

フラーム式安定水槽の設計法：附．圓弧型水槽の作用に就て

渡邊， 恵弘
九州帝國大學流體工學研究所

<https://doi.org/10.15017/7152011>

出版情報：流體工學研究所報告．2 (1), pp.22-31, 1943-05. Research Institute for Fluid Engineering, Kyushu Imperial University

バージョン：

権利関係：



フレーム式安定水槽の設計法

附. 圓弧型水槽の作用に就て

所 員 渡 邊 恵 弘

(昭和 18 年 1 月 29 日受理)

1. 緒 言

船舶の横揺を防止すると云ふ考は古來凡ての造船家の懷いた事で、特に船舶航海性能を出来るだけ進歩せしめやうと努力して居る現在では多くの方面で種々の考案を提唱し、嘗ての受動式安定方法は、現在は能動式に迄發展して居る。而してフレームの發明にかゝる安定水槽¹⁾は既に三十數年前のものに拘らず、その構造の簡單なる爲めに今尚屢々裝備せられて居る。筆者は嘗て此水槽の設計法に就き一論文を發表した。²⁾ 此水槽の作用は 船の横揺と結合振動をなして横揺を制止するもので、近時盛に唱へられる動吸振装置と同一理論によるものである。筆者の前論文執筆當時は、此結合振動の理論が餘り發達して居らなかつた時代であつて、筆者の當時の方法は、船の週期より小さい週期の波に出遭ふ場合の横揺が安定水槽の働かない場合よりも常に小さく且つ共揺状態に於ては著しく横揺角を減小せしむる様に安定水槽の主要寸法を設計する方法を提唱したのであつた。然しながら此様な方法に依る安定水槽は其の週期が可也小さくなり、特に小型艦船に裝備する場合には不適當であり、且つ、此様な小型艦船では船自身の週期よりも大きい週期の波に出遭ふ危険が非常に多く、然る場合は上の如き方法で設計せるものの効果は餘り期待出来ない事になる。故に理想としては凡ての週期の波に會つても常に水槽の作働しない場合よりも横揺角が小さくなる様に設計する事が望ましい事で、しかも之は近時發達せる動吸振理論によれば極めて簡単に達せられるのである。

本論文では此理念による設計法を述べたものである。又前發表論文に對する末廣恭二博士の討論に對し筆者は圓弧型水槽の不備な點を指摘し、その理論的説明は後の機會に譲る事を述べたのであるがその機會は現在迄無かつたので、本論文の序でに此點に就ての説明を附して、責を免れ度いと思ふ。・

2. 安定水槽内水の運動式

前著論文に於て筆者は安定水槽を裝備せる船と水槽内の水の運動に對し次の二式を得た。(前

1) 筆者の前論文では Anti-rolling Tank を減揺水槽と譯したが造船協會の用語では安定水槽となつて居るので、以下此の譯語を用ふる事にした。

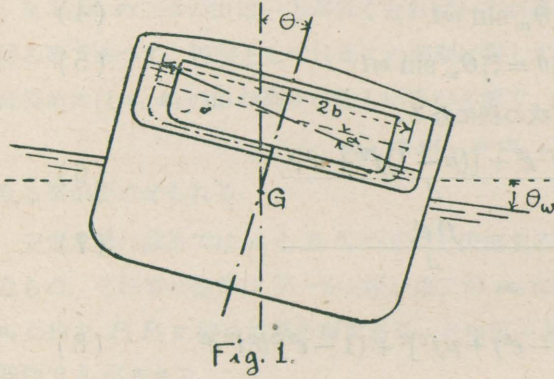
2) 渡邊恵弘：減揺水槽の設計に就て。造船協會々報。46 號，昭和 5 年。

論文の (3) (4) 式).

$$\ddot{\theta} + \frac{d+a\mu}{L_e} \ddot{a} + b_s \xi_s \dot{\theta} + \xi_s^2 \theta + \mu \xi_s^2 a = \xi_s^2 \theta_w \sin \omega t \quad (1)$$

$$\ddot{a} + \frac{d+a}{l_e} \ddot{\theta} + b_t \xi_t \dot{a} + \xi_t^2 a + \xi_t^2 \theta = \xi_t^2 \theta_w \sin \omega t \quad (2)$$

但し θ, a は第一圖に示す如く船及水槽内の水の振動角.



b_s, b_t : 船の横揺及水槽内水の振動に對する抵抗をあらはす減衰係數に比例する數

ξ_s, ξ_t : 船の横揺及水槽内水の自由振動の circular frequency.

θ_w : 波の最大有効傾斜.

ω : 波の circular frequency.

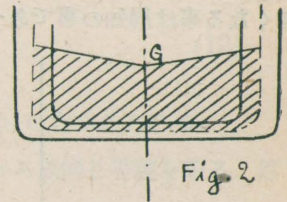
L_e, l_e : ξ_s 及 ξ_t に相當する相當單振子の長, $\therefore L_e = g/\xi_s^2, l_e = g/\xi_t^2$.

$\mu = 2A_1 b^2/V_0$. m . で A_1 は水槽豎管の切口面積, $2b$ は豎管間の距離, V_0 は船の排水容積, m はメタセンターの高.

$(d+a)$ は U 字型水槽に對し簡単な置き換えをしたもので, 實は第二圖の陰影せる面積 $\bar{A}$ を $2b$ で割つたものであつて, 従つて水槽が G より非常に高い處にあれば負となる.

(1) (2) の中で $(d+a)$ 或は $\bar{A}$ の項は二次的のものであり, 又 b_s は安定水槽をつける船では彎曲部龍骨をつけても小さい故横揺に對する抵抗は非常に小さいと見て $b_s = 0$ とおく.

又此様の振動防止装置の設計の理論では常に強制振動を取られる故, 今 $\theta = \theta_0 \sin \omega t$, $a = a_0 \sin \omega t$ とおけば $\ddot{\theta} = -\omega^2 \theta$, $\ddot{a} = -\omega^2 a$ となる. 故に (1) 及 (2) の第二項に入れれば



$$\left. \begin{aligned} \frac{d+a}{L_e} \ddot{a} &= -\frac{\bar{A}}{2bg} \xi_s^2 \omega^2 a \\ \frac{d+a}{l_e} \ddot{\theta} &= -\frac{\bar{A}}{2bg} \xi_t^2 \omega^2 \theta \end{aligned} \right\}$$

依つて (1) (2) は次の様になる.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta} + \xi_s^2 \theta + \xi_s^2 \mu \left(1 - \frac{\bar{A}}{2bg} \omega^2\right) a &= \xi_s^2 \theta_w \sin \omega t \\ \ddot{a} + b_t \xi_t \dot{a} + \xi_t^2 a + \xi_t^2 \left[1 - \frac{\bar{A}}{2bg} \omega^2\right] \theta &= \xi_t^2 \theta_w \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

此第一式を見ると $\bar{A}$ の項は $(1 - \bar{A} \omega^2 / 2gb)$ が μ にかゝつて丁度 μ の値を變化せしめた様になつて居る。 μ は安定水槽の大きさをあらはす數で、大なる程その効果は増加する。故に $\bar{A}$ の負即ち水槽が G より高い程、その効果は二次的ではあるが大となる。 $[1 - \bar{A} \omega^2 / 2bg]$ は第二式にも入つて居る故 $\bar{A}$ の影響として μ の代りに $\bar{\mu} = \mu(1 - \bar{A} \omega^2 / 2bg)$ を取つてその儘入れる事は理論上許されないが、實際設計に當つて、Frahm のやり方では μ の代りに $\bar{\mu}$ を取つて設計をして居る。然し何れにしても $\bar{A}$ の項の影響は小さい故之を無視すれば (3) は次の様になる。

$$\ddot{\theta} + \xi_s^2 \theta + \xi_s^2 \mu a = \xi_s^2 \theta_w \sin \omega t \quad (4)$$

$$\ddot{a} + b_t \xi_t \dot{a} + \xi_t^2 a + \xi_t^2 \theta = \xi_t^2 \theta_w \sin \omega t \quad (5)$$

之より強制振動の振幅 θ_0 及び a_0 を出せば次の様になる。

$$m^2 = (\theta_0 / \theta_w)^2 = \frac{b_t^2 f^2 e^2 + [(\mu - 1)f^2 + e^2]^2}{\Delta} \quad (6)$$

$$n^2 = (a_0 / \theta_w)^2 = \frac{f^4 e^4}{\Delta} \quad (7)$$

但し

$$\Delta = [-(1 - e^2)(f^2 - e^2) + \mu f^2]^2 + (1 - e^2)^2 b_t^2 f^2 e^2 \quad (8)$$

$$e = \frac{\omega}{\xi_s}, \quad f = \frac{\xi_t}{\xi_s} = \frac{T_s}{T_t}, \quad (T_s: \text{船の週期}, \quad T_t: \text{水槽の週期})$$

3. $\mu, \xi_t(T_t), b_t$ の決定法

f, μ, b_t にあるきまつた値を與へて (6) に依つて m と e との間の曲線を書けば第三圖の 1 の如くなる事は周知の事であつて、若し (6) で $b_t = \infty$ とすれば

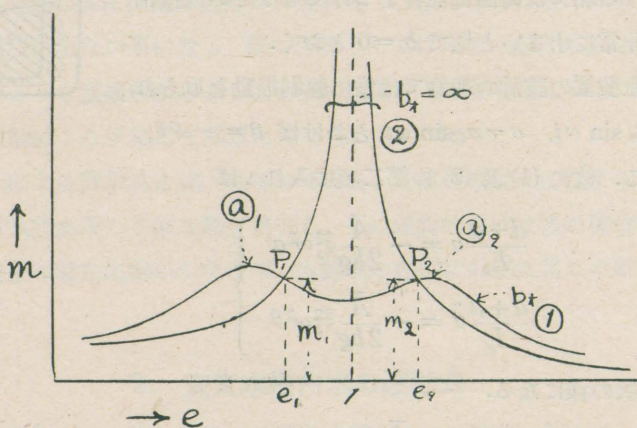


Fig. 3

$$m = \frac{1}{1 - e^2} \quad (9)$$

即ち 2 の曲線となり、之は水槽の水が動かず作働しない場合に當る。

1 と 2 は二つの點 P_1, P_2 で交り、且つ此等の交點は b_i の値に全く無關係である事もよく知られて居る事で、容易に証明する事も出来る。1 の曲線には普通必ず二つの山 a_1, a_2 が存在する。水槽を設計をする場合は、水槽をつけた時の m が水槽のない時の m より大となる事のない様にすべきで、即ち 1 の曲線が出来る丈け 2 の曲線より上に出ない様にすべきである。此爲めには a_1, a_2 の山が P_1, P_2 に一致する様にすればよい。

又 a_1, a_2 の二つの山は一方が低くなれば一方が高くなる事も此種振動の性質として知られて居る事であつて、理想としては凡ての週期に對して m が常に一樣に小さくなる事が望ましい。此爲めには a_1, a_2 の山の高さが等しい事が必要で、或は之等が P_1, P_2 に一致するとすれば

$$m_{P_1} = m_{P_2} = m_0 \quad (10)$$

なる事が要求せられる。

安定水槽の設計では μ, ξ_i 及 b_i の三つを決定する事が必要で、従つて三つの條件がなくてはならぬ。それ等の條件は第一が (10)、第二が m_0 に對しあるきまつた値を與へる事、第三が a_1, a_2 の山を P_1, P_2 に持つて來る事である。此中第一と第二の條件で μ と ξ_i が決定され、第三の條件で b_i がきまる。

今 P_1, P_2 に相當する e の値を e_1, e_2 とする。然る時は之等は b_i の値に無關係なる故、(6) で $b_i = 0, m = m_0$ とおいた式より求められる。即ち e_1 又は e_2 の一般の値を $\bar{e}$ とすれば

$$m_0 = \pm \frac{(\mu - 1)f^2 + \bar{e}^2}{(\bar{e}^2 - 1)(f^2 - \bar{e}^2) + \mu f^2} \quad (11)$$

同様に $b_i = \infty$ とおいた (9) より

$$m_0 = \pm \frac{1}{\bar{e}^2 - 1} \quad (12)$$

故に (11) と (12) を等しいとおけば $\bar{e}$ の方程式が得られ、之より e_1, e_2 が求められる。

然し (11) (12) の反對の符號は $e = 0$ に於ける 1 と 2 の交りを與へる故同じ符號を取る。然る時は

$$\bar{e}^4 - [1 + (1 - \frac{\mu}{2})f^2]\bar{e}^2 + (1 - \mu)f^2 = 0 \quad (13)$$

此式の二つの根が e_1, e_2 なる故、次の關係がある。

$$e_1^2 + e_2^2 = 1 + (1 - \frac{\mu}{2})f^2 \quad (14)$$

今 $e_1 < 1, e_2 > 1$ とすれば (12) より

$$m_0 = \frac{1}{1 - e_1^2} = \frac{1}{e_2^2 - 1} \quad \therefore e_1^2 + e_2^2 = 2 \quad (15)$$

故に (14) と (15) より

$$1 + \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) f^2 = 2$$

$$\text{又は} \quad f^2 = \frac{1}{1 - \mu/2} \quad (16)$$

又 (13) の f に (16) を入れて $\bar{e}$ を出せば

$$\bar{e}^2 = 1 \pm \sqrt{\mu/(2-\mu)} \quad \therefore \left. \begin{aligned} e_1^2 &= 1 - \sqrt{\mu/(2-\mu)} \\ e_2^2 &= 1 + \sqrt{\mu/(2-\mu)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(12) の $\bar{e}$ に e_1 又は e_2 を入れれば

$$\begin{aligned} m_0 = m_1 = m_2 &= \frac{\theta_0}{\theta_w} = \sqrt{\frac{2}{\mu} - 1} \\ \therefore \mu &= \frac{2}{m_0^2 + 1} \end{aligned} \quad (18)$$

(17) に入れれば

$$\left. \begin{aligned} e_1^2 &= 1 - 1/m_0 \\ e_2^2 &= 1 + 1/m_0 \end{aligned} \right\}$$

(16) に入れれば

$$f^2 = \frac{T_s^2}{T_t^2} = \left(1 + \frac{1}{m_0^2}\right) \quad (19)$$

(18) (19) が m_0 にある値を假定した場合の μ 及 f を求むる設計の基本となる式である。之等がわかれば安定水槽の週期及 A_1 がわかる故、裝備する場處の條件を考慮してその詳細を設計する事が出来る。

以上の關係では b_i が未定である。然るに (18) (19) を導くのに使つた條件は $m_1 = m_2 = m_0$ なる事丈けで $a_1 a_2$ の山が P_1, P_2 に來なければならぬ條件は使つて居らぬ。それには (18) (19) で出した μ と f を (6) に入れ、 b_i に種々の値を取つて試案に依つて、 $a_1 a_2$ の山が P_1, P_2 に來る様な b_i を求める。實際 b_i は水槽の豎管の上部を繋ぐ空氣管内の瓣の開き方を加減して、適當な値を與へるものであつて、計算に依つて b_i の適當な値がわかつて居ても、之に相當する瓣の開き加減を豫め決定する事は出来ない。故に之は上の様にして決定した水槽を實際に試験して尤も有効に瓣の開き方即 b_i をきむる方がより實際的である。

計算例として今波の最大有効傾斜 $\theta_w = 4^\circ$ として $m_0 = 2.07$ 即ち船の強制横揺角は 8° 迄許すとすれば (18) より $\mu = 0.377$ 。

之より V_0 , メタセンターの高及水槽の裝置しうる幅 $2b$ がわかれば豎管の切口面積 A_1 が出る。又 (19) から $f = 1.11$, 故に船の横揺週期 T_s がわかれば水槽の週期 T_t がわかり、從つて水平管の切口面積をきめる事が出来る。此場合の $m-e$ 曲線を種々の b_i に書いて見ると、大體 $b_i = 0.7$ の時の時に所期のものが得られる。此時の $m-e$ 曲線を第四圖に示す。

尙同圖には水槽の働かない場合のものも入れて置いた。

此場合水槽が理想的に働いたとして約 8° の強制横揺となるが、實際洋上では之に自由横揺が伴ふ故最悪の場合は $2 \times 8^\circ = 16^\circ$ 位迄の横揺があると推定される。若し安定水槽がなく、彎曲部龍骨で横揺をとめる場合は共揺に於て $m=6$ 位となる故、安定水槽に依つて横揺が約半分となる。

4. 水槽内の水の運動と豎管の高さ

此時の豎管内の水位の振動振幅は上の様にして求めた μ, f, b_i を (7) に入れて $n-e$ の曲線をかけばわかる。上の計算例の値を取つて求めたものを第五圖に示す。之より見ると、丁度 $e=e_1$ 及 e_2 の處で管内の水は非常に振動し $n=3$ 故に $\theta_w=4^\circ$ とすれば $\alpha_0=12^\circ$ となる。然る時は豎管の高は少くとも平均靜止水位より $\pm b \tan \alpha_0$ の高を必要とする。之は μ が小さい程大となり、實際水槽配置の周圍の條件の満足し難い程の高となる。故に上に示す様な豎管の高は理想としては望ましいが、實際問題として實現が難かしい。若し、此理想通りの高が得られなければ管内の水は理論通りの運動が出来ない事となる故、此爲めに水槽の効果は減ずる事になる。此効果の減少を幾何に止めるかは豎管の高さを最小幾何に抑へるかによつてきまり、之は從來の設計の例による外はない。Frahm のやり方は上述の如き理論によらず、今平均靜止水位より $\pm h$ 丈け動きうる丈けの高があるとすれば、之に對して次の様な式を與へて居る。

$$V_0 m \theta_w = 2 A_1 b h$$

$$\therefore \theta_w = \frac{2 A_1 b h}{V_0 m} = \mu \frac{h}{b}$$

Frahm の設計例から此 θ_w を取れば $2^\circ, 0.825^\circ, 2.45^\circ, 3.92^\circ, 3^\circ, 3.2^\circ$ 等の値が出て居り、先づ $\theta_w=3^\circ \sim 4^\circ$ に取れば充分となる。

$$\therefore h = (0.05 \sim 0.07) \frac{b}{\mu} \quad (20)$$

程度に押へれば先づ實用上差支ないと考へられる。

5. 結 論

本論文は Frahm 式安定水槽の設計法を動吸振裝置の理論に依つて示したものであつて、筆者の囊に發表せしものゝ補遺をなすものである。

〔附〕 圓弧型安定水槽の作用に就て

Frahm 式安定水槽の一形式として管の形に圓弧型が屢々考へられる。³⁾ 此時、此圓弧の中心と船の重心とが可也異つて居れば、普通の Frahm 式のもの見られるが、若し此二心が一致すれば、その作用は著しく異つたものとなり安定水槽としての用をなさなくなる。

3) Schuler: Werft-Reederei-Hafen 1928. 末廣恭二: 論文集.

文献に挙げた Schuler は此種の形式の實驗をして Frahm 式水槽の効果に対する疑念を表明して居る。然しながら、之は Schuler の實驗に供せるもの自身が Frahm 式水槽と異つた作用をする事より起る疑念であつて、之より Frahm 式それ自身の効果を論ずる事は見當違ひであると思ふ。以下此小篇に於て圓弧型水槽の作用が如何に Frahm 式と異なるかに就て述べて見度いと思ふ。

Fig. 4 に於て圓弧管の中心と船の重心 G が一致するとし、波の有効傾斜 $= \theta_w = \theta_w \sin \omega t$ とし船が之に對して θ_a 又は鉛直線に對し $\theta = \theta_a + \theta_w$ 丈け傾き、管内の水の傾斜は船に對して

α 或は鉛直線に對して $\alpha_1 = \theta + \alpha = \theta_w + \theta_a + \alpha$ 丈け傾斜した状態を考へる。船の G のまはりの慣性力率 $= I$, 重さ $= W$, メタセンター高 $= m$, 水槽管の半径 $= r$, 切口面積 $= A$ で之は一樣であるとする。然る時は水槽内の全體の水の質量は $M_t = w \cdot A \pi r$ (w : 單位容積の水の重さ) 然る時は全體の運動エネルギーは

$$T = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} M_t \cdot r^2 \alpha_1^2 \quad (1)$$

又位置のエネルギーは船の位置エネルギーと水槽内の水の位置エネルギーより成り、船が水面への法線に對し θ_a 丈け傾き、水槽内の水準が外海の水面と平行なる場合の位置エネルギーは

$$E_1 = \frac{1}{2} [Wm - 2A \cdot w r^2] \theta_a^2 = \frac{1}{2} (Wm - 2A \cdot w r^2) (\theta - \theta_w)^2$$

又水槽内の水を水面と平行な位置から鉛直線に對し α_1 の傾斜迄動かすに要する位置エネルギーは

$$E_2 = A w r^2 (\theta_a + \alpha)^2 = A w r^2 (\alpha_1 - \theta_w)^2$$

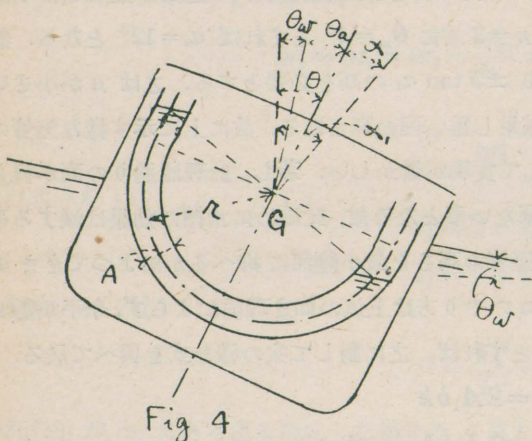
∴ 全體の位置エネルギーは

$$E = E_1 + E_2 = \frac{1}{2} [Wm - 2A w r^2] (\theta - \theta_w)^2 + A w r^2 (\alpha_1 - \theta_w)^2 \quad (2)$$

次に消散函数 (Dissipation function) の計算に當つては今船體自身から來る横搖に對する抵抗を無視すれば、船と水槽内の水との間の相對運動から來る抵抗があるのみで、之は此兩者の相對速度 $\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_1 - \dot{\theta}$ の函数で、且つ此抵抗は、此速度に比例すると假定する。然る時は消散函数 F は

$$F = \frac{1}{2} D \cdot \dot{\alpha}^2 = \frac{1}{2} D (\dot{\alpha}_1 - \dot{\theta})^2 \quad (3)$$

以上 (1) (2) (3) を Lagrange の式に入れれば運動式が得られる。即ち船に對しては θ の para-



meter を使へば

$$I\ddot{\theta} + D(\dot{\theta} - \dot{a}_1) + [Wm - 2Awr^2]\theta = (Wm - 2Awr^2)\theta_w \sin \omega t \quad (4)$$

又は I で割つて $D/I = a_s \xi'_s$, $(Wm - 2Awr^2)/I = \xi_s'^2$ とおけば

$$\ddot{\theta} + a_s \xi'_s (\dot{\theta} - \dot{a}_1) + \xi_s'^2 \theta = \xi_s'^2 \theta_w \sin \omega t \quad (5)$$

(此處で ξ_s' は前篇本論の ξ_s に比較すれば $\xi_s'^2 = \xi_s^2(1 - \mu)$ である)

又水槽内の水の運動に對しては a_1 の parameter を使へば

$$M_t r^2 \ddot{a}_1 + D(\dot{a}_1 - \dot{\theta}) + 2Awr^2 a_1 = 2Awr^2 \theta_w \sin \omega t \quad (6)$$

又は $D/M_t r^2 = a_t \xi_t$, $2Aw/M_t = \xi_t^2$ とおけば

$$\ddot{a}_1 + a_t \xi_t (\dot{a}_1 - \dot{\theta}) + \xi_t^2 a_1 = \xi_t^2 \theta_w \sin \omega t \quad (7)$$

(5) と (7) を見るに矢張り θ と a_1 とは聯合振動をなして居るが、兩者は各々の速度に於て結合し、所謂摩擦結合である。普通の Frahm の水槽その他の動吸振装置が復原力又は慣性力の結合であるに對し、著しき差異がある。(前篇の (1) (2) に相當する式の中の (1) は (4) と (6) を加へる事により又 (2) は (6) の中で $a_1 = a + \theta$ とおいて得られるが、その形は (1) (2) と違つたものとなる。之は水槽内任意の點の絶対線速度は圓弧型の場合は $r\dot{a}_1 = r(\dot{\theta} + \dot{a})$ であるのに對し、普通の Frahm 型では $\dot{\theta}$ によるものと $\dot{a}$ によるものが同一方向になく、従つて、全く違つた式となる事から起る。)

此 (5) (7) の様な摩擦結合の場合に θ の運動がどうなるかを見て見やう。

$\theta = A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t$, $a_1 = B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t$ において (5) (7) の左邊に入れ、全體の $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ の係数を零とおけば次の四式が得られる。但し $\omega/\xi_s' = e$, $\xi_t/\xi_s' = f$ とおく。

$$\left. \begin{aligned} A_1(1 - e^2) + a_s e(A_2 - B_2) &= 0, \\ A_2(1 - e^2) + a_s e(B_1 - A_1) &= \theta_w, \\ B_1(f^2 - e^2) + a_t f \cdot e(B_2 - A_2) &= 0, \\ B_2(f^2 - e^2) + a_t f e(A_1 - B_1) &= f^2 \theta_w. \end{aligned} \right\}$$

之より θ の振幅 $\theta_0 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$ と a_1 の振幅 $a_{10} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$ を求めると次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_0^2 &= \frac{(f^2 - e^2)^2 + f^2 e^2 (a_t + a_s f)^2}{\Delta} \theta_w^2 \\ a_{10}^2 &= \frac{(1 - e^2)^2 f^2 [f^2 + e^2 (a_t + a_s f)^2]}{\Delta} \theta_w^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\text{但し} \quad \Delta = (1 - e^2)^2 (f^2 - e^2)^2 + [a_s (f^2 - e^2) + a_t f (1 - e^2)]^2 e^2 \quad (9)$$

此處で船と水槽管壁との間の摩擦がないと云ふ様な二つの振動の結合が無い場合は (3) の

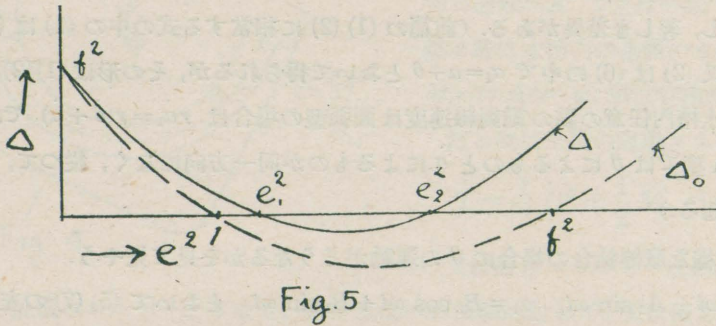
$D = 0$ なる故 $a_s = a_t = 0$

$$\therefore \quad \theta_0 = \frac{1}{1 - e^2} \theta_w$$

$$a_{10} = \frac{f^2}{f^2 - e^2} \theta_w$$

此中の初めの關係は水槽のない場合のもので明であるが、第二の關係は一考へると、此場合、水槽内の水の振動はなく従つて $a_{10} = 0$ の様に思はれるが、此時波の水面は常に動いて居り、見掛けの重力の方向は常に水面に垂直の方向なる故之も動いて居り、此爲めに水槽内の水は振動をするのであつて、之は船の横揺より誘起されるのではなく、見掛けの重力の變化によるものである。此事は (2) の最後の項から明である。

扱て此摩擦結合による聯成振動の特徴は (9) 式にある。此 $\Delta = 0$ を與へる e の値が此聯成振動の固有週期となるわけであるが、今 f, a_s, a_t 等が與へられるとして Δ と e の曲線を書いて見る。 $D = 0$ 即ち $a_s = a_t = 0$ の時の $\Delta = \Delta_0$ とすれば Δ_0 の曲線は第五圖の如く e -軸を $e = 1$ 及 f で切り、此二つの値は船と水槽が結合せず單獨にある場合の自己週期を與へる。



$D \neq 0$ でない場合は (9) の右邊の第二項が必ず正なる事より Δ 曲線は必ず Δ_0 曲線より上に來て従つて D が大きい場合は Δ 曲線と交らず、然らざる場合は矢張り e_1, e_2 の二點で切るが此二點は必ず 1 と f の間に來る。

一般には二點で交ると見られるが此時の自己週期は必ず 船の週期と水槽の週期との中間に來る、又 Δ 曲線が e 軸に交らない時でも Δ の最小値は $e = 1$ と f の間に來る。此時 $\Delta = 0$ となる故 θ_0 は非常に大となり、即ち共振曲線の山となる處であつて、本篇第三圖の a_1, a_2 に當り又 Δ 曲線が e 軸に交らぬ場合でも θ_0/θ_w の山は $e = 1$ と f の間に起る。一般に安定水槽に於ては $f \geq 1.1$ 程度である故共振の起る a_1, a_2 に相當する山は殆んど $e = 1$ の處に起る事になり、普通取扱はれる聯成振動の共振曲線とは非常に異つた様相を示し、共振曲線は水槽をつけない場合と餘り變らない事になる。此事は文獻に擧げた Schuler の實驗にも明瞭に現れて居る。此摩擦結合の特徴をあらはす (9) の結合の項第二項が Δ を増加せしむると云ふ點は普通的水槽に對する式本篇の (8) の μf^2 の項と比較すると明である。此様に圓弧型水槽の場合の共振曲線は略 $e = 1$ 附近で山を示し、水槽の作用しない場合と餘り變らず且つ (9) の第二項の影響は θ_0 式の分子第二項の爲めに消されて、 θ_0/θ_w も餘り減らない様になる事と推定される。

以上は圓弧型の中心が船の重心に一致した場合に就いて述べたのであるが、重心と此中心の距離が非常に近い場合も大體同じ様な傾向が現れる事と思はれる。(終り)

(造船學教室にて 昭和18年1月)