

回転スペクトルによって調べた大阪湾周辺における 左回転する海陸風の地域特性と季節変化*

溝 本 悟^{*1}・石 原 正 仁^{*2}

1. はじめに

気象の教科書、例えば浅井 (1996) には「海陸風の風向は地球回転の影響を受けて北半球では時刻の経過とともに右回転（時計回り）に循環する」と書かれている。ところが、大阪湾南東部にある関西国際空港（以下「関西空港」という）の暖候期には海陸風のホドグラフが左回転する現象がしばしば出現する（佐藤 1982）。このため、管制官や運航管理者に気象の実況・予報資料を提供している関西航空地方気象台では、この現象を予報作業上の留意点のひとつとしている（川北 1994）。

近畿地方西部における海陸風の振舞いは、水間 (1973)、伊藤・川添 (1983)、伊藤 (1995)、Mizuma (1995) らによって調べられており、大阪府南岸と和歌山県北部沿岸では風向が時間とともに左回転する海陸風が発生することも指摘されている。また、伊藤 (1995)、Mizuma (1995) はその成因として、海岸付近の局地的な海陸風循環と紀伊半島西部の広域海風の2つのスケールの海陸風循環が重なった結果であるとした。

関西空港において航空気象観測業務に従事していた溝本 (1997) はこの現象に興味を持ち、“回転スペクトル”という手法を用いて同空港における左回転する海陸風の振舞いを詳しく調べた。ただし、この現象の地域的分布や季節変動、さらにその成因を確認することは課題として残されていた。

今回は気象業務のための基礎資料を得ることを目的

に、溝本 (1997) をベースに調査領域を大阪湾全域及び紀伊半島西岸に拡大し、前回と同様に回転スペクトルを用いて、次の3点に着目して調査を実施した。①風向が左回転を示す海陸風の分布状況とその強さ、②その季節変化、③その発生原因。

2. 解析方法とデータ

長期間の風の時系列データをスペクトル解析し、風の変動特性を周波数領域で議論する研究は長く行われてきた (Van der Hoven 1957；石崎ほか 1968；甲斐 1984；藤谷 1985)。海陸風に着目した研究として、森 (1982) は風の東西・南北成分を別々にフーリエ解析し、日変化に対応した周波数成分のフーリエ cos 係数、sin 係数から風ベクトルの“日楕円”を描き、国内157の気象官署の約1/3で左回転の海陸風が出現していると報告した。荒川 (2001) も地域によってはこうした現象が見られるとしている。最近では Sakazaki and Fujiwara (2008) がアメダス観測データから、全国の主要な平野における右回転と左回転の海陸風の分布を示し、その成因を議論した。

風の東西成分を実数部、南北成分を虚数部とする複素時系列データをフーリエ変換すれば回転スペクトルが得られ、左右の回転方向別に風変動のスペクトルが求まる (O'Brien and Pillsbury 1974)。回転スペクトルの概念は、回転成分を有するベクトル変動量、たとえば深海流の回転などを調べる際に使われてきた (日野 1977)。また、気象ドップラーレーダーでは送信波と受信波の位相差をもとに、正負を判定しながらドップラー速度を算出する際に使われている (石原 2001)。風ベクトルの変動を左右の回転成分に分離し、両者の出現頻度を定量的に評価しようとする今回の調査には、回転スペクトルは最適な手法である。Sakazaki and Fujiwara (2008) もその研究の中で、こ

* Distribution and Seasonal Change of Anti-Clockwise Rotated Land-Sea Breeze around the Osaka Bay as seen by Rotary Spectral Analysis.

*1 Satoru MIZOMOTO, 関西航空地方気象台.

*2 Masahito ISHIHARA, 気象研究所.

© 2009 日本気象学会

の手法を一部利用している。

一般に海陸風の解析では、海陸風が発生した日や発生しやすい日を抽出し、風の日変化を調べることが多い。しかし、今回の解析ではこうした選択的なデータ抽出は行わずに、解析期間中の全データをもとに回転スペクトルを計算し、海陸風に対応する周波数成分を選び出し、それを基礎データとして議論する。季節変化を議論するため、回転スペクトルは1月単位で求める。ただし、月の日数の違いによってスペクトル強度にばらつきが生じることがないように、各月の1日から28日までの672個の毎時風データを使い、これにFFTを施して周波数ごとのスペクトルを求めた。

使用するデータは、2006年の1月から12月までの大阪湾とその周辺に位置する関西空港(6)、洲本(0.2)、神戸(0.1)、堺(4)、熊取(4)、友ヶ島(0.1)、和歌山市(2)、白浜(0.4)、潮岬(1)の気象官署・アメダスの9地点の毎正時の風データである。カッコ内は各地点の海岸からの距離(km)であり、第1図に各地点の位置を示す。調査対象を2006年としたのは、この年関西地方には台風の上陸がなく、海陸風分布にもとづく風の日周期変動が比較的明瞭に現れると考えたからである。

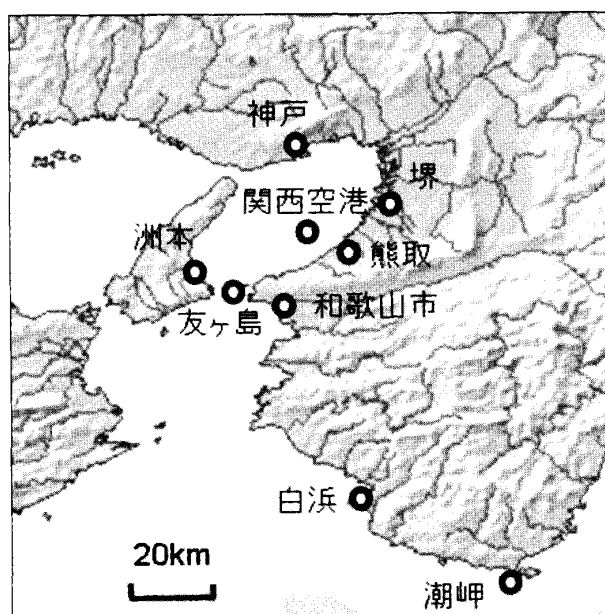
3. 結果

3.1 関西空港における風スペクトルと海陸風

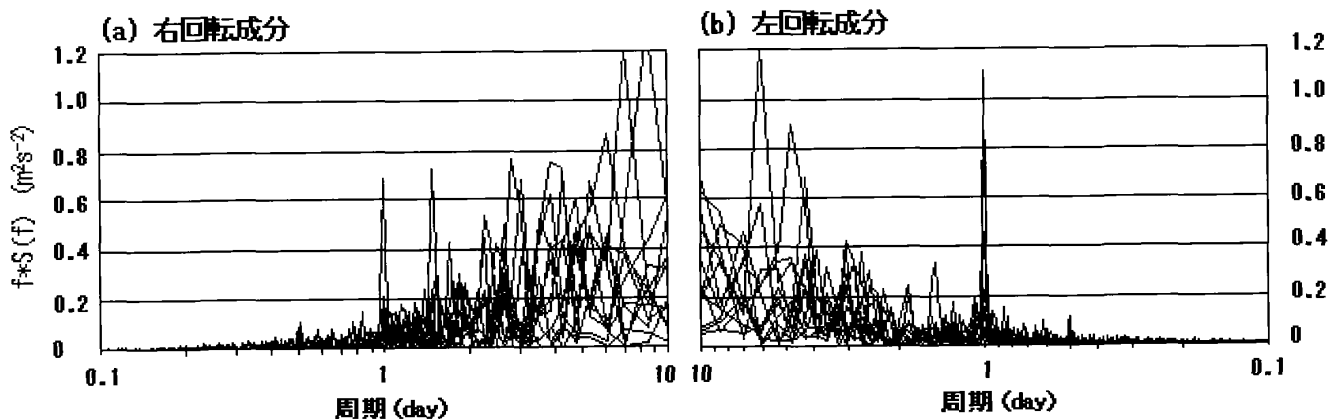
後述するように、関西空港は和歌山市と並んで調査対象9地点の中で最も左回転の海陸風が卓越する地点である。そこでまず、海陸風の振舞いを関西空港において見ることにする。第2図は、関西空港における各月における右回転と左回転の風スペクトルを12か月分重ね描きしたグラフである。0.1日周期から10日周期

に向かってスペクトルの強度がほぼ連続的に増加する中で、右および左回転の両スペクトルともに1日周期の変動がパルス状に現れている。この1日周期成分が海陸風に対応すると考えられる。0.5日周期にもわずかにピークが現れておりこれも興味ある現象であるが、今回は議論しない。

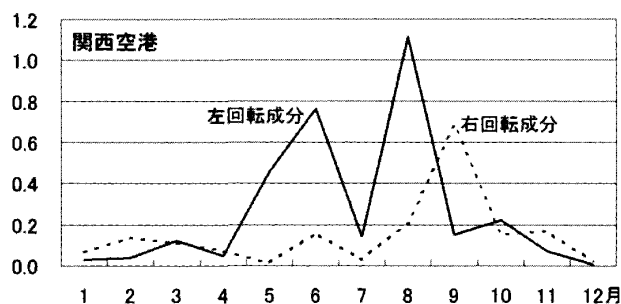
第3図は各月の風スペクトルから1日周期の左回転成分と右回転成分を取り出し、月ごとに並べたグラフである。5、6、8月に左回転成分が顕著に現れている。このことから、関西空港においては、暖候期の5月から8月において顕著な海陸風が出現し、海陸風は時間とともに左回転することが分かる。ただし、この期間であっても、7月には海陸風成分は大きく減少している。



第1図 風の回転スペクトルを求めた9地点。



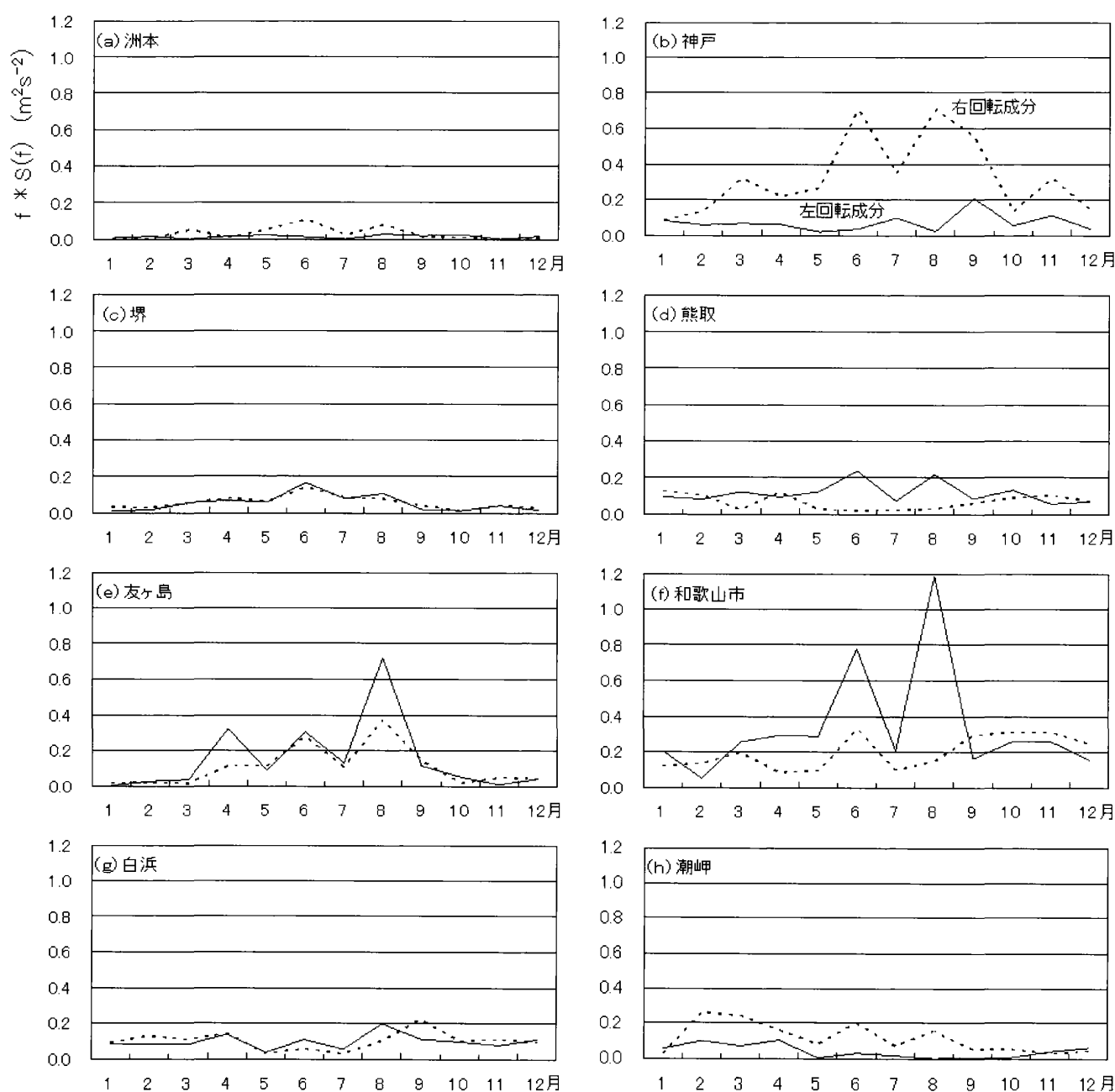
第2図 関西空港における2006年各月の風スペクトルを12か月分重ね合わせたグラフ。(a) 右回転成分、(b) 左回転成分。横軸は周期(日)、縦軸はスペクトル(m^2s^{-2})。



第3図 関西空港における2006年各月の風スペクトルから、1日周期成分を取り出して並べたグラフ。実線は左回転成分、破線は右回転成分を示す。

3.2 各地点における海陸風の振舞い

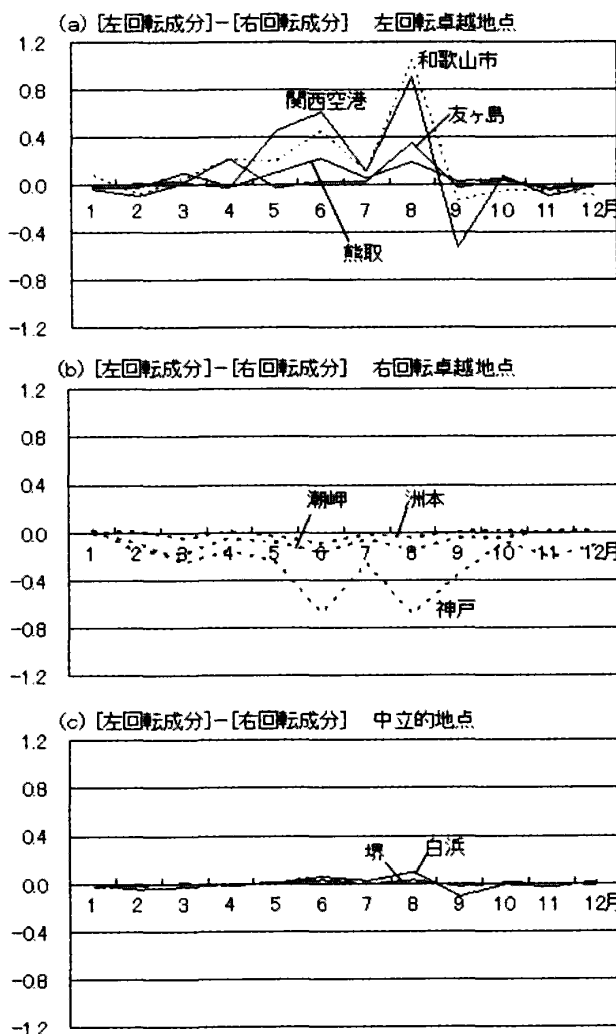
他の8地点についても、第3図と同様の図を作成した(第4図)。これによると、和歌山市(同図f)では関西空港と同様に、6月と8月において左回転成分に大きなピークが出現している。また、大阪湾の南端に位置する友ヶ島(同図e)においても、値は小さいが8月に左回転成分のピークが現れている。さらに、関西空港と海岸を隔て4 km 内陸に位置する熊取(同図d)においても、少ないながら8月に左回転成分が現れている。



第4図 第3図と同様。ただし関西空港以外の8地点。

一方、大阪湾東岸から4 km 内陸に位置する堺（同図 c）では左回転成分と右回転成分が同程度に出現しているが、年間を通して1日周期の回転成分は小さい。大阪湾の北端に位置する神戸（同図 b）では、年間を通じて右回転成分が卓越しており、特に6, 8, 9月にその傾向が顕著である。大阪湾西岸の洲本（同図 a）は友ヶ島に比較的近接して位置しているが、1日周期成分は1年を通じてごく弱い右回転となっている。

大阪湾の外を見ると、和歌山市の状況は上述のとおりである。和歌山市の南に位置する白浜（同図 g）では、堺と同様の傾向を示している。さらに南の、紀伊半島南端の潮岬（同図 h）では、弱いながら右回転の1日周期成分が1年を通じて見られる。



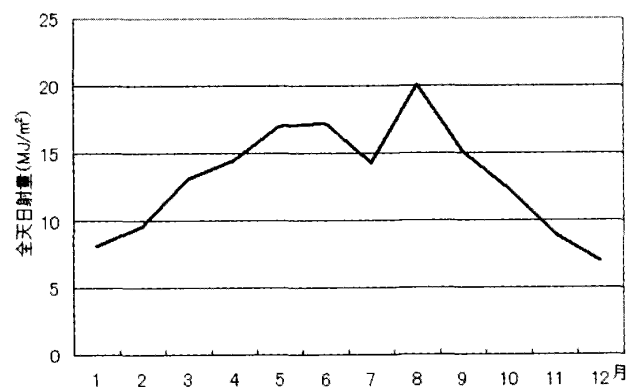
第5図 海陸風の回転の卓越方向で分けた3グループにおける風スペクトルの1日周期の[左回転成分]と[右回転成分]の差の月変化。(a) 左回転卓越地点、(b) 右回転卓越地点、(c) 中立的地点。

4. 考察

第5図は、各地点における各月の風スペクトルの中の1日周期の[左回転成分]と[右回転成分]の差をグラフに表したものである。調査した9地点は次の3つのグループに分けられる。第1グループは左回転成分が卓越する関西空港・熊取・友ヶ島・和歌山市の4地点であり、特に関西空港と和歌山市でこの傾向が顕著である（同図 a）。これらの地点は大阪湾の南東岸及びそこから南に続く地域であるという共通点がある。逆に右回転成分が卓越する地点を第2グループとすると、それは神戸・洲本・潮岬である（同図 b）。これらは、大阪湾の北岸と西岸、及び紀伊半島の南端である。そして第3グループの堺と白浜では、左右の回転成分が同程度に出現するが、両者ともに小さい（同図 c）。これらの結果は、Sakazaki and Fujiwara (2008) の Fig.6 f に示されたものと合致している。

第1グループにおける海陸風の季節変動について見ると、海陸風は4～5月に出現して6月に強まるが、7月には一旦弱まり、8月に最大を示す（第5図 a）。関西空港・和歌山市では9月に入ると一時的に右回転の海陸風が出現するが、この理由はわからない。10月には左右の回転成分はほぼ同程度に減少し、この状態が3, 4月まで続く。この地域におけるこのような海陸風の月々の変化は、今回の調査で初めて明らかになった。

7月に風スペクトルの1日周期成分が小さくなることは、大阪管区気象台における全天日射量の月平均値（第6図）が、梅雨期の7月にその前後の月の値より小さくなることと符合している。これは、日射が局地循環をドライブする大きな要素のひとつであることを裏付けている。



第6図 大阪管区気象台における2006年の月平均全天日射量。

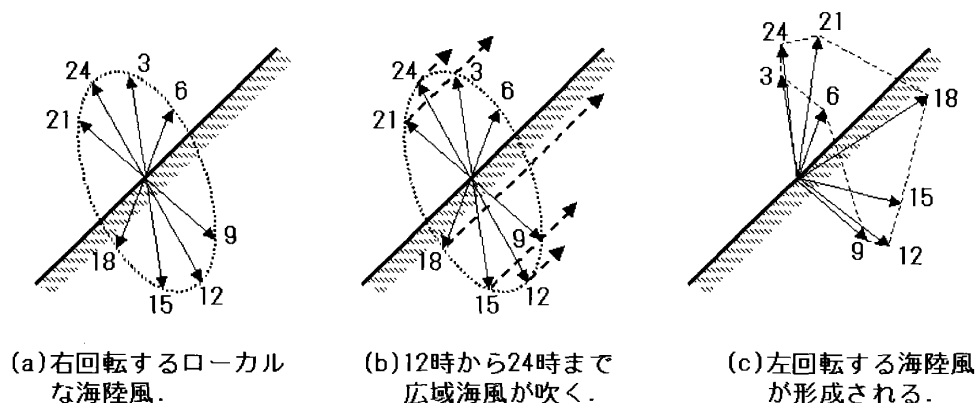
伊藤 (1995), Mizuma (1995) によると, 大阪湾とその南の地域では, 海岸に沿ったローカルな海陸風と, 紀伊水道沖から大阪平野へ吹く広域海風の二つのスケールの海陸風循環が存在する. 第7図aの模式図のように, ローカルな海陸風のみが大阪湾東岸に吹いた場合にはコリオリ力の効果によって右回転の風向変化を示すはずである. 一方, 伊藤 (1995) にもとづ

き, 広域海風が12~24時に紀伊水道から北東に向かって吹き, そのピークは16~18時に現れるとし, 第7図bの破線矢印のように広域海風が吹くと想定する. ローカルな海陸風と広域海風を線形に重ね合わせると, 第7図cのように左回転する hodograph が表現される. 広域海風の最大風速の出現時刻がローカルな海陸風のそれより3~6時間遅れることにより, 12~24時の間はローカルな海陸風の hodograph が北東側に折り返された形になっている. 一方, 大阪湾西岸で上と同じことを想定すると, 右回転が強調される hodograph ができる (図略). 今回の調査結果は, 伊藤 (1995), Mizuma (1995) が示したこの地方の局地循環のメカニズムを確認するものとなった.

5. まとめ

2006年のアメダス毎時風データを用いて大阪湾沿岸とそれに続く紀伊半島西岸の9地点の海陸風の振舞いを, 回転スペクトルという比較的簡便な手法を用いて定量的に調査し, 次のことが分かった.

- 5~8月の大阪湾南東部の海上や沿岸, 及び紀伊半島西端の和歌山市では, 7月を除いて顕著な左回転の海陸風が卓越する.
- 大阪湾北岸や淡路島東岸では右回転の海陸風が卓越する.
- 大阪湾の北東岸, 及び和歌山市を除く紀伊半島の南西部では海陸風に伴う風向の回転はほとんど見られない.
- こうした海陸風の振舞いは, ローカルな海陸風と紀伊半島を範囲とした広域海陸風が重畳した結果として説明できる.



第7図 大阪湾南東部における海岸付近のローカルな海陸風 (a 矢印) と, 紀伊水道沖から大阪平野に向かって吹く広域海風 (b 破線矢印) が重なった場合の海陸風の日変化の模式図 (c). 斜線域は海岸.

謝辞

1997年に本調査を実施した際には, 水間満郎氏 (当時京都大学), 九州大学の伊藤久徳氏 (当時和歌山大学), 及び荒川正一氏 (当時東京家政大学) から貴重なコメントをいただきました. 関西航空地方気象台の職員の方々には, 現場の情報にもとづいて当地の局地風について議論していただきました. 本ノートの投稿に際しては藤部文昭氏にお世話になりました. 皆様に感謝いたします.

参考文献

- 荒川正一, 2001: 局地風のいろいろ. 成山堂書店, 82-86.
- 浅井富雄, 1996: ローカル気象学. 東京大学出版会, 29-33.
- 藤谷徳之助, 1985: 筑波研究学園都市で観測された大気境界層下部の風の日変化とスペクトルについて. 天気, 32, 259-269.
- 日野幹雄, 1977: スペクトル解析. 朝倉書店, 300 pp.
- 石原正仁, 2001: ドップラー気象レーダーの原理と基礎. 気象研究ノート, (200), 1-38.
- 石崎澁雄, 光田 寧, 花房龍男, 1968: 風速変動の長周期成分について. 京都大学防災研究所年報, (11 A), 489-497.
- 伊藤久徳, 1995: 近畿地方の広域海風に関する数値実験. 天気, 42, 17-27.
- 伊藤久徳, 川添俊弘, 1983: 和歌山県における海陸風. 天気, 30, 151-159.
- 甲斐憲次, 1984: 30 m 鉄塔で観測された風速変動と気圧変動の長周期スペクトル. 天気, 31, 235-241.
- 川北昇司, 1994: 関西空港における海陸風について. 大阪管区気象台府県気象研究会誌, 6-7.
- 溝本 悟, 1997: 回転スペクトルを用いた関西空港におけ

る海陸風の解析. 大阪管区府県気象研究会誌, 58-59.
 水間満郎, 1973: 京大原子炉における海陸風の調査過程.
 近畿地方大気汚染調査連絡会誌, (7), 42-53.
 Mizuma, M., 1995: General aspects of land and sea breezes in Osaka Bay and surrounding area. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 1029-1040.
 森 征洋, 1982: 日本における風の日変化の気候学的特性について. 天気, 29, 223-230.
 O'Brien, J. J. and R. D. Pillsbury, 1974: Rotary wind spectra in a sea breeze regime. J. Appl. Meteor., 13,

820-825.
 Sakazaki, T. and M. Fujiwara, 2008: Diurnal variations in summertime surface wind upon Japanese plains: Hodograph rotation and its dynamics. J. Meteor. Soc. Japan, 86, 787-803.
 佐藤 功, 1982: 大阪府南部の海陸風について. 日本気象学会関西支部例会要旨集, 57.
 Van der Hoven, I., 1957: Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. J. Meteor., 14, 160-164.



The CPS International School of Planetary Sciences Planetary Atmospheres 開催のお知らせ

CPS 国際プラネタリスクール (CPS International School of Planetary Sciences) は, 惑星科学を研究する世界中の大学院生/若手研究者を対象にした国際学校です. 分野の第一線で活躍する研究者を招いて講義をおこなってもらうだけでなく, 講師や他の研究者が交流する<場>を提供することによって, 人材の育成を促し研究を活性化させることを目指しています.

今年のテーマは「惑星大気」です. 講師の方々には, 惑星大気のダイナミクス, 惑星圏の一部としての大気, 数多ある惑星のひとつとしてみた地球の大気, といった切り口で惑星大気について語っていただくことを予定しています. 分野や手法にとらわれず, 惑星大気について考えてみたいという方の参加をお待ちしています.

主 催: 惑星科学研究センター (CPS)
日 程: 2010年1月4日 (月) ~ 9日 (土)
場 所: シーパル須磨 (神戸市須磨区)
主たる対象: 惑星科学を研究する大学院生 (博士課程) および若手研究者
定 員: 40名程度 (海外からの参加者を含みます)
参加費: 参加費10,000円と宿泊費45,000円程度 (合宿全日程参加を前提とします)

講師予定 (確定分のみ, 敬称略)

Yutaka Abe (Univ. Tokyo)
 Francois Forget (LMD, France)
 Takeshi Imamura (ISAS)
 Yoshihisa Matsuda (Tokyo Gakugei Univ.)
 Kensuke Nakajima (Kyushu Univ.)
 Peter Read (Univ. Oxford)
 Tapio Schneider (Caltech)
 Dima Titov (Max Planck)
 Kevin Zahnle (ARC, NASA)

参加申込方法: 詳細は以下のページでご確認ください (若手への参加宿泊補助もあります).

URL: <http://www.cps-jp.org/~pschool/2010-01-04/index.html>

申込み締め切り:

国外からの支援希望参加者 9月25日 (金)
 (推薦書も必要です)
 国内からの支援希望参加者 10月2日 (金)
 (推薦書も必要です)
 支援を希望しない参加者 10月9日 (金)

問い合わせ先: プラネタリスクール組織委員会
 代表 林 祥介 (神戸大学理学研究科)
 Email: pschool-info2010@cps-jp.org