## 上信越山岳域における晴天日の気温・気圧日変化合成曲線の抽出

中川清隆\*重田祥範\*渡来靖\*

キーワード:気温日変化、気圧日変化、晴天日、上信越山岳域

### I. はじめに

関東平野北西部に位置する埼玉県熊谷地方では、6月 ~9月の暖候季にしばしば猛暑(日最高気温35℃以上) が出現する。1999年~2008年の10年(3653日)間に163回 発生した猛暑のうち、静穏(地衡風速3.6m/s以下)晴天 日(日最高気温起時までの日照率80%以上)の条件下で 発生する静穏晴天型猛暑は30回(18.4%)を占める(中 川, 2010)。静穏晴天型猛暑の際には、図1に示される通 り、関東平野平均より2℃以上の高温域が関東平野北西 部に楔状に集中するとともに、その起時が太陽南中後2.5 ~3.0時間程度と遅くなることが特徴である。海岸から遠 隔の地ほど日最高気温起時が遅れ、日最高気温が高温に なるのは、海風による冷気移流が無ければ太陽南中後3 時間が日最高気温起時となるが、それ以前に海風侵入が あると昇温が停止しその時刻近傍が日最高気温起時とな るためである。一方、海風侵入時刻が太陽南中後3時間 以上となる内陸平地においては、山地に近づくにつれて 日最高気温が低下し起時も早くなる。このプロセスの詳



図1 弱風晴天猛暑日における日最高気温(左)と同起 時(右)の分布(中川、2010、より)

日最高気温は関東平野の平均日最高気温からの偏差を 単位、1℃間隔で、日最高気温起時は太陽南中時刻から の経過時間(真太陽時)を時単位、0.5時間間隔で等値線 解析してある。地形は高標高地点ほど暗く段彩表現され ている。

\* 立正大学・地球環境科学部・環境システム学科

細やメカニズムについては、日中の斜面滑昇流反流の谷 口上層における収束に伴う谷口下層大気中の暖気の断熱 加熱との見解が示されているものの(中川, 2010)、未だ 詳細には明らかにされていない。その最大の原因は、山 岳地域における既存気象観測網が極めて粗であるため、 現状把握すらできないことにある。

近年、筆者らは、関東平野北西部における猛暑形成機 構解明を目指して上信越山岳域特別観測プロジェクトを 立ち上げて同地域24地点における連続気象観測を開始し、 継続している(重田ほか,2013)。本研究は、最近2年間 における上記プロジェクトの観測結果に基づいて、上信 越山岳域の利根川-魚野川谷筋および碓氷川-千曲川谷 筋における晴天日の気温・気圧日変化曲線の抽出を試み、 その季節変化および地域差を把握することを目的とする。

## Ⅱ. 観測方法、月別晴天日気温・気圧日変化の抽出 方法とその結果

筆者らによる上信越山岳域特別観測は、2012年8月以 降、図2に●印で示す24地点で実施されている。図中の ●印の傍に付されている数字は地点番号を表し、地点1 ~9は利根川の谷筋に展開され、地点10~16は三国峠を 挟んで反対側の魚野川の谷筋に展開されている。太平洋 側の利根川谷筋では地点1の埼玉県本庄市・本庄総合公 園における標高が最も低くて55mであり、地点8の群馬 県みなかみ町・湯檜曽公園が最も標高が高くて585mであ る。三国峠1224m~585mの間は冬季のアクセス等の問題 から観測点を展開することができなかった。三国峠を挟 んで反対側に位置する魚野川谷筋では地点16の新潟県長 岡市・千秋が原ふるさとの森公園における標高が最も低 くて23mであり、地点10の新潟県湯沢町・湯沢中央公園 の標高が最大で387mである。日本海側は太平洋側以上に 冬季のアクセスが困難となるため三国峠1224m~387mの



図2 上信越山岳地域高密度特別観測プロジェクトにお ける観測点の展開

 ●:観測地点、○:地方気象台、●の傍の数字は観測地 点番号を表す

間にも観測点を展開できなかった。

確氷峠西側の千曲川谷筋では地点17の長野県千曲市・ 科学の里ふれあい公園における標高が最も低くて357mで あり、地点21の長野県軽井沢町・矢ケ崎公園が最も標高 が高くて943mである。地点21の標高は碓氷峠の標高960 mと大差ない。碓氷峠を挟んで反対側の太平洋側の碓氷 川谷筋では地点23の群馬県高崎市・鼻高第一公園の標高 が118mで最も低いが、利根川との合流点直近の下流地点 である地点1埼玉県本庄市・本庄総合公園55m~地点21 長野県軽井沢町・矢ケ崎公園943mを臼井川谷筋として解 析する。

地点24の群馬県前橋市・赤城山白樺高原の標高は約1400 mであり、利根川および碓氷川の谷斜面上端地点を代表 する観測点として選定した。

いずれの観測点も天空率が1に近いよく開けた公園で あり、観測機器は当該公園監理者の許可を得て公園内街 灯柱の地上高2mの高度にアームを北方向に突き出して 設置されている。観測項目は、気温、相対湿度および気 圧の3項目であり、気温・湿度センサー TR-3110 (T&D 社製)およびデータロガーは自作の自然通風式シェルター 内に設置され、気圧センサー TR-73U (T&D 社製) は アーム下端に設置されている。

センサー出力は毎正時を含む10分間隔でメモリに記憶 され、メモリの内容はほぼ一箇月ごとに巡回して回収さ れている。一部の地点では2011年夏から測器の展開を開 始したが、全24地点において3要素を安定して測定しデー タの回収ができるようになったのは、2012年8月からで ある。

本研究では、2012年8月1日~2014年4月30日、638日 分の観測結果を解析対象とする。先ず、欠測や異常値が 無く144個の10分間隔観測値がすべて有効な日のみを解析 対象とする。次に、三国峠や碓氷峠を越えた地域におけ る代表性に疑問はあるものの、当該地域南東部に位置す る群馬県前橋市の前橋地方気象台の日照時間が9.0時間以 上の日を晴天日とする。解析対象期間中、前橋地方気象 台において日照時間が9.0時間以上の日の日数は243日で あるので、この条件だけで約62%の日が解析対象から除 外される。24箇所の全観測点ごとに上記の方法で抽出さ れたデータの時刻別月平均を求め、晴天日における気圧 および気温の日変化とする。

関東平野北西部猛暑は山越え気流の影響が大きいこと が知られているので、本来ならば風向および風速で更な るフィルタリングを施す必要があるが、日照時間9.0時間 以上の条件のみで約62%を除外するうえに、更に欠測や 異常値が生じた日を除外するため、有効データ数が極端 に小さくなってしまう危険性が大きいので、これ以上の 細分は行わないこととする。

上述の方法により抽出された上信越山岳地域24地点に おける晴天日気温日変化と晴天日気圧日変化を末尾付図 1に示す。付図1は48個の小図から構成されており、そ れぞれの地点においける気温と気圧の日平均からの偏差 の日変化を、2012年8月1日~2014年4月30日638日間に おける有効な観測結果すべての平均、同期間中晴天日の 平均、2012年と2013年の盛夏(8月)と2013年と2014年 の厳寒(1月)の晴天日日変化を、重ねて示している。

# Ⅲ. 前橋地方気象台における晴天日における気温・ 気圧日変化の季節変化

本研究は、24観測地点が展開されている地域の南端部 に位置している前橋地方気象台における日照時間9時間 以上を晴天日判定の閾値とした。当然のことながら、本 研究の観測項目は前橋地方気象台においても現業観測さ れている。付図1と同様の処理により作成した前橋地方 気象台における気温と気圧の日変化を図3に示す。図中





図3 前橋地方気象台における晴天日の(上)気温日変 化および(下)気圧日変化

●:全期間平均、○:晴天日平均、実線:2012年8月晴 天日平均、破線:2013年8月晴天日平均、×:2013年1 月平均、+:2014年1月平均。

には6種類の日変化が重ねて示されている:実線で繋が れた●は、全期間における有効な観測結果すべての平均 である。実線で繋がれた○は、●のうち、前橋地方気象 台における日照時間が9.0時間以上となった晴天日の平均 である。さらに、2012年と2013年の盛夏(8月)の晴天 日日変化を、それぞれ、実線と破線で示し、2013年と2014 年の厳寒(1月)の晴天日日変化を、それぞれ、×と+ で示してある。平均気温および気圧の絶対値は地点緯度 および標高や季節ごとに異なるので、他地点との比較を 容易にするため、日平均気温および気圧からの偏差で表 してある。時間軸(横軸)は、本来は真太陽時で目盛る べきであるが、前橋の太陽南中時刻が1月中旬11:52、 8月中旬11:49なので、11:50JST を8月および1月の 平均の南中時刻とみなして問題ないと判断して、全デー タを10分間隔のJST で目盛ってある。

図3(上)は気温日変化を示している。前橋地方気象 台における2012年8月1日~2014年4月30日の全有効 データ(626日分)による平均の気温日変化はほぼ完全に 閉じている。日平均気温は14.2℃であり、日最高気温偏 差は4.1℃、日最低気温偏差は-3.5℃である。これに対し て、晴天日と判定された日の全有効データによる日変化 には一日以上の長周期を持つ増加トレンドが存在してい る。晴天日の日平均気温は12.7℃で、全有効データの平 均より1.5℃低温である。晴天日には日最高気温偏差が 4.1℃→5.2℃と上昇するとともに日最低気温偏差が-3.5℃ →-4.6℃と低下して日較差が大きくなり、夜間放射冷却 増大による日最低気温低下の効果が日射量増大による日 最高気温上昇の効果に勝ることが示唆される。また、盛 夏(8月)における晴天日の気温日変化パターンには、 2012年と2013年とで殆ど差異が認められないが、厳寒(1 月)における晴天日の気温日変化パターンは日最高気温 も日最低気温も2013年の方が偏差の絶対値が約0.5℃大き く、日較差に約1℃の差と1日以上の長周期の昇温トレ ンドが認められる。

日最高気温偏差起時は、全データ、全晴天日ともに13: 50と太陽南中後約2時間で大差はない。しかしながら、 季節別に見ると、盛夏(8月)は2012年が15:10、2013 年が14:50と太陽南中後約3時間と遅いのに対して、厳 寒(1月)は2013年が14:10、2014年が14:00と約1時 間早まる。日最低気温偏差起時は、全データ、全晴天日 ともに05:40と太陽南中前約6時間であるが、季節別に 見ると、盛夏(8月)は2012年が05:10、2013年が05: 20と太陽南中前約7時間と早いのに対して、厳寒(1月) は2013年が06:50、2014年が07:00と約2時間遅い。こ れは、日出時刻の季節変化に対応した変化である。

図3(下)は気圧日変化を示している。気温日変化と 同様に、前橋地方気象台における2012年8月1日~2014 年4月30日の全有効データによる平均の気圧日変化は完 全に閉じており、大気潮汐に対応して、08:10ごろと22: 10ごろに2つの極大と03:30ごろと14:50ごろに2つの 極小を持つ半日周期が認められる。全有効データの日平 均気圧が1000.7hPaであるのに対して晴天日の日平均気 圧は1002.4hPaと1.7hPa高圧である。全データに比べて 晴天日では日最低気圧偏差は-1.7hPa→-1.5hPaとほぼ 同じだが日最高気圧偏差が1.1hPa→1.7hPaと上昇するた め日較差が大きくなる。夜の気圧偏差が大きくなり、1 日より長い周期の昇圧トレンドが存在する。

盛夏(8月)における晴天日の気圧日変化パターンに は2012年と2013年とで殆ど差異が認められず昇圧トレン ドも存在しないが、厳寒(1月)における晴天日の気圧 日変化パターンには年によって異なる明瞭な1日より長 い周期の昇圧トレンドが存在し、2013年1月より2014年 1月の方がトレンドが大きい。

日最低気圧偏差起時は、盛夏(8月)は2012年が15: 20、2013年が15:40と太陽南中後約3時間30分~50分と 遅いのに対して、厳寒(1月)は2013年、2014年ともに 13:40と約1時間50分早まる。朝の高気圧偏差起時は盛 夏(8月)に早くて厳寒(1月)に遅く、夜の高気圧偏 差起時は盛夏(8月)に遅くて厳寒(1月)に早い傾向 がうかがえるが、特に厳寒(1月)は年による変動が大 きい。

付図1に示されている24観測地点の中で前橋地方気象 台最寄りの地点は北北西約3.8kmに位置する群馬総合ス ポーツセンター(地点4、標高134m)なので、付図1(d) の同地点における晴天日気温・気圧日変化の季節変化を 図3と比較してみる。638日中、前橋地方気象台の有効 データ数は気温626日分、気圧635日分であるのに対して、 群馬総合スポーツセンターの有効データ数は635日分なの で、欠測日数は前橋地方気象台の方が多い。

付図1(d)左の群馬総合スポーツセンターにおける2012 年8月1日~2014年4月30日の全有効データによる平均 の気温日変化は、前橋地方気象台と同様に、ほぼ完全に 閉じているが、日平均気温は13.4℃であり、前橋地方気 象台の14.2℃に比べると0.8℃低温である。前橋地方気象 台より北方に位置し標高も22m高いことによる系統差も 当然含まれるが、前橋市街地北西部の一角を占める前橋 地方気象台に対して利根川氾濫原のスポーツ公園内とい う立地条件の違いによる都市温度の差異も影響している 可能性が大きい。平均気温に0.8℃差異があるのに対し て、日最高気温偏差は0.1℃高く、日最低気温偏差には差 異がないので、日較差はほぼ同じである。日平均気温が 全有効データの平均より1.5℃低温であり、日較差が大き くなるとともに日変化に一日以上の長周期を持つ増加ト レンドが存在する特徴も前橋地方気象台と同様である。

日最高気温偏差起時は、全データ、全晴天日ともに太 陽南中後約2時間で大差はないが、季節別に見ると、盛 夏(8月)は太陽南中後約3時間と遅いのに対して、厳 寒(1月)は約1時間早まる。一方、日最低気温偏差起 時は、全データ、全晴天日ともと太陽南中前約6時間で あるが、季節別に見ると、日出時刻の季節変化に対応し て、盛夏(8月)は太陽南中前約7時間と早いのに対し て、厳寒(1月)は約2時間遅い。これらの特徴だけで なく、盛夏(8月)における晴天日の気温日変化パター ンの年による差異が小さいのに対して、厳寒(1月)に おける晴天日の気温日変化パターンは年による変動が大 きいという特徴も、前橋地方気象台とよく一致している。

付図1(d)右の群馬総合スポーツセンターにおける2012 年8月1日~2014年4月30日の全有効データおよび晴天 日の日平均気圧は、それぞれ、998.9hPa および1000.7hPa で、ともに標高が22m低い前橋地方気象台より1.7hPa低 圧である。これは標準状態における地上付近の層厚22m に相当する気圧層厚2.6hPaの65%程度である。気圧日変 化も、気温日変化同様に、ほぼ完全に閉じており、大気 潮汐に対応して2つの極小を持つ半日周期が認められ、 全有効データに比べて晴天日は平均気圧が上昇するとと もに日較差が大きくなり、1日より長い周期の昇圧トレ ンドが存在する特徴も、前橋地方気象台とほぼ同じであ る。また盛夏(8月)における晴天日の気圧日変化パター ンには年による差異が殆ど認められず昇圧トレンドも存 在しないが、厳寒(1月)における晴天日の気圧日変化 パターンには年によって異なる明瞭な1日より長い周期 の昇圧トレンドが存在し、2013年1月より2014年1月の 方がトレンドが大きくなる特徴も前橋地方気象台と同様 である。

日最低気圧偏差起時は、盛夏(8月)は太陽南中後約 3時間20分~30分と遅いのに対して、厳寒(1月)は約 1時間30分早まり、朝の高気圧偏差起時は盛夏(8月) に早くて厳寒(1月)に遅く、夜の高気圧偏差起時は盛 夏(8月)に遅くて厳寒(1月)に早い傾向がうかがえ るとともに、特に厳寒(1月)は年による変動が大きく なる特徴も、前橋地方気象台とよく一致している。

上述のとおり、前橋地方気象台とその最寄り観測地点 の群馬総合スポーツセンター(地点4、標高134m)にお ける晴天日の気温・気圧日変化の上述の特徴は、日平均 値は異なるものの日平均値の周りの日変化はほぼ同一と みなせる。前橋地方気象台における晴天日の気温・気圧 日変化の上述の特徴は、振幅差や微妙な位相差はあるも のの、他の23地点で共通の特徴となっている。ただし、 三国峠や碓氷峠を越えた地域における前橋地方気象台の 日照時間の代表性に夏季と冬季で大きな差異が存在する 可能性や冬季における温度移流項の差異が大きい可能性 が示唆されるので、この点に関しては、更なる検討を要 する。

# IV. 2013年盛夏(8月)における晴天日の気温・気圧日変化の地域差

前節において、盛夏(8月)には晴天日の気温・気圧 日変化は厳寒(1月)における晴天日の気温・気圧日変 化に比べて位相が遅れる傾向が認められた。本節では、





2013年の盛夏(8月)に限定して、夏季晴天日の気温・ 気圧日変化位相差の地域差を検討する。

図4は南端の観測点である本庄総合公園(地点1、標 高55m)の2013年8月晴天日気温日変化曲線に、利根川 -魚野川谷筋の他の観測点の気温日変化曲線を重ねて示 したものである。群馬県側は標高昇順に、新潟県側は標 高降順に、観測点ごとに温度偏差目盛を1℃ずつ加算し て表示してある。図5は、同様に、本庄総合公園(地点 1、標高55m)の2013年8月晴天日気温日変化曲線に、 碓氷川-千曲川谷筋の他の観測点の気温日変化曲線を重 ねて示したものである。群馬県側は標高昇順に、長野県



図 6 利根川ー魚野川谷筋の2013年8月晴天日気圧日変化



図7 碓氷川-千曲川谷筋の2013年8月晴天日気圧日変化

側は標高降順に、観測点ごとに温度偏差目盛を1℃ずつ 加算して表示してある。

利根川-魚野川谷筋(図4)および碓氷川-千曲川谷 筋(図5)のいずれの谷筋においても、日最低気温起時 には大差がないにもかかわらず、標高が増すに従って日 最高気温起時が早くなる傾向が認められ、図1(右)の 静穏晴天型猛暑日における日最高気温起時の分布と整合 的である。ただし、魚野川谷筋や千曲川谷筋の最も標高 が低い観測点では日最高気温起時が早まる傾向があるよ うにも見えるので更なる検討が必要である。

図4、5中に△で示されている赤城山白樺高原1400m

では、日較差は小さいものの日変化の位相は関東平野と ほぼ等しく、水平移流の少ない状態で日射日変化に応答 して気温が日変化している可能性が示唆される。碓氷川 -千曲川谷筋(図5)では碓氷峠960mとほぼ同高度まで 観測点が展開されているので全高度における日最高気温 起時の負の高度依存性が確認できるが、利根川-魚野川 谷筋(図4)では三国峠1224m~580mには観測点が展開 されていないので日最高気温起時の負の高度依存性が確 認できるのは標高580m以下である。このため、上信越山 岳域では、碓氷峠960m~赤城山白樺高原1400mの中間に 日最高気温起時が負の高度依存性を示す上限高度が存在 する可能性がある。

図6は、気温日変化に関する図4と同様に、南端の観 測点である本庄総合公園(地点1、標高55m)の2013年 8月晴天日気圧日変化曲線に、利根川-魚野川谷筋の他 の観測点の気圧日変化曲線を重ねて示したものである。 群馬県側は標高昇順に、新潟県側は標高降順に、観測点 ごとに気圧偏差目盛を図60.25hPaずつ加算して表示して ある。図7は、気温日変化に関する図5と同様に、本庄 総合公園(地点1、標高55m)の2013年8月晴天日気圧 日変化曲線に、碓氷川-千曲川谷筋の他の観測点の気圧 日変化曲線を重ねて示したものである。群馬県側は標高 昇順に、長野県側は標高降順に、観測点ごとに気圧偏差 目盛を0.5hPaずつ加算して表示してある。

図6、7中に△で示されている赤城山1400mでは 09:20と20:50にほぼ同じ大きさの気圧偏差の極大が出 現し、03:10と14:50にほぼ同じ大きさの気圧偏差の極 小が出現しており、半日周期が支配的である。標高の低



図8 利根川谷筋4地点における2013年8月の晴天日気 温・気圧日変化の関係

下とともに、朝の正気圧偏差の位相が3時間程度進み、 夜の正気圧偏差のピークが高原状になり、昼の負の気圧 偏差が大きくなる傾向が明瞭である。群馬県側の利根川 谷筋や碓氷川谷筋においては、標高が増すに従って日最 低気圧起時が若干早くなる傾向が認められるが、日最高 気温起時におけるほど明瞭ではない。更に、三国峠や碓 氷峠を越えた新潟県側や長野県側においては、日最低気 圧起時には位相のずれは殆ど認められない。

赤城山1400mにおける盛夏(8月)の晴天日気圧日変 化は、ほぼ大気潮汐に従っているとみられるが、それよ り標高の低い所では、大気潮汐に地形の影響による日変 化が加わり、位相の遅れと振幅増加が生じた可能性があ る。

### V. 2013年8月晴天日における気圧日変化と気温日 変化の関係

図8は、利根川谷筋の標高の異なる4地点、即ち、標 高55mの地点1(本庄総合公園)、標高265mの地点5(沼 尾川親水公園)、標高585mの地点8(湯檜曽公園)およ び標高1400mの地点24(赤城山白樺高原)における2013 年8月晴天日の気温日変化と気圧日変化を重ねて示した ものである。日中の12時~15時ごろに最大値を持つ一つ 山分布をなしている曲線が気温日変化を表しており、同 時間帯に最小値を持つ二つ山分布をなしている曲線が気 圧日変化を表している。日平均からの気温偏差(℃単位) が左縦軸に目盛られており、日平均からの気圧偏差(hPa 単位)が右縦軸に目盛られている。

先ず、気温日変化に注目する。日最低気温偏差は、標 高が1400mと最高の地点24(赤城山)が-2.6℃程度であ るのに対して他の3地点は-5.4℃~-5.0℃とほぼ等し い。一方、日最高気温偏差は、最低標高の地点1(55m) で5.5℃であるのに対して最高標高の地点24(1400m)で は4.1℃と顕著に小さくなっていて一見負の標高依存性が 存在しているが、標高585m以下の高度では、地点1(55 m)より標高の高い地点5(265m)および地点8(585 m) で、それぞれ、6.3℃および6.7℃となる明瞭な正の標 高依存性が認められる。このため、気温日較差も、最低 標高地点に比べて最高標高地点で顕著に小さいものの、 標高585m以下の高度に限ると、標高が増すに従って増加 する明瞭な正の標高依存性が存在する。日最低気温起時 は4地点とも午前5時頃とほぼ同時刻であるが、日最高 気温起時は地点ごとに異なり、最も標高の低い地点1(55 m) では15:10、標高265mの地点5では14:40、標高

585mの地点8では13:00と、明瞭な負の高度依存性を示 す。しかしながら、標高が1400mと観測点中で最も高い 地点24における日最高気温起時は14:40であり、低地平 野部と大差がない。標高585m~1400mの間には観測点が 無いので上限高度は明確に特定できないが、山地斜面下 部においてのみ日最高気温起時に負の高度依存性が存在 することが明らかである。碓氷川谷筋では碓氷峠960mま での斜面全域で日最高気温起時の負の高度依存性が認め られるので、利根川谷筋における上限高度も960mを超え ている可能性は大きいと思われる。

次に、気圧日変化に注目する。気圧日変化には大気潮 汐起源の半日周期の振動が明瞭であるとともに、半日周 期の振動の2番目の気圧極小とこれを上回る振幅の1日 周期の振動の最小が同期して日中15時頃に著しい負の気 圧偏差を生じている。図8より、気圧の半日周期の振動 は気温日変化と直接は対応していないが、日中15時頃の 気圧降下は地上気温の昇温に対応していることが明らか である。大気潮汐は高度10~70kmに存在するオゾン層 における日射吸収による加熱のため発生する半日周期を ともなう1日周期を主とする気圧の振動に強制されてい るが、緯度30°以上の高緯度地方ではオゾン層における1 日周期の振動は地上には慣性重力波として伝播しないた め、地上へは半日周期の振動が選択的に慣性重力波とし て伝播する(沢田, 1975)。地表面や対流圏の水蒸気層で も日射吸収による加熱により1日周期と半日周期の振動



図 9 上信越山岳地域における日中の地上気温昇温量と 地上気圧下降量の関係

が生じるので、これらとオゾン層から慣性重力波として 伝播してきた半日周期振動が干渉して実際の地上気圧日 変化が出現する。地上気圧の時間変化は傾向方程式に従 い、上空大気中の質量フラックスの収束・発散により規 定される。地上気温は大気下層内において最も加熱量が 大きく日変化の位相が早いので、大気全層の温度変化、 即ち密度変化さらには質量収束発散の変化の位相はこれ に遅れる。

図9は、2013年8月晴天日の気温日変化における日平 均気圧からの日中の地上気温偏差の極値 dTと気温日変 化における日平均気温からの気圧偏差の極値 dp の散布 図である。同図より明らかに、日中の地上気温偏差極値 dT は正の値をとり、日中の地上気圧偏差極値 dp は負の 値をとり、両者の間には明瞭な直線関係が存在すること が一般的である。特に、魚野川谷筋や千曲川谷筋におい て決定係数が高く、両谷筋における日中の地上気温偏差 極値 dT [℃]と気圧偏差極値 dp [hPa]の関係は、

#### dp = -0.47 dT + 1.4

というほぼ同一の関係式で表される。日最高気温が1℃ 増すと日最低気圧が0.47hPa 減少する関係にあることを 示唆しており、決定係数は0.90を大きく上回る。

このような直線関係は、Kuwagata *et al.* (1995) や Li *et al.* (2009) が議論したように、大気最下層が静水圧平 衡を保ちながら加熱・冷却される場合に出現しうる。先 ず、任意の高度の気圧、密度、気温の日平均値とそれか らの摂動を、それぞれ、*p*<sub>m</sub>,*p*', *p*<sub>m</sub>, *p*', *T*<sub>m</sub>, *T*' で表すと、 瞬間値に対する状態方程式は

 $p_{\rm m} + p' = (\rho_{\rm m} + \rho') R(T_{\rm m} + T')$ 

と表される。状態方程式は日平均値でも成り立たねばな らないので、

#### $p_{\rm m} = \rho_{\rm m} R T_{\rm m}$

も成り立つ。両式辺々除し、高次の摂動を無視すると  $1+p'/p_m=(1+\rho'/\rho_m)(1+T'/T_m)=1+\rho'/\rho_m+T'/T_m$ が成り立つ。一般に、 $p'/p_m \ll T'/T_m$ であることを考慮 すると、上式から

$$\rho' \doteq -T' \rho_{\rm m}/T_{\rm m}$$

が成り立たねばならない。即ち、密度の摂動 $\rho$ 'は気温の 摂動Tに比例しており、比例定数は $-\rho_m/T_m$ なので、 日平均からの正の気温偏差あるいは加熱量に比例して日 平均からの負の密度偏差が発生することになる。

次に、瞬間値に対する静水圧平衡の式は

$$\partial (p_{\rm m} + p') = - (\rho_{\rm m} + \rho') g \partial z$$

と表される。静水圧平衡の式も日平均値でも成り立たね ばならないので、  $\mathcal{Z}$ 

$$\partial p_{m} = -\rho_{m}g\partial$$
も成り立つから、両式の差

$$\partial p' = - \rho' g \partial z$$

が成り立たねばならない。上式を地上から大気上限まで 積分すると、地上気圧の摂動 *p*<sup>0</sup> は

 $p_0' = g \int \rho' dz \approx -g \int T' \rho_m / T_m dz$ 

と表すことができる。即ち、地上気圧摂動 $p_0$  は大気層の 平均気温の摂動T の逆符号値に比例する。図9中の回 帰直線の切片がゼロにならないのは地上気温から得られ る dT と大気全層を積分して得られる $\int T' \rho_m / T_m dz$  との 差異および種々の誤差の伝搬に起因するものと推測され る。

これに対して、関東平野側の利根川谷筋や碓氷川谷筋 においては、この関係式から外れており決定係数も低い。 大気最下層が静水圧平衡を保ちながら加熱・冷却される こと以外の要因が加わっている可能性が示唆される。

#### VI. おわりに

本研究はまだ緒に就いたばかりであり、本稿では、単 に観測事実を列挙したに過ぎない。しかしながら、山岳 域における気温・気圧の高密度連続観測に基づいて得ら れた本研究は、疎密度の気象官署観測値に基づいてなさ れた既存の研究成果(例えば、Kuwagata et al., 1990;仁 科, 2000;岩井・宮下, 2005;岩井, 2007;岩井ほか, 2008)に新たな所見を付加する可能性がある。特に、上 信越山岳地域の標高1000m以下の谷筋では夏季(8月) には標高が増すに従って日最高気温起時が早まる傾向が 存在し冬季(1月)にはその傾向が弱まり、気温日変化 のこの特性を反映して、気圧も特徴的な日変化を示すこ とが、実測値に基づいて明らかにされたことが特筆され る。この現象のメカニズムとしては、水蒸気圧減少によ る放射冷却強化や雲形成による日傘効果、放射収支の斜 面方向・傾斜依存性、さらにはそれらに起因する斜面上 方からの冷気移流等の可能性があると考えているが、い ずれも今後の重要な課題である。本研究の観測を可能な

限り継続してデータを蓄積するとともに、数値モデルに よる再現計算も援用して、課題の解明に努める所存であ る。

#### 謝 辞

本稿は、2014年度日本気象学会秋季大会および2014年 度日本地理学会秋季学術大会において発表した内容に補 筆修正を施したものである。両大会における発表の際に 賜った数々のご助言・ご教示および匿名査読者から賜っ た貴重な査読コメントは原稿作成・改良に大変役立ちま した。記して深謝の意を表します。

#### 文 献

- 岩井邦中(2007):日本の低緯度の島,山岳測候所,および中 部地方の諸地点における気圧1/3日周期成分の振幅と位相. 天気, 54, 831-836.
- 岩井邦中・宮下恵美子 (2005):中部山岳地域の諸地点におけ る気圧日変化. 天気, **52**, 831-836.
- 岩井邦中・境野千亜紀・杉山裕也(2008):日本の85地点での 気圧日変化の調和解析.天気,55,457-468.
- Kuwagata, T., M. Sumioka, N. Masuko and J. Kondo (1990) : The Daytime PBL Heating Process over Complex Terrain in Central Japan under Fair and Calm Weather Conditions.Part I :Meso-scale Circulation and the PBL Heating Rate. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 68, 625-638.
- Li, Y., R. B. Smith and V. Grubišić (2009) : Using Surface Pressure Variations to Categorize Diurnal Valley Circulations:Experiments in Owens Valley. *Monthly Weather Review*, 137, 1753-1769.
- 中川清隆(2010):内陸都市はなぜ暑くなるか~メカニズム. 福岡義隆・中川清隆(編):『内陸都市はなぜ暑いか日本一 高温の熊谷から』成山堂書店,159p.,24-48.
- 仁科淳司(2000):夏型気圧配置下における中部日本の局地気 圧系の日変化.季刊地理学,52,131-140.
- 沢田竜吉(1975):気圧の半日周期の現われる理由. 天気, 22, 315-316.
- 重田祥範・渡来 靖・中川清隆(2013):関東平野北西部で発 生する猛暑の形成機構解明を目指した広域気象観測網の構 築. *E-journal GEO*, **8**, 166.



付図1 地点別の晴天日気温日変化および気圧日変化 (a)~(x)は地点1~24に対応し、各地点において、左側に気温日変化、右側に気圧日変化を示す。 ●:全期間平均、○:晴天日平均、実線:2012年8月晴天日平均、破線:2013年8月晴天日平均、 ×:2013年1月平均、+:2014年1月平均。





11





13





付図1 (つづき)

## Composite of Diurnal Variations in Surface Air Temperature and Pressure over the Johshin'etsu Mountainous Region on Sunny Days

NAKAGAWA Kiyotaka\*, SHIGETA Yoshinari\* and WATARAI Yasushi\*

\* Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Key words: diurnal variation in air temperature, diurnal variation in air pressure, sunny day, the Johshin'etsu mountainous region