

## ドームふじ観測拠点における風向測定値のエラーと補正

平沢尚彦\*

Errors in wind direction data at Dome Fuji Station, and corrections

Naohiko Hirasawa\*

**Abstract:** Some kinds of error in surface wind direction data at Dome Fuji Station observed by the 38th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-38) in 1997 are reported. The most serious error is that the wind direction data was shifted toward azimuths of 45-, 135-, 225- and 315-degrees. However, data correction is possible since the error is systematic. For example, the data in the 0~90-degrees azimuth domain are shifted toward 45-degrees. As a result of examining the correction method, though it is impossible to correct the data with the same resolution of 1 degree that the observed data had, it is possible to correct it at the resolution of 16 sectors. Wind direction data of the Auto Weather Station (AWS) at Dome Fuji Station are regarded as true values in this correction process. An empirical method comparing with the AWS data was proposed here. In the appendix, theoretical discussion on the correction is given, and corrections using exponential functions are demonstrated, which however, do not work well.

**要旨:** 本論文では、第38次南極地域観測隊によって1997年にドームふじ観測拠点で観測された地上風向データに複数の重大なエラーが含まれることを報告し、その特徴を記述した。最も重大なエラーは方位45度、135度、225度、315度に向かって、風向データが変移していることであった。補正方法の検討を通して、1度の解像度を持つ測定データを同程度の解像度で補正することは不可能であることが分かり、可能な最高の解像度として16方位に補正した。補正方法として、ドームふじ観測拠点で併行して観測していたAuto Weather Station (AWS)の風向を真値とし、AWS風向に合わせ込む経験的な方法を提案する。付録では補正方法に関する理論的な考察を行い、それに基づく一例として指数関数を利用した補正方法を検討するが、ここでは十分な補正結果が得られない。

### 1. はじめに

第36次~38次南極観測隊により行われたドームふじ観測拠点における深層氷床コア掘削プロジェクト (Hondoh, 1999; Watanabe, 1999) に関連して、日本隊にとって初めての南極内陸基地での気象の通年観測が実現した (佐藤ら, 1999)。ここで取得された気象データは様々な分野で利用されている。とりわけ、地上気象観測データは多くの研究において基本的データセットとして重要である。冬期には $-70^{\circ}\text{C}$ を下回る環境では測器の動作性能は一般には保証

\*国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

されず、観測の維持には大きな努力を必要とした。また、“基地”という人工物を作り、そこで我々が活動することが、観測される気象データに与える影響について適確に予察することが困難な中での観測でもあった。

しかし、データ利用に際して広い意味での人為的なエラーがどの程度あるのかを知っておくことは不可欠である。現在、少なくとも地上の風向と気温の測定値に明らかなエラーが検出されている(平沢・森永, 1998)。ここでは、風向測定値に含まれるエラーの特性を示し、利用上の注意を議論する。

解析には第38次(山内ら, 1999; 平沢, 1999)と37次観測隊が取得した1997年1月から12月のドームふじ観測拠点の地上気象データ(以後、地上風向と表す)と、ウィスコンシン大学が構築しインターネットで公開しているAuto Weather Station(AWS)データ(同, AWS風向)(Stearns *et al.*, 1993)を使用した。ドームふじ観測拠点の地上気象観測システムについては宮本ら(1999)の通りである。ドームふじ観測拠点の地上気象観測では1分値を記録しているが、10分値であるAWSデータと比較するために10分ごとのデータに間引いたデータセットに編集し用いた。

## 2. 地上風向に見られるエラーの概要

図1に1997年1月1日から12月31日までの地上風向の出現頻度を1度ごとに示す。北東(極大は44度)、南東(同135度)、南西(同223度)、北西(同316度)に明らかに系統的エラーと判断される極大が見られる。また、約7度の周期性を持つエラーも見られる。

風向を8方位で表す場合には1方位が45度分を、16方位で22.5度分、32方位で11.25度分を含むことになり、いずれもここで検出される約7度の周期的エラーは表面化し難い。今回のドームふじ観測拠点の地上風向に関して32方位より詳細な精度(例えば64方位)で風向を

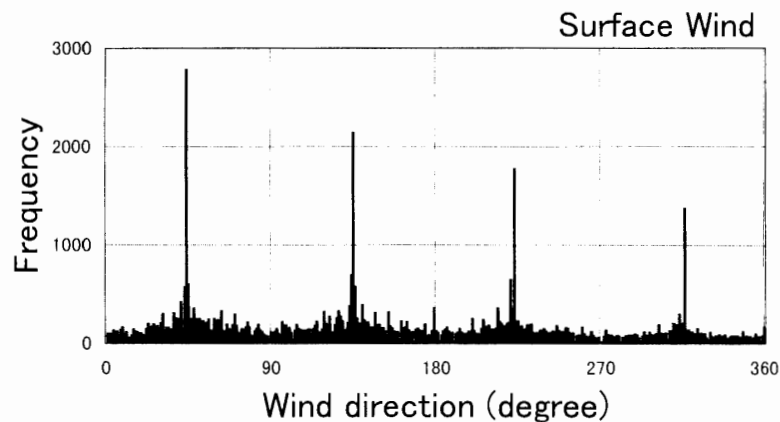


図1 1997年1月1日から12月31日までの地上風向の出現頻度(1度ごと)。

Fig. 1. Frequency of the surface wind direction from January to December 1997 (every 1 degree).

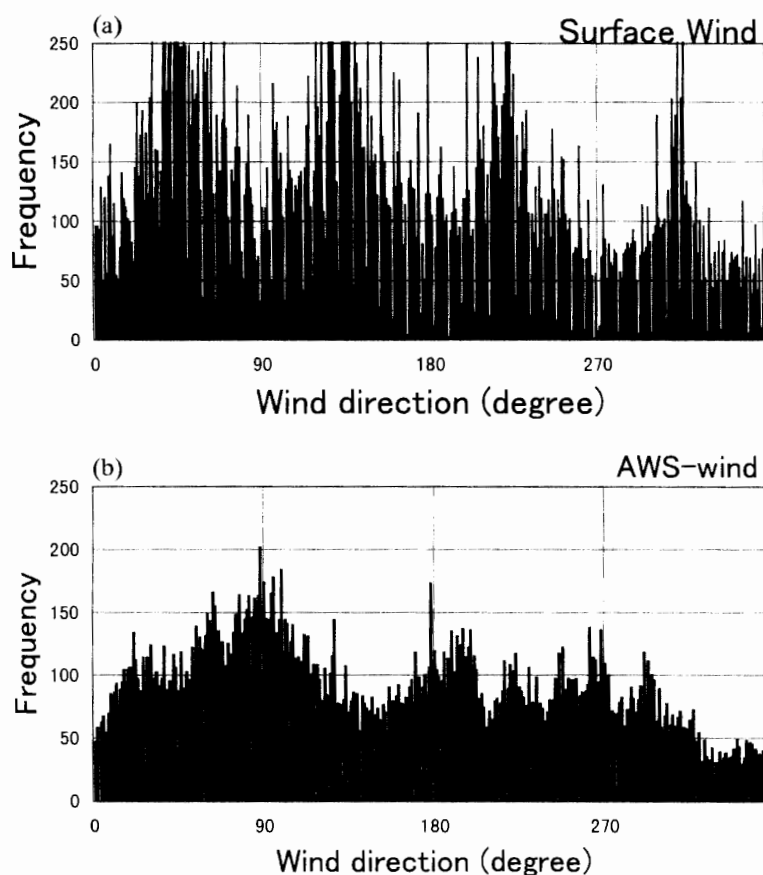


図2 a: 地上風向の出現頻度 (図1の縦軸のスケールを変えたもの), b: AWS風向の出現頻度.

Fig. 2. a: Same as Fig. 1 except for the scale of the vertical axis, and b: same as Fig. 2a except for the AWS wind direction.

議論することは、特別な処理をしない限りは残念ながら避けるべきであるが、多くの場合16方位程度の精度で支障はないであろう。そこで、本論文では約90度ごとに現れるエラーの特性を調査し、利用上の制限について議論する。

風向の出現頻度に関して、地上風向とAWS風向との比較のために図2を示す。図2aは地上風向の出現頻度で、図1の縦軸のスケールを変えたものである。図2bはAWS風向の出現頻度である。AWSの風向データにも3度から4度程度の周期的なエラーが見られるが、16方位で分類した利用ならば可能であろう。AWS風向の頻度には、90付近を中心とした極大と北北西に極小が認められるが、この特徴は地上風向からは読み取れない。このことは、地上風向に見られるエラーは全方位に及び、風向頻度の特徴を隠してしまうほどの重大なものであることを示唆している。

図3に地上風向とAWS風向との散布図を示す。図は5月から8月に関するのみ示しているが、その特徴は年間を通して共通している。既に示したように地上風向は非常に深刻なエラー

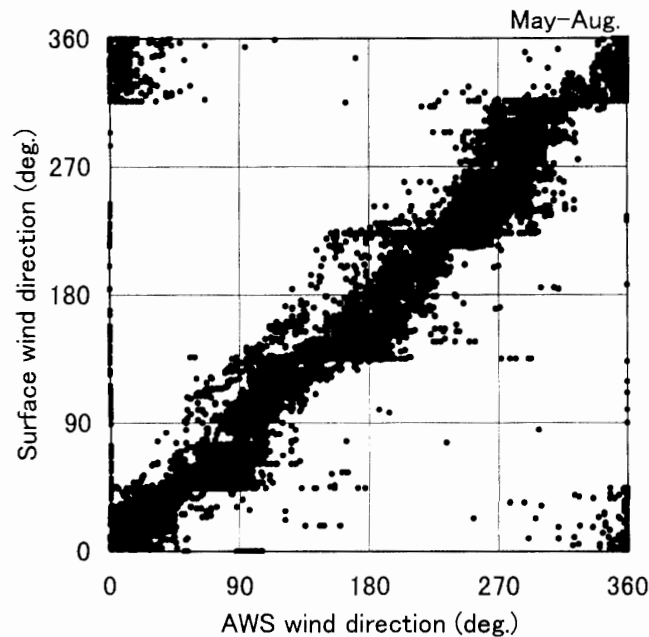


図3 地上風向と AWS 風向との散布図 (5 月から 8 月). 縦軸: 地上風向, 横軸: AWS 風向.  
 Fig. 3. The scatter diagram between the surface wind direction (vertical axis) and the AWS wind direction (quadrature axis) from May to August.

の影響を受けてはいるが, 両者の相関が明瞭に見られることから, 地上風向の測定値が完全に利用不可能な無秩序なデータでないことが確認できる. また, 図 2 を考慮すると, 地上風向のエラーは単に 45 度付近, 135 度付近, 225 度付近, 315 度付近の 4 つの狭い方位にのみ影響を及ぼすものではなく, 0 度から 90 度, 90 度から 180 度等の 90 度ごとに区切られた広い領域でそれぞれの領域の中心 (45 度, 135 度等) の方向に変移したためのエラーに見える. 45 度付近, 135 度付近, 225 度付近, 315 度付近の頻度が極端に大きくなるのがこの変移の特徴である.

### 3. 地上風向と AWS 風向の詳細な比較

図 4 には 3 月と 4 月を例に, 地上風向が頻度極大の一つである 43 度~45 度の時の AWS 風向の時系列を点で示した. ほとんどの場合は 0 度から 90 度の風向を示すことが分かる. この特徴は年間を通して共通であるし, 他の 3 つの地上風向の頻度極大方位についても同様の特徴を示す.

比率からは非常に少ないが, 図中に閉曲線で印したように AWS 風向が 0 度~90 度領域外の風向を示すことがある. 他の 3 つの地上風向頻度極大域を併せて, こうした事例で 30 分以上続いた場合を調べたところ, 静穏時等の風速が弱い場合が目立ったが 5 m/s 以上の風速時も希にあった. この 2 つのケースはいずれも静穏時に対応している.

地上風向に対する AWS 風向のばらつき度合いを見るために図 5 を示す. 図 5 中にはそれぞれ

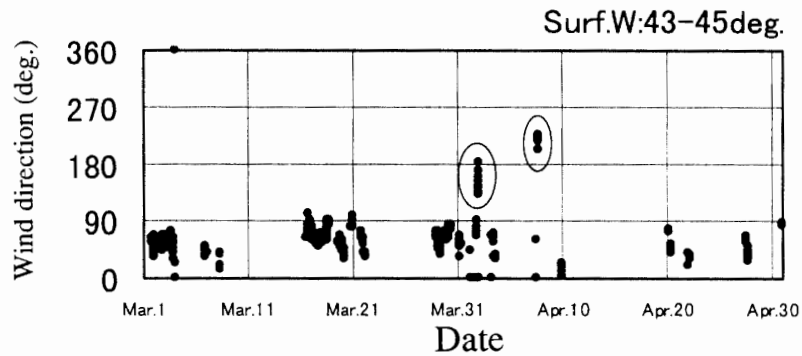


図4 3月と4月について、地上風向が43度～45度(頻度極大の一つ)の時のAWS風向の時系列(点)。AWS風向が0度～90度の範囲外を示す2ケース(4月1日と4月7日)を閉曲線で印した。

Fig. 4. Time series of the AWS wind direction only when the surface wind direction is 43-45 degrees (which is one of four azimuths with maximum appearance frequency) in March and April. Two cases (on 1st of April and 7th of April) in which the AWS wind direction is outside of 0-90 degrees are marked by closed lines.

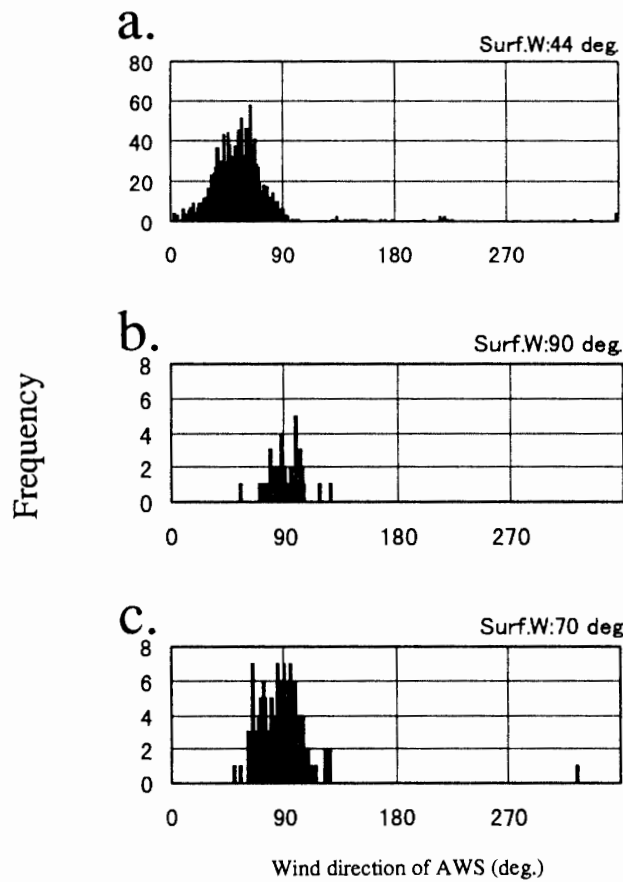


図5 地上風向 (a) 44度の時のAWS風向の頻度分布, (b) 同90度, (c) 同70度。

Fig. 5. Frequency distribution of the AWS wind direction at (a) 44-degrees surface wind direction, (b) same but 90-degrees and (c) same but 70-degrees.

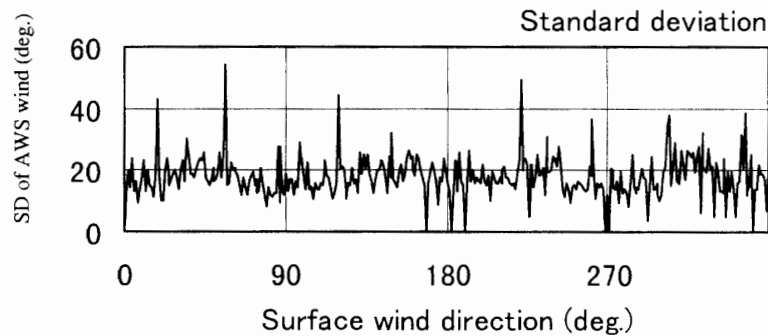


図6 地上風向 (1度ごと) に対する AWS 風向の標準偏差。

Fig. 6. Profile of the standard deviation of the AWS wind direction at each direction of the surface wind (with 1 degree resolution).

れ地上風向 (a) 44度の時の AWS 風向の頻度分布, (b) 同 90度, (c) 同 70度である。元々の地上風向の頻度が異なるので絶対値は比較できないが, 出現頻度で規格化して (例えば, 地上風向 44度は地上風向 90度の約 10倍) 比較すると AWS 風向の頻度分布の特徴が非常に似ていることが分かる。ただし, AWS 風向の最大頻度は地上風向 44度, 90度に関しては 45度付近と 90度付近にそれぞれ現れるが, 地上風向 70度に関しては 90度に近い方位に中心がある (90度寄りの風向が変移した) ように見える。この特徴は, 図 1.2 で議論した地上風向の変移と整合する。図 6 は各地上風向に対する AWS 風向の標準偏差の分布である。全方位でだいたい 20度~40度の値を示し, 図 1 に似た系統的な特徴は明瞭ではない。今回のエラーは地上風向の出現頻度を大きく変形してしまう一方で, AWS 風向とのずれの度合い (標準偏差等) に関しては風向別に明瞭な違いを及ぼさない。すなわち, 地上風向のエラーは風向の逆転等の複雑な変化ではなく, 並進的な移動を起こしていることの傍証とみることができる。

## 4. 地上風向の補正

### 4.1. 補正の概念

ここでは, 実際に観測された地上風向を正しい風向に戻すことを目的とする。表 1 に本稿で検出した風向エラーをまとめる。本節で補正を試みるのは項目 1 と 2 である。項目 3 については, 低温下で風向計のベアリングが硬くなるなどの原因で発生した非系統的なエラーである可能性が高く, 選択的に補正するためには気温等を考慮して検討する必要がある。

まず, データに対する補正を最少にする目的で, 最も顕著に風向変移の影響を受ける 4 方位 (45度付近, 135度付近, 225度付近, 315度付近) のみの補正を試みた結果を図 7 に示す。ここでは, 該当する狭い 4 方位の地上風向を AWS 風向にそのまま置き換えた。しかし, 図 2a で議論した四つの 90度幅の方位の中心付近に極大を持つ系統的なエラーは修正されずに残っており, 図 2b の特徴は全く見られない。このことは図 5 の特に方位 70度に関する議論にも見られるように, 地上風向の補正はすべてのデータを対象にする方法で行う必要があると考えられ

表1 地上風向に検出されたエラー  
Table 1. Summary of errors in surface wind direction.

	エラー内容	主な原因 (推定)	本論文の補正
項目1	45度付近, 135度付近, 225度付近, 315度付近への風向出現頻度の集中	測器不具合	対象
項目2	全方位に亘る約7度周期の風向出現頻度の集中	測器不具合	対象
項目3	例えば, 45度付近の風向の場合にAWS風向が0~90度以外の風向を指示	静穏時の測器誤動作 (低温によるベアリングの硬化)	非対象

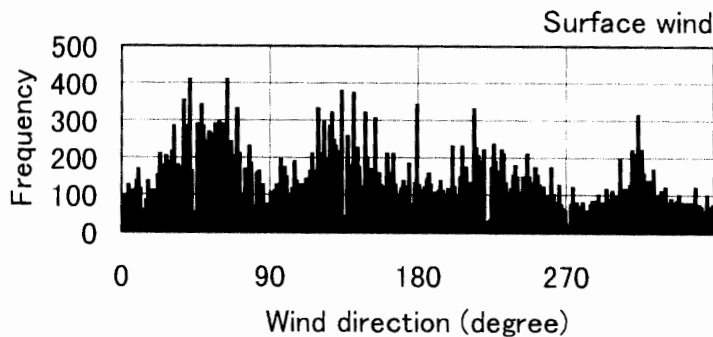


図7 43-45度, 134-136度, 221-223度, 316度のみの風向をAWS風向に置き換えた場合の地上風向の出現頻度分布。

Fig. 7. Frequency of the surface wind direction corrected by replacing the wind direction by the AWS directions in the four sectors of 43-45, 134-136, 221-223 and 316 degrees where the error is largest.

る。

これまでの解析から, 地上風向のエラーの一つは0度, 90度, 180度, 270度を境とする90度幅の4方位ごとに分けて扱うことが出来ることが分かった。ある90度幅の方位 ( $a_1 \sim a_1 + 90^\circ$ ) における, エラーの発現機構を模式的に図8に示す。ここでは上段 (AWSと表示) に示した正しい風向頻度が一様であるとしている。正しい風向が中心付近 ( $\sim a_1 + 45^\circ$ ) に近い値へと入れ変わることにによりエラーが生じている。中心付近に近い地上風向ほどより広い範囲からの風向変移の影響を受けている。その結果が下段 (Surf. obs.と表示) に示す中心付近の頻度の極大である。図1によると, 中心の最大値の風向は中心から5度程度以上離れた風向に比べ, 約10倍の範囲の風向が変移してきた (累計した) 結果である。換言すれば, 変移してくる元の風向の範囲は中心から離れるに従い急激に狭くなる。

これらの特徴を踏まえて観測値にエラーが加わる過程を表す関数を考えると, 定義域と値域がいずれも解像度1度の離散的表現であるため, 1対1対応の関係になり得ない。すなわち, 補正後の風向を1度の解像度で表現する逆関数は不可能であると結論される。従って, 8方位, 16

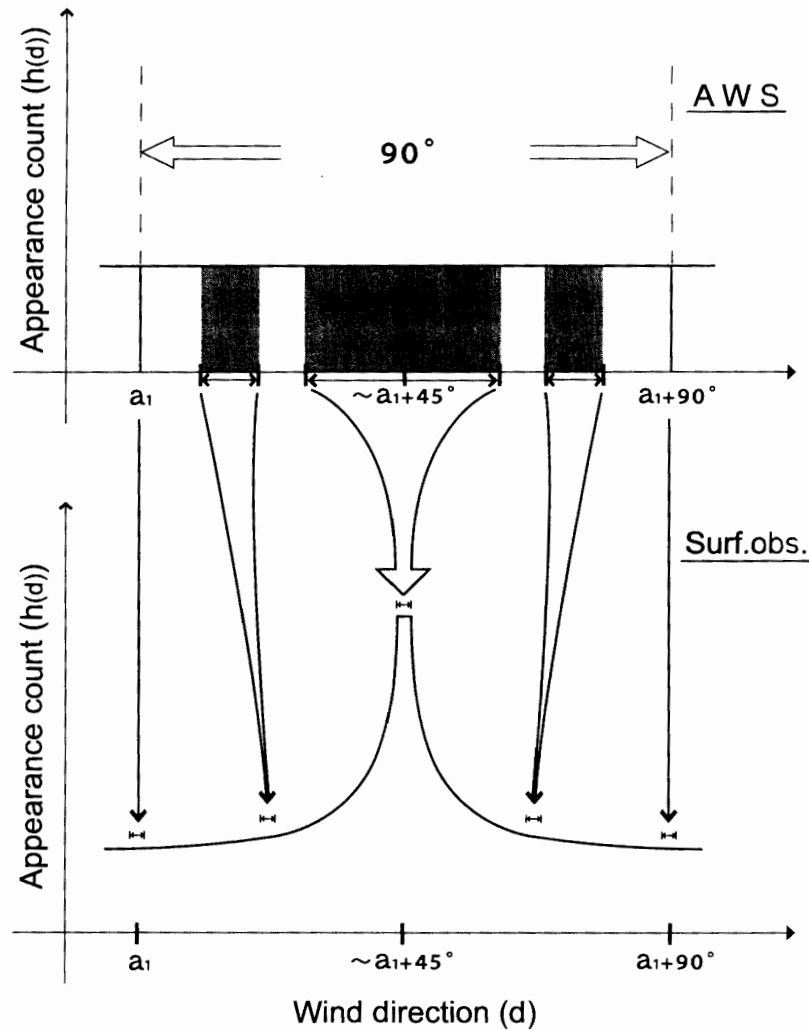


図8 エラーの発現機構の模式図.

Fig. 8. The error mechanism.

方位等のようにより広い解像度の表現に補正することになる。

次に、補正後の風向の解像度の限界（最小の風向範囲）について簡単に考察する。考慮すべき条件の一つは、上述の「中心の最大値の風向は4方位の境目付近の風向に比べ、約10倍の範囲の風向が変移している」ことで、例えば風向44度とは本来40度から50度の10度幅程度の風向範囲からの変移によってもたらされたものと考えることが出来る。すなわち、44度だけをNEの風向にそのまま置き換えるだけの場合でも、10度程度の風向範囲を代表することになる。このことは32方位（解像度11.25度）より細かい分類は出来ないことを示している。

第2章で述べた「約7度周期のエラー」の影響を回避することが次の条件である。この条件を完全に満足するためには、上記のように44度だけをNEに置き換えるだけでなく、少なくとも44度を含む7度以上の風向幅に対して補正後の風向を対応させる必要がある。この場合、44度を中心とした7度幅の風向は最低でも元々16度幅程度の風向の範囲を表していることにな



る。32 方位の解像度が 11.25 度であることを考慮すると、32 方位への補正は困難であると考えられる。従って、以下では 16 方位に補正するための具体的な方法を検討する。

#### 4.2. 補正方法の提案

図 8 で議論したエラーの特徴から、補正方法として 0 度から 45 度の範囲を考えることで、他の範囲 (45-90 度, 90-135 度等) に拡張することが可能である。図 9 は 0 度から 45 度の範囲を例として、観測された地上風向 (横軸) と補正後の風向 (縦軸) の模式的関係を示す。この範囲は、方位 N の東側半分、方位 NNE、方位 NE の北側半分に対応している。16 方位に再計算することは、観測された地上風向において、方位 N と方位 NNE の境界 (図 9 では WD (11.25) で標記)、及び方位 NNE と方位 NE の境界 (図 9 では WD (33.75) で標記) を決めることに帰着する。

図 9 に示されるように、WD (11.25) と WD (33.75) についてこれまでの解析から引き出される条件を満たす関数はその導関数が正で下に凸である (付録)。しかし、この条件を満たす関数は指数関数、2 次関数をはじめとする多項式関数等があり、それらを選択する根拠は今のところない。そこで、ここでは WD (11.25) と WD (33.75) を独立に変えて、補正後の風向と AWS 風向のずれの度合いが最も小さな場合を検出し、その時の WD (11.25) と WD (33.75) を補正のためのしきい値とする。そのしきい値から、NE と ENE の境界としての WD (56.25)、

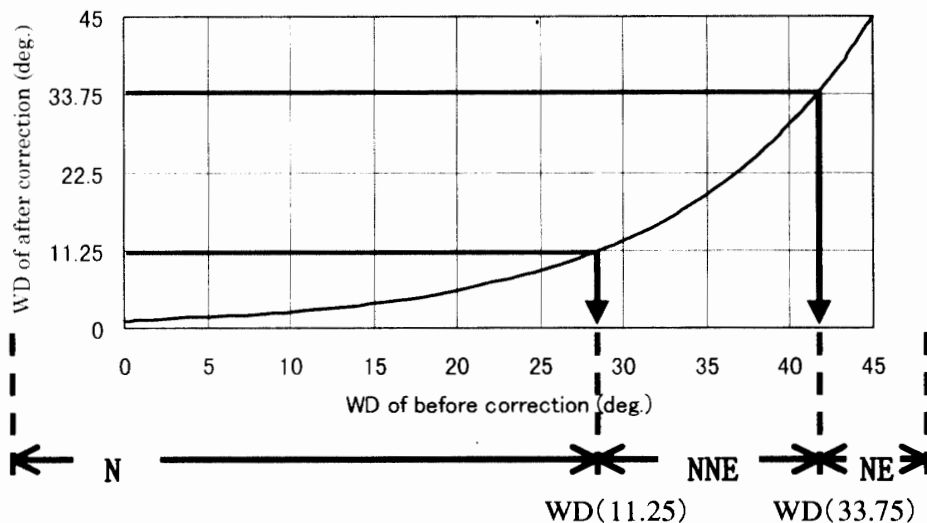


図 9 0 度から 45 度の範囲を例とした、観測された地上風向 (横軸) と補正後の風向 (縦軸) の関係の模式図。WD (11.25) は方位 N と方位 NNE の境界、WD (33.75) は方位 NNE と方位 NE の境界をそれぞれ示す。

Fig. 9. The relation between observed surface wind direction (quadrature axis) and corrected wind direction (vertical axis) in the 0-45-degree azimuth domain. WD (11.25) corresponds the boundary of N and NNE azimuths, and WD (33.75) is same but NNE and NE azimuths.

表2 Var(WD(11.25), WD(33.75)) の分布. WD(11.25) は 15-26, WD(33.75) は 38-43 の間で変えた場合の値を示す.

Table 2. Distribution of Var(WD(11.25), WD(33.75)) between 15- and 26-degree of WD(11.25) and 38- and 43-degree of WD(33.75).

( $\times 10^{-4}$ )

WD(11.25) \ WD(33.75)	38	39	40	41	42	43
15	72	59	52	49	53	111
16	65	51	44	39	41	96
17	62	47	38	34	35	88
18	59	44	34	27	27	78
19	59	42	31	23	21	69
20	61	43	31	<b>22</b>	18.1	62
21	65	46	33	<b>23</b>	<b>17.9</b>	59
22	69	50	35	25	19	58
23	78	57	42	30	23	59
24	90	67	51	38	29	63
25	102	79	61	47	37	68
26	124	100	80	64	53	78

ENE と E の境界としての WD (78.75) 等に拡張することになる。ずれの度合い Var (WD (11.25), WD (33.75)) を以下のごとく定義する。

$$\text{Var}(\text{WD}(11.25), \text{WD}(33.75)) = \sum_{i=1}^{16} \{(\text{Hsurf}(i) - \text{Haws}(i))^2\}.$$

ここで、Hsurf(i), Haws(i) はそれぞれ地上風向、AWS 風向の規格化された 16 方位の頻度分布で、それぞれの全方位の集計が 1 になる。Var (WD (11.25), WD (33.75)) の計算に際して、地上風向、AWS 風向のどちらか一方にでも欠測がある場合を対象から外し、両者のサンプル時刻 (従ってサンプル数も) を等しくした時系列を作成した。その結果を表 2 に示す。

表 2 で Var (21, 42) が最も小さい (以後、(21, 42) 補正と表現する)。これは、N として方位角 339 ~ 21 度 (43 度幅)、NNE として同 22 ~ 42 度 (21 度幅)、NE として同 43 ~ 47 度 (5 度幅) の補正を施す場合である。図 10 には AWS の風向頻度分布を、図 11 には補正後の地上風向頻度分布を示す。付録で示すように指数関数による補正では除去できなかった、NE, SE 等への頻度集中と、補正に関わる累計領域の不均衡からもたらされるエラーは大方除去されており、AWS 風向の頻度分布に近い結果となっている。

また、これまでの議論からは集計方位は 7 度程度以上が好ましく、それを満たすのは (21, 41) 補正、又は (20, 41) 補正であるが、図 11 に見られる良好な結果を評価しここでは Var の最小値である (21, 42) 補正を採用することにする。因みに、付録の指数関数の導入で検討した事象の一つ、Var (20, 39) は 0.0043 である。

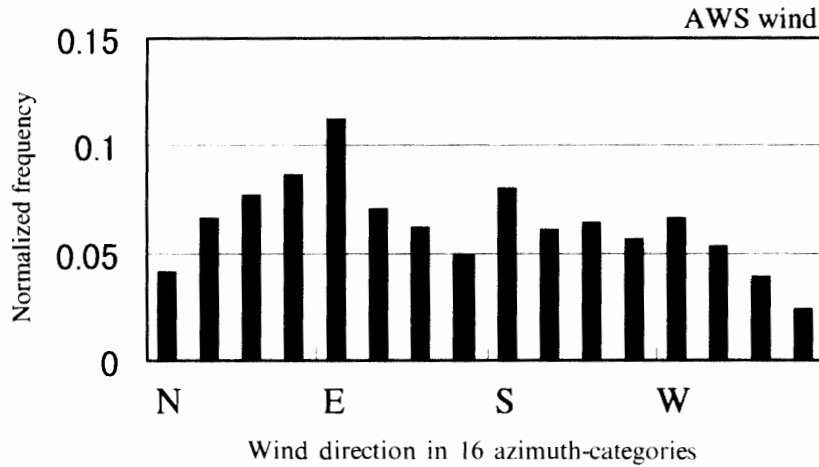


図 10 AWS 風向の 16 方位の出現頻度分布.

Fig. 10. Frequency distribution of the AWS wind direction in the 16 sectors.

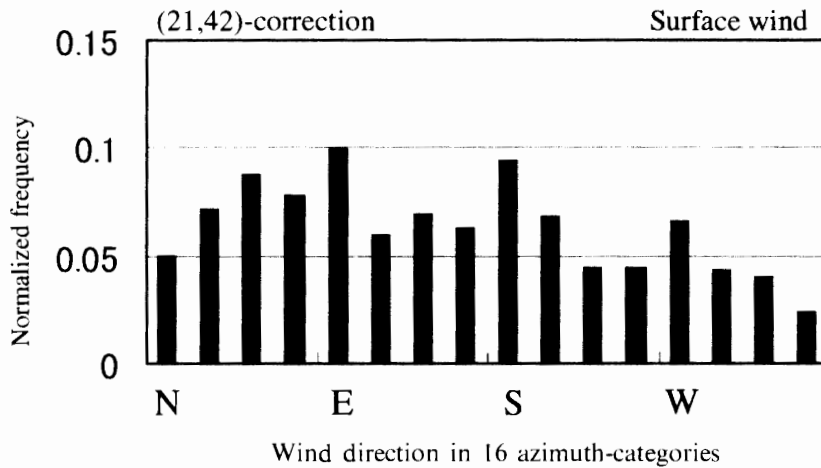


図 11 (21, 42) 補正後の 16 方位の出現頻度分布.

Fig. 11. Frequency distribution in the 16 sectors after making the (21, 42)-correction.

図 12 には補正前後の地上風向と AWS 風向の比較例を示す。(a) の 4 月 18 日 12 LT 付近は、エラーにより地上風向頻度が極小になる E の方位への補正が適正に行われた例である。すなわち、地上風向 (●) の測定値が ENE であったものが、補正風向 (○) は AWS (×) と同じ E に変わっている。また、(b) の 4 月 20 日 03-06 LT は、エラーにより地上風向頻度が極大となる NE から ENE へ補正が適正に行われた例である。すなわち、地上風向 (●) の測定値が E であったものが、補正風向 (○) は AWS (×) と同じ ENE に変わっている。因みに、同日 06-09 LT では 3 者ともに E となっている。また、20 日 00-03 LT では、AWS (×) が E であるが、補正風向 (○) は地上風向 (●) の測定値 NE から ENE へ変更されたままで、若干不十分な結果も見られるが、頻度分布、Var 値からは、多くの場合各々の風向は AWS 風向に一致

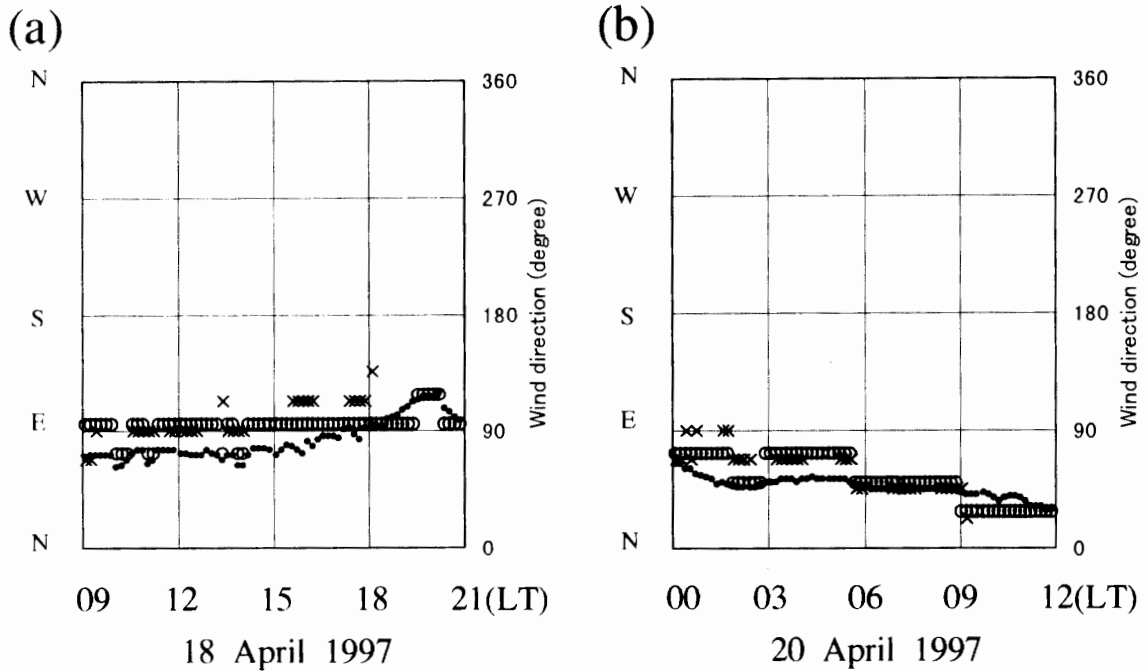


図 12 補正前後の地上風向と AWS 風向の比較例。補正前後の地上風向をそれぞれ ●, ○, AWS 風向を × で表す。

Fig. 12. A sample of comparison of the surface wind direction correction with the AWS wind direction. Surface wind directions before and after the correction are indicated by ● and ○, and AWS wind direction by ×, respectively.

表 3 16 方位に対応する補正関数テーブル

Table 3. Re-sample domains in the 16 sectors for the (21, 42)-correction table.

16 方位	地上風向 (度)	16 方位	地上風向 (度)
N	339- 21	S	159-201
NNE	22- 42	SSW	202-222
NE	43- 47	SW	223-227
ENE	48- 68	WSW	228-248
E	69-111	W	249-291
ESE	112-132	WNW	292-312
SE	133-137	NW	313-317
SSE	138-158	NNW	318-338

するように良好に補正されていると考えられる。今後の利用のために、(WD (11.25), WD (33.75))=(21, 42) の場合の 16 方位に対応する補正関数テーブルを表 3 に示す。38 次観測隊のデータに関してはこの表に基づいた補正済みのデータセットが極地研に準備されている。

## 5. ま と め

本論文では、第 38 次南極地域観測隊によって 1997 年にドームふじ観測拠点で観測された地上風向データに含まれるエラーの特徴を記述し、その補正について検討した。その結果、方位角 1 度の解像度で表わされている測定データではあったが、16 方位の解像度に補正することが限界であることが分かった。また、AWS 風向を基にした経験的な補正方法を提案した。

今回は 1997 年のデータに関して補正方法を検討したが、36 次 (1995 年)、37 次 (1996 年) 観測隊の風向データに同種のエラーが含まれているかどうかについて今後調べなければならない。同種のエラーが含まれていた場合、それぞれの観測データに関して補正のための係数を検討することが必要である。本来は AWS 風向との経験的關係ではなく、観測に用いた測器を使っての実験から補正のための実験式を導くことが最も望まれるが、3 年間という短い観測期間であり、既に観測が終了していることを考えると、今回提案した方法を使って今後の解析に利用することが最善の方法であろう。

## 謝 辞

南極内陸の貴重な気象データを取得出来たことは、ドームふじ氷床コア掘削計画に携わった多くの方々の努力による。著者が第 38 次観測隊で当該データの取得、データ解析に参加出来たことに対して、関係者の方々に深い感謝の意を表します。また、査読者及び編集委員の方々からは改稿過程において適切なコメントをいただいた。本論文を作成するにあたり、国立極地研究所情報科学センターを利用した。

## 文 献

- 平沢尚彦 (1999): ドームふじ観測拠点における高層気象・放射・雲の観測. 天気, **46**, 147-152.
- 平沢尚彦・森永裕幸 (1998): ドームふじ観測拠点の地上気温, 風向データに含まれるエラーについて. 第 21 回極域気水圏シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 118-119.
- Hondoh, T. and 17 collaborators (1999): Basic analyses of Dome Fuji deep ice core, Part 2, Physical properties. Polar Meteorol. Glaciol., **13**, 90-98.
- 宮本仁美・中村雅道・成田 修・横田 歩・森永裕幸 (1999): 第 37 次南極地域観測隊気象部門報告 1995. 南極資料, **43**, 477-533.
- 佐藤尚志・吉見英志・竹川元章・宮内誠司・中村辰男 (1999): 第 36 次南極地域観測隊気象部門報告 1995. 南極資料, **43**, 96-161.
- Stearns, C.R., Keller, L.M., Weider, G.A. and Sievers, M. (1993): Monthly mean climatic data for Antarctic automatic weather stations. Antarct. Res. Ser., **61**, 1-21.
- 山内 恭・平沢尚彦・林 政彦 (1999): 「南極大気・物質循環観測」の開始. 天気, **46**, 157-162.
- Watanabe, O. and 12 collaborators (1999): Basic analyses of Dome Fuji deep ice core, Part 1, Stable oxygen and hydrogen isotope ratios, major chemical compositions and dust concentration. Polar Meteorol. Glaciol., **13**, 83-89.

(2000 年 8 月 1 日受付; 2000 年 9 月 8 日改訂稿受理)

## 付 録

ここでは、エラーの発現機構の特徴から風向変移を表す関数について考察する。地上風向として記録されたデータセットから作成した風向頻度  $A(x)$  を、 $x$  を中心とする 1 度幅における頻度とする。このとき、 $A(x)$  は実際の正しい風向  $a_1$  と  $a_2$  ( $a_1 < a_2$ ) の間の風向頻度が集積したものとして表される。全ての風向の出現頻度が等しいとし、全方位の頻度の合計を 1 とする ( $\sum_{i=1}^{360} \{A(i)\} = 1$ )。すなわち、

$$A(x) = (1/360) \times (a_2 - a_1).$$

ここで、 $0 \leq x \leq 45$  (図 8 の左側の領域) とすると、

$$\frac{d \{A(x)\}}{d \{x\}} > 0, \quad (\text{A1})$$

$a_1$  と  $a_2$  も  $x$  の関数であるから、 $a_1(x)$ 、 $a_2(x)$  と書ける。考えている風向幅が 1 度であるので、 $a_1(x+1) = a_2(x)$  である。すると、式 (A1) より、

$$\begin{aligned} \frac{d \{a_1(x+1) - a_1(x)\}}{d \{x\}} &> 0, \\ \frac{d \{a_1(x+1)\}}{d \{x\}} - \frac{d \{a_1(x)\}}{d \{x\}} &> 0. \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

式 (A2) より、 $a_1(x)$  の  $x$  に関する 2 階微分が正、すなわち下に凸の関数である条件が導かれる。また、最初の条件  $a_1 < a_2$  より、 $a_1(x)$  の 1 階微分も正である。

従って、観測された地上風向 (横軸) と補正後の風向 (縦軸) の関係は、0 度から 45 度の範囲を例として、下に凸の単調増加関数を導入して図 9 のように模式的に示される。この範囲は、方位 N の東側半分、方位 NNE、方位 NE の北側半分に対応している。16 方位に再計算することは、観測された地上風向において、方位 N と方位 NNE の境界 (図 9 では WD (11.25) で標記)、及び方位 NNE と方位 NE の境界 (図 9 では WD (33.75) で標記) を決めることに帰着する。

以上の関係を満たす関数の一つは指数関数である。ここでは指数関数を利用した補正について検討する。観測された地上風向を  $X$ 、補正後の風向を  $Y$  とし、 $Y = A \times \exp(B \times X)$  の条件の下に経験的に係数  $A$ 、 $B$  を求める。ここで、 $X = 45$  (度) の時に  $Y = 45$  (度) の境界条件を与えることにより、 $Y = \exp \{(X - 45) \times B + \ln(45)\}$  となる。このとき、WD (11.25) =  $\{\ln(1/4)\} \times (1/B) + 45$ 、WD (33.75) =  $\{\ln(3/4)\} \times (1/B) + 45$  である。 $B$  を変えることにより WD (11.25) と WD (33.75) の組み合わせが上記の関連を保ちながら変化する。

図 A1 には、(WD (11.25), WD (33.75)) の組み合わせがそれぞれ (15.5, 38.88)、(20.5, 39.92)、(25.5, 40.95) の場合の関数  $Y = \exp \{(X - 45) \times B + \ln(45)\}$  を示す。それぞれの場合の方位 N、方位 NNE、方位 NE の累計範囲を表 A1 に示す。(15.5, 38.88) 補正は方位 NE への変移性を比較的弱く見積もった場合で、(25.5, 40.95) 補正は強く見積もった場合である。

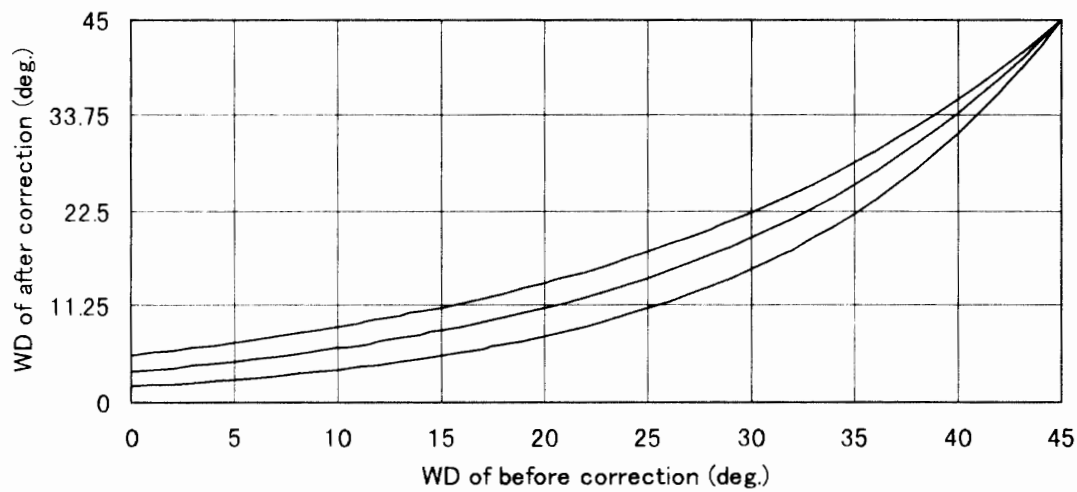


図 A1 (WD (11.25), WD (33.75)) の組み合わせがそれぞれ (15.5, 37.84), (20.5, 39.92), (25.5, 40.95) の 3 つのケースの補正関数。

Fig. A1. Correction functions of the (15.5, 37.84)-, (20.5, 39.92)- and (25.5, 40.95)-corrections.

表 A1 3 つの補正関数に対する方位 N, 方位 NNE, 方位 NE の方位角範囲と範囲の角度幅。

Table A1. Re-sample domains of N, NNE and NE azimuths for each of the three correction functions.

	(15.5, 38.88) 補正		(20.5, 39.92) 補正		(25.5, 40.95) 補正	
Coeff. B	0.047		0.057		0.071	
WD(11.25)	15.5		20.5		25.5	
WD(33.75)	38.88		39.92		40.95	
方位	方位範囲 (度)	範囲広さ (度)	方位範囲 (度)	範囲広さ (度)	方位範囲 (度)	範囲広さ (度)
N	345-15	30	340-20	40	335-25	50
NNE	16-38	23	21-39	19	26-40	15
NE	39-51	12	40-50	10	41-49	9

図 A2 は 3 つのケースの補正結果に基づいて集計した 16 方位の頻度である。補正結果の評価のために、図 10 の AWS の 16 方位の頻度と比較する。(15.5, 38.88) 補正は図 2 に比べ方位 N, E, S, W の 4 方位の頻度がやや小さく、方位 NE, SE 等に出現頻度が偏るエラーの特徴がまだ残っている。また、(20.5, 39.92) 補正や (25.5, 40.95) 補正では方位 N, E, S, W の 4 方位に頻度の極大が現れ、補正のための累計領域が大き過ぎることを示唆しており、方位 NE, SE 等のエラーの特徴も残っている。これらのことから、WD (11.25) や WD (33.75) をより小さくすれば方位 NE, SE 等のエラーが除去されず、逆に WD (11.25) や WD (33.75) をより大きくすれば方位 N, E, S, W の極大が新たに現れてしまうことが分かる。従って、ここで仮定した簡

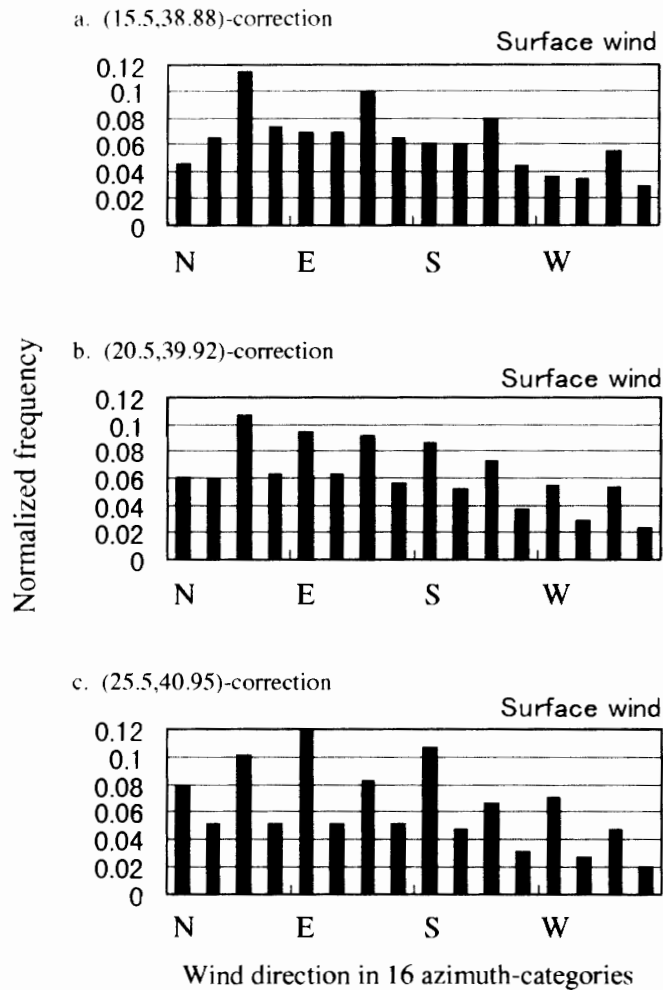


図 A2 図 10 のそれぞれ 3 つの補正後の 16 方位の出現頻度分布。

Fig. A2. Frequency distributions of wind direction in the 16 sectors after making the three kinds of correction in Fig. 10.

単な指数関数による補正は適当ではない。

当付録のはじめに検討した条件を満たす関数としては、2次関数を含む高次多項式関数、楕円関数等が考えられるが、エラーの原因に関する情報等がなく、ここで試行的に検討した指数関数を含めていずれの関数もそれが選択される根拠はない。すなわち、本文第4章で行った経験的な方法に優るものではない。