

台風の微細構造の研究

—神戸付近を上陸通過した2018年台風21号の構造—

黒田 要*

1. はじめに

台風の勢力を示す値として、最大風速や最低気圧、降水量や暴風域の大きさなどがあるが、その多くは中心部分の状態を示されている。それでは、中心以外での微細な風速分布、気温分布などはどのようになっているのだろうか。台風の進行方向に対し、右側半円では多くの被害が出ることは一般に知られている (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/2-1.html>, 2020.12.21閲覧) が、ここ神戸市では、実感として台風の接近に際して一時的な風の強弱の変化をよく経験する。また、台風の接近・通過に伴う、生暖かい気温の上昇とその後の急激な肌寒さを何度も経験している。

そこで、台風勢力内の分布構造を調べるために、神戸市周辺の地上観測で得られた気温や風速などの気象情報から、各データの相関を調べ、気温の時間微分値で温度上昇帯と温度下降帯を分離し、気温、風速、風向、気圧の地域差の読み取りを試みた。

2. 分析対象とデータ

2018年に神戸市に接近・通過した台風21号を分析対象とし、気象庁が公開している9月3日1時（日本時間、以下同じ）から5日24時までの1時間ごとのデータ (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn>, 2020.12.21閲覧) を用いて台風の構造を検討した。台風21号は、2018年9月4日12時ごろに非常に強い勢力で徳島県南部に上陸し、14時ごろには神戸市に再上陸し近畿地方を通過した最近の台風事例である。上陸時

の中心気圧は950hPa、強風域はE:560km W:220kmであった (<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/typhoon/T1821.pdf>, 2021.3.24閲覧)。台風内部は複雑で、地形や風向、気圧などにより、風速や気温は影響されると考えられるので、神戸市とほぼ同緯度に位置する大阪市と姫路市、ほぼ同経度に位置する洲本市と豊岡市（第1図）の1時間平均値データをもとに台風21号の内部温度、気圧、風速分布を調べた。なお、気圧の解析には現地気圧を用いた。

3. 気象変化の確認

気象庁が公開している神戸地方気象台における風速、気温、気圧、降水量の特別データをグラフ化した（第2図）。台風が最接近した時刻に記録した気圧の最低値や風速の最大値を中心とした大まかな時間対称な構造を見ることができ、風速や気温を細かく見る



第1図 台風21号の進路（2018年9月4日）と観測値を使用した5市の位置 (<http://www.digital-typhoon.org/> (2020.12.21閲覧) より)。

* Kaname KURODA, 神戸大学附属中等教育学校6年 (現：近畿大学理工学部)。

skuroda@kcc.zaq.ne.jp

© 2021 日本気象学会

と、単純な構造ではなさそうであり、大阪市、姫路市、洲本市、豊岡市の結果も同様であった。

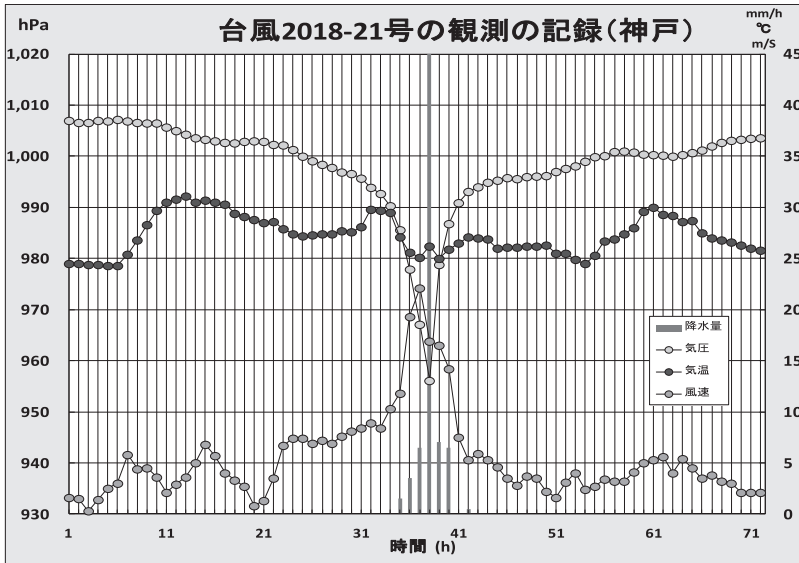
次に、上記5市における台風接近期間（分析期間）内の平均風速、最大風速（風速の最大値）、平均気温、最高気温（気温の最高値）、最低気圧（気圧の最低値）を調べた（第1表）。

平均風速は、神戸市5.4m/s>姫路市=洲本市3.8m/s>大阪市3.4m/s>豊岡市2.3m/sとなり、台風の上陸場所に近い神戸市では強風が吹き、台風の進行方向に対し左側に位置する姫路市の風速は、右側に位置する大阪市より大きかった。最大風速は、神戸市22.1m/s>大阪市20.9m/s>洲本市17.3m/s>姫路市11.7m/s>豊岡市6.1m/sとなり、5市の中で台風の中心が一番接近した神戸市が大きかった。

また、平均気温は大阪市27.5℃≒神戸市27.3℃>豊岡市26.3℃≒洲本市26.0℃>姫路市25.7℃であり、台風の右側に位置する大阪市と神戸市が高温を記録したが、最高気温は5市の中で最も北寄りの豊岡市が高く、豊岡市34.6℃>大阪市32.6℃>姫路市32.5℃>神戸市31.1℃であった。

最低気圧は豊岡市976hPa>姫路市969hPa>大阪市954hPa≒神戸市956hPa>洲本市948hPaであった。

以上のように、第1表の結果からは、気圧に関しては、台風中心の経路に近いほど最低気圧が低いという想定通りの結果を得たが、一般に言われているような、台風の右側が温かく強い風が吹くという結果は得られなかった。地上気温や地上風速については、各観測所周辺の環境の違いも影響しているのかもしれない。



第2図 神戸市で記録された2018年台風21号の1時間平均値気象データ（解析開始時刻より72時間）。平均風速、平均気温、降水量、気圧変化（現地気圧の変化）を示した。

4. 5市での風向変化

5市における解析開始時刻9月3日1時から72時間の風向変化を調べた。風向は、北北東を1とし東4、南8、西12、北16のように数値化した16分割の方で表した。

第2図で、台風21号の最低気圧は9月4日14時（解析開始時刻から数えて38時間目）に記録され、その時間帯を境に風向が北東（第3図で6）寄りから南西（同、10）寄りに大きく変化した。神戸市で、最低気圧を中心としてその前後で風向が大きく変化していることから、最低気圧までを台

第1表 神戸市、姫路市、大阪市、豊岡市、洲本市で観測された台風接近期間（分析期間）内の平均風速、最大風速（風速の最大値）、平均気温、最高気温（気温の最高値）、最低気圧（現地気圧の最低値）。

	平均風速 (m/sec)	最大風速 (m/s)	平均気温 (°C)	最高気温 (°C)	最低気圧 (hPa)
神戸市	5.4	22.1	27.3	31.1	956
姫路市	3.8	11.7	25.7	32.5	969
大阪市	3.4	20.9	27.5	32.6	954
豊岡市	2.3	6.1	26.3	34.6	976
洲本市	3.8	17.3	26.0	30.4	948

風前方とし、最低気圧以降を台風後方とし、台風の進行方向に対し右側を台風右側、左側を台風左側と表すことにする。

解析開始時刻から5時間目までは、神戸市の風向は定まらない一方、姫路市の風向はほぼ北北西（同、15）で一定し、残り3市の風向は南東（同、6）寄りであった。大阪市の風向は、解析開始時刻から10時間ほどの間に数回にわたり東北東（同、3）から北北西（同、15）に変化した。解析開始から11-20時間（9月3日11-20時）では、大阪市以外の4市では、南（同、8）から西南西（同、11）付近で安定していたように見える。

一方、台風の中心が神戸市付近を通過した後の9月4日16時-21時（解析開始から40-45時間）の豊岡市での風向は北（同、16）寄りであったが、9月5日2時（解析開始から50時間）以降に南（同、8）寄りとなった。9月5日20時（解析開始時刻から68時間目）以降での風向は東（同、4）寄りに変化し、他の4市の風向平均の南西（同、10）と異なっていた。

以上のことから、台風勢力内の前方と後方とで非対称な構造であることが推測される。

5. 気温変化率と気帯との関係

第2図の神戸市の気温変化を詳しく見ると、気温上昇部と下降部が存在することが確認できる。そこで、全ての観測点における1時間当たりの気温変化率 ΔT ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) = $T(t+1) - T(t)$ を算出し (t は観測時間)、 $\Delta T \geq 0$ を気温上昇部、 $\Delta T < 0$ を気温下降部とすることで、台風内部の温度分布を検討した(第4図)。第4図の縦軸は、気温変化率、気温、風速であり、横軸は時間軸で、9月3日1時から9月5日24時までの72時間のデータを1時間ごとに示した。

なお、本稿で使用している気帯とは、気温上昇部と気温下降部を総称した仮称であり、台風がその内部構造を大きく変えずに移動しているものとし、観測地点の気温変化率 ΔT が同符号の連続している時間帯に相当する台風構造中の気温遷

移領域のことである。

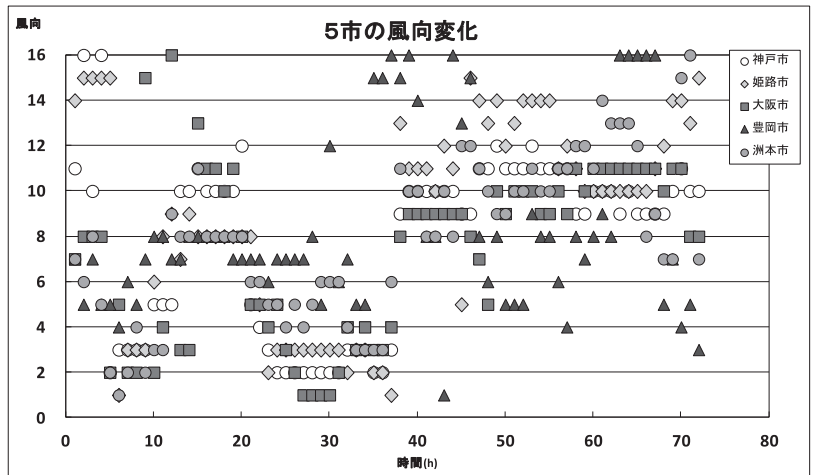
5市間で気帯により再整理した ΔT を比較すると、台風の進行方向に対し ΔT の異なる複数の温度域が確認でき、いずれの市でも類似した変化であった。

また、交互に繰り返されている気温上昇部と気温下降部の時間幅は、狭いもので1時間程度の時間幅であり、多くは3-5時間程度の時間幅であった。

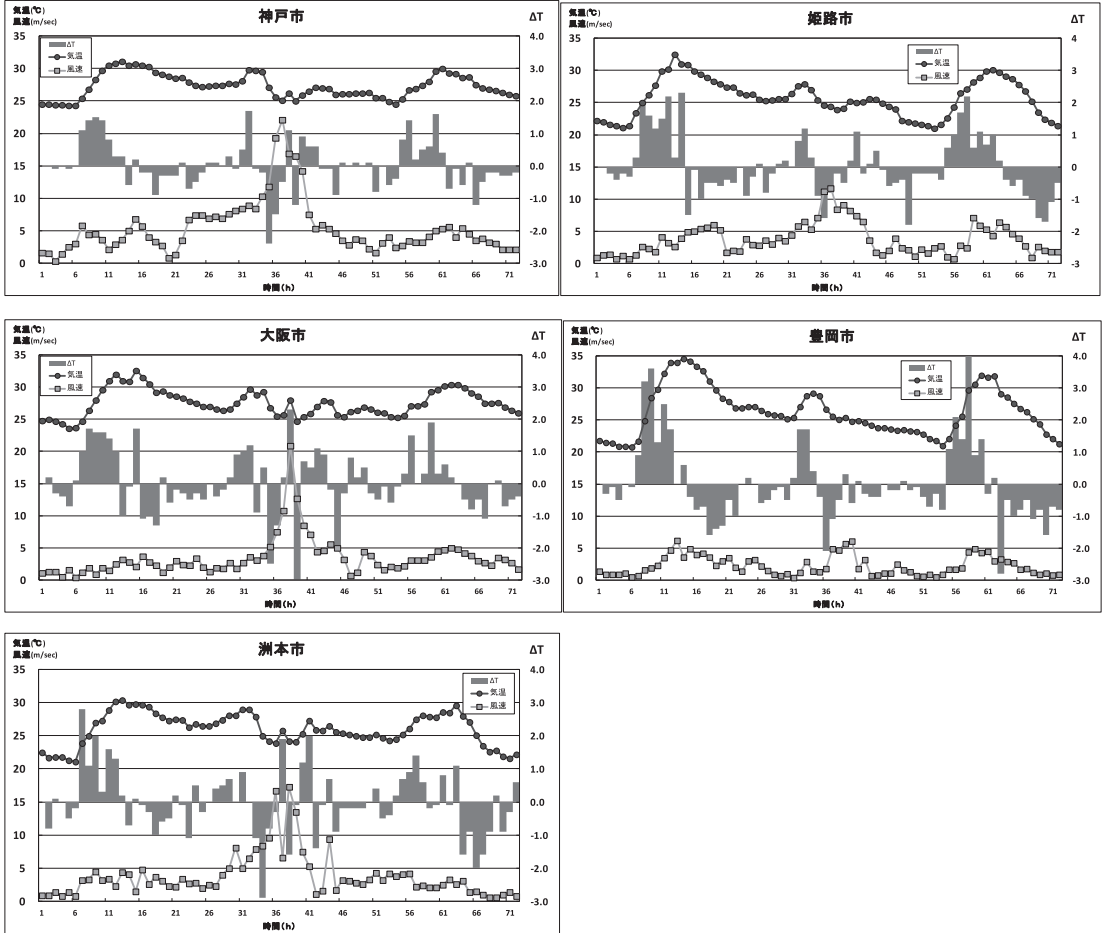
神戸市で最低気圧と最大風速を観測した9月4日14時の前後6時間において ΔT が大きいことから、台風を中心付近では温度変化が大きいことが推測される。また、台風前方の ΔT は台風後方に比べ大きいことも確認できた。さらに気帯の数(ΔT の符号が反転するごとに気帯が入れ替わったと考える)は、台風を中心から右側に位置する大阪市に多く、左側に位置する姫路市や豊岡市は少ないことも確認できた(第2表)。

台風の構造を調べるため、気帯を1つの気温遷移領域として算出した ΔT の平均値を用いた。 ΔT の時間変化は、1時間ごとの観測値ではなく、 ΔT の平均値を気帯内の値とし1時間ごとにプロットした。

神戸市と4市間の ΔT に関する相関(第5図)は、台風前方および台風後方ともに強く、5市共に類似した気温変化、気温上昇部や気温下降部が確認できた。台風前方では神戸市と洲本市との ΔT の相関がより強く、次いで水平方向にあたる姫路市や大阪市との相関が強かった。台風後方では洲本市と姫路市の相関は小さかった。すなわち、台風内部の気帯構造の空間スケールが、台風の前後で異なっていたことが推測される。



第3図 5市での台風21号の風向変化。2018年9月3日1時から1時間毎の平均風向を数値化し示した。なお、方位は16方位を使用した。



第4図 5市の気温変化率 ΔT 。左軸に気温と風速，右軸に ΔT を示した。

第2表 5市で確認できた異なる温度帯の数。
5市での気温上昇部と気温下降部の総数。カッコ内は台風前方と台風後方での異なる温度帯の数。なお、最低気圧部は除いた。

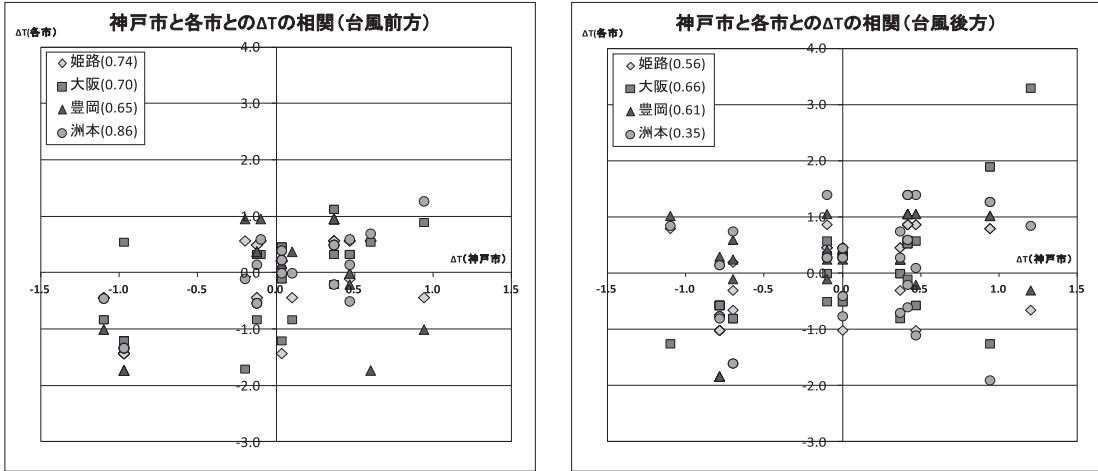
	異なる温度帯の数 (台風前方, 台風後方)
神戸市	25 (11, 13)
姫路市	13 (6, 6)
大阪市	22 (12, 9)
豊岡市	19 (8, 10)
洲本市	33 (15, 17)

6. 気帯に基づく気温、風速、風向、気圧にみる地域差

ΔT と同様の処理で、 ΔT に基づく気帯ごとに気温、風速、風向、気圧の平均値（風向については、同一気帯中で安定しているようだったので16方位の単純平均とした）を算出し、各時間帯（時間帯番号1~72）に割り振り直した。そのうえで、神戸市と4市との気温、風速、風向、気圧の相関図を作成し（第6図）、台風前後での各気象要素の地域差を検討した。

4市での台風前方の気温は神戸市と連動し相関係数も大きく、台風後方の相関係数は小さかった。台風後方での温度範囲は台風前方に比べて狭かった。

風速に関する神戸市と4市との相関は台風後方が台風前方に比べ大きかった。台風後方は台風前方に比べて、風速の幅（最小値から最大値）が広がった。また、



第5図 神戸市と各市間の ΔT に関する相関。図内カッコは、相関係数を示す。

最大風速も大きく、洲本市>姫路市>大阪市>豊岡市であった。

神戸市との風向の相関において、大阪市と豊岡市は負の相関を示したことから、この2市では神戸市と逆方向の風が吹いていたことが推測できる。

7. 気帯に基づく気温、風速、風向の変化

7.1 平均気温と最高気温の変化

第3表に、台風前方と台風後方に分け、気帯に基づいた5市の平均気温、最高気温、最低気温を示した。

平均気温は5市とも台風前方が台風後方より高く、台風の右側に位置する神戸市と大阪市が、姫路市、豊岡市、洲本市より約2°C高かった。また、最高気温の平均値は台風前方が高く、神戸市と洲本市の最高気温は台風の前方後方での差は少なく、豊岡市以外は台風前方が高かった。

台風の前方の最低気温は、神戸市や大阪市に比べて台風の左側に位置する姫路市や豊岡市で約2°C低かった。

このように、気帯を基準とした気温には地域差がみられ、一般に説明されている「北半球での台風では南風が吹く台風右側の地域の気温は高い」ことに矛盾しない結果となった。

7.2 平均風速と最大風速の変化

第4表に、気帯に基づいて平均風速と最大風速を整理した。台風前方の平均風速は、台風の中心に近い神戸市が大きく、大阪市と豊岡市は小さかった。また、台風後方では豊岡市の平均風速が小さいものの、大きな地域差はなかった。最大風速は、神戸市、姫路市、

大阪市が大きな値を記録したが、豊岡市は小さかった。洲本市は淡路島の中央部海岸沿いにあり、風を遮るものがない地域であることから、平均風速も最大風速も大きな値になったと思われる。

7.3 風向の変化

解析開始時刻から72時間の5都市の気帯に基づいた風向変化を、東4、西12、南8、北16のように方位を16分割した数値で整理した(第5表)。

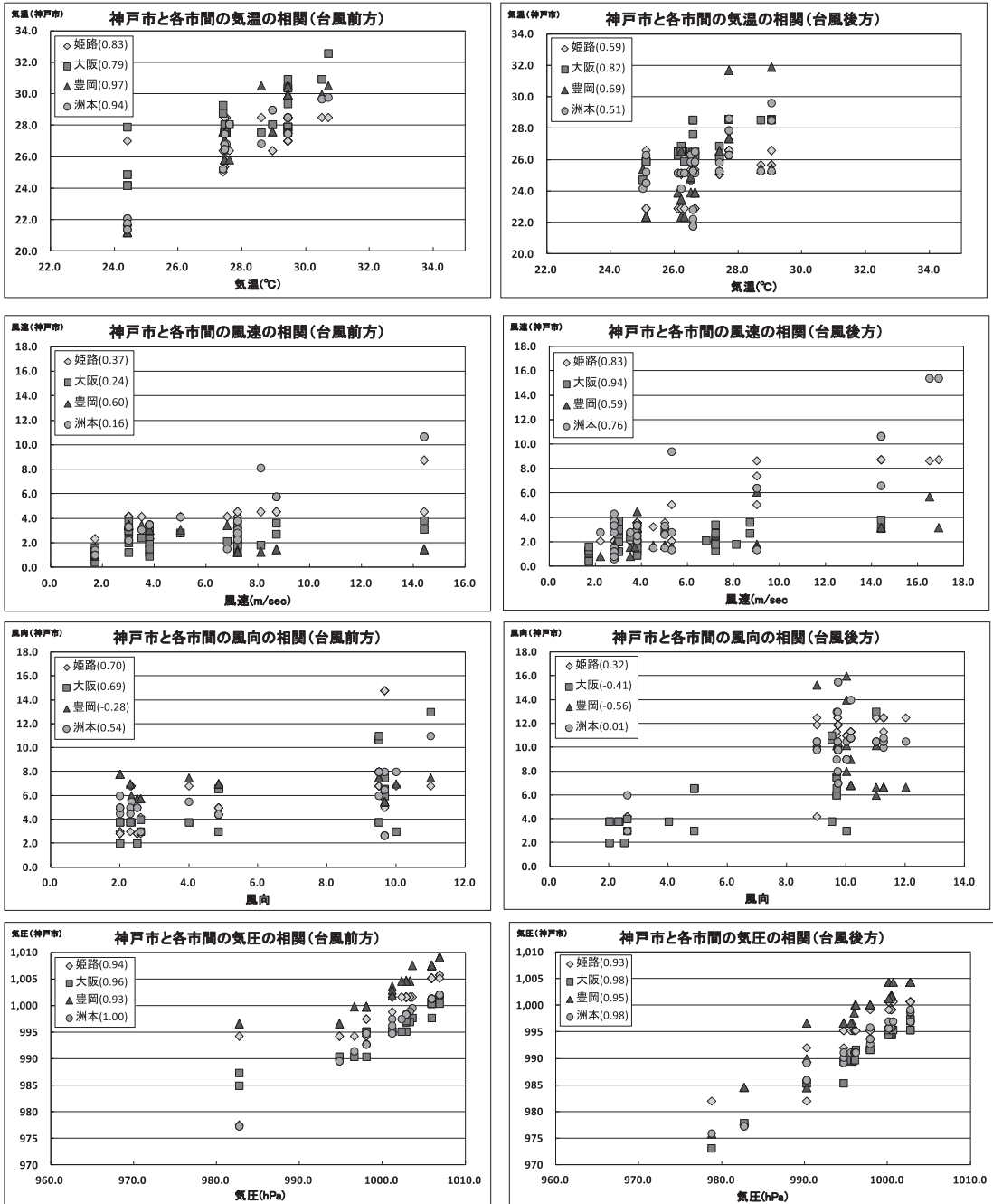
台風前方での平均風向は南東寄り(第2図、6.2)の風が吹き、台風後方では南西(同、10.1)に変化し、この間の風向変化は約90度であった。また、5市の風向変化の標準偏差が台風前方では大きく、台風後方で小さいことから、台風前方の風向変化が大きく、台風後方では地域における風向差は少ないことが読み取れた。神戸市とは風向に関して逆相関のある豊岡市では4市と異なるほぼ南東の風が平均的に吹いたが、方向変化を示す標準偏差が大きいことから、その方向は時間経過とともに大きく変化したと思われる。また、台風後方では、姫路市で4市と異なる西南西寄りの風が吹いた。

8. 風速極小点の数と風向変化量

気温や風向風速の変化などから、台風内の空気の流れ(台風中心から外側に向かう鉛直断面内の流れ)について考察する。 ΔT の符号が異なる連続する正→負、負→正の気帯組(それぞれ、暖気塊、寒気塊が通過した状況を想定)において、一方(暖気塊)が下降気流、他方(寒気塊)が上昇気流と仮定した2次元モ

デル（第7図）を検討した。下降気流が生じている部分では、地上付近まで下降してきた空気塊は、左右に分かれ気帯組境界側に移動する。その際、台風全体の移動による下降気流の中心の移動に伴って、地上の観

測地点においては、下降気流の中心付近での風向が右から左に変化するが、気帯の境界では下降気流の中心部が通過するまで風向の変化はない。また、下降気流の中心部に伴う風向変化が右から左に変わる時には、



第6図 神戸市と各市間の気温、風速、風向、気圧の相関。台風前方と台風後方での比較。

第3表 気帯に基づく5市の平均気温、最高気温、最低気温。表中の平均気温は気帯で分類した時の5市の気温に関する平均値±標準偏差であり、平均は表中の値から算出したものである。

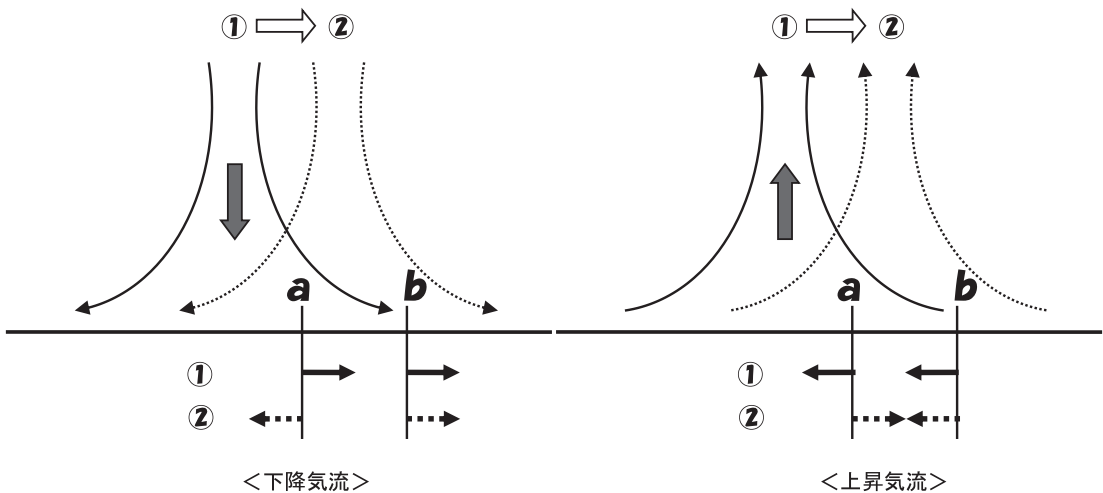
		神戸市	姫路市	大阪市	豊岡市	洲本市	平均 (°C)
平均気温 (気帯)	前	28.4±1.9	25.9±2.4	28.4±2.5	27.0±3.1	26.6±2.6	27.2±1.1
	後	26.6±1.4	25.4±1.2	26.6±1.6	26.1±3.3	25.7±2.3	26.1±0.6
最高気温 (気帯)	前	30.7	28.5	32.6	30.5	29.8	30.4±1.5
	後	29.0	26.6	28.6	31.9	29.6	29.1±1.9
最低気温 (気帯)	前	24.4	21.7	24.2	21.2	21.4	22.6±1.6
	後	25.0	24.7	24.7	22.4	21.8	23.7±1.5

第4表 気帯に基づく5市の平均風速と最大風速。表中の平均風速は気帯で分類した時の5市の風速に関する平均値±標準偏差であり、平均は表中の値から算出したものである。前と後は、台風前方と台風後方を示す。

		神戸市	姫路市	大阪市	豊岡市	洲本市	平均 (m/sec)
平均風速 (気帯)	前	6.3±2.4	3.0±2.9	2.6±2.7	2.2±1.0	3.6±3.1	3.5±1.31
	後	5.0±6.1	5.0±2.6	4.5±5.2	3.0±1.9	3.8±2.6	3.5±0.85
最大風速 (気帯)	前	14.4	4.5	6.4	3.4	6.4	7.9±4.6
	後	16.5	15.4	12.7	6.1	12.7	11.9±4.4

第5表 気帯に基づく5市の平均風向。表中の平均風向は気帯で分類した時の5市の風向に関する平均値±標準偏差であり、平均は表中の値から算出したものである。

		神戸市	姫路市	大阪市	豊岡市	洲本市	平均
平均風向 (気帯)	前	5.5±4.3	5.9±4.3	6.1±4.1	7.6±2.8	5.9±2.4	6.2±0.8
	後	10.3±0.9	11.5±2.1	9.8±1.4	9.5±4.6	9.8±2.2	10.1±0.8



第7図 気帯組内の下降気流と上昇気流と仮定した2次元モデル。①②は気帯の位置と風向を示した。左図：下降気流を伴う気帯組が①から②へ移動する場合、気帯対が①の位置では中心に近い観測点 a も境界に近い観測点 b では左向きの風（実線矢印）を観測できる。気帯組が②の位置へ移動した時の観測点 a での風向は左方向（破線矢印）に変化するが、観測点 b での風向変化はない。右図：風向は異なるが上昇気流でも同様な現象が起こる。

第6表 風速極小点の数と気帯境界における風向の変化量. 表中のカッコ内は、風速極小点の数と気帯境界で風向変化のあった境界数である.

		神戸市	姫路市	大阪市	豊岡市	洲本市	平均
風速極小点での 風向変化量	前	2.5 (6)	1.6 (8)	2.6 (26)	3.1 (25)	1.8 (11)	2.33±0.61
	後	0.7 (7)	2.8 (6)	0.8 (5)	1.9 (8)	3.2 (9)	1.89±1.14
気帯境界における 風向変化量	前	0.0 (0)	0.3 (1)	0.2 (3)	0.1 (1)	0.7 (7)	0.27±0.28
	後	0.0 (0)	0.3 (3)	0.4 (4)	0.5 (3)	0.3 (3)	0.20±0.28

風速の極小が観測されることになる。一方、上昇気流が生じている部分でも同様のことが起こり、風速極小点では台風の移動に伴う風向変化があるが、気帯の境界での風向の変化はないと考えられる。

そこで、5市における気帯内で確認できた風速極小点の数と気帯境界における風向の変化量から風速極小点における平均的な風向変化を算出した(第6表)。5市で認められた台風の中心付近を除く全気帯数107のうち、台風前方では82%、台風後方では64%に風速極小点が認められ、その風速極小点において、台風前方で約52°(16方位の値で2.33)、台風後方で約42°(同、1.89)の風向変化があった。

一方、台風全体で確認できた境界の数52のうち、気帯境界での風向変化が認められた境界は、台風前方では23%、台風後方では25%であり、風速極小点での風向変化に比べ、その変化量は台風前方で約6°(同、0.27)、台風後方で約4.5°(同、0.20)と小さかった。

以上のことから、気帯内に風速極小点が出現する割合は高く、風速極小点の前後で風向変化は大きい。さらに、気帯の境界では風向変化は少ないと考えられることから、台風内部には気帯ごとに異なる ΔT に依存した上昇気流と下降気流が存在すると考えられる。

9. まとめ

台風の構造を示すことのできる要素を検討した結

果、台風内部の気温の時間変化から気温上昇部と気温下降部に分類する方法の有効性を確認することができた。 ΔT の差異による気帯を基準として整理することにより、平均気温の時系列だけでは把握し難い台風通過に伴う気象変化を捉えることができた。また、気温上昇部と気温下降部、気帯境界で起こる風向の変化を調べることは、台風の内部構造を検討する上で重要な情報をもたらすと考えている。現実の台風は、3次元的な広がりを持ち、周辺の地形などの影響を大きく受けるので、本稿で示したような簡易な2次元モデルで説明ができるものではない。また、今回の分析は2018年の台風21号に対してのみのものであるので、一般化して論じるにはデータ不足である。今後は、他の台風にも適用し、台風の内部を研究する1つの手法として考えたい。

謝辞

台風の経路情報は国立情報学研究所のデジタル台風(<http://www.digital-typhoon.org>)を利用しました。執筆にあたり、多くのご指導とご助言をいただきました日本気象学会「天気」編集委員長 青柳暁典様に深く感謝いたします。