九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

水中浮力基礎(S.B.B.)の理論

渡辺, 恵弘
元応用力学研究所所長

https://doi.org/10.15017/4743483

出版情報：應用力學研究所所報. 37, pp.1-20, 1972-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

水中浮力基礎（S. B. B.）の理論

渡　辺　恵　弘*

概　要

本論文は，没水せる浮力体と水面上にある基地台および wire rope とから構成される水中浮力基礎（Submerged Buoyant Basement）の安定性に関する理論をのべると共に，その設計基準等について論じたものである．

1. 緒　言

元海軍技術大佐畑敏男君は水中浮力基礎 Submerged Buoyant Basement（S. B. B.）なるものを考案し，2，3 の造船所で実物をつくつたが，いずれも失敗している．

この考え方は必ずしも根本的に誤りがあるわけではなく，唯その方法に制限があり，この制限内で設計すれば良いのであるが，一部では根本的に欠陥があるかに誤解されている様に思われる．

海洋工学が現在脚光を浴びつつある．この考案が実用化されるか否かは別問題として，その根本的な性質を明らかにする事は無駄ではないと思う．

筆者は，この問題に興味を持つたので（畑君は筆者の一高以来の同窓），その考えた所を以下において述べたいと思う．

唯この考案を実施するには，安全装置，横漂流の防止法，施工法，耐久性と補修等の各種の問題がある様に思われる．

このうち横漂流（又は水平移動）防止又は制限については Anchor chain 等によれば良いが，その計算法についても知らなければならない．

2. 基本的原理の概念

図1で，S. B. B. は，Ⓔの基地台（Basement）と，Ⓕの浮力体（Buoyant body）および AC，BD（この外に AD，BC の diagonal）の wire rope とより成り，Ⓔ，Ⓕおよび wire ropes 全体の重量 W_0 を Ⓕの buoyancy Δ の一部で支え，$\Delta - W_0 = B_R$ を，AC および BD の wire rope の Tension $2T_0$ で balance させたものである．

又 AD および BC のdiagonal は，波，風その他（船の接触）の原因によつて生ずる水平方向の力に対してⒺの横方向の移動を防ぐ役目をしている．

それ故，これ等の wire rope は海底に充分しつかり固着されなければならない．

普通，浮力体が水面下にある場合は，丁度潜水艦の場合の如く，横傾斜（heel）に対して安定である

---

* 元応用力学研究所所長

なお本論文は，故渡辺恵弘博士の遺稿であり，田才福造が整理して紹介したものである．

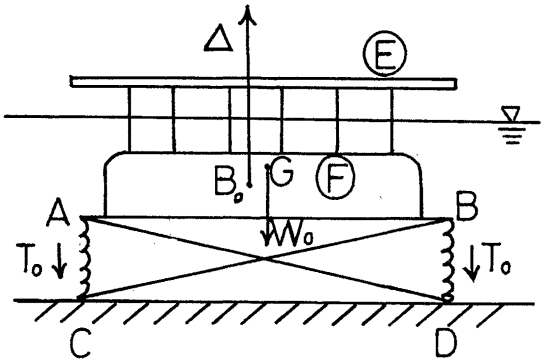

図　1

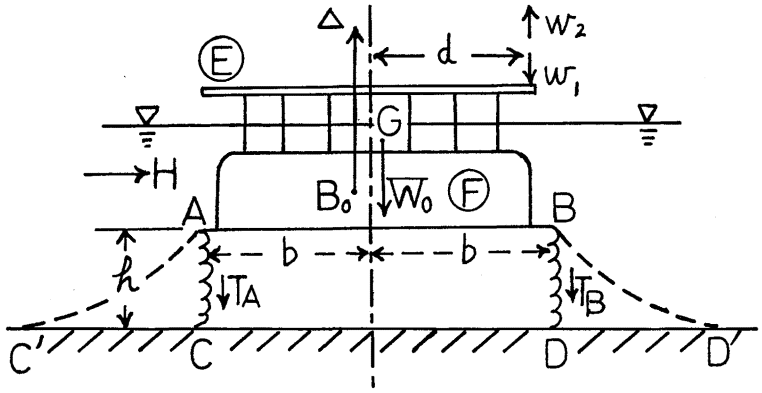

図　2

ためには浮力中心 B_0 は，全体の重心 G より上になければならないことは良く知られている．

然るに，S. B. B. の場合は，Ⓔおよび之に附随する構造物等のために全体の重心を B_0 より下におくことは不可能で，従つて，ⒺとⒻだけでは不安定となる．

然しながら，AC および BD の wire rope があり，之に B_R に相当する Tension が働いておれば，heel によつて収縮した rope の T_0 は減り，伸びた rope の T_0 は増す故，それ等の減つた量と，増した量から来る moment は heel を減らす様に働き，之は丁度水上に浮んだ船の water plane と同様の役目をし，船の場合の $W_0 \cdot \overline{B_0M}$ ($\overline{B_0M}$: metacentric radius) の働きをする．従つてこの effective な $B_0M > B_0G$ であれば，水上に浮んだ船の場合と同様に安定である．

潜水艦の場合は，buoyancy と weight とが等しい故，水面からの深度に対して不安定であることは周知である．然し S.B.B. の場合は，rope の tension が矢張り水上の船の water plane の役をなして一定の深度を保つ役目をしている．

次に，基地台Ⓔの上の任意の位置で w_1 の重量が加わり，又は除去された場合を考える．

水平力Hに対する diagonals の作用に就ては，極めて簡単なので之には触れない．(唯，浮力体Ⓕと

海底との間の距離hが，二つの rope AC と BD 間の距離 $2b$ に対し非常に大きい場合は与えられた H に対する横方向の移動が大となる故，AC′，BD′ の様な ropes が必要となる.）

この様な場合に必要な事は，

〔1〕上下方向の力が balance すること

〔2〕moment が balance すること

〔3〕balance した上で更に stable であること

今 rope から㊦に働く力は，下むきを正にとる．若し AC からの力 T_A と，BD からの力 T_B とは等しくなく，且つ，各 rope の延びが適当であれば，〔1〕の力の balance と〔2〕の moment の balance を満足する様な未知量 T_A, T_B が決められる故，balance の条件を満足させることができる．〔3〕の stable の条件は，各 rope が tension を受けている限り，前に述べたとほぼ同じ理由で満足される．

この様に，S. B. B. の可能な根本の条件は，各 rope に tension が働いているということである．rope の性質上之に compression が働けば浮力体に力が働かなくなるので，S.B.B. の根本原理が成立しなくなる．

然し rope の tension が余り大となれば，yield して，伸びても力は増さず従つて復原する力がなくなり，S.B.B. の stability は成立しなくなる．

rope の伸びと tension の関係が図3に示されるものとすれば，rope の tensile stress σ_t は

$$0 < \sigma_t < \sigma_{all} \qquad (A)$$

を満足するものでなければならない．但し σ_{all} は allowable maximum tensile stress である．この（A）が S.B.B. 設計の基本的条件である．

以下では，これらの考えの下に水上船と比較して S.B.B. の stability および設計の基準となるべき条件について考えてみる．

3. 相当 Metacentric Height

ここでいう metacentric height とは，復原 moment と傾斜角との比である．

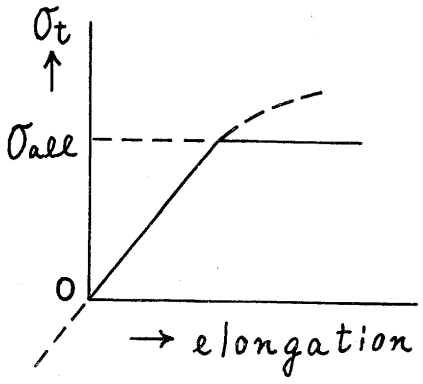

図　3

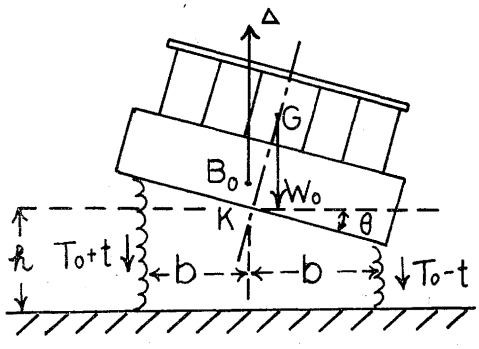

図　4

水上船の場合は，rolling 等を考えるために，metacentric height が過大になることは避けるべきであるが，S.B.B. の場合は rolling に対しては余り考慮を払う必要がない故，metacentric height は出来るだけ大きい方が良い．

図4で，Δ は浮力体の浮力で浮心 B_0 に働く．W_0 は装置全体の重量で重心 G に働く．

左舷側の rope に l，右舷側の rope に r の suffix をつける．左舷 rope を R_l，右舷 rope を R_r とする．rope が延び tension が働いて浮力体に下向きに力が働くが前述の様に，この下向きの力を正とする．

直立状態にある時，両舷には等しい力 T_0 が働き

$$T_0=(\Delta-W_0)/2 \tag{1}$$

θ だけ傾斜すれば

$$T_l=T_0+t \quad , \quad T_r=T_0-t \tag{2}$$

となり，G の周りの復原 moment$=M$ とおけば

$$M=-\Delta\cdot\overline{B_0G}\cdot\theta+(T_0+t)(b+\overline{KG}\cdot\theta)-(T_0-t)(b-\overline{KG}\cdot\theta)$$

(1) を入れれば

$$\mathrm{M}=[-\Delta\cdot\overline{B_0G}+(\Delta-W_0)\overline{KG}]\cdot\theta+2tb$$

(但し $\overline{B_0G}$ は，B_0 が G より下にある場合を正とする)*

上式は更に次の様になる

$$M=(\Delta\cdot\overline{KB_0}-W_0\cdot\overline{KG})\cdot\theta+2tb \tag{3}$$

θ があれば R_l は延び，R_r は縮む．この長さの変化を ξ とおけば，$\xi=b\theta$.

各 rope の断面積を A, Young 率を E とすれば

$$t=EA\frac{b}{h}\theta \tag{4}$$

但し h は rope の元の長さで，Kから海底までの深さ．

(4) を (3) に入れれば

$$M=\left(\Delta\cdot\overline{KB_0}-W_0\cdot\overline{KG}+2EA\frac{b^2}{h}\right)\theta \tag{5}$$

故に metacentric height$=m$ とおき，

$$M\equiv W_0m\theta \tag{6}$$

の定義をとることにすれば

$$m=\frac{\Delta}{W_0}\cdot\overline{KB_0}-\overline{KG}+\frac{2EA}{W_0}\cdot\frac{b^2}{h} \tag{7}$$

ここで $\frac{\Delta}{W_0}\overline{KB_0}\equiv\overline{KB_0'}$ とおけば$\overline{KB_0'}>\overline{KB_0}$ で，Δ および W_0 が既知であるから，B_0 から B_0' が求められる（図5）．

---

* 下から上に記号を書いた場合を正とする．例えば $\overline{B_0G}=-\overline{GB_0}$

$$\therefore\quad m=\frac{2EA}{W_0}\cdot\frac{b^2}{h}-\overline{B_0'G}$$

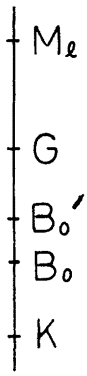

図　5

今　　$$\frac{2EA}{W_0}\cdot\frac{b^2}{h}\equiv\overline{B_0'M_t}\qquad(8)$$

にとれば　　$$m=\overline{B_0'M_t}-\overline{B_0'G}=GM_t\qquad(9)$$

これがこの場合の metacentric height である．

水上船の場合は　　$$m=\overline{B_0M}-\overline{B_0G}=GM\qquad(10)$$

waterplane area の moment of inertia を I_w とすれば，$\overline{B_0M}=\rho gI_w/W_0$ である．(9) および (8) と (10) とを比較すれば，B_0 の代りに B_0' をとり，又 $\frac{2EA}{W_0}\cdot\frac{b^2}{h}$ を metacentric radius，或は

$$\frac{2EA}{\rho g}\cdot\frac{b^2}{h}\equiv I_w\qquad(11)^*$$

を考えれば良いことになる．

このことからわかるように，B_0' が上にある方が有利なる故，Δ/W_0 が大きい程良い．

S.B.B. では water plane が無い（従つて水上船の $I_w=0$）故，安定性に欠陥があると言われているが，両舷の rope がこの役目をなし，しかも (11) の左辺が大きい程 I_w に相当するものが大となり，適当に設計することにより有効な metacentric height を充分増すことが出来る．

4. Stability Curve

水上船の場合は，free board の制限のために，stability curve はある傾斜角で最大となり，それより大きい傾斜角になると減少する．

S.B.B. の場合は，wire rope 内の tension が，(A) で与えられた limits をこえる場合に，stability の減少が起る．

cos $\theta\fallingdotseq1$，sin $\theta\fallingdotseq\theta$ の近似式が成り立つとすれば，stability moment と θ の関係は，(5) で示され，復原性曲線は直線で与えられる．そして R_l の tensile stress が σ_{all} になるか R_r のそれが零になるかで stability はmax. となつて，それ以上の θ では減少する．

以下この点について考えて見る．

(A) R_r の tension が零になる場合

この時の傾斜角を θ_{m1} とする．(1)と(2)より，

$$\left.\begin{aligned}&T_r=0\qquad\therefore\ T_0=t=EA\frac{b}{h}\theta_{m1}\\&\therefore\ \theta_{m1}=\frac{h}{EAb}\cdot T_0=\frac{(\Delta-W_0)h}{2EAb}\end{aligned}\right\}\qquad(12)$$

---

* $\frac{2EA}{\rho gh}$=water plane area，b=環動半径と考えても良い．また (9) の m の中の第2項は第1項に比べて非常に小さく，従つて $m\fallingdotseq\overline{B^{0\prime}M_t}=\frac{2EA}{W_0}\cdot\frac{b^2}{h}=\frac{2}{\omega}\cdot\frac{b^2}{h}$　(9)′

θ_{m1} における復原 moment を $M(\theta_{m1})$ とおけば，(3) 又は (5) に (4) および (12) を入れて，

$$\left.\begin{aligned} M(\theta_{m1}) &= [\Delta\cdot\overline{KB_0}-W_0\cdot\overline{KG}]\theta_{m1}+(\Delta-W_0)b \\ &= (\Delta-W_0)\left\{\frac{h}{2EA}\left(\Delta\cdot\frac{\overline{KB_0}}{b}-W_0\cdot\frac{\overline{KG}}{b}\right)+b\right\} \end{aligned}\right\} \qquad (12)'$$

或は

$$\Delta/EA\equiv\delta, \qquad W_0/EA\equiv\omega \qquad (13)$$

とおけば，δ および ω は無次元化されたものとなり

$$M(\theta_{m1})=(\Delta-W_0)\left\{\frac{h}{2}\left(\delta\cdot\frac{\overline{KB_0}}{b}-\omega\frac{\overline{KG}}{b}\right)+b\right\} \qquad (14)$$

或はまた，$\Delta/W_0\equiv\alpha(>1)$ とおき，3節で述べたように，B_0 の代りに B_0' を考えれば，

$$\Delta\cdot\overline{KB_0}-W_0\cdot\overline{KG}=-W_0\cdot\overline{B_0'G}$$

となる故，

$$\left.\begin{aligned} M(\theta_{m1}) &= W_0(\alpha-1)\left\{b-\frac{h}{2EA}b\cdot W_0\overline{B_0'G}\right\} \\ &= W_0(\alpha-1)\left\{b-\frac{h}{2}\omega\cdot\frac{\overline{B_0'G}}{b}\right\} \\ &= (\Delta-W_0)\left(b-\frac{h}{b}\cdot\frac{\omega}{2}\cdot\overline{B_0'G}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

とも書かれる．

次に $\theta_{m1}<\theta$ の場合は，Rr には全く tension が働かず，$(\Delta-W_0)$ の力は R_l で支えられる（図6）．

従つて

$$\left.\begin{aligned} T_l &= 2T_0=\Delta-W_0=\text{const} \\ T_r &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

故に R_l の長さ（延び）は一定となる．それ故若し θ が増すとすれば，G は沈下しなければならない．

此の時の復原 moment を $M(>\theta_{m1})$ とおけば，

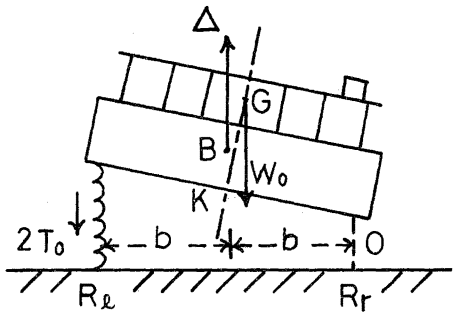

図　6

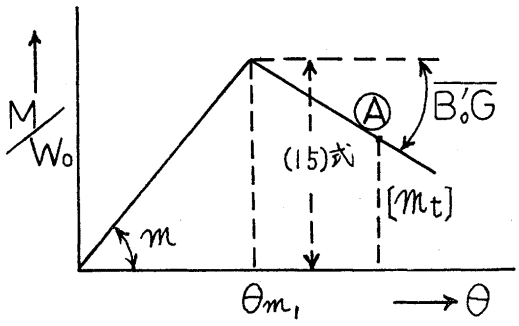

図　7

$$M(<\theta_{m1})=2T_0(b+\overline{KG}\cdot\theta)-\Delta\cdot\overline{B_0G}\cdot\theta$$
$$=(\Delta-W_0)b+(\Delta\cdot\overline{KB_0}-W_0\cdot\overline{KG})\theta \qquad (16)'$$
$$=W_0(\alpha-1)b-W_0\cdot\overline{B_0'G}\cdot\theta$$
$$=W_0\{(\alpha-1)b-\overline{B_0'G}\cdot\theta\} \qquad (17)$$

(17) で，$\theta=\theta_{m1}$ の時は (15) と一致することは (12)′ と (16)′ とを比較すれば明である．

$\theta>\theta_{m1}$ の時は，(17) から明らかな様に，$\overline{B_0'G}>0$ 即ち G が B_0' より上にあれば $\frac{dM(>\theta_{m1})}{d\theta}<0$ となる．普通 B_0' は G より下にあると見られる故，stability curve は図7の様になる*，

S.B.B. の性質としては m および $M(\theta_{m1})$ の値が大きいことが望ましいことは明らかである．

（B）R_l の tensile stress が σ_{all} となる場合

$$A\cdot\sigma_{all}\equiv T_{all} \qquad (18)$$

とおけば，この場合の条件は

$$\left.\begin{aligned} &T_l=T_0+t=T_{all} \quad 又は\ t=T_{all}-T_0 \\ \therefore\ &T_r=T_0-t=2T_0-T_{all}=\text{const} \end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

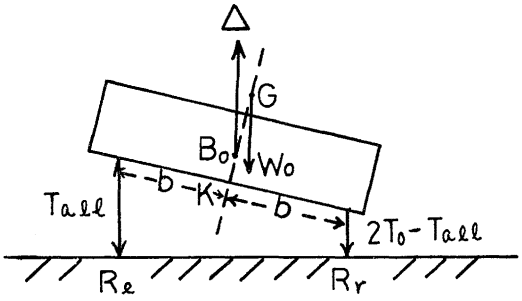

図　8

---

* 若し〔m_t〕の moment が働く場合，θ_{m1} を通り越してⒶになれば，ここでは stability curve の slope は負になる故不安定で〔m_t〕が減少すれば θ が増加する．それ故この状態では傾斜が増すと共に G 従つて装置全体が水中に沈下する．Ⓐでは uprighting couple は働くが unstable である．

この時の θ_m を θ_{m2} とおけば

$$t=EA\cdot\frac{b}{h}\theta_{m2}=T_{all}-\frac{\Delta-W_0}{2}$$

$$\therefore\quad \theta_{m2}=\frac{[2T_{all}-(\Delta-W_0)]h}{2EAb}=\frac{h}{b}\left[\textcircled{6}-\frac{\delta-\omega}{2}\right]\Bigg\} \tag{20}$$

但し　　$\textcircled{6}=\sigma_{all}/E$

この時の復原モーメント $M(\theta_{m2})$ は，(5) に (20) を入れて，

$$M(\theta_{m2})=\left[2EA\frac{b^2}{h}-W_0\overline{B_0'G}\right]\frac{h}{b}\left[\textcircled{6}-\frac{\delta-\omega}{2}\right]$$

$$=EA\left[b-\frac{\omega h}{2}\cdot\frac{\overline{B_0'G}}{b}\right]\left[2\textcircled{6}-(\delta-\omega)\right]$$

$$=\left(b-\frac{\omega}{2}\cdot\frac{h}{b}\cdot\overline{B_0'G}\right)[2T_{all}-(\Delta-W_0)] \tag{21}$$

$\theta>\theta_{m2}$ の場合は T_r=const なる故，その長さは一定であるが，$T_l\leqq T_{all}$ なる故 tension 一定で，いくらでも延びることができる．それ故 θ を増すためには G は上昇して行かなければならない．

$\theta>\theta_{m2}$ の時の復原 moment $M(>\theta_{m2})$ は

$$\left.\begin{aligned}M(>\theta_{m2})&=T_{all}(b+\overline{KG}\cdot\theta)-(2T_0-T_{all})(b-\overline{KG}\cdot\theta)-\Delta\cdot\overline{B_0G}\cdot\theta\\&=-(\Delta-W_0)b+(\Delta\cdot\overline{KB_0}-W_0\cdot\overline{KG})\theta+2b\ T_{all}\\&=-(\Delta-W_0)b+2b\cdot T_{all}-W_0\cdot\overline{B_0'G}\cdot\theta\\&=-W_0\{(\alpha-1)b+\overline{B_0'G}\cdot\theta\}+2b\cdot T_{all}\end{aligned}\right\} \tag{22}$$

それ故 stability curve は図9の様になり，$\theta>\theta_{m2}$ での傾斜は図7と同様に $-\overline{B_0'G}$ である．

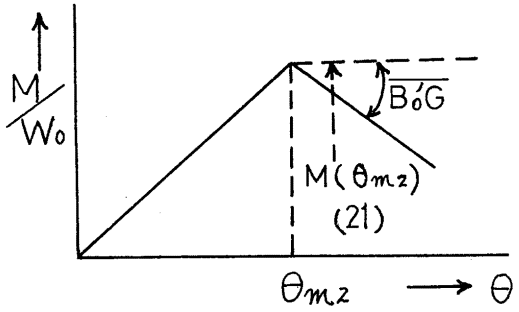

図　9

2.　設計上の考慮点

S.B.B. を設計する上においては，次節（6節）で述べることが重要であると思うが，今迄述べた点についても一応考えておかなければならない点があるので，ここに触れておく．

S.B.B. としては，之に moment $[M_{ex}]$ が働く場合，どれだけのものに堪えうるか重要であり，之は

$M(\theta_{m1})$ と $M(\theta_{m2})$ の中の小さい方の値となる．然るに（15）と（21）からわかる様に，

$$\left.\begin{aligned} \Delta M &\equiv M(\theta_{m2})-M(\theta_{m1})=2\left(b-\frac{\omega}{2}\frac{h}{b}\overline{B_0'G}\right)[T_{all}-(\Delta-W_0)] \\ M_m(\text{平均値}) &=\frac{M(\theta_{m2})+M(\theta_{m1})}{2}=\left(b-\frac{\omega}{2}\cdot\frac{h}{b}\cdot\overline{B_0'G}\right)T_{all} \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

である．その $M(\theta_{m1})$ と $M(\theta_{m2})$ の中の，いずれかが大きくなれば他はそれだけ小さくなる．それ故．それ等の中の小さい方を出来るだけ大きくするには，

$$M(\theta_{m1})=M(\theta_{m2})\equiv M_{\max}$$

にすべきで，換言すれば

$$T_{all}=\Delta-W_0,\quad \delta=\omega+\textcircled{3} \quad (24)$$

となり，そしてその時の $M_{\max}$ は次の様になる．

$$M_{\max}=W_0(\alpha-1)\left(b-\frac{\omega}{2}\cdot\frac{h}{b}\cdot\overline{B_0'G}\right) \quad (25)$$

（a） S.B.B. に $[M_{ex}]$ が働いた場合に，rope が compression にならない条件は，

$$[M_{ex}]<M(\theta_{m1}) \quad (25)'$$

（15）から

$$[M_{ex}]<W_0b(\alpha-1)\left[1-\frac{\omega}{2}\cdot\frac{h}{b}\cdot\frac{\overline{B_0'G}}{b}\right]$$

$$=b(\Delta-W_0)\left[1-\frac{\omega}{2}\cdot\frac{h}{b}\cdot\frac{B_0'G}{b}\right] \quad (26)$$

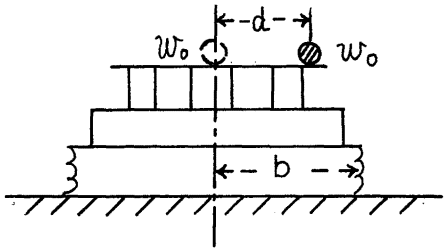

図　10

$[M_{ex}]$ は w_0 の weight を中心線より d だけ動かしたために生ずるものとすれば，

$$[M_{ex}]=w_0d\equiv W_0\varepsilon_0d,\quad(\varepsilon_0=w_0/W_0) \quad (27)$$

（26）と（27）を（25）′ に入れれば，次の関係が得られる．

$$\delta>\omega\left(1+\frac{\varepsilon_0d/b}{1-\frac{\omega}{2}\frac{h}{b}\cdot\frac{\overline{B_0'G}}{b}}\right) \quad (28)$$

（b） 次に rope が yield しない条件は

$$[M_{ex}]<M(\theta_{m2})$$

(21) を用いて同様の計算をすれば

$$\delta<\omega\left(1-\frac{\varepsilon_0 d/b}{1-\frac{\omega}{2}\frac{h}{b}\cdot\frac{\overline{B_0'G}}{b}}\right)+2\,⑥ \tag{29}$$

$⑤=\sigma_{all}/E$ であり，wire rope の σ_{all} および E は，軟鋼の約 70 % と見て，$\sigma_{all}=20\text{kg/mm}^2$，$E=1.5\times10^4\text{kg/mm}^2$ とすれば $⑤=1.3\times10^{-3}$ の order となる．

この範囲では δ，ω も (10^{-4}〜10^{-3}) の order であり，従つて h/b が大きい（非常に深海）場合を除けば，

$$\frac{\omega}{2}\cdot\frac{h}{b}\cdot\frac{\overline{B_0'G}}{b}\ll1$$

（c） 従つて (28)，(29) は近似的に

$$\delta>\omega[1+\varepsilon_0 d/b] \tag{28}'$$

$$\delta<\omega[1-\varepsilon_0 d/b]+2\,⑥ \tag{29}'$$

となり，之等は ε_0 および ω が与えられた時の浮力をあらわす δ の上下限となる．

$\bar{\delta}=\Delta/A$，　$\bar{\omega}=W_0/A$ とおけば，(28)′，(29)′ は

$$\bar{\delta}>\bar{\omega}(1+\varepsilon_0 d/b),\quad \delta<\omega(1-\varepsilon_0 d/b)+2\sigma_{all}$$

とも書かれる．之から見ると，設計には，E は無関係である（rope の伸びを無視したことになる）．

（d） 次に metacentric height をあらわす初期復原力 M_t が正になる条件は，(5) を用いると

$$M_t=W_0 m=EA\left\{\delta\cdot\overline{KB_0}-\omega\cdot\overline{KG}+2\frac{b^2}{h}\right\}$$

$$=EA\cdot\overline{KB_0}\left\{\delta-\omega\cdot\frac{\overline{KG}}{\overline{KG_0}}+2\frac{b}{h}\cdot\frac{\dot{b}}{\overline{KB_0}}\right\}>0$$

又は

$$\delta>\omega\frac{\overline{KG}}{\overline{KB_0}}-2\frac{b}{h}\cdot\frac{b}{\overline{KB_0}} \tag{30}$$

（e） 従つて δ と ω の関係として

理想的な関係	(24)
圧縮にならない関係	(28)′
yield しない関係	(29)′
初期復原力＞0 の関係	(30)

(31)

之等を $\omega-\delta$ を座標に取つた *diagram* をあらわせば図 11 の様になる．

各直線の hatched side が危険な範囲である．(28)′ の $0B$ と，(29)′ の AB とは必ず B で交り，従つて △O AB 内の各点は (28)′ と (29)′ を満足し，(24) は丁度この三角形の中線となる．(30) を表わす DE は遙に下に来る故，△OAB の中の点では当然の事ながら初期復原力＞0 である．

6. 設計の基準

今までは，S.B.B. の全重量は一定として，その中で一部の重量物が移動する様な場合の安定性を検討

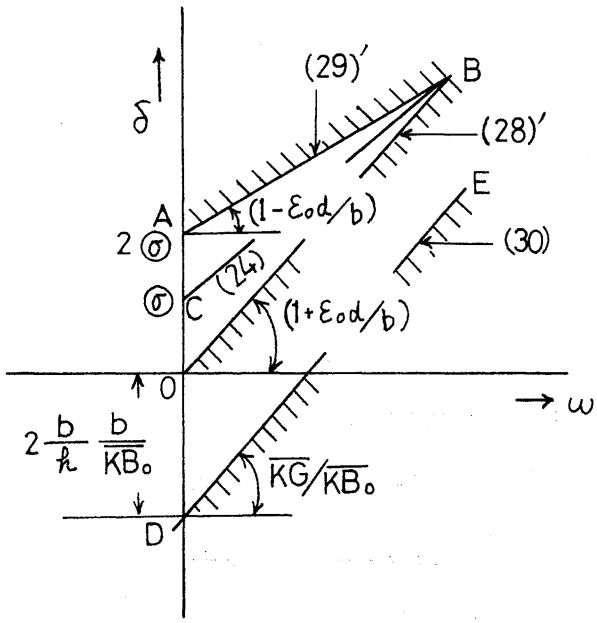

図　11

して来た.

然し作業基地として使用せられる以上は，全体の施設，装備を完了した状態を基準として，今迄述べた安全性の条件を満足したとしても，相当の重量物が基地上任意の場所に搭載されたり，又装備されたものも何等かの理由（Ballast を積む場合は之をおろすとか，相当の重量物を修理のために取り去るとか）で，矢張り任意の場所から取り去られることが起り得る.

水上船の場合は両舷又は前後端の free board（之にもある限度がある）で之に耐えることが出来るのと同様に，S.B.B. の場合も同様の性質を持つことが心要であつて，この様な場合を設計の基準にすべきであり，或は逆に言えば，この様な設計基準から重量物に制限を与えるべきである.

〔A〕w_a を搭載した場合

中心線より d_a の距離に $w_a=W_0\varepsilon_a$ の重量物を搭載した場合を考える.（図12）. この時は先ず w_a を中心線上Eに載せた状態を考え，その後 E より F に水平に d_a だけ動かせば，第2段の操作は5節で述べたと同様である.

第一段階を考える. E に w_a をのせれば，全体の重心 G は G_a に移り，

$$GG_a=\frac{w_a}{W_0+w_a}\cdot GE=\frac{w_a}{W}GE,\quad (W=W_0+w_a) \tag{32}$$

従つて W_0 の代りに W, G の代りに G_a を取ればよい. 又 B_0' の代りに B_{0a}' をとる. 即ち

$$\overline{KB_{0a}'}=\frac{\Delta}{W_0+w_a}\cdot\overline{KB_0'}=\frac{1}{1+\varepsilon_a}\cdot\overline{KB_0'} \tag{32}'$$

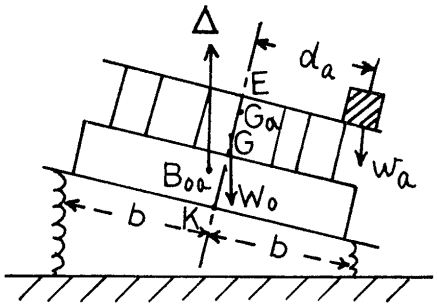

図 12

故に ω および ε_0 の代りに次のものを用いる.

$$\left.\begin{aligned}\frac{W}{EA}&=\frac{W_0+w_a}{EA}=\omega(1+\varepsilon_a)\\ \frac{w_a}{W}&=\frac{w_a}{W_0(1+\varepsilon_a)}=\frac{\varepsilon_a}{1+\varepsilon_a}\end{aligned}\right\}\tag{33}$$

(a) それ故 wire rope が compression にならない条件は, (28) に (33) を入れて

$$\delta>\omega(1+\varepsilon_a)\left\{1+\frac{\dfrac{\varepsilon_a}{1+\varepsilon_a}\cdot\dfrac{d_a}{b}}{1-\dfrac{\omega(1+\varepsilon_a)}{2}\cdot\dfrac{h}{b}\cdot\dfrac{\overline{B'_{0a}G_a}}{b}}\right\}$$

$$\therefore\quad \delta>\omega\left\{1+\varepsilon_a+\frac{\dfrac{\varepsilon_a d_a}{b}}{1-\dfrac{\omega(1+\varepsilon_a)}{2}\cdot\dfrac{h}{b}\cdot\dfrac{\overline{B_{0a}G_a}}{b}}\right\}\tag{34}$$

或は近似的に

$$\delta>\omega\{1+\varepsilon_a(1+d_a/b)\}\tag{34}'*$$

(尚 (34) で $\overline{B'_{0a}G}=\overline{KG}+\overline{GG_a}-\overline{KB'_{0a}}=\overline{KG}+\dfrac{\varepsilon_a}{1+\varepsilon_a}\overline{GE}-\dfrac{\delta\cdot\overline{KB_0}}{(1+\varepsilon_a)\omega}$ であるから, $\omega(1+\varepsilon_a)\overline{B'_{0a}G}$ $=\omega(1+\varepsilon_a)\overline{KG}+\omega\varepsilon_a\overline{GE}-\delta\overline{KB_0}$ とも書かれる).

(b) rope が yield しない条件は (29) に入れて

$$\left.\begin{aligned}&\delta<\omega(1+\varepsilon_a)\left\{1-\frac{\dfrac{\varepsilon_a}{1+\varepsilon_a}\cdot\dfrac{d_a}{b}}{1-\dfrac{\omega(1+\varepsilon_a)}{2}\cdot\dfrac{h}{b}\cdot\dfrac{\overline{B'_{0a}G}}{b}}\right\}+2\text{⑥}\\ &\text{又は近似的に}\\ &\delta<\omega\left[1+\varepsilon_a\left(1-\frac{d_a}{b}\right)\right]+2\text{③}\end{aligned}\right\}\tag{35}$$

---

* R_r が compression になつた時, R_l には $T_l=\Delta-W_0$ の tension がかかる. これが yield しない条件は $\delta-\omega<$ ⑥, (または $\bar{\delta}<\bar{\omega}+\sigma_{all}$) (34)″

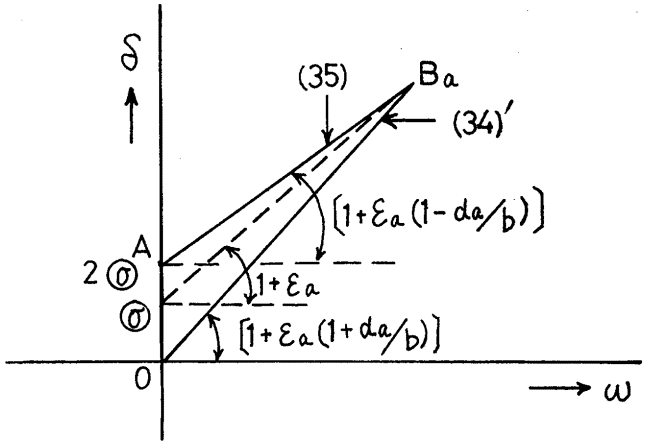

図　13

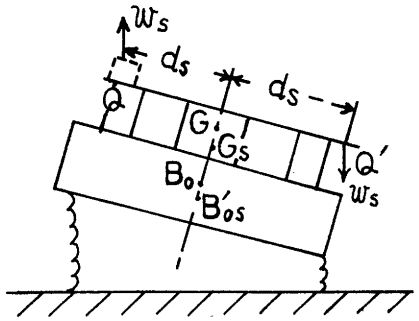

図　14

δ—ω の diagram にかけば，図13となり，$\triangle OAB_a$ の内部が（34），（35）の条件を満足する．

〔B〕 w_s を取り去つた場合

図14に示す様に，中心線より左に d_s の距離から w_s の重量物を取り去る場合を考える．

前と同様に，先ず中心線上からを w_s 取り去った状態を考える。

次に取り去る位置を Q に移すのであるが，このためには clockwise に $w_s d_s$ の moment を与えることになる．このことは w_s の重量物を反対側の Q' に移したと同様の効果となる故，矢張り5節の結果を用いることが出来る．

E より w_s だけ取り去れば，重心は G より G_s に下り，

$$\overline{GG_s}=\frac{w_s}{W_0}\cdot\overline{GE}\equiv\varepsilon_s\overline{GE}$$

全体の重量は W_0 の代りに $W_0-w_s=W_0(1-\varepsilon_s)$

故に，ω の代りに　　$\omega(1-\varepsilon_s)$

又　ε_0 の代りに　　$w_s(W_0-w_s)=\dfrac{\varepsilon_s}{1-\varepsilon_s}$

又　B_0' の代りに B_{0s}' となり　　(36)

$$\overline{KB_{0s}'}=\frac{\Delta}{W_0(1-\varepsilon_s)}\cdot\overline{KB_0}=\frac{\overline{KB_0'}}{1-\varepsilon_s}$$

の置きかえをすれば，(28)，(29) を用いることができる．

（a） rope が compression にならない条件は，(28) に (36) を入れて

$$\delta>\omega\left\{1-\varepsilon_s+\frac{\varepsilon_s\,d_s/b}{1-\dfrac{\omega(1-\varepsilon_s)}{2}\cdot\dfrac{h}{b}\cdot\dfrac{\overline{B_{0s}'G}}{b}}\right\}\qquad(37)$$

又は近似的に　　$\delta>\omega\left\{1-\varepsilon_s\left(1-\dfrac{d_s}{b}\right)\right\}$

（b） rope が yield しない条件は，(29) に (36) を入れて

$$\delta>\omega\left\{1-\varepsilon_s-\frac{\varepsilon_s\,d_s/b}{1-\dfrac{\omega(1-\varepsilon_s)}{2}\cdot\dfrac{h}{b}\cdot\dfrac{\overline{B_{0s}'G}}{b}}\right\}+2\,\textcircled{6}\qquad(38)$$

又は近似的に　　$\delta<\omega\left[1-\varepsilon_s\left(1+\dfrac{d_s}{b}\right)\right]+2\,\textcircled{6}$

之を $\delta-\omega$ の diagram にかけば図15となる．$\triangle OAB_s$ の内部が (37)，(38) の条件を満足する．そして，図14の B_a と図15の B_s は一致しない．

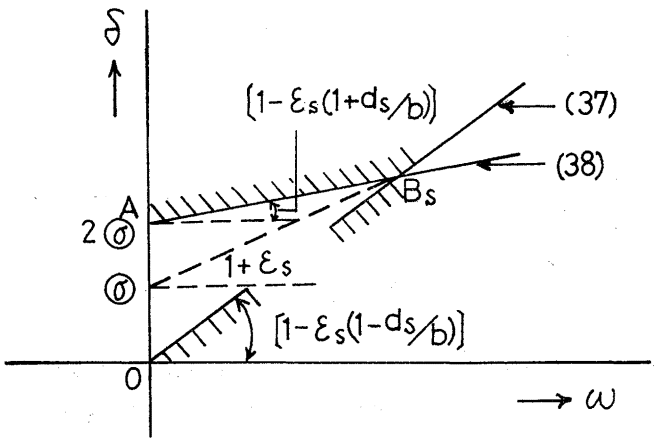

図　15

実際に設計する場合には，図13および図15の中で，OB_a と OB_s の中の傾斜の大きい方，AB_a と AB_s の中の傾斜の小さい方を取り，その中に挟まれた3角形内の δ，ωをとればよい．

然し，$d_a>d_s$ と考えられ，又 $\varepsilon_a>\varepsilon_s$ と思われる．而る時は，AB_s と OB_a の二つの直線，即ち，

$$OB \text{ 上は} \cdots\cdots \delta=\omega\left\{1+\varepsilon_a\left(1+\frac{d_a}{b}\right)\right\}$$

$$AB \text{ 上は} \cdots\cdots \delta=\omega\left\{1-\varepsilon_s\left(1+\frac{d_s}{b}\right)\right\}+2\textcircled{6}$$

に挟まれたδとωならば，与えられた δ_a, ε_s および d_a/b の範囲内で，rope は圧縮にもならず yield もしないことになる様である．

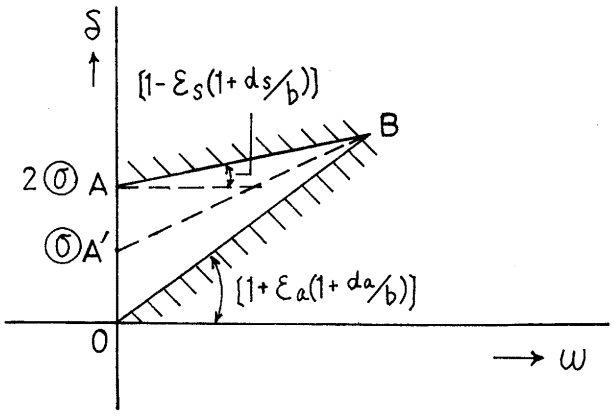

図　16

尚，(34)′, (35), (37), (38) はいずれも，δ, ω の代りに $\bar{\delta}$, $\bar{\omega}$, σ_{all} を入れて良く，この方がスッキリし且つ E を考えなくてもよい．之は rope の延びを無視してもよい事を示す．

7. 計　算　例

筆者は此の種のものに対しては全く不案内で，実際に問題になる大きさ等についてはよくわからない．それ故以下の数値も，筆者の全く想像で実用に供し得るものどうかわかからないが，ただここでのべた理論から設計する順序を説明するために数値を仮定することにする．

図17で水深=100m とする．浮力中心 B_0 の水面からの深=25m** とする．更に

$d_s=d_a=15$ m, $b=20$ m, $h=70$ m, $KB_0=5$ m, $KG=15$ m, $\varepsilon_a=0.5$, $\varepsilon_s=0.2$, $W_0=500$ ton,

$E=1.5\times10^4$ kg/mm², $\sigma_{all}=20$ kg/mm², ⑥$=1.3\times10^{-3}$ が与えられているとする．

然る時

** 之はこの海面に起り得る波の波長によつて考えるべきで，波長を λ, B_0 の水面よりの深さを h_B とすれば，exp.〔$-2\pi h_B/\lambda$〕が 1 に対して無視し得る様な h_B/λ を選ぶべきである．例えば，海面の disturbance（波等）の影響の

1/10 迄許すとすれば $e^{-2\pi h_B/\lambda}=0.1$　∴　$2\pi h_B/\lambda=2.3$

1/20 迄許すとすれば $e^{-2\pi h_B/\lambda}=0.05$　∴　$2\ h_B/\lambda=3.0$

故に，$h_B=25$m とすれば，$\lambda\leqq67$m で 1/10 の又 $\lambda\leqq82$m で 1/20 以下の disturbance となる．

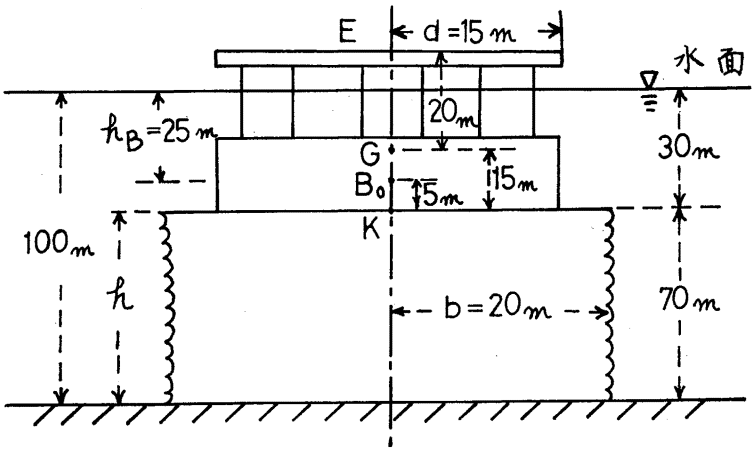
E
d=15m
水面
20m
h_B=25m
G
B_0
5m
15m
30m
K
100m
h
b=20m
70m

図 17

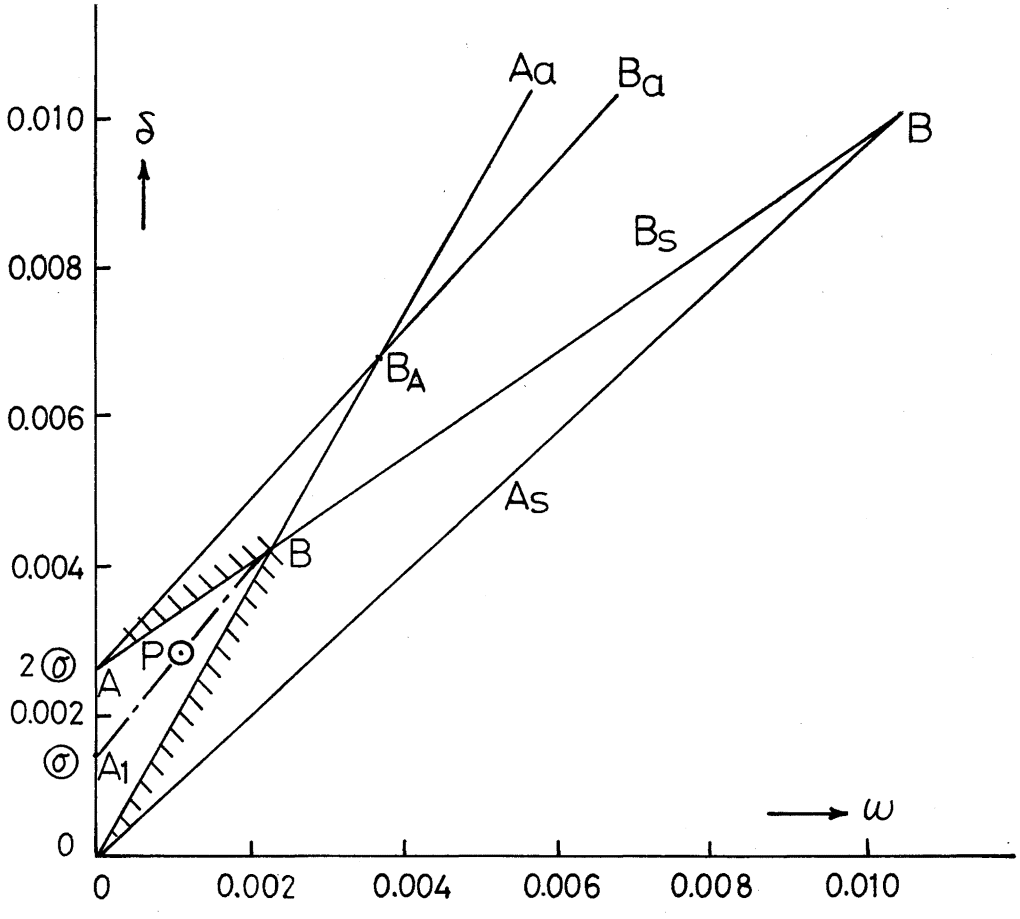
Aa
Ba
B
δ
Bs
B_A
As
B
P
A
A_1
2σ
σ
ω
0.010
0.008
0.006
0.004
0.002
0
0
0.002
0.004
0.006
0.008
0.010

図 18

(34)′ は…… $\delta > 1.875\omega$

(35) は…… $\delta < 1.125\omega + 0.0026$

之等を図18の A_a, B_a の直線で示す.

(37) は…… $\delta > 0.95\,\omega$

(38) は…… $\delta < 0.65\,\omega + 0.0026$

之等を A_s, B_s で示す.（尚（30）は $\delta > 3\omega - 2.3$ となり遙かに下に来る.）然る時は，すべての条件を満足する δ, ω は，A_a と B_s の間に挟まれた $\triangle OAB$ の内の点で与えられる.

その平均を与える意味で，中線 A_1B 上の点を取るのが妥当であろう.

此の上の各点によつて如何に異るかを見るために P と B の δ, ω の値を取つて見る.

〔P を取つた場合〕

$$\delta = 0.0026,\quad \omega = 0.001$$

$\omega = W_0/EA$ より $A = \dfrac{W_0}{E\omega}$（A：片側のrope の断面積）

$W_0 = 500\,\text{ton} = 500 \times 10^3\,\text{kg}$, $E = 1.5 \times 10^4\,\text{kg/mm}^2$, $\omega = 0.001$ を入れれば，$A = 3.33 \times 10^2\,\text{cm}^2$ となる．今 n 本の rope が片舷にあるとし，一本の直径を d_r とすれば

$$d_r^2 = \frac{A}{0.8n} = \frac{4.17 \times 10^2}{n} \qquad \therefore d_r = \frac{2.0 \times 10}{\sqrt{n}}\,\text{cm}.$$

これより n と dr(cm) の関係は次の表の様になる.

n	2	4	6	9
d_r(cm)	14.2	10	8.15	7

又図19に図示する．この場合の Δ および metacentric height m は夫々次の様になる.

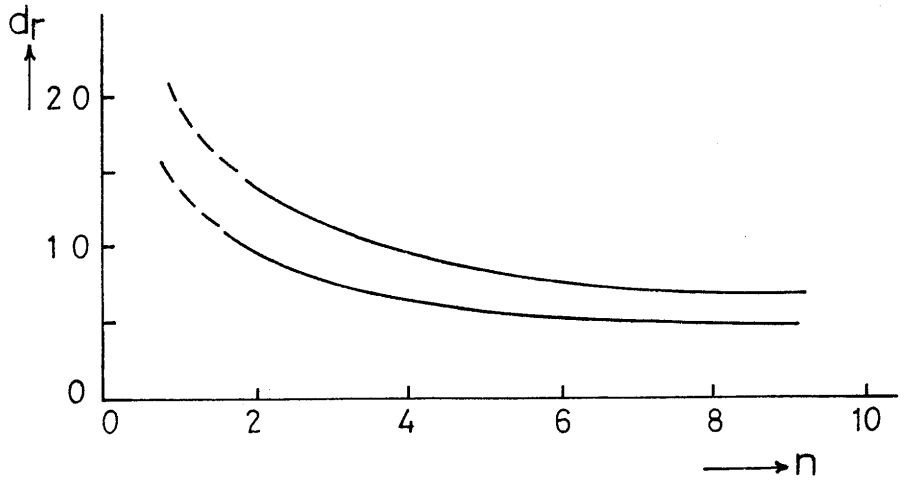

図　19

$$\Delta = EA\delta = 1.5\times10^{4}\times3.33\times10^{4}\times2.6\times10^{-3}\text{kg}$$
$$= 13\times10^{2}\text{ ton} = 1300\text{ ton}$$

$$m = \frac{2}{\omega}\cdot\frac{b^2}{h} = 1.14\times10^{4}\text{meter}$$

〔B を取つた場合〕

$$\delta = 0.0042,\quad \omega = 0.0022,\quad W_0 = 500\text{ ton}$$

同様の計算をすれば，
$$A = \frac{W_0}{E\omega} = 1.52\times10^{2}\text{cm}^2$$

$$\therefore\quad d_r = \frac{13.8}{\sqrt{n}}\text{ cm}$$

n と d_r との関係は次表および図19に示される．

n	2	4	6	9
d_r (cm)	9.78	6.9	5.62	4.6

又 Δ および m は

$$\Delta = \text{EA}\delta = 960\text{ton},\quad m = 5.2\times10^{3}\text{ meter}$$

となる．

この様に，A_1B 上で B に近い方の点の δ，ω を取つた方が，rope も細く且つ必要な浮力も小さくてすむ．

ただ B に近い方が AB および OB の critical を与える線に近い故，safety を与える margin が小さく，換言すれば Factor of safety が小となる．

又 rope が数本必要な場合は例えば $n=4$ の時は図20の様に配置すればよい．

この様な場合は，例えば CD 線上の rope が compression になり，或は AB 上の rope が yield しても，C_1D_1 および A_1B_1 上の rope が尚有効に働くから，stability curve は4節で述べた様に，

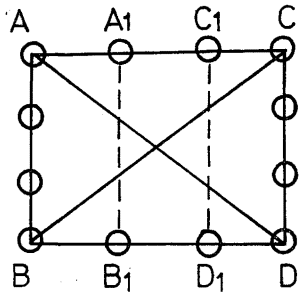

図 20

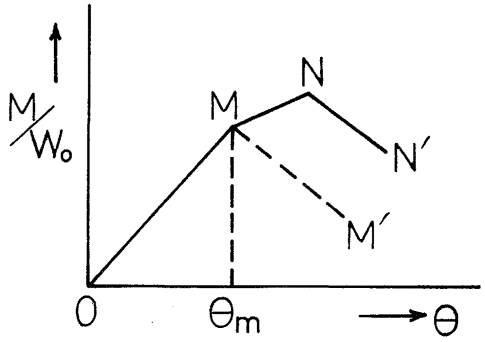

図 21

図21の OMM′ とはならず，OMNN′ の様になり，θ_m 以後の θ で尚復原力が残り，水上船の stability curve と同様の形となる．

n が多ければこの傾向が増す．

8. 結　　言

以上述べた様に S.B.B. は，適当に設計すれば，一般に懸念されている様な安定性上の不安は無い．

ただ設計でねらっている限度以上の重量物を載せたり，動かしたりすれば不安定となるが，この事は水上船の場合でも freeboard の大きさで制限されるのと全く同様で，重量物の大きさ，移動距離を前もつて仮定して設計すれば水上船の場合と全く同様である*．唯水上船の場合は freeboard は眼で見ることができるが，S.B.B. の場合は rope の tension を直接見ることが出来ない欠点がある．それ故この場合は load cell とか strain gauge とか，何等かの方法で各 rope の tension を一ケ所で常に見ることが出来る様な装置が必要である．

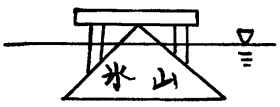

図　22

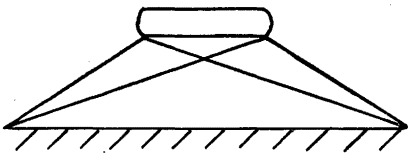

図　23

この稿は，S.B.B. が果して安全かどうかを調べるために，簡単な形を考え基本的な定理についてのみ考察した．従つて筆者の気のついた点として，次の様な諸問題について尚検討する必要があろう．

（1） rope が数本ある場合の stability

（2） rope が図23の様に斜めに張られた時の計算（特に，之等が catenary curve となる時）

（3） 横方向の力が働いた時の斜め rope の作用

之等 (1), (2), (3) は本稿で述べた方法を若干 modify すれば計算可能である．

（4） 安全係数のとり方

之は経験的に決められるべきものであるが，S.B.B. には経験が無いので特に慎重でなければならない．（尚図18の AB 上の δ, ω をとる時は若干の安全率があるが，この計算法は本稿では省略した。）

（5） 浮力体は B_0 の位置だけが決まればよいので，どう言う形でもよい．それ故，ドーナツ形でも良いし，又内部に装備の一部を入れる（水上との小さな出入口はつけてよい）とか，Ballast を積むとか言う事に便利な形にしたり，内部を仕切つたりしても良い．ただ充分な強度を持ち，且つ最小重量のものでなければならない．

（6） 浮力体だけでなく全体の強度の計算法

---

* これは氷山の上に作業台をつけた型式のものを合理的にしたものと考えればよい．

（7） rope の下端を海底に固着したり浮力体をある深さに沈下させる施工上の問題

（8） 水上の platform は，暴風雨時には，風浪にさらされるが，之に対する構造配置

（9） 曳航の必要がある場合の形状，方法

(10) E および σ_{all} の適正な推定

(11) 耐久年数（rope の腐蝕等）と補修方法

その他種々あるであろうが，実際には，小型の港湾用のものから出発して開発して行くのが安全であろう．

（昭和42年11月 6 日）

（昭和47年 1 月 6 日　受理）