

北西太平洋における海面水温と台風の発達の間関係

藤井 健・光田 寧

THE RELATION BETWEEN SEA SURFACE TEMPERATURE AND DEVELOPMENT OF TROPICAL CYCLONES IN THE NORTHWEST PACIFIC

By *Takeshi FUJII* and *Yasushi MITSUTA*

Synopsis

The monthly mean data of sea surface temperature (SST) of COADS (Comprehensive Ocean-Atmospheric Data Set) was analyzed in relation with tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in the period from 1951 to 1985. The original data of SST for mesh of two degree latitude and longitude interval is smoothed over five meshes to incooperate the scale of a tropical cyclone. The probability of tropical storm genesis shows the maximum value over the sea area with SST of 28.0~30.0°C.

In the region with SST lower than 28.0°C, the probability decreases sharply with decreasing of SST. And in the region higher than 30.0°C the probability also decreases.

The interannual variation of the sea area with SST in 29.0~30.0°C is distinct. The annual total area with SST of 29.0~30.0°C decrease in 1965, 72, 75, 76, and 82 distinctively. In these years except for 1975, El Nino Event occurred in the Eastern Equatorial Pacific, and it is considered that the event caused to reduce the area with SST in 29.0~30.0°C. In these years, the area with SST in 28.0~29.0°C increases conversely. Therefore, the total area of 28.0~29.0°C does not change significantly, and tropical storm genesis does not change largely even El Nino year.

The annual number of tropical storm genesis in the area under study changes with the area with SST in 28.0~30.0°C, with the correlation coefficient of 0.57.

The deepening rate of central pressure increases with SST in the latitudal belts except for 6~8°N. The deepening of central pressure is distinct between 130°E and 160°E, where SST is higher than the other longitudinal zones.

1. はじめに

熱帯低気圧の発生および発達には、海面からの潜熱・顕熱の供給に依存し、海面水温と関係が深いことはよく知られていて、Palmén¹⁾、Perlroth²⁾、Gray³⁾などの調査がある。Palménによると、熱帯低気圧は赤道付近を除いた海面水温 26~27°C 以上の海域で発生し、この水温を臨界温度としている。Perlrothによると、熱帯低気圧の発生には海面水温が 26°C 以上である必要があるという。また、Gray は、熱帯低気圧の発生域と海面水温 26°C 以上の海域がよく一致することを示している。

藤井・山元・光田⁴⁾は、年間台風個数変動と7~10月の平均海面水温変動との間の相関を調べ、周期16年

および8年に、相関関数が、それぞれ、0.90および0.83の顕著なピークがあることを示している。

海面水温と熱帯低気圧の発達については、熱帯低気圧の数値モデルによるシミュレーションにおいて、Emanuel⁵⁾ は海面水温が熱帯低気圧の最低気圧を支配し、水温が上昇すれば、中心気圧が下がるという結果を出している。しかし、この他には、定量的な調査はあまり詳しく行われていない。そこで、ここでは、北西太平洋における熱帯低気圧が発達し、気象庁の定義による「台風」となる頻度と海面水温との関係および台風の中心気圧の下降の割合と海面水温との間の関係について、統計的調査を行った。

なお、台風の発生という言葉の意味が曖昧であるので、本論文では、気象庁の定義による「弱い熱帯低気圧 (tropical depression)」が「台風 (tropical storm, severe tropical storm, typhoon を含む) に発達する、すなわち、域内の最大風速が 17.2 ms^{-1} 以上となることを「台風の発生」と呼ぶことにする。

2. 試 料

海面水温の試料としては、『総合海洋気象観測データセット COADS (Comprehensive Ocean-Atmospheric Data Set)』の月平均海面水温を使用した。COADS は米国の Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences が編集したものであり⁶⁾、本研究では、月平均海面水温を使用した。

このデータは緯度2度、経度2度のメッシュごとに平均をとったものである。しかし、台風となるころの弱い熱帯低気圧は1個のメッシュの大きさよりもはるかに大きなスケールに発達して、COADS の海面水温をそのまま用いて、台風の発生・発達との関係を調べるのには問題がある。そこで、Fig. 1 に示すように、各メッシュについて、その東西方向および南北方向に隣接している5個のメッシュの海面水温の平均をとり、その中央のメッシュの水温とした。すなわち、東西方向、南北方向に3メッシュずつの移動平均をとり、平滑化した月平均海面水温の分布の時系列を作成したのである。この移動平均により、200 km 程度の小さい水平規模の変化は平滑化され、数百 km 以上のスケールの変化が残されていることになる。

また、台風の資料としては、気象庁が編集した「ベストトラックデータ」の6時間おきの中心位置および中心気圧を使用した。

調査の対象とした期間は、両方のデータセットが揃っている1951~85年の35年間とした。また、統計の対象とした海域は、台風が発生する主な海域である $6\sim 26^{\circ}\text{N}$, $110\sim 180^{\circ}\text{E}$ の北西太平洋とした。

3. 海面水温と台風発生頻度

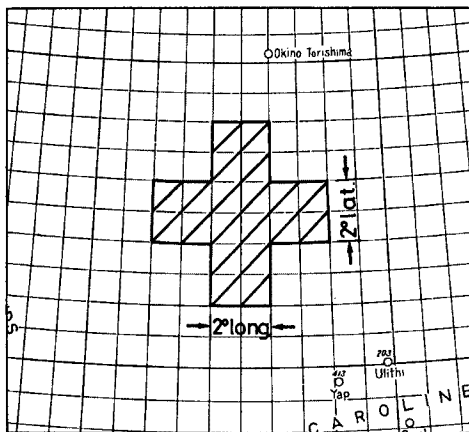


Fig. 1. The distribution of meshes for averaging of SST

台風が発生する確率が海面水温によってどのように変化するかについて調べてみた。Fig. 1 に示したメッシュごとの月別水温について、 1°C きざみの水温ごとに35年間の延べ面積を求め、水温別の35年間の台風の発生個数から、単位面積あたりに1か月に台風が発生する確率を計算し、台風発生率と呼ぶことにする。各水温別に、面積 10^6 km^2 の海域当たりの台風発生率は Fig. 2 のようになる。これによると、台風発生率は、 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域で最大で、月当り0.25個であり、 $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ の海域での台風発生率は、これよりわずかに小さいだけの0.21個である。

水温が 28.0°C より下がると、台風発生率は急激に減少していき、 $26.0\sim 27.0^{\circ}\text{C}$ の海域では 10^6 km^2 あたり月間0.02個にすぎない。すなわち、 $26.0\sim 27.0^{\circ}\text{C}$ の海域で

の台風発生率は、28.0～30.0°C の海域における確率に比べて1/10となる。また、26.0°C 未満の水温の海域においては、調査の対象とした台風804個のうち、わずか2個にすぎなく、発生率はさらに小さくなる。水温 26.0°C 未満の海域では台風がほとんど発生しないというこの結果は、前述のように、Palmén などが熱帯低気圧発生の臨界温度を 26.0～27.0°C としていたことと一致する。

なお、Fig. 2 において、水温 30.0～31.0°C の海域では、29.0～30.0°C の海域に比べて台風発生率が低くなっている。海面水温が 30.0°C を超える海域の面積が小さく、台風発生数はわずか7個であるので、その有意性について検討する余地がある。しかし、海面水温 28.0～30.0°C の海域で大きな確率を示すことは、この水温あたりで台風の発生率がピークになると考えることができ、30.0°C を超えるような高い水温の海域では、台風の発生数がかえって減少するところから、台風発生に最適な海水温の範囲があるということになる。

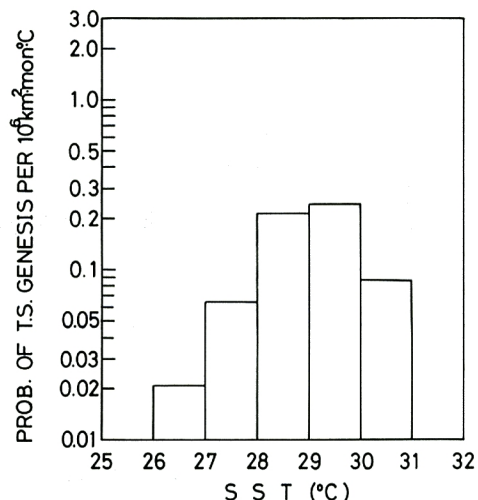


Fig. 2. Relation between monthly mean SST and probability of tropical storm genesis

4. 月平均海面水温 29.0°C 以上の海域の面積の経年変化

平滑化した月平均海面水温の水温別年間延べ面積の経年変化は Fig. 3 のようになる。この図によると、1965年、72年、75年、76年および82年には、29～30.0°C の海域の面積の減少が顕著である。これらの年を高温域の少ない年と呼ぶことにする。

一方、東部赤道太平洋における海面水温の経年変化は Fig. 4 のようになる。気象庁では、東部赤道太平洋の 4°S～4°N、150°W～90°W の海域をエルニーニョ監視海域とし、この海域における海面水温の月平均

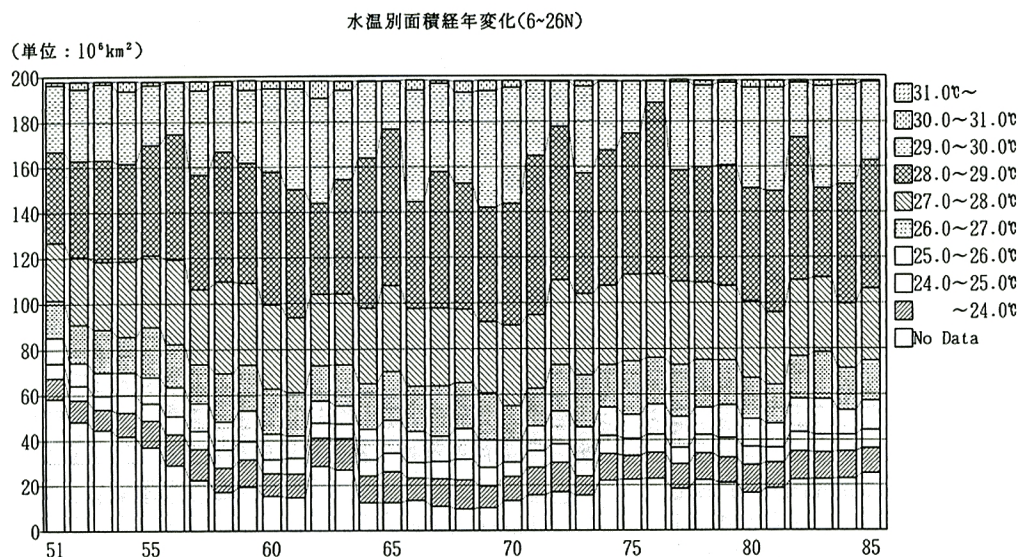


Fig. 3. Interannual variation of total area ($\times 10^6 \text{ km}^2$) divided by monthly mean SST in Northwest Pacific of 6～26°N and 110～180°E.

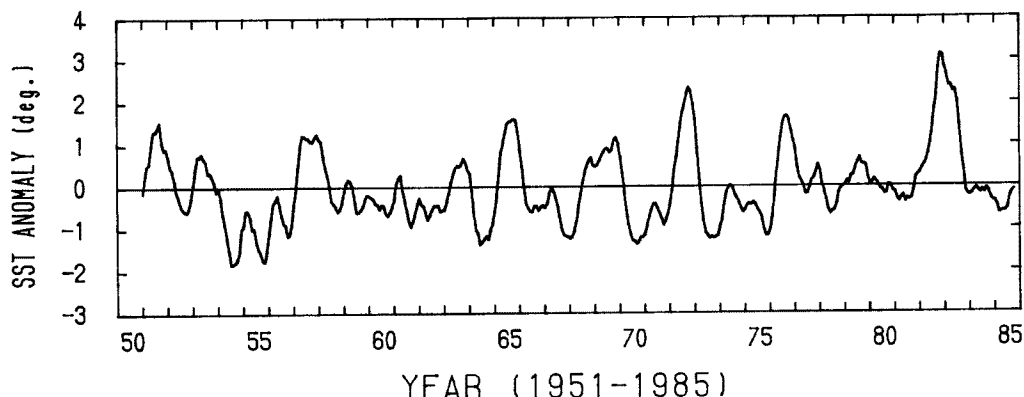


Fig. 4. Interannual variation of anomaly in SST in the Eastern Equatorial Pacific of $4^{\circ}\text{N}\sim 4^{\circ}\text{S}$ and $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$. The SST anomaly is represented as the three month running mean value.

値の平年からの偏差の5か年移動平均値が6か月程度以上継続して $+0.5^{\circ}\text{C}$ を超えるとエルニーニョ現象が発生したとみなしている⁷⁾。気象庁⁸⁾によると、1951~85年には9回のエルニーニョ現象が発生していることになる。エルニーニョ現象は2年にわたって継続している場合が多いのであるが、ここでは、台風シーズンの夏期から秋期にかけて水温の上昇が顕著であった1951, 53, 57, 63, 65, 69, 72, 76, 82年をエルニーニョ年とすることにする。

前述の北西熱帯太平洋の高温域の少ない年においては、1975年を除いて、東部赤道太平洋の海面水温が上昇していて、エルニーニョ現象が発生している。したがって、このような年の北西熱帯太平洋における海面水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の水温域の減少する現象は、エルニーニョ現象に起因したものではないかと考えられる。

松林⁹⁾は、エルニーニョ年の熱帯太平洋の水温偏差の特徴について詳しく調べている。これによると、NINO-WEST と呼ばれる $130\sim 150^{\circ}\text{E}$ および $14^{\circ}\text{N}\sim$ 赤道の北西熱帯太平洋において負偏差が顕著であったのは、1957, 65, 72, 76, 82年であった。一方、1951, 53, 63, 69年は、海面水温の変動が大きかったり、負偏差が期間がわずかであった。前者は、1957年を除いて、Fig. 3 に示した本研究の調査海域における高温域の少ない年と一致している。

Fig. 3 において、このような高温域の少ない年の水温 $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積を調べてみると、他の年よりも増加している傾向がみられる。これに反して、1983年のように、水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積が大きい年には、 $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積が小さくなっている。

そこで、各年の海面水温が $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積と $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積を比較してみ結果を Fig. 5 に示す。これら2つの水温域の面積には、明らかに逆相関の関係にあり(相関関数 -0.55)、水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積の増減とは逆方向に、 $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積が変動している傾向が明瞭に現れている。

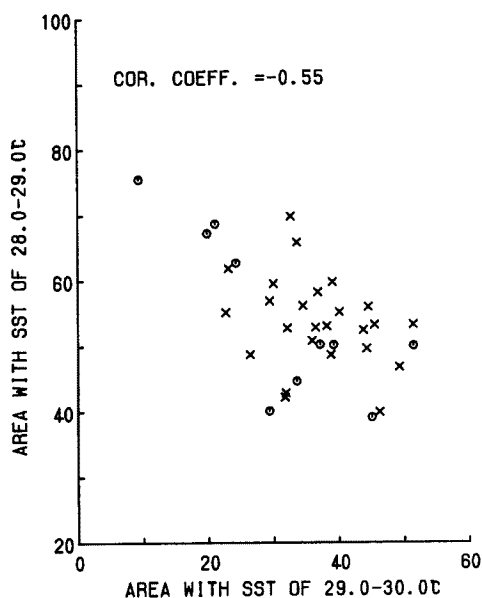


Fig. 5. Relation between annual total areas with SST of $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ and $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$. ○ and × indicate El Niño year and non-El Niño year, respectively.

る。

海面水温 28.0~29.0°C と 29.0~30.0°C の海域の面積を月別に調べてみると、台風シーズンの6~11月においては逆相関の関係がはっきりと現れている。相関関数は、5月は-0.49であるが、6月になると-0.74となり、7月が-0.85、8月が-0.89、9月が-0.83、10月が-0.77、11月が-0.56で、12月になると相関がほとんどなくなっている。8月の例を Fig. 6 に示す。

北西太平洋における海面水温の経年変化のこの調査により、エルニーニョ現象の影響により海面水温が下がるのは、主として 29.0°C 以上の高温域であり、29.0°C 未満の海域はほとんど水温が下がらなかった。また、水温 29.0°C 以上の高温域で 1°C 前後下がった結果、28.0~29.0°C の面積が増加したと思われる。

5. 海面水温と台風年間個数の関係

調査域内の年間台風個数の経年変化は Fig. 7 のようになる。先に示した4回の高温域の少ない年で同時にエルニーニョ年において、調査域内における年間台風個数はその前後の年に比べてとくに減少している傾向はみられない。すなわち、1965年30個、72年26個、76年25個、82年24個で、35年間の平均の23.0個に比べて、むしろ多くなっている。これは、海面水温 29.0°C 以上の海域の面積が減少したが、水温 28.0~29.0°C の海域の面積が増大し、28.0~30.0°C の海域の面積はほとんど減少しなかったことによると考えられる。

つまり、これらの年のうち、1975年を除く4回のエルニーニョ現象発生年についてみると、水温 28.0~30.0°C の海域の年間延べ面積は $87.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ であり、35年間平均の $89.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ に比べて、わずか2.2%減少したにすぎないのである。

一般には、エルニーニョ現象の発生時には、北西熱帯太平洋の海面水温が下がり、対流活動は不活発となり、熱帯低気圧の個数は減少するといわれている。エルニーニョ現象と台風年間個数の統計的關係については、Aoki¹⁰⁾ の調査があり、これによると、エルニーニョ発生年の年間個数はこの年を中心とした5年間で

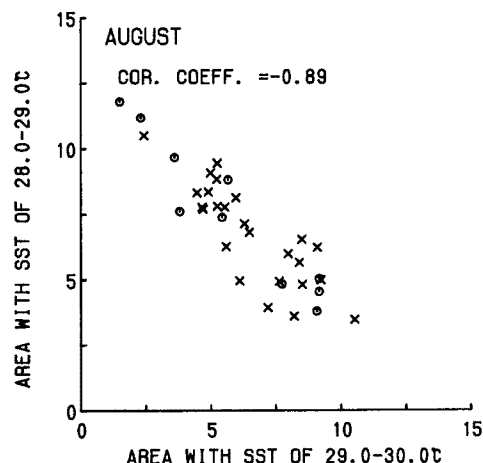


Fig. 6. Relation between total areas with SST in 29.0~30.0°C and 28.0~29.0°C in August. ○ and × indicate El Niño year and non-El Niño year, respectively.

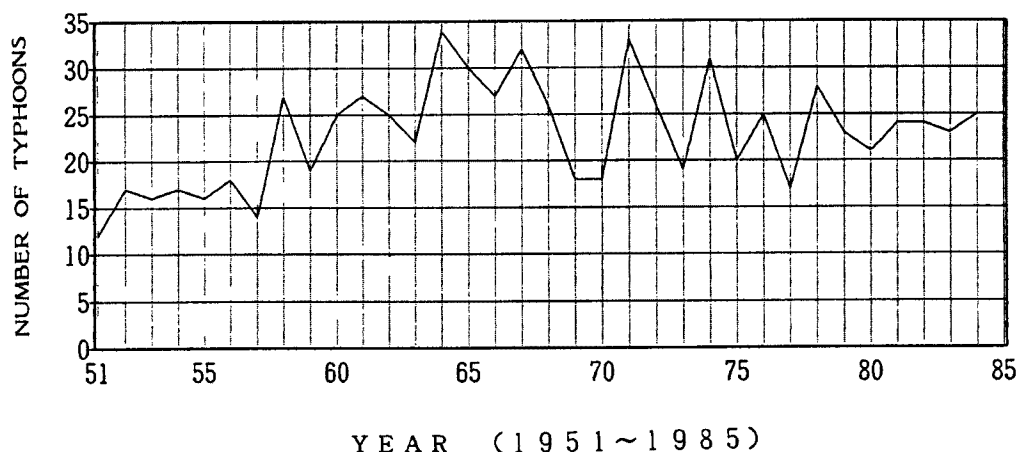


Fig. 7. Interannual variation of number of tropical storms formed in the analysis domain

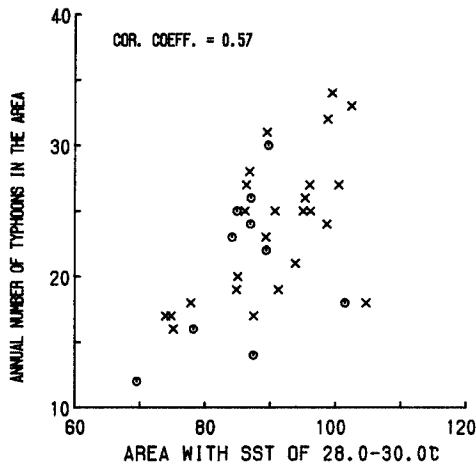


Fig. 8. Relation between annual total area with SST of 28.0~30.0 and annual number of tropical storms. ○ and × indicate an El Niño year and a non-El Niño year, respectively.

Fig. 2 に示したように、海面水温 28.0~30.0°C の海域で台風が発生する確率が最も高いのであるから、この台風発生最適水温域の面積と台風の個数とは関係があるものと思われる。そこで、この水温域の年間延べ面積と台風年間個数との関係を調べた。これを Fig. 8 に示す。この水温域の面積の増加とともに、台風個数が増加する傾向があり、相関係数は0.57である。

なお、水温 29.0°C 以上の海域の面積と年間台風個数との相関係数は-0.07で、全く相関がない。このことは水温 29.0°C 以上の海域が縮小しても、これは相応して 28.0~29.0°C の海域の面積が増大するので、台風の個数は変化しないことを意味している。

6. 台風の中心気圧低下率と海面水温の関係

中心気圧 p_c の時間変化を時間間隔 Δt で除した相対的な変化率 $\Pi = -\Delta p_c / p_c \Delta t$ を台風の中心気圧低下率 Π として表すことにする。統計の対象とした海域について、各緯度帯における海面水温 T_s と Π との関係を図 9 に示す。

なお、台風5313号は 1953年9月22日00~06時 (グリニッジ標準時) の6時間に中心気圧が 993 hPa から 900 hPa にまで 93 hPa も下降している。この発達率の値は例外的であり、問題があるのでこの統計では除いてある。

Π の緯度別平均値は、18°N 以南では大きく、各緯度帯で $5 \times 10^{-3} \text{h}^{-1}$ を超えている。これらの緯度帯では、海面水温はほとんど変わらなく、 $28.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$ の範囲にある。18°N 以北では、緯度とともに海面水温が下がっていき、 Π も減少している。

緯度別に T_s と Π の関係を調べてみると、Table 1 に示すように、 T_s と Π の間の相関はあまりよくないが、その関係を線形一次回帰式 $\Pi = aT_s + b$ で表してみると、 a および b の値は Table 1 のようになり、すべての緯度帯で、 a の値は正であり、海面水温が高くなるほど中心気圧低下率が大きくなっている。 a の値が正であることが統計的に有意であるかどうかを t 分布として検討してみた。その結果、信頼率99.9%で、6~10°N の緯度帯では有意とは言えないが、他のすべての緯度帯において有意である。これは、台風の発達率が、台風の発生率と同じく、海面水温 28.0~30.0°C の海域で正の大きな値を示すことによっている。し

最も少なくなっている。Aoki の調査と本研究における調査との差は、調査方法にもよるがさらに検討を必要とする。Aoki の調査では北西太平洋全域を対象にしているのに対して、われわれの調査では 26°N 以南を対象としている。このことは4回の高温域の少ない年では 26°N 以北で発生する台風の個数が少ないということの意味しているのかも知れず、事実、気象庁気候問題懇談会温室効果検討部会の報告書¹¹⁾によると、エルニーニョ年では台風の発生緯度が低くなっていると言われている。

29.0°C 以上の面積の減少が最も顕著であった1976年についてみると、調査海域内で台風が発達したのは25個である。この年の海面水温 29.0~30.0°C の海域の面積は、前述のように、35年平均の27%にすぎなく、この域内で台風が発達したのはわずか1個であった。しかし、水温 28.0~29.0°C の海域の面積は調査した35年間で最大の $75.5 \times 10^6 \text{km}^2$ であり、この水温領域内で14個の弱い熱帯低気圧が台風が発達している。

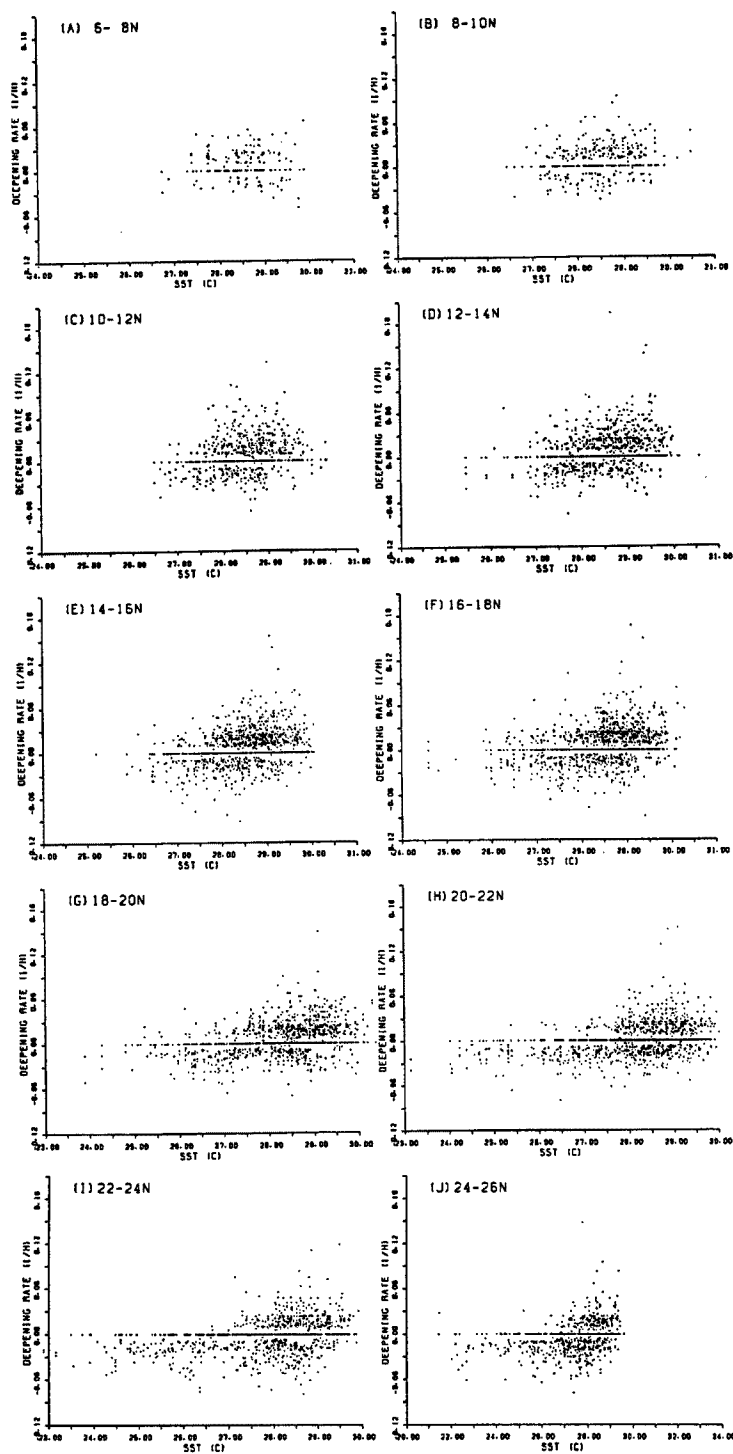


Fig. 9. Relation between SST and deepening rate II. (A) 6~8°N, (B) 8~10°N, (C) 10~12°N, (D) 12~14°N, (E) 14~16°N, (F) 16~18°N, (G) 18~20°N, (H) 20~22°N, (I) 22~24°N, (J) 24~26°N.

Table 1. Relation between monthly mean sea surface temperature and the deepening rate of a typhoon

latitude (°N)	number of cases	mean of SST (°C)	mean of Π ($10^{-3}h^{-1}$)	correl. coeff.	a ($10^{-3}^{\circ}C^{-1}h^{-1}$)	b (h^{-1})	t-value
6~8	243	28.55	6.70	0.03	1.01	-0.02	0.43
8~10	521	28.46	6.21	0.17	4.74	-0.13	3.93
10~12	992	28.49	6.47	0.20	5.94	-0.16	6.29
12~14	1548	28.52	6.21	0.25	6.55	-0.18	9.96
14~16	1801	28.48	5.26	0.28	7.13	-0.20	12.20
16~18	1894	28.49	5.12	0.28	6.59	-0.18	12.47
18~20	1994	28.34	3.38	0.28	4.86	-0.13	12.80
20~22	1851	28.20	0.49	0.33	5.59	-0.16	14.87
22~24	1482	27.98	1.97	0.31	5.07	-0.14	12.76
24~26	1239	27.62	3.41	0.29	3.84	-0.11	10.86

かし、興味があるのは水温がその範囲にあっても発達率が異なる場合が数多くあることである。これは、台風の発達が単に海面水温のみで決定されるのではなく、他の synoptic な条件でも支配されていることを意味する。海面水温 27°C 以下では発達率はほとんど負である。

7. 台風の中心気圧低下率の経度による変化

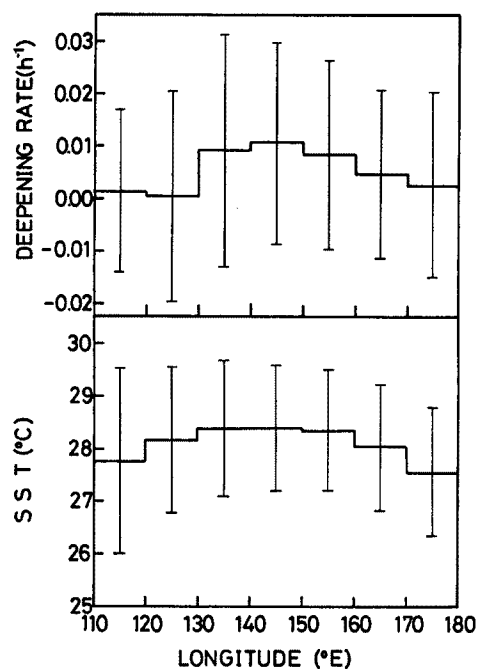


Fig. 10. Change of deepening rate (upper chart) and SST (lower chart) with longitude. A bar shows a standard deviation.

調査域を経度10度ごとの7つの経度帯に分割し、各経度帯内の台風発達率 Π の平均値について調べてみた。その結果は、Fig. 10 に示すように、経度帯によって差が生じている。 Π の値が大きく、台風の発達が顕著なのは、130°E から 160°E にかけての3つの経度帯においてである。35年間の平均海面水温は 130~160°E において 28.2~28.3°C と高くなっている。なお、台風の発達が顕著なこの熱帯海域は、Heta¹²⁾ の調査による熱帯の東西循環のセルの間の上昇流域と一致している。

8. おわりに

北西太平洋で弱い熱帯低気圧が発達して台風になった場所の月平均海面水温を調べたところ、熱帯低気圧が台風の強度に発達するのに最適な海面水温は 28.0°C から 30.0°C の範囲であることがわかった。海面水温 30.0°C 以上の海域では、むしろ台風の発生率は減少するという結果が得られたが、これは資料数が少なく、その有意性についての検討の余地がある。しかし、海面水温 28.0~29.0°C の海域と 29.0~30.0°C の海域において、台風の発生率はほとんど差がないということは、この水温あたりで台風の発生率がピークになると考えることでも

き、 30.0°C を超えるような高い水温の海域が広がれば、台風の発生数がかえって減少するのではないかという仮説を立てることも可能である。

北西熱帯太平洋では、月平均海面水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積の経年変動が顕著である。この海域の面積の増減と相応して、 $28.0\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積は逆の変化する傾向がある。北西太平洋の海面水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ 域の減少の一因として、東部赤道太平洋で発生するエルニーニョ現象の影響が考えられる。今回の調査の結果、明らかになったのは、エルニーニョ現象により北西熱帯太平洋の海面水温が下降するのは、水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域で水温が 1°C 前後低下するのであって、水温 29.0°C 以下の海域では、ほとんど水温が下がらないのではないかということである。この点については、今後、さらに詳しく検討することにする。

また、エルニーニョ現象の発生時には、北西熱帯太平洋の海面水温が下がり、対流活動は不活発となり、熱帯低気圧の個数は減少するといわれている。しかし、エルニーニョ現象が起こった年で、北西熱帯太平洋の海面水温が下がった4回についてみると、本研究の調査域内における年間台風発生数はとくに減少してはいない。これは、水温 $29.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域の水温が 1°C 程度下がっても、Fig. 2 に示したように、台風の発生率はほとんど変わらなく、また、水温 $28.0\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ の海域の面積はこれらの年ではほとんど減少してないので、調査海域の台風発生数は減少しないものと考えられる。

これに反して、1951, 53, 57, 63, 69年のエルニーニョ年においては、北西熱帯太平洋の海面水温 29.0°C 以上の海域の面積の減少は顕著ではない。エルニーニョ年における北西熱帯太平洋の海面水温の分布において、なぜこのように2つのタイプに分かれるのかについて今後検討することにする。ただ、北西熱帯太平洋の海面水温が 29.0°C 以上の海域の面積の減少が顕著でなかった年は、調査対象期間の前半に集まっている。したがって、気候の長期変動が関係しているのではないかとも考えられるが、このほかに船舶による観測域の偏りや観測精度の違いなども考えられないことはない。

台風の発達については、数多くの数値実験が試みられている。この中には、海面水温の上昇によって台風は発達し、中心気圧がどんどん下がるという結果を出した例もある。これらの研究結果と本研究の結果は必ずしも相入れないものがあるので、比較して検討してみる必要がある。

また、今後、台風の中心気圧の最低値が海面水温と関係があるのかどうか、あるいは台風が水温の高い海域を進行していく傾向があるのかどうかについて、引き続き調査を行う予定である。

なお、本研究は、文部省科学研究費補助金『高潮の氾濫による社会基盤施設の破壊と被害予測法に関する研究』（研究代表者服部昌太郎）の成果の一部である。

最後に、本研究で使用した『総合海洋気象観測データセット』は、山元龍三郎京都大学名誉教授および気象庁会場気象課の好意で使用させていただいたものであり、また台風の位置と中心気圧は気象庁の編集によるベストトラックデータを使用させていただいた。これらに対して厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Palmén, E.: On the formation and structure of tropical hurricanes. *Geophysica*, 3, 1948, pp. 26-38.
- 2) Perlroth, I.: Relationship of central pressure of hurricane Esther (1961) and the seasurface temperature field. *Tellus*, 14, 1962, pp. 403-408.
- 3) Gray, W. M.: Tropical cyclone genesis. Pap. No. 234. Dept. Atmos. Sci., Colorado State University, Fort Collins, 1975, pp. 1-121.
- 4) 藤井 健・山元龍三郎・光田 寧：台風発生数の経年変動について。京都大学防災研究所年報，第31号 B-1, 1988, pp. 167-175.
- 5) Emanuel, K. A.: Air-sea interaction for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *Journ.*

- Atmos. Sci., Vol. 43, 1986, pp. 585-604.
- 6) Slutz, R. J., S. J. Lubker, J. D. Hiscox, S. D. Woodruff, R. L. Jenne, D. H. Joseph, P. M. Steurer and J. D. Elms: Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set Release I. Climate Research Program, ERL, Boulder, Colorado, 1985.
 - 7) 佐伯理郎: エルニーニョ 91/92. 気象, 36巻12号, 1992, pp. 16-20.
 - 8) 気象庁 (編): 異常気象レポート'89. 大蔵省印刷局, 1989, pp. 198-203.
 - 9) 松林繁樹: 熱帯の対流活動, 海面水温. 気象研究ノート, 第68号, 1990, pp. 43-50.
 - 10) Aoki, T.: A climatological study of typhoon formation and typhoon visit to Japan. Pap. Meteor. Geophy., Vol. 36, 1985, pp. 61-118.
 - 11) 気象庁気候問題懇談会温室効果検討部会: 温室効果気体の増加に伴う気候変化 (II). 気象庁, 1990, pp. 102
 - 12) Heta, Y.: The origin of tropical disturbances in the equatorial Pacific. Journ. Meteor. Soc. Japan, Vol. 1991, pp. 327-351.