

### 第 3 章 LGEM<sup>1</sup>

#### 3-1 気象庁における LGEM 開発の目的

気象庁では台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームの枠組みのもと、統計力学モデル SHIPS を用いた 5 日先までの台風強度予測の現業運用を目指して開発が進められている。2 章で詳しく述べられている通り、SHIPS は重線形回帰に基づいて台風強度を予測する統計力学モデルであり、数値予報モデルで予測される大気環境場や、海面水温、気象衛星の観測データ等を説明変数として利用している。このため、これまで気象庁で台風強度予測ガイダンスとして利用されてきた SHIFOR 等の単純な統計モデルと比べて、より現実に近い大気状態を反映した強度予測が可能となっている。

これに加え、気象研究所では統計力学モデルの一つである LGEM (Logistic Growth Equation Model, DeMaria 2009) を北西太平洋海域における台風強度予報向けに開発した。SHIPS のような重線形回帰に基づいた統計力学モデルでは発達率の大きな台風の予測が難しい場合があるのに対し、LGEM の予測式はロジスティック方程式となっており、その解は非線形であるため、急発達のような発達率の大きな台風の強度予測により適していると考えられる。米国で開発されたオリジナルの LGEM は最大風速のみが予測対象であるが、台風中心気圧も予測可能な LGEM を新たに開発し、台風強度予測精度のさらなる向上を目指す。

#### 3-2 LGEM の予測式

この節では、米国で開発された LGEM の予測式について述べる。LGEM では台風中心が海上にある場合と陸上にある場合で別の予測式を使っている。台風中心が海上にある場合、式 (3.1) により最大風速の予測を行っている。

$$\frac{dV}{dt} = \kappa_V V - \beta_V V \left( \frac{V}{V_{mpi}} \right)^{n_V} \cdot \cdot \cdot (3.1)$$

ここで、 $V$  は予測対象である台風の最大風速である。 $V_{mpi}$  は最大風速の Maximum Potential Intensity (MPI) で、式 (3.2) で示す海面水温 (Sea Surface Temperature, SST) で決まる経験式を用いて算出している。

$$MPI = A + B \times \exp\{C(SST - SST0)\} \cdot \cdot \cdot (3.2)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $SST0$  は定数であり、 $SST$  は各予測時間における台風中心位置の海面水温である。北西太平洋域では  $V_{mpi}$  の経験式として次の式 (3.3) を用いている。

$$V_{mpi} = 19.7 + 88.0 \times \exp\{0.1909 (SST - 30)\} \cdot \cdot \cdot (3.3)$$

ここで計算された  $V_{mpi}$  の単位は  $m/s$  であるため、1.944 をかけてノットに変換したうえで予測計算に利用している。

SHIPS では重線形回帰により直接  $V$  を予測するが、LGEM では式 (3.1) の第 1 項の係数  $\kappa_V$  を重線形回帰で算出し、算出した係数を用いて  $V$  の予測計算を実行する。使用する説明変数としては、SHIPS と同様に数値予報モデルで表現される風速の鉛直シア一等の台風周辺の環境場や衛星観測データ等を利用している。 $n_V$ 、 $\beta_V$  は予報時刻によらない正の定数としている。式 (3.1) の右辺第 1 項から  $\kappa_V$  の値が大きいほど台風が発達する式となっている。また、右辺の第 2 項は  $V$  が  $V_{mpi}$  に近いほどより大きくなるので、 $V$  が  $V_{mpi}$  に近いほど発達を抑える式となっている。

台風中心が陸上にある時は次の式 (3.4) を用いて予測を行っている。

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha_V (V - V_b) \cdot \cdot \cdot (3.4)$$

この式は、最大風速  $V$  を減衰定数  $\alpha_V$  で背景風  $V_b$  まで弱めることを表している。 $\alpha_V$  及び  $V_b$  は緯度ごとに

<sup>1</sup> 入口武史

統計的に決められた値が用いられており、現時点で用いている値は北緯 36 度で  $\alpha_v = 0.095$ 、 $V_b = 36$  kt、北緯 40 度で  $\alpha_v = 0.183$ 、 $V_b = 40$  kt であり、その間の緯度の値については内挿で計算している。

式 (3.1) は非線形微分方程式となっており解析的に解けないため、数値積分で強度予測を行っている。予測計算のタイムステップは 1 時間としており、タイムステップごとに台風中心位置の海陸判定を行って、式 (3.1) または式 (3.4) のどちらを使うかを決定している。なお、LGEM では台風中心位置の予測は行っておらず、数値予報モデルで予測された台風トラッキングデータを使用している。

### 3-3 中心気圧を予測する LGEM の開発

台風中心気圧は、気象庁が発表する特別警報の基準の一つとして用いられるなど、防災上、重要な要素の一つである。現業での利用を考慮し、最大風速の予測式 (3.1) と (3.4) を台風中心気圧に拡張することにより、中心気圧を予測する LGEM を新たに開発した。式 (3.1) と同様に、海上における中心気圧の予測式を式 (3.5) で与える。

$$\frac{dP}{dt} = \kappa_p P - \beta_p P \left( \frac{P}{P_{mpi}} \right)^{n_p} \dots (3.5)$$

ここで、 $P$  は台風中心気圧、 $P_{mpi}$  は台風中心気圧の MPI であり、 $\kappa_p$  は重線形回帰で導出する。 $n_p$ 、 $\beta_p$  は正の定数であるが、その最適値は  $n_v$ 、 $\beta_v$  と同じではなく、 $V$  の予測と  $P$  の予測で異なる。なお中心気圧の予測では、 $P$  を  $P' = 1013 - P$  と変換した上で予測計算を行っている。これは  $n_p$ 、 $\beta_p$  が適切であれば、LGEM の予測値は 0 から MPI の間に収まり、極端な予測値の算出をある程度抑えることが可能となるためである。

式 (3.5) を用いて中心気圧の予測を行うには、 $P_{mpi}$  が必要となるが、 $P_{mpi}$  についても式 (3.2) の形の経験式で与えることとした。 $P_{mpi}$  の経験式の導出には、2000 年から 2012 年までの気象庁ベストトラックの台風中心気圧と中心位置、及びそれに対応する時刻、位置の COBE-SST の格子点値を利用した。

図 3.1 は期間中の海面水温と台風中心気圧の散布図を示しており、横軸は海面水温、縦軸は台風中心気圧である。DeMaria *et al.* (1994) にならって SST0 を 30°C とした上で、各海面水温に対する最小値付近の気圧データのみを使用して、最小二乗法により定数 A、B、C を決定した。これによって導出した中心気圧の MPI の経験式を式 (3.6) に示す。

$$P_{mpi} = 999.3 - 134.5 \times \exp\{0.114 (SST - 30)\} \dots (3.6)$$

但し、SST が 15°C 未満の場合は  $P_{mpi}$  を 980.0hPa、30°C 以上の場合は 864.8hPa で一定値とした。

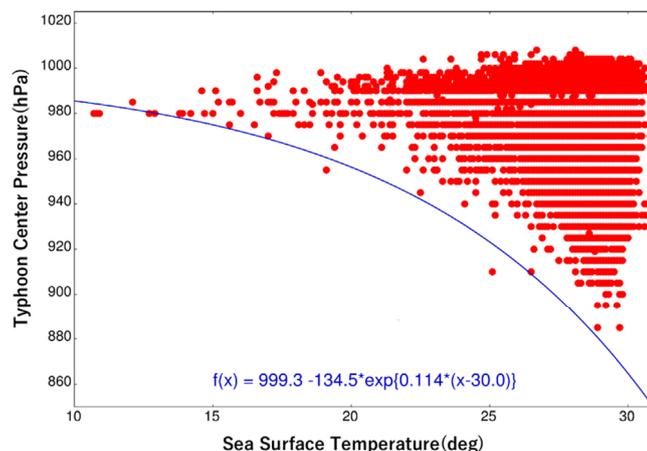


図 3.1 台風の中心位置における SST と気圧の散布図。実線は台風中心気圧の MPI の経験式。

### 3-4 回帰係数の作成方法

前述の通り今回開発した LGEM では、式 (3.1) 及び式 (3.5) 中の  $\kappa_V$  及び  $\kappa_P$  を重線形回帰で算出して予測計算を実行するが、重回帰計算で利用する回帰係数を計算するためには  $\kappa_V$  及び  $\kappa_P$  の値が必要となる。例えば最大風速予測式中の  $\kappa_V$  の値は式 (3.1) を変形して、以下の式から計算する。

$$\kappa_V = \left( \frac{1}{V} \right) \frac{dV}{dt} + \beta_V \left( \frac{V}{V_{mpi}} \right)^{n_V} \quad \dots (3.7)$$

式 (3.7) から、 $\kappa_V$  を算出するためには最大風速の時間変化率  $\frac{dV}{dt}$  の実況値が必要となるが、これについては DeMaria *et al.* (2009) にならって 24 時間の最大風速の時間変化率を用いた。ここでは、最大風速の実況値として気象庁ベストトラックを使用し、台風中心が 24 時間海上にある場合のみ  $\kappa_V$  を計算して、回帰係数作成に利用した。 $V_{mpi}$  は式 (3.3) により計算する。 $n_V$ 、 $\beta_V$  については、最適な値が台風ごとに異なるため、それぞれ少しずつ値を変えて計算した  $\kappa_V$  を用いて回帰係数を算出し、それらを利用した強度予測の統計検証結果を比較して、パフォーマンスが最もよくなる値を採用した。なお、回帰係数は熱帯低気圧や台風が存在するそれぞれの日時を初期時刻として、6 時間ごと 120 時間予報まで、予報時刻に対応する日時のトレーニングサンプルを用いて計算している。前述したとおり、LGEM の数値計算はタイムステップを 1 時間としているが、1 時間毎の回帰係数は数値積分実行時に 6 時間間隔で作成した回帰係数から線形内挿により算出している。

さらに、予報初期時刻において熱帯低気圧 (Tropical Depression:TD) である場合と台風 (Tropical Storm:TS、Severe Tropical Storm:STS、Typhoon:TY) である場合に対して、それぞれ別のトレーニングサンプルを用いて回帰係数を作成し使用するようにした。これは環境場が同じであっても、熱帯低気圧と台風では内部構造の違い等によって発達率が異なるので、これらを分離したほうがより適切な強度予測が可能と考えられるためである。TS、STS、TY についてもそれぞれのカテゴリ毎に回帰係数を作成して利用することで予測精度が向上する可能性もあるが、今回はこれらについては分割せずに回帰係数を計算した。台風用の回帰係数計算には気象庁のベストトラックに TS、STS、TY として記録されている日時のトレーニングサンプルを使用した。一方、TD 用の回帰係数計算には、TD として記録されている日時のトレーニングサンプルに加え、TS 以上に発達してから 5 日後までのトレーニングサンプルを使用した。なお、ベストトラックには台風が温帯低気圧に変化した後のデータも記録されているが、気象庁では温帯低気圧に変化した後の進路予測や強度予測は台風予報情報として発表していないため、温帯低気圧のデータは回帰係数作成には利用していない。

今回開発した LGEM の予測実行に採用した説明変数の一覧を表 3.1 に、 $n$ 、 $\beta$  の値を表 3.2 に示す。但し、LGEM の予測計算において、回帰係数及び  $n$ 、 $\beta$  の設定は予報初期時刻における強度にのみ依存することとし、予測の途中で TD から台風が発達した場合、及び、台風から TD に衰弱した場合、予測の途中で  $n$ 、 $\beta$  や回帰係数を変更するといったことは行わない。表 3.2 から TD 用と台風用で  $n$ 、 $\beta$  の値が大きく異なっており、時間的な強度変化特性の違いが大きいことがわかる。

ここで、TD の強度予測に台風用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$  を使用した場合と、TD 用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$  を使用した場合の違いの例を図 3.2 に示す。赤線は LGEM の最大風速予測、青線は当時の気象庁全球モデル (GSM、水平解像度約 20km) による最大風速予測である。濃い線は台風に対する強度予測、薄い線は台風が発達する前の TD に対する強度予測を示している。黒線は気象庁ベストトラックである。図 3.2 左は TD の予測に台風用の回帰係数を使用した場合の図である。図 3.2 左から、台風用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$  を使用した場合、LGEM による TD の強度予測はベストトラックに対して過発達となっている。一方、TD 用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$  を使用した場合を図 3.2 右に示す。この事例では台風用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$  を使う場合に比べて過発達の傾向が改善されている。

表 3.1 気象研究所で開発した LGEM による強度予測に採用した説明変数一覧。表 2.2 から抜粋。但し、PTPI、PTVI は独自に追加。r は台風中心からの距離を表す。

説明変数	説明	対象
MSLP	初期時刻の Pmin	P, V
VMAX	初期時刻の Vmax	P, V
PER	前 12 時間の VMAX の変化傾向	V
	前 12 時間の MSLP の変化傾向	P
POT	Vmpi と VMAX の差	V
	Pmpi と MSLP の差	P
COHC	海洋貯熱量 (OHC)	P, V
T200	200-hPa 高度の気温 (r=200-800 km)	P, V
T250	250-hPa 高度の気温 (r=200-800 km)	P, V
EPOS	地上空気塊を持ち上げた時の環境場との $\theta_e$ 差 (地上-100hPa 平均)	P, V
SHDC	850-200-hPa 間の鉛直シア (r=0-1000 km)	P, V
SHGC	1000-100hPa 高度の一般化鉛直シア (DeMaria 2010 参照)	P, V
SHLT	SHDC $\times$ sin(緯度)	P, V
Z850	850-hPa 高度の絶対渦度 (r=0-1000 km)	P, V
D200	200-hPa 高度の発散 (r=0-1000 km)	P, V
TWAT	850 hPa 高度の接線風の時間変化傾向 (r=0-500 km)	P, V
TADV	850-700 hPa 間の温度移流 (r=0-500 km)	P, V
TGRD	850-700 hPa 間の温度勾配 (r=0-500 km)	P, V
PC30	中心から半径 50-200km 以内の IR 輝度温度-30℃以下の割合	P, V
PTPI	予報初期時刻の Pmpi と MSLP との差	P, V
PTVI	予報初期時刻の Vmpi と VMAX との差	P, V

表 3.2 気象研究所で開発した LGEM による強度予測に採用した  $n$  及び  $\beta$  の値

	最大風速		中心気圧	
	$n$	$\beta$	$n$	$\beta$
TD 用	1.2	0.5	1.2	1.0
台風用	2.5	0.083	1.8	0.083

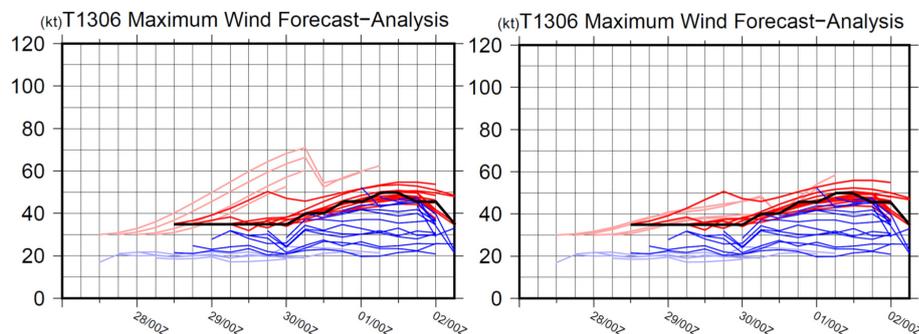


図 3.2 2013 年台風第 6 号に対する最大風速予測。左図は TD の最大風速の予測のために、台風用の回帰係数と  $n$ 、 $\beta$  を使用した場合。右図は TD 用の回帰係数と  $n$ 、 $\beta$  を使用した場合。赤線は LGEM による予測、青線は GSM による予測である。薄い赤、薄い青はそれぞれ LGEM による TD の予測、GSM による TD の予測を示しており、濃い赤線、濃い青線はそれぞれ LGEM による台風の予測、GSM による台風の予測を示している。黒線は気象庁のベストトラック。

### 3-5 使用データ

この節では気象研究所における LGEM 開発で利用したデータについてまとめておく。

(i) 台風中心気圧の MPI の経験式の導出に利用したデータ (3-3 節)

台風中心気圧の MPI の経験式を導出するために、台風中心気圧と SST の散布図を作成した。台風中心の位置と気圧については気象庁ベストトラック、対応する位置、時刻の SST については COBE-SST のデータ (日別値) を利用した。

(ii) 台風中心が海上にある場合の予測式中の  $\kappa$  ( $\kappa_V$  及び  $\kappa_P$ ) を重線形回帰で導出するために必要な回帰係数作成に利用したトレーニングサンプル (3-4 節)

$\kappa$  を重線形回帰で導出するために必要な回帰係数作成のためのトレーニングサンプルとして、次のデータを使用した。熱帯擾乱の最大風速、中心気圧、中心位置については気象庁ベストトラックデータ、台風周辺の大気環境場については JRA55 大気再解析データを使用し、SST については COBE-SST を使用した。海洋貯熱量データ (Ocean Heat Content, OHC) は、気象庁海洋気象情報室で作成された再解析値を利用した。また、2 章と同様、気象衛星の輝度温度観測データを使用している。

(iii) LGEM による強度予測実行時に使用したデータ (3-4 節、3-7 節、3-8 節、3-9 節)

LGEM の予報初期値としては気象庁の熱帯低気圧速報解析の最大風速と中心気圧を利用した。重線形回帰計算に必要な説明変数の算出には GSM の予報値、GSM で利用されている全球日別海面水温解析データ (MGDSST)、気象庁海洋気象情報室作成の海洋貯熱量速報解析データ及び気象衛星の輝度温度観測データを使用した。なお、3-9 節で述べる統計検証の真値として気象庁ベストトラックデータを使用している。

### 3-6 Persistence が原因の過発達への対応

今回開発した LGEM では説明変数の一つとして、予報初期時刻の 12 時間前から予報初期時刻までの台風強度 (中心気圧、最大風速) の変化量 (Persistence, PER) を利用している。LGEM で利用している説明変数の中で、PER は予報時間に対する依存性が比較的大きな説明変数であり、予報初期では予測に与える影響が大きいが、予報時間が長くなるにつれて影響が小さくなっていくという特徴を持っている。

個々の事例を調査していくと、PER が大きい場合にベストトラックに比べて大きく過発達な予測となる事例が見られた。図 3.3 左は 2014 年 10 月 7 日 18UTC を初期値とした台風第 19 号に対する LGEM の予測事例である。気象庁ベストトラックでは 2014 年台風第 19 号の中心気圧は 10 月 7 日 18UTC では 900hPa であり、8 日 12UTC まで 900hPa の勢力を保ち、その後衰弱している。一方、LGEM の予測

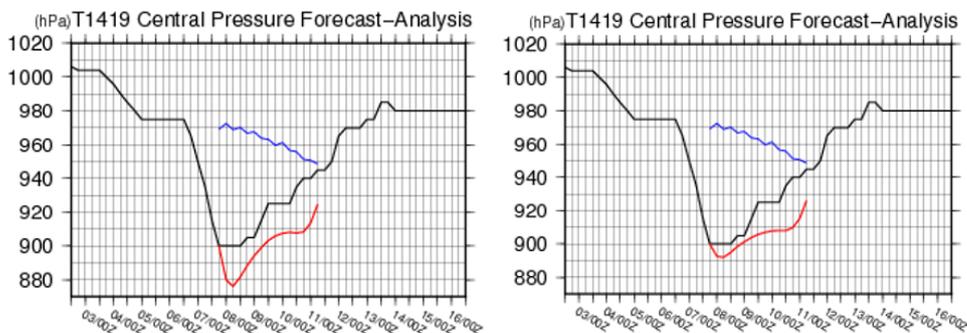


図 3.3 PER が原因で発生する過発達抑制処理の導入による中心気圧予測の違い。左図は抑制処理を行わなかった場合の LGEM の予測、右図は抑制処理を適用した場合の LGEM の予測。赤線は LGEM による予測、青線は GSM による予測、黒線は気象庁ベストトラック。

では FT=6h にあたる 8 日 00UTC で 880hPa まで勢力を強め、その後 FT=12h にあたる 8 日 06UTC には 876hPa まで発達させた後、衰弱する予測となっており、ベストトラックと比べるとピーク時で 24hPa の過発達となっている。

LGEM による強度予測実験では、初期値及び PER の算出に利用する V、P の値として熱帯低気圧速報解析のデータを利用しているが、この事例では中心気圧の PER は -45hPa となっており、このような大きな変化量が LGEM の予測に影響を及ぼしていると考えられた。熱帯低気圧速報解析は、解析に利用できる観測データがベストトラック作成時の解析と比べて少なく、使用できるデータ量に応じて解析精度が悪くなる場合もしばしば見られる。そのため品質管理の意味も兼ねて PER に制限を与え、PER が -20hPa よりも小さくなる場合は -20hPa に抑えるようにした。この変更を加えた場合の LGEM の予測を図 3.3 右に示す。変更後は FT=6h で 892hPa、12h で 891hPa となっており、予報初期で実況に近い。一方、予報中盤以降は PER の影響が他の説明変数に比べて小さくなるため、変更前後でそれほど大きな違いは見られない。

### 3-7 LGEM の予測事例

図 3.4 に 2013 年 10 月 11 日 12UTC を予報初期時刻とした台風第 26 号に対する LGEM の強度予測と、当時の GSM の進路予測及び強度予測を示す。図 3.4 左は台風を進路予測を示しており、気象庁ベストトラックの台風中心位置 (BST) と LGEM の説明変数算出に利用する GSM の進路予測が示されている。右上の図は台風中心気圧の予測図で横軸が日付、縦軸は中心気圧である。同様に、右下の図は最大風速の予測図である。

この事例では、ベストトラックでは FT=48h にあたる 13 日 12UTC に中心気圧が 930hPa まで発達しているが、GSM では発達の予測が弱く、960hPa までの発達しか予測できていない。一方、LGEM の予測では若干ピークの時刻が遅いもののベストトラックに近い予測ができています。また、図 3.5 に示す 2014 年台風第 8 号に対する予測事例では、図 3.4 の事例とは対照的に GSM の予測は最盛期においてベ

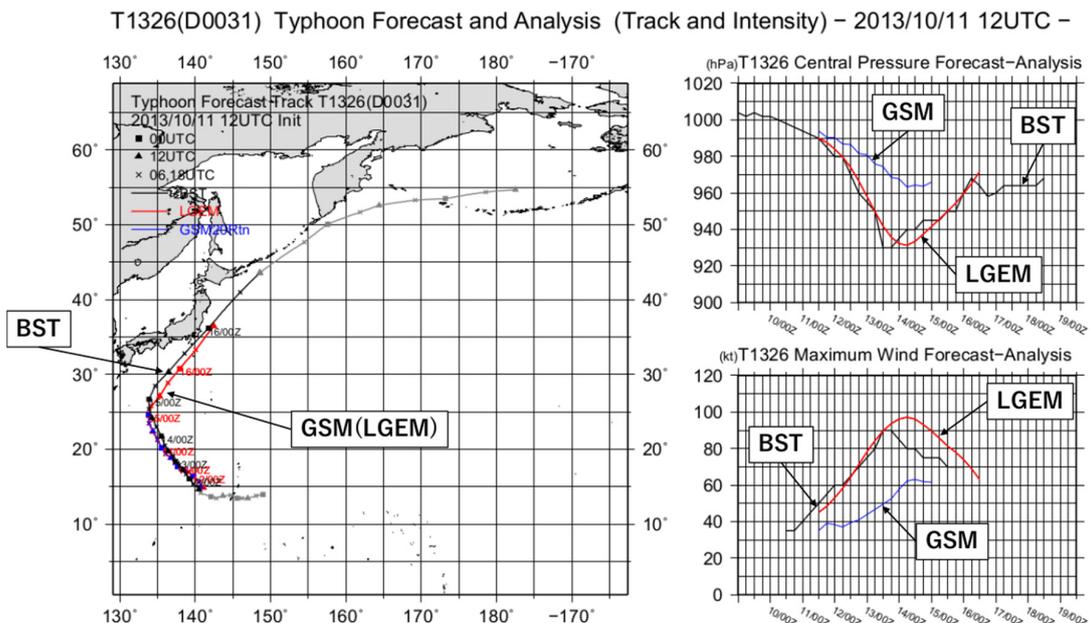


図 3.4 2013 年 10 月 11 日 12UTC における台風第 26 号の強度予測事例。左側の図は台風を進路予測を示しており、気象庁ベストトラックの台風中心位置 (BST) と当時の GSM の進路予測 (GSM) が示されている。右上の図は台風中心気圧の予測図で横軸が日付、縦軸は中心気圧である。右下の図は同様に最大風速の予測図。

ストトラックに対して過発達な予測となっているが、LGEM の予測では過発達を抑え、よりベストトラックに近い予測が出来ている。

LGEM の予測誤差が大きかった事例を図 3.6 に示す。この事例では、実況では予報初期の段階で台風が転向し北東進しているが、GSM の予測では転向せずに転向点付近で停滞する予想になっている。前述の通り LGEM では GSM の進路予測に沿って説明変数を計算しているため、GSM の進路予報誤差が大きい場合に、LGEM の予測誤差が特に大きくなる事例が見られた。

なお、LGEM は温低化の過程を考慮していないため、台風から変化した温帯低気圧の強度予測で誤差が大きくなる。例えば、図 3.7 は図 3.4 の例と同じく 2013 年台風第 26 号に対する予測で、2013 年 10

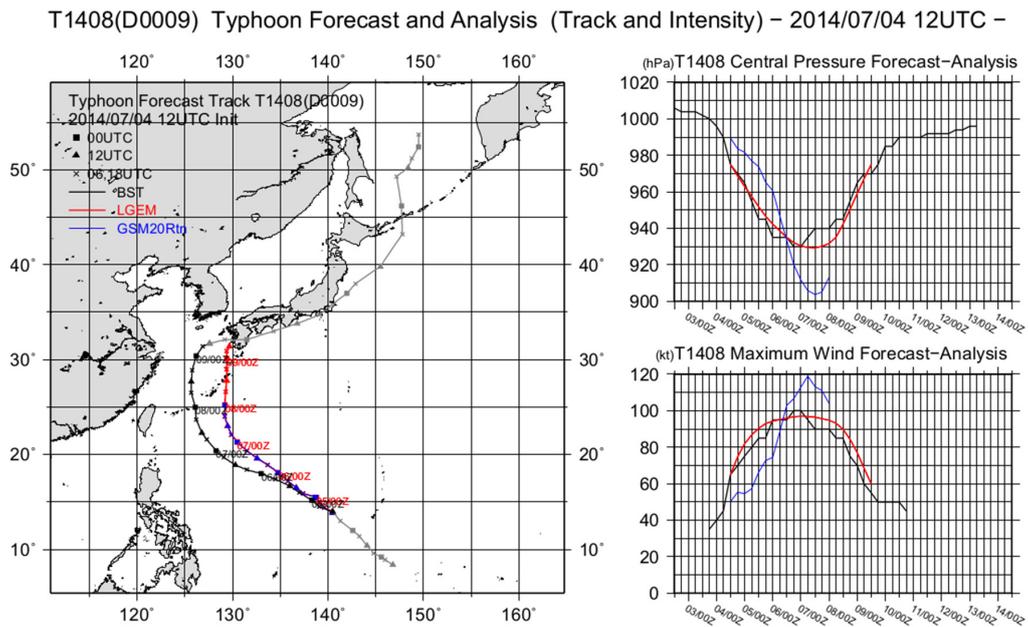


図 3.5 2014 年 7 月 4 日 12UTC 初期値の 2014 年台風第 8 号の強度予測事例。図の内容は図 3.4 と同じ。

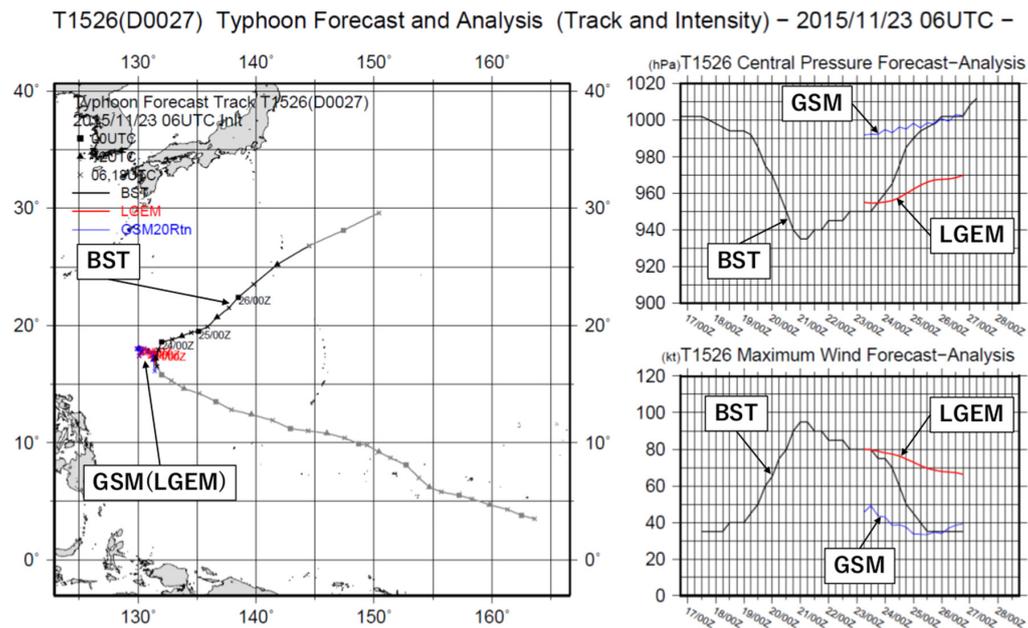


図 3.6 2015 年 11 月 23 日 06UTC における台風第 26 号の強度予測の事例。図の内容は図 3.4 と同じ。

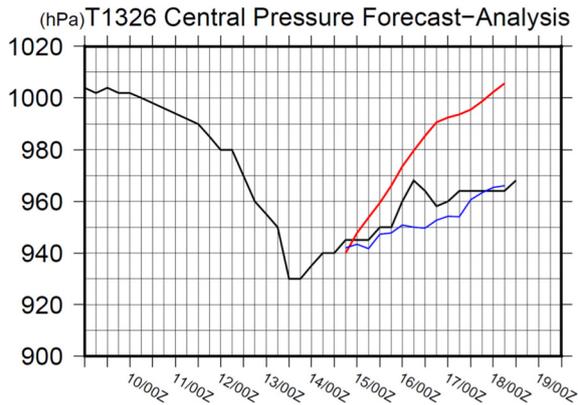


図 3.7 2013 年 10 月 14 日 18UTC における台風第 26 号の中心気圧の予測事例。2013 年台風第 26 号は 10 月 16 日 06UTC に台風から温帯低気圧に変化した。赤線は LGEM による予測、青線は GSM による予測、黒線は気象庁ベストトラック。

月 14 日 18UTC を予報初期時刻とした事例である。2013 年台風第 26 号は 16 日 06UTC に温帯低気圧となっており、ベストトラックでは温低化した 16 日 06UTC までは中心気圧が時間と共に弱まり、温低化直後にやや気圧がさがったものの、その後は概ね一定となっている。ところが LGEM の予測では温低化後も気圧を弱め続けており、予報時間が長くなるにつれてベストトラックとの差が大きくなっている。一方、GSM は温低下前後でやや誤差が大きいものの、LGEM に比べて精度のよい予測が出来ている。温帯低気圧化後のデータも含めた回帰係数を使用してもこの傾向はほとんど変わらなかった (図略)。

### 3-8 統計検証

LGEM による台風強度予測の統計検証結果 (検証期間は 2013 年から 2015 年の 3 年間) を図 3.8 に示す。図 3.8 左は中心気圧の予測精度の図である。横軸が予報時間、左の縦軸は平方根平均二乗誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) またはバイアス (BIAS) を示しており、右の縦軸はサンプル数 (Num) を示している。青線は RMSE、オレンジ色の線は BIAS、灰色の線はサンプル数である。同様に図 3.8 右は最大風速の予測精度を示す図である。LGEM の予測精度は、48 時間予報の RMSE は最大風速 13.4kt、中心気圧 15.7hPa、120 時間予報の RMSE では最大風速 18.1kt、中心気圧 21.8hPa であった。バイアスについては概ね予報前半を中心に若干台風強度を弱めに予測するバイアスがあり、予報後半では台風を強めるバイアスが見られた。

また、3-4 節で述べた、TD 用の回帰係数及び  $n$ 、 $\beta$  を用いた場合と、台風用の回帰係数及び  $n$ 、 $\beta$  を用いた場合の TD の強度予測の統計検証の比較を図 3.9 に示す。図 3.9 左は中心気圧の予測、右は最大風速の予測であり、赤線が TD 用の回帰係数と  $n$ 、 $\beta$  を用いた場合、青線は台風用の回帰係数と  $n$ 、 $\beta$  を用いた場合の予測精度である。実線は RMSE、点線は BIAS を表している。なお、この統計検証に利用した予測データはベストトラックに記録されている TD であつ、熱帯低気圧速報解析で TD と解析されたデータのみである。つまり、熱帯低気圧速報解析では台風と解析されたが、ベストトラックでは TD となっているデータについては統計に含めていない。

図 3.9 左より、中心気圧の予測精度の比較では台風用の回帰係数及び  $n$ 、 $\beta$  を TD の予測に利用した場合、予報の初期から中盤にかけてベストトラックより台風を弱め、FT=96h 以降は強めるバイアスが見られるが、TD 用の回帰係数及び  $n$ 、 $\beta$  を利用した場合は FT=48h までの正バイアスと FT=96h 以降の負バイアスを大幅に改善しているのがわかる。RMSE についても予報終盤を中心に予報期間全体にわたって精度が改善している。一方、図 3.9 右に示す通り、TD 時の最大風速の予測については予報終盤では若干改善傾向がみられるものの、予報初期、予報中盤ではそれほど改善は見られず、むしろ悪化している時間帯もある。このような結果となった原因の 1 つとして、以下の可能性が考えられる。

中心気圧については、TD 時でも 6 時間毎にベストトラックにデータが記録されているので、その時間変化を問題なく回帰係数に反映することが可能である。しかし、気象庁ベストトラックには TD 期間の最大風速が記録されていないため、回帰係数作成時に一様に 30kt を仮定して計算を行った。これは、TD の強度予測を行う場合に最大風速の初期値として 30kt を仮定していることを考慮したものであるが、

このことが式 (3.7) で計算する $\kappa_V$ の精度に影響を及ぼしたと考えられる。例えば発達中の TD の場合は、実際には式 (3.7) の第 1 項が正の値となるが、一様に 30kt を仮定した場合は 0 となる。そのため、TD のままである可能性が比較的高い予報前半を中心として、平均的に $\kappa_V$ の値が小さくなるのが原因となって、予報前半を中心に負バイアスとなっているのではないかと考えられる。以上の理由により、TD の最大風速の予測に関しては、回帰係数作成に気象庁ベストトラックのみを利用するかぎり限界があると考えられ、精度向上には更なる検討を行う必要がある。

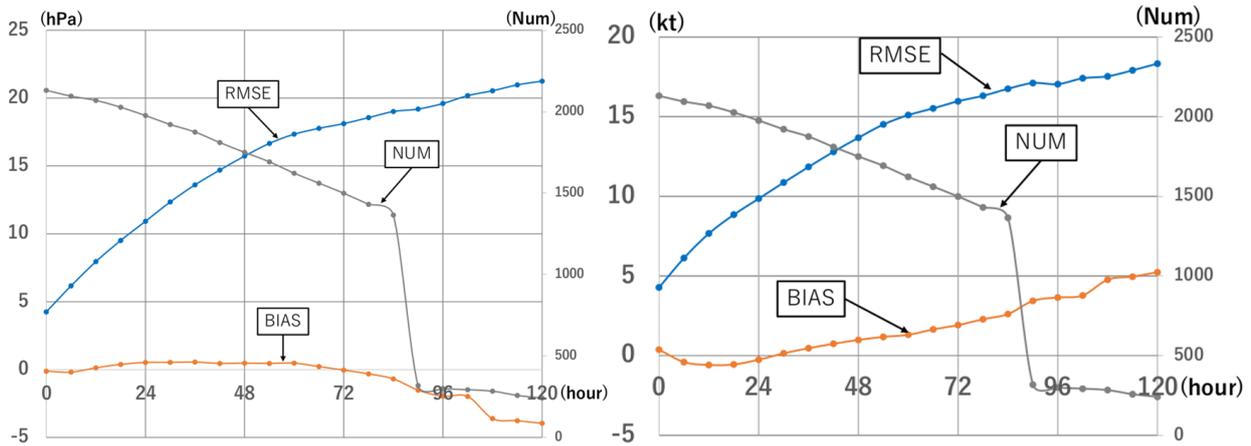


図 3.8 LGEM による台風強度予測検証。左は台風中心気圧、右は最大風速の検証図。左の縦軸は RMSE または BIAS を表しており右の縦軸はサンプル数 (Num) を表す。横軸は予報時間である。青線は RMSE、オレンジ色の線は BIAS、灰色の線はサンプル数を示している。

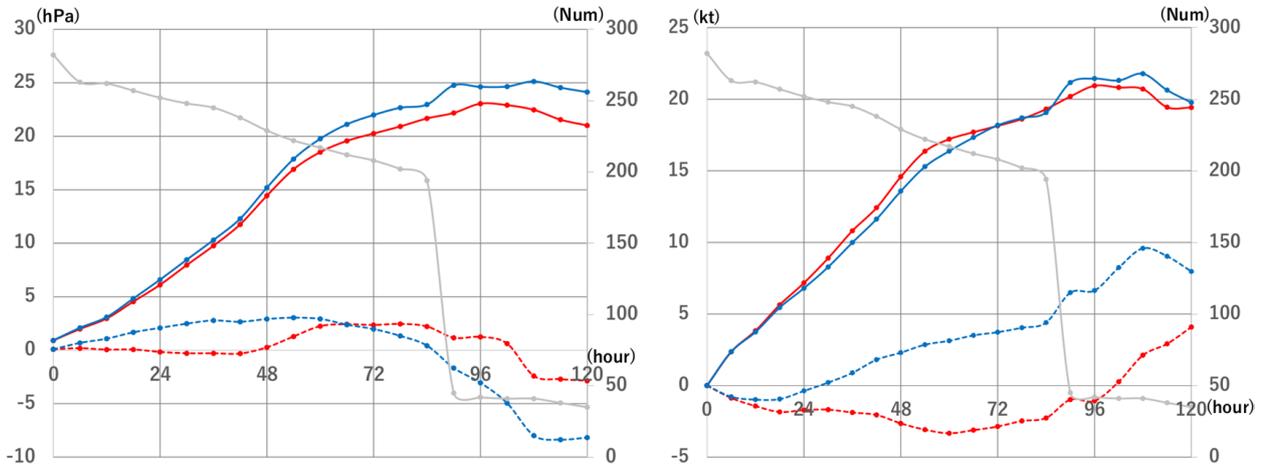


図 3.9 TD の予測に台風用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$ を使用した場合 (青色) と TD 用の回帰係数、 $n$ 、 $\beta$  (赤色) を使用した場合の比較。左図は中心気圧の予測精度、右図は最大風速の予測精度の図。実線は RMSE、点線は BIAS を示している。灰色の線はサンプル数。

### 3-9 まとめ

米国で開発された LGEM をベースに、気象庁の熱帯低気圧速報解析、全球モデル等のデータを入力として台風強度を予測する気象庁版 LGEM を開発した。米国版 LGEM は最大風速のみが予測対象であるため、ここでは中心気圧の MPI の経験式を導出し、さらに中心気圧を変数変換した上で予測する等の工夫を施すことにより、台風中心気圧を予測する LGEM を新たに開発した。台風が海上にある場合の予測式中の  $\kappa$  を重線形回帰で計算するための回帰係数及び  $n$ 、 $\beta$  は、TD と台風で異なるものを用いるようにした。但し、この設定は予報初期時刻における熱帯擾乱の強度にのみ依存することとした。

2013 年台風第 26 号及び 2014 年台風第 8 号に対して LGEM による強度予測を実施し、当時の GSM(水平解像度約 20km) の予測と比べて精度の良い予測ができていることを確認した。一方 LGEM は、GSM の台風進路予測に沿って説明変数を計算しているため、GSM の進路予測誤差が大きい場合、LGEM の予測誤差が特に大きくなる事例が見られた。

2013 年～2015 年の TD と台風に対して統計検証を実施したところ、48 時間予報の RMSE は最大風速で 13.4kt、中心気圧で 15.7hPa、120 時間予報の RMSE については最大風速で 18.1kt、中心気圧で 21.8hPa であった。BIAS については概ね予報前半を中心に若干台風を弱めに予測する傾向があり、予報後半では台風を強めるバイアスが見られた。

### 3-10 今後の課題

3-8 節の統計検証から、今回作成した LGEM では予報期間の前半を中心に台風をやや弱め、終盤で強めに予想する傾向があることがわかる。このようなバイアス傾向となる要因はいくつか考えられるが、その一例を図 3.10 に示す。図 3.10 は 2017 年台風第 18 号に対する LGEM による中心気圧の予測事例で、予報初期時刻は 2017 年 9 月 9 日 12UTC である。横軸は予報時間、縦軸は台風中心気圧であり、赤線は LGEM の予測、黒線は気象庁ベストトラックデータを示している。2017 年台風第 18 号は熱帯低気圧速報解析では 9 月 9 日 06UTC までは TD であり、9 月 9 日 12UTC に台風に発達した。図から LGEM の予測は予報初期を中心に緩やかな発達を予測しているが、気象庁ベストトラックデータでは LGEM よりやや発達率が大きくなっている。また、気象庁ベストトラックデータでは FT=66h から 90h にかけて一時的に発達が停滞している期間があり、その後再び発達しているが、LGEM の予測では実況で発達が停滞している時間帯に発達率が大きくなっており、発達停滞の予測ができていない。今回開発した LGEM の予測では、このような一時的な発達の停滞を予測できず、誤差が大きくなる事例が散見された。

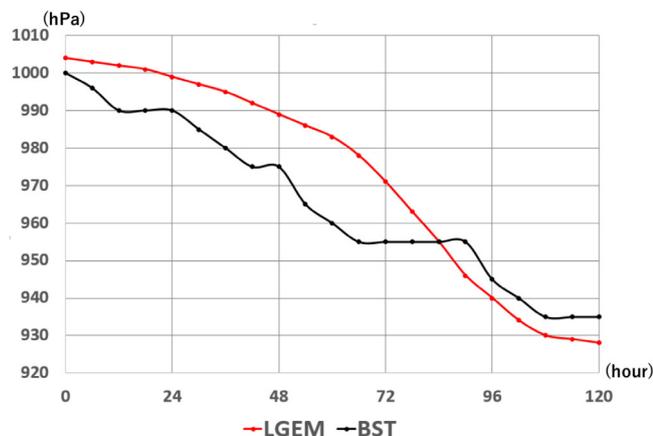


図 3.10 予報前半でベストトラックより弱め、終盤で強めとなっている LGEM による台風中心気圧予測の例。2017 年台風第 18 号に対する LGEM による中心気圧の予測事例で、予報初期時刻は 2017 年 9 月 9 日 12UTC。赤線は LGEM による予測、黒線は気象庁ベストトラック。

台風発達の一時的な停滞の原因については様々な要因が考えられる。例えば一時的な鉛直シアアの強まり等、台風周辺の環境場に主要因があると考えられる事例については、説明変数の一つとして台風周辺の鉛直シアアを使用しているため、停滞の予測も可能であると考えられる。一方、台風の壁雲交換にみられるように、台風の内部プロセスが主要因と考えられる事例もしばしば見られる。現時点では台風内部プロセスに関するメカニズムには未解明な部分も多いことや、説明変数算出に利用している、水平解像度約 20km の GSM ではこのような内部プロセスを適切に表現することが難しいといった事情もあり、今回開発した LGEM では現実的な台風の内部プロセスをほぼ考慮できていないと思われる。

3-4 節で述べた TD と台風の予測で用いる回帰係数の分離の必要性についても、気象庁ベストトラックに TD 時の最大風速値がないことに加えて、このようなことが潜在的な要因となっている可能性もあるだろう。LGEM の手法では予測が難しい事例も少なくないと思われるが、台風内部プロセスのメカニズム解明や全球モデルの性能向上により、回帰係数を分離しなくてもより精度の良い予測ができると考えられる。

#### 参考文献

- DeMaria, M., 2009: A Simplified Dynamical System for Tropical Cyclone Intensity Prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 68-82, <https://doi.org/10.1175/2008MWR2513.1>
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: A Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic Basin. *Weather and Forecasting*, **9**, 209-220, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0209:ASHIPS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0209:ASHIPS>2.0.CO;2)
- Schumacher, A., M. DeMaria, and J. Knaff, 2013: Summary of the new statistical-dynamical intensity forecast models for the Indian Ocean and Southern Hemisphere and resulting performance. JTWC Project Final Report.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **93**, 5-48, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865-879, <https://doi.org/10.1002/joc.1169>.
- DeMaria, M., 2010: Tropical cyclone intensity change predictability estimates using a statistical-dynamical model. Extended Abstract, 29th AMS Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, May 10-14, 2010, Tucson, AZ.