

軸対称衝突噴流の可視化観察

栗間 諄二*・三宅 常時**・世良 裕明***・宮本 政英*

Visual Observation of an Axisymmetric Impinging Jet

Junji KURIMA, George MIYAKE, Hiroaki SERA and Masahide MIYAMOTO

Abstract

The behavior of flow structure of an axisymmetric impinging jet has been experimentally studied by using the flow-visualization techniques, i.e., the hydrogen bubble technique and the fluorescent dye injection.

The Reynolds number based on the nozzle diameter ($D = 40$ mm) and the nozzle exit velocity is varied in the range of $4000 < Re < 11000$. The growth of vortex-like structures visualized by the hydrogen-bubble and the dye injection is observed either from the jet axis direction or in the jet cross-section.

When the jet impinges on the plate, the flow structure is varied by the relation between the location of the plate and the rolling up vortex. When the nozzle-to-plate spacing is less than the nozzle diameter, the frequency of occurrence of ring vortices is remarkably effected by the impingement plate. With increasing nozzle-to-plate spacing, the frequency of transport of ring vortices decreases due to the coalescence of vortices and the turbulence in the boundary layer increases.

1. まえがき

衝突噴流熱伝達の研究は数多くなされているが、各実験系における供試ノズルの幾何学的形状の違い等で衝突時の流動状態が異なり、その熱伝達特性は必ずしも一般的に整理されていない。これは通常、衝突噴流熱伝達はノズル出口から衝突板までの距離が比較的小さい条件で利用される場合が多く、噴流初期領域の挙動によって、淀み域の熱伝達特性が強い影響を受けているためと考えられる。しかしながら工業的適用性が高いノズル—衝突板間距離が比較的小さい場合の衝突噴流の流動及び熱伝達の研究は少なく、ノズル—衝突板間距離が小さい場合とした T. Davanipour 等¹⁾ の流れ場特性の研究でも、 $H/D < 20$ の範囲にあり、完全に発達した噴流を中心に考えている。

軸対称自由噴流の初期領域での流動の研究²⁾ に引きつづき、本報ではポテンシャルコア内に衝突板を設置した $H/D \leq 4$ での軸対称噴流において、流れの可視化による流動の観察を行なったので報告する。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。作動流体は水とし、回流水槽を使用した。オーバーヘッドタンクに運ばれた水が、助走部、整流部を経て軸対称ノズルから水で満たされている水槽に噴流として流出し、衝突板に垂直に衝突する。この水は気泡除去の為、一度50℃まで加熱し、その後、約20℃まで自然冷却したものを使用した。軸対称ノズルは直径 $D = 40$ mm、絞り比 10.5 : 1 で、ノズル特性については平均速度及び乱れ強さ分布から、その健全性が確かめられている³⁾

流れの可視化は水素気泡法と染料注入法の二種によって行なわれた。水素気泡法は $20 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤに 150~250V の直流電圧を流して行ない、染料注入法は蛍光染料ウラニンを点滴装置を用い、ノズル出口に設置した 10 mm の厚さをもつ染料注入リングから流して行なった。可視化観察は写真およびビデオテープレコーダーによって行なったが、その撮影における照明は、ハロゲンライト又はストロボフラッシュを実験条件にあわせて使用した。

実験はノズル出口速度とノズル—衝突板間距離を変化させて行なった。ノズル出口速度 U_0 は 11 cm/s ~ 27 cm/s の範囲であり、ノズル直径を代表長さとした

*機械工学科

**東京大学大学院

***中国電力

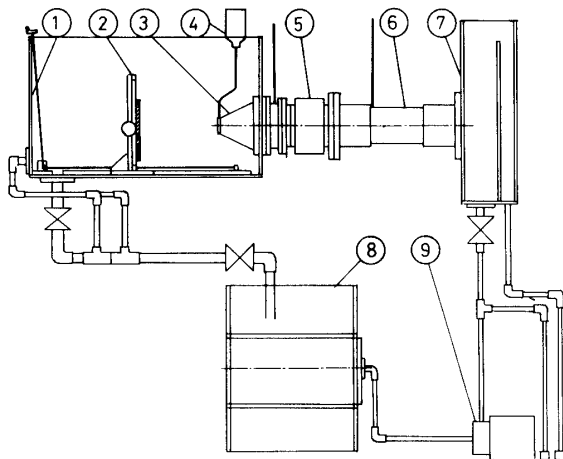


Fig. 1 Experimental apparatus

- | | |
|--------------------|-----------------|
| ① Water tank | ⑥ Straightener |
| ② Target plate | ⑦ Overhead tank |
| ③ Round nozzle | ⑧ Reservoir |
| ④ Dye injector | ⑨ Pump |
| ⑤ Settling chamber | |

噴口レイノルズ数 $Re = U_0 D / \nu \cong 4000 \sim 11000$ であった。無次元ノズル—衝突板間距離 $H/D = 0.5 \sim 4$ の範囲であった。この衝突板は幅が 200×200 mm、厚さ 15 mm の側面につや消しの黒塗料をぬった透明なアクリル樹脂板を用い、裏面からの可視化を可能にした。

3. 実験結果及び考察

3.1 染料注入法による衝突噴流側面観察

Fig. 2 は $Re = 10520$ で、無次元ノズル—平板間距

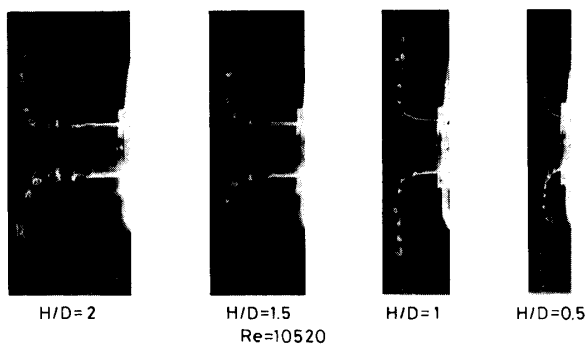


Fig. 2 Side view of a round jet impinging on a plate (dye injection)

離 H/D が 0.5, 1.0, 1.5 そして 2.0 の各々の場合の染料側面可視化写真である。 $H/D = 0.5$ ではノズル出口から噴流は広がりを持ち、小さなロールアップした渦輪が間隔を密にして衝突板上を流れる。 $H/D = 1.0$ でも同様にノズル出口から、やや広がりをもった形で、

衝突後に渦がロールアップしている。しかし、 $H/D = 0.5$ の場合と比較すると渦径がやや大きくなっている。 $H/D = 1.5$ では、噴流はノズル下流のある位置までは広がりを見せず、自由噴流の動きを示している。渦のロールアップは衝突前に生じ、渦径も大きくなっている。 $H/D = 2.0$ では、衝突前に大きくロールアップした渦輪が衝突後にあまり渦径を大きくせず、比較的早く崩壊している。この一枚の写真からだけでは観察できないが、 $H/D = 2$ の場合のようにロールアップした渦輪が衝突前に大きく成長した場合には、衝突前の渦輪の状態により衝突時の流れが変化する事が観察された。軸対称空気衝突噴流で、Popile 等³⁾ はスモークワイヤによる可視化観察から同様な結果をえている。

Fig. 3 は $Re = 5680$ での側面写真から観察した衝突前後の渦中心の位置を、各 H/D に対して示したものである。衝突後の渦の移動はあまり変化が見られず、 $r/R = 2 \sim 3$ の間で最も衝突板に近づいている。又 $H/D \leq 2.0$ では、渦のロールアップが衝突後に生じているが、 $H/D \geq 2.5$ では衝突前に生じている。又 $r/R = 1$ を示す直線からの逸脱から、 $H/D = 2.5$ と 3 の場合の渦輪の径が大きくなっている事がわかる。

Fig. 4 は $Re = 9640$ での側面写真から観察した流動の分類であり、横軸での $H/D = \infty$ は自由噴流（衝突板が存在しない）の場合である。 $H/D = 1.5$ 以上では、ロールアップした渦の発生位置が自由噴流の場合と比較してほとんど変化ないが、 $H/D = 1.0$ ではその発生位置が幾分ノズルに近づいており、 $H/D = 0.5$ では $x/D = 0.2$ 付近で発生している。即ち、ノズル—衝突板間距離が小さくなった場合には、衝突板の存在による影響のため渦の発生位置も変化する事が観察できる。

Fig. 5 は H/D に対するストローハル数 St_D の変化を異なる 5 つの Re 数に対して表わしたものである。ストローハル数は $St_D = fD/U_0$ として定義したもので、 f は渦の発生周波数 (1/sec) であり、噴流測面からのビデオ観察により求めたものである。 Re 数の違いによる変化は観察されるが、ノズル—衝突板間距離が $H/D = 1.5$ 以上では、 H/D による影響がほとんど観察されず、自由噴流 ($H/D = \infty$) とほぼ同一である。 $H/D = 1.0$ では渦の発生頻度が幾分増加し、 $H/D = 0.5$ では急激な増加を示している。これは Fig. 2 の $H/D = 0.5$ の場合での小さな渦輪が間隔を密にして進行している事と同様な現象を現わしており、又 Fig. 4 での衝突板の影響により渦の発生位置が変化する

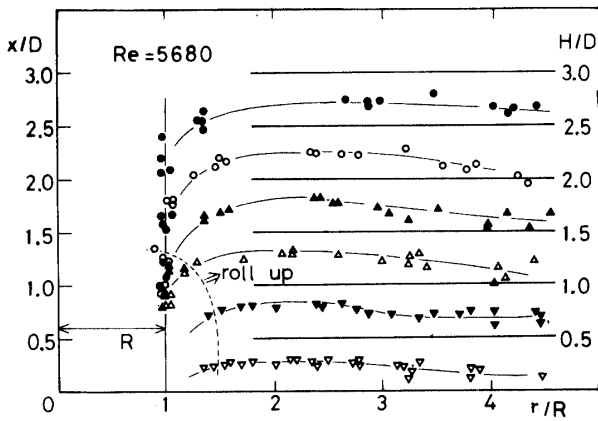


Fig. 3 Axial variation of the center of shear vortices

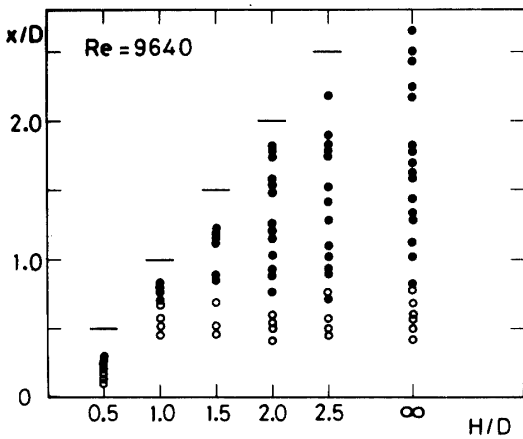


Fig. 4 Axial variation of shear vortices observed from photographs (○: Bending of shear layer, ●: Rolling up of shear vortex)

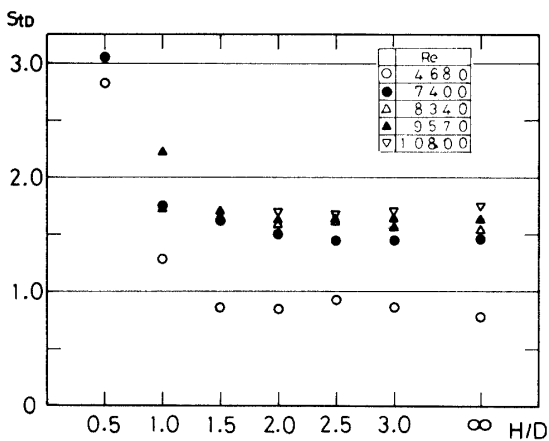


Fig. 5 Axial variation of a Strouhal number

る事と密接に関係している。ノズル—衝突板間距離が著しく小さくなると衝突板の影響により、噴流内の圧力勾配に変化が生じ、剪断層がより不安定になり、渦発生位置が早くなると共に渦の自然発生頻度が増加す

ると考えられる。

3.2 染料注入法による衝突板後方からの観察

ノズル出口で蛍光染料を注入された噴流を透明な平板に衝突させ、その衝突時の噴流断面の状態を衝突板後方より観察した写真が Fig. 6 である。これは

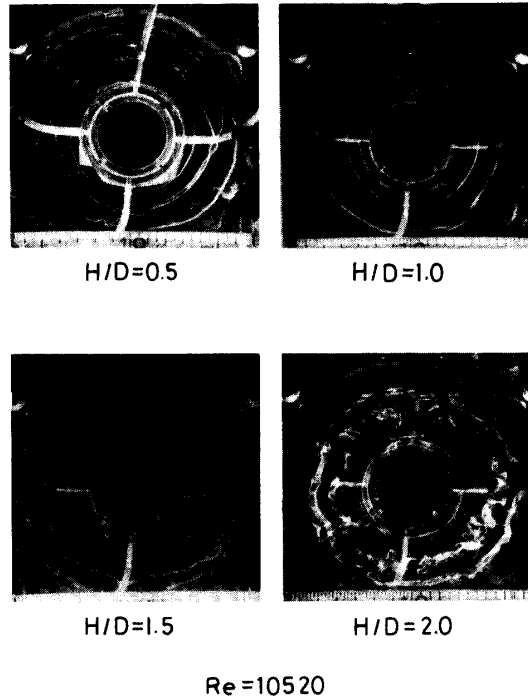


Fig. 6 Configuration of a round jet impinging on a plate with dye injection (plane view)

$Re = 10520$ で、ノズル—衝突板間距離 H/D が各々、0.5, 1.0, 1.5, そして2.0である。 $H/D = 0.5$ では渦輪を形成している染料線の幅が細くて、渦輪の数も比較的多く、渦輪どうしの交叉も観察される。渦輪の交叉はカップリング現象での渦の追い越しを示している。 $H/D = 1.0$ では渦輪の交叉は見られず、ほぼ同心円的な広がりを持ち渦径（染料線の幅）も大きい。 $H/D = 1.5$ になると、渦輪に局所的な周方向への歪が観察され、円形から多角形状へと変形している。 $H/D = 2.0$ では、渦輪を形成している染料線が不均一となり、小さな渦糸の集合体のような形状となり渦輪は全体的に崩れてきている。この位置では渦が大きく成長し、崩壊に向っている事が観察される。

Fig. 7 は染料断面可視化写真から求めた半径方向の無次元平均渦波長 l/D の H/D による変化を表わしたものである。 $H/D = 0.5$ の場合 l は高い渦発生頻度のために小さくなり、 $H/D = 1.0, 1.5$ で $l/D = 0.3 \sim 0.35$ でほぼ一定となり、 $H/D > 1.5$ では直線的に急

増している。H/D = 1.5~2.0での l の急な増加はカップリング現象により渦の周波数が半減するためと考えられる。一方、 Re 数の違いによる l の変化は小さい。

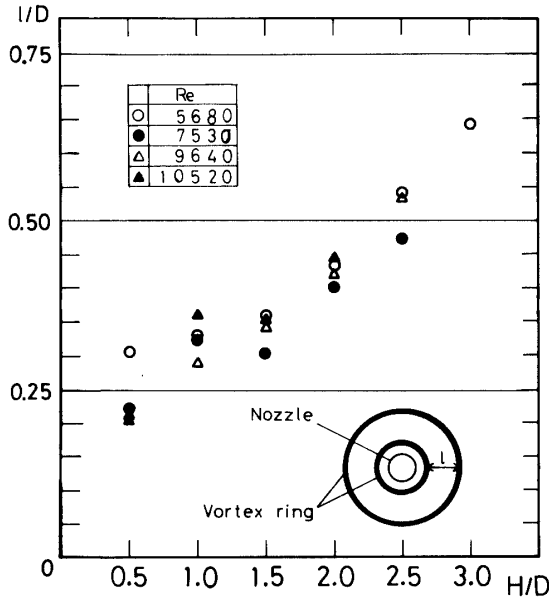


Fig. 7 Mean wavelength of vortex rings

3.3 水素気泡法による衝突噴流側面観察

ノズル出口中心に $20\mu\text{m}$ のタンゲステンワイヤを噴流軸に垂直にはり、水素気泡法により直流パルスで 0.1 秒間隔で与えた場合のタイムラインの変化を噴流側面より可視化観察をした。Fig. 8 は $Re = 7140$ で $H/D = 1.0, 2.0, 3.0$ そして 4.0 の場合のタイムライン側面可視化写真である。H/D = 1.0 では衝突板上でタイムラインに凸状の曲率が見られ、衝突板上での噴流中心部の流速の減少と噴流端部での加速が見られる。渦の発生は衝突後であるため、タイムラインには半径方向の流れによる引き伸ばしだけが観察される。H/D = 2.0 では、 $x/D = 1$ 付近で渦の発生が見られ、その位置迄は衝突板の影響は観察されないが、衝突板付近では H/D = 1.0 の場合と同様に凸状の変形が観察される。H/D = 3.0 では剪断渦が大きく成長しているため、タイムラインの両端が不明確となり、見かけ上の長さが不均一となっている。又、中心部でのタイムラインの間隔が広がっている部分もあり、カップリングでの加速が起っていると考えられる。衝突板付近での凸状の曲率もゆるやかになり、ほとんど平坦な線となっている。これは噴流端での加速が弱まったためと考えられる。H/D = 4.0 では衝突板近くまで自由噴流の挙動をとり、渦の発生から成長、そして合体が起っている。衝突板近くではタイムラインの長さが短くなり、噴流コア部が小さくなり、ポテンシャルコ

アの端に近づいている事が推測できる。又、H/D が小さい場合に見られた凸状の変形は見られず、板上で平坦な形になっている。

これらの事から、H/D が小さい場合には衝突板近くで噴流中心部と端部に速度差が生じ、タイムラインに凸状の変形が現われ、H/D が大きくなると剪断渦の成長により、その形が平坦となる事が観察されたが、これは R. Gardon ら⁴⁾ や著者⁵⁾ らの軸対称空気噴流での熱伝達の実験において、H/D が小さい場合に $r/D = 0.5$ 付近で熱伝達率が上昇する事を説明していると考えられる。

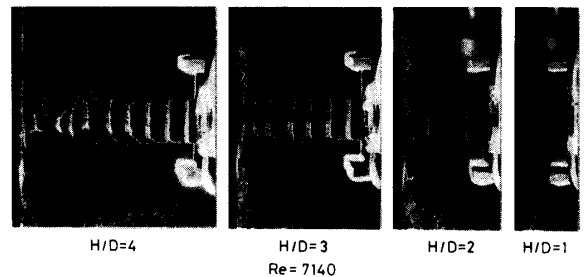


Fig. 8 Side view of round jet impinging on a plate (hydrogen-bubble)

Fig. 9 は各 H/D に対する側面写真でのタイムラインの間隔から求めた軸中心での速度分布を示す。横軸は無次元軸方向距離 x/D 、縦軸は出口速度 U_0 でタイムライン間速度 U を割った U/U_0 であり、 Re 数は 7140 である。H/D = 3 以上において、出口速度 U_0 より大きなタイムラインによる瞬間速度が生じている。これはカップリング現象による加速のためである。H/D = 1 の場合には Fig. 2 で観察されたように、ノズル出口から噴流は広がりをもつため、タイムライン間の測定では $U/U_0 = 1$ が存在せず、減少したものとなっている。噴流は衝突板近くで急激に速度を減少し

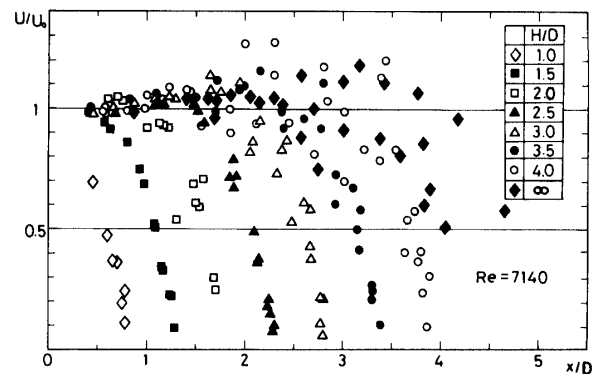


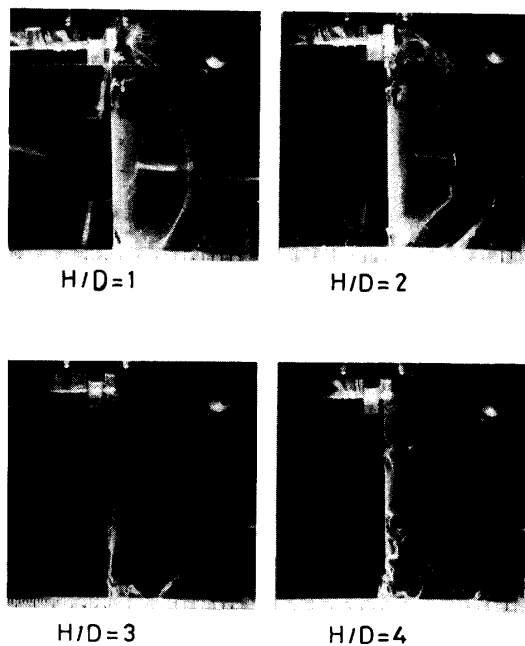
Fig. 9 Axial variation of the jet center velocity determined from photographs

ている事が観察され、T. Davanipour 等¹⁾の定量測定と同様な傾向を示している。

3.4 水素気泡法による淀み領域の観察

水素気泡法による断面可視化は、衝突板前方 5 mm 幾何学的淀み点から半径方向に 10 mm ($r/D = 0.25$) の位置にタングステンワイヤを垂直に張って、衝突アクリル板後方より観察を行なった。

Fig. 10 は $Re = 6620$ で、 $H/D = 1, 2, 3, 4$ のそれぞれの場合での水素気泡の連続電圧印加による断面可視化写真である。 $H/D = 1$ では、流れは淀み点を中心に放射状に広がり、 $r/D = 1.2$ 付近に観察される渦輪も円形を有している。 $H/D = 2$ では、流線は放射状になっているが、渦輪は波状になり、染料注入法による可視化写真での渦輪の周方向へのうねりに対応している。 $H/D = 3$ では、 $r/D = 1.5$ 付近での渦輪が大きく変形してきており、流線にも歪が観察される。 $H/D = 4$ になると、中心部にスケールの大きな乱れが観察され、流線の放射状の広がりが存在しなくなる。この大きな乱れは渦の成長に依存しており、 Re 数が大きくなると、より小さな H/D で観察される。



$Re = 6620$

Fig. 10 Configuration of a round jet at typical sections (hydrogen-bubble)

4. 結 言

軸対称衝突噴流において、側面及び断面の流れの可視化を行い、ノズル—衝突板間距離の比較的小さな場

合での噴流初期剪断層で発生する渦輪の形状及び挙動を観察し、この領域の熱伝達特性の詳細を検討すべき基礎的知見を得た。

衝突後の渦輪の挙動は衝突時の剪断渦の状態によって決定されるが、渦輪の発生周波数はレイノルズ数に依存し、 $H/D = 1.0$ 以下で急激に増加し、ノズル—衝突間板距離が小さい場合には衝突板の存在による噴流上流への影響が渦発生にまでおよんでいる。

又、従来ポテンシャルコア内の伝熱特性は、多くの場合、層流くさび流れ理論で解析されているが、 $H/D \sim 1.5$ を境にして渦輪のカップリングによって渦輪の輸送頻度が急減する流動構造の相異が存在する事や H/D の増加に伴い境界層内で乱れの増幅がおこる事が観察された。

最後に、本研究に対し御指導、御助言を頂いた村川勝弥名誉教授、東京大学工学部 平田賢教授、笠木伸英助教授に深く感謝の意を表します。

5. 主要記号

- f ; 自然渦発生頻度
- l ; 衝突板上での渦輪間距離
- r ; 半径方向距離
- x ; 噴流軸方向距離
- D ; ノズル出口直径
- R ; ノズル出口半径 ($= D/2$)
- H ; ノズル—衝突板間距離
- U ; 噴流軸方向速度
- U_0 ; ノズル出口での噴流軸方向平均速度
- Re ; 噴口レイノルズ数 ($= U_0 D / \nu$)
- St_D ; 渦発生ストローハル数 ($= f D / U_0$)

参 考 文 献

- 1) Davanipour, T and Sami, S; J. Hydraulic Division, ASCE, HY 5, 557 (1977)
- 2) 栗間他 3 名; 乱流研究 3, 13 2—1 (1984)
- 3) Popiel, C. O and Trass, O; Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., 6, Cp 25 141 (1982)
- 4) Gardon, R and Akfirat, J. C; Int. J. Heat Mass Transfer, 8, 1261 (1965)
- 5) 栗間他 5 名; 第21回伝熱シンポジウム講論集 91 (1984)

(昭和60年4月15日受理)