

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

# 温度計ウェルに作用する 流体力と乱流振動応答の評価

区分変更	
変更後資料番号	PNCTN9420 96-049
決議年月日	平成10年3月26日

1996年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

## 温度計ウェルに作用する流体力と乱流振動応答の評価

原因究明対策班 原因解析・試験グループ\*

### 要 旨

本報告書は、1995年12月8日に発生した「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明作業の一環として実施した、温度計ウェルに作用する流体力と乱流振動応答の評価の結果をまとめたものである。

---

\* 山口 彰 (大洗工学センター 基盤技術開発部 熱流体技術開発室)

## 温度計ウェルに作用する流体力と乱流振動応答の評価

### 1. 温度計ウェルで考慮すべき荷重

流れの中に円管もしくは円管群がある場合に、円管を振動させる原因となる力は、以下の3種類である。

- ① 流体圧力の変動による力（乱流振動）
- ② 渦放出による力（渦振動）
- ③ 円管と流れの流力弾性相互作用による力（流力弾性振動）

流れが周期的に変動する場合（ポンプの脈動等）に、その周期が構造の固有振動数に近いと共振が生じるが、当該温度計では有意な周期的な流速変動はないのでこれは考慮する必要はない。

流れ方向と、単円管か管群かによって作用する力は異なる。実験的に得られている知見を表にまとめれば以下の通りになる。[1]

		(1) 乱流振動	(2) 渦放出	(3) 流力弾性相互作用
単円管	交流	○	○	
	平行流	○		
円管群	交流	第一列	○	○
		二列以後	○	
	平行流	○		

流力弾性相互作用は、密に配置された管群において発生する流体力による構造不安定振動現象である。すなわち、それぞれの管の動きが、流体力及び他の管の動きに影響を及ぼすことによって発生する現象であり、単一円管では問題とならない。

従って、もんじゅの温度計ウェルでは、流れの乱れにともなう圧力変動による振動と、渦放出にともなう圧力変動による振動を検討する必要がある。

渦放出にともなう圧力変動による振動については、別途、詳細な検討を行っているの  
で、ここでは、乱流振動による変位応答について検討を行う。

## 2. 乱流励振力のパワースペクトル

流速 $U$ の直交流中にある温度計ウエルの表面に作用する力は、流速に依存する力と加速  
度に比例する力であり、ウエル表面における圧力 $p$ は次式で与えられる。

$$p = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D + \frac{1}{d} \rho A \dot{U} + \frac{1}{d} C_I \rho A (\dot{U} - \ddot{x}) \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は流体密度、 $U$ は主流流速、 $\dot{U}$ は流速の時間変化率（加速度）、 $A$ は温度計  
ウエルの断面積、 $\ddot{x}$ はウエルの加速度、 $C_I$ は慣性係数であり単円柱では1.0である。 $\rho A$ は  
ウエルによって排除される単位長さあたりの流体質量である。(1)式の右辺第一項は抗  
力、第二項は流体の加速度（圧力勾配）によって生じる浮力、第三項は排除流体質量によ  
る慣性項である。 $\ddot{x}$ を無視して $C_I=1$ とすれば、

$$p = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D + \frac{2}{d} \rho A \dot{U} \quad (2)$$

を得る。

ここで主流流速を一定値成分と変動成分に分離する。

$$U = \bar{U} + u_m \sin \omega t \quad (3)$$

流速の変動成分は一定値成分に比べて十分に小さいとすれば、(3)式を(2)式に代入したと  
きに $u_m^2$ に関する項は省略できる。従って次式を得る。

$$p = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_D + \rho u_m \bar{U} C_D \sin \omega t + \frac{2 \rho A u_m \omega}{d} \cos \omega t \quad (4)$$

固有振動数が比較的到低い構造では右辺第3項も無視できるが、温度計ウエルの固有振動  
数はおよそ260 Hzであり、右辺第2項と第3項の比 $\bar{U} C_D d / A \omega$ は0.2程度となるので第3項  
を省略できない。

圧力の一定値成分を $\bar{p}$ とすれば、時間変動成分は

$$p - \bar{p} = \rho u_m \bar{U} C_D \sin \omega t + \frac{\rho A u_m \omega}{d} \cos \omega t \quad (5)$$

で表される。従って、変動成分と一定値成分の比の二乗は

$$\frac{(p-\bar{p})^2}{\bar{p}^2} = 4 \left( \frac{u_m}{\bar{U}} \sin \omega t + \frac{2A u_m \omega}{C_D \bar{U}^2 d} \cos \omega t \right)^2 = 4 \left\{ \left( \frac{1}{\bar{U}} \right)^2 + \left( \frac{2A \omega}{C_D \bar{U}^2 d} \right)^2 \right\} u_m^2 \sin^2 (\omega t + \alpha) \quad (6)$$

である。ここで

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{C_D \bar{U} d}{2A \omega} \quad (7)$$

である。流速の変動は定常過程と考えられ、時間軸の原点に依存しないので位相を考慮する必要はない。そこで、 $u = u_m \sin (\omega t + \alpha)$ とおけば、

$$\frac{(p-\bar{p})^2}{\bar{p}^2} = 4 \left\{ \left( \frac{1}{\bar{U}} \right)^2 + \left( \frac{2A \omega}{C_D \bar{U}^2 d} \right)^2 \right\} u^2 \quad (8)$$

により、流速変動と圧力変動が関連づけられる。従って、圧力のパワースペクトルと流速のパワースペクトルの関係式

$$\frac{1}{\bar{p}^2} S_p(f, z) = 4 \left\{ \left( \frac{1}{\bar{U}} \right)^2 + \left( \frac{2A \omega}{C_D \bar{U}^2 d} \right)^2 \right\} S_u(f, z) \quad (9)$$

が導かれる。ここで  $z$  はウエルの長手方向の座標である。従って、圧力のパワースペクトルは次式で計算される。

$$S_p(f, z) = \rho^2 \left\{ \bar{U}^2 C_D^2 + \frac{4A^2 \omega^2}{d^2} \right\} S_u(f, z) \quad (10)$$

規格化して無次元化された流速のパワースペクトル形状を  $G(\zeta)$  とする。

$$\int_0^{\infty} G(\zeta) d\zeta = 1 \quad (11)$$

ここで、 $f$  を周波数、 $St$  をストローハル数として

$$\zeta = \frac{fd}{St \bar{U}} \quad (12)$$

である。ここで  $\overline{u^2}$  を流速の変動成分の二乗平均

$$\overline{u^2} = \int_0^{\infty} S_u(f, z) df \quad (13)$$

とすれば、ストローハル数が一定ならば、流速のパワースペクトルは

$$S_u(f, z) = \overline{u^2} \frac{d}{St \bar{U}} G(\zeta) \quad (14)$$

によって表される。

圧力のパワースペクトルと単位長さあたりの流体力のパワースペクトル  $G_F(f)$  の関係は

$$G_F(f) = S_p(f, z) d^2 \quad (15)$$

であるので、(10)式と(14)式を用いれば、規格化された流速の無次元スペクトル形状と流体力のパワースペクトルの関係

$$G_F(f) = \{U^2 C_D^2 d^2 + 4A^2 \omega^2\} \rho^2 \overline{u^2} \frac{d}{StU} G(\zeta) \quad (16)$$

を得る。

### 3. 乱流振動による変位応答

乱流による変位応答は圧力変動に関しては、ASMEコード[2]に減衰率が小さい場合の平均二乗応答の評価式が以下のように提示されている。乱流振動による平均二乗応答変位は

$$\underline{y^2}(x) = \sum_j \frac{L G_F(f_j) \phi_j^2(x)}{64\pi^3 M_j^2 f_j^3 \xi_j} J_{jj}^2 \quad (17)$$

により計算される。ここで、

$L$ : 円柱の長さ

$G_F(f_j)$ : 単位長さあたりの流体力の片側パワースペクトル密度であり、 $\left(\frac{N}{m}\right)^2 \frac{1}{Hz}$ の次元を持つ。

$\phi_j(x)$ : 直交条件  $\int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx = \delta_{ij}$  を満足するモード形状。ここで  $\delta_{ij}$  はクロネッカのデルタ記号である。

$M_j$ : 単位長さあたりの一般化質量であり、 $\int_0^L m(x) \phi_i(x) \phi_j(x) dx = M_j \delta_{ij}$  により計算される。 $m(x)$  は一定であるので、単位長さあたりの一般化質量と質量とは一致する。

$f_j$ :  $j$ 次振動モードの固有振動数

$\xi_j$ :  $j$ 次振動モードの減衰比

$J_{jj}^2$ : 規格化相関長さであり、 $J^2 = \frac{l_c}{L}$  で定義される。乱流振動では  $l_c$  は直径  $d$  の数倍程度と考えられる。

以下では、(17)式の各変数を定量化して変位応答の評価する。

### 3.1 モード形状

モード形状 $\phi_j(x)$ は、直交性を満たすように

$$\int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx = \delta_{ij} \quad (18)$$

と決められる。今、二次モード ( $i=j=2$ ) について考えれば、(18)式の右辺は1である。温度計ウエルのモード解析の結果から得られた、直交条件を満足するモード形状を図1に示す。ウエル先端においては

$$\phi(x)_{x=0} = 4.76 \quad (19)$$

$$\phi^2(x)_{x=0} = 22.6 \quad (20)$$

である。

### 3.2 減衰比

減衰比 $\zeta_j$ としては、構造減衰と流体減衰の合計を用いる必要がある。構造減衰は、

ウエルの減衰測定試験結果を検討した上で、熱電対シースが挿入されている状態での下限値を与えると考えられる値 0.005 (0.5 %)とする。これは、シースに曲がりがある場合に相当する。流体減衰は

$$\zeta_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho d^2}{m} \right) \left( \frac{U}{\omega_N d} \right) C_D \quad (21)$$

で与えられる[3]。ここで固有振動数 $\omega_N$ はウエルの固有角振動数である。

### 3.3 固有振動数

ウエルの固有振動数については、流体力による振動を評価する上で重要となる2次モードのみを考慮するものとし、100%流量 (流速 5 m/s) - ナトリウム温度 200°C 条件では 257 Hz、40%流量 (流速 2.2 m/s) - ナトリウム温度 485°C 条件では 241 Hzとする。

### 3.4 規格化相関長さ



規格化相関長さ (Joint acceptance) については、 $J_{jj}^2 \leq 1.0$  の不等式が成り立つ。Re数がおおよそ  $7 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$  の範囲 (もんじゅ 2次系の 40% ~ 100% 流量条件に相当) では、揚力方向の相関長さはウェル直径の 3 倍から 7 倍であるとの知見がある[2]。規格化相関長さの定義式 ( $J^2 = \frac{l_c}{L}$ ) において、 $L=150 \text{ mm}$ 、 $d=10 \text{ mm}$  である。上記知見を参考として、

$l_c = 3d$  及び  $l_c = 7d$  を規格化相関長さの定義式に代入すれば、それぞれ、 $J^2 = 0.45$  及び  $0.19$  となる。

### 3.5 流体力と圧力のパワースペクトル

流速の規格化スペクトル形状が決定されれば、(16)式より流体力のパワースペクトルを評価できる。流速の規格化スペクトル形状は実験や数値実験により評価されるべきであるが、ここでは文献を参考して決定する。例えば、100% 流量条件では、温度計ウェルのストローハル数に相当する周波数 (ストローハル周波数) はおおよそ 100Hz、温度計ウェルの固有振動数はおおよそ 250Hz であるので、ストローハル周波数の 2.5 倍の周波数における流速の規格化スペクトル密度によりウェルの乱流振動応答を評価できる。

単管にて測定された流速のスペクトル形状の例[1]を図 2 に示す。レイノルズ数は 91,000 と 140,000 であり、当該温度計ウェルのレイノルズ数と同程度である。単管の場合には、ストローハル数 (約 0.2) に相当する周波数に強いピークをもち、それよりも高周波数側では急速に減衰することが特徴である。図 2 からストローハル周波数の 2.5 倍の周波数におけるスペクトル密度は、ストローハル周波数におけるスペクトル密度に比べて 100 分の 1 以下となっている。

図 3 に、管束における乱流速度のパワースペクトルの測定例[3]を示す。流れ方向のピッチと直径比  $L/D$  は 1.5、主流直交方向ピッチと直径比  $T/D$  は 1.3 である。横軸は周波数を渦放出の周波数 (ストローハル周波数) で除した量である。 $\zeta = fD / S \bar{U} = 1.0$  のときにスペクトル密度はピーク値をとり、これはストローハル周波数に対応する。図 2 の単管の場合と比較すると、図 3 は幅の広いブロードなスペクトル形状をしている。管の配列ピッチが直径の 3 倍を越えると、渦放出振動数に強いピークを持つ狭帯域のスペクトルとなるとともに、渦放出振動数以上では減衰することが知られている。高周波数における減衰が単管の場合に比べて顕著でない理由は、隣接する円柱との相互作用によるものと説明できる。

以上から、図3の管束のスペクトル形状を用いれば、温度計ウエルの乱流振動応答は、保守的に評価されると考えられる。そこで、簡便かつ保守的な方法として、管束で測定された図3のスペクトル形状を用いることとする。当該温度計ウエルに相当するレイノルズ数範囲では、ストローハル数は約0.2であるので、温度計ウエルの固有振動数を用いると(12)式で定義される $\zeta$ は100%流量条件で2.6、40%流量条件で5.5と計算される。従って、ウエルの固有振動数における規格化スペクトル密度は、100%流量-200℃温度条件では0.05、40%流量-485℃温度条件では0.03と、図3から読みとれる。

#### 4 乱流振動による応答変位と不確定幅

以上の乱流振動解析に使用するパラメータを表1にまとめる。それを、(17)式に代入して200℃-100%流量条件及び485℃-40%流量条件でのウエル先端での二乗平均応答 $y^2(x)$ を求めた。温度計ウエル位置における乱流強度 $Tu$

$$Tu = \frac{\sqrt{u^2}}{U} \quad (22)$$

は不確定であるので、これをパラメータとして変位応答を計算する。

乱流強度を横軸として、100%流量条件と40%流量条件に関して求めた変位振幅の二乗平均値(RMS)をそれぞれ図4と図5に示す。ランダム振動の振幅はレイリー分布に従う[2]ので、(17)式の平方根を $\sqrt{2}$ 倍すれば平均変位振幅を求めることができる。変位振幅のRMSは、乱流強度が10%であるとしても100%流量で0.11 mmから0.17 mm、40%流量で0.07 mmから0.11 mm程度である。この結果は、これまでに実施した流力振動解析から得られている、100%流量条件における抗力方向の自励的振動の変位振幅(0.9 mm)を十分に下回っている。また、Chen[4]は、無次元変位振幅がウエル直径の1から2%(変位振幅のRMSにすれば0.07 mmから0.14 mm)以下であれば自励的振動は発生せずランダム振動となり、相関長さはウエル直径の数倍になると述べている。このランダム振動と考えてさしつかえない変位振幅は、ここに求めた変位応答と同程度となっている。

#### 5. まとめ

乱流励振による変位応答を定量評価した結果、別途実施している流力振動解析や水流動試験から得られる渦放出にともなう振動による変位振幅と比較して十分に小さな値となることが示された。従って、乱流振動は、ウェル破損の要因となり得ないと考えられる。

## 6. 参考文献

- [1] Zukauskas, A., et al., Fluid Dynamics and Flow-Induced Vibrations of Tube Banks, Hemisphere Publishing Corp. (1988).
- [2] ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec.III Division 1 - Appendices N-1300
- [3] Blevins, R. D., Flow- Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold Co. (1977)
- [4] S-S. Chen, Flow Induced Vibration of Circular Cylindrical Structures, Hemisphere Publishing Corp. (1987)

表1 温度計ウェル乱流振動解析の各パラメータ

	記号	100%流量条件	40%流量条件
ナトリウム温度	$T$	200 °C	485 °C
レイノルズ数	$Re$	$1.0 \times 10^5$	$7.4 \times 10^4$
円柱の長さ	$L$	0.154 m	0.154 m
ナトリウム密度	$\rho$	904 kg/m <sup>3</sup>	836 kg/m <sup>3</sup>
ウェル直径	$d$	0.01 m	0.01 m
流速	$\bar{U}$	5.0 m/s	2.2 m/s
単位長さあたり構造質量	$m_s$	0.574 kg	0.574 kg
単位長さあたり排除流体質量	$m_f$	0.071 kg	0.066 kg
単位長さあたり合計質量	$m_t$	0.645 kg	0.640 kg
単位長さあたりの一般化質量	$M$	0.645 kg	0.640 kg
固有振動数(Na中)	$f$	257 Hz	241 Hz
抗力係数	$C_D$	1.0	1.0
減衰比 (構造減衰)	$\xi_s$	0.005	0.005
減衰比 (流体減衰)	$\xi_f$	0.024	0.011
減衰比 (合計)	$\xi$	0.029	0.016
モード形状	$\phi^2$	22.6	22.6
規格化相関長さ	$J^2$	0.45	0.45
乱流流速スペクトル密度	$G(\zeta)$	0.05	0.05

表2 解析の不確定パラメータ

	変数	考慮した範囲
乱流強度	$T_u$	0.0 ~ 0.1
規格化相関長さ	$J^2$	0.19 ~ 0.45

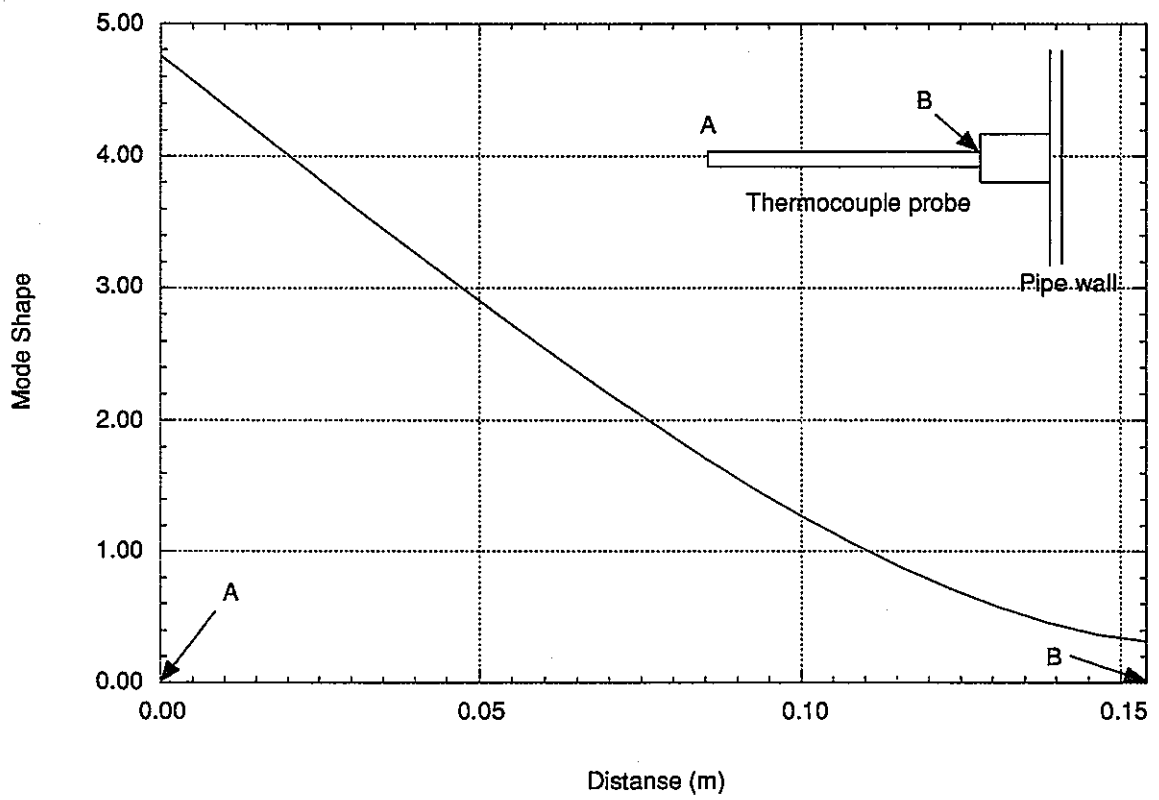


図1 温度計ウェルの変形モード形状

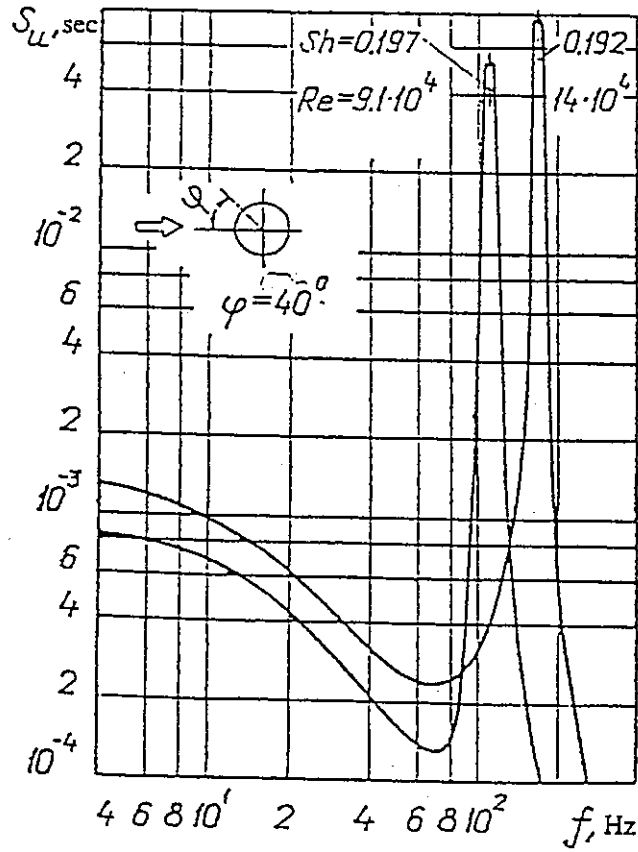


図2 単管の $\varphi=40^\circ$ における乱流流速のパワースペクトル密度[2]

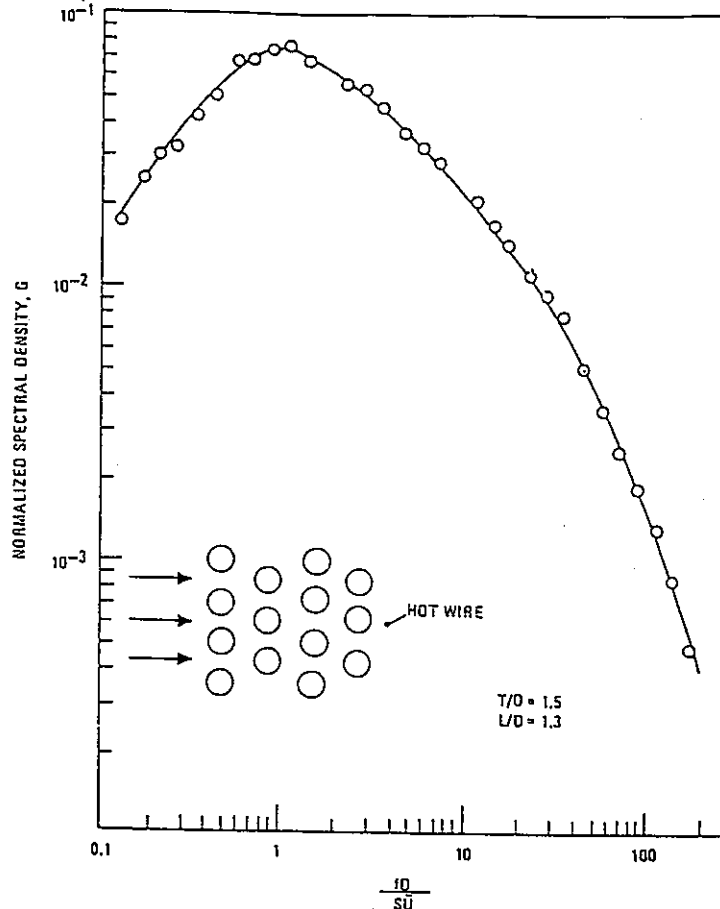


図3 管束における乱流流速のパワースペクトル密度[3]

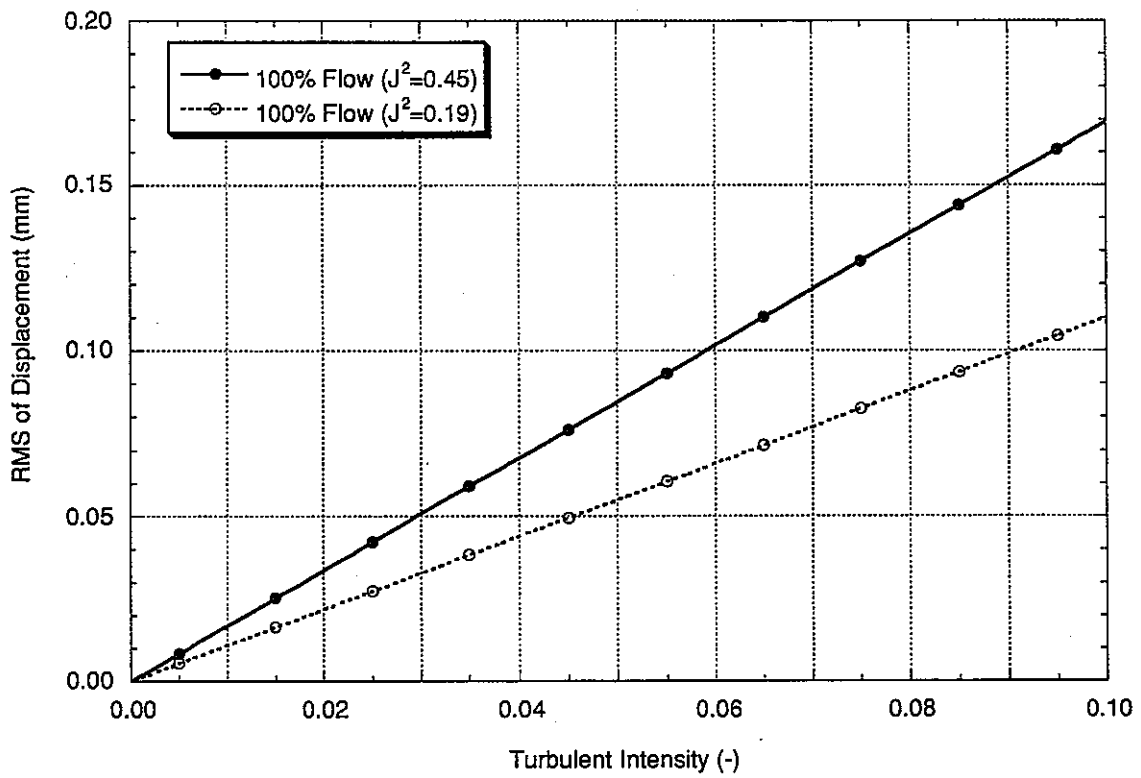


図4 100%流量時温度計ウエルの乱流振動応答

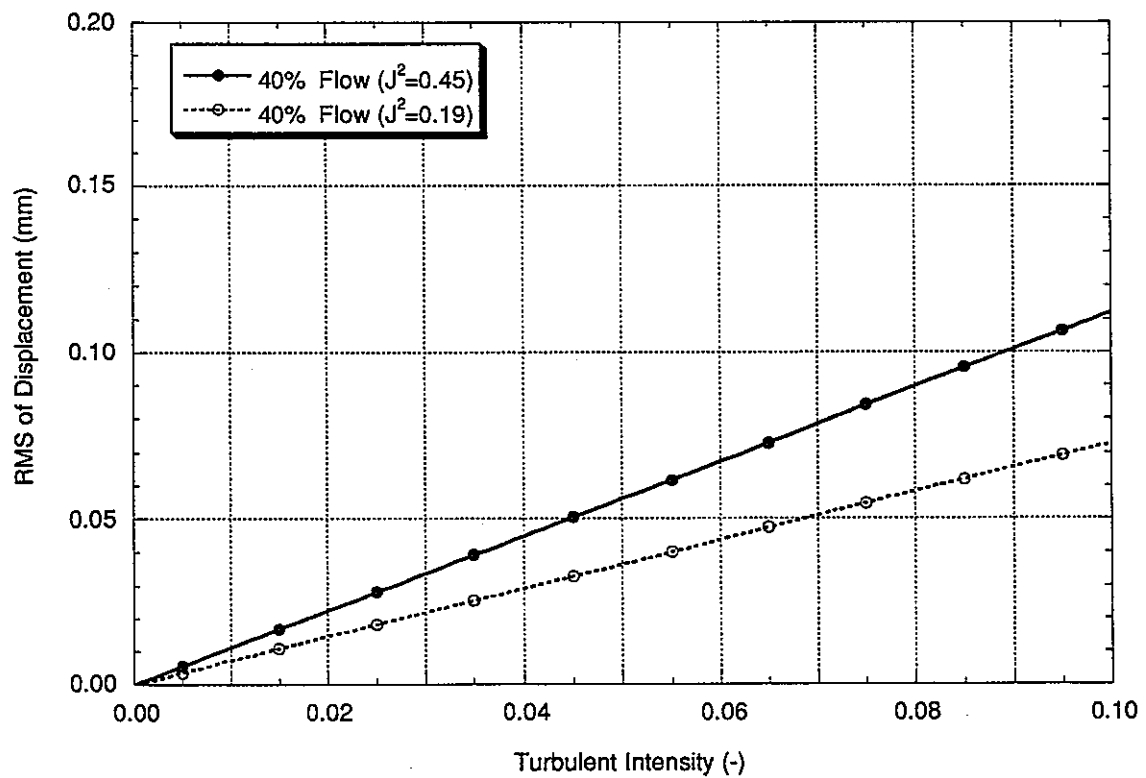


図5 40%流量時温度計ウエルの乱流振動応答