

「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

水中疲労確認試験（中間報告Ⅰ）

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

水中疲労確認試験（中間報告Ⅰ）

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水中疲労確認試験について、計画、流動試験を中心に中間結果をまとめたものである。

-
- * 岡林 邦夫（大洗工学センター）
岩田 耕司（大洗工学センター 基盤技術開発部）
和田 雄作（大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室）
森下 正樹（大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室）
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）
一宮 正和（大洗工学センター システム開発推進部 プラント工学室）
家田 芳明（大洗工学センター 基盤技術開発部 熱流体技術開発室、現企画部）

I. 温度計ウエル破断までの時間的推移に係る定性的考察

1. 損傷推移の定性的考察

図1に示すCループ運転履歴を参照して、当該温度計ウエル破断までの時間的推移について定性的に考察する。

破面観察からき裂の進行については、図2のように、主き裂は少なくとも15個の疲労き裂が合流して矢印の方向に比較的ゆっくり進み、最終的に副次き裂と合流して破断したと推定されている。この推定に基づいて、き裂状況を図3のようにパターン化する。

Cループ運転履歴（図1）、き裂進展模式図（図3）及び水流動試験結果（図4）から、温度計ウエル破断までの時間的推移は、定性的に以下のように考察される。

状態Ⅰ：運転開始初期の100%流量（無次元流速：2.0（200℃））の運転において流れ方向の主振動を受けて、細管段付き部の応力集中のために上流側縁に沿って複数のき裂が初生した。そして、上流側で主き裂が、又は上流側に加えて下流側でも副次き裂が、発生して、支配的な振動方向である流れ方向に進展を開始した。

状態Ⅱ：き裂の進展に伴い、固有振動数が減少したため、無次元流速が増大した。その結果、変位振幅が減少し、き裂はほとんど進まなくなった。

状態Ⅲ：100%流量への流量上昇、及び／又は、それからの流量低下の過程において、無次元流速は振動発生領域を通過し一時的にき裂が進んだ。そして、その後の40%流量運転において、無次元流速は振動発生領域に入り、き裂は再び微小な進展を開始した。

状態Ⅳ：ナトリウム漏えい前の40%流量運転で、振動は次第に大きくなり、き裂は有意な伝播を開始し、最終的な破断に至った。

2. 今後の検討事項

(1) き裂進展及びこれに伴う固有振動数変化を解析するとともに、破面解析結果と照合する等して、上記考察を定量化する。

(2) 以上による当該温度計ウエルのき裂進展から破断までの時間的推移に関する検討結果を確認するために、水中疲労確認試験を実施する。

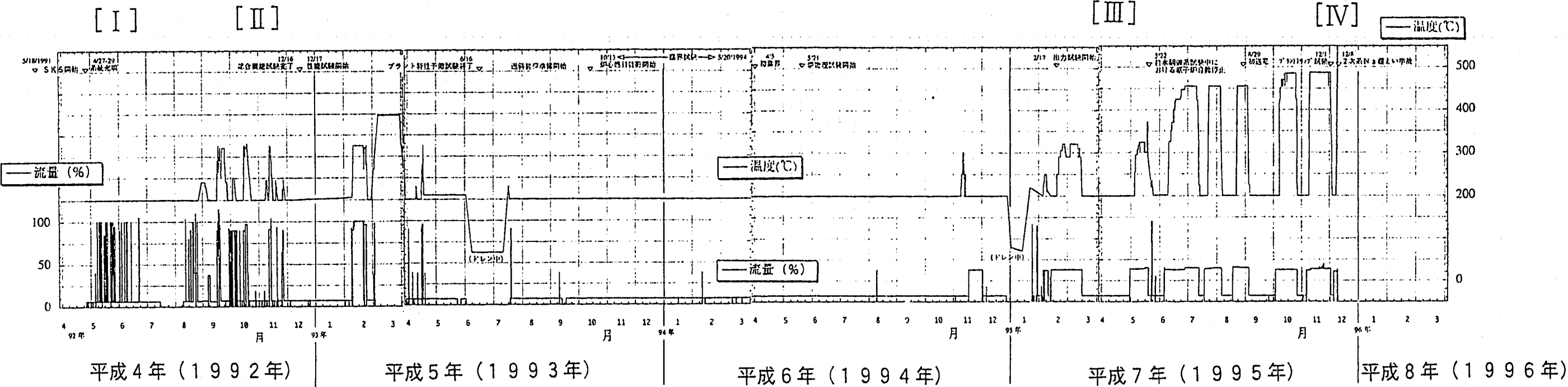


図1 2次主冷却系Cループの運転履歴

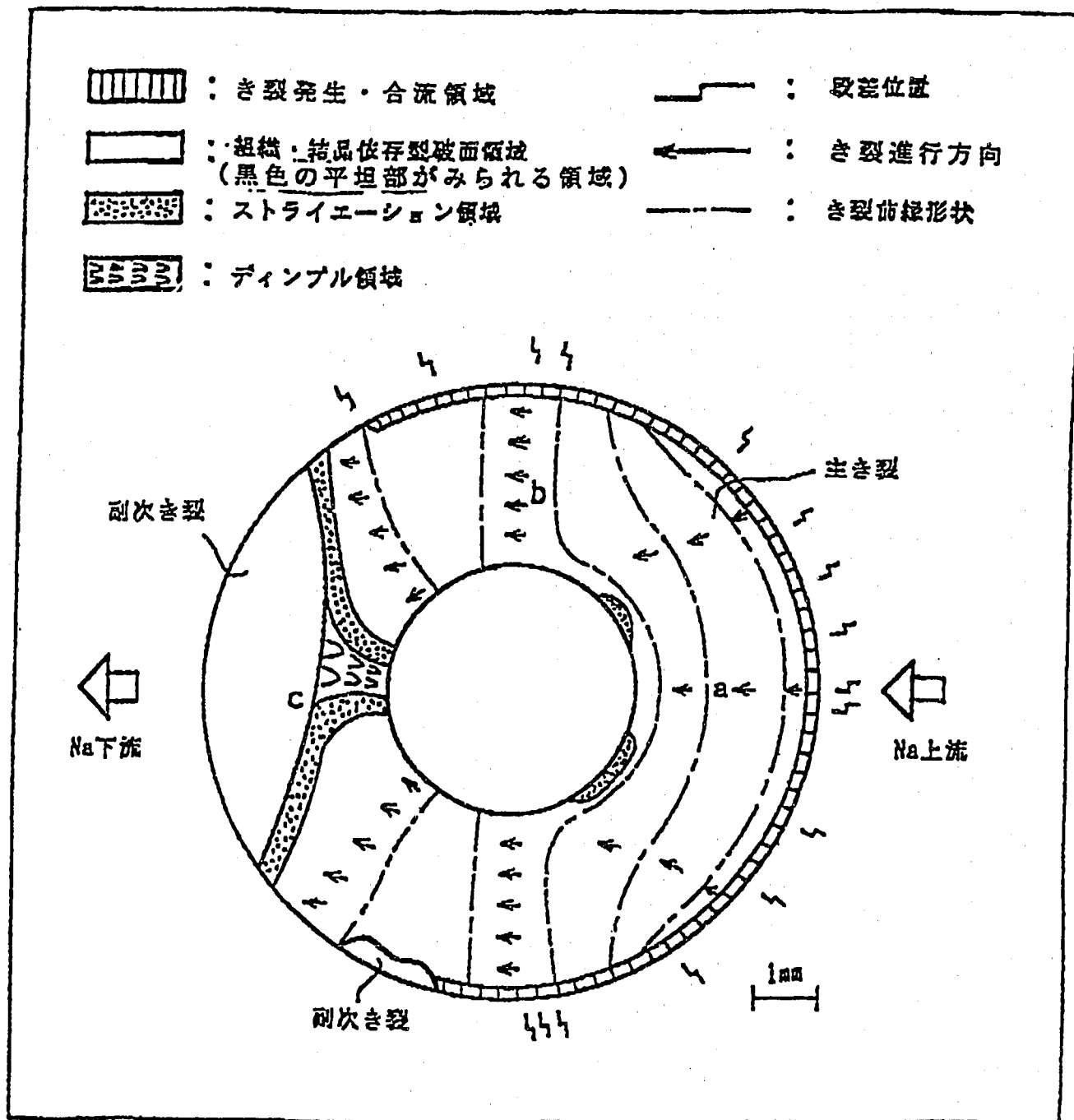


図2 き裂進行方向について

ストライエーション：疲労破壊した場合に破面に生じる縞模様
 ディンプル：延性破壊した場合に破面に生じるくぼみ

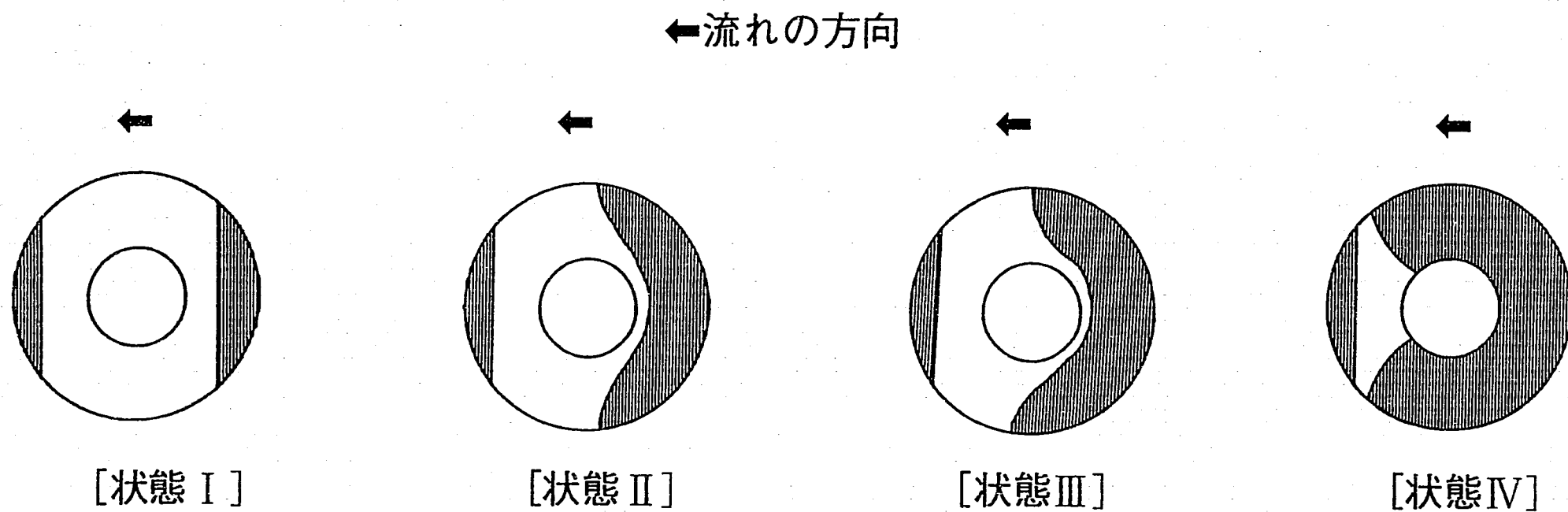
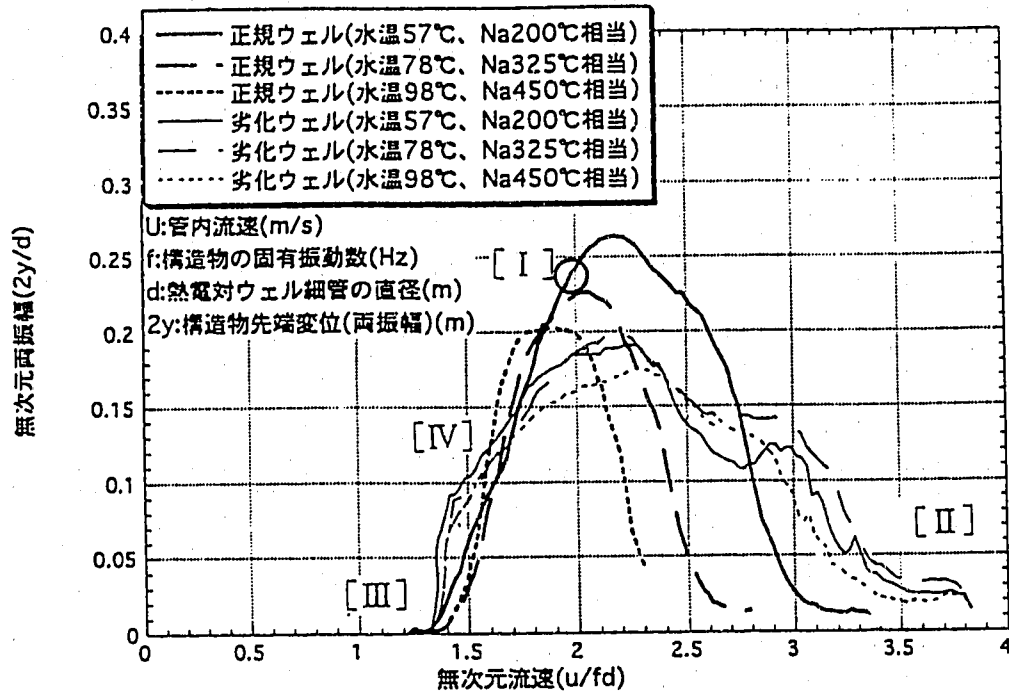


図3 き裂進展の模式図

流れ方向



流れ直角方向

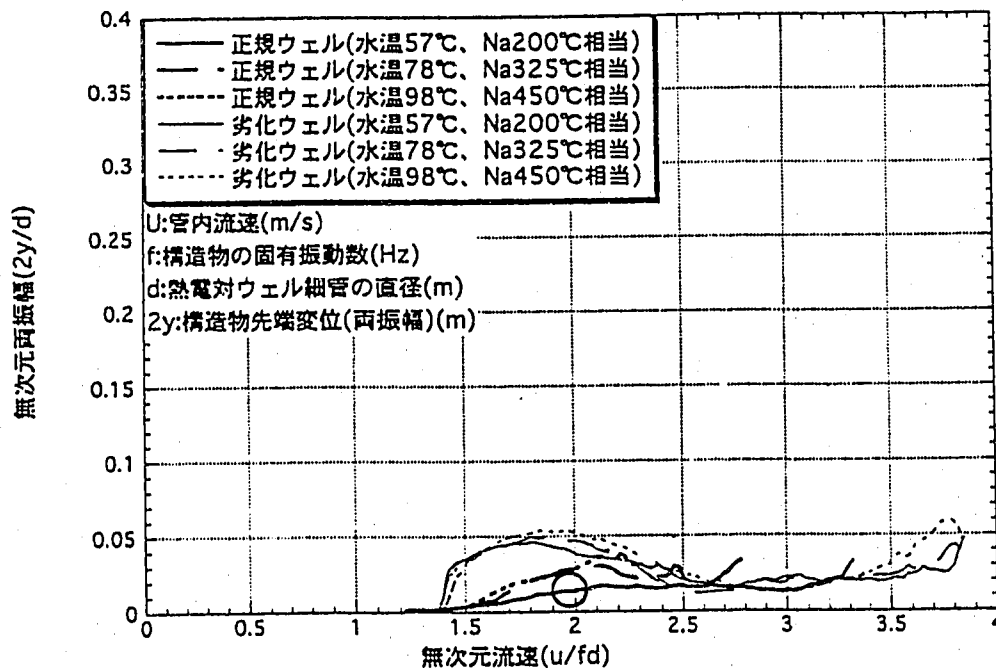


図 4 ウェル先端振動振幅（両振幅）と無次元流速との関連

(正規および劣化ウェル：実機定格運転条件でのレイノルズ数までの試験結果をプロット)

Ⅱ.水中疲労確認試験計画

1. 目的

当該温度計ウエルで生じた流力振動を模擬した試験を行い、流力振動による疲労き裂の進展、き裂の貫通、ウエルの破損を再現し、その間の流力振動の特性の変化を把握し、現象の理解に役立てる。

2. 試験体と試験装置

2. 1 試験体

当該温度計ウエルと同様な材質、形状の温度計ウエルを試験に用いる。なお、試験では初期き裂を試験体に付与する。

(1) 材質

試験体ウエルと当該破損ウエルの材料特性を表1に示す。

(2) 形状・寸法

当該破損ウエルと同一な形状、寸法の試験体を用いる。(図1参照)

(3) 初期き裂

初期き裂として、当該破損ウエルの破断箇所と同じ部位(図1参照)に疲労試験により初期き裂を流れ方向両側に入れる。

き裂の大きさは、

- ・長さ1mm程度
- ・固有振動数の低下が10%以下

を目安とする。

(4) 熱電対シース

熱電対シースをウエルの中に挿入するとウエル先端での加速度は計測できないため、シースは挿入しないものとする。

2. 2 試験装置

高温水流動試験装置（図 2 参照）を用いる。

3. 計測

図 1 に示す位置の加速度を計測する。

- a. ウェル先端（参考値：内径4 mm ϕ のウェル内に加速度計を挿入するためには加速度計先端を削る必要があり、これにより絶縁不良を生じ計測が不完全となる可能性がある）
- b. 細管／太管段付き部
- c. コネクタ部

4. 試験条件

き裂の進展挙動を調べるため100%及び40%流量で試験を行う。試験条件を表 2 に示す。

4. 1 100%流量試験

初期き裂を導入した試験体のき裂が進展した後、き裂進展が停止するかどうかを調べる。試験条件は、

- ・実機200℃相当（水温57℃）、100%流量

である。

4. 2 40%流量試験

上記100%流量の試験で、き裂進展が停止した後、同一の試験体を用いて、40%流量で、き裂進展するか調べる。試験条件は、

- ・実機200℃相当（水温57℃）、40%流量

である。

試験終了後、破面観察を行い、き裂の進展状態などを観察する。

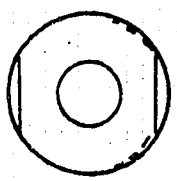
5、工程

試験工程は、表 3 に示す通りである。

表-1 材料特性 (SUS304F)

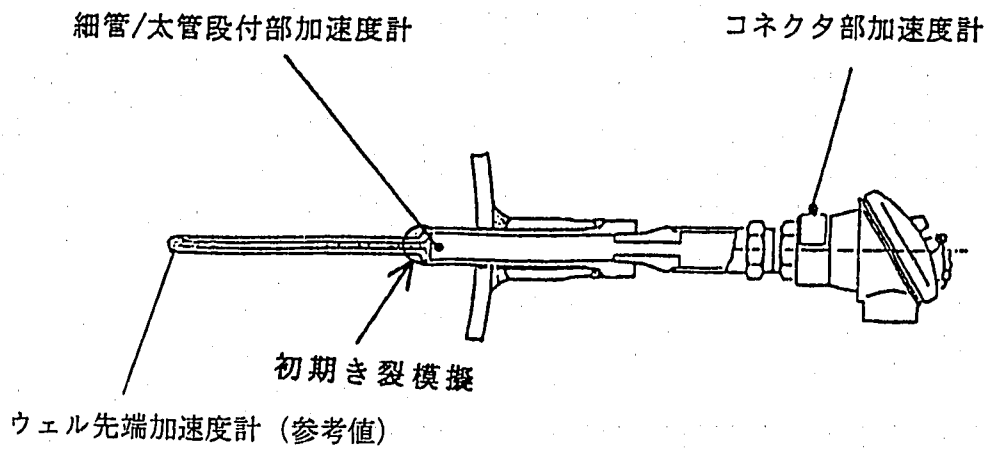
仕様	熱処理	化学成分(WT %)									引張試験				
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り		
		0.04/ 0.08	1.00 MAX	2.00 MAX	0.040 MAX	0.030 MAX	8.00/ 11.00	18.00/ 20.00	0.01/ 0.04	(N/MM2)	(N/MM2)	(%)	(%)		
										RT	205 MIN	520 MIN	40 MIN	60 MIN	
										550℃	105.84MIN	345.94MIN	-	-	
試験体材料	1038～1055℃で1時間10分 保持後、水冷	とりべ	0.05	0.41	1.52	0.029	9.26	18.30	0.04	JIS 10号 RT	235	549	70	81	
		製品	0.05	0.45	1.51	0.028	9.24	18.32	0.04	550℃	107.8	373.38	49	70	
当該材	1038～1059℃で3時間2分 保持後、水冷	とりべ	0.05	0.50	1.60	0.029	9.60	18.56	0.038	JIS 10号 RT	216	529	69	79	
		製品	0.05	0.50	1.58	0.028	9.54	18.43	0.038	550℃	109.76	365.54	45.4	77.9	

表－２ 試験条件

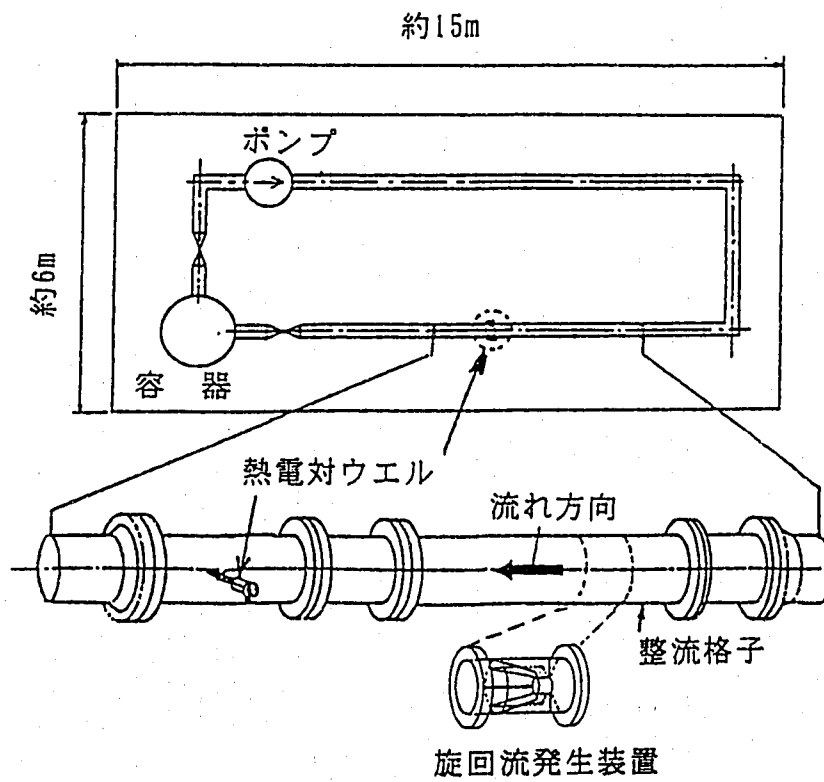
初期き裂	あり
初期き裂の形状	
熱電対シース	なし
流 量	100% → 40%

表－３ 試験工程

	3 月		
試験準備	3/4 		
試 験		3/11 	3/23
評 価			



図－１ 熱電対ウェル試験体



図－２ 高温水流動試験装置

Ⅲ.水中疲労確認試験（その１）の試験結果

1. 目 的

当該熱電対ウエルで生じた流力振動を模擬した試験を行い、流力振動による疲労き裂の進展、き裂の貫通、ウエルの破損を再現し、流力振動の特性の変化を把握し、現象の理解に役立てる。

2. 試験体と試験装置

（１）試験体

試験体ウエルとしては、疲労試験にて、ウエルの固有振動数が約５％低下するまで細管／太管段付部にき裂を発生させた「初期き裂ありウエル」（固有振動数=242Hz、減衰比=0.3％）を使用した。加速試験とするため、熱電対シースは挿入せずコネクターのみをウエル頂部に取り付けている（図１参照）。

（２）試験設備

既設の水流動試験設備を使用し、配管については配管の径（外径558.8mm）と肉厚（9.5mm）を模擬した体系で試験を行った。

3. 試験条件

試験条件は以下のとおりとした。

- ①水 温 ： 57℃（ナトリウム温度200℃相当）
- ②流 速 ： 5.5m/sec

4. 試験結果

水中疲労確認試験（その１）によって得られた結果を以下に示す。

- (1) 試験体ウエルの加速度計応答の時間変化を図２に示す。配管内流速が定格流速約5.5m/secに近づくに連れて振動レベルは一旦増加し、その後低下する傾向を示す。
- (2) 図２中の横軸０分から５分間の試験体ウエルの固有振動数の変化を図３に示す。流れ方向の固有振動数は233Hzから213Hzに５分間で低下している。また、流れ直角方向では、流れ方向の振動の他に直角方向の固有振動数と考えられる周波数242Hz

成分が計測されている。

- (3) 図4にほぼ定格流速到達後の試験体ウエルの先端変位を、流れ方向の固有振動数で無次元化した無次元流速と無次元振幅（両振幅）で整理した結果を、正規ウエル（初期き裂がないウエルで）の結果と比較して示す。試験体ウエルでは、き裂の進展にともなう固有振動数の低下によって横軸の無次元流速が増加し、それによる振動レベルの低下が見られる。この傾向は正規のウエルで得られている従来の特性とほぼ同様である。
- (4) 図5、6に、5時間連続運転中の流れ方向の固有振動数と試験体ウエル先端の振動振幅（両振幅）の時間変化を示す。固有振動数は時間とともに減少傾向を示すが、ほぼ停留状態に達している。

なお、この後、流量を定格の40%条件まで低下させ、配管内流速を2.2m/secにて7時間試験を行ったが、試験体ウエルの有意な振動は発生しなかった。このため、再び5.5m/secまで流速を増加させ一定に保持した。その後、約1.5時間で試験体ウエルは破断した。

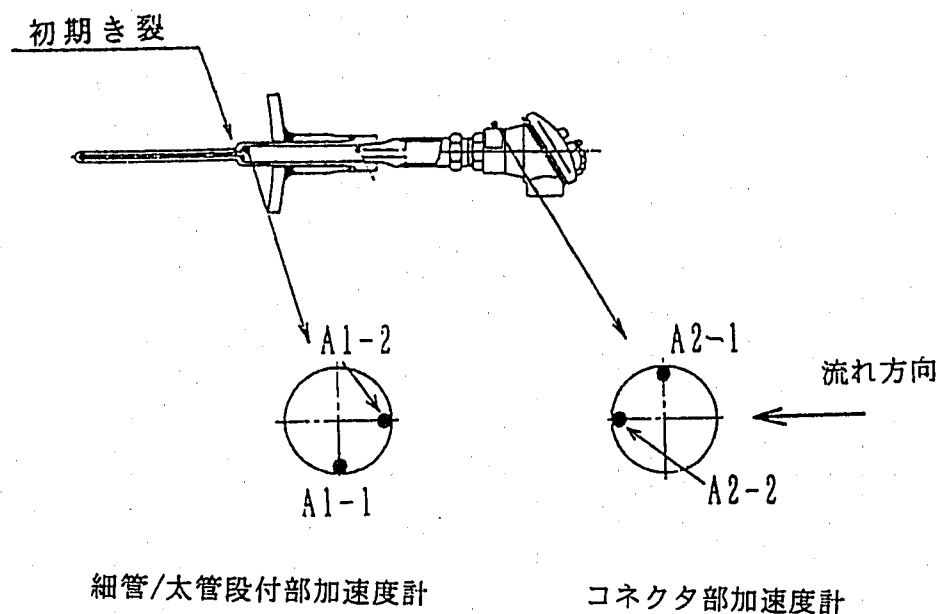


図-1. 試験体概念

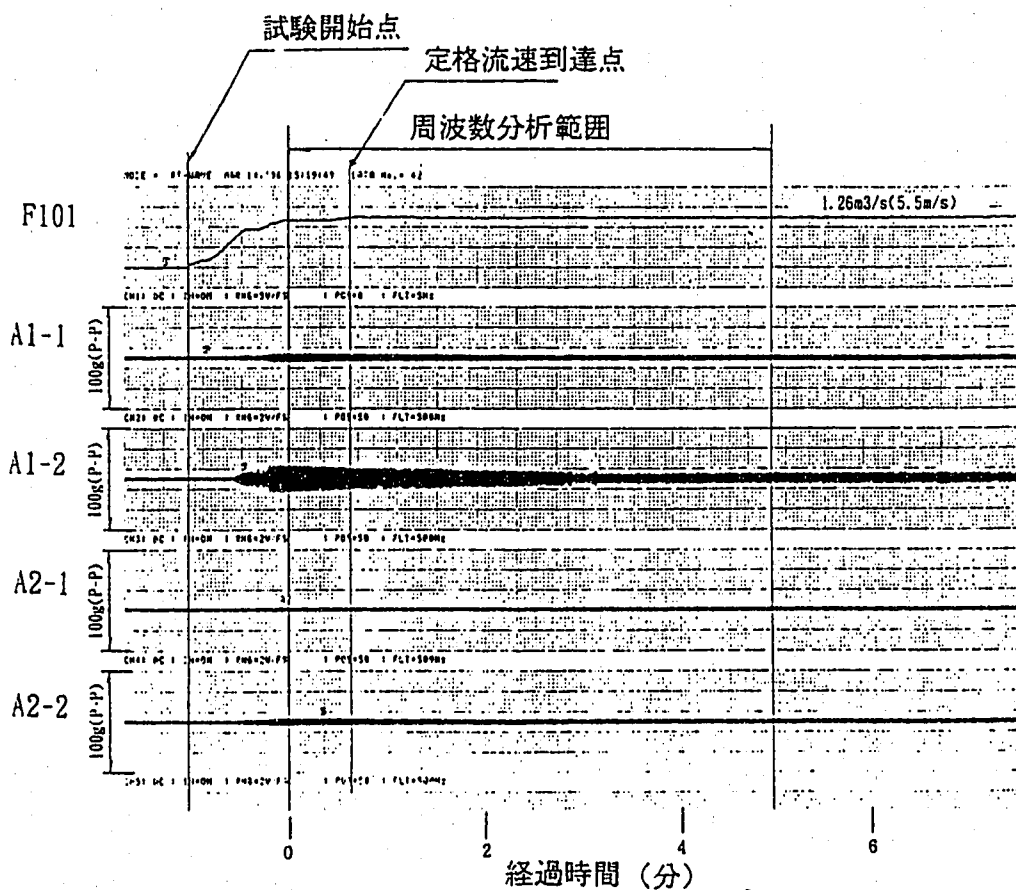


図-2. 振動レベルの時間変化 (初期き裂ありの熱電対ウエル)

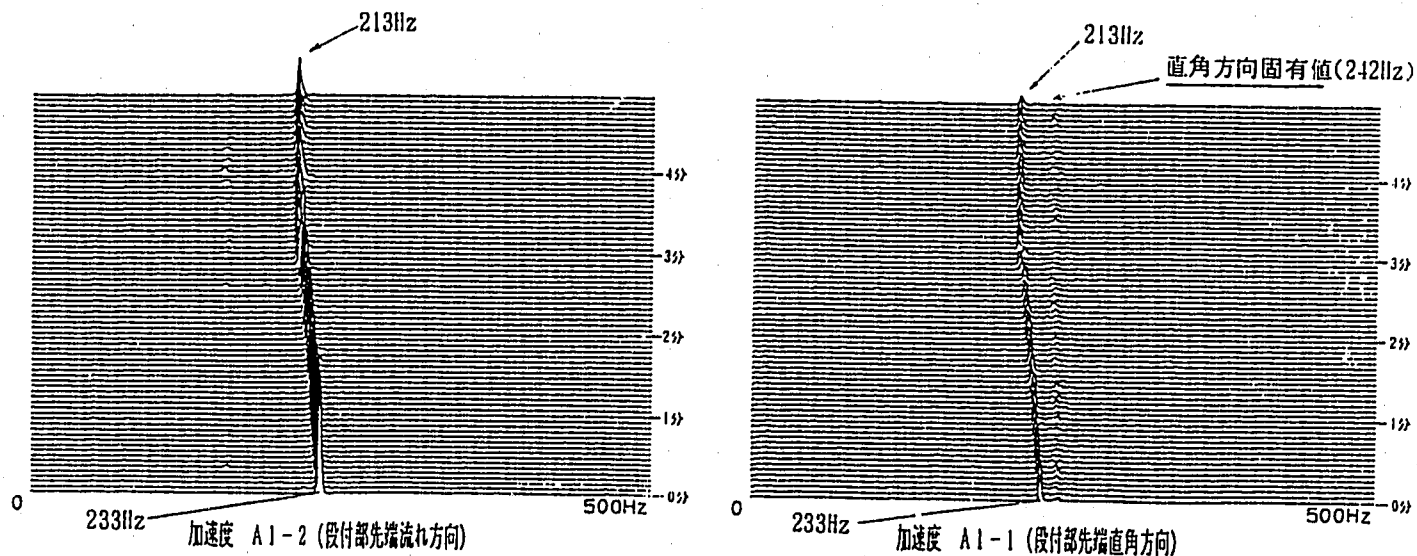


図-3. 固有振動数の時間変化 (初期き裂ありの熱電対ウエル)

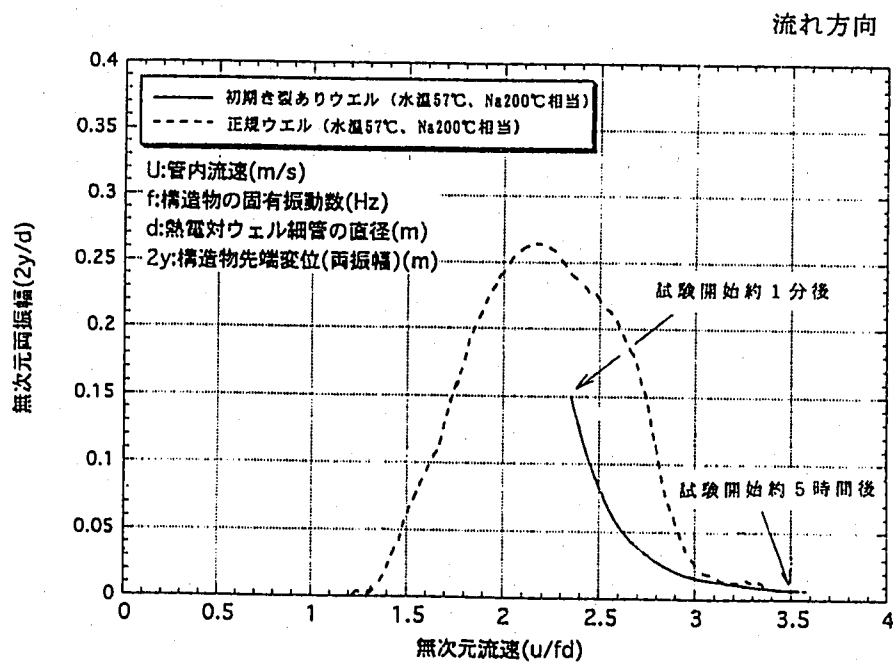


図-4. 熱電対ウエル先端の振動振幅 (両振幅)

流れ方向

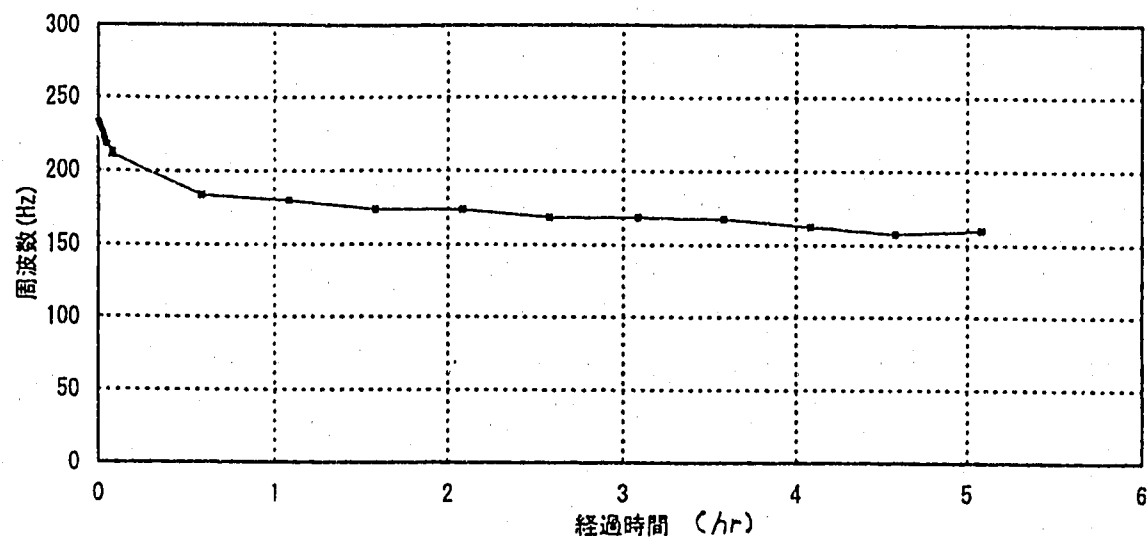


図-5. 固有振動数の時間変化 (初期き裂ありの熱電対ウエル)

流れ方向

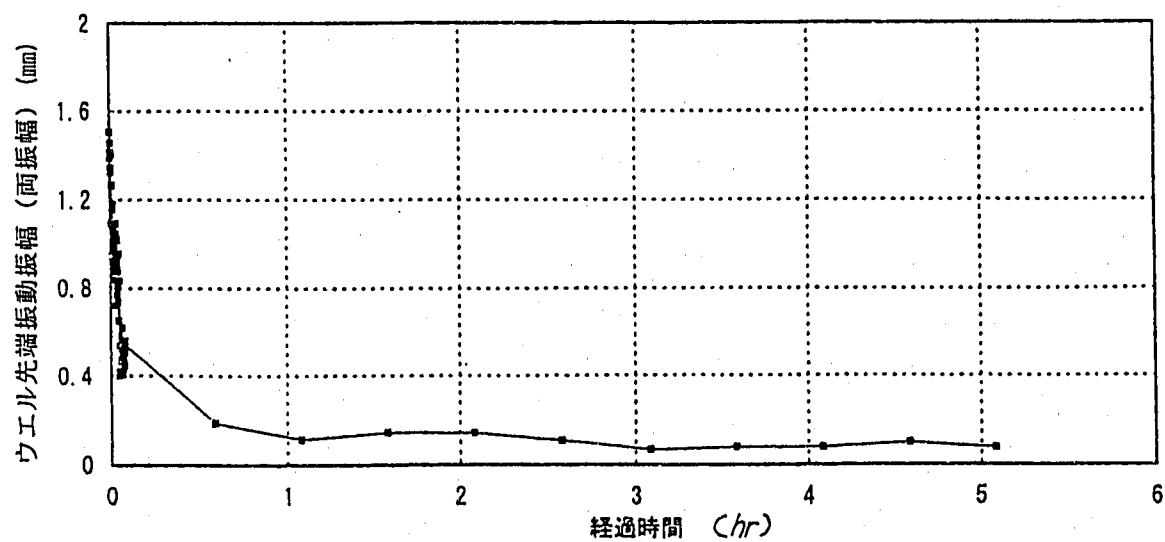


図-6. ウエル先端の振動振幅時間変化 (両振幅、初期き裂ありの熱電対ウエル)

IV.水中疲労確認試験（その2）の方案

1. はじめに

試験体ウエルに初期き裂を付与して、水中疲労試験を実施した（水中疲労確認試験その1）。その結果、き裂進展による固有振動数および振幅の低下は認められたが、き裂の進展は完全には停止しなかった。

水中疲労試験（その1）は熱電対シースなしの条件で行ったが、熱電対シースなしの場合、試験体ウエルの減衰は熱電対シースありに比べ小さく、ウエル先端の振幅は大きくなる可能性がある。

したがって、熱電対シースがウエルの振動性状およびき裂進展に影響することが考えられるので、熱電対シースありの条件で、再度、水中疲労試験を実施し、流力振動による疲労き裂の進展状況などについて調べる。

2. 目的

当該熱電対ウエルで生じた流力振動を模擬した試験を行い、流力振動による疲労き裂の発生、き裂の進展、ウエルの破損を再現し、その間の流力振動の特性の変化を把握し、現象の理解に役立てる。

3. 試験体と試験装置

3.1 試験体

当該熱電対ウエルと同様な材質、形状の熱電対ウエルを試験に用いる。

3.1.1 材質

試験体ウエルと当該ウエルの材料特性を表1に示す。

3.1.2 形状・寸法

当該熱電対ウエルと、同一な形状、寸法の試験体を用いる（図1参照）。

3.1.3 初期き裂

初期き裂として、当該ウエル破断箇所と同じ部位（図1参照）に熱電対シースなしの条件で流動試験を行い、初期き裂を流れ方向に発生させる。その後、熱電対シースを試験ウエルに挿入し水中疲労試験を行う。

初期き裂の大きさは、

・固有振動数の低下10%以下
を目安とする。

3. 2 試験装置

高温水流動試験装置（図 2 参照）を用いる。

4. 計 測

図 1 に示す位置の加速度を計測する。

- a. 細管／太管段付き部
- b. コネクタ部

5. 試験方法

き裂の進展挙動を調べるため100%および低流量で試験を行う。

5. 1 100%流量試験

試験体のき裂が進展した後、き裂進展が停留するかどうかを調べる。試験条件は、
・実機200℃相当（水温57℃）100%流量

である。

5. 2 低流量試験

- (1) 上記100%流量の試験でき裂進展が停留した後、いったん流量をゼロとし、その後流量を増加させ、再度有意な振動が開始する流量を調べる。
- (2) 上記流量を保持し、き裂が更に進展することを確認するとともに、最終的には約40%流量でき裂が進展することを確認する。

試験終了後、破面観察を行い、き裂の進展状態などを観察する。

6. 工 程

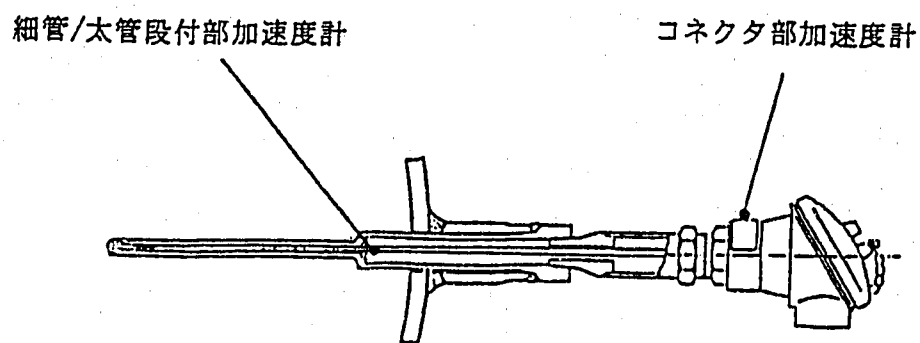
試験工程は、表 2 に示す通りである。

表-1 材料特性 (SUS304F)

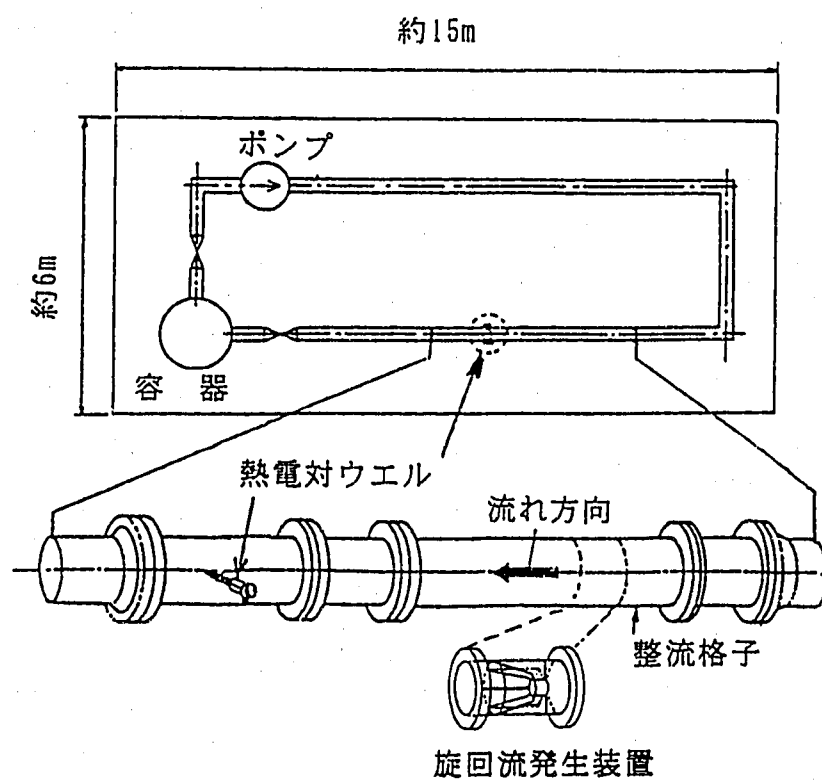
仕様	熱処理	化学成分 (WT %)									引張試験				
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り		
		0.04/ 0.08	1.00 MAX	2.00 MAX	0.040 MAX	0.030 MAX	8.00/ 11.00	18.00/ 20.00	0.01/ 0.04	(N/MM2)	(N/MM2)	(%)	(%)		
		RT 550℃	205 MIN 105.84MIN	520 MIN 345.94MIN	40 MIN -	60 MIN -									
試験体材料	1038～1055℃で1時間10分 保持後、水冷	とりべ	0.05	0.41	1.52	0.029	0.001	9.26	18.30	0.04	JIS 10号 RT	235	549	70	81
		製品	0.05	0.45	1.51	0.028	0.002	9.24	18.32	0.04	550℃	107.8	373.38	49	70
当該材	1038～1059℃で3時間2分 保持後、水冷	とりべ	0.05	0.50	1.60	0.029	0.002	9.60	18.56	0.038	JIS 10号 RT	216	529	69	79
		製品	0.05	0.50	1.58	0.028	0.003	9.54	18.43	0.038	550℃	109.76	365.54	45.4	77.9

表－２ 試験工程

	3 月		
試験準備	3/4 		
試験 その１		3/11 	3/23
その２		3/19 	
評価			



図－1 熱電対ウエル試験体



図－2 高温水流動試験装置

V. 水中疲労確認試験（その2）の試験結果

1. はじめに

水中疲労確認試験（その1）においては、試験体ウエルに初期き裂を付与して、水中疲労試験を実施した。その結果、き裂進展による固有振動数および振幅の低下は認められたが、き裂の進展は完全には停止しなかった。水中疲労確認試験（その1）は温度計シースなしの条件で行ったが、温度計シースなしの場合、試験体ウエルの減衰は温度計シースありに比べ小さく、ウエル先端の振幅は大きくなる可能性があった。すなわち、温度計シースがウエルの振動性状およびき裂進展に影響することが考えられた。

そこで、水中疲労確認試験（その2）においては、温度計シースありの条件で、再度水中疲労試験を実施し、流力振動による疲労き裂の発生、進展状況などについて調べた。

2. 目 的

当該温度計ウエルで生じた流力振動を模擬した試験を行い、流力振動による疲労き裂の発生、き裂の進展を再現し、流力振動の特性の変化を把握して、当該温度計ウエル破損現象の理解に役立てる。

3. 試験体と試験装置

3. 1 試験体

当該温度計ウエルと同様な材質、形状の温度計ウエルを試験に用いる。

(1) 材 質

試験体ウエルと当該ウエルの材料特性を表1に示す。

(2) 形状・寸法

図1に示すように当該温度計ウエルと、同一な形状、寸法の温度計ウエルを用いる。但し、細管段付き部の隅の丸みは半径0.4mmである。

(3) 初期き裂

温度計シースなしの条件で流動試験を行い、当該ウエル破断箇所と同じ部位（図1参照）に初期き裂を流れ方向に発生させる。その後、温度計シースを試験体ウエルに挿入し水中疲労試験を行う。シースの曲がり先端75mmにつき5mmである。なお、初期き裂の大きさは、

・固有振動数の低下10%以下
をめやすとする。これは、解析によれば主き裂深さにして4~5mmに相当している。

3. 2 試験設備

既設の高温水流動試験装置を用い、配管については配管の径（外径558.8mm）と肉厚（9.5mm）を模擬した体系で試験を行なう。

4. 計 測

図1に示す位置の加速度を計測する。

- a. 細管／太管段付き部
- b. コネクタ部

なお、ウエル先端の可視化用に設置していたビデオカメラをCCDカメラに変更し、き裂進展後の細管部の振動挙動をより詳細に把握できるように工夫した（添付資料1参照）。

5. 試験方法

き裂の進展挙動を調べるため100%および低流量で試験を行う。

5. 1 100%流量試験

試験体のき裂が進展した後、き裂進展が停留するかどうかを調べる。試験条件は以下のとおりとする。

- ①水 温 : 57℃（ナトリウム温度200℃相当）
- ②流 速 : 100%流量状態

5. 2 低流量試験

- (1) 上記100%流量の試験でき裂進展が停留した後、一旦流量をゼロとし、その後流量を増加させ、再度有意な振動が開始する流量を調べる。
- (2) 上記流量を保持し、き裂がさらに進展することを確認するとともに、最終的には約40%流量でき裂が進展することを確認する。

なお、試験終了後、破面観察を行い、き裂の進展状況などを観察する。また、ウエルの固有振動数及び減衰率を調べる。

6. 工程

試験工程は表2に示すとおりである。

7. 試験結果

試験結果を以下に示す。

(1) 初期き裂の発生

シース無しの条件で最大振幅となる流速をサーベイしてき裂発生のための加速条件において、表3の運転履歴の下で約215時間の連続運転した。その結果、温度計ウエルの固有振動数において259Hzから238Hzへの低下が測定され、き裂の発生が確認され

た。なお、図3に別途実施された温度計ウエルのモデル試験体の疲労試験結果と、今回、固有振動数の低下を確認した状態との関連を示す。

(2) 100%流量試験

固有振動数が約240Hzに低下した状態でシースを設置し、前記の試験条件に基づく100%流量運転を継続した。その結果、試験開始後約3時間でほぼ停留状態になることを確認した。この時点でのウエルの固有振動数は、図4（細管／太管段付部の加速度計応答に基づく結果）に示すように、約180Hz（流れ方向）、および約230Hz（流れ直角方向）である。固有振動数に異方性があるのは、ウエル段付き部断面において、流れ上流及び下流の両側からのき裂進行により、リガメントの流れ方向の長さが流れ直角方向のそれよりも小さい非軸対称形に変化したことに対応している。

また、この結果をもとに解析によって推定したウエル先端変位を図5に示す。なお、100%流量試験開始後約1時間の時点では、き裂からの漏洩と推定される水漏れが観察されている。なお、同水漏れはシース挿入時には観察されていない。

(3) 低流量試験

有意な振動が開始する流量条件を確認するため、一旦流量をゼロとし、上昇、下降スイープ試験を実施した。流量増大方向と比較して、減少方向の方が振動発生限界の流速は低くなる傾向を示した（図6参照）。

- ・ 流量増加スイープの結果：2.7m/s（約50%定格流量条件に相当）
- ・ 流量減少スイープの結果：2.4m/s（約45%定格流量条件に相当）

また、流速条件に依存して以下のような振動数の変化が測定されている。これは、流速の増加にともなう抗力の増加で、流れ下流側のき裂が閉口すること等によるものと推定される。

- ・ 流速条件：2.7m/s（振動発生限界近傍）→ 約160Hz
- ・ 流速条件：5m/s（定格流速）→ 約180Hz

横軸を無次元流速として整理した加速度挙動、および加速度データをもとに解析によって推定したウエル先端変位を図7、図8に示す。き裂の進展にともなう固有振動数の低下によって横軸の無次元流速が増加し、それによる振動レベルの低下傾向が見られた。

この後、さらにき裂の進展をはかるため実機の流量増減を模擬した運転を含む連続運転を行い、固有振動数の低下を確認している。表4に運転履歴、表5に固有振動数の変化を示す。また、図9に前記スイープ試験結果に基づくウエル先端振動振幅の推定値と実機の流量増減を模擬した試験（第6回）から振動振幅を画像処理によって求めた結果をまとめて示す。

図10に、き裂の進展にともない振動が発生する流速の領域が低下する傾向をスイープ試験から求めた結果を示す。また、図11にき裂の進展にともなう固有振動数の変化を示す。

8. まとめ

- ①温度計ウエルの流動試験をシースなしの条件で行い、総試験時間約215時間で固有振動数の低下を確認した（振動回数：約 2×10^8 回）。
- ②その後、100%流量運転を継続し、固有振動数約180Hzで固有振動数の低下がほぼ停留することを確認した。
- ③停留後、上昇／下降スイープ試験を実施し、定格流量のほぼ40%流量（流速2.4m/s）近傍で振動が発生し、ほぼ70%流量で最大振幅となることを確認した。同スイープ試験では、流量増大方向と比較して減少方向の方が振動発生限界の流速が低くなる傾向にあることが観察された。また、流速の増加に伴い固有振動数が増加する傾向が観察された。これは、流速の増加にともなう抗力の増加によってき裂が閉口すること等によるものと推定される。
- ④この後、実機の流量増減を模擬した運転を含む連続運転を行った。その結果、固有振動数の低下が測定され、これによって徐々にき裂が進展していることが確認された。また、き裂の進展に伴い振動が発生する流速領域も低下する傾向が確認された。
- ⑤さらに低流量試験を継続すると、次第に振動振幅が相対的に減少し、固有振動数の低下が遅くなり、き裂進展が極めて遅くなる傾向が現れた。実機では、この極めて緩慢な進展又は／及び停留するき裂状態において長期間の40%流量運転を経過したものと推定される。

表-1 材料特性 (SUS304F)

仕様	熱処理	化学成分 (WT %)									引張試験				
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り		
		0.04/ 0.08	1.00 MAX	2.00 MAX	0.040 MAX	0.030 MAX	8.00/ 11.00	18.00/ 20.00	0.01/ 0.04	(N/MM2)	(N/MM2)	(%)	(%)		
										RT 550℃	205 MIN 105.84MIN	520 MIN 345.94MIN	40 MIN -	60 MIN -	
試験体材料	1038～1055℃で1時間10分 保持後、水冷	とりべ	0.05	0.41	1.52	0.029	0.001	9.26	18.30	0.04	JIS 10号 RT	235	549	70	81
		製品	0.05	0.45	1.51	0.028	0.002	9.24	18.32	0.04	550℃	107.8	373.38	49	70
当該材	1038～1059℃で3時間2分 保持後、水冷	とりべ	0.05	0.50	1.60	0.029	0.002	9.60	18.56	0.038	JIS 10号 RT	216	529	69	79
		製品	0.05	0.50	1.58	0.028	0.003	9.54	18.43	0.038	550℃	109.76	365.54	45.4	77.9

表－２．試験工程

	3 月	4 月
試験準備		
試験・評価 その 1		
その 2		

表－３．「水中疲労確認試験（その２）」の運転履歴
（き裂発生による固有振動数低下の確認まで）

流速条件	試験時間	備 考
5.0m/s	2時間00分	100%流量条件（Na200℃条件）
5.5m/s	89時間05分	振動振幅を増大するため、流速を増加
5.7m/s	102時間04分	スイープ試験によって振動振幅が最大になる流速条件を設定 ^注
6.2m/s	21時間33分	水温を低下させ振動振幅が最大となる流速条件を設定 ^注
総試験時間	214時間42分	—

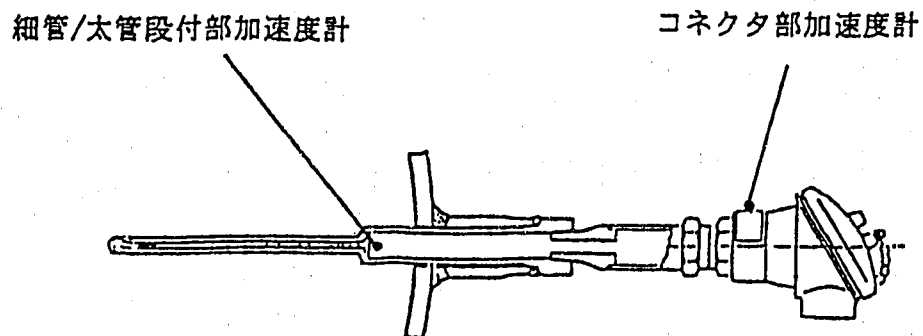
（注）流速スイープ試験を実施

表－４．「水中疲労確認試験（その２）」の運転履歴
（低流量試験等によるき裂の進展）

流速条件	試験時間	備 考
100%流量試験	3時間03分	き裂がほぼ停留するまでの試験
低流量試験等によるき裂の進展		
2.2m/s	58時間09分	定格流量の40%流量条件
2.5～3.7 m/s	96時間37分	振動振幅を増大するため、流速を調整
5 m/s	2時間51分	振動振幅を増大するため、流速を増大
流量増減 (11回)	11時間00分	2%/minの流量変化率をステップ状に模擬 (40 ⇔ 100%)
総試験時間	171時間40分	—

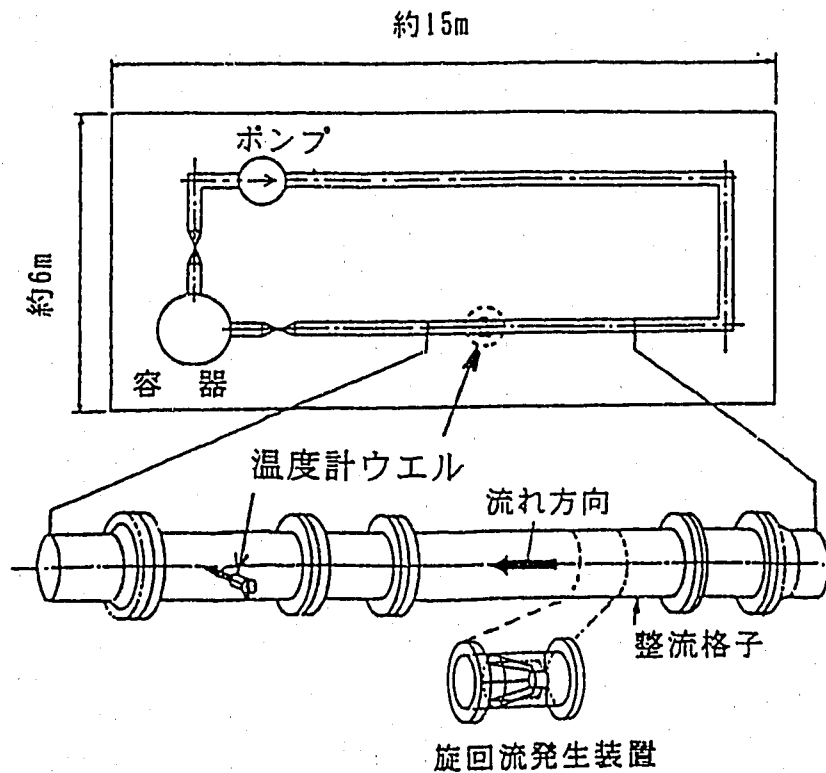
表－５．固有振動数の変化（流れ方向）

	流速：2.7m/s 振動発生限界近傍)	流速：5m/s (定格流速 (Na200℃))
100%流量運転による き裂停留時	約160Hz	約180Hz
低流量試験等による き裂進展後	約145Hz (約80時間後) 約130Hz (約130時間後)	約180Hz (約80時間後) —



(注) 段付部R:0.4mm

図－１． 温度計ウエル試験体



図－２ 高温水流動試験装置

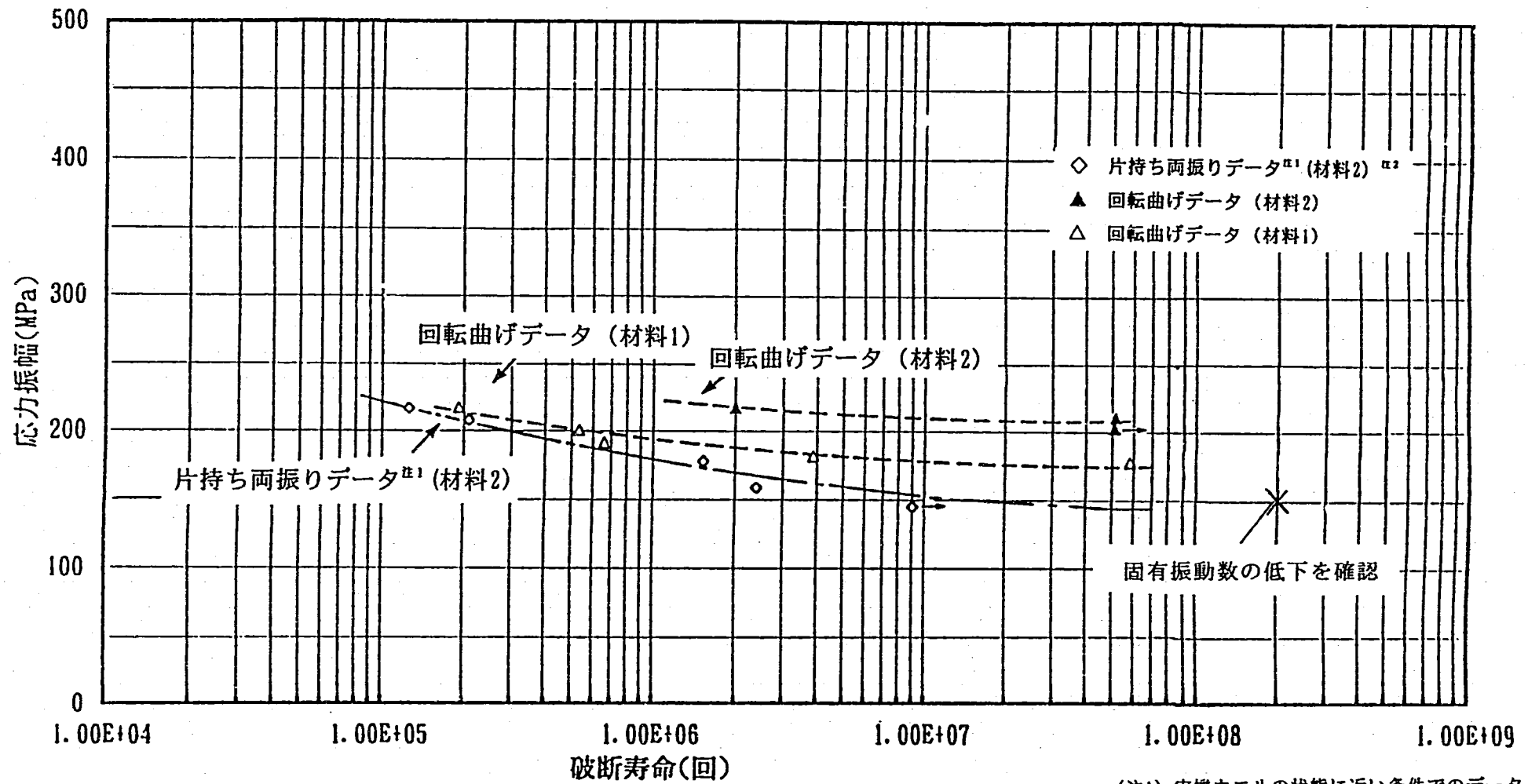


図-3. 温度計ウエルモデル試験体の疲労試験結果
(室温：回転曲げ、片持ち梁曲げ)

(注1) 実機ウエルの状態に近い条件でのデータ

(注2) 材料1：棒材。

材料2：当該材とほぼ同等の鍛造材

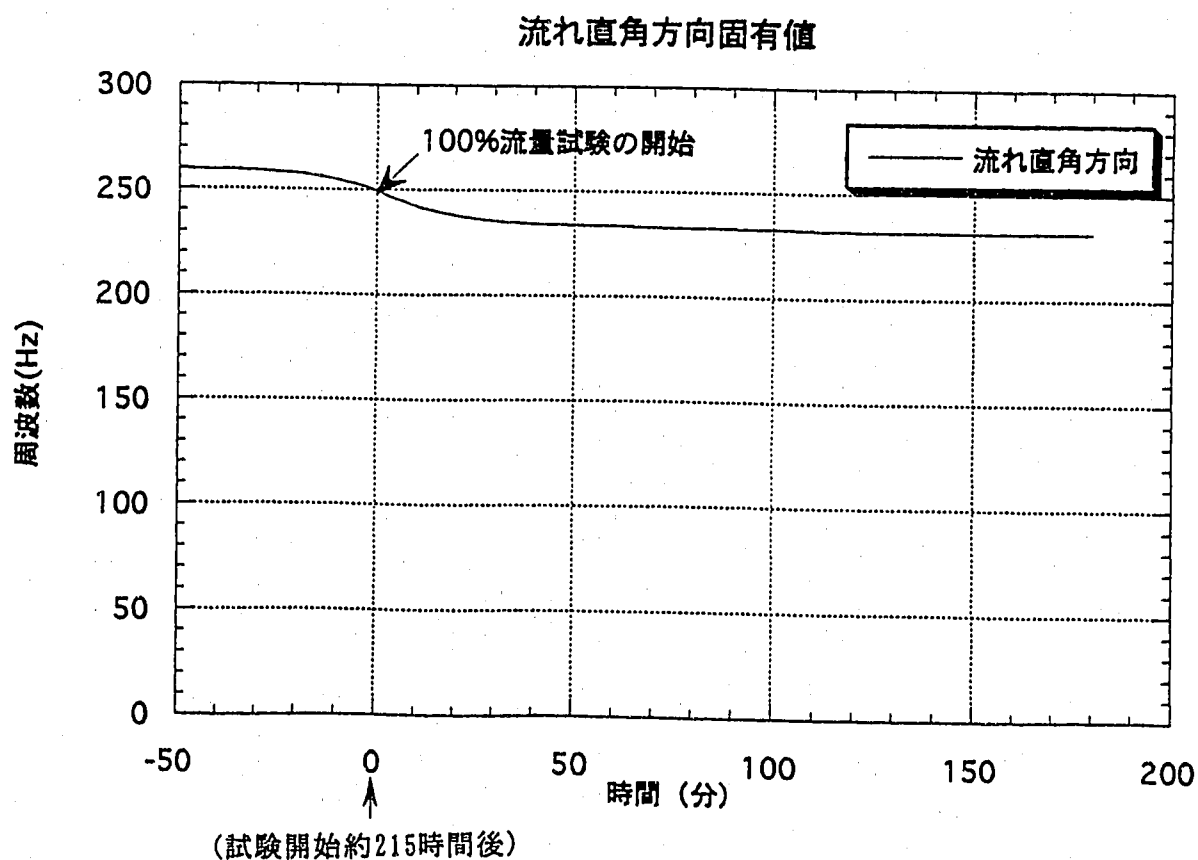
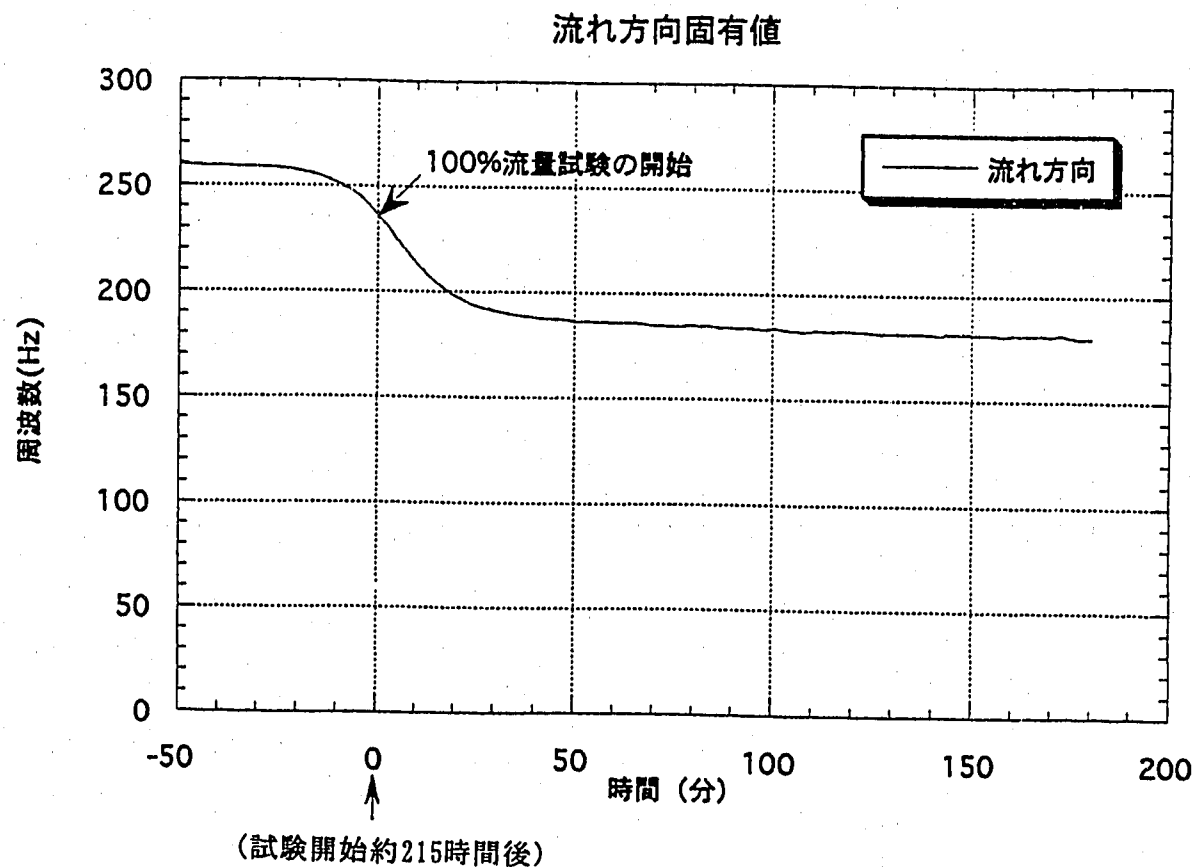
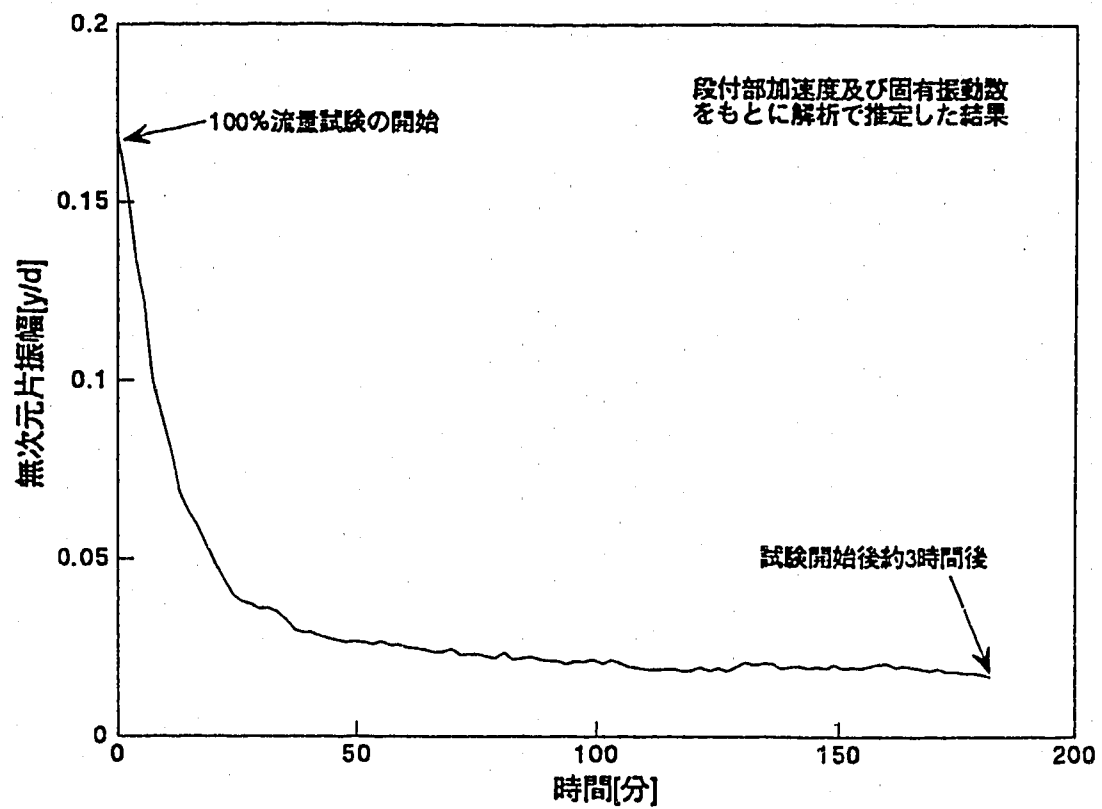


図-4 温度計ウェル固有振動数の経時変化



図－５． 100%流量運転時のウエル先端振動振幅の変化

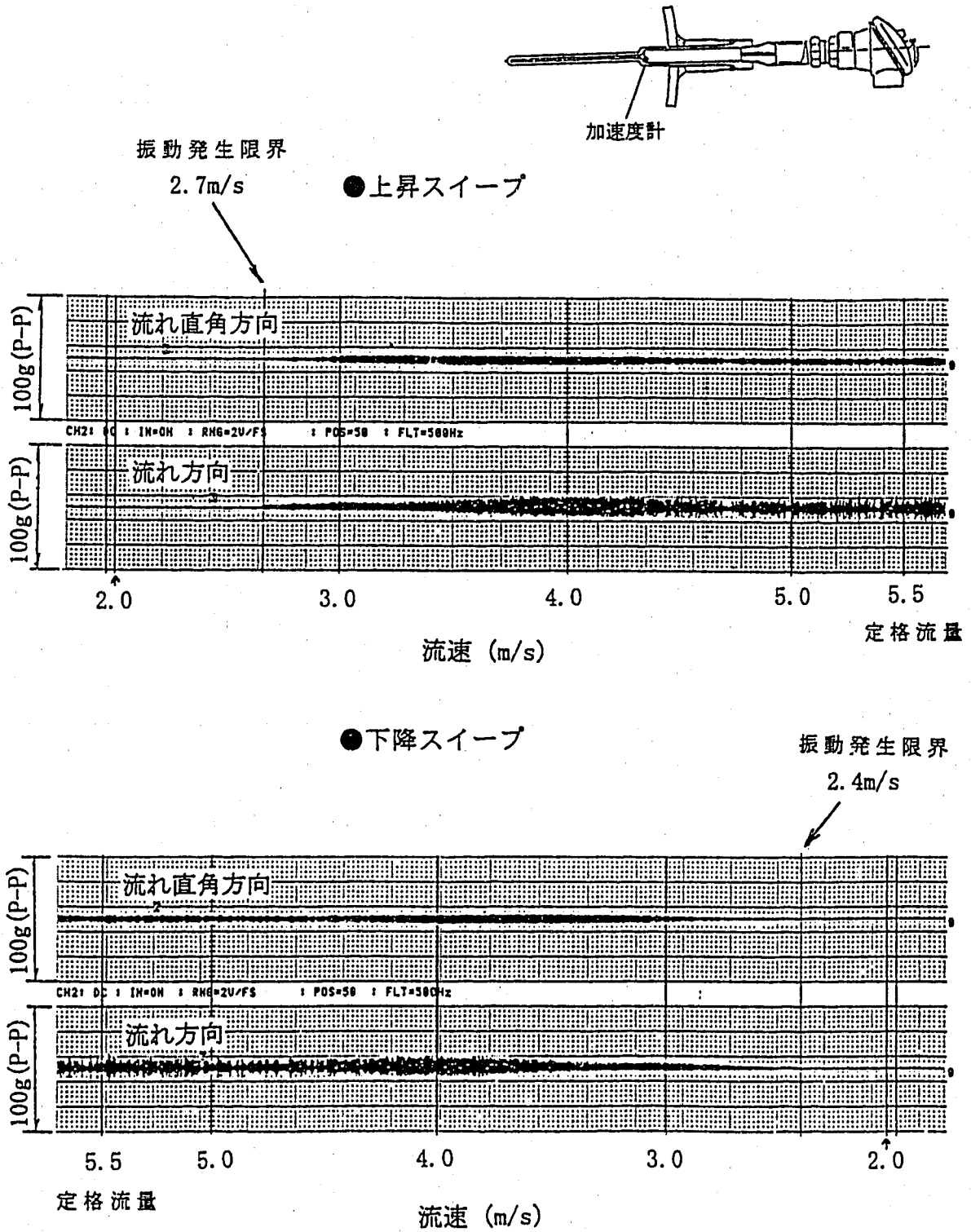


図-6. 上昇/下降スイープ試験結果

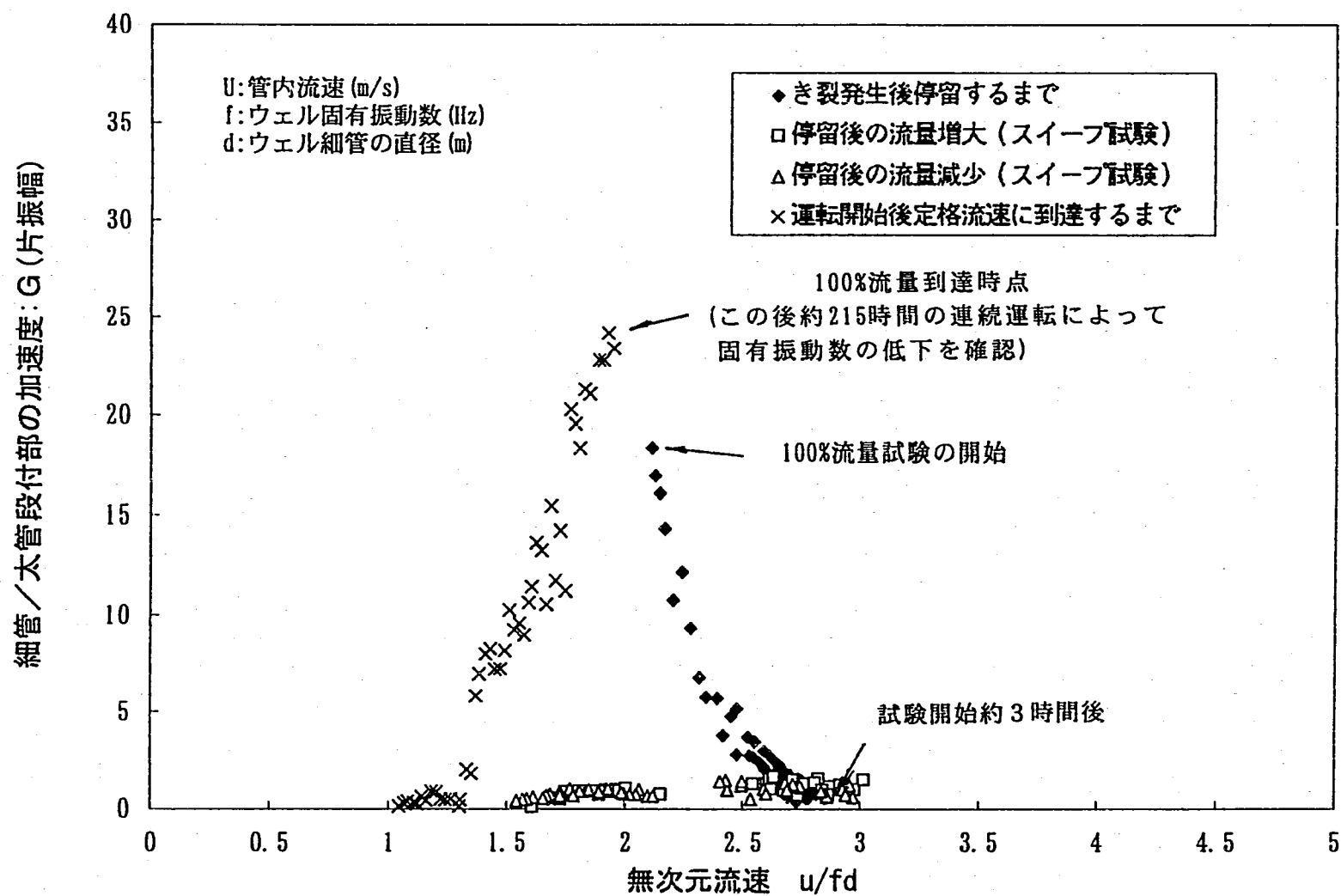


図-7. 無次元流速と細管/太管段付部の加速度応答との関連

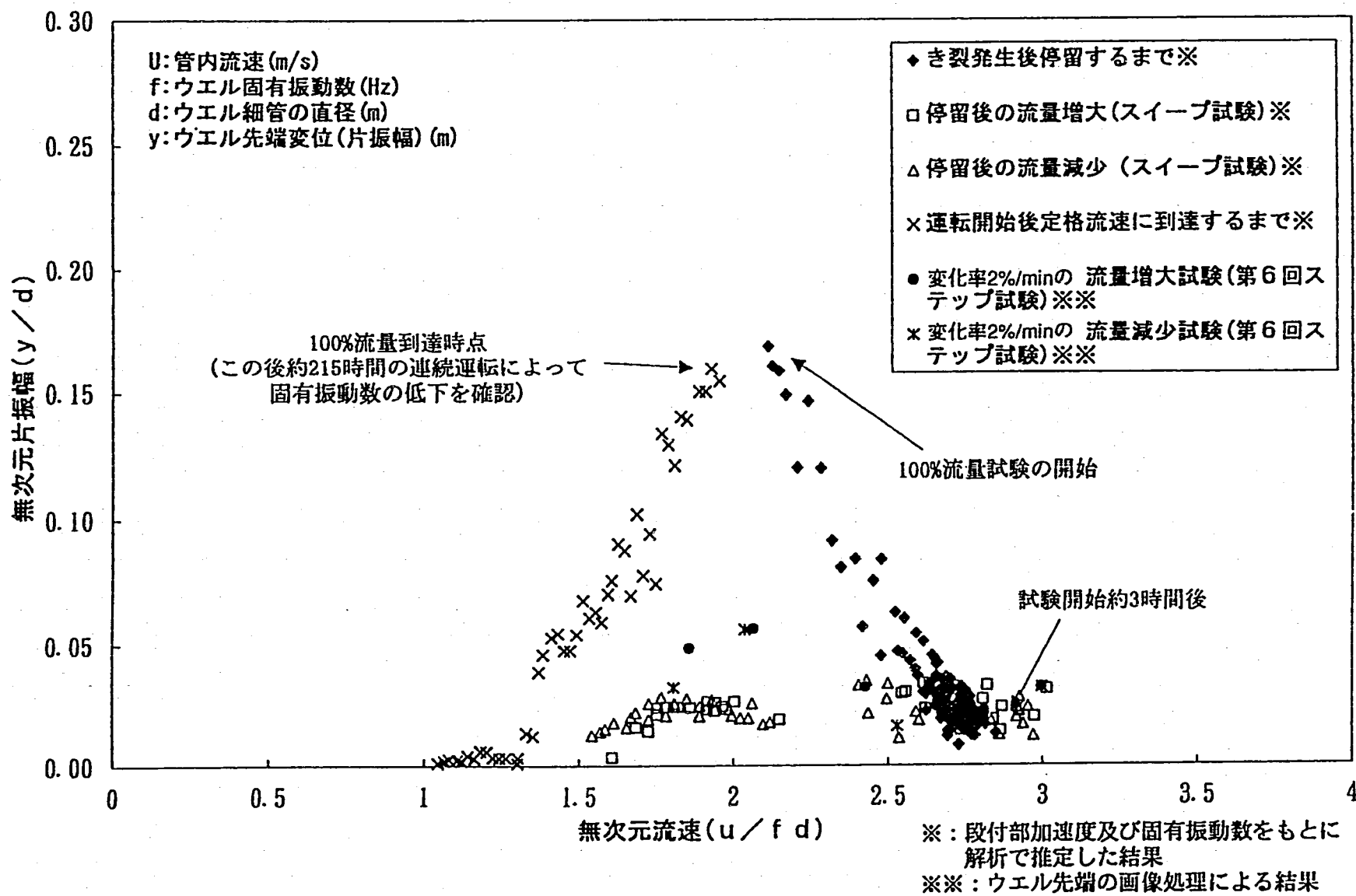


図-8. 無次元流速とウェル先端振動振幅との関連

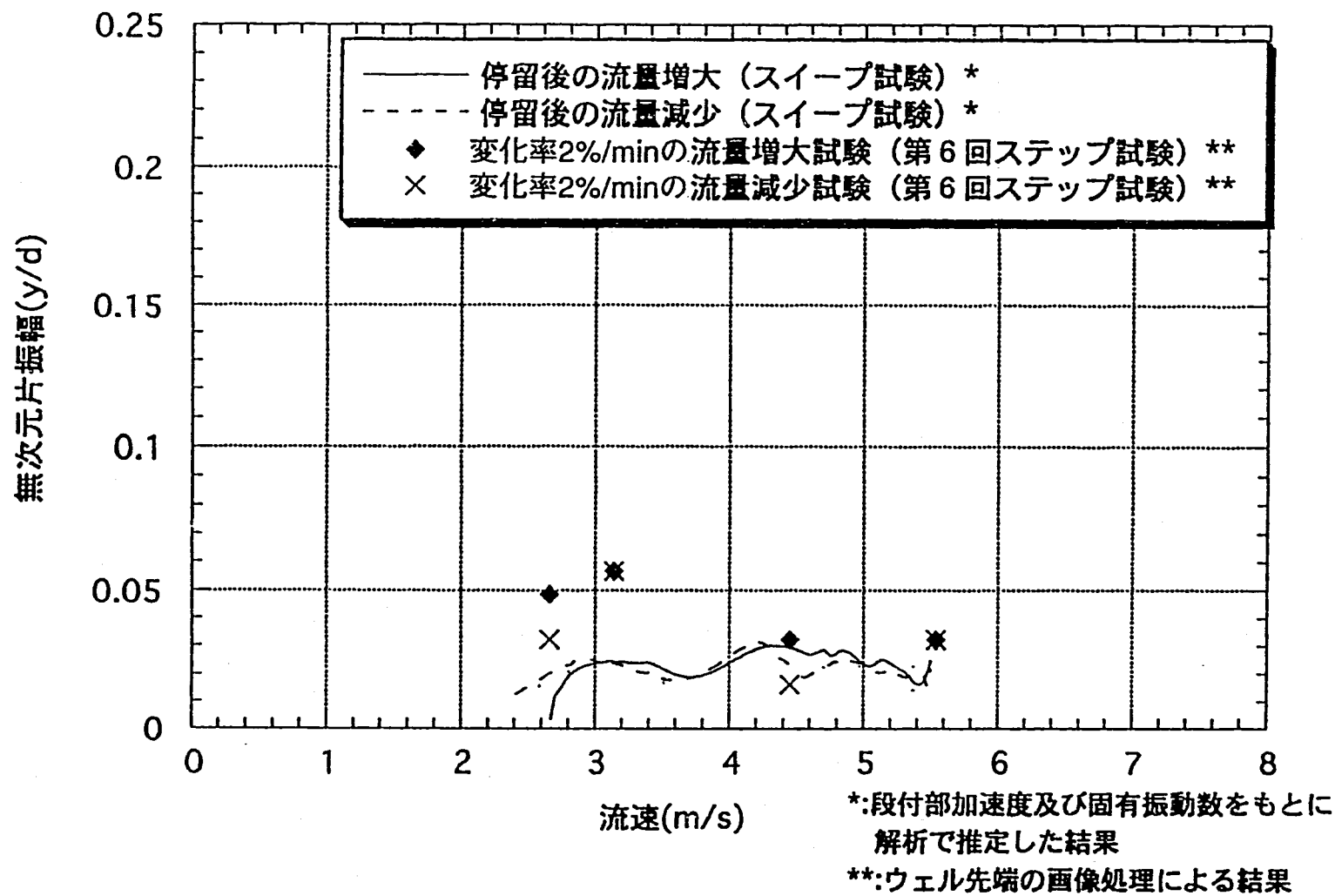
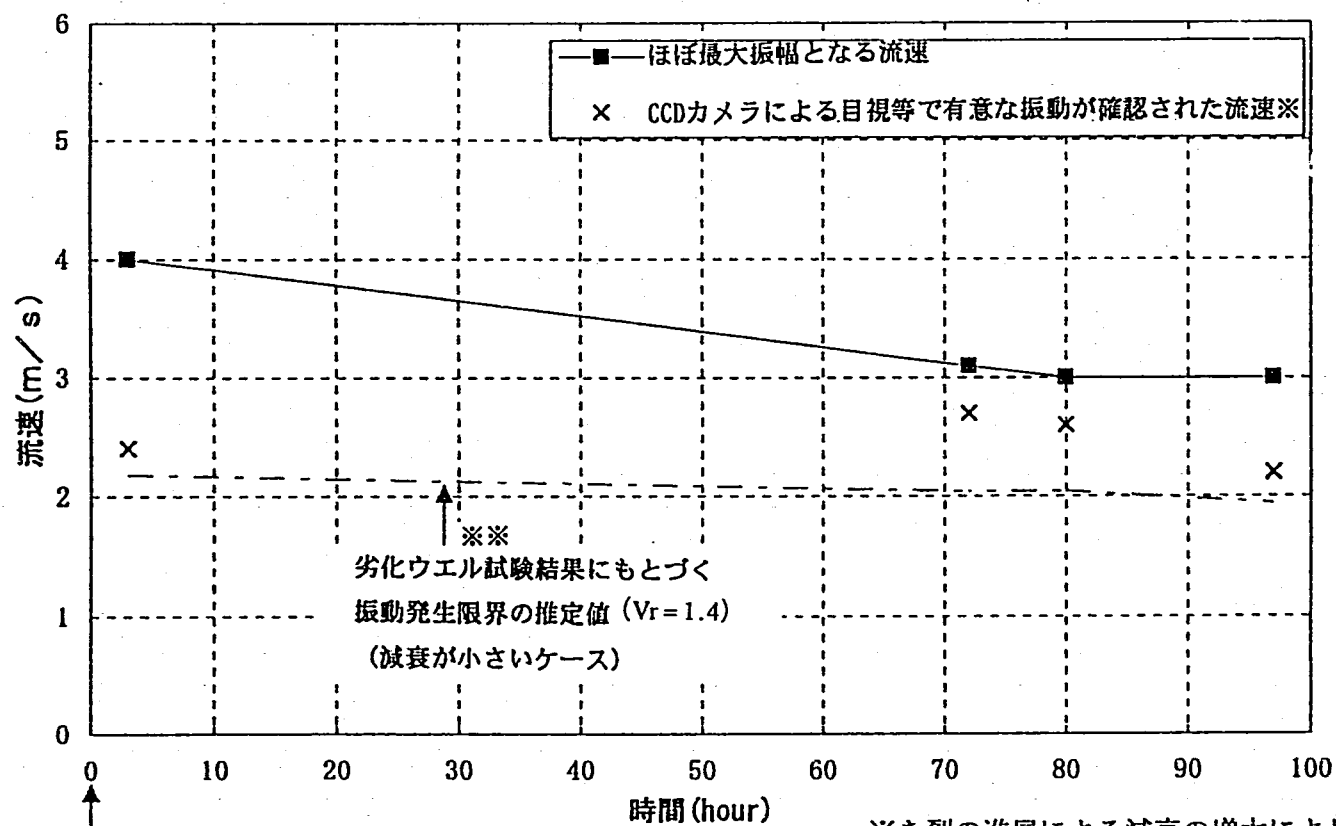


図-9 ウェル先端無次元片振幅と流速の関係



(試験開始約215時間後)

※き裂の進展による減衰の増大により、振動が発生する流速の限界は、ばらつく傾向にある。

※劣化ウェル：固有振動数を低下させるため肉厚を30mmの幅にわたって1mmに減肉したウェル。固有振動数は110Hz。

(注) 振動は約130時間以降は
ほぼ停留する傾向にある

図-10. き裂進展にともなう振動発生領域の変化
(下降スイープ試験の結果、流れ方向)

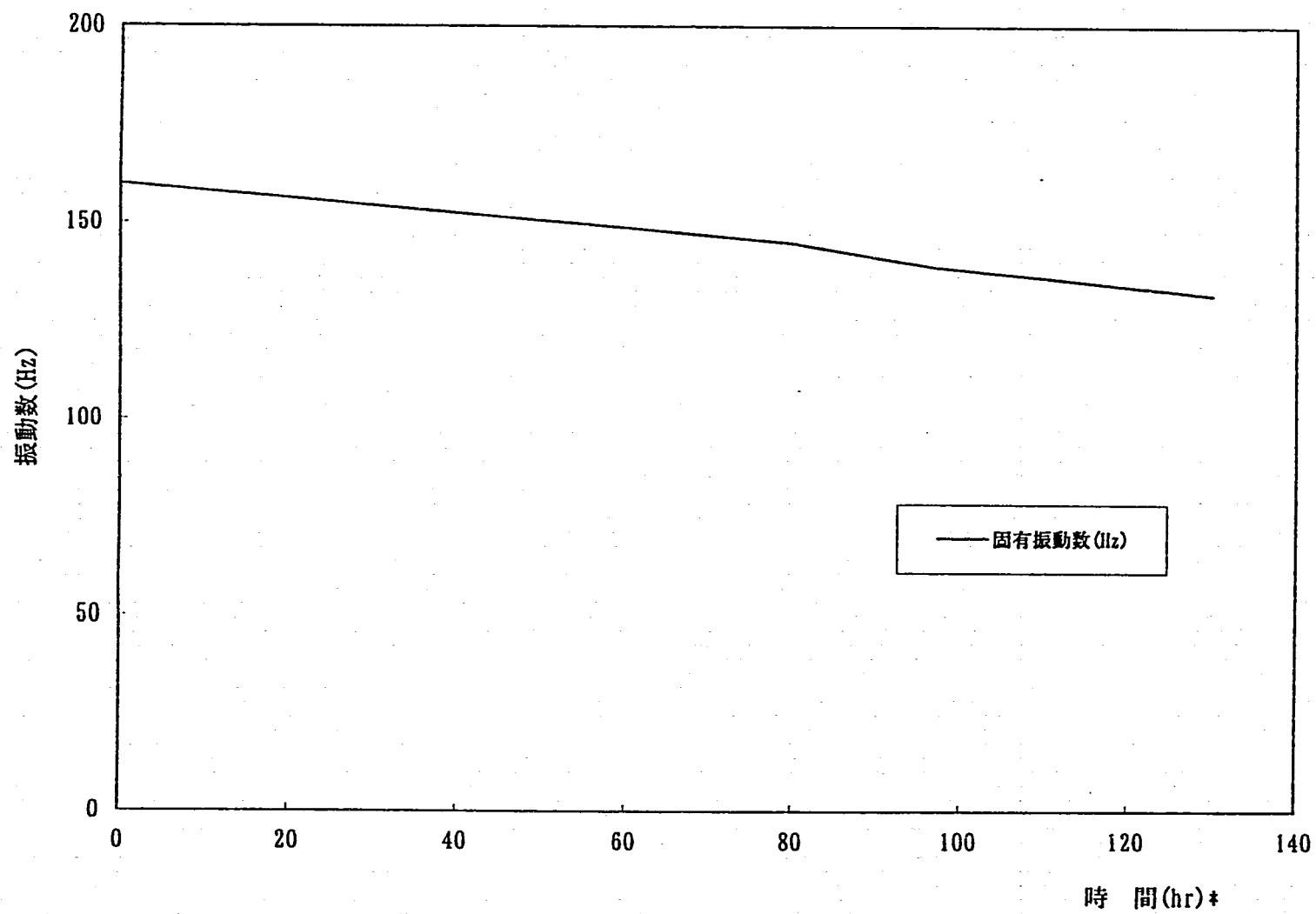


図-11. 固有振動数の時間変化 (流れ方向: 低流量状態)

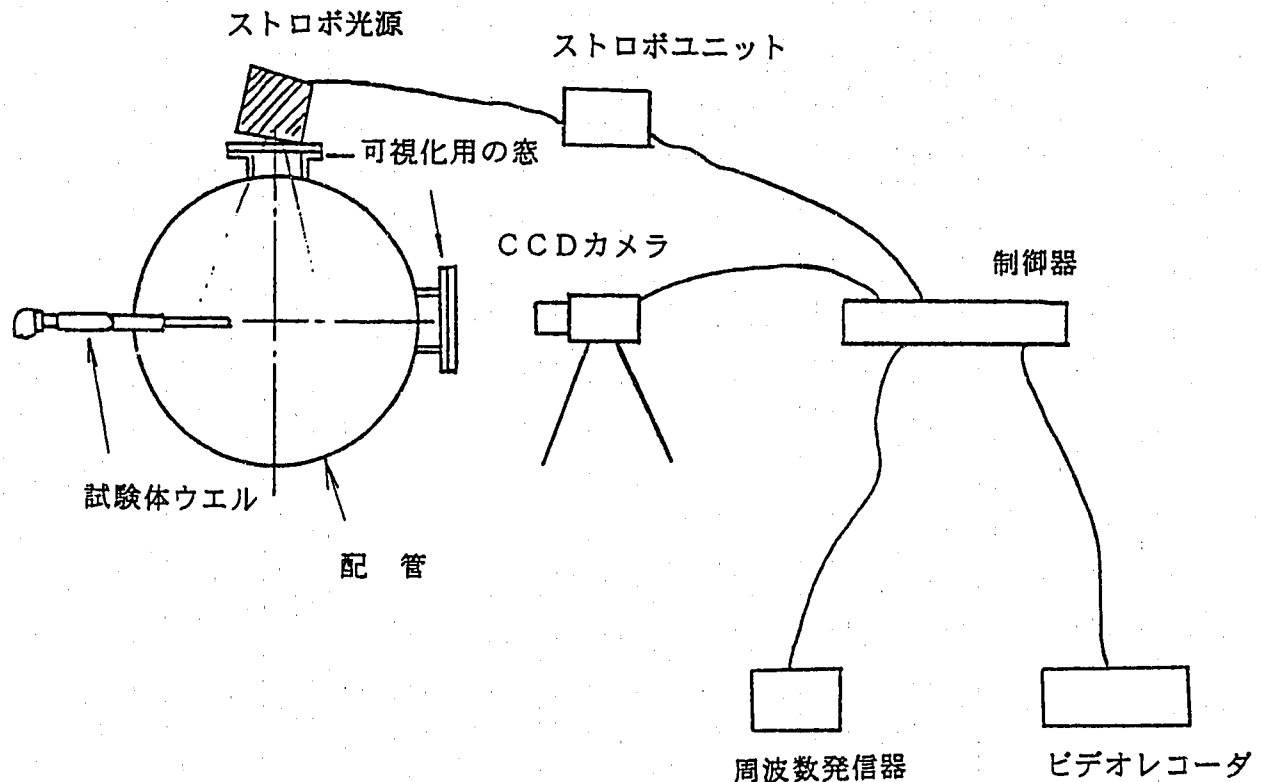
*: 100%流量運転による停留後の時間

[添付資料1] CCDカメラによるウエル先端部の振動挙動測定

測定器の配置を下図に示す。温度計ウエルの対面にCCDカメラを、さらに上部の可視化窓にストロボ光源を設置した。このCCDカメラからの画像の取り込みと、ストロボ光の発光のタイミングを同期させることで振動挙動を可視化した。

この方法によって、温度計ウエルの振動数とストロボの発光周波数を、たとえば1Hzずらすことで、あたかもウエルが1Hzで振動しているような画像が得られる。また、ウエルがほぼ停止して見える発光周波数がウエルの固有振動数に対応する。計測結果は以下のとおりであり、その妥当性を確認している。

- ・ ウエル固有振動数：259Hz（段付部加速度計の結果：259Hz）
- ・ ウエル先端片振幅：段付部加速度計の結果に基づく評価(1.3mm)とほぼ同等



測定器の構成

2次主冷却系ホットレグ200℃等温・100%流量での評価流速の訂正

平成8年11月13日

動燃事業団

1. 訂正内容

2次主冷却系ホットレグ200℃等温・100%流量状態での評価流速を5.0m/sから5.2m/sに訂正する。

2. 訂正理由

実機における100%流量の定義は電磁流量計通過時の温度が325℃として、定格質量流量3740ton/hから算出した体積流量=4278m³/hとしている。総合機能試験時の200℃等温、100%流量試験においてはこの4278m³/hを合わせるようにした。一方、温度計の流力振動評価に用いた流速については、100%流量時の定格質量流量（3740ton/h）からナトリウム温度200℃時での密度で体積流量を求め、配管断面積で割ることにより流速を算出したため違いが生じた。なお、他の運転状態の流速についても同じ考え方で流速を算出したが、たまたまコールドレグの温度が325℃であったため一致した。以上をまとめて表1に示す。

3. 訂正部分

1) 第9回T/F会合資料「流体力による温度計の振動について（中間報告第2報）－100%流量状態の再検討－」による報告内容：

抗力方向平均変位振幅が約3～5%増加する。流速訂正前後の詳細対比を別添1に示す。

2) 第10回T/F会合資料「流体力による温度計の振動について（中間報告第4報）－き裂発生以降破損に至るまでの検討－」による報告内容：

流速訂正前後で推定したき裂進展、停留の過程は同一であり、破損に至るまでの考えられる時間的推移に変更はない。なお、今回の評価では初期き裂深さをき裂発生後の最初の停留位置のものと訂正した。流速訂正前後の詳細対比を別添2に示す。

3) 第12回T/F会合資料「流体力による温度計の振動について（概要）」による報告内容：

累積疲労損傷係数の算定値は約5%変化する。流速訂正前後の詳細対比を別添3に示す。

4) 第13回T/F会合資料資料「水中疲労確認試験結果(その2)」による報告内容:

水中疲労確認試験(その1)では100%相当流速を5.5m/sで実施し、(その2)では5.0m/sで試験を実施して、ほぼ同様なき裂進展と停留挙動が模擬された。これら両試験の間にある200℃等温流量時の流速5.2m/sでのき裂挙動は、両試験結果に包絡されており確認内容に問題ない。流速条件に関する試験結果の包絡性についての詳細内容を別添4に示す。

5) 流速訂正に伴う影響について

以上1)～4)に示したとおり、流速変更に伴う振動応答の差違は僅かであり、推定した破損メカニズムや破損経緯に影響を与えるものではないと判断できる。

表1 評価流速の根拠について

温度 (℃)		流量 (m ³ /h) (%)		当該部流速 (m/s)		異なる理由
コールドレグ	ホットレグ (当該部)	コールドレグ	ホットレグ	報告書 (解析条件)	実流速 (計算値)	
200℃	200℃	4278 (100%)	4278 (100%)	5.0	5.2	定格質量流量 (3740ton/h) からナトリウム温度 200℃の密度で算出し、体積流量が4139m ³ /h となった。
325℃	325℃	4278 (100%)	4278 (100%)	5.2	5.2	定格質量流量 (3740ton/h) からナトリウム温度 325℃の密度で体積流量を算出したが、コールドレグ側の温度が325℃であったので一致した。
*1 (325℃)	485℃	4278 (100%)	4474 (100%)	5.4	5.4	定格質量流量 (3740ton/h) からナトリウム温度 485℃の密度で体積流量を算出したが、コールドレグ側の温度を325℃と見なしたため一致した。
325℃	505℃	4278 (100%)	4500 (100%)	5.5	5.5	定格質量流量 (3740ton/h) からナトリウム温度 505℃の密度で体積流量を算出したが、コールドレグ側の温度が325℃であったので一致した。

*1：質量を一定として考えたため、コールドレグの温度は325℃と見なしたと同じである。（実機ではこのような運転条件は無い）

第9回T/F会合資料「流体力による温度計の振動について（中間報告第2報）-100%流量状態の再検討-の正誤表

訂正箇所	訂正前	訂正後
・ 補足資料 3 P.1,l下3	流速 (5.0m/s)	流速(5.2m/s)
・ " P.2,l.8	単位面積当たりの質量流量 ρv 4,500kg/m ² s 4,500kg/m ² s 4,500kg/m ² s	体積流量 4,300m ³ /h 4,300m ³ /h 4,300m ³ /h
・ " P.2, l.10	質量流量を一定にして	体積流量を一定にして
・ " P.2, l.11	単位面積当たりの質量流量	体積流量
・ " P.5,l.2	$k_s=0.42$	$k_s=0.54$
・ " P.5,l.17	0.046mm	0.050mm
・ " P.5,l.18	(0.003mm)	(0.0014mm)
・ " P.5,l.19	0.071mm	0.082mm
・ " P.6,l.2	1.56mm	1.62mm
・ " P.6,l.2	0.10mm	0.12mm
・ " P.6,l.14	$k_s=0.84$	$k_s=1.08$
・ " P.6,l.22	1.23mm	1.29mm
・ " P.6,l.23	0.094mm	0.102mm
・ " P.6,l.23	79%	80%
・ " P.6,l.24	93%	89%
・ " P.7,l.8	0.91mm	0.94mm
・ " P.7,l.9	0.15mm	0.18mm

訂正箇所		訂正前	訂正後
・	” P.7,l.14	1.56mm	1.62mm
・	” P.7,l.15	0.10mm	0.12mm
・	” P.7,l.15	1.23mmmm	1.29mm
・	” P.7,l.16	0.094mm	0.10mm
・	” P.7,l.17	0.91mm	0.94mm
・	” P.7,l.17	0.15mm	0.18mm
・	” P.7,l.18	1.56	1.62
・	” P.7,l.18	0.91mm	0.94mm

変更前

流速 5.0 m/s

表1 減衰定数 0.5%の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.25秒から1.1秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	47.4	3.1	0.046	0.0029
平均値まわりのRMS	215	47.4	1.10	0.071
変位振幅の平均値	—	—	1.56	0.10

流速 5.0 m/s

表2 減衰定数 0.5%の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.6秒から1.10秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	47.1	4.7	0.046	0.0046
平均値まわりのRMS	214	41.8	1.10	0.062
変位振幅の平均値	—	—	1.55	0.088

変更後

流速 5.2 m/s

表1 減衰定数0.5%の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.25秒から1.1秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	56.5	-1.65	0.052	-0.0014
平均値まわりのRMS	225	53.9	1.14	0.082
変位振幅の平均値	—	—	1.62	0.115

流速 5.2 m/s

表2 減衰定数0.5%の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.6秒から1.10秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	54.7	-1.87	0.050	-0.0015
平均値まわりのRMS	226	60.0	1.15	0.089
変位振幅の平均値	—	—	1.62	0.126

変更前

流速 5.0 m/s

表 3 減衰定数 1% の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.25秒から1.1秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	46.5	8.4	0.045	- 0.0079
平均値まわりのRMS	173	40.4	0.87	0.066
変位振幅の平均値	—	—	1.23	0.094

流速 5.0 m/s

表 4 減衰定数 1.5% の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.25秒から1.1秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	54.6	-6.4	0.052	- 0.0058
平均値まわりのRMS	132	58.9	0.64	0.10
変位振幅の平均値	—	—	0.91	0.15

変更後

流速 5.2 m/s

表 3 減衰定数 1% の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.4秒から1.1秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	52.5	-1.04	0.047	- 0.00084
平均値まわりのRMS	184	52.5	0.91	0.072
変位振幅の平均値	—	—	1.29	0.102

流速 5.2 m/s

表 4 減衰定数 1.5% の場合の圧力荷重と変位の統計量 (0.25秒から1.1秒まで)

	抗力 (N/m)	揚力 (N/m)	X-変位 (mm)	Y-変位 (mm)
時間平均値	63.0	3.7	0.056	0.0032
平均値まわりのRMS	138	74.4	0.67	0.013
変位振幅の平均値	—	—	0.94	0.18

変更前

流速 5.0 m/s

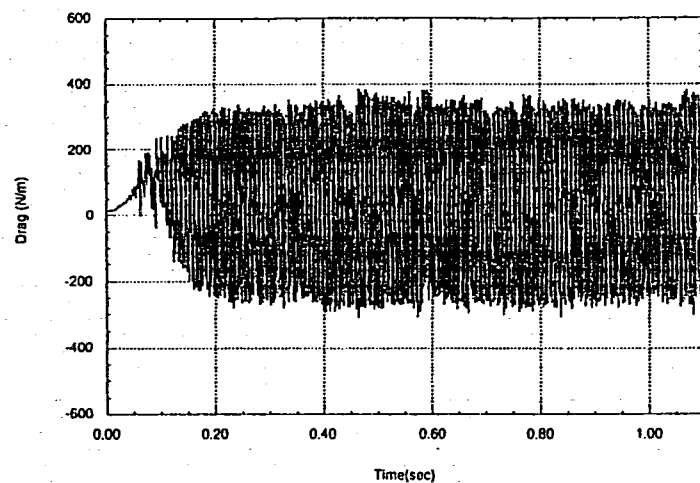


図4 抗力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

流速 5.0 m/s

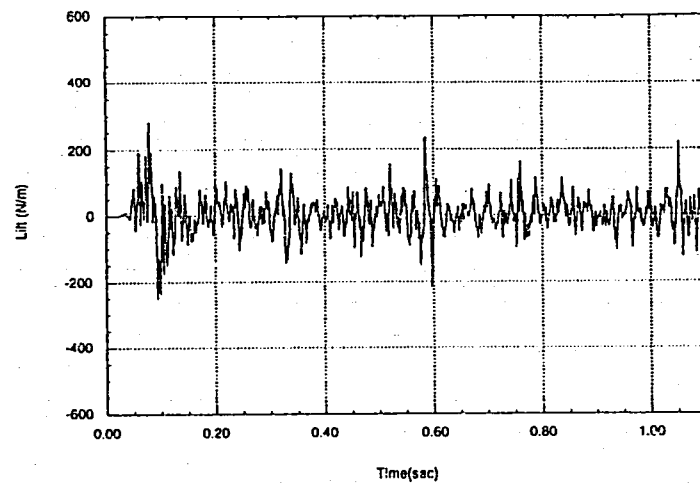


図5 揚力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

変更後

流速 5.2m/s

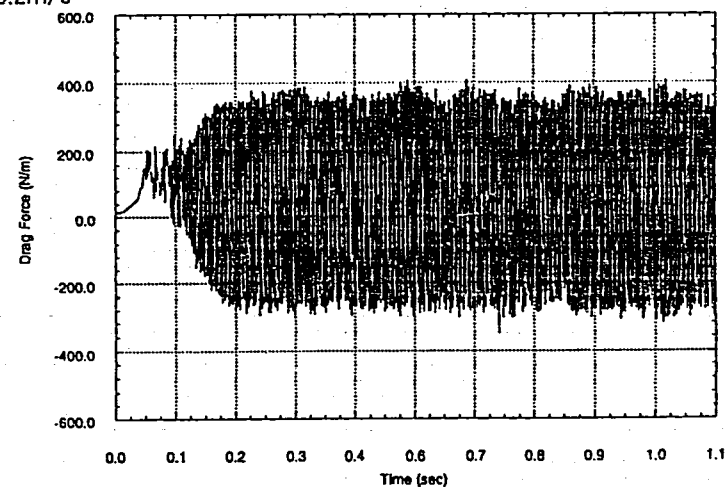


図4 抗力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

抗力振幅は 4.7 %増加する。

流速 5.2m/s

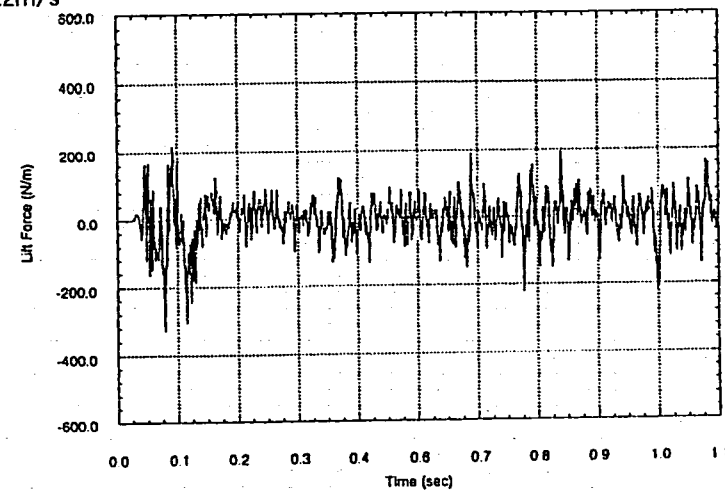


図5 揚力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

揚力振幅は14%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

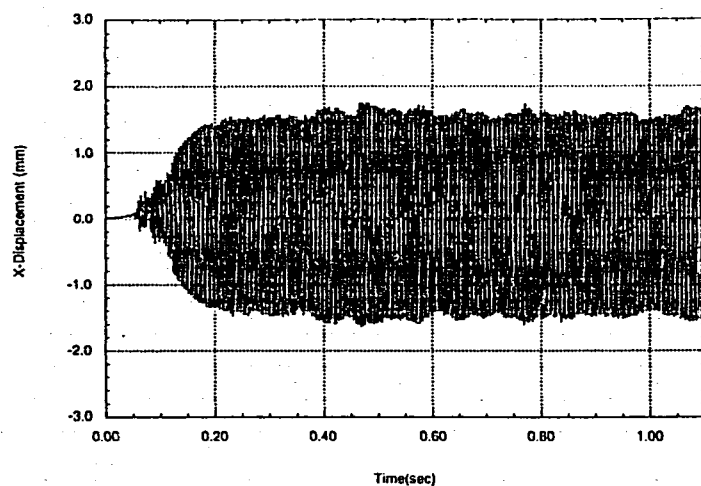


図6 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

変更前

流速 5.0 m/s

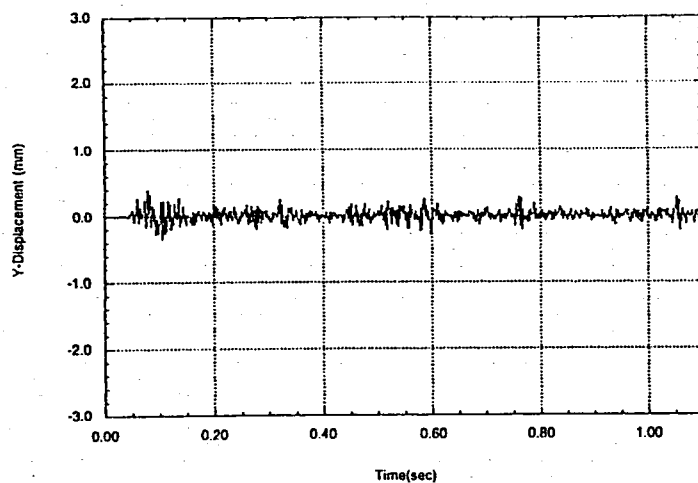


図7 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

変更後

流速 5.2m/s

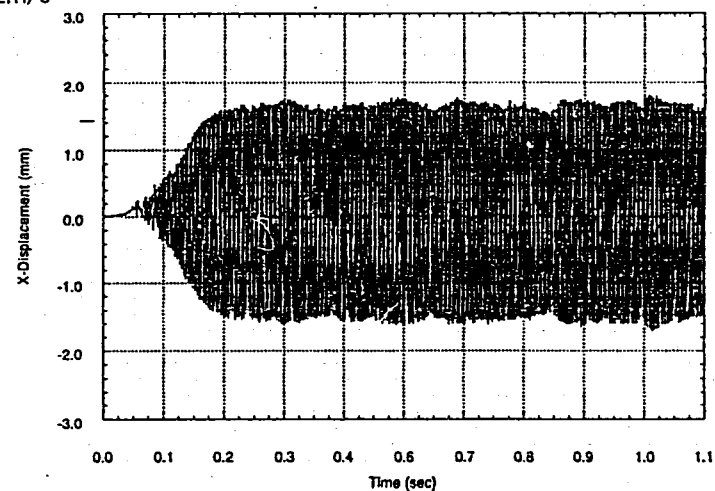


図6 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

流速 5.2m/s

抗力方向変位振幅は3.8%増加する。

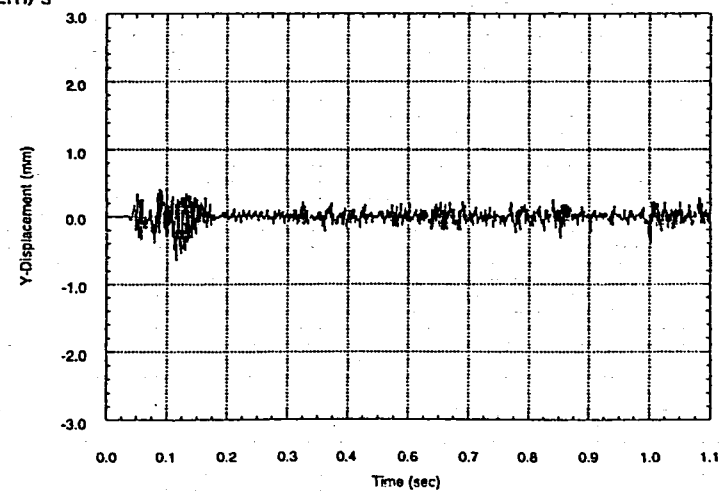


図7 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

揚力方向変位振幅は15%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

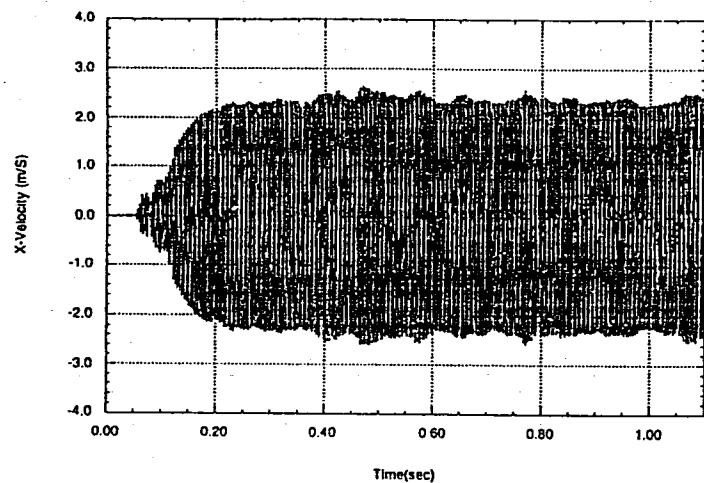


図8 抗力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数0.5%)

流速 5.0 m/s

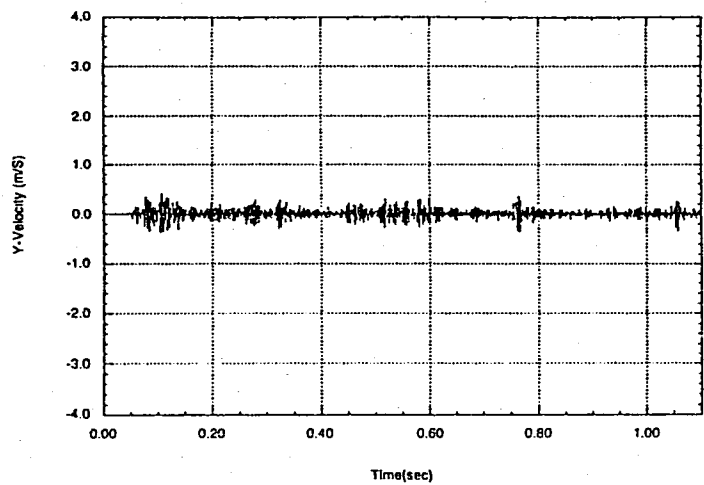


図9 揚力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数0.5%)

変更後

流速 5.2m/s

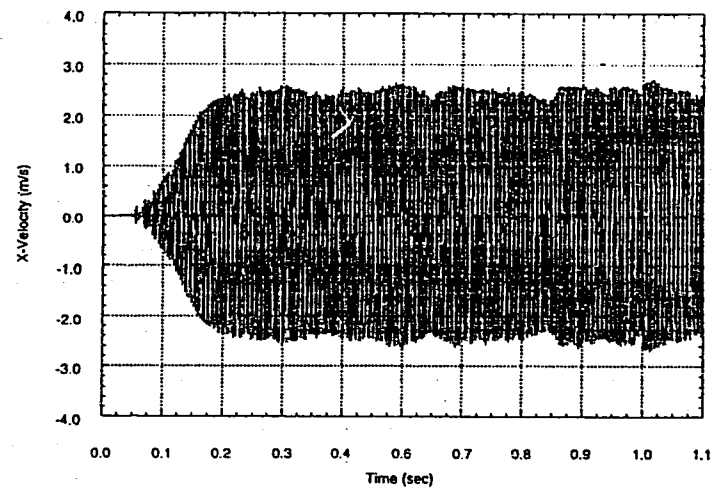


図8 抗力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数0.5%)

抗力方向変位速度振幅は3.8%増加する。

流速 5.2m/s

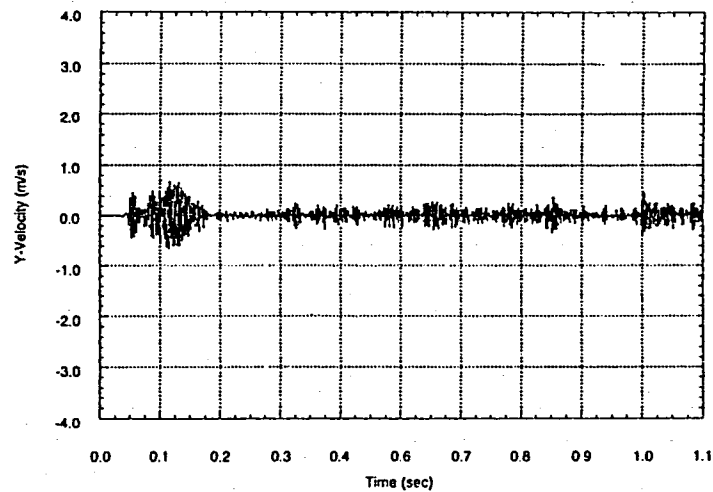


図9 揚力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数0.5%)

揚力方向変位速度振幅は15%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

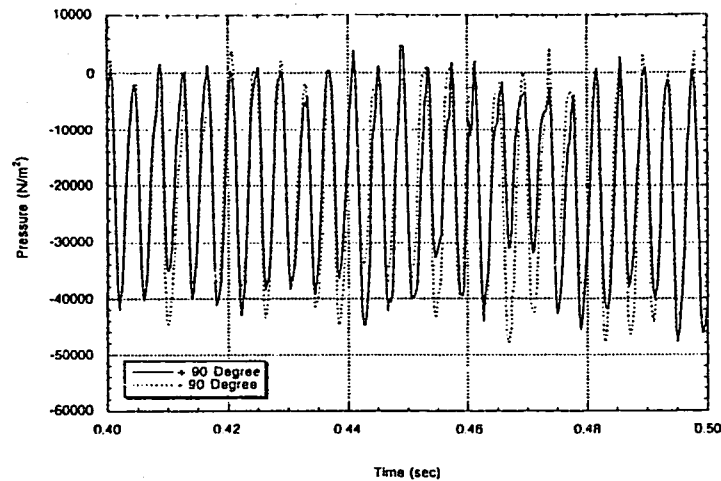


図11 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数0.5%）

流速 5.0 m/s

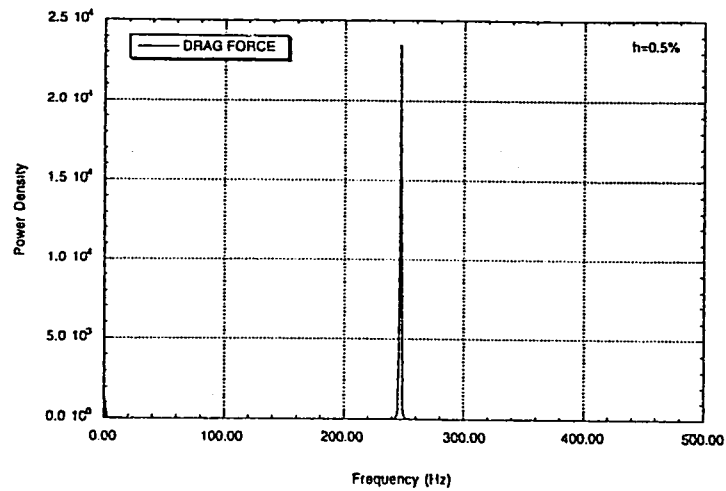


図13 抗力のパワースペクトル（減衰定数0.5%）

変更後

流速 5.2m/s

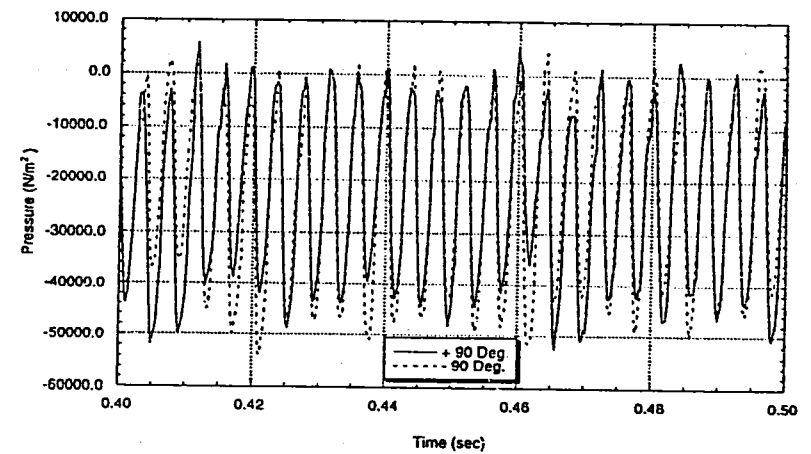


図11 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数0.5%）

流速を5.2m/sとしても、円柱両側面の点の圧力が同位相であることと温度計の固有振動数で圧力が変動している結果は変わらない。

流速 5.2m/s

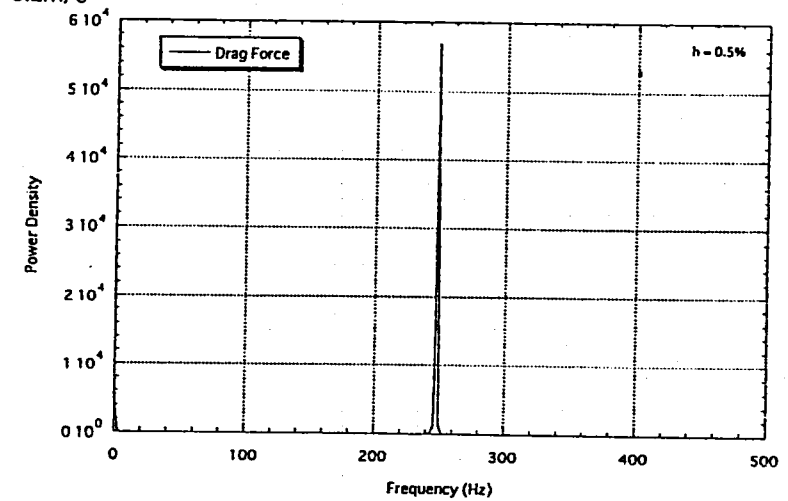


図13 抗力のパワースペクトル（減衰定数0.5%）

抗力が変動する周期は変わらない。

変更前

流速 5.0 m/s

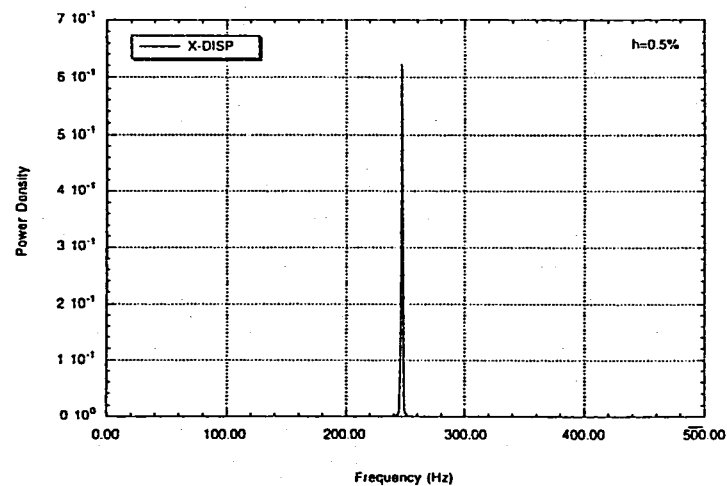


図14 抗力方向変位のパワースペクトル (減衰定数0.5%)

流速 5.0 m/s

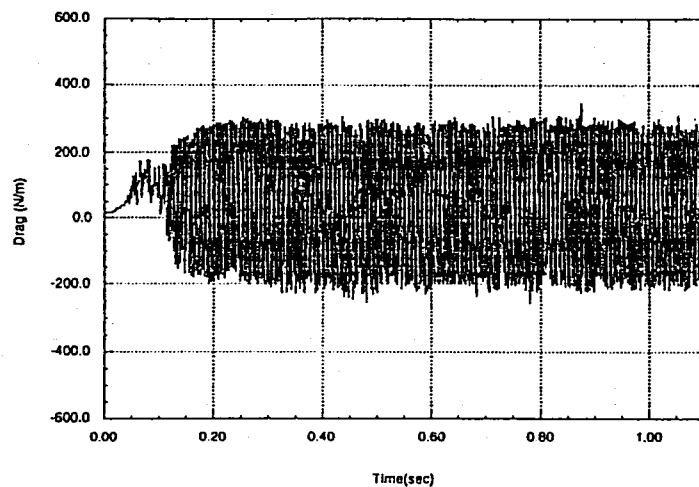


図15 抗力の時刻歴 (減衰定数1.0%)

変更後

流速 5.2m/s

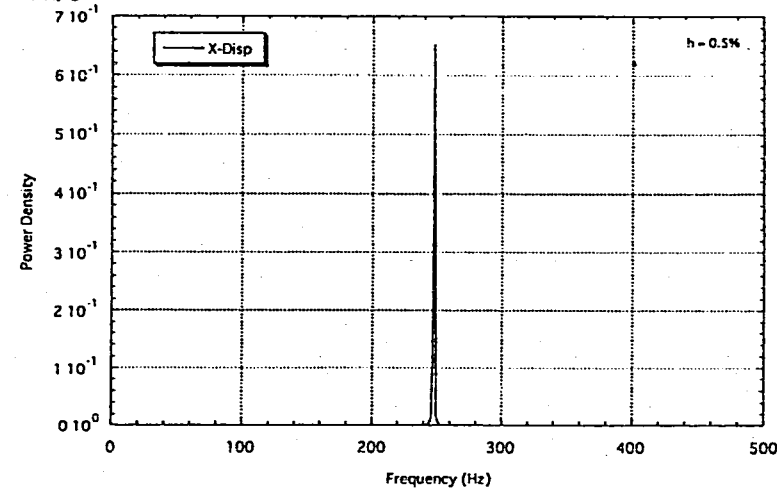


図14 抗力方向変位のパワースペクトル (減衰定数0.5%)

抗力方向変位が変動する周期は変わらない。

流速 5.2m/s

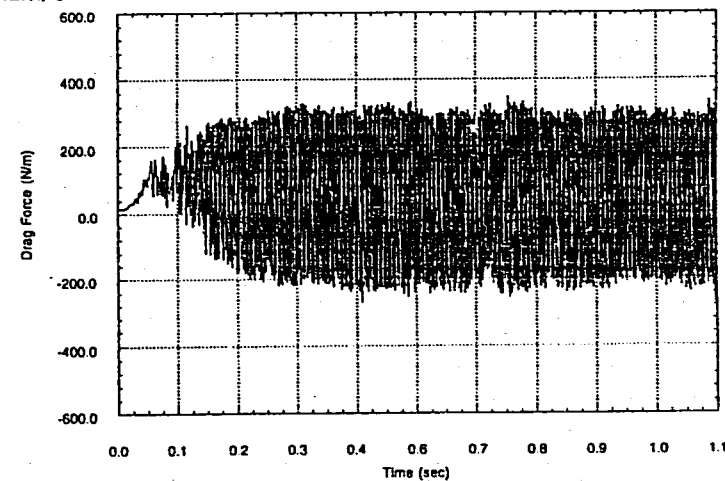


図15 抗力の時刻歴 (減衰定数1.0%)

抗力振幅は6.4%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

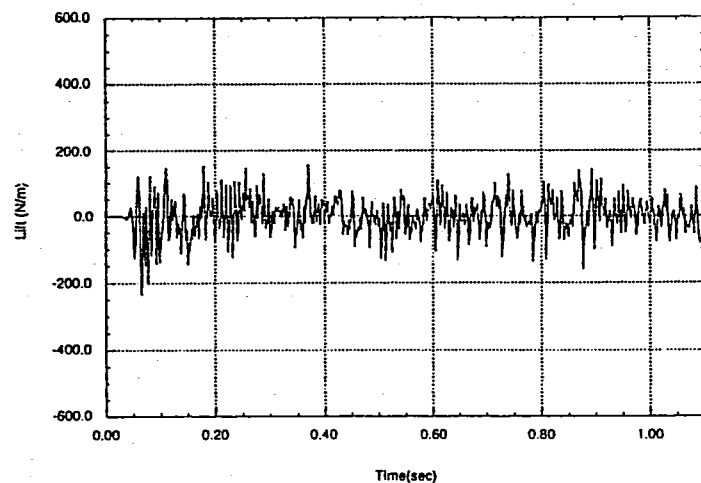


図16 揚力の時刻歴 (減衰定数1.0%)

流速 5.0 m/s

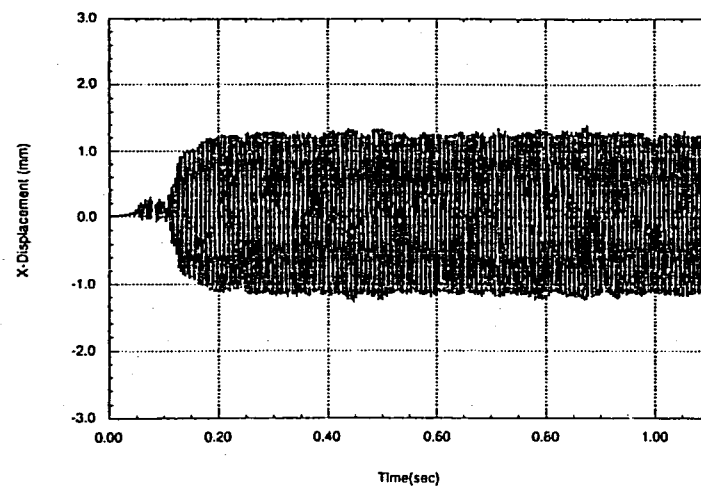


図17 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.0%)

変更後

流速 5.2m/s

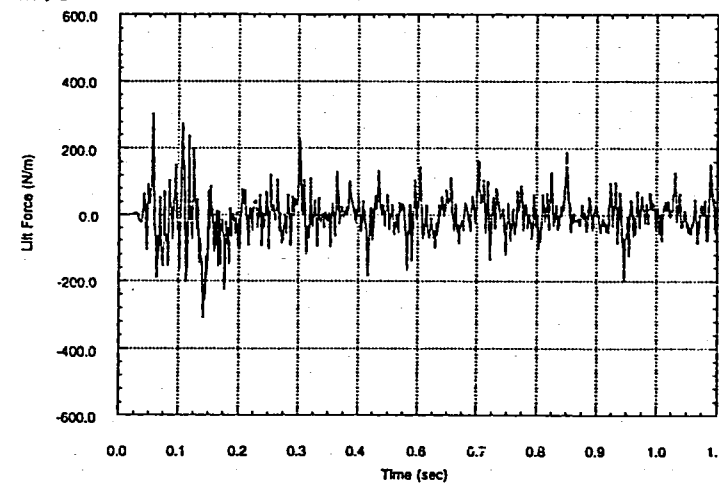


図16 揚力の時刻歴 (減衰定数1.0%)

揚力振幅は30%増加する。

流速 5.2m/s

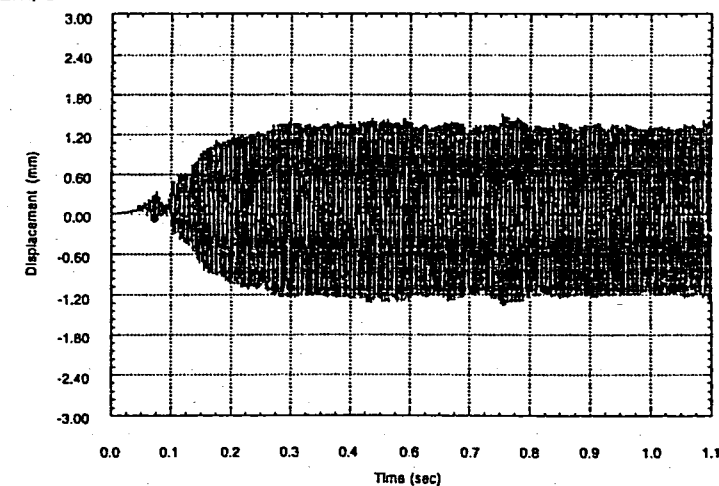


図17 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.0%)

抗力方向変位振幅は4.6%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

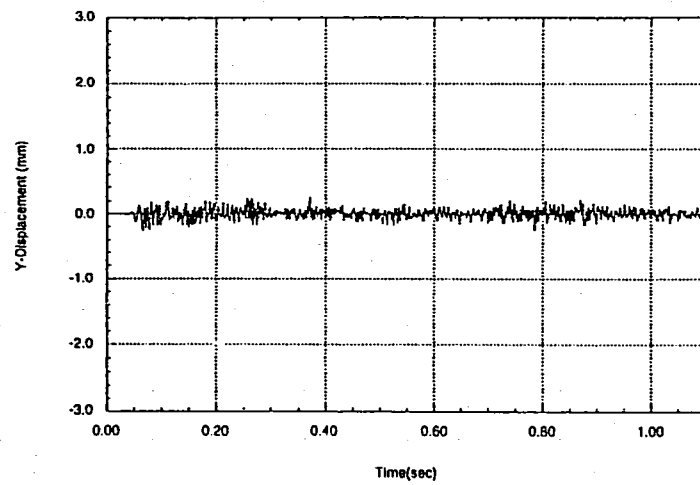


図18 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.0%)

流速 5.0 m/s

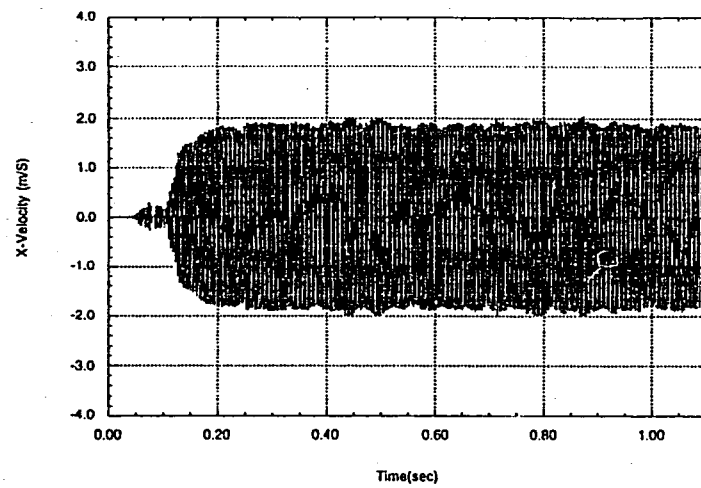


図19 抗力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数1.0%)

変更後

流速 5.2m/s

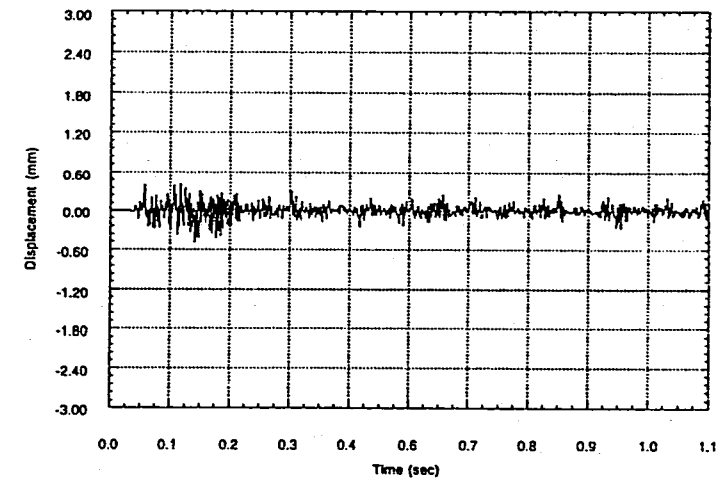


図18 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.0%)

揚力方向変位振幅は9.1%増加する。

流速 5.2m/s

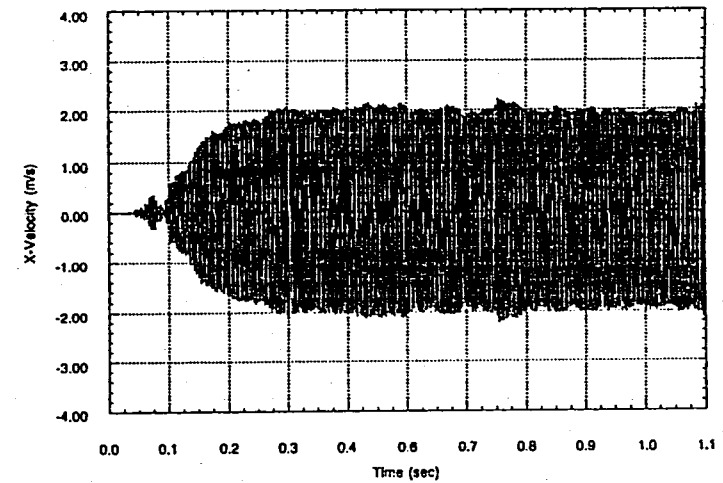


図19 抗力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数1.0%)

抗力方向変位速度振幅は4.6%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

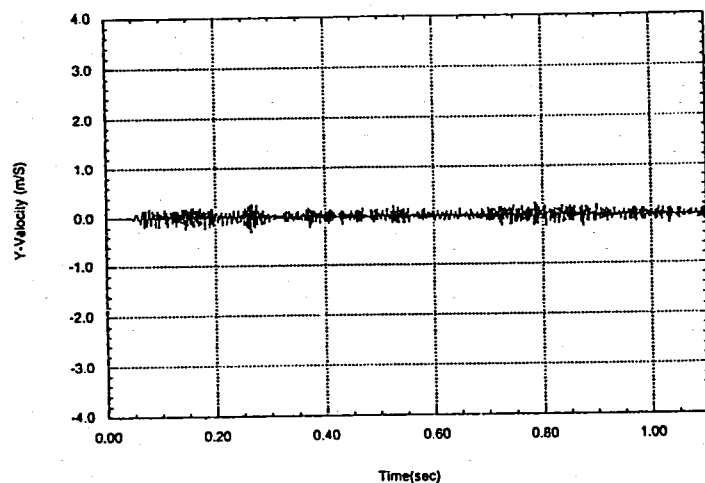


図20 揚力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数1.0%)

流速 5.0 m/s

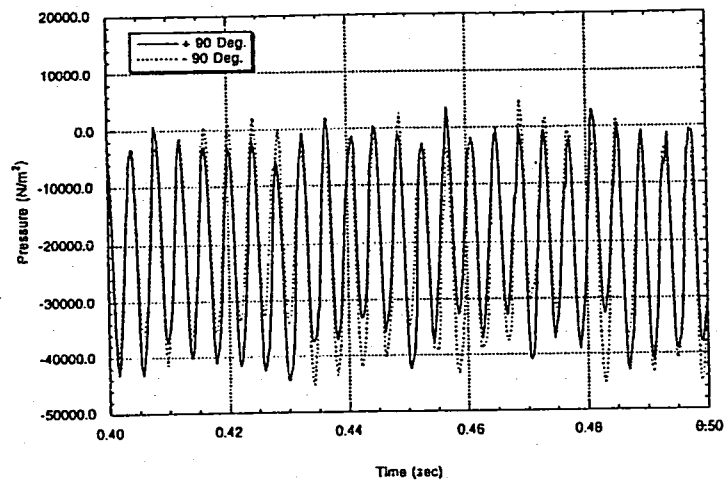


図21 円柱両側面 (90度と-90度の点) の圧力時刻歴 (減衰定数1.0%)

変更後

流速 5.2m/s

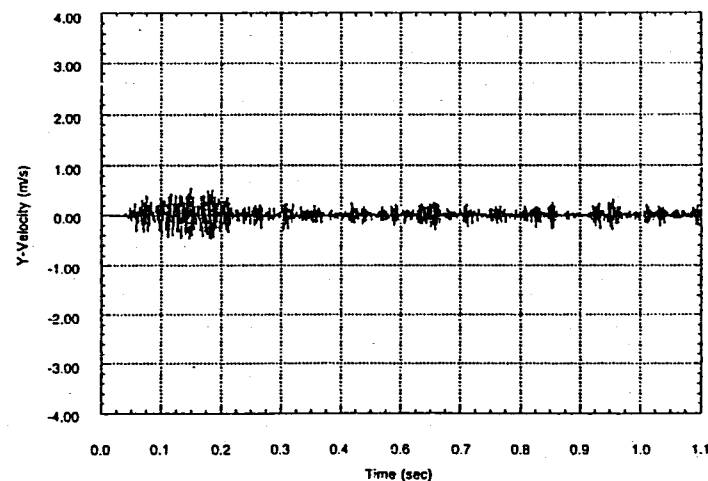


図20 揚力方向変位速度の時刻歴 (減衰定数1.0%)

揚力方向変位速度振幅は9.1%増加する。

流速 5.2m/s

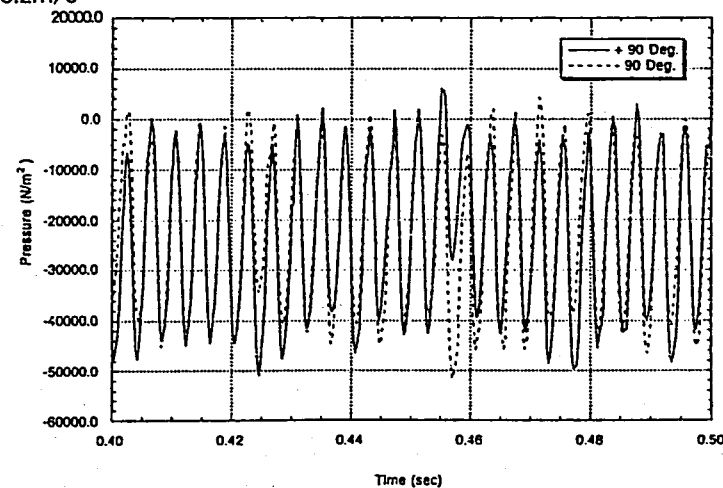


図21 円柱両側面 (90度と-90度の点) の圧力時刻歴 (減衰定数1.0%)

流速を5.2m/sとしても、円柱両側面の点の圧力が同位相であることと温度計の固有振動数で圧力が変動している結果は変わらない。

変更前

流速 5.0 m/s

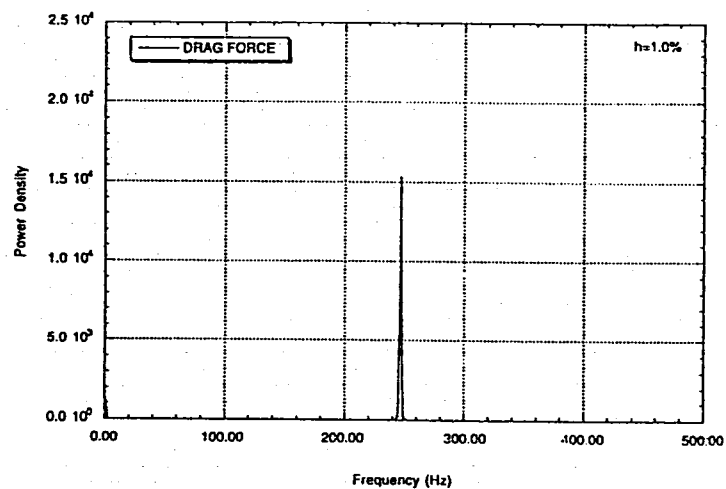


図22 抗力のパワースペクトル (減衰定数1.0%)

流速 5.0 m/s

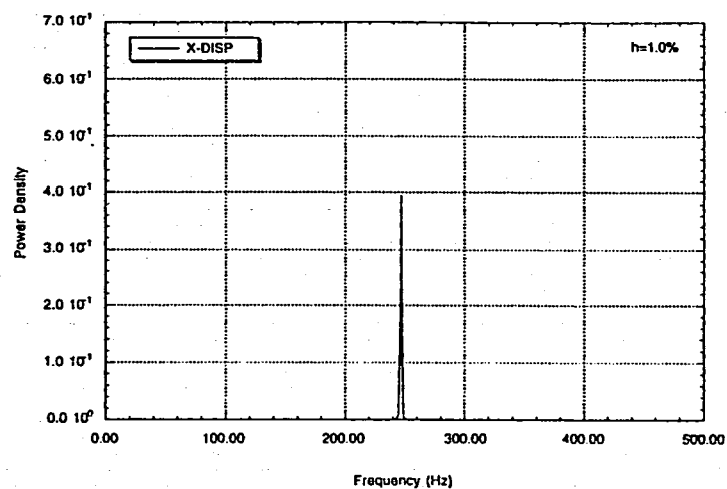


図23 抗力方向変位のパワースペクトル (減衰定数1.0%)

変更後

流速 5.2m/s

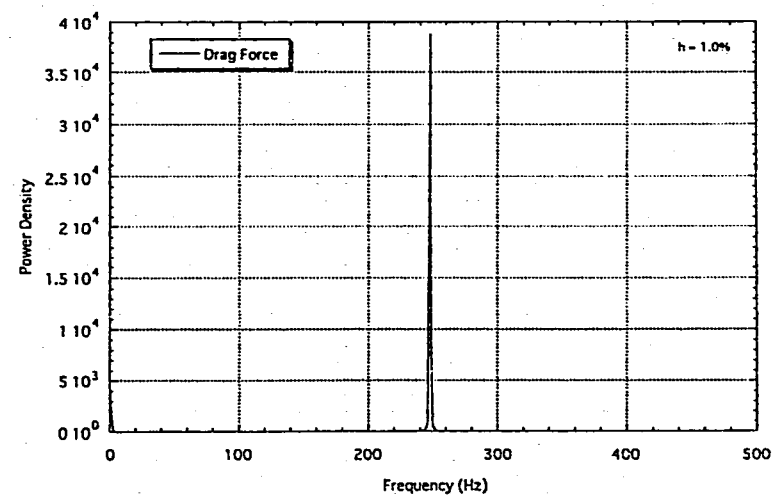


図22 抗力のパワースペクトル (減衰定数1.0%)

抗力が変動する周期は変わらない。

流速 5.2m/s

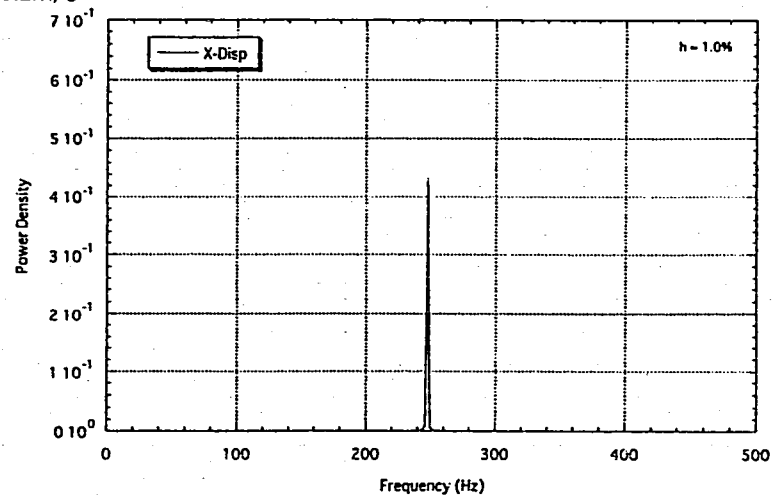


図23 抗力方向変位のパワースペクトル (減衰定数1.0%)

抗力方向変位が変動する周期は変わらない。

変更前

流速 5.0 m/s

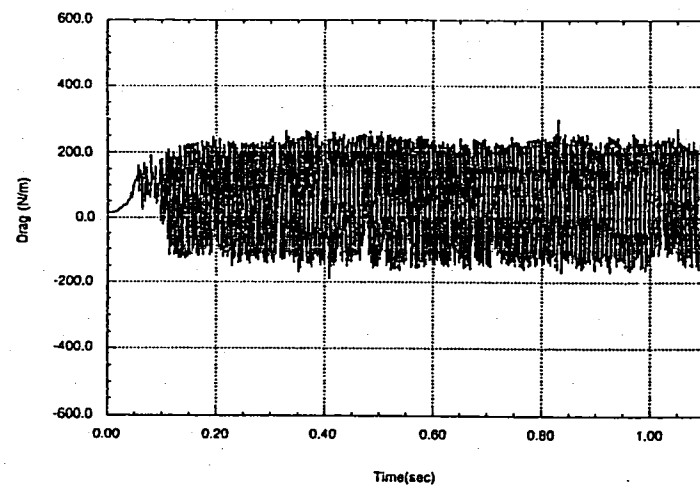


図24 抗力の時刻歴 (減衰定数1.5%)

流速 5.0 m/s

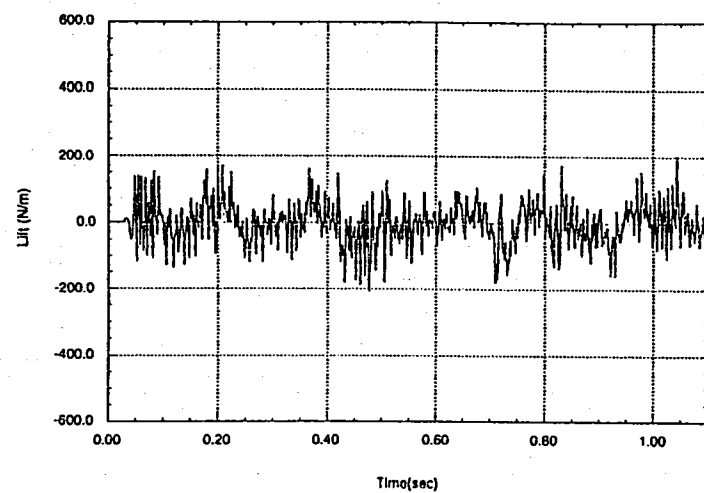


図25 揚力の時刻歴 (減衰定数1.5%)

変更後

流速 5.2m/s

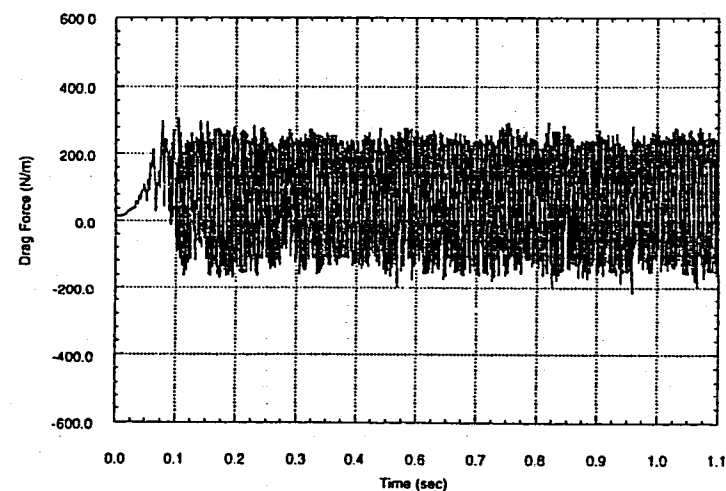


図24 抗力の時刻歴 (減衰定数1.5%)

抗力振幅は4.5%増加する。

流速 5.2m/s

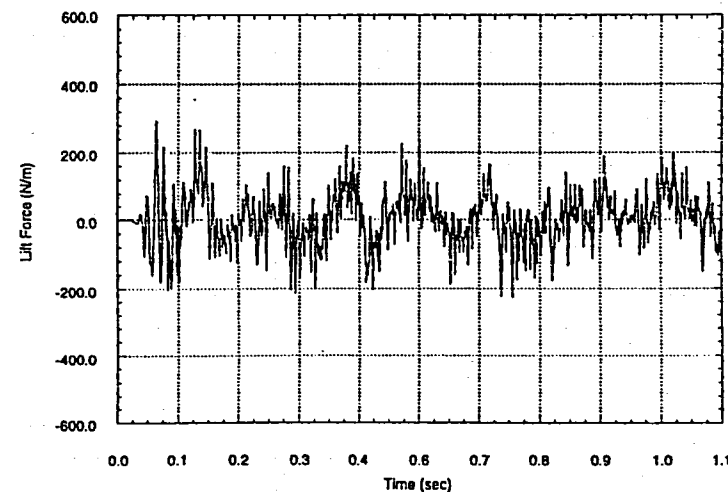


図25 揚力の時刻歴 (減衰定数1.5%)

揚力振幅は26%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

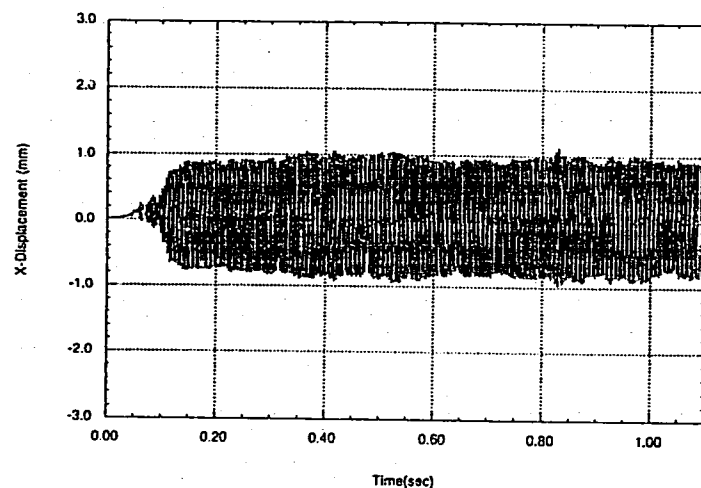


図26 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.5%)

流速 5.0 m/s

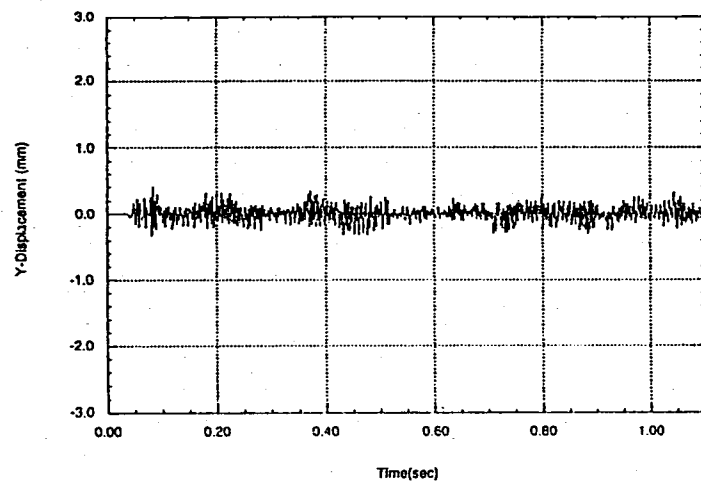


図27 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.5%)

変更後

流速 5.2m/s

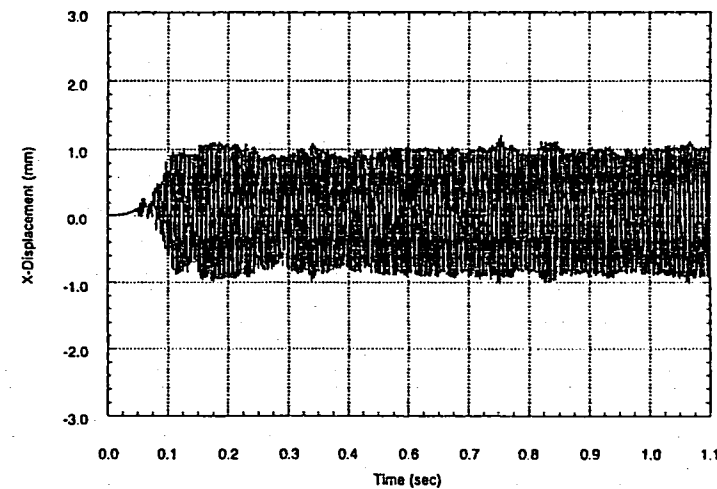


図26 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.5%)

抗力方向変位振幅は3.3%増加する。

流速 5.2m/s

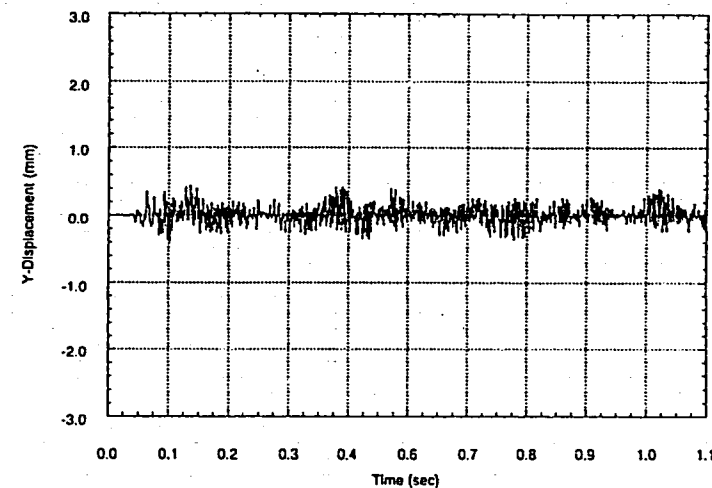


図27 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数1.5%)

揚力方向変位振幅は20%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

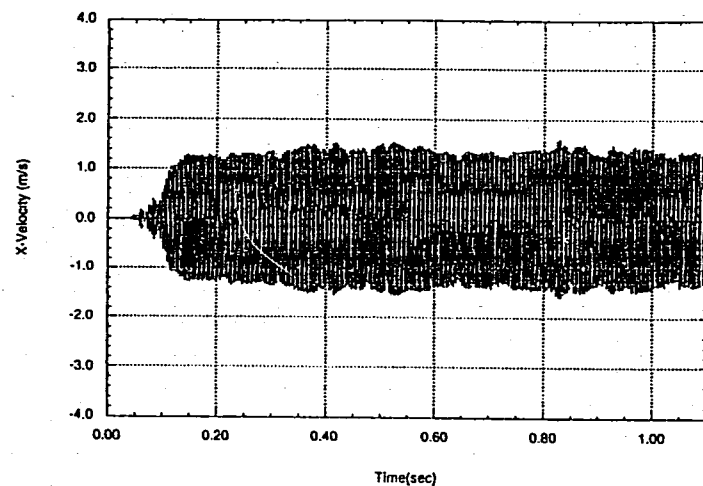


図28 抗力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

流速 5.0 m/s

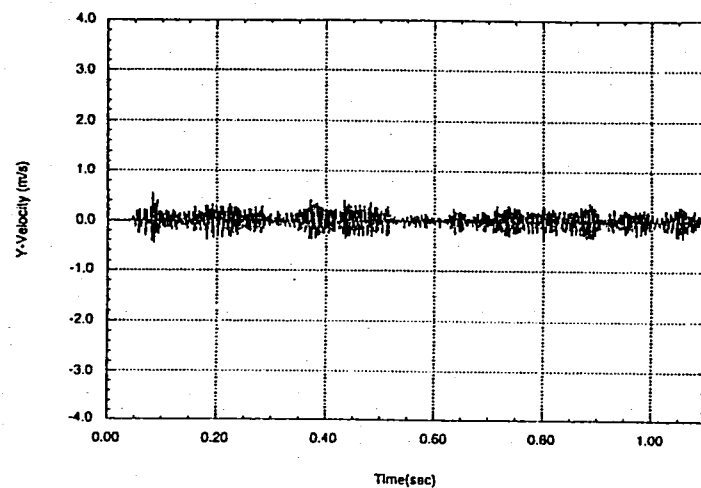


図29 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

変更後

流速 5.2m/s

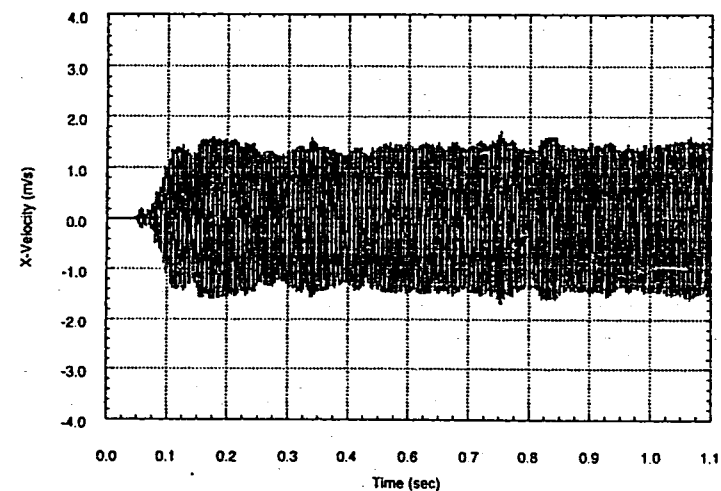


図28 抗力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

抗力方向変位速度振幅は3.3%増加する。

流速 5.2m/s

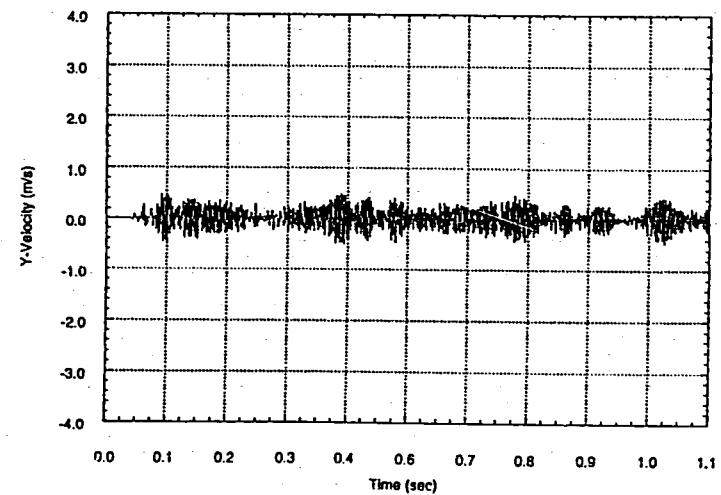


図29 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

揚力方向変位速度振幅は20%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

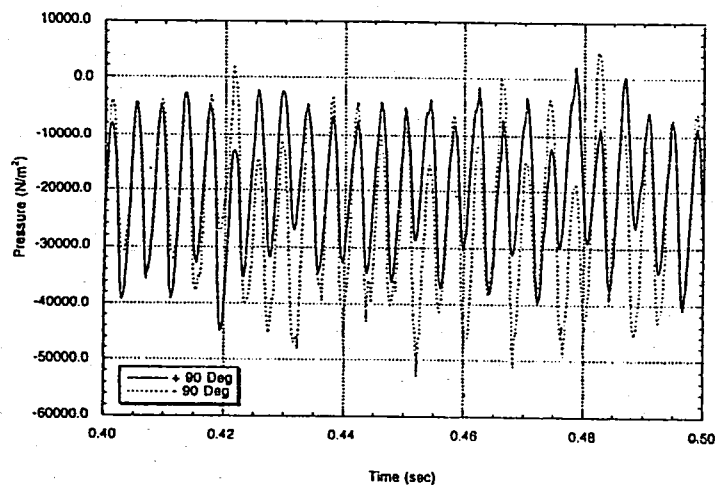


図30 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数1.5%）

流速 5.0 m/s

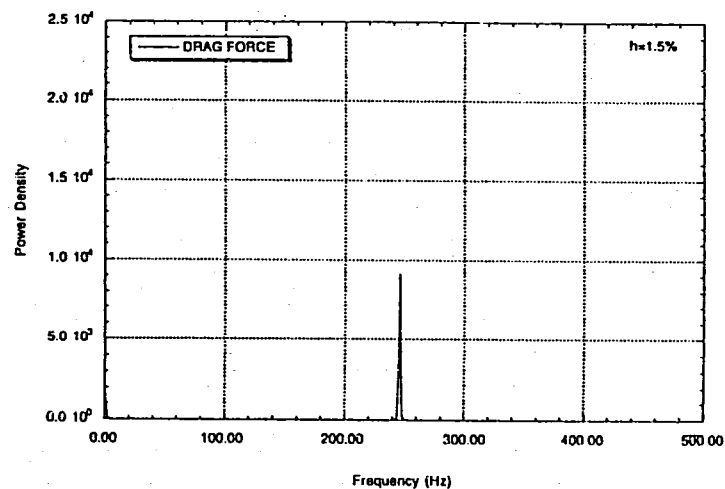


図31 抗力のパワースペクトル（減衰定数1.5%）

変更後

流速 5.2m/s

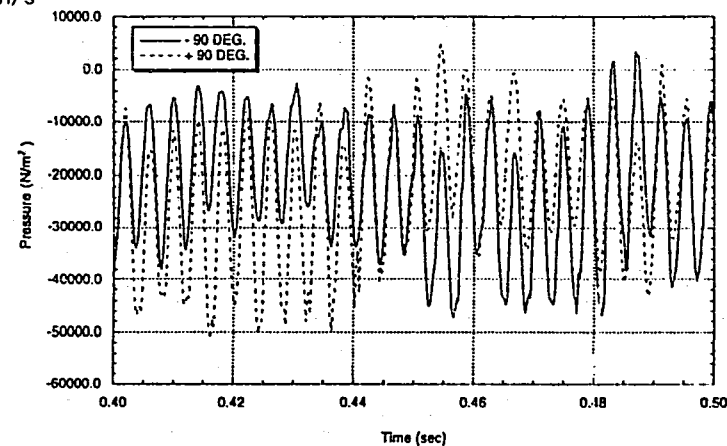


図30 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数1.5%）

流速を5.2m/sとしても、円柱両側面の点の圧力が同位相であることと温度計の固有振動数で圧力が変動している結果は変わらない。

流速 5.2m/s

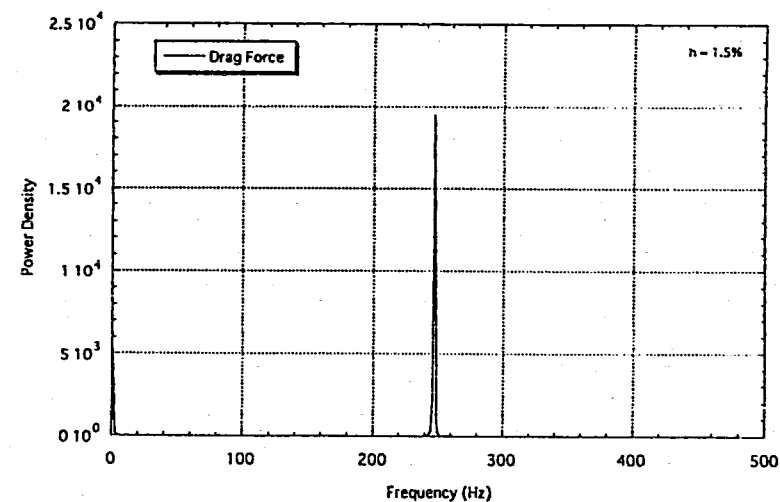


図31 抗力のパワースペクトル（減衰定数1.5%）

抗力が変動する周期は変わらない。

変更前

流速 5.0 m/s

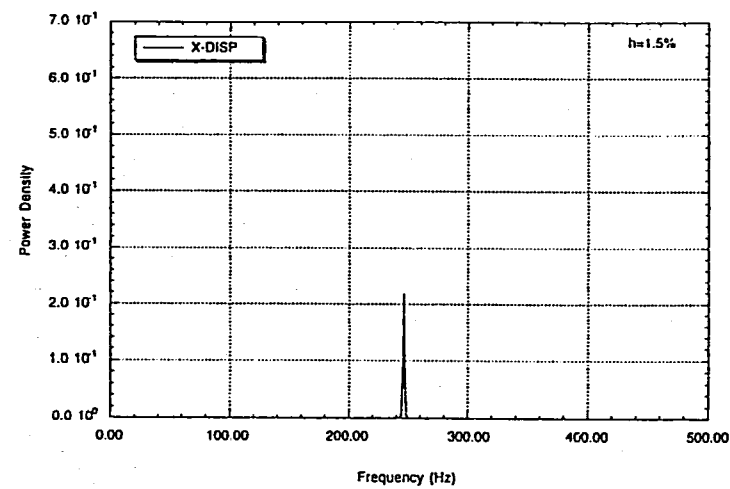


図32 抗力方向変位のパワースペクトル (減衰定数1.5%)

変更後

流速 5.2m/s

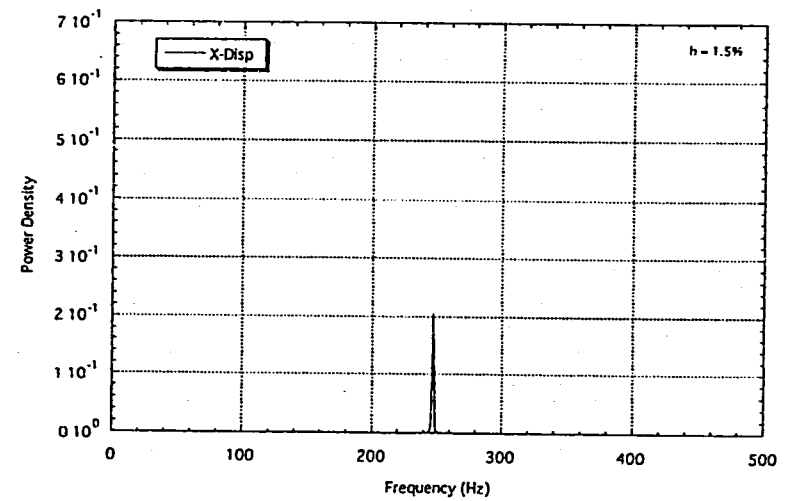
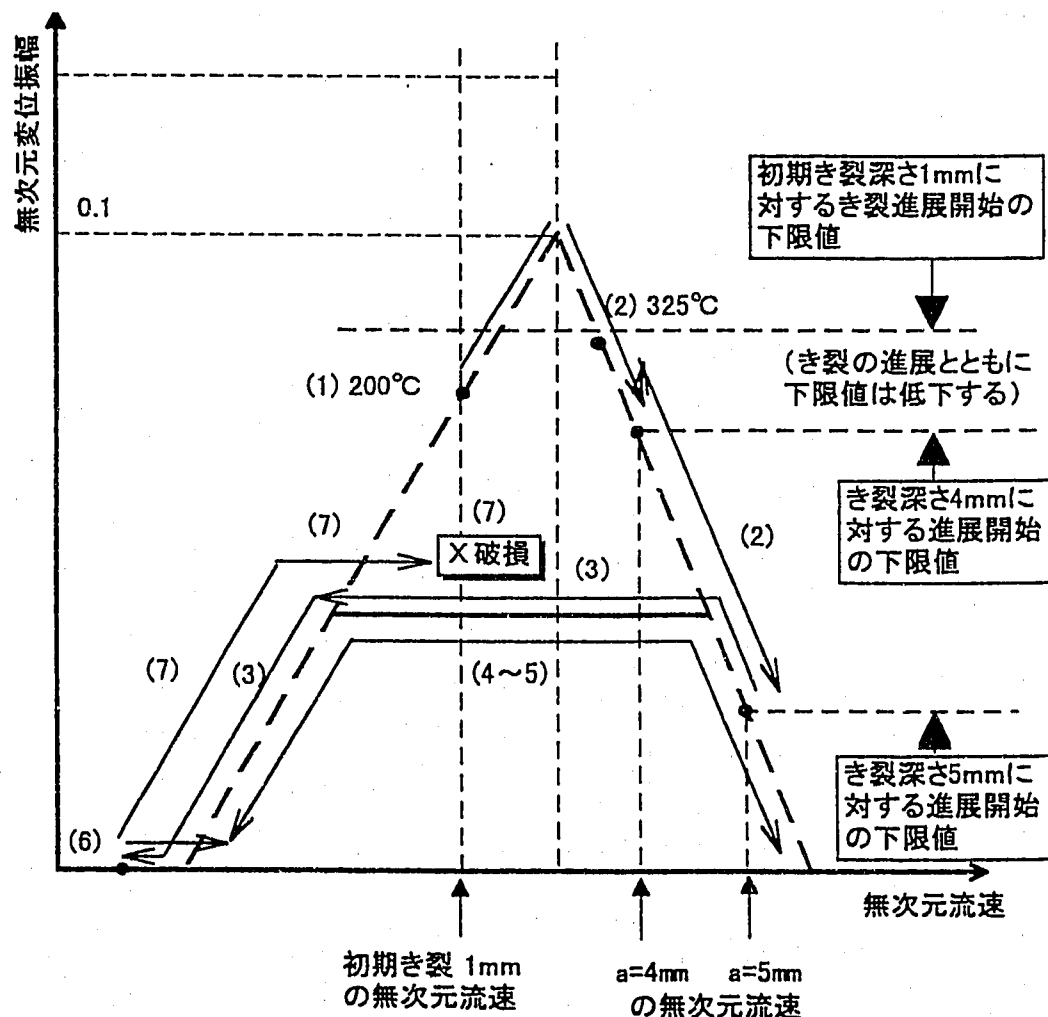
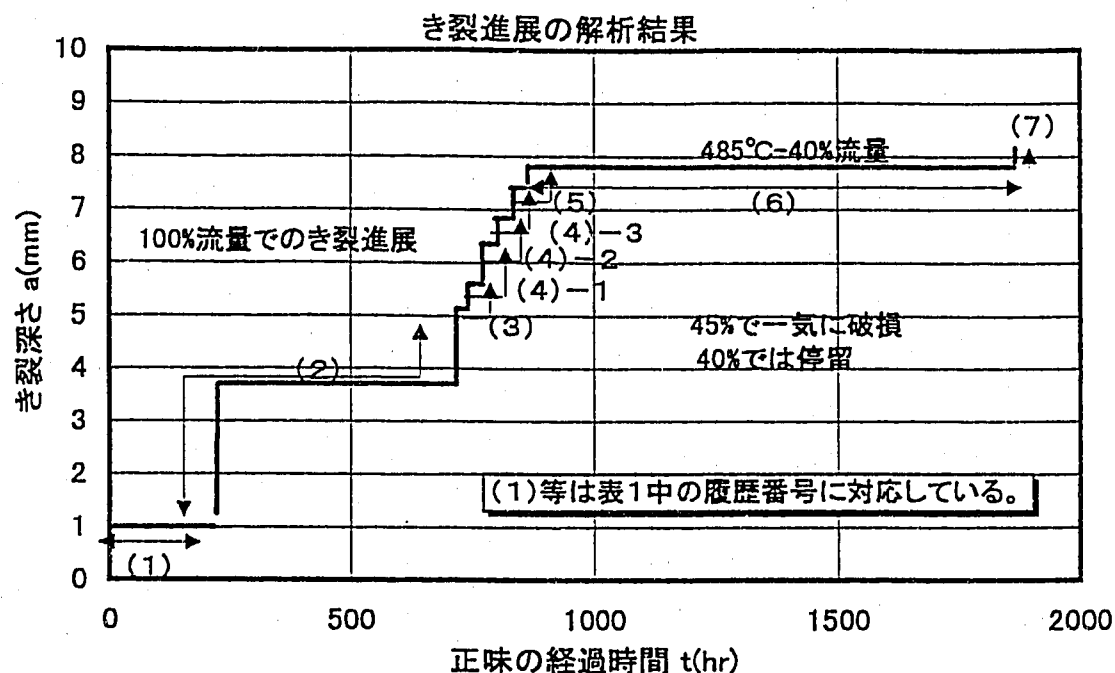


図32 抗力方向変位のパワースペクトル (減衰定数1.5%)

抗力方向変位が変動する周期は変わらない。

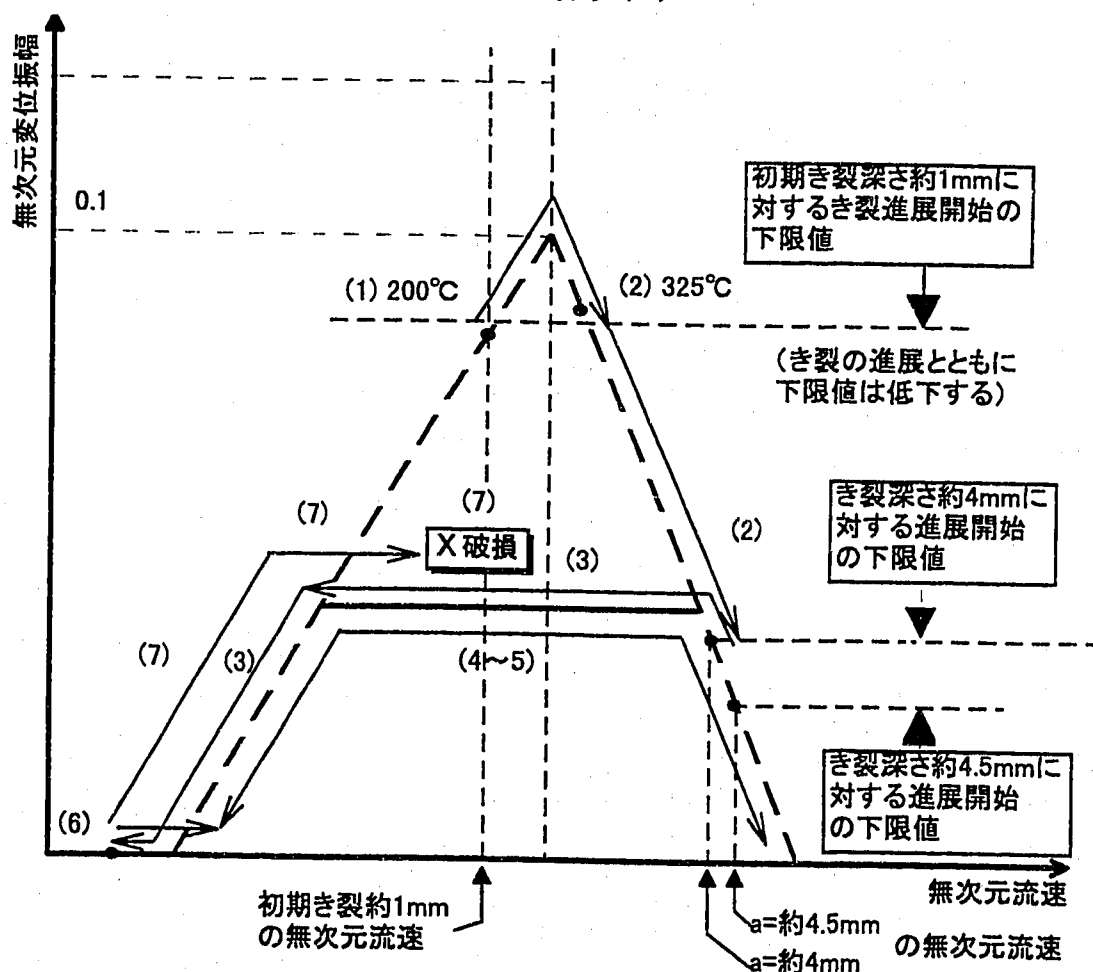
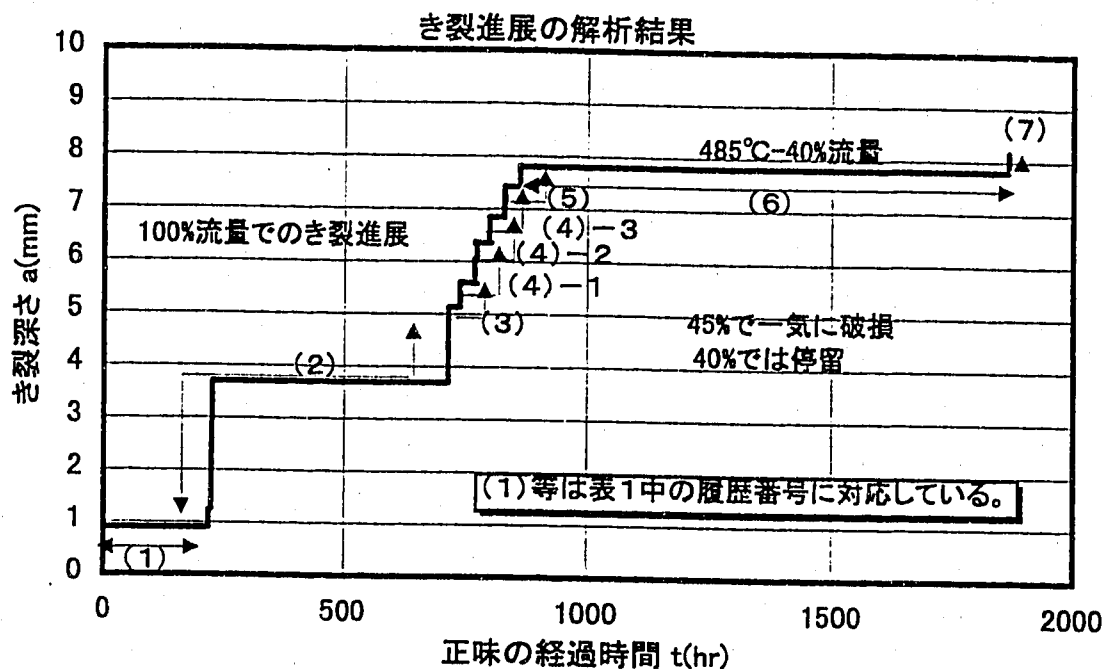
添付図2



破損に至るまでの考えられる時間的推移

第4報
添付図2

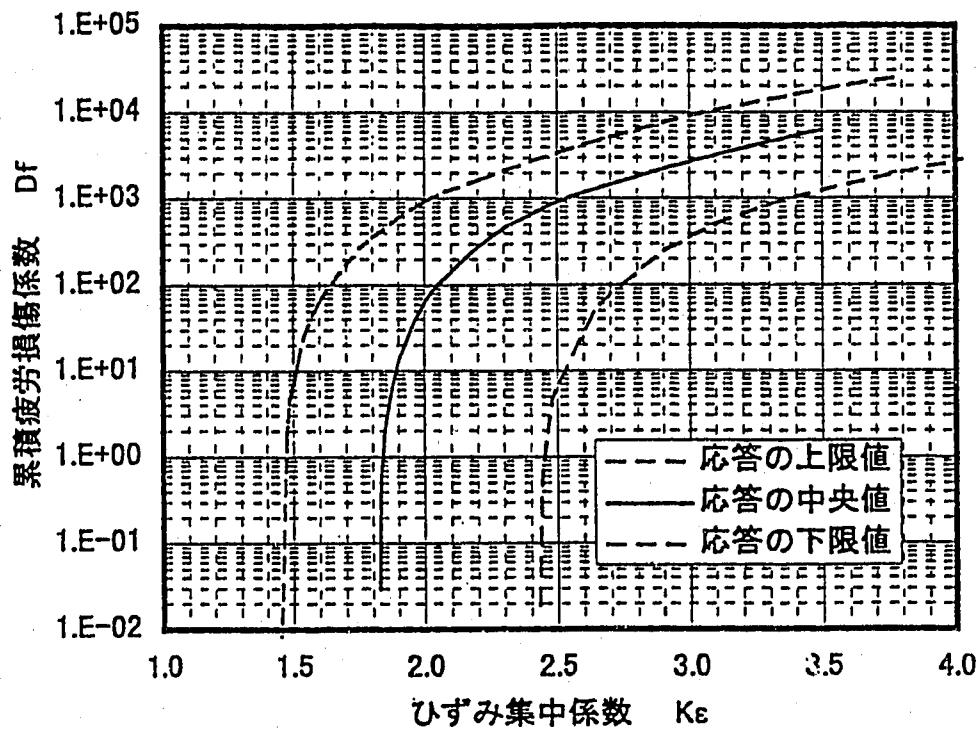
変更後



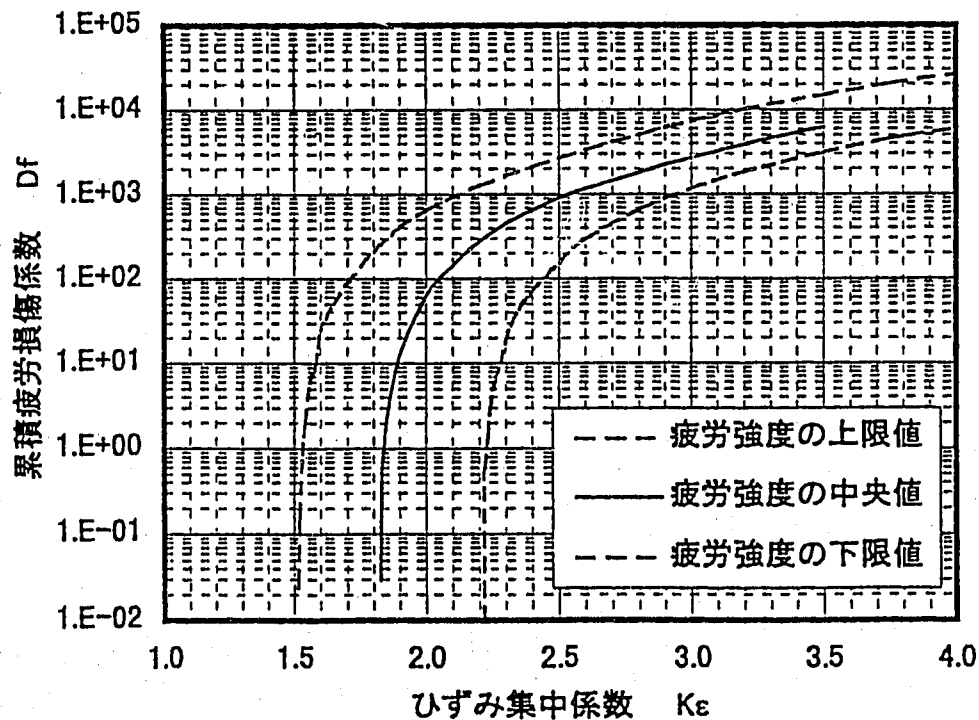
破損に至るまでの考えられる時間的推移

変更前

第12回T/F会合資料「流体力による温度計の振動について（概要）」



(a) 変位応答線図による相違

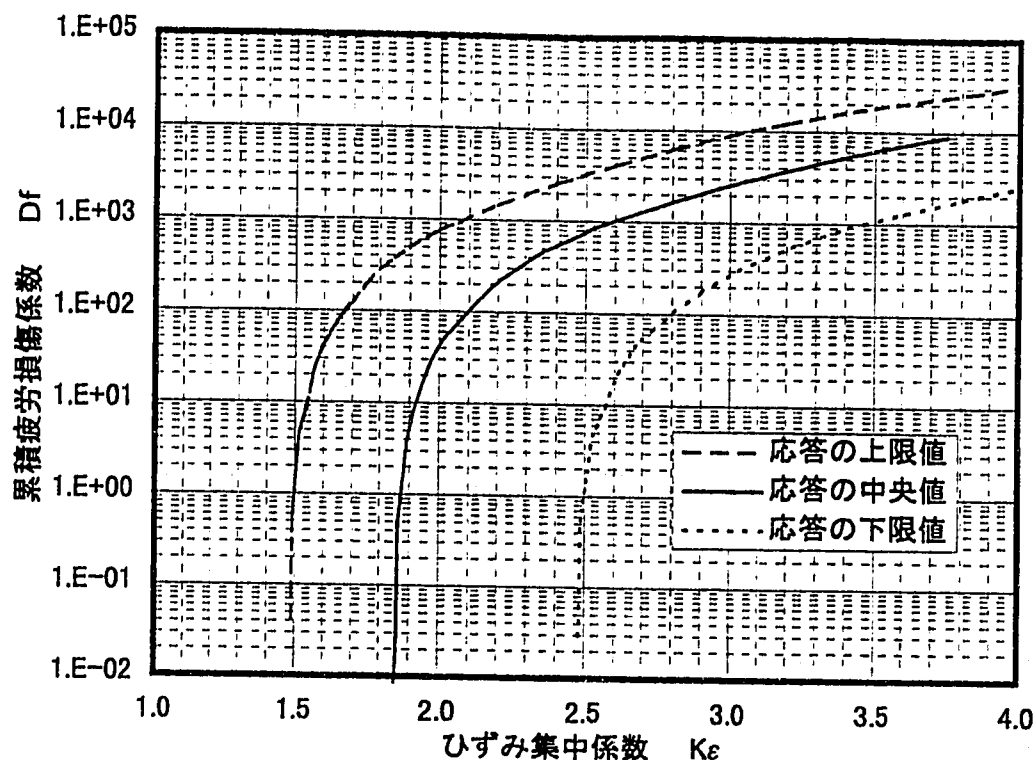


(b) 疲労強度による相違

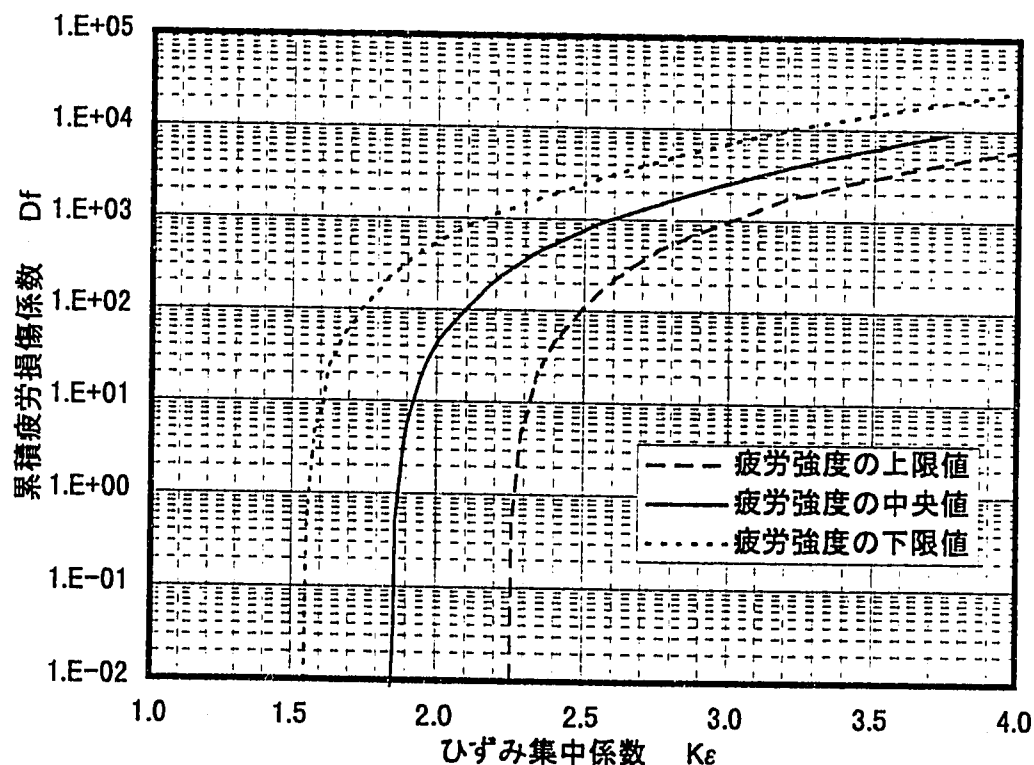
図6 累積疲労損傷係数の算定結果

「流体力による温度計の振動について(概要)」

変更後



(a) 変位応答線図による相違



(b) 疲労強度による相違

累積疲労損傷係数の値の変化は約5%である。
ただし、応答、疲労強度ともに中央値で、
ひずみ集中係数 $K_\sigma=3.0$ の場合。

図6 累積疲労損傷係数の算定結果

水中疲労確認試験の試験条件の包絡性

1. 概 要

当該温度計ウエルを設置している2次主冷却系配管の、200℃等温運転時の流速は約5.2 m/secである。温度計ウエルの水中疲労確認試験の試験条件は、5.5 m/secと5.0 m/secで行っているが、これらの試験条件は、当該ウエルの流速条件を包絡するものであると考えられる。

2. 水中疲労確認試験の目的

水中疲労確認試験は、当該ウエルで生じた流力振動を模擬した試験を行い、流力振動による疲労亀裂の進展と、それに伴う流力振動特性の変化を把握し、現象の理解に役立てることを目的としている。

特に、初期の100%流量条件の試験では、100%流量運転を継続した状態で流力振動により生じた亀裂が進展し、流力振動特性の変化により亀裂の進展が停留することを確認する必要がある。

3. 水中疲労確認試験の試験条件

水中疲労確認試験は、実機と同じ配管口径の試験装置で、200℃の等温運転時のNaの動粘性係数を合わせた条件で試験を行った。

水中疲労確認試験（その1）では、100%相当流速を5.5 m/secで試験を実施し、（その2）では、5.0 m/secで試験を実施している。従って、200℃等温100%流量運転時の流速5.2 m/secはこれらの試験条件の中間にある。

4. 水中疲労確認試験結果と評価

水中疲労確認試験（その1）の結果を図-1に、（その2）の結果を図-2に示す。100%流量試験開始後にウエルの固有振動が低下し、170~180Hz程度で停留する挙動は、ほぼ同様の傾向であり、いずれの試験条件でも100%流量における亀裂の進展と停留が模擬されている。

一方、水流動試験の結果による無次元流速とウエル先端振幅の関係を図-3に示すが、5.2 m/secの時のウエル先端振幅は、5.5 m/secと5.0 m/secの時の振幅の間にあり、亀裂の進展に伴い無次元速度が変化して行く際のウエル先端振幅もこの二つの流量条件に包絡されると推定される。

上記の試験結果から、5.2 m/secの流量条件でのウエルの亀裂の進展と停留の挙動は、水中疲労確認試験（その1）と（その2）の結果に包絡されると判断できる。

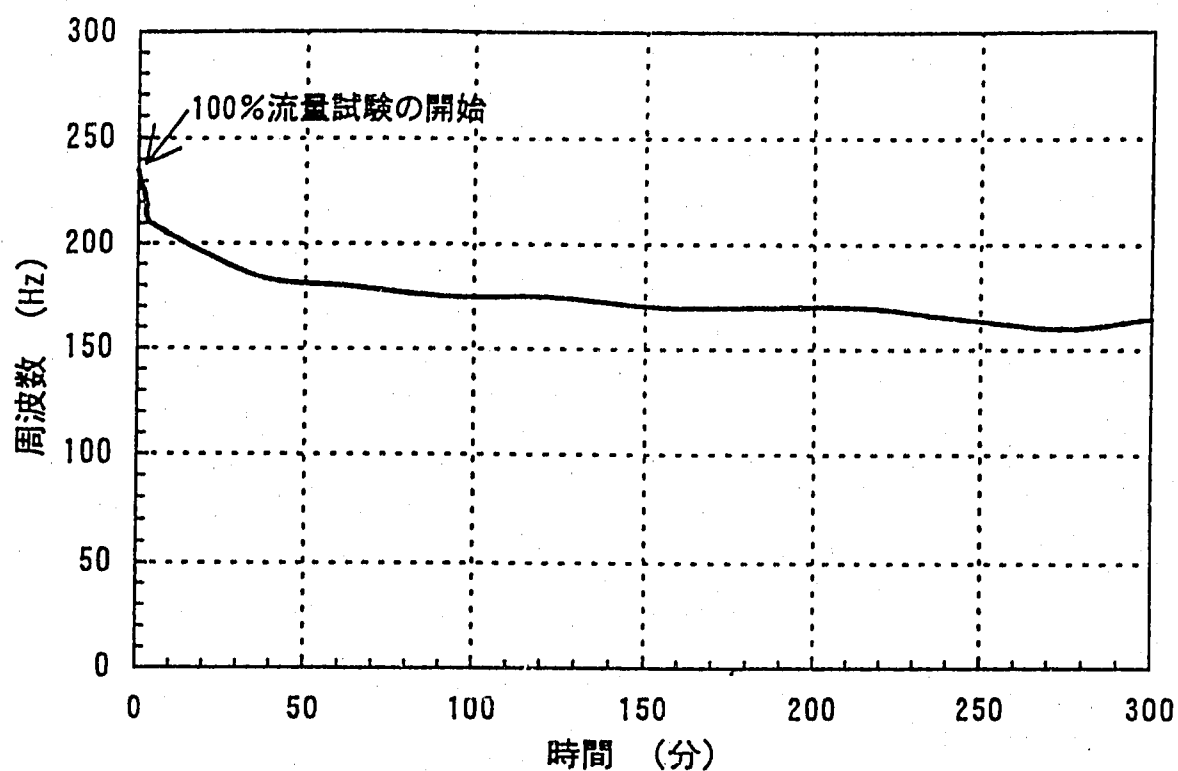


図-1 水中疲労確認試験 (その1)
固有振動数の時間変化 (初期き裂有り)

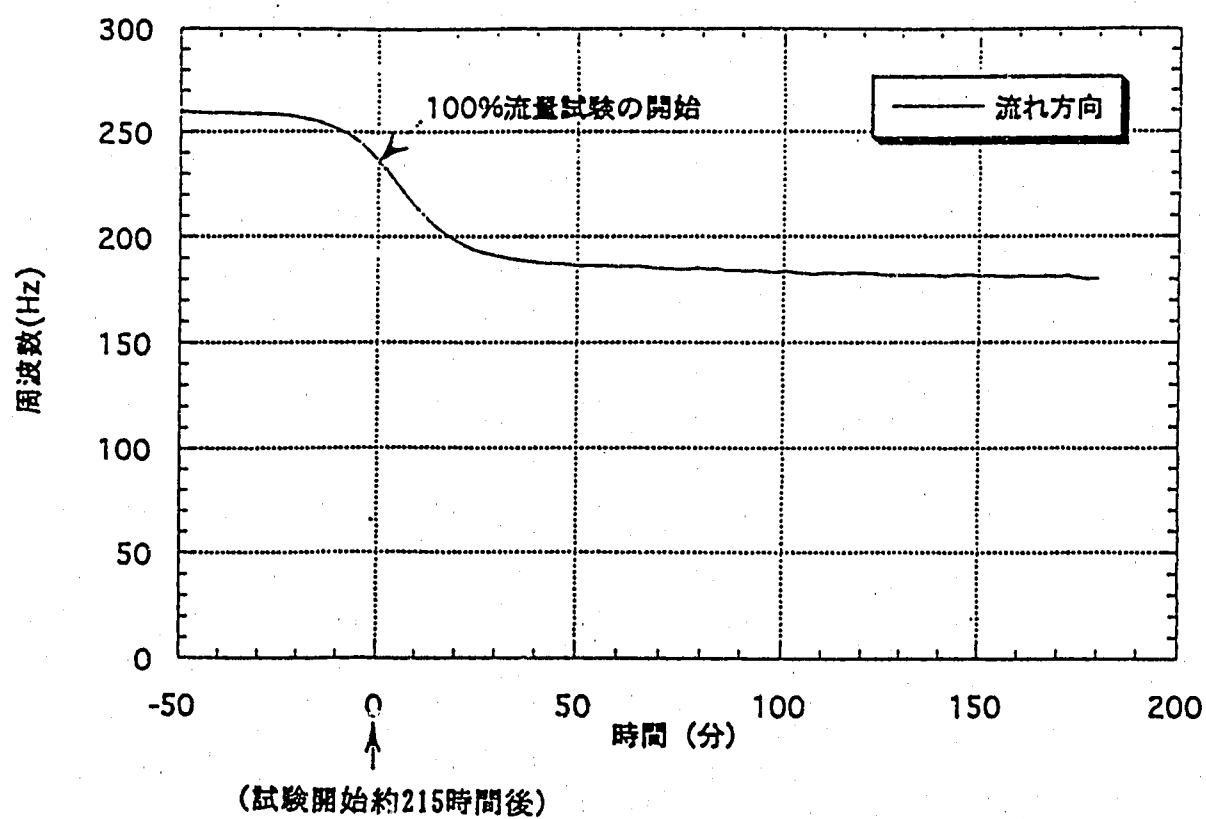


図-2 水中疲労確認試験 (その2)
固有振動数の時間変化

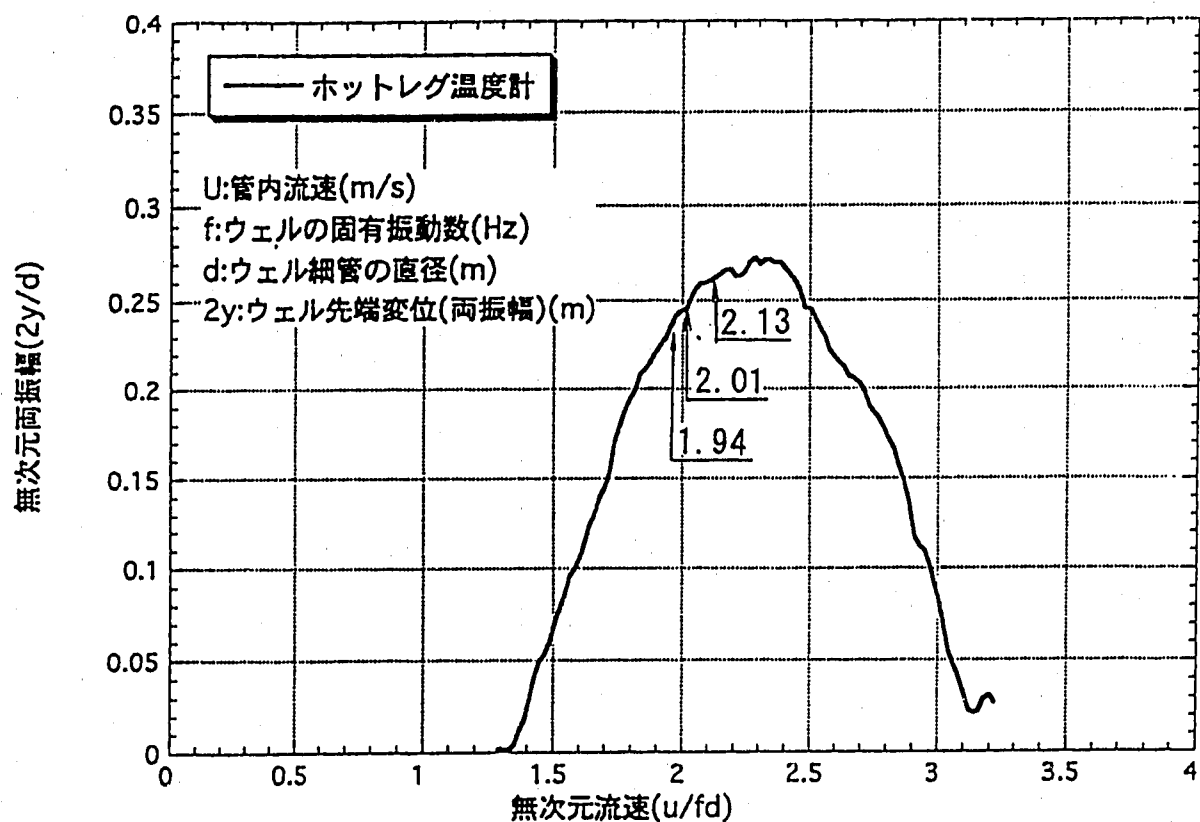


図3 ウェル先端振動振幅(両振幅)と無次元流速との関連
(ホットレグ温度計)

流 速		無次元流速 (u/fd)	
5.0	m/sec	:	1.94
5.2	m/sec	:	2.01
5.5	m/sec	:	2.13