

埼玉県熊谷市南郊における冬季静穏快晴日の放射4成分・地表面温度・気温の日変化の事例解析

中川清隆* 渡来靖* 福岡義隆*

キーワード：放射4成分、地表面温度、気温、日変化、事例解析

I. はじめに

近年、夏季における熊谷を中心とする関東平野北西部の猛暑の出現が顕著である。この現象のメカニズムを解明するためには、当該現象の実態およびその背景となる風系および熱収支に関するルーチン観測および同記録の蓄積・整理が不可欠であることは、論を待たない。しかしながら、既存のアメダス観測網では、風向・風速、気温、日照時間、降水量以外の観測が行なわれておらず、気象官署である熊谷地方气象台（北緯36°9.0、東経139°22.8、標高約30m）においてさえ放射4成分どころか、全天日射量や地温すら観測されていないのが実情である。

このような状況に鑑み、立正大学地球環境科学部環境システム学科環境気象学分野は、1998年の学部創設と同時に、総合地上気象観測装置の熊谷キャンパス気象観測露場への設置に着手し、1999年までに整備が完了したのに伴い、2000年1月からルーチン観測および同記録の整備に着手した（福岡ほか、2004）。観測開始当初の観測項目は、放射収支、風向・風速、気温、地温等の基本的気象要素のみのロガー式観測であったが、2007年からは、放射4成分、地表面温度、等の観測項目を追加するとともに、データのリモート収録・管理方式の導入に着手し、2009年12月15日、ほぼハード的な整備が完了した。

データ収録・管理方法切り替え作業を開始した2009年8月17日～同年12月29日までの暖候季後半～寒候季前半の4ヶ月余りの間で、熊谷市街地に位置する熊谷地方气象台が24時間以上快晴が継続したとしている期間は、12月6日06:00～12月8日18:00と12月19日18:00～12月23日18:00の2期間のみであった。暖候季より寒候季の方が大気が安定していることを反映した結果であるが、その寒候季においてさえ、長時間の快晴継続は稀な現象であることを示唆している。熊谷地方气象台の天気の日

視観測は09時、15時、21時の一日三回のみであるため、完全快晴の継続の有無を確認することはできない。この間の熊谷キャンパス気象観測露場の全天日射データおよび下向き長波放射データを整理したところ、日界から日界までほぼ完全に快晴であったと判断できるのは、当該の期間では、12月22日の1日だけであることが明らかとなった。出現頻度が低い完全快晴日における地上気象要素の日変化の特徴を観察することができたので、その結果を報告する。

II. 観測項目および観測方法

立正大学熊谷キャンパス気象観測露場は、埼玉県熊谷市中心市街地の南南西約4.5kmの郊外に位置する。露場内には総合気象観測システムと放射・熱収支観測システムの2種の気象観測システムが存在するが、2007年より数回にわたって両システムの観測機器の更新や追加、データ収集システムの更新が行われた。2009年12月には、観測露場と熊谷キャンパス3号館とを無線LANで結び、3号館内に設置されたコンピューターからリモートで両観測システムのデータを一元的に収集・管理できるようになった。2010年1月現在、観測露場にはあわせて14種43機の観測機器が稼働しており、62項目のデータが10分値や60分値の形で蓄積されている。観測露場に関する詳細は、渡来ほか（2010）を参照されたい。

III. 2009年12月22日を含む48時間の天気の推移の概観

図1は、2009年12月21日～23日の午前9時の地上天気図である。本邦付近は2009年12月20日まで冬型気圧配置が持続し、熊谷は12月18日から冬晴れが続いていた。12月21日（図1左）、千島近海の低気圧が発達し北海道で暴風雪、日本海側の北陸や東北は大雪となったものの、

* 立正大学・地球環境科学部・環境システム学科

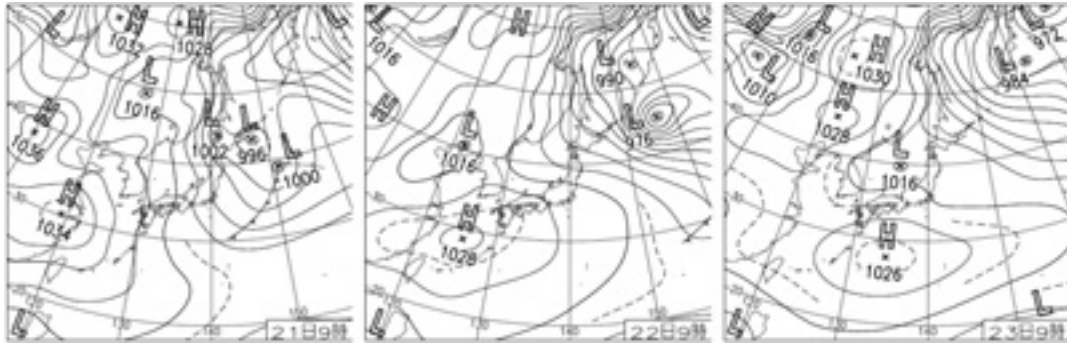


図1 2009年12月21日～23日の午前9時の地上天気図

中国上海付近に中心を持つ中心示度1034hPaの移動性高気圧が東進を始めたため、冬型の気圧配置は西から緩み始めた。これに伴い500hPaにおける-36の等温線、いわゆる“大雪ライン”は東北北部まで北上し、日本海側の雪は夕方までに峠を越えた。12月22日（図1中）、東北以北は冬型気圧配置が継続しているが、関東以西は東支那海中央まで東進した中心示度1028hPaの移動性高気圧に覆われたため袋型気圧配置から南高北低型気圧配置へ移行し、冬型の気圧配置は一週間ぶりに解消した。関東から西日本にかけては朝方激しく冷え込み終日静穏晴天が続いた。また、上空の寒気は東に抜け、500hPaにおける-30等温線は東北まで北上したため、日本海側の雪も小止みになった。12月23日（図1右）、移動性高気圧は四国沖まで東進したものの、日本海に小低気圧が発生して同日夕方には東北北部を通過したため、北海道の日本海側は寒気移流に伴う降雪、本州の日本海側は下層に流入した暖気による降雨となった。熊谷の日最小相対湿度は32%となり6日ぶりに30%を上回った。

IV. 観測結果と考察

図2に、熊谷キャンパス気象観測露場における2009年12月21日00:00～12月23日24:00の観測値の時系列を重ねて示す。

図2上段は、放射4成分と地表面温度、接地気温および地上気温であり、下段は風向・風速である。放射4成分は上段に面グラフで示されており、薄い灰色が上向長波放射フラックス密度、白色が下向長波放射フラックス密度、濃い灰色が全天日射フラックス密度、中間灰色が反射日射フラックス密度に対応しており、この順に前面に表示してある。

全天日射フラックス密度（濃い灰色）の時間変化の平滑度に着目すれば、日中の雲の有無の判断は容易である。12月22日の日出時刻、太陽南中時刻、日没時刻は、それ

ぞれ、6:54.5、11:40.8、16:27.2であるから、全天日射は6:54.5～16:27.2の間のみに出現し、11:40.8にピークを持つ、滑らかな一つ山曲線にならねばならない。図2より、前21日午前中には日射が雲で遮られたことが明白な全天日射フラックス密度および反射日射フラックス密度の乱れが認められ、翌23日南中直後にもかすかな全天日射フラックス密度の乱れが認められるので、この3日間の全天日射フラックス密度の時間変化でこの条件を満たすのは12月22日だけであることは明らかである。

雲の有無の把握には下向長波放射フラックス密度の時系列解析が有効である。地表面における下向長波放射フラックス密度は、各層の大気から射出されて地表面まで透過してきた大気放射フラックス密度成分と雲底から射出されて地表面まで透過してきた雲放射フラックス密度成分から構成されている。大気層の長波放射射率・吸収率はほぼ水蒸気量により定まるが、短時間間隔の著しい時間変化は生じ難いため、大気放射フラックス密度成分は絶対温度で表した気温の4乗の日変化に対応した滑らかな日変化を示すのに対して、雲放射フラックス密度成分は雲が無ければ存在せず、雲が存在する場合にはその雲底温度の高低に依存して激しく変動する。一般に、雲底温度は雲底高度が高いほど低温であるため、天空が下層雲により広く覆われると大きな雲放射フラックス密度成分が付加されて下向長波放射フラックス密度が著しく増加し、雲底温度が高温で雲量が多い場合には、下向長波放射フラックス密度が地表面から射出される上向長波放射フラックス密度を上回る事態すら生じさせる。例えば、12月23日18:30～19:40の間、下向長波放射フラックス密度が255.7W/m²から急上昇し、19:30には279.3W/m²に達する変動が認められる。これに対応して、地表面から射出される上向長波放射フラックス密度も増減しているが、その変化幅はごく僅かであることから、この現象は、この時間帯だけ下層雲が上空を覆ったため、と判断される。12月21日02:00～06:50の間にも、

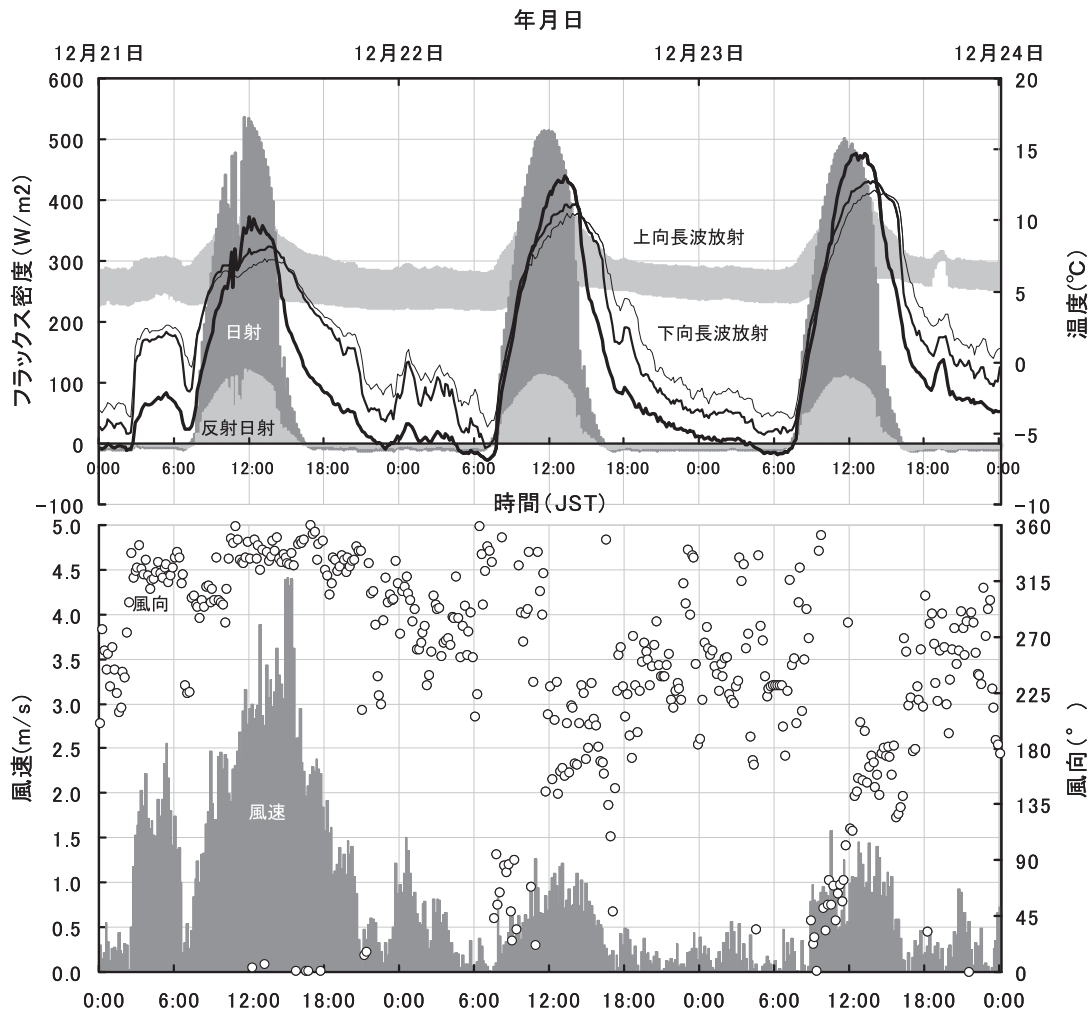


図2 2009年12月21日～23日の(上)放射・温度、(下)風向・風速の時系列

224.6W/m²から245.77W/m²への下向長波放射フラックス密度の増加が認められるが、12月23日夕刻のようなジャンプ状の変化ではないことと、地表面から射出される上向長波放射フラックス密度もほぼ同様の変化を示していることから、雲の影響だけによる変化とは断定し難い。8月17日～12月29日の全時系列データをグラフ化し(図省略)、上記のような観点から観察した結果、下向長波放射フラックス密度が上記のような付加的放射を含まず、滑らかな日変化を示したのは、12月21日12:00～12月23日18:00のみであった。

主として上述の2項目、即ち、全天日射フラックス密度と下向長波放射フラックス密度の時系列変化に関する観察結果に基づいて、本研究の事例解析対象期間が決定された。太陽南中前と南中後の非対称な全天日射フラックス密度日変化は、好天による対流混合層の発達に伴う日射透過率の減少を反映している可能性があるが、この点に関する検討は次の機会に譲りたい。

図2上段には実線が3本示されている。太実線は赤外

線温度計で測定された地表面温度であり、中間の実線は地表面ごく近傍の接地気温、細実線は地上高約2mの地上気温である。完全快晴が継続したと思われる12月21日12:00～12月23日18:00の間のこの三者の時間変化を観察すると、日最低温度は日出直後の07:00に現れ、地表面温度は-6.88、接地気温は-5.92、地上気温は-4.57である。地表面を離れるほど昇温率が大きく、10:30ごろまで三者の温度はほとんど区別できない状態で昇温した後は、気温の逡減状態が明確になった。地表面温度は13:10に日最高温度13.12に達し、接地気温と地上気温は14:10に、それぞれ、11.23と10.58に達した。瞬間的な日最高気温は同時に観測されたが、傾向的には高高度ほど位相が遅れているように見える。日最高温度から低下を始めた地表面温度と気温が等しくなる時に日最高気温が出現しているように見える。12月22日の太陽南中時刻が11:40.8なので、地表面温度は約1時間30分遅れて日最高温度に達し、気温は2時間30分遅れて日最高温度に達したことになる。これは、水平移流

のない平坦面においては、地表面温度および気温の日変化の位相は太陽南中後約3時間で日最高温度に達する、とする中川（2010）の見解と整合的である。

図2下段の棒グラフは風速を示す。12月21日の日中は風が強かったことが分かる。同日02:30、突然北西の風が吹走し始め、06:30~08:00の間一旦途絶えたが、20:30まで風速1.0m/sを越える風が吹き続けた。太陽南中時~日没時の風速は3~4m/sに達した。その後、夜半にかけて風向は反時計回りに回転して日出時まで西風に変わった。12月22日の日出~午前中は北~東へ時計回りに風向が変わり、南中~18:00ごろまでは風速1.0m/s以下の弱い南風が吹走した。その後は日出までは、風速0.5m/s以下の極めて弱い西風が吹走したが、風向はかなりばらついた。12月23日出~午前中は、12月22日と同様、北~東へ時計回りに風向が変わり、南中~18:00ごろは風速1.0m/s以下の弱い南風が吹走した。

この南寄りの微風の起源は、海風循環ではなく、谷風循環である可能性が高いと思われるが、詳細な解析を待たないと正確な見解は示せない。また、日出前~太陽南中時にかけての北~東への時計回りの風向変化を引き起こしている東寄りの風系についても、観測事実からだけでは的確な記載ができない。

夜間の地表面温度および気温の変動は、時間の経過とともに降温する傾向にあるものの、風速の変動とよく対応して振動している。12月21日~22日の夜と翌12月22日~23日の夜の温度の時間変化を比べると、大きな差異が認められる。後者の12月22日~23日の夜が比較的単調に降温しているのに対して、前者の12月21日~22日の夜は、夜半の20:20~00:20付近に突然大きく降温した後今度は04:10にかけて昇温している。この時間帯の下向長波放射フラックス密度には、気温の変動に対応する顕著な変化は見出せないため、この特徴的な温度の時間変化は雲の影響ではなく風の影響が大きいと推測される。図2からは、風速が増加すると地表面温度および気温が昇温し、逆に、風速が低下すると地表面温度および気温が降温する関係にあることが読み取れる。風速増加の際には、接地気温と地上気温の温度差が縮小していることも大きな特徴である。風速が増加しても地表面の放射冷却は継続されているため地表面と接地気温との間の温度勾配は維持されるが、接地気層そのものは攪拌されて逆転層が破壊されて等温位の混合層が形成される、と推測される。

12月21日02:50~06:50および12月23日18:50~20:40に顕著な昇温現象が認められるが、これらは、上記の

12月21日~22日の夜および翌12月22日~23日の夜の昇温とは原因が異なる可能性がある。12月21日02:50~06:50は、雲による顕著な下向長波放射フラックス密度の増加を伴うこともなく、それまでの西風微風状態から一転して風速1.5m/sを越える北西風の吹走を伴っている。夜間ではあるが、越後山脈を横切る山越え気流に伴うフェーン効果と攪拌による逆転層破壊に伴う昇温の可能性はある。一方、12月23日18:50~20:40は、顕著な下向長波放射フラックス密度の増加を伴うとともに、接地逆転層の破壊は生じていないので、下層雲の形成による放射冷却の抑制に伴う昇温と推測される。

V. 数値モデルによる再現計算

2009年12月21日00:00~12月23日24:00の熊谷キャンパス気象観測露場における地上気象データに認められた特徴について詳細に検討する目的で、領域気象モデルによる再現計算を試みた。再現計算に用いたモデルは、NCAR (National Center for Atmospheric Research ; 米国大気研究センター) を中心に開発されている WRF (Weather Research and Forecasting) モデルの Version 2.2である (Skamarock *et al.* 2005)。

WRF モデルによる計算領域を関東平野および中部山岳域を含む東西390km、南北390kmと設定し、水平格子は3km四方、鉛直層は37層（最下層は地上高約30m、最上層は100hPa）とした。モデル計算は、2009年12月19日21時（日本時間）を初期値とし、12月24日3時までの102時間分を実行し、12月21日00:00~12月23日24:00の計算結果を解析に用いた。モデル計算の積分間隔は18秒とし、境界値は6時間ごとに与えた。初期値・境界値には主に気象庁 MSM (Meso-Scale Model) データの0時間予報値を用いたが、地温と土壌水分についてはNCEP (National Center for Environmental Prediction ; 米国環境予報局) のFNL (Final analysis) データを、海面水温についてはNOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration ; 米国海洋大気庁) のOISST (Optimum Interpolated Sea-Surface Temperature) データを利用した。

図3は、立正大学気象観測露場に最も近い格子点における、モデル計算結果の時系列である。地上気温については、12月21日や23日日中に関しては比較的再現性が良いが、12月22日日中は、日最高気温起時は太陽南中時刻の11時40分ごろから3時間以上遅れた15時ごろとなり、図2の観測値に比べると2~3低くなっている。

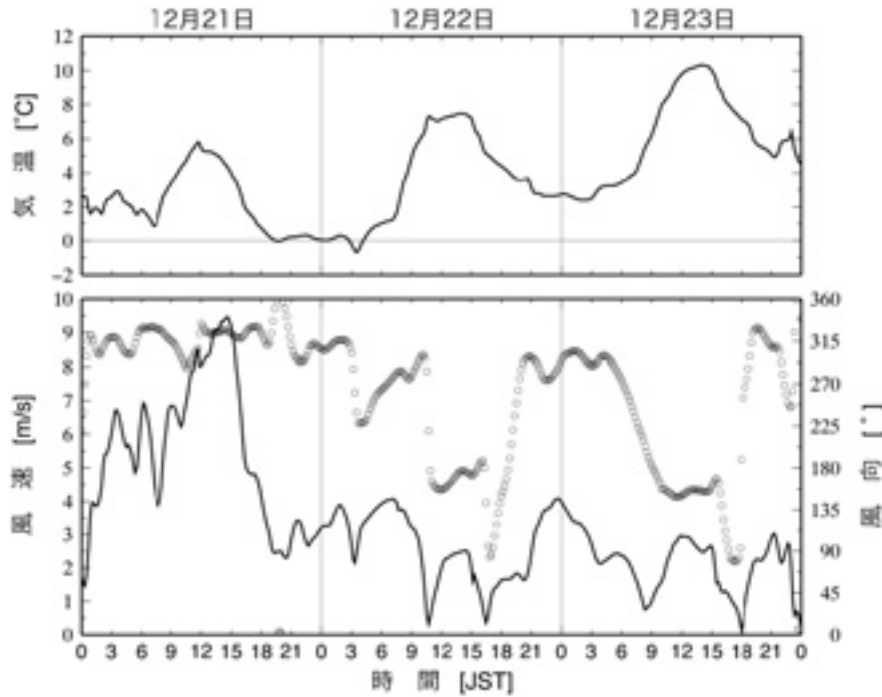


図3 立正大学気象観測露場に最も近い格子点における、地上2m気温（上段）と地上10m風向・風速（下段）のモデル計算結果の時系列。下段は実線が風速、白丸が風向を示す。

12月22日や12月23日の夜間を見ると、観測値では-5前後まで気温が低下している一方、モデル結果ではあまり下がっておらず、12月23日早朝の日最低気温起時は日出時刻より3時間以上早い午前3時ごろとなっており、日最低気温は2程度である。その結果、モデル結果の日較差は観測値と比べて小さくなっている。風に関しては、12月21日は北西風がほぼ一日中強く、12月22日や12月23日は夜間に西寄りの風、正午から夕方にかけては南寄りの風といった特徴は概ね再現されている。しかし、12月22日、12月23日の午前中に実測された北～東への時計回りの風向変化はモデル結果には見られず、12月22日午前中は西～北西寄りの風であり、12月23日午前中は北西～西～南への反時計回りの風向変化となっている。また、図2の観測値の測定高度がモデル結果に比べて低い（地上約5m）ことも一因と考えられるが、モデル結果のほうが観測値に比べて全般的に風速が強くなっている。

上述の如く、数値モデルによる現実場の再現性の点では十分であるとは言いが、その中でも比較的再現性の良かった12月22日および12月23日の正午～夕方の南風の成因を中心に、モデル計算結果を用いて検討する。

図4は、12月22日における地上高約30m付近の気温、水平風のモデル計算結果の水平分布である。午前中には、秩父盆地東側の関東平野の縁辺部を中心に地上風の発散域が見られ、そこから関東平野北西内陸域にやや強い西寄りの風が吹く領域が広がっている。その領域に対応し

て、地上気温が周囲に比べて高い領域が広がっている。この地上風と高温域の成因は関東山地越えの気流に伴うフェーンと考えられるが、その支配下にあるはずの立正大学気象観測露場の観測値とは合っておらず、現実にフェーンが吹いていたか否か疑わしい。その後、熊谷付近は10時にはこの西寄りの風が弱まり、12時以降になると南寄りの風が吹いている。この風は、内陸の平野縁辺部を中心に吹いていることや、東京湾や相模灘の海岸付近は正午から夕方にかけても風が非常に弱いことから考えても、海風の影響であるとは考えにくい。

12月22日12時におけるモデル計算領域全体の地上風と海面更正気圧の分布を図5に示す。中部山岳域で低気圧、関東平野で高気圧という分布が見られており、熱的局地循環の存在を示唆している。極端に低い海面更正気圧は、北アルプス、中央アルプス、南アルプスの稜線付近に集中しており、越後山脈や北関東山地、関東山地の稜線部も低海面更正気圧の中心部となっている。結果的に山地部では海面更正気圧に顕著な標高依存性が存在しており、関東平野には熱的高気圧の中心が位置する東京付近から関東平野北西部に向かって気圧の尾根が延び、東京付近を中心とする時計回りの弱い地上風系が形成されているとともに、その風系は山麓斜面滑昇流を形成している。また図5全域のスケールの地上風系に着目すると、中部山岳域の影響で強い西寄りの風が、東海沖および北陸沖に迂回させられているような様子が見られ、関東平野は

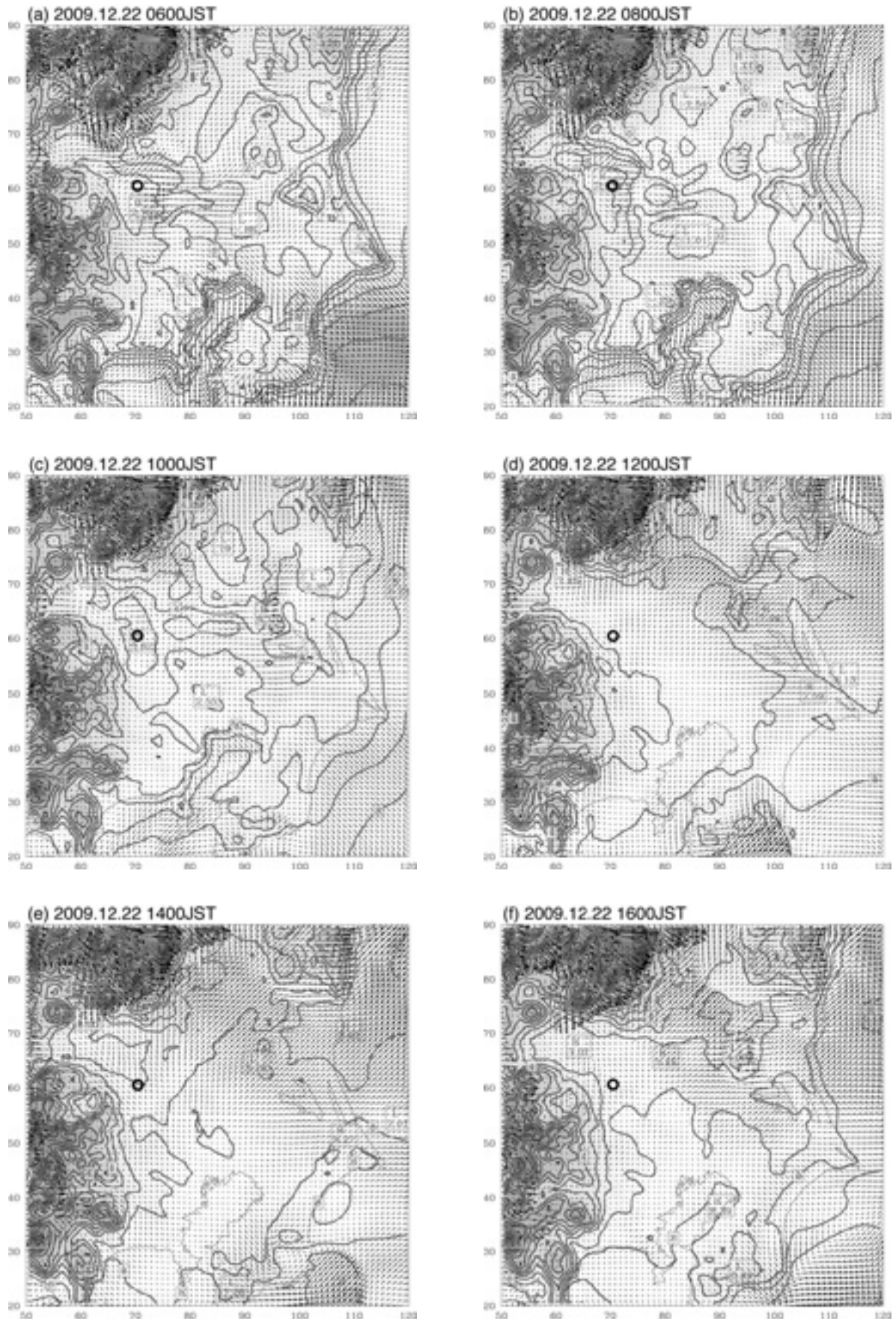


図4 モデル計算結果の水平分布。等値線は地上高約30mの気温（1 間隔）、矢印は地上高約30mの水平風。陰影は標高、黒丸は立正大学観測露場の位置を示す。

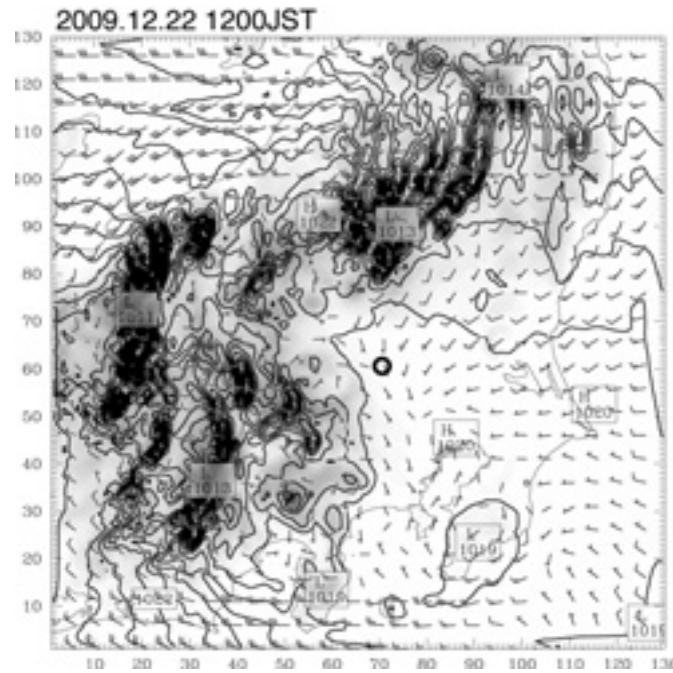


図5 2009年12月22日12時のモデル計算結果の水平分布図。等値線は海面更正気圧(1hPa間隔)、矢羽根は地上高約30mの水平風。陰影は標高、黒丸は立正大学観測露場の位置を示す。

風下のだよみ域のような状態となっているため比較的風が弱いようにも見える。このような力学的要因も、22日午後の風系に影響を与えていた可能性がある。12月23日午後に関しても、12月22日午後とほぼ同様なモデル結果となっていた(図省略)。

VI. おわりに

2009年8月17日～12月29日までの暖候季後半～寒候季前半の4ヶ月余りの間にほぼ完全な完全快晴静穏日は一回しか出現しないことが、実測データの整理から明らかになった。その極めて稀な事例に相当する2009年12月21日00:00～12月23日24:00の事例解析を行なった。その結果、地表面温度および気温の日最高気温起時は太陽南中時から約2時間30分の遅れが存在することが確認されるとともに、夜間の地表面温度および気温は風速の増加とともに一時的に増加するとともに下層大気の接地逆転強度は緩和されることが明らかになった。

領域気象モデルWRFによる観測場の再現計算を試みたところ、風速の過大評価や気温日較差の過小評価等の問題点は残るが、日中の比較的大きな日射-気温日変化位相差や風系のおおよその日変化は再現でき、日最高気温起時付近の海面更正気圧に明瞭な標高依存性が見出された。夜間の地表面温度および気温の風速依存性振動等

の微気象的な特徴の再現性は低いので、WRFモデルそのものや境界条件の改善が今後の大きな課題として認識された。

このような知見は、今回の観測システムおよびデータのリモート収録・管理システムの整備により、比較的容易に取得された。完全快晴静穏日の出現確率は1年間に数回程度であると予測されるので、今後、本システムにより観測データを蓄積し解析を実施することにより、本事例解析結果の妥当性に関する詳細な議論が可能になることが期待される。

文献

- 福岡義隆・新井正・丸本美紀(2004):熊谷市の都心と郊外の気候特性(第1報).地球環境研究,6,117-124.
- 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のか』成山堂,24-47.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A description of the Advanced Research WRF version 2. *NCAR Technical Note*, 468+STR, 88p.
- 渡来靖・丸本美紀・福岡義隆・中川清隆(2010):立正大学総合気象観測システムおよび放射・熱収支観測システムの拡充について.地球環境研究,12.(印刷中)

A Case Analysis of the Diurnal Variations in Four Radiative Components and Ground Surface and Air Temperatures at the Suburbs of Kumagaya City, Saitama Prefecture, North-western Kanto Plain, on a Cloudless Calm Day in Winter

NAKAGAWA Kiyotaka^{*}, WATARAI Yasushi^{*} and FUKUOKA Yoshitaka^{*}

^{*}Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

keywords: four radiative components, ground surface temperatures, air temperatures, diurnal variations, case analysis