

1~99

画面で学ぶ ブラフボディーの流力振動

1. 円柱の流力振動

Flow-Induced Oscillations of Circular Cylinders

2. 矩形柱の流力振動

Flow-Induced Oscillation of Rectangular Cylinders

3. 振動流における物体の流体力学

Fluid Dynamics around a Bluff Body Submerged in Oscillatory Flow

4. 直列2円柱および2角柱の流力振動

*Flow-Induced Oscillation of Two Circular Cylinders and
Two Rectangular Cylinders in Tandem Arrangement*

画面で学ぶブラフボディーの流力振動

次の項目について説明する。

1. 円柱の流力振動

Flow-Induced Oscillations of Circular Cylinders

2. 矩形柱の流力振動

Flow-Induced Oscillation of Rectangular Cylinders

3. 振動流における物体の流体力学

Fluid Dynamics around a Bluff Body Submerged in Oscillatory Flow

4. 直列2円柱および2角柱の流力振動

*Flow-Induced Oscillation of Two Circular Cylinders and Two Rectangular Cylinders in
Tandem Arrangement*

画面で学ぶ ブラフボディーの流力振動

1. 円柱の流力振動

Flow-Induced Oscillations of Circular Cylinders

岡島 厚

Professor Emeritus Kanazawa University

画面で学ぶブラフボディーの流力振動：円柱の流力振動

「画面で説明するブラフボディーの流力振動」について、『円柱の流力振動 Flow-Induced Oscillations of Circular Cylinders 』について講義をする。

円柱を例にして流力振動による物体の振動挙動を少し詳しく考察する。図にはKingら(2)による片持ち円柱の比較的広い換算流速 $V_r (=U/fcd=1/Stc)$: U は一様流速, f_c は円柱系固有振動数, d は円柱直径, Stc は振動円柱の無次元振動数)範囲の典型的な振動応答特性を示す。この場合、円柱は流れ方向および直角方向のいずれの方向にも自由に振動可能である。応答振動特性に見られるように静止の際の後流渦のストローハル数 $St_n (=fnd/U)$: f_n は静止円柱後流渦の自然発生周波数 $=0.2$ から求めた換算共振流速 $V_{rcr}(=1/St_n)=5$ 付近の流速領域、すなわち振動円柱の無次元振動数 $Stc(=f d/U)$ が St_n に等しい付近の流速域では、流れに直角方向(cross-flow)の比較的大振幅の振動が生ずる。そして丁度 $St_n=2St_n$ となる換算共振流速の半分の流速($V_r=V_{rcr}/2$)付近の領域で、小さい換算減衰率 C_n の場合には流れ方向(in-line)振動が卓越する2つの発振域が認められる。このように、流れ方向振動および直角方向振動は、その発振する流速域の領域がそれぞれ異なり、また換算減衰率 C_n の大きさに強く依存する。ここで、構造物の換算減衰率 C_n は、 $C_n=2m\delta/\rho d^2$ (m は、円柱の単位スパン当たりの質量, δ は振動系の対数減衰率, ρ は流体密度)と表され、構造物の振動挙動を強く左右し、 C_n 値を大きくすれば振動振幅を抑制することができる。しかし、水や金属ナトリウムなどの液体流中では、質遮比 $m/\rho d^2$ の値が空気中に比べて小さく、しかも構造物が溶接構造などで構造減衰が極めて小さい場合には、 C_n 数が1程度に極端に小さくなる。このような場合、 $V_{rcr}/2=1/(2St_n)$ 付近の流速域で流れ方向振動が発生し易くなる。



1. 円柱の静特性

- Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
- 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所報、(1973) 40, pp.387-400.

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999) 65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11).

3. 有限スパン長さ円柱の流れ方向振動

- Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705~711.

4. 高レイノルズ数における円柱の渦励振

- Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiwata, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

5. 高レイノルズ数における球まわりの流れ・サッカーボールの奇妙な飛翔挙動

- Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
- Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192 (1978)

円柱の流力振動についての講義内容と主なデータの出典を示す。詳細は、原論文を参照されたい。

1. 円柱の静特性

- Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
- 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所報、(1973) 40, pp.387-400.

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999) 65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11).

3. 有限スパン長さ円柱の流れ方向振動

- Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705~711.

4. 高レイノルズ数における円柱の渦励振

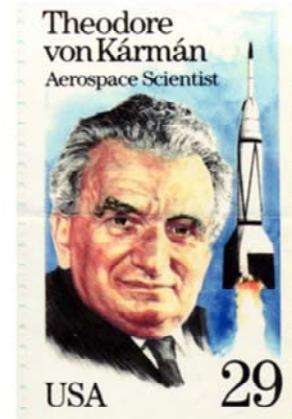
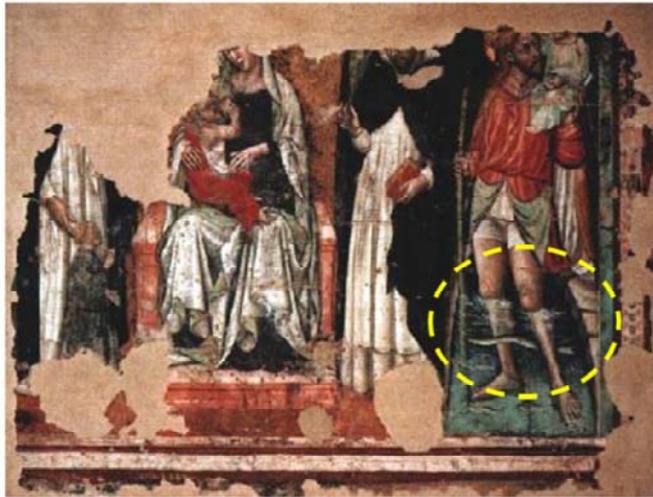
- Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiwata, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

5. 高レイノルズ数における球まわりの流れ・サッカーボールの奇妙な飛翔挙動

- Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
- Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192 (1978)
- 球まわりの流れ



カルマン渦 *Karman Vortex Street*



イタリアボローニャの聖ドミニコ教会の博物館にあるフレスコ画(1380頃) 聖クリストファ・カルマン22,3才

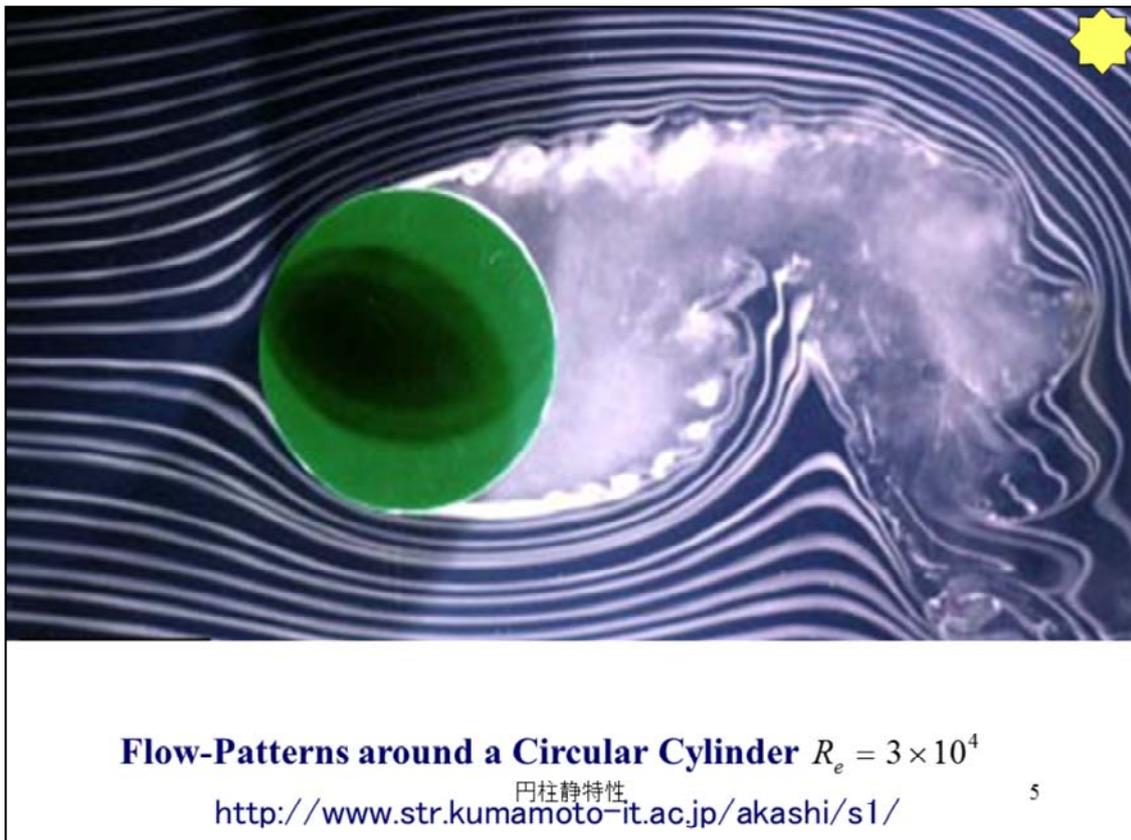
Theodore von Karman のフレスコ画との出会い

1. Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
and Mizota, T., Zdravkovich, M. M., Graw, K. and Leder, A., Nature, 404,(16 Mar. 2000), p.226

1. 渦の話

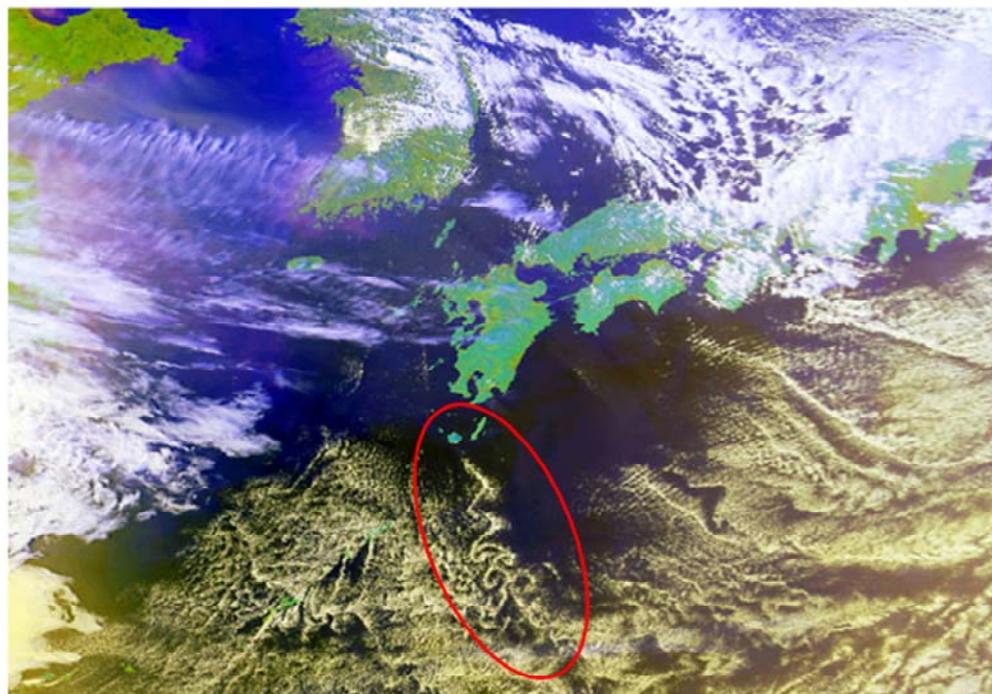
カルマン渦の研究でも有名なTh. von Karman が渦列の研究を始める契機の一つにもなったイタリアのボローニャ市の教会の絵は、最近、Mizotaら¹⁾によって同市にある聖ドミニコ教会のなかの博物館に展示してあるフレスコ画と特定され、話題になっている。

一様流中にある円柱構造物周りの流れは、円柱表面上で剥離して円柱背後でカルマン渦のような交互渦を形成する。そしてこの渦列や剥離した流れによって、円柱に渦励振などの流力振動 (flow-induced oscillation) を引き起こすことがある。このような流力振動による円柱構造物の振動例として、古くから潜水艦の潜望鏡の振動現象に見られる流れに対して直角方向(transvers direction)に振動する渦励振が良く知られている。

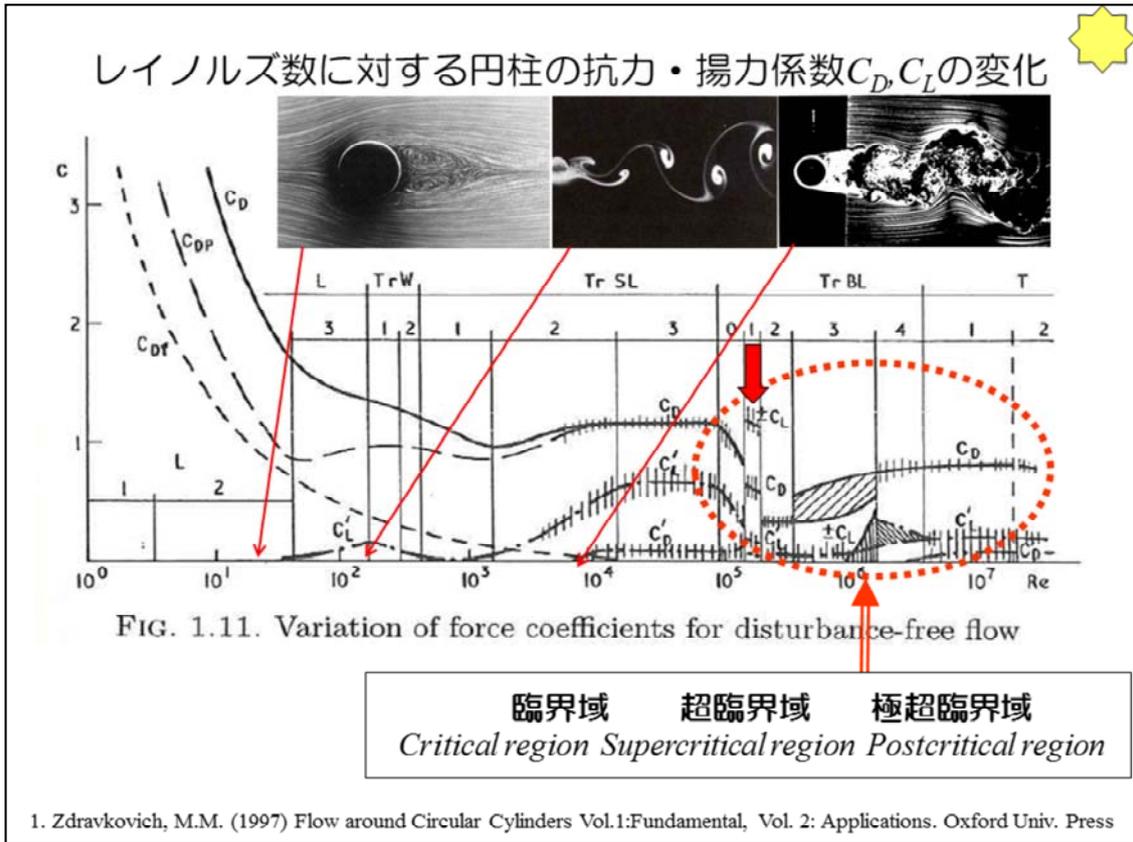


【概説】 この渦励振の系統的研究としては、1960年代前半のBishop-Hassan³⁾による流れに直角な方向に円柱を強制振動させた実験や、Scruton⁴⁾の風洞による円柱の自由振動実験などの研究が有名である。わが国においても、当時から多くの研究が精力的に成されている。さらに1968,69年に、円筒状海洋構造物において流れ方向 (streamwise) の自励振動が生ずること⁵⁾が報告され、Kingら⁶⁾による水響における基礎的実験が成された。この海洋構造物で観察された流れ方向の流力振動は、1995年12月、高速増殖炉「もんじゅ」の温度計さや管の破損事故の原因でもあった⁷⁾。この流力振動は、いわゆる渦励振とは発生機構が異なり、円柱の流れ方向運動と周辺流れとの相互干渉によって生ずる自励振動である。この場合の流力振動は、比較的低い無次元流速の領域で生じ、図2のスモーク・ワイヤー法による可視化流れパターン⁸⁾には、振動する円柱背後には対称渦形成を伴う円柱運動による後流やせん断層の息づき (wake breathing)現象⁹⁾が見られることが注目される。

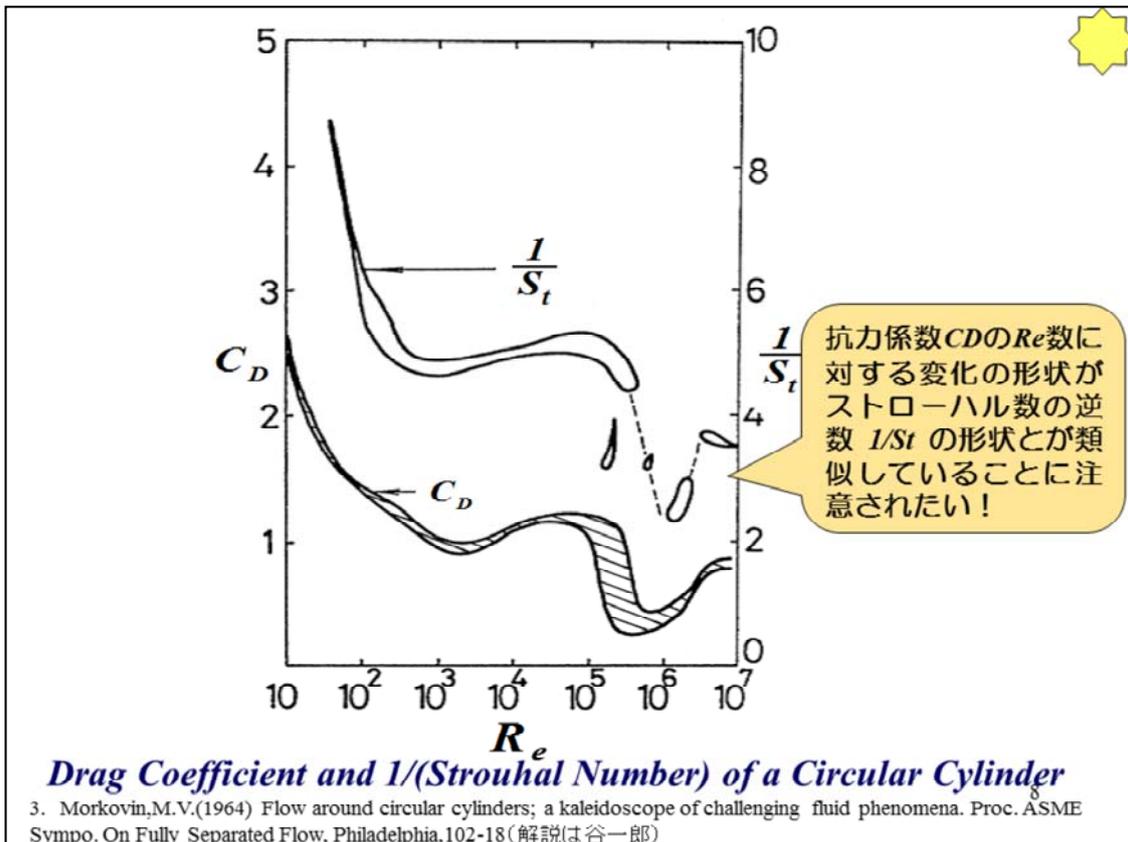
一様流中の円柱まわりの3次元LES simulationを実施したい！



屋久島下流の渦列

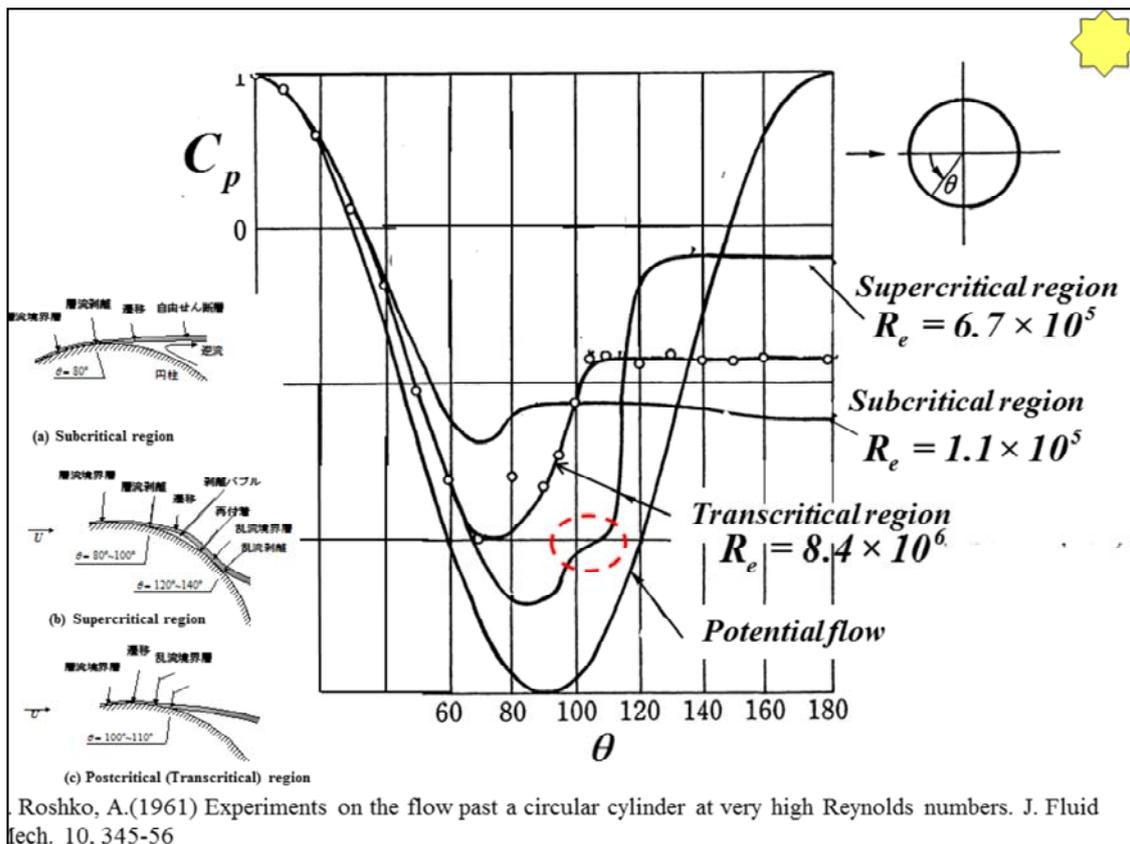


次に、円柱、矩形柱の静特性について述べる。まず、レイノルズ数に対する静止円柱の後流渦の流れパターン変化を示す。円柱の背後には、一様流速 U と物体直径 D でとったレイノルズ数 $Re=UD/\nu$ (ν : 流体の動粘度) がほぼ $40 \sim 50$ までは双子渦が形成され、それ以上の亜臨界域の広いレイノルズ数範囲では、図b,cに示したような周期的交互渦が放出され、後流渦列が形成される。 $Re=(0.37 \sim 3.5) \times 10^6$ の超臨界域(Supercritical region)では、次スライド以降に詳説する。層流バブル(Laminar bubble)が円柱表面に形成され、剥離点は下流側に後退して渦放出の周期性は極端に低下する。しかし $Re > 3.5 \times 10^6$ の極超臨界域(Transcritical region = Postcritical region)になると、円柱表面境界層は乱流剥離して再び周期的渦放出が見られる。



図には、 Re 数の広い範囲にわたって、円柱の C_D の変化を示す。 C_D 値が $Re=10^5$ を越えて急に減少し、さらに高い Re 数域で再び増加するのは、流れの剥離点の移動による流れパターンの変化に因っている。また同図には、カルマン渦の周波数のストローハル数の変化を St 数の逆数 ($1/St$) の形で示す。この表示はMorkovin, M.V. (1964) によるものであり、 C_D 値と $1/St$ の変化が Re 数に対して同じ変化を呈することから、 St 数値は C_D の大きいところで小さく、 C_D の小さいところで大きい。が、 C_D の最小となる Re 数の範囲では、流れが不安定で周波数を特定するのが困難である。図に示される C_D と St 数の変化は、円柱の置かれる気流の乱れが少なく、しかも円柱の表面が滑らかな場合に観察されるものである。気流の乱れが大きい、または表面が粗いような場合には、乱流への遷移が早目に起こり、 C_D および St 数の変化が Re 数の小さい値で現れる。

球の抵抗が使用される風洞によって著しく異なることを見出したのはエッフェル (Eiffel, 1913)であったが、円柱境界層の剥離の様相と抵抗係数の急減についての説明は、Prandtl (1914)によって与えられた。さらに高いレイノルズ数において抵抗係数が増加することは、1960-70年代、新しく知られた事実である。それまでは、高いレイノルズ数ではカルマン渦は存在しないと考えられていたが、実際に地表風の中で振動する煙突の観察を端緒として現象の正しい理解が得られるようになったのであるRoshko. (1961)。 (解説：谷一郎)



Roshko, A. (1961) Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds numbers. J. Fluid Mech. 10, 345-56

球や円柱のようなブラフな形状の物体が大きい抵抗を受けるのは、境界層が物体表面から剥離して渦を作ることに関係する。全体の抵抗に対する摩擦抵抗の寄与は極めて小さいので、抵抗の大小はほとんど剥離位置によって決定される。亜臨界域(Subcritical region)では、境界層は層流のまま表面から剥がれるが、臨界レイノルズ数 $Re=3.7 \times 10^5$ を超えると、剥離したせん断層が乱流に遷移して、表面に再び付着して層流バブル(Laminar bubble)が形成する。その下流は乱流境界層となり、乱流剥離する。この領域を、超臨界域(Supercritical region)という。さらに、 $Re > 3.5 \times 10^6$ の極超臨界域(Transcritical region=Postcritical region)では、境界層は乱流に遷移したあと剥離するが、その位置はいくらか上流に移動する。超臨界域では、赤点線で示す圧力変化の比較的小さい層流バブル(Laminar bubble)が円柱表面に形成され、剥離点は下流側に後退する。 $Re=8.4 \times 10^6$ の極超臨界域の流れでは、上下両側の剥離点は少し前進して死水域が増大する。(種子田定俊：画像で説明する流体力学、朝倉書店)

付図には、各領域における円柱表面上の境界層の剥離する点やせん断層の遷移する点や再付着点等の模式図を示す。亜臨界域の例えば、 $Re=10^5$ の場合には、上流よどみ点から78度付近で層流剥離し、超臨界域の $Re=6.7 \times 10^5$ では、円柱表面上に形成される層流バブル内の圧力分布は比較的小さく平坦になっていることに注意されたい。(谷一郎：流れ学、岩波書店)

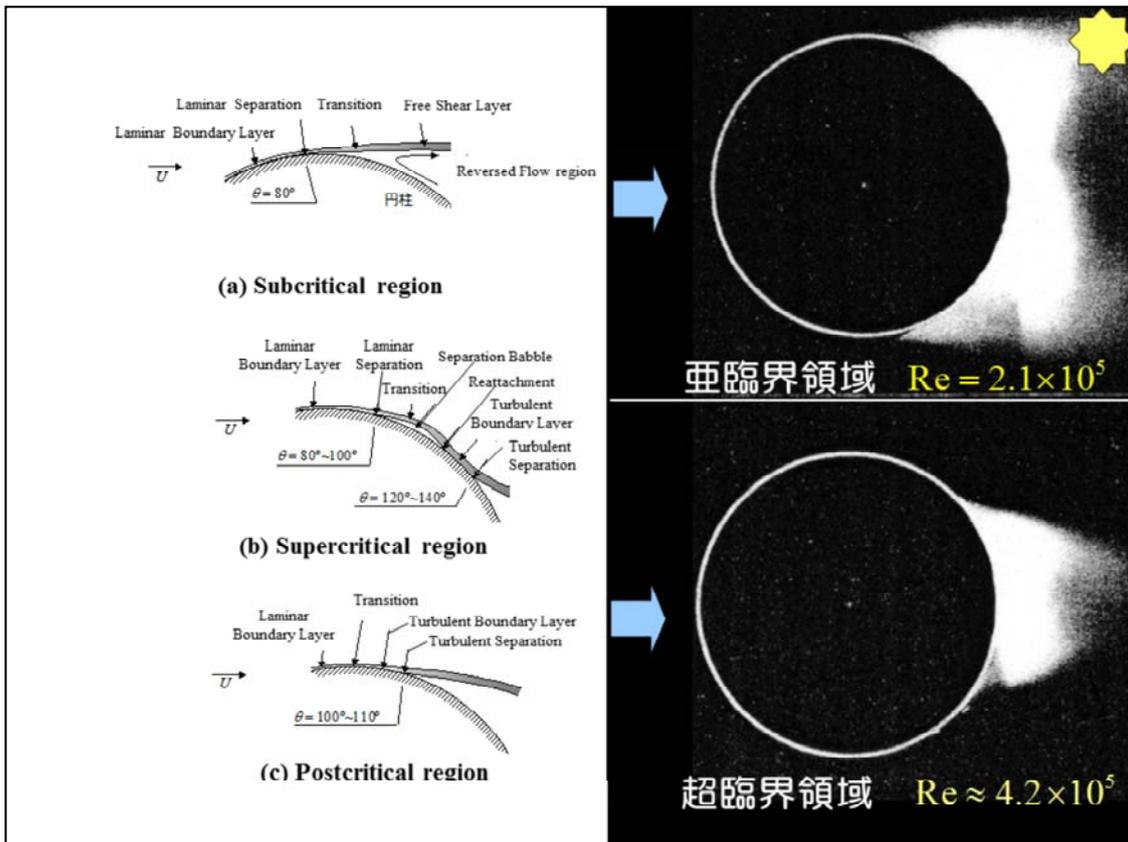
なお、Roshko²⁾は、 $Re=8.4 \times 10^6$ の極超臨界域の流れの領域をTranscritical regionと呼んでいる。このtechnical termは誤解を生むことから、Zdravkovich¹⁾によれば、以下のように修正解説している。また、「Transcritical region=Postcritical region」に対応する和名については、谷一郎によって、「極超臨界域」と名付けられた。

Further increase in Re brings transition to the primary laminar separation line in an irregular manner. This leads to the disruption and fragmentation of separation bubbles along the span of the cylinder. The irregularly fragmented separation lines prevented periodic eddy shedding, as seen in Fig. 1.10(d). The latter is the main feature of the super-critical regime. It was generally believed, up to 1961, that this was an ultimate state of the flow for all higher Re .

Roshko discovered that regular eddy shedding reappears at higher Re when the boundary layers are turbulent before separation all along the span. He called this the "transcritical" region but the

term was not generally adopted. Some authors, such as Szechenyi, interchanged transcritical and supercritical (to make sense in Latin) and others like Achenbach, Buresti and Lanciotti, Buresti, and Farell substituted it with supercritical, and Sarpkaya and Isaacson called it post-super-critical. Roshko

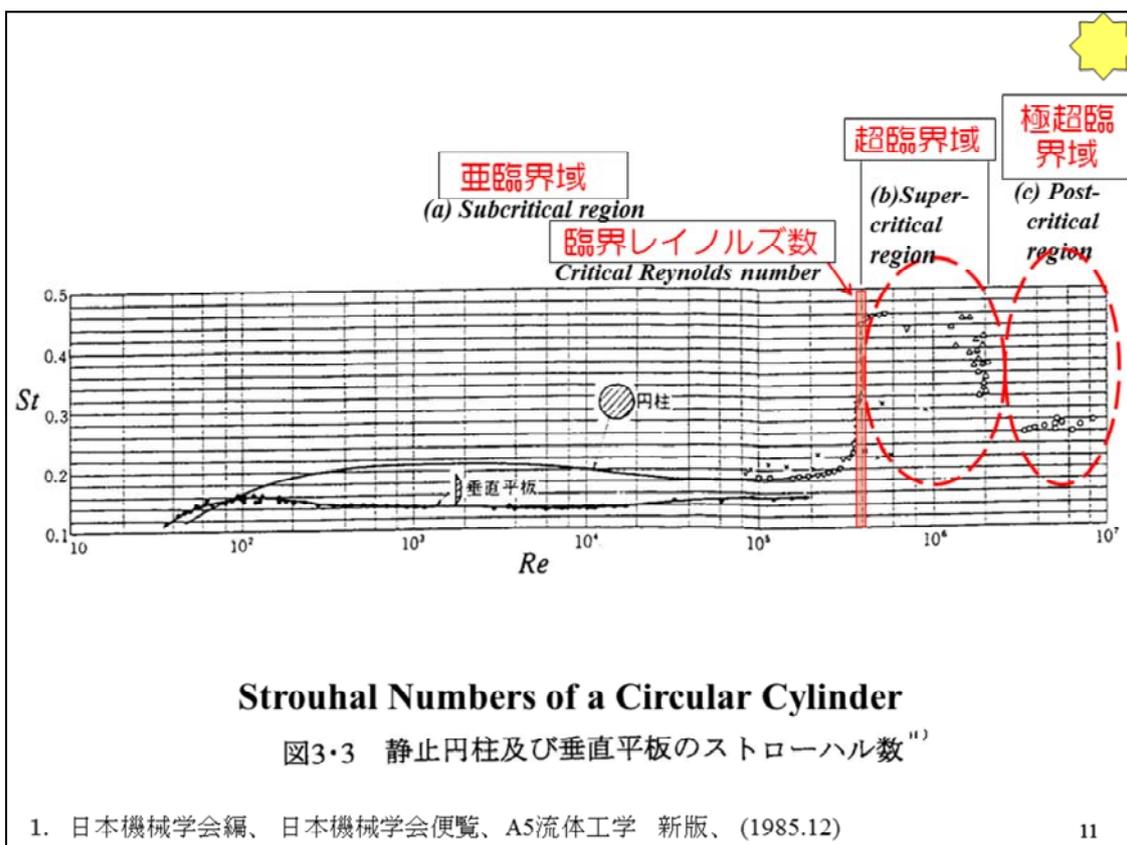
Noted that “*the proliferation of regime-naming in the literature has created a great deal of confusion and it is high time to stem the tide*”. Pearcy suggested the term postcritical regime is characterized by the transition in boundary layers being somewhere between the stagnation and separation lines. As Re increases the transition region advances towards the stagnation line asymptotically and hence the value of Re for the upper end of this region is hard to define.



図には、種子田らによる $Re=2 \times 10^5$ から $Re=8.4 \times 10^5$ の範囲における円柱まわりの流れを示す。流体は空気、可視化の方法は四塩化チタンの煙を円柱後端から発生させている。煙は剥離点まで逆流して剥離せん断層に沿って流れて死水域を可視化している。上図は、 $Re=2.1 \times 10^5$ の流れを示し、上下対称に75度の位置から剥離して大きな死水域を形成する。 $Re=3.8 \times 10^5$ の場合には円柱の片側のみ剥離点が大きく後退して死水域は収縮して偏る。流れは極めて不安定である。下図は $Re=4.2 \times 10^5$ の流れを示す。この場合の剥離点は上下両側とも135度付近まで後退して死水域は収縮する。 $Re=8.4 \times 10^5$ の超臨界域の流れは、上下両側の剥離点は少し前進して、死水域が増大する。(種子田)

付図には、各領域における円柱表面上の境界層の剥離する点やせん断層の遷移する点や再付着点等の模式図を示す。

亜臨界域の $Re=10^5$ の場合には、上流よどみ点から $\theta=78$ 度付近で層流剥離し、超臨界域の $Re=6.7 \times 10^5$ では、 $\theta=80-100$ 度で層流剥離し、その下流で再付着して表面上に層流バブル (Laminar bubble) が形成される。その中の圧力分布は比較的小さく平坦になっていることに注意されたい。極超臨界域では $\theta=100-110$ (103) 度で乱流剥離するようになる。



円柱の背後に形成される渦の周波数 f_n は、物体の流力振動の発生に対して重要なパラメータであり、一様流速 U と直径 d によって無次元表示して、 $St_n = f_n D / U$ と表され、ストローハル(Strouhal, St_n)数と呼ばれる。この St_n 数の値は Re 数の関数として実験によって求められている。図には $Re=40 \sim 10^7$ という広い Re 数範囲にわたる円柱及び垂直平板の St_n 数の変化を示す。図から、円柱の場合には $Re=500$ 以上から臨界レイノルズ数の $Re=3.7 \times 10^5$ の広い Re 数の範囲において、 St_n 値は $0.20 \sim 0.21$ でほぼ一定である。このような周期的に変動する後流渦を伴う円柱周りの流れにおいては、ある特定の条件のもとで後流渦や剥離した流れによって円柱に誘起される振動、すなわち流力振動が生じる。

Flow-Characteristics of a Circular Cylinder at Very High Reynolds Numbers

- Wind Tunnel Tests
- Vortex-Excitation at Very High Reynolds Numbers
- *Supercritical region*: 超臨界域
- *Transcritical region*: 極超臨界域

➡ Professor Ichiroh TANI 谷一郎

M.M. Zdravkovich ➡ *Postcritical region*

円柱静特性

12

高いレイノルズ数領域における

レイノルズ数について

1. Immingham の海洋構造物 :

直径: $D=0.762m$ 、流速 $U=2.6m/s$ 、動粘度 $\nu=1.0\times 10^{-6}m^2/s$

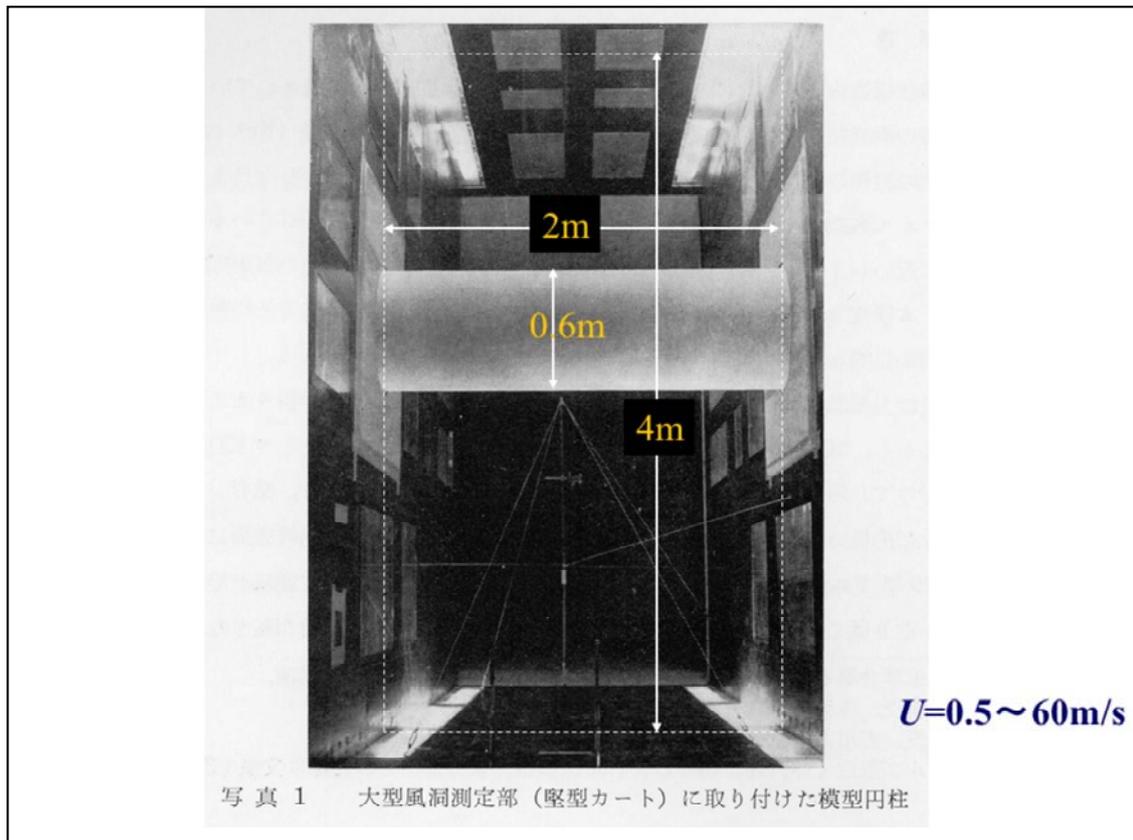
$$Re=UD/\nu=0.762\times 2.6\times 1.0/10^{-6}=1.98\times 10^6$$

2. “もんじゅ”の温度計さや管 ($V_r=1$)

直径: $D=0.0104m$ 、流速 $U=2.2m/s$ (40%運転)

動粘度 $\nu=0.3\times 10^{-6}m^2/s$ (450°C)

$$Re=UD/\nu=2.2\times 0.0104/0.3\times 10^{-6}=7.72\times 10^5$$



図は、大型風洞装置の風洞測定部を示す。測定断面は高さ2m、横幅4m、測定部の長さ6mで、試験風速域は $U=0.5\sim 60\text{m/s}$ で風洞内の乱れは約0.1%である。ここで、臨界レイノルズ数以上のレイノルズ数を得るには、たとえば、供試円柱の直径: $D=0.6\text{m}$ のような大きい模型で、流速 $U=15\text{m/s}$ 、空気の動粘度 $\nu=1.5\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ で、レイノルズ数は $Re=UD/\nu=0.6\times 10\times 15/(1.5\times 10^{-5})=6\times 10^5$ である。このような大型風洞装置ではじめて、臨界レイノルズ数以上の領域の実験が可能である。

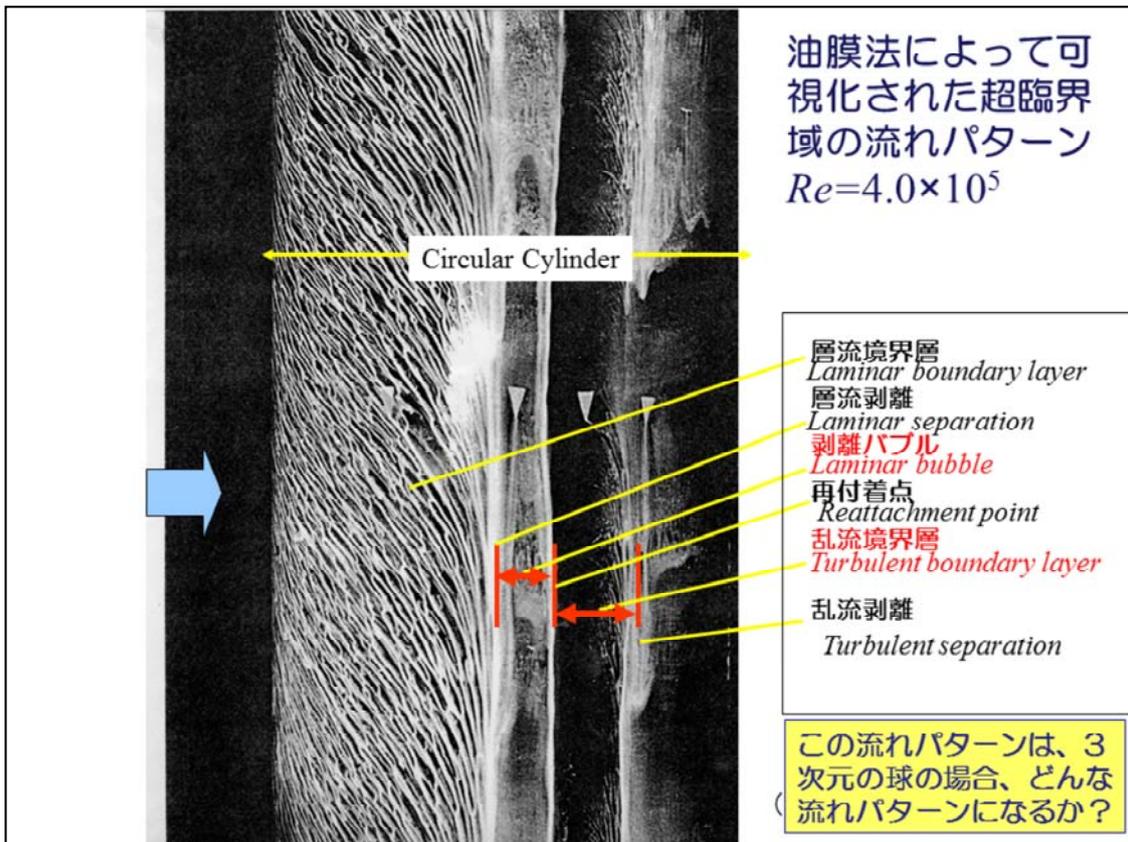
なお、測定部における模型円柱の閉そく率は15%である。この場合、風洞内におけるBlockage効果はかなり大きいので、測定された抵抗力や背面圧力の測定値に、風洞上下壁による閉そく効果に対する補正を施している。ここでは、Allen-Vmcantiの方法によって行う。すなわち、

$$U=U'(1+0.25C'_D(D/H)+0.82(D/H)^2)$$

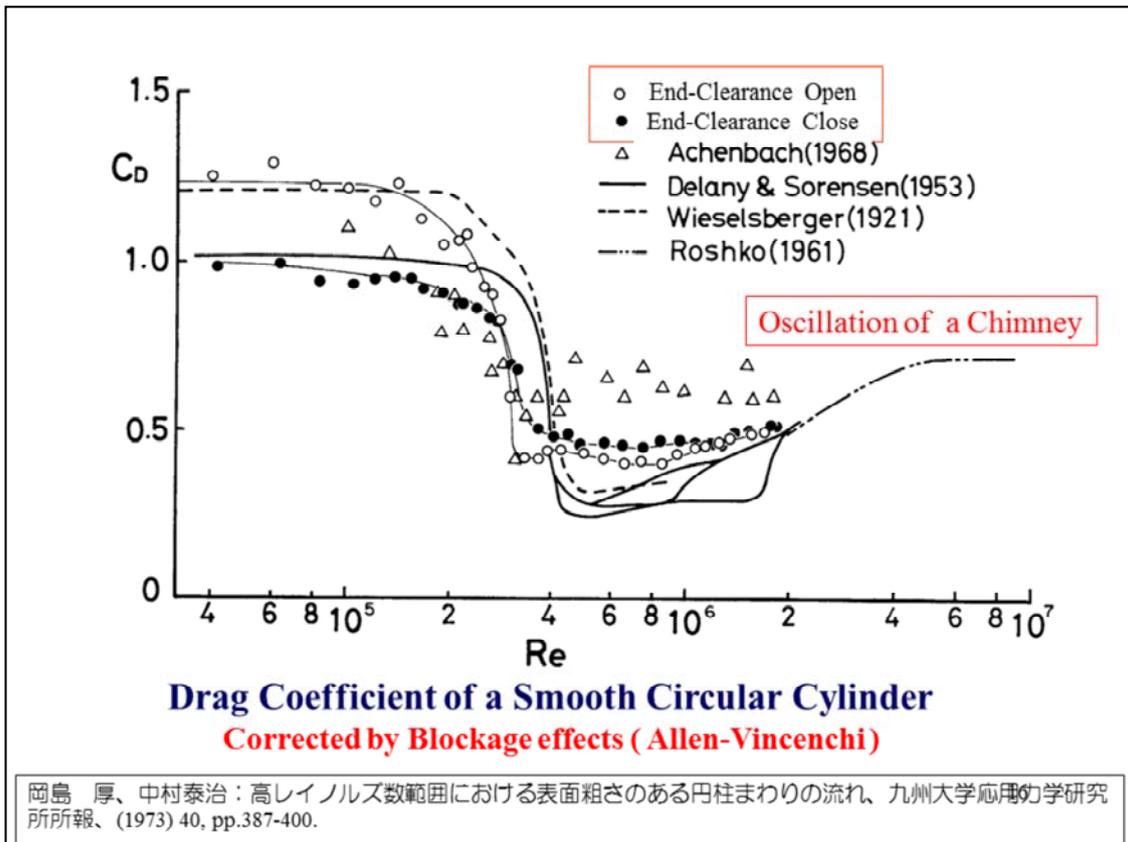
$$C_D=C'_D(1-0.5C'_D(D/H)-2.5(D/H)^2)$$

$$C_{p_b}=1+(U'/U)^2(C'_{p_b}-1)$$

である。ここで $(')$ は補正以前の値を表わし、 H は測定部の高さである。したがって D/H は測定部における模型の閉そく率を表わし、この場合 $D/H=0.15$ である。

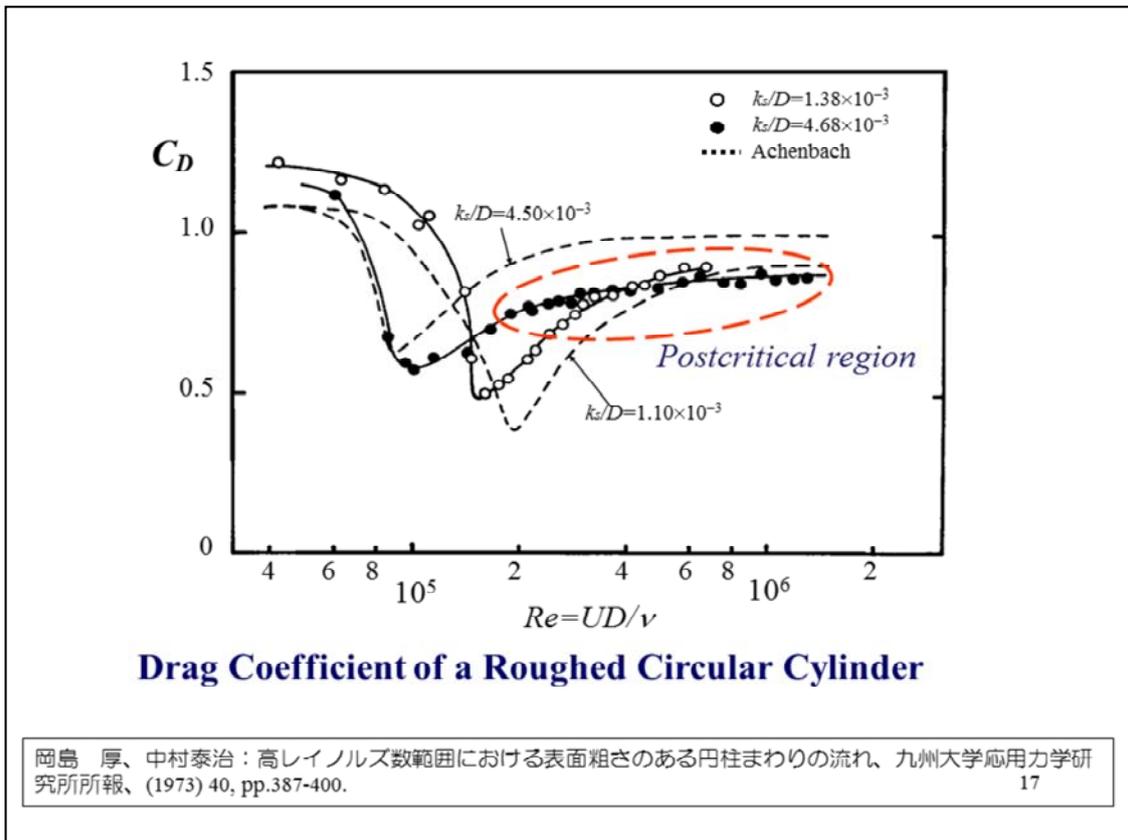


(種子田定俊の解説) 風洞気流中におかれた円柱表面油膜模様を示す。風洞測定部は高さ2m、横幅4m、直径0.6mの円柱表面は黒色に塗装されており、油膜は二酸化チタンと流動パラフィンを混合したものに少量のオレイン酸を加えた白色の油である。この油を円柱表面に一様に薄く塗り気流にさらすと油膜が変形して模様が現れる。風が吹き始めてから模様が出来上がるまでには、約10分間を要する。図は、風速10m/s、レイノルズ数 $Re=4.0 \times 10^5$ の油膜模様を示す。レイノルズ数が $Re=3.5 \times 10^5$ 程度を越えると、前方よどみ点から100度、110度および130度の位置に安定した3本の線が現れる。そして、100度と110度の間では油の筋が弱く前方になびき、110度と130度の間では強く後方になびいている。130度よりも後方では油膜はほとんど変化せず、そこが死水域であること示している。100度の線は層流剥離線、110度の線は再付着線、130度の線は乱流剥離線である。100度と110度の間はラミナーバブル(層流剥離泡)と呼ばれる領域である。110度と130度の間で油膜の強く後方に吹き掃われて黒い表面の地肌が現れているは、乱流境界層であって表面摩擦力が強いからである。油膜に現れる筋の傾きが水平に近いほど表面摩擦力が強いことを示す。



表面の滑らかな場合

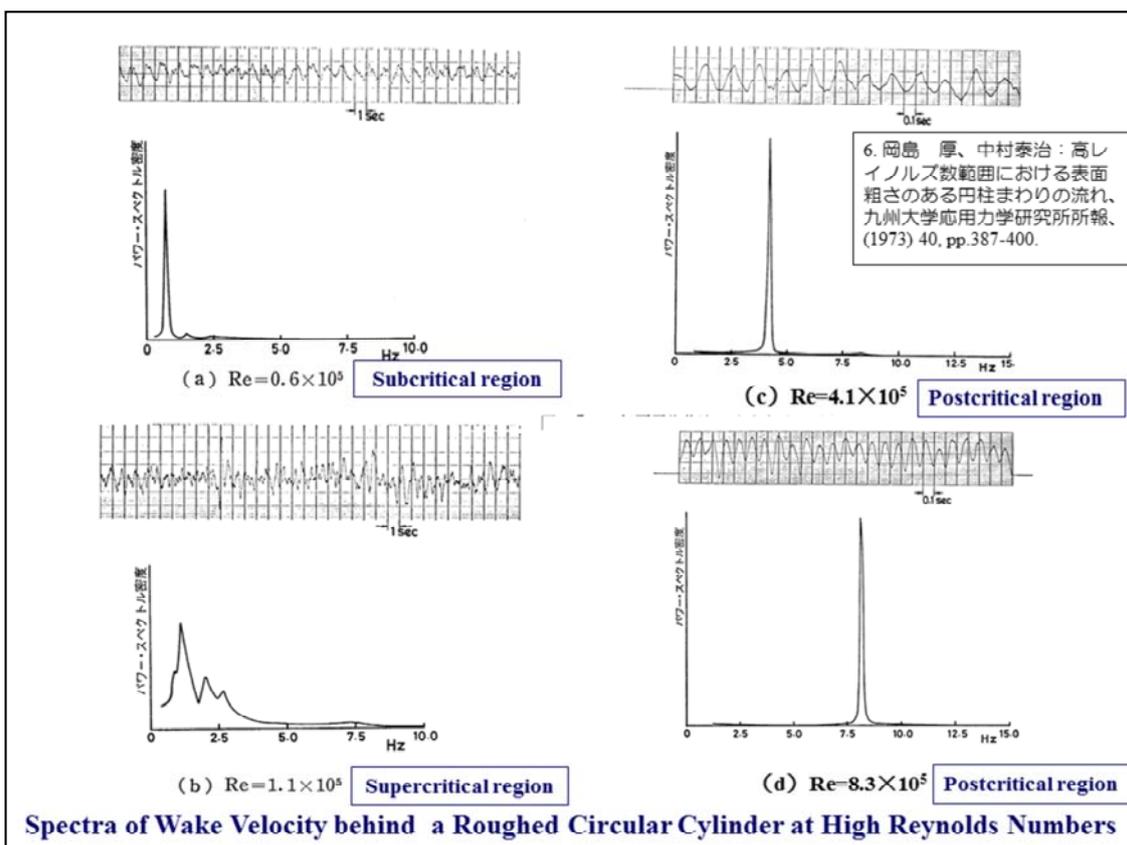
表面に分布粗さのある場合に先だって、まず $Re=4 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$ のレイノルズ数範囲にわたって表面の滑らかな円柱に働く抵抗係数を求め、それをレイノルズ数に対して図に示す。滑らかな表面円柱の抵抗係数 C_D 本研究の場合には、次に行なう自由振動法による振動実験のことを考慮して円柱の直径の20%近く上下方向に移動しうるように円柱の端板と風洞壁の間には狭い間隙がある。しかしこの間隙の影響は回避し難く、図にはこの間隙を薄いビニール・シートで被覆して密閉した場合と間隙を開放のままにした場合の実測値を示した。両者の抵抗係数 C_D の実測値の差は特にレイノルズ数が $Re < 3 \times 10^5$ の亜臨界領域で著しく、端部間隙が密閉の場合、 $C_D=1.2$ で、端部間隙の開放の場合には $C_D=1.0$ である。しかし亜臨界領域から臨界領域に移行する、いわゆる臨界レイノルズ数 Re_{cr} は両者ほとんど等しく、 $Re_{cr}=3 \times 10^5$ で、それ以上のレイノルズ数範囲では $C_D=0.4$ と抵抗係数は急減し、超臨界領域に移行しているが、この滑らかな表面の円柱では、本実験における最高レイノルズ 2×10^6 でも極超臨界域には達していない。なお図にはWieselsberger、Delany-Sorensen、そしてAchenbachの実測値とさらに高いレイノルズ数範囲のRoshkoの実測値も比較のために示した。亜臨界領域では端部間隙の密閉の場合はWieselsbergerの値に、端部間隙の開放の場合には、Delany-Sorensenの実測値にそれぞれほぼ一致している。なおDelany-Sorensenの値には端部間隙の影響が含まれていると報告されている。



表面上一様分布粗さのある場合

円柱表面上の境界層の層流から乱流への遷移させて、図に示したように滑らかな表面の円柱では実現し得なかった極超臨界域の状態を比較的低いレイノルズ数で得るために円柱表面上一様に $k_s/D=1.38 \times 10^{-3}$ (k_s は等価粒子径), $k_s/D=4.68 \times 10^{-3}$ の粒子径からなる分布粗さを貼付した。その場合のレイノルズ数 Re に対する抵抗係数 C_D の変化を図に示す。

なお、本実測値は全て端部間隙が開放に近い状態で得られたもので、模型によって端部間隙の状態が若干相違するため、実測値にはその影響が含まれている。図から表面に分布粗さのある場合、滑らかな表面の場合に比較して、まず亜臨界領域では分布粗さによる抵抗係数 C_D やストロハル数 St に与える影響はほとんどないが、臨界レイノルズ数は $k_s/D=1.38 \times 10^{-3}$ の表面粗さの場合、 $Re_{cr}=1.1 \times 10^5$ であり、 $k_s/D=4.58 \times 10^{-3}$ の場合には、 $Re_{cr}=0.7 \times 10^5$ である。表面粗さによって境界層の遷移が促進されて、臨界レイノルズ数は滑らかな円柱の場合の $Re_{cr}=3.7 \times 10^5$ と比べてより低く、それも分布粗さの粗いものほど低いことがわかる。そして抵抗係数 C_D が最小となる超臨界領域および C_D が漸増するレイノルズ数の範囲は滑らかな表面円柱の場合に比較して狭く、 $k_s/D=1.38 \times 10^{-3}$ の表面粗さの場合、大体 $Re=3.2 \times 10^5$ であり、 $k_s/D=4.68 \times 10^{-3}$ の場合、 $Re=1.9 \times 10^5$ 以上でほぼ抵抗係数 C_D は一定となり、極超臨界領域に達している。図にはAchenbachによる実測値も図示してある。図中 k_s は分布粗さの有効高さで本実測値と比較して定性的傾向は非常によく一致しているが、粒子径に対する抵抗の値には若干相違がある。分布粗さを織成する粒子の形状、分布粗さの密度そして模型円柱の端部間隙の相違などによるものと考えられる。また、Achenbachの測定によれば、このような抵抗係数の変化と円柱表面上のはく離点の移動とがよく対応している。



図には、表面粗さ円柱(粗さ $k_s/D=4.68 \times 10^{-3}$)に生じる後流の速度変動のスペクトル分布を示す。亜臨界域Subcritical regionの (a) $Re=0.6 \times 10^5$ 場合、後流の速度変動波形は規則的周期性が高く、そのスペクトルは鋭いピークを呈し、そのストローハル数は $St=0.21$ である。(b) $Re=1.1 \times 10^5$ は、前図で抵抗係数が最も小さくなる超臨界域の場合で、速度変動波形は不規則になり、スペクトル分布は広い周波数範囲にわたって複数のピーク($St=0.25, 0.4$)が生ずる。さらに高いレイノルズ数で、抗力係数はほぼ0.8で一定で極臨界域Postcritical regionの (c) $Re=4.1 \times 10^5$ および (d) $Re=8.3 \times 10^5$ に示すように (a) の亜臨界域と同じような周期性の高い速度変動波形が再び現れ、そのスペクトルは鋭いピークを呈し、そのストローハル数は $St=0.22$ である。表面粗さによって、円柱表面境界層の乱流への遷移が促進されていることがわかる。

画面で学ぶブラフボディーの流力振動

円柱の流力振動

1. 円柱の静特性

- Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
- 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報、(1973) 40, pp.387-400.

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188. 10-25
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999) 65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11) .

3. 有限スパン長さ円柱の流れ方向振動

- Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705~711.

4. 高レイノルズ数における円柱の渦励振

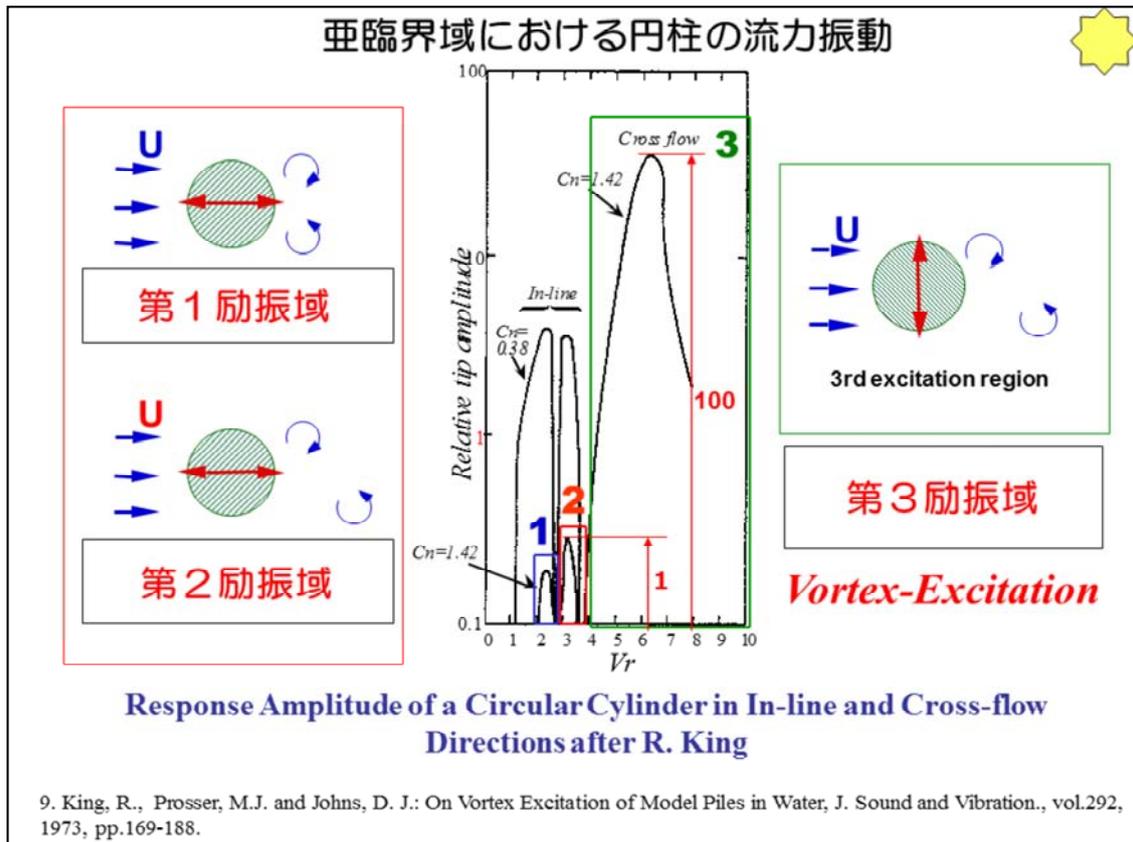
- Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiyama, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

5. 高レイノルズ数における球まわりの流れ・サッカーボールの奇妙な飛翔挙動

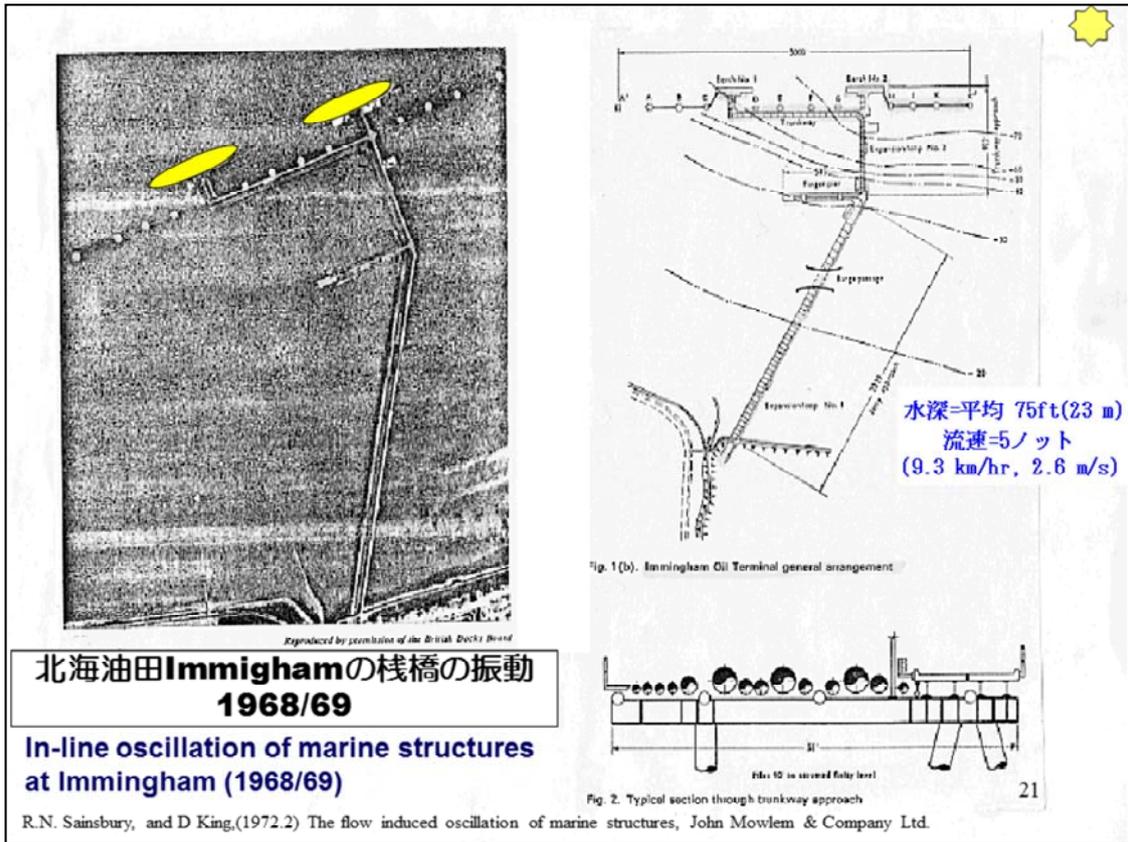
- Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
- Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192 (1978)

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

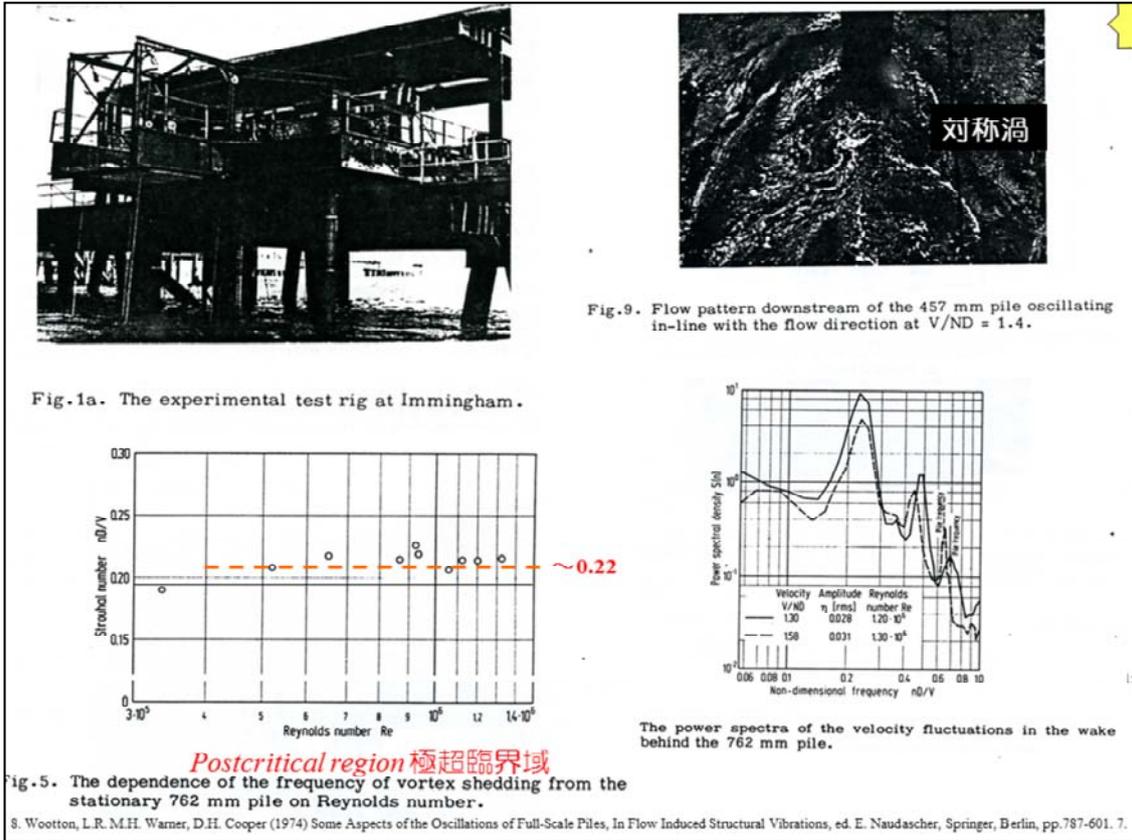
- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999) 65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11) .



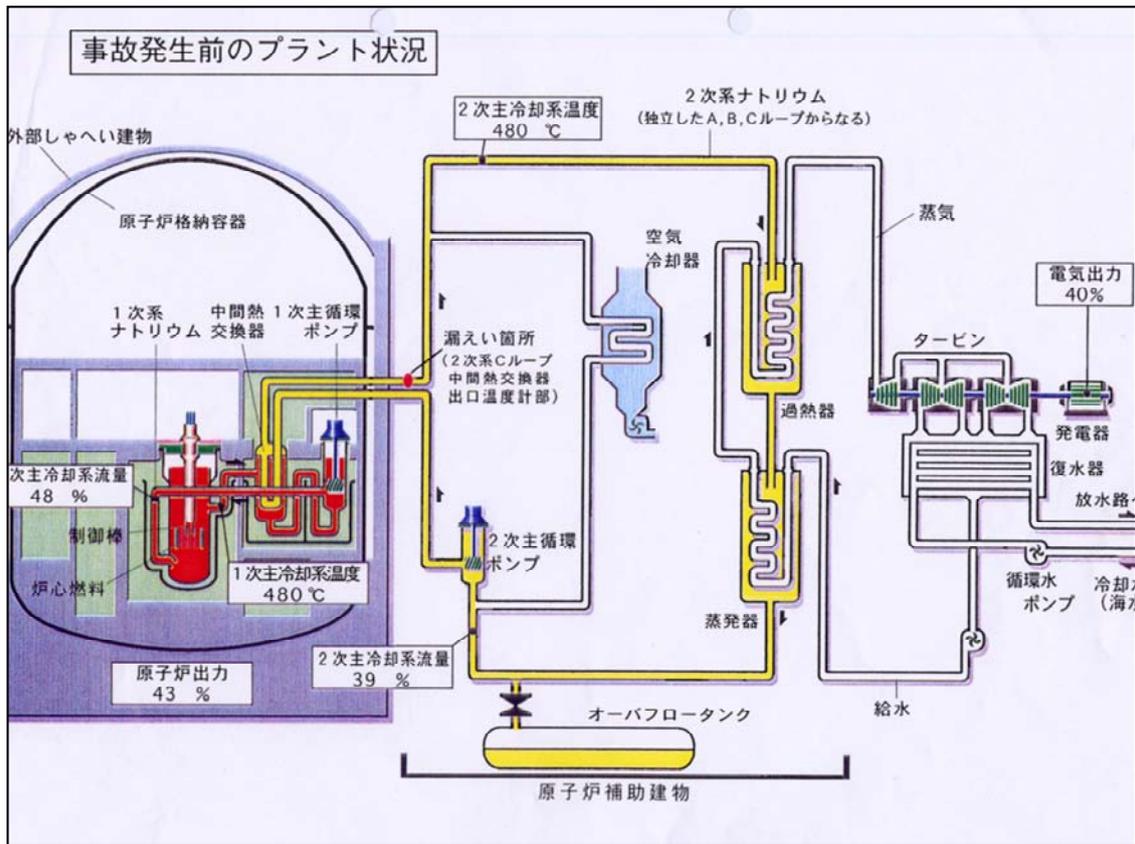
静止円柱の際の後流渦のストローハル数 $St_n=0.2$ から求めた共振換算流速 $Vr_{cr}(=1/St_n)=5$ 付近の流速領域、すなわち振動円柱の無次元振動数 $St_c(=fD/U)$ が St_n にほぼ等しい流速領域($St_c=St_n$)において、換算減衰率 $Cn=1.42$ の場合、流れに直角方向の振動が圧倒的に卓越する大振幅の振動が生ずる。一方、丁度 $St_c=2St_n$ となる共振換算流速の半分の流速 $Vr=2.5$ ($=Vr_{cr}/2$)付近では、流れ方向振動が卓越する2つの励振域が認められる。そして同じ換算減衰率 $Cn=1.42$ の場合、流れ方向振動の応答振幅は直角方向振動振幅の1/100以下の小振幅の振動であることが注目される。しかし、水や金属ナトリウムなどの液体流中の場合には、質量比 $m/\rho D^2$ の値が空気流中における現象に比較して小さく、しかも溶接構造などで構造減衰が極めて小さい場合には、 Cn 数値が1程度に極端に小さくなり、図中、 $Cn=0.38$ の場合では、流れ方向振動の振幅は直角方向振動の1/10程度になる。このように、円柱の流れ方向及び直角方向振動はその発振する Vr 領域がそれぞれ異なり、応答特性も異なる。また、換算減衰率 Cn の大きさにも依存する。



Immingham Oil Terminal (Figs 1(a) and 1(b)) on the south bank of the Humber stretches more than half a mile from the shore into water with a mean depth greater than 75 ft which during spring ebbs reaches a velocity of 5 knots. Helically welded steel piles were used, of wall thickness 0.5 in. and of diameters between 24 in. and 30 in. The berths and dolphins (操船余地や係船柱) have concrete decks but the pipeways are of open construction, consisting of steel bents at 50 ft centres: a typical bent is shown in Fig.2.



1. The first indication of trouble came during construction at the root of the coastal berth when it was noticed that piles in the cantilever condition, prior to the placing of capping beams, were oscillating, some across the current and some in line. The amplitudes were a few inches only and the motion stopped when the structure was completed.
2. There was clearly



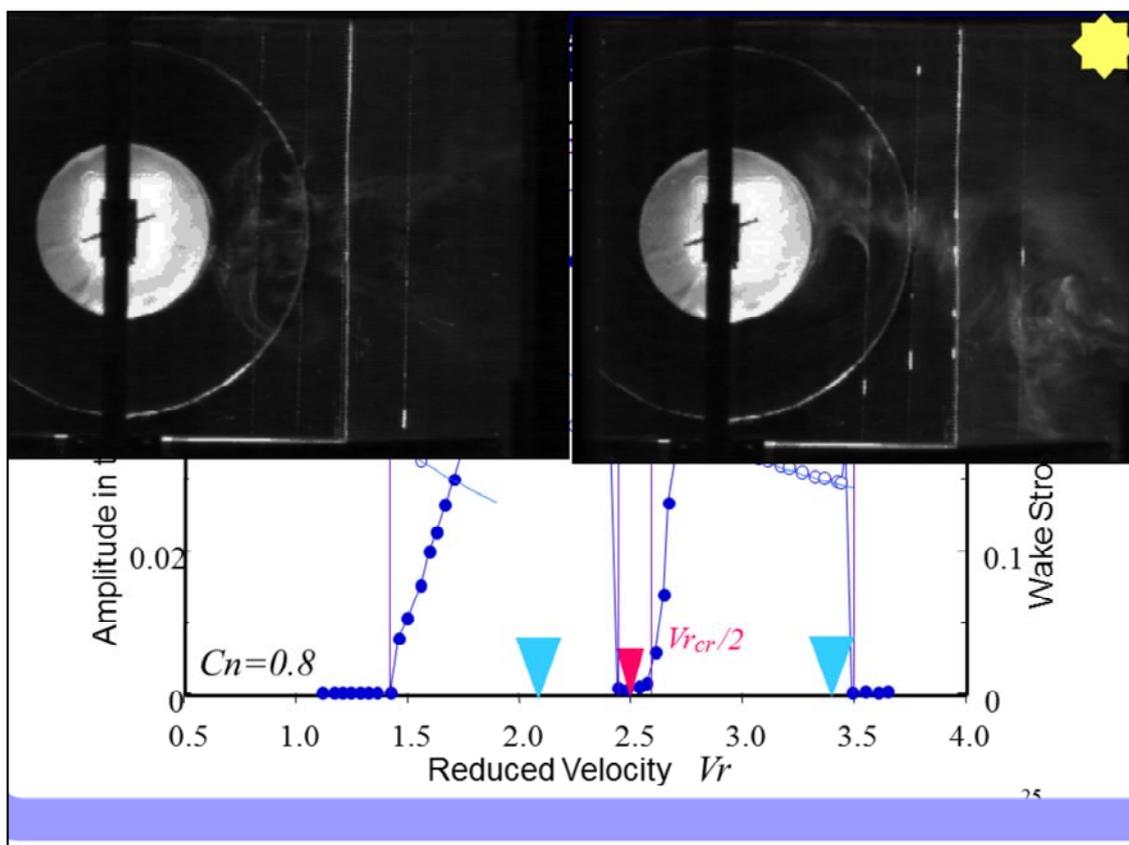
もんじゅ温度計の水槽実験（東芝）



$V=5.5m/s$

$V=8.1m/s$

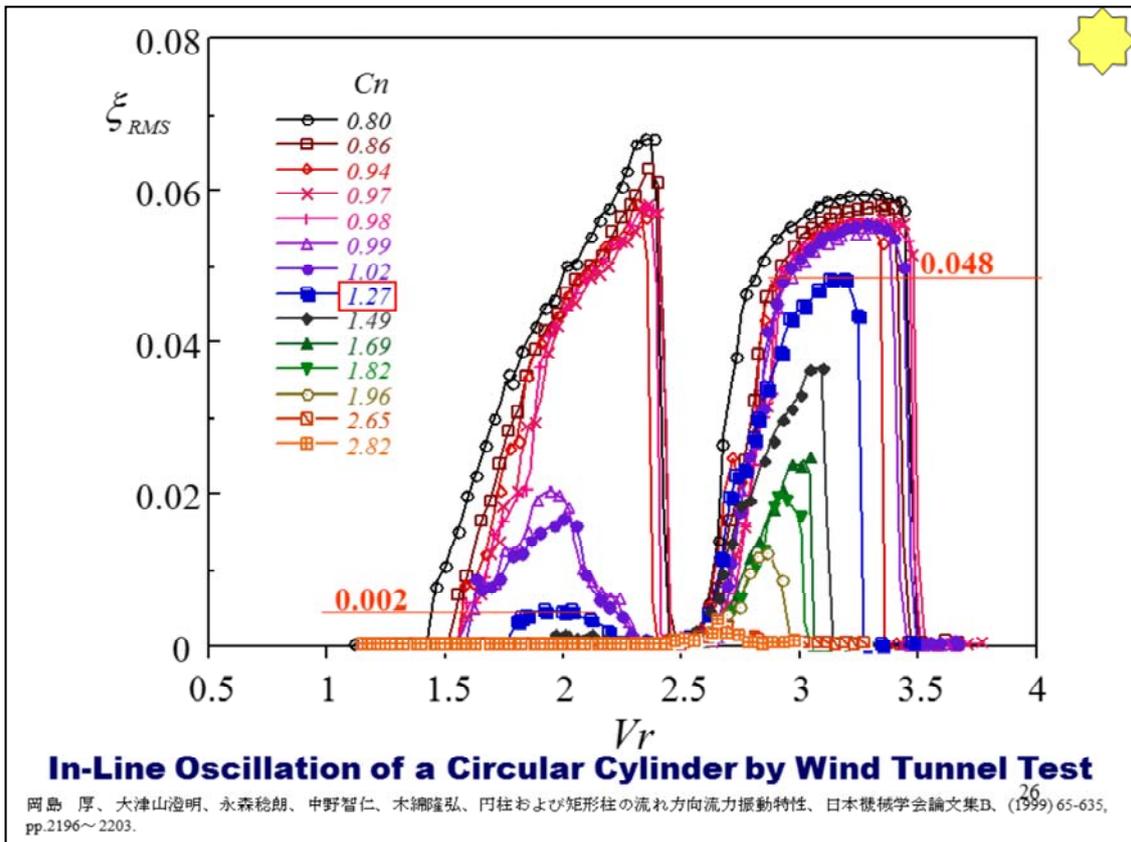
24



円柱の流れ方向振動特性について説明する。図は流れ方向の無次元応答振幅のRMS値（プサイ）と後流渦放出ストローハル数 S_{t_w} を換算流速 V_r で整理したものです。1/2共振流速 $V_{r_{cr}}/2$ を谷にしてその付近で2つの励振域が確認できる。また、ストローハル数の変動から第2励振域である流速範囲2.3~3.5でのみロックイン現象が生じることから、この2つの励振域は性質の異なる励振であることがわかる。

次にこの換算流速における流れの可視化を示します。

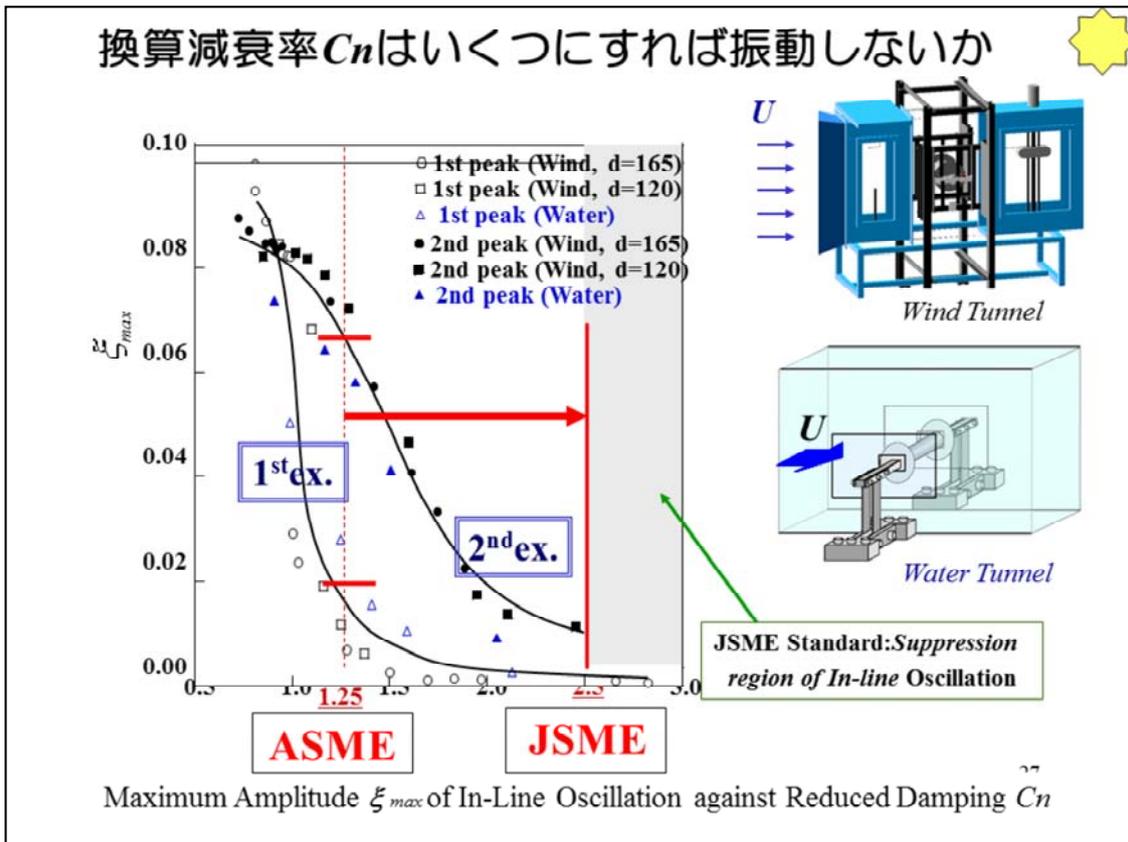
第一励振域では模型の上下側面から同時に剥離し、その剥離点には変動が見られます。後流では、この模型の移動に起因する息つき運動が見られ対称渦を形成する。一方、右図の第2励振域では上下側面のどちらか一方から剥離したせん断層はカルマン渦列型の交互渦を形成することが分かる。



This figure shows the amplitude of the two-dimensional circular cylinder at different reduced mass-damping parameters.

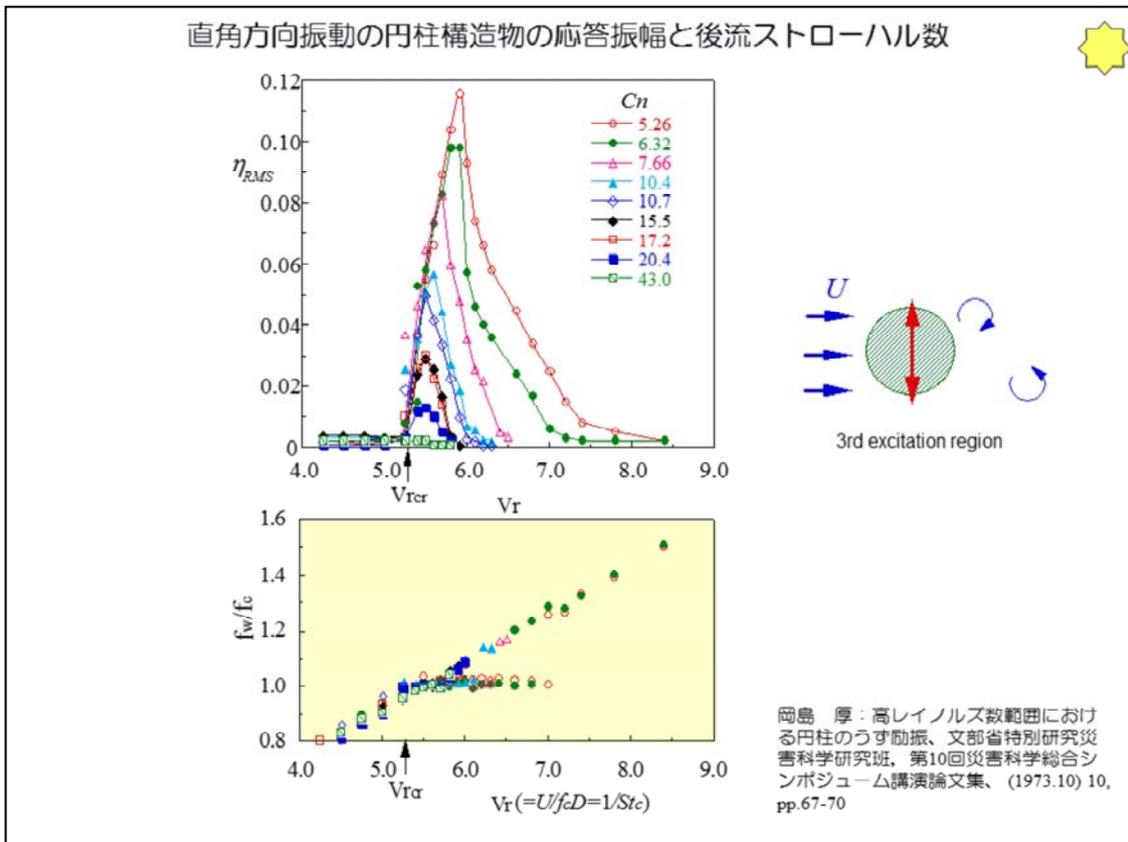
For all values of C_n , there are two excitation regions in this range of reduced velocity. The response amplitude is damped in both excitation regions as the C_n value increases.

図には、直角方向の渦励振に関するScrutonの風洞実験の方法と同じ方法で、一様流中で剛な二次元円柱が流れ方向に並進振動するように両端弾性支持した場合の風洞実験結果を示す。図は換算減衰率 C_n を0.8~2.8の範囲で種々変えた時の流れ方向の応答振幅 ξ_{PMS} (直径 D に対する応答変位のRMS値の%)を示すが、いずれの C_n 数においても、図に示した片持ち支持円柱の場合と同様に、 $V_{r_{cr}}/2$ より低い流速域の第1励振域 $1.4 < V_r < 2.5$ と $V_{r_{cr}}/2$ 以上の第2励振域の $2.6 < V_r < 3.6$ の2つの励振域が存在する。そして C_n の値が大きくなるに従い、2つの励振域の応答振幅はともに減少するが、 C_n 数に対してそれぞれ異なった振動特性を示す。すなわち、両実験結果ともに $V_{r_{cr}}/2$ 以下の第1励振域の ξ_{PMS} 値の変化は第2励振域に比較し、 C_n 値の増加によって急激に ξ_{PMS} の最大値は減少するとともにその励振流速が高流速側に移動する。そして $V_{r_{cr}}/2$ 以下の第1励振域では、既に図2で示したような上下対称の渦配置パターンが形成される。一方、 $V_{r_{cr}}/2$ 以上の第2励振域では非対称の交互渦パターンが円柱背後に形成され、渦励振による流れ方向振動が生じる。すなわち、それぞれの励振域で異なった渦パターンが形成される。



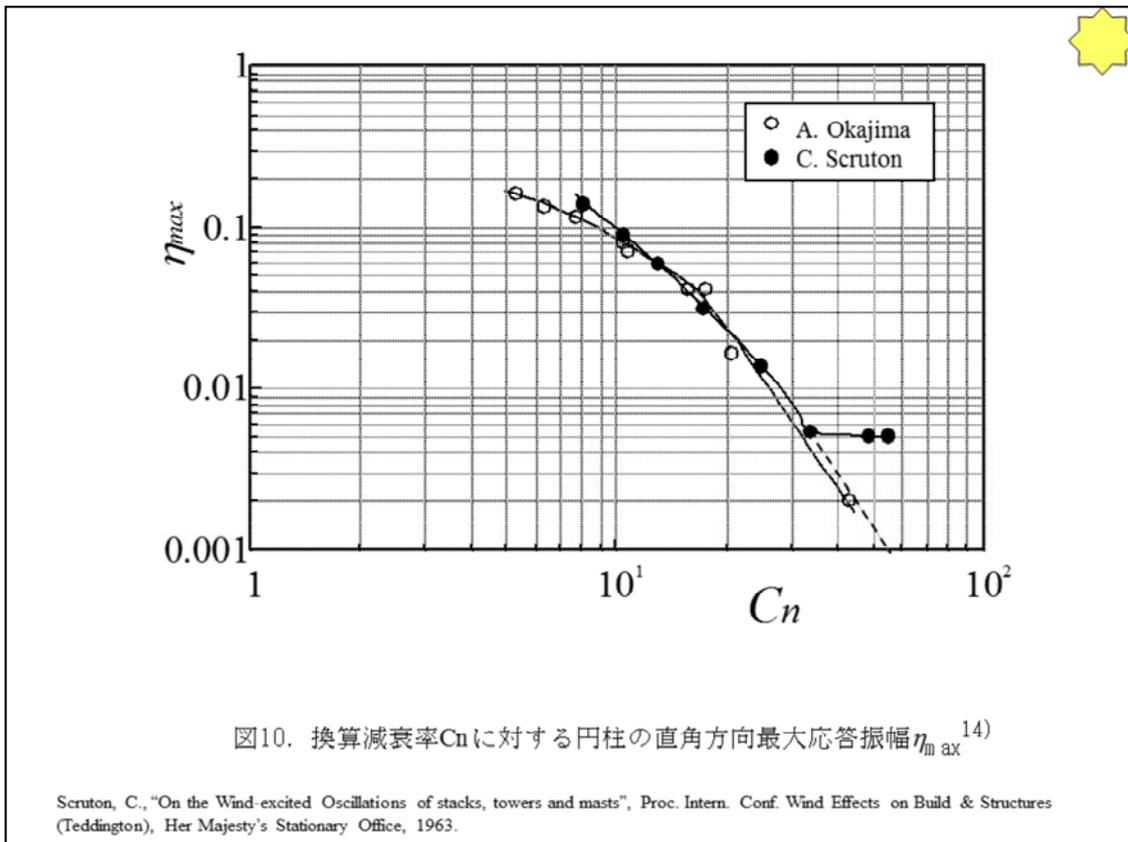
流れ方向振動抑制のための換算減衰率

前図に示した換算減衰率 $C_n = 0.8 \sim 2.8$ の流れ方向振動の第1及び第2励振域の応答振幅の最大値 x_{max} の変化を区別して図に示す。図から、第1及び第2励振域の x_{max} の値は、 C_n 値の増加に伴って共に減少するが、特に、低流速側の第1励振域における x_{max} は C_n 値の増加に対して極めて急激に減衰する。一方、高流速側の第2励振域の C_n 値に対する x_{max} の変化は比較的緩慢で、 $C_n = 2.5$ で0.5%程度まで減衰する。



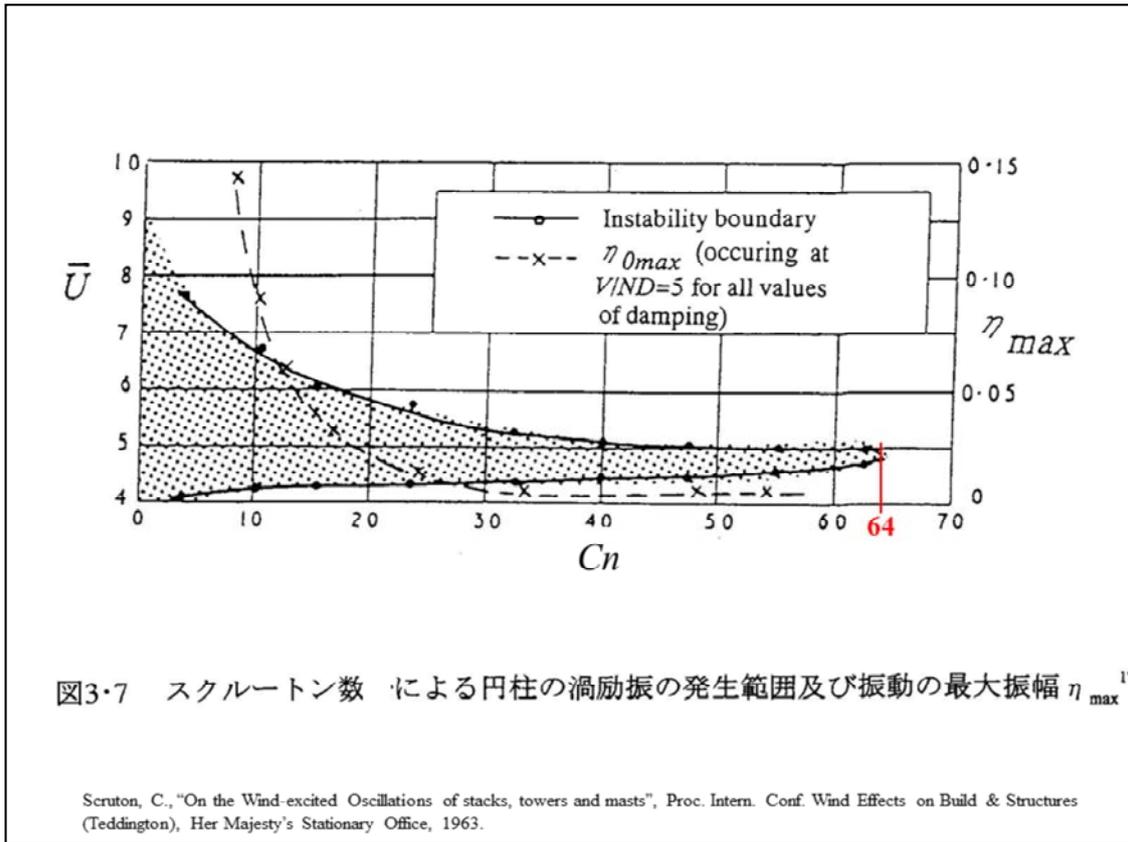
直角方向の流力振動-渦励振

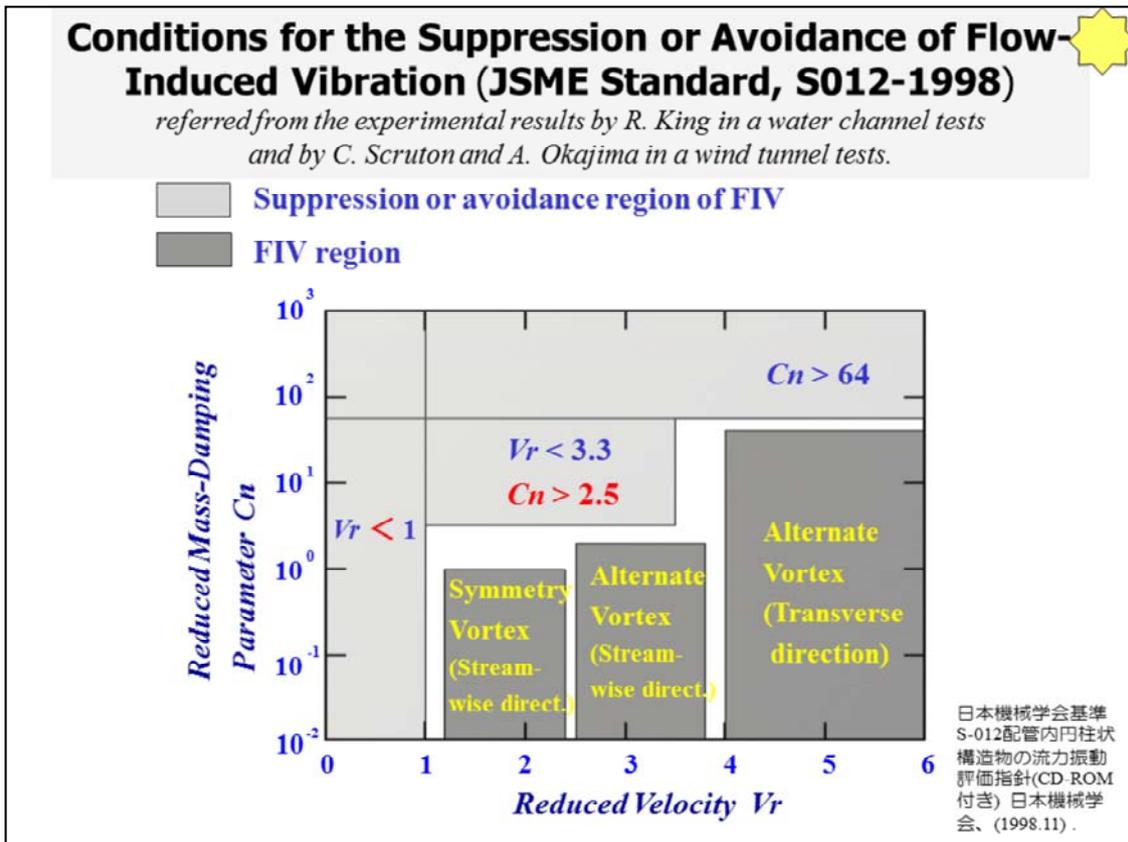
一般に、かなり大きい換算質量減衰率を持つ円柱構造物であっても、 $St_c = St_n$ となる共振流速 V_{rc} の近くの流速領域では流れに直角な方向の振動が起こり易く、普通、渦励振はこの領域で生じる直角方向の振動のことを言う場合が多い。また、この渦励振の発生領域や振動の振幅が限定される場合が多いことから限定振動とも呼ばれる。図には、風洞による自由振動法によって得られた円柱の換算減衰率 C_n を比較的広い $C_n=5.26\sim 43.0$ の範囲で変えた場合の流れに直角方向の振動応答特性を示す。そのうち、図には、換算流速 V_r に対する直径 D で無次元した円柱の直角方向の応答変位振幅 h_{RMS} のRMS値を示す。図から、流れ方向振動に較べて励振は強く、 $C_n=5.26$ でも、 $V_r=6.0$ で最大振幅 $h_{RMS}=0.12$ に達する。そして C_n の増加に伴い h_{RMS} が最大となる V_r の値は低流速側に移動して V_{rc} に近づく。この場合、 $C_n=43.0$ で $h_{RMS}=0.02$ となり、振動はほとんど抑制されている。次に、後流中の速度変動をスペクトル解析して得られた渦の周波数 f_w の変化を St_w 数($=f_w D/U$)と円柱の無次元振動数 St_c 数($=f_c D/U$)との比の形 St_w/St_c で表示して図に示す。図において、流速 V_r の増加にともなって St_c 数が直線的に増加し、静止時の St_n 数に一致するようになる。すなわち、 $St_c/St_n=1$ となる共振流速 $V_{rc}(=1/St_n)$ 付近になると、図の応答振幅に示すように渦励振が発生し、さらに高流速の領域の限定された流速領域で振動が持続する。そして振動の持続している V_r の領域では、後流渦の St_w 数は円柱の固有振動数 St_c に等しく、後流渦のロックイン現象が生じる。この場合、ロックイン現象が生じている V_r の領域の大きさは振動振幅 h_{RMS} に依存して変化する。



振動抑制のための換算減衰率

図にはScrutonの風洞実験の結果から換算減衰率 C_n の値に対する円柱の最大振動振幅 h_{max} の関係を比較して示す。振動振幅 h_{max} が直径の0.5%以下に減衰する C_n の値の大きい領域以外、両者良く一致している。 C_n 値の大きく、 h_{max} の小さい範囲の振動挙動の詳細は、図からはあまり明確ではないが、 $Vr=3.5\sim 9$ の流速領域で生じる渦励振は $C_n=64$ 以上であれば、円柱直径の0.1%以下まで振動を抑制することが出来、ASMEコードと同様、JSME, S012-1998でも限界の C_n 値を64としている。





振動抑制のための換算減衰率

日本機械学会・配管内円柱状構造物の流力振動評価指針 (JSME,S012-1998)では、流れ方向振動の抑制のための換算減衰率をASMEコードの $C_n = 1.2$ では不十分であり、第2励振域の C_n の値から限界の値を $C_n=2.5$ としている。そして $V_r=3.5\sim 9$ の流速領域で生じる渦励振は $C_n=64$ 以上であれば、円柱直径の0.1%以下まで振動を抑制することが出来、ASMEコードと同様、JSME, S012-1998でも限界の C_n 値を64としている。

Then, this shows the conditions for the suppression or avoidance of the synchronized oscillation, which is quoted from the JSME guideline. This figure is mainly referred from the experimental results by R.King in a water channel tests and by Scruton and Okajima in a wind tunnel tests. The conditions for the suppression or avoidance of the streamwise oscillation are established in this area.

ブラフボディーの流力振動：円柱の流力振動

1. 円柱の静特性

- Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
- 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報、(1973) 40, pp.387-400.

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999)65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11).

3. 有限スパン長さ円柱の流れ方向振動

25-35

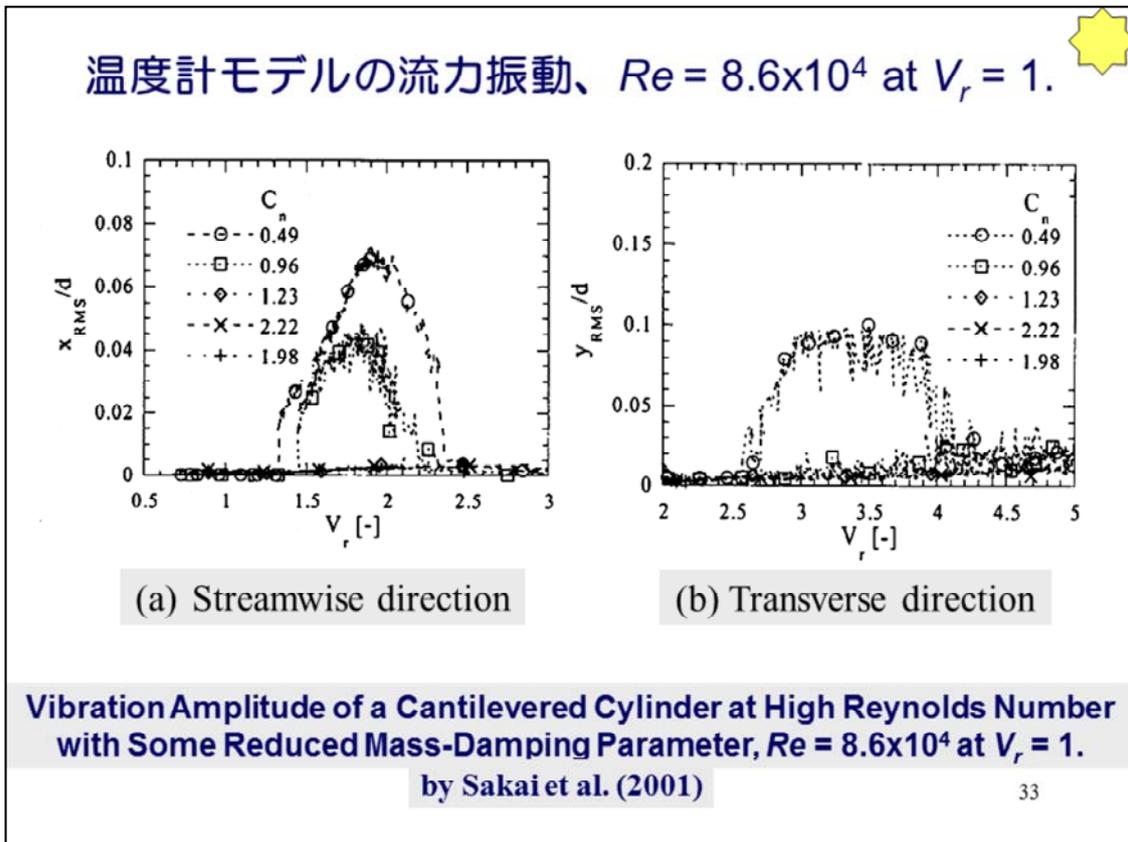
- Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705~711.

4. 高レイノルズ数における円柱の渦励振

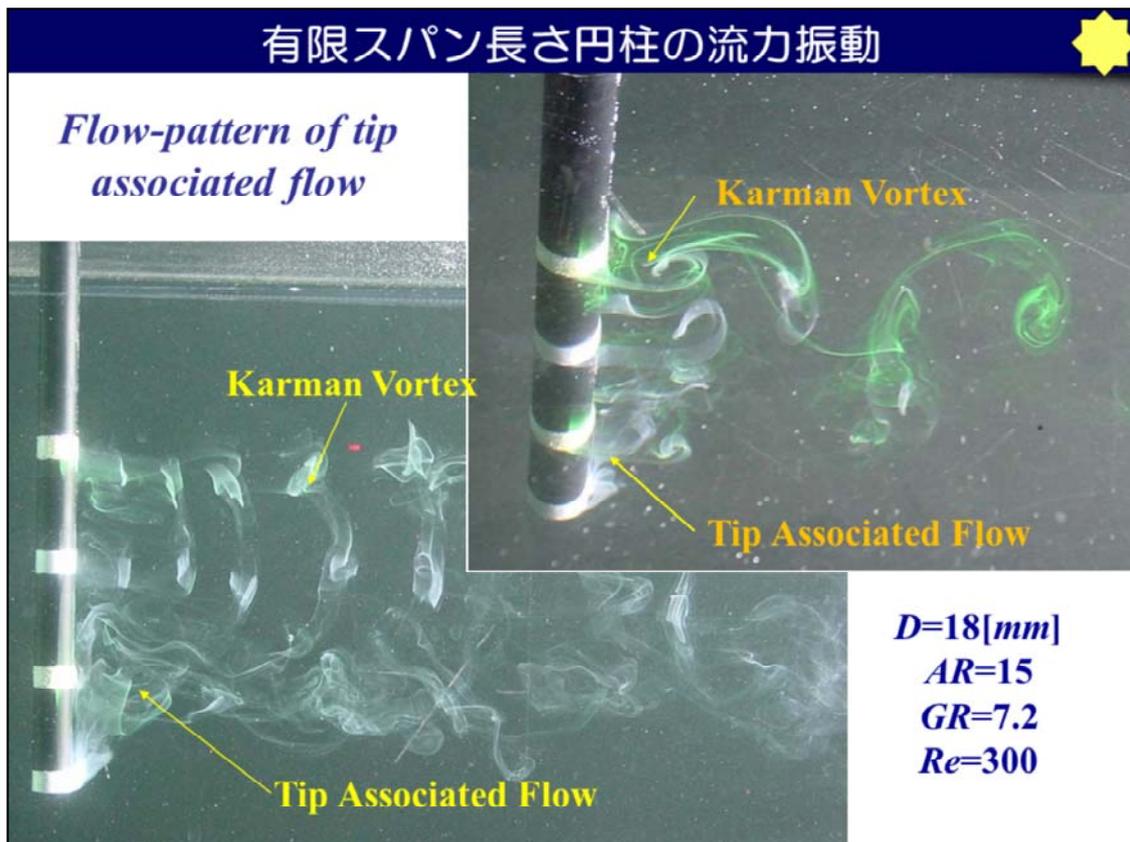
- Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiwata, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

5. 高レイノルズ数における球まわりの流れ・サッカーボールの奇妙な飛翔挙動

- Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
- Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192 (1978)



Sakai carried out experiments of a cantilevered cylinder with some reduced damping. You can see some streamwise and transverse oscillation regions. However, each oscillation is suppressed with C_n more than 2.5. The criterion of JSME is valid for the transverse oscillation at supercritical Reynolds number flow.

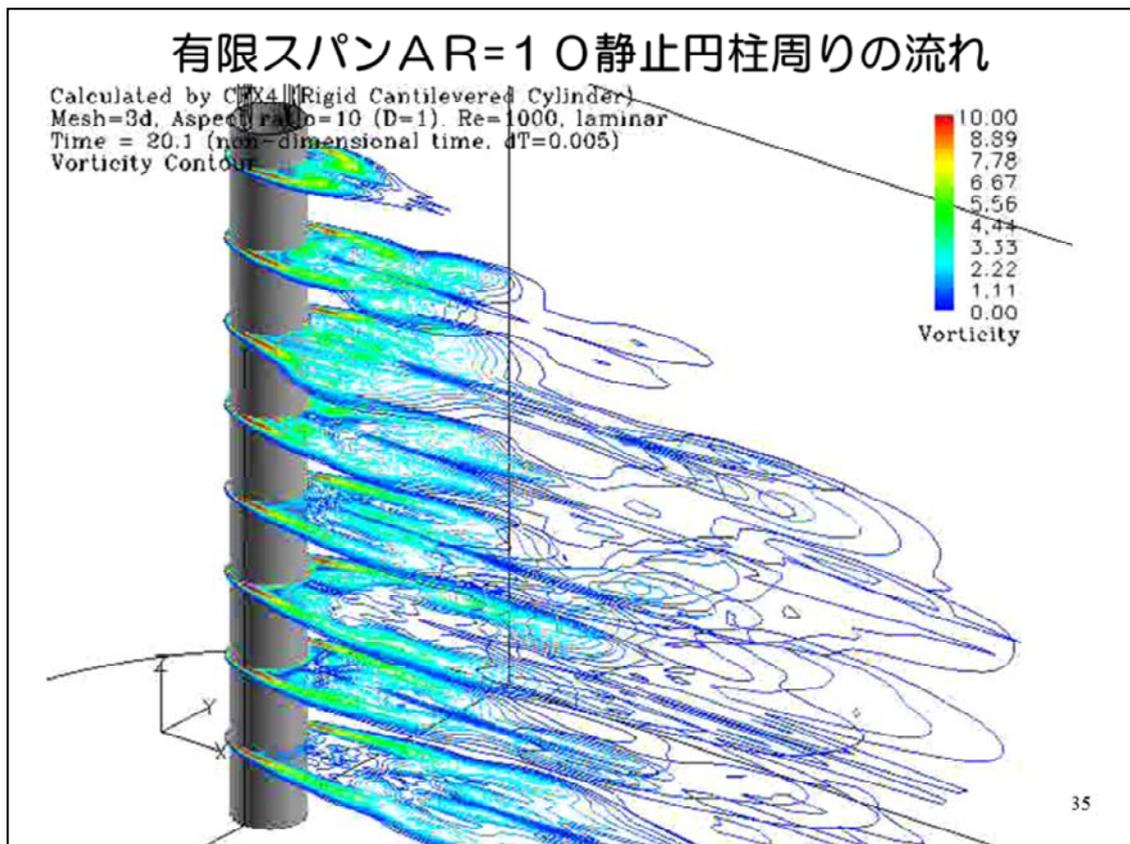


This flow-pattern shows the difference of supporting condition. It is the flow-pattern around a cantilevered cylinder. You can see in this picture, there is a tip-associated flow over free-end of a cylinder, and it makes flow-patterns different from that of a two-dimensional cylinder.

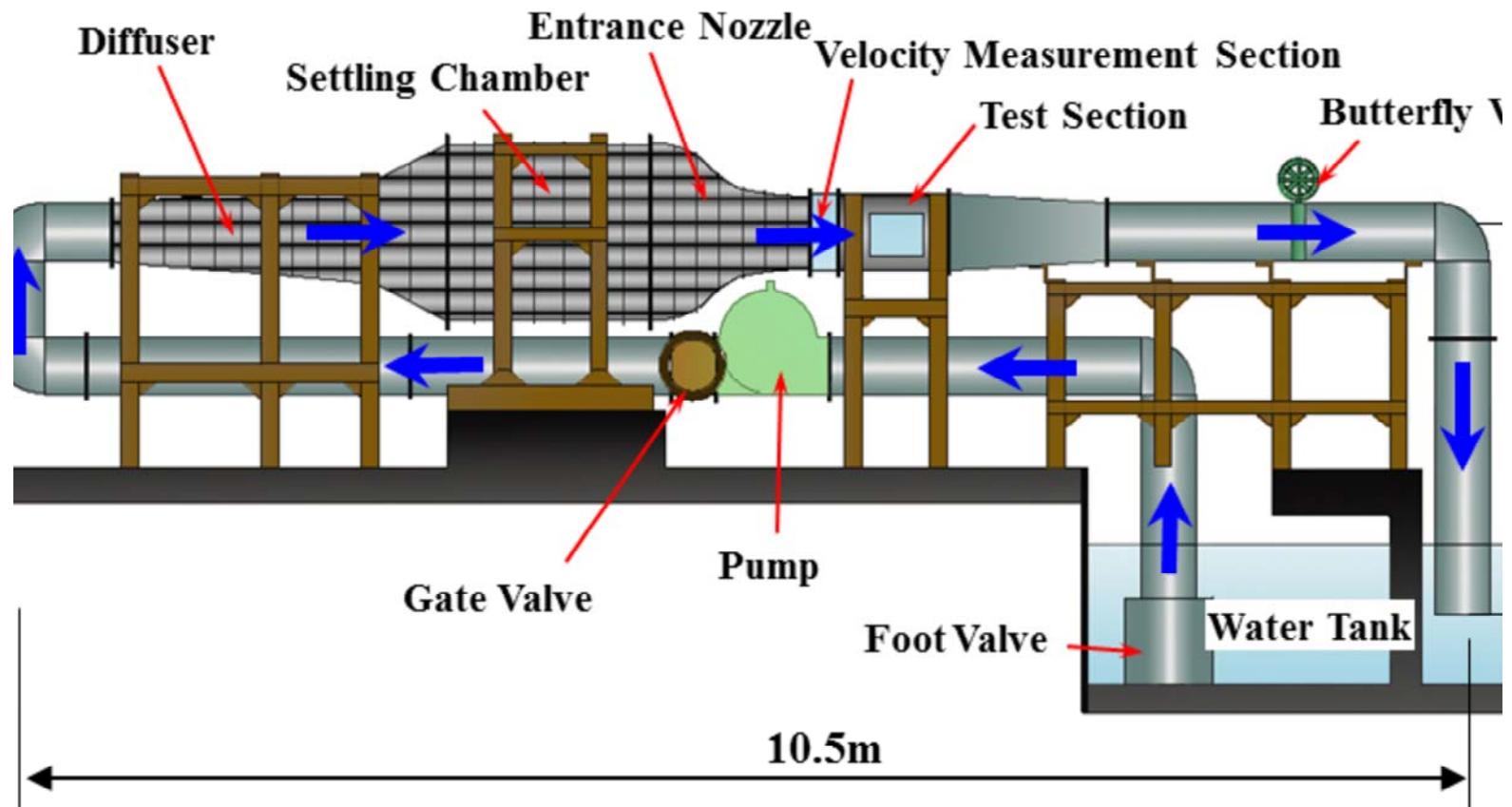
Then, I will show you the response characteristics of circular cylinders with various aspect ratios.

有限スパン長さ円柱周りの流れ

実際の温度計のような有限スパン長さ円柱周りの流れは、無限スパン2次元円柱の場合とは流れも異なり、その流力特性も異なる。特に、円柱先端部を乗り越えて流下する流れの発生に注目されたい。



Experimental Apparatus : Water Tunnel

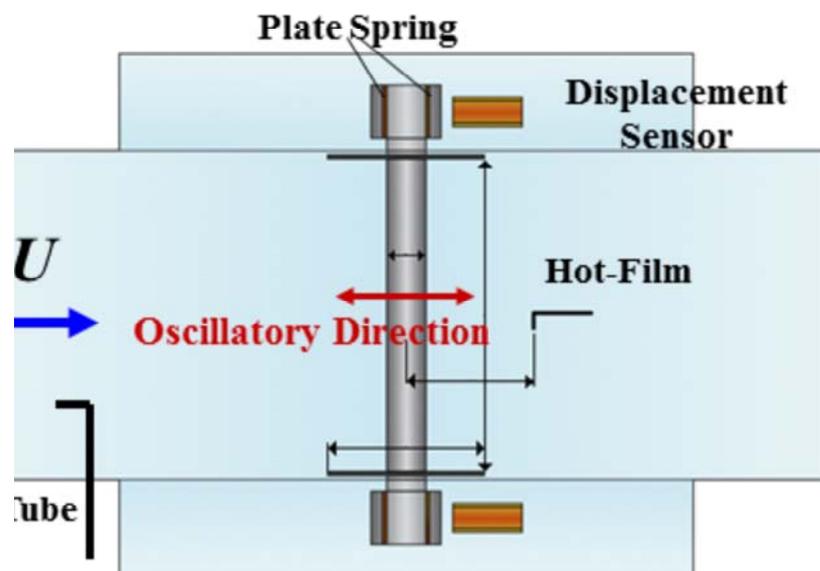


Velocity Range: $0.2 \text{ m/s} < U < 2.4 \text{ m/s}$

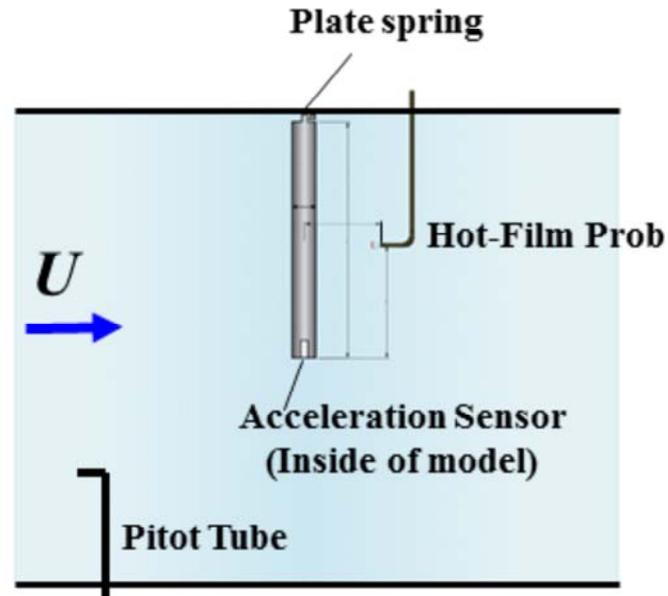
A., Okajima, A., Kosugi, T., Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (The Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, (2001.11) 44-4, pp.705~711.

This is experimental apparatus. Flow comes up from a water tank and goes through a pipe-circuit as shown. Here is the test section.

The range of velocity in the test-section was from about 0.2m/s to 2.4m/s.



Two-dimensional cylinder



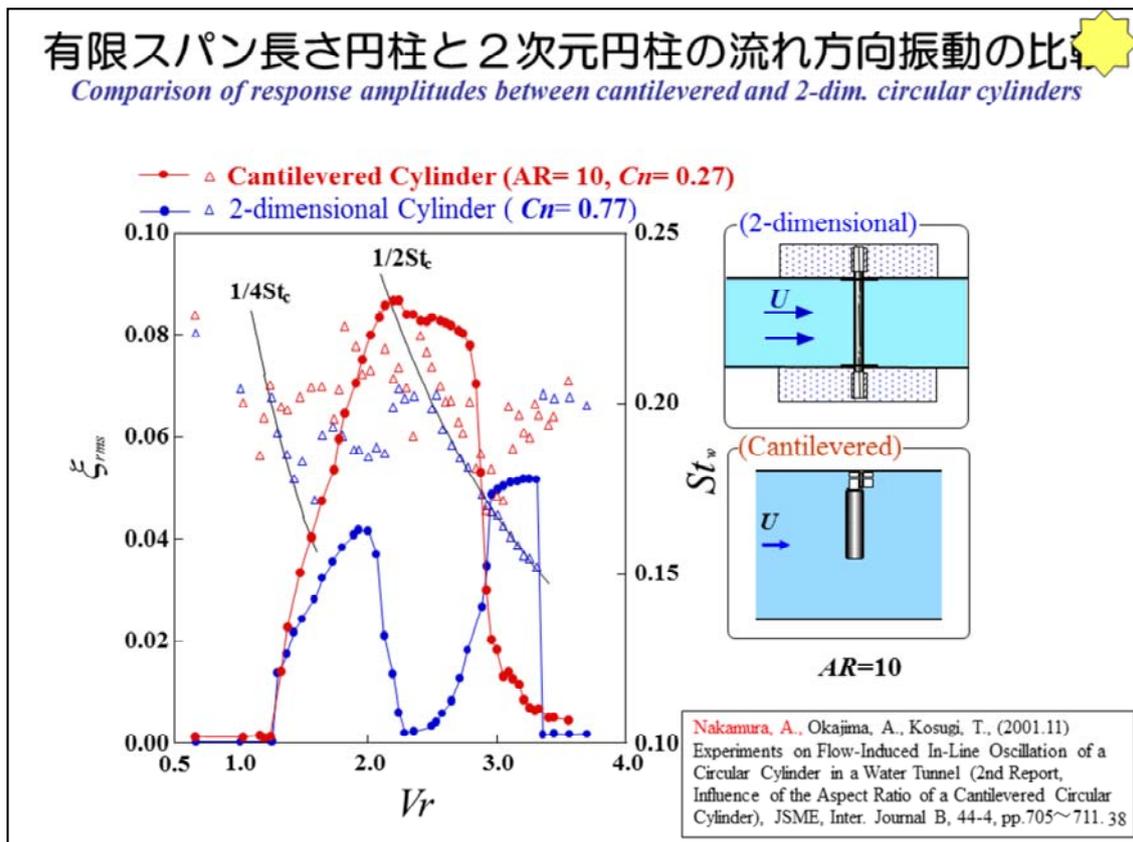
Cantilevered cylinder

Test Section of a Water Tunnel

A., Okajima, A., Kosugi, T., Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, (2001.11) 44-4, pp.705~711.

Thank you, Mr.Chairman!

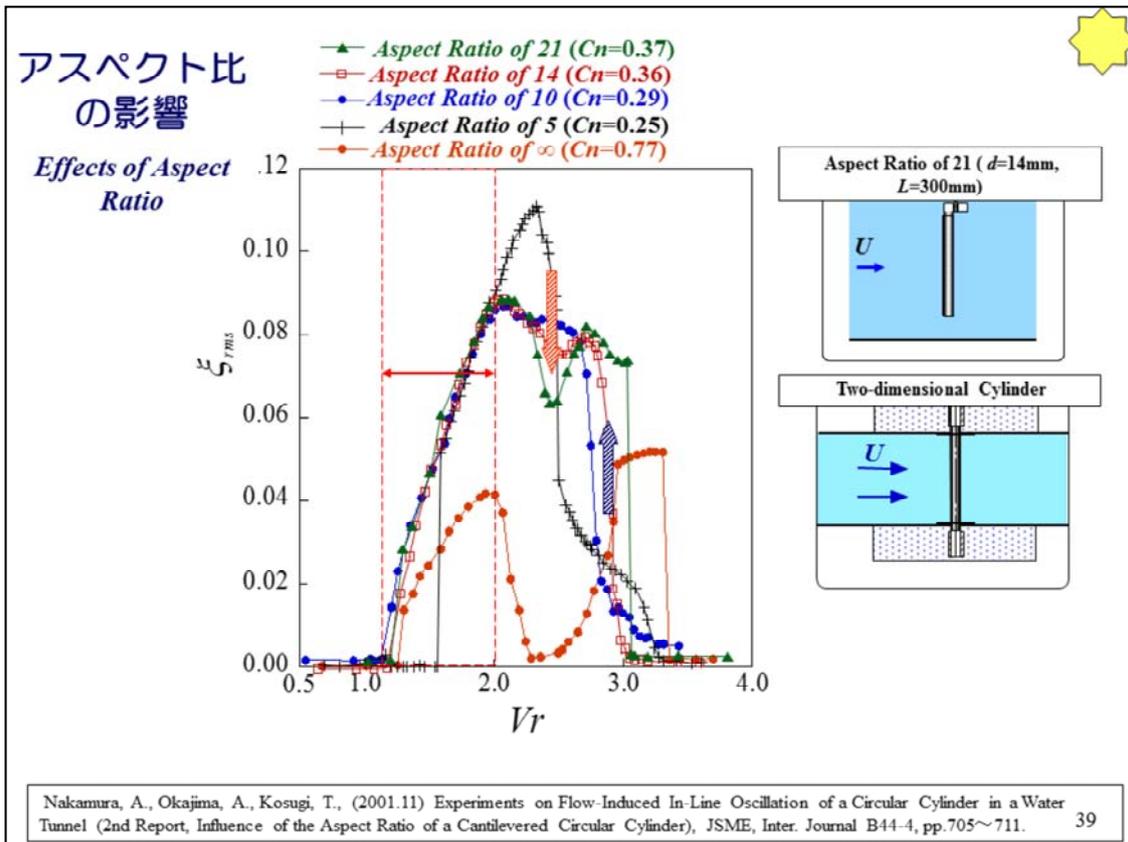
Today, I'm going to talk about flow induced in-line oscillation of a circular cylinder. We have experimentally studied flow-induced in-line oscillation of two types of a circular cylinder by free-oscillation tests in a water tunnel. One is a two-dimensional cylinder which is elastically supported at both ends with plate-springs, and another is cantilevered cylinder. I'll show the response characteristics of each type of circular cylinder.



This figure shows the response amplitude for a cantilevered circular cylinder, comparing with the two-dimensional cylinder. The response amplitude becomes very different from the response curve of a two-dimensional cylinder. The wake frequency shows the lock-in phenomenon at $St_w=1/2St_c$ for $2.6 < Vr < 3.2$. The in-line oscillation gradually decreases in the range of $2.7 < Vr < 3.3$, although the lock-in of frequency continues.

有限スパン長さ円柱の自由振動法による応答振幅($AR=10, Cn=0.24$)

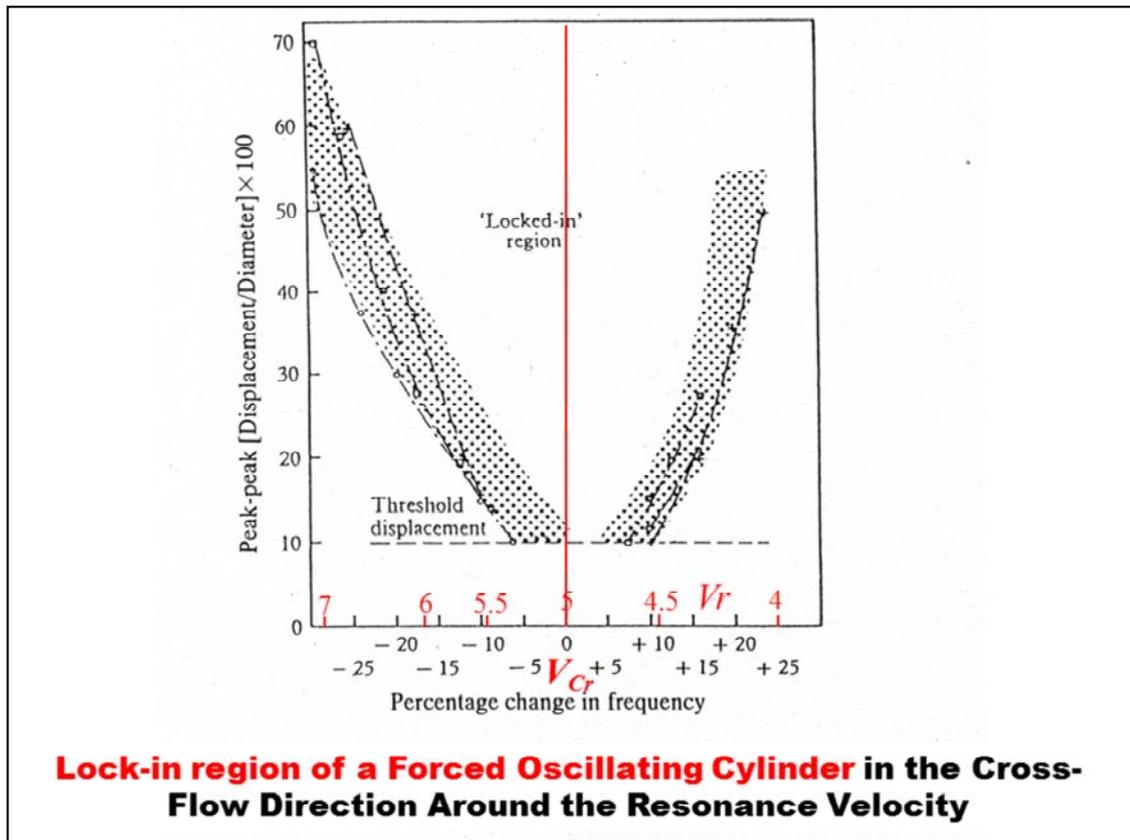
図は、有限スパン長さ円柱の自由振動法による応答振幅($AR=10, Cn=0.24$)を2次元円柱の応答振幅($Cn=0.77$)と比較して示す。後者の振動特性は $2.7 < Vr < 3.3$ の領域でLock-inし、この場合の励振域は2か所ある。一方、前者の温度計のような $AR=10$ の有限スパン長さ円柱の場合、 $2.6 < Vr < 3.0$ でLock-inして励振域は1か所のみであることが注目される。



Here, I'll show you the effects of aspect ratio on the amplitude of cantilevered cylinders. In the cases of cylinders with aspect ratios of 5 and 10, the response characteristics show one excitation region. On the other hand, the cylinders with aspect ratios of 14 and 21 have two excitation regions. When the V_r is between 1.7 and 2.1, the behavior seems much the same with all aspect ratios. The amplitudes of the second excitation regions are low for the case of small aspect ratios. It seems that the aspect ratio significantly affects the second excitation region more than the first excitation region.

有限スパン長さ円柱の自由振動法による応答振幅

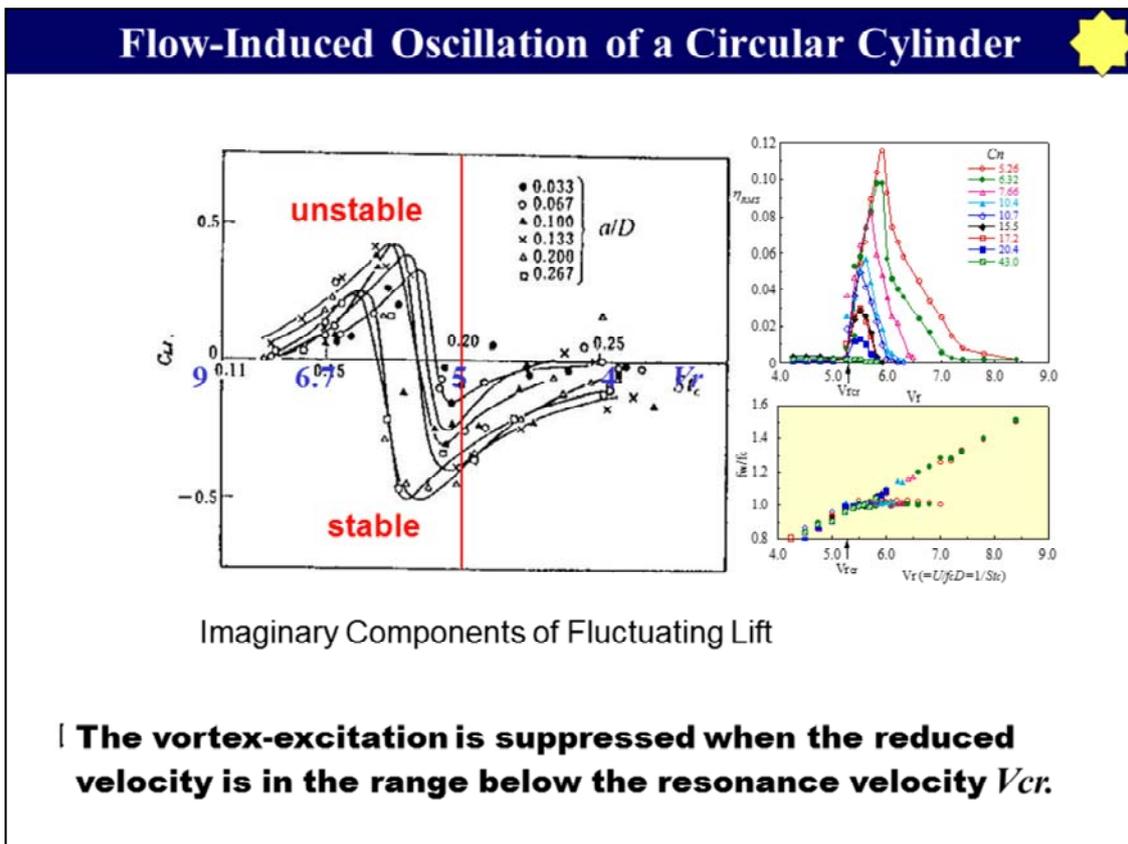
図は、有限スパン長さ円柱の自由振動法による応答振幅のアスペクト比の影響を示す。アスペクト比が小さく、 $AR=5$ の場合、流れ方向の対称渦による応答振幅は更に増大するのに対して、逆に $AR=14, 21$ と増加すると $V_r=2.5$ 付近の応答振幅が小さくなり、谷が深くなって2つの励振域が現れる兆候が認められる。また $V_r=2.7 \sim 3.0$ の流速域ではアスペクト比の増加に伴い、交互渦が発達して応答振幅が増大する。さらに、 $V_r=1.1 \sim 2.0$ の低流速励振域ではアスペクト比には無関係にいずれのアスペクト比の場合でもほとんど同じ応答振幅値になることは注目される。



Lock-in region of a Forced Oscillating Cylinder in the Cross-Flow Direction Around the Resonance Velocity

強制振動実験による振動振幅とLock-in領域

強制振動実験による振動振幅とLock-in領域の大きさを示すが、共振風速付近で生じるLock-in領域は振幅の大きいほど広い。しかし、たとえLock-inしていても正減衰する領域と負減衰の領域があることに注意されたい。



強制振動実験と自由振動実験

円柱を強制的に振動する。図は、強制振動数 $St_c (=1/V_r)$ を種々変化したときに円柱に作用する揚力の虚数部

$$C_{L_{imag}} = [C_L] \sin f \text{ (変位変動を基準とした位相差 } f)$$

を示す。この場合、 $C_{L_{imag}}$ の正領域は、変位変動とそのときの揚力変動の位相差から振動的にみて不安定で渦励振を起こす。一方、 $C_{L_{imag}}$ の負の領域は安定で、渦励振は減衰する領域である。

強制振動実験結果は、右図に示す自由振動結果と対応していることが分かる。



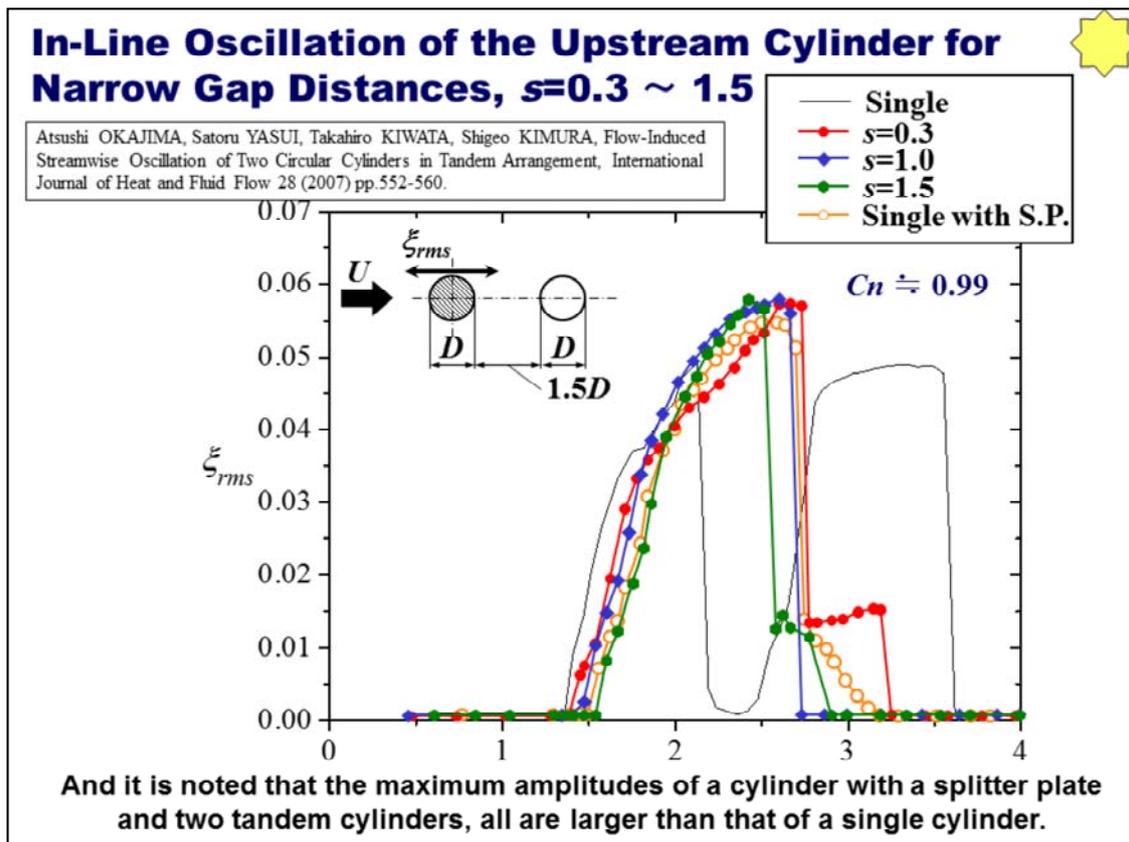
Flow-Induced In-Line Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement

Atsushi OKAJIMA,
Professor, Kanazawa-Gakuin Tanki University
and
Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, and Shigeo KIMURA

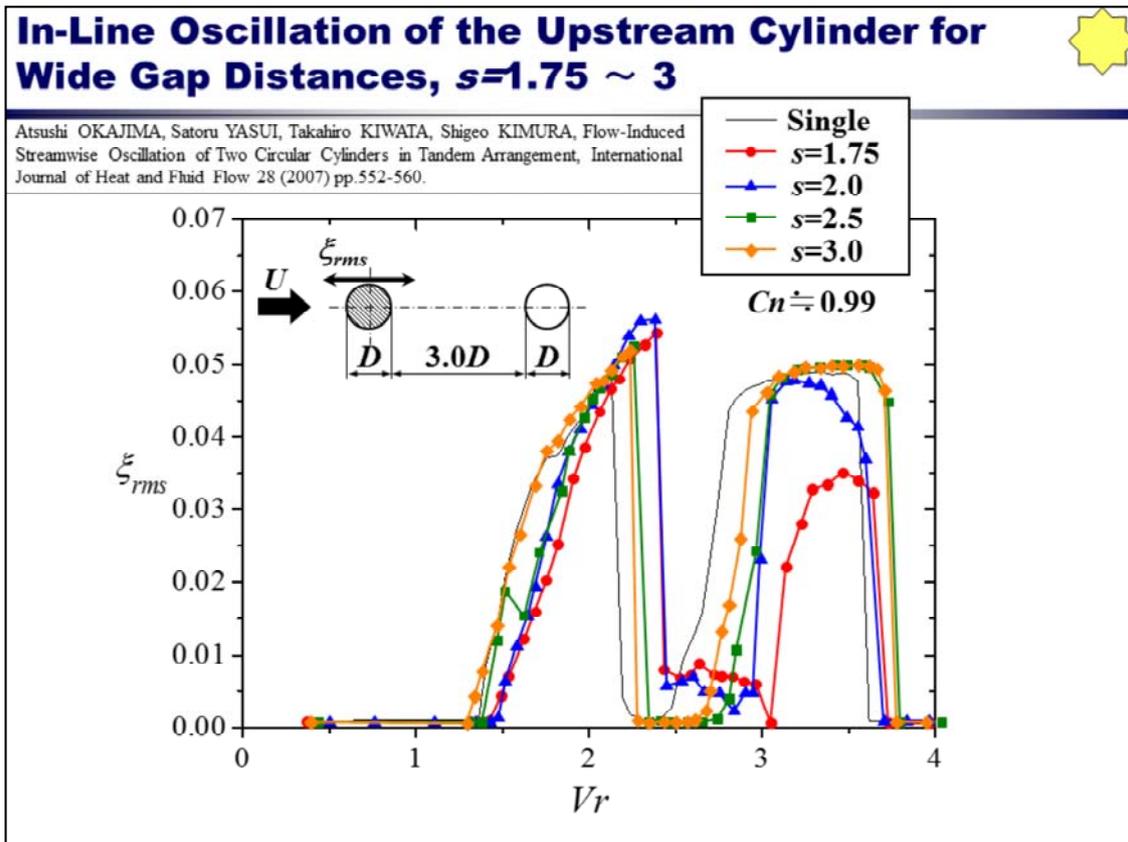
***Keywords: flow-induced oscillation, in-line oscillation, two circular cylinders,
tandem arrangement, flow visualization***

(1) Thank you, Mr. Chairman.

I would like to talk about Flow-Induced In-Line Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement.

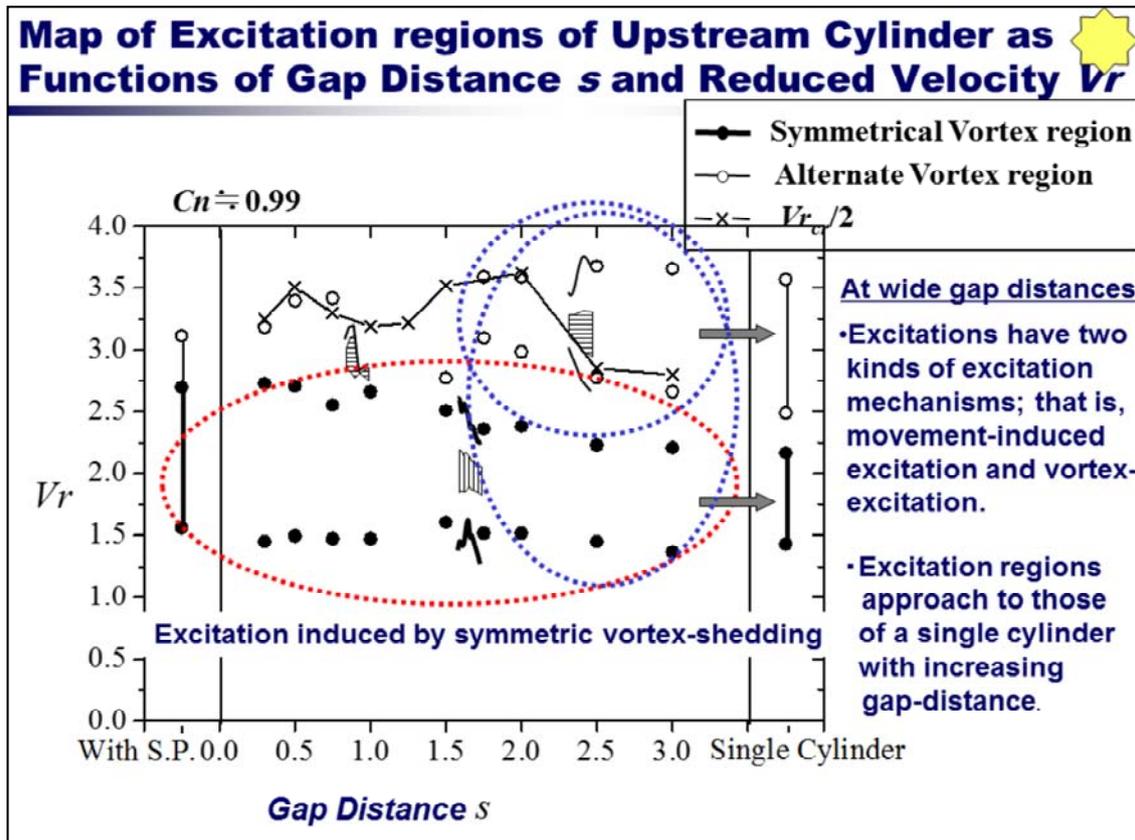


(11) This figure summarizes the response characteristics of the in-line oscillation of the upstream cylinder for the narrow gaps from 0.3 to 1.5. This is the response curve of a single cylinder. This is for a cylinder having a splitter plate. The gap distance changes into 0.3, 0.5, 1.0 and 1.5. You can see all response curves are similar to the response-characteristics of a cylinder with a splitter plate. It means that downstream cylinder works as a splitter plate.



(12)The response curves for the wide gap distances from 1.75 to 3 are presented here.

It is evident that all the response curves gradually approach that of a single cylinder with spreading gap distance over 1.75.



(13) Then we try to make a map of excitation regions of the upstream cylinder as functions of gap distance and reduced velocity. We can see two kinds of excitation regions due to different oscillation mechanisms; that is, symmetric vortices and alternate vortices. Excitation induced by symmetric vortex-shedding appears at all experimental gaps. The excitation of the upstream cylinder with wide gap have two kinds of excitation mechanisms; that is, movement-induced excitation and vortex-excitation. These characteristics approach to that of the single cylinder with increasing gap-distance over 1.75.

円柱試験体を用いて

- ・先端に**エンドプレート**を付けて端部の効果を調べる
- ・後流に**スプリッタープレート**を入れて渦構造を調べる

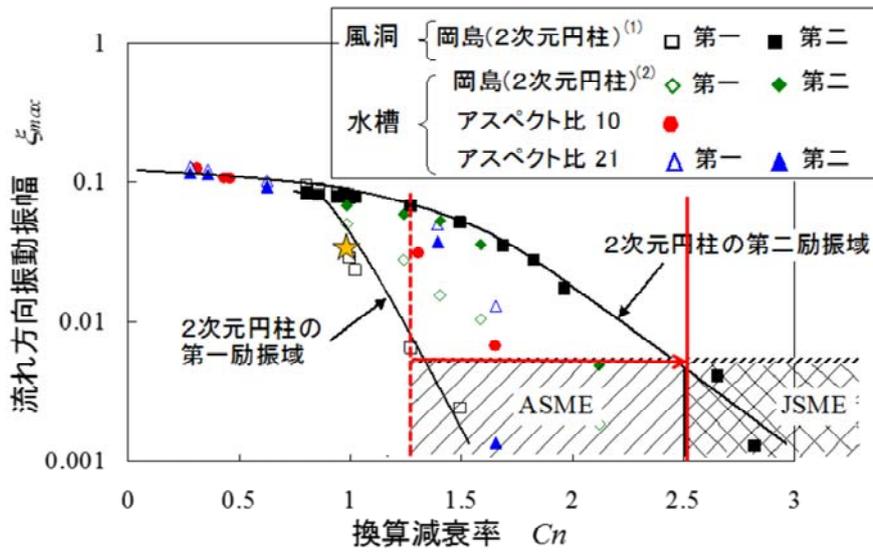


- ・**エンドプレート**により第二励振域が明瞭になる
- ・**スプリッタープレート**により対称渦による単一の励振域が現れる



- ・円柱試験体の構成により主として第二励振域が変化する

有限長円柱に対する換算減衰率の影響



- アスペクト比の影響を考慮しても、第二励振域をカバーした JSME 指針で評価すれば十分安全である。

ブラフボディーの流力振動：円柱の流力振動

1. 円柱の静特性

- Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
- 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報、(1973) 40, pp.387-400.

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999)65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11).

3. 有限スパン長さ円柱の流れ方向振動

- Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705~711.

4. 高レイノルズ数における円柱の渦励振

35-43

- Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiyata, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

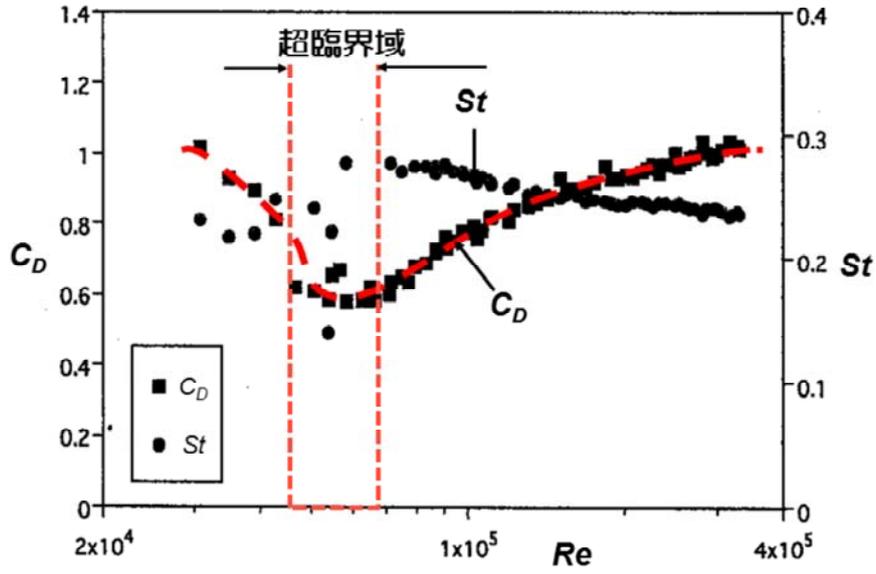
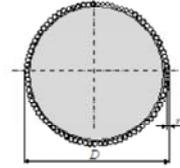
5. 高レイノルズ数における球まわりの流れ・サッカーボールの奇妙な飛翔挙動

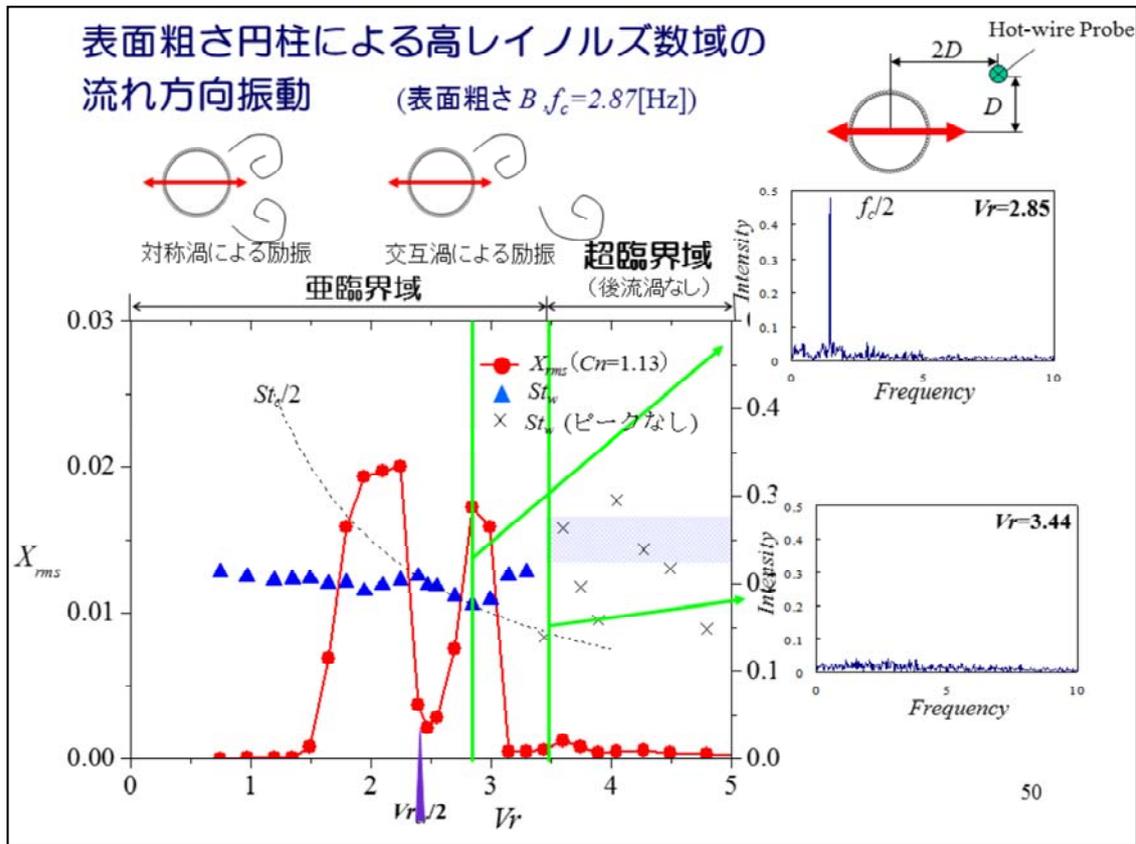
- Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
- Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192 (1978)

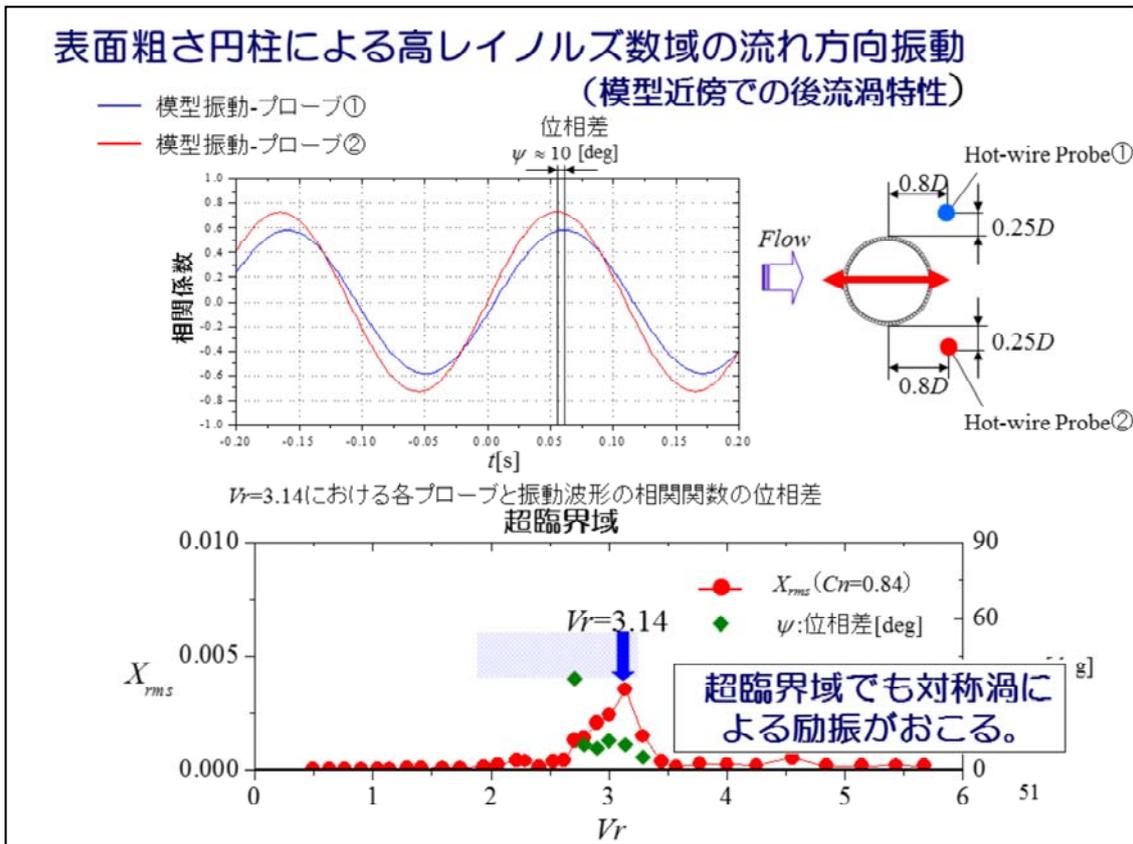
表面粗さ円柱の静特性

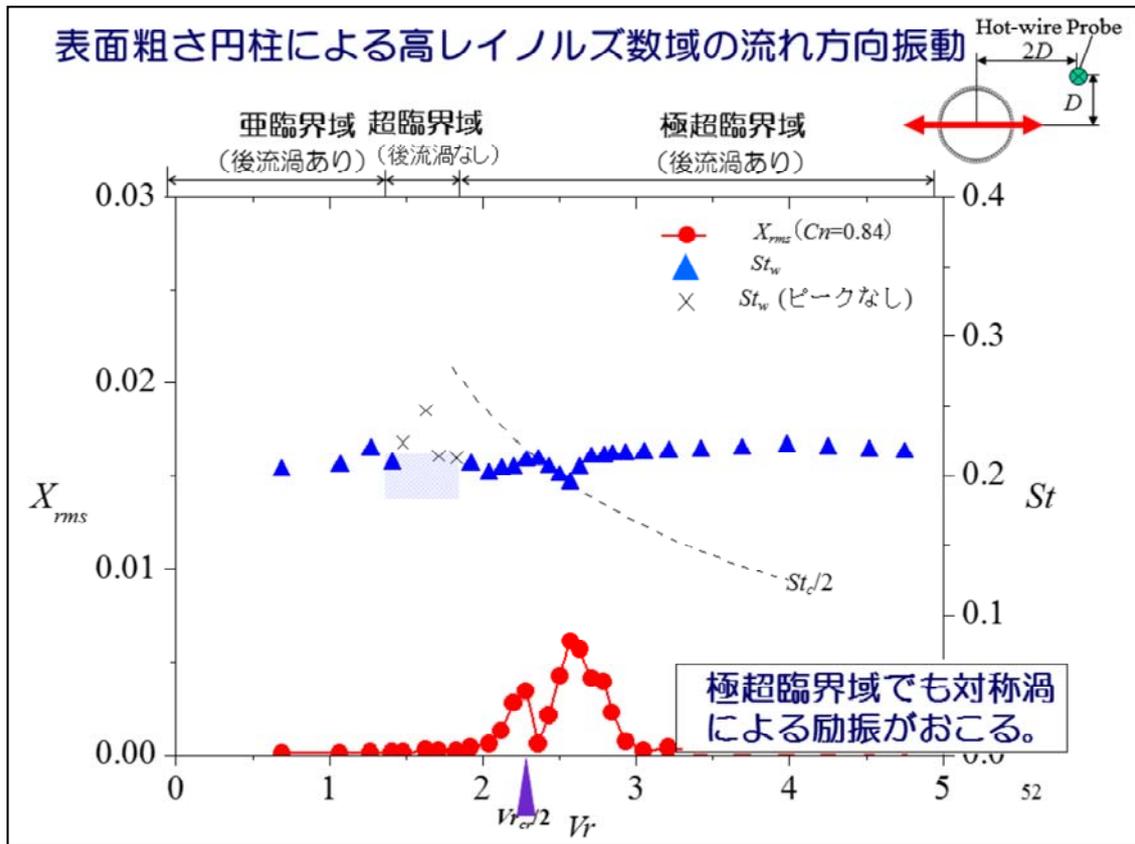
Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiwata, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, *Journal of Fluids and Structures*, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

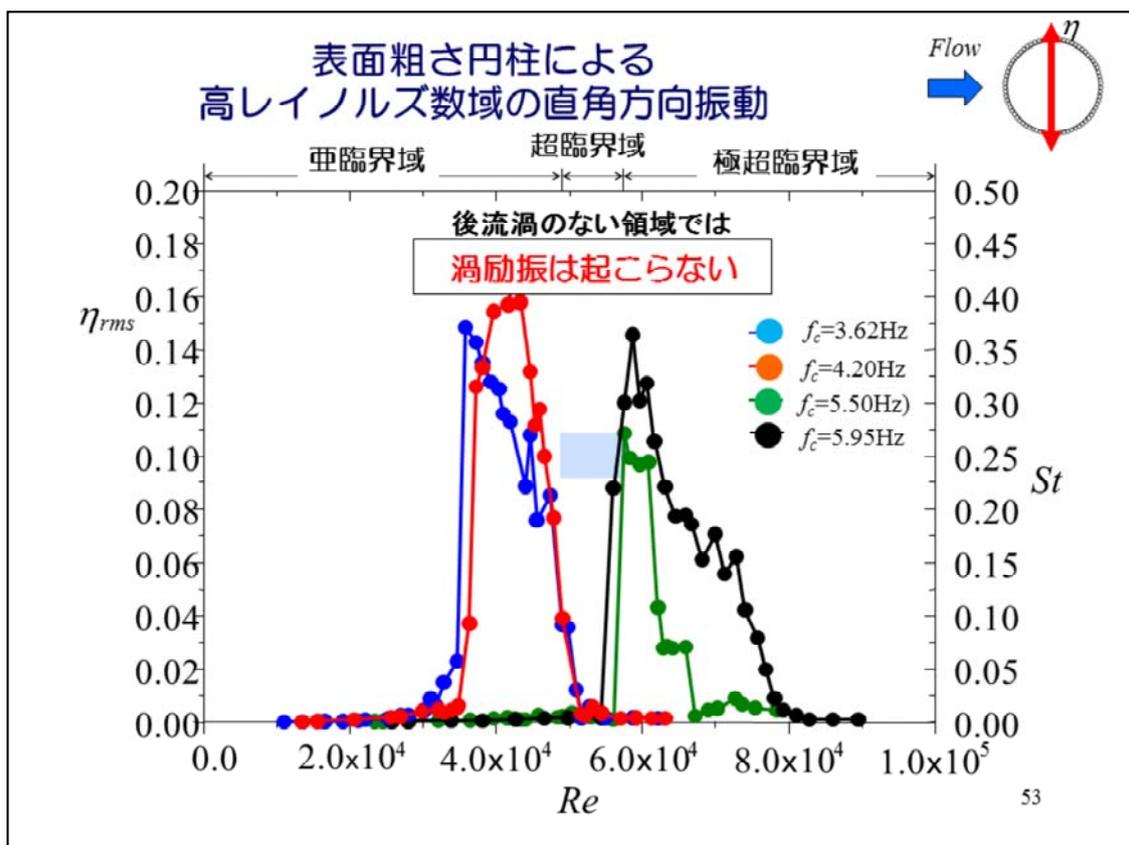
静特性 $r/D=0.017$

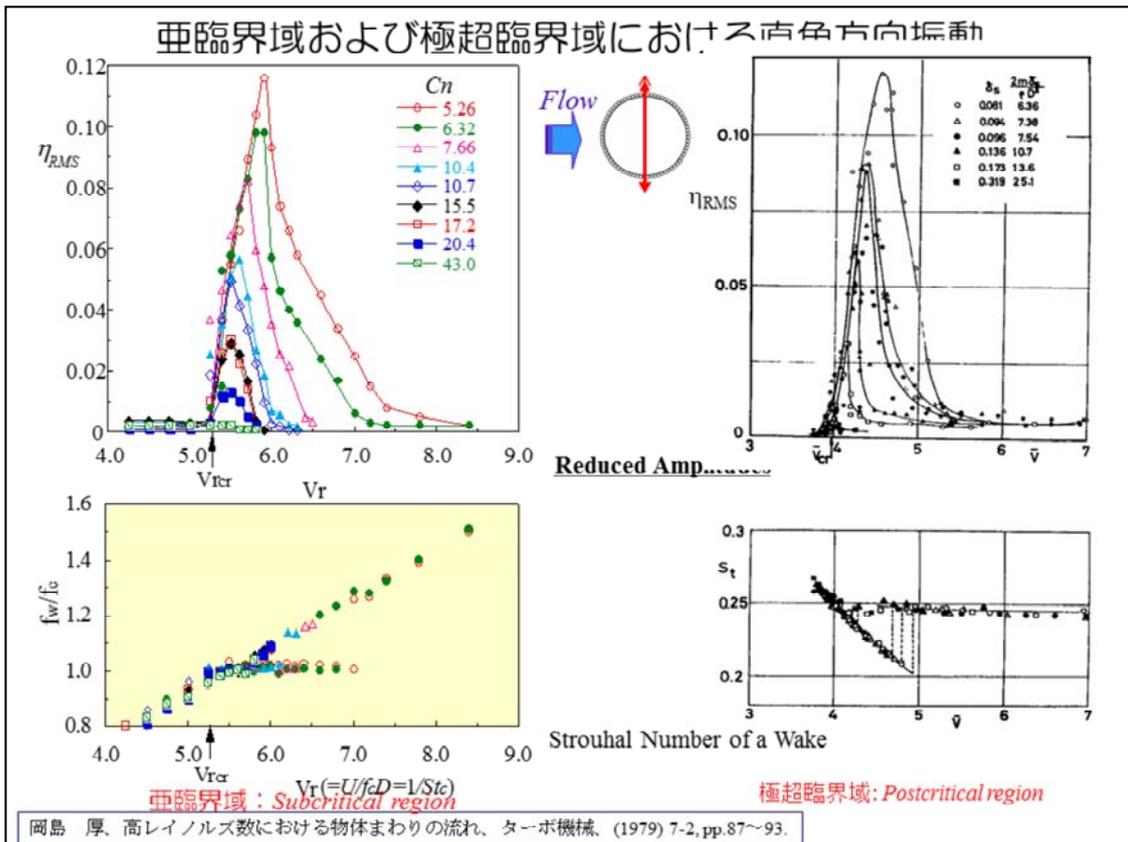












直角方向の流力振動-渦励振

一般に、かなり大きい換算質量減衰率を持つ円柱構造物であっても、 $St_c = St_n$ となる共振流速 $V_{r,cr}$ の近くの流速領域では流れに直角な方向の振動が起こり易く、普通、渦励振はこの領域で生じる直角方向の振動のことを言う場合が多い。また、この渦励振の発生領域や振動の振幅が限定される場合が多いことから限定振動とも呼ばれる。図には、風洞による自由振動法によって得られた円柱の換算減衰率 C_n を比較的広い $C_n=5.26\sim 43.0$ の範囲で変えた場合の流れに直角方向の振動応答特性を示す。そのうち、図には、換算流速 V_r に対する直径 D で無次元した円柱の直角方向の応答変位振幅 η_{RMS} の RMS 値を示す。図から、流れ方向振動に較べて励振は強く、 $C_n=5.26$ でも、 $V_r=6.0$ で最大振幅 $\eta_{RMS}=0.12$ に達する。そして C_n の増加に伴い η_{RMS} が最大となる V_r の値は低流速側に移動して $V_{r,cr}$ に近づく。この場合、 $C_n=43.0$ で $\eta_{RMS}=0.02$ となり、振動はほとんど抑制されている。次に、後流中の速度変動をスペクトル解析して得られた渦の周波数 f_w の変化を St_w 数 ($=f_w D/U$) と円柱の無次元振動数 St_c 数 ($=f D/U$) との比の形 St_w/St_c で表示して図に示す。図において、流速 V_r の増加にともなって St_c 数が直線的に増加し、静止時の St_n 数に一致するようになる。すなわち、 $St_w/St_n=1$ となる共振流速 $V_{r,cr}(=1/St_n)$ 付近になると、図の応答振幅に示すように渦励振が発生し、さらに高流速の領域の限定された流速領域で振動が持続する。そして振動の持続している V_r の領域では、後流渦の St_w 数は円柱の固有振動数 St_c に等しく、後流渦のロックイン現象が生じる。この場合、ロックイン現象が生じている V_r の領域の大きさは振動振幅 η_{RMS} に依存して変化する。

ブラフボディーの流力振動：円柱の流力振動

1. 円柱の静特性

- Zdravkovich, M.M. (1997) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications. Oxford Univ. Press
- 岡島 厚、中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報、(1973) 40, pp.387-400.

2. 円柱の流れ方向/直角方向振動

- King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.
- 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘、円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集B、(1999)65-635, pp.2196~2203.
- 日本機械学会基準S-012配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM付き) 日本機械学会、(1998.11).

3. 有限スパン長さ円柱の流れ方向振動

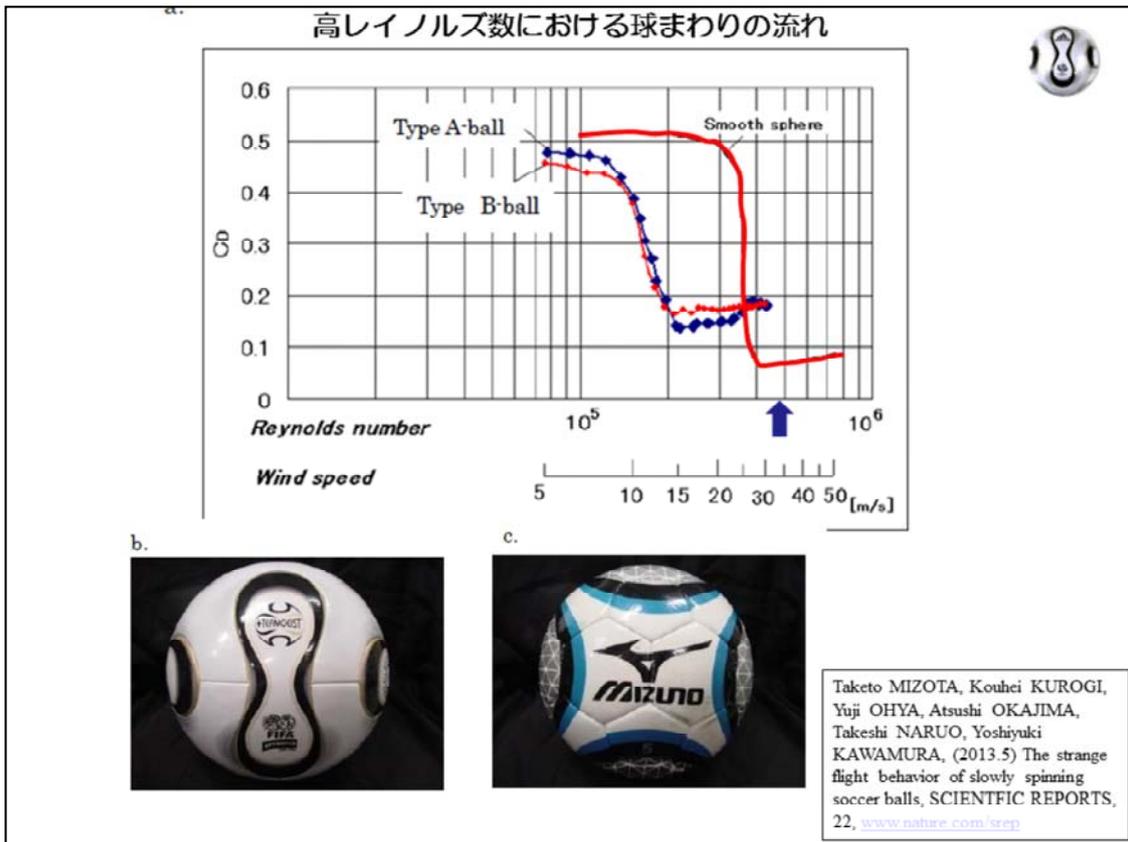
- Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705~711.

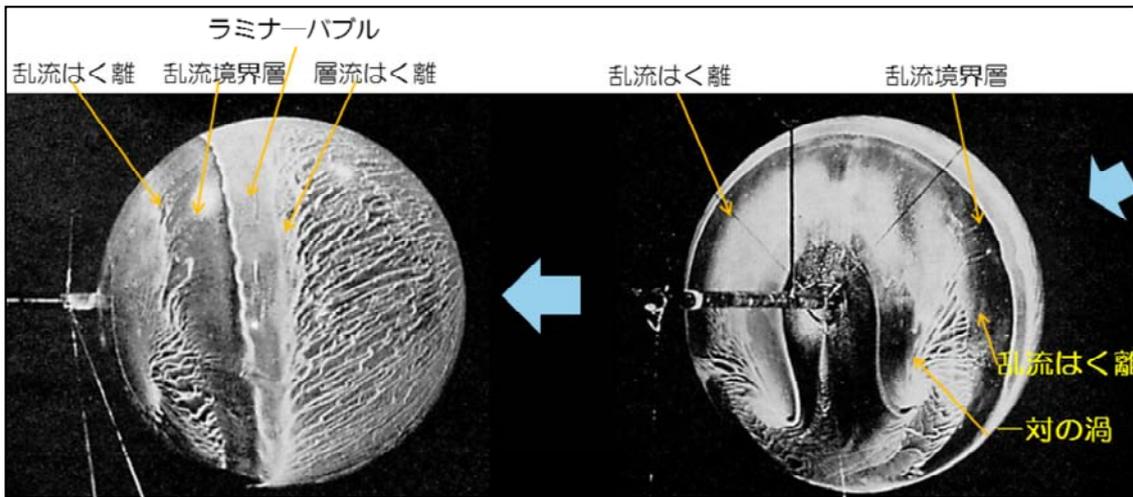
4. 高レイノルズ数における円柱の渦励振

- Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiwata, T., Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, (1999.12) 13-12, pp.853~864.

5. 高レイノルズ数における球まわりの流れ・サッカーボールの奇妙な飛翔挙動

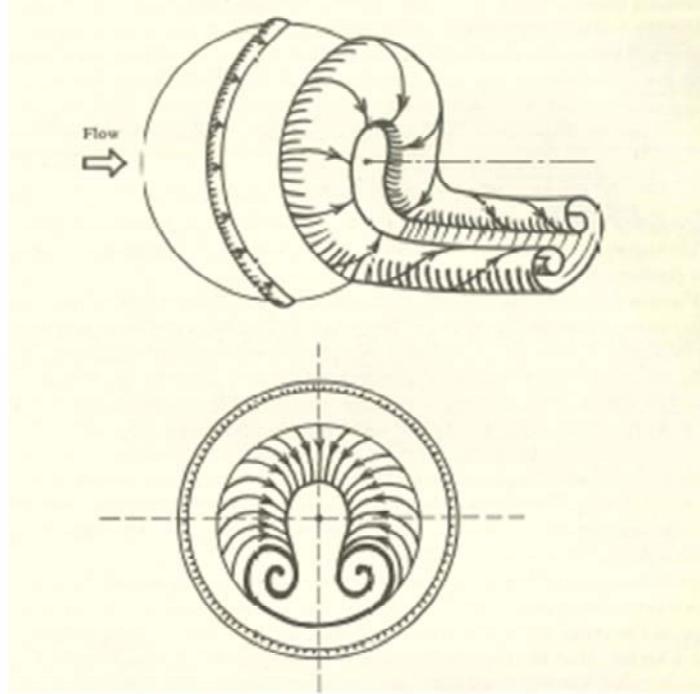
- Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
- Taneda, S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192 (1978)





高いレイノルズ数における球の表面の油膜模様
側面（左）と背面（右） $Re=4.7 \times 10^5$
死水中にΩ形状の**一对の渦**が見える

種子田定俊、天本肇、石井幸治、高レイノルズ数における球のまわりの流れ、九州大学応用研究所・所報44昭和51.1pp.1~11



高いレイノルズ数 ($Re=4.7 \times 10^5$) における球の背面に形成される一対の渦の模式図 (S. Taneda, *J. of Fluid Mechanics* 1976)

Nature Scientific Reports 掲載の研究



SCIENTIFIC
REPORTS

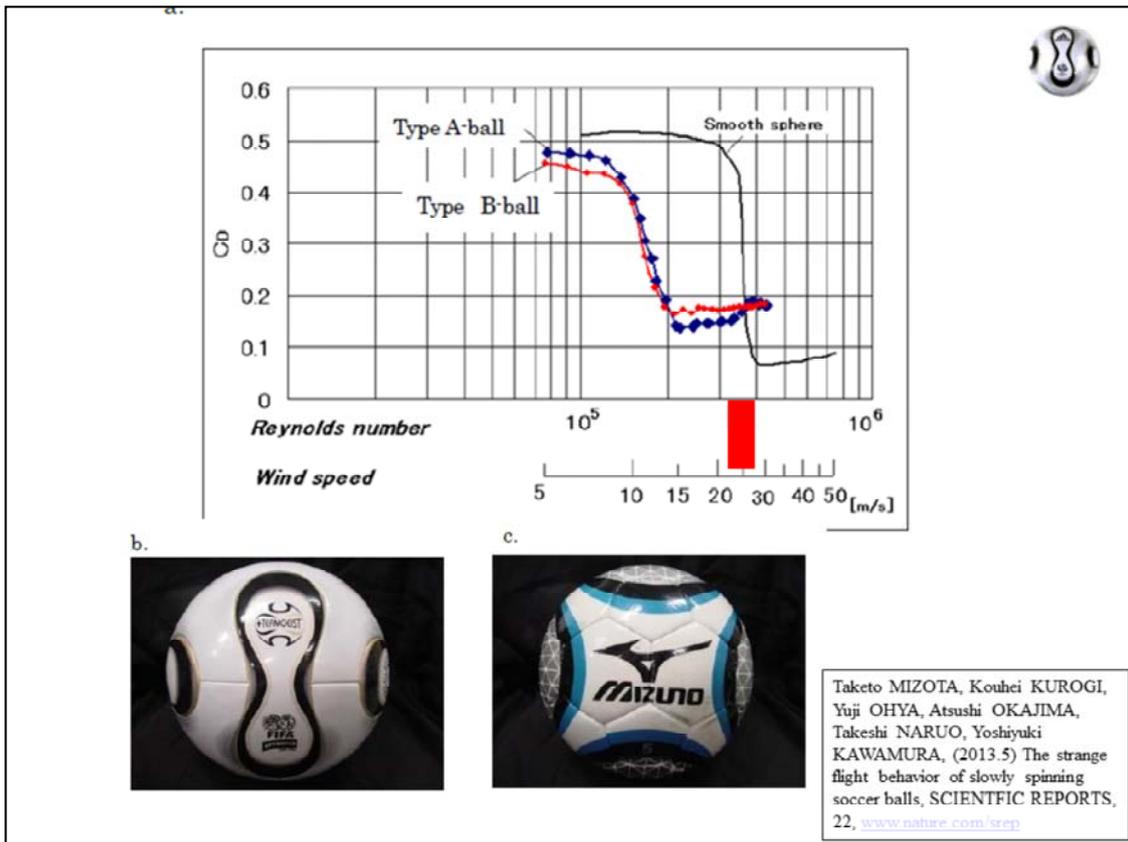
22 May 2013

www.nature.com/srep

ゆっくりと回転するサッカーボールの奇妙な飛翔挙動
The strange flight behaviour of slowly spinning soccer balls

Taketo Mizota,¹ Kouhei Kurogi,^{1, 5} Yuji Ohya,²
Atsushi Okajima,³ Takeshi Naruo⁴ & Yoshiyuki Kawamura¹

- The strange three-dimensional flight behaviour of slowly spinning soccer balls is one of the most interesting and unknown phenomenon associated with the trajectories of sports balls.
- Many spectators have experienced numerous exciting and emotional instances while observing the curious flight behaviour of these balls.



Contents



1. Strange behavior of 3-D flight of a soccer ball

(1) Shoot scene on TV image

- Middle shoot by Schweinsteiger
2006FIFA World Cup Germany tournament : Portugal vs. Germany
- The strange flight behaviour of slowly spinning soccer balls by
Keisuke HONDA

(2) Free fall experiments.

2. Force measurement by wind tunnel tests,

- (1) Forced oscillation method; locking-in occur?
- (2) Unsteady force measurements; a ball at rest.

3. Unsteady flow visualization and unsteady force,

- Tuft method with high speed video camera.

1. Middle shoot by Schweinsteiger



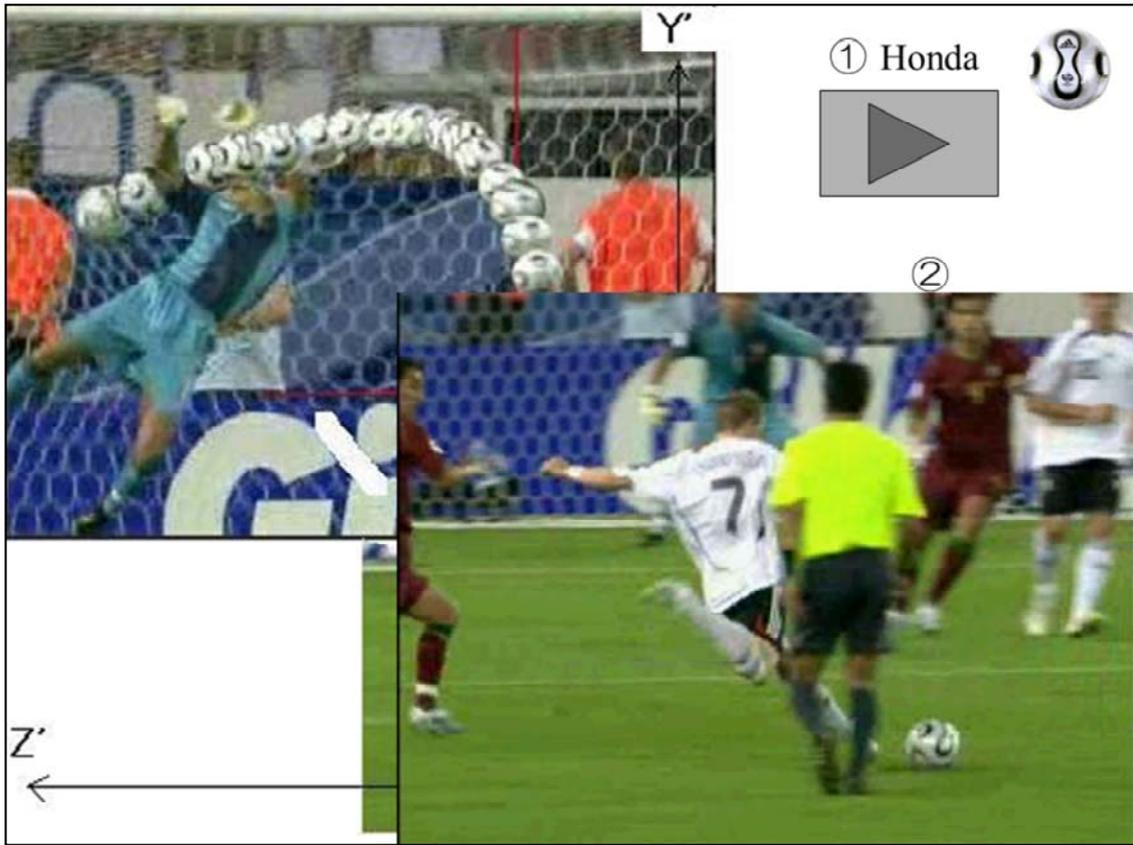
$U=21$ [m/s]

$N=1.3$ [Hz]

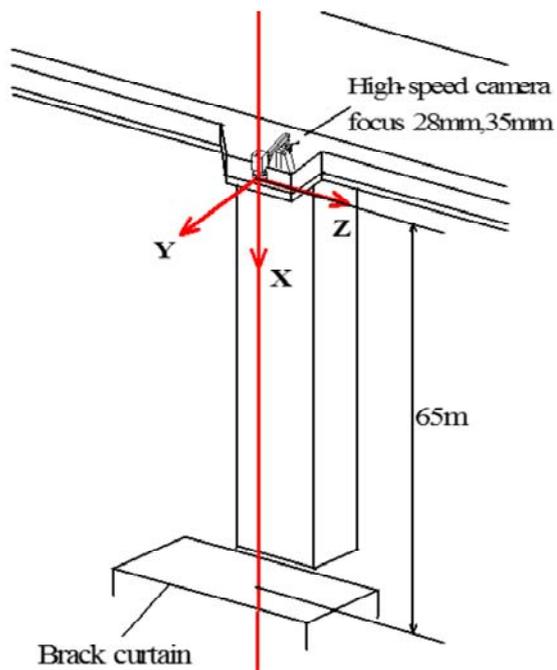


**2006 FIFA World Cup Germany tournament
Portugal vs. Germany**



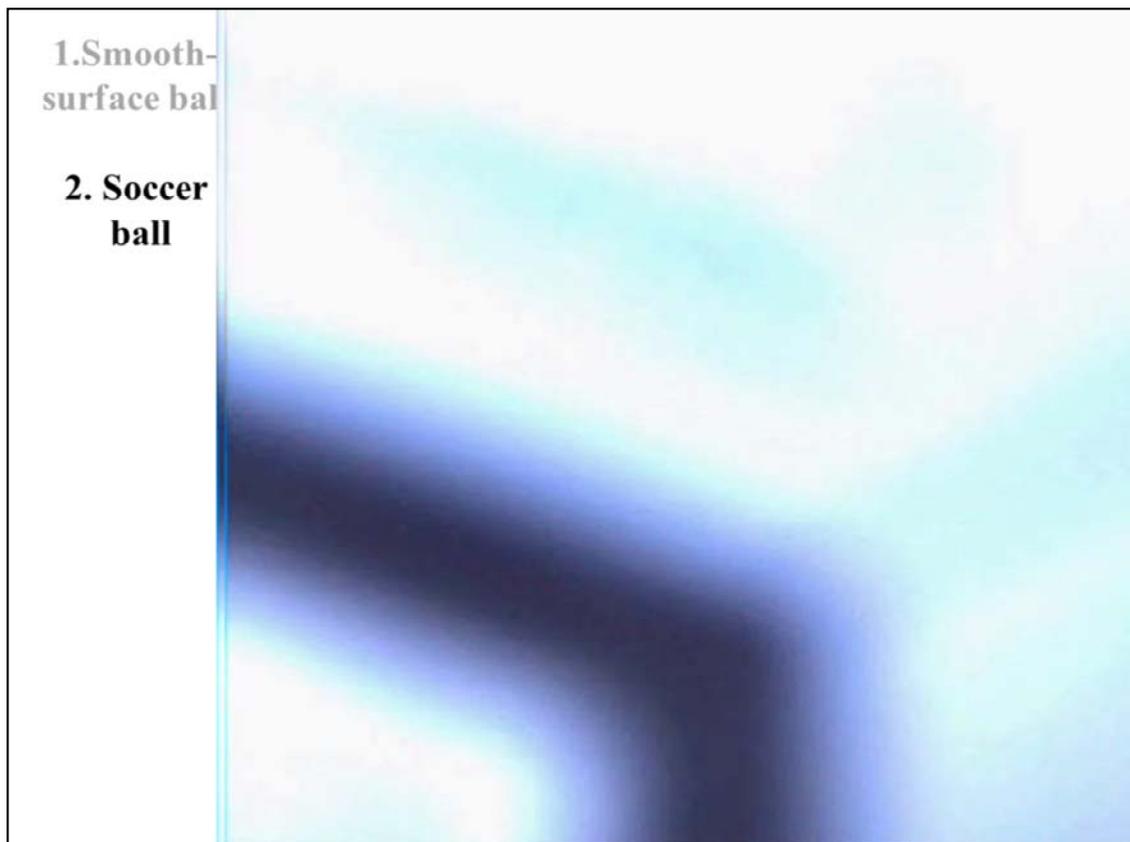


8.阿蘇長陽大橋落下実験



Free fall experiment Aso choyo bridge





Strobe-image from free fall exp.



Aerodynamic force measurement in a wind tunnel,

| Amplitude [m] | Frequency [Hz] |
|------------------------|----------------|
| 0.011, 0.022, 0.033 | 0.5~2 |





Next contents

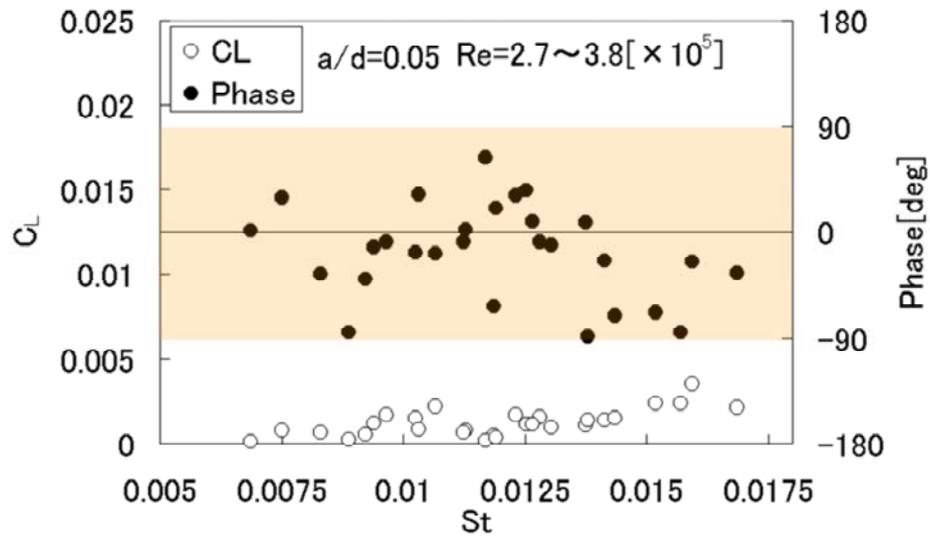
2. Aerodynamic force measurement in a wind tunnel,

(2) Unsteady force measurements
for **a ball at rest.**

(1) C_L amplitude and phase difference for velocity by forced oscillation methods

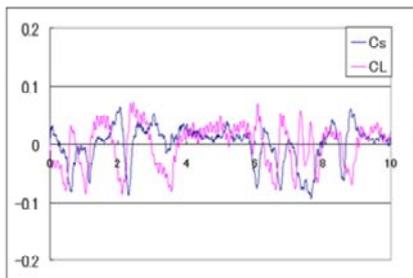


Flutter oscillation of a soccer ball does not occur.





(2) Unsteady force measurements; a ball at rest.



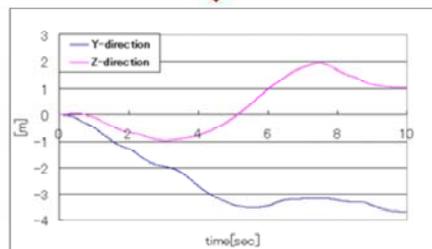
$C_L(t)$, $C_S(t)$ time trace



$$m \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_L(t)$$

$$y(t) = \frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot \int \int C_L(t) dt dt$$

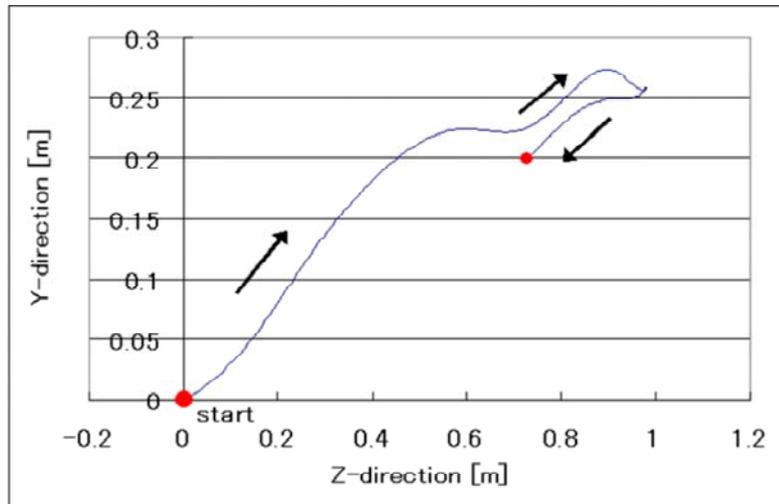
$$y(t) = \frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot \lim_{n \rightarrow 1000} \sum_{t=0}^n \left(\sum_{t=0}^n C_L(t) \Delta t \right) \cdot \Delta t$$



Z and Y directions time trace



Ball flight displacement on Y-Z plane



Z-Y Direction movements from kicker's view

U=22[m/s] t=6~8[s]



- Ball flight behaviours are able to be estimated by using the measured values of aerodynamic forces in a wind tunnel.
- Frequency of ball behaviours is
St=0.01 ~ 0.014 : Quasi-steady



Next contents

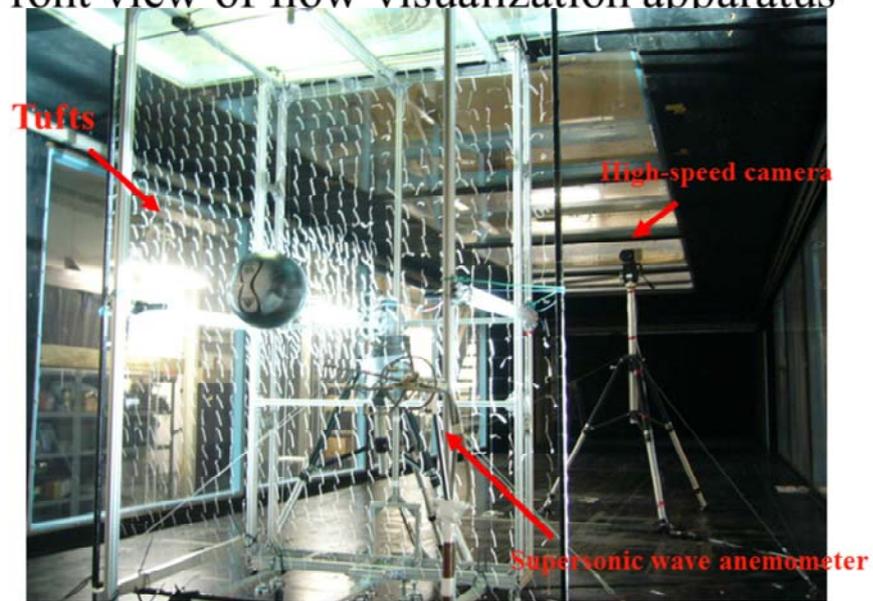
3. Unsteady flow visualization,
in the 3.8m x 2.0m wind tunnel.

(1) Tuft method with high speed camera,

(2) Comparison with the experiments of
a smooth sphere flow by Teneda (1976)
in the supercritical region of Re number.

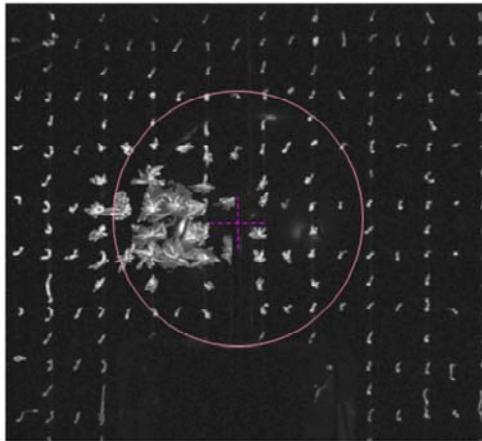


Front view of flow visualization apparatus



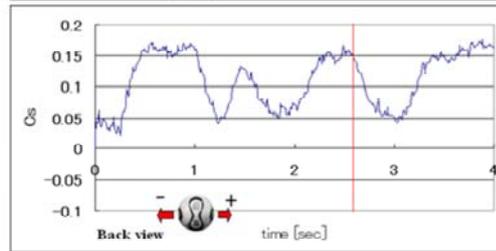
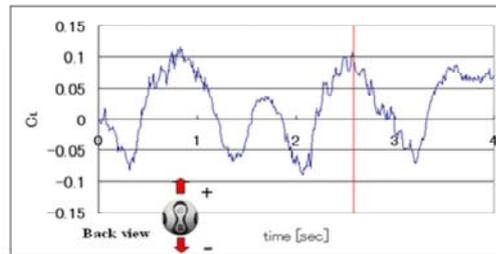


C_S is + and vortex position is left side.



2.52[s] ~ 2.62[s]

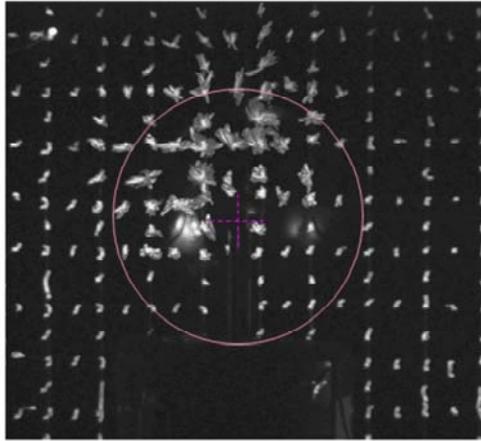
30 Flame integrated image



U=22 [m/s], Upper: C_L , Lower: C_S

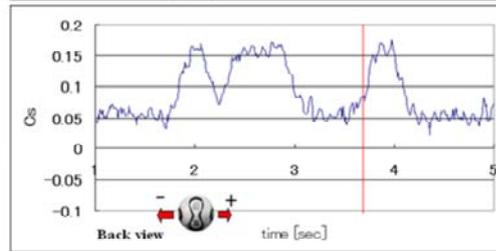
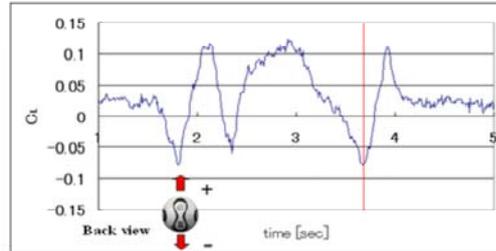


Vortex is upper and $-C_L$ case



3.63[s]~2.73[s]

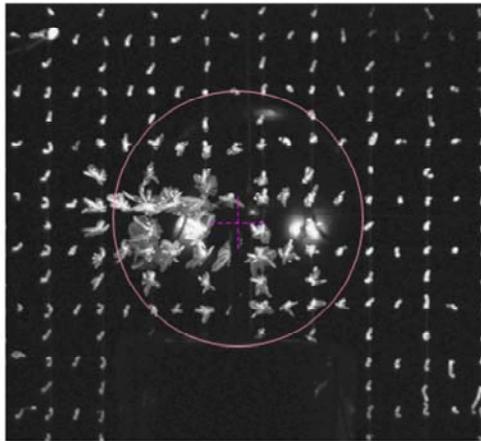
30 Flames integrated image



U=26 [m/s]: Upper C_L , Lower C_S

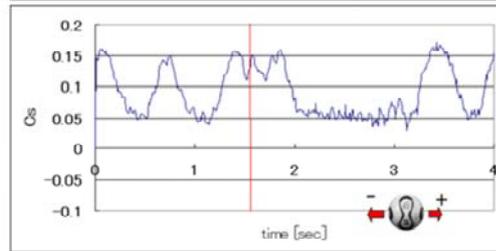
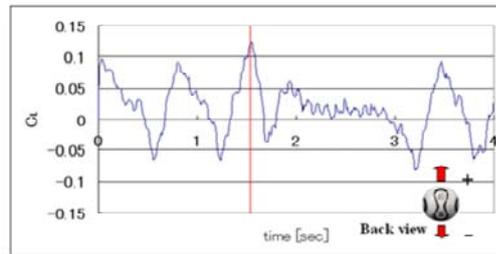


Vortex is left side and side force is acting +.



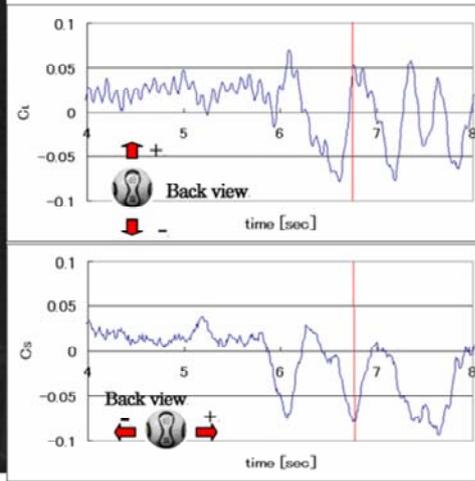
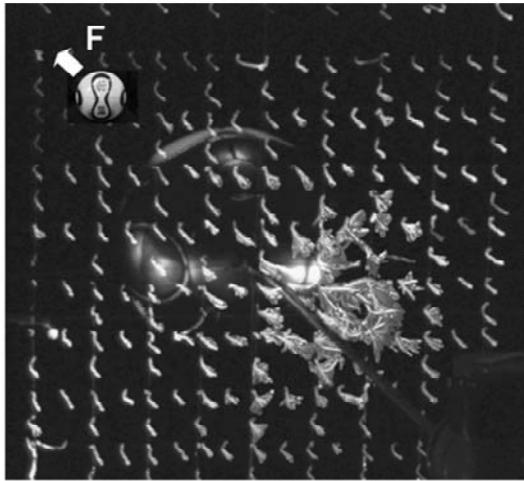
1.50[s] ~ 1.60[s]

30 frames integrated



U=26 [m/s], Upper: C_L , Lower: C_S

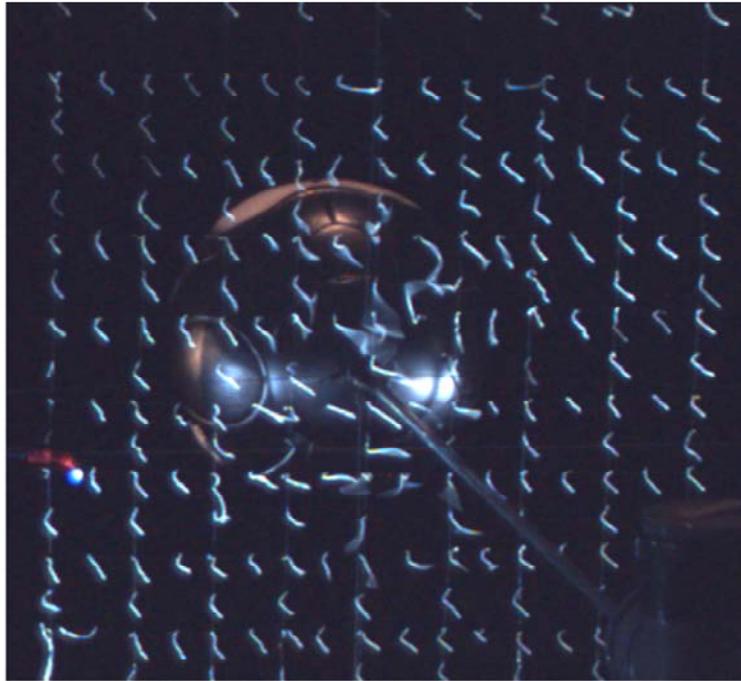
Unsteady force and vortex direction



Integrated with 30 frames
during 6.75[s]~6.85[s], 250[f/s]

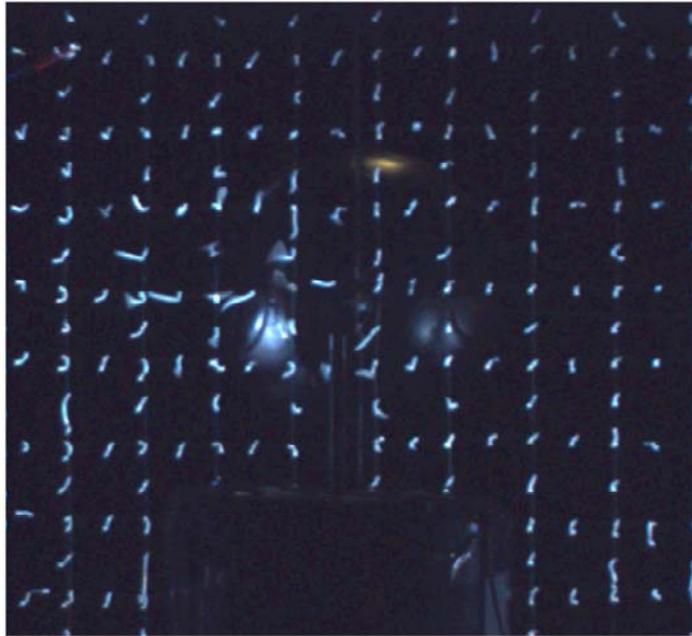
Fの方向と渦の運動方向が一致

Unsteady twin vortex behaviors



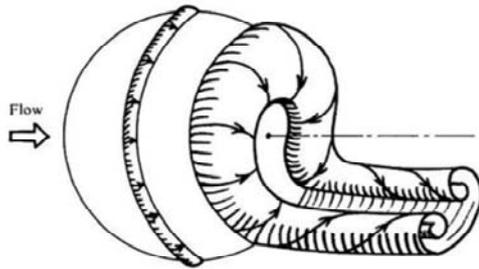
Flame speed is 250[f/s], reproduction speed is 30[f/s], $U=26\text{m/s}$

$U=26.0\text{m/s}$, case 2, During 4 seconds



Flame speed 250[f/s], during 4 seconds

Sketch by Taneda(1976, JFM):
and vortex rotates around center line



Flow around sphere of $Re=3.8 \times 10^5$

By S.Taneda (1976)

Smooth sphere : $Re > 3.8 \times 10^5$

the super critical region of Re number



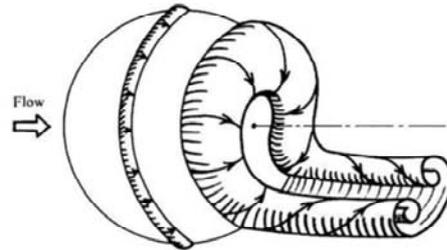
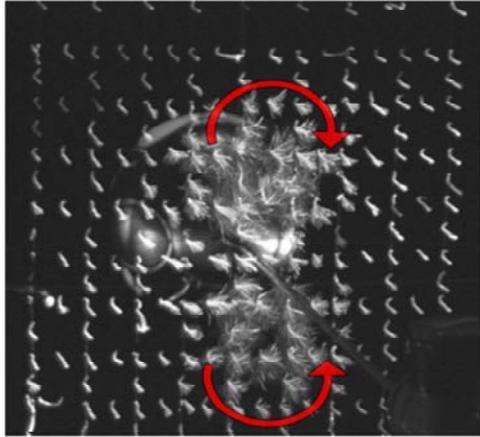
Hose-shoes like and two-
longitudinal vortex rotate
around center line



Reaction force on the sphere



$U=26\text{m/s}$, Integrated view from movie:
Evidence of one pair of longitudinal vortex





**Thank you
for your attentions !**

Atsushi (OKAJIMA)

*I assume this means that above a certain Reynolds
number it is impossible to make a football go perfectly
straight no matter how carefully it is kicked.*

*Peter (BEARMAN)
Imperial College*

REFERENCES

1. Zdravkovich, M.M. (2003) Flow around Circular Cylinders Vol.1:Fundamental, Vol. 2: Applications
2. Morkovin, M.V. (1964) Flow around circular cylinders; a kaleidoscope of challenging fluid phenomena. Proc. ASME Sympo. On Fully Separated Flow, Philadelphia, pp.102-118.
3. Roshko, A. (1961) Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds numbers. J. Fluid Mech. 10, pp.345-356.
4. 谷 一郎 流れ学 第3版 (1967)
5. (社)日本鋼構造協会 (1997.11) 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, pp.103-118.
6. 種子田定俊 画像から学ぶ流体力学 朝倉書店 (1988)
7. ☆日本機械学会便覧 (1985.12) A5 流体工学 新版、日本機械学会編、pp.97-105.
8. 岡島 厚, 中村泰治 (1973) 高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報、40, pp.387-400.
9. King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J. (1973) On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, pp.169-188.
10. R.N. Sainsbury, and D King, (1972.2) The flow induced oscillation of marine structures, John Mowlem & Company Ltd.
11. Wootton, L.R. M.H. Warner, D.H. Cooper (1974) Some Aspects of the Oscillations of Full-Scale Piles, In Flow Induced Structural Vibrations, ed. E. Naudascher, Springer, Berlin, pp.787-601.
12. 日本機械学会 (1998.11) 日本機械学会基準 S-012 配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(CD-ROM 付)
13. 岡島 厚、大津山澄明、永森稔朗、中野智仁、木綿隆弘, (1999) 円柱および矩形柱の流れ方向流力振動特性、日本機械学会論文集 B65-635, pp.2196~2203.
14. 岡島 厚 (1973.10) 高レイノルズ数範囲における円柱のうず励振、文部省特別研究災害科学研究班, 第10回災害科学総合シンポジウム講演論文集 10, pp.67-70.
15. Scruton, C. (1963) On the Wind-excited Oscillations of stacks, towers and masts, Proc. Intern. Conf. Wind Effects on Build & Structures (Teddington), Her Majesty's Stationary Office.
16. Nakamura, A., Okajima, A., Kosugi, T., (2001.11) Experiments on Flow-Induced In-Line Oscillation of a Circular Cylinder in a Water Tunnel (2nd Report, Influence of the Aspect Ratio of a Cantilevered Circular Cylinder), JSME, Inter. Journal B, 44-4, pp.705-711.
17. Okajima, A., Nakamura, A., Kosugi, T., Uchida, H., Tamaki, R., (2004.2) Flow-induced in-line oscillation of a circular cylinder, European Journal of Mechanics, B 23, pp.115-125.
18. Okajima, A., Morishita, M., Nishihara, T., Nakamura, A., (2004.10) Guideline for Evaluation of Flow-induced Vibration of a Cylindrical Structure in a Pipe, The 6th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6) Nara, N6P160
19. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA, (2007) Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, International Journal of Heat and Fluid Flow. 28, pp.552-560.
20. Okajima, A., Nagamori, T., Matsunaga, F., Kiwata, T., (1999.12) Some experiments on flow-induced vibration of a circular cylinder with surface roughness, Journal of Fluids and Structures, 13-12, pp.853-864.
21. 岡島 厚 (2000) 円柱構造物の流力振動の基礎、機械の研究、養賢堂、52-12, pp.1207~1213.
22. 岡島 厚 (1979) 高レイノルズ数における物体まわりの流れ、ターボ機械 7, 2, pp.87-93.
23. Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA, Atsushi OKAJIMA, Takeshi NARUO, Yoshiyuki KAWAMURA, (2013.5) The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, SCIENTIFIC REPORTS, 22, www.nature.com/srep
24. 種子田定俊、天本肇、石井幸治 (1976) 高レイノルズ数における球のまわりの流れ、九州大学応用研究所・所報 44 pp.1~114.
25. Taneda, S. (1978) Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 . J. Fluid Mech. 85, 187-192.
26. Achenbach, E. (1975) The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres. J. Fluid Mech. 65, pp.113-125.
27. Barber, S., Chin, S. B. & Carre, M. J. (2009) Sports ball aerodynamics: a numerical study of the erratic motion of soccer balls. Computational Fluid Dynamics, 38, pp.1091-1100.
28. God techniques by Honda, K., May 16, 2007 Hong Kong, U-22 Hong Kong vs. U-22 Japan, Beijing Olympic Asia-2nd preliminary match, (2007). <http://www.youtube.com/watch?v=5MdrXnsUkzDw>: in Japanese, accessed in March 2013.