

拡散モデルによる大気汚染シミュレーション*

岡本 眞一** 塩沢 清茂** 大滝 厚***

要 旨

有風時に正規型ブルーム拡散式，静穏時に積分型パフ拡散式を使用して，大気汚染のシミュレーションを行なう。拡散モデルは長期間の濃度分布を推定するためのものであり，対象期間内の気象条件を層別し，各条件ごとの濃度を計算する。このモデルにより，京浜地区の SO_2 濃度を計算し，実測値との比較を行なった。

1. まえがき

大気汚染の数式モデルは長期間の濃度分布を計算する長期モデル (Climatological model) と毎時間の濃度の推移を計算する短期モデル (Synoptic or Transient model) の2種類に大別される。

本研究では，長期間の拡散シミュレーションを対象とする。この長期モデルでは，濃度の確率分布を推定することが重要である。平均濃度のみの計算では，風向別平均風速を使用する簡略式もあるが，最大濃度や各パーセントイル値の推定には利用できない。これらの推定には，気象条件をより細く分類して，それぞれの条件ごとの濃度を計算する必要がある。

2. 拡散モデル

濃度計算には一般的な正規型ブルーム拡散式を使用する。

$$C = \frac{Q}{\pi(\sigma_y + \sigma_{y0})\sigma_z u} \exp\left\{-\frac{y^2}{2(\sigma_y + \sigma_{y0})^2}\right\} \exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1)$$

ここで

C : 濃度
 Q : 排出強度
 H_e : 有効煙突高度

σ_z : 鉛直方向の拡散幅
 σ_y : 水平方向の拡散幅
 σ_{y0} : 面源の初期拡散幅
 u : 風速

静穏時には，ブルーム拡散式が使用できないので，パフ拡散式を積分して求めた近似式により濃度を計算する。この静穏時の式は瞬間点源からの3次元パフ拡散式を積分したものである。ここで，拡散幅は $\sigma_y = \alpha t$ ， $\sigma_z = \gamma t$ として，Turner (1964) の線図を近似したものである。この積分された濃度は高煙源の場合でも，煙源から数 km の範囲では2時間程度で定常値に達し，煙源に隣接する所を除けば，よい推定値を与える (環境庁，岡山県，1973)。

本モデルでは面源からの拡散を計算するので，初期拡散幅 σ_{y0} に相当する経過時間を積分の下限とする。厳密には σ_y から計算される経過時間と σ_z から計算される経過時間は一致しないが，ここでは σ_y から求められる時間をもとに近似的に計算する。この結果を次に示す。

$$C = \frac{2\gamma Q}{(2\pi)^{3/2}(\gamma^2 d^2 + \alpha^2 H_e^2)} \left[1 - \exp\left\{-\frac{d^2 + \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^2 H_e^2}{2\sigma_{y0}^2}\right\} \right] \quad (2)$$

ここで

d : リセプターと煙源の距離

対象期間内の気象条件を風向 D ，風速 V ，大気安定度 S により分類し，それぞれの条件ごとの発生頻度 $f(D_i, V_j, S_k)$ を求める。ただし，安定度は日射量や温

* Air Quality Simulation by Atmospheric Dispersion Model

** S. Okamoto and K. Shiozawa 早稲田大学理工学部

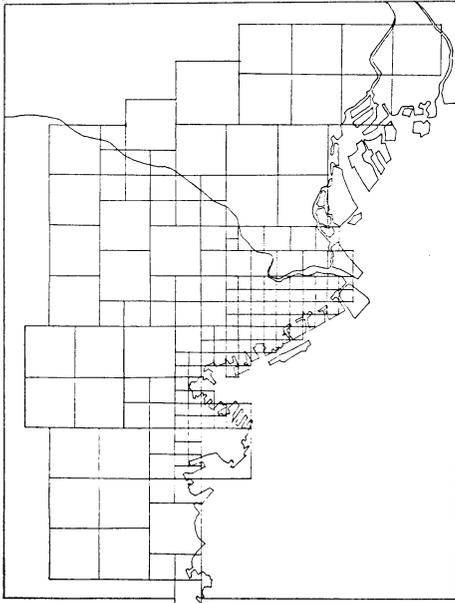
*** A. Ootaki 明治大学工学部

—1974年11月11日原稿受理—

—1975年3月26日改稿受理—

第1表 汚染源の分類

- (1) utility
- (2) large industry
- (3) small industry I
- (4) small industry II
- (5) space heating



第1図 面汚染源の格子間隔

度の鉛直勾配などを使用する厳密なものではなく、昼と夜、風速などから求める簡単なものである。計算時間の短縮と計算機のメモリーの節約のために、 σ_y の安定度は風速のクラス分けと一致させ、 σ_z の安定度は排出源

の日負荷変動のクラス分けと一致させる。

2.1 汚染源

汚染源は6つのタイプに分類して、それぞれの日負荷変動（昼と夜の排出量の比率）を設定する。火力発電所と根岸磯子地区の大工場を除き、大部分を面源として扱う、メッシュの間隔は第1図に示すように、川崎、鶴見の臨海部などで1kmとし、その他は排出強度や対象地域からの距離に応じて2, 4, 5kmとする。メッシュごとの煙突高度は大工場（神奈川県緊急時協力要請工場）で40mと60m、小中工場で30m、ビル暖房で20mとする。また有効煙突高度推定のための熱排出量は、ビル暖房で0、工場については、それぞれメッシュに含まれる工場の業種などから推定して、各メッシュごとの代表値を設定する。

面源の仮想排出点源位置はメッシュの中央として、両端での濃度が中心の1/2になるように、一辺の1/2.4に相当する初期拡散幅 σ_{y0} を与える。(Roberts et al. 1969) ただし、1つのメッシュの中に1つの大工場を含む場合は、大工場のタイプにあたる面源の仮想排出点源位置はその工場の所在位置とする。大工場は多数の煙突を有しているため、それに相当する初期拡散幅 σ_{y0} の値として、40mを与えることにする。

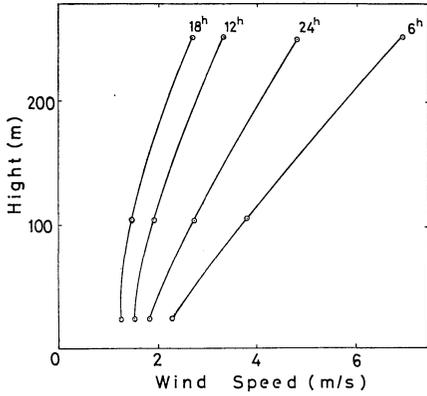
2.2 大気安定度と拡散幅

拡散幅の推定には、Pasquill-Giffordの線図を利用する。安定度の設定には、気象研究所(1970)、桜庭ら(1970)、McElory and Pooler (1968)などの研究を参考にして、昼と夜、風速、煙源高度などから求める方法によるものとする。水平方向の拡散幅 σ_y は日射量や雲量から求められるPasquillの安定度よりも、風向変動と密接な関係があり、風向変動のデータがない場合は、

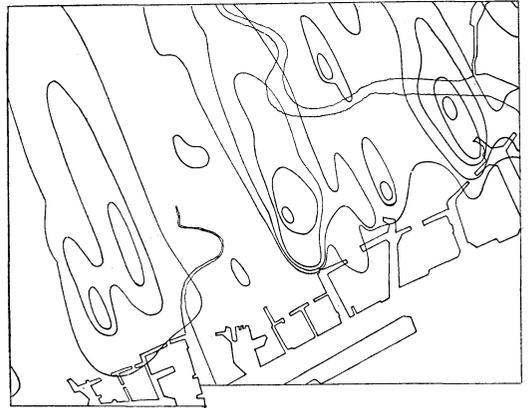
第2表 大気安定度と拡散幅

Trial	σ_y	σ_z
1	$1 < u \leq 3 \text{ m/s}$ ($u = 2 \text{ m/s}$) A	$H_o \geq 60 \text{ m}$ night E daytime (clear) C daytime (cloudy) D $H_o < 60 \text{ m}$ night ($u \leq 3 \text{ m/s}$) E night ($u > 3 \text{ m/s}$) D daytime (clear) B daytime (cloudy) C (2 × original value)
	$3 < u \leq 7 \text{ m/s}$ ($u = 5 \text{ m/s}$) B	
	$7 < u$ ($u = 8 \text{ m/s}$) C	
2	$1 < u \leq 3 \text{ m/s}$ ($u = 2 \text{ m/s}$) A	
	$3 < u \leq 6 \text{ m/s}$ ($u = 4 \text{ m/s}$) B	
	$6 < u$ ($u = 6 \text{ m/s}$) C	

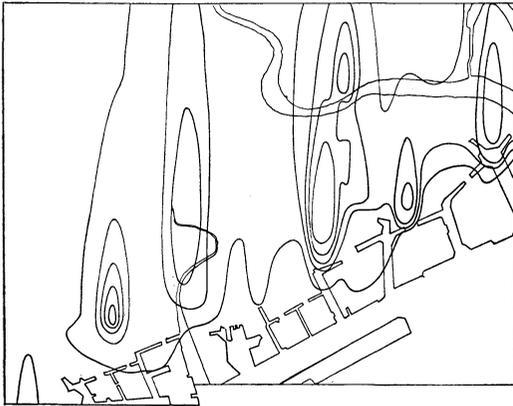
(u : wind velocity, H_o : stack height)
 (A~F: Pasquill's stability class)



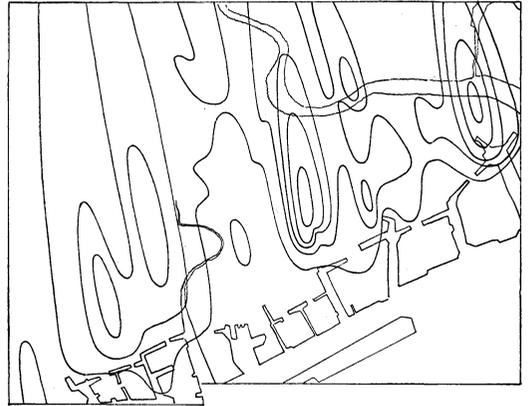
第2図 東京タワーの風速プロフィール (1969年2月1日～3月20日の時刻別平均値)



第4図 SO₂ 等濃度線図 (SSE, 5 m/s)



第3図 SO₂ 等濃度線図 (S, 5 m/s)



第5図 SO₂ 等濃度線図 (S-SSE, 5 m/s)

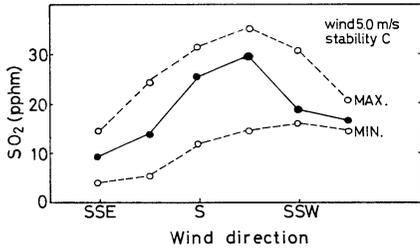
風速自身の方がよい推定値を与える。これは高煙源についても同様で、富山、姉ヶ崎などの拡散実験の結果からも実証されている。中野 (1972) の西淀川拡散計算も σ_y の安定度は風速のみによって決定する方法をとっているので、これに準じて分類表を作製する。この西淀川拡散計算では、St. Louis の資料に基づいているので、Pasquill の安定度と線図が利用できるように変換する。

鉛直方向の拡散幅は都市内では大きく、Pasquill (1970) によれば、平坦地の約2倍程度である。 σ_z の安定度は第2表のように設定する。日中は晴と曇、高煙源と低煙源において、B, C, Dの安定度とし、夜間は風速3 m/s以上の低煙源をD、その他はEとする。ただし、 σ_z の値はPasquill-Gifford図の2倍を与えるので、安定度がEであっても、Pasquill-Gifford図の安定度D

の σ_z よりやや大きい程度で、Turner (1964) のモデルとも矛盾しない。静穏時の安定度は環境庁、岡山県 (1973) のモデルを参考にして、Turner の安定度階級3と4を使用する。

2.3 風速

風速は高さとともに大きくなり、一般にベキ法則が適用される。ここで使用する鶴見保健所の風速は2階建の屋上での測定であるから、高煙突では、風速を補正する必要がある。京浜地区では、長期間の上層観測データが得られないので、東京タワーの観測値よりベキ法則の係数を推定する。1969年2月1日から3月20日までの時刻別の風速プロフィールの一部を第2図に示す。このデータより、ベキ法則の係数は、日中で0.2、夜間では0.5とする。



第6図 鶴見保健所測定点での SO₂ 濃度計算値と風向の関係 (濃度計算は 500m 間隔であり、最も近い格子点を「●」で、周囲8点を含めての最大値と最小値を「○」で表わす.)

2.4 風向

拡散計算における誤差はいろいろな原因によって生ずるが、最も大きな誤差原因の一つとして、風向の与え方の誤りがある。

長期平均濃度の地理的分布の計算において、大煙源を中心に「ヤッデ」の葉を広げたように星型の等濃度線図が得られることがある。これは水平方向の拡散幅の推定が小さいためにも生ずるが、風向を16方位に代表させていることにも原因がある。16方位では、1風向の間に22.5°の角度差があり、一般的な煙の幅に比べてかなり大きい。測定の精度から、これ以上に詳細な観測値を得ることは困難であるので、モデル上での修正が必要となる。

京浜地区の SO₂ 濃度の計算結果の一例を第3図から第5図に示す。ここでは、σ_y, σ_zとも安定度はC、風速は5m/sとして、500m間隔の格子点上の濃度を計算した。第3図は南風、第4図は南南東の風であり、南と南南東の中間の場合を第5図に示す。これらの図から、風向がわずかに変動しても、濃度計算値は大きく変化することがわかる。

第6図に鶴見測定点の風向別 SO₂ 濃度計算値を示す。ここでは σ_y, σ_zとも安定度Cである。500mメッシュで計算しているの、最も近い格子点での値を「●」で、測定点を囲む周囲8点を含めての最大値と最小値を「○」で示す。この図から、わずかな距離で、あるいは風向の差によって、濃度が2倍以上に変化することがわかる。

星型の等濃度線図が生じないような修正方法として、従来から多く利用されるものに、次の2つがある。一つは22.5°内の横風方向の汚染質濃度が一定であるとして、計算する Clarke (1964) のモデルである。また大

志野 (1970) のように、σ_y の値をやや大きく計算しておくこともできる。しかし、これらの方法では最大濃度の出現が16方位の間になる場合、最大値や99パーセント値などの推定には誤差を生じ、計算値がやや低くなるのが予想される。高濃度部分の推定精度を向上させるために、式(3)に示すように16方位の風向観測値の頻度を分割して、半分は対象風向の観測値とは11.25°ずれた方向から吹くものとして、32方位の拡散計算を行う。

$$\bar{C} = \sum_S \sum_V \left[\sum_{D(\theta)} \left\{ \frac{f(\theta)}{4} \cdot C\left(\theta - \frac{\pi}{16}\right) + \frac{f(\theta)}{2} \cdot C(\theta) + \frac{f(\theta)}{4} \cdot C\left(\theta + \frac{\pi}{16}\right) \right\} \right] \quad (3)$$

この場合、各気象条件の頻度はあらかじめ32方位に分割して求めておき、各条件別計算値をかけ合わせて平均濃度を計算する。また各濃度ごとの超過確率も32方位に分割された条件別発生頻度から求められる。

3. 計算結果および考察

計算対象地域は京浜臨海地域であり、SO₂濃度の測定点を第7図に示す。計算期間は1969年の1月から3月までの3か月間である。第8図はこの期間中の鶴見保健所の風配図である。

まず16方位で風速の補正を行わない場合の計算を行った。鶴見測定点での結果を第9図に示す。平均濃度の推定では、正規型モデルより、Clarke (1964) モデルの方がよい計算値を与えるが、22.5°内の一様濃度分布を仮定しているので、最大濃度の推定精度がよくない(塩沢ら, 1974)。

次に風向の細分割とベキ法則による風速の補正を行って計算する。ただし地上風の観測値では7m/s以上の頻度が非常に小さいので、第2表のようにクラス分けを変

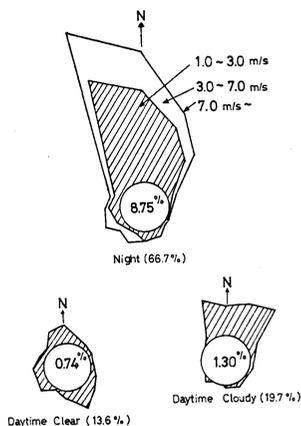


第7図 京浜地区の大気汚染 (SO₂) 測定点の分布

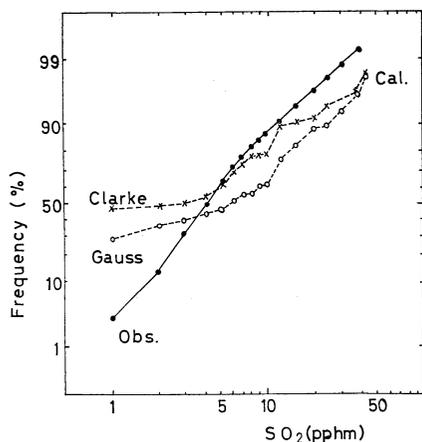
第3表 SO₂ 濃度の実測値と計算値の比較
(Jan.~Mar., 1969)

Monitoring station	Observation		Calculation	
	Ave.	Max.	Ave.	Max.
Kojiya	0.089	0.48	0.051	0.47
Daishi	0.067	0.62	0.094	0.78
Chuo	0.087	0.56	0.085	0.42
Nakahara	0.045	0.59	0.039	0.41
Tsurumi	0.062	0.60	0.083	0.61
Kohoku	0.031	0.64	0.028	0.36
Kanagawa	0.060	0.41	0.047	0.69
Hodogaya	0.050	0.41	0.044	0.51
Kasodai	0.079	0.46	0.082	0.30
Isogo	0.051	0.34	0.068	0.37

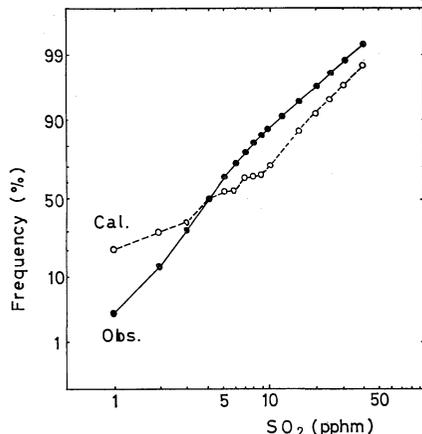
(ppm)



第8図 鶴見測定点での風配図 (1969年1月~3月) 9時~16時を日中, 17時~翌日8時を夜間とする。中央円内の数字はカーム ($u \leq 1$ m/s) の比率



第9図 鶴見測定点での実測値と計算値の比較 (1969年1月~3月, Trial I)



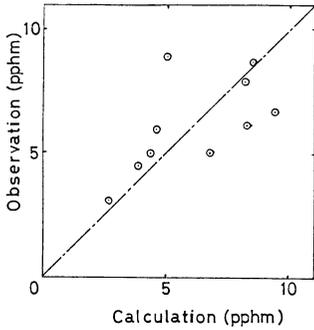
第10図 鶴見測定点での実測値と計算値の比較 (1969年1月~3月, Trial II)

更する。風速の分布は強い方へ尾を引いた分布形であるので、各クラスの代表値はクラスの中央値でなく、第2表のように設定する。この場合の計算結果を第10図に示す。

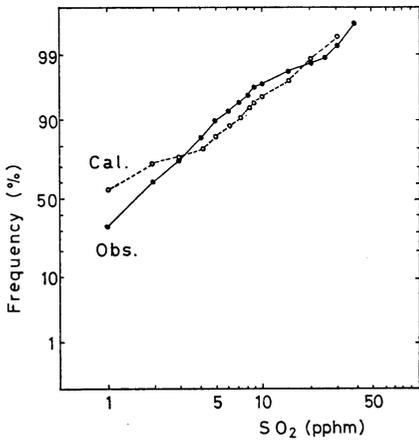
算術平均は(3)式で計算される。各測定点での実測値との比較を第11図、第3表に示す。平均値は糍谷がやや低く計算されている他は、計算値と実測値がよく一致している。最大濃度は主要煙源に近い大師、神奈川などでやや大きく計算しているが、糍谷、加曾台など多くの地点で実測値に近い値が得られている。最大濃度は観測値に含まれる測定誤差も大きくなるので、この拡散シミュレーションの結果は比較的によい推定値であると考えられる。

京浜地区は低煙源の寄与率が大きいため、トラッピングによる高濃度の発生はあまり多くないと考えられる。今回のシミュレーションの結果からも、大部分の測定点ではコーニングタイプの拡散式で十分であることがわかる。しかし、中原、港北では主要煙源より10km程度の距離があるので、最大濃度の計算値が実測値より低いことから、トラッピングの発生が予想される。

港北と中央(川崎)の計算結果を第12図、第13図に示す。この分布形から、濃度の低い部分の頻度がやや多く計算されていることがわかる。この傾向は港北など平均



第11図 京浜地区の SO₂ 算術平均濃度の 実測値と計算値の比較 (1969年1月~3月)



第12図 港北測定点での実測値と計算値の比較 (1969年1月3月)

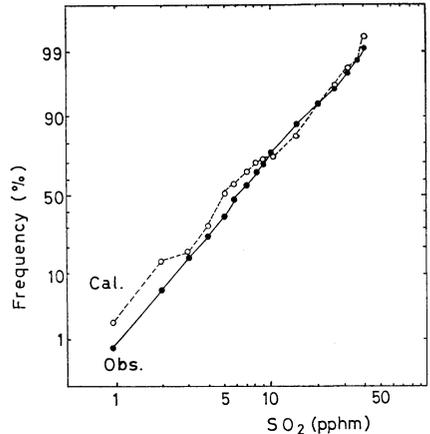
値の低い地点に見られ、このために港北、中原などでは、平均値の計算値が実測値より低くなっている。これは周辺部の汚染源のデータが十分でないために生じたものであり、バックグラウンドとしての濃度が評価されていないためであるとも考えられる。

4. あとがき

長期間の濃度分布を推定するための数式モデルとしては、各気象条件ごとの濃度計算値を重ねて、分布形を求める方法がある。この拡散モデルにより、京浜地区のSO₂濃度を計算した結果、次の結論が得られた。

(1) 長期間の拡散シミュレーションにブルーム拡散式および積分型パフ拡散式を使用するモデルでは、平均値のみでなく、最大濃度でも比較的によい推定値が得られる。

(2) 16方位の風向をモデル上で細分割することにより、不自然な星型の濃度分布計算値が生ずる問題を解決



第13図 中央(川崎)測定点での実測値と計算値の比較 (1969年1月~3月)

できる。

(3) 濃度計算値はわずかな地理的な差によって、大きく変動する。したがって、拡散計算では、煙源と計算地点の座標を正しく与える必要がある。

なお本論文の要旨は日本気象学会1974年春季大会において発表した。

文 献

Clarke, J.F., 1964: A Simple Diffusion Model for Calculating Point Concentrations from Multiple Sources, *J. Air Poll. Cont. Assoc.*, 14, 347-352.
 環境庁, 岡山県, 1973: 岡山県水島工業地域大気汚染調査報告書。
 気象研究所応用気象研究部, 1970: 臨海工業地域の大気汚染を対象とした大気拡散調査, 気象庁技術報告, 72。
 McElroy, J.L. and F. Pooler, Jr., 1968: St. Louis Dispersion Study, Vol. II
 中野道夫, 1972: 大気汚染寄与率の推定, *proc. ISAP*, 567-577。
 大志野章, 1970: 広域発生源のコントロールの方法, *大気汚染研究*, 5, 14-19。
 Pasquill, F., 1970: Prediction of Diffusion over an Urban Area-Current Practice and Future Prospects, *proc. Symposium on Multiple-Source Urban Diffusion Models*, 5-1~5-32。
 Roberts, J.J., E.J. Croke and A.S. Kennedy, 1969: An Urban Atmospheric Dispersion Model, Argonne National Laboratory。
 桜庭信一, 森口実, 大志野章, 中野道夫, 1970: 西大阪地区大気汚染調査(拡散実験), *大気汚染研究*, 5, 112。

桜庭信一, 1972: 大気中におけるばい煙の拡散, 公害防止管理者テキスト (日本マナージメントリサーチ), 2-1~2-22.

塩沢清茂, 大滝厚, 岡本真一, 1974: 大気汚染のシミュレーション, 第3回拡散モデルシンポジウム

(資料1).

Turner, D.B., 1964: A Diffusion Model for an Urban Area, J. Appl. Met., 3, 83-91.

横山長之, 1972: 大気汚染の制御と拡散モデル, 公害, 7, 125-133.

航空気象月例会のお知らせ

日時: 昭和51年2月下旬

東京航空地方気象台予報課

場所: 東京国際空港ビル内

島田守家宛申込下さい。

講演申込: 希望者は, 講演題目, 氏名, 勤務先, 講演所要時間を明記の上,

申込締切: 昭和50年12月20日(土)必着

(〒144) 東京都大田区羽田空港 2-3-1

なお開催日時, 場所の詳細については決定しだい『天気』誌上でお知らせします。