

# 安全快適な航海を目指して

## 計測コンテナについて

For safer, more comfortable voyages  
A measurement container system

名誉教授(工学研究院) 平山 次清

Tsugukiyo Hirayama, Professor Emeritus, Faculty of Engineering

我が国の輸出入は船舶と航空機が担っています。その中で99%以上の重量が船舶によるものですから船舶の効率と同時に安全性を追求する重要性は言うまでもありません。空気による浮力の900倍近い水の浮力を利用する船舶は飛行機に比べて大量の荷物を比較的ゆっくり運ぶのに適しています。大敵は荒天です。荒天中の実態は実際に計測する以外にありません。その解析を通してより進化した船の設計が可能となります。航海中の船の実態を解明し、より安全で快適・経済的な船の設計・運航に役立つ目的で当時の産学連携の一大プロジェクトが造船研究協会第125研究部会(SR125)主導で昭和46年(1971)から49(1974)年にかけて実施されました。



Japan imports and exports goods by ship and aircraft. Since more than 99% of these goods (by weight) travel onboard ships, the need for safety and efficiency is clear. Ships rely on the buoyancy of water, which is nearly 900 times that of air. They are ideal for carrying large amounts of cargo by relatively slow speed, compared to aircraft. However, bad weather raises various issues. Ship performances during bad weather can only be identified through measurement. Analyzing the results of measurements makes it possible to design better ships. To clarify the conditions onboard a ship during a voyage and to apply the results to design and operate safer, more comfortable, more economical ships, a major joint industry-university project studied this topic from 1971 to 1974, based on the initiative of SR125—Research Group 125 of the Shipbuilding Research Association of Japan.

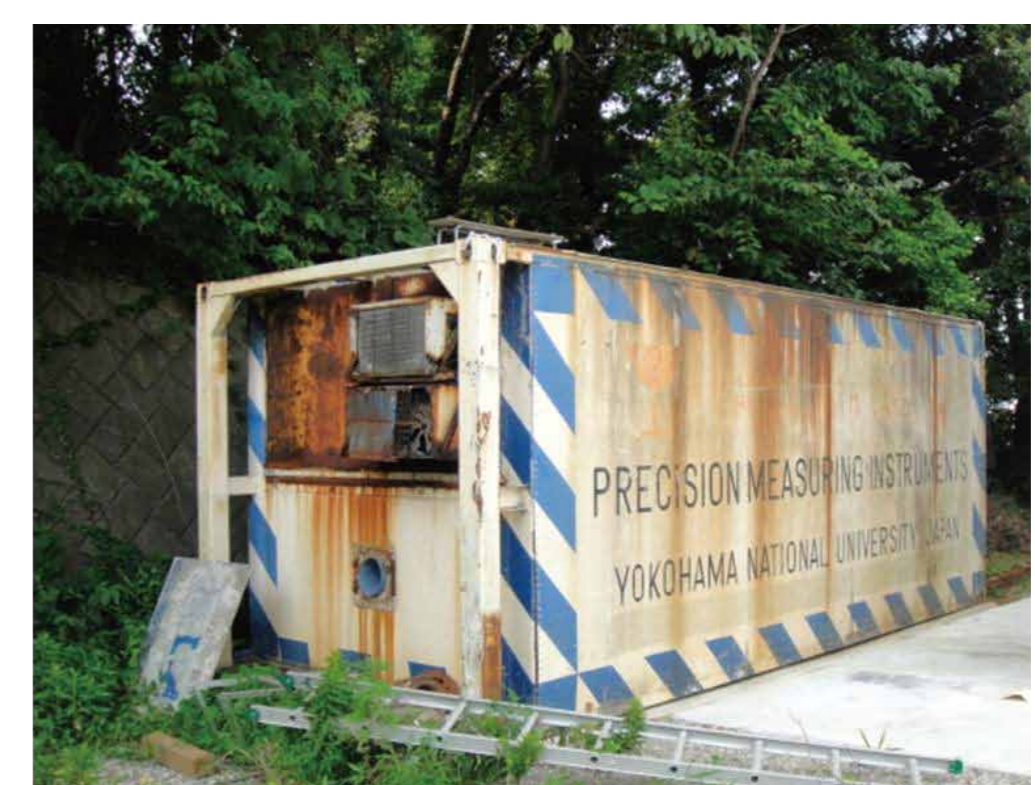
積み込み中の計測コンテナ(SR125)の文字が見える  
Hung-upped "measurement container" to a container ship. Letters SR125 can be seen.

### → コンテナについて Container details

実物は長さ\*幅\*高さ=6.1\*2.5\*2.5(単位m)の船用コンテナを改造したもので、内部に計測器用の棚や空調設備を取り付け船に積み、船体運動・加速度などをブリッジから自動遠隔計測しました。現在は理工学部・海空制御システム研究室横に保存されています。昭和46年(1971年)に作られ昭和49年(1974)まで7回にわたって日本—アメリカ、日本—ヨーロッパ間のコンテナ船(榛名丸や鎌倉丸など)計測航海で使用されました。またその後もコンテナ船以外の船やアマゾンに行くパルプ工場バージに積み込まれての航海計測などにも使われました。

なお日本船主で初めてのコンテナ船(昭和43年、1968年)が展示模型の“箱根丸”で、全長187m、6m長さコンテナで752個積みでしたが、今日では全長400mで18000個積みといった巨大コンテナ船も出現しようとしています。こういった発展にも実船計測は大いに役立っています。

A marine container 6.1 m long, 2.5 m wide, and 2.5 m high was equipped with shelves to store measuring instruments and air conditioning facilities and converted into an automated telemetry measurement system. The container was loaded onboard a ship to automatically measure, from the bridge, parameters such as ship motions and accelerations. Today, this container is in storage beside the Sea and Air Control System Laboratory, School of Engineering Sciences. Built in 1971, it has been used seven times through 1974 on container ships (including the Haruna maru and Kamakura maru) on voyages between Japan and the United States and between Japan and Europe. Later, it was also used to measure voyage conditions on ships other than container ships, including a pulp mill barge sailing to the Amazon. The first Japanese-owned container ship was the Hakone maru (1968). A model is shown here. Measuring 187 m in length, it could carry 752 six meter-long containers. The ships being built today measure 400 m in length and can carry up to 18,000 containers of 6 m in length. Earlier measurements made on actual seagoing vessels contributed significantly to the technology used to build these ships.



補修し保存されている計測コンテナ(本学キャンパス内)  
Repaired and preserved measurement container (inside YNU-campus).



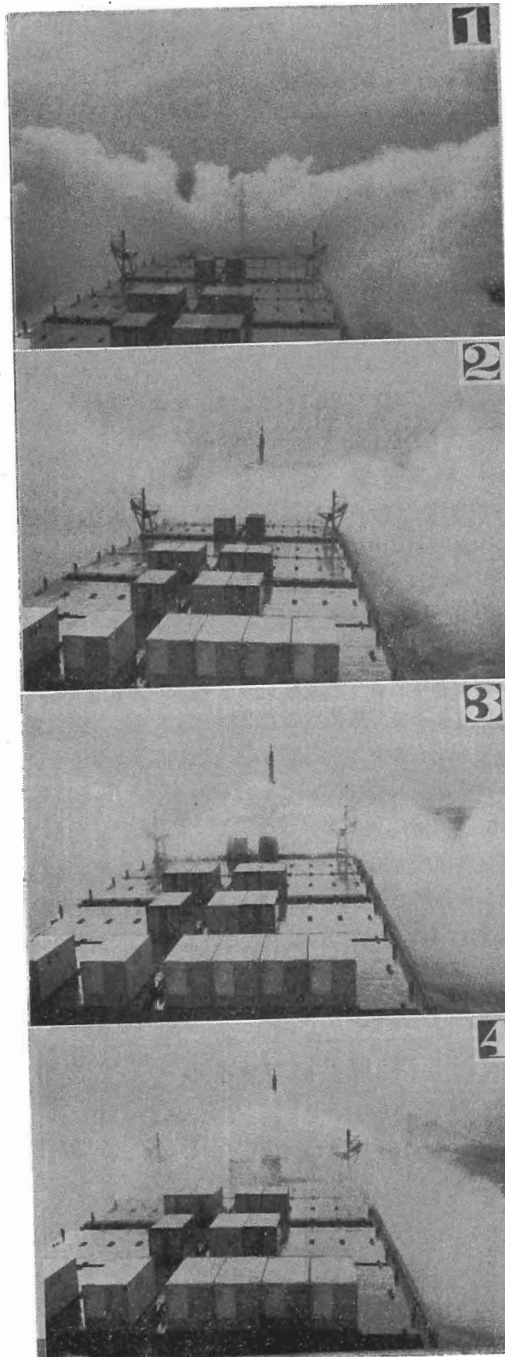




# 実船試験用計測コンテナシステム

竹 沢 誠 二\*

## I 計 測 装 置



荒天下航行状況 (KR) 連続写真

\*横浜国立大学工学部造船工学科

### 1. ま え が き

日本造船研究協会の第125研究部会 (SR-125) では“超高速コンテナ船の耐航性に関する研究”を昭和46年度から49年度までの4カ年計画で研究を継続実施中である。その主目的の一つとして、波浪中船体運動に関する理論計算値および水槽試験結果と実船実測値の比較検討が挙げられている。従って、特に実船試験小委員会が設けられ、毎年度相当な予算と工数を遣い大規模な実船計測を実施している。125部会では研究部会発足時から、本格的実船計測の継続実施を計画していたので、新しいアイデアを採り入れた専用の計測システムの開発、製作が行なわれた。このシステムは年度を経るにつれて充実して来ているが、製作後約3カ年経過した現在、システムとしてほぼ完成し、また、実用時の成績もよいので、ここにその概要を紹介することにした。本稿が、今後の同様な装置の計画時に参考になれば幸いである。

なお、本システムは共同利用の計測装置であり、ユーザーになるであろうと思われる関係者が集って実船試験小委員会を構成し、その議を経て製作された。完成後の運用も共同利用の装置としての目的を果しており、年度ごとに異なる造船所が利用して実船計測を実施している。

筆者は纏め役としての小委員長を務めさせて頂いたので、委員会の成果を紹介する立場から本稿を執筆する事になった。各機器の詳細はさておき、主としてどのような思考課程を経て計測システムとして纏め上げたかについて記述する。

SR-125部会の前身であるSR-108部会で行なつた実船試験に関しては、本誌昭和47年2月号に“PSW航路コンテナ船の波浪中船体運動に関する実船試験”と題した拙文を掲載して頂いたが、本稿はその続編とも言うべきものである。

### 2. 経 緯

SR-125部会の前身とも言うべきSR-108部会<sup>1)</sup>(高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究部会)では、昭和45年度の冬季(昭和45年11月~46年2月)に実船観測と称して、商業航海中のPSW航路(Pacific South West, 日本⇄ロスアンジェルス, サンフランシスコ)のコンテナ船6隻に便乗して、延9往復航海にわたる実船計測<sup>2)</sup>を行なつた。

このときは、大学(東京大学, 横浜国立大学, 大阪大学, 大阪府立大学), 研究所(船舶技術研究所), 造船所(日立造船, 住友重機, 日本鋼管, 川崎重工, 三菱重工, 石川島播磨重工, 三井造船)が参加し、上述のように1シーズン中に1航路で9往復航海のデータを収集できたので、この意味からはそれまでにない価値ある実船試験であつたと考えられる。一方、使用した計測器は各チームとも手持ちのものであつたので、計測装置に統一がなく、また十分な性能のものばかりとは言えなかつた。その反省として、本格的な実船試験用計測装置の開発製作が要望された。

このような状況下にSR-125の実船試験小委員会での計測装置の計画が始まつたので、SR-108の実船計測メンバーに参加いただき、その経験を十分に反映して、以下に述べる斬新な計測コンテナシステムの構想が生れ、さらに現物が誕生した。

計測コンテナシステムは計測装置と解析装置に二分されるが、計測装置の製作は主として昭和46年度に行なわれ、昭和47, 48年度に内容の充実が実施された。解析装置は昭和47年度に製作されたが、48年度にメモリーの増設を行なつた。

SR-125では、この波浪中実船試験専用計測コンテナシステムを使用して実船試験を実施している。被実験船の希望を募り、その船を建造した造船所に計測担当造船所になつてもらつているが、現在までの使用実績は下記の通りである。( )内に計測担当造船所、協力船主名を記す。昭和49年度は予定である。なお、計測はいずれも商業航海に便乗して行なわれており、また冬季の最も荒れる時期に実施している。

昭和46年度: K丸, ヨーロッパ航路<sup>3)4)</sup>

(三菱重工, 横浜国大; 日本郵船)

昭和47年度: JA号, ニューヨーク航路<sup>3)4)</sup>

(石川島播磨重工; ジャパンライン)

SA号, 太平洋南西岸航路<sup>3)4)</sup>(PSW)

(川崎重工; 川崎汽船)

昭和48年度: HT丸, 太平洋北西岸航路<sup>4)</sup>(PNW)

(三菱重工, 東大; 昭和海運)

NJ丸, ニューヨーク航路<sup>4)</sup>

(三井造船, 九大; 商船三井)

昭和49年度: HI丸, 太平洋北西岸航路(PNW)

(日本鋼管, 阪大, 阪府大; 日本郵船)

HI丸, 太平洋北西岸航路(PNW)

(横浜国大, 日本鋼管; 日本郵船)

本実船計測の最終年度である昭和49年度の計測は、有終の美を飾るべく、もつとも荒れるPNW航路

(Pacific North West, 日本⇄シアトル, バンクーバー)における同一船による二往復航海にわたる連続計測を実施することになっており、典型的な荒天航行時のデータが収集されるであろうことが期待されている。

### 3. 計測コンテナ方式の導入

一般商船での波浪中実船試験は商業航海に便乗して実施するのが通例になつている。特殊な船舶を除くと、波浪中試験のための実験航海をすることは経費との関連から不可能に近い。従つて、被実験船の商業スケジュールの中で計測装置の搬入、取付け、取外しを実施せねばならない。特にコンテナ船では、運航スケジュールを厳守せねばならないので、国内回航の短期間中に計測装置の据付け、配線を完了せねばならないが、この期間は通常3~4日、長くても1週間以内である。

一方、計測システムの主要部を構成する増幅器、記録器などを波浪中実船試験用として特注することは得策ではないので、市販品の中から適当なものを選択することになる。したがつて、個々の計測器の設置は簡便でない場合が多いので、多数の計測対象を取り上げられないことになる。前述のSR-108の実船計測では、各チームの記録チャンネル数は4~7である。内地回航期間にこれ以上の計測要素数の準備をすることは、手持ちの既存の計測器を用いる場合には、困難であることを端的に示している。

本格的な実船計測を考えると、純粋な船体運動のみを考えても6要素であるから、20要素程度の計測項目が直ちに挙げられる。このように計測要素が増してくると、設置面積も大となり一室を計測室として借り上げなければならず、また場合によっては若干の改造工事も必要になる。ところが、最新のコンテナ船などでは自動化に伴ない居室などの数が著しく減つており、たんなる計測室の借り上げさえ困難になりつつある。

このような大規模実船試験実施上の難点を一挙に解決する方策として、計測装置を内蔵した完成された計測室を被実験船にそのままそつくり積み込む方法があることに気がつき、たまたま対象船がコンテナ船であることから、筆者は標準型のコンテナの内部に計測装置一式を装備した“計測コンテナ”なる物の製作を提案した。断わるまでもないことであるが、計測コンテナの積み込み、積み出しは普通コンテナと全く同様に専用クレーンでワンタッチで行なえる。すなわち、計測室の据付までがワンタッチで完了することになり、けだし画期的なアイデアであると自画自賛している次第である。

計画当初は船用コンテナおよびコンテナ船の事情にう

とく、今考えると珍案とも思えることを真剣に考えた。すなわち、コンテナを文字通り計測室とする案で、計測員は少なくとも昼間は計測コンテナ内で仕事をす。したがって、計測コンテナの積載場所はブリッジより前の最上段とし、コンテナには窓をつけ、計測員は窓から外界状況を見ながら計測に従事する。荒れたときには居住区であるブリッジに帰れないであろうから、計測コンテナ内にはベッドも備えておく。といったような構想である。

このような案はコンテナ船の荒天航行状況を全く知らない者が考える滑稽とも思われるような思いつきであることが、SR-108の実船計測の体験から認識できた。つまり、計測コンテナ方式を実用化するためには次の(1)の条件を満足し、(2)、(3)の点に留意せねばならないことが判明した。

- (1) 計測コンテナ内の計測装置は無人運転を原則とし、記録用磁気テープの交換、あるいは整備のときにのみ人が出入する。安全法規上からも本件が要求されることが後に判った。
- (2) 計測コンテナの積載場所は屋外でも可であるが、その場合は船橋より船尾よりにならないと、コンテナへの出入が不可能になような状況がしばしばある。
- (3) 無人システムにするので、積載場所はブリッジから離れていてもよく、外地でおろさないで済む場所、すなわち、艙内の最下段、あるいは船橋甲板上の最下段が最適である。

以上のような経過をたどって、計測コンテナシステムの構想が固まり、種々の検討の結果として Fig. 1 に示す

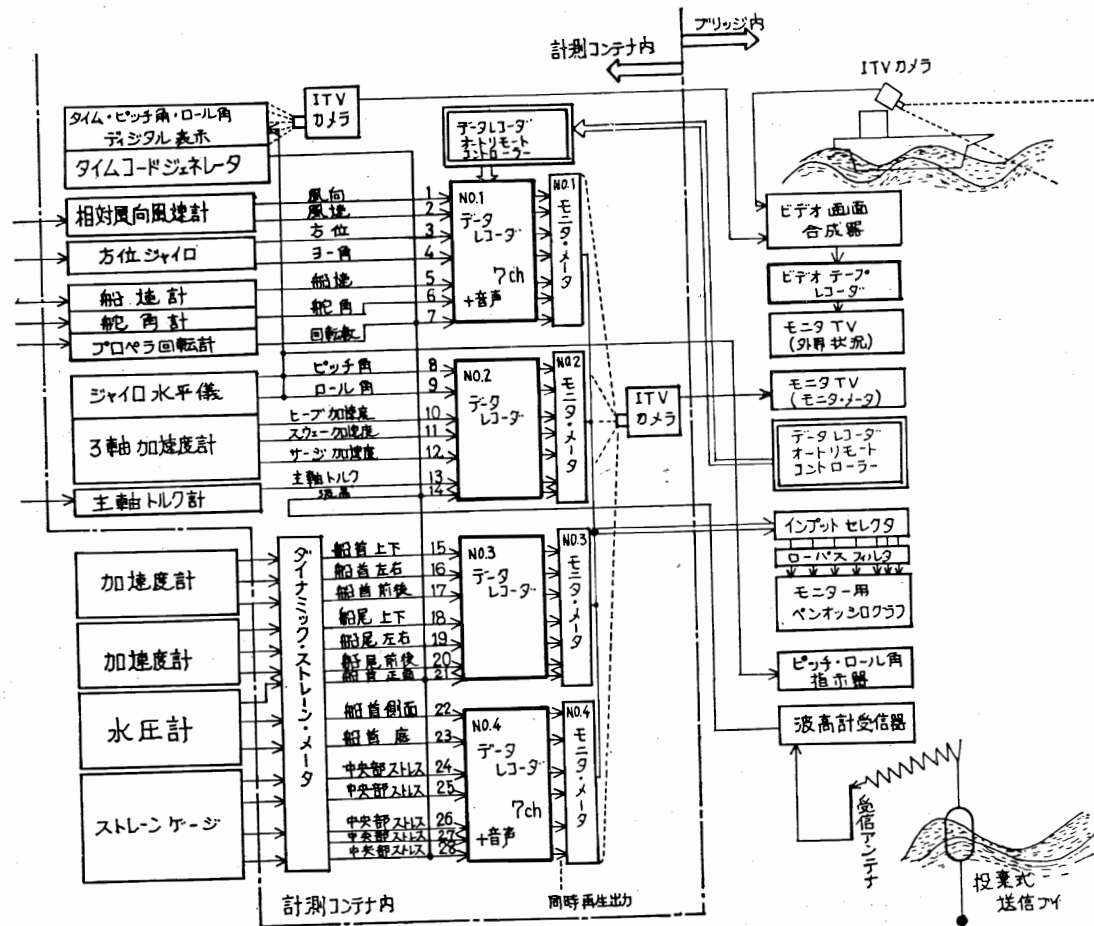


Fig. 1 計測コンテナシステムの計測装置

(データレコーダチャンネルの使用法は任意で、ここでは一例を示した.)

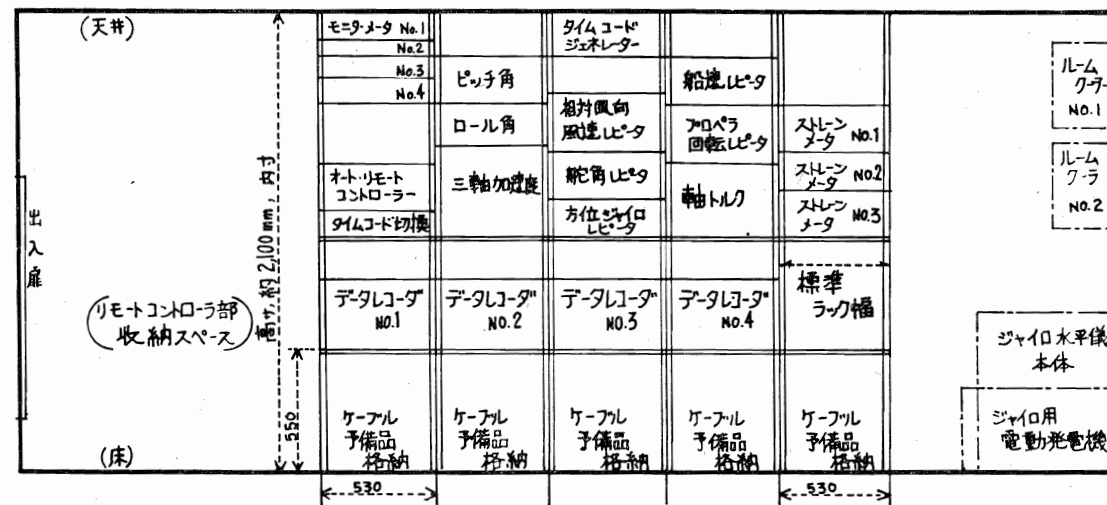
したようなブロックダイアグラムのシステムを製作することになった。

標準サイズの船用コンテナは 20'×8'×8' と 40'×8'×8' の 2 種類があるが、計測コンテナ本体内部には計測器のみを収納すればよいことになり、20 フィート型でスペース的には充分であるので、20'×8'×8' の物を計測コンテナ本体として採用することにした。船用コンテナには規格品として冷凍コンテナなる種類があり、これは外壁が断熱壁であり、計測コンテナ用の空調機設置に便なる冷凍機の取付スペースもある。またこれの積載位置

には、本船側に計測コンテナの電源として使用に適している冷凍機用電源コンセントが用意されている。

そこで、計測コンテナ本体には 20' の標準型冷凍コンテナを改造して使用することにした。内部の配置を Fig. 2 に示したが、標準ラックサイズに統一して製作された各種計測器が、標準ラックサイズの棚に収納されている。なお、冷暖房可能な家庭用ウィンド型クーラー 2 台を、冷凍機設置スペースを利用して取り付けてあり、計測コンテナ内の温度をほぼ 20°C に保つようにしてある。この電源には冷凍機用電源 AC, 220 V, 3φ,

側面図 (A-A断面)



平面図

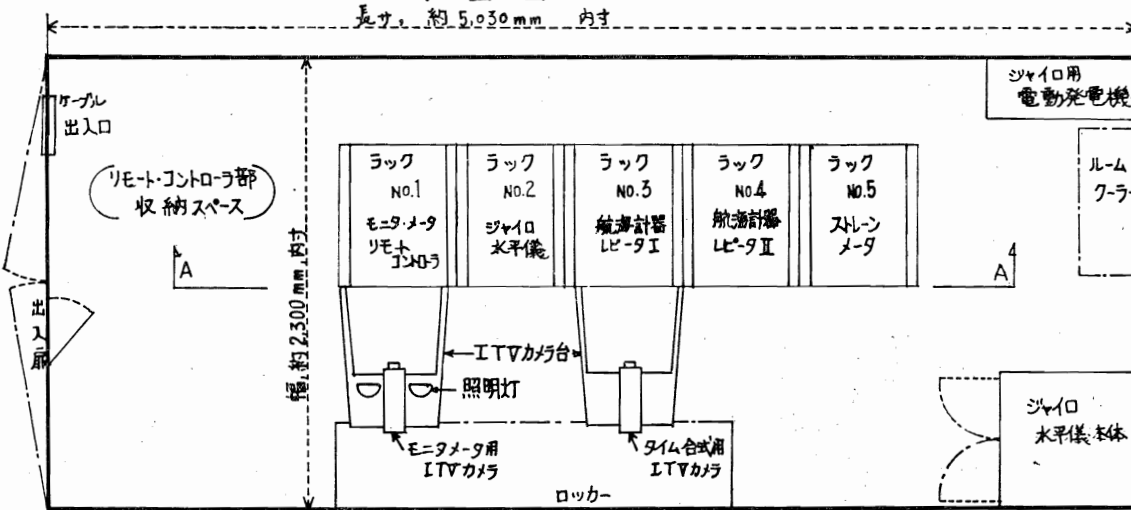


Fig. 2 計測コンテナ本体内配置図

(ラック棚内の計測器の配置は固定されていない。ここには一例を示した.)



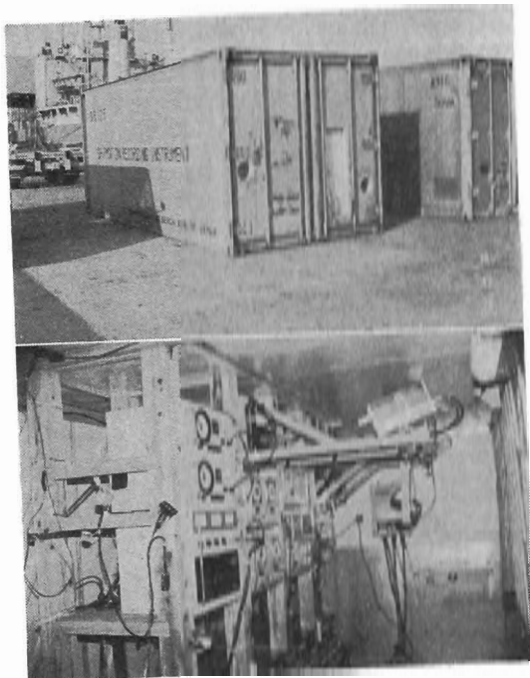


Photo 1 計測コンテナ本体  
外観と内部状況

60 Hz がそのまま利用されている。常時運転は1台で、1台は予備であるが、使用実績は良く、冬季のヨーロッパ航路やニューヨーク航路のように、酷暑のパナマを経て酷寒の地に至るような場合でもコンテナ内の温度を所期の値に保持できている。コンテナ内への品物の搬入搬出はコンテナ本来の全開扉を使用するが、日常の出入のために小型の出入口を附加した。Photo 1 に計測コンテナ本体の外観と内部状況を示したが、外観は普通のコンテナとほぼ同じである。

計測コンテナ本体への電源供給は上述の AC 220 V の冷凍機用ケーブルですべて賄われる。この電源をコンテナ内で AC 100 V に落とし、計測器用電源としている。リモートコントローラ部と計測コンテナ本体は約 10 本の専用ケーブルで接続するが、この他に検出器と計測コンテナ本体間の接続ケーブルが検出器の数だけ必要である。

#### 4. 記録方式の検討

先に SR-108 の実船計測の経験から、本格的な計測システムの開発が要望されたことを記したが、実はその中には専用解析装置の製作要求が含まれている。SR-108 の計測データは各チームともアナログデータレコーダにて記録したが、得られたアナログ記録は各チームが

使用可能であったデータ処理装置およびデジタル計算機によつてスペクトル解析および両振幅のヒストグラム計算が実施された。ところが、この解析には各チームとも実船計測そのものよりも工数を要した。一方、苦勞して収集してまでも解析されない記録は全く無価値であるから、本格的計測システムでは能率よく解析できる専用解析装置をも含めることが要望されたわけである。

計測システムとして一次的な解析装置まで含めると、その解析整理の方法との関連から、最適な記録方式が逆に決まる。波浪中実船試験で得られる記録は、どの現象も動的現象であり、また不規則時系列である。ピッチ、ロールなどの基本的な船体運動および船上のある位置での上下加速度などの二次的な船体運動などでは、その変動成分のみが主たる解析対象であるに対し、プロペラ回転数、主軸トルクなど推進性能関係の現象は、平均値のレベル（直流的成分）が主たる測定対象で、変動成分（交流的成分）は副次的解析対象とされているが、本システムでは適当な直流電圧を加えられた記録電圧範囲内に変動成分をできるだけ正確に記録する方式を採用している。

また、第1次の解析整理の方法としては、理論計算値あるいは水槽実験値との比較検討を考へるときには、いわゆる短期の解析となり、スペクトラム解析あるいは両振幅の頻度分布解析、さらには二現象間の周波数伝達関数、あるいはコーヒレンシーの解析が不可欠なものとなる。これに対しいわゆる長期の解析をする場合には、長期間での最大値や、あるレベルを越える頻度分布などが対象になり、このような長期特性を直接測定するような方式では、短期の特性は求められない。しかし、短期特性の積算として長期特性に換算可能であるので、本システムでは短期特性の計測に便する時系列の連続記録方式を採用している。

測定現象の周波数は、実船計測では一般的に極めて低く、計測器の性能が通常の意味での周波数特性上問題になることはないが、長時間記録時の安定性に注意せねばならない。しかし、一方では波浪衝撃圧の測定などでは 100 Hz オーダーの現象があるので、この程度の周波数特性も確保できる方式でなければならない。

測定データの電算機による数値解析を前提とする場合、動的現象の連続記録方式としては、アナログデータレコーダを採用するか、デジタルデータレコーダを採用するかが第1の問題点となる。ペンオシロあるいは直立式電磁オシロによる記録は電算機処理とは直結できないので、サブのモニター記録としての役しか果たせない。従つて主記録方式としては論外である。アナログ

データレコーダは 4 ch, 7 ch, 14 ch などの国際規格があり、それに基づいた多種多様な市販品があり、簡便な記録器として最近広く普及している。これに対して、デジタルデータレコーダは、30 ch 程度の多チャンネル型のものが多く、1台で多くの計測要素を記録できることが特色になつている。アナログデータレコーダの出力は  $\pm 1 V$  と規格化されており、それにマッチしたアナログ・デジタル変換器を含むデータ処理装置がカタログ品として多数市販されており、任意のデジタルコンピュータへの入力が容易に可能である。一方、デジタルデータレコーダはデジタルコンピュータと1対1の対応しかとれていないのが普通であり、また多チャンネルのデータが並列記録されているため、データの取捨選択もアナログデータレコーダのように簡単ではない。このようなことから同じような多量なデータを、固定された比較的簡単な解析方法で全部計算してしまうような場合にデジタルデータレコーダは向いていと言えよう。

ところが、本計測では多量のデータを集めておき、そのデータのある部分にはある複雑な解析方式を適用し、ある部分には簡単な解析を多量に行なう。また計測対象、解析方法も一定不変ではなく、実測年度ごとに変る部分も出て来る可能性がある。このような実状を考慮し、汎用性に富み、記録の臨機応変な活用が可能なアナログデータ記録方式の採用に踏み切つた。

具体的にはフィリップス製の ANA-LOG-7 (7チャンネル) を4台使用している。本器の採用理由は下記の通りであるが、外寸その他が全く同じで 14 ch の ANA-LOG 14 がその後発売されているが、現在ならばそれを採用したであろう。また他のメーカー品でも現在では下記の条件を満足するような品種がある。

- (1) テープ装填方式が独特のカートリッジ式であるため、ワンタッチでテープ交換可能であり、荒天時実船試験用として最適である。
- (2) 標準品で12時間の長時間記録が可能である。1回の計測時間を30分とし、4時間ごとに定時計測をするとしても、4日に1回のテープ交換で済むことになる。なお当時の普通のアナログデータレコーダの記録時間は3時間程度であつた。
- (3) 電源周波数に無関係である。船上電話は 60 Hz であるが、陸上での解析時には 50 Hz 地区で使用することが多い。アナログ7は駆動モータがサーボモータであるため、電源周波数を選ばない。
- (4) 外寸が標準ラックサイズになつている。
- (5) 可変速比が大（最高 32:1）で、解析時の高速

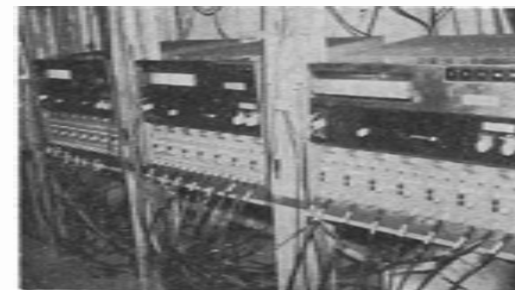


Photo 2 アナログデータレコーダの装置状況

再生に便である。

(6) ヘッドがフェライトであり長寿命である。

データレコーダの設置状況を Photo 2 として示した。

#### 5. 無人計測記録

本計測システムの運用は船員でなく、便乗者である計測員によつて行なわれる。しかも、この計測員は実船計測の専門家ではなく、造船所の設計技術者とか大学研究所の研究者が航海体験を兼ねて臨時に乗船する予定であるから、船酔いには全く弱いことが予想される。一方、申すまでもなく船酔いを起すような荒天時こそ、波浪中実船試験の意義は大であるから、計測員が不在でもデータが収集できる方式でなければならない。また、実船計測では一定時間（4～6時間）ごとに約30～60分の記録を行なう場合が多いが、無人計測が可能であれば、夜中も含めて一定時間ごとの計測をすることができる。

以上は、SR-108 実船計測の体験から得られた指針の一つであるが、本計測システムでは前述のように計測コンテナ本体には人が常駐しないシステムとなつたこととも関連して、本格的なオートリモートコントローラを備えることにした。

リモートコントロールする場合、どの範囲をリモートコントロールするかが問題となる。後に述べるように、本計測システムでは各検出器、増幅器は航海計器と同等に航海中は作動し続ける方式を採用したので、記録器、具体的にはデータレコーダの動作だけをリモートコントロールすればよいことになる。さらにオートタイマーを附加し、セットされた時刻になれば記録を開始し、設定された時間経過すると記録を停止する完全無人計測方式となつている。Fig. 1 のブロックダイアグラムに示されているように、リモートコントロール部は船橋内で得ればホイルハウス内に設置されるので、計測コンテナ本体との接続ケーブルは 100 m の長さが用意されている。オートタイマーのセットおよびマニュアル、オート



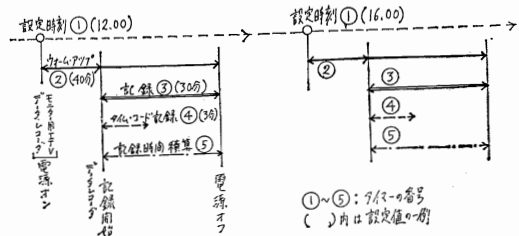


Fig. 3 オートリモートコントローラの動作

の切替えもリモートコントロール部で行なえるので、計測コンテナ本体内へは計測器の整備およびテープ交換時に入るだけである。

オートリモートコントローラは Fig. 3 の説明図に示したように巧妙にできている。すなわち、計測開始時刻の一定時間前にデータレコーダの電源が入りウォームアップをする。希望時刻になるとデータレコーダが記録動作に入るが、同時に各データレコーダの第7chにタイムコードの記録を始める。第7chは所定時間のタイムコードの記録を終ると、自動的にそれぞれの現象の記録に切り替わる。設定された時間だけ記録するとデータレコーダの電源が切れ、データレコーダは休止する。なお各データレコーダの記録動作時間を表示する積算タイマーがあるので、テープ交換時間がリモートコントローラの位置で判る。Fig. 3 に記入しておいたように①～⑤のタイマーが使用されているが、②、④は半固定で使用するに対し、①、③は変更する機会が多いのでパネルの表面に取りつけられている。このように、フルブルー式の自動記録方式であるので、ちょうど自動化船の機関部職員のように、計測員は計測装置の運転よりはむしろ保守および監視に従事することになる。もちろん、リモート・マニュアル操作も可能である。

なお、本リモートコントローラは4台のデータレコーダを同時にコントロールできるようになっている。上述のように、各データレコーダの第7chには同一のタイムコードが記録されるので、データレコーダ間の記録の相関が可能である。

ここで、使用したタイムコードは IRIG-E フォーマットによるもので、100 Hz の正弦波が基本波型となつており、222日22時22分22秒のように9桁の表示になつており、データレコーダ上のアナログ記録からは1/100 sec の時刻の読み取りが可能である。データレコーダの記録をデジタル表示で読み出す場合には、10秒ごとの表示が可能である。このタイムコードジェネレータのデジタル表示部の画像を、外界状況用 TV 画面にオーバーラップさせて、データレコーダ記録と

VTR 記録の同時マークとしている。

なお、オートリモートコントローラ的设计製作にあつては高千穂精器の永島雄吉氏(現在、日本鋼管技研)に負うところが多い、ここに改めて謝意を表す。

### 6. 遠方監視

以上のように、計測コンテナ本体にはほとんど人が駐在しない方式になつたので、計測コンテナ内の計測状



Photo 3 リモートコントローラ部

1. モニターメータ用 TV (画面の例を上写真に示した.)
2. データレコーダ・オート・リモートコントローラ
3. ピック角、ロール角指示計
4. 投棄式波高計受信部

況を遠方から監視する装置を附加する必要がある。

監視に従事する位置は当然リモートコントローラと同じ場所がよく、監視する内容はデータレコーダに記録された後の内容、すなわち同時再生出力がよいので、監視装置(モニター装置)をリモートコントローラに併設することにした。

モニターの系統図は Fig. 1 に記入されているが、工業用有線テレビ装置が使用されている。すなわち、データレコーダの同時再生出力を示すモニターメータを4台分1カ所に集めたモニターメータパネルを計測コンテナ内で ITV カメラで撮し、その像をリモートコントローラ上のモニター TV へ送る。なお、この ITV カメラの電源および撮影用照明の電源は前述の記録用オートタイマーによつて、データレコーダの電源と同時にオンオフされる。モニター TV 画面は8"であるが、24箇ものメータの指針の動きがこのような小型画面上で鑑別できるかどうかは懸念されたが、指針の形状、照明を工夫することによつて十二分の実績が得られた。リモートコントローラ部の外観を Photo 3 に示した。

後に、モニター装置としてモニター用ペンオッシュロ(三栄レクチホリー、8ch)が追加された。これの常置場所もリモートコントローラと同じ場所であるが、インプット切換盤によつて、任意のデータレコーダを選択することができ、その同時再生出力を書かせるようになっていた。このために計測コンテナ本体との間に多芯ケーブルを追加した。ITV 式モニターの方が連続ケーブルの点では有利である。

### 7. 航海状況撮影

前述のモニター装置に ITV を導入したのは、航海状況を録画するビデオテープレコーダ(VTR)の設置を当初から計画していたことに基因している。データレコーダに記録される時間ベースの各現象の記録と同期させて、外界状況の撮影を行ないたいとの願望は誰も抱くはずであるが、ITV システムの普及に伴ないそれが比較的安価に実現できそうであつたので、本計測システムでは、予算の関係もあつて市販品の組合せを前提としてそれに挑戦して見たわけである。

ITV あるいは VTR が選ばれた理由は、我々が使用できる範囲内の通常のフィルム式の撮影装置(8mm、16mm シネ)では不可能な次の機能を普及型の ITV システムでも持つているからである。

- (1) 画面合成が簡単に可能。時刻表示をオーバーラップさせ得る。
- (2) 1巻の撮影時間が長く、連続撮影むきである。

8mm シネなどでは3分程度であるが、VTR の場合60分。

- (3) リモコン可能、撮影感度がよい、音声が入る。
- (4) 直ちに録画の良否を確認できる。

具体的に使用された機器は、視聴覚教育用あるいは校内放送用として普及しているグレードのモノクロ用の機器である。録画テープをどこでも再生できることを考

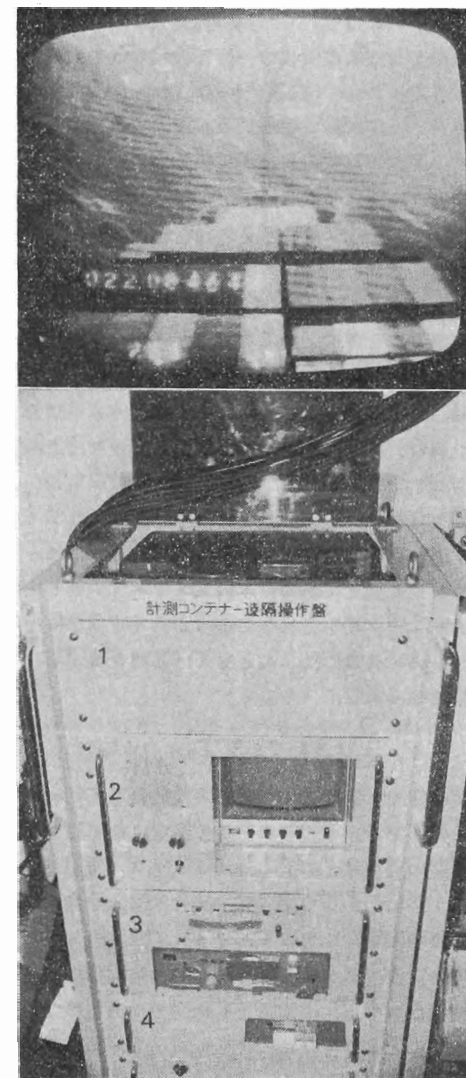


Photo 4 VTR 装置

1. VTR (上面で操作する)
2. 外界状況用 TV (画面の例を上写真に示した。数字は上段は時刻、下段左 ロール角、右 ピッチ角)
- 3, 4 画面の合成器



えて、統一I型のVTRを使用することにした。なお、データレコーダと同様に電源周波数を選ばないということから機種(シバデン製)が選定された。

系統図はFig. 1に示されている。通常ブリッジの最高所の正面に設置する外界撮影用カメラ(防水ケース、ワイパーつき、電動ズームレンズつき、撮影方向固定)が映す映像と、計測コンテナ内のタイムコードジェネレータのデジタル表示(ニキ管表示)を映すカメラの映像がピクチャコンポザーによつて合成され、VTRには034075911(34日7時59分11秒を意味する)のように1秒ごとに変化する時刻表示の入った外界状況が記録される。この時刻は符号化されて全く同時にデータレコーダ上に記録されているので、録画面とアナログ記録の完全な時刻の対応が可能である。

音声はマイクにより簡単にVTRとデータレコーダ(アナログでは音声専用チャンネルがある)に同時に入れることができる。本システムの場合、音声は全部のデータレコーダとVTRに同時に録音されるようになっているので、音声によつても録画とアナログ記録のラフな対応は可能である。

なお、タイムコードジェネレータにはロール角およびピッチ角のデジタル表示部が附属しており、この表示もTV画面に映し込むことが可能である。VTR装置の外観をPhoto 4に示す。これの設置位置はリモートコントローラと同一位置であるので、外形をリモートコントローラに揃えてある。本ITVシステムとしては、モニターメータ用を含め3台のITVカメラを使用しているが、カメラ本体は3台とも同一品種を使用し、互換性を持たせてある。

#### 8. 船体運動測定用ジャイロ水平儀

波浪中実船計測で必ず測定する現象としてロール角とピッチ角がある。ところが、この測定には可搬性を重視して小型の航空用バアティカルジャイロが使用されている場合が多いが、この種のジャイロは耐久性および長時間運転時の安定性に欠ける。

今回の計測システムでは計測コンテナ本体内に設置される機器はスペース、重量ともに余裕があるので、小型軽量なることよりも長時間運転に対する高い信頼性が要求性能として優先される。先に述べたように、検出装置などは一航海中連続運転する方式としたが、その場合の最大の難点は従来使用されているジャイロにあつた。そこで、まず船用方位ジャイロと全く同様な連続運転に耐える運動測定用ジャイロ水平儀製作の可否が検討された。種々調査の結果、艦船の兵器コントロール用とし

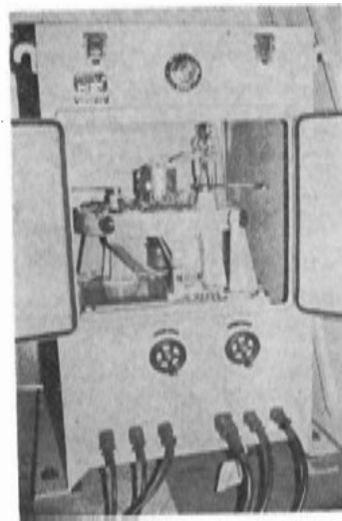


Photo 5 ジャイロ水平儀本体  
(コマの上の小円筒の中に三軸加速度計が入っている)

て、高精度、高信頼性のものがあることが判つたが、極めて高価であることから採用をあきらめた。一方、北辰電機では船用方位ジャイロのコマと全く同じものをコマにした連続運転用のジャイロ水平儀を製作した例があることを聞き、本計測システム用ジャイロ水平儀の製作を依頼した。

本器は計測コンテナ本体内に固定装備されているが、ジャイロ本体をPhoto 5に示す。外寸および重量は普通の船用方位ジャイロとほぼ等しく、したがっていわゆる可搬型ではない。船用方位ジャイロのコマをそのまま使用しているので、ジャイロ駆動用電動交流発電機が必要であるが、それも計測コンテナ内に設置されている。この発電機の電源はAC 220V, 3φ, 60Hzで冷凍コンテナ用冷凍機の電源に合せてある。

バアティカルジャイロのジンバルの変角を精密小型シンクロ発振器で検出し、サーボアンプを介してピッチ角、ロール角の広角指示およびポテンシオメータによるデータレコーダ用出力を得ている。測定範囲はピッチ角 $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 6^\circ$ ; ロール角 $\pm 18^\circ$ ,  $\pm 36^\circ$ の各2レンジにした。ピッチ角が片振幅で $6^\circ$ 以上に上ったことをすでに数度経験しているので、 $10^\circ$ 程度に改めたいと考えているが、船のピッチ角は予想外に大になることがあることを認識させられた。

本ジャイロのコマの慣性は大であるので小重量の検出器を乗せても誤差を招かない。そこでコマをステッププラットフォーム(人工水平台)として用い、その上に

3軸線加速度計を装着した。この加速度計によつて、ロール、ピッチによる回転運動の影響が入らない計測コンテナの設置位置でのヒープ加速度、スウェー加速度、サージ加速度が測定される。使用した加速度計はストレージ式のキャラメル型のもので、ヒープ用は $\pm 2G$ 、スウェー、サージ用はそれぞれ $\pm 1G$ の容量である。なお、計測コンテナ本体のクレーンによる搬入、搬出時には、ショックによる加速度計の故障を防止するため加速度計を取り外しておくことにしている。

本装置は予定通りに航海中運転しつばなして使用しているが、現在までのところ無故障で、高安定に作動している。ただ加速度計出力のドリフトは避けられないので、航海中ときどきゼロ調整をとる必要がある。

#### 9. 航海計器出力の利用

例えば船速、プロペラ回転数などのように操船に必要な情報に関しては、航海計器が本船に装備されている。航海計器で測定されている現象は船体運動と密接な関連のある基本量であるので、測定対象として採り上げる現象が多い。このような場合、わざわざそれを測定するために別の計測器を持ち込まずに、これらの航海計器の出力を利用してもらうて、計測を行なうのが最上の方法である。なんとすれば、航海計器は船の運用上重要な役割を果たすので、総合的に確度の高い機種が選定されているのが普通であり、また例えば船速、風速などの検出部は高精度のものを持ちこんでも短期間のうちに理想の場所に取り付けることは困難であるから、装備されている航海計器より以上の高精度計測を行なうことは不可能であるからである。

周知のように、航海計器は指示計形式になっている物が多い。しかもシンクロあるいはステップモータを利用した指示計が多い。したがって、指針の動きと電圧とが比例していない場合が多いので、指示計への入力から並列に出力を取り出しただけではデータレコーダ用の入力とはなり得ない。すなわち、信号変換器を必要とする。信号変換器の設計製作にあつては、本器の航海計器への接続あるいは万一の故障によつて本船側のレピータなどへ何等の影響を与えないように特に留意せねばならない。

本計測システムでは、多数の調査対象船に装備されている航海計器とのマッチングに汎用性を持たせて、次のようなレピータを製作した。これらは、いずれも計測コンテナ内の棚に収納されるので、外寸を標準ラックサイズに合せて製作した。また、現象指示メータをつけ、さらに較正用電圧を内蔵させた。

- (1) ヨー角、方位角レピータ: 本船のジャイロコンパスのレピータ信号を、角度に比例する直流電圧信号に変換する装置である。方位測定用として $\pm 180^\circ$ レンジ、ヨー角測定用として $\pm 18^\circ$ レンジを有する。これらは独立のポテンシオメータ出力となっているので、2出力を同時に記録させることができるが、波浪中運動測定用としては $\pm 18^\circ$ レンジのみで充分であろう。なお35Vステップモータ系レピータ、70Vステップモータ系レピータに接続可能になっている。
- (2) 舵角レピータ: 本船の舵角儀に接続して、舵角に比例した直流電圧を得る装置であるが、シンクロモータ系にのみ接続可能である。サーボアンプ、サーボモータ方式であるので、本船指示器のシンクロモータの容量が小でもよい。測定レンジは $\pm 40^\circ$ である。
- (3) 船速レピータ: 実測対象船はすべて電磁ログ(北辰電機製)を装備する予定になっていたため、電磁ログ用として製作した。電磁ログよりの船速信号をサーボシンで受信し、ログ指示計の回転角に等しい角度をポテンシオメータに与え、船速に比例する直流電圧を得る。測定レンジは指示計の最大値を100%として50%~100%、-30%~100%の2レンジで、この範囲の出力電圧を-0.9V~+0.9Vに対応させている。主として前者のレンジを使用するが、データレコーダの記録範囲を有効に利用するため、入力にゼロシフト電圧を与えている。
- (4) プロペラ回転数レピータ: 主軸回転計用直流発電機の出力はJIS規格で決められており、主軸の最高回転数で発電量は1,000RPMとなり、そのときの出力電圧は40V D.C.である。したがって、この測定は簡単で電圧を適当に落してやればよい。測定レンジは50%~100%、0%~ $\pm 90\%$ の2レンジとした。
- (5) 風向・風速レピータ: 本船のプロペラ式風向風速計に接続し、発信器の風速、風向の信号を変換してデータレコーダ用入力電圧を得る。ウィンディケター(風向は直流セルシン)、コーンベーン(風向は交流セルシン)に接続できるようにした。本器で計測できる量は相対風向および相対風速である。絶対風向、風速は方位ジャイロおよび船速計の信号を使用し、電気的あるいは機械的な演算をすれば得られ、またそのような試作製品もあるが、船が変わることに対する共用性を持



たせることが困難であつたので採用しなかつた。

以上の他に、本船の馬力計から主軸トルクの信号をもらつてトルク測定を行なうレピータも製作されたが、これは共用性がない。49年度試験では専用トルク計を設置して、主軸トルクの計測を行なう予定である。また対象船に2軸船があつたので、プロペラ回転数レピータは2軸分用意した。なお、これらのレピータ出力はデータレコーダの入力電圧の標準を+1V~-1Vとしたので、これに合せてある。

なお、レピータ関係の設計製作に関しては三菱重工神戸造船所の米田義昭、辛島光二氏の努力に負う所が多いことをここに附記して謝意を表する。

### 10. 動的歪計

船体運動などの基本現象に対する計測器は以上のごとく、本計測システムとして固有のものを完備しているが、今後の実船計測はこれらの基本現象の計測そのものより構造強度などの相関性の実態の把握に力点が置かれるべきであろう。したがつて、基本現象以外の計測が重要な意義を持つことになるが、計測対象は年とともに変わるであろうから、船体運動などのように完全な計測器を準備するわけにはいかない。一方、予想される計測対象を検討すると、ストレインメータが最も役に立つことが判つたので、基本量以外の計測はストレインメータによる測定を標準方式として考えることにした。

さしあたり船首、船尾あるいは船橋における上下および左右の加速度測定；縦曲げモーメントに対応するストレス測定；船首での波浪変動水圧あるいは衝撃水圧測定用として約10chの標準ラック型のダイナミックストレインメータが計測コンテナ内に設置されている。造船所ではストレインメータを多数保有しているのが普通であり、計測点数を増す場合には容易に借用可能であること、またストレインメータの取扱いに慣れていることがストレインメータ方式を標準としたもう一つの理由になつている。また最近のストレインメータは1航海中の連続運転に耐え得ることも理由になつている。

### 11. 波の計測

波浪中の実船試験で波高を計測しないのでは画龍点睛を欠くと言わざるを得ない。ところが、実用に供し得るような波高計は現存しないので、SR-132<sup>6)</sup>では各種の波高計の開発を行なつている。その中の一つに東大生研の前田研究室と久保田気象器械 K.K. で共同開発している水圧式の投棄式波高計がある。

SR-125 部会では、この波高計を計測システムの一環

とし組み入れることとし、本システムに適合するような仕様の物を開発して頂いた。すでに3年度にわたり、波高計の実用試験を兼ねて本部会の実船試験時に使用しているが、コンテナ船は高速であること、乾舷が高いこと、もつとも荒れる海域を航行することなどの条件から



Photo 6 波高計ランチャ  
(三連装であるが、一発だけ充填されている。)

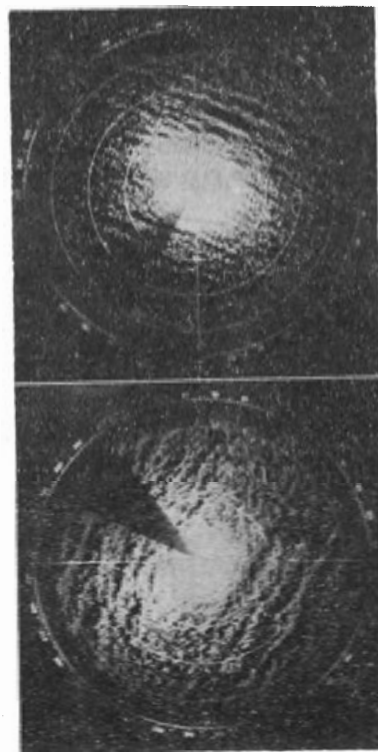


Photo 7 レーダーによる海況写真

投棄式波高計に対する要求性能は他種の船で使用する場合に比し著しくシビアである。にもかかわらず、本波高計は年ごとに種々の改良が加えられ、48年度実験では、荒天時のランチャによる投入および計測に成功したが、製品の安定性および信頼性にはいま一つの進歩が望まれる。49年度使用分についてはさらに改良が加えられているので、より確実なデータ収録に期待が持たれている。

波高計のランチャーは船尾の両舷に設置され、そのリモート操作部は波高計受信器とともに、計測コンテナのリモートコントローラと同じ位置に設置する。Photo 6にランチャに装填された波高計の投棄部を示した。

なお、Photo 7として、本委員会で実施している荒天時のレーダーによる海況写真の一例を示す。レーダーの画面を特に製作した接写装置でポラロイドカメラで撮影したもので、本装置も計測コンテナシステムの一部として附属させている。この写真から、うねりが大なる場合には波と船の出会い角度を明確に読むことができ、概略の波長がわかる場合もある。この事実は乗組員の間では広く知られているにもかかわらず、写真化してデータにされている例はほとんどなかつたので筆者の提案によつて撮影記録装置を試作したが、この例に見られるように多数の貴重な写真を得ることができた。なお本例は昭和47年度のIHIチームによつて撮影されたものである。

### 12. 計測コンテナシステムの適用法

以上で各構成機器の解説が終つたので、この章では本システムを使用して何ができるかを略説しよう。

現在の標準装備の状態では、アナログデータレコーダの同時記録可能チャンネル数は7ch×4台=28chである。一方、固定装備の計測器として、船体運動測定用ジャイロ(5要素)、レピータ(7要素)があるので、これを全部使用すれば12chを要する。従つて16chを他の計測に向けることができる。

船体各部のストレインを測定する場合のように多点計測の場合には、データレコーダへの入力切換パネル(リモートでオートであることが望ましい)を追加すればよい。また、何等の改造なしにアナログ7をアナログ14に置き換えることができるので、これを4台使用すれば56chの同時自動アナログ記録装置となる。

リモートコントローラ部の設置位置がない場合は、陸上の移送時と同様にこれを計測コンテナ内に収納して置けばモニターは不能になるが、オートタイマとして作動させることができる。さらに、レピータを使用しない場合には計測コンテナと本船との関係は電源ケーブルのみ

となり、文字通りワンタッチで計測準備が完了することになるが、この場合に測定可能な項目は運動測定用ジャイロ関係でピッチ角、ロー角、ヒープ加速度、スウェー加速度、サージ加速度の5要素である。この場合、計測コンテナ床面での3軸の線加速度およびコンテナ本体のストレイン測定を追加することは容易である。また、計測コンテナ設置位置近くでの船体のストレインあるいは加速度を計測することも比較的簡単に実施できる。

申すまでもないが、計測コンテナシステムはコンテナ船にのみ使用可能な計測装置ではない。なんとすれば大型船であれば、甲板上に積載可能なスペースがあるであろうし、220V、3φ、60Hzの電源供給も可能であろうから、以上のように本計測システムは移動計測室として広範な利用価値を持つ。

### 13. 測定精度

気がつかれた識者があるかも知れないが、本稿ではここまで測定精度について触れていない。計測装置では測定精度は設計製作の第一条件であり、本システムでも精度に対する考慮なしに計画が進められたわけではない。ユーザーの要求性能としての測定精度は、多くの実験特に動的計測では曰く言い難しというのが実状であろう。なんとすれば、総合精度として例えばフルスケール0.1%以内でなければデータとして無意味であるから計測しない方がよいとは言い切れないからである。むしろ、精度0.1%以内で測定できないならば、1%の精度でもよいからとにかく計測してくれという切実な要求がある分野が多い。というような事情から、とにかく計測することが優先され、測定精度の明確な指定ができない場合には、予算の関係も配慮して現状での最良の計測が要求される。

本システムの場合も、このような条件のもとに計画されており、明確な限界精度は与えられていない。一方、本システムの場合、総合精度は最終記録を受け持つデータレコーダの計測精度以上にはなり得ない。一般に、アナログデータレコーダの記録精度は長期間操作での安定性も考えると、フルスケールの1%程度であり、意外に低いと思われる読者もあろう。しかし、アナログ記録の標準方式としてアナログデータレコーダがますます普及しつつある事実は、逆に現象をアナログで見るとの精度はこれで充分である場合が多いとも言えよう。

いま、ピッチ角の測定を例に採ると、本システムの場合±3°なる測定レンジがある。ほぼ±3°の範囲でピッチングしているときには、データレコーダの入力レンジ



を  $\pm 1V$  にしておいて記録するので精度はフルスケールの1%, すなわち  $0.01V, 0.03^\circ$  となる。ピッチングが少なく  $\pm 1^\circ$  程度のときには入力  $\pm 0.3V$  程度となるので、データレコーダの入力レンジを  $\pm 0.5V$  レンジにすると記録精度はその1%として  $0.005V, 0.015^\circ$  となる。一方、ジャイロ水平儀の検定にあたり、 $0.01^\circ$  の精度で測定可能な検定用水準器を得ることさえ困難であるから、動的検定となると検定精度はこれ以下にならざるを得ない。このように、使い方によってはデータレコーダの記録精度は検出器の精度を上回る。

また、船速計の精度は  $\pm 0.2kt$  程度とされている。最高船速を  $30kt$  とすると精度は  $0.7\%$ 、このままデータレコーダへ入れたのでは記録精度が不足する。このような高精度の検出器は主軸回転数、トルクなどのようにその平均レベルがゼロから大きくずれ、その量(平均値)を測定対象にする場合に多い。本システムでは船速の場合、前述のように  $50\% \sim 100\%$  なるレンジを持つている。最高船速  $30kt$  の船では、 $15kt \sim 30kt$  がデータレコーダの記録の  $-1V \sim +1V$  に対応していることになり、この場合の記録精度は1%とすると  $0.15kt$  に対応し、検出器の精度をカバーする。このようにゼロを意識的にシフトさせて置くことにより記録精度を上げることができる。

以上の二つの手段、すなわち入力感度切換とゼロシフトを適宜使用することにより、本システムの総合精度はデータレコーダの記録精度を上回っている場合もあるが、計測の主流である動的変動成分のみを問題にする現象に関しては総合安定精度約1%なる数値は生きている。なお、アナログ記録では一旦記録された結果は、4桁のA-Dコンバータを使用すれば4桁の数値として、

### 海面清掃船“こうのしま”

石川島播磨重工業は、去る10月末運輸省第四港湾建設局(下関市)向け、海面清掃船“こうのしま”を完成、引渡した。

本船は、波高1メートルまでの海象条件のときでも作業出来るように、船型は双胴型を採用した。また集塵方式はIHIディスフロタ型を採用し、スキッパー装置によりゴミを捕集し、上甲板上の塵芥艙内のコンテナに積み込むようになっている。

本船の特長は次のとおりである。

- 双胴船型の採用により、波高1メートルの海象条件下でも作業出来、年間の作業回数が従来の清掃船よりはるかに向上した。
- 航行時は、集塵装置を水面上に引き上げることでより船速も速く、行動距離も延長され、広域の作業に感

3桁のA-Dコンバータでは3桁の数値として読み取れる。しかし、測定精度を考えるとあまり細かく読んでも意味がないので、本システムの解析装置では3桁のA-D変換器によって数値化している。すなわち、読み取り精度は  $0.1\%$  である。(つづく)

### 参考文献

- 1) “高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究” SR-108 部会, 昭和45年度報告。日本造船研究協会, 研究資料 No. 125, 昭和46年3月
- 2) “超高速コンテナ船の耐航性に関する研究” SR-125 部会, 昭和46年度報告。日本造船研究協会, 研究資料 No. 157, 昭和47年3月
- 3) “超高速コンテナ船の耐航性に関する研究” SR-125 部会, 昭和47年度報告。日本造船研究協会, 研究資料 No. 171, 昭和48年3月
- 4) “超高速コンテナ船の耐航性に関する研究” SR-125 部会, 昭和48年度報告。日本造船研究会, 研究資料 No. 188, 昭和49年3月
- 5) “実船搭載用波浪計に関する研究” SR-132 部会, 昭和47年度報告。日本造船研究協会, 研究資料 No. 177, 昭和48年3月
- 6) “実船搭載用波浪計に関する研究” SR-132 部会, 昭和48年度報告。日本造船研究協会, 研究資料 No. 193, 昭和49年3月

力を発揮出来る。

本船の主要目

船種: 海面清掃船, 全長: 22.0 m, 垂線間長: 20.2 m, 全幅: 10.8 m, 単胴幅: 3.8 m, 深さ: 2.7 m, 主機関: 高速船用ディーゼル 480 PS  $\times$  2 基, 速力: 12 kt, 航海区域: 沿海区域, 塵芥コンテナ容積:  $30m^3$



## 操縦シミュレーションについて

小川陽弘\*

### 1. はじめに

船の操縦性能の研究は、従来模型試験あるいは実船試験を中心として行われてきた。歴史的に見ると、定常直進からの旋回試験に始まり、KempfのZ操縦、Dieudonnéのスパイラル試験を経て、近くは逆スパイラル試験、変型Z試験、正弦操縦、平行移動、新針路、不規則操縦、等々正に百花繚乱の体である。推進性能関係の実験が、抵抗・自航試験を中心としてすつきりとまとまっているのに較べると、操縦性というものがいかに掴みどころのないものか、想像がつくというものである。

こうした船自身の固有の操縦性とは別に、操船者あるいは操舵手の人間学的特性も加味した、いわゆるMan-machine系の特性として船の操縦性を論じようとする立場もある。船の操縦性研究が、必ずしも衝突回避や緊急停止等の極限での性能にのみ重点を置いているわけではなく、離接岸等も含めた日常のハンドリングの良否をも問題にしているからである。

これら操縦性に関連して、最近シミュレーションとかシミュレータとかいう言葉が盛んに聞かれるようになって来ており、操縦性研究の大きな柱の一つになっていると思われる。そこでこの際シミュレーションに関する考え方、取扱い、問題点等について考え直してみたい。時間的な制約があつて文献等を詳細に検討している余裕がないので、話が主観的になりがちな点は予め御容赦願いたい。最近の操縦性研究の全般的展望については元良の論文<sup>1)</sup>を、より詳細には操縦性シンポジウムのProceedings<sup>2),3)</sup>を参照されることをお勧めする。いずれもシミュレーション及びシミュレータ関係の論文を含んでいる。また運動方程式と数式モデルについては藤野の解説<sup>4)</sup>が、操船シミュレータについては岩井・前畑<sup>5)</sup>の調査報告がある。シミュレーションの技術そのものは計算機のプログラムであつたり、シミュレータのメカニズムであつたりして、考案者によつて千差万別なので、そういう個々の技術ではなく、それらに共通した背景を捉えてみたい。

### 2. シミュレーションとシミュレータ

シミュレーションという言葉については改めて定義する必要もないと思われるが、強いて言えば、実物あるい

\* 船舶技術研究所

は実状の時間的経過を何らかの“モデル”を用いて近似すること、とでもなるであろうか。駅の切符売場の窓口の必要数を推定するのに、乱数を使つて窓口に着着する人数を時系列的に表わして計算する、というのはシミュレーションの代表的な例として良く知られている。この場合は、人が窓口に到達する時間間隔が不規則である、というモデルを作つて、その入力として乱数を利用しているわけである。

我々が用いる操縦シミュレーションも、同様に何らかのモデルを使つて行なわれる。モデルとして模型船を使うことも1つのシミュレーションであり、この場合の模型船はいわば“物理モデル”(Physical model)である。つまり我々は何十年も前からシミュレーションという言葉を意識しないで、模型実験=“物理モデルによるシミュレーション”をやつて来たわけである。モデルとして模型を使わないで、物理現象を数式で記述するものが、今これから我々が考えようとしている“数式モデル”(Mathematical model)によるシミュレーションである。(“数学モデル”とも訳されているが、必ずしも数学にのみ依存しているわけでもないし、その他いろいろ考え合わせると“数式モデル”の方が感じが出ているように思えるので、著者はこちらを使うことにしている。)

数式モデルによるシミュレーションは、通常電子計算機で行なわれるので、計算機実験などとも言われるが、物理モデルによる模型実験との類推から出た言葉にしても、幾分“コンピュータ崇拜”的なニュアンスが感じられないでもない。また船の操縦性能に関して、これまでシミュレーションと言つて来たのと同じ意味で、Predictionという表現も用いられるが、この場合には多少設計段階での性能予測または実船での航路予測といった面が強調されているのと、後に述べるシミュレータのためのシミュレーションに対して意識的に区別しているような所もある。

この様な数式モデルによるシミュレーションでは、実船や模型船では不可能な条件を与えたり、危険で試みる事が出来ないような運動をさせたり、また膨大な数のバリエーションについて検討したりすることが自由できるので、設計のための性能予測に限らず、広範囲の研究に使える。また個々の船の運動に止まらず、それらを組合せた交通量の問題、衝突回避の問題、最適航路の問題等にも適用できるわけである。

シミュレータという言葉は大別して2つの意味を持つ



II 解析装置

14. 実 測 例

以上の計測コンテナを使用して実測されたアナログデータレコーダ記録の生の再生例を Fig. 4, 5 に示した。

Fig. 4 は昭和48年度の HT 丸試験の際に得られた追波状態での大角度ローリングの典型例である。図の横軸は時間であるが、データレコーダへはタイムコードジェネレータの信号が記録されているので、図中に示したように、時刻までわかる。この例では図示の点が出港以来の積算時間で22日8時間46分40秒後の時刻であることを意味している。タイムコードジェネレータの初期値を出港時にゼロゼロに合せておけばこのような積算時間表示になるが、グリニッジ標準時刻に合せて置けば記録をログブックなどと対照するのに便利である。ロール角は両振幅で約30°に達し、またロールの周期がほぼ20秒で一定しており、この値は本船の固有周期に近いことを思い起すと興味深い。

Photo. 8 にはデータレコーダの記録と同期してビデオテープレコーダ (VTR) に録画した Fig. 4 の時点での外界状況を示した。各々の写真はローリング角がほぼピークに達した時刻の画面の複写である。写真中の右肩の数字はそのときの時刻の秒の桁を示している。時刻

は画面中の数字の上段に 022084640 のように表示されているが、印刷時には細かくて見にくくなる事を予想して右肩の数字を番号の代りに記入しておいた。これらの写真は希望時刻の画面を停止画面にしておいて 35 m/m カメラで撮影して製作したものである。

右側には右舷下り (STARB. DOWN), 左側に左舷下りのピーク時の写真を並べてある。これらの写真の時刻を Fig. 4 に記入しておいたが、このようにアナログ記録と外界状況の連続写真を対応させた例は珍しい。このような処理が出来る事も計測コンテナシステムの特色の一つである。Photo. 8 を一見して気がつく事は著しく左舷下り方向のローリングが大なる事である。ちなみに画面中に示されているロール角は左舷下りでは上から順に 15.8, 25.5, 26.1, 19.3 度であるに対し、右舷下りでは上から順に 2.5, 6.8, 3.4, 2.0 度に過ぎない。画面中の水平線の傾きからも左右舷の揺れ角の差が判るが、その傾向とよく一致している。一方 Fig. 4 のロール角に記録にはゼロ線が入っていないので、前述のように両振幅で約 30° のローリングとしか読めない。したがって片振幅では約 ±15° のローリングであると解釈してしまうのが普通である。ところが、画面の状況および画面中の数字から、この場合は明らかな非対称横揺れで左

		プロペラが内廻り回転の場合		プロペラが外廻り回転の場合	
伴平均流値	内外半円面について	内側 (船体側) にて w' 大		外側 (反船体側) にて w' 若干大	
	上下半円面について	上側にて w' 大		上側にて w' 大	
		内側, 上方部にて w' 大		やや外側, 上方部にて w' 大	
力の方向		横 方 向	上 下 方 向	横 方 向	上 下 方 向
軸に働く力		内 向 き	大	上 向 き	大
BEARING MOMENT による力		内 向 き	大	外 向 き	やや大
BEARING FORCE による力		内 向 き	大	上 向 き	大
合 成 結 果		内 向 き	大	上 向 き	大
		僅	小	内 向 き	やや大
		僅	小	上 向 き	大

くもので、船体全体の剛性は Tank Top と Side Shell との交点に入れて考え、また、ウェブの剛性はモデル化して取りこもうとするものである。

実船計測結果と計算結果とを比較したところ、必ずしも一致しているとはいえなかつたので、この不一致の原因と考えられる計測ミス、計算モデル上の問題点、外力条件設定上の問題点について検討を行った。

(b) 軸系外力の理論計算

i) 三軸船 E 丸の両舷プロペラ軸に加わる力の計算  
模型船により計測された伴流分布を用い、三軸コンテナ船 E 丸の両舷プロペラ (D: 5.9m, P: 7.635 m) が伴流中で作動する場合のプロペラ軸に加わるベアリングフォースの計算を行った。

計算の結果、推察されるベアリングフォースの大小関係およびその作用方向について、定性的にまとめたものが上の表である。

ii) 一軸コンテナ船 H 丸のプロペラ軸に加わる力の計算

三軸船 E 丸の方法と同様に一軸コンテナ船 H 丸のプロペラ (D: 6.7m, P: 6.7m) によるベアリングフォースの計算を行った結果、上方部の伴流係数が大きいので、軸を上方に持ち上げようとする力が大きいと重力と適当に釣合うであろうこと、回転方向の伴流の影響により右舷側でプロペラ翼に働くスラストが増加し軸を右舷側に曲げようとする傾向があることが明らかとなつた。

(3) 軸受支持方法および船尾管軸受の型式の違いによるアライメントの変化の研究

(a) 多軸コンテナ船の軸系配置実績調査


就航中および建造中の 20,000 DWt 以上の多軸コンテナ船の軸系配置について海外の船主および造船所、国内造船所に対しアンケート調査を行った結果、14 隻のコンテナ船の軸系要目およびその内 10 隻の軸系配置図を得ることができた。

(b) 三軸船について

旧日本海軍および海外諸国の艦船の実績を主にし、三軸船採用の理由、一軸で吸収できる馬力の限界等について調査し、「本邦建造の三軸船」、「馬力・軸数と吃水」の 2 表にまとめ、さらに測量艦建築の計画および三軸船の船尾形状と推進器位置について調査した。

(c) 旧海軍多軸船のプロペラ関係について

旧海軍多軸船のプロペラ関係等の要目を一覧表の形でレシプロ主機艦、タービン主機艦にわけてまとめた。(潮田)



**古き歴史と  
新しい技術を誇る**

## 三ツ目印 清 罐 剤

**登録 実用新案 罐水試験器**  
一般用・高圧用・特殊用・各種

最新の技術、50年の経験による特許三ツ目印清罐剤で汽罐の保護と燃料節約を計って下さい。  
罐水処理は何んでも御相談下さい。

**営業品目**  
三ツ目印清罐剤 三ツ目印罐水試験器  
罐水試験試薬各種 燐酸根試験器  
BR式PH測定器 試験器用硝子部品  
PTCタンク防蝕剤

**内外化学製品株式会社**

本社 東京都品川区南大井5-12-2 電(762)2441(代)  
大阪支店 大阪市西区南堀江大通2-43 電(541)0331(代)  
札幌営業所 札幌市南九条西2丁目12 電(521)6267(代)  
仙台営業所 仙台市宮城1-1-7014 電(23)8853  
名古屋営業所 名古屋市中区錦内本町1-17 電(936)0233  
福岡営業所 福岡市大平門1-9-27 電(72)1631(代)  
広島営業所 広島市国泰寺町2-3-1 電(43)1442

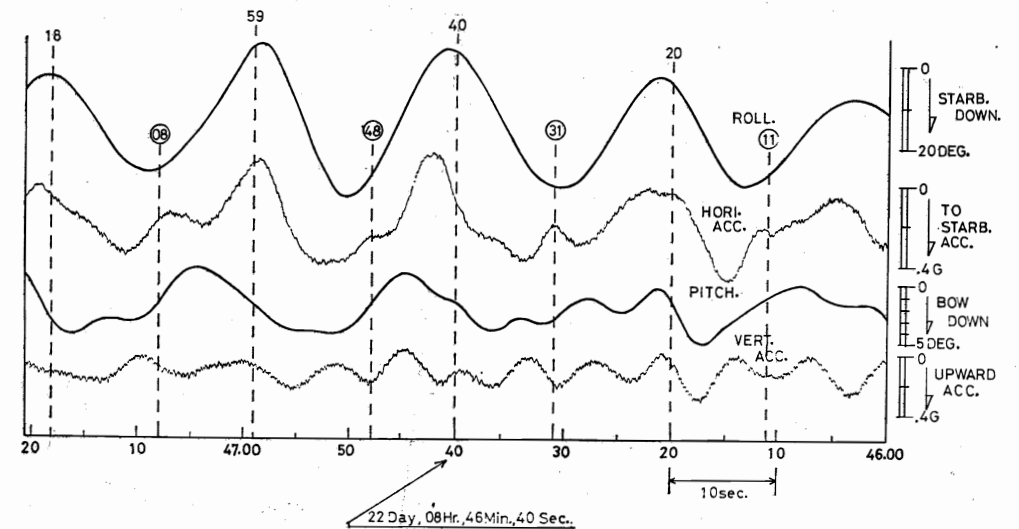


Fig. 4 横運動の大なる実測例 (HT 丸), 図中の番号は Photo. 8 に対応

\*横浜国立大学工学部造船工学科



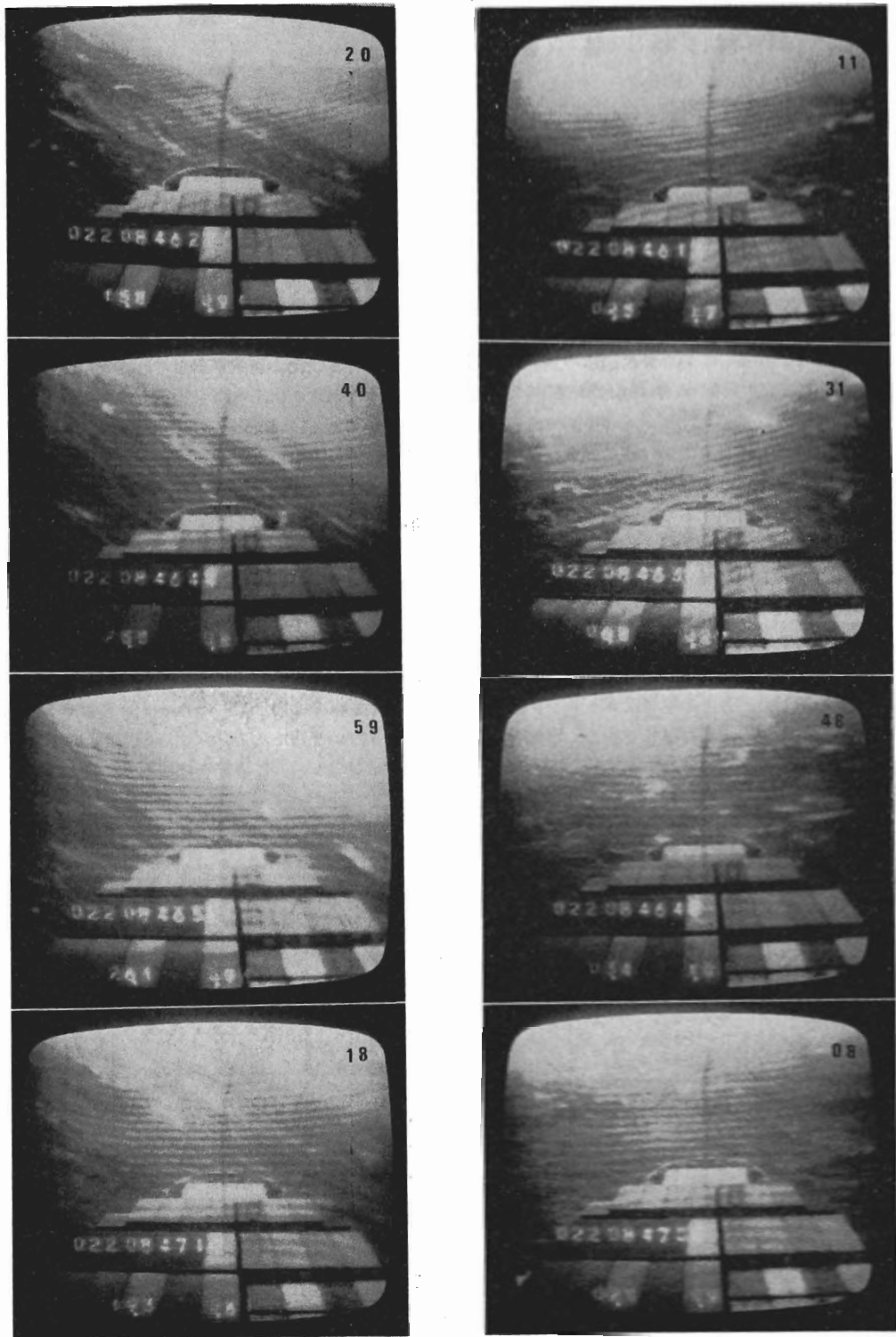


Photo. 8 VTR 画面のコピー, Fig. 4 の場合

舷下り方向では約 $25^\circ$ , 全振幅の約85%にも達していることが判る. 計測コンテナシステムの運動測定用ジャイロ出力はきわめて安定しており, ロール角のゼロレベルが明確であり, かつ信頼できることが, この記録と写真の対比から証明できたと見えよう. なんとすれば画面中のロール角のデジタル表示は, アナログデータレコーダに記録されるジャイロからの出力信号を A-D 変換した値に過ぎないからである. なお, 本例では船首マスト上端は ITV システム不調のため画像に歪みが出ている.

Fig. 5 および Photo. 9 には昭和46年度 K 丸の実験時に得られた大時化時の向い波状態での縦運動が大なる場合の例を掲げた. Photo. 9 では Photo. 8 と異なり, 2秒おきの等時間間隔の連続写真として, 外界状況を示した.

したがって, Fig. 5 に示されている時系列の一部分の外界状況を詳細に見ている事になる.

Fig. 5 からピッチ角の全振幅が約7度, ミドシップより船尾よりにおかれた計測コンテナ位置での上下加速度 (VERT. ACC) が約 0.6 G に及び, 典型的な大縦運動時である事が判るが, この例でもつとも特徴的な事は上下加速度記録に明確に現われている船体の2節振動である.

実際の状況としては, このようなときには船橋は主として前後にユサユサと揺れ“シャダー (shudder, 震動)”と呼ばれている現象が起る.

Photo. 9 と Fig. 5 を対比して見ると, 写真番号4と6の間でシャダーの原因となつた衝撃を船首部に受けたことが判る. したがって, 船は船首上りの運動に移つ

て間もなく衝撃を受けており, 写真6, 8, 10, 2と本船の前半部が船橋から全く見えなくなるほどのスプレーを巻き上げている. そして写真14にいたつて, すなわち, 次の船首下げのピーク時をやや過ぎた時刻で, もう一度衝撃を受けた事が, 画面および加速度記録から判断できる. これ以後の画面は, しばらく真白で前方が見えない状況が続いているので写真を省略したが, 再度のショックによりシャダーが長く続いている事が Fig. 5 からわかる.

ほんの2例の極端な場合を示したに過ぎないが, SR-125の実船試験が計測コンテナシステムの使用によつて成功裡に進行している事を推察いただけたものと思う.

Fig. 4, 5 に示したような貴重な大運動の記録については, 現象間の相関, 時系列と画面との関係などを徹底的に究明し, また, 決定論的な手法によつて現象と生因の関係などを検討する事は解析の一方向であろう. しかし, 一般的には実船試験によつて得られた記録は不規則現象であり, 基本的には確率過程として考えられているので, 統計学的な解析処理を一次解析として行なうのが常道である.

### 15. 解析に対する考え方

波浪中実船試験でアナログ計測を行なうと, 不規則な生のアナログ記録が無数に得られる. 特に不規則現象の記録では, これらの未処理の記録を積み上げて置くだけでは, その重量が何百キログラムになつても, 重大なデータとは言えない. 丁度, 鉱山から金鉱石を苦勞して掘り出して来ても, 精練して金にしなければ経済的にはは

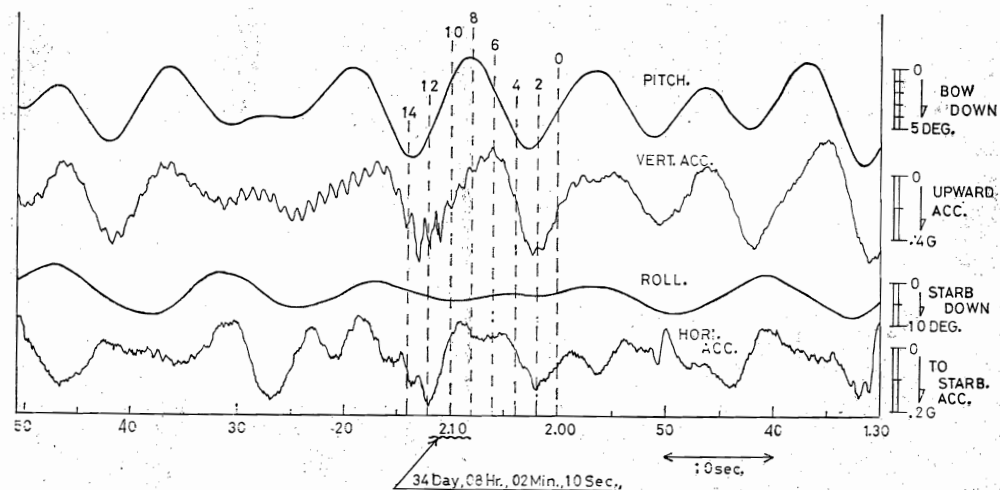


Fig. 5 縦運動の大なる実測例 (K 丸), 図中の番号は Photo. 9 に対応

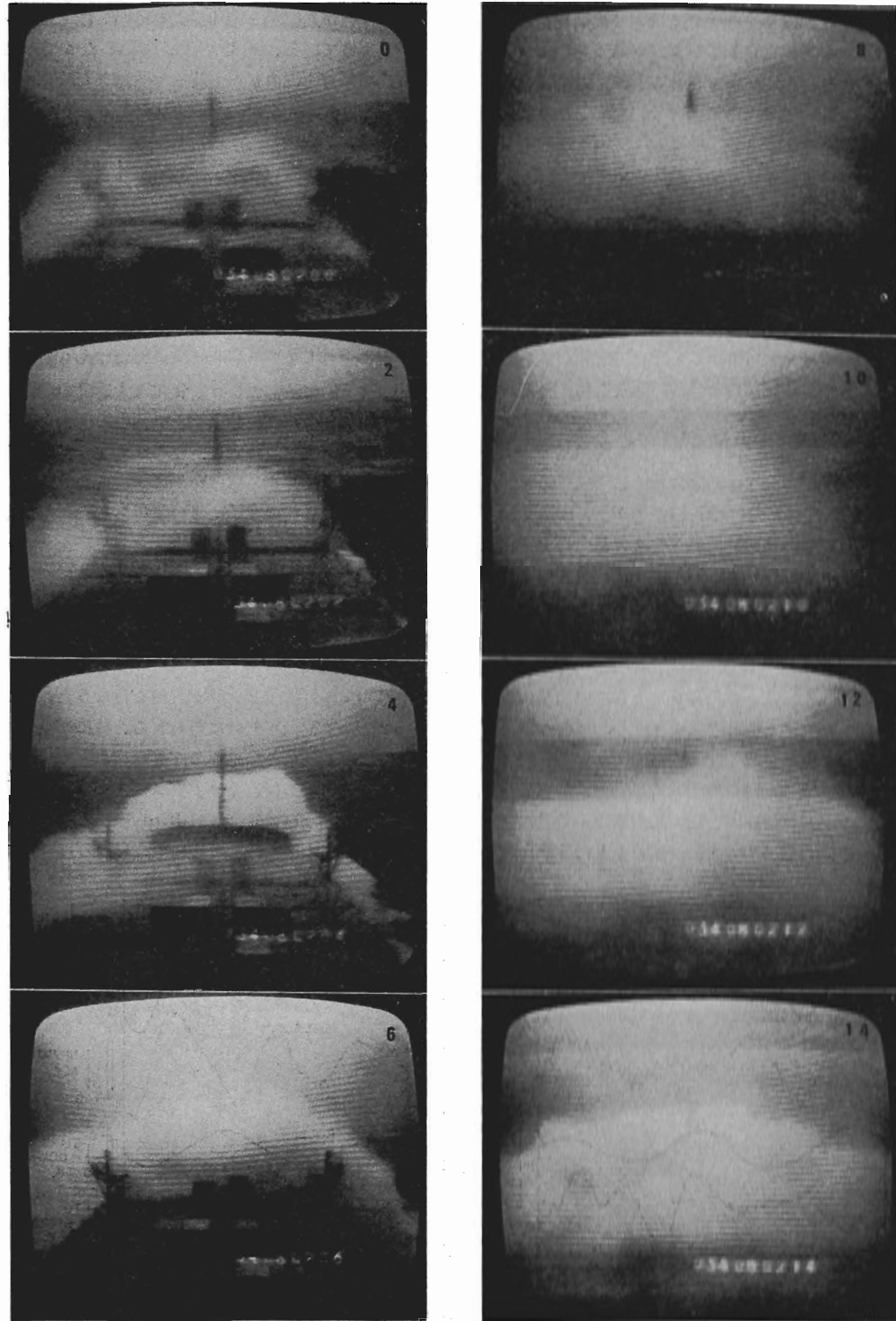


Photo. 9 VTR 画面のコピー, Fig. 5 の場合

ほとんど無価値であると同様に、精練すなわち解析して、金すなわち貴重な含有成分を具体的な型で抽出しなければ無意味である。波浪中の船体運動などは確率統計現象であつて、得られた生のタイムヒストリー記録は二度と再び全く同一タイムヒストリーとしては発生しないと言われている。このように生の記録そのものに全く再現性あるいは一般性がないので、いわば一般性のある内に含まれている統計的特性を抽出し、数値化して初めてデータとしての真の意義が生じる。

この隠された一般特性の抽出法として、広く用いられている方法としてスペクトル解析が先ず挙げられる。スペクトル解析法については山内博士の数々の名解説にその意義、理論、数値計算法が詳述されているので、今さら多言を要しないが、1現象のスペクトル解析結果としてオートパワースペクトラムが得られ、現象の周波数領域での特性が判ると同時に、このスペクトラムから簡単な計算で平均周期や平均振幅、最高振幅の期待値などが算出され、不規則現象の一義的な特性の殆どを知り得る。

これに対し、より簡単な解析法としてあるタイムヒストリーが与えられたときにその平均振幅、有義振幅あるいは平均周期などを直接に算術的計算で求める方法がある。あまり適切な表現ではないが、この方法を時系列の統計解析と呼んでおこう。スペクトル解析はいわば理想的な計算であるが、計算工数が大になるので、もつとも必要とする直接的統計数値のみを差し当り算出してみるときに使用されることが多い。

前述した SR-108 の実船試験時の解析結果整理表として筆者が作製した表を Table 1 として掲げた。この上半分はここで言う統計解析による結果を記入する欄で、下半分はスペクトル解析によつて得られた結果の記入欄である。SR-108 では各チームが使用可能なデータ処理装置、デジタル計算機および独自に組んだプログラムによつて得られた計算結果を、本表の型式に統一して整理した。本表は統計解析の教科書的な考え方によつて纏められており、一見造作なく記入可能のように思われるが、この計算が意外に手間ひまが掛かる。しかし、一方ではせつかくの貴重なデータであるから、この程度の特性は第一次解析結果として出しておかねばならないであろうということから、本稿で述べる専用解析装置の話が持ち上つたことは前述の通りである。

不規則現象を解析するとき、現象のオーダを知るだけでよいならば、振幅および周期の平均値、有義値、最大値などを求めればその目的を達成し得る。この範囲の計算すなわちここでいう統計解析は簡単であるが、現象の生因とか実験と理論の対応などを知る事を欲するならば

Table 1 SR-108 解析結果用紙

PHENOMENON		Roll(Y-39-H)		unit Deg	
Team_Yokohama-U.		M.V. Haruna-Maru		Home-Ward	
		(1)	(2)	(3)	(4)
Exp. No.		Ordinary	Ex. Val.	Analyser	Expre. of
[No. of Doubt]		Method	of Ray. D.	Method	Display
1	N	94		71.5	N
2	H	1.950		1.62	H(1.)
3	Hrms	2.227		(2.13)	(VH.VAR)
4	H <sub>1/2</sub>	3.214		2.87	H(.3)
5	H <sub>1/4</sub>	4.057		4.00	H(.1)
6	Hmax	4.983		5.50	H(MX)
7	T <sub>0</sub>	13.994	[→T <sub>0</sub> ]	13.90	T.ZCR
8	T <sub>m</sub>	7.933	[→T <sub>m</sub> ]	8.97	T.PTP
9	Hrms/H	1.142	[→1.129]	(1.31)	
10	H <sub>1/2</sub> /H	1.648	[→1.598]	1.77	
11	H <sub>1/4</sub> /H	2.081	[→2.032]	2.47	
12	Hmax/H	2.555	[→2.4-2.8]	3.40	
13	σ <sub>s</sub> /H	0.456	[→0.399]	0.55	
14	T <sub>m</sub> /T <sub>0</sub>	0.567	[<1]	0.65	
15	σ <sub>s</sub> ' = (2σ <sub>s</sub> /H) · Hrms	0.787	[→σ <sub>s</sub> ]	(0.75)	
16	c' = √{1 - (T <sub>m</sub> /T <sub>0</sub> ) <sup>2</sup> }	0.824	[→c <sub>s</sub> ]	0.76	
17	Sampling Time	1.000		1.0	
18	No. of Data	1341		1024	
19	No. of Lag	130		(256)	
20	ω <sub>1</sub> [Lower Limit of Integ.]	0		0	
21	ω <sub>2</sub> [Higher Limit of Integ.]	1.208		2.16	
22	ω <sub>p</sub> [Peak Freq.]	0.387		0.39	PF
23	σ <sub>s</sub> = √{2 ∫ S(ω) dω}	0.889		0.896	P.STD
24	ε <sub>s</sub> = √{(m <sub>0</sub> - m <sub>1</sub> )/m <sub>0}}</sub>	0.692	[→ Ray. D.]	0.797	BWP
25	(T <sub>0</sub> ) <sub>s</sub> = 2π(m <sub>0</sub> /m <sub>1</sub> )	17.33			
26	(T <sub>0</sub> ) <sub>s</sub> = 2π/m <sub>0</sub>	15.49		14.4	T(Z)
27	(T <sub>m</sub> ) <sub>s</sub> = 2π/m <sub>s</sub>	11.18			
28	Hv [Mean Double Amp.]	1.9		8.69	T(P)
29	Tv [Mean Period]	15.8			
30	Hv/H	0.97			
31	Tv/T <sub>0</sub>	1.13			

スペクトラム解析が必要になり、数値計算は途端に著しく複雑になる。Table 1 下半分では、単なるスペクトラム計算だけでなく若干の計算が追加されているが、この程度の追加計算はスペクトラム計算の工数に較べると問題ではなく、またここまで追加計算する事の意義は大であるので補足されている。また、本表での統計解析はスペクトラム解析の結果と対照するため通常の場合に比しやや複雑な計算内容になっている。

計測コンテナシステムの専用解析装置によつて得られる結果も、Table 1 と同等であれば実用上充分であるとの見解のもとに解析装置の計画を開始した。

### 16. データ処理

一般にデータレコーダ上へ記録された現象をデジタルコンピュータで解析するとき、記録されているアナログ電圧を単位を附した現象のデジタル数列に直す事をデータ処理と言っているようである。具体的に計測コンテナシステムの場合には、アナログデータレコーダ (ANALOG-7) で磁気テープ上にアナログ電圧として



記録されている現象を、例えば1秒ごとに20分間読み取り、それに電圧を現象に換算する係数(較正係数、例えばピッチ角に対して10度/ボルトのような値)を乗じて現象としての単位を持つデジタル時系列を得る。

これらのデジタル数列は、メモリーにストアされるか、磁気テープあるいは紙テープにもう一度記録される。多チャンネル解析の場合に、同一時刻で多チャンネルの時系列をスライスする必要がある場合にはサンプルホールドなる回路を要し、高級仕様になる。データ処理装置とはこのようにA-D変換および並べ替えをするような装置であり、この種の装置は大型デジコンの附加設備として重要な役割を持つので、市販品が多数ある。しかし、これらの既製の装置は大型でかつ高値である。また、大型計算機本体とマッチングをとっているので、この処理装置の出力を任意の大型計算機への入力とする事はできないので、共同利用を前提として考えている本システムには不向きである。

このようなことから、大型データ処理装置程度の価格で出来るA-D変換器付きの小型専用高速解析装置の試作購入が線上に浮び上つて来た。

### 17. 専用高速解析装置

以上のような理由から、専用解析装置を試作する事になったが、いざとなると要求はエスカレートしてきて、製作方針の大綱は下記のようになった。

#### 1) リアルタイム解析

現象が終るとほぼ同時に解析結果が得られるという事で、連続して解析を行なっている場合には、現象と同じように解析結果がリアルタイム(実時間)で進行しているように思われる。実時間相関計とか実時間スペクトル解析器と称する市販品がある位で、実時間(リアルタイム)なる単語は当分流行の術語であるばかりでなく、確かに高速フーリエ変換(F.F.T., Fast Fourier Transformation)のアルゴリズムを使用すると従来の算法のパーセントオーダの時間でスペクトラムの計算ができ、正にリアルタイム解析が可能である。したがって、本システムでもF.F.T.を基本にした解析装置になった。

#### 2) グラフィックディスプレイおよびハード・コピー

如何にリアルタイムで解析ができて、普通のコンピュータ出力のように数表で結果が出て来るのでは、その内容をリアルタイム的に素早く理解できない。また普通のプリンターではその出力に要する時間も大であり、折角リアルタイムで計算した意味も薄れる。X-Yプロッタによる図化はさらに時間を要する。

そこで本システムでは、従来法に比しきわめて高速であるブラウン管によるグラフィックディスプレイ(図化表示)を行なうとともに、この画面をそっくりそのままコピーするハードコピー装置を附加することにした。したがって、高速演算された結果は直ちにブラウン管上に判りやすい図になつて示される。たとえばスペクトラムの図を重ねて図化させると、スペクトラムが時々刻々に変化する様子がわかり、正に実時間解析の名に恥じない総合機能を有することになる。

本装置の完成時には、このような小型の専用解析装置で、ブラウン管によるディスプレイを持つ装置は国内にはほとんどなかった。ましてハードコピー装置を持つ小型装置としては国産1号機ではないかと思われる。またもや、自画自讃になつて恐縮であるが、ディスプレイされる図すなわちコピーされる図の基本的な割り振り、およびデザインは筆者によつてなされているが、このまとまりの良さも見逃がせない特色であろう。

#### 3) 可搬、船載型

現象の解析結果がリアルタイムで図化される事になると、さらに欲が出てその結果をその時点での操船に役立たせたい。従つて、ついでに解析装置を可搬型として、各実験船に持ち込めば、記録と同時に解析が出来、その結果を操船者にその場で知らせて荒天航行時などには運航の指針として利用してもらうことが可能である。

本装置はPhoto. 10に示したように、実際に可搬型として製作され、正式の名称も“船載型船体運動高速解析装置”となつている。また、昭和47年度のSA号の実験(川崎重工担当)では、本装置をホールハウス内に、リモートコントローラと並べて設置して、記録と同時に解析を実施し、船載型としての実用試験を行なつた。

しかし、本装置の解析結果を操船者が理解するためにはある程度の訓練期間が必要である事がわかつた。一方、SR-125部会では被実験船が毎回変る事になっているので、ある船に本装置を固定しておく事はできない。また、本装置は一式しかないのに船に載せてしまうと、陸上での解析がストップしてしまう事になり、部会全体の解析効率がかえつて落ちる事にもなつてしまう。

さらに、本装置は極力小型軽量にしたのであるが、人力での船橋内への搬入が困難な程度に重くなつてしまつた事、また高安定、高信頼性に留意して製作したのであるが、主要部分はデジコンとその関連機器であ

り、陸上では空調された部屋に入っている代物であるからその故障に一抹の不安感が残つた事と、故障してしまうと乗船している計測員では全く手がつけられないであろう事、などの理由からそれ以後は船載を中止している。しかし、本装置は船載を前提として製作したので、各機器の絶縁処理は船用規格に準じており、

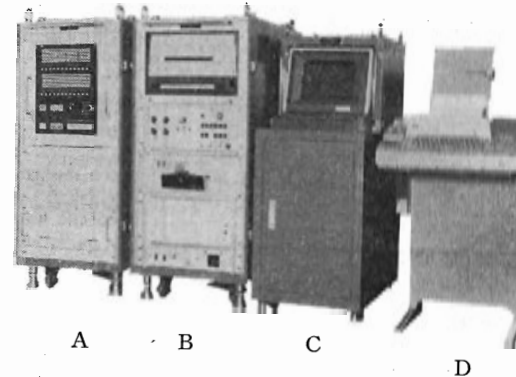


Photo. 10 専用高速解析装置

A: ミニコン, B: コントロール部とハードコピー器(最上段), C: ディスプレーと対話キーボード, D: 紙テープパンチャー(主としてプログラムテープ作成用, 通常は使用しない)。

ケースも堅牢なものになつており、耐震、耐湿、耐温度特性も充分である。その故か今までの実績ではコンピュータを主体にした機器にしては非常に故障が少ない。

このような要求事項を受けて立つた数社が真剣な技術的および价格的競争をした後に、日本無線 K.K. に発注が決まり、約8カ月後に完成したのが Photo. 10 として外観を示した装置である。そのブロックダイアグラムを Fig. 6 に示す。

外観上の特色は船載型であるので筐体を低くし、計測コンテナ用リモートコントローラと高さ、幅、奥行を合せてある。キャンバーのある甲板上でも垂直に立てられるように調節高の大なる脚がついている。また、船橋への釣り上げに便するようにコンピュータには不釣合なアイボルトがついている。さらに大動揺時につかまれるように握り手までついている周到さである。筐体はA, B, C, Dの4箇に分かれているが、各筐体に入っている部分を Fig. 6 中に枠で囲つて示した。Aはミニコンの筐体で、現在、メモリーは12Kワードとなつている。Bの筐体には2チャンネルのサンプルホールドつきA-Dコンバータと各種のコントロール部およびハードコピーユニットが入っている。Cは既製のグラ

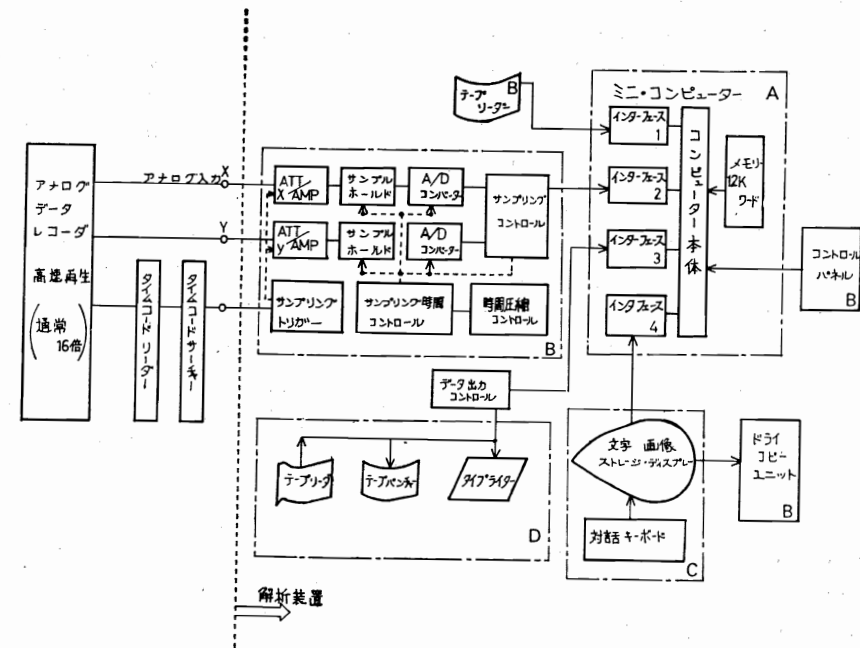


Fig. 6 専用高速解析装置のブロックダイアグラム

フィックディスプレイを船載型として安定を良くするため囲った筐体である。Dは普通のリーダーつきの紙テープパンチャで、プログラムテープの作製時にしか使用しないので、船には搭載しないことになっている。

Fig. 6 に示されているように、本装置は2チャンネルの解析装置である。いかに多チャンネル記録でも2現象間の相関を何回もとれば、相互の関係は明らかになるであろうという事から、チャンネル数は必要不可欠な最低の2チャンネルにおさえた代りに他の機能は最高のものにした。

標準的な解析の様子を概説すると、まず解析する現象をたとえばピッチ角とロール角という具合に選ぶ、データレコーダの1, 2チャンネルにその現象が記録されているとすると、1, 2チャンネルの再生出力を解析装置の入力コンセントに接合する。次に解析開始時刻をタイムコードサーチにセットし、データレコーダを高速再生する、実船試験の解析では通常16倍の高速再生にしている、実時間で16分の記録は1分間で解析装置に読み込まれる。なお、本装置では時間圧縮コントロール回路により、16倍の高速読み込みを行なっても解析結果は実時間読み込みと全く同じになるようになっている。これも本装置の特色の一つである。

予めセットされた計算プログラムおよび図化、コピープログラムによつて、読み込まれたデータは高速に演算され、読み込み終了後まもなくブラウン管上に結果が図示される、図化プログラムの指定によつて、中間計算結果の図や刻々と変化する図を表示させる事もできる。そしてコピー指令のある所ではブラウン管上の図と全く同じドライコピーがハードコピーから出て来る。

その一例を Fig. 7 として掲げた。この図は実船試験の一次解析として共通して使用している標準解析方式の図の一つである。上図は両振幅のヒストグラムで、右肩の表示は Table 1 の1~8欄と同じ内容の計算結果を示している。Table 1 の(4)列の Expre. of Display (ディスプレイ上の表現)は Fig. 7 中の表現を意味し

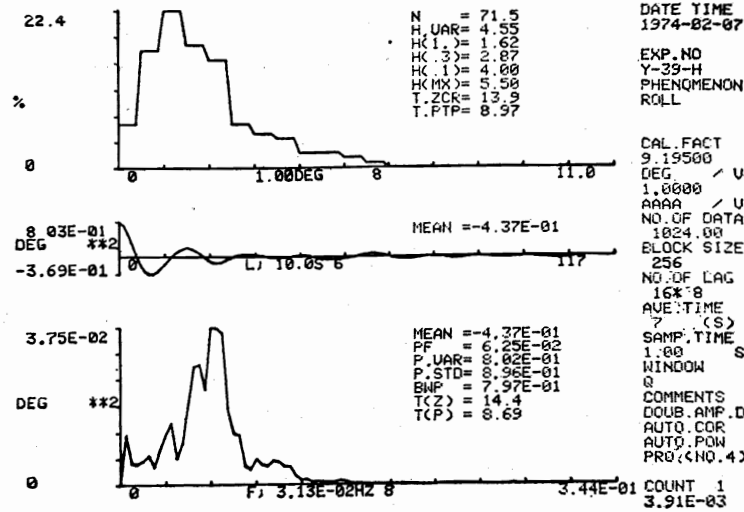


Fig. 7 解析装置によるハードコピーの例

ている。中図はオートコリレーションである。下図はオートパワースペクトラムで右肩の表示は Table 1 の22~27欄の計算に対応している。Table 1 の(3)列には Analyser (FFT) として Fig. 7 中の結果が記入されており、(1)列には Ordinary Method として、従来法による船用計算機での計算結果が示されている。本装置での計算法は FFT 法で、スペクトラムの計算法が従来法と基本的に異なっている、従来法との比較検討が必要である。ここに掲げた例は必ずしも適切な例ではないが、両計算法による結果は大約一致すると見てよいであろう。なお、FFT 法による計算法の解説、従来法との差異については後に詳述するつもりである。

Fig. 7 の縦軸はオートスケールで、各図の上端の数字が最高値を示している。横軸の右端の数字は右端の値を示し、中程の数字は1目盛の数字を示しており、例えば下図の F, 3.13E-02 HZ は横軸が F (Frequency, 周波数) であり、1目盛の間隔が  $3.13 \times 10^{-2}$  HZ であることを示している。

前述のように、Fig. 7 の計算は簡単なようであるが、従来法によると時間のかかる計算であるが、さらにそれを図にしたものが、実感としてはデータの読み込みとは同時にでて来るのであるから、従来法によつて同種の計算をした経験のある者にとっては本装置は正に驚異の新兵器の出現であつた。

(つづく)

# L N G 船

## (その4 材料・溶接および破壊力学) (6)

恵 美 洋 彦\*  
伊 東 利 成\*

### 9-4 疲労と破壊力学

#### 9-4-1 疲労設計と破壊力学

疲労を考慮した設計手法を LNG 船のタンクについて

示すと図9-55のようになる。また、図9-56に NK 規則に示すタンクの種類とこれらに対応する疲労強度解析および破壊機構解析の適用を示す。

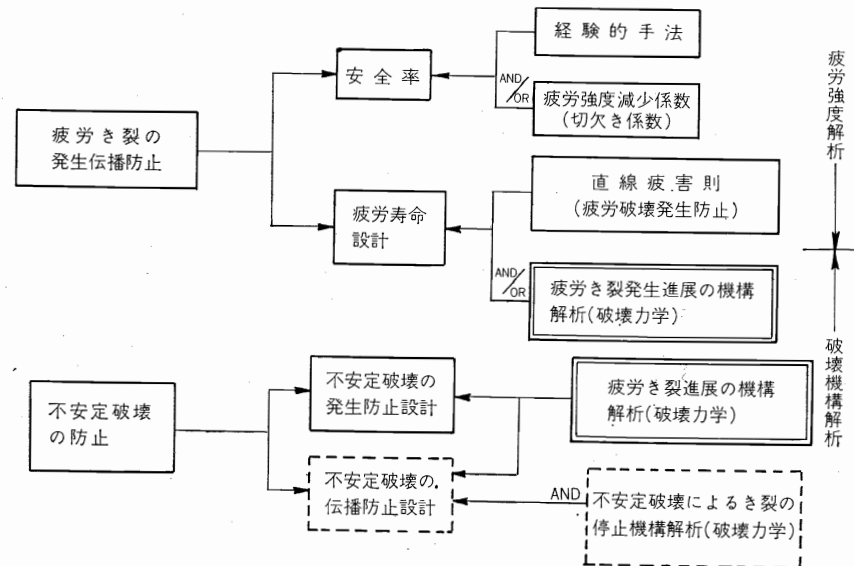
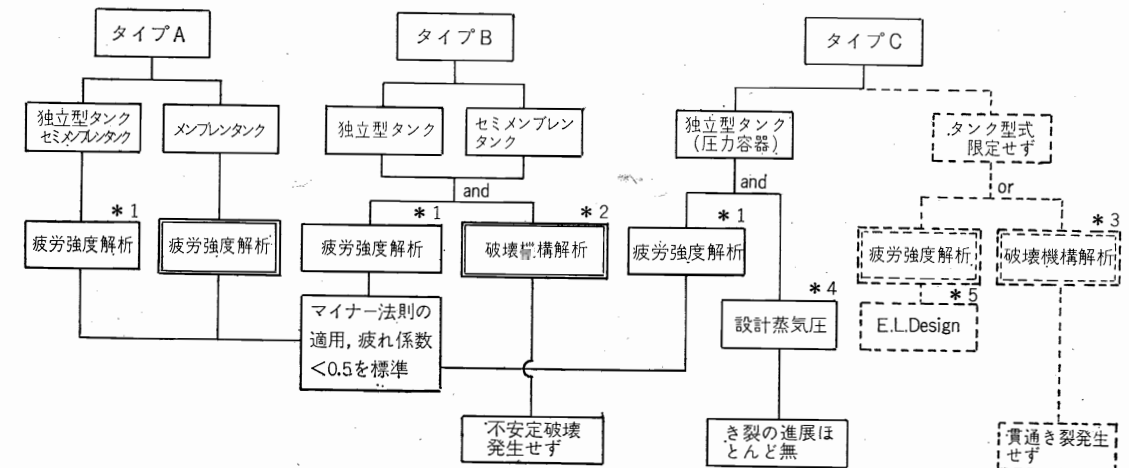


図 9-55 疲労を考慮した LNG 船の設計手法



- \*1 良好な実績が十分ある構造・形状に対しては省略可。ただし、応力の解析の不可能なタンク、あるいは部分については省略不可
- \*2 貫通後のき裂が不安定破壊に到らないような設計
- \*3 完全な破壊機構解析を行ない、あらゆる箇所貫通き裂が発生しないような設計 (逆に、压力容器タンクの場合は、初期欠陥が貫通き裂とならないような設計蒸気圧を採用しても可)
- \*4 高い設計蒸気圧を採用し、変動応力の影響がほとんどないような設計
- \*5 疲労強度試験において切欠係数、形状係数、溶接欠陥等を考慮して S-N 曲線を求め、マイナー法則の累計傷損度を、十分な安全率を見込んで従来採用されている値より少なくとも1桁以上小さくする。

図 9-56 NK 規則による LNG タンク疲労強度解析の概要

\*日本海事協会船体部



実船試験用計測コンテナシステム (3)

III 解析ソフトウェア

竹 沢 誠 二

18. FFT アルゴリズム

すでに述べたように、本解析装置の演算が高速であることの基幹はソフトウェアにFFTアルゴリズム (fast Fourier transformation algorithm) すなわち高速フーリエ変換の算法を採用したことにある。不規則時系列あるいは任意波形の数値解析にあたり、フーリエ解析は、その基本的な算法として重要な役割を持つが、その演算は定義式どおりに計算を行なう“直接フーリエ変換法”によると電算機を使用する場合でも時間の掛かる計算の代表例であった。

ところが、1965年に Cooley と Tukey により“計算機による復素フーリエ係数の一算法”と題した論文<sup>4)</sup>が発表されFFT法が誕生した。

本法によるとフーリエ解析しようとしている時系列あるいは波形が長いほど、従来法すなわち直接フーリエ変換法に比し演算時間は対数的に短くなる。本来、莫大な数列を取扱うことが目的である電子計算機のソフト関係者が、この劃期的な算法を見逃すはずはなく、以後、短期間のうちにFFT法は実用算法として各界へ波及した。

しかしながら、膨大な数値計算を得意とし、それ故に他学界に比し電算機による技術計算が広く行なわれている学界であるにもかかわらず、意外にも造船学界ではいまだにFFT法はあまり普及していない。そこで、誌面を借り、以下にFFT法の算法の簡単な解説を試みるとともに、その長所などを紹介しよう。

フーリエ解析は任意の時間波形および空間波形に適用可能であるが、実船実測値すなわちここで解析しようとする対象は不規則な時間波形であるので、以後、時系列を解析するものとしてFFTの解説を行なう。

時間ベースに連続なアナログ量として記録された時間波形があるとき、デジタル計算機に入れて解析するためには、等時間間隔 ( $\Delta t$ ) ごとに原データをデジタル量として読み取り、デジタル時系列にする必要がある。この操作を Analogue 量を Digital 量に変えるのでA-D変換と言い、 $\Delta t$  をサンプリングタイム、この逆数をサンプリング周波数と呼ぶ。

実測記録が十分に長くあっても、計算機の容量などの関係から、適当なサンプル数  $N$  まで計算する時系列を打切り、有限な時系列  $X_t$  (標本数  $N$  の  $t$  番目) に対する次式の有限フーリエ変換 (DFT, discrete Fourier transform) を行なうことになる。

$$C_x(f) = 1/N \sum_{t=0}^{N-1} X_t \exp(-i2\pi ft/N) \dots\dots\dots(1)$$

$f = 0, 1, \dots, N-1$

$C_x(f)$  は  $X$  の  $f$  次の復素型有限フーリエ係数で、次式のように、 $f$  次の実部フーリエ係数  $A_x(f)$ 、虚部フーリエ係数  $B_x(f)$  でも表現できる。 $A_x(f)$  を余弦フーリエ係数、 $B_x(f)$  を正

船 舶  
1975 (昭和50年) 4月号  
Vol 48/No.4  
& U  
1975 (昭和50年) 5月号  
Vol 48/No.5

弦フーリエ係数とも言う。

$$A_x(f) = 2/N \sum_{i=0}^{N-1} X_i \cdot \cos(2\pi f t / N) \dots\dots\dots (2)$$

$$f = 0, 1, \dots, N/2-1, N/2$$

$$B_x(f) = 2/N \sum_{i=0}^{N-1} X_i \cdot \sin(2\pi f t / N) \dots\dots\dots (3)$$

$$f = 1, 2, \dots, N/2-1$$

$X_i$  は時系列であるから、 $f$  は周波数に対応した番号になり、(1)式から  $N$  個の周波数に対応するフーリエスペクトル  $C_x(f)$  を得る。なお  $N \cdot C_x(f)$  をフーリエ係数と定義する場合もある。

逆フーリエ変換、すなわち  $C_x(f)$  がわかっているときに時系列  $X_i$  を算出する場合を考える。(1)式の有限逆フーリエ変換 (IDFT, inverse discrete Fourier transform) は次式で与えられる。

$$X_i = \sum_{f=0}^{N-1} C_x(f) \cdot \exp(2\pi i f t / N) \dots\dots\dots (4)$$

$$i = 0, 1, \dots, N-1$$

(2), (3)式の  $A_x(f)$ ,  $B_x(f)$  で表現すると

$$\begin{aligned} X_i = & A_x(0) + 2 \sum_{f=1}^{N/2-1} A_x(f) \cdot \cos(2\pi f t / N) \\ & + A_x(N/2) + 2 \sum_{f=1}^{N/2-1} B_x(f) \cdot \sin(2\pi f t / N) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$i = 0, 1, \dots, N-1$$

$C_x(f)$  と  $A_x(f)$ ,  $B_x(f)$  の間には次の関係があるので計算が簡略化される。

$$C_x(0) = A_x(0)/2, C_x(N/2) = A_x(N/2)/2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} C_x(f) &= [A_x(f) + i B_x(f)]/2 \\ C_x(N-f) &= [A_x(f) - i B_x(f)]/2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$f = 1, 2, \dots, N/2-1$$

したがって

$$C_x^*(f) = C_x(N-f) \dots\dots\dots (8)$$

$$f = 1, 2, \dots, N/2-1$$

\* は共役複素数を表わす。

$f = 1, 2, \dots, N/2-1$  に対する  $A_x(f)$  と  $B_x(f)$ , および  $A_x(0)$ ,  $A_x(N/2)$  を求めれば、 $N$  個のフーリエ係数  $C_x(f)$  が算出できたことになる。本解析装置では(2), (3)式のような  $N/2$  個の計算方式をとっている。なお、本装置では1回の計算に使用するサンプル数  $N$  をブロックサイズと呼んでいる。

さて、(1)式の DFT を式通りに“直接フーリエ変換”する場合の演算数は約  $N^2$  回にも達し、いかに電算機にあっても  $N$  が大になれば演算時間が大になり厄介がられていた演算の一つであった。一方、フーリエ解析の必要度は各界で高まる一方であったので、FFT アルゴリズムの開発は重大発明にも匹敵する価値があったと言える。

高速フーリエ変換 (FFT, Fast Fourier Transform) の解説は、造船学会関係では山内、大津の論文<sup>7)</sup>の附録に述べられているのが唯一の例のようであるが、この記述は平易であるとはいえない。容易に入手できる和文の解説としては、吉沢正著“数値解析”<sup>8)</sup>(岩波、基礎工学)に有限フーリエ係数のクーリー・チューキーの算法として詳細に述べられている。電気通信あるいは数値計算関係の学会では5~6年前に非常な関心が持たれた項目のようであり、FFT に関する解説記事は予想外に多い。

解説論文としては、I.E.E.E. すなわち米国電気通信学会誌に1967年に発表された Cochran, Cooley の論文<sup>9)</sup>が有名のようで、山内、大津の論文<sup>7)</sup>および山田、横井の論文<sup>8)</sup>でもこの論文に従った説明がなされている。ここでは、やはり IEEE に1969年に発表された、もう一つの著名な解説論文である Bergland の解説<sup>10)</sup>を紹介することにしよう。なお、Cochran, Cooley の解説とは相当に異なるので、興味のある方は山田、横井の論文なども併読されたい。

いま

$$W_N = \exp(i2\pi/N) \dots\dots\dots (9)$$

と定義すると、(1)式のフーリエ変換は

$$C_x(f) = 1/N \sum_{i=0}^{N-1} X_i \cdot \exp(-i2\pi f t / N) \dots\dots\dots (1)$$

$$C_x(f) = 1/N \sum_{i=0}^{N-1} X_i \cdot W_N^{-f t} \dots\dots\dots (10)$$

と書け、(4)式の逆フーリエ変換は

$$X_i(t) = \sum_{f=0}^{N-1} C_x(f) \cdot W_N^{f t} \dots\dots\dots (11)$$

となる。

ここで、(10), (11)式をまとめる一般型を考える。

$$\hat{X}(j) = \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot W_N^{j k} \dots\dots\dots (12)$$

$\hat{X}(j) \rightarrow X_i$ ,  $A(k) \rightarrow C_x(f)$  とすれば(11)の逆変換式になる。

(10)式を共役複素数で変形すると

$$C_x(f) = 1/N \left[ \sum_{i=0}^{N-1} X_i^* \cdot W_N^{f t} \right]^* \dots\dots\dots (13)$$

となるので、(12)式で

$\hat{X}(j) \rightarrow C_x^*(f)$ ,  $A(k) \rightarrow X_i^*/N$  とすれば正変換式(10)と同じになる。

故に、ここで以後(12)式一般型で FFT のアルゴリズムと考えることにしよう。

説明を簡単にするため、 $N=8$  の場合について述べることにすると、

$$j = 0, 1, \dots, 7 \quad k = 0, 1, \dots, 7$$

までを考えればよい。

$j, k$  を2進数で表わすと

$$\left. \begin{aligned} j &= j_2 4 + j_1 2 + j_0 \\ k &= k_2 4 + k_1 2 + k_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

となり、ここに  $j_0, j_1, j_2$  および  $k_0, k_1, k_2$  はそれぞれ0か1の値しかとれない。

(12)式を  $j_0, j_1, \dots$  など書き換えると

$$\hat{X}(j_2, j_1, 0) = \sum_{k_0=0}^1 \sum_{k_1=0}^1 \sum_{k_2=0}^1 A(k_2, k_1, k_0) \cdot W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)(k_2 4 + k_1 2 + k_0)} \dots\dots\dots (15)$$

ここに  $W_N^{m+n} = W_N^m \cdot W_N^n$

であるから

$$\begin{aligned} W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0)(k_2 4 + k_1 2 + k_0)} \\ = W_N^{j_2 4 + j_1 2 + j_0} \cdot W_N^{k_2 4} \cdot W_N^{j_2 4 + j_1 2 + j_0} \cdot k_1 2 \cdot W_N^{j_2 4 + j_1 2 + j_0} \cdot k_0 \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

右辺の各項を書き改めると

$$W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0) k_2 4} = [W_N^{j_2 4 + j_1 2 + j_0}]^{k_2} \cdot W_N^{j_0 k_2 4} \dots\dots\dots (17)$$

$$W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0) k_1 2} = [W_N^{j_2 4 + j_1 2 + j_0}]^{k_1} \cdot W_N^{j_0 k_1 2} \dots\dots\dots (18)$$

$$W_N^{(j_2 4 + j_1 2 + j_0) k_0} = W_N^{j_2 4 + j_1 2 + j_0} \cdot k_0 \dots\dots\dots (19)$$

ここに



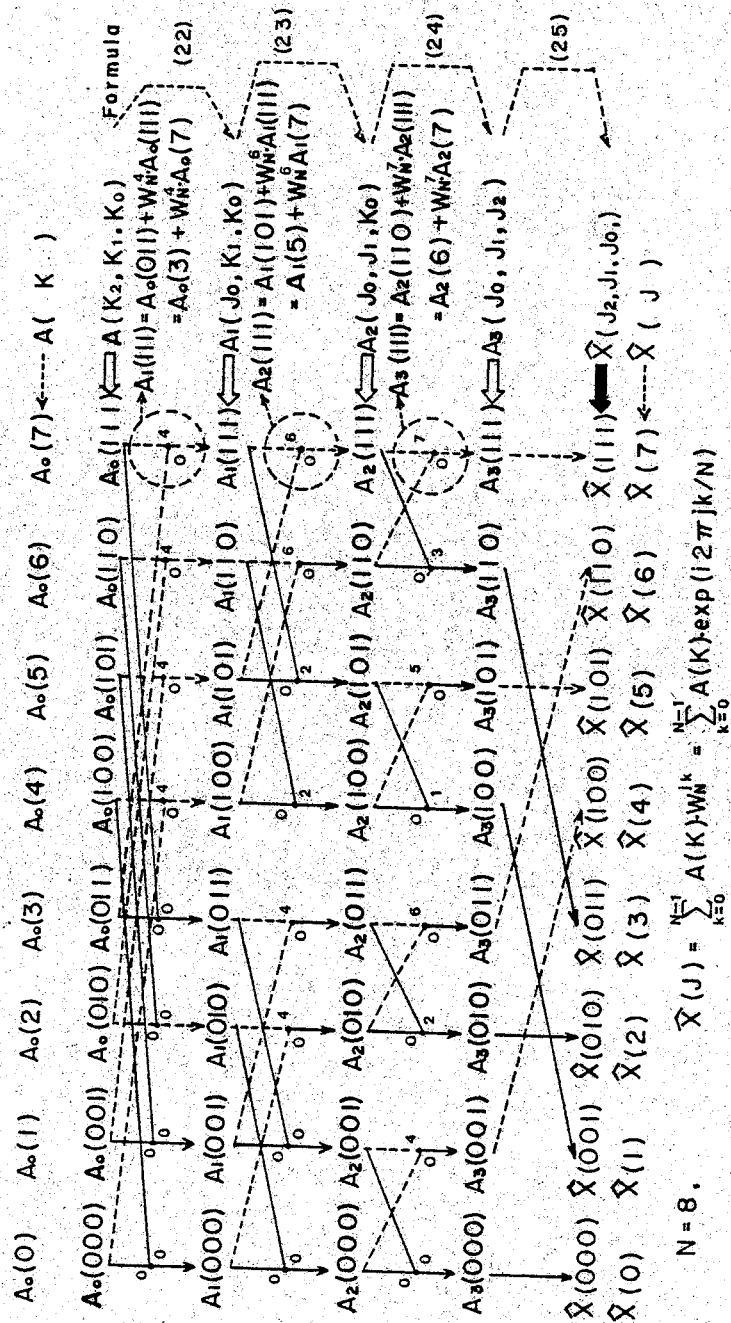


Fig. 8 FFT アルゴリズムの説明

$$W_{N^2} = [\exp(2\pi i/8)]^8 = \exp(2\pi i) = 1 \dots \dots \dots (20)$$

であるから、(17), (18)式の [ ] 内は 1 になる。

故に(18)式は次のように書ける。

$$\hat{X}(j_2, j_1, j_0) = \sum_{k_0=0}^1 \sum_{k_1=0}^1 \sum_{k_2=0}^1 A(k_2, k_1, k_0) \cdot W_N^{j_0 k_2^4} \cdot W_N^{j_1(2^2+j_0)k_1^2} \cdot W_N^{j_2(2^2+j_1^2+j_0)k_0} \dots (21)$$

この式を上記のようにサンメーションを分けて考えると、(21)式は以下の式で順番に計算されることになる。

$$A_1(j_0, k_1, k_0) = \sum_{k_2=0}^1 A(k_2, k_1, k_0) W_N^{j_0 k_2^4} \dots \dots \dots (22)$$

$$A_2(j_0, j_1, k_0) = \sum_{k_1=0}^1 A(j_0, k_1, k_0) W_N^{j_1(2^2+j_0)k_1^2} \dots \dots \dots (23)$$

$$A_3(j_0, j_1, j_2) = \sum_{k_0=0}^1 A_2(j_0, j_1, k_0) W_N^{j_2(2^2+j_1^2+j_0)k_0} \dots \dots \dots (24)$$

すなわち

$$\hat{X}(j_2, j_1, j_0) = A_3(j_0, j_1, j_2) \dots \dots \dots (25)$$

となるが、この式から  $\hat{X}$  と  $A_3$  はビット逆転 (bit reversal) の関係に並べ換えられていることが判る。

(21)式あるいは(22)~(25)式の演算を図示すると Fig. 8 のようになる。なお図中の・印の近くの数字は、たとえば 4 ならば  $W_{N^2}^4$  であることを意味している。本図が理解できれば、FFT アルゴリズムの大半が判ったと言える。(21)~(25)式と対比しながらじっくりと見ていただきたい。

なお、 $N=8$  の場合には

$$W_N = \exp(i2\pi/8) = \cos \pi/4 + i \sin \pi/4 \dots \dots \dots (26)$$

である。したがって、次式の関係があり、実際の演算は 1 または  $i$  を乗ずることが多く、いちじるしく簡単になっている。

$$\left. \begin{aligned} W_{N^2} &= i, W_{N^4} = -1, W_{N^6} = -i, W_{N^8} = 1 \\ W_{N^1} &= -W_{N^5}, W_{N^3} = -W_{N^7} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (27)$$

Fig. 8 で Node (・印) の数は  $8 \times 3$  すなわち、 $N=8=2^3$ 、 $3 = \log_2 N$  であるので、 $8 \times 3 = N \times \log_2 N$  であることが理解できる。

一般に  $N=2^n$  の場合には、Fig. 8 の縦線上の Node の数は、縦線 1 本につき  $n$  箇となるので、

$$N=2^n \text{ では Node の数} = N \log_2 N \dots \dots \dots (28)$$

なる関係がある。また、一つの Node では図中に例示したように、

$$A_1(7) = A_0(3) + W_{N^4} \cdot A_0(7) = A_0(3) \cdot W_N + A_0(7) \cdot W_{N^4} \dots \dots \dots (29)$$

一般に、2回の複素乗算と1回の加算が行なわれるが、第1の乗算は1を掛けるだけであるから、実質上は乗算回数は半分になる。また、(21)式のような関係があるので、第2の乗算回数も大分半になってしまう。すなわち、FFT 法では  $N/2 \cdot \log_2 N$  回の複素乗算と  $N/2 \log_2 N$  回の複素加算で演算が完了する。これに対し、(21)式式に従って直接計算すると  $N^2$  回の複素乗算と加算の複合計算が必要である。FFT 法と直接法の演算回数の比を安全側に見積って

$$2N \log_2 N / N^2 = 2 \log_2 N / N \dots \dots \dots (30)$$

とすると、

- $N=256=2^8$  では  $1/16=0.063$
- $N=512=2^9$  では  $1/28=0.035$
- $N=1024=2^{10}$  では  $1/51=0.020$
- $N=2048=2^{11}$  では  $1/93=0.011$

となり、 $N$ が増すにつれて小になり、よく使用される  $N=1024$  の場合で約2%、すなわち約50倍の速度で演算可能なことがわかる。

計算時間の短縮率はこのような簡単な算式では厳密には表わせないが、 $N=2^{10}=1024$  の場合に、IBM-7094 で FFT 法では約5秒、従来法では約30分の計算時間であったとの記述<sup>(9)</sup>がある。この時間の比は  $1/365$  で、上式で算出すると約1/300であるから、略算式はほぼよい値を与えることがわかる。

### 19. FFT 法を利用したパワー・スペクトル算法

#### A) 算法概説

一般に波浪中の実船試験で得られる記録は、海洋波の記録と同様に不規則現象であり、基本的に確率過程として取り扱わねばならない。確率過程をフーリエ解析する場合、すなわち確率過程の特性を周波数の場から見ようとするとき、パワー・スペクトラム（密度関数）を求めるのが通常の手段になっている。パワー・スペクトラムの算法は文献<sup>(1)</sup>に詳述されているので、以下に述べる標準的な算法を Blackmann-Tukey 法 と呼ぶ人もいる。

いま、オートパワスペクトラムを  $S_{xx}(f)$  とすると、これはオートコリレーション  $R_{xx}(\tau)$  フังก์ションのフーリエ変換として次式によって算出される。

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) \cdot \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

$$= 2 \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau) \cdot \cos(2\pi f\tau) d\tau$$

すなわち、時間  $\tau$  の関数である  $R_{xx}(\tau)$  の周波数領域の表現が  $S_{xx}(f)$  である。前述のフーリエ解析の場合、つまり解析対象が決定論的な波形である場合にはこの式の計算のみで波型解析が終ってしまったが、ここで取扱おうとしている確率過程の場合では、確率過程の特性を表現する時間関数  $R_{xx}(\tau)$  をまず求めておき、そのフーリエ変換として確率過程の周波数領域での表示であるパワスペクトル  $S_{xx}(f)$  が始めて得られる。

ここで、不規則時系列  $x(t)$  の自己相関関数 (autocorrelation function)  $R_{xx}(\tau)$  は次式で求まる。

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t+\tau) dt \quad (2)$$

$x(t)$  が  $\Delta t$  時間ごとのサンプル値で与えられていると、

$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(h\Delta t) = (1/M-h) \sum_{m=1}^{M-h} x(m\Delta t) \cdot x(m\Delta t+h\Delta t) \quad (3)$$

$$h=0, 1, 2, \dots, l$$

となる。③式の演算回数はラグ類と呼ばれる  $h$  を  $l$  までとることにすると約  $l \times M^2$  となり、手間のかかる計算であることが判る。またこのような方式による場合 ③式のフーリエ変換も直接法によって計算していることが多いのでパワスペクトルを得るまでの計算機使用時間はさらに大になる。なお  $S_{xx}(f)$  の周波数分解能はラグタイム  $L=l \cdot \Delta t$  の逆数になる。

いま、原信号  $X(t)$  をフーリエ変換してフーリエ係数  $C_x(f)$  を求め、次式の表現を考えると

$$P_{xx}(f) = C_x(f) \cdot C_x^*(f)$$

$$= [A_x(f) + iB_x(f)] \cdot [A_x(f) - iB_x(f)] \quad (4)$$

$$= A_x^2(f) + B_x^2(f)$$

$$f=1, 2, \dots, N/2-1$$

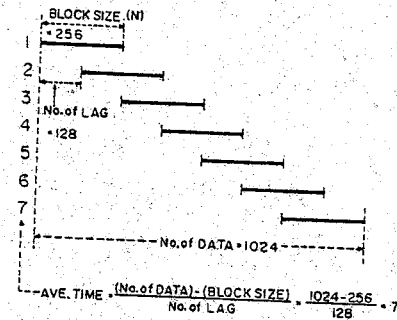


Fig. 9 重ねずらし平均法の説明

この  $P_{xx}(f)$  は形式上は原信号のパワーの周波数領域での表示になっており、④式から得られる  $S_{xx}(f)$  と等価のように思われる。しかし、この類推は軽率に過ぎることは明白である。

オーソドックスな算法によって得られた  $S_{xx}(f)$  と、自己相関関数を介さずに原信号を直接にフーリエ変換して得られる  $P_{xx}(f)$  の関係が如何なるものであるかの検討は別の文献にその解説をゆだねるとして、たとえば文献<sup>(4)</sup>の第2章(著者、石井 泰)には詳細な説明が出ている、その結論によると、

$$S_{xx}(f) \approx E[P_{xx}(f)] \quad (5)$$

のような関係にある。ここに  $E$  は集合平均を表わしているが、多数の  $P_{xx}$  の平均値が  $S_{xx}$  に近づくことを意味している。逆に一つ一つの  $P_{xx}$  は凹凸が激しく、その時点での周波数特性を示すが、それらを平均すると全体特性であるパワスペクトルに近いものが得られる。

そこで、本装置ではFFT法の利点を活かすことのできる④式によって  $P_{xx}(f)$  を求め、またFFT法によると、④式の計算は極めて短い時間で終了するので、さらに Fig. 9 に説明図を示した「重ねずらし平均法」を採用し⑤式のように  $P_{xx}(f)$  の平均値を算出し、 $S_{xx}(f)$  と等価とみなすことにした。

Fig. 9 中の数値は以下に示す例題に使用した値が記入されているが、データ数 (No. of DATA) 1024 箇のデジタル数列の計算をする時、その数列のうち最初の256箇の数列についてFFTを基礎にした④式の計算を行なう。この1回の計算に使用するデータをブロックと称し、図の例ではブロックサイズ  $N$  は256箇ということになる。次にラグ数 (No. of LAG) だけずらして2回目のブロックを取り、④式の計算を繰返す。このようにして、ずらした各ブロックについて  $P_{xx}(f)$  を算出し、その平均値  $\bar{P}_{xx}(f)$  を求める。

$$\bar{P}_{xx}(f) = \frac{A_x^2(f) + B_x^2(f)}{7} \quad (6)$$

Fig. 9 の例では、平均回数 (AVE. TIME) は図中に記入しておいた式の関係から7回となる。

FFTによる④式の演算は高速であるので、次のブロックのデータの読み込みを行なっている間に前のブロックの  $P_{xx}(f)$  が算出され、さらに本装置ではブラウン管式グラフィックディスプレイ装置を備えているので、結果が図として直ちに示される。すなわち、スペクトラムの図が実時間で刻々と表示され、現象が変化する状況を周波数領域での表示として時々刻々に見ることができる。

そして、図中の例では7回の  $P_{xx}(f)$  の算出が終ると、最後に⑥式の平均化演算を行ない、図に表示されるとともに、その図がハードコピーとして出て来る。(Fig. 10 参照)

オートコリレーション・ファンクション (autocorrelation function) はオートパワスペクトラムの時間領域での表示であるので、上述のFFTを利用したスペクトラムの計算法の一環として



考えるときには、 $P_{xx}(f)$  の FFT 法によるフーリエ逆変換として求めるのが便である。すなわち、次式の算法による。

$$\phi_{xx}(t) = 2 \sum_{f=0}^{N/2-1} P_{xx}(f) \cdot \exp(i2\pi ft/N) \dots \dots \dots (37)$$

$t = -N/2, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, N/2-1$

具体的にはフーリエ変換により  $P_{xx}(f)$  を求め、それをフーリエ逆変換することになるが、FFT 法によるとフーリエ逆変換も正変換と全く同様に高速に演算できるので、 $P_{xx}(f)$  とほとんど同時に刻々の図化表示および平均のコログラムを得る事が出来る。

**B) 結果の表示**

算出例として Fig. 10 を掲げたが、以後本稿では本図と同様に K 丸での実測例である実験番号 K-106 のピッチ角の記録を解析対象として使用することにす。オートパワスペクトラム  $P_{xx}(f)$  およびオートコリレーションファンクション  $\phi_{xx}(t)$  が時々刻々に変化する様子がよくわかる。最後に出て来る これらを平均した最終結果のハードコピーも示しておいた。右端の文字はタイトルと称している部分で、この計算を行なった条件を示している。

DATA TIME : 実験あるいは解析を実施した日付

EXP NO : 実験番号、ここでは K-106

PHENOMENON : 解析した現象、ここでは PITCH

CAL FACT : 校正係数、この欄に係数を記入することによって、自動的に電圧の数列がその現象の次元を持った数列に換算される。本例では 5.9702 DEGREE/VOLT となっている。

No of Data } Fig. 9 の定義による。

Block Size } ここに数値を記入することが計算指令になる。

No of Lag }  
Ave Time }

Samp Time : サンプルングタイム、 $\Delta t$  ; スイッチにより選択した値がここに自動的に記入される。この例では 1.0 sec ある。

Window : 周波数ウィンドウ、ここに記入したことが計算指令になる。この場合 Q ウィンドウを使用している。

また、オートパワスペクトラムの図の右肩に記入されている文字の意味は下記のとおりである。

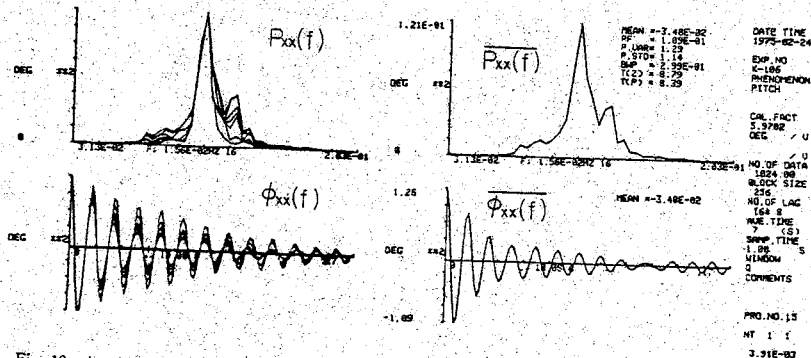


Fig. 10 オートスペクトラム  $P_{xx}(f)$  とオートコリレーション・ファンクション  $\phi_{xx}(f)$  の変化とその平均値

Mean : 原数列の平均値、船速などのように平均レベルが問題になる現象では重要。本例では -0.0348 DEG. であり、ゼロシフトが小なることを表わしている。

PF : Peak Frequency の略で、スペクトラムが最高になっている周波数。本例では 0.109 Hz.

P.VAR : パワスペクトルから算出された分散 (VARIANCE) の意味で、オートパワスペクトラムが囲む面積に比例する。ここでは 1.29 DEG<sup>2</sup>.

P.STD : パワスペクトルから求めた標準偏差 (Standard Deviation)。ここでは、1.14 DEG.

BWP : バンド幅パラメータ (Band Width Parameter), 本例では 0.299.

T(Z) : このスペクトラムから算出したゼロクロス (ZERO CROSS) の平均周期、本例では 8.79 sec.

T(P) : このスペクトラムから算出したピークトウピークの平均周期、本例では 8.39 sec.

なお計算は下記の式によって行なわれている。

$$P.VAR = \sum_{f=1}^{N/2-1} P_{xx}(f) \approx 2 \int_0^{\infty} S_{xx}(f) \cdot df = m_0 = \sigma_s^2 \dots \dots \dots (38)$$

$$P.STD = \sqrt{P.VAR} = \sigma_s \dots \dots \dots (39)$$

$$T(Z) = (T_{0s})_s = \sqrt{m_0/m_2} \dots \dots \dots (40)$$

$$T(P) = (T_m)_s = \sqrt{m_2/m_4} \dots \dots \dots (41)$$

$$BWP = \epsilon = \sqrt{(m_0 m_4 - m_2^2)/m_0 m_4} \dots \dots \dots (42)$$

$$m_n = \sum_{f=1}^{N/2-1} (f/N \cdot \Delta t)^n \cdot P_{xx}(f) \dots \dots \dots (43)$$

これらの諸量はオートパワスペクトラムの計算指令により自動的に算出され、図の一定位置に表示されるようになっている。

さて、本図の例についてパワスペクトラム算法をより具体的に説明しよう。いま、一回の計算に使用する時系列の長さすなわちブロックサイズ  $N$  は 256 であるから、K-106 のデータを 1 sec ごとにサンプルし、

$$X_0, X_1, X_2, \dots, X_{255}, \text{ (DEG)}$$

なる数列の解析をすることになる。この時系列の長さは  $N \times \Delta t = 256 \text{ sec}$  であるので、(34) 式中の  $C_x(f)$  すなわち (1) 式によるフーリエ係数  $C_x(f)$  は

$$C_x(0), C_x(1), C_x(2), \dots, C_x(255), \text{ (DEG)}$$

のように、周波数分解能  $\Delta f$  ごとに 256 箇算出される。

$$\Delta f = 1/N \cdot \Delta t = 1/256 \text{ HZ} = 0.00391 \text{ HZ} \dots \dots \dots (44)$$

この  $\Delta f$  の値は図のタイトル欄の最下段に自動的に表示される。

実際上は本装置では (2), (3), (34) 式のように  $N/2$  箇の計算を行なっているので、

$$P_{xx}(1), P_{xx}(2), \dots, P_{xx}(127), \text{ (DEG}^2)$$

が算出される。その周波数間隔は  $\Delta f$  であるので、

$$f_{max} = 1/N \cdot \Delta t \times N/2 = 1/2 \Delta t = 0.5 \text{ HZ} \dots \dots \dots (45)$$

なる最高周波数  $f_{max}$  まで算出されていることになる。

(34) あるいは (2), (3) 式からわかるように、 $P_{xx}(f)$  の次元は (DEG<sup>2</sup>) のように、 $P_{xx}(f)$  自体でパワーを表わしている。すなわち (34) 式での  $f$  は周波数に対応する番号であるので、 $P_{xx}(f)$  はパワーの線スペクトラムになっていることに注意されたい。したがって、周波数分解能を上げると線スペクトラムの数が増すので、 $P_{xx}(f)$  の値は小になる。すなわち、

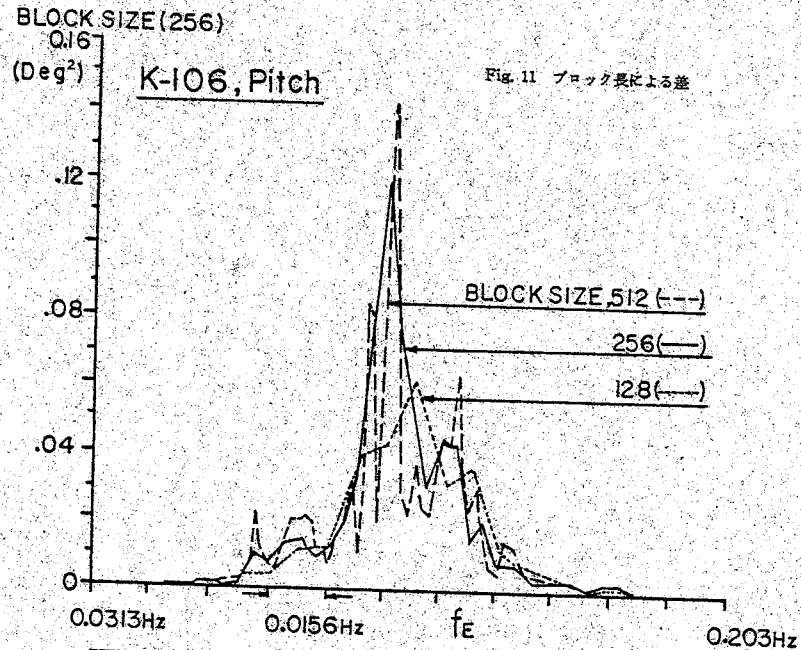
$$P_{xx}(f)/\Delta f = P_{xx}(f) \cdot N \cdot \Delta t = \text{const} \dots \dots \dots (46)$$

の関係にあり、サンプルングタイム  $\Delta t$  が一定であるならば  $N$  を増せば  $P_{xx}(f)$  は小になる。

オーソドックスなパワースペクトラムの算法では、縦軸の値は例えば (DEG)<sup>2</sup>·SEC の次元を持ち、横軸の周波数の次元 (SEC)<sup>-1</sup> を乗じてパワーの次元 (DEG)<sup>2</sup> となる。すなわちスペクトラム上の面積がパワーに対応しているため、49式のような関係はない。

本方式でも  $P_{xx}(f)$  に  $\Delta f$  を乗じ、面積スペクトラムとすれば標準法と同様なパワースペクトラムとなり、まぎらわしくなくなるが、当初のソフトが線スペクトルの考え方で開発されたので、この方式を改めるとソフトの全面的な改正となり甚だ手間を要するので、現在でもこのままになっている。

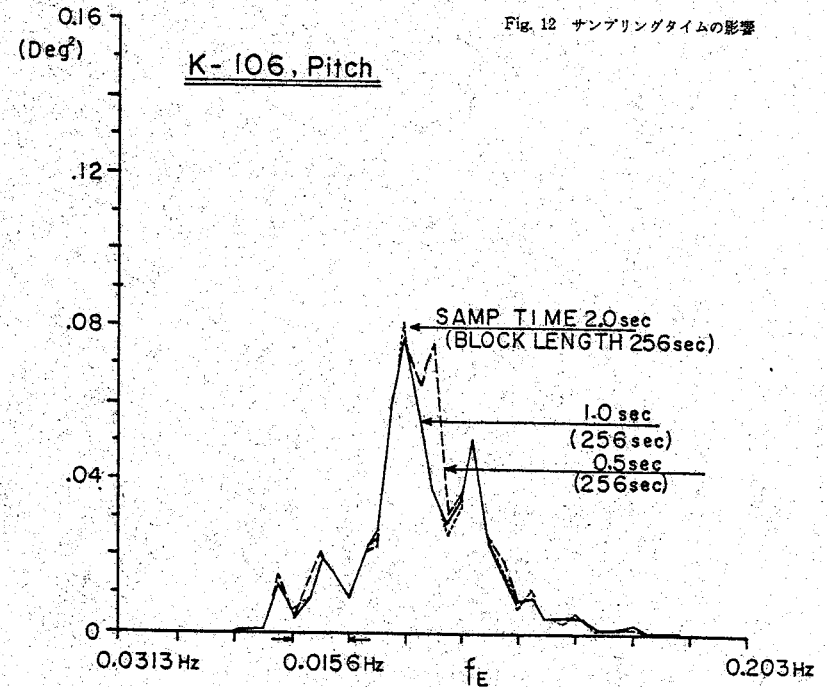
標準法によると、49式の  $R_{xx}$  の計算で  $M=10l$  であるとする約  $100l^2$  の演算回数となる。



BLOCK LENGTH	512 sec	256 sec	128 sec
BLOCK SIZE	512	256	128
No. of DATA	1024	1024	1024
SAMP. TIME	1 sec	1 sec	1 sec
WINDOW	0	0	0
No. of LAG	64	128	128
AVE. TIME	9	7	8
$\sigma_s^2$ , (VAR.)	1.14	1.28 (deg <sup>2</sup> )	1.10
$\sigma_s$ , (STD.)	1.07	1.13 (deg)	1.05
(T <sub>02</sub> ) <sub>s</sub> , T(Z)	8.78	8.79 (sec)	8.57
(T <sub>m</sub> ) <sub>s</sub> , T(P)	8.30	8.39 (sec)	8.16
$\epsilon_s$ , BWP	0.326	0.297	0.306

さらに  $R_{xx}$  から  $S_{xx}$  を求めるのに FFT 法を使用しない場合には約  $l^2$  の演算回数が必要である。標準法でのラグ数  $l$  は本法でのブロックサイズ  $N$  に対応するが、多く見積もっても  $100N$  オーダーの演算回数で済む49式による計算がいかに高速であるかが理解できよう。なお、標準法と本法の解析結果の比較は筆者<sup>(4)</sup>および横井などによって試みられているが、両算法による結果に有意な差はないことがわかった。

C) 算出パラメータによる影響



BLOCK LENGTH	256 sec	256 sec	256 sec
DATA LENGTH	1024 sec	1024 sec	1024 sec
SAMP. TIME	2 sec	1 sec	0.5 sec
No. of DATA	512	1024	2048
BLOCK SIZE	128	256	512
No. of LAG	64	128	256
AVE. TIME	7	7	7
WINDOW	—	—	—
$\sigma_s^2$ , (VAR.)	1.12 deg <sup>2</sup>	1.13	1.25
$\sigma_s$ , (STD.)	1.06 deg	1.06	1.12
(T <sub>02</sub> ) <sub>s</sub> , T(Z)	8.71 sec	8.68	8.71
(T <sub>m</sub> ) <sub>s</sub> , T(P)	8.28 sec	8.21	8.27
$\epsilon_s$ , BWP	0.321	0.326	0.314



ある長さの原数列が与えられたとき、オートパワースペクトラムを算出するためには、サンプリングタイム ( $\Delta t$ ) およびブロックサイズ ( $N$ ) を決め、またウィンドウの種類も決めなければならない。これらの要素が算出結果に与える影響を調べるため、一つの時系列 (K-106 のピッチ) に対して  $N$ ,  $\Delta t$  など色々な組合せでパワースペクトラムを算出してみた。

(1) ブロック長さによる差

(4) 式のように周波数分解能はブロック長さ  $N \cdot \Delta t$  で決まる。すなわちサンプリング時間  $\Delta t$  が一定であれば、ブロックサイズ  $N$  が大なるほど分解能は良くなる。この具体例を Fig. 11 に示したが、たしかにブロックサイズ 512 の場合のスペクトラムが一番凹凸が基だしく分解能が向上していると言える。なお、この例では平均回数がほぼ同じになる場合について比較をしているが、 $N$  の差によってスペクトラムの型は予想通りの影響を受け、一方これらから算出された

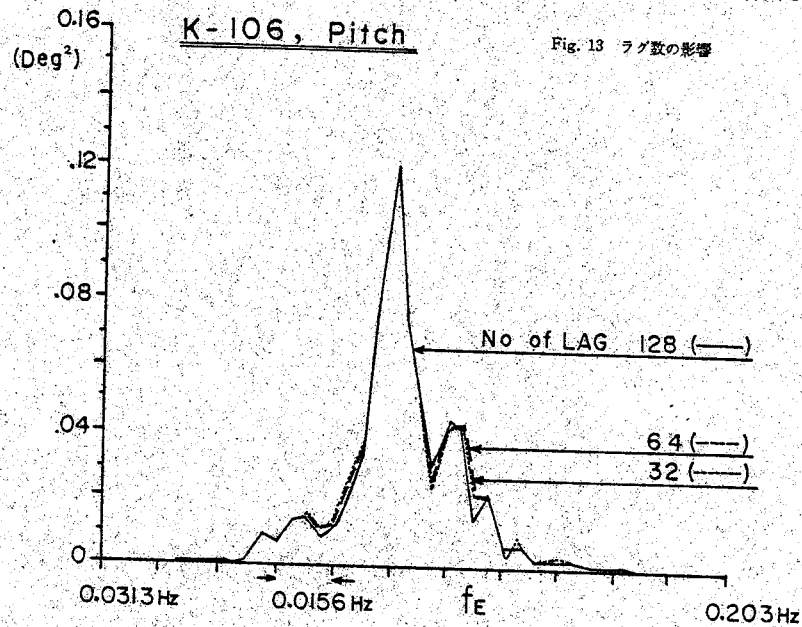


Fig. 13 ラグ数の影響

No. of LAG	128	64	32
BLOCK SIZE	256	256	256
No. of DATA(N)	1024	1024	1024
AVE. TIME	7	13	25
SAMP. TIME	1 sec	1 sec	1 sec
WINDOW	Q	Q	Q
$\sigma_s^2$ (VAR.)	1.28(deg <sup>2</sup> )	1.32	1.32
$\sigma_s$ (STD.)	1.13(deg)	1.15	1.15
(T <sub>02</sub> ) <sub>s</sub> , T(Z)	8.79(sec)	8.81	8.78
(T <sub>m</sub> ) <sub>s</sub> , T(P)	8.39(sec)	8.40	8.37
$\bar{\epsilon}_s$ , BWP	0.297	0.302	0.301

分散、平均周期などにはほとんど差がないことが示されている。

FFT 法では  $N$  をこのように大きく変化させても、計算時間に大きな影響を与えない。共に周波数分解能を決定するという意味で、 $N$  は標準法でのラグ数 (9) 式の  $l$ ) に対応するが、標準法で  $l$  の数を増加すると幾何級数的に計算時間が増大する。したがって  $l$  を大きく変化させてパワースペクトラムを算出し、比較した例は少ないが、山内によるとラグ数  $l$  は全データ数の 1/10 程度に取るのがよいとされている。本解析法の  $N$  と標準法のラグ数  $l$  には本質的な相似点はないが、分解能を決定するということから、標準法のラグ数と同様な値を取り、SR-125 の標準解析では  $\Delta t=1$  sec,  $N=256$  に一応決めている。

(2) サンプリングタイムの影響

サンプリングタイム  $\Delta t$  は(4) 式のように最高周波数 ( $f_{max}$ ) を決定する。Fig. 12 のように  $\Delta t$  を 2, 1, 0.5 sec にとると  $f_{max}$  は 0.25, 0.5, 1 Hz となる。本例の場合、スペクトラムは 0.2 Hz 以上の周波数域にまたがっていないので、 $f_{max}$  の最も低い  $\Delta t=2$  sec の場合で

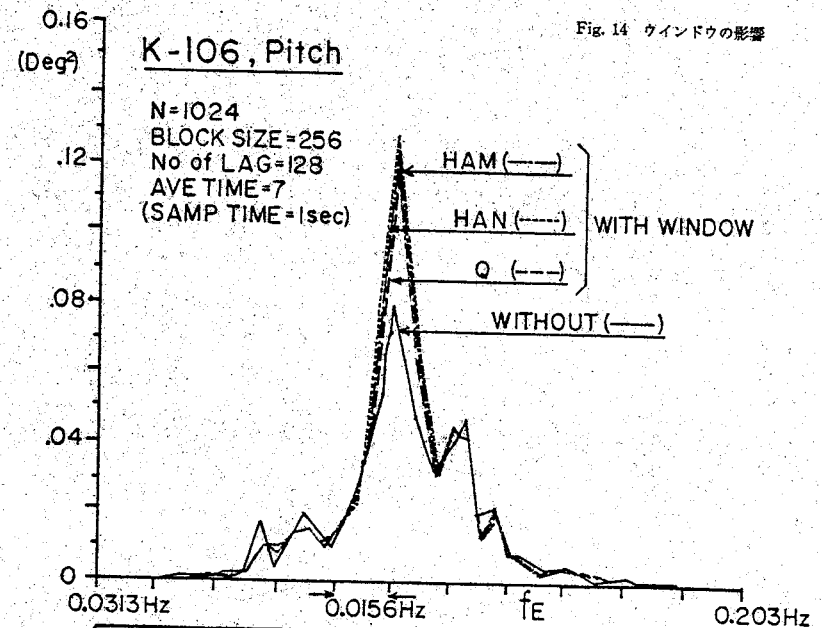


Fig. 14 ウィンドウの影響

WINDOW	WITHOUT	Q	HAN.	HAM.
$\sigma_s^2$ (VAR.)	1.12(deg <sup>2</sup> )	1.28	1.36	1.34
$\sigma_s$ (STD.)	1.06(deg)	1.13	1.17	1.16
(T <sub>02</sub> ) <sub>s</sub> , T(Z)	8.71(sec)	8.79	8.87	8.85
(T <sub>m</sub> ) <sub>s</sub> , T(P)	8.25(sec)	8.39	8.47	8.46
$\bar{\epsilon}_s$ , BWP	0.322	0.297	0.296	0.293
$f_d$ , PF	0.109(Hz)	0.109	0.109	0.109
MEAN	-0.159(deg)	-0.162	-0.158	-0.155

も十分なサンプリングであることが、各スペクトラム間に差がないことによって示されている。したがって各スペクトラムから算出された分散、平均周期などにもほとんど差がない。

### (3) ラグ数の影響

ここで言うラグ数は Fig. 9 に示されている No. of LAG で、標準法でいうラグ数  $l$  とは根本的に異なるので注意されたい。これは本来はシフト数とも称すべきもので、いずれ呼称を変えたいと考えている。

ブロック長が同じで、ラグ数のみを変えた場合を比較して Fig. 13 に示した。ラグ数が半分になると平均回数は約2倍になるが、その算出結果にはほとんど差がないことがわかる。ある限られた長さの原数列に対しては平均回数 (AVE. TIME) をやたらに増しても意味が少ない事がわかる。

### (4) ウィンドウの影響

Fig. 14 には、ウィンドウなしの場合と  $Q$ 、ハンニング (HAN.)、ハミング (HAM.) の各ウィンドウを施した場合を比較しておいた。スペクトラムを一見してわかる事は、ウィンドウをかけた場合とかけない場合の差があること、各ウィンドウ間の差はわずかであることである。そして、ウィンドウをかけた場合の方がやや凹凸が少なくウィンドウの効果が見えるが、その効果は予想外に小である。分散、平均周期などの算出値に目立った差はないが、ウィンドウ“あり”と“なし”ではやや差があるので、SR-15の標準プログラムでは  $Q$  ウィンドウを使用することになっている。

## 20. ヒストグラムの算出

Fig. 15 に示したような不規則時系列があるとき、よく算出されるヒストグラムとして、

- 1) 等時間間隔  $\Delta t$  ごとの時系列  $X_i$  のヒストグラム
- 2) 極大値 ( $h_{max}$ ) および極小値 ( $h_{min}$ ) のヒストグラム
- 3) 全振幅 ( $H$ ) のヒストグラム

の3種がある。

1) のヒストグラムは時系列の平均値をゼロとした正規分布に近くなるのが普通であり、この統計計算から得られる分散と標準偏差は当然オートパワースペクトラムから得られる分散 ( $P.VAR$ ) と標準偏差 ( $P.STD$ ) にほぼ等しいはずである。この関係は算出されたパワースペクトラムの良否の判定に役立つ。Fig. 16 に K-106 のピッチ角の算出例を示しておいたが、ヒストグラムの型はガウス分布 (正規分布) に近く、図中右肩に表示されているこの計算から求めた分散 ( $VAR$ ) と標準偏差 ( $STD$ ) の値は Fig. 10 などに示されている  $P.VAR$  および  $P.STD$  の値とほぼ等しく、パワースペクトラムの計算が妥当であることを示している。なお、 $MAX$  はプラス側の最大値、 $MIN$  はマイナス側の最大値を意味している。

2) のヒストグラムはいわゆる極値分布を与えるが、実測記録に高周波の雑音が混入している

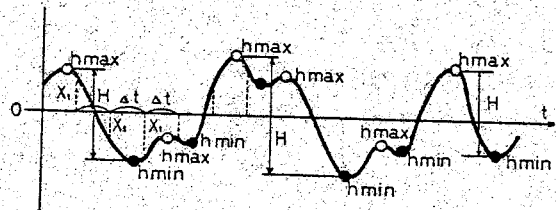


Fig. 15 ヒストグラム算出時の振幅、極値の採り方

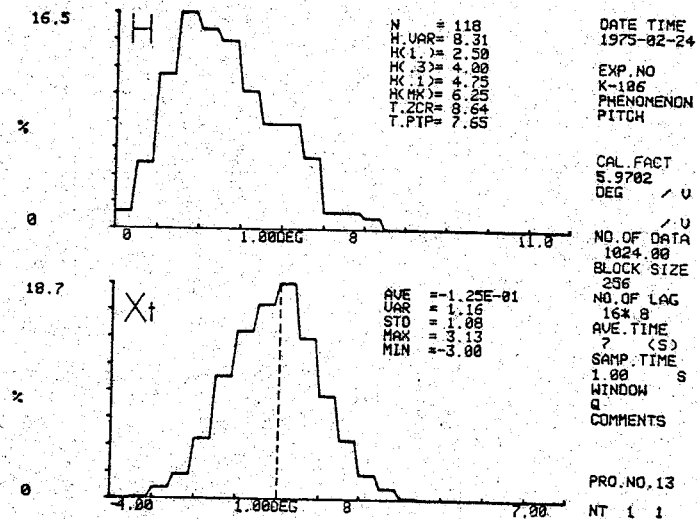


Fig. 16 全振幅 (H) および時系列 ( $X_t$ ) のヒストグラム

場合、あるいはゼロドリフトが著しい場合には、せっかく解析してもその意義に疑問が出て来る。本解析装置ではこの計算も簡単にこなせるようになってきているが、SR-125では概括的な傾向を誤りなくとらえる 3) の全振幅のヒストグラム計算を常用している。Fig. 16 にはタイムヒストリー ( $X_t$ ) の分布と同時に算出した全振幅 ( $H$ ) のヒストグラムが示されている。この計算では Fig. 15 中に記入しておいたように、相隣れるゼロクロスポイントの間では一点の極値しか認めていない、すなわち正の極小値、負の極大値を無視しているため、 $H$  などの高周波の雑音は自動的に除去されてしまうが、同時に有意義な高周波現象がある場合にはそれも無視してしまう欠点がある。

右肩の表示の意味は下記のとおりである。

- N: ゼロクロスの数の1/2, 採用した変動の山の数
- H.VAR: 全振幅の分散
- H(1.): 全振幅の平均値
- H(3): 全振幅の高い方から1/3の平均値, 有義値
- H(1): 全振幅の高い方から1/10の平均値
- H(MX): 全振幅の最高値
- T.ZOR: ゼロクロス周期の平均値
- T.PTP: ピークトウピーク周期の平均値

スペクトラムの図中に示されているバンド幅パラメーター ( $BWP$ ) が0に近い時は極値分布はレーレー分布になる。ここに例示した場合は  $BWP=0.3$  であるから、レーレー分布に近いことが予測されるが、Fig. 16 の上図は予想どおりの型になっている。完全なレーレー分布では次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} H(3) &= 1.598 \times H(1.) \\ H(1) &= 2.032 \times H(1.) \\ H(MX) &= (2.5 \sim 2.8) \times H(1.) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$



Fig. 16 の例でこの係数を算定してみると、上式から順に 1.60, 1.90, 2.50 となり、レーレー分布の係数に近い値になっている。

また、パワースペクトラムから得られる特性との関係として、

$$\left. \begin{aligned} P. VAR &= H. VAR + 8 \\ T(Z) &= T. ZCR \\ T(P) &= T. PTP \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

なる関係があるが、Fig. 16 と Fig. 10 などを比較するとこの関係がほぼ満足されていることがわかる。さらに完全にレーレー分布の場合には

$$\left. \begin{aligned} P. STD &= H(1.) \div 2.507 \\ P. STD &= H(.3) \div 4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

なる関係があるが、本例ではこの関係も大約満足されている。(横浜国立大学工学部造船工学科)

参 考 文 献

- (7) 山内, 大津: "船の応答の非線型性と高次元スペクトラム" 造船学会論文集 No. 131., 1972. 6
- (8) Cochran, Cooley etc.: "What is the Fast Fourier Transform?" IEEE, Vol. AU-15, No. 2, June 1967
- (9) Bergland: "A guided tour of the fast Fourier transform" IEEE Spectrum, July 1969
- (10) Cooley, Turkey: "An algorithm for machine calculation of complex Fourier series" Mathematics of Computation, 19-90 (1965)
- (11) Blackmann, Tukey: "The measurement of power spectra" Dover, N.Y. (1958).
- (12) 山田, 横井: "リアルタイム信号解析システム" 日本無線技報, No. 6, 1972
- (13) 吉沢: "数値解析", 岩波講座, 基礎工学 4
- (14) 吉村, 石井, 大岡: "測定値の統計的处理", 電気学会

■ 連 載

Measuring Container System for  
Observational Voyages in Rough Seas...  
IV "Soft wear" of the Graphic Display,  
by Seiji Takezawa.

実船試験用計測コンテナシステム (4)

IV. 図化ソフトウェア

竹 沢 誠 二

21. 高速図化とそのコピー

本システムの解析装置はリアルタイムデジタル解析装置であるので、それにマッチした図化装置を持たなければ高速演算した意味がなくなってしまう。図を高速に表示する方法としてブラウン管による方法があるが、普通のブラウン管ではアナログ量の表示しかできない。ところが、近年電算機の周辺機器としてデジタル量表示用のブラウン管が開発され、テーブルおよびグラフの高速表示に使用されるようになった。NHKなどのテレビ放送では選挙速報の時に、〇〇氏……××××票のようにちょっと変わった文字がつつぎに出て来る画面を記憶されている方も多いと思うが、あれがデジタル表示用ブラウン管による電算機と直結した高速表示の一例である。

一般に電算機では演算時間そのものより、演算結果の数表などのプリントアウトに時間を食われる場合が多い。さらに得られた数表をグラフにするためデジタルプロッターと称する機械式の図化機にかける場合には、演算時間に比し結果を表示あるいは図化する時間の方が確実に大になる。すなわち、実時間解析装置では図化あるいは演算結果のアウトプットの高速化が併行されなければ、その意義はきわめて小なるものになってしまう。

本装置の原型である日本無線製の高速時系列解析装置では、高速表示法としてブラウン管によるアナログ表示法が採用されていたが、筆者などの提案によりデジタル型ブラ

ウン管によるデジタル表示法を試みることになった。具体的に採用されたCRT式グラフィックディスプレイ装置はテタトロニック製Q4010型であり、さらにそのハードコピーユニットも採用し、図化部分はこの種の装置としては従来型に比し画期的な性能を持つものとなった。

ブラウン管の表示部面積は横 19.1 cm, 縦 14.3 cmであるが、この面積が横 1,024点, 縦 1,024点の正確な細かいメッシュで区分されており、画面上の任意の点はデジタルX-Y座標値を与えることによって指示される。すなわち、機械式のX-Yプロッターの場合と全く同様にX-Y軸に対応するデジタル値をインプットするとペン先がその位置へ移動するかわりに、ブラウン管上のスポットがその位置へ電子的な超高速で移動する。この移動速度はきわめて早く、実質上は移動時間は無視できるので、本方式によると1枚の図

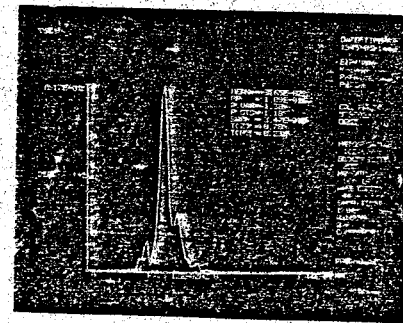


写真11 ディスプレー管上の画面例

を画く時間もきわめて短く、演算時間に対し逆は無視できるほどになり、解析演算の高速化の効果がシステム全体としての能力向上へ直結することになる。写真11に、ディスプレイ管上の画の1例を示した。印刷後は不明になるであろうが、原画では文字が点で構成されているのがわかる。

このように素早く解析結果の図が表示されると、これを見ている間に次の図が出て来てしまうので、つぎつぎと画面をコピーすることが必要になる。特に本解析装置ではメモリー容量の関係から、重ねづらし平均法(前掲の Fig. 9 参照)における途中経過の算出結果は憶えていないので、経過を知りたい場合には、その時点でコピーをすませておかなければならない。本装置でのハードコピー装置は1枚の画のコピーに約8秒かかるが、実船試験はきわめて速い現象であるので、このコピー速度でも、途中経過のコピーを含めて実時間解析のコピー装置としての実をあげている。コピー装置の原理はユニークなもので、一種の電子複写方式である。ディスプレイ管上にストアされた画面を下から上へ横軸が移動して画面の内容を掃引すると、横軸に対応する棒状の電子管上へその内容が移送されると同時に熱現像式記録紙上へ印画される。一方上下の掃引と記録紙の送りは完全に同期しているもので、平面としての画面が印画されることになる。したがって、得られるコピーはブラウン管上の画面と縦横ともほぼ同寸のものである。なお、得られるコピーの横幅はA-4判の横幅に等しくファイルに便利である。

デジタル表示管のもう一つの長所は文字が書き込めることである。したがって、機械式のX-Yプロッタによる図と同様にXY軸に現象の時元を記入し、完全な定量的なグラフにすることができる。このことはブラウン管オシロやX-Yレコーダによって、アナログ表示の図を画いていた、従来のこの種の装置から大きく飛躍した点として特に注目せねばなるまい。本稿では例示しなかったが、演算結果の数表の高速表示およびコピーも可能である。

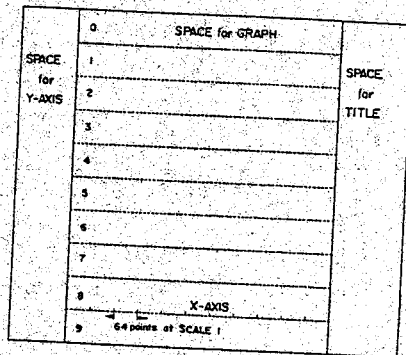


Fig. 17 画面の使用区分

## 22. 画面の使用区分および拡大

ブラウン管上の面積を本システムでは Fig. 17 のように区分して使用している。

右端には常にタイトルが記入され、同様に左端には常にY軸の説明用の数字および文字が記入される。図面を記入するスペースはそれ以外の真中の部分で、表示された図の中には現われないが、図面用のスペースは Fig. 17 に記入されているように0番から9番までの10等分された領域において使用する。例えば写真11の場合は、オートスペクトラムの画を2番から8番までの領域にわたって図示しなさいというプログラムによって得られた図である。

横軸すなわちX軸には常に11等分したマーカーが現われる。そして1つのマーカーとマーカーの間には SCALE=1 の場合に64点の情報が記入される。写真11の場合は、X軸に F; 3.13E-0.2 HZ 8 なる文字が記入されているが、これらは F は Frequency の略、1目盛の間隔が 0.0313 Hz、SCALE=8 なることを意味している。この例の場合(4式)に示したよう  $\Delta f = 0.00391$  Hz であるので SCALE=1 の場合には1目盛内に  $\Delta f$  の64倍の周波数範囲が記入されることになる。SCALE=8 とは横軸の拡大係数が8であることを意味している。すなわち1目盛の間に64/8箇の点が記入されていること。写真11の場合には

$$0.00391 \text{ Hz} \times (64/8) = 0.0313 \text{ Hz}$$

Fig. 18 画面の拡大例①

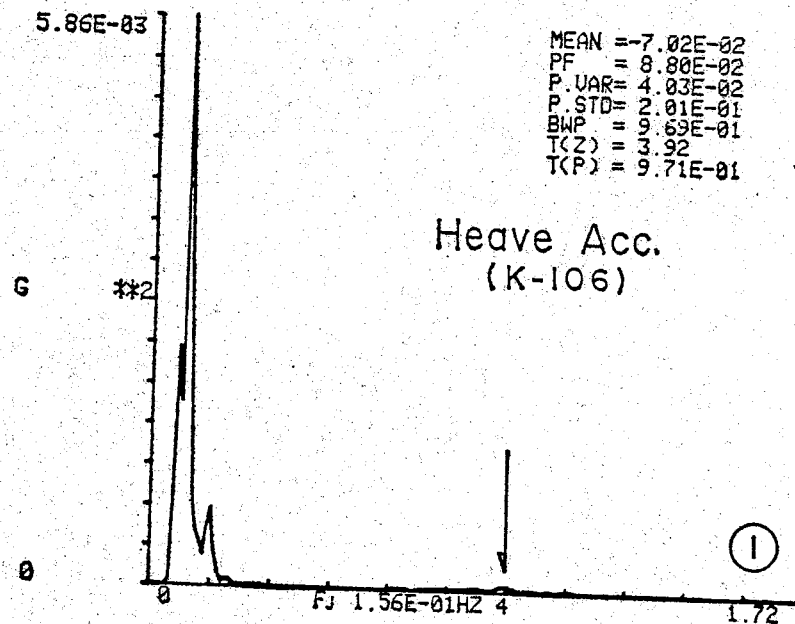


Fig. 18 画面の拡大例②

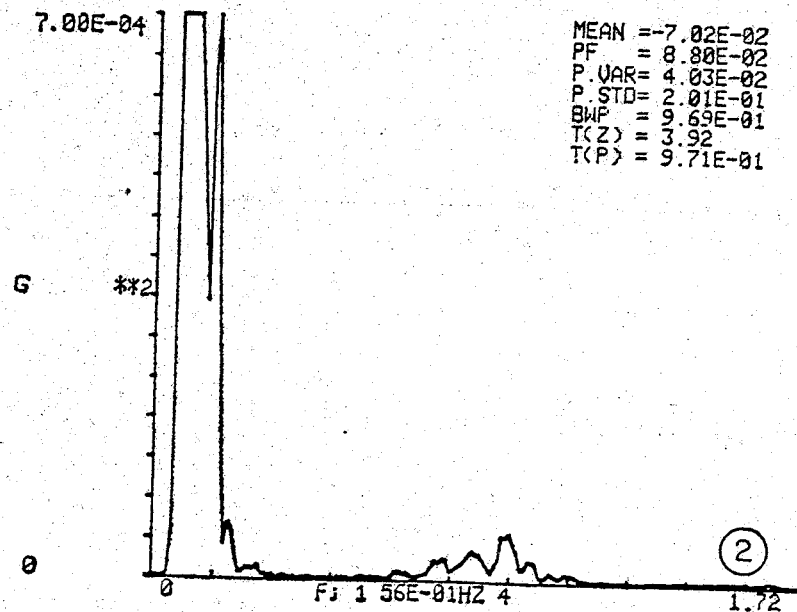




Fig. 18 画面の拡大例③

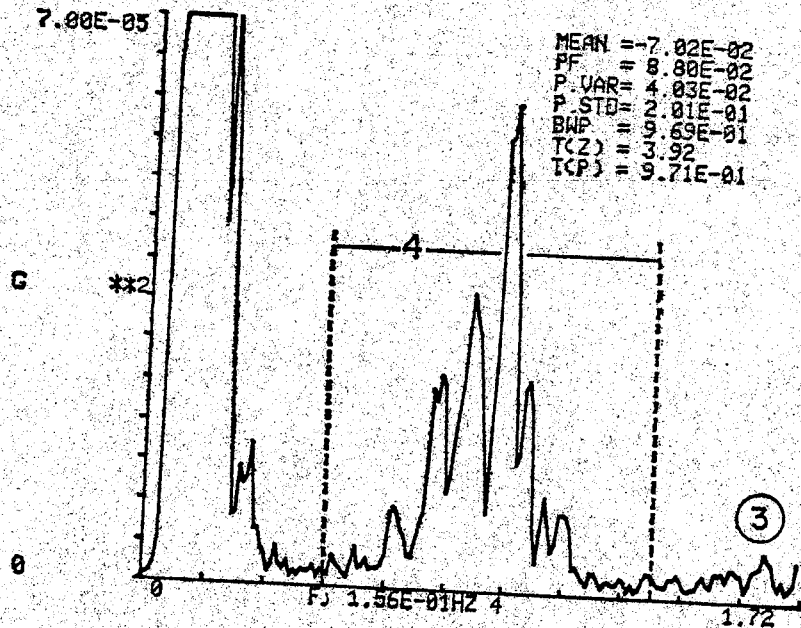
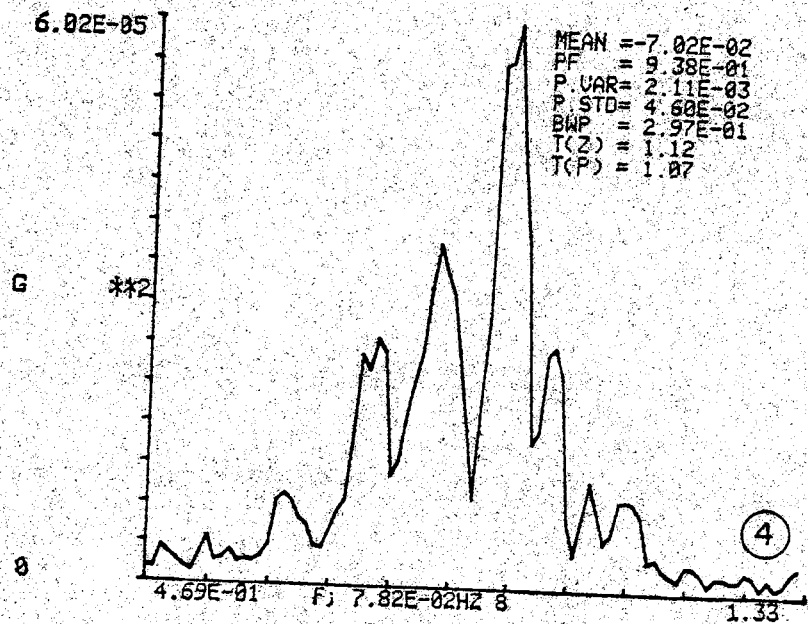


Fig. 18 画面の拡大例④



となり、図中に自動的に記入された値と一致する。

本グラフィックディスプレイでは縦軸の拡大も可能である。Fig. 18にはその具体例を示した。これは前にFig. 5として時系列を示したK丸の大縦運動時の上下加速度(VERT. ACC)の解析結果である。典型的な2節振動が加速度記録に見られるので、高周波成分のスペクトラムをも求めるためにサンプリングタイムを通常の1/5の0.2secとしている。Fig. 18-①は縦軸をオートスケールとして得られた図であるが、低周波成分のパワーが大なるため、ちょっと見ただけでは気がつかないが矢印の所にもう一つの山がある。そこで縦軸のフルスケールの値を①の約1/10に指定して得られた図がFig. 18-②である。約1Hzの所に明白な山が見えてきた。この図

の縦軸をさらに10倍に伸ばしたのがFig. 18-③であるが、ますます明確に2節振動部分のパワースペクトラムの型がわかる。ここで①~③の図中の右肩のP. VARなどの特性値は全く同じであることに注目されたい。すなわち、本システムではディスプレイされた周波数範囲内で、たとえば分散(P. VAR)などの演算が行なわれているということである。なお、縦軸を拡大して図を画かせても特性値は変化しない。Fig. 18-④は、低周波領域をカットして、さらに横軸を2倍に拡大して2節振動部分のみを拡大した図である。この図の縦軸はオートスケールであるので、縦軸の上部に記入されている数値は図示された周波数域内での最大値を与える。Fig. 18-①の縦軸の値は同様に低周波域をも含めた領域での最大値を示しているが、この場合、2節

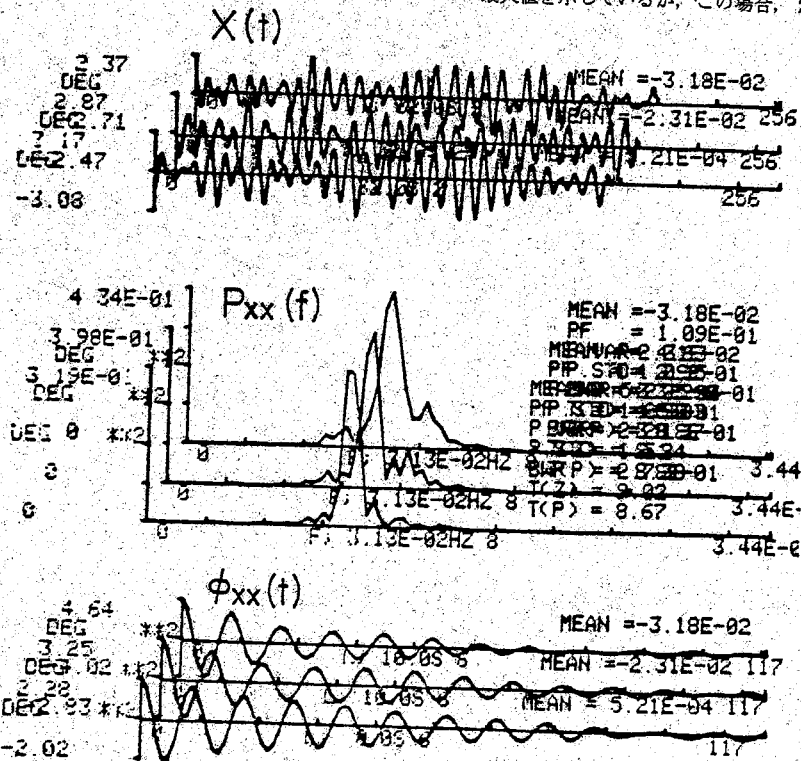


Fig. 19 三次元表示例

振動部分の最大値はその約1/100に過ぎない。

③、④での2節振動部分のスペクトラムは固有振動型を示しており、その中心周波数(PF)もタイムヒストリーに明確に現われている。2節振動の固有周波数と一致し、この部分が2節振動に対応していることを明示している。④の右肩の特性は①~③と全く異なる値になっている。これは図示された高周波部分だけから求めた分散、標準偏差などが示されているからである。③の横軸を拡大し、より狭い範囲のみを図示させた④の右肩の特性値は2節振動部分のみの特性に近づく。このように本システムではある周波数領域のみを拡大して見ることができ、さらにその部分だけの分散などを自動的に得ることができるので便である。

簡単な応用例としては、明らかに計測器の調子が悪くゼロドリフトがあるような場合には、周波数がゼロに近い領域をカットすることによって、より正しい変動成分のみのパワースペクトラムを得ることができる。

### 23. 三次元表示と平均化処理

本システムのグラフィックディスプレイでは、多数の図を重ね合わせて表示することが可能である。重ね合せに際し、座標軸を固定しておけば完全に重なり合った図ができる。前掲の Fig.10 がこの1例である。また例えば X 軸のみを1枚の図ごとにずらせば、上下にずれた図ができる。さらに、X、Y 軸ともに一定量だけ移動させて図を重ね合わせて画くと

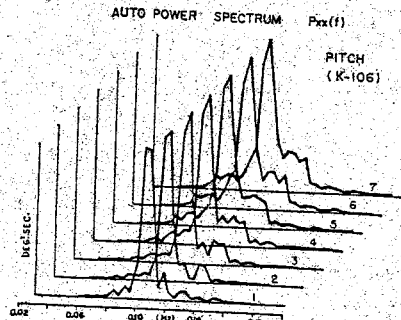


Fig. 20-① オートスペクトラムの変化

三次元表示となる。

この例を Fig. 19 として示した。上の図はタイムヒストリー  $[X(t)]$ 、中の図はオートパワースペクトラム  $[P_{xx}(f)]$ 、下図はオートコリレーションファンクション  $[\phi_{xx}(t)]$  である。そして1番下の  $X(t)$  の  $P_{xx}(f)$  および  $\phi_{xx}(t)$  がそれぞれ各グループの1番下に示されている。そして下から2番目の  $X(t)$  から得られた  $P_{xx}(f)$  を加算したパワースペクトラムを縦軸をオートスケールにして表示したのが下から2番目の  $P_{xx}(f)$  である。さらに3番目の  $P_{xx}(f)$  は3番目までの  $P_{xx}(f)$  を各周波数ごとに加算したものであり、縦軸の値は一番下の  $P_{xx}(f)$  の約3倍になっているのであるが、オートスケールで表示されているのでスペクトラムの型は似ている。

実際には、まず一番下の  $X(t)$ 、 $P_{xx}(f)$ 、 $\phi_{xx}(t)$  が書き込まれ、次の  $X(t)$  が読み込まれるまでやや間があって、2回目のデータ取り込み、演算が終了と2段目の図が表示される。すなわちほぼ実時間で解析結果が刻々と表示される。Fig. 19 の表示では図中に記入される文字もダブって書き込まれるので、図の枚数が多くなるにつれて画がきたなくなる。

そこで、1回の演算ごとに図を自動的にハードコピーし、その図を Fig. 19 と同様に立体的に重ね合わせてトレースした例を Fig. 20

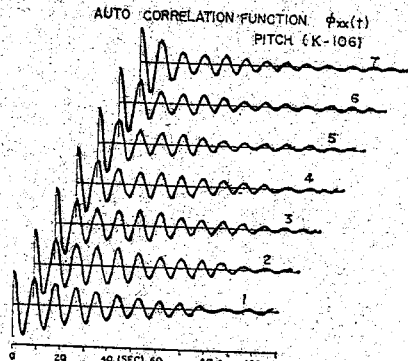


Fig. 20-② オートコリレーションの変化

①、②として示した。①のオートパワースペクトラム、②のオートコリレーションともに時間と共に変化する様子が如実にうかがえる。本システムの演算法式では前述のように前の計算結果に新しい結果を加算して行き、最終回の加算が終了と加算回数で結果を除して平均化する方式が採られているので、Fig. 20 の例では7番目の結果として表示されている平均された結果へ徐々に近づいて行く。もし、途中で前後の図と著しく傾向の異なる図が出て来たら、その計測は失敗か、あるいは異常な現象を含む場合であるから、注意を要する。

### 24. 二現象間の関係

本解析装置は基本的には2チャンネル用で

あり、二現象間の関係に関する演算も実時間で処理し、図示することができる。

いま、二現象の時系列を  $X(t)$  および  $Y(t)$  とするとクロススペクトラム  $P_{rx}(f)$  はFFT法では④式のオートスペクトラムと同様にフーリエ係数の積として次式から求める。

$$P_{rx}(f) = C^*_{x}(f) \cdot C_{r}(f) \\ = [A_x(f) - i B_x(f)] \cdot [A_r(f) + i B_r(f)] \\ = [A_x(f) \cdot A_r(f) + B_x(f) \cdot B_r(f) + i [A_x(f) \cdot B_r(f) - B_x(f) \cdot A_r(f)]]$$

$$f = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \dots \dots 60$$

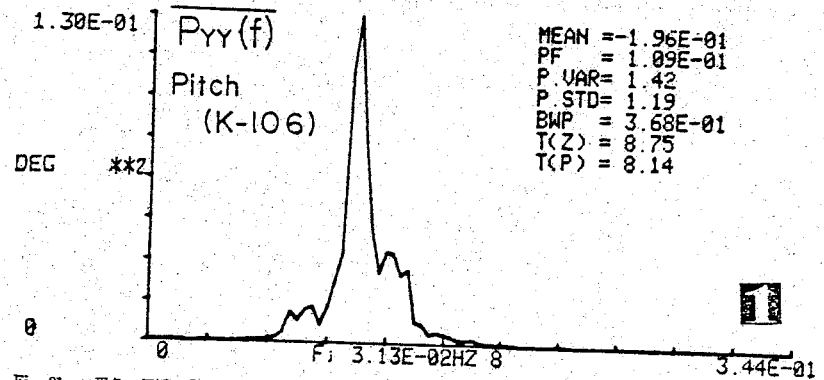
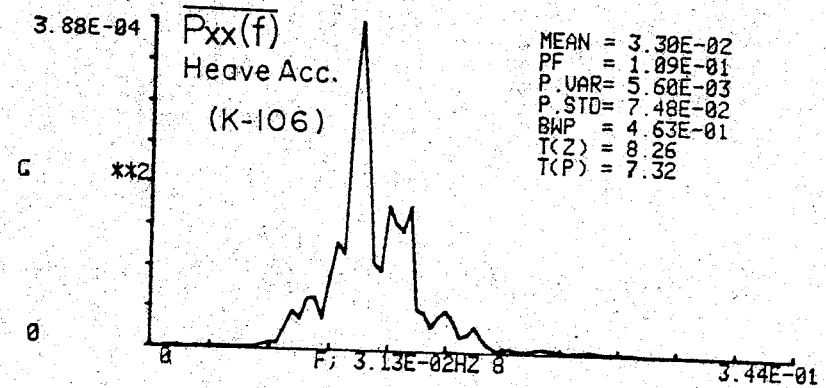


Fig. 21 二現象の解析例①

$X(t)$  を入力,  $Y(t)$  を出力時系列と考えると,  $P_{rx}(f)$  は入出力間のクロススペクトラム (Cross spectrum) である。クロススペクトラムはオートスペクトラムと異なり一般に実数でないで、60式のように実数部と虚数部を持つ。実数部をコースペクトラム (co-spectrum)  $Corx(f)$ , 虚数部をクォーダレイテュアスペクトラム (quadrature-spectrum)  $Qurx(f)$  と呼ぶ。

$$\left. \begin{aligned} Corx(f) &= A_x(f) \cdot A_r(f) \\ &+ B_x(f) \cdot B_r(f) \\ Qurx(f) &= A_x(f) \cdot B_r(f) \\ &- B_x(f) \cdot A_r(f) \end{aligned} \right\} \dots\dots 60$$

また、クロススペクトラムの振幅部

$|P_{rx}(f)|$ , および位相  $\theta_{rx}(f)$  を考えることが出来る。

$$P_{rx}(f) = |P_{rx}(f)| \cdot \exp[i\theta_{rx}(f)] \dots\dots 61$$

$$|P_{rx}(f)| = [\text{Corx}^2(f) + \text{Qurx}^2(f)] \dots\dots 62$$

$$\theta_{rx}(f) = \text{Arg}[P_{rx}(f)] \\ = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Qurx}(f)}{\text{Corx}(f)} \right] \dots\dots 63$$

60式の計算はFFT法によるとオートパワスペクトラムの場合と同等に高速演算されるので、二現象間の関係を求める計算も一現象の場合と同様に実時間解析が可能である。

不規則な入力時系列  $X(t)$  に対して、不規

則な出力時系列  $Y(t)$  があるとする、この線型系の伝達関数 (transfer function)

$G_{rx}(f)$  は、入出力のクロススペクトラム  $P_{rx}(f)$  と入力のオートスペクトラム  $P_{xx}(f)$  の比とじて求まる。

$$G_{rx}(f) = P_{rx}(f) / P_{xx}(f) \dots\dots 64$$

$G_{rx}(f)$  は一般に複素数であるから、振幅比  $A_{rx}(f)$  と位相差  $\psi_{rx}(f)$  に分けて考える。

$$\left. \begin{aligned} A_{rx}(f) &= |G_{rx}(f)| \\ \psi_{rx}(f) &= \text{Arg}[G_{rx}(f)] \end{aligned} \right\} \dots\dots 65$$

64式の分子、分母ともにFFT法による高速演算可能であり、また重ねずらし平均法を適用できるので、時々刻々の  $G_{rx}(f)$  お

よびその平均特性としての  $\overline{G_{rx}(f)}$  が算出可能である。

次式で定義される  $\gamma^2(f)$  なる関数をコーヒレンシー関数 (coherency function) とい

$$\gamma^2(f) = \frac{|P_{rx}(f) / P_{xx}(f)|^2}{P_{rr}(f) / P_{xx}(f)} \\ = \frac{[P_{rx}(f)]^2}{P_{rr}(f) \cdot P_{xx}(f)} \dots\dots 66$$

一般に出力信号  $Y(t)$  にはノイズ  $N(t)$  が含まれており、出力のオートパワスペクトラムは

$$P_{rr}(f) = P'_{rr}(f) + P_{NN}(f) \dots\dots 67$$

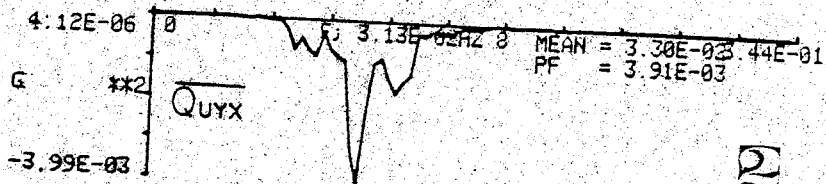
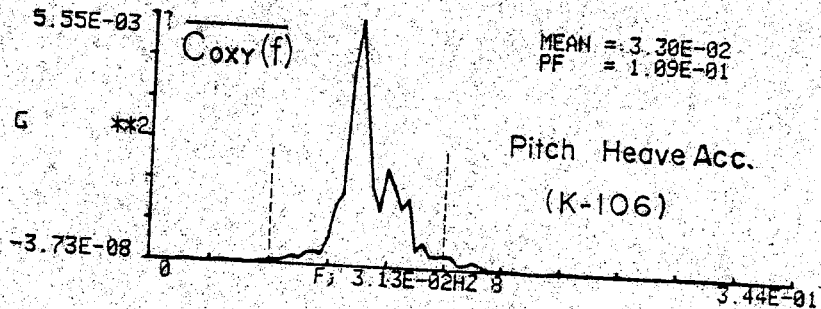
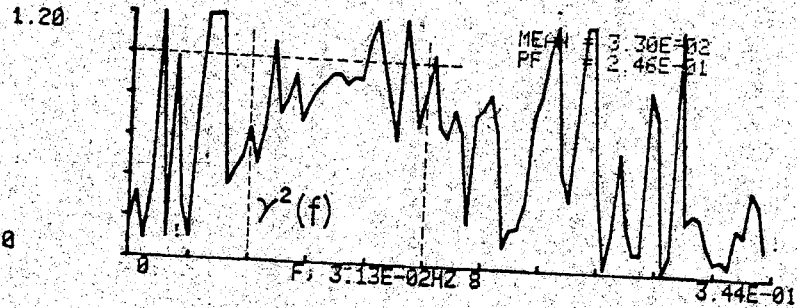


Fig. 21 二現象の解析例②

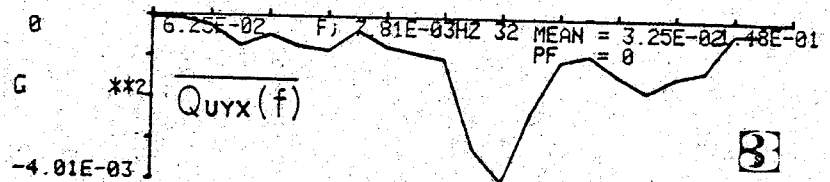
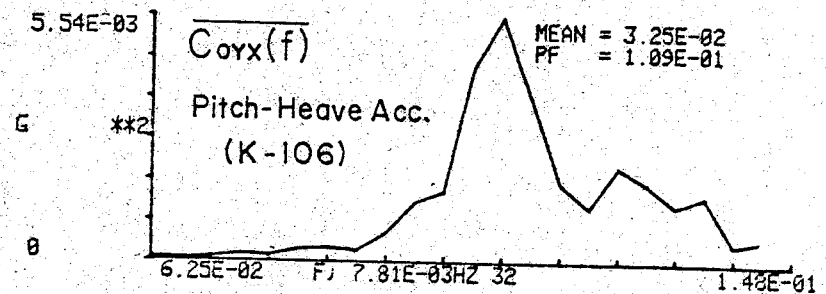
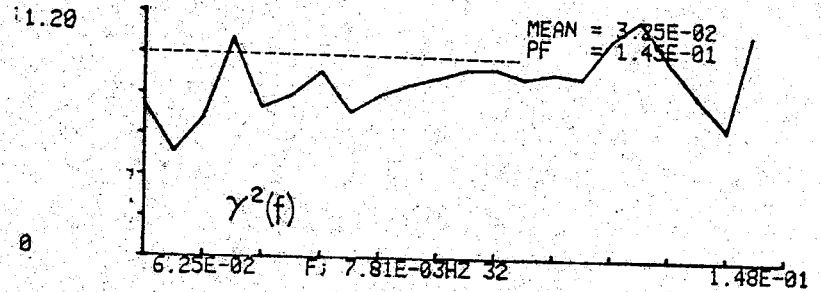


Fig. 21 二現象の解析例③



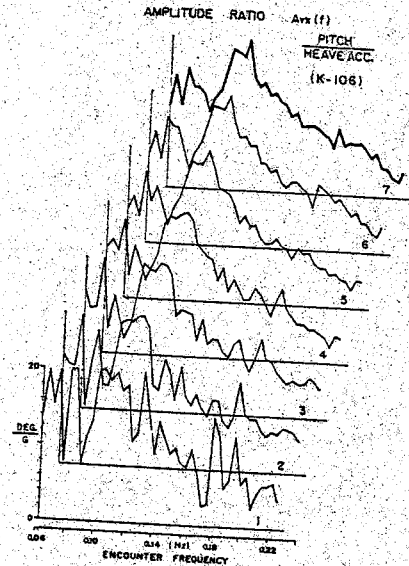


Fig. 22 振幅比の変化

のように、ノイズのオートパワースペクトラム  $P_{NN}(f)$  を含むので、この式を6)に代入し、 $Arx(f)$  を使って書き直すと

$$r^2(f) = \frac{[Arx(f)]^2 \cdot P_{rx}(f)}{P_{rx}(f) + P_{NN}(f)}$$

$$= \frac{[Arx(f)]^2 \cdot P_{rx}(f)}{[Arx(f)]^2 \cdot P_{rx}(f) + P_{NN}(f)}$$

$$r^2(f) = 1 - \frac{P_{NN}(f)}{P_{rx}(f)} \dots \dots \dots 69$$

となる。この式から  $P_{NN}$  が  $P_{rx}$  に占める割合が増すとコーヒレンシーが下がることがわかる。  $P_{NN}(f)$  を単にノイズだけとは考えないで線型応答特性  $Arx(f)$  で説明できない部分を含むものと考え、  $r^2(f)$  は今考えている系が線型伝達関数  $G_{rx}(f)$ 、あるいは  $Arx(f)$  で説明できる割合を示す関数になっていることがわかる。すなわち完全に説明ができていない場合には  $P_{NN}(f)$  がゼロであるから  $r^2(f) = 1$  となり、全く説明できていない場合には  $P_{NN} = P_{rx}$  であるから、  $r^2(f) = 0$  となる。

6)式の演算も  $P_{rx}$  と  $P_{xx}$ ,  $P_{yy}$  の組合せであるので、FFT法によると高速に演算さ

れ、結果の実時間表示が可能である。

Fig. 21 に上下加速度(H. Acc.)を入力とし、ピッチ角(Pitch)を出力とみなした場合の2現象間の関係の解析図化例を示した。

Fig. 21-①の上図は入力である上下加速度の加算平均されたオートスペクトラム  $P_{rx}(f)$  であり、下図は出力とみなしたピッチ角のオートスペクトラム  $P_{yy}(f)$  である。本例の場合2現象の有意な周波数の範囲およびスペクトラムの型が類似していることがよくわかる。

Fig. 21-②の上図は6)式のコーヒレンシー関数  $r^2(f)$  で理論上からは1を越えることはないの、縦軸の値はフルスケールを1.2に指定してある。中図は6)式で与えられるクロススペクトラムの実数部、すなわちクロススペクトラムの平均値  $C_{oxy}(f)$  で、下図は虚数部すなわちコードレーチユアスペクトラムの平均値  $Q_{oxy}(f)$  である。コーヒレンシー関数はオートスペクトラムおよびクロススペクトラムから算出されるものであるから、これらのスペクトラムが有意なパワーを持っている周波数範囲の算出値のみに意義がある。

そこで、Fig. 21-②に記入しておいた周波数領域のみを4倍に拡大して得られた図がFig. 21-③である。

クロススペクトラムに有意なパワーが存在する範囲では、コーヒレンシー関数は1に近く、この2現象が線型系でほぼ説明できることを示している。

69, 69式による伝達関数の演算はきわめて高速に行なわれるので、時々刻々に振幅比特性  $Arx(f)$  および位相差特性  $\Psi_{rx}(f)$  を図化することが可能である。

2現象間の関係で最も多く関心が持たれる振幅比特性  $Arx(f)$  の加算平均の途中経過をコピーしておき、Fig. 20と同様に三次元表示的に重ね合わせた図がFig. 22である。本図はFig. 20および21の場合と全く同じ場合の解析結果であるが、1番から7番へ加算平均が進むに従って、特性曲線に凹凸が少なく

なり、本質的な特性に近づいて来ているであろうことが推察される。Fig. 22とFig. 20は完全に対応しているの、じっくりと比較対照して見ていただきたい。

本システムでの2現象の解析では  $P_{rx}(f)$ ,  $P_{yy}(f)$ ,  $C_{oxy}(f)$ ,  $Q_{oxy}(f)$  および  $r^2(f)$  の算出が一挙に可能なプログラムを組み得る。すなわち、アウトプットされる図でいうと、Fig. 21-①, ②およびFig. 22が実時間解析の結果として得られる。

#### 24. 対話方式によるプログラム

本解析装置のもう一つの特色は専門的知識が全くなくてもプログラムが組めること、解析結果の図を見て、この次の計算でのプログラムの修正あるいは図の拡大および配列などをグラフィックディスプレイのキーボードから簡単に指令できる。すなわち計算機と対話しているような気分である。また同一算出値に対して種々な図化をさせることが可能である。

対話キーボードはディスプレイ管の前に位置している(写真10参照)。標準型の英文タイプキーボードとほぼ同じ配列になっており、文字を打つとディスプレイ管上にその文字が表示される。

例題として、Fig. 19の図を得る場合のプログラムを説明しよう。以下の英文字を順次打ち込むことによってプログラムが完成し、ただちに計算指令にもなる。本装置では、これをリンクテーブルと呼んでいるが、そのハードコピーの例をFig. 23として示しておいた。

ANA, A; 入力信号をA-D変換し、メモリーAへ格納せよ。  
 MOV, A, B; 指令されたブロックサイズだけ取り込みが終わったら、メモリーBへ移せ、この指令によって、メモリーAには次の入力信号を演算途中から取り込むことができる。  
 POW, B, C; メモリーBの数列のオートパワースペクトラムを求め、その結果をメモリーCへ格納せよ。

メモリCへ格納せよ。  
 COR, B, D; メモリーBのオートコリレーションを求め、その結果をメモリーDへ格納せよ。  
 3DI, 20, 40; 三次元表示をせよ、X軸の移動量は20、Y軸の移動量は40  
 DIS, B, 2, 2; メモリーBの内容(ここでは時系列)を2番のスペース(Fig. 17を参照)へディスプレイせよ。  
 DIS, C, 5, 6; メモリーCの内容(ここではオートスペクトラム)を5~6番のスペースへ図化せよ。  
 DIS, D, 9, 9; メモリーD(オートコリレーション)を9番へ図化せよ。  
 JAV; 以上の動作を平均回数に達するまで繰返しなさい。  
 COP; ここでコピーをとれ、Fig. 19のような図がコピーになって自動的に出て来る。  
 PAG; ディスプレー管上の図を消去せよ。

Fig. 23 リンクテーブルのコピー例 (Fig. 19に対応)

DIS, B, 2, 2; 加算平均された最終結果のみを Fig. 19 と同じスケール、同じ配列で出させる。時系列は最後のものが表示される。  
 COP; これ以下でコピーされる図は本稿には掲載されていない。  
 PAG; 画面消去  
 DIS, C, 0, 8; ) メモリーC (オートパワースペクトラム) をスペース0~8番の大きな図にして自動的にコピーせよ。  
 COP; )  
 PAG; 画面消去  
 DIS, D, 0, 8; ) メモリーD (オートコリレーション) をスペース0~8番の大きな図にして自動的に