10921 (海陸風; Von Mises 分布)

海陸風の風向分布について*

瀬 戸 信 也*・重 光 和 之*・大 原 真由美**

要 旨

広島県沿岸域とその周辺部に位置する大気汚染測定局のデータを対象に，海陸風の風向分布に，von Mises 分布を適用し，その分布特性について検討した．まず，風向の日変化から海陸風日を抽出し，海風と陸風の各々について，風向の平均方向と集中度母数を推定した．平均方向は沿岸域では海風，陸風ともに海岸線に概ね直角な地点が多いこと，海風の集中度母数は，沿岸域では地点間のバラツキが大きいが，内陸部では小さい値に収束する傾向があること，などを見いだした．さらに，集中度母数と，標準偏差との関連性について検討し，海陸風の標準偏差としては，Yamartino (1984) のモデルと Mardia (1972) のモデルのいずれを採用してもよいことを得た．

1. はじめに

瀬戸内沿岸域では，海陸風は最も顕著な局地風であり，従来から調査研究が活発になされ，多数の知見が蓄積されている（根山，1982）．これらの調査研究は観測期間が短いケーススタディが多く，観測結果の解釈に問題を残している．すなわち，観測結果が対象地域の海陸風の一般的な性質なのか，あるいは特殊な現象なのか，という点である．

近年になって，北林（1976）が大気汚染監視システムの測定局の大量のデータを使用して，海陸風の統計的解析を始めて以来，同様な解析が各地でなされ始めた．江口（1977）は大阪市を，楠田ら（1982）は大分市を，それぞれ対象にして，海陸風の時間的推移や水平スケールなどの諸特性について報告している．また，Yoshikado (1981) は，海風の形態と外部気象条件の関係について解析しており，宮田ら（1982）も同様な解析を行っている．

ところで，これらの解析では，地上風のベクトル平均値をもとにして海陸風の平均的な特徴を解明することを主要な目的としているため，風向分布に関する詳細な議論はあまりなされていない．しかし，瀬戸内沿岸域では臨海部に工業地帯が立地しているため，海陸風は大気汚染と密接な係わりを持っており，海陸風の風向の分布特性を詳細に把握することが大気汚染現象を解明するうえで必要となる．

本報では，海陸風の風向分布に von Mises 分布を適用し，海風と陸風の平均風向と，平均風向まわりのバラツキについて述べる．von Mises 分布は代表的な "circular model" のひとつであり，海風も陸風も概ね1山型の分布となるケースが多いことを考慮すれば，この分布で海陸風の風向分布を近似することは妥当と考えられる．まず，2節では von Mises 分布の母数の推定法について，3節では海陸風の判定方法について，それぞれ述べる．4節では，海風と陸風の風向の母数の地域的な特徴について考察し，さらに，風向の標準偏差について検討する．

2. von Mises 分布

最初に，"directional data" の平均方向について述べる．第1図に示すように，単位円上に位置する点，P_i ($i=1\cdots\cdots n$) の角度を θ_i とすると，θ_i の平均方向：$\bar{X}_0$ は単位ベクトル：$\overrightarrow{OP_i}$ の和から次式のとおり得られる．

$$\bar{X}_0=\tan^{-1}(\bar{S}/\bar{C}) \quad (1\,\mathrm{a})$$

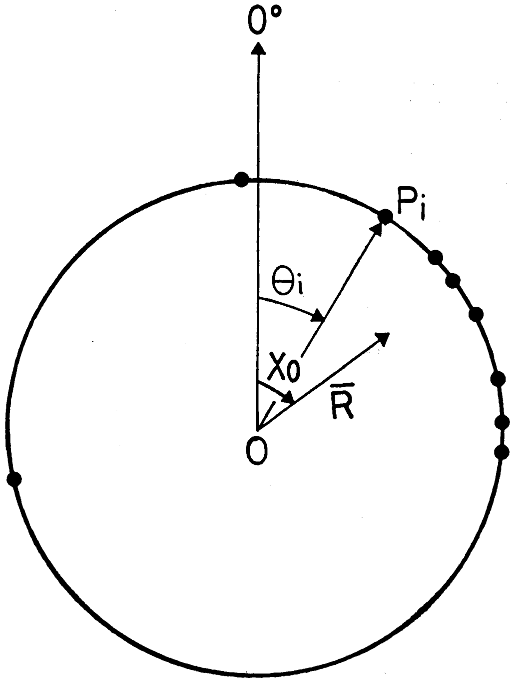
$$\bar{C}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos\theta_i \quad (1\,\mathrm{b})$$

---

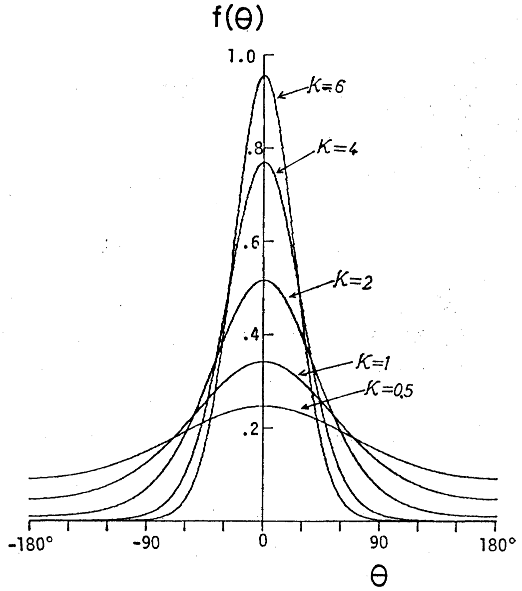
* Distribution of wind direction of land and sea breezes.

** Sinya Seto・Kazuyuki Shigemitsu・Mayumi Oohara，広島県環境センター．

——1989年3月10日受領——
——1989年6月26日受理——



第1図 平均方向の概念図.



第2図 von Mises 分布の確率密度関数. 平均方向を0°とし, 集中度母数を0.5~6の範囲で変化させている.

$$\bar{S}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sin\theta_i \qquad (1\,c)$$

また, ベクトルのバラツキの尺度：$\bar{R}$は, 次式で表わされる.

$$\bar{R}=\sqrt{\bar{C}^2+\bar{S}^2} \qquad (2)$$

いま, θ が von Mises 分布にしたがうと仮定すると, 確率密度関数は次式で与えられる.

$$f(\theta\,;\mu_0,\ \kappa)=\frac{1}{2\pi\ I_0(\kappa)}\exp\{\kappa\cos(\theta-\mu_0)\} \qquad (3)$$

ここに, $I_0(\kappa)$ は第1種変形ベッセル関数である. 2つの母数のうち, μ_0 は平均方向を, κ は μ_0 まわりの集中度を, それぞれ表わす. κ は "concentration parameter" であるが, ここでは, 集中度母数と呼ぶことにする.

平均方向と集中度母数の最尤推定値は次式から得られる (Mardia, 1972).

$$\hat{\mu}_0=\bar{X}_0 \qquad (4)$$

$$\hat{\kappa}=A^{-1}(\bar{R}) \qquad (5\,a)$$

ここに

$$A(\kappa)=\frac{I_0'(\kappa)}{I_0(\kappa)} \qquad (5\,b)$$

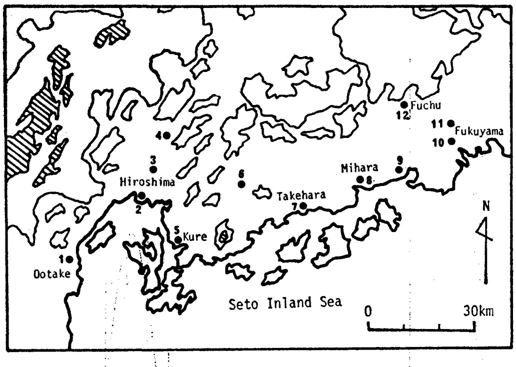
である. なお, (5)式の解析解を得ることはできないので, Mardia (1972) の数表を利用して集中度母数を算出した. von Mises 分布の確率密度関数の1例を第2図に示す. 平均方向を 0° とし, 集中度母数を0.5~6の範囲で変化させている. この分布は平均方向を中心とした1山型の対称分布であり, 集中度母数が大きくなるにしたがって平均方向まわりの集中度が強くなる. なお, 集中度母数が0のときは円周上の一様分布となる.

von Mises 分布と同様に, wrapped normal 分布も代表的な "circular model" であり, その確率密度関数の形状は, von Mises 分布とよく似ている. Fisher (1987) は両分布のうち取り扱い易い方を選択すればよいと指摘しており, ここでも同様な観点から母数が容易に推定できる von Mises 分布を採用した.

3. データと海陸風の判定方法

解析の対象とした測定局の配置を第3図に示す. 測定局は瀬戸内沿岸域とやや内陸部に位置している. 使用した風向データは微風向風速計により測定された毎正時の10分間平均値 (毎正時10分前から毎正時までの10分間) であり16方位にコード化されている. 対象期間は1981年4月から1984年3月までの3年間である.

ある日に海陸風が吹いたかそうでないかの判定法とし



第3図　測定局の配置．等高線を400m 間隔で示す．(斜線部分は800m 以上).

1：大竹消防署	7：竹原市役所
2：広島南観音小学校	8：三原第二中学校
3：広島安佐南支所	9：尾道東高校
4：広島安佐北支所	10：福山南小学校
5：呉西消防署	11：神辺町役場
6：西条小学校	12：府中市役所

ては 1) 日射量や降水の有無などによる間接的な方法，2) 風向風速の時間的変化から直接的に判定する方法，3) 両者を組み合わせたもの，などがある．ここでは，2) に属する宮田ら (1982) の方法にしたがった．この方法は測定局の地上風のデータを用いて主に風向の日変化から海陸風の出現の有無を判定するものであり，測定局毎の判定と地域毎の判定とから構成されている．1測定局での海陸風出現の判定条件を次に示す．

1）当日の3～6時に陸寄りの風向または風速が 0.5 m/sec 以下

2）当日の13～16時に海寄りの風向および風速が 1.0 m/sec 以上

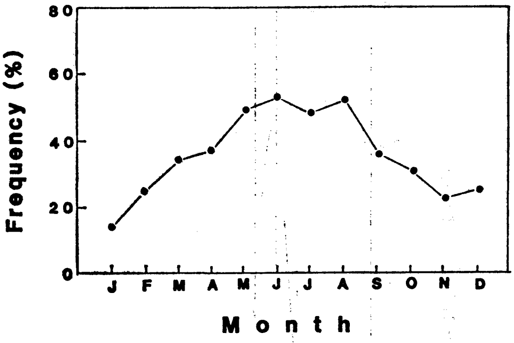
3）翌日の0～3時に陸寄りの風向または風速が 0.5 m/sec 以下

これらの3つの条件をすべて満足する日をその測定局で海陸風が吹いたとみなす．そして，県東部の福山市と西部の大竹市において，ともに，4測定局中の3測定局(欠測がある場合は3測定局中の2測定局) 以上で海陸風が吹いた日を広島県全体で海陸風が吹いた日 (海陸風日) と定義している．

4. 結　果

4.1. 海陸風の出現状況

3節の方法により，海陸風の有無を判定した結果を第4図に示す．月別の海陸風出現率は3年間の平均値である．海陸風の出現率が高い月は5～8月で40%以上，反対に低い月は1月で14%であり，年間の平均出現率は36%である．この値は宮田ら (1982) の同一地域での値：46%と比較すると，10%小さいが，年間を通して海陸風が吹く点では一致している．

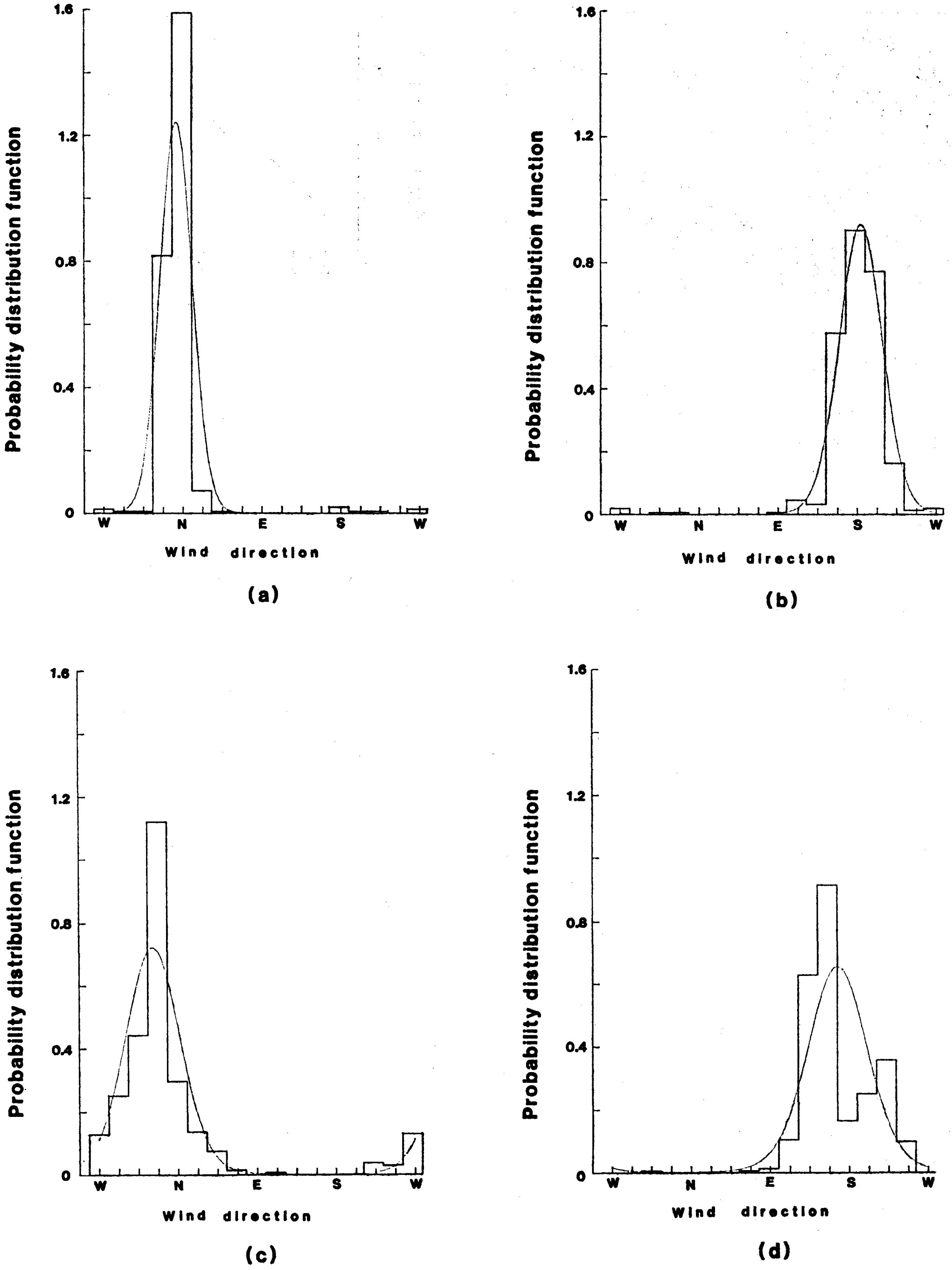


第4図　3年間の月別の海陸風出現率.

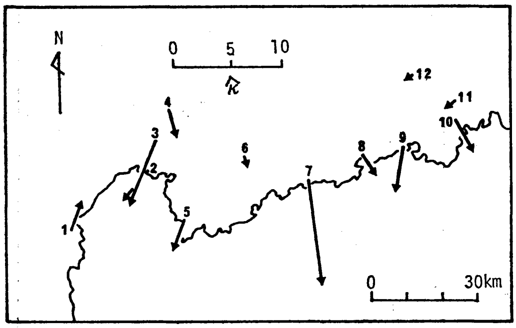
4.2. 平均風向と集中度母数の地域的特徴

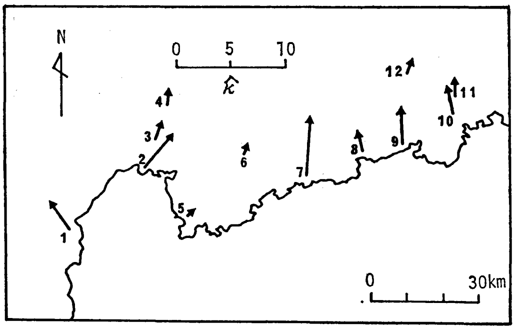
海陸風は吹き始めから吹き終わりまで時間的に変化する現象なので，まず海陸風の風向として吹走期間中のどの時点のデータを採用するかを決めなくてはならない．宮田ら (1982) は広島県沿岸域では陸風は24～6時に安定して吹き海風は14～16時に最盛期となること，また福山南小学校では陸風から海風への交替時刻は冬季が11～12時に，夏季が9～10時に最も多く，海風から陸風への交替時刻は冬季が18時頃，夏季が20時頃であると報告している．そこで，陸風を3時の風向で，海風を15時の風向でそれぞれ代表させ，これらのデータを各々の母集団からの標本とみなし von Mises 分布を適用した．なお，海陸風日と判定された日でも個々の地点では15時になっても海風が侵入していない日などもあり得，この場合にはバラツキを過大評価する傾向を生じるが，海陸風の交替時刻の分布 (宮田ら，1982) から，このようなケースは少ないと考えられる．

1例として，竹原市役所と福山南小学校の結果を第5図に示す．以後は測定局名の代わりに第3図中の番号を用いることにする．なお，風速が 0.3 m/sec 以下(calm) の場合は除いている．局7では海風，陸風ともに実測値と理論値とはほぼ整合している．一方，局10では，陸風の適合度は比較的よいものの，海風の適合度はやや劣っている．この原因は SSEの主ピークのほかに SW にも小ピークがあるためである．局10の海風と同様な現象は内陸部の局6，局12の陸風にもみられるが，その他の風

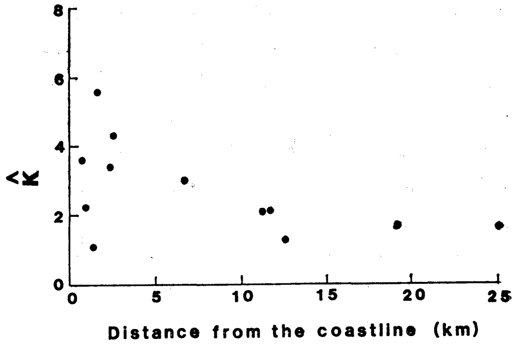


第5図　海陸風の風向分布への von Mises 分布の適用例．ヒストグラムが実測値を，細い実線が理論値を，示す．
（a）竹原市役所（陸風）；（b）竹原市役所（海風）；（c）福山南小学校（陸風）；（d）福山南小学校（海風）





第6図　平均風向と集中度母数の地域分布．(a)が陸風，(b)が海風を示し，平均風向をベクトルの方向で（矢印の向きが風下側），集中度母数をベクトルの長さで，それぞれ表わす．



第7図　集中度母数と海岸線からの距離との関係．

向分布は海風，陸風ともに1山型であり，von Mises 分布で近似するのは妥当と考えられる．

平均風向と集中度母数の地域分布を第6図に示す．海風の平均風向は，沿岸域，内陸部ともに海岸線の方向と概ね直角となっている．陸風の平均風向も沿岸域では局1を除いて海風と同様な傾向にあるが，内陸部の局11，局12では異なっている．この現象は海風と陸風の空間スケールの違いを反映しているとみることもできよう．次に，集中度母数の地域的特徴をみると，海風の場合，海岸線からの距離を尺度として2つのグループに分けられそうである．すなわち，ひとつは沿岸域に位置する測定局のグループと，他のひとつはより内陸部に位置する測定局のグループである．集中度母数を海岸線からの距離に対してプロットした結果を第7図に示す．集中度母数は海岸線からの距離が概ね 10 km 以内の沿岸域では地点間のバラツキが大きく，より内陸部では小さい値（1～2.5 の範囲）に収束する傾向があることが注目される．一方，図は省略するが陸風については，集中度母数と海岸線からの距離との関連性は海風ほど顕著ではない．

このような現象の要因について詳細に検討することは難しいが，地形の影響が大きいであろうことは予想される．たとえば，海風の集中度母数は呉市内に位置する局5が沿岸域の測定局中最小になる．呉市は南西方向が湾に面しその他の方向が山に囲まれた半盆地状の地形を成しており，このような複雑な地形条件のため海風の風向のバラツキが大きくなるもののと考えられる．一方，集中度母数が最大となるのは海風，陸風ともに竹原市の局7である．竹原市の北方にはv字型の谷が南北方向に走り，第5図に示すようにこの方向が海風と陸風の平均方向にほぼ一致しているため，谷沿いの方向に海陸風が収束し易いのであろう．また，内陸部では山谷風や斜面風が海陸風に及ぼす影響についても考慮する必要がある．このように，海陸風の風向分布はローカルな地形の影響を強く受けて多様な分布特性を持つものと推測される．

4.3. 風向の標準偏差

von Mises 分布の集中度母数が"circular data"のバラツキの尺度であることは第2図からも理解できるが，データのバラツキは標準偏差で表わされることが多い．風向の標準偏差は大気安定度を Pasquill 安定度階級に分類する指針のひとつに採用されており（環境庁，1982），大気汚染の分野においても汚染物質の拡散幅を推定する基礎的な統計量である．そこで本節では von Mises 分布の集中度母数と標準偏差との関連性について検討する．"circular data"の標準偏差は直線上のデータと異なり一義的に定義することが難しく，従来から風向の標準偏差として，Mardia (1972)，Verrall ら (1982)，

Ackermann (1983), Yamartino (1984), らの各モデルが提案されている．Yamartino はモンテカルロ実験の結果から，標準偏差が 0～40° の範囲内では Verrall ら，Ackermann，の両モデルともよい結果を与えるが，標準偏差が 40° を超えると Verrall らのモデルは過小評価し，Ackermann のモデルは過大評価する，と指摘している．また，Turner (1986) もこれらの3つのモデルを比較して，標準偏差が大きくなると Yamartino のモデルの精度がよいと述べている．また，Mori (1986) は実測データとの整合性から Yamartino と Mardia の両モデルはともによい推定量であるとし，重光ら (1987) は標準偏差が 60～80° よりも小さい範囲内では Verrall らと Yamartino の両モデルの間にはよい対応関係が認められるが，標準偏差がより大きくなると対応関係がよくないことを見いだしている．

ここでは，以上の知見に基づき，海陸風の標準偏差として，Yamartino と Mardia のモデルを採用する．Yamartino の標準偏差：σ_Y と，Mardia の標準偏差：σ_M はともに $\bar{R}$ のみの関数で表現され，次のように定義されている．

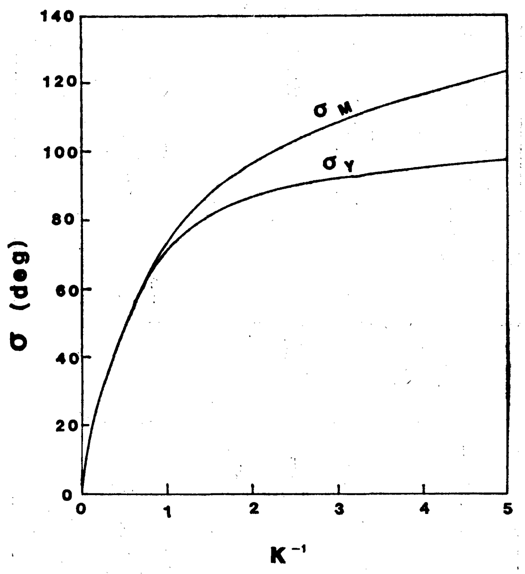
$$\sigma_Y=\sin^{-1}(\varepsilon)\ (1+0.1547\,\varepsilon^3) \quad (6\,a)$$

$$\varepsilon=\sqrt{1-\bar{R}^2} \quad (6\,b)$$

$$\sigma_M=\sqrt{-2\ln \bar{R}} \quad (7)$$

集中度母数は（5）式により $\bar{R}$ と関連づけられるので，両標準偏差はともに集中度母数のみの関数となる．標準偏差と集中度母数の関係を第8図に示す．横軸は集中度母数の逆数であり，集中度母数が概ね0.6～0.8以上になると両モデル間の差異は小さい．集中度母数がより小さくなると両モデル間の差が大きくなるが，この要因は σ_Y が上限値 (103.9°) を持つのに対し σ_M には上限がないためである．

海風の場合，集中度母数はすべての測定局において1.03～5.60であり，両モデルはよく一致する範囲内にある．一方，陸風についてみると，集中度母数の最小値は局12の0.39であり，このとき両モデル間の差は13.6°となる．つぎに集中度母数が小さいのは局6の0.66である．これらの測定局では陸風の風向分布は2山型となるため標準偏差の精度は他の測定局と比較して劣ることに注意する必要がある．その他の測定局では陸風の集中度母数は1.22～9.95の範囲内にあり両モデルの対応はよい．以上の結果から，沿岸域に位置する測定局の海陸風の標準偏差としては Yamartino, Mardia の両モデルのいずれを採用してもよいといえる．



第8図　風向の標準偏差と集中度母数 (κ) との関係．
σ_M : Mardia のモデル，σ_Y : Yamartino のモデル

5. まとめ

大気汚染常時監視システムの測定局の3年間のデータをもとに海陸風日を統計的に抽出し，海陸風の風向分布に von Mises 分布を適用した．海風と陸風の母数の地域的特徴および風向の母数と標準偏差との関連性について検討し，つぎの知見を得た．

1）広島県沿岸域では年間を通して海陸風が吹き，海陸風出現率は5～8月に高く，40%以上であり，1月に低く14%であった．

2）海風，陸風ともに風向分布は大部分の測定局で1山型であり，von Mises 分布で近似できる．

3）海風の平均風向は，沿岸域，内陸部ともに海岸線にほぼ直角となる．陸風の平均風向は沿岸域では海風と同様な傾向が認められるが，内陸部では異なっている．一方，集中度母数は，海風の場合，沿岸域では地点間のバラツキが大きく内陸部では相対的に小さい値に収束する傾向が伺える．

4）沿岸域に位置する測定局の風向の標準偏差としては，海風，陸風ともに Yamartino (1984) のモデル，または Mardia (1972) のモデルのいずれを採用してもよい．

本報ではすべての海陸風日を対象に風向分布の解析を

行った．今後は，日射量，気圧配置などの海陸風の発生条件，外部条件を考慮して解析し，これらの条件が海陸風の風向分布に及ぼす影響について検討する必要があろう．

本稿の内容について，有益なコメントをいただいた審査員の方々に感謝します．

参考文献

Ackermann, G.R., 1983: Means and standard deviations of horizontal wind components, J. Climate Appl. Meteor., 22, 959-961.

江口恒夫，1977：大阪市の海陸風について—地上風データの統計解析—，天気，24，739-746.

Fisher N.I., 1987: Problems with the current definitions of the standard deviation of wind direction, J. Climate Appl. Meteor., 26, 1522-1529.

環境庁，1982：窒素酸化物総量規制マニュアル，59-60.

北林興二，1976：海陸風の統計的解析，公害，11，288-306.

楠田信，阿部信男，1982：大分市の夏季の海陸風，天気，29，81-86.

Mardia, K.V., 1972: Statistics of directional data, Academic press, 357 pp.

宮田賢二編，1982：広島県の海陸風，渓水社，395 pp.

Mori, Y., 1986: Evaluation of several "single-pass" estimators of the mean and the standard deviation of wind direction, J. Climate Appl. Meteor., 25, 1387-1397.

根山芳晴，1982：瀬戸内海の海陸風について，天気，29，653-668.

重光和之，瀬戸信也，大原真由美，1987：風向データの統計解析，全国公害研会誌，12，82-88.

Turner, D.B., 1986: Comparison of three methods for calculating the standard deviation of the wind direction, J. Climate Appl. Meteor., 25, 703-707.

Yamartino, R.J., 1984: A comparison of several "single-pass" estimators of the standard deviation of wind direction, J. Climate Appl. Meteor., 23, 1362-1366.

Yoshikado, H., 1981: Statistical analyses of the sea breeze pattern in relation to general weather conditions, J. Met. Soc. Japan, 59, 98-107.

Verrall, K.A. and R.L. Williams, 1982: A method for estimating the standard deviation of wind directions, J. Appl. Meteor., 21, 1922-1925.

IFHP/CIB/WMO/IGU 国際会議「都市気候・計画・建築」のお知らせ

〈主催〉 IFHP/CIB/WMO/IGU 国際会議「都市気候・計画・建築」組織委員会

〈共催〉 世界：国際住宅連合（IFHP）・都市建築気候学委員会
国際建築情報会議（CIB）・W-71建築気候学ワーキング委員会
世界気象機関（WMO）
国際地理学連合（IGU）・気候学委員会・局地気候小委員会
日本：日本建築学会，日本気象学会，日本地理学会

〈後援〉 空気調和衛生工学会，日本農業気象学会，日本造園学会，ほか

期　日：1989年11月6日（月）～11日（土）

会　場：国立京都国際会館

テーマ：気候と建築／日射／植栽の効果／大気汚染／気候変化と観測／建築環境設計／都市気候の予測／都市気候とエネルギー管理／水／都市境界層の風構造／都市キャノピー層の風構造／都市気候と建築材料／人間の健康と快適性／都市気候と都市計画／設計解析／ほか

使用言語：英語（ただし，24題の招待講演には同時通訳がある）

登録費：9月30日まで，一般 25,000円，学生 15,000円（バンケット費は別）
10月1日以降，一般 30,000円，学生 20,000円

問合せ：〒606 京都市左京区吉田本町　京都大学工学部建築学教室　中村泰人
075-753-5739（直通）
FAX 075-753-5748（教室）