

地上稠密観測データに基づく関東平野北西部で発生する ダウンバーストにおける地上気象場の解析

大 津 佑 介* 中 村 祐 輔**

キーワード：ダウンバースト、ガストフロント、稠密気象観測、収束発散、鉛直渦度

1. はじめに

ダウンバースト (Downburst: 以下、DBと表記) とは、対流雲内部の下降流 (Downdraft) により地表付近に達した空気塊が放射状の強い発散流を引き起こす際の下降流や発散流である (Fujita and Byers, 1977)。DBによって地上で発散する冷氣外出流 (Outflow) の先端部はガストフロント (Gust Front: 以下、GFと表記) と呼ばれ、それらの通過時には気温急低下や気圧急上昇が発生することが報告されている (Charba, 1974; Wakimoto, 1982)。これらの現象の一般的な空間スケールは数kmで時間スケールは数分程度と言われている (Houze, 2017)。このようにDBは極めて小さい時空間スケールの強風を生じさせるため、しばしば局地的な被害 (家屋やビニールハウスの倒壊など) をもたらす。そのためDBの詳細な性状を把握することは、現象の予測精度向上や被害の低減を目指す上で非常に重要である。

我が国におけるDBおよびGFの既存の研究は大きく3つに区分される。①DBの発生環境場について統計解析したもの (例えば、大野ほか, 1996など)、②現象の構造に着目したもの (例えば、小林ほか, 2007など)、③予測指標について評価および検討したもの (例えば、松村・川村, 2012など) である。ただし、これらの研究は大気の下～中層に着目したものが多く、地上気象場の詳細な特徴について議論された例は非常に少ない。その要因として、ルーチンの地上気象観測における水平解像度の不足が挙げられる。例えば、日本全国に展開されている気象庁地域気象観測システムAMeDASは風観測の水平解像度が平均21kmであるが、DBの空間スケールは数kmであるために水平解像度が不十分である。以上のことから、DBの地上気象場を把握するためには、空間高密度な観測網が必要である。

また、DBの統計データに関しても議論の余地が残る。

1961年以降、我が国におけるDBや竜巻等の発生は、気象庁の突風データベース (以降、JMA-DBと表記) によってまとめられている。ただし、既存の突風事例の調査は住民からの被害通報を契機とする現地調査のみである。そのため仮にDBが発生していても、被害が出ていない事例や比較的風が弱い事例は発生数にカウントされない恐れがある。正確なDB発生数を把握するためには、高時空間分解能を有する稠密気象観測データの取得と、それを生かしたDBの抽出手法が必要である。例えば、岩下ほか (2017) は突風抽出手法として、明星電気株の高密度地上気象観測システムPOTEKAデータに対して、気温および気圧の1分変化量に閾値を設定する手法を提唱した。ただし、彼らが設定した気温変化量 $-2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ や気圧変化量 $+0.8\text{hPa}/\text{min}$ の閾値については、具体的な導出過程が述べられておらず、詳細な検証も行われていない。

そこで本研究では、関東平野北西部において水平解像度約2km、時間解像度1分で観測されているPOTEKAの実証実験データを利用し、関東平野北西部において発生したDBの事例抽出を行い、抽出された事例について地上気象場の特徴を明らかにする。そして、地上の気温変化と気圧変化に着目し、DB事例抽出に最適な閾値を検討する。また、これまでDBの発生や大きさを検出するために、ドップラーレーダーを用いた発散場の解析が実施されてきた (Wilson *et al.*, 1984)。DBの検出手法や突風予測の観点からも発散場の議論は重要と考えられるが、地上の観測値によってDB発生時の発散量が算出された事例は皆無であるため、地上風データによる発散量の算出を試みる。

* 立正大学・地球環境科学部・学部生

** 立正大学大学院・地球環境科学研究科・博士後期課程

2. 研究手法

2.1 使用データとその概要

本研究では、明星電気㈱が展開・管理する高密度地上気象観測システムPOTEKAの実証実験エリアで得られた観測データを利用する。POTEKAの実証実験器は主に、実証実験エリア内の小学校屋上（おおよそ10m～15mの高さ）などに130地点程度設置されている。関東平野北西部におけるPOTEKA観測網は2013年より展開されているが、その後観測地点の整備や追加などが実施され、2014年夏季以降におよそ現在の全観測地点における観測が開始された。そのため、本研究の解析対象期間は、2015年1月から2017年12月までの3年間とする。また、解析には期間を通して観測されていた92地点のデータを使用した（図1）。

POTEKAはソーラーパネルによる発電機能と通信機能が搭載されており、外部電源が不要の自立型観測器となっている。観測データは随時携帯回線を通じてサーバーに集められ、契約者向けの専用ホームページPOTEKA NET（<http://www.potekanet.com/index.php>）で利用することが出来る。POTEKAの観測項目は8要素であり、気温・湿度・気圧（現地、海面）・日射量・風向・風速・感雨・雨量を1分間隔で観測している。観測項目ごと1分間隔に品質情報が付記されており、本研究ではデータの品質のばらつきを抑えるために正常値のみ使用している。

2.2 ダウンバースト事例の抽出方法

岩下ほか（2017）で示されている通り、DBによる突風の通過時には気温の急低下と気圧の急上昇が生じるため、本研究では気温および気圧の1分あたりの変化量に着目して対象事例の抽出を行った。まず、解析対象期間における解析対象領域内のすべてのPOTEKAの1分値データを用いて、気温および気圧の1分あたりの変化量を算出した。そして、気温は $2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上の低下、気圧は $0.5\text{hPa}/\text{min}$ 以上の上昇を示した地点が存在した場合、対象事例とした。また、上記の条件を満たす事例が同時点で複数存在する場合や、異なる地点であっても対象領域内で連続的に存在する場合には、同一事例として扱った。

しかし、上記の条件により抽出された事例には、DB事例だけでなくその他の要因による突風事例や非突風事例が含まれている可能性がある。そこで本研究では、Charba（1974）やWakimoto（1982）を参考に、対象事例の中で以下の3つの条件をすべて満たすものをDB事例と判定した。すなわち、①突風（急速な風速上昇）がみられること、②突風発生時に活発な積乱雲が付近を通過していること、および③突風時に降水を記録していることである。具体的な判定条件として、①はPOTEKAの風速データより、前1分あたり $5.0\text{m}/\text{s}$ 以上の風速の急上昇を示す地点がみられた場合とした。②は当該時刻に最も近い時間の気象衛星ひまわりの衛星画像（可視および赤外）より、解析対象領域とその近傍に積乱雲が確認された場合とした。③は①を満たした地点において

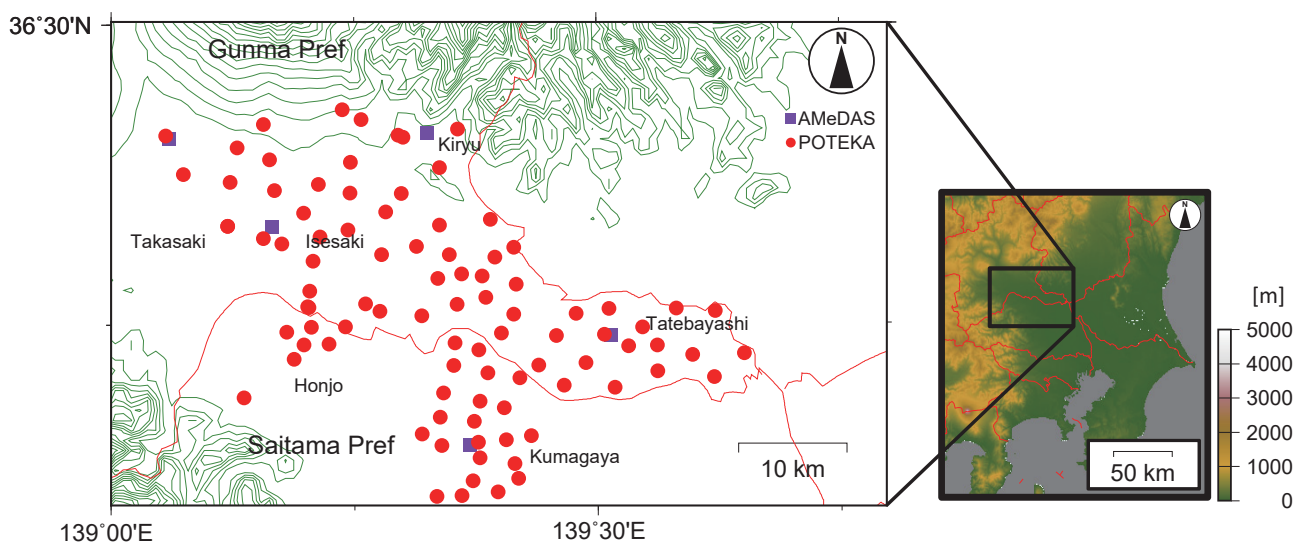


図1 （左）POTEKA実証実験エリアのうち本研究で使した92地点を示す。●および■印はPOTEKAが設置されている地点およびAMeDASを示しており、緑線は等高線を標高150m以上から50mごとに描いている。（右）関東地方を示しており、黒枠は左図の領域を示す。

POTEKAの感雨センサーが降水を記録した場合とした。一般にDBは強い降水を伴うウェットDBと降水を伴わないドライDBに分けられる。しかし、我が国におけるDBの発生実態を調査した大野ほか（1996）は、1981年から1994年までの13年間に発生した25件がすべてウェットDBであったと報告しており、我が国で発生するDBは大半がウェットDBであると考えられる。そのため、DB事例の条件として③を加えた。

2.3 水平発散、鉛直渦度の算出手法

水平発散および鉛直渦度の算出は平面近似法（甲斐ほか、1995）を用いて行った。鉛直渦度の算出を試みる理由については3.2節で述べる。対象地域において任意の格子点を中心とした局所直交座標系を定め、当該格子点から所定の距離内の観測値を用いて、当該格子点における風の u 、 v 成分をそれぞれ以下の平面の式（1）および（2）

$$u = ax + by + c \quad \text{式（1）}$$

$$v = dx + ey + f \quad \text{式（2）}$$

に最小二乗法により当てはめ、係数 $a \sim f$ を決定する。これにより、水平発散 D および鉛直渦度 ζ はそれぞれ

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = a + e \quad \text{式（3）}$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = d - b \quad \text{式（4）}$$

として求めることができる。算出には実証実験エリア内に展開されているPOTEKA地点を円一つに約4～5地点含めるよう、単位円の半径を5km、格子点を5km間隔に定めた（図2）。

3. 結果および考察

3.1 ダウンバースト事例の抽出結果

2015年1月から2017年12月までの3年間に、抽出された対象事例は気温の条件によるものが18事例、気圧の条件によるものが313事例であり、同一事例を合わせると全320事例であった。そのうち、DBが発生した事例としてJMA-DB未掲載の2事例を含めた5事例が抽出された（表1）。5事例はいずれも6月と7月に発生し、発生時刻は14時から18時であった。これらはDBの発生

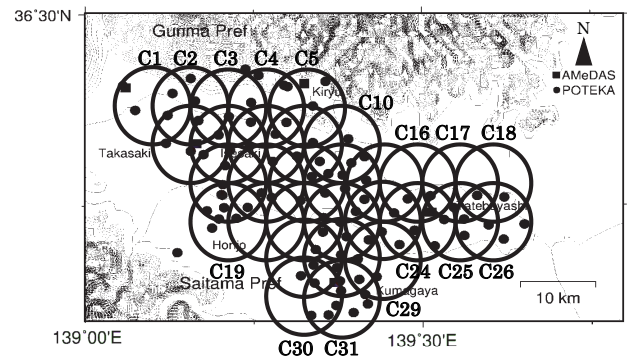


図2 POTEKA観測点および設定した平面近似法の単位円分布。各単位円は図左上から順にC1、C2とナンバリングし、全31円設定した。

実態を調査した大野ほか（1996）とも特徴が一致している。

図3に抽出された2017年7月16日のDB事例（Case 5）の気温、海面気圧および風向・風速の時系列と、顕著な発散流がみられた17:32の最大瞬間風速および風向の水平分布を示す。ここで時系列を示した3地点は、2.2節で定義されたDB事例の判定条件①を満たす突風出現地点である。17:32の最大瞬間風の水平分布から、■および★地点が発散流の影響を受けていることが分かる。また各地点の時系列において、1分変化量が5.0m/s以上の突風を示す時刻は、気温が急低下する時刻と一致している。ただし気圧に関しては、急上昇の直後に急低下する傾向がある。このような特徴は、Case 1～4においても同様にみられた（図省略）。

表1に示されたDB事例全5事例について、突風出現地点における気温低下および気圧上昇を調べたところ、気温は2.3°C/min以上の低下（閾値（1））、気圧は0.6hPa/min以上の上昇（閾値（2））が確認された。ただし、気温および気圧の閾値にそれぞれの値を使用してDBを抽出した結果、非DB事例が多数抽出されてしまった。全抽出事例に対して非DB事例の占める割合は、閾値（1）の場合が50.0%、（2）の場合が96.9%であった。したがって、気温変化あるいは気圧変化のみの閾値ではDB事例のみを抽出する精度が悪いと考えられる。そこで、両者を組み合わせた条件値を導入し、気温変化については-2.0°C/min～-2.5°C/minと気圧変化については+0.5hPa/min～+1.0hPa/minの範囲で、それぞれ0.1間隔で変化させた36通りの条件を調査し、DB事例のみを抽出することに適切な組み合わせを検討した（表2）。その結果、DB事例を全て抽出した上で、非DB事例を抽出する割合が最も低かった組み合わせは、気温は2.3°C/min以上の低下かつ気圧は0.6hPa/min（または

0.5hPa/min) 以上の上昇とした場合であり、非DB事例の割合は16.7%であった。以上のことから、気温および気圧それぞれで閾値を設定するよりも、両要素を組み合わせることでDB抽出の精度が上昇することが示唆された。

3.2 抽出事例の解析

本節では前節による事例抽出の結果、JMA-DB未報告事例であり広範囲（埼玉県本庄市・埼玉県熊谷市）に突風を記録したCase 5 について議論する。実況天気図（図省略）によると、2017年7月16日は本州の南海上に太平洋高気圧が張り出し南寄りの暖湿気が流入、オホーツク

表1 抽出されたDB事例

Case.	Event	Occurrence Area	Remarks
1	2015年6月15日 16時事例	前橋市	JMA-DB報告事例
2	2016年6月20日 16時事例	前橋市	
3	2016年7月4日 16時事例	伊勢崎市	JMA-DB報告事例
4	2016年7月14日 14時事例	本庄市～伊勢崎市	JMA-DB報告事例
5	2017年7月16日 18時事例	本庄市～熊谷市	

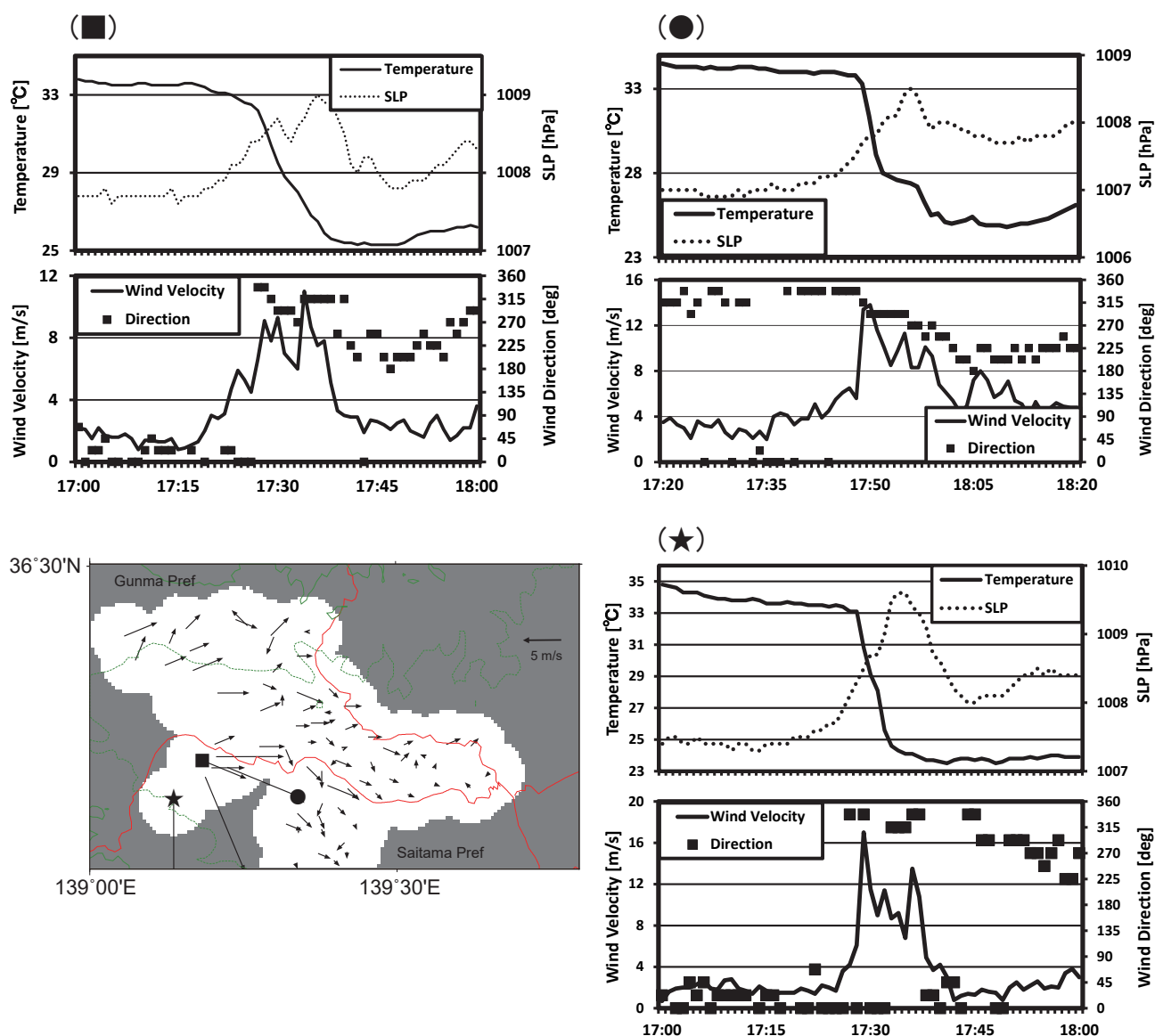


図3 2017年7月16日17:32における（左下）最大瞬間風速とその風向の水平分布。分布内の記号（●、■、★）は観測地点を示しており、時系列は分布内の記号に対応した各地点の気温、海面気圧、最大瞬間風速とその風向を示している。

表2 気温変化（行：単位は℃/min）および気圧変化（列：単位はhPa/min）の条件を変えたときの、各閾値における非DB事例数/抽出数（非DB事例の抽出割合[%]）。灰色で示された領域は表1におけるDB事例を全て抽出した組み合わせを表す。

	+1.0hPa/min	+0.9hPa/min	+0.8hPa/min	+0.7hPa/min	+0.6hPa/min	+0.5hPa/min
-2.5℃/min	0/2 (0.0%)	0/2 (0.0%)	0/3 (0.0%)	0/3 (0.0%)	0/4 (0.0%)	2/6 (33.3%)
-2.4℃/min	0/2 (0.0%)	1/3 (33.3%)	1/4 (25.0%)	1/4 (25.0%)	1/5 (20.0%)	2/6 (33.3%)
-2.3℃/min	0/2 (0.0%)	1/3 (33.3%)	1/4 (25.0%)	1/5 (20.0%)	1/6 (16.7%)	1/6 (16.7%)
-2.2℃/min	0/2 (0.0%)	2/4 (50.0%)	3/6 (50.0%)	3/7 (42.9%)	3/8 (37.5%)	6/11 (54.5%)
-2.1℃/min	0/2 (0.0%)	2/4 (50.0%)	3/6 (50.0%)	3/7 (42.9%)	3/8 (37.5%)	6/11 (54.5%)
-2.0℃/min	0/2 (0.0%)	3/4 (75.0%)	4/7 (57.1%)	4/8 (50.0%)	3/8 (37.5%)	6/11 (54.5%)

海には別の高気圧が位置し東北地方にかけて冷気が流入していた。性質の異なった空気の収束部には停滞前線が形成され、前線は東北地方から朝鮮半島を通り華中へ長く東西に伸びていた。

図4には、Case 5における最大瞬間風速・風向、前1分における気温および気圧の変化量の水平分布を示す。ここでは、DB発生直前時刻の17:22（以降、発生期）、DB本体付近で顕著な発散流がみられた時刻の17:32（以降、最盛期）とDB本体付近で発散流がみられなくなった時刻の17:52（以降、衰退期）について示す。発生期（図4 aおよび図4 d）では、気温および気圧に大きな変化は認められない。一方、最盛期（図4 bおよび図4 e）では、対象地域南西部の本庄市付近の地点において10.0m/s以上の風速が示された。それらの地点における風向は一定でなく、東～南の範囲で放射状に広がっている。さらに、その周辺地域では、気温が約-1.5℃/min、気圧が約+0.5hPa/minの大きな変化が生じている。これらから、DB中心からの冷氣外出流の影響によって周辺域で気温および気圧の急変化が生じていることが示唆された。さらに、風速および風向からDBの中心は本庄市北西部（図4 bおよびeの○領域）であることが推測される。その後の衰退期（図4 cおよび図4 f）では、DB発生域の本庄市においては風速が小さくなっている一方、熊谷市などでは風速が大きくなっている。本庄市と熊谷市における風速のピーク時刻の違いは、■および★地点と、●地点における風速の時系列の違いからも確認できる（図3）。さらに熊谷市では、気温が約-1.0℃/min、気圧が約+0.5hPa/minの変化が生じている。以上のことから、本庄市北西部で発生したDBからの冷氣外出流が、時間経過とともに南東方向へ進行したことが示唆された。

図5はDBによる冷氣外出流が通過したと考えられるC19およびC30の突風通過時刻前後における発散量の

時系列を示す。発散量の最大値が示されたのはDBの中心に最も近いC19であり、突風時刻の17:32において $3.3 \times 10^{-3}/s$ が示された（図5 a）。同時刻の発散量の水平分布において強い発散域が示されるのはC19のみであり、極めて局所的であることが分かる（図5 b）。これらより、C19における強い発散流は、DBの強い下降流により生じたものと考えられる。一方C30において、10.0m/s以上の強風が吹く時間帯には明瞭な収束を示した（17:53に $-1.1 \times 10^{-3}/s$ ）。さらに、同時刻における発散量の水平分布では、熊谷市～桐生市にかけて弧状の収束域が確認された（図5 c）。Koch (1984)は、冷氣外出流の前面において、冷氣が相対的に暖かい空気とぶつかることで強い収束が生じ、アーククラウド（Arccloud）が形成されやすいことを報告している。本研究においても、冷氣外出流とみられる強風が吹く領域において弧状の収束域が形成されており、その特徴はKoch (1984)の報告と一致する。

DB最盛期の17:32において、DB中心に近い地点では時計回りに南側の地点ほど風速が強い傾向がみられた（図4）。そこで、DBの回転成分を議論するために2.3節で示した手法により鉛直渦度 ζ の算出を試みた。その結果、強い発散量が示されたC19の17:32における渦度は負の値（ $-3.6 \times 10^{-3}/s$ ）を示した。この顕著な負の渦度域は局所的であり、その他地点における渦度の絶対値の平均値（ $0.3 \times 10^{-3}/s$ ）と比較して非常に大きい変化であった（図省略）。また他のDB事例においても、DBの中心付近では渦度の大きい値が示された。しかしながら、各事例によって渦度の正負が異なっており、Case 2 およびCase 4 が正の値、Case 1 およびCase 5 が負の値をそれぞれ示した。これらより、DBが回転成分を有しており、その回転方向は事例によって異なることが示唆された。ただし本研究では、渦度を算出する際に半径5 km領域を平面近似したため、DB以外の一般風の

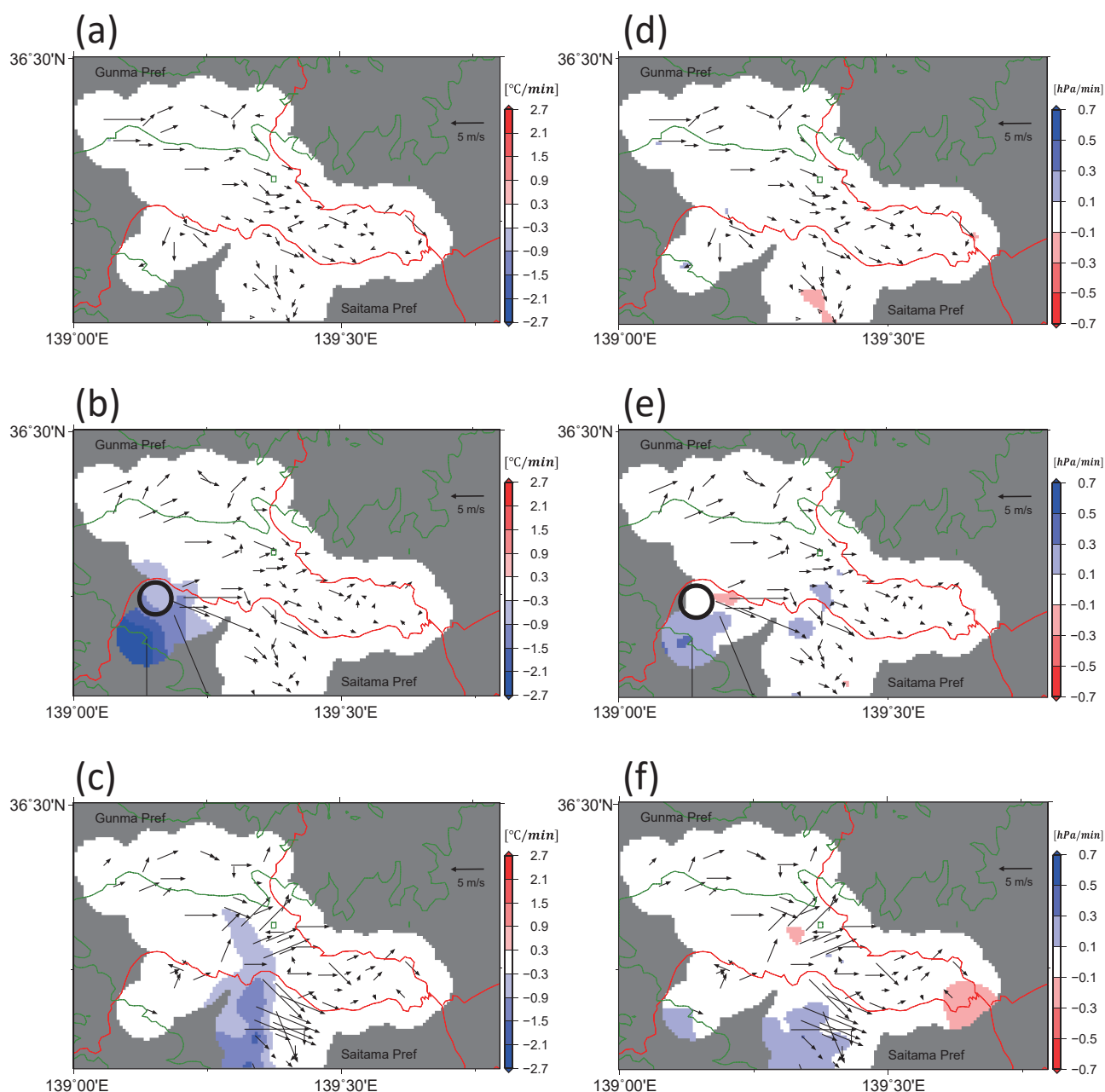


図4 Case5における（左：（a）、（b）、（c））前1分気温変化量（単位は $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）、（右：（d）、（e）、（f））前1分海面気圧変化量（単位は hPa/min ）および最大瞬間風速とその風向の水平分布を示す。（a）と（d）は17:22（発生期）、（b）と（e）は17:32（最盛期）、（c）と（f）は17:52（衰退期）を示す。（b）（e）では風向風速から推定される本事例のDB中心を○で示す。

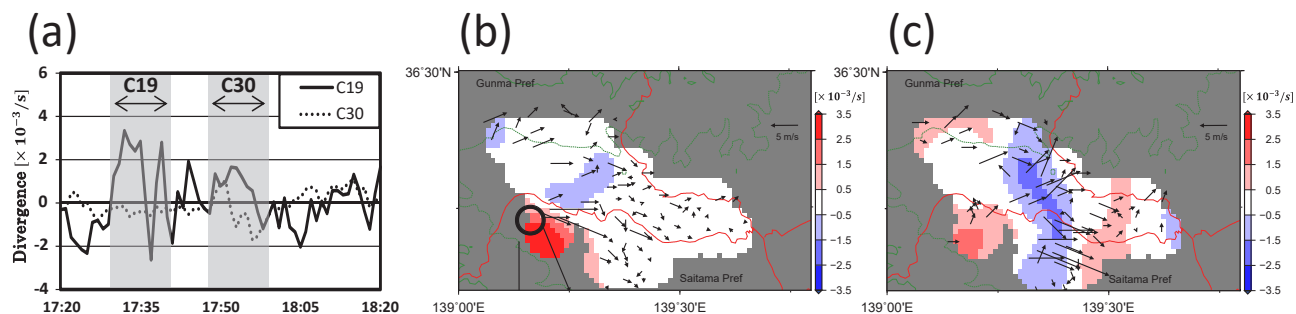


図5 Case5の（a）C19およびC30における発散量の時系列。灰色枠はC19およびC30領域内に設置されている観測点で10m/s以上の突風が発生した時間を表す。（b）、（c）は17:32、17:53における発散量（単位は $\times 10^{-3}/\text{s}$ ）、最大瞬間風速とその風向の水平分布を示す。（b）では風向風速から推定されるDB中心を○で示す。

影響を受けて過度の傾向が変化した可能性もある。よって今後は、過度の算出方法についてのさらなる検討が必要である。

4. 結論

本研究は関東平野北西部において展開されている高密度地上気象観測システムPOTEKAデータを用いてDBの事例抽出を行い地上気象場について調査した。その結果、本研究で定義した事例抽出手法により、解析領域内においてJMA-DBで報告されている3事例に加えて、未掲載の2事例が抽出された。さらに、気温変化および気圧変化の条件を組み合わせるとして検討した結果、気温は $2.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上の低下かつ気圧は $0.6\text{hPa}/\text{min}$ （または $0.5\text{hPa}/\text{min}$ ）以上の上昇とすることで、DB事例の抽出精度が上昇した。このことから、気温変化と気圧変化それぞれの閾値で事例を抽出するよりも、それらの閾値を組み合わせの方が有効であることが示唆された。これらの閾値については、①ほかの地域においても適用できるのか、②対象期間外においても適用できるのか、をそれぞれ検討することによって、本研究で提唱した手法の一般性を高められるものと考えられる。

抽出された事例の解析を行った結果、DBや冷氣外流出の影響下では突風が通過した時刻において顕著な気温急低下と気圧急上昇が確認された。これは、岩下・小林(2017)が報告した事例と特徴が一致する。さらに、DBの最盛期にはDB本体付近において放射状の発散流が確認され、 $3.3 \times 10^{-3}/\text{s}$ の発散量と $-3.6 \times 10^{-3}/\text{s}$ の負の渦度が局所的に示された。これらより、DBの発散流が回転成分を有している可能性が示唆された。一方、衰退期には最盛期に発散した冷氣外流出が、東方向へ弧状に進行したことが示された。そして、冷氣外流出の進行地域では明瞭な収束域も確認された。このことより、本事例においてGFの形成が示唆された。

防災上の観点からDBの発生予測や実態把握は非常に重要である。しかしながら、本研究においてJMA-DB未掲載の事例が発見されたことにより、JMA-DBの報告事例以外にもDBが相当数発生している可能性が推測される。以上のことから、日本国内におけるDBの正確な発生数を把握しその実態を議論するためには、稠密気象観測が継続的に実施される必要があると考えられる。

謝辞

本稿は、第1筆者の立正大学地球環境科学部環境システム学科卒業論文の骨子について、第2筆者をスーパーバイザーにしてまとめたものである。指導教員である中川清隆教授には多大なご指導を頂いた。匿名査読者からのコメントは原稿改良の際に大変役立った。本稿で使用した高密度地上気象観測システムPOTEKAの実証実験データは、熊谷市を通して明星電気㈱からご提供頂いた。記して心より深謝の意を表します。

参考文献

- Charba, J., 1974 : Application of gravity current model to analysis of squall-line gust front. *Monthly Weather Review*, **102**, 140-156.
- Fujita, T.T., and R.M. Byers, 1977 : Spearhead echo and downburst in the crash on airliner. *Monthly Weather Review*, **105**, 129-146.
- 岩下久人・小林文明, 2017 : 稠密気象観測データによるダウンバーストに伴う気圧変化. 日本気象学会大会発表予稿集, **112**, 239.
- 岩下久人・森田敏明・柴田耕作, 2017 : 地上稠密気象観測データを利用した突風予測手法の汎用性検証. 日本気象学会大会発表予稿集, **112**, 437.
- 甲斐憲次・浦 健一・河村 武・朴 (小野) 恵淑, 1995 : 東京環状八号線道路付近の上空に発生する雲 (環八雲) の事例解析. *天気*, **42**, 417-427.
- 小林文明・鈴木菊男・菅原広史・前田直樹・中藤誠二, 2007 : ガストフロントの突風構造. 日本風工学会論文集, **32**, 21-38.
- Koch, S.E., 1984 : The role of an apparent mesoscale frontogenetic circulation in squall line initiation. *Monthly Weather Review*, **112**, 2090-2111.
- 村松貴有・川村隆一, 2012 : 日本におけるダウンバースト発生の環境場と予測可能性. *天気*, **59**, 827-845.
- 大野久雄・鈴木 修・楠 研一, 1996 : 日本におけるダウンバーストの発生の実態. *天気*, **43**, 101-112.
- Houze, Jr., R.A., 2017 : Cloud dynamics, Second Edition, Academic Press, 432p.
- Wakimoto, R.M., 1982 : The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data. *Monthly Weather Review*, **110**, 1060-1082.
- Wilson, J.W., R.D. Roberts, C. Kessinger and J. McCarthy, 1984 : Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 898-915.

Analysis of Surface Meteorological Fields of Downburst over the Northwestern Kanto Plain based on Surface High Density Meteorological Observation Data

OTSU Yusuke*, NAKAMURA Yusuke**

* Undergraduate Student, Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

** Graduate Student, Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University

Key words: Downburst, Gust Front, High Density Meteorological Observation, Convergence and Divergence,
Vertical vorticity