局地風(1) 海陸風

日本農業気象学会局地気象研究部会*

Local Wind (1): Land and Sea Breeze Circulation

The Executive Committee of Sectional Meeting
on Local Meteorology and Climate

1. は し が き

局地気象学の中でも局地風(局地循環)は最も代表的な現象と考えられるが、その中でも、とりわけ海陸風は最もよく知られた現象で教科書にも多く取り上げられている。そして沿岸域からの大気汚染物質の拡散の問題などと関連して数多くの研究が行われている。

局地気象学で扱われる現象は一般的には地球の自転の効果が無視できるものが多いが、局地風、特に海陸風はその中では最も大きなスケールの現象と考えることができ、コリオリ力の効果を無視してしまうことはむずかしい。その水平スケールの上限は数十km~100kmと考えられ(小林ら, 1994)、鉛直スケールとしてはもちろん大気境界層内となる。これは別の見方をすれば地形によって影響を受けるために起こる現象と考えられ、水平方向に一樣な場所ではこのような現象は見られない。その意味で日本のように地形の複雑な場所での研究価値は高い。地形の影響としては、大別して「熱的なもの」と「力学的なもの」が考えられる。前者は海陸風、山谷風などに代表されるように海陸の分布や地形によって地表面の温度差が生まれ、それによって引き起こされる対流現象と考えられる。一方、後者は地形によって風の方が力学的に変形され加速されるもので、「おろし風」あるいは「だし風」とよばれ、やまじ風、広戸風、清川だしなどが具体例としてあげられる。これは時に山越え気流という表現も用いられるが、これにはもう少し上空の山岳波(Lee Wave)という現象も含まれるので、注意が必要である。前者は風を引き起こす原因を地形自身が持っているのに対して、後者は風を引き起こす原因は別にある

(台風、低気圧など)、それが地形によって変形されている、という違いがある。

局地風についての一般的なテキストとしては、過去にDefant(1951)のものがあるが、比較的新しいものではメソスケールの気象として扱われているAtkinson(1981)、Pielke(1984)などが参考になる。そしてこれまで海陸風に関してまとめられている邦文として、日本気象学会(1975, 1988)の「気象研究ノート」と宮田(1982)による「広島県の手海陸風」がある。後者は特に広島県に限った研究をまとめたものではあるが、他の地域についても充分参考になる考え方や資料が豊富に収められている。ごく最近、重力流の研究で有名なSimpsonによって「Sea breeze and local wind」という、本テーマに最適の単行本のテキストが出版された(Simpson, 1994)。彼はこの冒頭でグライダー飛行の中で海陸風を見出し、これを研究するきっかけになったと述べている。また、J. Huntがこのテキストの巻頭に述べているように、地球上の大部分の人間は海岸から200km以内の沿岸域に住んでいることを考えると、古代よりこの現象が人々の興味をひいたのは当然のことといえる。

局地気象研究部会では1994年6月の熊本での農業気象学会全国大会の際に、「局地風(1)海陸風」というタイトルで研究会を開催したが、これを機に海陸風についての解説を試みることにした。なお、本研究会の詳細については部会報告(局地気象研究部会, 1995)をご覧ください。

2. 観測できる海陸風の特徴

海陸風の基本的な原因は海陸の温度差による対流現象と考えられるが、地表面付近に限ってみれば、昼間は冷たくて重い海上の空気が暖かくて軽い陸上の空気の下にもぐりこむ現象と考えられる。地上観測ではこの海風の

1995年2月13日 受付, 1995年6月13日 受理
*執筆: 塚本 修, 柏木良明(以上代表), 小林哲夫, 鳥谷均, 五十嵐大造, 黒瀬義孝, 谷 宏, 脇水健次

侵入によって、風向が変化すると同時に気温の低下と相対湿度の増加をもたらすことによってこれを確認できる。そして、これは昼間の気温の上昇を抑制する効果がある。この冷たい(重い)空気が陸上の暖かい(軽い)空気を押しのけて下層に侵入する様子を、重力流の側面からとらえて海陸風を見た研究が、Simpson (1987)によって扉を開かれた。それによると海風の先端部は図1に示すような海風前線の最下部の流れが重力流ヘッドを形成するというモデルとして発表されている。図では右側から侵入する冷たい海風が陸上の暖気との境界で前線を形成し、上部ではいわゆる巻き波(Kelvin-Helmholtz波)となる様子が描かれている。これはその後、室内実験やライダーによる野外観測でも確認されている。Chiba (1993)は高知大学の観測塔での風や気温の乱流変動の記録から前線侵入の前後での気温や風向の変化だけでなく、Simpsonのモデルに見られるような鉛直流の変化の存在を超音波風速計によって観測している。この海風前線の陸上への侵入距離は、一般には数十 km とされている。一方、海風前線に対照的な海風の後端について、千葉ら(1994)はヘリコプター観測のデータから、海岸線から10 km 沖合にその存在を見出した、としている。Simpsonの教科書では、より大規模な海風の範囲を示すものとして、インド半島の衛星写真から海風の後端の下降気流に対応して海岸から100 km 付近まで雲のない領域が存在することを述べている。海風前線に比べて後端は海上にあることから観測が容易ではなく、今後の研究が必要である。

図1 Simpsonによる重力流的な海風前線モデル (Simpson, 1994)

図2 瀬戸内海における陸風の収束による雲の三叉路
図中の矢印は流線を示す。1981年11月19日07時の例 (中田, 1983)

両岸を陸地にはさまれた狭い海域では夜間に卓越する陸風による陸風収束雲が見られる場合がある。中田(1983)は晩秋の瀬戸内海で航空機観測と衛星写真によってこれを見出している。そして地上風の発散の計算を行ってこれが陸風による収束雲であることを定量的に確認した。図2はその一例で矢印で示した流線によって収束が起こり、それが図中に黒点の列としてあらわした雲列になって見えている様子がわかる。同様な例が海外でも見出されており、Elsner *et al.* (1989)は衛星写真からミシガン湖上での陸風収束雲と見られるバンド状の雲列を見出した。これと対照的な海風収束雲は特に報告されていないが、小規模なものでは島の上に昼間発生する積雲がこれに対応すると考えられる。佐橋(1987)は岡山平野では東西を播磨灘と燧灘にはさまれているため、南西よりの海風が吹く場合と南東よりの海風が吹く場合があることを見出した。そして、その2種類の海風が同時に発生した場合、収束線付近で雲にはならないが高濃度の大気汚染が見出されることを報告している。図3はその一例で汚染物質の濃度から推定した海風収束線の時間変化

図3 岡山平野における播磨灘からの海風と燧灘からの海風によってできた収束線の時間的移動

図中の数字は時刻を示す。1981年6月3日の例 (佐橋, 1988)

を表わしている(佐橋, 1988)。

これらの現象を総合的に観測するために、これまでは多点における同時パイロットバルーン観測が行われてきた(たとえば気象研究所(1984)による瀬戸内海の総合観測)。これを基にすれば風の鉛直分布の時間変化、空間分布を得ることができるが、近年発展してきたリモートセンシング技術によって、ドブラーレーダーの開発が進み、大気境界層観測用のレーダー、ソーダー(音波レーダー)、ライダー(レーザーレーダー)などが使えるようになってきた。今後この方面の開発・研究がますます進展し、特別観測期間を設定しなくても連続的な風の分布が常時得られるようになれば、海陸風およびこれらが複雑に組み合わさった局地気象についての研究が飛躍的に発展すると考えられる。

3. 海陸風の統計的解析

海陸風を統計的に解析する場合のデータとしては一般には地上気象データに限られるが、気象官署のほかにはAMeDASや大気汚染監視局などのものがある。これらのデータの中から海陸風の発現した日を選びだすためには、天気(日射量や日照率)や一般風の強さ(気圧傾度)を基準に用いることが多い。

海陸風の日変化の特徴を最も顕著に表すことができるものに、「日楕円」がある。これはベクトル風速の平均的日変化を1日周期の楕円で近似し、この日楕円の形で各地点の日変化の特徴を表すものである。図4はこの一例で瀬戸内沿岸の各都市の日楕円を示してある。ここで実線は時計回りの回転を、破線は反時計回りの風向変化を示す。後述のDefant(1951)によるホドグラフはこれを線形理論から得たもので、日楕円の形になっている。

先に佐橋(1987)によって岡山平野での海風の風向に2つの方向があり、総観規模の現象である高気圧の位置によって、どちらの向きの海風が発達するかが決まるという結果を紹介した。一方、森(1994)はどちらの海陸風が現れるかは地衡風(一般風)の風向と密接な関係があるとしている。ただし、ここでいう地衡風とは地上天気図から求められる「地表地衡風」で、上層の風を必ずしも表していないが、資料を得やすいことからこれを用いている。岡山と多度津についてこのような解析を行った結果、気圧場と海陸風の型の関係について地衡風の風向が8方位の1方位分変っただけで海風の型が変わることがわかった。

海陸風の起こる原因は初めにも述べたように海陸面の

図4 瀬戸内海沿岸の各都市の海陸風の日楕円(森, 1994)

図5 松山における月別最高・最低気温と海面温度(SST)の季節変化(森, 1994)

温度差であるが、これを直接裏付けるデータは意外に少ない。というのも、一般に測定されているのは陸上の気温と沿岸での水温で、陸面の温度と沖合の海面温度は得られていない場合が多いからである。図5は森(1994)が作成した松山における月別最高・最低気温と海面温度の季節変化である。これを見ると、春から夏にかけては日最高気温と海面温度の差は大きくなるので海風は発達しやすく、日最低気温と海面温度との差は小さくなるから夜間の陸風は発達しにくいことがわかる。そして秋から冬にかけては逆になる。このことは根山(1982)によって海風と陸風の季節別の平均風速の違いとして裏付けられている。しかし、これはあくまで気温と水温の比較であって陸面温度と海面温度の比較ではない。最近では衛星からのリモートセンシング技術によって、ある程度陸面と海面の温度を直接対比することが可能になってきているが、海陸風スケールでの日変化をとらえるところまでは残念ながら達成できていない。シミュレーション

の境界条件を検証するためにもこの方面の研究が必要であるとえられる。

4. 海陸風のモデリング

これまでに述べてきたような広範囲の現象を総合的に観測あるいは実験から把握することは実際には非常に難しい。そのため、数値モデルによって現象をコンピュータ上に再現し、そのふるまいを調べるといった研究が広く行われている。モデルは大きく分けると線形モデルと非線形モデルになる。線形モデルは1930～40年代に発展したもので、解析的に解を得るために現象を単純化したものである。海陸の表面温度の日変化をサインカーブで与えて、上空へは一定の渦拡散係数で熱が伝達し、それによっておこる気温分布、気圧分布によって大気の流れが引き起こされるというものである。図6にDefant (1951)の線形論によって得られた風の日変化のホドグラフを示す。先に示した日楕円の形になっていて、コリオリ力の効果が現れていることがわかり、実際の現象をかなりよく表現できるといえる。つまり線形論だけでも摩擦力のコリオリ力の導入によって、大筋では現象を表現することができるようになった。

図6 Defant (1951)の線形論に基づく地表面近くの海陸風ホドグラフ(浅井, 1979)

これに対して1950年代ごろから線形論の限界が明らかになってきて、渦拡散係数の鉛直方向の変化や非線形項(移流項)($u \partial u / \partial x$, $v \partial u / \partial y$ など)などを取り入れることで現実の海陸風との定量的な対比が可能になってきた。これには当時の電子計算機の発展に寄与するところが非常に大きい。これらの項を含んだ海陸風の基本的な方程式系は以下ようになる(大河内, 1994)。

3次元運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - f u + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\text{または } -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \quad (\text{静水圧平衡の式})$$

質量保存の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

熱力学方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

ここで u, v, w は風速の3次元成分(x, y, z 方向), θ, p, ρ, g は温位, 気圧, 空気密度, 重力加速度を示す。また f はコリオリパラメータ, K は渦拡散係数, t は時間である。

このような式を数値的に解くことによって、海岸線は直線で、海岸に平行な方向には一様とする二次元モデルがEstoque (1961, 1962)によって研究された。三次元モデルはMcPherson (1970)によって矩形的海岸線を持った場合が扱われはじめ、Pielke (1974)によって地形の効果を考慮するところまで進展した。その後は地表面の座標の取り方や、差分法のほかにスペクトル法を用いるなどの数値計算上での工夫もされている(大河内, 1994 参照)。

もう一つの大きな問題は局地風モデルに限らないが、渦拡散(乱流輸送)の項をどのように表すかということである。最近ではYamada and Mellor (1978)のclosure modelがよく用いられるが、これには接地境界層の研究成果によるところが大きい。Closure modelについては横山 (1992)のテキストに山田博士御自身による和文の説明があり参考になる。また具体的な数値計算法については、絶版になってしまったがPielke (1984)のテキストによくまとめられている。最近、新しいテキストも出版された(Pielke and Pearce, 1994)。

一方、線形論もその役割は終わったわけではなく、理論的な扱いにはその存在意義は依然として大きく、Walsh (1974), Kimura and Eguchi (1978), Niino (1987)などの研究が続いている。

5. 海陸風による物質輸送

海陸風の研究で最も社会的な問題と結びついているものは、汚染物質の輸送であろう。特に汚染源となる工場などは臨海地域に集中しており、ここから排出される汚染物質は海陸風の影響を最も大きく受けていると考えられる。これについては過去に非常に多くの研究が行われ

図7 関東平野から中部山岳地帯への汚染物質の長距離輸送の経路(太実線)

ハッチの部分は山地を示す。(栗田, 1988)

ており、工場からの大気汚染のみならず、原子力発電所などの核施設からの放射能汚染に関する研究も多い。中でも、関東地方を中心に行われた科学研究費「環境科学特別研究」のグループによって行われた総合的な観測(木村ら, 1986)では、図7の東京から長野に至る太い実線で示されているように汚染物質が海風、谷風によって関東平野から碓氷峠を越えて日本海側に侵入するといった、長距離輸送が見出された。東京湾沿岸で発生した汚染物質は夜間の陸風時は東京湾、相模湾に滞留するが、翌朝の海風によって日中、関東平野を北上し山岳地帯に入ると JR 信越本線沿いに西向きをかねて碓氷峠を越えて長野県に入る。この間約 200 km 以上にわたる長距離輸送であるが、これに大きく寄与しているのが局地的海風、大規模海風、中部山岳地帯に発生する熱的低気圧、局地的な谷風などである。この過程で汚染物質の光化学反応が進み、長野県で春から夏にかけて高濃度オキシダントが発生する原因になる、とみられている。この現象は海陸風のみならず山谷風やより大規模なスケールの現象とが合体して起こっているものと考えられる。そして、これは関東平野のみならず、他の地域でも起こり得る。

さらに沿岸域の都市に特有の昼間のヒートアイランド現象で、都市域の昼間の気温が上昇が指摘されているが、これに伴って海陸風循環にも何らかの変化がみられることが考えられる。関東平野では高速道路の環状八号線の上空に出現する通称「環八雲」が道路上のヒートアイランドと海風の収束の効果で出現するとされている(糸賀, 甲斐, 1995)。また、片山ら(1991)は福岡市における都

市気候の変化と海陸風の関連について、主に海風による冷却効果の観点から一連の研究結果をまとめている。

6. む す び

局地風の一つとして海陸風を取りあげた。海陸風は局地風の中で最も一般的なものというだけでなく、海陸風現象の中には種々の物理過程が含まれており、これを理解することで局地気象のメカニズムを研究する基礎を固めることができるといってもよい。

また日本の海陸風研究は 1970 年代以降、高度経済成長が産みだした沿岸域での大気汚染という公害を機にその研究の必要性が生じ、広範囲に研究がおこなわれるようになった。使われる言葉は変ってきているが、局地的な環境問題に海陸風が依然として重要な役割を果たしていることには変りがない。そしてこれは汚染物質の輸送のみならず、温度や湿度環境にも大きな影響を及ぼすもので我々の生活環境と切り離して考えることはできない。さらに、先に述べた Simpson (1994) の例にもあるようにマリンスポーツやスカイスポーツにおける海陸風の果たす役割も大きく、今後その方面での研究の進展の可能性もある。

本論が海陸風のみならず、局地風・局地気象学を理解するうえで何らかの参考になれば幸いである。なお本論をまとめるにあたって、岡山大学の佐橋謙教授および京都大学の水間満郎講師のコメントをいただきました。記して感謝します。

引用文献

- 浅井富雄, 1979: 海陸風のモデリング。都市の大気環境, 河村 武(編), 東京大学出版会, 126-137.
- Atkinson, B. W., 1981: Mesoscale atmospheric circulations. Academic Press, 495p.
- Chiba, O., 1993: The turbulent characteristics in the lowest part of the sea breeze front in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **65**, 181-195.
- 千葉 修, 1994: 海風を探る。局地気象研究会講演論文集第 10 号, 局地風(1)海陸風, 1-11.
- 千葉 修ほか, 1994: ヘリコプターによって観測された海風後部の構造について。日本気象学会 1994 年秋学会大会講演予稿集, D 158.
- Defant, F., 1951: Local Wind, *Compendium of Meteorology*. Amer. Meteorol. Soc., Boston, Mass., 655-672.
- Elsner, J. B., Mecikalski, J. R. and Tsonis, A. A., 1989: A shore-parallel cloud line over Lake Michigan. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2822-2823.
- Estoque, M. A., 1961: A theoretical investigation of the sea breeze. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*,

- 87, 136-146.
- Estoque, M. A., 1962: The sea breeze as a function of the prevailing situation. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 244-250.
- 糸賀勝美・甲斐憲次, 1995: 環八雲の発生条件に関する気候学的研究. 日本気象学会 1995 年春季大会講演予稿集, D-304.
- 片山忠久・林 徹夫・塩月義隆・北山広樹・石井昭夫・岩本静男・西田 勝・石原 修・堤 純一郎・斎藤郁雄, 1991: 都市の熱環境を測る. 気象利用研究会, 気象利用研究, 第 4 号, 30-61.
- 木村竜治, 1988: 局地循環の力学. 気象研究ノート第 163 号, 局地循環, 23-37.
- Kimura, R. and Eguchi, T., 1978: On dynamical processes of sea- and land breeze circulation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **56**, 67-85.
- 木村竜治・浅井富雄・三沢信彦, 1986: 関東・信越地域における特別観測の概要. 文部省科学研究費特別研究「環境科学」研究報告, B280-R11-2, 30-37.
- 気象研究所, 1984: 局地風と大気汚染物質の輸送に関する研究. 気象研究所技術報告第 11 号.
- 小林哲夫ほか (日本農業気象学会局地気象研究部会), 1994: 局地気象学序論 ― 観測と理解 ― 農業気象, **50**, 129-133.
- 栗田秀実・植田洋匡・光本茂記, 1988: 弱い傾度風下での大気汚染の長距離輸送の気象学的構造. 天気, **35**, 23-35.
- McPherson, R. D., 1970: A numerical study of the effect of a coastal irregularity on the sea breeze. *J. Appl. Meteorol.*, **9**, 767-777.
- 宮田賢二, 1982: 広島県の高陸風. 広島女子大学地域研究叢書Ⅲ, 溪水社, 395 p.
- 宮田賢二, 1988: 瀬戸内海西部の局地循環. 気象研究ノート第 163 号, 局地循環, 107-122.
- 森 征洋, 1994: 統計的に見た瀬戸内海沿岸における海陸風の特徴. 局地気象研究会講演論文集第 10 号, 局地風(1)海陸風, 12-20.
- 中田隆一, 1983: 瀬戸内海に発生する陸風収束雲について. 天気, **30**, 476-482.
- 根山芳晴, 1982: 瀬戸内海の高陸風について. 天気, **29**, 653-668.
- 日本気象学会(編), 1975: 気象研究ノート第 125 号, 海陸風と山越え気流.
- 日本気象学会(編), 1988: 気象研究ノート第 163 号, 局地循環.
- 日本気象学会(編), 1994: 新しい気象学. 第 28 回夏季大学テキスト, 局地風.
- 日本農業気象学会局地気象研究部会(編), 1994: 局地気象研究会講演論文集第 10 号, 局地風(1)海陸風.
- 日本農業気象学会局地気象研究部会, 1995: 第 10 回局地気象研究部会研究会「局地風(1)海陸風」. 農業気象, **51**(2), 175-177.
- Niino, H., 1987: On the linear theory of land and sea breeze circulation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **65**, 901-921.
- 大河内康正, 1994: 海陸風のシミュレーション. 局地気象研究会講演論文集第 10 号, 局地風(1)海陸風, 21-33.
- Pielke, R. A., 1974: A comparison of three-dimensional and two-dimensional numerical predictions of sea breezes. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1577-1585.
- Pielke, R. A., 1984: Mesoscale meteorological modeling. Academic Press, 612p.
- Pielke, R. A. and Pearce, R. P., 1994: Mesoscale modeling of the atmosphere. Meteorological Monograph No. 47, Amer. Meteorol. Soc.
- 佐橋 謙, 1987: 岡山周辺の高陸風について. 天気, **25**, 357-363.
- 佐橋 謙, 1988: 瀬戸内海東部の局地循環. 気象研究ノート第 163 号, 局地循環, 89-105.
- Simpson, J. E., 1987: Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory. Ellis Horwood Limited, 244p.
- Simpson, J. E., 1994: Sea breeze and local wind. Cambridge University Press, 234p.
- Walsh, J. E., 1974: Sea breeze theory and applications. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 2012-2026.
- Yamada, T. and Mellor, G. L., 1978: A numerical simulation of the BOMEX data using a turbulence closure model coupled with ensemble cloud relations. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **105**, 915-944.
- 横山長之(編), 1992: 大気環境シミュレーション. 白亜書房, pp. 202.
- 吉門 洋, 1994: 海陸風. 新しい気象学, 第 28 回夏季大学テキスト, 局地風, 日本気象学会(編), 13-21.
- Yoshino, M. M., 1976: Local wind Bora. University of Tokyo Press, 289p.