

局所排気用外付け式フードの捕捉性能に関する研究

越智, 廣志

<https://doi.org/10.11501/3078970>

出版情報：九州大学，1994，博士（工学），論文博士
バージョン：
権利関係：



第4章 フード開口近傍の吸込流れ場の数値解析

4.1 緒言

特定の作業行程で発生した汚染物質の発散を吸込気流によってコントロールする局所排気用外付け式フードにおいては汎用の風速計で測定が困難な程度の低速度領域の速度分布が重要な意味を持つ。第2章および第3章では二次元および三次元外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度を測定し、フード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を実験により調べた。しかし、実験において広範囲の吸込流れ場の精密かつ細かい速度特性のデータを得ることは、風速計の測定精度と吸込流れ場の測定点（風速計プローブのトラバース点）の間隔に限界があり、極めて難しい。そこで、広範囲の吸込流れ場の速度特性を細かく表現できる数値解析を用いて、実験で得られた速度特性データを定性的に（できれば定量的に）補っておく必要がある。

フード開口近傍の吸込流れ場はポテンシャル理論を用いて近似できることが確かめられており、数値計算により吸込流れ場を解析することは比較的容易であると思われる。しかしながら、最近、有限差分法⁽³¹⁾と有限要素法^{(29)(32~33)}を用いて二次元フードの吸込流れ場の数値解析が行なわれているが、これらの解析法は偏微分方程式が流れ場を決定する領域形解法であり、計算領域の境界条件の設定に問題が生じ、あまり良い解析結果は得られていない。境界要素法（特異点法）は境界上に分布する特異点に関する積分方程式が流れ場を決定する境界形解法で境界のみが解析の対象となり、しか

も特異点分布が無限遠方で速度が零となる条件をあらかじめ満足しているのので、フード開口近傍の吸込流れ場の解析には有効であると考えられる⁽³⁰⁾⁽⁴⁸⁾。

本章では、第2章および第3章の実験で得た速度特性のデータを補足するために、二次元および円形（軸対称）フードの壁面およびテイクオフダクトに渦点あるいは渦輪をスプラインフィット関数により連続かつ滑らかに配置する方法⁽⁴⁹⁾でフードの開口近傍の吸込流れ場を数値解析し、フード形状の違いが吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を調べた⁽⁵⁰⁾。なお、実験条件に近づけるために二次元フードに対しては可視化実験により得られたフード内のはく離形状を考慮して計算を行ったが、円形フードに対してはフードの材質の関係で可視化実験が行なえず、フード内のはく離の影響は計算では考慮できなかった。

さらに、第2章および第3章で考察した実験結果との比較も行ない、本数値解析法の有効性も併せて検討した。

4.2 解析方法および解析手順

山口らは軸対称物体表面上に強さが未知の渦輪をスプラインフィット関数を用いて連続かつ滑らかに分布させる特異点法によりターボ機械の吸込口の流れ解析を行い、非常によい結果を得ている⁽⁴⁹⁾。フード開口近傍の吸込流れ場の解析に対してもこの手法が有効であると考えられる。そこで、山口らの解析手法を用いてフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性を数値解析で求めた。

計算はテイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$ を一定とし、第2章の実験で用いた開口幅比 n を1から5まで変化させた A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、

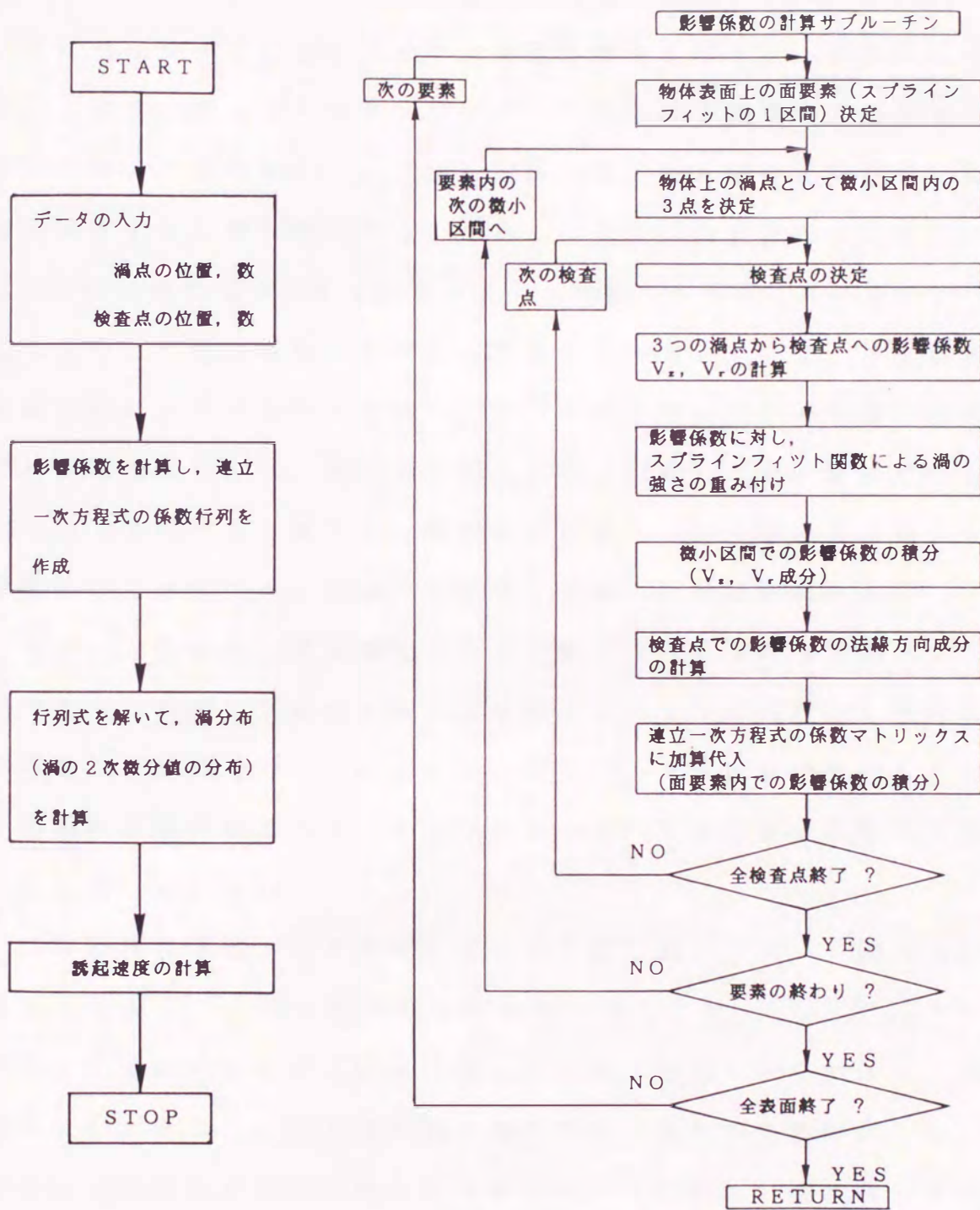
E_2 の 5 つのフレアー形フードおよびフランジ外端を開口面と考えた場合の n が 2 ～ 5 となるようにした B_{2F} , C_{2F} , D_{2F} , E_{2F} の 4 つのフランジ形フードの計 9 種類の二次元外付け式フード (表 2・1, 図 2・3) と, 第 3 章の実験で用いた開口面積比 m を 1 から 25 まで変化させた A_c , C_c , E_c の 3 種類の外付け式円形フード (表 3・1, 図 3・2(a)) に対して行った。

計算モデル (付図 A・1) は平行ダクトの長さをテイクオフ面の幅の約 1.5 倍とし, 渦点あるいは渦輪はフード先端部やテイクオフ面の角部が密となるように 52 ～ 71 点配置した。解析結果としてフード開口近傍の速度ベクトル図, フード開口中心線上速度分布図および開口近傍の等速度線図を作成した。

計算のフローチャートを図 4・1 に示す。計算手順は式 (A・34) の $2N$ 元の連立一次方程式の行列式の解, γ_N と γ^*_N を掃出し法により求め, 式 (A・11) のスプラインフィット関数で与えられる渦分布, $\gamma(s)$ を決定し, フード開口近傍の吸込流れ場の任意の計算点での誘起速度を計算し, 吸込流れ場の速度特性を求めた。

本解析法における計算精度は厳密解がない場合に対しても, 求められた渦分布によって物体内部に誘起される速度が零と見なせるかどうかによって容易に調べられる。計算結果はフード形状内部に誘起される速度は零であり, さらに $z = 0$ の壁面上 (付図 A・1) での誘起速度と代表速度との差が計算した全てのフードについて 1.5 % 程度であったが, 中心線上ではその差が 0.1 % 以下となり, 本解析法は十分な計算精度が得られていると考えられる。

なお, 解析法の基礎式は巻末の付録に記載した。



(a) メインルーチン (b) 影響係数の計算サブルーチン

図 4 ・ 1 計算の流れ図

4.3 フード開口内のはく離形状の考察

外付け式フードにおいてはフード開口端およびフランジ端で流れがはく離し、フード内面およびフランジ面にはく離領域が形成される。このはく離領域がフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性に影響を及ぼすことが予想される。しかしながら、特異点法による開口近傍の吸込流れ場の解析ではポテンシャル流れを仮定しているので、これらのはく離の影響は計算には考慮されない。そこで、はく離の影響を解析中に導入するために、タフト法を用いてフード開口内の流れを可視化し、はく離領域を測定した。測定したはく離領域に対して以下で述べる方法ではく離流線を定義し、はく離流線に渦点を配置することでフード壁面のはく離を考慮した計算を試みた。

なお、二次元フードは透明アクリル板で製作しており可視化が可能であったので、可視化実験により得られたフード内のはく離形状を考慮して計算を行った。しかし、円形フードは鉄板で製作しており可視化実験が困難であったので、フード内のはく離の影響は計算では考慮していない。

二次元外付け式フードに対してタフト法を用いてフード開口内の流れを可視化し、はく離領域を求めた一例として、 C_2 と C_{2F} フードのはく離領域の可視化結果を図4・2および図4・3に示す。両図に示したように、はく離領域内をタフトの振れ方の違いにより、主流域（常時流れ方向を向いて静止している領域）、逆流域（常時逆流を示している領域）、およびその中間の混合域の3つの領域に分類した。

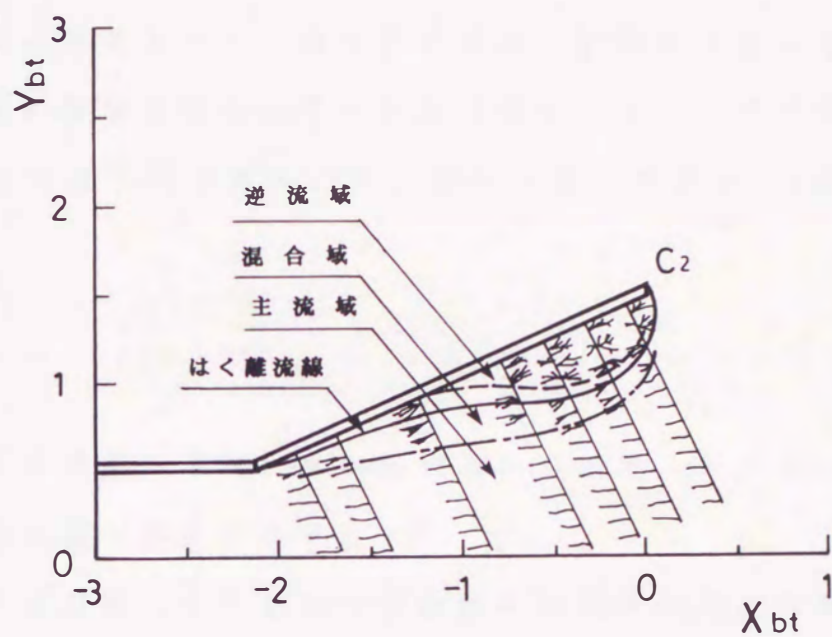


図 4 ・ 2 フレアー形フードのはく離形状

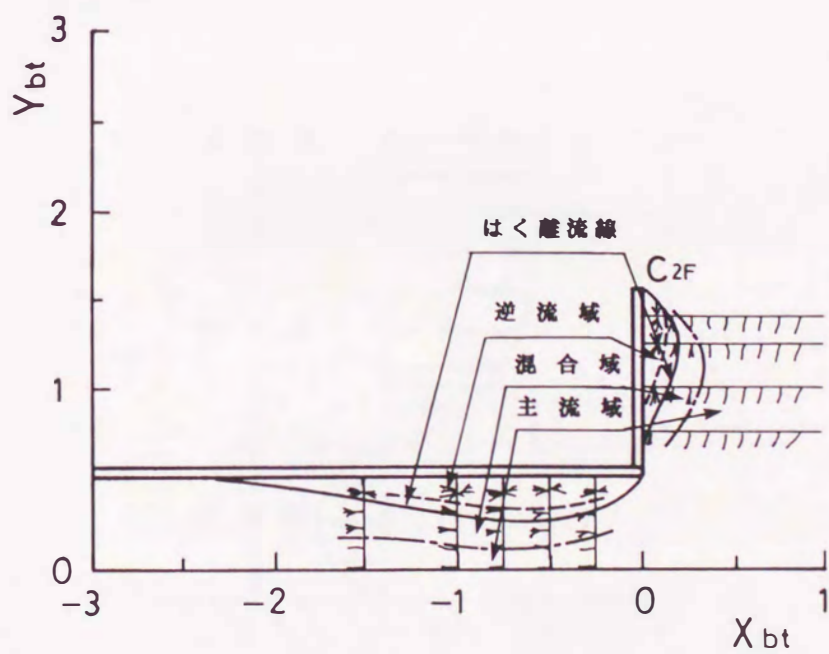


図 4 ・ 3 フランジ形フードのはく離形状

そこで，この逆流域の厚さに混合域の排除厚さ δ^* を加えた線をはく離流線と定義し，この線を物体境界と仮定することで，フード内のはく離の影響を計算に導入した（図4・4）。この際，混合域内の速度分布は不明であるので，速度分布を次式の $1/n$ 乗則で仮定する。

$$v/V = (y/\delta)^{1/n} \quad , \quad n : \text{一定} \quad \text{--- (4.1)}$$

ここで， V は主流の速度， v は混合域内の速度， y は混合域内の距離， δ は境界層の厚さである。

逆流域内は逆流しているので混合域との境界の速度勾配は0ではなく，定数 n は壁面乱流境界層の値 $n = 7$ より小さく，層流境界層の値 $n = 2$ より大きいと考えられる。ここでは各境界層に対する排除厚さ $\delta^*_{n=7} = 1/8 \cdot \delta$ と $\delta^*_{n=2} = 1/3 \cdot \delta$ の中間の値を採用し， $\delta^* = 1/4 \cdot \delta$ とした（51）。

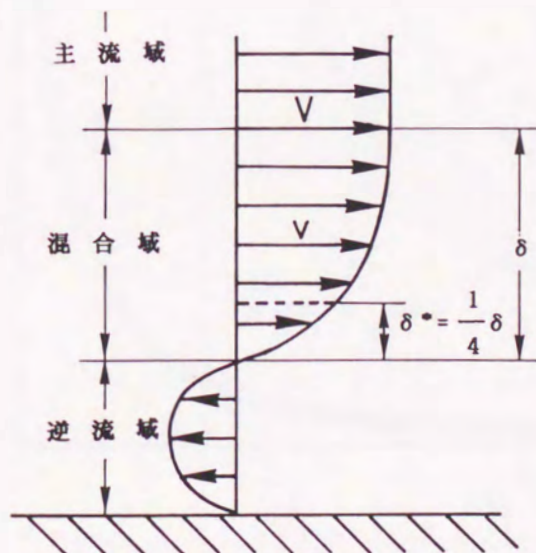


図4・4 はく離流線の定義

4.4 二次元フードの解析結果および考察

4.4.1 フード開口中心線上速度分布

二次元外付け式フレアー形およびフランジ形フードの開口中心線上速度分布をフード開口内のはく離を考慮して計算し、フード開口幅 b_o およびフード開口の断面平均流速 $\bar{v}_o$ で整理して図4・5および図4・6に示す。両図の右上方には $X_{bo} > 1.5$ の領域の拡大図を

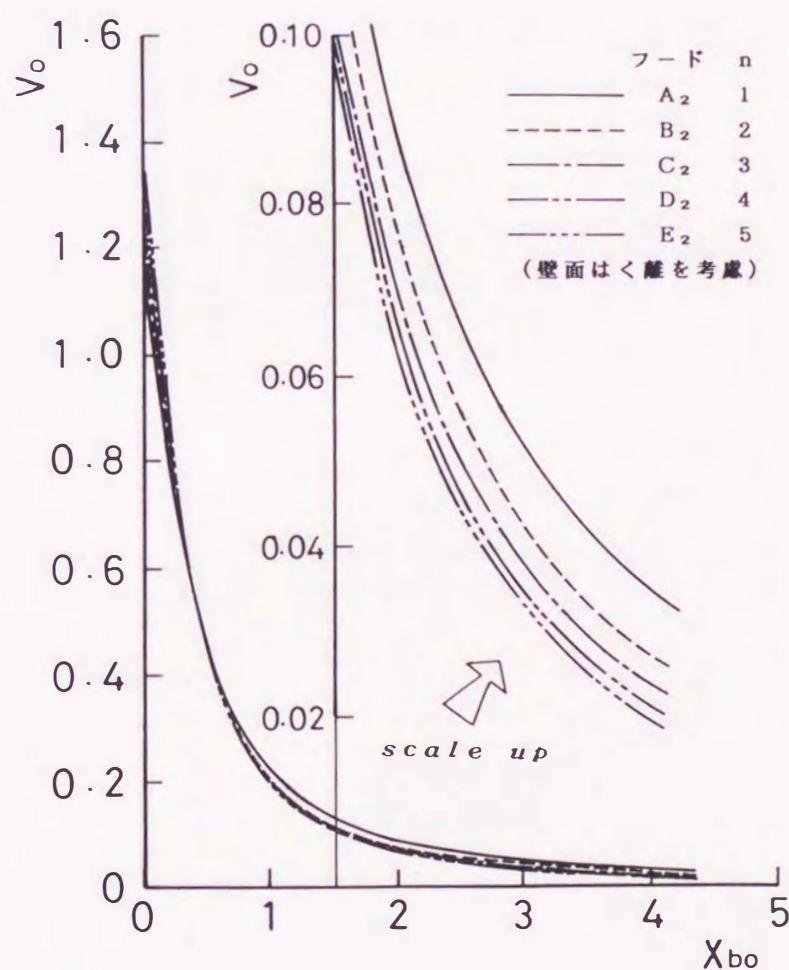


図4・5 フレアー形フードの開口中心線上速度分布
(開口面基準)

示している。フランジ形フードは第2章の実験データの整理方法と同様にフランジ外端の寸法を開口幅 b_o として整理した。

フード開口近くでは、フランジ形フードは流れが開口の中心部に集中して吸込まれるために速度はフレアー形よりも速いが、遠方では両者の間に明確な差は認められず、フランジ形フードもフランジ外端を開口面と考えればフレアー形フードと同じ開口中心線上速度分布を有し、1つの双曲線で近似できることが計算からわかる。このことは実験においても確認している（図2・5）。しかしながら、

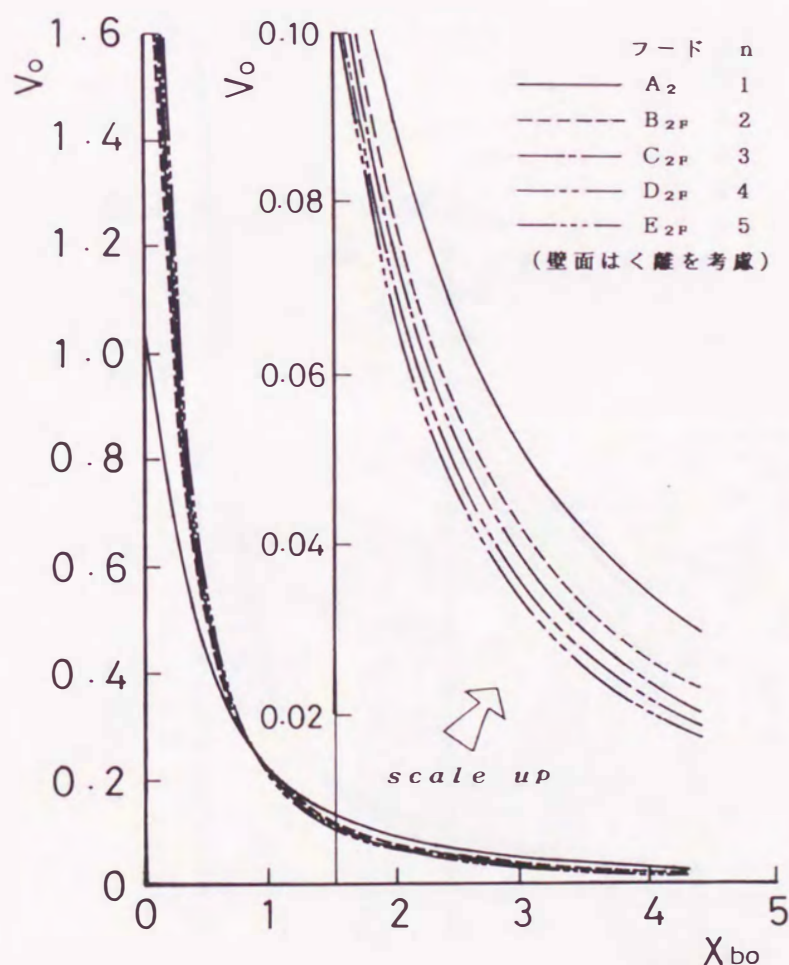


図4・6 フランジ形フードの開口中心線上速度分布
(開口面基準)

詳細にみればフード開口から遠方では開口幅比 n が大きいほど速度が遅くなっている。実験ではここまでの確認はできなかった。

従来，吸込み流れ場についてはほとんどフード開口面を基準として議論されているが，第2章および第3章で述べたようにテイクオフ面を基準として整理した方がフード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響をより明確に表現することができる。フレアー形およびフランジ形フードの開口中心線上速度分布をフード開口内のはく離を考慮して計算し，テイクオフ面の幅 b_t およびテイクオフの断

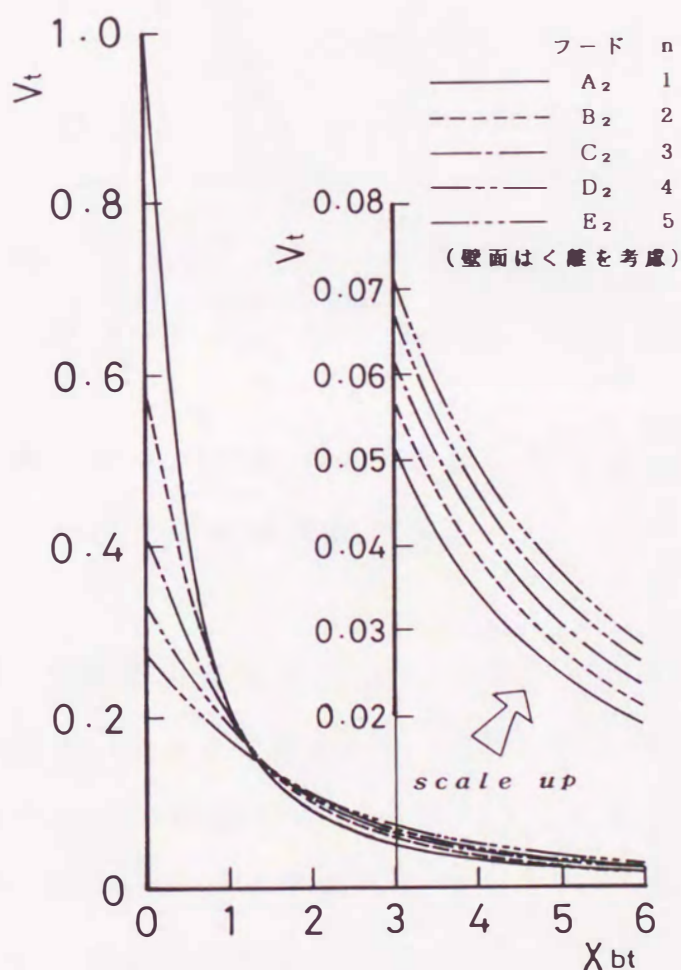


図4・7 フレアー形フードの開口中心線上速度分布
(テイクオフ面基準)

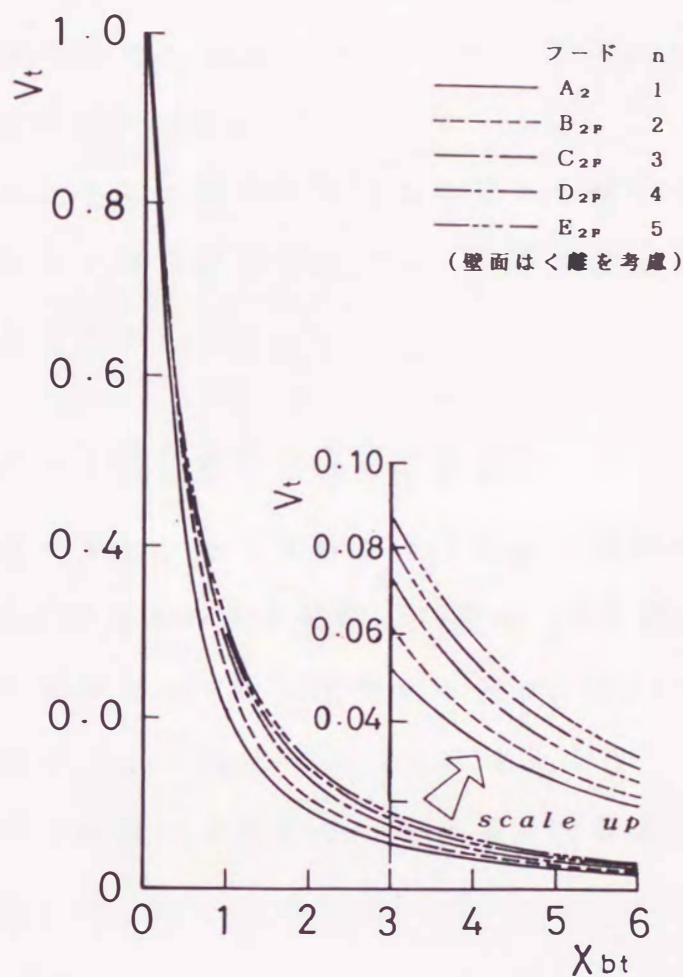


図 4 ・ 8 フランジ形フードの開口中心線上速度分布
(テイクオフ面基準)

面平均流速 $\bar{v}_t$ で無次元化して図 4 ・ 7 および図 4 ・ 8 に示す。両図の右上方には $X_{bt} > 3.0$ の領域の拡大図を示している。

フレアー形フードでは開口近くでは当然 n の小さなフードほど速度が大きいが、 $X_{bt} \approx 1.5$ で速度が逆転し、それ以上の領域では逆に n の大きなフードの方が速度が大きくなっている。フランジ形フードでは流れが小さな開口に集中するので開口近くではフレアー形よりも速度は大きくなり、速度の逆転は生じていない。外付け式フー

ドの開口中心線上速度分布はフード形状に関係なく一本の双曲線で表されることが知られているが^(4~6)、フード形状によって異なる特性を有することがわかる。

これらの結果はフード開口内ではく離を考慮しない計算でも同様な傾向を示した。第2章の二次元フードの実験でもこれらの結果は確認している（図2・6）。

4.4.2 フード開口近傍の等速度線分布

フレアー形フードとフランジ形フードの開口近傍の等速度線分布を計算した結果を開口面の値で整理して図4・9と図4・10に示す。フード開口面を基準にデータを整理するとき、開口形状が同じであれば等速度線は相似になると考えられてきたが⁽⁵⁾、計算結果を詳細に見ればフード形状により異なっている。すなわち、フード開口

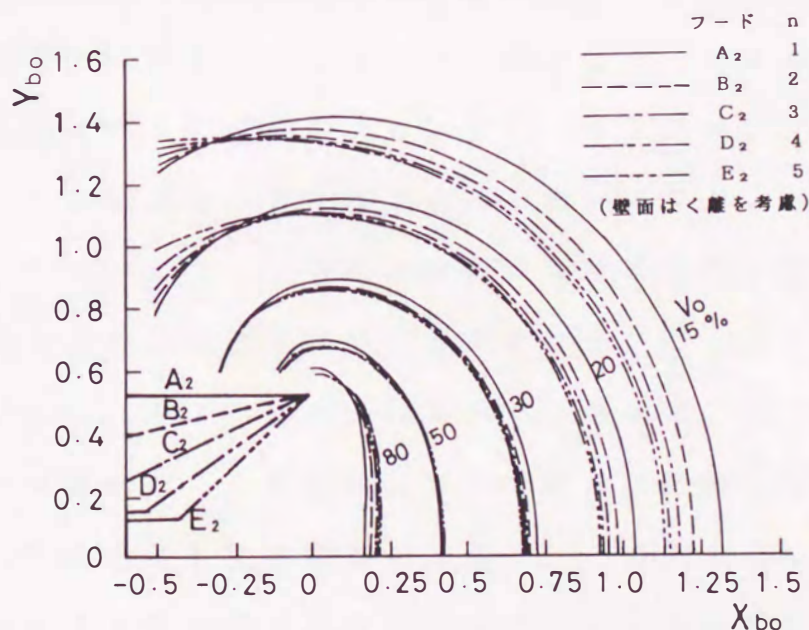


図4・9 フレアー形フードの開口近傍の等速度線分布
(開口面基準)

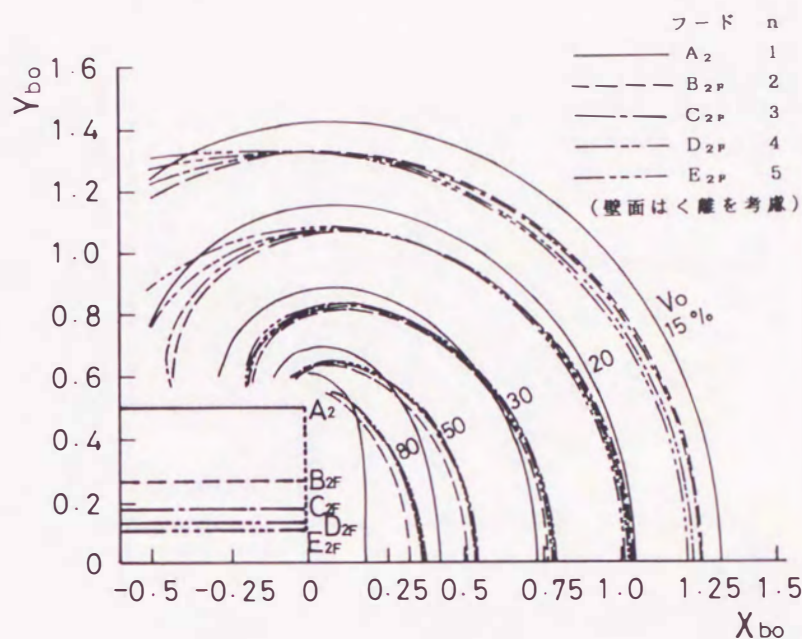


図 4・10 フランジ形フードの開口近傍の等速度線分布
(開口面基準)

の前方での等速度線はほぼ相似となるが、フードの開口幅比 n が小さいほど遠方での流速は大きく、逆に開口近くでは n の大きいフードの方が流速は大きい傾向がある。また、 n が小さいフードでは、フード後方での流速は小さくなる。この傾向はフランジ外端を開口面としたフランジ形フードの等速度線においても同じである。

フード開口近傍の等速度線分布をテイクオフ面の値で整理した計算結果を図 4・11 および図 4・12 に示す。第 2 章で述べたように局所排気用外付け式フードの設計においては捕捉距離を確保した上でフードにより吸込流れ場を制御するので、このデータの整理法の方がフードの捕捉特性を明確に表現することができる。すなわち、 n が小さいフードほど流れが中心部に集中するので開口近くの流速は速く、 n が大きくなるにつれて開口近くの流速は遅くなる。しかし

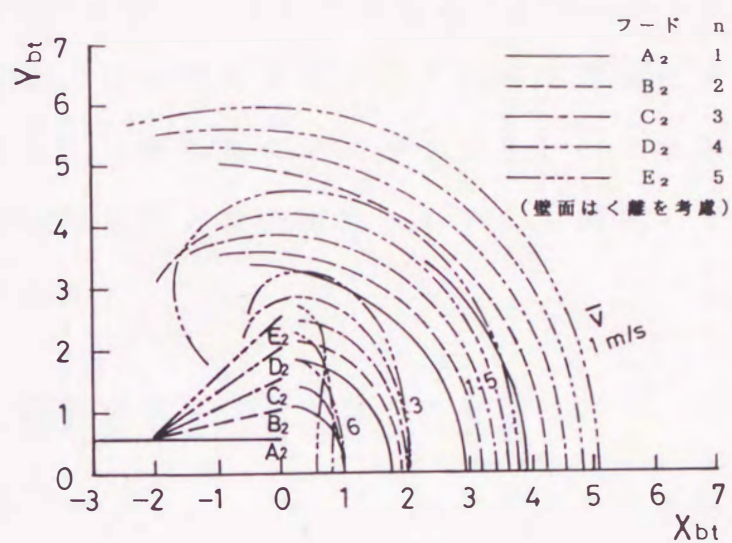


図 4 ・ 11 フレアー形フードの開口近傍の等速度線分布
(テイクオフ面基準)

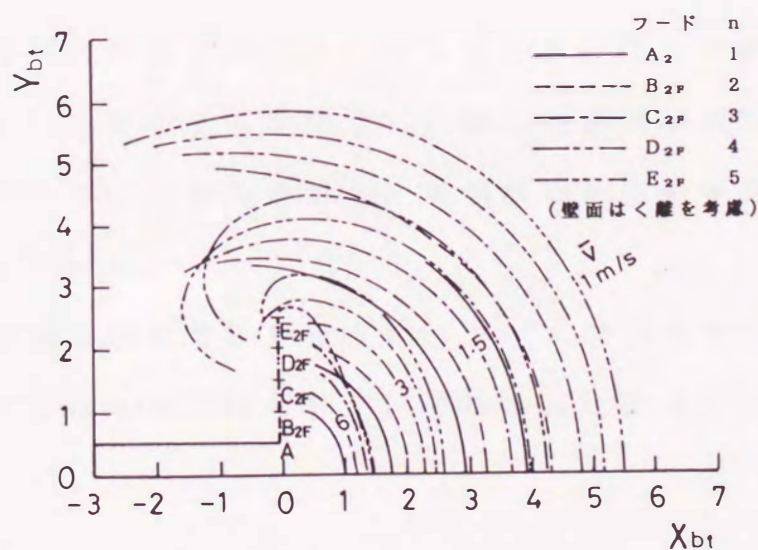


図 4 ・ 12 フランジ形フードの開口近傍の等速度線分布
(テイクオフ面基準)

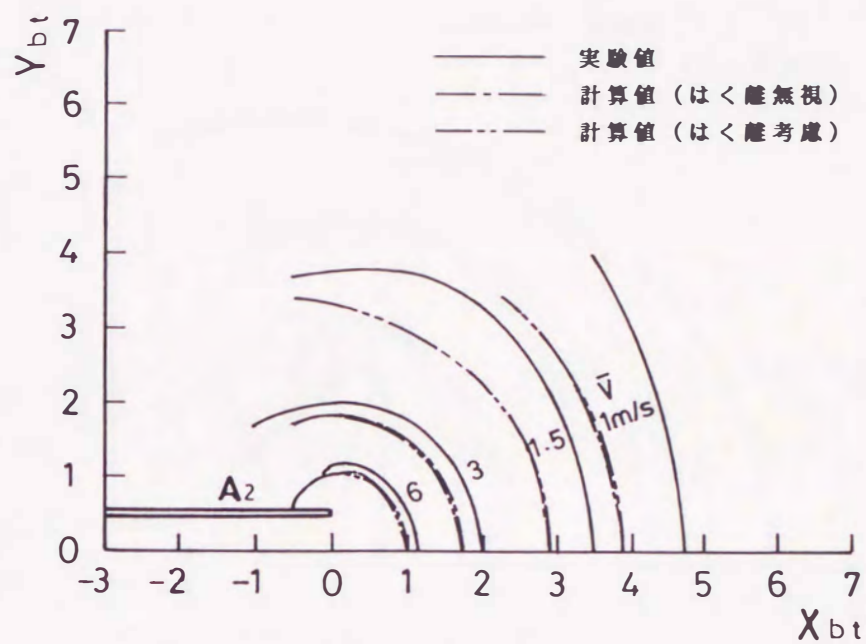
ながら、 n の大きなフードの方がフード後方の速度は遅くなり、後方からの流れ込みを防止する効果のあることがわかる。従って、フード開口面の遠方では n の大きなフードの方が流速が速い。この傾向はフレアー形フードのみならずフランジ形フードでも同じである。

以上の解析結果は第2章の実験においても確認している（図2・7および図2・8）。

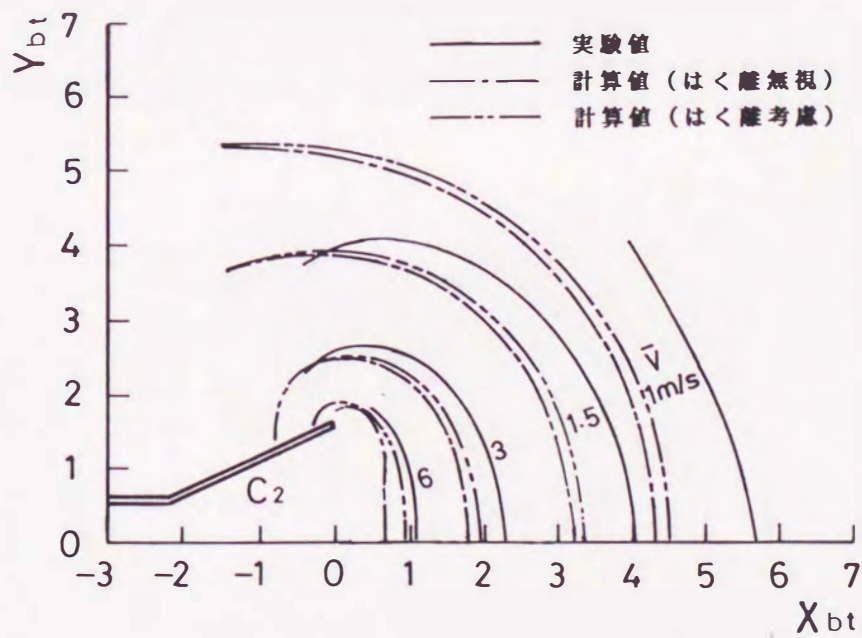
4.4.3 解析結果と実験結果との比較

フレアー形フード A_2 、 C_2 、 E_2 およびフランジ形フード C_{2F} のテイクオフ面基準で整理したフード開口近傍の等速度線分布の解析結果と第2章で行った実験結果との比較を図4・13に示す。解析結果はフード開口内のはく離を考慮した計算と考慮しない計算の両方から求めた線図を示している。フード開口の前方での速度はいずれの場合も計算値の方が実験値よりも小さく（この傾向は遠方ほど大きい）、フード開口の側方でこの傾向は逆転し、フード開口後方では計算値の方が実験値より大きくなっている。フード開口内のはく離を考慮しない計算よりは考慮した計算の方が実験値に若干ではあるが近づいている。しかしながら、実験値と計算値は定性的には良い一致を示している。

本解析法は定量的な比較を行うにはフード開口内のはく離形状を考慮するだけでは十分ではないが、定性的な比較を行うには有効である。

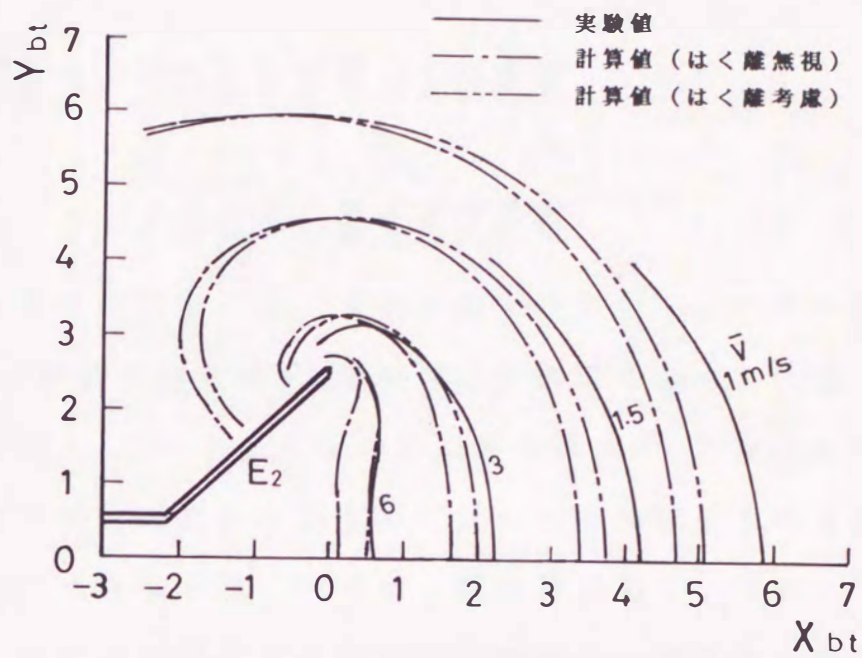


(a) A₂ フード

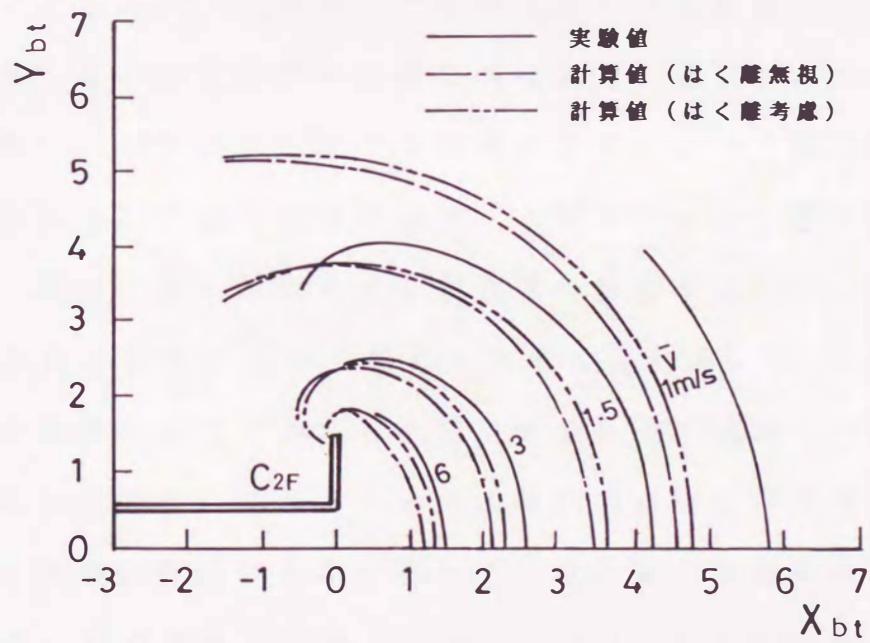


(b) C₂ フード

図 4・13-1 フード開口近傍の等速度線分布の解析結果
と実験結果との比較 (テイクオフ面基準)



(c) E_2 フード



(d) C_{2F} フード

図 4 ・ 13-2 フード開口近傍の等速度線分布の解析結果
と実験結果との比較 (テイクオフ面基準)

4.5 円形フードの解析結果および考察

4.5.1 フード開口中心線上速度分布

円形フードの開口中心線上速度分布を計算し、フードの開口面積 A_o と開口の断面平均流速 $\bar{v}_o$ で整理した結果を図4・14に、テイクオフの断面積 A_t とテイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$ で整理した結果を図4・15に示す。両図には第3章で行った実験結果も示している。なお、計算ではフード開口内のはく離は考慮していない。

最初に、開口面基準での計算値と実験値との開口中心線上速度分布を比較する（図4・14）。開口面積比 m が25のE_oフードでは開口近くおよび遠方とも計算値と実験値はよく一致しているが、 m がそれより小さいA_oとC_oフードでは開口近くで実験値が計算値よりも速く、遠くなるにしたがってその差は徐々に縮まり、 $X_o = 0.35$ 付近で逆転し、遠方では一致する傾向にある。フード開口の近くでのこの速度差は開口近くの速度はフード開口内のはく離の影響を大きく受け、開口面積に対するはく離領域の割合がA_oとC_oフードでは比較的大きくなることから生じると考えられる。E_oフードではその割合が比較的小さく、さらに開口面の断面平均流速が他の2つのフードに比べてかなり遅いために、開口中心線上速度分布にフード内のはく離の影響がほとんど現れず、計算値と実験値の差が見られないためと思われる。しかしながら、A_oフードの計算値と実験値との差は速度で表せば、 $X_o = 0.5$ で 0.66 m/s 、 1.0 で 0.27 m/s 、C_oフードではいずれの距離でも 0.05 m/s となり、その差は十分に小さい。

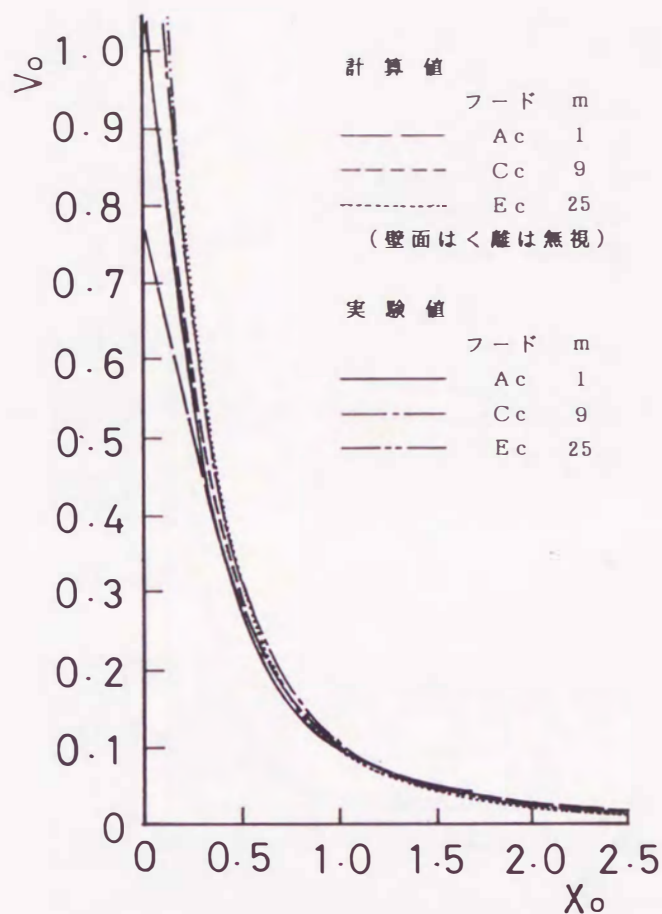


図 4・14 円形フードの開口中心線上速度分布

(開口面基準)

次に、テイクオフ面基準での計算値と実験値の開口中心線上速度分布を比較する(図 4・15)。A。フードは開口面とテイクオフ面が等しいので、両者の比較は上述のとおりである。E。フードはテイクオフ面基準で比較しても計算値と実験値はよく一致している。しかし、C。フードではフード開口近くで計算値と実験値に顕著な差が現われ、実験値の方が計算値より速くなった。これは開口面近くでの差であり、実用上の局所排気フードの捕捉点よりはるかに小さな距離である。従って、捕捉速度の限界に関する議論の対象外の距離であり、この差はあまり問題ではないが、フレア角が 24.3°

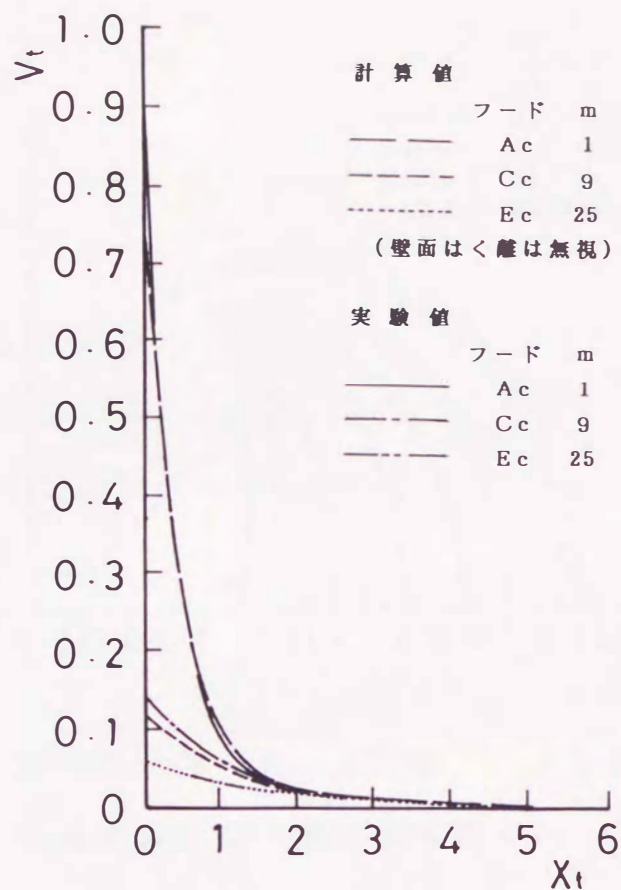


図 4・15 円形フールドの開口中心線上速度分布

(テイクオフ面基準)

近傍 (C。フールド) では他のフレアー角のフールドとは異なった現象が生じていると考えられる。

以上の解析結果よりフールド開口中心線上速度分布は本解析法によりフールド開口内のはく離形状を考慮しなくても十分に予測可能であることがわかる。

4.5.2 フールド開口近傍の等速度線分布

円形フールドの開口近傍の等速度線分布を計算した結果を開口面の値で整理して図 4・16 に示す。等速度線の形状は開口面積比 m によ

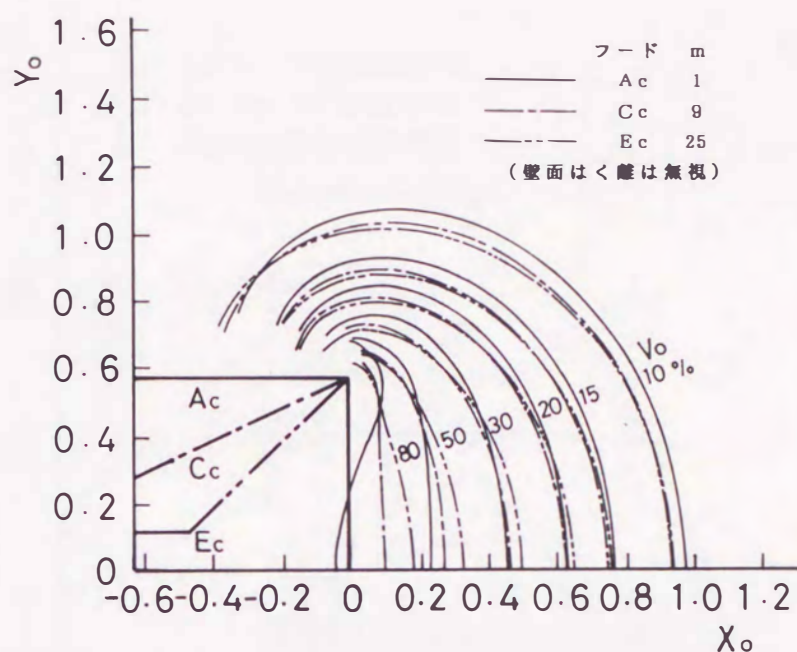


図 4・16 開口面積比の異なる円形フードの開口近傍の
等速度線分布（開口面基準）

り開口近くでは若干異なるが，その他の領域では m には無関係には
ば相似となっている。一方，実験結果（図 3・10）によればフード
開口中心線付近の領域に限れば，計算結果と同様にフード開口近く
でやや差があるが，遠方ではすべてのフードにおいてほぼ一致して
いる。しかし，開口中心線を離れたフード開口の側方では m の大き
なフードほど等速度線の間隔が密となり，さらにフード開口後方で
の回り込みが急になっており，計算結果とは異なった結果を示して
いる。両者のこの違いの原因の一つとして，計算ではポテンシャル
流れを仮定し，しかもフード開口内のはく離を考慮していないため
であると考えられる。

円形フードの開口近傍の等速度線を計算した結果をテイクオフ面
の値で整理して図 4・17 に示す。計算結果でも実験結果（図 3・14）

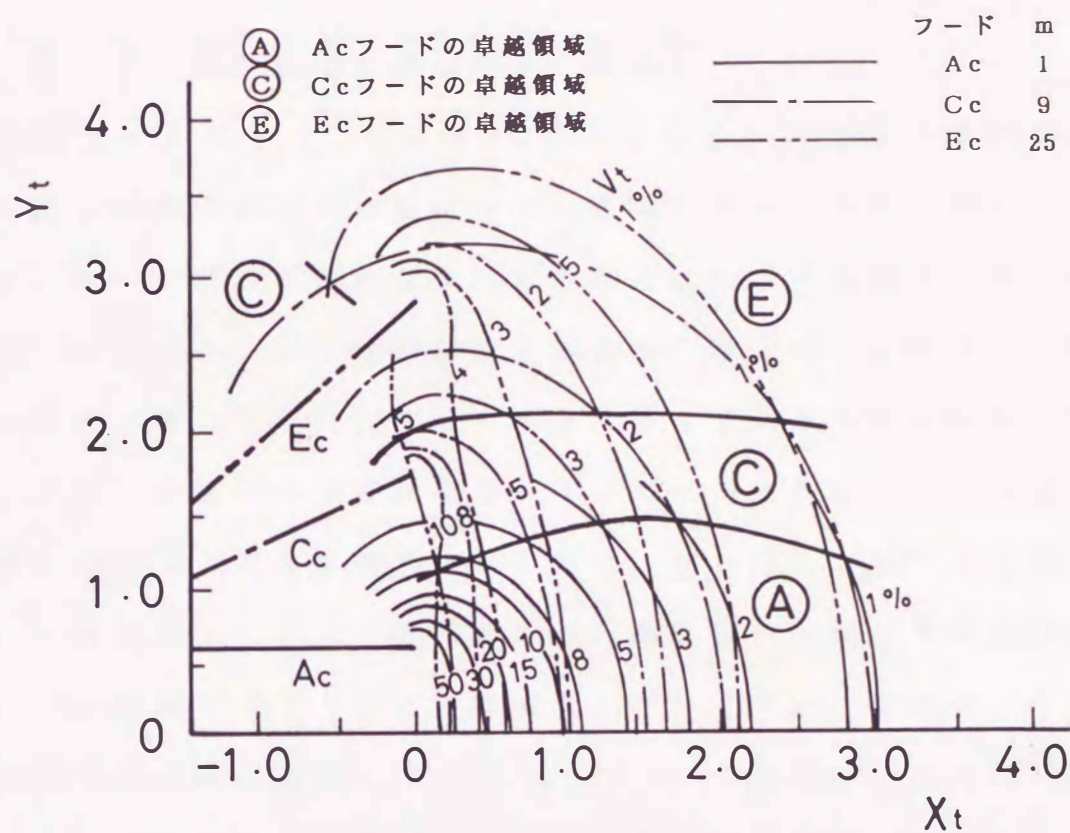
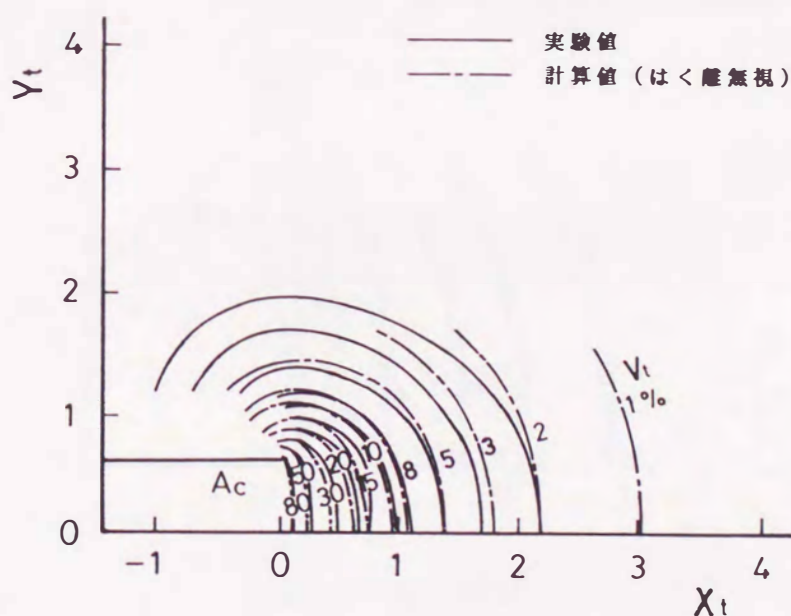


図 4・17 円形フードの開口近傍の等速度線分布
および卓越領域（テイクオフ面基準）

と同様に等速度線の形状は m の小さなフードほど円形に近く、 m が大きくなると横方向に延び、同じ X_t の位置では m の大きなフードの方が等速度線の形状は平坦となる。また、開口面近くでは m の小さなフードの方が開口面積が小さく、 m の大きなフードに比べれば速度が速くなる。これらの2つの効果により計算結果においてもフードの卓越領域の存在が確認される。計算と実験による卓越領域の境界線を比較すると A_c および C_c フードの境界線が大きく異なっている。これは計算でのポテンシャル流れの仮定が影響していると考えられる。

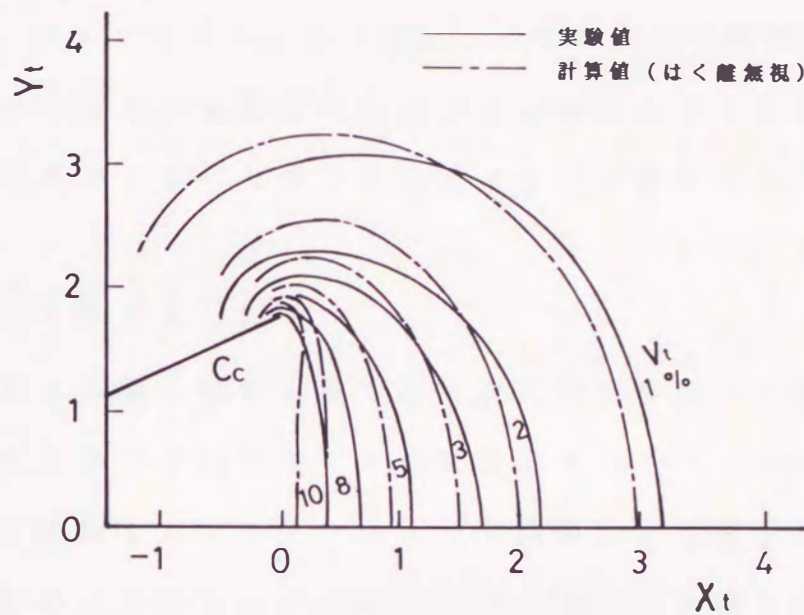
4. 5. 3 解析結果と実験結果との比較

円形フード A_c 、 C_c および E_c のテイクオフ面基準で整理した開口近傍の等速度線分布の解析結果と実験結果との比較を図 4・18 に示す。フード開口の側方から後方にかけての等速度線の形状は開口面積比 m が小さい場合は計算値と実験値はほぼ同じ形状であるが、 m が大きくなるほど両者の差は大きくなっている。すなわち、4. 5. 2 節でも述べたが実験結果によれば m が大きなフードほどフード開口後方での等速度線の間隔が密で、回り込みが急になっているが、計算結果ではフード開口後方の等速度線の形状（等速度線の間隔）は m が異なってもほとんど変化していない。二次元フードの計算でも同様な傾向を示した（図 4・13）。この差はフード開口内のはく離を考慮すれば若干ではあるが解消されると考えられる。

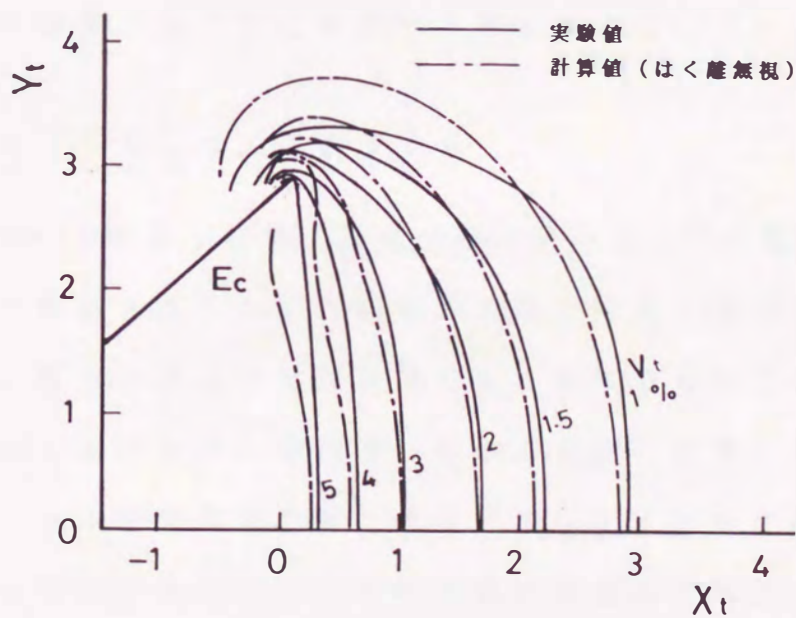


(a) A_c フード

図 4・18-1 フード開口近傍の等速度線分布の解析結果と実験結果との比較（テイクオフ面基準）



(b) C_c フォード



(c) E_c フォード

図 4・18-2 フォード開口近傍の等速度線分布の解析結果と
実験結果との比較 (テイクオフ面基準)

本解析法で円形フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性を予測する場合、フード開口中心線付近についてはほぼ予測可能であるが、フード開口の側方から後方にかけては m が大きくなるにしたがって実験値との差が大きくなることに留意する必要がある。

4.6 第4章のまとめ

第2章および第3章の実験で得た速度特性のデータを補足するために、二次元および円形フードの壁面およびテイクオフダクトに渦点あるいは渦輪をスプラインフィット関数により連続かつ滑らかに配置する特異点法でフードの開口近傍の吸込流れ場を数値解析し、フード形状の違いが吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を調べた。さらに、実験結果との比較も行ない、本数値解析法の有効性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

4.6.1 二次元フードのまとめ

(1) フード開口中心線上速度分布は開口面基準で整理すればフード開口近くを除きフランジ外端を開口面と考えたフランジ形フードもフレアー形フードと同じ速度場として表すことができる。さらに開口面の近くではフランジ形フードの方が速い流速が得られる。

(2) フード開口中心線上速度分布はテイクオフ面基準で整理すれば従来考えられていたような1本の双曲線では表わせず、開口面近くでは開口幅比の小さなフードの方が、また遠方では開口幅比の大きなフードの方が速い流速が得られる。これは開口幅比の大きなフードはフード後方からの流れ込みを防止する効果が大きいためである。

(3) 上記(1), (2)は実験によっても確認できる。

(4) フード開口内のはく離を考慮して解析した吸込流れ場の等速度線分布はフード開口の前方では計算値の方が実験値より小さくなったが, 定性的にはよい一致を示した。また, フード開口内のはく離を考慮しない計算においても定性的には正しい結果が得られた。

4.6.2 円形フードのまとめ

(1) フード開口中心線上速度分布はフード開口内のはく離を考慮しなくても, 開口面およびテイクオフ面基準で整理した計算結果は実験結果とよい一致を示した。

(2) フード開口近傍の等速度線分布は計算結果では開口面基準で整理すれば開口面積比によらずほぼ相似な形状となり, 実験結果とは異なった。

(3) フード開口近傍の等速度線をテイクオフ面基準で整理すれば, フードの卓越領域の存在が確認された。フードの卓越領域の存在は実験結果によっても確認できる。しかし, この卓越領域の境界は実験結果とは異なった。これはフード開口の側方から後方にかけて開口面積比が大きくなるにしたがって計算値と実験値の差が大きくなるためである。

第5章 吸込流れ場の捕捉性能評価システムの提案

5.1 緒言

汚染物質が発生する工場内の作業環境では作業者の健康と安全を守るために局所排気装置の設置が労働安全衛生法の規則で規定されている。外付け式フードを用いる局所排気装置はそれらの規則で定められた捕捉点での捕捉風速（フード開口中心線上の任意の点での速度）を満たす必要があり、ACGIH⁽³⁾は円形および矩形の外付け式フードに対してはDallavalleのフード開口中心線上速度分布に対する経験式⁽⁴⁾を推奨しており、この開口中心線上速度分布がフードの捕捉性能の評価基準となっている。我が国でもフード開口中心線上速度分布に対するDallavalleの経験式がフードの設計の基礎式として用いられている。

しかしながら、上述の労働安全衛生法の規則では捕捉点での捕捉風速の規定はクロスドラフト（乱れ気流）が発生していない作業環境下での基準値である。近年、汚染源自身、空調や換気用ファン、稼働機械や作業者の移動などにより発生するクロスドラフトがフード開口近傍の吸込流れ場に影響を及ぼすことによるフードの捕捉性能の低下が問題となっている。

クロスドラフトが混在する作業環境下ではフードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性の測定は困難さを伴うので、速度特性以外でのフードの捕捉性能の評価を行う必要性が生じている。

最近、新しいフードの捕捉性能評価の試みとして、作業工程により生じた全汚染物質と局所排気装置（フード）で捕捉した汚染物

質量の比をフードの捕捉効率と定義し、トレーサガス法により全汚染物質量、捕捉汚染物質量および漏れ汚染物質量のうちの2つの汚染量を測定し、これらから捕捉効率を求めてフードの捕捉性能の評価を行う研究がEllenbenker et al.⁽³⁴⁾, Hampl et al.⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾, Flynn et al.⁽³⁸⁾, Water et al.⁽³⁹⁾らによって行われている。しかしながら、これらの手法を実際の現場で適用するにはトレーサガスのサンプリングが煩雑で、さらにガス濃度分析器の取扱いに熟練を要し、ガス濃度の分析に時間がかかるなどの種々の問題が生じてくる。

本章では、汚染源自身が作り出すクロスドラフトに焦点を絞って、炭酸ガス(CO_2)をトレーサガスとしてフードの開口近傍の吸込流れ場にポイントソースで注入し、それを追跡して、トレーサガスの高濃度領域を検出することにより、吸込気流の流線の測定およびフードの捕捉性能の評価が行える簡易トレーサガス法を提案した。さらに、フードの捕捉性能の評価を行うために捕捉性能評価パラメータ(最大飛散幅と飛散長さ)、捕捉率およびフード開口面外への漏れなどを定義した⁽⁵²⁾。

5.2 簡易トレーサガス法

5.2.1 システム構成

簡易トレーサガス法のシステム構成(トレーサガス発生装置およびトレーサガス濃度検出装置)を図5・1に示す。トレーサガスとしては空気中にほとんど存在しない六フッ化硫黄(SF_6)がよく使用されているが⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁸⁾⁽⁴⁰⁾、本簡易システムでは安全なうえ

に濃度の測定が容易な炭酸ガス (CO_2) を用いた。図 5・2 は室内での CO_2 のバックグラウンド濃度の日時による変化の一例を示した図であるが、 CO_2 をトレーサガスとして用いる際にはバックグラウンドの CO_2 濃度が場所および時間により変化するので（実験中は室内で $400 \sim 500 \text{ ppm}$ の範囲で変化）、濃度の測定はバックグラウンドの濃度変化が無視できる程度の高濃度の範囲で行わなければならない。

ポンベに詰められた液化炭酸ガス⑮は、ヒーター付レギュレーター⑯およびフローメーター⑱により放出量が調整され、ビニールチューブを介してポイントソース発生源⑳（ポイントソースあるいは P. S.

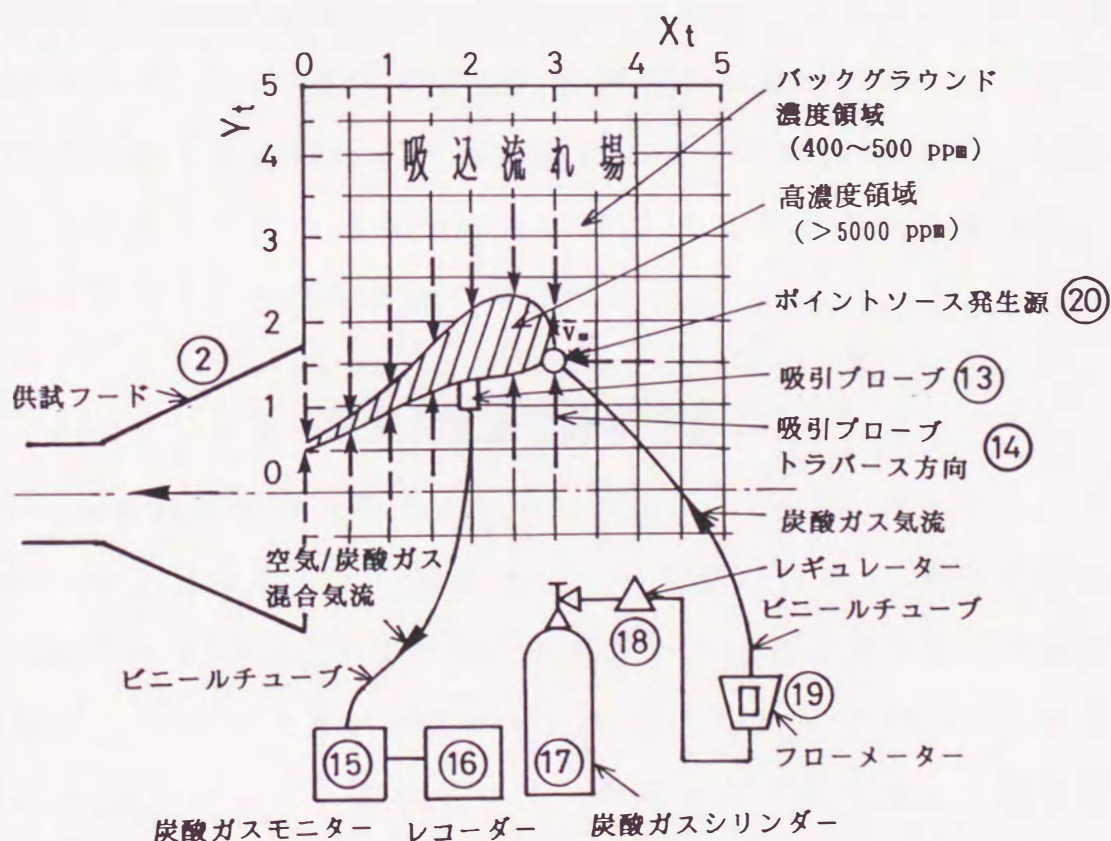


図 5・1 簡易トレーサガス法のシステム構成図

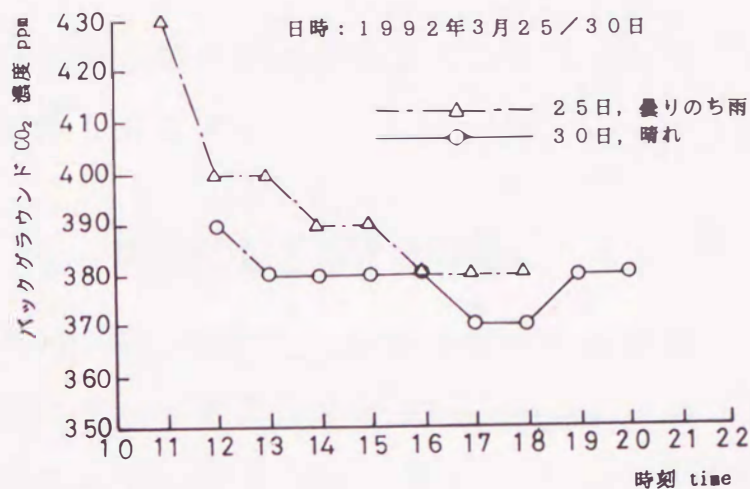


図 5 ・ 2 炭酸ガスのバックグラウンド濃度の変化

と略記) よりフードの開口近傍の吸込流れ場に放出する。 CO_2 の放出速度は熱式風速計によりP.S.の出口で実測する。

放出した CO_2 の濃度を吸込流れ場内で追跡してみると, 流れ場の速度は遅く, CO_2 はほとんど乱流拡散しないので, バックグラウンド濃度領域 ($\leq 500\text{ppm}$) と高濃度領域 ($> 5000\text{ppm}$) の2つの領域に区別できる。この現象を利用して CO_2 の高濃度領域を検出し, それによりフードの捕捉性能の評価を行う。

5. 2. 2 トレーサガスの濃度測定方法

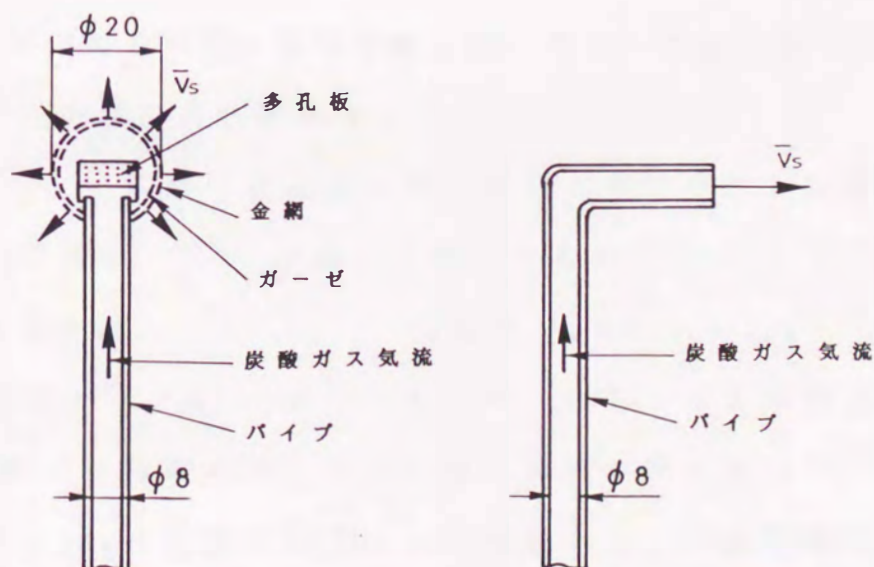
CO_2 の高濃度領域を検出するには図5・1で示したように, フード開口中心線を含む水平断面 ($x-y$ 断面) 内の X_1 の各位置で, $\phi 10\text{mm}$ の吸引プローブ⑬をバックグラウンド濃度領域から高濃度領域側へ Y_1 方向にトラバースさせ, サンプリングしたAir/ CO_2 混合気流を CO_2 検出モニター⑮にかけて, 後述する方法でフード開口近傍の吸込流れ場をバックグラウンド濃度領域と高濃度領域に分ける。吸込流れ場は多少変動しているので, 濃度分析に際しては変動の程

度により 1 ～ 6 分の間の平均値をとり，さらにレコーダー⑩により濃度の時間変動も記録する。

5. 2. 3 ソース形状および放出仕様

吸込流れ場内に CO_2 を放出する放出源の形状を図 5・3 に示す。放出口は内側にガーゼを張付けた $\phi 20\text{mm}$ の球形金網から全方向に放出する無指向性ポイントソース（図 5・3 - (a)）と，直角に曲げた $\phi 8\text{mm}$ のパイプから 1 方向のみに放出する指向性ポイントソース（図 5・3 - (b)）の 2 つを用いる。

ポイントソースの放出方向は図 5・4 に示すように全方向（Ⅰ），上流方向（Ⅱ），下流方向（Ⅲ），外向き（Ⅳ）および内向き（Ⅴ）の 5 方向とし，放出点は一般的な局所排気用外付け式フードで実際に作業点が設置される位置に対応させて，PSⅠ（ $X_s = 3.0$ ， $Y_s = 0.0$ ），PSⅡ（ 3.0 ， 1.5 ），PSⅢ（ 3.0 ， 3.0 ）の 3 点とする。



(a) 無指向性ポイントソース (b) 指向性ポイントソース

図 5・3 ポイントソースの形状

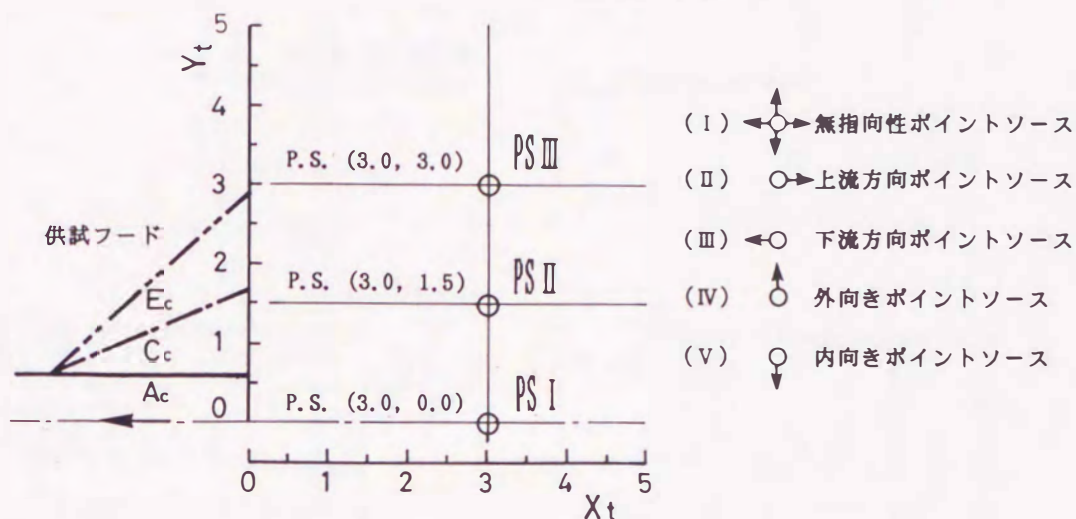


図 5 ・ 4 トレーサガスの放出方向および放出点

5. 3 吸込気流の流線測定の原理

図 5 ・ 3 - (a) の無指向性ポイントソースから放出する CO_2 の放出速度が P. S. 点における吸込流れ場の速度よりはるかに小さい場合には，高濃度領域の境界は多少は変動するもののほとんど拡散せず，P. S. の直径とほぼ等しい幅の帯状の線となってフード開口面に向かって流れることが実験により確認される。

図 5 ・ 5 - (a) に示した波形は第 3 章の実験で使用した開口面積比 $m = 3$ の円形フード C_c で流線を測定するために CO_2 を $\bar{v}_s = 0.06 \text{ m/s}$ で PS II から放出し， $X_s = 1.5$ の位置で $Y_s = 0.85 \sim 1.0$ まで 0.03 の間隔で吸引プローブを Y_s 方向にトラバースしたときの各位置における CO_2 濃度の時間変動の一例である。濃度が局所的にピークを有する理由は， CO_2 は空気中にほとんど拡散しないが流脈線がゆらいであり，測定点をよぎるためである。5000ppm を越える濃度波形が存在する $Y_s = 0.91$ を中心として 5000ppm は越えていないが高濃度

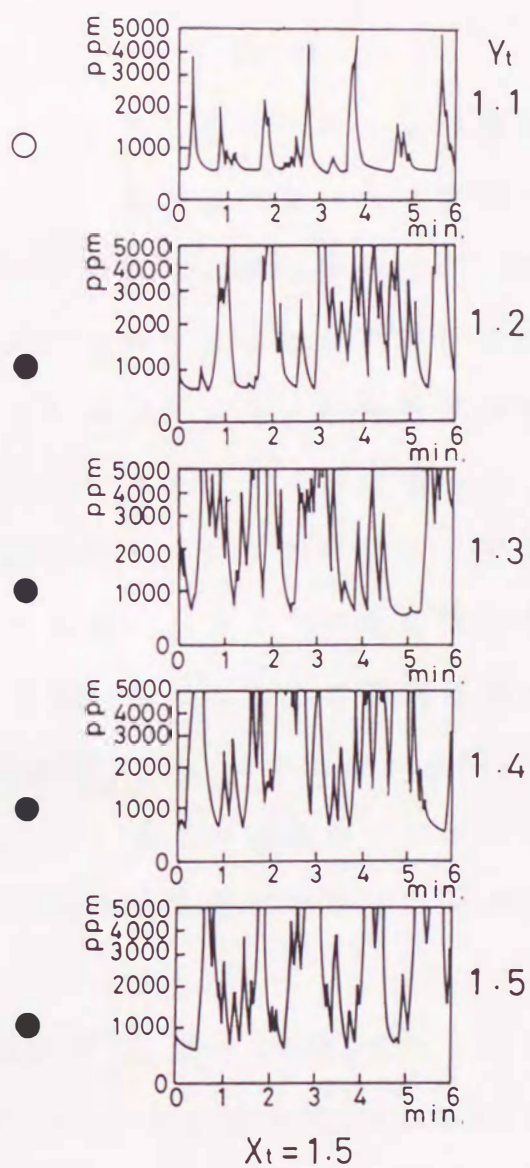
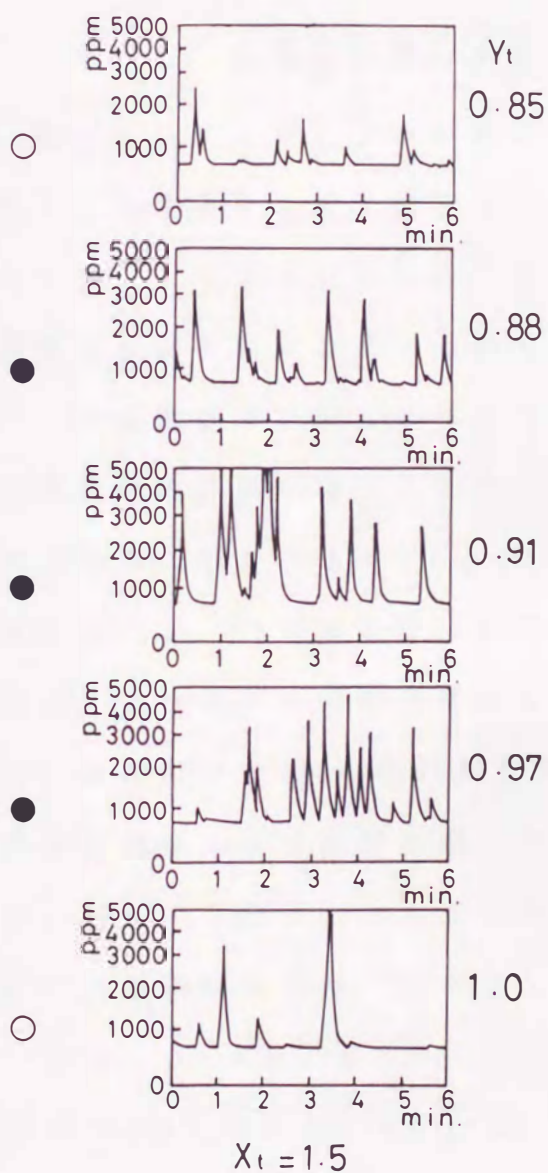
○ バックグラウンド濃度領域

● 高濃度領域

フード: C_c
 $\bar{v}_s = 0.06 \text{ m/s}$



フード: C_c
 $\bar{v}_s = 3.6 \text{ m/s}$



(a) 吸込流脈線の濃度波形 (b) 高濃度領域の濃度波形

図 5・5 トレーサガス濃度の時間変動の一例

波形が現れる頻度が多い $Y_c = 0.88 \sim 0.97$ の範囲を流線（流脈線）のゆらぎ領域とし，この範囲の中心に引いた線を時間平均の流線として処理する。

5.4 高濃度領域の測定による捕捉性能評価法

5.4.1 高濃度領域の定義

種々のクロスドラフトの存在がフードの捕捉性能に与える影響を明らかにすることは重要である。しかし，実験室内で一様な極低速のクロスドラフトをつくることは非常に難しく，また吸込速度との関係も多種多様であり，これらをすべて実験することは効率的でない。汚染源自身が作るクロスドラフトに焦点を絞り，汚染物質源の飛散速度の影響を調べることを目的として本システムを提案した。すなわち，図5・3-(b)の指向性ポイントソースを図5・4で示したPS I，PS IIおよびPS IIIの3点に設置し，フードの吸込流れ場の速度より大きい飛散速度を上流，下流，外向きおよび内向きの4方向に付加して CO_2 を吸込流れ場内に放出する。この場合には CO_2 の高濃度領域は流線測定の場合に形成されるような帯状の線にはならず，図5・1で示したような拡がりを持って下流に流れることが実験により確認される。

図5・5-(b)に示した波形は前述のC_oフードでPS IIから外向きに $\bar{v}_a = 3.6 \text{ m/s}$ で CO_2 を放出し， $X_c = 1.5$ の位置で $Y_c = 1.0 \sim 1.5$ まで0.1の間隔で吸引プローブを Y_c 方向にトラバースしたときの各点での CO_2 濃度の時間変動の一例である。この場合には $Y_c \geq 1.2$ の領域でみられるような5000ppmを越える高濃度のピークの出現が1

回/分以上の場合を高濃度領域と定義し、 $Y_t = 1.1$ でみられる波形はバックグラウンド濃度域として処理する。

CO_2 の高濃度領域の検出は図5・5で示したレコーダーによる方法のほかに、モニターに表示される数値から判定する方法もあるが、両者の測定精度はほとんど差がないので、実際の測定では主としてモニターにより行う方が簡単である。

5.4.2 捕捉性能評価パラメータの定義

5.4.1節で述べた方法により CO_2 をPS I, PS II およびPS IIIの各位置で4方向に $\bar{v}_s = 3.6 \text{ m/s}$ の速度で放出し、高濃度領域を測定する実験をC.フードに対して行った結果を図5・6に示す。図5・6の結果によれば内向きと下流方向への CO_2 の飛散幅と飛散長さは外向きと上流方向へのそれらと比較して小さくなっている。したがって、捕捉性能を評価する際には放出方向を外向きと上流方向の2方向に限定して測定すればよいことがわかる。そこで、この2方向の高濃度領域に対して図5・7に示す捕捉性能評価パラメータを導入すればフードの捕捉性能の評価が可能となる。

図5・7中の4つの捕捉性能評価パラメータ、 Y_w , X_i , X_w , Y_i は次のように定義した。

Y_w (Y_t 方向最大飛散幅) : 外向きP.S.から放出した CO_2 の高濃度領域の、P.S.点を基準とした y 方向最大無次元距離。

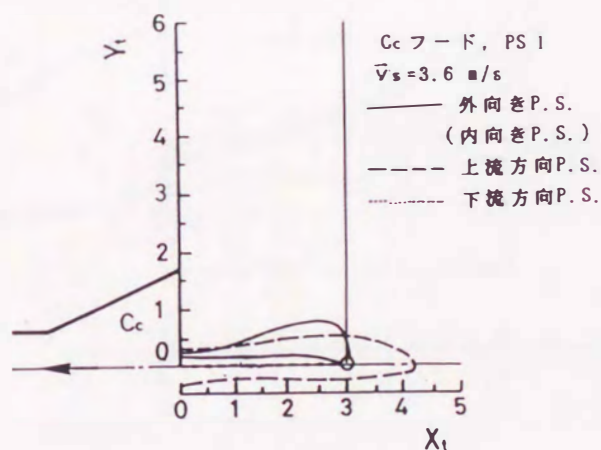
X_i (X_t 方向飛散長さ) : 外向きP.S.から放出した CO_2 の高濃度領域の、P.S.点を基準とした y 方向最大飛散点までの x 方向無次元距離。

X_w (X_t 方向最大飛散幅) : 上流向きP.S.から放出した CO_2 の高

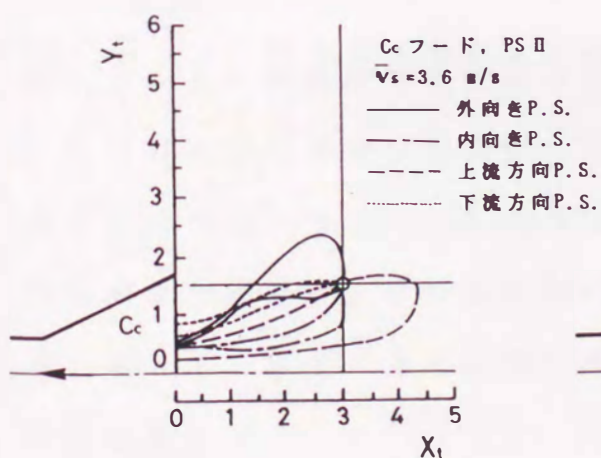
濃度領域の，P.S.点を基準としたx方向最大無次元距離。

Y_1 (Y_1 方向飛散長さ)：上流向きP.S.から放出した CO_2 の高濃度領域の，P.S.点を基準としたx方向の最大飛散点までのy方向無次元距離。

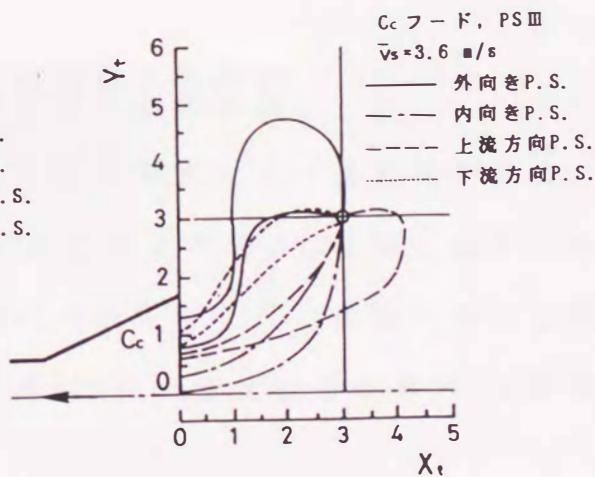
なお，以上4つのパラメータのうち，特にフードの捕捉性能に影響を持つパラメータは Y_w と X_w である。



(a) PS I



(b) PS II



(c) PS III

図5・6 トレーサガス放出方向の違いによる高濃度領域の変化

(C_c フード)

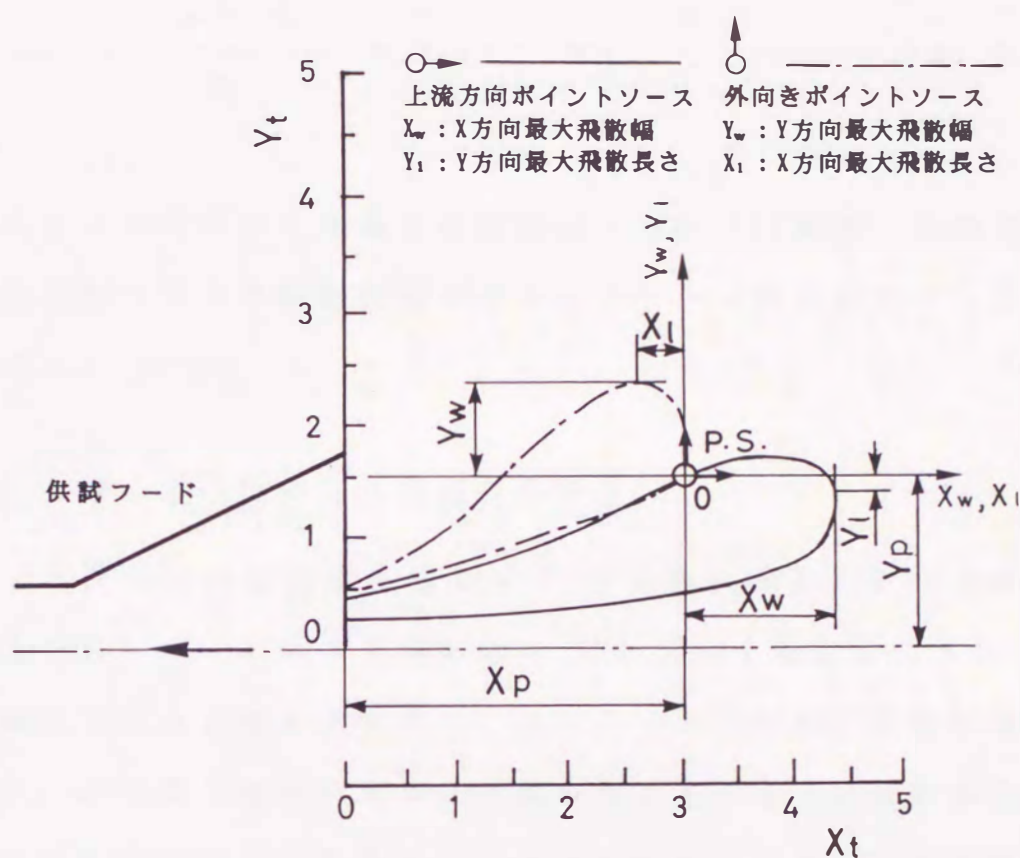


図 5 ・ 7 捕捉性能評価パラメータ

5.4.3 捕捉率の定義および捕捉性能曲線

外付け式フードでは汚染源の許容飛散度により捕捉点が決められる。そこで汚染源(P.S.点)を中心とする半径 X_p (開口面中心から汚染源までの距離)の範囲を限界飛散幅とし、この値に対して飛散幅の小ささを示すx方向の捕捉率CRXとy方向の捕捉率CRYを次式で定義する。

$$CRX = \frac{X_p - X_w}{X_p} \times 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

$$CRY = \frac{X_p - Y_w}{X_p} \times 100 \quad [\%] \quad \text{-----} \quad (5.2)$$

この2つの捕捉率より捕捉性能曲線（CRX-CRY線図）を作成すれば、汚染源の種々の飛散形態に対するフードの捕捉性能の比較が可能となる。

5.5 フード開口面外への漏れの定義

フード開口面の側方延長面上（ $X_s = 0$ の y 軸上）のモニター点（任意の点）で、本システムを用いて CO_2 濃度を測定しながら CO_2 の放出速度を徐々に増加させると、どのフードでも放出方向が外向きのとき、ある放出速度になると一部のモニター点で高濃度が検出され始め、それ以上の放出速度になると大部分のモニター点で高濃度が検出される。このことは高濃度領域がフード開口面の側方延長面より下流（フード開口面外の $X_s < 0$ の領域）に流れていることを示している。この下流に流れた高濃度領域の一部は最終的には再びフード開口内に吸込まれるかも知れないが、フードの捕捉能力としては信頼性がないので、この現象をフード開口面外への漏れと定義し、漏れが生じる限界の CO_2 の外向き放出速度を測定することによって、クロスドラフト（汚染源の飛散形態）に対するフードの適合性の検査が可能となる。

5.6 第5章のまとめ

フード開口近傍の吸込流れ場にポイントソースからトレーサガス

フード開口近傍の吸込流れ場にポイントソースからトレーサガスを放出し、トレーサガスの高濃度領域を追跡することによりフードの捕捉性能の評価が行える炭酸ガスをトレーサガスとする簡易トレーサガス法を提案した。本システムにより検出した炭酸ガスの高濃度領域を解析することにより、以下のようなフードの捕捉性能の評価が可能となった。

(1) 無指向性ポイントソースから炭酸ガスをフードの吸込流れ場の速度よりはるかに小さな速度で放出すると、炭酸ガスの高濃度領域は流線（流脈線）のゆらぎ領域を示し、この領域の中心に引いた線を時間平均の流線と考えてよい。そこで、吸込気流の流線を求めるのに本システムが適用できる。

(2) 指向性ポイントソースから炭酸ガスを吸込気流の速度より大きい速度で、外向きと上流向きに放出し、炭酸ガスの高濃度領域を本システムで測定し、捕捉性能評価パラメータ（最大飛散幅と飛散長さ）を導入すれば、種々のフードの捕捉性能を比較することができる。

(3) x方向とy方向の捕捉率を定義し、それらよりフードの捕捉性能曲線が作成でき、系統的なフードの捕捉性能の評価が可能となる。

(4) 本システムを適用してフード開口面の側方延長面上のモニター点で炭酸ガスの濃度測定を行うと、フード開口面外への漏れを検出することがでる。捕捉性能曲線と併せれば汚染の飛散形態に対するフードの適合性の検査が簡単に行える。