

(昭和 28 年 11 月造船協会秋季講演会に於いて講演)

潜水艦潜入運動の解析

正員 工学博士 德川武定
正員 工学博士 鬼頭史城

Abstract

Analysis of Diving of a Submarine

By Takesada Tokugawa, *Kogakuhakushi, Member*
and Fumiki Kito, *Kogakuhakushi, Member*

As is only too well known, the quick diving is one of the essential qualities of the present-day submarines.

In this paper, first of all, the authors have made an analytical study on the diving motion of a submarine.

In the next, the question may be solved as to how much degree the trim angle of the vessel does alter, when the vessel submerges with constant speed V_0 , along the specified course, into the given depth of immersion D , in the duration of time T , under the regulation by a pair of horizontal rudders with a certain rudder angle.

Fortunate to say, we have still on hand the underwater-performance curves based on the experimental results of the several types of submarine-models, and using them, we obtained numerical values of both the trim and rudder angles of submarine when she performs the diving motion as mentioned above.

In conclusion, it is shown that, if we try to make the time duration needed T , as short as possible, the allowance in inclination of hull matters more, rather than the addition of rudder angle.

1. 緒 言

本報告は、与えられた諸元をもつた潜水艦が、与えられた短時間内に急速に所定の深度まで潜入し得るために、どんな方法を施せばよいかを理論的に解析しようとするものである。即ち急速潜航を行うに要する水平舵（潜横舵と称する）の面積の大きさ、急速潜航の可能なる最短潜入時間、ひいては舵角、操舵時間等を与えた潜水艦に対して計算する方法を明かにしようとするものである。従来行われていた水槽試験は大体において定常的状態のみについてである。これらの資料はできるだけここに取入れてはあるが、非定常的な運動の解析が本文の主体であるから、その計算は理論的な立ち場から行つてある。

われわれの問題を力学的に言えば次のようになる。即ち水中において水平方向に進行中の物体があるとする。之に或る力（舵圧力）を加えることにより更に垂直運動をおこさせ、一定の時間内に所定の深度まで沈降せしめようとするには物体にどんな力を加えればよいか、ということである。なお実際の潜水艦に対しては、水上状態から水中状態に移行する過程（詳言すればバースト・タンク注水、諸弁の大きさの決定等）の力学的解析をも行わねば完全と言えないわけであるが、この問題は力学的に全く性能の異つた問題であるから、本文では之を取扱わず、水中状態のみを考えることとした。

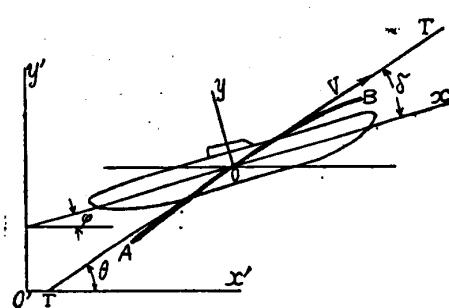
2. 運動の方程式

無限に拡がつているところの3次元的水域を想定し、その中における与えられた剛体の運動を考える。空間に固定せる坐標軸よりも物体 S に固着せる坐標軸を用いる方が便利であるから、この後者即ち動軸(moving axes)を用いることとする。即ち物体 S に固着せる一点 O を原点とし、物体に固着せる坐標 x, y, z を用いる。この坐標により、水中を進行するところの物体 S の瞬間的速度及び瞬間角速度をそれぞれ (u, v, w) 及び (p, q, r) とする。又この坐標軸についての、物体 S の運動量を $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 、角運動量を (λ, μ, ν) とする。物体のまわりの水の影響（仮性質量）は加算されているとする。物体 S に作用する外力並に外力モーメントの値を (X, Y, Z) 及び (L, M, N) とする。この中に水の作用（摩擦抵抗等）は加算されているとする。外力の内には重力をも取入れねばならぬのであるが、重量と浮力とが差（予備浮力、+又は-）を有する場合に限り、その差額だけが外

力と見なされる。物体の運動が或る垂直平面内においてのみおこるものとし、軸 ox, oy が常にこの平面内に含まれるものとすれば $w=0, p=q=0, \zeta=0, \lambda=\mu=0, Z=0, L=M=0$ である。この場合に対する運動の方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= r\eta + X, & \frac{d\eta}{dt} &= -r\xi + Y, \\ \frac{dv}{dt} &= v\xi - u\eta + N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

上の運動の方程式を潜水艦の潜入運動に応用するために、第1図に示すごとく物体 S は、 ∞ 軸と角 δ をなす方向に V なる速度をもつて（瞬間に）進行しているものとする。潜水艦の場合には ox はその中心線、 δ はトリム角である。（第1図）但し本報告では便宜上「下向きトリム角」を正ととつてある。



第1図 動軸と固定軸との関係

今 A = 排水量 (m^3), γ = 水の重量 (kg/m^3), R = 物体の(原点 0 のまわりの)回転半径, g = 地球重力の加速度 とすれば

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{\gamma}{g} (1+k_1) A \cdot u, & \eta &= \frac{\gamma}{g} (1+k_2) A \cdot v, \\ r &= \frac{\gamma}{g} R^2 (1+k') A \cdot r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。但し k_1, k_2, k' は仮性質量の係数である。上の(2)式は u, v, r が定常的である場合にのみ厳密に成り立つ。しかるにわれわれは非定常的運動を考えようとするものであるから(2)式は単に略近式であるにすぎないことになるのであるが、実用上差支ないものと思われる。

物体 S の空間における運動を完全に知るために、その絶対的針路との関係を求めねばならない。第1図に示すごとく物体の原点(重心) 0 が空間に画く軌跡を $A \sim B$ なる曲線であるとする。この曲線に引いた接線 OT は物体の進行方向を表わす。軸 Ox が水平線となす角を θ と名付けるときは $\theta = \theta - \delta$ 但し θ は接線 OT が水平線となす角、 δ はトリム角である。空間に対する OT 方向の進行速度を V と付けるときは

$$\left. \begin{aligned} u &= V \cos \delta, & v &= V \sin \delta, \\ r &= \frac{dp}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\delta}{dt} \end{aligned} \right.$$

なお実用上角 δ および θ は約 20° をこえない筈であるから（特殊の場合を除けば） $\cos \delta \approx 1, \sin \delta \approx \delta$ と見做される。これらの値を(2)に代入し、且つ(1)によつて、その運動に対する外力の値を求める

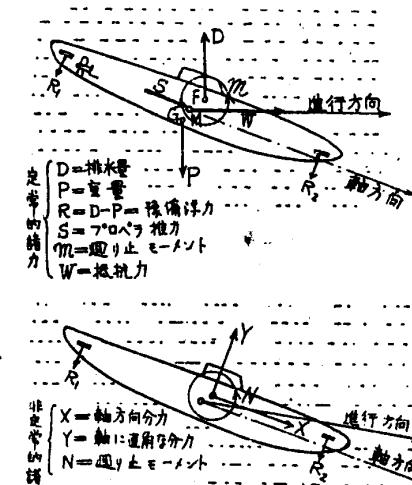
$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{\gamma}{g} A \cdot V (1+k_2) \delta \left(\frac{d\delta}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \right) \\ Y &= \frac{\gamma}{g} A \cdot V \left[(1+k_1) \frac{d\theta}{dt} - (k_2 - k_1) \frac{d\delta}{dt} \right] \\ N &= \frac{\gamma}{g} A \cdot R^2 (1+k') \left[\frac{d^2\theta}{dt^2} - \frac{d^2\delta}{dt^2} \right] \\ &\quad + \frac{\gamma}{g} A \cdot (k_2 - k_1) V^2 \cdot \delta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる。これが運動の方程式である。式中にトリム角 δ はなお未知数として残されている。

舵モーメントとトリム角との関係 潜入運動をなしつつある潜水艦に作用する諸力の関係を図示すれば第2図のごとくである。しかし実用上下のごとく考える。即ち水中を一定速度 V_0 且つ一定のトリム δ で進行するとき ∞ 軸に垂直に作用する力 Y_e と重心の廻りの廻りモーメント N_e は

$$\left. \begin{aligned} Y_e &= \frac{\gamma}{g} A^{2/3} V_0^3 (m - n\delta) \\ N_e &= \frac{\gamma}{g} A \cdot V_0^3 (m' - n'\delta) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

但し m, n, m', n' は無名数であつて物体の形状によって定まるものである。回転橍円体のごとき軸対称形の物体においては $m=0, m'=0$ となる理である。この力及びモーメント(4)の成り立ちについても説明すべき事項



第2図 潜入運動をしつつある潜水艦に加わる力の関係

があるが、ここに省略する。

針路傾斜角 θ とトリム角 δ との関係： 上の運動の方程式(3)においても第1式は x 方向の力に関するものであり推進器推力、進行抵抗等の釣合いを示す。次に第2式は y 方向の諸力の釣合いを示すものであり $Y=Y_e$ なるを要する。即ち

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{g} A \cdot V \left[(1+k_1) \frac{d\theta}{dt} + (k_2 - k_1) \frac{d\delta}{dt} \right] \\ = \frac{\gamma}{g} A^{2/3} V_0^2 (m - n\delta) \end{aligned}$$

以下において速度 V は一定値 V_0 をとるものと仮定する。(之は實際上余り正確でない場合と、可なり正確に当てはまる場合とが生ずることになるが、今は簡単のため V が一定の場合だけを取扱う) さて簡単のために

$$(1+k_1)/(k_2 - k_1) = \alpha, V_0 A^{-1/3} n / (k_2 - k_1) = \beta, V_0 A^{-1/3} m / (k_2 - k_1) = \varepsilon$$

とおくときは上式は

$$\alpha \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\delta}{dt} + \beta\delta - \varepsilon = 0 \quad (5)$$

となる。これより δ を求めると

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\beta} - \alpha e^{-\beta t} \int_0^t e^{\beta t} \frac{d\theta}{dt} dt \quad (6)$$

となる。但し潜入運動の開始期 $t=0$ において $Y=Y_e=0$ とした。

3. 運動の方程式の実用的解法

ここでは特殊函数や複雑な数式を用いることなく、大体の値を求める一方法を示そう。潜入運動の開始時 $t=0$ において、物体の重心点は第3図の0の位置にあるものとし、潜入運動の終期 $t=T$ において D なる深度の一点 A に到達するものとする。その間は図の $0MA$ のごとき曲線をたどるものとする。物体の進行方向角度 θ は第3図(b)のごとくになり、 θ の絶対値は点 M' において最大値 Θ をとる。潜入運動の始め及び終りにおいては $\theta=0$ である。又潜入運動の開始時 $t=0$ においては角速度 r 及び角加速度 dr/dt は0であると考えるのが至当である。(6)を微分してみれば、 $t=0$ において

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)_0 = -\alpha \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_0, \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right)_0 = \alpha\beta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_0 - \alpha \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right)_0$$

なることが知られ、一方において $r=(d\theta/dt)-(d\delta/dt)$ であるから、 $t=0$ において $d\theta/dt=0, d^2\theta/dt^2=0$ なるごとく定めておけばよい。曲線 $0MA$ の形は舵の操作法如何によつて左右されるが、ここでは上記の条件に適する最も簡単な一例として

$$\theta = -K \sin^3 \frac{\pi t}{T} \quad (7)$$

ととつてみよう。或いはこれを

$$\theta = -\Theta \left[\frac{3}{4} \sin \frac{\pi t}{T} - \frac{1}{4} \sin \frac{3\pi t}{T} \right]$$

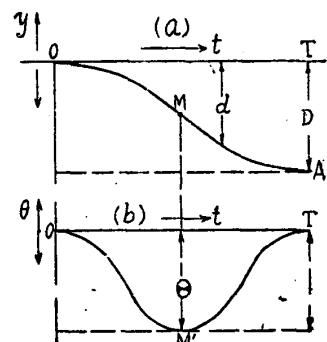
とも書くことができる。全深度 D は略近的に

$$D = - \int_0^T V_0 \theta dt = \frac{4}{3\pi} \Theta \cdot V_0 T \quad (8)$$

によつて与えられ、従つて D が与えられれば最大角 Θ は定まる。上記の θ の値(7)を(6)に代入することによつてトリム角 δ が得られる。その運算は積分公式によつて行うのであるから省略し、結果を示せば

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\varepsilon}{\beta} + \frac{\alpha\Theta}{4} \left[3 \cos s \sin \left(\frac{\pi t}{T} + s \right) \right. \\ &\quad \left. - \cos s' \sin \left(\frac{3\pi t}{T} + s' \right) \right] - \frac{\alpha\Theta}{8} [3 \sin 2s - \sin 2s'] e^{-\beta t} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。但し簡単のために



第3図 潜入運動を指定する曲線

$$\tan s = \frac{\beta T}{\pi}, \tan s' = \frac{\beta T}{3\pi}$$

によつて定義された角 s, s' を用いて表わしてある。

舵力モーメントの計算 次にこのような運動を起させるために必要な舵力モーメントの値を求めてみよう。先づ一定のトリム角 δ で定常的に水平方向に進行する場合に対するは、(3)の第3式により

$$N_a = \frac{\gamma}{g} A(k_2 - k_1) V^2 \delta$$

即ちこれだけのモーメント N_a を作用させて物体が廻らぬようにせねばならない。しかしこれは理論値であるにすぎない。実際の場合には N_r なる摩擦抵抗モーメントが生じるから、更に之に対抗するために $-N_r$ なるモーメントを外部から加えねばならない。従つて外部モーメントは $N_e = N_a - N_r$ なる値となるのである。

次に潜入運動の場合を考えよう。この場合には(7), (9)の値を(3)の第3式に代入することにより

$$\begin{aligned} N_b = & \frac{\gamma}{g} A(1+k') \left(\frac{\pi R}{T}\right)^2 \cdot \frac{3}{4} \Theta \left(\sin \frac{\pi t}{T} - 3 \sin \frac{3\pi t}{T} \right) \\ & + \frac{\gamma}{g} A(1+k') \left(\frac{\pi R}{T}\right)^2 \cdot \frac{3\alpha}{4} \Theta \left[\cos s \sin \left(\frac{\pi t}{T} + s\right) \right. \\ & \left. - 3 \cos s' \sin \left(\frac{3\pi t}{T} + s'\right) \right] \\ & + \frac{\gamma}{g} A(1+k') \frac{\alpha}{8} \Theta (\beta R)^2 [3 \sin 2s - \sin 2s'] e^{-\beta t} \\ & + \frac{\gamma}{g} A(k_2 - k_1) V_0^2 \delta \end{aligned} \quad (10)$$

なる値が得られる。これは理論値であるが、上の直線運動の場合と同様に考えると、この運動をおこさせるために必要な外部モーメント、即ち必要な舵力のモーメントの値 N_R は $N_R = N_b - N_r$ によって求められる。尙ほ实用上 N_b の代りに

$$n_b = \frac{N_b}{\frac{\gamma}{g} A(k_2 - k_1) V_0^2}$$

によつて定義せられた係数 n_b を用いるのが便利である。そして

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{\alpha}{4} \left[3 \cos s \sin \left(\frac{\pi t}{T} + s\right) - \cos s' \sin \left(\frac{3\pi t}{T} + s'\right) \right] \\ \psi(t) &= \frac{\alpha}{8} [3 \sin 2s - \sin 2s'] e^{-\beta t} \\ \phi(t) &= \frac{3}{4} \alpha \left[\sin \frac{\pi t}{T} - 3 \sin \frac{3\pi t}{T} \right] \\ & + \frac{3}{4} \alpha^2 \left[\cos s \sin \left(\frac{\pi t}{T} + s\right) - 3 \cos s' \sin \left(\frac{3\pi t}{T} + s'\right) \right] \end{aligned}$$

なる補助函数を用いれば

$$\left. \begin{aligned} n_b &= \left(\frac{\pi R}{V_0 T} \right)^2 \Theta \phi(t) + \alpha \left(\frac{\beta R}{V_0} \right)^2 \Theta \psi(t) + \delta \\ \delta &= \delta_0 + \Theta [\varphi(t) - \psi(t)] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

と書き表わすことができる。但し $\delta_0 = \varepsilon / \beta$ である。後文に示すごとく $N_r = (1-\eta) N_e$ ととるのが便利である。そして N_R の代りに無名数

$$n_R = N_R + \left[\frac{\gamma}{g} A(k_2 - k_1) V_0^2 \right]$$

を用いることすれば

$$n_R = \left(\frac{\pi R}{V_0 T} \right)^2 \Theta \phi(t) + \alpha \left(\frac{\beta R}{V_0} \right)^2 \Theta \psi(t) + \eta \delta \quad (12)$$

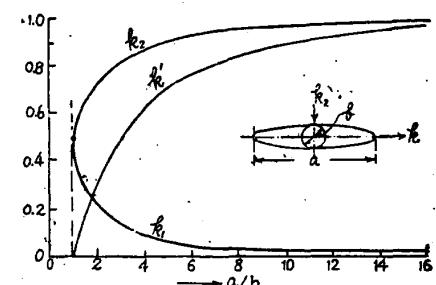
となる。

以上で舵力モーメントの値は分つた。 n_R は殆んど針路の最大傾斜角 Θ に比例しているから、舵力モーメントは

潜水艦潜入運動の解析

潜入深度にはほぼ比例した値をとる。

仮性質量係数 k_1, k_2, k' の値 回転楕円体に対するこれらの係数の理論値は分つてある。その値を曲線に示せば第4図のごとくであり、比 a/b の値が 10 以上では殆んど一定値をもつ。それ故通常の潜水艦のように細長い形をしたものにおいては、その細部形状は仮性質量に余り影響しないであろう。但し実際の潜水艦は厳密な対称軸をもたないから、もし之を回転楕円体で代表しようとすればその軸方向をどうとするべきかは尙ほ考える余地がある。ここでは概略値として $k_1 = 0.02, k_2 = 0.96, k' = 0.88$ とすることとした。次に長径 a 、短径 b なる回転楕円体の回転半径 R は $R^2 = (a^2 + b^2)/20$ によって与えられるが、略近的に $R^2 = a^2/20$ としてもよい。潜水艦そのものの R の値が与えられたとき、之と等価な回転楕円体の長径 a を求めることができます。



第4図 回転楕円体に対する附加質量の係数

4. 実際の潜水艦に対する資料

上記の理論的計算に実際的数値をあてはめるために、2, 3 の潜水艦に対するデータを検べた。第1表にこれを

第1表 潜水艦の基本資料

艦名	排水量 (水中)t	全長 m	縦傾斜モーメント係数		垂直分力係数		δ_0	回転半径 R m
			m'	n'	m	n		
A	2950	97	0.009	0.58	0.009	0.21	0.35°	21.5
B	3190	105	0.002	0.51	0.004	0.27	0.15	23.4
C	2300	90	0.007	0.68	0.002	0.31	0.4	20
D	2354	100	0.012	0.64	0.003	0.22	1.0	22.2
E	1060	64	0.010	0.79	-0.001	0.23	0.65	14.1
F	1200	74	0.007	0.76	0.006	0.22	0.4	16.5
G	1165	69	0.012	0.93	0.006	0.19	1.2	15.5

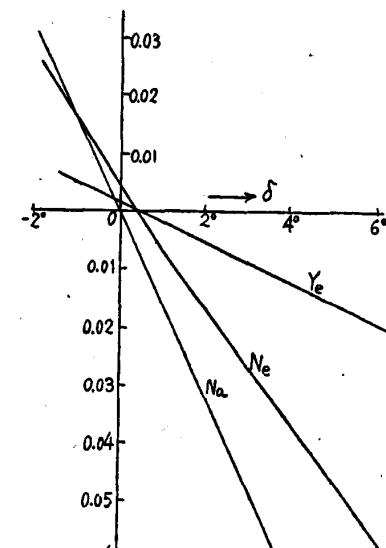
艦名	浸水面積 m ² (水中)	艦の重心より水面までの距離 (実験時) m
A	2947	13.9
B	2147	16.1
C		7.93
D	1858	8.13
E		7.22
F	1144	7.3
G		7.16

示す。表中の m, n, m', n' の値は船体附加物附の場合の値であり、 δ_0 は縦傾斜モーメント = 0 の状態に対するトリム角を示す。

潜水艦に対しては廻りモーメント N_e を縦傾斜モーメント垂直分力 Y_e を抵抗垂直分力と称する。第1表に示した艦型の内の或るものに対する N_e, Y_e の値を曲線に示せば第5図乃至第11図のごとくである。但しそれぞれ $(\gamma/g)4 \cdot V_0^2$ および $(\gamma/g)4^{2/3} V_0^2$ で割った値を示してある。実際の値は必ずしも速力 V_0 の自乗に比例して変化していないが、

ここでは一種の平均値の意味でこれを示してある。

第5~10図の値は小型模型による実験値でありしかも没入深度が小さいのであるが、大体の値を知るためにこれを用いた。

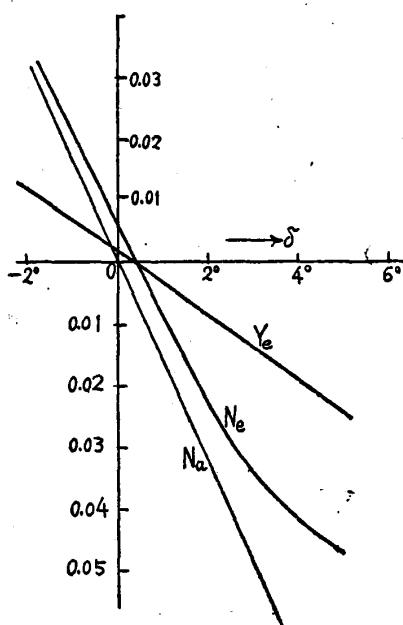


第5図 水中性能曲線（艦型A）
模型比 1:500
附加物付

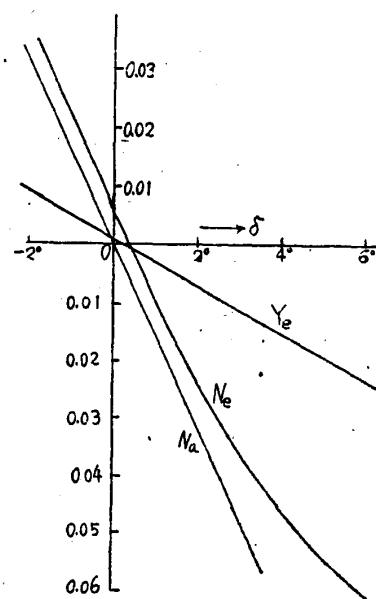
縦傾斜モーメントの検討 曲線図の中に理論的縦傾斜モーメント、即ち

$$N \div [(\gamma/g)4. V_0^3 (k_2 - k_1) \delta]$$

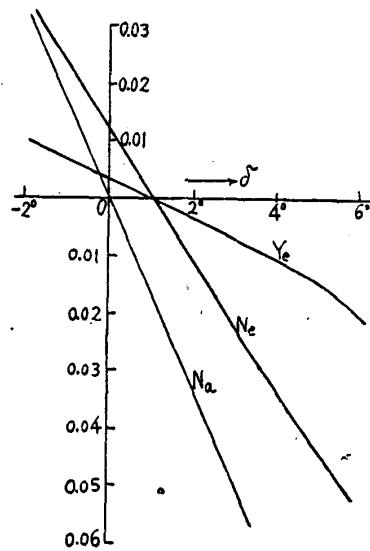
の値が記入してある。先ず縦傾斜モーメントの理論値と実験値とを比較しよう。理論値は直線であるが、実験値は必ずしもそうでない。しかしトリム角 δ が $0 \sim 4^\circ$ の間では大体において直線的である。両曲線の傾斜は可なり一致しているが多少の例外はある。ここに理論値と称するのは与えられた潜水艦に対し主要寸法が一致するところの回転橈円体に対する値である。もし水に粘性がなく渦の発生等もなければ両曲線の傾斜は一致するであろうと推定される。2, 3 の艦型を除けば縦傾斜モーメントが 0 となると同じトリム角において垂直分力も 0 となつていて。縦傾斜モーメントが 0 となるところの角 δ_0 の値は第1表に記入してある。もし潜水艦々型を 1 個の回転橈円体と見なすなればその軸中心線は角 δ_0 だけ傾けたものを想定すべきである。



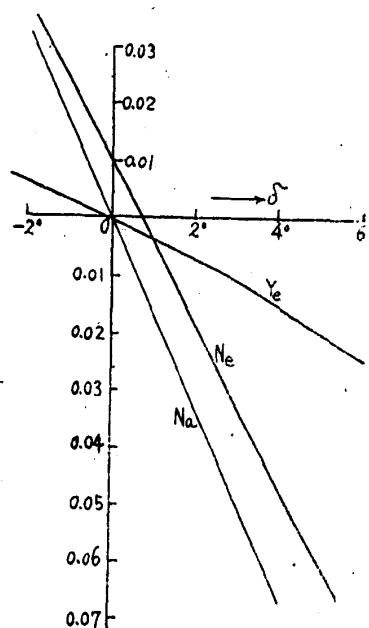
第6図 水中性能曲線（艦型B）
模型比 1:500
附加物付



第7図 水中性能曲線（艦型C）
模型比 1:480
附加物付

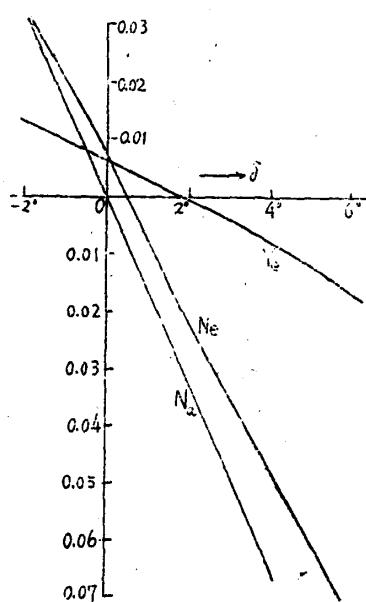


第8図 水中性能曲線（艦型D）
模型比 1:500
附加物付

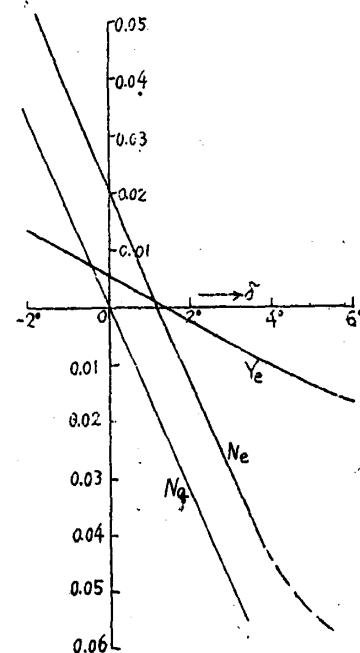


第9図 水中性能曲線（艦型E）
模型比 1:320
附加物付

潜水艦潜入運動の解析



第10図 水中性能曲線(艦型F)
模型比 1:320
附加物付



第11図 水中性能曲線(艦型G)
模型比 1:400
附加物付

5. 潜入運動の解析

上記の考により総傾斜モーメントの理論値、並に実験値をそれぞれ

$$N_a = \frac{\gamma}{g} 4(k_2 - k_1) V_0^2 (\delta - \delta_0)$$

$$N_c = \frac{\gamma}{g} 4n' V_0^2 (\delta - \delta_0)$$

と書く。それ等の値の比をとれば

$$N_c/N_a = \eta = n'/(k_2 - k_1)$$

である。舵力モーメントの計算は公式(12)によつて行うことができる。

舵角と舵力モーメントとの関係は概略次のように考えられる。ここに長短軸の比が 10 であるところの回転半円体を考えるなれば $b = 0.584^{1/3}$, $a = 5.84^{1/3}$ であり、その投射面積は

$$\frac{\pi}{4} ab = 2.654^{2/3}$$

となる。総舵面積は投射面積の 3.5% と仮定すれば総舵面積は $0.0934^{2/3}$ となる。前後舵軸間の距離を $0.9a$ とし、舵角を θ_r 、揚力係数を C_a とすれば、舵力のモーメントは、略近的に

$$N_r = \frac{\gamma}{2g} V_0^2 C_a \times \left(\text{舵面積} \times \frac{1}{2} \right) \times 0.9a$$

である。平板の場合には $C_a = 2\pi \sin \theta_r$ であるが、舵はスペクトル比が小さいから、その 0.6 倍をとることとした。かようにして

$$N_r = 0.945 \frac{\gamma}{2g} V_0^2 4\theta_r$$

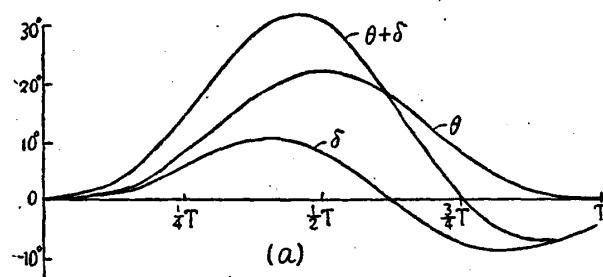
となる。従つて、 $k_2 - k_1 = 0.94$ として $n_r = 0.51\theta_r$ なる公式が得られる。

以上のような前提の下に第1表における B, C, F, G なる 4 種の艦型に対して詳細な数値計算を行つた。その計算に用いた基礎的数値は第2表のごとくである。

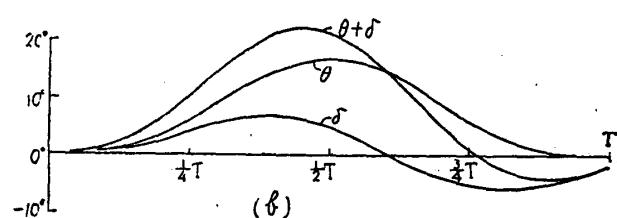
之等のものに対し、 $V_0 = 5 \text{ m/sec}$ (10 艦), 潜入深度 $D = 50 \text{ m}$, とし潜入完了時間 T は 60, 80, 100, 150 sec の 4 種をえらんだ。計算の結果は第12図乃至第15図の曲線図に示してある。数値計算を行うためには、 $\phi(t)$, $\psi(t)$ 等のグラフがあれば便利である。そのグラフを第16図乃至第21図に示してある。但し $\alpha = (1+k_1)/(k_2 - k_1) =$

第2表 数値計算の本とした値

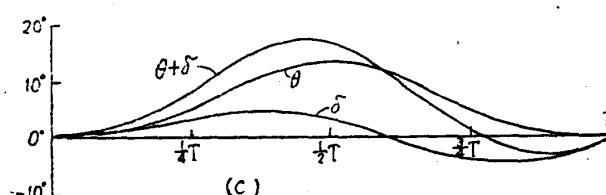
艦名	$A^{1/3}$	V_0 m/sec	α	β 1/sec	ε 1/sec	$\beta R/V_0$
B	14.72	5	1.08	0.0975	0.0014	0.456
C	13.20	5	1.08	0.125	0.0008	0.500
F	10.33	5	1.08	0.111	0.003	0.366
G	10.52	5	1.08	0.097	0.003	0.301



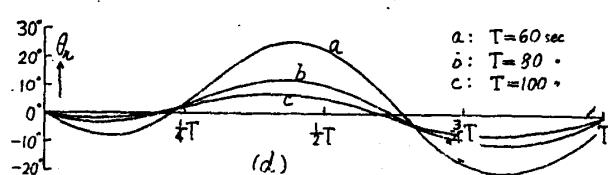
第12図 (a) 計算結果(艦型B)



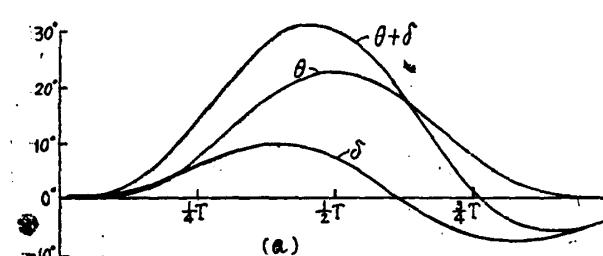
第12図 (b)



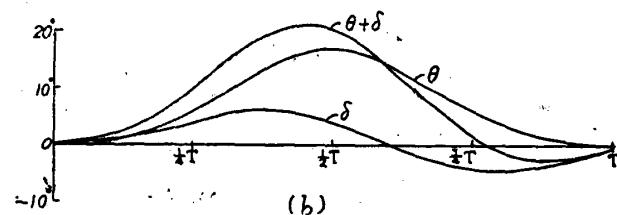
第12図 (c)



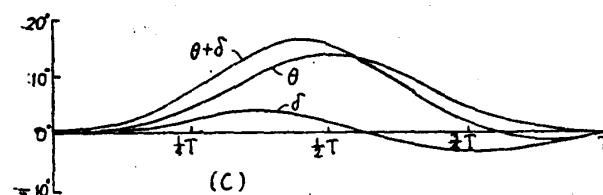
第12図 (d)



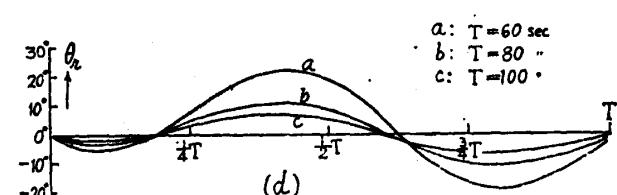
第13図 (a) 計算結果(艦型C)



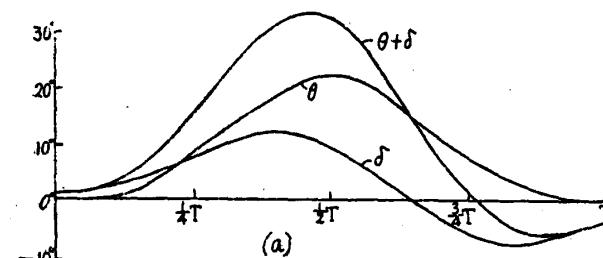
第13図 (b)



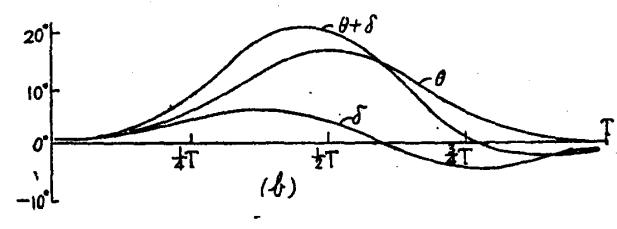
第13図 (c)



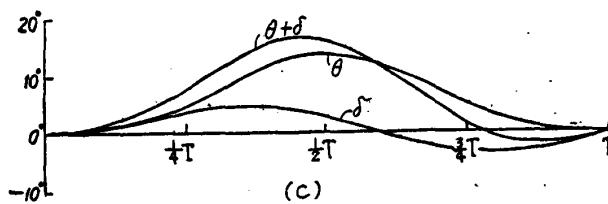
第13図 (d)



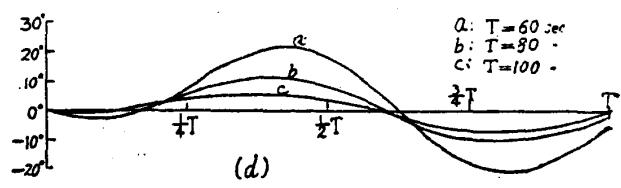
第14図 (a) 計算結果(艦型F)



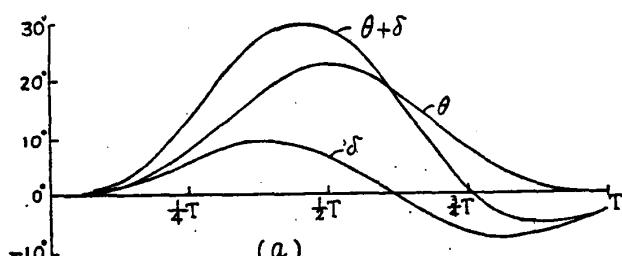
第14図 (b)



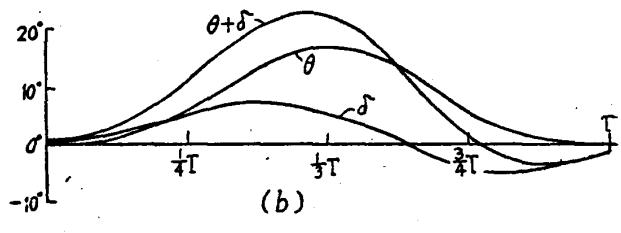
第14図 (c)



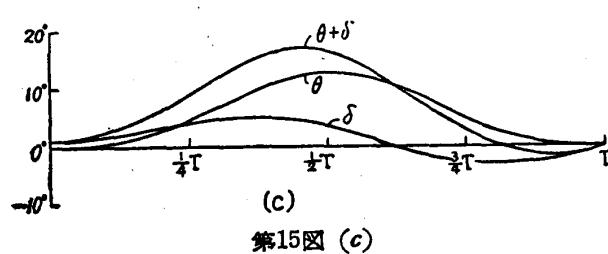
第14図 (d)



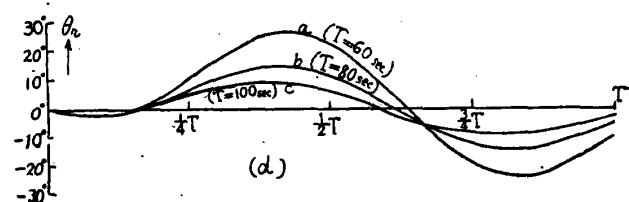
第15図 (a) 計算結果(艦型G)



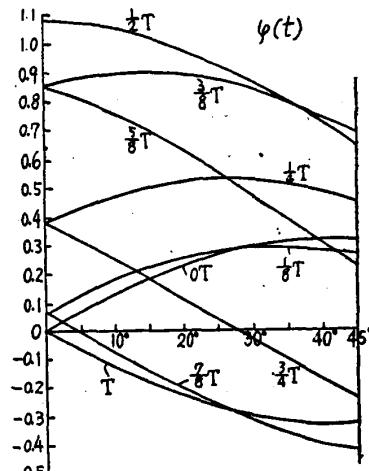
第15図 (b)



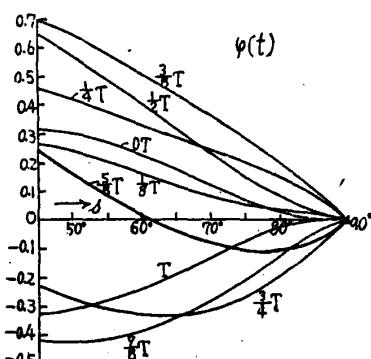
第15図 (c)



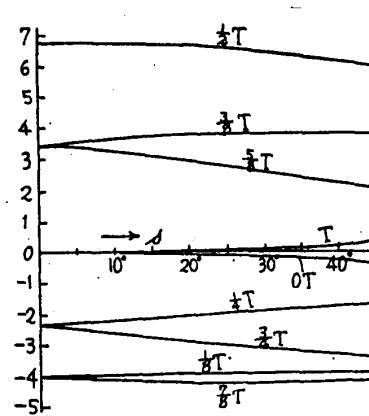
第15図 (d) 計算結果(艦型G)



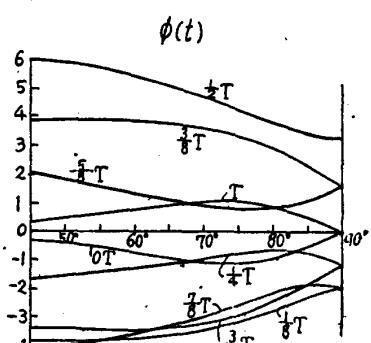
第16図 曲線ϕ(t) (その1)



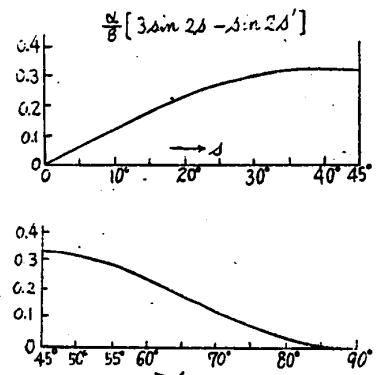
第17図 曲線ϕ(t) (その2)



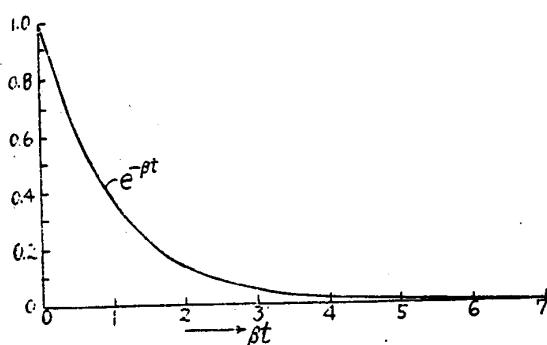
第18図 曲線ϕ(t) (その1)



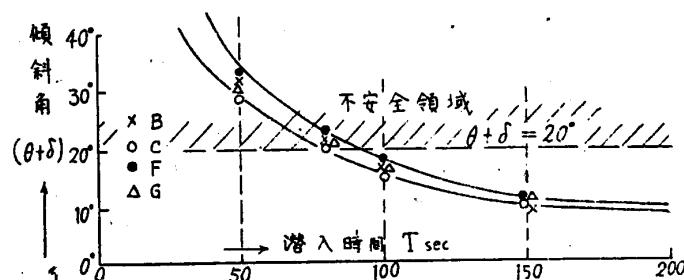
第19図 曲線ϕ(t) (その2)



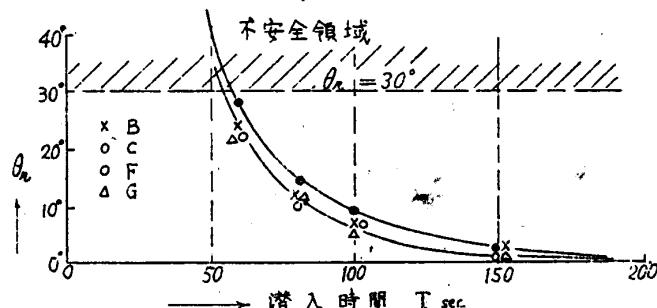
第20図 補助函数値(その1)



第21図 補助函数値(その2)



第22図 傾斜角から見た安全領域



第23図 舵角から見た安全領域

$1.02/0.94 = 1.08$ ととつてある。

かようにして計算結果が得られたのである。以下にその結果に対する検討を行つてみよう。第12図乃第15図によつて潜水艦の潜入運動中において、針路傾斜角 θ トリム角 δ 、舵角 θ_r 等がどんな時間的変化をするかを知ることができる。トリム角 δ は約 10° をこえていないから、角 δ が小さいとした始めの仮定は不当でなかつたと思われる。

最大傾斜角及び最大舵角は潜入時間 T によつて著しく異り、潜入時間 T と逆比例的関係にある。それを図示すれば第22図及び第23図のごとくになる。最大傾斜角及び最大舵角は艦種によつて著しい差違はない。(但し現在の調査の範囲内において) 潜入時間 T を短縮しようとすれば艦体中心線の傾斜角 $\theta + \delta$ 及び舵角 θ_r が逆比例的に増大し、遂には艦の安全性を失うに至る。例えは最大傾斜角 $\theta + \delta$ を 20° とおさえ、又最大舵角 θ_r は 30° (余裕をのこして) ととるものとし、第22図及び第23図の中にそれぞれ $\theta + \delta = 20^\circ$ 及び $\theta_r = 30^\circ$ なる横線を引き、之以下の部分のみが安全であると考える。そうすると艦体傾斜の見地からは潜入時間 T は約 80 sec まで短縮し得るにすぎないのであるが、舵角だけの見地よりすれば 60 sec まで短縮してよいことになる。故に潜入時間の短縮を行おうとして先ず行詰まるのは舵角ではなくて艦体の傾斜であることとなる。仮りに艦体の傾斜を 30° まで許し得るとしても最短潜入時間は約 50 sec. であり、それ以上に縮めることは現今の型の潜水艦としては困難であろう。

6. 附記事項

(イ) 上の計算では進行速力 V_0 を一定としたが、之は計算を簡単にするためである。もし V が一定でなけれ

ば、(3) の X, Y にそれぞれ $(\gamma/g)A(1+k_1)(dV/dt), (\gamma/g)A(1+k_2)\delta(dV/dt)$ なる項が追加される。そして微分方程式(5)における係数 β, ϵ の値は

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \left(\frac{1+k_2}{k_2-k_1} \right) + \frac{A^{-1/3}V}{(k_2-k_1)} n,$$

$$\epsilon = \frac{VA^{-1/3}}{k_2-k_1} m$$

となり、之等のものは時間 t の函数である。 V を時間 t の或る簡単な函数形に仮定して計算を行うこともできる。

(ロ) 上の計算では浮力は考に入れてない。しかし浮力(負浮力、又は予備浮力)が若干ある場合に対しては上の計算をそれだけ修正すればよい。トリム角 δ に対しては $+b_0/\beta$ だけの追加をすればよいことになる。但し浮力を $B_0(\text{ton})$ とするとき

$$b_0 = \frac{gB_0}{\gamma A V_0 (k_2 - k_1)}$$

とおく。いいかえると、負浮力の場合には b_0/β だけトリム角を減じ、予備浮力の場合には之を殺すために b_0/β だけトリム角を増し、そして上記のごとき運動を行えばよろしい。

参考文献

(A) 水中を進行する物体の力学

- (1) G. Greenhill, The Dynamics of Mechanical Flight, 1916. p. 42~47.
- (2) H. Lamb, Hydrodynamics, 6 th Ed., 1932, Chap. VI.
- (3) G. Kirchhoff, Vorlesungen Über Mechanik, 18, 19 Vorlesung.
- (4) W. Thomson and P.G. Tait, Natural Philosophy, Vol. I. Part 1, § 320, etc.
- (5) Milne-Thomson, Theoretical Hydrodynamics, 1938. Chap. XVI, XVII.
- (6) G.-H. Halphen, Traité des Fonctions Elliptiques, II Partie, Chap. IN.
- (7) W.F. Durand, Aerodynamic Theory, 1935, Vol. I. Div.C. Chap III. Vol. VI. Div.Q.R.

(B) 潜水艦の水中性能

- (1) Johow-Foerster, Hilfsbuch für den Schiffbau, p. 1010~1017.
- (2) W. Klein, Grundlagen zu einer Dynamik der Unterwasserfahrt, Schiffbau, 1912.
- (3) K. Schaffran, Modellversuche zur Ermittlung der Fahrstabilität von Unterseebooten, Schiffbau, Feb. 1915.
- (4) W. Hovgaard, The Motion of Submarine Boats in the Vertical Plane, TINA 1901.

p. 61~68

荒天中の自動操舵と Yawing について

元 良 誠 三

○谷 初蔵君 最後のおくれの問題に就ては velocity control を行えば位相が早められるので、或る程度緩和されると思う。最近のものには全部ついて居る。尙私の感じではその時の adjust の方法が不十分な様に思われる。

○元良 誠三君 どの程度の adjust を行つたか記録が取つて無いので判りませんが、逆算して見ると 3° 位のガタがあつた様に思われる。

○(座長)木下 昌雄君 一見複雑に見える荒天中の yawing について吾々に判りやすい方法で解析され、見事な成果を得られた。日聖丸の実験の結果からは未だ掘り出されるべき宝が潜んでいる様に思われる。今後共引き続き研究されて、更に我々に御示し下さることを希望して止まない。(拍手)

p. 69~87

潜水艦潜入運動の解析

徳川 武定
鬼頭 史城

○丸尾 孟君 この運動方程式は定常状態に対するものであると思うが、Lamb の教科書にある様な水中を働く物体の運動の一般的な取扱いが出来ると思うが……次に実用的解法で θ が(7)で与えられるが、この選び方は最後の結果に大きな effect を与えないものだろうか。例えば他の函数でやつて見られたら何なんなものか。

○鬼頭 史城君 第1については、この計算における水の仮性質量などのとり入れ方は之は勿論定常状態のものであるが、此の程度の実用的数値を得るには一応の答が出るのではないかと思う。第2の(7)式で押えたのは、逆に舵のとり方を先ず与えるのも一方法と思えるが、兎に角実用の面から見て簡単な計算を行う為にこの様な方法をとつた。曲線をかえると答は少し異つて来ると思う。然し根本的に結論をひつくり返す事はないと思う。 $\tan^{-1}k(t+t_0)$ を用いるのも良いが、ここに書いたより複雑な扱いにくい式になつたので今回の発表の計算には用いなかつた。

○田宮 真君 Fig. 20 で安全限度を 20° に抑えられたが、之は如何なる理由であるか。

○鬼頭 史城君 私は潜水艦の設計の専門ではないので、徳川氏に書面で返事を願うこととする。

○徳川 武定君 万一過度の傾斜になつたら水平舵の舵モーメントだけでは抑えきれなくなる恐れがある。又大型潜水艦の場合には、艦長が 100 m 以上にもなるから潜入時に過度の傾斜になれば、慣性の為底について仕舞う恐れもある。夫等を考慮してここでは実用上許し得る艦傾斜を 20° とおされた次第である。(書面にて解答)

○谷 初蔵君 舵は前後両方用いられるか。

○鬼頭 史城君 そうです。

○谷 初蔵君 計算では前後の舵にかかる力は同じと言う仮定で行われたか。

○鬼頭 史城君 そうです。前後同じものとしてやらないと、少くとも一意的な答が出ないと思ったのでそうした。ここではこの仮定の下で舵の揚力からモーメントを出すと言う考だけで行つた。

○(座長)木下 昌雄君 両氏は潜水艦潜入運動の解析について簡単な理論でこれを解かれ、水平面と同じ様な運動方程式を立て普通に舵角を与えて、解くと非常に複雑となる所を使用目的に応じた略算法を用いられた。之は名人芸で両氏にして初めて出来る事である。要求内の精度で略算法を示された事は我々にとつて非常な幸である。今後共にこの様な有益な論文を御発表下さる様御願いする次第である。(拍手)