

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6章 簡易トレーサガス法による吸込流れ場の捕捉性能の評価

6.1 緒言

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および捕捉性能評価手法を第5章で提案した。提案した簡易トレーサガス法は吸込流れ場の速度特性の測定を行わなくても、吸込流れ場内でのトレーサガスの高濃度領域を検出して、解析することにより汚染源自身が作り出すクロスドラフトに焦点を絞った、汚染源の飛散速度の影響の調査が容易に行える評価システムである。すなわち、本評価システムにより吸込気流の流線測定、捕捉性能評価パラメータによる高濃度領域の解析、捕捉率による捕捉性能曲線の作成およびフード開口面外へのトレーサガスの漏れの測定を行えば、系統的なフードの捕捉性能の評価が可能となることを示した。

本章では簡易トレーサガス法および捕捉性能評価手法を3種類の外付け式円形フードに適用して、汚染源が作るクロスドラフトの影響によるフードの捕捉性能の評価を行った。さらに、フードの簡易性能評価法としての本評価システムの実用性も検討した⁽⁵²⁾。

6.2 実験装置および実験方法

6.2.1 実験装置および供試フード

実験装置の概要を図6・1に示す。簡易トレーサガス法に関連し

た吸込流れ場内の測定装置以外の実験装置は第3章の三次元フードの実験で使った装置と同一である(3.2.1節参照)。

供試フード②の形状、仕様ならびに実験条件は図6・2および表6・1に示す。供試フードとしては第3章の実験で用いた開口面積比 m が1, 9および25の円形フードA_c, C_cおよびE_cの3種類を用いた。

なお、各供試フードのテイクオフの断面平均流速は第3章の実験結果との比較を行うために、第3章の実験の値と同じに設定した。

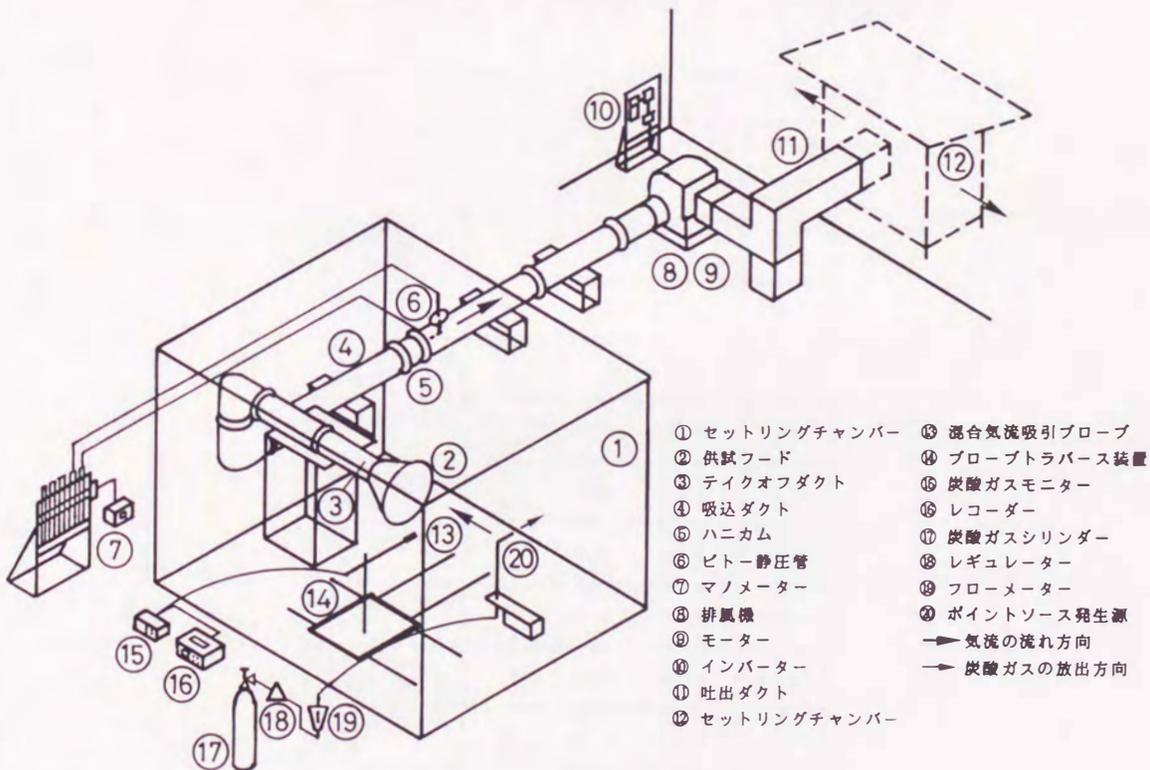


図6・1 実験装置の概要

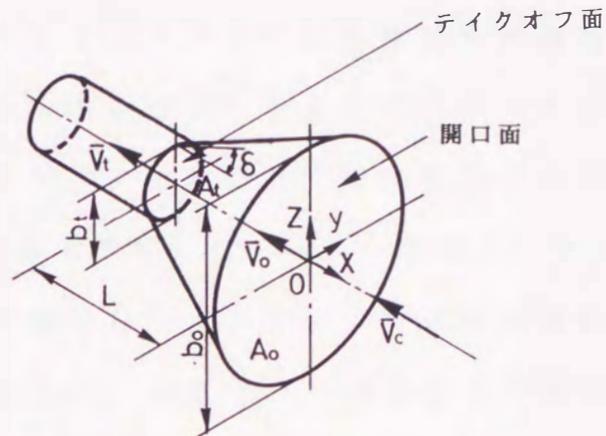


図 6・2 供試フードの形状および座標系

表 6・1 供試フードの仕様および実験条件

項目	フード		円形フード		
	形式		プレーン形	フレアー形	
	記号		A_c	C_c	E_c
開口幅比 (b_o/b_t)	n		1	3	5
開口面積比 (A_o/A_t)	m		1	9	25
テイクオフ面の寸法	$b_t \times A_t$ (mm)		$\phi 194$	$\phi 194$	$\phi 194$
開口面の寸法	$b_o \times A_o$ (mm)		$\phi 194$	$\phi 582$	$\phi 970$
フード壁面の厚さ	t (mm)		10	2.6	2.6
フード長さ	L (mm)		430	430	430
フレアー角	δ (deg)		$\delta = 0$	$\delta = 24.3$	$\delta = 42.1$
テイクオフ断面平均流速	\bar{V}_t (m/s)		44.2	44.2	44.2
開口断面平均流速	\bar{V}_o (m/s)		44.2	4.9	1.8

6.2.2 実験方法

簡易トレーサガス法 (トレーサガスの発生装置および濃度検出装

置の詳細は図5・1参照)を用い、第5章で詳述した捕捉性能評価手法を適用し、外付け式フードの捕捉性能の評価を行った。

実験方法の概略は次のとおりである。図6・1あるいは図5・1に示すように、ポンペに詰められた液化炭酸ガス⑩は、ヒーター付レギュレーター⑪およびフローメーター⑫により放出量を調整して、ビニールチューブを介してポイントソース発生源⑬(ポイントソースあるいはP.S.と略記)よりフード開口近傍の吸込流れ場に無指向性あるいは指向性ポイントソース(図5・3)として流れ場内の3点、PS I、PS IIおよびPS III(図5・4)から放出する。CO₂の放出速度は熱式風速計(Model 6141, (株)KANOMAX, 精度±2%F.S.)によりP.S.の出口で実測した値を用いて整理した。フード開口中心線を含む水平断面(x-y断面)内の各X_iの位置で、φ10mmの吸引プローブ⑭(吸引速度約0.03m/s)をバックグラウンド濃度領域から高濃度領域側へY_i方向にトラバースさせ、サンプリングしたAir/CO₂混合気流を非分散型赤外線式のCO₂検出モニター(測定範囲0~5000ppm, 最小表示10ppm, 吸引能力2~2.5cm³/s, 光明理化学工業(株))⑮にかけて、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区別し、高濃度領域を解析する。

最初に、無指向性P.S.から放出するCO₂の速度をP.S.点における吸込流れ場の速度よりはるかに小さくした場合の高濃度領域、すなわち吸込気流の時間平均の流線を求め、その流線より捕捉性能を評価した。

次に、外向きおよび上流向きの指向性P.S.から放出するCO₂の速度をP.S.点における吸込流れ場の速度より大きくした場合(汚染源の飛散速度を外向きおよび上流向きに付加)の広がりを持つ高濃度

領域を検出し，捕捉性能評価パラメータおよび捕捉率による捕捉性能評価線図によりフードの捕捉性能を評価した。

最後に，外向きの指向性P.S.からCO₂の放出速度を徐々に増加させ，フード開口面の側方延長面上（ $X_t = 0$ のy軸上）のモニター点でCO₂濃度を測定することにより，フード開口面外への漏れを測定し，漏れが生じる限界のCO₂の外向き放出速度より，汚染源の飛散形態に対するフードの適合性の検査を行い，捕捉性能を評価した。

なお，実験範囲内でのCO₂の放出量はフードの吸込風量に比べてはるかに小さな量で，吸込風量にはほとんど影響しない。

6.2.3 ソース点での吸込流れ場の速度特性

5.2.3節で述べたようにCO₂の放出点は一般的な局所排気用外付け式フードでの汚染源が設置される位置に対応させて，PS I（ $X_t = 3.0$ ， $Y_t = 0.0$ ），PS II（ 3.0 ， 1.5 ）およびPS III（ 3.0 ， 3.0 ）の3点に設定した。

A_c，C_cおよびE_cの各供試フードのPS Iでの速度（ $X_t = 3.0$ の点での開口中心線上速度）は第3章の実験によればフード形状に無関係にほぼ一定値， $\bar{v}_c \approx 0.4 \text{ m/s}$ であり（図3・6），さらに，3.3.3節においてフードの開口近傍の等速度線分布の測定より提唱したフードの卓越領域（それぞれのフードにおいて他のどのフードよりも早い速度が得られる領域）を考慮すれば，PS IとPS IIはC_cフードの卓越領域に，PS IIIはE_cフードの卓越領域に含まれる（図3・14）。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 吸込気流の流線

無指向性ポイントソースをPS I, PS II およびPS IIIの各点に置き, CO_2 の放出速度をフードの吸込流れ場によるP.S.点の吸込速度 ($\bar{v}_s = 0.4 \text{ m/s}$) よりはるかに小さい $\bar{v}_s = 0.06 \text{ m/s}$ とし, 5.3節で述べた方法により測定した各フードの吸込み気流の流線を図6.3~図6.5に示す。流脈線は各図中の破線の内側で変動しており, 変動の中心に引いた実線が時間平均の流線である。各図中には細線で第3章の実験で求めた吸込流れ場の等速度線も示している。

図6.3はプレーン形フードA₀の各P.S.点からの流線を示した図で, PS Iからの放出では流脈線の変動はほとんどなく, フード開口中心線に沿って吸込まれている。PS IIからの放出では流脈線は少し変動するが, 各等速度線に対しほぼ直角方向に吸込まれている。PS IIIからの放出では他の2点の場合に比べ流脈線の変動が大きく, 放出点近傍では流線ははじめ上に凸状で変曲点をもつ線となっている。これは, この放出点における吸込流れ場の吸込速度が非常に小さいので, CO_2 の放出速度が流れ場を乱したためと考えられる。フード開口近くではフードが作り出す吸込速度が大きくなるので乱れの影響は小さくなり, それぞれの等速度線にほぼ直角に交わる線となって流れる。

図6.4と図6.5はフレア形フードC₀とE₀の各P.S.点からの吸込気流の流線を示した図である。PS Iからの放出ではC₀とE₀の両フードとも流脈線の変動が少しあり, フード開口中心線上から

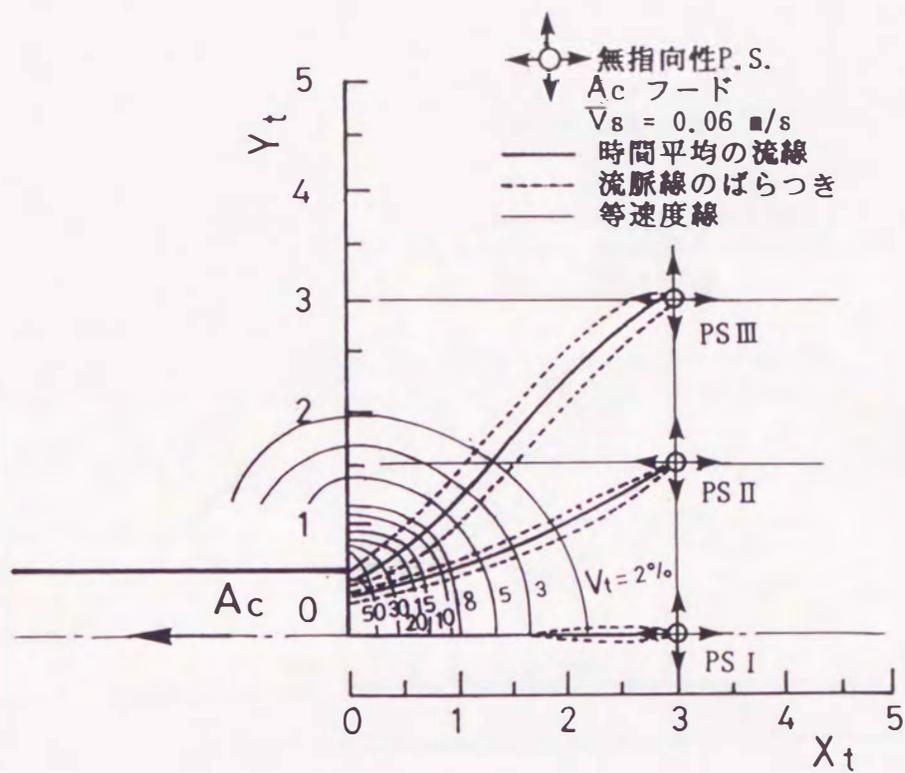


図 6・3 Acフードの吸込気流の流線

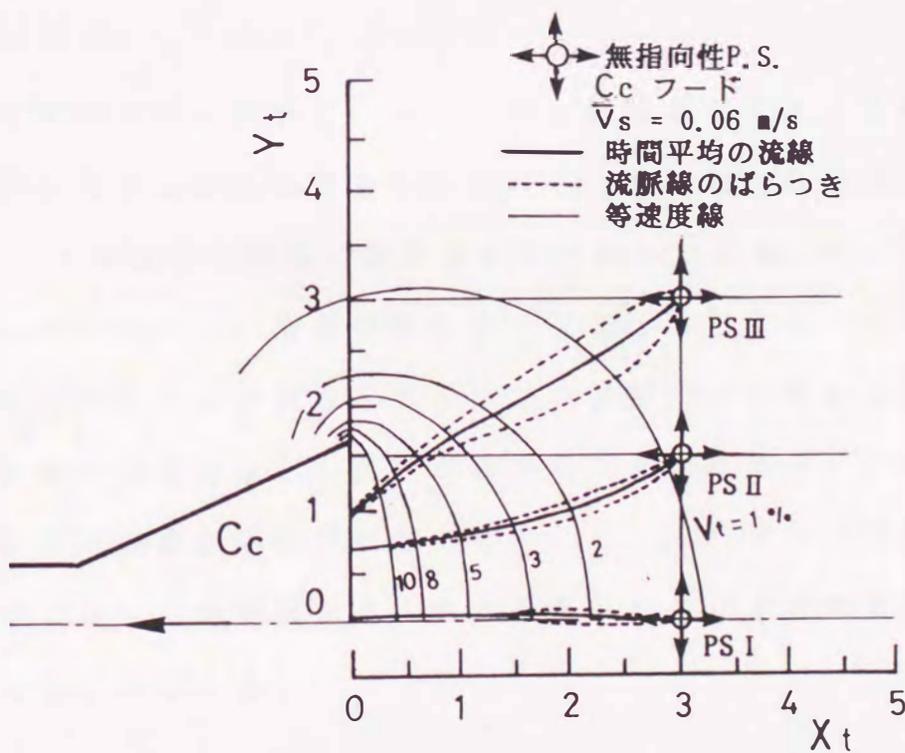


図 6・4 Ccフードの吸込気流の流線

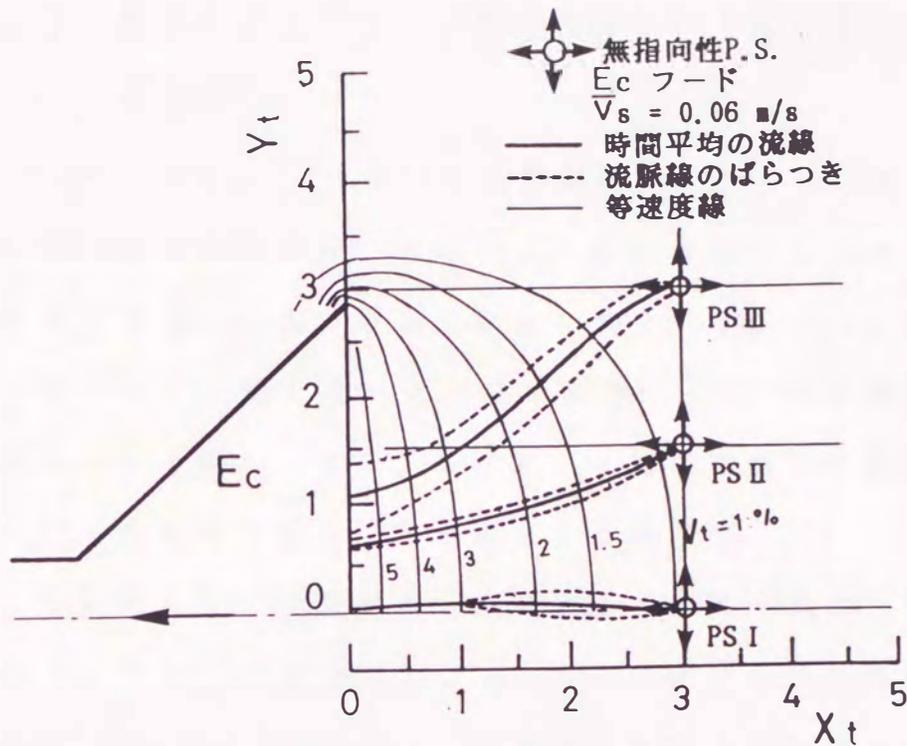


図 6・5 E。フードの吸込気流の流線

わずかにずれて吸込まれている。これは周囲の条件による吸込流れ場のわずかな非対称性の影響と思われる。PS II と PS III からの放出では A。フードの場合と同様に変曲点をもつ流線となる。C。と E。フードの PS I と PS II からの流線は完全に一致しており、フレアー形フードでは開口面積比 m は異なっても、フード開口中心線から一定の領域内の流線の形状はほとんど同じになることがわかる。一方、周辺部の PS III からの流脈線は変動が大きく、C。と E。フードでは流線は一致せず、フードの形状の違いによる吸込流線の変化は周辺部に表れていることがわかる。

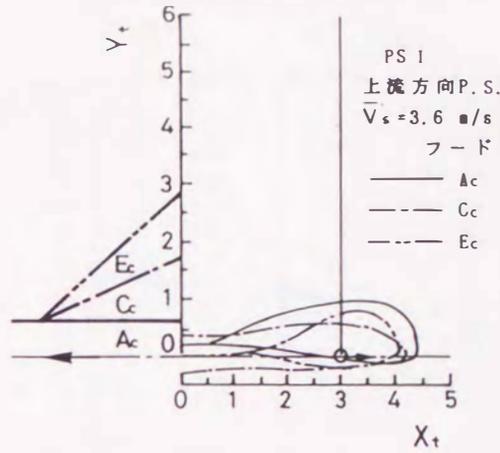
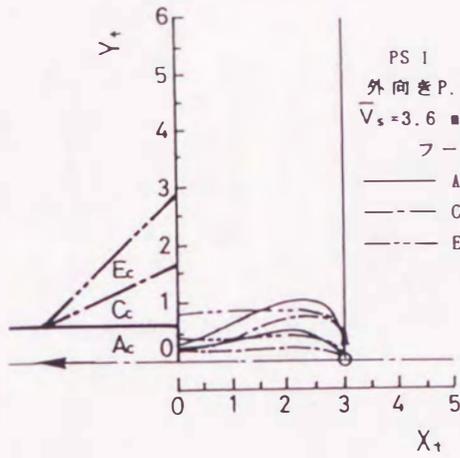
6.3.2 放出点およびフード形状の違いによる高濃度領域の変化

A_c, C_cおよびE_cフードについて指向性ポイントソースをPS I, PS IIおよびPS IIIの3点から, 外向きと上流向きの2方向にフードの吸込流れ場によるP.S.点の吸込速度より大きい $\bar{v}_w = 3.6 \text{ m/s}$ でCO₂を放出し, 5.4.1節で述べた方法で測定したCO₂の高濃度領域の変化を図6.6と図6.8に, 5.4.3節で定義した捕捉性能評価パラメータの変化を図6.7と図6.9に示す。

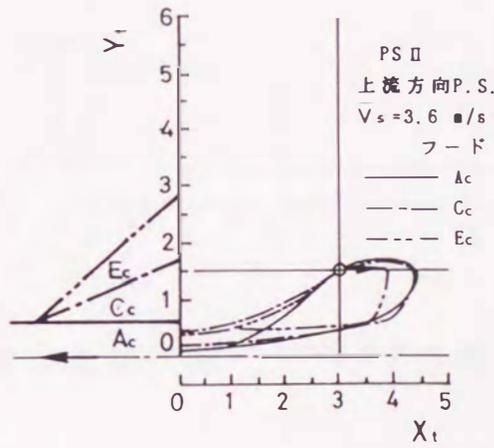
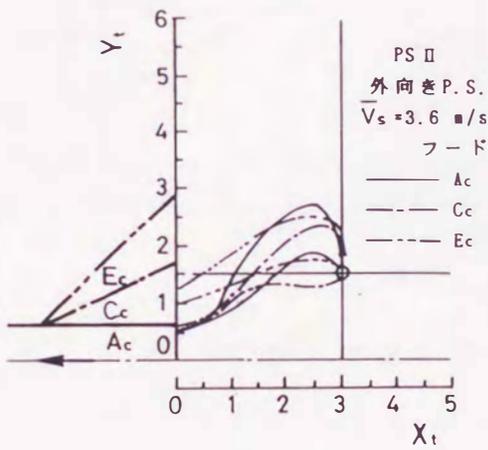
図6.6と図6.7は放出点の違いによるそれぞれの変化を示した図である。外向きの放出では, A_cフードはソース位置が外側にあるほど Y_w は大きくなり, X_1 (負の値) はPS IとPS IIではほぼ同じであるが, PS IIIでは大きくなる。これはPS Iがフードの開口面をx方向に延長した断面内にあるのに対し, 他の2点は延長断面の外側にあるためにフードの吸込流れ場の影響が弱くなる。そこでは, CO₂の放出速度が相対的に大きくなるので, P.S.の下流側で高濃度領域は外側に押出されるが, フード開口面に近づくと流れ場の影響が徐々に強くなり, 高濃度領域がフード開口面の方向に曲げられるためである。PS IIIの外向きの放出では高濃度領域がフード開口面の側方延長面上より漏れているのが見られる(図6.6-(c))。この漏れた高濃度領域では濃度変動が激しく, その後の軌跡は本測定では明らかにできなかった。上流向きの放出ではP.S.が外側に離れるに従い X_w は減少するが, Y_1 はほぼ零となり放出方向の延長線上に X_w がくる。PS IIIでは流れ場の速度が遅いので, X_w は最も大きくなると思われるが, CO₂はすべてフード内に吸込まれており, 外

外向きポイントソース

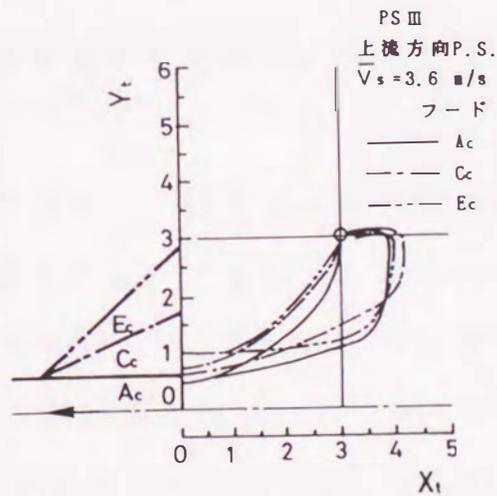
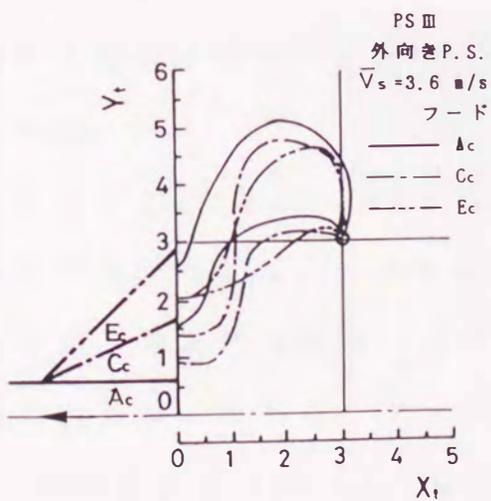
上流方向ポイントソース



(a) P S I



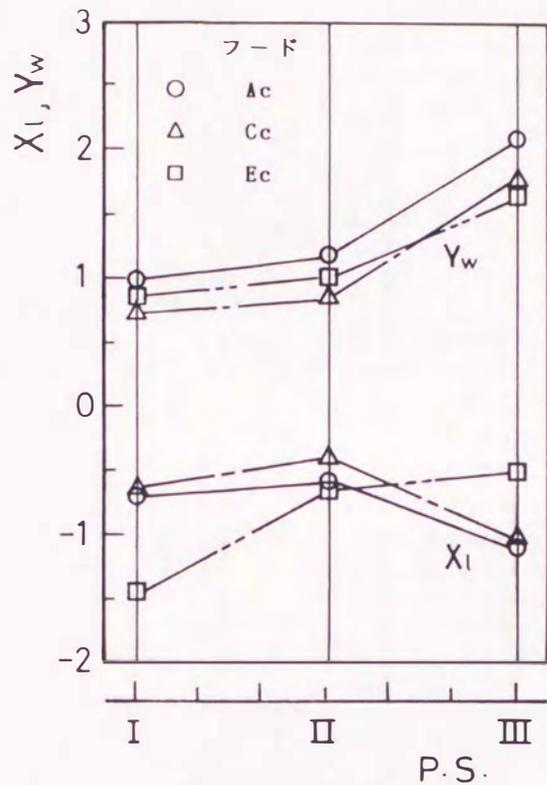
(b) P S II



(c) P S III

図 6 · 6 放出点の違いによる高濃度領域の変化 ($\bar{v}_s = 3.6 \text{ m/s}$)

外向きポイントソース



上流方向ポイントソース

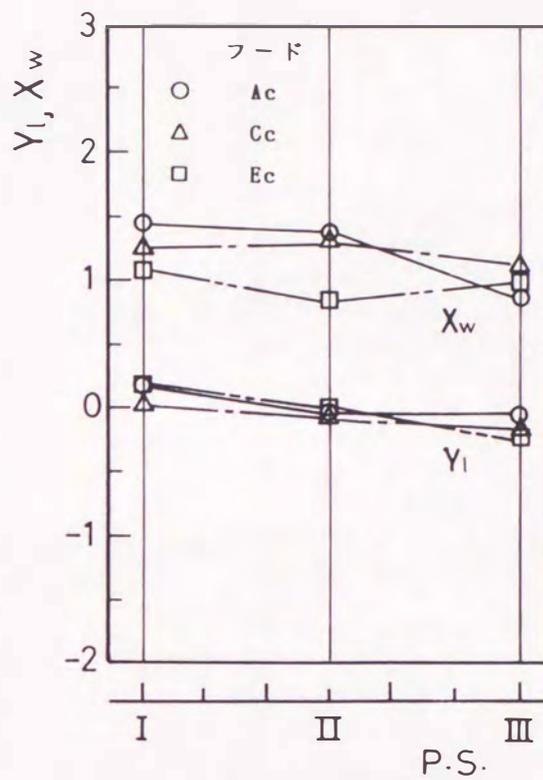
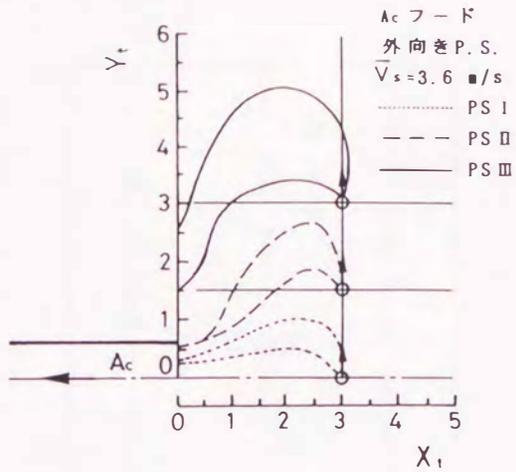


図 6・7 放出点の違いによる捕捉性能評価パラメータの変化
($\bar{v}_* = 3.6 \text{ m/s}$)

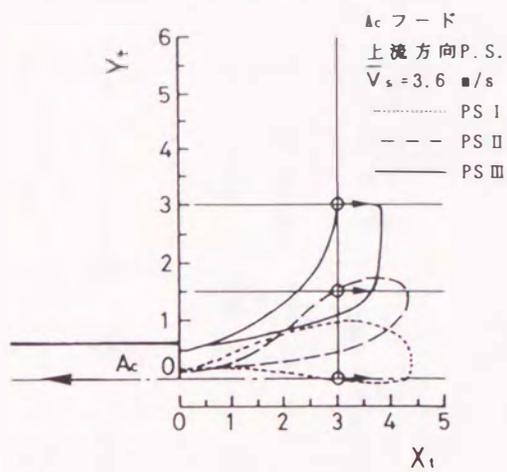
側ほど高濃度領域が急激に内側へ曲げられるために X_w は小さくなっている。

フード C₀ と E₀ では PS I と PS II とがフード開口面を x 方向に延長した断面の内であり、PS III は開口面を x 方向に延長した断面の外にあるが、捕捉性能評価パラメータの変化は A₀ フードとほぼ同じ傾向を示した。ただし、フードの開口面積比の大きい E₀ フードでは X_i の変化は他のフードとは逆の傾向を示した。これは、E₀ フードではこの位置がフードの卓越領域内にあり、吸込流れ場の影響を早くから強く受けるためである。

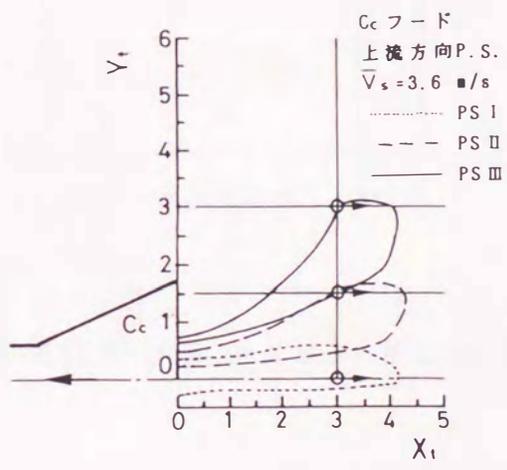
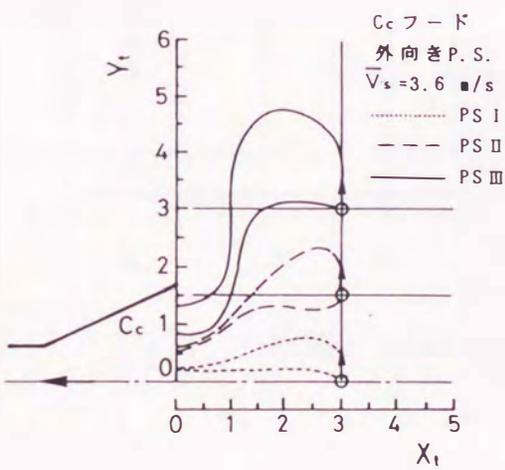
外向きポイントソース



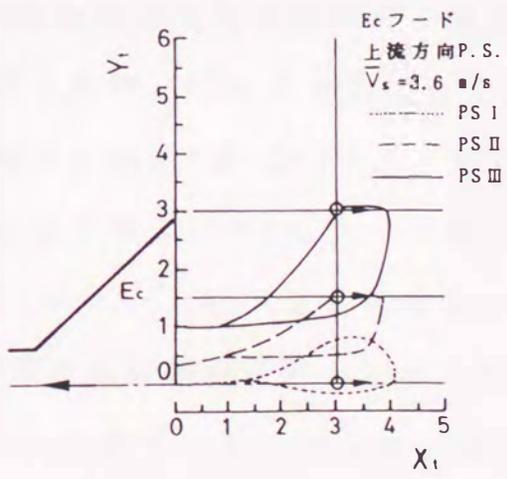
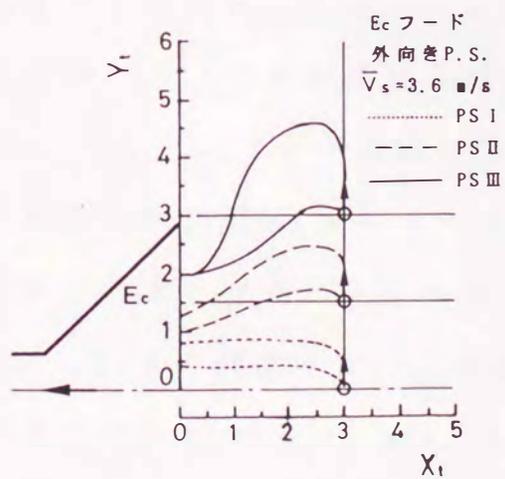
上流方向ポイントソース



(a) A_c フード



(b) C_c フード



(c) E_c フード

図 6・8 フード形状の違いによる高濃度領域の変化 ($\bar{V}_s = 3.6 \text{ m/s}$)

外向きポイントソース

上流方向ポイントソース

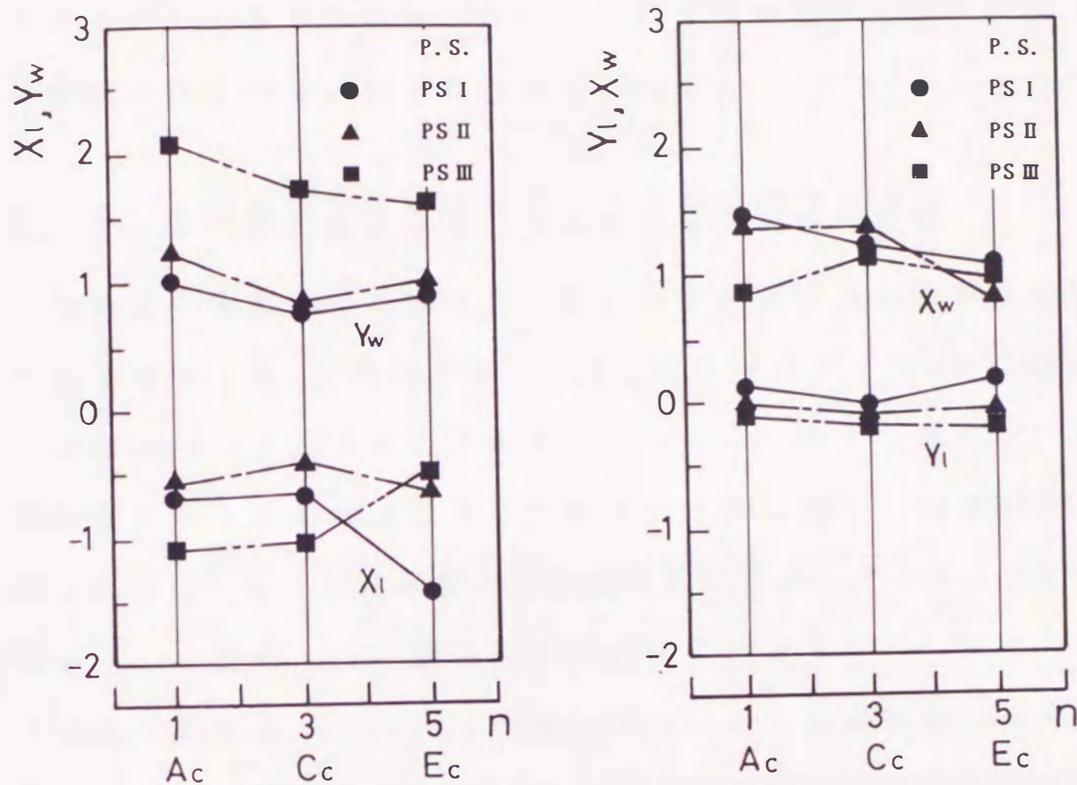


図 6・9 フード形状の違いによる捕捉性能評価パラメータの変化
($\bar{v}_m = 3.6 \text{ m/s}$)

図 6・8 と図 6・9 はフード形状の違いによる高濃度領域と捕捉性能評価パラメータの変化を示した図である。PS I の放出では Y_w は C_c , E_c , A_c フードの順で大きくなる。 X_i は A_c と C_c フードではほぼ等しいが、 E_c フードでは負に大きくなる。 X_w はフード開口面積比が大きくなるに従い減少し、 Y_i はどのフードでもほぼ零である。 PS II の放出では PS I の場合とほぼ同じ傾向を示したが、 PS III の放出では Y_w は E_c , C_c , A_c フードの順で大きくなった。 X_w と Y_i は PS I, PS II の場合と同じ傾向を示した。

以上の結果が、PS I と PS II とは C_c フードの卓越領域に、PS III は

E。フードの卓越領域にあることから説明できることは、本評価システムによる高濃度領域の解析から局所排気用外付け式フードの卓越領域の存在が裏付けられたことになる。

6.3.3 放出速度の違いによる高濃度領域の変化

汚染源の飛散速度の大ききの度合が吸込流れ場に及ぼす影響を調べるために、C。フードに対してCO₂の放出速度を $\bar{v}_s = 1.9, 3.6$ および 6.0 m/s の3段階に変化させて3つのP.S.点から放出し、放出速度の違いによる高濃度領域の変化を調べた。図6・10と図6・12に放出点の違いによる高濃度領域と捕捉性能評価パラメータの変化を、図6・11と図6・13に放出速度の違いによるそれらの変化を示す。

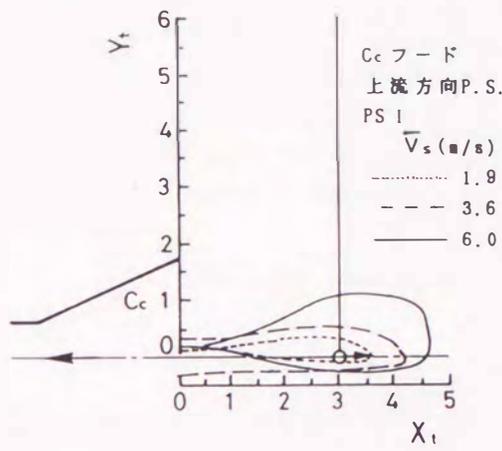
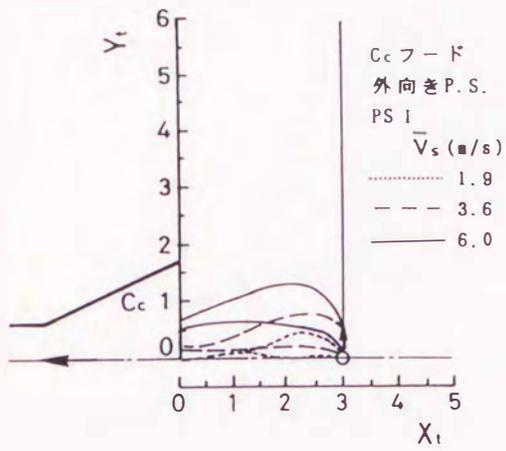
捕捉性能評価パラメータの変化はP.S.点には無関係にほぼ同じ傾向を示した。すなわち Y_w と X_1 は放出速度が大きくなるに従って大きくなり、 X_w は放出速度の増加につれて大きくなるが、 Y_1 はほぼ零となった。

以上の結果は、同一フード（C。フード）であるので放出速度が増加すれば吸込流れ場のCO₂に対する影響は相対的に小さくなり、高濃度領域の特性がこのような傾向を示すのは当然の結果である。

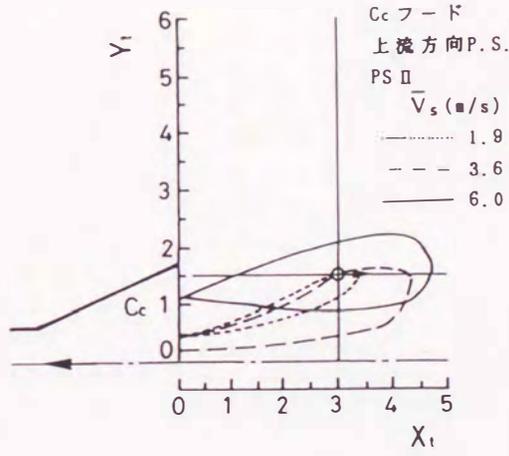
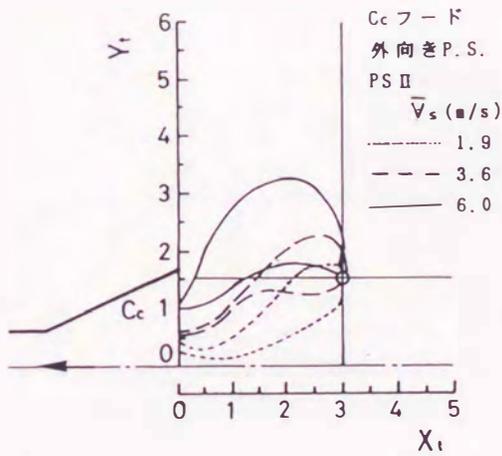
なお、PS IIIから $\bar{v}_s = 6.0\text{ m/s}$ の速度で外向きにCO₂を放出すると高濃度領域がフード開口面の側方延長面よりフード開口面外へ漏れているのが確認されたが（図6・10-（c）と図6・11-（c））、PS IとPS IIからの放出では実験範囲の放出速度においては漏れは検出されなかった。

外向きポイントソース

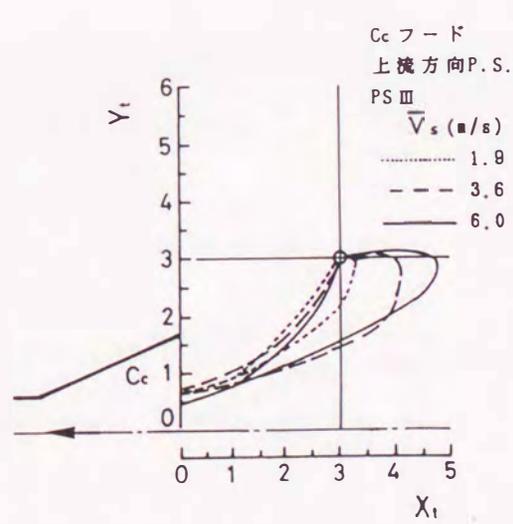
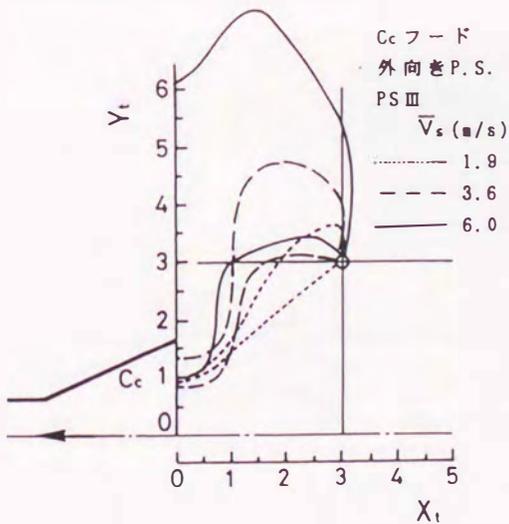
上流方向ポイントソース



(a) P S I



(b) P S II

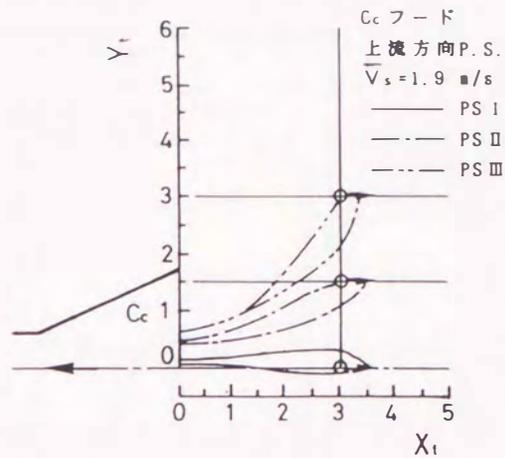
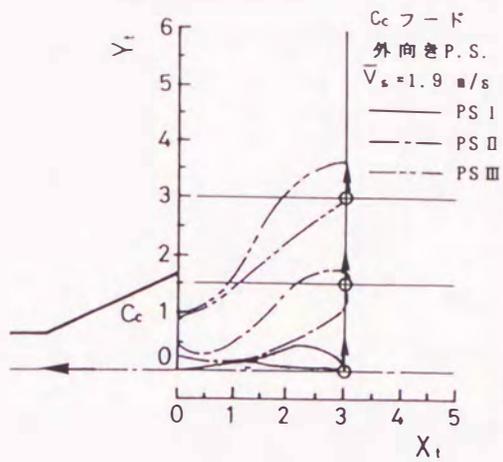


(c) P S III

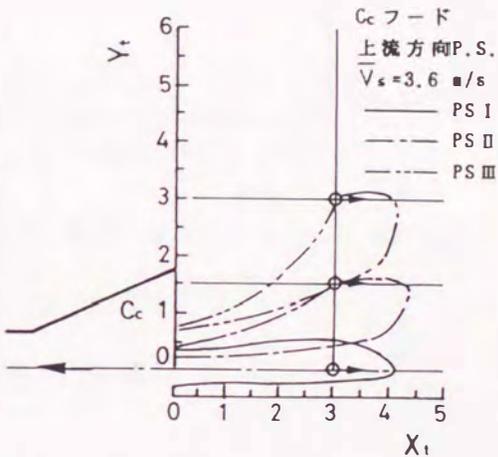
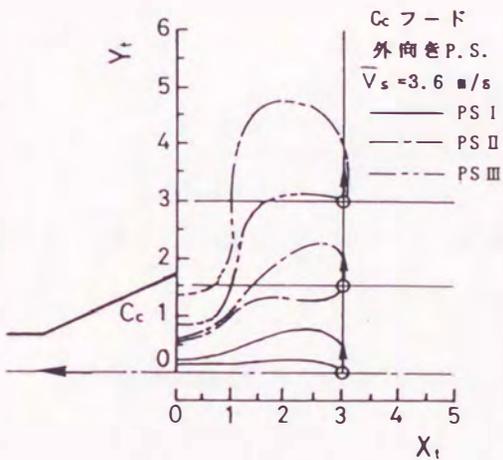
図 6・10 放出点の違いによる高濃度領域の変化 (C_cフード)

外向きポイントソース

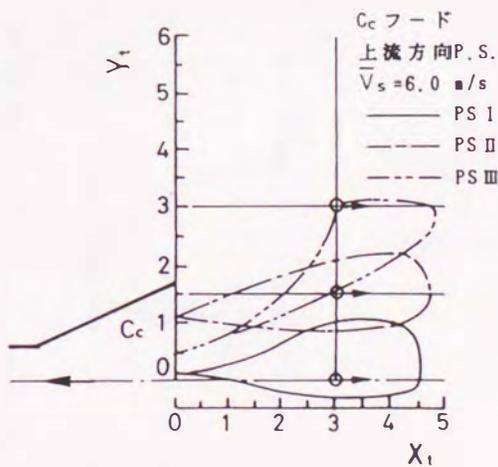
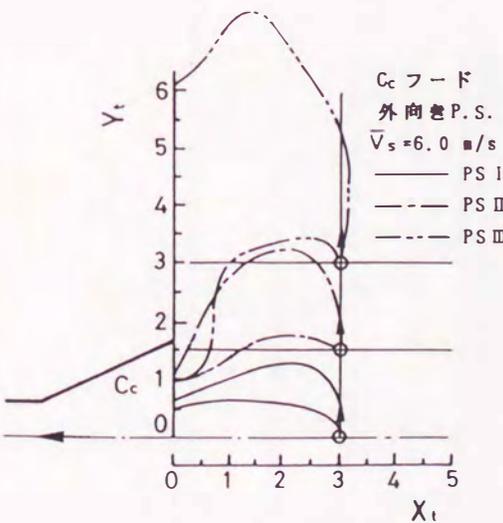
上流方向ポイントソース



(a) $\bar{V}_s = 1.9 \text{ m/s}$



(b) $\bar{V}_s = 3.6 \text{ m/s}$



(c) $\bar{V}_s = 6.0 \text{ m/s}$

図 6・11 放出速度の違いによる高濃度領域の変化 (Cc フード)

外向きポイントソース 上流方向ポイントソース

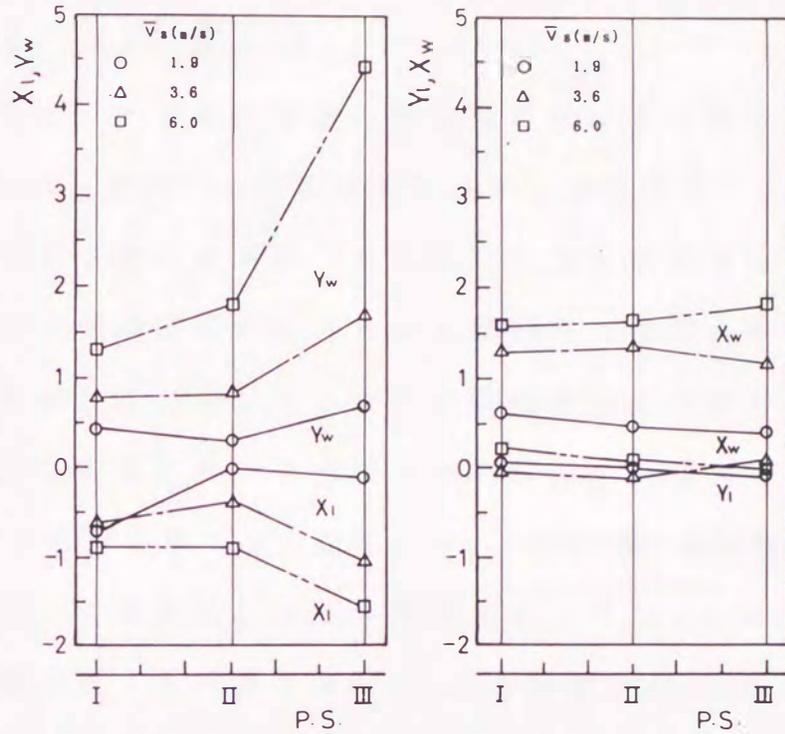


図 6・12 放出点の違いによる捕捉性能評価パラメータの変化

外向きポイントソース 上流方向ポイントソース

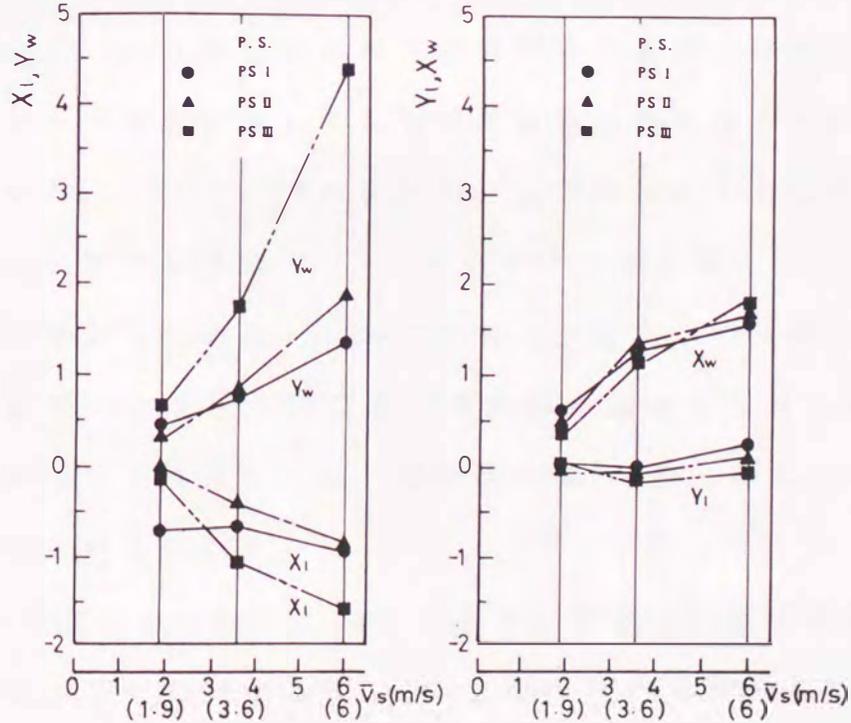


図 6・13 放出速度の違いによる捕捉性能評価パラメータの変化

6.3.4 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。すなわち、周囲への飛散が許されない作業環境では捕捉点をフード開口にできる限り近づけ、ある程度の飛散が許される場合には汚染物質がフード開口内に吸込まれる範囲内で作業条件を配慮して捕捉点が決定されている。そこで、一般的な局所排気用外付け式フードの捕捉点を考慮して、ここでは汚染源(P.S.点)を中心とする半径 X_p (開口から汚染源までの距離) = 3.0の範囲を限界飛散幅として、この値に対して飛散幅の小ささを示す式(5.1)および式(5.2)で定義したx方向捕捉率CRXとy方向捕捉率CRYを求めた。この2つの捕捉率より捕捉性能曲線(CRX-CRY線図)を作成して、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を行った。

A_c 、 C_c および E_c フードについてPS I、PS IIおよびPS IIIから、 $\bar{v}_s = 3.6 \text{ m/s}$ で CO_2 を吸込流れ場内に外向きおよび上流方向で放出したときのフード形状の違いによる捕捉性能曲線を図6.14に示す。

PS Iでは C_c 、 E_c フードがx方向、y方向にもともに高い捕捉率を示し、PS IIではx方向には E_c フードが、y方向には C_c フードが高い捕捉率を示している。PS IIIでは特にy方向への捕捉率が低下する。この線図ではフード開口面の側方延長面から漏れる場合(A_c で外向きのPS IIIの場合)でも、飛散幅が X_p の値を越えない限りCRYは負の値にはならない。

C_c フードに対してPS I、PS IIおよびPS IIIからの放出速度を $\bar{v}_s = 1.9$ 、 3.6 および 6.0 m/s として、 CO_2 を流れ場内に放出したときの放出速度の違いによる捕捉性能曲線を図6.15に示す。PS Iでは \bar{v}_s

がかなり大きくなっても十分な捕捉性能を示すのに対し，PS II とPS III では \bar{v}_a の大きい場合の捕捉性能の低下が大きくなり，フード開口面外に漏れる場合（外向きのPS III で $\bar{v}_a = 6.0 \text{ m/s}$ の場合）にはCRYは負の値となっている。

この捕捉性能曲線によれば，各フードの卓越領域はより明瞭に表され，汚染源の種々の飛散形態に対する各フードの捕捉性能が一目瞭然となる。ここでは $X_p = 3.0$ の位置に限定して捕捉性能曲線を求めたが，他の位置においても捕捉性能曲線を作成すれば，総合的な外付け式フードの捕捉性能の評価が可能となる。

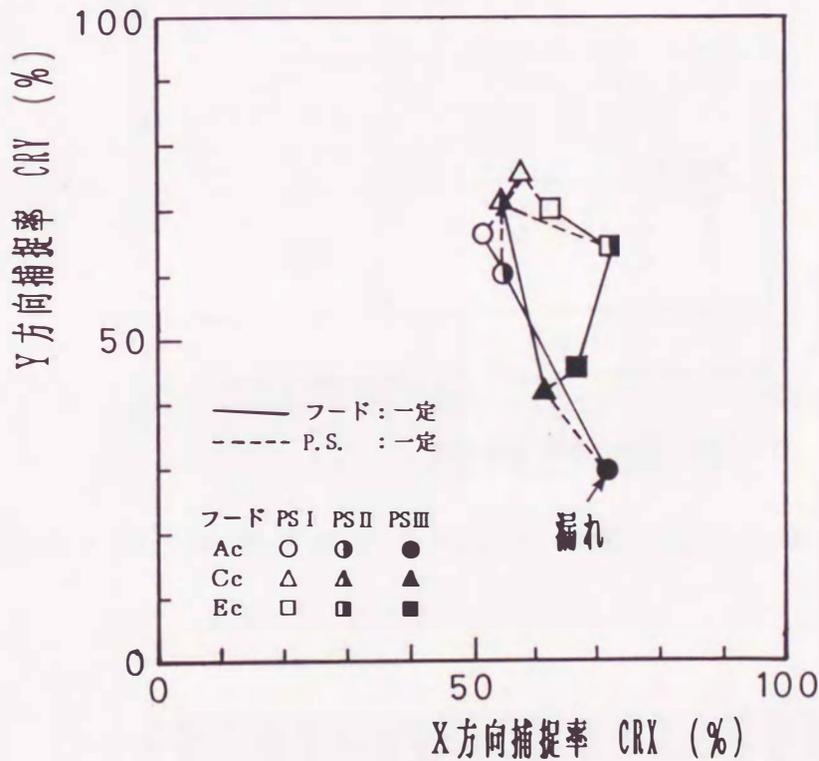


図 6・14 フード形状の違いによる捕捉性能曲線
($\bar{v}_a = 3.6 \text{ m/s}$)

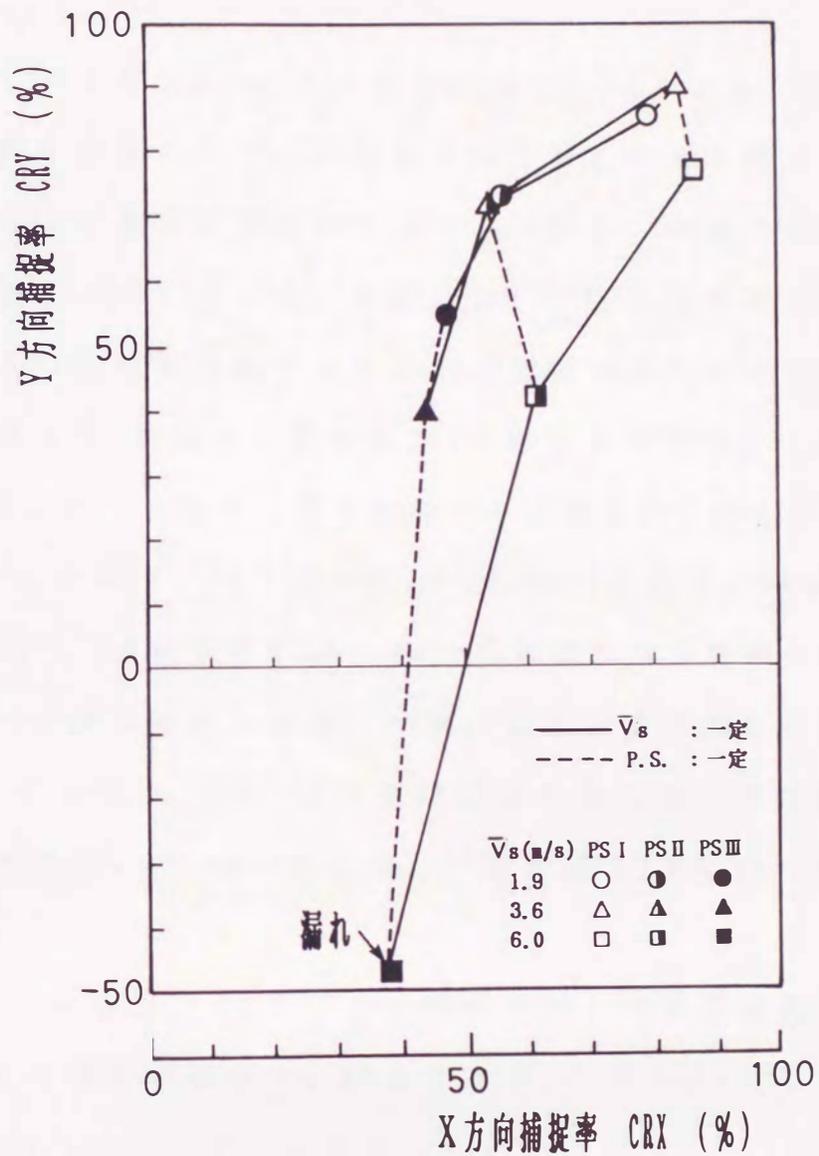


図 6・15 放出速度の違いによる捕捉性能曲線
 (C。フード)

6.3.5 フード開口面外への漏れの測定による捕捉性能評価

局所排気用外付け式フードの捕捉性能は、汚染源の飛散範囲は大きくても最終的にフード開口に吸込まれればよいと考えることもできる。ここでは、簡易トレーサガス法の手法を適用してフード開口

面から漏れる限界のCO₂の放出速度を測定し、フードの捕捉性能を評価した。

A_c、C_cおよびE_cフードに対し、PS I、PS II およびPS III からCO₂の放出速度を変化させて、外向き方向に放出させた場合のフード形状の違いによる高濃度領域のフード開口面外への漏れの観察図を図6・16～図6・18に示した。各図において左図はモニター点（図中の黒丸）とP.S.の座標を示してある。右図は漏れの観察図で縦軸はモニター点のY_t座標を、横軸はCO₂の放出速度を示し、白丸は漏れが検出されなかった点を、黒丸は漏れが検出された点を表している。

A_cフードの場合、PS I では $\bar{v}_m = 10.9 \text{ m/s}$ 付近で、PS II では $\bar{v}_m = 6.2 \text{ m/s}$ 付近で、PS III では $\bar{v}_m = 3.6 \text{ m/s}$ 付近で漏れが観察され始め、P.S.が開口中心線から離れるほど小さい放出速度で漏れが生じた。

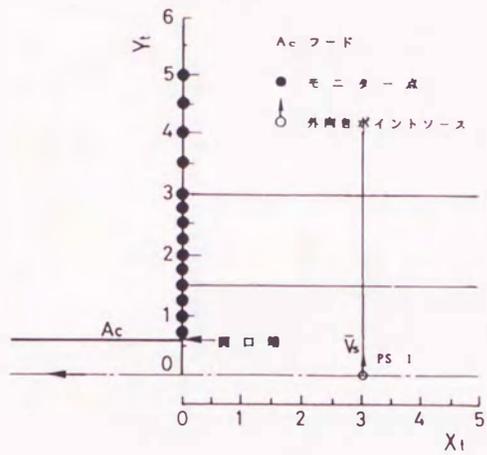
C_cフードの場合、PS I では実験範囲の放出速度では漏れは起らず、PS II では $\bar{v}_m = 7.5 \text{ m/s}$ 付近で、PS III では $\bar{v}_m = 3.8 \text{ m/s}$ 付近で漏れが始った。

E_cフードの場合、C_cフードと同様にPS I では実験範囲の放出速度においては漏れは起らず、PS II では $\bar{v}_m = 10.5 \text{ m/s}$ 付近で、PS III では $\bar{v}_m = 6.2 \text{ m/s}$ 付近で漏れが始まった。

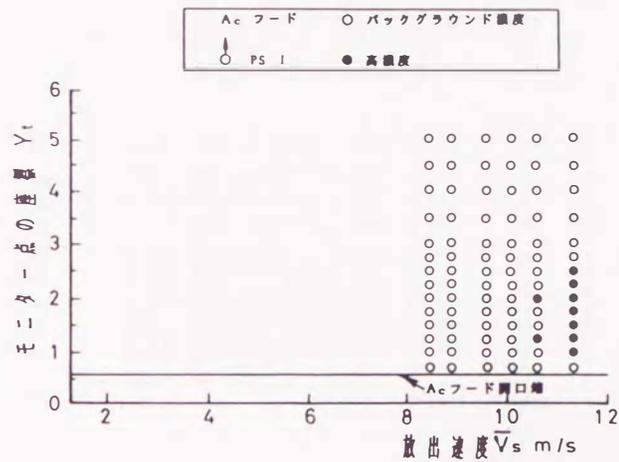
各フードに対するこの漏れ始めの放出速度 \bar{v}_m / \bar{v}_t とP.S.点の関係を図6・19に示す。図6・19によれば、E_cフードは各P.S.点においてA_cとC_cフードに比べればかなり大きな放出速度にならなければ漏れが始まらないことがわかる。

同一の放出点に対して異なるフードを同一吸込量で作動させた場合には、E_cフードが総合的に見ると最も捕捉性能（漏れ防止）が良いことが図6・16～図6・19からわかる。

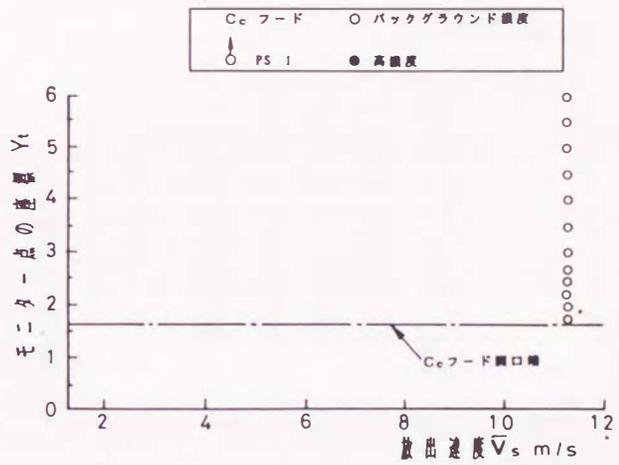
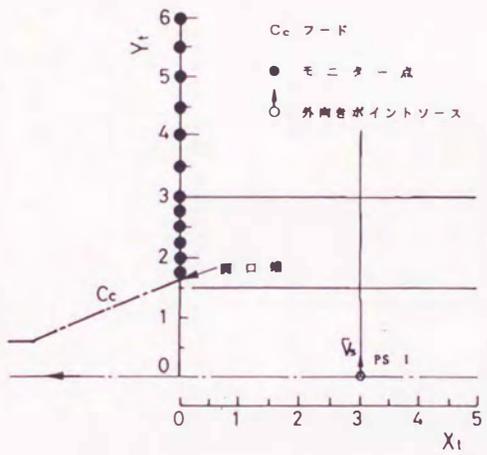
モニター点



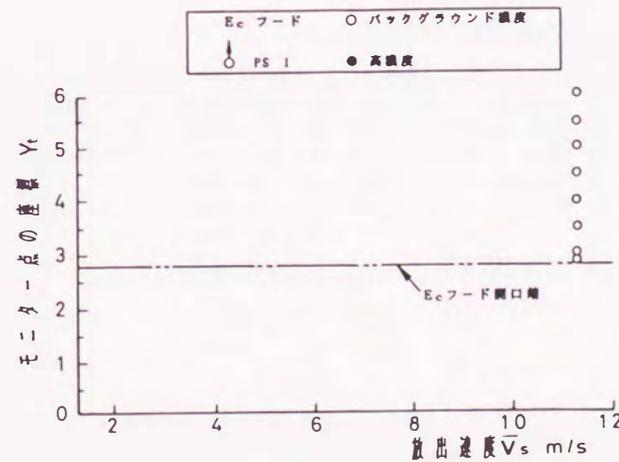
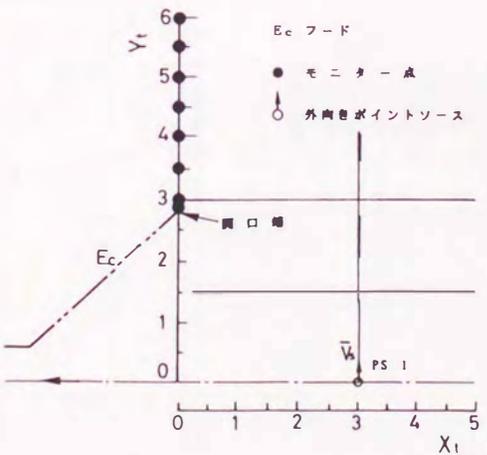
漏れの観察図



(a) Ac フード

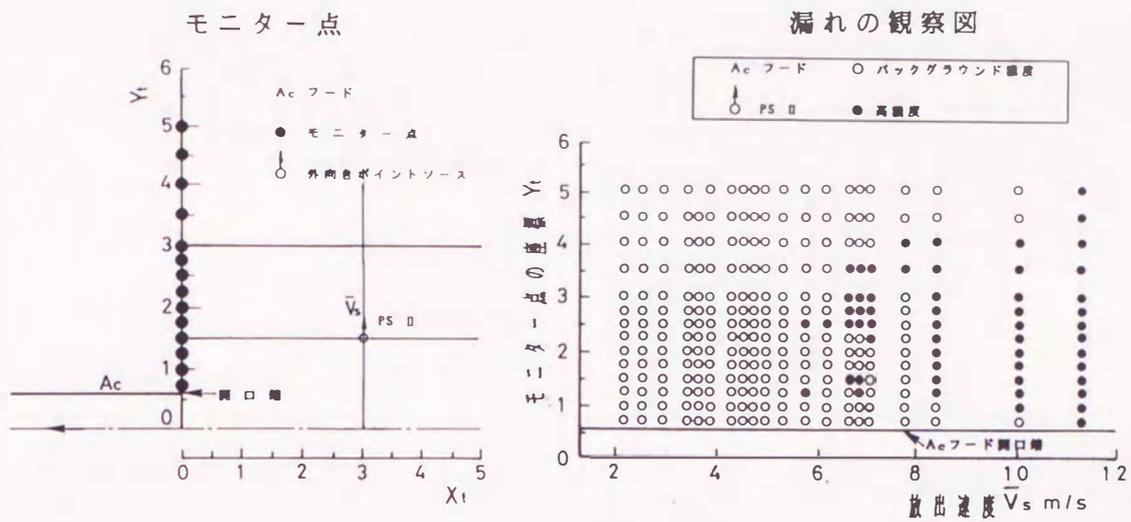


(b) Cc フード

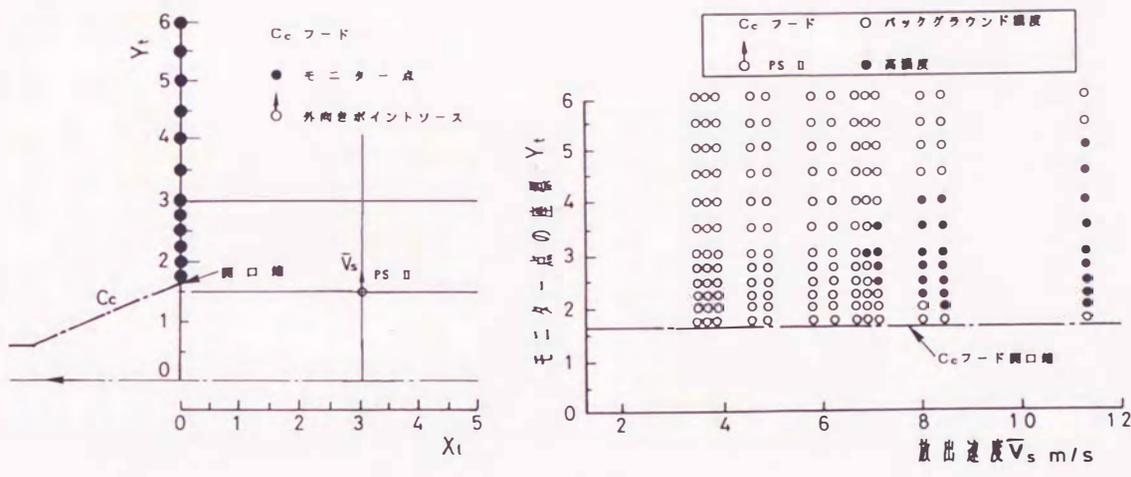


(c) Ec フード

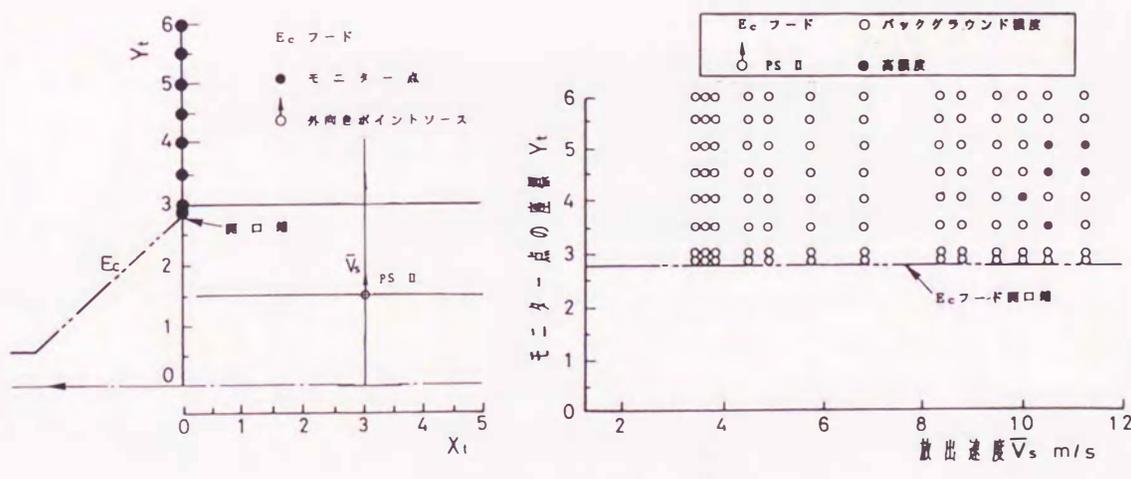
図 6・16 フード形状の違いによるフード開口面外への漏れの観察図 (PS I, 外向き放出)



(a) Ac フード

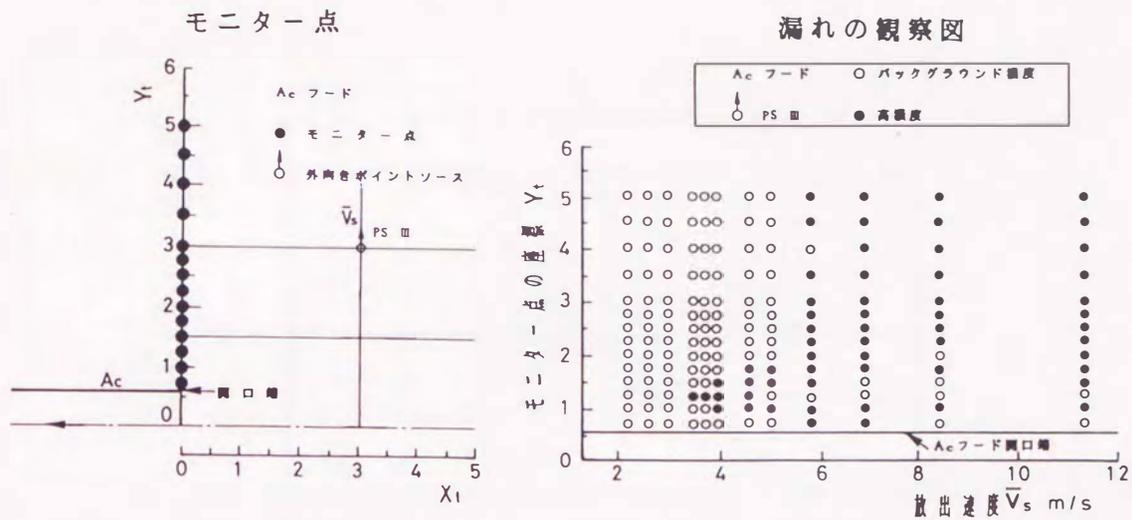


(b) C_c フード

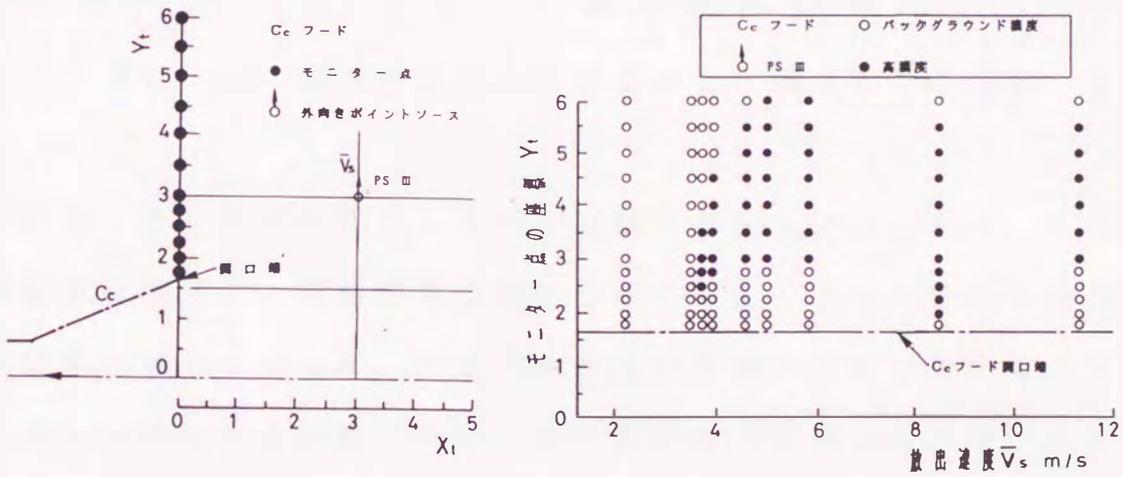


(c) E_c フード

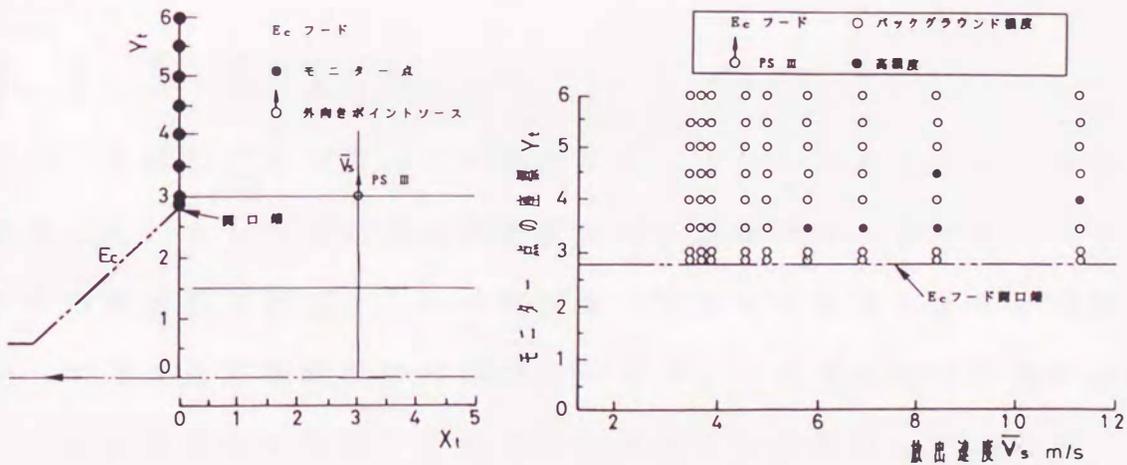
図 6・17 フード形状の違いによるフード開口面外への漏れの観察図 (PS II, 外向き放出)



(a) A_c フード



(b) C_c フード



(c) E_c フード

図 6・18 フード形状の違いによるフード開口面外への漏れの観察図 (PS III, 外向き放出)

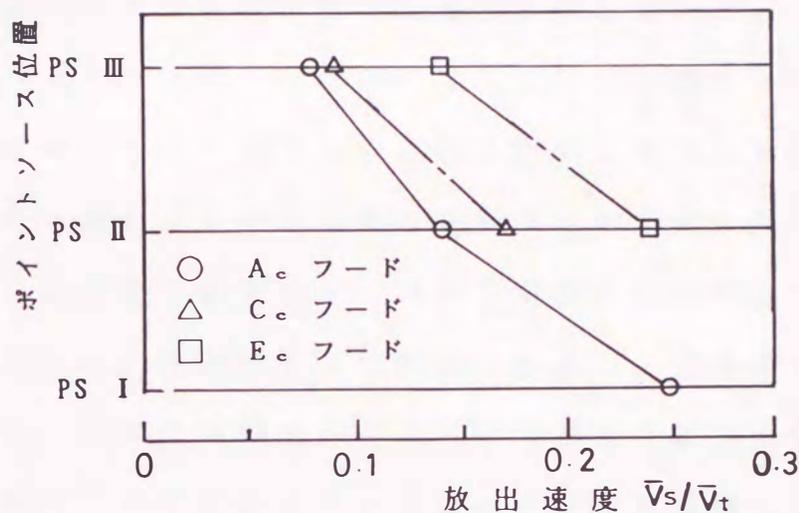


図 6・19 漏れ開始時の放出位置と放出速度との関係

簡易トレーサガス法によりフード開口面側方上のモニター点で濃度測定を行うと、汚染物質の飛散形態に対するフード形状の適合性の検査が簡単に行なえ、前述の捕捉性能曲線と併せて種々のクロスドラフトに対する最適のフード形状の簡易選定法として用いることもできる。

6.4 第6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3種類の外付け式円形フードの捕捉性能評価に適用し、その実用性を検討した結果、以下のことがわかった。

(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時間平均の流線を示した。吸込気流の流線を求めるのに本

捕捉性能評価システムが適用できることがわかった。

(2) フレア形フードでは開口面積比は異なっても、フード開口中心線から一定の領域内の流線の形状はほとんど同一になり、フード形状の違いによる吸込流線の変化は周辺部に表れてくる。

(3) 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検出し、捕捉性能評価パラメータ(最大飛散幅と飛散長さ)を導入した結果、等速度線分布の実験データから提唱したフードの卓越領域の存在が裏付けられた。

(4) xとy方向の捕捉率を求め、それらよりフードの捕捉性能曲線を作成した結果、各フードの卓越領域の存在が上記(3)の場合よりもさらに明瞭になった。

(5) 捕捉性能曲線によれば、汚染源の種々の飛散形態に対する各フードの捕捉性能が一目瞭然となるので、系統的な捕捉性能曲線を作成すれば、総合的な外付け式フードの捕捉性能の評価が可能となることがわかった。

(6) 簡易トレーサガス法を用い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(フード開口面外への漏れの検査)を行った結果、同一の放出点に対して、異なるフードを同一吸込量で作動させた場合には開口面積比の大きなE_oフードが総合的に見ると最も捕捉性能(漏れ防止)が良いことがわかった。

(7) 簡易トレーサガス法は捕捉性能曲線と漏れ測定を併用すれば、汚染源が作り出すクロスドラフトに対するフード形状の適合性の検査が簡単に行える。さらに、他のクロスドラフトに対しても最適フード形状の簡易選定法としても用いることができる。

第7章 総 括

作業工程で発生した有害な汚染源の発散を吸込気流によってコントロールする主要な手段の一つである局所排気用外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性（フード開口中心線上速度分布および開口近傍の等速度線図）を実験により調べ、フード形状の違いが速度特性に及ぼす影響を考察し、速度特性からフードの捕捉性能の評価を行った。吸込流れ場は低速であり、実験精度の限界があるので数値計算（特異点法）により実験データを確認し（定性的に）、それらを補足した。同時に、フード形状の違いがフード損失に及ぼす影響も実験により調べた。

さらに、汚染源自身が作り出すクロスドラフトに焦点を絞った、速度特性によらないでフードの捕捉性能の評価が可能な炭酸ガスをトレーサとする簡易トレーサガス法ならびにフードの捕捉性能評価手法（捕捉性能評価実験法）を提案した。提案したシステムを用いてフード形状の違いがフードの捕捉性能に及ぼす影響を調査し、フードの簡易捕捉性能評価法としての本システムの実用性を考察した。

本論文の各章で得られた主要な結論を要約すれば以下のとおりである。

第1章は序論であり、局所排気用外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性および捕捉効率からフードの捕捉性能の評価を行った研究の歴史的過程を展望し、多数の研究がなされているにもかかわらず、フード形状の違いが吸込流れ場の速度特性に及ぼす影

響についての系統的な研究がほとんどないこと，現場向きの簡易な捕捉性能評価法が確立されていないことを指摘した。さらに，これらの研究に基づいて局所排気装置の設置要件を規定している労働安全衛生法の規則の不備な箇所を述べて，本論文の背景および目的を明示し，本研究の必要性を強調した。

第2章では，自立形二次元外付け式フードの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実験により調べ，速度特性からフードの捕捉性能を考察した。さらに，フード形状の違いがフード損失に及ぼす影響も考察した。

(1) フランジ形フードもフランジ外端を開口面と考えると整理すれば，遠方ではフレアー形フードと同じ速度場として表すことができ，さらに開口面近くではフランジ形フードの方がフレアー形フードよりも速い流速が得られる。従って開口中心線近くの狭い領域で汚染物質を捕捉する局所排気用フードとしては速度場だけについて考えれば同じ開口面積ならばフレアー形よりもフランジ形の方が好適な捕捉特性を有する。

(2) フード開口中心線上速度分布についてはフード形状によらず開口面基準で整理すれば一本の双曲線で表されると従来考えられていたが，実際にはフード形状によって異なった速度特性を有した。開口幅比の小さなフードでは開口近くで流れが中心部に集中するので速度が速くなる。一方，開口幅比の大きなフードは後方からの気流の流れ込みを防止する効果により遠方で速い速度が得られる。

(3) フードの吸込流れ場の速度特性は開口面基準で整理するよりはテイクオフ面基準で整理した方が同一の排気装置に対するフー

ド形状の特性の差が明確に表現できる。

(4) フード損失はダクトのみの開口に小さなフランジを取付けるだけで約0.6倍に低減され、フレアー形にすればさらに約0.25倍に低減される。フランジ形でもフレアー形でも開口幅比3の近傍(フレア角 $\delta \approx 25^\circ$)で損失は最も小さくなる。

第3章では、自立型三次元外付け式フードの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実験により調べ、速度特性からフードの捕捉性能を考察した。さらに、フード形状の違いがフード損失に及ぼす影響も考察した。

(1) フード開口中心線上速度は開口面基準で整理した場合にはフード形状によらずほぼ同じ速度分布となるが、テイクオフ面基準で整理すれば開口面近くでは開口面積比のみによって異なり、開口面積比が同じであればフード断面形状によらず速度分布はほぼ同一となる。しかしながら、フード開口面の遠方では速度分布は一致する傾向となり、二次元フードの場合のような速度分布の逆転は見られなかった。

(2) フード開口中心線を含む水平および垂直断面内の等速度線の形状を開口面基準で整理した場合、その断面内でのフレアー角がほぼ同じであれば開口断面形状が異なる場合でも側方と中心線上の等速度線の間隔の比はほぼ等しくなる。

(3) テイクオフ面基準で表した等速度線図より開口面積比の異なるそれぞれのフードに対して卓越領域が存在することがわかった。これによりフードの開口面は汚染源の広さにほぼ等しい寸法とすることが効果的である。

(4) フード開口断面形状によらず，フード損失係数はフレア角 25° 近傍で最小となる。

第4章では，第2章および第3章の実験において吸込流れ場の精密かつ細かい速度特性のデータを得るためには，風速計の測定精度と吸込流れ場の測定点の間隔に限界があったので，数値解析により実験で得られた速度特性のデータを定性的に確認し，それらを補った。数値解析の手法は二次元および円形（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特異点法を用いた。さらに，第2章および第3章の実験結果との比較も行い，本解析法の有効性も検討した。

(二次元フードの解析)

(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。

(円形フードの解析)

(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章では、フードの開口近傍の吸込流れ場にポイントソース源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とする簡易トレーサガス法を提案し、捕捉性能評価手法を示した。

(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きる。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。

第6章では、第5章で提案した簡易トレーサガス法および捕捉性能評価手法を円形外付け式フードの捕捉性能の評価に適用し、フード形状の違いが捕捉性能に及ぼす影響を考察し、第3章の速度特性から得られた捕捉性能と対比させて、本システムによるフードの捕捉性能評価手法の実用性を検討した。

(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時間平均の流線を示した。吸込気流の流線を求めるのに本捕捉性能評価システムが適用できることがわかった。

(2) フレアー形フードでは開口面積比は異なっても、フード

開口中心線から一定の領域内の流線の形状はほとんど同一になり、フード形状の違いによる吸込流線の変化は周辺部に表れてくる。

(3) 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検出し、捕捉性能評価パラメータ(最大飛散幅と飛散長さ)を導入した結果、等速度線分布の実験データから提唱したフードの卓越領域の存在が裏付けられた。

(4) xとy方向の捕捉率を求め、それらよりフードの捕捉性能曲線を作成した結果、各フードの卓越領域の存在が上記(3)の場合よりもさらに明瞭になった。

(5) 捕捉性能曲線によれば、汚染源の種々の飛散形態に対する各フードの捕捉性能が一目瞭然となるので、系統的な捕捉性能曲線を作成すれば、総合的な外付け式フードの捕捉性能の評価が可能となることがわかった。

(6) 簡易トレーサガス法を用い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(フード開口面外への漏れの検査)を行った結果、同一の放出点に対して、異なるフードを同一吸込量で作動させた場合には開口面積比の大きなE。フードが総合的に見ると最も捕捉性能(漏れ防止)が良いことがわかった。

(7) 簡易トレーサガス法は捕捉性能曲線と漏れ測定を併用すれば、汚染源が作り出すクロスドラフトに対するフード形状の適合性の検査が簡単に行える。さらに、他のクロスドラフトに対しても最適フード形状の簡易選定法としても用いることができる。

第7章は、以上の研究の総括である。

謝 辞

本論文の主題を与えていただき、研究の遂行にあたって絶えず暖かい御指導御鞭撻を賜った九州大学工学部教授井上雅弘先生に衷心より謝意を表します。

本研究の遂行にあたっては福岡大学工学部鎌田好久教授、山口住夫教授の有益な議論に負うところが極めて大でありました。深甚の謝意を表します。

九州大学工学部深野徹教授、内野健一教授、古川明德教授には論文作成にあたり貴重な御助言を授かりました。深く感謝いたします。

本研究の大部分は福岡大学工学部機械工学科空気力学実験室で行いました。実験および数値計算に際しては空気力学実験室、佐々木一人助手、中牟田敏技官、山下昇二技官、中原大三氏、大坪康浩氏、村上誠氏のほか、多くの諸氏の協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。福岡大学は実験室の使用を快諾いただき、数々の御援助をうけました。厚くお礼申し上げます。

著者の研究生活を通じて常に御教示をいただき、論文作成にあたっては御助言を授かりかつ激励していただいた西日本工業大学岡部淳一学長ならびに林正徳副学長に心よりの謝意を表します。

本研究の遂行にあたり西日本工業大学からは特別研究費および重点研究費の支給をうけました。厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 労働省安全衛生部労働衛生課編, 局所排気装置フード-設計資料集成-(応用編), 中央労働災害防止協会, (1983) .
- (2) 沼野雄志, やさしい局排設計教室, 中央労働災害防止協会, (1986) .
- (3) American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Committee on Industrial Ventilation: Industrial Ventilation, A Manual of Recommended Practice. 16th ed. Lansing, Mich.: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1980.
- (4) Dallavalle, J. M. and Hatch, T., "Studies in the Design of Local Exhaust Hoods", Trans. ASME, 54(1932), 31-37.
- (5) Dallavalle, J. M., "Velocity Characteristics of Hoods under Suction", Heat., Pip., Air Condit., 4(1932), 370-375.
- (6) Silverman, L., "Velocity Characteristics of Narrow Exhaust Slots", J. Ind. Hyg. Tox., 24(1942), 267-276.
- (7) Garrison R. P., "Centerline Velocity Gradients for plain and Flanged Local Exhaust Inlets", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 42(1981), 739-746.
- (8) Garrison R. P., "Velocity Calculation for Local Exhaust Inlet—Empirical Design Equations", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 44(1983), 937-940.
- (9) Garrison R. P., "Velocity Calculation for Local Exhaust Inlet—Graphical Design Concepts", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 44(1983), 941-947.
- (10) Braconnier R., "Bibliographic Review of Velocity Fields in the Vicinity of Local Exhaust Hood Openings", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 49(1988), 185-198.
- (11) Flynn M. R. and Miller, C. T., "Comparison of Models for Flow Through Flanged and Plain Circular Hoods", Ann. Occup. Hyg., 32(1988), 373-384.
- (12) Pruzner, A. S., "Flow Structure in the Zone of Action of Suction Apertures", Otopleniye i Ventilyatsiya, 10(1939), 13-21. [in Russian].
- (13) Silverman, L., "Centerline Velocity Characteristics of Round Openings under Suction", J. Ind. Hyg. Tox., 24(1942), 259-266.
- (14) Koop, H. A., "Dust Suction Nozzles for Grinders", Zeitschrift V.D.I., 88 (1944), 21-24. [in German].
- (15) Brandt, A. D., Steffy, R. J. and Huebscher R. G., "Nature of Air Flow at Suction Openings", Heat., Pip., Air Condit., 19(1947), 101-108.

- (16) Hemeon, W. C. L., Plant and Process Ventilation, 2nd. ed., Industrial Press, 1963, 69-76.
- (17) Drkal, F., "Flow Conditions near Flanged Round Openings under Suction", Heiz. Lüft. Haustech., 21(1970), 271-273. [in German].
- (18) Engels, L. H. and Willert, G., "Criteria and Possibilities for the Capture of Dust in Industrial Plants", Staub-Reinhalt. Lüft., 33(1973), 140-141. [in German].
- (19) Garrison, R. P. and Byers, D. H., "Static Pressure and Velocity Characteristics of Circular Nozzles for High Velocity/Low Volume Exhaust Ventilation", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 41(1980), 803-811.
- (20) Flynn M. R. and Ellenbecker M. J., "Empirical Validation of Theoretical Velocity Fields into Flanged Circular Hoods", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 48(1987), 380-389.
- (21) Tyaglo, I. G. and Shepelev, I. A., "Air Flow near an Exhaust Opening", Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika, 5(1970), 24-25. [in Russian].
- (22) Drkal, F., "Theoretical Determination of Flow Conditions near Suction Slots", Heiz. Lüft-Haustech, 22(1971), 167-172. [in German].
- (23) Fletcher, B., "Centreline Velocity Characteristics of Rectangular Unflanged Hoods and Slots under Suction", Ann. Occup. Hyg. 20(1977), 141-146.
- (24) Garrison, R. P. and Byers, D. H., "Static Pressure, Velocity, and Noise Characteristics of Rectangular Nozzles for High Velocity/Low Volume Exhaust Ventilation", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 41(1980), 855-863.
- (25) Pavlov, B. M. and Pocokine, B. N., "Equations for the Calculation of Airflow Velocities towards Suction Slots", Industry and Health, Collection of Scientific Works of Prevention Institutes of the V. C. S. P. S., Moscow, Profizdat, 1980, 81-88. [in Russian].
- (26) Kuzmina, L. V. and Tyaglo, I. G., "Airflow Calculation for Long Rectangular Exhaust Openings", In Improvement of Working Conditions and of Prevention, Collection of Scientific Works of Prevention Institutes of the V. C. S. P. S., Moscow, Profizdat, 1982, 43-47. [in Russian].
- (27) Fletcher, B. and Johnson, A. E., "Velocity Profiles around Hoods and Slots and the Effects of an Adjacent Plane" Ann. Occup. Hyg., 25(1982), 365-372.
- (28) Flynn M. R. and Ellenbecker, M. J., "The Potential Flow Solution for Air Flow into a Flanged Circular Hood", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 46(1985), 318-322.

- (29) Garrison, R. P., and Wang, Y., "Finite Element Application for Velocity Characteristics of Local Exhaust Inlets", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 48(1987), 983-988.
- (30) Flynn, M. R. and Miller, C., "The Boundary Integral Equation Method(BIEM) for Modeling Local Exhaust Hood Flow Fields", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50(1989), 281-288.
- (31) Anastas, M. Y. and Hughes, R., "Finite Difference Methods for Computation of Flow into Local Exhaust Hoods", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50(1989), 526-534.
- (32) Garrison, R. P. and Park, C., "Evaluation of Models for Local Exhaust Velocity Characteristics—Part One: Velocity Contours for Freestanding and Bounded Inlets", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50(1989), 196-203.
- (33) Garrison, R. P. and Park, C., "Evaluation of Models for Local Exhaust Velocity Characteristics—Part Two: Velocity Gradients for an Inlet near a Boundary Surface", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50(1989), 204-209.
- (34) Ellembecker M. J., Gempel, R. F. and Burgess, W. A., "Capture Efficiency of Local Exhaust Ventilation Systems", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 44(1983), 752-755.
- (35) Hampl V. "Evaluation of Industrial Local Exhaust Hood Efficiency by a Tracer Gas Technique", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 45(1984), 485-490.
- (36) Hampl V., Niemela, R., Shulman, S. and Bartley, D., "Use of Tracer Gas Technique for Industrial Hood Efficiency Evaluation—Where to Sample?", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 47(1986), 281-287.
- (37) Hampl, V. and Hughes, R.T., "Improved Local Exhaust Control by Directed Push-Pull Ventilation System", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 47(1986), 59-65.
- (38) Flynn, M. R. and Ellembecker, M. J., "Capture Efficiency of Flanged Circular Local Exhaust Hoods", Ann. Occup. Hyg., 30(1986), 497-513.
- (39) Waters R. A., Hall, D. J. and Masood, T., "The Performance of Extraction Booths Subject to Draughts—A Wind Tunnel Study", Atmospheric Environment, 25A(1991), 1163-1171.
- (40) Grenier M. G., Hardcastle, S. G., Kunchur, G. and Butler, K., "The Use of Tracer Gases to Determine Dust Dispersion Patterns and Ventilation Parameters in a Mineral Processing Plant", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 53(1992), 387-394.
- (41) 越智・山口・鎌田・中原, "局所排気用外付け式フードの性能に関する研究(二次元フード形状が開口近傍の速度場の特性に及ぼす影響)", 日本機械学会九州支部講演概要集, No. 908-1(1990), 41-42.

- (42) 山口・越智・中原・鎌田・井上, "局所排気用二次元フードの形状が吸込流れ場に及ぼす影響", 日本機械学会論文集 (B編), 57-537(1991), 1562-1566.
- (43) 日本機械学会編, 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, 日本機械学会, (1979), 53-54.
- (44) 池本弘, ダクトの設計, 理工図書 (1981), 42.
- (45) 山口・越智, "局所排気フード開口近傍の速度場における気流の特性(第1報サイド比1:2の長方形開口を有する三次元フードの速度場)", 福岡大学工学集報, 42(1989), 13-19.
- (46) 越智・山口・大坪・鎌田・井上, "局所排気用三次元フードの形状が吸込流れ場に及ぼす影響", 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No. 910-50(1991), 57-59.
- (47) 山口・越智・大坪・鎌田・井上, "局所排気用三次元フードの形状が吸込流れ場に及ぼす影響", 日本機械学会論文集 (B編), 58-552(1992), 2407-2412.
- (48) 日本機械学会編, 流れの数値シミュレーション, コロナ社, (1990), 222-223.
- (49) 山口・井上・生井, "スプラインフィット法を用いたうず輪による軸対称流れの解析", 日本機械学会論文集 (第2部), 43-372(1977), 2993-3000.
- (50) 佐々木・山口・越智・中原・鎌田, "局所排気用外付け式フードの性能に関する研究(特異点法によるフード開口近傍の速度場の数値計算)", 日本機械学会第68期全国大会講演会講演論文集, No. 900-59(1990), 94-96.
- (51) Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", 6ed., McGraw Hill, 1968, 598-599.
- (52) 越智・山口・村上・鎌田・井上, "簡易トレーサガス法による局所排気用フードの吸込流れ場の性能評価", 日本機械学会論文集 (B編), 投稿中.

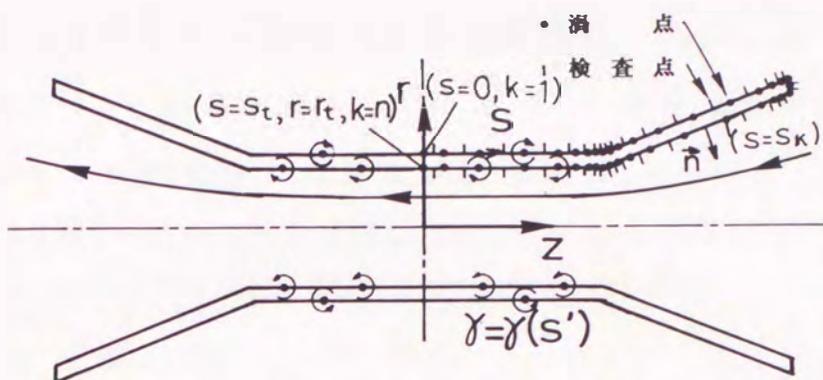
付録 特異点法による吸込流れ場の数値解析の基礎式

付録で用いた主な記号は以下のとおりである。

r	平行ダクト中央部を原点とする半径方向の座標
z	平行ダクト中央部を原点とする軸方向の座標
r_0	ダクト半径
Q	ダクト内の流量
s, s'	物体表面上の点あるいは子午線上の曲線座標
γ	渦点あるいは渦輪の強さ
γ'	s に関する γ の 1 次微係数, $= d\gamma/ds$
γ''	s に関する γ の 2 次微係数, $= d^2\gamma/ds^2$
\vec{v}	渦点あるいは渦輪による誘起速度ベクトル
v_r	渦点あるいは渦輪による誘起速度の r 方向成分
v_z	渦点あるいは渦輪による誘起速度の z 方向成分
\vec{n}	点 s における外向き法線ベクトル
n_r	点 s における外向き法線ベクトルの r 方向成分
n_z	点 s における外向き法線ベクトルの z 方向成分

計算に用いたモデルを付図 A・1 に示す。計算モデルは吸込口形状を $z = 0$ について対称に接続した形状とし、平行ダクトの長さは $z = 0$ の断面内の速度分布が一様となるように決める。ポテンシャル流れ場を仮定しているので、流れは $z = 0$ および $r = 0$ の線で対称になる。そこで、解析は $z \geq 0, r \geq 0$ の領域について行った。

物体（フードおよびダクト）の形状は子午線上の曲線座標 s に対して $r = r(s), z = z(s)$ で表わし、滑らかな連続関数 $\gamma =$



付図 A・1 計算モデル

$\gamma(s)$ に従って強さが変化する渦点（二次元フードの場合）あるいは渦輪（円形フードの場合）を物体表面に分布させる。

物体表面上の任意の点 s に誘起される r および z 方向の速度成分 v_r, v_z はそれぞれ次式で表される。

$$v_r(s) = \oint \cdot v_r(s, s') \gamma(s') ds' - \gamma(s) n_z(s) \quad \text{----- (A. 1)}$$

$$v_z(s) = \oint \cdot v_z(s, s') \gamma(s') ds' - \gamma(s) n_r(s) \quad \text{----- (A. 2)}$$

ここで、 n_r と n_z はそれぞれ点 s における外向き法線ベクトルの r および z 方向成分で、 v_r と v_z は s' ($s' \neq s$) の位置にある単位強さの渦により点 s に誘起される速度成分で、それぞれの形式のフードに対して次式で表される。

（二次元フード）

$$v_r = \tilde{v}_r + \bar{v}_r \quad \text{----- (A. 3)}$$

$$v_z = \tilde{v}_z + \bar{v}_z \quad \text{----- (A. 4)}$$

ここで、 \tilde{v}_r, \tilde{v}_z は $r > 0$ にある点 \tilde{s}' (\tilde{r}', \tilde{z}') の単位強さの渦

により点 $s (r, z)$ に誘起される速度成分, \bar{v}_r, \bar{v}_z は $r < 0$ で z 軸に対して点 \tilde{s}' と対称な点 $\bar{s}' (\bar{r}', \bar{z}')$ の単位強さの渦により点 $s (r, z)$ に誘起される速度成分である。

(円形フード)

$$V_r = \frac{r'}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z-z'}{\rho^3} \cos \alpha' d\alpha'$$

$$= \frac{z-z'}{4\pi r \sqrt{(z-z')^2 + (r+r')^2}} \left[\frac{2-k^2}{1-k^2} E_k - 2K_k \right] \dots\dots\dots (A. 5)$$

$$V_z = \frac{r'}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r' - r \cos \alpha')}{\rho^3} d\alpha'$$

$$= \frac{1}{4\pi \sqrt{(z-z')^2 + (r+r')^2}} \left[\left(\frac{r+r'}{r} k^2 - 1 \right) \frac{E_k}{1-k^2} + 2K_k \right] \dots\dots\dots (A. 6)$$

ここで

$$\rho = \sqrt{(z-z')^2 + (r' \sin \alpha')^2 + (r - r' \cos \alpha')^2} \dots\dots\dots (A. 7)$$

$$k^2 = \frac{4rr'}{(z-z')^2 + (r+r')^2} \dots\dots\dots (A. 8)$$

で, K_k, E_k はそれぞれ k を母数とする第 1 種および第 2 種完全楕円積分である。また α は z 軸まわりの角度である。

渦により誘起される速度が点 s で物体表面に接する条件は

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = v_r(s) \cdot n_r(s) + v_z(s) \cdot n_z(s) = 0 \dots\dots\dots (A. 9)$$

で、上式に式 (A. 1) と式 (A. 2) を代入する。

$$\oint \gamma(s') \{V_z(s, s') n_z(s) + V_r(s, s') n_r(s)\} ds' = 0 \quad \text{--- (A. 10)}$$

式 (A. 10) は未知関数 $\gamma(s)$ にスプラインフィット法を導入することにより安定に解くことができる。付図 A. 1 に示すように物体表面に $s = s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_N$ の N 個の分割点 (渦点) をおく。スプラインフィット法によれば $\gamma(s)$ は各区間でそれぞれ次の三次式で表される。

$$\gamma(s) = f_{1k}(s) \gamma_k + f_{2k}(s) \gamma_{k+1} + f_{3k}(s) \gamma''_k + f_{4k}(s) \gamma''_{k+1} \quad \text{--- (A. 11)}$$

ここで

$$f_{1k}(s) = \frac{s_{k+1} - s}{l_k} \quad \text{--- (A. 12)}$$

$$f_{2k}(s) = \frac{s - s_k}{l_k} \quad \text{--- (A. 13)}$$

$$f_{3k}(s) = - \frac{1}{6 \cdot l_k} (s - s_k)(s_{k+1} - s)(l_k + s_{k+1} - s) \quad \text{--- (A. 14)}$$

$$f_{4k}(s) = - \frac{1}{6 \cdot l_k} (s - s_k)(s_{k+1} - s)(l_k - s_k + s) \quad \text{--- (A. 15)}$$

$$l_k = s_{k+1} - s_k \quad \text{--- (A. 16)}$$

で、 γ_k, γ''_k は各分割点での関数値およびその二次微係数である。式 (A. 11) は各分割点で隣合う区間の関数値とその二次微係数の

連続条件が自動的に満足されるので、一次微係数の接続条件を与えれば $\gamma(s)$ は全区間にわたって二次微係数まで連続な関数となる。 $\gamma(s)$ の分布を式 (A. 11) で表すことにより連続的に分布する渦の任意の点の強さは N 個の渦点の強さで表すことができる。

物体表面上の渦点の強さが未知の場合、各区間の中央においた検査点 s_j について式 (A. 10) を適応すれば $N-1$ 個の点について次の関係が成立する。

$$\sum_{k=1}^{N-1} (l_{1jk} \gamma_k + l_{2jk} \gamma_{k+1} + l_{sjk} \gamma''_k + l_{4jk} \gamma''_{k+1}) = 0 \quad \text{----- (A. 17)}$$

($k=1 \sim N-1, j=1 \sim N-1$)

ここで、 l_{ijk} は次式で示されるように、 k 番目の区間から j 番目の検査点への影響係数で、物体の形状のみに依存する。

$$l_{ijk} = \int_{s_k}^{s_{k+1}} f_{ik}(s') [\{V_r(s_j, s') + V_r(s_j, -s')\} n_{rj} + \{V_z(s_j, s') + V_z(s_j, -s')\} n_{zj}] ds' \quad \text{----- (A. 18)}$$

ただし、 f_{ik} は $s_k \leq s' \leq s_{k+1}$ で定義される。

式 (A. 17) を書き直せば、次式に示す $N-1$ 元の連立一次方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} & l_{111} \gamma_1 + (l_{211} + l_{112}) \gamma_2 + (l_{212} + l_{113}) \gamma_3 + \dots + l_{21N} \gamma_N \\ & \quad + l_{s11} \gamma''_1 + (l_{411} + l_{s12}) \gamma''_2 + (l_{412} + l_{s13}) \gamma''_3 + \dots + l_{41N} \gamma''_N = 0 \\ & l_{121} \gamma_1 + (l_{221} + l_{122}) \gamma_2 + (l_{222} + l_{123}) \gamma_3 + \dots + l_{22N} \gamma_N \\ & \quad + l_{s21} \gamma''_1 + (l_{421} + l_{s22}) \gamma''_2 + (l_{422} + l_{s23}) \gamma''_3 + \dots + l_{42N} \gamma''_N = 0 \\ & \quad \vdots \\ & l_{1N-11} \gamma_1 + (l_{2N-11} + l_{1N-12}) \gamma_2 + \dots + l_{2N-1N} \gamma_N \\ & \quad + l_{sN-11} \gamma''_1 + (l_{4N-11} + l_{sN-12}) \gamma''_2 + \dots + l_{4N-1N} \gamma''_N = 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (A. 19)}$$

ここではスプラインフィット関数で渦を分布させているので、各分割点で隣合う区間の渦分布を滑らかに接続させるための条件、すなわち次式に示す $d\gamma/ds$ が相等しい条件式が必要となる。

$$E_{1k} \gamma_{k-1} + E_{2k} \gamma_k + E_{3k} \gamma_{k+1} + E_{4k} \gamma''_{k-1} + E_{5k} \gamma''_k + E_{6k} \gamma''_{k+1} = 0 \quad (\text{A. 20})$$

ここで、

$$E_{1k} = \frac{1}{l_{k-1}} \quad (\text{A. 21})$$

$$E_{2k} = \frac{1}{l_k} + \frac{1}{l_{k+1}} \quad (\text{A. 22})$$

$$E_{3k} = \frac{1}{l_k} \quad (\text{A. 23})$$

$$E_{4k} = -\frac{l_{k-1}}{6} \quad (\text{A. 24})$$

$$E_{5k} = \frac{l_{k-1} + l_k}{3} \quad (\text{A. 25})$$

$$E_{6k} = \frac{l_k}{6} \quad (\text{A. 26})$$

式 (A. 20) を書き直せば、次式に示す $N - 2$ 元の連立一次方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
 E_{12} \gamma_1 + E_{22} \gamma_2 + E_{32} \gamma_3 + E_{42} \gamma''_1 + E_{52} \gamma''_2 + E_{62} \gamma''_3 &= 0 \\
 E_{13} \gamma_2 + E_{23} \gamma_3 + E_{33} \gamma_4 + E_{43} \gamma''_2 + E_{53} \gamma''_3 + E_{63} \gamma''_4 &= 0 \\
 &\vdots \\
 E_{1N-1} \gamma_{N-2} + E_{2N-1} \gamma_{N-1} + E_{3N-1} \gamma_N \\
 + E_{4N-1} \gamma''_{N-2} + E_{5N-1} \gamma''_{N-1} + E_{6N-1} \gamma''_N &= 0
 \end{aligned}
 \tag{A. 27}$$

未知関数 $\gamma(s)$ は各分割点の γ_k と γ''_k がわかれば式 (A. 11) で与えられるが、式 (A. 19) および式 (A. 27) における未知数は $2N$ 個であり、さらに 3 つの条件式が必要となる。

そこで、スプラインフィット関数の両端の条件 (1 および N 番目の点の $\gamma(s)$ の関数形) を与える。物体は $z = 0$ の線について対称であるので、両端の点 ($z = 0$) では $d\gamma/ds = 0$ となる。式 (A. 11) を微分し、この条件を適用すれば次式に示す 2 つの条件式が得られる。

$$-\frac{\gamma_1}{l_1} + \frac{\gamma_2}{l_1} - \frac{l_1}{3} \gamma''_1 - \frac{l_{1k}}{6} \gamma''_2 = 0 \quad \text{--- (A. 28)}$$

$$-\frac{\gamma_{N-1}}{l_{N-1}} + \frac{\gamma_N}{l_{N-1}} - \frac{l_{N-1}}{6} \gamma''_{N-1} + \frac{l_{N-1}}{3} \gamma''_N = 0 \quad \text{--- (A. 29)}$$

最後の条件としてダクト内の流量を与える。すなわち、ダクト半径を r_c として $z = 0$ の面ですべての渦により誘起される速度を積分すればよい。

(二次元フードの場合)

$$\begin{aligned}
Q &= 2 \int_0^{\Gamma_t} \int_0^{\Gamma_t} \gamma(s') V_z \{(r, 0), s'\} ds' dr \\
&= 2 \int_0^{\Gamma_t} \sum_{k=1}^{N-1} \{J_{1k}(r) \gamma_k + J_{2k}(r) \gamma_{k+1} + J_{3k}(r) \gamma''_k \\
&\quad + J_{4k}(r) \gamma''_{k+1}\} dr \dots\dots\dots (A. 30)
\end{aligned}$$

(円形フードの場合)

$$\begin{aligned}
Q &= 2\pi \int_0^{\Gamma_t} r \int_0^{\Gamma_t} \gamma(s') V_z \{(r, 0), s'\} ds' dr \\
&= 2\pi \int_0^{\Gamma_t} r \sum_{k=1}^{N-1} \{J_{1k}(r) \gamma_k + J_{2k}(r) \gamma_{k+1} + J_{3k}(r) \gamma''_k \\
&\quad + J_{4k}(r) \gamma''_{k+1}\} dr \dots\dots\dots (A. 30)'
\end{aligned}$$

ここで

$$J_{ik} = \int_{s_k}^{s_{k+1}} f_{ik}(s') \{V_z(s_1, s') + V_z(s_1, -s')\} ds' \dots\dots\dots (A. 31)$$

で、 i は $z = 0$ で半径方向にとった流量の計算点番号である。

式 (A. 30) あるいは式 (A. 30)' を整理し、書き直すと次式が得られる。

$$D_1 \gamma_1 + D_2 \gamma_2 + D_3 \gamma_3 + \dots + D_{N+1} \gamma''_1 + \dots + D_{2N} \gamma''_N = Q \dots\dots (A. 32)$$

ここで、

(二次元フードの場合)

$$D_1 = 2 \int_0^{\Gamma_t} J_{11} dr, \quad D_2 = 2 \int_0^{\Gamma_t} (J_{21} + J_{12}) dr, \quad \dots\dots\dots (A. 33)$$

(円形フードの場合)

$$D_1 = 2\pi \int_0^{r_t} r J_{11} dr, \quad D_2 = 2\pi \int_0^{r_t} r (J_{21} + J_{12}) dr, \quad \text{----- (A. 33) '}$$

計算においてはダクト内流速を基準とするので、 $Q = 1$ とする。

式 (A. 19) の γ_k と γ_k'' ($k = 1 \sim N$) の係数を C_{ij} とおき、式 (A. 27) および式 (A. 32) の関係を行列式で表すと次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{1N} & C_{1N+1} & \dots & C_{12N} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \dots & C_{2N} & C_{2N+1} & \dots & C_{22N} \\ \vdots & & & & & & & \\ C_{N-11} & C_{N-12} & C_{N-13} & \dots & C_{2N} & C_{2N+1} & \dots & C_{22N} \\ D_1 & D_2 & D_3 & \dots & D_N & D_{N+1} & \dots & D_{2N} \\ E'_{11} & E'_{21} & 0 & \dots & 0 & E'_{41} & E'_{51} & E'_{61} & 0 \\ E'_{12} & E'_{22} & E'_{32} & 0 & \dots & 0 & E'_{42} & E'_{52} & E'_{62} & 0 \\ 0 & E'_{13} & E'_{23} & E'_{33} & \dots & 0 & & & & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & \\ 0 & \dots & 0 & E'_{1N-1} & E'_{2N-1} & E'_{3N-1} & 0 & \dots & \dots & E'_{6N-1} \\ 0 & \dots & 0 & E'_{1N} & E'_{2N} & 0 & \dots & 0 & E'_{4N} & E'_{5N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_{N-1} \\ \gamma_N \\ \gamma''_1 \\ \gamma''_2 \\ \gamma''_3 \\ \vdots \\ \gamma''_{N-1} \\ \gamma''_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

----- (A. 34)

ただし、上式の E'_{ik} は式 (A. 28) と式 (A. 29) の係数である。

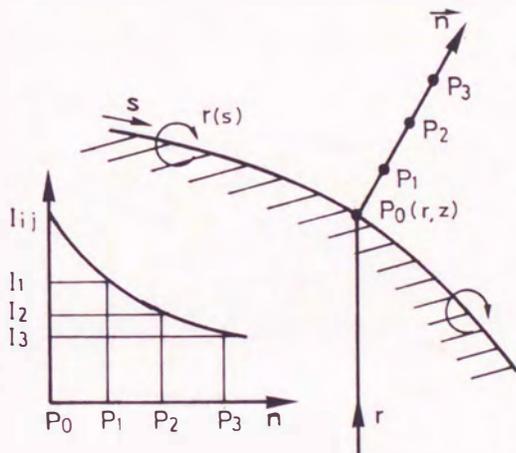
そこで、式 (A. 34) の $2N$ 元の連立一次方程式を解けば、物体表面上の N 個の分割点 (渦点) の γ_k と γ_k'' が求められる。

上記の数値解析において式 (A. 18) の被積分関数は $j = k$ の区間において特異性を有する。この区間では検査点上で V_r と V_z が無限大となり、解析的特異積分が困難となる。そこで、次の方法を採用

して特異積分を行った。

物体表面の検査点から法線方向に $r/1000$, $2r/1000$, $3r/1000$ 離れた点 P_1 , P_2 , P_3 を仮の検査点とし、この3点に対する積分値 I_1 , I_2 , I_3 を求める。この I_1 , I_2 , I_3 が P_1 , P_2 , P_3 に対して二次式で近似されたとすれば、検査点の積分値は次式によって外挿することができる。(付図A・2)

$$I_{ijk} = 3(I_1 - I_2) + I_3 \text{ (A. 35)}$$



付図A・2 特異積分の説明(49)



1/2 inches
1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

