

# 多重化した抵抗線歪計

—進水時船體應力の同時測定について—

高木 昇・尾上 守夫・増田 聖

安藤 良夫

飯田 國廣

船體の多數點の動的歪を同時に記録する抵抗線歪計を試作したが、これは船舶ばかりでなく飛行機、自動車、機械などの動的應力の測定にも應用できる。

## 1. はしがき

こゝには多數の測定點に貼付した抵抗線歪計の出力をたゞ一組の増幅器、記録器で共通に増幅、記録することによつて、各點毎に増幅器その他を準備するわずらわしさを除いた計測装置と、それによる進水時の船體應力測定例が示してある。

これはかねて生研第2部安藤研究室においてこの種の測定器の要望があつたのが、たまたまその参加している委員会<sup>(1)</sup>において進水時船體應力計測用装置の整備をすることになつたのを機会として、生研第3部の協力の下に實現したものである。第3部がその電氣的設計の依頼を受けたのは昨年10月末であつたが、部内で協議の結果高木研究室がこれを擔當することになり、12月初旬にはその第一次試作品をもつて現場試験を行うことができた。それ以來後述のように數回の現場試験を重ねてほゞ實用に供し得る段階に達したものである。

この研究は正式の依託研究ではないが、装置の試作および現場試験は造船協會の事業としてなされたものであつて、生研と外部との協力を示す一つの範例であるし、また生研内の各専門分野間の連携を紹介するのにも適していると思われるので本誌に収録したものである。

なお抵抗線歪計のゲージ自體についてはすでに本誌にもくわしい解説がでているから、<sup>(2)</sup>これを参照していただきたい。またこゝに録した測定器は主として動的歪の測定を對象とするものであるが、靜的歪を零位法によつて精度よく測定する計器も、生研内の應力關係の各研究室から第3部への依頼によつて、高木研究室で試作されていることを附記しておく。

## 2. 問題のおこり

一口に應力測定といつても船體のように大きな構造物では一點や二點の測定では意味をなさない。問題の解決に役立つような資料をうるためには少くとも數十點以上

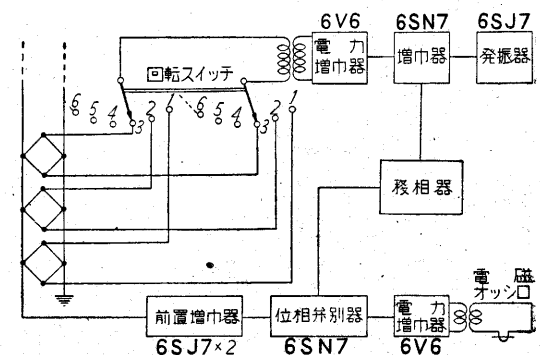
の測定が必要となる。これらの測定點は相互にかなりの距離をもつのが普通であり、しかも動的歪の測定には各點の同時計測を行わなければならないから、どうしても電氣的測定法によらざるを得なくなる。電氣的な歪計にもいろいろな種類があるが、特性が良好なこと、信頼度の高いこと、簡便、安価なこと等の點から抵抗線歪計が採用された。これはその出力を記録するためには一般に増幅器を必要とする。測定點が多數になると各點毎に増幅器を設けるのは相當な負擔である。とくに進水時の計測のように測定装置を進水の前後の短時間に積込み、積卸さなければならぬ時は重量・容積の軽減は大きな要求となる。また電源も進水する船には何の設備もないから外部から蓄電池とインバーターを持ち込むので、装置の電力消費は最小限にとどめておかなければならない。

以上のような理由によつて一組の増幅器、記録器でできるだけ多數の點を測定すること、すなわち装置の共用化が望ましいわけである。そして進水時船體應力のようにその變化速度が比較的緩慢なものならば、後述のように簡単な機械的スイッチによる切換によつてこの要望をみたすことができるのである。

以下においてまず装置の全體の構成とその各部の説明をした後に應用例の紹介にうつることにしよう。

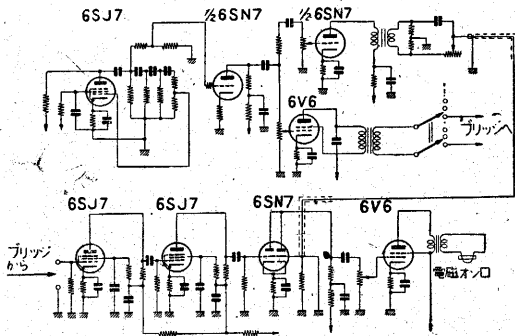
## 3. 装置の概略

第1圖は測定装置全體の構成圖であつて、その回路圖は第2圖に示す通りである。すなわちブリッジに印加すべき搬送波を發振器で發振し、その電壓を緩衝増幅器、



第1圖 装置全體の構成圖

電力増幅器で増幅した後、切換スイッチを経てブリッジに加える。その出力は前置増幅器で十分増幅した後、位相弁別器に送る。發振器出力の一部は側路されて移相器を経てこれも位相弁別器に送られ、兩者を加えてブリッジ出力の極性の弁別を行つている。その出力をさらに電力増幅し、電磁オシロで記録するわけである。ブリッジはその出力端を  $n$  ヶ共通にして増幅器入力に接続し、切換スイッチでそのいずれかのブリッジに電壓を印加する。スイッチの切換周期を現象の變化速度に比して十分速くすれば各測定點のブリッジ出力によつて振幅變調を受けた矩形波の系列が得られこれは一組の増幅器、記録器であつかうことができるわけである。この間の事情は時分割通信の場合と全く同じである。



第2圖 装置全体の回路圖

4. 各部の説明

a. 發振器

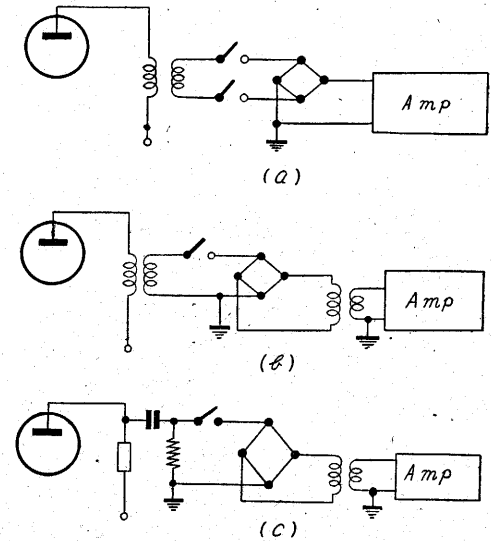
發振器としては簡単なCR位相推移發振器を使用し、發振波形の歪率を少なくするように留意した。位相推移回路の部分はプラグ・インにして發振周波數切換の便をはかつている。發振周波數は切替スイッチの切換速度、切換點數によつて下限がおさえられる。波形傳送の點からは高い程よいが、餘り高くなるとブリッジの容量不平衡の影響がいちじるしくなる。實驗は1,000 c/s で行つた。

b. 切換スイッチ

すでに述べたようにブリッジは従來の配列と異なつて出力側は全て共通にして前置増幅器の入力に接続するようにした。したがつて切換スイッチはブリッジの入力側に入ることになる。(3) 従來はこれと逆にブリッジの出力側にスイッチをおいたために、 $\mu V$  級の電壓の開閉となり、雑音などをひろいやすかつた。筆者等の方式では數V級の開閉であるのでこの點が非常に樂になり、スイッチとして簡単な電話交換機用ライン・スイッチ程度のもので間に合うことになつた。(4) これはリレーの自己斷續回路によつて直流を印加するだけでも回轉するのであるが、この斷續回路からの電磁誘導が相當大きいのと、回轉速度が固定なのは實用上不便なので、バンク接點とワイバーのみ利用して回轉は外附のモーターによつて行うようにした。

c. 切換スイッチの挿入位置

切換スイッチの挿入位置としては第3圖のように、いろいろの方式が考えられる。



第3圖 切換スイッチの挿入位置

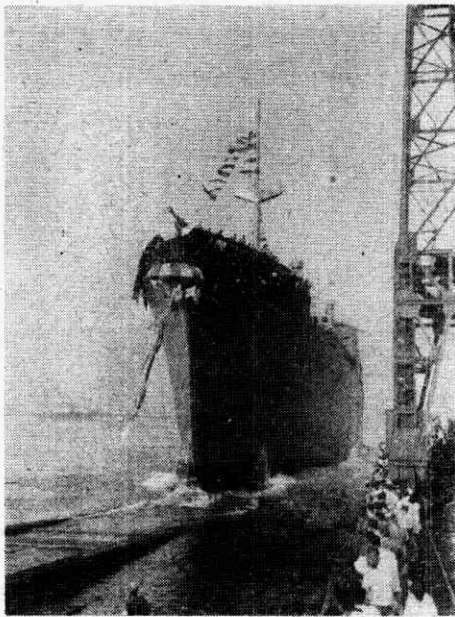
(a) は兩切で (b), (c) は片切である。片切の方が一箇のスイッチで測定點の數は多くとれるが實現にはいろいろの難點があるので今回の試作品は (a) を使い、將來 (b) に移行する豫定である。(b) は變成器が二箇いるのが缺點でとくに入力變成器は斷續矩形波を傳送するのであるから周波數特性に對する要求が相當きびしく、また外部からの誘導雑音を十分に抑えるために遮蔽その他の點で相當の苦心を必要とする。しかしその一箇入力變成器を使えば昇壓できるとともに、一次側が平衡回路になるのでゲージまでの導線がひろう誘導雑音を打消して二次側にあらわれないようにすることができる。もちろん (b) は (c) のようにすれば變成器は一箇ですむが、整合がとれないから好ましくない。結局 (a) は兩切だが回路としては無難なわけである。

d. ブリッジの出力を共通にしたための影響

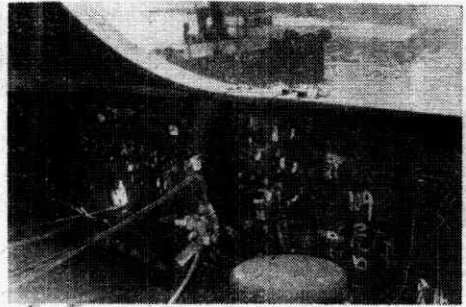
このため各ブリッジ相互間の相互干渉がないだろうかという疑問がおこるが、解析の結果は、<sup>5)</sup> 誤差の最大は

$$\frac{n-1}{n} \times \frac{\delta R}{4R} \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

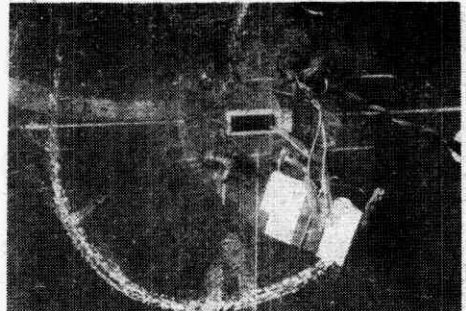
以下である。ここに  $n$  はブリッジの箇數、 $\delta R/R$  は電壓が印加されてないブリッジのゲージが呈している最大の抵抗變化である。したがつて  $\delta R/R$  が  $10^{-2}$  以上というような大きな變化をするときを除いては問題にならない。これは實驗的にも確められている。たゞ出力電壓は  $n$  箇並列にしたために、單獨の場合と比較して  $1/n$  に低下する。しかし増幅器側からブリッジを見たインピーダンスも同じく  $1/n$  になるので、整合變成器による昇壓は可能である。また各ブリッジに消費される平均電力も單獨の場合の  $1/n$  になるから、ゲージを過熱するおそれな



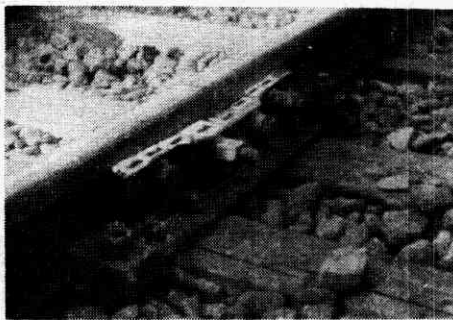
① 進水時船尾浮揚直後の状態で船体には相当曲げ応力がかかっている。横濱造船所で。



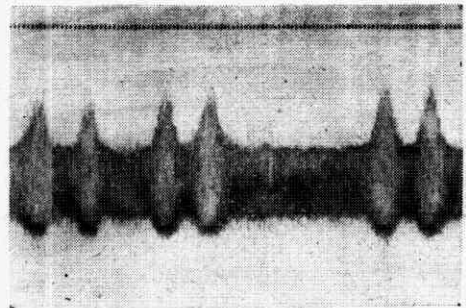
② 永兼丸ブルワークエクステンションジョイント附近の応力測定。浦賀造船所で



③ 祥雲丸船体に貼った歪ゲージ。右下にぶら下げた軟鋼片にダミーが貼つてある周囲のフックは貼付け用。



④ レール絶縁目板にアクティブ・ゲージを貼つたところ。小田急経営附近で。



⑤ ④の計測記録の一例。ボギー車の車輪通過の際に最大応力が出ている状態がよくわかる。

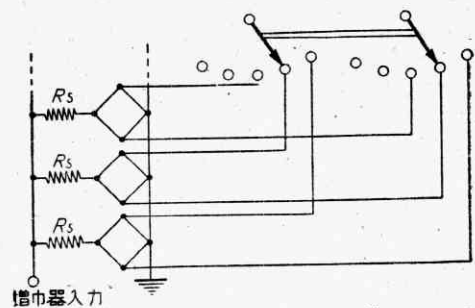
くブリッジの印加電圧を  $n$  倍にして、この利得の低下を補償することもできる。

$\delta R/R$  が極度に大きい場合には第4図のように隔離抵抗  $R_s$  を各ブリッジに加えればよい。このときの誤差は(4.1)式の代りに次式で與えられる。

$$\frac{n-1}{n} \times \frac{\delta R}{4(R+R_s)} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

$R_s$  を大きくすれば誤差はいくらでも小さくできる。出力電圧は前と同じく  $1/n$  になるだけであるが、増幅器側から見たインピーダンスは  $(R+R_s)/n$  となつて前より當然高くなる。したがつて前と同じ昇壓比をうるには整

合変成器の設計が厄介になるわけである。



第4図 ブリッジの隔離法

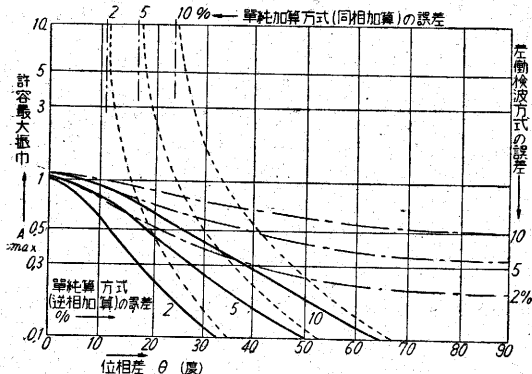
e. 前置増中器

2段の抵抗容量結合増幅器で利得は約 90 db, 周波数特性は 1,000 c/s を中心に帯域通過特性をもつようにし, またハム雑音を軽減するために, 50 c/s に對して大體 -40 db の利得低下を興えている。

f. 位相弁別器

ブリッジの印加電壓が直流の場合ならば平衡点を境として極性が逆轉するから歪の正負の判別は容易であるが交流を印加する搬送波方式では出力振幅のみに着目したのではこの判別はできない。しかしこの場合でも出力電壓の位相が平衡点を境として逆轉するので, これを何等かの方法で検出すれば極性の弁別ができるわけである。これが位相弁別器で, 昔から種々の回路方式があるが<sup>(6)</sup>原理的には大した差はない。もつとも簡単な方式は, ブリッジ出力電壓に發振器から側路した基準電壓をベクトル的に加算してその合成振幅に着目する方式である。平衡点における位相の逆轉によつて加算が同相または逆相に行われるから正負の判別がつくわけである。この方式では合成振幅をそのままでもあるいは検波してからでも記録できる。たゞ平衡点でも出力が零にならない點が注意を要する。これをさけるにはたがいに逆相の基準電壓を一組用意してブリッジ出力にそれぞれ加算し, そのおのおの合成振幅を差動検波すればよい。この場合には必ず検波する必要がある。

いずれの場合でも基準電壓の大きさはブリッジ出力よりある程度大きくないと兩電壓が完全に逆相又は同相のとき以外は非直線誤差を生じる。<sup>(7)</sup> 第5圖は兩電壓の位相差  $\theta$  を興えたときに誤差を所要の値以下におさえるためには基準電壓の振幅を1としてブリッジ出力電壓に許しうる最大値  $A_{max}$  を計算したものである。圖から明かな通り差動検波方式では  $A_{max} < 0.3$  にとつておけば位相差の調整は行わなくとも誤差は5%以下に保たれる。しかし單純に加算する方式では位相差とともに誤差が急激にますから, 位相差の調整は必要である。第2圖のよう移相器を使つて基準電壓の位相を變え, 一定のブリッジ出力電壓との合成振幅が最小になるように調整した場合, 位相差を大體  $10^\circ$  以下にすることができる。



第5圖 位相弁別器の非直線誤差

なお位相弁別器を使わないで, その代りにブリッジの平衡をあらかじめ既知量だけ崩しておけば單純な加算方式と同じような出力が得られ, しかも位相差による誤差はなくなる。しかし初調整が厄介であり, また増幅器を飽和させやすいので本装置には採用しなかつたが, 簡便を旨とするときは使用して便利であろう。

g. 記録方式

この装置では第2圖に示すように位相弁別器の出力は検波しないで, 搬送波のまま記録する方式をとつた。したがつて位相弁別器は單純な加算方式を採用している。検波しないと次のような利點がある。

第一に検波器の時定数による誤差がなくなるので, 搬送波の周波数が低いときには有利である。第二に終段の電力増幅器に整合變成器を使用できるから, 出力變換能率がよくなる。第三に外部からの誘導その他による雑音は本装置のように高利得の増幅器を使用するものでは相當厄介な問題であるが, 検波してなければオッシロの記録の上で搬送波と雑音とが相當程度識別できる。口繪グラビヤの第4圖がそのよい例である。第四に船上で計測を行うときは震動や衝撃が相當あるので装置全體に十分な防震對策を講じないとオッシロの零點がずれたりする惧れがあるが, これも検波してなければ記録された振幅の中心から容易に求まるわけである。しかし一方において記録紙の幅全部を有効に使えないこと, 何組もの記録を同一記録紙上に記録することができないことなどの缺點はある。

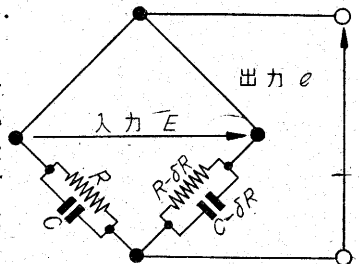
なお電磁オッシロの代りに生研式インクライター<sup>(8)</sup>を使用した装置も試作している。

5. 容量不平衡

ゲージの對地容量, 導線間の漂遊容量等に起因する容量不平衡は平衡點附近で問題になる。これ等の容量の數值的概念をあげるために, 實測した一例をあげると,  
ゲージの對地容量 約 10~15 pF  
シールド線の心線と外被間の容量 約 220 pF/m  
普通により合せた線の線間容量 約 20 pF/m

程度のものである。

第6圖のように電壓  $E$  を印加したブリッジに抵抗不平衡  $\delta R$ , 容量不平衡  $\delta C$  がある時の出力  $e$  は次式で與えられる。



第6圖

$$\frac{e}{E} = \frac{1}{4} \left[ \frac{\delta R}{R} - j(R \cdot \delta C X + X \cdot \delta R) \right] \quad (5.1)$$

こゝに  $X = 2\pi fC$ ,  $f$ : 周波數

上式の第一項は測定すべき抵抗變化の項であり, 第二項

は容量不平衡による不平衡電圧をあらわす項であり、第3項は並列容量の値自體が大きいために生じる非直線誤差の項である。この式から容量不平衡の許容量、導線の許容最大長等を求めることができる。

6. 實船による船體應力測定の沿革

船體のように大きくかつ複雑な構造物になると多くの問題を解明するためには模型実験では如何ともすることができず、どうしても實船について實測をしなければならない。船體構造の立場からみると、振動の問題や極めて局部的なものは別として、次の三種類に大別できる。

a. 靜的強度試験 これは船を入渠させるかまたは靜水中に浮べ、既知の曲げモーメントをかけて船體各部の應力の實態をつかむ目的で行われる。古くはBilesの“Wolf”<sup>(9)</sup>の實驗、米海軍が船渠内で行つた“Preston”、“Bruce”<sup>(10)</sup>の實驗など、近くは同型の溶接船と銲接船を比較した“Neverita”<sup>(10)(12)</sup>、“New Combia”<sup>(13)</sup>の實驗があり、我が國においても海事協會が運輸技術研究所と協力して行つた近油丸<sup>(14)</sup>の實驗がある。近油丸では抵抗線型靜的歪計を用い1000點近くの應力測定を試みた。

b. 航行中における動的強度試験 これは波浪中において主として船體に加わる外力を計測する目的で行われ、水壓、波型、船體の運動、加速度、撓み、應力等非常に多くのものを計測する必要がある。古くはSchnadelの“San Francisco”<sup>(15)</sup>の實驗、近くは“Ocean Vulcan”<sup>(16)(17)</sup>の實驗がある。わが國においては昭和10年荒天の太平洋上で特型驅逐艦二隻の船體切斷をはじめ多くの事故を起したいわゆる第四艦隊事件以來多大の關心が持たれているが、まだこの種の大がかりな實驗は行われていない。しかしこのために現在着々と準備が進められているので、こゝ數年のうちには多期北太平洋における強度試験が實施されることとおもう。

c. 進水時における試験 進水時には後で述べるようにながりの曲げモーメントがかかる。これによつて船體の破壊までも論ずることは困難であるが、應力の傳り方、應力集中の程度などを知ることができる。前述の二つの試験が多額の經費と時間を要するのに反し、これは比較的簡單に行うことができるのが利點である。

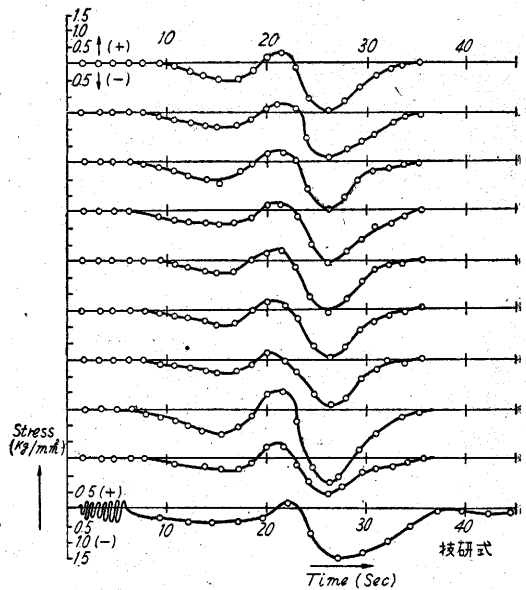
進水は船體の主要な構造ができ上つた後に行われる。進水重量は特別大きなものでは戰艦武蔵の3萬數千トンという例もあるが、普通のデッド・ウェイト1萬トン級の貨物船で3,000トン位である。進水途中船尾浮揚(Lift by Stern)の時この重量は主として船首抱臺(Fore Poppet)附近の反力と船尾部の浮力で支えられるのでかなりのSagging momentがかかる。靜的試験の場合はこの曲げモーメントをうるために水や屑鐵等で荷重をかけるのでその手間と時間は大變であるが、進水の場合は支綱切

斷からわずか數十秒で船體は完全に浮ぶので、その間に全てのデータがとれるが、測定としては相當の難しさを伴つてくる。

7. 測定例

進水時の應力測定は第1表に示すようにこれまで4回行つた。はじめの3回は實用試験の意味で行い好成績ををさめたので、第4回目はブリッジデッキ以上の上部構造への應力傳達状態と甲板室出入口附近の應力集中度の計測を試みた。<sup>(18)</sup> 寫眞①~③参照されたい。

第7圖はブリッジデッキ上に歪ゲージを貼つてテストを行つた時の應力時間曲線である。一番下の曲線はダイヤルゲージで讀む技研式の機械的歪計(ゲージ長400mm)で大體同じ傾向の曲線が得られている。多少應力に大小があるが、船のような構造物では初期撓み、溶接による残留應力などがあるので一様にはいかない。



第7圖

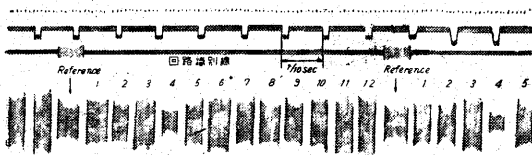
第1表

船名	船主	造船所	載貨重量	進水年月日
日洋丸	日産汽船	鋼管鶴見	9,900kt	1951. 12. 12
熱海丸	日本郵船	東重工横濱	10,100	1951. 12. 25
永兼丸	八馬汽船	浦賀	9,870	1952. 1. 25
祥雲丸	岡田商船	東重工横濱	9,900	1952. 3. 24

第8圖は12點切換のオッシロ記録の1例である。Reference とした部分の幅より、幅が大きいものが壓縮應力、小さいものが引張應力をあらわす。切換周期はこの場合約0.75秒である。

船體應力以外の測定例としてはレールの絶縁繼目板が電車の通過時にうける應力を測つた例がある。寫眞④

⑤はその記録の一例である。この場合は現象の變化速度がいちじるしく速いので切換は行っていない。このとき發振周波數 1,000 c/s で 100 c/s 位までの應力變化をとらえることができる。電車の車輪が通過するごとに衝撃的な荷重がかかることがよくあらわれている。記録波形が上下非對稱なのは出力がいちじるしく大きいので終段の電力増幅器のバイアスを加減して上側の部分のみ真空管の特性の直線部分にのるようにしたためである。



第 8 圖

8. む す び

進水時の應力を計測して造船學上の問題を解決しようとする試みは、從來適當な計測装置がなかつたために見るべきものがなかつたが、ここに述べた装置はその研究にあつて有力な武器となるであろう。船舶以外の構造物の應力測定にも使用して便利なが多い。さらに抵抗線歪計は若干の附屬品によつて容易に壓力計、振動計

加速度計、動力計等の目的に使用することが可能であるからこの装置の應用面も今後ますます多彩になつていくものと思われる。

終りにこの研究の開始にあつて御助言をいただいた澤井教授、現場試験に御援助下さつた丹羽助教に感謝するとともに、本研究に絶大な支持を與えられた造船協會の各委員の方々に厚くお禮申上げる。(27. 4. 5)

註

- (1) くわしくは造船協會構造研究委員會第一分科會計器小委員會以下において造船協會と略稱とする。
- (2) 大井, 淺野, 小倉: 生産研究 3, 12, 454~457 (昭 26~12)
- (3) Yates, J.G. & others: P.I.E.E. 89 Part II, No. 62, 109~124 も同様の接續を採用しているが、真空管で切換を行いつつ矩形波を印加するようにしているので装置が庞大になつている。
- (4) スイッチを寄贈された沖電氣工業株式会社の御好意を感謝する。
- (5) 生研第3部電氣談話會報告 3, 2 (1952)
- (6) 例えは Walter, C.H.: Zeits. f. tech. Phys. 13, 8. 363 ~367 (1932)
- (7) 生研第3部電氣談話會報告 3, 3, (1952)
- (8) 糸川: 生産研究 3, 6, 212~218 (昭 26~6)
- (9) Biles, J.H.: Trans. I. N. A. 1905.
- (10) Kell, C.G.: Trans. A. S. N. A. & M. E. 1931.
- (11) Bull, F.B.: Trans. I. N. A. 1946.
- (12) Shepherd, R.B. and Turnbull, J.: Trans. I.N.A. 1946.
- (13) Shepherd, R.B. and Bull, F.B.: N.E. Coast Institution 1947.
- (14) 未發表.
- (15) Schnadel, G.: J.S.T.G. 1936.
- (16) Bull, F.B. and Baker, J.F.: Trans. I.N.A. 1949.
- (17) Johnson, A.J. and Ridler, A.V.: Trans. I.N.A. 1949.
- (18) これらの測定はすべて造船協會構造研究委員會第1分科會が各造船所の協力を得て行つた。詳細は同委員會から發表される豫定である。

應力測定技術研究會 (S.M.R.C.)

應力測定技術は最近 10 年間に外國で急速に進歩し、廣い分野で盛に應用されているが、わが國でもこの方面の研究を促進させるために、生研の所員が主體となつて所内外によびかけて各方面より、多くの研究者が集り、昭和 25 年末より上記の研究會が発足した。もと所員竹中二郎教授が委員長、池田健教授が幹事となり、毎月開かれる研究會には常に 20~30 人が出席し、研究發表と討論が活潑に行われ、應力測定技術の向上に大いに寄與している。今その研究發表の二、三を拾つて略記してみる。

電氣容量型歪計 (池田所員, 富田特研生); 抵抗線歪計と共に最新の歪計として期待されているもので、溫度、湿度の影響が少く、小型輕量、取付け容易で多數點の測定に適した新しい歪ゲージと、感度精度の高い新しい歪指示装置を製作した。この歪計を使用してバス車體、橋梁等の靜的應力の測定を行い、よい結果を得た。

抵抗線歪計 (大井所員); 米英では最も廣く使われ、わが國でも早急な實用化が切望されているもので、歪ゲージ及び測定回路の基本的な研究成果を數次に亘つて發表した。

橋梁の應力測定 (岡本所員); 建設省・各縣と協同して、橋梁の耐力の判定、強度・振動の實測を大がかりに行い、機械的歪計・抵抗線歪計・容量型歪計或は撓度計等の新しい計器を多數使用している。

プレス作業および薄板試験における歪測定 (山田所員); 油壓薄板試験機を試作し、歪の分布を測定し、エリクゼン試験機と比較した。また薄板の歪測定用としての Photo grid 法の實用化に努めた。

索の研究 (大和田所員); 索の加工・疲勞・強度を解明するため、撓索の曲戻し加工と不反撥性について解析を行い、また曲げ剛性を振動法により測定した。

初期クリープの測定 (安井勇夫); 特に工夫した高感度の機械光學的歪計を使い、電氣容量型歪計を併用して、銅の單結晶の初期クリープの測定を実施した。

振動測定 (池田所員・森所員・富田研生); 振動數制禦が良く低い振動數 (5 サイクルまで) でも出力の減少しない電子管式起振器と、多數點の振幅・位相の測定に適した電氣容量型振幅計とを試作して、大型バス車體の振動試験を行つた。

なお第1部以外にも各部の多くの所員が参加して活潑な活動をしている。3 部の高木研究室と2部の安藤研究室とは抵抗線歪計による船舶の應力測定に活躍している。また同じ歪計を使つた鐵道軌條の繼目点の應力測定が高木・池田・安藤所員により行われた。

抵抗線歪計に對する要望は所内各部で非常に強く、數臺の靜的および動的歪計を生研に備えることが決定され、その装置の研究および製作を3部の高木研究室が擔當し、1部の池田・大井・森・富田もその整備に協力し、近く完成する豫定である。