

(昭和 40 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

船舶建造時における船体変形の研究 (第 4 報)

正員 小 田 道 隆*
梶 原 儀 親

The Deformation of Ship's Hull under Construction (No. 4)

By Michitaka Oda, *Member*
Yoshichika Kaziwara

Summary

In this report, three problems of hull deflection during construction will be dealt with. First the deflection of that part of the vessel's bottom which overhangs port & starboard of the concrete building berth will be discussed. Secondly the deformation of superstructure decks during the completion of work after launching will be discussed.

The third and major topic of discussion will be the problem of the deformation of the vessel's bottom and inner bottom in way of machinery room in connection with the problem of propeller shaft centerline alignment and/or boss boring. In regard to this problem, the following findings will be shown :

- (1) The rate of rising of the stern is greatest during the earlier period of construction and decreases gradually as the work progresses. The amount of eccentricity of stern tube bossing when plotted against progress of work gives the "Sine" curve.
- (2) The athwartship deflection of the vessel's stern either to port or starboard is strongly influenced by seasonal, climatic conditions.
- (3) The fore & aft shrinkage of the stern part of vessel's hull is greatest during early stages of construction (as is the case of the stern rising). The rate of shrinkage of the main deck does not necessarily coincide that of the vessel's bottom.

Finally, the shrinking force resulting from welding and heating will be discussed together with the result of some experimental model tests to confirm the fact that the fore & aft shrinkage of the vessel is caused to far greater degree by the welding on the ship's bottom and its vicinity than the welding on the main deck and above.

1 ま え が き

本報告においては、先ず建造中船台より張り出した船底の水圧試験による撓みについて述べ、次に進水後の工事に伴う上部構造の変形の問題にふれる。そして、さらに前報にひきつづき、軸心変形の問題に関連して、船台上の工事進捗に伴う船尾部の変形についてさらに詳しく述べる。このうちとくに溶接による船底附近の収縮、曲げ変形については、すでに第 3 報において「船尾船底の変形が二重底、ビルジ外板などの船底に近い部分の溶接によつては激しくひき起こされるが、上甲板以上の構造などのように船底から遠いところにあるものの溶接によつてはほとんど起きない」ことを述べたが、本報ではこれに関連していくつかの模型を用いて溶接（および歪取り）による変形の測定を行なつた結果を示す。

2 船台より張り出した部分の船底の変形

原稿受付 昭和 39 年 12 月 20 日

* 三菱重工横浜造船所

船の幅が船台幅より大きい場合には、船台からはみ出した部分の船底は比較的長い支柱（以下、中尺支柱と呼ぶ）によつて支えられることになる。その場合、中尺支柱の断面積と単位面積当りの本数が船台上の短かい支柱と同じであれば、支柱が長くなつただけ縮みやすくなる。これに加えて、中尺支柱を立てた地盤が船台よりも柔かい場合にはこの傾向が助長される。このことは張り出し部の船底支柱の必要本数、支柱の立て方に関連する問題であるが、ここでは張り出し部の船底沈下の状況についてだけ述べる。

2.1 計算式による張り出し部の船底沈下の傾向

支柱と地盤をふくめた基礎常数 k が一様でない場合の船底沈下が、左右舷方向にいかなる分布になるかを計算

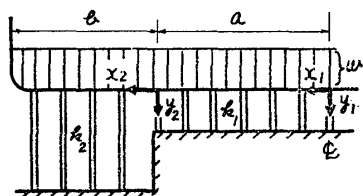


図1 異なる基礎常数

してみよう。簡単のために、船体の剛性 I および荷重 w は左右舷方向に一様であるとし、基礎常数は船台上（幅 a ）では k_1 、張り出し部（幅 b ）では k_2 であるとする。（図・1）

基本方程式は第1報(4.1)式で示され、 a, b の2つの範囲に分けて考えると一般解は第1報(4.2)式あるいは(4.7)式となり合計8個の積分常数が得られる。この常数は $x_1=0$ において $y'=y'''=0$, $x_2=b$ において $y''=y'''=0$ および $x_1=a$ ($x_2=0$) において $y_1=y_2$, $y_1'=y_2'$, $y_1''=y_2''$, $y_1'''=y_2'''$ の条件式から決定できる。いま、 $a+b=16\text{ m}$, $k_1=8,400\text{ kg/cm}^2$, $I=1\times$

10^9 cm^4 , $w=420\text{ kg/cm}$ とし、① $b/a=1$, $k_2/k_1=1/2$, ② $b/a=1$, $k_2/k_1=1/4$, ③ $b/a=1/3$, $k_2/k_1=1/2$, ④ $b/a=1/3$, $k_2/k_1=1/4$ の4つの場合について計算した結果を図・2に示す。図・2から次のことがわかる。

- (1) 船底の撓み曲線は滑らかに変化し、基礎の弱い所（張り出し部）では沈下量が大きくなる。
- (2) 基礎の弱い所があると、基礎の強い所（船台上）の支柱は負担（支持している）力が大きくなるがとくに境界（船台端）で最も大きくなる。張り出し部については反対に境界で最も小さくなる。

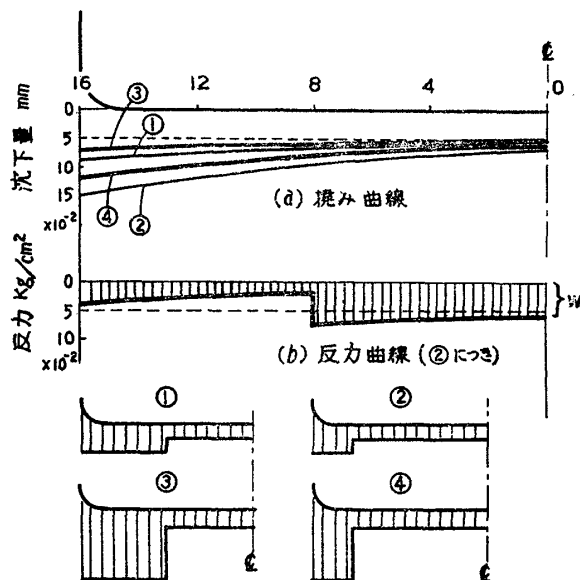
2.2 張り出し部の船底沈下の実測結果

船台張り出し部の船底沈下の左右舷方向の沈下の実測結果の例を図・3に示す。対象船は5万tタンカーS62(S61と同型)である。計測はF70およびF80(いずれもT.BHD位置)について行なつた。図・3で(a)は水張りの状況、(b)は支柱の位置、(c)はピアノ線による船底沈下量、(d)は各支柱の表面につけた標点間距離の縮み量から算出した支柱反力（ヤング率を $41,500\text{ kg/cm}^2$ として）である。支柱はF70について

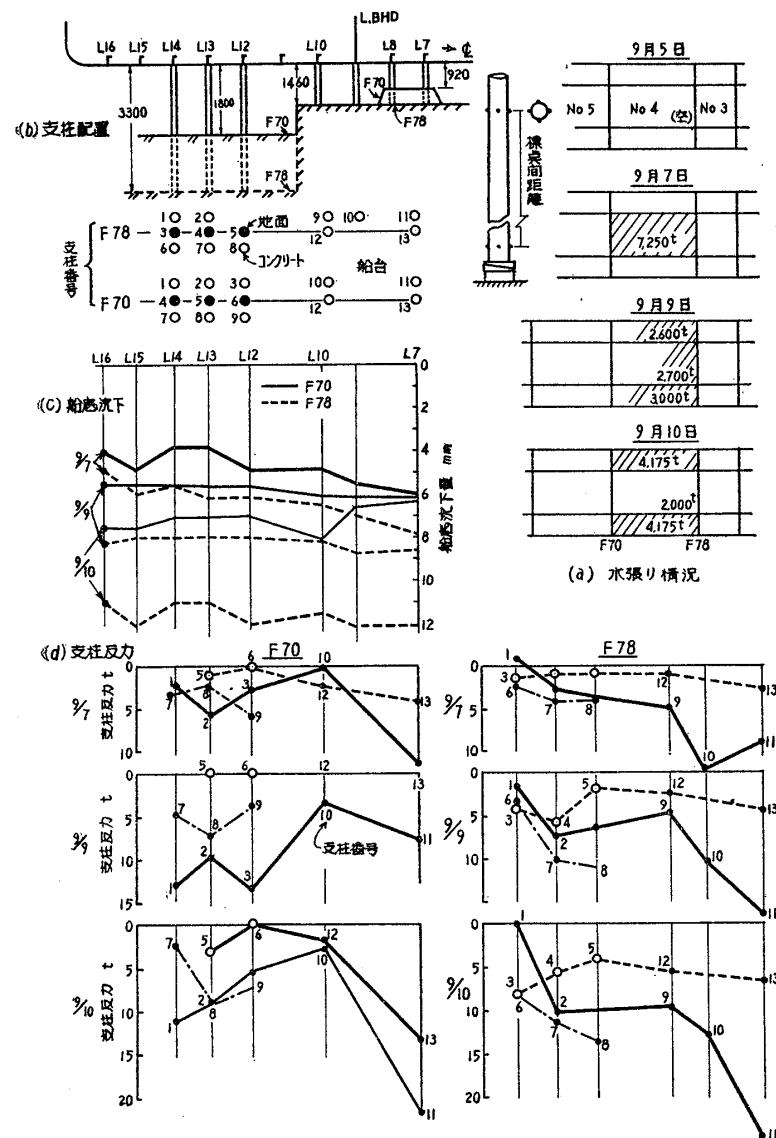
はNo.1~9が張り出し部、No.10~13は船台上に立つてをり、F78についてはNo.1~8が張り出し部、No.9~13は船台上に立てられている。また張り出し部の支柱のうち、F70についてはNo.4, 5, 6の3本は一般地面上に、他はコンクリート基礎に立っている。F78についてはNo.3, 4, 5が一般地面上、他はコンクリート基礎上である。

図・3(c)から明らかのように、本船の如き支持条件の場合、船底沈下は張り出し部が特に沈下するという傾向は認められない。(本船はT.BHDの下で計測したが、他船で一般ボトム、トランスの下で計測した場合も同様であつた。)この理由は(1)船の剛性(横方向のみならず縦方向の剛性も寄与する)が相当に強いこと(2)支柱の変形量に比べ、支柱の下に入れたカイモノの変形量あるいは支柱と船底(船台)間の間隙のツブレ量の方がずっと大きいので、支柱の長さの大小はそれほど影響がない、ことによるのであろう。

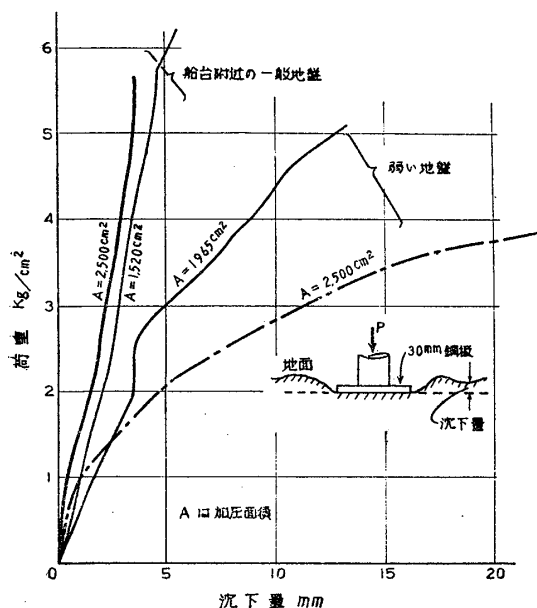
一方、図・3(d)に示すように、船底は上記のように平坦に下がるにもかかわらず、各支柱の反力は支柱によつて相当に異なる。すなわち、常に良く効く支柱と常に遊んでいる支柱とがある。これは支柱を立てる時期(初打応力の大小)、支柱の下のカイモノの状況などによつて左右されるためであらう。また図・3(d)から、張り出し部の支柱反力に比べ船台上的支柱反力が大きいことがほぼ認められる。(支柱反力の計算には変形の残留は



図・2 2つの異なる基礎常数をもつ弾性基礎上の梁の変形(計算値)



図・3 船台張り出し部の船底沈下と
支柱反力 (S 62)



考慮していないので断言はできない。)さらに、一般地面の上に立てられた中尺支柱は他の中尺支柱よりも効きが悪いことが認められる。この理由は、荷重がかかると、一般地面上に立てられた支柱は地中にもぐり込むために荷重を負担しないためではないかと考えられる。

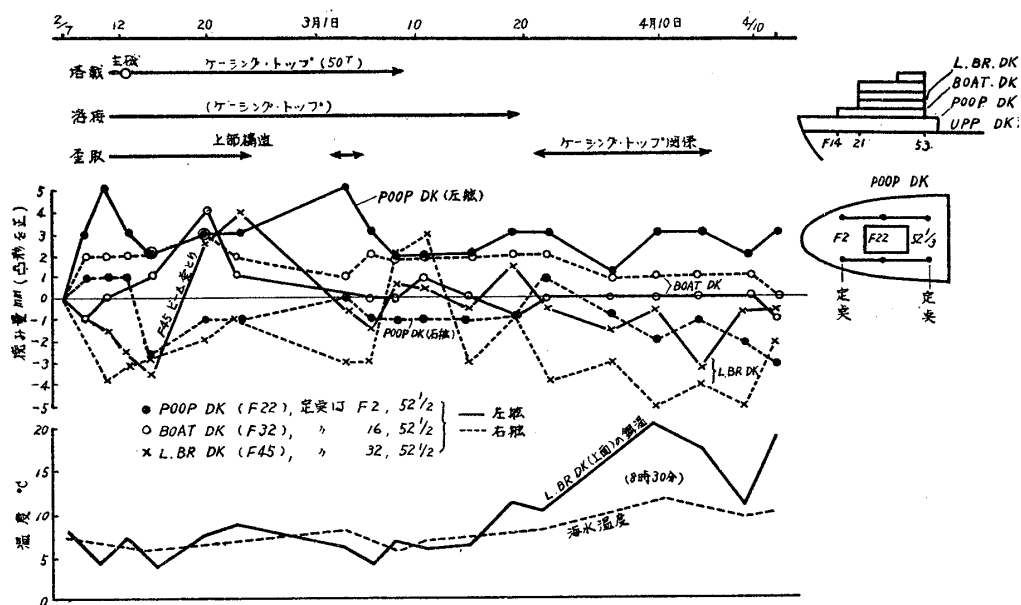
ちなみに、局部加圧による地盤の沈下量を実測した結果の一例を図・4に示す。図によると、直径270mmの中尺支柱を直接地面に立てたとき、5mmの沈下をひき起こすに必要な荷重は約4tに過ぎない。つまり地盤の沈下は比較的小さな荷重でも大きい。一方、支柱の方は4t大の荷重によつて圧縮される量は約2mmに過ぎない(第2報、図・8)。従つて、いま船底が平らに7mm沈下したとすれば一般地面上の中尺支柱については、支柱自体の圧縮量が2mm、地盤沈下が5mmであつて荷重分担は4tとみなせる。一方、それに隣接した、地盤沈下のない処の中尺支柱については7mmの収縮を全部支柱自体で処理しなければならない

いから、その荷重分担は約 15t ということになるわけである。実際には、船台と雖も沈下するから (第2報, 図・2) 一般地面上とコンクリート基礎上とは、それほど荷重分担の不均一はない筈であるが、いずれにせよ、弱い支柱の隣の支柱は過負荷になるという点は注意すべきである。

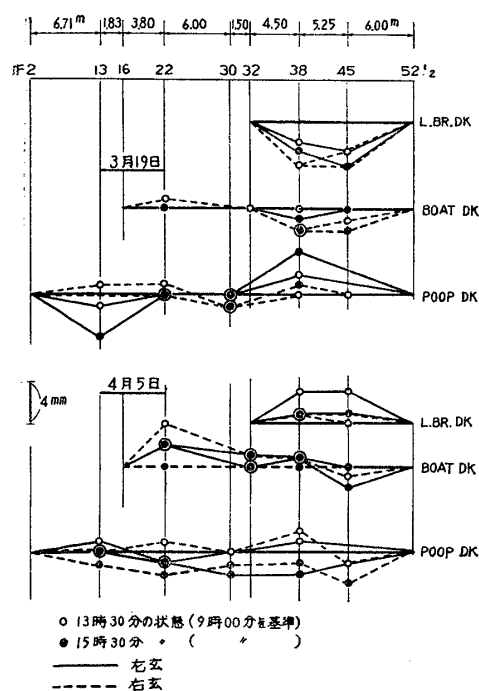
3 上部構造の変形 (艤装期間中の上下撓み)

進水後の艤装期間中は、主機、補機、ケーシング・トップなどの搭載、各種艤装品の溶接などが行なわれるが、上部構造の溶接や歪取り作業も相当期間続行される。

ここでは 5 万 t 鉱石船 S 24 につき、艤装期間中の上部構造の上下撓みの変化について述べる。S 24 の上部



図・5 進水後の工事進捗に伴う上部構造の変形 (724)



図・6 温度差変化による上部構造各甲板の撓み (S 24)

構造は 6 層の甲板からなるが、図・5 に示したのは POOP, BOAT, Lower BR. の相重なる 3 層の甲板についての計測結果である。計測は各甲板ともそれぞれ、左舷右舷に関し、 Δ に平行な線上で 2 つの定点 (例えば POOP DK については F 2 と F 52 $\frac{1}{2}$) の間にピアノ線を張って各計測点の上下撓みを計測した。基準は 2 月 7 日にとつた。(進水は前年の 12 月 14 日)。計測は 1 日 3 回各点につき行なつたが、図・5 には各計測点のうち任意の 1 点ずつを取上げ、朝 9 時の計測値を日附ベースで示した。また海水温度と L. BR. DK 上面の平均鋼温も示した。

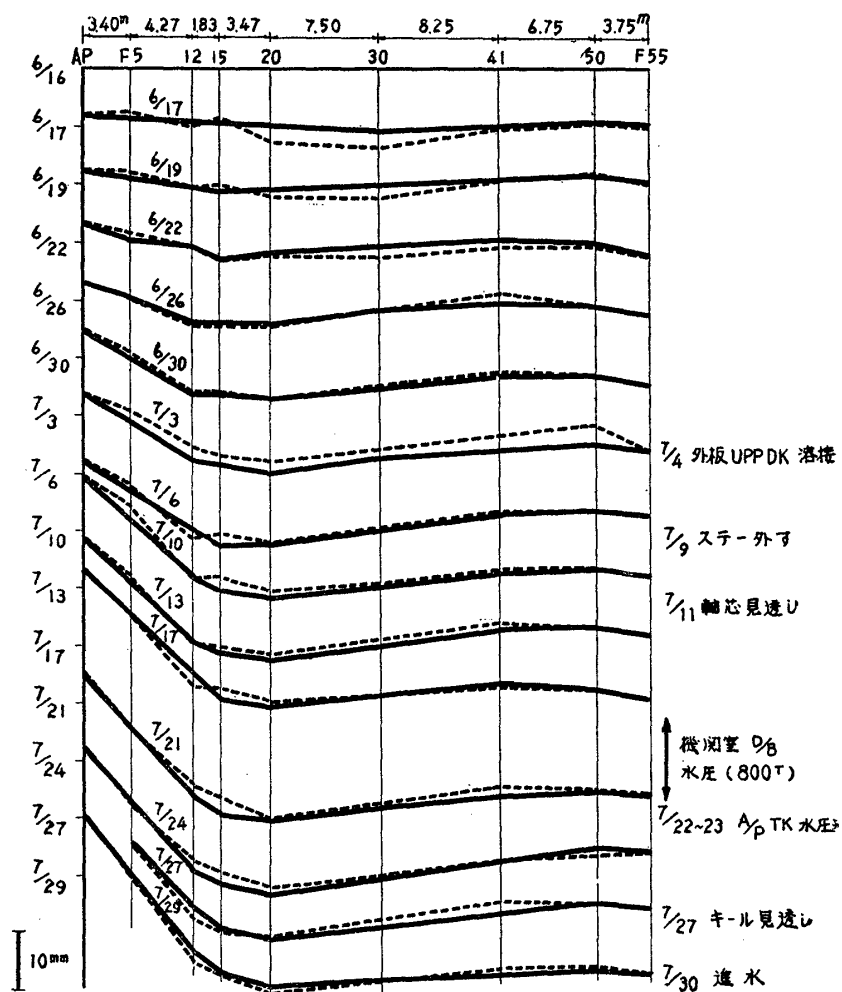
図・5 から分るように、進水後の上部構造の撓みは (ビームの位置では) 全体的には案外に小さいが、ビーム自体の歪取りが行なわれると局部的に撓みは可なり大きくなる。また左舷と右舷の撓みの傾向は全体的には一致するが、部分的には逆になることもあり得る。

つぎに、計測した 3 層の甲板の温度変化による撓みの傾向を図・6 に示す。図・6 (a) は 3 月 19 日、図・6 (b) は 4 月 5 日のものであり、何れも朝 9 時の状態を零とした場合の 13.30 および 15.30 における撓みを示す。(実線は左舷、点線は右舷)。これはある 1 日における船体温度差による撓みとみてよいが、撓み量は約 ± 4 mm である。図・6 (a) および (b) で気附くことは L. BR.

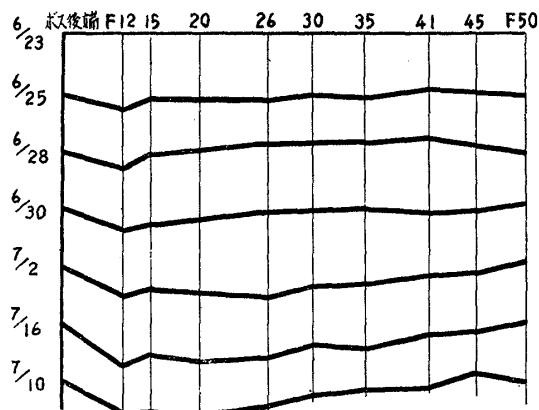
DK と POOP DK とでは撓みの凹凸がむしろ逆になっていることである。これは各甲板間のシヤーラックによるものであつて、上部構造が上甲板と同じ変形をするか逆に曲るかは両者の剛比と接合条件が関係するわけで、これについては既に多くの研究^{1)~4)}が行なわれている。

4 船尾船底および軸心の変形

船尾船底の上下撓みおよび収縮については第3報³⁾でもふれたが、ここでは軸心の変形を併せて、さらに検討

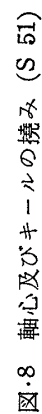


(a) キール下面の変形
—— 船底船台間距離
----- 光の見透し



(b) 軸心の変形 (ピアノ線)

図・7 キールおよび軸心の上下方向の変形 (S 37)



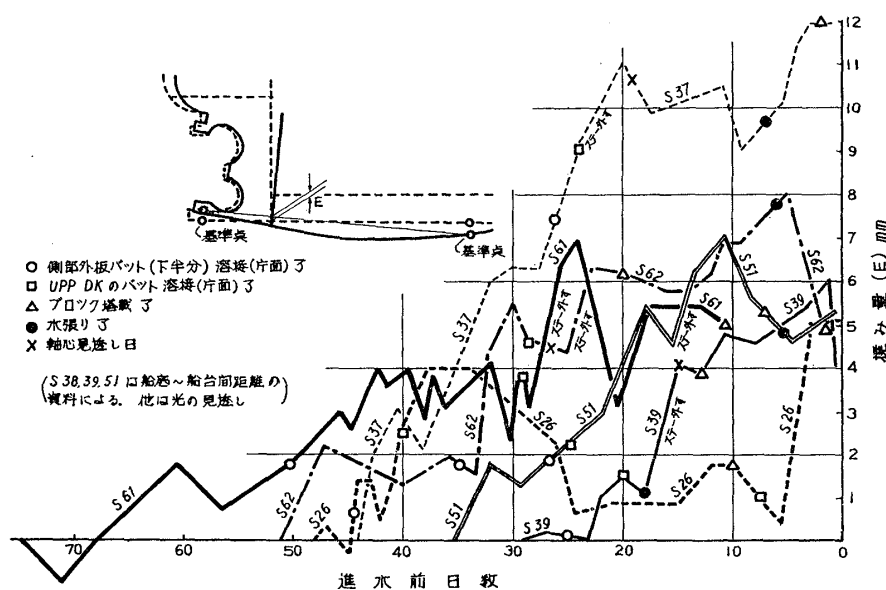
を続けたい。軸心の変形は一般に(1)上下方向のわん曲、(2)左右舷方向のわん曲、および(3)船首尾方向の収縮に分けられるが、軸心の変形も結局は船体変形、すなわちスターンチューブと内底板(二重底頂板)との相対変形に他ならない。

4.1 上下方向のわん曲

船尾船底の上下方向のわん曲については第3報(図・15, 17)でも示したが、本報では小型船の例もあげる。

図・7 は2万tタンカー S 37, 図・8 は木材運搬船 S 51(11,000 GT), 図・9 はトロール船 S 39(9,300 GT)の船尾部キール(あるいは軸心)の変形の進行状態である。図・10 は第3報に示した5万tタンカー S 61 と同型船 S 62 である。図・7 および図・8 にはキール下面の変形と軸心の変形とを一緒に示した。また図・9 はキール下面の船底～船台間距離の変化であり、図・10 は光の見透しによるキール下面の撓みである。これらの図を見ると、第3報で述べた大型船の場合のように、小型船でも建造の初期には変動が大きく不安定であつて、むしろ凸形に変形しようとするが、後になるほど変形の形ははつきりした形をとり凹みが深くなつてゆくことがわかる。

このような船底変形の計測結果のなかから特にスターンチューブの傾斜量だけを拾い出したものが図・11 である。すなわち、ボス後端および機関室船首部にそれぞれ対応するキール下面に設けた2つの基準点を結ぶ直線に対する、スターンチューブ前端隔壁位置でのキールの下り量を表わしたものであつて、船底と二重底頂板との変形が同じであるならば、軸心の変形を表わすものとみてよいものである。図中、○印は側部外板の下半分のバット溶接(片面)が終了した日を、□印は上甲板のバット溶接が終了した日を示す。また△印はブロックの塔載が



図・11 船尾管前端隔壁位置におけるキールの上下わん曲量の変化

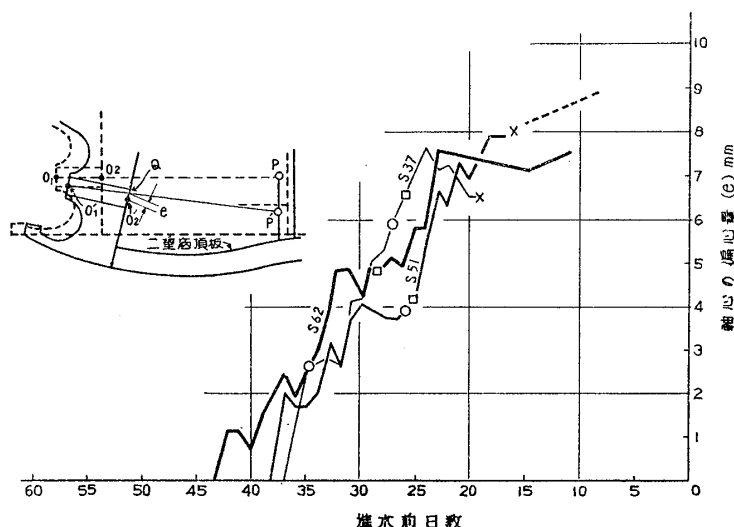
終了した日を●印はタンクの水張りが終了した日を示す。

図・11 をみると、側部外板(下半分)の溶接が終つてから進水直前までの偏心量の増加は約4mmであり、上甲板の溶接が終つてからの偏心量の増加は約3mmである。どの船でも、上下ガジョンを連結している鋼柱(ステー)を取外したときに偏心量が急増しているが、これについては4.3でもふれる。また進水日近くでは、プロペラ、舵の取付などによつて偏心量が減少したり、キール盤木の取はずしや塔載重量のために偏心量が増加したりして不安定となつてゐる。

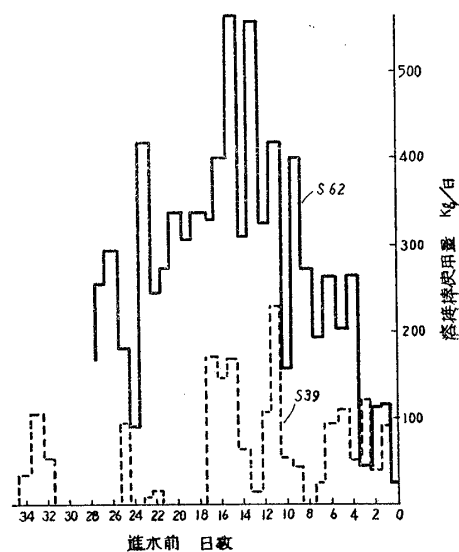
つぎに図・12 は軸心そのものの変形をピアノ線で計測した結果に基づいて、図・11 におけると同様に、スターンチューブ前端隔壁での上下の偏心量だけを拾い出したものである。

図・11 および図・12 からみると、船底外板のバット終了後の偏心量の増加は、キール下面でも軸心でも、大体 sine curve の形をとつてゐる。すなわち側部外板(下半分)のバット溶接(片面)が終了してからの上下変心量 e は、ごく大ざつぱに

$$e = 4.5 \sin \frac{\pi(a-x)}{2a} \text{ mm} \quad (1)$$



図・12 軸心の偏心量 (上下) の変化



図・13 船尾船体 (上甲板以下) における溶接棒使用状況

ただし、 a は側部外板の下半分のバットの溶接が終った日の進水前日数。

x は進水前日数

の形をとる。しかしいかなる場合にもこの形をとるか否かはさらに多くの資料と理論的検討が必要である。

図・13 は船台上における機関室内船殻工事に消費した1日当りの溶接棒 (仮付は除く) の使用量であるが、使用量は大体平均しており進水前2週間位で最高に達する傾向がみられる。このように溶接棒使用量が進水前までとくに減少しないにもかかわらず、図・11, 12 にみられるように、偏心量の増加が進水前になると少なくなる理由は、進水前の偏心量の増減に関係するのは溶接だけではないことにもよるが、船体が固まつてからの溶接は変形に余り関係しないとみるべきであつて、これは5でもふれる。因みに、船台上における全船殻工事に對する溶接棒使用重量は表・1 のようであつて、船殻重量が大きい船では使用重量も多くなるが、船殻重量当りの溶接棒使用重量にはそれほど差はない。

番船	船種	船殻重量 (A) t	船台上の溶接棒使用量 (B) t	$\frac{B}{A} \times 1000$
S51	木材運搬	3,000	17.67	5.86
S37	特殊	6,000	44.49	7.43
S61	タンカー	10,800	66.11	6.11
S62	タンカー	10,800	66.27	6.15
S38	車輪運搬	2,300	14.33	6.20
S39	トロール	3,290	16.60	5.06

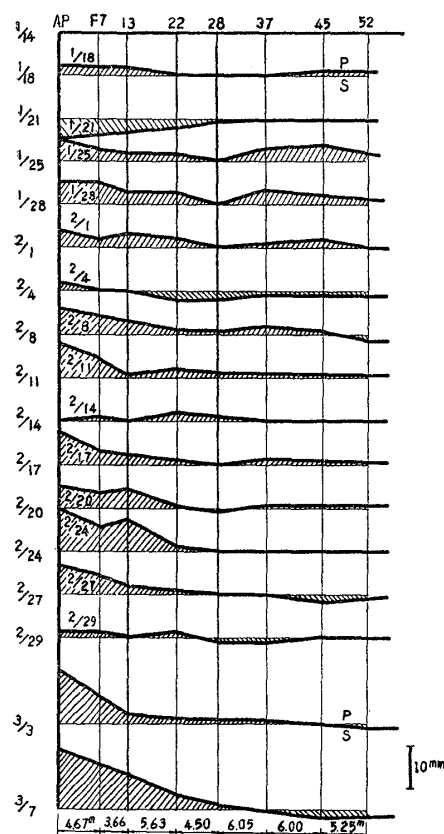
表・1 船殻重量と使用溶接棒 (船台上)

4・2 船尾船底の左右舷方向のわん曲

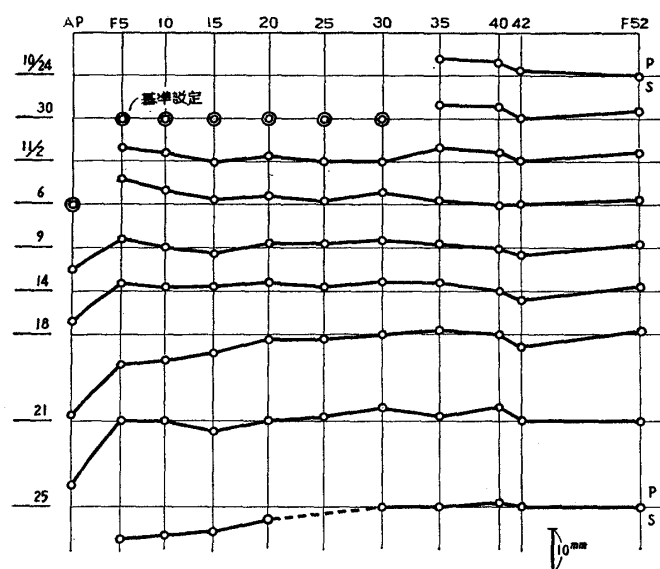
図・14~16 には、キールの左右舷方向の対地移動の計測結果を示す。ここに掲げた例は左舷方向に撓む例が多いが、進水台の後端、中央、前端にそれぞれ対応するキールの3点 (A_0 , M_0 , F_0) について対地移動を計測した29隻の船の実績 (詳細省略) を調査してみると、 A_0 点が、船底外板のバット溶接が全部終了した日を基準として、進水直前に左舷側に移動したものが9隻、右舷側に移動したものが12隻、左右舷何れにも移動せず基準日と同じ位置にあつたものが8隻あつた。そして、左右舷方向のわん曲は次の規則に大体従っている。すなわち「建造期間が季節的に暑さに向うとき (例えば2月→5月) は A_0 は右舷側へ移動して船体中心線は「型」のわん曲をする。反対に寒さに向うとき (例えば8月→11月) は A_0 は左舷側へ移動して船体中心線は「型」のわん曲をする。」

上記29例のうち、 A_0 が左舷に寄つた9隻は全部この規則に従っている。また A_0 が右舷に寄つた12隻のうち8隻がこの規則に従い、規則に反している4隻のうち2隻は A_0 の移動については規則に従つたが、 F_0 が規則にしたがわなかったために船体全体として「型」となるべきところを「型」となつたものである。 A_0 が動かなかつた8隻についても船体中心線のわん曲が「型」となるか「型」となるかについては8隻中5隻が規則に従っている。

船体中心線が「型」となるかは、主に温度差と溶接順序によるものと考えられるが、上記の例からみると温度差の方が顕著に効いていると考えられる。当所の場合、船台の向きに關係して左舷側が日射を受ける方



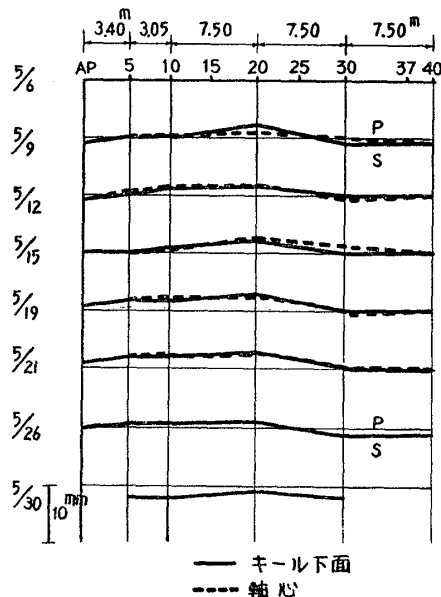
図・14 キールの左右舷方向の対地移動(S 61)



図・16 キールの左右舷方向の対地移動 (S 39)

4.3 船尾部の船首尾方向の収縮

船尾部キールの船首尾方向の収縮については5万tタンカーの例について第3報(図・14)でもふれたが、ここではトロール船 S 39 について船尾部のキール、二重底頂板、最上甲板の収縮の関連という形でとらえる。S 39 は外板と3層の甲板とを地上で一体にしたブロックとして搭載した。



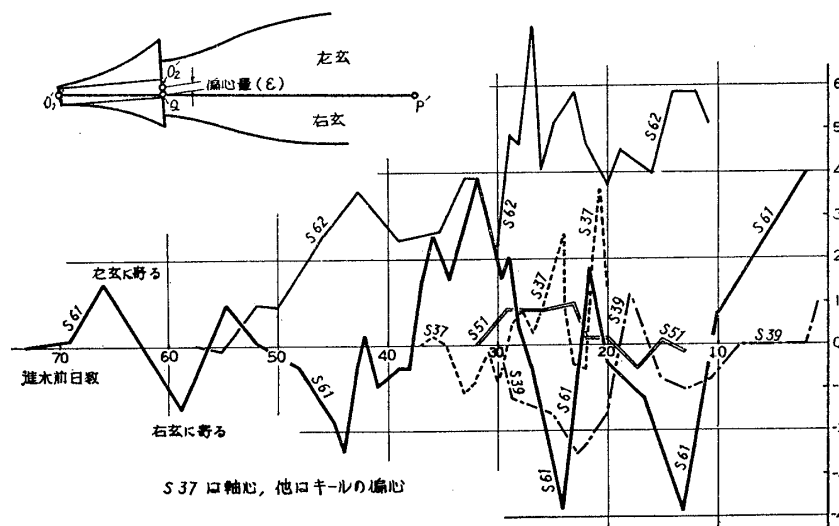
図・15 船底及び軸心の左右舷方向の変形 (S51)

向になるが、夏期(朝9時)の丸の形を基準にすれば冬期(朝9時)の丸の形は]形に変形することになるものと考えられる。

【】上記の規則から云えば、S 61は12月→3月の建造であるから丸は[形になる筈であるが実際には]形になつている。これはクレーン能力の関係で左舷ブロックを小ブロックに分割、搭載したためではないかとも考えられる。当所では左舷ブロックは一般に右舷ブロックよりも先に搭載されるので、溶接も左舷が先行することが多い。従つて、船体中心線は]形にわん曲する筈であるが、上記の29例では特にそういう傾向は認められない。

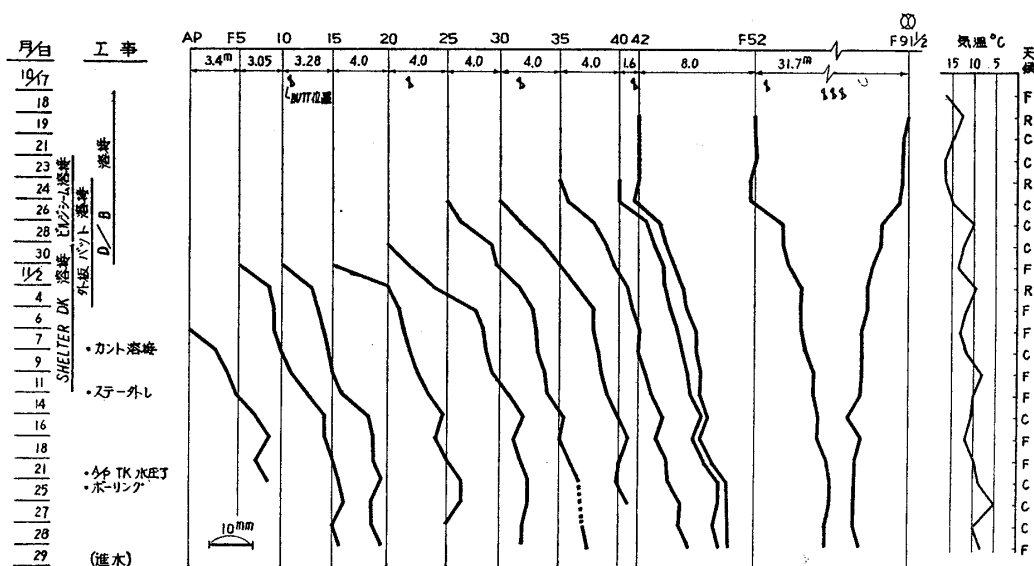
図・17 は4.1と同じように、ボス後端と機関室前部位置におけるキール下面の2定点を結ぶ基準線に対する、スターンチューブ前端壁位置のキールの左右舷方向の偏心量を示す。(S 37 は直接、軸心に関するもの)。

船全体としての、朝夕の温度差による左右舷方向のわん曲量は(とくに船尾部において)上下方向のわん曲量よりもずっと大きい、工事の進歩に伴う軸心の変形についてみれば、反対に、左右舷方向のわん曲の方が上下方向のわん曲よりも小さくなる。これは軸心については、左右舷方向の変形の要素(主に温度差)に比べ、盤木抵抗があるとは云え、上下方向の変形の要素(溶接順序、荷重、温度差)の影響が大きいためではないかと考えられる。



図・17 キール (あるいは軸心) の左右舷方向の偏心率の変化

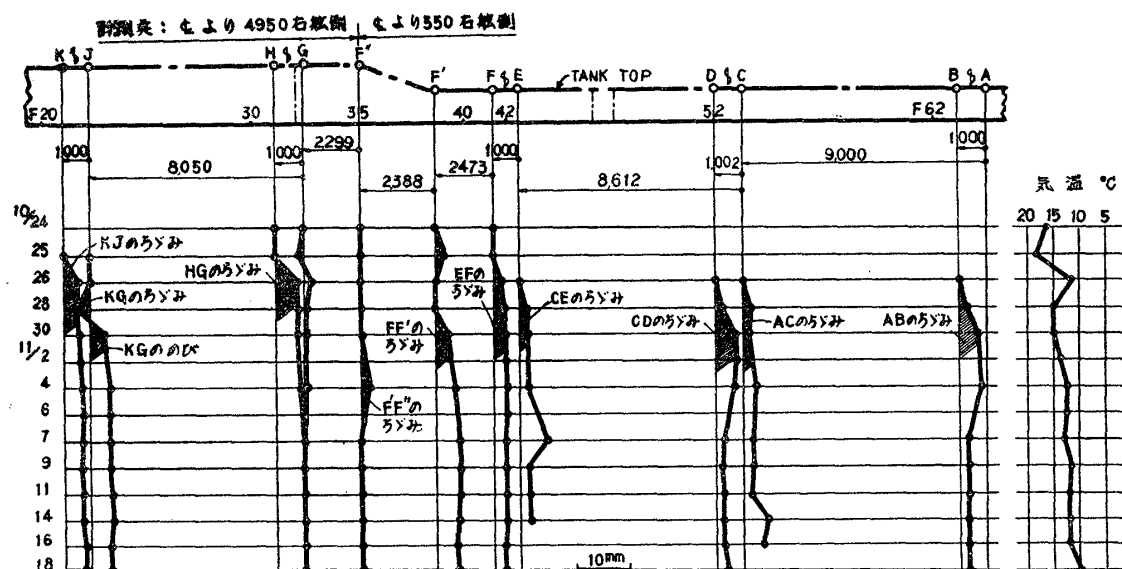
図・18 はキール下面の船首尾方向の対地移動量を示す。図・18 から分るように船尾部キールの船首尾方向の収縮は、タンカーの場合と同じように、工程の初期すなわち二重底およびその近傍の溶接によつて激しく起こり、工程の後期すなわち上甲板以上の溶接による影響は著しく減少する。S 39 の場合には F52 と Ⅹ との間の収縮が目立っているが、F 42 より船尾部の各点は (例えば 11月4日以降は) 略々平行に移動している。これは船尾部が伸縮することなくⅩ側に引付けられたことを意味するが、気温の低下を考慮すると、むしろ引き伸ばされていることになる。F 52 と Ⅹ との間の収縮が顕著な理由は、この間には、最後に溶接が行なわれるマスターバットを含む3本のバットがあり、しかも船首尾方向の収縮の中心 (不動点) がⅩより船尾寄りの位置に存在するためであろう。(マスターバットの溶接は二重底が 10/24, 最上甲板が 11/4, MAIN DK が 11/8, Lower DK が



図・18 キール下面の船首尾方向の対地移動 (S 39)

11/9頃に行なわれた。)このような船首尾方向の収縮は、工作法上のブロック端末伸し量の決定、多点建造の場合の船首尾部の建造始点ブロックの位置決めの問題、あるいは軸管の長さの決定など多くの問題に応用されるのであるが、その詳細はここでは述べない。

図・19 は S 39 の二重底頂板 (上面) の船首尾方向の収縮量を示す。計測点 A, B, ... F'' の8点はⅩより右舷側へ 550 mm, F'', G, ... K の5点はⅩより右舷側へ 950 mm のパトックライン上に設けた。(A, B), (C, D), (E, F), (G, H), (J, K) はそれぞれ二重底のブロックバットを挟んで、バットから 500 mm ずつ離れた点に設



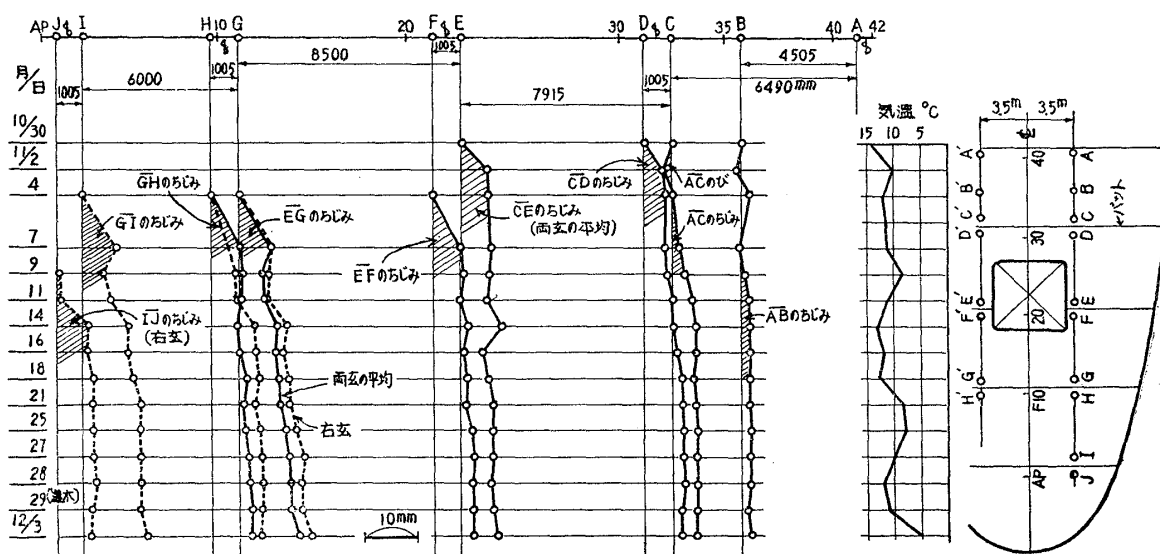
図・19 二重底頂板の船首尾方向の伸縮 (S 39)

けた。計測は $\overline{AB}$, $\overline{BC}$, $\overline{CD}$, $\overline{DE}$, $\overline{EF}$, ... の長さの変化を鋼製巻尺で読んだものである。基準は 2 月 24 日 (K, J は 25 日) にとつた。

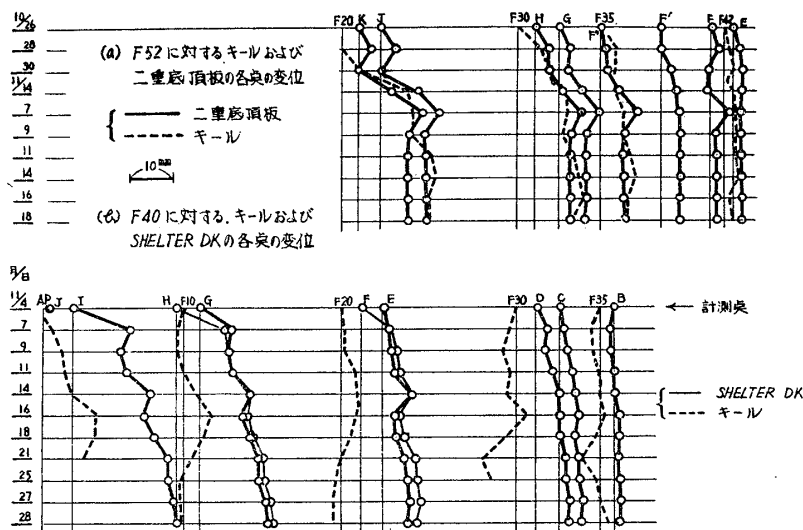
図・19 に示した収縮量は、その間の距離を測定した 2 点のうち、船首側の点を基準 (不動) とした場合の船尾側の点の移動量を示してある。これをみると、バットを挟んだ 1m 区間 (例えば CD 間) の収縮量は、同じバットを含んだより大きな区間 (例えば CE 間) の収縮量よりも大きいことがわかる。これはバットを挟まない区間では板が伸張されていることを示す。

図・20 は S 39 の最上甲板 (SHELTER DK) 上面の船首尾方向の収縮であつて、A, B, C, ... J (左舷は A', B', ... H') を 3.5m のバトックライン (両舷) 上に標点を取り、二重底と同様の計測を行なつた。(基準日は 10/30 と 11/4)。収縮量の表示要領は図・18 と同じである。A, B, ... F は左右舷の算術平均をとつてある。J, I は右舷しか計測できなかったもので、それを点線で示してある。また H, G については参考のために右舷のものを点線で示してある。(本船の場合、右舷の収縮量が左舷よりも多かつた。)

図・21 (a), (b) は図・18~20 を基にして、キールと二重底頂板、キールと最上甲板の収縮の相対関係を示したものである。標点の位置は厳密には一致していないが収縮の概要をうかがうことはできる。図・21 (a) は



図・20 SHELTER DK の船首尾方向の伸縮 (S 39)



図・21 キール、二重底頂板、SHELTER DK の船首尾方向の収縮(S 39)

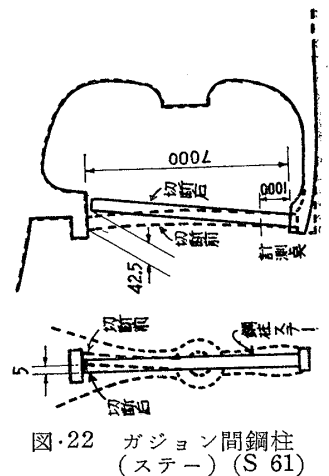
してしまいが、そのあとの傾向はキールの収縮と略々同じように収縮する期間(11/7~11/11)とむしろ逆の傾向を示す期間(11/14~11/21)とが認められる。上下がジョンを連結している鋼柱(ステー)をはずしたのは11月11日であるから、ステーが船底とDKの変形を一体化するのに役立っていたとみられる。すなわち、ステーを取外すとDKは縮むのに船底は伸びてくる。これと似た傾向は5万tタンカーS 61でも認められた。その測定結果について簡単に記す。

S 61のステーの上端切断時(9月7日10時)に図・22に示すようにステーの下端から約1mの所にコンタクト・ストレーンゲージを取付けて歪みを測定したが、上端のみを切断した直後のステーの歪は船首面は -21.9×10^{-5} 、船尾面は $+30.2 \times 10^{-5}$ であつた(平均のび 4.15×10^{-5} 、曲げ歪 $\pm 26.05 \times 10^{-5}$)。また切断直後、ステー上端は上部がジョンに対して船首側へ42.5mm(左舷側へ5mm)ずれた。つまり甲板は縮まうとしており、船底は伸びようとしていた(あるいは、そのようなモーメントが作用していた)と考えられるわけである。因みに、ステー船首面の切断時の引張応力 σ_1 は $\sigma_1 = E\varepsilon = (2.1 \times 10^6)(26.05 \times 10^{-5}) = 550 \text{ kg/cm}^2$ 、モーメント M_1 は $M_1 = \sigma_1 I_x / y_1 = (550)(1.07 \times 10^4) / 12.5 = 4.7 \times 10^5 \text{ kg-cm}$ となる。 M_1 がステーの至るところで一様であるとすれば、撓み δ_1 は $\delta_1 = M_1 l_1^2 / 2EI_1 = 5 \text{ cm}$ で大体42.5mmの実測値と合う。(左右方向についても、平均のび 1.8×10^{-5} 、両面の曲げ歪 $\pm 3.5 \times 10^{-5}$ であつたが、変位の計算は大体実測値と合う。)また、ステーの断面積は 111.6 cm^2 であつて、平均のびを 3×10^{-5} とすると、切断直前にステーに加わっていた圧縮力 P は $P = E\varepsilon A = (2.1 \times 10^6)(3 \times 10^{-5})(111.6) \div 7000 \text{ kg} = 7 \text{ t}$ となる。

以上、船尾船底および軸心の変形について述べたが、軸心変形について解決すべき問題は

- (1) 建造時および就航中の軸心はいかに変化するか。
- (2) 就航時の軸系に対する影響を考慮して、軸心の変形は何mmまで許容されるべきか。

の2つに集約できる。しかも、軸心の変形量に関しては、例えば(1)溶接と歪取りとではどちらの影響が大きいか(変形の要素の比重)、(2)厚板船と薄板船とではどちらが大きいか(船型、船の I の影響)、(3)夏期建造船と冬期建造船とではどちらが大きいか(温度差の影響)、(4)溶接(塔載)順序が変わるといかに変わるか(建造方式の影響)、(5)船台強度および盤木配置が変わるといかに変わるか(基礎反力の影響)、(6)輪切りブロック方式とバラ建造方式とではどちらが大きいか(現場溶接量と拘束度の影響)などの興味ある問題が残されているが、これらは後報にゆずる。



図・22 ガジョン間鋼柱(ステー)(S 61)

5 溶接の収縮力に関する模型実験

溶接が船体変形において重要な役割を占めることは今までにも述べたが、船体の溶接変形を少しでも定量的に論じようとする場合には、溶接変形の原因である収縮力について知らねばならない。また、船体のような複雑でしかも大きな構造の場合には、たとえ単純な strip の突合せ溶接による収縮力は分つていても、船体のなかの1つの継手の溶接によつて船体各部がいかなる変形を行なうかを正確に計算することは容易ではない。しかし模型実験によれば大体の傾向を掴み得る。上記の趣旨に基づいて行なつた実験について、その主要な結果だけを下に述べる。

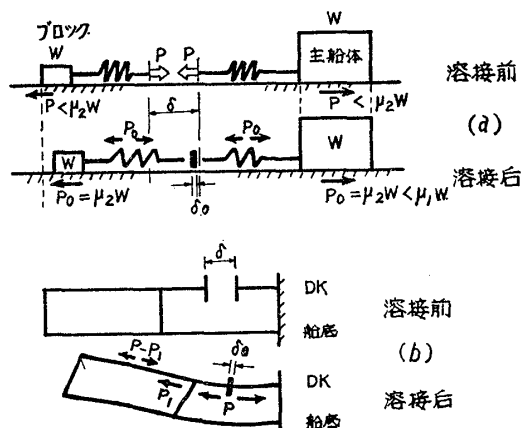
5.1 拘束のあるときの突合せ溶接の収縮力

細長い strip を突合せ溶接したとき、両端が自由であれば、開先から十分離れた点は長手方向には何の力も受けないで収縮する（溶接自体の自己拘束や幅方向の収縮による影響は今考えない）。しかし strip の両端が固定してあれば strip には大きな収縮応力が生じる。もし strip の両端がバネで止めてあれば、自由収縮と完全固定の中間の応力が生じるであろう。

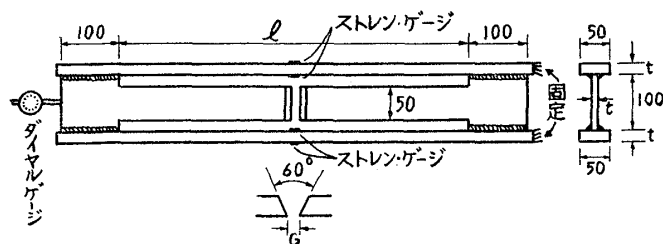
船体の場合には図・23 (a) に示したように輪切りブロックや、塔載されたままの単一ブロックを単に主船体に突合せ溶接するときのようにマサツ力だけが拘束となる場合には、最大静マサツ力にバランスするまでは収縮力 P が増加するが、 P がマサツ力 (P_0) に達するとブロックが移動を始めるので、結局、収縮力は $P_0 = \mu_2 w$ として感じられる。また図・23 (b) のように船底が固まつた状態で DK (または内底板) の突合せ溶接を行なうときは、船底外板や隔壁 (またはフロウ、ガード) や側部外板が拘束となるので、 δ を δ_0 にするための力が収縮力として感じられることになる。

これらの収縮力により発生する応力は reaction stress とバランスしているわけであるが、加工効果を考えなければ降伏応力を越えることはない。しかし降伏応力に見合う収縮力となると、船では断面積が大きいため非常に大きなものとなる。例えば、板厚 10 mm、幅 10 m の継手全体に降伏応力 (仮に 27 kg/mm^2 とする) が生じるとき収縮力は $27 \text{ kg/mm}^2 \times 10^5 \text{ mm}^2 = 2,700 \text{ t}$ となり龐大な抵抗力に打ち克てることになる。

しかし、実船の場合に reaction stress が 1 kg/mm^2 程度にしかならない原因は、第一に、固着部分が移動するために拘束がうんと弱められること、第二に、板の長さ比べて1本の突合せ溶接によつて収縮すべき量に限界があるためと考えられる。突合せ溶接による収縮量は一般には自由収縮のときでも高々 5 mm であるから、仮に 15 m 長さの板を突合せ溶接したときには、たとえ両端が完全固定であつても応力は $\sigma = E\epsilon = 2.1 \times 10^4 \times 5/3 \times 10^4 = 3.5 \text{ kg/mm}^2$ にしかならない。もし両端の固定点それぞれ 1 mm づつ継手の方へ移動すれば応力は直ちに 2.1 kg/mm^2 に落ちることになる。つまり、溶接の収縮力は龐大な力となり得るにもかかわらず、船体溶接ではその収縮力の限界まで発揮される機会は減多にないと言えよう。



図・23 溶接に於ける拘束の模型図



図・24 H型試験体

実験・1 H型拘束材

この実験は、拘束材の形状が同じで板厚が異なる場合の収縮量、ならびに板厚が同じで拘束度 (拘束距離) が異なる場合の収縮量を調べるために行なつた。試験材の形状、寸法を図・24 および表・2 に示す。開先は 60°V とし、溶接棒は D 4310, $4 \text{ mm}\phi$ (電流は $100 \sim 180 \text{ Amp}$) である。実験は試験材の一端を固定し、他端にダイヤルゲージを取付けて収縮量 δ を測定した。また、フランジの中央上下両面に SR-4 ストレ

表・2 H型試験体

No	t mm	ℓ mm	G mm	σ mm	フランジの 圧縮応力 kg/mm ²
1	7.08	106.9	2.4	0.395	15.0
2	9.34	112.2	3.2	—	(9.6)
3	13.20	114.2	2.8	0.226	9.0
4	16.20	108.4	4.3	0.228	8.2
5	6.88	349.7	3.5	0.395	7.2
6	9.30	350.0	4.3	0.368	16.6
7	13.20	353.0	4.2	0.419	15.9
8	16.60	349.7	5.3	0.435	16.4
9	7.30	798.5	3.0	1.460	(6.2)
10	9.48	797.7	4.0	1.100	(11.8)
11	13.40	815.0	3.3	(0.78)	8.7
12	16.50	800.0	5.0	(0.72)	9.5

() はバラツキの多いもの
() はノギスによる計測値

ーンゲージを取付けて圧縮歪を測つた。(表・2には $E=2.1 \times 10^4$ kg/mm²としたときの、応力に換算した値を示す)。

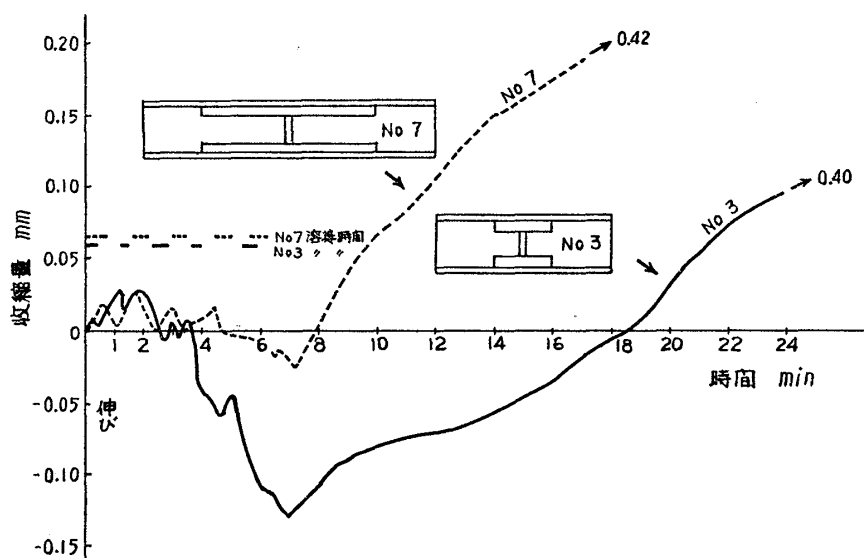
この実験では、溶接後水冷したので自然空冷の場合とは事情が異なる。冷却中の収縮状態は試験材No. 3とNo. 7の例を図・25に示すが、多層溶接のため、溶接中に材の膨張が認められる。

実験・2 門型拘束材

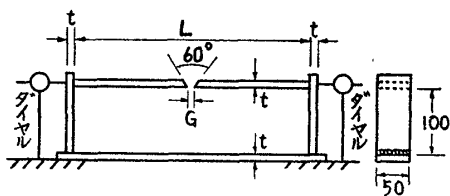
この実験は T. BHD などがあるときの DK の溶接による船底の曲り量をみるために行なつたものであるが、BHD 相当材(100×50)の抵抗が極めて小さかつたので、溶接材(長さL)はほとんど自由収縮に近い収縮をしたと考えられる。試験要領および冷却後の収縮量は図・26 および表・3 に示す。

実験・1, 2 に対する考察

上記の実験・1 および 2 の結果を板厚をベースにしてまとめたのが図・27 で、あるH型試験材については計算値を点線で記入してある。計算式は仲教授の式⁵⁾を用いた。図・27 で、門型



図・25 収縮量の増加 (H型拘束材)



図・26 門型試験体

材の場合に明確に示されているように拘束の小さいときは板厚が厚いほど収縮量は大きい。これは前記の式からも明らかである。実船の場合は薄板船の方が厚板船よりも船の長さに対する収縮量が大きい(第1報 2・1)のであるが、これは薄板船は1バット当りの収縮量は厚板船よりも小さいがバット数が多いことによるのではないと思われる。

つぎに、拘束の大きいH型材については、板厚と収縮量との関係は一見すれば門型材と逆のように見える。

表・3 門型試験体

No	t mm	L mm	G mm	溶接時間 sec	戸数	収縮量 mm
1	7.18	102.4	3.4	61	3	0.834
2	9.20	106.2	2.2	76	4	1.143
3	13.30	114.7	1.2	115	6	1.220
4	16.20	111.0	4.1	144	7	1.644
5	6.89	347.0	4.3	62	4	—
6	9.50	350.0	3.3	67	4	0.240
7	13.50	354.0	2.5	79	5	0.928
8	16.50	349.0	2.0	121	6	1.453
9	6.90	788.0	1.8	40	3	0.807
10	9.20	796.0	1.3	55	3	1.042
11	13.70	805.0	2.5	102	6	1.137
12	16.20	805.0	2.5	97	6	1.451

しかしこれは降伏と座屈という現象が入ってくるためであつて、座屈も降伏も起きない $l=350$ mm 材についてみれば、門型材ほど顕著ではないが、やはり板厚が厚くなると収縮量は増加している。 $l=110$ mm のときは溶接材が降伏するので、収縮量に対する板厚の影響はほとんどない（実験では No.1 材の拘束材が座屈して収縮量が増加している）。また、 $l=800$ mm のときは薄板 No. 9 および 10 は理論的にも（実際にも）拘束材が座屈するので却つて薄板の方が収縮量が多い。

一方、収縮応力は H 型材の $l=350$ mm の場合で 16 kg/mm^2 程度に達していることがわかる。なお完全拘束のときの応力および歪分布については吉田氏らの詳報⁶⁾がある。

5.2 模型実験（溶接による収縮とわん曲）

以下に述べる模型実験は側部外板、二重底、甲板などの溶接によつて船体各部がいかなる変形を行なうかをみたものである。実験は大別して 2 つの部分からなる。第一は単位ブロックについての

調査（実験 3～7）であり、第二は立体的組立についての調査（実験 8, 9）である。試験材の板厚は全て 6.5 mm とし、収縮はダイヤル・ゲージで測定した。溶接棒は 4 mmφ 電流は 140 Amp. で全て 1 層溶接とした。また、各継手の溶接は熱の伝導範囲を実船における proportion に少しでも近づけるために溶接終了直後に水冷した。開先は 60°V 、開先底間隙は 0～3 mm である。

主要な結果だけを以下に記す。

実験・3 側部外板のバット溶接（1 枚板）

図・28 の如き矩形板にスリットを切つて、先ず W_1 を溶接、冷却して W_1 による $\overline{AD}$, $\overline{MN}$, $\overline{BC}$ 収縮量を測定し、次に W_2 を溶接、冷却してから W_2 による収縮量（つまり、 W_1 による収縮完了の状態を基準としたものであつて、 W_1 を行なう前の状態を基準としたものではない。以下の実験結果も同じ要領）

を測定した結果を図・28 に示す。図・28 から分るように、回転変形のために $\overline{AD}$ で収縮量は最大となるが $\overline{BC}$ は却つて伸びている。

実験・4 二重底の溶接

これは図・29 のように先ず二重底々部外板のバット溶接 (W_1+W_2) をすませ、次にセンタ・ガーダのバット溶接 W_3 を行ない、最後にビルジ外板のバット溶接 (W_4+W_5) を行なつたときの各辺の収縮に関する各溶接の影響をみたものである。これをみると、センタ・ガーダがつながつてからのビルジ外板バットの溶接によつてセンタガーダは却つて伸びを生じている。

実験・5 二重底頂板のバット溶接

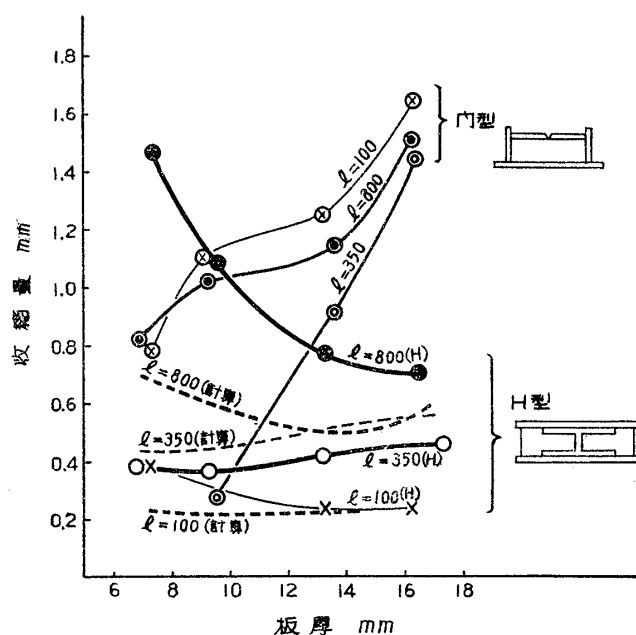
これは図・30 のように二重底の頂板の突合せ溶接 (W_1+W_2) による収縮量をみたもので、ボトム ($\overline{MN}$) とタンク・トップ ($\overline{M'N'}$) とは収縮状態が異なり、タンク・トップは却つて伸びている点が注目される。

実験・6 ビルジ・シームの溶接

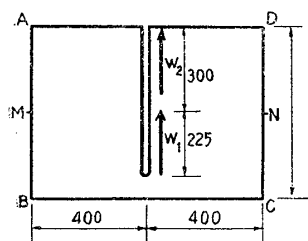
これは図・31 のように、ビルジ外板と側部外板とのシーム溶接による各部の収縮をみたものであるが ボトムでも側部外板でも伸びを生じていることに注目したい。

実験・7 側部外板のバット溶接

これは図・32 に示すように側部外板のバット溶接による収縮を調べたもので、実験・4 と同じ要領であるが、



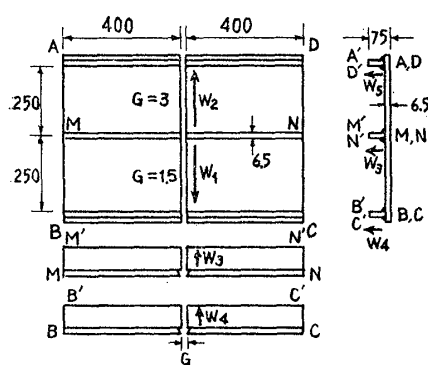
図・27 拘束のあるときの突合せ溶接による板厚と収縮量との関係



図・28 外板バット（1 枚板）

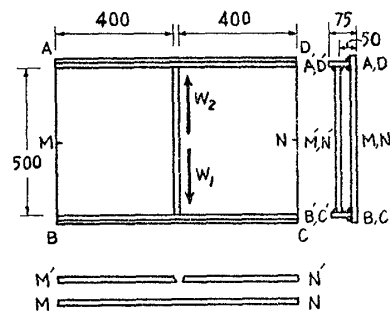
収縮量	W_1 により	W_2 により
$\overline{AD}$ に関し	1.09	0.51
$\overline{MN}$ "	0.26	0.18
$\overline{BC}$ "	-0.11	-0.17

(-)は伸び



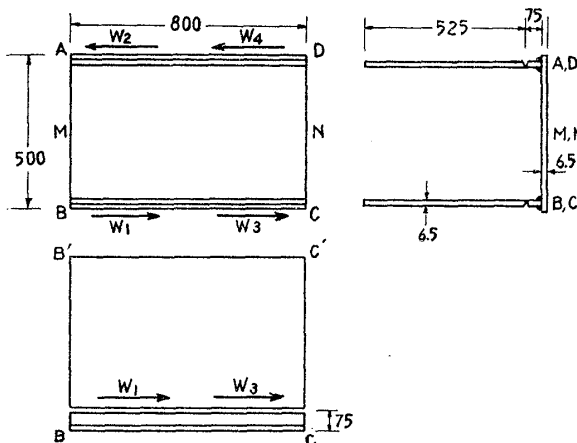
変形mm	溶接	W_1+W_2	W_3	W_4+W_5
A'D' に関し		0.86	1.00	0.95
MN 〃		0.88	1.09	-0.10 (伸び)
B'C' 〃		1.10	0.85	0.68

図・29 二重底の突合せ（模型）



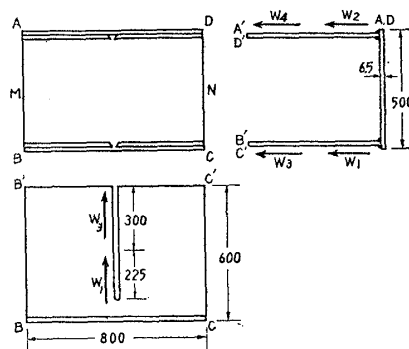
収縮mm	溶接	W_1+W_2 により
AD に関し		0.18
MN 〃		0.35
M'N' 〃		-0.64 (伸び)
BC 〃		0.13

図・30 二重底頂板突合せ（模型）



収縮mm	溶接	$W_1 \sim W_4$ により
AD に関し		-0.35 (伸び)
MN 〃		-1.32 (〃)
A'D' 〃		-0.27 (〃)
BC 〃		-0.15 (〃)

図・31 ビルジ・シームの溶接（模型）



収縮	溶接	W_1+W_2 により	W_3+W_4 により
AD に関し		0.07	0.02
MN 〃		0.12	0.20
BC 〃		0.07	0.06
A'D' 〃		0.45	0.62
B'C' 〃		0.77	0.65

図・32 側部外板のバット（模型）

底部外板が存在する点異なる。従つて、結果も実験・4 と似ているが、底部外板の抵抗があるので、ボトム BC は伸びず、僅かながら収縮している。

実験・8 船の模型（溶接）

これは実船と同じように二重底→外板→中甲板→上甲板→上部構造の順に組み上げてゆく場合の、溶接による収縮をみたものである。すなわち、実験 4～7 と同じ寸法の板で箱型船を作りながら、各過程における溶接の影響をみた。また、二重底頂板の端末における吊上り量をも併せ測定した。なお、底部外板のバットはあらかじめ溶接してをき、各 DK の外板取合いのスミ肉溶接は上面からの片面スミ肉とした。BOILER FLAT の取付け（および仮止め）は W_6 と W_7 との間に行ない、UPP. DK の取付けは B. FLAT のバット溶接 W_{17} の終了直後に行なつた。

模型の寸法、溶接順序は図・33 に、収縮量と吊上り量の測定値は表・4 に示す（DK プレートの取付け後に吊上り量が減少したが、表・4 にはそれは記入してない）。

この模型実験の結果から色々のことが、分るが特筆すべきことは、

(1) 船底の収縮および吊上りには、シーム溶接よりもバット溶接の方が遙かに強い影響を及ぼす。

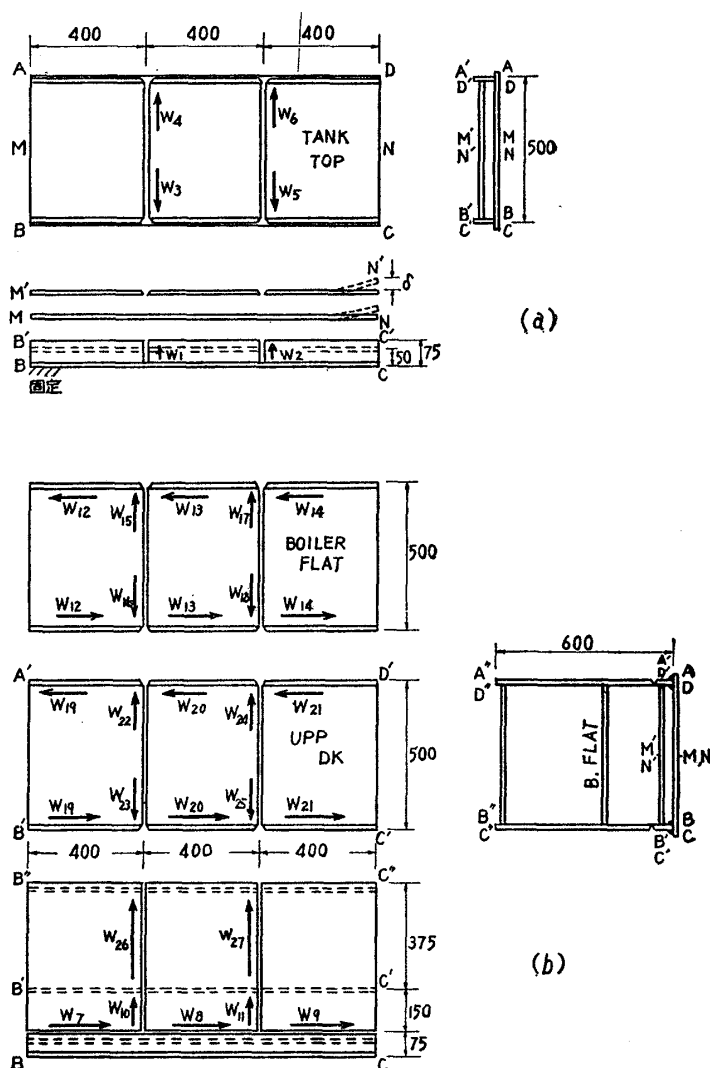
(2) 船底の収縮および吊上りに対するバット溶接の影響は、船底に近いバットほど大きい。すなわち、二重底頂板、側部外板(下半分)、BOILER FLAT、上甲板、側部外板(上半分)の各バット溶接は、大略、30(二重底):10(外板, 上):2(B. FLAT):1(上甲板):2(外板, 上)

の割合で、船底の収縮ならびに吊上りに影響する。(実船実測でも、船底の収縮ならびに船尾の上下方向のわん曲は船底に近い溶接で激しく起こることは第3報3.2および本報4でも述べたが、この実験結果はそれを裏書きしている。)

(3) ビルジ・シームの突合せ溶接は船底の収縮にはほとんど効かないで却つて伸ばすような役目をする傾向がある。またDKと側部外板とのスミ肉溶接は船底の収縮および吊上りにはほとんど影響しないが、どちらかと云えば、船底の収縮にはBOILER FLATのスミ肉溶接の方が(上甲板のスミ肉溶接の方が(B. FLATのスミ肉よりも)より効果的のようである。

実験・9 模型実験(歪取り)

この実験は歪取りによる変形をみるために行なつたもので、図・34に示すように、



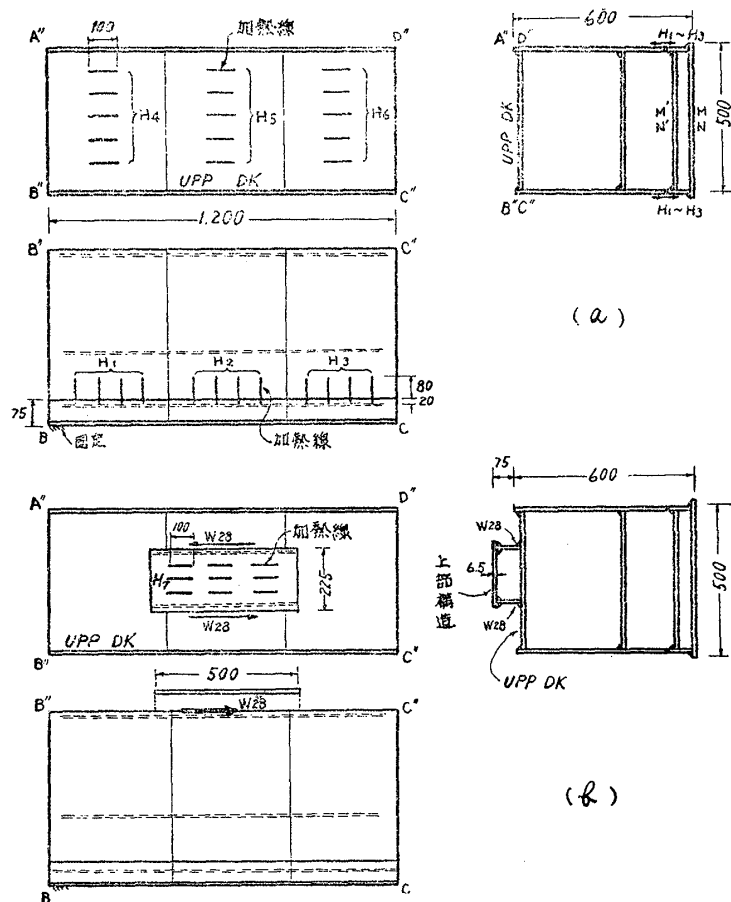
図・33 船体溶接(模型)

表・4 船体溶接(模型)による収縮(mm)

構造 測点	二重底				ビルジシーム			外板バット (下半分)		BOILER FLAT				UPPER DK				外板バット (上半分)			
	ビルジ外板		タンクトップ							スミ肉		突合せ		スミ肉		突合せ					
	W ₁ Kより	W ₂	W ₃ W ₄	W ₅ W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅ W ₁₆	W ₁₇ W ₁₈	W ₁₉	W ₂₀	W ₂₁	W ₂₂ W ₂₃	W ₂₄ W ₂₅	W ₂₆	W ₂₇
A Dの収縮	0.09	0.46	0.45	0.68	0.07	0.03	-0.01 (0.02)	-0.01 (0.02)	0.13	0.03	0.01	0.04	-0.01 (0.02)	0.04	0	0	0	0	-0.04 (0.02)	0.03	
M N	0.40	0.51	0.85	0.60	0.05	-0.06 (0.02)	-0.06 (0.02)	0.18	0.22	0.02	0.05	0.01	0.04	0.05	-0.01 (0.02)	0	-0.01 (0.02)	-0.04 (0.02)	-0.01 (0.02)	0.07	0.01
B C	0 ?	0.62	0.31	0.41	0.03	0.01	-0.12 (0.02)	0.06	0.13	0	0.03	0	0	0.01	0	-0.01 (0.02)	0	0	0	-0.01 (0.02)	0.01
B' C'	—	—	—	—	0.22	-0.09 (0.02)	-0.06 (0.02)	0.48	1.52 ₉	0.36	0.32	-0.04 (0.02)	0.77	0.37	-2.02 (0.02)	0.30	0.13	0.28	0.06	0.81	0.56 (0.02)
N' 奥の上り(δ)	0	0.53	3.10	2.46	0.12	-0.09 (0.02)	-0.02 (0.02)	0.02	0.84	0.05	0.02	0.03	0.12	0.18	-0.12 (0.02)	0.05	0.05	0.09	0.02	0.04	0.15
溶接時間	1'50"	1'55"	1'50"	2'05"	4'30"	4'50"	4'	3'50"	3'55"	2'25"	2'50"	3'05"	2'50"	2'50"	3'20"	3'40"	3'	2'	2'15"	3'50"	3'45"

実験・8 でこしらえた箱型船をそのまま用いて、そのビルジ部 H₁~H₃、および上甲板、H₄~H₆、を夫々2分間(例えば H₁ については左舷右舷の合計で2分間)ずつガス・バーナで加熱(水冷を併用)して、実験・8 と同じようにボトムの収縮とタンク・トップ端の吊上りを測定した。加熱に用いたバーナは火口直径 1.6mm のトーチである。つぎに、上甲板上に上部構造をスミ肉溶接(W₂₈)し、上部構造の甲板を4分間線焼き(水冷併用)したものである。測定結果を表・5に示す。

この実験の結果をみると、船底の収縮には上甲板の線焼きよりもビルジ部の線焼きの方が若干よく効いている。また、自由端に近い個所の線焼きは各部に収縮よりもむしろ伸びを生じさせるような傾向がある。さらに、上部



図・34 船体の歪とり(模型)

表・5 船体ひずみ取り(模型)による収縮 (mm)

構造 歪とり 計測内容	ヒルジ外板			UPPER DK			上部構造	
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	W 28 (溶接)	H ₇
A Dの収縮	0.04	0.01	-0.04 (0.05)	0.02	-0.01 (0.02)	-0.16 (0.05)	0	0
MN	0.04	0.02	0	0.01	0.01	0.01	0	-0.02 (0.02)
B C	0.04	0.02	-0.02 (0.05)	0.01	-0.02 (0.05)	-0.04 (0.05)	-0.01 (0.02)	0
B'C'	0.32	-0.02 (0.05)	-0.12 (0.05)	0.07	0.18 (0.05)	-0.28 (0.05)	0.06	-0.05 (0.05)
N'長のり(δ)	0.01	-0.22 (0.05)	-0.07 (0.05)	0.03	0.06 (0.05)	-0.02 (0.05)	0	0
加熱時間	2'	2'	2'	2'	2'	2'	3'20"	4'

最後に、船体変形の要因である溶接および歪取りによる収縮、曲げ変形に関する模型実験の結果について述べ建造中の船体各部の溶接による船底への影響の強弱について、実船計測値の傾向を検証するとともに影響力の割合について説明した。

参 考 文 献

- 1) L. Crawford, Theory of Long Ship's Superstructures, S. N. A. M. E. (1950) p. 693~732
- 2) 寺沢一雄他「上部構造の効きに関する研究 (第1~4報)」造船協会論文集第100~103号
- 3) 八木順吉「上部構造の効きに関する研究」造船協会論文集第105号
- 4) 山越道郎「船体上部構造の応力分布について」造船協会論文集第103号 p. 155~164
- 5) 仲威雄「溶接の収縮と亀裂」小峰工業出版 S. 27, p. 109~123
- 6) 吉田兎四郎他「船体構造における突合せ溶接継手の拘束と残留応力に関する研究 (第1報)」造船協会論文集第106号 (p. 223~236)
- 7) 筆者「船舶建造時における船体変形の研究 (第1~3報)」造船協会論文集第114~116号

構造の歪とりは上甲板には影響を与えるが、船底にはほとんど影響がないことがわかる。

表・4と表・5を比較すると、溶接の影響に比べて歪取りの影響は(加熱時間が上記実験のような場合には)それほど大きくないことがわかる。しかし、実船の場合でも常にこのことが云えるかどうかは、歪取りの加熱時間、加熱方法まで検討してみないと簡単には結論は出せない。因みに、実験・8, 9で行なつた溶接および線焼き(歪取り)の単位時間当りの入熱量は、溶接の方が歪取りの2倍強であつた。これは下記のような小テストの結果による。すなわち、200ccの水を入れたフラスコを用意し、約90gの鋼片に実験・8と同じ条件で溶接ビード(重量5g)を15sec流した直後フラスコに投入したときの水の温度上昇は35°Cであつた。一方、この鋼片を実験・9と同じガス・バーナで15sec加熱したものをフラスコに投入したときの水の温度上昇は16°Cであつた。

6 む す び

本報では、先ず水張りによる船台張り出し部の船底変形および工事進歩に伴う上部構造の変形について述べた。次に、軸心変形に関連して船尾船底の変形に関する実船実測の結果を示した。そして船尾船底の上下方向のわん曲については、中立軸より下の溶接が終了してから進水までの偏心量の増加はsine形としてまとめられること、左右舷方向のわん曲は季節(温度差)の影響を強く受けることを述べ、さらに船首尾方向の収縮については、船底と内底板とは収縮の傾向が似ているが、船底と上甲板とでは収縮の傾向は必ずしも一致しないことを示した。