

JAERI-M
92-034

船体の振動・動揺と
プラントパラメータの相関
—原子力第一船海上試運転報告書—

1992年3月

角田 恒巳・北村 敏勝・水島 俊彦
山崎 弘司・中原 健・神谷 栄世
工藤 隆広・内藤 彰*・富永 峰男**

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

船体の振動・動揺とプラントパラメータの相関

—原子力第一船海上試運転報告書—

日本原子力研究所むつ事業所原子力船技術部

角田 恒巳⁺・北村 敏勝・水島 俊彦・山崎 弘司

中原 健・神谷 栄世・工藤 隆広・内藤 彰^{*}

富永 峰男^{**}

(1992年2月4日受理)

原子力第一船『むつ』の海上試運転は、平成2年7月10日からの出力上昇試験第1次航海初日の投揚錨試験にはじまり、平成2年10月30日～11月9日の第3次航海及び平成2年12月7日～14日の第4次航海に渡って実施した。海上試運転では十数項目に及ぶ諸試験を実施したが、これと平行して試験時の船体運動に伴う振動、動揺が原子炉プラントに与える影響を調査するためプラント相関試験と位置付けた自主的な試験を行った。これは、原子炉から推進系に至る運転制御に係わる全システムの整合性を検証することを目的としたもので、船体の振動・動揺と原子炉プラント挙動の相関性について調査した。本報告書は、これらの結果の一部を解析し、取りまとめたものである。

その結果、船体振動との関連では、船舶の構造上きまる船体及び原子炉格納容器等の正確な固有振動数を確認することができた。また、プロペラ回転によって起振される船体振動、固有振動などに起因するプラント挙動は極めて小さいことが判った。

一方、船体動揺との関連では、推進系パラメータである軸馬力、主軸回転数にローリングの影響が強く現れた。原子炉関連のパラメータでは加圧器水位、一次冷却ループ平均温度、自動制御信号、一次冷却ループ圧力などにピッチングとの相関が認められ、特に加圧器水位に対して最も明瞭に表れた。また、原子炉の核的状況を表す反応度、起動率などには、ローリング及びピッチングとの相関が認められた。その他、『むつ』の原子炉系固有の応答と思われる0.06 Hzの揺らぎが起動率、反応度などの一次系パラメータや軸馬力などの推進系に表れることがわかった。

むつ事業所：〒035 青森県むつ市大字関根字北関根400

+ 東海研究所原子炉工学部

* 昭和海運株式会社

** 佐世保重工株式会社

Effects of Ship's Vibration and Motion on Plant Parameters
-Report on Sea Trials of Nuclear Ship MUTSU Made First in Japan-

Tsunemi KAKUTA⁺, Toshikatsu KITAMURA, Toshihiko MIZUSHIMA
Hiroshi YAMAZAKI, Takeshi NAKAHARA, Eisei KAMIYA
Takahiro KUDOU, Akira NAITOH^{*} and Mineo TOMINAGA^{**}

Department of Nuclear Ship Engineering
Mutsu Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Mutsu-shi, Aomori-ken

(Received February 4, 1992)

Present report was written about the study of the effects of ship's vibration and motion on reactor plant performances measured and analyzed to confirm the total balance for control systems of reactor to propulsion.

On July 10, 1990, or on the first day of the first voyage for the powerup test, the sea trials of MUTSU, nuclear ship made first in Japan, started from the anchoring test. The trial tests had finished through the third voyage between October 30 and November 9 to the fourth voyage between 7 and 14 of December.

The trial tests had been conducted over ten items or so containing in-house tests of the measurements of ship's vibration and motion in order to research the effects on reactor performance. We here call the in-house tests the plant correlation tests.

In regard to the correlation with ship's vibration, we confirmed that the inherent vibrations of hull and reactor containment arisen from ship structure had precisely been measured and that the plant

+ Department of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment

* Showa Line Co.

** Sasebo Heavy Industries Co.

correlations due to the hull and local vibrations arising from propeller revolutions are very small.

Concerning the correlation with ship's motion, it was shown that her rolling motion strongly had affected on the propulsion system such as shaft power and shaft revolutions.

About the correlation with reactor systems it was found that her pitching motion had given effect on the water level in pressurizer, primary coolant average temperature, ϵ -signal of the auto-control of reactor power and primary coolant pressure etc, particularly, most-strongly on the water level in pressurizer ; her rolling and pitching motions had given effect on nuclear characteristics such as reactivity and startup rate ; in addition the fluctuation of 0.06 Hz, we think the response inherent in [MUTSU] reactor systems, had been observed on her reactor parameters like reactivity and startup rate, and her propulsion systems like shaft horse power.

Keywords : Sea Trial, MUTSU, Nuclear ship, Correlation, Ship's Motion,
Ship's Vibration

目 次

1. はじめに	1
2. 計測方法	2
2.1 データ収録	2
2.2 計測パラメータと検出センサ	7
2.3 データ再生	30
3. 解析方法	32
3.1 概要	32
3.2 解析方法	32
4. 固有振動の影響	37
4.1 固有振動の確認	37
4.2 船体固有振動のプラントパラメータへの影響	51
4.3 原子炉格納容器等構造物の固有振動のプラントパラメータへの影響	58
4.4 固有振動の影響まとめ	58
5. 船体の過渡的動揺の影響	58
5.1 相関スペクトル	58
5.2 プラントパラメータとの相関	59
5.3 過渡的動揺の影響まとめ	79
6. まとめ	80
謝辞	81
文献	82

Contents

1. Introduction	1
2. Test Procedures	2
2.1 Collection of Data	2
2.2 Measuring Parameters, Detecting Censors and Tranducers	7
2.3 Regeneration of Data	30
3. Analytical Procedures	32
3.1 Abstract	32
3.2 Analytical Procedures	32
4. Effect of Inherent Vibrations	37
4.1 Measurement of Inherent Vibrations	37
4.2 Effect of Vibrations Inherent in Ship	51
4.3 Effect of Vibrations Inherent in Reactor Containment	58
4.4 Summary	58
5. Effect of Ship's Transient Motions	58
5.1 Correlation Spectra	58
5.2 Effects on Plant Parameters	59
5.3 Summary	79
6. Conclutions	80
Acknowledgement	81
References	82

1 . は じ め に

船舶において、船体の振動及び動揺は避けられない事象である。このうち船体振動は、プロペラの回転を起振源とする比較的周波数成分の高い事象であり、動揺は、航行中にうける波浪、操船に係わる船体運動などに誘引される数秒から数十秒に及ぶ長い周期の事象である。いずれも加速度という重力変化を伴い、機器・構造物に対する影響と、人体への不快感をもたらすなどの課題を有している。

第1の点は、船体構造物や設備・機器等の機構的な強度に係わるもので、一般に耐振性と応力疲労という課題で取扱われている。耐振性は、設備・機器に損傷を与え、誤動作をまねく原因となる課題であり、応力疲労は、構造物や機器が長時間振動に暴された場合に損傷などを生じる課題である。これらの課題に対処するため、船舶の建造には、通常遭遇するあらゆる船体条件を考慮した設計条件が設定され、厳しく評価されている。

第2の点は、直接人体に感じる不快感を、振動感覚という保健衛生的な面から捉えた課題である。これは、乗船者が無用な振動に暴され、作業能率の低下や健康を損うのを防ぐことを目的としたもので、ISO⁽¹⁾等の国際的な基準により評価されている。

これらは、船舶の安全と乗船者の健康を守る上で重要な課題であり、『むつ』の海上試運転において船体振動試験として取上げ、詳細な評価試験を実施した。その結果、機構的な強度上においても、また保健衛生面からみた振動環境面でも問題となる事象はほとんどないと評価できる結果が得られ、これを別稿で詳しく報告した⁽²⁾。

一方、原子力船という特殊な船舶として見た場合、もう一つの課題として振動や動揺が原子炉施設に与える影響がある。すなわち、船用炉は、振動や動揺に常時暴されるので、機器の動作不安定が懸念され、また、種々の操船による大きな負荷変動を伴い、これに追従することが強いられる。このように、負荷追従性と制御性という観点から、船用炉の運転制御に係わるプラント全系統の整合性の調査も重要な課題である。

そこで、種々の厳しい船体運動を伴う海上試運転において各種試験を実施する際、個々の試験と平行してプラント相関試験と位置付けし、船体の振動、動揺と原子炉プラントパラメーターを同時計測し、その相関性を調査した。

船体の振動及び動揺による重力変化を伴う事象は、陸上の原子炉プラントにも共通する課題であり、陸上炉の場合は設置する地域の“地震”を具体的な振動源として、機器や構造物の設計・評価がなされている。しかし、地震の持続時間は長くてもたかだか数分間であると共に、試験による評価は個々の機器を対象として行われる場合が多い。これに対し、船用炉はプラント全体が常時動くものであり、機器・構造物にとってより厳しい側にあるといえる。原子力船の振動・動揺に関する試験は、プラント全体を動く試験体として評価できる唯一の方法であることから、ここで得られた結果は陸上プラントにとっても大いに参考になるものと考えられる。

2 . 計 測 方 法

2.1 データ収録

2.1.1 収録パラメータ

プラント相関試験では、船体の振動、動揺を計測するため船体各部に設置した加速度計、動揺計からの信号と、原子炉及び推進プラントの状態を指示する信号とを同時に多チャンネルで計測し、これらの相関を解析することにした。

船体振動の信号は、上甲板各部に設置した加速度計、及び原子炉格納容器、原子炉圧力容器等に設置されている加速度計を用いた。上甲板の加速度計は、第3次航海においては船体振動試験用として仮設した加速度計のうち8箇所から、16点の信号を、第4次航海では、『むつ』に常設されている上甲板加速度計を用いて、7点の信号を収録した。また、船体動揺の信号は、『むつ』常設の動揺計測装置であるローリング角度計、ピッチング角度計、ヨーイング角速度計を用い、これらの信号を収録した。

原子炉及び推進系の情報としては、原子炉一次系プラントを中心に、軸馬力や主軸回転数など推進系の情報を加え、合計45点のパラメータを計測対象とした。

これら多数のパラメータを同時に計測するのは困難なため、デジタル(PCM)信号処理によって、データレコーダに収録する方法を採用した。また、一部のパラメータ(7項目)については、アナログ(FM変調)信号による収録を行ない、より高速の信号処理が可能なように対処した。

本試験における計測データの収録要領をFig. 1に、また計測したパラメータの詳細をTable 1に示す。

計測対象としたプラントパラメータは、船体振動試験時の仮設加速度計信号を除き、全て『むつ』に設置されたデータ処理装置(DAPS: Data Acquisition Processor System)への入力端から分岐した信号を用いた。この信号は、デジタル化信号処理を行う前のアナログ信号である。

計測対象とするパラメータの振動に対する最も大きな応答周波数は、船体固有振動数及びプロペラの回転に起振される振動数から下記値が予測される。

$$\cdot \text{解析による船体固有振動上限} \cdots \cdots 649.8 \text{ cpm} \div 60 \text{ s} = 10.8 \text{ Hz}$$

(原子力推進バラスト状態、上下方向振動)

$$\cdot \text{プロペラ回転の上限(200rpm)} \cdots \cdots 200 \text{ rpm} \times 5 \text{ 翼} \div 60 \text{ s} = 16.7 \text{ Hz}$$

これらの値に約2倍程度の余裕を持たせ、二通りの上限周波数を選んだ。すなわち、振動の影響が直接表れる可能性のあるパラメータに対しては、上限の周波数を41Hzレンジとし、他のパラメータについては20Hzレンジを上限とした。さらに、一部のパラメータはFM収録によって1,250Hzレンジまでの周波数領域を確保した。

Table 1 プラント関連試験計測パラメータ一覧

TR	Ch	計測パラメータ	TR	Ch	計測パラメータ	TR	Ch	計測パラメータ	
1	1	加速度計 1V ^{**} A1 ^{***}	4	1	No. 1 制御棒位置	6	1	No. 2 SG蒸気流量	
	2	加速度計 2T A2		2	No. 2 制御棒位置		2	No. 1 SG給水圧力	
	3	加速度計 3V A3		3	No. 3 制御棒位置		3	No. 2 SG給水圧力	
	4	加速度計 4T A4		4	No. 4 制御棒位置		4	主給水温度	
	5	加速度計 5V A5		5	反応度計出力		5	No. 1 SG狭域水位	
	6	加速度計 6T A6		6	自動制御 ε 信号		6	No. 2 SG狭域水位	
	7	加速度計 7V A7		7	NI-4 起動率		7	No. 1 SG蒸気圧力	
	8	加速度計 8T -		8	NI-5 起動率		8	No. 2 SG蒸気圧力	
2	1	加速度計 9V ^{**} RPV-Z ^{***}	5	1	主軸回転数	6	9	加圧器圧力	
	2	加速度計 10T RPV-R		2	高圧第1段落圧力		10	炉心入口温度	
	3	加速度計 11V RPV-θ		3	No. 1 ループ冷却水量		11	炉心出口温度	
	4	加速度計 12T CV-Z		4	No. 2 ループ冷却水量		12	加圧器液相温度	
	5	加速度計 21V CV-R		5	No. 1 コールドレグ温度		13	加圧器水位	
	6	加速度計 22T CV-θ		6	No. 2 コールドレグ温度		14	ローリング角度	
	7	加速度計 23V -		7	No. 1 ホットレグ温度		15	ピッチング角度	
	8	加速度計 24V -		8	No. 2 ホットレグ温度		16	ヨーインク角速度	
3	1	軸馬力	5	9	No. 1 ループ平均温度	7	FM	No. 1 ループ平均温度	
	2	主蒸気圧力		10	No. 2 ループ平均温度		8	FM	NI-10出力レベル
	3	NI-4 中性子束		11	一次冷却ループ圧力		9	FM	No. 1 制御棒位置
	4	NI-5 中性子束		12	No. 1 ループ温度差		10	FM	反応度計出力
	5	NI-7 出力レベル		13	No. 2 ループ温度差		11	FM	NI-4 起動率
	6	NI-8 出力レベル		14	No. 1 SG給水流量		12	FM	ローリング角度
	7	NI-9 出力レベル		15	No. 2 SG給水流量		13	FM	ピッチング角度
	8	NI-10出力レベル		16	No. 1 SG蒸気流量		14	FM	タイムコード
					(TR 1~6 : PCM収録)		(TR 7~14 : アナログ収録)		

* : 計測周波数上限の設定。F表示は周波数41Hzまで、S表示は20Hzまで。

** : 3次航海では仮設加速度計を使用 (TR1;1V~8T、TR2;9V~24V)

*** : 4次航海では「むつ」常設加速度計を使用 (TR1;上甲板、TR2;原子炉周辺)

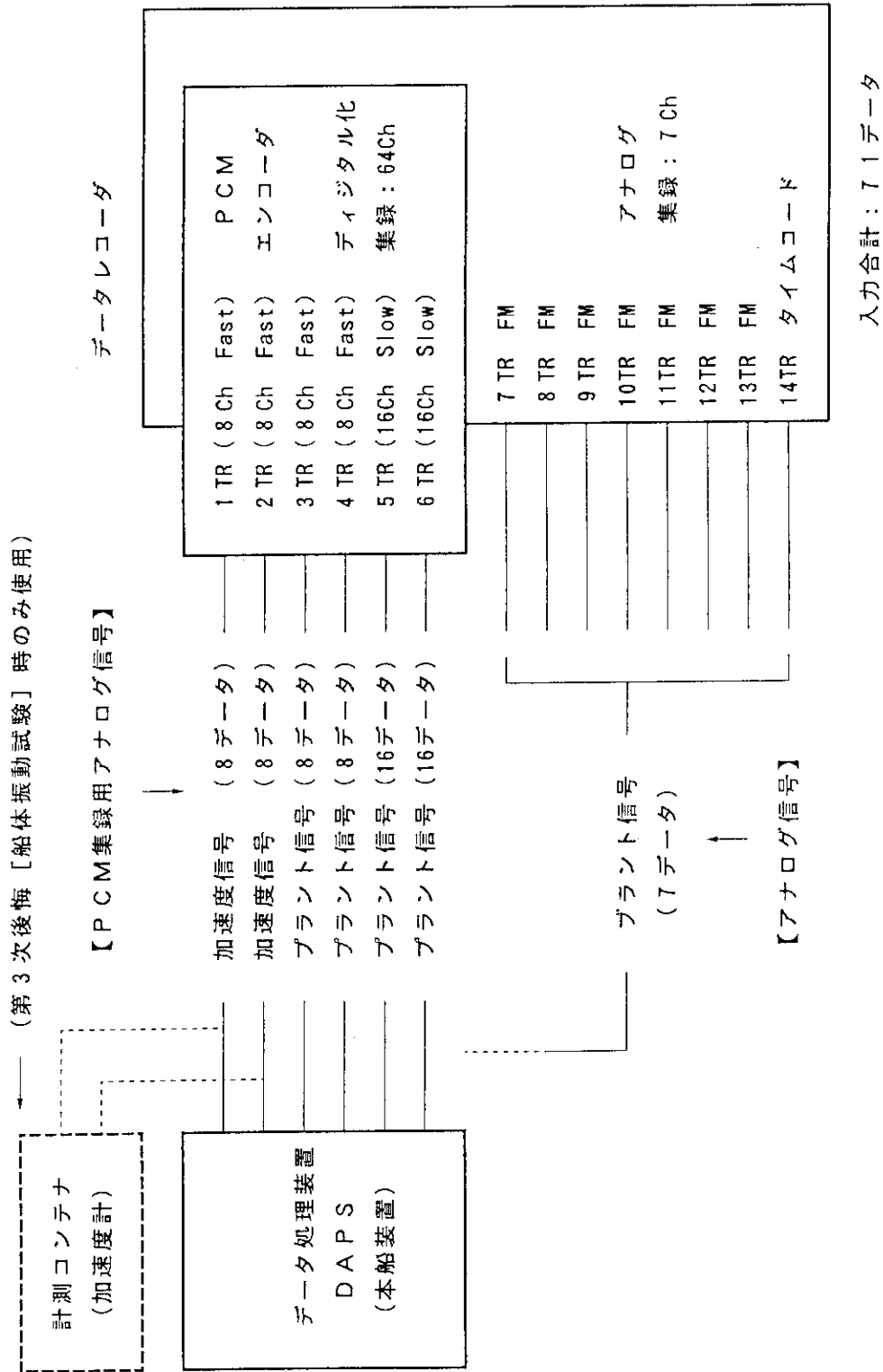


Fig. 1 プラント相関データ収録要領

本試験における計測周波数上限の設定値をTable 2に示す。収録した各パラメータの計測周波数の設定は、Table 1の脚注に示した通りである。振動計測、軸出力、原子炉出力などは早い応答のパラメータとして、圧力、流量及び温度などは、応答の緩やかなパラメータとして収録した。

Table 2 計測周波数上限の設定

パラメータ		収録方式	上限周波数 (Hz)	トラック数	1トラックの チャンネル数	集録チャンネル 合計数
振動		デジタル PCM	41	2	8	16
プラント 情報	F	デジタル PCM	41	2	8	16
	S	デジタル PCM	20	2	16	32
予備		アナログ FM	1250	8	1	8

2.1.2 対象試験

本試験は、Table 3に示す試験項目についてデータ収録した。この試験項目のうち、操舵試験、スパイラル試験、Z操舵試験、旋回試験、後進試験及び前後進切換試験（出力上昇試験項目）は、操船に伴う船体運動によって大きな振動と動揺を生じる試験である。

Table 3 計測した試験項目一覧

実施日	計測時間*	対象試験名称		
第 3 次 航 海	平成2年10月30日	船体振動試験(一部)		
	平成2年11月5日	電磁ログ校正(速力試験事前確認)		
	平成2年11月6日	10:10~10:32	船体振動試験(一部)	
		16:05~16:51	操舵試験	
		17:02~17:15	続航試験	
	平成2年11月7日	08:33~09:35	スパイラル試験	
		10:13~11:28	Z操舵試験	
		11:41~12:03	旋回試験	
		18:57~19:09	船体振動試験(一部)	
	平成2年11月8日	20:47~20:52	船体振動試験(一部)	
09:10~10:39		船体振動試験(一部)		
第 4 次 航 海	平成2年12月9日	08:15~11:58	速力試験	
		13:30~15:38	速力試験	
		17:45~19:45	続航試験(MCR)	
	平成2年12月10日	08:15~09:49	旋回試験(12ノット以下)	
		09:58~10:21	操舵試験(応急機力操舵)	
		11:30~11:59	後進試験(港内速力)	
		13:59~14:30	前後進切換試験(出力上昇試験)	
	平成2年12月11日	15:06~15:50	後進試験(NOR)	
		平成2年12月12日	08:32~11:30	単ループ試験(出力上昇試験)
			12:15~12:59	補助動力切換試験
平成2年12月13日	08:15~10:00	定格運転試験(出力上昇試験)		

* : 実際に計測、集録した時間を表す。対象試験の実施時間とは異なる。

2.2 計測パラメータと検出センサ

本試験で計測、収録した種々のパラメータを検出するセンサ及びトランスデューサの種類を、Table 4 に示す。

計測したパラメータは、本試験で基準としている振動及び動揺、主機出力と主軸回転数、原子炉内情報を知るための中性子束（原子炉出力）、原子炉の制御関連情報及び一次冷却ループの状況を把握する圧力、流量、温度などである。これら種々のパラメータを検出するセンサ及びトランスデューサの種類は、比較的限られたものとなっており大略以下のグループに分けられる。

- ・振動、動揺計測・・・・・・・・サーボ型及び歪ゲージ型加速度計
- ・軸出力・・・・・・・・位相差検出トルクセンサ
- ・中性子束計測・・・・・・・・ γ 線補償型及び非補償型の電離箱
- ・制御棒位置・・・・・・・・シンクロ電機／シンクロコンバータ
- ・圧力、流量計測・・・・・・・・圧力センサ／力平衡型伝送器
- ・温度・・・・・・・・測温抵抗体及び熱電対

これらのセンサ／トランスデューサがあらゆる条件下で、目的とするパラメータの変動に対し忠実に応答すれば、言い換えれば高速、高精度に追従し信頼性の高い計測値を出力するものであれば、本試験の解析結果はそのままプラントの状態を表すことになる。このことは同時に、原子炉から推進系に至る『むつ』の運転制御に係わる全システムの整合性が高く、適切に設計されていることも意味している。

しかし、センサ／トランスデューサの原理や形式は千差万別であり、それぞれ動作と特性面で長所と欠点を持っており、システム設計にはこの点を必ず考慮しなければならない。振動や動揺を伴う環境下での動作が十分であるかどうかは、陸上の原子炉プラントでは経験のなかったことだけに、それを確認することも重要な事柄である。当然のことながら、個々のセンサ／トランスデューサは耐振性が評価され、計測制御系の健全性は事前に解析されているが、実際には原子炉から推進系までがクローズドループとして働く系全体として捉え、その働きを評価しなければならない。本試験の目的の一つがこの点にある。すなわち、振動、動揺がプラントに与える影響を詳しく調べることによって『むつ』の運転制御に係わる全システムが、あらゆる船体運動に対して適切に設計されているかを確認することである。

そこで、主要なパラメータを測定するセンサ／トランスデューサと計測方式の原理について述べ、考慮しなければならない点と、本試験で特に着目した系統上の動作について理解を深める一助としたい。

Table 4 プラントパラメータの検出センサ、トランスデューサ

計測パラメータ	検出センサ／トランスデューサ	計測パラメータ	検出センサ／トランスデューサ
振動・動揺	1V~24V上甲板上下加速度(仮設)	圧力・流量	No. 1, 2 冷却水量
	2T~22T上甲板左右加速度(仮設)		No. 1, 2 SG給水流量
軸出力	A1~A7上甲板加速度(常設)	温度	No. 1, 2 SG蒸気流量
	RPV-Z, R, θ 圧力容器加速度		加圧器水位
中性子	CV-Z, R, θ 格納容器加速度	度	No. 1, 2 SG換水位
	軸馬力		主給水温度
制御	主軸回転数	動揺	No. 1, 2 ループ平均温度
	NI-4, 5 中性子束		No. 1, 2 ループ温度差
圧力・流量	NI-7, 8 出力レベル	動揺	No. 1, 2 コールドレグ温度
	NI-9, 10 出力レベル		No. 1, 2 ホットレグ温度
圧力・流量	NI-4, 5 起動率	動揺	炉心入口温度
	反応度計出力		炉心出口温度
圧力・流量	No. 1~No. 4 制御棒位置	動揺	加圧器液層温度
	自動制御 ϵ 信号		ロール角度
圧力・流量	主蒸気圧力	動揺	ピッチ角度
	高圧1段落圧力		ヨー角速度
圧力・流量	加圧器圧力	動揺	ジャイロ
	1次冷却ループ圧力		ジャイロ
圧力・流量	No. 1, 2 SG給水圧力	動揺	ジャイロ
	No. 1, 2 SG蒸気圧力		

2.2.1 振動及び動揺計測

(1) 加速度計及び動揺計配置

本試験において基準となる振動及び動揺の計測には、仮設の加速度計と『むつ』に常設されている加速度計を用いた。

仮設の加速度計は、船体振動試験用として、上甲板上の船首から船尾にかけ14箇所に上下(V: Vertical)方向、左右舷(T: Transversal)方向合せて25点の振動加速度を計測できるように配置した中から8箇所、16点を選んだ。振動の影響を最も考慮すべき原子炉室付近を中心に、比較的振動が大きいと予測される船尾部、これに船首部を加えた16点である。仮設加速度計による計測は、第3次航海に実施したもので、その配置をFig. 2に示す。図中※印が本試験における計測点である。

『むつ』に常設されているものとしては、上甲板上の船首から船尾にかけて7箇所に設置してある加速度計、原子炉格納容器及び原子炉圧力容器の加速度計、制御室床下に設置してある動揺計を用いた。Fig. 3に、上甲板上に常設してある加速度計(A1~A7)の配置を示す。この内A3のみT方向で、他はV方向である。またFig. 4に、原子炉格納容器内の加速度計の配置を示す。格納容器内の加速度計は、機器への影響を監視するために取付けられたものもあるが、本試験では格納容器壁(CV-Z, R, θ)及び原子炉圧力容器頂部(RPV-Z, R, θ)の2箇所、計6点を用いた。これら常設の加速度計は、第4次航海において使用し、動揺計は、両航海とも計測を実施した。

(2) 加速度センサ

本試験に使用した振動加速度計の検出方式は、サーボ型と歪ゲージ型である。これに、動揺検出のジャイロが加わる。

この内、サーボ型加速度センサの構造は、Fig. 5にその概略を示すように、

- ・バネと重錘によって構成された質量部(サイズモ系)
- ・重錘の平衡位置からのズレを検出する変位検出器
- ・電気出力を増幅するサーボ増幅器
- ・重錘を元に戻そうとする力を発生する駆動部

から成っている⁽³⁾。

質量部の重錘に加速度が加えられると、平衡位置からズレて変位を生じる。この変位を変位検出器で検出し、サーボ増幅器を通し駆動部に電流を流し、復元力を発生させ重錘を元の位置に戻す。復元力は重錘を移動させた加速度に比例するため、駆動部の電流によって加速度を計測できる。

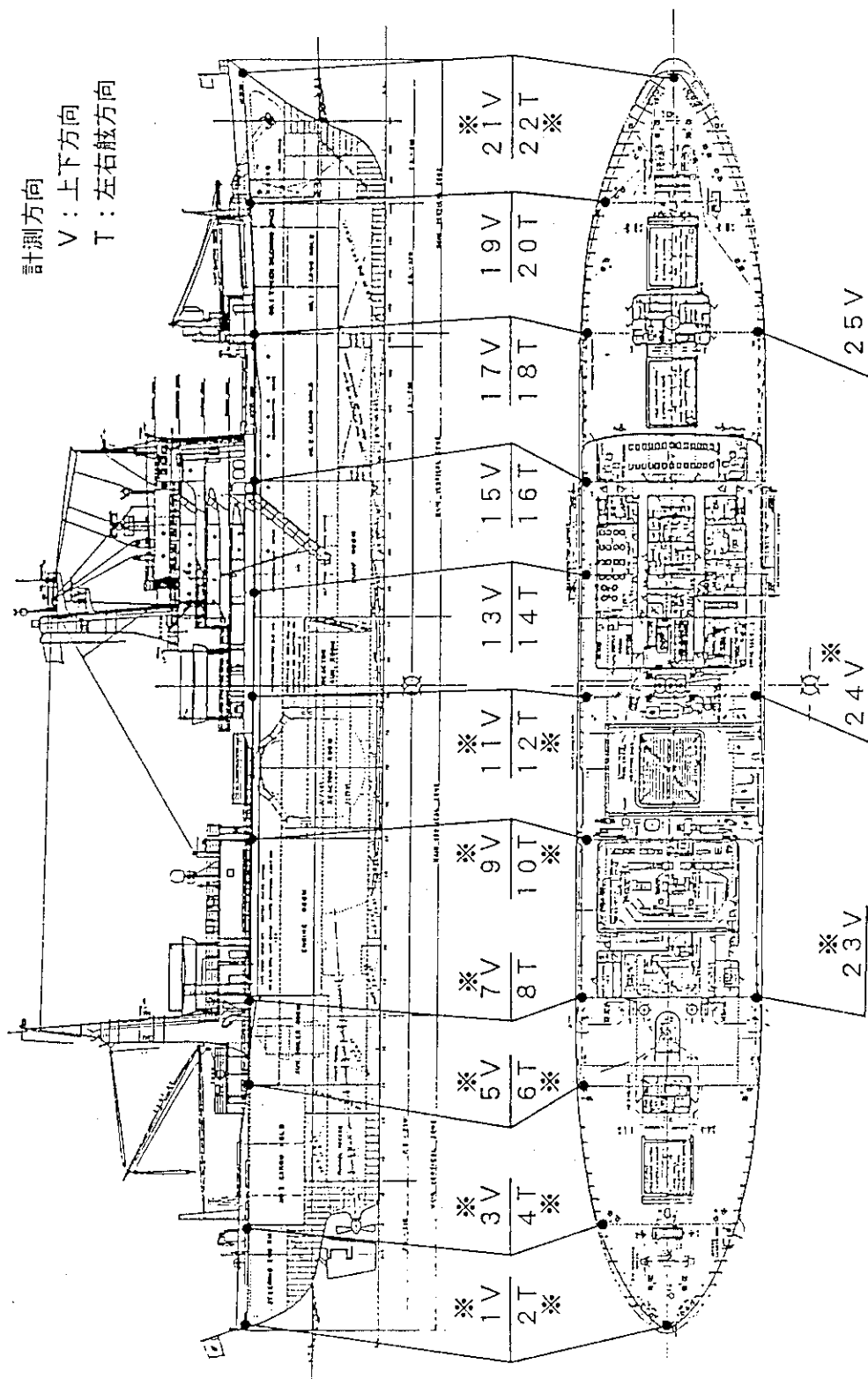
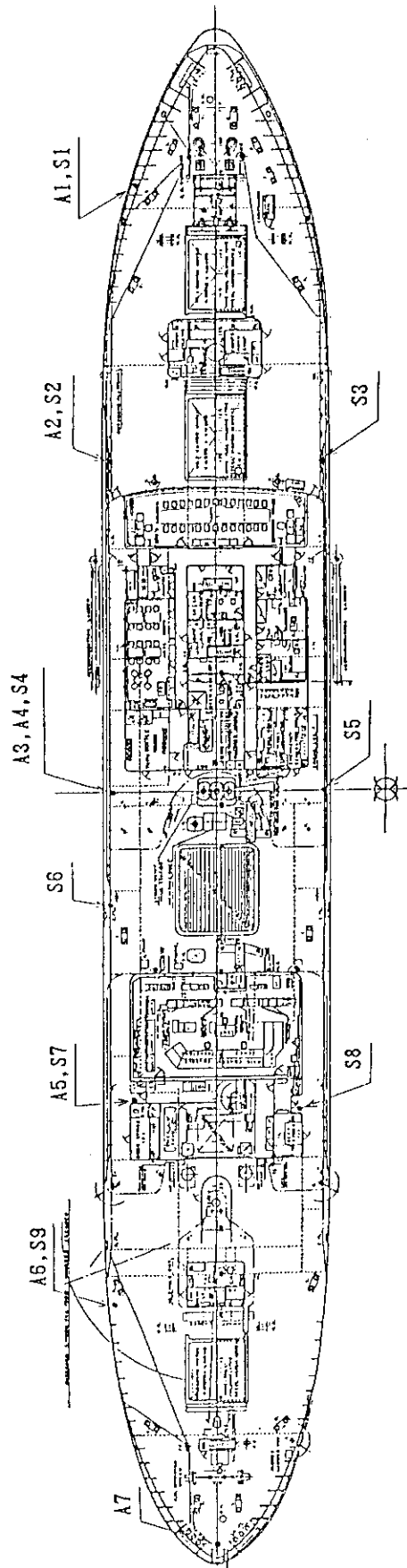


Fig. 2 振動計測用に上甲板に仮設した加速度計の配置
 [船体振動試験] 時の配置で、この内*印の加速度計を使用



A1~A7: 上甲板加速度計
S1~S9: 上甲板曲げ歪ゲージ

Fig. 3 『むっ』上甲板に常設された振動計測用加速度計の配置
この内、A1~A7の加速度計を使用した

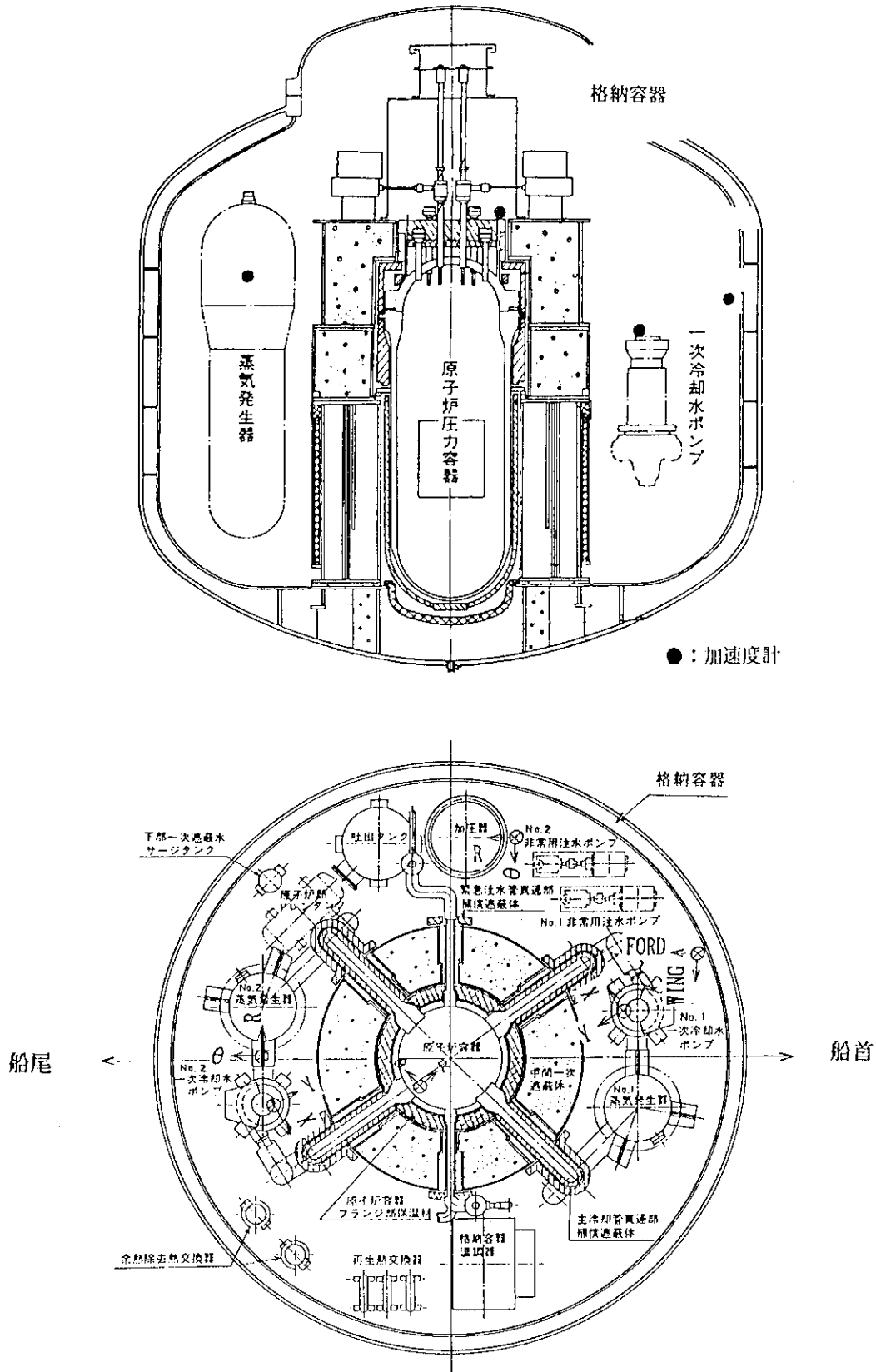


Fig. 4 原子炉格納容器内に常設された振動計測用加速度計の配置
格納容器壁(CV-Z, R, θ)、压力容器頂部(RPV-Z, R, θ)を使用

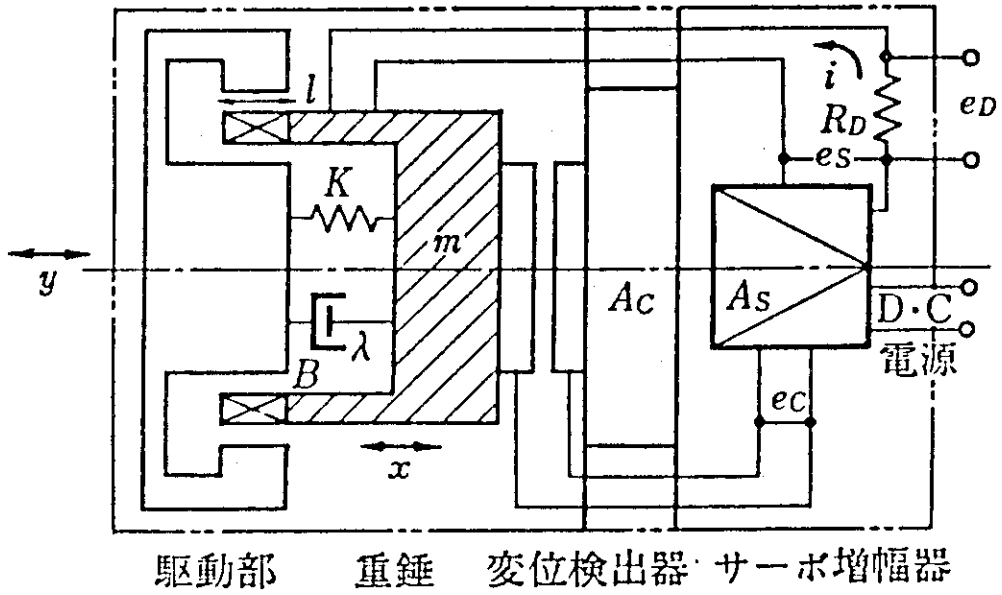


Fig. 5 サーボ型加速度計の動作原理図^(*)

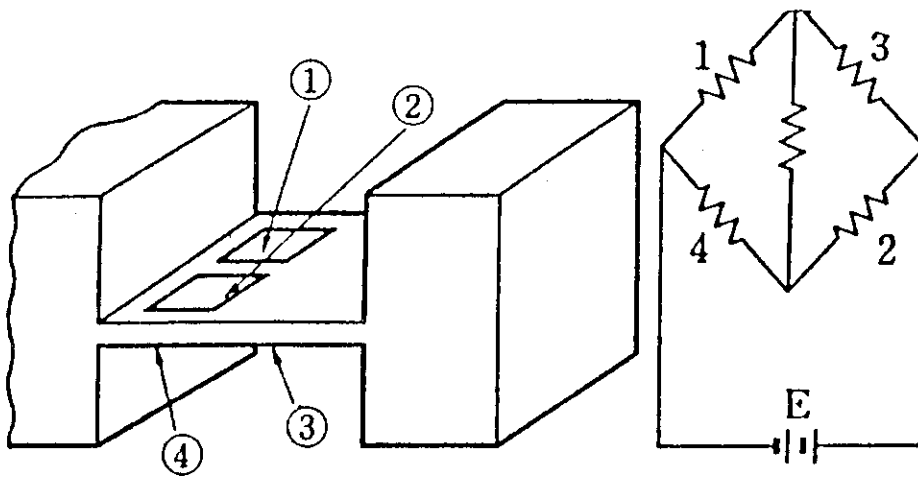


Fig. 6 歪ゲージ型加速度計の動作原理図^(*)

Fig. 5 に示す動作原理図で、磁気回路の磁束密度を B 、コイルの長さを l 、重錘の質量を m とすると、ループゲインが（サイズモ系に対し駆動部のバネ定数が）十分大きければ、入力加速度を y とし、負荷抵抗 R_L に生じる出力電圧 e_o は、

$$e_o = -y (R_L \cdot m / B \cdot l) \quad (2-1)$$

となる。

式 (2-1) からわかるように、出力電圧は入力加速度とサイズモ系の質量、駆動部の力定数 ($B \cdot l$) と負荷抵抗のみから求められる。検出部のバネのヒステリシスや直線性、増幅器の特性変化は関係しないので、このタイプのセンサは精度、感度、直線性に優れている特長を有している。

歪ゲージ型加速度センサは、歪を与えると非常に大きな電気抵抗値の変化を生じる現象を利用したものである。金属抵抗あるいは半導体を用いたものなどがある。

いずれも Fig. 6 に示すように、バネと重錘からなるサイズモ系のバネ部に、4 枚のゲージ（抵抗体）が使用されブリッジを形成している。振動加速度により、これらのゲージが歪を受けると電気抵抗が変化し、ブリッジの平衡がくずれ出力端に電圧を生じる。サーボ型に比べ小型軽量であり、多点測定に適したセンサである。また、金属抵抗体を材料にしたゲージでも、半導体を用いたものでも、ゲージは非常に薄く作られこれをバネ部に接着している。したがって、サイズモ系を薄く偏平なものにでき、目的とする加速度の方向に対し検出比を大きくとれる特長がある。

『むつ』常用の動揺計測装置としてジャイロ (Gyro) が搭載されており、パーティカルジャイロとレートジャイロが使用されている。前者はローリングとピッチングの検出に、後者は回頭角速度の検出に用いられている。ジャイロは、高速回転体の空間軸保存性と歳差運動を利用したものである。

パーティカルジャイロは、ジャイロのロータ軸を垂直に保つようにした 2 軸自由のジャイロであり、基盤（船体）の動揺角（傾斜角）の検出に用いられる。自由ジャイロは空間の一定方向を向く性質があるため、ジャイロ軸を垂直に保つためには、ジャイロにプリセッション (Precession) を与えなければならない。また、垂直方向からズレを生じたときは、元に戻すようなプリセッションを与えなければならない。ジャイロ軸を垂直に保つことを自立と呼んでいる。この状態が突然平静を失うことがある。これは、ロータ軸が外部からの急激かつ大きな力によって妨害を受けた時に生じるもので、ジャイロのタップル (Tumble) と呼ばれ、振動、動揺もその原因の一つとなる。

レートジャイロは、歳差運動の特性を利用している。高速で回転するロータ軸に力を加えると、力の大きさに比例し、力の方向に向きを変える性質を歳差運動と言う。

印加力 F と歳差運動の回転角速度 Ω の間には、 I をロータの慣性モーメント、 ω を回転

に相当する信号からは軸の回転数を、また位相差に相当する信号からは駆動トルクと軸馬力を求めている。

実際に振れ角 θ を検出する位相差式軸馬力計は、Fig. 8 に示す構造である⁽⁴⁾。軸の長さ S_L に相当する両端に、内歯歯車と外歯歯車、環状磁石、検出コイルからなる磁気回路を設け交流発電機を構成している。軸が回転すると、各検出コイルには同じ周波数の交流電圧が誘起する。このとき 2 つの交流電圧は、歯車を軸に取り付けた際に生じる両者のズレ角度に比例した無負荷位相差 α_0 を持っている。トルクによって軸が振れると、歯車のズレ角度は θ だけ増加し、交流電圧の位相差も α_m に増加する。これにより振れ角 θ は、次のように位相差の増加量に変換される。

$$\theta = (\alpha_m - \alpha_0) / z \quad (2-5)$$

ここに、 z は歯車の歯数、 $0 < \theta < 2\pi$ である。

交流発電機からの信号は、Fig. 9 に示す波形に変換され⁽⁴⁾、トルクの瞬時値、連続値、平均値など測定目的に応じて処理される。

瞬時値は、軸歯のピッチ毎、つまり交流発電機の発電信号の 1 周期毎の位相差を求める方式である。

交流信号 A、B をその周期毎にパルス化 (P_A 、 P_B) し、両パルスのズレ時間だけ開くゲート信号 E を作り、そこにクロックパルス f_c を送ってパルス群の列 F を作る。この P_A 、 P_B の周期を t_1 、E の時間幅を t_m とおけば、その周期毎の位相差は t_m / t_1 に比例する。そこで、 $1 / t_1$ をデジタル演算するとともに、先のパルス群を比率倍し t_m 中のパルス数を計数することにより瞬時値を得る。

瞬時値の計測は、軸歯のピッチが測定精度に直接影響するので、ムラがないよう精密工作する必要がある。測定精度が良く誤差がなければ、瞬時値の変動幅は主軸の振り振動を表す。逆に振り振動があれば測定精度に影響するので、考慮する必要がある。

連続値は、比較的ゆっくりした変動トルクを求める方式である。

前記のパルス群列 F を取りだせば、その周波数そのまま連続値を表す。この F は、連続した周波数信号とは異なるが、パルス群の周期間にパルスを並べ変えて見れば、単位時間に対するパルスの数、つまり周波数は位相差に比例する。無負荷時 (取付角のズレによる) の周波数 f_0 、負荷時 (振れ角による) の周波数 f_m と、クロックパルス f_c との関係は、

$$f_m = (\alpha_m / 2\pi) f_c \quad f_0 = (\alpha_0 / 2\pi) f_c \quad (2-6)$$

この周波数よりトルク Tq は、次式より求めることができる。

$$T = 2\pi \cdot k (f_m - f_0) / f_c \cdot z = (f_m - f_0) / K_r \quad (2-7)$$

ここに、 $K_r = f_c \cdot z / 2\pi \cdot k$ は換算計数で、 f_0 は一定である。

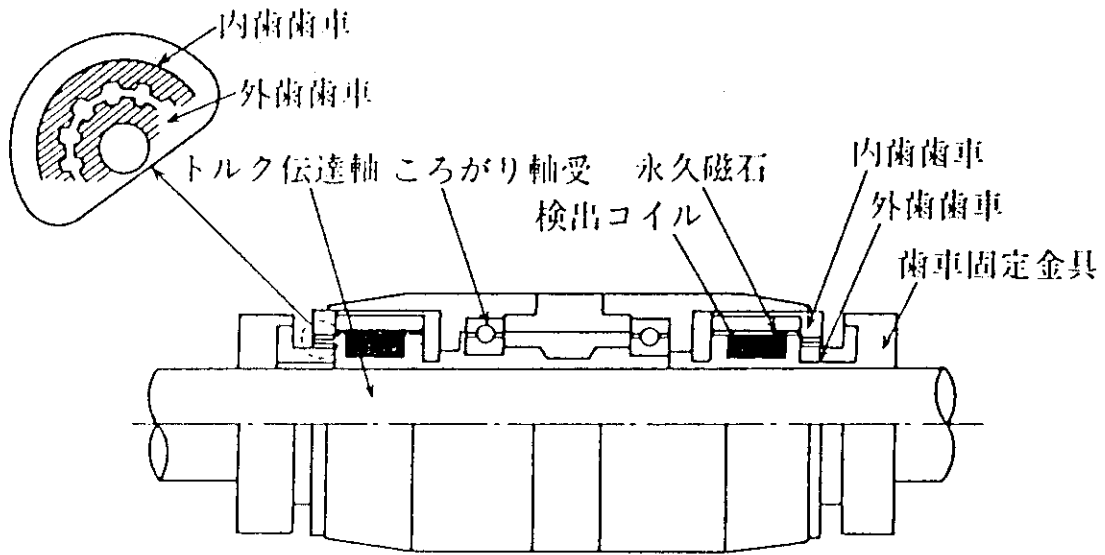


Fig. 8 位相差式軸馬力計の構造⁽⁴⁾

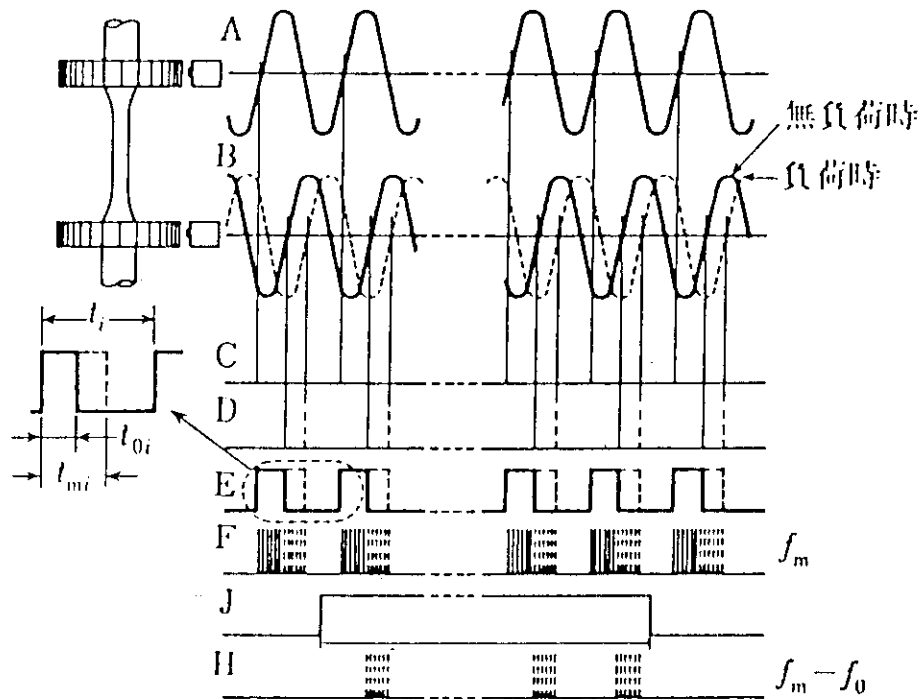


Fig. 9 位相差の検出方法⁽⁴⁾

平均値は、一定の時間、例えば10秒間毎の平均トルクを求める方式である。

前記の周波数信号Fを時間tの間だけ開くゲートを介して演算することにより求める。

$$T = 2\pi \cdot k (f_m \cdot t - f_0 \cdot t) / f_c \cdot z \cdot t = (N_m - N_0) / K_r \quad (2-8)$$

ここに、 $K_r = f_c \cdot z \cdot t / 2\pi \cdot k$ 、 $N_m = f_m \cdot t$ 、 $N_0 = f_0 \cdot t$ である。

平均値は、時間t中で誤差成分を相殺するので、振り振動や歯車ピッチのムラ、軸回転数の変動などの影響を除くことができ、精度の高い測定ができる。『むつ』に搭載している軸出力計（軸馬力、トルク、軸回転）は、この平均値を計測する方式のもので、回転計としての検出精度は±0.1rpm (Max.200rpmとすれば±0.05%に相当)、平均捩れ角検出精度は0.8%である。

軸出力計は、直接的には就航中の船舶の推進系の状態を計測するものであるが、この他にも重要な役割を持っている。すなわち、船底やプロペラの汚れによる推進抵抗の経時変化、機関性能の劣化の進行などを精度よく検出することによって、積極的に保守整備に活用することである。

因みに、船体の汚れによる推進系統への影響について計算結果が示されているので、その一例をあげる⁽⁴⁾。Kを定数、SHPを軸馬力、rを回転数とし、 $K \cdot \text{SHP} / r^3$ から計算すると、1年間における経時変化量は9～14%にも及ぶとされている。これから、1ヵ月あたりの変化量を検知するセンサの安定度の限界は、軸馬力計(SHP)で0.9%、回転計(rpm)では0.3%程度以下のものが必要であるとしている。

『むつ』の軸出力計は、軸馬力、トルク、軸回転とも、この要求を満たすものである。

2.2.3 中性子束検出

原子炉の熱出力は、炉内で単位時間内に発生する核分裂数に比例するので、中性子束すなわち中性子の量を測定すれば原子炉の出力を知ることができる。このように、中性子は炉内の核的な情報を直接表すパラメータであり、原子炉を運転する上で最も重要な監視項目の一つである。

原子炉内の中性子の量と共に核反応の程度を検知するため、核計装(NIS: Nuclear Instrumentation System)がある。NISは、極めて速い応答を示すと共に広範囲の計測が可能であり、原子炉の安全確保の上から最も重要な系統である。また、反応度計(Reactivity meter)が仮設され、原子炉の核的な特性を把握するための試験に供されている。

『むつ』に設置されたNISは、線源領域、中間領域、出力領域から成っており、このうち原子炉出力0%から原子力航行の100%出力までの間で使用されるのは、中間領域と出力領域である。中間領域及び出力領域での中性子束検出には4本の中性子検出器が使われ、6系統で原子炉の運転状態を監視している。中間領域のNI-4、5にはγ線補償型

電離箱が使用され、この出力を分岐しNI-9、10の出力領域にも用いている。もう一つの出力領域NI-7、8にはγ線非補償型電離箱が使用されている。

「むつ」に使用されているγ線補償型電離箱（Compensated Ionization Chamber：CIC）の構造を、Fig. 10に示す。

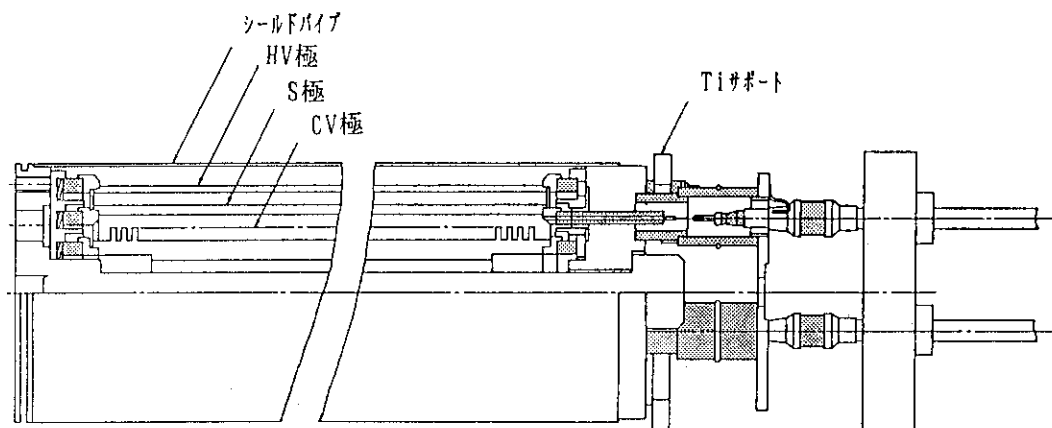
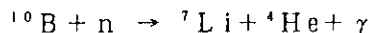


Fig. 10 γ線補償型電離箱の構造

検出器は円筒型のもので、同軸上に3つの電極を持ち、2組の電離箱から成っている。中間の電極が信号取出し用の電極である。このうち、外側の電極には正（+）の励起電圧が印加される。外側の電離箱内面には中性子感受物質として、96%程度に濃縮した ^{10}B が塗布されている。中性子の入射により、



の反応により、 ^4He のα粒子の電離電流を測定する。同時にγ線による電離電流も測定することになり誤差を生じる。この影響を避けるため、別の電極（内側の組：補償電極）には ^{10}B を塗布せず、γ線の電離電流のみを測り、これを差引いて中性子のみによる信号を取出している。補償電極には負（-）の電圧を印加し、電圧を可変することによって補償の割合を調整している。

中間出力領域は、測定範囲が5～6桁と広くγ線の影響を受けやすいので、補償型電離箱を使用している。出力領域はγ線による誤差を無視できるので、内側電極の無い非補償型電離箱（Uncompensated Ionization Chamber：UIC）を使用しても良い。

検出器の出力は直流電流で、中性子に対する感度は 10^{-14}A/nv 程度で、原子炉の100%出力時でも 10^{-4}A 程度の比較的小さな電流である。原子炉の熱出力に相当する中性子の量

は、検出器の出力電流を直接増幅し測定する。

また、炉内での核反応の程度を測定するには、検出器出力電流を微分して、単位時間あたりの変動率 $(dn/dt)/n$ を求めれば良い。この単位時間変動率の逆数をペリオド (T) と呼び、時間 (s) の単位で表している。

$$(1/n) (dn/dt) = (1/T) \quad (2-9)$$

$t=0$ における中性子数 $n(t)$ を n_0 、ペリオド T を一定になるように炉出力を上昇させれば、

$$n = n_0 \exp(t/T) \quad (2-10)$$

となり、原子炉出力は指数関数的に変化する。これを指示させるには、

$$(1/T) = d(\log n) / dt \quad (2-11)$$

の関係を利用し、一旦検出器信号を対数増幅しその出力 $(\log n)$ を微分すれば良い。微分増幅器の出力がペリオド T の逆数を示す。Fig. 11 に、ペリオドを指示させる回路構成の概略を示す。

式 (2-10) からわかるように、ペリオド T とは原子炉出力が e 倍になる時間といえるが、『むつ』の場合はこれを“起動率 (Startup rate)” と呼び (デカード/min) の単位で表している。原子炉を運転する際、操作の目安を与える有用なパラメータであると共に、安全確保に欠かせない信号でもある。この値の大きさによって、制御棒引抜き禁止 (Rod stop) 信号を発信し、さらに大きな場合は原子炉を緊急停止 (Scram) させる働きを持っている。

もう一つの微分方法を取入れた計測器に反応度計 (Reactivity meter) がある。

この計測装置は、原子炉に加わる反応度の大きさを直接測定するもので、炉心特性を把握するのに便利であることから、『むつ』には試験用機器として搭載されている。

中性子出力 $n(t)$ は、

$$n = n_0 \exp(t/T) = n_0 \exp(\delta k \cdot t / \ell) \quad (2-13)$$

ここに、 n_0 は $t=0$ における $n(t)$ の値、 ℓ は中性子寿命、 δk は反応度入力、T はペリオドで、

$$T = dt / d(\log n) = \ell / \delta k \quad (2-14)$$

である。式 (2-14) より

$$\delta k = (\ell/n) (dn/dt) \quad (2-15)$$

中性子出力 $n(t)$ に対応した信号を微分し $\ell (dn/dt)$ を得、これと $n(t)$ の比を求めると、その出力は δk を示す。Fig. 12 に反応度計の原理を示す。

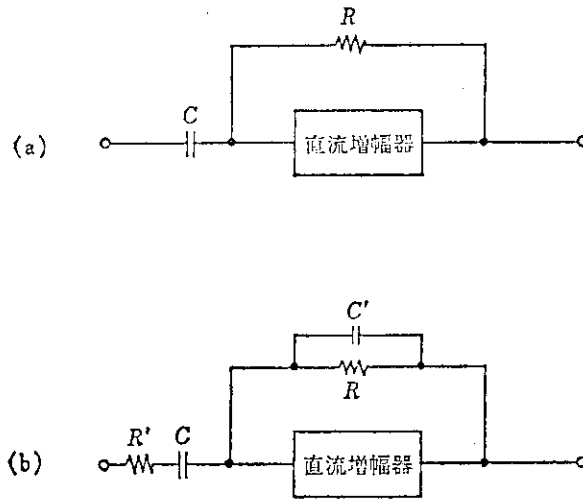


Fig. 11 ペリオド計の原理図⁽⁵⁾

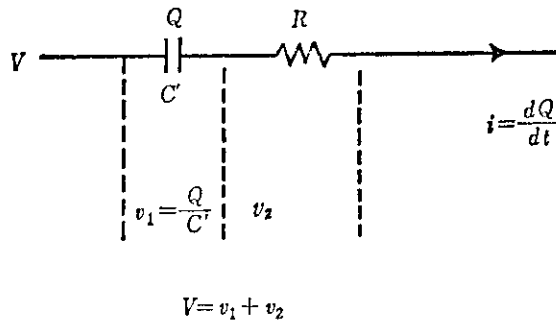
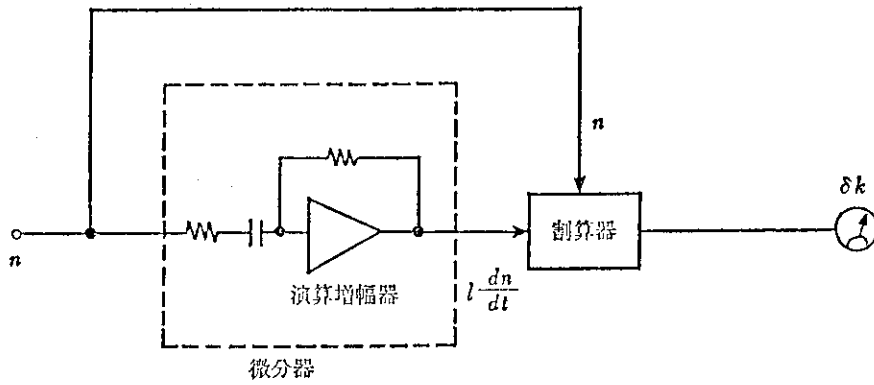


Fig. 12 反応度計の原理図⁽⁵⁾

ペリオド、反応度ともに炉心の状態を把握するのにすこぶる都合の良いパラメータであるが、原理図に示す通り計測器の回路構成は一種のハイパスフィルター（HPF）となっている。このことは、雑音の影響を受けやすく安定度に欠けることを意味している。特に微分と、除算を行う反応度計にあっては、さらに雑音の影響が大きい。種々のメリットはあっても、反応度計が高い信頼度を要求される計装機器として採用されない理由の一つである。したがって、船体の振動、動揺に対しても何等かの影響が懸念されることになり、炉心の直接情報との関連から本試験の重要な計測パラメータとなる。

また、『むつ』の中性子検出器の配置は、Fig. 13に示すようになっている。原子炉の出力領域の運転に係わる4本の中性子検出器は、それぞれ90度ずれた対角上に設置されている。また、船首尾方法（L方向）とは26度ずれて配置されている。検出器から制御室の計装盤（ドロワ）までは、同軸ケーブルで接続される。途中、ジャンクションボックス、格納容器のケーブルペネトレーションを通じて、この間約35mの距離がある。同軸ケーブルには、雑音対策を施した低雑音ケーブルが使用されているが、船体動揺によるケーブルからのノイズ発生（ $\leq 10^{-12}$ A）の影響^{(6)・(7)}も考慮される。

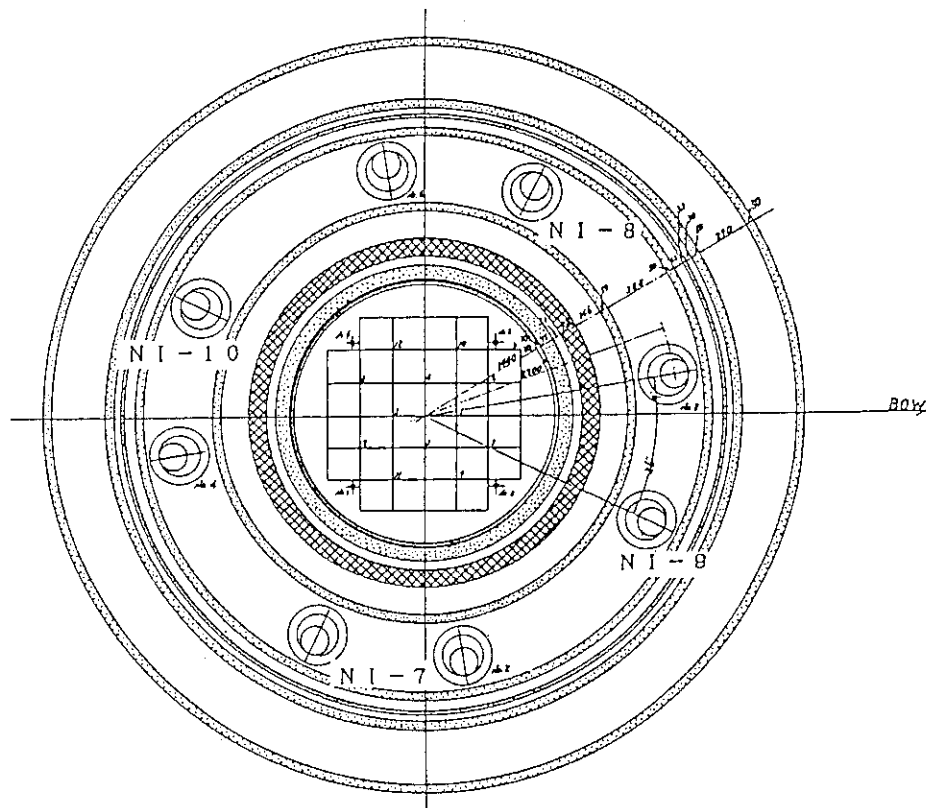


Fig. 13 中性子検出器の配置

シンクロ電機は、1個の一次巻線（回転子）と、それぞれ120度づらした3個の二次巻線（固定子）からなっている。発信機と受信機は基本的に同一構造のもので、巻線比も同じである。一次巻線への印加電圧の最大値を $E_o(\max)$ 、巻線比を k とした場合、発信機の軸を角度 θ 回転すると、二次巻線にそれぞれ誘起する電圧の最大値は、

$$\begin{aligned} E1(\max) &= k E_o(\max) \sin \theta \\ E2(\max) &= k E_o(\max) \sin (\theta - 120) \\ E3(\max) &= k E_o(\max) \sin (\theta - 240) \end{aligned} \quad (2-16)$$

一方、受信機側の二次巻線にも誘起電圧を発生するが、このとき発信機と受信機の回転子（一次巻線）の角度が異なると、それぞれの巻線に誘起する電圧が異なり、お互いに接続された二次巻線間に電流が流れ回転子にトルクを生じさせる。発信機側の回転子は外力により固定されているため、受信機側の回転子が角度 θ まで回転したところで、両シンクロ電機の二次巻線間の誘起電圧が平衡する。

受信機側の回転子に直接指針を取付ければ指示計となるが、制御装置として利用するには、この他に電気信号をとりだす必要があり、受信機側にもう一つのトランスデューサを接続している。多くの場合、回転軸に摺動抵抗器（ポテンショメータ）を取付け、回転角に応じた抵抗比によって得られる電圧値に変換し、これを信号としている。

シンクロ電機の動作原理からもわかるように、回転子の角度が一致する近辺で発生トルクは最も小さくなり、受信機側の機械的な負荷抵抗にその精度が支配されることになる。このため、回転抵抗の極力小さなポテンショメータを『むつ』の制御棒位置指示信号回路に使用していたが、ポテンショメータ摺動面に塗布していたグリスの劣化により、出力上昇試験第1次航海において制御棒位置指示信号回路の不具合が発生した。

(2) シンクロコンバータ（S/Dコンバータ）

そこで、出力上昇試験第2次航海からは、受信機側に機械的な結合を必要としないシンクロコンバータ（Synchro/Digital converter）と呼ばれるトランスデューサを採用した。

シンクロ発信機とS/Dコンバータの接続及びその動作原理をFig. 15に示す。図に示すように、電気的な接続のみによって信号の変換が行われる。

S/Dコンバータは、シンクロ発信機からの信号を2進デジタル信号に変換し、計算機による演算やデータ処理に利用することを本来の目的としているが、デジタル出力をさらにアナログ変換し直流電圧信号として指示及び制御用に利用している。直流電圧を出力することから、シンクロ直流コンバータとも呼ばれている。

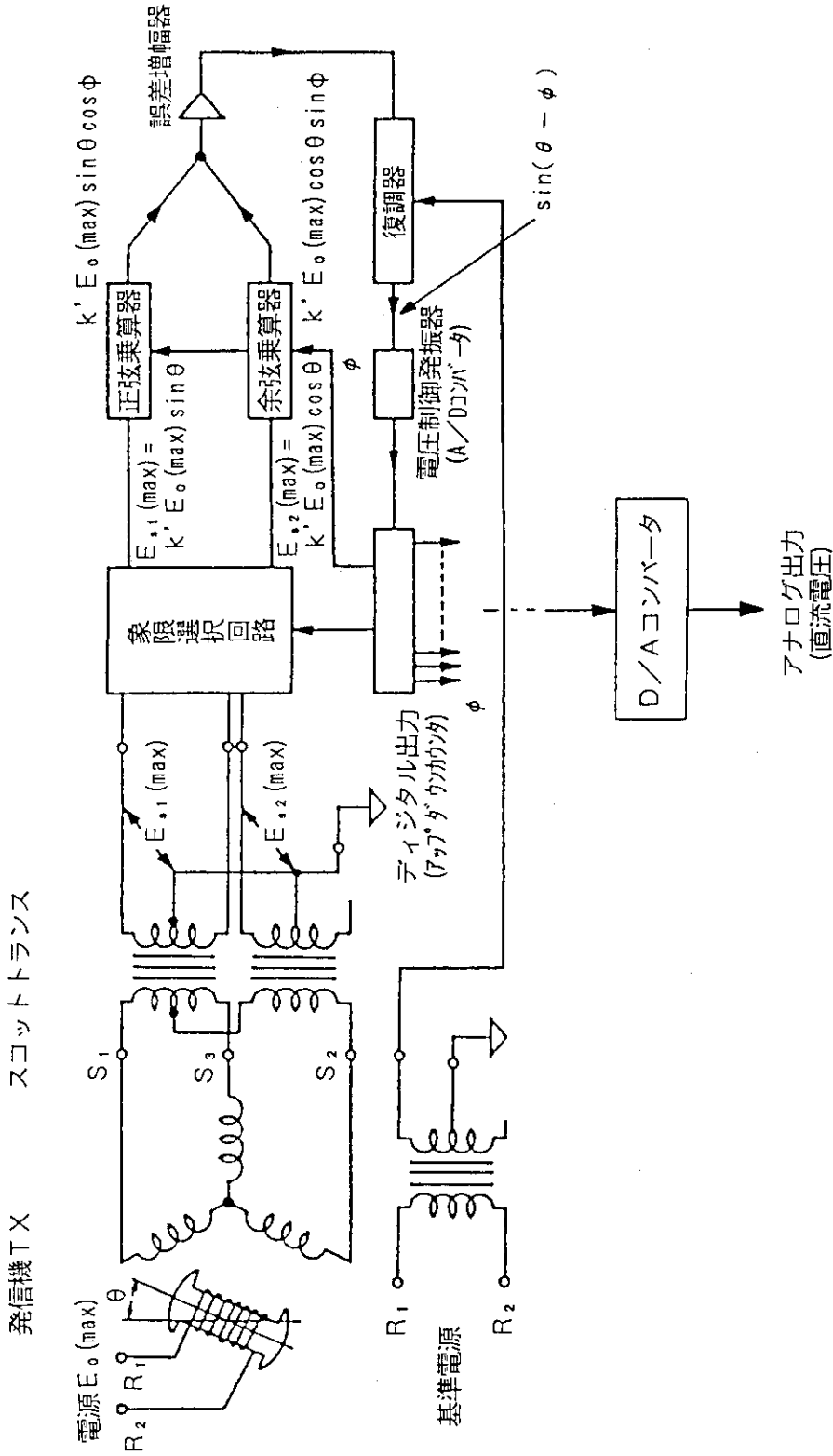


Fig. 15 シンクロコンバータ (S/Dコンバータ) の接続法と動作原理

シンクロ発信機の出力電圧は(2-16)式に示すように、回転角 θ に対し120度づつ位相のづれた3相の信号である。これを、まずスコットトランスによって位相差を90度の正弦(sin)及び余弦(cos)の関係にある2相信号に変換する。シンクロ発振器とスコットトランスの総合変圧比を k' とすると、スコットトランスの出力は、

$$\begin{aligned} E_{s1(max)} &= k' E_0(max) \sin \theta \\ E_{s2(max)} &= k' E_0(max) \cos \theta \end{aligned} \quad (2-17)$$

が得られる。

S/Dコンバータは、この角度関数 $\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ 信号をデジタル演算処理するものであるが、同図に示すようにやや複雑な回路構成によって処理されている。すなわち、象限選択回路、正弦/余弦乗算器、誤差検出回路、復調器、電圧制御発振器(A/Dコンバータ)、デジタル出力回路(アップダウンカウンタ)、D/Aコンバータなどの回路から成っている。

象限選択回路では、正弦及び余弦の関数を持った信号が θ の90度(各象限)毎に基準電圧波形(60Hz)と反転(180度)するため、これを同相にして常に第1象限と同じ信号を得るようにしている。

ここで、デジタル出力値を ϕ として、この ϕ を正弦、余弦関数の乗算器に入れ、上記(2-17)式の信号と積算すると、

$$\begin{aligned} E_{s1'(max)} &= k' E_0(max) \sin \theta \cos \phi \\ E_{s2'(max)} &= k' E_0(max) \cos \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (2-18)$$

が得られる。

両信号を誤差検出回路で減算し、これを偏差電圧 ΔV とすれば、

$$\begin{aligned} \Delta V &= E_{s1'(max)} - E_{s2'(max)} \\ &= k' E_0(max) \sin \theta \cos \phi - k' E_0(max) \cos \theta \sin \phi \\ &= k' E_0(max) \sin(\theta - \phi) \end{aligned} \quad (2-19)$$

ΔV は $\theta = \phi$ のときゼロとなる。

復調器は基準電圧を基に、この ΔV を同期整流し直流電圧信号としてA/Dコンバータに送り、パルス信号としてアップダウンカウンタの出力を制御する。

乗算器 ~ 復調器 ~ A/Dコンバータ ~ アップダウンカウンタの回路は、閉ループを構成しており、常に ΔV がゼロとなるよう一種のサーボ機構としての働きをする。シンクロ電機の角度 θ と、デジタル出力 ϕ が一致したところでS/D変換は完了する。ここで再び直流電圧に変換(D/A変換)し、指示及び制御用信号を取り出す。

2.2.5 圧力及び流量計測

原子炉において圧力や流量の計測は、プラントの安全運転と制御に欠かせない計測項目の一つである。このうち重要なのは、1次系、2次系の主ループにおける冷却材或いは蒸気を対象としたものである。監視のみならず制御用信号として使用されるので、振動、動揺との相関性を調べることも重要である。

『むつ』の場合、蒸気発生器（圧力、水位、流量）、加圧器（圧力、水位）、給水流量、一次冷却水量などの検出には、ほぼ同じタイプの力平衡型の伝送器に計測目的に応じたセンサを機械的につないでいる。基本となる力平衡型の伝送器の動作原理⁽⁸⁾と、これにつながる圧力センサをFig. 16に示す。

力平衡型の伝送器の動作原理は、センサで変換された“力”を、フォースバーに与え、この力がフィードバックコイルによって生じた力と平衡する構造となっている。これらの力は、フォースバーとベクトルフレクシャを介して作用する。フォースバーの動きは、ディテクタアーマチアへ変位を生じさせ、このディテクタアーマチアの動きはディテクタの2次側の電流変化を生じさせる。電流変化は増幅器で増幅され、フィードバックコイルと受信計に伝達される。フィードバックコイルに生じた力は、センサからフォースバーに与えられた力と平衡する。受信計は、記録、指示あるいは制御用信号として4～20 mAあるいは10～50 mAを出力する。増幅器のゲインは十分大きいので、フォースバーは僅かな変位（＝センサの変位）で平衡する。このため、直線性が極めて良く、精度も高い特長を有している。

センサとしてはダイヤフラム型圧力計、ベローズ型圧力計、ブルドン管型圧力計などの圧力検知用センサが接続される。センサを1個用いた場合はゲージ圧の測定を行ない、2個用いて差圧測定方式とすれば流量計とすることができる。同じタイプの伝送器を用意すれば多用途に使用でき汎用性が高い。

しかし、特長ばかりでなく次に挙げるような欠点もあるので、使用にあたっては注意を要する。すなわち、フォースバーなどの可動部分を持つ構造であること、また動作原理が後述の振動、動揺を検出するサーボ型の加速度計と極めて似ており、これは取りもなおさず振動、動揺の影響を受けやすい。センサ、トランスデューサの動作原理から、船体運動とプラント量との悪しき関係が生じる所以である。

また、圧力の検知方式との関連においても注意を要する点がある。例えば『むつ』の場合、蒸気流量計測をフローノズルによる絞り流量計方式としていることが挙げられる。フローノズルの前後から導いた2つのコンデンシングポットに生じる水頭差を圧力差として上記伝送器に与えているが、船体動揺はコンデンシングポットの水頭差を直接変化させることになる。

2.2.6 温度

原子炉プラントの中で、温度の計測もまた重要なパラメータである。「むつ」においては、冷却材の温度測定が原子炉出力制御のため重要な役割を担っている。

温度の計測には、2つのタイプの測温用センサが使用されている。一つは測温抵抗体(RTD: Resistance thermodetector)であり、他の一つは熱電対(TC: Thermocouple)である。測温抵抗体は、白金線を抵抗体としその温度特性を利用したものが使用されている。白金は、品質が一様で純度の高いものが得られ、線引き加工も容易で化学的にも安定である。したがって、精度の高い測定が可能であることから広く使われている。また、白金抵抗体の抵抗値はJIS等を含む内外の規格で定められており、選択が容易であると共に汎用性が高い。0℃における抵抗値は25、50、100Ωのものが標準となっており、最高使用温度は約500℃で、精度は0.5級及び0.3級の2段階に規定されている。

熱電対は、2種の異なった金属を2ヵ所で接合して閉回路をつくり、接点の温度を変えると回路に電流が流れる作用を利用したものである。この電流の基となる起電力を、熱起電力(Thermo-electromotive force)と呼んでいる。熱起電力は、2種の金属の種類と両接点の温度差によって定まり、導線の長さや太さに影響されず、また途中の温度にも関係しない。したがって、一方の接点の温度を一定に保つと、他方の温度を熱起電力から知ることができる。この一定温度に保った接点を基準接点または冷接点といい、他方を測温接点または温接点と言う。熱電対もJISを始めとする内外の規格で、その種類と熱起電力が定められており汎用性が高い。2種の金属の組合せにより何種類かの熱電対があるが、原子炉プラントの計装にはK型と呼ばれるものが良く使われる。これは、クロメル線とアルメル線を組合せたもので、以前にはCA型と呼ばれていた。K型熱電対の常用使用温度は1000℃で測定範囲が広く、安定性も良い。また、中性子による核変換が少ないことから照射による特性変化がなく長期安定性に優れており広く使われている。

熱電対を用いて精度良く測定するには、基準接点の温度を一定に保たなければならないが、プラント用としては実用的でない。そこでプラント用機器では、NiやCuなどの感温抵抗体の室温近辺の温度特性によって補償する補償式基準接点を用いている。

測温抵抗体、熱電対共に通常保護管を使用して計測するので、この熱伝達が悪いため一般的に応答性はあまり良好でなく、平衡するまでに数分のオーダーを要する場合がある。このため「むつ」の温度計測用センサは、感温部に特殊な加工を施し、応答性の改善を図っている。この改善策によって、0.5秒の応答速度が得られ、通常のものに比べ格段に速い温度計測が可能となっている。

測温抵抗体にしても、熱電対にしても測温センサそのものは極めて単純な構造をしており、動作原理からも振動や動揺の影響を直接受けることは考えられない。また、これらを用いて何れの温度パラメータを測定するか、その組合せもあまり問題ではない。むしろ、

これらによる測定量が、原子炉の制御信号として使用されるところに着目すべきである。

すなわち、応答性が改善されたとは言え十分速いものでなく、振動、動揺という比較的速い現象によって引起こされる他のパラメータ変化に追従できず、有効な制御信号となり得るか、という観点から調べる必要がある。

2.3 データ再生

これらパラメータのデータ収録は、先にも述べた通りそのほとんどがデジタル（PCM）方式によっているため、収録に使用したデータレコーダを用いて計測結果を航海中に直接船上で再生し解析することは難しい。収録したデータは、PCM方式の再生器（デコーダ）を用意し、これによって再生し解析する必要がある。したがって、データの再生と解析は、陸上に持ち帰って実施した。

Fig. 17に、収録したデータの再生と解析を行なう要領を示す。再生されたデータは、高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）によって、時間分析、周波数分析、相関関数など目的とする解析がなされる。

収録されたデータは、直流（DC）から20 Hz及び41 Hz（FM収録は1,250 Hz）を上限とした周波数成分を含んでいる。この中には、本来のパラメータ信号がDC成分として大きな値を占めている。これに船体の振動に反応する信号、あるいは動揺に反応する信号成分が重畳する形態で収録されている。この中から目的とする信号を取り出すには、余分な成分をカットするなどの工夫が必要である。このため、デコーダとFFTアナライザとの間に、DC～100 kHz間の周波数で自由に設定できる2チャンネルのアクティブフィルタを入れ、目的の信号を取り出すようにした。それぞれのフィルタは、2つの増幅器の組合せによってローパス（LPF）、ハイパス（HPF）あるいはバンドパス（BPF）として動作させることができるもので、DC～11.1 Hzのレンジでは0.01 Hzの分解能で、DC～111 Hzでは0.1 Hzの分解能でカットオフ周波数を設定できる。また、それぞれ20 dB + 20 dB（10倍×2）の増幅器をあわせ持つことから、必要に応じ選択した信号のみを増幅し解析することができる。

FFTアナライザへの入力が入力1チャンネルのみの場合は、そのチャンネルに対応したパラメータの時間波形、周波数スペクトルなどの解析を行なう。2チャンネルとした場合は、どちらかの入力を基準として、時間波形、周波数スペクトルなどの相互相関を解析することができる。例えば、ローリング信号を基準として、反応度信号との関係を解析する方法がそれである。

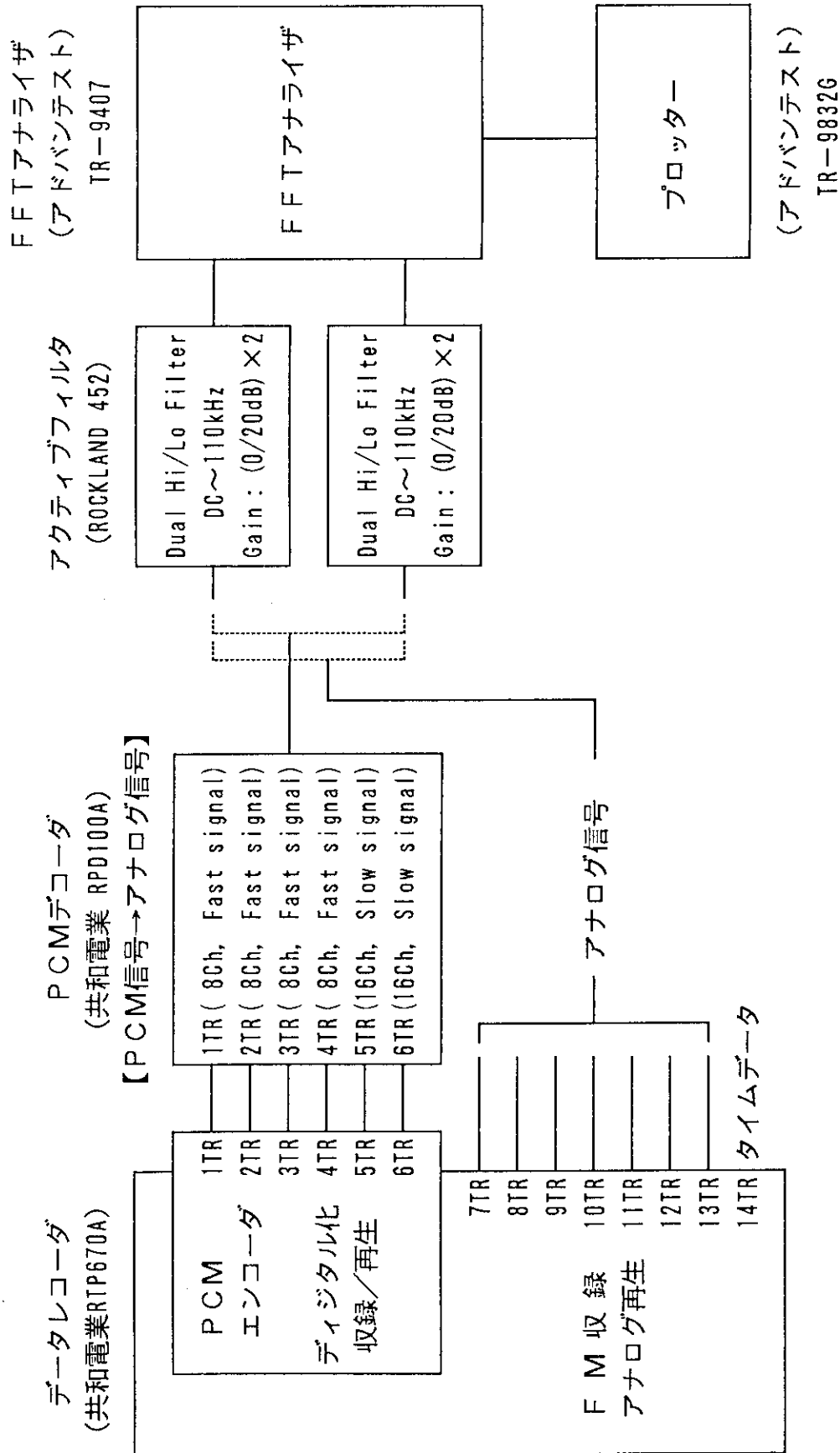


Fig. 17 収録データの再生と解析要領

3. 解析方法

3.1 概要

前項に示すように、収録したデータを再生し、2チャンネルのFFTアナライザによって、時間分析、周波数分析、相関分析など目的に応じた種々の解析を行なう。

収録したデータは、Table 3に示すように2航海分の十数項目におよぶ各種試験に対応したもので、その量は膨大なものである。また、各パラメータ間の相関を求めるには、その組合せは更に増える。そこで、次のステップを踏まえながら整理してゆくことにした。

第1段階では、主軸回転数を一定とした定常的な運航状態で行なった試験（試験項目によって回転数が異なる）を中心にして、

- ・船体振動の影響
- ・船体の過渡的動揺の影響

の順で解析することにした。

船体振動の影響では、船体及び原子炉格納容器などの振動状況と固有振動数を把握すると共に、これら振動がプラントパラメータに与える影響を確認する。

船体の振動状況と固有振動数は、先に報告した船体振動試験⁽²⁾において確認されているが、固有振動数の一部と、原子炉格納容器の固有振動数については不明の点もあるので、ここで更に詳しく調べ、その相関を確認することにした。

船体動揺の影響は、出力上昇試験の中でも、一部調べられ報告もされているが⁽⁹⁾、ここでは海上試運転で実施した試験項目を対象にした。

海上試運転は、船舶の推進性能、操縦性能及び安全性を確認するために実施する試験で、これら性能を確認するために通常とは異なる操船が強いられ、一部には厳しい船体運動を伴う。したがって、試験内容によっては動揺の周期も変動すると共に、過渡的で且つ大きな船体運動を呈する。このため、原子炉を含む主機関の出力も、これに追従する必要性から短時間の内に大幅な変動を要求される。海上試運転で取上げたプラント相関試験は、このような過渡的動揺時のプラント挙動を対象としたものであるが、解析のステップを考慮し、まず主軸回転数を一定にして航行する定常的な運航状態を取り上げ、その相関性を確認することにした。

3.2 解析方法

実際に収録データを再生し、時系列表示した例をFig. 18に示す。同図は、ある加速度計の応答出力を、40秒間の時系列で表したデータである。図の例から、時系列データには、7～10秒の周期を持つ振幅の大きな波形と、これに周期の比較的早い振幅の小さ

な波形が重畳している。振幅の大きな波形が船体の動揺にตอบสนองする信号成分で、振幅の小さな波形が船体振動にตอบสนองする成分である。このように、実際のตอบสนอง信号はいくつもの周波数成分を含んでおり、さらにそれぞれ変動する信号の大きさもまちまちである。また、計測したパラメータのほとんどは直流(DC)成分を含んでおり、この信号を直接FFTの入力とすると、精度の高い測定ができない。このため、適当なカットオフ周波数を持つフィルタを介してこの中から目的とする信号を取り出す必要がある。

船体振動にตอบสนองする信号成分を取り出すには、動揺にตอบสนองする信号とDC成分を除去する必要がある。動揺にตอบสนองする信号の周期は7~10秒で、これは0.15~0.1Hzの周波数に相当する。そこで、カットオフ周波数1Hz(60cpm)に設定したハイパスフィルタを介した。船体に振動を与えるプロペラの有効回転数は、30rpm(2.5Hz,150cpm)以上と考えられるので、このカットオフ周波数設定によって船体振動のみにตอบสนองする信号を取り出すことができる。

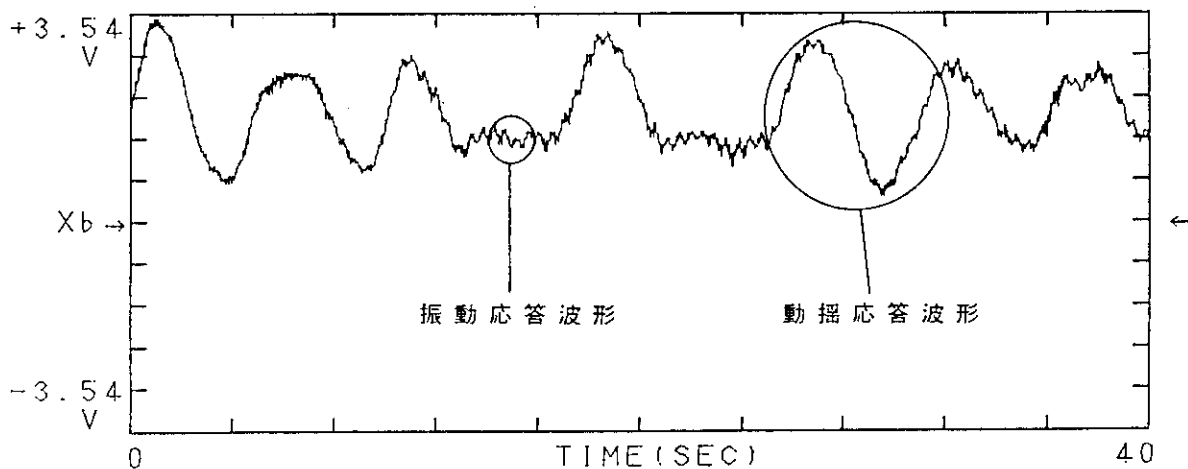


Fig. 18 再生した時系列データの例

一方、動揺にตอบสนองする信号成分を取り出すには、船体振動ตอบสนอง信号が動揺ตอบสนอง信号に比べ小さいことから、DC成分のみをカットする0.01Hzのハイパスフィルタを介することで対処できる。さらに、両者とも不必要な周波数成分の除去とノイズの影響を避けるため、100Hzのローパスフィルタを介した。

ところで、ここに出力されるプラントパラメータ信号は、振動、動揺いずれにตอบสนองするものでも揺らぎが重畳された形で表れる。これは、見方によって“炉雑音”として捉えることができ、最近盛んに行なわれている炉物理上の雑音解析の対象にもなる。しかし、船体振動は比較的早い周波数成分を持つもので、原子炉出力がこれに追従するとは考えられない。後者の動揺にตอบสนองする信号は炉雑音の対象になるので、その手法を用いた原子炉の動特性解析にも有用なデータを提供することになる。

3.2.1 船体振動の影響に関する解析方法

船体振動に係わる影響については、船体及び原子炉格納容器などの固有振動を再確認することから始める。振動が周囲に最も大きな影響を与えるのは、起振源となるプロペラの回転が、船体あるいは格納容器などの固有振動数（またはその倍数）と一致し、共振したときである。これが、固有振動確認の必要性の大きな理由である。

また、原子炉の動特性から考慮して、比較的高い周波数成分を持つ振動に対し原子炉出力は直接応答しないと考えられる。もし、影響が表れるとすれば、それはセンサ／トランスデューサを含めた計測系の応答と捉えられる。したがって、ここで得られる結果は、計測制御機器の設計や整合性が十分か、という面から検証すべき課題である。

固有振動数の確認は、次の方法により行なった。すなわち、主軸回転数を一定にして航走したとき、船体各部に配置した加速度計の過渡応答信号を同時に収録し、周波数スペクトル分析結果から固有振動を求める方法である。Fig. 19は、この方法により求めた周波数スペクトルの一例である。本例は「むつ」常設の加速度計A7（船尾端）のもので、主軸回転数99rpmで一定航走しているときの値である。主軸回転に係る振動（高調波を含む）を除いて、後に残るピークが船体の固有振動によるものと推定される。同様に他の加速度計の周波数スペクトルを求めると共に、主軸回転数の異なる一定航走状態のスペクトルを求めることによって、固有振動数を同定することができる。

また、プラントパラメータへの影響は、固有振動解析と同様にスペクトルを求め、これを計測対象の工学値（例：加速度G又はGal、軸馬力PS）に変換し、最初に求めた船体及び固有振動数との相関とその大きさを確認した。

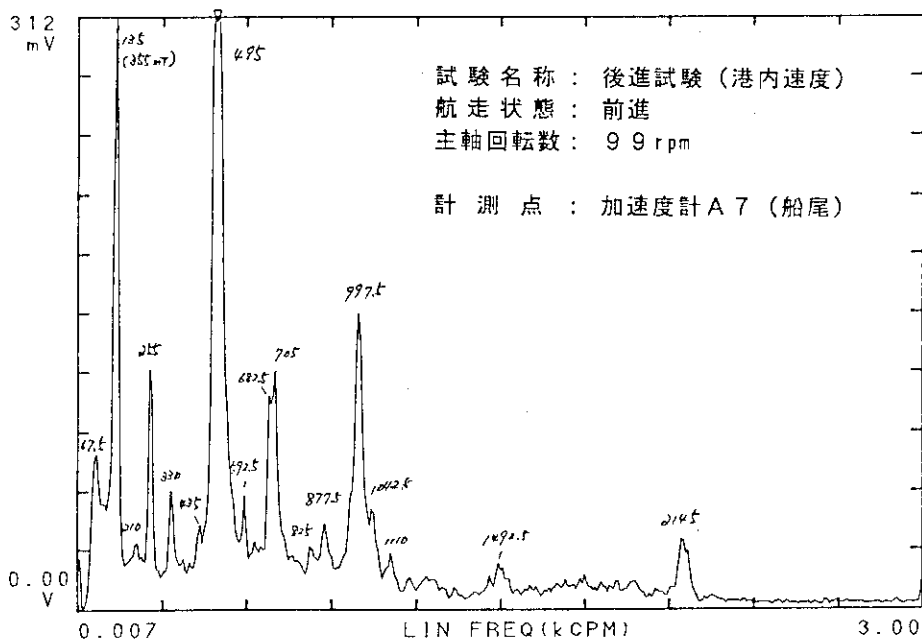


Fig. 19 一定航走状態での過渡応答振動スペクトルの例

〔後進試験（港内速力）99rpm前進航走時、加速度計A7〕

3.2.2 過渡的動揺の影響に関する解析方法

過渡的動揺に対する影響についても、過渡応答信号から周波数スペクトルを求める方法で行なった。“振動”の場合と異なるのは、より低い周波数領域での応答に着目しているため、0.01 Hz～数Hz程度の超低周波数領域について分析することである。

過渡的動揺の基準となる信号は、「むつ」に常設してあるローリング角度、ピッチング角度及びヨーイング角速度を計測する動揺計からの信号を用いた。これに、原子炉設置区域及び格納容器内に設置してある加速度計の信号を補助的に加えた。

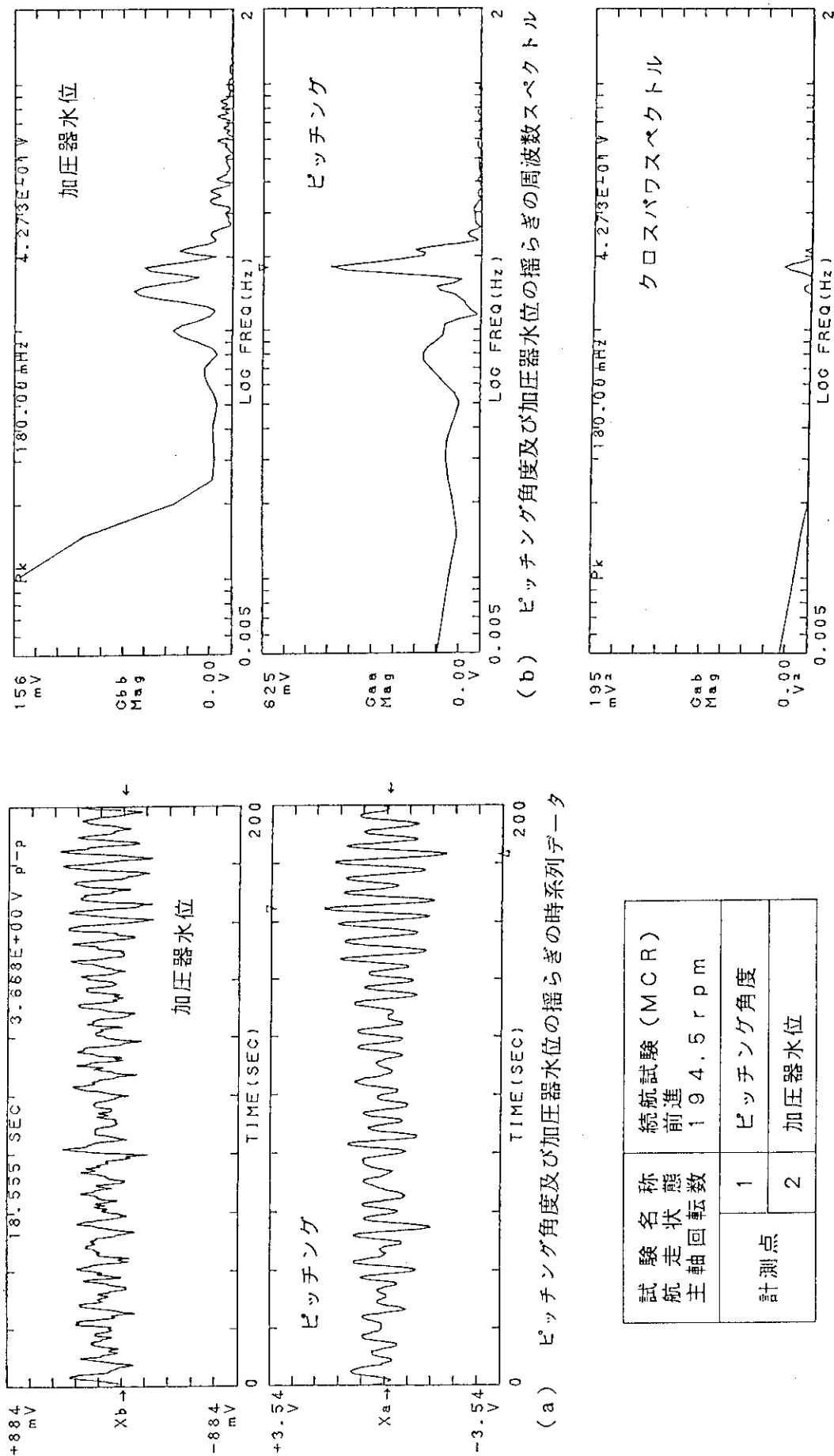
プラントパラメータと基準信号との相関は、次の方法によって求めた。

基準用の動揺信号と比較用のパラメータ信号の2つの信号を、同じ時刻間の時系列データとして再生し、これを夫々周波数分析の後、両者のクロスパワースペクトルを求める方法である。データの再生は、全てのパラメータとも同じテープ位置からスタートした。同じ位置からスタートし、同じ時刻間のデータを比較することで、位相情報も取入れることができる。

Fig. 2.0に解析法の例を示した。同図は、連続最大出力による続航試験時に、主軸回転数194.5rpm一定の状態で行っている時の例である。実際の試験は2時間の連続航走を行ない、この間のデータを収録しているが、この中からより安定な200秒間を選び再生した。

本例は、基準信号としてピッチング角度、比較信号に加圧器水位を選んだ。同図(a)は200秒間の時系列データで、両信号の揺らぎ成分を表している。これを、夫々周波数分析すると、同図(b)に示すスペクトルが得られる。さらに、両者の周波数スペクトルを積算し、その相関を求めると、同図(c)に示すクロスパワースペクトルが得られ、基準信号と比較信号の係わりが明確になる。本例では、加圧器水位は0.18Hzを中心とするピッチング周波数との間に相関が表れ、他の周波数成分は消えていることがわかる。

この方法で、他のパラメータの種々の組合せについての解析を行った。



試験名称	続航試験 (MCR)	
航走状態	前進	
主軸回転数	194.5 rpm	
計測点	1	ピッチング角度
	2	加压器水位

Fig. 20 船体動揺によるプラントパラメータの揺らぎ出力の例

4. 固有振動の影響

4.1 固有振動の確認

振動に対する影響の検討は、まず船体及び原子炉格納容器の固有振動数を求め、得られた固有振動数とプラントパラメータに表れる振動成分を比較し、その関連を確認することにした。

以下に、船体及び格納容器の固有振動数の確認結果について述べる。

4.1.1 船体固有振動

主軸回転数を一定にして航走した時、船体各部に配置した加速度計の過渡応答振動を収録し、その振動周波数を分析して固有振動を求めた。Fig. 21(a)～(f)に、過渡応答によって分析した周波数スペクトルのいくつかの例を示す。応答量は、工学単位に変換して表示し、その大きさもわかるようにした。この例は、一定の航走状態におけるものであるが、対象試験の種類によって主軸回転数は異なっている。これらのスペクトルから、主軸の回転に係る振動数を除いて（高調波を含む）、後に残るピークが船体の固有振動によるものであると推定できる。

Fig. 21(c)を例にとって見ると、この場合主軸回転数は99rpmであるので、

$$\text{基本波} \quad 99 \text{ rpm} \times 5 \text{ 翼} = 495 \text{ cpm}$$

この整数倍の周波数成分を含んでいるとして、

$$2 \text{ 次高調波: } 990 \text{ cpm}$$

$$3 \text{ 次高調波: } 1485 \text{ cpm}$$

など、高調波（及び高調波の極く近傍の）のピークが除かれる。残ったピークが船体の固有振動と、加速度計を設置している部分の局部的共振と推定される。また、除かれたピークの中にも、固有振動数と共振しているものが含まれる場合もあるので、他の主軸回転数の結果と照合し総合的に同定してゆく必要がある。

この例では、

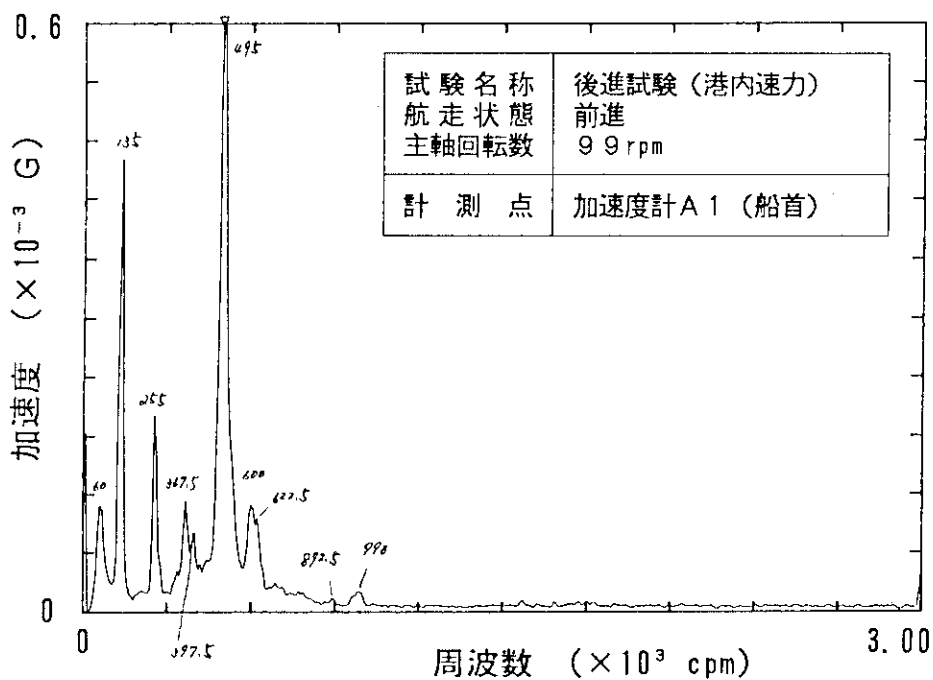
$$135.0 \text{ cpm} \quad 255.0 \text{ cpm}$$

$$330.0 \text{ cpm} \quad 682.5 \text{ cpm}$$

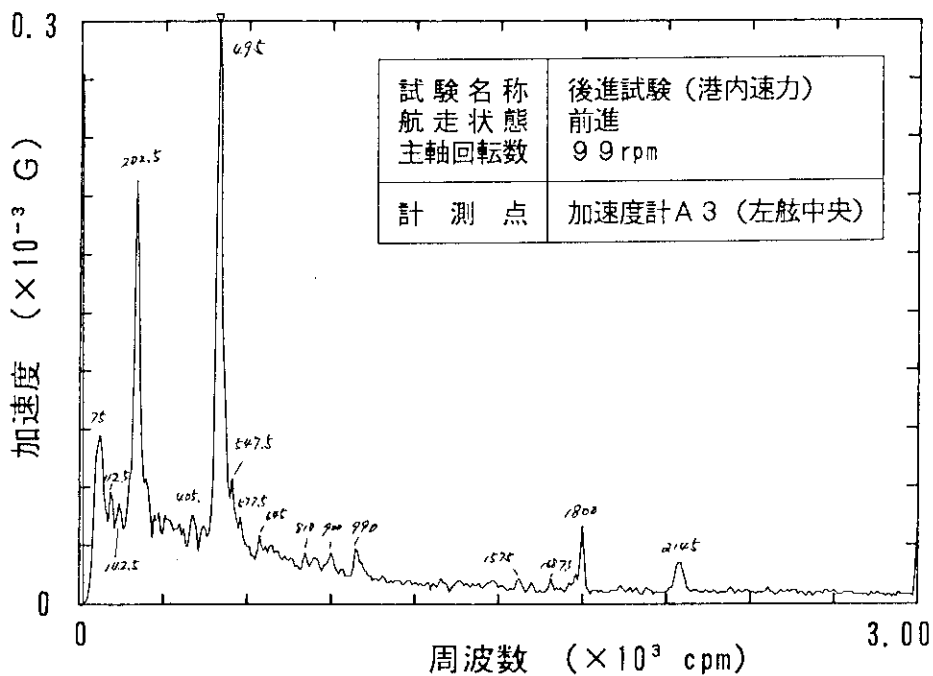
$$705.0 \text{ cpm} \quad 877.5 \text{ cpm}$$

などの振動ピークが残る。

同様の方法で、他の加速度計及び異なる主軸回転数の結果からピークを求め、これをまとめると、Table 4に示すように船体の上下（V）方向及び左右舷（T）方向の固有振動数を同定できる。船体固有振動は、船体各部に“節”をつくる形で、V及びT方向に振動することから、同表には1次～5次までの固有振動数を載せた。またFig. 22に、こ

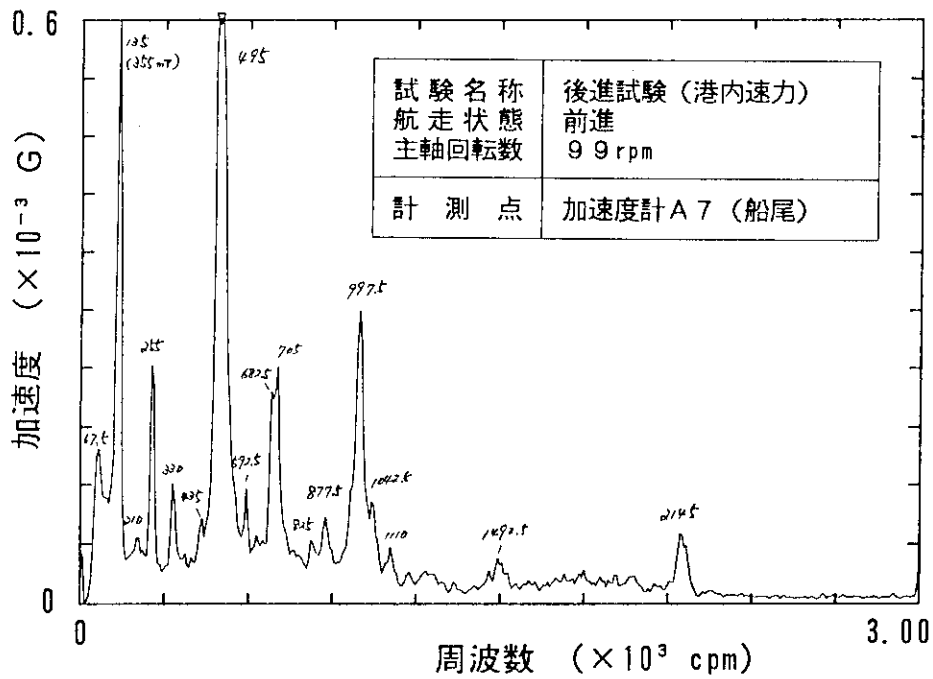


(a) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、加速度計 A 1

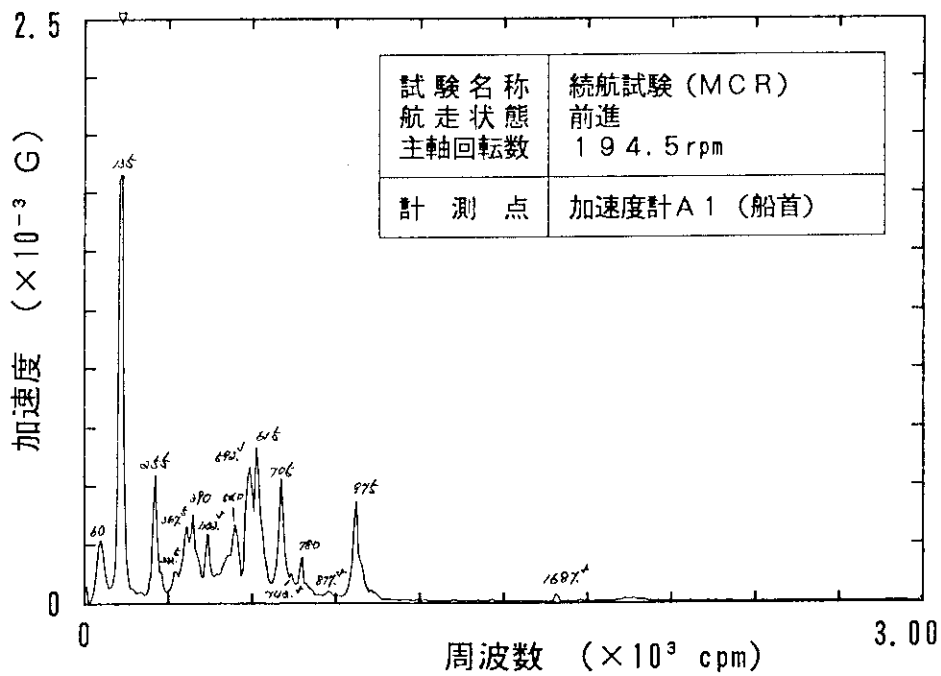


(b) 後進試験 (港内速度)、99 rpm 前進、加速度計 A 3

Fig. 21 一定航走状態における船体過渡応答振動スペクトルの例 (次ページに続く)

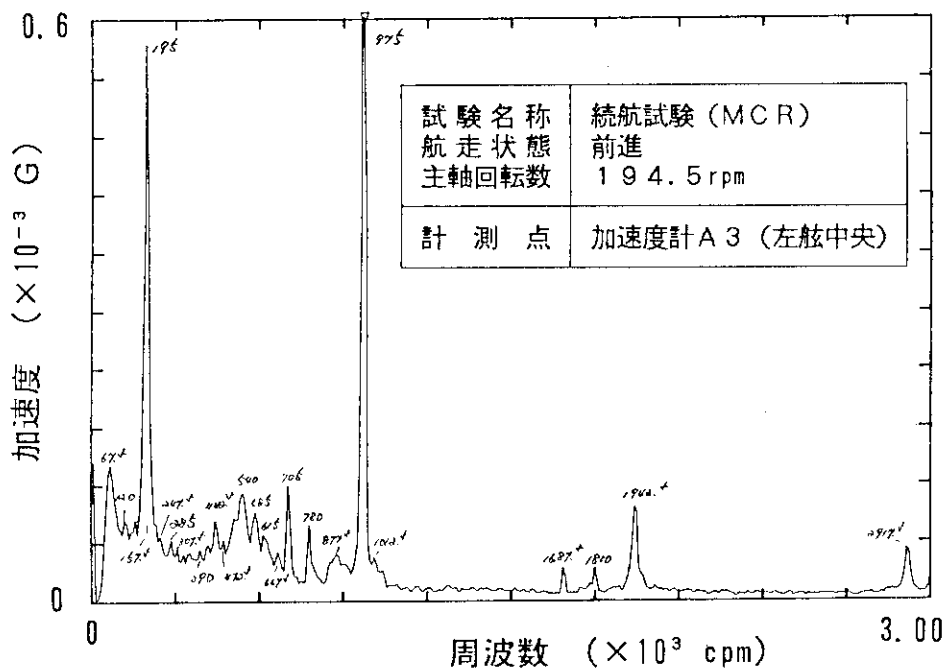


(c) 後進試験 (港内速度)、99 rpm 前進、加速度計 A 7

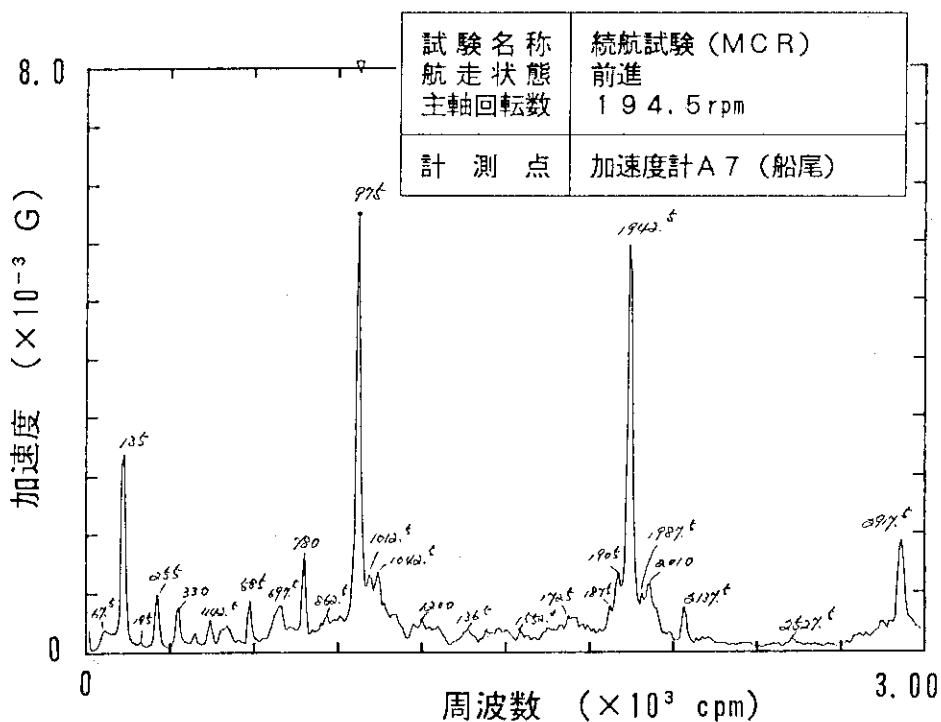


(d) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計 A 1

Fig. 2 1 一定航走状態における船体過渡応答振動スペクトルの例 (続き)



(e) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計 A 3



(f) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計 A 7

Fig. 21 一定航走状態における船体過渡応答振動スペクトルの例 (続き)

の振動次数と振動数の関係を示した。グラフが完全な直線関係とならないのは、次の理由によると考えられる。すなわち、船体の構造上振動の“節”となる部分が等分されないこと、試験の時期や船速によって吃水の状態が異なるためである。このような理由により、高次の振動数ほど航走状態の異なる測定間にズレが大きい。

ここで同定した固有振動数は、船体振動試験の結果⁽²⁾とほぼ同じである。また、V方向については解析結果と良好な整合性を有することも確認できた。しかし、船体振動試験で一部同定できなかった振動数もあったので再確認するとともに、新たな知見としてT方向の固有振動を確認することができた。

固有振動は、機構的な強度に関する問題、運航回避などに関する問題など、種々の重要な課題を有するが、船体振動試験⁽²⁾で詳しく述べたので、ここでは省く。

Table 4 確認された船体の上下及び左右方向固有振動数

振 動 方 向	固 有 振 動 数 (c p m)				
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
上 下 方 向 (V)	135	255	330-340	495	615
左 右 舷 方 向 (T)	195	367.5	585	780	910-945

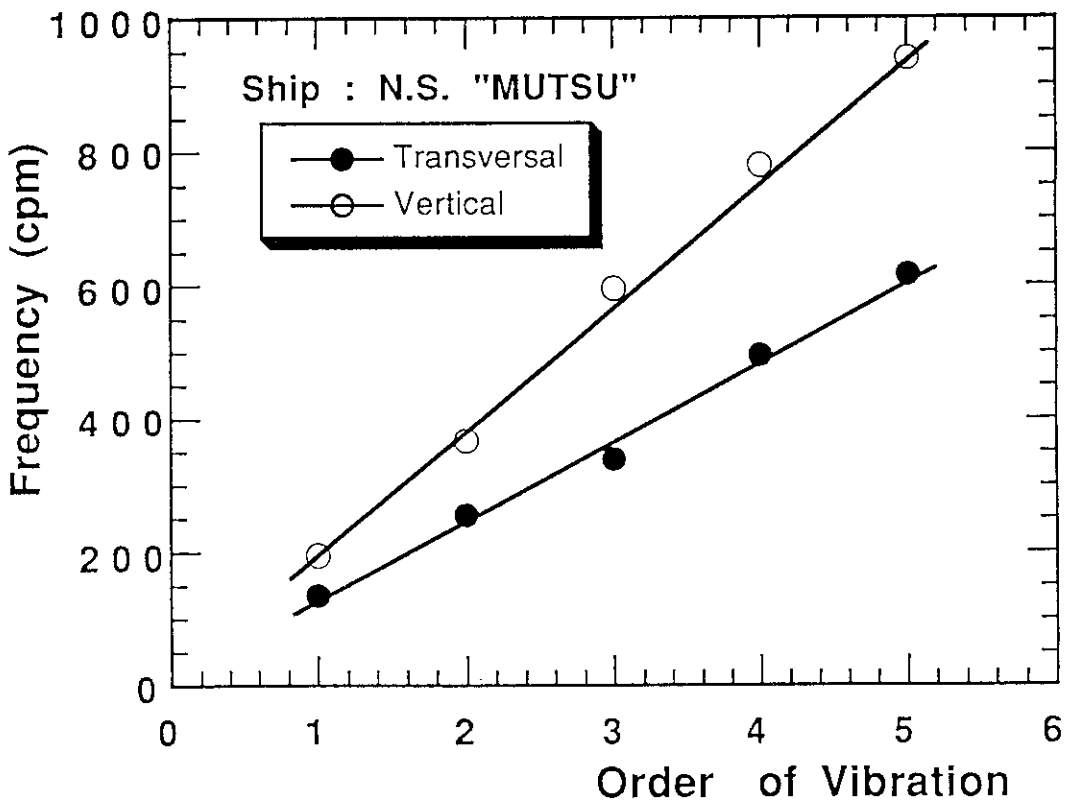


Fig. 2.2 確認された船体固有振動数と振動次数の関係

4.1.2 船体固有振動モード

海上試運転時の船体振動試験において、船体各部の振動加速度と、その位相角から変位を算出する方法で、上下（V）及び左右舷（T）方向の固有振動モードが確認されている⁽²⁾。Fig. 23 (a)～(b)に、確認した固有振動モードの例を示す。同図（a）はV方向、（b）はT方向の固有振動モードの例である。

V方向の例は、主軸回転数68rpmにおけるもので、3次4節の固有振動モードである。この時の振動数Fは、5翼プロペラにより起振されるため、

$$F = 68 \text{ rpm} \times 5 \text{ 翼} = 340 \text{ cpm}$$

となる。これは、海上試運転時の調査から吃水、排水量などを考慮すると、原子力推進バラスト状態が最も近く、この状態で解析された値、

$$3 \text{ 次振動数} = 339.4 \text{ cpm}$$

に一致すると共に、振動モードも良く一致していた。

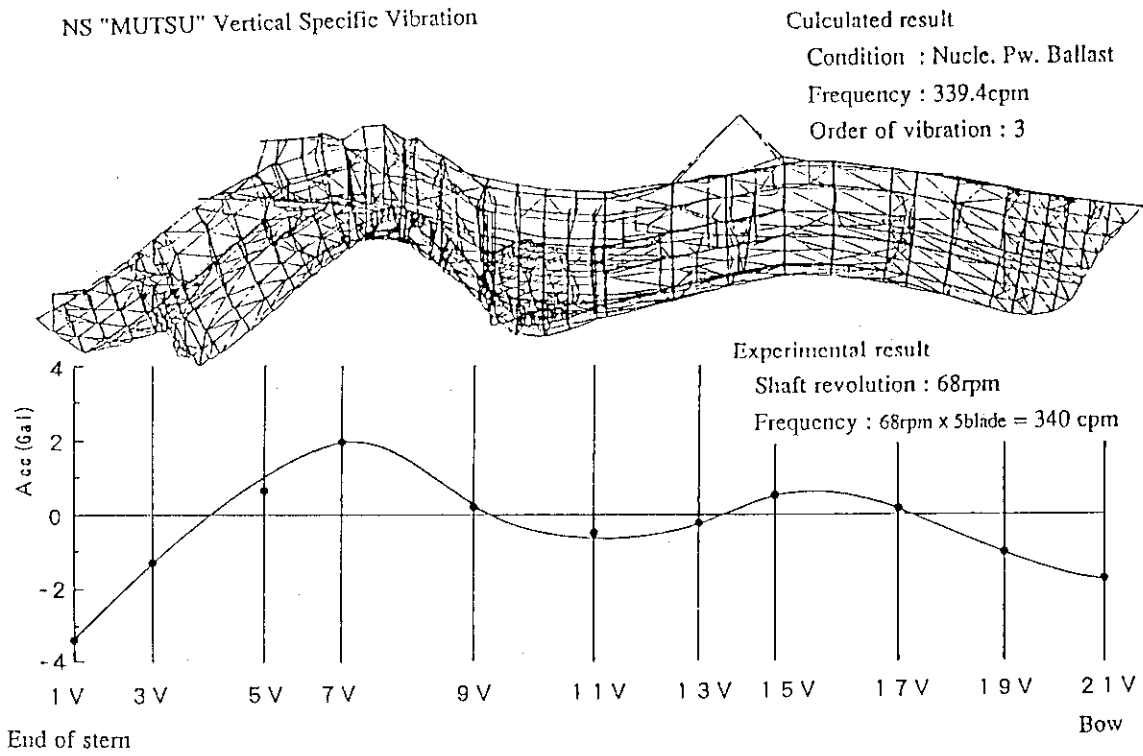
一方、T方向に対する固有振動は解析されていなかったが、同方法によって振動モードを確認した。図の例は船体振動試験の中で、最も大きな振動を船体に与えた時のものである。この時の主軸回転数は182rpmで、

$$F = 182 \text{ rpm} \times 5 \text{ 翼} = 910 \text{ cpm}$$

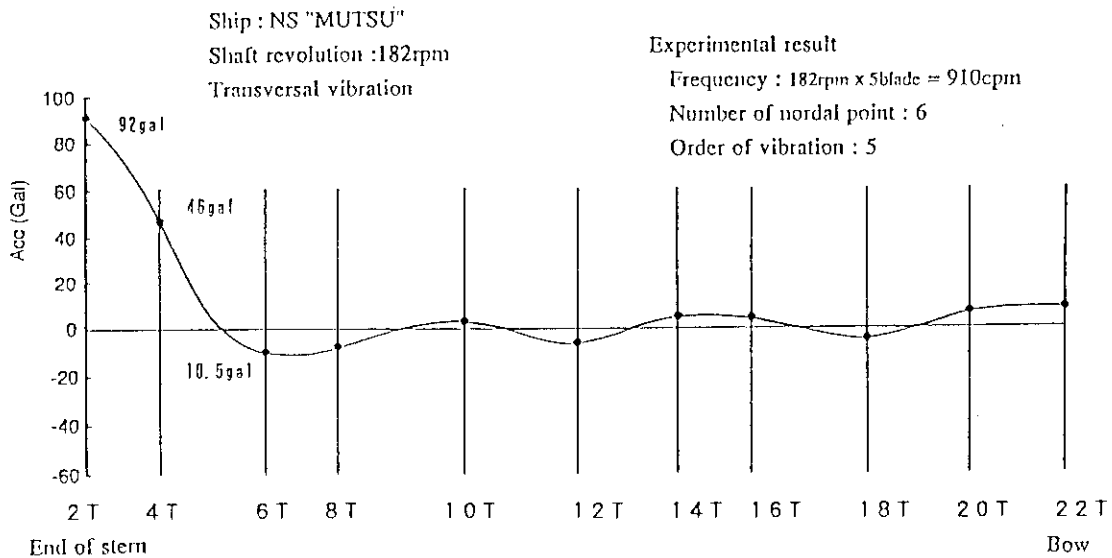
$$\text{節数} = 6$$

節数から、このT方向振動は5次の振動モードであると推定される。

これらの例から見ると、いずれの方向の振動にせよ、振動レベルが大きいのは船尾の部分で、原子炉設置区域は最大でも数Gal程度の小さな値であった。このことから考慮しても、振動が直接プラントパラメータに与える影響は少ないものと推察できる。



(a) 上下 (Vertical) 方向船体固有振動モードの例
 (主軸回転数 : 68rpm)



(b) 左右 (Transversal) 方向船体固有振動モードの例
 (主軸回転数 : 182rpm)

Fig. 23 船体振動試験⁽²⁾で確認した「むつ」の船体固有振動モード

4.1.3 格納容器等原子炉構造物の固有振動

原子炉格納容器等の固有振動の確認も、船体振動と同様の過渡応答法によって行なった。加速度計は、格納容器内及び原子炉設置区域に設置されたものを使用した。

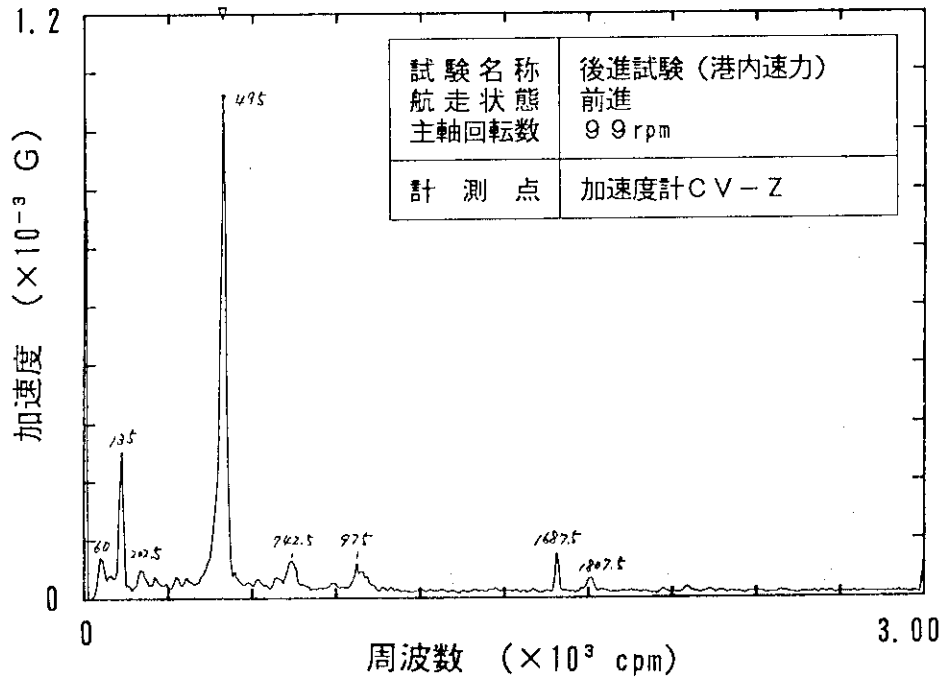
Fig. 24 (a)~(f)に、過渡応答振動スペクトルのいくつかの例を示す。これら図に表れたピークから、主軸回転に係わるピークと、船体固有振動に係わるピークを除いたものが、原子炉格納容器、原子炉圧力容器などの原子炉設置区域の原子炉構造物の固有振動数であると推定できる。これらのピークの中には、この区域に設置された種々の機器の運転に係わる振動なども含まれている可能性もあるが、いずれにせよプラントパラメータへの起振源となるものである。

前述の船体固有振動は勿論のこと「むつ」に搭載される原子炉をはじめとし、各種構造物の固有振動に関し、あらかじめ詳細な解析が実施されている。特に、原子炉格納容器については数度にわたり解析が行なわれてきた。これら各種構造物の固有振動のうち、原子炉及び原子炉設置区域の構造物についての解析結果と、格納容器について行なわれた解析結果をまとめて、Table 5に示した。あらかじめ行なわれた解析によれば、個々の機器・構造物に対し起振のポイント、固有振動数及び振動方向など、種々の条件とその結果が示されている。しかし、条件設定の違いや計算コードが異なることから、同表に見るよう解析結果は必ずしも一致していない。このことは、逆に実測によるデータ取得が重要なことを意味している。実測データを解析コードにフィードバックし、構造物の振動解析の精度と耐振設計を向上させれば“次の船舶設計”に有用な情報を提供することができる。

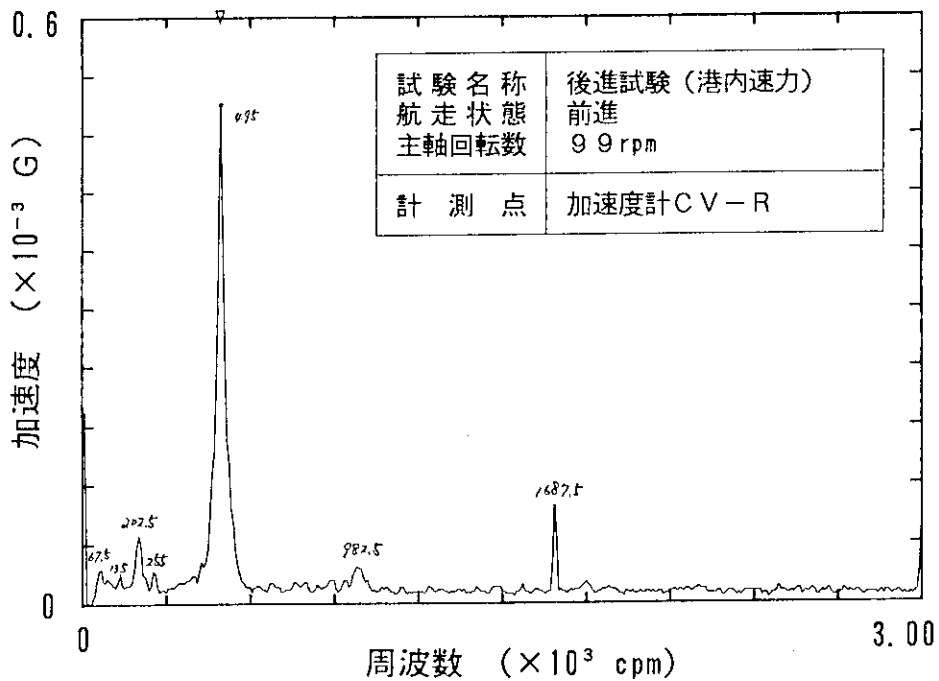
解析結果の中で、船体固有振動との共振、主軸回転数などとの係わりで注目する振動数を有する構造物としては、

- | | | | |
|----------|-----|-------------------|-------------------|
| ・原子炉格納容器 | ・・・ | 3 8 6 . 0 c p m | 7 3 6 . 8 c p m |
| | | 9 1 3 . 1 c p m | 1 0 1 1 . 9 c p m |
| | | 1 1 0 9 . 0 c p m | |
| ・蒸気発生器 | ・・・ | 1 2 0 1 . 9 c p m | |
| ・制御棒 | ・・・ | 3 . 8 c p m | 5 4 . 7 c p m |

などがあげられる。

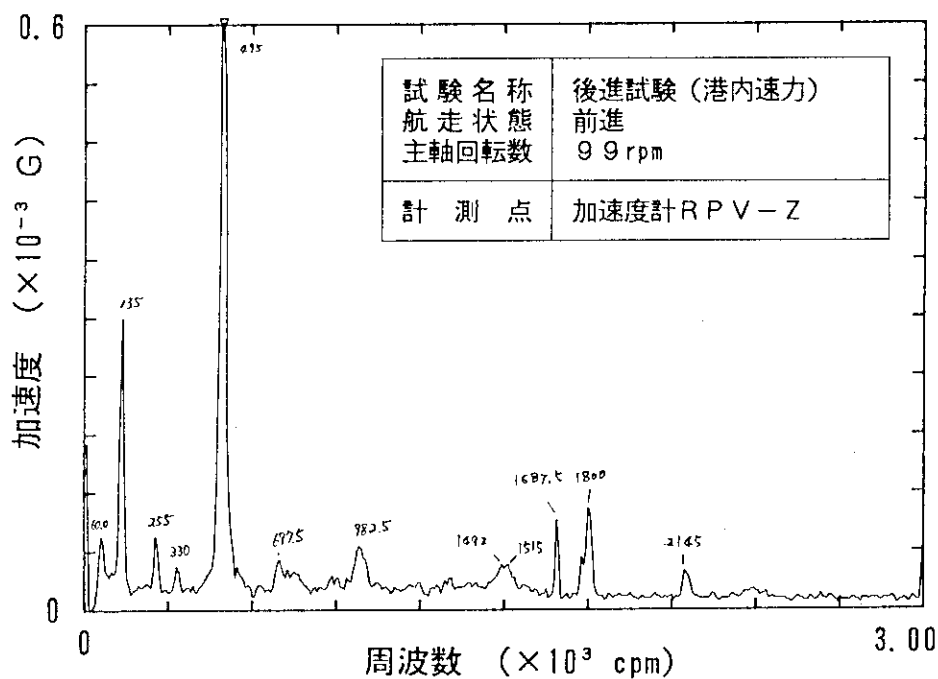


(a) 後進試験(港内速力)、99 rpm前進、加速度計：格納容器CV-Z

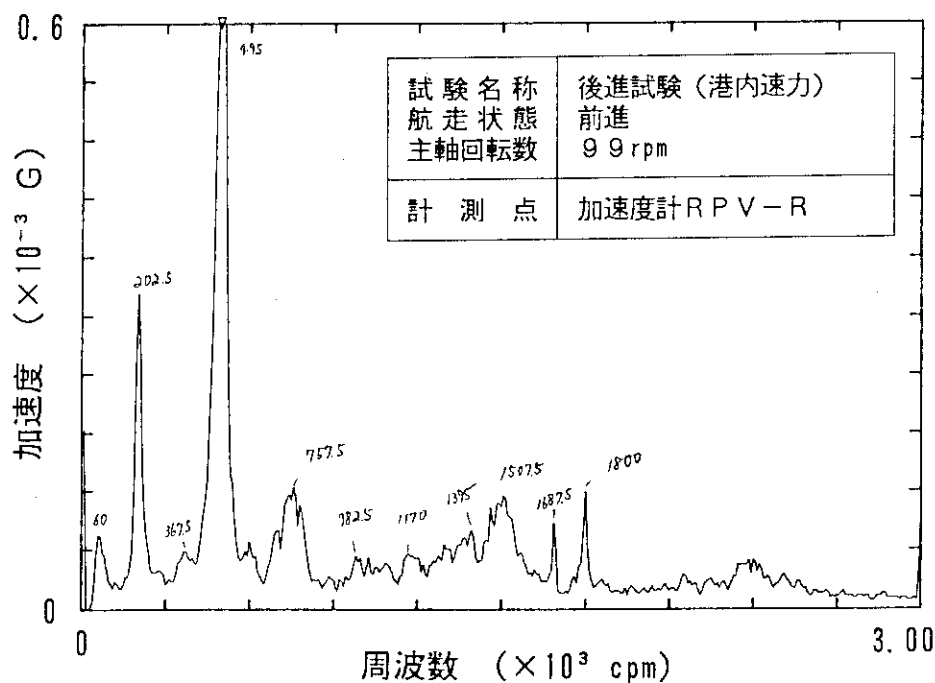


(b) 後進試験(港内速力)、99 rpm前進、加速度計：格納容器CV-R

Fig. 24 一定航走状態における原子炉構造物の過渡応答振動スペクトル (続く)

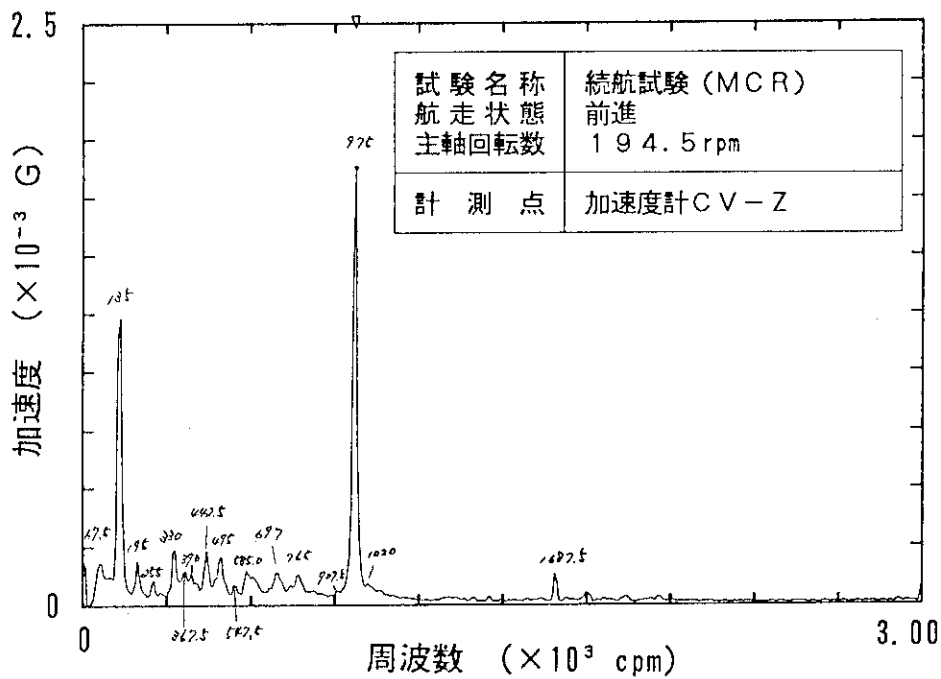


(c) 後進試験(港内速力)、99rpm前進、加速度計：压力容器RPV-Z

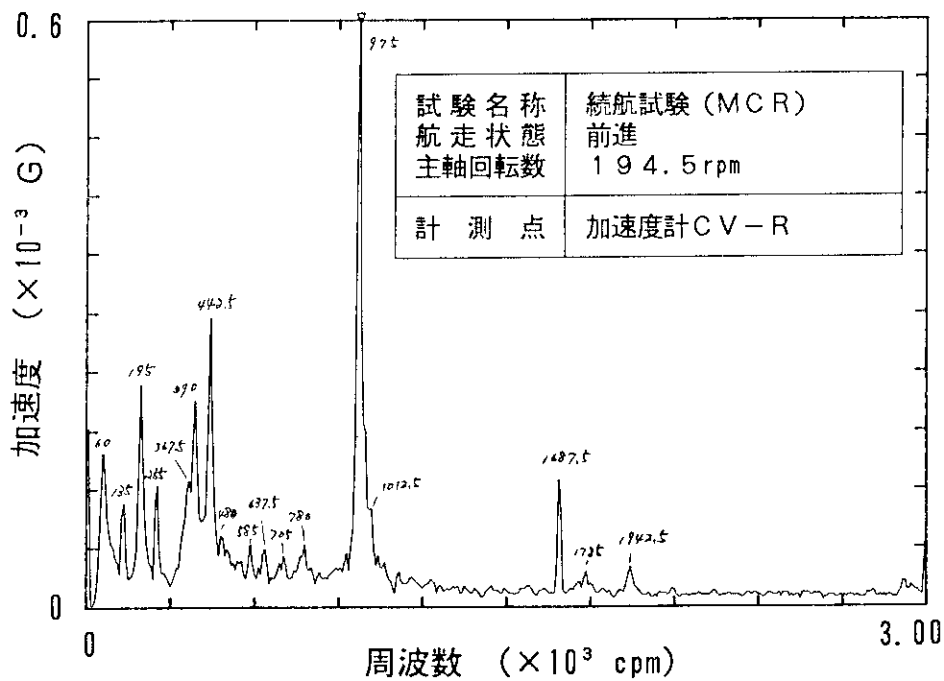


(d) 後進試験(港内速力)、99rpm前進、加速度計：压力容器RPV-R

Fig. 2.4 一定航走状態における原子炉構造物の過渡応答振動スペクトル(続き)

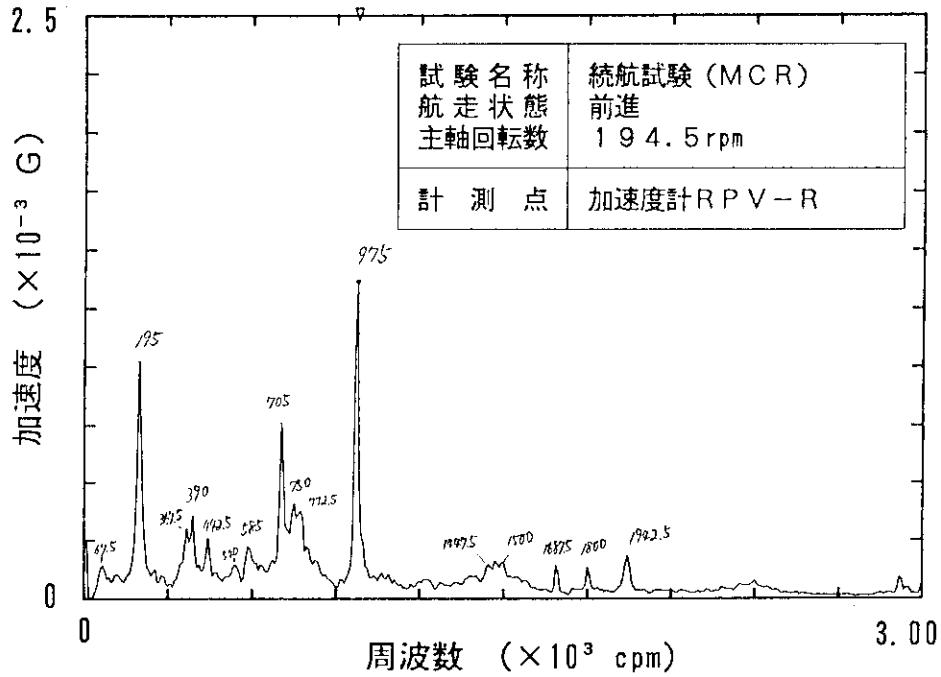


(e) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計：格納容器 CV-Z

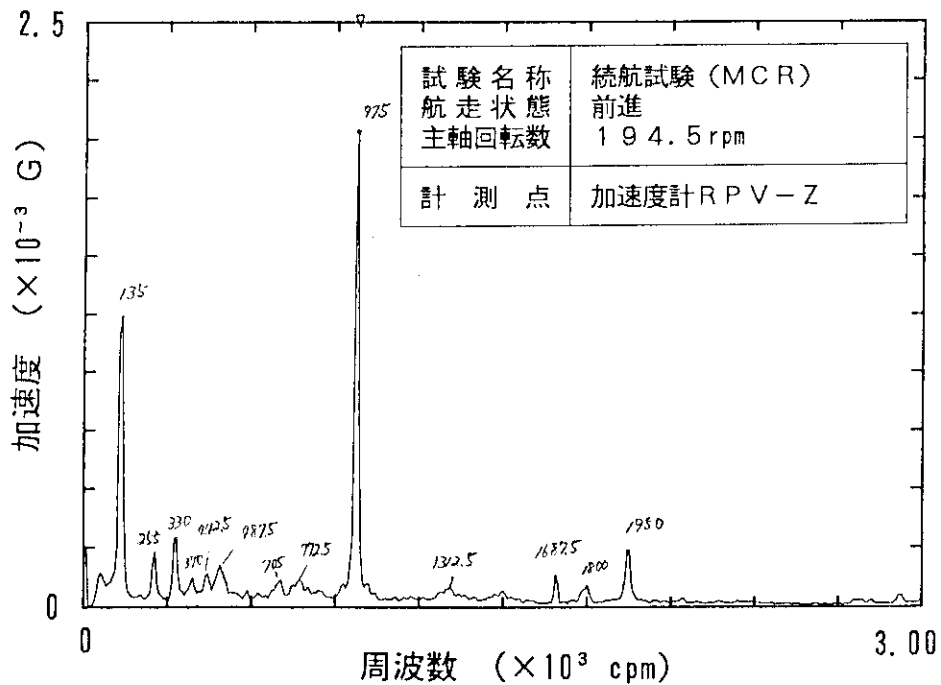


(f) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計：格納容器 CV-R

Fig. 2.4 一定航走状態における原子炉構造物の過渡応答振動スペクトル (続き)



(g) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計：压力容器RPV-Z



(h) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm、加速度計：压力容器RPV-R

Fig. 2.4 一定航走状態における原子炉構造物の過渡応答振動スペクトル (続き)

制御棒の1次固有振動数は、解析によれば3.8 c p mと極端に低いが、これは振動の影響よりも動揺との相関に関心を払わなければならない。この他、原子炉圧力容器、加圧器、原子炉炉心などの固有振動数は数千 c p mのオーダーとなっており、主軸の回転に係わる影響は数字の上から見て少ないものと思われる。

本試験で求めた格納容器等原子炉構造物の固有振動数を、Table 6にまとめて示した。これらを、個々の機器・構造物に起因するものとして明確に振分けることは、一部の振動数を除いて困難であるが、原子炉設置区域での有害な起振源となることに変わりはない。これら検出した振動数のうち、1687.5 c p mは、原子炉設置区域近辺に設置してある全ての加速度計から観測された。このことを考慮すると、原子炉格納容器(CV)の固有振動であると言いきることができよう。また、原子炉圧力容器(RPV)に設置された加速度計から、750.0 c p mの明瞭なピークが検出された。特に常用出力(NOR: Normal Rating)状態で行われた後進試験の前進時(主軸回転数189.7 r p m)に顕著に現れたことから、原子炉圧力容器の固有振動であると思われる。

本試験で計測した振動数は、ほとんどが解析結果と異なる値を示している。これは先に述べたように解析の際のモデルの立て方の違い、あるいは解析時以降に構造物が補強されたなど、手を加えられた可能性などが考えられる。

このように、構造物に関する固有振動の解析結果は、先の船体固有振動の場合、その解析と整合性が良好であったのに比べ、異なった結果を示した。その理由は、次によるものと考えられる。すなわち、船体そのものに関する解析は、長く十分な経験を有していること、またモックアップによるシミュレーションが容易にできることなどから、かなり精度の高い解析が可能である。これに比べ、構造物は個々の船舶に固有なものであることが多いことから、経験則と最適シミュレーションの適用が難しいことによる。

ここで得られた構造物等の固有振動に関する実測値は、以後のプラントパラメータとの相関性を調べる基となるデータであるが、単に本試験のみの結果に留らず、今後の耐振設計にフィードバックし“次の原子力船”設計に生かされることを望むものである。

Table 5 原子炉等建造物の固有振動解析結果

対象建造物	解析種別	固有振動数 (cpm)				
		振動方向、次数				
原子炉格納容器	解析 I	9 1 3 . 1	V	1 0 1 1 . 9	T	
	解析 II	7 3 6 . 8	V, 1	1 5 3 0 . 6	V, 2	
		1 7 9 1 . 6	V, 3	2 5 9 7 . 4	V, 4	
	解析 III	3 8 6 . 0	V, 1	1 1 0 9 . 0	V, 2	
原子炉圧力容器	解析 I	3 5 0 5 . 0	T, 1	6 4 9 8 . 4	T, 2	
加 圧 器	解析 I	6 7 6 3 . 9	T	1 1 1 2 0 . 0	L	
蒸 気 発 生 器	解析 I	1 2 0 1 . 9	T	3 3 9 2 . 3	L	
制 御 棒	解析 I	3 . 8	L, 1	5 4 . 7	L, 2	
原 子 炉 炉 心	解析 I	2 7 1 9 . 9	L, 1	3 5 2 7 . 6	L, 2	
配 管	RPV*→SG**	解析 I	1 7 3 6 . 3	1st	2 1 2 8 . 0	2nd
	SG→MCP***	解析 I	3 5 6 1 . 4	1st	7 4 5 2 . 5	2nd
	MCP→RPV	解析 I	2 5 0 3 . 5	1st	2 9 6 8 . 8	2nd

解析種別 解析 I ; 1989年1月、解析 II ; 1980年5月、解析 III ; 1980年6月
 配 管 * RPV;原子炉圧力容器、** SG;蒸気発生器、*** MCP;一次冷却水ポンプ

Table 6 原子炉等建造物の固有振動試験結果

検出箇所	検出振動数 (cpm)				
原子炉格納容器	390	435-442.5	480-490	585	690-705
	750	915	975	1687.5	1785-1830
原子炉圧力容器	390	435-442.5	690-705	750	980-990
	1470-1500	1687.5	1800	1950	2820

4.2 船体固有振動のプラントパラメータへの影響

プラントパラメータへの影響については、固有振動解析と同様にスペクトルを求め、これを計測対象の工学単位（軸馬力; P S、圧力; at G など）に変換し、最初に求めた船体固有振動と比較し、その相関性の有無と影響の大きさを確認した。プラントパラメータは加速度計の場合と異なり、プラントの運転状態を示す直流（D C）成分が大きいので、D C成分を除去し振動による揺らぎ成分のみを分析することが重要である。

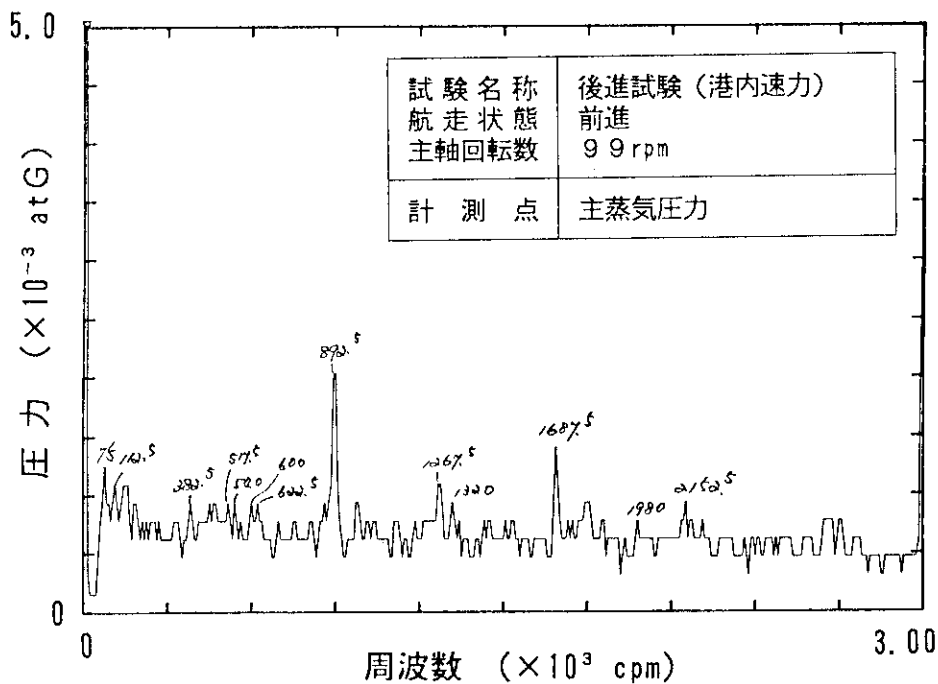
この方法で、海上試運転で実施した種々の試験の中から、まず一定の回転数で航走する運航モードの試験項目（試験によって回転数は異なる）を選び、過渡応答振動スペクトルを分析した。更に、船体が加速、減速あるいは旋回中などの過渡的状態にある時の振動スペクトルを分析した。

Fig. 2 5 (a)～(l)に、プラントパラメータの過渡応答振動スペクトルのいくつかの例を示す。これらの結果と、先に同定した固有振動数とを比較し、その相関性を確認した。

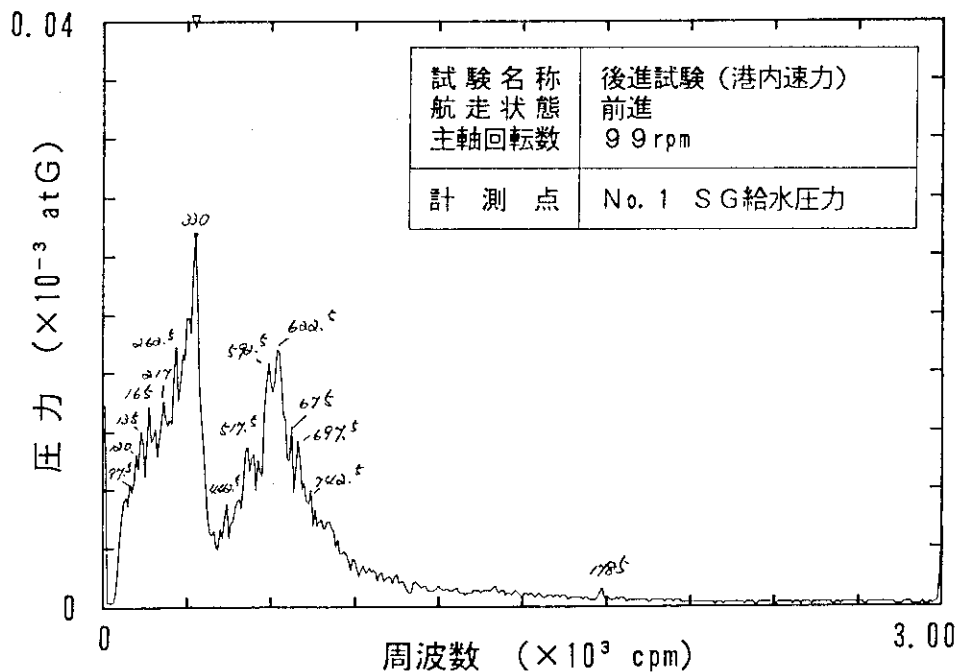
これら結果の中から Fig. 2 5 (g)は、連続最大出力（M C R : Maximum Continuous Rating）の続航試験時における主蒸気圧力信号の振動応答スペクトルである。9 7 5 c p mのピークはプロペラ回転の起振によるもので、1 6 8 7.5 c p mの小さなピークは原子炉格納容器の固有振動に起因するものと思われる。また、4 0 0～5 0 0 c p mの割合幅広い周波数領域に現れたピークは、センサ（圧力伝送器の設置された）近傍の主蒸気配管の共振、あるいは圧力伝送器の振動ノイズと推定される。

本例に見られるように、ほとんどのプラントパラメータ信号に、船体固有振動あるいは原子炉格納容器等の固有振動と同成分の信号が重畳していることが判った。しかしその値は、大部分が数 m V 以下であり、プラントの運転状態を示す D C 成分が数 V であるのに比べて、十分小さな値（約 1/1000）であった。このことは、船体固有振動に影響される揺らぎの成分が、最大でも 0.1～0.2% 程度のものであることを意味している。この程度の揺らぎが、D C 成分に重畳したとしても、その平均値は変わらない。また、対象パラメータの計測システムそのものの精度よりも、むしろ小さな値であることなどを考慮すると、プラント状態の監視精度を特に悪化させることにはならない。また、船体が加速中、旋回中など過渡的状態にある時においても、振動成分のピーク中に特に大きくなる部分や、新たに発生するピークは見当らなかった。

さらに、船体振動試験で調査した結果⁽²⁾から、原子炉設置区域の振動加速度は最大でも 1 0 Gal 程度であり、対象機器への振動ストレスは問題ないものであることがわかっている。したがって、船体固有振動がプラントパラメータに与える影響は極く小さく、問題ないと結論できる。

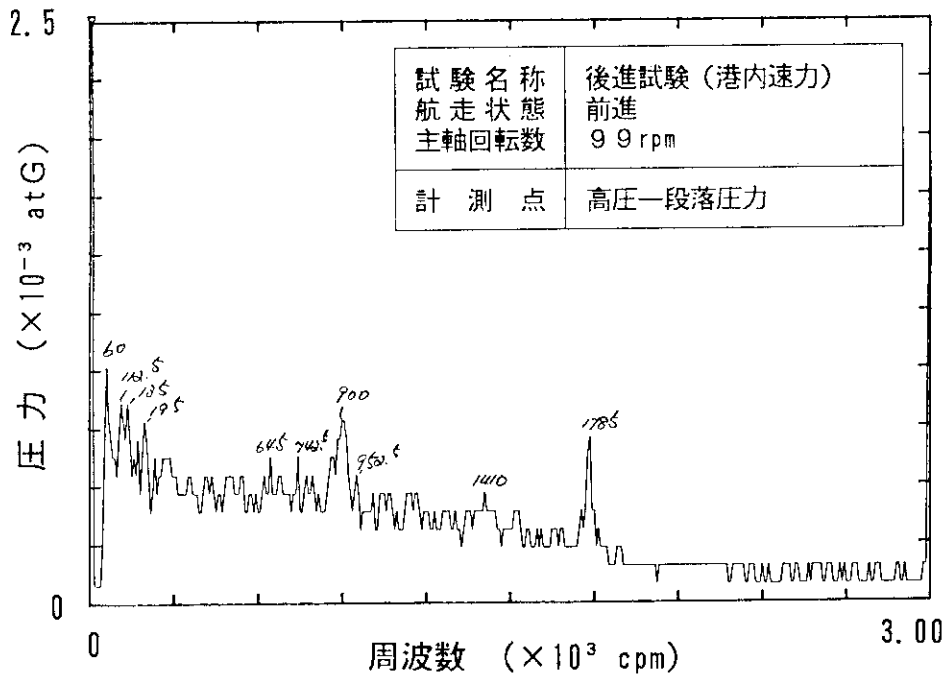


(a) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、主蒸気圧力

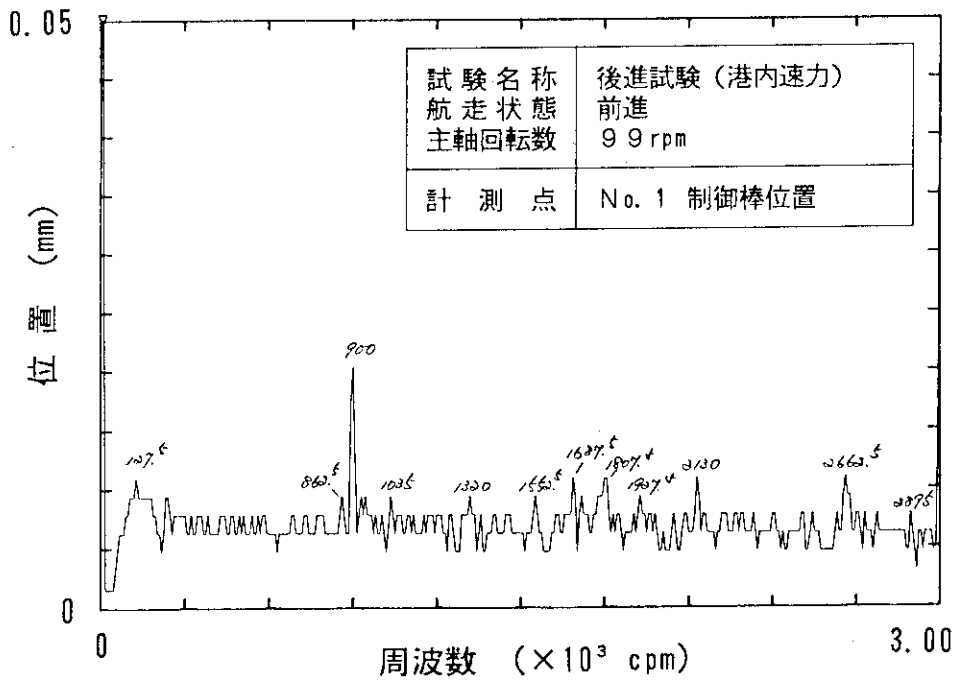


(b) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、No. 1 SG 給水圧力

Fig. 25 原子炉パラメータの過渡応答振動スペクトルの例 (次ページに続く)

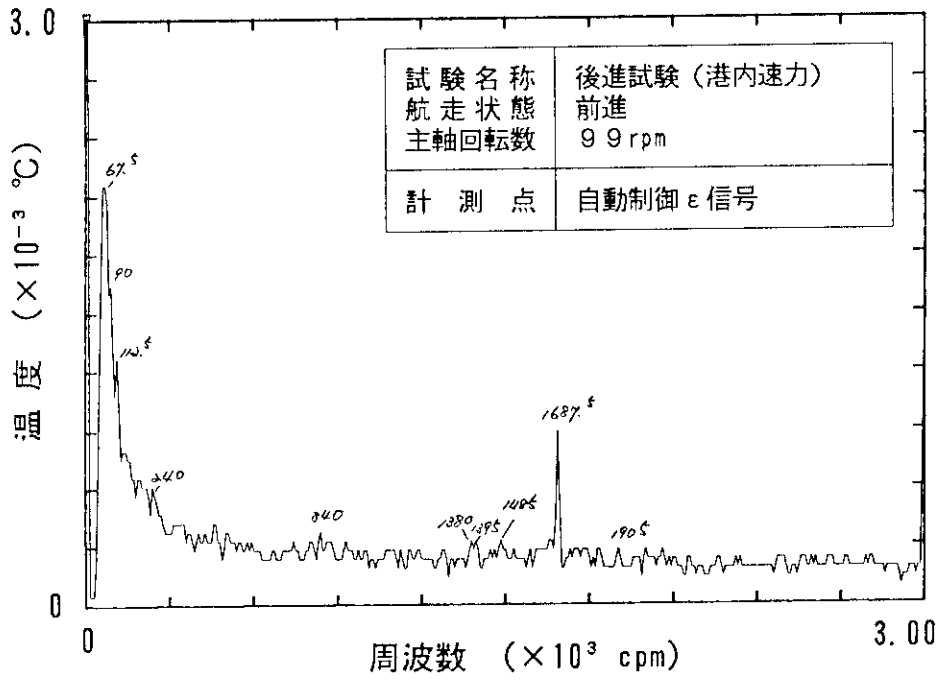


(c) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、高压一段落压力

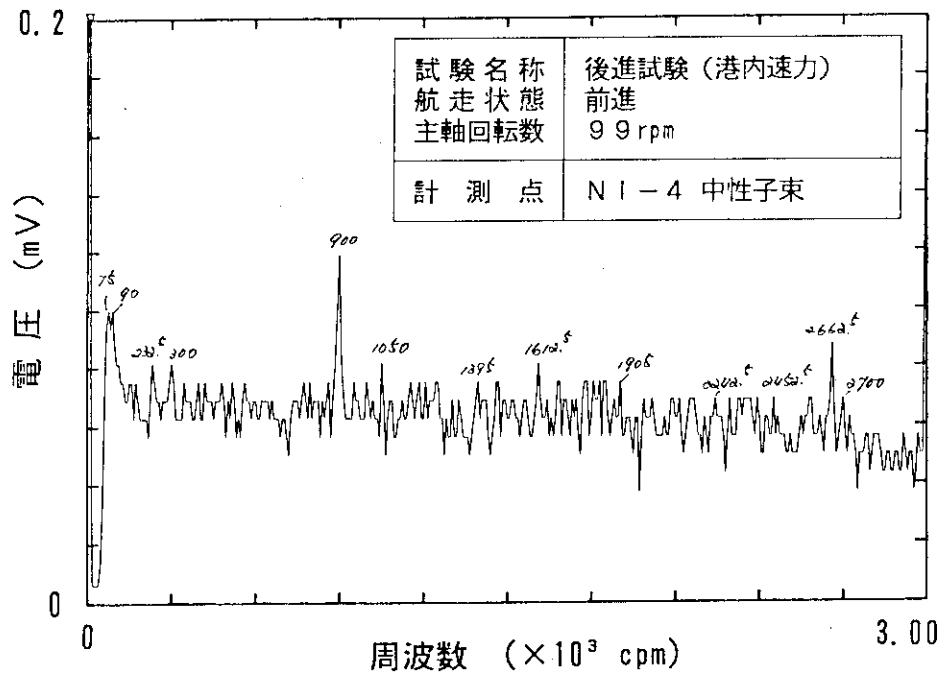


(d) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、No. 1 制御棒位置

Fig. 25 原子炉パラメータの過渡応答振動スペクトルの例 (続き)

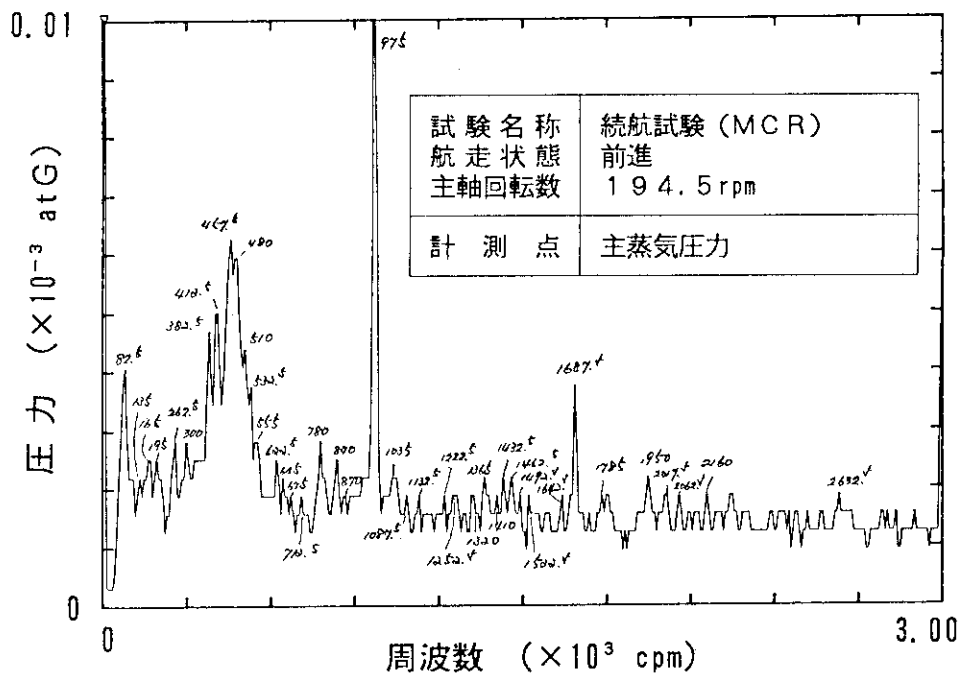


(e) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、自動制御 ε 信号

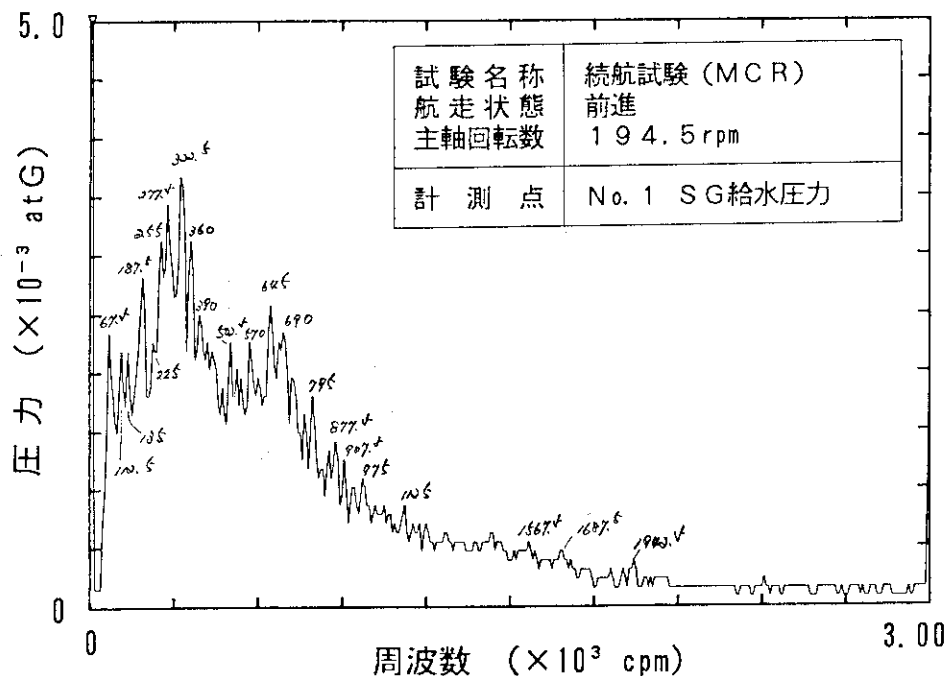


(f) 後進試験 (港内速力)、99 rpm 前進、NI-4 中性子束

Fig. 2.5 原子炉パラメータの過渡応答振動スペクトルの例 (続き)

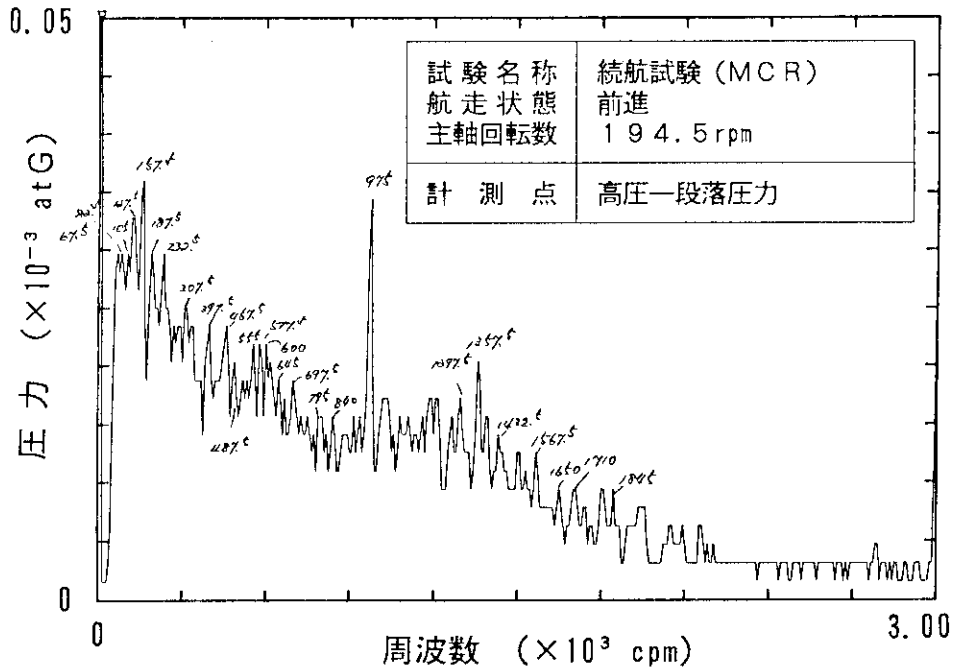


(g) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm前進、主蒸気圧力

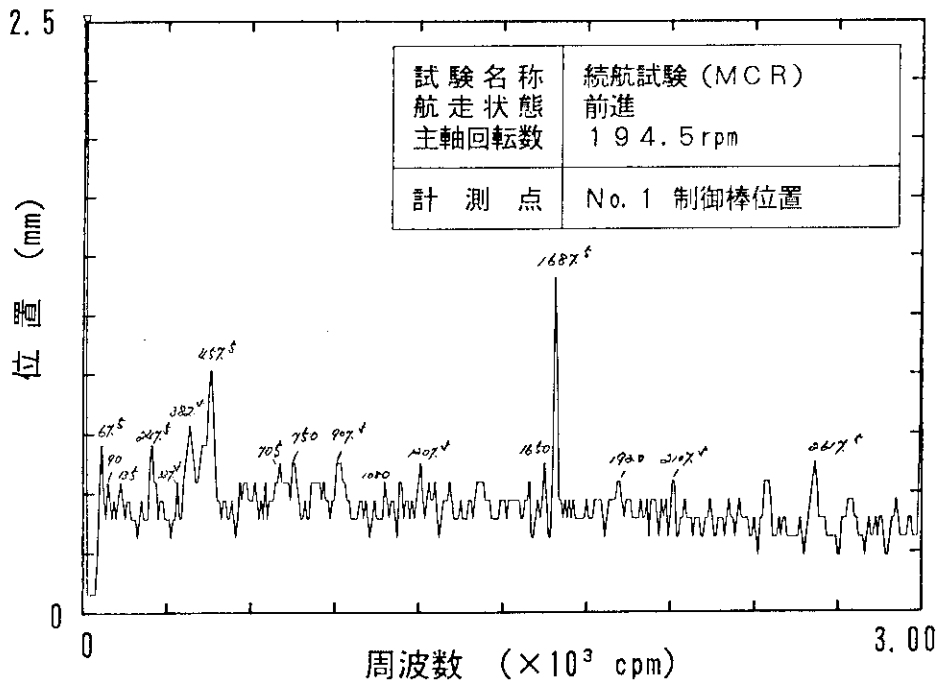


(h) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm前進、No. 1 SG給水圧力

Fig. 25 原子炉パラメータの過渡応答振動スペクトルの例 (続き)

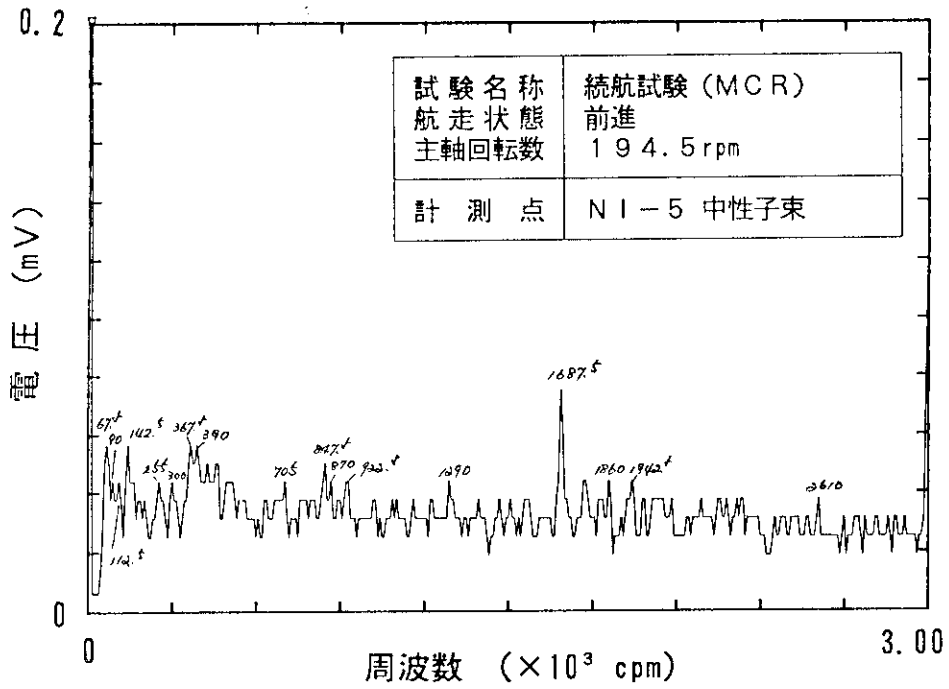


(i) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm 前進、高压一段落圧力

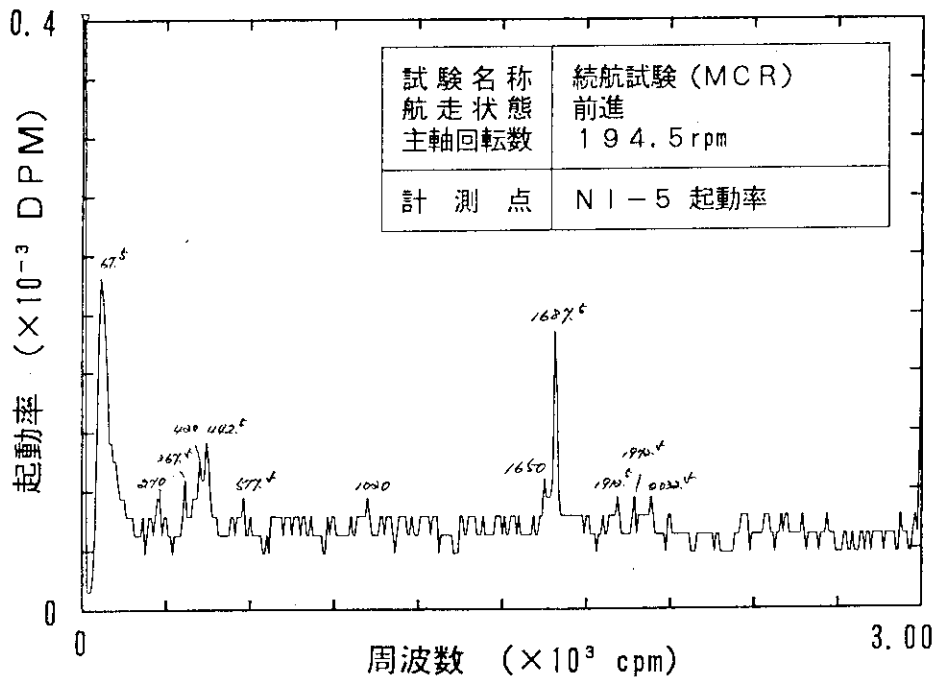


(j) 続航試験 (MCR)、194.5 rpm 前進、No. 1 制御棒位置

Fig. 25 原子炉パラメータの過渡応答振動スペクトルの例 (続き)



(k) 続行試験 (MCR)、194.5 rpm 前進、NI-5 中性子束



(l) 続行試験 (MCR)、194.5 rpm 前進、NI-5 起動率

Fig. 25 原子炉パラメータの過渡応答振動スペクトルの例 (続き)

4.3 原子炉格納容器等構造物の固有振動のプラントパラメータへの影響

原子炉格納容器等構造物の固有振動のプラントパラメータへの影響の解析は、前項と同様の方法で行い、解析用に取得したスペクトル波形も、Fig. 25(a)～(1)を使用した。

図から、前項と同じ様にスペクトルの中には、原子炉格納容器など構造物の固有振動と同じ周波数成分のピークが重畳していることがわかる。しかし、その値は十分小さな値であり、船体固有振動の場合と同様に全く問題にならないと言ってよい。また、船体が加速あるいは減速等の過渡的状態にある他の試験条件においても、原子炉格納容器などの構造物の固有振動に係わるピークの増加はほとんど認められなかった。

4.4 固有振動の影響まとめ

これらの結果を総合すれば、船体固有振動にせよ、原子炉格納容器など構造物の固有振動にせよ、また種々の運航モードにおいて起振される局部振動にせよ、プラントパラメータに対しほとんど影響を与えないということがわかった。

したがって、これらの振動が、原子炉プラントそのものに影響を与えたり、プラントの運転状態を監視するシステムの精度を悪化させることはない結論できる。

しかし、結果を単にプラントパラメータとの相関性において“問題なし”と結論するに留めることなく、ここで得られた構造物等の固有振動に関する実測値を、今後の耐振設計にフィードバックし“次の原子力船”設計に生かされることが重要である。

5. 船体の過渡的動揺の影響

5.1 相関スペクトル

過渡的動揺の影響については、3.2.2項で詳しく述べたように、動揺信号と計測対象パラメータ信号の時系列データから、それぞれの周波数スペクトルを分析した後、両者のクロスパワースペクトルを求める方法によって解析した。動揺信号は『むつ』に常設しているローリング角度、ピッチング角度及びヨーイング角速度信号を用いた。これに加え、原子炉設置区域及び原子炉格納容器内の加速度信号を補助的に用いた。収録したデータの再生にあたっては、テープの同じ位置からスタートし、同じ時刻間を再生する時系列データとした。これによって、パラメータ間の位相情報も取入れることができる。また、時系列データを求める際、信号にほとんど変動のなかったパラメータについては、その後のスペクトル解析は省略した。

4.3 原子炉格納容器等構造物の固有振動のプラントパラメータへの影響

原子炉格納容器等構造物の固有振動のプラントパラメータへの影響の解析は、前項と同様の方法で行い、解析用に取得したスペクトル波形も、Fig. 25(a)~(1)を使用した。

図から、前項と同じ様にスペクトルの中には、原子炉格納容器など構造物の固有振動と同じ周波数成分のピークが重畳していることがわかる。しかし、その値は十分小さな値であり、船体固有振動の場合と同様に全く問題にならないと言ってよい。また、船体が加速あるいは減速等の過渡的状態にある他の試験条件においても、原子炉格納容器などの構造物の固有振動に係わるピークの増加はほとんど認められなかった。

4.4 固有振動の影響まとめ

これらの結果を総合すれば、船体固有振動にせよ、原子炉格納容器など構造物の固有振動にせよ、また種々の運航モードにおいて起振される局部振動にせよ、プラントパラメータに対しほとんど影響を与えないということがわかった。

したがって、これらの振動が、原子炉プラントそのものに影響を与えたり、プラントの運転状態を監視するシステムの精度を悪化させることはない結論できる。

しかし、結果を単にプラントパラメータとの相関性において“問題なし”と結論するに留めることなく、ここで得られた構造物等の固有振動に関する実測値を、今後の耐振設計にフィードバックし“次の原子力船”設計に生かされることが重要である。

5. 船体の過渡的動揺の影響

5.1 相関スペクトル

過渡的動揺の影響については、3.2.2項で詳しく述べたように、動揺信号と計測対象パラメータ信号の時系列データから、それぞれの周波数スペクトルを分析した後、両者のクロスパワースペクトルを求める方法によって解析した。動揺信号は『むつ』に常設しているローリング角度、ピッチング角度及びヨーイング角速度信号を用いた。これに加え、原子炉設置区域及び原子炉格納容器内の加速度信号を補助的に用いた。収録したデータの再生にあたっては、テープの同じ位置からスタートし、同じ時刻間を再生する時系列データとした。これによって、パラメータ間の位相情報も取入れることができる。また、時系列データを求める際、信号にほとんど変動のなかったパラメータについては、その後のスペクトル解析は省略した。

Fig. 26 (a) ~ (m) に、いくつかのパラメータについて求めた時系列データ、周波数スペクトル、クロスパワースペクトルを例として示す。ここに示した例は、時系列データを再生した際、比較的顕著に変動の表れたパラメータについて載せたもので、軸馬力、主軸回転数、加圧器水位、反応度、No. 1 ループ平均温度、自動制御 ϵ 信号などの信号に変動が見られる。

プラントパラメータへの動揺の影響に関しては、時間的な制約と測定系の制約から、対象とした試験全てのデータを再生し、その結果を解析することはできなかった。ここに示した例は、連続最大出力 (MCR) による続航試験及び港内速力による後進試験における結果である。いずれも、主軸回転数を一定にして安定に航走している状態のもので、前者は 194.5 rpm で前進中、後者は 99 rpm で前進中の、ある 200 秒間を選び再生したもので、試験の全時間を対象としたものではない。

5.2 プラントパラメータとの相関

Fig. 26 (a) ~ (m) は、比較的顕著に影響の現れたパラメータについて例示したものである。その影響の大きさを比較するため、時系列データ上に現れた変動値 (揺らぎの最大値) をまとめ、Table 7 に試験条件及び動揺 (ローリング/ピッチング) との関係で示した。

同表の値は、データ再生を行った 200 秒間における各パラメータの変動 (揺らぎ) の最大値を示した。船体の動揺は、気象・海象条件、試験種別などにより異なるため、ここに示した値が絶対的なものではないが、その影響の大きさをある程度知ることができる。

同表によれば、最も影響が大きく現れたパラメータは軸馬力であった。これは、船体動揺の一つの形態であるローリングと同軸上で起る事象であることから、主軸回転数を含む推進系に現われる影響として当然の結果とも言える。次いで、加圧器水位、反応度、No. 1 ループ平均温度の順で、それぞれのパラメータへの影響を確認することができた。

以下に、影響が比較的明瞭に現われたパラメータについて、Fig. 26 (a) ~ (m) 及び Table 7 を基に検討を加える。

Table 7 船体動揺のプラントパラメータに及ぼす影響

試験条件 変動 値 計測項目	後進試験 (港内速力) 航走状態: 前進 回転数: 99 rpm		続航試験 (MCR) 航走状態: 前進 回転数: 194.5 rpm	
	揺らぎの 大きさ	FSに対する 変動誤差	揺らぎの 大きさ	FSに対する 変動誤差
ローリング角度	±2.04 deg	±6.7%	±1.17 deg	±3.85%
ピッチング角度	±0.35 deg	±3.5%	±0.38 deg	±3.8%
軸馬力	±136 PS	±1.12%	±310 PS	±2.6%
回転数	未解析		±0.92 rpm	±0.46%
加圧器水位	未解析		±0.92%	
No. 1 ループ平均温度	未解析		±0.12°C	±0.2%
1次冷却水ループ圧力	未解析		±0.1 atG	±0.07%
自動制御ε信号	未解析		±0.23°C	±0.08%
起動率	未解析		±0.002 DPM	±0.002%
反応度	未解析		±0.037 CPM	±0.37%

試験名称 主軸回転	後進試験 (港内速度)
	前進 99 rpm
計測点	1 ローリング角度
	2 軸馬力

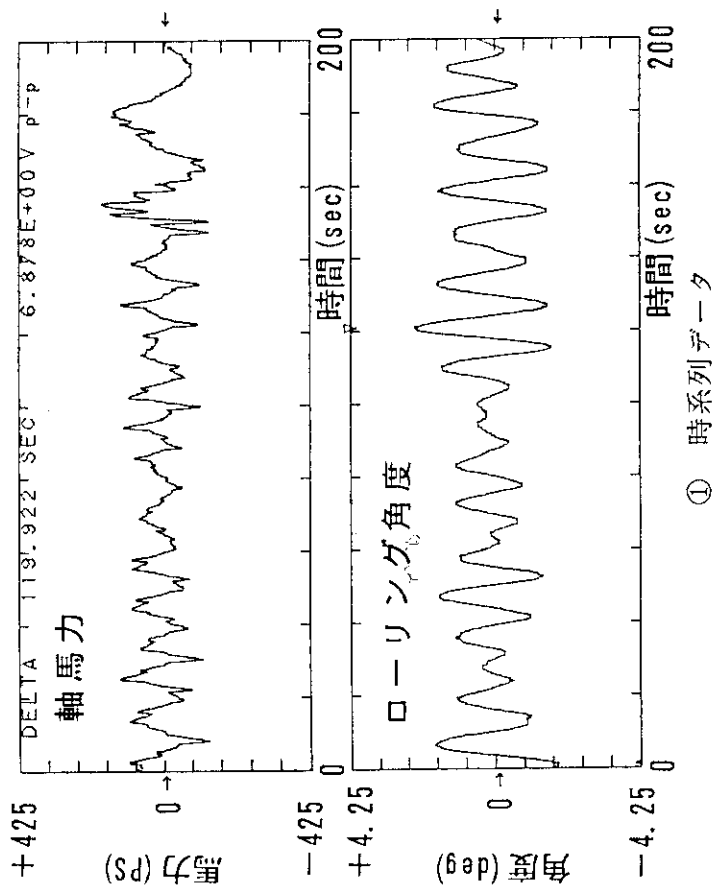
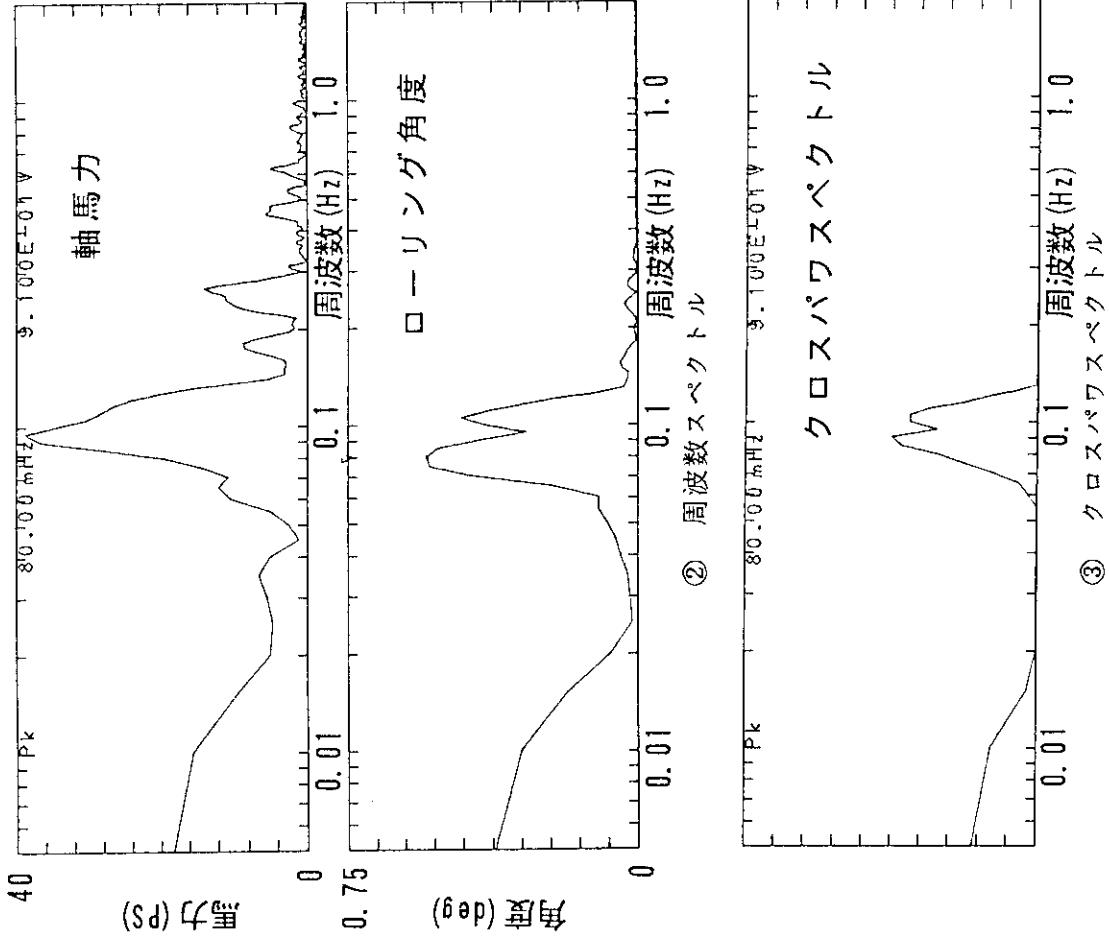


Fig. 26 (a) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験航主	計測点	称状回数	後進 前進	試験 (港内速度)
	1	1	99 rpm	
	2	2		
				ローリング角度
				ピッチング角度

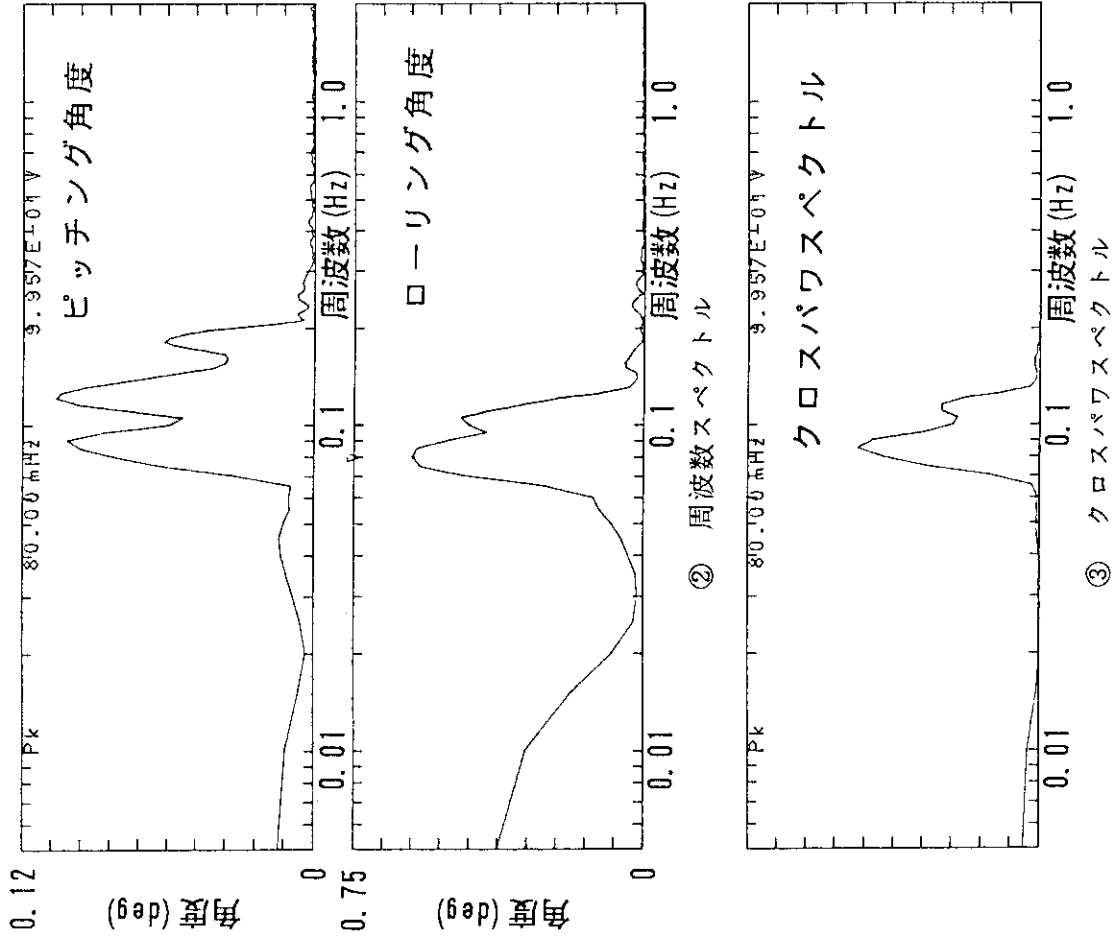
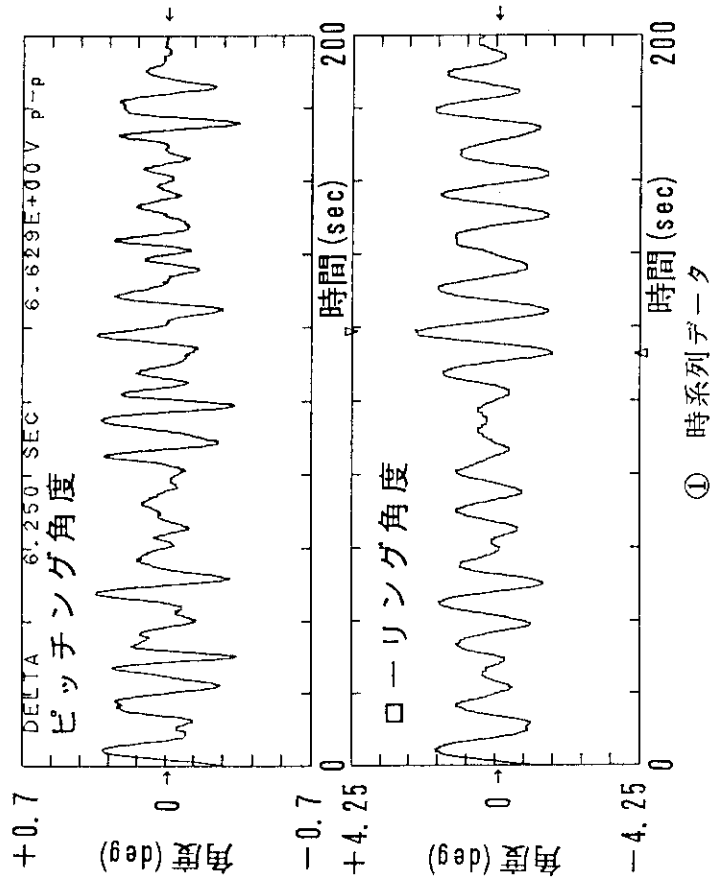


Fig. 2.6 (b) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験名称 主軸回転	後進試験 (港内速度) 前進 99 rpm
	状態数
計測点	1 ローリング角度
	2 加速度計 A 4

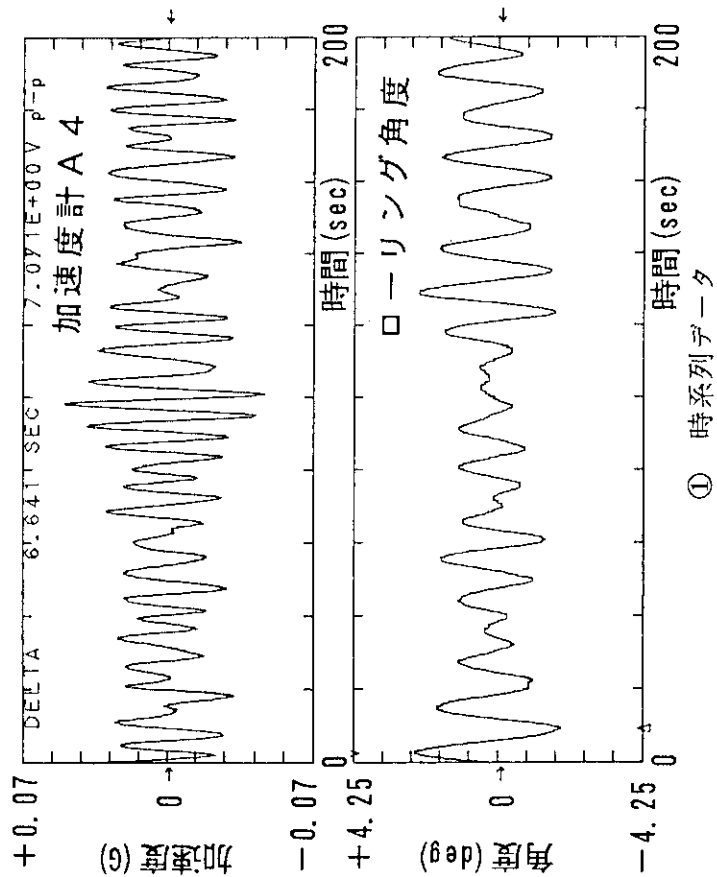
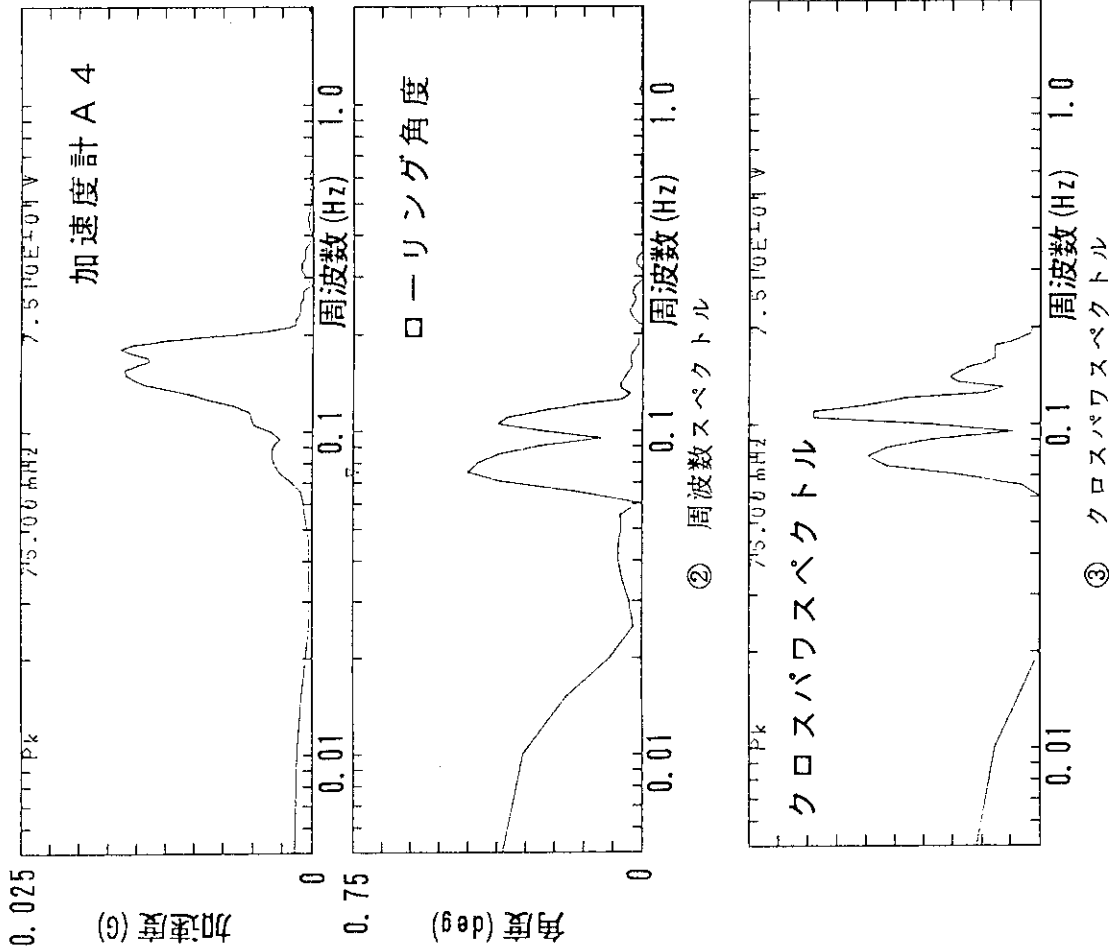


Fig. 26 (c) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験航主軸	計測点	1	続航試験 (MCR) 前進 194.5 rpm
		2	
			ローリング角度
			主軸回転数

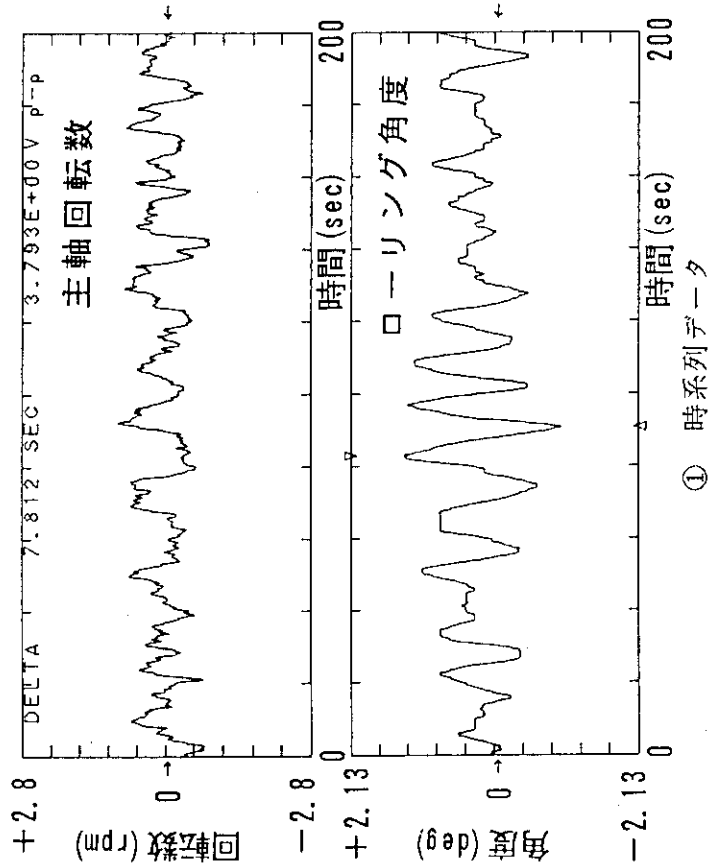
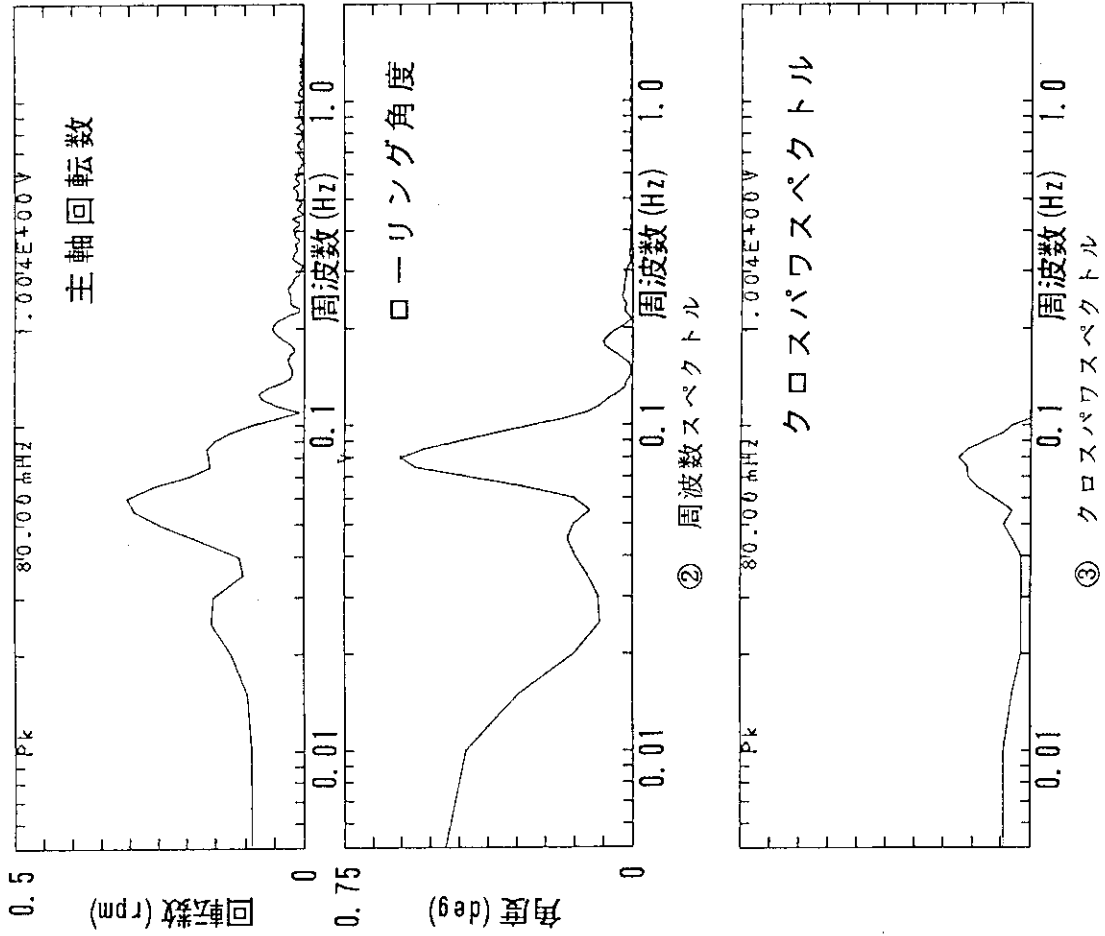


Fig. 26 (d) 船体動揺とプロントパラメータの相関

試験 主軸回転	称 状 名 数	続航試験 (MCR) 前進 194.5 rpm
	計測点	1 ピッチング角度 2 主軸回転数

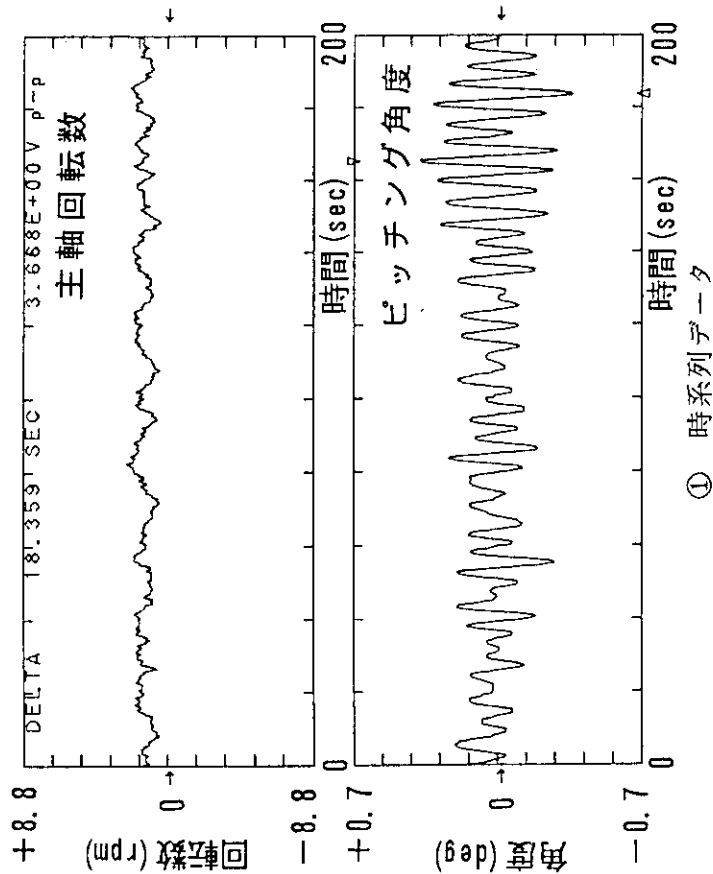
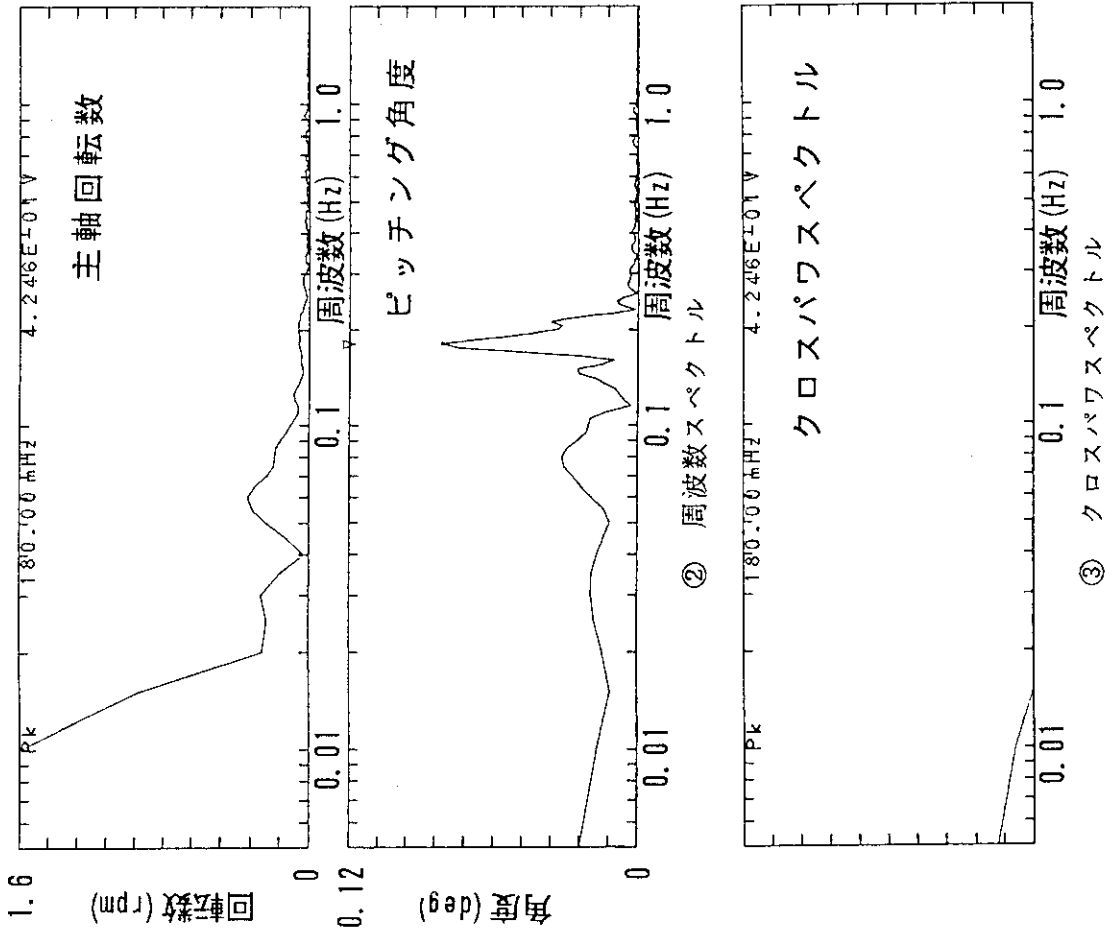
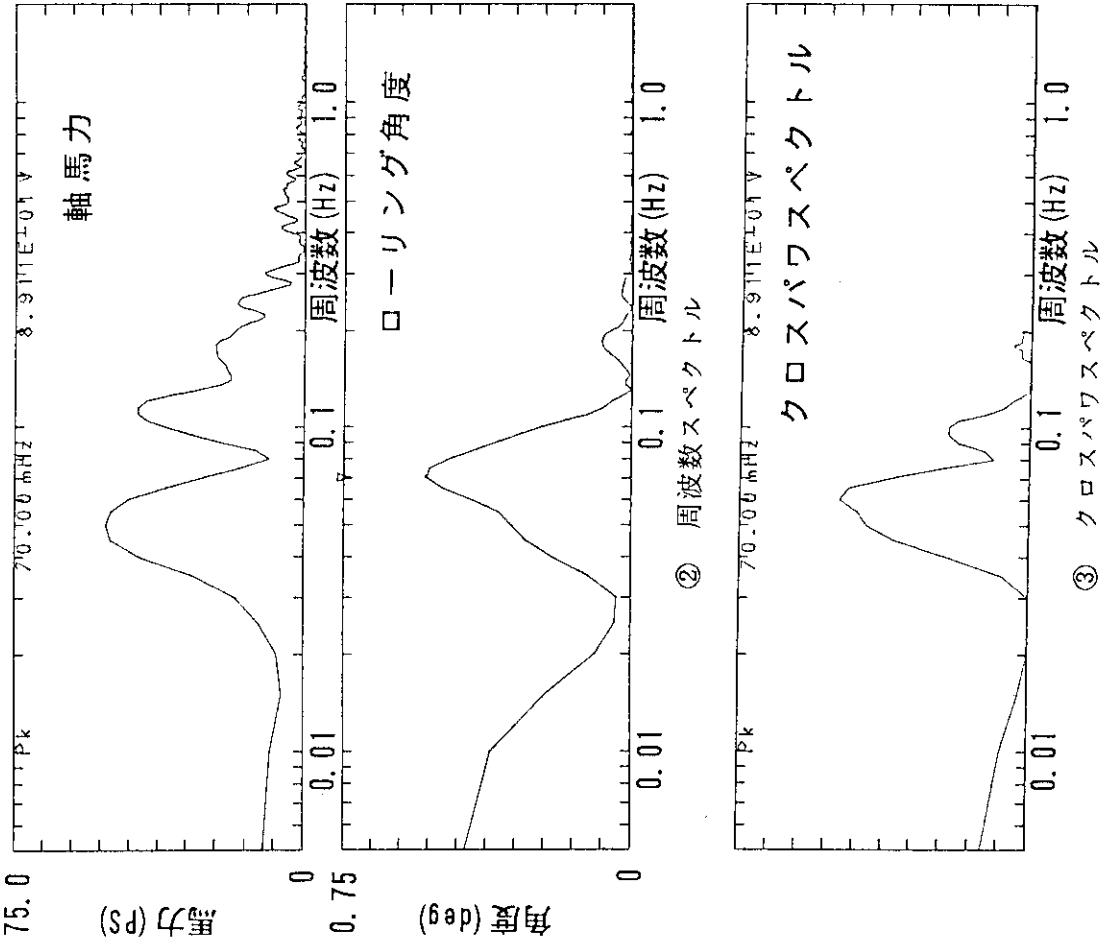


Fig. 26 (e) 船体動揺とプラントパラメータの相関



試験主軸回転	称状態数	続航試験 (MCR)
計測点	1	前進 194.5 rpm
	2	ローリング角度
		軸馬力

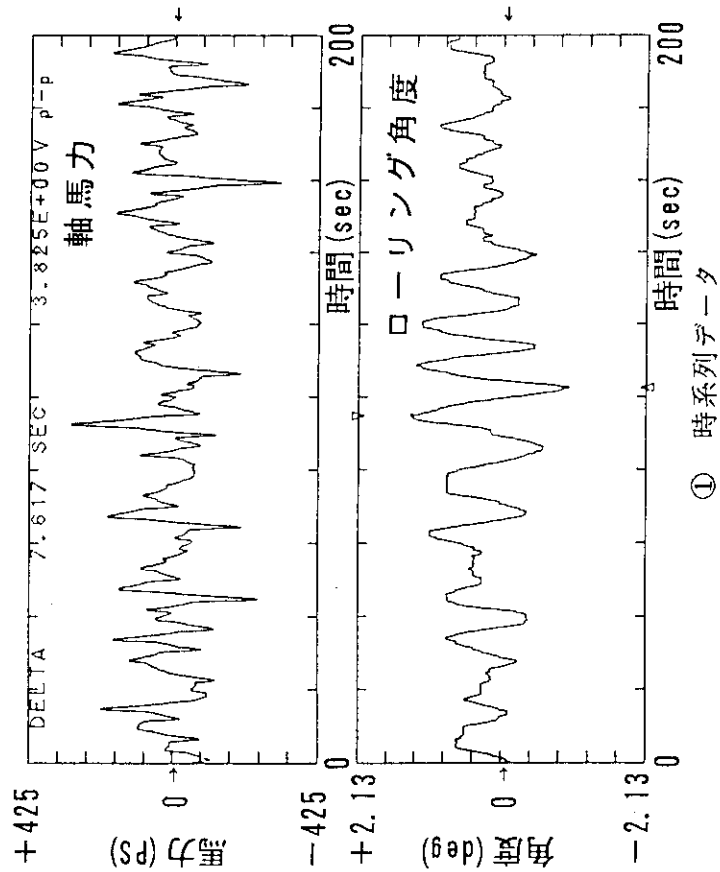


Fig. 26 (f) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験主軸回転数	称状態	続航試験 (MCR)	
		前進	194.5 rpm
計測点	1	ピッチング角度	
	2	加压器水位	

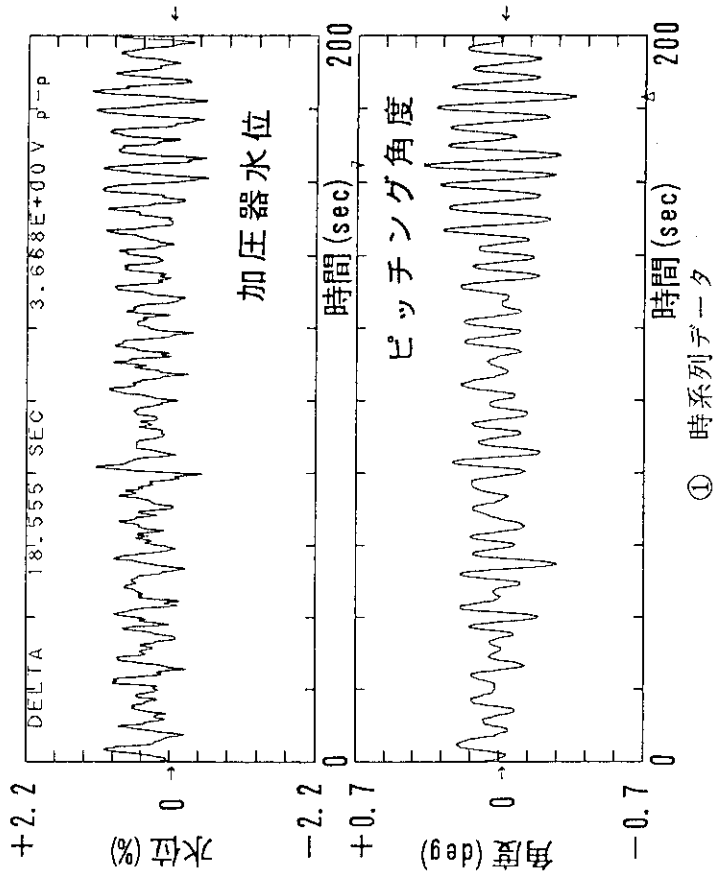
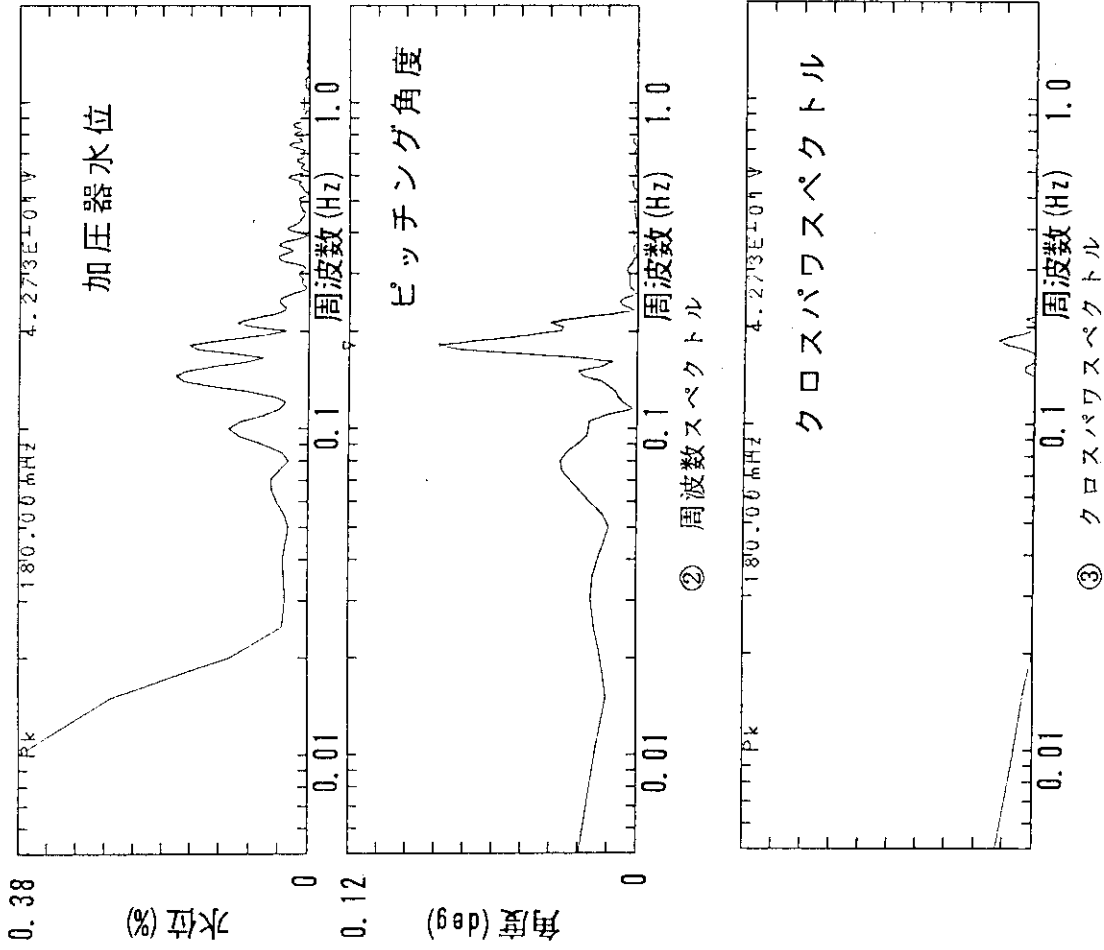


Fig. 2.6 (g) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験航主軸	試験名称	続航試験 (MCR)
	状態数	前進 194.5 rpm
計測点	1	No. 1 μ -7° 平均温度
	2	加速度計 A 4

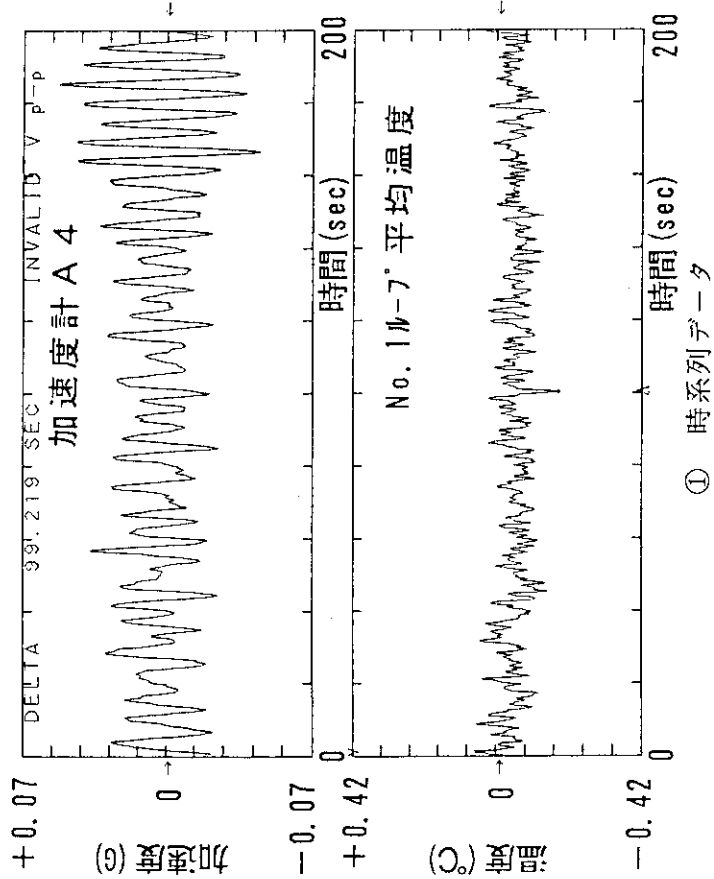
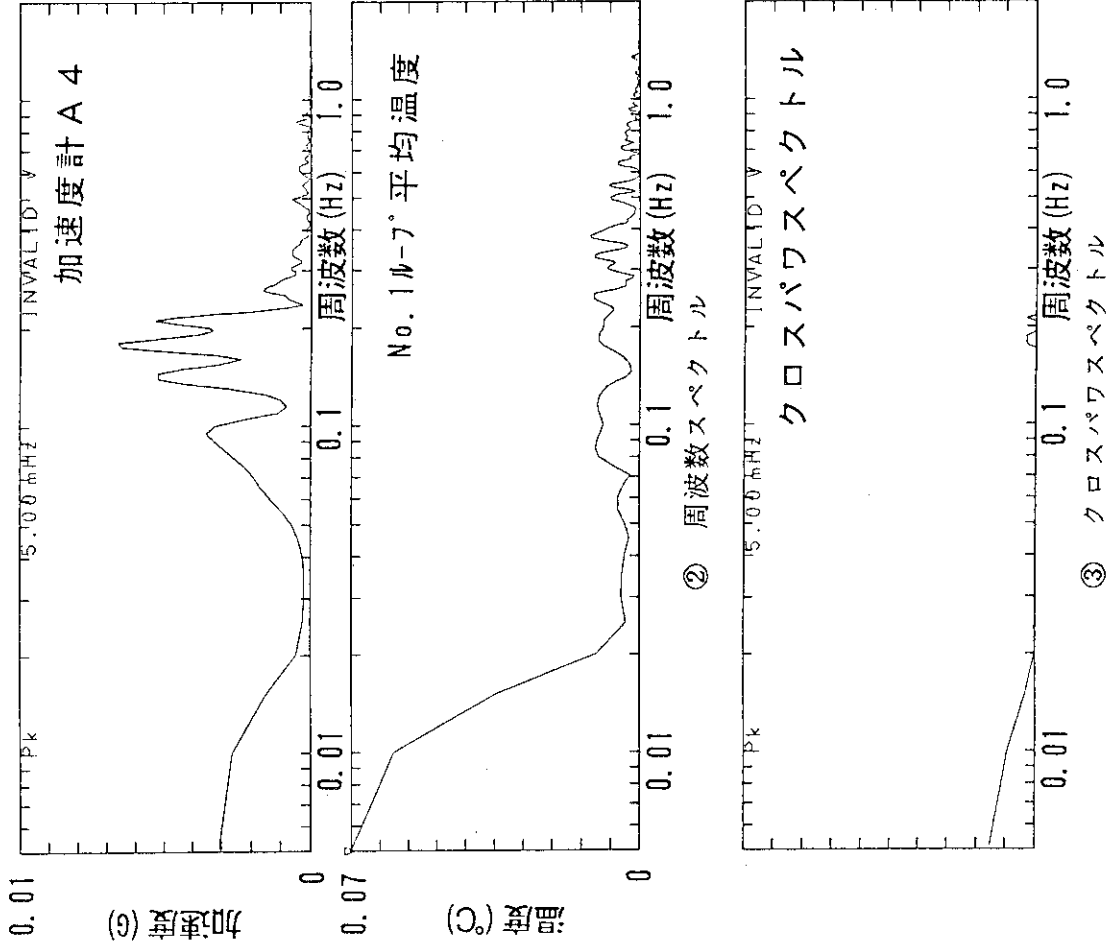


Fig. 26 (h) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験主軸回転数	状態	航試 (MCR)
	前進	194.5 rpm
計測点	1	ピッチング角度
	2	1次冷却ループ圧力

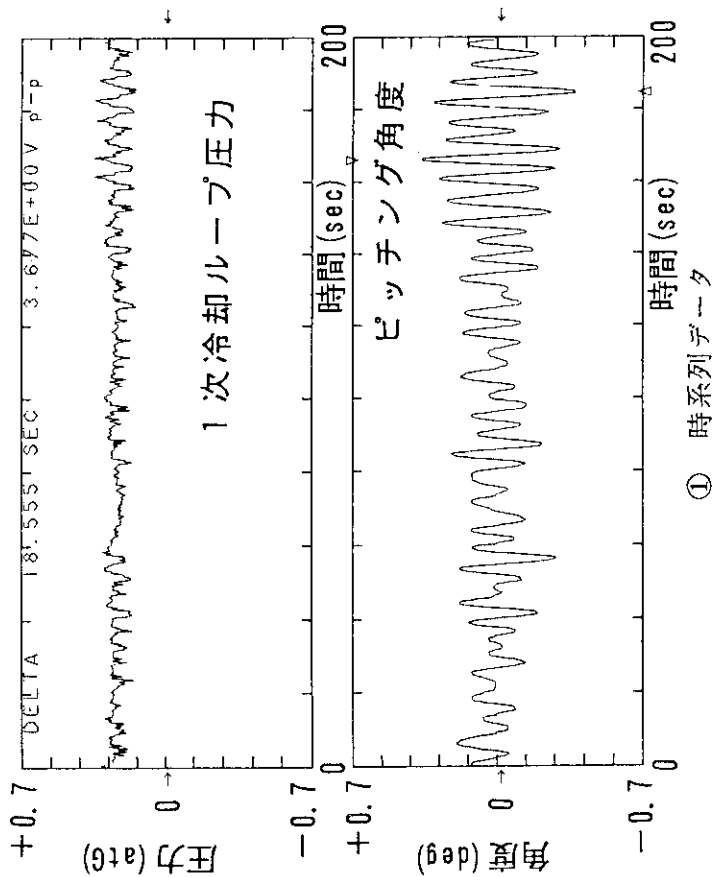
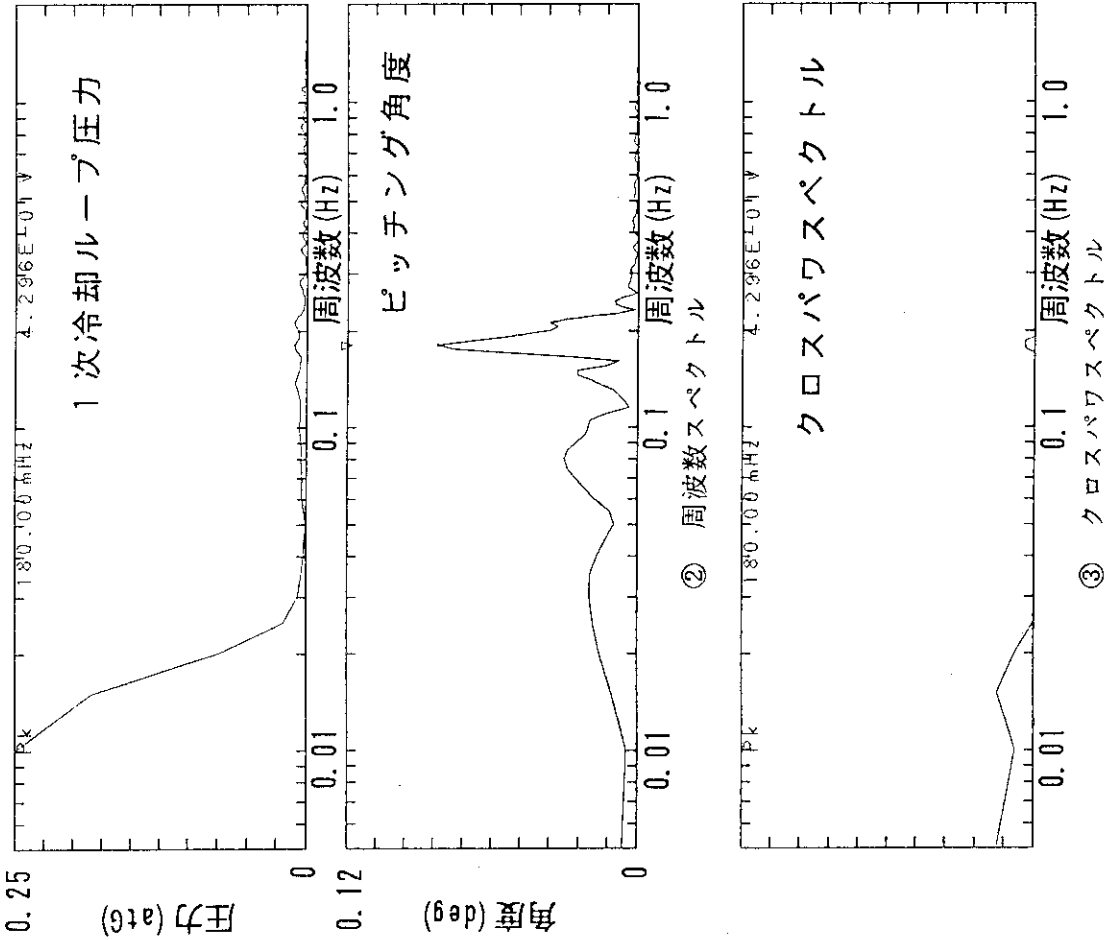


Fig. 26 (i) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験主軸回転	試験名称	航試験 (MCR)
	状態数	続航前
計測点	1	N1-4 起動率
	2	加速度計 A4
試験進		194.5 rpm

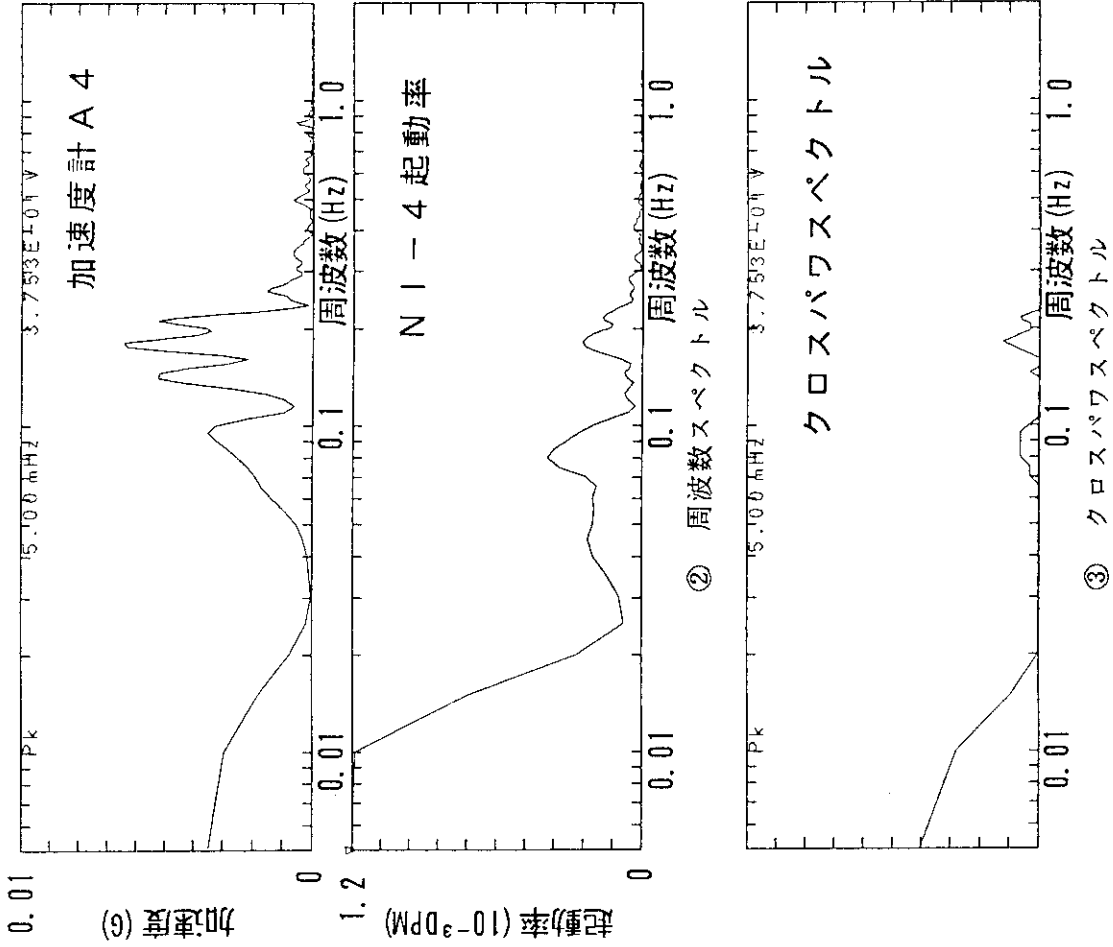
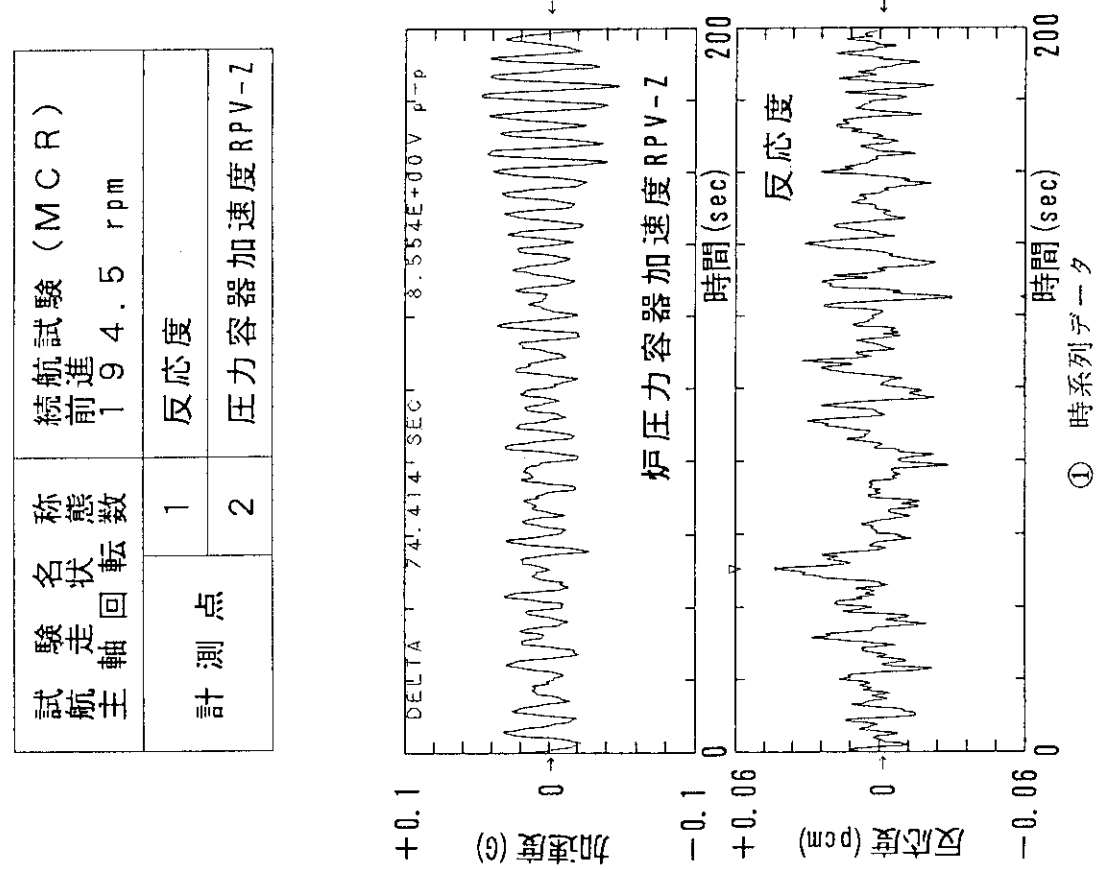
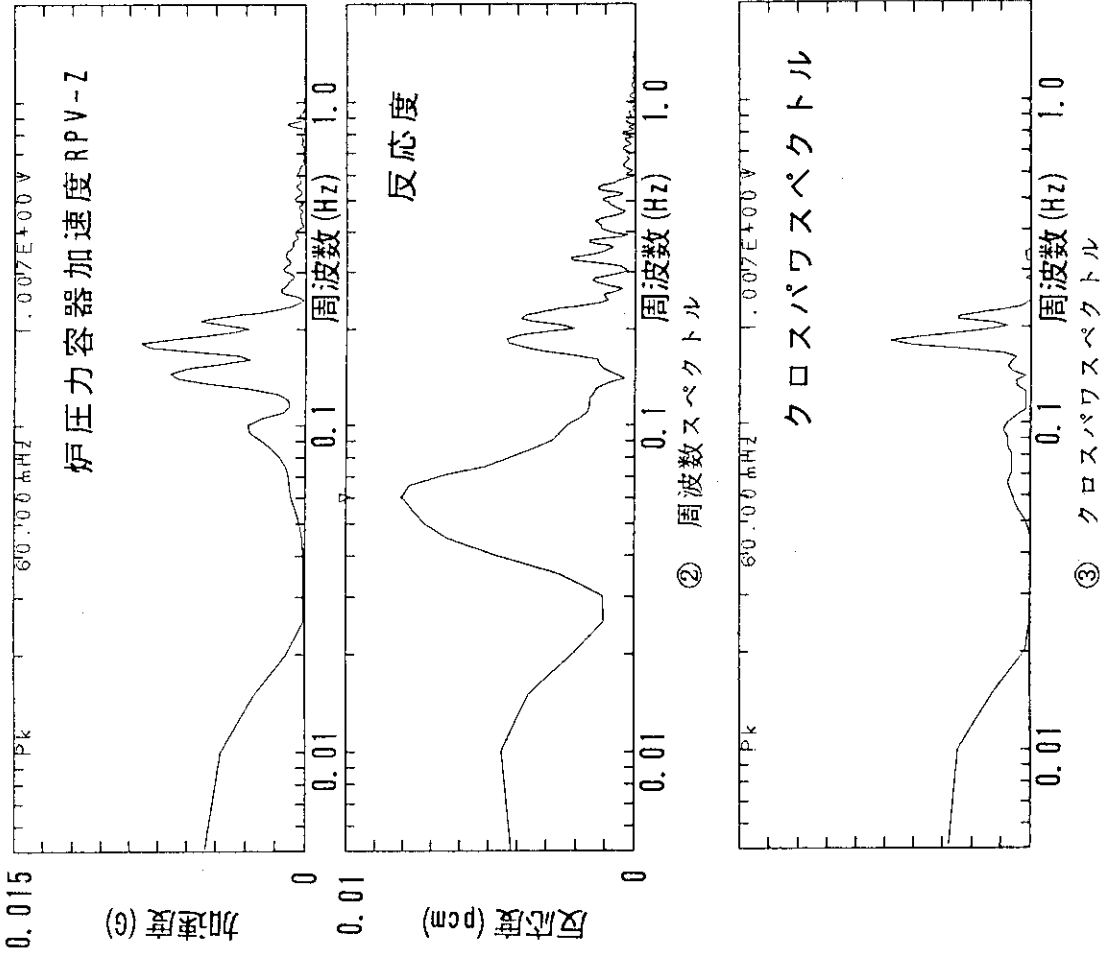


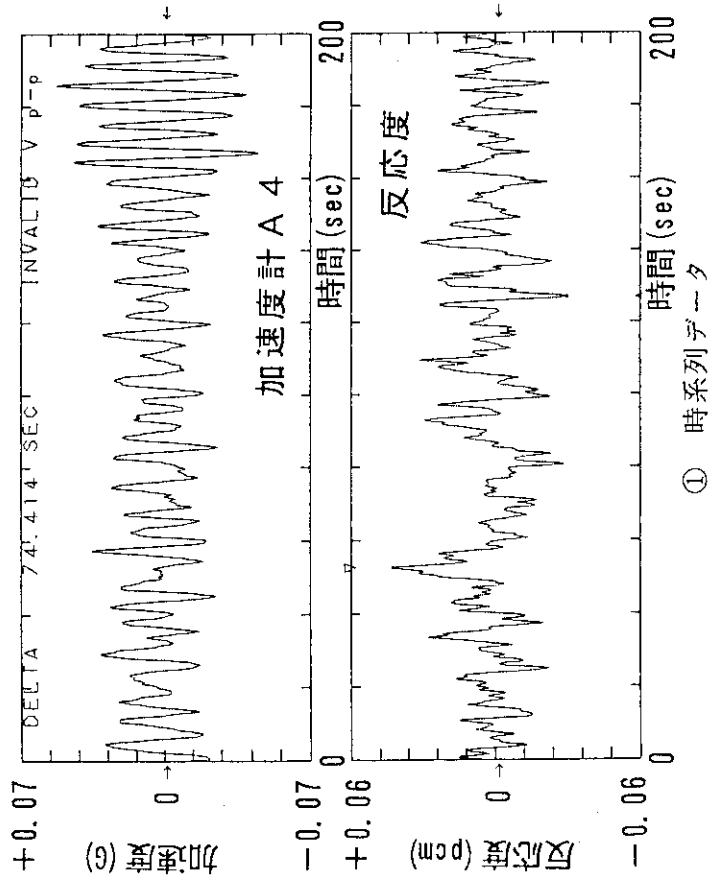
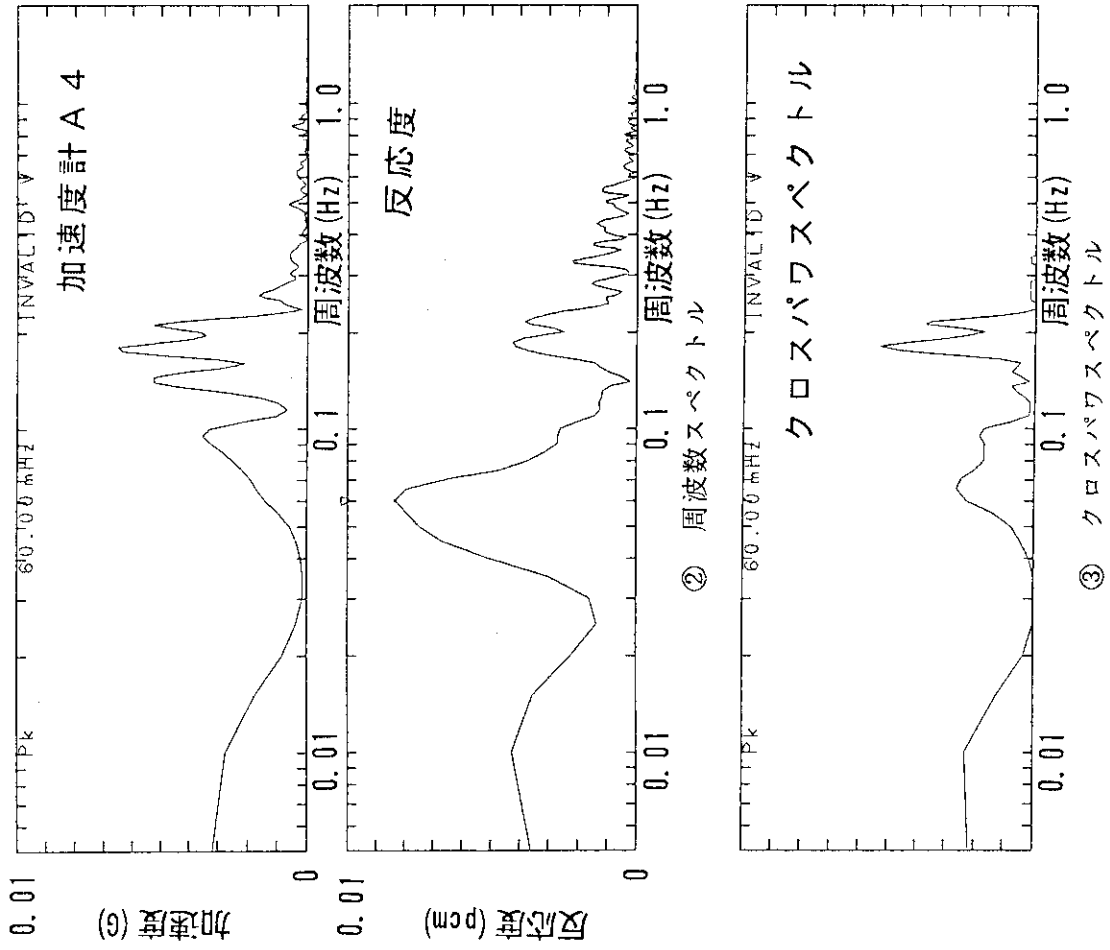
Fig. 2.6 (j) 船体動揺とプラントパラメータの相関



試験 航主	走軸 回転	状態数	試験 (MCR)
		1	前進 194.5 rpm
計測点	1	反応度	
	2	圧力容器加速度 RPV-Z	

Fig. 26 (k) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験名称	航主	航走軸	航進	試験 (MCR)
状態	1	2	1	94.5 rpm
回転数				
計測点	反応度			
	加速度計 A 4			



① 時系列データ

Fig. 2.6 (1) 船体動揺とプラントパラメータの相関

試験主軸回転	試験名	航試 (MCR)
	状態	航進
計測点	1	194.5 rpm
	2	ピッチング角度
		自動制御 ε 信号

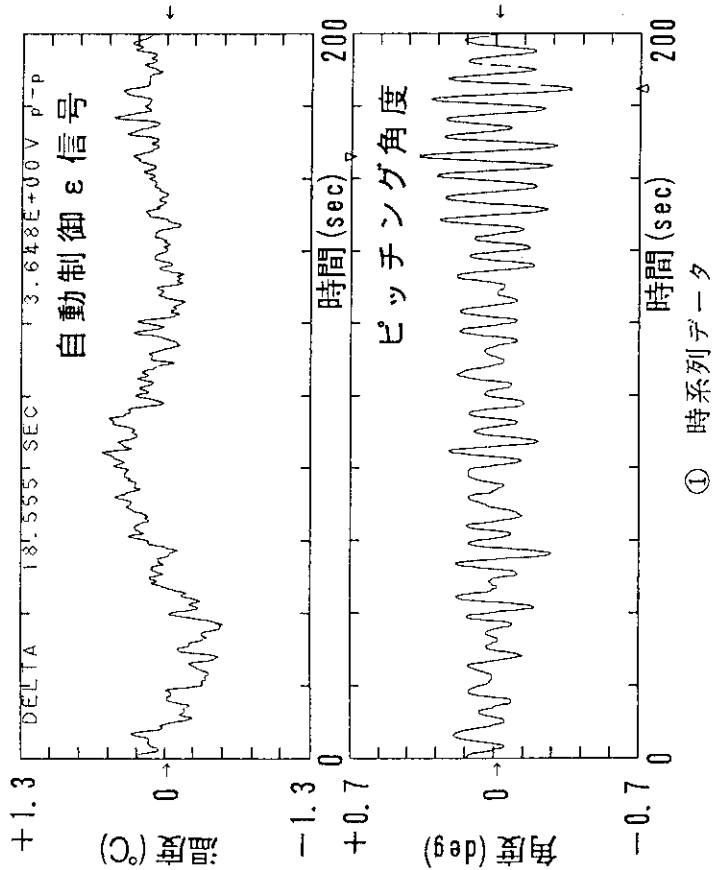
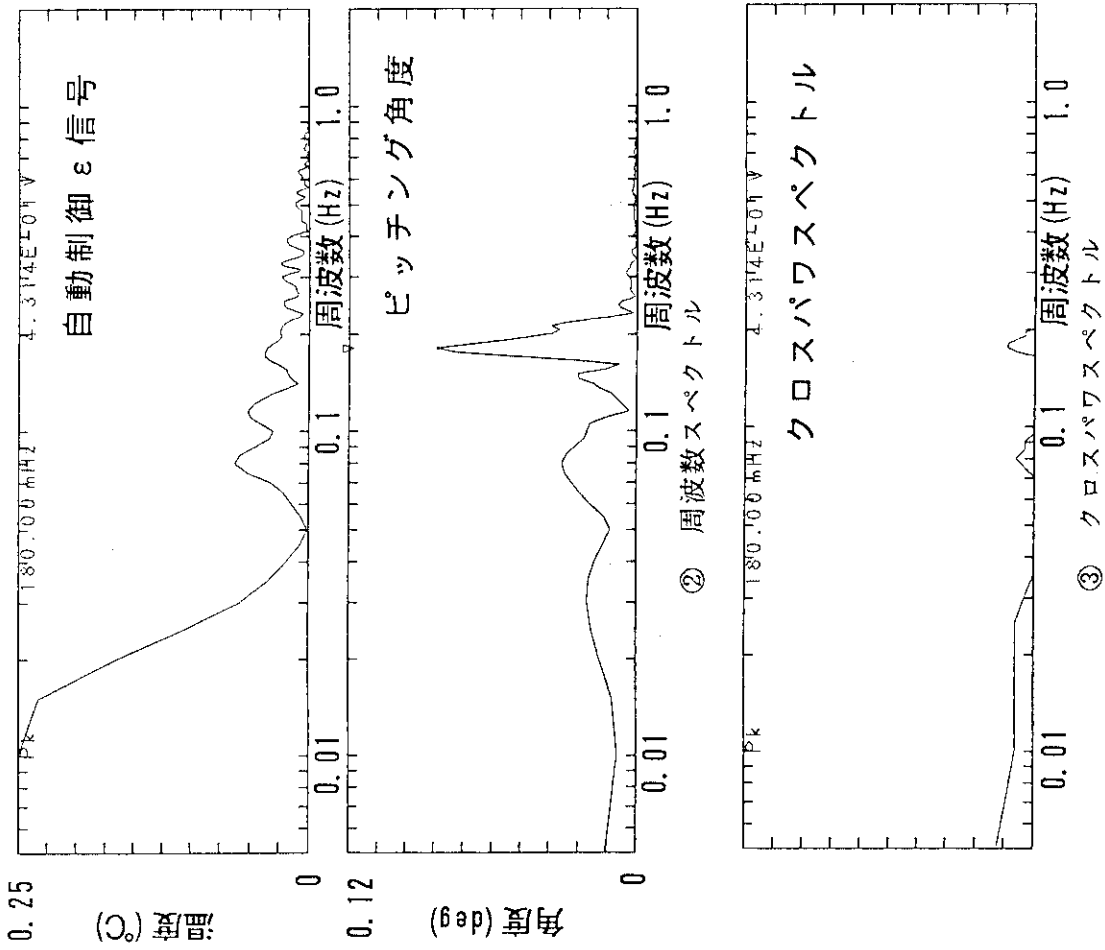


Fig. 2.6 (m) 船体動揺とプラントパラメータの相関

5.2.1 動 揺

動揺信号のうち、ローリングとピッチング信号について、主軸回転数と、その時の速力に対応した周波数ピークをまとめ、Table 8 に示した。

同表からわかるように、ローリングは、主軸の回転数に関係なく、ほぼ一定の周波数成分を持っている。その値は、主軸回転数 99 rpm 及び 194.5 rpm とともに 0.07 から 0.08 Hz にピークを有するものであった。言い換えれば、速力に関係なく一定の周期で『むつ』が“横揺れ”していることになる。これが波浪によるものか、『むつ』の固有の船体動揺によるものかは興味あるところであるが、この結果だけでは判断することはできない。

これに対し、ピッチング周波数は、速力（主軸回転数）によって変化することが確認された。すなわち、主軸回転数が 99 rpm のときには 0.09 Hz や 0.12 Hz に明瞭なピークが、この他に 0.18 Hz に少し小さなピークが確認された（Fig. 26 (b) 参照）。一方、主軸回転数が 194.5 rpm のときには 0.18 Hz のピークが確認された。これは、0.09 Hz に対し 2 倍の周波数である。対象とした港内速力後進試験（主軸回転数：99 rpm）及び連続最大出力続航試験（主軸回転数：194.5 rpm）は、試験日は異なるが、試験条件として、船首を風上に向けて航行させたので、うねりを船首から受けることになり、当然のごとくピッチング周波数が変動したものと考えられる。この時『むつ』の速力は、前者の場合 10.2 kt、後者が 18.07 kt で、その倍率は約 1.8 倍であった。ピッチング周波数には、気象・海象条件（風力、波浪、うねり、潮流など）が大きな影響を与えていると思われ、その影響を考慮すれば、速力とピッチング周波数の関係において相関があるとも考えられるが、今回の解析結果ではそれらを明確にすることはできなかった。なお、両試験において、ピッチング周波数として 0.18 Hz のピークが確認され、これはローリング周波数に見られたと同様に『むつ』固有の船体動揺によるものとの推測も成り立つが、この結果だけでは判断することはできない。

Table 8 主軸回転数に対する船速と動揺周波数の関係

試 験 名 称	運 航 状 態		動 揺 周 波 数 (H z)				
	回 転 数 (rpm)	船 速 (kt)	ローリング		ピッチング		
続航試験 (MCR)	194.5	18.07	0.07		0.18		
後進試験 (港内) *	99.0	10.2	0.08	0.11	0.09	0.12	0.18

*：港内速力による後進試験における前進安定航行時

5.2.2 軸馬力

軸馬力の揺らぎ成分の解析結果は Fig. 26(a)及び Fig. 26(f)に示した。

主軸回転数 99 rpm のとき 0.09 ~ 0.1 Hz に明瞭なピークを表し、この他に高調波と思われる 2 次 0.18 Hz、3 次 0.27 Hz に小さなピークを表した。また、主軸回転数 194.5 rpm の場合、軸馬力の揺らぎのピーク周波数は 0.04 ~ 0.06 Hz 及び 0.12 Hz であった。ローリングのピーク周波数 0.07 ~ 0.08 Hz と若干異なるが、両者のクロスパワースペクトルを求めると、主軸回転数 99 rpm の場合には 0.09 ~ 0.10 Hz に、194.5 rpm では 0.06 Hz と 0.09 ~ 0.10 Hz にその相関性を表した。

主軸回転数 99 rpm におけるローリング角度の最大値は ± 2.04 度で、このときの軸馬力変動は ± 136 PS であった。これは軸馬力計の最大指示値 (FS) に ± 1.12 % の変動を与える値である。194.5 rpm の MCR 条件では、ローリング角度の最大値は ± 1.17 度と前者の約 $1/2$ 、軸馬力変動は ± 310 PS で、指示計の FS に対し ± 2.6 % と約 2 倍になった。一般に、軸馬力は主軸回転数の 3 乗に比例するとされており、軸馬力変動の大きさもローリング角度の効果、回転数 (2 倍) との関係性を考慮すると、その影響の大きさを説明できる。

一方、ピッチングとの間には相関はほとんど見られなかった。

船体のローリングと主軸の回転は言わば同軸上にあるので、この間に相関が表れて当然と思われる。しかし、両者の揺らぎの中心周波数が若干異なっており、これを説明するには原子炉出力関連のパラメータの解析結果と照合する必要がある。すなわち、軸馬力の揺らぎ成分が、原子炉の動特性として固有のものなのかを見極める必要がある。

5.2.3 主軸回転数

主軸回転数については、今回の収録データの解析では 194.5 rpm の場合のみを行なったが、Fig. 26(d)に示すように、軸馬力と同様にローリングとの間に相関が表れた。また、ピッチングとの間にはほとんど相関性は表れなかった。

データを再生した範囲でのローリング角度最大値は約 ± 1.17 度で、このときの主軸回転数の変動は ± 0.92 rpm であった。これは FS に対し ± 0.46 % 程度の変動に相当する。主軸回転数が小さい場合、その影響はさらに少なくなるものと思われる。

前項の軸馬力と同様に、ローリングとは同軸上に生じる現象であるので相関を表して当然と言える。しかし、主軸回転数の揺らぎの中心周波数は 0.06 Hz であり、ローリングの中心周波数 0.07 ~ 0.08 Hz とは若干異なっている。これが単に計測上の測定誤差に入るのか、原子炉の特性上のものなのかを判定するには、軸馬力の場合と同様に原子炉出力関連のパラメータと照合する必要がある。

後に詳しく述べるが、主軸回転数 194.5 rpm において、原子炉に与えられる反応度には 0.06 Hz 近傍に明瞭な揺らぎが存在し、また、原子炉出力の微分値である起動率

には、 $0.04 \sim 0.07$ Hz及び 0.08 Hz近傍に揺らぎ成分が表れていた。

このことから、軸馬力及び主軸回転数の揺らぎは、船体動揺のみならず原子炉の動特性との関連性も高いものと考えられる。これは、他の試験条件について詳しく解析すれば、その関連が明確になると思われるが、今回のデータ解析では実施できなかった。

5.2.4 加圧器水位

加圧器水位への影響については、主軸回転数 194.5 rpmの条件のみ収録データの再生を行った。Fig. 26(g)に示すように、 $0.10 \sim 0.22$ Hzの間にいくつかのピークが見られ、加圧器内で冷却水が穏やかではあるが、複雑に波打つ状況を示している。この時のピッチング周波数は 0.18 Hzで、この他に 0.08 Hzにも小さなピークを有している。クロスパワスペクトルを求めると、 0.18 Hzを中心とするピッチング周波数に相関が表れ、この他のピークは消える。このことから、ピッチングによって起振された加圧器内の冷却水が、穏やかに波打っているものと思われる。

加圧器水位への影響は、主軸回転数 194.5 rpmの条件では、加圧器水位の変動は $\pm 1\%$ 弱であったが、加圧器と水の共振も考えられることから、他の運航状態での状況をさらに詳しく調べる必要があるものと思われる。

なお、原子炉1次系関連のパラメータの中では、この加圧器水位に対する影響が最も大きく表れた。

この他、加圧器の動作において水位と共に重要なパラメータである圧力に対しては、ほとんど影響が表れなかった。

5.2.5 反応度及び起動率

反応度及び起動率に関する収録データ解析は、主軸回転数 194.5 rpmの場合について行った。

反応度の揺らぎの成分は、Fig. 26(k)に示すように、大きく分けて2つの周波数帯域に表れた。その一つは、 0.06 Hzを中心とする帯域に明瞭なピークを表し、他の成分として、 0.18 Hz及び 0.22 Hzを中心とする帯域にやや小さなピークを表した。

周波数成分から考慮して、前者はローリングと相関を表すものと思われるが、ピークの中心周波数が若干異なっている。後者のピークは、原子炉格納容器に設置された加速度計(RPV-Z)及び原子炉設置区域の上甲板の加速度計(A4)信号と、ほぼ一致し相関性を表した(Fig. 26(k)、(1))。また、 0.18 Hzのピークは、ピッチング周波数とも一致する。

回転数 194.5 rpmの条件で、加速度計(RPV-Z、A4)の振幅が ± 0.05 G(ローリング角度 ± 1.17 度)であるのに対し、反応度への影響は ± 0.037 pcm(FSに対し 0.37%)程度であった。原子炉が出力運転状態にあるときは問題となら

ない値であるが、起動時あるいは零出力臨界状態などの低出力で炉物理試験を行う場合には、揺らぎとして考慮しなければならない。

一方、起動率の揺らぎは Fig. 26(j) に示すように 0.08 Hz 及び 0.18 Hz にピークが表れ、加速度計 A4 との間に相関性が認められた。これらのピーク周波数は、ローリング及びピッチングの周波数ともほぼ一致することから、起動率も船体動揺と相関を表すものと言えよう。この他に起動率の揺らぎには、0.04～0.07 Hz 近傍に広がる周波数帯域の成分が見られる。反応度の場合のように 0.06 Hz の明確なピークではないが、この成分が含まれているものと思われる。

主軸回転数 194.5 rpm において、加速度計 (A4) の振幅が $\pm 0.05 G$ (ローリング角度 ± 1.17 度) であるのに対し、起動率への影響は $\pm 0.002 DPM$ (FS に対し 0.02%) 程度の揺らぎを与えるものであった。反応度と同様に、起動時や極く低出力領域において考慮しなければならないが、出力運転時には問題とならない。

これら原子炉の直接情報と、軸馬力及び主軸回転数などの揺らぎの結果から、0.06 Hz のピークが原子炉の動特性に重要な関連を持っているものと考えられるが、船体運動との関連においては種々の推測が成立つ。

その一つは、船体運動に伴う種々のプラント状況の変化に追従するために、自己制御性が働き原子炉出力を一定に保つように働いているとの解釈である。原子炉の状態を直接示す反応度及び起動率などのパラメータには、一見種々の船体運動とかなり強い相関が表れるが、それは原子炉の正常なフィードバック作用によるもので、『むつ』の原子炉が種々の船体運動に十分追従する機能を有しているとする解釈である。

その一方で、4.1.3 項において述べたように、あらかじめ実施された解析結果では制御棒の固有振動数は、3.8 cpm (0.06 Hz に相当) であり、反応度の揺らぎと一致することも考慮する必要がある。船体動揺によって起振された制御棒の振動 (横揺れ) が、反応度に直接影響を及ぼしたとする解釈である。この場合、反応度及び起動率の応答の違いは、センサの中性子検出器の設置位置がそれぞれ異なることから、検出器と制御棒の位置関係が寄与しているとする推測も成立する。

ここで上記を説明するためには、他の原子炉の制御関連のパラメータについて見る必要がある。収録したデータの中で制御に直接関連するパラメータには、制御棒の位置信号と自動制御 ϵ 信号がある。また、一次冷却水の温度、流量、圧力等も原子炉出力に係わるパラメータで、これらが揺らいでいる可能性がある。

これらパラメータについては後述するが、制御棒の位置信号には動揺に応答する変動は全く表れなかったが、自動制御 ϵ 信号にはピッチング周波数と相関を持つ揺らぎが存在した。一次冷却水のパラメータとしては、一次冷却水平均温度及び一次冷却水ループ圧力がピッチング周波数に相関を持ち、流量には変動が認められなかった。動揺に応答があったとしても、ピッチングに対するもので、ここで議論している 0.06 Hz の揺らぎはほとん

どなかったと言って良い。

これらのことから、反応度に表れた 0.06 Hz の明確な揺らぎのピークは、ローリング周波数 $0.07\sim 0.08\text{ Hz}$ と制御棒の固有振動数 0.06 Hz が非常に近いことから、ローリングによって起振された制御棒の共振作用によるものではないかとの推測も成立つ。

これをさらに明確にするには、加速、減速、旋回などを含めた他の異なる運航状態における解析を行ない、検討を加えてゆく必要がある。この点、海上試運転での諸試験は、有用な船体運動のベースとなるものである。

5.2.6 制御棒位置及び自動制御 ϵ 信号

制御棒は、原子炉の運転中に炉心燃料領域から全引抜きされるグループと、中間位置で出力調整を行なうグループがある。前者は、たとえ船体運動によって位置が変動したとしても、よほど変化しない限り原子炉出力の変動には寄与しない。したがって、後者のグループがここでの対象となるが、動揺に応答する位置変動（上下動）は全くなかった。

一方、自動制御 ϵ 信号は、Fig. 26 (m)に示すように、主軸回転数 194.5 rpm において 0.08 、 0.12 、 0.18 Hz に揺らぎのピークを持っており、これはピッチング周波数と相関を持つものである。このときのピッチング角度は ± 0.38 度で、自動制御 ϵ 信号の変動は $\pm 0.23^\circ\text{C}$ （FSに対し $\pm 0.08\%$ ）程度であった。

両者とも、 0.06 Hz の揺らぎは観測されなかった。

この結果から見る限り、ローリングの影響は少ない。

5.2.7 一次冷却水に関するパラメータ

その他のパラメータとして重要なものに、原子炉出力に係わる情報として一次冷却水の温度、流量、圧力などがある。前述のように反応度に動揺の影響が表れ、さらに 0.06 Hz に揺らぎのピークを生じることから考慮すると、一次冷却水の温度、流量等が揺らぎを生じている可能性もある。

一次冷却水に関するデータ解析は、主軸回転数 194.5 rpm についてのみ行った。このうち、No.1ループ平均温度はFig. 26 (h)に示すように $0.08\sim 0.18\text{ Hz}$ にピークを有しており、また一次冷却水ループ圧力はFig. 26 (i)に示すように 0.18 Hz にピークを有し、共にピッチングに相関を持つものであった。

ピッチング角度 ± 0.38 度に対し、No.1ループ平均温度変動は $\pm 1.2^\circ\text{C}$ （FSに対し $\pm 0.2\%$ ）、また一次冷却水ループ圧力の変動は $\pm 0.1\text{ atG}$ （FSに対し $\pm 0.07\%$ ）程度の小さな値であった。

温度のデータについては、センサそのものの応答時間が遅いため十分でないという疑問があるので、ピッチングと相関を持つとする結果が得られても、先の反応度など原子炉情報の揺らぎを説明するデータとしては信頼性が低い。

この他、一次冷却水の流量に関するパラメータには、ほとんど影響は表れなかった。

5.3 過渡的動揺の影響まとめ

船体動揺に対する影響は、時系列データから見てもわかるように、いくつかのパラメータにかなり明瞭に現れることがわかった。

推進系統では、軸馬力及び主軸回転数の両信号にローリングの影響が強く現れた。主軸回転数194.5rpmのMCR条件では、ローリング角度 ± 1.17 度に対し、軸馬力変動は ± 310 PS(FSに対し $\pm 2.6\%$)であった。これら推進系統は、船体のローリングと同軸上にあるので相関性が大きく現れて当然であるが、推進系の揺らぎの中心周波数とローリングの中心周波数に若干差のあることが判明した。ローリングは主軸回転数(船速)に関係せず $0.07\sim 0.08$ Hzで一定であるが、推進系には、この他の揺らぎとして 0.06 Hzが観測された。

一方、原子炉関連のパラメータでは加圧器水位、一次冷却水平均温度、自動制御 ϵ 信号、一次冷却水ループ圧力などのパラメータに影響が現われ、ピッチングとの相関が認められた。特に、加圧器水位に対して最も明瞭に現れ、主軸回転数194.5rpmの条件(ピッチング角度: 0.38 度、同周波数: 0.18 Hz)で、加圧器水位の変動は $\pm 0.92\%$ であった。Na1ループ平均温度の変動は $\pm 0.2\%$ 、自動制御 ϵ 信号、一次冷却水ループ圧力の変動はFSに対し $\pm 0.1\%$ 程度であった。

また、原子炉の核的状況を直接表すパラメータである反応度、起動率については、ローリング及びピッチング共に相関性を示した。主軸回転数194.5rpmで(ローリング角度 ± 1.17 度)のとき、反応度への影響は ± 0.037 pcm(FSに対し 0.37%)程度であり、起動率への影響は ± 0.002 DPM(FSに対し 0.02%)程度であった。原子炉が出力運転状態にあるときは問題とならない値である。反応度及び起動率には、この他に 0.06 Hzの明瞭なピークが表れた。

これら推進系及び反応度などに表れた特有の揺らぎ 0.06 Hzは、制御棒固有振動解析結果と一致することから、その共振によるものとの推測も成立つと共に、原子炉動特性との関連でも重要な意味を持つ成分であると思われることから、加速、減速、旋回など他の異なる運航状態の解析を行ない、さらに検討を加えてゆく必要がある。

6. ま と め

原子力第一船「むつ」の海上試運転では、十数項目に及ぶ諸試験を実施したが、これと平行して試験時の操船等に係わる船体運動に伴う振動、動揺が原子炉プラントに与える影響を調査するための計測とデータの収録を行った。これはプラント相関試験と位置付けて、海上試運転における自主検査として実施した。この試験は、原子炉から推進系にいたる「むつ」の運転制御に係わる全系統の整合性を検証することを目的として、船体運動に伴う海上試運転時における船体振動及び船体動揺と原子炉プラントパラメータ挙動の相関性を調査するためのものである。

本報告書はプラント相関試験において計測、収録したプラントパラメータの一部を再生のうえ解析し、その結果を取りまとめたものである。

その結果、次の事柄について確認するとともに、興味ある知見が得られた。

(1) 船体振動の影響

- ・船舶の構造などによってきまる船体及び原子炉格納容器等の正確な固有振動数を確認することができた。
- ・原子炉設置区域において1687.5 c p mの振動を観測した。これは、同区域における固有の値であり、原子炉格納容器の固有振動と思われる。
- ・原子炉圧力容器からは、同容器の固有振動と思われる750 c p mの振動を観測した。
- ・プラントパラメータへの影響として、船体及び原子炉格納容器等の固有振動と同じ成分の振動数が観測されたが、プラントの運転状態に比べ1/1000程度の極めて小さな値であった。
- ・したがって、固有振動に起因するプラント挙動はほとんど無いものと言える。

(2) 船体動揺の影響

- ・ローリングは主軸回転数（船速）に関係せず0.07～0.08 Hzで一定であるが、ピッチングは回転数とともに上昇し、99 r p mの時は0.09、0.12 Hzにピークを有し、194.5 r p mのピーク位置は0.18 Hzで、0.09 Hzに対し2倍の周波数となった。
- ・主軸回転数、軸馬力など推進系統のパラメータに対しては、ローリングとの相関性が大きいが、この他の揺らぎとして0.06 Hzを観測した。
- ・加圧器水位は、ピッチングと相関性を表した。
- ・反応度、起動率など原子炉情報を直接表すパラメータは、ローリング及びピッチング共に相関性を表した。特に反応度には0.06 Hzの明瞭なピークが表れた。
- ・自動制御ε信号、一次冷却水ループ圧力などにピッチングとの相関性が見られた。
- ・また、船体動揺に対する影響の大きさは、軸馬力、主軸回転数の順にその影響が現れた。船体動揺のパラメータであるローリングと同軸上に起る事象であり、推進系に現

われる影響として当然の結果と言える。次いで、加圧器水位、反応度、No.1 ループ平均温度の順で、それぞれのパラメータへの影響を確認することができた。

ここで、推進系及び反応度などに表れた特有の揺らぎ0.06 Hzは、原子炉動特性との関連で重要な意味をもつ揺らぎ成分であると思われることから、加速、減速、急旋回などを含んだ他の異なる試験運航状態における解析を行ない、さらに検討を加えてゆく必要がある。

これらの知見を踏まえながら、今後、収録した膨大な計測データの解析を進め、その相関性を明らかにしてゆくことにより、原子炉から推進系にいたる制御系全系統の整合性を検証することができよう。

また、本報告で述べた事象は、陸上の原子炉プラントにも共通する課題を多く含んでいるものと言える。陸上炉の場合は、地震を具体的な振動源として、機器や構造物の設計がなされているが、地震の持続時間はたかだか数分間であり、設計は個々の機器が対象となっている。これに対し、船用炉はプラント全体が常時動くものであり、機器・構造物にとってより厳しい側にあると言える。原子力船の振動・動揺に関する試験は、プラント全体を動く試験体として評価できる唯一の方法であることから、本試験で得られた結果は陸上プラントにとっても大いに参考になるものと考えられる。

謝 辞

本試験の実施と報告書をまとめるにあたり、監督官庁を始め「むつ」の出力上昇試験及び海上試運転に係わる多くの方々に多大な御協力を頂いた。

特に監督官庁である運輸省、科学技術庁の関係の方々及び日本海事協会の関係の方々には、計画の段階から懇切なる御指導、御協力を賜わった。運輸省海上技術安全局次席船舶検査官佐藤直樹氏、同船舶検査官宮村弘明氏、運輸省青森海運支局船舶検査長小玉博文氏、科学技術庁原子炉施設検査室長井上義夫氏、同原子炉施設検査室飯塚裕久氏、同原子力安全局原子炉規制課梶田啓悟氏、日本海事協会機関部船舶検査員岩切博氏、同船体部船舶検査員小岩敏郎氏の諸兄には、実際に乗船のうえ試験に当たっての御指導を仰ぐと共に、種々の御便宜を図って頂いた。

東海研究所高温工学部次長若山直昭氏、同研究所原子炉計測研究室長荒克之氏には、本試験の計画段階から、試験内容についての御検討と適切なるコメントを頂いた。

また、「むつ」船長軍司吉樹氏、機関長渡辺卓嗣氏、一等航海士吉本誠義氏、一等機関士戸田克美氏、原子炉主任技術者東興一氏を始めとする乗組員の諸兄には、諸般の厳しい条件のなか試験のため運航上の御便宜を図って頂くと共に、データ収録にあたって適切なアドバイスと御協力を頂いた。

られる影響として当然の結果と言える。次いで、加圧器水位、反応度、No.1 ループ平均温度の順で、それぞれのパラメータへの影響を確認することができた。

ここで、推進系及び反応度などに表れた特有の揺らぎ0.06 Hzは、原子炉動特性との関連で重要な意味をもつ揺らぎ成分であると思われることから、加速、減速、急旋回などを含んだ他の異なる試験運航状態における解析を行ない、さらに検討を加えてゆく必要がある。

これらの知見を踏まえながら、今後、収録した膨大な計測データの解析を進め、その相関性を明らかにしてゆくことにより、原子炉から推進系にいたる制御系全系統の整合性を検証することができよう。

また、本報告で述べた事象は、陸上の原子炉プラントにも共通する課題を多く含んでいるものと言える。陸上炉の場合は、地震を具体的な振動源として、機器や構造物の設計がなされているが、地震の持続時間はたかだか数分間であり、設計は個々の機器が対象となっている。これに対し、船用炉はプラント全体が常時動くものであり、機器・構造物にとってより厳しい側にあると言える。原子力船の振動・動揺に関する試験は、プラント全体を動く試験体として評価できる唯一の方法であることから、本試験で得られた結果は陸上プラントにとっても大いに参考になるものと考えられる。

謝 辞

本試験の実施と報告書をまとめるにあたり、監督官庁を始め「むつ」の出力上昇試験及び海上試運転に係わる多くの方々に多大な御協力を頂いた。

特に監督官庁である運輸省、科学技術庁の関係の方々及び日本海事協会の関係の方々には、計画の段階から懇切なる御指導、御協力を賜わった。運輸省海上技術安全局次席船舶検査官佐藤直樹氏、同船舶検査官宮村弘明氏、運輸省青森海運支局船舶検査長小玉博文氏、科学技術庁原子炉施設検査室長井上義夫氏、同原子炉施設検査室飯塚裕久氏、同原子力安全局原子炉規制課梶田啓悟氏、日本海事協会機関部船舶検査員岩切博氏、同船体部船舶検査員小岩敏郎氏の諸兄には、実際に乗船のうえ試験に当たっての御指導を仰ぐと共に、種々の御便宜を図って頂いた。

東海研究所高温工学部次長若山直昭氏、同研究所原子炉計測研究室長荒克之氏には、本試験の計画段階から、試験内容についての御検討と適切なるコメントを頂いた。

また、「むつ」船長軍司吉樹氏、機関長渡辺卓嗣氏、一等航海士吉本誠義氏、一等機関士戸田克美氏、原子炉主任技術者東興一氏を始めとする乗組員の諸兄には、諸般の厳しい条件のなか試験のため運航上の御便宜を図って頂くと共に、データ収録にあたって適切なアドバイスと御協力を頂いた。

むつ事業所原子力船技術部長八巻治恵氏、同試験課長落合政昭氏、同試験課京谷正彦氏を始めとする原子力船技術部の諸兄には、データ収録に係わるアドバイスと御便宜を図って頂いた。

さらに、石川島播磨重工業（株）船舶海洋事業本部艦船事業部重松祥三氏、同北島康寿氏、同山口章氏を始めとする同社の関係諸兄には、試験用計測機器の構成とその手配などに御協力を頂くと共に、実際に試験の一部を御担当頂いた。

御協力頂いた諸兄に深甚なる感謝の意を表します。

文 献

- (1) ISO International Standard: Mechanical vibration and shock - Guidelines for the overall evaluation of vibration in merchant ships, ISO 6954-1984(E)
- (2) 山崎弘司、北村敏勝、水島俊彦、角田恒巳、内藤彰、中原健、富永峰男、神谷栄世、工藤隆広、中村和義：原子力第一船海上試運転報告書、JAERI-M 91-212（1991年11月）
- (3) 森村正直、山崎弘郎編集：センサ工学、朝倉書店（1982年10月）
- (4) 片岡照栄、柴田幸男、高橋清、山崎弘郎共編：センサハンドブック、培風館（昭和61年5月）
- (5) 川口千代二、荒克之著：原子炉の計測、幸書房（昭和53年11月）
- (6) 上田敏晴、神代哲哉、山下忠雄、牧岡俊之、福井政博、喜多貞三郎、工藤敏夫、尾島正：PWR形原子炉核計装用同軸ケーブルの開発（RG-149/U相当低雑音耐熱三重同軸ケーブルの諸特性）、大日本電線時報、第62号（昭和52年5月）
- (7) 住田健二、加藤利明、古川友三、若山直昭：原子力計測（増補改定版）、pp 94~95、日刊工業新聞社（昭和47年3月）
- (8) 技術資料〔電子式圧力伝送器〕：MI Y20-110B、横河電機（株）（1979年1月）
- (9) 田中義美、京谷正彦、徳永貴元、森拓也：船体動揺による原子炉出力への影響（出力上昇試験航海時の炉雑音解析）、JAERI-M 91-021（1991年3月）

むつ事業所原子力船技術部長八巻治恵氏、同試験課長落合政昭氏、同試験課京谷正彦氏を始めとする原子力船技術部の諸兄には、データ収録に係わるアドバイスと御便宜を図って頂いた。

さらに、石川島播磨重工業（株）船舶海洋事業本部艦船事業部重松祥三氏、同北島康寿氏、同山口章氏を始めとする同社の関係諸兄には、試験用計測機器の構成とその手配などに御協力を頂くと共に、実際に試験の一部を御担当頂いた。

御協力頂いた諸兄に深甚なる感謝の意を表します。

文 献

- (1) ISO International Standard: Mechanical vibration and shock - Guidelines for the overall evaluation of vibration in merchant ships, ISO 6954-1984(E)
- (2) 山崎弘司、北村敏勝、水島俊彦、角田恒巳、内藤彰、中原健、富永峰男、神谷栄世、工藤隆広、中村和義：原子力第一船海上試運転報告書、JAERI-M 91-212（1991年11月）
- (3) 森村正直、山崎弘郎編集：センサ工学、朝倉書店（1982年10月）
- (4) 片岡照栄、柴田幸男、高橋清、山崎弘郎共編：センサハンドブック、培風館（昭和61年5月）
- (5) 川口千代二、荒克之著：原子炉の計測、幸書房（昭和53年11月）
- (6) 上田敏晴、神代哲哉、山下忠雄、牧岡俊之、福井政博、喜多貞三郎、工藤敏夫、尾島正：PWR形原子炉核計装用同軸ケーブルの開発（RG-149/U相当低雑音耐熱三重同軸ケーブルの諸特性）、大日本電線時報、第62号（昭和52年5月）
- (7) 住田健二、加藤利明、古川友三、若山直昭：原子力計測（増補改定版）、pp 94~95、日刊工業新聞社（昭和47年3月）
- (8) 技術資料〔電子式圧力伝送器〕：MI Y20-110B、横河電機（株）（1979年1月）
- (9) 田中義美、京谷正彦、徳永貴元、森拓也：船体動揺による原子炉出力への影響（出力上昇試験航海時の炉雑音解析）、JAERI-M 91-021（1991年3月）