

No. 3

渦輪の周方向の不安定波に関する研究

内藤 隆*, 今井伸治*, 山田日出夫*

Experimental Study on Circumferential Instability of Vortex Ring

Takashi NAITOH, Shinji IMAI, and Hideo YAMADA

Nagoya Institute of Technology

A vortex with fingers structure (named as fingers vortex) was for the first time found in a flow in which a vortex ring at $Re=2600$ impinged on a flat plate. The fingers vortex accelerates to make the main and other induced vortices more wavy azimuthally and plays a crucial role in the subsequent development of the flow field. The azimuthal period of the flow field remained $2\pi/14$ [rad] all that while. To clarify the origin of the periodicity, we examined the vortex ring, travelling in free space, in detail spatially and temporally using smoke visualization method. Then we happened to find that the number of waves called Widnall instability decreases as the ring travels downstream. Moreover in the case of the vortex ring impinging on the flat plate, the azimuthal period also increases as the distance between the nozzle and the plate becomes longer. Since the result in impinging case has shown good agreement with that in free space, it is concluded that the azimuthal periodicity appeared on the interaction with a plate is caused by Widnall instability.

Key Words : vortex ring, Widnall instability, number of waves, smoke visualization, fingers vortex, flat plate, induced vortex

1. はじめに

平板に垂直に接近する渦輪に関する研究課題は、壁乱流中に存在する渦構造やbursting等の現象の解明につながる基礎研究として注目されている。これまでの研究によれば、主渦の作り出す流れ場によって平板付近で境界層が形成され、その非定常剥離によって2次渦や3次渦といった誘起渦が発生・成長すること、また、主渦が誘起渦と干渉する様子とその干渉過程において円周方向に不安定な波状変形が起こることなどが明らかにされている^{1, 2)}。

$Re=UD/\nu=2600$ ($U=62\text{cm/s}$: 渦輪の並進速度, $D=6.4\text{cm}$: 渦輪の直径) の渦輪が、平板に垂直に衝突する流れ場を煙可視化法によって調べたところ、フィンガー状の縦渦構造が偶然見出された。そして、このフィンガー渦は流れ場の周方向の周期性を増大させ、その後の乱流への遷移に大きな役割を果たしていることが観察された。なお、この流れ場に現れる周方向の周期の決定

要因についても調べられた。

2. 実験装置と可視化方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。渦輪はスピーカを駆動して発生させた。また、円形ノズルと平板は水平に設置され、特に断りのない場合ノズル先端から平板までの距離は20.0cmである。流れ場を記述するために円柱座標系を用いる、Fig. 1非定常場を記述するための経過時間はトリガー信号を基準時刻とし、スピーカはその約200ms後に駆動されている。

線香の煙をトレーサーとして予め箱に入れておき、約3mm幅のスリット光によって流れ場を平板に垂直に、或いは平行に照明して可視化した。本研究で用いた実験装置による渦輪の発生は非常に安定しており、その再現性は確認されている。そのため、ここで示す時間経過の写真は、トリガー信号を基準にした別々の渦輪の特定の時刻の流れ場の様子を並べたものであるが、一つの渦輪の変化の過程として解釈することができる。

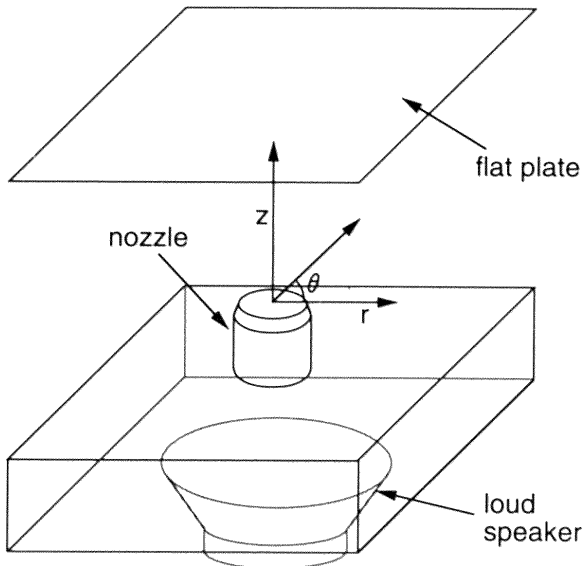


Fig. 1 Experimental arrangement and cylindrical coordinates

3. 結果と考察

3. 1 フィンガー渦の様子

平板と渦の干渉によってフィンガー渦が発生する³⁾。Fig. 2 に $t = 660\text{ms}$ におけるフィンガー渦の構造を示す。(a) は平板と主渦・誘起渦・フィンガー渦の位置関係を表している。 $z = 19.5, 18.0, 16.5\text{cm}$ の断面での様子が、それぞれ (c), (d), (e) に対応している。(c) では、主渦に巻き付いているフィンガー渦と円周方向に波状変形している 2 次渦輪が捉えられている。(d) では、内側から順に 2 次渦輪、 z 軸方向に引き伸ばされ渦度が集中したフィンガー渦、主渦輪、そして一番外側に 3 次渦輪が可視化されている。(e) では、3 次渦輪の自由空間側の一部とそれに巻き付き始めているフィンガー渦の自由空間側先端が捉えられている。この他多数の可視化情報をもとに、フィンガー渦のトポロジーが Fig. 2 (b) のよう

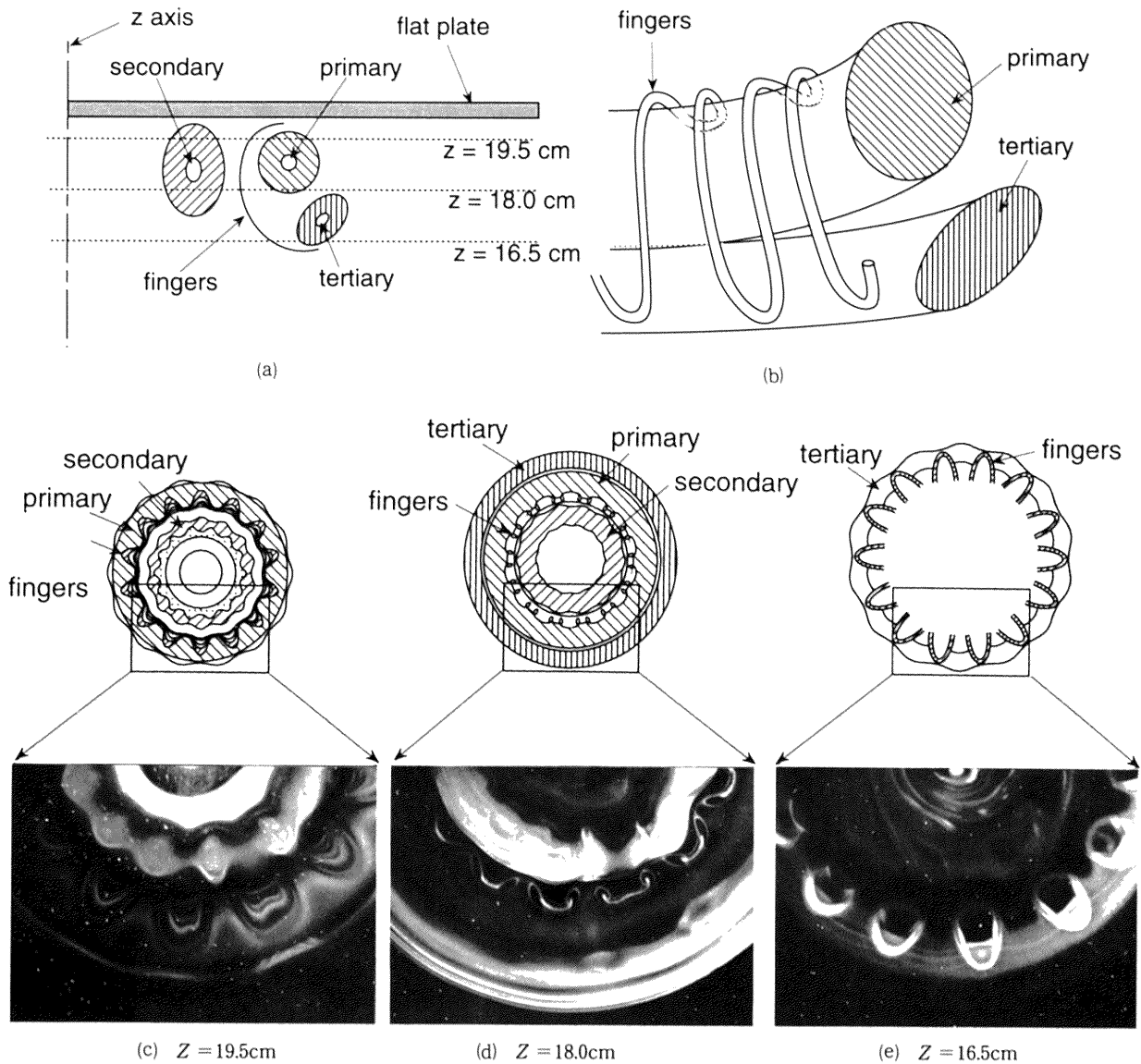
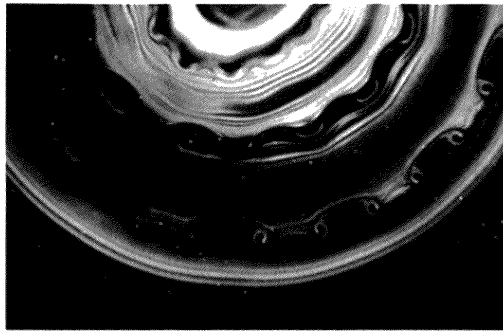
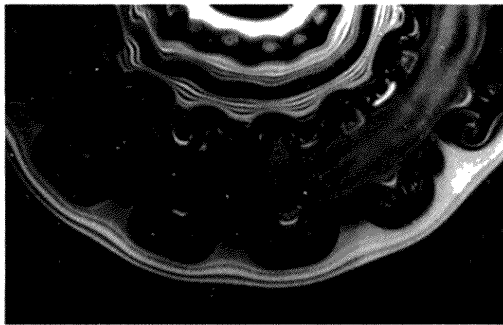


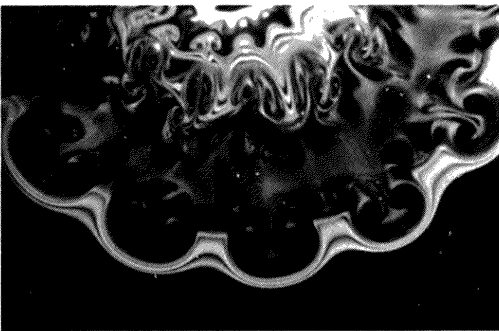
Fig. 2 Structure of the fingers vortex at $t = 660\text{ms}$



Z = 18.5cm, t = 690ms



Z = 18.5cm, t = 710ms



Z = 18.5cm, t = 740ms

Fig. 3 The cross section of the fingers vortex (front view)

に推測された。

時間経過と共にフィンガー渦は、主渦輪に巻き付くようにさらに引き延ばされるため、主渦輪・2次渦輪・3次渦輪の断面での煙の筋が円周方向のみであるのに対し、フィンガー渦のそれは半径方向や z 軸方向にもつながっている。Fig. 3に $z = 18.5\text{cm}$ の断面における、フィンガー渦の成長していく様子が示されている。半径方向や z 軸方向の渦度成分を持つフィンガー渦の誘起する流れが、この流れ場の乱流化を促進している。なお、この流れ場の周方向の周期は、波状変形が確認されてから乱流化するまでいつでも $2\pi/14$ [rad]であった。

3. 2 自由空間を並進する渦輪の周方向の波の数

自由空間を並進する渦輪をその並進方向と垂直な面($r-\theta$ 面)で光切断した様子を観察した, Fig. 4. $t =$

500msまでは渦輪の円周方向の波状変形は認められない。 $t = 750\text{ms}$ では、部分的に波の明瞭なところがあり、この明瞭な部分から不明瞭な部分についても波の数を推測してみた。(b)図がその場合であり、 $n = 10$ と求められた。(e), (f)の図では、波の頂点を白点で指摘してあるが、それぞれ波の数は整数値を取り、9個、8個であることが判る。ノズル先端からの並進距離 z と波の数 n の関係をFig. 5に○でプロットした。また、遷移状態にあると考えられる場合は、波の数 n を7から11までの整数値列の中間の値、すなわち8.5, 9.5, 10.5として便宜的にプロットしておいた。このグラフから波の数 n は、並進距離 z の増加と共に減少することが判る。

3. 3 平板に衝突する渦輪の周方向の周期性

Fig. 6は、ノズルから平板までの距離を変化させて、平板と衝突する渦輪の周方向の様子を示している。ノズルから平板までの距離を変化させると波の数に変化することから、この流れ場に現れる不安定波の波の数は、実験装置に依存したものではなく、平板の影響を実質的に受け始める直前(本実験条件では平板の上流約4.5cm)に渦輪自身もっている固有の数であると推測される。

自由空間を並進する渦輪を可視化した場合には、ノズルから $z = 30\text{cm}$ までの領域では渦輪の周方向の波状変形はほとんど観察できなかった。しかしながら、可視化で波状変形が見られるようになる以前においても、渦輪自身が固有の不安定波の周期性を持っており、これが平板との干渉において増大したと考えられる。

Fig. 5の▲は、ノズル先端から平板までの距離と波の数の関係を示したものである。自由空間を並進する渦輪の場合と同様、ノズルからの距離が増加するにしたがって波の数が減少している。また、平板を設置した場合は、渦輪は平板の設置座標 Z から4.5cm程度上流から平板の影響を強く受け、その渦径を急激に拡げることがその軌跡からわかっている。このため自由空間を並進する渦輪と条件が同一であるわけではない。そこで、▲については、平板設置の場合の Z の値は、 Z の値から4.5cm減じた値を用いてプロットした。ノズルからの距離と波の数の関係は、平板を設置した場合と設置しない場合とでよく一致している。特に、平板を設置してはじめて不安定波の波の数が観察される $z = 30\text{cm}$ 以下の波の数と、30cm以上の領域のそれとが滑らかにつながってプロットされる事実は特筆される事柄である。このことから、平板に垂直に衝撃する渦輪が作り出す周方向の不安定波の周期性は、Widnall Instabilityが原因であると考えられる。

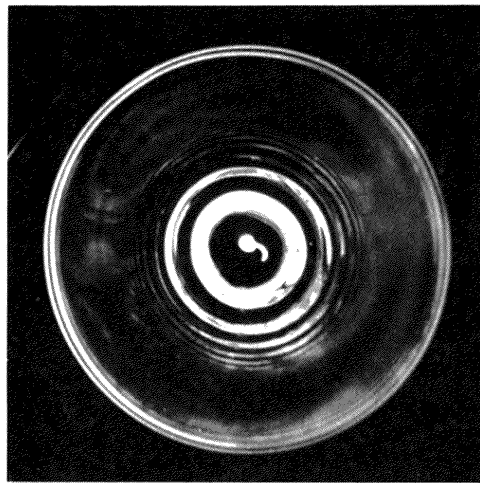
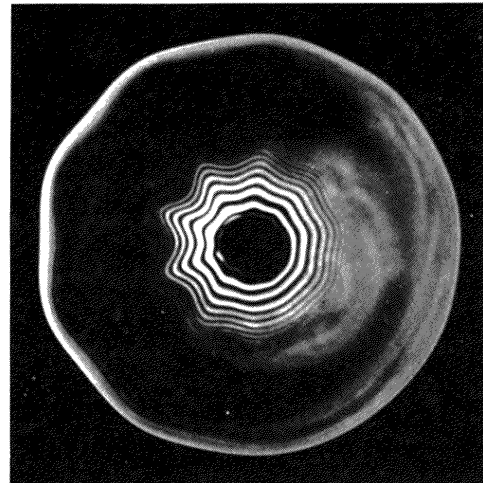
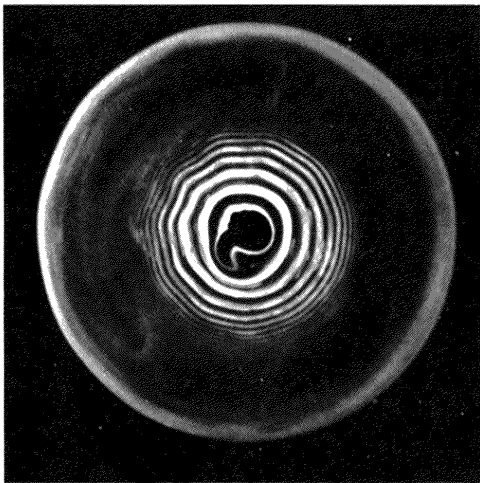
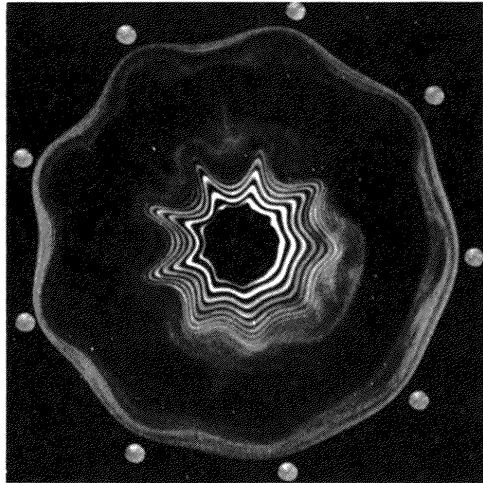
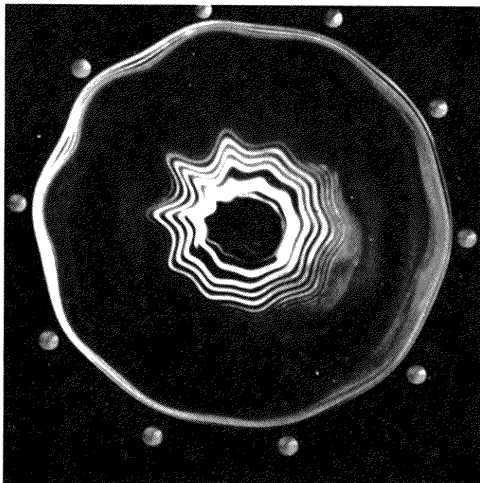
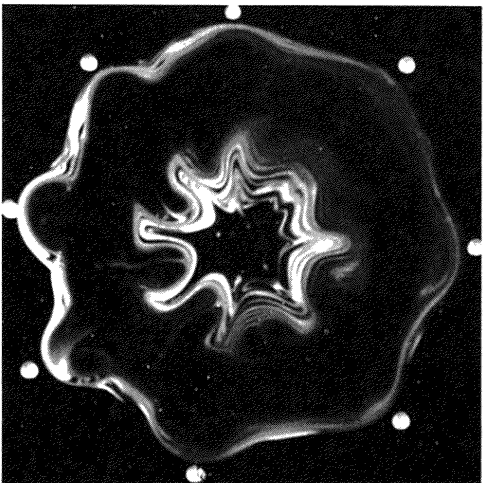
(a) $t = 450\text{ms}$, $z = 15.1\text{cm}$ (d) $t = 1100\text{ms}$, $z = 53.5\text{cm}$ (b) $t = 750\text{ms}$, $z = 32.7\text{cm}$ (e) $t = 1200\text{ms}$, $z = 59.1\text{cm}$ (c) $t = 1000\text{ms}$, $z = 48.3\text{cm}$ (f) $t = 1300\text{ms}$, $z = 65.1\text{cm}$

Fig. 4 Instability of the vortex ring travelling in a free space

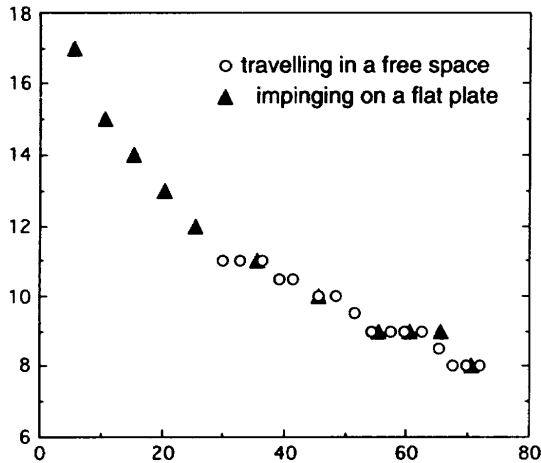


Fig. 5 Number of waves vs. distance from nozzle z [cm] for without plate and $z-4.5$ [cm] for with plate

4. まとめ

$Re=2600$ の渦輪を自由空間で並進または平板に衝突させ、その流れ場を煙可視化法によって調べた。その結果、

1. 平板と渦輪の干渉過程でフィンガー渦構造が見出され、その形状過程とトポロジーが明らかにされた。
2. フィンガー渦は主渦輪・3次渦輪の波状変形を促進し、流れ場の3次元化並びに乱流化に重要な役割を果たしていることが明らかにされた。
3. 単独渦輪が並進するのに伴い、周方向に現れる不安定波 (Widnall Instability) の波の数が減少することが初めて見いだされた。
4. 渦輪が平板に衝突する場合に現れる周方向の不安定波の波の数も、ノズルから平板までの距離を大きくすると減少することが判った。
5. 平板に衝突する場合の波の数が自由空間のそれとよく一致することから、渦輪が平板に衝突したときに現れる周方向の周期性は、平板の影響を強く受ける前の渦輪の Widnall Instability に因るものと推測された。

参考文献

- 1) Walker, J. D. A., Smith, C. R., Cerra, A. W., and Doligalski, T. L. : The impact of a

vortex ring on a wall, *J. Fluid Mech.* **181** (1987) 99–140.

- 2) Orlandi, P. and Verzicco, R. : Vortex rings impinging on walls : axisymmetric and three-dimensional simulations, *J. Fluid Mech.* **256** (1993) 615–646.
- 3) 内藤隆, 今井伸治, 山田日出夫 : 渦輪の周方向の不安定波に関する実験, 「ながれ」別冊14 (1995) 175–1783.
- 4) 内藤隆, 阪野治, 山田日出夫 : 平板に衝突する渦輪による流れ場中のフィンガー渦, 「ながれ」別冊13 (1994) 405–408.
- 5) Krutzsch, C. R. : Über eine experimentelle beobachtete Erscheinung an Wirbelrigen bei ihrer translatorischen Bewegung in wirklichen Flüssigkeiten, *Ann. Phys.* **35** (1939) 487–523.
- 6) Maxworthy, T. : The structure and stability of vortex rings, *J. Fluid Mech.* **51** (1972) 15–32.
- 7) Widnall, S. E. and Sullivan, J. P. : On the stability of vortex rings, *Proc. R. Soc. London A33* (1973) 335–353.
- 8) Widnall, S. E., Bliss, D. B., and Tsai, C.-Y. : The instability of short waves on a vortex ring, *J. Fluid Mech.* **66** (1974) 35–47.
- 9) Widnall, S. E. and Tsai, C.-Y. : The Instability of the thin vortex ring of constant vorticity, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **287** (1977) 273–305.
- 10) Liess, C. and Didden, N. : Experimente zum Einfluss der Anfangsbedingungen auf die Instabilität von Ringwirbeln, *Z. angew. Math. Mech.* **56** (1976) T206–T208.
- 11) Maxworthy, T. : Some experimental studies of vortex rings, *J. Fluid Mech.* **81** (1977) 465–495.
- 12) Yamada, H., Kohsaka, T., Yamabe, H., and Matsui, T. : Flowfield produced by a vortex ring near a plane wall, *J. of the Physical Society of Japan* **51** (1982) 1663–1670.

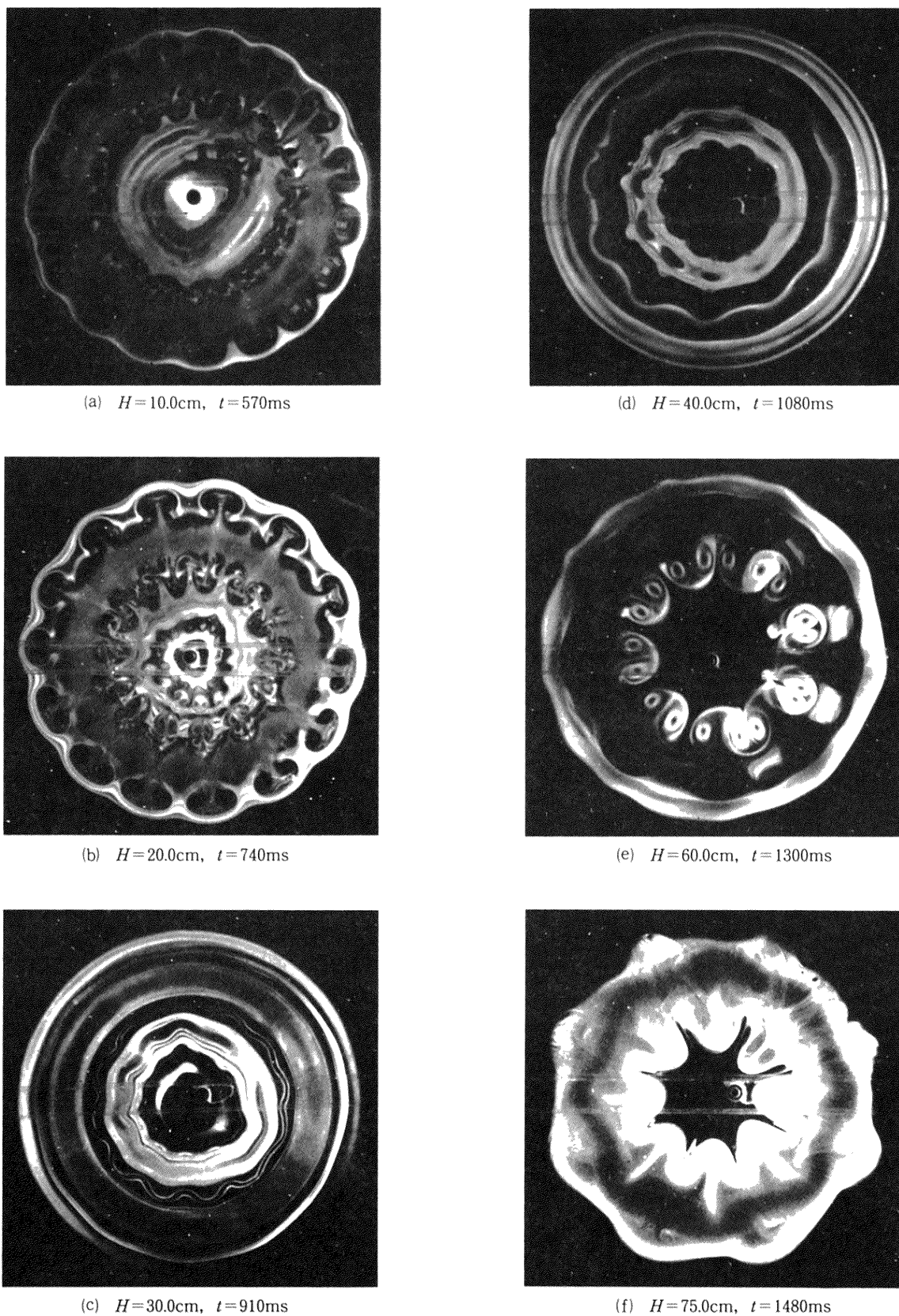


Fig. 6 Instability of vortex ring impinging on flat plate
 H : distance between nozzle and flat plate