

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：



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

①

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

目 次

	頁
記 号	(5)
第 1 章 序 論	(8)
1 . 1 本 研 究 の 背 景 と 目 的	(8)
1 . 2 開 口 近 傍 の 吸 込 流 れ 場 の 速 度 特 性 に 関 す る 従 来 の 研 究	(12)
1 . 3 フ ー ド の 捕 捉 効 率 に 関 す る 従 来 の 研 究	(15)
1 . 4 本 論 文 の 構 成	(17)
第 2 章 二 次 元 フ ー ド 形 状 が 吸 込 流 れ 場 の 速 度 特 性 に 及 ぼ す 影 響	(20)
2 . 1 緒 言	(20)
2 . 2 実 験 装 置 お よ び 実 験 方 法	(22)
2 . 2 . 1 実 験 装 置	(22)
2 . 2 . 2 供 試 フ ー ド	(23)
2 . 2 . 3 実 験 方 法	(25)
2 . 3 実 験 結 果 お よ び 考 察	(26)
2 . 3 . 1 開 口 中 心 線 上 速 度 分 布 に 及 ぼ す 影 響	(26)
2 . 3 . 2 開 口 近 傍 の 吸 込 流 れ 場 の 等 速 度 線 分 布 に 及 ぼ す 影 響	(30)
2 . 3 . 3 フ ー ド 損 失 に 及 ぼ す 影 響	(32)
2 . 4 第 2 章 の ま と め	(34)

第 3 章	三次元フード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響	(36)
3 . 1	緒言	(36)
3 . 2	実験装置および実験方法	(37)
3 . 2 . 1	実験装置	(37)
3 . 2 . 2	供試フード	(39)
3 . 2 . 3	実験方法	(41)
3 . 3	実験結果および考察	(41)
3 . 3 . 1	開口中心線上速度分布に及ぼす影響	(42)
3 . 3 . 2	開口近傍の吸込流れ場の等速度線分布に及ぼす影響	(47)
3 . 3 . 3	フードの卓越領域	(52)
3 . 3 . 4	フード損失に及ぼす影響	(54)
3 . 4	第 3 章のまとめ	(56)
第 4 章	フード開口近傍の吸込流れ場の数値解析	(58)
4 . 1	緒言	(58)
4 . 2	解析方法および解析手順	(59)
4 . 3	フード開口内のはく離形状の考察	(62)
4 . 4	二次元フードの解析結果および考察	(65)
4 . 4 . 1	フード開口中心線上速度分布	(65)
4 . 4 . 2	フード開口近傍の等速度線分布	(69)
4 . 4 . 3	解析結果と実験結果との比較	(72)
4 . 5	円形フードの解析結果および考察	(75)
4 . 5 . 1	フード開口中心線上速度分布	(75)

4 . 5 . 2	フード開口近傍の等速度線分布	(77)
4 . 5 . 3	解析結果と実験結果との比較	(80)
4 . 6	第 4 章のまとめ	(82)
4 . 6 . 1	二次元フードのまとめ	(82)
4 . 6 . 2	円形フードのまとめ	(83)
第 5 章	吸込流れ場の捕捉性能評価システムの提案	(84)
5 . 1	緒言	(84)
5 . 2	簡易トレーサガス法	(85)
5 . 2 . 1	システム構成	(85)
5 . 2 . 2	トレーサガスの濃度測定方法	(87)
5 . 2 . 3	ソース形状および放出仕様	(88)
5 . 3	吸込気流の流線測定の原理	(89)
5 . 4	高濃度領域の測定による捕捉性能評価法	(91)
5 . 4 . 1	高濃度領域の定義	(91)
5 . 4 . 2	捕捉性能評価パラメータの定義	(92)
5 . 4 . 3	捕捉率の定義および捕捉性能曲線	(94)
5 . 5	フード開口面外への漏れの定義	(95)
5 . 6	第 5 章のまとめ	(95)
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	(97)
6 . 1	緒言	(97)
6 . 2	実験装置および実験方法	(97)
6 . 2 . 1	実験装置および供試フード	(97)

6 . 2 . 2	実験方法	(99)
6 . 2 . 3	ソース点での吸込流れ場の速度特性	(101)
6 . 3	実験結果および考察	(102)
6 . 3 . 1	吸込気流の流線	(102)
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	(105)
6 . 3 . 3	放出速度の違いによる高濃度領域の変化	(110)
6 . 3 . 4	捕捉性能曲線	(114)
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	(116)
6 . 4	第 6 章のまとめ	(121)
第 7 章	総括	(123)
謝 辞		(130)
参 考 文 献		(131)
付 録	特異点法による吸込流れ場の数値解析の基礎式	(135)

記 号

A_o	フード開口面の断面積
A_t	テイクオフ面の断面積
a_o	フード開口面の厚さ
a_t	テイクオフ面の厚さ
b_o	フード開口面の幅
b_t	テイクオフ面の幅
n	開口幅比, $= b_o / b_t$
m	開口面積比, $= A_o / A_t$
δ	フードのフレア角 (二次元, 円形, 正方形フード)
δ_1, δ_2	フードのフレア角 (長方形フード)
L	フード長さ
L_F	フランジ長さ
t	フード壁面の厚さ
x, y	フード開口中心を原点とする軸および幅方向の座標 (二次元フードの場合)
X_{b_o}	開口面基準の無次元 x 方向距離, $= x / b_o$ (二次元フードの場合)
Y_{b_o}	開口面基準の無次元 y 方向距離, $= y / b_o$ (二次元フードの場合)
X_{b_t}	テイクオフ面基準の無次元 x 方向距離, $= x / b_t$ (二次元フードの場合)
Y_{b_t}	テイクオフ面基準の無次元 y 方向距離, $= y / b_t$ (二次元フードの場合)

x, y, z	フード開口中心を原点とする軸，厚さおよび幅方向の座標（三次元フードの場合）
X_o	開口面基準の無次元 x 方向距離， $= x / \sqrt{A_o}$ （三次元フードの場合）
Y_o	開口面基準の無次元 y 方向距離， $= y / \sqrt{A_o}$ （三次元フードの場合）
Z_o	開口面基準の無次元 z 方向距離， $= z / \sqrt{A_o}$ （三次元フードの場合）
X_t	テイクオフ面基準の無次元 x 方向距離， $= x / \sqrt{A_t}$ （三次元フードの場合）
Y_t	テイクオフ面基準の無次元 y 方向距離， $= y / \sqrt{A_t}$ （三次元フードの場合）
Y_w	テイクオフ面基準の無次元 y 方向最大飛散幅
X_1	テイクオフ面基準の無次元 x 方向飛散長さ
X_w	テイクオフ面基準の無次元 x 方向最大飛散幅
Y_1	テイクオフ面基準の無次元 y 方向飛散長さ
X_p	テイクオフ面基準のポイントソース点までの無次元 x 方向長さ
$C R X$	x 方向捕捉率， $= (X_p - X_w) / X_p \times 100$ [%]
$C R Y$	y 方向捕捉率， $= (X_p - Y_w) / X_p \times 100$ [%]
$\bar{v}_o$	フード開口の断面平均流速
$\bar{v}_t$	テイクオフの断面平均流速
$\bar{v}_c$	フード開口中心線上速度
$\bar{v}$	フード開口近傍の速度
V_o	開口面基準の無次元速度， $= \bar{v} / \bar{v}_o, \bar{v}_c / \bar{v}_o$

V_t	テイクオフ面基準の無次元速度, $= \bar{v} / \bar{v}_t, \bar{v}_c / \bar{v}_o$
$\bar{v}_o$	トレーサガス (炭酸ガス) の放出速度
p_o	テイクオフダクトおよびフードの壁面静圧 (ゲージ圧)
ρ	空気密度
C_p	圧力係数, $= p_o / (\rho \bar{v}_t^2 / 2)$
C_{p_o}	フード開口面での仮想圧力係数
ζ_F	フードの損失係数, $= - (C_{p_o} + 1)$
V	主流の速度
v	はく離領域の混合域内の速度
y	はく離領域の混合域内の距離
δ	境界層の厚さ
δ^*	境界層の排除厚さ

添 字

o	フード開口面での値あるいはその基準面での無次元値
t	テイクオフ面での値あるいはその基準面での無次元値
2	二次元フード
$2L$	二次元ロングフード
$2F$	フランジ付き二次元フード
c	円形フード
s	正方形フード
R	長方形フード
$R1$	片側面フレアー形長方形フード
$R2$	両側面フレアー形長方形フード

第1章 序 論

1. 1 本研究の背景と目的

局所排気（局排）装置は作業工程で発生した有害な汚染物質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。有機溶剤，特定化学物質，鉛などを使用する工場内や粉塵，ガス，ヒューム，蒸気など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一定の環境基準を満たすことが労働安全衛生法の規則，すなわち有機溶剤中毒予防規則，鉛中毒予防規則，四アルキル鉛中毒予防規則，特定化学物質等障害予防規則，粉じん障害予防規則などにより義務付けられ，局所排気装置の設置要件が規定されている。これらの規則においては局所排気装置の性能要件として，発散源の周囲の有害な汚染物質の濃度をある値以下に定める抑制濃度を規定し，抑制濃度が規定できない汚染物質に対しては捕捉点での風速，すなわち捕捉風速（制御風速とも呼ばれる）を定めている。局所排気装置の性能要件としての抑制濃度は理想的な定め方であるが，この規定は局所排気装置を設置し，稼働させた後に性能要件を満足するか否かの結果論であり，抑制濃度を満たす局所排気装置でも捕捉点での捕捉風速が設計の基準となっている。捕捉点とは作業者と汚染源の間の点で，作業側への汚染物質の許容飛散点と考えることができるが，この点は単なる設計上の架空の基準点であり，非常に曖昧な表現である（図1・1）。

局所排気装置に用いられるフードは囲い式フード，ブース式フード，外付け式フード，レシーバー式フード，プッシュ・プル式フー

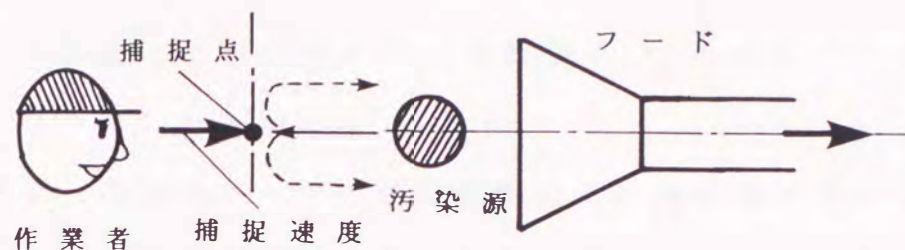


図 1 ・ 1 捕捉点および捕捉風速（外付け式フードの場合）⁽²⁾

ドなどが有害な汚染物質の発散形態や作業形態などにより適宜用いられている⁽¹⁾。これらのフードは汚染物質の捕捉（吸込）性能を向上させようとするれば囲い式あるいはブース式のフード形式が良いが，特定の作業条件を除いて大部分の作業環境では，フードそれ自身の存在が作業工程の障害になり，遠方から汚染物質を吸引する外付け式フードの形式が多く採用されている。外付け式フードの形式はめっき槽や作業台の端に設置される細長い開口を有するスロット形，汚染源の傍らに設置されるすだれまたはよろい戸状の開口を有するルーバ形，作業台の甲板を格子状の開口にしたグリッド形およびごく一般に用いられている円形あるいは矩形の開口を有する自立形に分類される⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究の対象である自立形外付け式フードはさらにフード側壁面の形状によりプレーン形およびフレアー形に，フード開口面端のフランジの有無によりフランジ無しフードおよびフランジ付きフードに分けられる。

自立形外付け式フードを用いる局所排気装置においても前述の労働安全衛生法の規則によれば，汚染物質の人体への影響の程度に応じて捕捉点での捕捉風速（フード開口中心線上の捕捉点での速度）の

規定を満足すればよく、ACGIH⁽³⁾が推奨しているDallavalleのフード開口中心線上速度分布に対する経験式⁽⁴⁾が通常のフード設計の基礎となっている。

自立形外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場はフード開口面からその直径ほどの距離離れた位置では開口中心線上速度が開口面の断面平均速度の1/10程度にまで急速に減衰するという宿命的な特性を有しており⁽⁴⁾、そのため捕捉点での捕捉速度を保証するには過大な吸込風量で装置を運転しなければならない。

自立形外付け式フードを用いる局所排気装置では捕捉点での捕捉風速の確保も大切であるが、作業環境に応じてフードの上流の吸込領域をある空間領域に集中させ、その領域内の風速を増加させるとともにフードの圧力損失をできるだけ小さくして省エネルギー化を図ることが重要である。これらの観点から捕捉性能のよい局所排気装置を設計するためには、まず最適なフード形状により最も合目的な速度場を得ることが大切であり、そのためにはフード形状の違いがフード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と開口近傍の等速度線分布）に及ぼす影響をより詳細に明らかにする必要がある。しかしながら、これらのことはあまり考慮されておらず、過去の経験によって case by case でフードの設計がなされているのが現状である⁽¹⁾。

さらに、前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。実際の作業行程での既設のフードがクロスドラフトの影響のために著しい捕捉性能の低下をきたしている状況が時々見受けられる。

クロスドラフトが混在する状況下ではフード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、トレーサガス法を用いてフードの捕捉効率を求めて、これによりフードの捕捉性能の評価を行う研究がなされているが^(34~40)、これらの研究で用いられたトレーサガス法の手法を実際の現場で採用するにはトレーサガスのサンプリング、ガス濃度分析などに問題があり、あまり実用的ではない。現場で簡便に行えるトレーサガス法によるフードの捕捉性能評価法の確立が急務である。

このような背景のもとに、次の二つの主要な目的を定めて本研究を行った。

(1) クロスドラフトが存在しない環境下での、自立形外付け式フードのフード形状の違いが開口近傍の吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響の調査(実験および数値計算によるアプローチ)と速度特性からのフードの捕捉性能の考察。

(2) 汚染源が作り出すクロスドラフトに焦点を絞った、フードの捕捉性能評価が可能な簡易トレーサガス法およびフードの捕捉性能評価手法の提案と、フードの捕捉性能評価法としての本システムの実用性の検討。

なお、自立形の外付け式フードは慣例的に単に外付け式フードと呼ばれているので、本論文においても外付け式フードと略記する。

1. 2 開口近傍の吸込流れ場の速度特性に関する従来の研究

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分布）に関する最初の系統的な研究としては1932年に出されたDallavalleらの実験的研究⁽⁴⁾がある。Dallavalleらは5種類の円形開口，4種類の正方形開口および縦横比0.75，0.667，0.500，0.333の18種類の長方形開口の総計27種類のフランジ無し外付け式フードの開口中心線上速度分布をModified Pitot-static tubeを用いて測定し，開口面基準でデータを整理して，開口面の縦横比のみの関数で表現できる経験式を提案し，そして，その経験式を簡便化したフード形状には無関係の1本の曲線で表される経験式も提案した。さらに，3つの代表的な開口形式のフードの開口近傍の吸込流れ場の速度を測定し，フード開口面基準で表した等速度線分布図を示した。それらは開口の縦横比によって異なった分布線図を示すが，フード形状（開口面積比，フレア角など）の違いによっては重要な特性の相違を示さず，吸込流れ場がフード開口面の形状に対してほぼ相似と見なせることを示している。

さらに，これらの速度特性はレイノルズ数には依存しないことも示している。

Dallavalleはフランジがフードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性に及ぼす効果も研究し⁽⁵⁾，フランジを取付けた場合（フランジの効果が十分に期待できる幅の場合）はフランジの無い場合と比較して等速度面の面積が約25%ほど小さくなることを考慮して，フランジ無しフードの開口中心線上速度分布を修正した経験式を提案し

た。さらに、それらのフードの開口近傍の等速度線分布図も示している。

Silvermanは1942年にフード開口の縦横比が0.067から0.025の6種類のフランジ無しスロット形フードと開口幅の3倍のフランジを持つ開口の縦横比が0.068から0.100の10種類のフランジ付きスロット形フードの開口中心線上速度をHeated-thermometer anemometerを用いて測定し、スロット開口の縦横比のみの関数で表されるスロット開口面基準で整理した経験式を提案し、さらに、その経験式を簡略化した経験式も提案した⁽⁶⁾。Silvermanの研究においてもスロットの形状の違いが開口中心線上速度分布に及ぼす影響およびフランジ幅の大きさが開口中心線上速度分布に及ぼす影響は考察されていない。

その後、外付け式フードの開口中心線上速度分布の特性に関する研究は多数の研究者が種々の測定装置を用いて行っており、フード開口中心線上速度分布に対する経験式が数多く提案されている^(7~11)。それらの研究の内の代表的なものを以下に列記する。

円形フードのフード開口中心線上速度分布に関しては、Pruzner⁽¹²⁾、Silverman⁽¹³⁾、Koop⁽¹⁴⁾、Brand et al.⁽¹⁵⁾、Hemeon⁽¹⁶⁾、Drkal⁽¹⁷⁾、Engels and Willert⁽¹⁸⁾、Garrison and Byers⁽¹⁹⁾、Flynn and Ellenbecker⁽²⁰⁾らの研究がある。

矩形フードのフード開口中心線上速度分布に関しては、Pruzner⁽¹²⁾、Koop⁽¹⁴⁾、Brand et al.⁽¹⁵⁾、Hemeon⁽¹⁶⁾、Tyaglo and Shepelev⁽²¹⁾、Drkal⁽²²⁾、Engels and Willert⁽¹⁸⁾、Fletcher⁽²³⁾、Garrison and Byers⁽²⁴⁾、Pavlov and Pocokhine⁽²⁵⁾、Kuzmina and Tyaglo⁽²⁶⁾らの研究がある。

外付け式フードの開口近傍の等速度線の特性に関する研究はあまり行われておらず，円形フードに対して，Koop⁽¹⁴⁾らの研究が，矩形フードに対して，Pruzner⁽¹²⁾，Fletcher and Johnson⁽²⁷⁾らの若干の研究があるのみである。

上述の研究においては特定の形状のフードに対する研究が大部分であり，フード形状の違いがフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を系統的に研究し，それらを詳細に議論した研究は見当たらない。

自立形外付け式フードの設計の基礎式としては，今日においても，円形および矩形フードに対してはDallavalleの経験式⁽⁴⁾が，外付け式スロット形フード（本研究の対象ではないが）に対してはSilvermanの経験式⁽⁶⁾が一般に信頼性が高く，我が国でも両者の経験式を外付け式フードの設計の基礎式として用いている。

前述の研究の他に，フード開口近傍の吸込流れ場をポテンシャル理論を用いて理論解析を行った研究⁽²⁸⁾や二次元あるいは三次元ポテンシャル流れの仮定のもとで数値解析を行った研究^(29~33)があるが，これらの解析モデルは単純でしかも特殊なフード形状であり，通常用いられているフード形状に対してはほとんど適用できず，また解析結果も信頼性に乏しく，あまり実用的な研究ではない。

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が，このような領域の吸込流れ場を外乱を排して，あるいはクロスドラフトを付加して速度を測定し，精密なデータを得ることは極めて難しい。数値計算により形状の異なる種々のフードの吸込流れ場の速度を解析し，実験では得られにくいフードの速度特性を把握する方法が有効である。しか

しながら、この分野の実用的な研究はほとんど行われていないのが現状である。

1. 3 フードの捕捉効率に関する従来の研究

外付け式フードの捕捉性能の評価基準としては、現在のところ、フード開口中心線上速度が用いられているのみである。1. 2 節で述べたフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性に関する研究はクロスドラフトが混在しない吸込流れ場での研究である。

近年、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。このようなクロスドラフトが混在する吸込流れ場の速度特性の測定は困難さを伴うので、これらの環境下でフードの開口近傍の吸込流れ場の速度を測定し、速度特性を考察した研究は皆無である。

さらに、発ガン物質の吸引などが社会問題になり、労働安全衛生法の基準の見直しが起こってきた。従来の外付け式フードの捕捉性能評価の基準であった捕捉点での捕捉速度の確保に代わる新しい捕捉性能評価基準として捕捉効率の概念が1980年代初めにEllenbecker⁽³⁴⁾やHampl⁽³⁵⁾らにより導入され、その後、多数の研究者によって捕捉効率によるフードの捕捉性能評価法が提案されている^(34~40)。

捕捉効率は、作業工程で生じた全汚染物質量と局所排気装置で捕捉した汚染物質量の比で定義される。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つの汚染物質量を測定し、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。トレーサガス法を用いて捕捉効率を求め、フードの捕捉性能を評価した代表的な研究を以下に述べる。

Ellenbeckerらはトレーサガスとしてオイルミストジェネレーターで発生させたエアゾルをフードの吸込流れ場に注入し，フード下流の吸込ダクトにサンプリング点を設け，フォトメーターでエアゾルの濃度を測定し，全放出トレーサ量と捕捉トレーサ量を求めて捕捉効率を計算し，フードの捕捉性能の評価を行っている⁽³⁴⁾。

Hamplらはトレーサガスとして六フッ化硫黄 (SF_6) を用い，フード下流の吸込ダクト内でサンプリングプローブをトラバースさせて Air/SF_6 の混合気流のサンプルを取出し，ガスクロマトグラフを使用してその濃度分析を行い，全放出トレーサ量と捕捉トレーサ量を求めて捕捉効率を計算し，フードの捕捉性能の評価を行っている。さらに，フード下流の吸込ダクト内のサンプリング点についても詳細な検討を行っている^(35~36)。

Flynnらはクロスドラフトがフードの吸込流れ場に及ぼす影響を調べるために理論モデルを作り，計算とトレーサガス法（トレーサガス：六フッ化硫黄，濃度分析器：ガスクロマトグラフ）の両方で捕捉効率を求め，フードの捕捉性能の評価を行っている⁽³⁸⁾。

Watersらはクロスドラフトに対するブースの性能に関してトレーサガス法により風洞モデル実験を行っている。トレーサガスとしてメタンガスをブース内で放出し，風洞断面内に設定した各格子点でのメタンガス濃度をフレイムイオン検出器で測定し，全放出トレーサ量と漏れトレーサ量を測定し，捕捉効率を求めている⁽³⁹⁾。

これらの研究で使用されたトレーサガス法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実際に現場で行うには問題がある。トレーサガス法による簡便なフードの捕捉性能評価法の確立が

必要となる。

1. 4 本論文の構成

本論文は以上述べた研究の背景と目的に基づいて行った局所排気用外付け式フードの捕捉性能に関する研究結果を全7章にまとめたものである。以下、本論文の構成と各章の内容について記述する。

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によるフードの捕捉性能評価に関する研究の歴史的過程を展望した。また、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、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、本論文の背景および目的を明示した。

第2章では、二次元流れ場において自立形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、フードの開口幅比、フレア角およびフランジなどのフード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を開口面とテイクオフ面の両面を基準として整理した線図より調べ、それらの速度特性からフードの捕捉性能を考察した。さらに、フード損失についても調べた。

第3章では、三次元流れ場において自立形外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場を測定し、フードの開口断面形状、開口面積比およびフレア角など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開口面とテイクオフ面の両面を基準として整理した線

図より調べ、それらの速度特性からフードの捕捉性能を考察した。さらに、フード損失についても調べた。

第4章では、フードの開口近傍の吸込流れ場の速度は低速であり、第2章と第3章で行った実験では測定精度と測定点に限界があったので実験結果を数値計算で補足した。ここでは二次元および円形（軸対称）フードの開口近傍のポテンシャル流れを特異点法により解析した。すなわち、フードの壁面ならびに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で連続かつ滑らかに配置する特異点法により、フード開口近傍の吸込流れ場の速度を計算し、フード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を調べた。さらに、解析結果と実験結果との比較を行ない、本解析方法の有効性も検討した。

第5章では、炭酸ガスをトレーサガスとしてフード開口近傍の吸込流れ場に注入し、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現場向きの簡易トレーサガス法を提案し、フードの捕捉性能の評価を行うための捕捉性能評価パラメータおよび捕捉率を定義した。さらに、簡易トレーサガス法によりフード開口面外への汚染物質の漏れを定義し、本手法を適用すれば漏れの調査も可能であることを示した。

第6章では、第5章で提案した簡易トレーサガス法を3種類の円形外付け式フードの吸込流れ場で適用し、汚染源自身を作り出すクロスドラフトに焦点を絞ったフードの捕捉性能評価を、第3章で考察したクロスドラフトが存在しない場合の速度特性から得た捕捉性能と対比させて行った。さらに、フード開口面外への漏れの調査も

行い，クロスドラフトに対するフード形状の総合的な性能評価法としての本捕捉性能評価システムの実用性を検討した。

第7章は，以上の研究の総括である。

なお，付録には，スプラインフィット法を用いた特異点法によるフード開口近傍の吸込流れ場の数値解析の基礎式を示した。

第2章 二次元フード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響

2.1 緒言

めっき洗浄や噴霧塗装などの作業工程では汚染物質を除去する手段として大形の二次元形状の自立形外付け式フード（フード開口面の縦横比が0.25以上の矩形フード）がよく用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、二次元形状の外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性に関する系統的な研究はまったく見当たらない。簡単なめっきや塗装などのテーブル作業に用いられるスロット形フード（スロット開口面の縦横比が0.025～0.100の範囲の小形の長方形フード）に対してはSilvermanの系統的な研究があるが⁽³⁾、二次元フード開口とスロット開口の近傍の吸込流れ場は異なる速度特性を有していると考えられる。

Silvermanは外付け式スロット形フードの開口中心線上速度分布に関する系統的な研究（開口近傍の等速度線分布に関する研究は行っていない）を行い、開口中心線上速度分布を与える経験式を提案した⁽³⁾。Silvermanの提案した経験式はスロット形フードのみでなく、異なる速度特性を有する二次元フードの設計においても基礎式として用いられており、フードの捕捉性能評価の基準となっている。Silvermanの研究ではスロット開口の形状（縦横比とフランジの有無）の違いが開口中心線上速度分布に及ぼす影響の考察は試みているが、スロット形状の違いが開口中心線上速度分布と開口近傍の等速度線分布に及ぼす影響の考察は行われていない。

フードの使用目的および使用状況からみて、スロット形フードの

場合はフード形状の違いによる影響の考察はあまり重要ではないが、二次元形状の外付け式フードにおいてはこれらの考察が捕捉性能の評価に重要な意味を持つと考えられる。

外付け式フードを用いる局所排気装置では、フードの上流の吸込領域をある空間領域に集中させ、かつその領域内の速度を増加させるとともにフードの圧力損失をできるだけ小さくして省エネルギー化を図ることが極めて重要である。この観点から捕捉性能のよい局所排気装置を設計するためには、まず最適なフード形状により最も合目的な流れ場を得ることが大切であり、そのためにはフード形状の違いが吸込流れ場の速度特性（フード開口中心線上速度分布と開口近傍の等速度線分布）に及ぼす影響をより詳細に明らかにする必要がある。

本章では、二次元流れ場において自立形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、フードの開口幅比、フレア角およびフランジなどのフード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響を調べ、速度特性からフードの捕捉性能を考察した⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。さらに、吸込フードの損失に関する資料が乏しいので⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾、フード損失を測定し、フード形状の違いがフードの損失係数に及ぼす影響についても考察した。

なお、本章で得られたデータは近似的にはスロット形フードの吸込流れ場の速度特性の基礎データとして用いることもできる。

2.2 実験装置および実験方法

2.2.1 実験装置

実験装置の概要を図2・1に示す。フード開口近傍の空気は排風装置⑧、⑨、⑩により供試フード②、テイクオフダクト③および吸込ダクト④をへて、吐出ダクト⑪から室外に排気される。フード開口近傍の吸込流れ場は非常に低速であり、外乱の影響を受けやすいので、測定場へのフード形状以外の障害物の影響を排除するために十分な広さの三次元空間（約4×4×4m）を設け、さらに測定場の周囲および排風機の吐出管出口にネットを張ったセッティングチャンバー①、⑫を設けた。

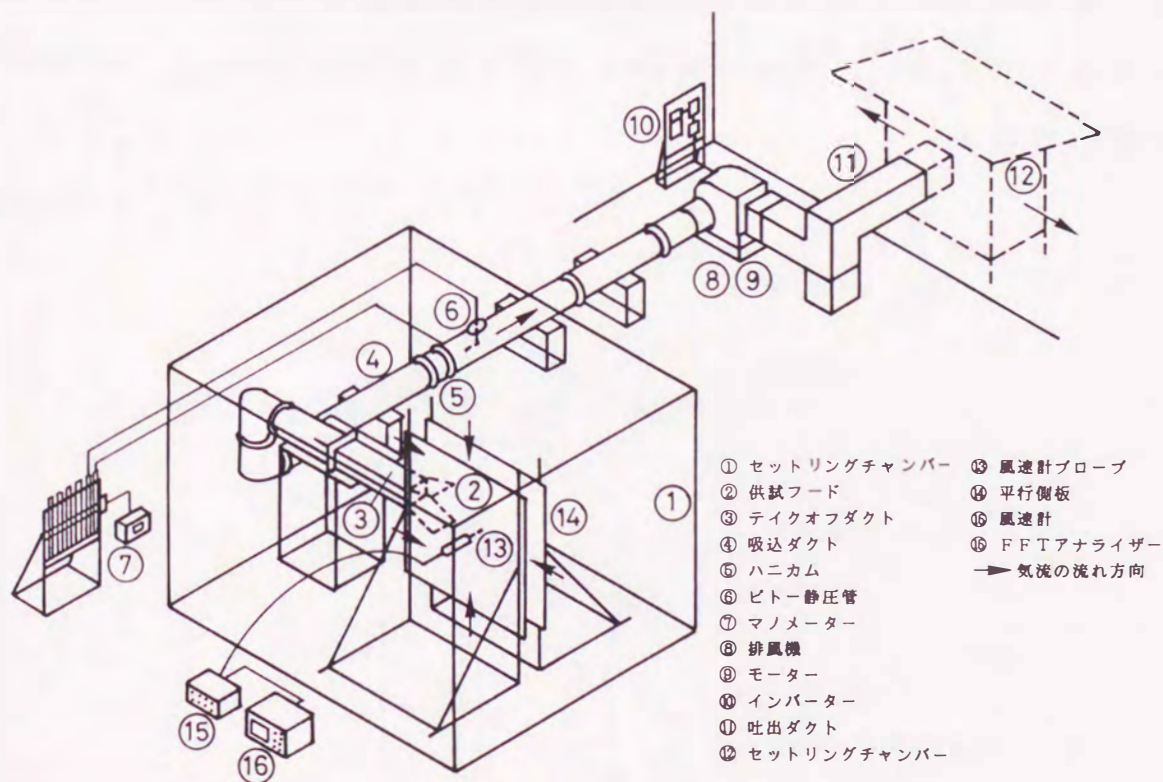


図2・1 実験装置の概要

供試フード②は400mmの間隔で設置した2枚の平行側板④(2×2m)間に2枚の板をはさんで二次元形状に構成したもので、これを断面200×400mm、長さ1225mmのテイクオフダクト③に接続した。平行側板の周囲にはベルマウスを設けるなどして流れの二次元性の実現には細心の注意を払った。

2.2.2 供試フード

図2・2および図2・3に二次元形状のフードの座標系および供試フードの形状を、表2・1に供試フードの仕様ならびに実験条件を示す。供試フードは管軸方向の長さを一定($L=430\text{mm}$)とし、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 と、 n が3で L が2倍(C_2 とはフレア角 δ が異なる)の C_{2L} の6つのフレア形フード(厳密には A_2 はプレーン形フードである)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10種類を用いた。

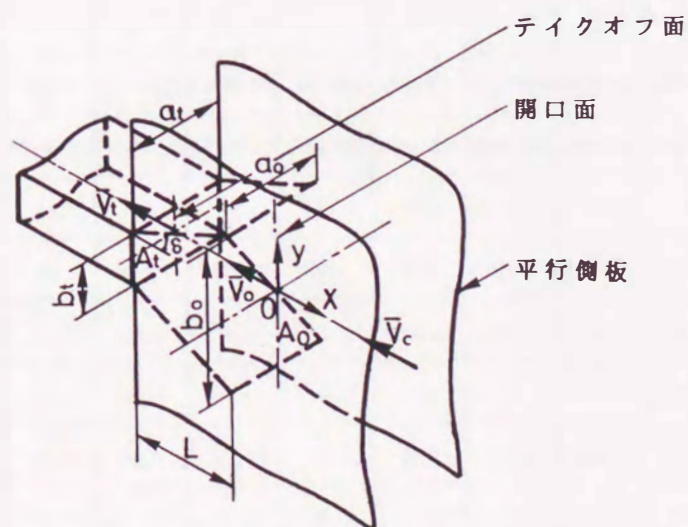


図2・2 供試フードの座標系

なお，平行側板，供試フードおよびテイクオフダクトは視察が可能な透明アクリル板で製作し，フレアー形フードの開口部は同一平面になるように加工した。

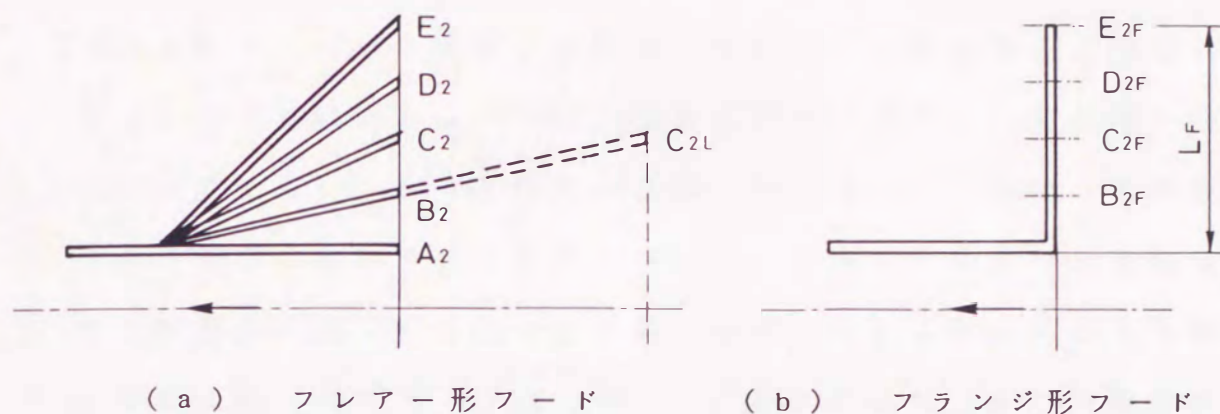


図 2・3 供試フードの形状

表 2・1 供試フードの仕様および実験条件

項目	フード 形式	二 次 元 フ ー ド									
	形 式	プレーン 形	フ レ ア ー 形					フ ラ ン ジ 形			
	記 号	A ₂	B ₂	C ₂	C _{2L}	D ₂	E ₂	B _{2F}	C _{2F}	D _{2F}	E _{2F}
開口幅比 (b _o /b _i)	n	1	2	3	3	4	5	2°	3°	4°	5°
開口面積比 (A _o /A _i)	m	1	2	3	3	4	5	2°	3°	4°	5°
テイクオフ面の寸法	b _i ×a _i (mm)	200X400	200X400	200X400	200X400	200X400	200X400	200X400	200X400	200X400	200X400
開口面の寸法	b _o ×a _o (mm)	200X400	400X400	600X400	600X400	800X400	1000X400	400X400	600X400	800X400	1000X400
フード壁面の厚さ	t (mm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
フード長さ	L (mm)	430	430	430	860	430	430	430	430	430	430
フレアー角	δ (deg)	0	13.1	24.9	13.1	34.9	42.9	(90)	(90)	(90)	(90)
フランジ長さ	L _F (mm)	—	—	—	—	—	—	100	200	300	400
テイクオフ断面平均流速	$\bar{v}_i$ (m/s)	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
開口断面平均流速	$\bar{v}_o$ (m/s)	28.0	14.0	9.3	9.3	7.0	5.6	14.0°	9.3°	7.0°	5.6°

注*) フランジ形フードはフランジ外端の寸法を開口面として整理した。

2.2.3 実験方法

テイクオフの断面平均流速 $\bar{v}$ を一定とし（吸込ダクト④に設けたハニカム⑤の下流で各フードの吸込流量と管路中心流速との関係をピトートラバース法により求めておき，その管路中心に設置したピトー静圧管⑥のヘッドの読み⑦が一定になるように排風機の回転数を調整する），フード開口中心線に対して上下での吸込気流の対称性を確認した後，フード開口中心線上とフード開口中心線を含む垂直断面の片側半分の測定点に平行側板に設けた測定孔から直径2 mmの熱式風速計プローブ⑬（AVC-1，関西テック（株），精度 $\pm 3\%$ F.S.）を挿入して約3分間の平均流速を風速計⑮とFFTアナライザー⑯で測定し，その平均値からフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性を求めた。平行側板に設けた測定孔の座標を図2・4に示す。格子の交点が測定孔の位置で，開口近傍は測定孔を密に配置した。

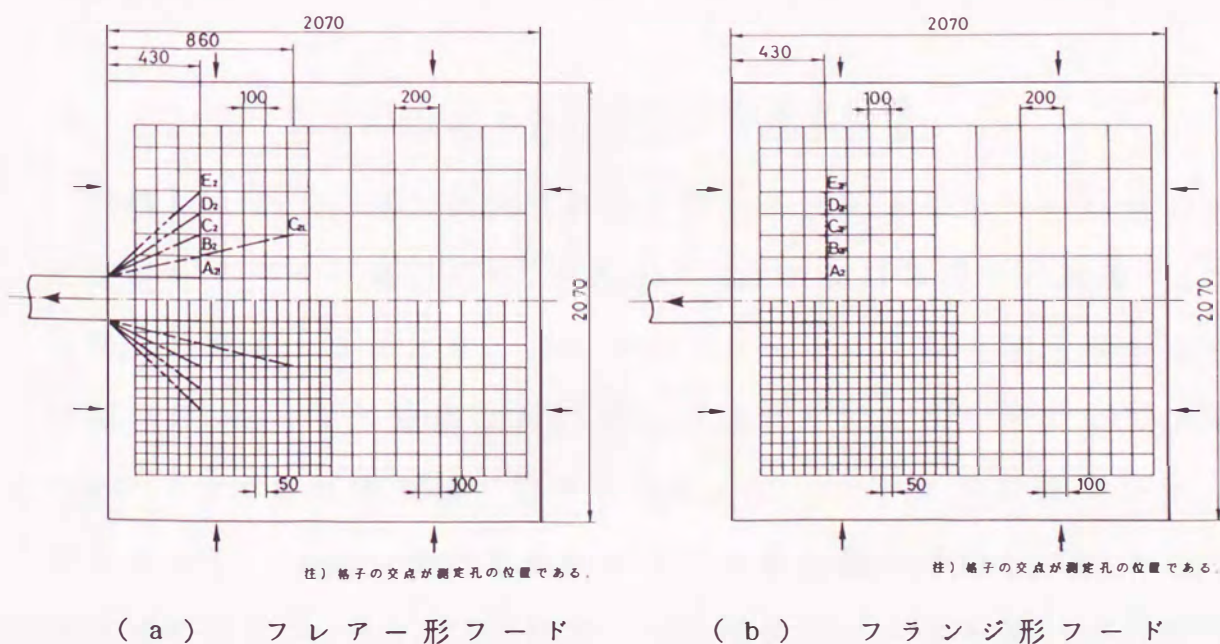


図2・4 測定孔の座標

さらに、フードの上下壁面とテイクオフダクトの4面に設けた静圧孔より壁面静圧分布を測定し、フードの損失係数を求めた。

2.3 実験結果および考察

自立形外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性についてはほとんどが開口面を基準として議論されてきた。二次元形状の外付け式フードに対する速度特性の考察はないが、スロット形フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性は開口面を基準として取扱われている^(*)。しかしながら、テイクオフ面を基準として整理した方が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明確に表現できる場合も考えられる。

本節ではフード形状の違いが吸込流れ場の速度特性、すなわち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分布に及ぼす影響を開口面とテイクオフ面の両面を基準として議論した。さらにフード形状の違いがフードの損失係数に及ぼす影響についても考察した。

2.3.1 開口中心線上速度分布に及ぼす影響

実験したすべての二次元形状の外付け式フードの開口中心線上速度分布をフードの開口幅 b_o およびフードの開口断面平均流速 $\bar{v}_o$ で整理して図2・5に示す。フランジ形フードはフランジ外端の寸法を開口幅 b_o として整理した。また、図2・5の右上方には $X_{b_o} = x/b_o > 0.7$ の領域の拡大図を示している。フード開口近くでは、フランジ形フードの場合は流れが開口の中央部に集中して吸込まれるために速度 $V_o = \bar{v}_o/\bar{v}$ はフレアー形フードよりも速いが、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示すことがわかる。すなわち，フード開口近くの吸込流れ場はフード形状に強く依存するが，遠方ではフード（またはフランジ）の外端がフード開口後方からの気流の流れ込みを妨げることにのみ意味を持つのでフード形状には無関係となることを示している。

さらに，図 2・5 には外付け式スロット形フードの開口中心線上速度分布に対する Silverman の経験式⁽⁶⁾，

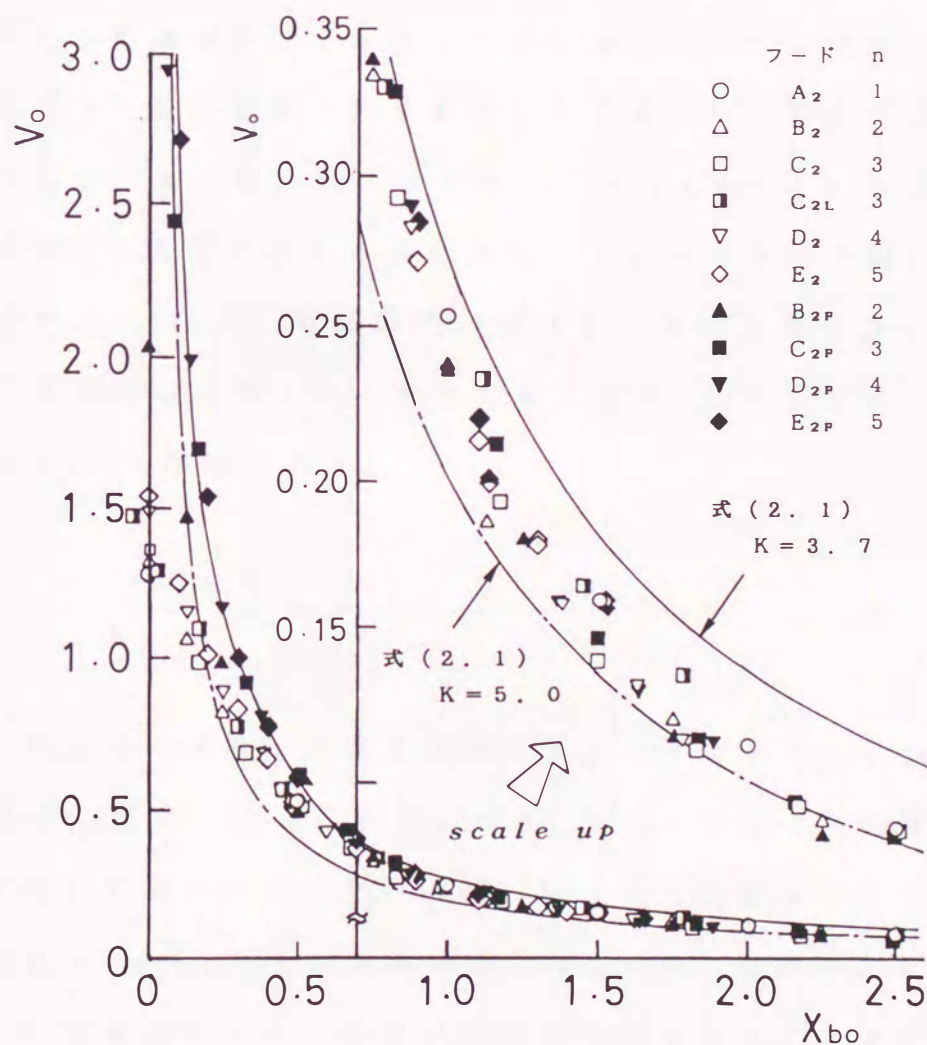


図 2・5 フード形状の違いによる開口中心線上速度分布
(開口面基準)

$$\frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_0} = \frac{b_0}{K \cdot x} \quad (2.1)$$

(ここで、 K は開口面の縦横比による定数で図には $K=3.7$ と 5.0 の線を示す)も示しており、これと比較すると $X_{b_0}=0.7$ 付近では $K=3.7$ の線に近い値であるが、遠方になるほど徐々に $K=5.0$ の線に近付くように変化することがわかる。

従来、フード開口中心線上速度分布は上述のようにほとんど開口面を基準として議論されてきた。しかし開口中心線上速度分布の変化はテイクオフ面を基準として整理した方がフード形状(開口幅比 n あるいはフレア角 δ およびフランジ長さ L_F など)の違いによる影響を明確に表現することができる。すなわちフード開口中心線上速度分布がSilvermanの経験式、式(2.1)に従うとして、これをテイクオフ面基準(テイクオフ面の幅 b_t とテイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$)で整理すれば、

$$\frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_t} = \frac{b_t}{K \cdot x} \quad (2.2)$$

となり、やはり一本の双曲線で表現できるはずである。しかしながら実験値は、図2・6(右上方には $X_{b_t} = x/b_t > 2.5$ の領域の拡大図を示す)に示すようにフード開口近くでは当然 n の小さなフードほど速度 $V_t = \bar{v}_c/\bar{v}_t$ が大きい、 $X_{b_t} > 1.5$ では逆に n の大きな(従って大きな)フードの方が速度が大きくなることがわかる。このことは図2・5において遠方ほどデータが式(2.1)の K の大きい値の側へ移行していたことによるもので、速度差は $X_{b_t} \approx 2$.

5 付近で 50 % にも達し，二次元外付け式フードの捕捉性能としては明らかな差を示している。このことは n が大きなフードほど開口後方からの気流の流れ込みを防ぎ，前方に流れを集中する効果が遠方まで及ぶことから当然といえよう。

フランジ形フードでは流れが小さな開口（ A_2 の開口）に集中するので開口面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。従って開口中心線上速度分布を見る限りでは，

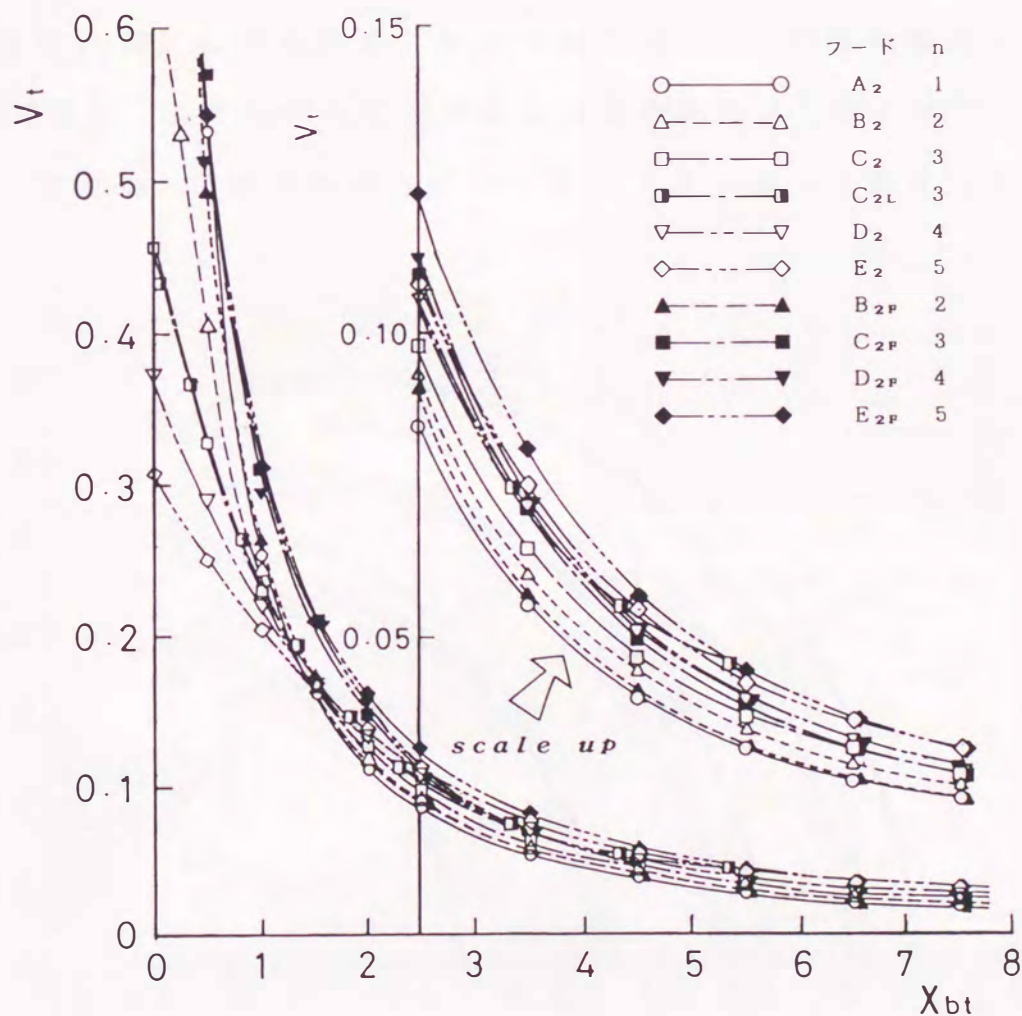


図 2・6 フード形状の違いによる開口中心線上速度分布
(テイクオフ面基準)

開口中心線近くの狭い領域で汚染物質を捕捉する場合にはフレアー形フードよりなるべくフランジ長さ L_F の大きいフランジ形フードが適していると言える。また、図2・6において同一の n で δ の異なる（従って L が異なる） C_2 と C_{2L} では δ が小さい方が開口中心線上速度はやや大きくなる。

2.3.2 開口近傍の吸込流れ場の等速度線分布に及ぼす影響

フード開口近傍の吸込流れ場の等速度線の形状は、開口面の形状（縦横比）が同じであれば、フード開口幅 b_o と開口の断面平均流速 $\bar{v}_o$ で無次元化すればほぼ相似になると考えられているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、厳密には図2・7に示すようにフレアー角 δ によって異なる。すな

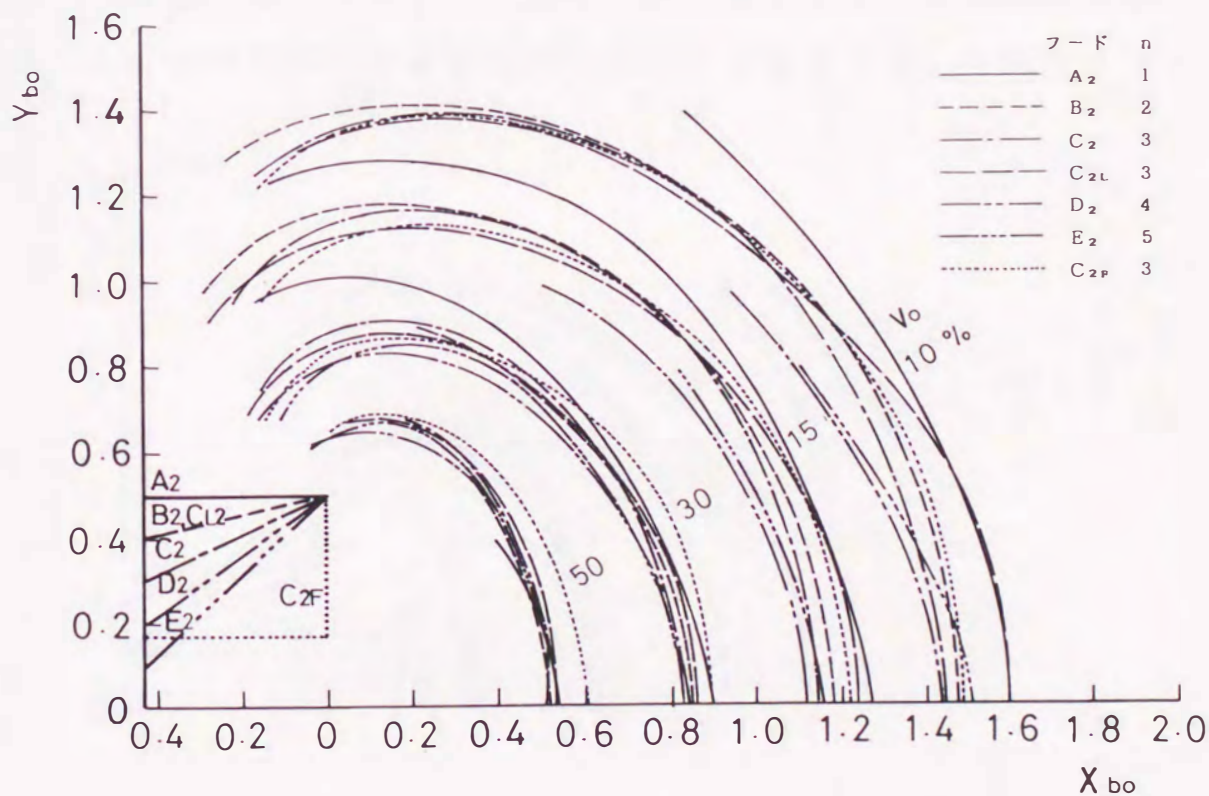


図2・7 フード形状の違いによる開口近傍の等速度線分布
(開口面基準)

わち δ の小さい方が等速度線が側方に広がり，吸込流れ場の広がりが大きくなり，逆に δ の大きい方が速度の大きい領域が前面に集中する特性のあることがわかる。なお，図2・7で遠方ほどフードの違いによる等速度線の位置の差が大きいのは速度勾配が小さいからである。このような等速度線の形の違いはフレアーの形状とフレアーの内面に生じるはく離形状の両方が深く関係していると考えられる。

フード開口近傍の等速度線分布をテイクオフ面基準で整理して図2・8に示す。図2・8の等速度線は吸込流れ場の速度の大きさが把握しやすいように絶対速度 $\bar{v}$ で整理しているが，無次元速度 V に換算すれば，1，1.5，3，6および10m/sは3.6，5.4，10.7，21.4および35.7%に相当する。開口幅比 n の大きなフードの方が開口面近くの等速度線はフラットであり，開口面より後方では速度は急に遅くなって後ろからの気流の回り込みが少なくなる。そのためフー

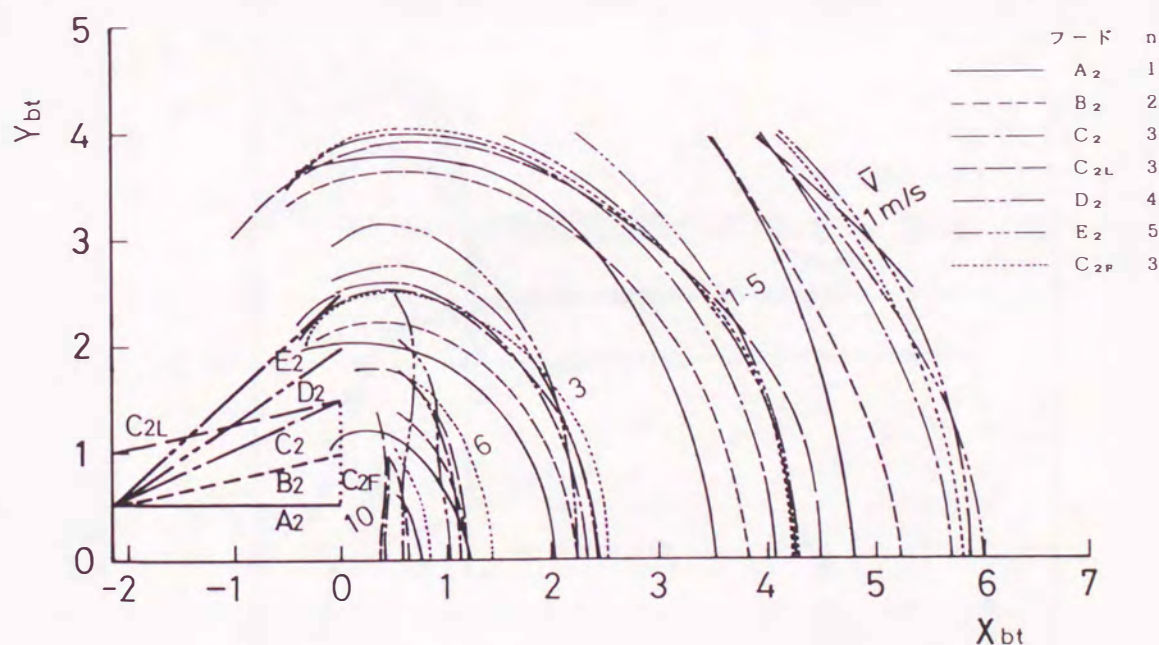


図2・8 フード形状の違いによる開口近傍の等速度分布
(テイクオフ面基準)

ド開口面の遠方では n の大きいフードの速度が速くなっている。

2.3.3 フード損失に及ぼす影響

フードおよびテイクオフダクトの壁面静圧をテイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$ に対応する動圧で無次元化したフード形状の違いによる圧力係数 C_p の軸方向分布を図 2・9 に，フードの損失係数 ζ_F の変化を図 2・10 に示す。フランジのないフレアー角 0° の A_2 フードではフード開口入口部で大きなはく離が発生し，流れが混合するのに約 $3 \cdot b_t$ の距離を要し，圧力損失は他のフードに比べて最も大きい。フランジ形の C_{2F} フードでは入口部の圧力低下は A_2 より小さく，混合も早い。フレアー形フードでは開口入口部で生じたはく離はフレアー内の増速により再付着する。また，テイクオフ面の角で

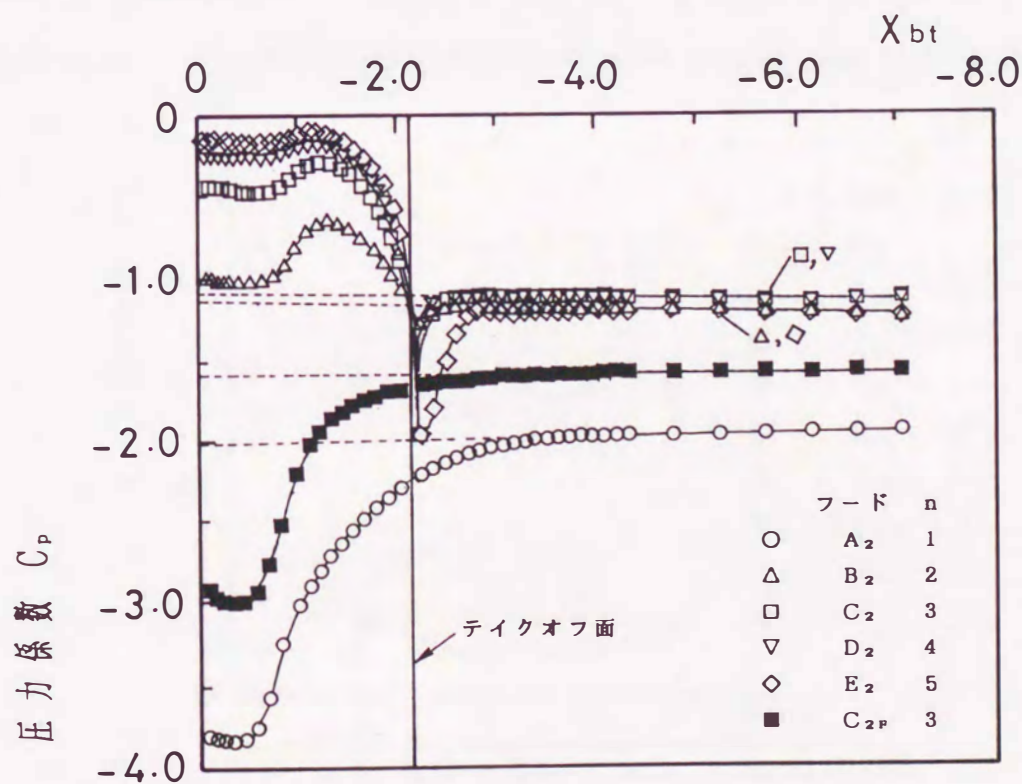


図 2・9 圧力係数 C_p の軸方向分布線図

再び局所的に増速した後に小さなはく離を生じるが、 A_2 や C_{2F} の入口はく離に比べてテイクオフ面でのはく離は小さい。

二次元外付け式フードのフード損失はフードを含む吸込管の全圧損失からフードを含んだダクト長さの摩擦損失分を差引いて求めた。すなわち、ダクト内で直線分布する静圧の線をフード開口面 ($X_{b,t} = 0$) まで延長した点の値をフード開口面での仮想圧力係数 $C_{p,0}$ とし、フードの損失係数 ζ_F を次式で定義した。

$$\zeta_F = -(C_{p,0} + 1) \quad (2.3)$$

フードの損失 (図 2・10) は図 2・9 の静圧分布からも明らかのように A_2 フードが最も大きく損失係数 $\zeta_F \approx 0.95$ で、フランジを設けた場合は $\zeta_F \approx 0.6$ に、フレアー形の場合は $\zeta_F < 0.15$ となることがわかる。特にフレアー形では $\delta \approx 25^\circ$ または $n \approx 3$ 近傍で ζ_F が最小値を示す。一方、フランジ形でも $n \approx 3$ で最小値となることが

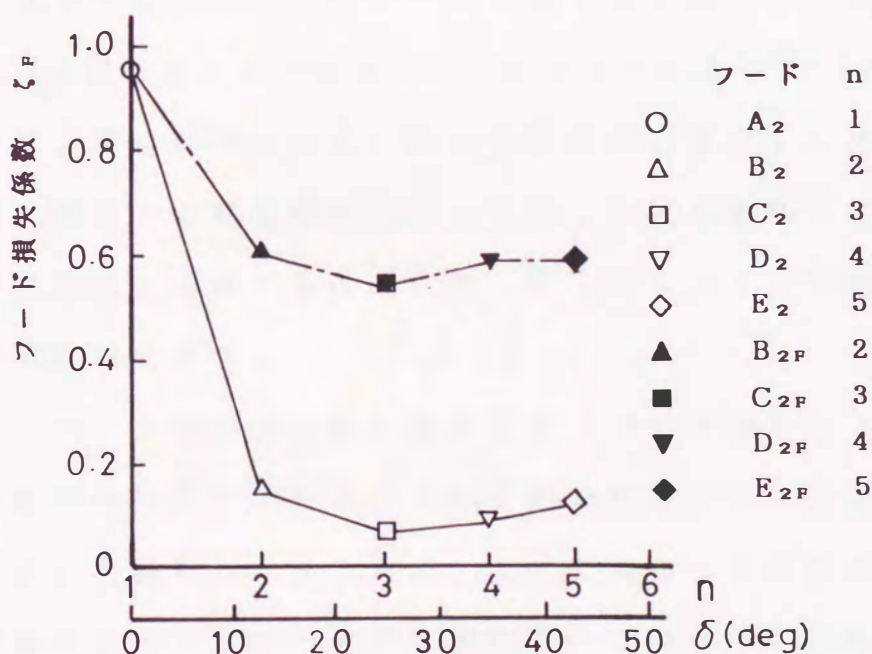


図 2・10 フード形状の違いによるフード損失係数の変化

わかる。フランジ形の場合には n が大きくなっても δ は変化しないので ($\delta = 90^\circ$) , ξ_F の変化は小さいが, フレアー形では n が大きくなると共に δ も変化して ξ_F は大きくなる傾向がある。従って, 2. 3. 1 節で述べたように吸込流れ場の速度特性の観点からは n の大きなフランジ形が好ましいが, フード損失を考慮するとある程度角度を設けたフレアー形とするのがよいと考えられる。

2. 4 第2章のまとめ

形状の異なる10種類の自立形二次元外付け式フードを用いて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, 速度特性からフードの捕捉性能を評価した。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。その結果, 以下のことが明らかとなった。

(1) フランジ形フードもフランジ外端を開口面と考えて整理すれば, 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 三次元フード形状が吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響

3.1 緒言

特定の作業条件を除いて溶解，溶接，粉碎などの多くの作業行程では自立形の外付け式円形および矩形フードがよく用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。矩形フードとはフード開口面の縦横比が0.25以上のフードで，テーブル作業などで用いられる縦横比が0.25以下のスロット形フードとは使用目的が異なり，区別されて取扱われている。

外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性については，Dallavalle⁽⁴⁾⁽⁵⁾，Silverman⁽¹³⁾，Garrison⁽¹⁹⁾⁽²⁴⁾，Fletcher⁽²³⁾らがフード開口中心線上速度分布を与える経験式を提案し，またDallavalle⁽⁴⁾⁽⁵⁾，Fletcher⁽²⁷⁾らはフード開口近傍の吸込流れ場の等速度線分布図を示している。これらの研究のうちDallavalleの研究が最も系統的でかつ信頼性があり，Dallavalleの提案したフード開口中心線上速度分布を与える経験式と，開口近傍の速度場（等速度線分布）は開口面に対してほぼ相似と見なせることを示している吸込流れの相似則が外付け式フードの設計の基礎として用いられており，フードの捕捉性能評価の基準となっている。しかしながら，Dallavalleの研究ではフード開口の形状（縦横比とフランジの有無）の違いがフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性に及ぼす影響についての議論は試みられているが，フード形状の違いが速度特性に及ぼす影響についての考察はなされていない。

第2章で述べた二次元形状の外付け式フードを用いる局所排気装置と同様に三次元外付け式フードを用いる局所排気装置においても，

その上流の吸込領域をある空間領域に集中させ、かつその領域内の速度を増加させるとともにフードの圧力損失をできるだけ小さくして省エネルギー化を図ることが極めて重要である。捕捉性能のよい局所排気装置を設計するためには、まず最適なフード形状により最も合目的な速度場を得ることが大切であり、そのためにはフード形状の違いが吸込流れ場の速度特性（フード開口中心線上速度分布と開口近傍の等速度線分布）に及ぼす影響をより詳細に明らかにする必要がある。

本章では、自立形外付け式円形および矩形フードの開口近傍の吸込流れ場の速度を測定し、フードの開口断面形状、開口面積比およびフレア角など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調べ、速度特性からフードの捕捉性能を考察した^(45~47)。さらに、吸込フードの損失に関する資料が乏しいので⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾、フード損失を測定し、フード形状の違いがフードの損失係数に及ぼす影響についても考察した。

3.2 実験装置および実験方法

3.2.1 実験装置

実験装置の概要を図3・1に示す。供試フード部以外は第2章の二次元フードの実験で使用した装置と同一である。フード開口近傍の空気は排風装置⑧、⑨、⑩により供試フード②、テイクオフダクト③および吸込ダクト④をへて、吐出ダクト⑪から室外に排気される。フード開口近傍の吸込流れ場は非常に低速であり、外乱の影響を受けやすいので、測定場へのフード形状以外の障害物の影響を排

除するために十分な広さの三次元空間（約 $4 \times 4 \times 4 \text{ m}$ ）を設け，さらに測定場の周囲および排風機の吐出管出口にネットを張ったセッティングチャンバー①，⑫も設けた。

供試フード②の形状は円形，正方形および長方形フードで，テイクオフダクト③は円形フードに対しては断面 $\phi 194 \text{ mm}$ ，長さ 994 mm のダクトを，正方形フードに対しては断面 $\square 172 \text{ mm}$ ，長さ 1000 mm のダクトを，長方形フードに対しては断面 $200 \times 400 \text{ mm}$ ，長さ 1000 mm のダクトを用いた。

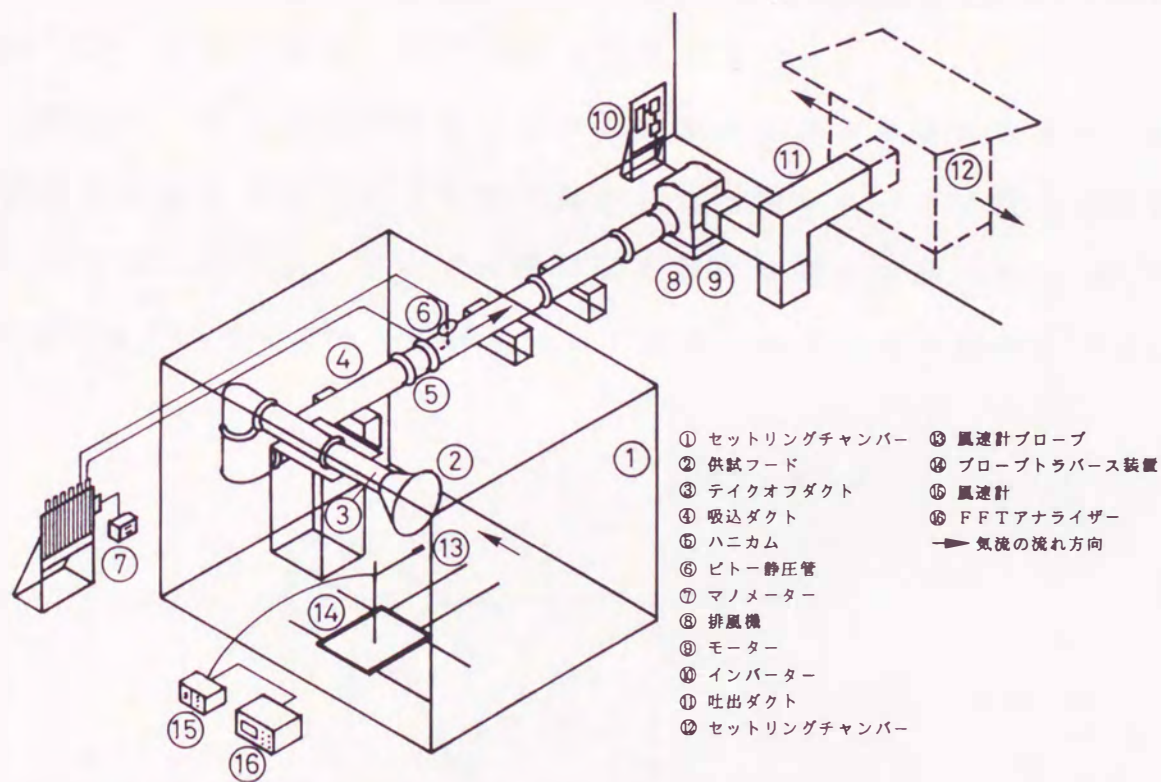
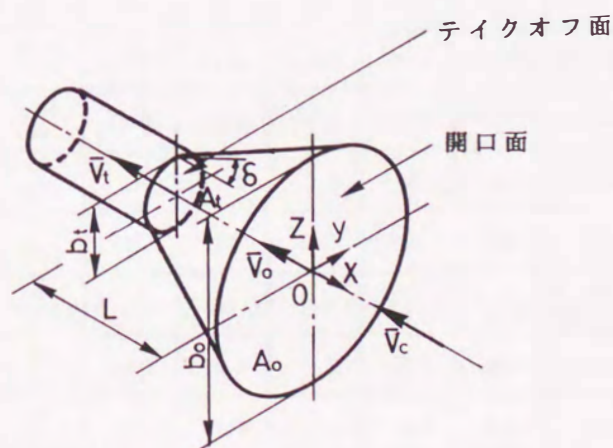


図 3 ・ 1 実験装置の概要

3.2.2 供試フード

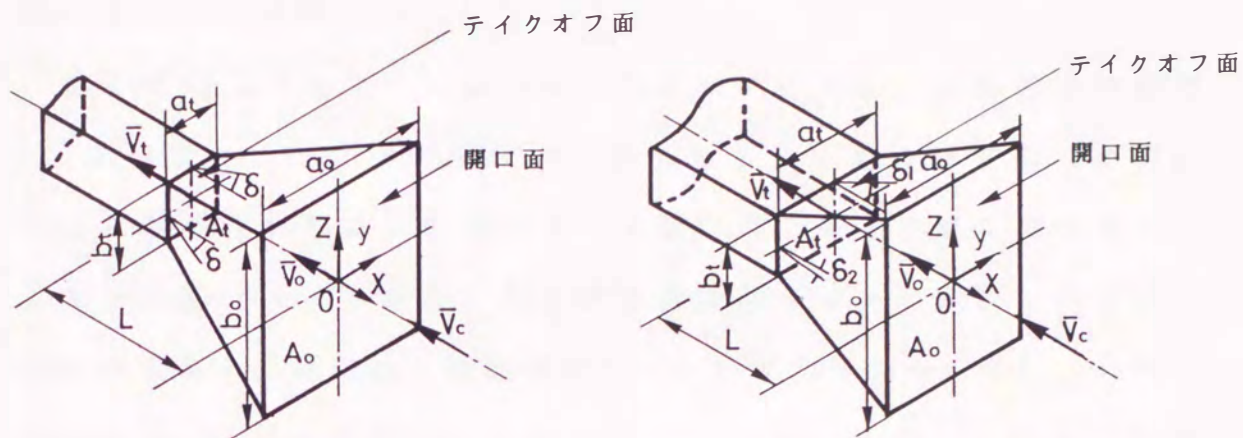
図3・2に供試フードの形状および座標系を，表3・1に供試フードの仕様ならびに実験条件を示す。供試フードは管軸方向の長さを一定（ $L=430\text{mm}$ ）とし，開口面積比 m を1から25まで変化させた円形フード A_c （プレーン形，厚さ 10mm ）， C_c （フレアー形，厚さ 2.6mm ）， E_c （フレアー形，厚さ 2.6mm ）， m が9の正方形フード C_s （フレアー形，厚さ 10mm ）および m を1から約5まで変化させた長方形フード A_R （プレーン形，厚さ 10mm ）， C_{R1} （片側面フレアー形，厚さ 10mm ）， E_{R1} （片側面フレアー形，厚さ 10mm ）， B'_{R2} （両側面フレアー形，厚さ 10mm ）の計8種類を用いた。

円形フード以外の供試フードおよびすべてのテイクオフダクトは視察が可能な透明アクリル板で製作した（円形フードは製作が困難であった）。なお，フードの開口部の形状は同一平面（ C_c ， E_c および C_s フードはフード壁面に対して直角）になるように加工した。



(a) 円形フード

図3・2-1 供試フードの形状および座標系



(b) 正方形フード

(c) 長方形フード

図 3・2-2 供試フードの形状および座標系

表 3・1 供試フードの仕様および実験条件

項目	フード形式	円形フード			正方形	長方形フード			
	形式	プレーン形	フレアー形		フレアー形	プレーン形	片側面フレアー形	両側面フレアー形	
	記号	A _c	C _c	E _c	C _s	A ₂	C ₂₁	E ₂₁	B' ₂₂
開口幅比 (b _o /b _t)	n	1	3	5	3	1	3	5	2.25
開口面積比 (A _o /A _t)	m	1	9	25	9	1	3	5	5.06
テイクオフ面の寸法	b _t × a _t (mm)	φ 194	φ 194	φ 194	□ 172	200×400	200×400	200×400	200×400
開口面の寸法	b _o × b _t (mm)	φ 194	φ 582	φ 970	□ 516	200×400	600×400	1000×400	450×900
フード壁面の厚さ	t (mm)	10	2.6	2.6	15	10	10	10	10
フード長さ	L (mm)	430	430	430	430	430	430	430	430
フレアー角	δ (deg)	δ = 0	δ = 24.3	δ = 42.1	δ = 21.8	δ ₁ = 0 δ ₂ = 0	δ ₁ = 24.9 δ ₂ = 0	δ ₁ = 42.9 δ ₂ = 0	δ ₁ = 16.2 δ ₂ = 30.2
テイクオフ断面平均流速	$\bar{V}_t$ (m/s)	44.2	44.2	44.2	44.2	28.0	28.0	28.0	28.0
開口断面平均流速	$\bar{V}_o$ (m/s)	44.2	4.9	1.8	4.9	28.0	9.3	5.6	5.5

3. 2. 3 実験方法

第2章の二次元フードの実験と同様にテイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$ を一定とし、フード開口中心線に対し上下および左右での吸込気流の対称性を確認した後、フード開口中心線上と開口中心線を含む水平断面（ $x-y$ 断面）および垂直断面（ $x-z$ 断面）の片側半分の測定点に直径10mmの熱式風速計プローブ⑬（Model 6141, (株) KANOMAX, 精度 $\pm 2\%$ F.S.）をトラバースさせ、約3分間の平均流速を風速計⑬とFFTアナライザー⑭で測定し、その平均値からフード開口近傍の吸込流れ場の速度特性を求めた。

さらに円形フードを除いたフードの壁面とすべてのテイクオフダクト面に設けた静圧孔より壁面静圧分布を測定し、フードの損失係数を求めた。

なお、テイクオフの断面平均流速は円形および矩形フードに対してテイクオフ面基準でのレイノルズ数が等しくなるように設定した。

3. 3 実験結果および考察

三次元外付け式フードの開口近傍の吸込流れ場の速度特性は開口面を基準として整理すれば、開口面に対してほぼ相似と見なせると考えられてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。実際には第2章の二次元フードの実験でも述べたようにフード形状の違いにより吸込流れ場の速度特性は大きく異なる。

本節では自立形三次元外付け式フードのフード形状が開口近傍の吸込流れ場の速度特性、すなわち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分布に及ぼす影響を開口面とテイクオフ面の

両面を基準として議論した。さらにフード形状の違いがフードの損失係数に及ぼす影響についても考察した。

3.3.1 開口中心線上速度分布に及ぼす影響

実験したすべてのフードの開口中心線上速度分布をフードの開口面積 A 。および開口の断面平均流速 $\bar{v}$ 。で整理して図 3・3 に示す。

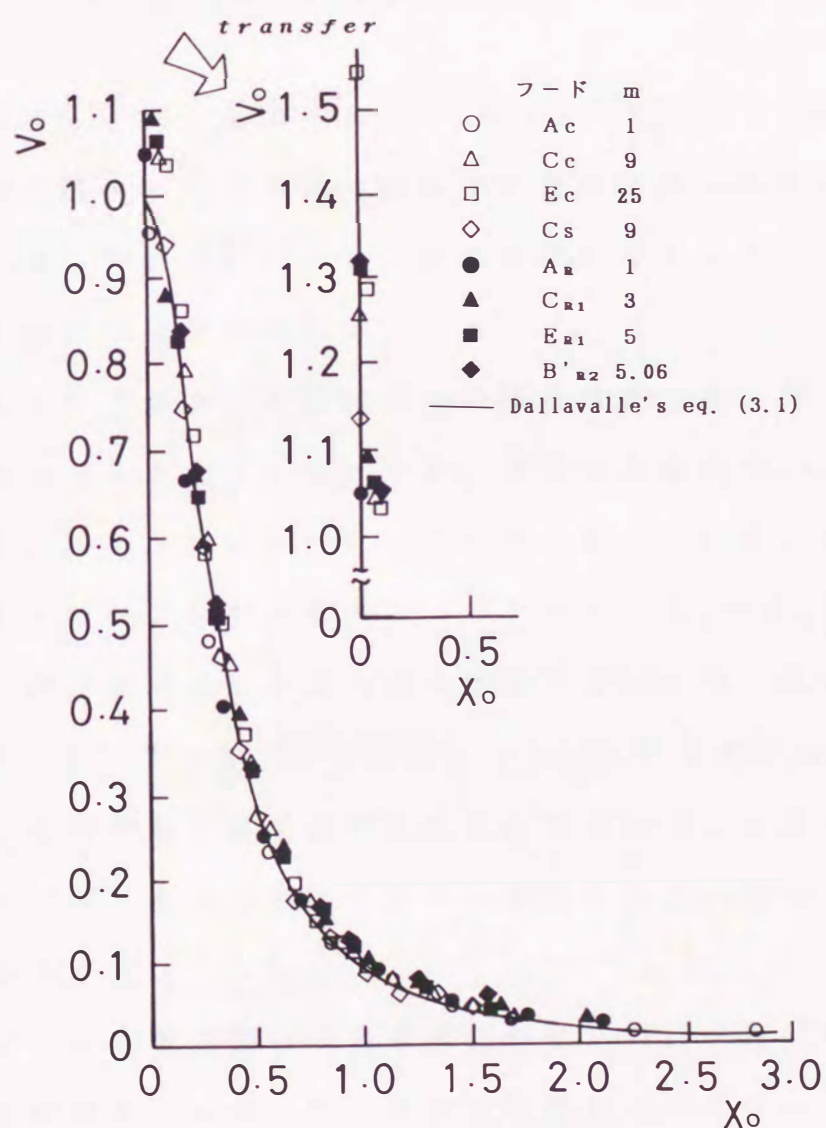


図 3・3 フード形状の違いによる開口中心線上速度分布
(開口面基準)

それぞれのフードによってやや差はあるが全体的に見ると速度分布はある幅をもってほぼ一致しており、従来言われているように開口面の値で無次元化すればすべてのフードの開口中心線上速度分布は一つの曲線で表されるという表現はほぼ正しい。

さらに、図 3・3 には Dallavalle の経験式⁽⁴⁾,

$$\frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_0} = \frac{1}{1.0 \left(x / \sqrt{A_0} \right)^2 + 1} \quad (3.1)$$

も示しており、これと比較すると $X_0 = x / \sqrt{A_0} > 0.7$ で Dallavalle の経験式が実際よりもやや低い値を示す傾向は見られるが、全体的にはよく一致している。しかし、詳細に見ればそれぞれのフード形状によって微妙な差が見られる。

円形および長方形フードの開口中心線上速度分布を開口面基準で整理して図 3・4 と図 3・5 に示す。遠方では速度 $V_0 = \bar{v}_c / \bar{v}_0$ の値は小さく、フード形状が異なっても流れ場への影響が小さいが、開口面の近くではフレアー形の 2 つのフード (C_c と E_c および C_{R1} と E_{R1}) は開口面積比 m によらずほぼ同じ分布となるのに対し、フレアー角 $\delta = 0^\circ$ であるプレーン形フード (A_c および A_R) はフレアー形フードよりやや低い速度分布となる。すなわち、開口面近くの吸込流れ場はフード形状 (主にプレーン形かフレアー形か) に依存することがわかる。

従来、フードの吸込流れ場の速度特性は開口面を基準として整理されることが多かったが、同一の排気装置に対するフード形状の特性の差をより明確に表現したい場合にはテイクオフ面を基準として整理する方法が適している。第 2 章の二次元フードの実験では開口

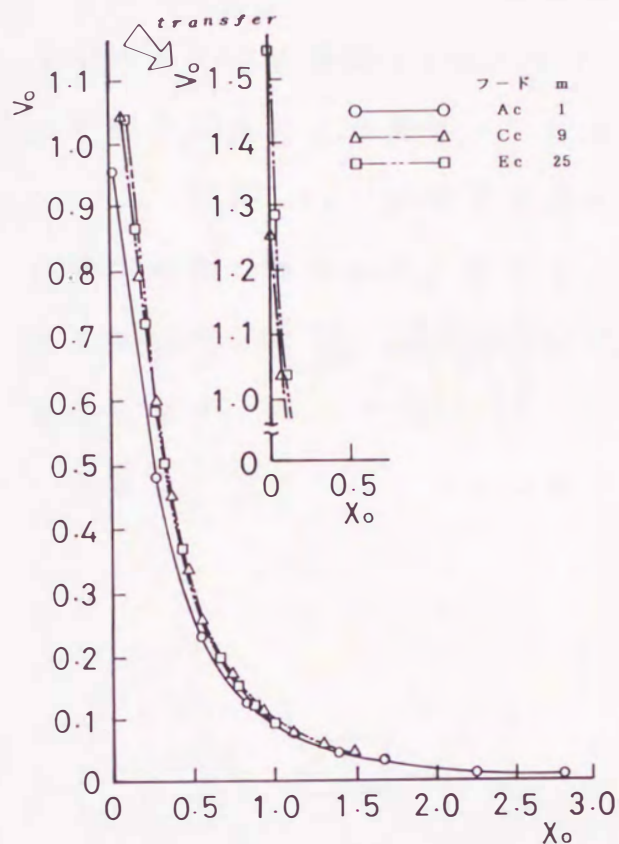


図 3・4 円形フードの開口
中心線上速度分布
(開口面基準)

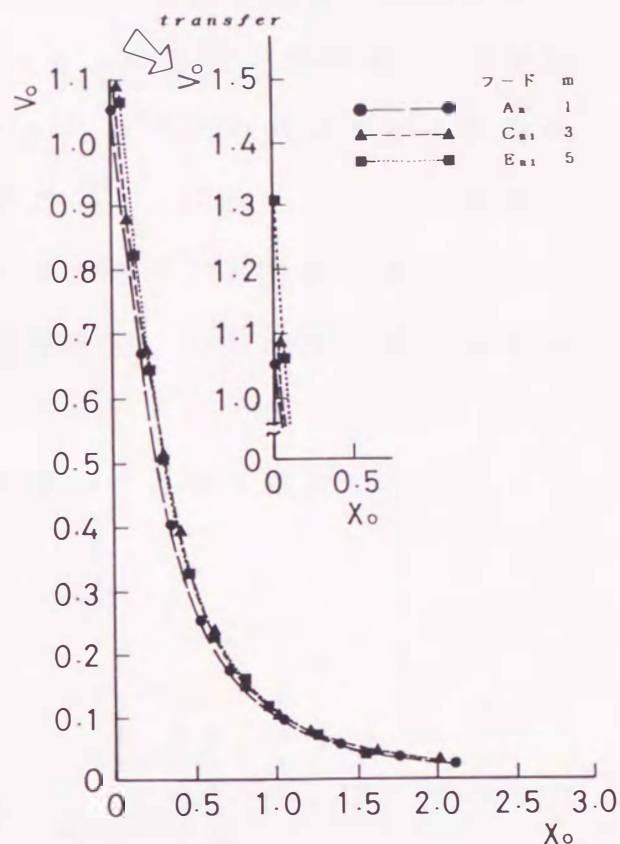


図 3・5 長方形フードの開口
中心線上速度分布
(開口面基準)

面の値で整理するとフード開口中心線上速度分布はほぼ同一となり、フード形状による特性の差は見られなかったが、テイクオフ面の値で整理すればフレアー角の小さなフードの方が開口面積が小さいので開口面近くでは速度が速くなるが、フレアー角の大きなフードはどフード後方からの気流の流れ込みを防ぐ効果が強いため開口面から一定距離離れた位置で速度分布が逆転し、遠方では逆にフレアー角の大きなフードの方が速度が速くなることが明らかになった(図 2・5 と図 2・6)。

実験で用いた円形および長方形フードの開口中心線上速度分布を
 テイクオフの断面積 A_t およびテイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$ で整理
 して図 3・6 および図 3・7 に示す。それぞれの図の上方の線図は
 $X_t = x / \sqrt{A_t} > 1.0$ の領域の拡大図である。三次元フードの場合に
 は開口面近くでは m の小さなフードほど速度が速いが、遠方では一
 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
 見られない。

実験したすべてのフードに対する開口中心線上速度分布をテイク

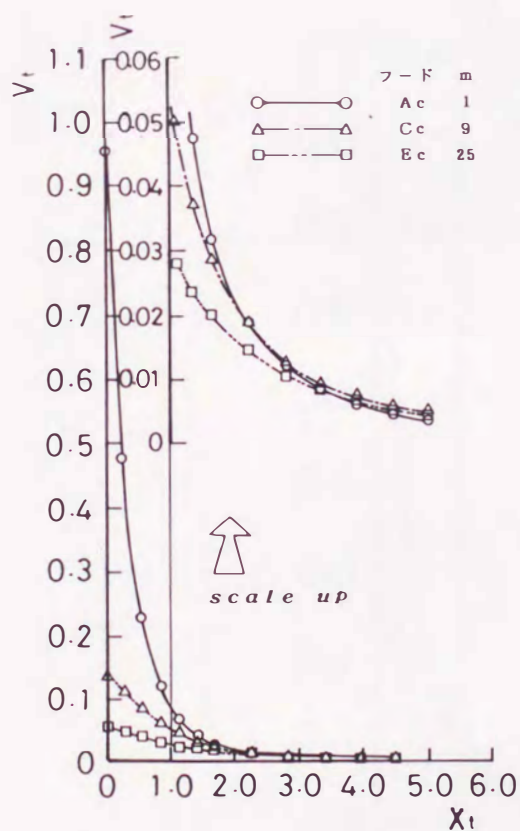


図 3・6 円形フードの開口
 中心線上速度分布
 (テイクオフ面基準)

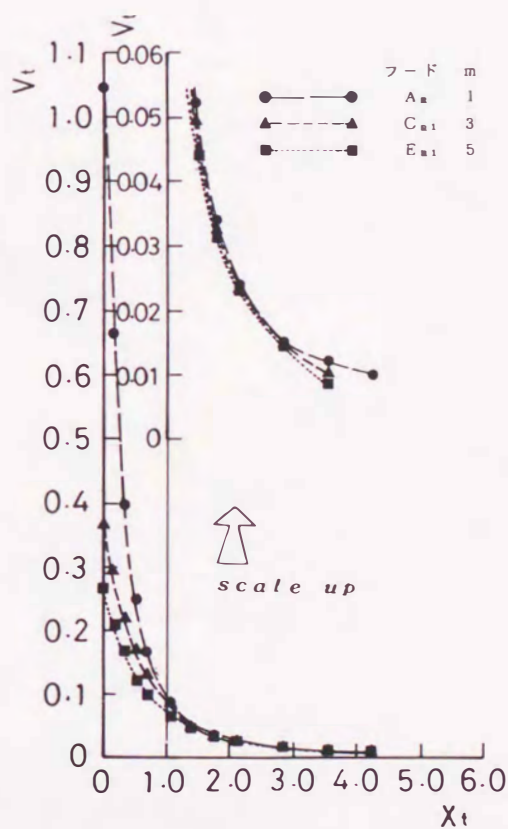


図 3・7 長方形フードの開口
 中心線上速度分布
 (テイクオフ面基準)

オフ面の値で整理して図3・8に示す。開口面積比 m による違いは上述のとおりであり、さらにフード形状が異なっても m が等しいフード (A_c と A_R , C_c と C_s および E_{R1} と B'_{R2}) では縦横比が 1 : 2.5 程度まではほぼ同一の速度分布となる。なお、 m が 9 の円形フード C_c と正方形フード C_s では速度の差が他の場合よりやや大きい。この二つのフードではフード開口壁面の板厚が異なっており、

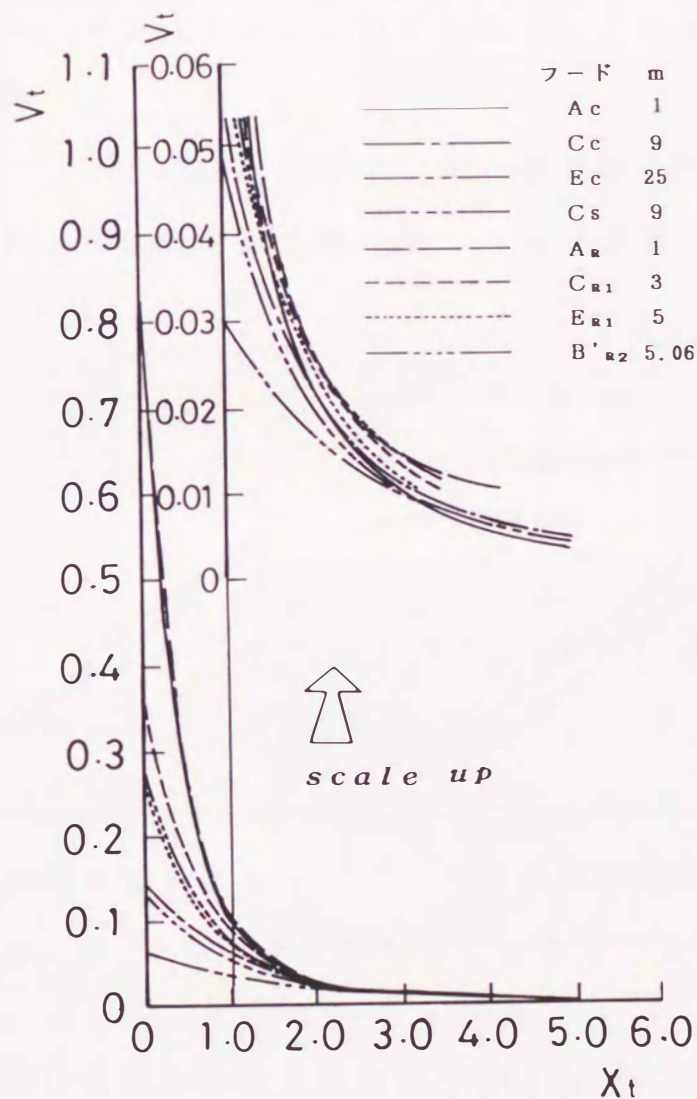


図3・8 フード形状の違いによる開口中心線上
速度分布 (テイクオフ面基準)

この違いによりフード内壁面に形成されるはく離領域の形状（厚さ）が異なるために差が生じたと考えられる。この二つのフードの開口端内面でのはく離状態を可視化し、スケッチした図を図3・9に示す。開口端が薄い場合（ C_c ）にはフード外壁に沿う流れは開口端で急に 180° 近く曲げらるため内側のはく離領域は厚いが、開口端が厚い場合（ C_s ）には端面上に形成される小さなはく離領域が端面を丸くする効果をもつので、フード内面ではく離の厚さは開口端が薄い場合に比べて薄くなり、前者の場合より有効吸込面積が広がっている。

また、矩形フードの開口面内のコーナー部では二次流れの影響により辺の中央部よりのはく離領域が薄くなり、速度はこの部分で速くなった。

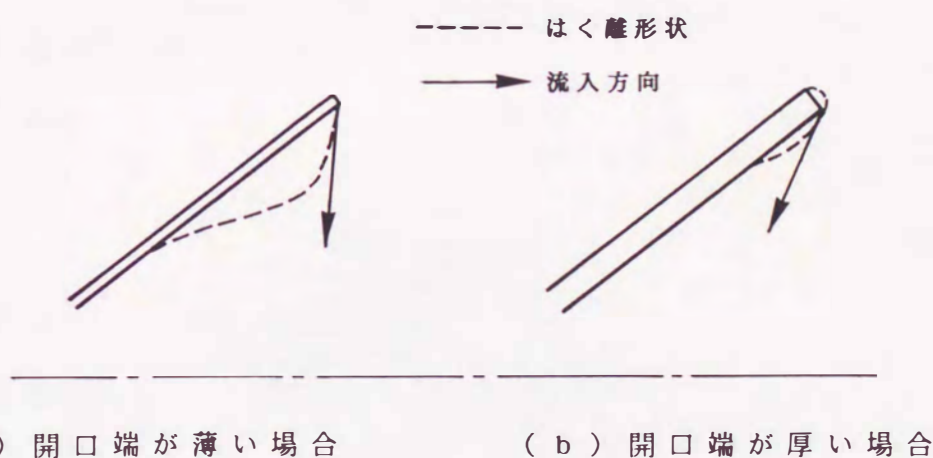


図3・9 フード壁面内のはく離領域の比較

3.3.2 開口近傍の吸込流れ場の等速度線分布に及ぼす影響

フード開口中心線を含む水平断面および垂直断面内では開口近傍の吸込流れ場の等速度線の形状はフード開口面の値で整理すれば同

一の開口面形状のフードに対してはほぼ相似になると考えられているが（吸込気流の相似則），実際にはフード形状によって異なる。

図3・10は円形フードの開口近傍の等速度線分布を開口面基準で整理して示した図である。開口中心線付近の領域に限れば等速度線は図3・4で示したフード開口中心線上速度分布の違いに応じた位置の差はあるものの，いずれも開口中心線とほぼ直角な線となる。しかし開口中心線から離れた領域では等速度線の形状は，特にプレーン形とフレアー形とでは大きく異なり，同じフレアー形でもフレアー角 δ が大きいフードほどフード側方の等速度線の間隔は開口中心線上の間隔に比べて密になり，フード後方へ急に回り込む形状となる。

図3・11には開口面の断面形状が異なる2つのプレーン形円形フード A_c と長方形フード A_R （両者とも $m=1$ と $\delta=0^\circ$ ）の開口中心

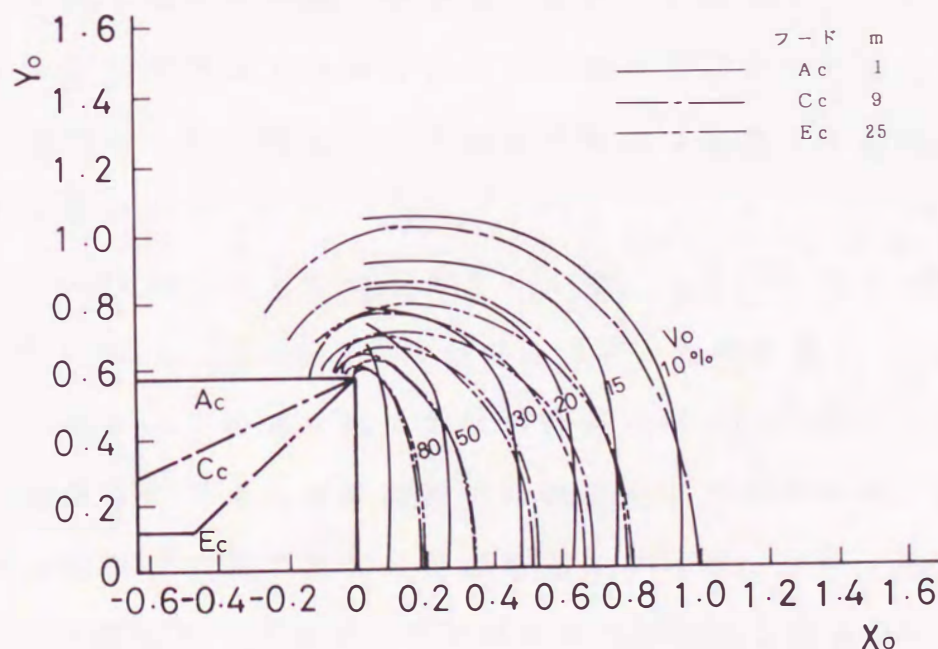
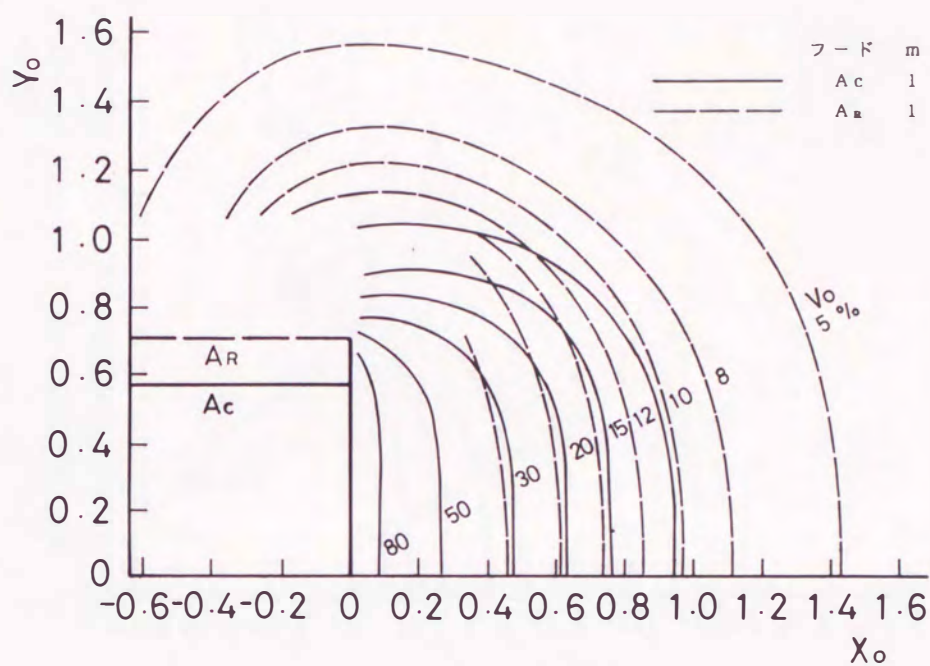


図3・10 開口面積比の異なる円形フードの等速度線分布
（開口面基準）

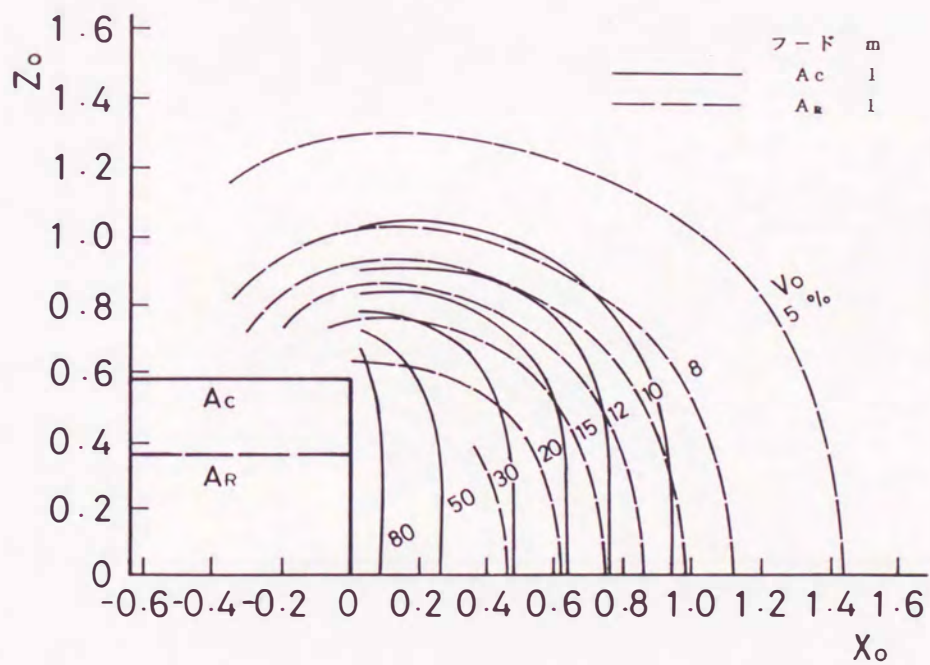
線を含む水平断面および垂直断面内の長辺方向と短辺方向の等速度線分布の比較を示す。当然のことながら両者の等速度線分布は明かな相違を示した。すなわち、 A_c フードの等速度面は開口近くではフード内のある仮想原点を中心とする球が開口中心方向に押しつぶされた形状であり、遠方になるに従いその半径を増しながら膨張して次第に球形に近づく。それに対して A_R フードの等速度面は開口近くでは長辺断面方向の軸を中心とする円筒面に近い形状であり、遠方ではその形状が次第に膨張し球形に近づく。

同様に開口面積比 m はほぼ等しいが開口面の断面形状(縦横比)が異なる2つのフレアー形長方形フード E_{R1} と B'_{R2} について、開口中心線を含む水平断面および垂直断面内の等速度線を長辺方向(図 a : フレアー角大)および短辺方向(図 b : フレアー角小)の断面で比較した分布図を図3・12に示す。この場合も両者の等速度線分布にわずかではあるが違いが生じている。すなわち、フレアー角の大きな長辺方向断面では側方の等速度線の間隔は中心線上の間隔に比べて密であるが、短辺方向断面では側方の間隔は中心線上の間隔とあまり変わらない。

さらに、円形フードと正方形フードで、 m が同じでフレアー角がほぼ等しい C_c と C_R フードの等速度線分布の比較を図3・13に示す。図3・13によれば等速度線の形状の違いはほとんどなく、特にフード開口面側方の等速度線の間隔はほぼ等しい。すなわち、等速度線の形状は開口の寸法に対して相似形とはならず、フードのフレアー角によって異なり、フレアー角がほぼ同じになれば断面形状が異なっても等速度線の形状は等しくなる。

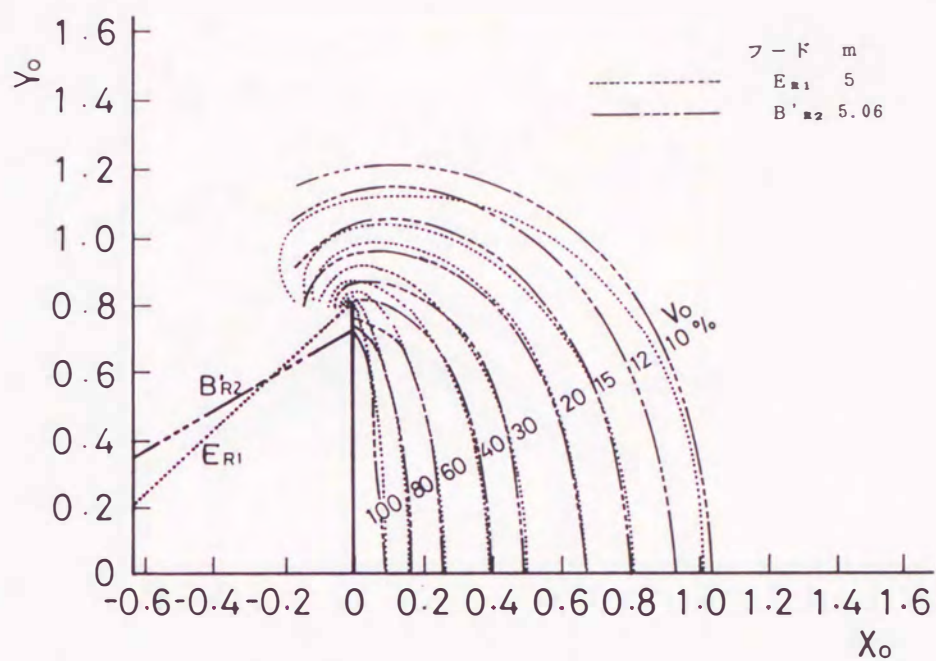


(a) 長辺方向断面

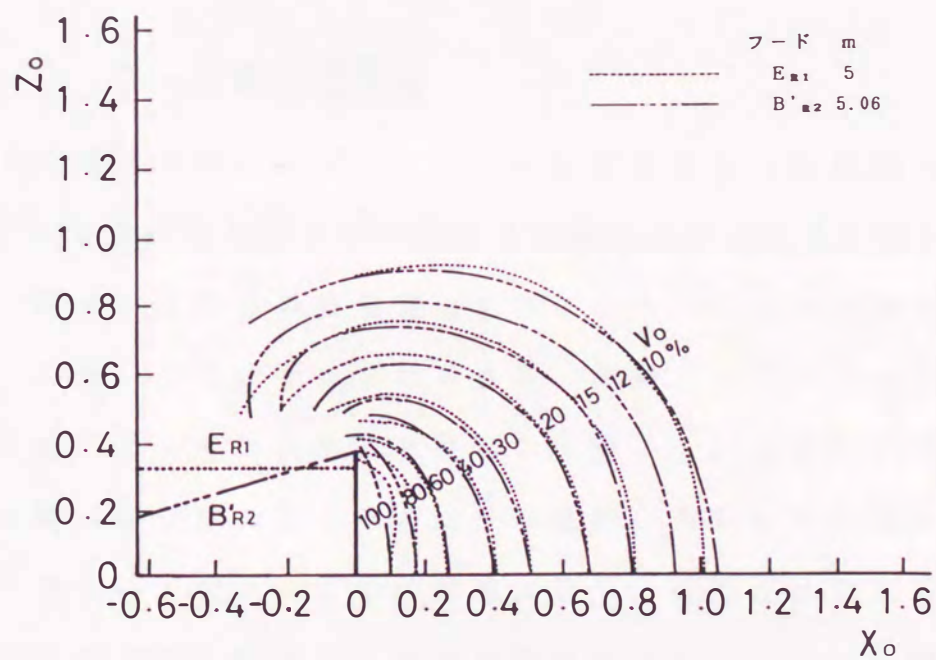


(b) 短辺方向断面

図 3 ・ 11 フード形状の異なるプレーン形フードの等速度線分布
(開口面基準)



(a) 長辺方向断面 (フレアー角 : 大)



(b) 短辺方向断面 (フレアー角 : 小)

図 3 ・ 12 開口面積比がほぼ等しく，縦横比の異なるフレアー形
長方形フードの等速度線分布 (開口面基準， $m \approx 5$)

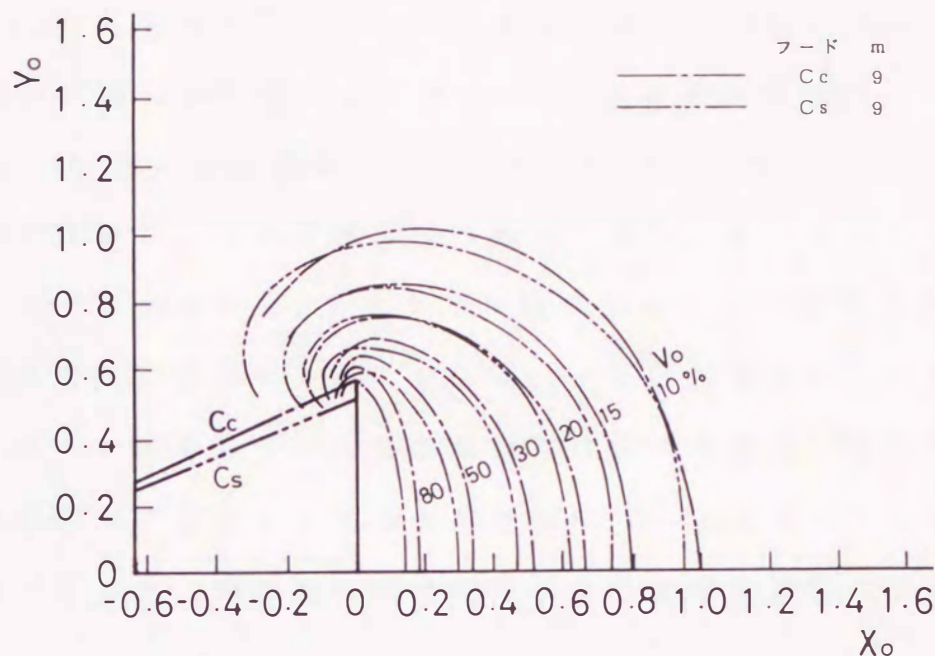


図 3・13 開口面積比が同じでフレア角もほぼ等しいが形状が異なるフードの等速度線分布（開口面基準， $m = 9$ ）

3.3.3 フードの卓越領域

フードの吸込流れ場に関しては，開口面に対する速度場の相似性が強調されて速度場の広がりに関する議論はあまりなされていない。しかし，テイクオフ面の値で整理すればフードによる有効な速度場の広がりの違いを見出すことができる。実験した円形フードの等速度線分布をテイクオフ面基準で整理して図 3・14 に示す。等速度線の形状は開口面寸法に対する相対的な位置の違いにより開口面積比 $m = 1$ のプレーン形フードでは円形に近く， m の大きなフレア形フードでは横方向に広がった平坦な形状となる。さらに，開口面近くでは m の小さなフードの方が速度が速くなる。これらの 2 つの効果によりそれぞれのフードにおいて他のどのフードよりも速い速度が得られる領域が存在する。この領域を卓越領域と呼ぶことにする。

図3・14中にはそれぞれのフードの卓越領域を示している。すなわち，フード開口中心線付近にはA。フードの卓越領域が，その外側にはC。フードの卓越領域が，さらにその外側にはE。フードの卓越領域が存在する。この卓越領域は開口面の近くでは各フードの開口外端よりやや広く，C。フードでは開口面積よりやや広い断面積を保って軸方向に延びている。そこで，一定断面積のテイクオフダクトに円形フードを取付けて汚染物質を排気する場合，開口中心線近くの狭い領域で発生する汚染源の捕捉に対してはプレーン形フードが有効であるが，横方向に広がりのある汚染源の捕捉に対してはそ

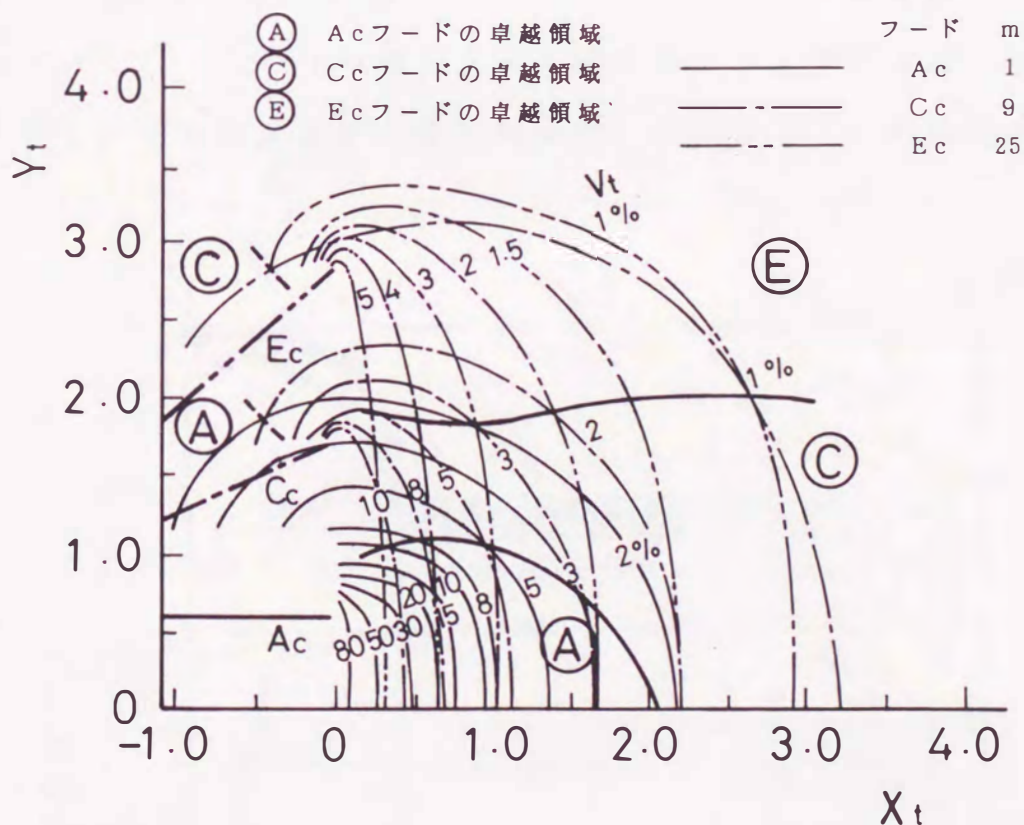


図3・14 形状の異なる円形フードの等速度線分布および卓越領域線図（テイクオフ面基準）

の幅に応じたフレアー形フードを用いるのが効果的であることがわかる。

なお，実用上は汚染源の捕捉性能には直接関係しないが，図3・14中の太い破線で示すようにフード開口端の後方にも卓越領域が存在しているのがわかる。

3.3.4 フード損失に及ぼす影響

円形および長方形フードについてフードとテイクオフダクトの壁面静圧（円形フードについてはダクト壁面のみ）を測定し，テイクオフの断面平均流速 $\bar{v}_t$ に対応する動圧で無次元化して求めた圧力係数 C_p の軸方向分布を図3・15に示す。フレアー形長方形フードでは $-0.5 < X_{bt} < -1.0$ の間にフード開口端のはく離による小さな圧力低下と再付着による圧力回復があり，さらにフード内の増速によ

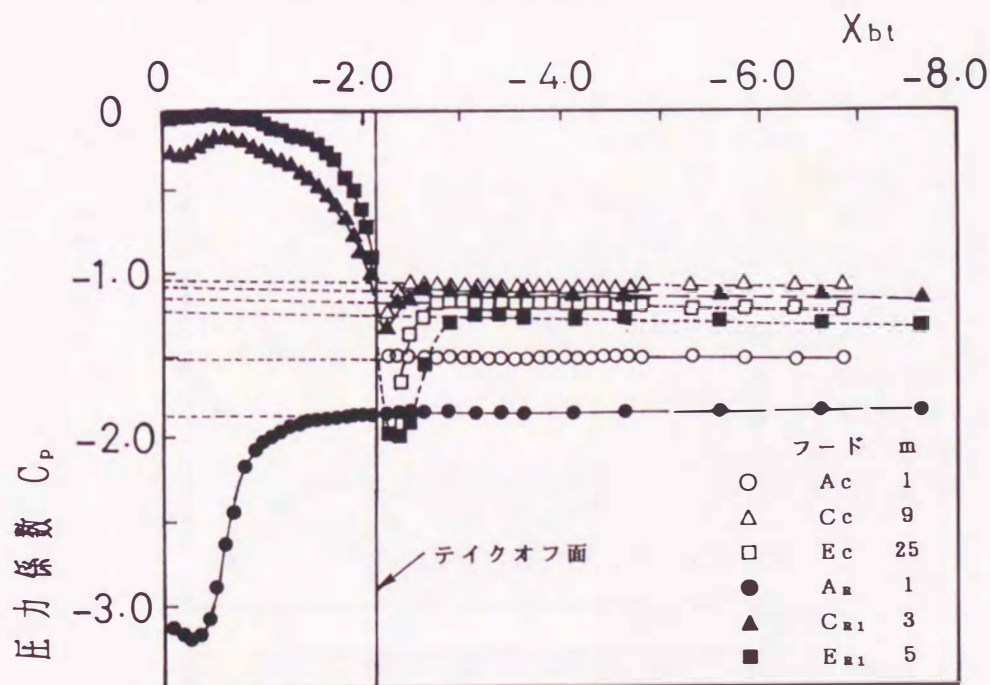


図3・15 圧力係数 C_p の軸方向分布線図

り再び圧力が低下し，テイクオフ面で縮流による大きな圧力低下が生じている。この場合，フレア角の大きなフードの方がテイクオフ面での圧力低下が大きく，はく離の再付着による圧力回復も遅い。プレーン形長方形フードの開口端では，フレア形のテイクオフ面におけるよりも大きい圧力低下が生じ，圧力回復も遅くなっている。

三次元外付け式フードのフード損失は二次元フードの場合と同様にフードを含む吸込管の全圧損失からフードを含んだ長さのダクトの摩擦損失分を差引いて求めた。すなわち，フード損失はダクト内で直線的に低下する静圧の線をフード開口面（ $X_{b,t} = 0$ ）まで延長した点の値を $C_{p,0}$ とし，さらにテイクオフの断面平均流速の動圧を差引いて次式で定義した。

$$\zeta_F = -(C_{p,0} + 1) \quad (3.2)$$

円形フードと長方形フードの損失係数 ζ_F を開口面積比 m とフレ

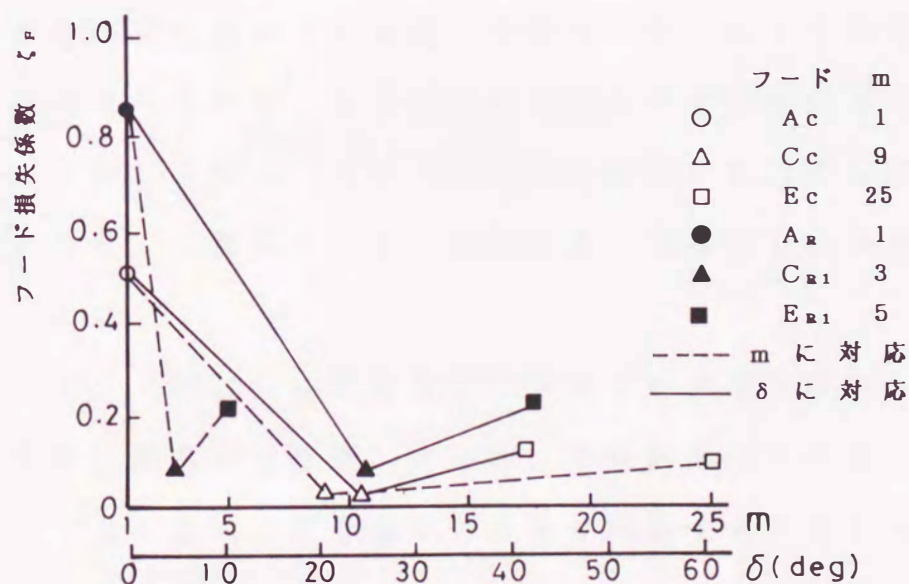


図 3・16 フード形状の違いによるフード損失係数

アール角 δ で整理して図 3・16 に示す。フード形状の違いによる ζ_F の変化は m よりも δ の大小により決定され、どちらの形状のフードもプレーン形の損失が最も大きく、 δ が 25° 近傍で損失が最も小さくなり、 δ がさらに増加するとテイクオフ面での圧力低下が大きくなり損失は再び大きくなる。また長方形フードよりは円形フードの方が損失は小さい。

3.4 第3章のまとめ

形状の異なる 8 種類の三次元外付け式フードを用いて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、速度特性からフードの捕捉性能を評価した。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。その結果、以下のことが明らかとなった。

(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ル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。