

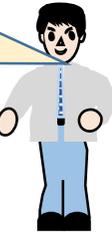
なるほど！シリーズ8

振動の揺れ具合を左右する減衰比とは？

「これだけ知っていれば ほぼ大丈夫」



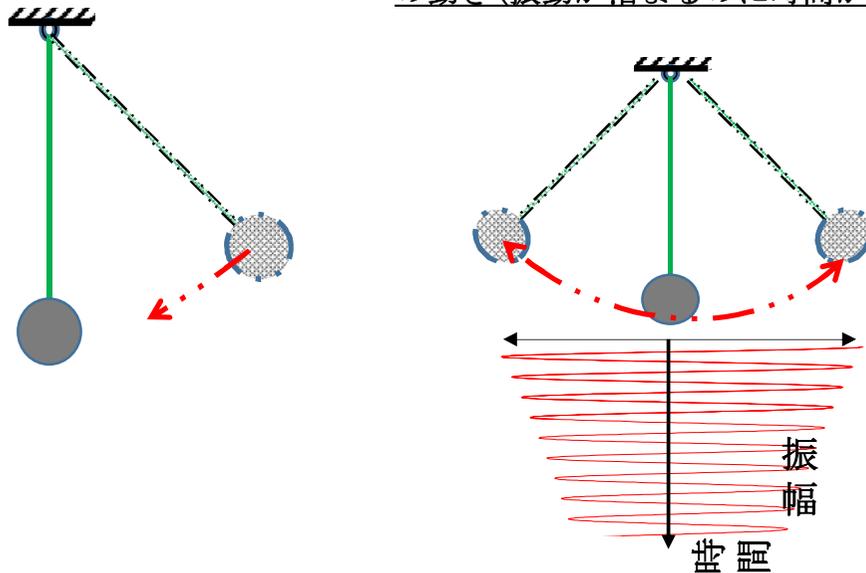
振動問題では固有振動数、減衰、振動モードが重要なパラメータだと言われています。固有振動数は共振現象の回避対策の面から、振動モードは力が作用した結果、どのような変位形状や応力形状で振動しているのかを把握し、振幅低減対策の面(どの部位を補強するかなど)から重要な要素です。一方、減衰比が振動問題で重要なのはなぜでしょうか。



減衰比は振動の大きさ(特に共振現象の振幅を支配する要素)や、振動のし易さ、収まり易さを表す指標です。図1は振り子の振動例として手で一定の初期変位を与え、その状態から急に手を離れた場合の減衰比が1%と5%に対する振動変位の時間経過波形を示します。減衰比が大きいと振動はすぐに収まりますが減衰比が小さいと振動は長く続きます。



減衰比1%の場合に対する錘を離れたあとの錘の動き(振動が治まるのに時間がかかる)



減衰比05%の場合に対する錘を離れたあとの錘の動き(すぐに振動が収まる)

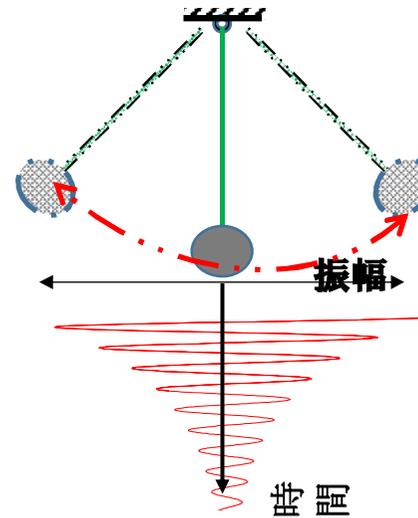
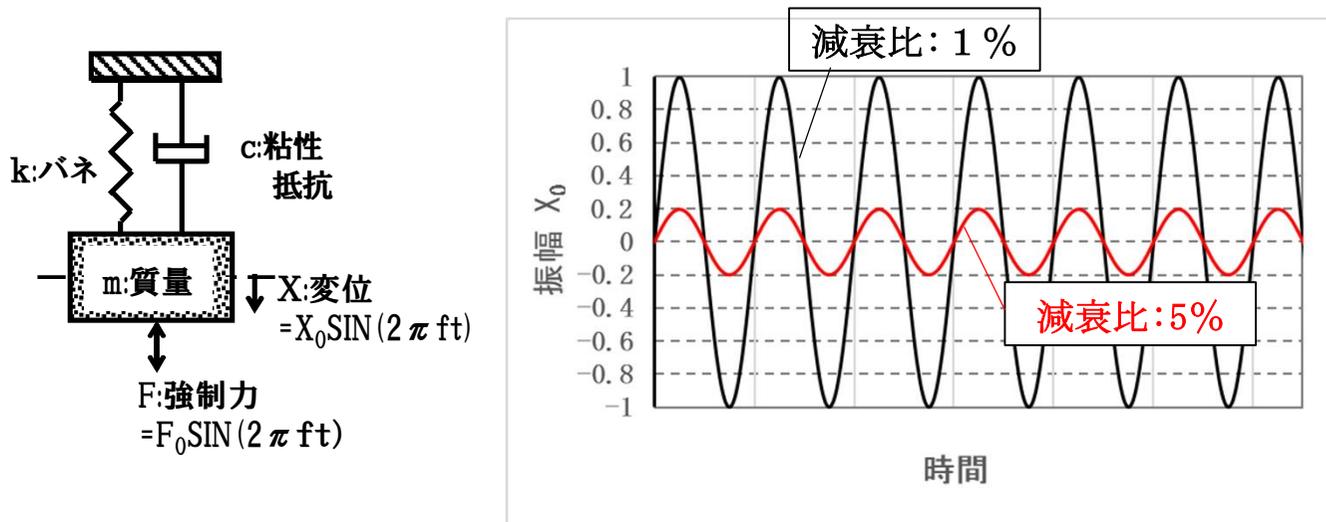


図1 減衰比と自由振動の関係

また、図2はバネ、ダンパー、質量からなる振動系が強制力により共振しているとした場合の減衰比1%と5%の系に対する共振振幅を比較して示しています。明らかに減衰比が大きい方が振動振幅は小さく、この場合1%の振幅は5%の時の振幅に比べ5倍になっている事が判ります。なお、共振振幅と減衰比の関係を表す式を下記に示します。このように、減衰比は振動振幅に大きな影響を及ぼしますが、固有振動数に対しては実用の減衰範囲内ではほとんど影響しません(図3参考)。



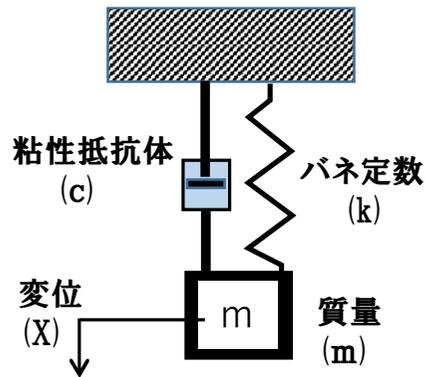
一自由度系に力一定の加振力が作用し、共振した時の振幅の式

$$\text{共振時の振幅} = X_R = \frac{1}{2h} X_0$$

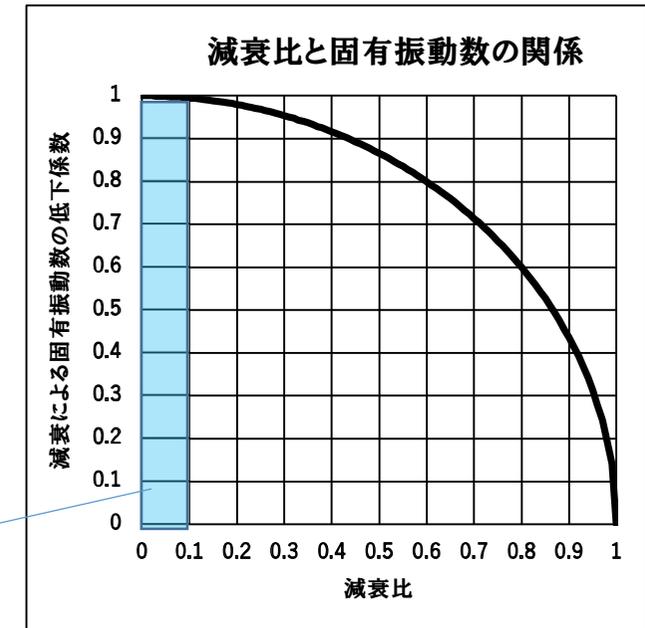
h : 減衰比 X_0 : 静的変位 $= (F_0/k)$
 F_0 : 強制力の大きさ k : バネ定数

図2 減衰比と共振振幅の関係

参考：質量－粘性－バネ系の固有振動数と減衰比の関係



粘性がない場合 (c=0) の式	粘性がある場合の式
固有振動数: f_0 (Hz)	固有振動数: f_d (Hz)
$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$f_d = \sqrt{1 - h^2} \times f_0$ $h : \text{減衰比} = c / 2m\omega_0$



日常的には減衰無と有の固有振動数を同じ値として取り扱うことが多いです。その理由はごく一般的な構造物や配管などでは減衰比は10% (h=0.1) 以下であり、この場合でも減衰比による振動数の低下は0.5%程度以下になるからです。

図3 減衰比と固有振動数の関係図

図2は共振時に対する振幅に関して述べましたが、非共振状態に対する振幅と振動数の関係式は下式で与えられ、図4に示すような共振曲線になります。

減衰比が振動振幅に及ぼす影響は共振時において最も大きく、強制振動数/固有振動数の比率が共振点の±10%範囲内では減衰比が振幅に及ぼす影響は小さくなり、共振点の±10%範囲外ではその影響はほとんどない。



$$X_0 = (F_0 / k) * \sqrt{\frac{1}{\{1 - (f/f_0)^2\}^2 + \{2h(f/f_0)\}^2}}$$

f: 強制力振動数
 f₀: 固有振動数
 F₀: 強制力の大きさ
 k: バネ定数
 h: 減衰比 = c / (2√(mk))

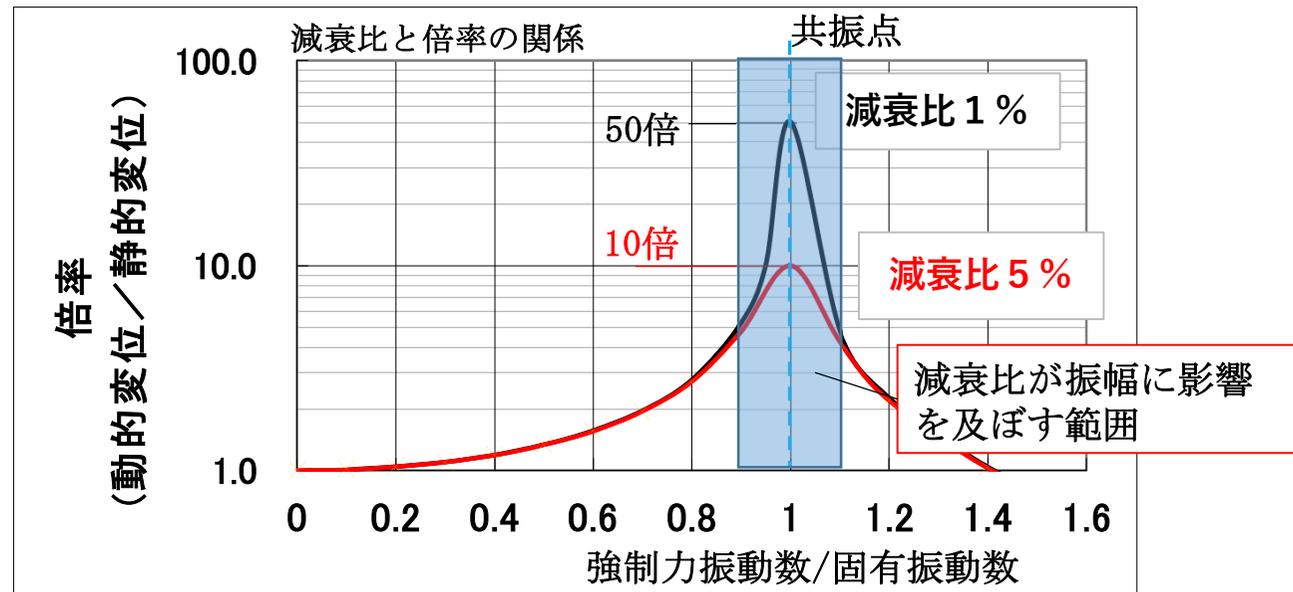
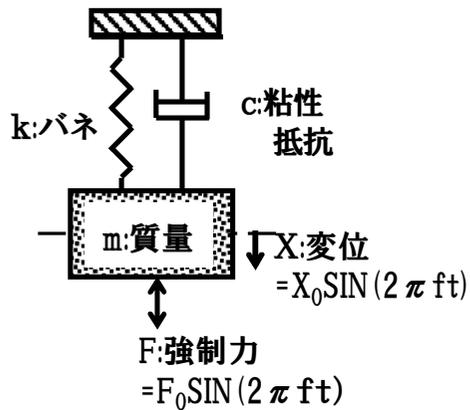


図4 一自由度系の力一定加振に対する共振曲線と減衰比の関係

減衰比は振動の大きさや振動のし難さ、収まり易さに影響を及ぼす減衰比ですが、シリーズ7でも述べたように、減衰要素(材料減衰、構造減衰、摩擦減衰など)に依存するため、実際の構造物がどれ位の減衰比を持っているか、実際のものを対象に振動試験により求めることが必要になります。

しかしながら、初期設計段階において、すべての物に対し試験するのは現実的ではありません。そこで、現実的には類似構造物に対し計測された減衰比のばらつきを考慮し、安全側となるような減衰比(データ中の最小減衰比など)を用い、健全性を検討することになります。

次ページ以降に機器・配管関係の構造物に関する減衰比の計測データ資料を示します。

計測データを見ても判る様に減衰比の値は非常にばらつきます。

理由は前頁に述べた要因の他に減衰比を求める方法によっても余程注意して計測しないと誤差が大きくなります。

一般的に減衰比は打撃試験後の自由振動の時刻歴波形から求める方法と、加振試験で得られた共振曲線からハーフパワー法によって求める方法があります。また、大型構造物では自然風や地盤の常時微動から求めることも可能です。なるほど!シリーズ1を参照して下さい。

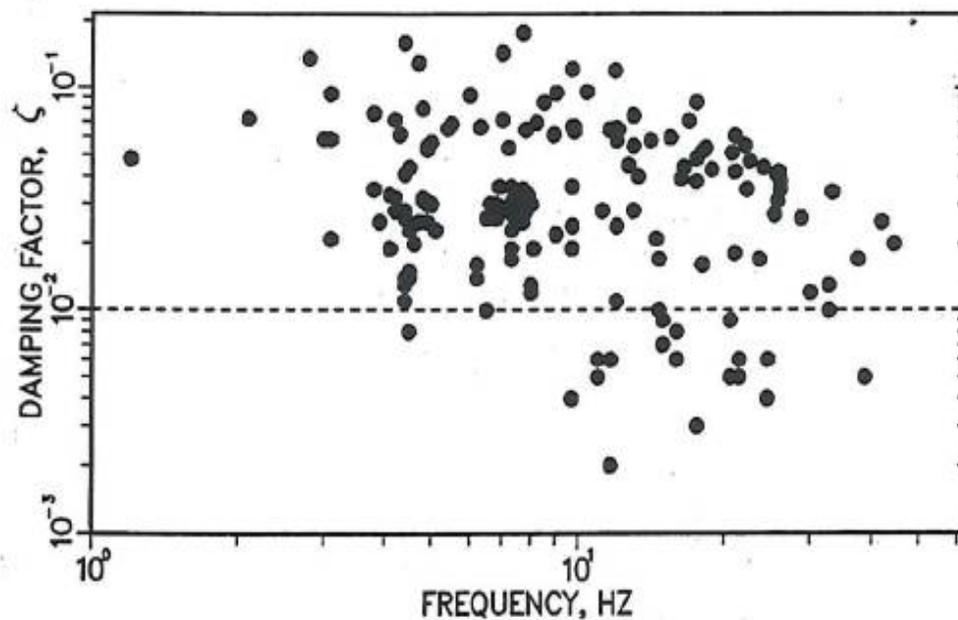


原子力発電所設備の減衰比例

対象物	減衰定数 (水平方向)
溶接構造物	1.0
ボルト及びリベット構造物	2.0
配管	0.5~2.5
空調用ダクト	2.5
ケーブルトレイ	5.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0
電気盤	4.0

(出典：原子力発電所耐震設計技術指針JEAG
4601追補版より抜粋)

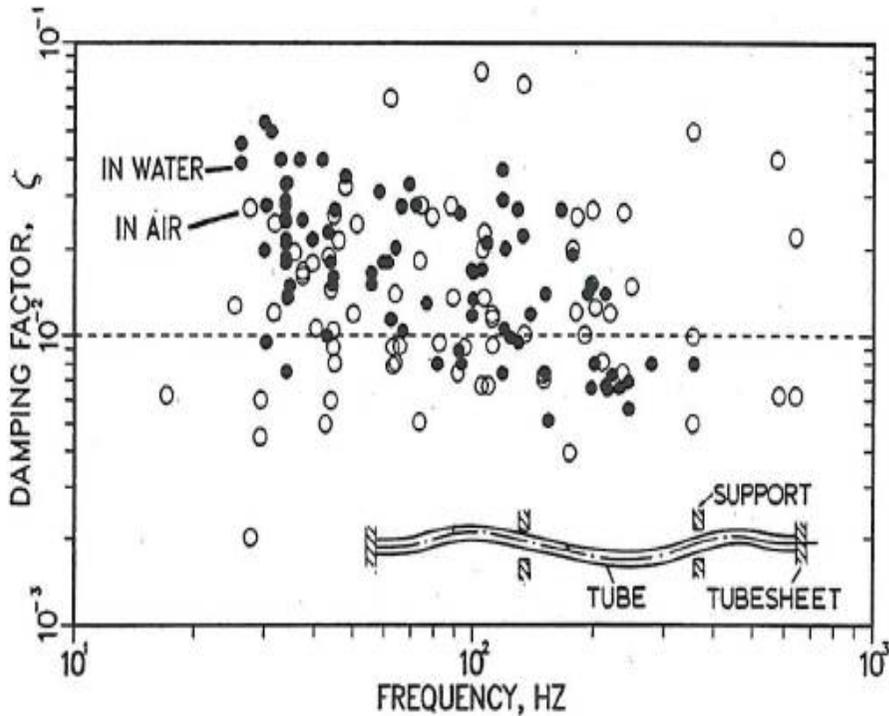
発電所配管設備の減衰比例



(出典：“Piping System Damping Evaluation,” by Hadjian, A. H., and H. T. Tang(1988))

上図では地震解析に適用する発電所の配管の広範な減衰データを収集した。調査に用いた配管は直径25~450mmで、周波数との対応をプロットしている。

蒸気発生器チューブの減衰比例



(出典: "Damping of Multi-span Heat Exchanger Tubes" by Pettigrew, M. J. (1986))

低振幅振動に対するチューブの減衰比例

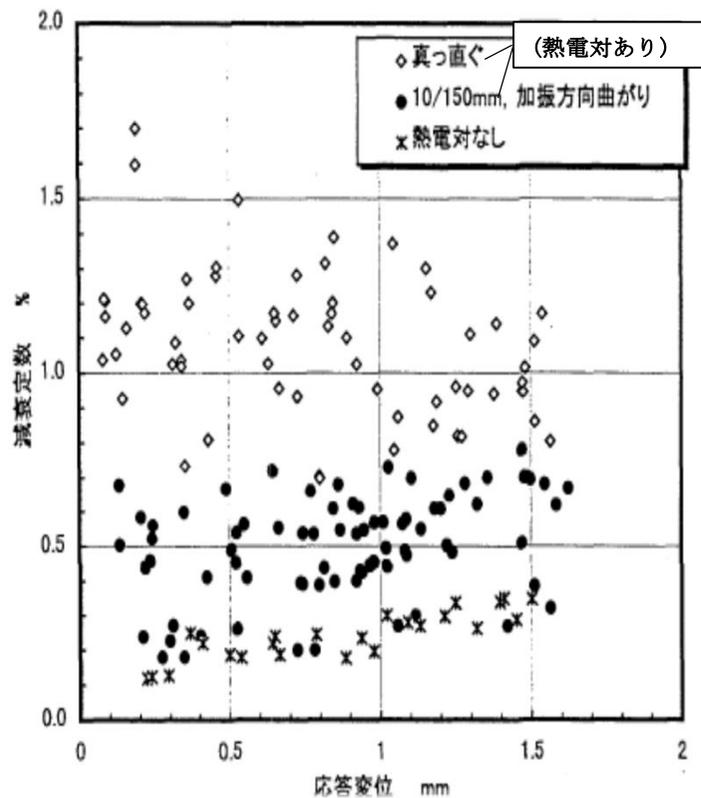
	チューブ内の流体	最小	平均	最大
バッフルプレートの大きすぎる穴を通るマルチスパンチューブ	空気または密度の低いガス	0.008	0.012	0.021
	水または液体	0.01	0.017	0.027
端が溶接または固定されたシングルスパンチューブ	空気または密度の低いガス	0.0005	0.002	0.005
	水または液体	$0.0005 + \zeta_f$	$0.002 + \zeta_f$	$0.005 + \zeta_f$

※ $\zeta_f = \frac{\pi \rho D^2}{2m} \left(\frac{\nu}{\pi f D} \right)^{\frac{1}{2}}$: 液体の負荷減衰

ρ =流体の密度 D=チューブの外径、 ν =流体の動粘度、f=チューブの固有振動数(Hz)、
 m =内部質量や付加質量を含む単位長さあたりのチューブの質量
 上表は、外径12.7mm~38.1mm、支持体間が254mm~1524mm、
 支持体の厚みが12.7mm~38.1mmの金属製のチューブに最も当てはまる。

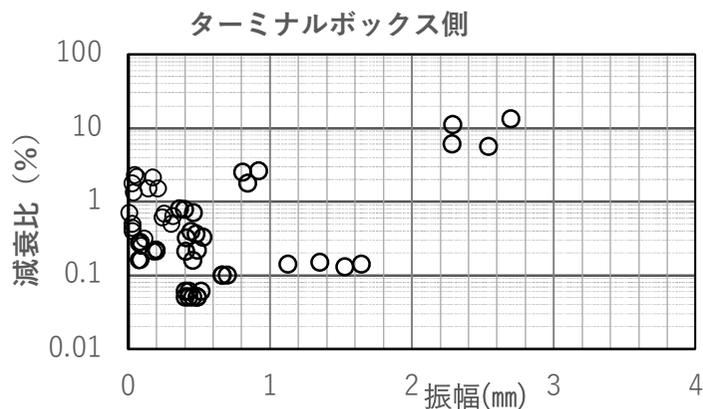
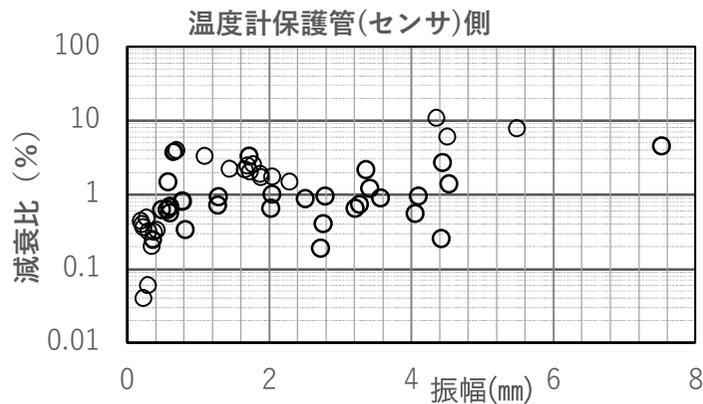
(出典: "VORTEX-INDUCED VIBRATION AND DANPING OF THERMOWELLS" by R. D. Blevins 他 ASME 1996))

温度計保護管の減衰比例

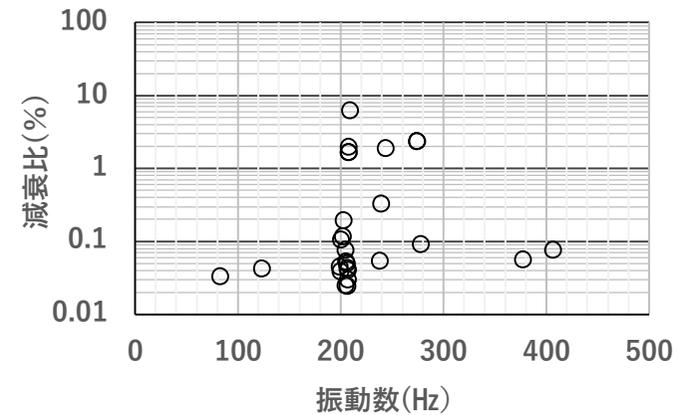


温度計の減衰特性に及ぼす熱電対の影響

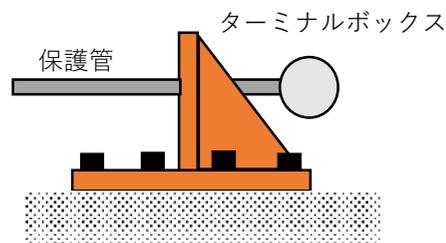
出展 動燃報告書 PNC-TN--9410-97-017
 注釈一部追加



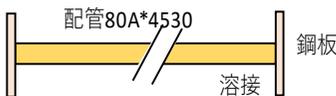
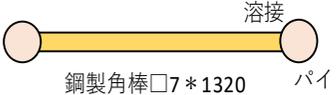
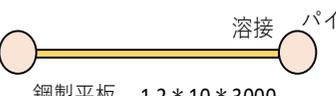
保護管振動数と減衰比
 (フランジ+ガスケット取付)



出展: VORTEX-INDUCED VIBRATION
 AND DAMPING OF THERMOWELLS
 R.D.Blevins 他



要素部材の減衰比例

供試体形状他	減衰比(h%)		備考
	一次	二次	
	0.24~0.61 平均値0.383	0.1~0.72 平均値0.406	
	0.05~0.09	0.074	
	0.02~0.06 平均値0.0325	0.03~0.04 平均値0.035	
	0.704~0.921 平均値0.812	0.076~0.108 平均値0.088	張力 150N
	0.39~0.56 平均値0.485	0.074~0.085 平均値 0.08	張力 1000N

素材の減衰比例

材質	最小	平均	最大
アルミニウム(6063-T6)	0.0005	0.001	0.005
真鍮	0.002	0.003	0.004
純鉄	0.001	0.005	0.01
SAE1020 鉄	0.0004	0.001	0.002
純チタン	0.001	0.005	0.05
天然ゴム	0.01	0.05	0.08
クロロプレンゴム	0.03	0.05	0.08
ブチルゴム	0.05	0.2	0.50
木(シトカトウヒ)	-	0.006	-
低合金鋼	0.0036	-	0.0025
コンクリート	0.0018	-	0.0026
プレストレスト・コンクリート梁	0.005	0.01	0.02
石膏ボードパーティション	0.07	0.14	0.40

(出典: "Damping of Materials and Members in Structural Mechanics by Lazan(1968),
 "Properties of Rubber" by Frye(1988),
 "Wood" by Zeeuw, C. H.(1967),
 "Estimating Damping of Real Structures" by Raggett, J. D.(1975))

参考1：振動減衰要素試験による摩擦減衰特性について

摩擦による減衰波形の特徴は図5の波形例に示す如く、振幅は時間に対し線形(直線的)に減少し、減衰比は

- ・ 押付力が大きいほど減衰比も大きくなる。
- ・ 振幅が大きくなると減衰比は小さくなる。

傾向を示す。

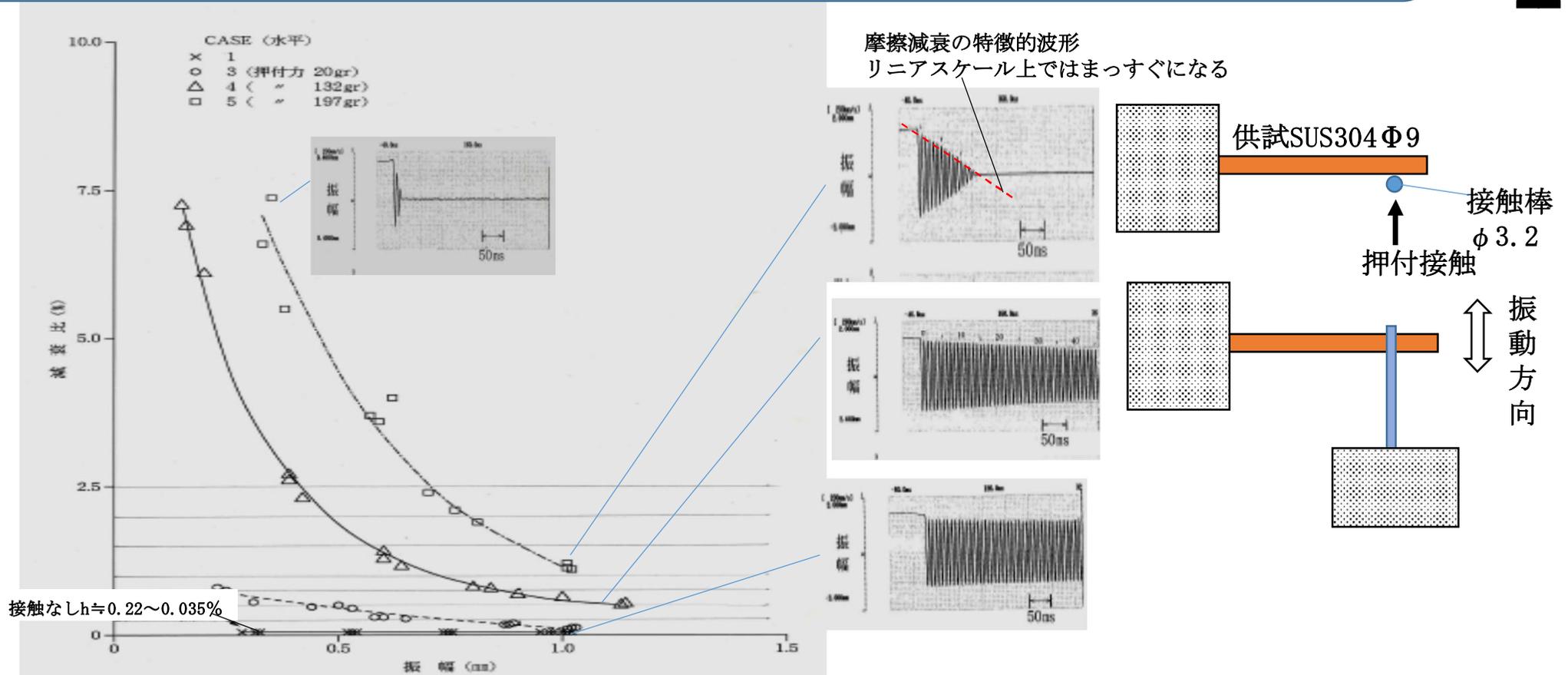


図5 摩擦減衰：振幅および押付力と減衰比の関係

参考2：振動減衰要素試験による弾性体間の衝突減衰特性について

衝突による減衰波形の特徴は図6の波形例に示す如く、衝突を繰り返す間は振幅が時間に対し制限され、減衰比は
 ・弾性体間の初期ギャップが小さい場合、ギャップが大きい場合に比較し、減衰比は大きくなる。
 傾向を示す。

なお、衝突や接触のない場合の振動振幅は時間に対しはほぼ指数関数的に減少する。

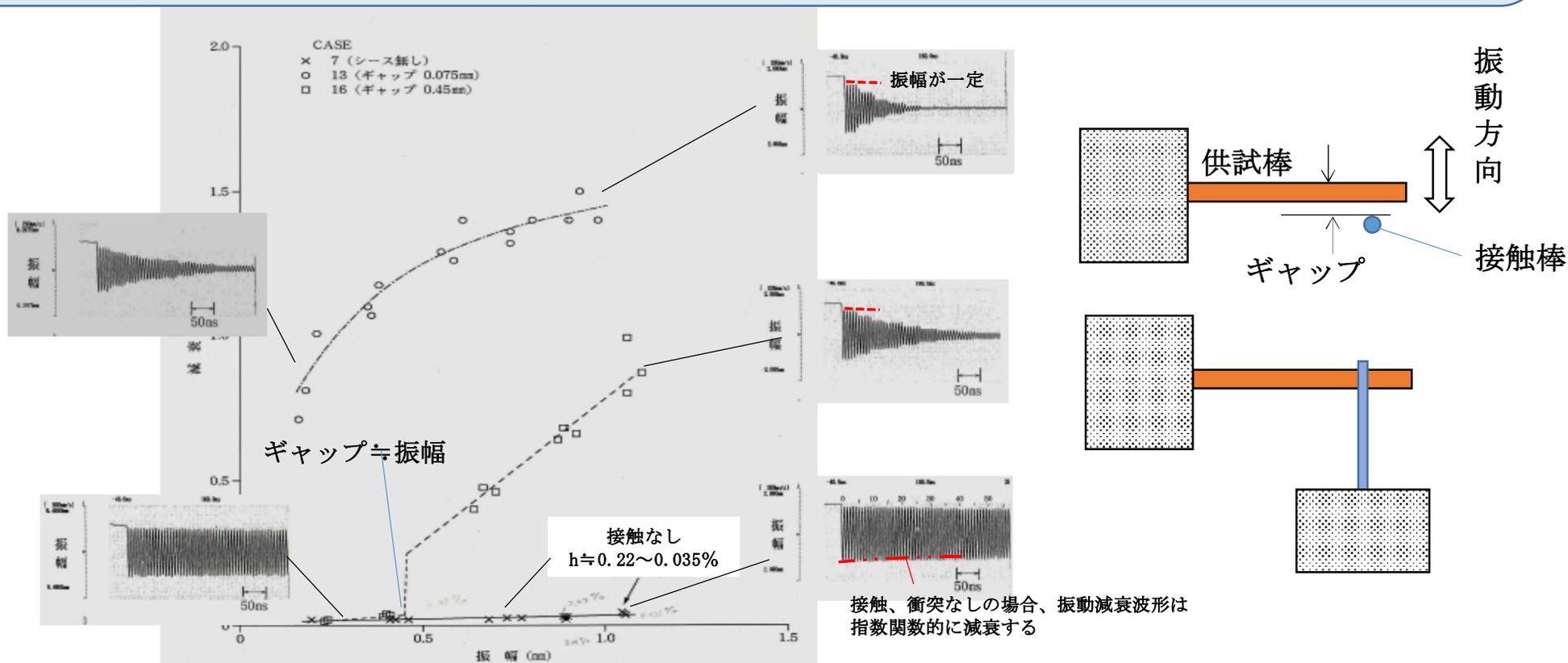


図6 衝突減衰：振幅およびギャップと減衰比の関係

参考3：付加質量と減衰比の関係について

試験対象物に質量が付加された場合の付加質量と減衰比の関係を図7に示します。

質量の増加に伴い減衰比は小さくなります。

なぜならば、減衰比(h)= $\frac{\text{粘性係数}}{2\sqrt{mk}}$ と定義されているため、粘性係数とバネ定数 k が一定とすれば減衰比は質量 m の平方根に反比例することになります

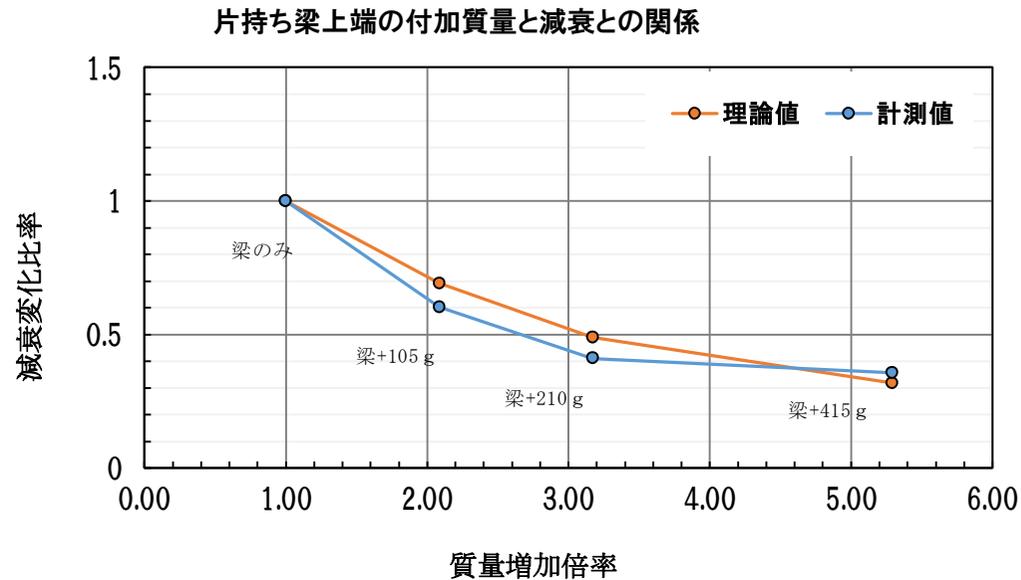
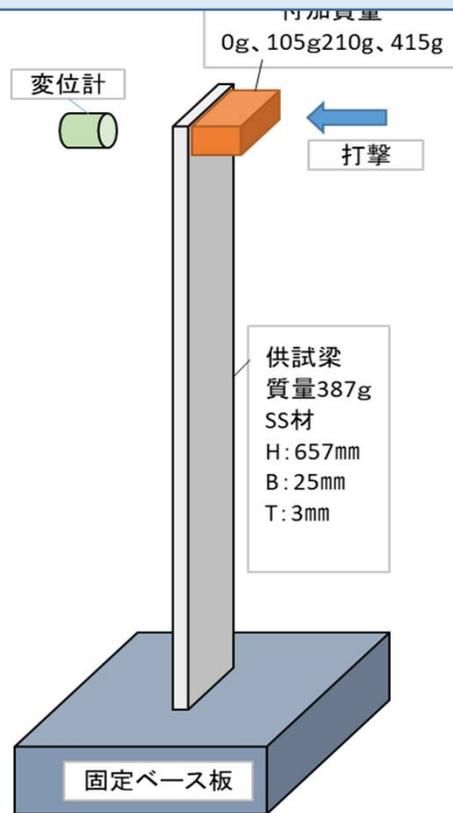


図7 付加質量と減衰比の関係