

衝突噴流の今・昔

Research on Impinging Jet

一宮 浩市 (山梨大工) *1, 榊原 潤 (筑波大機能工) *2

*1 Koichi Ichimiya, Yamanashi Univ., Mechanical Systems Eng.,

*2 Jun Sakakibara, Univ. Tsukuba, Inst. Eng. Mechanics & Systems

Impinging jet is very useful for heat transfer and mass transfer enhancement. Historical research process on the impinging jet heat transfer is described systematically. The present paper is composed of two stages. In the first stage, the heat transfer characteristics of impinging jet are described for the heat transfer movement of a single circular impinging jet, an inclined jet and an impinging jet with an oscillated surface. In the second stage, a systematic structure of an impinging jet and a heat transfer mechanism are explained corresponding to the turbulent structure at the stagnant region, turbulent heat flux and three-dimensional vorticity.

Key Words: Impinging Jet, Forced Convection, Heat transfer, Numerical Analysis, PIV, LIF

1. 緒言

衝突噴流は、局所的に伝熱促進、物質伝達促進を比較的に簡便に行う方法として実用的にも広く応用されてきている。産業界では、物体の加熱、冷却、乾燥などに幅広く適用され、はじめのころは、寸法がノズル径に比較し、大きいものが対象となり、ノズル・衝突面間距離もノズル径の 7-8 倍 (potential core と伝熱の関係) あるいはそれ以上であった。しかし、対象物が電子機器の冷却などと小さくなるにつれ、また装置の小型化で空間も狭くなるにつれ、上壁を有し、ノズル・衝突面間距離がノズル系と同等もしくは、それ以下という形態も多くなってきた。衝突噴流熱伝達に関する review は、Martin⁽¹⁾ や Viskanta⁽²⁾ をはじめ、いろいろな人が行っている。

衝突噴流熱伝達に及ぼす影響因子は、(a)ノズル寸法、ノズル形状および姿勢、ノズルの数、(b)噴出流体の種類と流量、(c)ノズル・衝突面間距離、(d)衝突面の状態(平滑、粗面等)および衝突面姿勢、(e)衝突噴流系へのエネルギー付加(振動、音波等)、(f)時間的変化(パルス jet) (g)熱的境界条件などと多く、これらを用途に応じて適用すれば、より効果的に伝熱制御および質量伝達制御を得ることができる。しかし、これら制御における一つの問題点は如何に一様化(温度分布など)を行うかにある。

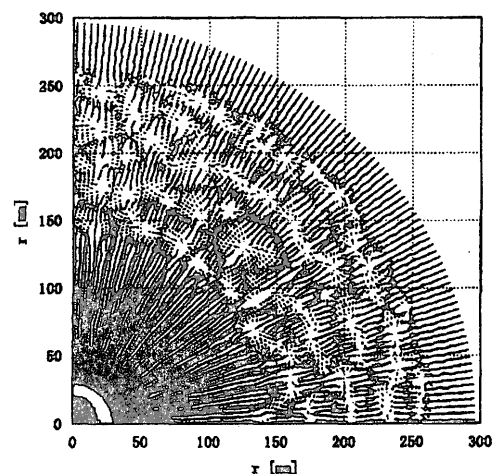
基本的な現象に目を向けると、これまで、衝突面上の渦の発生は明らかにされているが、充分な解明には至ってはいなかった。特に軸対称噴流の淀み付近の三次元機構の解明は大きなテーマであろう。しかし、計測方法および可視化、画像処理法の発達で次第に熱伝達機構もより詳細に明らかになりつつある。

計測方法として、衝突面上の温度分布は熱電対による点線分布から感温液晶などによる面分布として捉えるようになり、より特性が明らかになってきている。空間的にも PIV と LIF を駆使して速度・温度場の同時計測さらに三次元渦度場の計測などが可能になり機構の説明に寄与している。

本報では、「今」に重点をおき、最初に、各種衝突噴流熱伝達特性の代表的なものとして、単一円形ノズルからの噴流が平滑等温面に衝突した後の熱移動、ノズル姿勢の影響(斜め衝突噴流)、さらに二次元衝突噴流に及ぼす衝突面の加振の影響について紹介し、次に、よどみ域を対象とした組織構造を代表に、衝突噴流の乱流構造と熱伝達機構について説明する。

2. 各種衝突噴流熱伝達

2.1 円形衝突噴流熱伝達の移行 円形ノズルによる衝突噴流熱伝達特性に関しては Jambunathan⁽³⁾ が半径方向の分布特性として review している。本報では、単一円形ノズルから噴出した流体が、断熱上壁を持つ流路内の平滑等温面に衝突した後、どのような伝熱流動特性を示すかを、数値解析と可視化実験にて検証したものを示す⁽⁴⁾。単一円形ノズルから噴出した流体 ($Re=400$) は等温加熱面に衝突し、半径方向に流動する。図 1 に、三次元数値解析により求められた局所熱流束分布を周方向 90° の範囲で示す。 $r=0$ から $r=40\text{mm}$ 付近までは同心円状で二次元強制対流支配域である。その後、筋模様が半径方向に現れ、 $r=140\text{mm}$ 付近まで続く。これは流路断面上昇流と下降流が生じ、周方向に上昇・下降流のグループができる。すなわち、三次元複合対流支配域である。 $r=150\text{mm}$ 以降では、ベナール対流もどき、三次元自然対流支配域が現れる。このように代表的 3 領域が存在することになるが、これは、感温液晶シートを衝突面に設置し、水を作動流体として使用することにより可視化実験により検証されている。

Fig.1 Heat flux ($Re=400$)

2.2 斜め円形衝突噴流の伝熱 衝突噴流により伝熱制御を行うときノズルの衝突面に対する姿勢が一つの要素である。円形ノズルの出口を衝突面に平行にし、同じレベルに断熱壁を有する系でノズル角度を変化させた結果の一例を図2(a),(b)に示す⁽⁵⁾。図2(a)は、右斜め45°より空気を噴出($Re=24000$)させた場合の、衝突面上に張られた感温液晶の色分布である。主流側と副流側で明確に差が有り、 $Y=0$ に対して対称な馬蹄形状を呈している。図2(b)は、色の輝度と温度の関係を予め校正した回帰式より、色を温度に定量化し、衝突面温度と正味熱流束より求めた局所ヌセルト数 Nu 分布の鳥瞰図である。最大 Nu は、ノズルを延長することにより得られる交差領域(破線域)内の端部(副流側)に見られ、破線域の主流側に平坦領域が存在する。これは層流噴流では存在せず、乱流噴流でより明確になる。

2.3 衝突面の加振効果 スリットノズルから噴出した空気が平滑伝熱面に衝突したときの伝熱特性が衝突面の加振の有無により、如何に変化するかを実験的に得た結果の1例を図3(a),(b)に示す。図3(a)の無次元ノズル・衝突面間距離 $H(=h/B, B$:ノズル幅) $=1.0$ 、ノズル出口レイノルズ数 $Re=1000$ では周波数の低いところで伝熱促進が見られている。図3(b)の $H=4.0, Re=10000$ では、周波数の増加とともに全領域で伝熱劣化をきたしている。本実験範囲では H

が比較的短く低レイノルズ数、低周波数で伝熱促進が得られ、高周波数で、 H が大きくなると伝熱劣化の傾向になる。これは衝突面の加振が渦の更新に働くと伝熱促進になっている。

3. 衝突噴流の乱流構造と伝熱機構

3.1 平面衝突噴流の渦対と伝熱機構 衝突噴流における渦運動の時空間的挙動に注目し、よどみ域の組織構造の解明を目指した研究が多く行われている。ここでは、平面(二次元)衝突噴流に関する最近の研究成果について解説する。

横堀ら⁽⁷⁾は平面衝突噴流のよどみ域に発生する渦対構造に着目し、よどみ域の乱流輸送機構に関する系統的な実験研究を行った。彼らは、よどみ線と垂直かつ壁面に平行に軸を持ちノズル幅と同程度の大きさを有する渦対群を発見し、その空間スケールおよび発生頻度に関する詳細な知見を得た。

榊原ら⁽⁸⁾は PIV と LIF による平面衝突噴流よどみ域の速度・温度場の同時計測結果から、渦対の渦度と流体側温度の時空間的な分布を直接計測した。作動流体は水でノズル幅 $B=14.5\text{mm}$ 、アスペクト比 10 である。図4は壁面近傍の噴流中心面における速度ベクトルと温度の瞬時分布である。ここで、壁面流れ方向を x 、壁面垂直方向を y 、スパン方向

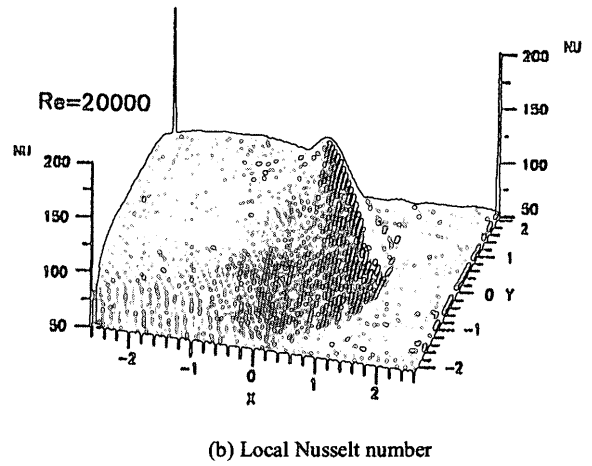
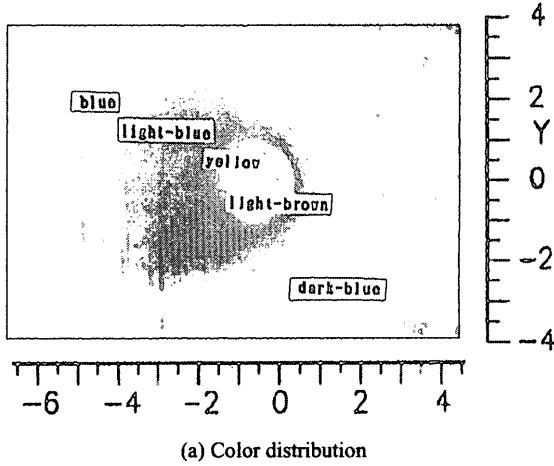


Fig. 2 Oblique impinging jet ($\theta=45^\circ, Re=20000$)

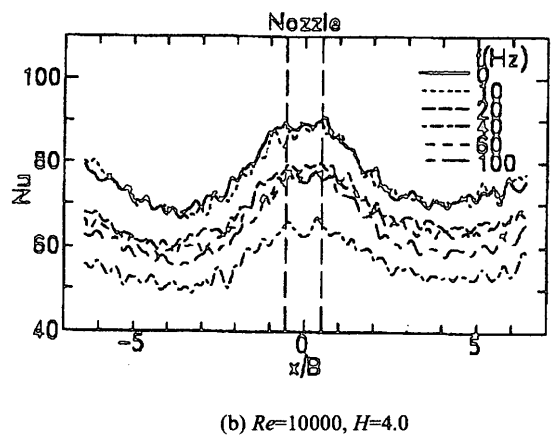
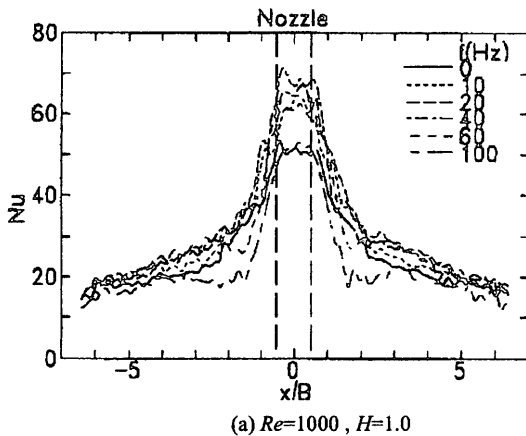


Fig. 3 Local Nusselt number in impinging jet with oscillated surface ($a=1.0\text{mm}$)

を z とする。 $z=-4\text{mm}$ および $z=4\text{mm}$ 付近にそれぞれ中心を持つ渦が対となって存在し、その外側ではダウンウォッシュ（壁向き）、内側ではアップウォッシュ（外向き）が発生している。渦によって誘起された流れが温度境界層から高温流体をはく離するためアップウォッシュ部分は高温で、これにより外側へ高温流体が噴出している。噴出した高温流体は $y=5\text{mm}$ 付近まで達している。このことは、渦対による乱流熱流束の発生を予想させる結果であり、事実、乱流熱流束の荷重結合確率密度関数および渦度と乱流熱流束の空間相関から渦対による乱流熱流束の生成が支配的であることが示されている⁽⁸⁾。また、図5は条件付き平均された乱流熱流束の分布である⁽⁹⁾。ここで、横軸は条件抽出点に対する z 方向への相対的な距離 x を、縦軸は条件抽出点における渦度 ω_z が $\omega_z > \omega_{th}$ を満たす場合における周囲の瞬時乱流熱流束 $v'w'$ を平均したものである。これより、正の渦度（この図で反時計回り）が存在する場合にはその右側 ($x > 0$) において高い乱流熱流束が発生することが分かる。これは図4の観察結果と一致する結果であり、渦対による高温流体の巻き上げに伴う乱流熱流束の発生が支配的であることを示す。一方、時間平均乱流熱流束は渦対の最も多く発生する壁面近傍 $y/B=0.2$ 付近において最大値をとり、その大きさは全熱流束の20%程度であることが報告されている⁽⁸⁾。

以上の様に、渦対が乱流熱流束の発生に貢献している事実が明らかとなったが、渦対の発生機構に関しても多くの知見が得られている。渦対の時空間的な変化を見るため、図6(a)に z 方向で絶対値が最大の瞬時渦度の y 方向分布を時間 t に対して、また、図6(b)に y 方向で絶対値が最大の瞬時渦度の z 方向分布を時間 t に対して表す。すなわち、図6(a)では y 方向への、図6(b)では z 方向への渦の軌跡が示されている。図6(a)では、渦は時間と共に上流より下流し（図中①参照）、壁近傍 ($y/B=0.3$ 付近) で渦度を高め、上下動を繰り返しながら壁面上で漂流する（図中②参照）。図6(b)において、渦対は z 方向の移動を繰り返したのち消滅する（図中③参照）。一つの渦対を構成する渦は z 方向へ正、負の順で並んでおり、図4で示された渦構造が頻りに存在していることが分かる。これらのことから、渦対は上流から下流して壁近傍で渦度を増加させ、しばらく漂流した後に消滅していくことが理解される。

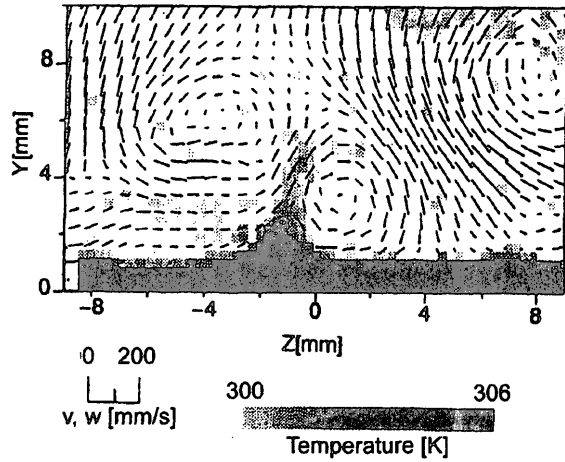


Fig. 4 Velocity vectors in a center plane of the plane impinging jet. Superposed gray scale indicates temperature measured by LIF. Hot fluid is rolled up by the counter-rotating vortices near the heated wall at $y=0$.

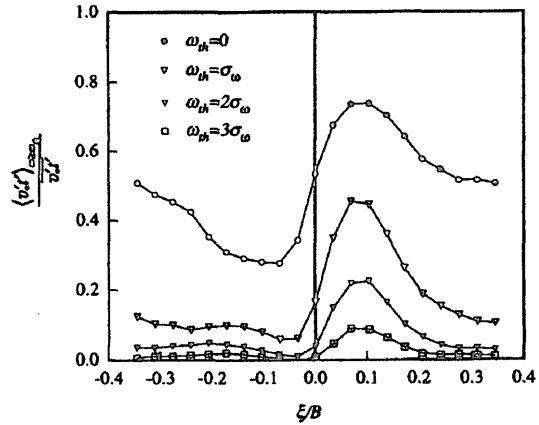


Fig. 5 Conditional averaged turbulent heat flux $\langle v'w' \rangle$ thresholded by the various vorticity magnitude of the counter-rotating vortices.

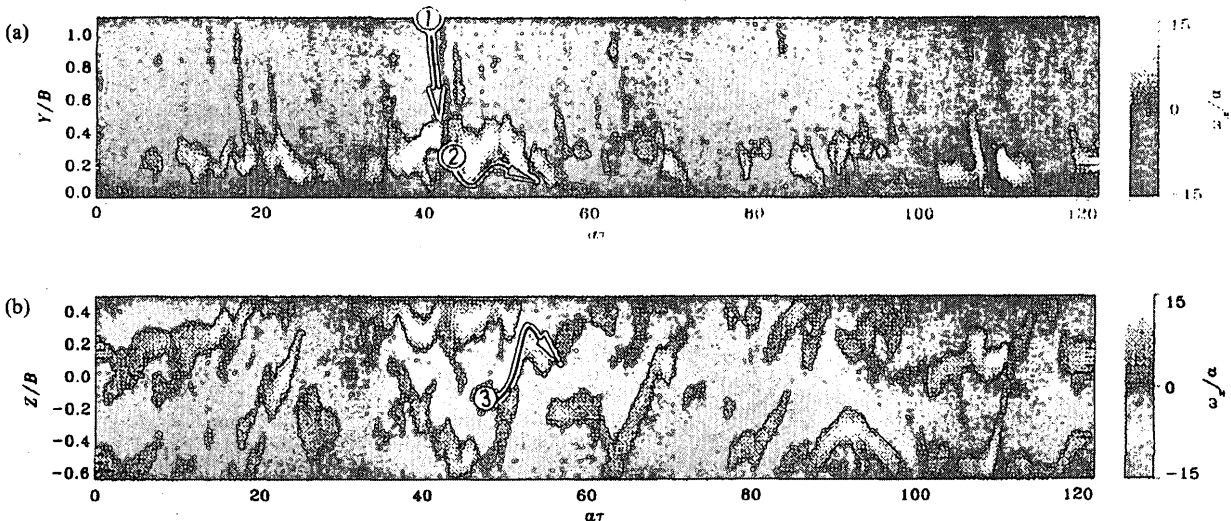


Fig. 6 Temporal evolution of the profile of vorticity near the impinging surface. (a) profile in a spanwise direction, z . (b) profile in a wall-normal direction, y .

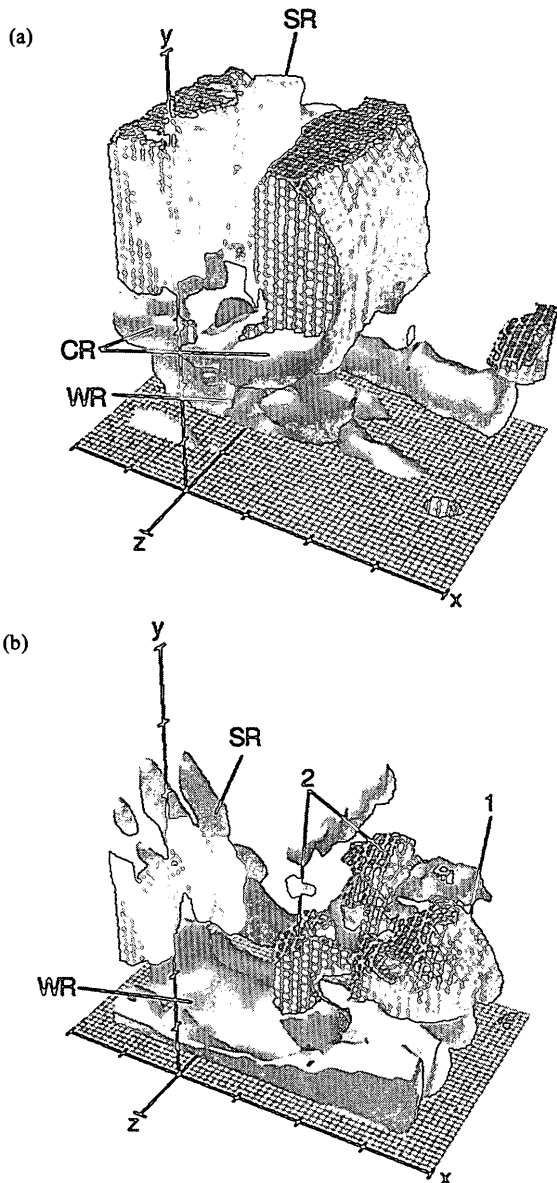


Fig.7 Phase-averaged vorticity isosurfaces near the impinging wall; light gray, $|\omega_x|$; dark gray, $|\omega_y|$; dark mesh, $|\omega_z|$. Tic interval is $0.5B$ in the all direction.

3. 2 平面衝突噴流の三次元渦構造 それでは、上流から流下してくる渦対の起源は何か。これを明らかにするべく、平面噴流よどみ域の三次元渦度場の計測結果が報告されている⁽¹⁰⁾。瞬時渦度三成分の三次元分布を計測することは困難であるため、噴流に周期的擾乱を加えてせん断渦の時間的位相を固定した上で、異なる時刻に計測された複数断面における二次元速度分布より各断面における位相平均渦度を分布を求め、それに基づいて位相平均渦度場の三次元構造を再構成した。図7は位相平均渦度場を各渦度成分の絶対値の等渦度面によって表したもので、(a)および(b)はそれぞれ位相 $\phi=0^\circ$ および $\phi=180^\circ$ である。格子パターンは壁面($y=0$)をあらわし、 y および z 軸は $x=0$ に位置する。 $\phi=0^\circ$ および $\phi=180^\circ$ に共通して、せん断渦は噴流中心面($y-z$ 面)に対して対称の位置に存在している。せん断渦(ワイヤ

フレーム)は、図中(a)で測定領域に進入し壁面に近づいた後、よどみ域で移流方向を変化させ、(b)で壁面に沿って流れていく。壁面上には x 軸に平行な渦対構造(WR)がよどみ線を横切る形で x 方向に伸びている一方で、(a)において左右のせん断渦の中間下側にはクロスリブ(CR)が存在し、これがせん断渦の流下に伴って x 方向に伸張され、せん断渦のよどみ域通過と共に壁面の渦対に合体する (b)。すなわち、三次元的に変形した左右せん断層のせん断渦が干渉することで噴流中心面において弱い ω_x が発生し、それがせん断渦間下流側において x 方向に伸張されることで成長し、さらに、壁面近傍における速度勾配によって伸張されて渦度強度を増しながら渦対に合体する。

以上のように、平面衝突噴流の乱流伝熱機構および渦構造の詳細に関しては多くの知見が得られてきた。一方、軸対象衝突噴流においては、乱流エネルギー収支等の詳細な統計量⁽¹¹⁾や渦構造の時空間分布に関する計測結果⁽¹²⁾⁽¹³⁾も得られているが、平面衝突噴流に見られる明瞭な渦対構造が存在するという報告はない。しかしながら、軸対象衝突噴流においても壁面近傍における速度勾配は大きく、上流から種となるような渦構造がよどみ域に到達することで渦度の増幅がなされることは期待され得る。このあたりが今後解明されるべき課題の一つであると思われる。

参考文献

- (1) Martin, H.(Hartnett, J.P.and Irvine, T.F. eds), Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces, *Adv. Heat Transf.*, 13 (1977), 1-27.
- (2) Viskanta, R., Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 6 (1993), 111-134.
- (3) Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A. and Button, B.L., A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 13-2 (1992), 106-115.
- (4) 一宮浩市, 竹間勝一, 森本俊一, 功刀資彰, 秋野詔夫, 単一円形衝突噴流熱伝達の移行に関する研究, 機論, 64-625 (1998), 3350-3355.
- (5) Ichimiya, K., Heat Transfer and Flow Characteristics of an Oblique Turbulent Impinging Jet Within Confined Wall, *Transactions of ASME (Ser. C)*, 117 (1995), 316-322.
- (6) 一宮浩市, 吉田裕, 二次元衝突噴流熱伝達に及ぼす衝突面の加振効果, 機論, 65-637 (1999), 3078-3083.
- (7) 横堀・笠木・平田, 二次元衝突噴流のよどみ領域における乱流輸送機構に関する研究, 機論 B, 49-441 (1983), pp.1029-1039.
- (8) 神原・菱田・前田, 二次元衝突噴流よどみ域における渦構造と熱伝達 (DPIV と LIF による速度・温度場の同時計測), 機論 B, 60-573 (1994), pp.1538-1545.
- (9) Sakakibara, J., Hishida, K., Maeda, M., Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet (Simultaneous Measurements of Velocity and Temperature Fields by Digital Particle Image Velocimetry and Laser-Induced Fluorescence), *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40-13 (1997), pp.3163-3176.
- (10) Sakakibara, J., Hishida, K., Phillips, W.R.C., On the vortical structure in a plane impinging jet, *J. Fluid Mech.*, 434 (2001), pp.273-300.
- (11) Nishino, K., Samada, M., Kasuya, K., Torii, K., Turbulent statistics in the stagnation region of an axisymmetric impinging jet flow, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 17 (1996), pp.193-201.
- (12) Kataoka, K., Suguro, M., Maruo, K., Mihata, I., The effect of surface renewal due to large-scale eddies on jet impingement heat transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30 (1987), pp.559-567.
- (13) Landreth, C.C., Adrian, R.J., Impingement of a low Reynolds number turbulent circular jet onto a flat plate at normal incidence, *Exp. Fluids*, 9 (1990), pp.74-84.