

(昭和 35 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

木船船体たわみの動的測定

正員 竹 鼻 三 雄*

Dynamic Deflection Gage for Long Span

(With two examples of longitudinal deflection measurements of wooden ship in rough water)

By Mitsuo Takehana, *Member*

Summary

In order to measure the deflection in long span dynamically, a new type deflection gage was designed.

The gage is made up of eleven steel pipes placed in one row, ten connecting pieces (pickups) and two end pieces. The pickup contains four electric resistance strain gages and the output voltage is in proportion to the angle change between adjacent pipes. The sensitivity is 0.3 mv per 1/1,000 radian. (0.06 degree) The accuracy of deflection over 66 ft. span is 1/50 in., and maximum measurable deflection is 10 in. in same span.

Satisfactory results were obtained in experimental voyages of four wooden ships in rough sea, and the influence of hull deflection upon the bending of shafting was explained.

1. 緒 言

木船の船体たわみが大きいことは古くから知られているところで、これが水防の破損とか、推進軸系の故障の原因となると言われていた。しかし、従来上架時、進水時またわ静水中の船体たわみの実験はあるが、波浪中で実測した例は皆無であつたから、これら事故の原因を深く解明することはできなかった。

木船の船体たわみを動的に測定するためには、10m~20m 位のスパンの各点において $\pm 0.5\text{mm}$ 以上の精度をもつて、しかも船体の動揺のはげしい荒天候中でも測定可能でなければならない。従つて静試験(みず糸、水管、レベル等を使用する方法)のような簡単な装置では実用にならない。このような測定が可能となるならば、一般に長スパン構造物で中間に固定点の得られない例えば橋梁などのようなものの動的たわみ測定にも応用が可能となると思われ、著者は以前からその必要性を感じていた。

たまたま、著者が委員の一人として参加している船用機関軸系の設計等に関する委員会において、木船々体のたわみが軸系におよぼす影響を調査するに当り、波浪中のたわみ測定を行う必要が生じ、著者の年来の腹案を実現する機会に恵まれた。

本装置は上述のような経過で実現され、船上実験で一応の成果を得たので、なお改良すべき点が残されているが、ここにその概要と実測結果を紹介し、大方の御批判を仰ぎたく存ずる次第である。

2. 長スパンの動的たわみ測定の問題点

途中に固定点の得られない長スパン構造物のたわみを測定するには次のような方法が考えられる。

(a) 直接法——基準線としてスパンの両端間に張力を強くかけて張つた軽くて強い糸を用い、途中の各点に立てたスケールと基準線との相対変位を動的に記録するもの。糸の代りに光線のビームによる光学的装置も考えられる。

(b) 折線近似法——適当な長さの軽くて剛性の高い棒を長さ方向に一列に並べ、おのおのの棒の両端は相対にヒンジで結合して、ヒンジ部分の角変化を測定し、折線近似でたわみ曲線を求めるもの。

(c) ひずみ法——一定断面のビームを構造物の長さ方向に密着させ、各点の表面ひずみを測定し、長さについて2重積分してたわみを求めるもの。

原稿受付 昭和 35 年 6 月 20 日

* 東京大学工学部

(d) 振動計法——スパンの中間に振動計(変位計または加速度計)を配置し、その点の運動を記録するもの。荒天波浪中の航海で船体たわみを正確に測定するためには、次のような苛酷な条件が測定器に課せられる。

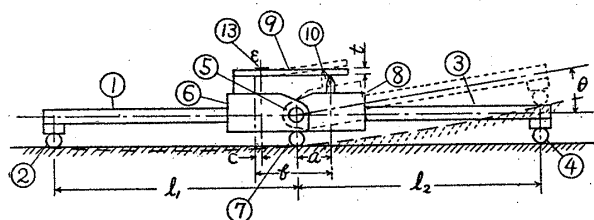
- (i) 船体の動揺および振動の影響を極力小とすること。
- (ii) 風・雨・海水等のために精度が狂つたり、測定不能となつたりしないこと。
- (iii) 測定器の0点および感度が長時間安定なこと。
- (iv) 所要電源容量がなるべく小なること。
- (v) なるべく操船・船上作業の障害とならないこと。
- (vi) 他の測定量(船体応力、軸系応力、動揺加速度)と同時記録の可能なことが望ましい。

これらの点を考慮に入れて最も実現性のある方法について考察を行なつた結果、記録は電磁オシロを、ピックアップには抵抗線ひずみ計を使用するのが最適であるとの結論に達し、(b)の方法で角変化をひずみゲージで測定することとし、これをヒンジ式たわみ計と呼ぶこととした。

この方法では連結棒の剛性/重量の比をなるべく高くすることと、連結棒の長さを適当に選ぶことに問題がある。すなわち、連結棒の数を増す程折線近似度が増し、棒の固有振動数が高くなつて(i)の影響を受けにくくなるが、他面、測定点数の増加と誤差が重ね合わせられることから、これらの適当な兼ね合いを見付けなければならない。

3. ヒンジ式たわみ計の原理と構造

第1図に示すように、端部にローラー②、④を附属させた剛性の大きな棒①、③を横たえ、棒の他端はヒンジ⑤で結合されローラー⑦の上にのせたピックアップ⑥、⑧に接続する。⑥には、抵抗線ひずみゲージ⑩を貼り付けた板厚 t のバネ⑨をつけ、バネの他端は⑧につけた突起⑩で押している。いま、基礎が点線のようにたわんだとすると、③は①に対して角 θ だけ回転し、⑩は⑨を点線のように押上げ、⑩にひずみ ϵ を生ぜしめる。 θ が小なるときは $\epsilon = 3/2 \cdot t(b-c)a/b^3 \cdot \theta$ なる関係が成立つから、 θ に対して ϵ を較正しておけば、 θ をひずみの値であらわすことができる。



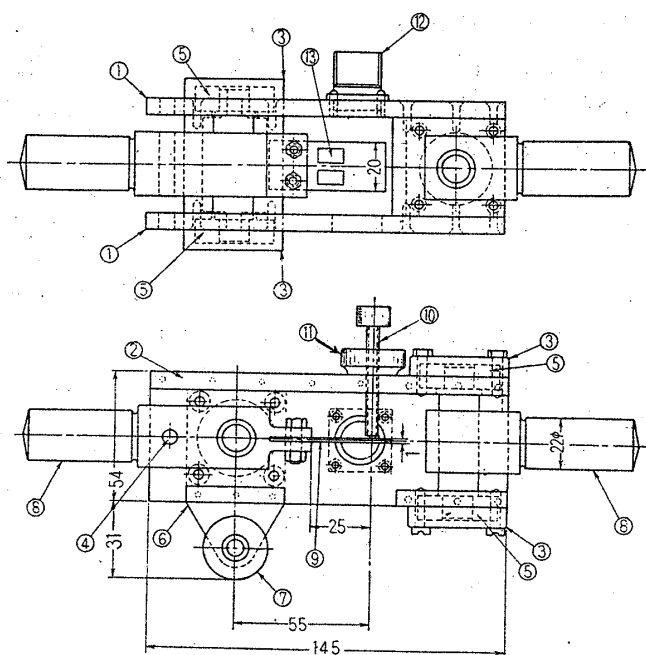
第1図 ヒンジ式たわみ計の原理

実際の構成は第2図に示すピックアップ、ローラーのみを有する終端金具および外径25.4mm、肉厚1.5mm、長さ1.85mの鋼管の3種と、その他に鋼管の締め金具と鋼管の振動を減衰させるダンパー金具よりなっている。第2図の側面図にみられるように、水平方向にもヒンジを設け、連結棒の水平の回転を $\pm 12^\circ$ 間で自由にし、舷側線に沿つての敷設を便利にした。

歪ゲージ⑩は表裏おのおの2枚貼り、4辺ブリッジとして感度を上昇させた。押しねじ⑩は敷設後0点調節が自由にできるようにし、ロックナット⑪で固定しうるようにした。出力コンセント⑫とゲージ⑩は防水に留意し、金属部分は防食処理を施してある。運搬時のバネの保護のために止めピン孔④がある。

ローラー間はすべて2.00mとなるようにしてあり、これが一本の折線の長さとなる。隣合う鋼管のなす角は、 $\pm 6^\circ$ の調整範囲があるから、舷弧の強い所でも敷設可能である。

標準感度は角度変化1/1000ラジアン(1mr)当りひずみ出力 $200 \times 10^{-6}(\mu)$ であり、出力(ブリッジ入力電圧3Vのとき約0.3mV)は4芯シールドキャブタイヤ線でひずみ測定器に接続する。



第2図 ピックアップの構造

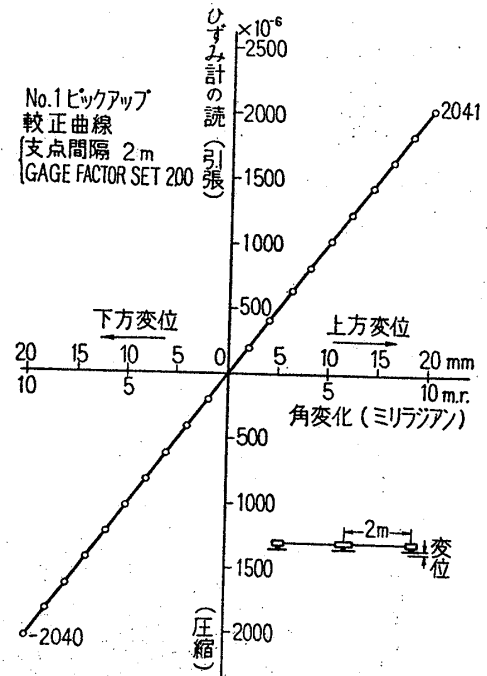
4. 感度と特性

静的感度特性の一例を第3図に示す。±10mrの範囲で直線関係にあるから、20mのスパンに換算すると250mmのたわみまで直線性があることとなる。ピックアップは10個製作し、個々の感度は181μ/mr~240μ/mrの間にあつたが、製作後半年以上を経過し、実船試験を3回行なつたが、感度は最初の値から変つていない。

つぎにピックアップ部分を振動台にのせ、200~1,000cpmの振動を加えた場合の倍率の変化は第4図の実線となる。厚いスポンジでパイプの中央を両側からゆるく挟む構造のダンパーを入れると点線のようにピークは全然消滅する。

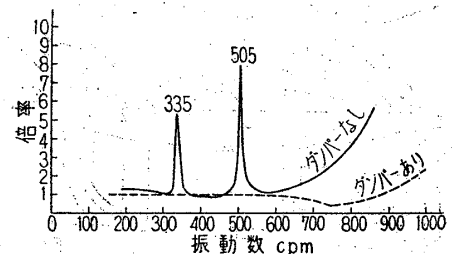
パイプの中央を木づちで打つて固有振動数を求めると、ダンパーなしのとき1,038cpm (これは $f=60\pi/2l^2 \cdot \sqrt{EIg/w}$ として計算した値と一致)、ダンパー入りのとき1,314cpmであり、第3図の実線のピークは前者の1/3, 1/2に当つている。

静加速度を受けた場合のパイプのたわみによる見かけの出力は、自由落下法により試験した結果、加速度1G当り、344μ (No.8ピックアップ)であつた。(パイプを両端支持で慣性負荷を受けるビームとして計算すると、端部のたわみ角は $i=w l^3/24EI=1.68mr$ となり、実験値1.7mr/Gと一致する) 船体の動揺加速度は普通0.3~0.5G以下であるから、船首尾においても、動揺加速度による誤差は1mr以下である。

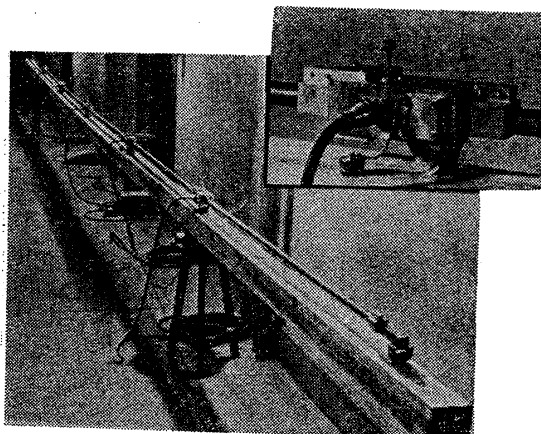


第3図 感度特性

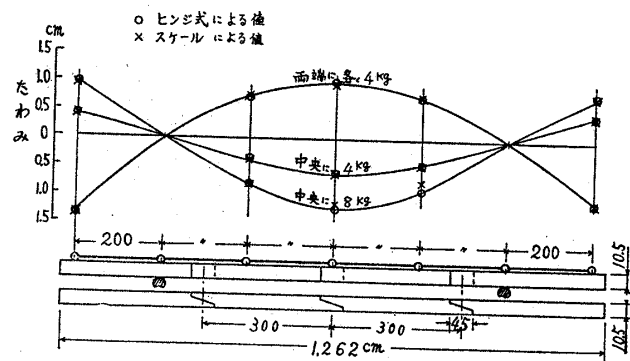
第5図に見られるように、長さ12.6m、断面10.5cm角の木材ビームをスパン8mの2点支持とし、その上にヒンジ式たわみ計をのせ、荷重を加えた場合のたわみを測定した。別に床面から測つたスケールのよみと比較して、第6図に示した。図示のように1.5cm程度のたわみが本計器により正確に測定できることを確めた。



第4図 振動特性



第5図 木材ビームのたわみ試験状況、およびピックアップの外観



第6図 木材ビームのたわみ試験結果

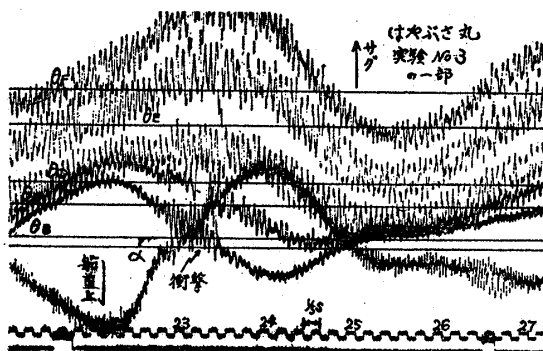
別の実験によつて本材のヤング係数が80,000kg/cm²であることを知つたので、計算値と比較すると、中央に4kgまたは8kgを加えた場合にはビームのたわみ有効率は93~94%で、両端に4kgずつ加えた場合にはこれが83%となる。前者では中央の接手にのみ大きな曲げモーメントが加わるが、後者の場合には3個の接手に一様の曲げモーメントが加わるため有効率が低下するものと考えられる。

試験船による実用化試験は水産庁試験船ちどり(4総トン)により東京港内で大形船の航走波に突込む方法で

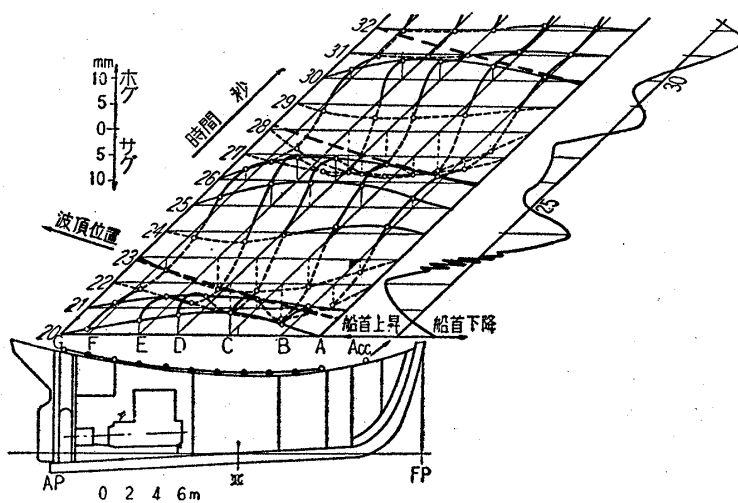
行ない、船上の使用が差し支えないことを確めた。

6. 実 船 試 験

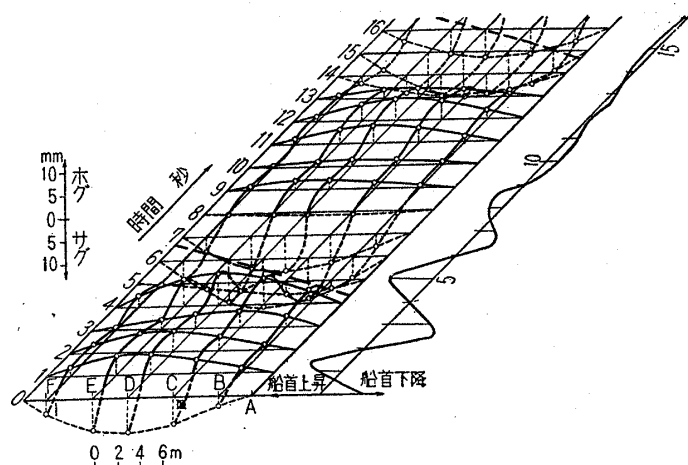
まず、練習船はやぶさ丸 (140 総トン, 28.56m×5.91m×3.00m) における船体たわみと軸系との測定試験に本計器による上甲板舷側部 20m 間の動的たわみ計測を実施した(昭和 34 年 12 月 2 日, 千葉県洲崎沖)。



第7図 はやぶさ丸の実験記録の一例



第8図 はやぶさ丸の船体たわみの時間変化 (向波全速)



第9図 はやぶさ丸の船体たわみの時間変化 (向波半速)

また、練習船鵜丸 (70 総トン, 22.51m×4.86m×2.32m) においては、船体中央より後方 12m 間の船尾側の上甲板舷側部のたわみを計測し、軸系の曲げモーメントとの関係性を求めた。(昭和 35 年 2 月 8 日, 島根県三保ヶ関沖)

ピックアップは 9 個使用し、そのうち船首側の 6 個は 2 個ずつ並列とし、船尾側の 3 個は 1 個ずつ使用し、合計 5 点 (残り 1 個は測定せず) と、船首においた非接着抵抗線型加速度計 1 点とを 6 点用動ひずみ計に入れた。

当日は低気圧の中心での実験となり (風力 6~7, 瞬間最大風速 30 m/s), 船体の最大傾斜は 35° にも達したが、本計器は故障なく動作した。得られたオシログラムの一例を第 7 図に示す。図にはスラミング現象もみられ、船首最大加速度 (上下) 600 cm/sec² 船体中央最大たわみ 8mm に達している。

本実験ではスパン 20m 間に測定点が両端を含めて 7 点

あるから、船体たわみの船長方向分布の時間に対する変化を求めることができる。その例を第 8~10 図に示す。

第 8 図は向波全速、第 9 図は向波半速、第 10 図は追波全速の 1 例であつて、図の右側に船首の上昇・下降の状況を加速度で示し、また目視による波頂位置の線を入れてある。各図の起伏状況を比較すると向波全速が半速より船首上下動がひどいが、船体たわみはほとんど変わらない。追波全速 (波速 > 船速) では加速度も船体たわみもはるかに小となつてゐる。これは推定波長 80~90m に対して、船の長さはその 1/3 程度であるので、波の傾斜に従つた運動をし、動揺のひどい割合に、船体にかかる曲げモーメントが少いためであると考えられる。

本計器による測定値と、ナイロン糸による測定値 (市川慎平氏の考案によるもので、風による糸の振動を防ぐため太径のビニールパイプ中に強く張つたナイロン糸を通し、これと船体中央部甲板上に立てたスケールとの相対変位を 8 ミリシネカメラにて撮影記録する装置によるスパンは 21.30m) と比較したのが第 11 図である。両者の位相はよく合つてゐるが、絶対値はヒンジ式の記録の方が相当大となつてゐる。

つぎに、練習船鵜丸 (70 総トン, 22.51

使用したピックアップは5個で、それぞれ増幅器の1点に入れて記録した。当日は山陰地方に珍しい晴天で無風に近く、僅かに波長約30m、波高約1.5mのうねりが存在する程度であつたが、本計器はこの程度でも十分感度があることが証明された。ただし、船尾部では船体振動の影響が大であり、オシログラムが読みずらくなるので、この点については適当なフィルターを入れる等の考慮が必要であることを知つた。

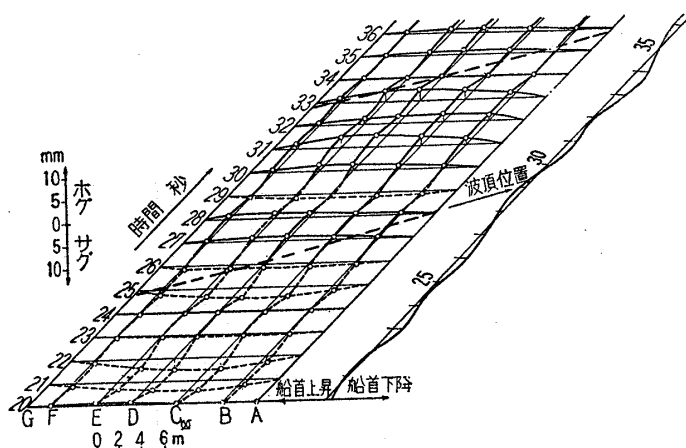
軸系におよぼす船体たわみの影響をみるため、第12図の下部略図に示すように、たわみ曲線からB点とD点（それぞれ主機関の前端と後端に近い）を結んだ延長線からのF点（プロペラ位置の直上）の上下量 δ_F と軸系の曲げモーメントとの関係を第12図の上部に示した。これによると δ_F は中間軸の曲げモーメントと位相が一致しているが、ナイロン糸による船体中央たわみとは位相が逆になつている。これは本船船体の全体としての曲げ形状が例えばサグ方向になつていても、船体後部の曲げ形状は上に凸となつていように位相が逆となる傾向があるためと思われる。このことは日立造船の模型実験の結果からも推定できる*。

7. 結 言

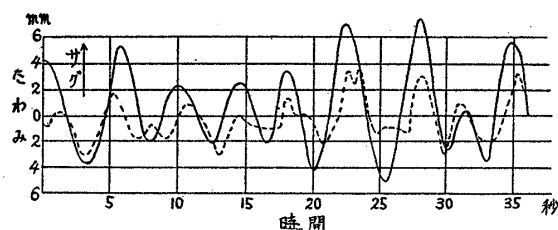
ヒンジ式たわみ計の概略とその実船試験結果**について述べたが、これを要約すると、本計器は長スパン（20m程度）のたわみ形状を折線近似で求めるもので、たわみ角の精度は1/50,000ラジアンであり、これを20mスパンに換算すると、約0.5mmとなる。また本計器は振動や動揺の影響を受けること少く、荒天中でも実用となることを確めた。

本たわみ計の原理としては別に新奇の点はないが、軸系委員会の委員諸氏の懇切なる御助言と、製作に当つた東京測器研究所の協力によつて、はじめて実用化されたものであつて、御援助を多とするものである。

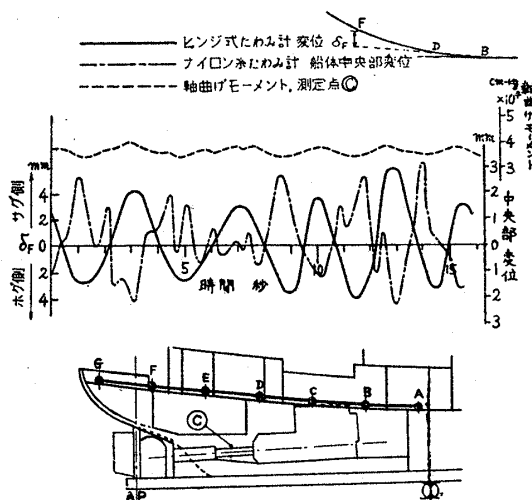
終りにのぞみ、本計器の実用化の機会と研究費の援助を与えられ、かつ発表を許された日本船用発動機に謝意を表す。



第10図 はやぶさ丸の船体たわみの時間変化（追波全速）



第11図 はやぶさ丸の船体中央たわみ計測値の比較（実線はヒンジ式たわみ計によるもの、点線は糸式たわみ計によるもの）



第12図 鰐丸のヒンジ式たわみ計による船尾たわみと糸式たわみ計による船体中央たわみとの、中間軸の曲げモーメントに対する関係

* 菱田一郎・真能創：本船強度の理論的研究（第1報）.造船協会論文集 104号, p.131 (1959).

** 詳細については、日本船用発動機：船用機関軸系の設計等に関する調査研究事業報告 第3報 (1960).