

台風 9918 号の気圧分布と海上風推算について

藤井 健*・林 泰一・石川裕彦・植田洋匡・奥田昌弘**

*京都産業大学一般教育研究センター

**日本気象協会関西本部

要 旨

1999 年 9 月 24 日に九州を襲った台風 9918 号は、海面水温 28°C 以上の高水温域を通過してきたこともあり、最盛期の強い勢力を維持して熊本県北部に上陸した。このため、熊本県不知火町松合地区で高潮が発生し、12 名の死者を出すなど強風により大きい被害を残した。そこで、この台風について、気圧場の客観解析を行って、気圧分布の特徴について検討した。また、気圧分布から傾度風風速を計算し、海上風風速を推算した。その結果、海上風の最大風速半径は 40km 程度と小さく、このため八代海が最大風速域に当たり、1 時間以上にわたって 30 m s^{-1} を超える強風が吹いていたと考えられる。一方、台風 9918 号とほぼ同じコースを通過して上陸した台風 9612 号の解析結果によると、最大風速半径が 100 km を超え、八代海では強い風が吹いていなかった。このことは、台風による強風災害においては、コースや最大風速だけでなく、最大風速半径も重要な要素であることを意味している。

キーワード：台風，気圧分布，海面水温，海上風，最大風速半径

1. はじめに

1999 年 9 月 24 日に九州に上陸した台風 9918 号は、強い風を伴っていて、熊本県不知火町松合地区で高潮により 12 名の死者を出すなど、九州を中心として強風や高潮により大きな災害を引き起こした。そこで、この台風通過時の気象官署における海面気圧の観測値を用いて、気圧場の客観解析を行い、気圧分布の特徴について調べた。また、気圧場の解析結果を利用して、気圧場から海上風風速を推算し、高潮が発生した八代海における風速分布について検討した。

さらに、過去に台風 9918 号と類似したコースを通過し、ほぼ同じ場所に上陸した台風 9612 号について客観解析により得られた気圧分布と比較し、なぜ台風 9918 号により八代海で高潮が発生したのか

について検討を加えた。

2. 台風 9918 号の発生から衰弱まで

台風 9918 号について、『気象要覧』（気象庁編 1999b）に基づいて、弱い熱帯低気圧発生時からの経路を Fig.1 に示す。これによると、1999 年 9 月 17 日 09 時に沖縄南海上で発生した弱い熱帯低気圧はゆっくりと北西に進み、2 日後の 19 日 09 時に同海上で台風の勢力に発達して、台風 9918 号となった。台風は発達しながら、ゆっくりと北東に進み、22 日 09 時に沖縄本島西海上で中心気圧 935 hPa、最大風速 45 m s^{-1} にまで発達した。その後は、向きを次第に北から北北東に変え、24 日 05 時前に天草下島を通過、06 時ごろに熊本県北部に上陸した。この時の勢力は、中心気圧 950 hPa、最大風速 40 m s^{-1}

であった。九州上陸後は北東に進み、周防灘に出て、同日 09 時前に山口県宇部市付近に再上陸し、中国地方西部を通過、10 時前に日本海へ出た。台風は日本海を北東に進み、25 日 02 時頃に北海道渡島半島に再上陸し、同日 12 時に網走沖で熱帯低気圧としての性質を失った。

なお、台風来襲時、気象庁は中心位置や中心気圧などを速報値として発表した。これによると、上陸 3 時間前の 24 日 3 時には、中心は下甕島北方約

20km の北緯 31.9 度、東経 129.7 度であり、中心気圧は 945hPa であった。しかし、『気象要覧』（気象庁、1999b）によると、中心は下甕島辺りの北緯 31.7 度、東経 129.7 度であり、中心気圧は 935hPa となっている。これは、来襲後に詳細な解析を行った結果、台風中心位置がずれていたことと台風の勢力がより強かったことが判明し、修正されたのであろう。

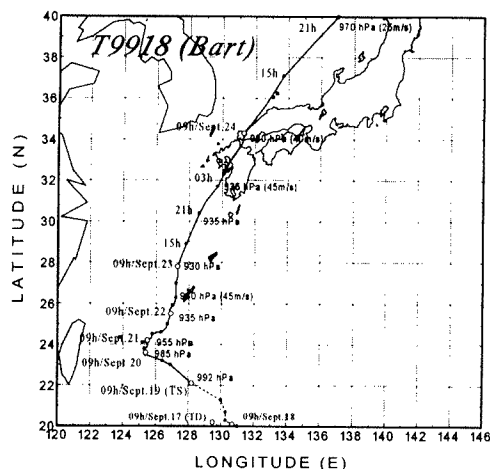


Fig. 1 The courses of Typhoon 9918 (Bart) determined by Japan Meteorological Agency (JMA). A dotted line indicates a period in intensity of a tropical depression.

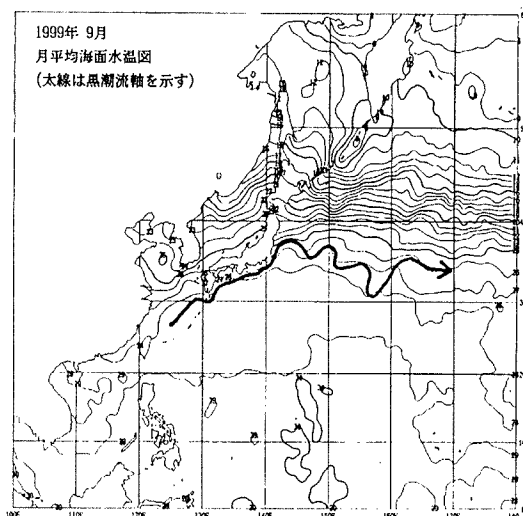


Fig.2 A distribution of the monthly mean sea surface temperature in September, 1999 (JMA, 1999a). A arrow indicates Kuroshio Main Current.

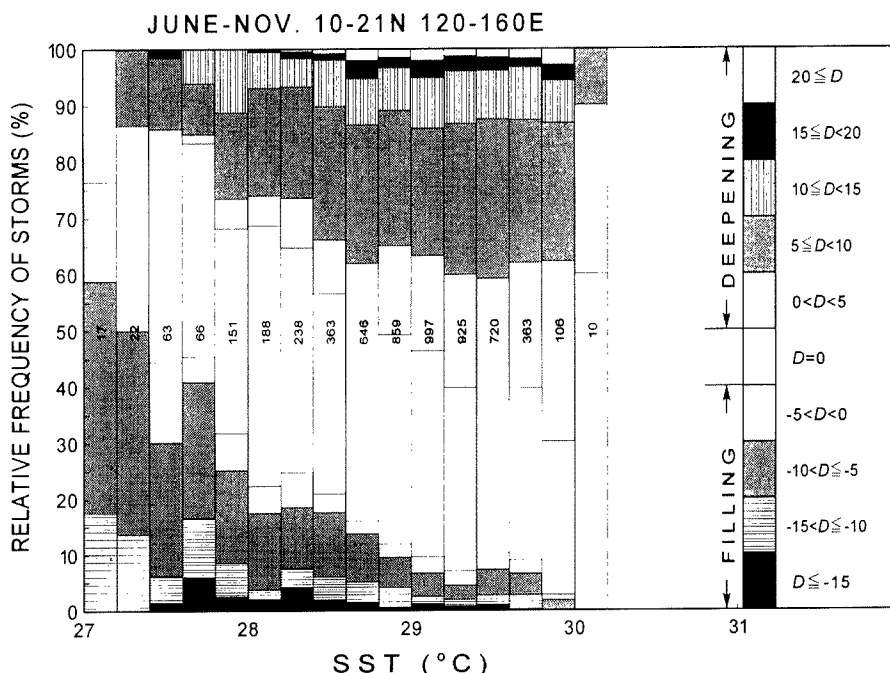


Fig. 3 The relative frequency distribution of deepening rate of the central pressure in six hours, D , as a function of the smoothed SST. A figure in the vertical bar denotes the number of cases. (Fujii, 1998)

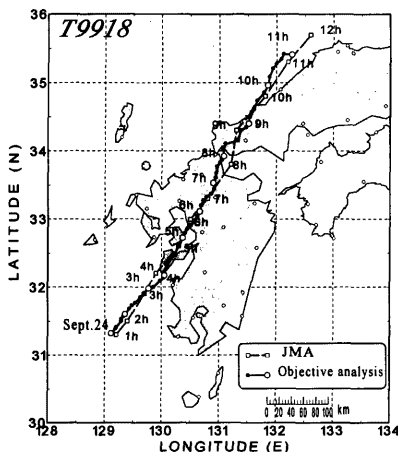


Fig. 4 A course of Typhoon 9918 determined by the objective pressure analysis. A broken line represents a preliminary course determined by JMA.

台風 9918 号は九州上陸直前までほとんど衰えず、最盛期の勢力を維持した。気象庁編『気象要覧』（気象庁，1999a）によると，1999 年 9 月の海面水温月平均値の分布は Fig.2 のようになる。沖縄本島付近から九州南端にかけて海域では，海面水温が 28～29℃である。Fujii（1998）によると，Fig.3 に示すように，この水温域では中心気圧が上昇，すなわち衰弱する台風は 10～25%であり，一方，中心気圧が下降，すなわち発達する台風は 30～50%で，この方が多い。したがって，上陸直前まで最盛期の勢力を維持したのは，海面水温が高かったことが一因であると考えられる。

3. 台風9918号の気圧場客観解析

気象官署の地上気象観測日原簿には毎正時の観測値のみが収録されている。しかし，台風による強風は時間変化が大きく，毎正時の気圧場解析だけから風速時間変化を再現しても最大風速推定は不十分である。そこで，われわれは，重大な災害を引き起こしたような台風について詳細な解析を行う必要がある場合には，気象庁等より地上気象観測自記紙の提供を受け，10 分間おきに気圧場の解析を行ってきた。たとえば，台風 9119 号，9313 号および 9426 号の場合には，自記紙から 10 分間おきに現地気圧を読みとって，海面更正を行い，各地点において海面

気圧 10 分値の時系列を得た。これを用いて 10 分間おきに気圧場の解析を試み，中心位置，中心気圧，最大風速半径などを求めた（藤井ら，1992a；藤井・光田，1994；藤井・光田，1995）。

しかし，近年，気象官署では，順次，従来の自記紙が廃止され，1 分値のデジタルデータに切り替わりつつある。台風 9807 号の場合には，大阪管内では従来の自記紙で記録を取られていたが，東京管内は 1 分値データに切り替わり，そのグラフの提供を受けた。今回の 9918 号の場合には，福岡管内の一部の官署について 1 分値をファイルの形で提供を受けた。ただ，福岡管内の他の官署および大阪管内は従来の形式で記録された自記紙の提供を受け，現地気圧を読みとり，海面更正を行った。

このようにして作成した海面気圧 10 分値の時系列を用いて，Schloemer（1954）の気圧分布式

$$p = p_c + \Delta p \exp(-1/x) \quad (1)$$

により，気圧場の客観解析を行い，中心位置および気圧分布を得た。なお，この式で， p は中心からの距離 r における海面気圧， p_c は中心気圧， Δp は中心気圧低下量（周辺気圧－中心気圧）， x は r と最大風速半径 r_m の比で， r_m を基準とした無次元相対距離に相当する。

今回行った気圧場の客観解析法は次のとおりである。

まず，中心から 500 km 以内に存在するデータを用いて，気圧場の客観解析を行い，周辺気圧の値を得た。この値の時系列について，10 分間前の時刻における周辺気圧との平均値を取っていき，平滑化した。

次に，この周辺気圧を固定値として与えて，中心から 250 km 以内に存在する官署のデータを用いて，10 分間おきに気圧場の客観解析を試み，中心の位置，中心気圧，最大風速半径を算出した。その結果に基づいて決定した台風中心の経路を Fig. 4 に示す。

4. 計算海上風風速

われわれが開発した気圧場から基本地表風速を算出する方法（光田・藤井，1993）に準じて，客観解析により得られた気圧分布から海上風風速の推算を行った。その方法は次のとおりである。

4.1 海上風風速計算法

客観解析により得られた気圧場とバランスする風として，傾度風方程式（藤井ら，1998）により傾度風風速を算出した。このさい，Blaton の式

(Holmboe et al., 1945) を用いて、流跡線の曲率半径を流線の曲率半径すなわち等圧線の曲率半径で置き換えることにより、進行方向の右側で大きく、左側で小さいという風速分布の非対称性が得られた。

なお、Blaton の式は等圧線の曲率半径と流線の曲率半径が等しいという仮定から運動学的に導出されたものであり、気圧場が移動しているとき力学的見地からは問題がある(藤部, 1996)。この点については検討する必要があるが、ここでは、Blaton の式により気圧場移動の効果を表すことにする。

また、大気境界層では、地表面の摩擦のため、空気塊は傾度風風速が最大となる半径(ほぼ r_m に等しい)を横切って内側へ流入する。このとき、角運動量の保存により、境界層内の風速は傾度風風速を超えて、いわゆる super-gradient な風となることが知られている(Gray and Shea, 1973; Mitsuta et al., 1988)。そこで、過去の台風についての調査に基づいて作成した次の式により補正を行うことにした(藤井・光田, 1986)。すなわち、傾度風風速に対する海上風風速の比 $G(x)$ を x の関数として、

$$G(x) = G(\infty) + \{G(0.5) - G(\infty)\} (2x)^{1.5} \exp[0.6\{1 - (2x)^{2.5}\}] \quad (2)$$

と表した。なお、この式で、 $G(\infty)$ は台風周辺における $G(x)$ の値で、基本地表風速の場合には $1/2$ としたが、海上風風速では藤井・光田 (1992b) と同じく $2/3$ とした。 $G(0.5)$ は $x=0.5$ における $G(x)$ の値で、最大値をとる。この値は、台風の強さによって変化し、 Δp の関数として次の式で表すことにした。

$$G(0.5) = G(\infty) (1 + 10^{0.0231 \Delta p - 1.96}) \quad (3)$$

このようにして求めた $G(x)$ を V_{gr} に乗じた値を計算海上風の風速とした。また、海上風の風向については、傾度風の風向(等圧線に接する方向)から反時計回りに 30 度偏った方向とした。

4.2 計算海上風風速の分布

台風の中心が牛深付近に達した 4 時から熊本県北部に上陸した後の 6 時にかけて、上記の方法で算出した海上風風速の分布を 30 分間おきに Fig.5(a) ~ (e) に示す。また、八代海域の 3 カ所における風速変化を Fig.6 に示す。これら 3 カ所の位置は、Fig.7 に示すように、A は八代海南部天草長島東方海上(北緯 32 度 10 分、東経 130 度 15 分)、B は八代海中部天草上島南部東方海上(北緯 32 度 23 分、東経 130 度 27 分)、C は八代海北部不知火町沖合(北緯 32 度 36 分、東経 130 度 35 分)である。

Fig.5 および Fig.6 にもとづくと、八代海における風速分布と気圧分布から推定した風向分布は次のように変化している。

Fig.5(a) に示した 4 時 00 分には、中心は天草地方南端にあり、八代海中部から北部にかけての風速は $30 \sim 40 \text{ m s}^{-1}$ で、風向は東南東である。

Fig.5(b) に示した 4 時 30 分には、中心は天草地方中央にあり、最大風速域が八代海に達している。八代海南部から中部にかけて $45 \sim 50 \text{ m s}^{-1}$ を超える強風が吹いている。風向は、八代海南部で南西、中部で南、北部で南東であり、場所による変化が顕著である。

Fig.5(c) に示した 5 時 00 分には、中心は島原半島にあり、風速は $30 \sim 40 \text{ m s}^{-1}$ 、風向は南部では西、中部では南西、北部では南である。

Fig.5(d) に示した 5 時 30 分には、中心は熊本県玉名市付近に上陸している。八代海中部から北部にかけて、風速は $30 \sim 35 \text{ m s}^{-1}$ である。風向は南部で西、中部で西南西、北部で南西である。

Fig.5(e) に示した 6 時 00 分には、中心は熊本県と佐賀県の県境付近に達している。八代海北部の風速は 30 m s^{-1} 程度で、風向は南部で西、中部と北部では西南西である。

このように、八代海では、4 時 30 分ごろから 5 時 30 分ごろにかけて 30 m s^{-1} を超える強い風が吹いていて、風向の変化が顕著である。

5. 類似コースを通過した台風 9612 号との比較

1996 年 8 月 14 日に九州を襲った台風 9612 号は、台風 9918 号と類似のコースを通過して上陸した。この台風については、気象庁地上気象観測日原簿の毎時データを用いて、1 時間おきに気圧場の客観解析を行っている(藤井ら, 1998)。そこで、その結果を台風 9918 号の解析結果と比較してみることにした。

気圧場の客観解析により決定した台風中心のコースを Fig. 8 に示す。天草地区の東経 130 度に達するまでは、ほぼ同じコースを経てきたが、その後、台風 9918 号の方が少し北に向きを変え、経路は次第に離れていっている。

両台風について、客観解析の結果得られた中心気圧、中心気圧低下量、最大風速半径および進行速度の時間変化を Fig.9 に示す。なお、上陸時刻は、9612 号は 14 日 10 時、9918 号は 24 日 6 時とした。これによると、上陸時頃は台風 9918 号の方が 10 hPa 程度低い、上陸 1 時間後以降は、ほとんど差がなくなっている。台風の強さに相当する Δp の値

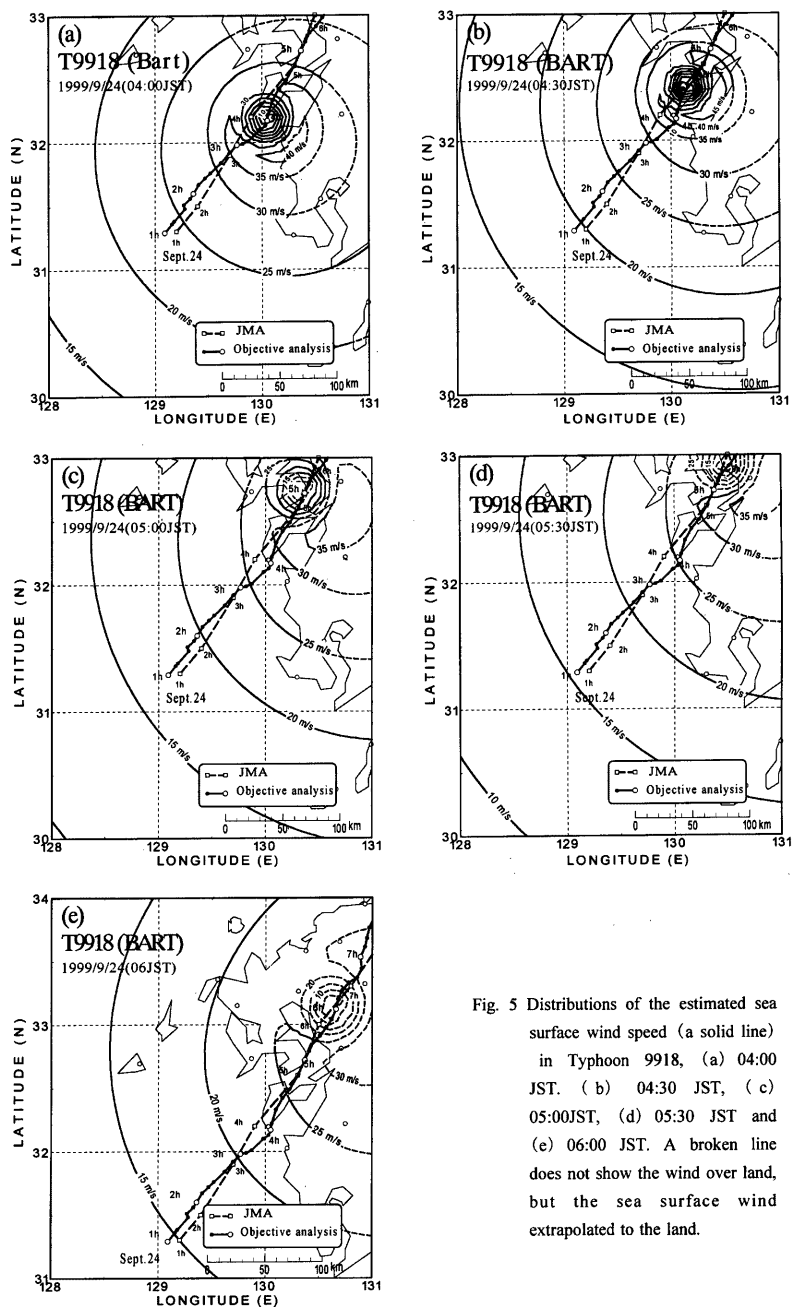


Fig. 5 Distributions of the estimated sea surface wind speed (a solid line) in Typhoon 9918, (a) 04:00 JST, (b) 04:30 JST, (c) 05:00JST, (d) 05:30 JST and (e) 06:00 JST. A broken line does not show the wind over land, but the sea surface wind extrapolated to the land.

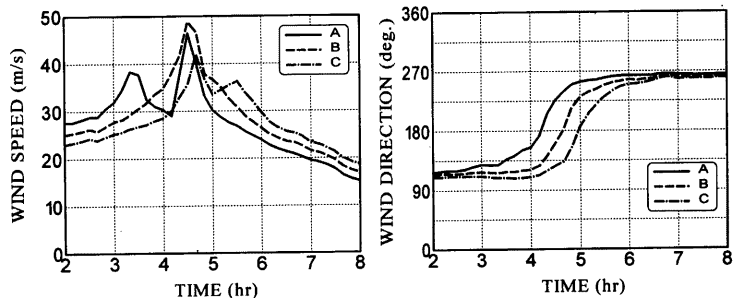


Fig. 6 Time changes of estimated sea surface wind at 3 points over the Yatsushiro Sea, (a) wind speed and (b) wind direction

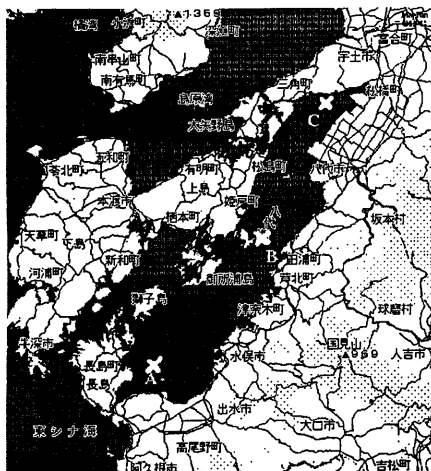


Fig. 7 Location of the points A, B, and C to estimate the sea surface wind in the Yatsushiro Sea

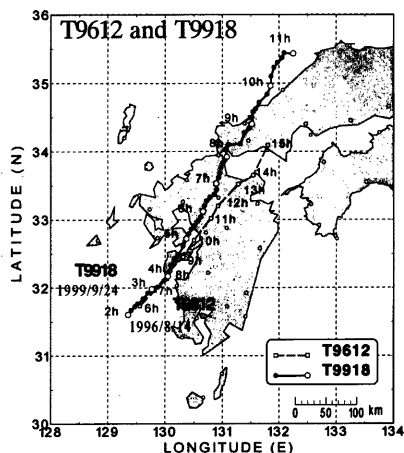


Fig. 8 Comparison between the courses of Typhoons 9612 (Kirk) and 9918 (Bart) determined by the objective pressure analysis

は上陸時以降ほとんど差がない。 r_m の値については、上陸 3 時間前から上陸 2 時間後までは、9612 号が 120 ~ 140 km であったのに対して、9918 号は 50 ~ 80 km である。進行速度については、9612 号が 30 ~ 40 km/h であったのに対して、9918 号は 50 ~ 60 km/h である。結局、両台風の間で顕著な差があるのは、 r_m の値と進行速度である。

Fig. 10 には、両台風について、上陸 1 時間前における海面気圧分布、傾度風風速分布および計算海上風風速を示す。Fig.10 (a) によると、中心から 80 km 以内の気圧傾度が大きく異なっている。この気圧分布に基づいて、進行方向右側における傾度風風速を算出し、Fig.10 (b) に示す。最大風速は 9612

号が約 40 m s^{-1} , 9918 号が約 50 m s^{-1} と差が 10 m s^{-1} 程度である。これに対して, 八代海に相当する半径 40 km における風速は, 9612 号が約 30 m s^{-1} , 9918 号が約 50 m s^{-1} と風速差が 20 m s^{-1} もある。この傾度風風速分布から海上風風速の分布を求めると, Fig. 10 (c) のようになる。半径 40 km では, 9612 号と 22 m s^{-1} であるのに対して, 9918 号は 40 m s^{-1} と, 20 m s^{-1} 近くの差がある。

したがって、八代海における風速は 9612 号に比べて、9918 号が著しく強く、このことが八代海沿岸地域において強風や高潮によって災害が発生した原因の一つであったと考えられる。

次に、九州南西沿岸域にある 6 気象官署におけ

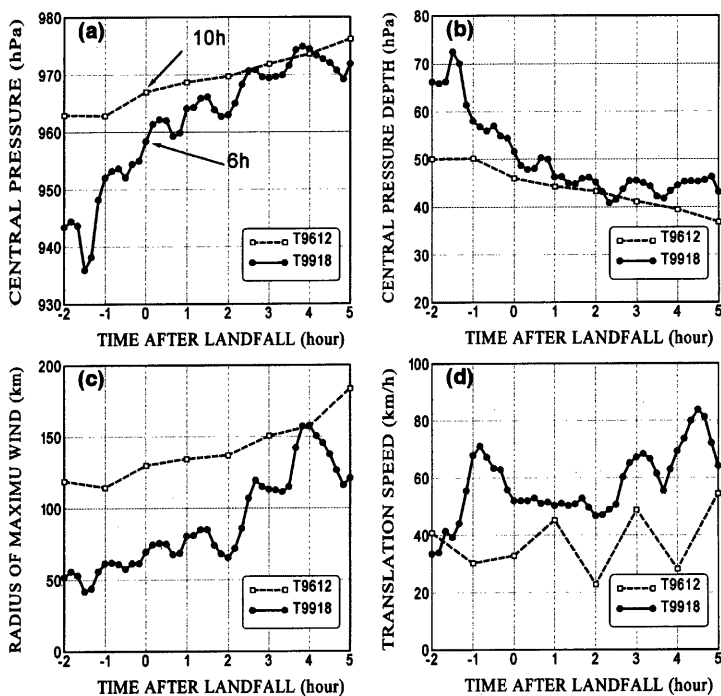


Fig. 9 Time changes of the parameters in Schloemer's Formula determined by the objective pressure analysis Typhoons 9612 and 9918, (a) central pressure, (b) central pressure depth, (c) radius of the maximum wind speed, and (d) translation speed

る風速時間変化を Fig.11 に示す。牛深では、両台風とも眼が通過しているが、両台風における風速分布の相異が明瞭に現れている。熊本と阿久根では、9612 号は眼が通過しているが、9918 号は眼は通過していない。一方、人吉、枕崎では、ほとんど風速差がなく、鹿児島では、むしろ 9612 号の方が強い。

台風 9612 号は沖縄本島を縦断したさい、台風眼の直径は 100 km を超え、那覇では 10 時間にわたって眼の中に入っていたことが報告されている（大林, 1996）。このため、台風 9612 号では、中心から離れた鹿児島あたりで風が強く、中心経路に近い八代海は眼の中にすっぽり入り、このため、かえって風が弱かったのである。

6. まとめ

1999 年 9 月 24 日 6 時ごろに熊本県北部に上陸し

た台風 9918 号は、海面水温 28℃以上の海域を通過してきたこともあって、上陸時に最盛期の勢力を維持していた。この台風によって、熊本県不知火町で高潮により 12 名の死者を出すなど、九州地方を中心として、大きな災害が発生した。そこで、観測資料を収集し、著者が以前に開発した台風気圧場の客観解析法を適用して、10 分間隔で気圧場の解析を試み、台風の中心経路と気圧分布を求めた。この結果に基づいて、海上風風速の分布を推算すると、八代海では 4 時 30 分ころから 5 時 30 分ころまで、風向が南西～西で、風速が 30 m s⁻¹ を超える強い風が続いている。

次に、ほぼ同じコースを通過して上陸した台風 9612 号との比較を通して、なぜ不知火町で高潮が発生したのかについて検討してみた。

上陸 1 時間前の解析結果を比較すると、Table 1 のようになる。9918 号は Δp が大きく、 r_m が小さく、しかも進行速度が大きい。この中で、気圧分布

や風速分布の相異には、 r_m の差が大きく寄与している。なお、9612 号は、上陸時の r_m の値が 120 km と大きいのは眼が大きかったためで、実測風は鹿児島や枕崎あたりで最も強かった。

これらの台風について、進行方向と直角右方向において、気圧分布から傾度風速を計算し、さらに、super-gradient wind の効果を考慮に入れて、海上の風速を推算した。最大海上風速は 10 m s^{-1} 程度の違いである。しかし、半径 40 km 付近の風速は、9918 号が 40 m s^{-1} 程度であるのに対して、9612 号は 20 m s^{-1} 程度にすぎなく、大きな差がある。

結論として、台風 9918 号は、勢力が強く、進行速度が大きい台風であつたばかりでなく、気圧場の解析の結果、最大風速半径が小さかったことが明らかになった。そして、ちょうど八代海が最大風速半

径付近に位置していて、 30 m s^{-1} を超える強い海上の風が長時間にわたって吹いた。これが強風や高潮により顕著な被害を出したものと考えられる。

最後に、1990 年代は、それ以前約 30 年間の台風災害が少ない時期とは一変して、台風 9918 号以外にも、9119 号、9313 号、9807 号など最盛期の勢力を維持して日本本土を襲い、大きな災害を引き起こした強い台風が多かった。21 世紀に入り、地球温暖化が進行していくと海面水温が上昇し、強い勢力を維持して日本本土を襲う台風が増加するであろう。このため、台風災害予測と防災対策により一層力を注がなければならないであろう。

Table 1 Comparison of Typhoons 9918 and 9612 at the time of one hour before landfall on Kyushu

Parameter	Typhoon 9918	Typhoon 9612
Δp	60 hPa	50 hPa
r_m	50 km	120 km
Translating Speed	65 km h^{-1}	30 km h^{-1}

謝 辞

本研究の実施に当たって、気象観測資料収集のために、平成 11 年度文部省科学研究費補助金特別研究促進費(1)「台風 9918 号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する調査研究」(研究代表者・桂順治京都大学教授)の補助を受けた。この研究の推進に当たって、気象観測資料を提供していただいた気象庁各官署に対して感謝の意を表したい。

参考文献

- 大林正典 (1996) : 台風の眼にすっぽり入った沖縄本島—巨大な眼をもった台風第 12 号—。気象、第 475 号, pp.14600-14603.
- 気象庁 (編), (1999a) : 気象要覧, 平成 11 年 9 月, No.1201, 69pp.
- 気象庁 (編), (1999b) : 気象要覧, 平成 11 年 10 月, No.1202, 78pp.
- 藤井 健, 光田 寧, (1986) : 台風の確率モデルによる強風のシミュレーション。日本風工学会誌, 第 28 号, pp.1-12.

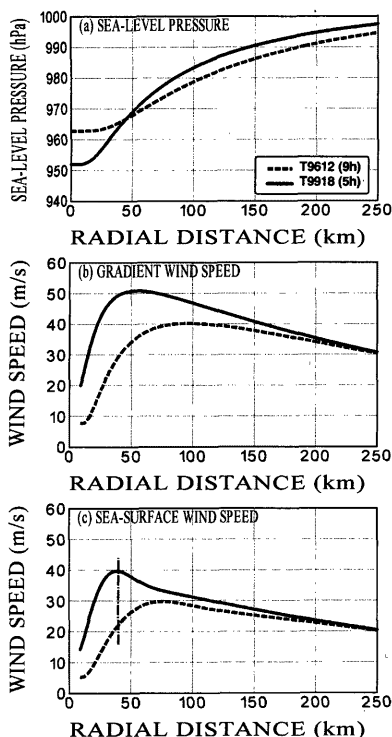


Fig. 10 Distributions of (a) sea-level pressure, (b) gradient wind speed and (c) sea surface wind speed obtained by the objective pressure analysis for Typhoons 9612 and 9918

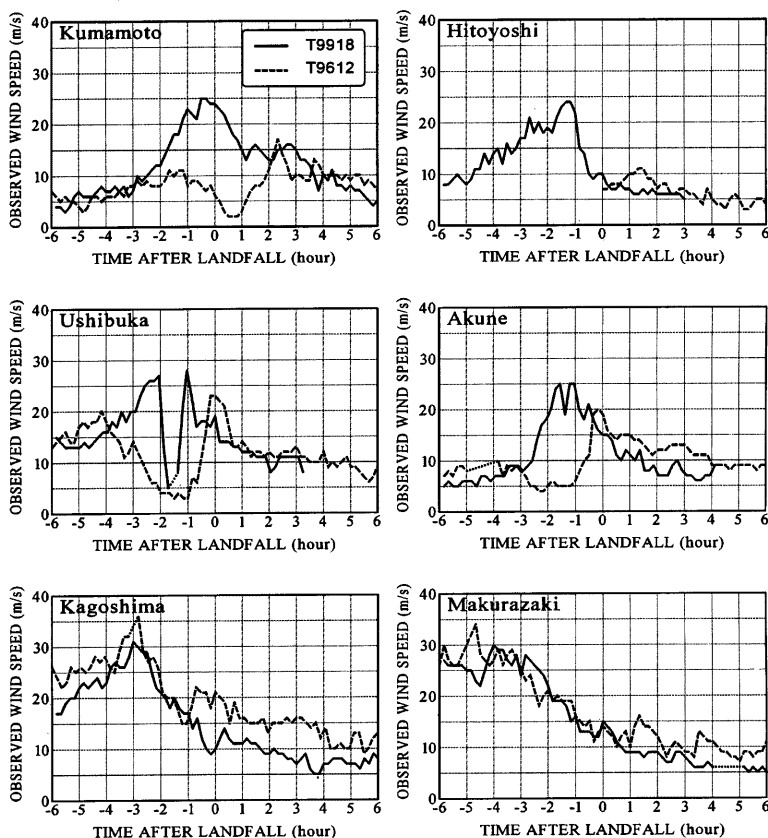


Fig. 11 Time changes of observed wind speed at some weather stations for Typhoons 9612 and 9918

藤井 健・林 泰一・光田 寧 (1992a) : 台風 9119 号の解析と強風の分布について. 京都大学防災研究所年報, 第 35 号 B-1, pp.183-191.

藤井 健・光田 寧 (1992b) : 台風による強風の出現確率の予測について—海上風の予測—. 自然災害科学, 11-3, pp.125-144.

藤井 健・光田 寧 (1994) : 台風 9313 号の気圧と強風の分布の特性について. 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-1, pp.35-46.

藤井 健・光田 寧 (1995) : 台風の気圧分布形について. 京都大学防災研究所年報, 第 38 号 B-1, pp.101-116.

藤井 健・光田 寧・植田洋匡 (1998) : 台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速

との関係 (第 2 報), 京都大学防災研究所年報, 第 41 号 B-1, pp.399-410.

藤部文昭 (1996) : 移動する台風の風速分布を表す計算式について. 天気, 43 巻, pp.671-680.

光田 寧・藤井 健, (1993) : 1991 年台風 19 号による風と被害について. 京都大学防災研究所年報, 第 36 号 B-1, pp.1-16.

Fujii, T. (1998) : The most preferable sea surface temperature for tropical storm formation and intensification over the Northwest Pacific. 海と空, 第 74 巻, pp.101-111

Gray, W. M. and Shea, D. J. (1973) : The hurricane's inner core region, II. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 30, pp.1565-1576.

- Holmboe, J., Forsythe, G. E. and Gustin, W. (1945) : *Meteor. Soc. Japan*, Vol.66, pp.505-508.
 Dynamic meteorology. *John Willy and Sons, Inc.*, pp.207-209.
- Schloemer, R. W. (1954) : Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. *Hydrometeorological Report, USWB*, No.31, 49pp.
- Mitsuta, Y., Suenobu, T. and Fujii, T. (1988) : Supergradient surface wind in the eye of a typhoon. *J.*

Pressure Distribution Analyzed in Typhoon 9918 (Bart) and Sea Surface Wind Estimated from it

Takeshi FUJII*, Taiichi HAYASHI, Hirohiko ISHIKAWA, Hiromasa UEDA and Masahiro OKUDA**

*General Education and Research Center, Kyoto Sangyo University

**Kansai Head Office, Japan Weather Association

Synopsis

Typhoon 9918 (Bart) hitting the Kyushu District on Sept. 24 in 1999 with very strong intensity caused storm surge at Matsui-area of Shiranui in Kumamoto Prefecture and 12 people died. We analyzed the pressure pattern by the objective method and estimated the sea surface wind from the gradient wind. The estimated wind distribution indicates that the strong wind exceeding 30 m s^{-1} occurred over one hour in the Yatsushiro Sea. Typhoon 9612 (Kirk) made landfall after passing a similar course as Typhoon 9918 on Aug. 14 in 1996, but the estimated sea surface wind in the Yatsushiro Sea is 20 m s^{-1} or so. This relatively weak wind may have its cause in the large eye exceeding 100 km in diameter. The analyzed result indicates that radius of the maximum wind speed is an important parameter in wind disaster occurrence by a severe typhoon.

Keywords: typhoon; pressure profile; sea surface temperature; sea surface wind; radius of the maximum wind speed