

# 台風の熱力学的可能最大強度と実強度に関する統計的解析

A Statistical Study on the Relationship between Typhoon Maximum Potential Intensity and Actual Intensity

吉野 純<sup>1</sup>・荒川大介<sup>2</sup>・安田孝志<sup>3</sup>

Jun YOSHINO, Daisuke ARAKAWA and Takashi YASUDA

Using a steady-state axis-symmetric typhoon model, the maximum potential intensity of typhoon is evaluated in this study to reveal a relationship with the actual typhoon intensity during its mature stage. The steady-state typhoon model requires a set of environmental parameters (e.g. temperature, relative humidity, geopotential, and sea surface temperature) which can be implemented from global atmospheric and ocean analyses, and provides us with the mature typhoon structure, as well as the maximum potential intensity (e.g. maximum sustained wind and minimum central pressure) at each grid point. Statistical analyses during 20 years lead to a conclusion that typhoons which travel longer over the warm ocean before are likely to reach levels of the maximum potential intensity.

## 1. はじめに

台風やハリケーンなどの熱帯低気圧に関する理解は、近年の数値気象モデルの発展や気象観測網の拡充により着実に進歩しつつあるにも拘わらず、現状では、依然として高精度な台風予測、特に、台風強度の予測には大きな誤差を伴っている。台風強度は、様々な台風周辺の環境場因子（海水面温度、波浪状態、風の鉛直シア、移動速度、中緯度トラフ等）の影響を強く受け、時々刻々と変化すると定性的には理解されているが、個々の環境場因子による寄与については定量的な理解に至っていない。また、Emanuel (2005) らは、地球温暖化により台風の破壊力が増大する可能性を指摘しているが、今後確実に進行する地球温暖化によって台風強度特性が如何に変化するかを予測する上でも、現在気候における環境場因子と実際の台風強度との間の統計的関係を理解することは重要な研究課題である。

そのような背景の中、Bister ら (2002) によって、台風の熱力学的可能最大強度 (maximum potential intensity) の評価手法が確立され、現在では、台風強度との関連性の強い重要な環境場パラメータの 1 つとして認知されつつある。これは、定常軸対称台風モデルにより評価され、与えられた環境場因子の下で、台風が十分に発達した時 (定常状態に達した時) に示す可能最低気圧と可能最大風速のことを指す。実際には、全ての台風がこの可能最大強度 (定常状態) まで発達できるわけではなく、何らかの原因によって、途中で強度のピークを迎え減衰して

しまう。よって、この可能最大強度と実強度との間の差が、何に依存しているかが理解できれば、台風強度に大きく影響する環境場因子の同定が可能となり、結果として、台風強度予測の精度向上や、地球温暖化時の台風特性変化の理解にも繋がること期待される。

そこで、本研究では、Emanuel (1986) や Bister ら (2002) により開発された定常軸対称台風モデルを用いて、全球大気再解析データを環境場因子として入力することで、長期間の熱力学的可能最大強度の変化を評価し、気象庁ベストトラックに記載の実強度との統計的関係性を調べる。これによって、台風の発達を阻害する環境場因子や、強い台風にまで発達するための必要条件について解釈できるものと期待される。また、得られた知見から、ピーク時における台風強度に関する簡易的な推定式を提案し、その推定精度の検証も行った。

## 2. 台風の熱力学的可能最大強度について

本研究では、Emanuel (1986) や Bister ら (2002) により開発された簡略化された定常軸対称台風モデルを用いて、台風の熱力学的可能最大強度の評価を行う。これは、与えられた環境場の下で、理論的に発達可能な最大強度のことを指す。ここでは、このモデルの理論的背景について解説し、計算設定の詳細について議論する。

評価に用いる定常軸対称台風モデルとは、ポテンシャル半径座標系 (potential radius coordinate) にて、軸対称・静力学平衡・傾度風平衡・斜行平衡の各条件を仮定し、定常台風渦の構造を熱力学的に解くものである。更に、台風は十分に発達しているものと仮定し、その時、台風上端では絶対渦度を  $0 \text{ sec}^{-1}$ 、台風上端では摩擦を無視、また、最大風速半径において傾度風は旋衡風に等しいとしている。

ここで台風を熱力学的に見ると、暖かい海面上 (海水面温度  $T_s$ ) にて加熱され、対流圏界面付近 (対流圏海

1 正会員 博(理)	岐阜大学助教大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
2 学生会員 修(工)	岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
3 フェロー 工博	岐阜大学教授大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

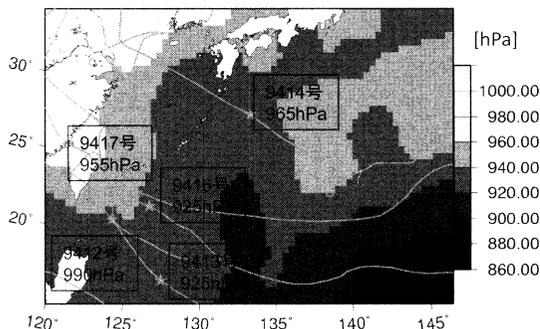


図-1 1994年8月の月平均可能最低気圧 $P_{min}$ 分布と個々の台風進路(星印はピーク時の位置, 数値はピーク時の強度).

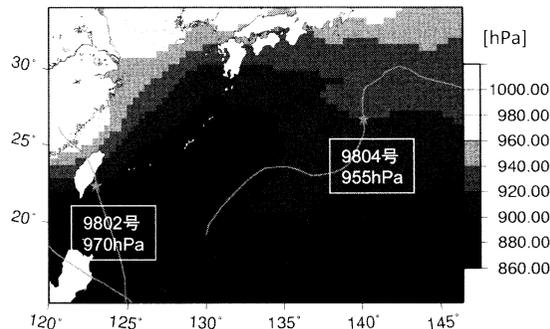


図-2 1998年8月の月平均可能最低気圧 $P_{min}$ 分布と個々の台風進路(星印はピーク時の位置, 数値はピーク時の強度).

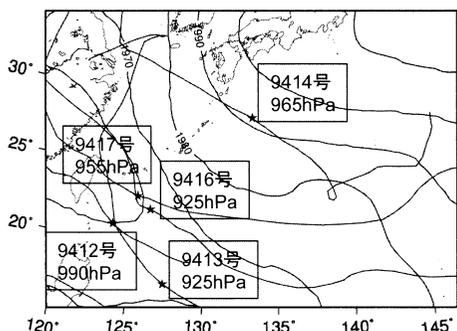


図-3 1994年8月の月平均850hPa面高度[m]分布と個々の台風進路(星印はピーク時の位置, 数値はピーク時の強度).

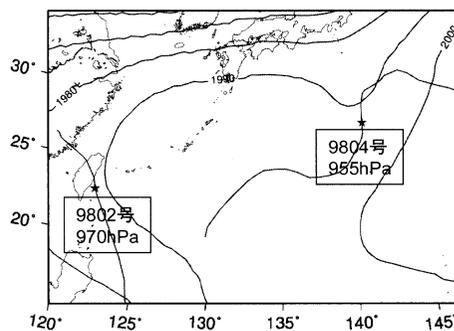


図-4 1998年8月の月平均850hPa面高度[m]分布と個々の台風進路(星印はピーク時の位置, 数値はピーク時の強度).

面温度 $T_0$ で冷却されるカルノーサイクルエンジン (Carnot cycle engine) と等価であると見なせる. このエンジンの熱効率 $\varepsilon$ は,  $(T_s - T_0)/T_s$ となり, 海水面温度 $T_s$ と対流圏海面温度 $T_0$ の差が大きければ大きいほどエンジン(台風)の持つ仕事量は大きくなる. このカルノーサイクルとは, 4つの過程からなり (Emanuel, 1997), それぞれ, 等温過程 (過程1), 断熱過程 (過程2), 等温過程 (過程3), 断熱過程 (過程4) となっている. まず, 過程1で, 暖かい海水面上から加熱を受けて気温 $T_s$ となり, 過程2で, 上昇気流により断熱膨張する. 過程3の対流圏界面で, 気温 $T_0$ まで冷却され, 最終的に, 過程4にて, 下降気流により断熱圧縮される. 過程4では必ずしも断熱的な変化をするわけではないが(放射冷却のため), 空気塊が湿潤断熱的に下降していることを考慮すれば, 打ち消されてこの効果は無視できる.

このような条件の下で, サイクルの熱力学第一法則の式は,

$$|V_m|^2 = c_p(T_s - T_0) \frac{T_s}{T_0} \frac{C_k}{C_D} [\ln \theta_e^* - \ln \theta_e]_m \quad (1)$$

のように整理される. ここで,  $V_m$ は最大風速(傾度風),  $c_p$ は定圧比熱,  $T_s$ は海水面温度,  $T_0$ は対流圏界面温度,  $C_k$ は海面における熱交換係数,  $C_D$ は海面における運動

量交換係数,  $\theta_e^*$ は海面における飽和相当温位,  $\theta_e$ は境界層内の相当温位, をそれぞれ示している. 添え字の $m$ は最大風速半径での値を意味する. ここで, Emanuel (1994) による潜在有効位置エネルギー (convective available potential energy) の概念を導入することで, 式(1)は,

$$|V_m|^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s}{T_0} [CAPE^* - CAPE]_m \quad (2)$$

のように変形できる. ここで,  $CAPE^*$ は海面における飽和空気 $\theta_e^*$ を持ち上げた時の潜在有効位置エネルギーであり,  $CAPE$ は境界層内の湿潤空気 $\theta_e$ を持ち上げた時の潜在有効位置エネルギーであり, 共に, 環境場の大気鉛直プロファイル(仮温度)に基づき評価される. 式(2)を解くためには, まず, 最大風速半径における海面気圧 $P_m$ を得る必要がある. ここで, 次の傾度風平衡の式と温度風平衡の式を組み合わせる式,

$$RT_s \ln \left( \frac{P_0}{P_m} \right) CAPE|_m + \frac{1}{2} V_m^2 \quad (3)$$

から海面気圧 $P_m$ を得ることができる. ここで,  $P_0$ は環境場における海面気圧,  $R$ は乾燥空気の大気定数を示す. 適当な初期値 $P_m$ の下で計算を開始し, 式(2)と式(3)の計算を反復法によって解くことで, 最終的に台風の可能最大

強度(可能最低気圧 $P_m$ と可能最大風速 $V_m$ )の収束解を得ることができる。式(2)と式(3)の中の、交換係数比 $C_k/C_D$ 、海水面温度 $T_s$ 、環境場の仮温度プロファイルを入力値として与えることで閉じた方程式系となる。

本研究では、海水面温度 $T_s$ に対しては、水平解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ で1週間毎のNCEP/NOAA全球海水面温度解析データを使用した。また、環境場の仮温度プロファイルに対しては、水平解像度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ で6時間毎のECMWF全球大気再解析データ(ERA40)を使用し、1000 hPaから70hPaまでの計13層のデータによりCAPE\*とCAPEを評価した。また、交換係数比 $C_k/C_D$ は、一律で0.9とした。これらの入力値を基に、1982~2001年までの計20年間の台風可能最大強度の月平均値(水平解像度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ )を評価した。このうち、台風発生数のピークとなる各年の8月と9月に着目し、日本近海に接近した全117個の台風を解析対象として、台風の可能最大強度と実際の台風強度(中心気圧)との統計的関係について調べた。尚、個々の台風の進路及び強度(中心気圧)については、気象庁ベストトラックを使用した。

### 3. 1994年と1998年の台風シーズンの比較

ここでは、まず、20年間の中で台風発生数が特に多かった1994年の台風シーズン(計17個)と、発生数が特に少なかった1998年の台風シーズン(計4個)の極端な2つの年に着目して、月平均可能最低気圧 $P_{mpi}$ の分布特性について比較検討を行う。また、気象庁ベストトラックに記載の個々の台風のピーク時における中心気圧 $P_{min}$ (実最低気圧)との関係について考察した。

図-1と図-2は、それぞれ、1994年8月と1998年8月の月平均可能最低気圧 $P_{mpi}$ の分布を示す。これらの結果から、各格子点近傍で台風が定常状態に達した時の最大強度を計り知ることができる。例えば1998年8月(図-2)の結果より、南西諸島付近で台風が定常状態に達した場合、その中心気圧は880~900hPaになることが読み取れる。そして、本州に接近するに従い可能最低気圧 $P_{mpi}$ は弱まり、その中心気圧は920~960hPaとなる。平均的には、暖流(黒潮)の軸に沿って $P_{mpi}$ が小さく、海水面温度が急激に下がる中緯度帯付近で急激に $P_{mpi}$ が大きくなるといった分布を呈し、定性的な理解と矛盾しない。

次に、これら2つの年の可能最低気圧 $P_{mpi}$ の分布について比較すると、台風発生数の少なかった1998年8月(図-2)では、可能最低気圧 $P_{mpi}$ の極端に小さな領域が広く分布しており、一方で、台風発生数の多い1994年8月(図-

1)の場合、それほど極端に小さな可能最低気圧 $P_{mpi}$ にはなっていないことが見て取れる。つまり、可能最大強度の大小は、必ずしも台風発生数の多寡とは直接関係していないと言い換えられる。また、1998年8月に発生した台風(図-2)は、発生しさえすれば強い台風にまで発達できるものと推測されるが、実最低気圧 $P_{min}$ を見る限りは、可能最低気圧 $P_{mpi}$ とは大きな隔たりがあり、強い台風にまで発達できていない。つまり、定常状態に達する前に何らかの環境場因子の影響を受けて強度ピークに達してしまっただと考えられる。逆に、1994年8月(図-1)の場合は、発生した台風の多くが可能最低気圧 $P_{mpi}$ 近くまで発達できており、定常状態にまで達しやすい条件がそろっていたと言える。これらのことは、表-1にも示されるように、実最低気圧 $P_{min}$ と可能最低気圧 $P_{mpi}$ の差(つまり、台風未発達度)からも理解できる。以上の結果から、1998年8月のように、たとえ熱力学的には非常に強い台風にまで発達可能な環境場であったとしても、必ずしも強い台風にまで発達できるとは限らず、台風が定常状態に達するかどうかを決定付ける他の環境場因子が存在すると推察できる。

ここで1つの仮説を立てることができる。図-1と図-2を比較すると、これらの2つの年の台風の進路パターンには大きな違いがあることから、台風発生からピークに達するまでの台風経路の相違が、ピーク時の台風強度に対して何かしらの影響を及ぼしているものと推測できる。例えば、 $P_{min}$ と $P_{mpi}$ の差が小さい1994年8月(図-1)の台風の多くは、暖かい海面上を長く北西進するパターンとなり、 $P_{min}$ と $P_{mpi}$ の差が大きい1998年8月(図-2)の台風は、事例数は少ないものの、発生して短時間で上陸するパターンや、海水面温度の低い中緯度に向かって北進するパターンとなっている。以上の進路パターンの違いは、月平均850hPa面ジオポテンシャル高度分布(図-3と図-4)の相違からも理解できる。一般的に、台風は太平洋高気圧の縁辺に沿って進行するが、1994年8月(図-3)の場合、太平洋高気圧は日本付近にその中心があるために、多くの台風は暖かい海面上を長く西進しやすく、逆に1998年8月(図-4)の場合は、太平洋高気圧はより南方に位置するために、台風は暖かい海面上を進行するのに適していない気圧配置であったと考えられる。

### 4. 過去20年間の統計解析結果

以上より、実際の台風が可能最低気圧 $P_{mpi}$ まで発達できるか否かは、ピークに達するまでの台風経路によってお

表-1 1994年8月と1998年8月の全台風のピーク時における各種物理量の平均値。

	実最低気圧 $P_{min}$	可能最低気圧 $P_{mpi}$	台風未発達度 $P_{min}-P_{mpi}$	海水面温度 $T_s$	風の鉛直シアー $U_{200hPa} - U_{850hPa}$
1994年8月	952 hPa	936 hPa	19.8 hPa	28.8 °C	9.9 m/s
1998年8月	962 hPa	911 hPa	51.2 hPa	29.4 °C	8.4 m/s

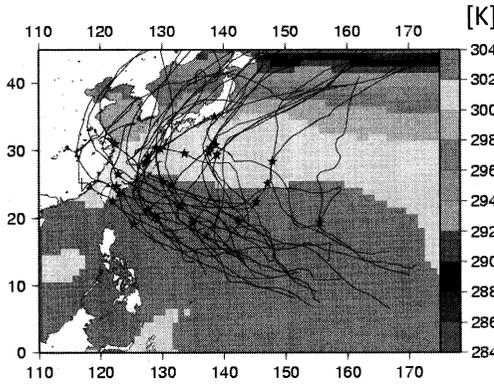


図-5 1982～2001年の発達できた台風 ( $\Delta P \leq 15\text{hPa}$ ) の進路 (星印はピーク時の位置) と平均海水面温度。

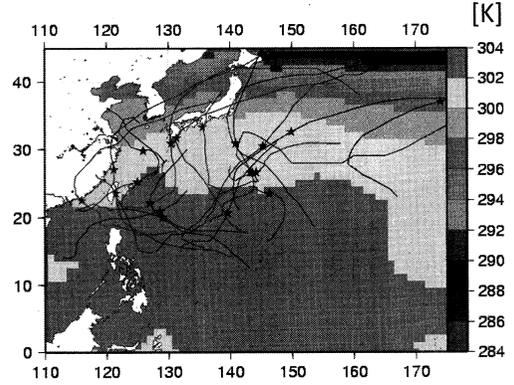


図-6 1982～2001年の発達できなかった台風 ( $\Delta P \geq 60\text{hPa}$ ) の進路 (星印はピーク時の位置) と平均海水面温度。

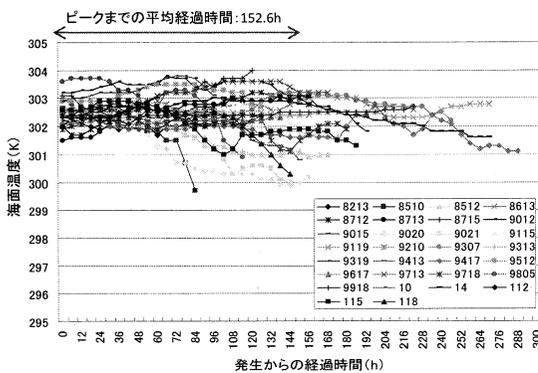


図-7 1982～2001年の発達できた台風 ( $\Delta P \leq 15\text{hPa}$ ) の経過時間と台風直下の海水面温度の関係。

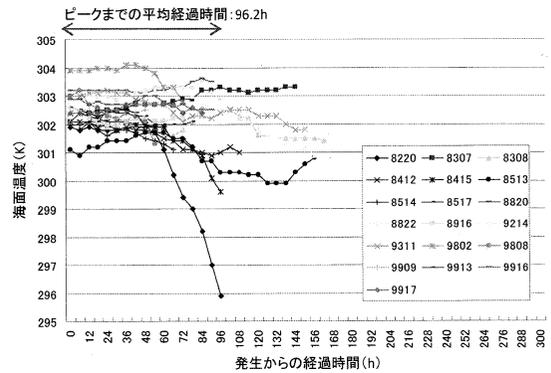


図-8 1982～2001年の発達できなかった台風 ( $\Delta P \geq 60\text{hPa}$ ) の経過時間と台風直下の海水面温度の関係。

およそ決まり、より長い時間をかけて暖かい海面上を移動することで定常状態に達し、強い台風へと発達するものと推察された。ここでは、より多くの台風事例（過去20年間の計117事例）を対象に統計解析を行うことで前節の仮説を実証し、台風のピーク時における実強度と可能最大強度との関係についてより詳細な考察を行う。

まず、発達できた台風と発達できなかった台風に区別するために、次のように定義される「台風未発達度 $\Delta P$ 」

$$\Delta P = P_{min} - P_{mpi} (\geq 0) \quad (4)$$

を導入した。ここで、 $\Delta P \leq 15\text{hPa}$ の時、台風は可能最低気圧 $P_{mpi}$ 近くまで「発達できた台風（計30個）」とし、一方で、 $\Delta P \geq 60\text{hPa}$ の時、十分に「発達できなかった台風（計15個）」と定義した。

まず、過去20年間の台風シーズンにおいて、「発達できた台風」と「発達できなかった台風」の進路パターンの相違について考察する。図-5と図-6は、それぞれ、発達できた台風と発達できなかった台風の全進路と平均海水面温度分布を示している。海水面温度分布については、

両者で殆ど差は見られず、台風未発達度 $\Delta P$ の大小には直接影響していないように見える。しかし、進路パターンについては両者間で大きな違いがあり、発達できた台風の多くは、より低緯度で発生し、 $28^\circ\text{C}$ 以上の暖かい海面上を北西方向に長距離を移動し、日本列島付近で転向している（発生からピークまでの平均移動距離 $2536\text{km}$ ）。一方で、発達できなかった台風は、比較的高い緯度で発生し、その幾つかは発生地点からそれほど移動せずに上陸していることが見て取れる（発生からピークまでの平均移動距離 $1758\text{km}$ ）。また、図-7と図-8は、それぞれ、発達できた台風と発達できなかった台風の経過時間と海水面温度との関係性を示す（折れ線の右端で強度ピークに達する）。いずれも海水面温度 $28^\circ\text{C}$ 以上の暖かい領域を移動している点については共通しているが、発生からピークまでの経過時間には大きな差が生じている。発達できた台風は、ピークに達するまでに平均して152時間（約6日間）を要するが、発達できなかった台風は平均して96時間（約4日間）でピークとなっている。以上の結果より、台風が可能最低気圧 $P_{mpi}$ 近くまで発達するためには（すなわち、 $\Delta P \sim 0\text{hPa}$ となるためには）、 $28^\circ\text{C}$ 以上の暖

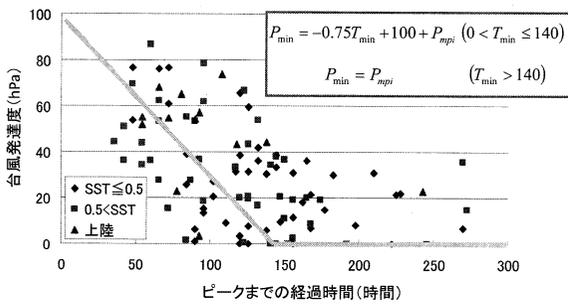


図-9 1982~2001年の台風のピークまでの経過時間 $T_{min}$ と台風未発達度 $\Delta P$ の関係。

かい海面上を、より長い時間(約6日間以上)をかけて長距離移動する必要があると結論付けることができる。

以上の結果をまとめると、全117個の台風の発生からピークに達するまでの経過時間 $T_{min}$ と台風未発達度 $\Delta P$ の関係性を理解することができる(図-9)。ピークまでの経過時間 $T_{min}$ が140時間(約6日間)よりも小さな台風の多くは、台風未発達度 $\Delta P$ が大きく(つまり、定常状態に達しておらず)、 $T_{min}$ に比例して $\Delta P$ は減少している(定常状態に近づく)。一方で、 $T_{min}$ が140時間を超えると $\Delta P$ は0hPaに近づいている(つまり、完全に定常状態に達している)。この関係を回帰的に表現すると、次のように、

$$P_{min} = -0.75T_{min} + 100 + P_{mpi} \quad (0 \leq T_{min} < 140)$$

$$P_{min} = P_{mpi} \quad (140 \leq T_{min}) \quad (5)$$

と表せる。つまり、台風発生時点で、可能最低気圧 $P_{mpi}$ とピークに達するまでの経過時間 $T_{min}$ が分かれば、個々の台風のピーク時における実最低気圧 $P_{min}$ を予測できることになる。ここで、図-10は、式(5)により推定された実最低気圧 $\tilde{P}_{min}$ と、観測された実最低気圧 $P_{min}$ との散布図を示す。この簡易評価手法により、相関係数にして0.63の計算精度でピーク時の実最低気圧を推定できることが明らかとなった。しかし、若干の過小評価であり、吉野ら(2007)が示すように台風直下の海水面温度低下の効果も加味できれば、更に計算精度は増すものと期待される。

## 5. 結語

本研究では、過去20年間の台風シーズンの熱力学的可能最大強度を評価し、詳細な統計解析を行うことで、台風周辺の環境場因子が台風強度に如何に影響しているかについて考察した。

その結果、ピーク時における台風強度は、可能最大強度のみならず、発生からピークに達するまでの経過時間にも強く依存しており、暖かい海面上を長時間(6日

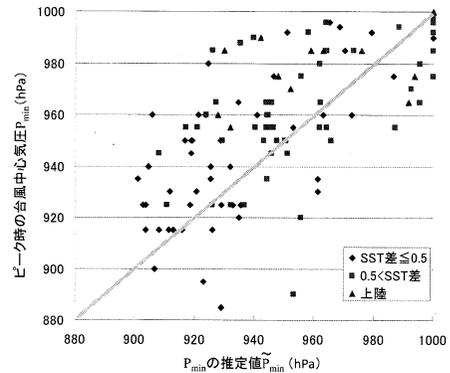


図-10 1982~2001年の台風のピーク時の実強度 $P_{min}$ と式(5)による推定強度 $\tilde{P}_{min}$ との散布関係(相関係数0.63)。

間以上)かけて長距離移動することで定常状態に達し、強い台風となることが明らかとなった。このことは、台風強度を評価する上で、個々の台風の持つ過去の履歴情報(発生からピークまでのライフサイクル)が重要であることを意味しており、すなわち、台風モデルにより高精度な強度予測を行うためには、台風のライフサイクルをも考慮した台風初期値化技術の開発に加え、進路予測の精度向上もまた不可欠となることを示唆している。

また、本研究によって回帰的に構築された簡易的な強度評価式により、ピーク時の台風強度を評価したところ、相関係数0.63の精度で日本列島に接近する台風のピーク強度を推定できることが明らかとなった。これを活用することで、台風接近前にその最大規模をある程度推定することが可能となり、リアルタイムハザードマップの構築の際に有用な情報になると期待される。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究(B)20760325、及び、基盤研究(B)(2)18360236による成果であることをここに付記する。

## 参考文献

- 吉野純・村上智一・林雅典・吉田尚弘・安田孝志(2007):大気-海洋-波浪結合モデルによる高精度台風予測のための感度実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 341-345.
- Bister, B. and K. A. Emanuel (2002): Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity. 1. Interannual to interdecadal variability, *J. Geophys. Res.*, 107, D24, 4801.
- Emanuel, K. A. (1986): An air-sea interaction theory for tropical cyclones. 1. Steady-state maintenance, *J. Atmos. Sci.*, 43, pp. 585-604.
- Emanuel, K. A. (1994): *Atmospheric convection*, Oxford Univ. Press, 580 p.
- Emanuel, K. A. (1997): Some aspects of hurricane inner-core dynamics and energetics, *J. Atmos. Sci.*, 54, pp. 1014-1026.
- Emanuel, K. A. (2005): Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 year, *Nature*, 436, pp. 686-688.