

「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

流体力による温度計の振動について（概要）

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

流体力による温度計の振動について（概要）

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、流体力による温度計の振動についての検討の中間結果の概要である。

-
- * 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 热流体技術開発室)
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 热流体技術開発室、現企画部)

流体力による温度計の振動について（概要）

1. はじめに

平成7年12月8日、高速増殖原型炉「もんじゅ」の2次主冷却系配管から冷却材ナトリウム漏えい事故が発生した。漏えい箇所の調査の結果、本事故は、2次主冷却系Cループの中間熱交換器出口配管に取り付けられていた温度計のウェル（さや管）先端細管部が破断したことによりナトリウムが漏えいしたものであることが判明した。

本報告書は、事故当初より有力な破損原因候補の1つとされている流体力による振動（以下、流力振動という）について、定量的な評価を行い、これにより温度計ウェルが破断に至る可能性について検討したものである。

2. 検討方法

検討の全体の流れを図1に示す。検討に当たっては、まず、温度計の打振試験、加振試験及び解析により温度計の振動特性を把握した上で、定格100%流量状態の流れの中に置かれた温度計ウェルについて流体一構造連成振動解析を行い、流力振動の特徴と応答の概略を把握した。流力振動解析結果、別途実施した流力振動実規模水試験の結果、既往の実験結果等を参考にして、温度計ウェル先端の応答変位振幅と冷却材の流速との関係を表す変位応答線図を策定した。この線図より算出される応答変位を基に、さらにウェル細管段付部のひずみ集中を考慮して疲労評価を行い、疲労き裂が生じる可能性を調べた。

つぎに、き裂発生が想定された場合に、温度計ウェルの振動特性に及ぼすき裂深さの影響を考慮しつつ、運転履歴に基づき、き裂の進展を検討した。このようにして、き裂が進展し最終的に40%流量時に破断に至る推移を検討した。この検討においても、上記の変位応答線図を用いて、き裂の進展に伴う温度計の振動特性の変化を考慮した変位応答を評価した。

上記の一連の検討結果から得られた破損原因、破損シナリオに関する知見は、金属材料技術研究所及び日本原子力研究所で実施された当該破損ウェルの損傷部の破面等の調査結果との照合、及び温度計破断までの振動特性を調べる実規模流力振動水試験（水中疲労確認試験）によりその妥当性を確認することとした。

3. 温度計の振動特性

温度計ウェルの固有振動特性を解析により求めた。200°Cのナトリウム中における固有振動数は、1次が約165Hz、2次が約260Hzである。対応する振動モードは、1次が温度計全体が回転するモード、2次がウェル細管部が太管部に弹性支持された片持ちはりとして振動するモードである（図2参照）。なお、ウェルが流体の圧力荷重

によって励振される場合、その応答は2次モードに支配され、1次モードの寄与は無視できるほど小さい。温度計の振動特性については別途単体の打振試験を実施し、これらの解析結果の妥当性を確認した。

ウェル細管付け根段付き部のき裂が進展した場合の振動特性の変化については、き裂が細管断面中央部に達する段階で固有振動数はき裂なしの場合の約80%に、最終破断直前では同40%程度に低下すること、固有振動モードも変化し、片持ちはりのモードからき裂断面を回転中心とする振動モードに遷移していくことを確認した。

温度計の流力振動応答に大きく影響する減衰特性については、減衰に及ぼすシースの影響が顕著であり、例えば流体や保温材の有無等、他の要因の影響はほとんど見られないこと、さらに、シースの挿入状況（シースの曲がりの有無）が減衰特性に大きく影響し、シースに曲がりがあると、減衰はシースなしの場合の平均傾向を僅かに上回る程度まで減少することが明らかになった（図3参照）。

以上の結果に基づき、有意な変位振幅を伴う流力振動応答を評価する観点からは、温度計の減衰定数をシースの曲がりの有無で区別して、1%程度（シースに曲がりがない場合）及び0.5%程度（シースに曲がりがある場合）と見積もっておくことが適切であると判断した。後述の流体一構造連成振動解析においては、これらの減衰定数の値をそれぞれシースの曲がりの有無の代表値として用いることにした。

4. 温度計の流力振動特性

①流体一構造連成振動解析

温度計ウェルの振動とウェルの後流に発生する渦の相互作用を検討し、ウェル先端の応答変位を算定するため、ウェルと流体の連成振動解析を行った。解析体系は2次元（温度計ウェル断面を含む平面）であり、ウェルは、抗力方向（流れ方向）及び揚力方向（流れに直交する方向）にばねと減衰をもつ質点としてモデル化した。

100%流量条件では、抗力方向に卓越する自励的な振動が解析された。また、抗力方向振動が発生するとき、円柱両側面から、同期した対称渦が放出されることが示された。図4には解析により得られた対称な渦放出の様子を示す。King¹⁾は、抗力方向振動が発生するとき、円柱後流渦は、円柱の両側面から交互に生成されるのではなく、同位相で対称に生成されることを観察しており、この解析結果は、既往の実験で得られた知見と合致していることが分かった。

40%流量条件での解析では、き裂がない健全なウェルでは、抗力方向の振動が卓越する現象は見られず、また、抗力方向、揚力方向ともに平均変位振幅は十分小さい結果が得られた。一方、細管段付部のき裂が進展した状態に対応して、ウェルの固有振動数を低下させた状態での解析によれば、抗力方向振動が生じる結果が得られた。

②流力振動水試験

実機と同じ配管系に実寸大の温度計ウェル模型を取り付けた試験装置を製作し、ウ

エルの流力振動特性を把握する水流動試験を実施した。この試験では、流体の温度、ウェルの固有振動数、主配管内の旋回流の効果等をパラメータとした試験を行い、これらのパラメータが流力振動特性に与える影響を調べた。

試験の結果、無次元流速 V_r ($=V/(fD)$, V : 流速, f : ウェルの固有振動数, D : ウェル外径) が 1.3 程度 (流速で 3.3m/s 程度) の状態から、抗力方向に流力振動が生じることが確認された。100%流量条件では、温度計ウェルの振動は抗力方向振動が卓越した結果となっており、それと比較して揚力方向の振動は十分に小さかった。一方、40%流量条件では健全なウェルにこの振動は発生しないことが分かった。これらの結果は、4①の解析結果と合致している。

温度計ウェル細管付根段付部にき裂が進展することにより、ウェルの固有振動数が低下すると考えられる。そこで、ウェル細管付根部を周方向に一様に減肉させて固有振動数を 110Hz 程度まで低下させた温度計ウェルにより試験を実施したところ、40% 流量条件 (流速約 2.2m/s) においても、抗力方向振動が発生することが確認された。有意な流力振動を開始する無次元流速は、健全なウェルとほぼ一致していた。

当該温度計ウェルの設置場所での配管引き廻しの影響による旋回流の有無を確認するため、1/5 アクリルモデルを用いた試験を実施した結果、当該箇所では配管内に旋回流 (主流の流速に対して約 20% の旋回流速) が生じていたが、温度計ウェルの流力振動に及ぼす影響は小さいことが確認された。

③変位応答線図

過去の研究から、流速と変位振幅との関係は、無次元流速 V_r と無次元変位振幅 y/D (y : ウェル先端変位振幅、 D : ウェル外径) で良く整理できることが分かっている。そこで、抗力方向振動に関する変位応答線図 (無次元流速とウェルの無次元変位振幅との関係を示す図) を作成した。温度計ウェルの細管付根段付部にき裂が生じると、3 で述べた通り、き裂進展に伴い固有振動数が減少する。このため、ウェルの固有振動数をパラメータとした流体-構造連成振動解析を実施し、それぞれの解析ケースにおけるウェル先端の平均変位振幅を求めた。この流力振動解析結果と、4②の実規模流力振動水試験結果及び既往の実験結果を総合的に判断して、き裂進展解析に使用する変位応答線図を作成した。流力振動解析と水流動試験結果、及び、設定した変位応答線図を図 5 に示す。抗力方向振動の開始無次元流速を 1.25、無次元変位振幅が最大となる無次元流速を 2.1、変位振幅が 0 となる無次元流速を 2.5 とした。最大無次元変位振幅は、図 5 のデータの平均的な値をとり 0.1 とし、上記 3 点を直線で内挿した。ここで、最大無次元変位振幅 0.1 の変位応答線図は、水流動試験結果等を参照すると、減衰定数として 0.5% 程度を見積もっていることと対応している。さらに、シースの状態によって減衰特性が変化すること等を考慮して無次元変位振幅のピーク値として 0.1 ± 0.025 の幅を考えることが適当であると判断した。

5. き裂の発生

流力振動の変位応答線図から求めたウェル先端変位から、細管段付部の公称曲げ応力を算定し、さらに当該部位の局所的ひずみ振幅を評価した。SUS304 の疲労曲線に基づき、この局部ひずみ振幅による累積疲労損傷係数を算定した。なお、SUS304 の高サイクル疲労強度は、通産省告示第 501 号の疲労線図、ASME の設計線図策定期の裏付けデータ、及び動燃での過去の試験結果を参照して推定した。

100%流量での運転期間中（運転時間を 720 時間として評価）におけるウェル細管付根段付部の疲労損傷評価を行った結果を図 6 に示す。ひずみ集中係数が 1.5~2.5 のとき、疲労損傷係数が 1 を上回ることが分かる。別途実施したひずみ集中係数に関する解析結果からは、細管付け根段付き部の隅の丸みが 0.1mm 程度の時にはひずみ集中係数が 3 程度になるという結果が得られている。また、ウェル外表面における累積疲労損傷係数の周方向分布に関する解析結果から、ひずみ集中係数として 3 を用いた場合には上流から $\pm 60^\circ$ 程度の範囲において疲労損傷係数が 1 を上回っていることが分かった。このことは、ウェル上流側の外表面において、周方向にある幅をもって複数の疲労き裂が発生したとされる破面解析結果と符合している。

これらの結果から、100%流量での運転期間中に上下流側にそれぞれ周方向にある幅を持った範囲で有意な疲労き裂が発生していた可能性があることが明らかとなった。

6. き裂の進展と破損

3. で求めたき裂の進展に伴う温度計ウェルの振動特性の変化と、4 ③で定めた変位応答線図を用いて、主要な運転履歴に基づく疲労き裂の進展を線形破壊力学手法により評価した。評価の結果推定された破損のシナリオは、無次元変位振幅のピーク値としては、0.1 が破面調査結果と対応した*。また、100% 流量状態で一気に破損に至らなかった振動特性については、水中疲労確認試験によりその妥当性を確認した。

①線形破壊力学手法に基づく破損のシナリオの推定

考えられる破損シナリオの概要を、き裂進展の様子、変位応答線図での対応する位置、運転履歴を対比させながら図 7 に示す。また、疲労き裂の進展経緯を、同じく運転履歴と対比させて整理した結果を表 1 に示す。

* a. シースが大きく曲がってウェルと密着したとすると、最大無次元変位振幅が 0.125 程度になると考えられる。この場合、深さ 1 mm からのき裂進展速度は破面調査のそれよりも 1 枝程度大きくなり、また、き裂の停留位置も破面調査のそれ (c ライン) よりも深くなるので、破面調査結果と整合しなくなる。

b. シースに曲がりがないとすると、ピーク無次元変位振幅は 0.075 以下となり、き裂は進展しない。

②水中疲労確認試験による破損シナリオの確認

流力振動による疲労き裂の進展、及びこれに伴う流力振動特性の変化を把握するため、4 ②の実規模流力振動水試験と同じ装置を使用して、水中疲労確認試験を実施した。試験結果から、表 1 に示すように、次項の破損シナリオの要点が確認された。

- a. 初期の 100% 流量運転状態で、き裂が発生することにより固有振動数の低下が生じる。
- b. 100% 流量条件で、さらにき裂が進展することによって無次元流速が増加し、き裂の進展が停留する。
- c. その後の 100% と 40% の間の流量増減では、健全なウェルの場合と比較して、同じ無次元流速に対する変位振幅は小さくなる。
- d. き裂が進展するとともに固有振動数がさらに低下し、低流量状態でも抗力方向振動を生じるようになる。

③破損シナリオと破面調査結果の対応

線形破壊力学手法等、主として数値解析に基づき推定した破損シナリオと、破面調査結果²⁾との対応関係を検討した。その結果、以下のことが確認された。

- a. き裂が周方向にほぼ全周にわたって発生しているとの破面調査結果は、数値解析結果においてウェル細管段付部のひずみ集中が大きく疲労損傷が 1 を超える領域が上流側周方向約 120° にわたっていることと対応している。
- b. 表面での段付き部の最大主応力方向が垂直断面方向より太管方向に約 30° の角度をなしているとの数値解析結果は、同角度をなす面上を主き裂が初期の約 1mm の間進展したとの立体観察結果と対応している。
- c. 1mm 位置からのき裂の進展は、破面調査では貫通手前で停止しているが、解析でも停止することが確認できた。また、その間の進展速度及び停止位置もほぼ対応した。
- d. 上記位置からのき裂進展は、き裂の中央部と端部とで異なっている。き裂進展速度の解析結果は、端部では破面調査の結果と整合し、中央部では破面調査で確認されたストライエーションが生じるようなき裂進展速度を予測した。
- e. 40% 流量状態でのき裂進展は、最終破断時近傍で破面との照合ができるところから、この条件で比較のための解析を実施した。一旦き裂が進み始めると短時間（約 15~20 分）で破損に至ることが示された。また、破面調査で確認されたストライエーションが生じるようなき裂進展速度を予測した。

7. まとめ

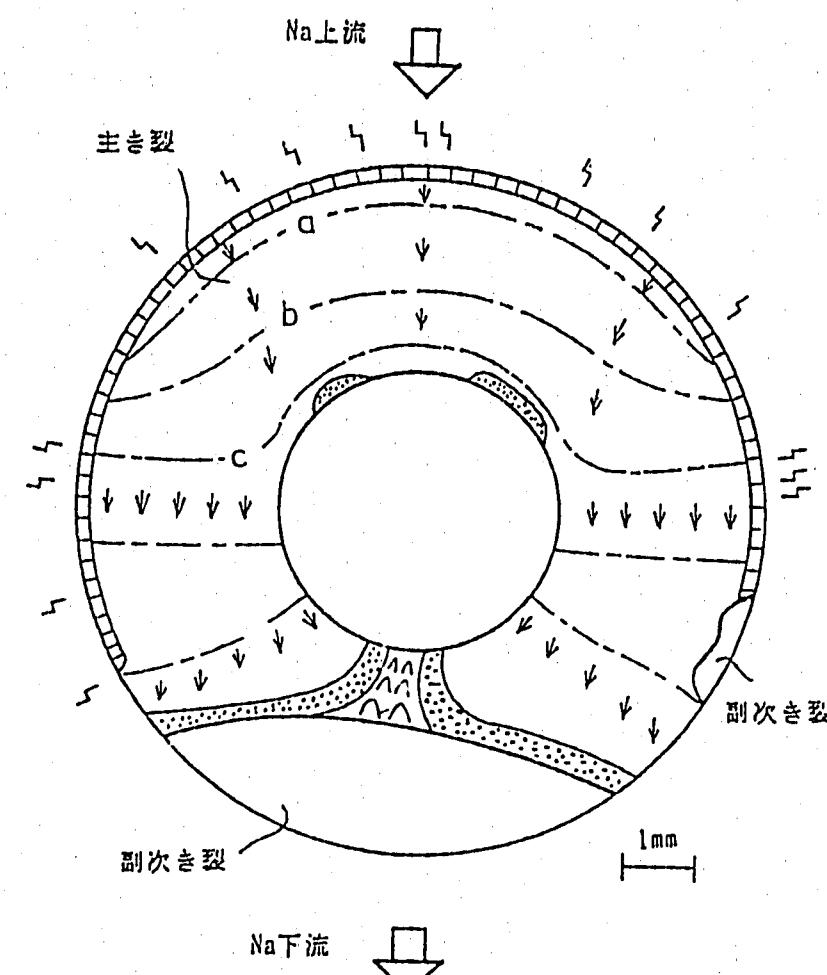
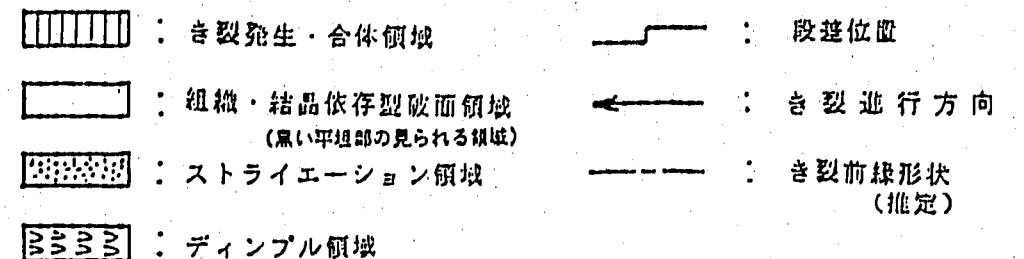
「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明の一環として、流力振動による温度計ウェルの破損の可能性について定量的に検討した。検討の結果、当該温度計ウェルは、対称渦放出を伴う抗力方向の流力振動による高サイクル疲労により破損した可能性が高いことが判明した。また、運転履歴に基づく温度計ウェルのき裂の進展解析により、初期の100%流量運転においてき裂が発生し、その後の40%流量運転で最終破断に至った破損過程の推定が得られた。推定した破損過程の要点は、破面調査結果及び水中疲労確認試験の結果とも整合していることが確認された。

(参考文献)

1. R. King : A Review of Vortex Shedding Research and Its Application, Ocean Engng, Vol. 4, pp. 141-172 (1977)
2. 金属材料技術研究所「もんじゅ温度計破損に関する疲労解析中間報告（案）」

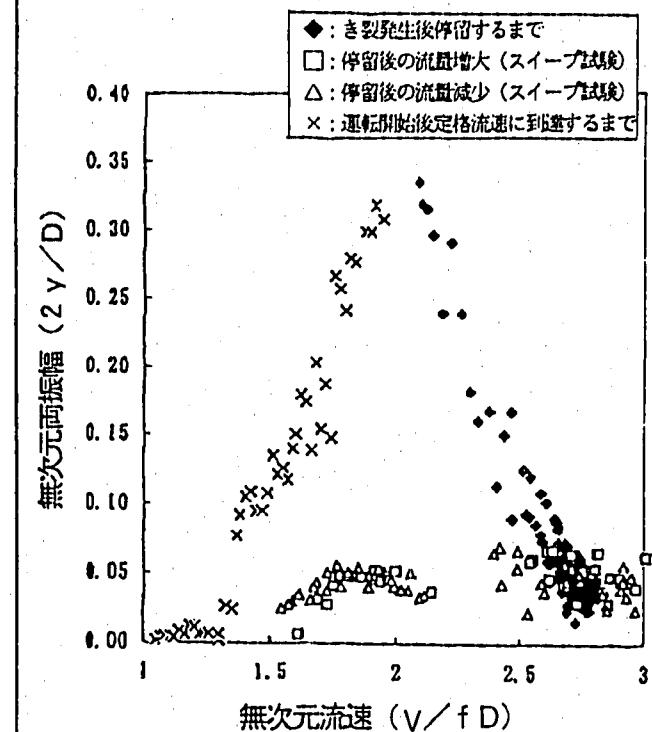
表1 疲労き裂の進展経緯の推定

運転履歴	運転時間	運転状況	き裂発生・進展状況
(1)	216時間	温度：200°C 流量：100%	温度計ウェルで流力振動発生 →細管付根段付部で高サイクル疲労 →疲労損傷累積によりき裂発生
(2)	504時間	温度：325°C 流量：100%	温度上昇 →Na上流 →N a流速↑／ウェル固有振動数↓ →振動の振幅増大 →細管付根段付部の応力増大 →上流側／下流側頂部中心に周方向にき裂発生域が拡大 →段付部応力集中効果で約1mmまで微小き裂進展（進展速度極小） [き裂前縁位置：a ライン] 約1mmから巨視的なき裂進展開始 →き裂進展で固有振動数低下 →振動の振幅減少 →き裂進展の停止 [き裂前縁位置：c ライン]
(2)→(3)	0.5時間	温度：325°C 流量：100% ↓ 40%	流量減少 →振動の振幅増大 →き裂進展の開始 →正味断面積減少で塑性変形有意 →振動の減衰
(3)→(5)	約20時間	温度：200°C 225°C 流量：100% ↑ 40%	流量増大→減少 →振動の振幅増大域を通過 →時的なき裂進展
	約2000時間	温度：200°C 325°C 流量：40%	40%流量ではき裂進展せず
(6)→(7)	約2000時間	温度：450°C 流量：40%	き裂進展せず 付根断面内に繰返し塑性変形 →き裂開口変位の増加
	約1000時間	温度：485°C 流量：40%	
(7)	1.5時間	温度：450°C ↓ 485°C 流量：40%	き裂開口変位の増加 →き裂進展開始／細管部曲がり進行 →加速的な進展 →破断 [き裂前縁位置：ストライエーション域]



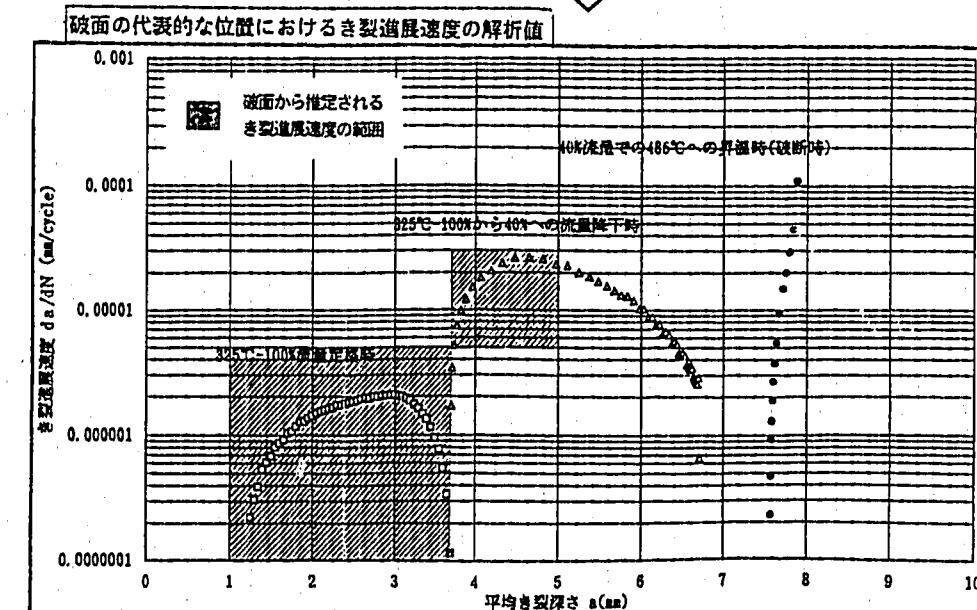
水中での流力振動による疲労試験での確認

- 100%流量状態で、き裂が発生することにより、ウェルの固有振動数の低下が生じる。
- 100%流量状態で、さらにき裂が進展することによって、無次元流速が増加し、き裂進展が停留する。
- その後の100%と40%の間の流量増減では、同じ無次元流速に対して、振幅が小さくなる。
- き裂が進展するとともに、固有振動数がさらに低下し、低流量状態でもインライン振動を生じるようになる。



き裂進展解析による進展速度の推定

- 深さ1mmからのき裂進展は、破面で観察された組織・結晶依存型破面領域に相当する進展速度で、加速し減速して停留した。
- 上記停留後のき裂進展速度は、 10^{-5} mm/cycle 前後の値となり、破面から推定される値にはほぼ対応した。
- 最終破断直前では、一旦き裂が進み始めるとストライエーションが観察される程度の進展速度まで、一気に加速した。



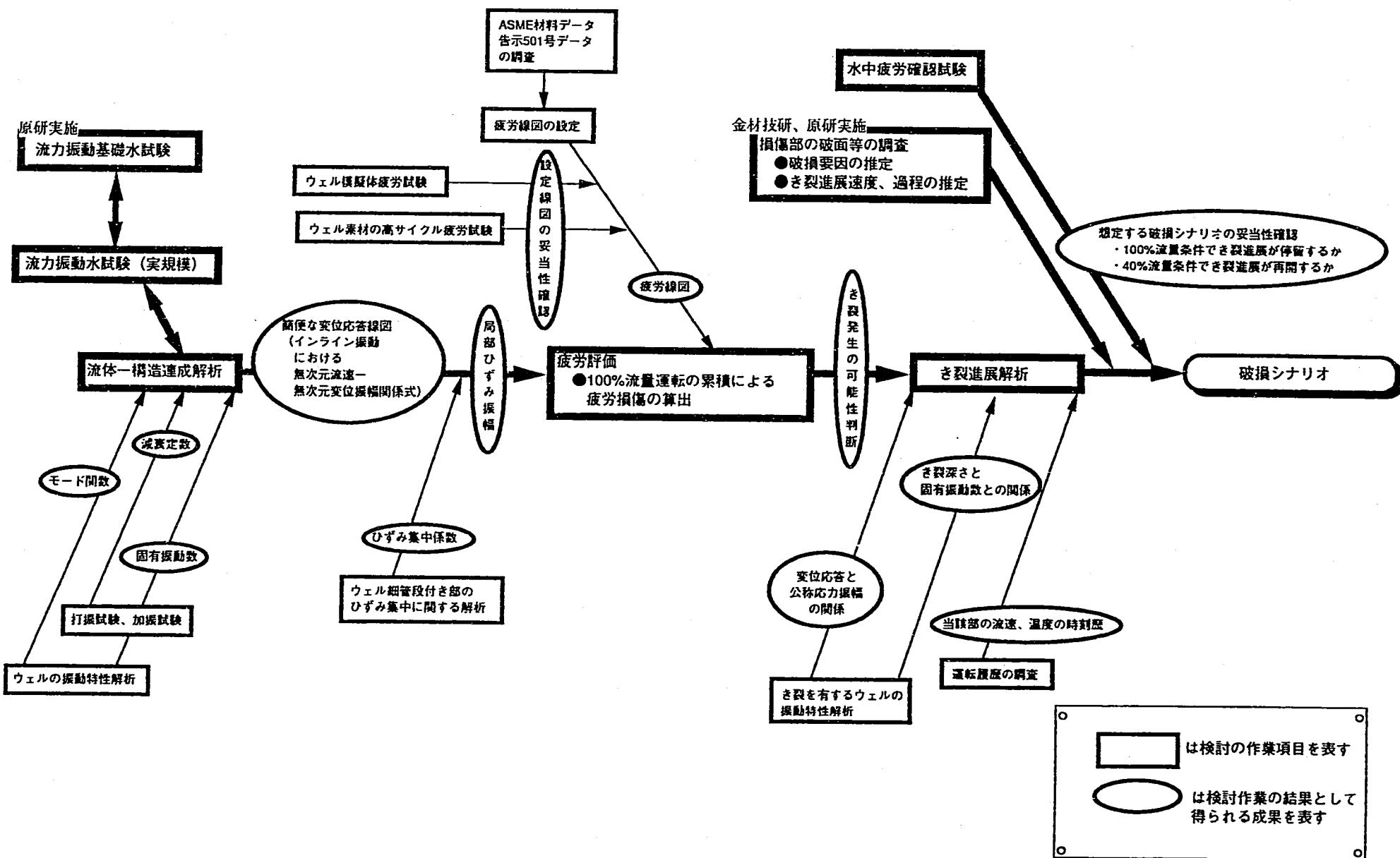
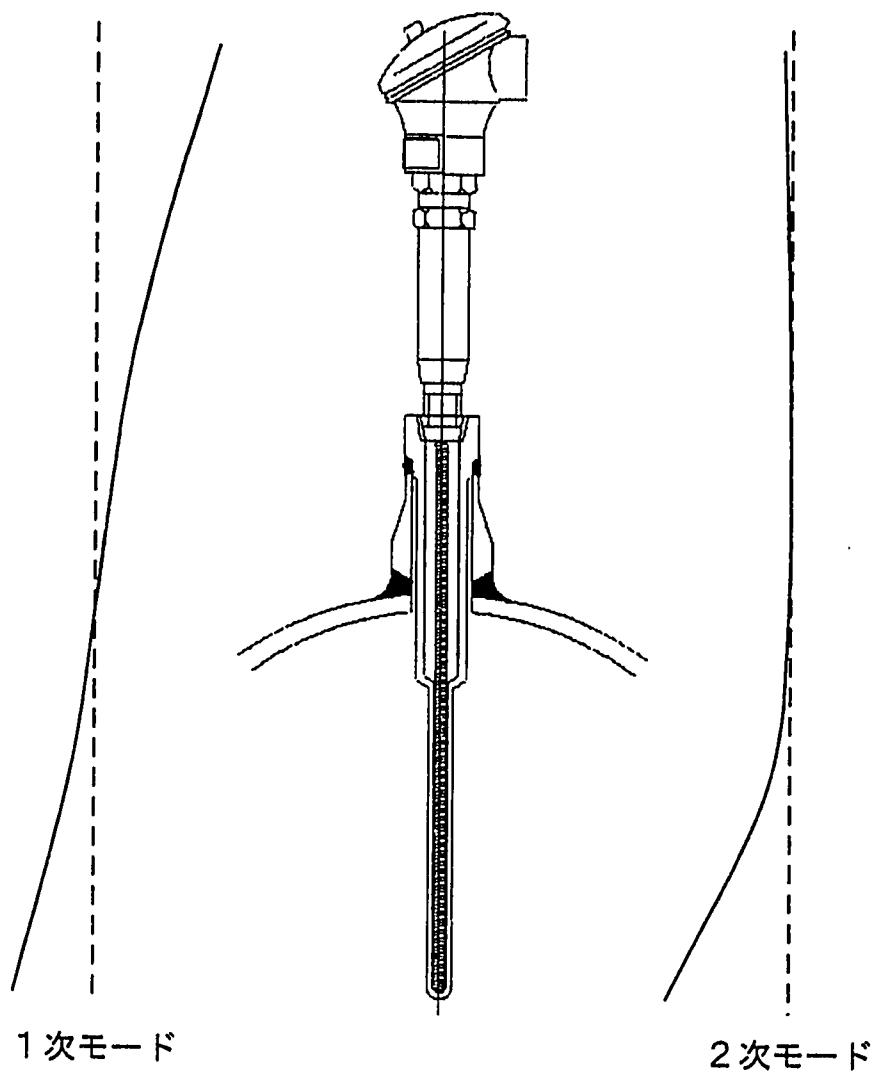


図1 流体力による温度計の振動についての検討の流れ



* 2次モードの値に対する比

図2 温度計の固有振動モード (ナトリウム中, 200°Cの例)

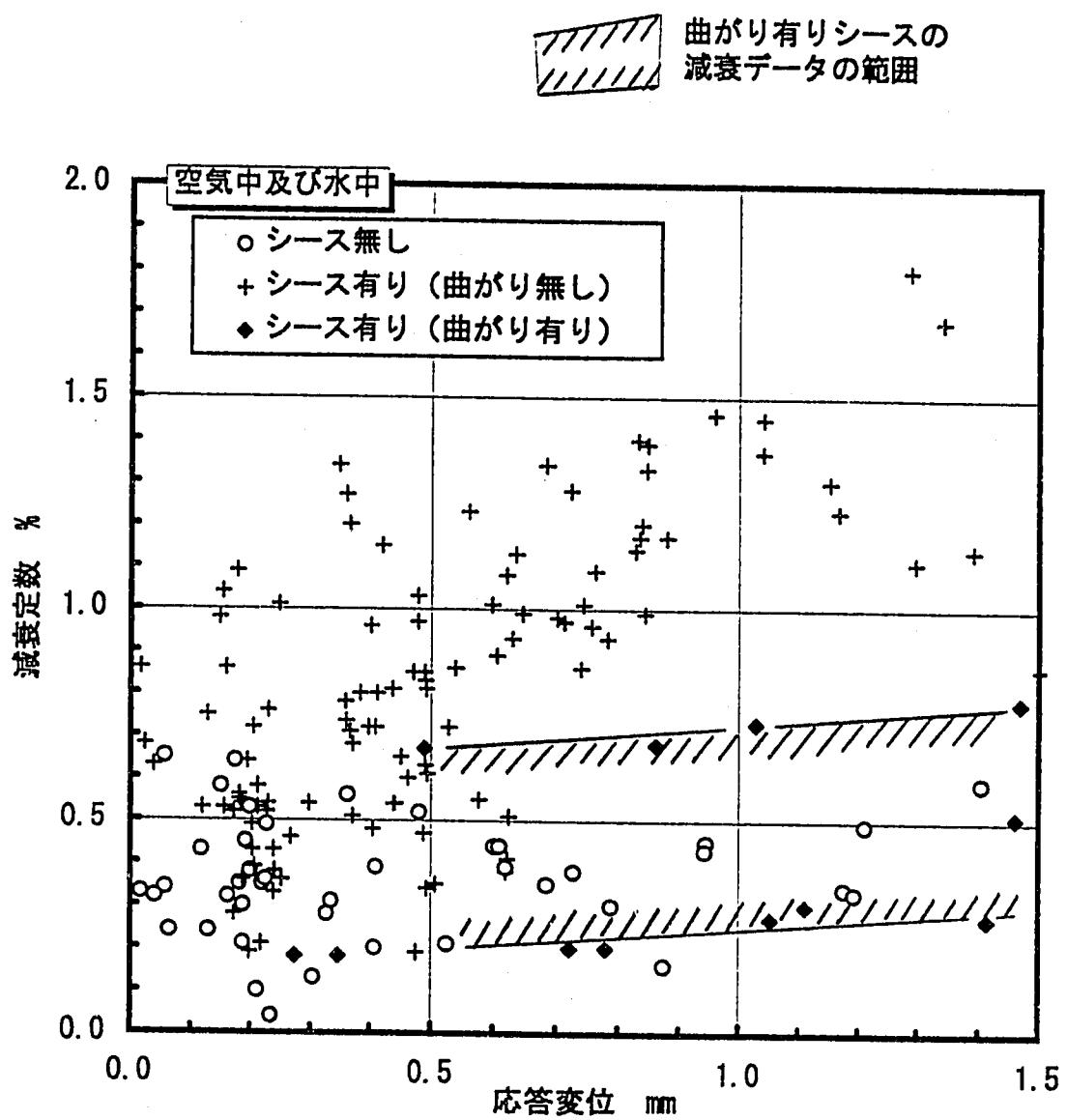


図3 温度計の減衰に及ぼすシースの効果

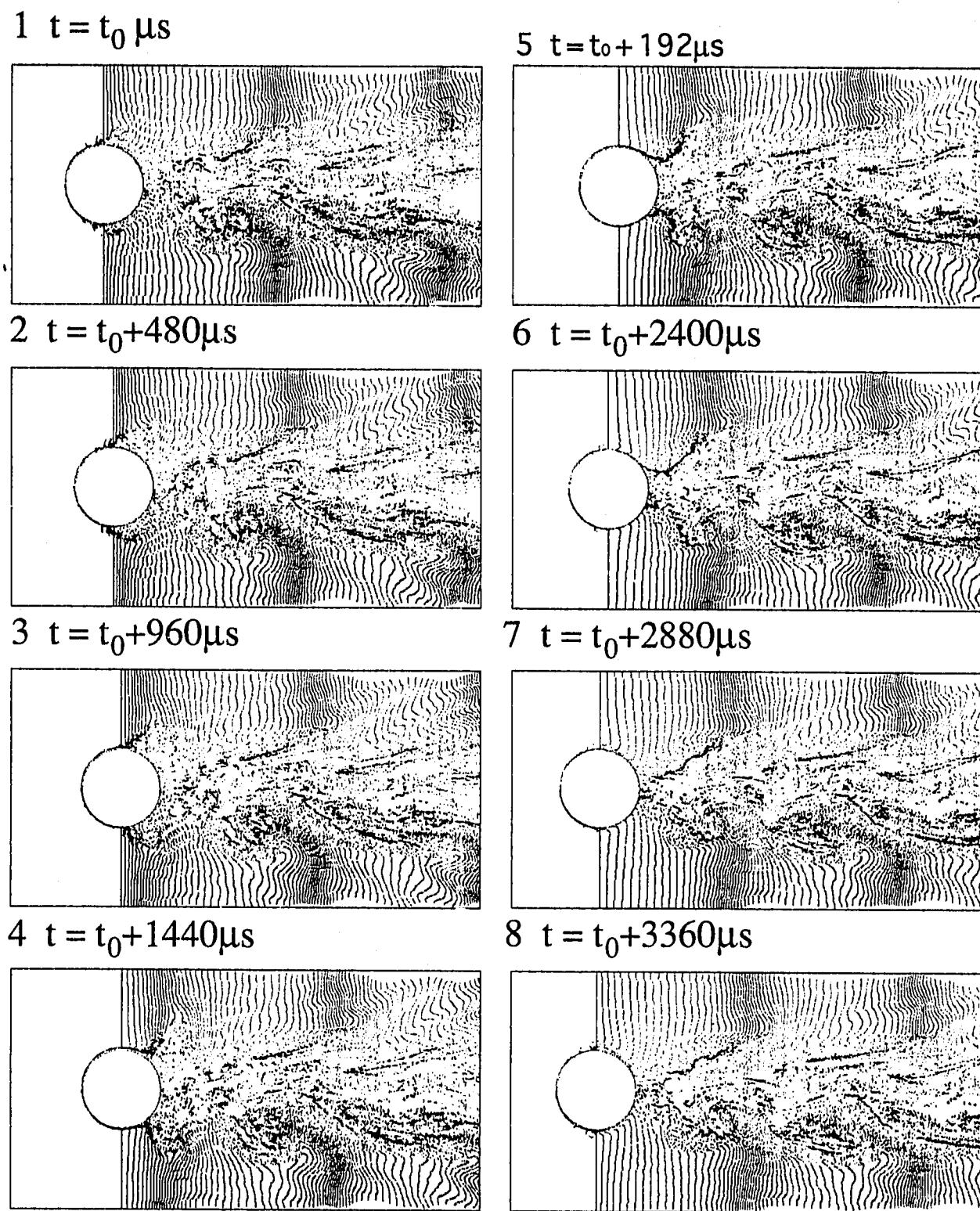
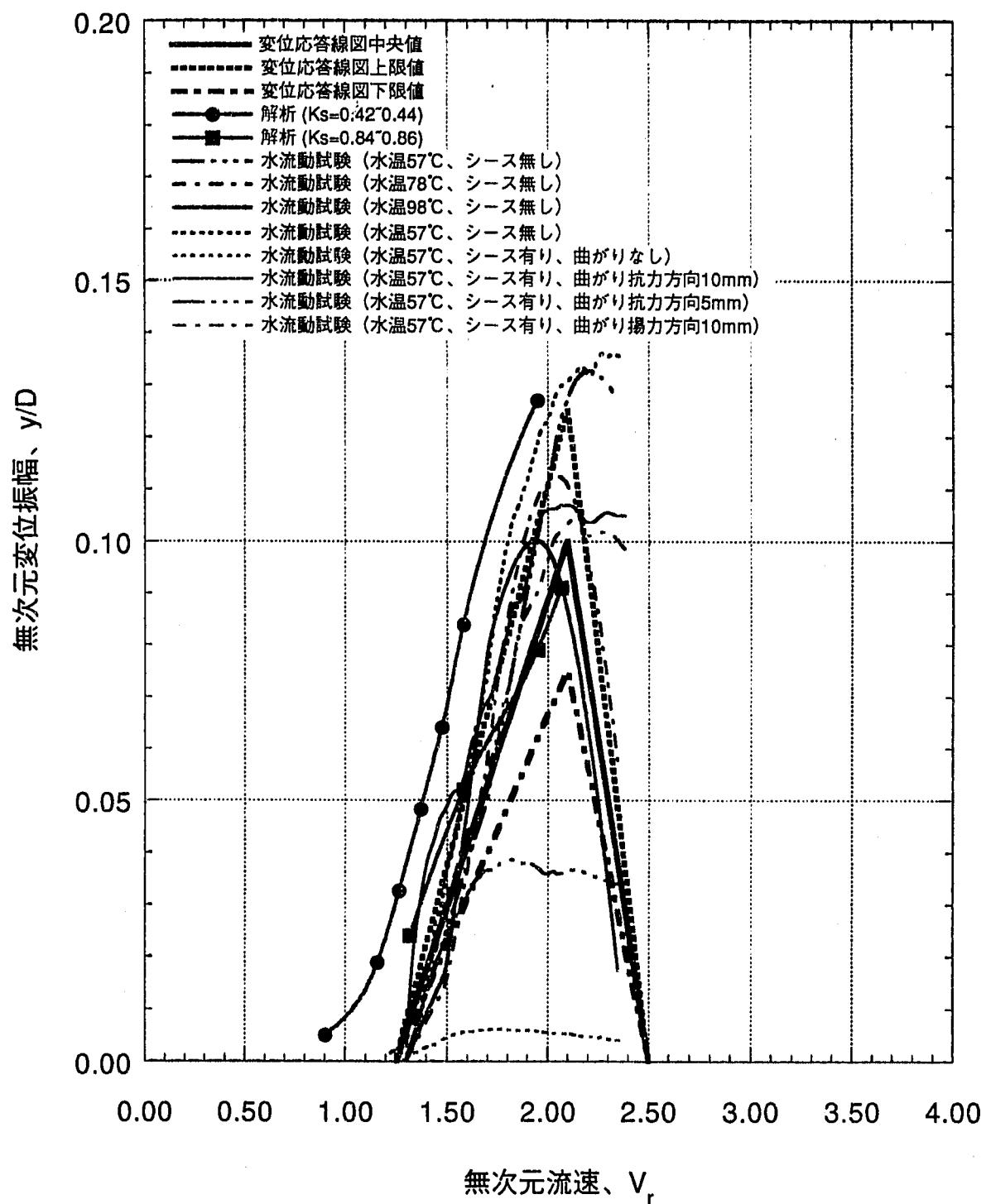
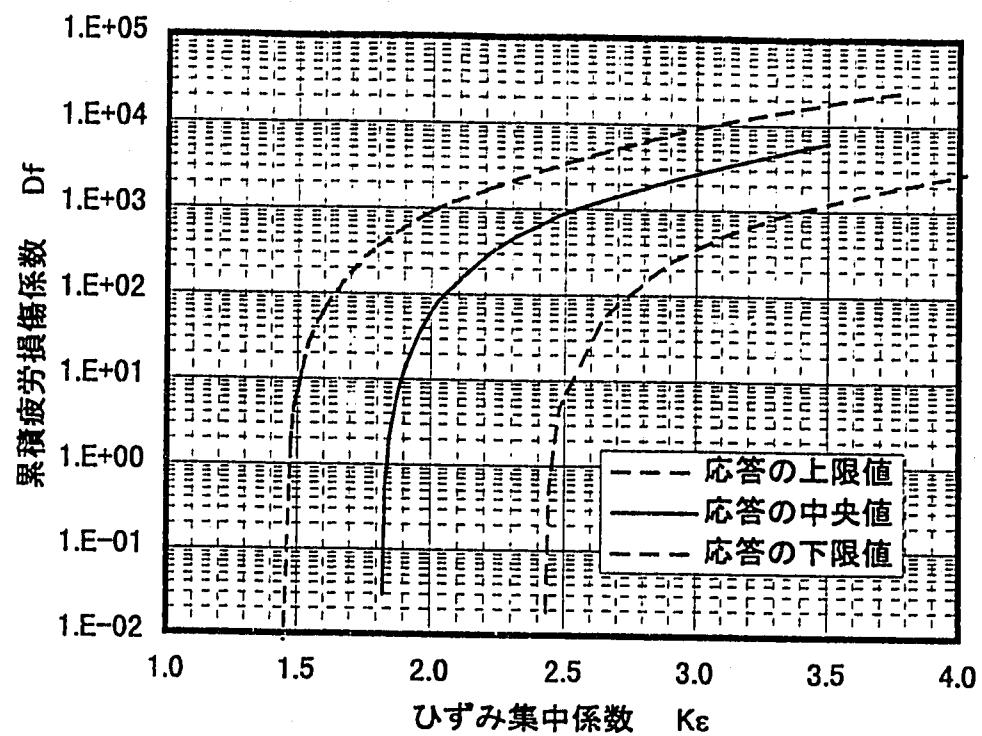
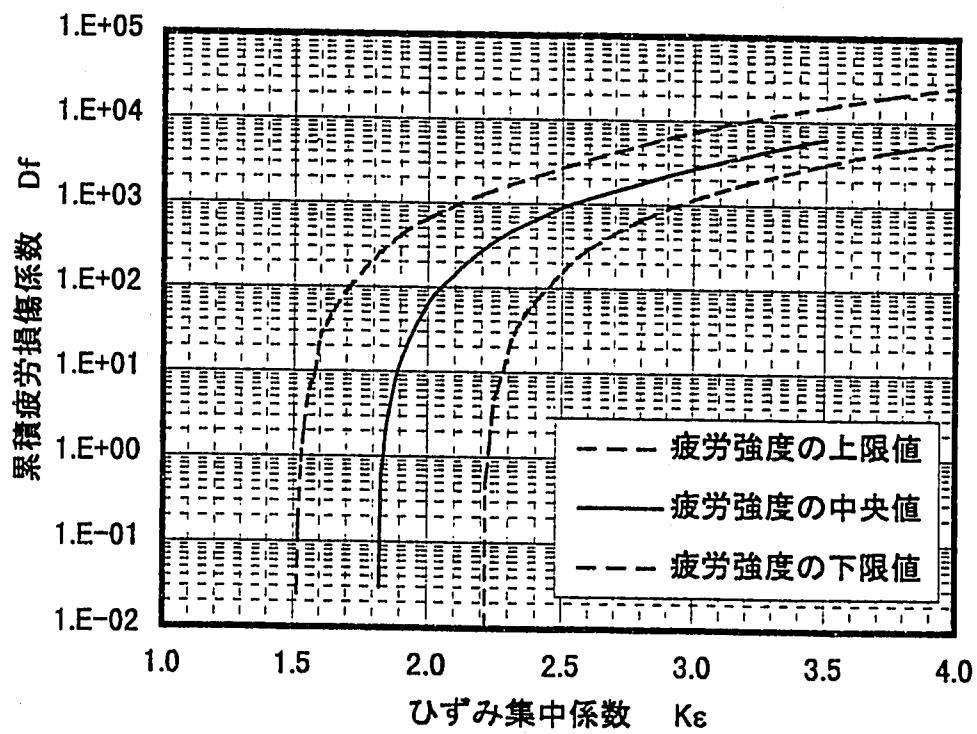


図4 円柱の振動と円柱両側面より対称に放出される渦の様子



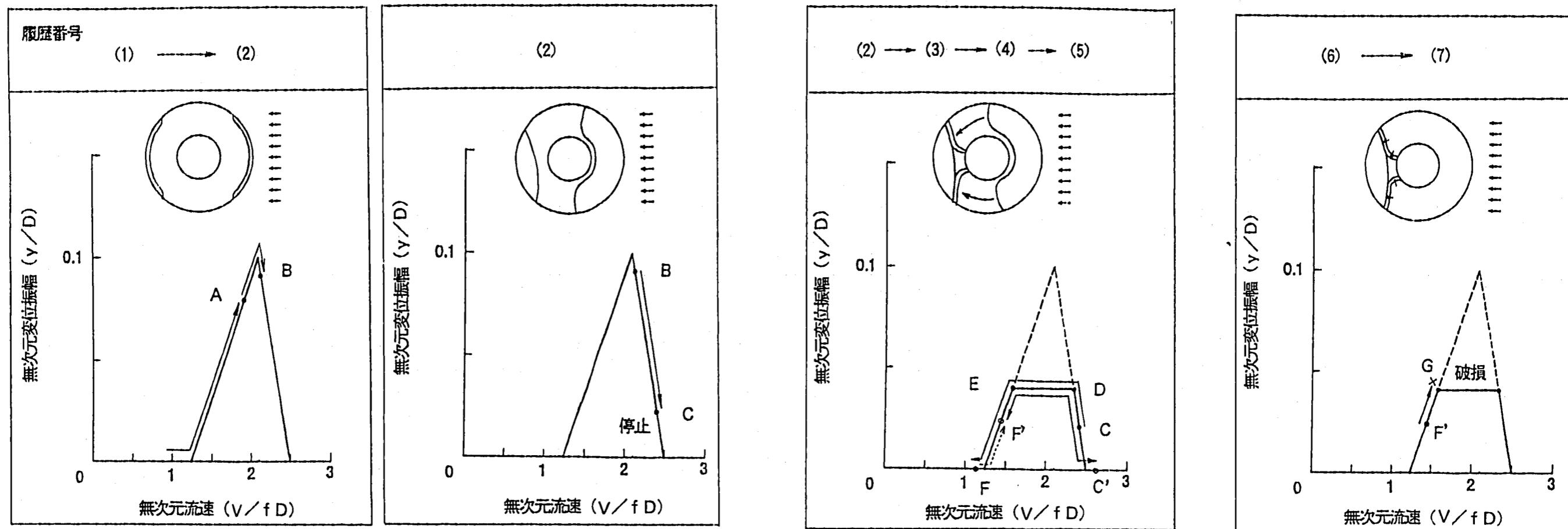


(a) 変位応答線図による相違

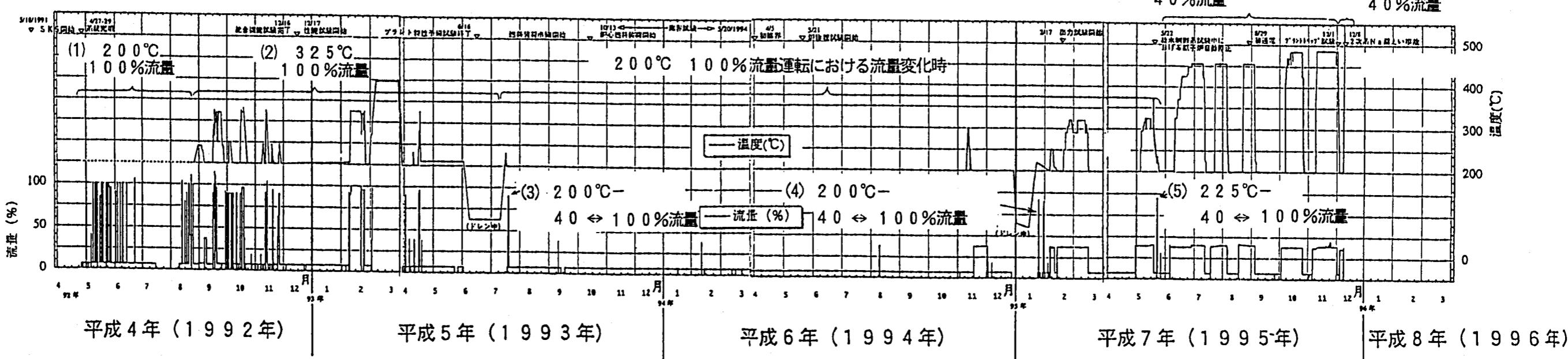


(b) 疲労強度による相違

図6 累積疲労損傷係数の算定結果



(6) 450°Cおよび485°C (7) 450→485°C温度上昇時
40%流量 40%流量



2次主冷却系Cループの運転履歴

図7 考えられる破損のシナリオ

V:管内流速 (m/s)
f:ウェル固有振動数 (Hz)
D:ウェル細管直徑 (m)
y:ウェル先端変位 (m)

2次主冷却系ホットレグ200°C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°C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°C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°C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°C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°C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拳動が模擬された。これら両試験の中間にある200°C等温流量時の流速5.2m/sでのき裂拳動は、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ないと判断できる。

表1 評価流速の根拠について

温度 (°C)		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°C	200°C	4278 (100%)	4278 (100%)	5.0	<u>5.2</u>	定格質量流量 (3740ton/h) からナトリウム温度 200°Cの密度で算出し、体積流量が4139m ³ /h となった。
325°C	325°C	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°C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°Cであったので一致した。
*1 (325°C)	485°C	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°C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°Cと見なしたため一致した。
325°C	505°C	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°C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°C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°C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,I.下3	流速(5.0m/s)	流速(5.2m/s)
・" P.2,I.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, I.10	質量流量を一定にして	体積流量を一定にして
・" P.2, I.11	単位面積当たりの質量流量	体積流量
・" P.5,I.2	$k_s=0.42$	$k_s=0.54$
・" P.5,I.17	0.046mm	0.050mm
・" P.5,I.18	(0.003mm)	(0.0014mm)
・" P.5,I.19	0.071mm	0.082mm
・" P.6,I.2	1.56mm	1.62mm
・" P.6,I.2	0.10mm	0.12mm
・" P.6,I.14	$k_s=0.84$	$k_s=1.08$
・" P.6,I.22	1.23mm	1.29mm
・" P.6,I.23	0.094mm	0.102mm
・" P.6,I.23	79%	80%
・" P.6,I.24	93%	89%
・" P.7,I.8	0.91mm	0.94mm
・" P.7,I.9	0.15mm	0.18mm

訂正箇所	訂正前	訂正後
• " P.7,I.14	1.56mm	1.62mm
• " P.7,I.15	0.10mm	0.12mm
• " P.7,I.15	1.23mm	1.29mm
• " P.7,I.16	0.094mm	0.10mm
• " P.7,I.17	0.91mm	0.94mm
• " P.7,I.17	0.15mm	0.18mm
• " P.7,I.18	1.56	1.62
• " P.7,I.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

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

6 (20)

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

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

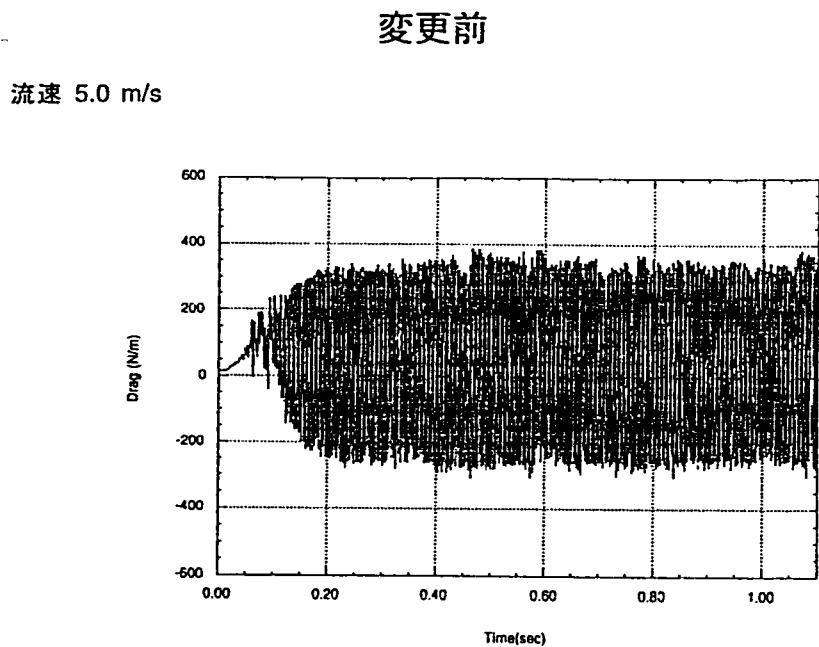


図4 抗力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

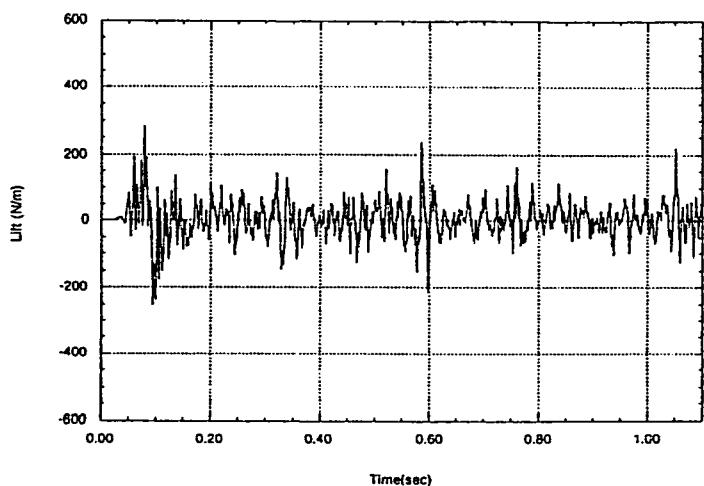


図5 揚力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

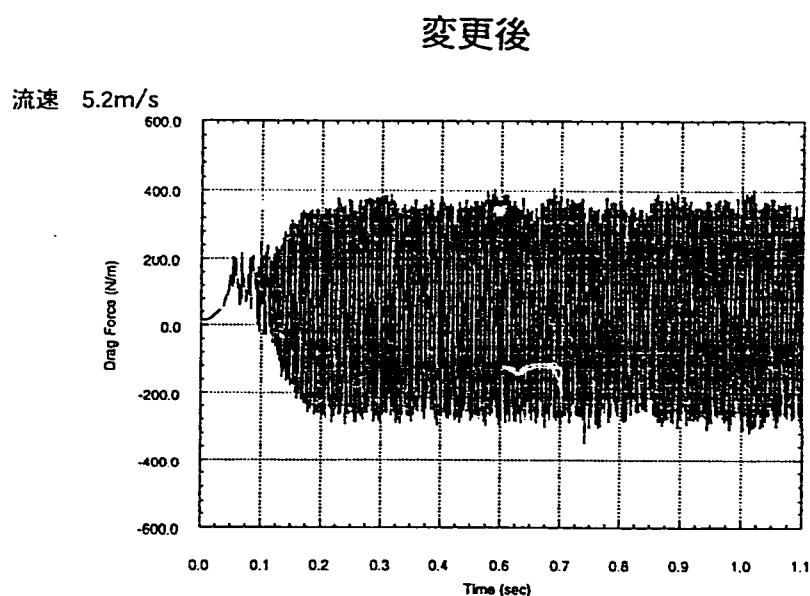


図4 抗力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

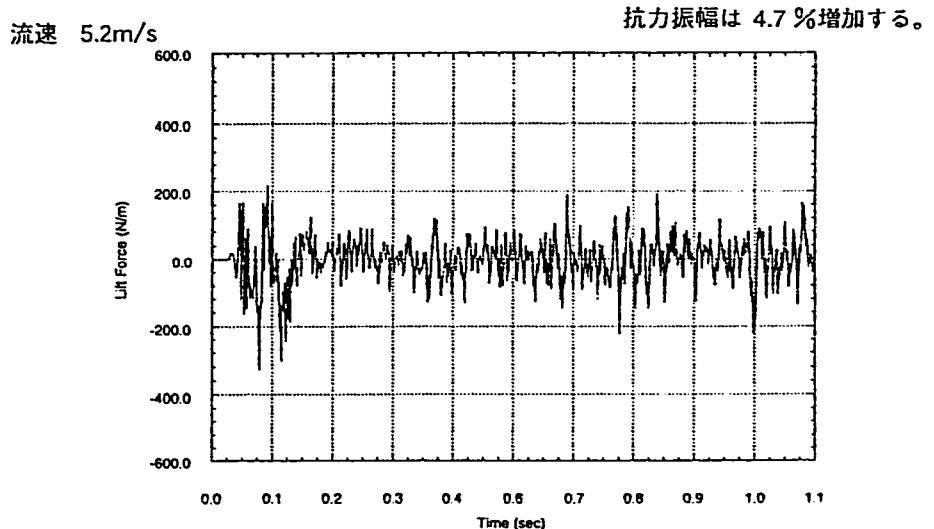


図5 揚力の時刻歴 (減衰定数0.5%)

揚力振幅は14%増加する。

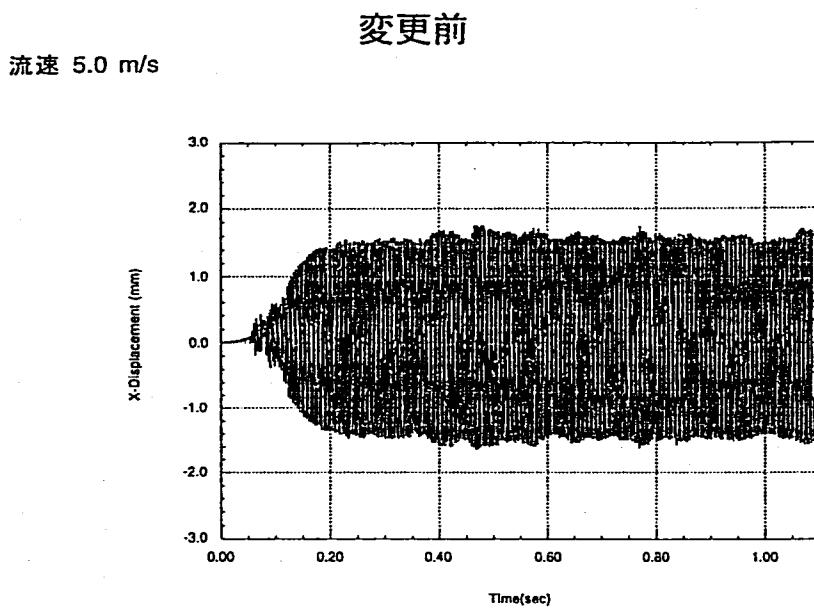


図 6 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

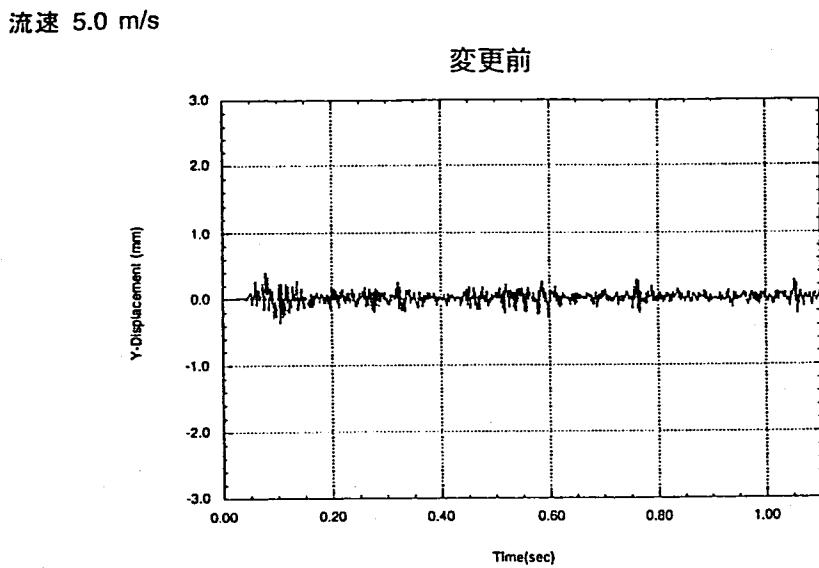


図 7 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

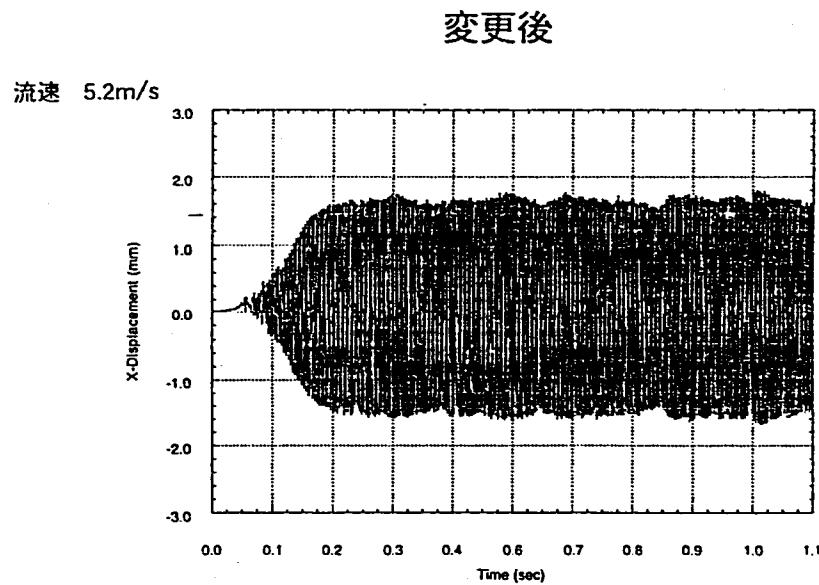


図 6 抗力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

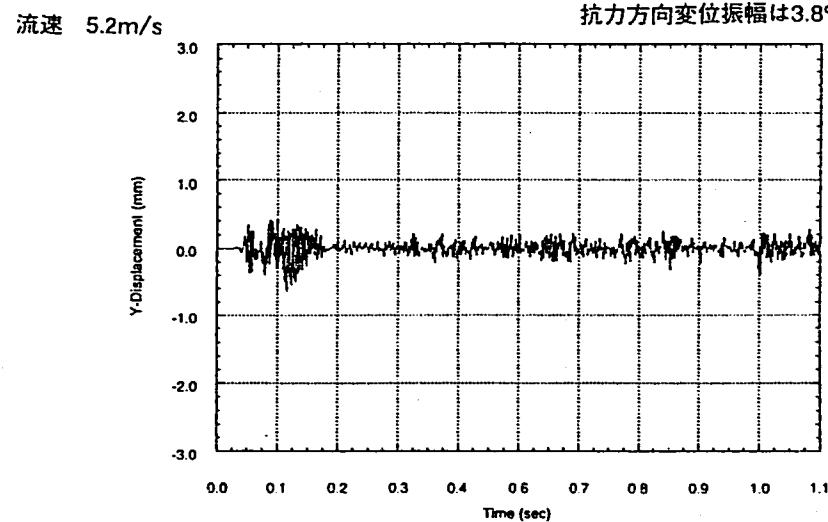


図 7 揚力方向変位の時刻歴 (減衰定数0.5%)

揚力方向変位振幅は15%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

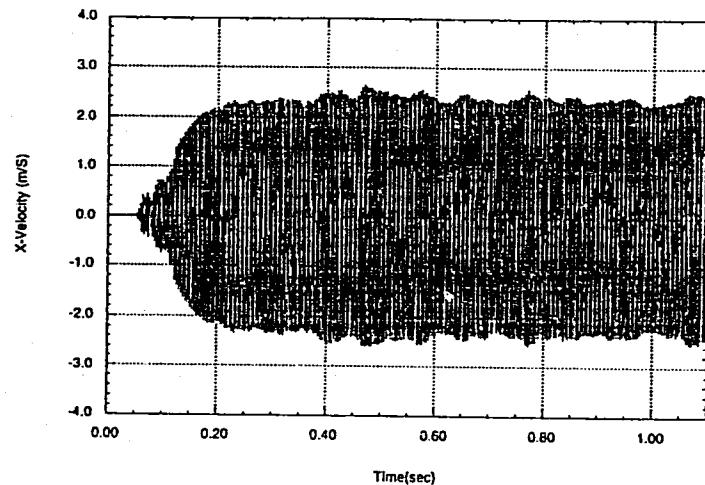


図8 抵抗方向変位速度の時刻歴（減衰定数0.5%）

流速 5.0 m/s

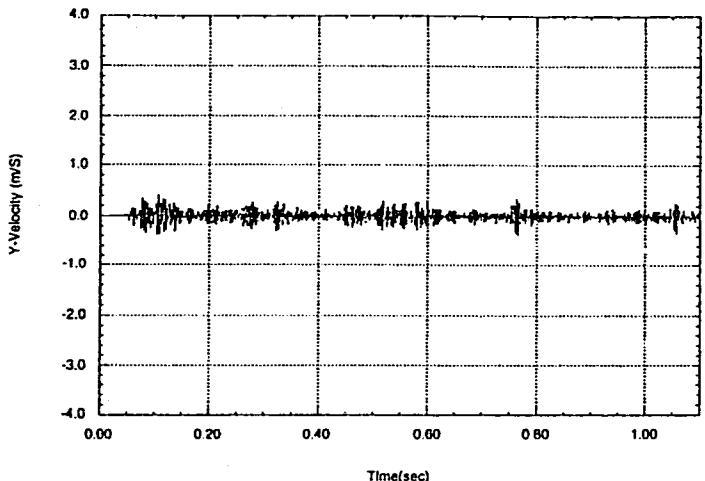


図9 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数0.5%）

変更後

流速 5.2m/s

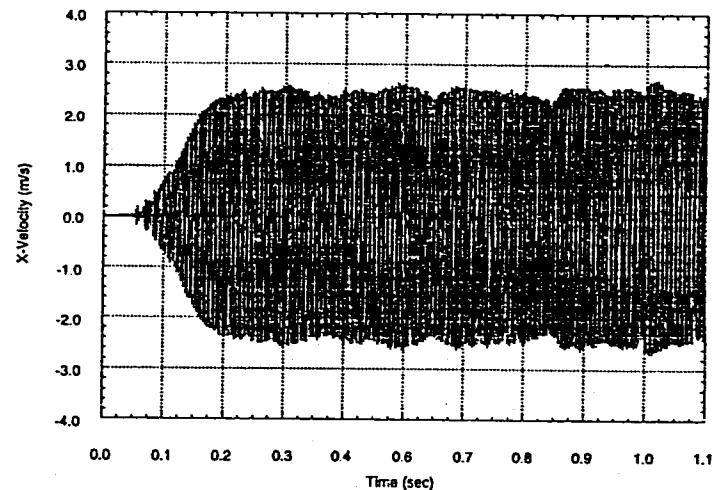


図8 抵抗方向変位速度の時刻歴（減衰定数0.5%）

抗力方向変位速度振幅は3.8%増加する。

流速 5.2m/s

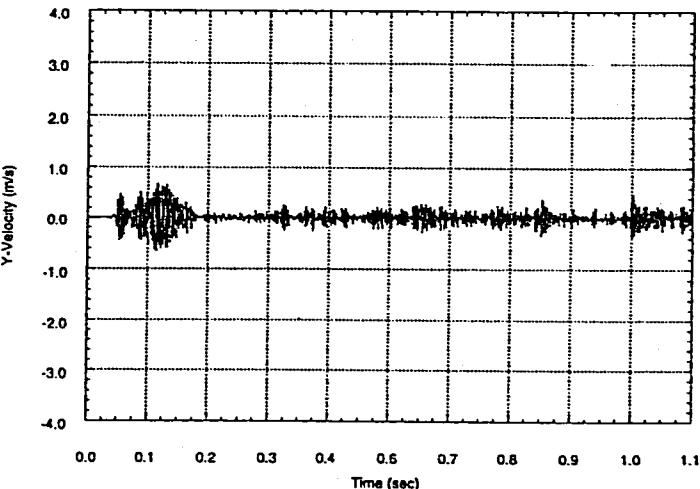


図9 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数0.5%）

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

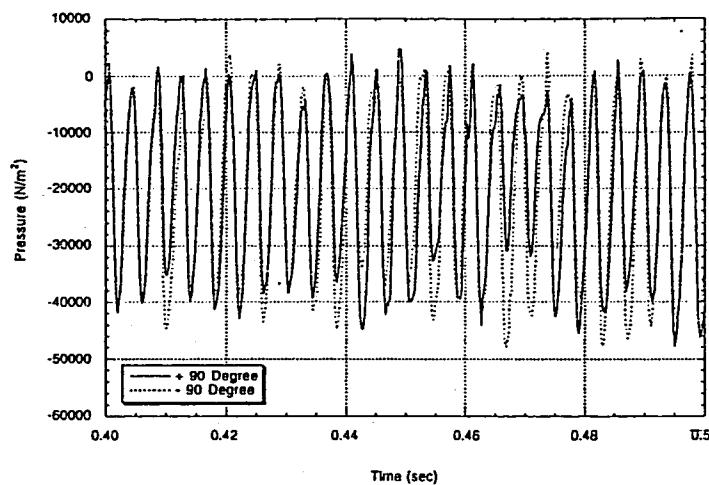


図11 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数0.5%）

流速 5.0 m/s

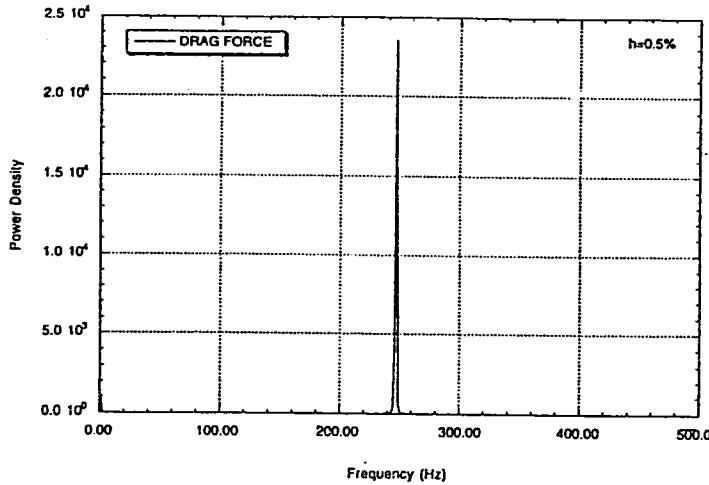


図13 抗力のパワースペクトル（減衰定数0.5%）

変更後

流速 5.2m/s

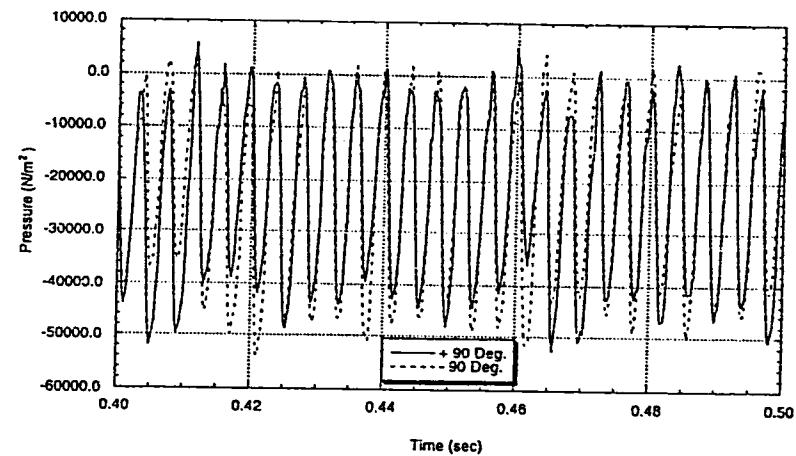


図11 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数0.5%）

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

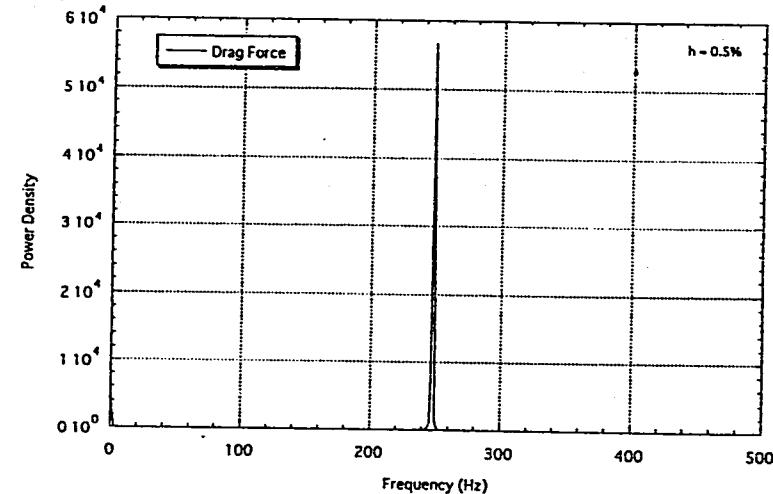


図13 抗力のパワースペクトル（減衰定数0.5%）

抗力が変動する周期は変わらない。

変更前
流速 5.0 m/s

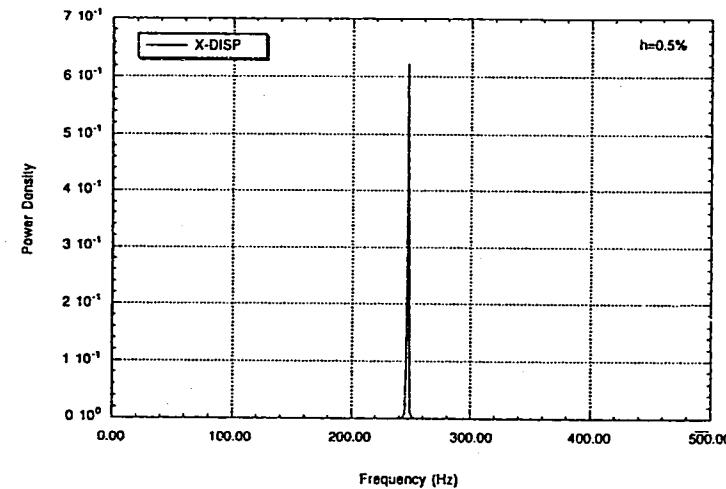


図14 抗力方向変位のパワースペクトル（減衰定数0.5%）

流速 5.0 m/s

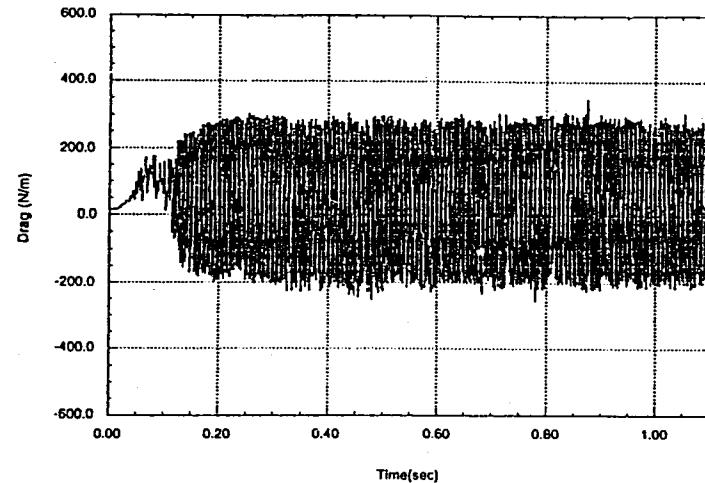


図15 抗力の時刻歴（減衰定数1.0%）

変更後
流速 5.2m/s

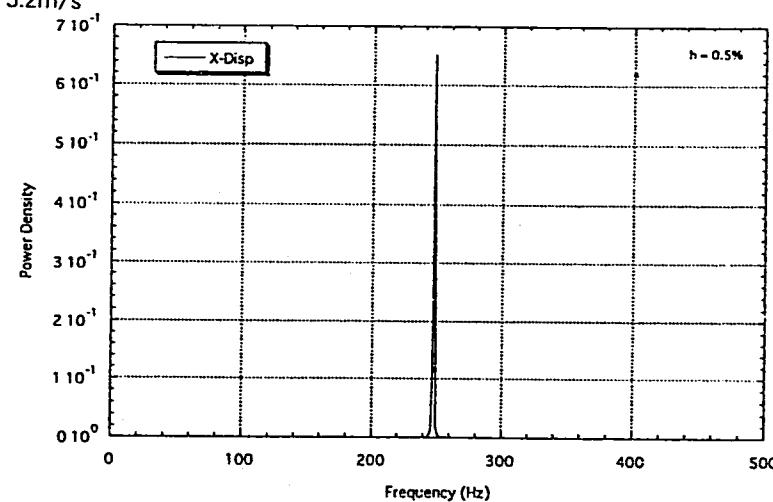


図14 抗力方向変位のパワースペクトル（減衰定数0.5%）

抗力方向変位が変動する周期は変わらない。

流速 5.2m/s

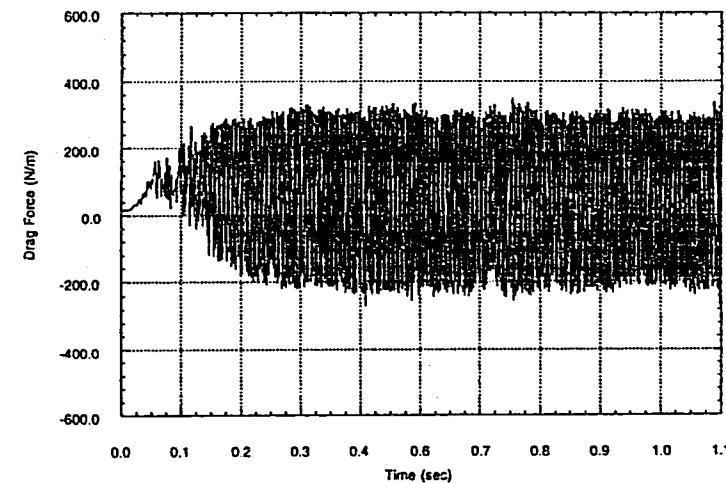


図15 抗力の時刻歴（減衰定数1.0%）

抗力振幅は6.4%増加する。

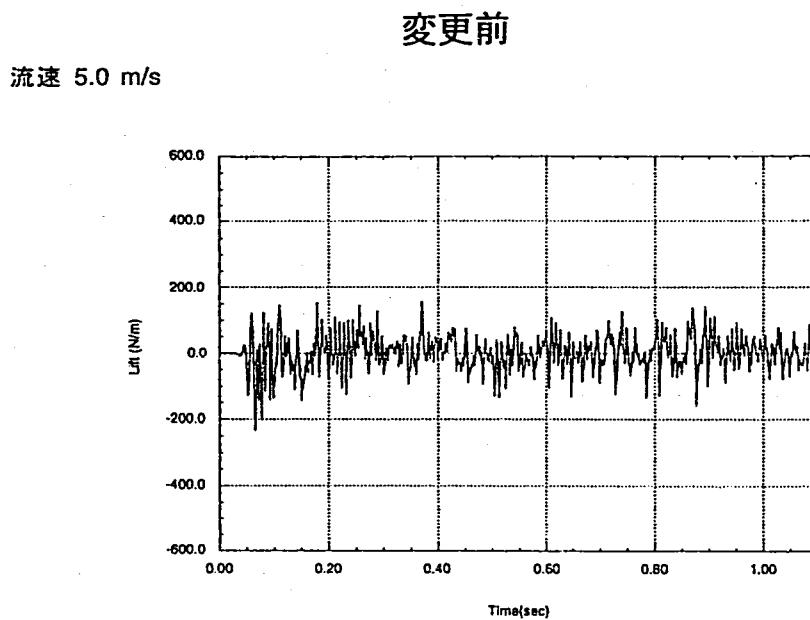


図16 揚力の時刻歴（減衰定数1.0%）

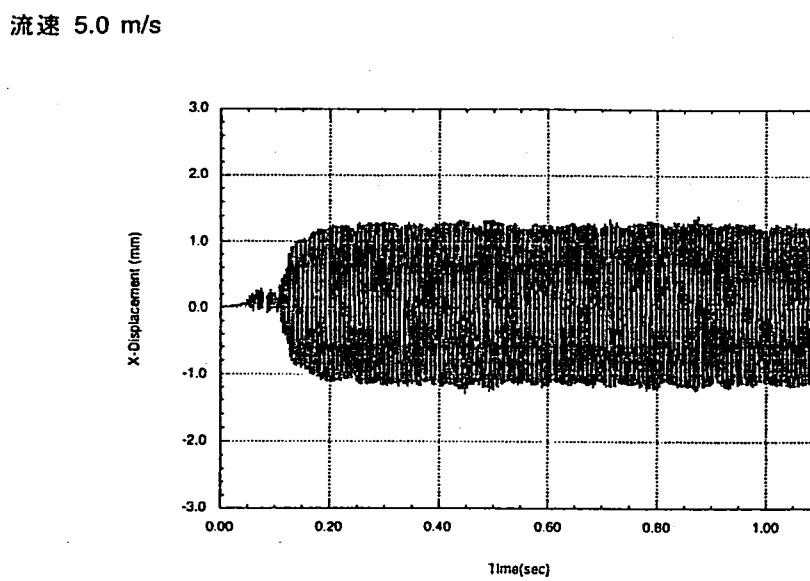


図17 抗力方向変位の時刻歴（減衰定数1.0%）

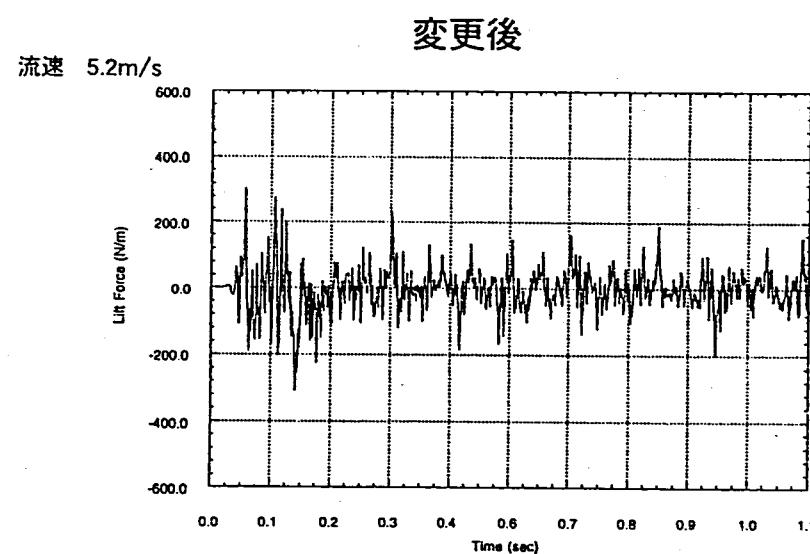


図16 揚力の時刻歴（減衰定数1.0%）

揚力振幅は30%増加する。

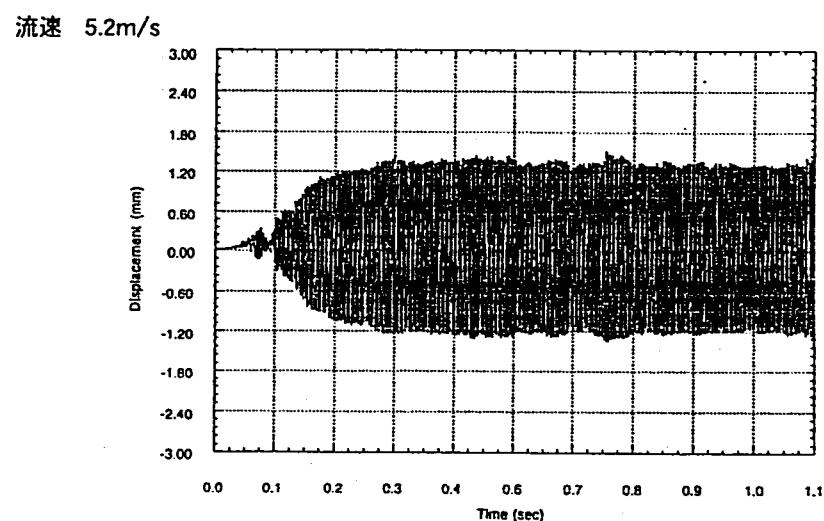


図17 抗力方向変位の時刻歴（減衰定数1.0%）

抗力方向変位振幅は4.6%増加する。

変更前

流速 5.0 m/s

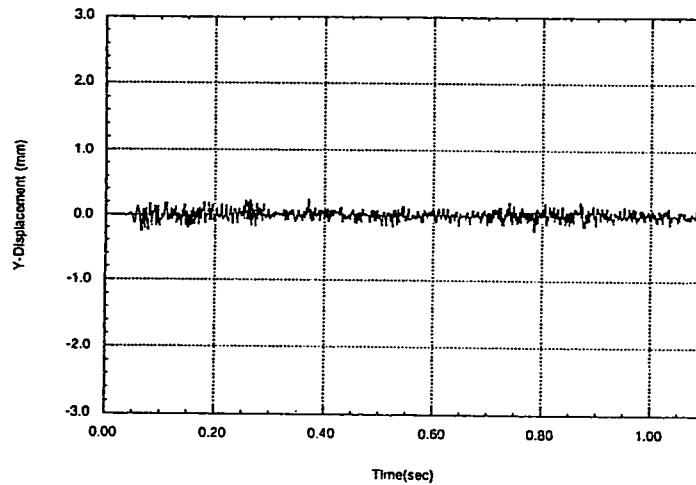


図18 揚力方向変位の時刻歴（減衰定数1.0%）

流速 5.0 m/s

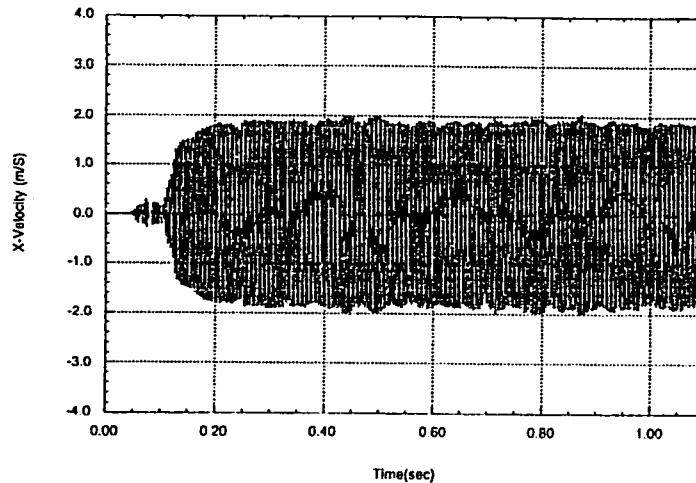


図19 抗力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.0%）

変更後

流速 5.2m/s

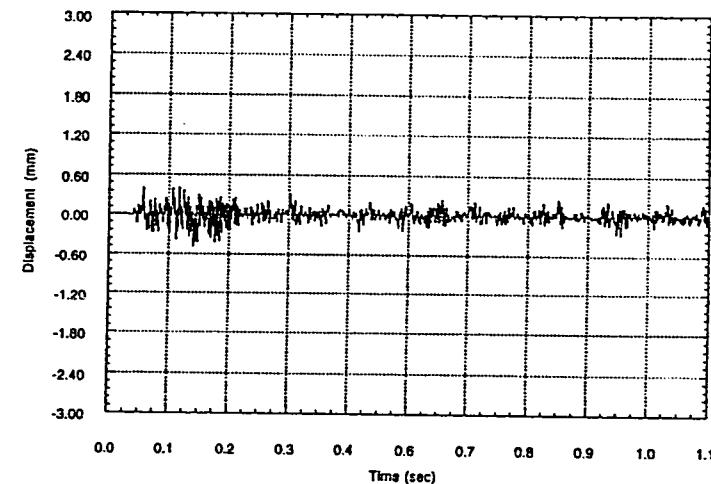


図18 揚力方向変位の時刻歴（減衰定数1.0%）

揚力方向変位振幅は9.1%増加する。

流速 5.2m/s

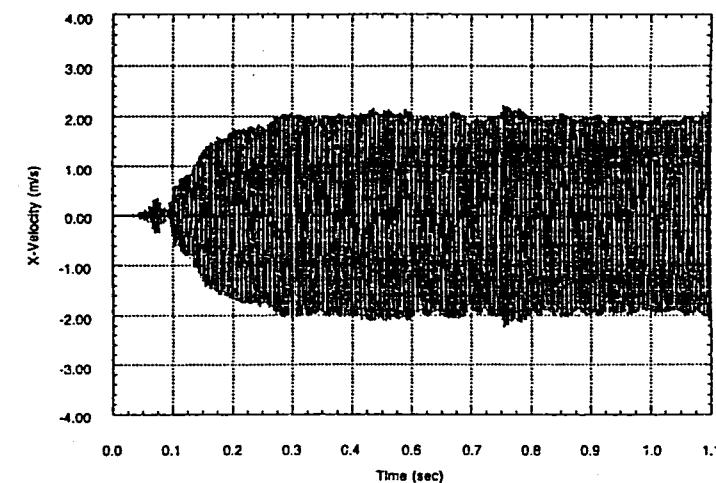


図19 抗力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.0%）

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

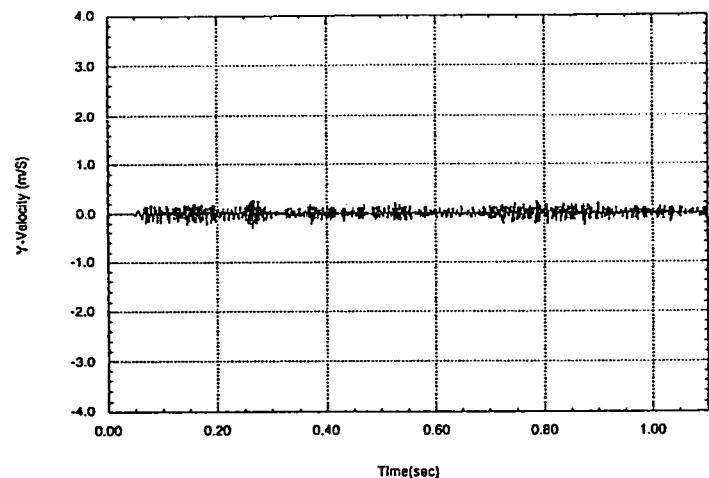


図20 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.0%）

流速 5.0 m/s

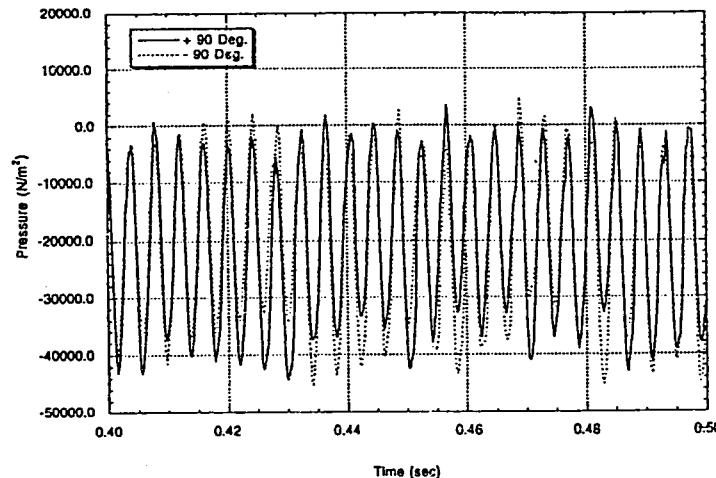


図21 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数1.0%）

変更後

流速 5.2m/s

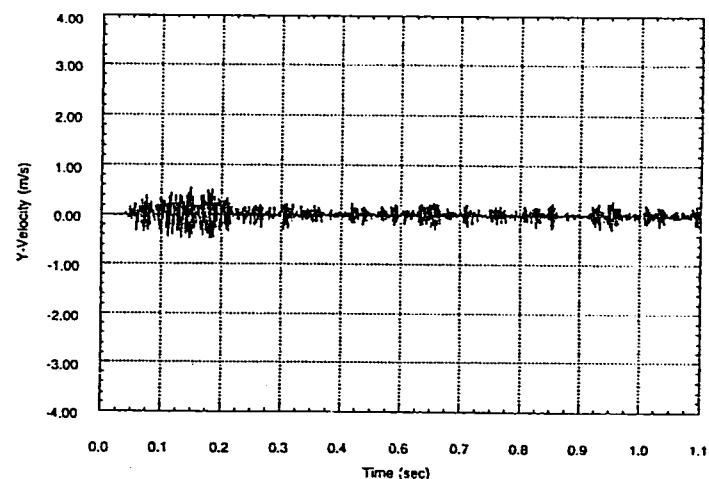


図20 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.0%）

揚力方向変位速度振幅は9.1%増加する。

流速 5.2m/s

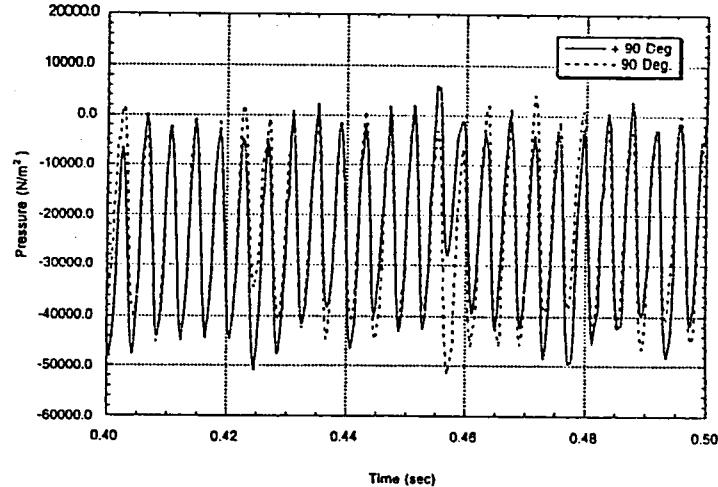


図21 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数1.0%）

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。

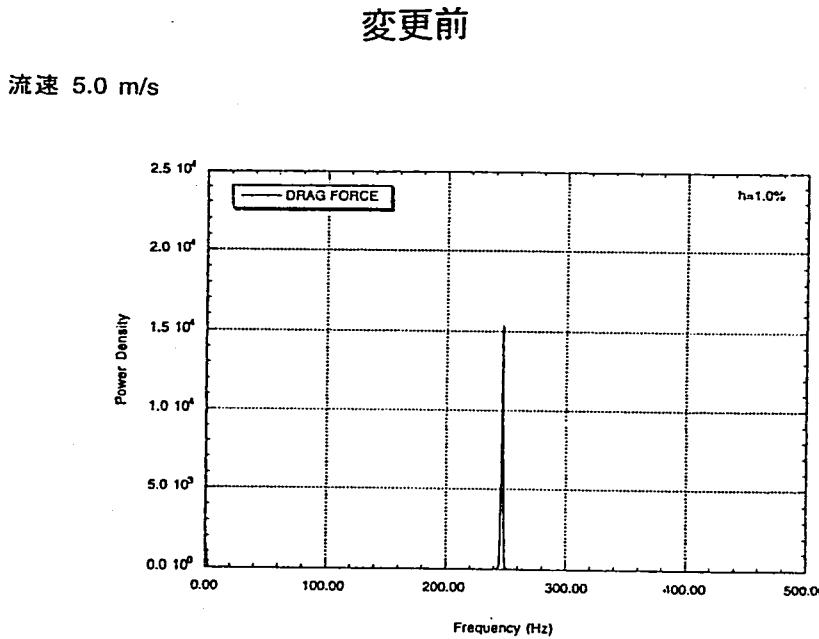


図22 抗力のパワースペクトル（減衰定数1.0%）

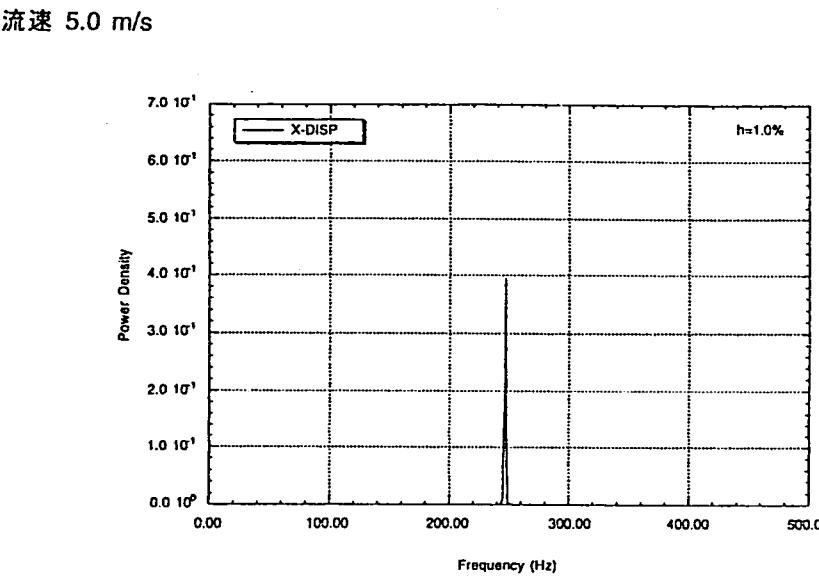


図23 抗力方向変位のパワースペクトル（減衰定数1.0%）

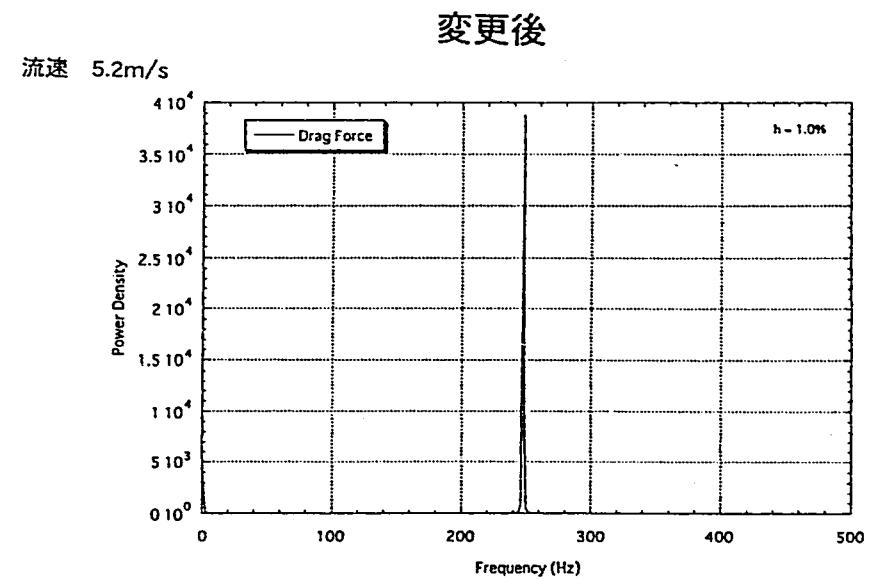


図22 抗力のパワースペクトル（減衰定数1.0%）

抗力が変動する周期は変わらない。

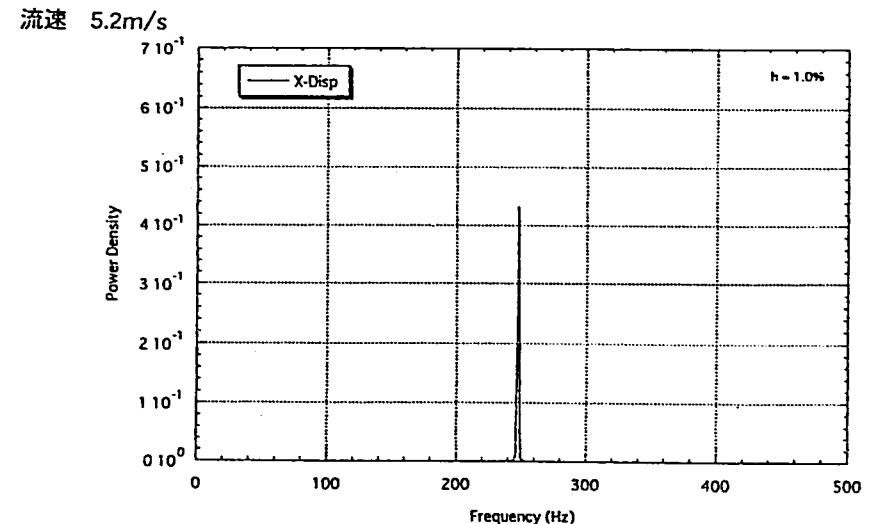


図23 抗力方向変位のパワースペクトル（減衰定数1.0%）

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

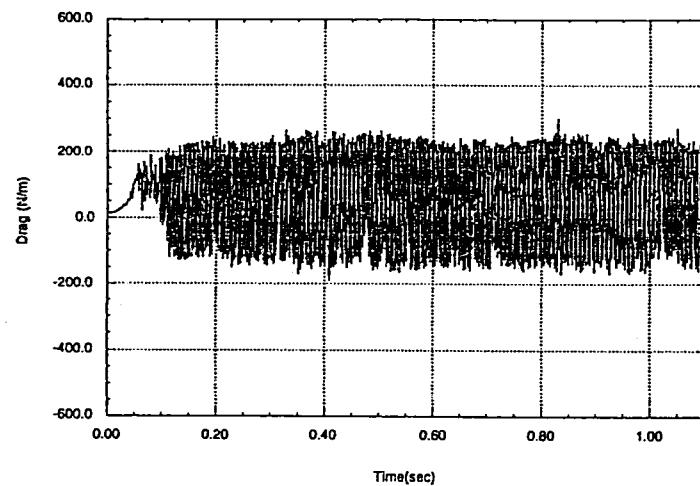


図24 抗力の時刻歴（減衰定数1.5%）

流速 5.0 m/s

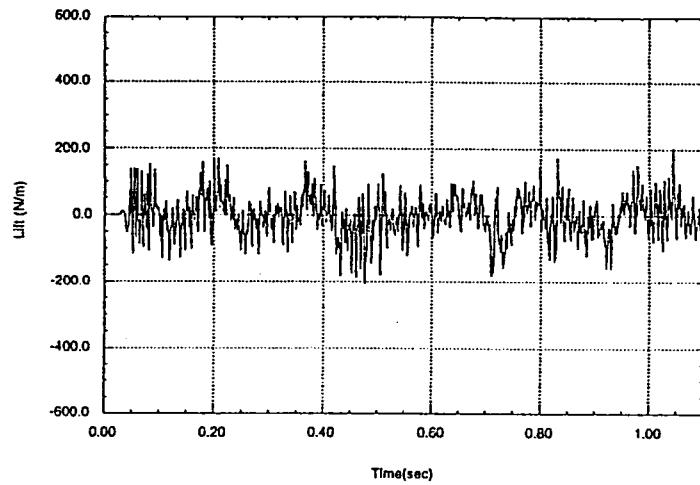


図25 揚力の時刻歴（減衰定数1.5%）

変更後

流速 5.2m/s

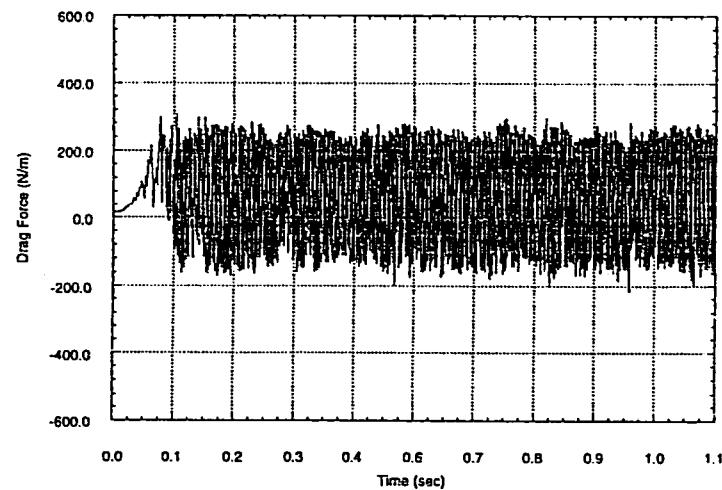


図24 抗力の時刻歴（減衰定数1.5%）

抗力振幅は4.5%増加する。

流速 5.2m/s

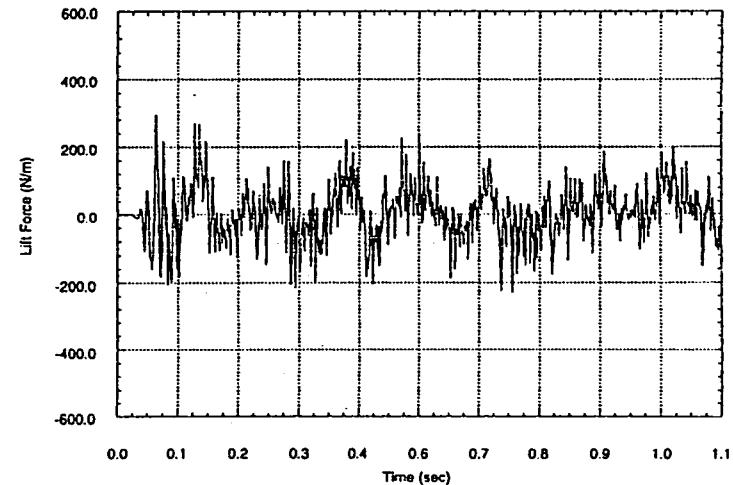


図25 揚力の時刻歴（減衰定数1.5%）

揚力振幅は26%増加する。

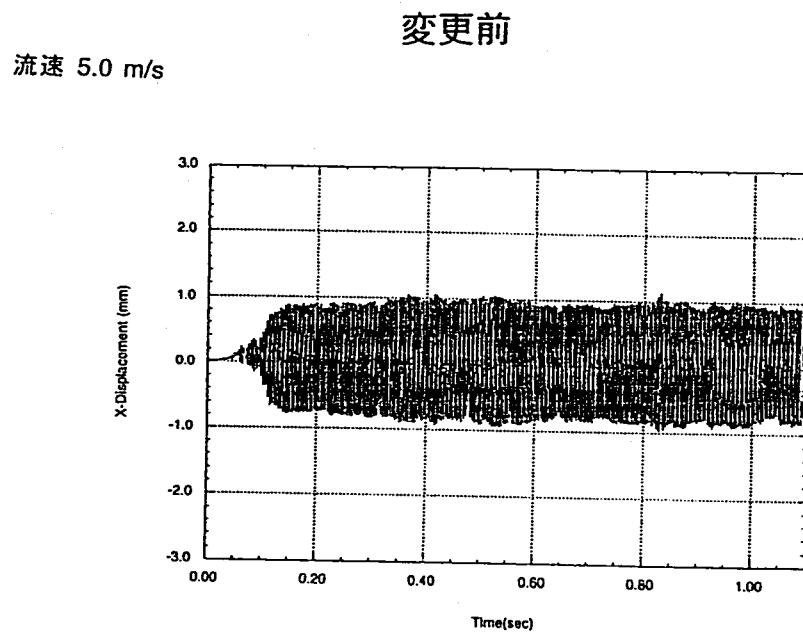


図26 抗力方向変位の時刻歴（減衰定数1.5%）

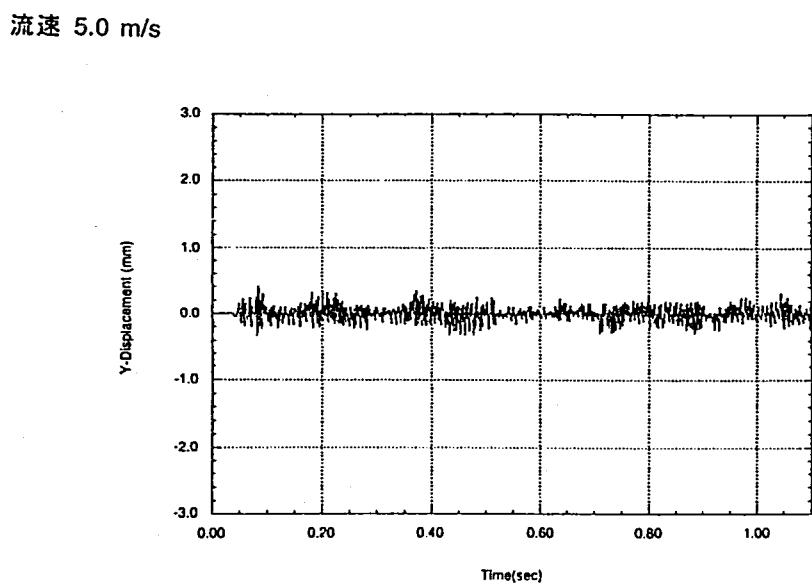


図27 揚力方向変位の時刻歴（減衰定数1.5%）

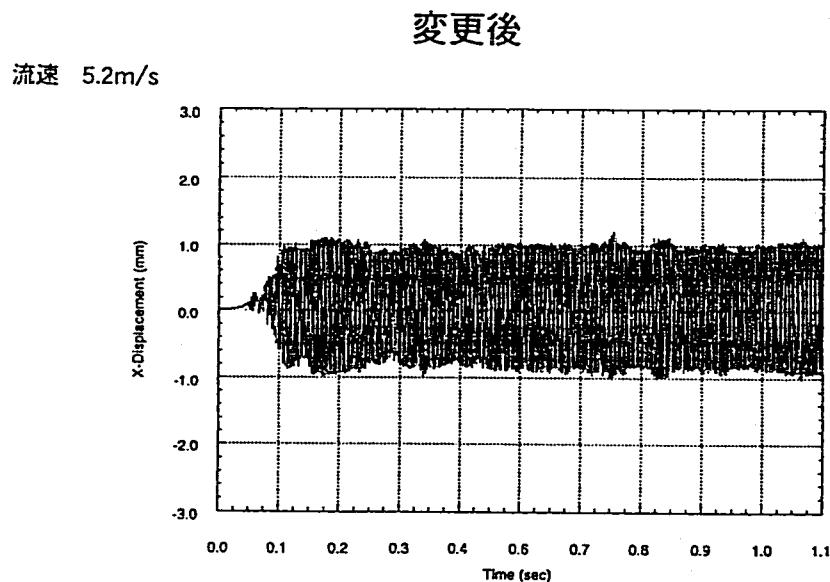


図26 抗力方向変位の時刻歴（減衰定数1.5%）

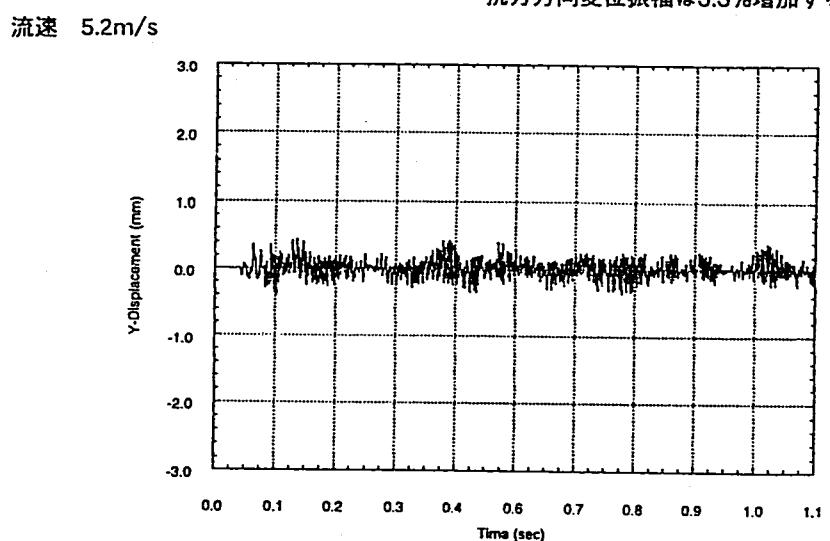


図27 揚力方向変位の時刻歴（減衰定数1.5%）

揚力方向変位振幅は20%増加する。

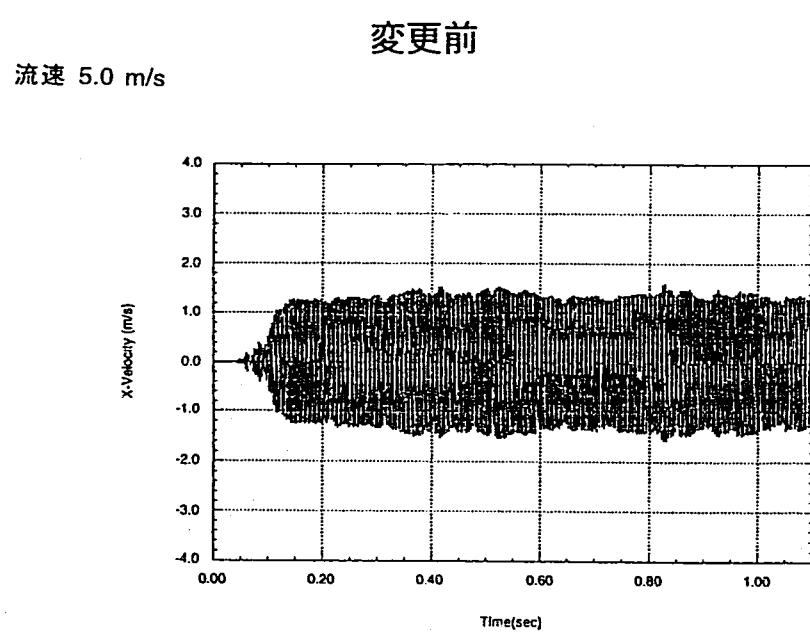


図28 抗力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）
流速 5.0 m/s

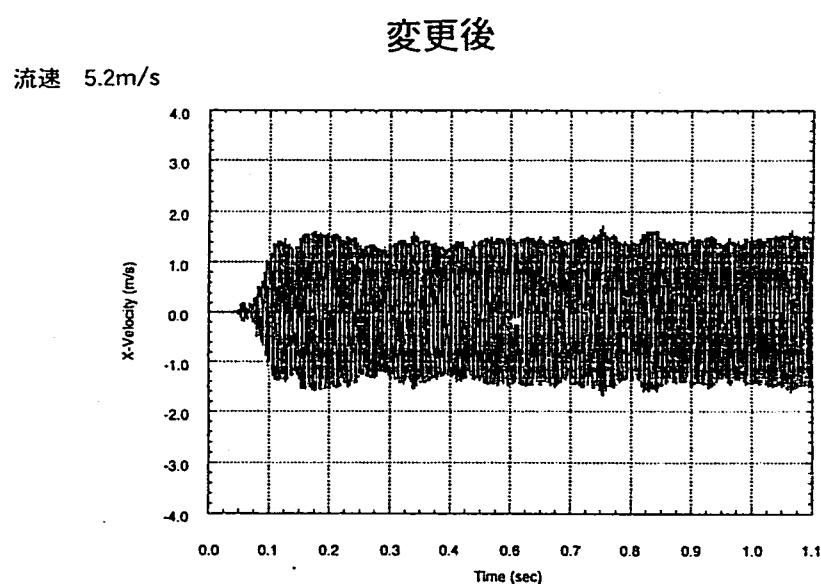


図28 抗力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

抗力方向変位速度振幅は3.3%増加する。

流速 5.2m/s

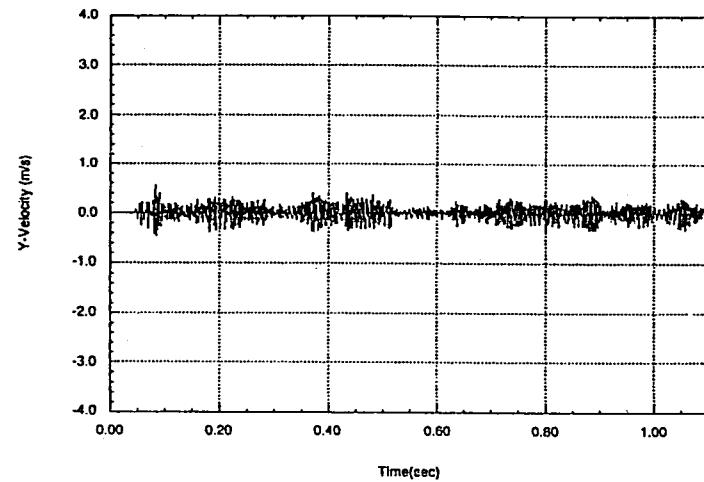


図29 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

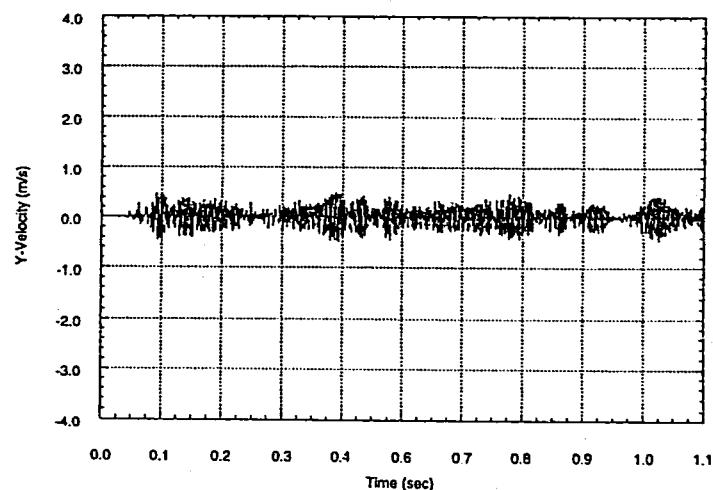


図29 揚力方向変位速度の時刻歴（減衰定数1.5%）

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

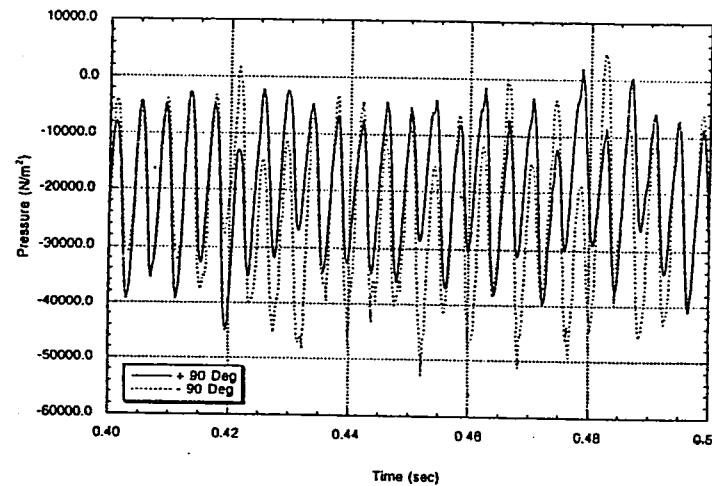


図30 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数1.5%）

流速 5.0 m/s

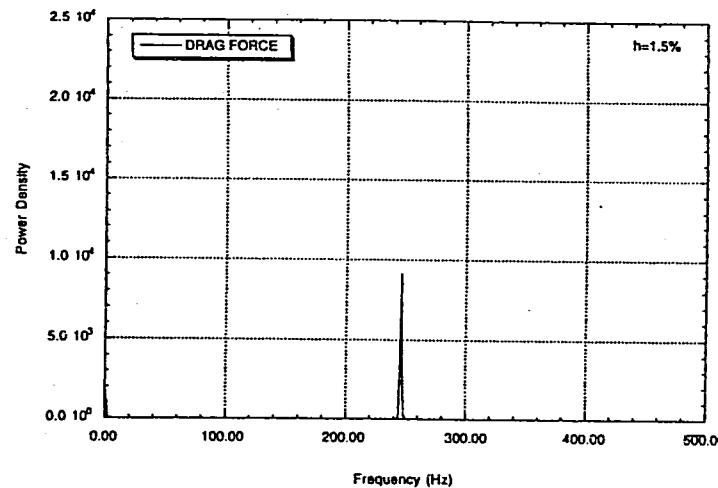


図31 抗力のパワースペクトル（減衰定数1.5%）

変更後

流速 5.2m/s

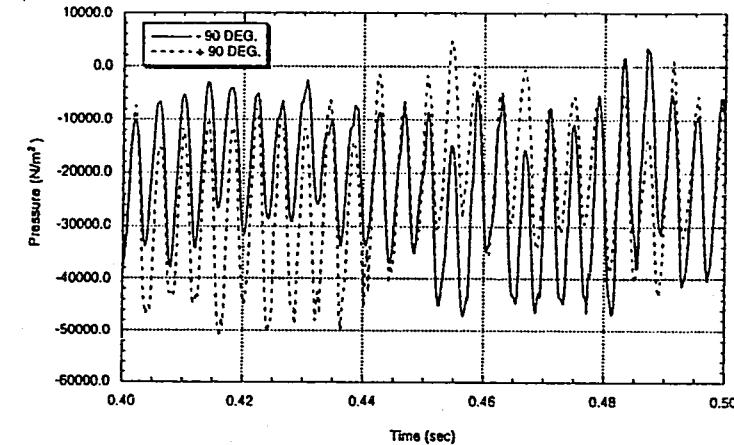


図30 円柱両側面（90度と-90度の点）の圧力時刻歴（減衰定数1.5%）

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

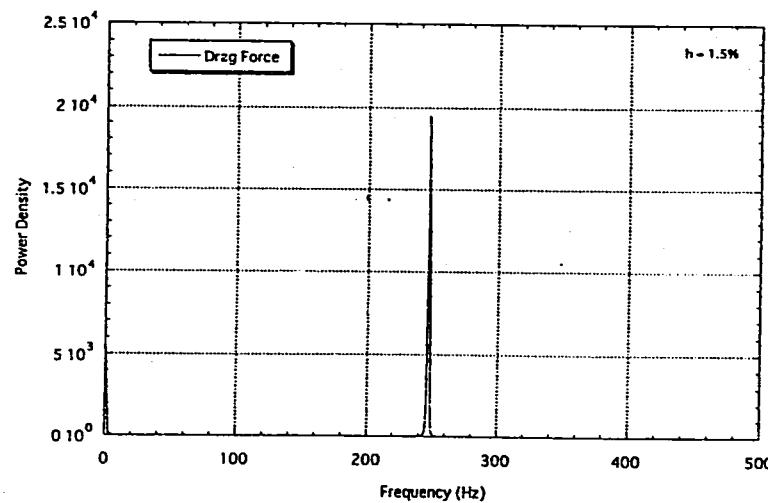


図31 抗力のパワースペクトル（減衰定数1.5%）

抗力が変動する周期は変わらない。

変更前
流速 5.0 m/s

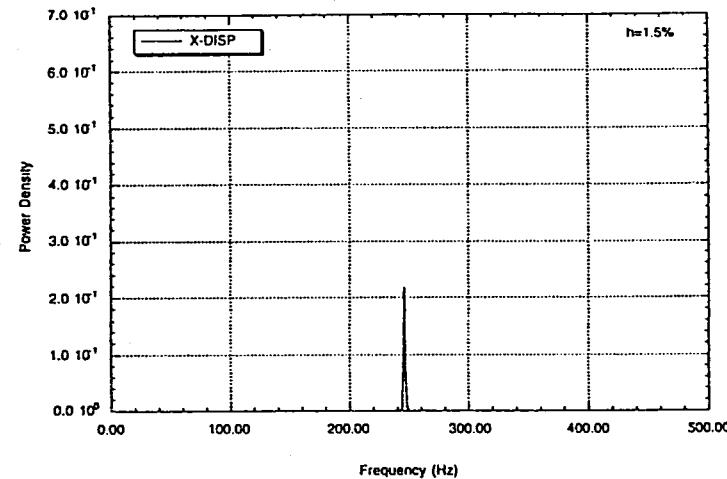


図32 抗力方向変位のパワースペクトル（減衰定数1.5%）

変更後
流速 5.2m/s

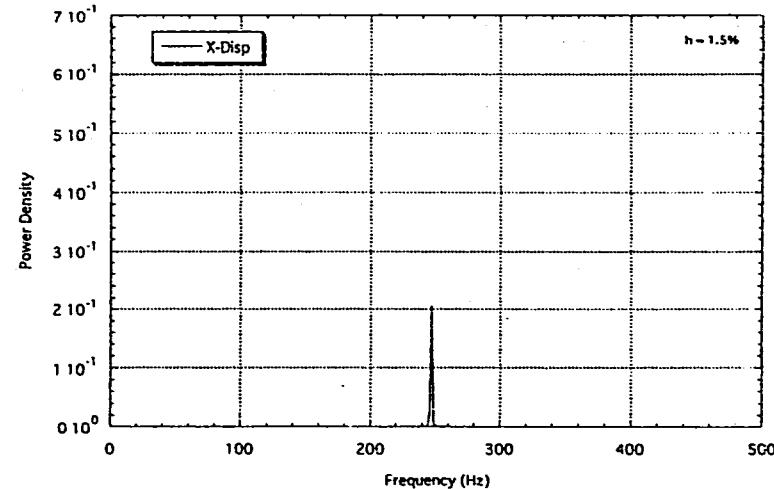


図32 抗力方向変位のパワースペクトル（減衰定数1.5%）

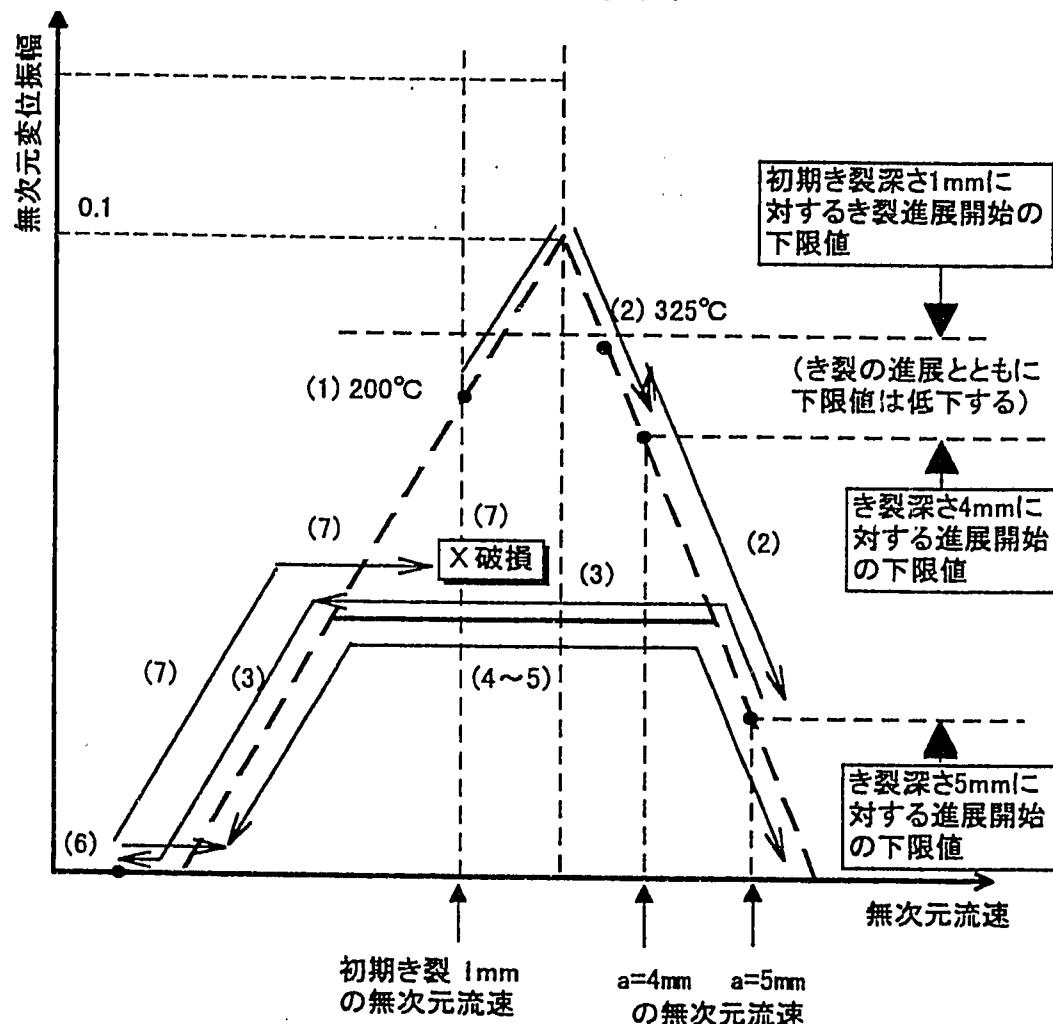
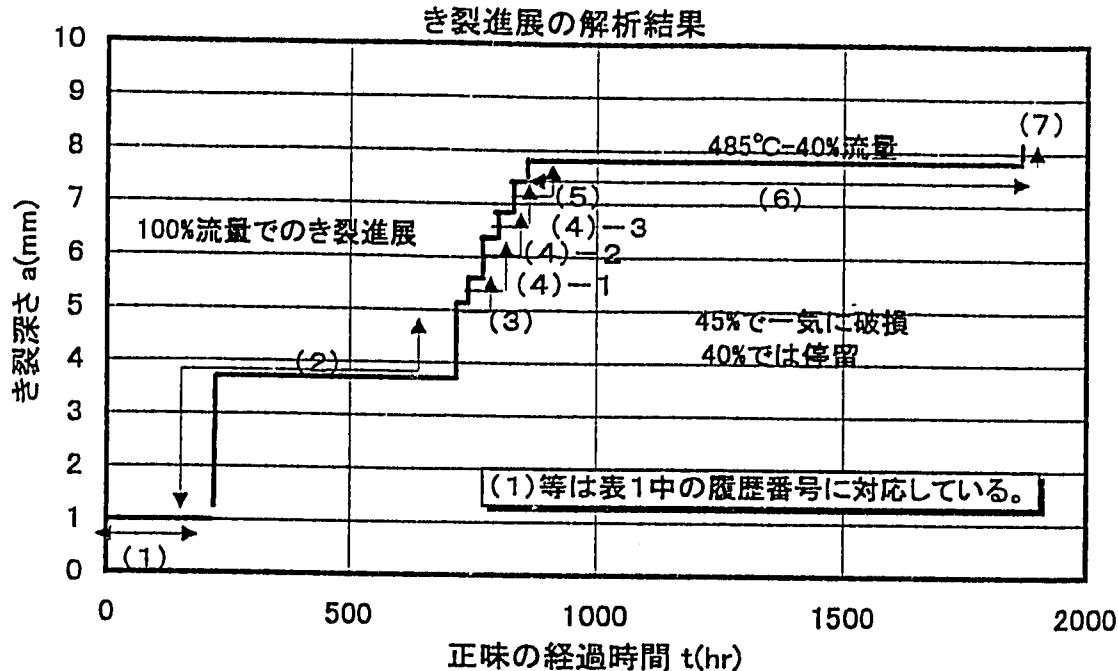
抗力方向変位が変動する周期は変わらない。

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）
—き裂発生以降損傷に至るまでの検討—」

別添2

変更前

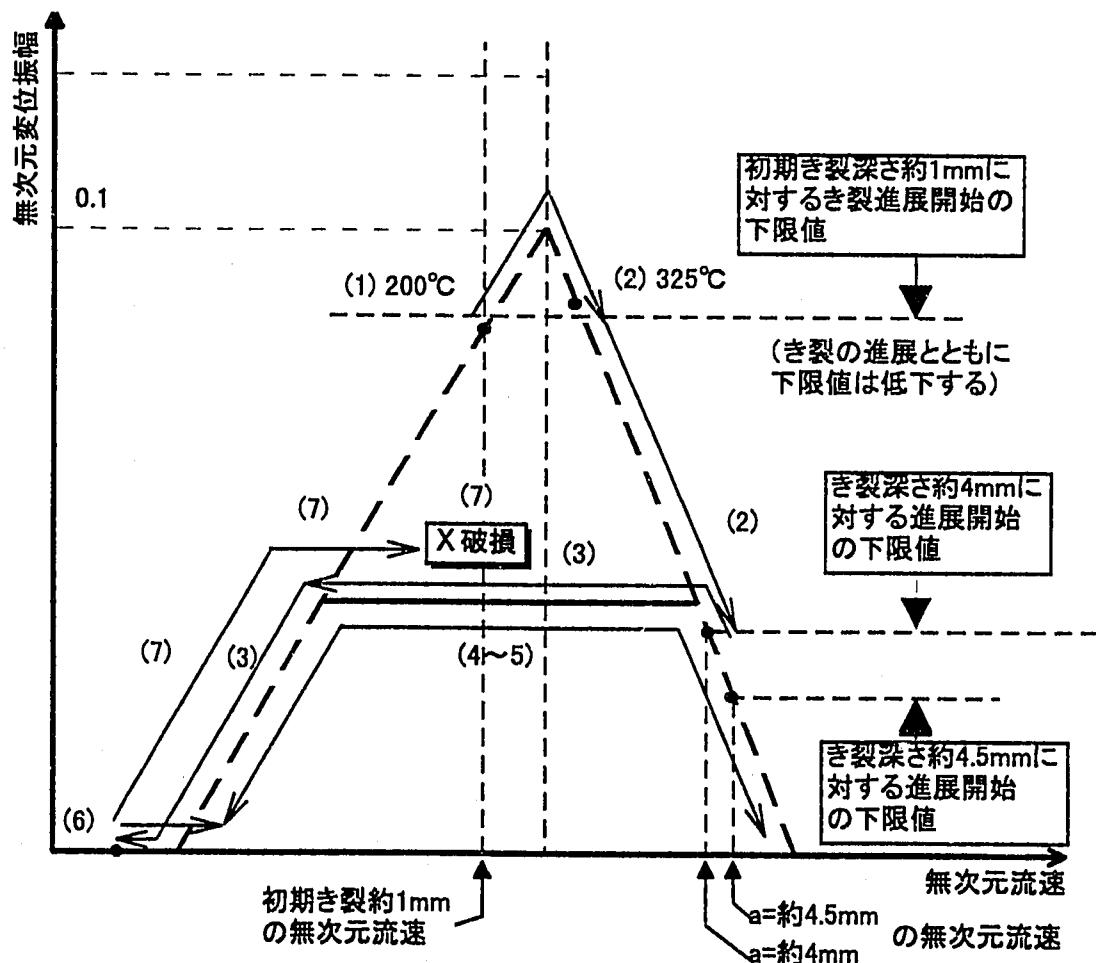
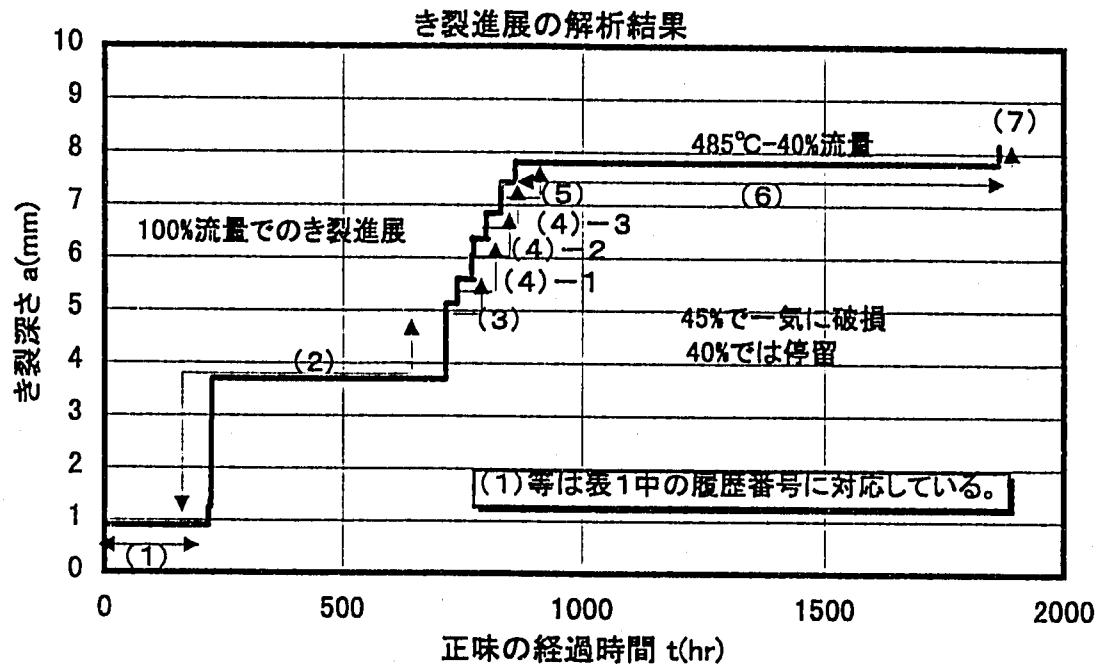
添付図2



破損に至るまでの考え方の時間的推移

第4報
添付図2

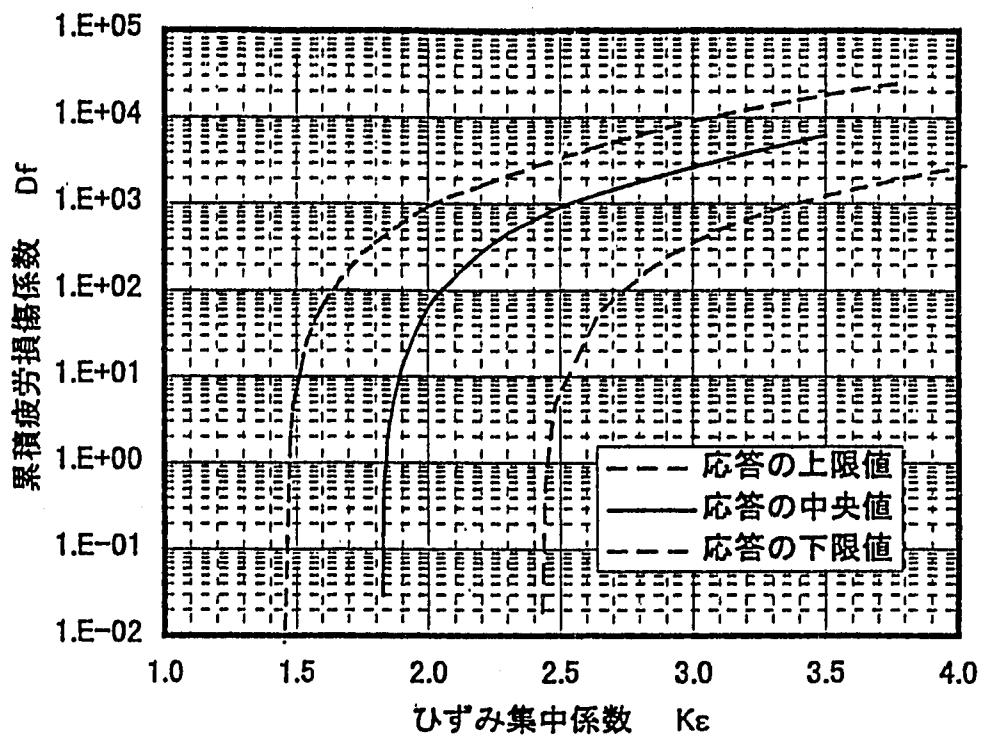
変更後



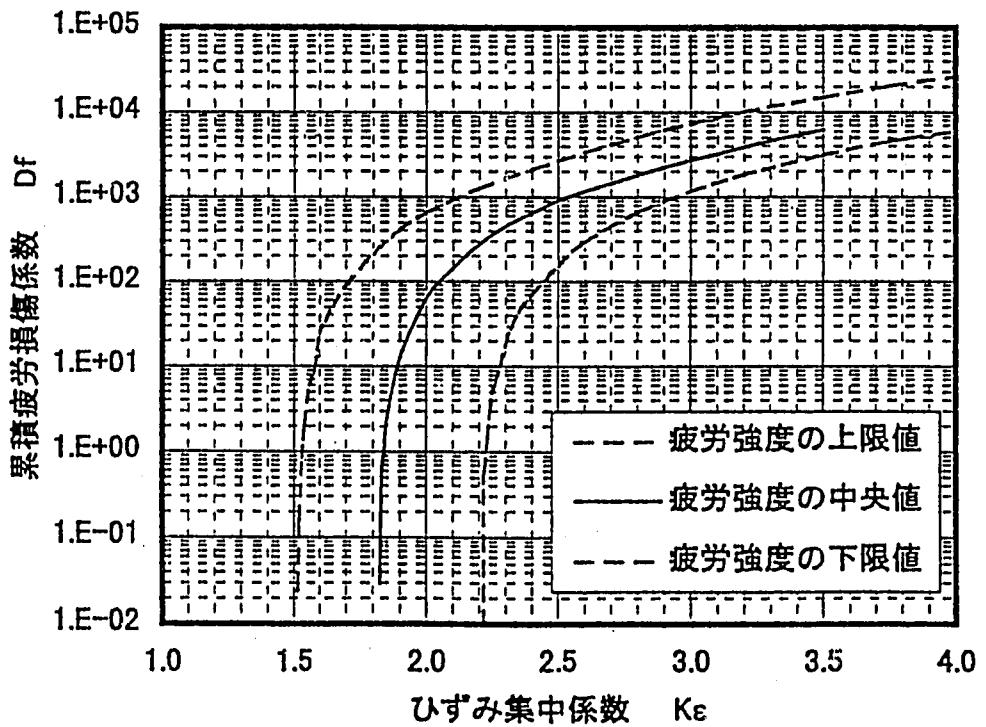
破損に至るまでの考えられる時間的推移

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

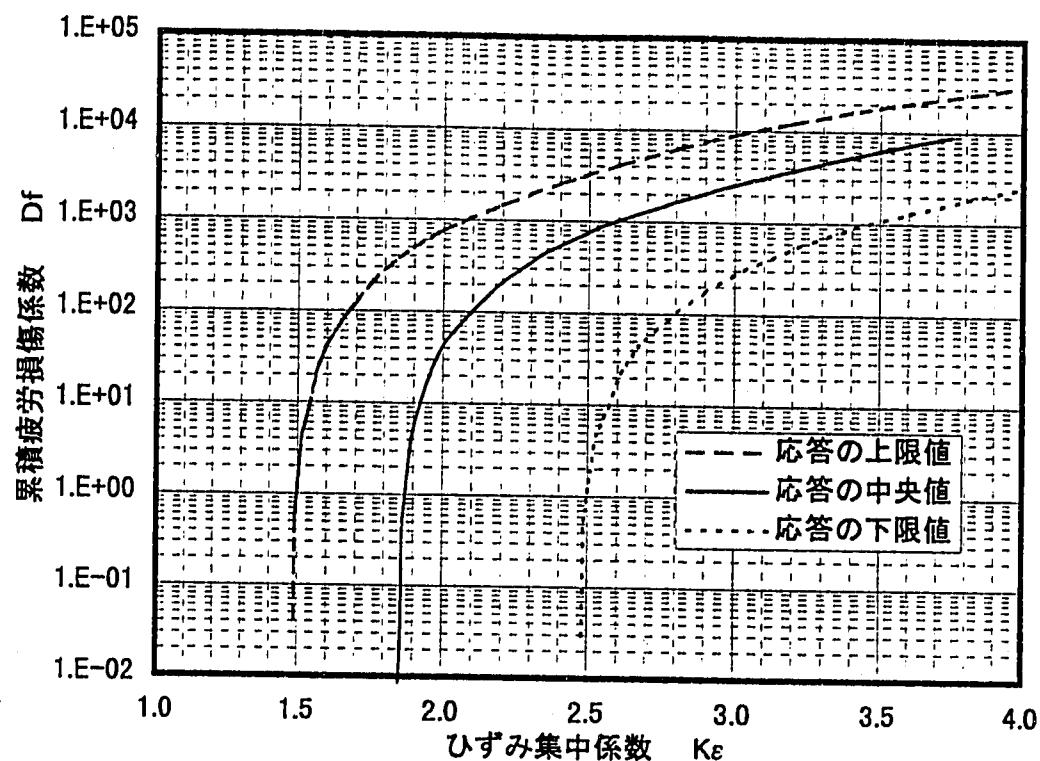


(b) 疲労強度による相違

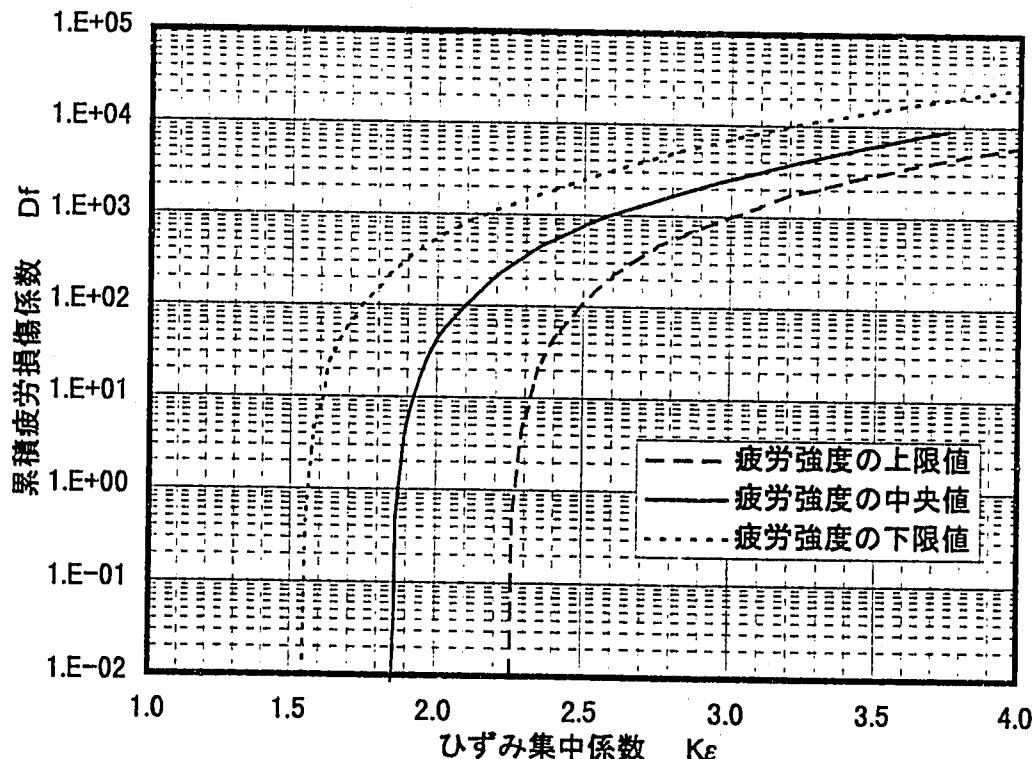
図6 累積疲労損傷係数の算定結果

「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、疲労強度とともに中央値で、
 $ひずみ集中係数 K_{\varepsilon} = 3.0$ 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5.2m/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、5.5m/secと5.0m/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5.5m/secで試験を実施し、（その2）では、5.0m/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5.2m/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、5.2m/secの時のウエル先端振幅は、5.5m/secと5.0m/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、5.2m/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。

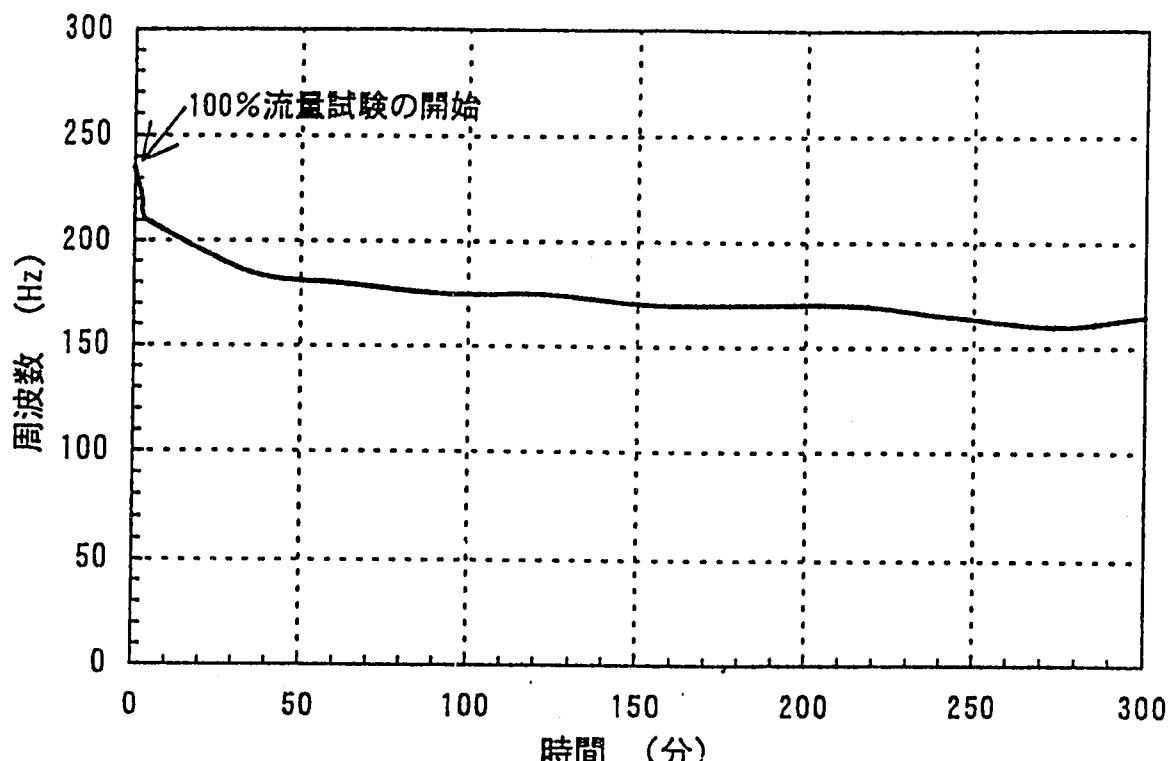
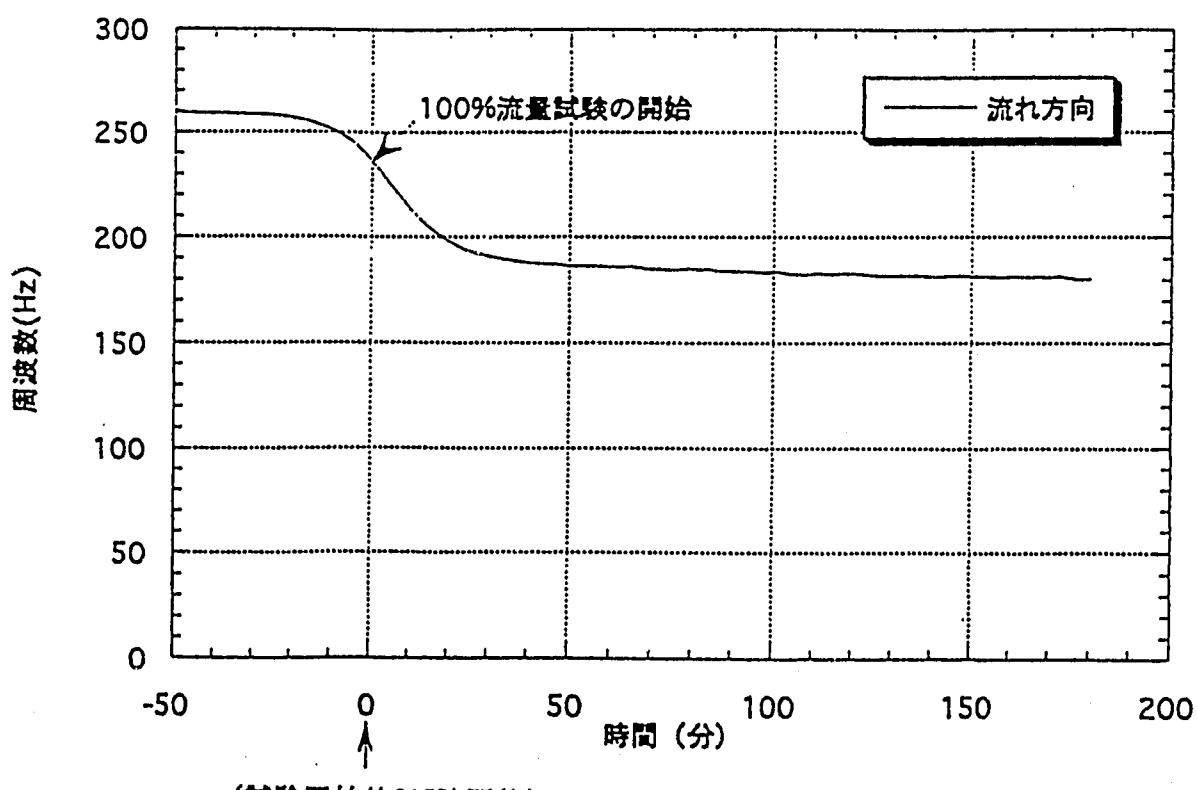


図-1 水中疲労確認試験（その1）
固有振動数の時間変化（初期き裂有り）



(試験開始約215時間後)

図-2 水中疲労確認試験（その2）
固有振動数の時間変化

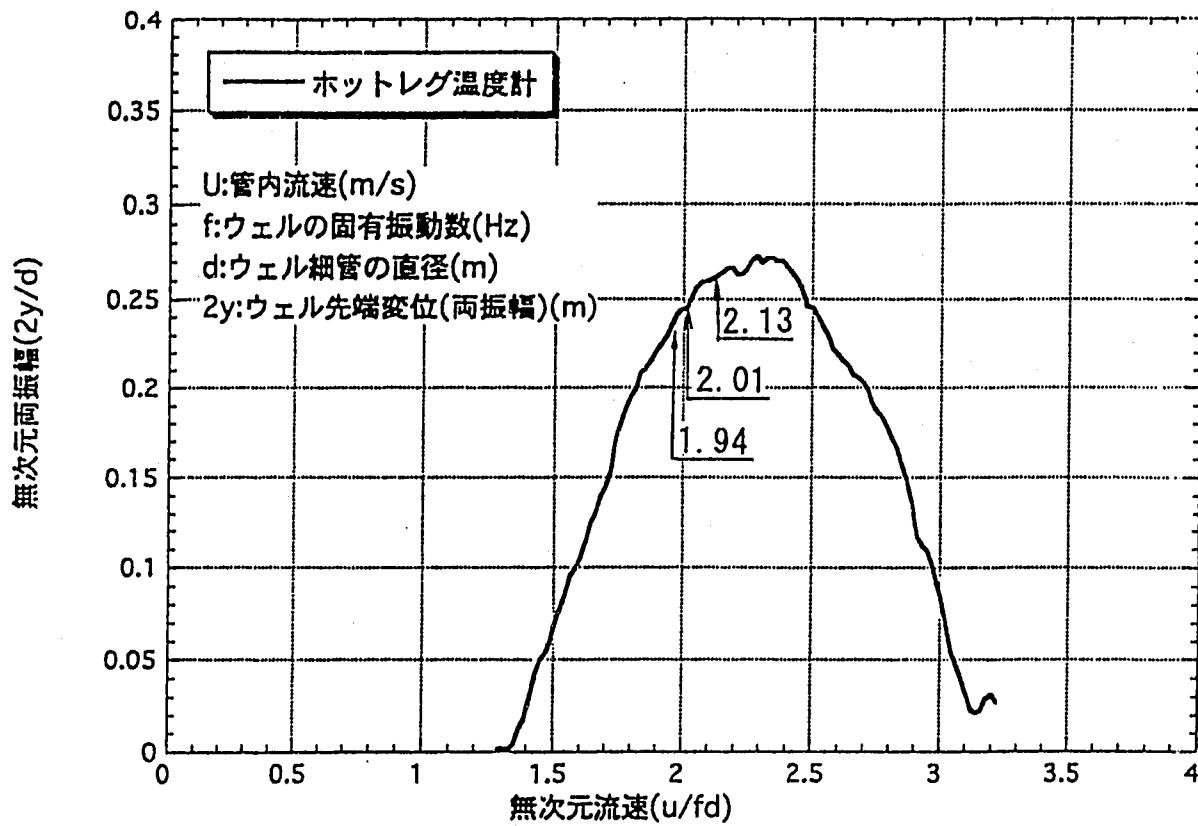


図3 ウェル先端振動振幅(両振幅)と無次元流速との関連
(ホットレグ温度計)

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