

洋上ブイの波浪および風に対する安定性について

永井 荘七郎*・角野 昇八**

1. 緒言

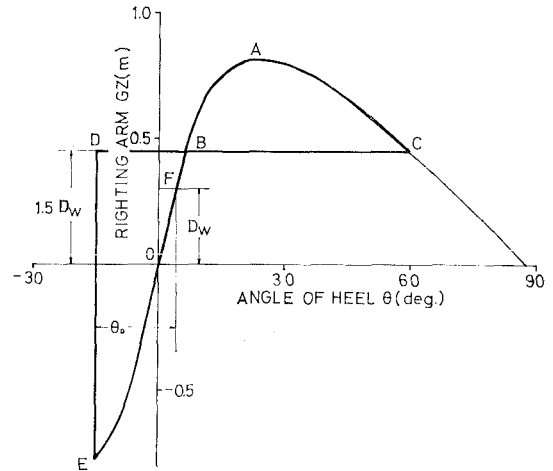
近年、沿岸部や海洋上の気象・海象データを永続的に集録する目的から、Ocean Data Buoy System が多く用いられている。洋上の buoy system に対しては、それをとりまく種々の自然条件のうち、波浪および風に対して転覆せずに、間断なく海洋に関する情報を集録、送信することが最も要求される場所である。ところが現実には、日本を含めた世界中でブイの転倒例が報告されている。たとえば、直径約 5 m の円盤型ブイが北太平洋上で¹⁾、また 1972 年には直径 6 m の円盤型ブイが日本海で転覆したと報告されている。ブイのような比較的小さな浮体の波浪中での安定性については、現在世界的に注目されているところである²⁾。

本研究は、Ocean Data Buoy System の中でも最も多く用いられている、円盤型ブイの風および波浪に対する安定性を理論的および実験的に検討したものである。なお、本研究では、解析の簡単化と、係留索はブイに対して転倒に対する抵抗モーメントを与えると考えられるために³⁾、ブイの係留索の影響は考慮せず、自由浮体としてのブイの安定性を検討した。

2. 理論的検討

著者らは、既に円盤型ブイ固有の復原力の面からみた安定性についての理論的検討を加え、基礎的な成果を得た⁴⁾。しかしながら、そこでは、ブイに対する外的な自然条件である、波浪や風を考慮したブイの安定性に対する検討は加えられていないので、ここではまず、船舶工学の分野で用いられている「運輸省船舶復原性規則」^{5),6)}に定められているように円盤型ブイの安定性について検討を加えた。

運輸省船舶復原性規則とは、静的な要素として、浮体固有の復原力特性、定常風による浮体の傾斜角などを考慮し、動的な要素として、突風による傾斜モーメント、波浪による浮体の傾斜角などを考慮して、浮体の風および波浪に対する安定性を動的に検討しようとするもので



図—1 船舶復原性規則

ある。すなわち、図—1において、面積 ABC が面積 BDE よりも大きければその浮体は安定と考えるのである。図—1において、

D_w : 定常風圧による傾斜モーメントで θ (度)

θ_0 : 波浪による浮体の同調横揺れ角 (円盤型ブイにおいては同調縦揺れ角でもある) (度)

$\delta = \delta \cdot D_w / D_w = 1.5$: 突風風圧による傾斜モーメントでこの変動係数

である。また、図—1において、EOBAC に沿う曲線は浮体の復原力曲線を表わしている。

ここで検討の対象としたブイとしては、日本海で転覆した直径 6 m のブイ (図—2) を選び、転覆当時の気象条件の下での安定性を検討した。なお、このブイの重量は 14.6 t であり、その直立状態における吃水線上の部分の鉛直面への投影面積は 6.25 m² である。また風圧の計算に用いられる同部分の抵抗係数は、海面上の風速の鉛直分布を考慮^{7),8)}して 1.36 とした。

表—1 にその検討結果を示す。表—1 において、角度 θ_0 は、面積 ABC と面積 BDE とを等しくするブイの波浪による同調揺れ角である。この検討結果から、たとえば定常風速が 50 m/sec 以上で、波浪によるブイの同調揺れ角が 25 度以上であるなら、このブイは不安定と

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

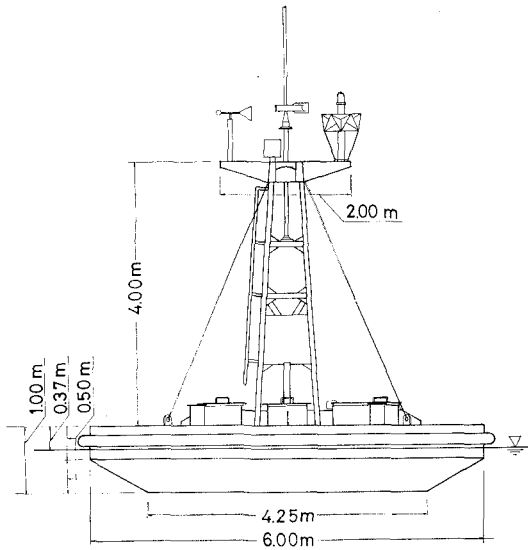


図-2 モデル (I) (直径 6m)

表-1 モデル (I) の風と波浪に対する安定性の検討

風速 (m/sec)	風 圧 (t)	傾斜モーメント で D_w (m)	同調揺れ角 θ_0 (度)
30	0.48	0.08	47
40	0.85	0.13	35
50	1.33	0.21	25
60	1.91	0.30	16
70	2.60	0.41	9

なるということがわかる。このブイが日本海で転倒した当時の自然条件は、舞鶴海洋気象台によれば、定常風速 30 m/sec, 有義波高 6 m であったと言われている。表-1 からは、定常風速が 30 m/sec の条件下では、ブイが波浪によって 47 度以上の同調揺れ角をもってれば転倒するであろうという結論が得られる。しかしながら、ここで検討の対象としている円盤型ブイは、一般に SURFACE-FOLLOWER と称されるように、規則波に対しては波浪そのものの傾斜角以上には動揺を起こさないことが知られている⁹⁾。Kaplan¹⁰⁾ によれば、その同調時の揺れ角は、 $\theta_0 \approx 0.75 \cdot \pi \cdot H/L$ (ここに H/L は波形勾配を表わす) である。これは、波の最大傾斜角 $\pi \cdot H/L$ の値が、限界波形勾配時に約 30 度になるとしても $\theta_0 \approx 23$ 度となり、また実際の海面の波浪は不規則波であり、ブイの同調揺れ角はさらに小さくなることを考慮すると¹¹⁾、それが 47 度にも達することは考えられない。このようなことから、このブイの転倒の原因は、ブイの復原能力の不足にあるとは考えられず、むしろ他に原因があったと考えざるを得ない。すなわち、海洋中の巨大な砕波によると考える方が、より合理的であろう。この海洋中の砕波現象は、海洋中において不規則な波浪が直角に近い角度で互いに衝突したり、あるいは波長の大きな波の上に、それよりも小さい波長の波が重なった場合な

どに生ずると考えられる。このような海洋での砕波に対する考え方は、高木・雁野¹²⁾や佐藤¹³⁾らによっても紹介されている。また、第2次世界大戦中に、ドイツの潜水艦によって北大西洋の Green Land の近くで撮影された写真¹⁴⁾は、海洋中でまさに砕けんとする巨大な波を示している。また buoy technology に豊富な経験をもつ米国においても、ブイを含めた各種の浮体の海洋上での転倒原因として、砕波を考えている²⁾。このような観点から、著者らはこれを確かめるために、数種の円盤型ブイの模型を製作し、それらの砕波に対する安定性を検討するための模型実験を行った。

3. 模型実験

(1) 実験装置および実験条件

実験は、大阪市立大学工学部河海工学実験場の長さ 60m, 幅 10m, 深さ 2.5m の大型波浪水槽、ならびに長さ 100m, 幅 1.2m, 深さ 2.0m の風洞付波浪水槽を用いて行った。この大型波浪水槽の壁の一部はガラス壁となっており、実験状況を観察することができる。また、風洞付波浪水槽の側壁の片側は、ほぼ全長にわたってガラス壁であるため、ここでも実験状況を容易に観察することができる。

実験条件を表-2 に示す。この実験では波高に比して水深が3倍以上あるので、砕波を起こすことが非常に困

表-2 実験条件 (縮尺 1/20)

流 速 (m/sec)	0	波 長 (m)	3.73 大型波浪水 (75) 槽
定常風速 (m/sec)	0, 8.9, 11.9 (0), (40), (53)		3.69 風洞付 (74) 波浪水槽
砕 波 高 (m)	0.45~0.50 (9~10)		1.80 大型 (36) 波浪水槽
周 期 (sec)	1.56 (7)	水 深 (m)	1.40 風洞付 (28) 波浪水槽
() 内の値は実物に換算した値			波 形 勾 配 0.12~0.13

表-3 ブイ模型の形状諸元 (縮尺 1/20)

モデル	直 径 (m)	設計重量 (t)	D_k (m)	H_h (m)	E_h (m)	備 考
(I)	6.0	14.6	4.25	1.00	0.50	日 本
(II)	9.2 (30 ft)	46.0	5.72	1.92	0.92	アメリカゼネラル・ダイナミックス
(III)	12.2 (40 ft)	100.0	8.00	2.28	1.06	〃

難であったので、周期と波高を種々に変えることはできなかった。また砕波高は、砕波直前の谷から波頂までの高さを目視観測したものである。

(2) 模 型

実験には、表-3 に示すような3種類のブイ模型を使用した。なお、表-3 の D_k , H_h , E_h などは、図-3 に示されるようなブイの形状諸元である。模型は真鍮製で、その内部は空洞になっているので、その中に鉄製円板をねじで止めてブイの重量を加減することができる。各ブイ模型においては、その重心がほぼ円盤高さの中央

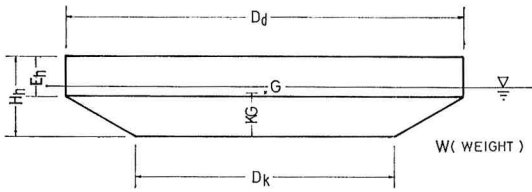


図-3 ブイの形状諸元を表わす記号

にあるように重量調節用鉄板を付加したが、慣性モーメントはブイの転倒現象に対しては重要な要素とは考えず、考慮しなかった。また、直径 6 m のブイ模型を除いて、甲板上の構造物は無く、ブイの浮体部のみの模型である。なお前述のように、各模型は、実験においては係留されず、自由浮体として砕波のなかにおかれた。

(3) 実験結果

本章における数値は、すべて実物に換算された値を用いる。

a) 無風条件

まず、無風状態の下でのブイの安定性を検討するために、上記の大型波浪水槽を用いて実験を行った。実験水槽の中で起こした砕波は、毎回全く同じ諸元あるいは砕け方であるとは限らなかったため、数回あるいはそれ以上の実験を繰り返し、正確な実験結果を得られるように心掛けた。

実験の結果、直径 6 m のモデル (I) は、上記の諸元の砕波に対して確実に転倒し、モデル (II), (III) のブイは、転倒することなく安定であることが確認された。しかしながら、これらのモデル (II), (III) のブイでも、その重量が設計重量以下の 33~35 t になると、砕波に対して不安定になることが確かめられた。

砕波に対してブイが転倒する状況を観察し、かつその機構を考察することは、理論解析を進めるうえにおいて重要であるので、ガラス壁を通じての目視観察、および 16 mm 高速度映画 (毎秒 1 000 コマ~2 000 コマ) によって観察した。その結果によると、砕波直前のなめらか

な波面上にあるブイが、突然、砕波の前面の急勾配部で波面に乗って大きく傾き、さらにブイ底部に砕波の多量の水塊が衝突し、それによって発生する転倒モーメントによって転倒するものと考えられる (図-4)。転倒しないモデル (II) および (III) の場合は、砕波の前面においてもブイはそれほど大きく傾斜せず、砕波部分を乗り越えてしまうので安定である。その理由は、ブイ (II) および (III) は十分な重量と直径を有しているために、モデル (I) よりは転倒に対する抵抗モーメントが大きいためであると考えられる。

b) 風がある場合

風がブイの転倒現象に与える影響を調べるために、上記の風洞付波浪水槽を用いて実験を行った。ここで発生させた砕波の周期と波高は、無風で大型波浪水槽で発生させた砕波とほぼ同じである。また風速は、砕波の発地点近傍の断面で、静水時に風洞全断面にわたって数個の値を測定し、それを平均した値である。したがって砕波時の風速は、砕波による風洞断面の縮小のためこの平均値よりは相当大きい。

実験は、まず直径 6 m のブイが転倒した際の定常風速 (30 m/sec) を考慮して、40 m/sec の風を起し、砕波高が 9 m~10 m の砕波を発生させ、風と波が共存する場合のブイの安定性を検討した。

実験の結果、この風速の場合には、風がブイの転倒現象に与える影響はほとんどみられず、無風状態のときと同様にモデル (I) のブイは転倒し、モデル (II) と (III) のブイは転倒せずに安定であった。

次に、風速を 53 m/sec に増し、同様の実験を行ったが (この場合にも波頂上では風速は 53 m/sec よりもかなり大きくなってははずである)、モデル (I) および (II) のブイは転倒し、モデル (III) のブイは転倒せずに安定であった。モデル (II) のブイの転倒の状況は次のようであった。

水槽内にはまず風のみによって発生させられた不規則



(a)



(b)

図-4 円盤型ブイの転倒

な風浪が発生する。この風浪の最大波長はほぼ 30 m であったが、直径 9.2 m のモデル(II)のブイはこの風浪に十分に追従できずにピッチング運動を起し、ブイはその底部を周期的に風や波にさらすようになる。このような状態に造波機によって起こされた大きな砕波が襲来すると、ブイ底部に砕波の水塊が衝突し、ブイは転倒する。

4. ブイ転倒の機構

目視観測、および高速度映画フィルムにより、ブイの転倒の状況を観察すると、砕波の水塊がブイの底部に衝突することによって生ずるブイ下端部に関する転倒モーメントが、ブイの重量によるブイ下端部に関する抵抗モーメントよりも大きくなって転倒するものと考えられる(図-5 参照)。

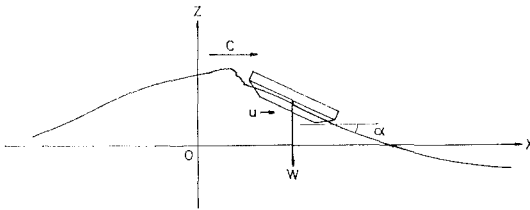


図-5 ブイ転倒の機構

ブイの転倒は、砕波の波傾斜が最大の地点で生ずると考えられるので、ブイ下端部に関する転倒モーメントは次式で表わされる。

$$M_0 = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot (\omega - u)^2 \cdot (D_d/2) \cdot \sin^2 \alpha \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- C_D : 抵抗係数
- ρ : 海水の密度 ($t \cdot sec^2 \cdot m^{-4}$)
- A : ブイの水線面積 (m^2)
- ω : 波速
 $= [gL/2\pi \{1 + (\pi H/L)^2\}]^{1/2}$ (m/sec)
- g : 重力加速度 (m/sec^2)
- L : 波長 (m)
- H : 波高 (m)
- u : 最大波傾斜の地点の水粒子速度
 $= \omega \cdot (\pi H/L) \cdot \exp(2\pi/L \cdot z_0) \times \cos(2\pi/L \cdot x_0)$ (m/sec)
- z_0 : 最大波傾斜の地点の z 座標 (上向き正) (m)
- x_0 : 最大波傾斜の地点の x 座標 (波の進行方向に正) (m)
- D_d : ブイの直径 (m)
- α : 最大波傾斜の角度 (度)

一方、重量によるブイ下端部に関する転倒に対する抵抗モーメントは、

$$M_R = W \cdot (D_d/2) \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots (2)$$

ここに W : ブイの重量 (t)

ブイの重量が、転倒限界重量であるときには、この転倒モーメント M_0 と転倒に対する抵抗モーメント M_R は等しくなると考えられるので、この式 (2) に、実験で得られたモデル (II) と (III) のブイに対する安定限界重量の値 (33t) を代入し、式 (1) と式 (2) とを等置することによって、各ブイに対する抵抗係数 C_D の値を求めた。その結果、波高が 9 m で、 $H/L=0.12$ の場合、モデル (II) のブイに対して $C_D=1.0$ となり、モデル (III) のブイに対しては $C_D=0.9$ となった。これらの C_D の値は、ここに考察したような現象に対して水理学的に合理的な値であると考えられるため、上記の転倒の機構は、ほぼ妥当であると考えられよう。

5. 結 論

以上のブイの安定性に関する研究の結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 洋上におけるブイの転倒は、主として、海洋で発生する砕波によって起こされるものであると考えられる。
- (2) 風速が約 50 m/sec 以下で、砕波高が 9 m から 10 m の砕波に対しては、直径 6 m のブイはいかなる重量であっても転倒する。直径が 9 m および 12 m のブイは、そのおのおののブイの重量が 33t から 35t 以上の十分な重量を有しておれば転倒しない。すなわちこの風速の下では、砕波高がブイの直径より小さければブイは転倒しないといえる。
- (3) 風速が約 50 m/sec 以上となっても、砕波高が 9 m から 10 m の砕波に対して、直径 12 m のブイは転倒せずに安定である。しかしながら、直径 9 m 以下のブイは転倒する。

最後に、この研究論文の内容の主要部は 1974 年 5 月に Houston で開かれた Offshore Technology Conference¹⁰⁾ で発表したものである。また本研究は文部省科学研究費による研究「浮構造物の係留の研究」の一部でもあることを付記する。また実験に協力して頂いた当時大阪市立大学研究員の重松典男君に感謝の意を表わしたい。

参 考 文 献

- 1) NOAA Data Buoy Office: Practical experience with buoys developed by the NOAA Data Buoy Office, Nov., 1973, pp. 4.1-12.
- 2) 角野昇八: アメリカ・ノアデータブイオフィスに滞在して, 土木学会誌, Vol. 59, No. 12, 1974. 11, pp. 45~48.
- 3) Devereux, R. and et al: Development of an

- ocean data station telemetering buoy, Progress report, General Dynamics/Convair, 1965, pp. 18.
- 4) 永井莊七郎, 角野昇八, 芝原 平: 洋上ブイの最適形状・重量に関する研究, 第 20 回海岸工学講演会論文集, 1973, pp. 257~261.
 - 5) 造船協会編: 船舶工学便覧, コロナ社, 1960, pp. 557~558.
 - 6) Watanabe, Y. and et al: A proposed standard of stability for passenger ships (Part III Ocean-going and coasting ships), 造船協会論文集, 第 99 号, 1956, pp. 22~46.
 - 7) 岡田正次郎: 小型船舶に対する風圧に因る傾斜モーメントについて, 造船協会論文集, 第 92 号, 1952, pp. 75~81.
 - 8) Sato, M. and et al: A proposed standard of stability for passenger ship (Part I Smooth water area), 造船協会論文集, 第 95 号, 1954, pp. 65~80.
 - 9) 前記 1) pp. 4.1-1~4.1-5.
 - 10) Kaplan, P. and et al: Experimental and analytical studies of buoy hull motions in waves, U.S. Dept. of Commerce Report No. NDBCM 6113.3, April, 1972.
 - 11) 元良誠三: 船体運動力学, 共立出版, 1967, pp. 111.
 - 12) 高木又男, 雁野昌明: 波浪中を航行する船舶が受ける波浪衝撃力の一推定, 日立造船技報, Vol. 33, No. 2, 1972, pp. 15~22.
 - 13) 佐藤孫七: 火を吹くロザリオ島 (2), OCEAN AGE, Vol. 6, No. 3, 1974. 3, pp. 77~79.
 - 14) 英国国立海事博物館蔵, そのコピーは Mr. G.L. Hargreaves の好意で永井が保有している。また Saunders, H.E.: Hydrodynamics in ship design, Vol. III, SNAME, 1965, pp. 151 にも転載されている。
 - 15) 永井莊七郎: 水理学, コロナ社, 1974, pp. 316~321.
 - 16) Nagai, S. and Kakuno, S.: On the stability of a discus-shape buoy, Offshore Technology Conference. OTC 2029, May, 1974.
-