

(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

## 木船縦強度の理論的研究 (第2報)

—木船甲板の有効断面積について—

正員 菱 田 一 郎\*  
正員 真 能 創\*\*

A Theoretical Study on Longitudinal Strength of Wooden Ships

(Report II)

The Effective Sectional Area of Deck

By Ichiro Hishida, Member  
and Hajimu Mano, Member

## Abstract

In the first report, authors showed the base of new method to solve the problem of the longitudinal strength of wooden ships.

To apply the new method on actual ships, it is very important to research the characteristics of deck as a longitudinal member in wooden ships. Researching the relation between remarkable shear-lag which is observed at deck of wooden ships and deck construction, we find the way to estimate approximate stress distribution at deck. The stress values by this way are proved their accuracy by observed stress distributions at experiments on models and actual wooden ship.

Judging from the characteristic, the conclusion that in wooden ship the shear-lag effect at deck is not neglected, and the way estimating effective sectional area of deck as a longitudinal member in applying the new method in first report, are drawn.

## 1. 緒 言

第1報<sup>(1)</sup>において、木船の船体構造は、一種の多層重ね梁と同じ性質および構成をもつことから木船の縦強度を解明する、新解法の基本方針を示した。

本報告は、これを実船に適用する第一歩として、木船甲板の特性、すなわち鋼甲板には見られぬ顕著な剪断遅れの現象と、甲板構造との関係を究明し、これより木船甲板の応力分布等を異方性構造板として近似的に求める方法を導き、且つこの方法による計算結果は、模型および実船試験の計測値とよく一致することを確かめた。つぎにこの結果から、前報の解法による縦強度の算定に必要な甲板の取扱い、および甲板の有効断面積を近似的に算定する方法を示したものである。

## 2. 弹性層により結合された平行縦材構造板としての木船甲板の性質とその解法

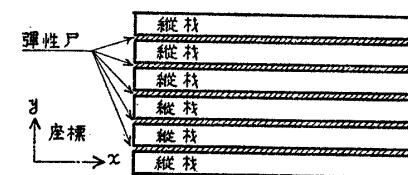
## i 木船甲板の構造

木船甲板はデッキプランク等の縦材が、甲板梁、斜板、固着釘等で、互に弾性的に結合された構造で、第1報の重ね梁と全く異なる所はない。重ね梁との相異は、荷重条件が左右対称の引張または圧縮力が負荷され、曲げモーメントが加わらぬため、重ね梁と言うよりむしろ弾性層で結合された。平行縦材構造板と呼ぶ方が、適当である点だけである。(第1報と重複するが甲板の構造を第1図に示す) したがつて第1報と同様、甲板は近似的に一種の異方性板と見なせるから、この異方性板が

原稿受付 昭和 35 年 1 月 9 日

\* 日立造船神奈川工場

\*\* 海技専門学院助教授

第1図 弹性層により結合された平行  
縦材構造板

甲板と同一の荷重条件下にある場合の性質を究明すれば、甲板の性質も解明できる\*。

今甲板の任意の縦材の、微小長さ  $\Delta x$  の部分に働く力の、 $x$  方向の釣合を考えると（第2図参照）

$$\begin{aligned} ptb + \tau \Delta x &= tb \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) + \Delta x \left( \tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} b \right) \\ \therefore \frac{\partial p}{\partial x} t + \frac{\partial \tau}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

但し、 $p$ ……縦材の軸方向（ $x$  方向）の引張又は圧縮応力

$\tau$ ……縦材を結ぶ弾性層に働く、単位長さ当たりの剪断力（剪断応力ではない）

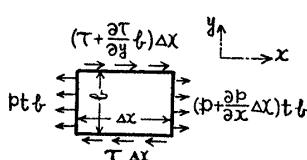
$t$ ……甲板縦材の厚さ（甲板は一様な厚さとする）

$b$ ……甲板縦材の巾（甲板全体の巾に比べて微小な値であるとして  $\Delta y$  と同様に扱つた）

また縦材の  $x$  方向変位を  $u$  とすると、縦材の  $y$  方向変位は無視できると考えられるから、構造板の見掛けの剪断歪；  $\gamma$  は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial y}$$

第1報と同様に、前記の  $\tau$  に対する構造板としての剛性率を  $G$  とすると



第2図 甲板縦材の微小部分に働く力の釣合

$$\frac{\tau}{G} = \gamma = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

また構造板であるから、縦材の  $y$  方向応力の影響を無視すると

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{p}{E} \quad (3)$$

これらの式から  $p, \tau$  を消去すると

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{G}{Et} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

(4) は本解法の基本式となるもので、これを解けば (1)～(3) より  $p, \tau$  も求められ、甲板の応力分布は明らかとなる。

## ii 基本式の解（単一構造板と見られる甲板の場合）

船体を箱形桁と考え、甲板はその頂部を構成するフランジであるとする。すなわち甲板は両玄側に左右対称の剪断力が加わる長さ；  $L$ 、幅；  $B$  の矩形板と考えて、(4) の解を求める。（第4図参照）

$u$  は  $x$  及び  $y$  の函数であるから、これを  $x$  の函数  $X(x)$  と、 $y$  の函数  $Y(y)$  の積で示せると仮定すると

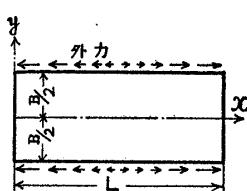
$$u = X(x) Y(y)$$

これを (4) に代入し、 $u$  は  $x$  および  $y$  の偶函数、また箱形桁のフランジであるから、その両端 ( $x=0$  および  $x=L$ ) で  $p$  が 0 と言う条件を入れると、 $u, p, \tau$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u &= - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{L}{En\pi} C_n \cos \frac{n\pi}{L} x \cosh \frac{n\pi}{\alpha L} y \\ p &= \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi}{L} x \cosh \frac{n\pi}{\alpha L} y \\ \tau &= - \sum_{n=1}^{\infty} \alpha t C_n \cos \frac{n\pi}{L} x \sinh \frac{n\pi}{\alpha L} y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$



第3図 縦材の変位 ( $u$ ) と構造板の剪断歪 ( $\gamma$ ) の関係



第4図 解 (5) の場合の甲板に加わる外力および座標位置

$$\text{ただし, } \alpha^2 = \frac{G}{Et}$$

$C_n$ ……積分常数、甲板に与えられる荷重条件（分布）によって決定される。

$C_n$  の値は、例えば玄側の縦材の外力による応力分布が与えられ、これがフーリエ級数で次の形で示されるとすると

\* 第1図の構造板の性質は縦材の数だけの未知数を含む多元連立微分方程式を解いても解は得られる。

## 木船縦強度の理論的研究(第2報)

$$p_{B/2} = \sum_{n=1}^{\infty} C'_n \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (6)$$

これと(5)で  $y=B/2$  を代入した  $p$  の値は等しくなければならぬから

$$C_n = \frac{C'_n}{\cosh(n\pi B/2\alpha L)} \quad (6)'$$

となり、甲板各部の応力分布等は、総て(5)から決定できる。なお応力の代りに、剪断力または変位の分布を与えて、同様に  $C_n$  は求められる。

## iii 基本式の解(複合構造板と見られる甲板の場合)

実験例に示すように、片矢羽構造等では、甲板全体を单一の構造板と見るより、むしろ玄側材と甲板とで構成される複合構造板と見られるので、この場合の解を求める。荷重条件等は ii と同一とする。

甲板の構造は第5図に示す。玄側材と甲板は滑り係数;  $K$  の、無数の剪断バネからなる弾性層によつて結合されているとする。

甲板部(玄側材を除いた部分)の荷重条件は ii と同一ゆえ、 $u, p, \tau$  は(5)で与えられる。

$C_n$  の値は、玄側材の変位;  $u_g$  が与えられ、これがフーリエ級数でつぎの形で与えられるとする。

$$u_g = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{L}{E_g n \pi} C_{gn} \cos \frac{n\pi}{L} x \quad (7)$$

ただし、 $E_g$ ……玄側材のヤング率

$C_{gn}$ ……フーリエ級数の係数

弾性層に働く剪断力;  $\tau_{B'/2}$  は  $K$  の定義から次の式で示される

$$\tau_{B'/2} = K(u_g - u_{B'/2}) \quad (8)$$

ただし、 $B'$ ……甲板部(玄側材を除いた部分)の幅

$u_{B'/2}$ ……甲板部の外縁( $y=B'/2$ )に於ける変位

上式の  $\tau_{B'/2}$  は当然(5)の  $\tau$  に  $y=B'/2$  を代入した式と一致しなければならない。したがつて

$$C_n = \frac{(E/E_g) C_{gn}}{\cosh(n\pi B'/2\alpha L) (1 + [\alpha t E n \pi / K L] \tanh[n\pi B'/2\alpha L])} \quad (7)'$$

となり、ii と同様にすべてが(5)より求められる。なお玄側材の応力;  $p_g$  は(7)から次式で与えられる。

$$p_g = \sum_{n=1}^{\infty} C_{gn} \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (7)''$$

玄側材自体も一種の構造板と見なせる場合も、同様に解くことができる。

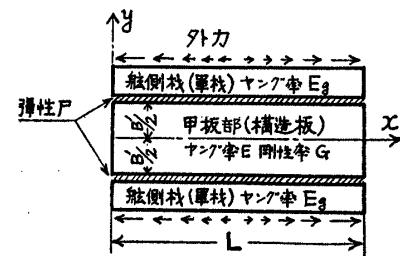
## iv 木船甲板の性質

上述の解は甲板と同様の条件なら、 $y$  方向の応力の影響を無視した近似解として、等方性板にも適用できる。したがつてこれらの解を木船甲板に適用する場合、鋼船と異なる条件の第一は、木構造の  $G$  は木材の  $E$  に比べ著しく低い値であることである。第1報に引用した構造の剪断試験の結果では、 $\alpha^2$  の値は 0.001~0.07 程度で、これと鋼が 0.4 近い値であるのを比較すれば、木船甲板の特性は明白となる。すなわち、木船甲板では玄側から負荷される外力は、甲板内部まで伝達されにくく、いわゆる剪断遅れの現象が、鋼甲板では見られない程顕著なものとなる。

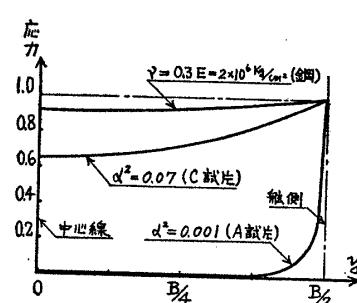
第6図は参考迄に  $L/B$  が 6 の矩形板の、両玄側の応力分布が、第4章の(9)の形で与えられた場合の、横断面上の応力分布を示す。図から木船甲板と鋼甲板の性質の相異が、十分推定できると思う。

## 3. 応用例

以上の近似解法の応用例として、これを以下のべる種々の実験結果の解析に適用し、その精度を検討してみる。



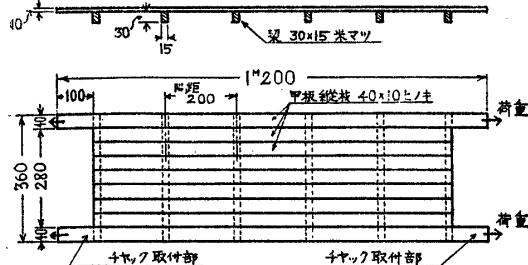
第5図 解(7)の場合の甲板構造外力および座標位置



第6図 木船甲板と鋼甲板の応力分布の比較

i 木船甲板模型の引張試験<sup>(2)</sup>

この実験は本解法の基本になつてゐる、甲板の異方性構造板と見なされる性質を、実験的に確認する目的で計画された。

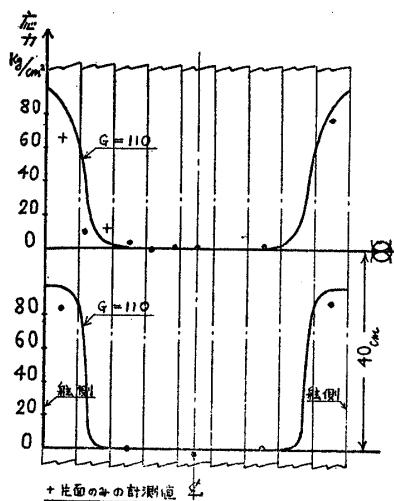


第7図 甲板模型引張試験の試片詳細(図はA試片)

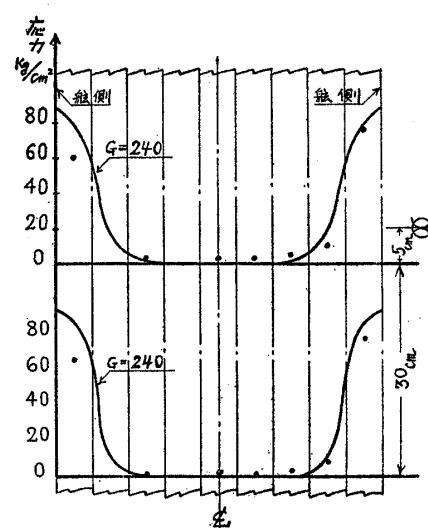
註 B試片は梁心距(100 m/m) C及びF試片は構造(C試片……片矢羽構造, F試片……2重縦材構造)が異なる他はすべて本図と同一である(C, F試片の構造の詳細は第1報第1表, 又は参考文献(3)を参照されたい。)

様の性質をもつものと推定される。

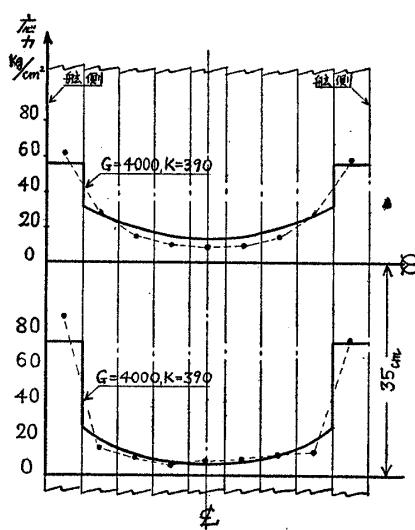
## C 解 法



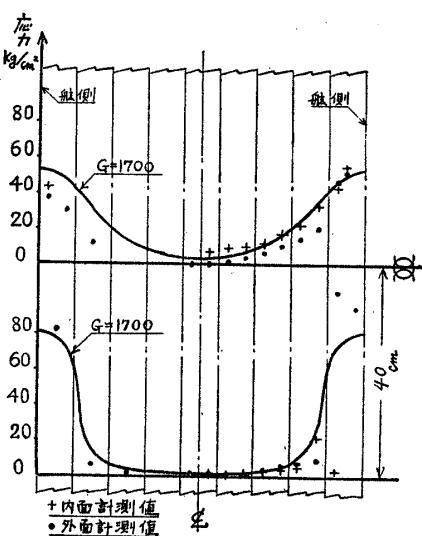
第8図 A試片応力分布(荷重 800 kg) ( $E=1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  とする第9~11図も同様)



第9図 B試片応力分布(荷重 800 kg)



第10図 C試片応力分布(荷重 600 kg)



第11図 F試片応力分布(荷重 800 kg)

試片の荷重条件は甲板と異なるので、(5), (7)'をそのまま適用できない。ゆえに(4)を両舷側では $\tau=0$ と言う条件を入れて解き、この解によつて計算値を求めた。なお木材のE、試片のGは前報と同じ値とした。

AおよびB試片は構造上、その長さは一肋骨心距だけ長いものとして計算した。C試片は構造上複合構造板と考えた解を使用した。

#### D 計測結果

歪計測は抵抗線歪計を使用した。第8~11図に各試片の最も傾向が異なる2断面の計測値を示す。図より判るように計算値とよく一致する。

試片AおよびBは、甲板縦材と梁を固着する釘の滑り係数さえ判かれば、縦横の梁が各節点で、相互のx方向変位、および角変化に比例した反力を生ずるバネで結合された格子構造として、厳正解を得ることができる。(ただし、この解法はAで15元、Bで25元連立方程式を解かねばならない)第12図はA試片中央断面の本解法の値、厳正解による値を比較したもので、本解法による結果の特性、精度を十分知ることができる。

C試片の計算のGの値は前報と異なるが、それはつぎの理由による。剪断試片では斜板の端は、縦材の巾を増し多数の固定釘で固めているが、本試片および前報の外板模型では、このような構造ではない。しかしこの部分は釘に加わる力も最大になる箇所で、この構造の相異はGに大きな影響を与えると思われる。したがつて剪断試験より得られるGの値は、本試片等には過大になると思われる。

この結果は前報第1表にも明白に見られるので、第1表の撓み実測値からGを逆に算出すると、 $G=4,000 \text{ kg/cm}$ が得られるので仮にこの値を採用した。(ただし本試片のGは外板模型のガルバニカルのようなものがないため、この値より更に小さいと思われる)前報にも述べたが、Gの値は今後更に検討すべき点が多く残されている。

C試片の複合構造板として、舷側材と内側の甲板を結ぶ弾性層の滑り係数; Kは、この部分の縦材間の滑りは剪断歪からくる滑りと、舷側材と斜板を結ぶ釘のx方向の変形による滑りの和になるから、 $G=4,000 \text{ kg/cm}$ 、釘の滑り係数 $1,800 \text{ kg/cm}^{(8)}$ とすると、約 $390 \text{ kg/cm/cm}$ となるのでこの値を使用した。

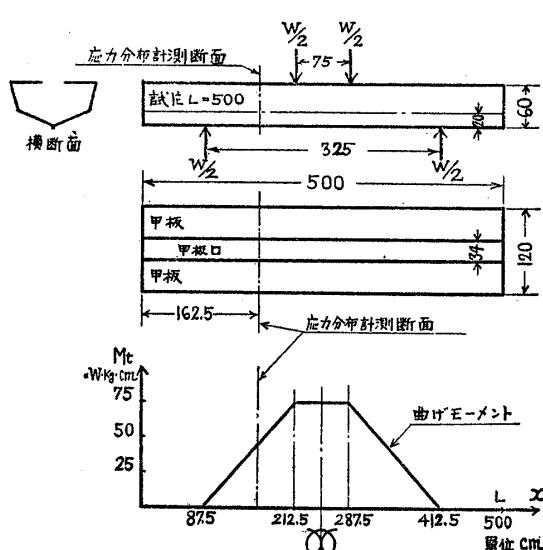
#### ii 木船船体模型曲げ試験<sup>(4)</sup>

本試験は先般日立造船で行なわれたもので、魚雷艇の中央部構造をそのまま箱形桁にした模型の、縦強度研究に供されたものである。試片の内B型の甲板構造は、前記の試片Cとほとんど同一で、G等が既知なので、この甲板の応力分布を調べる。

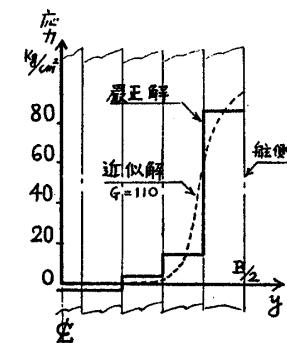
甲板を長さ、巾はそれぞれ模型の長さ、甲板口を除いた甲板の巾に等しい矩形板と考え、舷側材の応力分布は

第13図の模型に加わる曲げモーメント分布と同形であると仮定して、(7)'によつてその応力分布を算出した。

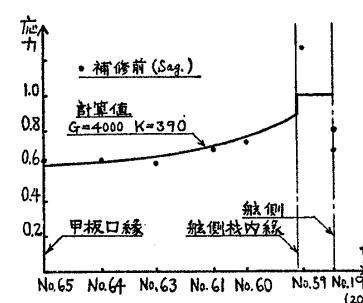
第14図は計測断面の応力分布を比較したもので、iに比べ要素も多く点も相当散つているが、大体よく一致する。(図の補修前、後とあるは、肋骨心距が実船に比べ过大



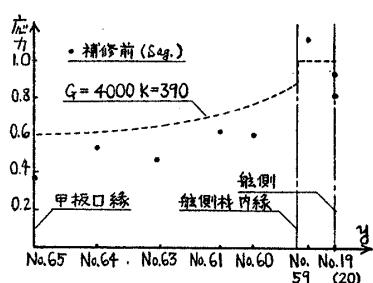
第13図 木船々体模型曲げ試験の負荷条件および曲げモーメント分布



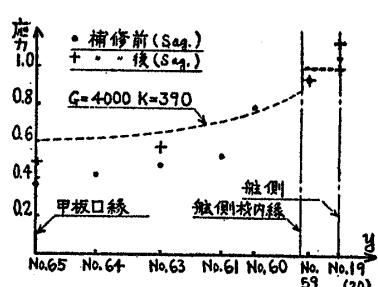
第12図 甲板模型引張試験(A試片)における近似解の精度(中央断面における応力分布)



第14図 B試片甲板応力分布(応力の値は舷側における応力との比で示す。No.65等はゲージの番号を示す荷重5t)



第15図 A試片甲板応力分布（詳細は第14図参照）



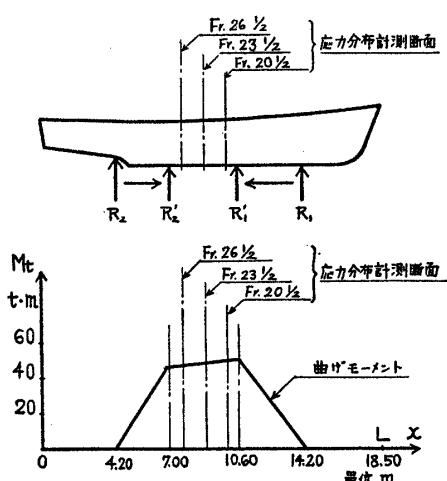
第16図 C試片甲板応力分布（詳細は第14図参照）

であるので、内側縦通材との結合をよくするため補修したもので、剪断遅れへの影響は少ないとと思われる）

第15, 16図は試片AおよびCの計測値を参考までに示す。両者共構造は片矢羽であるが、部材寸法が異なるためGの値は不明である。

### iii 実船試験<sup>(5)</sup>

(5) 等の解の荷重条件は大体甲板に近いが、箱形桁のフランジと同様に前後端では  $\rho=0$  と仮定してあり、この点が実船と異なる。したがつて箱形桁の ii では実測値と一致するが、実船にまで適用できるとは言い難い。



第17図 実船試験の負荷条件および曲げモーメント分布

この問題の検討のために、同じく日立造船で行われた小型掃海艇の実船試験の結果と比較してみる。

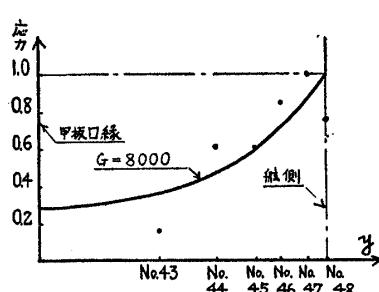
同試験は図のように船底の支点を移動させ、それによつて加わる曲げモーメントの変化に対する船体各部の歪、および撓みの変化を計測したもので、甲板3箇所の計測断面の応力分布を第18図に示す。

計算値は ii と同様に長さ、巾がそれぞれ船の長さ、および開口部の巾を除いた中央部甲板の巾に等しい矩形板の、 $\rho_{B/2}$  分布が第17図の曲げモーメント分布と同形であるとして求めた。大体これから甲板のGは 8,000 kg/cm と推定される。

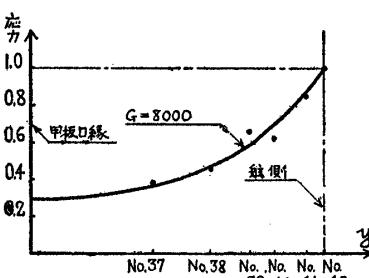
本船の甲板のGは全く不明であるが、前述の剪断試験では、本船の甲板に近い構造の試片のGは 3,000~5,000 kg/cm 程度になつてゐる。

この試片の構造と本船の甲板構造では、本船は剪断試片より  
(イ) 梁心距が大きい

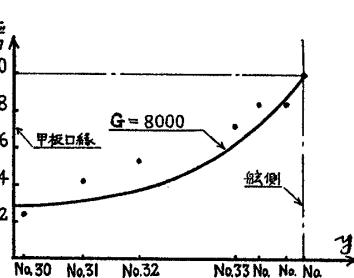
(ロ) 固着釘、甲板、梁の寸法が大きい。梁の材質がケヤキである（試片は米松）コーティングが施されている等の点が異なる。（イ）はGを小さくするが、（ロ）は総てGを大きくする要素であり、本船の甲板の



第18図a 実船試験甲板応力分布（応力の値は玄側における応力との比で示す。No. 43等はゲージの番号を示す）



第18図b Fy. 23 1/2 断面



第18図c Fy. 26 1/2 断面

Gは 8,000 kg/cm 程度はあるのではないかと思われる。

はなはだ大胆な推定とも言えるが、この結果から 2-ii, 2-iii 等の解は実船にも十分適用できると考えられる。すなわち木船では甲板縦材の前後端を固着する影響は無視できる程度であり、箱形桁のフランジと同程度の剪断遅れが見られると考えられる。

この理由としては甲板縦材の前後端に限らず、一般に木構造の釘による固着は鋼船のように完全でなく、少くとも固着剛性は著しく低い点があげられる。

#### 4. 木船甲板の有効断面積

前述のように、木船甲板の剪断遅れは顕著であり、縦強度の問題ではこの現象を無視することはできない。

第1報の解法を実用する場合についてこれを考えると、甲板は船体を重ね梁と考えると、その最上層にある梁に相当する。この梁は所謂  $I_t$ 、すなわち甲板を单一の梁としての曲げ剛性を問題にするときは、甲板の個々の材の曲げ剛性の緩和と考えてよいが、船体横断面の慣性能率(船体全体を单一梁と考える場合)  $I_t$  の計算には、剪断遅れを考慮し、その有効断面積を基にして算定しなければならない。

具体的に述べると、甲板の縦材は、それぞれの位置や甲板の構造寸法等で決まる、次式の断面有効率;  $\eta_D$

$$\eta_D = \frac{p}{p_{B/2}} \quad \left( \text{または複合構造板では } \eta_D = \frac{p}{p_g} \right)$$

を算出した上、それぞれの縦材の断面積を乗じたものを有効断面積として、 $I_t$  を算出せねばならない。

甲板の板厚の変化が少いと、次式で示されるいわゆる有効巾;  $\eta$

$$\eta = \frac{2 \int_0^{B/2} p dy}{B p_{B/2}} \quad \left( \text{または複合構造板では } \eta = \frac{2 \int_0^{B'/2} p dy}{B' p_g} \right)$$

を求め、これから甲板全体の有効断面積を算出し、 $I_t$  を計算する方が便利である。(上式中複合構造板では玄側材を除いた有効巾を示す、したがつて有効断面積はこれに玄側材の断面積を加える必要がある。) ただし、本解法では玄側での甲板の応力分布が判らねば、上記の  $\eta_D, \eta$  は算定できない。

今甲板玄側の応力分布は近似的に

$$p_{B/2} \text{ or } p_g = p_{\infty} \sin \frac{\pi}{L} x \quad (9)$$

で与えられると仮定する。この分布は、普通考える船体に加わる曲げモーメント;  $M_t$  の分布とは相当傾向が異なるが、船体中央の断面積は両端より大きいこと、重ね梁では  $M$  の分布は  $M_t$  の分布より平均化される事から、 $\eta$  等の計算には十分な仮定と思われる。

この場合の  $\eta_D, \eta$  はそれぞれ次のようになる。

$$\eta_D = \frac{\cosh(\pi y/\alpha L)}{\cosh(\pi B/2\alpha L)} \quad (\text{单一構造板の場合}) \quad (10)$$

$$\eta_D = \frac{E/E_g}{1 + \alpha t(E/K)(\pi/L) \tanh(\pi B'/2\alpha L)} \frac{\cosh(\pi y/\alpha L)}{\cosh(\pi B'/2\alpha L)} \quad (\text{複合構造板の場合}) \quad (10)'$$

$$\eta = \frac{2\alpha L}{\pi B} \tanh \frac{\pi B}{2\alpha L} \quad (\text{单一構造板の場合}) \quad (11)$$

$$\eta = \frac{E/E_g}{1 + \alpha t(E/K)(\pi/L) \tanh(\pi B'/2\alpha L)} \frac{2\alpha L}{\pi B'} \tanh \frac{\pi B'}{2\alpha L} \quad (\text{複合構造板の場合}) \quad (11)'$$

甲板の構造としては、 $\eta$  等の大きいものが優れている事になるが、構造によつては  $\eta$  が大きくても、有効横断面積はそれ程大きくならぬこともあり、注意を要する。また他の部分の構造との釣合も問題で、外板等の  $G$  が小さい場合は、甲板のみ  $G$  を大きくしても効果は少い。

何れの構造でも、縦材は玄側部に集める方が  $\eta_D$  の点から有利と思われる。

#### 5. 結論

以上の結果をとりまとめると、

(1) 甲板を弾性層によつて結合された構造板として得られた結果は、種々の実測結果とよく一致し、甲板の応力伝達の機構もこの構造板と同様のものと思われる。

(2) 甲板の応力分布は、構造上  $G/E_t$  が鋼等より遙に小さく、顕著な剪断遅れの現象が見られる。これは木船甲板の特性として重要なものと思われる。

(3) 実船においても、甲板縦材の前後端が固着されている影響は少なく、箱形桁のフランジと考えた場合と、

応力分布はほとんど変わらない。

(4) 前報の解法で甲板は、 $I_t$  の算定は甲板の個々の材の曲げ剛性の総和に等しいが、 $I_t$  の算定には前記の有効横断面積だけの断面積を持つ、重ね梁を構成する一つの梁として取扱わねばならない。

(5) 甲板はその構造によつて、有効断面積は非常に大きく変動するので注意を要する。

最後に前報以来引き続き指導助言を賜わつた阪大寺沢教授、多元連立方程式の数値計算に協力して頂いた播磨造船所研究部の方々に厚く感謝の意を表する次第であります。

#### 参考文献

- (1) 菊田一郎、真能創；木船縦強度の理論的研究（第1報）造船協会論文集 第104号
- (2) 本試験は試片作製および試験の一部は日立造船で行なわれた。
- (3) 針の滑り係数は下記文献による  
菊田一郎他；木船の強度に関する研究、運輸省指令官企第425号による科学技術補助金を受けて実施した研究（未発表）
- (4) 丹羽誠一、菊田一郎他；木船強度の実験研究、造船協会論文集第104号 参照
- (5) 山近勇他；小型掃海艇の船体応力およびタワミの測定、日立造船技報 Vol.18, No.4 参照