(昭和十二年三月三十一日造船協會創立四十年記念講演會に於て講演)

船内浸水經過中に起る最大横傾斜に就て

正員 工學博士 渡 邊 恵 弘

准員 工學士 小 田 原 勉

Abstract.

On the Maximum Transverse Inclination of
a Ship during the Stage of Flooding.

By Y. Watanabe, *Kogakuhakushi*, Member.
and T. Odahara, *Kogakushi*.

The motion of a ship during the flooding stage is obtained by the numerical integration of the equation of her transverse motion, with the assumption that the level of the flooding water is always horizontal, its quantity increasing with time. The typical passenger ship of 20,000 tons with the met. ht. of 0.44 m. is adopted and the length of the flooded compartment is taken to be one fifth amidship of the ship's length, and the area of the damage hole is chosen at the side, its value being changed variousely. Main results obtained are as follows:

- (1) Max. heel changes with the initial conditions, that conditions being that the ship is initially at rest and inclined at θ_0 . The value occurs at nearly $\theta_0 = 1^\circ \sim 5^\circ$.
- (2) Max. heel changes with the area of the damage hole. The greatest value occurs at nearly 10 m^2 , and if the area is greater than 40 m^2 , the max. heel is very small.
- (3) The greatest heel obtained is nearly twice of the value which can be calculated by the statical consideration, i.e. by assuming the water quantity being constant, if the resistance to the motion is neglected, and is 1.4 times, if the resistance is taken into account.
- (4) For the larger met. ht., if the damage hole is very small, say less than 5 m^2 , the oscillatory motion of increasing amplitude gives rise to, in the early stage of flooding, resulting to the very great heel. But in such a case, the flooding water may act so as to damp that motion, the assumed condition of horizontal level not being fulfilled, but the actual procedure should be studied experimentally. If such cases be put aside, the max. heel for the larger met. ht. is generally less than that for smaller met. ht.
- (5) From the above investigations, it is concluded that the max. heel statically obtained, as is generally adopted, does not indicate the real one, and that such a problem should be treated dynamically.

1. 緒 言

船内區劃が問題になつた當時、浸水した水による船の横方向の復原性の變化が亦 Flamm, Hovgaard 等に依つて注意され、其後も多くの人に依つて論議され、近頃に於ても Niedermair (T.S.N.A.

M.E. 1932) が取扱つて居る。歐洲大戰當時魚雷襲撃に依つて沈没した多くの商船の例によると、縦方向の隔壁の無い船で、浸水の爲めの横方向の復原性の缺陷から顛覆したと考へられるものは絶無であつたと云はれて居つて、此意味から考へると、此際の横方向の復原性は問題にならない様であるが、一方に於ては、嘗ての油槽船の如きに於て載貨中、復原力不足の爲め顛覆した例もあり、又荒天に於て甲板に打上げた海水の爲め横方向に不安定を來して一時的の急傾斜を爲し、之が遭難の原因になり得る事を指摘して居る人もあり、或は更に横方向の復原性の不足は必ずしも横方向の顛覆 (capsize) を來すとは限らず、此爲めに過度の横傾斜をなして、水密充分ならざる部分より船内他の區劃に浸水をなし、結局は縦方向に沈没する事もあり得る事等を思へば、此問題は不問に附し去るべき性質のものでない様に思ふ。

從來の此問題の取扱ひ方は皆靜力學的であつた。即ち浸水經過中の GM の變化の状態を求め、又復原性曲線の性質が如何に變つて行くかを調べた。その結果は、浸水量が少い間は GM の減少が多くは負となり、従つて復原性曲線は直立状態で不安定である事を示す形となり、或る傾斜で初めて安定に浮び得る事を示して居る。此安定な浮揚傾斜角(之を靜傾斜角と名づける)を求めて、此角度が船の傾き得る角度として、浸水時に於ける横方向の安全性が論ぜられて居た。此角度は多くは 20° 以内で、普通の載貨状態では決して船の安全性を脅かすに足る程のものではないのである。

然し此靜傾斜は船の傾き得る角度を直接示すものでない事は明で、船内の水面の高さは時々刻々に變化し、船は斯の如き傾斜角を取る暇は無く、或る浸水量の時の船の傾斜は、その時迄の船の運動の時間的經過の有様で決まる事は自明の理で、前述の靜傾斜角は單に浸水經過中に於ける復原性の性質の一部を與へるに止まり、船の傾き得る傾斜角には何等直接的關係は無い。

故に此問題を取扱ふのには時間を考へる必要があり、即ち横方向の運動を力學的に調べなければいけない。此論文では此様な見地から力學的に船の運動を考察してどの位迄船は傾くものであるかを調べたのであるが、唯此場合の運動式は非常に複雑で數學的には到底簡単な形に解けない。それで或る代表的な客船の例を取つて運動式を數值的に積分して運動状態を求め、此船の傾き得る角度を出して前述の靜傾斜角と比較し、又浸水の状態(浸水孔の大きさ、位置、その他)が種々變つた場合、船の傾斜がどんな具合に變るか等を調べたものである。唯此計算では簡單にする爲めに一般の場合に對しては運動に對する抵抗を無視した。之れは結果の傾斜角を過大にする。又他方で船の慣性力率は浸水と共に増加するのであるが之を常數と假定した。浸水前後に於ける慣性力率の變化は此計算例の場合は大體 40% 前後である。慣性力率の大は傾斜角を小さくする傾向を有し、従つて浸水後の慣性力率を計算に取れば underestimate する事になり、此二つの近似は互に打消し合ふ性質のものである。實際の計算には慣性力率の代りに船の週期を假定した。此週期は浸水前後では約 20% の差(浸水後は大)があり、此平均を取るとすれば浸水前の週期より 10% 位大に取ればよい。而して最後に最も大きい傾斜角を與へる如き場合に對し抵抗を入れて計算し、之を抵抗のない場合と比較した。更にもう一つの假

定は浸水せる水の表面は常に水平であるとした。是は船の運動が徐々である時は成立するが、角速度が急激であれば水の運動は船に比して遅れ、更に船が振動状態になれば船内の水は矢張り振動して船の運動を damp する様になり、何れも上の如き假定より出した傾斜角を減少せしむる傾向を持つ。故に此水面が水平である假定が成立し難い如き船の運動状態の場合の計算の結果は除外した。

2. 静力學的考察と動力學的考察

船が浸水を受けずに傾けば、 $W \cdot GZ$ の復原偶力が働き、是は $\theta < 30^\circ$ 位の範圍では近似的に

$$GZ = m \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{r}{m} \tan^2 \theta \right] \sin \theta.$$

m : メタセンターの高

r : メタセンター半径

で表されるが、若し船の内部に ΔW の重量の水が入れば吃水線は WL から $W'L'$ に移り、従つて WL と $W'L'$ 間の浮力と水の重量間に $\Delta W \cdot H$ の偶力が働き、従つて船全體には

$$W \cdot GZ - \Delta W \cdot H \dots \dots \dots (1)$$

の復原力が働く。 H の値は附録 (7) に示す如き値である。直立状態では此偶力は zero であるが、此時のメタセンターの高さは

$$\frac{d}{d\theta} \left[GZ - \frac{\Delta W}{W} \cdot H \right]_{\theta=0}$$

から決まり、之を m_x とすれば

$$m_x = m - \frac{\rho B x}{V_0} \left[h' + \frac{x}{2} + \frac{B^2}{12x} - \left(d + \frac{\mu l B x}{2A_w} \right) \right] \dots \dots \dots (2)$$

μ : 滲水率、

l : 浸水區劃の長さ、

B : 浸水區劃の幅で、船の幅に等しとす、

x : 浸水量の平均深さ、

d : 浸水前の吃水、

V_0 : 浸水前の船の排水容積、

A_w : 吃水面積、

h' : 二重底の高さ、

となり、第 2 項が浸水によるメタセンターの高さの變化である。 m_x は普通は x の小なる間は負の事が多く、従つて船は直立状態で浮ぶ事が出来ず、傾斜して平衡状態に達し、此平衡傾斜角は (1) を zero と置いて求められる。

實際の浸水に於ては x は時間と共に變り、従つて (1) 式は時間の函數である。 x が t と共に如何に變るか浸水孔の大きさ、位置、 x 、 θ 等に依つて變り、 $\frac{dx}{dt}$ の値は附録 (2) 及 (4) に示す。之れは

一般に

$$\frac{dx}{dt} = \mathfrak{N}(\theta, x, t) \dots \dots \dots (3)$$

と書かれる。

此様に船に働く偶力が時間の函数であれば、問題は静力學的には考へられなくなり、所謂動力學的に運動式より出發して考察しなければならぬ。即ち抵抗を無視すれば

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Delta W \cdot H - W \cdot GZ \equiv \mathfrak{M}(\theta, x, t) \dots \dots \dots (4)$$

即ち (2) と (3) から $t=0$ の initial conditions を使つて積分をなし、 θ と x を t の函数として求める事になる。

3. 計算に用ひたる船と静力學的計算結果

以上の積分を數值的に行ふ爲めに、次の様な客船を採用した。

$$V_0 = 20,000 \text{ m}^3, L = 175 \text{ m},$$

$$B = 22 \text{ m}, \quad d = 8 \text{ m},$$

$$h' = 1.5 \text{ m}, \quad A_w = 2,310 \text{ m}^2,$$

$$r = 4.8 \text{ m}, \quad m = 0.44 \text{ m},$$

$$T_s = 20 \text{ 秒}.$$

船の中央部が浸水する時が最も危険なる故、此部分を取り、その長さは可浸長計算から出し得る最も確からしい値として船の長さの $1/5$ を取り、

$$l = 35 \text{ m}.$$

此部は機關室に當る故

$$\mu = 0.8.$$

此時のメタセンターの高さと x の關係は Fig. 1 の (a) 曲線である。尚ほ $T_s = 15$ 秒になる様に m の値の大きい場合に就いても種々の計算を行つたので、その時の $m_x - x$ 曲線を Fig. 1 (b) 曲線に示す。

此船に於て船の内外の水面が等

しくなるのは $x=8.6\text{m}$ で、圖より見る様に、 x が小さい間は m_x は負で、 x の増加と共に増し、内外水面等しくなる處で m_x は最大となるが、浸水前に比べれば可なり減少して居る。

次に静傾斜角を上例に依つて計算したのが Fig. 2 である。之れより見る様に、静傾斜角は m の小さい程大きい事は勿論であるが、その最大値の起る x の値は、浸水の途中で m の大きい程之れに相當する x は小さい。

各の場合の最大静傾斜角は大體次の様である。

(a) 20° ,

(b) 12.5° .

4. 浸水孔のある側と傾斜側との關係

(3) と (4) より θ と x を求むる方法は附録に示した。此際に $t=0$ に於ける初期條件が必要である。E. Kieback⁽¹⁾ に依れば、浸水の當初は damage を與へる原因の爲に、船は浸水孔のある船側と反對側の方に傾き、次に浸入せる水が一時的に浸水孔側に溜る爲め此水の重量による偶力の爲に浸水孔側に傾き、此傾斜側を保つて浸水が終るとの事である。故に初期條件としては此浸水の重量に依つて起された浸水孔側の傾斜を取るべきであるが、此値に就いては適確に知る事は出来ない。それで實

⁽¹⁾ Stabilitätsprobleme im Leckfalle. "Schiffbau" 17. Nov. 1926.

際の計算では $t=0$ で $\dot{\theta}=0$, $x=0$ で θ_0 の値は必要に応じて 1° , 5° , 10° と種々の値を取つた。且つ上の Kieback の言によれば、浸水孔側の傾斜に就いて考ふべきであるが、此傾斜の $\dot{\theta}$ の差が傾斜角に對し如何なる影響を與ふかを見る爲めに、二つの傾斜方向を取つて見た。此傾斜方向が計算に

現れるのは、孔に於ける水頭が異なる爲め、浸水速度が變る點である。尙ほ計算を簡単にする爲め、浸水速度に對する傾斜の影響を無視せる即ち孔に於ける水頭は船が直立して居ると假定した時の孔の水面よりの深さに相當するものと考へて計算したものを比較して見た。是等の計算は浸水孔の面積 $A=30\text{ m}^2$ 、浸水孔中心の原吃水線よりの深さ $h=4\text{ m}$ 、 $\theta_0=1^\circ$ 及 5° に就いて行つた。その結果を船の傾斜 θ と t 、及び θ と x の曲線に書いたのが Fig. 3a 及 Fig. 3b である。

此圖から見る様に、孔と反對側に傾斜せる場合の方が傾斜角が大きく、傾斜を考へぬ場合は、傾斜を考へた二つの反對の場合の中間に来る。而して傾斜を考へぬ場合の傾斜角は普通起ると考へられる浸水孔側の傾斜に比べると、約 $2^\circ\sim3^\circ$ 位の overestimation となり大なる差違とはならぬ故、以下の計算に於ては、浸水速度の計算には傾斜角を考慮せぬ事にした。

5. 初期傾斜角の最大傾斜角に對する影響

Figs. 3a, b に $\theta_0=10^\circ$ で傾斜方向の影響を考へぬ時の θ の曲線を入れて置いた。從つて是等の曲線より各 θ_0 の値の時に起り得る最大傾斜角を θ_0 の base として曲線に書く事が出来、之が Fig. 4 である。是よりわかる様に θ_0 の値

は實際には決定し難いものであるが、最大傾斜角は θ_0 の値に依つて無制限に大きくなるものでなく、或る値の時に最大となる。此 θ_0 の値は浸水孔の大きさ等で變るものであるが、上の如き $A=30\text{ m}^2$ の例では大體 $\theta_0=5^\circ$ で最大傾斜角を與へるが、後に出て来る様に、 $A=5\text{ m}^2$ 位の處では更に小さい θ_0 で大きい傾斜角を與へる。是より見る時は、此處に取扱つて船に關する限りに於ては先づ

$\theta_0 < 5^\circ$ 位の時が最も重大な初期傾斜角ではないかと思はれる。

6. 浸水孔の大きさと其の深さとの關係

浸水孔の大きさと其の水面下の深さとの關係は浸水速度に於てのみ關係する。今 4 に述べた理由で浸水速度に對する傾斜角の影響を無視する。浸水速度を與へる式は浸水量に依つて異なるが、最大傾斜角に影響を持つのは主として x の小さい初期の状態で、此時の浸水速度は附録 (2) で $\theta=0$ とおき

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A}{\mu l B} \sqrt{2g \left[h + \frac{\mu l B}{A_w} x \right]}$$

此式の右邊の $h + \mu l B x / A_w$ は浸水孔の水面からの深さで之を浸水前即ち $x=0$ の時と浸水完了後即ち $x = \frac{A_w(d-h')}{A_w - \mu l B}$ との間の平均値を取れば、浸水速度の平均値は

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{\text{mean}} = \frac{A}{\mu l B} \sqrt{2g \left[h + \frac{A_w(d-h')}{2(A_w - \mu l B)} \right]}^{(1)}$$

然る時は

$$A \sqrt{h + \frac{d-h'}{2(1-\alpha)}} \quad \text{但し } \alpha = \frac{\mu l B}{A_w}$$

が常數であれば浸水速度は變らず、従つて A と h が變つても上の關係が満足して居れば、最大傾斜角は近似的に變らぬ筈である。故に今上の條件を満足する様

$$(1) \quad A = 30 \text{ m}^2 \quad h = 4 \text{ m} \quad (2) \quad A = 38.28 \text{ m}^2 \quad h = 2 \text{ m}$$

の二つの場合に就いて $\theta_0 = 1^\circ$ の時の θ を計算した。此結果は Fig. 5 に示す如く、船の傾斜状態は殆んど等しくなる。故に浸水経過を考へる際孔の大きさと其の深さの取り方は非常に澤山の選び方があるが、船の傾斜を考へる上からは其の中の一つだけを考へればよい事がわかる。故に、此處の計算で

(1) 實際は x が大となれば dx/dt の式は別箇のものとなる故、嚴密に云へば此式は正しくないが、此處では唯近似的に考へる事にする。

は $h = \text{const.}$ として A の値を種々變へる事にした⁽¹⁾。

7. 浸水孔の大きさの影響

浸水孔の大きさは浸水速度に最も関係が大きく、従つて最大傾斜角に非常に影響する。前例の船に於て $\theta_0 = 1^\circ$ 及 5° に就き A の値を種々變つた場合の $\theta - x$ 及 $\theta - t$ の關係が Fig. 6a 及 Fig. 6b で、之より各 A に對する最大傾斜角を A を base として曲線に書けば Fig. 7 の如くなる。

是より見る様に、最大傾斜角に相當する x の値は A が小さい程小さいが、之れに相當する t は或る A の値の時を最大として、之れより A が大きくなつても小さくなつても漸次減少する。而して此最大傾斜する迄に要する時間の最も大きい A の値は此例に於ては $10 \sim 20 \text{ m}^2$ で、之に要する時間は船の週期の $3/4$ 位である。

又最大傾斜角は $A \rightarrow 0$ の場合は最大靜傾斜角になるべきで、之より A が増すに従つて最大傾斜角は増加し、或る A の値で max. となり、之より A が増加すると共に非常に減少して来る。而して此 max. の最大傾斜角を與へる A は大體 $10 \sim 15 \text{ m}^2$ 位の處にあり、之は θ_0 の値で變り θ_0 の値が増す程 max. の最大傾斜を與へる A の値が大きくなるが、前述の如く θ_0 が或る値の時最も大きくなる故、 θ_0 の種々の値を考慮して最も大なる傾斜角の値は先づ $A \sim 10 \text{ m}^2$ 前後に當り且つ $\theta_0 \sim 1^\circ$ 附近の極く小さい初期傾斜で起る。而も此時の最大傾斜角は靜傾斜角の約 1.8 倍に達する。此論文の取扱は前にも屢々述べたやうに種々の點で overestimation をして居るが、夫れでも動力學的に考へた最大傾斜は靜傾斜角に比して遙に大きくなる事がわかる。然し此角度は reasonable なメタセンターの高さを持つて居れば必ずしも船を沈没せしむる程のものではなく、充分な乾舷を有し或は此角度の範囲内で舷側或は甲板が充分水密を保たれて居れば船は安全であるが、夫等が充分でなくして、傾斜の際に更に他の compartment に浸水するとか或は船内の重量が移動するとか云ふ様な事に到れば危険である。更に A が非常に大きくなれば、傾斜角は靜傾斜角に比して非常に小さくなる。之は緒言に述べた魚雷襲撃の爲めに横方向の不安定による遭難が無かつた事を示すもので、普通魚雷による damage の孔の大きさは $40 \sim 45$ 呎の範圍に亘ると稱され、従つて A は 100 m^2 以上に達する。従つて此爲めの横の傾斜は非常に僅少で、之より浸水孔の非常に大きい性質の damage による浸水に對しては横方向の安定は考へる必要のないことがわかる。然し浸水孔の大きさは damage を與へる原因が同一でも船殻の構造に依つて非常に異り、殊に外板が鈑付された場合と、熔接された場合では後者は著しく減少するものと考へられる。従つて damage を與へる原因の種類に依つては、熔接外板と浸水による横方向の傾斜との關係は相當考慮すべき事柄ではないかと思はれる。

(1) h が非常に變る場合は (例へば孔が浸水室の床に近い時の如き) 水頭の式が變る故、此の議論は其の儘當嵌まらぬ事は勿論である。二重底に孔が生じた如き場合は浸水速度は早く減少する故、此處に出たと異なる如き結論が出るはしないかと思はれる。

8. メタセンターの高さの影響

メタセンターの高さが増加すれば静傾斜角は減少するが、上の如く動力學的に考へた實際の傾斜は如何になるかを調べた。それが上の例の船のメタセンターの高さを $0.765m$ とした〔之に相當した

週期は約 15 秒) 場合に就き、上と同様の計算を試みた。此時の m_x 及静傾斜角は Fig. 1 及 2 に示す如く、之は常識的にもわかる様にメタセンターの高さは増加し、静傾斜角は減少する。

次に $\theta_0=1^\circ$ 及 5° の時の $\theta-x$ 及 $\theta-t$ の関係を A の種々の値に就いて計算した結果が Fig. 8a, Fig. 8b である。是等の曲線より特に注意すべきは、 A の小さい時船が振動状態で第 1 又は第 2 の swing で大きい傾斜角となる事である。例へば $\theta_0=1^\circ$, $A=5\text{m}^2$ の時の最初の swing に於ては其の角速度は夫れ程大きくはないが、第 2 の swing では角速度は可なり大となり、船内の水は船に附いて行けない。此事は $\theta_0=5^\circ$ の時にも現れ、此様に角速度が大きくなり、船と水とが別箇の運動をする様なになれば水は船の運動を damp する様に働き、従つて此計算に現れた様な大きい傾斜角に達するとは考へられぬ。然し幾何の角度迄傾くかは見當が付かず、此點に尙實驗的研究の餘地が有る。故に此様な場合の傾斜角は此處の議論には除く事にした。各の A に相當する最大傾斜角を A を base として書いたのが Fig. 9 である。之より見る様に m の小さい場合と同様 $\theta_0=1^\circ$ の時の方が max. 最大傾斜が大きくて静傾斜角の約 2 倍近くに達する。Fig. 7 と比較して見ると、max. の最大傾

斜の起る A の値は m の小さい時よりも小さくなり、 $5 \sim 10 \text{ m}^2$ の邊りに来る、而して之に相當した max. の最大傾斜角も m の小さい時に比して減少して居る。故に m を大きくすれば、浸水による横方向の不安定から來る大きい傾斜を減らす事が出来る。

9. Max. の最大傾斜に對する抵抗及傾斜角の影響

是迄の計算に於ては、船の横運動に對する抵抗を無視し、且つ浸水速度の計算に船の傾斜の影響を無視して來た。その結果は overestimation となる事は前述の通りで、此の無視の結果、浸水に依つて船の傾き得る角度は靜傾斜角の約 2 倍近くになる事を得たが、是等の影響を考へた場合に、果してどの位の最大傾斜になり得るかを見る必要がある。それで $m=0.44 \text{ m}$ の時に最も大きい傾斜を與へた $A=10 \text{ m}^2$, $\theta_0=1^\circ$ の場合に就き、抵抗係數 α (横運動に對する抵抗 $= 2\alpha I \frac{d\theta}{dt}$ で與へた時) に商船に就いて先づ合理的な 0.012 と與へて計算して見た。此の結果は Fig. 10 である。之を同じ狀

態で、抵抗のない傾斜角の浸水速度に影響の無い場合に比較すると、最大傾斜角はかなりの減少を來して居るが、それでも靜傾斜角に對して約 40% 位の増加を示して居る。此の最大傾斜角の起る x と t の値は、以上の影響を考へぬ時に比し殆んど變らぬ。

10. 結 言

以上は浸水による横方向の不安定に關しての從來の考へ方に對する補遺の意味で、之を動力學的に調べて見た結果である。此の結果を更に確める爲めに實驗して見たかつたのであるが、時間が無かつ

たので他に譲る事にした。然し以上の結果は大體に qualitatively に此場合の傾向を示すものと考えられ、主なる點を綜合すれば次の如し。

- (1) 浸水による横方向に起る最大傾斜は或る initial disturbance で最大となる。従つて或る船の最大傾斜は initial angle それ自身を考へなければ或る限度がある。
 - (2) 浸水孔の大きさと、其の水面からの深さに或る値を加へたものの平方根との積が定數であれば、與へられた船に生ずる最大傾斜は大體に於て等しい。
 - (3) 浸水孔の深さが定まり、孔の面積が種々變る時孔の面積の或る値に於て（大體浸水區劃床面積の $\frac{1}{60} \sim \frac{1}{90}$ ）で傾斜角が最大となり、孔の面積が之より増加すると傾斜角は非常に減少して所謂靜傾斜角よりも遙に小さくなる。
 - (4) メタセンターの殊更に大ならざる船では、孔の面積と initial disturbance の適當な値の時、浸水経過中の最大傾斜角は max. となり、之は或る浸水量の時の statical な平衡浮揚角より大であつて、抵抗を無視した計算では 1.8 倍位になり、適當な抵抗を考慮しても約 1.4 倍位である。然し之れは必ずしも船を顛覆に導くものでなく、舷側及甲板を充分に水密に保てば船は安全である。
 - (5) メタセンターの高さを充分大きくすれば、浸水経過中の最大傾斜角を小さくする事が出来る。
- 此問題に關聯して、計算の中に入つて居る種々の parameters の値が變つた時の影響、side compartment が浸水した時、甲板上に海水が打ち上げられた時等の事も調べて見たかつたが、時間が無かつたので是も後に譲る。

此計算の大半は小田原勉君が行ひ尙ほ一部は本教室助手池田茂君を煩はした。此處に感謝の意を表する。

（九州帝國大學造船學教室に於て）

附 録

1. 浸水速度 船内浸水の平均の深さを x とすれば浸水せる水の量は

$$\mu l B x.$$

但し

μ : 滲水率、

l : 浸水區劃の長さ、

B : 浸水區劃の幅で船の幅に等しいと假定する。

船が θ だけ $[a]$ の如く傾斜した時、此水が底部に溜まる形は x の大きさに依つて 2 種ある。

$x < \frac{B}{2} \tan \theta$ の時は水面は $w_1 l_1$ の如き形となり、此時、圖の $\overline{rl_1}$ の高さは

$$\overline{rl_1} = 2 \sqrt{\frac{Bx}{\sin 2\theta}} \cdot \sin \theta$$

$x > \frac{B}{2} \tan \theta$ の時は水面は $w_2 l_2$ の形となり $\overline{r l_2} = x + \frac{B}{2} \tan \theta$. 右圖 [b] の如く傾斜が反対側に起つた時は $x = \frac{B}{2} \tan \theta$ より小さい x では水面は r に達せず、此値より大となり $w_2 l_2$ の如くなれば

$$\overline{r l_2} = x - \frac{B}{2} \tan \theta$$

となる。

浸水孔の中心 a が海面よりの深さは

$$h' \cos \theta \pm \frac{B}{2} \sin \theta$$

正号は [a] の傾斜

負号は [b] の傾斜

故に浸水表面が a に達せざる間、即ち

$$\left. \begin{array}{l} \text{[a] 傾斜では} \left\{ \begin{array}{l} x < \frac{B}{2} \tan \theta \text{ の時} \\ x > \frac{B}{2} \tan \theta \text{ " } \end{array} \right. \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 2 \sqrt{\frac{Bx}{\sin 2\theta}} \sin \theta < m (= d - h - d') \\ x + \frac{B}{2} \tan \theta < m \quad (= \text{ " }) \\ x - \frac{B}{2} \tan \theta < m \quad (= \text{ " }) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

なる範囲では a より浸水する水は平均 $\left(h' \cos \theta \pm \frac{B}{2} \sin \theta \right)$ の水頭に相當する速度で浸入する故、船内の水の深さの増加する速さ $dx/dt = \dot{x}$ は次の様になる。

$$\dot{x} = \frac{A}{\mu l B} \sqrt{2g \left[h' \cos \theta \pm \frac{B}{2} \sin \theta \right]} \dots\dots\dots (2)$$

但し A : 浸水孔の大きさ

$$h' = h + \frac{\mu l B x}{A_w} \quad (h \text{ は L.W.L. から } a \text{ の深さ})$$

然るに浸水の表面が a に達した後即ち (1) の兩邊が等しくなつた時以後は、浸水速度は内外水頭の差に相當するものとなり、此の水頭の差 ΔH は次の様である。

此外に船が intact の状態で有する復原偶力があり、之は普通の形の船で傾斜角 30° 以内の範囲内では垂直船側の船の場合の復原偶力にて近似し得るゝ事は周知の事で、即ち之を M とすれば

$$M = -Wm \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{r}{m} \tan^2 \theta \right] \sin \theta. \dots\dots\dots (8)$$

但し W : 船の重量、 m : メタセンターの高さ、

r : メタセンター半径。

故に船に働く全體の復原偶力は $(M - \Delta M)$ となり、 I を船の縦軸の周りの慣性力率とし抵抗を無視すれば、此時の船の運動式は

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \Delta M - M \dots\dots\dots (9)$$

となる。唯此式に於ては、次の様な假定が含まれて居る。即ち船が θ の傾斜をすれば船内の水も直ちに之に應じた水面となると考へて居る。之は θ が徐々に變つて行く場合には成り立つが、急激な θ の變化或は船が振動の形を取る如き場合は水面の運動は船の運動に追隨し得ないで、水の運動の phase は遅れ、或是一種の振動状態となり、従つて之より起る偶力は非常に複雑な形となる。故に此様な運動の起り相な場合には、上の假定から出した結果は適用出來ず、除外しなければならぬ。

(9) 式の右邊の ΔM の中には x が含まれ、此 x は浸水速度を與へる (5) から求めらる。又 (9) 式の右邊は $\theta=0$ の時は消失し、従つて船は垂直状態にあつて外から何等の妨害も受けなければ、假令へ船内に浸水しても傾斜は起さぬのであるが、多くは此平衡状態は不安定で、外から何等かの力が働けば直ちに傾斜して行く性質のもので、且つ浸水を起す様な場合は何等かの形で必ず傾斜力が働く故、此傾斜力によつて (9) の右邊は有限値として現れ、是より以後の運動が生じて來る。此初めに起る外部よりの傾斜力による傾斜を今初期傾斜とし之を θ_0 とする。此初期傾斜 θ_0 の値で後に續く運動が甚だ影響を受ける。

3. 數値積分法 (9) 式の右邊は θ と t の非常に複雑な函數で、且つ嚴密に云へば I 自身が矢張り t と共に變るのであるが、本文中に述べてある様に之は適當の allowance を與へて常數と假定した。それでも到底數學的に式の上で解き得る形ではない。それで初期條件として

$$t=0 \text{ の時に } \theta=\theta_0, \quad \dot{\theta}=0, \quad x=0$$

を與へ、(5) と (9) より θ と x が t と共に變る状態を數値積分に依つて求めた。その方法は次の様である。(5) 及 (9) は次の形である。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A}{\mu l B} \sqrt{2gK(\theta, x)} \equiv \mathfrak{N}(\theta, x) \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{\Delta M - M}{I} = \left(\frac{2\pi}{T_s} \right)^2 \frac{\Delta M - M}{W_m} \equiv \mathfrak{M}(\theta, x, t) \dots\dots\dots (11)$$

但し T_s : I 及 m に相當した自由動搖週期。

今 $t=t_1$ に於ける $\theta=\theta_1$, $\dot{\theta}=\dot{\theta}_1$, $x=x_1$ がわかつて居るとすれば、 t_1 以後 Δt の間の平均角速度 $\dot{\theta}_{1\text{mean}}$ は次の様になる。

$$\dot{\theta}_{1\text{mean}} = \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \mathfrak{M}(\theta_1, x_{1\text{mean}}, t_1) \Delta t \dots\dots\dots (12)$$

但し $x_{1\text{mean}}$ は此 Δt 間の平均の x の値で、之は (10) より

$$x_{1\text{mean}} = x_1 + \frac{1}{2} \mathfrak{N}(\theta_{1\text{mean}}, x_1) \Delta t \dots\dots\dots (13)$$

又此式の $\theta_{1\text{mean}}$ は Δt 間の平均傾斜角で、之は (12) より

$$\begin{aligned} \theta_{1\text{mean}} &= \theta_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_{1\text{mean}} \Delta t \\ &= \theta_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_1 \Delta t + \frac{1}{4} \mathfrak{M}(\theta_1, x_{1\text{mean}}, t_1) \overline{\Delta t}^2 \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

故に (13) と (14) より $x_{1\text{mean}}$ と $\theta_{1\text{mean}}$ を求める。然し此聯立式から 2 つの値を求むる事は式の形から簡単には行かぬ。それで近似的に (13) の右邊の $\theta_{1\text{mean}}$ の代りに θ_1 を入れ

$$x_{1\text{mean}} = x_1 + \frac{1}{2} \mathfrak{N}(\theta_1, x_1) \Delta t \dots\dots\dots (13')$$

の形として計算を行つた。實際に於て、本文にも示してある様に、本論文の目的に對しては (13) 又は (13') の右邊の θ の影響を無視しても差支ない故、必要の場合は (13') を用ひ、多くの場合は (13') の右邊の $\theta=0$ と置き、單に x のみの函数として計算を行つた。

従つて $t_2=t_1+\Delta t$ に於ける θ_2 , $\dot{\theta}_2$, x_2 の値は

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \theta_1 + \dot{\theta}_{1\text{mean}} \Delta t = \theta_1 + \dot{\theta}_1 \Delta t + \frac{1}{2} \mathfrak{M}(\theta_1, x_{1\text{mean}}, t_1) \overline{\Delta t}^2 \\ \dot{\theta}_2 &= \dot{\theta}_1 + \mathfrak{M}(\theta_1, x_{1\text{mean}}, t_1) \Delta t \\ x_2 &= x_1 + \mathfrak{N}(\theta_1, x_1) \Delta t = x_1 + \mathfrak{N}(\theta=0, x_1) \Delta t \end{aligned} \right\}$$

此 θ_2 , $\dot{\theta}_2$, x_2 を使つて順次 θ_3 , $\dot{\theta}_3$, $x_3, \dots$ を求めて行く。故に初期條件の $t=0$ に於ける $\theta=\theta_0$, $\dot{\theta}=0$, $x=0$ が與へられれば、その後の θ , $\dot{\theta}$, x を求めて行く事が出来る。 Δt は浸水の初めは 1 秒に取り、浸水が充分進んで後は 2 秒に取つて計算した。

抵抗が入る場合は (11) は

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\Delta M - M}{I} - 2\alpha \frac{d\theta}{dt} \equiv \mathfrak{M}_1(\theta, \dot{\theta}, x, t) \dots\dots\dots (11')$$

α : 抵抗係數

となり、

$$\dot{\theta}_{1\text{mean}} = \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \mathfrak{M}_1(\theta_1, \dot{\theta}_1, x_{1\text{mean}}, t_1) \Delta t$$

$$\theta_{1\text{mean}} = \theta_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_1 \Delta t + \frac{1}{4} \mathfrak{M}_1(\theta_1, \dot{\theta}_1, x_{1\text{mean}}, t_1) \Delta t^2$$

となり、以下同様で唯少し計算が複雑になるだけである。

討

論

○座長(重光 藤君) 唯今の御講演に就て御質問或は御討論がありましたら御述べを願ひます…
 …別に御座いせんければ私より一言申し上げます。渡邊博士は從來から度々純力學的問題に關する論文を御發表になり、吾々裨益する所多かつたのでありますが、今回小田原君と共に又々純學理的結果を御發表になつたことは、本協會にとつて大いに仕合せとする所であります。茲に拍手を以て皆様と共に御禮申し上げたいと思ひます。(一同拍手)