

関東北部の山岳地における晴天日の可降水量の日変化

木村 富士男*¹・谷川 亮一*²・吉崎 正憲*³

要旨

晴天静穏時の大気下層における水蒸気輸送と、それによる可降水量の日変化を調べるため、1995年7月24日から29日までの6日間、関東地方の3地点(丸沼、前橋、つくば)において、オメガゾンデなどによる集中観測を行った。

過去の研究で、アメダスやレーダーの解析などにより、夏期の北関東山地や中部山岳域では降水頻度が高いことが示されている。また理論的にも静穏日には山岳域に水蒸気が集まりやすいことが予想されているが、これらを確認するための、晴天静穏日の山岳域における水蒸気量の観測は例が少なかった。

今回の観測の結果、山岳域と平野域とで水蒸気量の日変化に顕著な違いがみられた。山岳域の丸沼では、局地循環によると思われる水蒸気の日変化が高度4500mまで及び、午前中から夕方にかけて可降水量が増加した。一方で、山岳域の麓の前橋では、午前中に可降水量の急減がみられ、その後次第に回復した。これらの結果から、水平規模の大きな局地循環による水蒸気輸送と、可降水量の日変化との間に密接な関係があることが明らかになった。さらに、夏期の局所的な降水頻度の地域分布との関係についても示唆に富む結果が得られた。

1. はじめに

晴天静穏が続いた1995年7月24日から29日まで、群馬県の前橋市、丸沼高原(標高1440m)及び茨城県つくば市において、オメガゾンデを中心とした観測を実施した。本観測のねらいは大気下層における水蒸気輸送と、それによる可降水量の日変化を調べることにある。晴天静穏日には、斜面では局地循環が発達するため、北関東の山岳地帯周辺に発達する局地循環によって、水蒸気がどのように輸送されているのか考察する。

Kimura and Kuwagata (1995)によれば、晴天静穏日の局地循環によって、水蒸気は平地から山岳地帯に輸送され、顕熱はこれと逆に輸送されること、その輸送量は山岳の水平規模が100 km程度のときに最も大きいことが示されている。水蒸気と顕熱の輸送が逆向きなのは、水蒸気は平均的には下層に多く存在し、

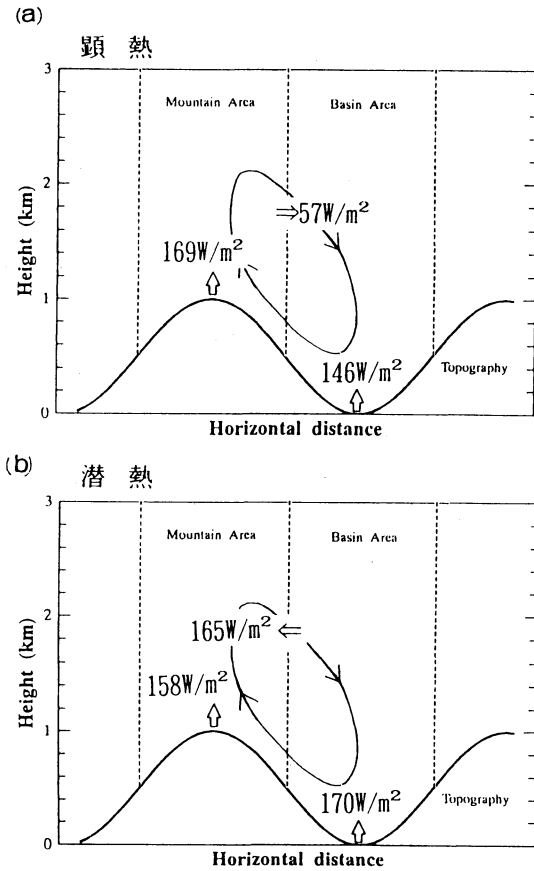
顕熱輸送に関わる保存量である温位は逆に上層ほど高くなっているためである。彼らは地形や地表面の熱特性の分布、初期の温度場などに簡単な条件を仮定した2次元モデルによる数値実験により、地表面から大気に伝わる顕熱・潜熱と風による熱・水蒸気輸送を計算し、その性質を調べた。その結果を模式図にして第1図に示す。地面は正弦型の起伏を持っているものと仮定し、地表は一定の蒸発効率を有する面で覆われているとする。静穏・晴天の気象条件のもとに地表面フラックスを計算すると、地面から蒸発した水蒸気は、潜熱に換算して山域、谷域それぞれ158 W/m²、170 W/m²であるが、局地風によってもこれらに匹敵する量の165 W/m²が谷域から山域に輸送されている。山域では地表からの蒸発に加えて、局地循環による潜熱の水平輸送により大量の水蒸気が蓄積される。しかも高度が高く気温が低いので凝結が起りやすくなる。ただし計算に使ったモデルでは、簡単のため凝結過程を考えていないので、仮に過飽和になったとしても雲はできない。また上記は簡単な初期値から出発した場合であるが、数日間にわたり数値積分し続けた場合や、複雑な

*¹ 筑波大学地球科学系、*² 筑波大学環境科学研究科。

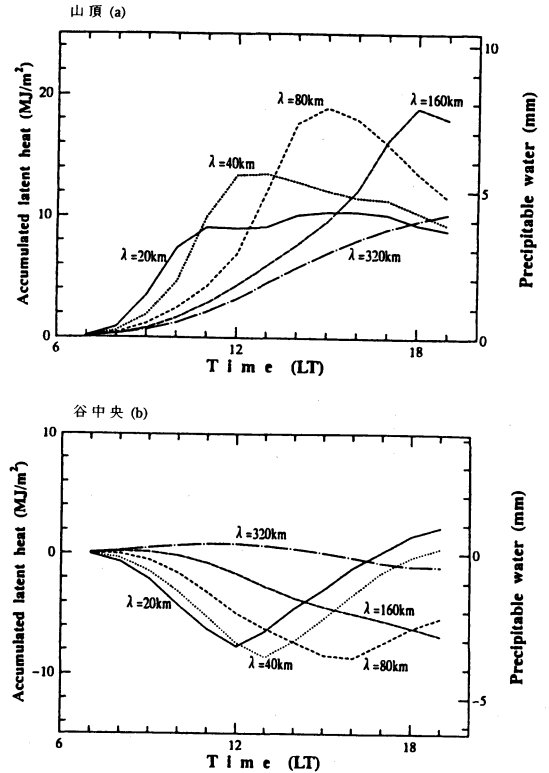
*³ 気象研究所予報研究部。

—1996年10月14日受領—

—1997年8月8日受理—



第1図 斜面上昇風による山域、谷域における顕熱 (a)、潜熱 (水蒸気) (b) の収支 (6時から18時までの平均)。2次元数値モデルによる計算結果を模式図化。山頂間の距離は140 km (a 図は木村(1994a), b 図は木村(1994 b)より)。



第2図 山頂 (a)、及び谷中央 (b) におけるカラム積算潜熱の時間変化、右の縦軸の目盛りは可降水量に換算した値。λ は谷幅 (山頂と山頂の距離)。(Kimura and Kuwagata, 1995より)

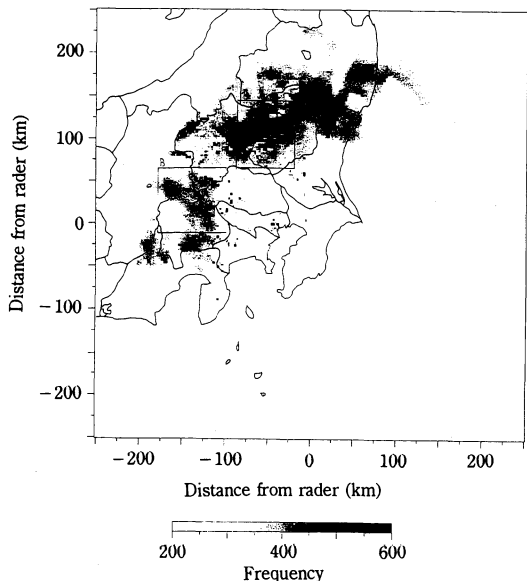
初期値から出発したときには、結果は異なる。しかし多くの場合、定性的には同様な特徴を持った水蒸気輸送となると考えられる。

次に山頂部の気柱積算水蒸気量 (可降水量) の日変化を、モデル地形の水平規模毎に計算してみると第2図 a のようになる。谷の水平規模が100 km 程度のとときに日較差が最も大きく、また夕方に最大値をとる。地形の水平規模がこれより小さいと、水蒸気の蓄積は急速であり、日の出後、比較的短時間に多くの水蒸気量が蓄積される。しかし、すぐにほとんど平衡状態または漸減するようになる。逆に水平規模がこれより大きすぎると水蒸気の蓄積速度が遅く、夕方の斜面上昇風が弱まる時刻になっても蓄積量は少ない。

第2図 b は谷中央部におけるカラム大気中の積算

水蒸気量である。谷では山頂と反対に、負の値になる傾向にある。これは地面からの蒸発による供給量を上回る量の流失があるためである。谷の水平規模が小さいと、例えば水平規模20 km 程度では、昼前後から増加に転じる。これは山岳部に蓄積された水蒸気が、反流により谷中央部上空にまで輸送されてくるためである。谷の水平規模が大きくなるにつれて、この効果は遅れて現れ、水平規模が160 km では夕方まで減少し続ける。

これらの数値実験で予想される性質は、中部地方のアメダス局の日照時間のデータによって間接的にはあるが確認されている (木村, 1994b)。また地形の水平規模が100 km より小さく、谷の深さが混合層高度より浅ければ、顕熱の水平配分には地形の水平規模によらず、相似性がある。さらに、そのようなときには簡単な一様混合層モデルにより、顕熱の水平配分が見積もれる。逆に谷の水平規模が100 km よりかなり大きい



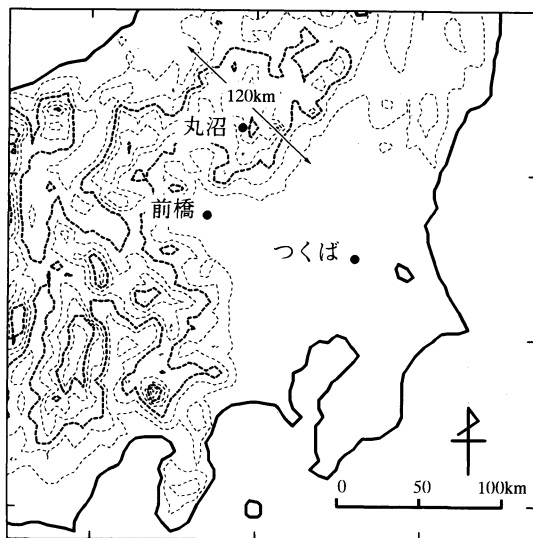
第3図 1994年7, 8月にレーダーにより観測された降水頻度 (岩崎, 1996).

と、局地循環による熱の再配分の効果は小さくなる。また谷の深さが混合層高度を大きく上回ると、通常の乱流混合層と局地循環による熱の鉛直輸送によってできる「準混合層」とが分かれて見えることがある (Ku wagata and Kimura, 1995)。乱流混合層はほぼ等温位であることに對して準混合層は弱い安定成層をしていることなどが特徴であることが2次元の数値シミュレーションにより示されている。

関東北部の山岳地帯は水平規模が100 km程度であり、局地循環による顕著な水蒸気の日変化が観測されると期待される。岩崎 (1996) によれば、1994年7, 8月のレーダーによって観測された関東地方の降水頻度は、北関東の山岳地域と中部山岳地域で顕著に高く、上記した局地循環による水蒸気輸送が、夏の降水頻度分布にも大きな影響を及ぼしていることが推測される (第3図)。図の陰の色の濃さは、期間中に実施された一定時間ごとのレーダー観測において降水が観測された回数を表す。また Ku wagata (1996) はアメダスデータの詳細解析により地形と降水の日変化がよく対応していることを報告している。

2. 観測の概要

観測地点は第4図に示す丸沼高原スキー場 (標高1440 m)、前橋 (群馬大学, 標高139 m) 及び、つくば (気象研究所, 標高31 m) の3地点である。観測期間は



第4図 中部関東地方の地形とゾンデ観測地点の配置。地形のコンターは300 mごと、太い破線は900 mごと。

1995年7月25日から7月30日の6日間で、オメガゾンデにより風向、風速、気温、湿度、及び気圧を観測した。また気圧を無電源の気圧計・レコーダにより、丸沼のゾンデ放球地点と白根山山頂付近の2か所で連続観測した。また丸沼ではこれらと並行して、日射量、正味放射量、気温、湿度、風向、風速の毎時観測を行った。観測期間中とくに静穏であった26日と27日には丸沼と前橋では6時から21時までの3時間ごとのゾンデ観測を行い、つくばでは、高層気象台のルーチン観測とあわせて9時から21時までの3時間間隔の連続観測となるよう観測時間を定めた。各地点におけるゾンデの観測時間をまとめて第1表に示す。

第5図に示されている地上天気図によると、この期間中観測地域は太平洋高気圧に覆われ、雲の少ない静穏な日が続いた。

3. 観測結果

第6図は7月26日に丸沼で観測された温位と比湿の鉛直分布である。縦軸は海拔高度であり、各プロファイルの下端は地上高度である。6時 (破線) の温位をみると、ほぼ全層で安定成層をしており、平均すると高度1000 mにつき約5度の温位傾度を持っている。ごく下層の接地層では、薄い逆転層が形成されている。比湿は地上では10 g/kg以上あるものの、高度とともに減少し、高度5000 mでは約2 g/kgとなっている。

第1表 ゾンデ観測時間表.

日	時	丸沼	前橋	つくば
24	21	—	o	r
25	9	—	o	r
	15	o	o	—
26	6	o	o	—
	9	o	o	r
	12	o	o	o
	15	o	o	o
	18	o	o	o
	21	o	o	r
27	6	o	o	—
	9	o	o	r
	12	o	o	o
	15	o	o	—
	18	o	o	o
	21	o	o	r
28	9	—	o	r
	15	—	o	—
	18	—	o	—
	21	—	—	r
29	9	o	o	r
	15	o	o	—
	18	o	o	—
	21	—	—	r

o: 観測 r: ルーチン観測 - : 欠測

高度約3300 m 付近に薄く、かつ比湿の極端に低い層が観測されているが、類似の層は9時や15時の観測でも見られる。継続性からみて観測誤差ではなくある程度の水平広がりをもつ何らかの擾乱によって形成されたものと思われるが、それ以上のことは不明である。

15時になると地上から1500 m 付近（標高で2900 m 付近）までは混合層が発達し、温位は鉛直方向にほぼ一様となる、それ以上の高度には6時より冷却している層が存在するが、これは丸沼周辺の山岳地帯へ収束する局地循環のもたらす上昇流によるものと推測される。

比湿を6時と15時で比べてみると、地上から海拔高度で4500 m までの、かなり厚い層で、顕著な水蒸気の増大がみられる。これは可降水量に換算するとほぼ6 mm に相当し、9時間平均で460 W/m²の蒸発と等価である。この値の大きさと、水蒸気の増大した高度が混合層高度を大きく上回っていることを考えあわせると、この比湿の増大が地表蒸発と乱流による輸送だけによって形成されたとは考えにくく、局地循環による

水蒸気輸送がかなり寄与しているものと推測される。なお15時の比湿の鉛直分布は、混合層の高さである海拔2900 m 程度までは概ね一様であると言える。なお、18時には可降水量は少し減少した。

15時の地上風系をみると、関東平野からの風系と日本海側からの風系が、北関東の山岳地域に収束している様子が見られる(第7図)。このことも、丸沼における可降水量の増大が局地循環によるものであるとの推測を支持している。

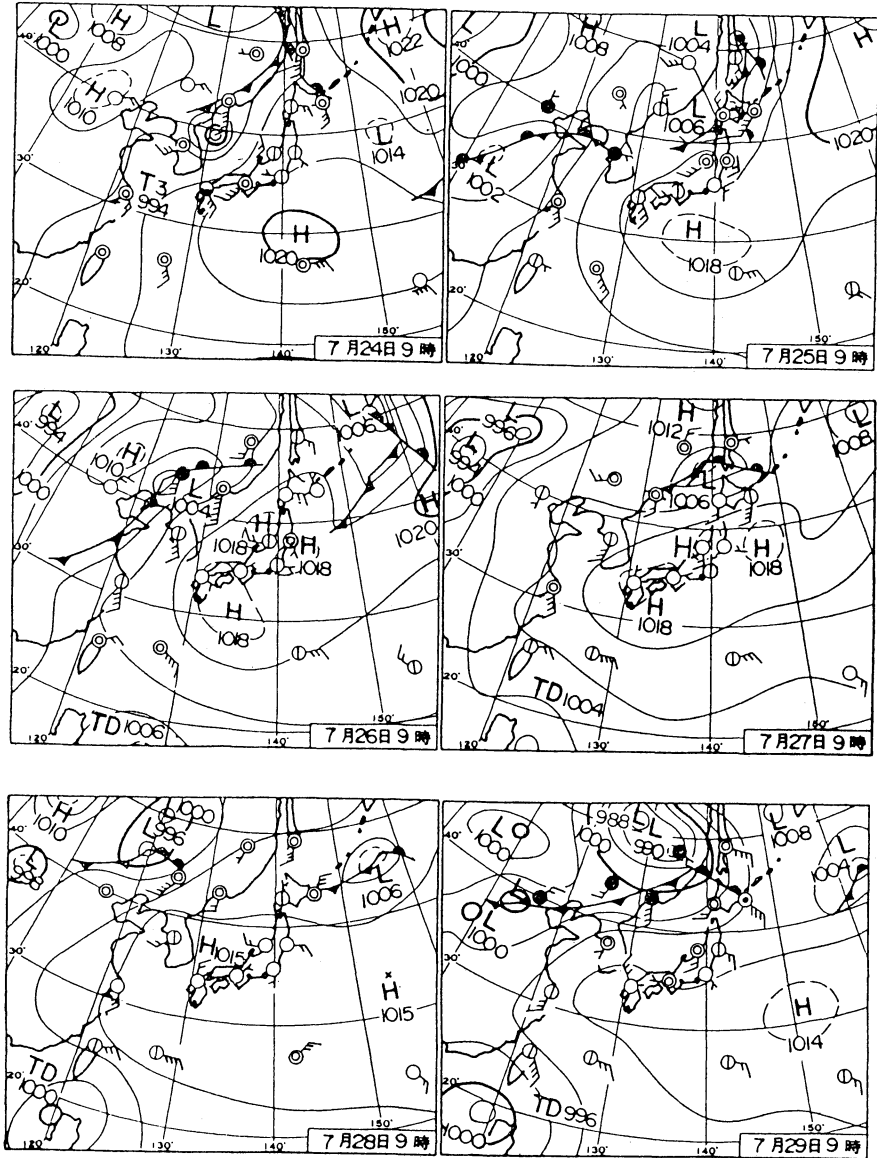
7月26日だけでなく、翌27日にもほぼ同様な比湿と温位の鉛直分布の推移がみられた(第8図)。ただしこの日の混合層は大変に厚く(約2000m)、また比湿の増大はほぼ混合層内に限られていた。可降水量に換算した水蒸気量の変化は、15時までは26日とほぼ同程度であったが、26日とは異なり18時にはさらに増大し続けた。このことから丸沼におけるこの高度での水蒸気の午後の増大は、良く晴れた日にはしばしばみられる現象であることと考えられる。

26日の前橋における6時と15時の温位と比湿の鉛直分布を第9図に示す。温位の鉛直分布は6時には安定成層をしていたが、15時には高度約2000 m まで混合層が発達した。第6図の丸沼の温位分布と比べると、混合層はより深く、6時からの温位の増大もより大きい。これは第1節で述べたように、局地循環によって丸沼を含む山岳域から、前橋を含む平地に顕熱が輸送されていることを示している。比湿については6時と15時ではそれほど際だった差はみられない。18時になると比湿の増大がみられるが、わずかである。

第10図は前橋の27日の6時と15時の温位と比湿である。15時の温位分布では混合層が上下2段になっているように見える。上段の層でも15時には6時に比べて、明確に昇温している。上段の層の昇温に使われた熱は、下段のより低温位の混合層を経由して供給されたとは考えにくい。第1節で述べたように下段の層は乱流による混合層、上段の層は局地循環によって加熱される準混合層であると推測される (Kuwagata and Kimura, 1995)。

比湿分布も混合層内では温位に応じた分布となっている。水蒸気量の鉛直分布の形は変化しているものの、26日と同様6時と比べて可降水量に顕著な変化はみられない。しかし、27日は18時になると高度約1500 m から4500 m の層で顕著な比湿の増大がみられた(第11図)。

つくばでは26日と27日の両日18時以降から、地上か

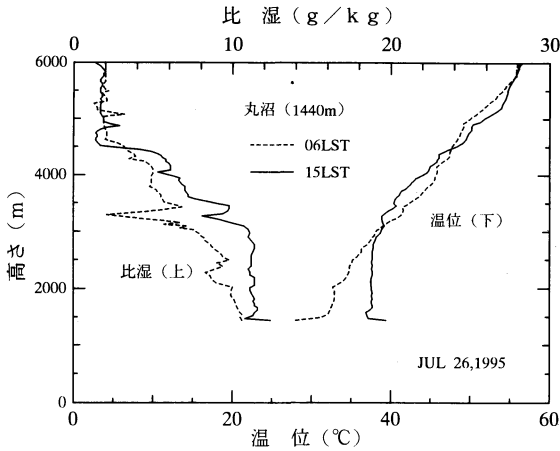


第5図 1995年7月25日から29日までの地上天気図（気象1996年10月号より）。

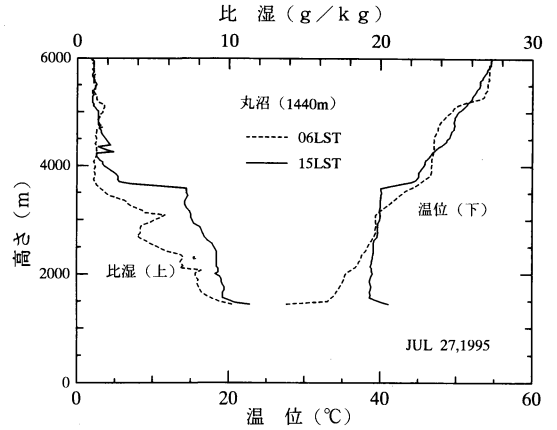
ら高度3000 m以上に及ぶ厚い層で、水蒸気の急激な増大がみられた。特に27日には顕著で水蒸気の増大する層は高度4000 mを越えていた。これは前橋と同じように北関東山岳地からの移流によるものと推測される。なぜなら関東地方の平野部に発達する混合層内の海風によって水蒸気が輸送されたのでは、これほど上層での水蒸気の増大は説明できない。例えば27日の15時の混合層高度は約1200 mにすぎない。この成因については数値モデルを利用した別の報告で詳しく考察する。

4. 可降水量の日変化

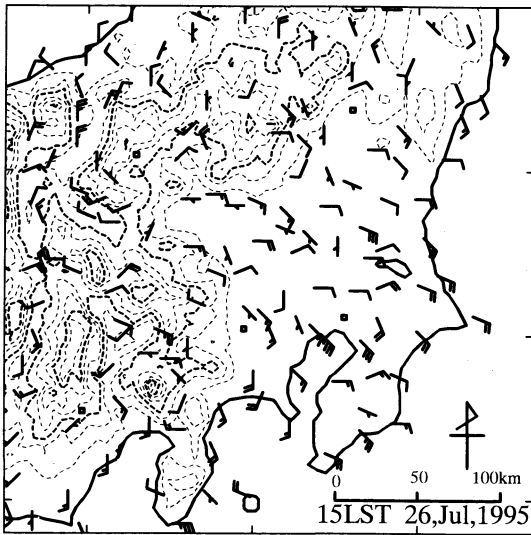
丸沼及び前橋における、26日と27日の可降水量の時間変化を第12図に示す。いずれも、6時の可降水量からの偏差で表している。丸沼では26、27両日とも6時から15時までは、ほぼ同じ経過をたどり、朝の9時から可降水量が増大した。15時までの可降水量の増大は、6 mm ないし 8 mm である。26日には15時以降に減少に転じたものの、27日には18時まで増大し、その後緩やかに減少した。27日の18時には可降水量の増大



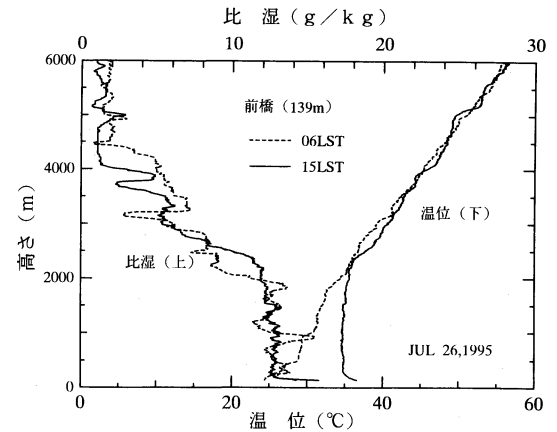
第6図 丸沼における温位(右, 下の目盛り)と比湿(左, 上の目盛り)の鉛直分布. 1995年7月26日, 破線: 6時, 実線: 15時.



第8図 第6図に同じ. ただし7月27日.



第7図 1995年7月26日15時のアメダスによる地上風向と風速(短い矢羽 1 m/sec, 長い矢羽 2 m/sec).



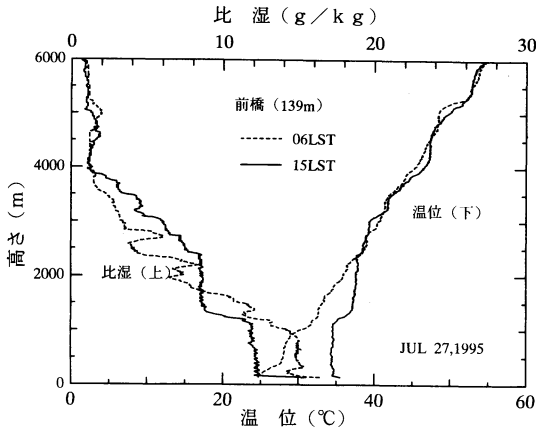
第9図 前橋における温位(右, 下の目盛り)と比湿(左, 上の目盛り)の鉛直分布. 1995年7月26日, 破線: 6時, 実線: 15時.

量は 9 mm に達した.

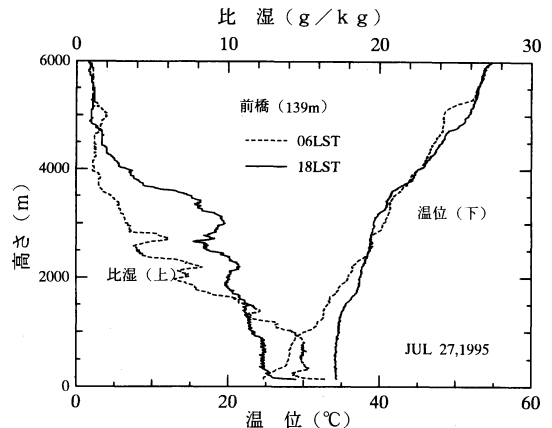
前橋では両日とも, 午前中に顕著な可降水量の減少がみられた. 26日は12時に -7 mm, 27日には9時に -5 mm の最小値をそれぞれ記録している. その後, 可降水量は急速に増大し, 21時には 4 mm (26日) 及び 7 mm (27日) に達している.

丸沼及び前橋でゾンデによって観測された可降水量の日変化は, 第2図の2次元モデルによる山頂及び谷における日変化に, それぞれ特徴がよく似ている. 丸

沼は北関東の山地のほぼ中央にあり, 日中に山岳地帯の斜面をはい昇る局地循環によって水蒸気が収束する. 山地の水平規模は約100 km であり, 局地循環による水蒸気輸送が最も顕著に表れる水平規模と一致している. 前橋は三方を山で囲まれており, あたかも谷や盆地と同様な可降水量の日変化をする. 2次元モデルでは, 午前中の可降水量の減少は, 周囲の山岳地帯に向かって吹く局地風の発散とこれを補う下降流によって, 地表面の蒸発を上回る水蒸気の流失があるためである. また, 午後遅くなってからの可降水量の増大は, 周囲の山岳に蓄積された水蒸気の移流によるものと説明できる. 現実大気でも前橋の夕方における可降水量の顕著な増大は, 関東北部や西部の山岳地帯からの移流である可能性が高い.



第10図 第9図と同じ。ただし7月27日の6時と15時。



第11図 第9図と同じ。ただし7月27日の6時と18時。

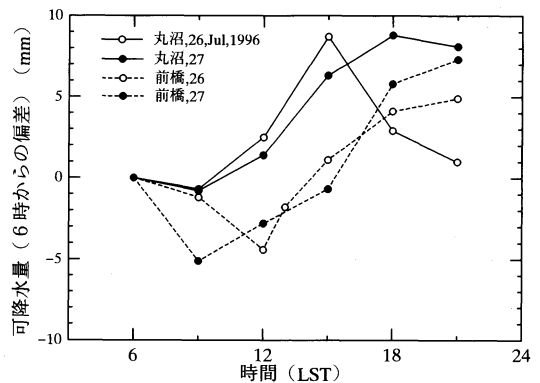
前橋では岩崎 (1996) によりマイクロ波放射計による可降水量の観測が行われている。この観測によってもゾンデ同様に午前中に最小値をとる明確な日変化が観測されている。

5. まとめ

静穏晴天であった1995年7月26, 27両日のゾンデ観測によると、6時から15時までの間の混合層内の顕熱量の増大は、前橋で大きく、丸沼では小さい。これは局地循環により山岳域から平地への顕熱輸送によるものと推測できる。また前橋では混合層が乱流混合層と準混合層に分かれて見えることがある。準混合層は最近の研究により、深い谷や盆地で存在すると予測されている。更に準混合層は局地循環によって、地表から顕熱が運ばれ、大気が加熱されて形成されていると考えられている。

可降水量は丸沼高原では15時ぐらいまでほぼ一貫して増大した。これは主として高度2000 m から4500 m での水蒸気の増加によるもので、局地循環による水蒸気輸送が4500 m の高度にまで及んでいることを示している。前橋では、両日も正午頃まで一旦減少し、その後急速に増大した。午前の減少は主として1500 m 以下の層で起こり、午後の増大は主として高度2000 m から4000 m の層でみられる。これはそれぞれ局地循環の発散による下層の水蒸気の減少と、山岳域に蓄積された水蒸気の水平移流によるものと推測され、2次元モデルにより記述されている水蒸気輸送のメカニズムと整合する。

第3図からも明らかなように夏期の降水量は地形と密接に関係する。今回の観測結果は、夏期の局地的降



第12図 丸沼及び前橋における可降水量の時間変化。

水が、局地循環による水蒸気輸送により大きな影響を受けている可能性を示唆している。実際に夏期の内陸域の降水量は、降水域が限られた広がりを持っているときだけに絞って統計をとると、夕方から夜にかけて顕著な極大を持つことが知られている (Fujibe, 1988)。この時間は局地循環により、山岳域において水蒸気をもっとも増大する時間とほぼ一致する。日射により加熱された地面からの水蒸気の供給や、顕熱による大気安定度の日変化とともに、局地循環による水蒸気の水平輸送による可降水量の日変化が、局所的な降水頻度の日変化に深く関係しているものと推定される。つくばでは、午前中には可降水量は変わらないか、やや減少傾向だが、午後遅くから夜にかけて、2000~4000 m の高度を中心に水蒸気が増大したことが2日連続して観測された。この変化は、同様な気象条件のときには繰り返しみられる日変化であること、水蒸気が増大する高度が、北関東における水蒸気の局地循環による鉛

直輸送高度にほぼ等しいことから、山岳地域の可降水量の日変化と密接に関係していることが推定できる。これについては更に詳しい分析が必要である。

6. GPS 気象学への期待

この報告によって、水平規模の大きな局地循環は可降水量の日変化、さらには降水の頻度分布と密接な関係を持っていることが明らかになった。時間単位の可降水量変動は数10 km から100 km 規模の気象を考える上で大変に重要である。いままでは水蒸気の観測手段が限られ、ごく断片的なデータしか入手できなかった。

しかし最近では、マイクロ波放射計やGPS受信機を使った可降水量の推定が可能となり、このような状況に変化が生じてきている。特にGPS受信機は地殻変動の観測のため、日本全土でアメダスに匹敵するほどの高密度で展開されていて、しかも時間単位の可降水量が常時得られる可能性が高まってきている。山岳域に観測点が少ないなどの問題点はあるものの、GPS受信機網による可降水量の観測が本格的に実施されれば、マイクロ波観測や衛星を利用した観測、あるいは現地観測などの情報と組み合わせることにより、水蒸気の挙動に関する研究は飛躍的に進歩し、ひいてはメソ気象の予測技術の向上に大きく貢献するものと期待できる。

謝 辞

本論文を作成するに当たって東北農業試験場の桑形恒男博士、群馬大学教育学部の岩崎博之助教授、筑波大学地球科学系の鈴木力英講師、西森基貴助手をはじめ筑波大学院地球科学研究科、環境科学研究科、自然

学類の学生諸氏には観測に際してご協力を頂いた。丸沼高原スキー場管理部石井勝次長はじめ社の皆様には丸沼での観測場所また宿泊施設を提供していただいた。ここに深く感謝の意を表します。本観測は筑波大学地球環境変化特別プロジェクトの一環として実施した。また「つくば域降雨観測実験」と密接な連携を取りつつ実施した。本研究の推進にあたり、文部省科学研究費補助金(基盤B)「降水の日変化と局地循環による水蒸気輸送の研究」課題番号08454128による助成を受けた。

参 考 文 献

- Fujibe, F., 1988: Diurnal variations of precipitation and thunderstorm frequency in Japan in the warm season, *Pap. Meteor. Geophys.*, **39**, 79-94.
- 岩崎博之, 1996: 個人的交流による。
- Kimura, F. and T. Kuwagata., 1995: Horizontal heat fluxes over complex terrain computed using a simple mixed layer model and a numerical model, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 549-558.
- 木村富士男, 1994a: 熱的局地循環, *天気*, **41**, 5-12.
- 木村富士男, 1994b: 局地風による水蒸気の水平輸送—晴天日における日照時間の地形依存性の解析—, *天気*, **41**, 313-320.
- Kuwagata, T. and F. Kimura, 1995: Daytime boundary layer evolution in a deep valley. Part I: Observations in the Ina Valley, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1082-1091.
- Kuwagata, T., 1997: An Analysis of summer rain showers over central Japan and its relation with the thermally induced circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 513-527.

Diurnal Variation of Precipitable Water in Clear Days over the Northern Mountains in Kanto Plain

Fujio Kimura*¹, Ryoichi Tanikawa*² and Masanori Yoshizaki*³

*¹ (Corresponding author) University of Tsukuba, Institute of Geoscience, Tsukuba 305, Japan.

*² University of Tsukuba, Master's Program in Environmental Sciences.

*³ Forecast Research Department, Meteorological Research Institute.

(Received 14 October 1996 ; Accepted 8 August 1997)

日本気象学会1997年度秋季大会の報告

日本気象学会1997年度秋季大会は、北海道大学学術交流会館および百年記念会館を会場として1997年10月7日(火)～9日(木)に行われた。参加者数(前納登録者と当日受付者の合計)は627名(一般会員362名, 学生会員183名, 非会員82名)であった。

2日目午後には、学術交流会館2階講堂において山本・正野論文賞が植田宏昭氏と小林文明氏に、堀内基金奨励賞が神沢博氏と川村宏氏に授与され、また日本気象学会奨励金が山下龍平氏と花宮廣務氏に贈呈された。その後、山本・正野論文賞と堀内基金奨励賞の受賞記念講演が行われた。引き続き、大会シンポジウム「北極圏の大気環境と物質循環」が行われた。

一般講演の発表申込み件数は352件(ただし、キャンセルが数件あった)で、過去最高であった。

その内訳は第1種講演が235件、第2種講演が30件、ポスターが87件であった。第2種講演として申込まれた講演のうち、予稿が第2種の要件を満たさない等の理由でプログラム編成時に第1種に変更したものが2件(1996年度秋季大会は8件)あった。今回は、特にポスターが目立って増加したため、大会実行委員会にはポスター会場の確保に特段のご尽力をいただいた。

会期中およびその前日と翌日には、個別のテーマによる研究会が4件開かれた。

最後に、今大会事務局として大会準備・運営にご尽力いただいた札幌管区気象台、北海道大学をはじめとする北海道支部の皆様に深く感謝の意を表します。

1997年10月講演企画委員会