船舶建造時における船体変形の研究

(第 1 報)

正 員 小 田 道 隆*
梶 原 儀 親*

The Deformation of Ship's Hull under Construction (No. 1)

By Michitaka Oda, Member
Yoshichika Kaziwara

Summary

Ship's hull under construction undergoes various deformations, such as bending up and down or athwartships and shrinkage fore and aft. The major elements to cause such a deformation are (1) loading (hull weight and water weight), (2) temperature variation, and (3) shrinkage force due to welding.

The deformation of ship's hull is complicated, because the above elements affect the ship simultaneously and the intensity of element itself varies with time. Thus, while the length of ship, for instance, varies every moment with atmospheric temperature and sun shine, it tends to be shortened as a whole due to the welding shrinkage force. Furthermore, because of the nature of wood, the ship's bottom lying on wooden blocks lowers with time even if the load be kept constant.

The present paper is concerned with the result of deformation measurement on actual ships, theoretical investigation, and practical applications in ship-building in connection with, for example, the hull supporting method on berth and the method to find the most favourable propeller shaft center line.

1 ま え が き

船の重量は船台上では盤木支柱で保持され、進水後は浮力で支えられるが、船体は絶え間なく変形している。変形の主なものは、上下、左右方向へのわん曲、および船首尾方向への伸縮である。筆者は、さきに、「船底支柱、盤木の必要量の算定」(造船協会論文集第 111 号)について報告したが、これも荷重の変化による、上下方向の船体の変形の一つである。船体の変形の要素となるものは、荷重のほか、温度、溶接(または歪取り)による収縮力、などがある。建造中の船体には、これらの要素が同時に作用するのが普通で、例えば、船首尾方向の伸縮については、気温変化や日射の影響のために、刻々に伸び縮みを行ないながらも、全体としては、溶接による収縮量が増加してゆく。また、例えば、温度差による上下方向の曲げ変形量については、進水前と進水後とは著しく異なる。さらに、船台上では、船台自体の変形も無視できない場合があり、盤木についても、時間効果のために、たとい、同じ荷重であっても、長時間かけると変形が増大し、荷重をとり去っても、すぐには復原しない。

このように、船体の変形は複雑であるが、もし、これを定量的に把握することができれば、船体建造上の重要な問題、すなわち(1)盤木配置要領 (2)軸心決定の要領 (3)吃水深——載貨重量の問題 (4)工作法の問題などを合理的に解決することができる。

原稿受付 昭和 38 年 6 月 18 日

* 三菱横浜造船所

この研究は、以上の趣旨にもとづいて計画、実施された、実船計測と解析結果をもとに、上記の諸問題を扱ったものである。

1.2 実測船の内訳

実測の対象となった船の、種別と船の長さ L は表 1 のとおりである。このうち S 24 については、とくに詳細な実測を行なった。

表 1 実測船の内訳

貨物船		タンカー		鉱石船		その他	
番 船	L m	番 船	L m	番 船	L m	番 船	L m
S 1	145	S 11	204	S 21	204	S 31	85
S 2	137	S 12	204	S 22	147		
S 3	145	S 13	204	S 23	210	S 32	114
S 4	145	S 14	239	S 24	220	S 33	175
S 5	145	S 15	204	S 25	220		
S 6	150	S 16	216				
S 7	140	S 17	223				

2 船首尾方向の収縮

2.1 溶接工事によるもの (長期間)

船底の3定点で観測した、船底外板の船首尾方向の対地移動量の一例を図1に示す。この三つの定点は、滑动台の前後端位置に相当する F_0 、 A_0 と、中央部 M_0 の3点である。計測の0点は、 M_0 点については、船底ブロックの船首尾の各1本のバット溶接が完了したとき、 F_0 、 A_0 点については、該点から、寄りの船底バットが全て終わったときを0としてある。したがって、普通には、 M_0 の計測が先ず始まり、 A_0 、 F_0 がこれに続くが、その値には船底バットの溶接は入ってこない。つまり、船底以外 (上甲板、BHD など) の溶接の影響である。計測は、定刻 (8.30) に、10日間隔で行なったが、気温の変化の影響は当然はいっている。船体が、全体として、船尾へズレるのは船台傾斜のためである。

図 1 船底外板の対地移動量

図1から、船底外板の収縮量が求められるが、それに温度補正 (鋼の線膨脹係数を $1.15 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ とす) を施したものが図2で、これが、極言すれば、デッキの溶接による船底外板の縮み量を示す。工程の進め方、あるいはブロック・サイズの関係などで収縮量は異なるが、図2より、船底の溶接が終わってから進水直前までの収縮量は、大体、タンカーで 35 mm、貨物船で 25 mm 程度である。この収縮力はすべて上甲板の溶接によるものとして、収縮応力を概算すると、 A_0 F_0 間距離はタンカで 180 m、貨物船で 105 m 位であるから、

図2 溶接による船底外板の収縮量

タンカーでは $\sigma = E \cdot \Delta l / l = 2.1 \times 10^6 \times 3.5 / 1.8 \times 10^4 \approx 400 \text{ kg/cm}^2$ 、貨物船では $\sigma = 2.1 \times 10^6 \times 2.5 / 1.05 \times 10^4 \approx 500 \text{ kg/cm}^2$ となる。

2. 2 温度変化によるもの（短期間）

図3は、温度の変化だけによる、船底外板の船首尾方向の伸縮の状態を示す。実測は、S24につき、11月17日～18日の一昼夜にわたり、約2.5h間隔で行なった。17日は昼間は晴れていたが、20時頃から曇り、22時頃から18日まで小雨の天候であり、直射日光は受けていない。

大気温度は、上甲板の上と、船底外板の下とで計測したが、両者の間には、かなりの差異がみとめられる。船体の鋼温度は、いずれも、船体の外面の表面温度で、Fr. 13, 45, 72, 108のそれぞれ σ の温度が、上甲板と船底外板について示してある。

船底外板の対地移動は、この図でみると、船の長さ方向に必ずしも一様に行なわれていない。このように伸縮が一様でない原因は、盤木のマサツ力、船台傾斜による自重の分力と“行キ止メ支柱”の抗力、さらには、温度分布の不均一などがある。この実測のときは、Fr 62とFr 86とに、それぞれ約4,800t、Fr 45とFr 72とに、それぞれ約1,500tの水張りがしてあったので、これが、マサツ力、分力、温度分布に影響していると考え

図3 船底外板の温度変化による船首尾方向の対地移動量及び温度変化

えられる。

盤木のマサツ力は、既に報ぜられているように⁶⁾、その絶対値はそれほど大きなものではない。この理由の一つは、盤木は一種の積木細工のようなもので、頂面に水平力が加わると、重ね目にスキマを生じて、外力に余り抵抗しないからである。図3では、 Δ より船首側の収縮量が船尾よりも大きいのが、これは、船台傾斜のために船殻重量と張り水の分力が船尾側へ作用しているの、 Δ より船首側の収縮力はそれに重畳されるような形になるが、船尾側ではお互いに相殺する形となるためであろう。しかし、この分力の影響は、船首尾間の全収縮量には無関係と考えてもよく、盤木のマサツ力を無視して、Fr 13~108 間 192 m について収縮量 δ を求めてみると、18.00~8.00 間の温度差は上甲板で 4.1°C、底部で 2.4°C とみて平均 3.2°C とし、線膨脹係数を $1.15 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ とすれば $\delta = 1.92 \times 10^6 \times 3.2 \times 1.15 \times 10^{-5} = 7.05 \text{ mm}$ で大体、実測値と合う。

また、ここで注意すべきことは、気温の変化と鋼温度の変化に時間的ズレがあることで、図3で日射のない船底についてみると、大気温度は 11 月 17 日の 23 時は下降しつつあるが、船底外板の外表面温度は 11 月 18 日の 1 時頃になって始めて下降し始めている。つまり両者の間に約 2 時間前後の時間のズレがある。このことについては 5.2 で検討する。

3 左右舷方向の曲げ変形

温度傾斜が一定 β_0 の梁は、慣性率 I には無関係に円弧状にまがり、その量 d は $d = \alpha \beta_0 x^2 / 2 \dots (3.1)$ である。但し、 α は膨脹係数、 x は梁の長さである。図4は、S24 における船台上での左右方向の、15 時でのわん曲である。自重は盤木で支持されているので、盤木のマサツ力を無視すれば上式が使える。

図4 左右舷方向の船体のわん曲

いま、左右舷の温度差を 3°C とすれば、船巾 B は 30 m であるから、 $\beta_0 = 3^{\circ}/3 \times 10^3$ となる。 $\alpha = 1.15 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、 $L = 100 \text{ m}$ とすれば $d = 5.8 \text{ mm}$ となり、実測値と大体合う。

4 船底の上下方向の曲げ変形

4.1 温度差によるもの

上甲板と船底外板の温度差によって、船体は上下方向にわん曲する。進水後ならば、その量は 30 mm 前後に及ぶが、船体が盤木上になっているときは、そのわん曲の量は、進水後に比べると、著しく小さくなる。それでも、船首尾部ではかなりの変形が見られ、冬期でも、朝と夕方とは数ミリの差があり、朝は、船体と盤木との

図5 盤木に支えられた船底外板の温度変化による上下方向の曲げ変形 (S24)

間にスキマが生じていることがある。そして、船首尾は 13 時半頃、最も垂れ下がり、再び上昇してゆく。

図 5 は、S24 における船首尾部の変位で、8 時と 15 時との差が 5mm 程度みとめられる。この図でわかるように、はっきりと変位がみとめられるのは、船首尾部 $L/4 \sim L/5$ 間だけである。この船で実測したところでは、一般に、上甲板の温度が底部外板の温度より高く、温度差のなくなる夜間に、船首尾部はもっとも高い位置にあり、8 時現在、船尾端では数 m にわたって、盤木との間に隙間を生じた。

以下、S24 の船尾部のわん曲について検討する。図 6 のように、まず、分布荷重（自重） w をうける真直梁が、 k なる基礎常数を有する弾性基礎の上に横たわり、 M_0 なる曲げモーメントによる変形を考える。

この場合、図 6 (2) のように M_0 が大きくなると、梁の一部が空中に跳ね出る。温度差の傾斜が梁のいたところ $\beta_0 = \text{一定}$ ならば、 $M_0 = EI\alpha\beta_0$ (E : ヤング率, I : 慣性率, α : 線膨脹係数) なる曲げモーメントを受けたときの変形と同じである。

図 6 (1) の場合は、基礎方程式は $EI(y'' + \alpha\beta_0) = M$ より

$$EIy^{IV} = -ky + w \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

の一般解は

$$y = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) + w/k,$$

$$\text{但し, } \beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

で与えられる。条件は、 $x=0$ において、 $y'' = -\alpha\beta_0$, $y''' = 0$, および $x=L/2$ において $y' = 0$, $y''' = 0$ から、

$$y = \frac{\alpha\beta_0}{4\beta^2(\sinh \beta L + \sin \beta L)} \cdot \left[e^{\beta x} \left\{ \cos \beta x (e^{-\beta L} + \sin \beta L - \cos \beta L) + \sin \beta x (-\sinh \beta L + \cosh \beta L - \sin \beta L - \cos \beta L) \right\} + e^{-\beta x} \left\{ \cos \beta x \cdot (-e^{\beta L} + \sin \beta L + \cos \beta L) + \sin \beta x (\sinh \beta L + \cosh \beta L + \sin \beta L - \cos \beta L) \right\} \right] + w/k \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

となり、 $x=0$ における変位は

$$y_0 = \frac{-\alpha\beta_0}{2\beta^2} \cdot \frac{\sinh \beta L - \sin \beta L}{\sinh \beta L + \sin \beta L} + \frac{w}{k} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

また、 βL が大きい (例えば $\beta L > 3$) のときは、 $y = w/k$ からの上がり量 Δ_1 は

$$\Delta_1 \doteq \frac{\alpha\beta_0}{2\beta^2} + \frac{w}{k} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

である。

ここで注意すべきことは、 I , k , w が x について変化しても $I:k:w = \text{一定}$ のときには上式が成立するというで、例えば、(4.1) で、添字を $x=0$ における値とすれば、 $I = I_0(1+cx^2)$, $k = k_0(1+cx^2)$, $w = w_0(1+cx^2)$ であっても (4.1) は $EI_0 y^{IV} = k_0 y + w_0$ となるだけで、その解は、 I , k , w の代りに I_0 , k_0 , w_0 と書くだけでよい。

つぎに、図 6 (2) の場合は、 x_1 の部分については $I/I_0 = k/k_0 = w/w_0 = (1+cx)$ とすれば

$$y_1 = -\frac{\alpha\beta_0}{2} x^2 + \frac{w_0}{6EI_0} \left[\frac{x^4}{12} + \frac{x^3}{3c} - \frac{x^2}{c^2} + \frac{2}{c^3} \left\{ (x + \frac{1}{c}) \log(1+cx) - x \right\} \right] + A_1 x + B \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

x_2 の部分については

$$y_2 = e^{\beta x_2} [A_2 \cos \beta x_2 + B_2 \sin \beta x_2] + e^{-\beta x_2} [C_2 \cos \beta x_2 + D_2 \sin \beta x_2] + w/k \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

であり、条件は $y_{1x_1=X}=0$, $y_{2x_2=0}=0$, $y'_{1x_1=X}=y'_{2x_2=0}$, $y''_{1x_1=X}=y''_{2x_2=0}$, $y'''_{1x_1=X}=y'''_{2x_2=0}$, $y'_{2x_2=L/2-X}=0$, $y'''_{2x_2=L/2-X}=0$ で、これから

$$A_2 = - \frac{\frac{w_0}{k_0} \left\{ 1 + e^{\beta(L-2X)} \cdot \cos \beta(L-2X) \right\} - \frac{\alpha\beta_0}{2\beta^2} - \left\{ \frac{w_0 X^2 (cX+3)}{12EI_0 \beta^2 (cX+1)} \right\} \cdot \sin \beta(L-2X) \cdot e^{\beta(L-2X)}}{\left\{ \sin \beta \left(\frac{L}{2} - X \right) \right\}^2 \cdot \left\{ 1 - e^{\beta(L-2X)} \right\}^2 + \left\{ \cos \beta \left(\frac{L}{2} - X \right) \right\}^2 \cdot \left\{ 1 + e^{\beta(L-2X)} \right\}^2}$$

図 6 モーメントと変形の記号

$$\left. \begin{aligned}
 B_2 &= - \frac{\left(\frac{w_0}{k_0} \right) \cdot e^{\beta(L-2X)} \cdot \sin \beta(L-2X) + \frac{\alpha \beta_0}{2\beta^2} - \left\{ \frac{w_0 X^2 (cX+3)}{12 EI_0 \beta^2 (cX+1)} \right\} \left\{ 1 + e^{\beta(L-2X)} \cdot \cos \beta(L-2X) \right\}}{\left\{ \sin \beta \left(\frac{L}{2} - X \right) \right\}^2 \cdot \left\{ 1 - e^{\beta(L-2X)} \right\}^2 + \left\{ \cos \beta \left(\frac{L}{2} - X \right) \right\}^2 \cdot \left\{ 1 + e^{\beta(L-2X)} \right\}^2} \\
 C_2 &= -A_2 - \frac{w_0}{k_0}, \quad D_2 = B_2 + \frac{\alpha \beta_0}{2\beta^2} - \frac{w_0 X^2 (cX+3)}{12 EI_0 \beta^2 (cX+1)} \\
 A_1 &= \alpha \beta_0 X + \beta (A_2 + B_2 - C_2 + D_2) - \frac{w_0}{6 EI_0} \left\{ \frac{X^2}{3} + \frac{X^2}{c} - \frac{2X}{c^2} + \frac{3}{c^3} \log(1+cX) \right\} \\
 B_1 &= + \frac{\alpha \beta_0}{2} X^2 - A_1 X - \frac{w_0}{6 EI_0} \left[\frac{X^4}{12} + \frac{X^3}{3c} - \frac{X^2}{c^2} + \frac{2}{c^3} \left\{ \left(X + \frac{1}{c} \right) \log(1+cX) - X \right\} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

となる。ここで X は

$$-A_2 + B_2 = \frac{w_0}{2k_0} - \frac{\alpha \beta_0}{4\beta^2} + \frac{w_0 X (c^2 X^2 + 3cX + 3)}{12 \beta^3 EI_0 (cX+1)^2} - \frac{w_0 X^2 (cX+3)}{24 EI_0 \beta^2 (cX+1)} \dots\dots\dots (4.10)$$

から試算法で求めるが、(4.9) の左辺を零とをいて求めた X の値が、よい近似値であることが多い。そして、 $x_1=0$ における、 $y=w/k$ からの上がり量 Δ_2 は $\Delta_2 = -\beta_1 + w_0/k_0 \dots\dots\dots (4.10)$

である。

さて図5にもどって Δ_1 , Δ_2 を求めるのであるが、 I , k , w の値を次のように定める。すなわち、 $L/4$ において、 $I=2.5 \times 10^{10} \text{ cm}^4$, $k=2,770 \text{ kg/cm}^2$, $w=600 \text{ kg/cm}$ とし、 $x=0$ において、 I , k , w は前記のそれぞれ $1/5$ とし、その間は直線的に変化するものとする。また、上甲板とボトムとの温度差を 10°C とし、後述の実測結果にもとづいて、これが船の深さ $1,600 \text{ cm}$ について直線的に傾斜しているものとすれば $\beta_0=1/160^\circ\text{C/cm}$ となる。また、 $\alpha=1.15 \times 10^{-5}/\text{cm}$, $L=2.2 \times 10^4 \text{ cm}$ とすれば (4.5) より $\Delta_1=3.11 \text{ mm}$ となる。これは $w/k=2.16 \text{ mm}$ よりも大きいから、跳ね出ることになるが、盤木は負の力を及ぼし得ないので、ここでは採用できない。従って (2) によるべきであるが、(2) の場合は $X \approx 8 \text{ m}$ となり (4.10) より $\Delta_2=3.51 \text{ mm}$ となり、実測の 5 mm より小さい。これは溶接と水張りのために、盤木上の船体が、温度差がないときに、すでに sag 状態になっていたためであらう。

4.2 荷重によるもの

船台上で、タンクに水張りしたときの、船底外板の船首尾方向の変形については、第111号で述べたので、ここでは、S16を例にとり、センタ・タンクを満水したときの、左右舷方向の、船底沈下量の分布について考える。

まず、フレーム・スペース (S16では 3 m) 分の有効巾のついた、トランス部材からなるラーメン構造 (以下「輪切りブロック」と呼ぶ) を切り出す。自重を無視すれば、外力としては、水の重量と、支柱からの反力、それに、ロンジ部材からくる反力であるから、トランス材とロンジ材との変位は、その交点では等しいという条件を用いれば解ける。

4.2.1 ラーメン計算

S16の例では、輪切りブロックの寸法を、図7のようにとる (サイドタンクのストラットやビルジ・サークルなどは無視)。また、支柱の位置を A, M, E, N, T (左右対称) とする。 $k=k_2=I_2/I_2$ とすれば、 $k_1=2k$, $k_3=k_4=4k$, $k_5=3k$, $k_6=k$ となり、撓角は、 A, C 点の θ だけが未知量となる。

支柱の反力による影響を求めるために、輪切りブロックは A, B の2点だけで支持されているものとし、 M, E, N, T のいずれか一つに単位力 $P (=1)$ が加わったときの M, E, N, T 点の変位を求める。モーメントは四連モーメントの定理から求めるが、 θ があるために、上下の力の釣合方程式が一つ必要となる。

図7 輪切りブロックの寸法

例えば, N 点に P が作用するとき

$$\left. \begin{aligned} \text{GEA} : 8M_{El} + 6M_{E0} + M_{Ar} + 9/4Ps &= -6E\theta/k \\ \text{EAC} : M_{El} + 10M_{Ar} + 4M_{Cr} &= 6E\theta/k \\ \text{ACF} : 4M_{Ar} + 14M_{Cr} + 3M_{Fl} &= 6E\theta/k \\ \text{CFH} : 3M_{Cr} + 6M_{Fl} + 18M_{Fu} + 18M_{Fu} &= 6E\theta/k \\ \text{CFE} : 3M_{Cr} + 6M_{Fl} - 8M_{Fu} - 4M_{E0} &= 6E\theta/k \\ \text{FEA} : -4M_{Fu} - 8M_{E0} + 2M_{El} + M_{Ar} &= -6E\theta/k \\ \text{釣合式} : M_{Fl} - M_{Cr} + M_{Ar} - M_{El} &= 2Ps \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

から, モーメントと θ とが求められる。これがわかれば変位が求められる。以下同様にして, 各点に $P=1$ が作用したときの変位が, 表 2 のように求められる。ただし, α は支柱のバネ常数, $\mu = ks^2/E$, $\mu_0 = kqs^3/E$ である。

表 2 両端のみがバネ支持の場合単位力の位置と変形量

点の位置 単位力の 加わる位置	A	M	E	N	T
	$\frac{1}{2\alpha}$	$0.29\mu + \frac{1}{2\alpha}$	$0.62\mu + \frac{1}{2\alpha}$	$1.08\mu + \frac{1}{2\alpha}$	$1.40\mu + \frac{1}{2\alpha}$
	$\frac{1}{\alpha}$	$0.56\mu + \frac{1}{\alpha}$	$1.23\mu + \frac{1}{\alpha}$	$1.49\mu + \frac{1}{\alpha}$	$1.55\mu + \frac{1}{\alpha}$
	$\frac{1}{\alpha}$	$0.49\mu + \frac{1}{\alpha}$	$1.18\mu + \frac{1}{\alpha}$	$0.34\mu + \frac{1}{\alpha}$	$0.06\mu + \frac{1}{\alpha}$
	$\frac{1}{\alpha}$	$0.40\mu + \frac{1}{\alpha}$	$0.53\mu + \frac{1}{\alpha}$	$0.52\mu + \frac{1}{\alpha}$	$0.52\mu + \frac{1}{\alpha}$
	$\frac{2\mu_0}{\alpha}$	$1.14\mu_0 + \frac{2\mu_0}{\alpha}$	$2.53\mu_0 + \frac{2\mu_0}{\alpha}$	$2.88\mu_0 + \frac{2\mu_0}{\alpha}$	$3.08\mu_0 + \frac{2\mu_0}{\alpha}$

4.2.2 輪切りブロックとロンジ部材相互の反力

横部材と縦部材との反力を求めるために, 次の仮定をする。

- 1) T. BHD は変形しない。すなわち C. GDR, L. BHD, 外板および一般プレートは, タンク内部での変形は各フレーム・ラインでは異なっても, T. BHD のところでは, 沈下量は同じである (図 8 参照)
- 2) 輪切りブロックに対する, 船首尾からの力 (剪断力だけを考慮) は, 外板, L. BHD, およびボトム C. GDR だけから伝えられる。(その力を P_1 , P_3 , P_5 等であらわす)
- 3) 外板, L. BHD, C. GDR のロンジ部材には, 水張りタンクの部分の輪切りブロックおよび T. BHD から伝えられる力だけが作用し, 水張りタンクの船首尾の輪切りブロックから伝えられる力は無視しうるものとする。

T. BHD での変位 y_{BHD} は

$$y_{BHD} = -\frac{q_0}{2k_0} (1 - e^{-\alpha_0 L} \cdot \cos \alpha_0 L) \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

である。ここに, $\alpha_0 = \sqrt{\frac{k_0}{4EI_e}}$ であるが, I_e は, Schade の有効巾の理論⁴⁾を考慮して, 計算による I の 80 % をとる。また, k_0 については, 実船の支柱より数をへらして計算しているので, k_0 をその分だけ大き目にとる。結局, $k_0 = 8,330 \text{ kg/cm}^2$, $I_e = 1.57 \times 10^{10} \text{ cm}^4$, $q_0 = 2.34 \times 10^3 \text{ kg/cm}$ とすれば $y_{BHD} = 0.077 \text{ cm}$ となる。

4.2.3 ロンジ部材の影響を入れた輪切りブロックの変形

表 2 を用いると, 各輪切りブロックの変形の方程式 [第 111 号, p. 318 (5)] がつくれる。

図 8 で, Fr. 0 については :

図8 縦横部材の反力の記号

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= \frac{X_1}{\alpha} = \frac{2qs}{\alpha} - (P_1 + P_3 + P_5/2 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5/2)/\alpha \\
 \delta_2 &= \frac{X_2}{\alpha} = \frac{2qs}{\alpha} + 1.14\mu_0 - \frac{P_1}{\alpha} - \left[X_2 \left(0.40\mu + \frac{1}{\alpha} \right) \right. \\
 &\quad \left. + (X_3 + P_3) \left(0.49\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + X_4 \left(0.56\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + (X_5 + P_5) \left(0.29\mu + \frac{1}{2\alpha} \right) \right] \\
 \delta_3 &= \frac{X_3}{\alpha} = \frac{2qs}{\alpha} + 2.53\mu_0 - \frac{P_1}{\alpha} - \left[X_2 \left(0.53\mu + \frac{1}{\alpha} \right) \right. \\
 &\quad \left. + (X_3 + P_3) \left(1.18\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + X_4 \left(1.23\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + (X_5 + P_5) \left(0.62\mu + \frac{1}{2\alpha} \right) \right] \\
 \delta_4 &= \frac{X_4}{\alpha} = \frac{2qs}{\alpha} + 2.88\mu_0 - \frac{P_1}{\alpha} - \left[X_2 \left(0.52\mu + \frac{1}{\alpha} \right) \right. \\
 &\quad \left. + (X_3 + P_3) \left(0.34\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + X_4 \left(1.49\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + (X_5 + P_5) \left(1.08\mu + \frac{1}{2\alpha} \right) \right] \\
 \delta_5 &= \frac{X_5}{\alpha} = \frac{2qs}{\alpha} + 3.08\mu_0 - \frac{P_1}{\alpha} - \left[X_2 \left(0.52\mu + \frac{1}{\alpha} \right) \right. \\
 &\quad \left. + (X_3 + P_3) \left(0.06\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + X_4 \left(1.55\mu + \frac{1}{\alpha} \right) + (X_5 + P_5) \left(1.40\mu + \frac{1}{2\alpha} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Fr. 1 については、Fr. 0 と全く同じで、 $P_1, P_3, P_5, X_1, X_2, \dots$ の代りに $P_1', P_3', P_5', X_1', X_2', \dots$ としたものである。……………(4.13)'

ここに $\alpha = 2.78 \times 10^5 \text{ kg/cm}$, $\mu = 1.75 \times 10^{-5} \text{ cm/kg}$, $\mu_0 = 3.05 \text{ cm}$ となる。

4.2.4 ロンジ部材の変形

ロンジ部材を無限長梁とすれば、集中荷重 P による、着力点から x の距離にある点の撓み y は、

$$y = \frac{P\beta}{2k} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) = \frac{P\beta}{2k} \varphi(\beta x) \quad \dots\dots\dots(4.14)$$

である。T. BHD のところでは $y_{\text{BHD}} = 0.077 \text{ cm}$ であり、例えば T 点については、図8で $y_T = X_5/\alpha$ であるから方程式は

$$\begin{aligned}
 T'' : \quad & P_5 \left[\varphi(\beta_5 L) + 1 \right] + P_5' \left[\varphi\left(\frac{3\beta_5 L}{4}\right) + \varphi\left(\frac{\beta_5 L}{4}\right) \right] \\
 & + P_5 \left[\varphi\left(\frac{\beta_5 L}{2}\right) \right] = 0.077 \times \frac{2k_5}{\beta_5}
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 T' : \quad & P_5' + P_5 \cdot \varphi \left(-\frac{\beta_5 L}{4} \right) + P_5' \cdot \varphi \left(-\frac{\beta_5 L}{2} \right) + P_5'' \cdot \varphi \left(\frac{3\beta_5 L}{4} \right) \\
 & + P_5'' \cdot \varphi \left(-\frac{\beta_5 L}{4} \right) = \frac{X_5'}{\alpha} \cdot \frac{2k_5}{\beta_5} \\
 T : \quad & P_5 + 2 \left[P_5' \cdot \varphi \left(-\frac{\beta_5 L}{4} \right) + P_5'' \cdot \varphi \left(-\frac{\beta_5 L}{2} \right) \right] = \frac{X_5}{\alpha} \cdot \frac{2k_5}{\beta_5}
 \end{aligned} \right\} (4.15)$$

E'' , A'' 点については, T'' 式と同じで, 添字を5の代りに, それぞれ, 3および1としたものである。

同様に, E' , A' 点については T' の, E , A 点については T の添字を5から3に変えればよい。これで (4.15) のほかに6個の方程式が得られる。……………(4.16)

ここで添字は, 1は外板を, 3はL. BHD を, 5はC. GDR を示し, $I_1=2.35 \times 10^9 \text{ cm}^4$, $I_3=2.73 \times 10^9 \text{ cm}^4$, $I_5=22.77 \times 10^6 \text{ cm}^4$, $k_1=835 \text{ kg/cm}^2$, $k_3=k_5=1,666 \text{ kg/cm}^2$ となり, したがって $\beta_1=4.54 \times 10^{-4}$, $\beta_3=5.2 \times 10^{-4}$, $\beta_5=1.72 \times 10^{-3}$ 。また $L=1,200 \text{ cm}$ とする。(4.13)~(4.16) の19個の連立方程式を解いた結果と, 実測値とを図9に示す。

図9 4万t タンカーの, センタータンクに水張りしたときの船底外板の左右方向の, 沈下量の分布

図9で, サイドタンク下の沈下量について, 計算値が実測値より少ないのは, 実測ではセンタ・タンクのほかにサイドタンク (No.4 PS) も注水していることが原因の一つであると考えられる。

5 船体の温度差と時間的ズレの問題

船体の温度を変えるものには, 気温の変化と, 日射の影響がある。前者は, 主に, 伝導により, 後者は輻射によりエネルギーの授受が行なわれる。タンク内の空気は, さらに, 対流によって, デッキ裏は暖かく, ボトム上は冷たいのが普通であるが, タンク内の上下の温度傾斜は, ほぼ直線的であるとみてよい。また, 船体の温度は, 外気温度の変化と同時に変化するものではなくて, 日射のない夜間は, 外気温度の変化よりも時間的におくれてあらわれる。日射のある昼間は, 日射量の変化, 外気温度の変化の二つの各々についてそれぞれ若干の時間的ズレ (time lag) をもって変化するが, 日射量の変化の影響を強く受けるので, 例えば, 外気温度は下がらないうちに, 日射量が減るために, 船体温度は下がるということになる。

5.1 日射と外気温度変化をうける鋼片の温度変化

図 10 は空中に、水平に、支えられた鋼片の温度変化を示す。鋼の温度は上下両表面の平均値をとっているが、両面の温度差は最高 0.8°C であった。

図中、□印は板厚 14mm の場合の計算値である。板の温度を θ 、外気温度を θ_1 、鋼板の表面積を $2A$ 、重量を W 、比熱を C 、熱伝達率を α 、日射量を q とすれば、 Δt 時間について

$$2\alpha(\theta_1 - \theta)A \cdot \Delta t + q \cdot A \cdot \Delta t = WC \cdot \Delta(\theta - \theta_0) \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

で、 $\theta_1 = \theta_0 + \theta_3 \sin \omega_1 t$ 、 $q = q_0 + q_3 \sin \omega_2 t$ とすれば

$$\begin{aligned} \theta - \theta_0 = & \frac{p\theta_3}{p^2 + \omega_1^2} \left[p \sin \omega_1 t - \omega_1 \cos \omega_1 t + \omega_1 e^{-pt} \right] \\ & + \frac{s}{p^2 + \omega_2^2} \left[p \sin \omega_2 t - \omega_2 \cos \omega_2 t + \omega_2 e^{-pt} \right] \\ & + (1 + e^{-pt}) \cdot r/p \quad \dots\dots\dots(5.2) \end{aligned}$$

となる。ただし、 $p = 2A\alpha/WC$ 、 $s = q_3A/WC$ 、 $r = q_0A/WC$ である。図10の計算値は、 $\alpha = 8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、 $C = 0.11 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、 $q_0 = 50 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 、 $q_3 = 225 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 、 $\omega_1 = \pi/8$ 、 $\omega_2 = \pi/7$ 、 $\theta_0 = \theta_3 = 6$ としてある。

5. 2 時間的ズレ

2.2 において、夜間の船底の伸縮が、気温変化と時間的ズレがあることを示したが、それについて考える。大気温度を Θ_1 、タンク内温度を Θ_2 、外板の温度を θ とする。時刻 $t=0$ において、すべての温度は Θ_a であったとし、大気温度が $\Theta_1 = \Theta_a + \Theta_b \cos \omega t$ で変化するものとする。

外板の板厚を δ 、熱伝導率を λ 、外板～空気間の熱伝達率を α とすれば、流れる熱量 q は、 $q = k \cdot (\Theta_1 - \Theta_2)$ 、ただし $1/k = \frac{2}{\alpha A} + \delta/\lambda$ である。タンク内の空気重量を V 、比熱を r とし、 A 、 W 、 C は 5.1 と同じ記号とすれば、 $k[\Theta_a + \Theta_b \cos \omega t - \Theta_2] \cdot \Delta t = WC \cdot \Delta\theta$ であり、また、 $WC(\theta - \Theta_a) = V \cdot r(\Theta_2 - \Theta_a)$ であるから、方程式は

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{k}{V \cdot r} \cdot \theta = k \frac{\Theta_b}{Wc} \cdot \cos \omega t + k \frac{\Theta_a}{V \cdot r} \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

となり、 $p = \frac{k}{V \cdot r}$ とおけば

$$\theta = \frac{k\Theta_b}{Wc} \cdot \frac{p}{p^2 + \omega^2} \left(\cos \omega t + \frac{\omega}{p} \sin \omega t - e^{-pt} \right) + \Theta_a (1 + e^{-pt}) \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

となる。長時間後、すなわち $t \rightarrow \infty$ のときは、

$$\theta = \Theta_a + k \frac{\Theta_b}{Wc} \cdot \frac{p}{p^2 + \omega^2} \cdot \left(\cos \omega t + \frac{\omega}{p} \sin \omega t \right)$$

となり、 $\tan m = \omega/p$ とおけば

$$\theta = \frac{V \cdot r}{Wc} \left[\Theta_a + \Theta_b \cos(\omega t - m) \right] \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

となる。これを見ると、外板の温度は大気温度の変化よりも m だけ位相がをくれることがわかる。S 24 のタンクについて $\omega = \pi/12$ (すなわち、12h で $\pi \text{ rad.}$)、 $\alpha = 8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、 $A = 1,790 \text{ m}^2$ 、 $r = 0.241 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、 $V = 6,250 \text{ kg}$ 、 $\lambda = 37 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、 $\delta = 0.03 \text{ m}$

として m を求めると、 $m = 0.361 \text{ rad.}$

となる。これは、 $12 \times 0.361 \approx 1.45$ 時間だけおくれることを意味する。

5. 3 船台上の船の温度傾斜

図 11 は、S 24 の Ⅷ タンクの鋼温および空気温度を、1 月 7 日の 8.20～9.17 ならびに 13.07～14.40 の

図 10 日射を受ける、水平に支えられた鋼片の温度変化 (12 月 28 日)

図 11 日射をうける船体のタンク内温度分布の例 (1 月 17 日)

2 回にわたって計測した結果である。最初に右舷タンク、つぎに左舷タンクの順で計測したので、計測時刻を () で示してある。第一回目のときは、上甲板上で外気温度は 11°C であった。第二回目のときの空気温度は □ で示してある。測定温度は、第一回目の分にアンダ・ラインをつけて第二回目と区別した。

この図から、上甲板ボトム温度傾斜は、大体、直線的であるとみなせるようである。

6. 盤木の、荷重による、時間効果と船底沈下

建造中の船体の変形を考えるにあたって考慮すべき要素の一つに、盤木の長時間荷重による変形がある。すなわち、木材は、圧縮荷重を一定にしておいても、時間の経過とともに圧縮量が増してゆく。

図 12 盤木における荷重の時間効果

図 12 は、米松の頂面 (202×603) に、均一に、 20t の荷重をかけたまま $1,000\text{h}$ 放置し、そのあとで荷重を除去して、更に $1,000\text{h}$ 放置したときの米松の圧縮量の変化を示す。この試験では、加圧後 $1,000\text{h}$ を経ても、圧縮量はふえる一方であった。一方、戻しのときは 600h で圧縮量は静定したが、それでも、もとの寸法には戻りきらなかった。

上記の盤木の時間効果は、船台上では、船底の全面的な沈下という現象となってあらわれる。

図 13 はタンカーおよび貨物船の、 Δ における、船底外板～船台間距離の減少を示す。日数は、船底外板の

パット溶接がほぼ完了したとき (2.1 参照) から起算してある。この図でみると、貨物船に比べてタンカーの方が船底沈下が激しく、とくに、計測位置およびその附近のタンクが水圧期間に入ると、沈下が急激にふえている。もちろん、盤木の積み木細工による木と木の間のスキマが荷重によってつぶれることも、船底沈下の一つの原因ではあるが、盤木の時間効果も大きな原因であろう。

しかも、この船底沈下が、船底のいたる所で同じならば問題はないが、場所によって異なるときには、そのための船体変形、したがって内部応力が発生する。このことは、船台上の船の形から、進水後の船の形を推定する場合に考慮すべき要素の一つとなる。

7 む す び

本稿においては、船台上における船底の収縮、曲げ変形を主として取扱い、温度、荷重の影響を解析して、実測結果と大体合致することを示した。また、盤木の時間効果による圧縮量の増大が、船底沈下となってあらわれることを指摘した。

参 考 文 献

- 1) 太田 友弥 船体強弱学 p. 402~417.
- 2) 谷下 市松 熱工学ハンドブック, 山海堂, 昭 37. p. 223.
- 3) 関谷 文彦 木材強弱論, 賢文館, 昭 14, p. 355.
- 4) H. A. Schade, The Effective Breadth of Stiffened Plating Under Bending Loads S. N. A. M. E. (1951) p. 403.
- 5) 国安 常雄 多点同時溶接法に関する研究 (第1報), 造船協会論文集 第110号
- 6) " 中型貨物船のマスターパット継手建造法における拘束度および残留応力について 造船協会論文集 第104号
- 7) 小岩, 金子 大気温度変化に因り生ずる船体撓度 造船協会々報 第62号
- 8) 筆 者 船底支柱, 盤木の必要量の算定 造船協会論文集 第111号

図 13 船台上における建造中の船底沈下