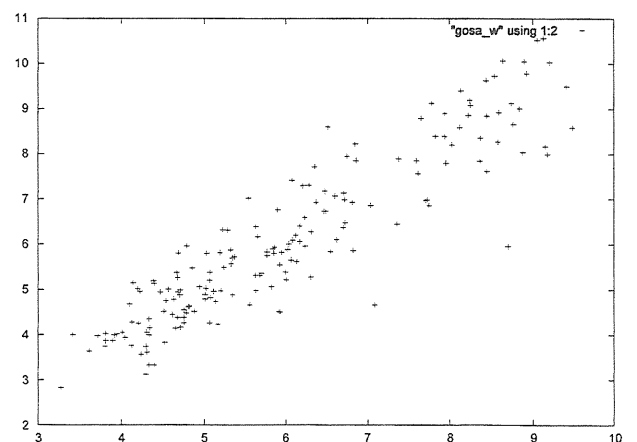


Fig.10 Scattergram of Wind Speed GDAS WS

Estimated Water Vapor by SA

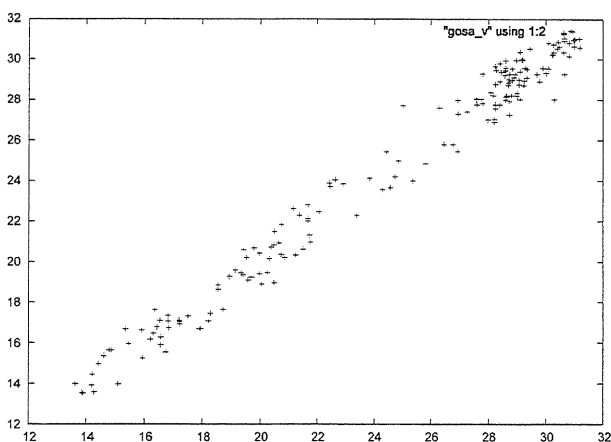


Fig.11 Scattergram of Water Vapor GDAS WV

Residual Error

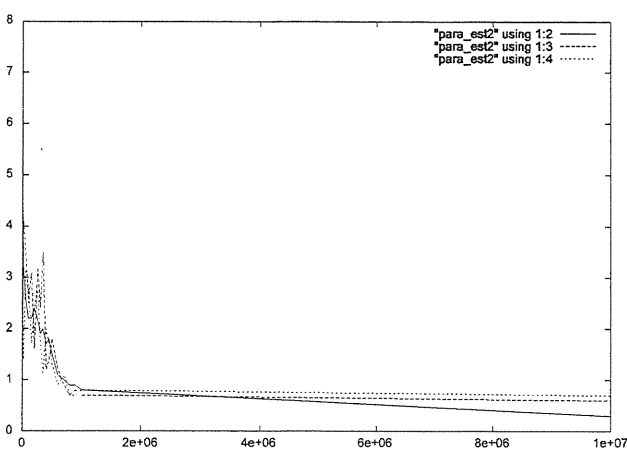


Fig.12 Learning process of SA Iteration No.

3.4 複数の物理量の同時推定法

海面温度、水蒸気、海上風速等のマイクロ波放射計データにて推定可能な物理量の間には相互作用がある。すなわち、海面温度が高い海域では蒸発散に伴う水蒸気量が多い。また、海上風速の高い海域では水蒸気が風により移動し、一般に、水蒸気量が少ない。したがって、これら相互作用の特性を考慮することにより、すなわち、複数の物理量を同時に推定することによって更なる推定精度の向上が図れるものとする。Fig.13は海上風速と海面温度との相互作用を示し、また、解の空間に多くの局所解が存在することをも示す。これは格子探索法によってすべてのメッシュの交点における解を推定したものであり、メッシュサイズが所望の精度、または、許容誤差になるように設定すれば準最適解が得られるが、メッシュとメッシュの間に大域的

最適解があっても到達することはできない。また、当然ながら、この学習には多大な時間を要する。

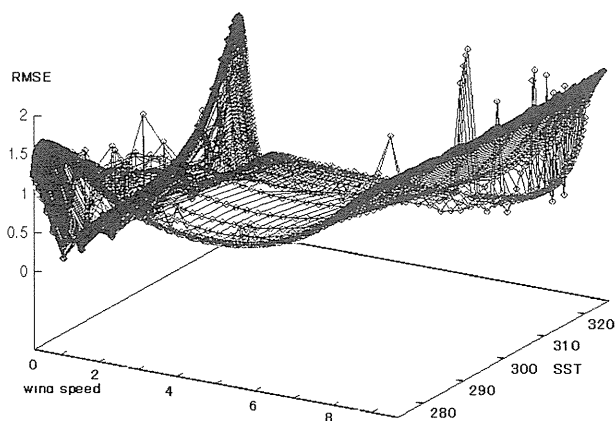


Fig.13 Interaction between wind speed and sea surface temperature (It also shows that there are many local minima not only global optimum solution in the solution space)

Table 4では3つの物理量を同時に推定する、すなわち、3つの物理量に係る方程式を連立させて解く方法による推定精度を示した。Table 5は、一方、2つの物理量に関する方程式を連立させて解く方法による解の精度を示す。すなわち、3つの物理量から2つの物理量を組み合わせる6通りの場合について解の精度を示している。これによれば、提案方法により3つの物理量を同時推定する場合、水蒸気のみは精度向上が芳しくなかったが、2つの物理量同時推定では海面温度と水蒸気を同時に推定する場合、0.472mmの精度が期待できることから最良組み合わせによる同時推定が最も推定精度向上に効果があることが分かる。すなわち、海面温度推定の場合は3つの物理量同時推定が最適であり、海上風速の場合は海面温度と同時推定、また、水蒸気量推定の場合も海面温度との同時推定が最適であることが分かる。

Table 5 Simultaneous estimation of SST, WS and WV with the proposed Modified simulated annealing method

物理量	RMS error
海面温度	0.632, 0.846
海上風速	0.621, 0.853
水蒸気量	0.472, 0.565

4. 結 語

推定法にシミュレーテッドアニーリングを用いる提案手法は従来手法である重回帰分析に比較して、

海面温度：27%

海上風速：25%

水蒸気量：22%

の推定精度の向上が期待できることが分かった。しかし、提案手法は学習に時間を要し、両者を比較すると、

重回帰分析：10秒

SA：1500時間

となっており、54万倍もの時間が係ることが分かった(Pentium 3, single CPU の場合)。

マイクロ波放射計データを用いる物理量推定において、処理時間は係ってもよいが精度を高めたい場合に提案手法は有効であることが分かった。また、物理量の相関を考慮する(海上風速、水蒸気量の組み合わせ)ことにより、さらに精度が向上し、時間短縮が図れることも分かった。すなわち、海面温度推定の場合は3つの物理量同時推定が最適であり、海上風速の場合は海面温度と同時推定、また、水蒸気量推定の場合も海面温度との同時推定が最適であることが分かった。

謝 辞

本研究は21世紀COE研究の一環として行ったものであり、研究代表者である、理工学部機械システム工学科門出教授、海洋エネルギー研究センター(IOES)からご支援賜った池上助教授に深謝の意を表します。また、研究遂行に当たり、尽力戴いたIOESポストドクトラルフェローPDであった故芳沢 聡博士、同じくIOESのPD 梁 興明博士(現在、NOAA/NESDIS のリサーチフェロー)および工学系研究科知能情報システム学専攻博士前期課程修了生榊原 淳さんに感謝いたします。

文 献

- (1) <http://www.ip.is.saga-u.ac.jp/~arai/arai.html>
- (2) 新井康平、独習リモートセンシング、森北出版、2002
- (3) 新井康平、リモートセンシングの基礎理論、学術図書出版、2001
- (4) 新井康平、地球観測衛星データの利用方法、森北出版、2000

- (5) Cole, K.S., and R.H. Cole, Dispersion and absorption in dielectrics, J. Chemical Physics, 9, 341-351, 1941.
- (6) Cox, C.S., and W.H. Munk, Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter, J. Opt. Sci., America, 44, 838-850, 1954.
- (7) Debue, R., Polar Molecules, Chemical Catalog, New York, 1929.
- (8) Waters, J.R., Absorption and emission by atmospheric gasses, in Methods of experimental Physics, 12B, Edt. By M.L. Meeks, Chap.2.3, Academic, Orland, 1976.
- (9) Wentz, F., AMSR Ocean Algorithm, second version of ATBD, NASA/GSFC., 2000.
- (10) Wilheit, T.T., and A.T.C. Chang, An algorithm for retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from the observations of the Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR), Radio Science, 15, 525-544, 1980.