11. 消波発電装置“海明”の実験

益田善雄,[*1]　宮崎武晃[*1]

波力発電装置“海明”の研究は，波エネルギーを空気エネルギーへ変換し，大規模に発電することを目的とし，昭和51年度から本格的に開始された。

研究の一環として，長さ80mの船型発電装置を製作し，本装置上に3台のタービン，発電機を搭載し，昭和53年8月以降，山形県由良沖で第一次海上実験を実施した。

“海明”は無人で運転され，各種のデータは無線テレメーターで陸上へ送信され，記録された。

海上実験期間，すべての装置は計画通り作動し，貴重なデータを取得することができた。

Study of Wave Power Generator “KAIMEI”

Yoshio Masuda,[*2]　Takeaki Miyazaki[*2]

Small navigation marker buoys powered by wave energy have been in use in Japan since 1965.

The possibility of using this same principle to generate power on a much larger scale was investigated by JAMSTEC, starting in 1976.

The sea-going model named “KAIMEI”, was constructed with steel as the main construction material, it is 80m in length, 12m in width and 7.8m in depth. Three air-turbine generators were installed on the deck above the air pump rooms at the bow, center and stern position. The turbines, each rated at approximately 125kW output, were fitted with valve boxes to rectify the air flow.

On completion of fitting out, “KAIMEI” was towed to the test site situated 3.5km off the coast near Yura on the North West coast of Japan, and “KAIMEI” was moored with anchors and chains.

The trials commenced on August 1978, and all systems worked satisfactorily.

1. はじめに

エネルギー資源の供給に関する危機感およびエネルギー変換に伴う環境問題に対する高まる中で，太陽エネルギーの受皿として，巨大でクリーンなエネルギーを蓄積している海洋の利用が注目されている。

海洋科学技術センターでは，海洋エネルギーの中で波力エネルギーに注目し，昭和51年度から4箇年計画で，消波発電装置“海明”の研究開発を実施している。昭和52年度までに各種模型実験を終了し，昭和53年度には第一次海上実験を実施した。ここに，これまでの研究開発の経過と消波発電装置“海明”の概要および第一次海上実験の結果を示す。

2. 研究開発の現状

“海明”の発電方式は，種々の方式のうち，空気タービンによるものであり，波のエネルギーを空気エネルギーへ変換して空気タービンを回わして

*1 海洋利用技術部
*2 Marine Utilization Technology Department

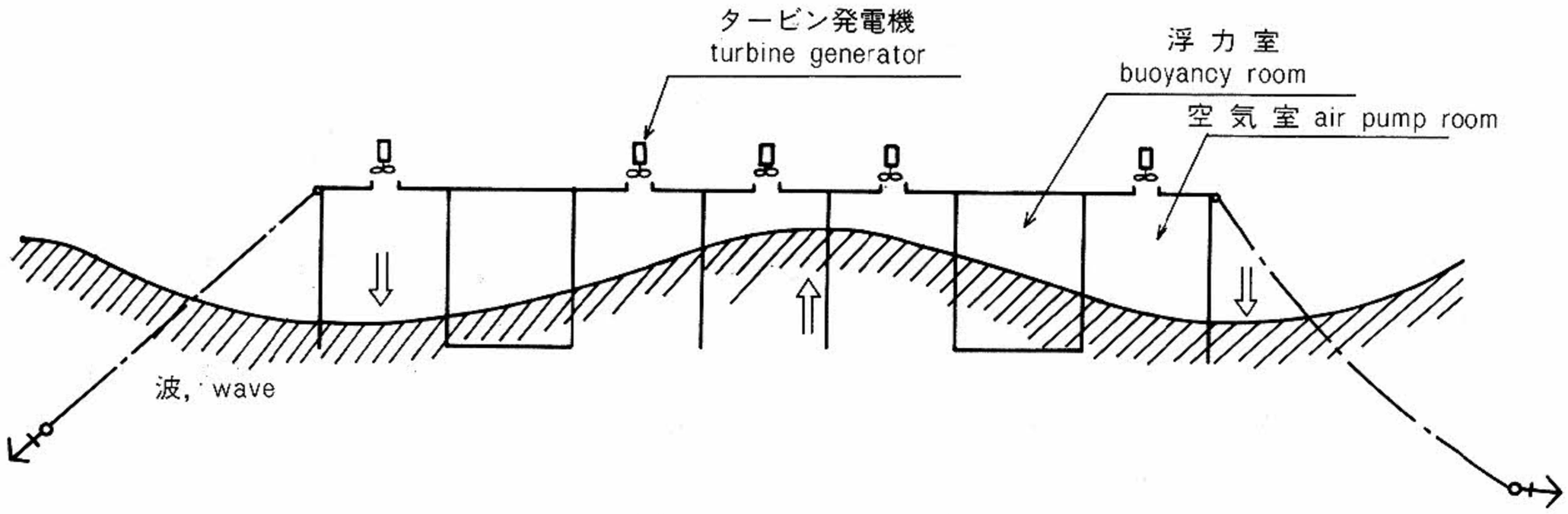

図1　システムの原理

Principle of the system

発電し，同時に，波エネルギーの吸収による消波機能を兼ね備えている。

“海明”の型は，各種模型実験によって，船型形状が決定した。この形状の特徴は，船のように，細長く，風波の方向に船首を向けることによって抵抗を最少にし，係留を安全にすることと，波エネルギーの吸収とが十分あることが確認されている。

第一次海上実験では3台のタービンおよび発電装置を本体上に搭載し，山形県鶴岡市由良沖の日本海で行った。

3.　システムの原理

“海明”は，第1図に示すように，浮力室と数多くの空気室からなる船型の構造体であり，空気室の底は海水中に開いており，波の通過によって内部の水面は上下する。この動きに伴い，空気室上部に溜まっている空気は，ノズルから高速空気として出入するので，この空気流の中にタービンを置き，タービンと直結されている発電機で発電する。

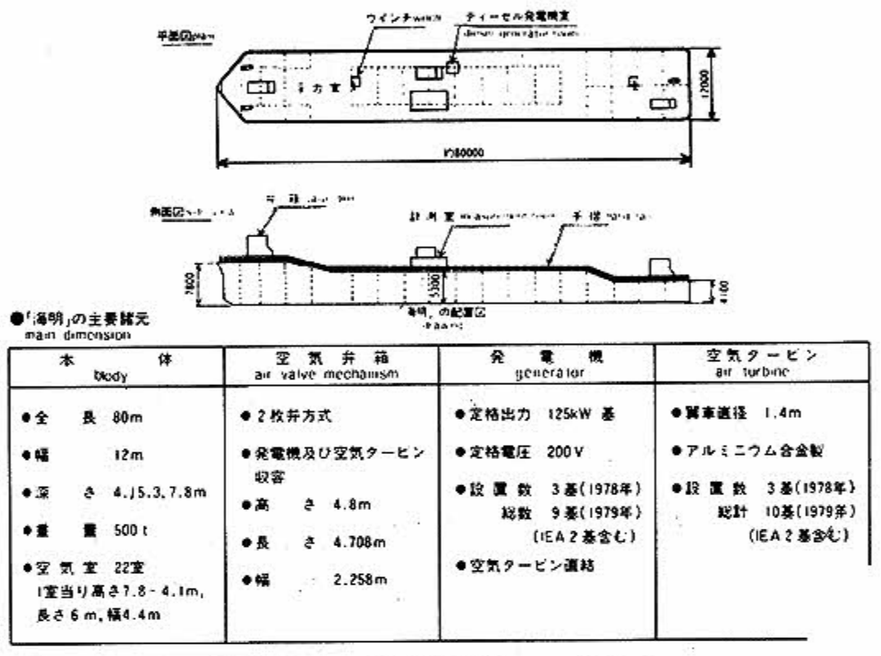

図2　“海明”の概略

Outline of KAIMAI

4.　実験装置

4.1.　本体

“海明”は長さ80m，幅12m，高さ7.8mで，重量約500tで，第2図に示すように，内部に4個の浮力室と22個の空気室が配置されている。

設計に当り，荒海で使用するため，強度と安定性に注意を払った。

4.2.　弁箱

波によって作られた空気の流れは，波の周期と共に変化し，又その流れの方向も反転する。

そこでタービンに対して，常に同一方向へ空気が流れるように，第3図に示すように2個の空気室を対にして用い，開閉方向の異なる2種類の弁を持つ，2枚弁弁箱の使用を試みた。

弁の開閉は，弁箱内外の空気圧差による機構を用いた。弁板の材質は，軽く強度があるFRP 製とした。

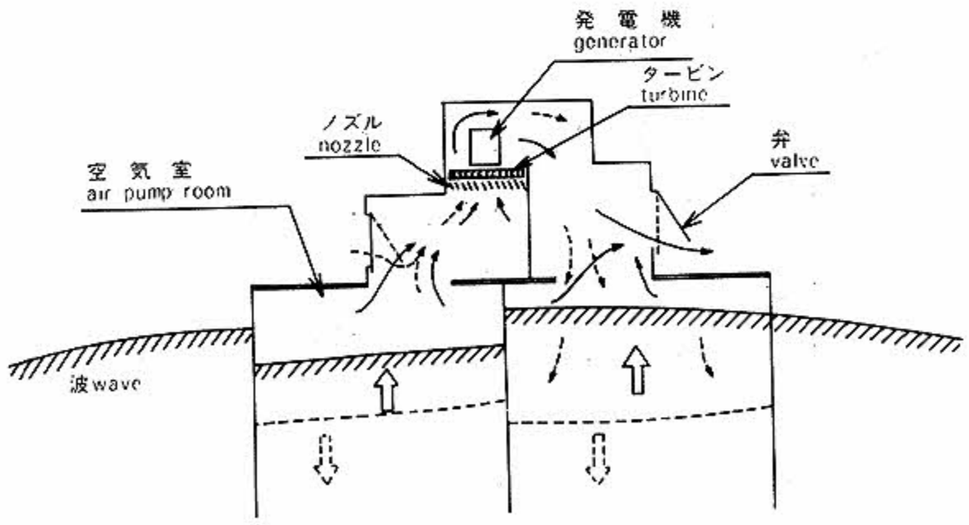

図3　弁　箱

Valve mechanism

4.3. 空気タービン

波力発電用タービンは，常に変動する空気流をいかに効率よく，エネルギーを取り出すかが研究の対象となる。そのため，動翼の型，翼の枚数および静翼の角度の異なる４種類の模型で試験を行った。

第１表は試験結果を示す。ただし，このデータは動翼径を１m，空気圧を1m aq に換算した値である。

表１　空気タービンの模型試験

Model tests of turbines

項目 item / 模型 model	無負荷の回転速度 no load rotation speed n_1 (rpm)	最大効率時 in maximum efficiency			
		風量 air flow volume q_1' (m^3/s)	回転速度 rotation speed n_1' (rpm)	効率 turbine efficiency η_{opt} (%)	出力 turbine output kw_1' (kW)
turbine Ⅰ	2040	6.3	1050	51	31.5
turbine Ⅱ	2660	16.0	1300	57.5	90
turbine Ⅳ	2340	13.7	1230	58	78
turbine Ⅴ	2340	13.7	1230	58	78

実機としては第１表に示すタービンが選ばれて製作された。

タービンの材質は海水による腐食を避けるため，耐食性アルミニウム合金のヒドロナリウムを使用した。

4.4. 発電機

製作に当り，同期発電機と誘導発電機との２方式の発電機を検討した。

第一次海上実験では波と発電出力の関係を明確にすることが，一つの目的であるため，広く船舶に使われているブラシュレス同期発電機を選んだ。発電機の設計は，これまでの模型実験の結果から平均波高３m，周期６sの波が連続に通過した場合には，125kW の発電出力が得られるものとした。

第２表には実機の試験結果を示す。

表２　実機のタービン試験結果

Resuls of actual turbine tests

回転速度 (rpm) rotation speed	出力 (kW) output	電圧 (V) voltage	効率 (%) efficiency
500	11.4	62	78.9
700	45.6	119	90.3
950	126	198	93.7
1200	254.5	282	94.7
1400	394.8	350	94.1

第一次海上実験では発電状況を把握するため，電流，電圧および回転数を計測した。電力は本体上に備えてある負荷抵抗器で消費する方式をとった。

5. 係　留

海上実験を行うに当り，最も重要な問題として安全な係留が上げられる。係留に関する研究は，本体装置の1/10および1/20スケールの模型を作り，実験海域で遭遇する波を予想し，規則波および不規則波による水槽実験を実施した。

その結果，既報のように，本体装置が実験海域で鎖で係留された状態で，装置の動揺および係留ラインに働く張力を模型で実験的に究明した。

この実験時の鎖の長さは，水深の2.5倍としトウト（Tout）係留状態で最大360t の張力が加わることが計測された。

係留ラインの鎖の強度およびアンカーの把駐力の面から，前後揺れに制約がない場合には，鎖の安全およびアンカーの軽減を計るため，係留ラインをできる限りスラック（Slack，ゆるやかの意味）とし，同時に，鎖が海底をはう距離を長くすべきであると結論した。

その結果，海上実験では最大張力360t の約３倍の破断力を持つ，第４種（仮称）の95mm径の鎖とし，なお安全のためスラック係留とし，鎖の長さを水深の５倍とした。

使用した係留装置を示す。

錨：クイックホールド型で，20t（日本最大）４個，10t ４個および５t ６個を用いた。

鎖：径95mmφ 第４種，２ラインと，径76mmφ 第３種，３ラインを用いた。

6. 海上実験

波力発電システムの技術的，経済的問題を解明するため，“海明”本体上に３台のタービン発電機を搭載し，第一次海上実験を昭和53年８月から山形県鶴岡市由良沖に“海明”を係留し，昭和54年３月末までの約８箇月にわたり実施した。

6.1. 係　留

“海明”は由良沖3.5km，水深40m の海域に，図４に示すように，前方４点，後方１点の５点で係留した。

これは将来，“海明”で発電した電力を陸上へ送

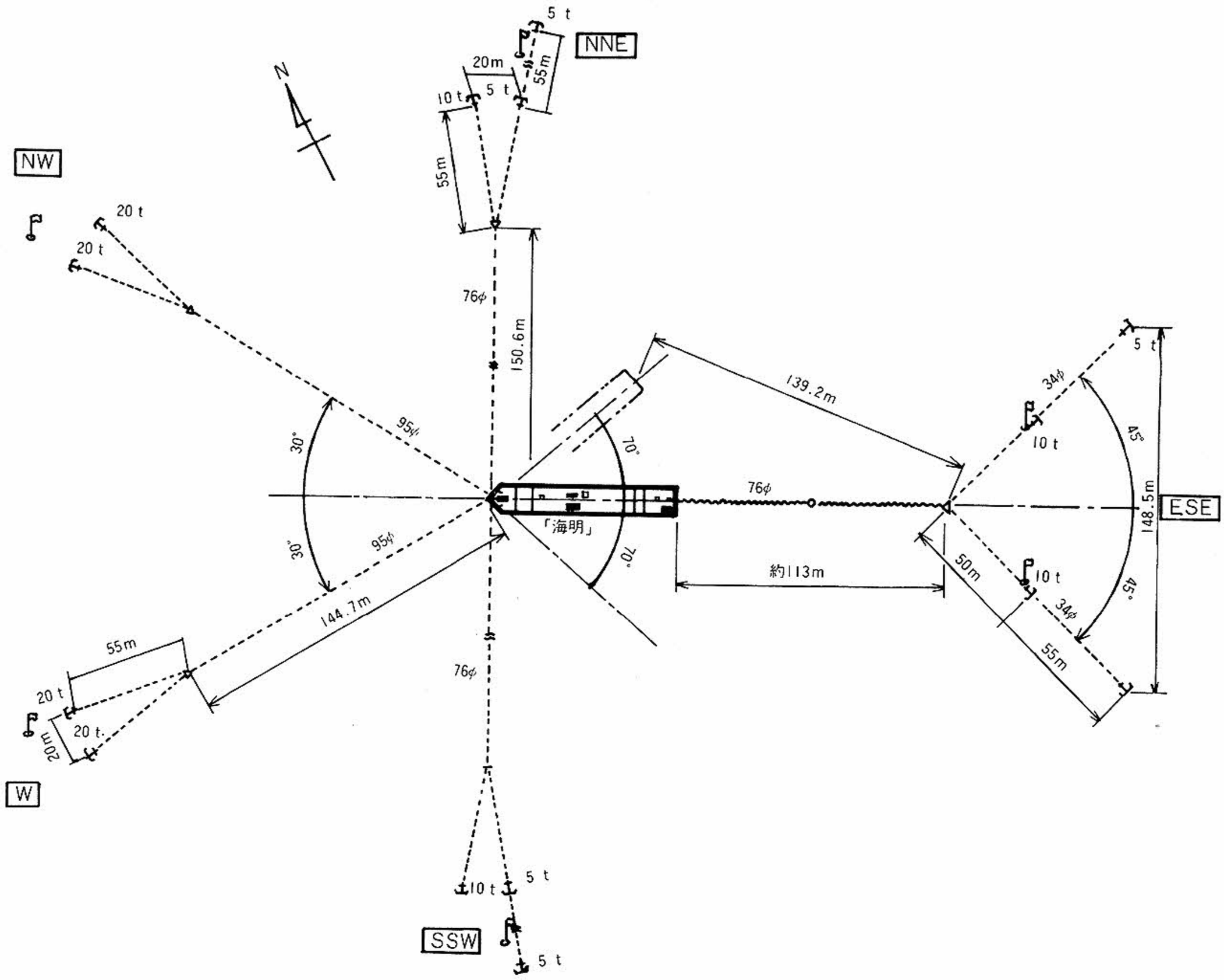

図4　海明の係留システム

Mooring system of "KAIMEI

電する送電線の敷設を考慮し，“海明”の運動をある程度制約したものであると共に，船首は実験海域で最も大波のくる北西および西の方向を含む135度の範囲内で風波の方向を向く係留方式とし，風波によって受ける力を最小になるようにした。

この係留装置および係留方式の安全性は，水槽実験の結果を示し，ロイド船級協会およびノルウェーのノルスケベリタスの承認を受けた。

6.2.　海中ケーブル

海上の浮体構造物と陸上の間を送電ケーブルで結ぶ技術のうち，海底部分は海底ケーブルがあるが，浮体と海底を結ぶ海中ケーブルについて，確立した技術がない。

そのため“海明”では発電された電力を陸上へ送電するため，海中ケーブルについて水槽実験を実施してきた。

この結果を基に第一次海上実験では，FRP鎧装特殊ケーブルを製作し，“海明”と海底とを結ぶ，本体の動揺移動から受ける引張り，捩り，曲げなどの外力に耐え，波浪に伴う繰返し疲労とケーブルと海底との摩擦によって導体と鎧装材が耐えるかどうか試験を行なった。

6.3.　計測装置

自然条件のきびしい環境下での計測であるため，各種の機器および計測システムの設計にあたり，安全で信頼性のある保守の容易なシステムとし，“海明”上はすべて無人化とした。

計測点数は，(1)海域の海象…4点，(2)本体の運動と係留力…5点，(3)発電状況…17点で，総計26点であり，これらのデータはアナログ無線テレメ

ーターによって陸上の本部へ電送され，監視および記録された。

7. 実験結果

7.1. 実験海域の海象

波の観測は，船舶式波高計と，ブイ式波高計で行い，船舶式波高計では実験中の全時間の連続観測を行った。

この記録の中から８時間ごとに,20minの記録から最大有義波高および平均波高を求めた。特に有機波高について実験海域に近い酒田の昭和45～50年の５箇年間の月平均有機波高との比較を表３に示す。

実験海域の波は10月頃から次第に高くなり，11月から３月までかなりの波高が観測された。最も高い波は12月に観測され，最大波高8.8mを記録した。しかし本年は上記表3に示すとおり,例年に比べて波の発生率は比較的少なかったことがわかる。

又,波の周期はスペクトル解析から,5.5～8.0s周期の間に広く分布し，特に6.7～7.1sに集中していることが確認された。

実験海域の最大風速は，最大波高の発生した３月，瞬間最大32.2mを記録した。

図５は12月の風向別出現率を示す。これによると，北西と西の風向の多いことがわかる。その結果，係留システムの考え方が正しかったことが明らかになった。

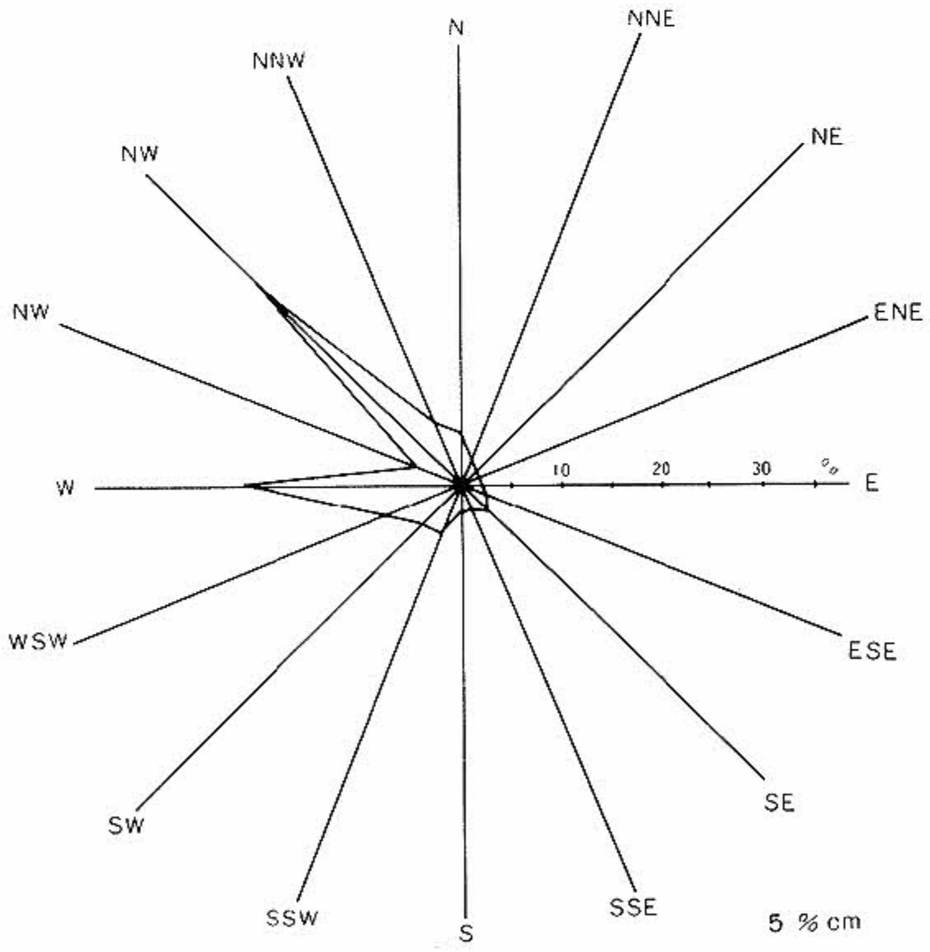

図５　12月の風向分布(重度：風速)
Distribution chart of wine direction December (wine velocity)

7.2. 浮体および係留の安全性

“海明”は図４で示すように，５本の係留ラインで，水深40mの海域に係留された。北西および西方向のラインは張力計を取付け，鎖に加わる力を計測した。

実験期間中の最大波高は8.8mで，このとき，係留鎖に加わった最大張力は北西ライン52.5も，西ライン44tであり，鎖の破断力から考えて十分安全であることが明確となった。

しかし鎖の海水中における繰返し疲労，腐食，摩耗等については現在，検討中である。

又“海明”に作用する波と係留力の関係について計算値と実測値の比較を行った。計算では浮体に作用する漂流力の関係と鎖のカテナリーの式であり，特に有義波高と漂流力の関係に着目し，(1)式を用いた。

$$F=\frac{1}{2}\rho g\zeta_R{}^2\left(\frac{1}{2}Hs\right)^2L \quad \cdots\cdots (1)$$

ここでF：漂流力，ρ：海水の密度，ζ_R：漂流力係数（ここでは水槽実験の値 0.75を用い，この値は波長が船長と等しいときの値である），Hs：有義波高，L：船幅である。

(1)式と船首方位，係留ラインの方向，カテナリーの式を用い，有義波高から求めた値と実測値を比較した結果の例を表３に示す。

この結果，データNo.３の値は両者に差があるが，他はほぼ一致と考えられ，今後の有効な計算方法と言えよう。

表３　張力の実測と計算値の比較

		実測値 measured values				計算値 calculated values
No.	日時 date	波高 Hs significant wave height (m)	船首方位 heading direction	風向 wined direction	W張力 W tension (t)	W張力 W tension (t)
1	2.Dec 12:00	3.7	242°	242°	20.0	14.2
2	20:00	5.9	247°	247°	24.0	27.8
3	3.Dec 04:00	6.3	260°	270°	26.5	37.3
4	12:00	3.7	277°	307°	21.5	17.8

浮体の安全性ではピッチングはなく，安全上の問題はなく，またローリングは最大±12°と予想値よりも若干大きく，その周期は設計値よりも長く，波の周期に近かったが，これも安全上の問題はなかった。大時化時の“海明”は数min周期で，船首を左右に約±10°振り,又前後移動は100～160sでスロードリフトを繰返していることが確認された。

7.3.　波による発電出力の特性

“海明”には3台の発電装置を前部(1号機)，中部(2号機)，後部(3号機)，の3箇所へ搭載し，それぞれの空気圧力，タービン回転数，発電電圧および電流を計測した。

図6は記録の例を示す。これは同時刻における波，空気圧，発電出力の記録である。

又　図7には1号機と3号機の発電状況の比較を示す。

1号機と3号機の取付位置は前部と後部であり，約70m離れているが，発電状況に大きな差異は見られない。しかし2号機の発電出力は他に比べ，約30%低下していることが確認された。第7図からもわかるように，発電出力が0に落ちるのは発電機の発電開始回転数が約600rpmと高いところに設計したためであり，有義波高1.3m以下の場合には発電しない結果となった。

今回は同期発電機を使用しているため，入力である波の変動によって当然，出力も変化するが，発電状況の傾向を知るため，最大出力と平均出力の比を取ると，つぎの関係にあることが多かった。

最大出力：平均出力＝7.2：1

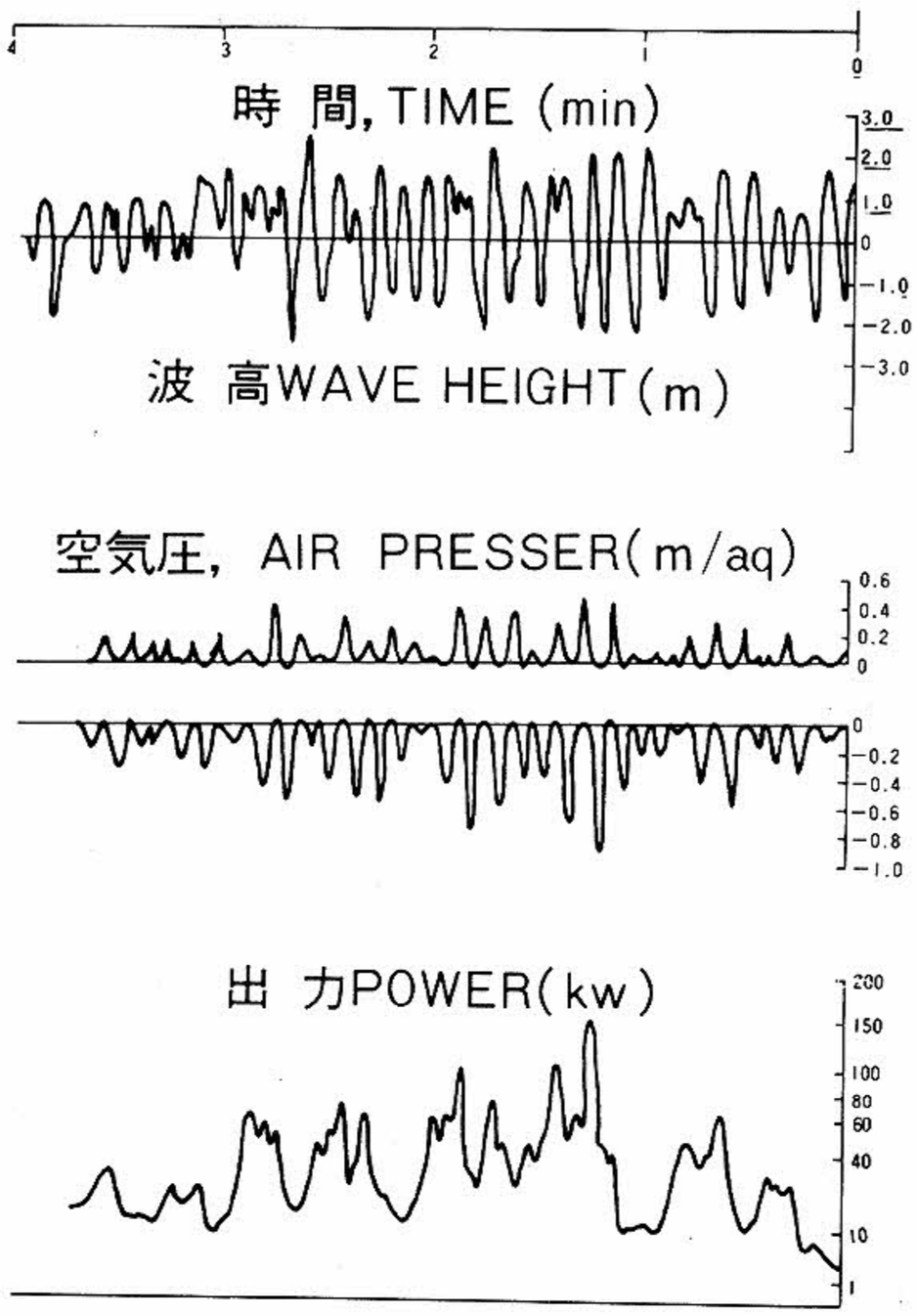

図6　波による発電出力

Electoric power of "KAIMAI"

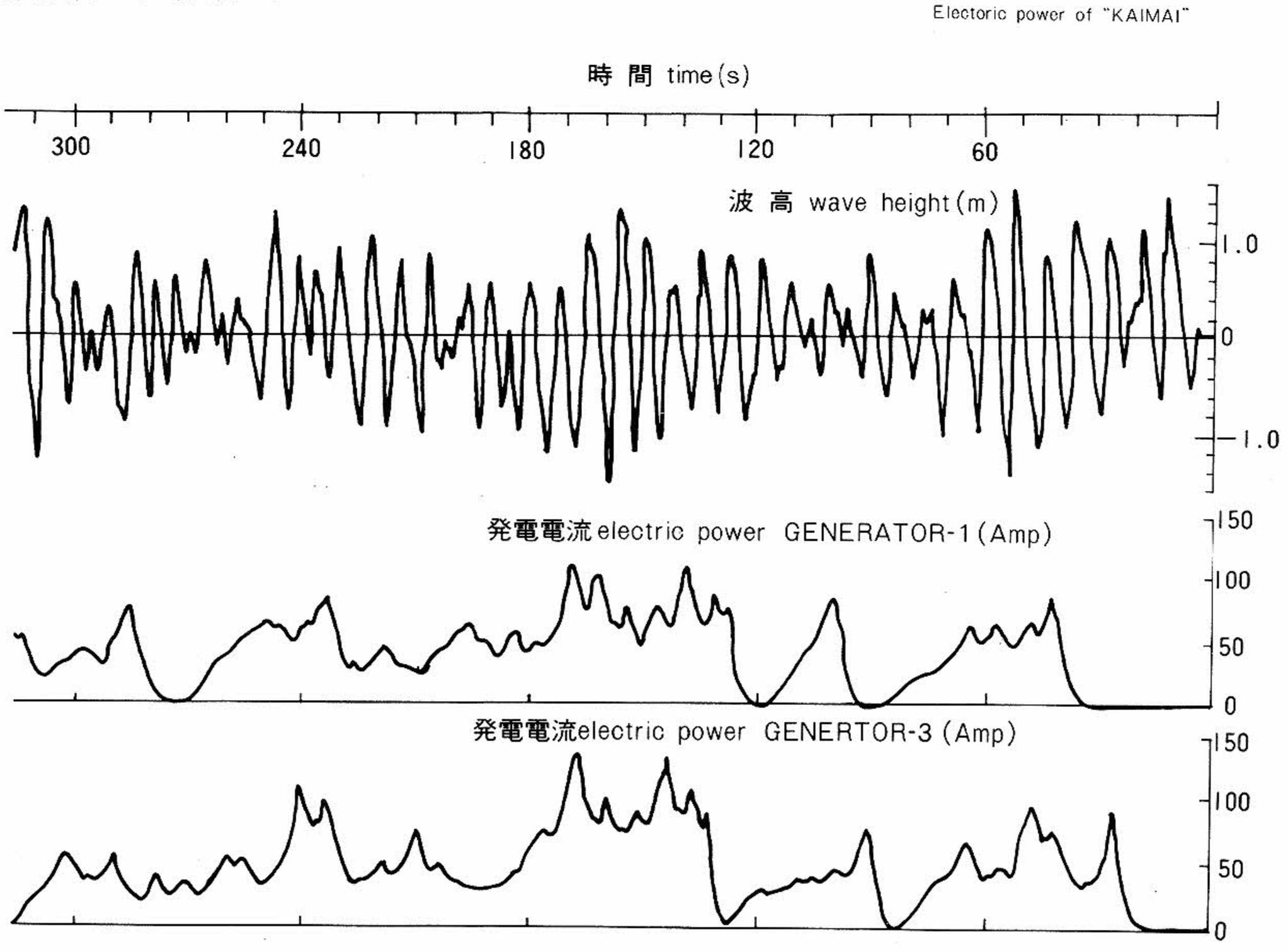

図7　1号と3号発電機の性能比較

Comparison of ability between generator -1 and -2

波の高い天候時には発電機1台当り，150kW以上のピーク出力があり，このような状況で，平均出力は20～30kW程度であった。発電出力の変化は波の一波一波によらず，10～30s周期で大きな変動することが確認され，これは入力である波の持つ特性と，タービン発電機の大きさと重さによるものと思われる。

本実験を通じて，弁箱，空気タービン，発電機等の発電システムはすべて順調に作動した。しかし波が小さい場合にはほとんど発電せず，波高と波周期の変動が大きく影響した。

7.4. 海中ケーブルの耐久性

本実験で，FRP鎧装特殊ケーブルの試験を実施したが，これと比較のため，一般に広く使用されている鉄線鎧装ケーブルについても試験を行った。鉄線鎧装では垂下方式が悪かったため，数箇所にキンクが発生した。しかしFRPケーブルは外層に多くのキズはあったが，キンクの発生はなく，絶縁性にも異常は認められなかった。しかし長期間の使用についてはまだ疑問が残る。

8. おわりに

“海明”の実験は，世界初の大出力波力発電の実験であるため，安全を第一に優先し，実験に取組んだ。このため，すべての装置について，特に異常を認められるところはなく，多くの成果を得ることができた。しかし今回の第一次海上実験の期間中は，例年に比べて実験海域の波が小さかったこともあり，当初，期待していた発電出力が得られなかった。今後，波の多くの部分を占める0.8～1.3mの波においても発電を可能にすること，又現在の2枚弁方式を複雑であるが出力の高い4枚弁方式へと変更し大幅な出力の向上を計ることと，出力の平滑化等について改善していく必要がある。

文　献

(1) 益田善雄，宮崎武晃：大型波力発電に関する模型実験，海洋科学技術センター試験研究報告第1号 32—39（1977.）

(2) 宮崎武晃　益田善雄　安藤定雄：消波発電装置に関する水槽実験，海洋科学技術センター試験研究報告第2号 35～44（1978.）

(3) Miyazaki, T.Y. Masuda：Research and development of wave power electricity generation system, Ocenology International ‘78.

(4) Masuda, Y.T. Miyazaki：Wave power electric generation study in Japan, International Symposium “Wave and Tidal Energy”, Sep. 1978.