

東アジアにおける局地循環系の出現と変化

田上 善夫

Appearance of local air circulation and its change in Eastern Asia

Yoshio TAGAMI

E-mail: tagami@edu.u-toyama.ac.jp

Abstract

By the global warming, environment of Eastern Asia is changing greatly. In this study, an important air environment, a local circulation system, is analyzed. The day when the inner product between the wind vector of 15 o'clock and that of 03 o'clock becomes negative is defined as "Wind direction reversing day". WINDAS and MSM data of recent 2 or 3 years are used to extract the days. First of all, the distribution of appearance rate of wind direction reversing days in the Japanese Islands and Eastern Asia are clarified. Next, the seasonal changes of their appearance rate in the case region are analyzed. Also the surface wind system and the atmospheric pressure distribution of the case day are analyzed. Then, the results are compared with the former studies on local circulatory system. Following from the comparisons are; 1) the appearance rate of wind direction reversing day is higher in the inland than in the coastal area, and is especially high at plains near the mountain foot and mountain slope. The rate rising in these regions corresponds to the local circulation, like the mountain and valley wind, at individual basin. And it also corresponds to the wide area circulation that occurs in the entire region with the mountainous district and a lot of basins and valleys in it, like the one around a thermal low that develops in the inland. In addition, it may correspond to the diurnal circulation between the Japanese Islands and those surrounding seas. 2) Besides the Chubu region, northern part of Korean peninsula and Taiwan are also typical regions where a local circulation system develops. However, there is a difference in the main scale among the circulations that develop in each region. In Taiwan, smaller circulations develop around Taiwanese mountain range where many basins and valleys come together. In the northern part of Korean peninsula, main circulations develop between the continent and the ocean.

キーワード：東アジア，地球温暖化，局地循環系，日変化

keywords：Eastern Asia, global warming, local air circulation, diurnal change

I はじめに

温暖化は地球規模での問題であると同時に、東アジアのような地域においては、そこに特有の側面をも含んでいる。最近の2010年夏季には、日本では記録的な猛暑に見舞われ、それにより都市部では電力供給が逼迫し、平野部稲作地帯では一等米比率が低下し、山間部では獣害が増加し、山地森林でも翌春にスギ花粉飛散量の増大などがもたらされた。一方でそれに続く2010/11年冬季には低温が継続し、それにより積雪量の増加や野菜類などへの影響や、さらに海況にも大きな影響がもたらされた。こうした変動とその影響は、最近の日本でのように、地域の自然的基盤にもとづく生産構造とくに顕著に現れている。東アジア、とくに日本や朝鮮半島および中国東部は、一般に温帯モンスーン気候とされるが、自然的基盤が類似する地域であるために、変動や影

響もおおよそ類似するものと捉えられる。

こうした変動や影響が広域において類似するとしても、さらに個々の局地内においても同様というわけではない。たとえば環境問題でも、四大公害病の一つの四日市ぜんそくでは、局地的に激甚な被害がもたらされた。もちろん汚染質の排出に1次的な原因があるが、それにより顕著な被害がもたらされたことには、汚染質の輸送が大きくかかわっている。さらにこうした局地的要因にかかわる局地循環系は、温暖化の下で都市をはじめとした地域の気候や環境に、大きく影響する。汚染質輸送と同様に、熱輸送が行われるためであるが、その局地的な差異が原因となって、さらに温暖化への影響が生ずることも考えられる。たとえば昇温の顕著な地域に都市が存在するならば、冷房に要するエネルギーが増大することになる。そうした環境への不適切な対応による悪循

環を解消するためには、温暖化の地域的な発現状態を明らかにすることを必要とする。

大気循環にはさまざまなスケールのものが複合しており、東アジア地域での循環はグローバルな循環の一環として捉えられる。一方前述のような局地的な差異は、それぞれにおいての局地循環と深くかかわっている。こうした局地循環を把握するには、時間的・空間的に密度の高い観測網を必要とする。また各地域で共通した観測が行われていることも必要である。これらの実測値を得ることはできないが、気象庁の解析値にもとづいて、局地循環の解明を試みた(田上善夫, 2011)。

局地循環系は、日変化が明瞭であることが特色であるが、その発生もこの日変化にもとづいて捉えていくことができる。およそ数十キロの範囲で発生する局地現象であるとともに、東アジアのような広域において、とくに発生の多い地域というものも存在する。そのために、こうした広域内各地の局地現象について、その類似と相違について明らかにし、さらにそれらが環境としてもたらす影響について、相異を検討することを試みる。

II 研究方法

1. 対象地域

東アジアに広がる温帯モンスーン気候は、とくに降水量の季節変化が共通するが、その範囲において大気大循環や総観規模の擾乱が同じではない。さらに日変化する局地循環系は、東アジア内でも地域的差異が大きい。

局地循環系の日変化は、日中の太陽放射と夜間の長波放射に起因する地表付近の温度差にもとづいている。そのため局地循環系は、海や湖などの水体と陸面、山地と平野、また都市と郊外などの間で発達する。とくに山岳の寄与が大きい。こうした地域は、東アジアに多く、日本列島、朝鮮半島、台湾などに広がる。

そのため本論では、東アジアでもとくに東経120° 以東の地域を扱う。さらに山岳の多い、日本列島の中部地方、朝鮮半島北部、台湾をとりあげて、それらの地域における局地循環系を比較していくことにする。

2. 資料

気象庁の局地的気象監視システム WINDAS:

Wind Profiler Network and Data Acquisition System は、全国の31地点でドップラーレーダーにより上層風を観測するもので、2001年4月に開始された。観測地点の水平間隔は133kmで、地表から400m以上の風を観測する。このウィンドプロファイラでは、真上の高層風が観測される(加藤美雄・阿保敏広・小林健二・泉川安志・石原正仁, 2003)。

上層風について、この WINDAS 以前より高層気象観測が行われているが、国内18地点と海洋観測4隻によるもので、水平間隔は350km、また1日2回の観測であり、データが限られる。WINDAS は、10分間隔の観測であり、とくに時間密度が高い。降水のない時には上空約3~6 kmまで観測し、降雨時には雨粒により散乱した強い電波により、さらに上空の約7~9 kmまで観測する。

気象庁のメソ数値モデル MSM: Meso Scale Model は、水平格子間隔10km、鉛直40層で、2001年3月に開始された。上述のウィンドプロファイラの観測値も、1日4回の予報開始時刻、00, 06, 12, 18UTC で、初期値に使われている(加藤美雄・阿保敏広・小林健二・泉川安志・石原正仁, 2003)。

現在の MSM の地表データは、東経120°-150°、北緯22.4°-47.6°の、481×505の格子点から構成される。そこでの1時間ごとの、気圧や気温、風、降水量など11の気象要素値が格納される。全国にわたり1976年から AMeDAS で、気象観測が行われているが、その水平間隔は約30kmであり、MSM の水平間隔5 kmにくらべて粗い。

また2001年4月から、毎時下層風解析、現在の毎時大気解析が始められた。アジア域の高度22kmまで、水平間隔5 kmでの風と気温について、MSM の2~4時間予報値を、ウィンドプロファイラ、アメダス、毎時衛星風の観測値も利用して、修正する(室井ちあし、藤田匡、石川宣広, 2008)。

局地循環系は日変化をするために、日最高気温の出現する15時前後が重要である。前述の高層風観測は実測値であるが、09時および21時の観測であるため、本論文では WINDAS を用いることにする。それには京大生存圏研のサイトより WINDAS データ速報値解析データ、日別ファイルを利用する。期間は2008年5月から、最近の2011年4月までの3年間とする。なお集計にあたり、その RAOB 形式のファイルより ASCII 化した。

また WINDAS の限られた観測地点を補うため、

水平間隔 5 km の MSM を用いることにする。局地循環系の日変化から重要で、予報開始時刻でもある 15JST (06UTC), 03JST (18UTC) を中心にする。

期間は、2009年5月から、最近の2011年4月の2年間を、対象とする。なお同データは、京大生存圏研のサイトより、MSM-Sを用いる。同データは netCDF 形式であるが、集計する場合には netCDF-4.1.1 を利用して ASCII 化し、とくに気圧、相対湿度、気温、風の u 成分、風の v 成分の 5 要素を、通常の単位に変換して用いた。

なお WINDAS および MSM で対象とした期間には、観測史上最高気温を記録した2010年の夏季、また低温の継続した2010/11年の冬季が含まれている。

3. 解析方法

はじめに、局地循環系の出現について、15時と翌日03時 (JST) の風向がおおよそ反対となる場合、から捉えることにする。ここでは東西風 u, 南北風 v より示される風ベクトルについて、両時刻のそれらの内積値を指標とする。この内積値が負となる場合、すなわち風向差が90°より大きい場合、を風向反転日とする。

WINDAS での、最初の観測高度である地表から 400m では、風には局地的な影響が少ないと考えられる。日本列島周辺について、風の概要を把握するため、まず WINDAS の03時と15時の風ベクトルの内積値を計算する。これより、内積値が負の日数を集計する。

さらに水平間隔 5 km で、日本列島周辺の広域を範囲に含む MSM データを用いる。日中と夜間での風の反転を抽出するために、WINDAS と同様に格子点ごとの風の u, v 成分から、15時と03時のベクトル内積値を求め、その値が負となる場合を抽出する。これより対象期間の24ヶ月について、全期間にわたる出現率の分布を明らかにする。

日夜で風向が反転する日は、海上では沿岸部付近を除いて、月の半分を超えることはない。一方陸上では、出現日数は月の4分の3を超え、中には月の全日におよぶところも現れる。またその出現地域は比較的散在するが、山岳や海洋との位置関係が影響しており、とくに山地の周辺などに密集域が現れる。この特色は局地循環である、海陸風や山谷風の出現と対応している。そのため、この内積値は、局

地循環の指標として有効であると判断した。

さらに出現の顕著な3地域について、季節別に分布を明らかにする。さらに、局地風の出現が典型的である日を事例として、風系と気圧の局地的な分布について、明らかにする。

III 風向反転日の出現

1. 日本列島での出現の変化

WINDAS データより、地点ごとに前記の風ベクトルの内積値を計算する。次にその値が負となる地点の、全31地点に対する出現率を求める。さらに2008年5月から2011年4月の3年間について、各月ごとにその出現率を求める。出現率は10月から3月の寒候期には低く、4月から9月の暖候期には高くなる。とくに4月から6月にかけて高く、6月に32%ほどになる。一方低いのは1月で、18%ほどである (図1)。局地循環系は、夏季の太平洋高気圧や春・秋の移動性高気圧下での気圧傾度の小さいときに発達するが、このように春季に出現がピークに達することは擾乱通過前後での風向の反転が含まれている可能性が考えられる。

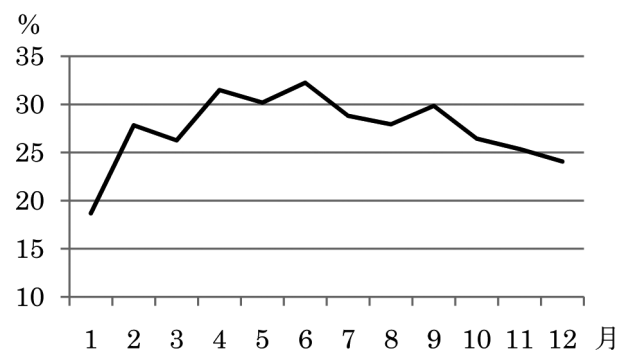


図1 風向反転する WINDAS 地点の平均月別出現率 (2008.05-2011.04, 31地点×(31)日×3年に対する率)

対象とした3年間では、暖候期では2010年がやや高いが、大きな差はない。一方寒候期では2010-2011年にとくに低くなる (図2)。最高は2008年7月で約34%に達する。猛暑であった2010年の8、9月は、2008、2009年にかけてやや高い。一方、最低は2011年1月の15%である。この前後は低温が長く継続した期間に対応している。

日々の出現率は、大きく変動する。ただし、最高でも65%程度である。60%を超える場合は、2、4、5、11、12月に起きている。ただし2日連続することはない (図3)。海陸風/山谷風であれば、出現率の高い日が連続すると考えられ、とくに2月な

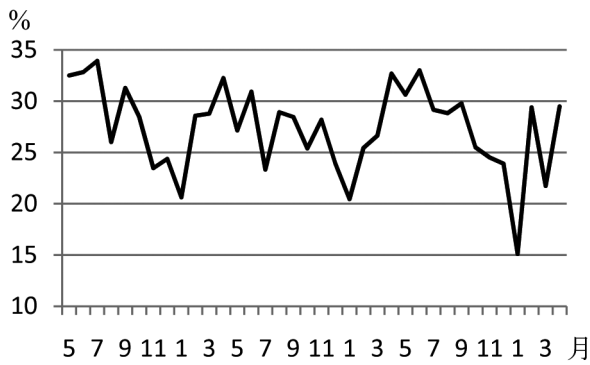


図2 風向反転の WINDAS 地点の月別出現率
(2008.05-2011.04, 31地点×(31)日に対する率)

どでの出現率の高い日は、擾乱の通過の影響が考えられる。また局地循環系の出現は、最大でも全国の2/3以下の範囲となるが、この地表から400mという高度は、海陸風/山谷風の層より高い場合もあり、発達した局地循環系のみを示すことが考えられる。

2. 出現地帯とその季節的振動

この風向反転日の出現は、全国的には局地循環系のそれにおよそ対応している。局地循環系の出現は地域差が大きいので、風向反転日の地域差を明らかにする。WINDASの地点別に、風向反転日の季節別の出現率を求め、分布を示す。通年にわたり、本州中央部から九州東部にかけて出現率の高い地点が現れる。一方東北日本や九州西部から南西諸島では低い。春季には、本州から九州の太平洋岸で、とくに高くなる。夏季には、太平洋岸のほか日本海側と北日本でも高くなる。秋季は春季とよく似る。冬季は全体に低く、日本海側でとくに低くなる(図4)。WINDASの31地点は、帯広、熊谷、河口湖の3地点以外は全て沿岸部に位置している。このことは、

局地循環系でも山谷風より海陸風の影響を示すことになるが、風向の反転は島嶼部や一般風の風上側地域では出現しにくいことを示している。

出現には季節変化があるが、地点により出現率に違いがあるため、地点別に出現率が最高となる月を示す。およそ南西諸島から関東南部では2月、3月に最高となる地点が多い。関東を除いた西南日本と東日本の太平洋側では、4月から6月が多い。一方日本海側では7月と8月が多い。さらに太平洋側では9月、10月が最高となる地点が現れる(図5)。このことは出現の多い地帯は、列島の走向に沿って延びていることを示している。すなわち冬季の太平洋から春季の日本列島太平洋側に進み、さらに夏季には日本列島の日本海側に達した後に、秋季にはふたたび日本列島の太平洋側に戻っている。このことは前線帯の南北振動に似るが、東西ではなく、北東から南西方向へ、すなわち日本列島の走行に沿うことを示している。日本海には観測地点が少ないが、巖原では太平洋側と同様に2月となる。

3. 東アジアにおける出現地域と季節変化

次に、日本列島周辺の東アジア地域について、風向反転日の出現をMSMデータから明らかにする。前述のWINDASデータと同様に、03時と15時の風ベクトルの内積値から抽出する。

全年の風向反転日の出現は、東アジアでは中部日本、朝鮮半島北部、台湾にとくに多い。日本列島では中部山地周辺にあたるが、その太平洋側と日本海側で異なる。なかでも北陸周辺に多く、次いで関東平野、濃尾平野周辺にも多い地域が現れる(図6)。朝鮮半島北部では、やや散在して現れる。黄海側

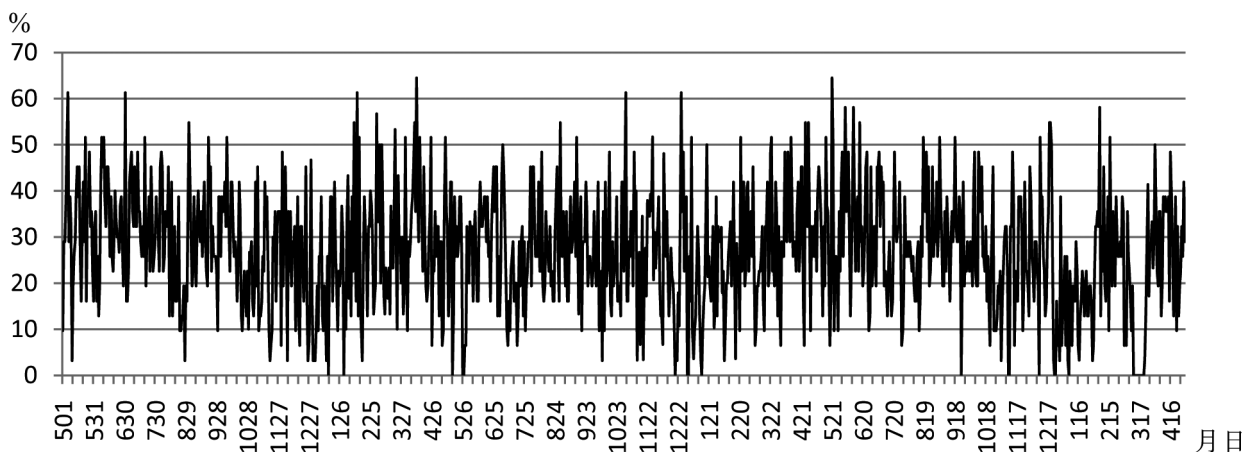


図3 風向反転する日別地点数出現率の変化 (2009.05-2011.04, 31地点に対する率)

よりも日本海側に多く、海岸線に並行する傾向がある。同地域には海岸寄りに咸鏡山脈、内陸に長白山脈が並行し、その間に鴨緑江が流れる。風向反転日の出現の高い地域は、それぞれの山麓部にあたる。また長白山(白頭山)(2744m)は、山脈というより大きな孤立峰であるが、その山麓付近に密集域がみられる。

台湾での出現の高い地域は、海岸付近よりも内陸側に集中するようすがみられる。台湾山脈周辺で南北に2列に延び、同島西側の台湾海峡側で明瞭である。台湾山脈は玉山(3997m)をはじめとし、東アジアでも高度の高い山々が南北に連なるが、その西側にあたる。そこは偏東風の風下側にあたる。

前述のように風向反転日には、総観スケールの擾乱の通過の影響が考えられる。しかしこの場合には広域で同じ変化が起こるため、出現に局地差があることは、相対的に局地循環系の出現が多いことを示すと考えられる。また風向反転日の出現には季節的变化がみられ、とくに夏季から秋季にかけて多くなる。この出現の多い地域は季節的に移動する。上述のように、高い出現を示す地域は、日本の中部地方、朝鮮半島北部、台湾に集中している。そのためこれら3地域について、出現の季節変化を明らかにする。

中部地方

風向反転日の出現の多い中部地方でも、局地的な差異が大きい。中部山地を取り巻くように、出現の多い地域があるが、それらは山脈により隔てられている。北陸では、出現の多い地域が連続している。関東平野では、西部の関東山地周辺部分に密集する。さらに濃尾平野では、北部で出現が多い。また甲府盆地や高山盆地などの、内陸盆地にも多い(図7)。

風向反転日の出現は季節変化し、とくに夏季に出現が多くなる。なかでも北陸の新潟から石川にかけて、多く現れる。その沿岸部の海上から陸上にかけて現れるが、とくに平野部から内陸奥にかけて、出現の中心がある。また太平洋側でも同様に、沿岸部よりも内陸側で多くなる。最高気温は熊谷や多治見で記録されているが、両地点ともに、出現の多い地域の中心ではなく、その縁辺に位置している。夏季に続いて秋季に出現は多く、春季と冬季には少なくなる。冬季では出現の中心は内陸の山麓域となる。

局地的な特色の一つは、飛騨、木曾、赤石などの山脈の両側で、出現率は対照的でなく、およそこれ

らの山脈の西側で多いことである。また関東山地では東側、三国山脈では北側に多い。風向反転日の出現の多い側とは、中部山地周辺での反時計回りの風を仮定すればその風上側にあたり、時計回りの風を仮定すればその風下側にあたる。反時計回りの風は内陸熱低気圧にもとづき日中に出現するため、出現の多い地域は日中の谷風の吹走方向に一致する地域である。反対に時計回りの風は夜間の出現が考えられるため、出現の多い地域は内陸熱的高気圧にもとづき夜間に出現するため、出現の多い地域は夜間の山風の吹走方向に一致する地域である。すなわち中部山地-沿岸地方、個々の山脈-盆地の、二つのスケールでの風向が一致する地域では、風向反転日の出現率が高まり、一方相反する地域では低下することが考えられる。

また風向反転日の出現率は、夏季には太平洋側では内陸側で高く、日本海側では海岸付近でも高くなっている。これは夏季の日本海側では、日夜での風向反転は海陸風よりも、海風と南東季節風にもとづくと考えられる。とくに猛暑時に中部地方の太平洋岸には陸風は現れず、日変化に風向の反転は現れない。これは夏季の南東季節風が強まることによると考えられる。一方冬季には、日本海側でも内陸側で出現率が高くなり、また日本海側よりも太平洋側の方が高くなる。太平洋側は、北西季節風の風下側にあたり、風向反転は海陸風よりも、北西季節風と海風にもとづくと考えられる。

上述のような個々の盆地や山地、中部山地、さらに日本海側と太平洋側での風向反転日の差異には、海陸風/山谷風の局地的な風、中部山地周辺のような地域的な風、太平洋とユーラシア大陸のような広域の風、のように異なるスケールの風の影響が重なると示している。すなわち日変化の中には、日変化する局地的、および地域的な熱的循環と、季節変化する広域の循環による風の影響が重なっている。ここでは風の観測値から風向反転日を抽出しているため、全てのスケールの循環が含まれているが、偏差や周期などから、特定のスケールの成分を抽出するならば、風向の反転も異なる特色が現れることが考えられる。

また春季と秋季の間でも、風向反転日の出現率は大きく異なる。それには春季には擾乱通過により局地循環の発達を抑えられるのに対して、秋季には移動性高気圧による安定化で、局地循環系の発達が促

進されることにもとづくと考えられる。

朝鮮半島北部

朝鮮半島北部での出現は、日本の中部地方にくらべると季節変化は小さい。この地域全体では、冬季には沿岸部で出現が明瞭になるのに対して、夏季には内陸部で出現が明瞭となる。また出現は、夏季には北東側に偏り、一方冬季には、南西側に偏る傾向がみられる(図8)。

なお6月には朝鮮半島南部の日本海側でも多く、ロシアの沿海州沿岸にも現れて、日本海沿岸のほぼ全域で出現が多くなる。7月と8月には、日本の中部地方で最も多いが、9月と10月には、長白山脈周辺で最も多くなっている。朝鮮半島北部では、冬季から春季にやや少なくなる。

台湾

日本列島では冬季にとくに少なくなるのに対して、台湾では通年にわたり出現し、季節的变化は小さい。台湾山脈の西側の高出現地域は、夏季には海岸付近などに広がり、また3地帯に分かれる様子が見られる。秋・冬春季には西側の高出現域は連続するが、南西部と北部では縮小し、とくに冬季にその傾向が強まる(図9)。海岸付近よりも山麓部で出現が多いことから、風向反転は山谷風の影響が大きいと考えられる。台湾山脈が急峻で内陸の盆地は少ないため、台湾島全体での熱的低気圧・高気圧はあまり発達しないが、夏季には若干の影響が認められる。また台湾山脈の西側は偏東風の風下側にあたり、それがとくに夏季には出現域を海岸付近にまで拡大させたことが考えられる。

4. 事例日における局地循環系

日夜の風向反転日は、局地循環系の出現によると考えられるが、中部地方、朝鮮半島北部、台湾の3地域について事例日を抽出し、それらの局地循環系の相異を、地上風系と気圧分布から明らかにする。出現の多く、また猛暑であった2010年8月を対象にする。ここでWINDASから求めた日々の風向反転の地点の全地点に対する出現率は、猛暑日には必ずしも高くない。これには、日中の異常な昇温が夜間にも継続し、その結果夜間に内陸高気圧が発達せず、風向の反転に至らなかったことも考えられる。擾乱の通過の影響を除くため、地上天気図から広域が太平洋高気圧に覆われた日を選定した。なお風と気圧の分布の描画には、OpenGrADSを使用した。

中部地方

中部山地周辺では、2010年8月5日には、03時に内陸の熱的高気圧が美濃、木曾、赤石山脈付近まで南下した。一方15時には内陸の熱的低気圧が飛騨山脈付近にまで北上した。この日には、夜間には太平洋側に吹き出す陸風は弱く、むしろ太平洋側から吹きこむ南の一般風が明瞭となっている。また日本海側での陸風は明瞭である。一方日中には、太平洋側では強い海風が侵入している。また日本海側での海風はそれに比べると弱い(図10)。

2010年8月18日には、03時に内陸の熱的高気圧が飛騨山脈付近まで北上した。一方15時には内陸熱的低気圧が美濃、木曾、赤石山脈付近まで南下した。この日には、夜間には太平洋側に吹き出す陸風は明瞭である。日本海側では、海から吹きこむ一般風はそれほど強くない。また日本海側での陸風はやや弱い。一方日中には、日本海側では強い海風が侵入している。また太平洋側での海風もそれと同程度である(図11)。

両日ともに夜間には谷筋に沿って気流が強く収束している。一方日中には収束域は明瞭ではない。このことは、個々の谷や盆地スケールで、夜間に個々の山風循環が発達することを示している。また両日ともに、中部山地周辺のやや内陸部で、反時計回りの風がみられる。一方夜間には明瞭ではない。このことは、日中には中部山地スケールの循環系が発達することを示している。また高気圧の作用中心が、5日には南偏する一方、18日には北偏する場合にあたる。太平洋高気圧は、前者のように日本列島付近に南から張り出すことが多いが、さらに北偏するようなときには、太平洋側の沿岸部でも風向が反転することが示されている。

朝鮮半島北部

朝鮮半島北部では、2010年8月18日には、03時に内陸の熱的高気圧が山地部で明瞭となる。それより山風が沿岸付近まで吹き降ろしている。また15時には、内陸の熱的低気圧が山地部に発達し、沿岸部では強い海風が侵入している(図12)。

朝鮮半島北部の場合、とくに日夜でパターンが大きく異なる。中部日本でも同様であるが、とくに夜間には明瞭な収束域が形成されるのに対し、日中には明瞭な不連続域はみられない。ただし夜間の風速はやや弱く、夜間には山風が谷や盆地で収束しても風速としては小さく、日中に吹走する風は一般に強

いことを示している。これは夜間の低温で密度の高い気流が、地形の影響を強く受けるのに対して、日中の高温で密度の小さい気流は、地形の影響が小さいことによると考えられる。

朝鮮半島北部では夜間の個々の山風の発達が見られることは、中部山地と同様である。しかし、日中にその周辺での時計回りの循環はみられない。わずかに清津付近で、夜間に時計回りの方向に吹き出し、日中に反時計回りの方向に吹き込む程度である。一方で日中には海岸線に直行して内陸に吹き込む風が見られる。これはこの地域の山地は中部地方と異なり、一方は日本海に面するが他方は内陸内部につながることに由来すると考えられる。すなわち中部山地は周囲の大半が海であるのに対して、朝鮮半島北部では海は周辺の一部に限られるために、独立した熱的低気圧となりにくいことによると考えられる。

台湾

事例とした2010年8月16日は、台湾周辺に太平洋高気圧が張り出すほどではないが、低気圧は存在してしない。その03時には台湾山脈付近に内陸に熱的高気圧がみられる。一方15時においては、北部沿岸部と南東部沿岸部に低圧部がみられるが、山地付近はやや高圧の状態が継続している。台湾では、夜間に山風がみられるが、海岸付近に達すると弱まり、海岸付近では明瞭な陸風はみられない。また日中には強い海風が侵入しているが、内陸部では弱まり、谷風には連続しないようである(図13)。

台湾では中部山地や朝鮮半島北部と異なり、夜間に谷筋での風の収束は明瞭ではない。日中にも内陸に熱的低気圧がみられない。このことは個々の谷や盆地スケールでの循環はあまり発達しないことを示している。さらにこの日の一般風は南風であり、大陸-海洋間での循環の影響もみられない。台湾において特徴的なことは、夜間には海岸線付近に収束域がみられ、全島的に内陸からの風が吹き出している。また日中には内陸の山地周辺部において、山地の中心に向かう風が卓越している。このことは、台湾における局地循環系は、個々の谷や盆地よりもスケールは大きい、島のやや内陸側に発達していることを示している。そのため風向反転日の出現率は、やや内陸側で高いことにつながると考えられる。

IV 検討

1. 局地循環系の規模

前述のように風向反転日を指標とすると、東アジアには3つの局地循環系の発達する地域がある。また風向反転には、およそ3つのスケールの異なる循環がかかわっており、主要な循環のスケールは3地域で異なると推定された。ただし風向反転の指標は、局地循環系そのものではないため、局地循環系について、以下に検討を加える。

まず、局地循環系の基本である海陸風/山谷風は、地形に強く影響される。風の日変化を表す hodograph について、形や方向、回転率をみると、気圧傾度力、コリオリの力、摩擦力が影響している、といわれる。特別の風の日平均からの偏差では、谷の出口に向かい、右側では時計回りの風の変化、左側では反時計回りの風の変化がみられる。しかし反時計回り地点は少ないため、風の変化は基本的にコリオリ力による (Sakazaki, T. and Fujiwara, M., 2008)。

hodograph は風ベクトル先端の時間変化を示すが、一般に長楕円形を示し、風向反転といっても日夜で直線的な振動をするわけではない。長楕円形の両端が日変化の二つの極であり、対照的な循環系がみられると考えられる。日中の極はほとんどが15時前後であるが、夜間の極は遅れた06時から09時頃であり、それぞれ日最高気温と日最低気温の出現時に近い。ただし後夜半における変化はきわめて小さいために、日中の15時と夜間の03時から風向反転を抽出しても大きな支障はないと考えられる。

また局地循環系には、海陸風や山谷風とは異なるものがある。晴れて風の弱い夜間に、関東平野西部に、直径100km、厚さ1km、風速1-2m/sの渦が形成される。これは日中の中部山地の低気圧性循環が、その風下側で夜になって独立したものである。日中には斜面上昇風として発生して、日没後に山越えの風が起こるようになる。中部地方の観測点がほとんど盆地にあり、それから熱的低気圧が表されるが、中部山岳地帯全体を覆う熱的低気圧ではなく、山岳地帯の盆地にできる熱的小低気圧の集まりとみられる (木村富士男, 1994)。

実際に出現しているのは個々の盆地の熱的小低気圧であり、中部山岳全体の熱的低気圧とはそれらの集合体にあたるが、このスケールでの循環は中部地方で顕著で、台湾では規模が小さく、さらに朝鮮半島北部では不明瞭である。これは中部地方では多く

の熱的小低気圧が発達し、しかも周囲のかなりの部分を海に囲まれているために、より大きな規模での局地循環系の発達につながったものとみることができると考えられる。

こうした中部山地周辺の循環のスケールは、およそ日本列島とその周辺海域との循環に相当する。日本列島周辺に設定した海岸線上の風を、海岸線から50km以内の気象官署から求めると、日本列島周辺の収束・発散は、夜間また冬季に正となる。これは日周期の風と、年周期の「日本モンスーン」を示すが、黒潮・対馬海流と列島周辺の海との温度差にもとづいている (Onishi, M. Sakai, S. and Iizawa, I., 2010)。

日本列島スケールでの夜間の発散、日中の収束は熱的な中・小規模低気圧の集合に対応している。さらに年周期での変動が海洋と大陸間のみならず、日本列島と周辺海域との間でも出現している。先述のように WINDAS での風向反転日出現率が、年周期で日本列島と太平洋との間で振動するようすが現れた。厳原に示されるように、日本列島と太平洋だけでなく、日本列島と周辺海域との間での振動であれば、これは「日本モンスーン」に対応することが考えられる。

2. 上層の渦と局地循環系

本論で対象とした局地循環系は、日夜の風向反転を指標とし、日周期を前提としている。ただし日周期には、局地のみならず広域の現象も含む可能性がある。

対流圏下層の風の日・半日周期成分は、地表では局地風システムから、1-3 kmでは地表風上の反流から、3-5 kmでは冬・春は中規模東進波 (medium-scale eastward-traveling wave) から、夏・秋は大規模大気潮汐から発達する (Sakazaki, T. and Fujiwara, M., 2010a)。1-3 kmの高さにはさらに、直径700km以下、位相速度10-15m/sの、日周期東進エディ（diurnal eastward-moving eddies）が、日本海上と太平洋上に通年現れる。日本海上では0時のウラジオ沖から12時の津軽海峡西に移動し、太平洋上では0時の関東沖から9時の本州東方に移動し、別のものが0時の九州沖から12時の鳥島付近に移動する。日周期東進エディは、高山地域の東側に発生した傾圧構造 (barotropic structure) である (Sakazaki, T. and Fujiwara, M.,

2010b)。

こうした日周期東進エディは、ウラジオ、関東、九州の山地において、夜半に偏西風の風下側に現れる。このことは局地循環系が、とくに中部山地や朝鮮半島北部に発達することに対応する。また高度2 km付近で明瞭であり、直径が700km以下であることも、山地の高度や範囲に対応することが考えられる。台湾付近であれば、必ずしも東進しないことも考えられる。

3. 局地循環系の気温・降水への影響

局地循環系が発達することにより、顕著な昇温や降水が局地的にもたらされることがある。

北海道では夏季静穏日には、GPS可降水量の日平均からの偏差は、極大域が石狩山地の南東側に偏る。北西寄りの一般風により山岳上空に集積した水蒸気が、風下側に輸送される (澤田武彦・川村隆一, 2010)。

北海道の中央部に熱的低気圧が形成され、より大きなスケールの風の風下側に影響が現れる。これは前述のように中部山地でも、風下側の関東平野に大きな変動をもたらされることに対応する。

また瀬戸内では日本海側・太平洋側の沿岸部よりも気温の低下が遅れ、15時~22時頃には相対的に3°C程度高温となり、岡山・香川付近の瀬戸内海上に19時ころに最大1.3hPa程度の熱的低気圧が現れる (糟谷司・川村隆一, 2011)。

瀬戸内のように小規模の海面は、むしろ日中の熱的低気圧を遅くまで継続させる。この場合には風向反転の時刻も遅れることとなり、中国・四国地方の局地循環系の出現は、他の地域と大きく異なることが考えられる。

朝鮮半島南部では、山地の多い半島北部とは異なる。韓国では冬季月降水量・降雪量からみると、東岸は降水量や降雪量が多く、北西岸や南西岸では雪は少なく、済州島は最も少なく、鬱陵島は最も多い。降水は東岸、南岸、済州島では、南岸の低気圧による南東から東風でもたらされ、北西岸、南西岸、鬱陵島では、大陸の高気圧からの北西から北風によりもたらされる (Lee, S. and Yamakawa, S., 2006)。

すなわちおよそ南東側の地方は、夏季の南東風の影響を受け、北西側の地方は冬の北西風の影響を受ける。しかしこの間にある太白山脈などの、局地循環系の形成への影響は小さい。これは主に山の高さ

や盆地の規模が小さいことによると考えられる。

熱的低気圧への影響は小さいが、降水だけでなく風への影響は大きい。韓国の東海岸地域は南北に高い太白山脈が広がり、典型的なフェーン風が頻繁に発生する。盈徳での調査では、高温乾燥風が作物に被害をもたらしている（姜東鎮・呂運尚・呉秉根・姜正勲・楊世準・石井龍一・李仁中，2003）。

こうした山地の影響は、特定の期間、たとえば2009年9月、2010年6月などにみられ、この地域でも風向反転日の出現率の高さが認められた。そのため、朝鮮半島北部ほどの顕著な出現はないにせよ、ときにより多くの出現が考えられる。

朝鮮半島の西方、山東半島の東側では、4・5月に熱的高気圧が発生し、黄海－東シナ海高気圧とよばれる。青島では卓越風向が、4月に北北西から南南東に変わって7月まで続く。このとき暖かい南東風が冷海面を吹走して、霧が発生する。この黄海－東シナ海高気圧は、1) 高度400mより上の偏西風、2) その下の熱による南風、3) 冷大陸棚水と黒潮との間の北東風、から構成される。冷温の渤海・黄海がなければ冬季季節風が継続し、黒潮は冬期に明瞭となって北東風が発達する（Zhang, S., Liu, J., Xie, S.-P., and Meng, X., 2011）。

黄海周辺では、山東半島をはじめ韓国西岸部でも局地循環系はあまり発達しない。黄海－東シナ海において、夏季にも冷海面が継続するなら海風の進入が考えられるが、東海地方と同様に海風と規模の大きな風系と風向が同じとなるために、夜間の陸風の吹き出しを阻み、風向反転が抑制されることが考えられる。

V おわりに

地球規模での温暖化の中で、東アジアにおいても環境に大きな変化が生じている。そのため東アジアで共同して、環境危機に対応する必要がある。本論ではそこでの近年の環境変化に関連して、とくに地域の大気環境として重要な、局地循環系について解析を進めた。局地循環系抽出の指標として、15時と03時との風ベクトルの内積値が負となる場合を「風向反転日」と定義した。それにもとづいて、近年2～3年間のWINDASとMSMデータから、風向反転日を抽出した。まず日本列島および東アジアにおける、風向反転日出現率の分布を明らかにした。次に事例地域において、風向反転日出現率の季

節変化を解析し、また事例日における地上風系および気圧分布を解析した。さらにこれらの結果について、従来の局地循環系の研究成果と比較検討した。その成果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 風向反転日出現率は、海岸付近よりも内陸側に多いが、とくに山麓付近の平野部から山地の斜面に多い。これらの地域での出現は、山谷風のような個々の盆地などでの循環に対応している。さらにこれらの地域は、内陸に発達する熱的低気圧の周辺でもあり、出現は中部山地のような多くの山地や盆地・谷を含む地域全体での循環に対応する。また、日本列島と沿海の間での、日周期での循環に対応する可能性がある。
- 2) 局地循環系の発達する地域は、中部地方のほか、朝鮮半島北部や台湾が顕著である。ただし、これらの3地域において主として発達する循環のスケールには差異がある。台湾では、小さな盆地や谷の集合した台湾山脈周辺で明瞭で、やや小さな循環が発達する。朝鮮半島北部では、大陸と海洋との間において主要な循環の発達がみられる。

なおこうした局地循環系は、汚染質輸送や熱輸送を介して、農産物、都市環境、人々の健康などにも直接、間接に影響する。以下に環境からみたその問題点について付記する。

局地循環系は擾乱を伴わない穏やかな風のため、さまざまな影響を緩和することが多い。反対に局地循環系の出現の少ない地域では、高温や低温が顕著となることが多い。たとえば最高気温を記録した、熊谷や多治見などは、局地循環の出現しにくい地域である。また四日市ぜんそくのように、石油化学コンビナートから排出される硫黄酸化物が狭い地域に降下して、激しい被害をもたらされたのは、伊勢湾周辺が日夜の風向反転が少ないことにもよる。こうした熱汚染質、化学的汚染質の集中は、局地循環系からは類似する。

さらに汚染質は、その放射強制力により気候に影響を与える。たとえば放射強制力に対し全球平均としては小さなエアロゾルの直接効果も、局地的には大きく、また地表面で大きな強制力を作る（中島映至，2004）。すすを含む炭素性エアロゾルや硫酸塩エアロゾルは人為的に排出されて輸送されるために、局地循環系による影響の大きいことが考えられる。

さらに大陸内部の盆地など、定常風速の弱いところでは、さまざまな大気物理的・化学的成分が滞留しやすく、そこにおける雲量や降水量にも影響する可能性が考えられる。

このように環境に影響する人為的汚染質であるが、とくに石炭利用による大気汚染、酸性雨、地球温暖化は問題であり、新たなエネルギー源の開発が必要とされる。東アジア酸性雨モニタリング・ネットワーク (EAENT) やクリーン開発メカニズム (CDM) などで、共同してモニタリングの実施、統一的制度構築、結果の合意形成、カーボン・クレジットの買上げなどがめざされる (明日香壽川, 2004)。ここで人為的排出抑制に関して、局地的な自然要因、たとえば都市のヒートアイランド、海陸風・湖陸風、山谷風などによる局地不連続線などは、局地的高温域を形成することから、そこでの人為的排出を加速する。そのため局地循環系の実態の解明が必要である。

また東アジアにおいて局地循環系は、中部山地、朝鮮半島北部、台湾付近で顕著であった。それぞれの位置に隔たりがあるため、近年の気候変動に差異がある。たとえば1980年代後半以降では、長江流域では降水量が増加したが、黄河流域では乾燥傾向が強まった。これは太平洋高気圧の中国への張り出しなどにより、長江流域には熱帯海洋から水蒸気が多くもたらされるのに対して、黄河流域では降水に地表面からの蒸発散が多くを占めるためとされる (安成哲三, 2004)。上記3地域もまた太平洋高気圧からの影響は異なり、その結果として局地循環系も異なる変動をすることが考えられる。こうした気候変動と、局地循環系の変動の関係の解明などは、今後の課題である。

文献

明日香壽川 (2004) : 東アジアにおける地球環境問題と国際協力. 天気, 51, 778-783.
姜東鎮・呂運尚・呉乗根・姜正勲・楊世準・石井龍一・李仁中 (2003) : 高温乾燥風に対する耐性イネ品種の生理学的特徴. 日本作物学会紀事, 72 (3), 328-332.
糟谷司・川村隆一 (2011) : 中国・四国地方と瀬戸内海の夏季静穏日における GPS 可降水量の日変化と熱的局地循環. 天気, 58, 291-303.
加藤美雄・阿保敏広・小林健二・泉川安志・石原正仁 (2003) : 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務. 天気, 50, 891-917.

木村富士男 (1994) : 熱的局地循環 - 1993年度日本気象学会賞受賞記念講演 -. 天気, 41, 5-12.
Lee, S. and Yamakawa, S. (2006): Wintertime climate classification and climatological features of South Korea. J. Agric. Meteorol., 62(2), 53-63.
室井ちあし, 藤田匡, 石川宣広 (2008) : 気象庁毎時大気解析. 天気, 55, 401-408
中島映至 (2004) : 東アジアにおける大気汚染と気候影響. 天気, 51, 783-790.
Onishi, M. Sakai, S. and Iizawa, I. (2010): Annual and diurnal wind variations originating from Japanese Islands. SOLA, 6, 105-108.
Sakazaki, T. and Fujiwara, M. (2008): Diurnal variations in summertime surface wind upon Japanese plains. J. Meteor. Soc. Japan, 86, 787-803.
Sakazaki, T. and Fujiwara, M. (2010a): Diurnal variations in Lower-Tropospheric wind over Japan, Part I: Observational Results using the Wind Profiler Network and Data Acquisition System (WINDAS). J. Meteor. Soc. Japan, 88, 325-347.
Sakazaki, T. and Fujiwara, M. (2010b): Diurnal variations in Lower-Tropospheric wind over Japan, Part II: Analysis of Japan Meteorological Agency Mesoscale Analysis Data and four global reanalysis data sets. J. Meteor. Soc. Japan, 88, 349-372.
澤田武彦・川村隆一 (2010) : 北海道の夏季静穏日における GPS 可降水量の日変化. 天気, 57, 305-314.
田上善夫 (2011) : 東アジアにおける近年の環境変動と環境危機への対応 - 環境への局地循環系の影響 -. 富山大学『東アジア「共生」学創成の学際的融合研究地球環境危機チーム中間報告書 2010年度』65-69.
安成哲三 (2004) : 東アジアにおける近年の水循環と気候の変動について. 天気, 51, 797-800.
Zhang, S., Liu, J., Xie, S.-P., and Meng, X. (2011): The formation of a surface anticyclone over the Yellow and East China Seas in spring. J. Meteor. Soc. Japan. 89, 119-131.

(2011年5月17日受付)

(2011年7月20日受理)