

第75回実海域推進性能研究会
特別講演：水槽試験技術について
第2部 円筒構造物の流力振動

国立研究開発法人
海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所
星野 邦弘

はじめに
流れは古代から興味の対象

目に見えない水や空気の流れの観察(古代より)



落ち葉や花びらをトレーサに
渦をながめる

縄文土器と双子渦とカルマン渦

縄文人の可視化



火焰土器
岩に砕ける大波とさざ波？
下部に渦文様
双子渦とカルマン渦(S字
形)が見える

縄文人が水の流れをじっと
見つめ渦を観察して土器に
写したのか？

渦の観察

レオナルド・ダビンチ

流れの中に置いた板等のの作る渦をスケッチ



Figure 1.8. Leonardo: Old man and Vortex: probably a self-portrait (Windsor Castle, Royal Library, copyright reserved).

老人と渦のデッサン 人体解剖学の血液の運動

渦の観察

レオナルド・ダビンチ 人体解剖図



心臓のスケッチ

心臓弁が起こす渦流

心臓の動きを確認するた
めガラス模型を製作

・ダビンチのノートが発見
は書かれて250年後で科
学の進歩にはほとんど貢
献しなかった。

カルマン渦の発見

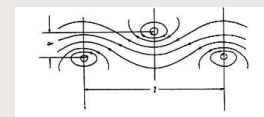
プラントル(式を解くことなく答えのわかった人)

円柱の抗力を測定・・・学生ヒューマンズ

円柱が振動・・・実験装置が悪い(プラントル先生)

助手カルマン

振動が起こるのは実験装置のせいではなく、振動が
起こる必然性があるのでは？



カルマン渦の安定配列計算 (渦間隔 h /波長 $\lambda = 0.359$)
互い違いの渦が安定

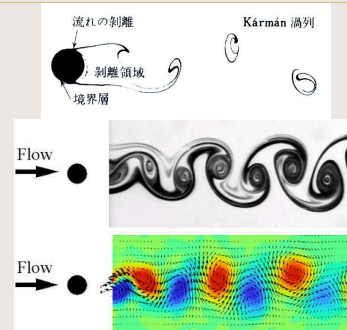
カルマン 現象解析の魔術師

- ・渦は私が登場するずっと前から観察され、記録されていた。
- ・歴史家にとっては、なぜクリストファがイエスを担いで水を渡っているのが問題。私にとっては、なぜ渦ができたのが問題なのである。

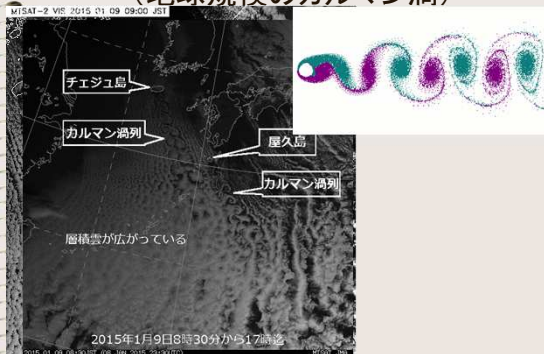


「聖ドミニコ、聖ペトロおよび聖クリストファの間にいる子供を抱くマドンナ」

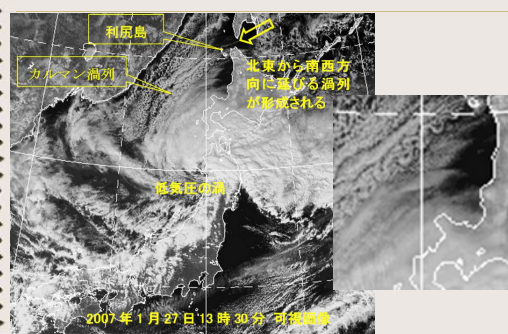
流れの不思議 (模型のカルマン渦)



流れの不思議 (地球規模のカルマン渦)



流れの不思議 (地球規模のカルマン渦)



流力振動問題とは？

【流力振動】

- ・物体と流体が作用しあうことで生じる振動
- ・地球上の物体のまわりには常に大気や水が存在するので建物や橋などの構造物、車両・船舶・航空機などの高速輸送機器など、さまざまな状況で発生する。

【機械または構造物の破壊の原因】

例えば タコマーナロウズ橋の崩落、「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故・・・

流力振動の代表例 その1 タコマーナロウズ橋の崩落

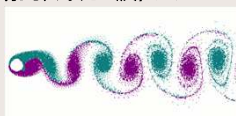
動画



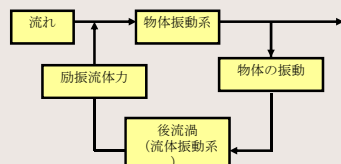
ねじれフラッターによる振動
事故調査報告でカルマンはカルマン渦励振と・・・

渦励振の発生機構

渦励振は強制振動や自励振動として説明される。
【調和的(周期的)外力:波, カルマン渦】



【自励振動】

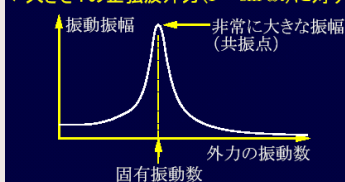


【自励振動と強制振動の違い】

渦励振を考える上で、自励振動と強制振動の違いを良く認識しておくべきである。通常の渦励振は、自励振動なので振動を引き起こす力は、自らの振動によって作り出された力である。自励振動は定常的な振動が自らの振動によって作り出された力によって持続し、振動が止まるとこの力が消失する。強制振動は物体自身の振動とは無関係に外部から別に加えられた力により振動する。

共振現象

◆ 大きさ1の正弦波外力 ($F = \sin \omega t$) に対する振動



● 外力の振動数 = 構造物の固有振動数
→ 共振: 構造物に非常に大きな振動

渦励振は共振現象であり限定振幅型であり発生流速も限定的

構造物の振動

(3) 不規則変動流体力による振動現象

物体へ作用する流体速度の乱れにより生じる振動現象である。乱れを伴う流れのなかではどのような構造物でも多かれ少なかれ発生する。この振動現象は準定常的な応答として考えることが出来る。

例えば

不規則外力: 地震, 風の乱れ, 車両や人の交通



Morison 式

Morisonは、流れ方向の力に関して、渦から受ける力が流体速度2の乗に比例する成分と、流体加速度に比例する成分に分けられると考え、円柱に働く単位長さあたりの流体力が次式で表現できるとした。

$$f_I = C_D \frac{1}{2} \rho D u |u| + C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{du}{dt}$$

右辺第1項 抗力 (drag force), 第2項 慣性力 (inertia force)

ここで, ρ : 流体密度, D : 代表長さ, u : 相対流速

※ C_D と C_M を知る必要がある。

なお、慣性力には、渦から受ける力の成分に加えて完全流体中での付加質量に基づく力と水平浮力の成分が含まれている。

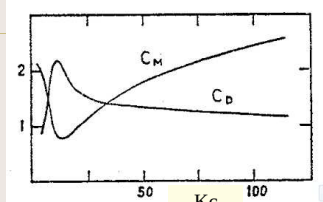
相似則2 (K_C 数と β)

振動流中の抗力係数は定常流の場合と大きく異なりレイノルズ数だけで決まらない。KeuleganとCarpenterは振動流中の円柱と平板についてMorison式を当てはめて次式の K_C 数を提案した。

$$K_C = \frac{U_m}{fD}$$

ここで U_m は最大速度, f は振動周波数である。 K_C 数は物体がひと揺れの間に掃きだす領域の縦横比に相当するようなものである。 K_C 数に対する円柱の C_D , C_M は次のような特性を示す。

相似則2 (Kc数とβ)



定義式では運動の周波数に依存しているように見えるが、単一周波数の場合は運動振幅をAとすると運動振幅比の意味を持つ形になる。

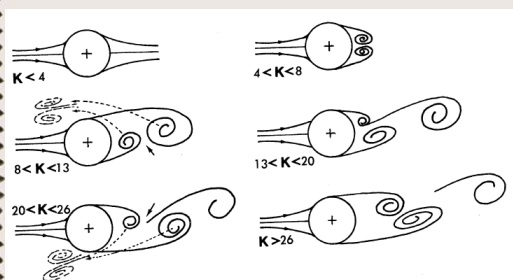
$$Kc = \frac{U_m}{fD} = \frac{2\pi A}{D}$$

相似則3 (Kc数とβ)

運動振幅比で表されることから、現象を支配しているものは、運動の動的な大きさではなく運動の形態であることを意味していると言える。言い換えれば、流体力学的には運動している物体周りに形成される渦領域のパターンが重要な役割を果たしていることになる。

振動流中の円柱に作用する流体力は渦の運動や運動している物体から次々と放出される渦度の反作用から誘起される。渦度の放出力は主流の瞬間的な相対速度だけでなく渦度分布による誘起速度の影響も受けるために、メモリー効果が生じることになり、運動に対する位相遅れが生じることになる。

相似則3 (Kc数とβ)



※ 振動流ではレイノルズ数とKc数の比β(=Re/Kc)が等しい場合に現象が相似となる。

相似則4 (Strouhal Number, S)

Strouhal Number Sは流体中に存在する物体の後ろに生じる、周期を持った非定常な流れを表す無次元数である。縦軸をカルマン渦の発生周波数、横軸を流れの速さ(代表長さ: 円柱の直径で割った量)にとると、一定の比例関係があることが分かっている。この傾きをストローハル数と呼ぶ、定常流れの中に置かれた円柱のストローハル数の定義を示す。

$$S = \frac{Df}{U}$$

ここでDは円柱直径、fは渦放出周波数、Uは定常流の流速である。

相似則5 (Scruton Number, Sc)

Scruton Number Scは振動系の減衰を無次元化した係数で換算減衰率とも呼ばれる。

$$Sc = \frac{m\delta}{\rho D^2}$$

m は円柱の単位長さあたりの質量、δは対数減衰率、ρは流体密度。円柱質量と作用流体との質量比と模型の対数減衰率の積と言える。Scの大きさによりin-line方向の振動やcross-flow方向の振動の大きさや発生条件が変わる。

相似則6 換算流速 (Reduced velocity)

流の中で振動する物体に作用する流体力については、次式に示す換算流速(Reduced Velocity U_r)も重要なパラメータの一つである。 U_r は次式で定義される。

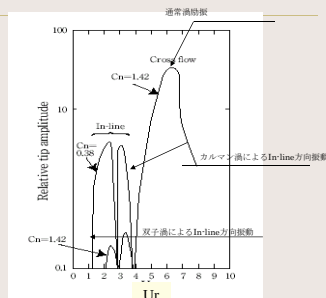
$$U_r = \frac{U}{f_m D}$$

ここで、Dは円柱直径、fは渦放出周波数、Uは流速である。

(換算流速に対する振動振幅) Scによる違い

換算流速 U_r

$$U_r = \frac{U}{f_m D}$$



(換算流速に対する振動振幅)
換算減衰による違い

実験解析の方法 (模型質量の計測)

実験により計測された力 F には、円筒模型に働く流体力の他に模型と検力計の慣性力が含まれる。したがって、付加質量係数 C_A を求めるためには、計測された質量力から模型質量と検力計内部質量によって生じる慣性力を引く必要がある。模型質量を求めるために空気抵抗を無視して、空気中の加振動実験により求めた。模型の空気中加振時に検定力計で計測される力を F 、加振周波数を f 、加振振幅を Y_0 とすると質量 m は

$$m = \frac{|F|}{Y_0 \omega^2} = \frac{|F|}{Y_0 (2\pi f)^2}$$

実験解析の方法 (定常流中)

実験の解析は、次のようにして行った。抗力係数 C_D は、計測した流れの方向の抵抗を F_y 、模型の投影面積を $A = DL$ 、流体密度を ρ 、として次式で求めた。

$$C_D = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho A U^2}$$

揚力係数 C_{Lrms} は揚力の時系列データから機械振動と思われる 10 Hz 以上の高周波成分をカットし、その自乗平均 F_{Lrms} を使い次のように求めた。

$$C_{Lrms} = \frac{F_{Lrms}}{\frac{1}{2} \rho A U^2}$$

実験解析の方法 (振動流中)

一般に海洋構造物の運動方程式においては、減衰力項は線形な造波減衰力と非線形な粘性減衰力の和として表されることが多い。粘性減衰力は構造物と流体の相対速度の絶対値と相対速度の積で表され、モリソン式における抗力項の表現と一致する。実用的見地から平水中で前後揺る円柱に加わる流体力を次に示すモリソン式にしたがって解析する。

$$F = -(\rho \nabla C_A + M) \ddot{y} - \frac{1}{2} \rho A C_D \dot{y} |\dot{y}|$$

ここで、 ∇ は模型排水量、 M は模型質量、 C_A は付加質量係数であり、 $\dot{y}$ および $\ddot{y}$ はそれぞれ前後揺れの速度および加速度である。強制前後揺れ振幅を Y_0 、動揺円周波数を ω とし前後揺れ変位を $y = Y_0 \sin \alpha t$ で与えれば

$$F = (\rho \nabla C_A + M) Y_0 \omega^2 \sin \alpha t - \frac{1}{2} \rho A C_D Y_0 \omega \cos \alpha t |Y_0 \omega \cos \alpha t|$$

実験解析の方法 (振動流中)

抗力項を線形化すると

$$F = (\rho \nabla C_A + M) Y_0 \omega^2 \sin \alpha t - \frac{4}{3\pi} \rho A C_D Y_0^2 \omega^2 \cos \alpha t$$

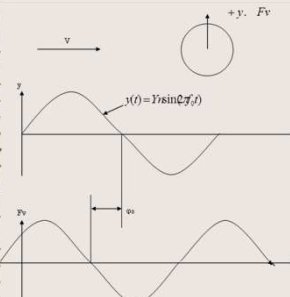
実験で求めた模型に加わる運動方向反力をフーリエ級数展開すると

$$F_{exp} = A_0 + A_1 \cos \alpha t + B_1 \sin \alpha t + \dots + A_n \cos n\alpha t + B_n \sin n\alpha t$$

2つの式の ω 周波数成分の項を比較することにより抗力係数 C_D 、付加質量係数 C_A は次式で求められる。

$$\begin{cases} C_D = \frac{-A_1}{\frac{4}{3\pi} \rho A Y_0^2 \omega^2} \\ C_A = \frac{B_1}{\rho \nabla Y_0 \omega^2} - \frac{M}{\rho \nabla} \end{cases}$$

実験解析の方法 (定常流中の加振実験)



揚力変動を加振変位と同位相成分の力 $F_{L \text{ 同位相}}$ (付加質量成分) と、加振変位と 90° 位相が異なる成分の力 F_{L90° (減衰成分) に分離し、付加質量係数 (C_{LA}) と減衰係数 (C_{LD}) を算出する。

実験解析の方法 (定常流中の加振実験)

$$C_{LA} = \frac{F_{L\text{同位相}} - MA(2\pi f_v)^2}{\rho \frac{\pi D^2}{4} LA(2\pi f_v)^2}$$

$$C_{LD} = \frac{F_{L90^\circ}}{\frac{1}{2} \rho D L V_n A (2\pi f_v)}$$

Mは計測部の質量である。このため、揚力 F_L の時系列データについて、強制動揺変位を基準とする振動位相解析を行い、揚力変動の振幅と、強制動揺変位に対する位相差を求める。

流力振動の代表例 その2

高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故

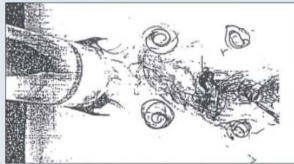
【双子渦またはカルマン渦による流れ方向の振動】
高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故の原因



【海洋構造物でも発生】
1980年代英国で報告

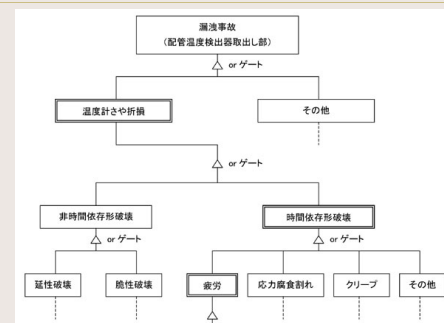


クロスフロー自励振動とインライン自励振動

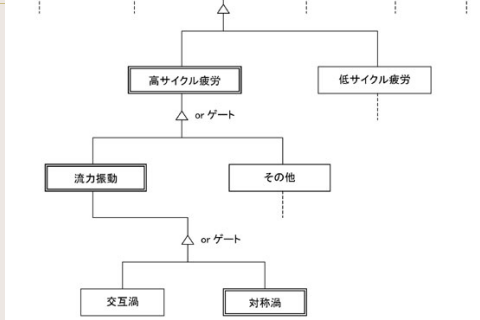


インライン自励振動する円柱と双子渦 (King)

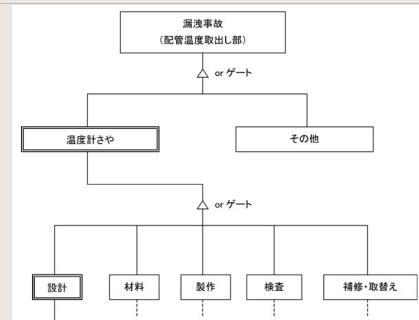
高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故 フォールトツリー解析の結果(1/2) 破壊のメカニズム



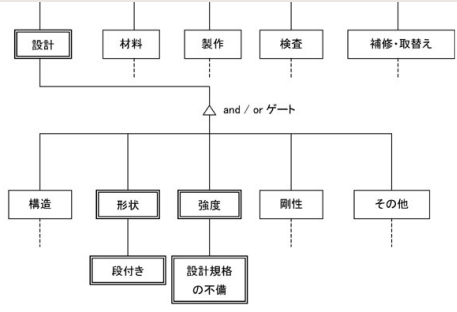
高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故 フォールトツリー解析の結果(2/2) 破壊のメカニズム



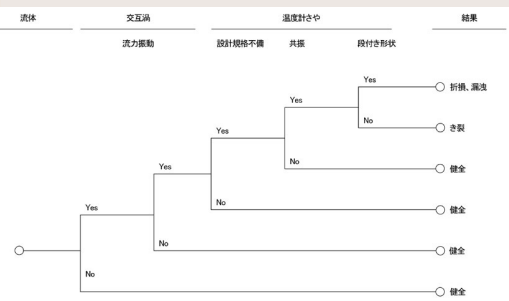
高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故 フォールトツリー解析の結果(1/2) 機器の設計と製作における不適切・不良



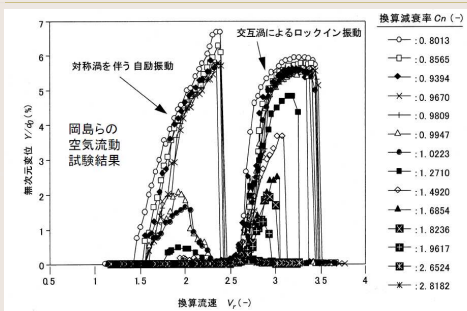
高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故 フォールトツリー解析の結果(2/2) 機器の設計と製作における不適切・不良



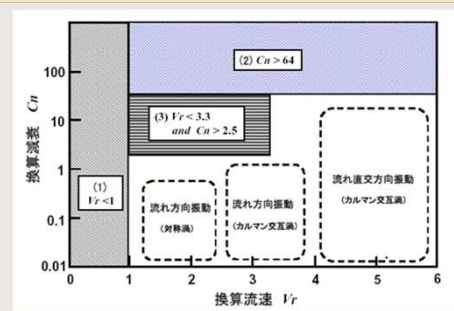
高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故 対称渦の流体振動による 温度計さや折損のイベントツリー図



実は交互渦によるインライン方向振動も問題



振動回避: 配管内円柱状構造物の流力振動評価指針 (JSME S012-1998)



渦励振の発生機構 (副共振 その1) 揚力の分数調和共振

流れの中で横振動する円柱に作用する揚力の分数調和共振

正田 辰野 邦 弘*

Subharmonic Resonance of Lift Force on Circular Cylinder due to Transverse Motion in a Uniform Flow

by Kenjiro HOSHINO, Member

渦励振の発生機構 (副共振 その2) 揚力の分数調和共振

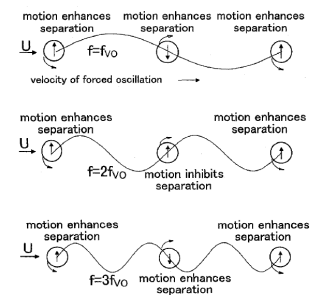


Fig. 10 Vortex shedding at $f_0 = f_{v0}$, $2f_{v0}$ and $3f_{v0}$

渦励振の発生機構

(副共振 その2) 揚力の分数調和共振

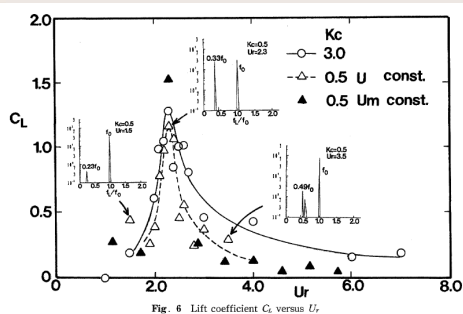


Fig. 6 Lift coefficient C_L versus U_r

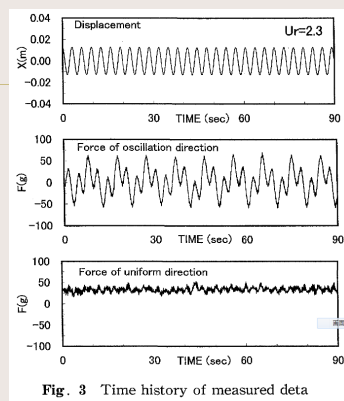


Fig. 3 Time history of measured data

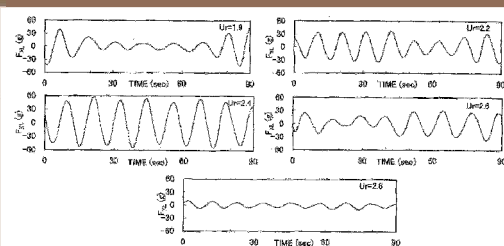


Fig. 5 Time histories of lift force

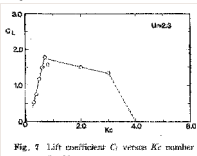


Fig. 7 Lift coefficient C_L versus Kc number for $U_r=2.3$

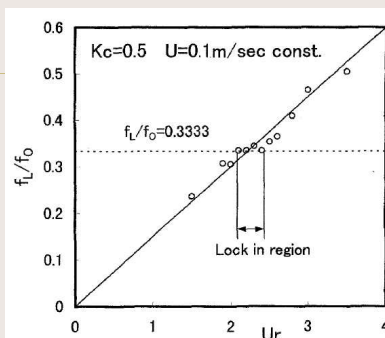


Fig. 4 Ratio of f_L (= Spectral peak frequency without f_0 of lift force) to f_0

渦励振の発生機構

(副共振 その2)

【脈流成分による渦生成への影響】

主流方向に僅かな流速変動(単一正弦波)を付加した流れが剥離せん断層の不安定性への増幅刺激となり、非常に大きな渦を生成することがよく知られている。この現象により主流と直角方向の大きな振動が生じる場合がある。

例えば

星野邦弘: 波と流れの共存場に置かれた円筒構造物の渦励振について、西部造船会会報 第96号

渦励振の発生機構

【脈流成分による渦生成への影響】振動円柱

(平成10年5月西部造船会96回例会において講演)

143

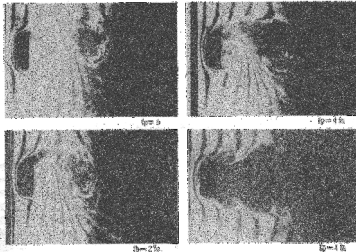
波と流れの共存場に置かれた円筒構造物の渦励振について

正員 星野邦弘*

Vortex-Induced Vibration of Circular Cylinder Structure in Wave-Current Coexisting Fields

by Kunihiro HOSHINO, Member

渦励振の発生機構 (副共振 その1) 【脈流成分による渦生成への影響】静止矩形柱



辺長比 $B/D=0.5$

f_p : 脈流の周波数
 f_s : 一様流中 ($f_p=0$)
の渦の放出周波数

松本勝ほか (1984)
風工学シンポ

脈流中の矩形柱の剥離せん断層の同期領域は自己励起型の渦励振の生じる無次元周波数領域と良く対応する。

渦励振の発生機構

【脈流成分による渦生成への影響】振動円柱

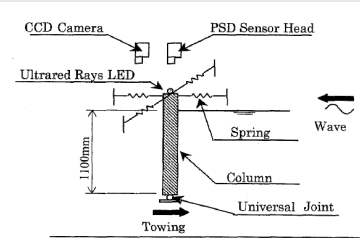


Fig. 1 Experimental arrangement of vortex-induced vibration

渦励振の発生機構

【脈流成分による渦生成への影響】振動円柱

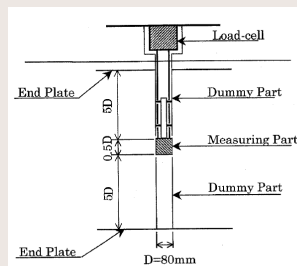


Fig. 2 Circular cylinder model

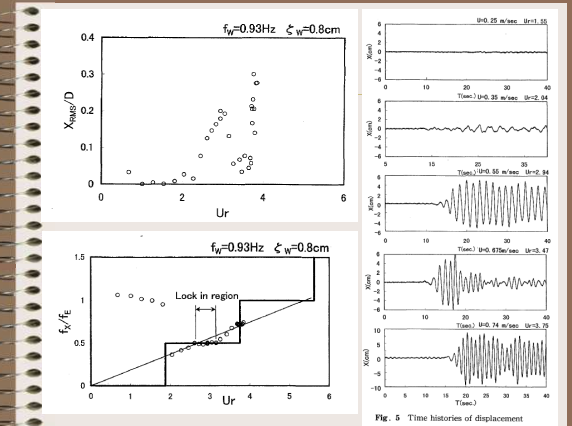


Fig. 5 Time histories of displacement

力の変動周波数は、渦の離脱現象のみを考慮すれば十分であるため[14]、渦の成長および渦の移動速度を無視した次に示す Kutta-Joukowski の算定式による値で十分である。

$$F_L = -\rho U \Gamma \quad (3)$$

(3) 式の流速 U は、脈動流の場合は常に同一方向であるため符号を変えない。一方、脈動流の変動成分の一周期中に放出する渦の個数を n とすれば管轄下は n 回符号を変えることになる。すなわち、 F_L は、 U との積で表されるため、 F_L は n 回符号を変化することになり非定常荷力の振動周波数 f_n と脈動流の周波数 f_s の比 f_n/f_s は $n/2$ となる。定常流中に置かれた 2 次元静止円柱の渦放出の周波数は、ストローハル数 $S (= nD/U)$ 、 n : 渦放出周波数、 D : 円柱直径、 U : 流速) で定義され、レイノルズ数 $Re=10^4 \sim 10^5$ の範囲では、 $S=0.2$ とされているが、今回の実験については、定常流中の振動計測結果から S は 0.15 と推定された。2 次元円柱に比べてストローハル数が減少している理由は渦の 3 次元影響等が考えられる。したがって、

$$S = nD/U = 0.15 \quad \therefore TU/D = 3.0 \quad (4)$$

(4) 式から水粒子が直径 D の 3 倍進む毎に上下 1 対の渦を放出することになる。すなわち、水粒子の移動距離 $1.5D$ 毎に一個の渦を放出することになる。実験に用いた円筒構造物模型の振動流中の平均渦放出個数 n は、脈動流の水粒子の進む距離を、一個の渦を放出する水粒子の移動距離 $1.5D$ で割ればよい。故に

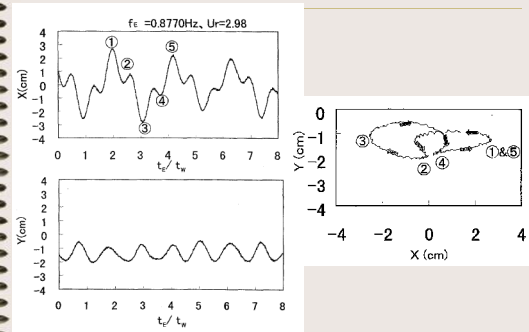
$$n = \frac{\int_{-1.5D}^{1.5D} (U + U \sin \omega t) dt}{1.5D} = \frac{U}{1.5D} \quad (5)$$

この結果を整理すると、次の U_r の範囲で f_n/f_s は次のようになる。

$U_r < 1.5$	0	0
$1.5 \leq U_r < 3.0$	1	1/2
$3.0 \leq U_r < 4.5$	2	1
$4.5 \leq U_r < 6.0$	3	3/2

渦励振の発生機構

【脈流成分による渦生成への影響】振動円柱



渦励振の発生機構

【脈流成分による渦生成への影響】振動円柱

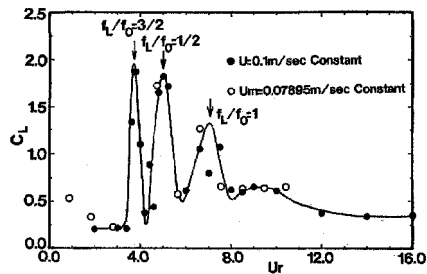
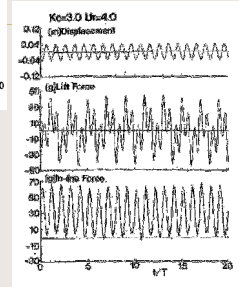
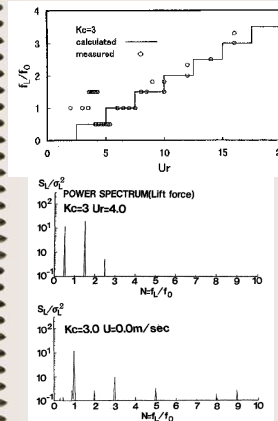


Fig. 16 Lift coefficient C_L for the case of $Kc=3$



ライザー管の流力振動評価 流体カデータベースの構築

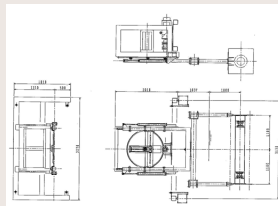
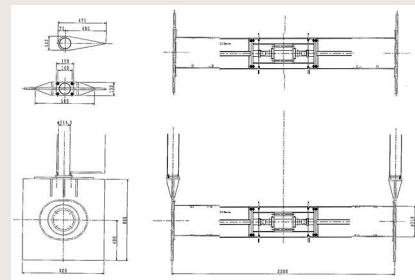


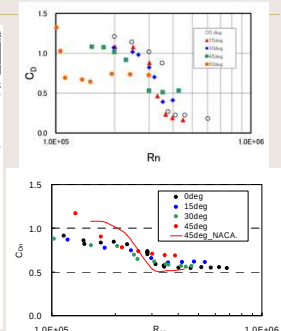
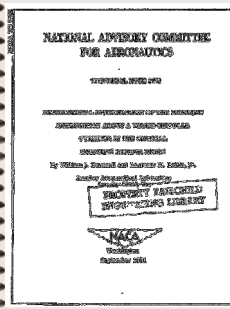
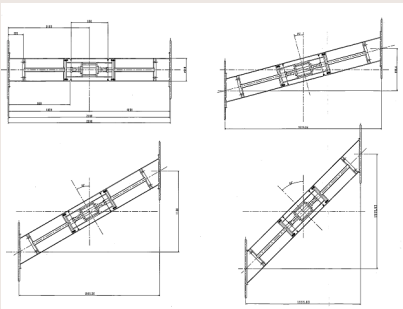
表 円柱模型の仕様

項目	記号	単位	数値	備考
直径	D	mm	6.35	
長さ	L	mm	2.5	振動長さ
振動長さ	L_v	mm	1.48	
アスペクト比	L/D	-	7.0	
表面粗度	R_a	μm	10以下	表面仕上げ
材質	-	-	-	ステンレス

ライザー管の流力振動評価 流体カデータベースの構築



ライザー管の流力振動評価 流体カデータベースの構築



ライザー管の流力振動評価 流体力データベースの構築

レイノルズ数 ^{b)}	傾斜角度(deg) ^{c)}	曳力係数(1/m ² sec) ^{d)}	水速と実験時期 ^{e)}
1.5×10 ⁴	0.45°	0.98	20.0°(3月) ^{f)}
3×10 ⁴	0.30,45°	0.98	16.6°~17.0°(1月) 18.5°~19.9°(3月)
4×10 ⁴	0.30,45°	1.63	17.5°(1月) 18.8°~19.7°(3月) ^{g)}
5×10 ⁴	0.15,30,45°	1.63	17.2°~17.6°(1月) 19.1°~20.2°(3月) ^{h)}
6×10 ⁴	0°	1.93	20.5°(3月) ⁱ⁾

表 流体力データベースの項目の

Exp No	円柱外径 D m	計測部長さ L m	傾斜角 θ deg	流速 U m/s	上下変位 周波数f 片振幅A Hz mm	水温 °C	動粘性係数 ν m ² /sec	計測部質量 kg
				Re	A/D	fD/U	Cd	付加質量係数 減衰係数

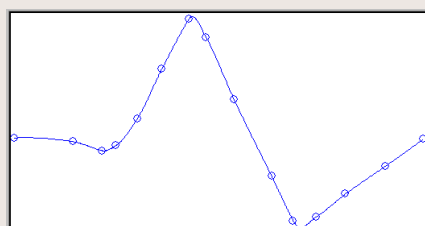
ライザー管の流力振動評価 流体力データベースの構築

揚力方向減衰係数(CLD)、揚力方向付加質量係数(CLA)、および流れ方向抗力係数(CD)の流体力データベースの構築を行った。データベースの構築は次の手順で行った。

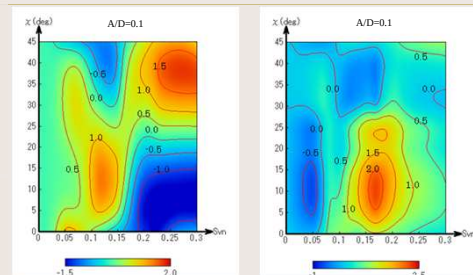
- (1) 実験データから明らかに異常と思われるデータを削除する。
- (2) 実験したデータをレイノルズ数、傾斜角度毎に整理し秋間の補間法で指定した点を必ずとおる形で補間する。
- (3) 実験した傾斜角度毎のデータを0から45度まで5度ごとに指定した点を必ず通る形で補間する。
- (4) 無次元加振周波数を0～0.30の範囲について0.01刻みで補間する。

ライザー管の流力振動評価
流体力データベースの構築

秋間浩 (アメリカ合衆国 Institute of Telecommunication Science) の 2次元空間内挿法を用いた。指定した計測点を絶対に含む形で滑らかに補間することが出来る。



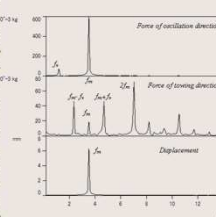
実験データの補間結果の一例 (Svn-C_{LD})

ライザー管の流力振動評価
流体力データベースの一例

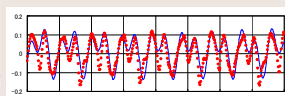
レイノルズ 5×10^5
(減衰係数) (付加質量係数)

変動抗力が定常流中の渦放出周波数から受ける変調と共振現象(星野)

Block diagram of a feedback system. The input signal is $f_n(t) = A_n \cos(\omega_n t + \theta)$. This signal is fed into a summing junction (represented by a circle with a plus sign). The output of the summing junction is $f(t) = A_t \left[1 + \frac{A_n}{A_t} \cos(\omega_n t + \theta) \right] \cos(\omega_t t + \phi)$. This output signal is fed back through a block labeled with a multiplication symbol ($\times$) to the summing junction.



※ 流れと直角方向の強制加振周波数 f_m に対して静止円柱の渦放出周波数 f_v の和形(f_m+f_v)、差形(f_m-f_v)の結合調波振動(共振)が現れている。



ご清聴ありがとうございました。