

取り入れ口渦の発生条件

中山昭彦*

壁面近傍に置かれた取り入れ口に形成する竜巻に似た渦の発生条件を、既存の実験データの解析及び理論的数値計算により検討した。実験結果によると渦発生に要する取り入れ口限界流量は壁面の位置により一義的に決まる。ポテンシャル流理論に基づく数値計算では、傾向は一致したものが得られるが限界流量は実験値に比べ大きく下回る。渦糸を流れ場に置く等の改良することにより実験結果に近づきはするものの、渦発生条件の実験的相関を完全に説明するまでに到らない。

Keywords : inlet, vortex, potential flow, jet engine

1. ま え が き

竜巻に似た渦糸状の渦流が取水口や堰の上流側、また卑近な例では浴槽の排水口付近に発生するという事はよく知られている¹⁾。しかしその発生条件や特性については充分には把握されていない。簡単な幾何学的、力学的条件のもとで数量的にははっきり解明されておらず、竜巻などの自然現象では統計的、定性的な発生条件しかつかめていない。渦が発生した場合としない場合とでは流体力学的条件が大きく変わり、構造物等の設計には充分考慮にいれられるべき現象である。土木構造物では吸入速度が比較的低い事もあり重大問題につながらないにしろ、ダム取水口等では渦がおきることにより土砂吸入等の悪影響を及ぼす可能性もある。また自由水面が取り入れ口の近くにある場合は空気を巻き込み気泡を発生させる事もある^{2),3)}。

1950年代ジェット旅客機が飛ぶようになり、ジェットエンジンの空気取り入れ口付近でも同様な渦が発生する事が発見されている⁴⁾。この渦はエンジン運転性能への影響、異物の吸入によるエンジン部品の損傷などの問題と関連がある事が発見され⁵⁾⁻⁹⁾、以来航空工学でも「取り入れ口渦 (inlet vortex)」として研究の対象となり、模型実験や飛行実験などが行われかなりのデータが集められている¹⁰⁾⁻¹⁴⁾。これらのデータや研究結果は、土木構造物も含めたより一般的な取り入れ口の吸入による渦の発生条件を詳しく数量的に調べるうえで、また渦の影響をうけた流れの特性を一般的に論じるうえで有用である。本研究は、このような実験結果をまとめ考察し直すことにより取り入れ口渦の発生の条件を定量的に解析し、その理論的裏づけを数値計算等で試みるものである。比較的簡単な幾何学的、力学的条件のもとで扱われてい

るが、より複雑な条件への一般化も困難でない。

データは主にエンジン空気取り入れ口を対象にしたものが多く、流体は圧縮性気体を想定されているが、空気の圧縮性は速度が音速に近くなった時衝撃波がおきたり、取り入れ口内のダクトがチョークする以外渦発生には決定的な要因とならず結果は非圧縮流体にも適用出来るものである。ただし水の場合では高速になるとキャビテーションをおこす可能性があるがそれは無視されることになる。

2. 取り入れ口渦

取り入れ口渦に似た渦の例を **Photo 1** と **2** にしめしてある。**Photo 1** はジェットエンジンのテスト中に発生した渦を写真に撮ったものである。これは圧力の下がった渦中心部で空中の水分が凝縮したため白くなり可視化されたものである。**Photo 2** はよく似た渦が堰の上流側に発生し床砂内の染料を吸い上げているものである¹⁾。**Photo 1** の渦は自然の風に含まれている渦度が強力な吸い込みの力により地面の一点に集められ出来たと考えられる。**Photo 2** の場合も水路側壁近傍の二次流中に既に存在する渦度が堰越流による強い加速により引き延ばされ出来たものである。どちらもよく似た現象で、低気圧中の渦が上昇気流により引き延ばされ発生する竜巻とよく似ている^{15),16)}。ただし、堰越流の場合はほぼ二次元的加速によるものであるのに対し、ジェットエンジンと竜巻の場合は三次元的流れの収縮による現象である。本論文では後者の様な三次元的流れを扱うものである。

三次元的取り入れ口に関し、Kline¹⁷⁾は実験結果に基づき、上記のような渦の発生の条件として次の三点を挙げている。すなわち、a) 上流あるいは回りになんらかの形で渦度が存在すること、b) 取り入れ口付近に壁が存在しその壁面上に流線の収束するよみ点が存在する

* 正会員 Ph. D. 神戸大学助教授 工学部土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台1-1)

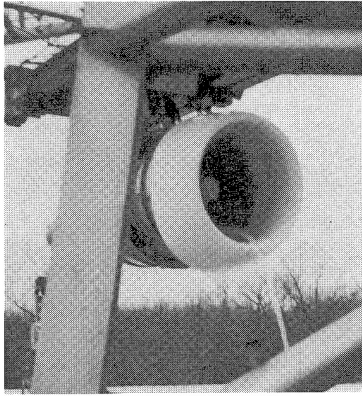


Photo 1 A vortex formed in front of jet engine on a test stand.

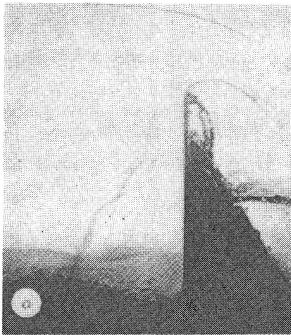


Photo 2 A vortex formed in a flow over a weir (from Rouse¹⁾, p.271).

こと、c) 上昇流（壁面から取り入れ口に向かう方向の流れ）が存在すること、である。a) の条件の必要性は無風状態の部屋内にあるいは乱れの少ない一様性の高い風洞では渦はおきないことで証明されている。b) の条件が必要であるということは何かの方法（例えば小さなジェット）によりよどみ点を吹き流すことにより渦を消滅させることができるという事より説明されている。a) の条件の修正として Siervi at al.¹²⁾ は取り入れ口自体が斜め風等により循環を生成する場合、既存渦度は必要でない事を指摘している。これに対し Quick⁹⁾ は、渦度は壁面上の境界層の粘性の働きにより生成されるとし、境界層が必要であるとした。しかし、境界層が生成する渦度は横方向のもので渦形成に必要な垂直方向成分は生成されない。境界層内の横方向の渦度は取り入れ口方向への吸い込みによりヘアピン状に変形し垂直方向成分を作り出しえると考えられる。このヘアピン渦の垂直部分は反対方向の渦度をもつ一對の渦糸からなる。しかし取り入れ口渦は対で発生する事ではなくこの説明は妥当でない。壁面は、よどみ点を形成するという点で必要であるが、境界層を形成するという点で必要ではないことは、壁を鏡像の役目をはたす、つまり不透面の境界条件を満たすが境界層は形成されない第二の取り入れ口でお

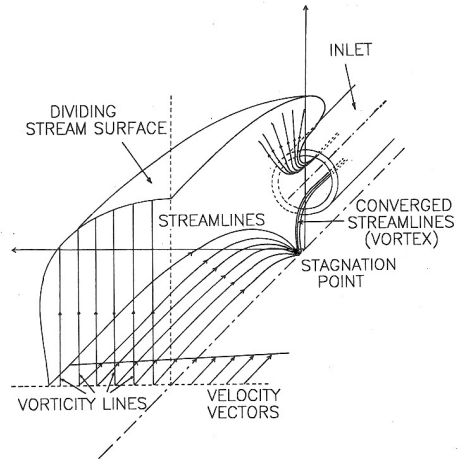


Fig.1 Mechanism of inlet-vortex formation.

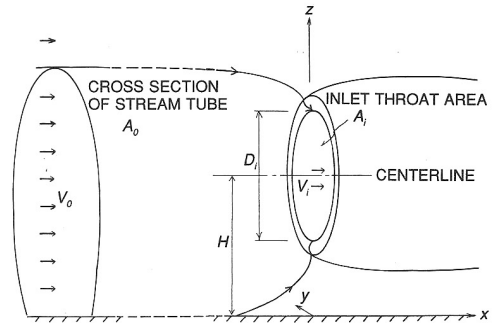


Fig.2 Definition for inlet flow near wall.

きかえた「取り入れ口対」(Twin inlet) を用いた実験でも渦は発生することにより確かめられている (Kline¹⁷⁾。これらの条件と渦発生 of の仕組みの過程を Fig.1 の略図に示してある。

上記の内最初の二条件は以後他の研究者らによってもうけいられている^{9),10),12)}。問題はこれらの条件、特に条件 b) の数値的限界値及びその理論的説明である。Glenny⁵⁾ の実験によれば既存渦度は少しでもあれば渦発生条件はほとんど変わらない事が明らかにされている。渦度の逆数を無限遠での流速 V_0 と取り入れ口の最小内径 D_i で無次元化して得られる Rossby 数 R_0 にして約 2000 程度以下 25 以上であれば、結果はほとんどかわらない。また上昇流であるが、取り入れ口吸入速度が V_0 より小さくない限り必ずあるものである、よって以下は上の三条件のうち条件 b) を主に考える。数値的に論議するために Fig.2 で定義されるような一般的な流れの場を考えることにする。取り入れ口の形状は代表的な軸対象形で、その軸は壁に平行であるとする。無限遠での流れは壁に平行で取り入れ口の軸方向に対して B の角度の方向に流れる速度 V_0 の一様流を考える。ただし $B=0$ の場合この一様流は上に述べた程度の渦度を含んでい

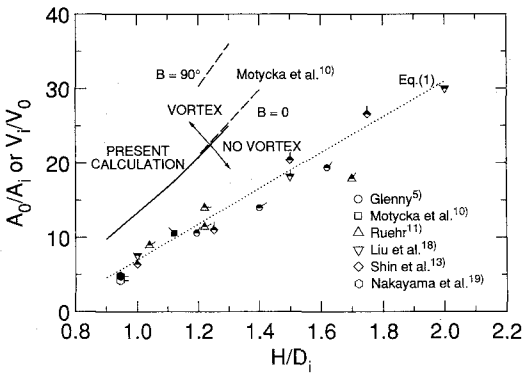


Fig.3 Correlation of velocity ratio and inlet height for vortex formation.

る、例えば水平方向に速度勾配があるものとする。\$A_i\$ は取り入れ口最小断面面積、\$V_i\$ はこの面での平均流速である。これは無風状態のまたは横風をうけて離着陸する航空機のエンジンの回りの相対的な流れの場に相当するが一般的に壁面近辺に備えつけられた取り入れ口の回りの流れの場と考えてよい。

3. 渦発生の限界速度比

上記の Kline の渦発生の第二条件である壁面のよどみ点であるが、\$V_0=0\$ では取り入れ口は流れがあらゆる方向から来るので、速度の方向が反転するところできならずよどみ点となる。普通このよどみ点は取り入れ口面のすこし前方にある。\$V_0\$ が増えるにつれてこのよどみ点は下流側に移動し、ある時点で消滅する。また取り入れ口を壁面から離せばよどみ点は流されやすくなり消滅しやすくなる。よって偏角 \$B\$ が一定であれば \$V_0\$ が大きければ大きいほど、また \$H\$ が大きければ大きいほどよどみ点は存在しにくく渦も出来にくい事になる。\$B\$ の影響であるが、\$B=0\$ の場合、\$V_0\$ が大きくなるにつれよどみ点は取り入れ口真下方向へ動く事になり、取り入れ口への距離は短くなる。しかし \$B=180^\circ\$ の時、取り入れ口面の反対方向へ移動する事になり、よどみ点と取り入れ口との距離は離れていきよどみ点は飛ばされやすい。よって、\$B=0\$ の時は \$B=180^\circ\$ の時に比べよどみ点は存在しやすく、渦も出来やすいと考えられる。そこでこれまでに得られている実験データを解析し直し、これらの変数からなる無次元パラメータを座標にして Fig.3 にまとめてみた。圧縮性流体の場合も含めるため \$V_i/V_0\$ の代わりに取り入れ口に取り込められる流管の断面の収縮比 \$A_0/A_i\$ が用いられている。ここで、\$A_0\$ は \$V_0\$ の速度での等エントロピー一次元流関係による流管の断面積である。マッハ数ゼロでは \$V_i/V_0=A_0/A_i\$ である。横軸は取り入れ口の中心線の壁からの相対的高さとして \$H\$ を取り入れ口最小内径 (inlet throat diameter) \$D_i\$ で無次元

Table 1 Details of the experiments shown in Fig.3.

著者	実験方法	渦発生判断方
Glenny ⁹⁾	風洞実験	プラスチックビーズ
Motycka et al. ¹⁰⁾	風洞実験 屋外テスト	煙 水分凝縮
Ruehr ¹¹⁾	屋内実験	煙、微小粒子
Liu et al. ¹⁸⁾	風洞実験	煙、速度、圧力測定
Shin et al. ¹³⁾	風洞実験	煙、速度成分測定
Nakayama et al. ¹⁹⁾	風洞実験	総圧、変動圧測定

化したものがとられている。塗りつぶしてある記号は渦が観測されたケースを示してあり、塗りつぶされていない記号は渦が形成しなかった場合である。上半分が塗りつぶされている記号は渦の発生の境めを表す。各記号上の棒印は偏角 \$B\$ を表す。棒印が時計の三時の方向にあるときを \$B=0\$ とし \$B\$ が正の方向を反時計方向にとつてある。

Fig.3 に示されている各々の実験方法などの詳細については Table 1 にまとめてある。この図によれば殆ど全てのデータの示す渦発生の限界値は各々の実験設備、実験方法、また渦発生の判定方法が異なるにもかかわらずほぼ一直線上に並び、渦発生条件の普遍性を意味している。また予想通り取り込み口が壁に近い場合ほど低い吸入速度でも渦が発生する事がわかる。しかし予想に反して \$B\$ の値は渦発生に関係していないと見られる。渦発生限界での \$A_0/A_i\$ と \$H/D_i\$ の関係を Fig.3 のデータから求めると次のような式で相関させられることが分かる。

$$A_0/A_i = 24H/D_i - 17 \dots\dots\dots (1)$$

この式の直線は Fig.3 に破線で示されている。

これまでの発表されている文献^{8),9),11)}によれば壁面のよどみ点は非回転流理論で予測出来ると考えられている。よって Fig.3 に示されたデータはすべて非回転流理論で説明されるはずである。そこでこの仮説を試すために非回転流理論に基づいた数値計算を \$B=0\$ について行ってみた。計算にはパネル法である Douglas 三次元ノイマンプログラムを取り入れ口周辺の流れを計算する為に改良されたもの²⁰⁾が用いられている。この方法では、まず取り入れ口の吸い込みのみによる流れの場を取り入れ口表面上に分布させた渦度によりつくり、次に無限遠で一様な流れの場は通常の吸い込み吹き出しの特異点の分布で求める。これら二つの解を重ね合わせることにより \$V_i/V_0\$ あるいは \$A_0/A_i\$ の値を与えられた値と一致させる。この方法では取り入れ口後縁での Kutta の条件は満足されない為一般には後縁での流速は無量大となり非現実的な剥離領域が形成される欠点があるが、この剥離領域は取り入れ口の長さが充分長ければ取り入れ口前面の流れの場への影響はない。本計算に用いられたモデルは

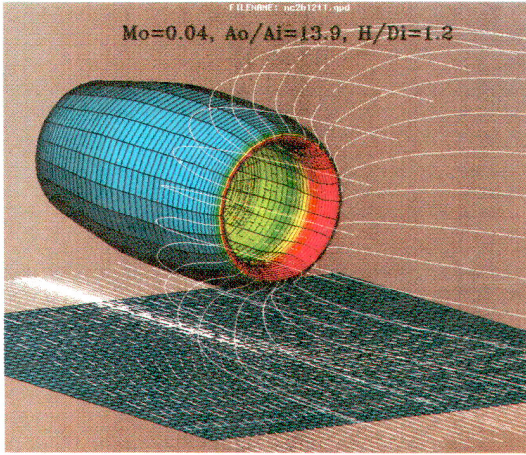


Fig.4 Potential-flow calculation for $A_0/A_1=14$, $H/D_1=1.2$, no vortex formed.

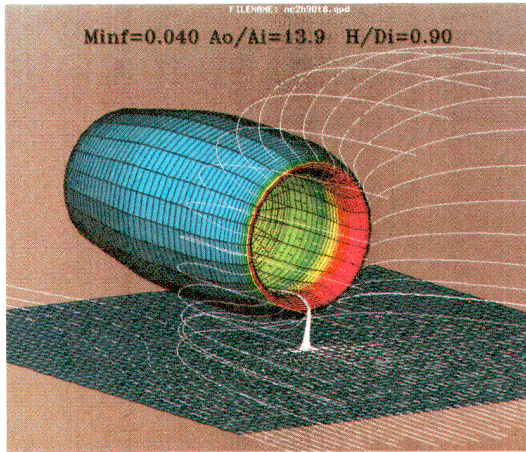


Fig.5 Potential-flow calculation for $A_0/A_1=14$, $H/D_1=0.9$, no vortex formed.

この影響ない程度の長さの取り入れ口である。圧縮性は基本モード計算後修正の形で組込まれている。

計算結果の代表的なものでよどみ点が壁面に形成する場合としない場合との例を Fig.4 と Fig.5 に示してある。これらの図には壁面上の流線および取り入れ口に吸入される流れと後方へ流される流れとの境界面上の流線が何本か描かれてある。よどみ点が存在する場合、壁面上の流線何本かが一点に集まり、そこから取り入れ口に向かっていく部分が太く白くなって見える。この白くなった部分が Photo 1 の実際の渦が可視化されたものによく似ているのは興味深い。この計算による渦発生すなわちよどみ点形成の限界速度比 V_1/V_0 および限界流量比 A_0/A_1 は Fig.3 に実線で示されてある。また Motycka et al.¹⁰⁾ による非圧縮を仮定した同様な計算結果も破線で示されてある。これらの計算結果はよく一致し双方の計算手法の正しさを意味するが両計算結果はデータと大

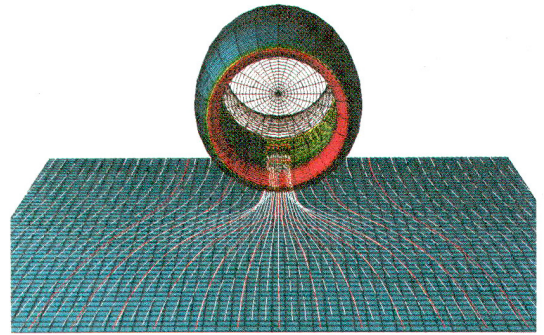


Fig.6 Calculation results for $A_0/A_1=9.0$, $H/D_1=0.95$; no stagnation point formed, red lines are on-body streamlines and white lines are off-body streamlines at $z_0/D_1=0.02$ upstream.

きくくいちがっている。それに理論結果によると B が大の場合すなわち横風を受けた場合は高い吸入速度でも渦は消滅することになるが実験結果では B の影響はみられない。実験結果と非回転流理論にもとづく計算結果の差については Motycka et al.¹⁰⁾ も気づいてはいたものの実験データの不足などの理由により深くは追求されていなかった。しかし、この差の意味はおおきい。たとえば地面近くにまたは胴体のちかく（この場合機体が壁面の役割をはたす）に取付けられたエンジンをもつ航空機の場合 (H/D_1 が 1.0 程度で V_1 がマッハ数で 0.7 程度)、理論では 50 ノットほどの低速で渦は消滅するが実験値からすると離陸速度でも存在する事になる。

4. Kline の渦条件の一般化

上の理論と実験データのくいちがいの意味するところは Kline の条件 b), すなわちよどみ点が必要とするのが正しくないか、非回転流モデルによるよどみ点の計算に問題があるかどうかであると考えられる。まずよどみ点の必要条件から考えてみる。Kline は実験的に渦が存在している時はよどみ点がある事を発見した。それでよどみ点がある場合、回りの壁面上にある渦度が一点に集められる為その増幅率が無限ちかくに大きくなり、しかもこの増幅された渦度は上昇流により取り込み口に吸い込まれる為と解釈されてきた。しかし逆は確かめられていなく、たとえよどみ点がなくとも取り込み口に吸入される流線上で渦度の増幅率が充分に大きければ渦が形成されてもよいと考えられる。Fig.6 によどみ点の形成しない場合の計算結果の一例を示してある。壁面上の流線が赤線で、また上流で壁面から約 $0.02 D_1$ 離れたところでの流線が破線の白線で描かれてある。これによると、よどみ点は見られず、壁面上の流線は収縮してはいるものの一点に集結せず全て下流に流れている。壁面から少し離れたところでも流線はかなりの収縮率で収束し、しかも取り入れ口に入っていることがわかる。よって、こ

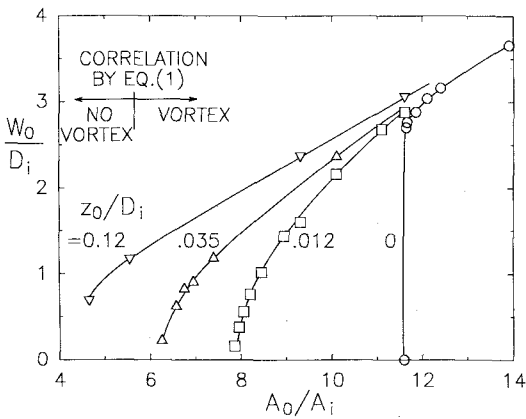


Fig.7 Width of captured streamtube at 3 Di upstream of inlet.

の収縮した流線上に渦が形成されても不合理ではない。実際竜巻が発生した場合、地面近くでの風向の収縮はみられるが、必ずしもよどみ点は観測されていない¹⁵⁾。そうすればよどみ点存在の理論値以下の A_0/A_i でも渦は形成される事になり実験値に近づくことになる。そこでこの増幅率を非回転流モデルを用いて計算し、どういふ条件でこれが大になるかを調べてみた。

Fig.7に上述の非回転流モデルの計算結果の $H/D_i = 0.95$ の場合を示してある。この図には、取り入れ口に吸い込まれる流管の、上流で壁から z_0 離れた所での水平幅 W_0 を A_0/A_i を横軸にとってグラフにしてある。 W_0 が大きければ大きい程渦度が幅広い領域から集取されるので渦発生の可能性は高いと考えられる。この図には幾つかの z_0 についての結果が表されているが、 $z_0 = 0$ の曲線、すなわち壁面上の流線だけを見ると、よどみ点がある場合、すなわち $A_0/A_i > 11.6$ では上流で、 $2.6 D_i$ 以上と大変広い幅の流れが取り入れ口に流れこむが、よどみ点が消える $A_0/A_i = 11.6$ で急激にその幅は0に落ち、取り入れ口には流れこまなくなることがわかる。しかし $z_0 > 0$ の曲線、つまり壁面から離れたところの流線を見てみると、よどみ点のない場合の $A_0/A_i < 11.6$ でもかなりの幅からの流れが吸入され、例えば $z_0/D_i = 0.12$ では A_0/A_i が約9でも W_0/D_i は2以上の値をとっている事が解る。実際壁面には境界層がありその排除厚を考えにいれると、壁面上での流線よりも壁面からすこし離れた所の流線を見るべきであり、よどみ点消滅の $A_0/A_i = 11.6$ をもって渦消滅ととるより、壁面から少し離れた所での流線の収縮が減少する低い A_0/A_i まで渦が存在しても不合理でないといえる。しかし $z_0 = 0$ の場合と異なり壁から離れた所では W_0 はシャープに変化するところがないので限界値のとり方は一義的でなく任意的になり曖昧さが残る。この任意性は、境界層の厚さに影響するレイノルズ数に關係する可能性もある。また経験式(1)によれば $H/D_i = 0.95$ の時 $A_0/A_i = 5.6$ で渦発

生であるが、この付近では z_0/D_i が0.10とかなり大きく考えても W_0 は1.0程度で流線の収縮はあまりなくそこで渦が存在しているとは考えにくい。従ってKlineの条件を流線の収縮比の変化でおきかえる事により実験結果に近い結果を得る事ができるがそれでもFig.3の実験結果を完全に説明する事は出来ない。よって他の要因も考えてみる必要がある。

5. ポテンシャル流理論による解析の改良

ここではもう一つの要因である非回転流モデルすなわちポテンシャル流理論の妥当性を考えてみる。渦という回転性の大きな流れを問題にするに非回転流理論で説明するのは無理ではないかというのが即座にでる異論である。そこでRankineのcombined vortex model¹⁾の概念にならない渦度は渦の中心部(core)に集中しているとし中心部以外では非回転流理論を適用する事を考えてみる。core内での渦度は上流での渦度が粘性による渦度の生成および散逸なしに渦の足元まで運搬されるとし、中心部の位置も非回転流モデルの流線の位置から与えられるものとすれば比較的簡単に渦度の流れ全体への影響を考慮にいれる事ができる。すくなくとも非回転流モデルの最大の欠陥点がおおまかではあるが推定できる。

上流でのロスビー数が R_0 とすれば、渦度 Ω_0 は

$$\Omega_0 = V_0 / (R_0 D_i) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。前項でも述べたように、渦中心部の渦度は上流の壁面近辺の渦度が収束して増幅されたものである。上流で横幅 W_0 壁から z_0 の距離内の流れが渦中心部を形成するとすると、よどみ点、もしくはそれにあたる地点に集められる渦度の総量は

$$\begin{aligned} \gamma &= \Omega_0 W_0 z_0 \\ &= 1/R_0 (z_0/D_i) V_0 W_0 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

と考えられる。そこでこのよどみ点、またはそれにあたる点から取り入れ口内まで仮定した線上に接線方向に強さ γ の渦糸が分布していると考ええる。この既知の渦糸を流れの場に置き、それにより誘発される速度の場はBiot-Savartの法則により計算する。この渦糸により乱された境界条件は、非回転性流れを重ね合わせる事により満足させる事ができる。従って渦糸が流れの場に存在する場合でも非回転流の計算方法で解析する事が出来る。より正確には渦の位置も渦糸により誘発された速度に影響されるので、この影響された位置に置き直して繰り返し計算すべきである。また渦中心部の大きさはレイノルズ数により有限で、その内部での渦度は境界層方程式に類似した薄いせん断層内の渦度運搬の式で計算すべきである。さらに進んで考えると3次元ナビエ・ストークスの式を解くべきである。しかし、ただ渦の全般の流れへの、特によどみ点形成への一次的影響のみを推定するには本方式で充分であるとえられる。

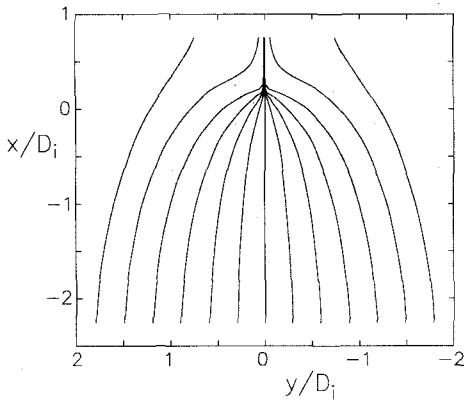


Fig.8 Calculated surface streamlines ; no line vortex, $A_0/A_1=0.95$, $H/D_i=11.4$.

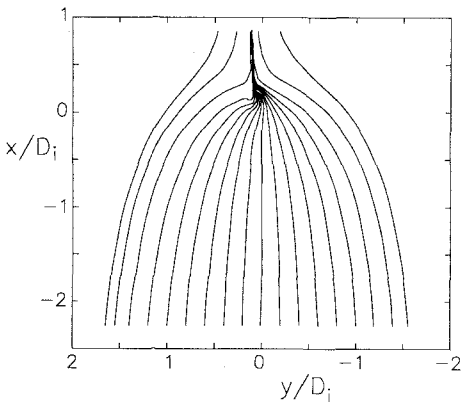


Fig.9 Calculated surface streamlines ; no line vortex, $R_0=100$, $A_0/A_1=0.95$, $H/D_i=10.9$.

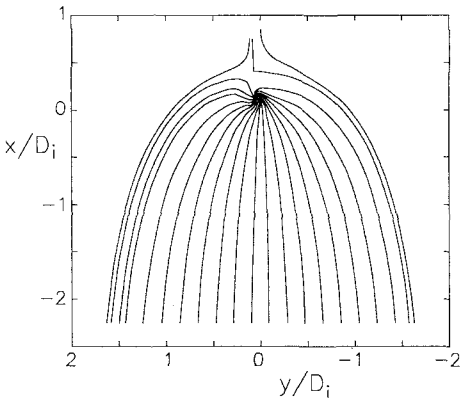


Fig.10 Calculated surface streamlines ; no line vortex, $R_0=100$, $A_0/A_1=0.95$, $H/D_i=11.9$.

Fig.8からFig.10に渦糸の特異性を置かない場合の結果と、上記の方法による計算結果の二例をしめしてある。いずれも $H/D_i=0.95$ の場合で壁面上での流線を表してある。渦糸を置いた場合はロスビー数 100 を仮定し、 $W_0 \cdot z_0/D_i^2=1$ が用いられている。Fig.8の渦糸を置か

い場合は丁度よどみ点の消失する $A_0/A_1=11.4$ での計算結果である。Fig.9とFig.10は渦糸を置いた場合の結果で、それぞれ $A_0/A_1=10.9$ と 11.9 でFig.7の流線収縮比の図から解るように、渦糸を置かない場合でよどみ点消失直前、直後にあたる条件である。Fig.9の流線はかなり収縮しているものよどみ点はみられない。Fig.10には明らかによどみ点があり、渦糸をおいた場合と置かない場合とでよどみ点の形成という見地からは殆ど差はないと考えられる。よってFig.3にみられた非回転流計算結果と実験的結果のずれは、よどみ点の形成の判定に渦の回転性を無視したためとは言えない。

6. おわりに

上記の研究結果の意味するところをまとめると次のようになる。まず今回取り上げられた、渦度の存在する流れに平行な壁面の近くに取り付けられた取り入れ口での渦発生は、取り入れ口の位置と流れに対する相対的吸入速度でほぼ一義的に決まる事が実験結果より裏づけられ、発生の限界値の相関関係が求められた。また取り入れ口の細部形状、無限遠での流れの方向は渦発生には直接影響はない事が確かめられた。しかしこの渦発生の限界値はKlineの渦発生条件をもとにした非回転流理論の計算値とき大きくくいちがっており、渦発生はこれまで考えられていたような非回転流理論では予測できないことが解った。Klineの条件を一般化する事により、また非回転流の仮定をゆるめ渦糸を仮定することにより理論的計算の改良し実験結果の相関値に近づく事は出来たものの、一般的に取り入れ口渦をともなった流れの場を完全に解析するにはいたっていない。より実際に近い解析法には解像度の高いグリッドを使ったナビヤール・ストークスの式の解が必要になる。渦中心部近くの乱流モデルはもちろん非定常的な渦の位置も考慮にいれなければならない。こういった計算は今の計算機の規模また現在の乱流の知識ですぐには実現できるものではない。

謝辞：本研究の諸段階で、米国ダグラス航空機会社の J. R. Jones 氏、また元南カリフォルニア大学の W. M. Douglass 氏からは有益なご意見を賜った。またマサチューセッツ工科大学の C. S. Tan 氏、元プラットアンドホイットニー社の W. A. Walter 氏、ゼネラルエレクトリック社からはデータの提供をえました。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Rouse, H. : *Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers*, p.81, 271, Dover Publications, 1961.
- 2) Quick, M. C. : Efficiency of air-entraining vortex formation at water intake, J. Hydraulics division, Proc. A. S. C. E., Vol.HY7, pp.1403~1416. 1970.

- 3) 荻原能男：空気吸込渦に関する研究，土木学会論文報告集，第215号，pp.15~25，1973年7月。
- 4) Kline, H. : Small scale tests on jet engine pebble aspiration tests, Douglas Aircraft Company Report SM-14885, 1953.
- 5) Glenn, D. E. : Ingestion of debris into intakes by vortex action, Aeronautics Research Council Report C.P. No.1114, 1970.
- 6) Youngmans, J. L. and Paul, D. L. : Considerations in inlet engine integration. In The Aerodynamics of Aircraft Gas Turbines (ed. G. C. Oates), AFAPL-TR-78-52, Airforce Aero Propulsion Laboratory, 1978.
- 7) Motycka, D. L. and Walter, W. A. : An experimental investigation of ground vortex formation during reverse engine operation, AIAA paper 75-1322, 1975.
- 8) Motycka, D. L. : Ground vortex-limit to engine reverser operation, *J. Engng. Gas Turbine & Powers*, Vol.98, pp.258~266, 1976.
- 9) Colehour, J. L. and Farquhar, B. W. : Inlet vortex, *J. Aircraft*, Vol.8, pp.39~43, 1971.
- 10) Motycka, D. L., Walter, W. A. and Muller, G. L. : An analytical and experimental study of inlet ground vortex, AIAA paper 73-1313, 1973.
- 11) Ruehr, W. C. : Inlet vortex ingestion characteristics-GE 1/16 scale model test results scaled to CF6 engine size, G. E. Technical Information Series Report No. R75AEG384, 1975.
- 12) Siervi, F. De., Viguier, H. C., Greitzer, E. M. and Tan, C. S. : Mechanism of inlet-vortex formation, *J. Fluid Mech.*, Vol.124, pp.173~207, 1982.
- 13) Shin, H. W., Greitzer, E. M., Cheng, W. K., Tan, C. S. and Shippe, C. L. : Circulation measurements and vortical structure in an inletvortex flow field, *J. Fluid Mech.*, Vol.162, pp.463~487, 1986.
- 14) Walter, W. A. : A summary of inlet vortex studies, Pratt & Whitney Aircraft Co. Report TDM2412, 1975.
- 15) Wilson, J. W. : Tornadogenesis by nonprecipitation induced wind shear lines, *Monthly Weather Review* Vol.114, pp.270~284, 1986.
- 16) Kessler, E. (ed.) : Thundestorm morphology and dynamics, 2nd ed., University of Oklahoma Press, 1986.
- 17) Kline, H. : An aerodynamic screen for jet engines, Douglas Aircraft company Report No. SM-22625, 1957.
- 18) Liu, W., Greitzer, E. M. and Tan, C. S. : Surface static pressure in an inlet vortex flow field, *J. Engng. Gas Turbins & Power*, Vol.107, pp.387~393, 1985.
- 19) Nakayama, A., Jones, J. R. and Douglass, W. M. : Formation of inlet vortex, *J. Fluids Engng.* に投稿中
- 20) Hess, J. L., Friedman, D. M. and Clark, R. W. : Calculation of compressible flow about threedimensional inlet with auxiliary inlets, slats and vanes by means of a panel method, MDC Report No. MDC J3789, 1985.
(1991.3.29 受付)

CONDITIONS FOR INLET VORTEX FORMATION

Akihiko NAKAYAMA

Conditions for a vortex to form in front of an inlet located near a solid wall have been examined. The correlation for the critical inlet mass flux required to form a vortex has been obtained from existing experimental data. The stagnation-point criteria based on the potential-flow theory are found to fail in reproducing the experimental correlation. Improved calculations with an imbedded line vortex have been carried out but they are still inadequate to explain the experimental results, indicating a need for a more realistic model.