

茨城県東海村における原研のドップラーソーダで観測された 1991-1992年の上層の乱流強度

Upper layer turbulence intensities observed by Doppler soda of JAERI in TOKAI village,
IBARAKI prefecture, 1991-1992

富森 涼* 安達 隆史†
TOMIMORI Ryoko ADACHI Takashi

要約: 従来、教員養成系学部や高校において、気流と乱流が大気汚染物質や放射性物質等を運び、拡散させているという観点での気象学教材が不足している。この論文は、科学的な新たな知見を発表するとともに、前記の教材不足を補うものである。この論文では、茨城県東海村の日本原子力研究所によって1991-1992年に実施された、四季別2週間のドップラーソーダ観測を基にしている。この観測による地上42m~350mでの水平風速データおよび鉛直方向の乱流を表す鉛直風速成分の標準偏差データから鉛直方向乱流強度を算出し、その高度変化を解析した。解析結果は、四季をまとめて、風向別大気安定度別の鉛直方向乱流強度の高度分布図などで表わし、従来、高煙突からの排煙による大気汚染の濃度予測に用いられている「上層の大気安定度」が、長期平均濃度予測に適用される場合は、ほぼ妥当であるが、短時間高濃度予測に適用される場合は必ずしも妥当であるとは限らないことがわかった。

キーワード: 東海村、ドップラーソーダ、鉛直方向乱流強度、上層の大気安定度

I はじめに

この研究は、筆頭著者の富森(2009)が、山梨大学教育人間科学部ソフトサイエンス課程環境科学コース(地学分野)の平成20年度卒業研究として行った「大気汚染濃度推定のための上層の乱流強度の研究—茨城県東海村におけるドップラーソーダデータ解析—」の成果を学部付属の教育実践総合センター研究紀要の論文として取りまとめたものである。また、研究の手法と対象地域が同様であるが、夏と冬に限って上層の乱流強度を解析した近藤の卒論(2008)とそれを公表用に手直した近藤ら(2009)の研究に引き続くもので、春と秋を追加して四季を取りまとめたものである。内容は日本原子力研究所(現在名は、独立行政法人日本原子力研究開発機構であるが、ここでは、利用した気象観測の実施時期での名称を使い、短く「原研」またはJAERIと記す。)によるドップラーソーダ観測データを有効活用したもので、理科教育教材の開発という意味があるので、解析図を多く掲載した。このドップラーソーダは音波レーダとも呼ばれ、送受信における音波の周波数のドップラーシフトを検知して上層の3次元風ベクトルに換算する地上設置型のリモートセンシングである。

この論文は、上層の乱流強度の観測値を、環境アセスメントの際に使われる、火力発電所等の高煙突からの排煙による大気汚染濃度予測手法の検証に利用したものである。具体的には、従来、環境アセスメントにおいて一般的に使われている表1「地上の大気安定度」(科学技術庁;1993)から「上層の大気安定度」を推定する方法(表2)の妥当性を、観測された鉛直方向乱流強度の高度分布を解析することによって検証するものである。

*ソフトサイエンス課程環境科学コース学生、現在、京都教育大学大学院修士課程、†理科教育講座、現在、非常勤講師

表 1 パスکیل安定度分類表 (原子力安全委員会の気象指針；1982、科学技術庁；1993)

		日射量 $T(\text{kW}/\text{m}^2)$				放射収支量 $Q(\text{kW}/\text{m}^2)$		
		$T \geq 0.60$	$0.60 > T \geq 0.30$	$0.30 > T \geq 0.15$	$0.15 > T$	$Q \geq -0.020$	$-0.020 > Q \geq -0.040$	$-0.040 > Q$
風速 U (m/s)	$U < 2$	A	A-B	B	D	D	G	G
	$2 \leq U < 3$	A-B	B	C	D	D	E	F
	$3 \leq U < 4$	B	B-C	C	D	D	D	E
	$4 \leq U < 6$	C	C-D	D	D	D	D	D
	$6 \leq U$	C	D	D	D	D	D	D

表 2 地上と上層の大気安定度の対応関係 (従来法：最近の環境影響評価準備書より)

地上の大気安定度	A	A-B	B	B-C	C	C-D	D1 (D 昼間)	D2 (D 夜間)	E	F	G
上層の大気安定度	B	B-C	C	C-D	C-D	C-D	C-D	D	D	E	F

そもそも、「地上の大気安定度」と「上層の大気安定度」の対応関係を表にまとめて提案したのは、大田 (1980) である。それは、1960 年前後から 1970 年前後に公害資源研究所と電力中央研究所によって実施・解析された主に沿岸地域における大気拡散実験結果を利用したもので、表 2 にかなり近い結果になっている。朝倉ら (1982) も上記と同じデータを含めて様々な解析を行い、火力発電所の高煙突用の拡散パラメータを提案している。結果的に、通常、上層は地上に比べてあまり強い安定状態や強い不安定状態にはならないとする趣旨が共通している。これは従来の上層の気温勾配の観測値から、定性的にはほぼ妥当な結論であるが、気温勾配だけでは大気拡散を定量的に説明できない。定量的な結論の根拠とされた大気拡散実験は費用がかさみ、実施条件にも制約があるので、データ数が必ずしも十分ではない。また、窒素酸化物総量規制の地域総合シミュレーションでのパラメーターフィッティング (過去の環境濃度値に地域総合シミュレーション結果が合うように濃度計算等のパラメータを調節すること。) の結果、表 2 またはそれと類似な表が得られたという報告もある。しかし、地域総合シミュレーションに適用できたからといって、環境濃度に対する寄与率が低い単独高煙源の濃度予測に適用できるとは限らない。現実問題として、他に代わりになる適当な方法が見当たらないことから、現在、発電事業者から担当官庁に提出される環境影響評価準備書に表 2 が多く使用されているので、これをこの論文での検証対象に選定した。

この論文では、表 2 を従来法と呼ぶことにするが、これは地上気象観測によって得られる地上の大気安定度を中立側に一階級程度ずらして、PG 図の拡散パラメータ (環境庁；1988、公害研究対策センター；2000) を使う方法である。上記の PG 図とは、パスکیلとギフォードの研究が元になったもので、拡散パラメータを水平 (σ_y) と鉛直 (σ_z) に分け、それぞれを縦軸に、煙源からの風下距離を横軸にした両対数グラフの線図で、大気安定度別の線が描かれているものである。上記の従来法について、これまでに沿岸地域における上層の大気乱流の実測値との比較という観点での検証はほとんどなされていない。そのため、ここでは、ドップラーソーダによる上層の鉛直方向乱流強度の観測値 (沿岸地域における昼夜連続観測) によって上記の従来法を検証することを試みた。ここでの上層とは、地上 50~350m のこととし、煙軸がこの高度範囲に入るような高所放出が研究対象である。なお、ドップラーソーダ観測による高度 100~200m の鉛直方向乱流強度は鉄塔の同じ高度に設置された超音波風速計による値と平均的にかなり良く一致することは著者の安達も参加した Hanafusa ら (1996) に報告されている。

II 研究方法

1 研究対象地点

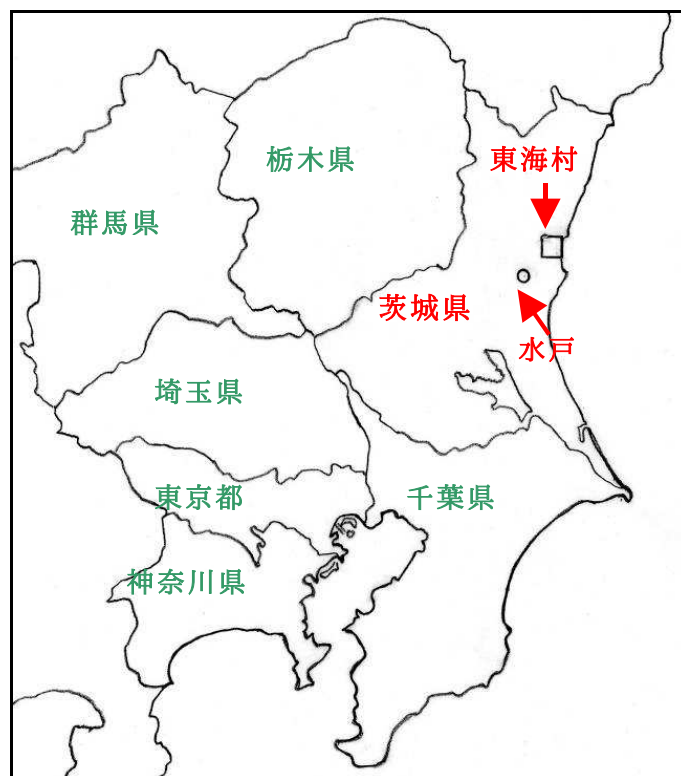


図1 東海村の位置（関東地方北部、太平洋岸、茨城県の県都水戸市より北東に約15kmの沿岸地域。気象庁の関東地方地図を元に作成）

茨城県那珂郡東海村（図1）の海岸部にある原研の東海研究所構内の気象室（海岸から約0.9km内陸）脇に設置されたドップラーソーダの観測データを利用した。この村は関東地方の北部の太平洋側に位置し、海岸線南部の埋立地に常陸那珂火力発電所を含み、比較的平坦な地域である。東海村（2009）HPによれば、この村の位置は、東経140°34′、北緯36°28′で、県都水戸市から北東へ約15kmの距離にあり、村域は東西が7.9km、南北が7.9kmとほぼ円形に近い。この地域は、我が国の火力発電所の多くが立地する比較的平坦な沿岸地域という部類に含まれるので、類似の地域にもここでの研究結果がある程度当てはまる可能性が高い。

2 使用データ

原研が国からの特別会計受託事業「環境放射能拡散評価安全性実証試験」において実施し、著者の安達も参加した長期野外拡散試験のデータ（林ら；1998a,b,c,d）の内の気象観測データを利用した。観測時期は秋季（1991年10月から11月）、春季（1992年3月）、夏季（1992年7月から8月）、冬季（1992年12月）の四季に14日ずつである。使用したデータは、試験期間中の1時間毎のドップラーソーダの地上42, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350m高の水平風向風速および鉛直風速の標準偏差の観測結果である。いずれも評価時間が10分間である。機種は海上電機製（AR410型）の筐

体が3本のモノスタテック型である。さらに、原研気象室で記録された日射量、放射収支量、地上風速が組み合わされた大気安定度（この論文で言う「地上の大気安定度」のこと。）も利用した。

III 解析のための理論

1 解析方針

まず、各高度における 10 分間内の鉛直風成分の変動の標準偏差をその高度の 10 分間平均の水平風速で割り、その高度の鉛直方向乱流強度とする。それらの値を安達（1996）提案の対応表により、大気安定度に結び付けて、地上の大気安定度との差異を検討する方法も考えられるが、観測原理が異なる超音波風速計とドップラーソーダの違いが目立つ懸念がある。そのため、絶対評価よりも相対評価の方が測定器の違いなどの影響が除かれるので結果の信頼性が高いと考えて次の方法を考案した。

原研に設置されたドップラーソーダの観測値はそれぞれ 45m 程度の厚さの空間平均値（中心高度 ± 22.5m）であることから、地上 42m 高の鉛直方向乱流強度を地上付近の代表値とみることにして、その値で各高度の鉛直方向乱流強度を割り、その高度分布を解析する。鉛直方向乱流強度は通常、高度とともに減少する傾向があるので、上層は地上の半分程度なのかどうかという見方をし、それが従来の高所放出時の大気汚染濃度予測に用いられる「上層の大気安定度」と矛盾しないかどうかを吟味することになる。この「上層の大気安定度」の概念を上層の鉛直方向乱流強度に結びつける理屈を次節で述べる。

2 従来法から導く地上の σ_z に対する上層の σ_z の比率

地上の大気安定度は地上気象観測と表 1 により決定される。高所放出の場合は、表 2 の「上層の大気安定度」に対応する PG 図の拡散パラメータが選択されて拡散計算が行なわれる。表 2 は地上大気安定度を D 側に 1 階級程度ずらして「上層の大気安定度」として使うという意味になっている。これが従来法であるが、次のようにして σ_z に結びつける。風下距離 (X) が 100m の地点での鉛直拡散パラメータの σ_z の値を使い、地上の値、上層の値を示し、さらに、上層÷地上を計算したものが表 3 である。この表 3 の最下段の大気安定度別の値が従来法から導いた基準であり、これらがドップラーソーダ観測による地上付近の乱流強度に対する上層の乱流強度の比を上回っているかどうかを見るのがこの研究の重要な視点である。その理論的根拠は後述する。ここでの風下距離 (X) とは、煙突から風下方向へ測った距離のことである。

表 3 風下 100m における地上の σ_z に対する上層の σ_z の比率（従来法から導いた基準）

地上の大気安定度	A	A-B	B	B-C	C	C-D	D1 (D 昼間)	D2 (D 夜間)	E	F	G
距離 100 m での σ_z (m)	14.03	12.30	10.78	8.88	7.32	5.86	4.69	4.69	3.50	2.30	1.44
上層の大気安定度	B	B-C	C	C-D	C-D	C-D	C-D	D	D	E	F
距離 100 m での σ_z (m)	10.78	8.88	7.32	5.86	5.86	5.86	5.86	4.69	4.69	3.50	2.30
上層÷地上	0.77	0.72	0.68	0.66	0.80	1.00	1.25	1.00	1.34	1.52	1.59

次に、前述のように大気拡散実験は費用が多いため高所放出時の σ_z の実測値を多数入手することは必ずしも容易でないため、上層の σ_z の代わりに上層の鉛直方向乱流強度を解析すれば良い

ことを導く。まず、風下距離 (X) が非常に短い場合は、 σ_z は、

$$\sigma_z = [\text{鉛直方向乱流強度}] \cdot X$$

となることが知られている。さらに、PG 図の σ_z を表す線が X=100m 付近では、傾きが 45 度に近い直線であり、傾きはあまり大気安定度によらないことから、この論文では、X=100m でも上式が近似的に成立するものとした。そうすると、 σ_z が鉛直方向乱流強度に比例することになる。即ち、ある大気安定度での σ_z と別の大気安定度での σ_z との比は、それぞれの大気安定度での鉛直方向乱流強度の比に置き換えることが出来る。このことから、ドップラーソーダの観測値を用いた上層の鉛直方向乱流強度を地上付近の鉛直方向乱流強度で割った値を、大気安定度毎に表 3 の最下段の値 (A:0.77, A-B:0.72, B:0.68, B-C:0.66, C:0.80, C-D:1.00, D1:1.25, D2:1.00, E:1.34, F:1.52, G:1.59) と比較検討することがこの論文の主要部分となる。具体的には、上層とは高所放出時の煙軸高度となりうる高度やドップラーソーダ観測の上限高度を考慮して地上 50~350m 高とした。地上付近とは観測時の一番低い高度である地上 42m 高とした。また、この論文では、「各高度の鉛直方向乱流強度」を「地上 42m 高の鉛直方向乱流強度」で割った値を、簡単のために、「鉛直方向乱流強度比」または短く、「乱流強度比」と呼ぶ。

IV 解析

1 陸風と海風の区分

鉛直方向乱流強度比の高度分布は、風上の海面または地面の粗度の影響を受けるが、海寄りの風の場合は、熱的内部境界層の影響も受けることがあるので、地上 42m の風向を指標として次のように三つに区分した。図 1 で示すように、東海村の海岸線は、ほぼ南北に走向し、東側が太平洋であり、西側が内陸である。ドップラーソーダ観測地点の原研気象室が海岸から約 0.9km の内陸であることも考慮して、海風、陸風、中間の風向範囲を、6~174 度の風向を海風、186~354 度の風向を陸風、それ以外を中間風向と定めた (図 2)。ただし、風向角は、北風を 0 または 360 度、東風を 90 度、南風を 180 度、西風を 270 度とする方式である。また、ここでは、海風と陸風の用語は、海陸風機構にこだわらずに、単に、海から陸に吹く風を海風、陸から海に吹く風を陸風とする。中間風向時は、いろいろな影響が混じり、鉛直方向乱流強度比の高度分布の特徴がはっきりしない可能性があるため、解析から除外した。

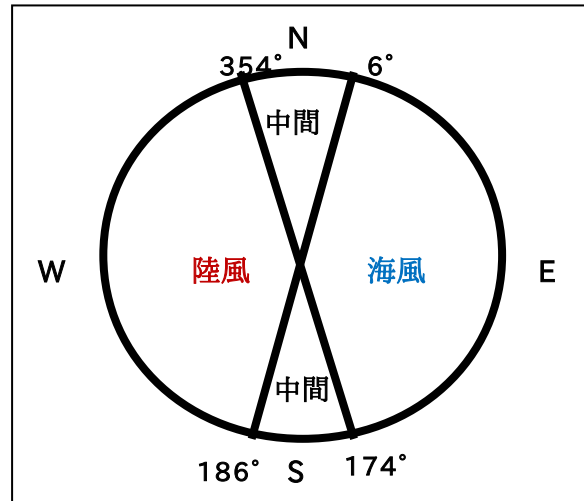


図 2 陸風と海風の区分

2 鉛直方向乱流強度比の陸風時と海風時の比較

大気安定度にかかわらず、四季を合計した陸風時の鉛直方向乱流強度比（図3）では、707個の平均値が下層において1前後であるが、50から150m高までわずかに増加し、150～250m高までは減少し、250～350m高までわずかに大きくなっている。ここで、大気安定度や季節による区別をしない理由はデータ数を多くするためである。平均値の信頼性をチェックするために、平均値に標準偏差を±した値も示しているが、プラスした値が高さ方向に大きく変化している。プラスした値の最大値は3程度である。ただし、乱流強度（比）は本来、正の値であるので、平均値マイナス標準偏差の値が負になった場合は零に置き換えてある。

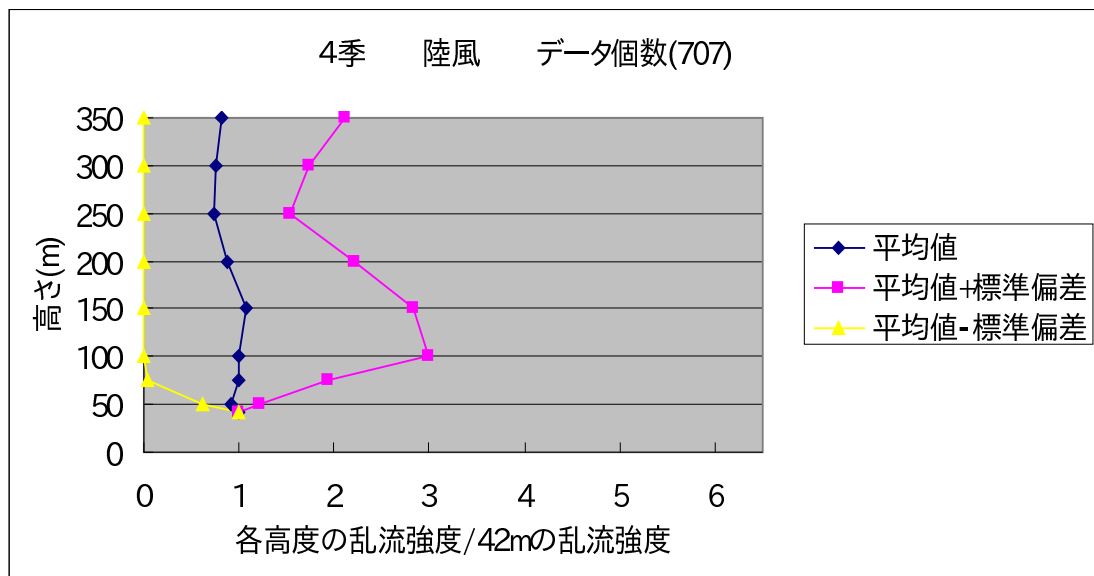


図 3 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布

大気安定度にかかわらず、四季を合計した海風時（図4）では、700個の平均値が1程度から上

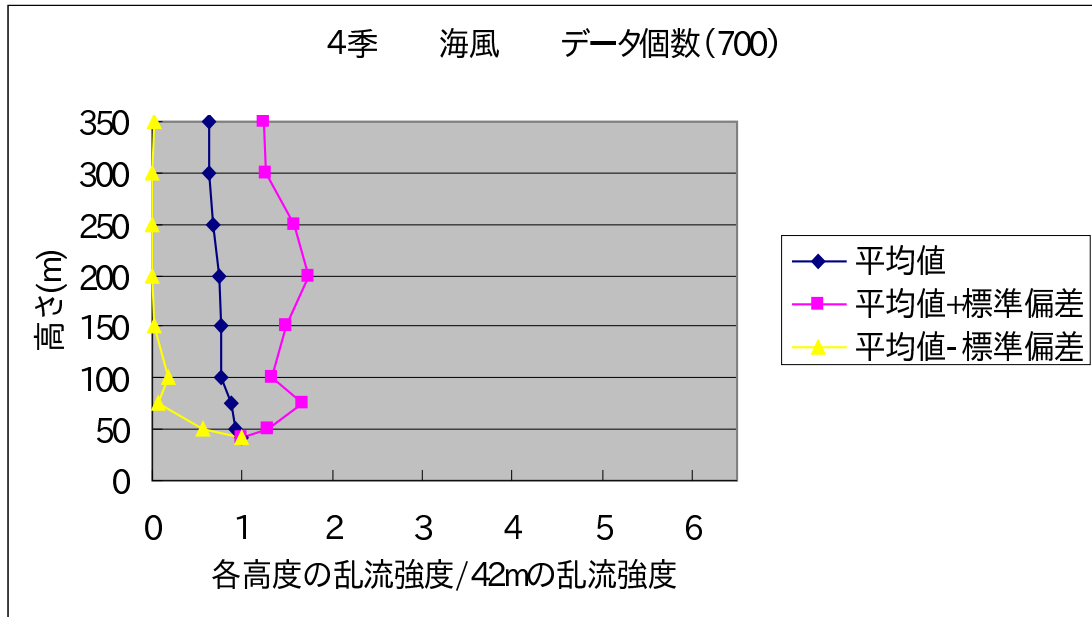


図 4 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布

層に行くにつれて単調に小さくなっている。平均値に標準偏差をプラスした値は陸風時ほど大きくない。

大気安定度にかかわらず、四季を合計した陸風時と海風時を比較しやすいように同じグラフにそれぞれの乱流強度比の平均値のみを並べた（図5）。それによると、海風時よりも陸風時の乱流強度比の方が全体的にやや大きい。これは、陸上の粗度が大きいために、粗度の小さい海上よりは乱流が高さ方向に減衰しにくいことが現れている。高度 150 m 以上を大雑把にみれば、陸風時、海風時ともに上層に行くにつれて乱流強度は小さくなっている。これは、通常の大気境界層の状態である。

図5を、陸風時と海風時に明らかな違いがあるかどうかという観点で見ると、平均値における両者の差は標準偏差の値に比べて小さく、統計的には区別をする必要がないのかもしれない。しかし、高度変化の形に特徴的な違いが見られるので、この論文の後段では、念のために陸風時と海風時を分けて、それぞれ大気安定度で区分する。また、十分なデータ数を確保するために四季をまとめる。

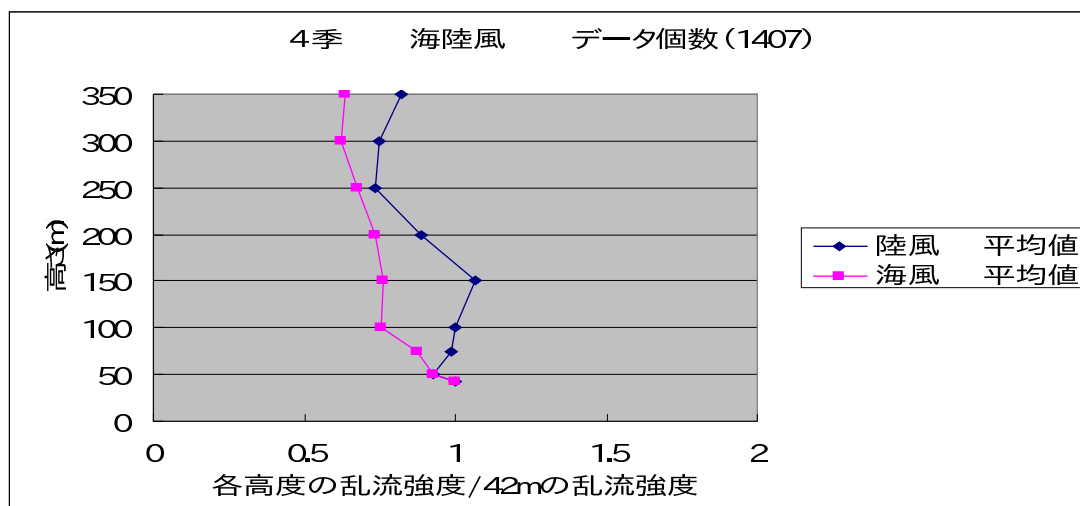


図 5 四季合計、陸風時と海風時、鉛直方向乱流強度比の高度分布の比較（平均値のみ）

3 陸風・海風時別、大気安定度別の解析

四季合計で、陸風時と海風時を分けて、大気安定度別の解析を行う。

(1) 陸風時の大気安定度別の解析

まず、陸風時の大気安定度別に解析結果を示すが、大気安定度が A、B-C 及び C-D のケースのデータ数が十分ではないので省略する。

図 6 に大気安定度が A-B のケースの鉛直方向乱流強度比の観測値を示す。表 3 で求めた基準値 (0.72) も縦の直線で示した。横軸の目盛で、観測の平均値が高度にかかわらずに基準値の 0.72 前後であるので、ほぼ安全側であり、従来の大気汚染濃度予測の際の「上層の大気安定度」は、長期平均濃度予測では妥当であることがわかる。しかし、平均値に標準偏差を加えた値は基準値を上回っているため、短時間高濃度予測では、従来法が必ずしも妥当ではないことがわかる。なお、従来法が安全側であるという意味は、鉛直方向の拡散パラメータ σ_z を大き目に設定すれば、高所放出の際の煙が比較的近距离に着地するので、地上濃度が高めに予測されるということである。やや高めになるように計算した予測値にバックグラウンド濃度を加算した値が環境基準を下回っていれば大丈夫というのが、一般的な環境アセスメントでのやり方である。残りの、大気安定度が B、C、D1、D2、E、F、G のケースをそれぞれ、図 7 から 図 13 に示す。

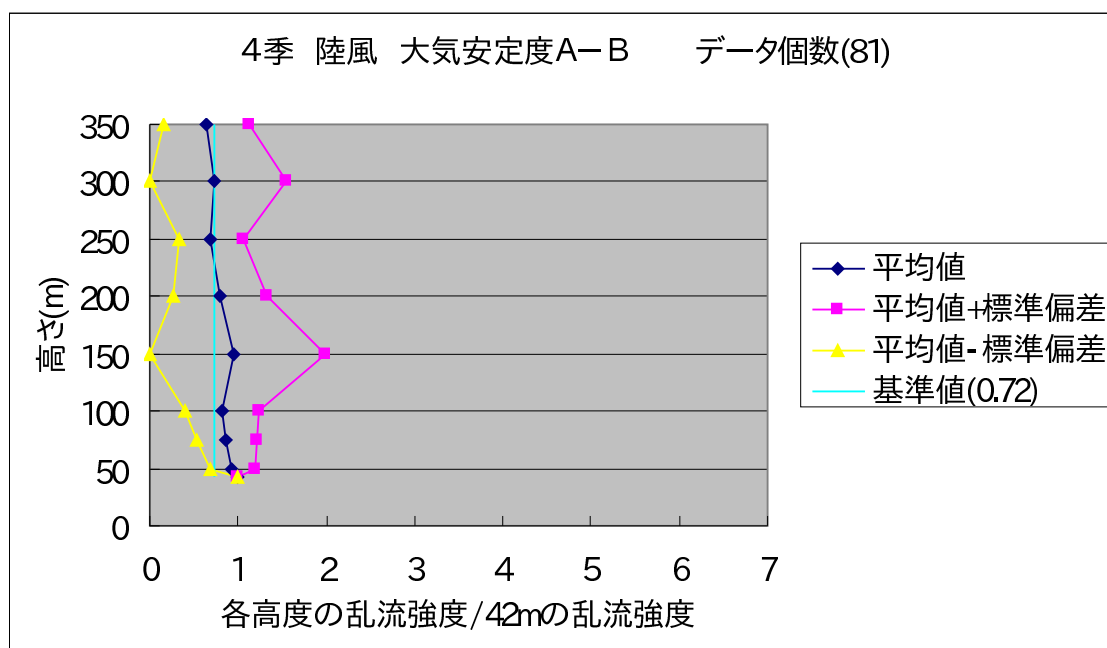


図 6 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 A-B）

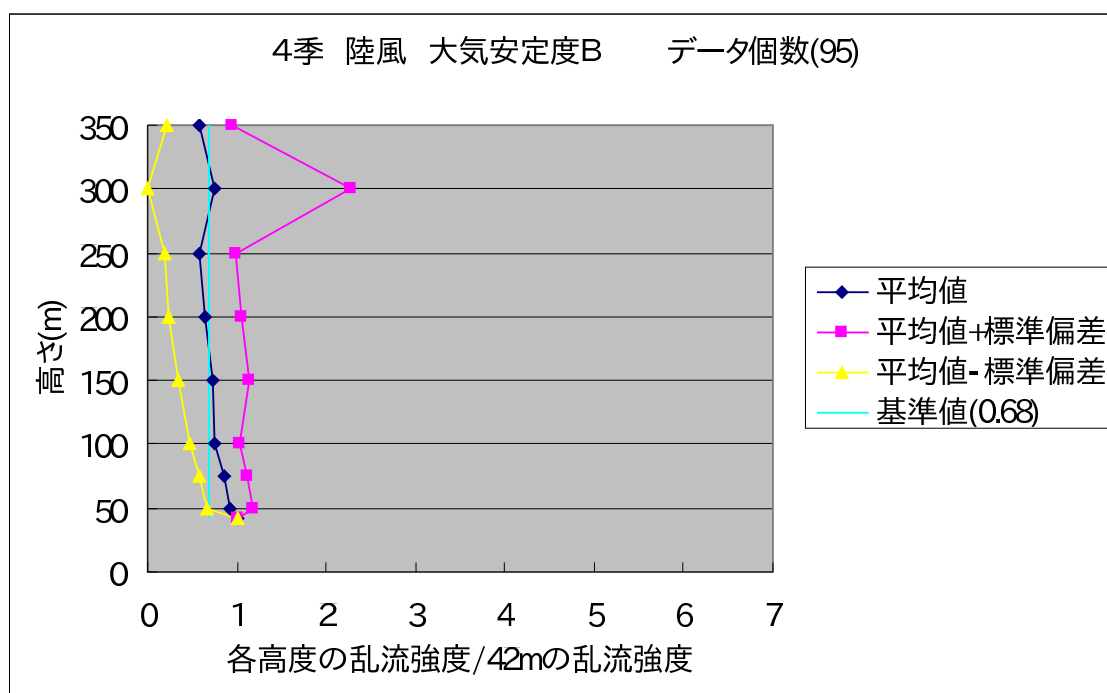


図 7 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 B）

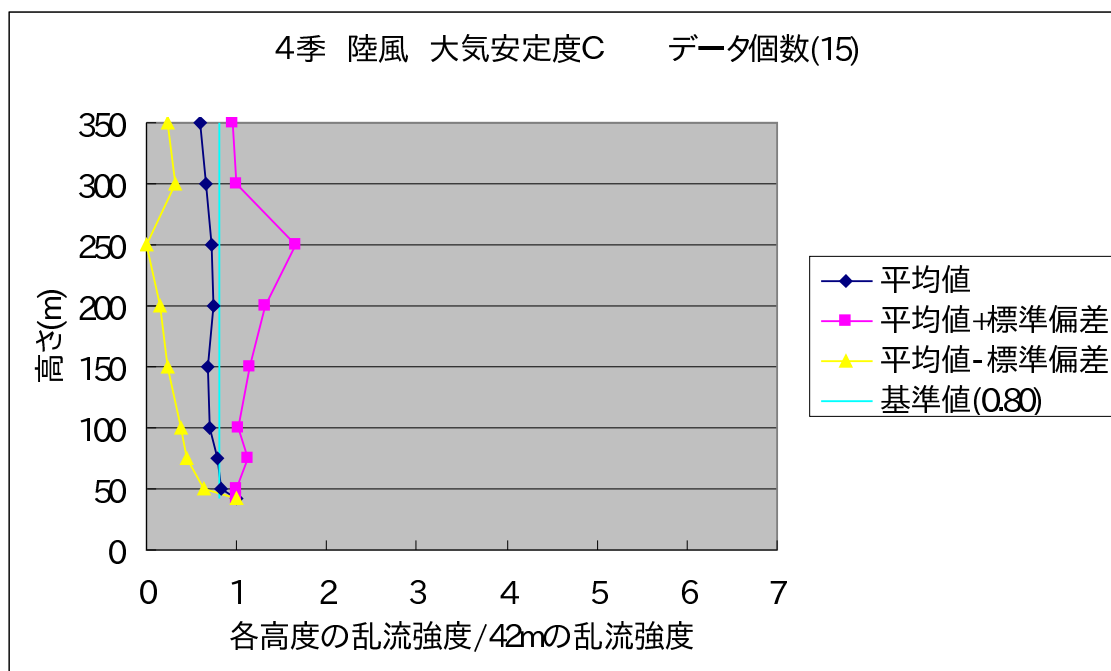


図 8 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布 (大気安定度 C)

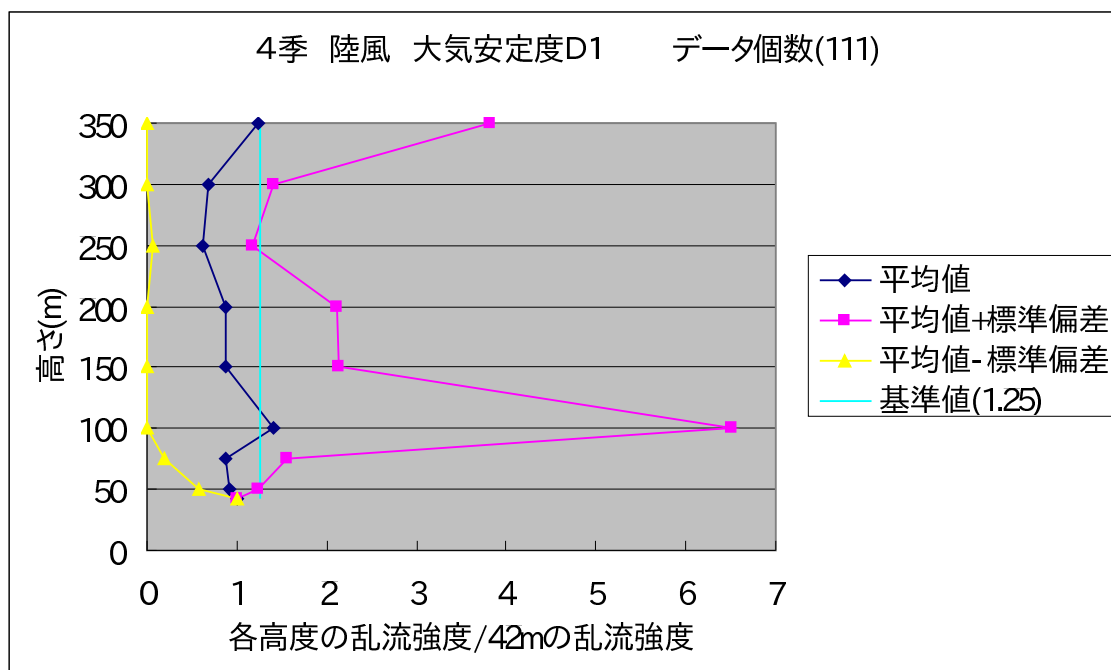


図 9 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布 (大気安定度 D1)

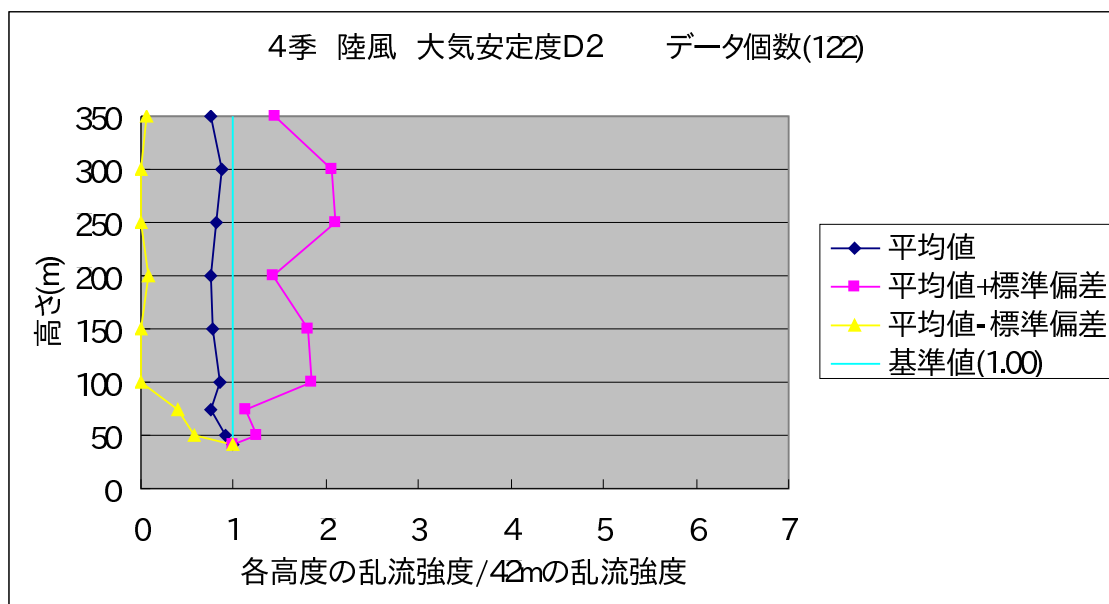


図 10 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 D2）

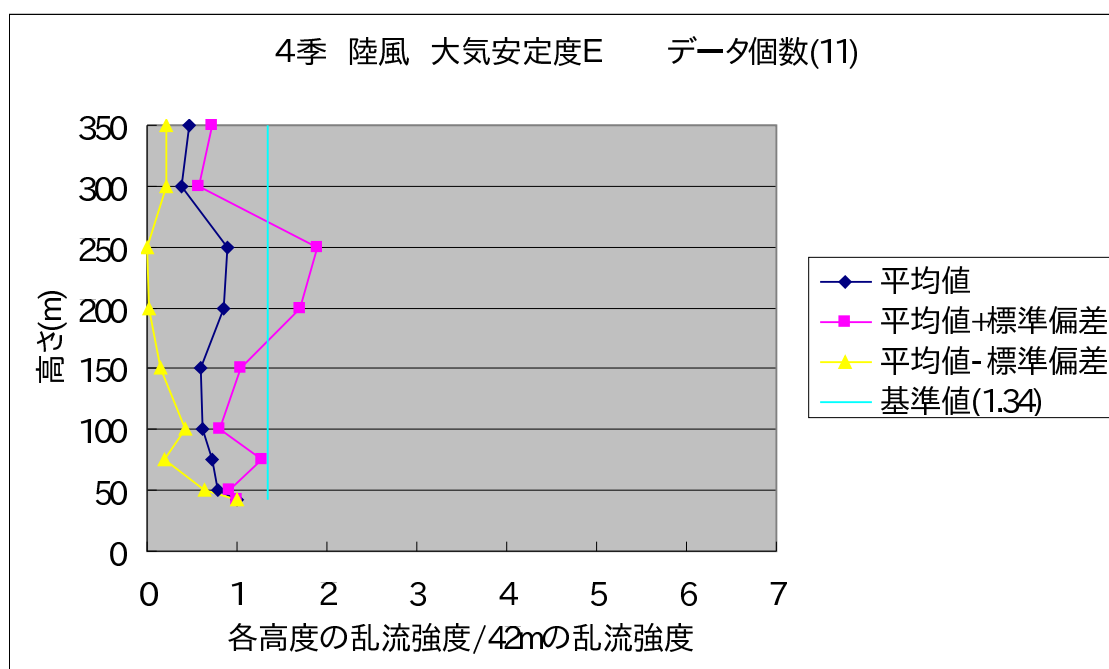


図 11 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 E）

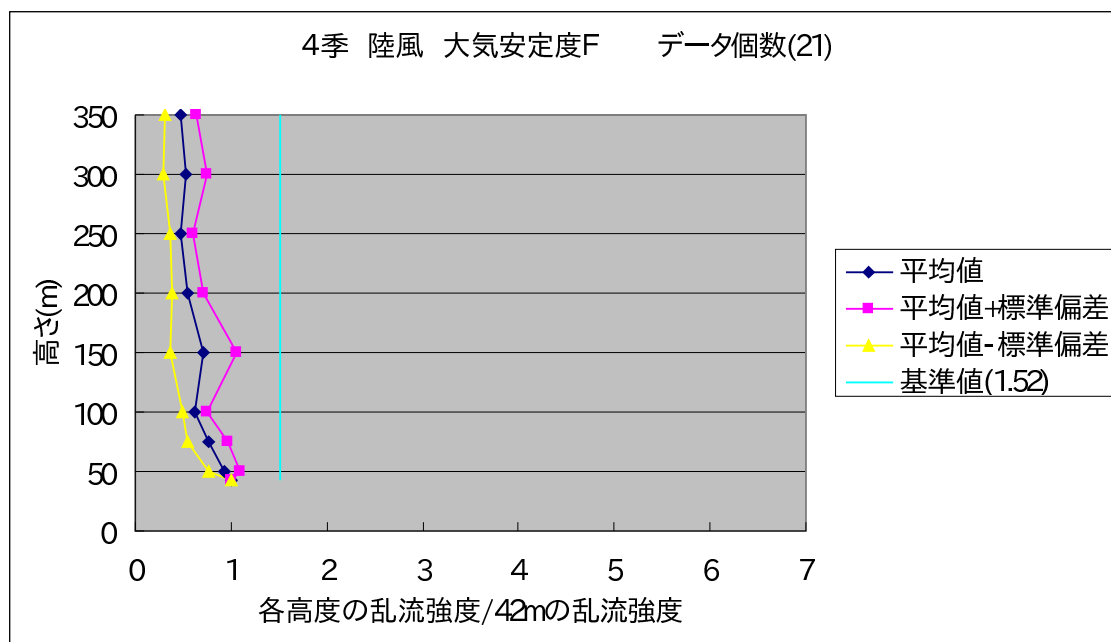


図 12 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 F）

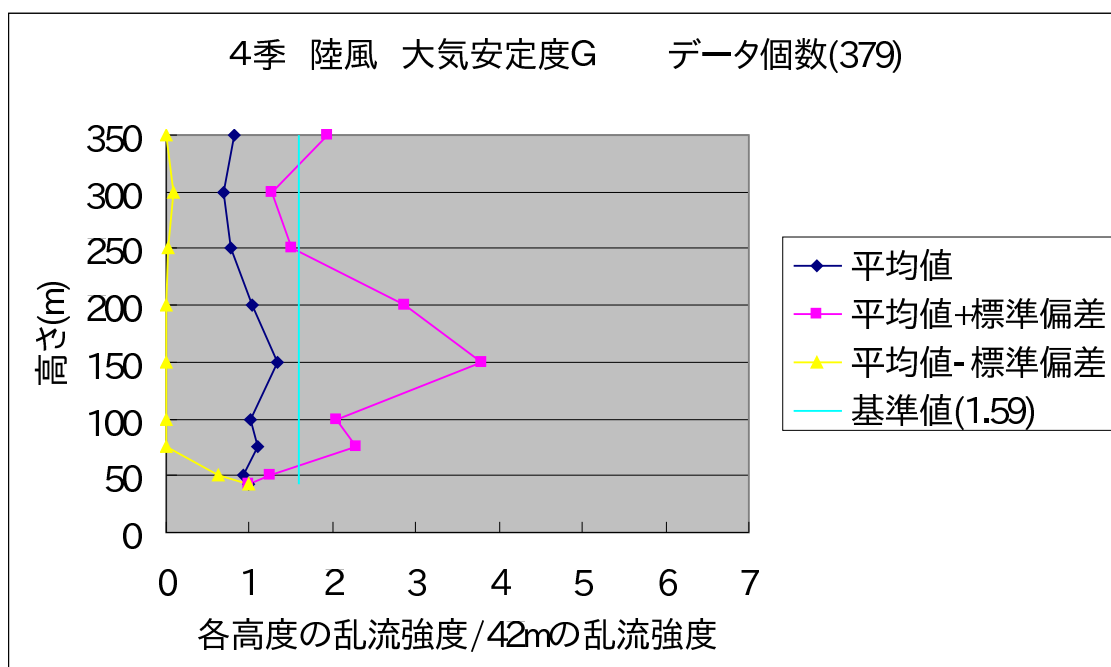


図 13 四季合計・陸風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 G）

図9の100mと図13の150mでの平均値+標準偏差の値が特別に大きいのは、弱風が原因と思われる。ドップラーソーダではなくて超音波風向風速計による観測結果であるが、いずれの大気安定度でも、弱風時に、水平方向も鉛直方向も、乱流強度または風向変動幅が特に大きくなることは、安達(1985)によって既に報告されている。また、地上よりも上層に弱風が現れる原因は、沿岸地域での上層に海風と陸風が入れ替わる境目の層が現れるという現象が考えられる。このような気層では、風向が定まらずに弱風となり、この気層を上下に挟む形の風向鉛直シアは非常に大きい。当該地域における海風時の風向鉛直シアと上層の弱風については安達ら(2006、2009)の研究があり、他の沿岸地域でも知られている現象である。

次に海風時の大気安定度別に解析結果を示すが、大気安定度がAのケースのデータ数が十分ではないので省略する。図14から図23は、それぞれ大気安定度がA-B, B, B-C, C, C-D, D1、D2、E, F, Gのケースである。図14の250mと図23の75mでの平均値+標準偏差の値が特別に大きいのは、やはり弱風が原因と思われる。

図6から図23を基に、乱流強度比の観測値を評価してまとめたものが表4である。この表4によると、観測の平均値は、陸風時も海風時もほぼ基準値以下である。観測の平均値に標準偏差を加えた値は、陸風時は、E, F以外で基準値をほぼ超えている。海風時は、C-D, E, F以外で基準値をほぼ超えている。さらに厳しく、2パーセント除外の最高濃度を評価することにほぼ対応する「観測値の平均値に標準偏差の2倍を加えた値」を基準値と比較すれば、基準値を超える可能性がさらに高いことは明らかである。

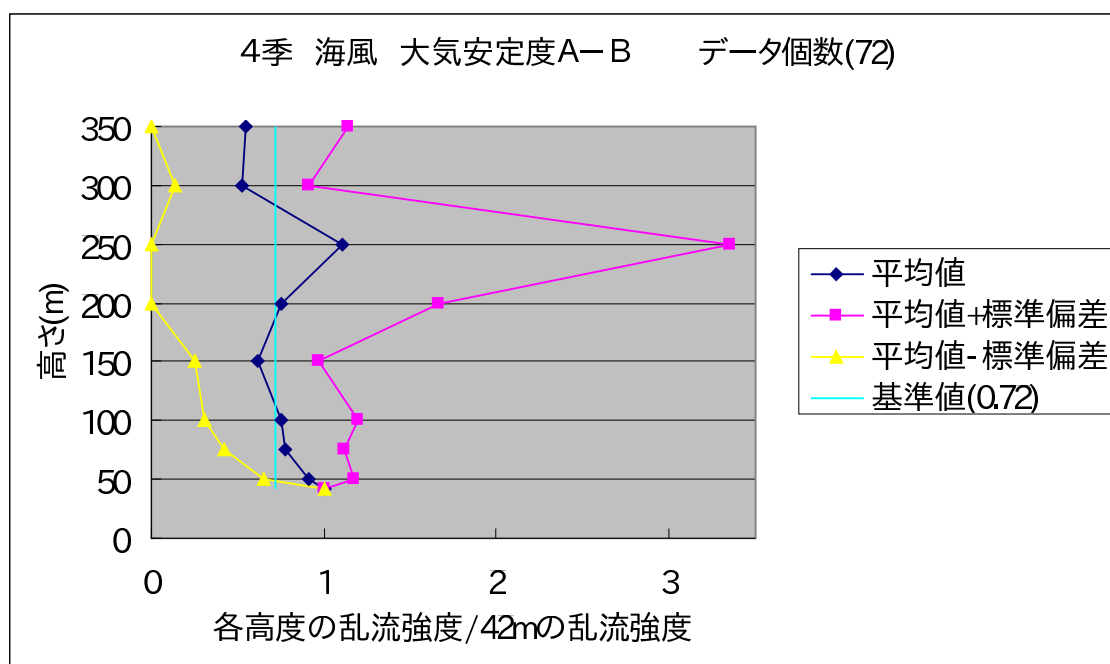


図14 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布 (大気安定度 A-B)

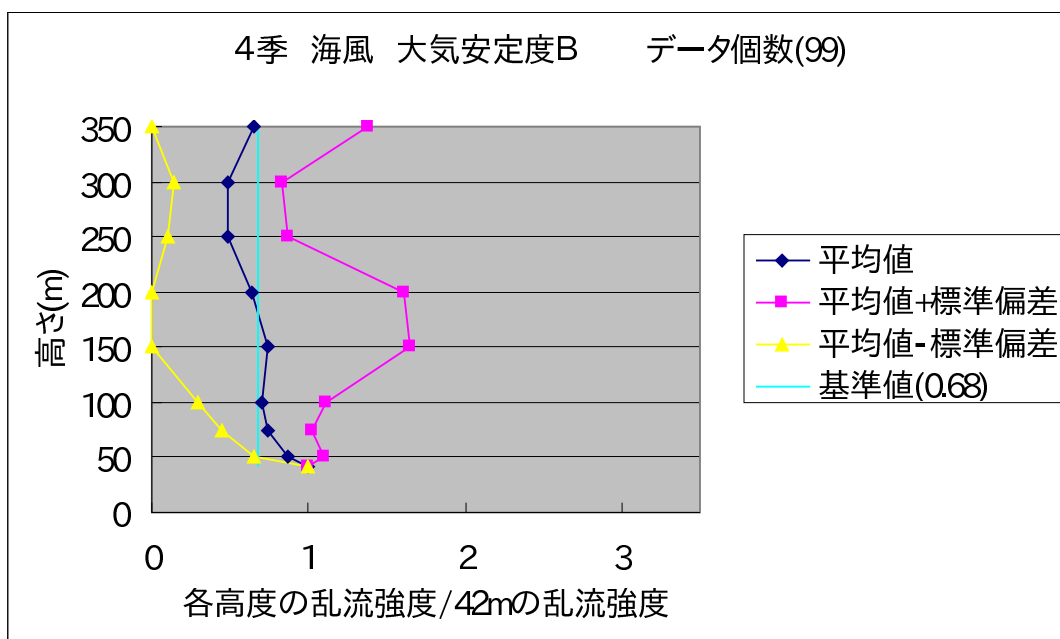


図 15 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 B）

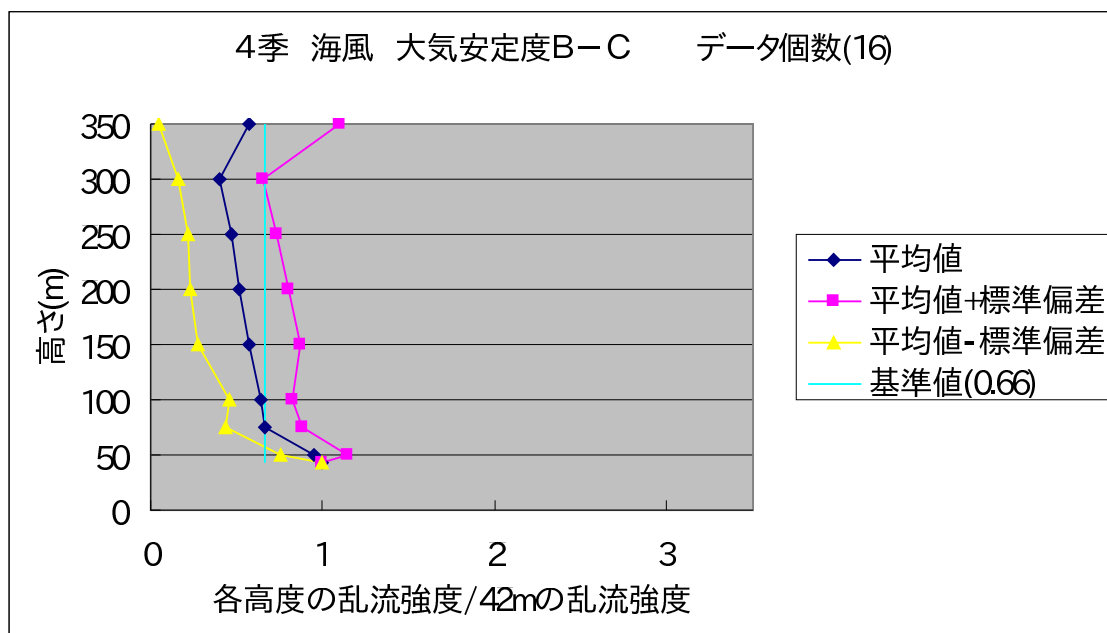


図 16 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 B-C）

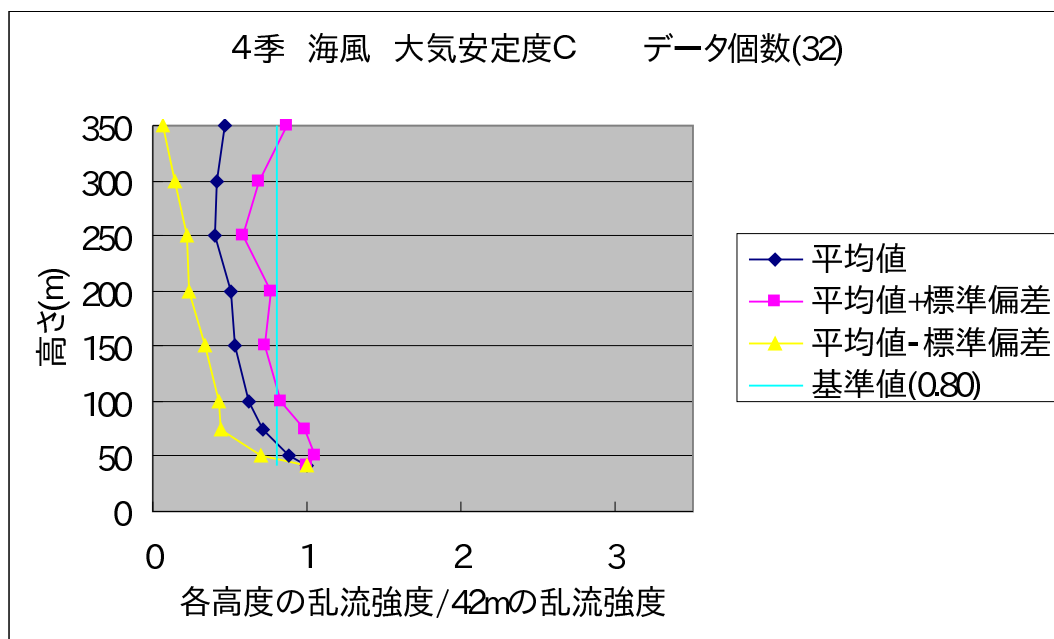


図 17 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 C）

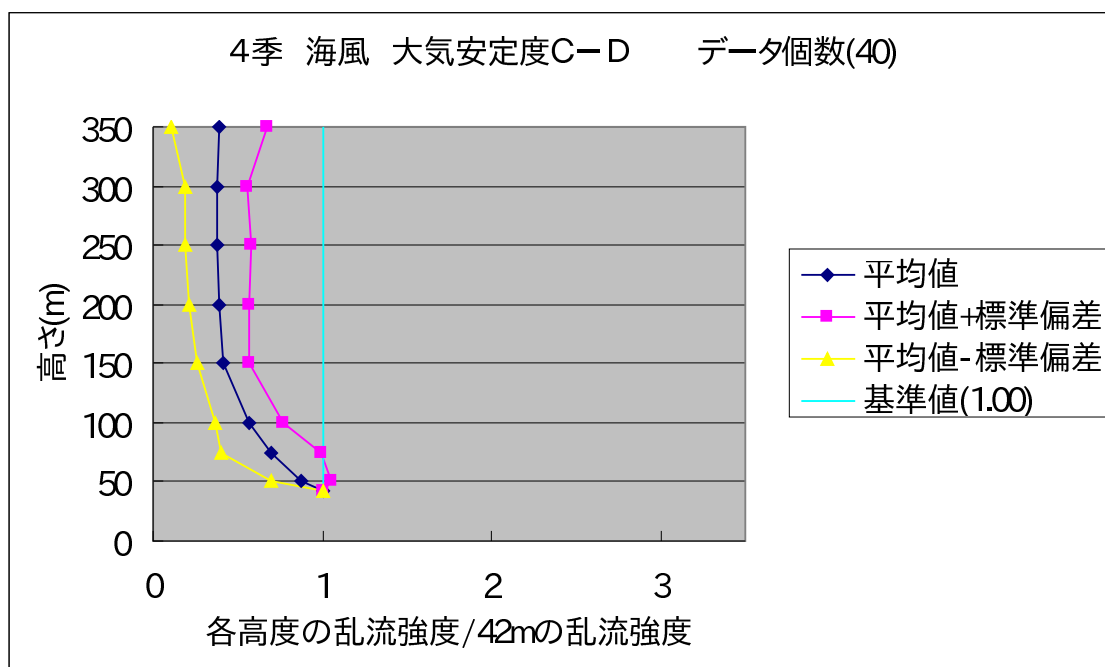


図 18 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 C-D）

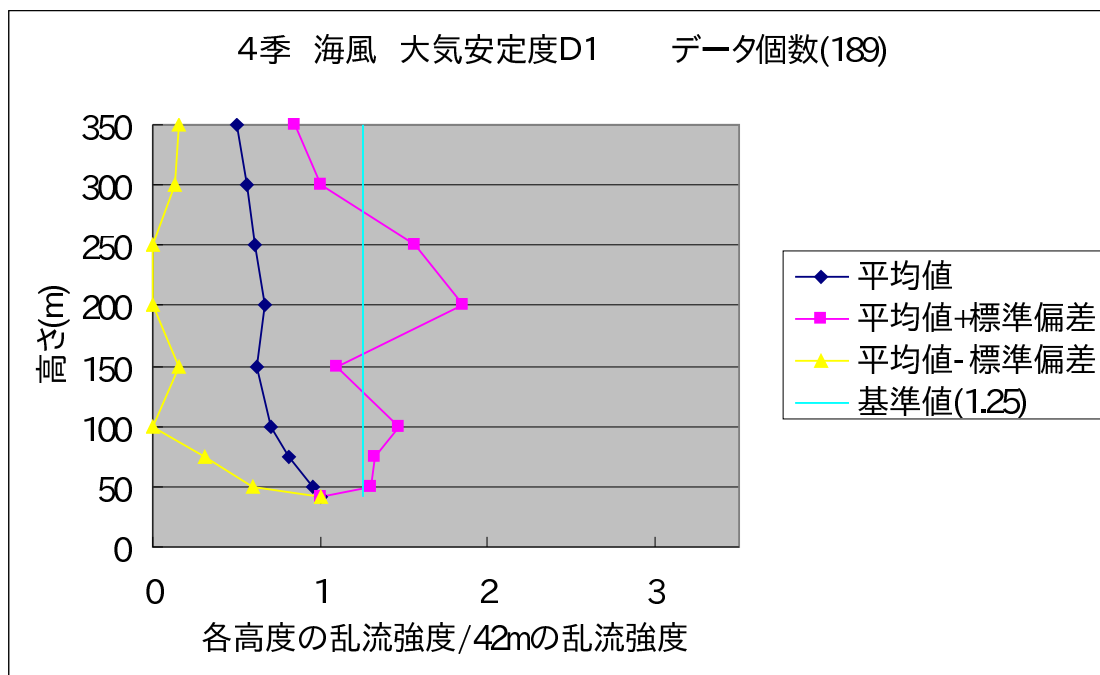


図 19 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 D1）

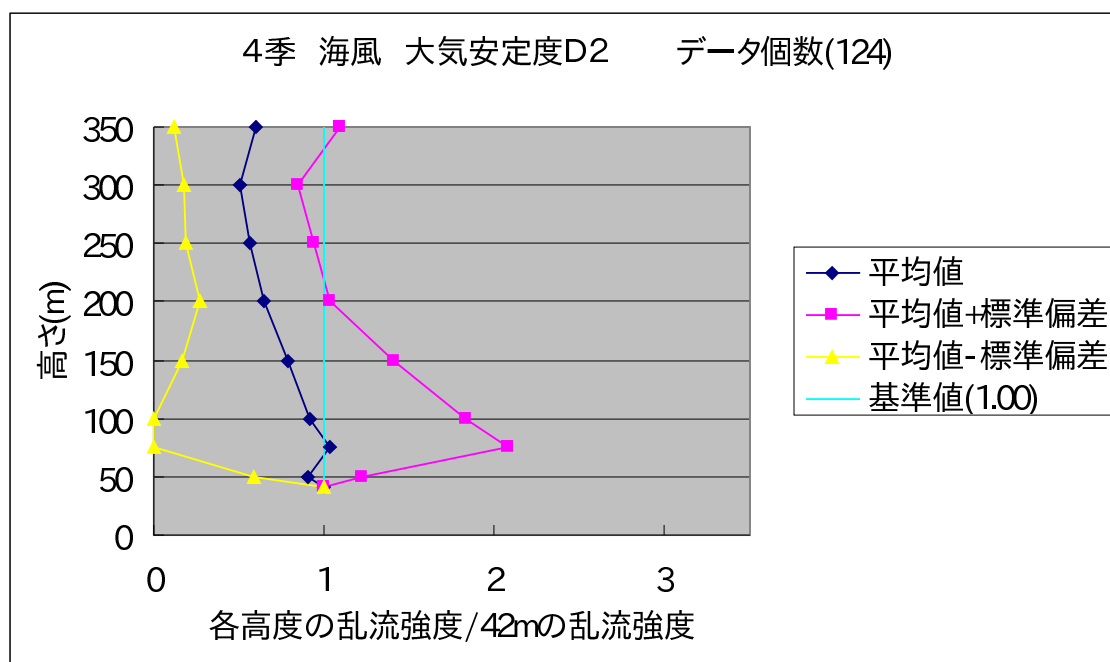


図 20 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 D2）

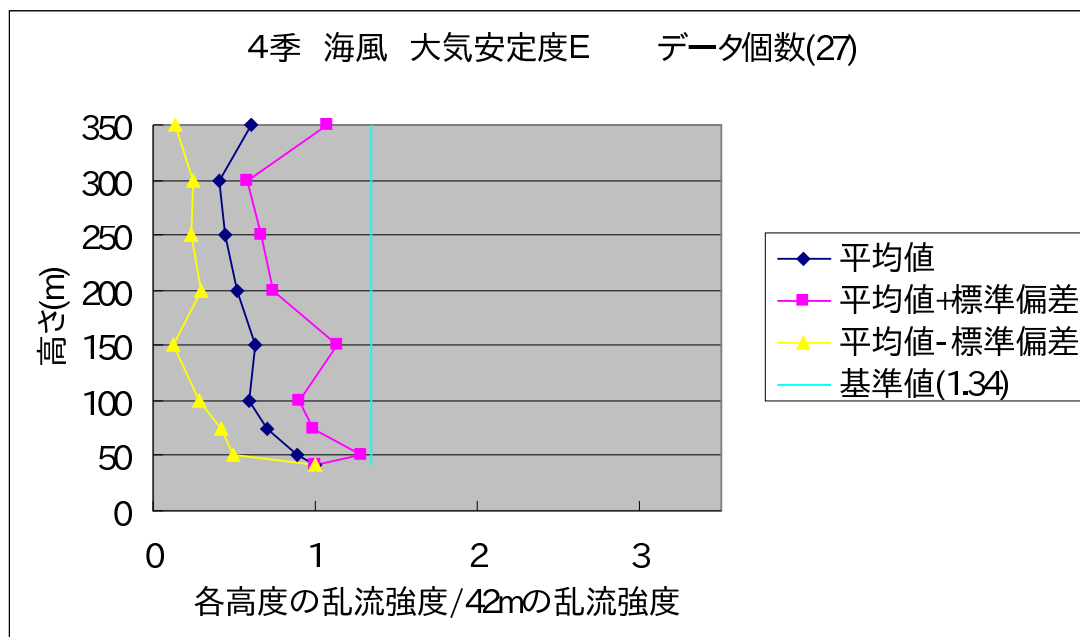


図 21 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 E）

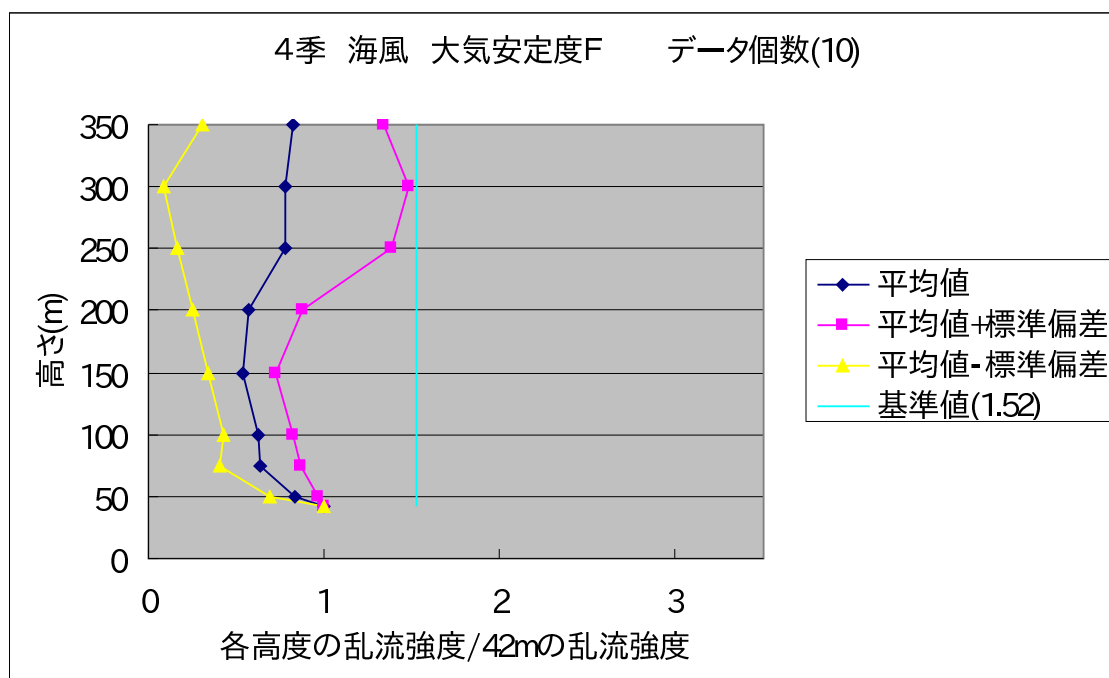


図 22 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 F）

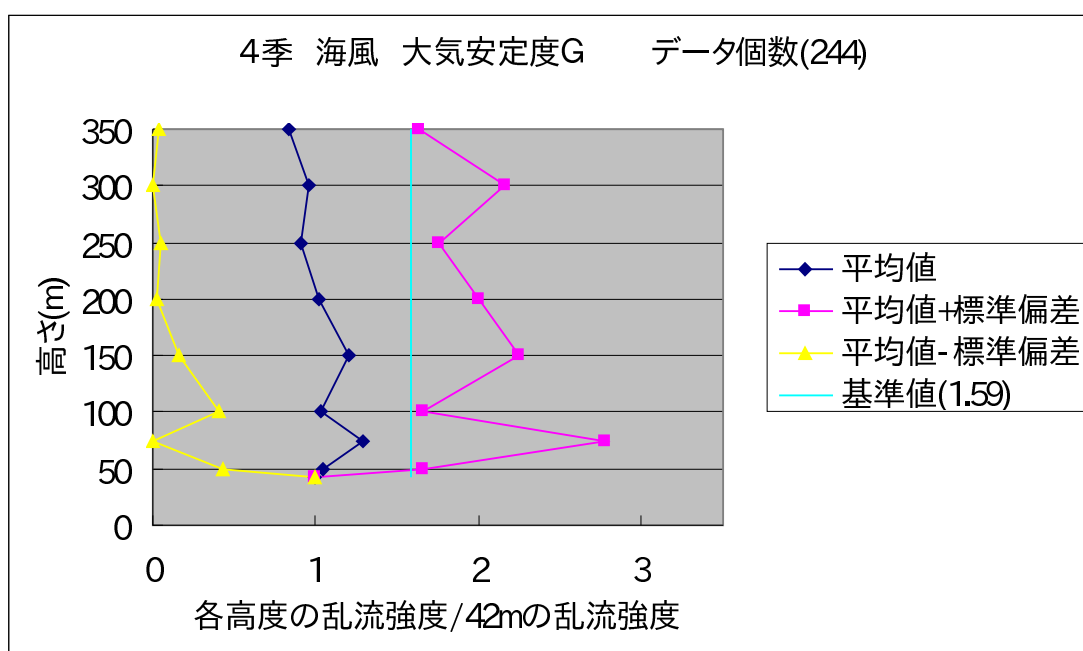


図 23 四季合計・海風時の鉛直方向乱流強度比の高度分布（大気安定度 G）

平均値は長期平均濃度予測に相当し、平均値から高い方へ逸脱するものは短時間濃度予測に対応する。陸風時、海風時にかかわらず、従来の「上層の大気安定度」は、長期平均濃度予測の場合は、ほぼ妥当であることがわかった。その傾向は中立から安定状態の時に顕著である。しかし、短時間高濃度予測の場合は、風向や大気安定度にかかわらず、従来の「上層の大気安定度」が必ずしも妥当であるとは限らないことがわかった。

表 4 鉛直方向乱流強度比の観測値を基準値と比較した評価結果

(○：観測値が基準値以下、△：過半数の高度で観測値が基準値以下、×：過半数の高度で観測値が基準値を超えている。－：データ不足)

大気安定度	陸風			海風		
	乱流強度比 平均値	乱流強度比 平均値+標準偏差	データ数	乱流強度比 平均値	乱流強度比 平均値+標準偏差	データ数
A	-	-	-	-	-	-
A-B	△	×	81	△	×	72
B	△	×	95	△	×	99
B-C	-	-	-	△	×	16
C	○	×	15	△	△	32
C-D	-	-	-	○	○	40
D1(昼間の D)	△	×	111	○	×	189
D2(夜間の D)	○	×	122	○	×	124
E	○	△	11	○	○	27
F	○	○	21	○	○	10
G	○	△	379	○	×	244

V まとめ

1 従来法の「上層の大気安定度」の妥当性

1991年から1992年にわたって四季別2週間、昼夜連続1時間毎に、茨城県東海村の原研構内の気象室脇で行われたドップラーソーダ観測の気象データを入手し、地上350m高までの鉛直方向乱流強度の高度分布を解析した結果、陸風時、海風時にかかわらず、従来の環境アセスメントに使用されている「上層の大気安定度」は、長期平均濃度予測の場合は、ほぼ妥当であることがわかった。その傾向は中立から安定状態の時に顕著である。しかし、短時間高濃度予測の場合は、風向や大気安定度にかかわらず、従来の「上層の大気安定度」が必ずしも妥当であるとは限らないことがわかった。

2 理科教育教材の開発

風向の区分図、大気安定区分表、鉛直方向乱流強度比の高度分布図など、理科教育の教材として活用できる多くの図を示すことができた。

謝辞

当研究にあたり、山梨大学教育人間科学部理科教育講座（地学分野）准教授の角田謙朗理学博士、同じくソフトサイエンス講座環境科学コース（地学分野）の石垣武久准教授、および教育実践総合セ

ンター准教授の山下和之理学博士には、ご支援と励ましのお言葉をいただきました。また、日本原子力研究所東海研究所と財団法人日本気象協会の首都圏支社および東北支局の方々からデータ利用についてご指導・ご協力をいただきました。また、当論文の前に、解析時季が夏と冬に限られるが、同様な研究を行った山梨大学の安達研究室卒業生の近藤通史氏（山梨県信用農業協同組合連合会）には、その成果を活用させていただきました。以上の方々に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 富森 涼, 2009 : 大気汚染濃度推定のための上層の乱流強度の研究—茨城県東海村におけるドップラーソーダデータ解析—, 山梨大学教育人間科学部・平成 20 年度卒業論文,56pp.
- [2] 近藤通史, 2008 : ドップラーソーダデータによる乱流強度の研究, 山梨大学教育人間科学部・平成 19 年度卒業論文,35pp.
- [3] 近藤通史, 安達隆史, 2009 : 大気汚染濃度推定のための上層の大気安定度と鉛直方向乱流強度との比較—東海村の 1992 年の夏と冬—, 山梨大学教育人間科学部紀要, 第 10 巻,21-28.
- [4] 科学技術庁（監修）, 1993 : 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, 改訂 7 版原子力安全委員会安全審査指針集, 大成出版社,343-373.
- [5] 大田正次, 1980 : 大気汚染に係る環境影響評価マニュアル（案）, 私信
- [6] 朝倉一雄, 四方 浩, 1982 : 火力発電所排煙の大気拡散予測手法の検討, 電力中央研究所報告, 総合報告 211,93pp.
- [7] 環境庁大気保全局大気規制課（編）, 1988 : 窒素酸化物総量規制マニュアル, 公害研究対策センター,134-135.
- [8] 公害研究対策センター窒素酸化物検討委員会（編纂）, 2000 : 窒素酸化物総量規制マニュアル（新版）, 公害研究対策センター,185-186.
- [9] HANAFUSA,T.,Y.KIKUCHI,Y.ITO,R.KODAMA,T.ADACHI,T.NAGANUMA,Y.ARISAWA AND K.TAKEUCHI, 1996 : Evaluation of Doppler Sodar Data for Diffusion Study, Proceedings of The 13th International Clean Air and Environment Conference, The Clean Air Society of Australia and New Zealand Inc., Adelaide, Australia, 489-494.
- [10] 東海村, 2009 : ホームページ (h <http://www.vill.tokai.ibaraki.jp/viewer/info.html?id=189>)
- [11] 林 隆, 茅野政道, 山澤弘実, 永井晴康, 森内茂, 石川裕彦, 安達隆史, 岡野博, 小島啓美, 小田川文明, 1998a:長期野外拡散試験データ（1991 年, 秋）, 日本原子力研究所,JAERI-Data/Code98-026,347pp.
- [12] 林 隆, 茅野政道, 山澤弘実, 永井晴康, 森内茂, 石川裕彦, 安達隆史, 岡野博, 小島啓美, 小田川文明, 1998b : 長期野外拡散試験データ（1992 年, 春）, 日本原子力研究所, JAERI-Data/Code98-027,290pp.

- [13] 林 隆, 茅野政道, 山澤弘実, 永井晴康, 森内茂, 石川裕彦, 安達隆史, 岡野博, 小島啓美, 小田川文明, 1998c: 長期野外拡散試験データ (1992 年, 夏), 日本原子力研究所, JAERI-Data/Code98-028,282pp.
- [14] 林 隆, 茅野政道, 山澤弘実, 永井晴康, 森内茂, 石川裕彦, 安達隆史, 岡野博, 小島啓美, 小田川文明, 1998d: 長期野外拡散試験データ (1992 年, 冬), 日本原子力研究所, JAERI-Data/Code98-029,288pp.
- [15] 安達隆史, 1996: 平滑地上の鉛直方向乱流強度と PG 大気安定度階級との関係, 大気環境学会誌, 31(5),224-231.
- [16] 安達隆史, 1985: 大気汚染濃度予測のための上層風と拡散パラメータの推定法の研究, 技術情報 No58, 日本気象協会,194pp. (国会図書館に寄贈して公開済み)
- [17] 安達隆史, 筑紫文夫, 林 隆, 2006: 茨城県東海村の沿岸地域で観測された海風の鉛直分布, 山梨大学教育人間科学部紀要, 第 7 巻,2 号,1-8.
- [18] 安達隆史, 筑紫文夫, 林 隆, 2009: 茨城県東海村における 1981 年 8 月の海風の高度別流線と鉛直シアー, 山梨大学教育人間科学部附属教育実践総合センター研究紀要: 教育実践学研究, No.14, 23-40(CD-ROM 版及びインターネットにより公開).