三次元矩形くぼみまわりの流れ*

岡本史紀^{*1}, 川村昌生^{*2}, 水谷靖之^{*3}

Flow around Three-Dimensional Rectangular Cavity

Shiki OKAMOTO^{*4}, Masao KAWAMURA and Yasuyuki MIZUTANI^{**} Shibaura Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Shibaura 3-9-14, Minato-Ku Tokyo, 108-8548 Japan

In this paper we describe the flow associated with three-dimensional surface-mounted rectangular cavities. The experiment was carried out in two types wind tunnel and water channel. A significant aspect of the study has been an examination of the effects of changing the flow incidence angle from 0 degree to the normal from the cavity major axis to 90 degrees. The cavities investigated have had sectional geometries with width/depth of 1.0 and planform aspect ratio of length/width equal to 9.5. The time mean surface pressure distributions, mean velocity inside cavities, and mean velocity and turbulent intensity in the immediate wake of the cut-out were measured as the flow incidence angle was varied. The flow pattern inside cavities was observed by flow-visualization. Consequently it was found that (i) the greatest disturbance to the cavity flow occurs when the flow incidence angle is approximately 75 degrees to the longest cavity axis, and (ii) this is reflected in a large asymmetric wake associated with an increase in cavity drag.

Key Words: Pressure Distribution, LDV, Velocity Distribution, Drag, Flow Visualization, Cavity, Incidence Angle

1. 緒 言

都市部でのビルの谷間に見られる建物間のくぼみまわりの流れは大気汚染やヒートアイランド現象など環境問題と密接なかかわりをもっている。また川床に発生するくぼみは周辺の流れが水質汚染物質を拡散させる重要な役割を担っている。航空工学の分野⁽¹⁾⁽²⁾でも航空機のタッチダウングア使用時やフラップ収納時における機体表面のくぼみ周辺の流れの挙動は抵抗削減, 騒音防止の観点からも重要な問題である。また伝熱工学の点からもくぼみ周辺の流れは熱伝達促進, 熱物質拡散の問題など密接な関係にある⁽³⁾⁽⁴⁾。

このようなくぼみまわりの流れはスパン方向に無限の長さとする二次元の場合は Roshko⁽⁵⁾ などによって従来数多く報告されている。このような二次元のくぼみまわりの流れは, そのくぼみ内の流れの様子によってくぼみ幅 W の深さ D に対する比によって open cavity と closed cavity に分けられ⁽⁶⁾, 前者では抵抗,

熱伝達の減少をもたらす, 後者では抵抗, 熱伝達の増加をもたらすことが報告されている⁽³⁾。正方形断面のくぼみを境として, deep cavity ($W/D < 1$) と shallow cavity ($W/D > 1$) とも分けられている⁽⁷⁾。

しかし実際多く見られる三次元矩形くぼみまわりの流れに関しては前述の二次元の場合に比べて報告は少ない。Gaudet ら⁽¹⁾ は矩形くぼみの形状による抵抗係数の変化を報告しており, 最近では Dimicco ら⁽⁸⁾, Disimile ら⁽⁹⁾, Savory ら⁽¹⁰⁾ によって数種類の三次元矩形くぼみ内の圧力分布, 抗力係数, さらにくぼみの主流に対する迎え角による圧力分布, 抗力係数の変化も報告されている。特に迎え角の影響では迎え角が 60° 付近でくぼみ内の圧力変動, 抗力係数が急増することが報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。他方, くぼみ内の流れの様子は可視化観察によってセル状の流れの三次元構造が Maul ら⁽¹²⁾, Kistler ら⁽¹³⁾ によって報告されている。この流れの三次元構造は二次元の場合にも存在することが檜和田ら⁽⁴⁾ によって指摘された。

以上述べたように三次元矩形くぼみまわりの流れは圧力分布, 抗力係数が中心で, くぼみ内の流れの様子はピトー管等計測エレメントを流れ場に挿入して計測することが困難であるため可視化観察によるものしか見当たらない。

* 原稿受付 2000年3月17日。

^{*1} 正員, 芝浦工業大学(☎108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)。^{*2} 准員, 三菱重工業(株)(☎676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1)。^{*3} 学生員, 芝浦工業大学大学院。

E-mail: okamoto@sic.shibaura-it.ac.jp

本研究では三次元矩形くぼみ内の流れを LDV を用いて計測を行い、くぼみ内の流れの挙動を明らかにし、主流に対する矩形くぼみの迎え角による変化、特に前に述べた抗力係数、圧力変動が急増する迎え角付近の流れ構造を明らかにする。

記 号

H, I, J, K: くぼみの各頂点

C_D : 抗力係数

C_{N1}, C_{N2} : 法線力係数

C_P : 圧力係数 $= (P - P_{s\infty}) / (1/2) \rho U_\infty^2$

D : くぼみの深さ

L : くぼみのスパン方向長さ

$P_s, P_{s\infty}$: 静圧および主流の静圧

Re : レイノルズ数 $= U_\infty D / \nu$

S : くぼみの頂点 J から下流方向 $W/2$ を原点 O' として主流に垂直な Y 方向の座標

u, v, w : 時間平均速度の X, Y, Z 方向成分

u' : 変動速度の X 方向成分

U_∞ : 主流速度

W : くぼみ幅

X, Y, Z : くぼみ底面中心を原点とする直角座標軸で主流方向に X 軸, 水平方向に Y 軸, 鉛直方向に Z 軸をとる

θ : くぼみの迎え角

ν : 動粘度

2. 実験装置および実験方法

本実験ではレーザドップラー流速計による速度測定, 表面圧力測定, 流れの可視化観察に際して 3 種類の実験装置を用いた。まずレーザドップラー流速計による実験に使用した風洞は 200×200 mm の正方形断面をもつ循環形風洞で測定部の長さは 2 000 mm である。三次元矩形くぼみはノズル出口から 650 mm 下流の位置に直径 180 mm のターンテーブル上に設置してあり, 主流に対する迎え角を自由に選択することができる。矩形くぼみの幾何学的形状は幅 $W=15$ mm, 深さ $D=15$ mm, 長さ $L=143$ mm と幅 $W=7$ mm, 深さ $D=7$ mm, 長さ $L=66.5$ mm の二種類で前者はくぼみ内の流れの構造を調べるのに用い, 後者はくぼみ後方の後流を調べるのに用いた。矩形くぼみを含めて測定部はアクリル製である。図 1 に示すように矩形くぼみのおおのの角を (H, I, J, K) とつける。本実験では矩形くぼみのアスペクト比 ($L/D=9.5$) 一定のもとで迎え角を $0, 30, 60, 90^\circ$ の 4 種類に変え実験を行った。

Fig. 1 Schema of apparatus and nomenclature

実験ではくぼみ内部およびくぼみまわりの流れの構造を中心として平均速度, 変動速度の測定には二次元レーザドップラー流速計を用いた。実験に用いたドップラー流速計の諸元は次のようである。前方散乱形, デュアルビームモード (2 カラー 4 ビーム法), 最大出力 4 W (測定時の出力 300 mW), アルゴンイオンレーザ (波長: 緑 514.5 nm, 青 488 nm), ビーム間隔 50 mm, 収束レンズ焦点距離 500 mm, ビーム交差部測定体積最大直径, 緑 0.16 mm, 青 0.16 mm, 長さ緑 3.2 mm, 青 3.0 mm, シーディングには線香の煙を用いた。この場合の測定の精密度は 0.02% 程度である。実験は主流速度 $U_\infty=5$ m/s および 10 m/s とし, くぼみ深さを代表長さにとるとレイノルズ数: $Re=U_\infty D / \nu=5 \times 10^3$ のもとで行った。

次にくぼみ内の表面圧力測定の実験に使用した風洞は 400×400 mm の正方形断面をもつ N. P. L. 式プロードダウン形風洞で測定部の長さは 2 000 mm である。三次元矩形くぼみはノズル出口から 600 mm 下流の位置に直径 360 mm のターンテーブル上に設置してある。矩形くぼみの幾何学的形状は幅 $W=30$ mm, 深さ $D=30$ mm, 長さ $L=285$ mm で $L/D=9.5$ の一定のもとで迎え角を $0, 30, 60, 75, 90^\circ$ の 5 種類に変え実験を行った。表面圧力の測定にはデジタルマノメータを用いた。実験は主流速度 $U_\infty=12$ m/s とし, くぼみ深さを代表長さにとるとレイノルズ数 $Re=2.05 \times 10^4$ のもとで行った。最後に流れの可視化観察の実験に使用した回流水槽は幅 400 mm, 深さ 300 mm, 測定部の長さ 1 000 mm である。矩形くぼみの幾何学的形状は $W=15$ mm, $D=15$ mm, $L=143$ mm で実験は速度 $U_\infty=12$ cm/s, $Re=1.8 \times 10^3$ のもとで行った。なお, 3 種類の実験では各実験のレイノルズ数は異なる。

っているが、従来の報告⁽⁵⁾⁽¹⁴⁾より本実験の範囲ではレイノルズ数の違いによる影響はほとんどないものと思われる。

3. 実験結果および考察

3.1 くぼみ内の圧力分布、抗力係数 図2にくぼみ内の圧力分布を示す。図2(a)の $\theta=0^\circ$ の場合は Savory ら⁽¹⁰⁾の $D/W=0.7$ の場合の結果に近い分布を

Fig. 2 Surface pressure distribution in rectangular cavity

示しており、左右の側面の圧力分布からは1対の負圧領域が明らかに存在しており、くぼみ内に大きい渦すなわち再循環領域が停留している様子がみられる。その渦の中心は上流壁より $0.5W$ 、底面より $0.5D$ の位置付近で渦の軸は主流方向に対し直交している。また、この圧力分布からはくぼみ内の左右の分布がほぼ対称であることから Maul ら⁽¹²⁾、Kistler ら⁽¹³⁾によって指摘されたくぼみ内部においてセル状の流れの構造が見られる。

次に図2(b)の $\theta=30^\circ$ の場合になると上流側の頂点Hから流れがはく離することによって頂点H, K付近には負圧領域が存在する。また図2(a)の $\theta=0^\circ$ の場合と同様、左右の側面の圧力分布からはくぼみ内に大きい渦が停留している様子がうかがわれるが、その渦の中心は $\theta=0^\circ$ の場合に比べて多少上方の位置にずれている。しかし図2(b)からも $\theta=0^\circ$ の場合に見られたくぼみ内の流れにおけるセル状の構造も少し移動したのがみられる。さらに図2(c)の $\theta=60^\circ$ の場合になると、先の $\theta=30^\circ$ の場合に比べて上流側の頂点Hからのはく離した流れによる負圧領域は拡がり、また左右の側面の圧力分布からは渦の中心は頂点H, Jの上方に移動し、渦の軸はくぼみ内において対角線に沿って斜めに変化する。図2(b), (c)の $\theta=30, 60^\circ$ の両者の場合では、 $\theta=0^\circ$ の場合に比べ頂点H付近の負圧領域より左側では図2(b)の $\theta=30^\circ$ では $C_p=0.04$ から $C_p=0$ 、図2(c)の $\theta=60^\circ$ では $C_p=0.2$ から零の等圧力線が示しているようにスパン方向の右から左に向かう流れが存在することがみられる。これは図2(d)の $\theta=75^\circ$ の場合においても見られた。この右から左に向かうくぼみ内の二次的流れの存在、すなわちくぼみ内の流れの強い非対称性がこの後に述べる抗力係数の増加に密接に関係するものと思われる。図2(e)の $\theta=90^\circ$ の場合になると、上流側から下流へ $2.5W$ 付近において流れに垂直な左右の側面に1対の $C_p=-0.1$ の負圧領域があり、この付近に渦が停留しているものと見られ、それより下流では等圧力線がステップ状に見られるような圧力が増加していく分布

Fig. 3 Drag coefficient

となっている。

ここで対向する HI, KJ 面および HK, IJ 面上の圧力分布の差を求め積分して総和をとれば、それぞれ法線力 N_1, N_2 が求められる。抗力係数と同様に無次元化して法線力係数 C_{N1}, C_{N2} を求めれば、くぼみに働く抗力係数は次式で与えられる。

$$C_D = C_{N1} \cos \theta + C_{N2} \sin \theta$$

なお、 C_{N1}, C_{N2} の正の方向は図 1 に示されている。 C_{N1} と C_{N2} を用いて上式によって抗力係数を求め図 3 に示す。図 3 を見ると $\theta = 75^\circ$ 付近で抗力係数は最大値をもつ分布形である。Savory ら⁽¹⁰⁾, Wieghardt⁽¹⁵⁾ によると平面上の摩擦抵抗係数はくぼみの存在によって 4.5~10 倍程度、迎え角によって抵抗が増加することが示された。本実験においても同様な結果が示された。Savory ら⁽¹⁰⁾ によると $W/L=0.5, D/W=0.5$ の場合、抗力係数は $\theta=50^\circ$ 付近で最大であったのに対し、Wieghardt⁽¹⁵⁾ は $W/L=0.12, D/W=0.5$ で $\theta=80^\circ$ 付近で最大であった。本実験は $W/L=0.105, D/W=1$ であったが Wieghardt の結果に近い値であった。いずれにおいてもくぼみの抗力係数はある迎え角で最大となる分布形を示しているが、これはくぼみ内の流れの挙動によって生じたものである。

3.2 くぼみ内の流れの速度分布 図 4 に $Y/D=0$ の中央断面におけるくぼみ内の速度ベクトル図を示す。図 4(a) の $\theta=0^\circ$ の場合では、くぼみ内の表面圧

力分布で述べたような、大きく停留している渦すなわち再循環領域が形成されている様子が見られる。これは、くぼみ上流側のエッジからはく離れた流れが、下流側のエッジに衝突しくぼみ内に流れ込み、くぼみ全体にわたって下方で逆流領域が存在し再循環領域が形成されている。また、図 4(b) の $\theta=60^\circ$ においても、同様にくぼみ内に再循環領域が形成されているが $\theta=0^\circ$ の場合と違い再循環領域の範囲は中央付近でくぼみ下流の壁にまで達していない。

図 5 に速度ベクトルより求めた $Y/D=0$ の中央断面における Z 方向成分の等速度線図を示す。図 5(a), (b) の $\theta=0^\circ$ および 60° において、くぼみ下流側の壁付近で速度の Z 方向成分は流れがくぼみ内底面に向かうためマイナスであり、それに対し上流側では速度の Z 方向成分は上方へ循環する方向へ流れているためプラスの値を示している。

くぼみ内の流れのスパン方向の挙動を調べるために、図 6 に $Y/D=0$ の中央断面における速度の Y 方向成分の等速度線図を示す。図 6(a) の $\theta=0^\circ$ の場合、再循環領域内で Y 方向の速度成分はほとんど変化がないことがわかる。それに対し図 6(b) の $\theta=30^\circ$ の場合は、くぼみ底部では速度の Y 方向成分はプラスで下流側にあたる I, J 側の面に向かう強い流れが

Fig. 4 Velocity vector in X-Z cross section at $Y/D=0$

Fig. 5 Z-component of velocity profiles in X-Z cross section at $Y/D=0$

Fig. 6 Y-component of velocity profiles in X-Z cross section at $Y/D=0$

存在し、くぼみ上部では速度のY方向成分はマイナスで流れは上流側にあたるH,K側の面へ向かっており、スパン方向にも流れが再循環している様子が確認できる。また $\theta=30^\circ$ に比べて図6(c)の $\theta=60^\circ$ の場合は速度のY方向成分の変化が大きくなっており、迎え角が大きくなるにつれてスパン方向の流れの循環が強くなっていくことを示している。

今までは $Y/D=0$ のくぼみ内の中心断面付近の流れの挙動を述べたが、次に中心断面から離れた位置における流れを調べ、くぼみ内のスパン方向の流れの循環が強い $\theta=60^\circ$ の場合についてその挙動の詳細を明らかにする。図6に $\theta=0^\circ$ および 60° の中心断面から離れた位置での流れの速度のY方向成分の等速度線図を示す。図7(a)の $\theta=0^\circ$, $Y/D=3$ のE-E'断面で

Fig. 7 Y-component of velocity profiles

Fig. 8 Flow visualization

は図6(a)の $Y/D=0$ の位置の分布形とはあまり変わらず、くぼみ内においてスパン方向の流れの動きは小さいことを示している。しかし図7(b), (c)の $\theta=60^\circ$ の $Y/D=0.975$ のF-F'断面, $Y/D=1.975$ のG-G'断面では速度のY方向成分のマイナスの領域では

$Y/D=0.975$ の位置では図 6(c) の $Y/D=0$ の中心断面とあまり変わらないが、 $Y/D=1.975$ の位置ではマイナスの領域は下流側の角付近に移動し、角付近よりくぼみ内の流れが流出している様子が見受けられる。

3・3 くぼみ内の流れの可視化 図 8, 9 にくぼみ

Fig. 9 Flow visualization

内の流れを可視化観察した写真を示す。 $\theta=0^\circ$ の場合では 3・1 節の圧力分布で述べたようにくぼみ内では図 8(a) に示すような大きな渦が停留している様子が見られる。また図 8(b) から下流側の両頂点 J, K より対称にわずかにくぼみ内の流れが流出しているのが見られる。さらに迎え角が増した場合のくぼみ内の流れの可視化写真を図 9 に示す。図 9(a) の $\theta=30^\circ$ の場合はくぼみ内に渦の軸がスパン方向に沿って見られる。くぼみ内の流れは IJ 側の面に向かって流れ、渦の一部分は下流側のコーナ J から流出している様子が見られ、図 8 の $\theta=0^\circ$ の場合とは明らかに異なっている。さらに図 9(b), (d), (e) の $\theta=45, 60, 75^\circ$ のように迎え角が増すにつれ、その傾向は顕著に見られ、図 9(d) の $\theta=60^\circ$ 、図 9(e) の $\theta=75^\circ$ ではくぼみ内の渦の軸心がはっきりと現れており、それに伴い下流側のコーナ J からくぼみ内の流れが流出している様子が見られる。また写真では不明りょうであるため $\theta=60^\circ$ の場合のくぼみ内部の渦の観察図を図 9(c) に示すが、らせん状に渦がくぼみ内部ではスパン方向に動いている。こうした迎え角 θ が増すにつれて生じるくぼみ内の流れの挙動の変化過程はくぼみ内の流れとくぼみ外側のせん断層との間で大きな運動量輸送をもたらす、その結果くぼみに作用する抗力係数は増加するものと思われる。最後の図 9(f) の $\theta=90^\circ$ では先の圧力分布で述べたように上流の HK 側の面より下流へ $L/3$ の位置付近まで再循環領域が生成され、それより下流では流れが下流方向に流れ、下流の IJ 側の面より流出している様子が見られる。

3・4 くぼみ後方近傍後流 くぼみの頂点 J から $W/2$ 下流の位置を原点 O' とする新たな座標系をとり、流れに垂直方向にとった座標 S をとる(図 1)。図 10(a)~(c) に S - Z 断面におけるくぼみ近傍後流の

Fig. 10 Velocity vector in Y - Z cross section at $X/D=3$

Fig. 11 X-component of velocity profiles in Y-Z cross section

Fig. 12 Y-component of velocity profiles in Y-Z cross section

Fig. 13 Z-component of velocity profiles in Y-Z cross section

Fig. 14 X-component of turbulence intensity in Y-Z cross section

速度ベクトル図を示す。なお、図中の矢印は流れに面した他のコーナの位置を示す。図10(a)の $\theta=0^\circ$ の場合は、ほとんど速度ベクトルの変化がなく、くぼみ内の流れのコーナJ, Kからの流出はほとんど見られない。一方図10(b)の $\theta=60^\circ$ の場合は、コーナJを中心に $-1 \leq S/D \leq 1$ の範囲で大きな速度ベクトルが存在し、コーナJからくぼみ内の流れの流出が活発に行われていることがわかる。また、 $S/D=0$ の位置を中心に速度ベクトルが非対称に広がっていることから、くぼみ内の流れが流出する範囲は、 $S/D > 0$ の方向に広がっていることが見られる。さらに図10(c)の $\theta=90^\circ$ の場合は、 $S/D=0.5$ を中心にコーナI, Jからくぼみ内の流れが左右ほぼ対称に激しく流出しているのが確認できる。ここでくぼみ内の流れの流出が顕

著に見られた $\theta=60^\circ$ および $\theta=90^\circ$ の場合について流れの挙動を詳細に調べる。

図11, 12および図13は速度ベクトルより求めたS-Z断面におけるくぼみ近傍後流での速度のX, Y, Z方向成分の等速度線図を示す。図11(a)の $\theta=60^\circ$ の場合は、 $S/D=0$ 付近でくぼみ内の流れによる流出が活発で、X方向成分の速度欠損が大きくなりつつあることがわかる。また、図11(b)の $\theta=90^\circ$ の場合は、 $S/D=0$, $S/D=1$ と二つの速度欠損のピークがあり、くぼみのコーナI, Jより流れが流出していることを示している。 $\theta=60^\circ$ ではコーナJである $S/D=0$ 付近を中心にくぼみ内の流れが流出しているのに対して、 $\theta=90^\circ$ では両コーナI, Jよりくぼみ内の流れが流出する。したがって $\theta \geq 60^\circ$ ではコーナJからコーナI,

J へと流出する範囲が変わるものと考えられる。Dimicco ら⁽⁸⁾の可視化実験では $\theta=45^\circ$ 前後で、くぼみ内の循環流が下流に位置する二つのコーナから流出したが、 $\theta=60^\circ$ 近辺になるとより下流に位置するコーナのみから流出する傾向が示され、その流出範囲も $\theta=60^\circ$ ではくぼみの中央付近にまで及んでいた。本実験の結果は以上述べた Dimicco ら⁽⁸⁾の結果と一致した。図 12 の速度の Y 方向成分の等速度線図においても、 $\theta=60^\circ$ の場合では $S/D=0$ を中心に左右に向かう Y 方向の流れが強くなっており、くぼみから流れの流出する範囲は $S/D=0$ を中心に $-2 \leq S/D \leq 1$ である。また $\theta=90^\circ$ の場合は $S/D=0.5$ を中心に左右に向かう Y 方向の流れが強くなっている。図 13 の速度の Z 方向成分の等速度線図からも、くぼみ近傍後流の流れは、迎え角 θ が大きくなるに従い、コーナ J に集まったくぼみ内の循環流が活発に流出しており、流出する強さや範囲も拡大していることが明らかである。

さらにくぼみ近傍後流での乱れ強さについて調べてみる。図 14 に S-Z 断面におけるくぼみ近傍後流での乱れ強さの X 方向成分を示す。 $\theta=60^\circ$ の場合では、 $S/D=0$ の位置で乱れ強さが大きくなり、乱れ強さの影響する範囲は $-3 \leq S/D \leq 1$ の位置まで広がっている。一方 $\theta=90^\circ$ の場合は、 $S/D=0, 1$ の二つの位置で乱れ強さが大きくなっており、高さ方向にも、乱れ強さが大きく広がっている。乱れ強さの値は、迎え角 θ が増すにつれて大きくなっていき $\theta=90^\circ$ のときに最も大きくなる傾向が見られる。

4. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 三次元矩形くぼみ内には大きな渦が停留し、迎え角 $\theta=0, 30^\circ$ ではセル状の構造が見られ、迎え角が増すにつれスパン方向に沿って下流側へ流れることが明らかになった。また、くぼみの抗力係数は迎え角が増すにつれ増加し、 $\theta=75^\circ$ 付近で最大値をもつ分布形で示される。

(2) くぼみ内の流れは迎え角が増すにつれ、スパン方向の流れの循環が強くなり、 $\theta=60^\circ$ では一部分は下流側のコーナより流出し、その他はくぼみ内でスパン方向に再循環するなどくぼみ内の流れの挙動が明らかになった。

(3) 迎え角が増すにつれ、停留している渦の軸心をはっきり見られ、スパン方向に沿う二次の流れを伴うくぼみ内の流れの挙動が可視化観察によって明らかにされた。

(4) くぼみ近傍後流では迎え角が増すに従い、コーナ J よりくぼみ内の循環流が活発に流出しており、特に $\theta=60^\circ$ では流出する範囲はくぼみの中央付近にまで及んでいることが明らかになった。

文 献

- (1) Gaudet, L. and Winter, K. G., Measurements of the Drag of Some Characteristic Aircraft Excrescences Immersed in Turbulent Boundary Layers, AGARD, No. 124 on Aerodynamic Drag (1973).
- (2) Undercarriage Drag Prediction Methods, ESDU (Engineering Sciences Data Unit), 79015 (1987), Roy. Aero. Soc.
- (3) Charwat, A. F., Roos, J. N., Dewey, F. C. and Hitz, J. A., An Investigation of Separated Flows, Part II: Flow in the Cavity and Heat Transfer, *J. Aeronaut. Sci.*, **28-7** (1961), 513-527.
- (4) 檜和田宗彦・馬淵幾夫・熊田雅弥, 二次元長方形くぼみ内の三次元流れ構造, 機論, **49-445, B** (1983), 1895-1903.
- (5) Roshko, A., Some Measurements of Flow in a Rectangular Cutout, NACA Tech. Note, 3488 (1955).
- (6) Charwat, A. F., Roos, J. N., Dewey, F. C. and Hitz, J. A., An Investigation of Separated Flows, Part I: The Pressure Field, *J. Aeronaut. Sci.*, **28-6** (1961), 457-470.
- (7) Sarohia, V., Experimental Investigation of Oscillations in Flows over Shallow Cavities, *AIAA J.*, **15-7** (1977), 984-991.
- (8) DiMicco, R. G., Disimile, P. J., Leuders, K., Toy, N. and Savory, E., Three-Dimensional Flow in a Rectangular Cavity, *Proc. 12th Biennial Symp. Turbulence*, (1990), A 13.1-13.8.
- (9) Disimile, P. J., DiMicco, R. G., Leuders, K., Savory, E. and Toy, N., Unsteady Flow in a Three-Dimensional Rectangular Cavity Immersed in a Subsonic Crossflow, *Proc. ASME Conf. Forum on Unsteady Flow*, **102** (1990), 45-50.
- (10) Savory, E., Toy, N., Disimile, P. J. and DiMicco, R. G., The Drag of Three-Dimensional Rectangular Cavities, *J. Appl. Sci. Res.*, **50** (1993), 325-346.
- (11) Disimile, P. J., Toy, N. and Savory, E., Pressure Oscillations in a Subsonic Cavity at Yaw, *AIAA J.*, **36-7** (1998), 1141-1148.
- (12) Maull, D. J. and East, L. F., Three-Dimensional Flow in Cavities, *J. Fluid Mech.*, **16** (1963), 620-632.
- (13) Kistler, A. L. and Tan, F. C., Some Properties of Turbulent Separated Flows, *Phy. Fluids*, (1967), S. 165.
- (14) Sinha, S. N., Gupta, A. K. and Oberai, M. M., Laminar Separating Flow over Backsteps and Cavities, Part II: Cavities, *AIAA J.*, **20-3** (1987), 370-375.
- (15) Wiegardt, K., Increase in Turbulent Frictional Resistance Caused by Surface Irregularities, Min. of Air Prod. R & T No. 103, *Trans. FB*, 1563 (1946).