

# 台風状況下における初期値と海面交換係数の同時最適化

伊藤耕介（海洋研究開発機構）・川畑拓矢（気象研究所）・本田有機（気象庁）  
加藤輝之（気象研究所）・石川洋一（海洋研究開発機構）・淡路敏之（京都大学）

## 1 はじめに

近年、台風進路の予測精度は著しく改善されてきたが、台風強度の予測精度はほとんど改善されていない。この問題に対処するためには、強度に影響のある物理現象を適切に表現できる数値モデルを用いることとともに、変数の不確定性を適切に考慮し、観測値の情報を数値モデルの空間に内挿する「データ同化」の高度化が重要となる。

気象庁のJNoVAと呼ばれるデータ同化システムは、アジョイントモデルをベースとした四次元変分法と呼ばれる優れた手法を採用し、台風強度の再現も可能となる高解像度化が進んでいる（Honda et al., 2005; 本田・澤田 2010）。しかし、海面での運動量・熱・物質の交換に関わる海面交換係数と呼ばれる係数は、データ同化による最適化の対象となっていない。特に、海面で大気側が受ける摩擦の強さを決める摩擦係数と、海面からの水蒸気供給量を決める水蒸気交換係数は台風のエネ

ルギーバランスを考える上で重要であり（Emanuel, 1986）、かつ、直接観測が困難なため、その不確定性を考慮に入れて適切な修正を施すことが重要と考えられる。

アジョイント法は、数値計算に用いられる方程式を拘束条件として、観測可能な物理量をうまく説明するように変数を制御する最適化法である。これを応用すれば、海面から離れた観測値の情報を用いて、海面交換係数を制御変数として加えることも可能である（図1を参照）。Ito et al. (2010)は、単純化された数値モデルを用いて、海面交換係数をアジョイント法の制御変数として加えることで、台風の再現性能が向上しうることを示した。本研究は、この手法をより精巧なシステムであるJNoVAに導入し、より現実的な台風の再現性能に対するインパクトを調べるものである。

## 2 実験設定

本研究では、2010年台風14号の最盛期を対象とした。まず、気象庁高解像度メソ解析値（MA）2010年10月28日0時（世界標準時）の値を初期値として、3時まで数値積

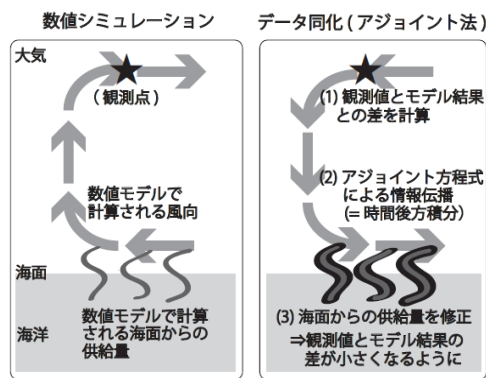


図1 アジョイント方程式による海面交換係数の最適化の概念図。簡単のため、定常な移流のみを考えている。

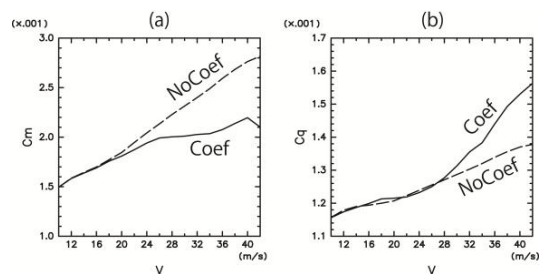


図2 海面交換係数の風速依存性 (a) 摩擦係数 (b) 水蒸気交換係数。破線が“NoCoef”、実線が“Coef”の値を表す。

表1 NoCoef と Coef における観測値と数値モデルの差異を定量化した関数  $J_{obs}$  及び変化率(RC)

cycle	$J_{obs}$		
	NoCoef	Coef	RC
1	781.4	785.7	+0.6%
2	1083.5	1067.1	-1.5%
3	3457.0	2683.2	-22.4%
4	4984.1	4657.8	-6.5%
5	2290.5	1925.8	-15.9%
6	1546.1	1348.8	-12.8%
7	1860.5	1784.3	-4.1%

表2 各サイクルの最終時刻における台風の地表面最大風速 (単位は m/s)。“NoCoef”と“Coef”の各実験によって得られた値、及び、気象庁のベストトラックデータの値。

cycle	Vmax		
	NoCoef	Coef	JMA
1	45.7	48.6	48.9
2	44.5	45.4	48.9
3	41.6	48.7	48.9
4	36.3	41.8	46.3
5	35.6	39.9	43.7
6	32.2	38.3	43.7
7	37.7	37.7	41.2

分を行う。その後、3時の値を初期値として、現業の数値天気予報システムと同様のデータ同化サイクル実験(NoCoef)、及び、海面交換係数の修正を施すデータ同化サイクル実験(Coef)をそれぞれ 29 日 0 時までに行い、両者を比較する。JNoVA では同化の 1 サイクルを 3 時間としており、本研究でもそれを踏襲したため、全部で 7 サイクルについての比較を行う。数値モデル及びデータ同化システムについての詳細は Ito et al. (2013) に記している。

### 3 比較データ同化実験の結果

図 2 に、全 7 サイクルの結果から得られた摩擦係数と水蒸気交換係数の風速依存性を示す。この結果は、“Coef”では、強風速域で

摩擦係数が小さくなるように修正され、水蒸気交換係数は大きくなるように修正されていたことを示している。近年の観測的研究・室内実験における研究によれば、強風速域で摩擦係数は一定の値で飽和、もしくは、減衰する可能性の高いことが指摘されている (Powell et al., 2003)。本研究で得られた摩擦係数の風速依存性は、この結果とも整合的である。

表 1 には、領域全体で、観測値と数値モデル結果との二乗誤差の総和を、観測値の誤差共分散で重みづけして定量化した値  $J_{obs}$  を示す。この表から、“Coef”では、最大で 22.4% も値が低くなっており、観測値と数値モデルの結果がより整合的になっていることが分かる。

各サイクルの最終時刻における台風の地表面最大風速の値を、気象庁のベストトラックデータ (衛星画像などから推測される台風の情報を収めたデータセット) と比較したのが表 2 である。同じ観測データを同化してい

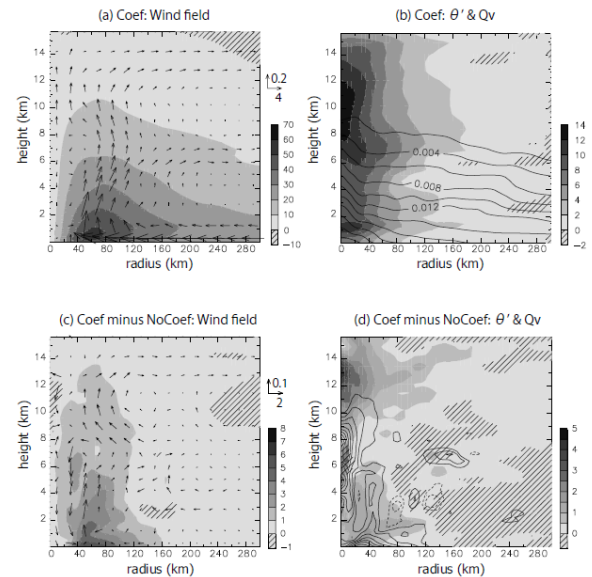


図 3 第 3 サイクルにおける接線方向平均場。(a) Coef における接線風速 (陰影)、動径風速及び鉛直風速 (矢印)。単位は m/s。(b) モデルの基本場からの温位偏差 (陰影; 単位は K)、水蒸気混合比 (コンター; 単位は kg/kg)。(c)(d) それぞれ、(a)(b) と同じ。ただし、NoCoef に対する Coef の偏差を書いたもの。

るにもかかわらず、"Coef"の結果は"NoCoef"よりも、ベストトラックデータに近くなっている。また、NoCoef 実験とベストトラックにおける台風中心の位置ずれは二乗平均平方根が 19.4 km であったのに対し、Coef 実験とベストトラックのそれは 14.0 km となっていた（図表は省略）。これらの結果は、海面交換係数の最適化をはかることで、より現実に近い台風の位置・強度が数値モデルで再現されることを示している。

再現性が最も高かった第3サイクルにおける内部構造に注目してみると、中心付近で水蒸気が多くなり、温暖核は強くなっている(図3)。すなわち、台風の強度変化と整合的に構造の変化が起きていることがわかる。

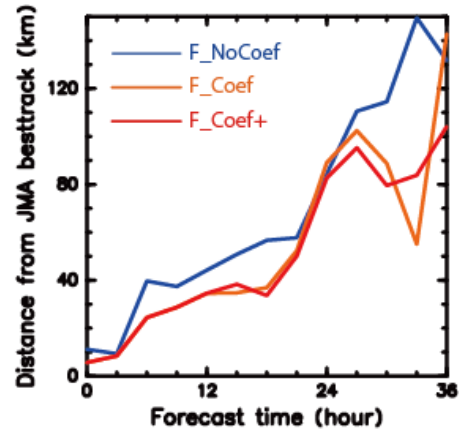
#### 4 予報実験

同化実験に引き続いて、第7サイクル終了時点の同化結果を初期値とした予報実験を行い、最適化の予報結果へのインパクトを調べた。予報実験には、以下の3種類を用い、予報期間は36時間とした。(I)F\_NoCoef: NoCoef の同化結果を初期値として予報。(II)F\_Coef: 初期値を Coef の同化結果とし、海面交換係数は同化結果を利用しない予報。(III)F\_Coef+: 初期値を Coef の同化結果とし、同化によって最適化された海面交換係数の風速依存性を用いる予報。

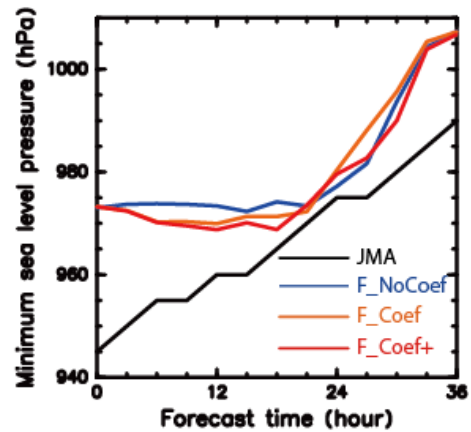
台風の進路予報結果は、F\_Coef 及び F\_Coef+において成績がよくなっていた。これは、台風の位置が予報開始時刻においてよく再現されていたために、進路予報の精度が高められたからだと考えられる。台風強度に関して言うと、潜熱交換係数が大きくなり、摩擦係数が小さくなったことで、F\_Coef+において強度は最も強く再現されていた。ただし、どの実験においても、強度予報の性能はあまり変わらず、最大風速は前半で急激に強くなり、後半で急激に弱まる傾向にあった。

予報期間における台風は、すでに衰退期に入っている。そこで、衰退期の強度に影響が大きい鉛直シア(200hPa と 850hPa との間

(a) Track Error (Init. time: 10/29 00:00)



(b) Pmin (Init. time: 10/29 00:00)



(c) Vmax (Init. time: 10/29 00:00)

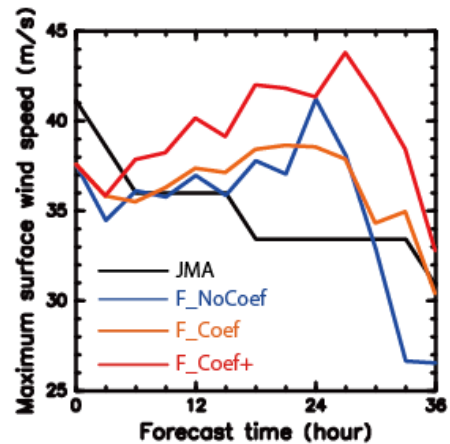


図4 予報実験の結果。上から順に進路予報、最低中心気圧、最大風速の結果を示している。黒はベストトラックの結果を表している。

Vertical Wind Shear (Init. time: 10/29 00:00)

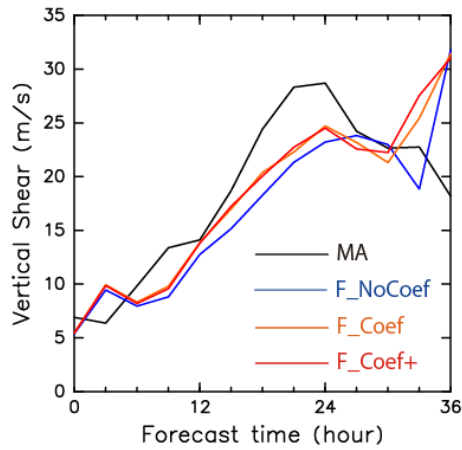


図5 予報期間における水平風の鉛直シア。MAはメソ解析値

の水平風速ベクトルの差の絶対値を台風中心から300km以内で平均したものを、3つの実験とMAで比較した(図5)。3つの実験ではいずれも予報時刻における鉛直シアを前半で過小評価、後半で過大評価する傾向にあった。鉛直シアが強い場合、ベンチレーション効果によって水蒸気が外側に排出され、強度は弱くなることが知られている(Frank and Ritchie, 2001)。本研究において、衰退期における強度予報がうまくいかなかったのは、海面交換係数の最適化の有無にかかわらず、水平風の鉛直シアの予報が適切ではなかったことが理由のひとつと考えられる。

## 5 まとめ

気象庁の高解像度データ同化システムを用い、新たに海面交換係数の最適化を施すデータ同化実験を行った。その結果、観測値とモデル結果のミスフィットは、既存の手法に比べ最大で22.4%低下し、数値モデルによって再現される台風の強度や位置も、ベストトラックデータへと近づいた。海面交換係数と初期値の同時最適化の結果を将来予報に用いたところ、進路予報に顕著な改善傾向が見られた。強度予報に関しては、明瞭な改善傾向が見られなかったが、これは、衰退期の強

度に影響の大きい水平風の鉛直シアを適切に予測できていなかったことが理由の一つと考えられる。

本研究は、2010年台風14号に関する1日間のみのデータ同化実験であるが、本手法の有効性を確かめるためには、より多くの事例について適用を進め、統計的に実証する必要がある。また、海洋モデルや波浪モデルを結合することにより、台風強度の再現性はさらに高められると考えられるため、今後も研究を進めていきたい。

## 参考文献

- Emanuel, K., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**(6), 585-605.
- Frank, W. and E. Ritchie, 2001: Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **129** (9), 2249-2269.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the japan meteorological agency: formulation and preliminary results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465-3475.
- Ito, K., Y. Ishikawa and T. Awaji, 2010: Specifying air-sea exchange coefficients in the high-wind regime of a mature tropical cyclone by an adjoint data assimilation method, *SOLA*, **6**, 13-16, doi:10.2151/sola.2010-004.
- Ito, K., T. Kawabata, Y. Honda, T. Kato, Y. Ishikawa and T. Awaji, 2013: Simultaneous observation of air-sea exchange coefficients and initial condition around a tropical cyclone with JNoVA, *J. Meteorol. Soc. Japan*, in minor revision.
- Powell, M., P. Vickery, and T. Reinhold, 2003: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, **422**, 279-283.
- 本田有機・澤田謙, 2010: 非静力学メソ4次元変分法, 数値予報課報告・別冊第56号