

日本に來襲する台風とそれに伴う強風の数値解析

藤 井 健・光 田 寧

TYPHOONS APPROACHING JAPAN AND A NUMERICAL ANALYSIS OF WIND FIELD IN THEM

By Takeshi FUJII and Yasushi MITSUTA

Synopsis

The tracks of 258 severe and moderate typhoons, which approached the Japanese islands from 1951 to 1982, are represented as the sequence of mesh points of 1 degree latitude by 1 degree longitude intervals. At each grid point, the forward directions of typhoons are analyzed statistically according to the direction approaching to that grid point. The method by H. C. Bijvoet (1957) for estimating the wind over sea is applied to the analysis of high winds in 10 severe typhoons from 1977 to 1982, with data observed at the Buoy Nos. 3 and 4 of the Japan Meteorological Agency. The values of parameters a_1 and a_2 of the Bijvoet's formula, in non-steady pressure patterns with large curvature of isobars in typhoons, are estimated much less than those in quasi-steady pressure patterns with nearly straight isobars, and it seems to be caused by neglecting the terms higher than the first order differential of pressure gradient force.

1. 序

台風に伴う強風は中心を含んで幅数十 km の範囲内に限られている場合が多く、数十年という短い統計年数による台風の経路の偶然性が風速の極値や統計的予測値の地域分布に大きく影響を及ぼしている。このような信頼性の乏しい極値や統計的予測値を防災計画の立案の基準として利用することは大きい危険性を伴っている。そこで、本研究においては、日本本土に來襲する台風について全体的な統計的イメージを作り上げるための努力を進めることとし、まず過去32年間のその経路を統計的に分析し、経路の特徴を明らかにし、さらに、移動する台風内の風速分布を気圧分布から推算するにあたって、Bijvoet 方法の適用について検討した。

2. 日本本土に來襲する台風の経路の統計的解析

台風が日本本土に接近しつつある場合、あるいはそれ以後の台風の進路の特徴を、過去32年間に日本本土付近を通過した台風について調べることにした。調査はある区画内に進入してくる台風の進路とその区画から出て行くときの進行方向との関連において行った。

2.1 台風進路の資料

1951年から1982年までの32年間に台風として確認されたものは総計865個であるが、このうち、23°N と 47°N の緯線および 123°E と 147°E の経線で囲まれた日本列島およびその周辺の解析対象域を通過し、しかもこの領域内で中心気圧が 980 mb 以下の258個の台風を解析の対象とした。それらの台風名を Table 1 に示す。台風の経路については、1951～1970年について日本気象協会発行の台風経路30年集から、1971～1982年については気象庁編集の台風経路図から必要な情報を読み取った。また、中心気圧についての情報は気象要覧によった。

Table 1 A list of typhoons during the period from 1951 to 1982, which maintained the central pressures below 980 mb and passed through the region bounded by parallels of latitudes 23°N and 47°N , and circles of longitudes 123°E and 147°E

Year	No. of typhoon	Year	No. of typhoon
1951	4, 6, 15, 17, 21	1967	7, 10, 13, 18, 22, 28, 30, 34, 38
1952	2, 9, 14, 20, 22	1968	2, 3, 4, 7, 10, 12, 13, 15, 16, 19, 21, 23, 24
1953	5, 6, 7, 13, 16, 18, 23	1969	8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17
1954	5, 6, 12, 13, 14, 15	1970	2, 9, 10, 11, 12, 15, 17
1955	7, 9, 11, 13, 14, 20, 22, 23, 25, 27, 28	1971	5, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 28, 35
1956	6, 7, 9, 12, 13, 15	1972	6, 7, 9, 13, 14, 20, 21, 24, 26
1957	5, 7, 10, 13, 14, 16, 19, 21	1973	3, 6, 10
1958	3, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 22, 26, 27, 30	1974	4, 8, 14, 16, 18
1959	5, 6, 7, 14, 15, 18, 19, 20	1975	3, 4, 5, 6, 8, 13, 20
1960	6, 8, 9, 11, 14, 15, 16, 18, 21, 24, 25, 26	1976	3, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 17, 22
1961	10, 11, 18, 20, 23, 24, 26, 28	1977	5, 9, 11, 14, 16
1962	2, 3, 7, 9, 12, 13, 14, 22, 24, 28	1978	6, 7, 8, 11, 15, 18, 19, 24, 28, 29, 30
1963	2, 4, 9, 11, 14, 17, 18, 19, 24	1979	10, 11, 13, 16, 20
1964	5, 9, 11, 14, 16, 20, 27	1980	3, 10, 12, 13, 16, 17, 19
1965	6, 15, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32	1981	5, 12, 15, 18, 19, 22, 24
1966	4, 10, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 24, 26, 27	1982	4, 5, 11, 13, 15, 18, 19, 21, 23

2.2 台風の進入方向と進行方向

解析対象域を緯度1度おきに引いた緯線および経度1度おきに引いた経線から成る格子網で分割する。台風中心の位置は間隔1度の緯線および経線で囲まれた区画の中心にあるとして、台風の経路をこれらの区画の中心の連続として単純化する。ただし、台風の経路が区画の隅を斜めにかすめるような場合には、その隅より東西南北方向に経度0.25度以内および南北方向に緯度0.25度以内で横切った場合には、その区画を通過していないこととする。たとえば、台風8218号について、区画の中心を結んで単純化した経路の一部は Fig. 1 の白丸および破線で示したようになる。

区画への台風の進入方向は、2区画前の位置から現在の位置を直線で結んだ方向とし、また、先の区画への進行方向は、現在の位置から2区画先の位置へ直線で結んだ方向とする。Fig. 1において、B点にある台風の進入方向はAB方向で、進行方向はBC方向である。

2.3 進入方向別の進行方向

解析対象域内で、関東地方以西の日本本土およびその南方海上の $28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$ ならびに $128^{\circ}\text{E}\sim 142^{\circ}\text{E}$ で囲まれた領域について、区画への進入方向が資料数の比較的多い北北東、北東および東北東の場合の進行方向の平均値および標準偏差を Fig. 2 (a)～(c)に図示する。ただし、1度間隔の区画ごとでは資料数が少ないために、2度間隔の緯線、経線

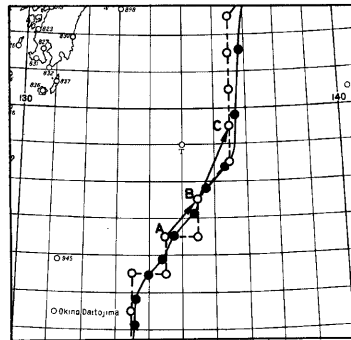


Fig. 1 An example of a simplified track of a typhoon. Solid and broken lines show the track by the Japan Meteorological Agency and the simplified one, respectively. Closed and open circles show the positions of typhoon centers by the Japan Meteorological Agency and that by the simplified track, respectively. Arrow AB points the direction of typhoon motion approaching the point B, and arrow BC points the forward direction from the point B.

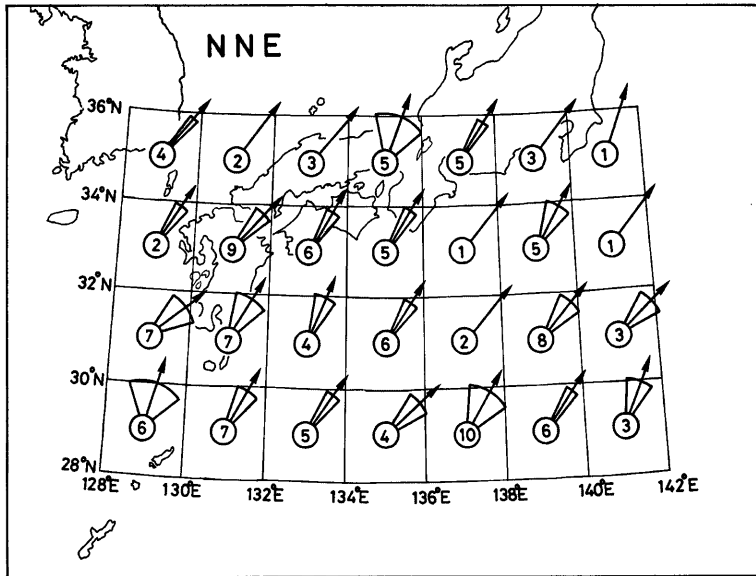


Fig. 2 (a) The distribution of the forward directions for typhoons approaching the grid points toward north-northeast. Arrows point the mean values of forward direction and fan-shape shows the standard deviation of forward directions. In the area where standard deviation is zero, no fan-shaped direction is shown. Values in circles are the number of data.

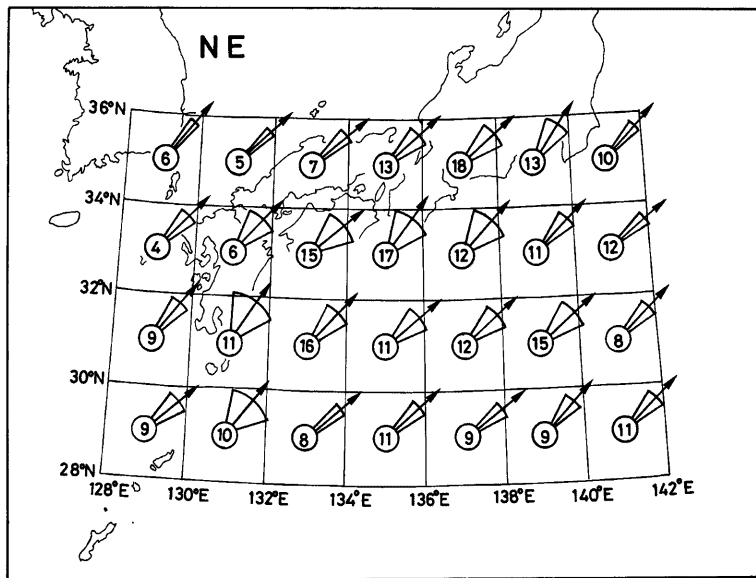


Fig. 2 (b) Same as Fig. 2 (a), except for typhoons approaching toward northeast

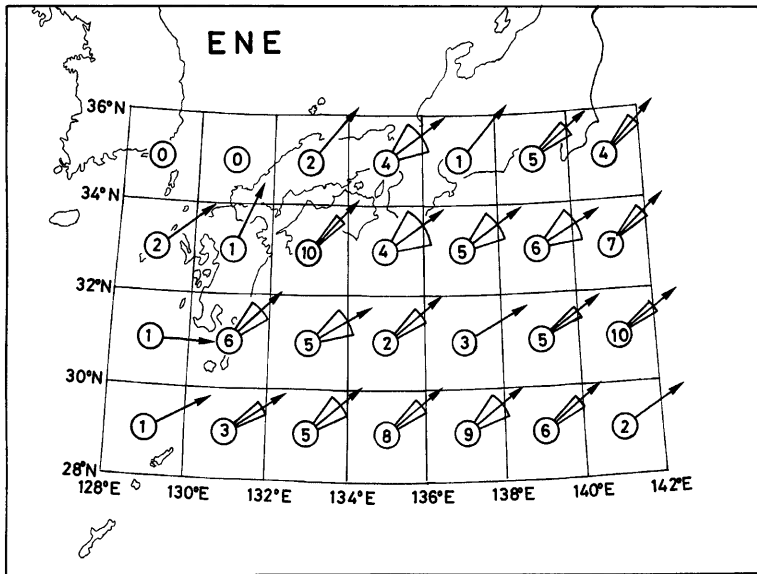


Fig. 2 (c) Same as Fig. 2 (a), except for typhoons approaching toward east-northeast

で囲まれた 4 区画の解析結果を合成して求めた平均値 (矢印の方向) および標準偏差 (扇形は標準偏差内の方向) を示してある。なお、全資料の進行方向が一致する区画は扇形を示していない。

進入方向が北北東の場合 (Fig. 2(a)) は、資料数は多くはないが、九州、四国および近畿地方の南岸、ならびに東海地方では進行方向は北北東に持続していて、標準偏差も小さい。一方、九州中部および北部では、進行方向は北東に変化している。

進入方向が北東の場合 (Fig. 2(b)) は、全般的に進行方向の平均値は大部分の区画で北東であるが、本土南岸では標準偏差が大きく、北北東や東北東に進行する台風も少なくはない。

進入方向が東北東の場合 (Fig. 2(c)) は、全般に資料数は少ないが、資料数の比較的多い九州南部および四国西部においては進行方向は北東に変わっていて、標準偏差も小さい。

このような台風の進路の統計にもう少し資料を追加して信頼度を高めると、日本付近における台風の動きを確率的にシミュレートすることが可能となる。この区画の分割法の再検討を含めて、統計的分析方法についてさらに研究することが必要である。

3. 台風域内の強風の数値解析

海洋上における発達した台風域内の強風については、海上での観測資料も少なく、ほとんど解析されていない。しかし、海洋上の台風域内の強風の分布は、太平洋上の島々や船舶にとって防災のために調べる必要があるばかりでなく、陸地の地形の影響を受けず、ほとんど変形していない風の場合は、気圧場ととの関係や大規模場ととの間の相互作用の解明において重要であり、台風域内の強風のモデル化の基礎となる。

海上の風を推算する一方法として、気圧場の移動、等圧線の曲率、気圧傾度の勾配、海面摩擦の効果などを考慮に入れて、与えられた気圧場から力学的に海上風を推算する Bijvoet の方法¹⁾がある。われわれは、以前、冬季の日本の海上風の推算に利用した²⁾が、本研究では、この方法の台風域内の海上風の推定へ

の適用について検討することにした。

3.1 海上での風の観測資料

気象庁は1973年より日本列島周辺の海洋上に海洋気象ブイを設置し、3時間おきに海上気象および海洋の観測を行っている。ブイの設置場所は5か所あるが、そのうち、潮岬南方約800km ($25^{\circ}40'N$, $135^{\circ}55'E$)の太平洋上にある3号機、および那覇の北西約300km ($28^{\circ}20'N$, $125^{\circ}05'E$)の東シナ海にある4号機の観測資料を今回の調査に利用した。風速は海面上7.5mの高さに設置された三杯発電式風速計によって測定されている。

ブイによる風速の観測値の妥当性については、舞鶴海洋気象台の観測船清風丸がブイ6号機と比較観測を

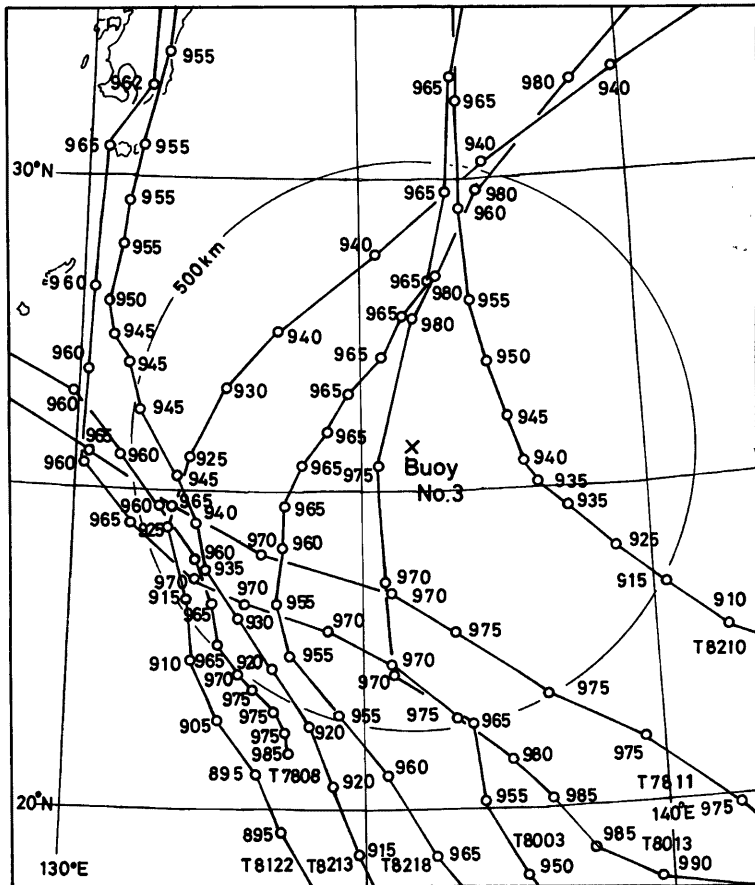


Fig. 3 (a) Tracks of typhoons to analyze the wind fields with data observed at Buoy No. 3. Circles show the positions of typhoon centers at 03, 09, 15, and 21 J. S. T., and values besides them indicate the central pressures (mb).

3.2 海上風の推算方式

海上風の推算方式である Bijvoet の方法については、以前の論文²⁾で詳細に説明したので、ここでは概略について述べるに留める。

単位質量の空気粒子についての単純な運動方程式は、

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = f\vec{v} \times \vec{k} + \vec{G} + \vec{R} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表わされる。この式で、 $\vec{v}$ は海上風、 t は時間、 f はコリオリ因子、 $\vec{k}$ は鉛直上向きの単位ベクトル、 $\vec{G}$ は気圧傾度力、 $\vec{R}$ は摩擦力である。この式の左辺の加速度は解析が容易ではなく、そのため、この式を $\vec{v}$ について解いて級数に展開し、気圧傾度力と摩擦力の実質的時間微分で表わす。さらに、気圧傾度力および摩擦力の 2 次以上の実質的時間微分の項を無視し、摩擦力については、その大きさをコリオリの力の大きさに対する比 (κ) でもって、またその方向を $-\vec{v}$ の方向となす角 (β) でもって表わすと、式(1)は直角座標 x - y 方向の成分では、

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{a_1}{f} G_y + \frac{a_2}{f} G_x - \frac{2a_1a_2}{f^2} \frac{dG_x}{dt} - \frac{a_2^2 - a_1^2}{f^2} \frac{dG_y}{dt} \\ v_y &= -\frac{a_1}{f} G_x + \frac{a_2}{f} G_y + \frac{2a_1a_2}{f^2} \frac{dG_y}{dt} - \frac{a_2^2 - a_1^2}{f^2} \frac{dG_x}{dt} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし、 a_1 および a_2 は κ と β のみの関数で、 a_1 と a_2 の値は、特殊な場合を除いて、0 と 1 の間の値をとる。

Bijvoet は、等圧線が直線状で、気圧場が準定常とみなせるような場合について、北大西洋における船舶による海上風の実測値と地衡風との対比により、海面気温 (T) と海水表面温度 (T_s) の差 ($T - T_s$) の関数として a_1 および a_2 の値を求めている。しかしながら、台風域内の海上風の推算にこの方法を適用しようとすると、 $T - T_s$ の値は 0°C 前後で、あまり大きい変化はなく、この効果よりもむしろ、等圧線の曲率や気圧場の移動にともなう変圧風の効果を無視することの方が問題であり、 a_1 および a_2 の値について検討する必要がある。

3.3 解析方法

本土のはるか南方海上にある発達した台風の中心から半径 500 km 程度以内の領域では等圧線はほぼ同心円状に分布していると考えられる。半径方向の気圧分布は Schloemer の気圧分布式⁹⁾、

$$p = p_c + \Delta p e^{-\frac{r}{r_m}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表現できるとする。この式で、 p は中心からの距離 (r) における気圧、 p_c は中心気圧、 Δp は中心気圧低下量、 r_m は最大旋衡風速半径である。

台風の中心の位置および中心気圧は気象要覧に示された数値 (03, 09, 15, 21 時) あるいはそれらの数値の内挿値 (00, 05, 12, 18 時) を用い、周辺気圧は解析期間中一定であると仮定し、天気図上の台風のまわりの閉じた等圧線の最も外側の値から推定することにした。プイにおける気圧の観測値を用いて、式(3)により r_m の値を求めると気圧分布を定めることができる。

式(2)において、 y 軸の正の方向を気圧傾度力の方向に一致するように座標軸をとると、 $G_x = 0$ であり、また、等圧線が同心円状に分布しているので $\partial G_x / \partial y = 0$ および $\partial G_y / \partial x = 0$ であり、したがって、

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{a_1}{f} G_y - \frac{2a_1a_2}{f^2} \left(\frac{\partial G_y}{\partial t} + v_y \frac{\partial G_y}{\partial y} \right) - \frac{a_2^2 - a_1^2}{f^2} \left(\frac{\partial G_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial G_x}{\partial x} \right) \\ v_y &= \frac{a_2}{f} G_x + \frac{2a_1a_2}{f^2} \left(\frac{\partial G_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial G_x}{\partial x} \right) - \frac{a_2^2 - a_1^2}{f^2} \left(\frac{\partial G_y}{\partial t} + v_y \frac{\partial G_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

のように単純化される。この式で、気圧傾度力の局所的時間微分の項 $\partial G_x / \partial t$ および $\partial G_y / \partial t$ の値の推定には、3 時間前と 3 時間後の気圧傾度力の値から中央差分法で数値積分を行うことにした。

気圧場の解析による G_x と G_y の値、プイにおける海上風の実測値 v_x と v_y を用いると、式(4)により a_1 および a_2 の解が 2 ～ 4 組求まる。この解のなかで、 a_1 および a_2 の非現実的値を除き、時間的連続性

を考慮して、最も妥当と考えられる解を採ることとした。

3.4 台風 8218 号についての解析

解析の対象とした10個の台風のうち、1982年9月9日から12日にかけて、ブイ3号機から500km以内を

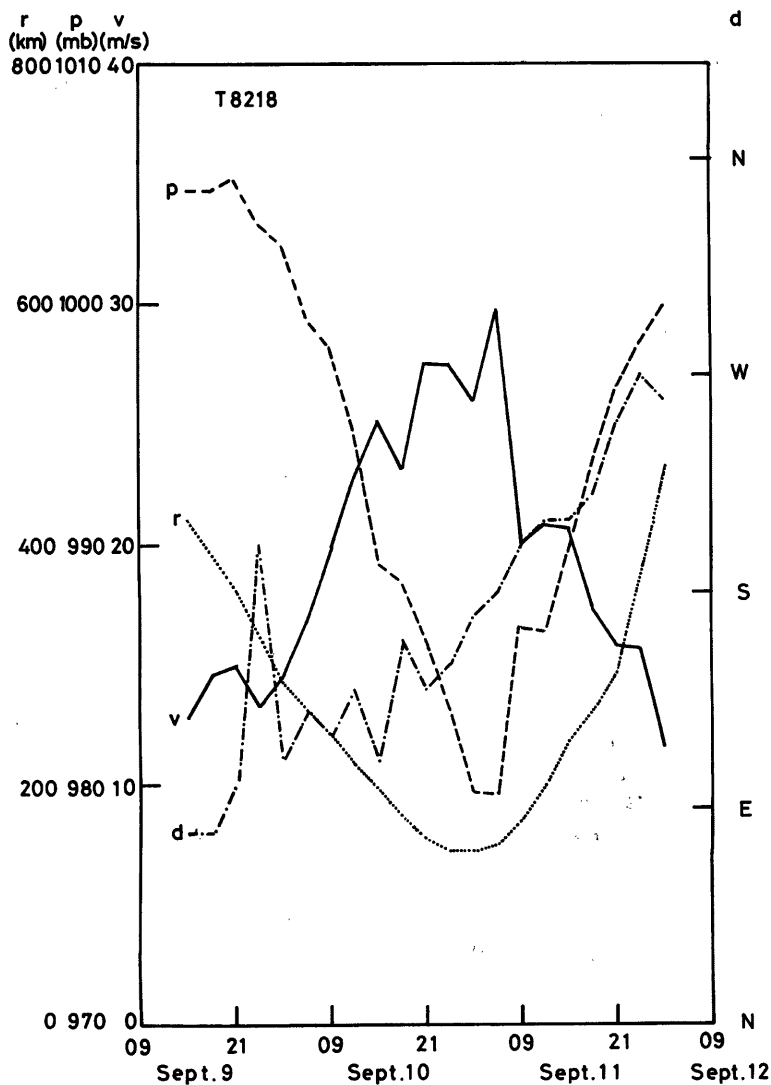


Fig. 4 Time changes of data observed at Bouy No. 3 in Typhoon 8218. p , v , d , and r are pressure, wind speed, wind direction, and distance from the typhoon center, respectively.

通過し、バイに 145 km まで接近した台風 8218 号 (Judy) を例にして、数値解析の内容を説明する。解析期間中の中心気圧は、10日 03 時までが 960 mb で、それ以後は 965 mb であり、勢力はほぼ一定であり、また周辺気圧は 1014 mb とした。バイから台風の中心までの距離、バイにおける気圧、風向、風速の観測値を Fig. 4 に示す。台風の中心は 11 日 00 時に最も接近していて、11 日 06 時に気圧は 979.6 mb にまで下がっている。風向は東よりから南よりに、さらに西よりに変化している。ただし、中心がバイの南西約 320 km にある 10 日 03 時の風向が南南西で、前後の時刻とは急変しているが、これは測定ミスではないかと思われる。風速は、中心が 220 km 以内に接近している 10 日 09 時頃から 11 日 15 時頃までの約 30 時間にわたって 20 m/sec 以上であり、11 日 06 時に最大風速 29.7 m/sec を記録している。

これらの観測資料を用いて、前節に述べた方法により求めた式 (4) の解の a_1 および a_2 の値の時間変化を Fig. 5 に示す。 a_1 の値は、9 日 15~21 時は 0.6~0.7 で、Bijvoet が海上風と地衝風との比較により求めた値 0.58~0.77 に近い値を示す。しかし、中心が最も近い 11 日 00 時に近づくにつれて a_1 の値は減少していき、中心の最接近時頃の 11 日 00 時は 0.21 で、約 1/3 に減少している。一方、 a_2 の値は、風向の実測値に疑問のある 10 日 00 時を除いて、中心の最接近時頃までは -0.1~0.1 であり、それ以後、徐々に増加して、Bijvoet による値 0.16~0.21 に近い値を示している。

a_1 および a_2 の値から換算した摩擦係数およびその実質的時間変化を用いて、式 (1) の加速度と力の間の関係を、台風の中心がバイから 250 km 以内に接近した 10 日 09 時から 11 日 05 時まで 6 時間おきに図示すると Fig. 6 のようになる。なお、加速度は気圧傾度力と摩擦力の和の実質的時間変化から求めている。また、この図においては、バイにおけるこれらの関係を同時刻の台風の中心に移して図示してある。加速度は風向とほぼ同じ方向を指していて、摩擦力は風向の逆方向に対して $19^\circ \sim 55^\circ$ の角をなしていて、そのコリオリの力との比は 2.2~5.6 で、Bijvoet の調査による 0.2~0.8 に比べて著しく大きい。

3.5 パラメーター a_1 および a_2 の検討

台風 8218 号を含めて解析の対象とした 10 個の台風の 96 例の解析により求めた a_1 および a_2 の値について、Bijvoet による値と比較し、総合的に検討した。

a_1 の値については、台風 8218 号以外の台風においても、中心に近づくにつれて減少し、したがって、摩擦力は著しく増加した。この摩擦力の増加のうちの一部は、等圧線の曲率の効果が摩擦力として評価されたのではないかと考えられるが、この効果は厳密には曲線運動する空気塊に作用する遠心力であり、中心に近づくにつれて空気塊の流跡線の曲率が増大することによるものである。そこで、 a_1 の値が Blaton の公式で求めた流跡線の曲率半径 (r_t) にともなって変化するように示すと、Fig. 7 のようになる。 r_t が減少するにつれて a_1 の値は減少する傾向があり、 a_1 と r_t の間の相関係数は 0.88 である。この図では、 a_1 を r_t の線型 1 次回帰式で表わし、直線で示してある。この回帰式によると、 $r_t = 600$ km では a_1 の値は 0.66 で、Bijvoet による値 0.58~0.77 の範囲内であるが、 $r_t = 100$ km では 0.12 で、Bijvoet による値に比べて著しく小さい。 r_t の減少にともなう a_1 のこのような顕著な減少は、気圧傾度力の二次微分以降の項を無視したために生じたとも考えられ、これらの項の検討が必要である。

一方、 a_2 の値については、 r_t との相関はほとんどない。しかし、96 解析例についての a_2 の平均値は 0.04

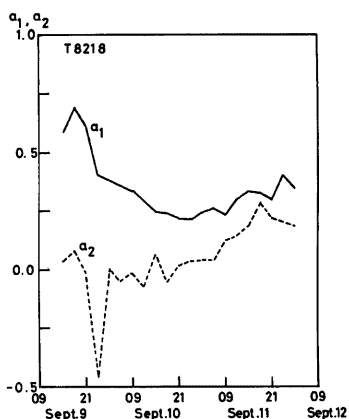


Fig. 5 Time changes of parameters a_1 and a_2 , analyzed with data shown in Fig. 4

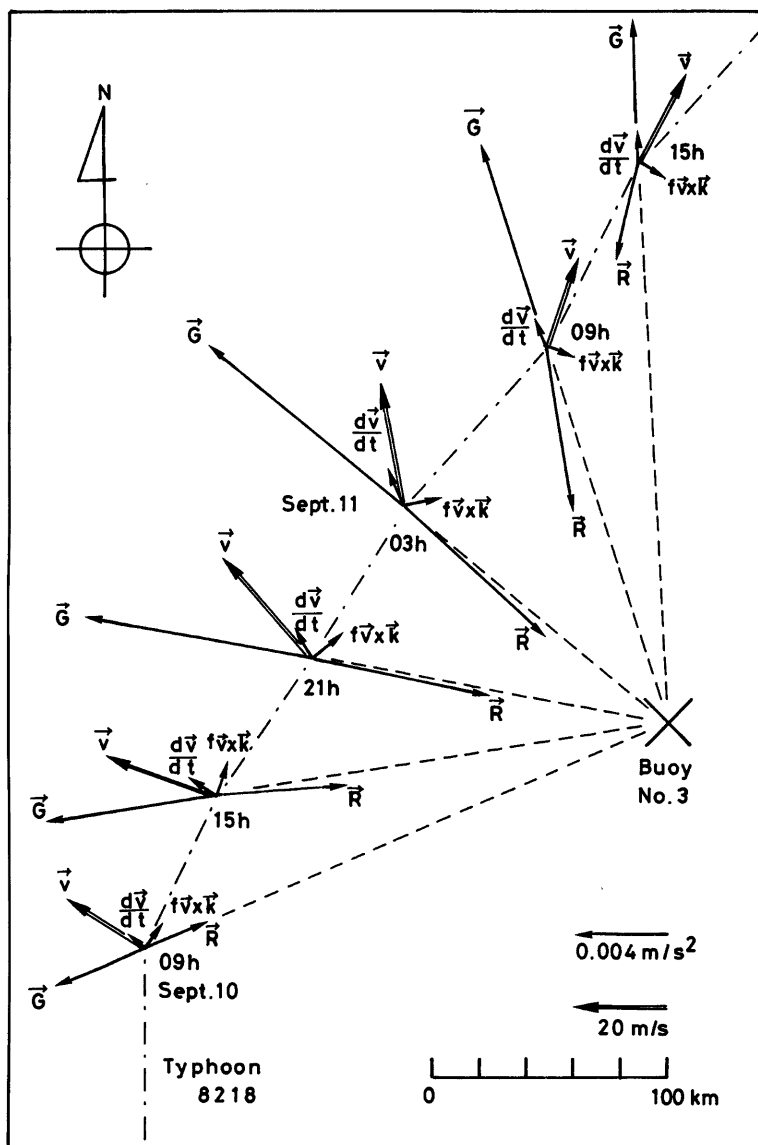


Fig. 6 The relation between forces and acceleration per unit mass at Buoy No. 3 in Typhoon 8218. $\vec{v}$ shows wind, and $f\vec{v} \times \vec{k}$, $\vec{G}$ and $\vec{R}$ show the Coriolis' force, pressure gradient force, and friction force, respectively. $\frac{d\vec{v}}{dt}$ shows acceleration. Their relations at the buoy are shifted to the positions of typhoon centers at the same hours. A dash-dotted line shows the track of typhoon center.

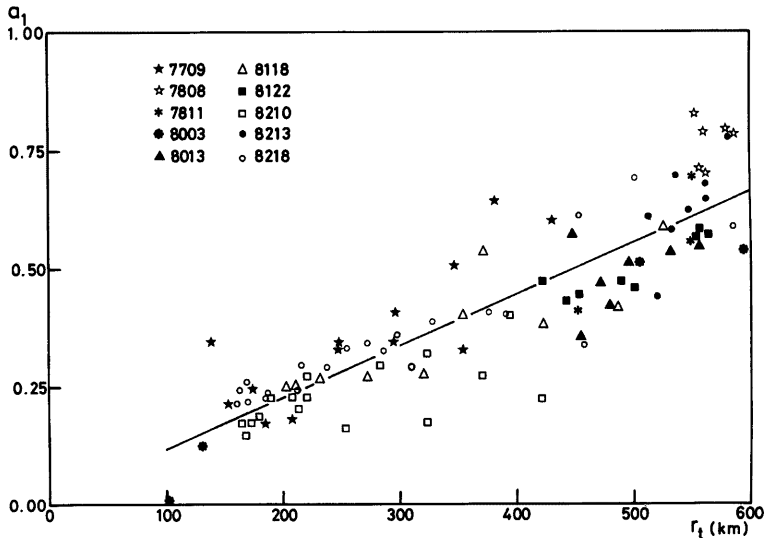


Fig. 7 The relation between a parameter a_1 in the Bijvoet's formula and a radius (r_1) of a trajectory of air parcel. A solid line is drawn by a simple linear regression equation.

で、Bijvoet による値 $0.16 \sim 0.21$ に比べてかなり小さい。 a_2 は、摩擦力により等圧線を横切る風の成分と関係があるが、台風域内では、この成分は台風の象限により異なっている。そこで、ブイと台風の中心を結ぶ半径が台風の中心の進行方向に対してなす相対的な方向と a_2 の値の関係を図示すると、Fig. 8 のようになる。 a_2 の値は、台風の前面では小さく、負の値をとる場合も少なくないが、後面では大きくなる傾向があり、 a_1 と同様に、気圧傾度力の二次微分以降の項について検討する必要がある。

このように、Bijvoet の考えを等圧線の曲率が大きく、非定常な台風の気圧場に応用することには種々の問題があり、運動方程式の級数展開による近似的取り扱いについて、今後、検討が必要である。

4. 結 語

過去32年間に日本本土付近に襲来した台風について、その経路を1度間隔の格子網の各区画の中心の連続として単純化し、前の区画からの進入方向別に先の区画への進行方向の平均値と標準偏差の分布について調べた。その結果、資料数は多くないが、日本本土へ接近してくる台風の経路の特徴がある程度明らかになった。今後、新しい資料を追加して、統計値の信頼度を高めるとともに、この方法について再検討を加えて、日本本土へ襲来する台風の経路のシミュレーションの方法を確立する予定である。

次に、日本本土南方海上から北上している発達した台風域内の海上の強風について、海洋気象ブイの観測資料を利用し、Bijvoet の方法を適用して数値解析を行った。その結果、Bijvoet が解析の対象とした準定常の気圧場で、等圧線が直線状とみなせるような場合に対して、流線の曲率が大きく、非定常な気圧場の台風域内では、100 m/sec を超える地衡風速を生じるような大きい気圧傾度力の作用を打ち消す効果の大部分が摩擦力として評価され、等圧線の曲率や気圧場の移動の効果は過小に評価されたのではないかと考えられる。そのために、Bijvoet が無視している気圧傾度力の二次微分以降の項について調べる必要があることが明らかになった。

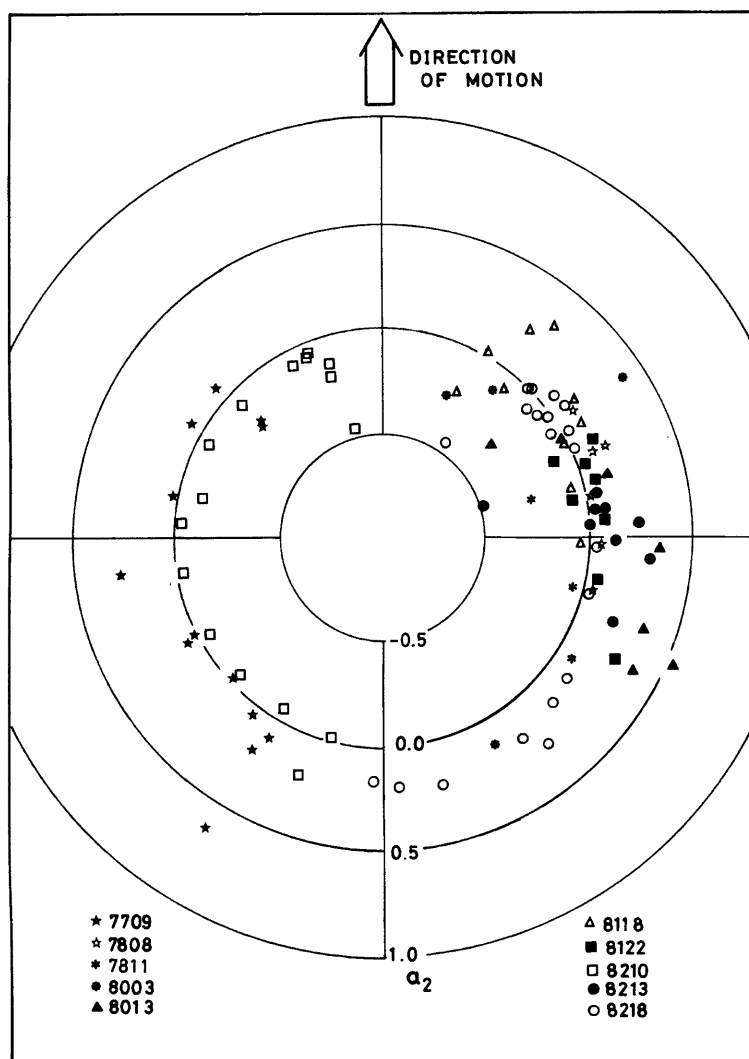


Fig. 8 The relation between a parameter a_2 in the Bijvoet's formula and a direction relative to the direction of typhoon motion

なお、本研究のなかで、台風の経路の統計的分析の方法については日本電子計算株式会社中西隆紀氏が開発したものであり、それを利用して頂いた。厚く感謝の意を表す。

また、本研究は文部省科学研究費補助金（自然災害特別研究(2)課題番号58025025, 研究代表者 光田 寧）の補助を得て行われた。

参 考 文 献

- 1) Bijvoet, H. C.: A New Overlay for the Determination of the Surface Wind over Sea from Surface Weather Charts, K. N. M. I., mededelingen en Verhandeligen, Vol. 71, 1957, 35 pp.
- 2) 光田 寧・藤井 健・塚本 修：日本海における季節風時の波浪予知(Ⅰ) ——海上風の推定——，京都大学防災研究所年報，第26号 B-2, 1983, pp. 587-598.
- 3) 沢田芳夫：観測船と海洋ブイとの比較観測，海と空，第59巻第1号，1983, pp. 19-29.
- 4) 気象庁：気象庁海洋気象ブイロボット観測資料，第3号，1979, 96 pp.
- 5) 気象庁：気象庁海洋気象ブイロボット観測資料，第4号，1981, 158 pp.
- 6) 気象庁：気象庁海洋気象ブイロボット観測資料，第5号，1982, 70 pp.
- 7) 気象庁：気象庁海洋気象ブイロボット観測資料，第6号，1983, 63 pp.
- 8) Schloemer, R. W.: Analysis and Synthesis of Hurricane Wind Patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydrometeorological Report, No. 31, 1954, 49 pp.