

高速実験炉「常陽」温度計ウェルの流力振動評価

1997年5月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

高速実験炉「常陽」温度計ウェルの流力振動評価

磯崎 和則*、富田 直樹*

要 旨

高速原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故は、ナトリウムの流れによって温度計ウェルの後流に発生する対称渦による流力振動に伴う高サイクル疲労破損が原因であった。したがって、「もんじゅ」と同様に、1次及び2次冷却系ナトリウム配管にナトリウム温度を測定するナトリウム中に突き出した温度計ウェルが多数設置されている「常陽」においても、これらについて流力振動評価を行った。

温度計ウェルの流力振動評価においては、「常陽」の設工認における流力振動評価の実施状況調査、並びに温度計ウェルのうちナトリウム中に突き出した長さを片持ち梁とした固有振動数とASME Code Section III Appendix N-1300の揚力及び抗力方向のロックイン回避の判定基準（無次元流速 $V_r < 1.0$ ）に基づく簡易流力振動評価を行った。さらに、簡易流力振動評価を満足しない2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられた温度計ウェルについては、詳細な振動特性の把握と水流動試験を実施し、その構造健全性評価を行った。

この結果、2次主冷却系12B配管用温度計ウェルは、熱電対が挿入されていない温度計ウェルを用いた水流動試験結果から、原子炉定格出力運転時の100%流量運転状態で、ウェル先端変位振幅0.13mm（無次元変位振幅0.015）、ウェル細管付け根部発生ピーク応力 2.9kg/mm^2 となり、保守的に設定された設計疲労限である 5.3kg/mm^2 を十分満足していることを確認した。

*：大洗工学センター 実験炉部 原子炉第2課

Evaluation of Flow-induced Vibration of Thermometer Well for JOYO

K. Isozaki* , N. Tomita*

Abstract

Sodium leak accident of MONJU was caused high cycles fatigue damage of thermometer well by flow-induced vibration. It was due to the symmetric vortex shedding which was occurred rear flow of thermometer well. So, Thermometer wells installed in primary and secondary heat transport systems of JOYO were evaluated of flow-induced vibration.

Evaluation of flow-induced vibration of thermometer well was done checking of flow-induced vibration base on authorized design report for JOYO, evaluation of summary flow-induced vibration by natural frequency of thermometer well in sodium as cantilever models, and evaluation based on small velocity rule of ASME Code Section III Appendix N-1300. By this result, thermometer wells (12B piping of secondary cooling system) were not satisfied requirement to avoid flow-induced vibration by small velocity rule. Therefore, Detailed vibration characteristic analysis, water flow-induced vibration test, dumping test and evaluation of structural integrity were carried out.

These results, vibration amplitude of well on the tip was 0.13mm (vibration non-dimensional amplitude of 0.015) and peak stress of 2.9kg/mm² is occurred. Thermometer wells (12B piping of secondary cooling system) which occurred peak stress by flow vibration was confirmed enough to satisfy 5.3kg/mm² of design fatigue limit.

*1 : Maintenance Section, Experimental Reactor Division, OEC

目 次

1. 概 要	1
2. 温度計ウェルの流力振動評価フローチャート	2
3. 温度計ウェルの簡易流力振動評価	4
4. 温度計ウェルの振動特性	13
5. 2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数に関する一考察 （「常陽」と「もんじゅ」の減衰定数の違いについて）	28
6. ASMEに基づく流力振動評価	46
（2次主冷却系温度計ウェルの振動特性を考慮）	
7. 2次主冷却系温度計ウェルの水流動試験	54
8. 2次主冷却系温度計ウェルの応力集中係数	64
9. 2次主冷却系温度計ウェルの疲労損傷評価	68
10. 流力振動評価の保守性及び妥当性について	75
11. まとめ	112
12. 謝 辞	113
13. 参考文献	114
添付資料1 温度計ウェルの減衰定数測定データ	117
添付資料2 温度計ウェルの水流動試験データ	125
添付資料3 実機温度計ウェルの配管外ウェル打振試験	135
添付資料4 温度計ウェルの刺激係数	157

図リスト

図 2 - 1	「常陽」温度計ウエルの流力振動評価フローチャート	3
図 3 - 1	1次主冷却系温度計ウエルの構造比較	6
図 3 - 2	2次主冷却系温度計ウエルの構造比較	7
図 4 - 1	1次主冷却系温度計ウエルの解析モデル及び解析条件	17
図 4 - 2	2次主冷却系温度計ウエルの解析モデル及び解析条件	18
図 4 - 3	1次主冷却系温度計ウエルの振動モード	21
図 4 - 4 (1/2)	2次主冷却系温度計ウエルの振動モード (スプリング式)	22
図 4 - 4 (2/2)	2次主冷却系温度計ウエルの振動モード (コmpレッションソフティンク式)	23
図 4 - 5	2次主冷却系温度計ウエルの打振試験概念	24
図 4 - 6	2次主冷却系温度計ウエルの打振試験結果の一例	26
図 4 - 7	スナップバック試験より得られた減衰定数と自由振動減衰波形	27
図 5 - 1	「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウエル単体の減衰定数	34
図 5 - 2	L. E. Goodman 著「MATERIAL DAMPING AND SLIP DAMPING」より抜粋したデータ	35
図 5 - 3	「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウエルに 熱電対が挿入された場合の減衰定数	37
図 5 - 4	「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウエルの構造比較	38
図 5 - 5	熱電対シースの解析概念図	39
図 5 - 6	「もんじゅ」熱電対シースの調和加振解析結果(1) (強制加振試験を想定)	42
図 5 - 7	「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(1) (強制加振試験を想定)	43
図 7 - 1	2次主冷却系温度計ウエルの水流動試験用試験体	57
図 7 - 2	水流動試験用試験ループの構成	58
図 7 - 3	水流動試験時の2次主冷却系温度計ウエル振動計測概念	59
図 7 - 4	2次主冷却系温度計ウエルの配管内平均流速と 温度計ウエル先端応答加速度との関係	60
図 7 - 5 (1/2)	水流動試験時の2次主冷却系温度計ウエル先端応答加速度の時刻歴波形	61
図 7 - 5 (2/2)	水流動試験時の2次主冷却系温度計ウエル先端応答加速度の時刻歴波形	62
図 7 - 6	2次主冷却系温度計ウエルの無次元流速と 温度計ウエル先端無次元変位振幅との関係	63

図8-1	2次主冷却系温度計ウェルの3次元ソリッドモデルと解析結果 (軸方向モデルと解析変位図)	66
図8-2	2次主冷却系温度計ウェルの3次元ソリッドモデルと解析結果 (軸直角方向モデルと解析変位図)	67
図9-1	調和加振解析の概念図(ナトリウム中ウェルの連続的振動を想定)	71
図9-2	梁モデルを用いた調和加振解析結果 (ウェル先端変位量とウェル先端応答加速度との関係)	72
図9-3	梁モデルを用いた調和加振解析結果 (ウェル先端変位量と細管付け根部発生応力との関係)	73
図10-1(1/2)	2次主冷却系温度計ウェルの各振動モード (熱電対シースの取付け方式:スプリング式)	91
図10-1(2/2)	2次主冷却系温度計ウェルの各振動モード (熱電対シースの取付け方式:コンプレッションフィティング式)	92
図10-2	抗力方向の変動流体抵抗係数	102
図10-3	揚力方向の変動流体抵抗係数	102
図10-4	ストローハル数とレイノルズ数、渦の放出とレイノルズ数との関係	103
図10-5	2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数	104
図10-6	スナップバック試験で得られた2次主冷却系温度計ウェルの自由振動波形	105
図10-7	配管上部から見た配管内流速分布(主冷却器入口部流動解析結果)	106
図10-8	ASMEに掲載されている低合金鋼の設計疲労線図の定め方	108
図10-9(1/2)	ASME式の室温疲労曲線とBDS式の375℃疲労曲線の対応	109
図10-9(2/2)	ASME式の室温疲労曲線とBDS式の375℃疲労曲線の対応	110
図10-10	ASME基準値、計算結果及びBDS式に基づく値の対応	111
添付図1-1	2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数 (スプリング式熱電対を挿入した温度計ウェル)	122
添付図1-2	2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数 (コンプレッションフィティング式熱電対を挿入した温度計ウェル)	123
添付図1-3	スナップバック試験時の自由振動減衰波形	124
添付図2-1	2次主冷却系温度計ウェルの配管内平均流速と ウェル先端応答加速度との関係(タイプB)	132
添付図2-2	2次主冷却系温度計ウェルの無次元流速と ウェル先端無次元変位振幅との関係(タイプB)	133
添付図3-1	実機温度計ウェルの打振試験方法の概念	141

添付図 3-2	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果 (1 A)	142
添付図 3-3	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果 (1 B)	143
添付図 3-4	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果 (3 A)	144
添付図 3-5	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果 (3 B)	145
添付図 3-6	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果(2A-1)	146
添付図 3-7	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果(2A-2)	147
添付図 3-8	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果(2B-1)	148
添付図 3-9	大気中 (20℃) 及び予熱中 (200 ℃) の温度計ウェル打振試験結果(2B-2)	149
添付図 3-10	ねじ部の締め付け状態が固有振動数に及ぼす影響 (20℃) (ナトリウム中ウェル長さ150mm (タイプA))	152
添付図 3-11	ねじ部の締め付け状態が固有振動数に及ぼす影響 (20℃) (ナトリウム中ウェル長さ130mm (タイプB))	153
添付図 3-12	水流動試験用の模擬試験体の配管打振試験結果 (配管打振、配管周波数スペクトル測定)	154
添付図 3-13	水流動試験用の模擬試験体の温度計ウェル打振試験結果 (配管外ウェル打振、配管外ウェル周波数スペクトル測定)	155

表リスト

表3-1	1次主冷却系温度計ウエルの簡易流力振動評価	8
表3-2	2次主冷却系温度計ウエルの簡易流力振動評価	9
表3-3	1次補助冷却系温度計ウエルの簡易流力振動評価	10
表3-4	1次Na充填ドレン系及び1次Na純化系温度計ウエルの簡易流力振動評価	11
表3-5	2次補助冷却系及び2次Na純化系温度計ウエルの簡易流力振動評価	12
表4-1	2次主冷却系温度計ウエルの原子炉停止中及びドレン中の解析条件	19
表4-2	1次主冷却系温度計ウエルの固有値解析結果	20
表4-3	2次主冷却系温度計ウエルの固有値解析結果	20
表4-4	2次主冷却系温度計ウエルの打振試験結果(模擬試験体)	25
表5-1	「常陽」と「もんじゅ」の温度計ウエル及びシースの違い	36
表5-2	熱電対シースの固有値解析結果	40
表5-3	熱電対シースの調和加振解析結果(1) (ウエル先端が連続的に振動している場合の各節点の最大変位)	41
表5-4	「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(2)(固定・固定) (シース先端に初期変位を与えた場合)ギャップ0.2mm	44
表5-5	「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(2)(固定・固定) (シース先端に初期変位を与えた場合)ギャップ0.4mm	45
表6-1	ロックイン回避及び抑制する条件	50
表6-2	1次主冷却系温度計ウエルのロックイン回避及び抑制の判定	51
表6-3(1/2)	2次主冷却系温度計ウエルのロックイン回避及び抑制の判定(12B配管)	52
表6-3(2/2)	2次主冷却系温度計ウエルのロックイン回避及び抑制の判定(10B配管)	53
表8-1	3次元ソリッドモデルと梁モデルの細管付け根部応力	65
表9-1	2次主冷却系温度計ウエル細管付け根部応力及び疲労損傷評価結果	70
表9-2	材料の疲労限(BDSより)	74
表10-1	2次主冷却系温度計ウエルの有効質量と刺激係数	93
表10-2(1/2)	十分発達した流れにおける配管内の流速分布 n=7の場合	94
表10-2(2/2)	十分発達した流れにおける配管内の流速分布 n=10の場合	95
表10-3(1/2)	12B配管に取付けられた温度計ウエル部の流速分布 n=7の場合	96

表10-3 (2/2)	12B配管に取付けられた温度計ウェル部の流速分布	n=10の場合	97
表10-4 (1/2)	10B配管に取付けられた温度計ウェル部の流速分布	n=7の場合	98
表10-4 (2/2)	10B配管に取付けられた温度計ウェル部の流速分布	n=10の場合	99
表10-5	配管口径による流速分布への影響		100
表10-6	水流動試験と実機条件との比較検討		101
表10-7	主冷却器入口部温度計ウェル(ナトリウム中ウェル)の等価流速		107
添付表2-1	常温水を用いた水流動試験時のレイノルズ数		127
添付表2-2	水流動試験時の温度計ウェル先端応答加速度(加速度計を内挿)		128
添付表2-3	水流動試験時の温度計ウェル先端応答加速度		129
添付表2-4	水流動試験時の無次元流速とウェル先端無次元変位振幅との関係 (加速度計を内挿)		130
添付表2-5	水流動試験時の無次元流速とウェル先端無次元変位振幅との関係 (RMS値)		131
添付表3-1 (1/2)	実機打振試験結果(大気中:20℃)		150
添付表3-1 (2/2)	実機打振試験結果(予熱中:200℃と大気中:20℃)		151
添付表4-1 (1/5)	スプリング式温度計ウェルの1次モード刺激係数の算出		159
添付表4-1 (2/5)	スプリング式温度計ウェルの2次モード刺激係数の算出		160
添付表4-1 (3/5)	スプリング式温度計ウェルの3次モード刺激係数の算出		161
添付表4-1 (4/5)	スプリング式温度計ウェルの4次モード刺激係数の算出		162
添付表4-1 (5/5)	スプリング式温度計ウェルの5次モード刺激係数の算出		163
添付表4-2 (1/6)	コンプレッションファイティング式温度計ウェルの1次モード刺激係数の算出		164
添付表4-2 (2/6)	コンプレッションファイティング式温度計ウェルの2次モード刺激係数の算出		165
添付表4-2 (3/6)	コンプレッションファイティング式温度計ウェルの3次モード刺激係数の算出		166
添付表4-2 (4/6)	コンプレッションファイティング式温度計ウェルの4次モード刺激係数の算出		167
添付表4-2 (5/6)	コンプレッションファイティング式温度計ウェルの5次モード刺激係数の算出		168
添付表4-2 (6/6)	コンプレッションファイティング式温度計ウェルの6次モード刺激係数の算出		169

1. 概 要

「常陽」では、高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故が発生した平成7年12月8日当時、第11回定期検査を実施中であった。事故発生を受けて、「常陽」では、ナトリウム漏えい当該箇所である温度計ウェルを始めとして、ナトリウム漏えい関連設備、運転マニュアル等の自主的な点検検査を開始するとともに、茨城県及び科学技術庁からの要請及び通達を踏まえて、ナトリウム漏えいに係る防止措置、抑制対策の総合的な検討を開始した。

その後、温度計ウェルからのナトリウム漏えい事故は、ナトリウムの流れによって温度計ウェルの後流に発生する対称渦による流力振動に伴う高サイクル疲労破損が原因であることが明確となった。したがって、「常陽」では、「もんじゅ」と同様に1次及び2次冷却系ナトリウム配管にナトリウム温度を測定するナトリウム中に突き出た温度計ウェルが多数設置されていることから、流力振動評価を行うこととした。流力振動評価においては、「常陽」の設工認における流力振動評価の実施状況調査、並びに温度計ウェルのうちナトリウム中に突き出た長さを片持ち梁とした固有振動数とASME Code Section III Appendix N-1300の揚力及び抗力方向のロックイン回避の判定基準に基づく簡易流力振動評価を行った。本評価によって、ロックイン回避の判定基準を満足しない温度計ウェルについては、詳細な振動特性の把握と水流動試験を行い、その構造健全性を確認した。

本成果報告書は、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故以降、「常陽」で行った温度計ウェルの流力振動評価結果についてまとめたものである。

2. 温度計ウェルの流力振動評価フローチャート

「常陽」では、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故以降、「もんじゅ」のナトリウム漏えい当該箇所である温度計ウェルについて設工認における流力振動評価の実施状況調査に始まり、簡易流力振動評価、簡易流力振動評価を満足しない2次主冷却系の12B配管用温度計ウェルについては、詳細な振動特性の把握と水流動試験によりウェルの先端変位振幅を求め、疲労損傷評価を行い、その構造健全性を確認している。

図2-1に「常陽」で行った温度計ウェルの流力振動評価のフローを示す。

なお、設工認では、2次冷却系の温度計ウェルが2次冷却系計装設備（申請書No.30分冊-2）の添付書類Ⅱ. 1「ナトリウム用熱電対ウェル強度計算書」の中で評価されているが、当時の規格であるASME Power Test Code part 3に基づく評価であり、カルマン渦による流力振動評価（交互渦による揚力方向のロックイン回避の判定（ASME Code Section III Appendix N-1300（1991年版）における(d)項の判定に相当するもの）を行っているものであり、対称渦に対するロックイン回避の規定はなかった。また、1次冷却系の温度計ウェルについては、カルマン渦による流力振動評価を行っているが、その構造が剛構造であり、固有振動数が十分高く、温度計ウェルのうち発生する応力が最も高い部分がウェルと内管用スリーブとの溶接部で内管外であり、かつ、発生応力が熱応力を主体としたものであることから、この最大応力発生部位の評価結果が設工認に記載され、流力振動評価の詳細は設工認に記載されていない。

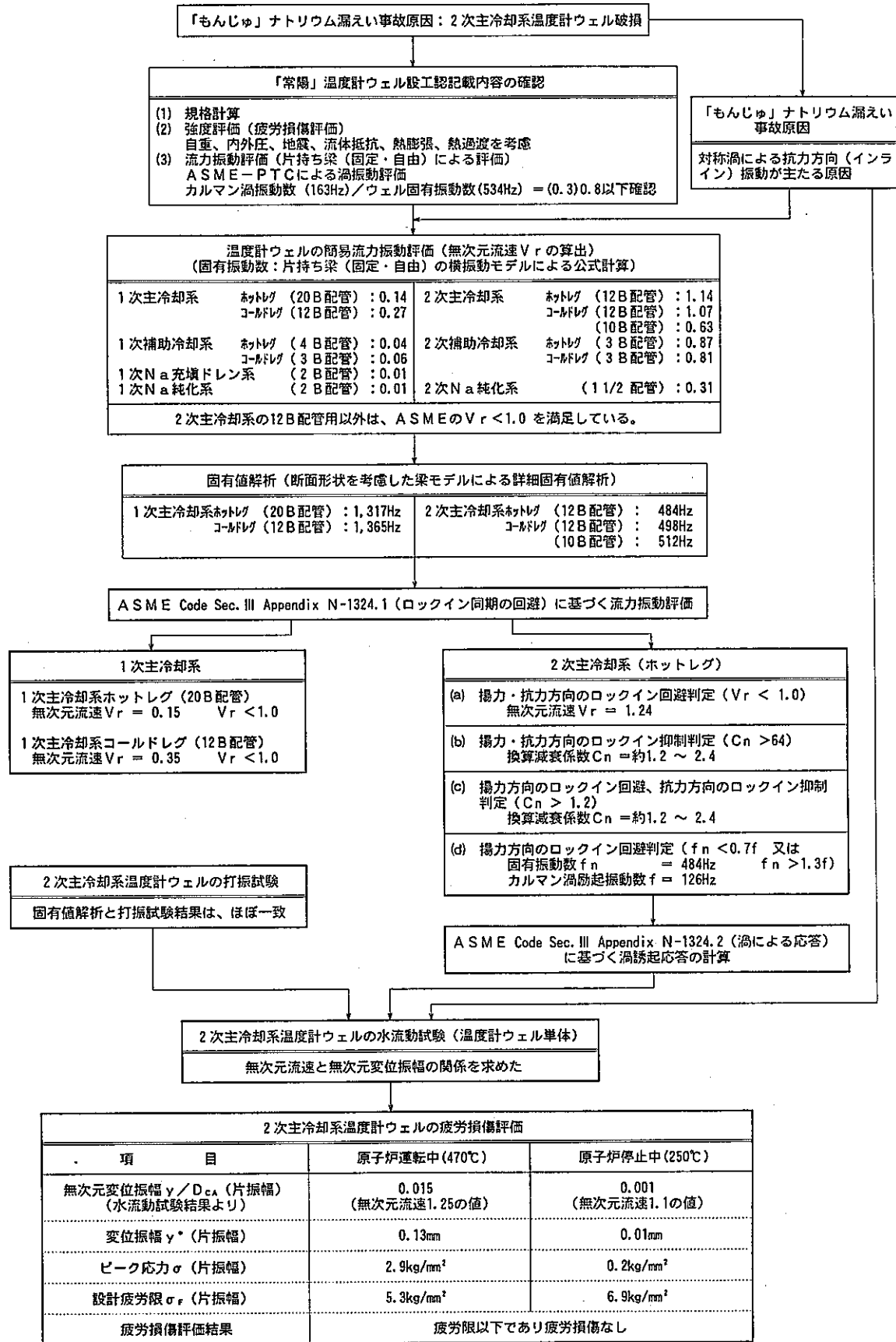


図 2-1 「常陽」温度計ウェルの流力振動評価フローチャート

3. 温度計ウェルの簡易流力振動評価

3.1 概要

「常陽」においては、1次及び2次冷却系ナトリウム配管にナトリウム温度を測定するための温度計ウェルが多数取り付けられており、この温度計ウェルの一部分は、ナトリウム中に突き出た構造を有している。

流体の流れの中にウェルのような円筒構造物が存在すると、円筒構造物の背後に交互渦又は対称渦ができ、この渦が円筒構造物の後方で交互又は対称に離脱する現象が発生する場合がある。円筒構造物の背後に発生する渦の放出周波数又は放出周波数の2倍、3倍の周波数が円筒構造物の固有振動数とほぼ一致すると、円筒構造物は共振（自励振動）を起こす。このような場合に円筒構造物の支持部等に繰り返し応力が発生し、これが円筒構造物材料の設計疲労限を超えると疲労損傷を生じる可能性がある。

このような現象の発生を防止するため、ASME⁽¹⁾では、その設計対処法が示されている。よって、これらに基づきナトリウム中ウェルの簡易流力振動評価を行ったものである。

3.2 評価条件

温度計ウェルの代表として、図3-1に1次主冷却系温度計ウェルの構造を「もんじゅ」と比較して示す。図3-2に2次主冷却系温度計ウェルの構造を「もんじゅ」と比較して示す。

ナトリウム中ウェルの簡易流力振動評価は、以下の評価条件で行った。

- (1) 温度計ウェルの固有振動数 f_n は、その取付け構造から配管内に突き出た長さを持った片持ち梁（固定・自由）の横振動モデル⁽²⁾として計算している。また、断面2次モーメント及び単位長さ当たりの重量は、構造上一定断面でないことから、等価断面2次モーメント及び等価単位長さ重量に置き換えている。
- (2) レイノルズ数 Re は、温度計ウェル壁面で算出している。⁽³⁾
- (3) ストローハル数 St は、温度計ウェルを単独円筒として算出している。⁽⁴⁾

3.3 評価結果

表3-1に1次主冷却系温度計ウェルの簡易流力振動評価結果を示す。表3-2に2次主冷却系温度計ウェルの簡易流力振動評価結果を示す。表3-3に1次補助冷却系温度計ウェルの簡易流力振動評価結果を示す。表3-4に1次ナトリウム充填ドレン系及び1次ナトリウム純化系温度計ウェルの簡易流力振動評価結果を示す。表3-5に2次補助冷却系及び2

次ナトリウム純化系温度計ウエルの簡易流力振動評価結果を示す。

評価の結果、1次冷却系については、いずれも $V_r < 0.3$ 以下であり、揚力及び抗力方向の双方の自励振動を回避できるASMEの設計対処法の(3-1)式である無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足しており、共振することはない。2次冷却系については、2次主冷却系以外はいずれも無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足しており、共振することはないと考えられる。しかし、2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウエルについては、以下に示す設計対処法の(3-1)式を満足していなかった。

$$\text{自励振動を回避できる条件： } V_r = \frac{V}{f_n \cdot D_{CA}} < 1.0 \quad (3-1)$$

V : ナトリウム流速 (m/sec)

f_n : ナトリウム中ウエル固有振動数 (1/sec)

D_{CA} : ナトリウム中ウエル細管部の外径 (m)

3.4 まとめ

簡易流力振動評価の結果、2次主冷却系以外の温度計ウエルについては、揚力及び抗力方向の渦によるロックインを回避できることを確認した。

しかし、2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウエル（ナトリウム中ウエル長さ150mm）については、無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足していないことから、詳細な流力振動評価を行う必要があり、断面形状を詳細にモデル化した固有値解析、模擬試験体を用いた打振試験及び水流動試験を行うこととした。これらの結果は、4章「温度計ウエルの振動特性」、7章「2次主冷却系温度計ウエルの水流動試験」に示す。

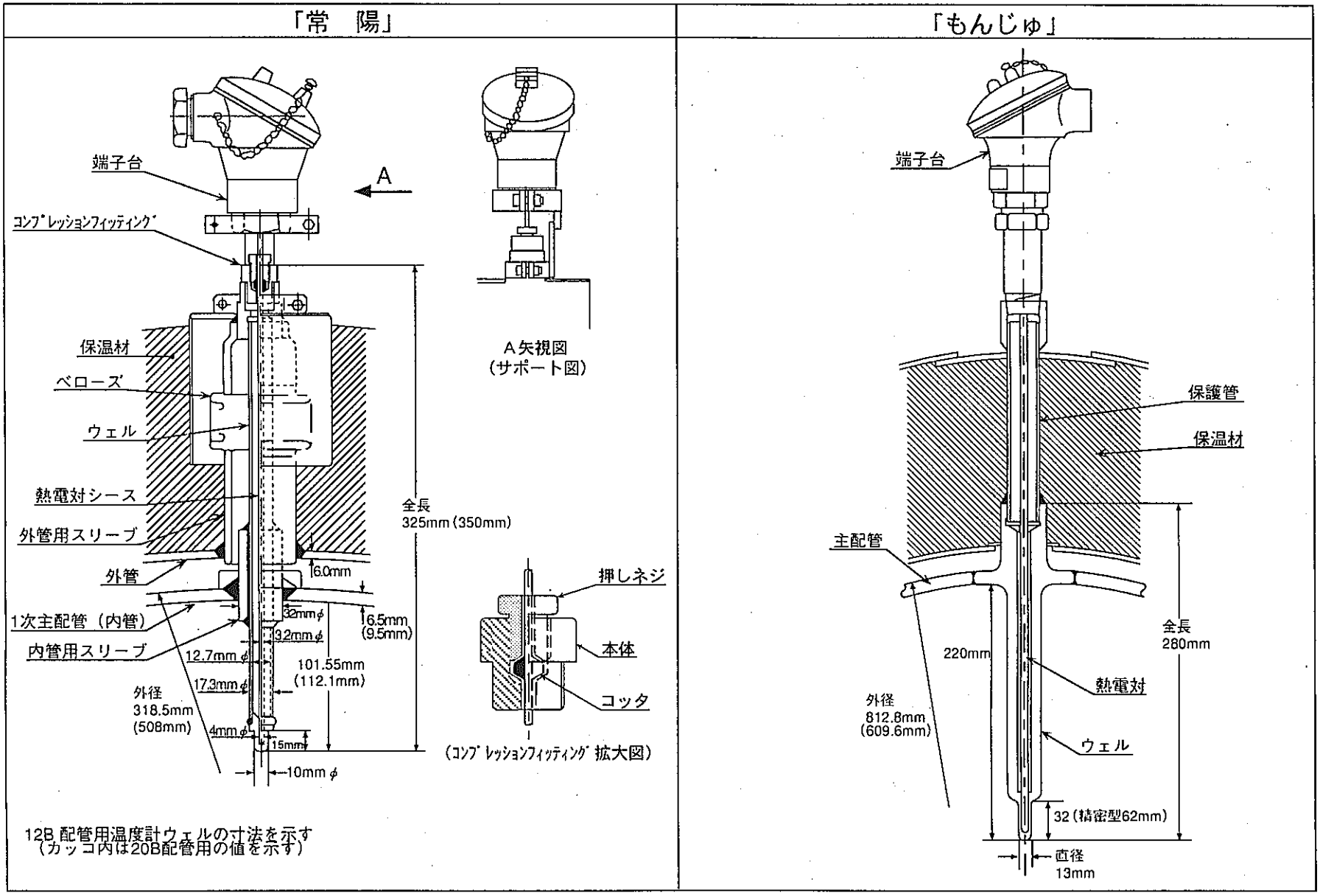


図3-1 1次主冷却系温度計ウェルの構造比較

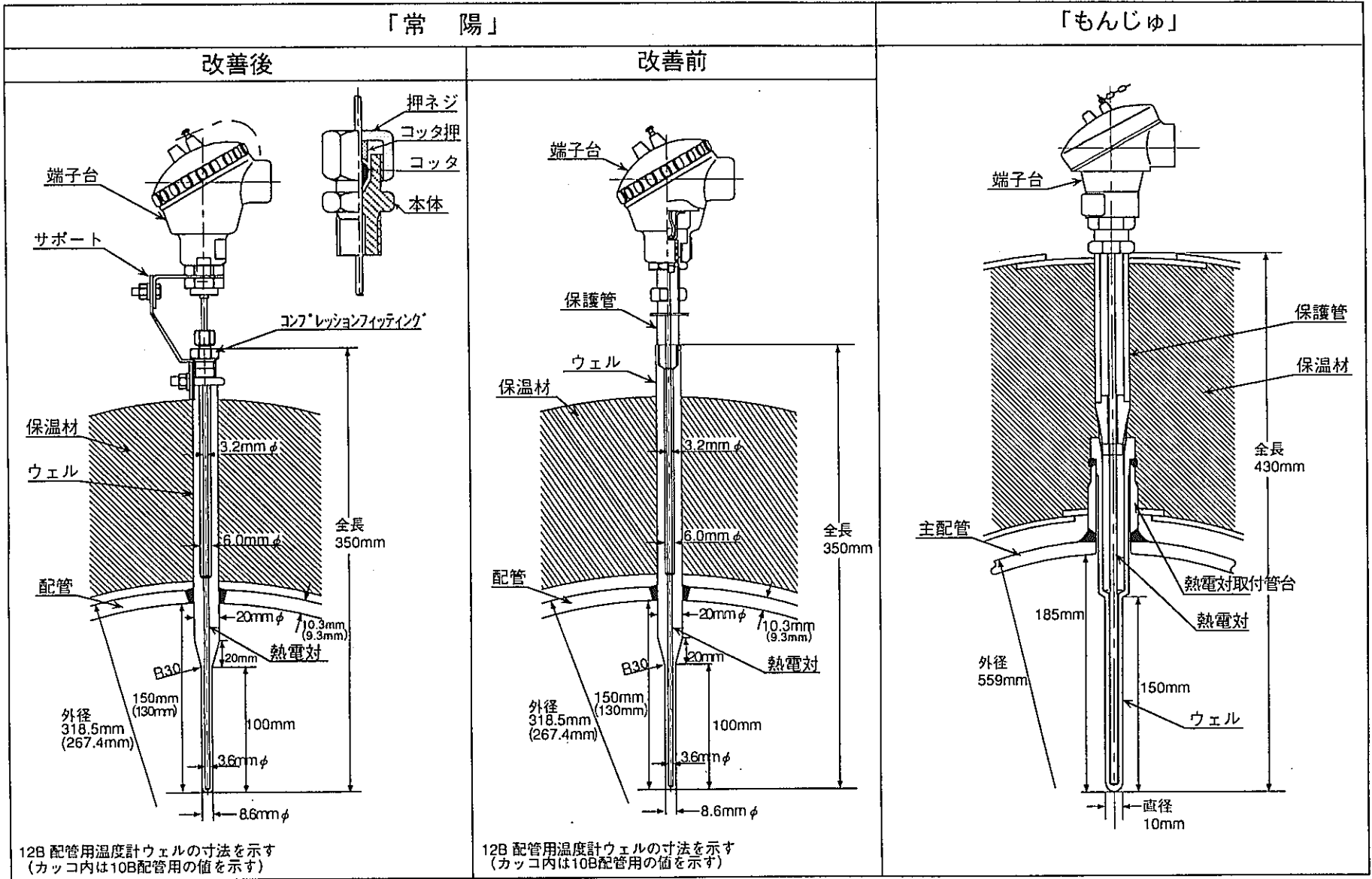


図3-2 2次主冷却系温度計ウェルの構造比較

表 3-1 1次主冷却系温度計ウエルの簡易流力振動評価

項 目	計算式	1次主冷却系	
		ホットレグ	コールドレグ
		20B配管	12B配管
ナトリウム温度 (°C)		500	370
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)		0.3631	0.3500
配管外径 D (m)		0.5080	0.3185
配管内径 d (m)		0.4890	0.3055
配管内断面積 A (m ²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	1.878052E-01	7.330141E-02
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	1.93	4.77
動粘性係数 ν (m ² /sec)		2.94639E-07	3.47179E-07
レイノルズ数 Re	$Re = V \cdot D_{CA} / \nu$	6.56E+04	1.38E+05
ストローハル数 St		0.21	0.21
ナトリウム中温度計ウエルの全長さ l (mm)		112.10	101.55
ナトリウム中温度計ウエル細管部外径 D _{CA} (mm)		10.0	10.0
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.6215E+04	1.7415E+04
温度計ウエル等価断面 2次モーメント I (mm ⁴)		9,066	9,683
温度計ウエル等価重量 γA (kg/mm)		1.44E-03	1.50E-03
重力加速度 g (mm/sec ²)		9,800	9,800
振動係数 λ^2		3.516	3.516
温度計ウエル固有振動数 f _n (Hz)	$f_n = \lambda^2 \cdot (E \cdot I \cdot g / \gamma A)^{1/2} / (2\pi \cdot l^2)$	1,408	1,801
カルマン渦による励振振動数 f (Hz)	$f = St \cdot V / D_{CA}$	41	100
自励振動数を回避できる条件 <1.0	$Vr = V / (f_n \cdot D_{CA})$	0.137	0.265

表 3-2 2次主冷却系温度計ウエルの簡易流力振動評価

項目	計算式	2次主冷却系		
		ホットレグ	コールドレグ	
		12B 配管		10B 配管
ナトリウム温度 (°C)		470	340	340
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)		0.3589	0.3461	0.1731
配管外径 D (m)		0.3185	0.3185	0.2674
配管内径 d (m)		0.2979	0.2979	0.2488
配管内断面積 A (m ²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	6.969970E-02	6.969970E-02	4.861728E-02
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	5.15	4.97	3.56
動粘性係数 ν (m ² /sec)		3.04976E-07	3.64398E-07	3.64398E-07
レイノルズ数 Re	$Re = V \cdot D_{CA} / \nu$	1.45E+05	1.17E+05	8.40E+04
ストローハル数 St		0.21	0.21	0.21
ナトリウム中温度計ウエルの全長さ l (mm)		150.0	150.0	130.0
ナトリウム中温度計ウエル細管部外径 D _{CA} (mm)		8.6	8.6	8.6
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.7876E+04	1.9047E+04	1.9047E+04
温度計ウエル等価断面 2次モーメント I (mm ⁴)		2,283	2,283	1,427
温度計ウエル等価重量 γA (kg/mm)		8.90E-04	8.90E-04	6.61E-04
重力加速度 g (mm/sec ²)		9,800	9,800	9,800
振動係数 λ^2		3.516	3.516	3.516
温度計ウエル固有振動数 f _n (Hz)	$f_n = \lambda^2 \cdot (E \cdot I \cdot g / \gamma A)^{1/2} / (2\pi \cdot l^2)$	527	544	665
カルマン渦による励振振動数 f (Hz)	$f = St \cdot V / D_{CA}$	126	121	87
自励振動数を回避できる条件 <1.0	$Vr = V / (f_n \cdot D_{CA})$	1.136	1.061	0.623

表 3-3 1次補助冷却系温度計ウェルの簡易流力振動評価

項 目	計算式	1次補助冷却系	
		ホットレグ	コールドレグ
		4 B 配管	3 B 配管
ナトリウム温度 (°C)		500	370
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)		0.0188	0.0181
配管外径 D (m)		0.1143	0.0891
配管内径 d (m)		0.1063	0.0811
配管内断面積 A (m ²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	8.874756E-03	5.165729E-03
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	2.12	3.50
動粘性係数 ν (m ² /sec)		2.94639E-07	3.47179E-07
レイノルズ数 Re	$Re = V \cdot D_{CA} / \nu$	7.19E+04	1.01E+05
ストローハル数 St		0.21	0.21
ナトリウム中温度計ウェルの全長さ l (mm)		51.0	51.0
ナトリウム中温度計ウェル細管部外径 D _{CA} (mm)		10.0	10.0
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.6215E+04	1.7415E+04
温度計ウェル等価断面 2 次モーメント I (mm ⁴)		7,675	7,675
温度計ウェル等価重量 γA (kg/mm)		1.40E-03	1.40E-03
重力加速度 g (mm/sec ²)		9,800	9,800
振動係数 λ^2		3.516	3.516
温度計ウェル固有振動数 f _n (Hz)	$f_n = \lambda^2 \cdot (E \cdot I \cdot g / \gamma A)^{1/2} / (2\pi \cdot l^2)$	6,350	6,581
カルマン渦による励振振動数 f (Hz)	$f = St \cdot V / D_{CA}$	44	74
自励振動数を回避できる条件 <1.0	$V_r = V / (f_n \cdot D_{CA})$	0.033	0.053

表3-4 1次Na充填ドレン系及び1次Na純化系温度計ウェルの簡易流力振動評価

項目	計算式	1次Na充填ドレン系	1次Na純化系
		2B配管	2B配管
ナトリウム温度 (°C)		250	450
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)		0.0019	0.0025
配管外径 D (m)		0.0605	0.0605
配管内径 d (m)		0.0535	0.0535
配管内断面積 A (m ²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	2.248006E-03	2.248006E-03
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	0.85	1.11
動粘性係数 ν (m ² /sec)		4.37361E-07	3.11947E-07
レイノルズ数 Re	$Re = V \cdot D_{CA} / \nu$	1.93E+04	3.57E+04
ストローハル数 St		0.21	0.21
ナトリウム中温度計ウェルの全長さ l (mm)		31.75	31.75
ナトリウム中温度計ウェル細管部外径 D _{CA} (mm)		10.0	10.0
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.8400E+04	1.6691E+04
温度計ウェル等価断面2次モーメント I (mm ⁴)		2,407	2,407
温度計ウェル等価重量 γA (kg/mm)		9.07E-04	9.07E-04
重力加速度 g (mm/sec ²)		9,800	9,800
振動係数 λ^2		3.516	3.516
温度計ウェル固有振動数 f _n (Hz)	$f_n = \lambda^2 \cdot (E \cdot I \cdot g / \gamma A)^{1/2} / (2\pi \cdot l^2)$	12,143	11,566
カルマン渦による励振振動数 f (Hz)	$f = St \cdot V / D_{CA}$	18	23
自励振動数を回避できる条件 <1.0	$Vr = V / (f_n \cdot D_{CA})$	0.007	0.010

表 3-5 2次補助冷却系及び2次Na純化系温度計ウエルの簡易流力振動評価

項 目	計算式	2次補助冷却系		2次Na純化系
		ホットレグ	コールドレグ	1 1/2B配管
		3 B配管	3 B配管	
ナトリウム温度 (°C)		470	340	340
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)		0.0188	0.0181	0.0017
配管外径 D (m)		0.0891	0.0891	0.0486
配管内径 d (m)		0.0781	0.0781	0.0412
配管内断面積 A (m ²)	$A=(\pi \cdot d^2)/4$	4.790622E-03	4.790622E-03	1.333166E-03
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V=Q/A$	3.92	3.78	1.28
動粘性係数 ν (m ² /sec)		3.04976E-07	3.64398E-07	3.64398E-07
レイノルズ数 Re	$Re=V \cdot D_{CA}/\nu$	1.11E+05	8.92E+04	3.01E+04
ストローハル数 St		0.21	0.21	0.21
ナトリウム中温度計ウエルの全長さ l (mm)		150.0	150.0	130.0
ナトリウム中温度計ウエル細管部外径 D _{CA} (mm)		8.6	8.6	8.6
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.7876E+04	1.9047E+04	1.9047E+04
温度計ウエル等価断面2次モーメント I (mm ⁴)		2,283	2,283	601
温度計ウエル等価重量 γA (kg/mm)		8.90E-04	8.90E-04	5.20E-04
重力加速度 g (mm/sec ²)		9,800	9,800	9,800
振動係数 λ^2		3.516	3.516	3.516
温度計ウエル固有振動数 f _n (Hz)	$f_n=\lambda^2 \cdot (E \cdot I \cdot g/\gamma A)^{1/2}/(2\pi \cdot l^2)$	527	544	486
カルマン渦による励振振動数 f (Hz)	$f=St \cdot V/D_{CA}$	96	92	31
自励振動数を回避できる条件 <1.0	$Vr=V/(f_n \cdot D_{CA})$	0.866	0.807	0.305

4. 温度計ウェルの振動特性

4.1 概要

3章「温度計ウェルの簡易流力振動評価」において、ナトリウム中ウェルを片持ち梁とした振動モデルによる固有振動数と、ASME Code Section III Appendix N-1324.1に基づき評価を行った結果、2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウェルについては、無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足しないことが判った。よって、ここでは、2次主冷却系温度計ウェルの詳細な流力振動評価を行うために、温度計ウェルの断面形状を詳細にモデル化した固有値解析及び模擬試験体による打振試験を行ったものである。なお、併せて1次主冷却系温度計ウェルの固有値解析も行った。

4.2 温度計ウェルの構造及び解析モデル

4.2.1 温度計ウェルの構造

(1) 1次主冷却系

図3-1に1次主冷却系温度計ウェルの構造を示す。1次主冷却系(20B配管用)温度計ウェルは、ウェルの外側に内管用スリーブを設け、内管とこのスリーブとが溶接され、内管内(ナトリウム中)には温度計ウェル全長350mmのうち約110mm(12B配管用は約100mm)が突き出した構造で、このうち先端15mmを10mmφの細管としている。また、外管は外管用スリーブと溶接され、外管用スリーブの途中で内管と外管との温度差を吸収するベローズを設けている。したがって、振動系としては、内管と外管に溶接された部分で支持された梁と見なすことができる。

(2) 2次主冷却系

図3-2に2次主冷却系温度計ウェルの構造を示す。2次主冷却系(12B配管用)温度計ウェルは、ウェルが直接配管に溶接され、配管内(ナトリウム中)には温度計ウェル全長350mmのうち150mm(10B配管用は130mm)が突き出した構造で、このうち先端100mmを8.6mmφの細管としている。したがって、振動系としては、配管に溶接された部分で支持された梁と見なすことができる。

4.2.2 温度計ウェルの解析モデル及び解析条件

図4-1に1次主冷却系温度計ウェルの解析モデル及び解析条件(原子炉運転中500℃)を示す。図4-2に2次主冷却系温度計ウェルの解析モデル及び解析条件(原子炉運転中470℃)を示す。また、表4-1に2次主冷却系温度計ウェルの原子炉停止中(250℃)及

びドレン中（大気中20℃）の解析条件を示す。

温度計ウェルは、振動系として溶接部で支持された梁と見なすことができるので、振動解析は梁要素によるモデル化を行っている。モデル化の対象範囲は、温度計ウェル、温度計ウェル取付けスリーブ（1次系のみ）、外管用スリーブ及びベローズ（1次系のみ）、熱電対本体である。寸法は、設計製作図の値を用いている。温度計ウェルのナトリウム接液部については、流体排除質量を考慮している。また、温度計ウェルを支持する主配管の撓み性は、バイラード（Bijlaard）の方法を用いて評価し、これを回転剛性に置き換えている。

解析コードは、以下のとおりである。

使用解析コード : FINAS Ver. 12.0
 使用要素 : 3次元梁要素 (BEAM2)
 3次元バネ減衰要素 (LCOMB2)

4.3 固有値解析結果

4.3.1 1次主冷却系

表4-2に1次主冷却系温度計ウェルの固有値解析結果を示す。また、図4-3に1次主冷却系温度計ウェルの振動モードを示す。

解析によって得られた温度計ウェルの固有振動数は、1次：105Hz、2次：988Hz、3次：1,317Hzである。

1次モードは、ウェル外シース部付近を弾性支持点とした熱電対本体端子台の振動モードである。2次モードは、ウェル熱電対取付けナット部付近を弾性支持点とした熱電対本体端子台の揺れが顕著な振動モードである。また、3次モードは、ウェル内管用スリーブとウェルとの溶接部付近を弾性支持点とした内管内（ナトリウム中）中細管及び細管部ウェルの振動モードである。

4.3.2 2次主冷却系

2次主冷却系については、4.4項で示す模擬試験体による打振試験結果との比較等を行うため、温度条件や流体排除質量を考慮した場合及びしない場合等、種々の条件で解析を行った。

表4-3に2次主冷却系温度計ウェルの固有値解析結果を示す。また、図4-4(1/2)に2次主冷却系温度計ウェル（スプリング式）の振動モード（原子炉運転中470℃の流体排除質量を考慮した場合）を示す。

解析によって得られた温度計ウェル（タイプA：ナトリウム中ウェル長さ150mm）の固有振動数は、原子炉運転中（470℃）の場合で1次：80Hz、2次：484Hzである。原子炉停止中（250℃）の場合は、縦弾性係数の温度依存性により2次固有振動数が上昇し、507Hzとなる。また、4.4項で示す実機を模擬した試験体による打振試験による固有振動数と比較検証する上から行った大気中（20℃）における解析結果では、2次固有振動数が555Hzとなる。

1次モードは、配管溶接部を弾性支持点として上部（配管外ウェル）が主体的に振動するモードである。また、2次モードは、太管部下端を弾性支持点として細管部（配管内ナトリウム中ウェル）が主体的に振動するモードである。

なお、熱電対の取付け方をこれまでのスプリング式からコンプレッションフィティング式に変更したことで上部形状が異なることになり、1次モードの固有振動数は若干低下したが、ナトリウム中細管部分が主体的に振動するモードである2次モードには影響を与えないことを確認した。図4-4(2/2)にコンプレッションフィティング式温度計ウェルの振動モードを示す。

4.4 模擬試験体による打振試験

4.4.1 固有振動数

打振試験は、固有値解析結果の妥当性と水流動試験で用いる温度計ウェルの固有振動数を把握するため、2次主冷却系実機と同一の温度計ウェル（ナトリウム中ウェル長さ150mm）模擬試験体を用いて大気中において行った。なお、温度計ウェルを取り付ける配管口径は、試験の都合上実機と同一の12B配管ではなく10B配管としている。

図4-5に2次主冷却系温度計ウェルの打振試験概念を示す。模擬配管に溶接支持された温度計ウェルの上端及び先端をインパルスハンマで打振し、ウェル上端及びウェル先端の変位（又は加速度）応答を計測、FFT（高速フーリエ変換）アナライザを用いて伝達関数を算出し、これより固有振動数を求めた。

表4-4に模擬試験体の打振試験結果を示す。試験は、温度計ウェル単体、熱電対を挿入した温度計ウェル、水流動試験で用いる温度計ウェル（加速度計を内挿）について実施した。図4-6に打振試験結果の一例（熱電対を挿入した温度計ウェル）を示す。この場合のナトリウム中ウェルの固有振動数は、約555Hzであった。この結果、固有値解析の熱電対を挿入した温度計ウェルの大気中（20℃、流体排除質量なし）の2次固有振動数に一致することを確認した。

4.4.2 減衰定数

温度計ウェルの先端変位振幅は、温度計ウェル（加速度計を内挿）を用いて行う水流動試験結果より求めることとした。したがって、2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数は、温度計ウェルに加速度計を内挿した場合の減衰特性を把握すること、及びその減衰特性が実機の熱電対を挿入した温度計ウェルに比べて十分保守的な値であることを確認するため、温度計ウェル単体、温度計ウェル（加速度計を内挿）及び熱電対を挿入した温度計ウェルについて行った。

減衰定数の測定は、ワイヤによってウェル先端に初期変位を与えた状態からワイヤをカットした後の自由振動減衰波形から求める方法、いわゆるスナップバック試験法により行った。

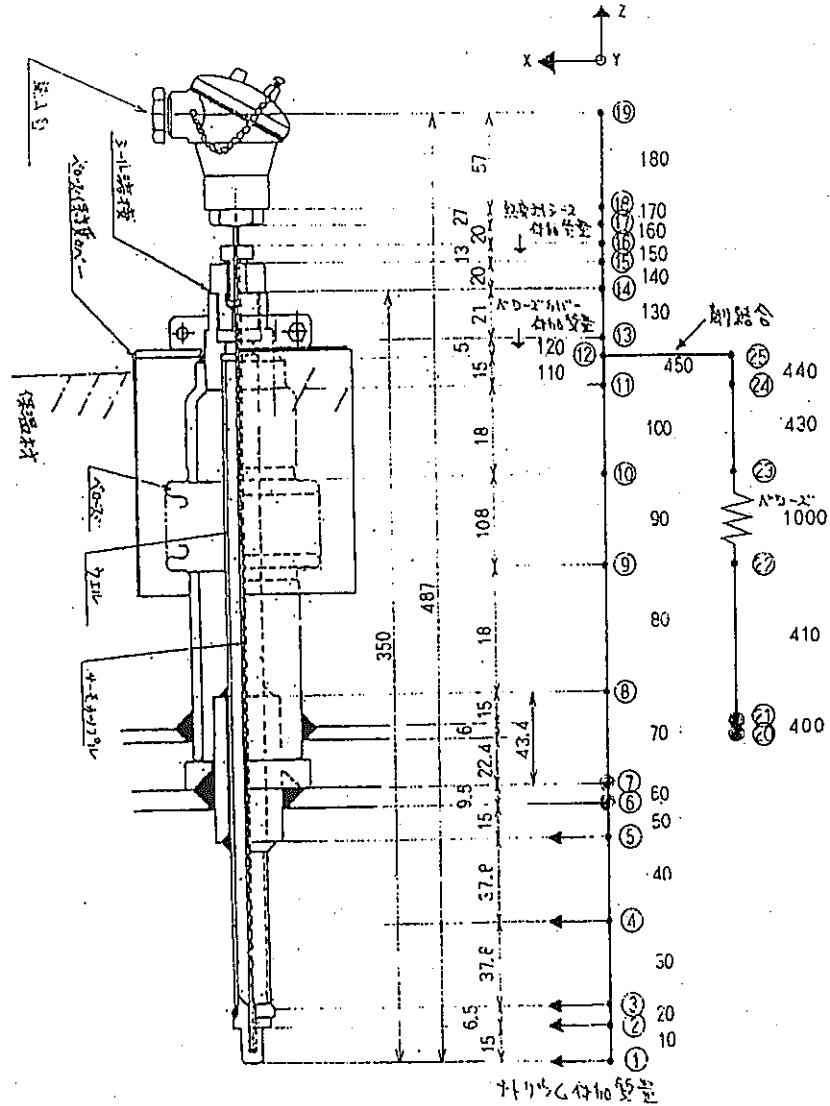
図4-7にスナップバック試験により得られた減衰定数と自由振動減衰波形を示す。

この結果、明らかに減衰定数に差があり、熱電対を挿入した温度計ウェルの方が、水流動試験で用いる温度計ウェル（加速度計を内挿）に比べて減衰定数がかかなり大きいことが判断できる。なお、水流動試験に用いる温度計ウェル（加速度計を内挿）と温度計ウェル単体の減衰定数は、ほぼ同一の減衰定数を示しており、温度計ウェル単体で水流動試験を行うことと相違ないことを示している。

4.5 まとめ

固有値解析及び打振試験の結果、温度計ウェルの固有振動数は、固有値解析結果と打振試験結果が一致することが確認した。よって、温度計ウェルの固有振動数は、1次：80Hz、2次：484Hz（原子炉運転中：温度470℃）であると判断した。本固有振動数は、原子炉定格出力運転中における温度計ウェルの先端変位振幅を求める際の無次元流速の算出に用いることとした。

また、水流動試験に用いる温度計ウェル（加速度計を内挿）の減衰定数は、温度計ウェル単体とほぼ同一であり、実機の熱電対を挿入した温度計ウェルより十分小さく、水流動試験が保守的な結果を与えることを確認した。なお、これらの保守性及び妥当性については、10章「流力振動評価の保守性及び妥当性について」に示している。



1次主冷却系配管温度計ウェル (SUS304) の解析条件 (解析ケース2)

節点 No.	要素 No.	外径 (mm)	内径 (mm)	長さ (mm)	ウェル比重量 (kg/mm ³)	ウェル質量密度 (kg·sec ² /mm ⁴)	付加質量 (kg·sec ² /mm)
①	140	90.0	0.0	57	1.32×10^{-4}	1.3414×10^{-10}	—
②	170	32.0	0.0	27	1.47×10^{-4}	1.3051×10^{-9}	—
③	160	7.8 ^{*)}	0.0	20	7.9523×10^{-6}	8.1146×10^{-10}	—
④	150	7.8 ^{*)}	0.0	13	"	"	1.6072×10^{-9} **
⑤	140	18.5	0.0	20	"	"	—
⑥	130	18.5	0.0	21	"	"	—
⑦	120	19.5	0.0	5	"	"	1.8368×10^{-9} **
⑧	110	42.0	12.7	15	"	"	—
⑨	100	37.3	12.7	18	"	"	—
⑩	90	37.3	12.7	108	"	"	—
⑪	80	17.3	12.7	18	"	"	—
⑫	70	32.0	12.7	43.4	7.9523×10^{-6}	7.9796×10^{-10}	—
⑬	60	32.0	12.7	9.5	"	"	—
⑭	50	32.0	12.7	15	"	"	—
⑮	40	32.0	12.7	37.8	"	"	1.5221×10^{-9} **
⑯	30	17.3	12.7	37.8	"	"	8.1934×10^{-9} **
⑰	20	17.3	4.0	6.5	"	"	2.7533×10^{-9} **
⑱	10	10.0	4.0	15	"	"	1.2485×10^{-9} **
⑲	10	10.0	4.0	15	"	"	5.4401×10^{-9} **
⑳	450	42.0	12.7	0	7.9523×10^{-6}	8.1146×10^{-10}	—
㉑	440	42.0	12.7	15	"	"	—
㉒	430	52.0	42.0	18	"	"	—
㉓	420	52.0	42.0	108	"	"	ベローズ **
㉔	410	52.0	42.0	33	7.9523×10^{-6}	8.1146×10^{-10}	—
㉕	400	52.0	42.0	6	"	"	—

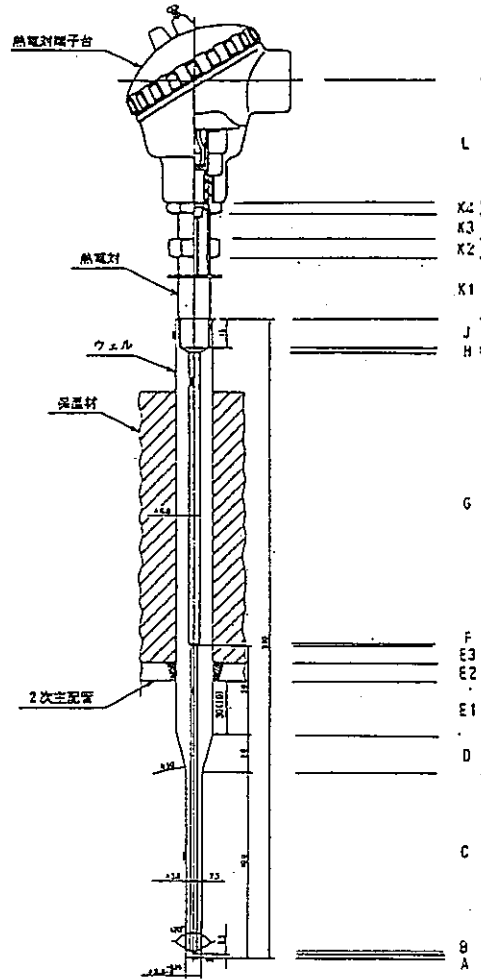
* 1: 要素全体質量は、単位単位体積質量に置き換えている。
 * 2: 熱電対シースの質量15.75gを付加質量として加えている。
 * 3: ベローズ保護カバーの質量0.18kgを付加質量として加えている。
 * 4: ナトリウム質量を付加質量として加える。ナトリウム質量 9.0361×10^{-3} kg/mm³
 * 5: ベローズのパネ定数 Z 軸方向257.4kg/mm
 * 6: 熱電対端子台用固定金具の断面積を考慮した外径としている。

解析コード: 汎用非線形構造解析システム FINAS Version12.0
 使用要素: 3次元線要素 BEAM2
 3次元パネ線要素 LCOMB2 (固定端の剛性を考慮する場合)

節点①、②の固定条件 解析ケース1-1⇒X, Y, Z, R X, R Y, R Z 固定
 解析ケース1-2⇒X, Y, Z, R Z 固定
 R X, R Y の剛性 4.29×10^{10} kg·mm/rad / 2 = 1.615×10^{10} kg·mm/rad
 節点③、④の固定条件 解析ケース1-3⇒X, Y, Z, R X, R Y, R Z 固定
 解析ケース1-2⇒Y, Y, Z, R Z 固定
 R X, R Y の剛性 1.895×10^{10} kg·mm/rad / 2 = 6.9495×10^{10} kg·mm/rad

①-④: 温度条件500℃、⑤-⑥、⑧-⑯、㉑-㉕: 温度条件200℃

図4-1 1次主冷却系温度計ウェルの解析モデル及び解析条件 (原子炉運転中500℃)



2次主冷却系ホットレグ温度計ウェルの解析条件 (定格出力運転時) 470℃

部材記号	質点間	長さ (mm)	下端位置		上端位置		比重量 (at 20℃) (kg/mm ³)	温度 (℃)	縦弾性係数 (kg/cm ²)	μ/ν比	備考
			内径 (mm)	外径 (mm)	内径 (mm)	外径 (mm)					
L	150~160	64.00	剛な梁を想定								端子台重量0.425kgを集中質量として考慮
K4	145~150	10.00	12.7	17.3	同左		8.0273E-05	100	1.9429E+04 (SUS304)	0.272	ナット重量0.02kgを集中質量として考慮
K3	140~145	10.00	12.7	17.3	同左						
K2	130~140	10.00	12.7	17.3	同左						
K1	120~130	42.00	12.7	17.3	同左						
J	110~120	16.00	12.7	20.0	同左						
H	109~110	1.75	6.0	20.0	12.7	20.0					
G	91~109	161.55	6.0	20.0	同左		7.3064E-06	250	1.9764E+04 (STPA24)	0.300	
F	90~91	0.70	3.6	20.0	6.0	20.0					
E3	80~90	9.70	3.6	20.0	同左						
E2	70~80	10.30	3.6	20.0	同左						
E1	60~70	30.00	3.6	20.0	同左						
D	50~60	20.00	3.6	8.6	3.6	20.0	470	1.7876E+04 (STPA24)	0.294	RX,RY剛性(8.745E+06kg・mm/rad)	
C	14~50	96.00	3.6	8.6	同左					Na付加質量を考慮(Na比重量8.39473E-07kg/mm ³)	
B	12~14	1.50	0.0	8.6	3.6	8.6				Na付加質量を考慮(Na比重量8.39473E-07kg/mm ³)	
A	10~12	2.50	0.0	8.6	同左					Na付加質量を考慮(Na比重量8.39473E-07kg/mm ³)	
合計		486.00									

部材記号C~K 4に熱電対シース重量を考慮(シース重量4.5E-05kg/mm)

図4-2 2次主冷却系温度計ウェルの解析モデル及び解析条件(原子炉運転中470℃)

表4-1 2次主冷却系温度計ウエルの原子炉停止中(250℃)及びドレン中(大気中20℃)の解析条件

2次主冷却系ホットレグ温度計ウエルの解析条件(原子炉停止中) 250℃

部材記号	質点間	長さ (mm)	下端位置		上端位置		比重量 (at 20℃) (kg/mm ³)	温度 (℃)	縦弾性係数 (kg/mm ²)	ポアソン比	備考
			内径 (mm)	外径 (mm)	内径 (mm)	外径 (mm)					
L	150~160	64.00	剛な梁を想定								端子台重量0.425kgを集中質量として考慮
K 4	145~150	10.00	12.7	17.3	同左		8.0273E-06	20	1.9871E+04 (SUS304)	0.240	ナット重量0.02kgを集中質量として考慮
K 3	140~145	10.00	12.7	17.3	同左						
K 2	130~140	10.00	12.7	17.3	同左						
K 1	120~130	42.00	12.7	17.3	同左						
J	110~120	16.00	12.7	20.0	同左						
H	109~110	1.75	6.0	20.0	12.7	20.0					
G	91~109	161.55	6.0	20.0	同左		7.8064E-06	100	2.0700E+04 (STPA24)	0.281	
F	90~91	0.70	3.6	20.0	6.0	20.0					
E 3	80~90	9.70	3.6	20.0	同左						
E 2	70~80	10.30	3.6	20.0	同左						
E 1	60~70	30.00	3.6	20.0	同左						
D	50~60	20.00	3.6	8.6	3.6	20.0		250	1.9764E+04 (STPA24)	0.300	RX,RY剛性(8.745E+06kg・mm/rad)
C	14~50	96.00	3.6	8.6	同左						
B	12~14	1.50	0.0	8.6	3.6	8.6					
A	10~12	2.50	0.0	8.6	同左						
合計		486.00									

部材記号C~K 4に熱電対シース重量を考慮(シース重量4.5E-05kg/mm)

2次主冷却系ホットレグ温度計ウエルの解析条件(ドレン中) 20℃

部材記号	質点間	長さ (mm)	下端位置		上端位置		比重量 (at 20℃) (kg/mm ³)	温度 (℃)	縦弾性係数 (kg/mm ²)	ポアソン比	備考
			内径 (mm)	外径 (mm)	内径 (mm)	外径 (mm)					
L	150~160	64.00	剛な梁を想定								端子台重量0.425kgを集中質量として考慮
K 4	145~150	10.00	12.7	17.3	同左		8.0273E-06	20	1.9871E+04 (SUS304)	0.240	ナット重量0.02kgを集中質量として考慮
K 3	140~145	10.00	12.7	17.3	同左						
K 2	130~140	10.00	12.7	17.3	同左						
K 1	120~130	42.00	12.7	17.3	同左						
J	110~120	16.00	12.7	20.0	同左						
H	109~110	1.75	6.0	20.0	12.7	20.0					
G	91~109	161.55	6.0	20.0	同左		7.8064E-06	20	2.1029E+04 (STPA24)	0.260	
F	90~91	0.70	3.6	20.0	6.0	20.0					
E 3	80~90	9.70	3.6	20.0	同左						
E 2	70~80	10.30	3.6	20.0	同左						
E 1	60~70	30.00	3.6	20.0	同左						
D	50~60	20.00	3.6	8.6	3.6	20.0		RX,RY剛性(8.745E+06kg・mm/rad)			
C	14~50	96.00	3.6	8.6	同左						
B	12~14	1.50	0.0	8.6	3.6	8.6					
A	10~12	2.50	0.0	8.6	同左						
合計		486.00									

部材記号C~K 4に熱電対シース重量を考慮(シース重量4.5E-05kg/mm)

表 4-2 1次主冷却系温度計ウェルの固有値解析結果
(温度計ウェル+熱電対 (シース付))

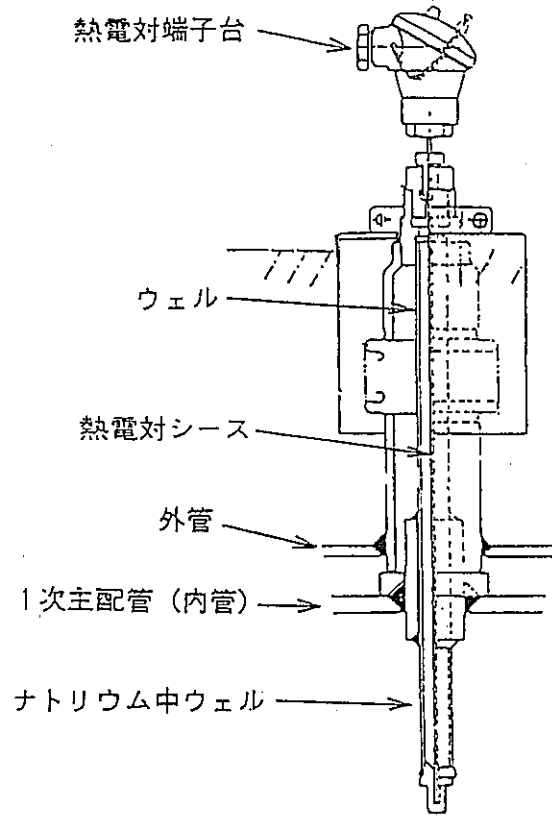
単位:(Hz)

運転状態	モード		
	1次	2次	3次
運転中 (500℃)	105	988	1,317

表 4-3 2次主冷却系温度計ウェルの固有値解析結果
(温度計ウェル+熱電対 (シース付))

(単位:Hz)

タイプ	モード	運転状態				
		Na付加質量考慮		Na付加質量なし (気中)		
		運転中 470℃	停止中 250℃	運転温度 470℃	停止温度 250℃	大気温度 20℃
タイプA (150mm)	1次	80	81	80	81	82
	2次	484	507	512	538	555
タイプB (130mm)	1次	73	74	73	74	75
	2次	497	521	526	553	570



熱電対端子台⇒

1次モード
105 Hz
(端子台)
弾性支持点⇒

外管⇒

1次主配管 (内管) ⇒

熱電対端子台⇒

2次モード
988 Hz
(端子台)
弾性支持点⇒

外管⇒

1次主配管 (内管) ⇒

外管⇒

1次主配管 (内管) ⇒

弾性支持点⇒

ナトリウム中ウェル⇒

3次モード
1, 317 Hz
(ナトリウム中ウェル)

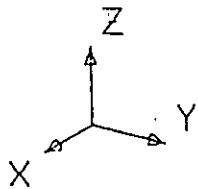


図4-3 1次主冷却系温度計ウェルの振動モード

1次モード
80Hz

2次モード
484Hz

弾性支持点 →
2次主配管 →

2次主配管 →

弾性支持点 →

ナトリウム中ウェル細管部 →

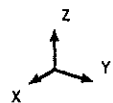
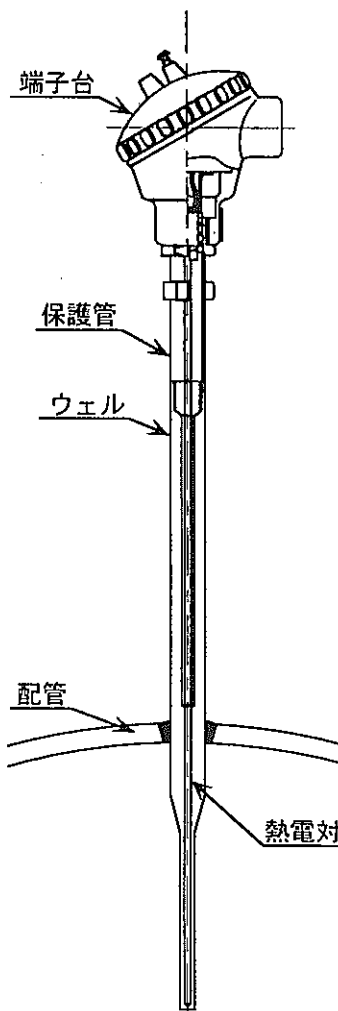
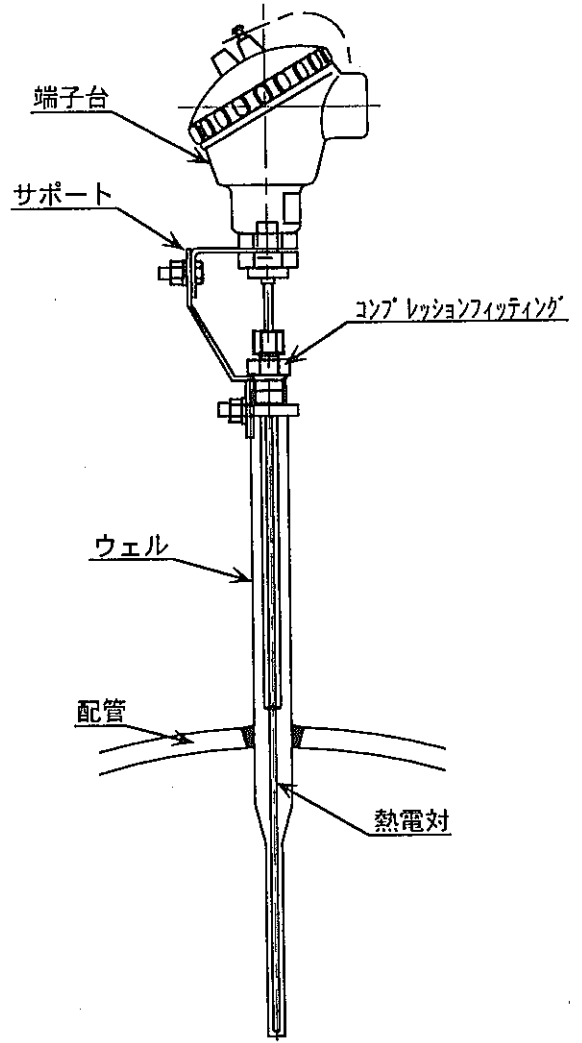


図4-4 (1/2) 2次主冷却系温度計ウェルの振動モード
(熱電対シースの取付け方式：スプリング式)

1次モード
71Hz

2次モード
484Hz



弾性支持点 →
2次主配管 →

2次主配管 →
弾性支持点 →

ナトリウム中ウェル細管部 →

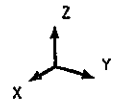


図4-4 (2/2) 2次主冷却系温度計ウェルの振動モード
(熱電対シースの取付け方式：コンプレッションフィッティング式)

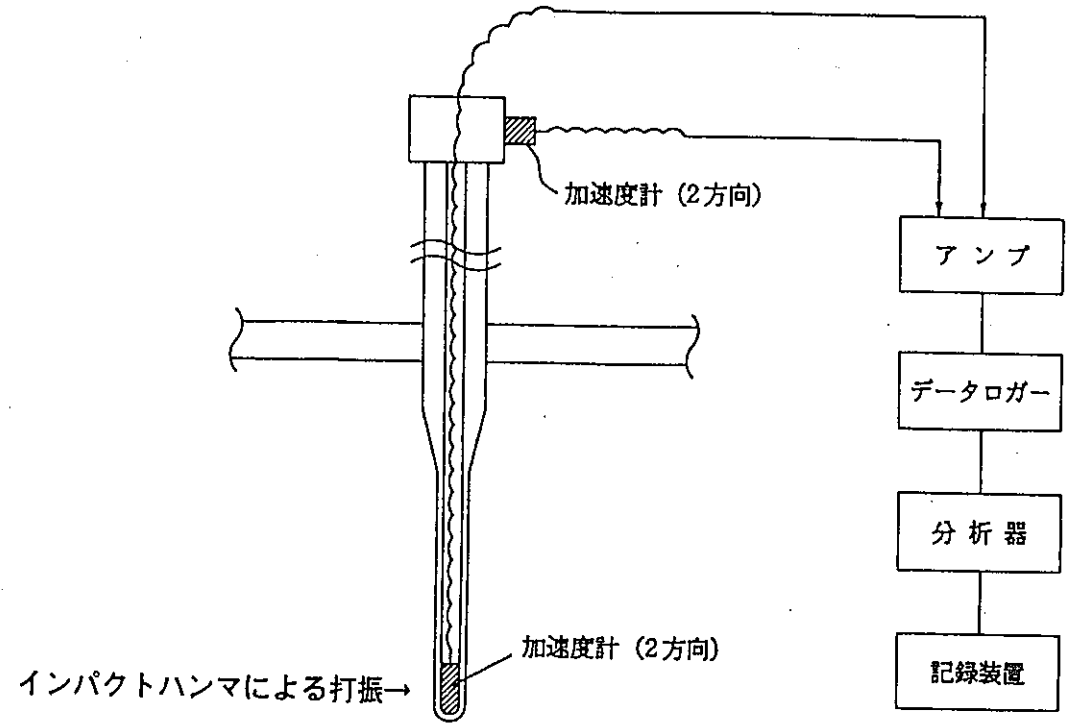
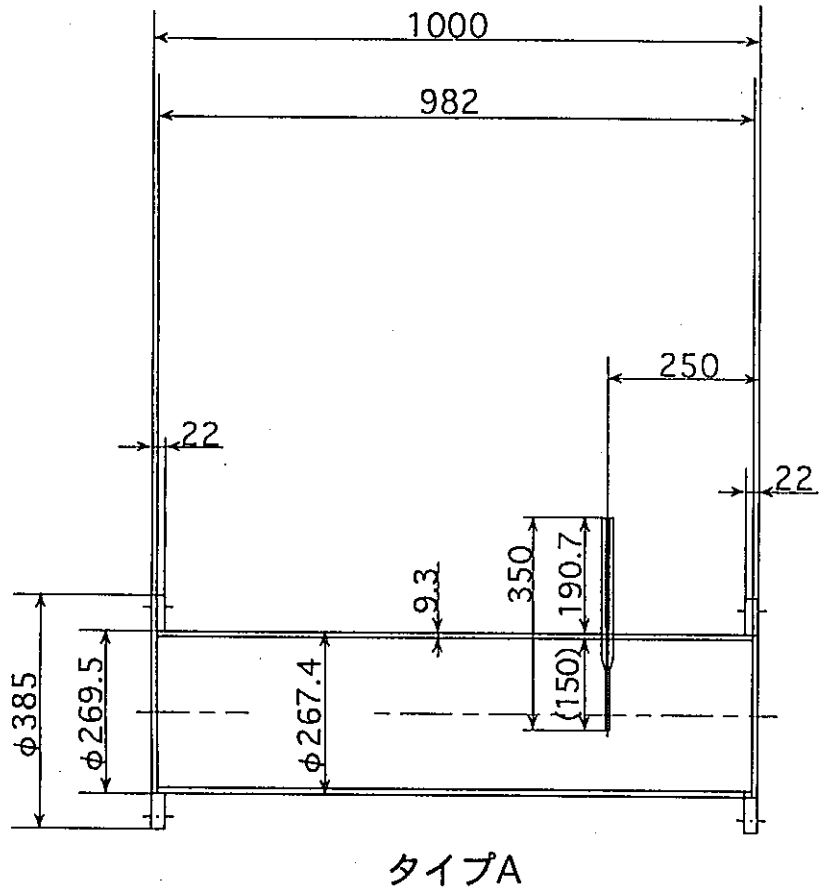


図 4 - 5 2次主冷却系温度計ウェルの打振試験概念

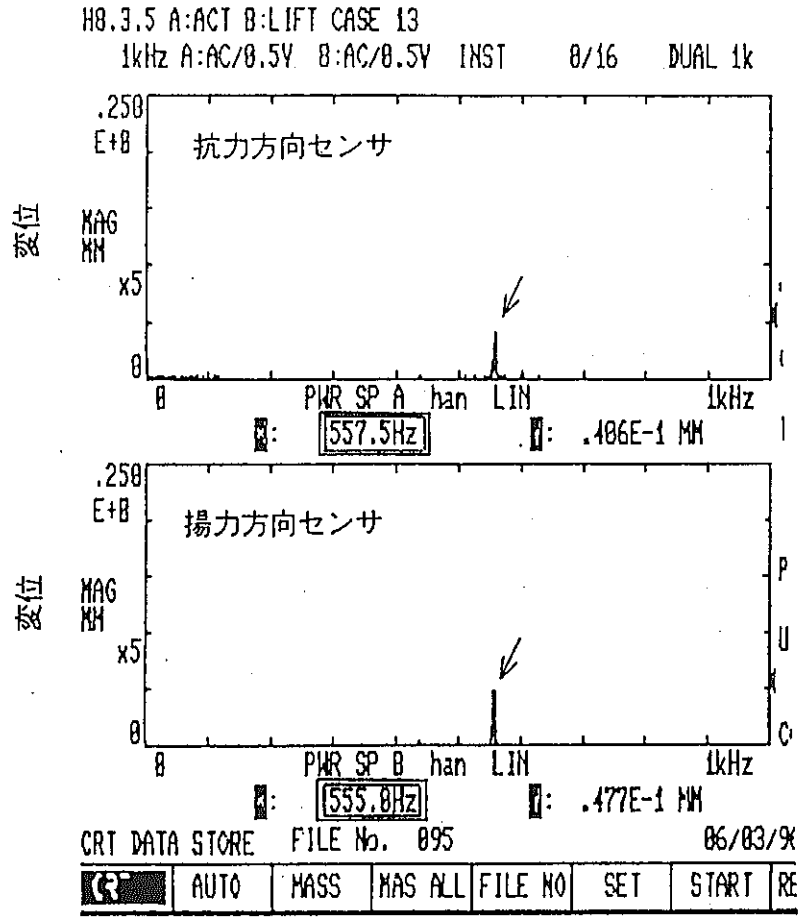
表 4-4 2次主冷却系温度計ウェルの打振試験結果 (模擬試験体)

(単位: Hz)

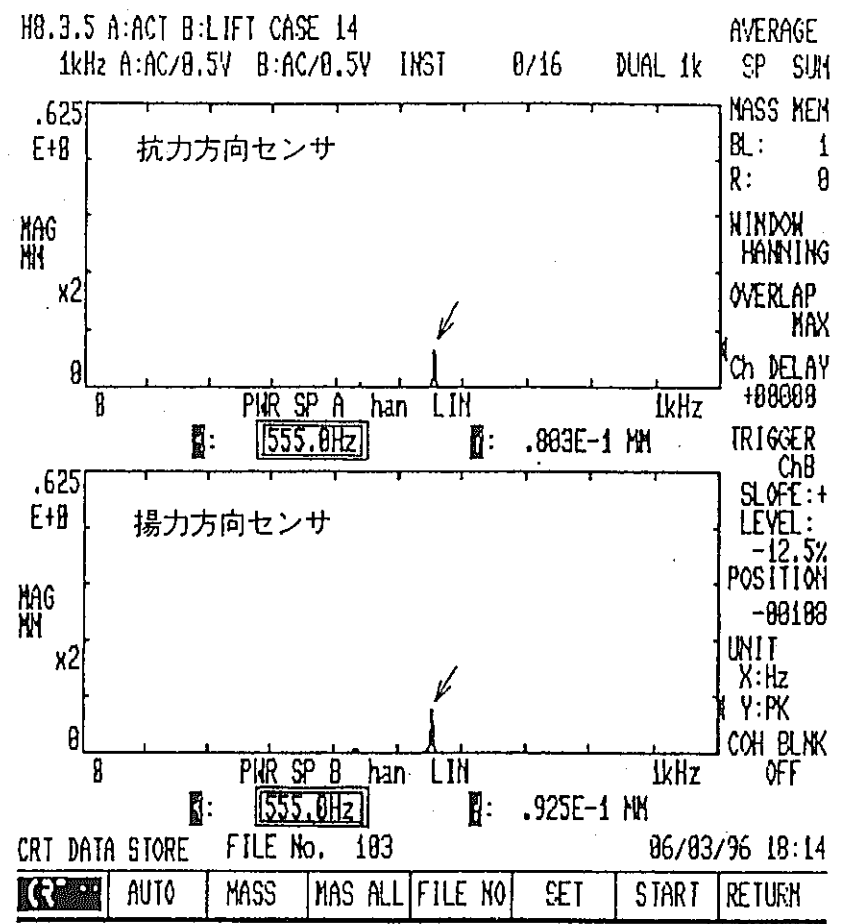
ウェルタイプ (Na中ウェル長さ)	ウェル+熱電対 (シース付)	ウェル単体	ウェル+加速度計内挿	
	大気中	大気中	大気中	水中
タイプA (150mm)	555.0	582.5	572.5	537.5
タイプB (130mm)	572.5	602.5	590.0	550.0

タイプA : 12B 配管用温度計ウェル

タイプB : 10B 配管用温度計ウェル



抵抗力方向打振



揚力方向打振

図 4 - 6 2次主冷却系温度計ウエルの打振試験結果の一例 (熱電対付き温度計ウエル)
(ウエル先端打振、ウエル先端応答)

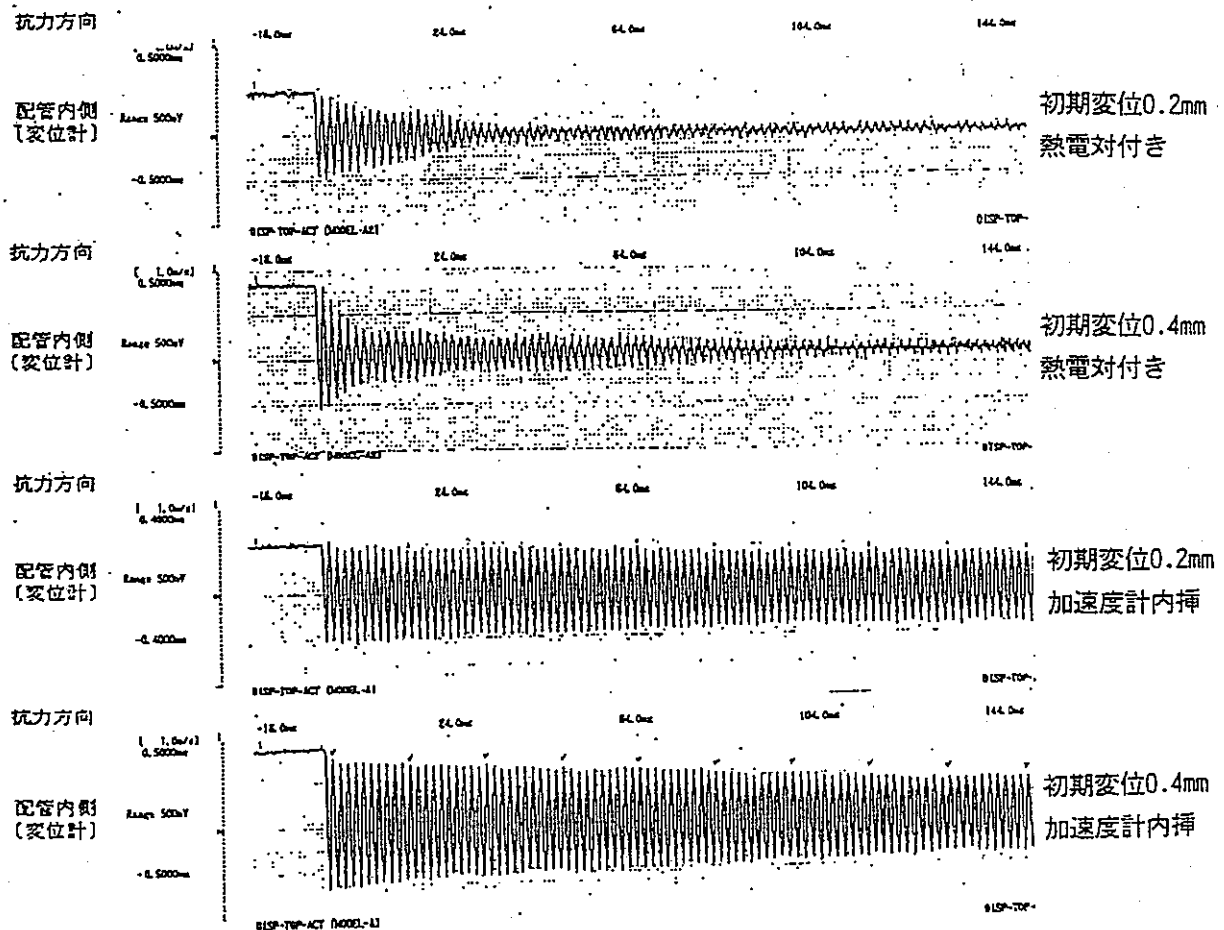
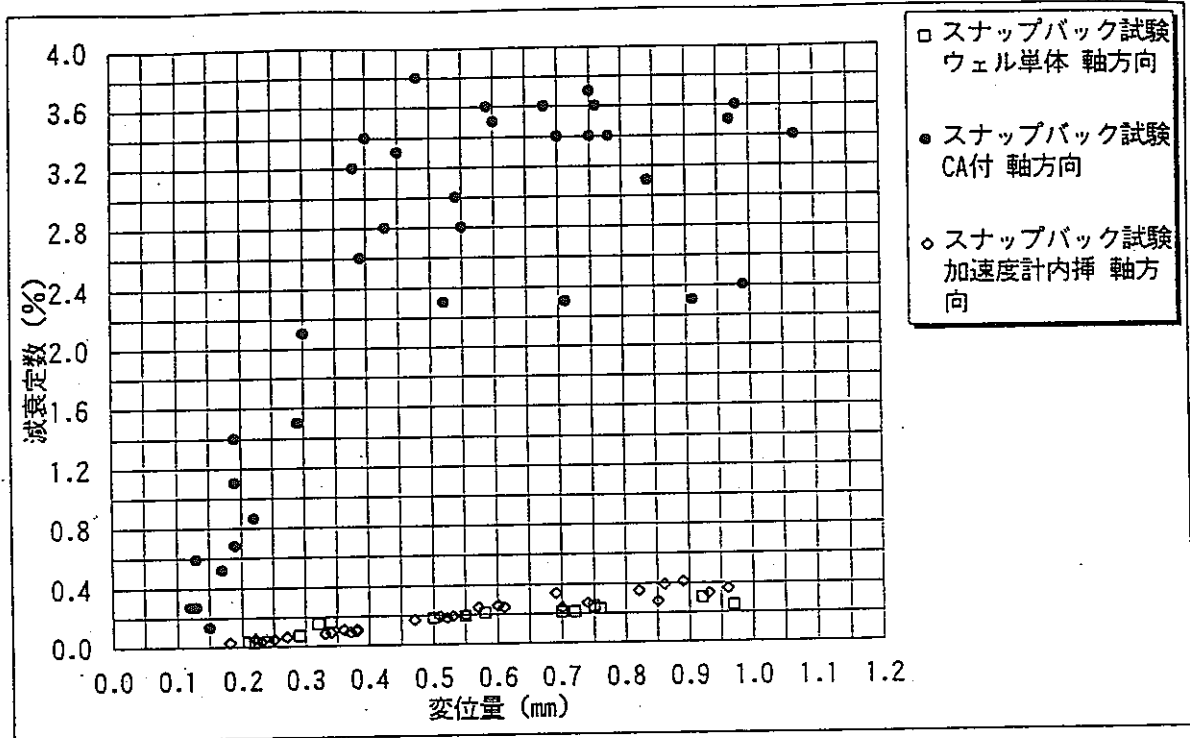


図 4-7 スナップバック試験により得られた減衰定数と自由振動減衰波形
(2次主冷却系温度計ウェル)

5. 2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数に関する一考察 (「常陽」と「もんじゅ」の減衰定数の違いについて)

5.1 概要

温度計ウェルのような弾性体(振動系)が動的エネルギーを与えられた場合、必ずエネルギーを消耗し、発散させる。エネルギーの消耗の方法としては、内部減衰と外部減衰とがある。内部減衰は、構造材の粒子又は結晶相互間の摩擦によるエネルギー損失である。よって、発生応力(変位量)が弾性限界内の場合と塑性域に達する場合とでは、減衰が異なると推定される。一方、外部減衰は、いろいろな形態が考えられる。構造材同士の摩擦や衝突(温度計ウェルの場合はウェルとシースの摩擦や衝突、温度計ウェルと保温材との摩擦や衝突、温度計ウェル取付け部を通じての配管中へのエネルギー逸散等)、流体中へのエネルギー逸散によるエネルギー損失である。

上記のように、構造物の減衰は、内部減衰のみであれば、その材料に依存するのみである。しかし、温度計ウェルのような内部にシースが挿入された場合には、様々な要因が減衰に影響し、一概に減衰の機構を説明することは難しいのが一般的である。温度計ウェルとシースの場合は、ウェル穴径とシース外径との間隙、構造物の表面粗さ、シースの固有振動数及び振動モード形状(重量、断面2次モーメント、シースの剛性)、シースの押し付け力、シースの曲がり具合等、その要因は多数あり、これらの相互作用によって減衰が得られるものである。

したがって、減衰は、各温度計ウェルの形状とシースとの関係が異なると変化するものであると考えられるが、4.4.2項に示した「常陽」2次主冷却系温度計ウェル(熱電対シース有り)の減衰定数測定結果について、その減衰特性が、「もんじゅ」の温度計ウェル(熱電対シース有り)の減衰特性と大きく異なる傾向を示しているので、その違いについて考察したものである。

5.2 温度計ウェル単体の場合の減衰定数

温度計ウェル単体に動的エネルギーを与えられた場合、そのエネルギーの消耗方法は、内部減衰である温度計ウェル構造材の粒子又は結晶相互間の摩擦と、外部減衰である流体中へのエネルギー逸散によるものと考えられる。

図5-1に「常陽」2次主冷却系温度計ウェル単体の減衰定数を示す。

5.2.1 温度計ウェル単体(材料)の粒子又は結晶相互間の摩擦

温度計ウェル単体(材料)の減衰は、材料の粒子又は結晶相互間の摩擦により生じるも

のと考えられている。理論的に減衰は、(5-1)式で表されることから、材料が弾性領域内（応力とひずみの関係が比例関係にある）にあれば、一定値となる。

$$\text{減衰定数} \zeta = C / C_c \quad (5-1)$$

C : 減衰係数（振動速度に比例する粘性減衰）

C_c : 臨界減衰係数

$$\begin{aligned} C_c &= 2 (m \cdot k)^{1/2} = 2 k / \omega = 2 m \cdot \omega \\ &= 2 m \cdot \left(\frac{\lambda^2}{L^2} \cdot \left(\frac{E \cdot I \cdot g}{\gamma A} \right)^{1/2} \right) \end{aligned} \quad (5-2)$$

m : 温度計ウェルの質量

k : バネ定数

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{3 E \cdot I}{L^3} \quad (5-3)$$

P : 温度計ウェル先端荷重

δ : 温度計ウェル先端変位

E : 縦弾性係数

I : 断面2次モーメント

L : ウェル長さ

ω : 固有円振動数

$$\omega = 2 \pi \cdot f_n \quad (5-4)$$

f_n : 固有振動数

しかし、上記は、マクロ的なレベルの話であり、Goodman⁽⁵⁾（図5-2参照）によれば、マクロ的に十分弾性領域内であっても、ミクロ的にヒステリシスを持っていれば、このヒステリシスによってエネルギーを消耗することが示されている。このヒステリシスは、ひずみレベルが大きいほど大きくなるため、変位に依存して減衰が大きくなるものと考えられている。なお、図5-1に示した「常陽」2次主冷却系温度計ウェル単体の減衰特性においても、変位に依存して減衰が大きくなる傾向が見られる。

5.2.2 流体中へのエネルギー逸散

流体中へのエネルギー逸散は、(5-1)式の減衰係数に係わるものである。これは、配管系などのように配管支持装置にオイルダンパー等が取り付けられている場合に、大きく減衰に寄与してくるものである。

5.3 温度計ウェルに熱電対シースが挿入された場合の減衰定数

温度計ウェルに熱電対シースが挿入された場合の減衰定数は、内部減衰である温度計ウェルの粒子又は結晶相互間の摩擦と、外部減衰である温度計ウェルとシースの摩擦や衝突、配管へのエネルギー逸散、流体中へのエネルギー逸散によるものと考えられる。

表5-1に「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウェル及びシースの違いを比較したものを示す。また、図5-3に「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウェルに熱電対シースが挿入された場合の減衰定数を示す。

以下に、表5-1に基づき、減衰特性に影響すると考えられる測定方法、温度計ウェル穴径とシース外径との差（間隙）等について考察する。

5.3.1 測定方法の違いによる影響

測定方法は、「常陽」はスナップバック試験、「もんじゅ」は強制加振試験を用いている。

強制加振試験は、常に温度計ウェルが振動している状態（流力振動が生じている状態を想定）における減衰特性を把握することができる。したがって、変位量が小さい場合でも、繰り返し振動している間には内部に挿入したシースも温度計ウェルとは異なる振動モードで温度計ウェルと同時に振動しており、温度計ウェルとシースの衝突によるエネルギー逸散がある。図5-3に示した「もんじゅ」のデータを見ると、ほとんど変位に依存せずにほぼ一定の減衰が得られているのは、この衝突によるエネルギー逸散が支配的であるためと考えられる。

一方、「常陽」で行ったスナップバック試験は、ワイヤによって初期変位を与えた状態からワイヤをカットした後の自由振動減衰波形から減衰を求める方法である。この方法は、減衰して徐々に変位が小さくなっていく自由振動であることから、図5-3に示すように初期変位が小さい場合、温度計ウェルとシースが衝突する割合が小さくなり、かつ、この割合は初期変位の大小に依存しているものと考えられる。一方、初期変位量が大きくなると、強制加振試験と同様に、自由振動減衰していく過程においても温度計ウェルとシースの衝突する割合が大きくなり、「もんじゅ」で行った強制加振試験で得られている減衰と同じようにほぼ一定値を示してくるものと考えられる。なお、一定値になる初期変位量は、シースが挿入された時の微妙な位置の違いによって、シースが温度計ウェルの穴径の中心にあるか、穴径の片側に偏っているかによってその一定値となってくる初期変位量が変わってくるものと考えられる。したがって、常に振動している時の減衰は、初期変位0.4mm

以下のレベルでも、温度計ウェル穴径とシース外径との差（間隙）が0.4mmと「もんじゅ」の1/2と小さい「常陽」では、温度計ウェルとシースの衝突が「もんじゅ」と同様に生じ、0.4mm以上の変位レベルの減衰とはほぼ同様な2～4%の減衰になると考えられる。

なお、上記のメカニズムからすれば、変位量が極わずかな領域（「もんじゅ」で測定していない領域）では、強制加振試験でもスナップバック試験と同様に温度計ウェルとシースの衝突する割合が変位に依存して小さくなっていく領域があると考えられる。

5.3.2 温度計ウェル穴径とシース外径との差（間隙）等の影響

図5-4に「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウェルの構造の比較を示す。

「もんじゅ」は減衰が約1%であるのに対して、「常陽」は5.3.1項を考慮すると減衰が約3%である。これは、以下の原因によるものと考えられる。

「常陽」は、「もんじゅ」に比べて温度計ウェル穴径とシース外径との差（小ギャップ部）が小さい。これは、振動の際に、温度計ウェルとは異なる振動モードで温度計ウェルと同時に振動するシースの温度計ウェル内壁に衝突する面積が大きくなることを意味している。したがって、「常陽」の方が、衝突によるエネルギー損失が大きくなるため、減衰が大きい傾向を示しているものと考えられる。

5.3.3 熱電対シースの調和加振解析による検討

5.3.1項及び5.3.2項で示した考察の妥当性を確認するため、今回「常陽」において、「もんじゅ」及び「常陽」それぞれの熱電対シース単体の固有値解析及び熱電対シース単体の調和加振解析（熱電対シース単体を温度計ウェルの固有振動数で強制加振したことを想定）を行った。

図5-5に熱電対シースの調和加振解析の概念図を示す。また、表5-2に熱電対シースの固有値解析結果を示す。

この結果、「もんじゅ」の熱電対シースは、上端固定・先端固定で2次モード（210Hz）が温度計ウェルの固有振動数（257Hz）に近い。また、「常陽」の熱電対シースは、上端固定・先端固定で3次モード（446Hz）が温度計ウェルの固有振動数（484Hz）に近い。

表5-3及び図5-6～図5-7に熱電対シースの調和加振解析結果(1)（ウェル先端が連続的に振動している場合）を示す。なお、熱電対シースの減衰定数は、ほぼ材料減衰のみであるので0.05%としている。

この結果、「もんじゅ」では、ウェル先端を0.05mm連続的に変位させた時の熱電対シース

ス各位置における変位は、いずれも片側ギャップ (0.4mm) を下回っている。一方、ウェル先端を0.1mm連続的に変位させた時の熱電対シース各位置における変位は、シース先端約100mm～150mmの間で片側ギャップ (0.4mm) を上回っている。したがって、「もんじゅ」で行っている強制加振試験の約0.1mm以上の領域の減衰定数測定結果がほぼ一定になっているのは、5.3.1項でも示したとおりシースと温度計ウェル内壁との衝突によるエネルギー逸散であると考えられる。また、ウェル先端変位0.1mm以下では、シースと温度計ウェル内壁との衝突が小さくなり、仮に0.1mm以下の領域における強制加振試験が可能であったとすると、5.3.1項に示したとおり減衰定数は変位に依存して低下していくものと考えられる。

一方、「常陽」の解析結果では、熱電対シースと温度計ウェルの固有振動数が「もんじゅ」より近いことから、振動時の変位振幅が「もんじゅ」より大きく、かつ、温度計ウェルの穴径と熱電対シース外径とのギャップが「もんじゅ」より小さいため、シースと温度計ウェル内壁が衝突する長さ (面積) も長く (大きく) なっている。よって、「常陽」においても変位振幅が小さい領域で強制加振試験で減衰定数を求めたと仮定すると、「もんじゅ」と同様の傾向を示し、ほぼ現在得られている減衰定数の初期変位0.4mm以上の領域と同一となると考えられる。また、衝突する長さが「もんじゅ」より長いことから、減衰定数が「もんじゅ」の約1%に対して、「常陽」は約3%と大きくなっているものと考えられる。

表5-4～表5-5に「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(2) (シース先端に初期変位を与えた場合) を示す。

この結果、ウェル先端変位が増加するにしたがって、シースと温度計ウェル内壁との衝突する長さ (面積) が長くなり、ある変位からは、衝突する長さがほぼ一定になるため、減衰定数もほぼ一定になるか、変位 (衝突速度) が大きくなることによるシースと温度計ウェル内壁との間で逆にすべり (速度が増加すると摩擦係数が小さくなり、すべりが大きくなる) が働いて減衰が下がる傾向を示すものと考えられる。なお、すべりは、ギャップが大きいほどシースと温度計ウェル内壁とのすべりが生じやすいと考えられることから、ギャップの大きい「もんじゅ」の方が変位が大きくなると、図5-3に示すように僅かに減衰定数が下がる傾向を示すことも納得できる。

5.4 まとめ

「常陽」と「もんじゅ」で温度計ウェルに熱電対シースが挿入されている場合の減衰定数

の違いは、以下の理由によるものと考えられる。

(1) 測定方法の違い

スナップバック試験の場合は、初期変位が小さい場合、温度計ウェルとシースが衝突する割合が小さくなり、また、この割合は初期変位の大小に依存しているものと考えられる。しかし、初期変位量が大きくなると、強制加振試験と同様に、自由振動減衰していく過程においても温度計ウェルとシースとの衝突する割合が大きくなり、ほぼ一定値を示すものと考えられ、初期変位の小さい領域では、試験方法の影響がでたものと考えられる。

(2) 温度計ウェル穴径とシース外径との差（小ギャップ部）等の影響

「常陽」は、「もんじゅ」に比べて温度計ウェル穴径とシース外径との差が小さいことから、振動した際に温度計ウェルとは異なる振動モードで振動するシースの温度計ウェル内壁に衝突する面積が大きくなるためと考えられる。

以上より、「常陽」の温度計ウェルにシースが挿入されていた場合の減衰定数は、ほぼ一定値になっている部分の約3%であるとしてよいと考えられる。なお、スナップバック試験の初期変位0.4mm以下の変位依存性のある減衰定数を考慮しても、シースが挿入されている場合は、明らかに温度計ウェル単体より減衰定数が大きい。したがって、流力振動評価においては、減衰定数の小さい温度計ウェル単体の水流動試験結果を用いて評価しているので、実機の熱電対を挿入した温度計ウェルより保守的な評価結果であると判断している。また、「常陽」の減衰定数は約3%一定であると考えれば、ASMEに基づく評価における(c)項の揚力方向のロックイン回避及び抗力方向のロックイン抑制の判定を満足していることになる。

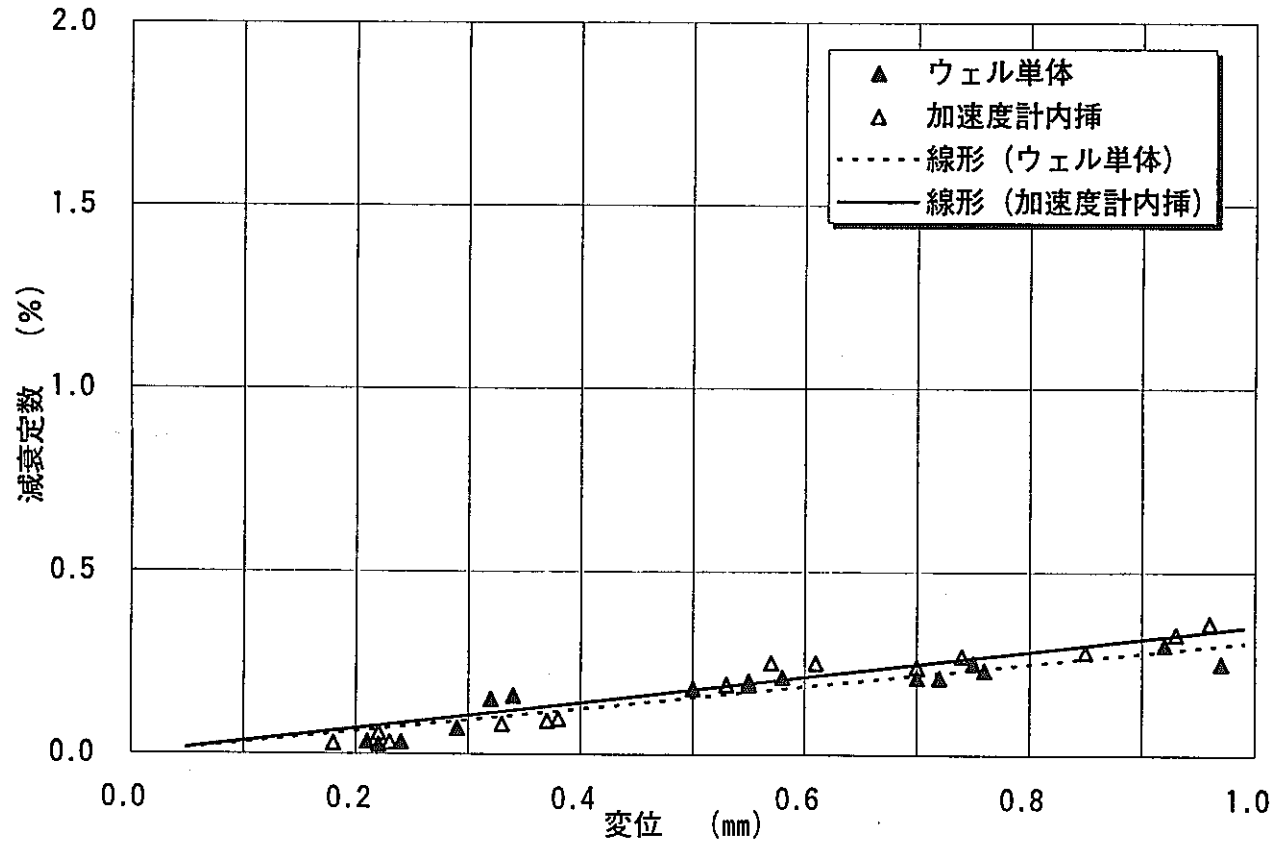


図5-1 「常陽」2次主冷却系温度計ウェル単体の減衰定数

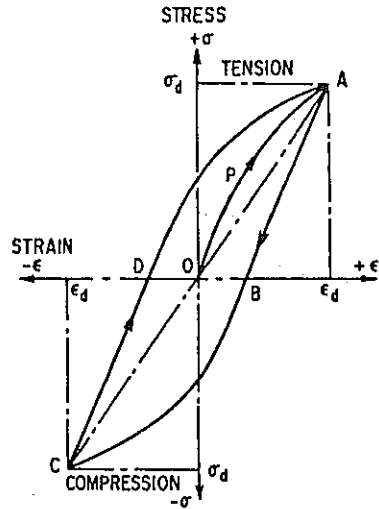


Fig. 36.1. Typical stress-strain (or load-deflection) hysteresis loop for a material under cyclic stress.

- 85 -

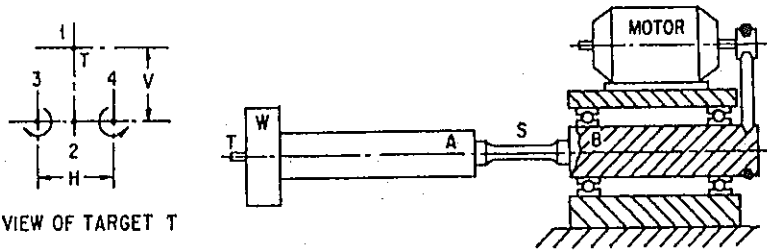


Fig. 36.4. Principle of rotating cantilever beam method for measuring damping.

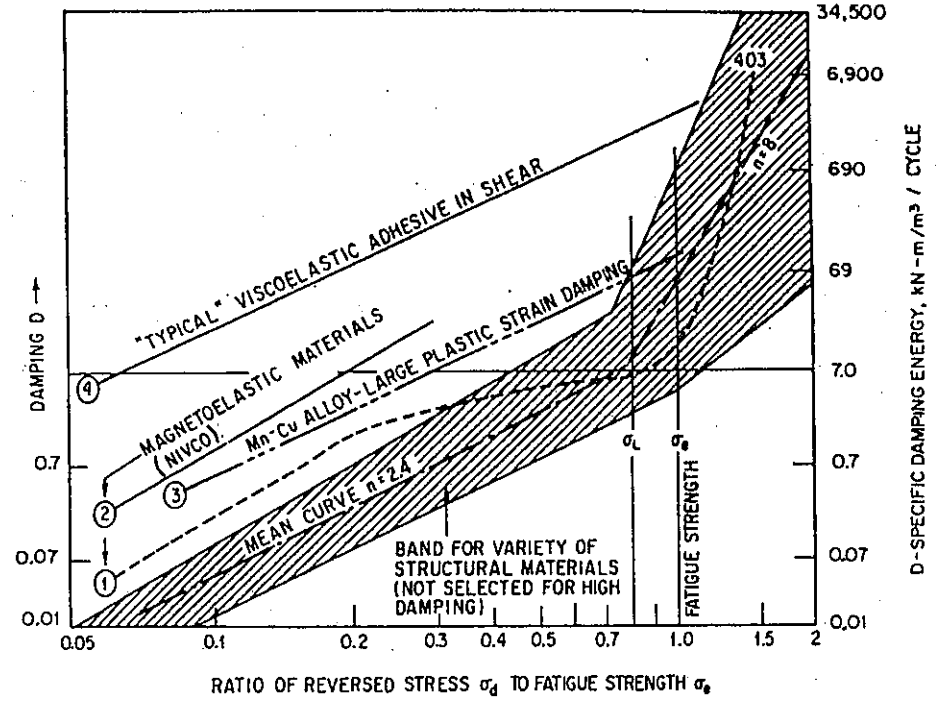


Fig. 36.11. Range of damping properties for a variety of structural materials. The shaded band defines the damping for most structural materials. $1 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3 = 0.146 \text{ in}\cdot\text{lb}/\text{in}^3$

表5-1 「常陽」と「もんじゅ」の温度計ウェル及びシースの違い

項 目	「常陽」	「もんじゅ」
減衰定数の測定雰囲気	大気中	
減衰定数の測定方法	スナップバック	強制加振
シースの長さ (mm)	420	430
シースの重量 (kg/mm)	4.50E-05	4.10E-05
シースの縦弾性係数 (kg/mm ²)	1.9871E+04	
ウェル穴径とシース外径との差 (間隙 (小ギャップ部)) (mm)	0.4	0.8
小ギャップ部の長さ (mm)	167.5	151.0
シース全長さに対する小ギャップ部シース長さの割合	0.40	0.35

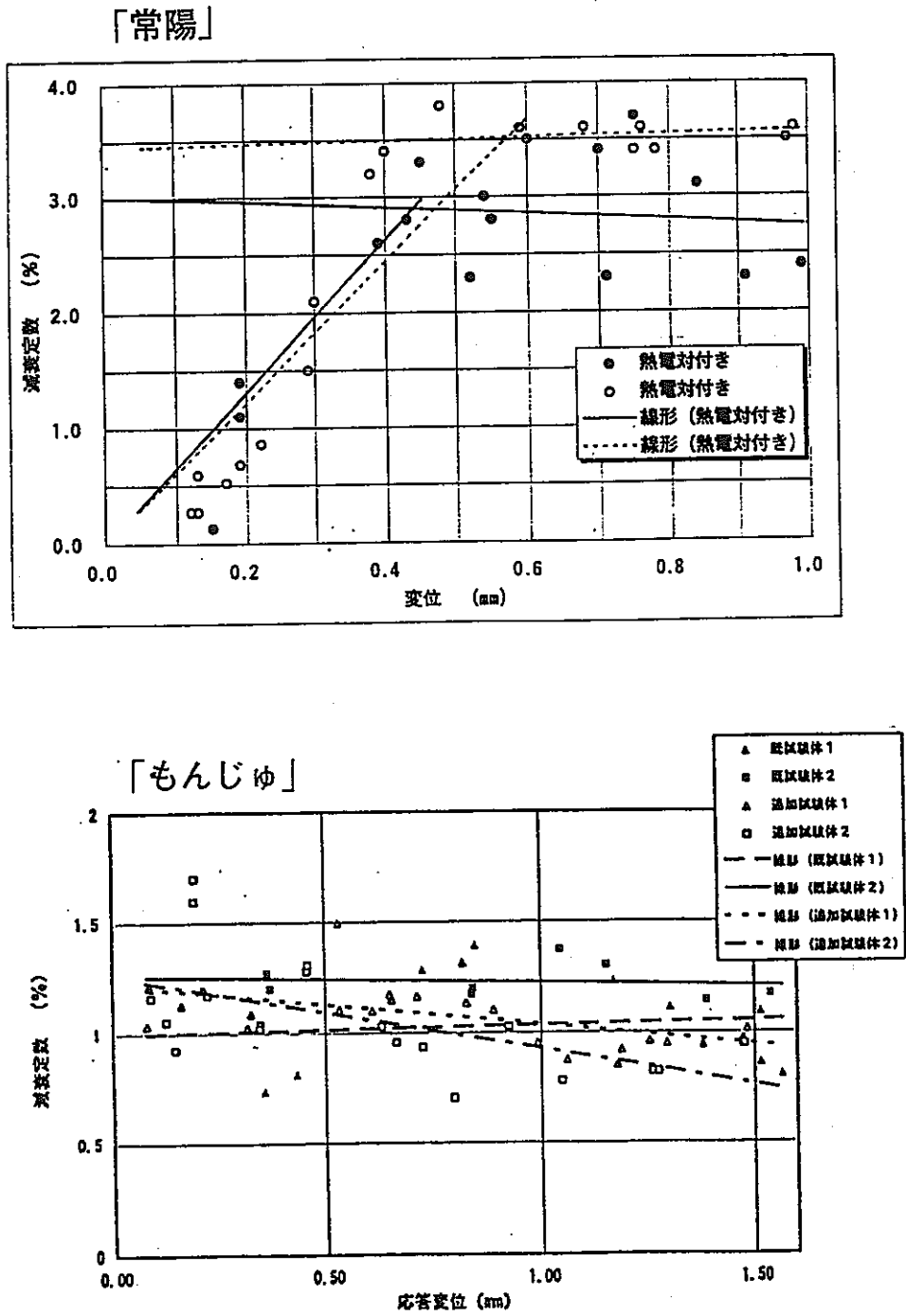


図5-3 「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウエルに熱電対が挿入された場合の減衰定数

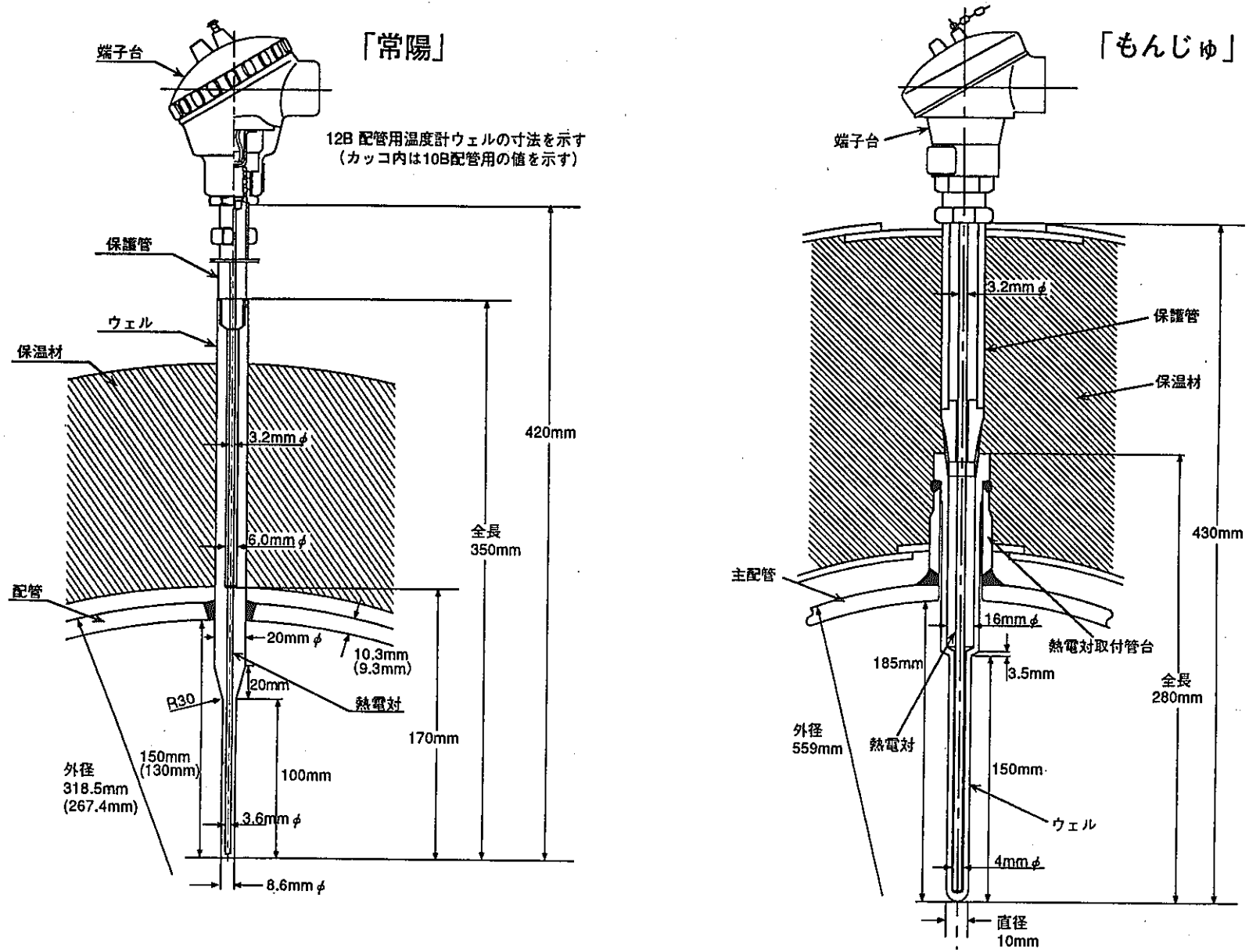


図5-4 「常陽」と「もんじゅ」の2次主冷却系温度計ウェルの構造比較

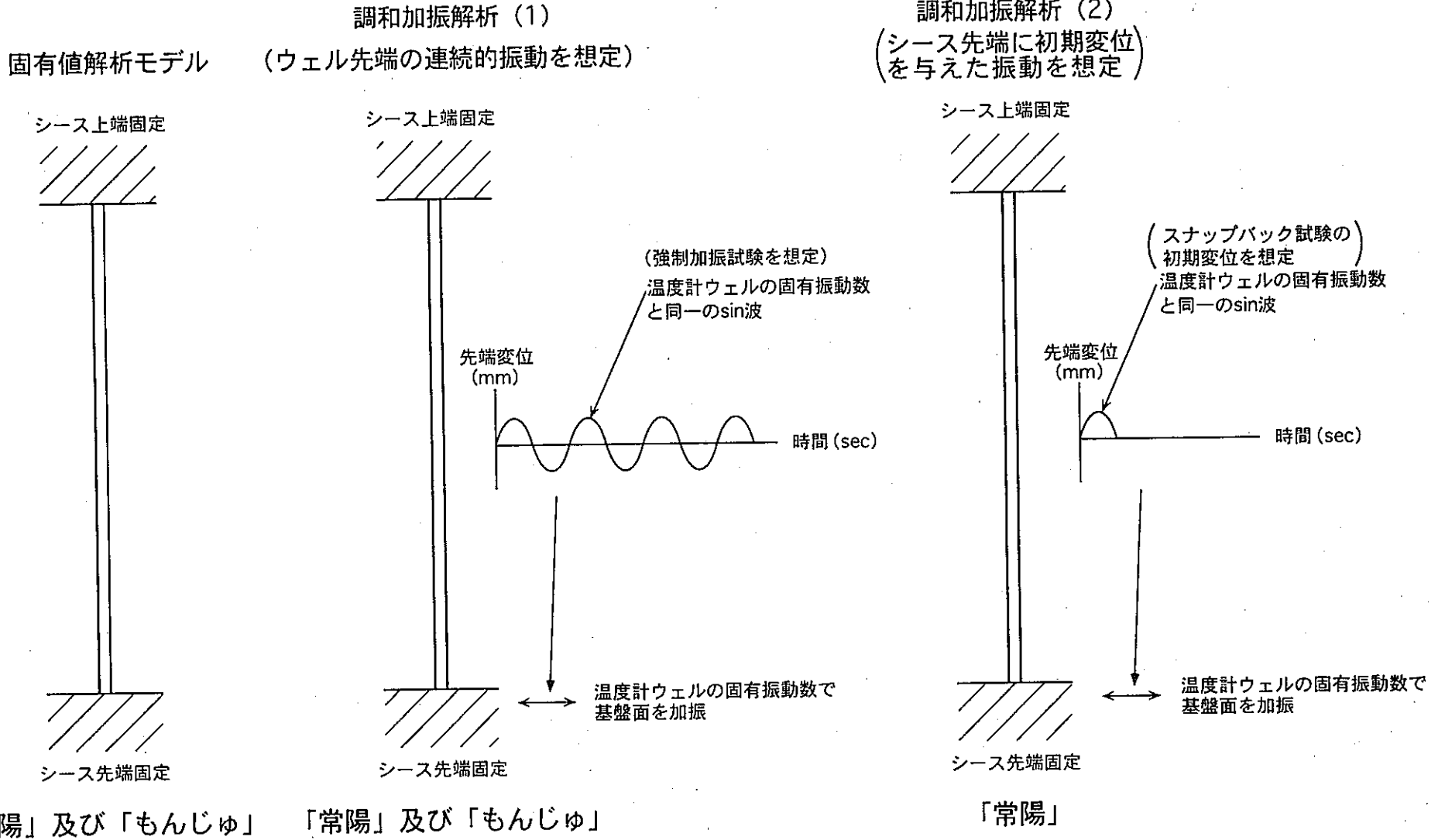


図5-5 熱電対シースの解析概念図

表 5-2 熱電対シースの固有値解析結果

(単位：Hz)

モード	「もんじゅ」(シース長さ430mm)		「常陽」(シース長さ420mm)	
	固定・固定	固定・自由	固定・固定	固定・自由
1次	76	12	83	13
2次	210	75	228	81
3次	411	210	446	227
4次	680	411	738	445
5次	1,016	678	1,102	736

注)：本熱電対シース単体の解析は、「常陽」と「もんじゅ」の温度計ウェル(熱電対シース有り)の減衰定数の違いを考察するために、「常陽」側で「もんじゅ」の熱電対シース単体解析も含めて実施したものである。

表 5-3 熱電対シースの調和加振解析結果(1)
 (ウェル先端が連続的に振動している場合の各節点の最大変位)
 (単位: mm)

シース先端からの 位置 (mm)	「もんじゅ」*1			「常陽」*2	
	ギャップ (片側)	固定・固定		ギャップ (片側)	固定・固定 先端0.1mm
		先端0.05mm	先端0.1mm		
0(先端)	0.4mm	0.000	0.000	0.2mm	0.000
10		0.004	0.008		0.020
20		0.016	0.031		0.073
30		0.033	0.066		0.150
40		0.055	0.110		0.244
50		0.080	0.160		0.345
60		0.107	0.215		0.445
70		0.136	0.271		0.539
80		0.164	0.327		0.620
90		0.190	0.381		0.685
100		0.215	0.430		-0.744
110		0.237	0.474		-0.784
120		0.255	0.511		-0.805
130		0.270	0.541		-0.808
140		0.281	0.562		-0.823
150		0.288	0.575		-0.841
160	6.4mm	0.290	0.580	1.4mm	0.849
170		0.288	0.576		0.854
180		0.282	0.565		0.870
190		0.273	0.546		0.916
200		0.260	0.521		0.939
210		0.245	0.490		0.938
220		0.237	0.474		0.930
230		-0.236	-0.471		-0.918
240		-0.237	-0.474		-0.898
250		0.242	0.484		-0.856
260		0.245	-0.497		-0.795
270		-0.248	-0.496		0.757
280		-0.248	-0.487		-0.766
290		-0.244	-0.487		-0.784
300		-0.235	-0.470		0.788
310		-0.223	-0.446		0.778
320		-0.207	-0.415		0.748
330		-0.189	-0.377		0.698
340	-0.167	-0.334	0.630		
350	-0.144	-0.288	0.545		
360	-0.120	-0.239	0.449		
370	-0.095	-0.190	0.347		
380	-0.071	-0.142	0.245		
390	-0.049	-0.097	0.151		
400	-0.029	-0.058	0.073		
410	-0.014	-0.028	0.020		
420	-0.004	-0.007	0.000		
430	0.000	0.000	0.000		

* 1 : 「もんじゅ」は、温度計ウェルの固有振動数257Hzで調和加振解析を実施。

* 2 : 「常陽」は、温度計ウェルの固有振動数484Hzで調和加振解析を実施。

は、ギャップ(片側)以上の変位応答を示す。

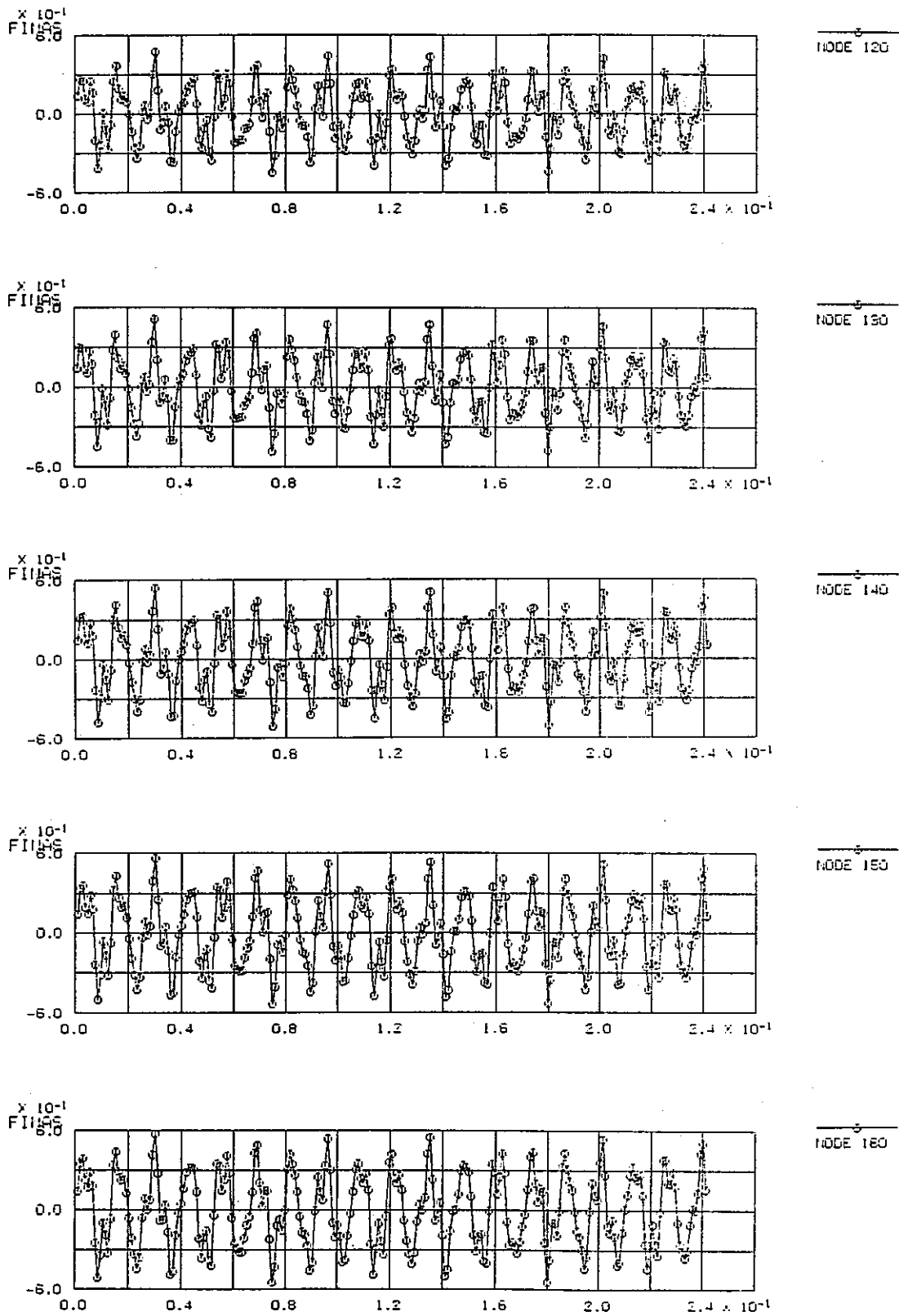


図5-6 「もんじゅ」熱電対シースの調和加振解析結果(1) (強制加振試験を想定)

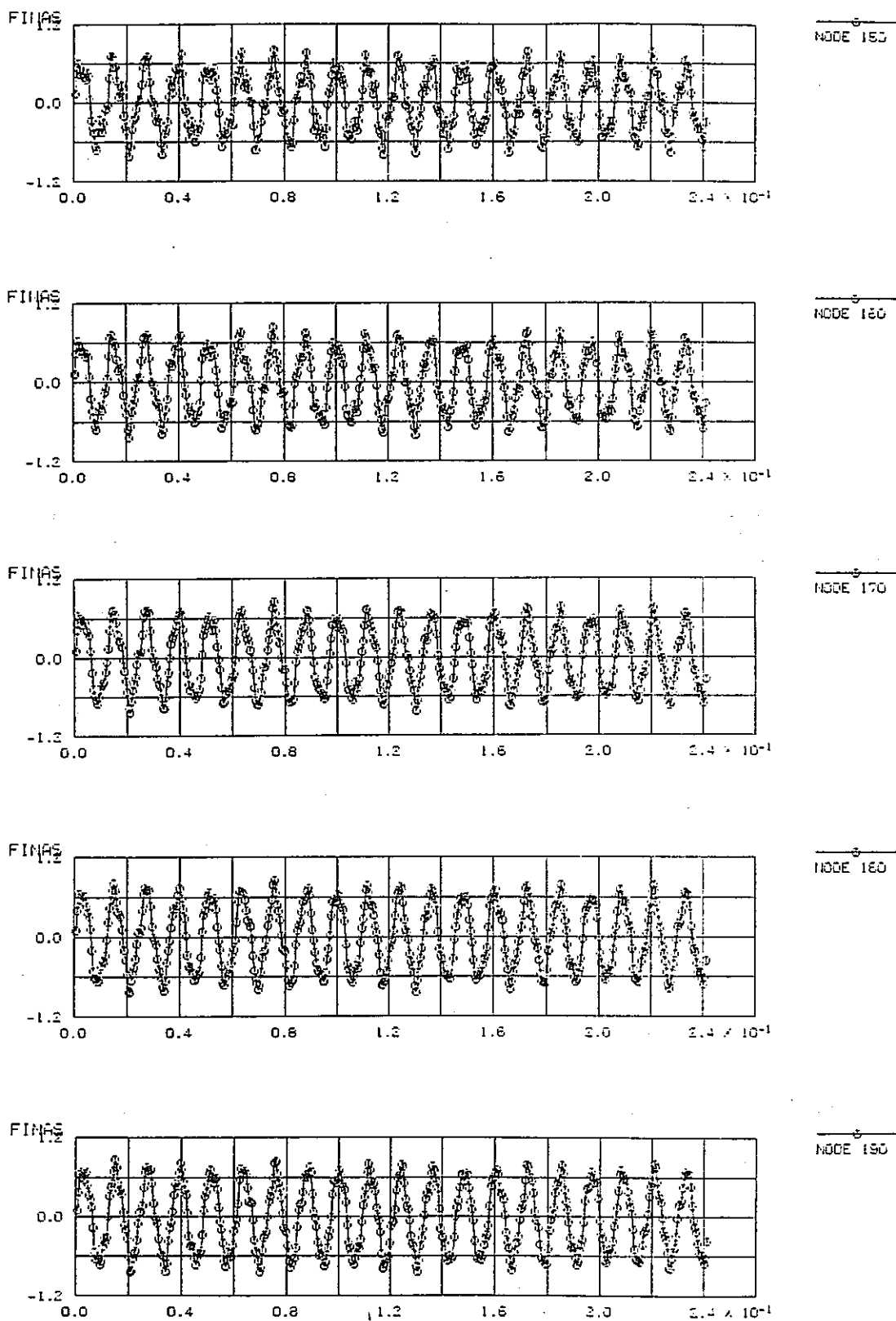


図 5 - 7 「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(1) (強制加振試験を想定)

表5-4 「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(2) (固定・固定)
(シース先端に初期変位を与えた場合)

(単位: mm)

シース先端からの 位置 (mm)	ギャップ (片側)	初期変位量 (片振幅)				
		0.1mm	0.2mm	0.3mm	0.4mm	0.5mm
0(先端)	0.2mm	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10		0.006	0.013	0.019	0.026	0.032
20		0.024	0.048	0.072	0.096	0.120
30		0.050	0.099	0.149	0.198	0.248
40		0.081	0.162	0.242	0.323	0.404
50		0.115	0.230	0.345	0.460	0.575
60		0.150	0.299	0.449	0.599	0.748
70		0.183	0.366	0.549	0.731	0.914
80		0.213	0.426	0.638	0.851	1.064
90		0.238	0.476	0.714	0.952	1.190
100		0.258	0.515	0.773	1.031	1.288
110		0.271	0.543	0.814	1.085	1.356
120		0.279	0.557	0.836	1.114	1.393
130		0.280	0.560	0.840	1.120	1.400
140		0.276	0.552	0.828	1.104	1.380
150		0.267	0.535	0.802	1.069	1.336
160		0.255	0.510	0.765	1.020	1.275
170	0.240	0.480	0.719	0.959	1.199	
180	1.4mm	0.223	0.446	0.669	0.892	1.115
190		0.205	0.410	0.616	0.821	1.026
200		0.187	0.375	0.562	0.750	0.937
210		0.170	0.340	0.511	0.681	0.851
220		0.154	0.308	0.462	0.616	0.770
230		0.139	0.278	0.417	0.556	0.694
240		0.125	0.250	0.376	0.501	0.626
250		0.113	0.226	0.338	0.451	0.564
260		0.102	0.203	0.305	0.406	0.508
270		0.091	0.183	0.274	0.365	0.456
280		0.082	0.164	0.245	0.327	0.409
290		0.073	0.146	0.219	0.292	0.364
300		0.064	0.129	0.193	0.258	0.322
310		0.056	0.112	0.169	0.225	0.281
320		0.048	0.097	0.145	0.193	0.241
330		0.041	0.081	0.122	0.163	0.203
340		0.033	0.067	0.100	0.133	0.167
350		0.026	0.053	0.079	0.106	0.132
360		0.020	0.040	0.060	0.080	0.100
370		0.014	0.029	0.043	0.057	0.072
380		0.009	0.019	0.028	0.038	0.047
390		0.005	0.011	0.016	0.022	0.027
400		0.002	0.005	0.007	0.010	0.012
410		0.001	0.001	0.002	0.003	0.003
420(上端)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

温度計ウェルの固有振動数484Hzで調和加振解析を実施。

は、ギャップ (片側) 以上の変位応答を示す。

表5-5 「常陽」熱電対シースの調和加振解析結果(2) (固定・固定)
(シース先端に初期変位を与えた場合)

(単位: mm)

シース先端からの位置 (mm)	ギャップ (両側)	初期変位置 (片振幅)				
		0.1mm	0.2mm	0.3mm	0.4mm	0.5mm
0(先端)	0.4mm	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10		0.006	0.013	0.019	0.026	0.032
20		0.024	0.048	0.072	0.096	0.120
30		0.050	0.099	0.149	0.198	0.248
40		0.081	0.162	0.242	0.323	0.404
50		0.115	0.230	0.345	0.460	0.575
60		0.150	0.299	0.449	0.599	0.748
70		0.183	0.366	0.549	0.731	0.914
80		0.213	0.426	0.638	0.851	1.064
90		0.238	0.476	0.714	0.952	1.190
100		0.258	0.515	0.773	1.031	1.288
110		0.271	0.543	0.814	1.085	1.356
120		0.279	0.557	0.836	1.114	1.393
130		0.280	0.560	0.840	1.120	1.400
140		0.276	0.552	0.828	1.104	1.380
150		0.267	0.535	0.802	1.069	1.336
160		0.255	0.510	0.765	1.020	1.275
170	0.240	0.480	0.719	0.959	1.199	
180	2.8mm	0.223	0.446	0.669	0.892	1.115
190		0.205	0.410	0.616	0.821	1.026
200		0.187	0.375	0.562	0.750	0.937
210		0.170	0.340	0.511	0.681	0.851
220		0.154	0.308	0.462	0.616	0.770
230		0.139	0.278	0.417	0.556	0.694
240		0.125	0.250	0.376	0.501	0.626
250		0.113	0.226	0.338	0.451	0.564
260		0.102	0.203	0.305	0.406	0.508
270		0.091	0.183	0.274	0.365	0.456
280		0.082	0.164	0.245	0.327	0.409
290		0.073	0.146	0.219	0.292	0.364
300		0.064	0.129	0.193	0.258	0.322
310		0.056	0.112	0.169	0.225	0.281
320		0.048	0.097	0.145	0.193	0.241
330		0.041	0.081	0.122	0.163	0.203
340		0.033	0.067	0.100	0.133	0.167
350		0.026	0.053	0.079	0.106	0.132
360		0.020	0.040	0.060	0.080	0.100
370		0.014	0.029	0.043	0.057	0.072
380		0.009	0.019	0.028	0.038	0.047
390		0.005	0.011	0.016	0.022	0.027
400		0.002	0.005	0.007	0.010	0.012
410		0.001	0.001	0.002	0.003	0.003
420(上端)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

温度計ウェルの固有振動数484Hzで調和加振解析を実施。

は、ギャップ (両側) 以上の変位応答を示す。

6. ASMEに基づく流力振動評価 (2次主冷却系温度計ウェルの振動特性を考慮)

6.1 概要

3章「温度計ウェルの簡易流力振動評価」で2次主冷却系以外の温度計ウェルは、ASMEの設計対処法に示されている揚力・抗力方向の渦による振動のロックインを回避できる条件を満足しており、共振することはないことを示した。しかし、2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウェルについては、ASMEの設計対処法の(3-1)式である無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足していないことが判った。

ここでは、4章「温度計ウェルの振動特性」で示した固有値解析結果及び模擬試験体による打振試験結果を用いて、ASMEの設計対処法に示されている揚力・抗力方向の渦による振動のロックイン回避及び抑制の評価を行ったものである。

6.2 揚力・抗力方向の渦による振動について

6.2.1 揚力方向の渦による振動

流れの中に撓み性のある円筒が置かれている場合、円筒後流には、(6-1)式より算出される周波数を持った渦が放出される。

$$\text{渦放出周波数 } f = \frac{St \cdot V}{D_{ca}} \quad (6-1)$$

St : ストローハル数

V : 流速 (m/sec)

D_{ca} : 円筒の外径 (m)

流れの渦放出周波数が円筒の固有振動数 f_n に近い流速では、円筒の固有振動数 f_n に同期(ロックイン)する現象が見られる。この場合、円筒は、揚力方向に振動を起こす。

6.2.2 抗力方向の渦による振動

揚力方向の渦による振動で示した円筒の固有振動数 f_n に同期する領域のほかに、円筒の固有振動数 f_n より低い $f_n/2$ および $f_n/3$ の近辺でも振動の励起(サブ・ハーモニク振動)が起きることが明らかにされている。この場合、流れ方向(抗力方向)に振動が生じる現象、いわゆるインライン振動が見られる。また、その振幅は、円筒の固有振動数 f_n で同期したとき(揚力方向の渦による振動)に比べると、かなり小さいものであることが報告されている。⁽⁶⁾

なお、インライン振動の不安定領域は、以下の領域であることが報告されている。⁽⁶⁾

●第一不安定領域 : 対称渦

$V_r = 1.25 \sim 2.5$ で抗力方向の振動が卓越し $V_r \approx 2$ で最大となる。

(振動は、ほとんど抗力方向のみ)

●第二不安定領域 : 交互渦

$V_r \approx 2.5$ で振動は一度小さくなり、 $2.5 < V_r < 3.8$ でまた大きくなる。

(振動は、揚力・抗力方向の双方に生じるが、抗力方向が支配的)

なお、 V_r は、(6-2)式で算出される値である。

$$\text{無次元流速 } V_r = \frac{V}{f_n \cdot D_{CA}} \quad (6-2)$$

V : 流速 (m/sec)

f_n : 円筒の固有振動数 (1/sec)

D_{CA} : 円筒の外径 (m)

6.3 ASME Code Section III Appendix N-1324 (円筒の設計方法)⁽¹⁾の概要

渦によるロックイン振動を回避及び抑制する方法には、2つの方法がある。1つは、渦放出周波数と構造物の固有振動数を十分に離し、ロックインを回避すること(無次元流速を小さくすること)である。もう1つは、構造物の減衰を大きくし、振幅を制限することでロックインを抑制すること(換算減衰係数を大きくとること)である。

ASME Code Section III Appendix N-1324には、円管や管群の流力振動に対する設計対処法が非強制という位置づけで整備されている。N-1324.1(ロックイン同期の回避)の中では、一様流れの中の単一円管のロックインを回避及び抑制するために、4つの設計対処方法が推奨されており、このうち、いずれか1つを満足するようにとされている。

これらの方法は、6.2項で示したKingほかの実験結果に基づくものであり、実験結果を保守的に見た設計対処方法である。表6-1にこれらロックインを回避及び抑制する条件を示す。しかし、ASMEのとおり(a)~(d)のいずれか1つを満足すれば良いとすると、(d)のみを満足した場合は、条件から見れば揚力方向のロックインは回避されるが、抗力方向のロックインは回避又は抑制されたことにはならない。よって、抗力方向に対しては、(a)~(c)のいずれかを満足する必要がある。なお、この場合は、同時に揚力方向のロックインも回避又は抑制されることになる。

また、N-1324.2(渦による応答)によれば、「もし、運転条件でロックインが回避又は抑制できない場合は、渦誘起応答を計算する」として評価のための簡易評価式が推奨されて

いる。しかし、本評価式は、揚力方向のみが記載されており、抗力方向については記載がない。よって、抗力方向の渦誘起応答を評価する場合は、妥当と考えられる方法、すなわち、実機を模擬した水流動試験等を行い、応答特性を把握する必要がある。

6.4 揚力・抗力方向のロックイン回避及び抑制の判定

表6-2及び表6-3に4章「温度計ウエルの振動特性」で示した温度計ウエルの固有振動数を用いてMK-II条件における1次及び2次主冷却系温度計ウエルの揚力・抗力方向のロックイン回避及び抑制の判定を行った結果を示す。

6.4.1 判定に用いた諸条件

- (a) 原子炉運転中における100%流量条件を用いている。
- (b) レイノルズ数 Re は、 2×10^5 以下の領域であることから、ストローハル数は0.21一定としている。
- (c) 換算減衰係数 C_n は、ASMEで示されている温度計ウエルの振動モード関数を考慮して算出している。
- (d) ウエルの減衰定数 ζ は、「もんじゅ」で得られたデータを参考に0.5~1.0%を用いている。

6.4.2 判定値

- (a) 揚力・抗力方向のロックイン回避の判定 (Small Velocity Rule)
ASME推奨値 無次元流速 $V_r < 1.0$
- (b) 揚力・抗力方向のロックイン抑制の判定 (Large Damping Rule)
ASME推奨値 換算減衰係数 $C_n > 64$
- (c) 揚力方向のロックイン回避及び抗力方向のロックイン抑制の判定
(Small Velocity Rule and Large Damping Rule)
ASME推奨値 無次元流速 $V_r < 3.3$
換算減衰係数 $C_n > 1.2$
- (d) 揚力方向のロックイン回避の判定 (The $\pm 30\%$ Rule)
ASME推奨値 固有振動数 $f_n < 0.7 f$
又は $f_n > 1.3 f$

ASMEに基づく判定によれば、以下のとおりである。

1次主冷却系温度計ウエルは、無次元流速 $V_r < 1.0$ を十分満足するので、抗力及び揚力方向ともロックインを回避することができる。

2次主冷却系温度計ウエルは、揚力方向のロックインは回避できる。これに対して、抗力

方向は、(1)項の無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足しない。しかし、減衰定数約0.6%で換算減衰係数 $C_n > 1.2$ を満足するため、ロックインが抑制される領域の下限界近傍であると考えられる。

上記より、ASMEのN-1324.2（渦による応答）にしたがって評価を行うものとした。

6.5 まとめ

ASMEに基づく判定によれば、「常陽」2次主冷却系温度計ウェルは、揚力方向のロックインは回避できるが、抗力方向のロックインは抑制される下限界近傍にあると考えられる。

ASMEのN-1324.2（渦による応答）によれば、「もし、運転条件でロックインが回避又は抑制できない場合は、渦誘起応答を計算する」として評価のための簡易評価式が推奨されているが、本評価式は、揚力方向のみが記載されており、抗力方向については示されていない。よって、抗力方向については、妥当と考えられる方法、すなわち実機を模擬した水流動試験を行い、応答特性を把握し、疲労損傷評価を行うものとした。

なお、5章「2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数に関する一考察」で考察したように、熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数が約3%一定であるとすれば、ASMEの(c)項の揚力方向のロックイン回避及び抗力方向のロックイン抑制の判定を十分満足していることになる。

表 6 - 1 ロックイン回避及び抑制する条件

回避及び抑制の基準		無次元流速 V_r	換算減衰係数 C_n	備考
(a)	揚力・抗力方向ロックイン回避	$V_r < 1.0$		倍調モードの共振を回避する様に剛性を高めることを目的
(b)	揚力・抗力方向ロックインの抑制		$C_n > 64$	風にさらされるスタック、塔及びマスト等に関するもの
(c)	揚力方向ロックイン回避及び抗力方向ロックイン抑制	$V_r < 3.3$	$C_n > 1.2$	$C_n > 1.2$ は特に抗力方向のロックインを抑制する目的
(d)	揚力方向ロックイン回避	$f_n < 0.7 f$ 又は $f_n > 1.3 f$		

表6-2 1次主冷却系温度計ウェルのロックイン回避及び抑制の判定

項目	計算式	1次主冷却系	
		ホットレグ	コールドレグ
ナトリウム温度 T (°C)		500	370
ナトリウム流量 Q (m³/sec)	運転温度を考慮	0.3631	0.3500
配管内断面積 A (m²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	1.87805E-01	7.33014E-02
縦弾性係数 E (kg/mm²)		1.6215E+04	1.7415E+04
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	1.93	4.77
動粘性係数 ν (m²/sec)		2.94639E-07	3.47179E-07
レイノルズ数 Re	$Re = (V \cdot D_{CA}) / \nu$	6.56E+04	1.38E+05
ストローハル数 St		0.21	0.21
渦放出周波数 f (1/sec)	$f = (St \cdot V) / D_{CA}$	41	100
温度計ウェル固有振動数 fn (1/sec)	FINAS解析値	1,317	1,365
温度計ウェルの細管部外径 D _{CA} (mm)		10	10
無次元流速 Vr	$Vr = V / (fn \cdot D_{CA})$	0.15	0.35
ウェルの減衰定数 $\zeta_{0.5}$		0.005	0.005
ウェルの減衰定数 $\zeta_{1.0}$		0.010	0.010
温度計ウェルの一般化質量 Mn (kg · sec²/mm)	$Mn = \int_0^L mt(x) \phi n^2(x) dx$	3.24412E-06	3.24412E-06
流体の質量密度 ρ (kg · sec²/mm⁴)	$\rho = \gamma / g$	8.49259E-11	8.80996E-11
流れを受けるウェルの長さ Le (mm)		112.10	101.55
$\int_{Le} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx$		5.30362E+03	5.30362E+03
換算減衰係数 C _{n0.5}	$C_{n0.5} = (4\pi \cdot \zeta_{0.5} \cdot Mn) / (\rho \cdot \int_{Le} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx)$	0.45	0.44
換算減衰係数 C _{n1.0}	$C_{n1.0} = (4\pi \cdot \zeta_{1.0} \cdot Mn) / (\rho \cdot \int_{Le} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx)$	0.91	0.87
0.7 f		28	70
1.3 f		53	130

表 6-3 (1/2) 2次主冷却系温度計ウエルのロックイン回避及び抑制の判定(12B配管)

項 目	計算式	2次主冷却系	
		ホットレグ	コールドレグ
ナトリウム温度 T (°C)		470	340
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)	運転温度を考慮	0.3589	0.3461
配管内断面積 A (m ²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	6.96997E-02	6.96997E-02
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.7876E+04	1.8962E+04
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	5.15	4.97
動粘性係数 ν (m ² /sec)		3.04976E-07	3.58357E-07
レイノルズ数 Re	$Re = (V \cdot D_{CA}) / \nu$	1.45E+05	1.19E+05
ストローハル数 St		0.21	0.21
渦放出周波数 f (1/sec)	$f = (St \cdot V) / D_{CA}$	126	121
温度計ウェル固有振動数 fn (1/sec)	FINAS解析値	484	498
温度計ウェルの細管部外径 D _{CA} (mm)		8.6	8.6
無次元流速 Vr	$Vr = V / (fn \cdot D_{CA})$	1.24	1.16
ウェルの減衰定数 $\zeta_{0.5}$		0.005	0.005
ウェルの減衰定数 $\zeta_{1.0}$		0.010	0.010
温度計ウェルの一般化質量 Mn (kg · sec ² /mm)	$Mn = \int_0^L m t(x) \phi n^2(x) dx$	3.28519E-06	3.28519E-06
流体の質量密度 ρ (kg · sec ² /mm ⁴)	$\rho = \gamma / g$	8.56605E-11	8.88281E-11
流れを受けるウェルの長さ Le (mm)		150	150
$\int_{L_0} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx$		2.01056E+03	2.01056E+03
換算減衰係数 C _{n0.5}	$C_{n0.5} = (4\pi \cdot \zeta_{0.5} \cdot Mn) / (\rho \cdot \int_{L_0} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx)$	1.20	1.16
換算減衰係数 C _{n1.0}	$C_{n1.0} = (4\pi \cdot \zeta_{1.0} \cdot Mn) / (\rho \cdot \int_{L_0} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx)$	2.40	2.31
0.7 f		88	85
1.3 f		163	158

表 6-3 (2/2) 2次主冷却系温度計ウエルのロックイン回避及び抑制の判定(10B配管)

項目	計算式	2次主冷却系
		コールドレグ
ナトリウム温度 T (°C)		340
ナトリウム流量 Q (m ³ /sec)	運転温度を考慮	0.1731
配管内断面積 A (m ²)	$A = (\pi \cdot d^2) / 4$	4.86173E-02
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.8962E+04
ナトリウム流速 V (m/sec)	$V = Q / A$	3.56
動粘性係数 ν (m ² /sec)		3.58357E-07
レイノルズ数 Re	$Re = (V \cdot D_{CA}) / \nu$	8.54E+04
ストローハル数 St		0.21
渦放出周波数 f (1/sec)	$f = (St \cdot V) / D_{CA}$	87
温度計ウェル固有振動数 fn(1/sec)	FINAS解析値	512
温度計ウエルの細管部外径 D _{CA} (mm)		8.6
無次元流速 Vr	$Vr = V / (fn \cdot D_{CA})$	0.81
ウエルの減衰定数 $\zeta_{0.5}$		0.005
ウエルの減衰定数 $\zeta_{1.0}$		0.010
温度計ウエルの一般化質量 Mn(kg・sec ² /mm)	$Mn = \int_0^L m t(x) \phi n^2(x) dx$	3.02003E-06
流体の質量密度 ρ (kg・sec ² /mm ⁴)	$\rho = \gamma / g$	8.88281E-11
流れを受けるウエルの長さ Le(mm)		130
$\int_{Le} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx$		1.96651E+03
換算減衰係数 C _{n0.5}	$C_{n0.5} = (4\pi \cdot \zeta_{0.5} \cdot Mn) / (\rho \cdot \int_{Le} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx)$	1.09
換算減衰係数 C _{n1.0}	$C_{n1.0} = (4\pi \cdot \zeta_{1.0} \cdot Mn) / (\rho \cdot \int_{Le} D_{CA}^2(x) \phi n^2(x) dx)$	2.17
0.7 f		61
1.3 f		113

PNC TN9410 97-062

7. 2次主冷却系温度計ウエルの水流動試験

7.1 概要

ここでは、6章「温度計ウエルの振動特性を考慮したASMEに基づく評価」の結果を受けて、渦誘起応答の評価を行うために実機を模擬した試験体による水流動試験を行い、温度計ウエルの疲労損傷評価を行うための流力振動特性の把握を行ったものである。

7.2 水流動試験用試験体

水流動試験用試験体は、長さ1mの10B配管に実機同様に配管上部から配管内に温度計ウエルを突き出し、直接溶接支持された模擬試験体を用いている。図7-1に水流動試験用試験体を示す。なお、模擬試験体は、配管内ウエル長さ150mm（タイプA）、配管内ウエル長さ130mm（タイプB）（以上、実機MK-II用）、配管内ウエル長さ75mm（タイプC（参考））の3種類である。また、助走区間用配管としては、長さ2mのものを用いている。

7.3 水流動試験装置

図7-2に水流動試験の試験ループを示す。3種類の温度計ウエルを流れ方向に1mピッチで配置し、同時に計測を行っている。なお、 $10D_{CA}$ （ D_{CA} は温度計ウエルの外径）以上間隔をとれば、上流のウエルによる渦の影響はなくなると言われているが、今回は、ウエル細管部で $10D_{CA}$ 以上、配管付け根部で $50D_{CA}$ となる1mピッチとしている。

試験は、試験体の前に整流板及びほぼ配管系の10倍の助走区間を設けることにより、充分発達した流れを模擬している。なお、試験水の温度は常温であり、レイノルズ数は実機定格出力運転時の100%流量運転状態とは一致していないが、その妥当性及び保守性については、10章「流力振動評価の保守性及び妥当性について」にまとめている。

7.4 水流動試験における温度計ウエル振動の計測方法

図7-3に温度計ウエル振動の計測概念図を示す。計測は、温度計ウエル先端の振動挙動を把握するため、ミニチュア加速度計を温度計ウエル内部先端に挿入している。また、配管の剛性を含む上部の振動挙動を把握するため、温度計ウエル上部にも加速度計を取り付けている。

水流動試験中の流速は、超音波流速計で配管内の平均流速を計測している。

7.5 水流動試験結果

図7-4にタイプA（ナトリウム中ウエル長さ150mm（12B配管用））の水流動試験による平均流速と応答加速度（PEAK及びRMS）との関係を示す。また、図7-5に水流動試験時

の温度計ウェル先端の時刻歴波形（軸方向：抗力方向、軸直角方向：揚力方向）を示す。

時刻歴波形よれば、以下のことが言える。

- (1) 流速5.25m/sec ($V_r = 1.14$) 以下では、いわゆる乱流流れ場における弾性体の振動（乱流振動）を示しているものと考えられる。
- (2) 流速6.5m/sec ($V_r = 1.4$) からは、抗力方向の振動が支配的となる、いわゆるインライン振動が顕著に出てきたものと考えらる。

本試験結果は、常温での試験結果であることから、温度計ウェルの固有振動数は原子炉運転中の状態より高めであり、温度による縦弾性係数の補正（固有振動数の補正）を行う必要がある。したがって、これらの結果をナトリウム温度470℃及び250℃での応力評価及び疲労損傷評価に使用できるように、無次元流速と無次元変位振幅との関係に整理した。

図7-6に2次主冷却系温度計ウェルの無次元流速と無次元変位振幅（PEAK及びRMS）との関係を示す。水流動試験の結果は、温度計ウェルの先端加速度を測定する観点から、熱電対を取り付けず温度計ウェル内部にミニチュア加速度計を内挿したもので測定を行っている。したがって、無次元流速及び無次元変位振幅には、(7-1)及び(7-2)式を用いて変換している。

この関係から、温度計ウェル先端の変位振幅は、無次元流速 $V_r =$ 約1.2~1.3までは揚力方向及び抗力方向とも上昇し、 $V_r =$ 約1.3以上では、揚力方向の変位振幅が低下し、抗力方向のみの変位振幅が上昇する、いわゆるインライン振動の傾向が見られる。

$$\text{無次元流速 } V_r = \frac{V}{f_n \cdot D_{CA}} \quad (7-1)$$

V : 各水流動試験時の流速 (m/sec)

f_n : 温度計ウェル（加速度計内挿）の水中における固有振動数
(1/sec) =537.5 Hz

D_{CA} : 温度計ウェルの外径 (m) =0.0086m

$$\text{無次元変位振幅 } y^*/D_{CA} = \frac{a \cdot 9,800}{D_{CA} \cdot (2\pi \cdot f_n)^2} \quad (7-2)$$

y^* : 温度計ウェル先端の変位振幅 (mm)

a : 各水流動試験の温度計ウェルの先端応答加速度 (G)

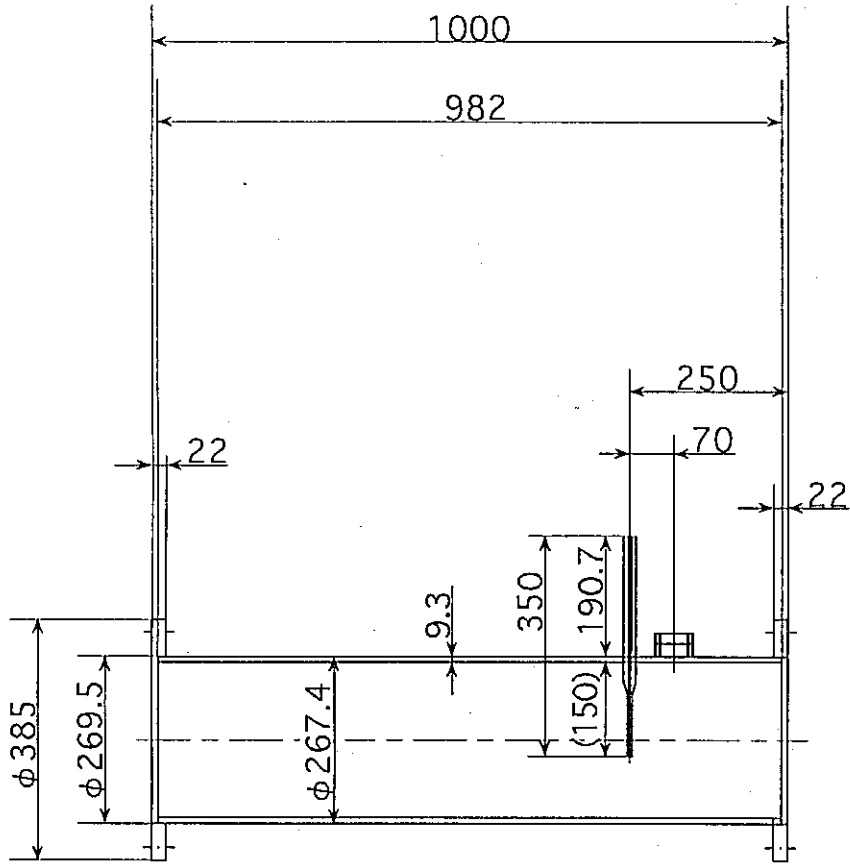
f_n : 温度計ウェル（加速度計内挿）の水中における固有振動数
(1/sec) =537.5 Hz

D_{CA} : 温度計ウェルの外径 (m) =0.0086m

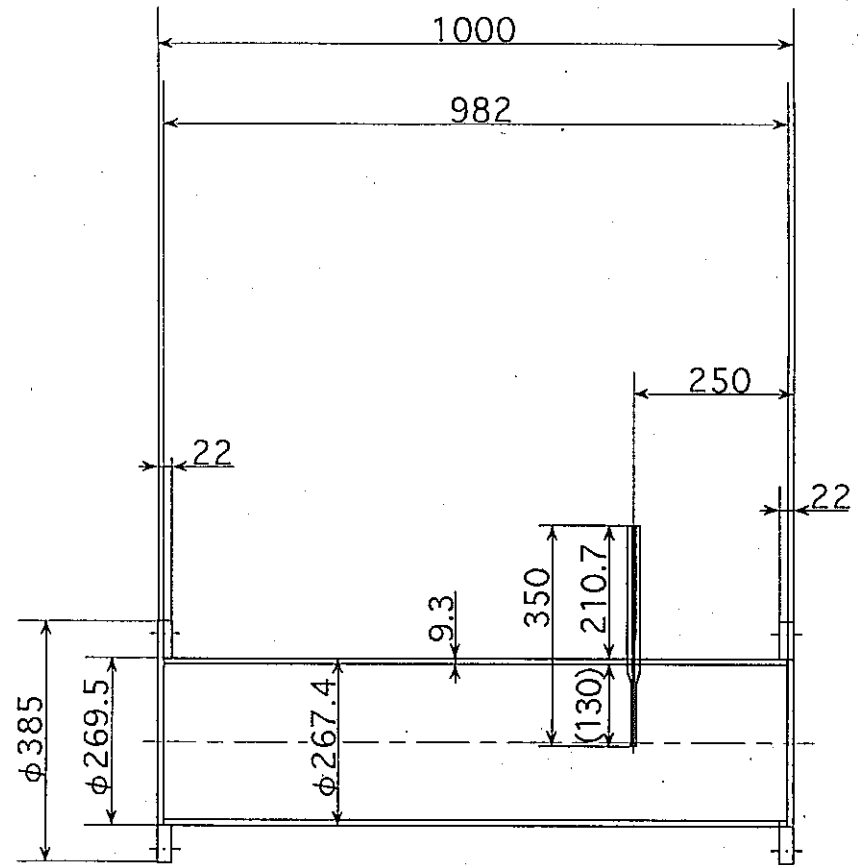
温度計ウエルの無次元流速は、原子炉運転中470℃において流速約5.15m/secで無次元流速1.24 (484Hz) となり、原子炉停止中250℃において流速約4.85m/sec無次元流速1.11 (507Hz) となる。これらの無次元流速に対する無次元変位振幅 (PEAK) は、水流動試験結果から、無次元流速1.25で約0.015 (約0.13mm (片振幅))、無次元流速1.1で約0.001 (約0.01mm (片振幅)) となる。

7.6 まとめ

温度計ウエルの流力振動については、保守的な結果を与える減衰定数が低い温度計ウエル (加速度計を内挿) の水流動試験によって、「常陽」2次主冷却系温度計ウエルの無次元流速と無次元変位振幅との関係を明確にした。したがって、本関係を用いて、温度計ウエルの疲労損傷評価を行うものとした。



タイプA



タイプB

図7-1 2次主冷却系温度計ウェルの水流動試験用試験体

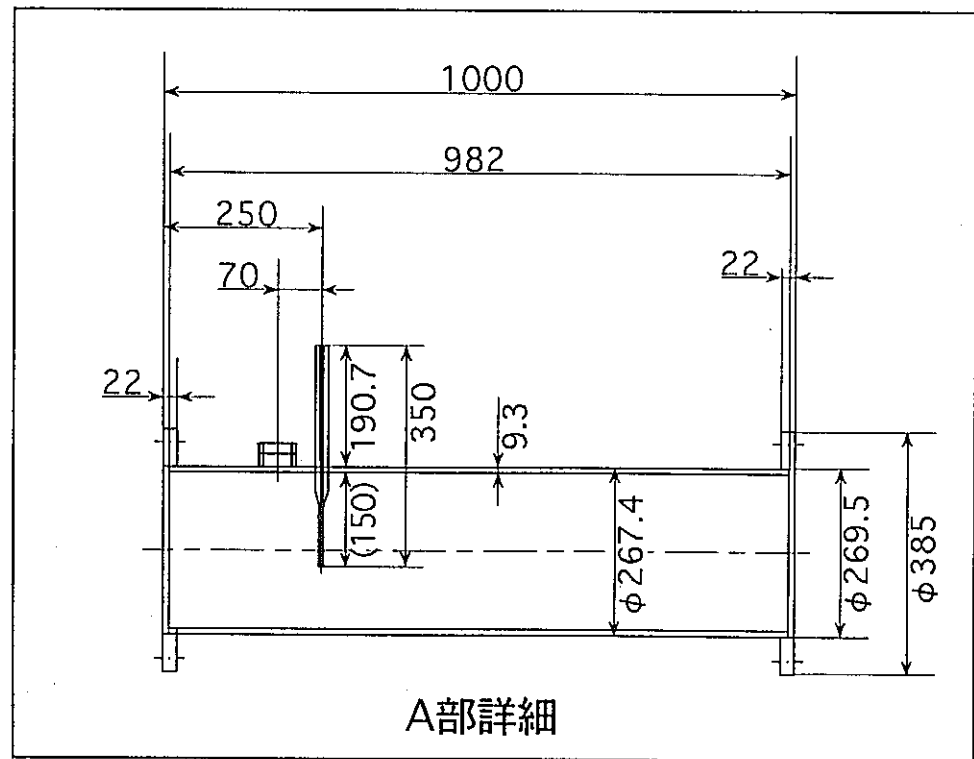
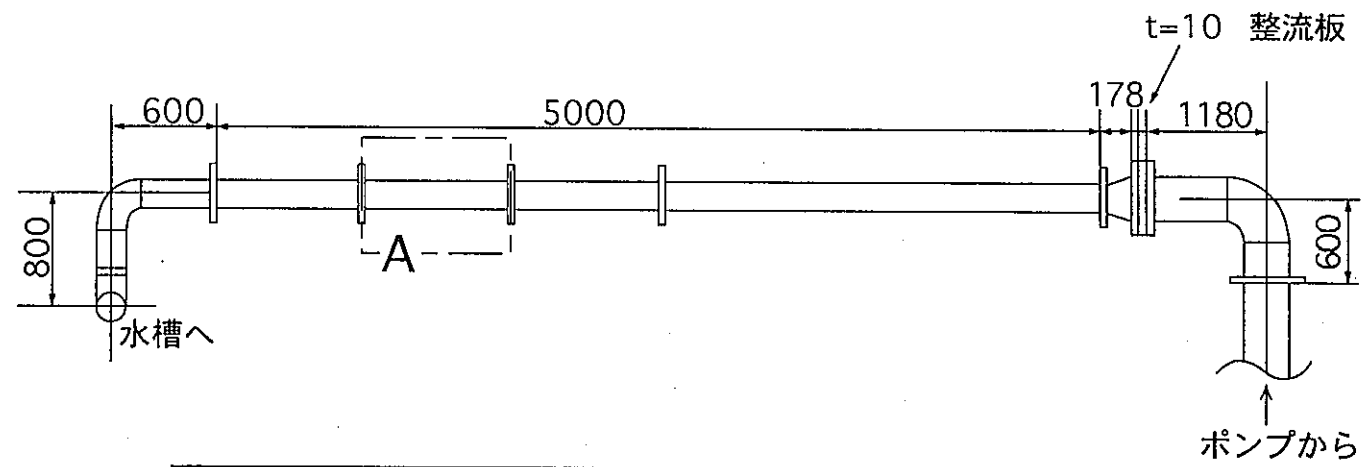


図7-2 水流动試験用試験ループの構成

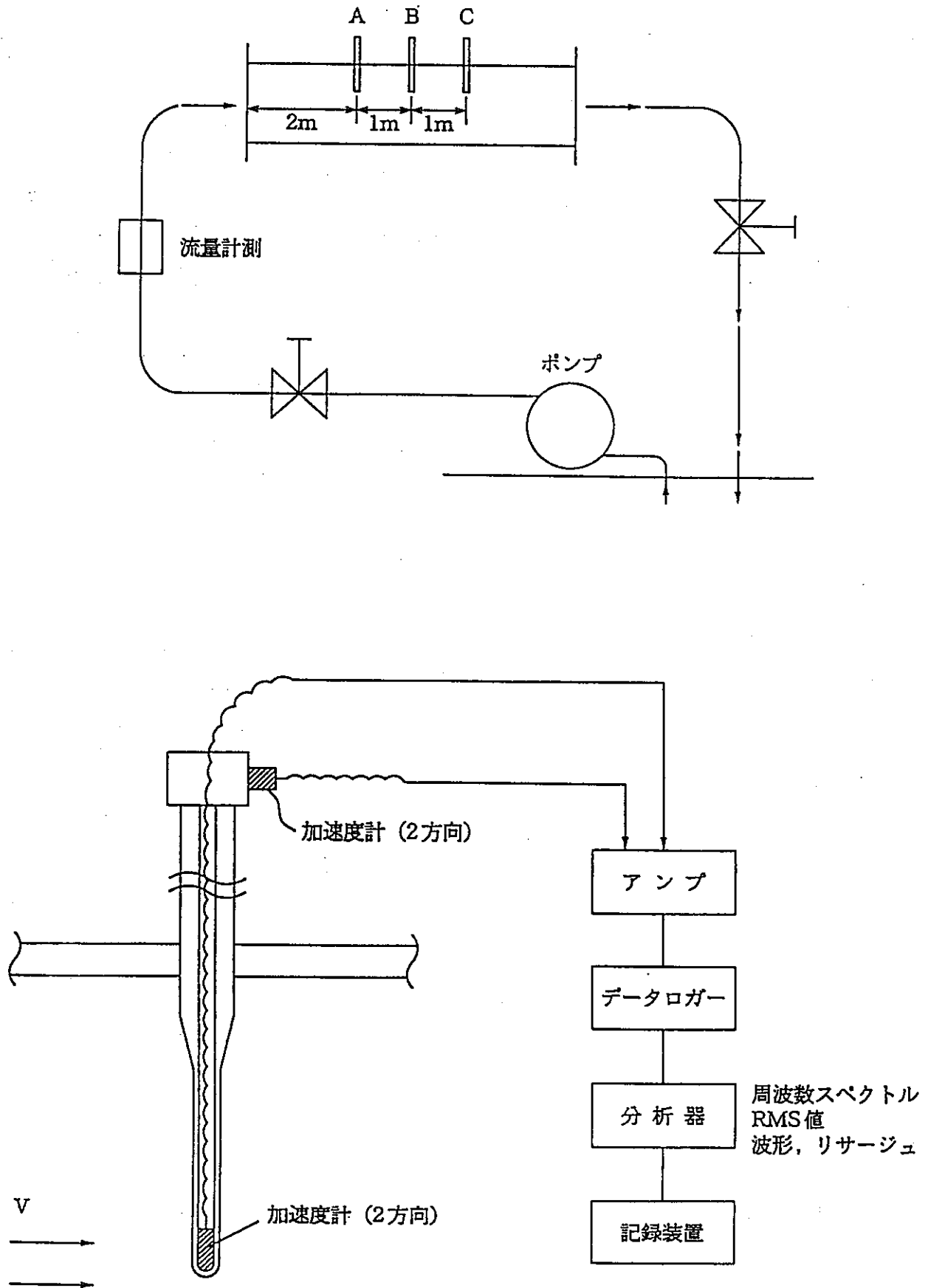


図 7-3 水流動試験時の 2 次主冷却系温度計ウェル振動計測概念

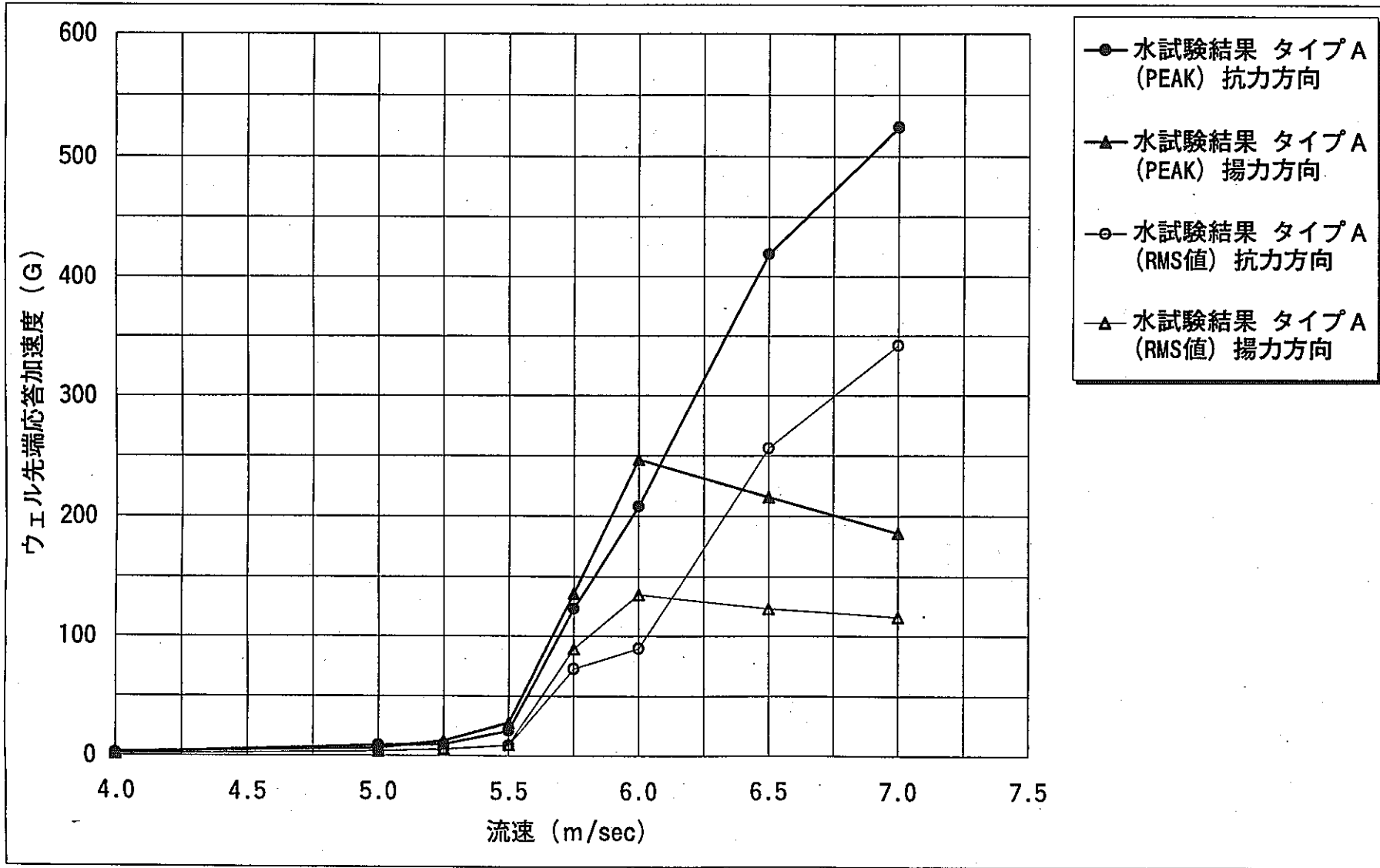
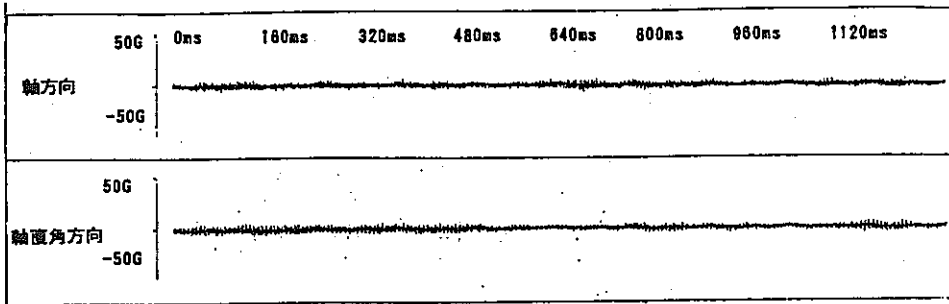
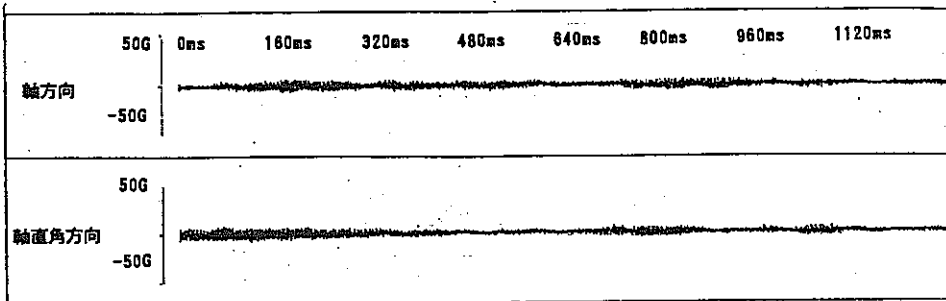


図 7-4 2次主冷却系温度計ウェルの配管内平均流速と温度計ウェル先端応答加速度との関係



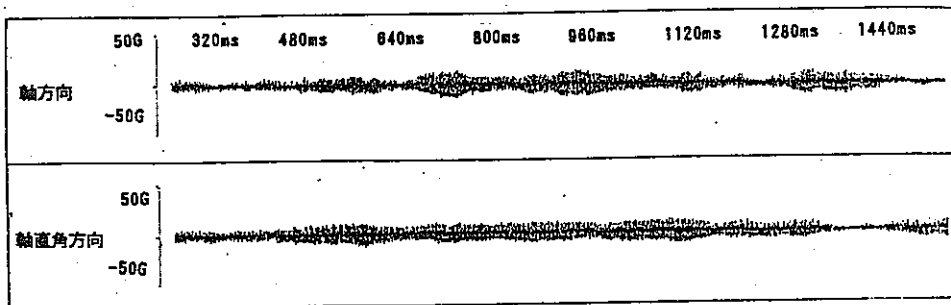
水試験流速 = 4.0m/sec

$$V_r = 0.865$$



水試験流速 = 4.5m/sec

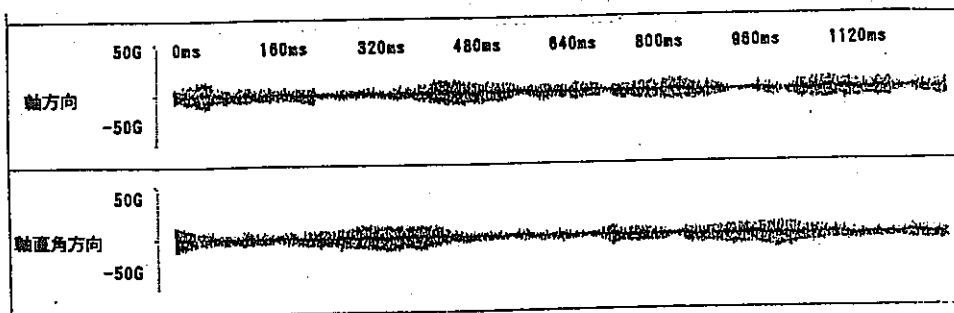
$$V_r = 0.973$$



水試験流速 = 5.0m/sec

$$V_r = 1.082$$

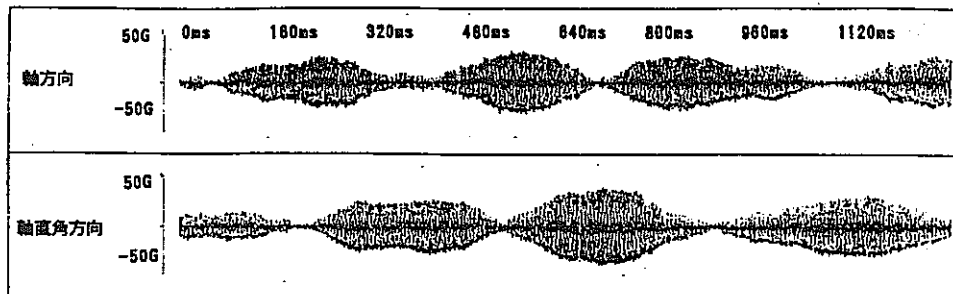
(原子炉停止中250°Cの
流速4.85m/secに相当)



水試験流速 = 5.25m/sec

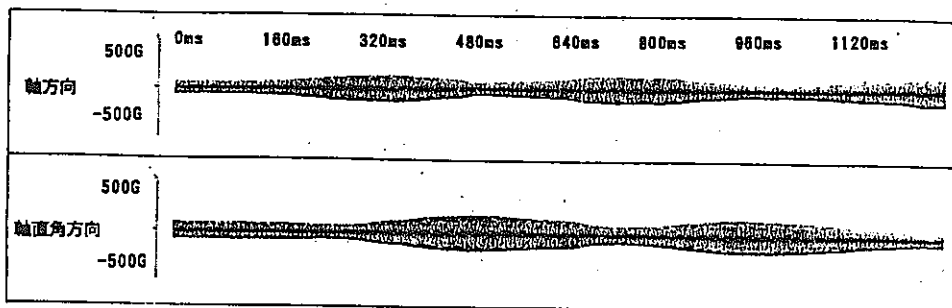
$$V_r = 1.136$$

図7-5(1/2) 水流動試験時の2次主冷却系温度計ウェル先端応答加速度の時刻歴波形
(軸方向：抗力方向、軸直角方向：揚力方向)



水試験流速 = 5.5m/sec

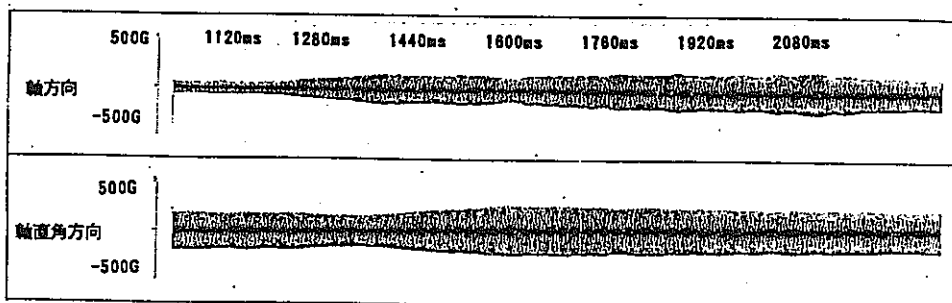
$$V_r = 1.190$$



水試験流速 = 5.75m/sec

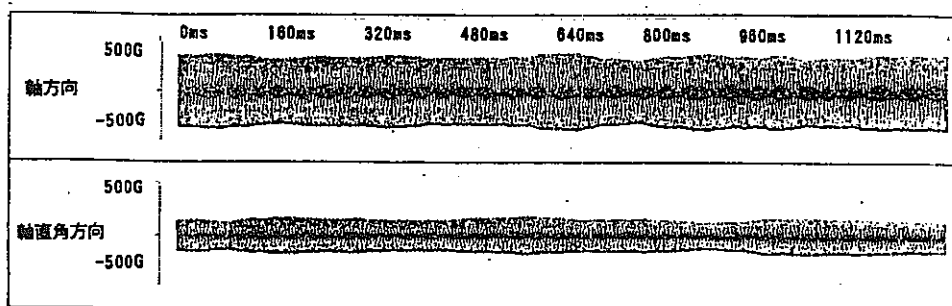
$$V_r = 1.244$$

(原子炉運転中470°Cの
流速5.15m/secに相当)



水試験流速 = 6.0m/sec

$$V_r = 1.298$$



水試験流速 = 6.5m/sec

$$V_r = 1.406$$

図 7-5 (2/2) 水流動試験時の2次主冷却系温度計ウェル先端応答加速度の時刻歴波形
(軸方向：抗力方向、軸直角方向：揚力方向)

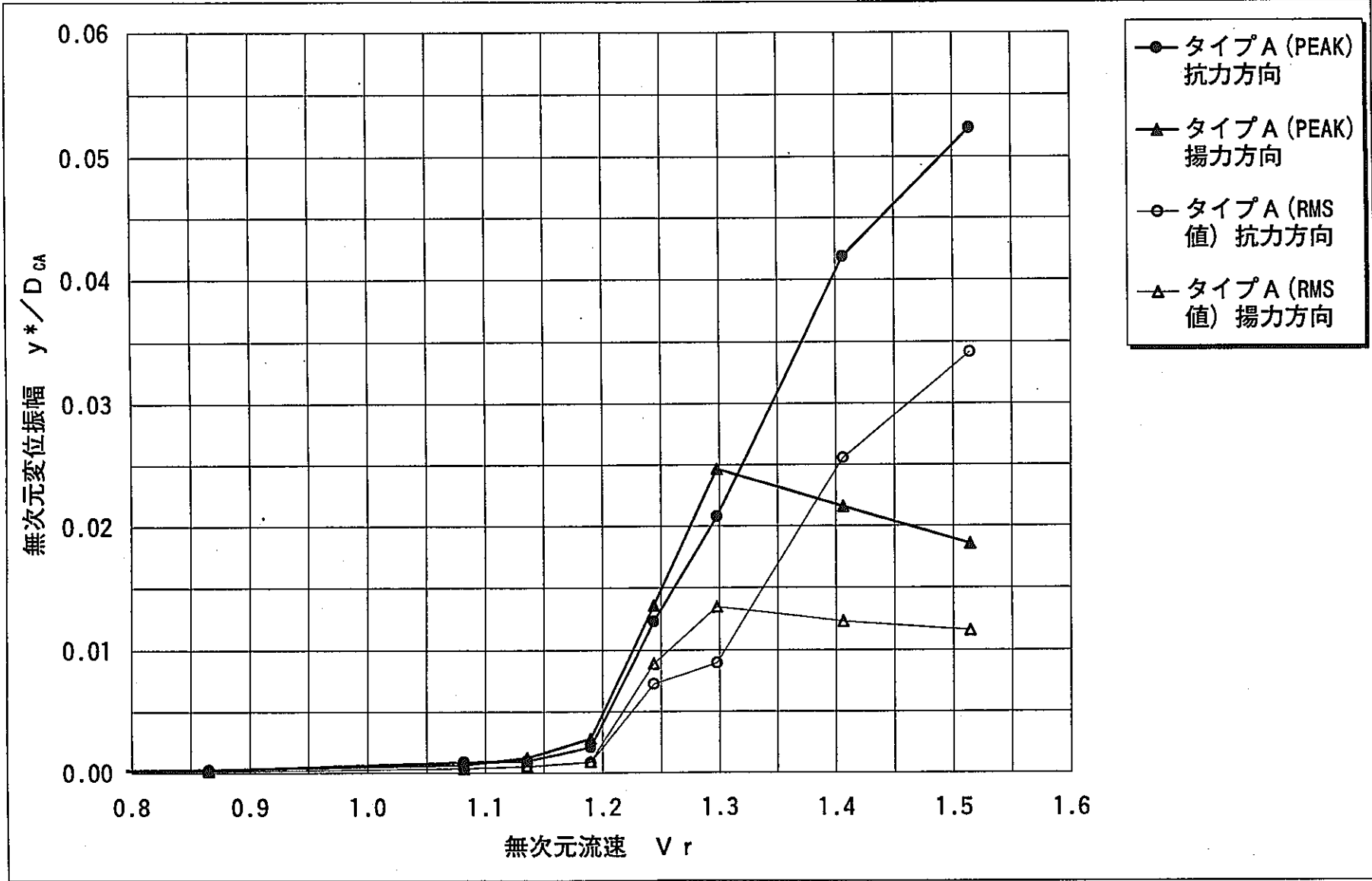


図 7-6 2次主冷却系温度計ウェルの無次元流速と温度計ウェル先端無次元変位振幅との関係

8. 2次主冷却系温度計ウェルの応力集中係数

8.1 概要

2次主冷却系温度計ウェルの細管付け根部は、長さ20mmの間で20mmφから8.6mmφまでテーパ上に細くなっている。また、8.6mmφになる凹部は30R（曲率半径）の仕上げを行い、応力が集中しない構造となっている。よって、応力集中係数はかなり小さいものと考えられるが、応力及び疲労損傷評価に反映させるために、本形状不連続部の応力集中係数を明らかにしたものである。

8.2 文献から算出される応力集中係数

温度計ウェルのテーパ上に細くなっている凹部（30R部）の応力集中係数は、PETERSONの文献⁽⁷⁾の切り欠き棒の r/d より算出した。（ r ：曲率半径、 d ：細管部外径）

$$r/d = 3.5 \quad \text{、} \quad \text{応力集中係数} = 1.04$$

8.3 3次元ソリッドモデル解析から算出される応力集中係数

図8-1～図8-2に温度計ウェル部の3次元ソリッドモデルを示す。

応力集中係数の算出は、温度計ウェルのテーパ上に細くなっている凹部（30R部）をモデル化した3次元ソリッドモデル（配管部もモデル化）の軸方向応力と固有値解析に用いた梁モデル（配管部の剛性をバイラードで評価）の軸方向応力との比より求める。

図8-1～図8-2に3次元ソリッドモデルによる解析結果（変位図）を示す。また、表8-1に3次元ソリッドモデル及び梁モデルの細管付け根部発生応力を示す。

応力集中係数は、それぞれのモデルの温度計ウェル先端部に強制変位0.5mm（弾性範囲で応力がある程度発生し、計算誤差とならない変位置を設定している）を与え、その結果得られた細管付け根部付近の応力を比較検討し、算出している。

3次元ソリッドモデル及び梁モデルによる解析の結果、応力集中係数は軸方向と軸直角方向で配管溶接部の局部剛性が異なる影響を受けて多少発生応力が異なるものの、その差は僅かで応力集中係数は1.01～1.03となり、文献で求めた値1.04より小さくなる。

8.4 まとめ

3次元ソリッドモデル及び梁モデルによる解析の結果、応力集中係数は1.01～1.03であった。これに対して、温度計ウェルの形状とは異なるものの、文献の切り欠き棒より求めた応力集中係数は、1.04であった。よって、文献で求めた値は、保守的であるが温度計ウェルの形状を詳細にモデル化した解析結果の値とはほぼ一致している。なお、応力算定に当たって

は、文献で求めた値である1.04を用い、これに基づき高サイクル疲労損傷評価を行うものとした。

表 8 - 1 3次元ソリッドモデルと梁モデルの細管付け根部応力

(単位 : kg/mm²)

	3次元ソリッドモデル	梁モデル	応力集中係数
軸方向モデル	9.7507	9.5151	1.03
軸直角方向モデル	9.5675		1.01

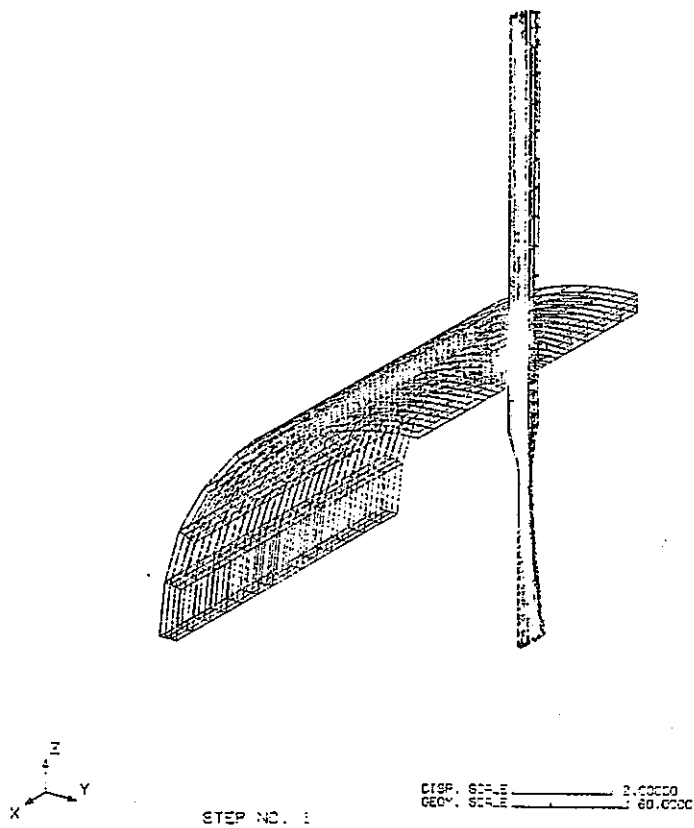
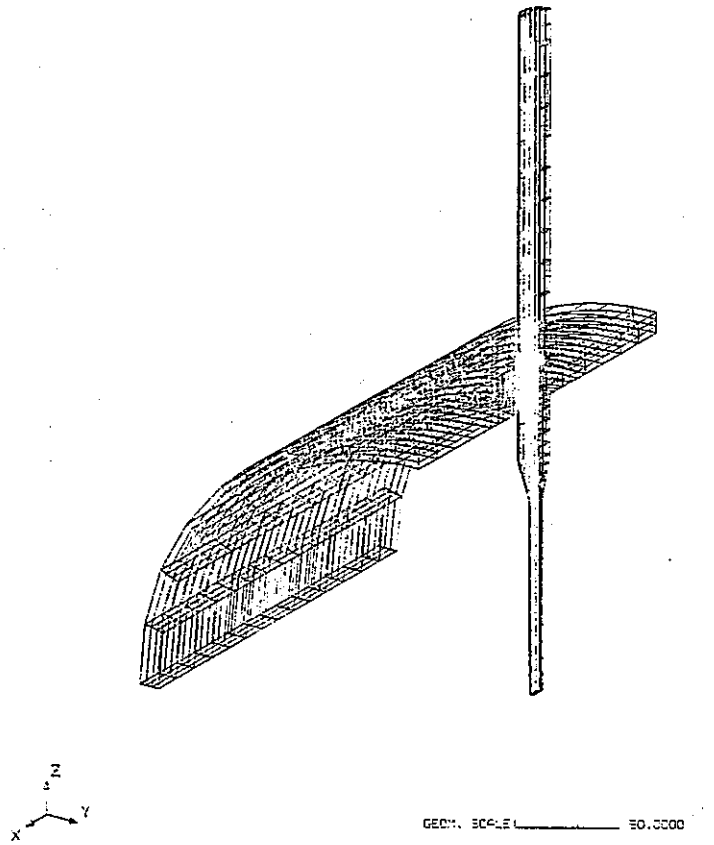


図 8 - 1 2次主冷却系温度計ウェルの3次元ソリッドモデルと解析結果
(軸方向モデルと解析変位図)

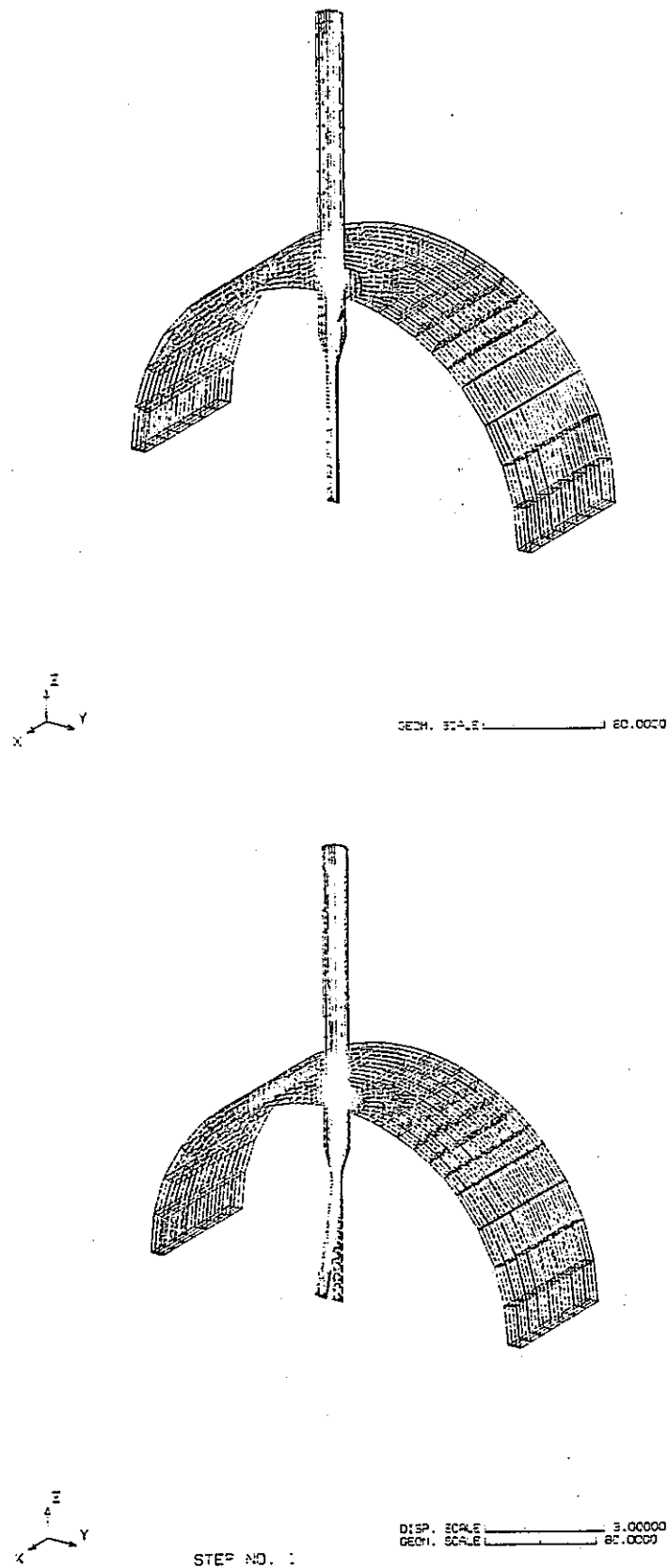


図 8 - 2 2 次主冷却系温度計ウェルの 3 次元ソリッドモデルと解析結果
(軸直角方向モデルと解析変位図)

9. 2次主冷却系温度計ウエルの疲労損傷評価

9.1 概要

ここでは、7.章「2次主冷却系温度計ウエルの水流動試験」で得られた無次元流速と無次元変位振幅との関係から求めた変位振幅及び8.章「2次主冷却系温度計ウエルの応力集中係数」で算出した結果を用いて、「常陽」2次主冷却系温度計ウエルの健全性を確認するために、応力評価及び引き続いて疲労損傷評価を行ったものである。

9.2 水流動試験結果による温度計ウエルの発生応力及び疲労損傷評価

表9-1に2次主冷却系温度計ウエル細管付け根部応力及び疲労損傷評価結果を示す。応力算出にあたっては、固有値解析で用いた梁モデルによる調和加振解析を行った結果を用いている。なお、調和加振解析は、温度計ウエルに固有振動数と同一のsin波の等分布荷重をパラメータとして与えるものであり、その結果から温度計ウエル先端変位量 y^* ($= a \cdot 9,800 / (2\pi \cdot f_n)^2$) と応答加速度 a 、発生応力 σ との関係を把握している。図9-1に調和加振解析の概念を示す。図9-2に調和加振時のウエル先端変位量と加速度との関係を示す。図9-3に調和加振時のウエル先端変位量と細管付根部の発生応力との関係を示す。

原子炉運転中(470℃)については、水流動試験結果から得られた無次元変位振幅(0.015)における変位振幅及びピーク応力は、表9-1より、最大変位振幅約0.13mm(片振幅)、ピーク応力2.9kg/mm²(片振幅、応力集中係数1.04を考慮)となる。また、原子炉停止中(250℃)についても同様に、水流動試験結果から得られた無次元変位振幅(0.001)における変位振幅及びピーク応力は、表9-1より、最大変位振幅約0.01mm(片振幅)、ピーク応力約0.2kg/mm²(片振幅、応力集中係数1.04を考慮)となる。

上記より、表9-1に示すとおり原子炉運転中及び原子炉停止中とも発生するピーク応力は、いずれも設計疲労限 σ_F ($=5.3\text{kg/mm}^2$ (運転中)、 6.9kg/mm^2 (停止中))以下であり、温度計ウエルが流力振動によって損傷することがないことを確認した。

なお、設計疲労限 σ_F は、保守的に定められた高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針(BDS)より求めた疲労限に1/1.2倍した値を用いている。また、BDSの疲労限は、BDSに示されている高サイクル疲労評価に用いられる許容ひずみ範囲、通産省告示501号の設計疲れ線図及びASMEに示されている高サイクル疲労評価に用いられる許容ひずみ範囲を比較検討した結果、最も保守的な設定がされているものである。

表9-2にBDSより求めた材料の疲労限を示す。なお、この値は、BDSのクリープ疲

労損傷評価との組み合わせのために疲労損傷計算をする必要がなく、疲労損傷を0と評価できるようにしたものである。

9.3 まとめ

表9-1に示すとおり、保守的な温度計ウェル単体の変位振幅でも、変位振幅は原子炉運転中で約0.13mm、原子炉停止中にあたっては約0.01mmと極めて小さいものであった。なお、この時のピーク応力は、原子炉運転中で約2.9kg/mm²、原子炉停止中で約0.2kg/mm²で、いずれも設計疲労限 σ_f 以下であった。

上記より、流力振動によって発生する応力は、設計疲労限以下であることから、MK-IIにおける今後の原子炉施設運転を考慮したとしても、「常陽」2次主冷却系温度計ウェルが渦による振動によって損傷することはなく、その構造健全性に問題ないことを確認した。

表 9-1 2次主冷却系温度計ウェル細管付け根部応力及び疲労損傷評価 (PEAK値による)

項 目	計算式	2次主冷却系	
		炉運転中(470℃)	炉停止中(250℃)
100%流量運転時の流量 Q (m ³ /sec)		0.3589	0.3378
100%流量運転時の流速 V (m/sec)		5.15	4.85
ウェル先端の応答加速度 a (G)	水流動試験結果(PEAK値)	150	10
ウェル先端の無次元変位振幅 y [*] /D _{CA} (片振幅)	水流動試験結果(PEAK値)	0.015	0.001
ウェル先端の最大変位振幅 y [*] (mm) (片振幅)	y [*] =無次元変位振幅・D _{CA}	0.13	0.01
縦弾性係数 E (kg/mm ²)		1.7876E+04	1.9764E+04
断面2次モーメント I (mm ⁴)	$I = \pi (D_{CA}^4 - d_{CA}^4) / 64$	260.27	260.27
細管部外径 D _{CA} (mm)		8.60	8.60
細管部長さ L (mm)		100	100
断面係数 Z (mm ³)	$Z = \pi (D_{CA}^4 - d_{CA}^4) / (32 D_{CA})$	60.53	60.53
発生応力 σ (kg/mm ²) (片振幅)	調和加振解析結果より	2.79	0.21
ピーク応力 σ _p (kg/mm ²) (片振幅)	σ _p =σ・1.04	2.90	0.21
現在までの100%流量運転時間 T1 (sec)	実績運転時間	1.8443E+08	3.1639E+08
MK-2 予定を含めた100%流量運転時間 T2 (sec)	予定を含めた運転時間	2.1554E+08	3.7860E+08
BDSによる疲労限 (kg/mm ²) (片振幅)		6.4	8.3
設計疲労限 σ _F (kg/mm ²) (片振幅)	σ _F =BDSによる疲労限/1.2	5.3	6.9
疲労損傷評価結果		疲労限以下で疲労損傷なし	

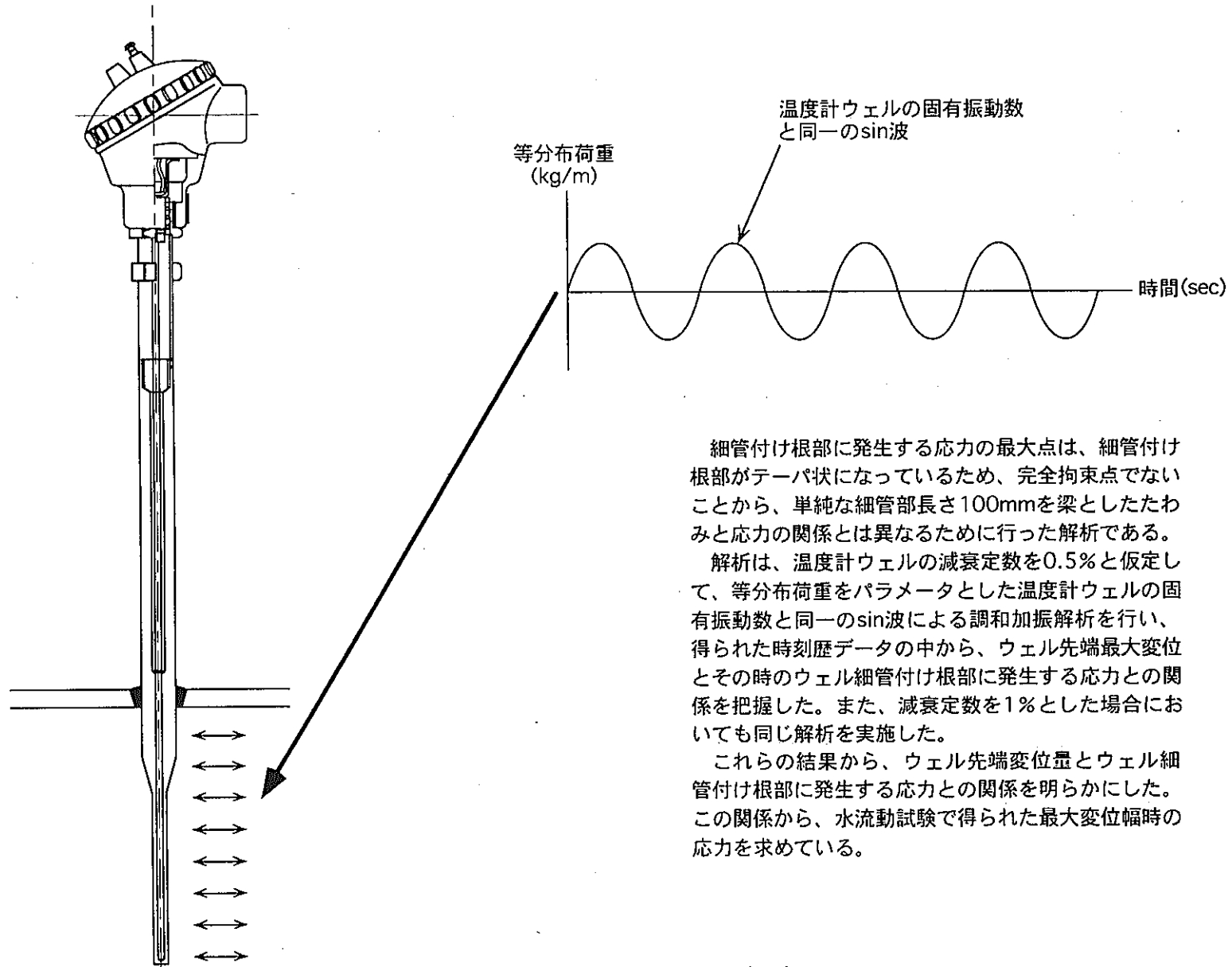


図9-1 調和加振解析の概念図
(ナトリウム中ウェルの連続的振動を想定)

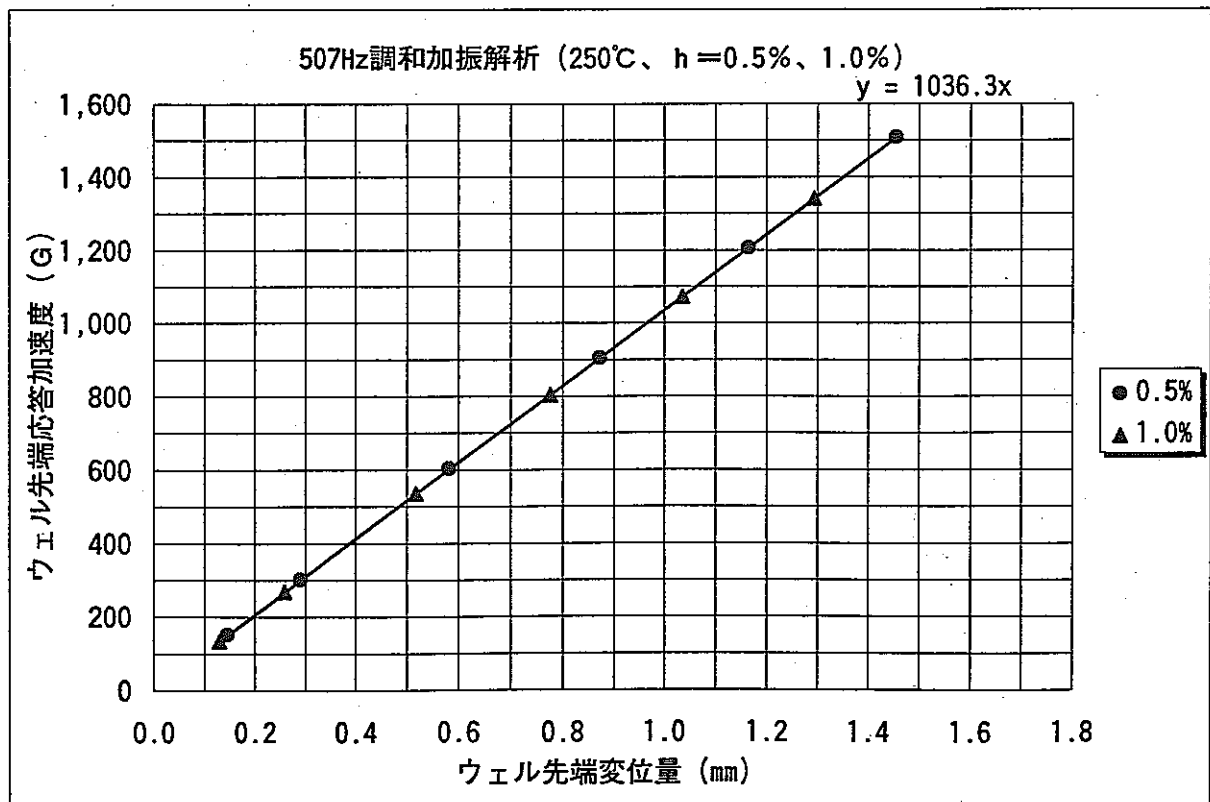
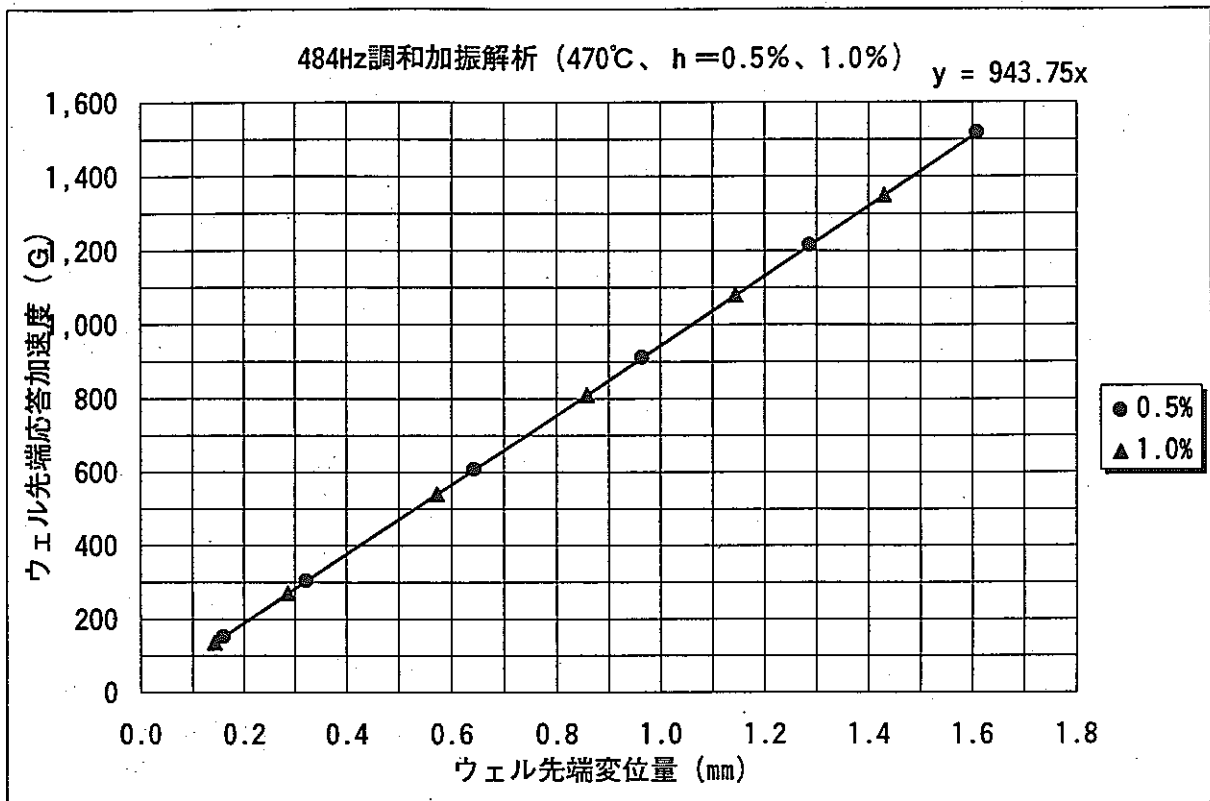


図9-2 梁モデルを用いた調和加振解析結果
(ウェル先端変位置量とウェル先端応答加速度との関係)

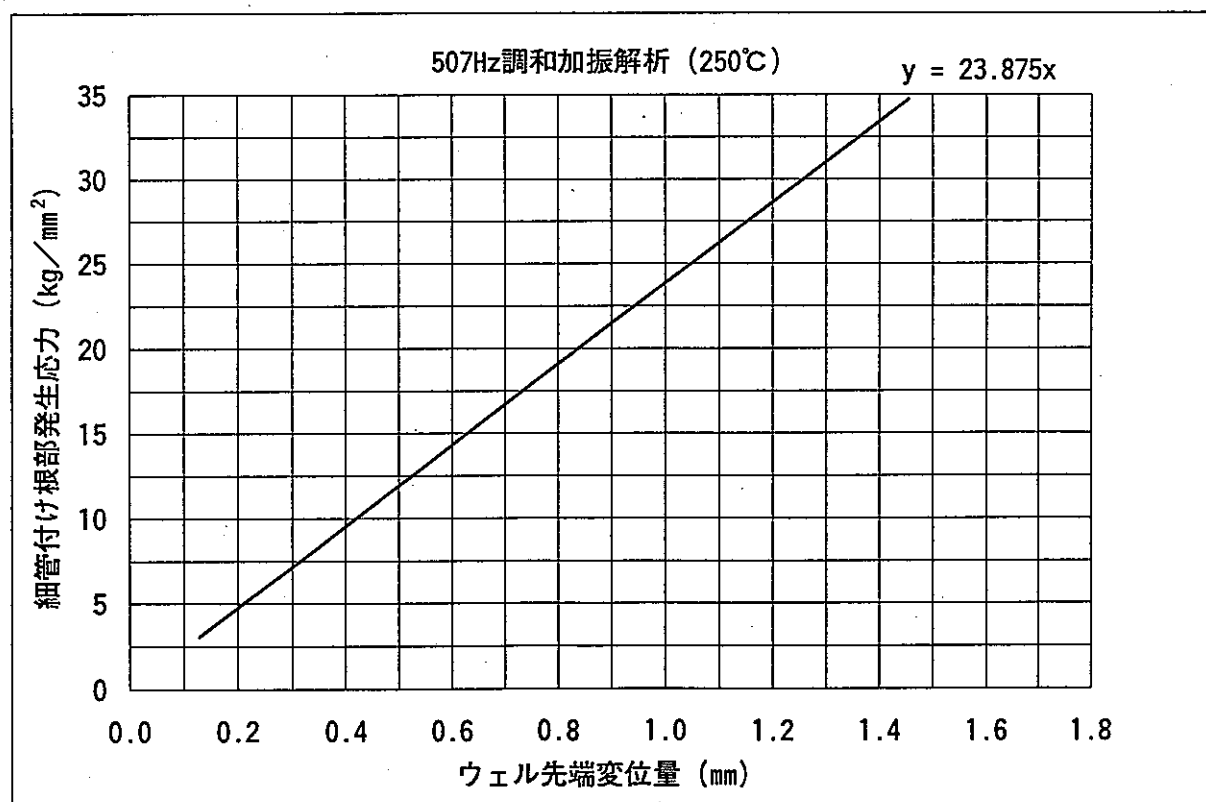
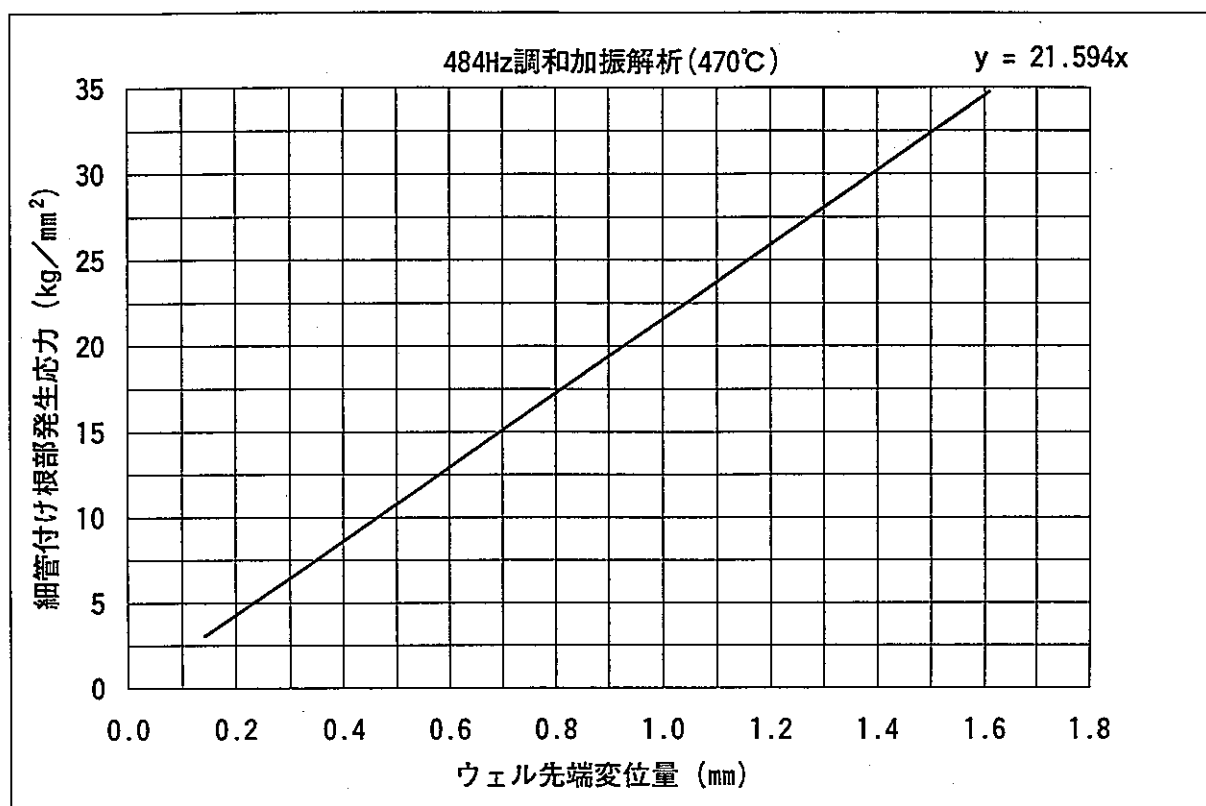


図9-3 梁モデルを用いた調和加振解析結果
(ウェル先端変位量と細管付け根部発生応力との関係)

表9-2 材料の疲労限 (BDSより)

(単位: kg/mm²)

温度(°C)	SUS304及びSUS316鋼	21/4Cr-1Mo鋼
20	11.6	8.8
50	11.5	8.7
75	11.5	8.7
100	11.3	8.6
125	11.2	8.5
150	11.1	8.5
175	11.1	8.5
200	10.9	8.4
225	10.9	8.3
250	10.8	8.3
275	10.6	8.2
300	10.5	8.1
325	10.4	8.0
350	10.3	7.9
375	10.2	7.8
400	10.1	7.7
425	9.9	7.3
450	8.0	6.8
475	7.7	6.3
500	7.5	5.9
525	7.3	5.4
550	7.0	5.0
575	6.8	
600	6.6	
625	6.3	
650	6.1	

10. 流力振動評価の保守性及び妥当性について

10.1 概要

「もんじゅ」では、2次主冷却系温度計ウェルがなぜ、いつ、どのような履歴を経て破損に至ったか、その原因を究明するために様々な試験、検討が行われている。また、1次主冷却系温度計ウェルについても、その構造健全性を確認するために、様々な試験、検討が行われている。一方、「常陽」では、2次主冷却系温度計ウェル（12B配管用）がASME Code Section III Appendix N-1324.1（ロックイン同期の回避）の無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足せず、換算減衰係数 $C_n > 1.2$ を減衰定数約0.6%で満足するため、抗力方向のロックインが抑制される下限界近傍であると考えられることから、常温水と実機を模擬した試験体を用いて水流動試験を行い、その構造健全性を確認している。

「もんじゅ」2次主冷却系温度計ウェルは、既に破損したウェルの原因究明を行うものであることから、なぜ、いつ、どのような履歴を経て破損に至ったかを詳細に究明する必要があるため、そのためには、様々な試験、検討を行う必要があったとともに、その試験の実機条件との一致性が議論された。また、「もんじゅ」1次主冷却系温度計ウェルについては、レイノルズ数が 5.2×10^5 と臨界レイノルズ数領域（ 2×10^5 以上）に入っており、流れの様子の変化が著しく、渦放出特性が不安定な領域であるため、その試験の妥当性が議論された。

これに対して、「常陽」では、実機条件が臨界レイノルズ数以下で、流れの様子の変化が連続的で著しくなく、渦放出特性が一定な領域である。また、流力振動が生じていたとすると、温度計ウェルの固有振動数（484Hz：原子炉定格出力運転時、507Hz：原子炉停止時100%流量運転時）と運転時間（原子炉定格出力運転時間：約51,230時間（2次主冷却系100%流量運転時間：約142,000時間））とから、これまでに原子炉定格出力運転時で約 9×10^{10} 回、原子炉停止時100%流量運転時で約 2.5×10^{11} 回の繰り返し振動が生じていることになるが、温度計ウェルは健全であり、発生応力が疲労限以下であることを実績として示していると考えられる。また、「常陽」では、温度計ウェルの構造健全性を評価するため、その評価が全体として保守性を有していることを確認できればよいと考えている。

しかし、「もんじゅ」における水流動試験等の議論を踏まえると、「常陽」においても、流力振動評価の妥当性及び保守性を整理しておく必要があることから、本章では4章～9章に記述した評価結果の妥当性及び保守性をまとめたものである。

10.2 温度計ウェルの振動特性の妥当性及び保守性について

温度計ウェルの振動特性では、固有値解析及び模擬試験体の打振試験で得られた温度計ウェルの固有振動数及び振動特性が、実機を模擬したもので、かつ、保守性を有したものであるかについて検討したものである。

10.2.1 温度計ウェルの配管溶接部の局部剛性について

(1) 概要

流力振動評価では、温度計ウェルの固有振動数が重要なファクターの一つとなり、この温度計ウェルの固有振動数は、拘束点となる配管溶接部の局部剛性によって影響される。「常陽」の固有値解析では、配管溶接部の局部剛性に、バイラード (Bijlaard) の方法⁽⁸⁾によって求めたバネ定数を用いている。よって、局部剛性は、実際より低めになっていると考えられるため、その保守性を検討したものである。なお、バイラードの方法は、大径 (シェル) のものに小径 (アタッチメント) のものが接続される部分の外径、接続面積等の関係からシェルパラメータとアタッチメントパラメータを算出して、剛性を求めるものであり、JEAG4601-1987⁽⁹⁾でも固有振動数を求める際の局部剛性の算出方法として示されているものである。

(2) 局部剛性にバイラードの方法を用いた固有値解析結果

「もんじゅ」1次主冷却系温度計ウェルの固有値解析で検討しているバイラードの方法と3次元FEM解析で求めたバネ定数の比較検討結果を参照すると、3次元FEM解析で求めた局部剛性の方が約10~30% (なお、範囲があるのは配管に取り付けられているため、軸方向と軸直角方向で剛性が異なるため) 高くなることが示されている。また、固有振動数は、3次元FEM解析で求めたバネ定数を用いた方が、約2~4%高くなる結果が示されている。

「常陽」2次主冷却系温度計ウェルの固有値解析では、局部剛性の算出にバイラードの方法を用いている。上記の検討結果から、バイラードの方法は、固有振動数を若干低めに見積もることになる。よって、流力振動評価においては、無次元流速を若干大きめに見積もることになる。

(3) 模擬試験体の打振試験で得られた固有振動数

「常陽」2次主冷却系温度計ウェル模擬試験体の打振試験では、水流動試験の都合上、温度計ウェルを10B配管に取り付けた模擬試験体を用いて固有振動数の把握を行っている。よって、配管の板厚は、模擬試験体10B配管が9.3mmで、実機12B配管が10.3mmで

あり、模擬試験体の局部剛性は、バイラードの方法で求めると実機より約10～40%低くなっている。

(4) まとめ

上記より、固有値解析で用いたバイラードの方法による局部剛性（12B配管を模擬）⇨模擬試験体の局部剛性（10B配管使用）であることから、固有値解析と模擬試験体の固有振動数は、ほぼ一致した結果が得られている。しかし、配管溶接部の局部剛性は、固有値解析及び模擬試験体とも(2)項及び(3)項で示したとおり実機（12B配管）より低めになっていることを考えると、得られた固有振動数も、約2～4%低めになっていると考えられる。よって、流力振動評価においては、無次元流速が若干大きめになり、保守的な評価結果を与えていると判断している。

10.2.2 固有値解析結果の2次モードを流力振動評価に用いる妥当性について

(1) 概要

「常陽」2次主冷却系温度計ウェルの固有値解析の結果、温度計ウェルのうちナトリウム中部分が支配的に振動するモードは、2次モードである。これは、固有値解析から得られる温度計ウェルのナトリウム中部分の振動系としての揺れやすさの指標となる刺激係数の算出結果より判断したものである。

(2) 有効質量とナトリウム中部分の刺激係数

図10-1に温度計ウェルの各振動モードを示す。

温度計ウェルのナトリウム中部分の各モードにおける刺激係数 β は、振動理論に基づく^{(10)・(11)} (10-1)式を用いて算出している。

$$\text{刺激係数 } \beta = \frac{\int_{L_0}^{L_1} m_t(x) \phi_n(x) dx}{M_n} \quad (10-1)$$

M_n : n次モードに対する有効質量

$$M_n = \int_0^L m_t(x) \phi_n^2(x) dx$$

L : ウェル全体長さ

m_t : ウェルの単位長さ当たりの質量

ϕ_n : n次の振動モード形状関数

L_e : 流れを受けるウェル長さ

表10-1に各モードの有効質量とナトリウム中部分の刺激係数を示す。

上記の結果、無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足しないn次モードで、ナトリウム中部分の

刺激係数が大きい2次モードがナトリウム中部分が支配的に振動するモードとなる（有効質量は、温度計ウェル全体のうち、振動に有効に働く質量を表している。ナトリウム中部分のウェル質量は、温度計ウェル全体の質量に対する割合が小さいため、ナトリウム中部分が支配的になるほど有効質量は小さくなる）。

(3) まとめ

固有値解析結果より、流力振動評価において2次主冷却系温度計ウェルの2次モードを用いることは、有効質量とナトリウム中部分の刺激係数から妥当なものと判断している。また、現在、万が一温度計ウェルが破損した場合を想定して、温度計ウェル部からのナトリウム漏えいを抑えるため、熱電対の取付け方式をこれまでのスプリング式からコンプレッションフィティング式に変更しているが、ナトリウム中細管部分が主体的に振動する2次モードに、この変更は影響を与えないと判断している。

10.3 水流動試験の妥当性及び保守性について

水流動試験では、模擬試験体が実機温度計ウェル部を模擬したものであるか、試験条件と実機条件の間に力学的相似性があるか、仮に相似性が成立していなくても保守性を有した試験であるか。また、2次主冷却系実機温度計ウェル上流側のエルボやティーによる偏流の影響を考慮する必要はないかについて検討したものである。

10.3.1 水流動試験における温度計ウェル部の流速分布について

(1) 概要

水流動試験では、試験の都合上、常温水と10B配管に温度計ウェルを取り付けた模擬試験体を用いて行っている。これに対して、実機の温度計ウェルは、各主冷却器出口の10B配管に取り付けられている温度計ウェル（ナトリウム中部分長さ130mm：タイプB）を除き、12B配管に取り付けられた温度計ウェル（ナトリウム中長さ150mm：タイプA）である。

無次元流速 $V_r < 1.0$ を満足しない温度計ウェルは、12B配管に取り付けられたタイプAの温度計ウェルである。よって、水流動試験は、実機より配管口径を若干縮小した試験となっている。

(2) 温度計ウェル部の流速分布について

一般的に、円管内の十分発達した流れの流速分布は、 V_{max} となる円管中心を基準とした流速分布の $1/n$ 乗べき則⁽⁴⁾である(10-2)式で表される。 n の値は、配管内のレイノルズ数が高くなるほど大きくなるため、流速分布は、レイノルズ数が高くなるほど平

坦化する。なお、水流動試験時に計測している流速は、配管内平均流速であり、配管内のレイノルズ数 Re は、(10-3)式より求めることができ、その値は12B配管でも10B配管でもほぼ同一で、 $1.26 \times 10^6 \sim 1.51 \times 10^6$ となる。この時の n は、Hermannの文献⁽¹²⁾より9となる。

$$V(r) = V_{\max} (1 - r/R)^{1/n} = V_{\max} (y/R)^{1/n} \quad (10-2)$$

$V(r)$: 円管中心から距離 r における流速

V_{\max} : 円管内の最大流速

r : 円管中心から距離

n : 係数 ($n = 7 \sim 10$)

R : 円管の半径

y : 円管壁面からの距離

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (10-3)$$

$$= 1.26 \times 10^6 \text{ (10B配管)}、1.51 \times 10^6 \text{ (12B配管)}$$

V : 配管内流速 (=5.15m/sec)

d : 配管内径 (=0.2488m (10B配管)、0.2979m (12B配管))

ν : 動粘性係数 (=1.0144 $\times 10^{-6}$ m²/sec (at20°C))

表10-2に十分発達した流れにおける配管内流速分布を示す。

流速分布は、(10-2)式を用いて各配管内の V_{\max} に対する流速比、 V_{\max} に対する平均流速比を求め、平均流速 $V_{ave} = 5.15$ m/sec (実機470°Cの条件) として計算を行っている。

上記より、求めた流速分布を用いて、温度計ウェル部の流速分布を算出している。表10-3に12B配管に温度計ウェルが取り付けられている場合の温度計ウェル部の流速分布を示す。また、表10-4に10B配管に温度計ウェルが取り付けられている場合の温度計ウェル部の流速分布を示す。これらの値を整理すると表10-5のとおりとなる。

この結果、温度計ウェル部の流速分布は、温度計ウェルが振動しない完全固定体とした場合、10B配管の方が平均流速は大きくなる。しかし、実際の温度計ウェルは、振動が生じる弾性体であることから、ウェルが振動した時に有効に働く等価流速 (有効流速) を、その振動モード形状関数を考慮して (動圧 (流速の2乗) による温度計ウェル細管付け根部に加わる曲げモーメントを考慮) 算出した場合、12B配管の方が逆に大きくな

るが、その差は僅かで約0.7～0.9%大きくなるだけであり、10B配管を用いてもほぼ12B配管流速分布を模擬できていると考えている。

なお、ASME Code Section III Appendix N-1324.1 (ロックイン同期の回避)⁽¹⁾の無次元流速 V_r を求める際に用いられる流速は、流れを受ける構造物の振動モードを考慮しない平均流速であることを考慮すると、10B配管の方が大きくなる。

(3) まとめ

水流動試験で温度計ウェルに加わる平均流速は、振動モード形状関数を考慮すると、10B配管でも12B配管でもほぼ同一(約0.7～0.9%の差)であり(細管付け根に加わる曲げモーメントもほぼ同一)、10B配管を用いた水流動試験でも、評価に与える影響はなく、妥当な試験であると判断している。

10.3.2 流動と構造に関する相似則について

(1) 概要

水流動試験条件と実機定格出力運転状態との比較検討を行うため、力学的相似性の観点から、流動と構造の相似則に着目して検討したものである。

(2) レイノルズ数 Re

レイノルズ数は、流体の慣性力と粘性力の比であり、(10-4)式のとおりである。

$$Re = \frac{V \cdot D_{CA}}{\nu} \quad (10-4)$$

V : 流速 = $V_r \cdot f_n \cdot D_{CA}$

V_r : 無次元流速

f_n : 固有振動数

D_{CA} : ウェルの外径

ν : 動粘性係数

表10-6に水流動試験と実機条件との比較検討結果を示す。

無次元流速1.24における水流動試験20℃及び実機470℃のレイノルズ数は、以下のとおりであり、水流動試験20℃の方が約1/3と小さい。なお、いずれの条件も乱流領域($2 \times 10^3 <$)であるが、臨界レイノルズ数以下($< 2 \times 10^5$)である。よって、レイノルズ数の相違に基づく流れの様子の変化は、連続的で著しくない領域にあるため、レイノルズ数が異なっても模擬できていると考えられる。

水流動試験時のレイノルズ数

$$Re = (1.24 \times 537.5 \times 0.0086^2) / 1.0144 \times 10^{-6} = 4.9 \times 10^4$$

実機470℃条件のレイノルズ数

$$Re = (1.24 \times 484 \times 0.0086^2) / 3.0498 \times 10^{-7} = 1.5 \times 10^5$$

図10-2及び図10-3に「もんじゅ」1次主冷却系温度計ウエルの構造健全性の検討で示されていたCheungの文献⁽¹³⁾による抗力方向及び揚力方向の変動流体抵抗係数を示す。これより変動流体抵抗係数は、実機のレイノルズ数領域 (1.5×10^5) の方が、水流動試験時のレイノルズ数領域 (4.9×10^4) よりも小さい。

なお、変動する流体力Fは、(10-5)式⁽¹⁴⁾で算出される。

$$F = \frac{C' \cdot \rho \cdot V^2 \cdot D_{cA}}{2g} \quad (10-5)$$

C' : 変動流体抵抗係数

ρ : 流体の密度

V : 流速

D_{cA} : ウエルの外径

g : 重力加速度

上記に示したように、水流動試験のレイノルズ領域における変動流体抵抗係数は、実機470℃のレイノルズ数領域の値より大きく、かつ、流体の密度も大きいため、温度計ウエルに生じる流体力は水流動試験の方が厳しくなる。なお、流体の密度比は、1.19 (=水の密度998.159kg/m³ (at20℃) / ナトリウムの密度839.473kg/m³ (at470℃)) と水流動試験の方が大きいので保守的な評価となる。

(3) ストローハル数 St

図10-4にストローハル数とレイノルズ数、渦の放出とレイノルズ数との関係を示す。

ストローハル数は、水流動試験20℃及び実機470℃のレイノルズ数領域では、ほぼ一定で0.2~0.21である。また、渦の放出とレイノルズ数との関係の模式図⁽¹⁵⁾から、レイノルズ数が $150 < Re < 3 \times 10^5$ の範囲では、渦の放出特性が同一である。

(4) 温度計ウエルの等価質量

温度計ウエルの重量は、水流動試験及び実機条件でも違いはない。しかし、流体連成の効果として、温度計ウエルが存在する容積分の流体排除質量が温度計ウエルの付加重量として考慮されている。よって、この影響を単純な片持ち梁の固有振動数を求める式

である(10-6)式⁽²⁾を例に検討している。

$$\text{固有振動数 } f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi \cdot l^2} (E I g / W)^{1/2} \quad (10-6)$$

λ^2 : 振動係数

l : ウェルの長さ

E : 縦弾性係数

I : 断面2次モーメント

g : 重力加速度

W : ウェルの重量

$$W = W_1 + W_2$$

W_1 : ウェル本体の重量 (シース含む)

W_2 : 流体排除重量

表10-6に水流動試験と実機条件との比較検討結果を示す。この結果、ウェルの重量に対する流体排除重量の割合が小さく、固有振動数に対する重量の影響は、重量の逆数の1/2乗に比例するため、固有振動数では約0.9%の差である。なお、評価時には、各条件での流体排除重量を考慮した固有振動数を用いて、流速を無次元化しているため、固有振動数の違いは考慮済みである。

(5) 温度計ウェルの剛性

温度計ウェルの剛性は、材料の縦弾性係数に比例する。

水流動試験における縦弾性係数は、21,029kg/mm² (at20℃)、実機における縦弾性係数は、17,876kg/mm² (at470℃)と約18%の差が生じている。温度計ウェルの固有振動数に対する縦弾性係数の影響は、(10-6)式より縦弾性係数の1/2乗に比例するため、固有振動数では約9%の差が生じることになる。しかし、評価時には、各温度での固有振動数を用いて、流速を無次元化しているため、固有振動数の違いは考慮済みである。

(6) 無次元流速

無次元流速 V_r は、A S M E⁽¹⁾より(10-7)式で算出される。

$$V_r = \frac{V}{f_n \cdot D_{CA}} \quad (10-7)$$

V : 平均流速

f_n : ウェルの固有振動数

D_{CA} : ウェルの外径

温度計ウェルの固有振動数に対する縦弾性係数と流体排除重量の影響は、(10-6)式より縦弾性係数の1/2乗と重量の逆数の1/2乗に比例するため、固有振動数では約9%の差が生じる。しかし、評価時には、各温度での固有振動数を用いて、流速を無次元化しているため、固有振動数の違いは考慮済みである。

(7) 換算減衰係数

換算減衰係数 C_n は、ASME⁽¹⁾ より(10-8)式で算出される。

$$C_n = \frac{4\pi \cdot \xi_n \cdot M_n}{\rho \cdot \int_{L_e} D_{CA}^2 \phi_n^2(x) dx} \quad (10-8)$$

ξ_n : 臨界減衰比

M_n : n次モードに対する一般化質量

$$M_n = \int_0^L m_t(x) \phi_n^2(x) dx$$

L : ウェル全体長さ

m_t : ウェルの単位長さ当たりの質量

ϕ_n : n次の振動モード形状関数

ρ : 流体の密度

D_{CA} : ウェルの外径

L_e : 流れを受けるウェル長さ

上記に示したように換算減衰係数は、流体の密度に逆比例する。水流動試験20℃と実機470℃における流体の密度比は、1.19で水流動試験の方が大きい。したがって、水流動試験の方が換算減衰係数が小さくなり、不安定な条件となるため、振動時の変位振幅は大きくなり、保守的な評価となる。

(8) まとめ

水流動試験条件と実機定格出力運転状態とでは、レイノルズ数が3倍違うが、いずれも臨界レイノルズ数以下であり、渦の放出特性に違いはない。変動する流体力は、水流動試験の方が、変動流体抵抗係数は大きく、かつ、密度も大きいいため、保守的な評価となっている。温度計ウェルの剛性は、評価時に各温度等の条件での固有振動数を用いて、流速を無次元化しているため、固有振動数の違いは考慮済みである。また、換算減衰係数は、密度が大きい水流動試験の方が小さくなり不安定となるため、保守的な評価となっている。

以上より、力学的相似性は実機と完全に同一ではないが、「常陽」のような臨界レイノルズ数以下の領域で使用される温度計ウェルの水流動試験は、常温水でも実機の流れの様子の変化が模擬された試験で、かつ、保守性を有した試験であると判断している。

10.3.3 温度計ウェルの減衰定数について

(1) 概要

水流動試験は、模擬試験体にミニチュア加速度計を内挿した温度計ウェルを用いて行っている。一方、実機では、温度計ウェル内に熱電対シースが挿入されている。したがって、実機の熱電対を挿入した温度計ウェルの安定性が、水流動試験で用いた温度計ウェル（加速度計を内挿）に対して、どの程度高く、かつ、裕度を有しているかを減衰定数測定結果に基づき検討したものである。

(2) 試験方法（スナップバック試験）及び減衰定数の算出方法

減衰定数の測定は、温度計ウェル先端にワイヤを取り付け、このワイヤによってウェル先端に初期変位を与えた状態からワイヤをカットした後の自由振動波形を計測し、振動理論に基づく⁽²⁾・⁽¹¹⁾ (10-9)式より減衰定数を算出している。

$$\text{減衰定数 } \zeta = \frac{1}{2n\pi} \ln \left(\frac{y_1}{y_n} \right) \quad (10-9)$$

y_1 : 応答波形の1番目の片振幅

y_n : 応答波形のn番目の片振幅

n : 片振幅の波数

(3) 温度計ウェルの減衰定数

図10-5に熱電対を挿入した温度計ウェル、温度計ウェル単体及び温度計ウェル（加速度計を内挿）の減衰定数を示す。また、図10-6に熱電対付き温度計ウェル、温度計ウェル単体及び加速度計を内挿した温度計ウェルの自由振動波形を示す。

この結果、明らかに減衰定数に差があり、水流動試験に用いた加速度計を内挿した温度計ウェルの方が、実機同様の熱電対付き温度計ウェルより減衰定数が小さくなること判断できる。なお、水流動試験で得られている無次元流速1.25における最大変位振幅（=0.13mm）付近の減衰定数は、実機同様の熱電対を挿入した温度計ウェルで平均約0.2%であり、温度計ウェル（加速度計を内挿）で平均約0.015%である。よって、温度計ウェル単体を用いた水流動試験により得られた応答は、保守的な結果となっていると考えられる。

(4) 温度計ウェルの換算減衰係数

(3)項の減衰定数の違いを考慮して、渦の放出による流力振動の抑制に重要な安定性パラメータである換算減衰係数をASME Code Section III Appendix N-1324⁽¹⁾に示されている(10-10)式に基づき、温度計ウェルの細管部が主体的に振動するモードである2次モードについて算出している。

$$\text{換算減衰係数 } C_n = \frac{4\pi \cdot \xi_n \cdot M_n}{\rho \cdot \int_{L_e} D_{CA}^2 \phi_n^2(x) dx} \quad (10-10)$$

ξ_n : 減衰定数

M_n : n次モードに対する一般化質量

$$M_n = \int_0^L m_t(x) \phi_n^2(x) dx$$

L : ウェル全体長さ

m_t : ウェルの分布質量

ϕ_n : n次の振動モード形状関数

ρ : 流体の密度

D_{CA} : ウェルの外径

L_e : 流れを受けるウェル長さ

上記に基づき算出した換算減衰係数は、以下のとおりであり、実機の熱電対を挿入した温度計ウェルの方が、加速度計を内挿した温度計ウェル（温度計ウェル単体とほぼ同様）より10倍以上安定性が高いことが判断できる。

温度計ウェル（加速度計を内挿）	$C_n = 0.035$ （減衰定数0.015%）
温度計ウェル単体	$C_n = 0.034$ （減衰定数0.015%）
熱電対を挿入した温度計ウェル（実機同様）	$C_n = 0.479$ （減衰定数0.2%）

(5) まとめ

熱電対付き温度計ウェル、温度計ウェル単体及び水流動試験で用いている加速度計を内挿した温度計ウェルの減衰定数測定結果では、明らかに減衰定数に差があった。その減衰定数は、水流動試験で得られている無次元流速1.25における最大変位振幅（=0.13 mm）付近で、加速度計を内挿した温度計ウェルが約0.015%で、実機同様の熱電対付き温度計ウェルが約0.2%であった。

渦の放出による流力振動の抑制に重要なパラメータである換算減衰係数をASMEに示されている式に基づき算出した結果、実機同様の熱電対付き温度計ウェルは、水流動

試験に用いた加速度計を内挿した温度計ウェルより、換算減衰係数が10倍以上大きいため、安定性が高く、裕度を持っていると考えられる。なお、5章「2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数に関する一考察」で考察したように、減衰定数が約3%一定であるとすれば、その換算減衰係数も大きく、十分な安定性を有していると言える。

10.3.4 温度計ウェル取付け位置における偏流の影響について

(1) 概要

温度計ウェル取付け位置上流側には、エルボやティー部が存在する。一般的に、エルボやティー部が流れの中に存在すると、偏流が生じる。なお、この偏流は、エルボやティー部から配管内径の約10d以上離れた下流側では影響がなくなると言われている。

「常陽」2次主冷却系温度計ウェルは、いずれも上流側エルボやティーより10d以内の位置にあり、少なからず偏流の影響を受ける可能性がある。よって、一般的な円管内の十分発達した流れの流速分布の検討とは別に、配管内3次元流動解析を行い、温度計ウェル設置位置における流速分布を求めている。

(2) 配管内3次元流動解析

配管内3次元流動解析は、温度計ウェルが設置されている位置で、無次元流速 V_r が最も大きく（ホットレグ12B配管 $V_r=1.24$ 、コールドレグ12B配管 $V_r=1.16$ 、コールドレグ配管10B配管 $V_r=0.8$ ）、かつ、最も偏流の影響を受けると考えられる主冷却器入口部（ホットレグ）について行っている。この位置は、上流側にエルボより偏流の影響がでる可能性のあるティー部を有していることから、流動解析の対象位置としている。

解析には、3次元流体解析システム「FUJI-RIC/ α -FLOW」を用いている。

解析は、解析手法の妥当性を確認するため、広島大学の実験結果⁽¹⁶⁾と同一体系による検証解析を行い、実験結果と解析結果がほぼ一致することを確認した後、検証された解析手法を用いて「常陽」主冷却器入口近傍の流動解析を実施したものである。

図10-7に配管上部から見た（温度計ウェル上部から見た）配管内の流速分布を示す。流動解析の結果、流速は、ティー部から直管への入口角部で流れの剥離によって生じる圧力変動による流速増加が見られ、この速い流速が直管壁に向かって進み、その後、この速い成分は、配管内壁を旋回しながら流れていく。一方、配管内中央は、平均流速よりも遅くなっている。

(3) 温度計ウェルの等価流速の算出

(2)項で示した配管内3次元流動解析結果を用いて、温度計ウェルのナトリウム中部分の等価流速を算出している。

① 等価流速の算出方法

等価流速の算出方法は、以下の手順で行っている。

- (a) 主流成分である軸方向（流れ方向）の流速分布を用いる。
- (b) 各位置における時間平均の流速を求める。なお、デジタルデータのアウトプット時間間隔が等時間隔でない場合は、主流成分である軸方向（流れ方向）データを積分した後、時間平均流速を求める。
- (c) 温度計ウェルのナトリウム中部分の長さ方向の流速データ間の流速は、線形的に流速が分布しているものと仮定して、温度計ウェル部分の流速分布を求める。
- (d) (c)項及び温度計ウェルの振動解析で得られた2次モードの振動モード形状関数を用いて、(10-10)式⁽¹⁾により温度計ウェルの等価流速を求める。

$$\text{等価流速} = \left(\frac{\int_0^{L_e} \phi_n^2(x) \cdot V^2(x) dx}{\int_0^{L_e} \phi_n^2(x)} \right)^{1/2} \quad (10-10)$$

L_e : 流れを受けるウェル長さ

ϕ_n : 温度計ウェルn次モードの振動モード形状関数

V : 流動解析結果のウェル部流速分布

② 等価流速の算出結果

表10-7に主冷却器入口温度計ウェル部の等価流速を算出した結果を示す。

この結果、温度計ウェルのナトリウム中部分が支配的に揺れる振動モード（2次モード）における等価流速は、約4.9m/secである。この値は、これまで用いている平均流速5.15m/secより小さく、ティ一部による偏流の影響は、剛性の高いウェル太管部には生じるが、2次モードで支配的に揺れるウェル細管部には影響なく、これまでの評価が妥当であることを示している。

(4) まとめ

配管内3次元流動解析を行った結果から、温度計ウェル部の等価流速を算出した結果、約4.9m/secであり、これまで用いていた平均流速5.15m/secより小さく、これまでの評価で十分であると判断している。

10.4 温度計ウェルの疲労損傷評価の妥当性及び保守性について

疲労損傷評価では、温度計ウェルに発生する最大ピーク応力が妥当であり、かつ、保守性を有しているか、また、この発生ピーク応力の上限值（設計疲労限 σ_F ）を定める方法が適切な規格、規定に基づく方法によって定められ、その値が保守性を有しているかについて検討したものである。

10.4.1 温度計ウェル細管付け根部に発生するピーク応力について

(1) 概要

温度計ウェルの疲労損傷評価では、温度計ウェル単体と同様な減衰定数である（保守的な応答を与える）加速度計を内挿した温度計ウェルを用いた水流動試験より得られた温度計ウェル先端の応答加速度を用いて、細管付け根部に発生するピーク応力を算出している。

(2) 温度計ウェル先端変位振幅

温度計ウェル先端変位振幅は、水流動試験で得られた応答加速度を無次元変位振幅と無次元流速との関係に整理したデータを用いて、実機定格出力運転状態における無次元流速に相当する値を算出している。この際、「常陽」のような振動の一定していない領域（ロックインが抑制される下限界近傍）に相当する水流動試験データを用いて評価する場合には、一般的に変動している試験データのRMS値（変位振幅：0.082mm）を用いて評価するものである。しかし、「常陽」2次主冷却系温度計ウェルについては、保守的な値である水流動試験データのPEAK値（変位振幅：0.13mm）を用いた評価としている。また、PEAK値の算出の際には、無次元流速1.24に対して1.25における値を用いている。

(3) ピーク応力

発生応力は、固有値解析で用いた梁モデルとナトリウム中部分の支配的な振動モードである2次固有振動数と同一のsin波を用いた調和加振解析結果から、温度計ウェル先端変位振幅と温度計ウェル細管付け根部発生応力との関係に整理したデータを用いて、実機定格出力運転状態における無次元流速に相当する値を算出している。

ピーク応力は、上記で求めた値が温度計ウェル細管付け根部の応力集中係数を考慮した値でないことから、別途文献ベース⁽⁷⁾、固有値解析で用いた梁モデルと3次元ソリッドモデルによる応力解析の比から応力集中係数を算出し、保守的となる文献ベースの応力集中係数（=1.04）を乗じて算出している。

(4) まとめ

温度計ウェルの先端変位振幅は、一般的に用いられるRMS値より保守的なPEAK値を用いている。また、温度計ウェルの細管付け根部に発生するピーク応力は、2次固有振動数と同一のsin波を用いた調和加振解析結果と保守的な文献ベースの応力集中係数を用いて算出している。

よって、得られたピーク応力は、保守的であり、破損していない温度計ウェルの疲労損傷評価を行う上では妥当なものと判断している。

10.4.2 設計疲労限 σ_F について

(1) 概要

温度計ウェルの疲労損傷評価では、流力振動によって発生する温度計ウェル細管付け根部のピーク応力の上限值として、BDSの疲労限を1/1.2倍した設計疲労限 σ_F を定めている。この設計疲労限 σ_F の定め方について、その妥当性を検討したものである。

(2) BDSの疲労限

BDSの疲労限は、高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針（BDS）、通産省告示501号⁽¹⁷⁾及びASME⁽¹⁸⁾に示されている疲労曲線を用いて、以下の方法を用いて定めている。

- ① ASME及び通産省告示501号で与えられている 10^6 回までの線図の式を調査。
図10-8にASMEに掲載された低合金鋼の設計疲労線図の定め方を示す。なお、この定め方は、平均応力効果⁽¹⁹⁾を考慮したものになっている。
- ② 図10-8の式による疲労曲線と高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針（BDS）の375℃式（最適値）による疲労曲線の対応を調査。
図10-9にASME式による疲労曲線とBDSの375℃式による疲労曲線の対応を示す。
- ③ 図10-8の式を用いて、以下の3ケースについて計算し、ASME基準値、BDSの式で得られるひずみ振幅を室温の縦弾性係数により S_a に表示し直した値を比較。
図10-10に計算結果を示す。
 - (a) 平均応力 σ_m がない場合（ $\sigma_m=0$ ）
 - (b) ステンレス鋼と同じく設計係数を乗じる前に σ_m の効果を修正する場合（ σ_m あり：最適値）
 - (c) 設計係数を乗じてから修正する場合（ σ_m あり：設計値）

- ④ ASME基準値は、ケース(c)にほぼ一致していることを確認。
- ⑤ BDSの式は、告示のもとになったASME式と低サイクル側でほぼ整合し、高サイクル側では安全側に外挿される（図10-9より）。よって、BDSの式（最適）の 10^{11} 回外挿値を用いている。
- ⑥ ⑤項で求めたBDSの式（最適）の 10^{11} 回外挿値に設計係数（ $=1/2$ ）を乗じている。

上記より、BDSの疲労限は、ASME式より安全側に設定されている。

(3) 設計疲労限 σ_F

設計疲労限 σ_F は、(2)項で保守的に定められたBDSの疲労限を $1/1.2$ 倍した値を用いている。この値は、BDSのクリープ疲労損傷評価との組み合わせのために疲労損傷計算をする必要がなく、疲労損傷を0と評価できるようにしたものである。したがって、これにより負荷サイクル毎に細かいクリープ疲労損傷値を算出する必要はない。

(4) まとめ

設計疲労限 σ_F は、BDS、通産省告示501号及びASMEを用いて設定されたBDSの疲労限を $1/1.2$ 倍した値であり、その設定方法は妥当なもので、許容応力は保守的に定められたものと判断している。

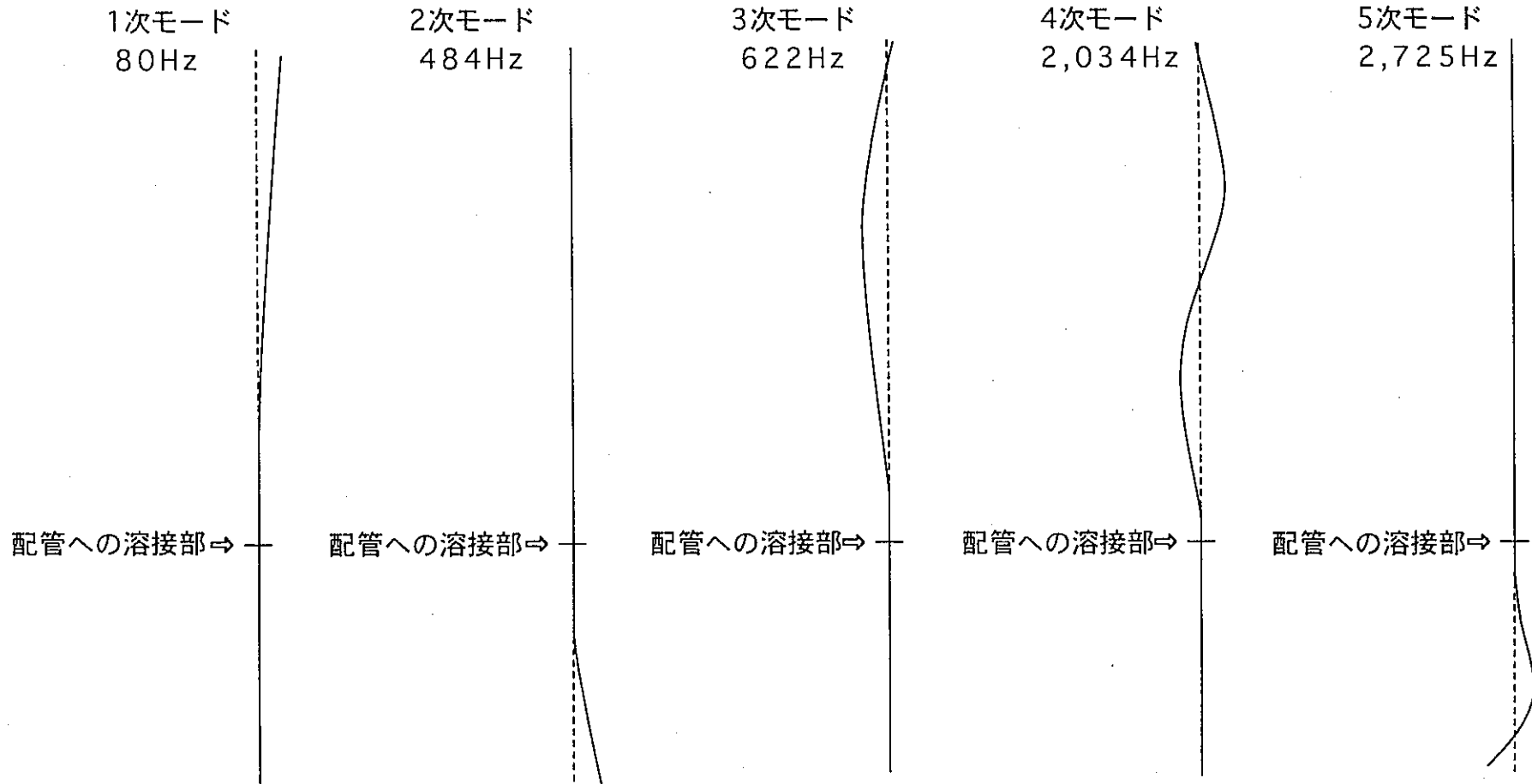


図10-1 (1/2) 2次主冷却系温度計ウェルの各振動モード
(熱電対シースの取付け方式：スプリング式)

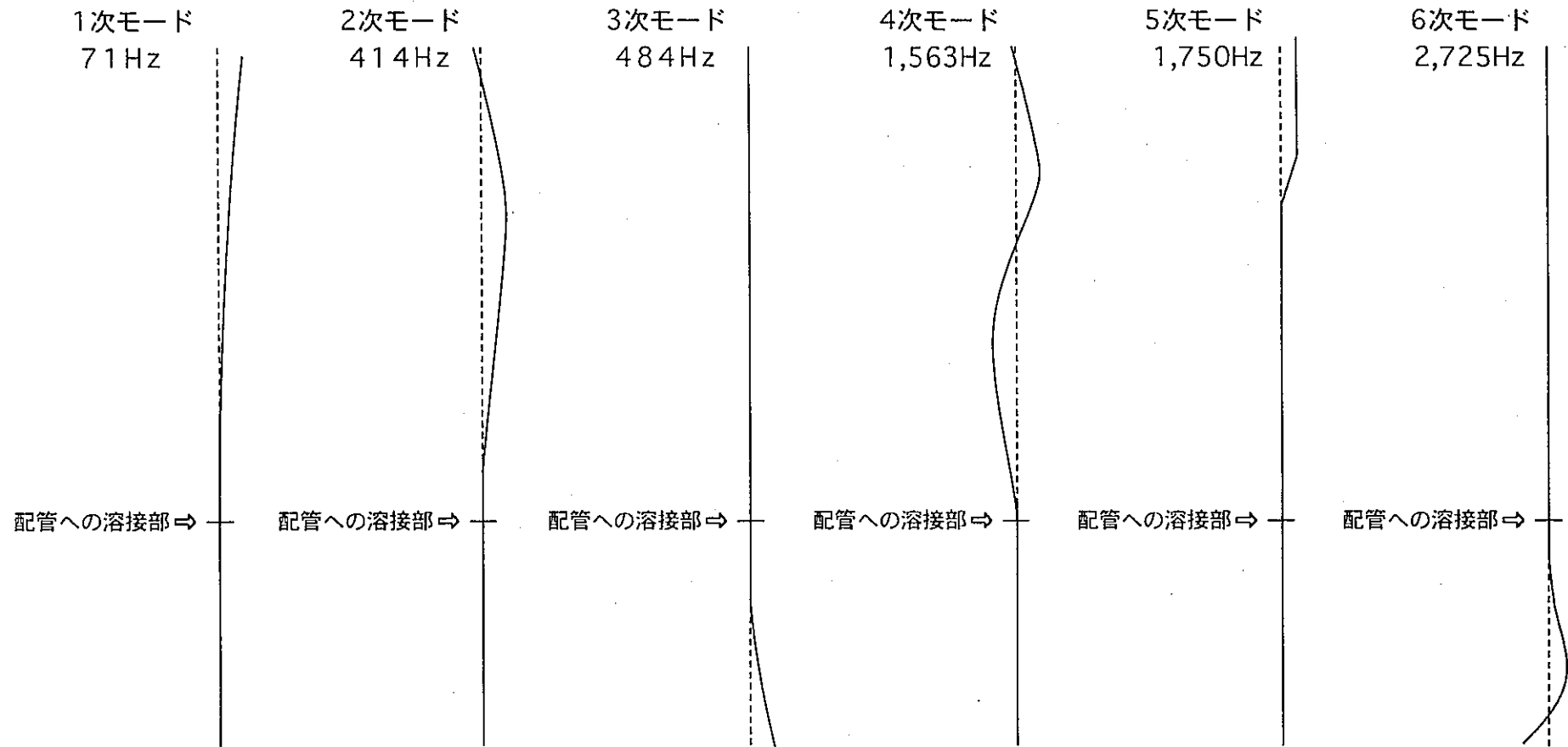


図10-1 (2/2) 2次主冷却系温度計ウエルの各振動モード
(熱電対シースの取付け方式：コンプレッションフィッティング式)

表10-1 2次主冷却系温度計ウエルの有効質量と刺激係数

スプリング式温度計ウエル

モード	固有振動数 (Hz)	主体的に振動する部位	ウエルの有効質量		ナトリウム中ウエルの刺激係数	
			有効質量	1次モードに対する比	刺激係数	1次モードに対する比
1次	80	配管外ウエルの1次	6.2479E-05	1.0000	-0.00006857	1
2次	484	ウエル細管部の1次	3.2852E-06	0.0526	0.62280278	-9,083
3次	622	配管外ウエルの2次	1.7216E-05	0.2755	-0.00061067	9
4次	2,034	配管外ウエルの3次	6.2546E-06	0.1001	0.00829556	-121
5次	2,725	ウエル細管部の2次	2.3917E-06	0.0383	0.80942311	-11,804

コンプレッションフィティング式温度計ウエル

モード	固有振動数(Hz)	主体的に振動する部位	ウエルの有効質量		ナトリウム中ウエルの刺激係数	
			有効質量	1次モードに対する比	刺激係数	1次モードに対する比
1次	71	配管外ウエルの1次	7.1782E-05	1.0000	-0.00005085	1
2次	414	配管外ウエルの2次	1.9457E-05	0.2711	-0.00231267	45
3次	484	ウエル細管部の1次	3.3833E-06	0.0471	0.60473784	-11,893
4次	1,563	配管外ウエルの3次	7.9271E-06	0.1104	0.00469258	-92
5次	1,750	配管外ウエルの4次	6.1617E-05	0.8584	-0.00000001	0
6次	2,725	ウエル細管部の2次	2.3508E-06	0.0327	0.82353926	-16,195

表10-2 (1/2) 十分発達した流れにおける配管内の流速分布 n = 7 の場合

12B 配管内の流速分布					10B 配管内の流速分布				
円管中心からの距離 (mm)	流速比 V_e	$\int_{L_e} V_e(x) dx$	流速 V (m/sec)	$\int_{L_e} V(x) dx$	円管中心からの距離 (mm)	流速比 V_e	$\int_{L_e} V_e(x) dx$	流速 V (m/sec)	$\int_{L_e} V(x) dx$
-148.95	0.000	1.539	0.000	9.144					
-143.95	0.616	3.239	3.658	19.240					
-138.95	0.680	3.501	4.038	20.794					
-133.95	0.720	3.678	4.279	21.844					
-128.95	0.751	3.466	4.459	20.588					
-124.40	0.773	0.348	4.591	2.069	-124.40	0.000	0.101	0.000	0.595
-123.95	0.775	3.926	4.603	23.319	-123.95	0.448	2.719	2.643	16.041
-118.95	0.795	4.021	4.725	23.886	-118.95	0.640	3.354	3.774	19.789
-113.95	0.813	4.105	4.830	24.381	-113.95	0.702	3.611	4.142	21.303
-108.95	0.829	4.179	4.923	24.823	-108.95	0.742	3.787	4.380	22.345
-103.95	0.843	4.246	5.006	25.221	-103.95	0.773	3.925	4.559	23.155
-98.95	0.856	4.307	5.082	25.585	-98.95	0.797	4.038	4.703	23.822
-93.95	0.867	4.364	5.152	25.921	-93.95	0.818	4.134	4.825	24.392
-88.95	0.878	4.416	5.216	26.232	-88.95	0.836	4.219	4.931	24.891
-83.95	0.888	4.465	5.276	26.522	-83.95	0.852	4.294	5.025	25.337
-78.95	0.898	4.511	5.332	26.794	-78.95	0.866	4.363	5.109	25.739
-73.95	0.907	4.554	5.385	27.051	-73.95	0.879	4.425	5.186	26.107
-68.95	0.915	4.595	5.435	27.294	-68.95	0.891	4.483	5.257	26.447
-63.95	0.923	4.634	5.482	27.525	-63.95	0.902	4.536	5.322	26.762
-58.95	0.931	4.671	5.527	27.744	-58.95	0.912	4.586	5.383	27.056
-53.95	0.938	4.706	5.570	27.954	-53.95	0.922	4.633	5.440	27.332
-48.95	0.945	4.740	5.611	28.154	-48.95	0.931	4.677	5.493	27.592
-43.95	0.951	4.772	5.650	28.347	-43.95	0.940	4.718	5.544	27.839
-38.95	0.958	4.803	5.688	28.531	-38.95	0.948	4.758	5.592	28.073
-33.95	0.964	4.833	5.724	28.709	-33.95	0.955	4.796	5.637	28.295
-28.95	0.970	4.862	5.759	28.881	-28.95	0.963	4.832	5.681	28.508
-23.95	0.975	4.890	5.793	29.046	-23.95	0.970	4.866	5.722	28.712
-18.95	0.981	4.917	5.826	29.206	-18.95	0.977	4.900	5.762	28.907
-13.95	0.986	4.943	5.857	29.361	-13.95	0.983	4.931	5.801	29.095
-8.95	0.991	4.968	5.888	29.512	-8.95	0.989	4.962	5.837	29.275
-3.95	0.996	3.942	5.917	23.418	-3.95	0.995	3.941	5.873	23.251
0.00	1.000	3.942	5.940	23.418	0.00	1.000	3.941	5.900	23.251
3.95	0.996	4.968	5.917	29.512	3.95	0.995	4.962	5.873	29.275
8.95	0.991	4.943	5.888	29.361	8.95	0.989	4.931	5.837	29.095
13.95	0.986	4.917	5.857	29.206	13.95	0.983	4.900	5.801	28.907
18.95	0.981	4.890	5.826	29.046	18.95	0.977	4.866	5.762	28.712
23.95	0.975	4.862	5.793	28.881	23.95	0.970	4.832	5.722	28.508
28.95	0.970	4.833	5.759	28.709	28.95	0.963	4.796	5.681	28.295
33.95	0.964	4.803	5.724	28.531	33.95	0.955	4.758	5.637	28.073
38.95	0.958	4.772	5.688	28.347	38.95	0.948	4.718	5.592	27.839
43.95	0.951	4.740	5.650	28.154	43.95	0.940	4.677	5.544	27.592
48.95	0.945	4.706	5.611	27.954	48.95	0.931	4.633	5.493	27.332
53.95	0.938	4.671	5.570	27.744	53.95	0.922	4.586	5.440	27.056
58.95	0.931	4.634	5.527	27.525	58.95	0.912	4.536	5.383	26.762
63.95	0.923	4.595	5.482	27.294	63.95	0.902	4.483	5.322	26.447
68.95	0.915	4.554	5.435	27.051	68.95	0.891	4.425	5.257	26.107
73.95	0.907	4.511	5.385	26.794	73.95	0.879	4.363	5.186	25.739
78.95	0.898	4.465	5.332	26.522	78.95	0.866	4.294	5.109	25.337
83.95	0.888	4.416	5.276	26.232	83.95	0.852	4.219	5.025	24.891
88.95	0.878	4.364	5.216	25.921	88.95	0.836	4.134	4.931	24.392
93.95	0.867	4.307	5.152	25.585	93.95	0.818	4.038	4.825	23.822
98.95	0.856	4.246	5.082	25.221	98.95	0.797	3.925	4.703	23.155
103.95	0.843	4.179	5.006	24.823	103.95	0.773	3.787	4.559	22.345
108.95	0.829	4.105	4.923	24.381	108.95	0.742	3.611	4.380	21.303
113.95	0.813	4.021	4.830	23.886	113.95	0.702	3.354	4.142	19.789
118.95	0.795	3.926	4.725	23.319	118.95	0.640	2.719	3.774	16.041
123.95	0.775	0.348	4.603	2.069	123.95	0.448	0.101	2.643	0.595
124.40	0.773	3.466	4.591	20.588	124.40	0.000		0.000	
128.95	0.751	3.678	4.459	21.844					
133.95	0.720	3.501	4.279	20.794					
138.95	0.680	3.239	4.038	19.240					
143.95	0.616	1.539	3.658	9.144					
148.95	0.000	平均流速比	0.000	平均流速			平均流速比		平均流速
		0.867024509		5.150			0.872890122		5.150

表10-2 (2/2) 十分発達した流れにおける配管内の流速分布 n=10の場合

12B 配管内の流速分布					10B 配管内の流速分布				
円管中心からの距離 (mm)	流速比 V_e	$\int L_e V_e(x) dx$	流速 V (m/sec)	$\int L_e V(x) dx$	円管中心からの距離 (mm)	流速比 V_e	$\int L_e V_e(x) dx$	流速 V (m/sec)	$\int L_e V(x) dx$
-148.95	0.000	1.780	0.000	10.198					
-143.95	0.712	3.689	4.079	21.128					
-138.95	0.763	3.895	4.372	22.312					
-133.95	0.795	4.032	4.553	23.097					
-128.95	0.818	3.761	4.686	21.541					
-124.40	0.835	0.376	4.783	2.154	-124.40	0.000	0.128	0.000	0.728
-123.95	0.837	4.221	4.792	24.178	-123.95	0.570	3.253	3.236	18.474
-118.95	0.852	4.293	4.880	24.588	-118.95	0.731	3.780	4.153	21.465
-113.95	0.865	4.355	4.956	24.944	-113.95	0.781	3.981	4.433	22.605
-108.95	0.877	4.410	5.022	25.259	-108.95	0.812	4.116	4.609	23.374
-103.95	0.887	4.459	5.082	25.543	-103.95	0.835	4.220	4.740	23.964
-98.95	0.897	4.504	5.135	25.800	-98.95	0.853	4.305	4.845	24.445
-93.95	0.905	4.546	5.185	26.036	-93.95	0.869	4.377	4.933	24.854
-88.95	0.913	4.584	5.230	26.255	-88.95	0.882	4.439	5.009	25.209
-83.95	0.920	4.619	5.272	26.458	-83.95	0.894	4.495	5.075	25.524
-78.95	0.927	4.652	5.311	26.648	-78.95	0.904	4.545	5.135	25.807
-73.95	0.934	4.684	5.348	26.826	-73.95	0.914	4.590	5.188	26.065
-68.95	0.940	4.713	5.383	26.995	-68.95	0.922	4.632	5.238	26.302
-63.95	0.945	4.741	5.415	27.154	-63.95	0.930	4.670	5.283	26.521
-58.95	0.951	4.767	5.446	27.306	-58.95	0.938	4.706	5.325	26.725
-53.95	0.956	4.792	5.476	27.450	-53.95	0.945	4.740	5.365	26.915
-48.95	0.961	4.816	5.504	27.587	-48.95	0.951	4.771	5.401	27.094
-43.95	0.966	4.839	5.531	27.719	-43.95	0.957	4.801	5.436	27.263
-38.95	0.970	4.862	5.557	27.846	-38.95	0.963	4.829	5.469	27.424
-33.95	0.974	4.883	5.582	27.967	-33.95	0.969	4.856	5.500	27.576
-28.95	0.979	4.903	5.605	28.084	-28.95	0.974	4.882	5.530	27.721
-23.95	0.983	4.923	5.628	28.196	-23.95	0.979	4.906	5.558	27.859
-18.95	0.986	4.942	5.650	28.305	-18.95	0.984	4.929	5.585	27.992
-13.95	0.990	4.960	5.672	28.410	-13.95	0.988	4.952	5.611	28.119
-8.95	0.994	4.978	5.692	28.512	-8.95	0.993	4.973	5.636	28.241
-3.95	0.997	3.945	5.712	22.594	-3.95	0.997	3.944	5.660	22.394
0.00	1.000	3.945	5.728	22.594	0.00	1.000	3.944	5.678	22.394
3.95	0.997	4.978	5.712	28.512	3.95	0.997	4.973	5.660	28.241
8.95	0.994	4.960	5.692	28.410	8.95	0.993	4.952	5.636	28.119
13.95	0.990	4.942	5.672	28.305	13.95	0.988	4.929	5.611	27.992
18.95	0.986	4.923	5.650	28.196	18.95	0.984	4.906	5.585	27.859
23.95	0.983	4.903	5.628	28.084	23.95	0.979	4.882	5.558	27.721
28.95	0.979	4.883	5.605	27.967	28.95	0.974	4.856	5.530	27.576
33.95	0.974	4.862	5.582	27.846	33.95	0.969	4.829	5.500	27.424
38.95	0.970	4.839	5.557	27.719	38.95	0.963	4.801	5.469	27.263
43.95	0.966	4.816	5.531	27.587	43.95	0.957	4.771	5.436	27.094
48.95	0.961	4.792	5.504	27.450	48.95	0.951	4.740	5.401	26.915
53.95	0.956	4.767	5.476	27.306	53.95	0.945	4.706	5.365	26.725
58.95	0.951	4.741	5.446	27.154	58.95	0.938	4.670	5.325	26.521
63.95	0.945	4.713	5.415	26.995	63.95	0.930	4.632	5.283	26.302
68.95	0.940	4.684	5.383	26.826	68.95	0.922	4.590	5.238	26.065
73.95	0.934	4.652	5.348	26.648	73.95	0.914	4.545	5.188	25.807
78.95	0.927	4.619	5.311	26.458	78.95	0.904	4.495	5.135	25.524
83.95	0.920	4.584	5.272	26.255	83.95	0.894	4.439	5.075	25.209
88.95	0.913	4.546	5.230	26.036	88.95	0.882	4.377	5.009	24.854
93.95	0.905	4.504	5.185	25.800	93.95	0.869	4.305	4.933	24.445
98.95	0.897	4.459	5.135	25.543	98.95	0.853	4.220	4.845	23.964
103.95	0.887	4.410	5.082	25.259	103.95	0.835	4.116	4.740	23.374
108.95	0.877	4.355	5.022	24.944	108.95	0.812	3.981	4.609	22.605
113.95	0.865	4.293	4.956	24.588	113.95	0.781	3.780	4.433	21.465
118.95	0.852	4.221	4.880	24.178	118.95	0.731	3.253	4.153	18.474
123.95	0.837	0.376	4.792	2.154	123.95	0.570	0.128	3.236	0.728
124.40	0.835	3.761	4.783	21.541	124.40	0.000		0.000	
128.95	0.818	4.032	4.686	23.097					
133.95	0.795	3.895	4.553	22.312					
138.95	0.763	3.689	4.372	21.128					
143.95	0.712	1.780	4.079	10.198					
148.95	0.000	平均流速比	0.000	平均流速			平均流速比		平均流速
		0.899128180		5.150			0.906937845		5.150

表10-3 (1/2) 12B配管に取付けられた温度計ウェル部の流速分布 (配管内Vmax=5.94m/sec, Vave=5.15m/sec) n=7の場合

12B配管に取り付けられた場合										
ウェルの位置 (mm)	配管中心 からの距離 (mm)	ウェル先端 からの距離 (mm)	流速 V (m/sec)	$\int L_e V(x) dx$		ϕ	$\int L_e \phi(x)^2 dx$	$\int L_e \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx$	$\frac{(\int L_e \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx)}{(\int L_e \phi(x)^2 dx)^{0.5}}$	
150.00	-1.05	0.00	5.934	14.832	14.832	1.00000E+00	2.50000E+00	8.80266E+01	—	—
147.50	1.45	2.50	5.932	5.929	5.929	9.68149E-01	9.37312E-01	3.29778E+01	—	—
146.50	2.45	3.50	5.926	38.393	38.393	9.55410E-01	5.93325E+00	2.08347E+02	—	—
140.00	8.95	10.00	5.888	43.983	43.983	8.72640E-01	5.71125E+00	1.97968E+02	—	—
132.50	16.45	17.50	5.841	43.629	43.629	7.77423E-01	4.53290E+00	1.54670E+02	—	—
125.00	23.95	25.00	5.793	36.074	36.074	6.83004E-01	2.91559E+00	9.78423E+01	—	—
118.75	30.20	31.25	5.751	35.803	35.803	6.05455E-01	2.29110E+00	7.57668E+01	—	—
112.50	36.45	37.50	5.706	35.520	35.520	5.29499E-01	1.75231E+00	5.70607E+01	—	—
106.25	42.70	43.75	5.660	35.223	35.223	4.55756E-01	1.29821E+00	4.15890E+01	—	—
100.00	48.95	50.00	5.611	34.909	34.909	3.84921E-01	9.26026E-01	2.91565E+01	—	—
93.75	55.20	56.25	5.560	34.578	34.578	3.17755E-01	6.31052E-01	1.95060E+01	—	—
87.50	61.45	62.50	5.505	34.226	34.226	2.55073E-01	4.06639E-01	1.23240E+01	—	—
81.25	67.70	68.75	5.447	33.851	33.851	1.97735E-01	2.44370E-01	7.25093E+00	—	—
75.00	73.95	75.00	5.385	33.450	33.450	1.46638E-01	1.34392E-01	3.89752E+00	—	—
68.75	80.20	81.25	5.319	33.017	33.017	1.02706E-01	6.59283E-02	1.86505E+00	—	—
62.50	86.45	87.50	5.247	32.548	32.548	6.68874E-02	2.79620E-02	7.69769E-01	—	—
56.25	92.70	93.75	5.168	32.033	32.033	4.01413E-02	1.00708E-02	2.69018E-01	—	—
50.00	98.95	100.00	5.082	平均流速比	25.221	2.34384E-02	2.74679E-03	7.09462E-02	等価流速比	5.827
45.00	103.95	105.00	5.006	5.580	24.823	1.67809E-02	1.40799E-03	3.52882E-02	—	—
40.00	108.95	110.00	4.923	—	24.381	1.27298E-02	8.10239E-04	1.96348E-02	—	—
35.00	113.95	115.00	4.830	—	23.886	9.76939E-03	4.77205E-04	1.11314E-02	—	—
30.00	118.95	120.00	4.725	—	23.319	7.35683E-03	2.70615E-04	6.04045E-03	—	—
25.00	123.95	125.00	4.603	—	22.654	5.27920E-03	1.39350E-04	2.95257E-03	—	—
20.00	128.95	130.00	4.459	—	21.844	3.51947E-03	6.19333E-05	1.23121E-03	—	—
15.00	133.95	135.00	4.279	—	20.794	2.09463E-03	2.19374E-05	4.01692E-04	—	—
10.00	138.95	140.00	4.038	—	19.240	1.02173E-03	5.21966E-06	8.51216E-05	—	—
5.00	143.95	145.00	3.658	—	9.144	3.17829E-04	5.05076E-07	6.75687E-06	—	—
0.00	148.95	150.00	0.000	—	平均流速比	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	等価流速比	5.826
					5.155					

表10-3 (2/2) 12B配管に取付けられた温度計ウェル部の流速分布 (配管内V_{max}=5.728m/sec, V_{ave}=5.15m/sec) n=10の場合

12B配管に取り付けられた場合										
ウェルの位置 (mm)	配管中心 からの距離 (mm)	ウェル先端 からの距離 (mm)	流速 V (m/sec)	$\int_{L_0} V(x) dx$		ϕ	$\int_{L_0} \phi(x)^2 dx$	$\int_{L_0} \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx$	$\frac{(\int_{L_0} \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx)}{(\int_{L_0} \phi(x)^2 dx)^{0.5}}$	
150.00	-1.05	0.00	5.724	14.307	14.307	1.00000E+00	2.50000E+00	8.19024E+01	—	—
147.50	1.45	2.50	5.722	5.720	5.720	9.68149E-01	9.37312E-01	3.06906E+01	—	—
146.50	2.45	3.50	5.718	37.085	37.085	9.55410E-01	5.93325E+00	1.94010E+02	—	—
140.00	8.95	10.00	5.692	42.576	42.576	8.72640E-01	5.71125E+00	1.85063E+02	—	—
132.50	16.45	17.50	5.661	42.335	42.335	7.77423E-01	4.53290E+00	1.45272E+02	—	—
125.00	23.95	25.00	5.628	35.087	35.087	6.83004E-01	2.91559E+00	9.23574E+01	—	—
118.75	30.20	31.25	5.599	34.902	34.902	6.05455E-01	2.29110E+00	7.18346E+01	—	—
112.50	36.45	37.50	5.569	34.709	34.709	5.29499E-01	1.75231E+00	5.43506E+01	—	—
106.25	42.70	43.75	5.538	34.505	34.505	4.55756E-01	1.29821E+00	3.98083E+01	—	—
100.00	48.95	50.00	5.504	34.290	34.290	3.84921E-01	9.26026E-01	2.80535E+01	—	—
93.75	55.20	56.25	5.469	34.061	34.061	3.17755E-01	6.31052E-01	1.88722E+01	—	—
87.50	61.45	62.50	5.431	33.819	33.819	2.55073E-01	4.06639E-01	1.19943E+01	—	—
81.25	67.70	68.75	5.391	33.559	33.559	1.97735E-01	2.44370E-01	7.10191E+00	—	—
75.00	73.95	75.00	5.348	33.280	33.280	1.46638E-01	1.34392E-01	3.84369E+00	—	—
68.75	80.20	81.25	5.302	32.978	32.978	1.02706E-01	6.59283E-02	1.85306E+00	—	—
62.50	86.45	87.50	5.251	32.649	32.649	6.68874E-02	2.79620E-02	7.71095E-01	—	—
56.25	92.70	93.75	5.196	32.287	32.287	4.01413E-02	1.00708E-02	2.71926E-01	—	—
50.00	98.95	100.00	5.135	平均流速比	25.543	2.34384E-02	2.74679E-03	7.24408E-02	等価流速比	5.651
45.00	103.95	105.00	5.082	5.481	25.259	1.67809E-02	1.40799E-03	3.63585E-02	—	—
40.00	108.95	110.00	5.022	—	24.944	1.27298E-02	8.10239E-04	2.04356E-02	—	—
35.00	113.95	115.00	4.956	—	24.588	9.76939E-03	4.77205E-04	1.17188E-02	—	—
30.00	118.95	120.00	4.880	—	24.178	7.35683E-03	2.70615E-04	6.44375E-03	—	—
25.00	123.95	125.00	4.792	—	23.693	5.27920E-03	1.39350E-04	3.19932E-03	—	—
20.00	128.95	130.00	4.686	—	23.097	3.51947E-03	6.19333E-05	1.35986E-03	—	—
15.00	133.95	135.00	4.553	—	22.312	2.09463E-03	2.19374E-05	4.54743E-04	—	—
10.00	138.95	140.00	4.372	—	21.128	1.02173E-03	5.21966E-06	9.97713E-05	—	—
5.00	143.95	145.00	4.079	—	10.198	3.17829E-04	5.05076E-07	8.40454E-06	—	—
0.00	148.95	150.00	0.000	—	平均流速比	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	等価流速比	5.651
					5.154					

表10-4 (1/2) 10B配管に取付けられた温度計ウェル部の流速分布 (配管内 $V_{max}=5.90\text{m/sec}$, $V_{ave}=5.15\text{m/sec}$) $n=7$ の場合

10B配管に取り付けられた場合										
ウェルの位置 (mm)	配管中心からの距離 (mm)	ウェル先端からの距離 (mm)	流速 V (m/sec)	$\int_{L_0} V(x) dx$		ϕ	$\int_{L_0} \phi(x)^2 dx$	$\int_{L_0} \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx$	$\frac{(\int_{L_0} \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx)}{(\int_{L_0} \phi(x)^2 dx)^{0.5}}$	
150.00	-25.60	0.00	5.709	14.298	14.298	1.00000E+00	2.50000E+00	8.14790E+01	—	—
147.50	-23.10	2.50	5.729	5.733	5.733	9.68149E-01	9.37312E-01	3.07674E+01	—	—
146.50	-22.10	3.50	5.737	37.458	37.458	9.55410E-01	5.93325E+00	1.95307E+02	—	—
140.00	-15.60	10.00	5.788	43.618	43.618	8.72640E-01	5.71125E+00	1.91338E+02	—	—
132.50	-8.10	17.50	5.843	44.022	44.022	7.77423E-01	4.53290E+00	1.54781E+02	—	—
125.00	-0.60	25.00	5.896	36.740	36.740	6.83004E-01	2.91559E+00	1.01350E+02	—	—
118.75	5.65	31.25	5.861	36.490	36.490	6.05455E-01	2.29110E+00	7.86994E+01	—	—
112.50	11.90	37.50	5.816	36.201	36.201	5.29499E-01	1.75231E+00	5.92692E+01	—	—
106.25	18.15	43.75	5.769	35.898	35.898	4.55756E-01	1.29821E+00	4.31987E+01	—	—
100.00	24.40	50.00	5.719	35.578	35.578	3.84921E-01	9.26026E-01	3.02850E+01	—	—
93.75	30.65	56.25	5.666	35.241	35.241	3.17755E-01	6.31052E-01	2.02610E+01	—	—
87.50	36.90	62.50	5.611	34.882	34.882	2.55073E-01	4.06639E-01	1.28010E+01	—	—
81.25	43.15	68.75	5.552	34.500	34.500	1.97735E-01	2.44370E-01	7.53158E+00	—	—
75.00	49.40	75.00	5.488	34.091	34.091	1.46638E-01	1.34392E-01	4.04837E+00	—	—
68.75	55.65	81.25	5.421	33.650	33.650	1.02706E-01	6.59283E-02	1.93723E+00	—	—
62.50	61.90	87.50	5.347	33.172	33.172	6.68874E-02	2.79620E-02	7.99562E-01	—	—
56.25	68.15	93.75	5.268	32.647	32.647	4.01413E-02	1.00708E-02	2.79430E-01	—	—
50.00	74.40	100.00	5.180	平均流速比	25.705	2.34384E-02	2.74679E-03	7.36921E-02	等価流速比	5.784
45.00	79.40	105.00	5.102	5.642	25.298	1.67809E-02	1.40799E-03	3.66541E-02	—	—
40.00	84.40	110.00	5.017	—	24.849	1.27298E-02	8.10239E-04	2.03948E-02	—	—
35.00	89.40	115.00	4.922	—	24.344	9.76939E-03	4.77205E-04	1.15623E-02	—	—
30.00	94.40	120.00	4.815	—	23.766	7.35683E-03	2.70615E-04	6.27424E-03	—	—
25.00	99.40	125.00	4.691	—	23.089	5.27920E-03	1.39350E-04	3.06685E-03	—	—
20.00	104.40	130.00	4.544	—	22.263	3.51947E-03	6.19333E-05	1.27886E-03	—	—
15.00	109.40	135.00	4.361	—	21.192	2.09463E-03	2.19374E-05	4.17240E-04	—	—
10.00	114.40	140.00	4.116	—	19.609	1.02173E-03	5.21966E-06	8.84162E-05	—	—
5.00	119.40	145.00	3.728	—	9.319	3.17829E-04	5.05076E-07	7.01840E-06	—	—
0.00	124.40	150.00	0.000	—	平均流速比	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	等価流速比	5.783
					5.224					

表10-4 (2/2) 10B配管に取り付けられた温度計ウェル部の流速分布 (配管内 $V_{max}=5.678\text{m/sec}$, $V_{ave}=5.15\text{m/sec}$) $n=10$ の場合

10B配管に取り付けられた場合										
ウェルの位置 (mm)	配管中心からの距離 (mm)	ウェル先端からの距離 (mm)	流速 V (m/sec)	$\int_{L_0} V(x) dx$		ϕ	$\int_{L_0} \phi(x)^2 dx$	$\int_{L_0} \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx$	$\frac{(\int_{L_0} \phi(x)^2 \cdot V(x)^2 dx)}{(\int_{L_0} \phi(x)^2 dx)^{0.5}}$	
150.00	-25.60	0.00	5.549	13.890	13.890	1.00000E+00	2.50000E+00	7.69816E+01	—	—
147.50	-23.10	2.50	5.563	5.566	5.566	9.68149E-01	9.37312E-01	2.90069E+01	—	—
146.50	-22.10	3.50	5.568	36.307	36.307	9.55410E-01	5.93325E+00	1.83977E+02	—	—
140.00	-15.60	10.00	5.603	42.162	42.162	8.72640E-01	5.71125E+00	1.79289E+02	—	—
132.50	-8.10	17.50	5.640	42.435	42.435	7.77423E-01	4.53290E+00	1.44207E+02	—	—
125.00	-0.60	25.00	5.676	35.399	35.399	6.83004E-01	2.91559E+00	9.39217E+01	—	—
118.75	5.65	31.25	5.652	35.230	35.230	6.05455E-01	2.29110E+00	7.31924E+01	—	—
112.50	11.90	37.50	5.622	35.035	35.035	5.29499E-01	1.75231E+00	5.53779E+01	—	—
106.25	18.15	43.75	5.590	34.829	34.829	4.55756E-01	1.29821E+00	4.05607E+01	—	—
100.00	24.40	50.00	5.556	34.612	34.612	3.84921E-01	9.26026E-01	2.85837E+01	—	—
93.75	30.65	56.25	5.520	34.382	34.382	3.17755E-01	6.31052E-01	1.92289E+01	—	—
87.50	36.90	62.50	5.482	34.137	34.137	2.55073E-01	4.06639E-01	1.22210E+01	—	—
81.25	43.15	68.75	5.442	33.875	33.875	1.97735E-01	2.44370E-01	7.23614E+00	—	—
75.00	49.40	75.00	5.398	33.593	33.593	1.46638E-01	1.34392E-01	3.91634E+00	—	—
68.75	55.65	81.25	5.351	33.288	33.288	1.02706E-01	6.59283E-02	1.88808E+00	—	—
62.50	61.90	87.50	5.301	32.956	32.956	6.68874E-02	2.79620E-02	7.85670E-01	—	—
56.25	68.15	93.75	5.245	32.590	32.590	4.01413E-02	1.00708E-02	2.77066E-01	—	—
50.00	74.40	100.00	5.184	平均流速比	25.783	2.34384E-02	2.74679E-03	7.38100E-02	等価流速比	5.600
45.00	79.40	105.00	5.129	5.503	25.497	1.67809E-02	1.40799E-03	3.70457E-02	—	—
40.00	84.40	110.00	5.069	—	25.179	1.27298E-02	8.10239E-04	2.08219E-02	—	—
35.00	89.40	115.00	5.002	—	24.819	9.76939E-03	4.77205E-04	1.19403E-02	—	—
30.00	94.40	120.00	4.926	—	24.406	7.35683E-03	2.70615E-04	6.56555E-03	—	—
25.00	99.40	125.00	4.837	—	23.916	5.27920E-03	1.39350E-04	3.25979E-03	—	—
20.00	104.40	130.00	4.730	—	23.314	3.51947E-03	6.19333E-05	1.38556E-03	—	—
15.00	109.40	135.00	4.596	—	22.522	2.09463E-03	2.19374E-05	4.63338E-04	—	—
10.00	114.40	140.00	4.413	—	21.327	1.02173E-03	5.21966E-06	1.01657E-04	—	—
5.00	119.40	145.00	4.118	—	10.294	3.17829E-04	5.05076E-07	8.56340E-06	—	—
0.00	124.40	150.00	0.000	—	平均流速比	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	等価流速比	5.600
					5.182					

表10-5 配管口径による流速分布への影響

流速分布の評価部分		振動モード	12B配管	10B配管
			n = 7 ~ 10	
配管内の流速	V _{max}	考慮なし	5.94 ~ 5.728 (1.000)	5.90 ~ 5.678 (1.000)
	V _{ave}		5.15 (0.867 ~ 0.899)	5.15 (0.873 ~ 0.907)
ナトリウム中ウェル部分のうち細管部 (長さ100mm) の流速	平均流速	考慮なし	5.580 ~ 5.481 (0.939 ~ 0.957)	5.642 ~ 5.503 (0.956 ~ 0.969)
	等価流速	考慮	5.827 ~ 5.651 (0.981 ~ 0.987)	5.784 ~ 5.600 (0.980 ~ 0.986)
ナトリウム中ウェル部分 (長さ150mm) の流速	平均流速	考慮なし	5.155 ~ 5.154 (0.868 ~ 0.900)	5.224 ~ 5.182 (0.885 ~ 0.913)
	等価流速	考慮	5.826 ~ 5.651 (0.981 ~ 0.987)	5.783 ~ 5.600 (0.980 ~ 0.986)

注) : カッコ内は、V_{max}比を示す。

表10-6 水流動試験と実機条件との比較検討

動粘性係数、レイノルズ数及び密度の比

温度 (°C)	水流動試験		実機条件		水流動試験と実機との比		
	動粘性係数 (m ² /sec)	密度 (kg/m ³)	動粘性係数 (m ² /sec)	密度 (kg/m ³)	動粘性係数 ν	レイノルズ数Re $Vr \cdot fn \cdot D_{CA}^2 / \nu$	密度 ρ
20	1.0144E-06	998.159					
250			4.3736E-07	891.836	2.319	0.457	1.119
470			3.0498E-07	839.473	3.326	0.334	1.189

縦弾性係数の固有振動数への影響

温度 (°C)	水流動試験		実機条件		水流動試験と実機との比		
	縦弾性係数 (kg/mm ²)	固有振動数 (Hz)	縦弾性係数 (kg/mm ²)	固有振動数 (Hz)	縦弾性係数 E	固有振動数 fn	fnへの影響 E ^{0.5}
20	2.1029E+04	537.5					
250			1.9764E+04	507.0	1.064	1.060	1.032
470			1.7876E+04	484.0	1.176	1.111	1.085

流体排除質量の固有振動数への影響

温度 (°C)	水流動試験		実機条件		水流動試験と実機との比		
	ウェル重量 (kg)	流体排除質量 (kg)	ウェル重量 (kg)	流体排除質量 (kg)	ウェル重量 W ₁	流体排除質量 W ₂	fnへの影響 $(1/(W_1+W_2))^{1/2}$
20	0.1390	0.0186					
250			0.1390	0.0166	1.000	1.119	0.994
470			0.1390	0.0156	1.000	1.189	0.991

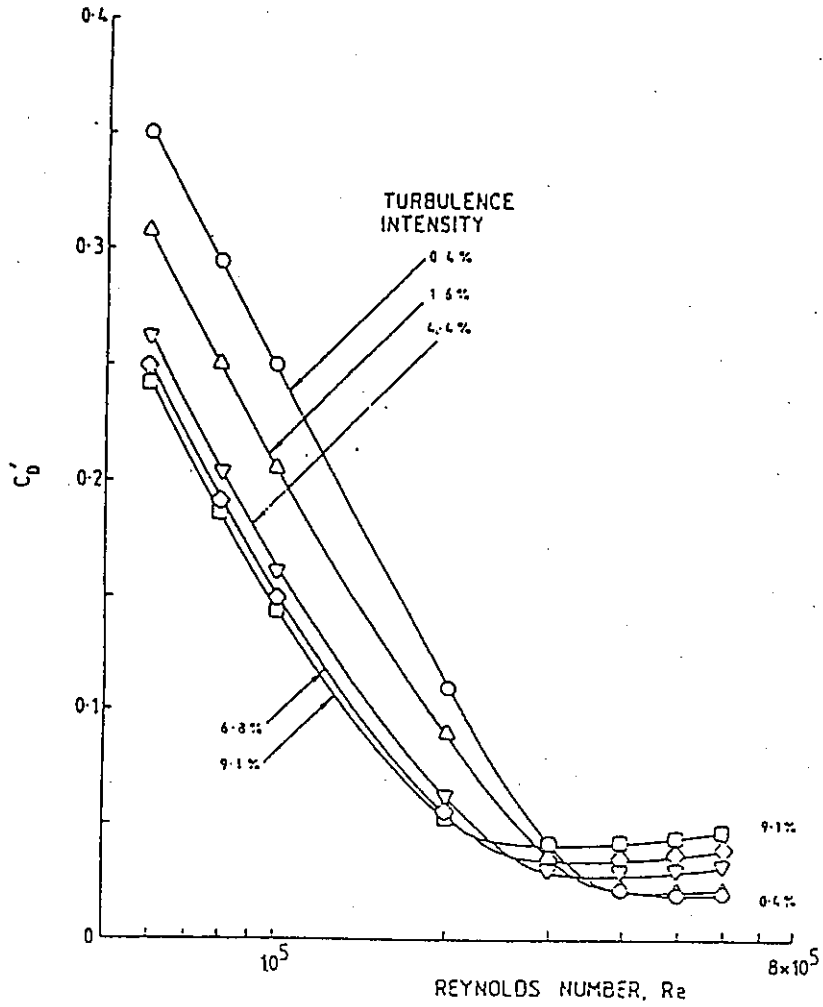


FIGURE 7.14. Fluctuating drag coefficient as a function of Reynolds number for various turbulence intensities (from Cheung and Melbourne 1983, with permission--see Credits)

図10-2 抗力方向の変動流体抵抗係数

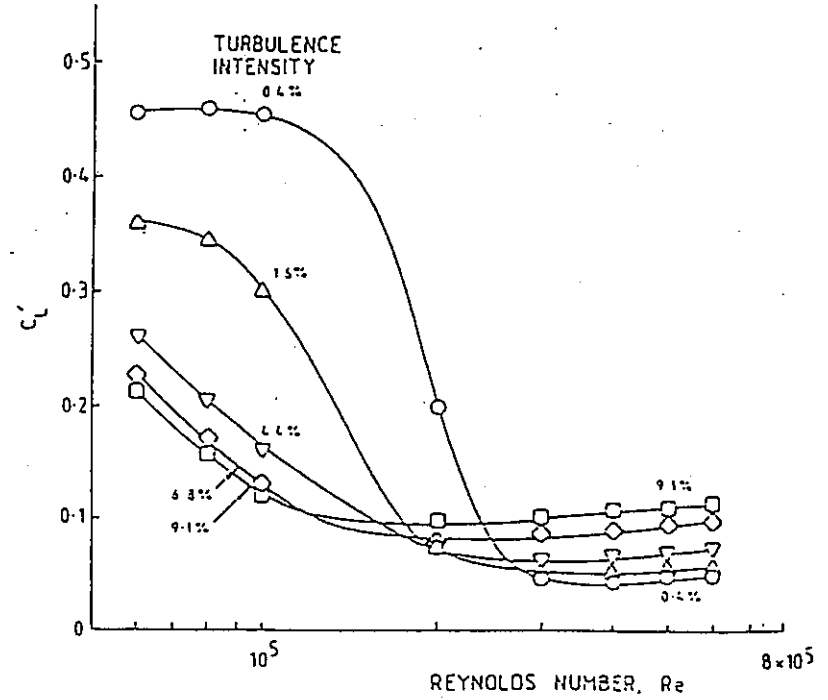
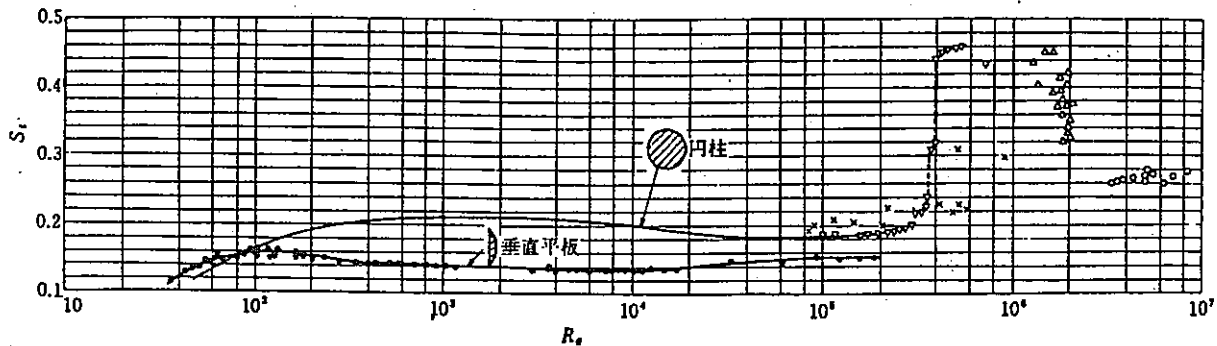


FIGURE 7.15. Fluctuating lift coefficient as a function of Reynolds number for various turbulence intensities (from Cheung and Melbourne 1983, with permission--see Credits)

図10-3 揚力方向の変動流体抵抗係数



(b) 円柱, 垂直平板のストローハル数
図 206

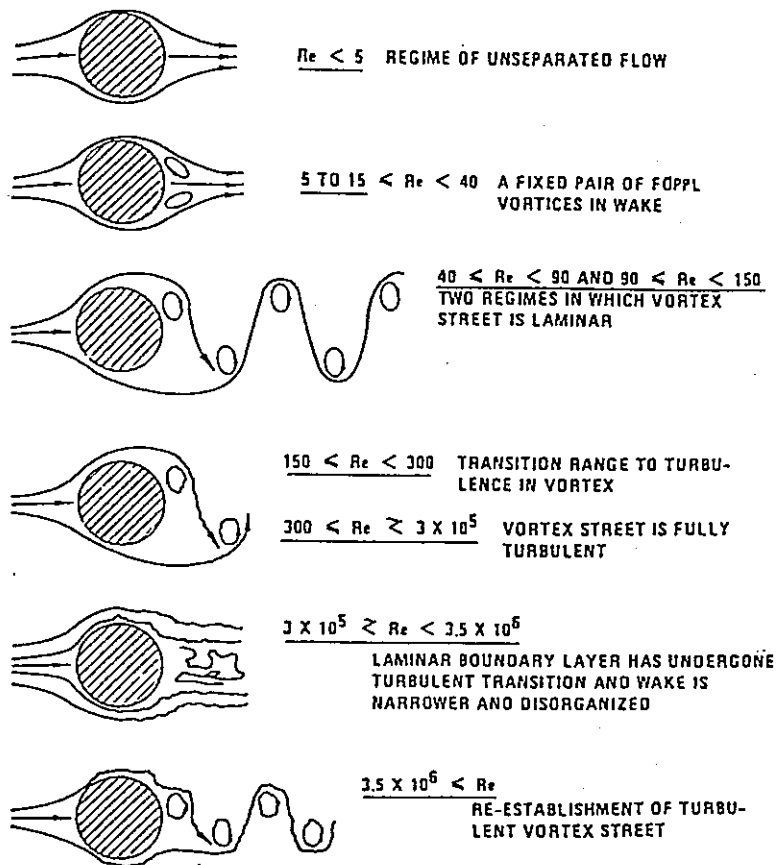


FIGURE 7.1. Regimes of flow across a circular cylinder (from Shin and Mambganss 1977; original source from Lienhard 1966)

図10-4 ストローハル数とレイノルズ数、渦の放出とレイノルズ数との関係

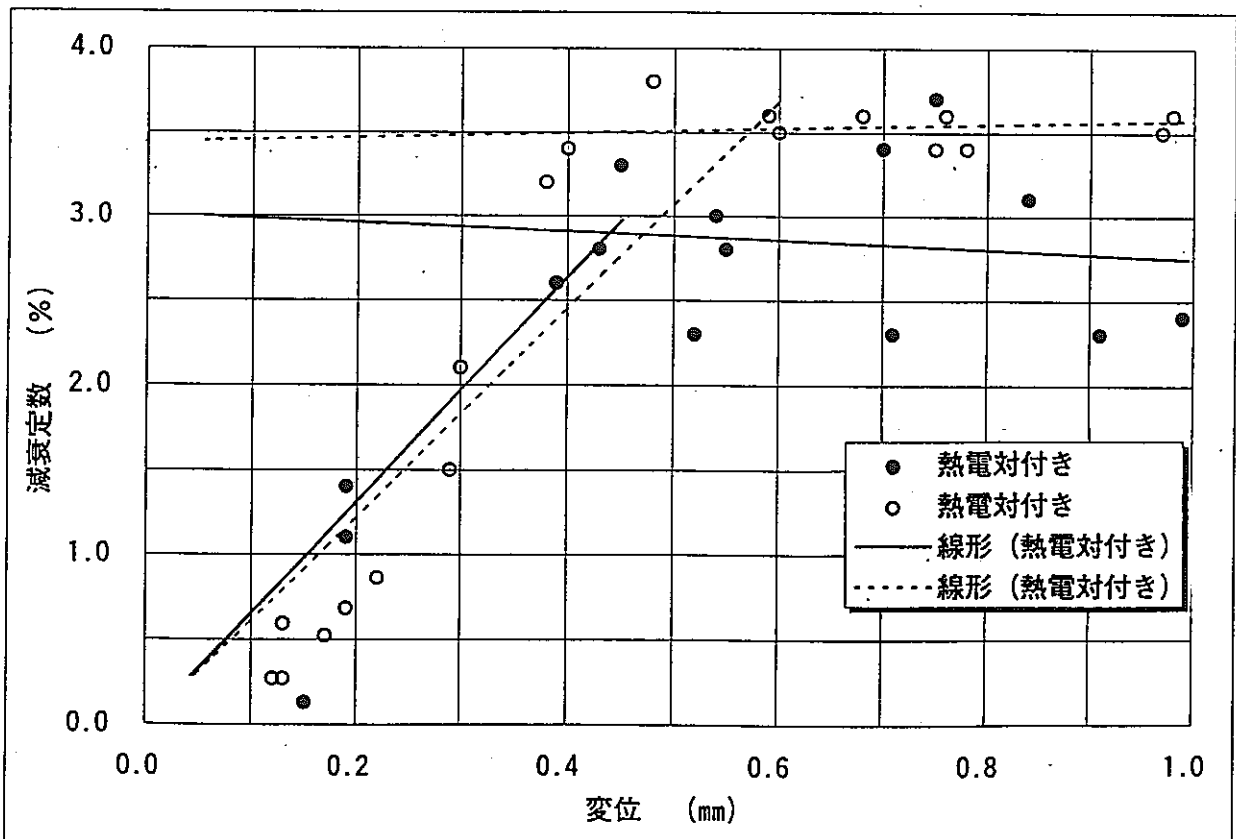
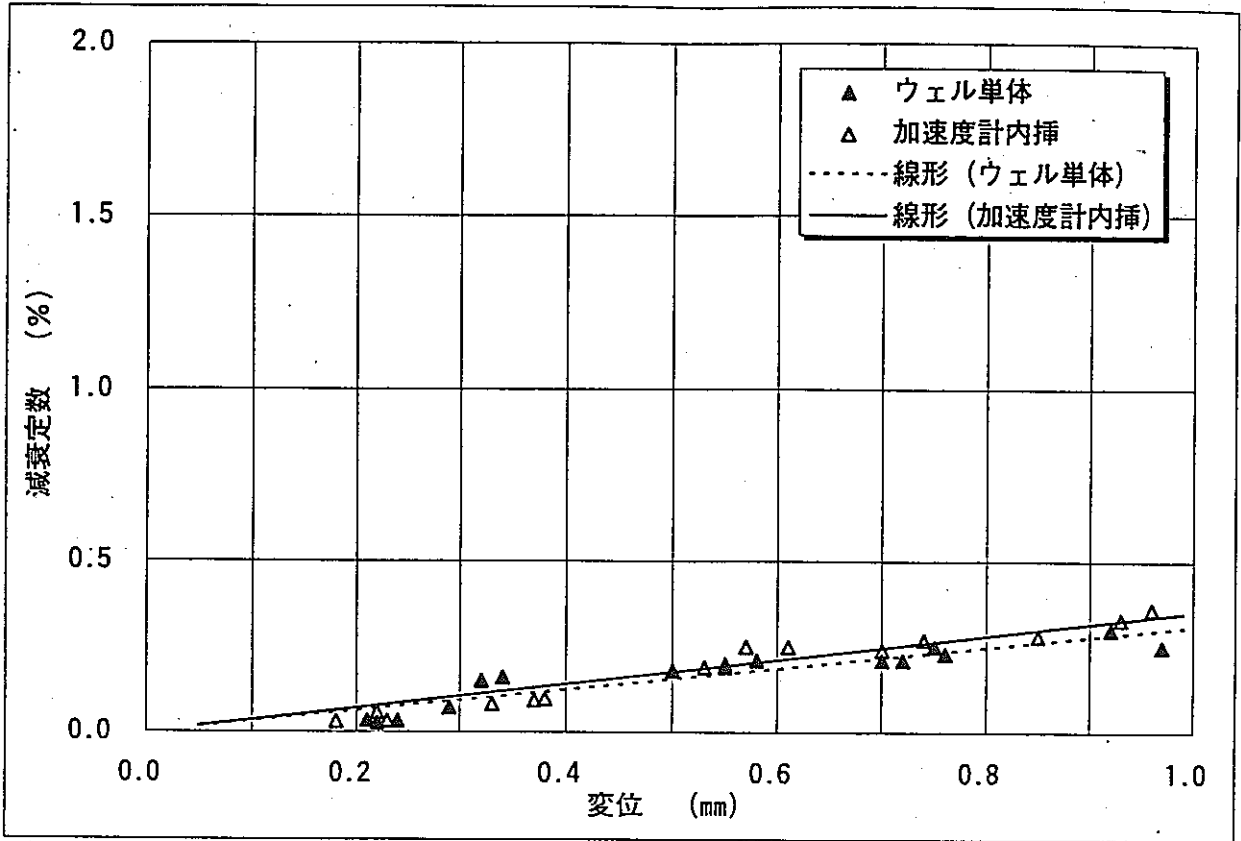


図10-5 2次主冷却系温度計ウエルの減衰定数

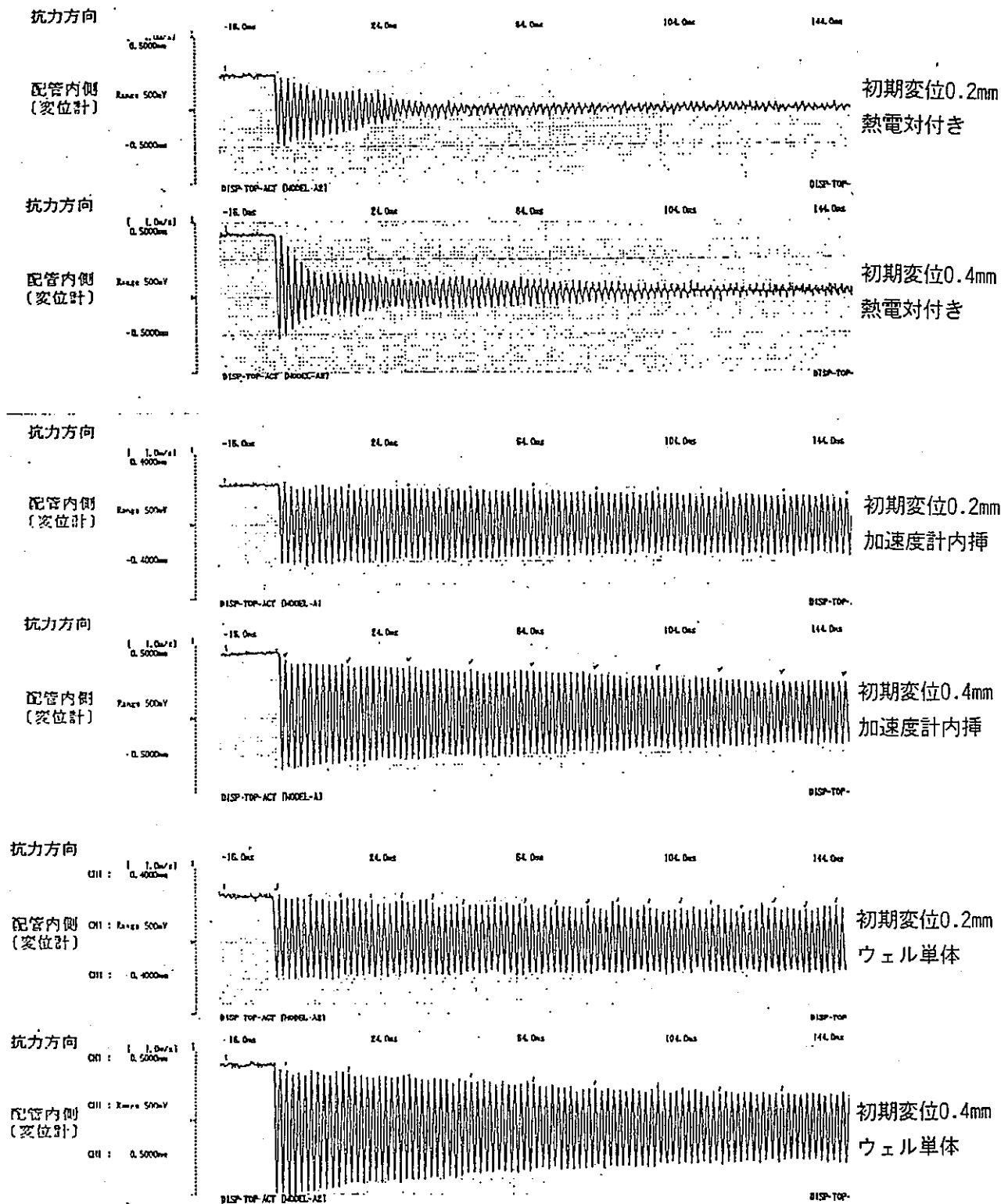


図10-6 スナップバック試験で得られた2次主冷却系温度計ウェルの自由振動波形

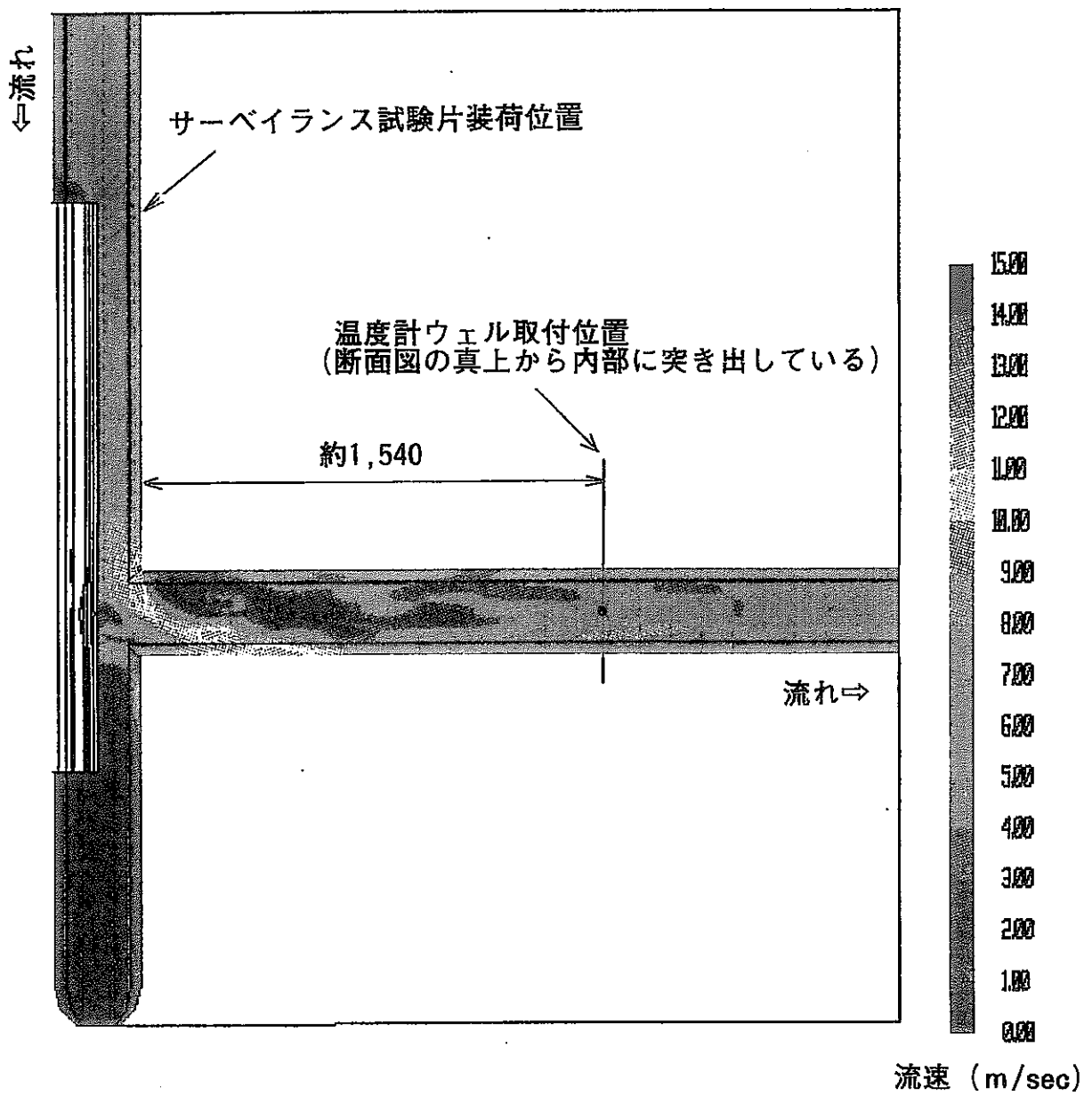


図10-7 配管上部から見た配管内流速分布 (主冷却器入口部流動解析結果)

表10-7 主冷却器入口部温度計ウェル（ナトリウム中部分）の等価流速

質点No.	距離 L_e (mm)	ウェル外径 (mm)	EIGENVECTOR ϕ_n	$\int_{L_e} \phi_n^2(x) dx$	流速分布 V (m/sec)	$\int_{L_e} \phi_n^2(x) V^2(x) dx$	$\int_{L_e} \phi_n^2(x) \cdot V^2(x) dx$ / $\int_{L_e} \phi_n^2(x) dx$	等価流速 (m/sec)
10	1.250	8.60	1.00000E+00	1.25000E+00	4.75704	2.82868E+01	—	—
12	1.750	8.60	9.68149E-01	1.64030E+00	4.76155	3.71894E+01	—	—
14	3.750	8.60	9.55410E-01	3.42303E+00	4.78545	7.83892E+01	—	—
16	7.000	8.60	8.72640E-01	5.33050E+00	4.83005	1.24358E+02	—	—
18	7.500	8.60	7.77423E-01	4.53290E+00	4.87785	1.07853E+02	—	—
20	6.875	8.60	6.83004E-01	3.20715E+00	4.92166	7.76859E+01	—	—
22	6.250	8.60	6.05455E-01	2.29110E+00	4.96149	5.63985E+01	—	—
25	6.250	8.60	5.29499E-01	1.75231E+00	5.00131	4.38307E+01	—	—
28	6.250	8.60	4.55756E-01	1.29821E+00	5.04114	3.29915E+01	—	—
30	6.250	8.60	3.84921E-01	9.26026E-01	5.08097	2.39065E+01	—	—
32	6.250	8.60	3.17755E-01	6.31052E-01	5.12080	1.65478E+01	—	—
35	6.250	8.60	2.55073E-01	4.06639E-01	5.16062	1.08296E+01	—	—
38	6.250	8.60	1.97735E-01	2.44370E-01	5.20709	6.62579E+00	—	—
40	6.250	8.60	1.46638E-01	1.34392E-01	5.26603	3.72682E+00	—	—
42	6.250	8.60	1.02706E-01	6.59283E-02	5.32496	1.86941E+00	—	—
45	6.250	8.60	6.68874E-02	2.79620E-02	5.38390	8.10517E-01	—	—
48	6.250	8.60	4.01413E-02	1.00708E-02	5.44283	2.98341E-01	—	—
50	5.625	8.60	2.34384E-02	3.09014E-03	5.49587	9.33366E-02	—	—
52	5.000	11.45	1.67809E-02	1.40799E-03	5.54302	4.32607E-02	—	—
55	5.000	14.30	1.27298E-02	8.10239E-04	5.59017	2.53200E-02	—	—
58	5.000	17.15	9.76939E-03	4.77205E-04	5.63732	1.51653E-02	—	—
60	5.000	20.00	7.35683E-03	2.70615E-04	5.68447	8.74442E-03	—	—
62	5.000	20.00	5.27920E-03	1.39350E-04	5.73162	4.57784E-03	—	—
63	5.000	20.00	3.51947E-03	6.19333E-05	5.77876	2.06821E-03	—	—
65	5.000	20.00	2.09463E-03	2.19374E-05	5.82591	7.44582E-04	—	—
67	5.000	20.00	1.02173E-03	5.21966E-06	5.87306	1.80041E-04	—	—
68	5.000	20.00	3.17829E-04	7.57615E-07	5.87306	5.31149E-05	—	—
70	2.500	20.00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.87306	0.00000E+00	—	—
	150.00	11.64	8.44150E+00	2.71782E+01	—	6.51791E+02	2.39821E+01	4.89715E+00

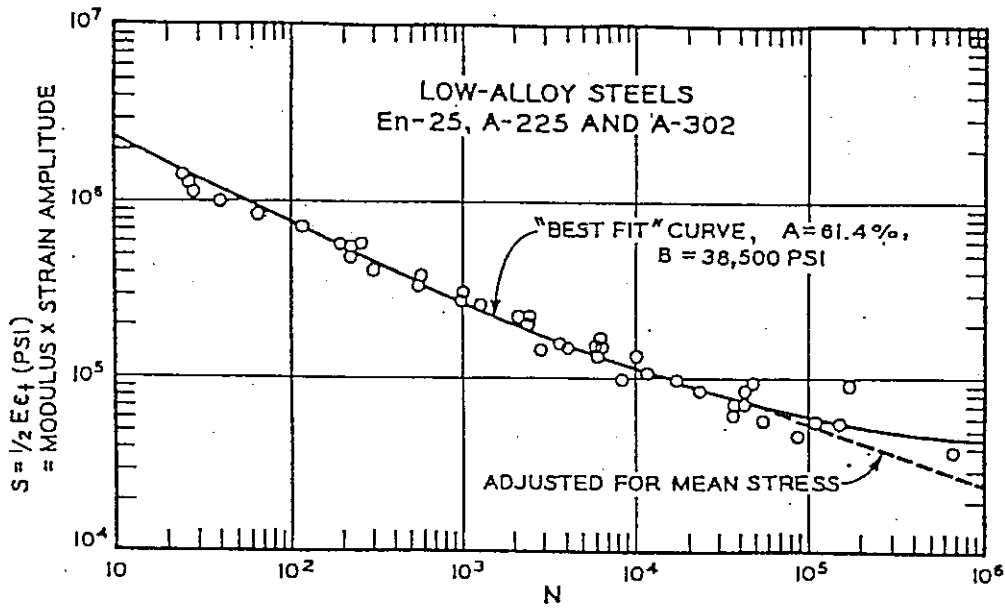


FIG. 10. FATIGUE DATA - LOW-ALLOY STEELS.

(低合金鋼の疲労試験データに対する最適曲線のあてはめ性)

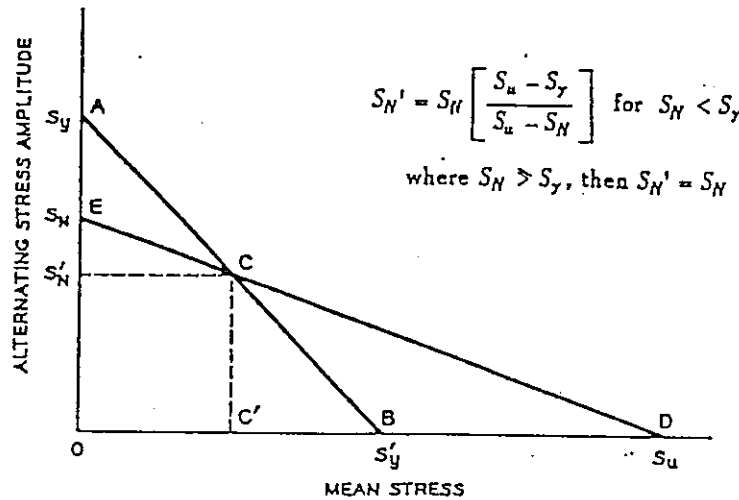


FIG. 6. MODIFIED GOODMAN DIAGRAM.

(修正 Goodman線図による平均応力効果の評価)

(出典)

"Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2," The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1969

図10-8 ASMEに掲載されている低合金鋼の設計疲労線図の定め方

2.25Cr-1Moの疲労曲線

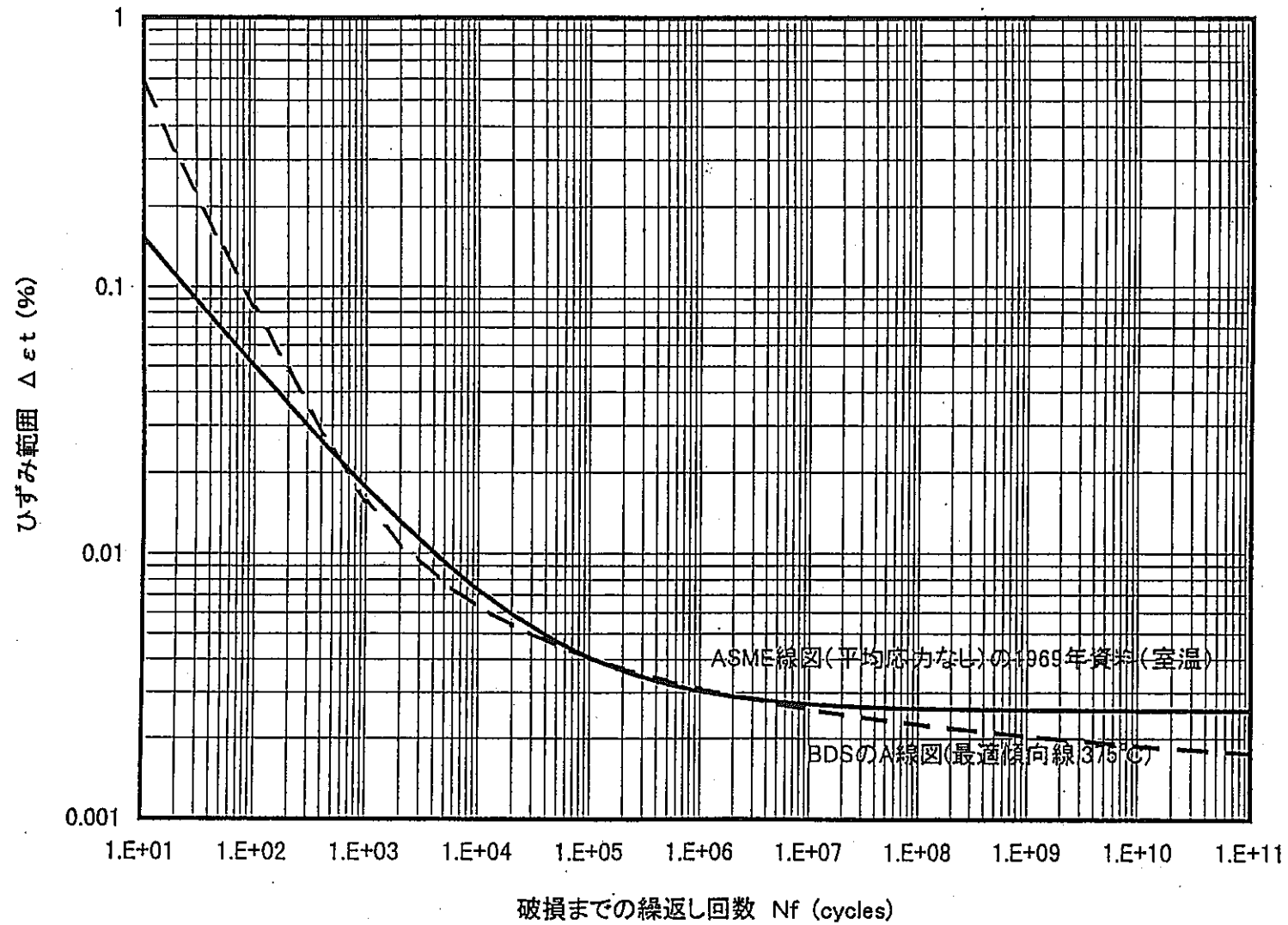


図10-9 (1/2) ASME式の室温疲労曲線とBDS式の375°C疲労曲線の対応

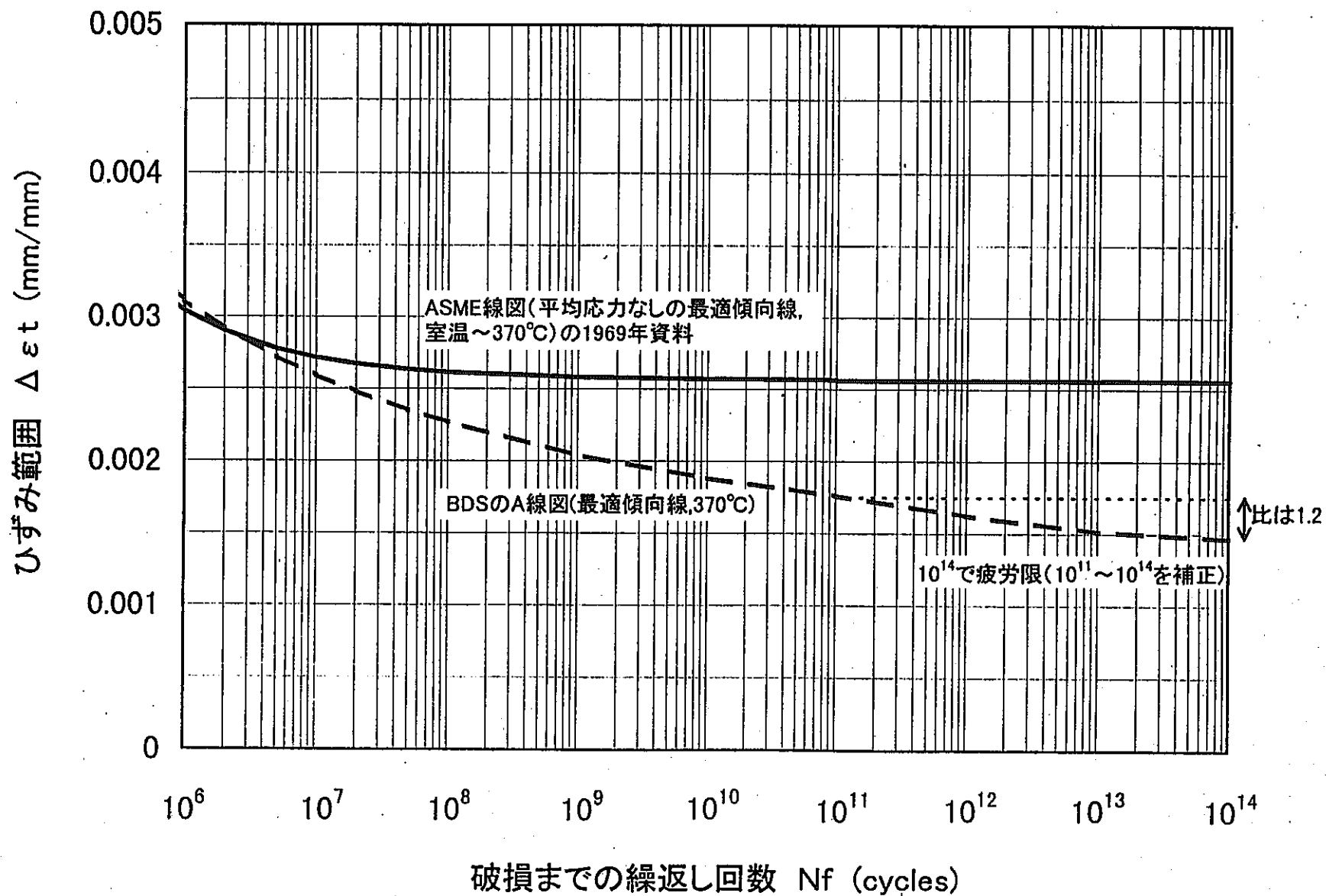


図10-9 (2/2) ASME式の室温疲労曲線とBDS式の375°C疲労曲線の対応

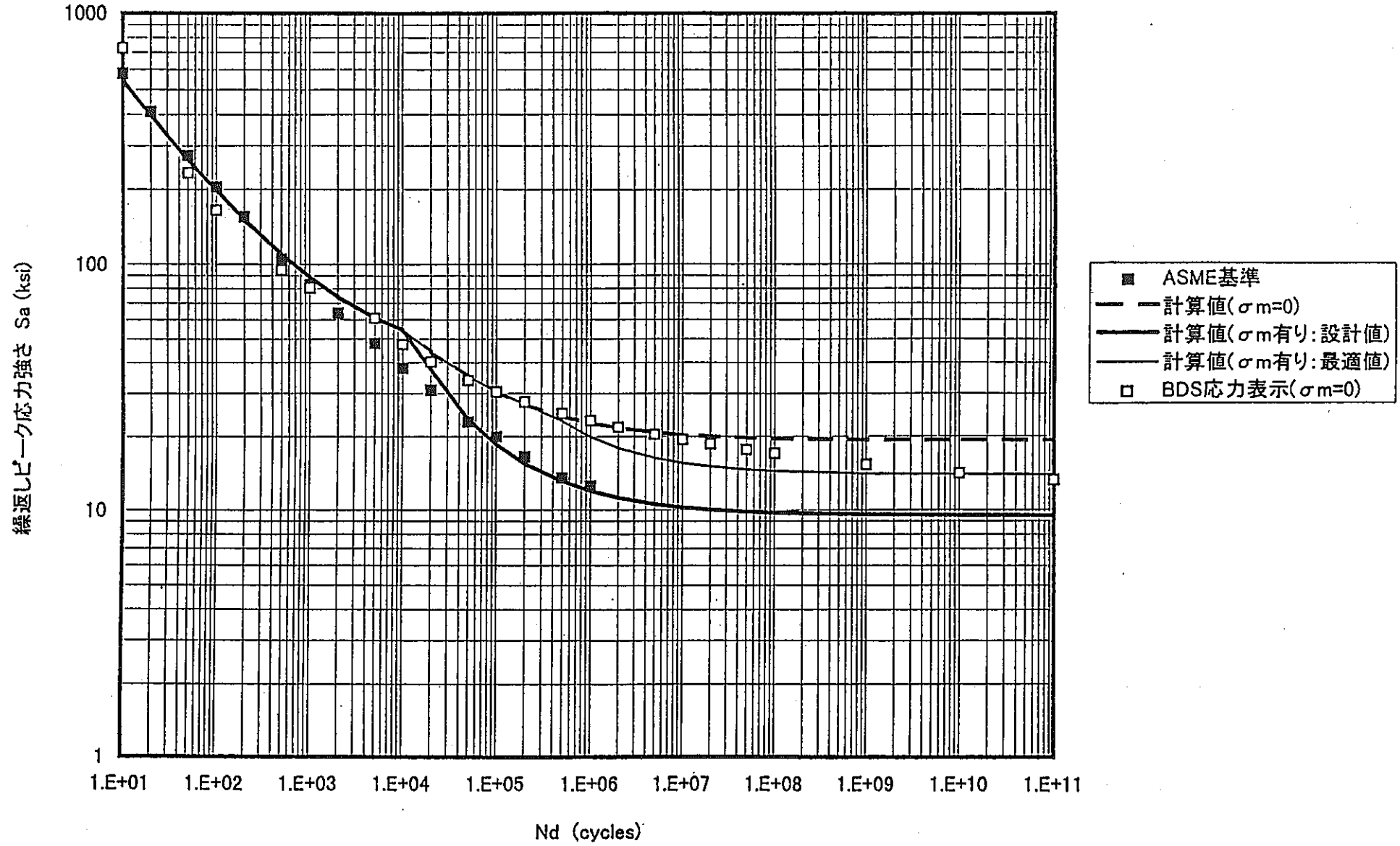


図10-10 ASME基準値、計算結果及びBDS式に基づく値の対応

11. ま と め

「常陽」では、「もんじゅ」2次冷却系ナトリウム漏えい事故を受けて、「もんじゅ」と同様に1次及び2次冷却系配管にナトリウム温度を測定するナトリウム中に突き出た温度計ウェルが多数設置されていることから、これらの流力振動評価を行った。

1次冷却系については、いずれの温度計ウェルにおいても簡易流力振動評価で $V_r < 0.3$ であり、ASMEに基づく評価の(a)項である揚力方向及び抗力方向のロックイン回避の判定値($V_r < 1.0$)を十分満足し、渦により共振することがないことを確認した。

2次冷却系については、2次主冷却系以外はいずれも(a)項である揚力方向及び抗力方向のロックイン回避の判定値($V_r < 1.0$)を満足しており、渦により共振することがないことを確認した。しかし、2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウェルについては、(a)項を満足せず、(c)項である揚力方向のロックイン回避及び抗力方向のロックイン抑制の判定値($V_r < 3.3$ 、かつ、 $C_n > 1.2$)を減衰定数約0.6%で満足し、抗力方向のロックインが抑制される領域の下限界近傍であると考えられたことから、詳細な振動特性の把握と水流動試験を実施した。この結果、温度計ウェル単体と同様の加速度計を内挿した温度計ウェルを用いた水流動試験で、原子炉定格出力運転中(470℃)の無次元流速 $V_r = 1.24$ における温度計ウェル先端無次元変位振幅は0.015(0.13mm)、この時のウェル細管付け根部に発生するピーク応力は 2.9kg/mm^2 (応力集中係数 $K_e = 1.04$ を考慮)であることを確認した。したがって、流力振動によってウェル細管付け根部に発生するピーク応力は、設計疲労限である $\sigma_F = 5.3\text{kg/mm}^2$ を十分満足しており、2次主冷却系温度計ウェルが流力振動(交互渦及び対称渦)によって破損することがないことを確認した。

上記のことから、無次元流速がASMEに基づく評価の(a)項の $V_r < 1.0$ を満足せず、換算減衰係数も(c)項の $C_n > 1.2$ を満足しなくても、 V_r がKingの文献で示されている $V_r < 1.25$ を満足し、温度計ウェルの形状が「常陽」のように応力集中を生じないような適切な形状を確保していれば、温度計ウェルに振動が生じていても、その発生応力は疲労限以下で温度計ウェルが破損するようなことはなく、「常陽」の温度計ウェルが設計時において適切な形状を選定していたことが再確認できた。

12. 謝 辞

2次主冷却系温度計ウェルの詳細な流力振動評価にあたっては、熱流体技術開発室の山口担当役、村松主任研究員、ヴァーチャルエンジニアリング開発室の佐藤室長、プラント工学室の一宮室長、構造材料開発室の森下室長代理、北村副主任研究員に、ご指導、ご助勢頂いた。また、解析作業にあたっては、原子力システム（株）の菅谷和司氏にご助勢頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

13. 参考文献

- (1) The American Society Mechanical Engineers : ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SECTION III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components DIVISION1-AppendixN, 1995
- (2) 小堀与一 : 実用振動計算法, 工学図書, 1978
- (3) 日本機械学会 : 機械工学便覧, A 3 編力学・機械力学, 丸善, 1987
- (4) 日本機械学会 : 機械工学便覧, A 5 編流体力学, 丸善, 1987
- (5) L. E. Goodman : MATERIAL DAMPING AND SLIP DAMPING, Shock&VibrationHandbook(2nd Edition), McGRAW-HILL Company, 1976
- (6) King. R : On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound Vib. 29(2), pp. 169-188, 1973
- (7) R. E. PETERSON : STRESS CONCENTRATION FACTORS, A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, 1974
- (8) P. P. BIJLAARD : STRESSES FROM RADIAL LOADS AND EXTERNAL MOMENTS IN CYLINDRICAL PRESSURE VESSELS, WELDING JOURNAL, 34(12), WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, 1955
- (9) (社) 日本電気協会, 電気技術基準調査委員会 : 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987, 昭和62年8月
- (10) 柴田明德 : 最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981
- (11) 岡田旻, 高橋賢三 : 配管設計の諸問題と対策, 工学図書, 1979
- (12) HERMANN. S : Boundary Layer Theory, Turbulent flow through pipes, McGRAW HILL BOOK COMPANY, 1968
- (13) Cheung. J. C. K. and Melbourne. W. H. : Turbulence Effects on Some Aerodynamic Parameters of a Circular Cylinder at Supercritical Reynolds Numbers, J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics 14, 399-410, 1983
- (14) 原田幸夫 : 流体力学, 槇書店, 昭和52年
- (15) 原文雄 : 流体関連ダイナミックス(その2) — 渦放出と渦による振動 —, ターボ機械, 第19巻, 第11号, 1991
- (16) 須藤浩三, 高見敏弘, 矢野賢司 : 円形断面をした90° ベント内の乱流, 日本機械学会 論文集(B編), 58巻548号, 1992-4

- (17) 通産省資源エネルギー庁 : 解説原子力設備の技術基準, 電力新報社, 1986
- (18) The American Society Mechanical Engineers : Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2, 1969
- (19) 宮健三, 矢川元基 : 原子力シリーズ1 原子炉構造工学, 東京大学出版会, 1976
- (20) D. ハルトック : 機械振動論, コロナ社, 1960

添付資料 1

温度計ウェルの減衰定数測定データ

1. 概要

4.章「温度計ウェルの振動特性」及び5.章「2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数に関する一考察（「常陽」と「もんじゅ」の減衰定数の違いについて）」で「常陽」2次主冷却系温度計ウェルの減衰特性について説明した。ここでは、4.章及び5.章で説明したスプリング式熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数測定結果を含め、更に追加して行った減衰定数測定結果と、「もんじゅ」2次系ナトリウム漏えい事故に鑑みて、万が一、温度計ウェルが破損した場合のナトリウム漏えい対策として、温度計ウェル内に挿入される熱電対シースの固定方式をこれまでのスプリング式から、コンプレッションフィティング式に変更していることを考慮して行ったコンプレッションフィティング式温度計ウェルの減衰定数測定結果を示すものである。

2. スプリング式温度計ウェルの減衰定数

添付図1-1にスプリング式熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数を示す。

スプリング式熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数は、5.章の「常陽」と「もんじゅ」の減衰定数の違いで考察したように、衝突によるエネルギー逸散が支配的である。また、その減衰定数は、スナップバック試験による自由振動減衰波形から求めていることから、温度計ウェルの穴径と熱電対シース外径との差（間隙）である0.4mm以下の初期変位領域では、温度計ウェルと熱電対シースが衝突する割合が初期変位量に依存するため、減衰に変位依存性があることを示した。

この傾向は、スプリング式の追加試験データを加えて示した添付図1-1でも判るように同様の傾向を示しているが、「常陽」と「もんじゅ」の減衰定数の違いでも考察したように、一定値になる初期変位量は、シースが挿入された時の微妙な位置の違いによって、追加試験データの方が初期変位量の小さいうち約0.2mmで一定値になる傾向を示している。

3. コンプレッションフィティング式温度計ウェルの減衰定数

添付図1-2にコンプレッションフィティング式熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数を示す。

コンプレッションフィティング式熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数は、添付図1-1に示したスプリング式熱電対を挿入した温度計ウェルの減衰定数とは明らかにその減衰特性が違っている。コンプレッションフィティング式温度計ウェルの減衰定数では、スプリング式温度計ウェルの減衰定数で見られたような温度計ウェルの穴径と熱電対シース外径との差（間隙）である0.4mm以下の領域において高い減衰定数が測定され、その値は初期変位

量が大きくなると小さくなる傾向を示している。

4. スプリング式とコンプレッションフィティング式の減衰定数の違いに関する考察

スプリング式とコンプレッションフィティング式の減衰定数の違いについては、以下のようなことであると考察する。

コンプレッションフィティング式温度計ウェルは、図3-2に示したようにコッタ部でテープ上に締め付けられるため、熱電対シース先端の接触圧力がスプリング式より大きい。スプリング式温度計ウェルは、シース先端に接触した後は、スプリングが縮む（同時に熱電対シースもスプリングが縮む分だけ同時に動く）だけで、スプリングの遊び代の間は、そのバネ定数でコントロールされるため、熱電対シースの接触圧力は変化しない。したがって、スプリング式とコンプレッションフィティング式では、減衰の機構が異なると考えられる。スプリング式は、温度計ウェルと熱電対シースとの衝突によるエネルギー逸散が支配的（シースが振れやすい）、コンプレッションフィティング式は温度計ウェルと熱電対シースの摩擦によるエネルギー逸散が支配的であることによるものと考えられる。

上記は、以下のことから推測できる。

添付図1-3にスプリング式とコンプレッションフィティング式の温度計ウェルの典型的な自由振動減衰波形を示す。この図から、スプリング式の減衰波形は、指数関数的に減衰していることが判断できる。一方、コンプレッションフィティング式の減衰波形は、線形的に減衰していることが判断できる。振動理論⁽²⁰⁾より、線形的に減衰していく振動系の減衰機構は、摩擦減衰であることが知られている。

減衰定数は、(添1-1)式に示した1周期あたりに振幅が減少した比の自然対数であることから、線形的に減衰する摩擦減衰系では、振幅が小さくなると対数減衰率は大きくなるということになる。

$$\text{減衰定数 } \zeta = \frac{\delta}{2 n \pi} \quad (\text{添1-1})$$

δ : 対数減衰率

$$\delta = \ln \frac{y_1}{y_n} = \ln \frac{y_0 - (n-1) \Delta y}{y_0 - n \Delta y} \quad (\text{添1-2})$$

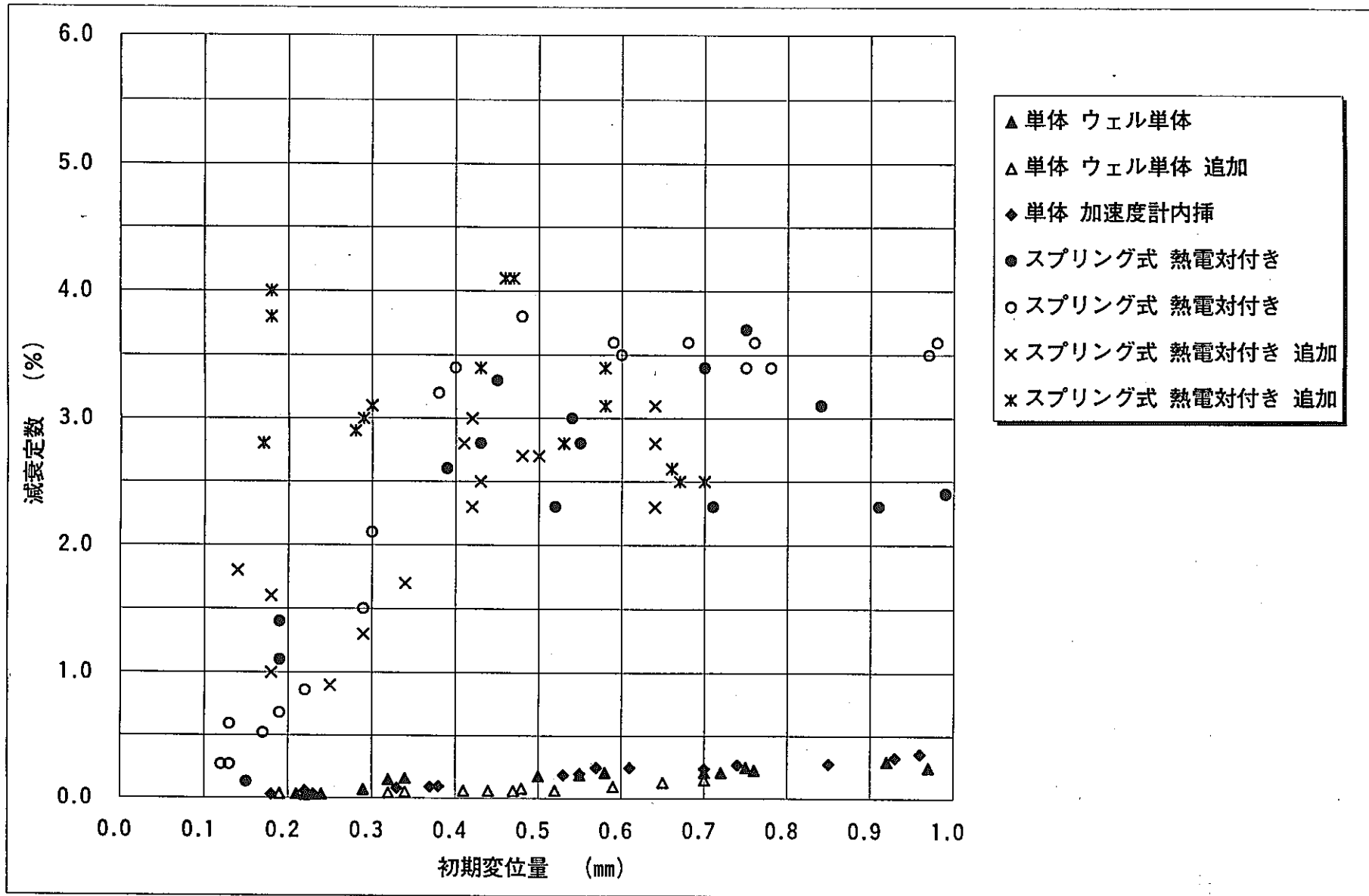
y_0 : 応答波形の初期片振幅

y_1 : 応答波形の1番目の片振幅

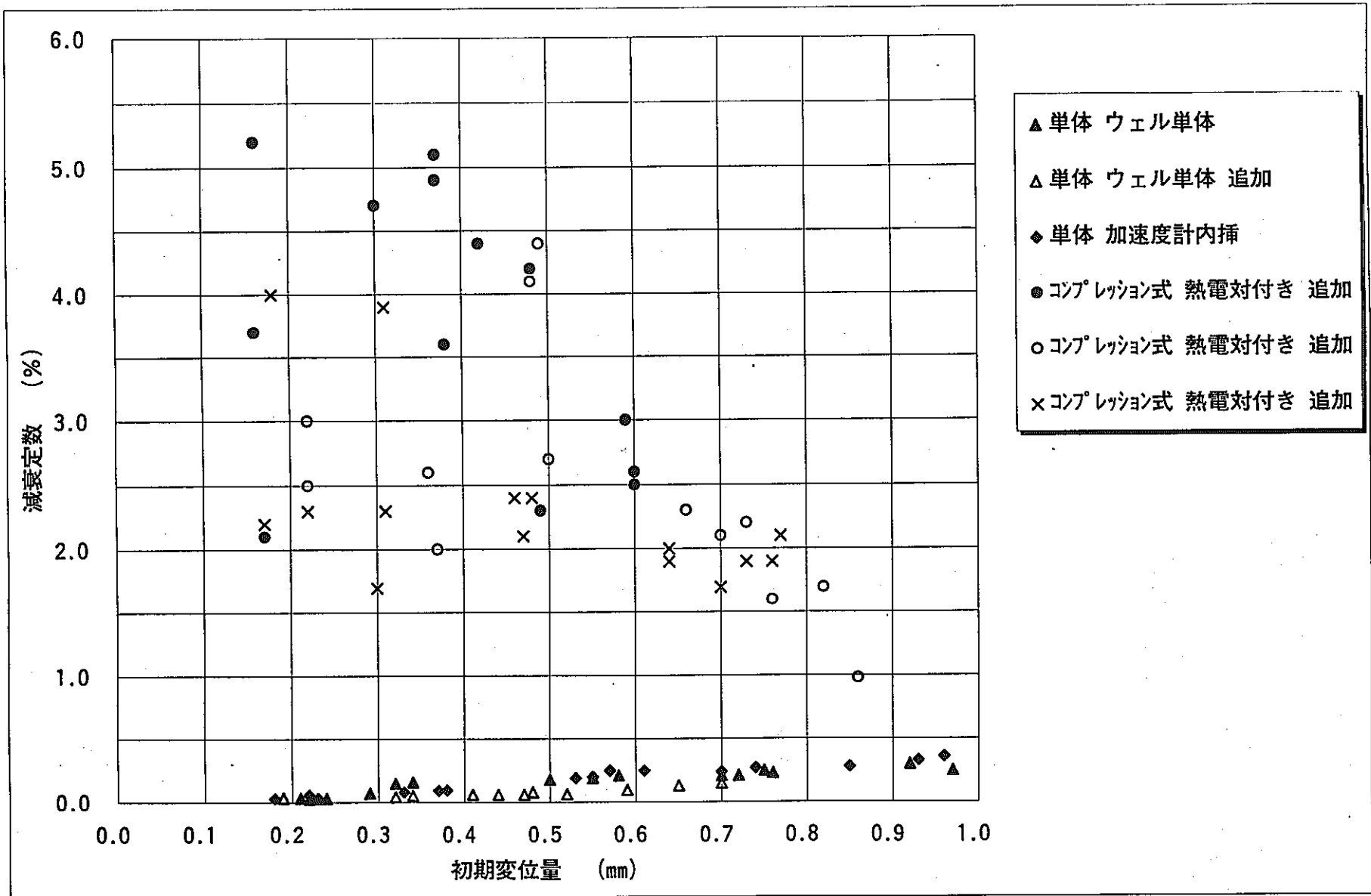
y_n : 応答波形のn番目の片振幅

Δy : 1周期毎の減衰振幅

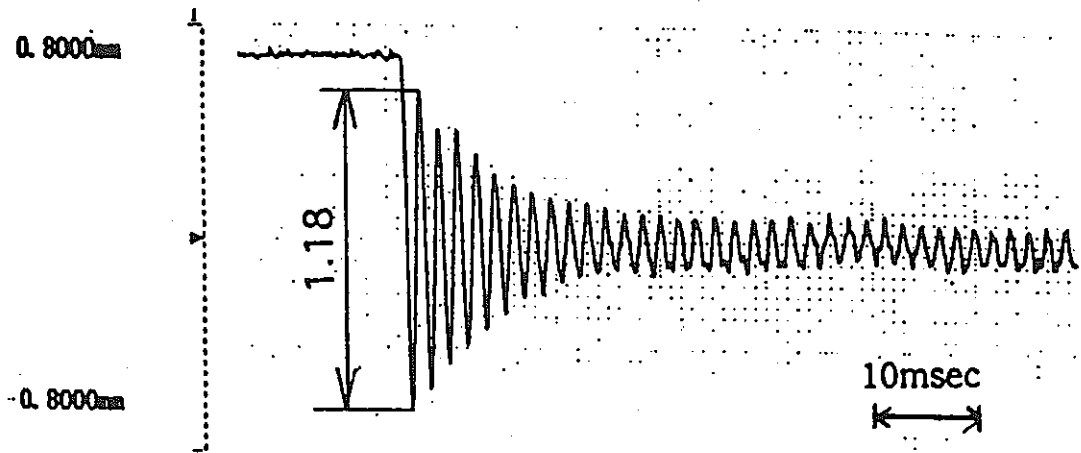
n : 片振幅の波数



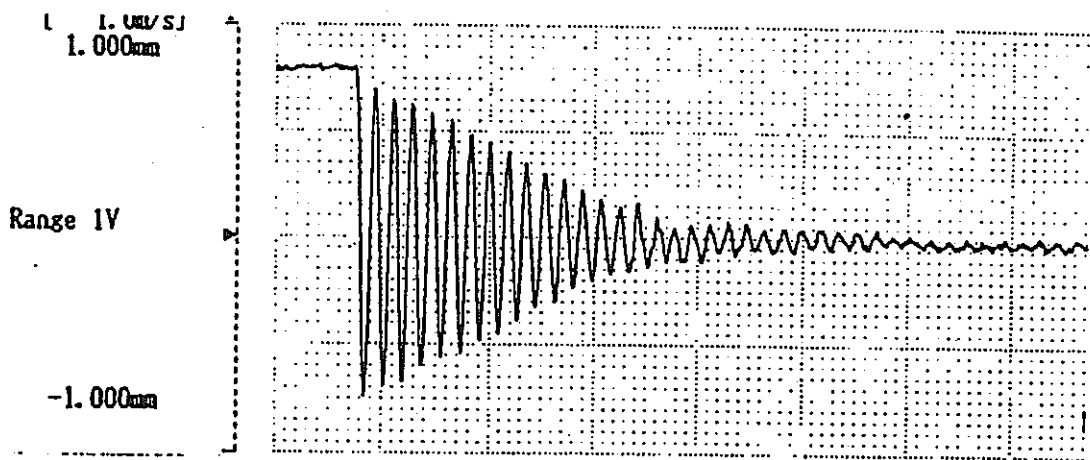
添付図1-1 2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数 (スプリング式熱電対を挿入した温度計ウェル)



添付図 1-2 2次主冷却系温度計ウェルの減衰定数 (コンプレッションファイティング式熱電対を挿入した温度計ウェル)



スプリング式熱電対付き温度計ウェル



コンプレッションフィティング式熱電対付き温度計ウェル

添付図 1-3 スナップバック試験時の自由振動減衰波形

添付資料 2

温度計ウェルの水流動試験測定データ

添付表 2-1 常温水を用いた水流動試験時のレイノルズ数

試験水温 T_{wa} (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
試験流速 V_{wa} (m/sec)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.50	7.00
温度計ウェルの外径 D_{CA} (m)	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086
水の動粘性係数 ν_{wa} (m ² /sec)	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06	1.0144E-06
試験時のレイノルズ数 Re	8.48E+03	1.70E+04	2.54E+04	3.39E+04	4.24E+04	4.45E+04	4.66E+04	4.87E+04	5.09E+04	5.51E+04	5.93E+04

添付表 2-2 水流動試験時の温度計ウェル先端応答加速度(加速度を内挿)

(単位: G)

流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ A (PEAK)		タイプ A (RMS値)		流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ B (PEAK)		タイプ B (RMS値)	
		抗力方向	揚力方向	抗力方向	揚力方向			抗力方向	揚力方向	抗力方向	揚力方向
1.00	0.22	0.21	0.09			1.00	0.21	0.37	0.34	0.22	0.22
2.00	0.43	3.01	1.26	0.98	0.65	2.00	0.42	0.23	0.36	0.26	0.26
3.00	0.65	2.19	0.98	1.04	0.71	3.00	0.63	1.12	0.77	0.45	0.41
4.00	0.87	2.23	3.03	1.21	1.49	4.00	0.85	1.09	1.88	0.68	0.74
5.00	1.08	8.96	6.41	3.92	3.66	5.00	1.06	2.26	6.52	1.49	2.00
5.25	1.14	9.62	12.50	5.15	5.49	5.25	1.11	3.33	7.86	1.96	2.70
5.50	1.19	20.90	27.70	8.44	9.23	5.50	1.16	4.46	8.22	2.76	4.36
5.75	1.24	123.00	136.00	72.60	89.30	5.75	1.22	7.81	16.60	3.22	4.69
6.00	1.30	208.00	247.00	89.70	135.00	6.00	1.27	10.30	14.30	4.25	5.69
6.50	1.41	419.00	216.00	256.00	123.00	6.25	1.32	12.20	14.80	6.54	8.10
7.00	1.51	524.00	186.00	342.00	116.00	6.50	1.37	20.10	18.70	8.21	7.50
						6.75	1.43	22.00	16.90	10.80	7.84
						7.00	1.48	78.30	22.20	31.10	12.00
						7.25	1.53	238.00	58.00	95.90	28.00
						7.50	1.59	356.00	95.40	194.00	49.50

添付表 2-3 水流動試験時の温度計ウェル先端応答加速度

タイプAは配管外ウェルの応答加速度

タイプC、Dは加速度計を内挿したウェル先端応答加速度

(単位：G)

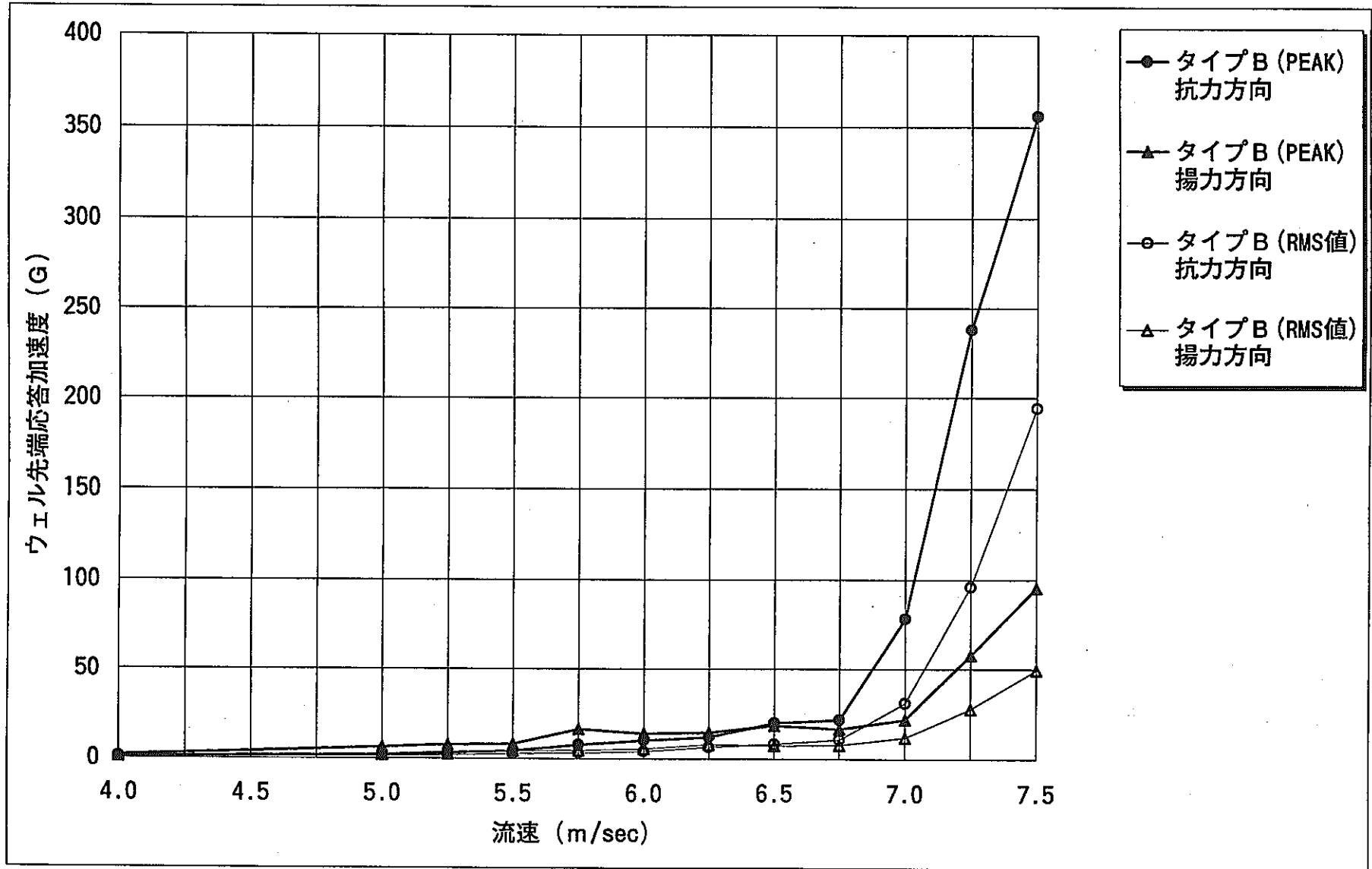
流速 (m/sec)	無次元流速	タイプA CA付(RMS値)		タイプA CA付(ピーク値)		無次元流速	タイプC (RMS値)		無次元流速	タイプD (RMS値)	
		抗力方向	揚力方向	抗力方向	揚力方向		抗力方向	揚力方向		抗力方向	揚力方向
1.00	0.22	0.10	0.10	0.02	0.01	0.00	0.07	0.07	0.05	1.29	1.25
1.50	0.33			0.05	0.05				0.00	1.45	1.40
2.00	0.45	0.12	0.12	0.09	0.05	0.00	0.07	0.07	0.06	1.89	1.40
2.25	0.50								0.00	2.14	1.49
2.50	0.56			0.10	0.09				0.00	42.10	2.40
3.00	0.67	0.14	0.12	0.10	0.10	0.00	0.12	0.10	0.07	78.90	6.85
3.50	0.78			0.07	0.05				0.00	117.00	12.60
4.00	0.89	0.14	0.12	0.10	0.07	0.00	0.14	0.10	0.07	160.00	18.40
4.50	1.00			0.16	0.16				0.00	188.00	23.20
5.00	1.12	0.29	0.23	0.41	0.35	0.01	0.12	0.10	0.15	204.00	26.20
5.25	1.17	0.35	0.24	0.45	0.31	0.01	0.13	0.10	0.18	197.00	26.20
5.50	1.23	0.48	0.30	0.78	0.52	0.02	0.15	0.10	0.24	186.00	27.20
5.75	1.28	0.77	0.33	1.57	0.60	0.03	0.15	0.11	0.39		
6.00	1.34	3.69	0.82	8.90	2.00	0.12	0.15	0.11	1.85	115.00	24.40
6.25	1.39	8.52	2.31	14.50	4.80	0.28	0.17	0.11	4.26		
6.50	1.45	14.00	3.88	26.60	6.40	0.46	0.26	0.27	7.00	120.00	32.70
7.00	1.56	23.20	7.01	37.40	11.20	0.77	0.38	0.36	11.60	150.00	41.90
7.50	1.67	31.10	8.32	48.90	13.30	1.03	0.61	0.51	15.55	17.00	31.10

添付表 2-4 水流動試験時の無次元流速とウェル先端無次元変位振幅との関係(加速度を内挿)

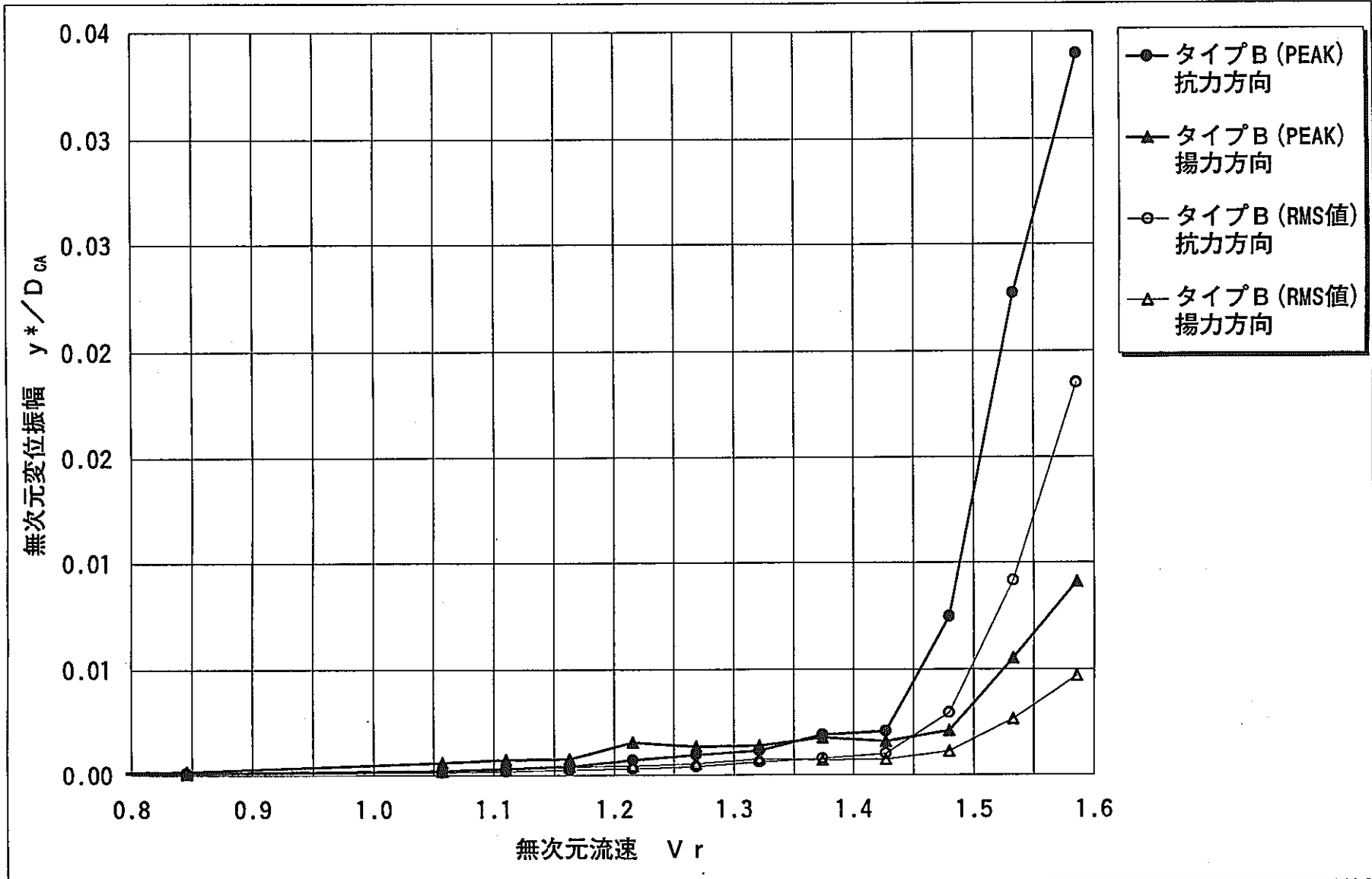
流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ A (PEAK)		タイプ A (RMS値)		流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ B (PEAK)		タイプ B (RMS値)	
		抗力方向	揚力方向	抗力方向	揚力方向			抗力方向	揚力方向	抗力方向	揚力方向
1.00	0.22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.00	0.21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.43	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	2.00	0.42	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.00	0.65	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	3.00	0.63	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4.00	0.87	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001	4.00	0.85	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001
5.00	1.08	0.0009	0.0006	0.0004	0.0004	5.00	1.06	0.0002	0.0006	0.0001	0.0002
5.25	1.14	0.0010	0.0012	0.0005	0.0005	5.25	1.11	0.0003	0.0008	0.0002	0.0003
5.50	1.19	0.0021	0.0028	0.0008	0.0009	5.50	1.16	0.0004	0.0008	0.0003	0.0004
5.75	1.24	0.0123	0.0136	0.0073	0.0089	5.75	1.22	0.0007	0.0016	0.0003	0.0004
6.00	1.30	0.0208	0.0247	0.0090	0.0135	6.00	1.27	0.0010	0.0014	0.0004	0.0005
6.50	1.41	0.0419	0.0216	0.0256	0.0123	6.25	1.32	0.0012	0.0014	0.0006	0.0008
7.00	1.51	0.0524	0.0186	0.0342	0.0116	6.50	1.37	0.0019	0.0018	0.0008	0.0007
						6.75	1.43	0.0021	0.0016	0.0010	0.0007
						7.00	1.48	0.0075	0.0021	0.0030	0.0011
						7.25	1.53	0.0227	0.0055	0.0092	0.0027
						7.50	1.59	0.0340	0.0091	0.0185	0.0047

添付表 2-5 水流動試験時の無次元流速と無次元変位振幅との関係 (RMS 値)
 (タイプ A は配管外ウエルの応答加速度、タイプ C、D はウエル先端応答加速度)

流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ A CA付き (RMS値)		流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ C (RMS値)		流速 (m/sec)	無次元流速	タイプ D (RMS値)	
		抗力方向	揚力方向			抗力方向	揚力方向			抗力方向	揚力方向
1.00	0.22	0.0000	0.0000	1.00	0.03	0.0000	0.0000	1.00	0.50	0.0000	0.0000
2.00	0.45	0.0000	0.0000	2.00	0.07	0.0000	0.0000	1.50	0.75	0.0000	0.0000
3.00	0.67	0.0000	0.0000	3.00	0.10	0.0000	0.0000	2.00	1.00	0.0000	0.0000
4.00	0.89	0.0000	0.0000	4.00	0.13	0.0000	0.0000	2.25	1.13	0.0000	0.0000
5.00	1.12	0.0000	0.0000	5.00	0.17	0.0000	0.0000	2.50	1.25	0.0000	0.0000
5.25	1.17	0.0000	0.0000	5.25	0.17	0.0000	0.0000	3.00	1.50	0.0001	0.0000
5.50	1.23	0.0000	0.0000	5.50	0.18	0.0000	0.0000	3.50	1.75	0.0000	0.0000
5.75	1.28	0.0001	0.0000	5.75	0.19	0.0000	0.0000	4.00	2.00	0.0001	0.0000
6.00	1.34	0.0004	0.0001	6.00	0.20	0.0000	0.0000	4.50	2.25	0.0000	0.0000
6.25	1.39	0.0009	0.0002	6.25	0.21	0.0000	0.0000	5.00	2.50	0.0001	0.0001
6.50	1.45	0.0014	0.0004	6.50	0.22	0.0000	0.0000	5.25	2.63	0.0001	0.0001
7.00	1.56	0.0023	0.0007	7.00	0.23	0.0000	0.0000	5.50	2.75	0.0001	0.0001
7.50	1.67	0.0031	0.0008	7.50	0.25	0.0000	0.0000	6.00	3.00	0.0001	0.0010
								6.50	3.25	0.0001	0.0037
								7.00	3.50	0.0002	0.0062
								7.50	3.75	0.0003	0.0083



添付図 2-1 2次主冷却系温度計ウェルの配管内平均流速とウェル先端応答加速度との関係 (タイプB)



添付図 2-2 2次主冷却系温度計ウエルの無次元流速とウエル先端無次元変位振幅との関係 (タイプB)

添付資料 3

実機温度計ウエルの配管外ウエル打振試験

1. 概要

実機温度計ウエルの固有振動数を把握し、流力振動評価に反映させるため、ドレン状態の大気中（約10℃）及び予熱中（約200℃）において、打振試験を行ったものである。

2. 打振試験方法

実機温度計ウエルは、ナトリウムバウンダリを構成していることから、その固有振動数を把握するためには、配管外ウエルに加速度計を取り付けてウエルを打振し、配管内ウエルに振動が伝播した後の反射振動を測定することで、配管内ウエルの固有振動数を計測しようとするものである。添付図3-1に実機温度計ウエルの打振試験方法を示す。

しかし、この方法は、配管外からの打振であり、かつ、ナトリウムバウンダリを構成しているため、打振力も限られたものになる。したがって、ナトリウム中ウエルの固有振動数を正確に測定できるかどうかは不明である。

3. 打振試験結果

添付図3-2～添付図3-9に大気中（ドレン状態：20℃）と予熱中（ドレン状態：200℃）の打振試験結果を示す。また、添付表3-1に大気中（ドレン状態：20℃）と予熱中（ドレン状態：200℃）の打振試験結果を整理したもの示す。

固有値解析と実機を模擬した試験体の打振試験で得られた固有振動数は、ほぼ一致したことを4章「温度計ウエルの振動特性」で示した。これに対して、実機の打振試験結果は、大気中（ドレン状態：温度20℃）と予熱中（ドレン状態：温度200℃）との結果で不一致が見られ、大気中より予熱中の打振試験によるピーク周波数の方が高い周波数を示すものがある。大気中及び予熱中における測定データは、いずれもドレン中に測定したものであり、流体排除質量がないため、基本的に温度の影響のみであり、固有振動数の計算式から判断すれば、ほぼ縦弾性係数比の1/2乗小さくなる（ $(20,116/21,029)^{1/2}=0.978$ ）はずである。しかし、1A及び1Bなどは、温度が高い方がピーク周波数が高くなっており、整合性が取れていない。

打振試験で得られた結果を示した添付図、添付表及び固有値解析の振動モードから、最も低いピーク周波数は、温度計ウエルの1次固有振動数であることは明らかであるが、それ以外のピーク周波数は判断が難しい。

4. 考察

添付表3-1より、打振試験により得られた加速度計の周波数スペクトルのピークを分類すると、大きく5つのブロックに分けることができ、約60～80Hzの領域、約200～400Hz

の領域、約420～500Hzの領域、約510～540Hzの領域及び約600Hz以上の領域である。

(1) 約65～80Hzの領域

温度計ウエルの1次固有振動数（配管外ウエルの1次モード）は、固有値解析によれば、実機の打振試験で得られた約65～80Hzの領域にある。固有値解析結果によれば、温度計ウエルの1次固有振動数は、熱電対本体取付けねじ部の締め付け状態によって変化する。添付図3-10にナトリウム中ウエル長さ150mmの温度計ウエル（12B配管用）の大気中（20℃）における熱電対本体取付けねじ部の締め付け状態を回転剛性で模擬した固有値解析結果を示す。また、添付図3-11にナトリウム中ウエル長さ130mmの温度計ウエル（10B配管用）の固有値解析結果を示す。

この結果から、ねじ部の締め付け状態に依存して1次固有振動数が変化することが判る。よって、ピークが明確に現れているこの領域は、温度計ウエルの1次固有振動数（配管外ウエルの1次モード）であると判断できる。

(2) 約200～400Hzの領域

約200～400Hzの領域は、各温度計ウエルで見られるピークでないこと、及び各温度計ウエルで周波数がばらついていることから、温度計ウエルに関係ない配管外部に取り付けられた予熱ヒータ、保温材、その他の雑音によるものと考えられる。

(3) 約420～500Hzの領域

約420～500Hzの領域は、温度計ウエルの3次固有振動数（配管外ウエルの2次モード）、配管自体の固有振動数あるいは配管+予熱ヒータ等の配管外全体の固有振動数である可能性がある。

添付図3-10及び添付図3-11より、1次（配管外ウエルの1次モード）：約72～80Hzとすると、3次（配管外ウエルの3次モード）：約520～600Hz（ウエル長さ150mm）、1次：65～70Hzとすると3次：約420～500Hzとなる。この結果、1次：65～70Hzとすると、3次（配管外ウエルの3次モード）が実機の打振試験結果と本領域が一致することになる。配管自体の固有振動数は、実機を模擬した試験体の配管（10B）を打振することで測定した結果、添付図3-12に示すように437.5Hzであることが判る。なお、この結果は、模擬試験体の配管打振による値であることから、配管は裸の状態である。よって、予熱ヒータ、保温材等が取り付けられている状態では、配管固有振動数が437.5Hz前後にばらつく可能性がある。また、約420～500Hzの領域のピークは、各温度計ウエルで見られるピークでないことを考えると、配管外ウエルの2次モードよりは、配管+予熱ヒータ

タ等の配管全体の固有振動数であると考えられる。

(4) 約510～540Hzの領域

約510～540Hzの領域は、温度計ウエルの3次固有振動数（配管外ウエルの2次モード）あるいは2次固有振動数（ナトリウム中ウエルの1次モード）である可能性がある。2次固有振動数（ナトリウム中ウエルの1次モード）であるとすれば、固有値解析結果及び打振試験結果より、すべての温度計ウエルが低い固有振動数であることになる。また、その原因として考えられるのは、ウエルの長さが違うことが大きな原因となるが、その固有振動数の違いに相当するには、すべて約10mmナトリウム中ウエルが長くなければならない。しかし、代表として寸法測定した3A温度計ウエル（12B配管）及び2A-1温度計ウエル（10B配管）のシース穴長さ、配管外ウエル長さ、配管板厚及びX線撮影記録による先端部肉厚から、ナトリウム中ウエル長さを算出すると、3A温度計ウエルが約137mm（設計では150mm）、2A-1温度計ウエルが約118mm（設計では130mm）となり、いずれも設計寸法より短く取り付けられている可能性がある。よって、2次固有振動数は、固有値解析結果より高めの領域に周波数のピークがあるはずである。

添付表3-1の3Aを対象とした種々の打振試験結果を見ると、ウエル打振・外装板測定、内装板打振・ウエル測定、ウエル打振・配管測定、配管打振・ウエル測定で約520Hzに顕著なピークが見られる。外装板や内装板で測定しても、約520Hzに顕著なピークが見られることを考えると、この領域は、ナトリウム中ウエルの固有振動数ではなく、配管外ウエルの2次モードである可能性が最も高いと考えられる。これは、ナトリウム中ウエルの振動が微弱な外装板等の打振によって、逆伝播して再び外装板まで伝播するとは考えにくいからである。また、添付図3-13に示した実機を模擬した試験体（タイプB）の配管外ウエル打振、配管外ウエル測定データを見ると、配管外ウエルの2次固有振動数のピークが明確に現れ、ナトリウム中ウエルの固有振動数のピークは小さい。このように、裸管である模擬試験体で、かつ、その打振力も実機の打振試験よりかなり強い打振試験で、この程度のピークがナトリウム中ウエルのピークとして見られる程度であり、実機の打振試験結果の500Hz以上の領域にこのような2つのピークは見られない。

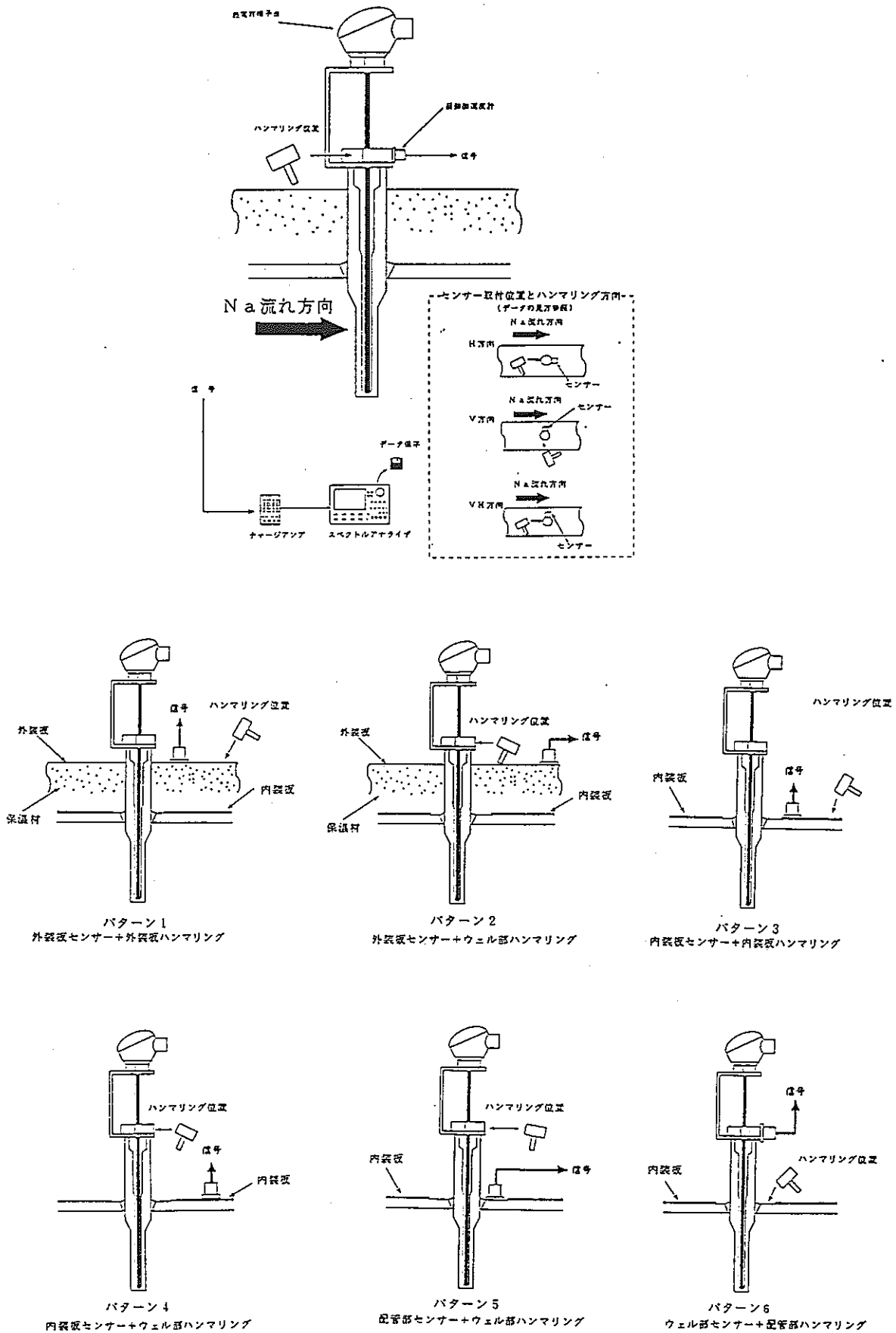
(5) 約600Hz以上の領域

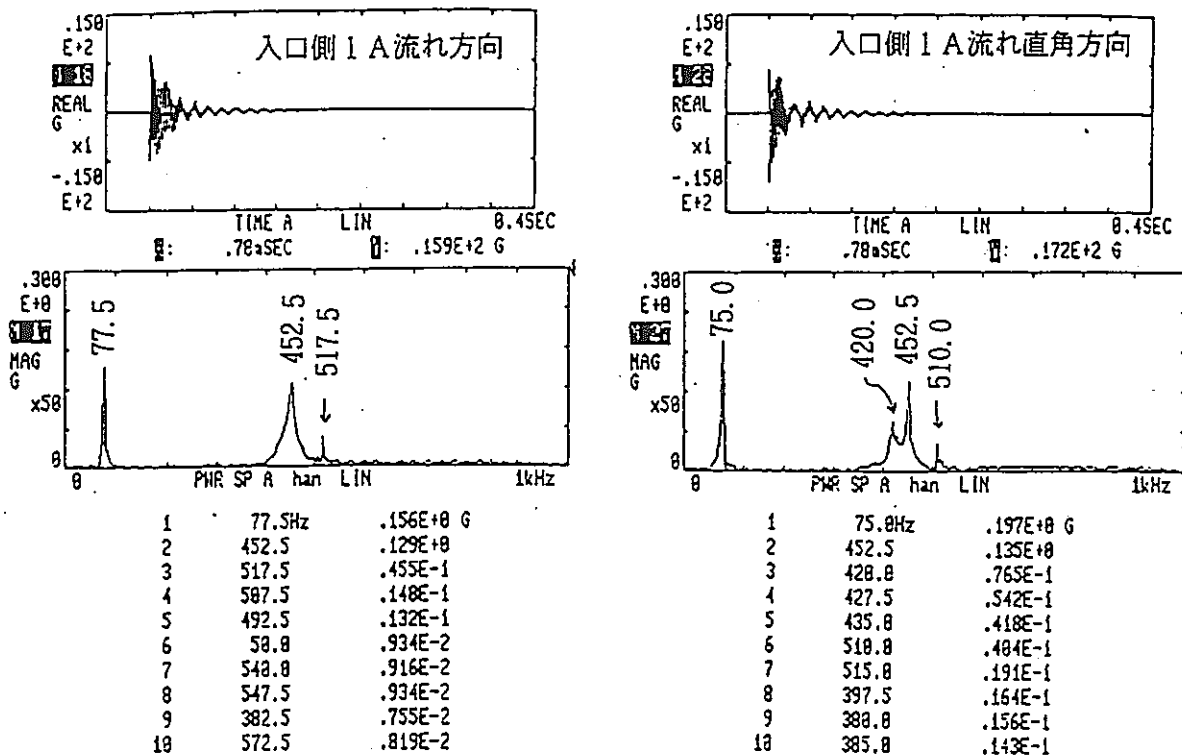
約600Hz以上の領域は、温度計ウエルに関係ない配管外部に取り付けられた予熱ヒータ、保温材、その他の雑音によるものと考えられる。

5. まとめ

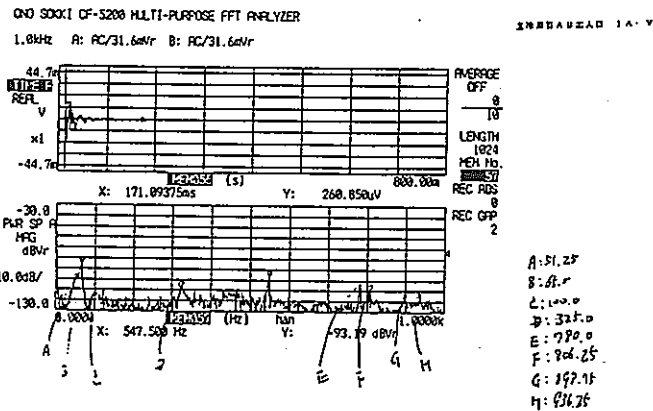
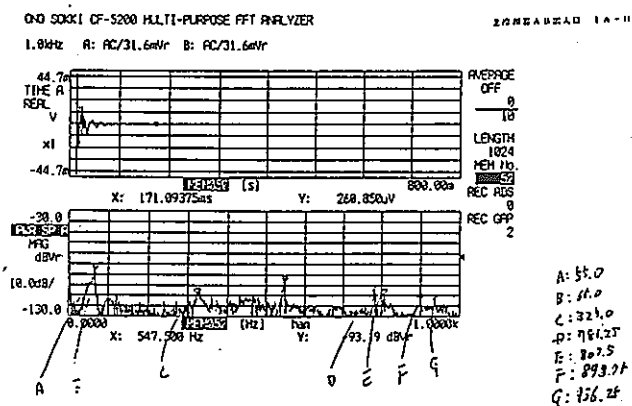
実機温度計ウエルの打振試験で得られた周波数スペクトルからは、打振力も弱く、かつ、配管外の雑音源が多数あり、配管内のナトリウム中ウエルの固有振動数を正確に測定できていないと考えられる。また、周波数スペクトルからナトリウム中ウエルの固有振動数付近に見られるピークは、熱電対本体取付けねじ部の締め付け状態を回転剛性で模擬した固有値解析、3 A温度計ウエル、2A-1温度計ウエルの寸法測定データ及び3 Aを対象とした種々の打振試験結果から判断すると、ナトリウム中ウエルの固有振動数付近にあった周波数ピークは配管外ウエルの2次モードである可能性が最も高いと考えられる。

上記のことから、温度計ウエルの流力振動評価には、実機打振試験結果の周波数スペクトル解析データを採用せず、固有値解析結果と実機を模擬した打振試験結果を用いて評価を行っている。



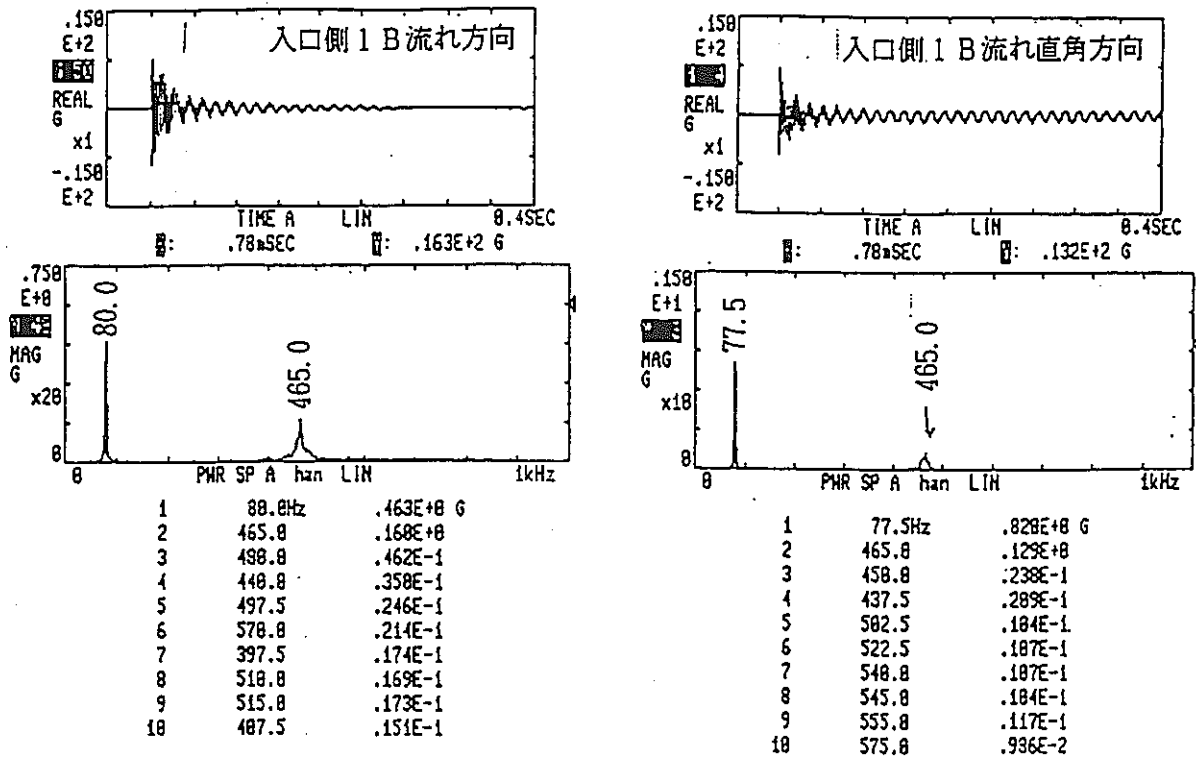


大気中 (ドレン状態 : 20°C)



予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-2 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (1 A)



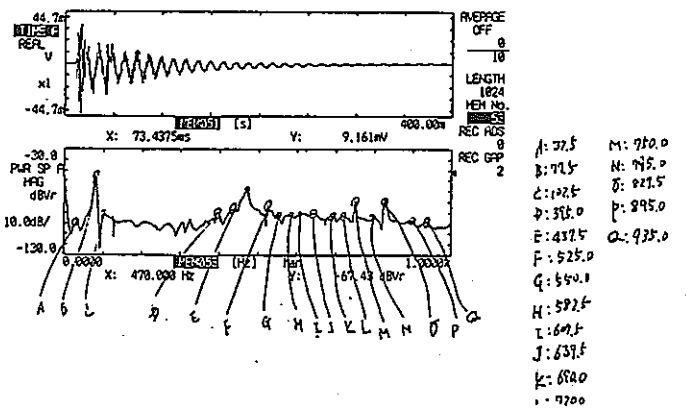
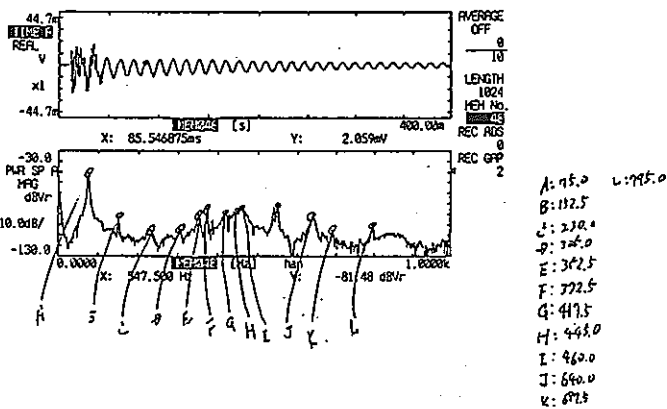
大気中 (ドレン状態 : 20°C)

ONO SOKKI OF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER
1.0kHz A: AC/31.6mV B: AC/31.6mV

主冷却器AB出入口 1B-H

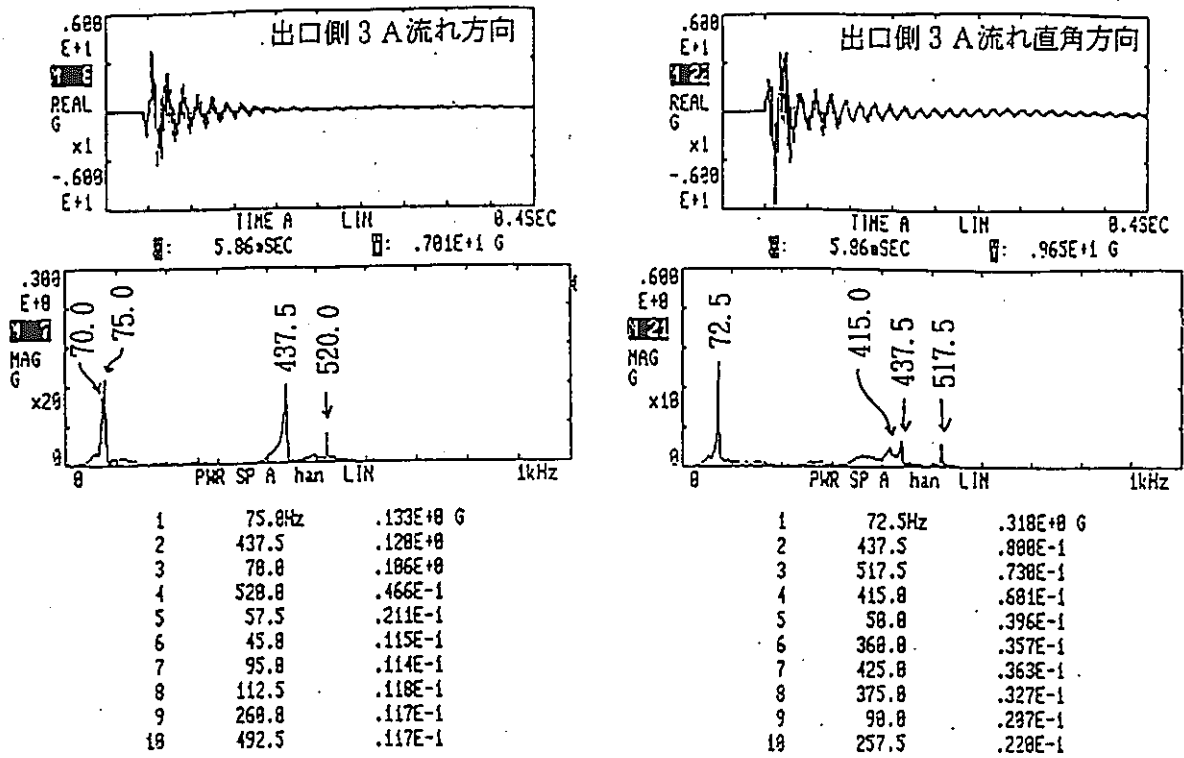
ONO SOKKI OF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER
1.0kHz A: AC/31.6mV B: AC/31.6mV

主冷却器AB出入口 1B-V

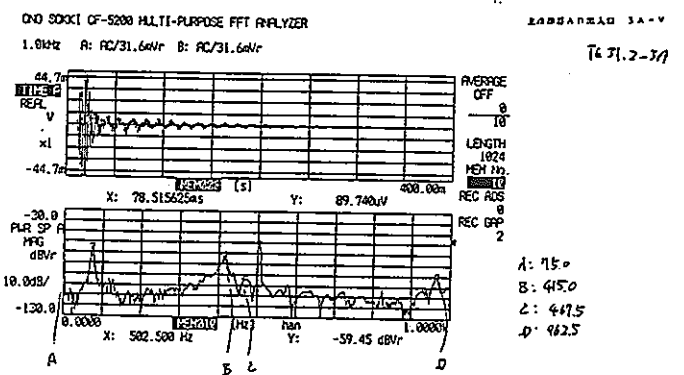
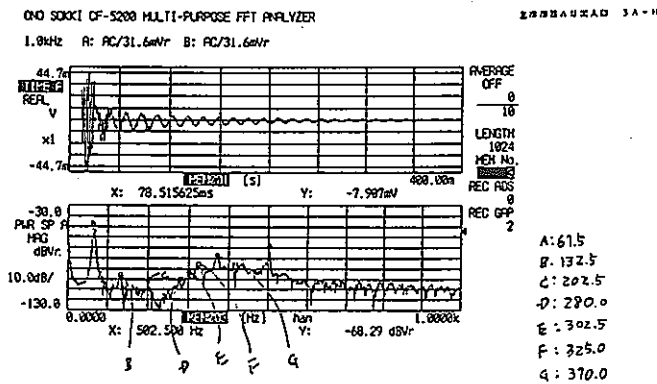


予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-3 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (1 B)

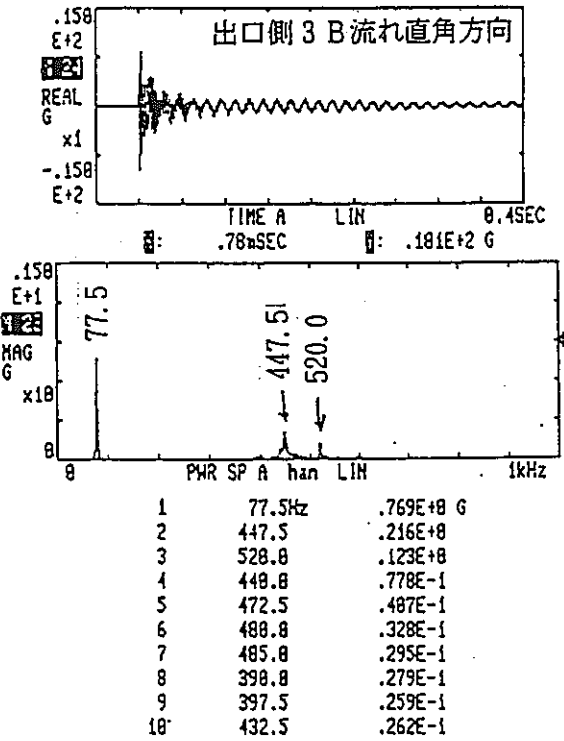
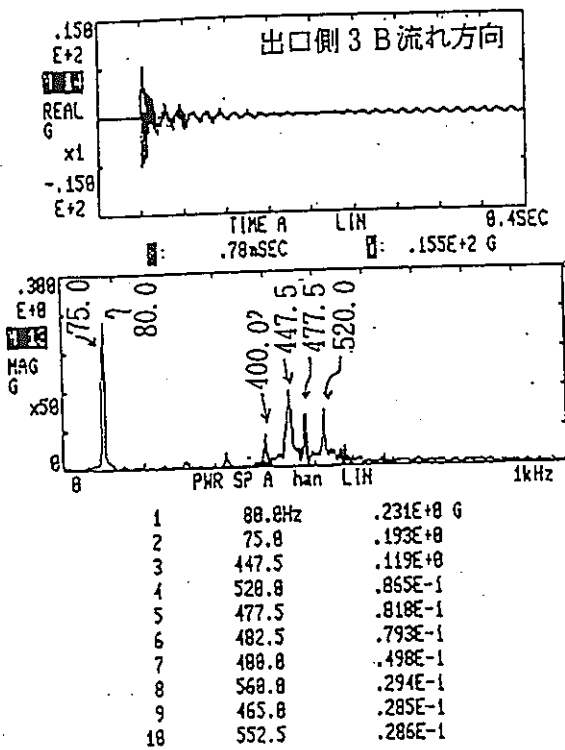


大気中 (ドレン状態 : 20°C)

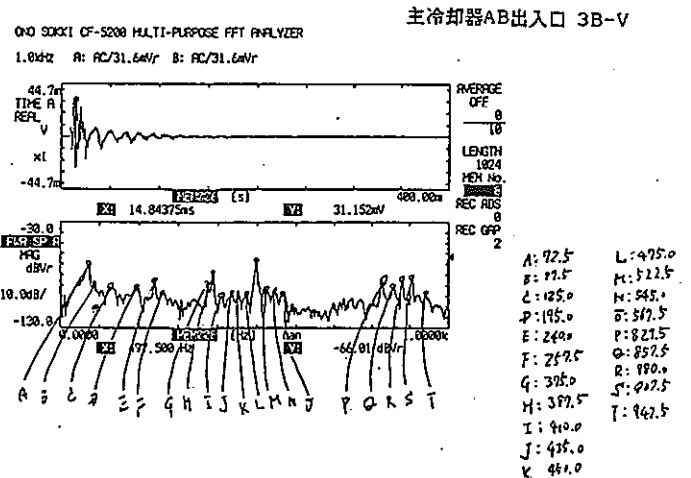
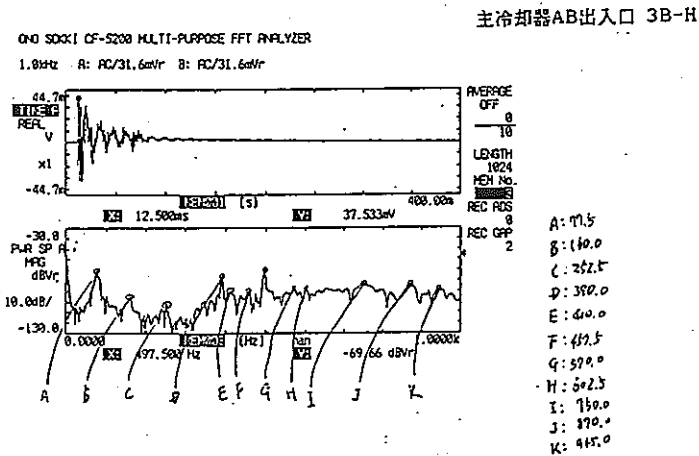


予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-4 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (3 A)

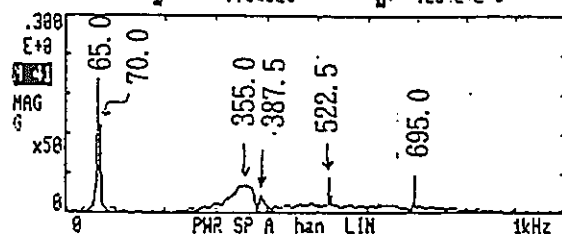
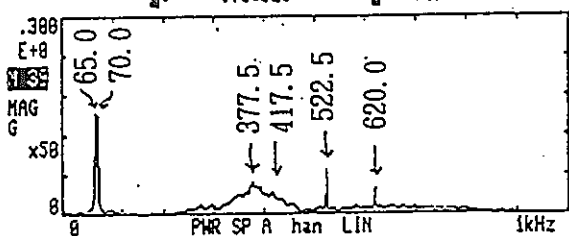
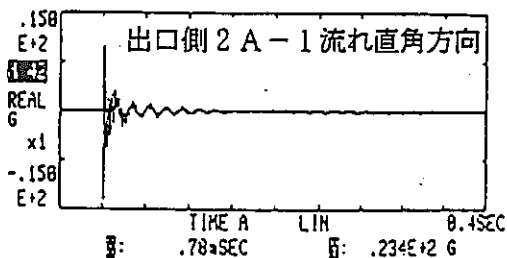
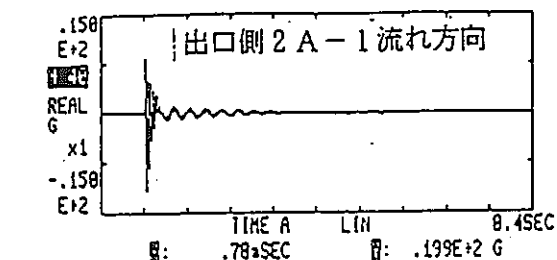


大気中 (ドレン状態 : 20°C)



予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-5 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (3 B)



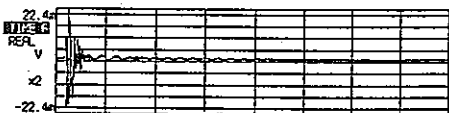
1	65.0Hz	.153E+0 G
2	78.8	.152E+0
3	522.5	.673E-1
4	377.5	.487E-1
5	392.5	.414E-1
6	628.8	.377E-1
7	365.8	.338E-1
8	417.5	.334E-1
9	482.5	.311E-1
10	347.5	.303E-1

1	65.0Hz	.284E+0 G
2	78.8	.133E+0
3	695.8	.569E-1
4	522.5	.531E-1
5	355.8	.435E-1
6	362.5	.418E-1
7	387.5	.252E-1
8	527.5	.252E-1
9	328.8	.229E-1
10	388.8	.169E-1

大気中 (ドレン状態 : 20°C)

OND SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER

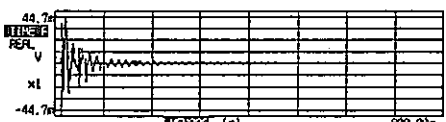
1.0kHz A: AC/31.6dBV B: AC/31.6dBV



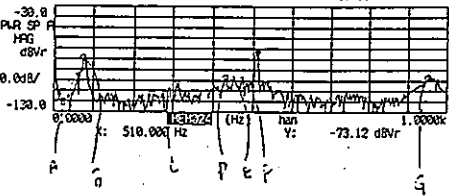
各主冷却器 2A-1H

OND SOKKI CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER

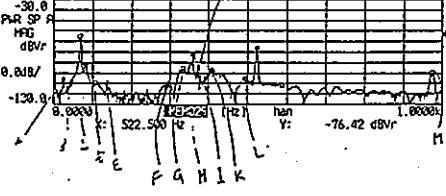
1.0kHz A: AC/31.6dBV B: AC/31.6dBV



各主冷却器 2A-1V



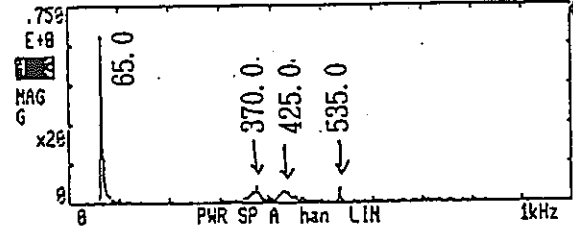
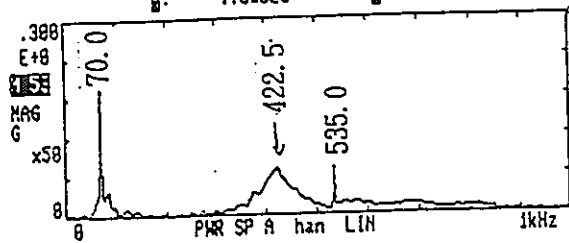
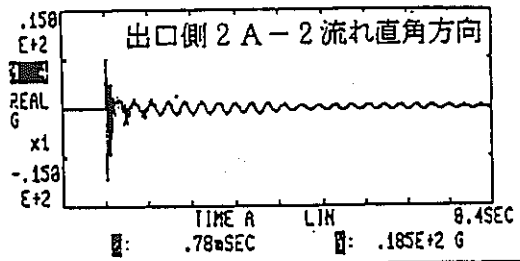
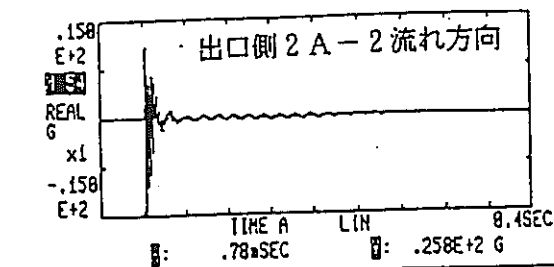
A:	62.5
B:	77.5
C:	372.5
D:	432.5
E:	492.5
F:	492.5
G:	482.5



A:	25.0	K: 472.5
B:	67.5	L: 492.75
C:	81.25	M: 525.75
D:	110.0	
E:	135.0	
F:	255.0	
G:	332.75	
H:	352.75	
I:	352.5	
J:	372.5	

予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-6 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (2 A-1)

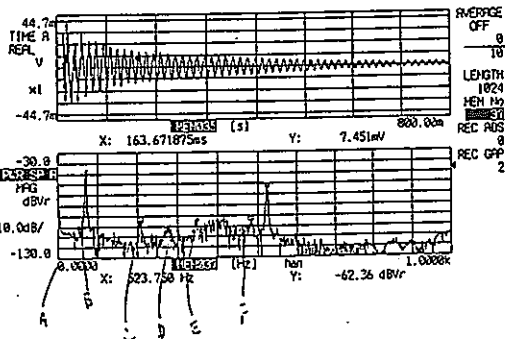


1	78.8Hz	.198E+0 G
2	422.5	.711E-1
3	535.8	.712E-1
4	85.8	.377E-1
5	372.5	.348E-1
6	377.5	.358E-1
7	485.8	.244E-1
8	557.5	.197E-1
9	577.5	.197E-1
10	92.5	.173E-1

1	65.8Hz	.541E+0 G
2	378.8	.635E-1
3	535.8	.622E-1
4	425.8	.487E-1
5	362.5	.464E-1
6	392.5	.298E-1
7	445.8	.288E-1
8	387.5	.257E-1
9	488.8	.228E-1
10	457.5	.191E-1

大気中 (ドレン状態 : 20°C)

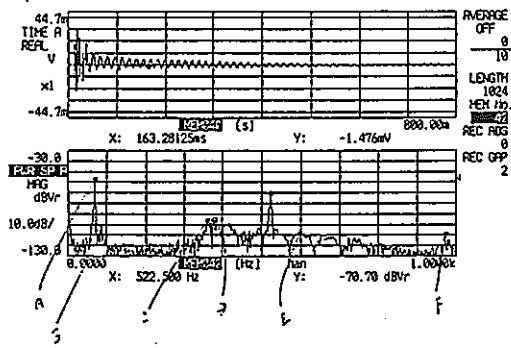
DIGI SOCK1 CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER
1.0kHz A: AC/31.6mV B: AC/31.6mV



各主冷却器 2A-2H

- A: 57.5
- B: 62.75
- C: 706.5
- D: 277.5
- E: 343.75
- F: 413.75

DIGI SOCK1 CF-5200 MULTI-PURPOSE FFT ANALYZER
1.0kHz A: AC/31.6mV B: AC/31.6mV

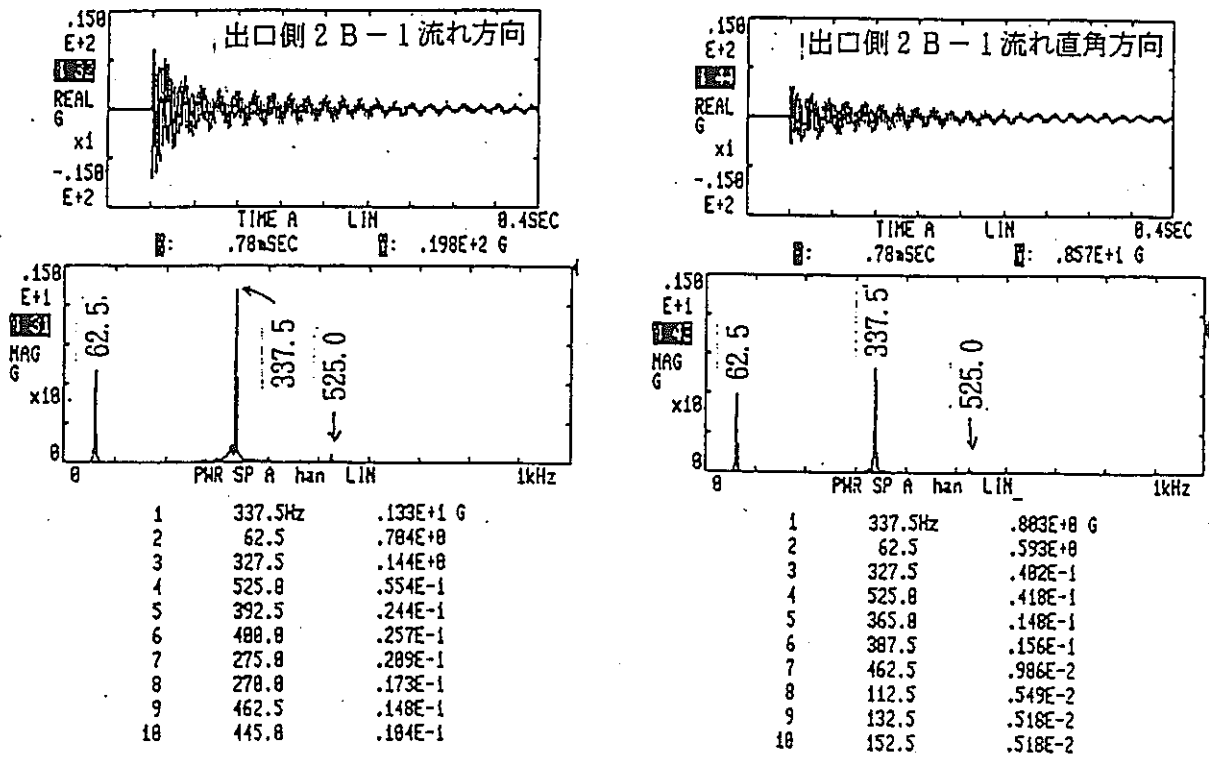


各主冷却器 2A-2V

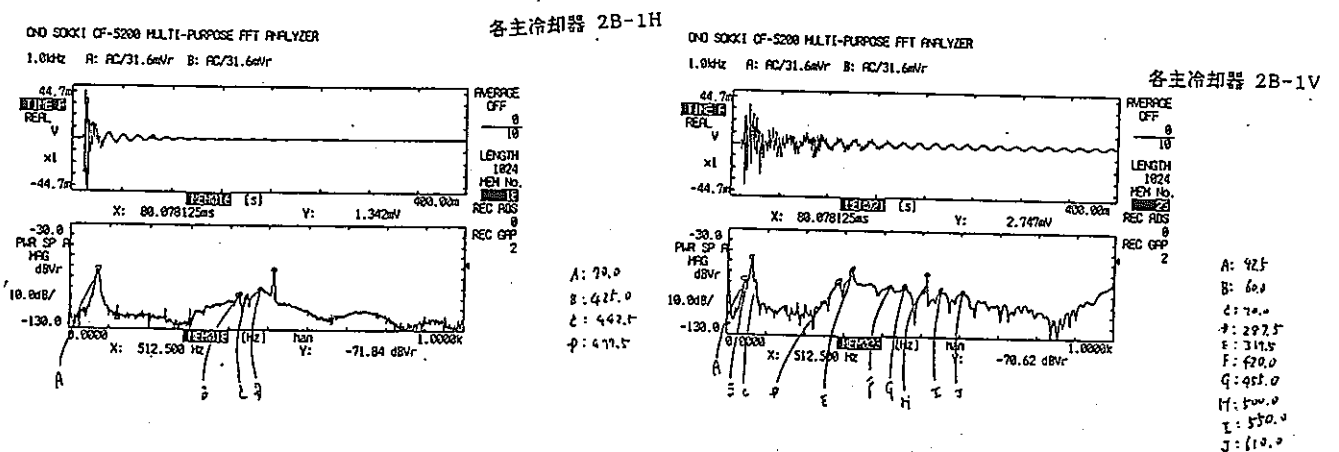
- A: 62.75
- B: 62.75
- C: 343.75
- D: 377.5
- E: 343.75
- F: 970.

予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-7 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (2 A - 2)

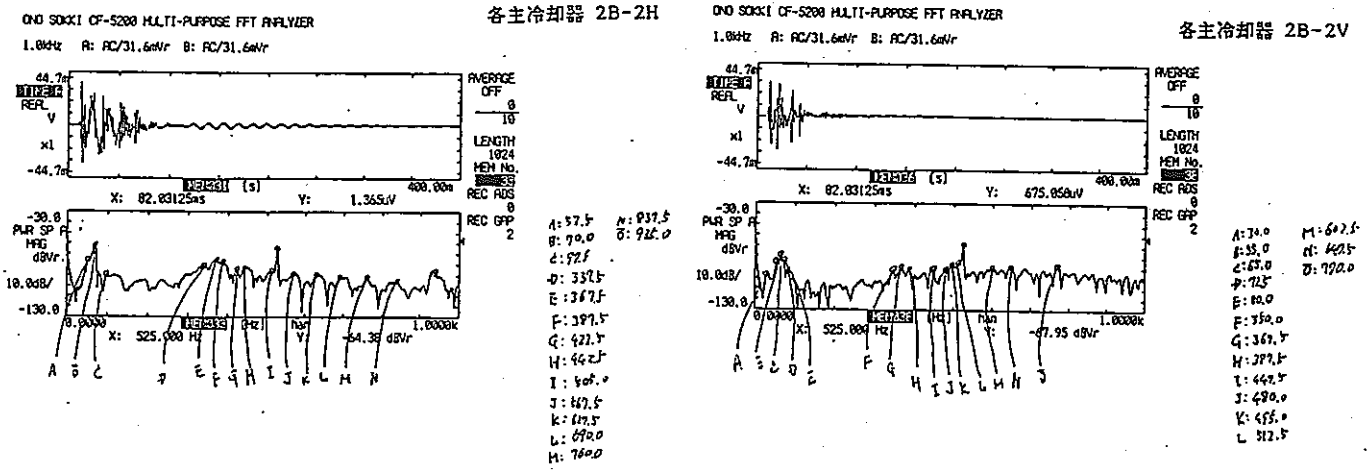


大気中 (ドレン状態 : 20°C)



予熱中 (ドレン状態 : 200°C)

添付図 3-8 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (2 B-1)



予熱中 (ドレン状態: 200°C)

添付図 3-9 大気中 (20°C) 及び予熱中 (: 200°C) の温度計ウェル打振試験結果 (2B-2)

添付表 3-1 (1/2) 実機打振試験結果 (大気中: 20℃)

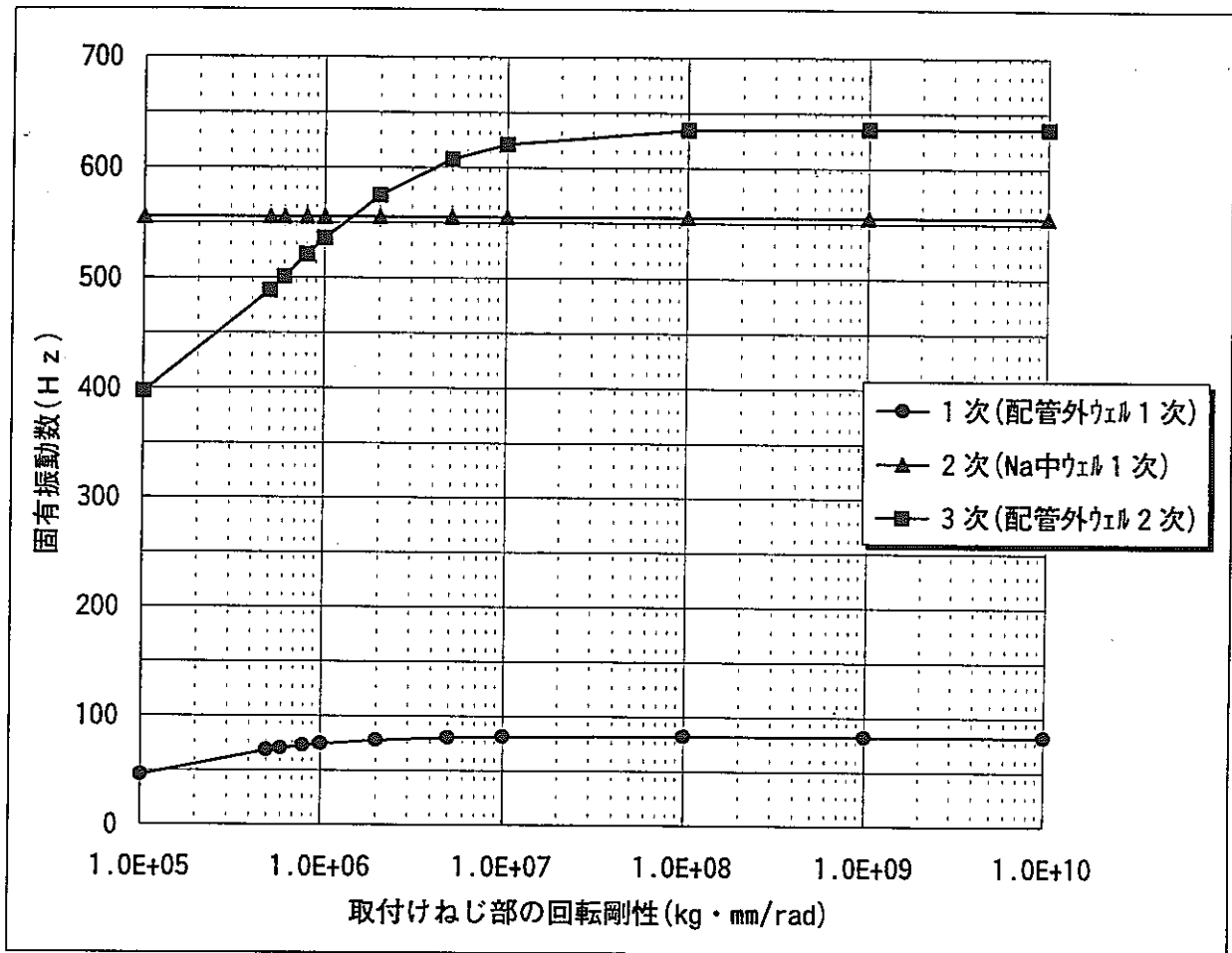
(単位: Hz)

温度計No.	ウェル長さ (mm)	大気中 (ドレン状態: 20℃)							
		保温材取外し (ウェル部廻り約20cm)							
1 A 流れ方向		77.5				452.5		517.5	
1 A 流れ直角方向		75.0				420.0		452.5 510.0	
3 A 流れ方向	150	70.0 75.0				437.5		520.0	
3 A 流れ直角方向		72.5				415.0		437.5 517.5	
1 B 流れ方向		80.0				465.0			
1 B 流れ直角方向		77.5				465.0			
3 B 流れ方向		75.0 80.0		400.0		447.5		477.5 520.0	
3 B 流れ直角方向		77.5				447.5		520.0	
2A-1 流れ方向	130	65.0 70.0		377.5		417.5		522.5 620.0	
2A-1 流れ直角方向		65.0 70.0		355.0		387.5		522.5 695.0	
2A-2 流れ方向		70.0				422.5		535.0	
2A-2 流れ直角方向		65.0		370.0		425.0		535.0	
2B-1 流れ方向		62.5		337.5				525.0	
2B-1 流れ直角方向		62.5		337.5				525.0	
2B-2 流れ方向									
2B-2 流れ直角方向									
温度計No.	ウェル長さ (mm)	大気中 (ドレン状態: 20℃)							
		コンプレッションフィッティング式熱電対取付け後 (保温材あり)							
1 A 流れ方向		100.0 127.5		231.5 248.5		433.5		513.5 755.0 797.5	
1 A 流れ直角方向				231.5				513.8 796.5	
3 A 流れ方向	150	97.5						518.8	
3 A 流れ直角方向		38.5						517.5	
1 B 流れ方向		50.0 163.5		398.5				508.8	
1 B 流れ直角方向		165.0						508.8 535.0	
3 B 流れ方向									
3 B 流れ直角方向									
2A-1 流れ方向	130	31.5 98.8		200.0		451.5		521.3	
2A-1 流れ直角方向		36.5 147.5		348.5		481.5		522.5	
2A-2 流れ方向		33.5 162.5		312.5		456.5		536.3	
2A-2 流れ直角方向		33.5 145.0		312.5		460.0		535.0	
2B-1 流れ方向		151.5						522.5	
2B-1 流れ直角方向								522.5	
2B-2 流れ方向				375.0 396.5				538.8	
2B-2 流れ直角方向				395.0				536.3	

添付表 3-1 (2/2) 実機打振試験結果
(予熱中：200℃と大気中：20℃)

(単位：Hz)

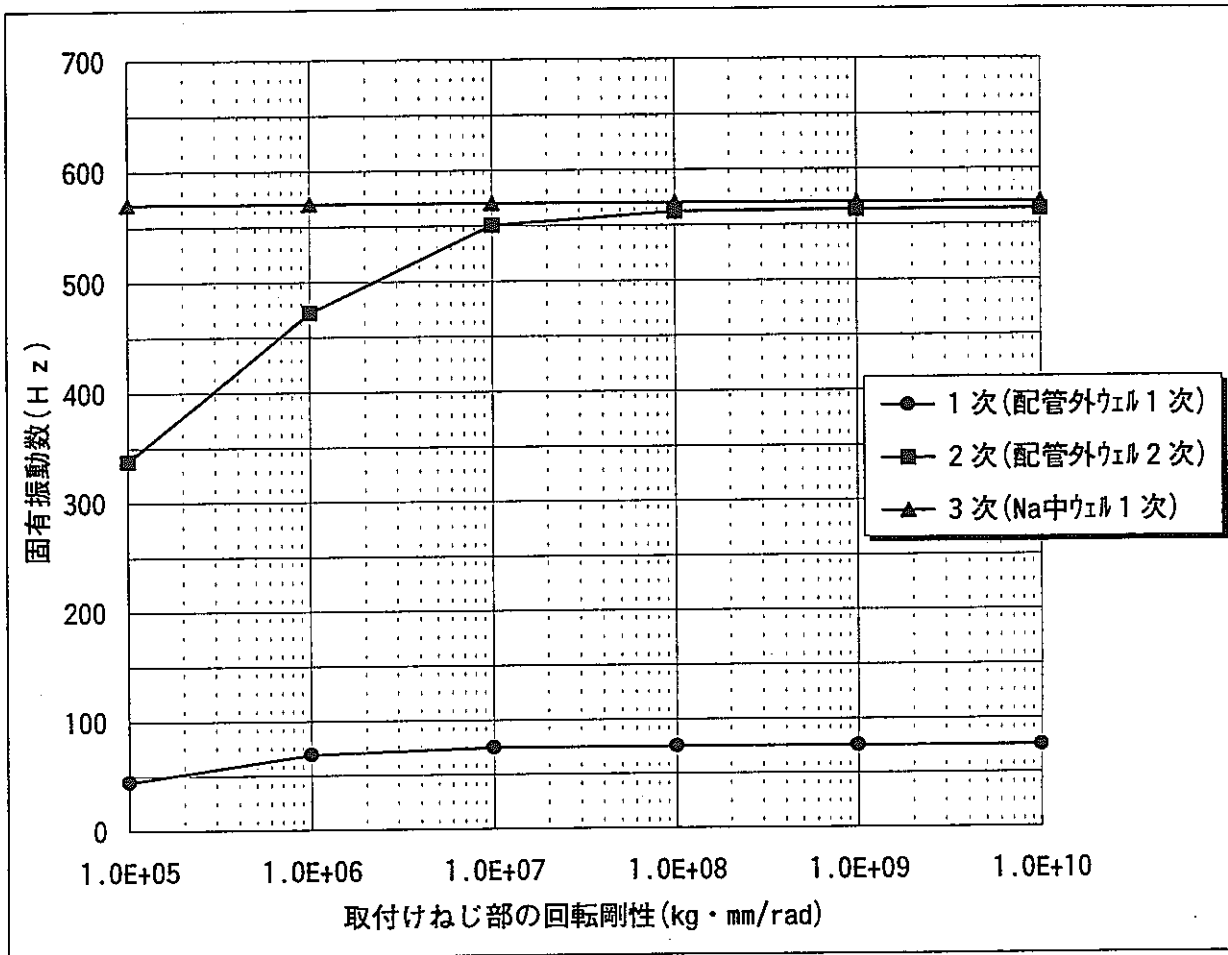
温度計No.	ウェル長さ (mm)	予熱中 (ドレン状態：200℃)					
		保温材あり					
1 A 流れ方向		55.0	65.0	325.0		547.5	781.0
1 A 流れ直角方向		51.0	65.0	325.0		547.5	780.0
3 A 流れ方向	150	67.5		370.0		502.5	
3 A 流れ直角方向		75.0			415.0	502.5	
1 B 流れ方向		75.0		372.5	460.0	547.5	640.0 795.0
1 B 流れ直角方向		77.5			470.0	525.0	750.0 827.5
3 B 流れ方向		77.5		390.0	497.5		
3 B 流れ直角方向		72.5		387.5	497.5		
2A-1 流れ方向	130	62.5	77.5			510.0	
2A-1 流れ直角方向		67.5		357.5		522.5	973.8
2A-2 流れ方向		68.8				523.5	
2A-2 流れ直角方向		68.8				522.5	
2B-1 流れ方向		70.0				512.5	
2B-1 流れ直角方向		60.0		317.5		512.5	
2B-2 流れ方向		70.0				525.0	
2B-2 流れ直角方向		65.0				525.0	
温度計No.	大気中 (ドレン状態：20℃)						
3 Aを対象とした種々の打振試験							
外装板打振・外装板測定 保温材あり	105.0		192.5	215.0			
ウェル打振・外装板測定 保温材あり	38.5	121.3	203.5	223.5			
内装板打振・内装板測定 保温材なし ウェル廻り約20cm	68.5	96.3	163.5				
内装板打振・ウェル測定 保温材なし ウェル廻り約20cm	92.5	115.0	152.5	230.0			
ウェル打振・配管測定 保温材なし ウェル廻り約20cm	60.0	100.0	196.5			516.5	
ウェル打振・配管測定 保温材なし ウェル廻り約20cm	100.0	126.3	178.5	323.5 385.0		516.5	
配管打振・ウェル測定 保温材なし ウェル廻り約20cm	50.0		175.0	197.5 381.5		515.0	552.5
配管打振・ウェル測定 保温材なし ウェル廻り約20cm	60.0		158.5		492.5	521.3	



温度計ウエル(ナトリウム中ウエル長さ:150mm)の場合

熱電対固定ねじ部回転剛性 (kg·mm/rad)	熱電対シース質量ウエル分散(大気中(20℃))		
	1次(配管外ウエル1次)	2次(Na中ウエル1次)	3次(配管外ウエル2次)
1.0E+05	46.0	555.0	396.7
5.0E+05	68.6	555.0	488.1
6.0E+05	70.4	555.0	500.9
8.0E+05	72.8	555.0	520.8
1.0E+06	74.4	555.0	535.6
2.0E+06	77.9	555.0	574.7
5.0E+06	80.2	555.0	607.7
1.0E+07	81.1	555.0	621.0
1.0E+08	81.8	555.0	634.3
1.0E+09	81.9	555.0	635.7
1.0E+10	81.9	555.0	635.8

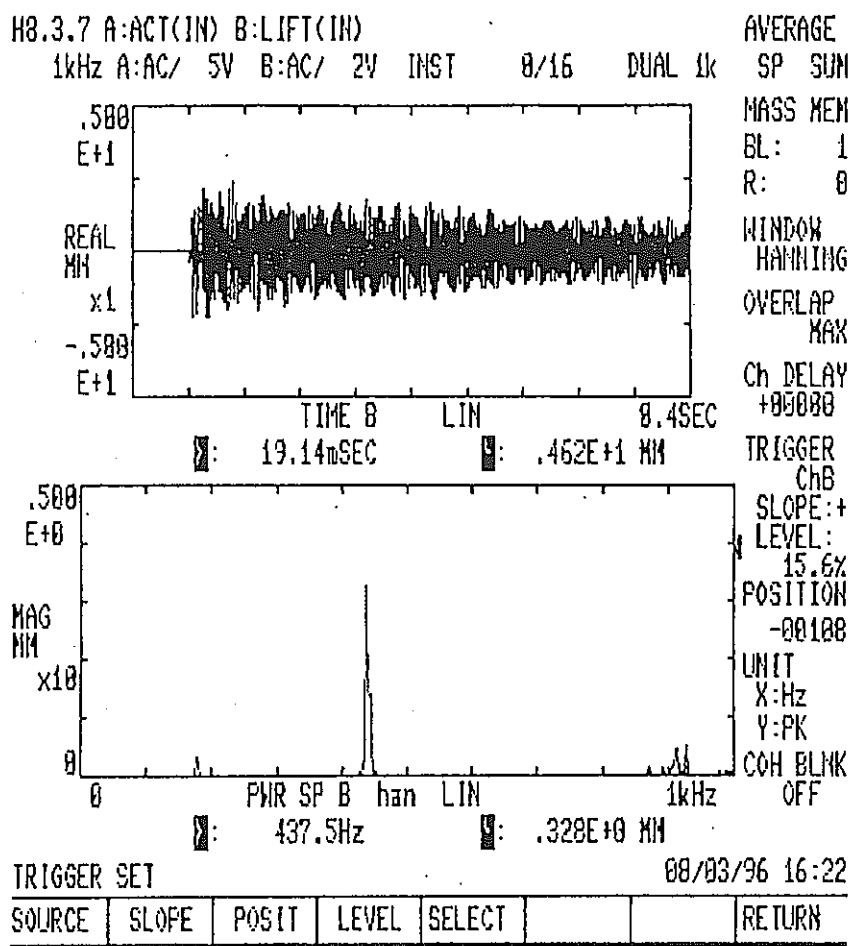
添付図3-10 ねじ部の締め付け状態が固有振動数に及ぼす影響 (20℃)



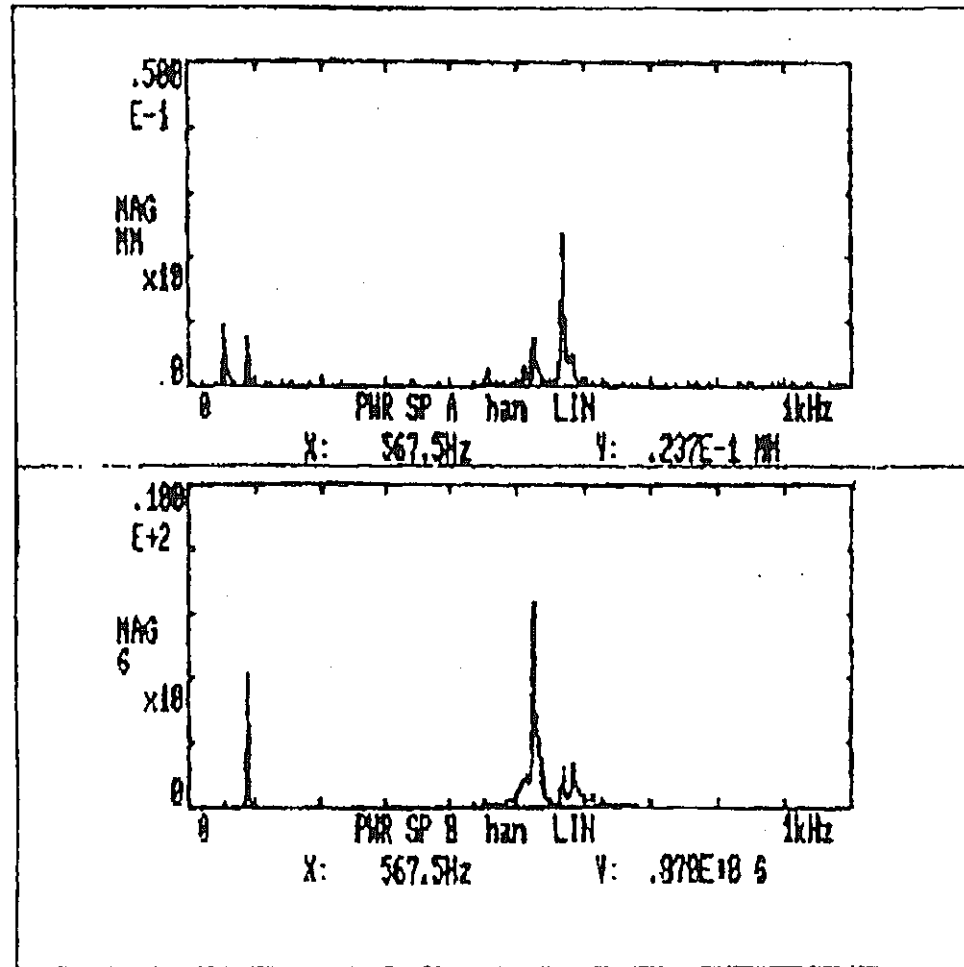
温度計ウェル(ナトリウム中ウェル長さ:130mm)の場合

熱電対固定ねじ部回転剛性 (kg · mm/rad)	熱電対シース質量ウェル分散(大気中(20℃))		
	1次(配管外ウェル1次)	2次(配管外ウェル2次)	3次(Na中ウェル1次)
1.0E+05	44.8	338.1	570.1
1.0E+06	69.2	472.2	570.1
1.0E+07	74.4	550.2	570.1
1.0E+08	74.9	562.0	570.1
1.0E+09	75.0	563.3	570.1
1.0E+10	75.0	563.4	570.1

添付図 3-11 ねじ部の締め付け状態が固有振動数に及ぼす影響 (20℃)



添付図 3-12 水流动試験用の模擬試験体の配管打振試験結果
 (配管打振、配管周波数スペクトル測定)



ウェル先端応答

配管外ウェル応答

添付図 3-13 水流動試験用の模擬試験体の温度計ウェル打振試験結果
 (配管外ウェル打振、配管外ウェル周波数スペクトル測定)

添付資料 4

温度計ウェルの刺激係数

添付表 4-1 (1/5) スプリング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の1次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対シース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-9.29986E-04	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-5.0148E-11		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-9.14033E-04	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-6.9149E-11		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-9.07652E-04	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-1.5917E-10		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-8.66174E-04	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-2.8483E-10		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-8.18322E-04	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-2.8831E-10		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-7.70491E-04	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-2.4884E-10		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	-7.30662E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.1452E-10		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.90876E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.0284E-10		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.51150E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.9118E-10		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.11504E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.7954E-10		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.71962E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.6793E-10		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.32548E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.5636E-10		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.93289E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.4483E-10		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.54216E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.3336E-10		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.15359E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.2195E-10		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.76751E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.1061E-10		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.38427E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.2872E-10		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.00422E-04	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	-8.6113E-11		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	-2.70236E-04	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	-1.1761E-10		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	-2.40134E-04	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	-1.6556E-10		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	-2.10069E-04	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	-2.1007E-10		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.80023E-04	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	-2.3696E-10		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.49988E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-2.0465E-10		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.19964E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-1.6369E-10		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	-8.99528E-05	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-1.2274E-10		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	-5.99543E-05	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-8.1805E-11		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	-2.99697E-05	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	-4.2908E-11		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				-1.28241E-02	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	-4.2844E-09	6.24789E-05	-0.00006857

添付表 4-1 (2/5) スプリング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の2次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対ケース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	1.00000E+00	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	5.3924E-08		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	9.68149E-01	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	7.3243E-08		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	9.55410E-01	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	1.6754E-07		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	8.72640E-01	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	2.8695E-07		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	7.77423E-01	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	2.7390E-07		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	6.83004E-01	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	2.2058E-07		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	6.05455E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.7776E-07		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	5.29499E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.5546E-07		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	4.55756E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.3381E-07		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	3.84921E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.1301E-07		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	3.17755E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	9.3293E-08		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	2.55073E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	7.4890E-08		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	1.97735E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	5.8055E-08		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	1.46638E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	4.3053E-08		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	1.02706E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.0155E-08		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	6.68874E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.9638E-08		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	4.01413E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.1786E-08		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	2.34384E-02	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	6.7184E-09		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	1.67809E-02	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	7.3030E-09		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	1.27298E-02	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	8.7765E-09		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	9.76939E-03	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	9.7692E-09		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	7.35683E-03	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	9.6835E-09		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	5.27920E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	7.2032E-09		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	3.51947E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	4.8022E-09		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	2.09463E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	2.8580E-09		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	1.02173E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.3941E-09		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	3.17829E-04	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	4.5504E-10		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				8.44150E+00	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	2.0460E-06	3.28519E-06	0.62280278

添付表 4-1 (3/5) スプリング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の3次モード刺激係数の算出 (MK-2温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対ケース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-1.27196E-02	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-6.8589E-10		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-1.22190E-02	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-9.2440E-10		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-1.20188E-02	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-2.1076E-09		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-1.07181E-02	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-3.5245E-09		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-9.22338E-03	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-3.2496E-09		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-7.74508E-03	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-2.5014E-09		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.53633E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.9191E-09		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.35990E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.5737E-09		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.22795E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.2413E-09		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.15393E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-9.2600E-10		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	-2.15227E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-6.3191E-10		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	-1.23815E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-3.6352E-10		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.27253E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.2544E-10		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	2.64442E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	7.7640E-11		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	8.20853E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.4100E-10		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	1.22596E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.5994E-10		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	1.46394E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	4.2981E-10		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	1.51924E-03	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	4.3548E-10		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	1.44287E-03	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	6.2793E-10		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	1.32009E-03	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	9.1013E-10		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	1.17812E-03	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	1.1781E-09		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	1.02664E-03	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	1.3513E-09		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	8.69434E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.1863E-09		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	7.06892E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	9.6452E-10		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	5.38839E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	7.3522E-10		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	3.65108E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	4.9817E-10		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	1.85544E-04	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	2.6565E-10		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				-7.48118E-02	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	-1.0513E-08	1.72157E-05	-0.00061067

PNC TN9410 97-062

添付表 4-1 (4/5) スプリング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の4次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対ケース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-1.43075E-02	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-7.7151E-10		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-1.29598E-02	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-9.8045E-10		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-1.24209E-02	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-2.1781E-09		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-8.92730E-03	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-2.9356E-09		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-4.96301E-03	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-1.7486E-09		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-1.17058E-03	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-3.7805E-10		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	1.76540E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	5.1832E-10		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	4.41322E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.2957E-09		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	6.69825E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.9666E-09		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	8.55692E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.5123E-09		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	9.94247E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.9191E-09		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	1.08296E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.1796E-09		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	1.12179E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.2936E-09		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	1.11342E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.2690E-09		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	1.06336E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.1220E-09		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	9.79885E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.8769E-09		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	8.73972E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.5660E-09		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	7.59045E-03	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	2.1757E-09		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	6.69762E-03	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	2.9148E-09		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	5.94511E-03	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	4.0988E-09		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	5.02275E-03	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	5.0227E-09		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	4.22253E-03	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	5.5579E-09		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	3.44065E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	4.6946E-09		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	2.68113E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	3.6583E-09		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	1.95028E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	2.6611E-09		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	1.25496E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.7123E-09		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	6.02370E-04	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	8.6243E-10		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				7.83889E-02	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	5.1886E-08	6.2546E-06	0.00829556

添付表4-1(5/5) スプリング式温度計ウェル(ナトリウム中ウェル長さ150mm)の5次モード刺激係数の算出(MK-2温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対シース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-1.00000E+00	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-5.3924E-08		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-8.91631E-01	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-6.7455E-08		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-8.48298E-01	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-1.4876E-07		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-5.67840E-01	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-1.8672E-07		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-2.52447E-01	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-8.8942E-08		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	4.22266E-02	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	1.3638E-08		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	2.61367E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	7.6737E-08		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	4.47494E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.3138E-07		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	5.93370E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.7421E-07		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	6.93765E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0369E-07		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	7.46120E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.1906E-07		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	7.50995E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.2049E-07		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	7.12309E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0913E-07		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	6.37361E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.8713E-07		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	5.36661E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.5756E-07		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	4.23585E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.2436E-07		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	3.13936E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	9.2172E-08		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	2.25425E-01	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	6.4616E-08		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	1.77761E-01	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	7.7361E-08		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	1.42048E-01	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	9.7935E-08		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	1.12556E-01	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	1.1255E-07		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	8.67714E-02	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	1.1421E-07		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	6.36152E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	8.6800E-08		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	4.32910E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	5.9069E-08		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	2.62740E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	3.5850E-08		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	1.30538E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.7811E-08		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	4.12862E-03	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	5.9110E-09		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				3.49390E+00	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	1.9359E-06	2.3917E-06	0.80942311

添付表 4-2 (1/6) コンプレッションフィティング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の1次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対ケース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-7.94616E-04	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-4.2849E-11		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-7.81065E-04	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-5.9090E-11		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-7.75645E-04	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-1.3602E-10		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-7.40413E-04	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-2.4347E-10		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-6.99766E-04	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-2.4654E-10		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-6.59133E-04	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-2.1287E-10		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.25292E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.8359E-10		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.91481E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.7366E-10		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.57710E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.6374E-10		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.23993E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.5384E-10		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.90347E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.4397E-10		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.56788E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.3411E-10		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.23334E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.2429E-10		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.90005E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.1451E-10		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.56823E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.0476E-10		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.23810E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-9.5071E-11		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	-2.90888E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-8.5405E-11		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	-2.58384E-04	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	-7.4064E-11		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	-2.32448E-04	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	-1.0116E-10		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	-2.06570E-04	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	-1.4242E-10		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	-1.80716E-04	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	-1.8071E-10		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.54874E-04	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	-2.0385E-10		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.29041E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-1.7607E-10		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.03215E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-1.4083E-10		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	-7.73974E-05	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-1.0561E-10		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	-5.15886E-05	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-7.0390E-11		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	-2.57892E-05	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	-3.6923E-11		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				-1.09011E-02	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	-3.6498E-09	7.17822E-05	-0.00005085

添付表 4-2 (2/6) コンプレッションフィティング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の2次モード刺激係数の算出 (MK-2温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対シース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-1.70183E-02	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-9.1769E-10		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-1.65369E-02	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-1.2511E-09		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-1.63443E-02	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-2.8661E-09		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-1.50931E-02	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-4.9631E-09		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-1.36531E-02	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-4.8103E-09		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-1.22230E-02	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-3.9476E-09		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	-1.10456E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-3.2430E-09		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	-9.88837E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.9032E-09		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	-8.75927E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.5717E-09		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	-7.66730E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.2511E-09		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.62236E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.9443E-09		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	-5.63516E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.6545E-09		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.71710E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.3849E-09		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.88015E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.1392E-09		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	-3.13680E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-9.2097E-10		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	-2.49994E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-7.3398E-10		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	-1.98277E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-5.8214E-10		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	-1.59876E-03	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	-4.5827E-10		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	-1.38085E-03	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	-6.0094E-10		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	-1.19778E-03	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	-8.2581E-10		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	-1.02936E-03	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	-1.0293E-09		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	-8.68338E-04	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	-1.1430E-09		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	-7.11863E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-9.7130E-10		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	-5.59732E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-7.6373E-10		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	-4.12211E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-5.6244E-10		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	-2.69567E-04	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-3.6781E-10		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.32072E-04	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	-1.8909E-10		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				-1.64864E-01	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	-4.4997E-08	1.94566E-05	-0.00231267

添付表 4-2 (3/6) コンプレッションフィティング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の3次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対シース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	1.00000E+00	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	5.3924E-08		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	9.68149E-01	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	7.3243E-08		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	9.55410E-01	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	1.6754E-07		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	8.72640E-01	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	2.8695E-07		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	7.77423E-01	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	2.7390E-07		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	6.83003E-01	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	2.2058E-07		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	6.05454E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.7776E-07		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	5.29498E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.5546E-07		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	4.55754E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.3381E-07		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	3.84919E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.1301E-07		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	3.17753E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	9.3292E-08		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	2.55071E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	7.4889E-08		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	1.97733E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	5.8054E-08		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	1.46635E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	4.3052E-08		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	1.02704E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.0154E-08		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	6.68852E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.9638E-08		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	4.01392E-02	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.1785E-08		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	2.34365E-02	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	6.7179E-09		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	1.67792E-02	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	7.3023E-09		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	1.27283E-02	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	8.7755E-09		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	9.76801E-03	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	9.7678E-09		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	7.35564E-03	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	9.6819E-09		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	5.27820E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	7.2019E-09		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	3.51867E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	4.8011E-09		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	2.09403E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	2.8572E-09		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	1.02133E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.3936E-09		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	3.17627E-04	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	4.5475E-10		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				8.44147E+00	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	2.0460E-06	3.38330E-06	0.60473784

添付表 4-2 (4/6) コンプレッションフィティング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の4次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX: m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対シース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-9.68878E-03	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-5.2245E-10		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-8.89979E-03	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-6.7330E-10		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-8.58423E-03	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-1.5053E-09		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-6.53700E-03	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-2.1496E-09		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-4.20197E-03	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-1.4804E-09		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-1.93813E-03	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-6.2594E-10		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	-1.46369E-04	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-4.2974E-11		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	1.52089E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	4.4653E-10		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	3.02735E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	8.8883E-10		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	4.33895E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.2739E-09		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	5.42615E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.5931E-09		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	6.26579E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.8396E-09		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	6.84280E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0090E-09		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	7.15138E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0996E-09		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	7.19588E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.1127E-09		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	6.99127E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0526E-09		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	6.56320E-03	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.9270E-09		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	5.94768E-03	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	1.7049E-09		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	5.36369E-03	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	2.3343E-09		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	4.75595E-03	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	3.2790E-09		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	4.14367E-03	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	4.1436E-09		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	3.53204E-03	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	4.6491E-09		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	2.92287E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	3.9881E-09		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	2.31825E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	3.1631E-09		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	1.72073E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	2.3479E-09		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	1.13314E-03	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.5461E-09		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	5.58509E-04	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	7.9963E-10		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				4.77239E-02	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	3.7199E-08	7.92712E-06	0.00469258

添付表 4-2 (5/6) コンプレッションフィティング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の5次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対ケース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	6.97871E-12	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	3.7632E-19		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	4.33821E-12	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	3.2820E-19		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	3.29785E-12	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	5.7831E-19		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-2.46991E-12	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-8.1219E-19		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-4.34481E-12	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-1.5308E-18		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	-1.22921E-13	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	-3.9699E-20		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	4.50655E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.3231E-18		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	5.49245E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.6126E-18		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	1.20560E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	3.5396E-19		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	-4.96281E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-1.4571E-18		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	-6.99991E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.0552E-18		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	-2.19442E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-6.4428E-19		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	5.10420E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.4986E-18		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	6.95778E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0428E-18		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	4.23466E-13	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.2433E-19		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	-7.95284E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.3350E-18		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	-8.59946E-12	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	-2.5248E-18		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	-1.12597E-12	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	-3.2275E-19		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	3.39008E-12	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	1.4754E-18		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	4.12980E-12	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	2.8473E-18		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	2.44998E-12	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	2.4499E-18		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	-1.16818E-13	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	-1.5376E-19		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	-2.47548E-12	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-3.3777E-18		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	-3.79716E-12	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-5.1811E-18		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	-3.62646E-12	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-4.9481E-18		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	-2.20376E-12	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	-3.0069E-18		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	-5.10572E-13	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	-7.3100E-19		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				-3.22863E-12	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	-1.4109E-17	6.16171E-05	-2.28986E-13

添付表 4-2 (6/6) コンプレッションフィティング式温度計ウェル (ナトリウム中ウェル長さ150mm) の6次モード刺激係数の算出 (MK-2 温度計ウェル)

質点No.	質点間距離 (mm)	ウェル外径 (mm)	ウェル内径 (mm)	質点断面積 (mm ²)	EIGENVECTOR ϕ	MASS MATRIX : m				$\phi \times m$	EFFECTIVE MASS M	刺激係数 β
						ウェル本体	ナトリウム	熱電対ケース	合計			
10		8.60	3.60	47.91	-1.00000E+00	4.7704E-08	6.2198E-09	0.0000E+00	5.3924E-08	-5.3924E-08		
12	2.50	8.60	3.60	47.91	-8.91632E-01	6.6785E-08	8.7077E-09	1.5990E-10	7.5653E-08	-6.7455E-08		
14	1.00	8.60	3.60	47.91	-8.48299E-01	1.4311E-07	1.8659E-08	1.3590E-08	1.7536E-07	-1.4876E-07		
16	6.50	8.60	3.60	47.91	-5.67842E-01	2.6714E-07	3.4831E-08	2.6860E-08	3.2883E-07	-1.8673E-07		
18	7.50	8.60	3.60	47.91	-2.52450E-01	2.8622E-07	3.7319E-08	2.8779E-08	3.5232E-07	-8.8944E-08		
20	7.50	8.60	3.60	47.91	4.22229E-02	2.6237E-07	3.4209E-08	2.6381E-08	3.2296E-07	1.3636E-08		
22	6.25	8.60	3.60	47.91	2.61363E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	7.6736E-08		
25	6.25	8.60	3.60	47.91	4.47491E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.3138E-07		
28	6.25	8.60	3.60	47.91	5.93367E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.7421E-07		
30	6.25	8.60	3.60	47.91	6.93764E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0369E-07		
32	6.25	8.60	3.60	47.91	7.46120E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.1906E-07		
35	6.25	8.60	3.60	47.91	7.50997E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.2049E-07		
38	6.25	8.60	3.60	47.91	7.12313E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	2.0914E-07		
40	6.25	8.60	3.60	47.91	6.37369E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.8713E-07		
42	6.25	8.60	3.60	47.91	5.36670E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.5757E-07		
45	6.25	8.60	3.60	47.91	4.23597E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	1.2437E-07		
48	6.25	8.60	3.60	47.91	3.13948E-01	2.3852E-07	3.1099E-08	2.3982E-08	2.9360E-07	9.2175E-08		
50	6.25	8.60	3.60	47.91	2.25438E-01	2.3489E-07	3.0164E-08	2.1584E-08	2.8664E-07	6.4620E-08		
52	5.00	11.45	3.60	92.79	1.77772E-01	3.7168E-07	4.4329E-08	1.9186E-08	4.3520E-07	7.7366E-08		
55	5.00	14.30	3.60	150.43	1.42059E-01	6.0125E-07	6.9016E-08	1.9186E-08	6.8945E-07	9.7942E-08		
58	5.00	17.15	3.60	220.82	1.12565E-01	8.8163E-07	9.9167E-08	1.9186E-08	9.9998E-07	1.1256E-07		
60	5.00	20.00	3.60	303.98	8.67794E-02	1.1672E-06	1.2988E-07	1.9186E-08	1.3163E-06	1.1422E-07		
62	5.00	20.00	3.60	303.98	6.36219E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	8.6809E-08		
63	5.00	20.00	3.60	303.98	4.32964E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	5.9076E-08		
65	5.00	20.00	3.60	303.98	2.62780E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	3.5855E-08		
67	5.00	20.00	3.60	303.98	1.30565E-02	1.2107E-06	1.3456E-07	1.9186E-08	1.3645E-06	1.7815E-08		
68	5.00	20.00	3.60	303.98	4.12997E-03	1.2107E-06	2.0183E-07	1.9186E-08	1.4317E-06	5.9130E-09		
70	5.00	20.00	3.60	303.98	0.00000E+00	6.0535E-07		1.9474E-08	6.2483E-07	0.0000E+00		
	150.00				3.49400E+00	1.3613E-05	1.5947E-06	5.7330E-07	1.5781E-05	1.9360E-06	2.35079E-06	0.82353926