

船舶における応力頻度計測装置

高 橋 幸 伯

船舶のように、きわめて不規則な変動荷重を受ける構造物においては、所要耐用年数中に考えられる最大荷重を推定するためにも、また、応力集中部の低サイクル疲労強度を検討するためにも、実働状態における荷重および応力の統計的計測が必要である。船舶用各種応力頻度計測の簡単な展望をこころみた。

1. ま え が き

構造物が周期的に変動する荷重によって繰返し応力を受けるとき、繰返し数がきわめて大きくなると部材の一部に疲労の現象を起し、一般に静的破壊または降伏応力よりはるかに低い応力の繰返しでも破壊に至ること、また疲労被害はふつう疲労クラックの伝播という形で進行して、延性材料でも巨視的な塑性変形を起すことなく破壊することなどはよく知られていることである。このような動的繰返し荷重を受けるものの設計や強度判定を行なうには、予想される最大荷重に対する静的強度だけでなく、疲労強度をも考慮しなければならないことは常識となっている。

今日われわれのもっている疲労強度に関する知識の大部分は、材料そのものまたは簡単な構造要素の試験片による疲労試験によるものである。すなわち、正弦波のような単純な振幅一定の荷重サイクルによる公称応力と破壊までの繰返し数との関係を示す S-N 線図がそのおもなもので、変動荷重については、単純な荷重サイクルを二三重複した重複荷重試験による累積被害の検討が若干行なわれているに過ぎない。

船体構造に限らないが、実際の構造物においては、これらの疲労試験のような簡単な荷重状態となることはほとんどなく、きわめて複雑な不規則変動荷重を受けるのがふつうである。これらの構造部材の疲労強度を検討するには、材料の疲労試験による強度ばかりでなく、それが実働状態においてどのような変動荷重を受け、どのような繰返し応力を生ずるかということ、知る必要がある。すなわち、不規則に変動する応力を統計処理して、ある期間中にどれくらいの応力が何回生ずるかという応力頻度計測が必要である。

実際には、部材各点の応力頻度を計測することは、容易でないので構造物に加わる荷重頻度を計測して各局部の応力は、この荷重値と、別に理論計算または実測で求めた応力分布状態から算定するのがふつうである。しかし、目的は荷重頻度計測であっても、具体的には構造

物中の基準となる部分の応力、たとえば船の場合ならば船体中央部の船底または上甲板の縦曲げ応力を（さらに正確に言えばその部分のひずみまたは変位を）ピックアップするものであるから、“応力”頻度計測という言葉が最も多く使われているようである。複雑な構造物においては、構造細部における荷重と応力の関係が簡単には求められず、応力頻度と荷重頻度とを容易に結びつけることができない場合も多いが、それは別問題としてここでは触れないことにする。

部材の応力頻度が求められた場合、その疲労強度を検討するのに大別して二つの方法が考えられる。

その一つは、試験片、構造要素模型またときには実物構造物に、実働荷重と等価と考えられる頻度分布をもつ重複荷重を実際に加えて、その疲労強度を調べるプログラム荷重試験による方法である。これは最近各種のプログラム制御方式の進歩に伴って、とくに航空機分野などではよく用いられている方式である。実情に近い試験結果が得られることは期待できるが、ほう大な試験設備、時間および労力を要することはいうまでもない。また、プログラム荷重といっても、単純波形の荷重を荷重順序などは適当に選んで簡単に組み合わせたものによる試験が大部分で、はたして本当に実働荷重と等価であるかどうかという点には多くの問題があると思われる。

もう一つの方法は、振幅一定の疲労試験結果 (S-N 線図) から、累積被害の仮定を用いて疲労被害を推定する方法で、相当古くから行なわれているのである。累積被害の仮定中もっとも簡単なものはいわゆる直線被害則¹⁾と呼ばれているもので、ある試験片の繰返し数 N_i に対する時間強度を S_i (応力 S_i の繰返しの場合の寿命を N_i) とすれば、応力 $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots$ の繰返しを順次 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$ 回ずつ受けた試験片は、それぞれの荷重によって $n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_i/N_i, \dots$ ずつの疲労被害を受け、

$$D = \sum_i (n_i/N_i) = 1$$

に達すると疲労破壊を起すという仮説である。このほ

かにもいくつかの説があるが、いずれも簡単な重複応力の繰返し試験から類推した便宜上の仮定に過ぎず、実際には2, 3段の簡単な重複応力試験でも $D=1/3\sim 3$ 程度のひらきがあることは周知のとおりである。しかし、疲労強度の検討や寿命の推定など概略的な見当をつけるには十分有用なものとして相当広く用いられている。

変動荷重を受ける部材を設計するに当たって、荷重頻度を無視して疲労強度を考えるとすれば、きわめて回数少ない大荷重によって生ずる応力を部材の疲労限以下におさえるという、きわめて不経済非能率的な設計となるおそれがある。構造物が所要の耐用年数の間、安全にその機能を果たすに必要にして十分な強度さえあれば、できるだけ経済的能率的な部材の配置や寸法を考慮することが、われわれ技術者の任務である。この見地から最近船舶・車両および航空機などの分野において、応力頻度計測と並行して、疲労限をはかるかに越えた高応力領域でのいわゆる低サイクル疲労または塑性疲労が大いに関心を集めている。

以上疲労との関連だけから、応力頻度計測の必要性を述べてきたが、構造物がある期間中に受ける最大応力を求めるにも、やはり実働荷重の統計解析によらなければならない。船体構造においては、主要部材の寸法はこのようにして求めた最大荷重について静的に検討し、疲労に対しては、被害を受けそうな構造不連続部、応力集中部などの設計工作を入念にする程度の配慮で十分であると論ずる人も多い。

いずれの立場をとるにしても、船舶分野における応力頻度計測または応力計測データの統計処理は欠くことのできないものとして、近年各国でいろいろの計測が行なわれている^{2,3)}。以下にその現況および使用計器などの簡単な展望を行なってみよう。

2. 応力頻度計の計数方式

現在実用されている船舶用応力頻度計を計測方法の面から分類すると、手動式、半自動式および自動式、または手動式、機械式、電磁式、電子管式およびこれらの混用などに分けられる。手動式のもの、電磁オシロまたは、ペンオシロに記録された応力変動を手動で追跡して(場合によっては機械式または電気式計数装置を用いて)計数する比較的原始的なもので、大量のデータ処理にはあまり適したものとは言えない。できるだけ多くの船に搭載して簡単に応力頻度を計測するためには、精度その他をいくらか落としても、取付け使用が簡単で特殊の熟練技術を要しな

いで計測できるもの、比較的安価に大量生産ができるもの、長期間安定に動作するものであることが望ましく、電氣的または電子管式のものとも機械的のものにもそれぞれ一長一短があるようである。

また、応力頻度計を対象の面から分類すると、以下のようなものがあるが⁴⁾、大別すると極大値 (peak) の頻度、振幅 (range) の頻度および帯域通過 (level crossing) の頻度を測るものに分けられるようである。

これらの計数方式では、いずれも時間尺度は問題としない、すなわち、繰返し速度や荷重順序またはある荷重を受けていた時間などはすべて無視して、ただ回数だけを求めるのがふつうである。

(1) 極大値頻度計数方式

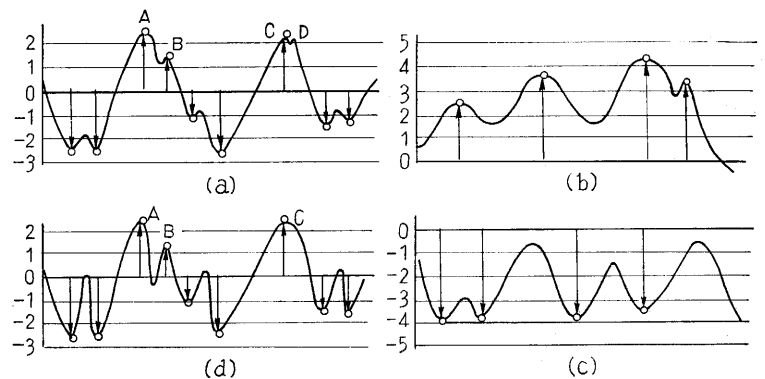
これは第1図 (a), (b) または (c) のように、正負の極大値だけを計数する方式である、この場合計数結果としては、図 (a) 中の A も B もともに0から出発して0にもどるものとして、すなわち図 (d) とまったく同じものとして勘定してしまう。いわゆる total peak 計数方式のものが多い。ただし、C, D のように二つの山の振幅がある値以下の場合には、これをフィルターして一つの山として計数するようになっている。このフィルター方式にもいろいろあるが、この小振幅の値をどの程度にとるかは、自由に決められる場合もあり、また頻度計の機構上おのずから決まる場合もある。この問題は以下に述べる他の計数方式の場合でも同様である。いずれにしても材料の疲労強度にはどの程度以下のリップル波は無関係であるというような見解に立って決めるとい段階には至っていない。

(2) 零通過最大値計数方式

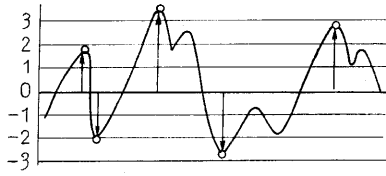
これは0から出発して0にもどる間の極大値のみを計数する方式(第2図)で、途中の変動は相当振幅の大きいものでもすべて無視してしまうものである。

(3) 振幅頻度計数方式

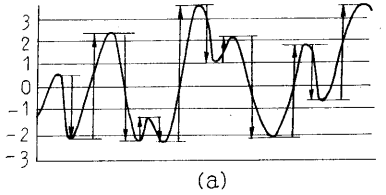
これは第3図 (a) のように変動の振幅を計数するもので、この場合極大値や平均値についての情報は得られな



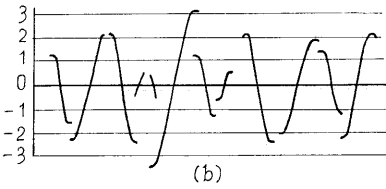
第1図 極大値頻度



第 2 図 零通過極大値頻度

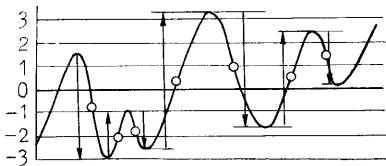


(a)



(b)

第 3 図 振幅頻度計数方式



第 4 図 振幅二平均値計数方式

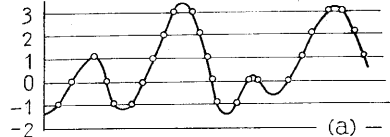
い。すなわち、各サイクルはいずれも平均値は 0 で、0 軸の上下に対称に変動する図 (b) と等価なものとして計数するわけである。

(4) 振幅一平均値計数方式

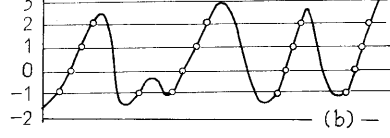
振幅頻度ばかりでなく、各変動区間中の平均値の頻度も各段階ごと計数する 2 元的な方法である (第 4 図)。これは応力～時間曲線をより忠実に再現するためには、上述のどの方法よりも多くの情報が得られる高級な方式であるが、振幅および平均値いずれも 7 段階に区分するとすれば 49 個の計数装置を必要とするわけで、相当複雑な装置となる。また、この計数結果にしたがってプログラム荷重試験を行なう場合も、このような荷重を再現するには複雑な装置を必要とするので、これまでではあまり実用されていない。しかし、最近の電子管応用の計測および制御機器の進歩に伴って、今後大いに期待される方式ではある。

(5) 帯域通過頻度計数方式

変動曲線が各レベルを通過する数を計数する方式 (第 5 図 (a), (b)) である。これは計数結果をそのまま使用するのではなく、計算または処理装置にかけて極大値頻度を求める形式のものが多いようである。したがって、

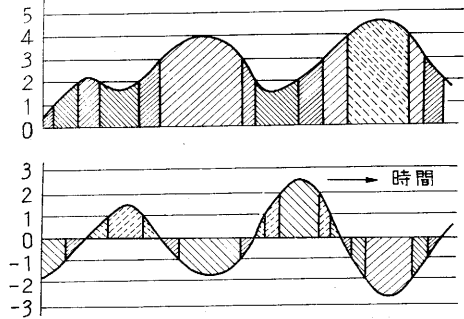


(a)



(b)

第 5 図 帯域通過頻度計数方式



第 6 図 経過時間率計数方式

0 基線を通過しないリップルの多いような変動波形の場合にはあまり適当でない。

(6) 経過時間率計数方式

これは上記各方式とは異なり、回数の代わりに時間を変数項としてとり入れたもので、第 6 図のように各段の応力値に遭遇していた時間をそれぞれ集計する方式である。荷重繰返し速度の影響を考えなければならぬ場合、または動クリープ現象も考慮に入れなければならないようなきわめて高応力の低サイクル疲労と関連づける場合などには、今後大いに利用価値のあるものではないかと思われる。

以上のほかにも、これらの各方式をいくらか修正したもの、または組み合わせたものなど、多くの方式があるようである。しかし現段階では、比較的簡単に計数できること、またその結果を疲労強度の検討に便利のように簡単な形で整理できることなどの要件を考えると、極大値頻度 (第 1 図) と振幅頻度 (第 3 図) の方式が最も一般的のようである。ここで、極大値頻度の場合には第 1 図 (a)→(d) のように高い方の応力値を誇張して示す傾向があること、振幅頻度の場合には第 3 図 (a)→(b) のように低い方が誇張されやすいことに注意する必要がある。同じ変動応力でも、リップル波の多い場合には、計数方式によってまったく異なった頻度分布が得られることになる。いずれの方式がよいかを結論するには、対象とする応力～時間曲線の特性を検討する必要があり、さらに材料の疲労強度に及ぼす平均応力振幅の影響につい

ても、今後いっそうの研究を必要とするものと思われる。

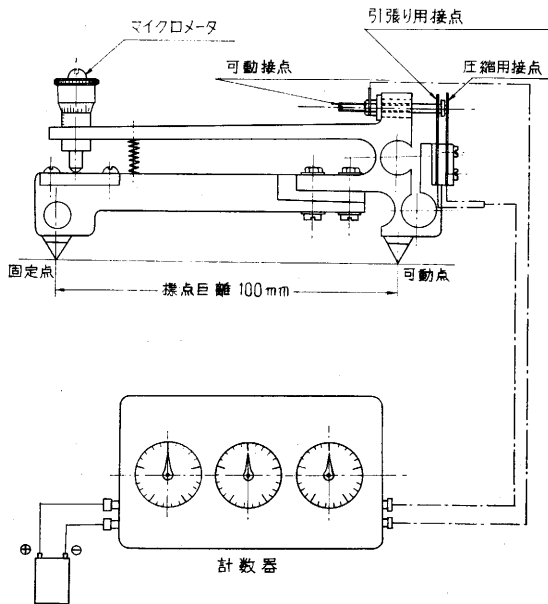
3. 船用応力頻度計の実例

船用応力頻度計の実例については、すでに二三の展望記事もあるので^{3,5,6)}、ごく簡単に紹介するにとどめる。

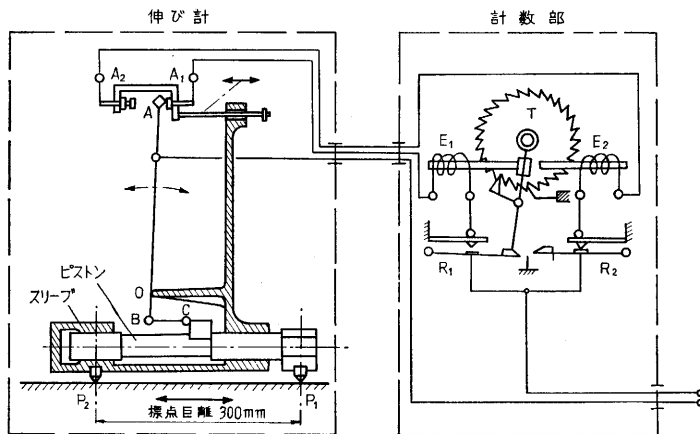
第7図は元来船用ではないが、日本の鉄道技研で作った極大値計数式の応力頻度計⁷⁾で、機械的ひずみ計と電気接点を組み合わせたもので、比較的小型簡便である。図示のものを所要段階数だけならべて取り付けるわけである。

第8図はフランスで開発された船用の応力振幅頻度計で、同様に数個を組み合わせ、下部のピストンを共通にして組み込んでいる。

第9図は米国テイラー試験水槽で実船計測用に開発したもの⁹⁾の模式図で、振幅と平均応力の2元式のもので



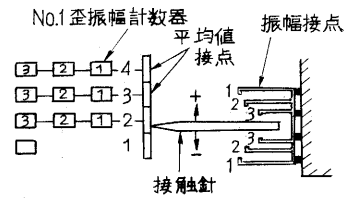
第7図 極大応力頻度計



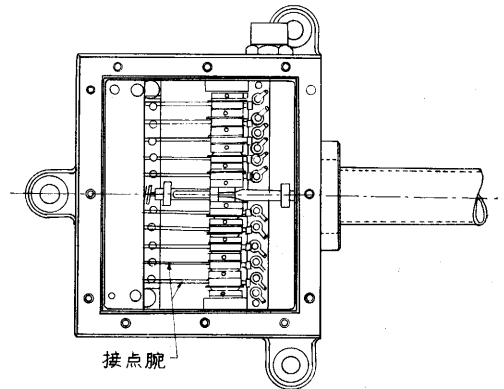
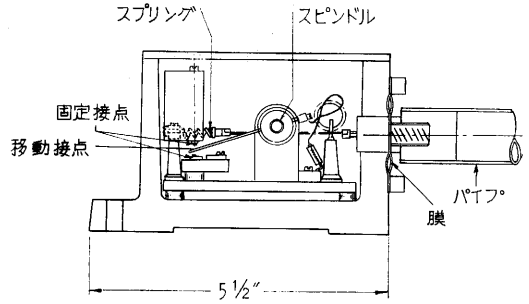
第8図 振幅頻度計

第4図の方式に相当する。

第10図は英国造船研究協会で開発した振幅頻度計数方式のものである。



第9図 2元頻度計



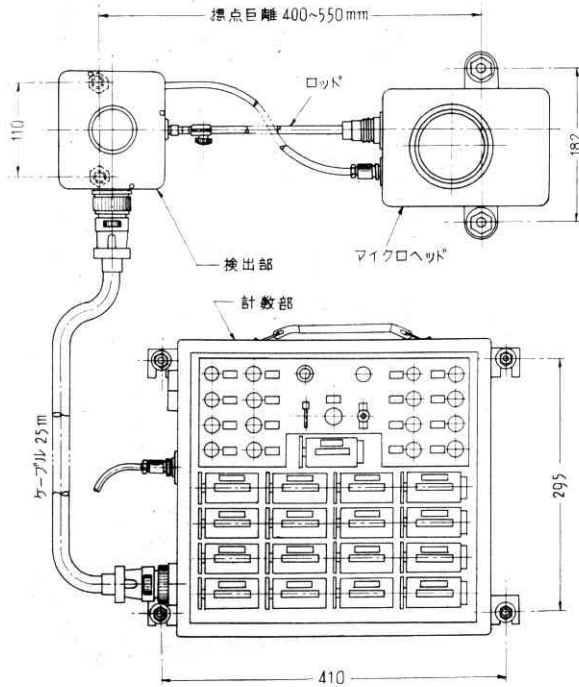
第10図 振幅頻度計

第11図は国産の帯域通過頻度計数方式のもので、ダイヤルゲージと電気接点を組み合わせたものをピックアップとしている。

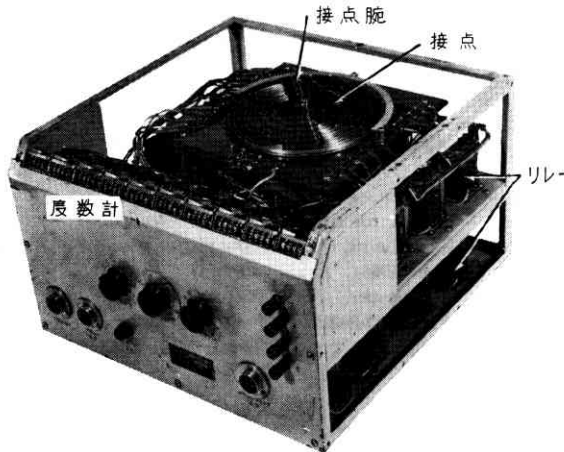
以上はいずれもピックアップ部に機械的のものを用いたものであるが、最近では抵抗線ひずみゲージその他を利用した電氣的ピックアップ应用のものも数多く試作実用されている。

第12図および第13図はいずれも国産のもので、第12図はバラシングモータを利用した振幅頻度計数方式⁸⁾、第13図は反照式ガルバノメータと光電素子を用いた極大値頻度計数方式¹⁰⁾のものである。

第14図は全トランジスタ式の国産応力頻度計で、前節で述べた、(1) 極大値頻度、(2) 零通過最大値頻度、(3) 振幅頻度、(4) 帯域通過頻度、および(5) 経過時間率の5種類の計数方式のいずれでもスイッチ



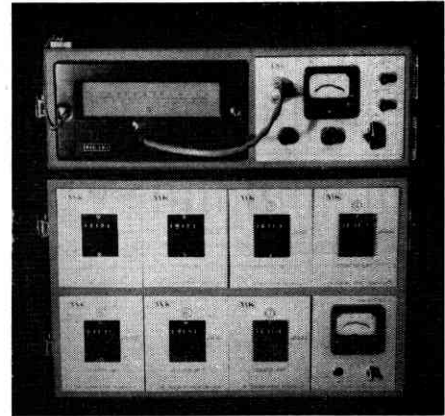
第11図 帯域通過頻度計



第12図 振幅頻度計

の切換えによって自由に行なうことのできる万能型のものである。入力に電流量に変換できるものならばどんなものでもよく、日本造船研究協会では、応力だけではなく、波浪、船体運動などの統計解析にも、第15図に示すような多素子のテープ式データレコーダと組み合わせて活用する計画を進めている。

最後にこれらの応力頻度計とはやや趣きを異にするが同じく応力の統計処理装置として、米国テイラー水槽で開発した応力モニター¹¹⁾を紹介しておこう。これは、抵抗線ひずみゲージの出力から、電子管回路を用いて一定時間の間の（この場合は過去15分間の）応力変動の二乗平均を表示および記録する装置である。気象・海象など



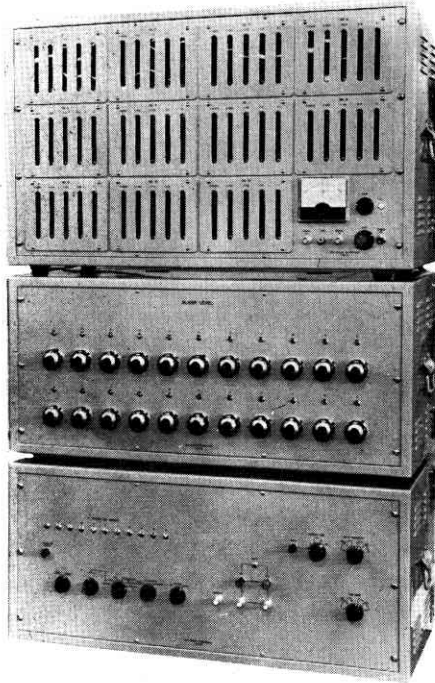
第13図 光電式極大値頻度計

の外界条件や操船条件がほぼ一定と考えられる短期間（ほぼ 30 分程度）の応力頻度分布はほぼ Rayleigh 分布関数に適合すること、およびその分布曲線は変動量の二乗平均 E によって一義的に定まることが確かめられているので、ある時点における応力変動の E がわかれば、その状態における応力頻度分布および予想最大応力の値などが推定できる。したがって、これをモニターとして使用して操船条件を変える（波に対する迎え角度や速度を変える）ことによって危険を防止することができるわけである。これもモニターとしてばかりでなく、応力頻度記録装置としても十分役立てうるものである。

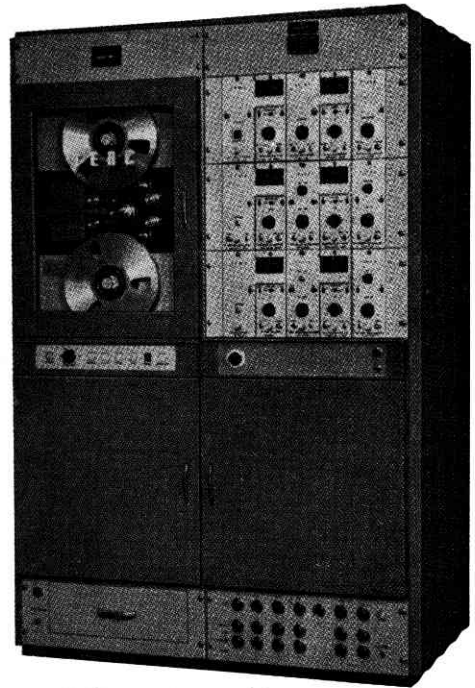
4. むすび

以上船舶の応力頻度計測装置の方式、および実例について簡単な紹介を行なった。前節に述べたとおり、各国ごとにまたは研究機関ごとにそれぞれ独自に開発した計測装置を利用して記録を集めているのが現状である。第2節でも触れたが、同じ変動現象でも計数方式によってまったく異なった頻度分布が得られることがあるので、なんらかの国際的標準化の努力をしなければ、各国間の資料の比較を軽々しく行なうことも危険である。筆者も委員の一人として参加している国際船体構造会議でもこの問題をとり上げて、計測装置の面でも、データ処理の面でも標準化の方向へ努力することになっている。さらにこの国際会議では船体の応答ばかりでなく、外界条件である海象・気象の統計解析をするために、全世界の海面を各国で分担してほう大な資料の集積および統計処理も推進している。

さて、現段階で得られる船体の応力頻度は、どの方式どの計器を用いるにしても、その計測結果から正確に荷重～時間曲線を再現することはできないが、きわめて既略的ではあるが等価に近いと考えられる荷重スペクトルを推定することは可能であり、部材の設計および既存の



第14図 トランジスタ式頻度計



第15図 磁気テープ式データレコーダ

ものの寿命推定などに大いに役立てられている。最近の記録およびデータ処理用機器のめざましい進歩と、各方面で強力に推進されている部材の低サイクル疲労強度の研究の成果と相まって、さらにいっそうの飛躍が期待できるものとする。(1964年10月10日受理)

文 献

- 1) M. A. Miner; J. App. Mechanics, Vol. 12, No. 3 (1945)
- 2) Report of the Committee 2b-II on Wave Bending, Shear and Tortion-Full Scale Statistics; Proc. of the 2nd Intern. Ship Structures Congress, July 1964, Delft (1964)
- 3) Report of the Committee 6 on Experimental Appa-

ratus; Ditto

- 4) T. Haas, "Loading Statistics as a Basic of Structural and Mechanical Design", IIW Document, XIII-315-63 (1963)
- 5) 多田美朝, "応力頻度計", 材料試験, Vol. 5, No. 37 (1956)
- 6) 非破壊検査協会, 応力頻度計測に関するシンポジウム別刷 (1958)
- 7) Y. Tada, Proc. of Sympo. on the Stress Measurement for Bridge and Structures (1957)
- 8) H. de Leiris, Annual Meeting of Ass. Tech. Maritime (1956)
- 9) N.H. Jasper, Taylor Model Basin Rep. 781 (1953)
- 10) 造船研究協会第63研究部会報告 (1964)
- 11) Sheng-Lun Chuang, Taylor Model Basin Rep. 1960 (1962)

正 誤 表 (第 16 卷 第 11 号)

ページ	綫	行	種 別	正	誤
72	右	下 8	本 文	……入力パルス……	……入力カパルス……
74	左	5	"	…測定と比較すると……	……測定と比較と……
82	"	2	"	Ba(NO ₃) ₂	B(NO ₃) ₂

次 号 予 告 (2月号)

研 究 解 説

磁場が強いときの物体のまわりの電導性流体の流れ……………成 瀬 文 雄
 菊川の「応力分布の測定において標点距離が有限なることによる誤差の補正方法」の一拡張…大 井 光 四 郎
 明治の建築と近代化の問題……………村 松 真 次 郎
 マテリアルズハンドリングとその自動化……………山 下 忠

研 究 速 報

無機イオンの酢酸セルロース電気泳動……………高 井 信 治 学 部
 ……妹 尾 武 郎

生 研 ニ ュ ー ス