

第 2 章 SHIPS¹

2-1 SHIPS とは

SHIPS とは、重線形回帰式を用いて、予測初期時刻からそれぞれの予測時刻までの熱帯低気圧の強度変化量を予測するモデルのことである。以下の式で表される。

$$y = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \dots \quad (2.1)$$

ここで、 y はモデルの初期時刻（Forecast Time : FT = 0 h）から予測時刻までの強度変化量、 x_1, x_2, x_3 は説明変数、 α, β, γ はそれらの係数を表す。予測時刻は 6 時間先（FT = 6 h）から 6 時間おきに 120 時間（FT = 120 h, 5 日）先まであり、予測時刻の数（20 個）だけ重線形回帰式がある。説明変数はどの予測時刻の回帰式でも同じものを使う。予測時刻によっては寄与がほとんどない説明変数があるものの、同じ変数を使うことで予測結果の解釈が容易になり、また FT=6 h から FT=120 h までの予測値の不規則変動を抑えられる。SHIPS の説明変数としては、現在強度や直近の強度変化傾向の他、数値モデルが計算した熱帯低気圧の予測進路に沿って平均した環境場条件、および予測初期時刻における静止気象衛星の輝度温度情報が使われる。

SHIPS は、DeMaria and Kaplan (1994) によって開発され、その後改良が重ねられ（DeMaria and Kaplan 1999; DeMaria *et al.* 2005）、精度改善が図られてきた。現在では、信頼できる熱帯低気圧強度ガイダンスモデル（表 1.1）の一つとして、世界の現業機関で広く使われるようになっている（Sampson and Knaff 2014）。

重線形回帰式に基づく強度予報モデルの利点は、全体の強度変化量に対する各説明変数の寄与が求まることである。台風予報官は、強度予報の際に、その根拠も報告することになっている（予報根拠報）。SHIPS は、各説明変数による強度変化への寄与を定量的に評価できるという点で、その根拠報作成に欠かせない有力なツールとなる。

一方で、SHIPS は物理関係式に基づくモデルではないため、その予測精度には限界がある。SHIPS の重線形回帰式では、統計的に最も起こりうる強度変化量を予測することになる。しかし、現実の熱帯低気圧は、たとえ環境場条件が同じであっても、内部プロセスの違いにより、同じ強度変化をするとは限らない（例えば、Hendricks *et al.* 2010）。また、後に実証する通り、SHIPS は、統計的に頻度が少ない急発達の予測が極めて不得手である。

以降では、気象庁用に構築した SHIPS で使用されるデータ、SHIPS 係数の特徴、上陸時等における予測値の補正、予測実験・精度検証の方法を述べる。その後、精度検証の結果を示し、SHIPS の良い点、限界点を明らかにする。最後に全体をまとめ、今後の課題を述べる。

2-2 気象庁版 SHIPS の構築

気象研究所では、2015 年以降、米国の SHIPS 開発者からの多大なる協力と計算コードの提供を得て、気象庁全球モデル（GSM）に適用させた SHIPS の開発を行った。以降、これを「気象庁版 SHIPS」と呼ぶ²。米国の SHIPS は、最大風速（Vmax）の変化量のみを予測するが、気象庁版 SHIPS ではそれに加えて中心気圧（Pmin）の変化量も予測するよう、気象研究所でさらなる開発が加えられた。気象庁版 SHIPS は北西太平洋海域における熱帯低気圧の強度予報を対象とする。

¹ 嶋田宇大、大和田浩美

² 気象庁では、本稿を執筆以降に、「気象庁版 SHIPS」を TIFS（Typhoon Intensity Forecast scheme based on SHIPS）と名付けた。

2-2-1 使用データ

表 2.1 に気象庁版 SHIPS に使用されるデータセットを示す。気象庁版 SHIPS の係数作成に使用するデータ（以下、「トレーニングサンプル」という。）は、気象庁ベストトラックデータ（6 時間間隔の最大風速、中心気圧、中心位置）、JRA-55 大気再解析データ（Kobayashi *et al.* 2015）、赤外静止気象衛星データ、COBE-SST（海面水温データ、Ishii *et al.* 2005）、北太平洋海洋データ同化システム（MOVE/MRI.COM, Usui *et al.* 2006）による海洋表層再解析データから作成した海洋貯熱量（OHC、Wada 2015）データである。海面水温データは、JRA-55 の境界値として使用されたデータと同じで、このデータから経験式に基づいた最大到達可能強度（MPI）が算出される。OHC データは気象庁海洋気象情報室で作成されたものである。トレーニングサンプルに含まれる熱帯低気圧は、中心が海上にある時に限定される。係数作成期間は 2000 年から 2012 年までの 13 年間とした。

SHIPS の予測に使用するデータは、熱帯低気圧速報解析データ、一日 4 回の GSM の予測値、海面水温として GSM の境界値として使用されている全球日別海面水温解析データ（MGDSST、栗原ら 2006）、赤外静止気象衛星データ及び OHC データである。精度検証のための予測実験は、2013 年から 2016 年の 4 年分のデータで行った。2013 年から 2015 年までの GSM は、12UTC 初期時刻のみ 11 日先まで計算され、他の 3 回は 84 時間先までの計算である。2016 年の GSM では、他の初期時刻（00, 06, 18UTC）でも 132 時間先まで試験的に計算されたデータを使用した。従って、本報告の精度検証では、FT = 90 h 以降のサンプル数は大きく減る。

本報告の精度検証では、正解を気象庁ベストトラックの強度とする。ただし、気象庁ベストトラックには、熱帯低気圧が台風強度未満の時、Vmax 値がない。また、熱帯低気圧速報解析とベストトラックでは温帯低気圧化や台風未満の熱帯低気圧に衰弱するタイミングが異なることがある。そのため本報告では、Vmax の精度検証はベストトラック上で台風強度期間のみの予測サンプルを用いて行う。Pmin の検証は、台風の温帯低気圧化前後を含む衰弱時の精度評価をするために、ベストトラックに対応する時刻の強度情報がある限り、全ての予測サンプルを使用する。従って、ベストトラックに含まれる温帯低気圧化した擾乱も検証対象とする³。なお、SHIPS と他のガイダンスモデルの精度比較は、第 6 章を参照していただきたい。

2-2-2 説明変数

気象庁版 SHIPS の説明変数は、全部で 26 個からなり（表 2.2）、米国の SHIPS ですでに長期間にわたり使用されている変数の他、重線形回帰式モデルにとって最適な説明変数を探索するステップワイズ法で選択された新たな変数からなる。このうち後者には、新たに Pmin 用の SHIPS を開発するために、気象庁版 SHIPS 独自に導入されたものが含まれる。一方、米国の SHIPS では使われているが、気象庁版 SHIPS には使われていない説明変数もいくつかある。鉛直シアの向き及び台風の指向流高度がそれに

表 2.1 SHIPS で使用されるデータセット

	係数作成データ	予測データ
熱帯低気圧情報	気象庁ベストトラック	熱帯低気圧速報解析
大気環境場	JRA55	GSM 予測値
海面水温	COBE-SST	MGDSST
海洋貯熱量	MOVE/MRI.COM	MOVE/MRI.COM

³ SHIPS の予報は、その擾乱が熱帯低気圧と解析され、GSM 予報値のトラッキングがされている時に限り行われる。

表 2.2 SHIPS 説明変数リスト。Pmin 及び Vmax 用の説明変数として、P 及び V で記されている。

説明変数	説明	対象
MSLP	初期時刻の Pmin	P, V
VMAX	初期時刻の Vmax	-
VMA2	VMAX の二乗	V
PER	前 12 時間の Pmin または Vmax の変化傾向	P, V
OSLP	初期時刻の Pmin と 970 hPa の差の絶対値	P
PMPE	(MSLP - 880)×PER	P
VMPE	VMAX×PER	V
POT	最大到達可能強度 (MPI)と VMAX との差	P, V
POT2	POT の二乗	P, V
COHC	海洋貯熱量 (OHC)	P, V
OHC2	COHC の二乗	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
ZNAL	東西方向の移動速度	P, V
RHMD	700-500 hPa 相対湿度 (%) (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 θ_e 差 (r=200-800 km) (地上-100 hPa 間の正值の平均)	P, V
SHDC	850-200 hPa 間の鉛直シア (r=0-500 km)	P, V
SHGC	1000-100 hPa 高度の一般化鉛直シア (DeMaria 2010 参照)	P, V
SHSH	SHDC の二乗	P, V
SHLT	SHDC×sin(latitude)	P, V
SHVM	SHDC / VMAX	P, V
VMSH	VMAX×SHDC	V
PMSH	(MSLP - 880)×SHDC	P
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 の間の温度移流 (r=0-500 km)	P, V
TGRD	850-700 hPa の間の温度勾配 (r=0-500 km)	P, V
PC30	中心から半径 50-200 km 以内の IR 輝度温度-30℃以下の割合	P, V
SDIR	中心から半径 0-200 km 以内の IR 輝度温度の標準偏差	P, V

当たる。この理由は、変数それぞれに対して使うべき、北西太平洋における最適な係数に対する統計調査ができていないためである。これは今後の課題である。

Pmin 用に新たに導入された説明変数は、「初期時刻の Pmin と 970 hPa の差の絶対値 (OSLP)」、「(初期時刻の Pmin - 880) × 前 12 時間の強度変化傾向 (PMPE)」、「(初期時刻の Pmin - 880) × 鉛直シア (PMSH)」である。これらの変数は、SHIPS の Pmin 予測全体のパフォーマンス改善に寄与していたため、気象庁版 SHIPS に導入した。具体的には、OSLP は、台風の発達期において、FT = 0 h における中心気圧が 960-975 hPa 付近の台風で最も気圧低下量が大きいという研究成果に基づく (Shimada *et al.* 2017)。PMPE 及び PMSH は、Vmax における、「初期時刻の Vmax × 前 12 時間の強度変化傾向 (VMPE)」及び「初期時刻の Vmax × 鉛直シア (VMSH)」に相当する変数として導入した。

ステップワイズ法によって新たに選択された変数は、「海洋貯熱量 (COHC) の二乗 (OHC2)」、「鉛直シアの二乗 (SHSH)」、「鉛直シア / 初期時刻の Vmax (SHVM)」である。説明変数の二乗は、「初期時刻の Vmax の二乗 (VMA2)」や「最大到達可能強度と初期強度の差 (POT) の二乗 (POT2)」と同

様に、線形回帰式の SHIPS に非線形的な関係を持たせる効果を持つ。なお、これらの説明変数は、従来の説明変数と強い相関関係を持つ。一般に、重線形回帰モデルでは多重共線性の問題があるため、高い相関関係にある説明変数を共に用いることを避ける。気象庁版 SHIPS の開発に当たっては、この点に注意しつつ、十分な数のサンプルを用意すること、算出された係数が相関の高い変数同士でおかしな値にならないこと、両方の変数を使用した方が精度改善することを確認の上、26 個の説明変数を決定した。

トレーニングサンプルを使用して作成した SHIPS の重線形回帰式は、どの程度強度変化量を説明できているだろうか。それには、自由度調整済決定係数 (R_f^2) を見るとよい。 R_f^2 は大きいほど、重回帰式の当てはまりの良さを表す。 R_f^2 は、以下の式で計算される。

$$R_f^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - f_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \right) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (2.2)$$

y_k は k 番目の標本値、 f_k は SHIPS による k 番目の予測値、 $\bar{y}$ は標本平均値、 n は標本数、 p は説明変数の数である。図 2.1 は、Pmin 及び Vmax の決定係数を示す。この決定係数の大きさは、全体的に米軍合同台風警報センター (JTWC) の SHIPS のそれら (Schumacher *et al.* 2013 の図 4) より 1 割前後大きかった。これは第 2-3-1 節に示すように、JTWC の SHIPS と気象庁版 SHIPS の予測誤差の大きさの違いが関係しているかもしれない。

次に SHIPS 係数の特徴を紹介する。SHIPS の係数計算に当たっては、最初に SHIPS の説明変数の値から各サンプル平均値を引き、その標準偏差で割ることで規格化する。これにより、SHIPS の係数の大小が説明変数の相対的な寄与として表現される。図 2.2a は Pmin の係数を示す。MSLP はサンプル平均値 (972 hPa) よりも大きい場合、発達に寄与する変数であることがわかる。「前 12 時間の強度変化傾向 (PER)」は FT = 36 h まではサンプル平均値よりも小さい場合 (従って Pmin が大きく低下している時) に発達に働くが、それ以降はわずかに衰弱に寄与する⁴。OSLP は予測期間前半を中心に、サンプル平均値よりも小さい時 (FT = 0 h の Pmin が 990–950 hPa の時)、発達に寄与する。POT 及び COHC の係数については、それぞれの二乗項の係数と逆符号であることが重要である。これらの変数は、単独項と二乗項の寄与が互いにある程度相殺されることで、変数の値に応じて非線形的な寄与をする。POT については、それがサンプル平均よりある程度大きい時は発達に寄与するが、非常に大きい時には POT2 の寄与が上回り、全体として POT は衰弱に寄与する。COHC も同様だが、COHC は非常に大きい時でも OHC2 の寄与が上回ることなく、基本的に発達に寄与する。こうして、POT 及び COHC は、ある程度大きければ発達に効くが、大きければ大きいほど発達に寄与するわけではない。「地上空気塊を持ち上げた時の環境場との相当温位 (θ_e) 差 (EPOS)」は、対流不安定の程度を表す変数である。サ

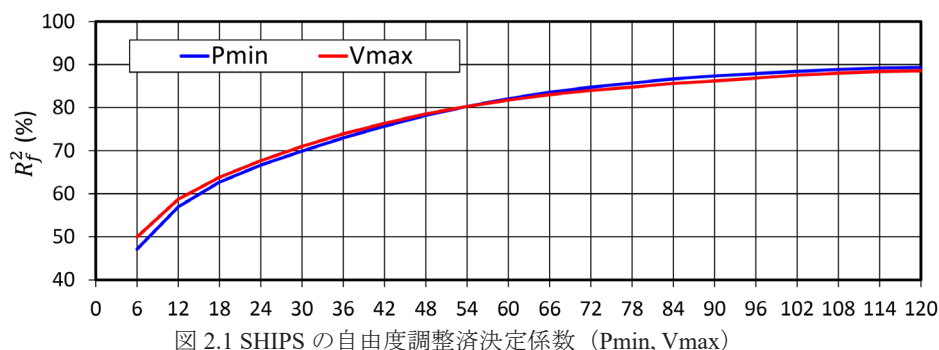


図 2.1 SHIPS の自由度調整済決定係数 (Pmin, Vmax)

⁴ このように、SHIPS は変数間で相関を持つ変数を含む設計になっている。従って、POT や COHC のような変数の寄与については、相関関係にある単独項と二乗項の寄与の合計で評価するべきである。

ンプル平均より大きい場合、発達に寄与する。つまり、対流不安定であるほど、発達に寄与する。「鉛直シア（SHDC）」、「一般化鉛直シア（SHGC）」、SHSH、「鉛直シア×緯度（SHLT）」、SHVM 及び PMSH は鉛直シアに関連する説明変数である。これも SHDC と SHSH の係数の符号が逆になっているなど、鉛直シアの寄与が非線形的に働くようになっている。ここでは直感で理解できる範囲で、それぞれの係数の寄与を述べる。SHDC 及び SHGC は基本的にサンプル平均より大きければ衰弱に効く。ただし、SHSH が、鉛直シアが大きすぎても衰弱量が大きくならないよう抑える役割を果たしている。SHLT は、熱帯低気圧が鉛直シアのある中緯度帯に北上し、そこで温帯低気圧化して再発達する効果を持つ説明変数である。SHVM 及び PMSH は、係数の物理的な解釈が困難であるが、予測時刻によって発達にも衰弱にも寄与する特徴を持つ。「数値モデル（GSM）における擾乱の 850 hPa 接線風速の時間変化傾向（TWAT）」は、それがサンプル平均よりも大きい時に発達に寄与する。その他の変数の寄与は相対的に小さい。「中層湿度（RHMD）」の寄与が小さいのは意外であるが、米国の SHIPS でも同様である（Schumacher *et al.* 2013）。

Vmax の係数（図 2.2b）は、Pmin と似たような傾向だが、いくつかの変数で異なる特徴を持つ。「初期時刻の Pmin（MSLP）」はサンプル平均（~972 hPa）より大きい時、つまり中心気圧が大きい時、衰弱に寄与する。これは、通常は「初期時刻の Vmax の二乗（VMA2）」が小さい時に相当する。VMA2 はサンプル平均より小さい時に発達に寄与する変数であるため、MSLP は発達初期段階で Vmax の増加量が相対的に小さくなるように寄与すると考えられる。シアに関係する項の係数については、SHSH、SHVM、及び VMSH で Pmin のそれらと異なった特徴を持つ。

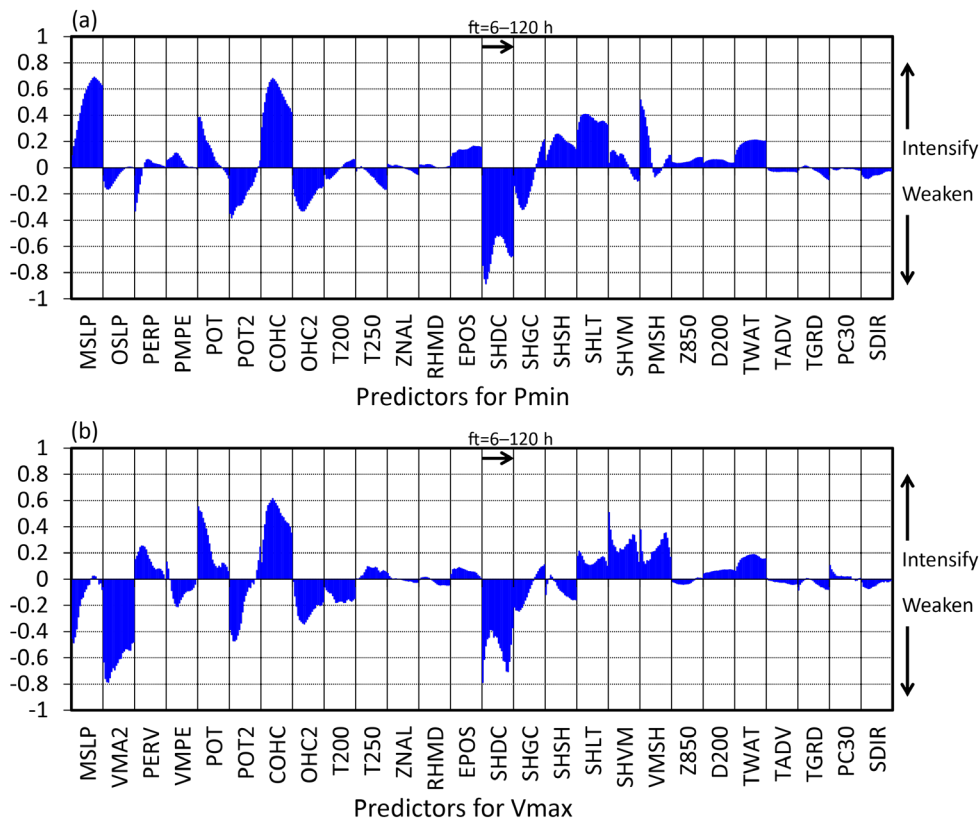


図 2.2 SHIPS の係数。(a)Pmin 用。(b)Vmax 用。横軸の各ボックス内に FT = 6 h から FT = 120 h までの各説明変数の回帰係数が棒グラフで示されている。ただし、Pmin の係数は Vmax と比較できるように、係数が逆符号になっている。例えば、MSLP の係数が正値の場合、その変数がサンプル平均値より大きい時、発達に寄与することを意味する。

2.2.3 予測値の補正

SHIPS の予測値は、熱帯低気圧が上陸した場合や非現実的な値を予測した場合に補正される。式 (2.1) で算出される SHIPS の強度変化量は、熱帯低気圧が海上にあるか陸上にあるかに関係なく計算される。その際、陸域には外挿した海面水温や OHC が与えられる。熱帯低気圧が海上にある間は、SHIPS の予測値がそのまま出力となる。熱帯低気圧の中心が陸地から半径 110 km 以内に接近した場合、または上陸した場合には、以下の式と条件を用いて減衰補正を行う。

まず V_{max} については、得られた $FT = 6 \text{ h}$ から 120 h までの V_{max} 予測値を用いて、次のように補正を行う (Kaplan and DeMaria 1995, 2001; DeMaria *et al.* 2006)。

$$d(V_{max})/dt = -\mu(V_{max}-V_b) \quad (2.3)$$

μ は減衰率、 V_b は気候学的な背景風速を表す。減衰率は中心から半径 110 km 以内の海陸比に応じて変わり、陸の割合が大きくなるにつれて減衰率が大きくなる。上陸した熱帯低気圧はこの減衰率に従って背景風速に次第に近づく。現在の気象庁版 SHIPS では、北大西洋域の上陸熱帯低気圧から統計的に算出された V_{max} の減衰率と背景風速を使用している。

一方 P_{min} に対しては、先に「1034 マイナス P_{min} 予測値」を計算し、その値を V_{max} に相当するものとして式 (2.3) を使い減衰させ、最後に「1034 マイナス減衰した値」をして元に戻す。定数 1034 は、1000 hPa の P_{min} の熱帯低気圧が 34 kt の V_{max} に相当するように設定されている。これにより V_{max} とほぼ同じスケールの変数になるため、 V_{max} と同じ減衰率を用いる。北西太平洋用の減衰率を開発することが今後の課題として残る。

なお、SHIPS は強度変化量を算出するモデルであるため、場合によっては P_{min} が 1020 hPa や V_{max} が負値になるなど、非現実的な値をとることがまれにある。このような場合に対して、適切な補正をする必要がある。特に温低化している台風は、スケールが次第に大きくなり、海水温が低くても発達する場合がある。また、中国大陆に上陸するような台風は、衰弱しても中心気圧は 990 hPa 台のままであることがよくある。そこで、 P_{min} については、減衰率によって補正した後の強度予測値が、熱帯低気圧周辺 200 – 800 km 以内の平均気圧 (P_{env}) に比べて次の上限値より大きい場合には、さらに補正をする。 $V_{max} > 40 \text{ kt}$ なら、 P_{min} の上限値を” $P_{env}-10 \text{ hPa}$ ” とする⁵。 $35 \text{ kt} < V_{max} \leq 40 \text{ kt}$ なら、 P_{min} の上限値を” $P_{env}-5 \text{ hPa}$ ” とする。 $V_{max} \leq 35 \text{ kt}$ なら、 P_{min} の上限値を” $P_{env}-3 \text{ hPa}$ ” とする。 V_{max} については、30 kt 以下の V_{max} に対し全て 30 kt に補正している。これは気象庁でリアルタイムに解析される台風未満の熱帯低気圧の強度は、全て 30 kt と解析されるためである。

2-3 精度検証

2-3-1 統計検証

初めに、気象庁版 SHIPS 固有の精度を評価するため、GSM の予測進路が海上にある時の事例を対象にした、気象庁版 SHIPS の P_{min} 及び V_{max} 予測の平均絶対誤差 (MAE) 及びバイアスを示す (図 2.3a)。これらの事例は、上陸補正も周辺気圧場に合わせた補正も行っていない。熱帯低気圧の中心点が陸地から半径 100 km 未満に接近した事例も含んでいない。SHIPS の MAE は、 P_{min} 、 V_{max} ともに予測期間前半のうちに大きく増加し、予測期間後半はほとんど変わらなくなる。 $FT = 84 \text{ h}$ と 90 h の間に不連続があるのは、90 h 予測以降のサンプルに 2016 年事例の割合が多くなるためである。バイアスについては、 P_{min} も V_{max} も予測期間後半にやや過発達の傾向を示す。

図 2.3b は、上陸補正や環境場の気圧補正を行った事例のみを対象とした MAE 及びバイアスを示す。

⁵ ここで使用する V_{max} も減衰補正後の値である

サンプル数が少ないことに注意が必要である。図 2.3a に比べて MAE は小さく、バイアスも 3 (hPa, kt) 未満となっている。全体として一連の補正は、SHIPS 固有の精度を悪化させない範囲で、新たなバイアスを生じさせることなく行われていることが確認できる。

図 2.3c は、上陸事例等も含む全事例を対象とした、気象庁版 SHIPS の MAE 及びバイアスを示す。これが気象庁の現業で実際に使われる SHIPS の精度である。以降の全ての精度評価は、図 2.3c と同じ事例で行われる。Vmax の MAE は、FT = 120 h で 13 kt 程度である。JTWC の報告によると、北西太平洋を対象とした SHIPS や LGEM の MAE は FT = 120 h で 18 kt 程度だった (Schumacher *et al.* 2013)。JTWC は 1 分値の Vmax を扱っており、JTWC のベストトラックの Vmax は成熟期にかけて急激に増大する傾向がある (例えば、Nakazawa and Hoshino 2009) ため、これが JTWC の SHIPS 誤差を大きくしている要因と考えられる。

SHIPS の精度は、台風の発達・定常・衰弱事例で大きく異なる。図 2.4 左は、x 軸に予測時間、y 軸に実際の強度変化量を取り、カラーで MAE を示した図である。サンプル数をカラーで図 2.4 右に示す。Pmin については、FT = 60 h までの特性として、実際の強度変化量が小さいほど誤差が小さいこと、急発達・急衰弱のような強度変化量が多い事例の誤差が非常に大きい (30 hPa 以上に達する) ことがわかる (図 2.4a)。ただし、そのような事例数は全体からすると非常に少ない。FT = 60 h より先になると、大きな衰弱事例の誤差が非常に小さくなる。上陸補正がうまく働き、上陸に伴う大きな衰弱が予測できているためである。一方、強度変化量が少ない事例で誤差が大きくなる特性が現れる。Vmax 予測につ

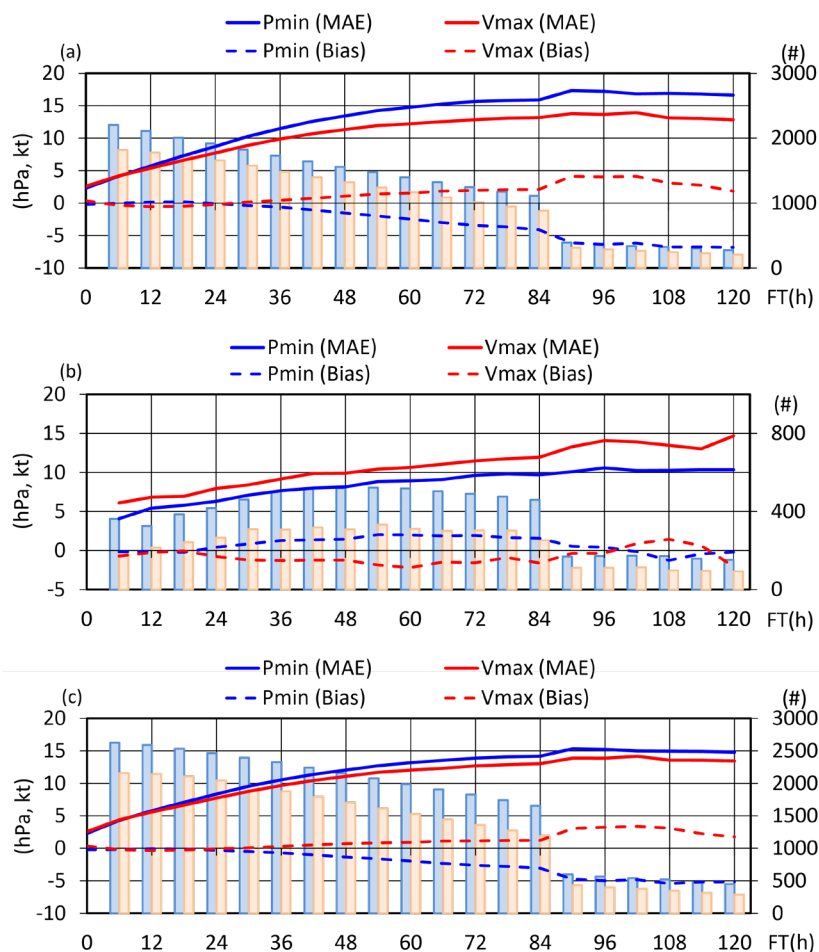


図 2.3 予測精度 (MAE, BIAS)。(a) 海上事例のみ。(b) 上陸補正や環境場の気圧補正を行った事例のみ。(c) 上陸事例を含む全事例。棒グラフはそれぞれのサンプル数 (右縦軸) を示す。

いても、Pmin とほぼ同様な特性がみられる (図 2.4b)。

以上の予測誤差の傾向を、発達 (Intensify)・定常 (Steady)・衰弱事例 (Weaken) の三つに分けたものを図 2.5 に示す。発達・定常・衰弱事例の分類は、FT = 0 h から各予測時刻までのベストトラック上の強

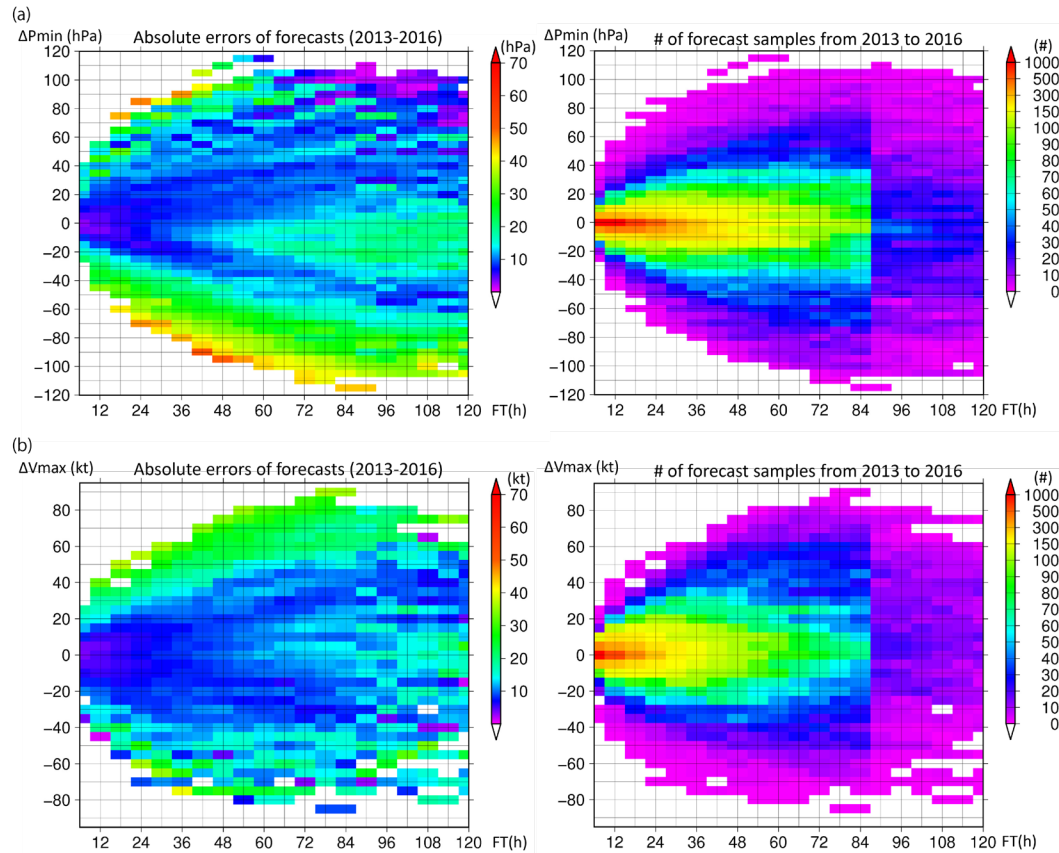


図 2.4 予測時間 (x 軸) と実際の強度変化量 (y 軸) に対する MAE (左) とサンプル数 (右)。(a)Pmin 予測。
(b)Vmax 予測。

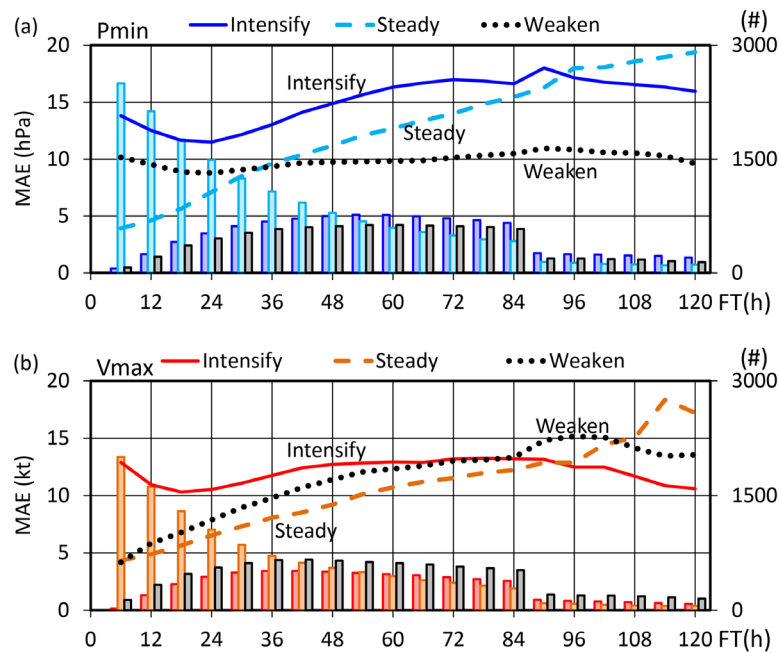


図 2.5 強度変化事例別の MAE。(a)Pmin 予測。(b)Vmax 予測。棒グラフはそれぞれのサンプル数 (右縦軸) を示す。

度変化量で定義し、Pmin (Vmax) の変化量が -10 hPa より小さければ (15 kt 以上ならば) 発達事例、10 hPa より大きければ (-15 kt 以下ならば) 衰弱事例、その他を定常事例と呼ぶ。図 2.5 によれば、発達事例では、Pmin、Vmax とともに予測前半を中心に MAE が定常事例や衰弱事例よりも大きい。一方、定常事例では、Pmin は FT = 30 h まで、Vmax は FT = 12–90 h で最も精度が良いが、FT = 120 h には両者とも最も MAE が大きい。衰弱事例では、Pmin で MAE がほぼ一定で、FT = 36 h 以降は最も MAE が小さい一方、Vmax では定常事例の MAE と似た変化をし、予測後半になるにつれて MAE が増加する傾向にある。

強度変化事例別でバイアスをみると (図 2.6)、全体として、発達事例は実際より弱めに、定常・衰弱事例は実際より強めに予測される傾向にある。発達事例は、Pmin、Vmax とともに予測後半に、MAE は小さくはないものの (図 2.5)、バイアスは小さい傾向にあることは一つの特徴である。

2-3-2 72 時間予測の精度評価

ここでは気象庁版 SHIPS の予測の代表例として、初期強度別に Pmin の 3 日先 (FT = 72 h) 予測の精度をもう少し詳細に紹介する。図 2.7 は初期強度を横軸にした、FT = 72 h 予測の MAE を示す。初期 Pmin が 980 hPa 以上の事例で、それ未満の強度の事例に比べて誤差が大きい。Vmax についても、初期 Vmax が小さい事例ほど誤差が大きい傾向がある。この傾向は、しばしば台風未満の熱帯低気圧を含む初期強度が弱い定常事例において過発達を予測する事例が多い (図 2.6) ことと関係している。図 2.8 は実際の強度変化量を横軸にした、FT = 72 h 予測の MAE を示す。Pmin は、サンプル数は少ないものの、3 日先までに 60 hPa 以上低下する事例で MAE がかなり大きい。Vmax も、55 kt 以上増加する事例で MAE がかなり大きい。つまり、SHIPS が急発達の予測をできていないことを示す。一方、衰弱事例については、急発達事例ほど MAE は大きくない。図 2.8 の衰弱事例 (図 2.8a の横軸の正值、図 2.8b の横軸の負値) にみられる MAE の極大は、進路予測誤差によって上陸のタイミングが異なったため大きくなる場合が見られた。例えば、2016 年台風第 14 号 (Meranti) の事例では、GSM はバシー海峡を抜ける進路予測だったのに対し、実際には台湾に上陸したため大きな誤差が生じた。

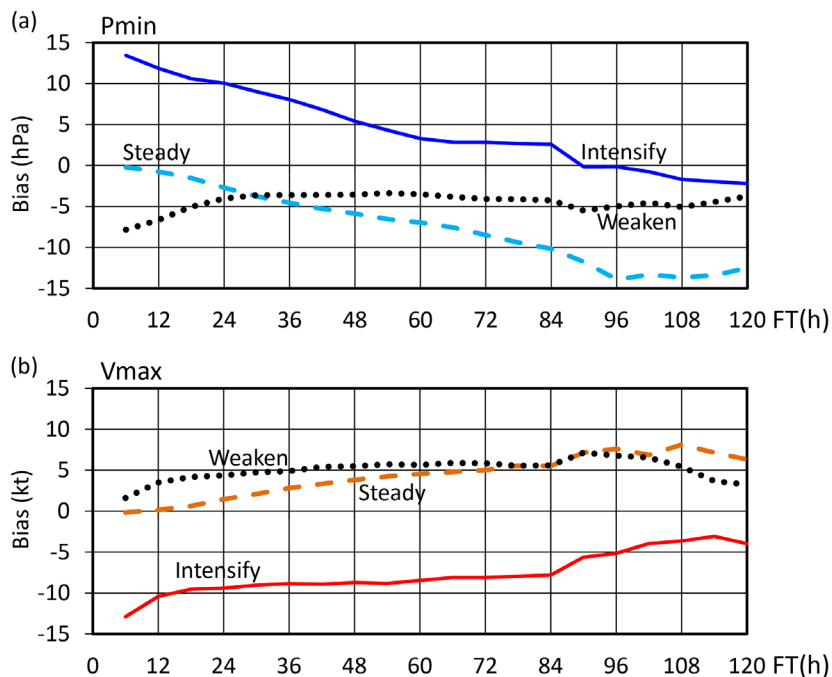


図 2.6 強度変化事例別のバイアス。(a)Pmin 予測。(b)Vmax 予測。サンプル数は図 2.5 と同じ。

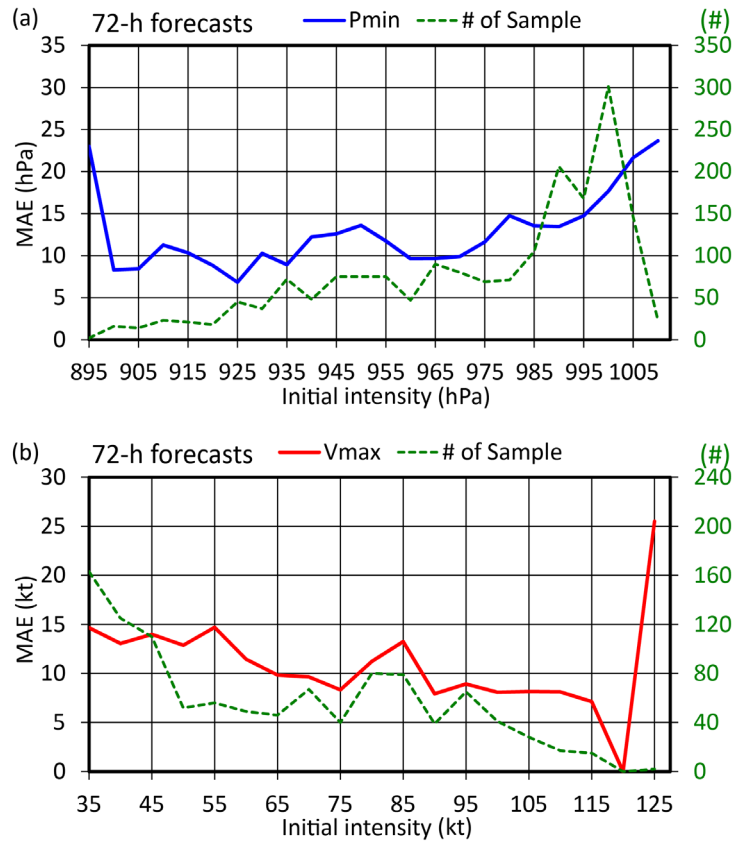


図 2.7 72 時間強度予測の初期強度別 MAE。(a)Pmin 予測。(b)Vmax 予測。

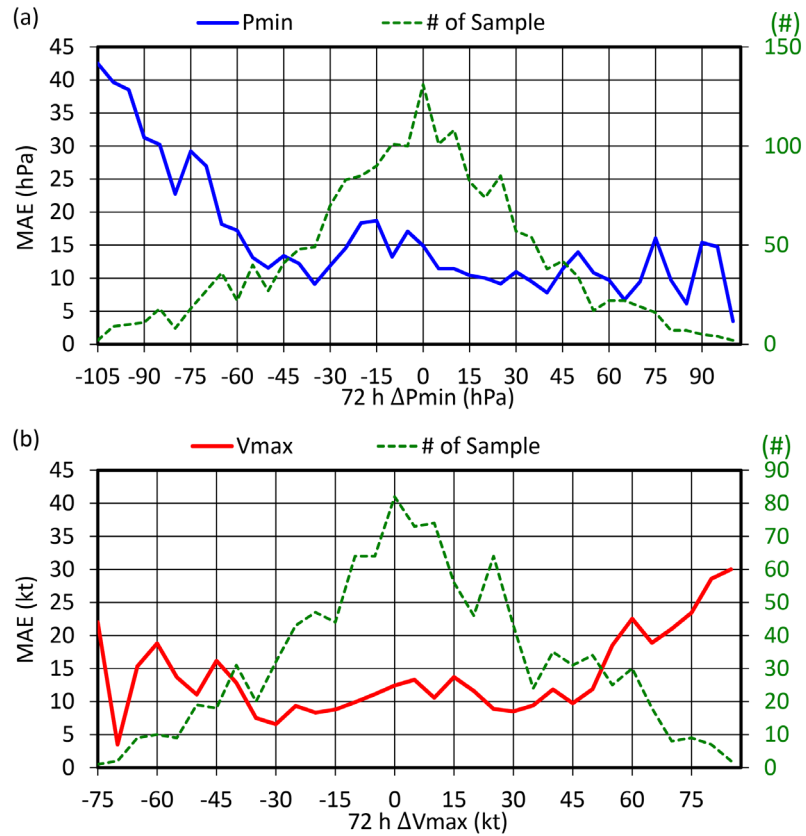


図 2.8 72 時間強度予測の実際の強度変化量別の MAE。(a)Pmin 予測。(b)Vmax 予測。

図2.9は72時間予測誤差の頻度分布を示す。全体としては、ほぼ左右対称の山型だが、強度変化別では、誤差に偏りがある。発達事例のPmin (Vmax) は、正（負）の側に偏っており、発達量を十分に予測できていない。特にVmaxで頻度分布の偏りが目立つ。逆に、定常及び衰弱事例のPmin (Vmax) は、負（正）の側に偏っている。特に定常事例でPminが低めに、定常・衰弱事例でVmaxがやや強めに予測される傾向が目立つ。

2-3-3 事例検証

ここでは、発達事例を対象に、SHIPSの特性をいくつか紹介する。一つ目は、典型的な発達をした2015年台風第16号である（図2.10）。2015年8月15日12UTC初期値の予測では、気象庁版SHIPSは、ほぼベストトラックと同じような発達予測をした。ただし、発達率は実際よりやや小さく、最大強度は934 hPa、94 ktで、実際の生涯最大強度（925 hPa、100 kt）には達しなかった。それでも、SHIPSはGSMよりずっと良い強度予測をした。この予測結果から、気象庁版SHIPSの利用は、気象庁の台風強度予報の精度を大きく改善させることが期待される。

しかしながら、同じ発達台風でも、ある予測時刻に急に大きく発達する事例では、SHIPSの予測精度は良くない。その例が、図2.11に示す2事例である。これらの事例では、FT=24 h及びFT=12 hに中心気圧が大きく下がるべきだが、SHIPSは滑らかな発達を予測するだけで、ベストトラックの生涯最大強度には達しない。これらの事例では、GSMも発達の程度、タイミングともうまく予測できてない。このような事例が、発達事例のMAE及びバイアスを大きくしている。

もう一つ、逆にSHIPSが熱帯低気圧を過発達させる事例を紹介する（図2.12）。この特徴は、モンスーンジャイア（Lander 1994）またはモンスーントラフ（Lander 1996）と呼ばれる擾乱を起源とする熱

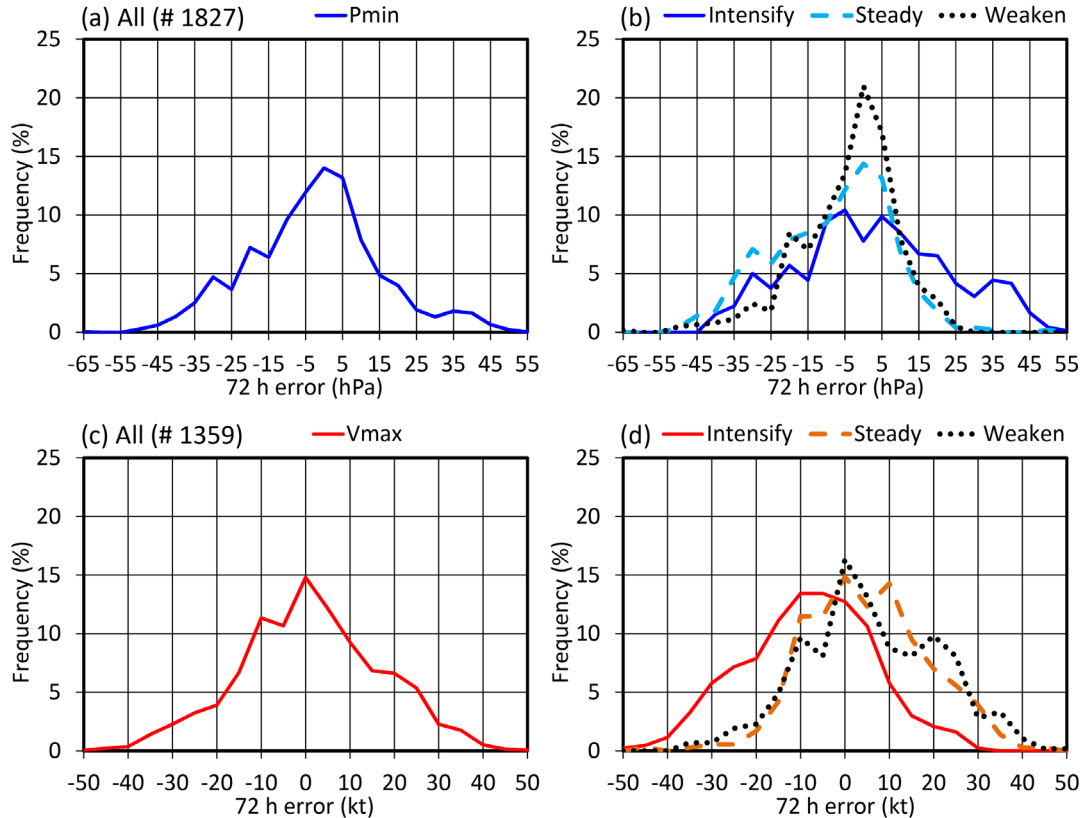


図2.9 72時間強度予測のエラー頻度分布。(a)Pmin予測の全事例。(b)Pmin予測の強度変化事例別。(c)Vmax予測の全事例。(d)Vmax予測の強度変化事例別。

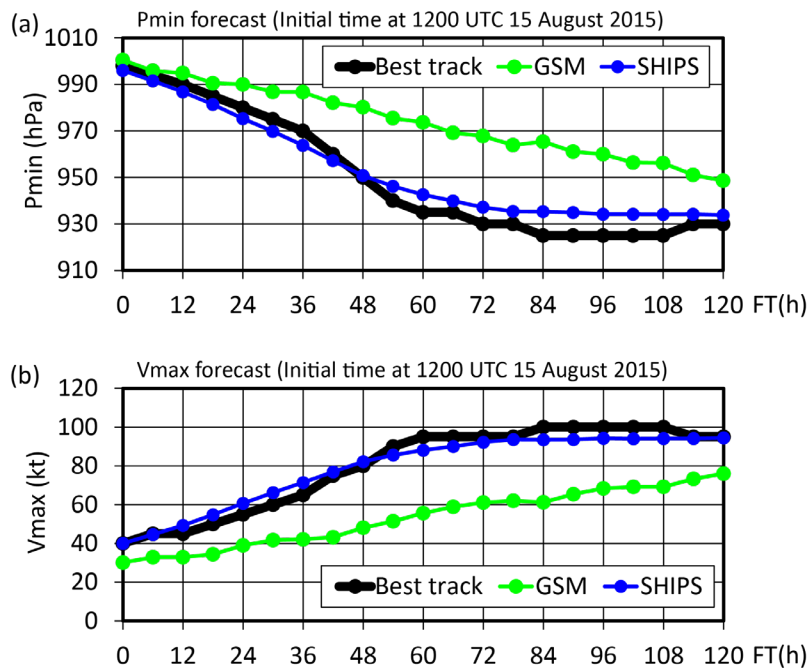


図 2.10 2015 年台風第 16 号における、2015 年 8 月 15 日 12UTC 初期値の強度予測事例。(a)Pmin 予測。(b) Vmax 予測。

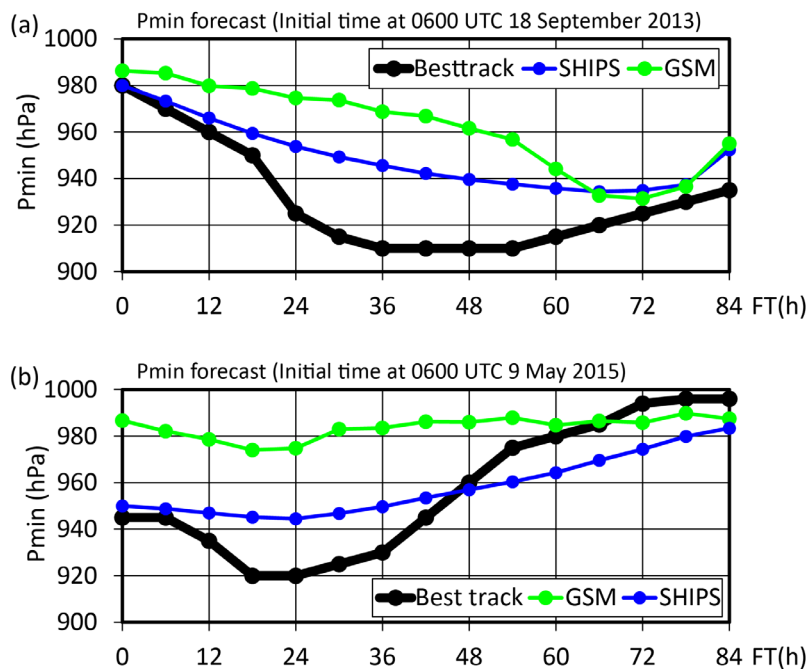


図 2.11 (a)2013 年台風第 19 号における、2013 年 9 月 18 日 06UTC 初期値の強度予測事例 (Pmin)。(b) 2015 年台風第 6 号における、2015 年 5 月 9 日 06UTC 初期値の強度予測事例 (Pmin)。

帯低気圧で典型的に見られる。2014 年台風第 12 号がその代表的な事例である。大きなスケールを持つモンスーンジャイアの中心領域付近で 17 m s^{-1} 以上の風速が観測され、中心領域付近の渦が台風として識別されるものだが、降水域がまばらで組織化されていない (図 2.12b)。このような事例は、頻度は多くはないものの、時々起きている。この種の台風は、海面水温などの環境場条件が熱帯低気圧の発達に好都合であっても、大きく発達することはない。7 月 30 日 12UTC 初期値の予測事例では、実際にはこの後ベストトラックでは $P_{\min}$ が 10 hPa しか深まらなかったが、SHIPS は $FT = 42 \text{ h}$ までに 20 hPa 以上深まると予測した。 $V_{\max}$ も過発達の予測だった。SHIPS はほぼ環境場の説明変数で強度変化量が決まるため、この時期海面水温が高く、鉛直シアが弱いと、SHIPS はこの種の台風でも発達を予測してしまう。この種の台風については、ほぼ環境場変数に依存した SHIPS では予測精度に限界がある。

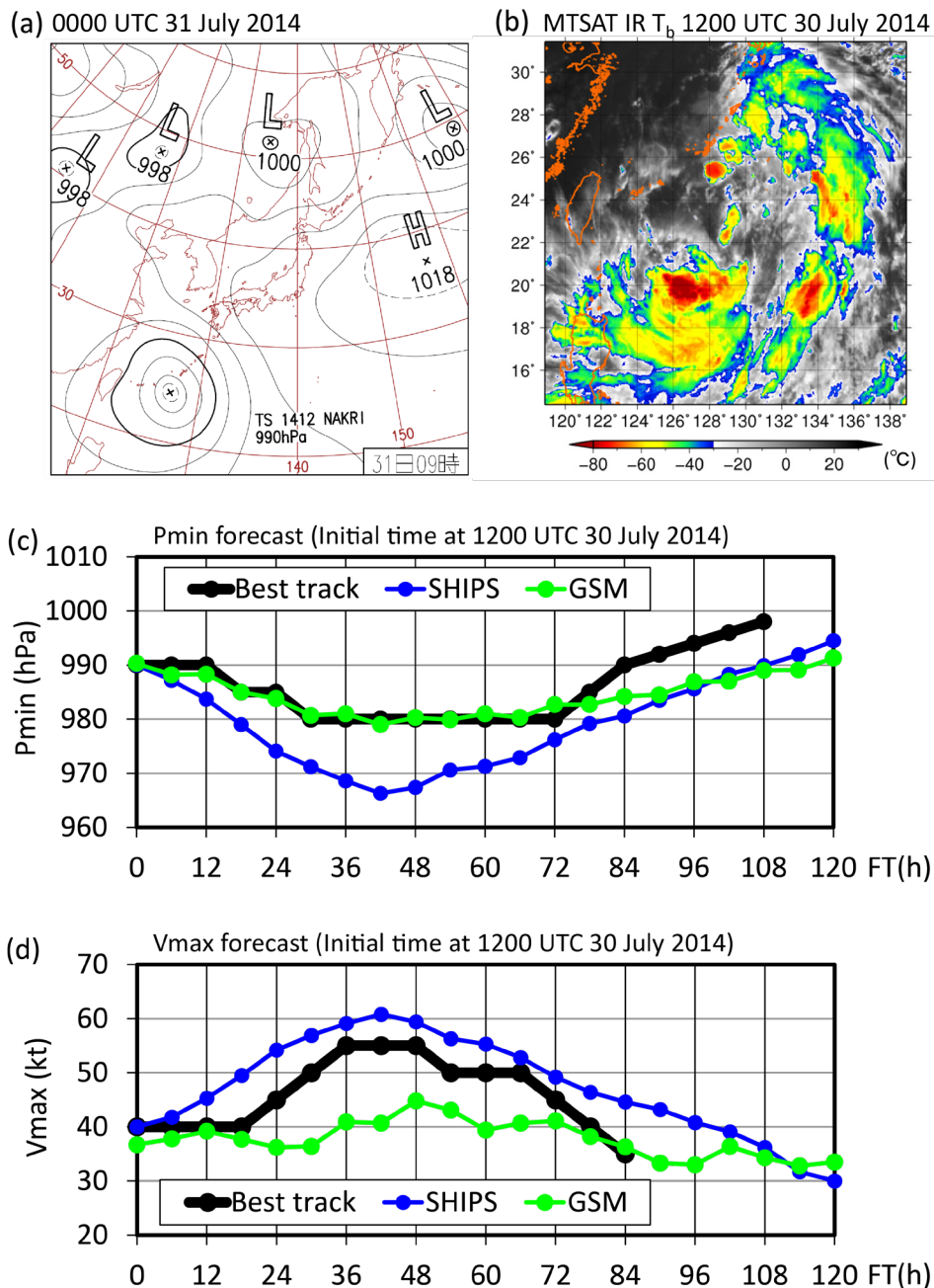


図 2.12 2014 年台風第 12 号における、2014 年 7 月 30 日 12UTC 初期値の強度予測事例。(a)2014 年 7 月 31 日 00UTC の地上天気図。(b)2014 年 7 月 30 日 12UTC の MTSAT 赤外画像。(c) $P_{\min}$ 予測。(d) $V_{\max}$ 予測。

2-4 まとめと課題

気象庁版 SHIPS は、GSM が予測する熱帯低気圧の進路に沿った環境場条件を使い、5 日先までの Pmin 及び Vmax を予測する重線形回帰モデルである。気象庁版 SHIPS は、米国の SHIPS 開発者から主要な計算コードを提供いただくとともに、気象研究所独自に Pmin を予測するように改良を重ねた。気象庁版 SHIPS の特徴を以下にまとめる。

- ・気象庁版 SHIPS は、予測前半を中心に最もサンプルの多い事例(定常事例)で誤差が相対的に小さく、また GSM が発達を予測できていない場合でも発達傾向を捉えており、強度予報に使えるガイダンスモデルである。
- ・気象庁版 SHIPS の全体の精度は、予測後半にかけて、海上にある熱帯低気圧は過発達傾向、上陸事例は衰弱させすぎる傾向がある。
- ・全体の精度で見るとバイアスは小さいが、発達・定常・衰弱事例別でみると、予測特性が大きく異なることに注意が必要である。またその特性は予測時間にも依存する。
- ・一般的に、発達事例の精度は、全ての予測時間を通じて定量的に良くない。特に急発達の予測はできない。
- ・定常事例については、Pmin、Vmax 予測ともに、予測期間前半は精度が良い(誤差が小さい)が、後半にかけて過発達させる傾向がある。
- ・衰弱事例については、Pmin 予測は若干負のバイアス傾向があるが、予測後半を中心に発達・定常事例に比べて良い精度である。Vmax 予測も若干正のバイアス傾向がある。

実際に SHIPS を利用して強度予報を行う際は、これらの特徴をよくつかんでおく必要がある。一方で、これまで述べたいくつかの SHIPS の限界は、さらなる開発により軽減できる可能性があるとして著者らは考えている。具体事例で示した通り、環境場変数の利用のみでは、過発達させる場合がある(図 2.12)。しかし、最近の熱帯低気圧強度に関する研究によると、熱帯低気圧の発達は、環境場だけでは決まらず、熱帯低気圧の内部プロセスが関係していることがわかってきた(Hendricks *et al.* 2010; Miyamoto and Takemi 2013, 2015)。内部プロセスの違いは、内部構造の違いに現れる。例えば環境場が同じでも、内部で起きているプロセスが異なれば、発達率は違ってくるはずである。現在、このような最新の研究成果を強度予測に生かすため、GSMaP (JAXA 2018) という全球衛星降水データから熱帯低気圧の内部構造情報をとり出し、SHIPS に追加することで SHIPS の精度向上を図る取り組みを行っている(Shimada *et al.* 2018)。

また熱帯低気圧の内部構造情報の他にも、発達率に寄与する重要な要素として、熱帯低気圧が急発達する時には、その直前に OHC が大きな海域を通過していることが挙げられる(例えば、Lin *et al.* 2005)。現在の SHIPS では、OHC を使用しているものの、進路に沿った平均値を使っているため、進路に沿った海洋場の変化情報を必ずしも的確に取り込めていない。特に急発達は一度オンセットすると、その後の強度が大きく変わるため、この課題に今後取り組む必要がある。

参考文献

- 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. [Available online at http://rammb.cira.colostate.edu/research/tropical_cyclones/ships/docs/demaria_hurr10_predictability.pdf]
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, **9**, 209–220, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0209:ASHIPS>2.0.CO;2
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1999: An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, **14**, 326–337, doi:10.1175/1520-0434(1999)014<0326:AUSHIP>2.0.CO;2

- DeMaria, M., J.A. Knaff, and J. Kaplan, 2006: On the decay of tropical cyclone winds crossing narrow landmasses. *J. Appl. Meteor.*, **45**, 491–499, doi:10.1175/JAM2351.1
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, **20**, 531–543, doi:10.1175/WAF862.1
- Hendricks, E. A., M. S. Peng, B. Fu, and T. Li, 2010: Quantifying environmental control on tropical cyclone intensity change. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3243–3271.
- 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, doi:10.1002/joc.1169
- Japan Aerospace Exploration Agency, 2018: JAXA global rainfall watch. [http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index.htm]
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 1995: A simple empirical model for predicting the decay of tropical cyclone winds after landfall. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2499–2512, doi:10.1175/1520-0450(1995)034<2499:ASEMFP>2.0.CO;2
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2001: On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the New England area. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 280–286, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0280:OTDOTC>2.0.CO;2
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001
- Kurihara, Y., T. Sakurai, and T. Kuragano, 2006: Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations (in Japanese). *Wea. Bull.*, **73**, S1–S18
- Lander, M. A., 1994: Description of a monsoon gyre and its effects on the tropical cyclones in the western North Pacific during August 1991. *Wea. Forecasting*, **9**, 640–654, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0640:DOAMGA>2.0.CO;2
- Lander, M. A., 1996: Specific tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with a reverse-oriented monsoon trough in the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **11**, 170–186, doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0170:STCTTA>2.0.CO;2
- Lin, I.-I., C.-C. Wu, K. A. Emanuel, I.-H. Lee, C.-R. Wu, and I.-F. Pun, 2005: The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2635–2649, doi:https://doi.org/10.1175/MWR3005.1
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2013: A transition mechanism for the axisymmetric spontaneous intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112–129, doi:10.1175/JAS-D-11-0285.1
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2015: A Triggering Mechanism for Rapid Intensification of Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 2666–2681, doi:10.1175/JAS-D-14-0193.1
- Nakazawa, T., and S. Hoshino, 2009: Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **5**, 33–36, doi:10.2151/sola.2009-009
- Sampson, C. R., and J. A. Knaff, 2014: Advances in intensity guidance. *8th International Workshop on Tropical Cyclones*, Jeju, Republic of Korea. [Available online at https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Topic2.7_AdvancesinIntensityGuidance.pdf]
- Shimada, U., K. Aonashi, and Y. Miyamoto, 2017: Tropical cyclone intensity change and axisymmetry deduced from GSMaP. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1003–1017, doi: 10.1175/MWR-D-16-0244.1
- Shimada, U., H. Owada, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sawada, K. Aonashi, and M. DeMaria, 2018: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme using tropical cyclone rainfall and structural features. *Weather and Forecasting*, **33**, 1587–1603, doi:10.1175/WAF-D-18-0021.1
- 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.[Available online at http://rammb.cira.colostate.edu/research/tropical_cyclones/ships/docs/JTWC_project_final_report_oct_2013.docx]

Wada, A., 2015: Utilization of Tropical Cyclone Heat Potential for Improving Tropical Cyclone Intensity Forecasts. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, 17.