夏季の北陸地方のフェーン発現日における 地上風系と GPS 可降水量の日変化特性

大橋喜隆*・川村隆一**

要旨

1996年から2004年の夏季に北陸地方でフェーン現象が発現した日を抽出し、中部地方を対象にフェーンとその状況下で形成される熱的局地循環の傾向と、GPS 可降水量変動について考察した。

GPS 可降水量分布は,北陸地方の東部ではフェーンによる大気下層の乾燥傾向を反映するが,西部では太平洋 側と同様に高い値を示した.フェーンが発現するような一般風が強い環境であっても,中部山岳域に熱的低気圧が 形成される場合には北陸地方で日中に海風や谷風が生じ,フェーンの中断または弱化(フェーンブレイク)が生じ る.熱的局地循環に伴う GPS 可降水量の日変化は,夏季静穏日と同様にフェーン発現日においても夕方に中部山 岳域で極大を示した.北陸地方沿岸域の中で日中にフェーンブレイクが見られる地域では、夕方に GPS 可降水量 の増加が顕著であり,フェーンに伴う南風と海風の間で水蒸気収束が発生していると考えられる.夜間には GPS 可降水量の高い領域が山岳風下側の新潟県の平野部へ移動する傾向が見られ、熱的局地循環によって山岳上空に輸 送された水蒸気が,フェーンをもたらす南から南南西の一般風によって風下側へ輸送されたと考えられる.フェー ンブレイクが生じていない事例では太平洋沿岸の可降水量が高く,中部山岳の風上斜面で降水頻度が高くなってお り,熱的低気圧も形成されなかった.

1. はじめに

北陸地方では、強い南風が本州の脊梁山脈を越える ときにフェーンが発生しやすいことが知られている. 北陸地方で発生するフェーンについて、Arakawa et al. (1982) では AMeDAS と高層ゾンデから解析を行 い、フェーンが顕著な地域やフェーン時の上空の一般 風の風向を示した. Inaba et al. (2002) では富山市 で5日間にわたってフェーンが持続する特異な現象に ついて、その原因を考察している.フェーンのような 一般風が卓越する状況下では、海陸風や山谷風といっ た日変化する熱的局地循環が抑制される可能性があ る.しかし一方で、中部山岳は2000 mを超える大規 模山脈帯を抱え、静穏日には日変化する熱的局地循環 が形成される地域である.従って、北陸地方でフェー

* 富山大学大学院理工学教育部.

** 富山大学大学院理工学研究部.

© 2007 日本気象学会

ンが発現する状況であっても、中部日本では熱的局地 循環が生じ、両者が複合した循環場が形成されている 可能性を否定できない。

フェーンのような一般風と熱的局地循環の関係は過 去から研究されており、例えばEstoque (1962) では 2次元数値モデルから一般風と海風の関係を考察し、 一般風が海風に対して卓越する風向によって海風の振 る舞いが異なることを示した。Arakawa et al. (1982) では実際に北陸でフェーンが発生している状 況下でも、日中に北陸地方の沿岸で北風成分を持つ海 風の進入がみられることを報告している。永沢・宮川 (1980) では北海道オホーツク海岸付近で一般風が卓 越する状況下で、海風が進入することによって生じる 気温急変現象について報告している。また、Fujibe et al. (1999) では、2次元数値モデルを用いておろ し風と日中の谷風による収束帯の振る舞いを論じてい る.

熱的局地循環を理解する上で,水蒸気の挙動を把握 することが重要であるが,大気中の水蒸気量を高い時

2007年6月

⁻²⁰⁰⁷年1月11日受領--2007年5月18日受理-

空間分解能で把える手法の1つとして, GPS 観測網 から可降水量を求める GPS 気象学の利用が有用であ る、これまで、GPS 可降水量を用いた水蒸気分布の 日変化に関する研究が関東、中部地方を中心に行われ てきている. Iwasaki and Miki (2001) では前橋周 辺の GPS 観測点のデータとゾンデ観測データを使用 し, 前橋周辺から北関東の水蒸気量の日変化について 考察している。また、Iwasaki (2004) でもGPS 観 測点のデータと気象庁の東京のレーダーデータを使用 し,新潟県と群馬県の県境にある谷川岳周辺の対流活 動度の日変化を考察している。他に、佐々木・木村 (2001)が関東地方を中心に夏季静穏日における水蒸 気分布の日変化を解析し、山岳域と沿岸域で可降水量 の日変化傾向の相違が見られることを示している。中 部山岳域を含む領域を対象にした研究として、大橋・ 川村(2006)は、GPS 可降水量の日変化の解析に基 づいて,中部山岳で発生する熱的低気圧に対応する地 上風収束の最盛期と GPS 可降水量の極大期に3時間 ほどずれが生じることや,夜間に濃尾平野や静岡沿岸 で GPS 可降水量の極大が見られることを報告した. Sato and Kimura (2005) では GPS 可降水量と数値 モデルから、熱的局地循環に伴う日変化と広域の水蒸 気輸送について解析しており,中部地方から関東地方 で発生する熱的局地循環と一般風の影響を受けた水蒸 気変動の関連について示している.

しかし,上記の論文では解析対象日が夏季静穏日を 想定したものであり,フェーン卓越時の熱的局地循環 とそれに伴う水蒸気変動に着目した研究例はほとんど みられない.また,そのような状況下での水蒸気分布 の地域的特徴についても不確かである.そこで本研究 では,GPS 可降水量の1時間平均値を計算して,北 陸地方でフェーンが発現した日の中部日本を対象に, ①フェーン卓越時における熱的局地循環の特徴を明 確にすること,また,②GPS 可降水量の解析に基づ いて,フェーンと熱的局地循環が複合した影響下での 水蒸気分布の日変化とその地域性を明らかにすること を目的とする.

2. 使用データおよび解析手法

2.1 使用データ

解析対象日について、AMeDASによる気温,風向 ・風速,日照,降水量を使用し,気象官署の現地気 圧,海面気圧,相対湿度を使用した。国土地理院の GPS 観測網 GEONET (GPS Earth Observation Network System)の観測データを使用した。また, 日平均風向・風速は1時間値から1時から24時までの



第1図 a)主な地形と都市の配置図とb)解析領域の各観測点配置図.AMeDAS 観測点(白丸),気象官署 (四角),GPS 観測点(黒丸),高層気象観測点(三角)を示す.点線は県境,陰影は標高を示す.

風向・風速のベクトル平均をして算出した。日最多風 向は1時から24時の風向・風速の観測値(24サンプ ル)の中で最も多い風向を用いている。輪島と浜松の ゾンデ資料から風向・風速と混合比,温位,ゾンデ可 降水量を,高田のWINDASによるウィンドプロファ イラの水平風を用いた。

2.2 フェーン発現日の抽出

フェーンが発生しやすい地域である北陸地方を含 み,静穏日には山谷風循環や海陸風循環が卓越する本 州 中 部 地 方 (東 経135.5°~139.0°,北 緯34.5° ~37.75°)を解析領域とした(第1図a参照).領域 内には標高2000 mを超える山脈帯がいくつも存在し ている.領域の北西部には両白山地,中央部には北か ら飛騨山脈,木曽山脈,赤石山脈が存在し,赤石山脈 の北東側には関東山地が存在する.解析領域内の AMeDAS 観測点は251地点(雨量計のみの地点も含 む),気象官署は31地点,GPS 観測点は188地点であ る(第1図b).

まず始めに,夏季に北陸地方でフェーンが発生した

日を抽出した.GPS 観測データが使用可能である 1996年から2004年までの6月16日から9月15日(計 828日)を解析対象日の抽出期間としている。その中 から,北陸地方の中でフェーンが発生しやすい都市で ある富山の気象官署の観測値から以下の4つの基準に より、フェーン発現日を抽出した。

① 日最高気温が30°C以上

- (2) 日最低湿度が45%以下
- ③ 日平均風速が3.0 m/s 以上
- ④ 日最多風向が SSW, S, SSE, SE

本研究におけるフェーン発現日の抽出条件は Inaba et al. (2002)を参考にしており,フェーンによる昇 温傾向,乾燥傾向,強風傾向及び富山市と周辺山岳域 との位置関係を考慮したものである。また,本研究で は、上述の抽出条件を全て満足する事例から更に, フェーンが24時間持続している事例のみを対象とし た。具体的には,時刻毎の気温分布図で北陸地方が太 平洋側の地域よりも昇温している状態が0時から24時 の間で持続した事例を抽出した。その結果,解析日と

事例番号	年	月日	最高気温(℃)	最低湿度(%)	平均風速 (m/s)	最多風向	FB or NFB
1	1996	7月30日	35.0	44	3.3	SSW	FB
2		8月14日	36.7	39	4.9	S	NFB
3	1997	7月6日	34.3	40	3.3	SSW	
4		8月9日	35.7	44	7.3	S	NFB
5	1998	8月24日	35.5	39	4.4	SSW	
6	1999	7月25日	34.9	43	3.1	SSW	
7		7月26日	34.0	43	4.0	S	FB
8		7月27日	34.8	42	3.4	SSW	NFB
9		7月30日	36.0	41	6.0	SSW	
10		7月31日	38.8	26	6.0	SSW	
11		8月1日	38.1	31	5.4	S	FB
12		8月2日	38.3	27	5.7	SSW	FB
13		8月3日	36.6	32	5.4	S	FB
14		8月31日	36.4	38	4.0	SSW	
15	2000	7月30日	37.4	37	6.7	S	NFB
16		7月31日	38.4	33	7.4	S	NFB
17		9月1日	36.7	45	5.5	S	
18	2002	7月6日	33.3	41	6.5	S	NFB
19		8月9日	35.5	45	4.8	S	
20		8月10日	37.4	36	5.7	SSW	
21		8月31日	36.9	32	3.9	SSE	
22		9月1日	38.3	24	6.9	SSW	
23	2004	8月2日	37.4	27	6.3	SSW	FB

第1表 解析対象日の一覧と富山における日最高気温,日最低湿度,日平均風速,日最多風向.ここで,FB(NFB)は合成図解析に用いたフェーンプレイク発生(非発生)の事例である.

して23日間が抽出された(第1表).解析対象日では, 日本の東海上に太平洋高気圧が存在し,低気圧や台風 などの擾乱が九州付近から日本海の間の領域に存在し ていた。

2.3 GPS 可降水量

GPS データを解析するソフトウェアとして、マサ チューセッツ工科大学とスクリプス海洋研究所が共同 で開発を進めている GAMIT (GPS At MIT)のバー ジョン10.2を用いた。GPS 観測データの標準フォー マットである RINEX 形式観測データから GAMIT を用いて天頂大気遅延量を算出し、天頂大気遅延量か ら気象観測データより求めた天頂静水圧遅延量を差し 引いて天頂湿潤大気遅延量を導き出す。それをさらに 気象観測データを用いて可降水量を算出した。本研究 では可降水量を1時間平均値として算出している。 GAMIT の解析手順については島田 (1998)を参照し てほしい。

本研究で算出された GPS 可降水量の精度を見積も るために、輪島と浜松のゾンデ可降水量と近傍の GPS 観測点の可降水量を比較した.ゾンデ観測点と GPS 観測点の距離は,輪島が水平距離1.2 km,標高 差0.1 m,浜松が水平距離8.5 km,標高差25.8 m で ある。本研究で計算された GPS 可降水量は従来の研 究と比較すると同程度の精度が得られている。

3. フェーンと GPS 可降水量分布

3.1 抽出されたフェーンの特徴

第2図は解析日の23日間で平均した気温と地上風向 ・風速の日平均値の空間分布図a)と輪島と浜松の9 時の温位と水平風の鉛直分布図b)である。日本海側 の地域では太平洋側に比べて気温が高く,南寄りの風 が卓越していることがわかる。地上気温が太平洋側で 26°Cから27°Cなのに対して日本海側沿岸地域では全域 で28°C以上である。特に富山,金沢,小松,福井では 日平均気温が30°C以上になっており,昇温が顕著であ る。地上風は福井沿岸や富山で日平均風速が4m/s を超えており,フェーンによる強風傾向が顕著であっ た。輪島と浜松における高層データを見ると,一般風 (本研究では700 hPa 面高度の風とする)は南西の風 で,温位は1000 hPa から850 hPa にかけて輪島が浜



第2図 a)解析対象日の23日間で平均した気温と地上風向および風速の日平均値の空間分布図. 陰影は気温を 示す.ベクトルは風向・風速,等値線が標高(500m間隔)で海抜高度2000mまで描写.b)高層気象 観測点の輪島と浜松における9時の温位と水平風の鉛直分布.破線が浜松,実線が輪島,矢羽根が風 向・風速,Wの記号が輪島,Hの記号が浜松の風である.また,エラーバーは±σ(標準偏差)であ る.

松よりも2Kから3K程高くなっている。また,850~700 hPa でも若干輪島で温位が高い。輪島が中部山岳の山麓から水平距離で100 km ほど離れていることに注意しなくてはならないが、フェーンによって昇温する大気下層の高度は地表から少なくとも1.5 km までの高さであると考えられる。このような結果は過去にAMeDASと高層ゾンデデータを用いて研究を行ったArakawa *et al.* (1982)の結果と矛盾していない。

3.2 GPS 可降水量の空間分布

第3図は解析日の23日間で平均した GPS 可降水量 の日平均値の空間分布図 a) と輪島と浜松の9時の混 合比鉛直分布図 b) である。本研究の解析領域では, 沿岸部の標高の低い GPS 観測点では40 mm から50 mm の値を示すのに対して,中部山岳域の標高の高い 場所に位置する GPS 観測点では,40 mm 以下の観測 点が多い。山岳による標高差が可降水量分布に顕著に 現れていることがわかる。標高が低い沿岸部で太平洋 側と日本海側を比較すると,太平洋側では46 mm か ら52 mm,日本海側の富山以東の地域では40 mm か ら46 mm であり,解析領域内では日本海側の方が太 平洋側よりも GPS 可降水量が有意に小さい値を示し た. これはフェーンに伴う大気下層の乾燥傾向を GPS 可降水量が捉えたものであると考えられる.し かし,日本海側でも富山以西では GPS 可降水量の値 が46 mm を超える値を示し,太平洋側とほぼ同程度 であった.

第3図bを見ると,混合比は1000 hPa から925 hPa にかけて輪島が浜松よりも2g/kgほど小さく,乾燥 傾向を示している.一方で,700 hPa 面以上では輪島 の方が浜松よりも湿潤になっている.対流圏中層にみ られるこの湿潤層の影響で北陸地方の富山以西の地域 では GPS 可降水量の値が富山以東に較べて高い値を 示したと考えられる.湿潤層については,第3図b で輪島の上空の風は南西風が卓越していることを考慮 すると,フェーンで乾燥する地表付近の大気層の上 に,湿潤な空気塊が南西方向から流入している可能性 がある.

4.フェーン発現日における熱的局地循環

4.1 フェーンブレイクとその発生要因

本研究の解析事例において,北陸地方の沿岸域や平 野部では日中にフェーンの南寄りの強風傾向から風向



第3図 a) 解析対象日の23日間で平均した GPS 可降水量の日平均値の空間分布図. 陰影は GPS 可降水量を示し、等値線は第2図と同じ.b) 高層気象観測点の輪島と浜松における9時の混合比鉛直分布図.破線が浜松、実線が輪島.

545

が反転して北寄りの風が観測される現象が確認され た.一例として関山の AMeDAS 観測資料から2004年 8月2日の時系列を示す(第4図).13-14時までは6 m/s前後の南寄りの風が卓越しているが,14-15時に 風向の反転が発生して北風になる。そして,風向の反 転と共に気温が下がる。18-19時以降はまた南寄りの 風が徐々に吹きはじめ,風速が大きくなると気温も上 昇する。このような現象は永沢・宮川(1980)で示さ れていると共に,北陸地方のフェーン発生時の傾向と して Arakawa *et al.*(1982)においても指摘されて いる。本研究ではこのようなフェーン卓越時の日中に おける風向の反転あるいは弱風化の現象をフェーンブ レイクと名づけることにする。

546

本研究の研究対象事例ではフェーンブレイクの有無 に事例ごとの差が見られため、典型的なフェーンブレ イクが観測される関山を基準にして、本研究の対象事 例(23事例)をフェーンブレイクが生じた事例(17事 例)と生じなかった事例(6事例)に分類した。さら に、フェーンブレイクの17事例の中から、フェーン発 現日の途中で,前線などの影響を受けて解析領域全体 で GPS 可降水量の極端な増加や減少が生じていた事 例を排除した結果, 6事例が残された。以下, 各分類 から6事例ずつを合成し、その結果について示すこと にしたい、念のため、フェーンブレイク17事例につい ても合成を行った。若干不明瞭な傾向になったが、得 られた主な特徴はフェーンブレイク6事例と同様な結 果であった。以下,フェーンブレイク発生の6事例 (第1表の事例番号1,7,11,12,13,23)の合成 をFB,フェーンブレイク非発生の6事例(事例番号 2, 4, 8, 15, 16, 18) の合成をNFBと便宜的に 呼ぶことにする.

第5図aは関山のFBにおける各気象要素の日変化 を表している。12-13時までは4m/sを超える南風が 吹いているが、13-14時から南風の弱化が始まり、14-15時から17-18時には北寄りの風の進入が見られ、そ れに伴い昇温傾向も抑制される。18-19時以降は再度 南風になり夜間にかけて風速が増大していく。一方、 NFB(第5図b)では1日を通して約4m/sから6 m/sの南風が吹いている。また、本研究のフェーン 発現日の抽出に用いた富山でもフェーンブレイクが発 生している。FBでは(第6図a)、8-9時までは約6 m/sの南風が吹いているが、9-10時からは次第に南 風が弱くなり、14-15時から18-19時までは微風の状態 になり、19-20時以降は南風が増大していく。NFB



(第6図b)では関山と同様に一日を通して4m/sから6m/sの南風が吹いている。また、地上混合比の日変化は、NFBでは1日を通して一定の値であるが、FBでは日没後に極大になり日変化が顕著である。

中部山岳や北陸沿岸の観測点について地上風の日変 化を解析した結果,中部山岳では松本以北,北陸沿岸 では富山から新潟にかけてフェーンブレイクが発生し ていた.フェーンブレイクは少なくとも中部山岳北部 から北陸沿岸の富山から新潟までの空間規模を持って いると考えられる.

上述のフェーンブレイクの発生要因として, 海風や 谷風あるいは、中部山岳域の熱的低気圧に対応する局 地循環の影響を考察する。FBにおける14-15時の海 面気圧と地上風分布(第7図a)を見ると、中部山岳 域の中央部から北部で発達する熱的低気圧が形成され ていることがわかる。それに伴い北陸地方の沿岸地域 ではフェーンブレイクが発生している。一方, NFB (第7図b) ではFBのような熱的低気圧は見られな い. また, FB においても熱的低気圧から離れている 福井県沿岸の観測点ではフェーンブレイクは発生しな い、つまり、南北方向の水平気圧傾度が大きいフェー ン卓越時においても,中部山岳域北部で熱的低気圧が 形成されることにより,北陸地方で海風や谷風が生 じ、フェーンブレイクが発生すると考えられる. フェーン発現日の熱的低気圧が発達する地域で特に気 圧低下が著しい地域は,夏季静穏日(大橋・川村, 2006) と較べて北偏しているが, NFBのような

24

"天気"54.6.



第5図 第4図と同じ観測点関山における気温(破線)と風向・風速(ベクトル)と風速(点線)の合成図.a) がフェーンブレイク発生(FB)6事例,b)がフェーンブレイク非発生(NFB)6事例.上向きのベ クトルが南風を示す.



(ベクトル)と風速(点線)。a)がFB,b)がNFB.上向きのベクトルが南風を示す。

フェーン日と夏季静穏日の気圧分布の重ね合わせによるものと解釈可能である。また、FBでは中部山岳域でも熱的低気圧に向かう風が顕著である。

4.2 フェーンブレイクをもたらす海風の立体構造

フェーン発現日にフェーンブレイクをもたらす北風 が海風循環によるものかどうかを確かめるために, ウィンドプロファイラの観測データから,その立体構 造を考察した。ウィンドプロファイラの観測開始期間 の影響で,FB(6事例)の合成は不可能であったの で,高田のWINDAS資料からFBに含まれている 2004年8月2日(事例番号23)における風の時間高度 断面図を第8図に示す。これを見ると,12時前までは 高度2kmまで強い南風の層が形成されている。12時 に高度400m付近で北東の風になり,その後北寄りの 風が続くことがわかる。15時から北風の高度が高くな り,17時半ごろでは1km付近でも風は弱いが北寄り の風が吹いている。AMeDAS高田の地上風(1時間 毎)は11-12時から16-17時まで北寄りの風の進入が見 られている(図略).この北風層の高度は夏季静穏日 の日中に発達する海風の発達高度とほぼ一致してお り,フェーン発現日においても夏季静穏日と同様な鉛 直構造をもった海風の進入が生じる場合があることが わかった。

5.フェーンブレイク発生日の GPS 可降水量変動

5.1 GPS 可降水量の日変化

FB に着目し、フェーン発現日に形成される熱的局 地循環に伴う水蒸気変動とその地域性について考察す る.GPS 可降水量の日変化について第9 図に FB に おける GPS 可降水量と地上風の空間分布図(6 事例



第7図 14-15時の海面更正気圧,地上風向および風速の合成図.a)がFB,b)がNFB.等値線は海面更正 気圧を示し,0.5hPa間隔.四角形は気象官署の配置,陰影は標高を示す.風向・風速はベクトル平 均してある.



第8図 高田のウィンドプロファイラ2004年8月2日の風の時間高度断面図。陰影は水平風の南北成分で,正 の値が南風成分である。矢羽根は水平の風向・風速を示す。

548

合成図)を示す.本研究の解析領域においては,中部 山岳による標高差が可降水量分布に強く反映されてし まうので,空間的な変動傾向が考察しづらい.そこ で,大橋・川村(2006)と同様に,地点ごとに可降水 量の日平均値から毎時の偏差をとることによって,可 降水量の日変化の変動傾向を考察する.午後から夜間 にかけての GPS 可降水量の増加ならびに減少傾向に 特徴的な変動が見られたので,午後から夜間の傾向に ついて以下に述べる.

14-15時(第9図a)では沿岸域にGPS可降水量 が+1mmよりも小さな値を示す観測点が点在する一 方で、中部山岳を中心に+1mmを超える正偏差域が 広がっている。しかし、第7図aで熱的低気圧が発 達する地域の中で気圧低下が顕著であった松本盆地や 長野盆地では、周囲の観測点よりもGPS可降水量の 値が小さく、周囲の観測点と位相差が見られる。偏差 の値としては小さいけれども、熱的低気圧の中心で GPS可降水量の増加開始が遅れる傾向は夏季静穏日 の傾向(大橋・川村,2006)と同様の傾向である。

16-17時(第9図b)になると、山岳全体でGPS可 降水量の値が高くなる。その中でも、日本海側の中部 山岳の風下に位置する観測点では、特に GPS 可降水 量の増加が顕著であり、+5mmを超える観測点が数 地点見られる。これらの地域での GPS 可降水量の増 加傾向について,AMeDAS 観測点高田(標高13 m) の気象要素と高田の7km南に位置するGPS観測点 の新井(標高42m)のGPS 可降水量変動を時系列で 示す(第10図). 高田では10-11時までフェーンによる 南寄りの風が卓越するが、11-12時からは海風が進入 してフェーンブレイクが発生している。フェーンブレ イクは17-18時まで持続し、18-19時頃からはまた徐々 に南寄りの風になる、相対湿度と地上混合比は海風進 入とともに上昇する傾向を示す一方で、GPS 可降水 量は海風侵入後徐々に増加して、16-17時まで増加が 続く.

18-19時(第9図 c)になると、山岳全体で GPS 可 降水量の値が高くなり、+5 mm を超える正偏差域も 現れるようになる。山岳域に位置する観測点では、こ の時間帯に GPS 可降水量の日最大値を示す観測点が 多かった。また、14-15時に極大を示す熱的低気圧と GPS 可降水量のピークは4時間ほどずれがあり、夏 季静穏日に類似した傾向であった。

19-20時以降には、中部山岳のGPS 可降水量の正 偏差域が北東から北北東へ移動していく様子が見られ た.23-24時(第9図d)では中部山岳の南側では0 mmから+2mmの領域が広がっているが、中部山岳 の中央部から北東部の松本盆地や長野盆地、そして中 部山岳の北東側に位置する越後平野で+4mm以上の 領域が分布している。輪島と浜松のゾンデ観測資料か らFBの21時における上空の風のホドグラフをみると (第11図)、700hPa面では、浜松では南風、輪島では 南南西となっており、このような一般風の影響を受け て、中部山岳から風下側へ水蒸気の水平輸送が生じて いると考えられる。

5.2 GPS 可降水量と降水頻度

第12図に FB と NFB における日平均 GPS 可降水 量分布図を示す。太平洋側沿岸の GPS 可降水量の値 を比較すると、NFBの方がFBに比べて10mmほど 大きな値を示しており、大気が湿潤であることがわか る.FBとNFBでフェーン発生時の山岳風上側の降 水頻度を比較すると(第13図),NFBでは中部山岳 風上斜面で降水頻度が高く,FB ではほとんど降水頻 度が高い観測点は見られない。つまり, NFB では太 平洋沿岸部から中部山岳域へ向かう湿潤空気の流入 が,高い降水頻度に寄与している可能性があり,結果 としてフェーンの昇温にも影響を与えていると考えら れる。また第13図で、FBではNFBに比べて日照時 間が多く,地上気温の日変化の振幅も大きい傾向があ り、顕著な地表面加熱が生じていたと考えられる。こ の日照時間の差が第4節で述べた熱的低気圧の形成に 寄与していたことが示唆される。また,第7図から FBよりも NFB が南北方向の気圧傾度が若干大きく, 総観場の気圧傾度の大小も熱的低気圧の発達度に影響 している可能性がある.

6. 考察とまとめ

6.1 従来の研究との比較

本研究では、日中にフェーンの南寄りの風から風向 が反転して北寄りの海風や谷風が進入する現象 (フェーンブレイク)が確認された.永沢・宮川 (1980)はこのような急変現象について、日中に一般 風をもたらす総観場の気圧傾度よりも海風や谷風をも たらす気圧傾度が大きくなることで風向の急変が発生 すると述べている.本研究では、フェーンブレイクが 発生する場合には中部山岳域で北偏した熱的低気圧が 形成されており、それに伴う気圧傾度が総観場の気圧 傾度よりも大きくなったと考えられる.

また,本研究ではフェーンブレイク発生日において

2007年6月



第9図 FBにおける GPS 可降水量偏差(日平均値からの偏差)の合成図. 陰影が GPS 可降水量で標高1500 m
以上は白抜きにしてある.ベクトルは風向・風速,等値線は第2図と同じ.a) 14-15時,b) 16-17時,
c) 18-19時,d) 23-24時.

GPS 可降水量が午後から夕方に中部山岳を中心に増加する傾向が見られた。山岳域で日中に GPS 可降水量が増加する傾向には地表面からの蒸発と地上風の下

層収束が考えられる(Iwasaki and Miki, 2001; 佐々
木・木村, 2001; Sato and Kimura, 2005; 大橋・川
村, 2006).
地表面からの蒸発の影響はもちろん無視



第12図 a) FBとb) NFBにおける GPS 可降水量の日平均値の合成図。 陰影は GPS 可降水量を示し、等値線 は第2 図と同じ。

45

48

42

39

36

できないが(Iwasaki and Miki, 2001; 佐々木・木 村, 2001),解析範囲の中では沿岸域よりも山岳で GPS 可降水量の日変化が顕著なことから,夏季静穏 日と同様に,海風と谷風の結合によって周囲の地域か ら水蒸気が山岳域に輸送される効果が、山岳域と沿岸 域との間の可降水量の日変化の違いに実質的な寄与を していると考えられる.

51 (mm)

また、フェーンブレイクが観測された日本海側の富



第13図 a) FBとb) NFB における日照時間の日積算値と降水頻度の合成図. 陰影は日照時間. 降水頻度は6 事例(144時間)の中で1時間に1mm以上降水が見られた時間をカウントしたもの. 降水頻度が10% 以上の観測点のみ円で描写している. 円内の陰影が降水頻度. 等値線は第2図と同じ.

山から新潟の観測点では、夕方における GPS 可降水 量の増加が顕著であった。この現象はフェーンブレイ クを伴わない事例では不明瞭であった. Sato and Kimura (2003) では山岳から吹き降ろしてくる風が 風下斜面で山岳に向かってくる谷風と収束帯を形成 し、そこで水蒸気収束が発生する傾向を示している。 本研究でも、GPS 可降水量の増加が顕著な観測点付 近ではフェーンに伴う南風と海風や谷風の間で水蒸気 収束が発生していると考えられる. 高田の観測結果 (第10図参照)において、地上混合比や相対湿度は、 海風の侵入と共に、フェーンの遮断と日本海からの水 蒸気移流の影響を受けてすぐに上昇するが, GPS 可 降水量は午後から徐々に増加し始める. GPS 可降水 量は鉛直積算値なので、湿潤空気が移流して収束し、 鉛直方向に拡がることで増加が顕著になると考えられ る.このことが、地上混合比や相対湿度とGPS 可降 水量の増加開始時刻の時間差に現れていると示唆され る.

夜間には中部山岳に位置していた GPS 可降水量の 高い領域が北東から北北東へ移動していく様子が見ら れた. Iwasaki and Miki (2001) や Sato and Kimura (2005) では,日中に熱的局地循環によって山岳上 空に集められた水蒸気が夜間に一般風によって山岳の 風下側へ水平輸送されることが示されている.前述の 通り、フェーン卓越時でも熱的局地循環が形成される と、山岳上空に水蒸気が輸送される.本研究の事例で は、一般風の風向は南から南南西であるので、中部山 岳に輸送された水蒸気が一般風の影響を受けて風下側 の新潟県の平野部上空に輸送されていると考えられ る.

6.2 まとめ

本研究では,夏季の北陸地方のフェーン発現日に形 成される熱的局地循環の傾向とそれに伴うフェーンブ レイクや水蒸気変動について,いくつかの新しい知見 が見出された.

北陸地方の特に東部において、GPS 可降水量は フェーンによる下層乾燥傾向の影響を受けて太平洋側 よりも低い値を示す.しかし,北陸地方西部では GPS 可降水量が太平洋側と同程度の値を示し, フェーンによって乾燥化がみられる大気下層の上部に 流入する湿潤空気の影響が考えられる.

フェーンが発生するような一般風が強い環境であっ ても、日射が顕著な場合には中部山岳域で熱的低気圧 が形成され、北陸地方で海風や谷風が卓越して地域的

"天気"54.6.

にフェーンが中断または弱化する現象(フェーンブレ イク)が見出された.熱的低気圧の北偏は総観場の気 圧傾度との重ね合わせによると思われる.

熱的低気圧が形成される状況下では,熱的局地循環 による水蒸気輸送の日変化が明瞭である.夏季静穏日 と同様に,GPS 可降水量は午後になると熱的低気圧 に対応する地上風収束の影響を受けて山岳域で増加 し,夕方に極大になる.また,熱的低気圧に対応する 地上風の最盛期と4時間ほどのずれが見られた.日本 海側の中部山岳の風下側に位置する観測点ではフェー ンの南風と北寄りの海風の間で水蒸気収束が生じてい ると考えられる.そして夜間になると上空の一般風に より,山岳域上空に集められた水蒸気が山岳風下側の 平野部に輸送されるプロセスの存在が示唆された.

本研究の結果から,フェーン発現日には,フェーン による大気下層の乾燥傾向,フェーンブレイクをもた らす熱的局地循環,そして,上空の一般風の影響が複 合的に作用して水蒸気量の特徴的な時空間変動が生じ ていることが示された.

謝 辞

本論文の改訂にあたり、小司禎教編集委員ならびに 2人の査読者から適切なコメントを頂きました。防災 科学技術研究所の島田誠一先生には、大変お忙しい中 GAMIT の解析技術等を懇切丁寧にご指導いただき厚 く御礼申し上げます。気象業務支援センター、日本測 量協会、国土地理院には研究に使用する気象観測デー タや、GPS 観測データを入手する際の御協力に感謝 致します。

参考文献

- Arakawa, S., K. Yamada and T. Toya, 1982 : A study of foehn in the Hokuriku district using the AMeDAS data, Pap. Meteor. Geophys., 33, 149-163.
- Estoque, M. A., 1962 : The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation, J. Atmos. Sci., **19**, 244–250.
- Fujibe, F., K. Saito, D. S. Wratt and S. G. Bradley, 1999: A numerical study on the diurnal variation of low-level wind in the lee of a two-dimensional moun-

tain, J. Meteor. Soc. Japan, 77, 827-843.

- Inaba, H., R. Kawamura, T. Kayahara and H. Ueda, 2002 : Extraordinary persistence of foehn observed in the Hokuriku district of Japan in the 1999 Summer, J. Meteor. Soc. Japan, 80, 579–594.
- 岩淵哲也,内藤勲夫,萬納寺信崇,1998:国土地理院 GPS/SINEX データから得られた日本列島上空の可降 水量の動態,気象研究ノート,(192),137-142.
- Iwasaki, H., 2004: Diural variation of precipitable water and convective activity with dual maxima in summer season around Mt. Tanigawa in the northern Kanto District, Japan, J. Meteor. Soc. Japan, **82**, 805– 816.
- Iwasaki, H. and T. Miki, 2001 : Observational study on the diurnal variation in precipitable water associated with the thermally induced local circulation over the "semi-basin" around Maebashi using GPS data, J. Meteor. Soc. Japan, 79, 1077-1091.
- Iwasaki, H., F. Kimura, K. Nakagawa, T. Miki, F. Kimata, S. Shimada and S. Nakao, 2000 : The influence of the moisture gradient on the accuracy of precipitable water derived from GPS data, J. Meteor. Soc. Japan, 78, 223–231.
- 永沢義嗣,宮川和夫,1980:北海道オホーツク海岸における春の気温急変現象,天気,27,261-269.
- 西村昌明, 岩淵哲也, 内藤勲夫, 里村幹夫, 2003: GPS 可降水量のラジオゾンデによる再検証, 天気, 50, 909-917.
- 大橋喜隆,川村隆一,2006:中部日本の夏季静穏日におけ る GPS 可降水量の日変化,天気,53,277-291.
- 佐々木太一,木村富士男,2001:GPS 可降水量からみた 関東付近における夏期静穏日の水蒸気の変動,天気, 48,65-73.
- Sato, T. and F. Kimura, 2003 : A two-dimensional numerical study on diurnal cycle of mountain lee precipitation, J. Atmos. Sci, 60, 1992-2003.
- Sato, T. and F. Kimura, 2005 Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season, J. Atmos. Sci, 62, 1626–1636.
- 島田誠一, 1998:GAMIT ソフトウエア, 気象研究ノート, (192), 78-88.

Diurnal Variations of GPS Precipitable Water and Surface Wind under the Condition of Foehn in the Hokuriku District during Summer

Yoshitaka OHASHI* and Ryuichi KAWAMURA**

- * Graduate School of Science and Engineering for Education, University of Toyama, 3190 Gofuku 930-8555, Japan.
- ** Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama.

(Received 11 January 2007 ; Accepted 18 May 2007)

554