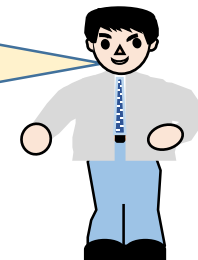


なるほど！シリーズ9
風と振動
(カルマン渦振動について)
「これだけ知っていれば ほぼ 大丈夫」

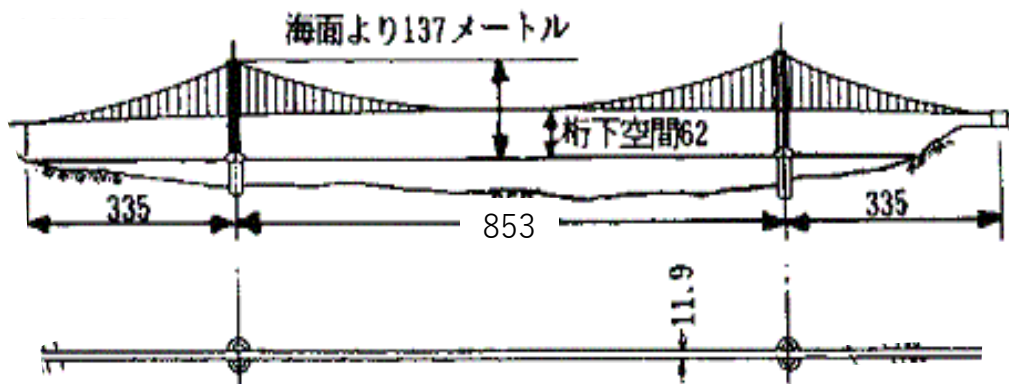


風が吹くと電線や木々が揺れるのを見たことがあります。なぜ揺れるのでしょうか？また風などの流れに晒されている構造体がそれほど高くない流速で振動し、損傷することがあると聞いたことがあります。具体的にどのような例があるのでしょうか？

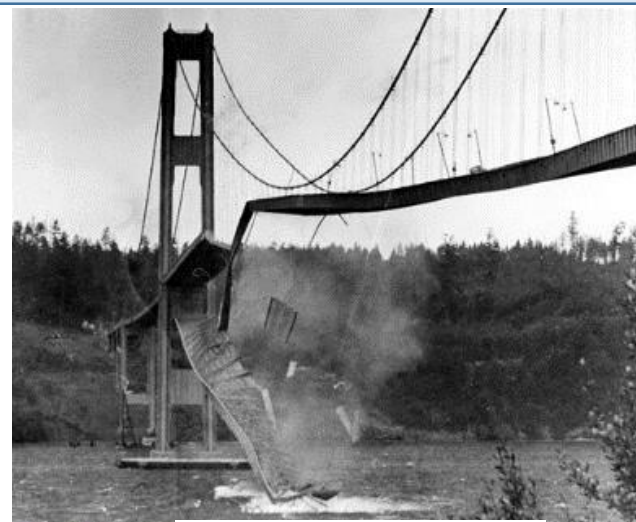


流れの作用を受け構造物が振動した具体例を図1の写真に示します。図1は風による旧タコマ・ナローズ橋の崩壊事例です。橋梁関係者の間では有名な話です。

この吊橋は風速54m/sの風が吹いても壊れないように設計され、建設されました（完成は1940年7月）。ところが完成約4か月後に風速17～19m/sの風が吹いて、橋は振動をし始め、時間経過とともに大きな振動を生じ、最終的には写真(右)に示すように崩壊しました。ちなみに振動の最終段階では橋はフラッター現象を生じ、破壊に至りました。



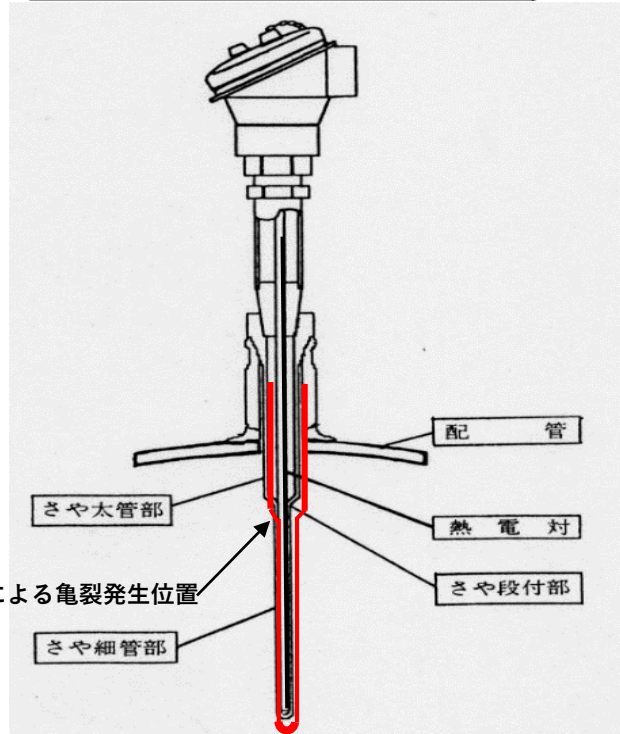
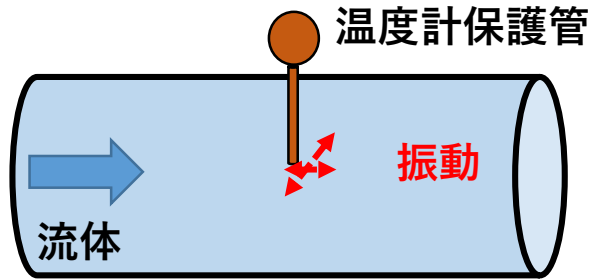
タコマナローズ橋の諸元



崩壊時の状況

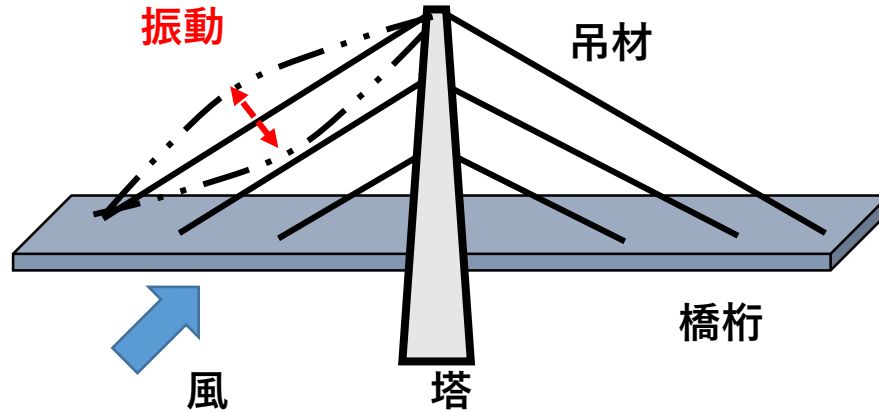
図1 吊り橋の風によるフラッター振動例

また、別の例では図2に示すように、温度計保護管(さや管)、橋梁吊材などの部材、熱交換器伝熱管群の振動例があります。



温度計保護管の対称渦による振動例

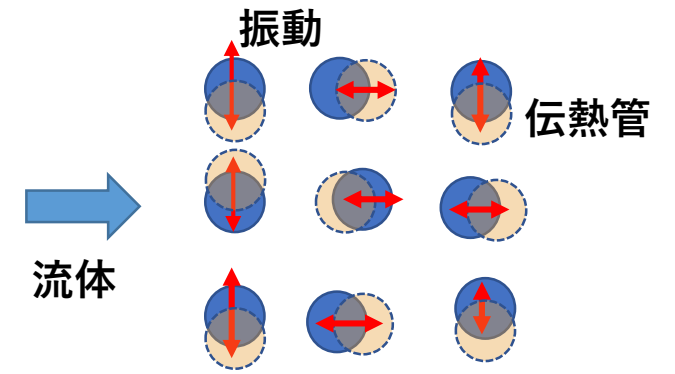
*保護管：熱電対(温度計)を流体力から保護するため、温度計の外側に設置する管。



斜張橋吊材のカルマン渦による振動例



橋梁部材のカルマン渦振動に対する振動防止例

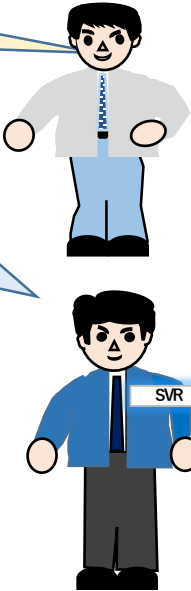


熱交換器の伝熱管など管群の流力弾性振動の例

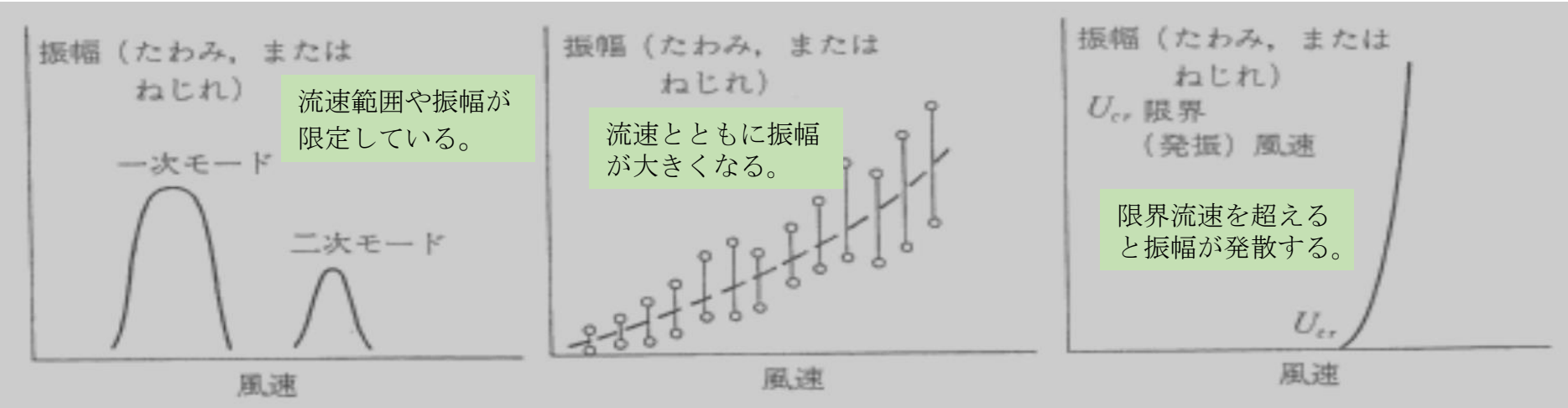
図2 流れによる振動例

それでは流れを受けている構造物の振動にはどのような現象があるのでしょうか？

流れを受けている構造物の振動にはカルマン渦による振動を含め、下表に示すようなものがあります。個々の事象に対する詳細な説明は別の機会に譲ることにし、ここでは主に流体中の円柱状構造物で多く観測されるカルマン渦振動について、その特徴や振動防止法などについて説明します。



事象	対象構造物例	備考
1) カルマン渦振動(交互渦を含む)	温度計保護管 橋梁部材	同期振動
2) ギャロッピング振動	電線 (氷が付着した状態)	自励振動
3) フラッター振動	タコマ橋、翼、窓のブラインド	自励振動
4) バフエティング振動	鉄塔、長大柔構造物	強制振動
5) 流力弾性振動(管群)	熱交換器伝熱管群	自励振動

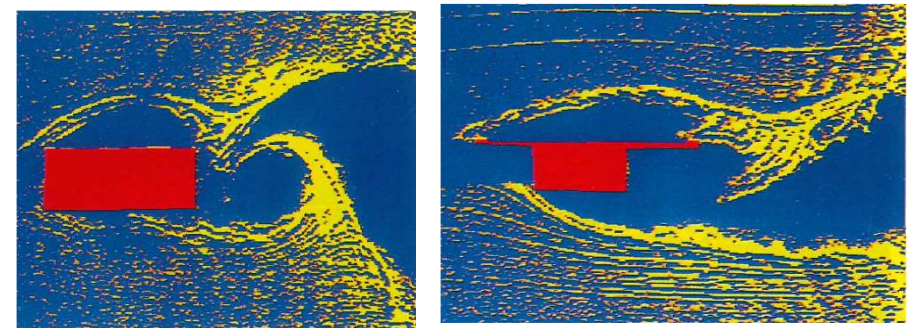
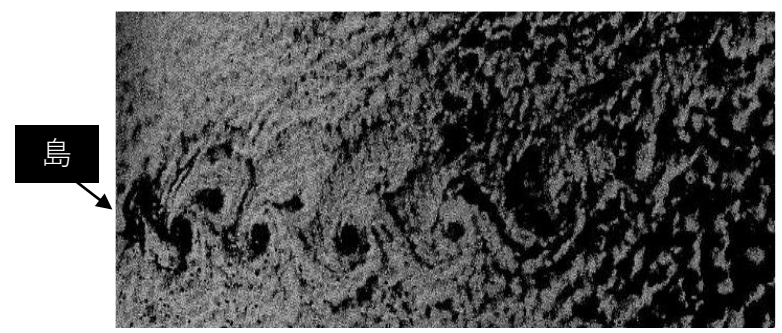
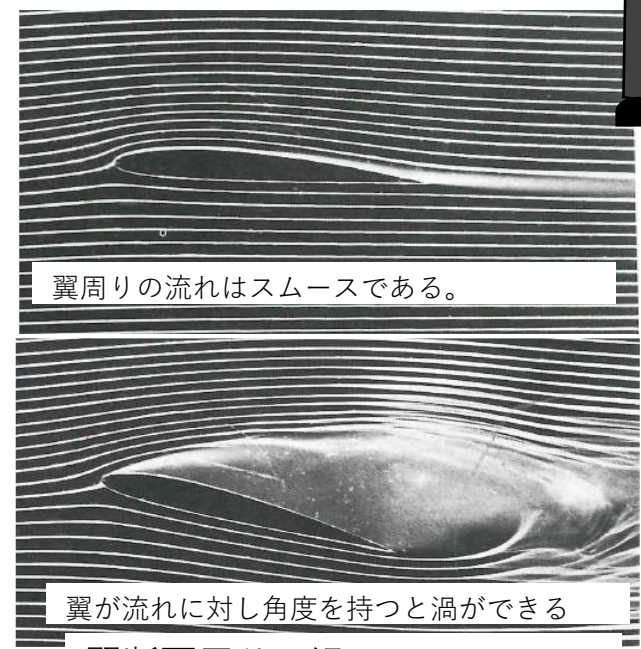
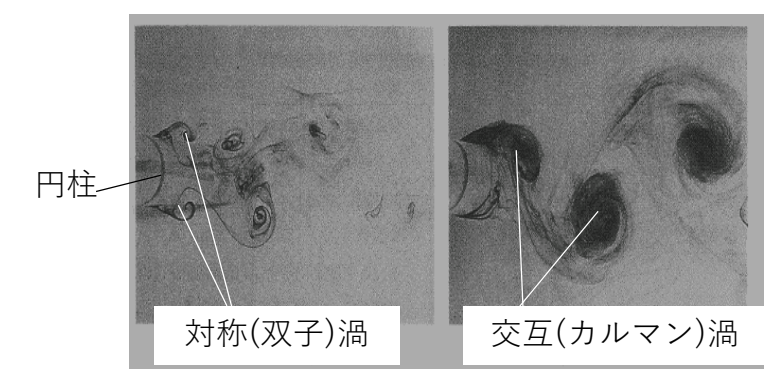
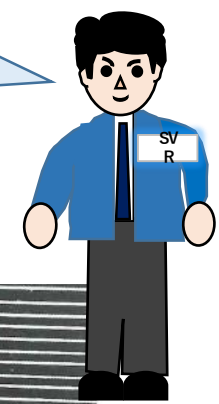


1) カルマン渦振動

4) バフエティング渦振動

2)、3)、5) ギャロッピング、フラッター、流力弾性振動

流れの中におかれた構造物の後流側には渦が発生します(図3参照)。
 その構造物の断面形状が円形に限らず、四角形、三角形、ブラッフボディ(鈍頭物体)などいずれの場合にも渦が発生します。
 渦が発生し難い断面は航空機の翼や新幹線のノーズのような流線型断面です。
 構造物の後流側に見える周期的な交互渦はカルマン渦と呼ばれています。



翼断面周りの渦
 流れのファンタジー 流れの可視化学会編

島の後流側のスケールの大きな渦
 様々なスケールの渦について 亀本 喬司 ながれ24(2005)143-150

橋桁の渦励振動応答に及ぼす乱流効果のメカニズムに関する考察 武田 勝昭 日本風工学会誌 第54号 平成5年2月

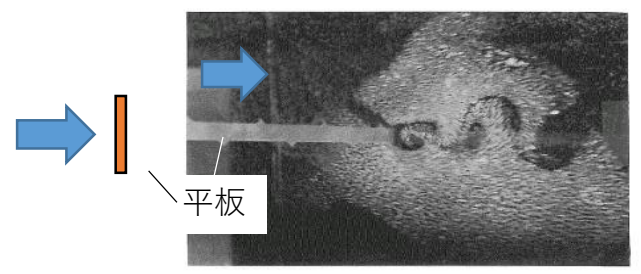


図3 色んな断面形状に対する後流渦の例



円柱群交流側の渦
 流れのファンタジー 流れの可視化学会編

物体の後流側に周期性を持って出現する渦の発生振動数は流れの速度に比例し、物体の代表長さに反比例し、ストローハル数を比例定数として下式で与えられます。



ここで

f_s : 渦の発生振動数 (Hz)

S_t : ストローハル数、断面形状やレイノルズ数に依存しますが、振動が問題となる流速域での円断面に対する交互渦(カルマン渦)の場合は約0.2です。

対称渦に対する場合は約0.8程度と考えられます。

V : 流速

D : 流れに対し直交する長さ。円柱の場合は直径。

$$f_s = S_t * \frac{V}{D}$$

上式から求まる渦の発生振動数と構造体(物体)の固有振動数が近くなると共振状態に似た現象が生じ、振動が大きくなります。

後述しますが、断面が円柱で減衰比が小さい場合のカルマン渦による振動事象では大まかには $0.7 < (f_0/f_s) < 1.3$ の範囲で振幅が非常に大きくなります。ここで f_0 は構造体の固有振動数です。



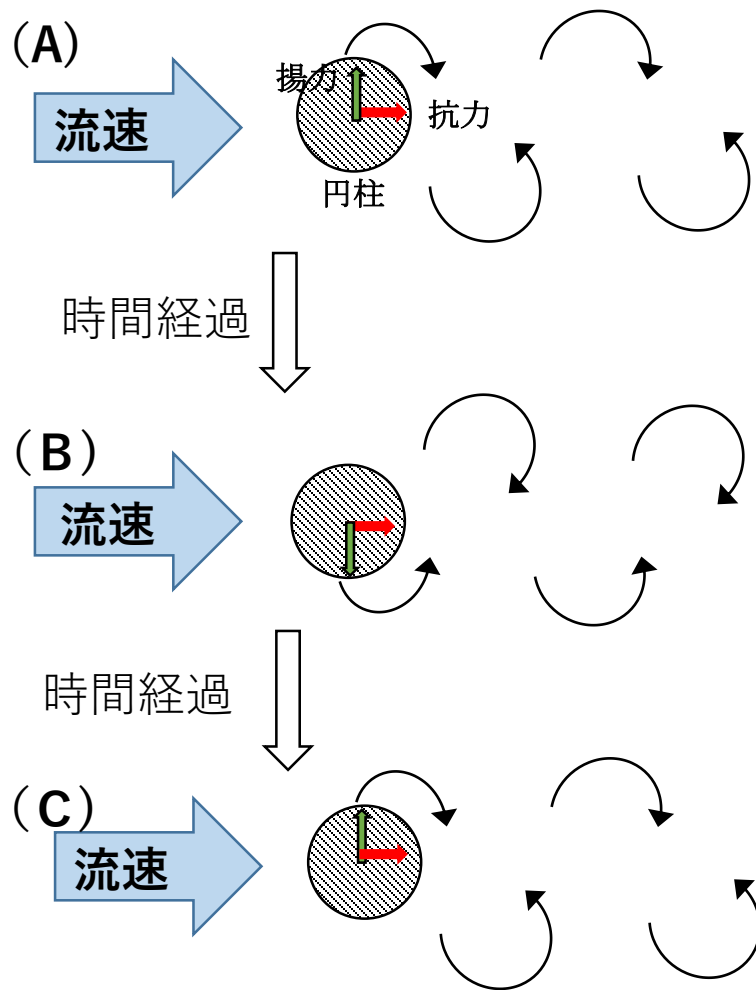


図4: 渦の発生と作用力の関係図

まず、カルマン渦（交互渦）の発生と力の関係について考えてみます。図4は円柱断面に流れが作用し、交互渦ができる状況の時間変化のイメージ図です。

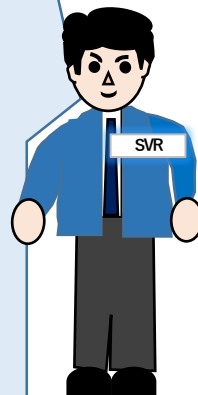
(A)は円柱断面の上側から渦が出来ています。下側は渦が流れていっています。この場合円柱周りの圧力バランスが崩れ、円柱には上下（揚力）方向と流れ（抗力）方向に力が作用します。

時間が経過し、
(B)の場合は断面の下側から渦ができていますので、円柱には揚力方向に(A)の場合と逆位相の力が、抗力方向には同位相の力が作用します。

更に時間が経過し
(C)の場合は(A)の場合と同じ力が円柱に作用します。

従って、円柱に作用する力の周期は

- ・ 揚力方向には(A)～(C)の時間経過
- ・ 抗力方向には(A)～(B)あるいは(B)～(C)の時間経過に等しくなります。



次に流れの中に置いた円柱に対し、流速を上昇させて行くと、図5に示すような3種類の振動現象が生じます。

- ①まず、対称渦により抗力方向の振動が生じ、
- ②次にカルマン渦（交互渦）により抗力方向主体の振動が発生（揚力方向にも揺れる）し、
- ③さらに流速を上げて行くとカルマン渦による揚力方向主体の振動が発生します。

このカルマン渦による揚力方向（流れに直行する方向）の振動が構造体の損傷を与えることが多いので考慮すべき事柄です。

図6は渦の発生と振動状況のイメージ図です。

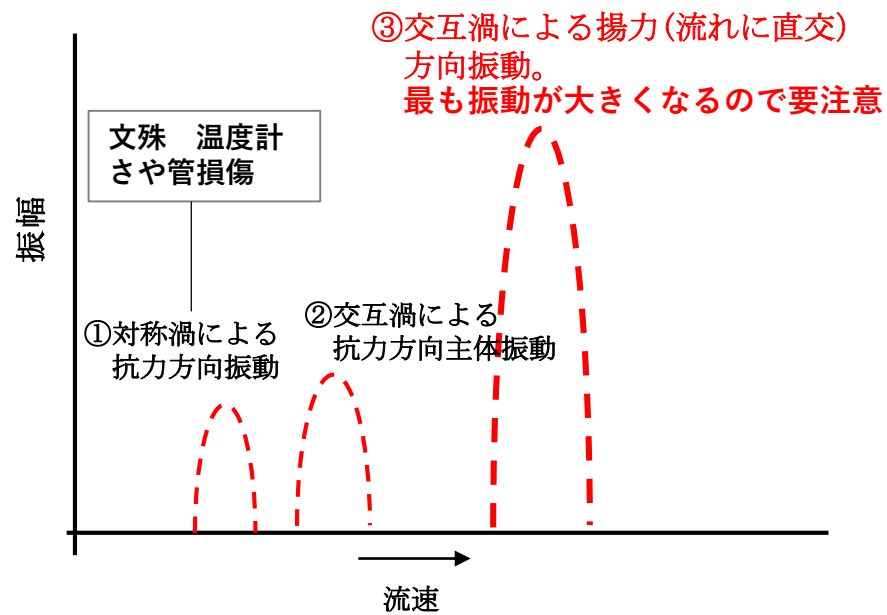


図5 流速と振動振幅のイメージ図

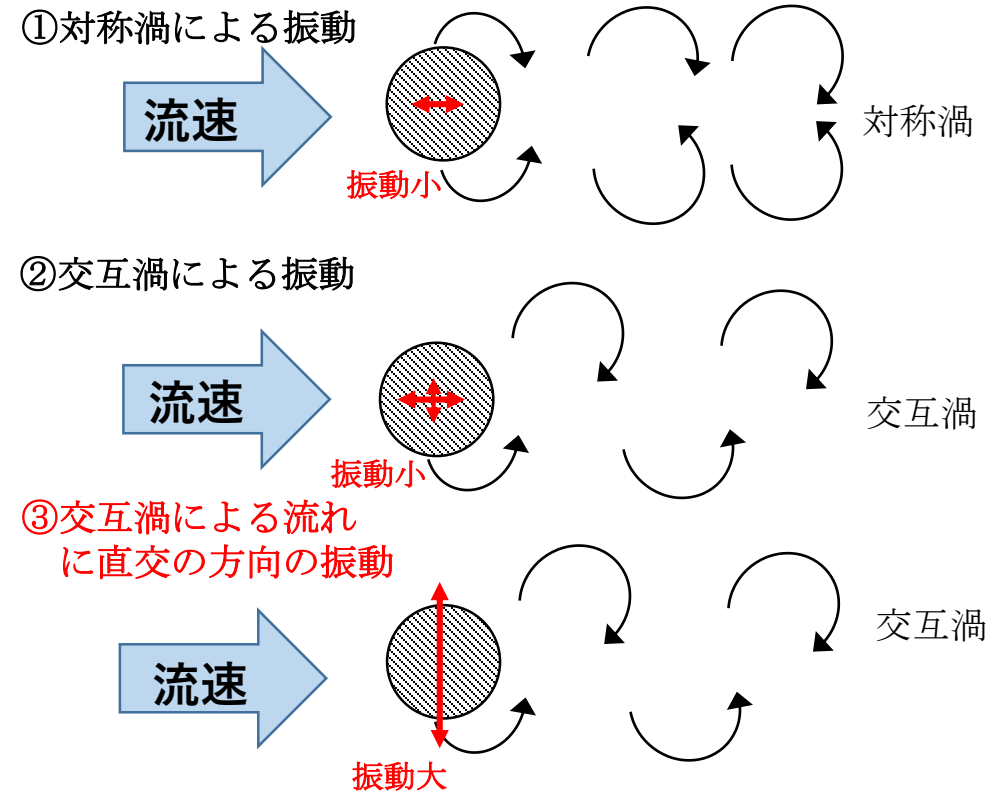


図6 渦の種類と円柱の振動イメージ図

少し専門的になりますが、カルマン渦による振動は厳密には円柱の振動と渦の発生が相互に干渉した自励振動（同期振動）ですが、理解を容易にするため、敢えてカルマン渦による円柱の強制振動として考えると図7Aに示すように渦の発生振動数と円柱の固有振動数が一致すると円柱が大きく振動することになります。

実際の現象は円柱が振動することにより、渦の発生振動数が影響を受け、円柱の振動数と渦の発生振動数が同じになる引き込み現象が生じる同期振動なので、図7Bに示すようになります。（共振している流速領域が広くなります）。

また、カルマン渦による振動の特徴は振動が発生する流速範囲が限定されること、振幅もある程度限定的である事です。流れに直交する方向の振動が顕著であることも特徴の一つです。

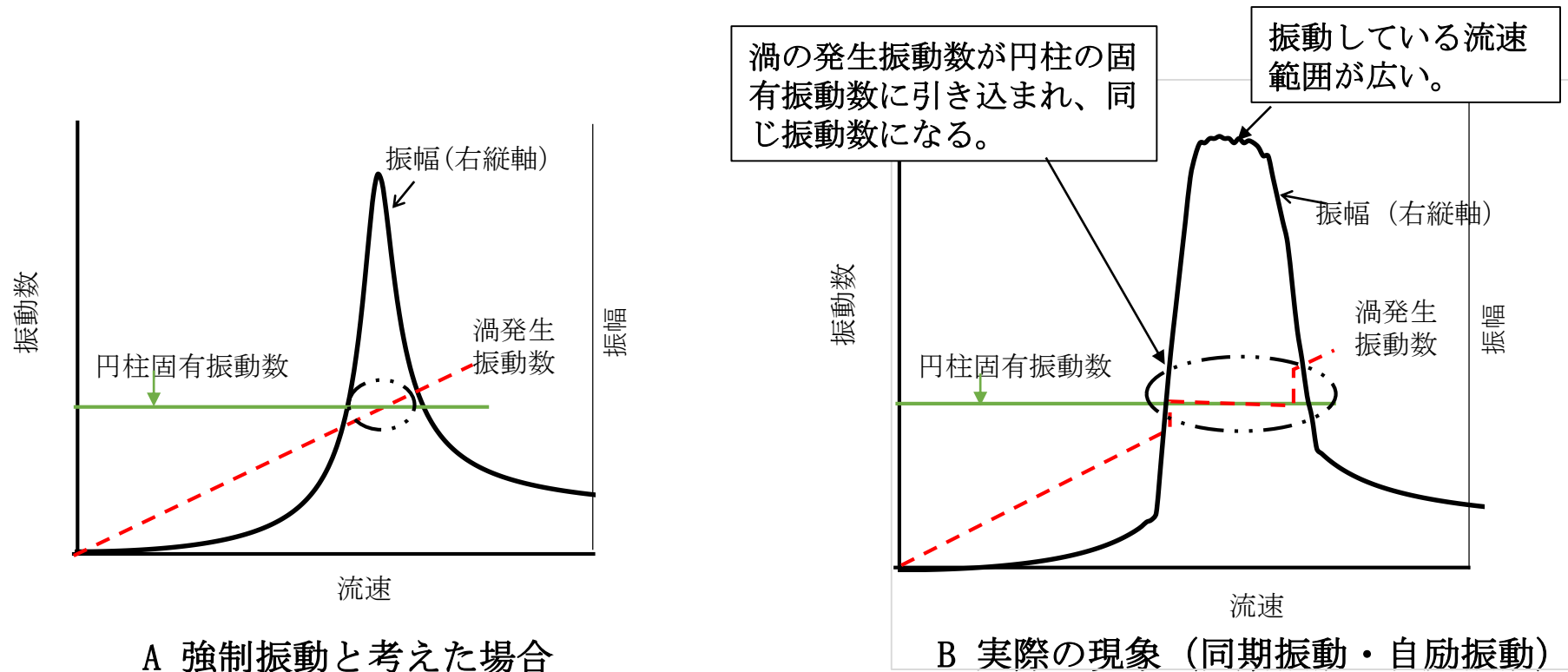
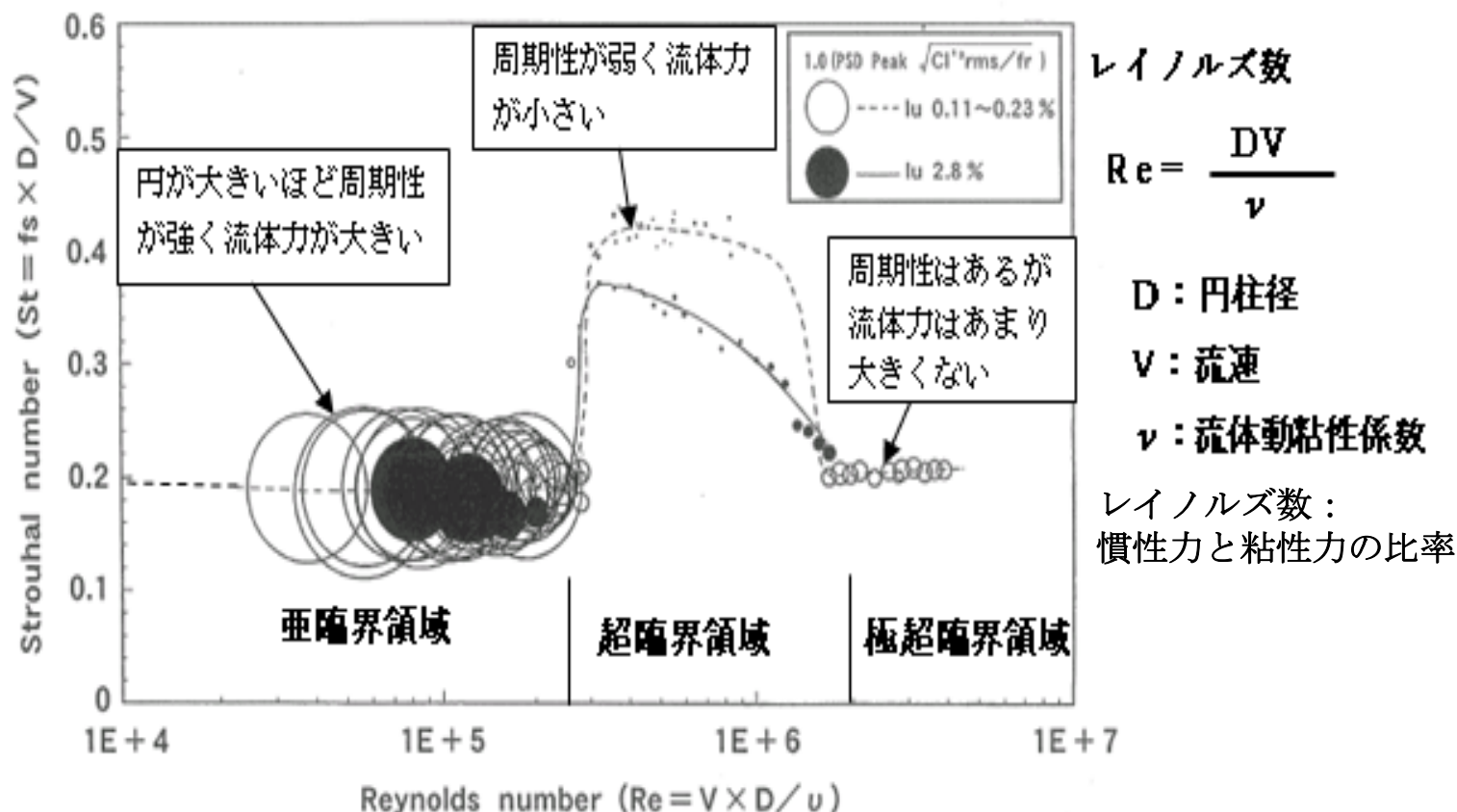
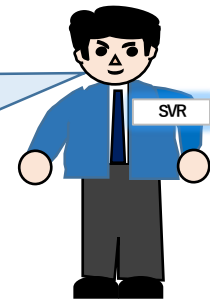


図7 強制振動と同期振動のイメージ図



円柱状の物体の場合、カルマン渦が発生する状況(渦の発生振動数と力の大きさ)はレイノルズ数に依存します。カルマン渦振動が問題となる多くの場合のレイノルズ数領域は亜臨界領域です(図8参照)。その理由は、この領域ではカルマン渦の周期性が強く、変動流体力も大きいからです。



カルマン渦による振動はレイノルズ数の範囲が、

- ① 亜臨界領域では渦発生の周期性が強く、流体力も大きいので振動しやすい。
- ② 超臨界領域でも渦は発生するが、周期性が弱く流体力が小さいため、振動が発生しても、振幅は小さい。
- ③ 極超臨界領域では渦発生の周期性はあるが、流体力はあまり大きくない。亜臨界領域の振動よりは小さい。
- ④ 亜臨界領域から超臨界領域に移行する
臨界領域では非定常流体力が発生する。
(渦発生の周期性が崩れるためだと思われる)・・・この非定常力はパルス的であり、流体力もやや大きいと考えられるため、この領域での使用は外すことが望ましい。

図8 静止円柱に対するストローハル数とレイノルズ数の関係

カルマン渦が発生する振動数やカルマン渦による振動現象はわかりましたが、その際、円柱に作用する変動力はどれくらいでしょうか。



静止円柱（円柱が振動しない剛な円柱）の単位長さ当りに作用する変動揚力、変動抗力は下式より求めることができます。
式中の変動空気力係数 C_L' 、 C_D' はレイノルズ数に依存して変化しますが、図9に静止円柱に対する変動力計測係数例とレイノルズ数の関係を示します。



$$\text{変動揚力： } F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L' D$$

$$\text{変動抗力： } F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D' D$$

ここで、

- F_L : 単位長さ当りの変動揚力
- F_D : 単位長さ当りの変動抗力
- ρ : 流体密度
- V : 流速
- C_L' : 変動揚力係数(≒0.6)
- C_D' : 変動抗力係数(約0.2)
- D : 円柱直径

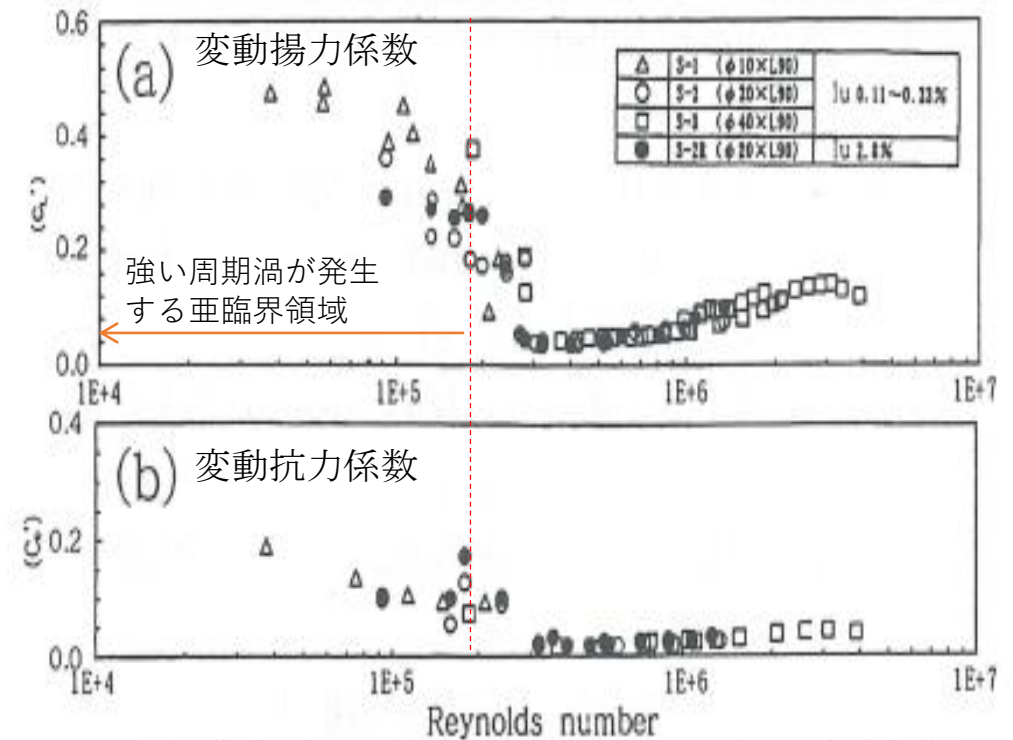


図9 レイノルズ数と変動流体力係数の関係

それでは、温度計や保護管のカルマン渦振動に対する設計をする際、どのような点に注意すれば良いのでしょうか。

カルマン渦による振動評価法については機械学会「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」に記載されています。詳細についてはその資料を参考して下さい。
ここではカルマン渦による振動を回避あるいは抑制するための条件表を示します。

下表の判定条件のいずれかを満たす設計を行えばまず問題はないと考えます。

無次元流速 (Vr) と換算減衰率 (Cn) が重要なパラメータになります。

判定条件	判定基準	内容	備考
(a)	$V_r < 1$	すべてのカルマン渦振動を回避する	実機ではこの条件を満足することが困難な場合が多い。
(b)	$C_n > 64$	カルマン渦振動を抑制 (共振時の振幅を小さく) する。	減衰比を大きくする。あるいは円柱の密度を大きくする。
(c)	$V_r < 3.3 \ \& \ C_n > 2.5$	対称渦による振動を抑制し、交互渦による振動を回避する。	
(d)	$f_0/f_s < 0.7$ $f_0/f_s > 1.3$	揚力方向のカルマン渦による共振を回避する。	ASME指針 JSMEでは明記せず。

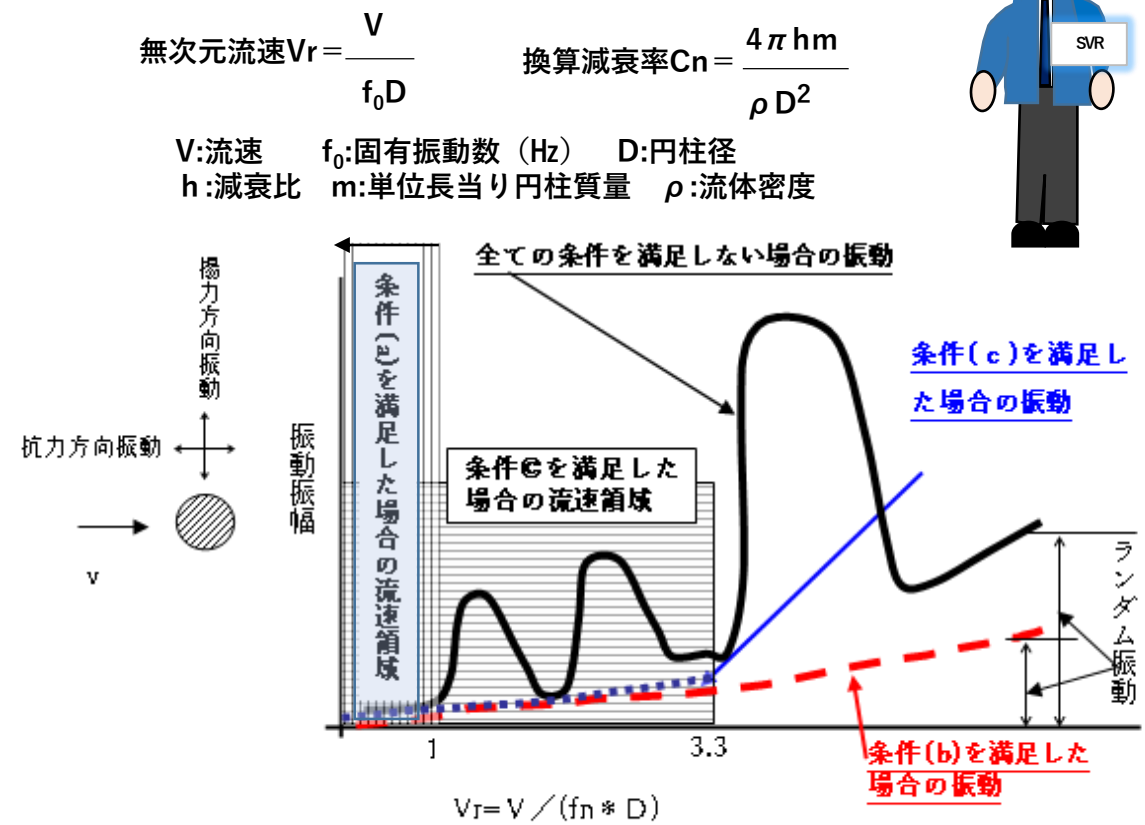
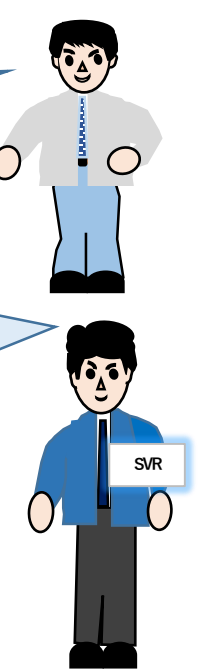
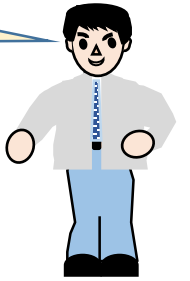


図10 カルマン渦振動に対する回避あるいは抑制条件と振動のイメージ図



無次元流速や換算減衰率という親しみのない言葉について、もう少し説明してください。



無次元流速は流速(円柱に作用する最大流速) V を(固有振動数*円柱径)で割り算した値です(下式参考)。渦の発生振動数と固有振動数が一致し、共振すると考えた場合、無次元流速 V_r はストローハル数 $St=0.2$ の逆数である5で共振することになります。前述したように、実際には円柱は同期振動として振動するため V_r は3.3程度から振動することになります。図10の判定基準(c)における $V_r < 3.3$ の条件は交互渦による振動を回避する条件を示しています。

換算減衰率 C_n は円柱と流体の単位長さ当りの質量比率 ($m/(\rho D^2)$) と円柱の減衰比 h の掛け算です。質量比率が大きい場合、あるいは減衰比が大きいほど換算減衰率が大きくなり、振動が生じ難くなることを意味します。例えば 流体が水と空気では空気の方が密度が小さい分だけ質量比率が大きくなり振動が生じ難くなります。

次ページの図11に質量減衰パラメータ(換算減衰率/2) と振幅の関係を示しますので参考にして下さい。



$$\text{無次元流速 } V_r = \frac{V}{f_0 D}$$

$$\text{換算減衰率 } C_n = \frac{4 \pi h m}{\rho D^2}$$

V : 流速

f_0 : 固有振動数 (Hz)

D : 円柱径

h : 減衰比

m : 単位長さ当り円柱質量

ρ : 流体密度

カルマン渦による振動は前述したように、振動が発生したとしても発散することではなく一定の振幅に落ち着きます。図11は質量減衰パラメータ（換算減衰率 $C_n/2$ ）と発生振幅の関係図を示します。極大まかですが作用流体が水の場合は質量減衰パラメータ δ_s が1以下になり、発生最大無次元振幅は ≈ 1.5 程度、流体が空気の場合は δ_s が ≈ 3 以上で無次元振幅は0.3以下程度になります。ちなみに、前頁の振動抑制条件（b）の $C_n=64$ では無次元振幅はほぼ0.01程度になります。

無次元振幅と質量減衰パラメータの実験予測式は研究者によって提案されていますが、ここでは省略します。

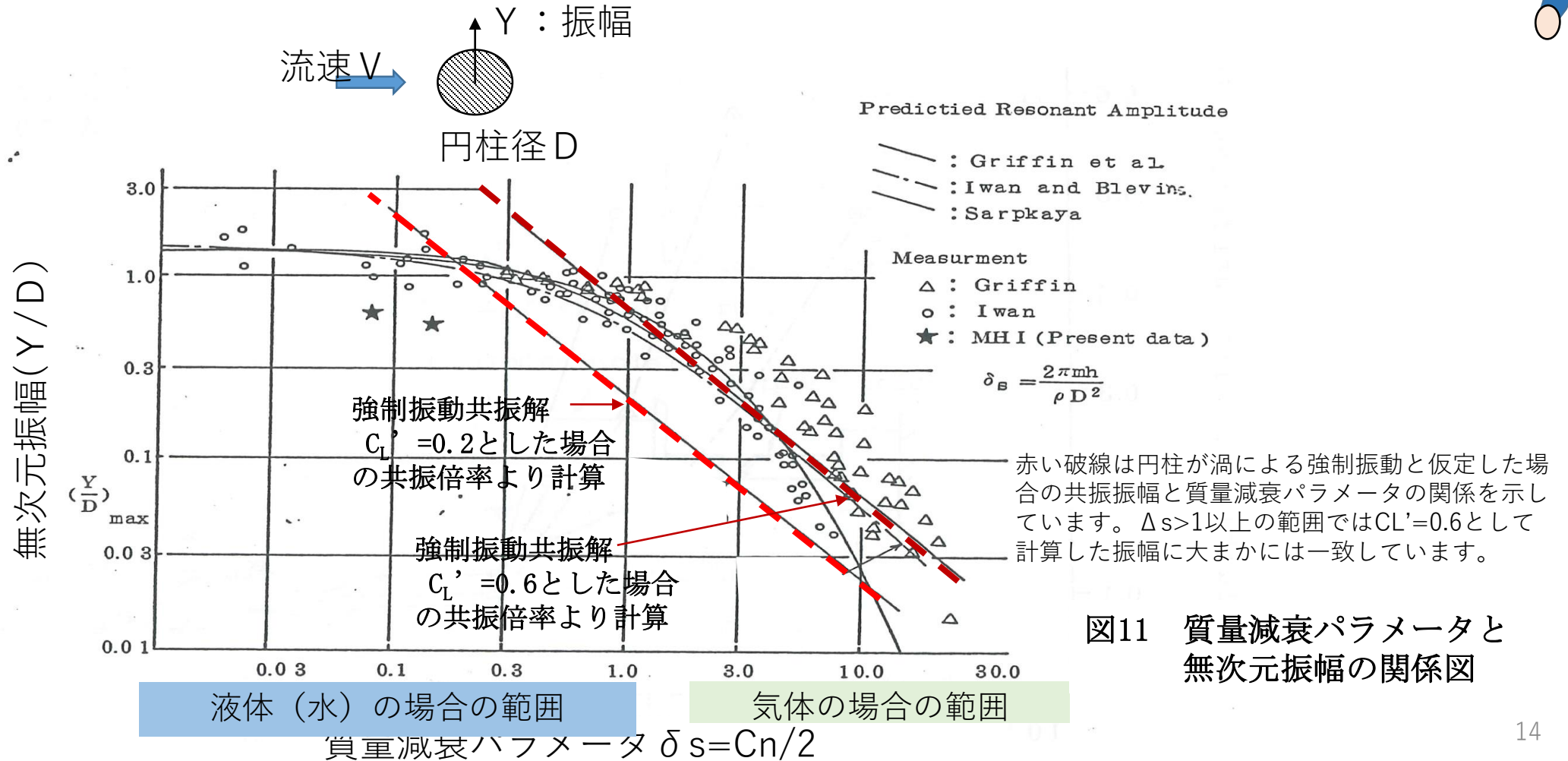
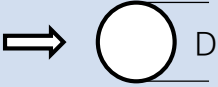
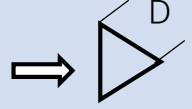
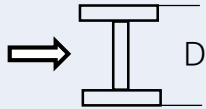
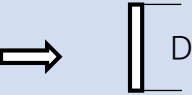


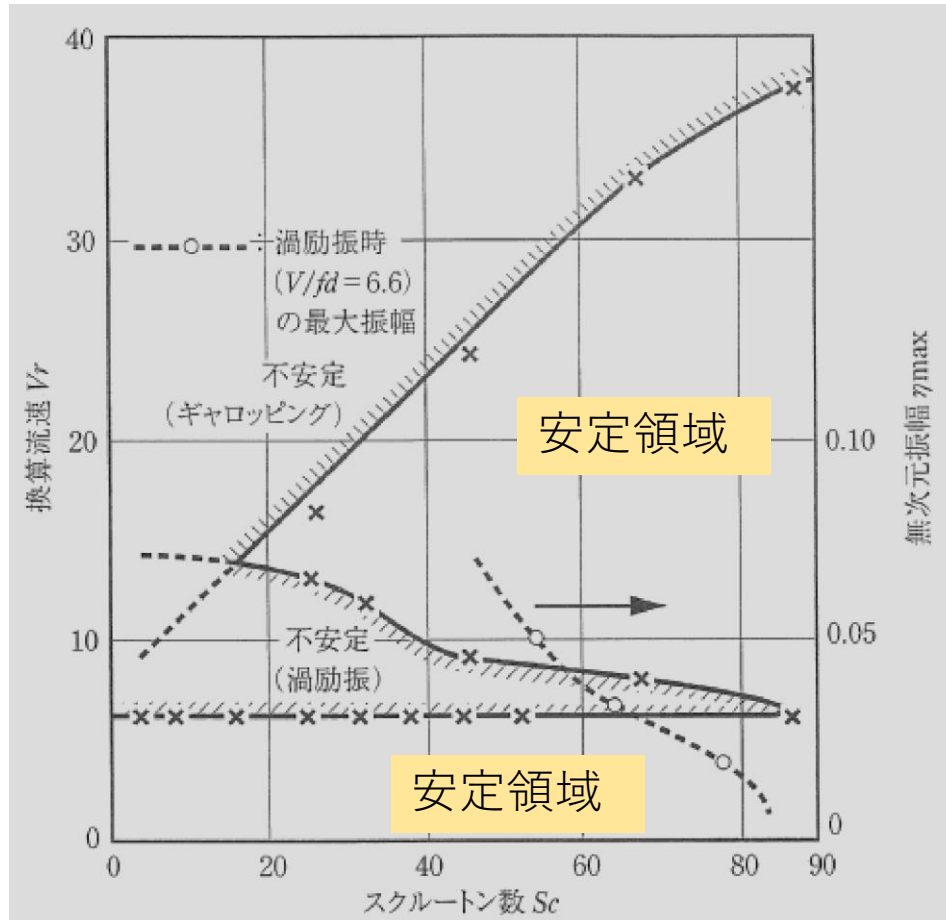
図11 質量減衰パラメータと無次元振幅の関係図

おまけ① 断面形状とストローハル数



断面形状	ストローハル数	断面形状	ストローハル数
円 ⇒ 	0.2 (Re数 $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^5$)	三角 ⇒ 	0.15
正方形 ⇒ 	0.12~0.16	I型 ⇒ 	0.14
薄板 ⇒ 	0.145	D型 ⇒ 	0.16

おまけ② 正方形断面に対する流速限界線図

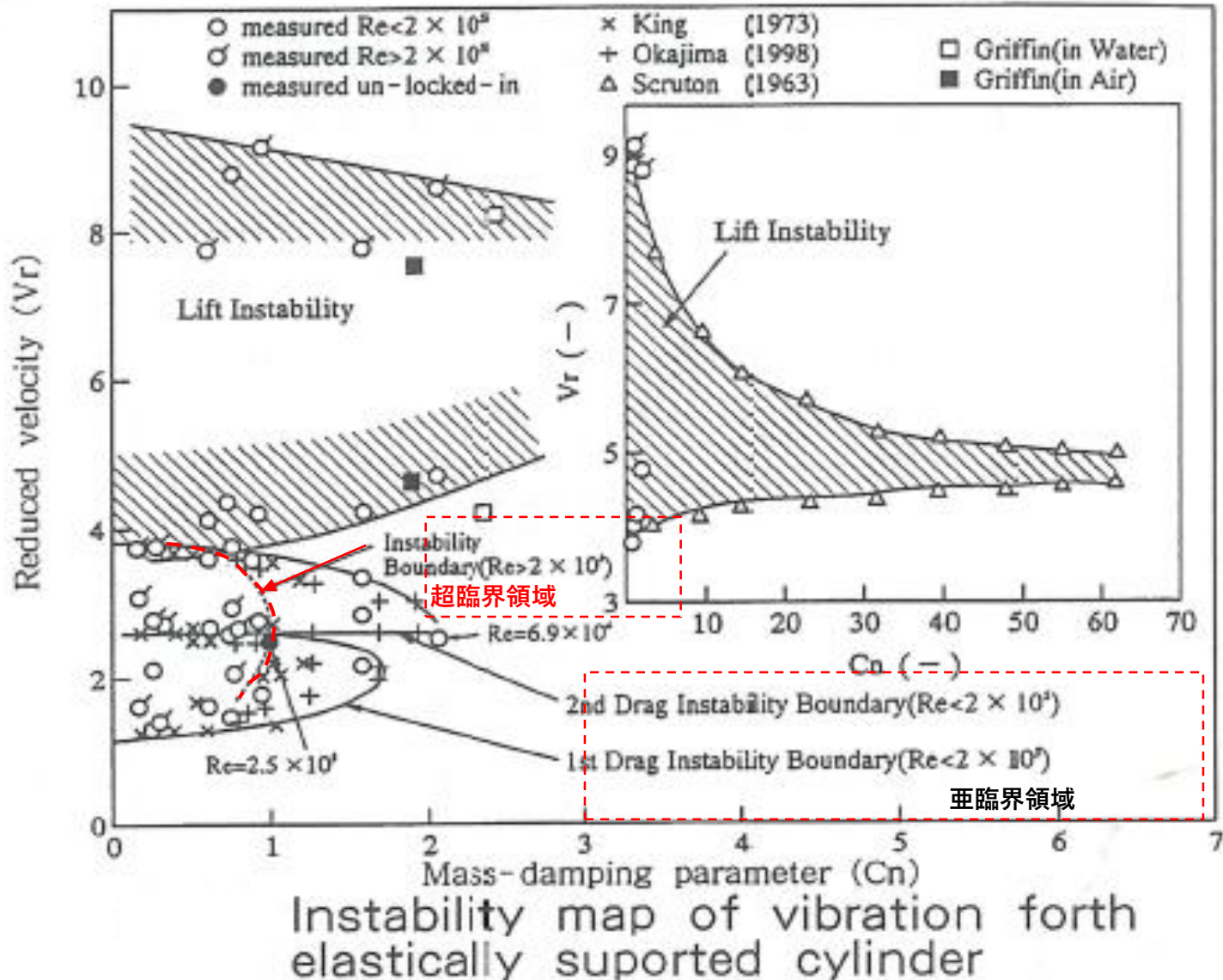


左図はSCRUTONにより示された正方形断面に対する限界流速図です。換算流速(無次元流)を徐々に速くして行くと、まずカルマン渦による振動(図中では渦励振と表示)が発生し、さらに流速を上昇するとギャロッピングという現象が発生する事を示しています。設計時には安定領域内に収まるよう配慮する必要があります。

正方形断面構造物の流れに対する安定限界線図

SCRUTON [ON THE WIND-EXCITED OSCILLATIONS OF STACKS, TOWERS AND MASTS]

おまけ③ 亜臨界レイノルズ数と超臨界レイノルズ数における抗力方向振動発生領域の比較



超臨界レイノルズ数領域ではカルマン渦の周期性は低く、変動力も小さいと述べました(静止円柱に対するストローハル数計測結果)。

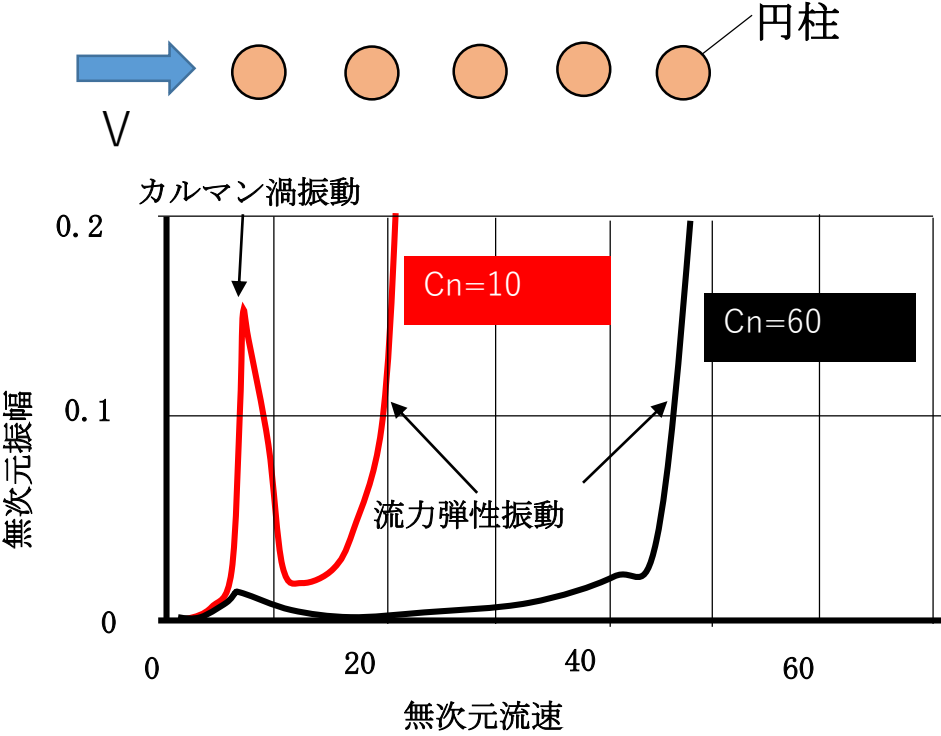
左図は弾性支持された円柱に対する超臨界レイノルズ数領域における流動試験結果です。

超臨界領域においても弾性支持円柱(円柱は振動し得る構造)に対し、同期振動は発生する事が分ります。振動が発生する無次元流速範囲は亜臨界領域の流れの場合とほぼ同じですが、振動が発生する換算減衰率の範囲は狭くなります。



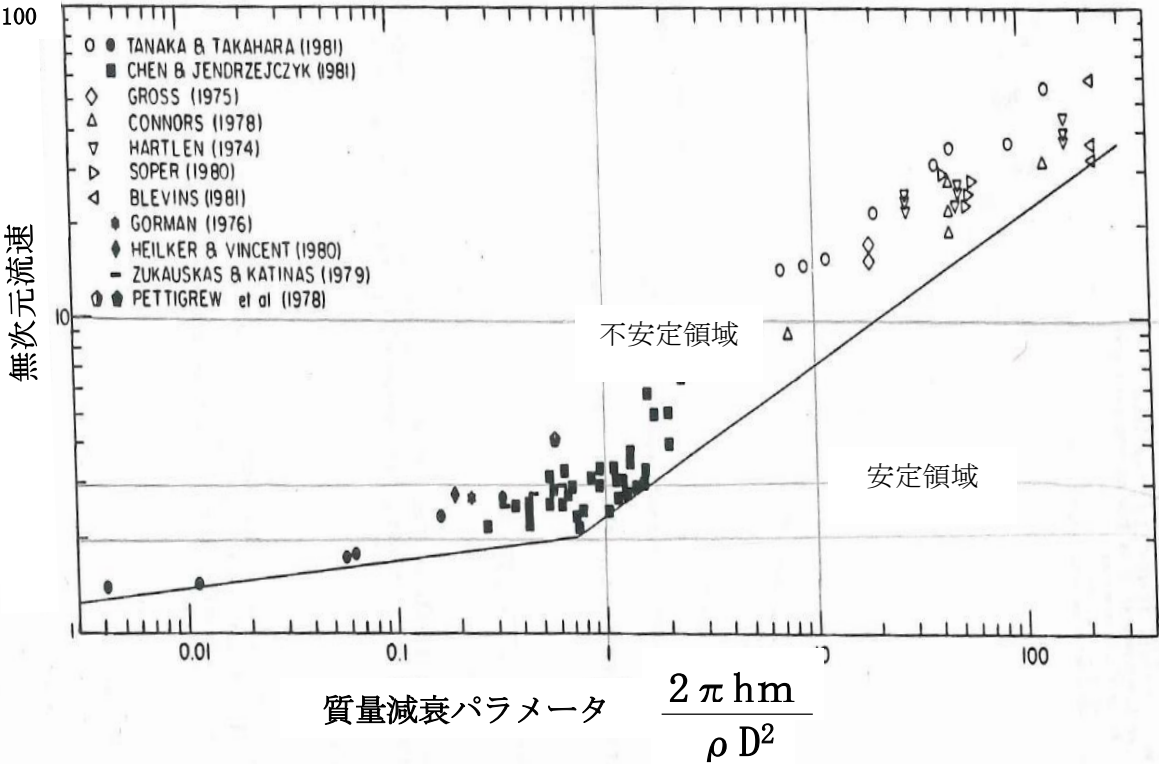
おまけ④ 管群に対する流力弾性振動発生限界について

下図は一列5本配列に対する流動試験結果例を示す。
流速を上昇させると、まずカルマン渦による振動が発生し、次に流力弾性振動が発生しています。流離振動発生時の振幅はカルマン渦発生時の振幅より大きい事が分かります。また、振動が発生する状況は換算減衰率に依存する事が分かります。



管群に対する流動振動応答例

無次元流速 V_r	換算減衰率 C_n	無次元限界流速 U_r
$V_r = \frac{V}{f_o D}$	$C_n = 2 * \frac{2\pi h m}{\rho D^2}$	$U_r = K * \left(\frac{2\pi h m}{\rho D^2}\right)^{0.5}$
V : 流速 f_o : 固有振動数 D : 円柱外径	h : 減衰比 m : 単位長さあたり質量 ρ : 流体密度	$U_r = \frac{V_c}{f_o D}$ K : 係数 V_c : 発生限界流速



流力振動発生に対するクライテリア例 (BY CHEN)

