

都市における局所風の測定に対する考察

伊藤 政志 福岡 三郎 大平 俊男

1 はじめに

汚染質の拡散に関しては数多くの研究がなされているが、そのほとんどが定常解であり、建物、地形及び風の垂直方向変化は無視されており、風速 $U=0$ のときは定義できないものである。都市のように複雑な構造をしている場合には拡散についての微視的な見方をすることが望まれる。

たとえば建物周辺の気流は図1のようになり、建物前面の逆流、後面の死水領域、剥離流などが形成され、下降流がみられ、従来の有効煙突高は意味をなさなくなる。このことは坂上¹⁾も指摘しているとおりでである。

都市は障害物が多くかつ複雑であるため、一般に風は弱められ、境界層は高くなっている。(500m程度とされている。)最近が高層建物周辺の風害が問題となっているが、荒川²⁾なども指摘しているように、都市には強い風の通りみちのあることもわかっている。今後このような特殊な風の乱れに関する研究も大気汚染との関連からすすめられるべきである。

従来の大気汚染についての風速の評価は、水平成分の平均風速のみを問題としていたが、前述したような事実もあるので乱流論的観点からの研究が望まれ、J. R. Mahoney³⁾は乱流分散速度が拡散モデルに取り入れられることを要求している。

以上の観点から筆者らは、超音波風速計を使って都心部ビル街における風の特長、乱れなどについて検討する

とともに各種の風速測定法の比較を行なったので報告する。

2 風速の測定法

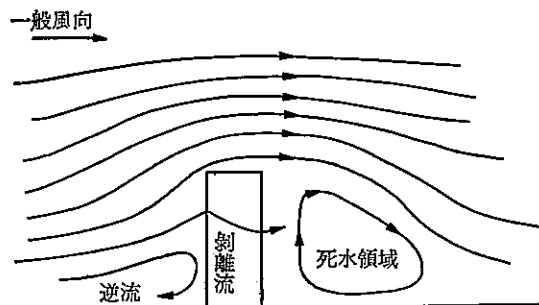
風速の測定法は風力による回転を利用したもの(風杯型、プロベラ型)、風速による温度降下を利用したもの(サーミスター、熱線型)、風速による動圧と静圧差を利用したもの(ピトー管)などがある。ところが風力回転を利用するものは慣性が大きく、レスポンスが悪い、温度降下を利用するものは出力が非線型であり、日光、雨などの影響をうけ感部が破損しやすい、風圧差による方法は風速の減少するときのレスポンスが悪い、などの欠点がある。最近、光田、Miyake、Koboriらによって超音波パルスを用いた風速計が実用化され、従来の測定法のもつ短所を補い、かつ精度のよいものが作られた⁴⁾。

測定原理は大気中の2固定点間を互いに逆方向に伝播する音波信号の伝播時間が、その点を結ぶ方向の風速成分と静止大気中の音速すなわち気温の関数であり、近似的に2つの伝播時間の差及び和として検知するものである(注参照)。x, y, z方向各々に2組の互に向き合う送受波器があり、風速は440times/sec、温度は220times/secのパルスの波によって伝播時間差を検出する方法であるから、100cycle/sec程度の風の息、温度の微細変動を測定できる。機械的に動く部分がないため、摩擦、慣性に妨げられることなく感度、動特性を電子回路でよくすることができ、出力が直線的であり、任意方向(x, y, z)の分速度を測定できる長所をもっている。大気汚染で問題となる弱風時、とくに1m/s以下の風速については従来の測定法では正確に測定することが困難であったが、超音波を用いたことにより正確に測定できるようになった。

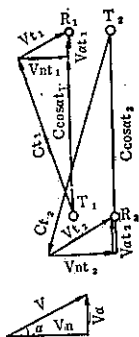
(注) 風速測定原理

2組の互に向き合う送受波器間の音波の伝播は、風速Vなる風がある場合、図のようになる。ここで v_1 及

図1 建物周辺の気流



び t_2 を計算すると



C : 音速, ℓ : 送受波器間隔

V : 風速, (スパン)

V_n : 伝播路に直角な成分

V_d : 伝播路に平行な成分

t_1 : $T_1 \rightarrow R_1$ 間の伝播時間

t_2 : $T_2 \rightarrow R_2$ 間の伝播時間

$$t_1 = \frac{\ell}{C \cos \alpha + V_d} \dots\dots\dots(1)$$

$$t_2 = \frac{\ell}{C \cos \alpha - V_d} \dots\dots\dots(2)$$

となる。 t_1 及び t_2 の差を Δt とすると

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2\ell}{(C \cos \alpha) - V_d} V_d \dots\dots\dots(3)$$

$$= \frac{2\ell}{C^2 - V^2} V_d \dots\dots\dots(4)$$

で表わされる。 $C^2 \gg V^2$ ならば

$$\Delta t = \frac{2\ell}{C^2} V_d \dots\dots\dots(5)$$

したがって

$$V_d = \frac{C^2}{2\ell} \Delta t \dots\dots\dots(6)$$

となって, Δt を測定することにより風速の音波伝播路方向の風速成分 V_d を知ることができる。

3 超音波型, 風杯型, プロペラ型測定器の比較

超音波風速温度計-PAT-311-1型 (海上電機), 三杯型指示風速計-CI-200型 (小笠原計器), 微風向風速計-PR-550TC型 (小笠原計器), 微風向風速計-MV-110型 C Type (光進電機) を使い, 公害研究所屋上 (地上18m)

図2 超音波型, プロペラ型, 風杯型の測定結果

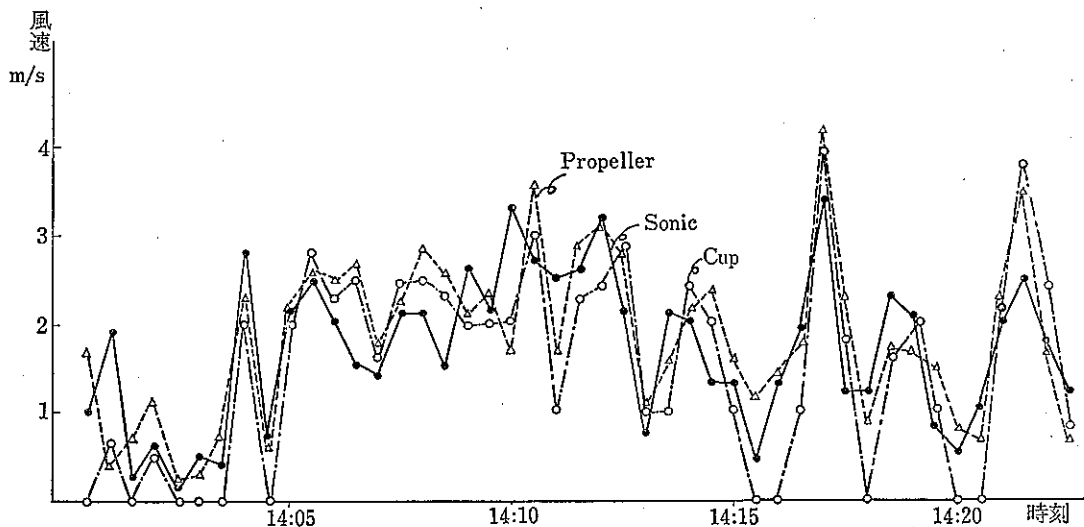


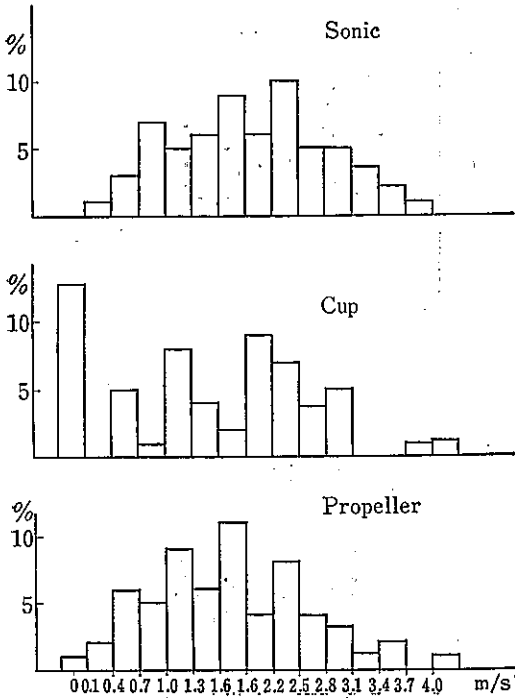
表1 三種の測定法による測定結果

	相 関 係 数					Sonic 1 m/s 以下のときの 相関係数		
	\bar{U}	$\sqrt{U'^2}$	Sonic	Cup	Propeller	Sonic	Cup	Propeller
Sonic	1.60	0.87	1	0.735	0.711	1	0.243	0.401
Cup	1.44	1.10	0.735	1	0.784	0.243	1	0.487
Propeller	1.73	0.90	0.711	0.784	1	0.401	0.487	1

表2 風向出現頻度分布

風向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
頻度(%)	0.0	0.9	2.7	5.5	7.8	8.2	24.5	27.3	12.7	3.6	1.8	2.7	0.9	0.0	0.0	1.8

図3 超音波型、風杯型、プロペラ型の風速出現頻度分布



で弱風時の瞬間風速を測定した結果、図2、表1のようになった。風速出現頻度分布を図3に示す。なお超音波型測定器の結果はベクトルアナライザーによって水平成分をベクトル合成した。風速が2 m/s以上では3つの測定値とも割合よく一致しているが、1 m/s以下の風速では対応がかなりわかっていない。とくに風杯型では風速0 m/sの記録が圧倒的に多く、これは慣性誤差によるものであり、弱風の場合には風杯型測定器は不適当である。

測定器は互いに3~4 m離れていたことを考えると対応の悪さは高周波の乱れによるズレとしても考えられるが、測定数は100個であり、超音波型の分布型は正規あるいは対数正規型をしていることを考慮すれば、測定値のズレは一応器械のもつ特性と考えてよいであろう。この測定期間(50分間)の平均風速、風向(プロペラ型風速計の10分間の平均化回路によるもの)は1.5 m/s、SEであるが実際の風速分布は図3、風向分布は表2のよう

図4 水平成分風速の頻度分布

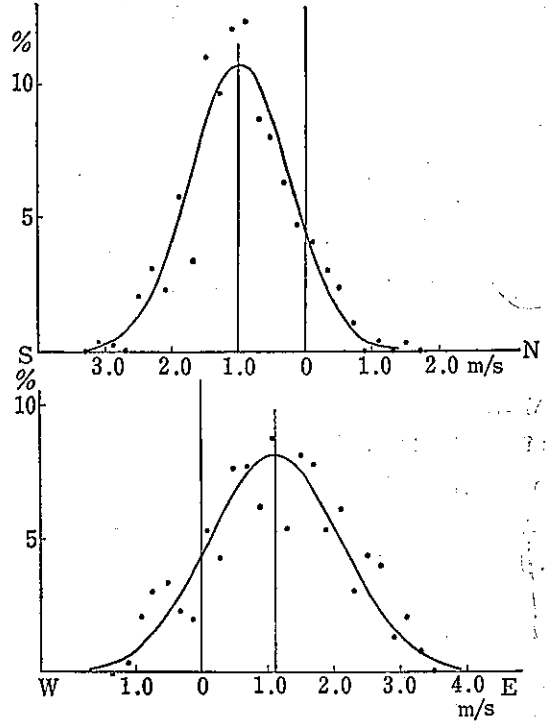
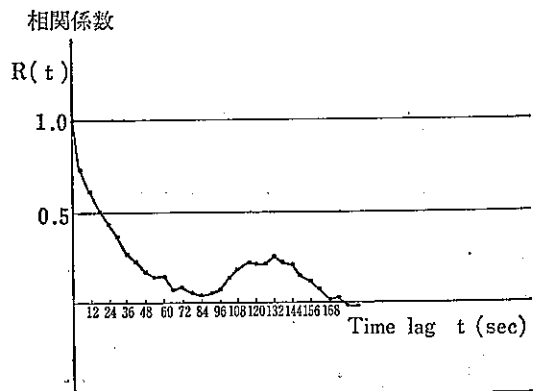


図5 水平成分風速のコレログラム



になっておりかなりのバラツキがみられる。約500 m離れている都庁第2庁舎屋上(地上38 m)の平均風速、風向(微風向風速計MV110型)は1.9 m/s、Sであった。この風は周囲のビルにあまり影響されないとみられ、一

般風向と考えてよいであろう。公害研究所屋上では南側に朝日新聞社ビル（地上30m）があるため、S風が曲げられSE方向の風向を記録し、風速もその他の測定例によっても都庁第2庁舎屋上より弱くなっている。鉛直方向の風速出現頻度を調べてみると下向きの風が65%を占めており、S風の場合は死水領域に入っていることがわかる。図4は水平成分の風速を東西成分、南北成分として測定したものであり、これをスカラー的な風速に換算したものが図3のSonicのような分布になる訳である。

超音波風速計の水平風速成分を6秒毎によみとり、ズレの系列相関係数を計算した結果のコレログラムを図5に示すが、これによると132秒の周期性をもっている。平均風速を考慮すれば渦のスケールは200m程度である。このときの一般風向はSであるからこの周期性をビルの風下側にできるカルマン渦と推定すれば、カルマン渦による安定周期 $T=d/S \cdot U$ (d : 代表的スケール, S : Strouhal 数 ≈ 0.2 , U : 一般風速) であるから、 $d=50m$ (風向と直角方向のビルの長さ), $U=1.9m/s$ (都庁第2庁舎屋上の平均風速) を代入すると $T=132$ 秒となり、風速のもつ周期と一致している。

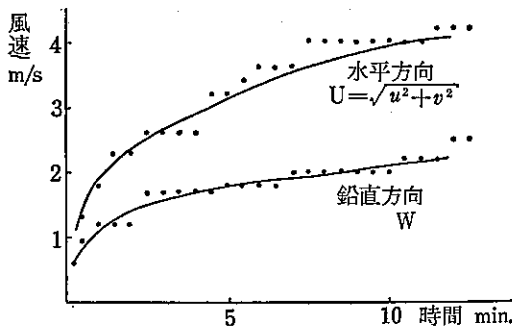
4 風の特徴

超音波型風速計を使用し、弱風時について公害研究所屋上での数回の測定を行なった結果を以下にのべる。

x, y, z 方向の風速を $u=\bar{u}+u', v=\bar{v}+v', w=\bar{w}+w'$ とする。 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ は平均風速, u', v', w' は平均値からの偏差、すなわち乱れの成分である。水平方向の合成風速を $U=\sqrt{u^2+v^2}$ とする。

図6は測定時間とその時間までに記録した風速の最大値との関係を示した。測定開始後2~3分までは急激に

図6 測定時間と最大風速の関係



大きくなり、それ以後はゆるやかに増加している。現在気象官署及び自治体の風速測定は10分間の平均値で代表させているが、標準的な観測時間としては妥当なものであろう。しかし、10分以上になっても記録は徐々に大き

図7

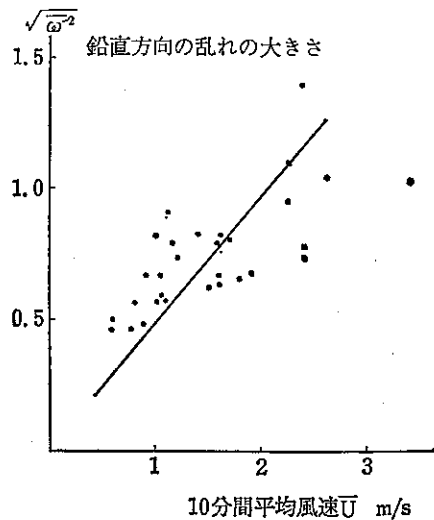
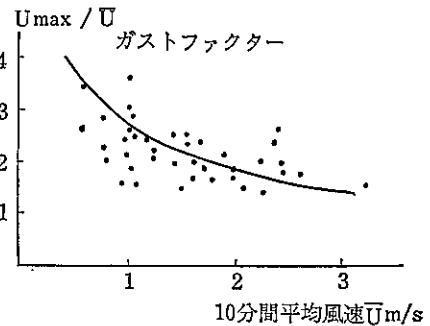
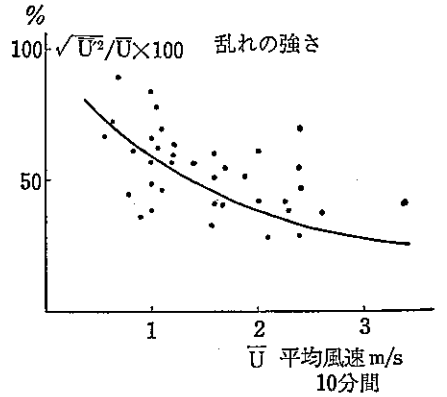
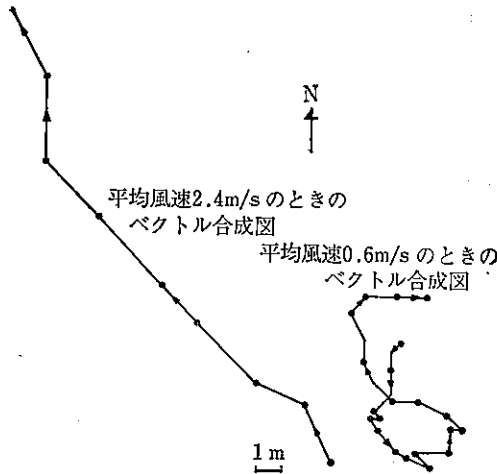


図8 2.5秒毎の測定値によるベクトル合成図



くなっていることから、さらに低い周波数成分もある程度存在していることも明らかである。鉛直成分の変動が水平成分にくらべ少ないのは、測定器の位置が屋上から高さ4 mであり、屋上面の影響をうけ等方向性が成立していないからであろう。

図7に平均風速と乱れの強さ、ガストファクター (U_{max}/\bar{U}) 鉛直方向の乱れの大きさととの関係を示す。風速が大きくなるにつれて、乱れの強さ、ガストファクターは減少し、鉛直方向の乱れの大きさは大きくなる一般的な傾向はみられるが、弱風のためかなりバラツキている。

図8は水平方向の風向、風速の2.5秒毎の値をベクトル合成したものである。右側は静穏の状態 ($\bar{U}=0.6\text{m/s}$)、左側は $\bar{U}=2.4\text{m/s}$ のときのものであり、静穏の場合、合成ベクトルは小さく、風が発原点からほとんど動いていないが、やや風が強いときは出発点から急激に離れていくようである。等質、定常の乱流場と仮定すれば、図の示す線はラグランジュ流（注：特定の流体の微小部分に着目して、その運動を追跡する方法）に追跡された気塊の航跡と考えられる。

5 乱流のスペクトル

一点で風の観測を連続的に行なった結果の示す記録は複雑な曲線となり、これはいろいろな振動数の振動が重なったものとして表わすことができる。乱流の運動エネルギーは $K = \frac{1}{2} \rho \iiint (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) dx dy dz$ であり、

各成分波の振動の平方はその成分のエネルギーを示している。

実際の風の資料からスペクトルを求める方法は、種々の方法があるが、ここでは R. A. Jones⁶⁾の方法を用いた。風速の記録を δt 間隔で測定し、これを X_i ($i=1, 2, \dots, N$) とし、これよりおくれ $k\delta t$ の相互分数 Q_k を作る。

$$Q_k = \frac{1}{N-k} \left\{ \sum_{i=1}^{N-k} X_i \cdot X_{i+k} - \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i \sum_{i=1}^{N-k} X_{i+k} \right\} \quad (k=0, 1, 2, \dots, m)$$

次にフーリエ変換し、周波数 n のエネルギースペクトル $F(n)$ に比例する L_h を作る。

$$L_0 = \frac{1}{2m} (Q_0 + Q_m) + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} Q_k$$

$$L_h = \frac{1}{m} Q_0 + \frac{2}{m} \sum_{k=1}^{m-1} Q_k \cos \frac{kh\pi}{m} + \frac{1}{m} Q_m \cos \pi h$$

$$L_m = \frac{1}{2m} \left\{ Q_0 + (-1)^m Q_m \right\} + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} (-1)^k Q_k \quad (h=1, 2, \dots, m-1)$$

ここで3項の移動平均をとって平滑化する。

$$U_0 = 0.54L_0 + 0.46L_1$$

$$U_h = 0.54L_h + 0.23(L_{h-1} + L_{h+1})$$

$$U_m = 0.54L_m + 0.46L_{m-1} \quad (h=1, 2, \dots, m-1)$$

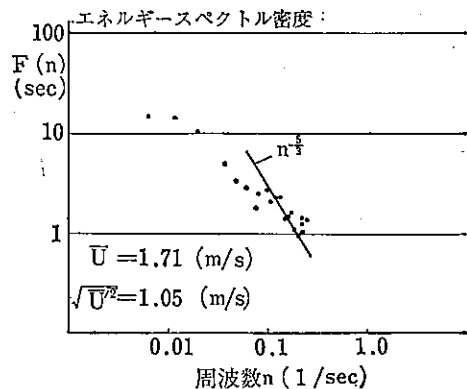
U_h と $F(n)$ は $U_h = F(n) Q_0 \Delta n$ の関係がある。

$$(\Delta n = 1/2m\delta t)$$

周波数 $n = h/2m\delta t$ である。

この計算方法を用いて弱風時 ($\bar{U}=1.7\text{m/s}$) の10分間の風速を2秒おきによみとり、時間おくれ20まで計算し

図9 水平成分風速のスペクトル密度と周波数の関係



て、($N=300$, $m=20$, $\delta t=2$ sec) 両対数グラフに書いた結果を図9に示す。低周波部分の傾斜はゆるやかであるが、 $n=0.1$ 以上では勾配が急になっており、勾配はほぼ $-\frac{5}{3}$ であり、乱流理論でいう慣性小領域と同じであり、等方性の乱流状態であることを示している。風速変動のエネルギー（一般にパワースペクトルと呼ぶ） $nF(n)$ を調べてみるとエネルギーの最大部は $n=0.2$ 付近にあるが判然としていない。相馬⁷⁾の強風時のスペクトル解析を参考にすると、今回の弱風時の風速変動のエネルギーの主要部は高周波側にずれている。これは小さい渦によるエネルギーの寄与率が大きいことを示しているが、弱風時の特性としてよいであろう。

6 まとめ

(1) 超音波型、プロベラ型、風杯型の3種の測定法を比較した結果2 m/s以上での対応はよいが、1 m/s以下の対応は悪く、微風時の風速の正確な測定はプロベラ型、風杯型では無理である。

(2) 都市では一般に風速が弱められ、とくにビルの風下側は風がまげられ、死水領域ができ複雑な乱れが生じている。

(3) 弱風時の風向、風速はかなりバラツキが多く、気塊はほとんど動かない場合がある。

(4) 大気汚染質の輸送を解析する際に、現在は10分間の平均風速、風向（たとえば一時間の値は正時より10分前から正時までの移動平均値を使っている。）の資料を使用しているが、汚染質の輸送を云々するにはさらに細かい測定が必要である。（たとえば風向風速のベクトル合成などをしたらよいであろう。流線解析より流跡線解析をすべきである。）都市のように複雑な構造をしている場合には鉛直方向の気流も調べる必要があり、風の収束、発散、海陸風前線の構造を解明のためにも鉛直方向成分の風を調査する必要があると思われる。従来の議論は平均化された資料に基づいての解析がほとんどであったが、これからは乱流論的な解析が必要となってくるで

あろう。

(5) スペクトル解析の結果、ビル街では高周波、すなわち小さい渦による乱れのエネルギーが大きいことがわかった。

(6) 最近、汚染質の拡散についての風洞実験がかなり行なわれているが、この点からも、地上風の乱流観測、さらに鉛直方向の気流に関する研究の必要性がうかがわれる。

本稿は大気汚染質輸送機構の解明に関する気象学的な一つのアプローチであり、今後、大気安定度を考慮し、乱流の運動のエネルギーと汚染質の拡散能力との関係についての研究をすすめ、風洞によるシミュレーションを試みたいと思っている。最後に本調査に協力して下さった小笠原計器製作所の見並浩氏に感謝し、本稿を提出する。

参 考 資 料

- 1) 坂上治郎：煙突よりの排気ガスの接地濃度に関する気象学的研究（調査資料 No. 9, 昭和46年8月号）(1971. 8)
- 2) 荒川秀俊：都市気象と都市災害 ジュリスト No. 492 環境破壊特集号 (1971. 11)
- 3) 日立製作所：大気汚染予測モデルに関する報告書（訳） OECD 大気汚染管理研究グループ (1970. 11)
- 4) 光田寧：超音波風速温度計とその大気境界層研究への応用, 天気 Vol. 18. No. 8 (1971. 8)
- 5) 正野重方：気象力学 岩波全書 (1960. 9)
- 6) F. Pasquill: Atmospheric Diffusion. D. Van Nostrand Company Ltd. (1962)
- 7) S. Soma: The Properties of Atmospheric Turbulence in High Winds, Journal of Meteorological Society of Japan Series II Vol. 42, No. 6 (1964. 14)