

海上実験による海洋観測ステーションの開発研究： 第1報

田才，福造
九州大学応用力学研究所：教授

栖原，寿郎
九州大学応用力学研究所：教授

光易，恒
九州大学応用力学研究所：教授

川建，和雄
九州大学応用力学研究所：助教授

他

<https://doi.org/10.15017/4743578>

出版情報：応用力学研究所所報. 46, pp.17-109, 1977-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



海上実験による海洋観測ステーション の 開 発 研 究 (第 1 報)

田 才 福 造*	栖 原 寿 郎*	光 易 恒*
川 建 和 雄**	水 野 信 二 郎**	大 楠 丹**
小 寺 山 亘**	富 岡 勝***	肥 山 央***
長 浜 智 基***	荒 川 広 行***	本 多 忠 夫***
高 木 幹 雄***	増 田 章***	

概 要

この報告は、昭和49年度より昭和52年度にわたり、文部省臨時事業費の援助を得て、九州大学応用力学研究所が実施した、大型共同研究「海上実験による海洋観測ステーションの開発研究」に関する第1報である。

1 においては、まず最初にこの研究が計画された背景として、応用力学研究所の海洋物理グループと海洋工学グループとが共同して推進している長期プロジェクト研究について述べられている。次に今回の研究の目的、内容並びに実施計画等に関する概略的な記述が行われている。

2 の前半においては、この研究の目的が、第1に海洋環境に関する各種データを得るために必要な小型で安定した浮遊式海洋観測ステーションの開発にあること、第2に浮遊ステーションを利用した測定を精度をあげるためにステーションの運動を補正して固定座標系に変換する方法の研究にあること、第3に、両ステーションを利用した沿岸海域の調査並びにステーションと海洋環境との力学的相互作用の研究にあること、などが述べられている。さらに、2の後半においては、この大型研究を進めるに際しての研究組織並びに分担についても述べられている。

3 においては、海洋観測ステーションに関する現地実験を行う実験海域として津屋崎沖が選ばれた理由並びに具体的選定に至るまでの経過が述べられている。

4 は、実験海域における海象・気象に関する基準データを得るために建設された固定式海洋観測ステーションに関する記述が行われている。すなわち、ステーションの設計条件・構造設計並びに計測システムに関する詳細な記述が行われている。

5 は、この報告の中心を為す部分で、ここでは、動揺理論を適用して設計された新しいタイ

*九州大学教授，応用力学研究所

**九州大学助教授，応用力学研究所

***九州大学助手，応用力学研究所

プの一点係留式スパーブイを中心とした浮遊式海洋観測ステーションに関する研究とその結果が詳しく述べられている。その主要な内容を列記すると次の通りである。(i) 新たに開発した浮遊ステーションの本体は、排水量約 11 ton の spar buoy で、今回の設置海域において波長約 150 m 以下の波に対して上下揺の振幅が波の振幅の 10% 以下になるように理論的に設計された。(ii) ステーションの運動性能は詳細な水槽実験により確認され、この種のステーションの理論的設計法が確立された。(iii) ステーションの係留システムは、ステーション本体と中間ブイを結ぶナイロンロープ並びに中間ブイと海底のシンカーを結ぶ鎖によって構成されており、種々の定常力によって生ずるステーションの姿勢がほとんど変化しないように設計された。(iv) 浮遊式海洋観測ステーションは、固定式ステーションの近くの海域に設置され、塔載された計測システムによって、波高、ステーションの動揺、係留索の張力並びに風向及び風速の計測が行われている。

6 においては、両海洋観測ステーションで得られた大量のデータの処理及び解析方法について述べられている。

7 は全体の結びである。我々が新たに開発した浮遊式海洋観測ステーションを津屋崎沖の実験海域に設置して以来、約 1 年 9 ヶ月が経過した。この期間における各種の計測を通じて、この浮遊式海洋観測ステーションが、充分に当初に目標とした性能を有していることが結論されている。

目 次

1. 緒言
2. 研究目的と組織
 - 2.1 目的
 - 2.2 組織
3. 実験海域の設定と調査
 - 3.1 実験海域の設定
 - 3.2 地質調査
4. 固定式海洋観測ステーション
 - 4.1 概要
 - 4.2 固定ステーションの設計条件
 - 4.3 構造設計
 - 4.4 固定ステーションの建造・設置工事
 - 4.5 計測項目及び機器
5. 浮遊式海洋観測ステーション
 - 5.1 Spar buoy 型ステーション開発研究の目的
 - 5.2 ステーションの水面下形状についての流体力学的考察

- 5.3 ステーションの設計の概要
- 5.4 ステーションの風波浪中の運動及び係留索張力
- 5.5 ステーションの建造及び設置工事
- 5.6 事故及びその対策と係留システムの変遷
- 5.7 監視及び点検
- 6. 計測データの処理及び解析
 - 6.1 データ解析システム
 - 6.2 計測データ
- 7. 結語
 - 7.1 研究経過のまとめ
 - 7.2 結論

1. 緒 言

応用力学研究所は、海洋物理及び工学の分野における長期プロジェクト研究「海洋環境の調査並びに海洋環境と海洋構造物との力学的相互作用の研究」を推進している。その一環として、昭和46、47及び48年度の3ケ年に亘り、文部省大型共同研究「海洋波の計測法の開発研究」が行われた。この研究の主たる目的は Clover buoy などの特殊なブイを開発し、海洋波の計測を行って波に関する高精度の情報を集積し、更に海洋波の発生、発達、減衰等の機構を明らかにして波浪の予報精度を向上させることにあった。得られた研究成果は文献(1)、(2)、(3)に報告されている。

ここに報告する「海上実験による海洋観測ステーションの開発研究」は、前述の研究につづいて昭和49年度から4ケ年継続で行われている文部省大型共同研究である。このプロジェクト研究においては、海上の定位置にあって、波浪に対する動揺が小さく、各種の海洋環境データを精度良く取得し、内陸基地に情報を伝達する浮遊式海洋観測ステーションの開発研究を中心として研究が進められている。

研究上の便を考慮し、実験海域として応用力学研究所附属津屋崎海洋災害実験所の西方沖合が選ばれた。まず固定式観測ステーションを建設し、それによって、風、波、潮流及び波力等を計測する。次に小型ではあるが波浪に対する応答の小さい Spar buoy 型一点係留の観測ステーションを開発、建造、設置し、風、波、動揺、ロープ張力等の計測を行う。更に、固定式と浮遊式ステーションによる波浪、風などのデータを比較し、浮遊式で得られたデータに対する動揺の影響（小さい量ではあるが）を補正する方法を開発する。

これに附随して、沖合波浪と沿岸波浪の比較に関する研究、一点係留システムの研究、鋼管型固定構造物に作用する波力の推定法の研究、海洋構造物と海底土床との相互作用に関する研究等が行われている。

現在本プロジェクト研究には、船舶安全性部門、弾性学部門、沿岸海象力学部門、海洋流体力学部門、耐波浪構造学部門が参加している。

この第1報においては、実験海域の調査、固定ステーション及び浮遊式ステーションの設計、建造、

設置, 並びにそれに関連して行った理論的及び実験的研究について報告するものである。尚, 固定式と浮遊式ステーションによるデータの比較, 浮遊式ステーションによるデータの修正法, 及びこれに関連した研究成果については第 2 報以下にのべるものである。

2. 研究目的と組織

2.1 目的

海洋開発を促進するに当っては, 海洋環境を十分に把握しておかなければならない。そのためにはまず海洋環境の調査の技術および方法が確立される必要がある。

長期間定位置にあって海洋環境の各種データを取得し, 内陸基地へ情報を伝送する海上ステーションとして, 沿岸では固定塔式のものが多く利用されており, 水深が数十米の海域では水中浮力基礎を利用したものが開発されつつある。しかし更に水深が大きくなると, 固定塔式ものは技術的に建造が困難であり, たとえ建造されたとしても安全性に問題が多い。したがって水深の大きい場所においては浮遊式ステーションが適していると考えられる。浮遊式のものには, 気象庁が設置した円盤型ブイ (モンスターブイ) あるいは, 米国スクリップス海洋研究所に開発された大型スパーブイなど各種のブイステーションがある。

海洋波の計測に用いられる小型の Clover buoy¹⁾ あるいは上述のモンスターブイは, 海洋波浪によく追従して動く形式のものであり, スパーブイは, その波浪による運動をある海象範囲において小さくしう特性を利用したものである。一般的に海洋観測ステーションとしては, 後者のように運動の小さいものが望ましい。しかしながら, このスパーブイといえども波浪による微小な運動は避けることはできない。したがって, 風, 波浪, 流れなど海洋環境の各種情報を浮遊式ステーションに設置した計測器によって正確に測るためには, そのステーションの運動による影響を補正する必要がある。

海象が激しい場合には, 構造物本体及び係留システムに作用する風及び波浪等の外力に対する十分な安全性が考慮されなければならない。特に係留技術については, 構造物の運動のため係留索あるいは鎖に働く外力及び腐食, 更には疲労を始めとする多数の問題が力学的に解明されなければならない。

昭和 49 年度から 4 ケ年継続して行われる文部省大型共同研究「海上実験による 海洋観測 ステーションの開発研究」は, 次のような目的で研究を進めるものである。

- (1) 運動の小さい浮遊式海洋観測ステーションを開発し, それを海上に設置, 係留する方法を明らかにする。
- (2) 浮遊式ステーションを用いて海洋環境データを収集, 併せて設置される固定式観測ステーションによる環境データを基準にし, 前者のデータを修正する方法を明らかにする。これによって, 浮遊式観測ステーションによる精度の高い海洋環境計測法を確立する。
- (3) 上述 2 個のステーションによって環境データを得るとともに, 風, 波浪及び流れと固定ステーションの基礎部の洗掘, 漂砂の移動による海底地形の変形等を調査し, 海上, 海中, 海底の環境と構造物との力学的相互作用を明らかにする。

2.2 組織

この大型研究の内容は極めて多岐にわたるため、これを実施するに際しては応用力学研究所の海洋関係のすべての組織が参加し、更に固体材料関係の研究組織も一部参加している。すなわち、海洋災害研究部の船舶安全性部門及び耐波浪構造学部門、海洋環境研究部の沿岸海象力学部門及び海洋流体力学部門、材料研究部の弾性学部門及び塑性学部門、更に、津屋崎海洋災害実験所及び大水槽の要員が参加している。

この研究の運営組織としては、参加部門の所員で構成される海洋工学臨時事業小委員会を設けて、研究の基本方針並びに実施計画等を決定している。

研究の実施に際しては、船舶安全性部門及び耐波浪構造学部門が主として浮遊式海洋観測ステーションの開発を行い、その維持管理とこれを利用した計測を担当している。沿岸海象力学部門及び弾性学部門は主として固定式海洋観測ステーションの維持管理並びにこれを利用した海象及び気象の計測を担当している。

その他の部門は両海洋観測ステーションを利用して機動的に各種計測を行っている。また、津屋崎海洋災害実験所の要員は、主として観測の支援作業を担当している。

この大型研究に参加しているすべての職員を部門別に列記すると次の通りである。

〔船舶安全性部門〕 教授 田才福造，助教授 大楠丹，助手 荒川広行，高木幹雄，技官 安永誠，稲田勝，田代昭正（大水槽）

〔耐波浪構造学部門〕 助教授 川建和雄，小寺山亘，助手 長浜智基，石井秀夫，技官 篠崎高茂

〔沿岸海象力学部門〕 教授 光易恒，助教授 水野信二郎，助手 本多忠夫，増田章，技官 江藤賢次，田中道芳

〔海洋流体力学部門〕 教授 竹松正樹，講師 力石国男，技官 北統夫

〔弾性学部門〕 教授 栖原寿郎，助手 肥山央，技官 古賀洋治

〔塑性学部門〕 技官 堤哲男

〔津屋崎海洋災害実験所〕 助手 富岡勝，事務官 安部哲二

3. 実験海域の設定と調査

3.1 実験海域の設定

応用力学研究所附属津屋崎海洋災害実験所の西方海域は、晩秋から冬期にかけて北西の季節風による風浪が卓越している。この風浪観測を目的とする観測ステーションの設置場所としては、図3.1.1にみるように、津屋崎鼻，相ノ島と新宮町とを結ぶ3角形内の海域が適当であると判断された。

ステーションへの連絡は、九大農学部附属水産実験所（津屋崎町）所属実習船と、津屋崎並びに福岡漁業組合所属漁船によるので、ステーションの設置場所はなるべく海岸に近い方が便利である。更に固定式ステーションの海底への貫入が可能である（これは後述の海底地質調査で確認された）ためには、岩礁のある津屋崎鼻より1000 m 位離れる必要のあることが推定された。

以上のことから、実験海域は実験所と相ノ島を結ぶ線上で、海岸より西方約2 km の近傍が選ばれた

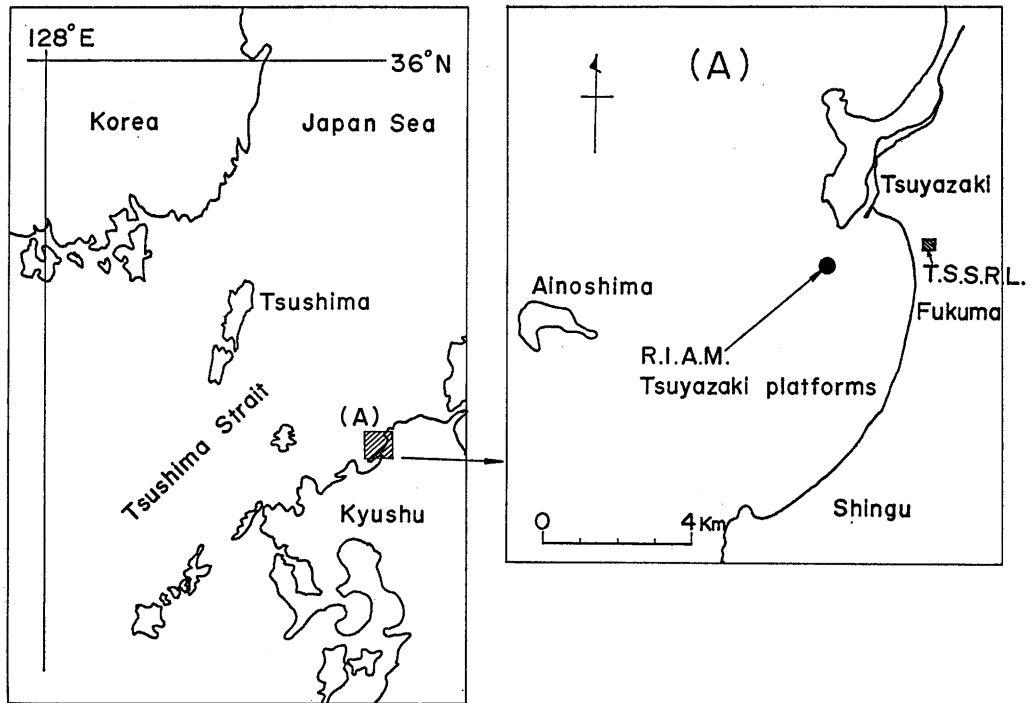


図 3.1.1 実 験 海 域

T.S.S.R.L. (Tsuyazaki Sea Safety Research Laboratory)
R.I.A.M. (Research Institute for Applied Mechanics)

(3.1.1 中の黒丸印の場所). この特定海域を実験に使用するには, 地元 7 漁業組合の同意を得なければならなかった. 関係の深い津屋崎漁協と福岡漁協に対して, 我々は本臨時事業の学術的並びに社会的意義を十分に説明し, 海域使用について協力を求めた. その結果, 昭和 53 年 10 月末までの期限で, 前記海域において固定式及び浮遊式海洋観測ステーションを建設して研究することに対する地元 7 漁業組合の同意が得られ昭和 49 年 7 月 26 日津屋崎及び福岡漁業組合員立会いのもとに, 上記選定海域の内で漁業に支障の少ない場所が設定され, 固定式ステーション建設の位置が決定された.

すなわち, その位置は次の通りである.

東経: $130^{\circ}26'50''$

北緯: $33^{\circ}46'10''$

水深: 約 16 m

3.2. 地質調査

3.2.1. 音波探査

超音波法による実験海域の水深及び地質調査は, 8 月 4 日から 5 日までの期間, 三井海洋開発 (株) と三洋水路 (株) によって我々の立合いのもとに実施された. その結果, 固定式ステーション建設予定

海域とその近傍は岩盤はなく、砂質堆積物の層厚は2～4 m 位で、その下位に堆積している砂礫層が17～20 m であり、ステーションの杭打ちは可能であることが判明した。

3.2.2. ボーリング地質調査

固定式ステーション建設位置のボーリング調査は8月24日から9月11日までの間、三井海洋開発（株）と基礎地盤コンサルタントによって実施された。ボーリングの様子を写真3.2.1. に示す。工事途

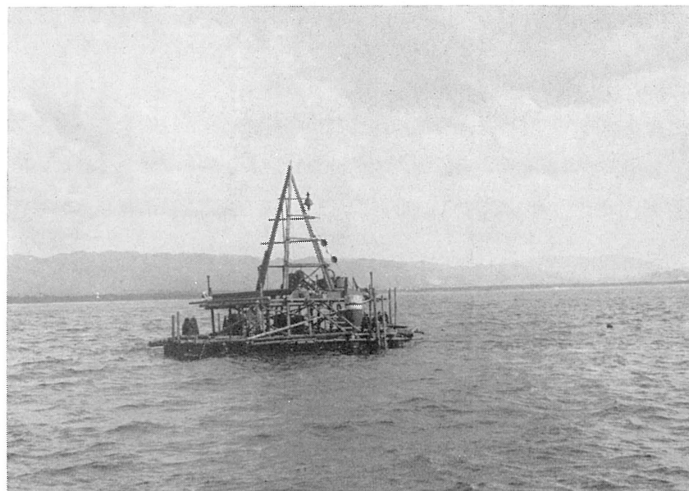


写真 3.2.1 地 質 調 査

中で時化のため一週間の待機がなされたが、機械持込み、ボーリング用筏檣組立、現地到着、係留、試掘、海底下10 m までのボーリング工事は約一週間で終了した。

地質は地表部に薄く堆積した砂層が分布するが、その下位は風化花崗岩の十分締まった地盤であることが判明した。しかし、固定式ステーションの杭（口径800 m）を6～8 m 貫入せしめることは可能であると判断された。

ボーリング調査の結果、得られた N 値を表3.2.1 に示す。

4. 固定式海洋観測ステーション

4.1 概要

本事業の主要な目的は、海洋に係留し高精度で、海象及び気象のデータを収集できる浮遊

表 3.2.1. N 値

深度(m)	N 値 回/30 cm
— 1.15 — 1.45	18
— 2.15 — 2.45	20
— 3.15 — 3.45	50
— 4.15 — 4.36	50/21 cm
— 6.15 — 6.39	50/24 cm
— 8.00 — 8.12	30/12 cm
— 9.00 — 9.14	50/14 cm
— 10.00 10.10	50/10 cm

式の海洋観測ステーションを開発することにある。したがって、波によってできるだけ運動しないで、かつ、波及び風を乱さないような構造の浮遊式のプラットフォームを開発することに研究の重点がおかれた。研究は、理論解析並びに水槽実験など様々な段階をふんで進められ、研究の主要段階で浮遊式ステーションの実機を使用して様々な角度より海上実験が行われた。このような海上実験においては、実験海域の海象及び気象に関する精密なデータが不可欠である。すなわち、浮遊ステーションに作用する外力を定めるためにも、あるいはまた浮遊ステーションで計測された波及び風のデータの測定精度を確かめるためにも、浮遊ステーションの係留してある場所の波及び風の特徴が精密に計測されていることが必要である。

津屋崎沖 2 km の水深約 16 m の実験海域に設置された固定式海洋観測ステーションは、このような目的で設置されたものである。すなわち、浮遊ステーションよりあまり離れていない位置に設置された、この固定式観測ステーションにおいて、海洋波、海上風、潮流、気温及び水温等各種の量の精密な

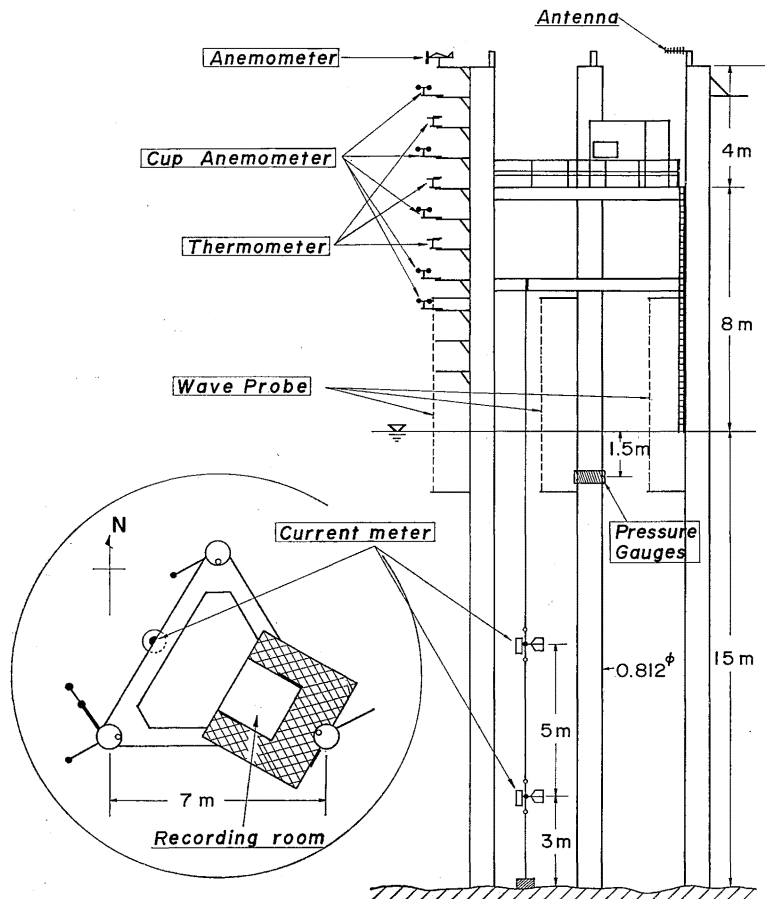


図 4.1.1 固定式ステーション説明図

計測を行うことになった。

この固定式ステーションに要求される機能を列記すると、次のようなものである。

（1）浮遊ステーションに作用する風圧力を推定するために少なくとも海上約10 mまでの風速の鉛直分布及び風向の計測が可能であること。

（2）浮遊ステーションに作用する波力の特性あるいは波と浮遊ステーションとの相互作用の特性を明らかにするために、海洋波の方向スペクトルの測定が可能であること。

（3）浮遊ステーションに作用する流れによる力を推定するために、潮流を含む各種の流れの計測が可能であること。

（4）上記の風、波及び流れの測定を高精度で行うためには、固定ステーション本体によって風波及び流れの場ができるだけ乱されないこと。

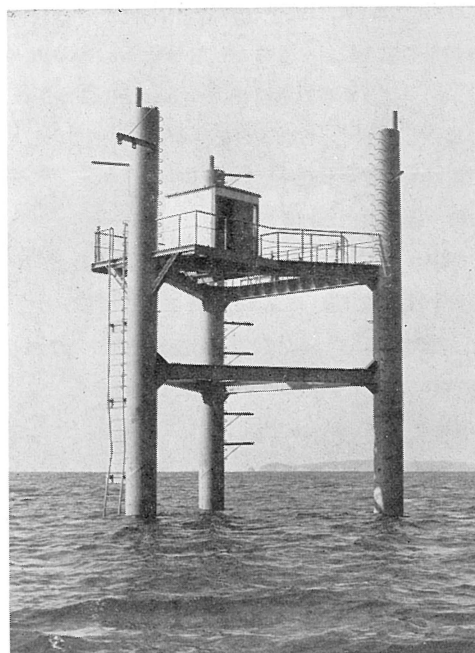


写真 4.1.1 固定式海洋観測ステーション

このため、固定式海洋観測ステーションの構造としては、図 4.1.1 に示されたように、812.8 mm ϕ の鋼管を7 m間隔で海底に打ち込んで正三角形の檣に組み立てたものを採用した（写真 4.1.1 及び図 4.3.1 参照）。

最初、モノポール型のステーションも検討されたけれども、海洋波の方向スペクトルを測定するために波高計を多角形のアレイ状に取り付ける際にこれでは不便であるので、結局3本の円柱を使用した上記のようなものが採用された。円柱の間隔7 mは、この海域で最も頻繁に発生する周期3 sec 前後の波の波高を正確に検出するための波高計の配列を考慮して決定したものである。

4.2 固定ステーションの設計条件

固定ステーションに作用する主要な外力は波力と風圧力であるので、これらの力を次のようにして推定した。

4.2.1. 波力

1) 設計波

設計波としては次の2種類を考えた。

	沖 波 波 高	周 期	沖 波 波 長
A	5 m	8.4 sec	110 m
B	8 m	10.5 sec	172 m

設計波 A は, NNW 方向の対岸距離 220 km を吹送距離にとり, 風速 20 m/sec の冬期季節風が充分長時間吹き続いたものとして Wilson (1965)⁴⁾ の波の推算式を用いて算出したものである. 設計波 B は, 同一吹送距離で風速を 30 m/sec とし求めた値であるが, このような波は極めてまれにしか発生しないものと考えられるので参考までに使用することにした. したがって主要な設計はすべて設計波 A を使用して行われた.

2) 設置点における波

固定ステーションの設置水域* は, 満潮時に $h=17$ m, 干潮時に $h=15$ m で, この地点では沖波の約 90% に波高が減衰することになる. しかし安全のため設計波高としては沖波の値を使用した. また, 固定ステーションのデッキの高さを波の峰が達しないようにするためには波峰高 $\eta_{\max}$ の推定が必要であるが, この値は次のようにして求めた.

$$\eta_{\max}=0.8H.$$

これより, 設計波 A ($H=5$ m) の場合 $\eta_{\max}=4$ m, 設計波 B ($H=8$ m) の場合 $\eta_{\max}=6.4$ m となる. 平均水面として満潮位すなわち +2 m を選ぶとそれぞれ基準面上 6 m 及び 8.4 m となる. このような値を考慮して固定ステーションのデッキの高さは基準面 (干潮位) 上 8 m に決められた.

3) ステーションの主柱に作用する波力

固定ステーションの設置水深においてはいわゆる浅海領域の碎波は生じないものと考えられるので, ステーションの主要部材である円柱に作用する波力は Morison の式で推定した. 波による水粒子速度は微小振巾波理論による値を実験値で補正した合田 (1965)⁵⁾ の式を使用し, 水粒子の加速度は微小振幅波理論による値を使用した. なお, 具体的な計算に際しては合田 (1965)⁵⁾ の計算図表を利用した.

設計波 A の場合 ($H_0=5$ m, $T=8.4$ sec)

水 深		15 m	17 m
水 平 波 力	慣 性 力 (ton)	2.0	2.2
	抗 力 (ton)	3.7	3.3
	合 成 波 力 (ton)	3.9	3.6
モ ー メ ン ト	慣 性 力 モ ー メ ン ト (ton・m)	16	20
	抗 力 モ ー メ ン ト (ton・m)	45	44
	合 成 モ ー メ ン ト (ton・m)	46	47
合成波力の作用点 (海底面上) m		12	13

波力の向 北西の方向から作用 (図 4.1.1 参照)

* 固定ステーションの設置後測定した水深は約 16 m であったが, 設計の時点では水深 15 m とし各種の計算を行った. 水深 15 m の場合と 17 m の場合の計算例でわかるように, これは安全側の値を与える.

円柱の抗力係数を $C_D = 1$ とし、慣性係数を $C_M = 2$ として1本の直立円柱に作用する全水平波力、海底面のまわりのモーメント並びに合成波力の作用点（海底面上）を計算するとそれぞれ上記の表のようになる。

4.2.2 風圧力

固定ステーションに作用する風圧力は次のような条件のもとに計算された。

- (1) 設計風速：40 m/sec (50 m/sec の場合についても参考までに検討)
- (2) 風速分布：一様分布（ステーションの高さの範囲では対数分布に近いものと考えられるが簡単のため一様分布とする。これは、高風速時は水の飛沫が海面近くに多量混入すると考えられるので、このための密度補正と考えてもよい。）
- (3) ステーションに作用する全風圧力は各部材に作用する風圧力の線型結合と考え、相互作用は無視する。
- (4) 抗力係数：各部材の抗力係数としては次の値を採用する。円柱： $C_D = 0.7$ ，H型鋼： $C_D = 2.0$ ，上屋： $C_D = 2.0$ 。
- (5) 投影面積としては、干潮位でステーションが最大に露出した時の値を使用する。
- (6) ステーションの各部に作用する風圧力：雑部材に作用する風圧力は無視し、上記の諸条件のもとに主要部分の風圧力を計算すると次のようになる。ただし、空気の動粘性係数は $\nu = 0.145 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ ，空気の単位重量 $W_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ とする。

部 材	主 柱 (1本)	下 梁 (H型鋼)	上梁(H型鋼+上屋)
水 平 力 ton	0.685	1.15	3.04
力 の 作 用 点 (海 底 面 上) m	21	20	23

主柱（円柱）の渦励振：20 Hz （周期 0.05 sec）

なお主柱に作用する風圧力は1本あたりの値である。したがって、3本に作用する合力はこの3倍 2.055 ton である。下梁及び上梁に作用する風圧力は、下梁全体に作用する値及び上梁（含上屋）全体に作用する値をそれぞれ示す。したがって、ステーションに作用する全風圧力は、

$$p = 2.055 + 1.15 + 3.04 = 6.245 \text{ ton},$$

となる。

4.3. 構造設計

4.2. の設計条件に基づき構造設計を行った。本ステーションは図4.3.1に示すごとく 812.8ϕ の3本の鋼製パイルを正三角形形状に海底に打ち込んだもので、これらを連結する強度部材として、海面上 8 m 及び 5 m の二つの水平面に H 型鋼 ($390 \times 300 \times 10 \times 6$) の水平梁が正三角形に配置されている。海中及び海底部には補強部材がない。また 8 m の高さには計測用甲板を設けてある。水中部分のパイルの長さは 15 m であり、海底下は 8 m の深さまで打ち込まれている。

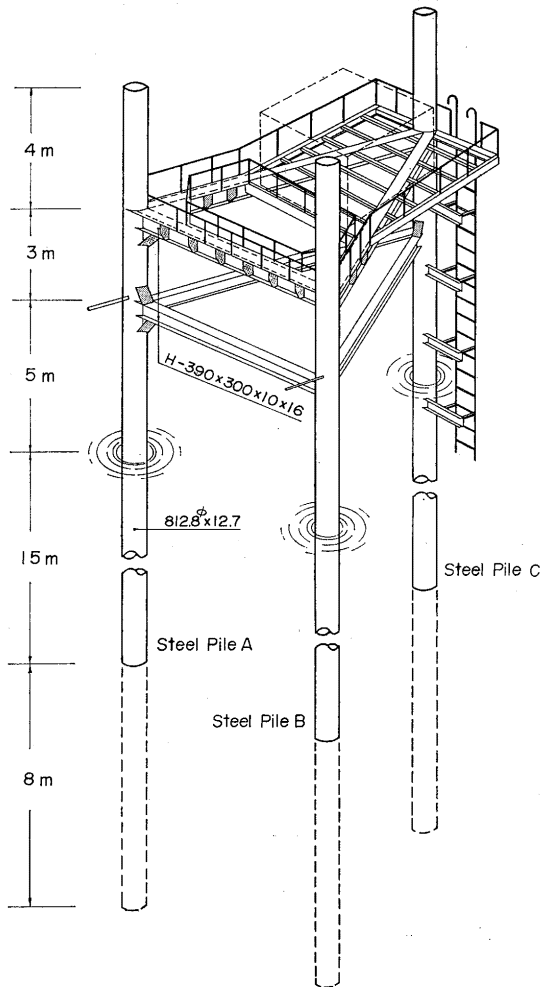


図 4.3.1 固定式ステーション透視図

$$E_s \rightleftharpoons n_h \frac{l_y}{3},$$

である。ここで $h=23\text{m}$ 、また E_s は横方向地盤反力係数であり、前の計算における BK に相当する。

n_h は締った水中の砂で約 1.1kg/cm^3 である。上述の三式から $1/\beta$ を計算すると、

$$\frac{1}{\beta} \rightleftharpoons 363\text{cm} \text{ となる。}$$

一方大崎は $1/\beta$ を次のように提案している⁸⁾。すなわち締った砂の場合、

パイルの $I=50,000\text{cm}^4$ 程度では $1/\beta=2\text{m}$

パイルの $I=500,000\text{cm}^4$ 程度では $1/\beta=3\text{m}$

4.3.1. 構造解析におけるパイルの 仮想固定点の計算

3.2.1. に示したごとく海底面から $1\sim 4\text{m}$ の深さの N 値は $20\sim 50$ であり、土質は風化花崗岩の締った地盤であるので地盤係数 K は、

$$K=2.8\sim 8.3\text{ (kg/cm}^3\text{)}^{\otimes},$$

と考えられる。また

$$\beta^4 = \frac{BK}{4EI}$$

とおくと、海底から $1/\beta(\text{cm})$ の深さが近似的に仮想固定点となる⁷⁾。ここで B はパイルの径 (cm)、 EI はパイルの剛性 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2$) である。 $K=2.8$ とすると、 $1/\beta=313\text{cm}$ となり、 $K=8.3$ とすると、 $1/\beta=240\text{cm}$ となる。

同じ問題を Y. L. Chang の考え方によって計算してみる⁷⁾。現在のパイルは甲板の高さでほぼ固定端の形状に近いものと仮定すると、海底中におけるパイルの第1不動点の位置を海底面からの距離 l_y であらわすと、

$$l_y = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left(-\frac{1+\beta h}{1-\beta h} \right),$$

ただし、

$$\beta^4 = E_s/4EI,$$

現在のパイルは $I = 256,000 \text{ cm}^4$ であるので $1/\beta \approx 3 \text{ m}$ と考えてよい。

以上三つの推定結果から考えてパイルの仮想固定点を海底下 3 m とした。

4.3.2. 応力計算

ステーションを図 4.3.2 に示す 骨組構造と考え、4.2. に示した外力を受けた場合の応力計算を行った。最大応力は member ③—⑬ (東南側のパイル C) の基部③に生ずるが、その値は約 15 kg/mm^2 である。水平梁 (H 型鋼) の最大応力は member ⑪—⑬ 及び ⑫—⑬ のそれぞれの端部 ⑪, ⑫に発生し、約 13 kg/mm^2 である。

4.3.3. 振動実測と計算

計算に際して、仮想固定点の位置 $1/\beta$ を 3 m として計算したことに大きな誤りがないことを確かめるためにステーション完成後に自由振動試験を行い、計算による振動周期と実測の周期との比較を行った。振動計測は通船を軽くパイルに衝突させ、そのとき発生した自由振動を計測したものであり実測振動波形を図 4.3.3 a), b) に示す。

↑は衝突方向を示し、↔は振動方向を示す。図 4.3.3 a) は衝突方向の振動計測結果であり、ステーションの撓み振動を示す。このときの平均周期 T_m は約 1.09 秒 である。これに対して計算で求めた撓み振動周期 T_c は約 1.11 秒 であり両者はよく一致しており、 $1/\beta = 3 \text{ m}$ と推定したことに大きな誤りがあったことが確かめられた。図 4.3.3 b) は衝突方向と直角方向の振動波形である。これは通船の衝突が正確に↑の方向に行われず若干の方向のずれがあったため誘起されたものであり、主としてステーションの振り振動をあらわすものと考えられる。その周期は約 0.6 秒 であり、撓み振動周期に比べて小さい。

4.4 固定ステーションの建造、設置工事

固定ステーションの設置方法としてはまず3本の杭 (主柱) を実験海域の計画地点に1辺 7 m の正三角形を形成するように貫入し、その上に工場で製作した上部構造を塔載し固定する方法を採用した。

上部構造は、三井海洋開発 (株) が設計し、岡山県の内海興業 (株) 玉野工場において製作された。昭和49年9月5日～7日に工場検査を行った後、完成した機材は9月13日に玉野市で作業船に積み込まれた。14日、日比港を出港し15日に津屋崎沖の現地に到着し、ただちに設置準備にとりかかった。

現地据付工事は9月16日より20日にかけて三井海洋開発 (株) によって実施された。まず、ボーリング調査地点を示すマーカーブイを目標にして作業船を保留した。812.8mmφの鋼管を50 ton 吊りクローラ・クレーンで作業船より張り出したガイドに沿わせて建込み、パイプロハンマーにて可能な深さ

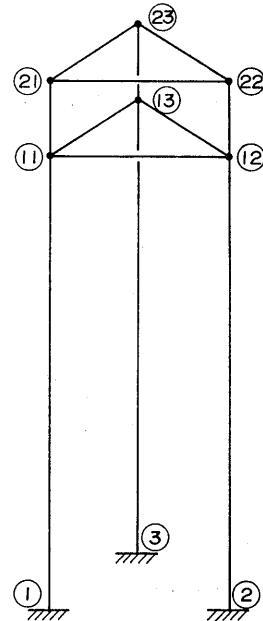


図 4.3.2 固定式ステーション骨組構造

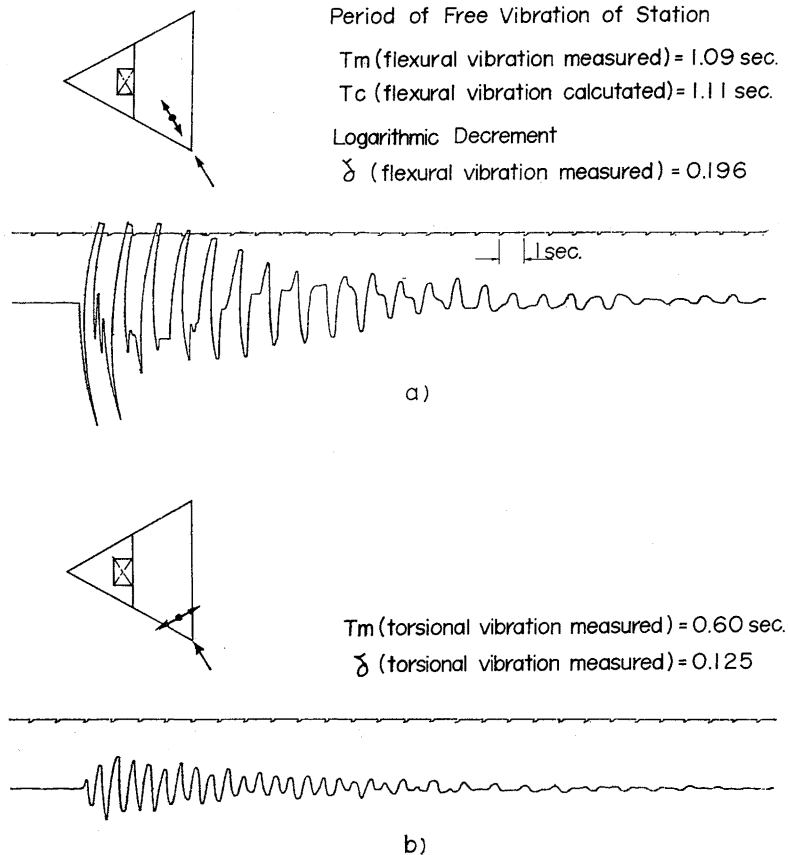


図 4.3.3 固定式ステーションの振動波形

梅北式振動計, 昭和 49 年 9 月 21 日午後 0 時頃, 満潮, 潮位 172 cm.

まで貫入した。その後、ディーゼル・ハンマーにて目標貫入量まで打ち込んだ。

3本の主柱の天端高を完全に揃えた後、上部構造を作業船台より静かに吊り降して3本の主柱に接合した。この場合接合を容易にするため、特殊な接合金具が使用された。接合後溶接して3本の主柱と上部構造は完全に固定された。

ステーション完成時の仕様は、上部構造の3本主柱において中心間隔は 5 mm 以内、傾度は 1/1000 以内、上下梁の水平高低下は 10mm 以内であった。

設置工事完了後、ステーションの構造の安全性並びに振動特性の確認のため、曳船を軽くステーションに衝突させて、ステーションの振動試験を行った。

4.5 計測項目及び機器

4.5.1 計測項目及び機器

固定ステーションにおける計測項目は次の通りである。

1) 気象要素

海面上 12m における風向風速

海面上の風速分布 ($z=4, 5, 7, 9, 11\text{m}$)*

海面上の温度分布 ($z=6, 8, 10\text{m}$)

2) 海象要素

波浪（含波向）一辺 7 m の正三角形の波高計アレー

流向, 流速

水温, 塩分, 水圧

潮位

3) ステーションの振動及び外力

ステーションの加速度

脚柱に作用する波圧

これらの計測を行うための計測器をまとめて示すと表 4.5.1 及び 4.5.2 の通りである。

なお表 4.5.1 に示された 23 のデータは、すべて鶴見精機 K.K. の計測制御収録装置内蔵のデジタル型データレコーダーに計測制御部の指示に従って記録される。なお、No.1~12 のデータは横河電機 K.K. の自動平衡型打点式記録計にも記録される。表 4.5.2 に示される 24~28 のデータは鶴見精機 K.K. の流向流速計 MTCM-5 によるもので、指定のプログラムに従って内蔵のカセット式データレコーダーに記録され、29 の潮位は協和商工 K.K. 製フース型潮位計で計測され、専用のチャート・レコーダーに連続的に記録される。図 4.5.1 は固定式海洋観測ステーションの全計測システムを示すブロック図である。

4.5.2 計測制御

各種データの連続記録を行うことは、電源を電池に依存している点から好ましくないし、また実験の目的からいっても必要でない。したがって、計測制御装置を使用して、次のような種類の計測の制御が選択的に行えるようにした。

1) 風速制御（図 4.5.2）

風速計（ダイナペン）の出力の平均値（平均化時間可変）を設定風速と比較して、風速が設定風速を超えると計測をはじめ、独立に設定した時間だけ計測を行って一旦停止する。さらに風速が設定風速を超えていれば、再び計測を実行し、上記の動作を繰り返す。この制御方式は時間制御とは独立に行うことが可能で、主として、カセットレコーダーへの記録（計測項目 No.1~23）を行うのに使用する。

風速の平均化時間：0, 1, 3 分のいずれか

計測記録時間 T_2 ：10, 20, 40, 60 分のいずれか

設定風速 U_s ：0~60 m/sec 連続可変

2) 時計制御（図 4.5.2）

制御装置に内蔵された時計により次のようなプログラムに従って自動的に計測を行うことができる。

* 若干変更する場合もある。

表 4.5.1. 固定式ステーションの計測項目及び計測機器一覧

No.	計測項目	セ ン サ ー 様 式	測 定 範 囲	セ ン サ ー 出 力	電 源	メ ー カ ー
1	風 向	ダイナペン, 500 Ω ボテンショ	0~540°	D C. 0~6V	I 15V 8mA	} 太田計器
2	風 速	" 直流発電機	0~60m/s	D C. 0~1V	I 15V 4mA	
3	風速分布(1)	三杯式, 交流発電機	0~60m/s	A C. 1~10V	} 12V, 25mA	} 太田計器
4	" (2)	" "	0~60m/s	A C. 1~10V		
5	" (3)	" "	0~60m/s	A C. 1~10V		
6	" (4)	" "	0~60m/s	A C. 1~10V		
7	" (5)	" "	0~60m/s	A C. 1~10V		
8	気 温(1)	通風式, 100 Ω 白金抵抗	-10°~40°C	100+0.4 $t\Omega$	} 12V, 36mA	} 横河電機
9	" (2)	" "	-10°~40°C	100+0.4 $t\Omega$		
10	" (3)	" "	-10°~40°C	100+0.4 $t\Omega$		
11	温度差(2)-(1)	" "	-5~5°C	—	} 12V, 24mA	} 鶴見精機
12	" (3)-(1)	" "	-5~5°C	—		
13	波 高(1)	容量型, 電極 ϕ 5mm	0~ $\pm$ 3m	D C. -1~1V	} 24V, 600mA	} 電子工業
14	" (2)	" "	0~ $\pm$ 3m	D C. -1~1V		
15	" (3)	" "	0~ $\pm$ 3m	D C. -1~1V		
16	加 速 度(1)	歪 計	}	D C. -1~1V		
17	" (2)	" "		D C. -1~1V		
18	" (3)	" "		D C. -1~1V		
19	波 圧(1)	歪 計		D C. -1~1V	}	}
20	" (2)	" "		D C. -1~1V		
21	" (3)	" "		D C. -1~1V		
22	" (4)	" "		D C. -1~1V		
23	" (5)	" "		D C. -1~1V		
24	流 向	ペン及びコンパス	0~360°	} 内部記録 (カセットデータ・ レコーダ)	} 内蔵単 2—16ヶ	} 鶴見精機 (MTCM-5A)
25	流 速	サボニアローター	0.03~3m/sec			
26	水 温	白金抵抗	0~35°C			
27	電気伝導度	誘電型	0~0.06 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$	} 専用記録計	} D C. 6V	} 協和商工
28	深 度	ブルドン管	0~200m			
29	潮 位	フロート型	3.5m			

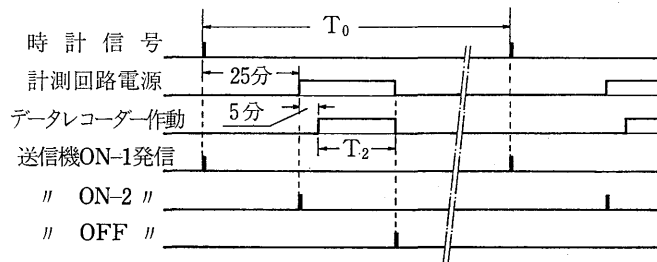
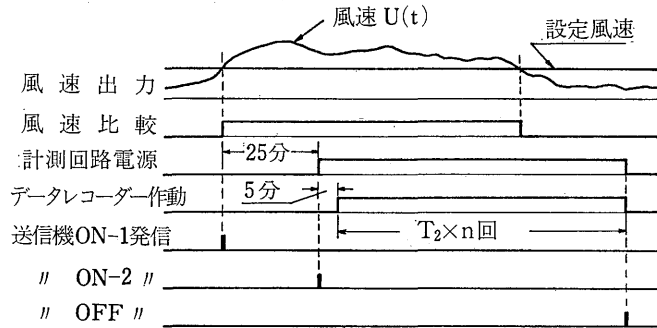
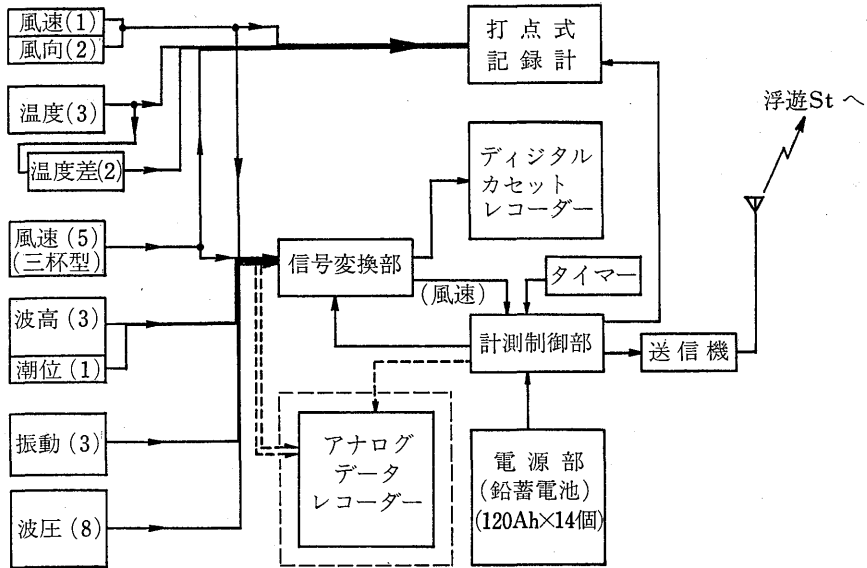


図 4.5.2 計測制御のタイムシーケンス

計測時間間隔 T_0 : 0 時を基点として 1, 2, 3 時間あるいは連続のいずれか

計測記録時間 T_2 : 10, 20, 30 分間のいずれか

この制御方式は主として定時観測に使用し, 計測項目 No. 1~12 のデータを打点式記録計に記録するのに用いられている。

3) 風速・時計制御

時計制御と風速制御を組み合わせたもので, 両方の条件を満足するときのみ計測とカセットレコーダーへの記録を行い, いずれか一方の条件では計測は行われない。すなわち, 設定した時間間隔の定時に風速が設定値を超えていれば計測記録を行う。この場合, 打点式記録計にも前記の 12 項目のデータは同時に記録される。カセットレコーダーへの記録は, この方式が一般に使用されている。

4) 無線指令

浮遊ステーション自体も計測制御装置をそなえているが, 浮遊ステーションと固定ステーションとで全く同時計測を実施するため, 固定ステーションの計測制御指令を無線にて浮遊ステーションに伝達し, 固定ステーションと同時に浮遊ステーションにおいて計測を行うことが可能である。これは, 時計制御, 風速制御, 風速時計制御のいずれに関しても可能である。図 4.5.2 に示されたタイムシーケンスで説明すると, 無線機 ON-1 の信号で浮遊ステーションのジャイロ電源を ON にし, 無線機 ON-2 で計測回路の電源を ON にする。その後は内蔵のタイマーで 5 分後に自動的に記録を開始する。無線機 OFF 信号で記録を停止し, 無線機以外の全電源を切る。

5) テスト

計測器及び計測制御装置のテストを行う際には, テスト・スイッチによって任意の時刻に全計測器及び制御記録装置を作動させることが可能である。

4.5.3 データの記録

計測されたすべてのデータは, 時計による日付けとともにすべて鶴見精機 K.K. の 2 トラックのカセットレコーダー 3 台にデジタル形式で記録される。データのサンプリング間隔 Δt は 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 秒のいずれかを選ぶことができる。各トラックあたり 16 チャンネルのマルチプレクサーをそなえているので, 1 台のレコーダーで最高 32 チャンネルのアナログ入力を記録することができる。記録時間は最高のサンプリング間隔 0.05 秒で, 延べ 6 時間である。サンプリング間隔を長くすればそれに応じて記録時間を延長することは可能である。

5. 浮遊式海洋観測ステーション

5.1. Spar buoy 型ステーション開発研究の目的

近年わが国においても海象計測その他の目的のために円盤型のブイが気象庁によって数個設置されている。例えば 1973 年 8 月紀州沖約 550 km, 30°N, 135.5°E, 水深 4200 m に設置された 3 号ブイは直径 10 m, 重量約 43 ton である⁹⁾。このような円盤型ブイは動揺固有周期が短く (3 号ブイで約 3 sec), 短波長の波に対しては波との相対運動は大きい, 長波長の波 (3 号ブイでは周期 6 sec 以上の波) に対しては波面に良く追従する性質を有する。このように波面に良く追従するブイは Wave rider buoy

と呼ばれ、前記円盤型ブイの外にも Clover buoy¹⁾ などがある。

一方、Wave rider buoy とは異なり、入射波に対して動揺が極めて小さいという特性を有するものに Spar buoy がある。Spar buoy とは、その軸を鉛直にして水面に浮かぶ長円筒形のブイの総称で、ブイの吃水を l とすれば上下揺の固有周期 T_z は凡そ $2\pi\sqrt{l/g}$ (但し g は重力の加速度) となり、吃水 l が大きい場合は T_z は非常に大きくなり得る。例えば $l=100\text{ m}$ の場合 T_z は約 20 sec である。

アメリカのスクリップス海洋研究所で 1962 年に開発された Spar buoy FLIP¹⁰⁾ は全長 355 ft, 直立時の吃水は 300 ft, 水線面積 125 ft², 排水量約 2,200 ton である。また 1974 年伊豆大島の西方海上に 4 点係留で設置された電々公社の海上無線中継船¹¹⁾ は吃水 100 m, 排水量約 2,000 ton の Spar buoy 型ステーションである。

図 5.1.1. は直立時の FLIP の側面図である。水面下部の断面積は水線面積より大きいために $T_z=2\pi\sqrt{l(1+\alpha)/g}$ ($\alpha>1.0$) となり、単純な円筒ブイよりも T_z を更に大きくすることができる。なお図のような形状を持つ浮体では、上下揺に対して波無し周期が存在し、その周期の波が入射したとき、ブイの上下揺は極めて小さくなる特性を有している。波無し周期を持つブイの規則波に対する上下揺の振幅応答特性は図 5.1.2. に示すようになる。

上下揺固有周期 T_z 及び波無し周期 T_0 を大きくし、かつ $0<T_w$ (波周期) $<T_0$ における $\bar{z}=z_A/\zeta_A$ (z_A は上下揺振幅, ζ_A は規則波振幅) の最大値 $\bar{z}_1$ を小さくすれば、相当長周期の波浪に対しても上下揺振幅応答 $\bar{z}$ を小さくすることができる。

Wave rider buoy の一種である Clover buoy と Spar buoy FLIP の上下揺振幅応答特性及び不規則波中の上下揺応答スペクトルの差異を図 5.1.3. に示す。不規則波としては風速 $U=20\text{ m/sec}$ に対する Moskowitz-Pierson の波スペクトルを用い、線型スペクトル解析で上下揺のパワースペクトル密度 S_{zz} を計算した。図から Clover buoy は波に良く追随し、 S_{zz} の周波数特性及び分散は波のパワースペクトル密度 $S_{\zeta\zeta}$ のそれらにほぼ等しく、また FLIP は S_{zz} の分散は小さく、従ってこの不規則波中での上下揺応答が小さいことがわかる。

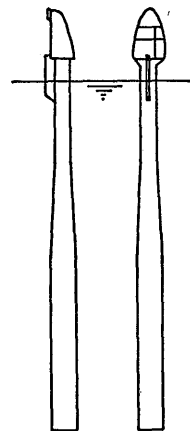


図 5.1.1 FLIP 側面図

次に Spar buoy の場合、メタセンター高さ GM , 横揺や縦揺の環動半径及び係留方法を適当に選べば、定常風や潮流に対する傾斜を小さくし、且つ横揺あるいは縦揺の固有周期を大きくすることができる。このことから不規則波中の横揺あるいは縦揺の応答の平均値が小さくなるように設計することができる。

Spar buoy 型ステーションには FLIP や海洋無線中継船の外に、大型のものとしては SPAR* (1,700 ton) があり、中型のものとしては POP** (115 ton), Bouée Laboratoire*** (250 ton) が

*SPAR: Seagoing Platform for Acoustic Research の略称

**POP: Perpendicular Ocean Platform の略称, Genenal Motor Corp. 所有.

***Bouée Laboratoire: Centre National pour Exploitation des Oceans (CNEXO) 所有.

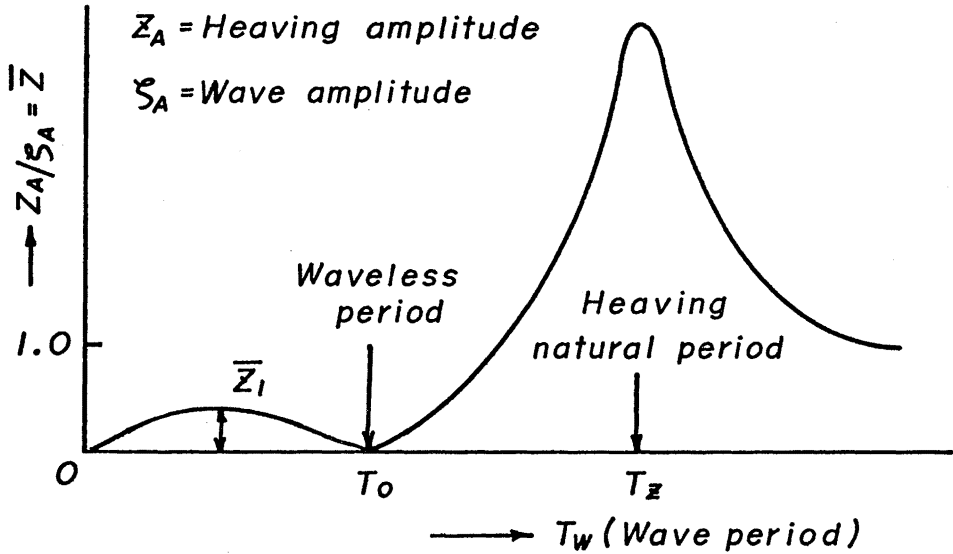


図 5.1.2 Spar buoy の上下揺振幅特性

有名である。

われわれの開発研究の目的は、第 1 には小型ではあるが中型や大型のものに匹敵する性能を持つ Spar buoy 型ステーションを開発すること。第 2 には Spar buoy 型ステーションの一点係留方式について研究すること。第 3 にはステーションで得られた波浪データについて、小さい量ではあるが存在するステーションの運動の影響を修正し、固定式観測ステーションで得られた波浪データに近い精度を有するものに変換する方法を開発することである。

5.2. ステーションの水面下形状についての流体力学的考察

前節にのべた大型及び中型の Spar buoy 型ステーションの場合は吃水が大きいのので水面下形状については、さしたる考慮を必要としない。しかし小型のステーションの場合は、動揺固有周期及び波無し周期 T_0 を大きくし、相当な量の計測器類を搭載して、かつ Z_1 を小さくするためには特別の工夫をしなければならない。

本研究においては、Spar buoy 型ステーションの水中部分を構成する要素として、図 5.2.1. に示すように、円筒部（半径 r_0 、長さ l_0 ）、フーティング部（半径 r_1 、深さ l_1 ）、円盤フィン（半径 r_f 、没水深度 l_f ）及び斜めフィン（図中の斜線部分）を考える。

図 5.2.1. で静水面上の点 O を原点とする空間固定座標を $O-XYZ$ とし、 $O-XY$ は静水面で OZ は鉛直下向きを正とする。 h は水深である。ステーションの水線面の中心 O_1 を原点とするステーション固定座標を O_1-xyz とし、波が無いときは O_1 は O に、 x, y, z は X, Y, Z に一致するものとする。

— Y 方向に入射する円振動数 ω の微小振幅の規則波の速度ポテンシャル ϕ_w は次式で表わされる。

$$\phi_w = -i\zeta_A \frac{g}{\omega} H_1(h, Z) \exp i(m_0 Z + \omega t). \quad (5.2.1)$$

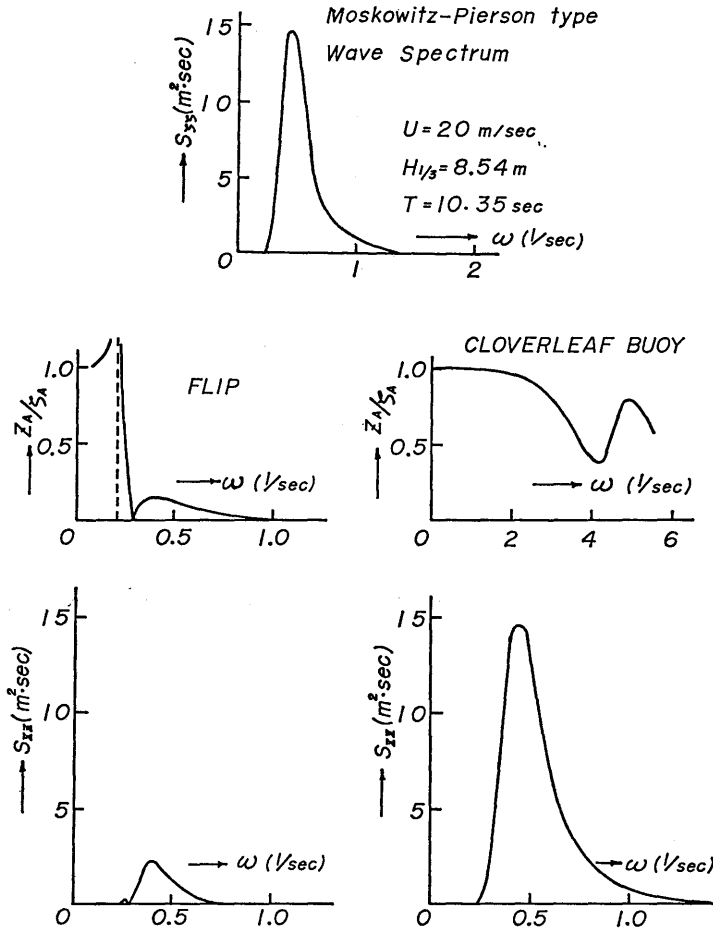


図 5.1.3 FLIP と Clover buoy の不規則波中の上下揺応答の比較

ただし、 ζ_A は波振幅、 g は重力の加速度で、 m_0 は、

$$\omega^2/g = K = k \tanh kh \quad (5.2.2)$$

の実根である。また、

$$H_1(h, z) = \cosh m_0(h-z) / \cosh m_0 h \quad (5.2.3)$$

次に波の sub-surface ζ 及び流体内部の変動圧力 P は次式で与えられる。

$$\zeta = \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} = \zeta_A H_1(h, Z) \exp \cdot i(m_0 Y + \omega t), \quad (5.2.4)$$

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} = -\rho g \zeta = -\rho g \zeta_A H_1(h, Z) \exp \cdot i(m_0 Y + \omega t), \quad (5.2.5)$$

ただし ρ は流体の密度。

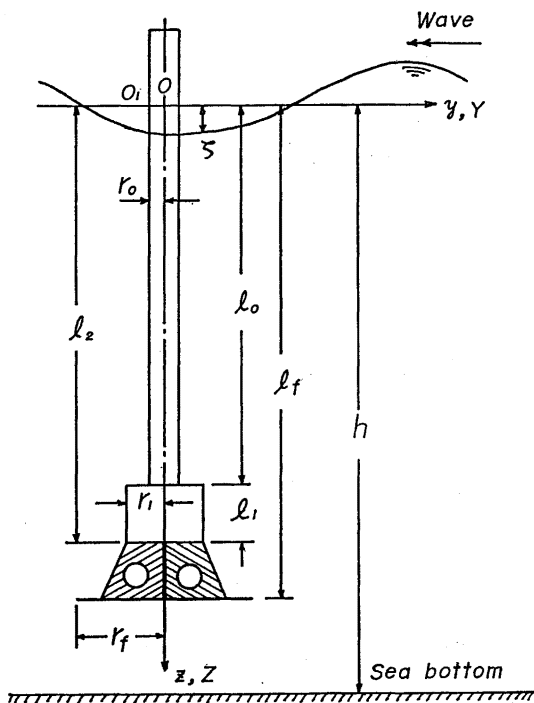


図 5.2.1 Spar buoy 型ステーションの水面下形状図

4.2.1 上下揺固有周期 T_z

上下揺固有周期 T_z は次式で表わされる.

$$T_z = \sqrt{2\pi(M + \Delta M + \Delta M_f) / \rho g A_w}. \quad (5.2.6)$$

ただし M = ステーションの質量 $= \rho\pi(r_0^2 l_0 + r_1^2 l_1) + m$, (5.2.7)

m は円盤フィン, 斜めフィンその他の質量. ΔM はフーティングの付加質量で, $r_1 \ll r_0$ で, かつ自由表面の影響は無視できると仮定すれば,

$$\Delta M \doteq \rho \frac{8}{3} r_1^3 \quad (5.2.8)$$

ΔM_f は円盤フィンの付加質量で, 自由表面及び水底の影響が無視でき, かつ上下揺変位が小さいと仮定すれば,

$$\Delta M_f \doteq \rho \frac{8}{3} r_f^3. \quad (5.2.9)$$

以上の関係式を用いれば

$$T_z \doteq \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{l_0 + \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 l_1 + \frac{m}{\rho\pi r_0^2 l_0} + \frac{8}{3} \frac{r_1^3 + r_f^3}{\pi r_0^2}}$$

となる.

ここで

$$T_z = 2\pi \sqrt{l_0(1+\alpha)/g}$$

とおけば

$$\alpha = \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 \left(\frac{l_1}{l_0}\right) + \frac{m}{\rho\pi r_0^2 l_0} + \frac{8}{3\pi} \left(\frac{r_1^3 + r_f^3}{r_0^2 l_0}\right), \quad (5.2.11)$$

であり, T_z を大きくするにはフーティング半径或は円盤フィンを大きくすれば良いことがわかる.

$l_0 = 10$ m の円筒部のみから成るステーションでは $T_z \doteq 2\pi\sqrt{l_0/g} = 6.3$ sec である. 今排水体積 $\nabla \doteq 10$ m³ とし, $l_0 = 10$ m, $r_0 = 0.4$ m の円筒部, $l_1 = 1.5$ m, $r_1 = 1.0$ m のフーティング及び $r_f = 2.25$ の円盤フィンから成るステーションの場合は, (5.2.11) 式から $T_z \doteq 18.5$ sec となる.

∇ を一定とした場合, T_z の値は r_0, l_0, r_1, l_1, r_f の組み合わせによって変る. 後節にのべるように r_1 及び r_f をむやみに大きく, 従って T_z を非常に大きくしても図 5.1.2 の $\bar{Z}_1$ が大きくなって好ましくない. それ故, T_z を大きくすることは基本条件であるが, T_0 がなるべく大きく, かつ $\bar{Z}_1$ が小さく

なるように部材寸法を決めねばならない。

5.2.2. 横揺固有周期と GM

重心 G の周りの横揺慣性能率を J 、同じく付加慣性能率を I 、メタセンター高さを GM 、排水量を W とすれば、横揺固有周期 T_ϕ は、次式で与えられる。

$$T_\phi = 2\pi \sqrt{(J+I)/W \cdot GM}. \quad (5.2.12)$$

風や流れによる定常傾斜を小さくするには、 $W \cdot GM$ を大きくする必要がある。小型のステーションの場合は W が小さいので GM を大きくしなければならない。一方、長周期の波に対しても横揺を小さくするためには T_ϕ をできるだけ大きくする必要がある。結局 GM と I とそして T_ϕ を大きくすることが必要である。(5.2.12) 式から以上のことを満足するには $I+J$ を大きくし、かつ重心 G を下げれば良いことになる。

5.2.3. 規則波中の上下揺

一 Y 方向に進む $\zeta_A \cos(m_0 Y + \omega t)$ の規則波中におけるステーションの上下揺の運動方程式は、上下揺変位 z が微小であるとすれば次式で与えられる。

$$(M + \Delta M + \Delta M_f) \ddot{z} + n_1 \dot{z} + n_2 z + \rho g A_w z = F_{ZE}. \quad (5.2.13)$$

ただし M はステーションの質量、 ΔM 、 ΔM_f はそれぞれフーティング及び円盤フィンの付加質量である。 n_1 は主として造波現象に基づく線型減衰係数であるが、フーティング及びフィンの没水深度が大きい場合は無視できる。 $n_2 z$ は粘性による非線型減衰力、右辺は線型現論による波強制力である。

(5.2.13) 式は非線型方程式であるが、その応答は ω の円振動数成分が卓越するので、

$$z = z_A \cos(\omega t + \varepsilon), \quad (5.2.14)$$

とおく。そのときの粘性減衰は、

$$\begin{aligned} n_2 \dot{z} &= -n_2 z_A^2 \omega^2 \sin(\omega t + \varepsilon) |\sin(\omega t + \varepsilon)| \\ &= -n_2 z_A^2 \omega^2 \left\{ \frac{8}{3\pi} \sin(\omega t + \varepsilon) + \frac{8}{15\pi} \sin(3\omega t + \varepsilon) + \dots \right\} \\ &\doteq -n_2 z_A^2 \omega^2 \frac{8}{3\pi} \sin(\omega t + \varepsilon) = n_2 z_A \omega \frac{8}{3\pi} \dot{z}. \end{aligned} \quad (5.2.15)$$

ここで、

$$n_2 \frac{8}{3\pi} = N_z, \quad (5.2.16)$$

とおき、 $n_1 \doteq 0$ と仮定すれば減衰力は $N_z z_A \omega \dot{z}$ で近似することができる。

ΔM 、 ΔM_f 及び波強制力は線型境界値問題を解いて求められるが、本研究では (5.2.8)、(5.2.9) の近似値を用いて以下の計算によることにした。すなわち波強制力 F_{ZE} は次式で与えられる。

$$F_{ZE} = F_z^{F \cdot K} + F_z^D. \quad (5.2.17)$$

ただし $F_z^{F.K.}$ = Froude-Kriloff 理論に基づくもの

F_z^D = diffraction force = 入射波がステーションによって攪乱されることによって生ずるもの

$F_z^{F.K.}$ は, $Z=l_2$ 及び $Z=l_0$ における変動圧力を用いると次式で表わされる.

$$F_z^{F.K.} = -P(Z=l_2)\pi r_1^2 + P(Z=l_0)\pi(r_1^2 - r_0^2). \quad (5.2.18)$$

$\zeta_A \cos \omega t$ の入射波があるときの変動圧力 P は (5.2.5) より

$$p = -\rho g \zeta_A H_1(h, Z) \cos(m_0 Y + \omega t). \quad (5.2.19)$$

本論の解析においては r_1, r_0 は波長 λ に比べて十分小さいとして $Y=0$ の P の値を用いる.

而るときは

$$F_z^{F.K.} = \rho g \zeta_A \pi r_0^2 H_1(h, l_0) \{1 - r^2(1 - \beta)\} \cos \omega t. \quad (5.2.20)$$

ただし

$$r = r_1/r_0, \quad \beta = H_1(h, l_2)/H_1(h, l_0). \quad (5.2.21)$$

次に波粒子の軌道運動による Z 方向の速度 $\dot{\zeta}_w$ 及び加速度 $\ddot{\zeta}_w$ は

$$\left. \begin{aligned} \dot{\zeta}_w &= -\omega \zeta_A H_2(h, Z) \sin(m_0 Y + \omega t) \\ \ddot{\zeta}_w &= -\omega^2 \zeta_A H_2(h, Z) \cos(m_0 Y + \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (5.2.22)$$

ただし

$$H_2(h, Z) = \sinh m_0(h - Z) / \sinh m_0 h. \quad (5.2.23)$$

ステーションの中心線 $Y=0$ 上で, $Z=l_0+l_1/2$ 及び $Z=l_f$ における波粒子速度を $\dot{\zeta}_{w1}$ 及び $\dot{\zeta}_{w2}$, 加速度を $\ddot{\zeta}_{w1}$ 及び $\ddot{\zeta}_{w2}$ とおけば, それらは次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\zeta}_{w1} &= -\omega \zeta_A H_2\left(h, l_0 + \frac{l_1}{2}\right) \sin \omega t, \\ \dot{\zeta}_{w2} &= -\omega \zeta_A H_2(h, l_f) \sin \omega t, \\ \ddot{\zeta}_{w1} &= -\omega^2 \zeta_A H_2\left(h, l_0 + \frac{l_1}{2}\right) \cos \omega t, \\ \ddot{\zeta}_{w2} &= -\omega^2 \zeta_A H_2(h, l_f) \cos \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (5.2.24)$$

diffraction force F_z^D は, $\dot{\zeta}_w$ 及び $\ddot{\zeta}_w$ に比例する力の和で表わされるが, 造波減衰係数 n_1 が小さいときは前者の力は無視できる. しをがって F_z^D は近似的に次式で与えられる.

$$\begin{aligned} F_z^D &\doteq 4M_f \ddot{\zeta}_{w1} + 4M_f \ddot{\zeta}_{w2} \\ &= -\frac{8}{3} \rho \omega^2 \zeta_A \{r_1^3 H_2\left(h, l_0 + \frac{l_1}{2}\right) + r_f^3 H_2(h, l_f)\} \cos \omega t \end{aligned} \quad (5.2.25)$$

故に (5.2.17), (5.2.20) 及び (5.2.25) より

$$F_z^E = F_z^{F.K.} + F_z^D$$

$$= \left[\rho g \zeta_A \pi r_0^2 H_1(h, l_0) \{1 - r^2(1 - \beta)\} - \frac{8}{3} \rho \omega^2 \zeta_A \left\{ r_1^2 H_2\left(h, l_0 + \frac{l_1}{2}\right) + r_f^2 H_2(h, l_f) \right\} \right] \cos \omega t.$$
(5.2.26)

ここで

$$F_{ZE} = F_{ZEA} \cos \omega t, \quad (5.2.27)$$

$$F_{ZEA} = \rho g \zeta_A \pi r_0^2 H_1(h, l_0) A, \quad (5.2.28)$$

とおけば, $\rho g \zeta_A \pi r_0^2 H_1(h, l_0)$ はカラムだけの場合の上下揺強制力である.

更に

$$\left. \begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_3, \\ A_1 &= 1 - r^2(1 - \beta), \\ A_2 &= -\frac{8}{3\pi} \frac{\omega^2 r_1}{g} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 \bar{H}_2\left(\frac{l_1}{2}\right), \\ A_3 &= -\frac{8}{3\pi} \frac{\omega^2 r_f}{g} \left(\frac{r_f}{r_0}\right)^2 \bar{H}_2(l_f), \\ \bar{H}_2\left(\frac{l_1}{2}\right) &= H_2\left(h, l_0 + \frac{l_1}{2}\right) / H_1(h, l_0), \\ \bar{H}_2(l_f) &= H_2(h, l_f) / H_1(h, l_0). \end{aligned} \right\} \quad (5.2.29)$$

とおけば

A_1 = Froude-Kriloff 理論のフーティング効果,

A_2 = diffraction force としてのフーティング効果,

A_3 = diffraction force としての円盤フィン効果,

である.

A_1, A_2, A_3 及び A が, どのような周波数特性を有するかを示したのが図 5.2.2. である. これは $h=16\text{ m}$, $r_0=0.4\text{ m}$, $l_0=10\text{ m}$, $r_1=1.0\text{ m}$, $l_1=1.5\text{ m}$ 及び $r_f=2.25\text{ m}$ として, $l_f=12\text{ m}$ と $l_f=13\text{ m}$ の2状態についての計算である.

(5.2.28), (5.2.29) 式及び図 5.2.2 から次のことがわかる.

- (1) カラムのみの場合は $r=1$, $\beta=1$, 従って $A_1=A=1.0$ で F_{ZEA} は常に正である. 故に波無し周期は存在しない.
- (2) フーティングが付加されると $1-\beta>0$, $r>1.0$ であるから $A_1=0$ の周期を生ずる.
- (3) A_2 及び A_3 の値は全周波数領域で負値となる.
- (4) $A_1+A_2=0$ 及び $A_1+A_2+A_3=0$ となる周期 T_{01} 及び T_0 は, 近似的に所謂波無し周期である (文献12) が, $T_0>T_{01}$ である. また円盤フィンの深度 l_f が小さい場合の方が T_0 は大きい.

フィンによるもので近似される。これより N_z は、

$$N_z = \frac{8}{3\pi} \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_f^2 = \frac{4}{3\pi} \rho C_D \pi r_f^2, \quad (5.2.31)$$

で表わすことができる。

文献 (13) によれば円盤の C_D は次式で与えられる。

$$C_D = 9.7 - 3.6 \pi z_A / r_f. \quad (5.2.32)$$

(この式は $z_A / r_f > 0.86$ では負となるので使用できない)。

ステーションの上下揺固有周期 T_z は大きいので、短波長領域の上下揺応答は減衰力の項を無視して推定しても大きな誤りは犯さない。(5.2.30) 式で $N_z = 0$ とおけば、 z_A は次式から計算できる。

$$\bar{z} = z_A / \zeta_A = \rho g \pi r_0^2 H_1(h, l_0) A / \{ \rho g A_w - (M + \Delta M + \Delta M_f) \omega^2 \}. \quad (5.2.33)$$

以上は線型波強制力に対する上下揺応答についてのべて来たが、Morison¹⁴⁾ によって示されるように、波高が大きい場合には波粒子速度の2乗に比例する波強制力の成分が相当大きくなる。

図 5.2.1 のステーションの場合、円盤フィンに上記非線型波強制力 F_{zv} が作用するとすれば、それは近似的に次式で与えられる。

$$F_{zv} = \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_f^2 \bar{\zeta}_w |\bar{\zeta}_w| = N_z \omega^2 \zeta_A^2 H_2(h, l_f) \sin \omega t. \quad (5.2.34)$$

しかし浮体の場合は、波粒子速度と上下揺速度との相対速度の2乗に比例する力として考えるべきであるので、次式の形となる¹²⁾。

$$F_{zv} = \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_f^2 (\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}) |\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}|. \quad (5.2.35)$$

今

$$\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z} = U_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (5.2.36)$$

とおけば、

$$(\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}) |\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}| = \frac{8}{3\pi} U_0 (\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}). \quad (5.2.37)$$

故に (5.2.35) 式は

$$F_{zv} = \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_f^2 \frac{8}{3\pi} U_0 (\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}) = N_z U_0 (\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}). \quad (5.2.38)$$

以上から F_{zv} を考慮した上下揺の運動方程式は

$$(M + \Delta M + \Delta M_f) \ddot{z} + \rho g A_w z = \rho g \pi r_0^2 H_1(h, l_0) A \cos \omega t + N_z U_0 (\bar{\zeta}_{w2} - \dot{z}), \quad (5.2.39)$$

となる。

ここで $z = z_A \cos(\omega t + \varepsilon)$ とおき、適当な C_D の値を用いれば (5.2.39) 式を解いて z_A 及び ε を求めることができる。この場合は波無し周期においても波強制力は存在し、従ってその周期で z_A は零

とはならない。

最良の性能を有するステーションを設計するには、カラム、フーティングの部材寸法及び円盤フィンの深度 l_f と半径 r_f を変えて多くの計算を行わなければならない。

本研究においては、解析的考察が容易であること、及び T_0 以下の波周期に対して最良の性能を有する形状を求めれば大略所期の目的が達せられることを考え、先ず (5.2.33) 式による数値計算を行って最適形状を求め、次に (5.2.39) 式による非線型応答の計算を行い、前記の結果を確かめる或は修正する方法を採用した。

本実験海域の水深は low water level で 15.4 m である。この海域の最大波高は 5 m で、10 sec 以上長周期の波のエネルギーは小さいと推定される。いくつかの設計例について数値計算を行った。その結果 10 sec 以下の波周期において $\bar{z} < 0.4$ であるステーションは実現可能で、円盤フィンと海底との間隙は 2 m あれば十分であり、従って $l_f = 13\text{m}$ でよいという結論が得られた。

$h = 16\text{m}$, $l_f = 13\text{m}$ として (5.2.33) 式によって数多くの数値計算を行ったが、その中で $r_0 = 0.4\text{m}$, $l_0 = 10\text{m}$, $r_1 = 1.0\text{m}$, $l_1 = 1.5\text{m}$ として r_f を変えた場合の z の計算例を図 5.2.3 に示す。

この図から次のことがわかる。

- (1) 波無し周期より短い波周期に対する $\bar{z}_1$ の最大値はフィン無しの場合が最も小さい。
- (2) 円盤フィンの半径が大きい程、波無し周期は大きくなるが、同時に $\bar{z}_1$ も大きくなる。

この計算結果を参照し、次節にものべるように図 5.2.3 中で $r_f = 2.25\text{m}$ の円盤フィンを持つステー

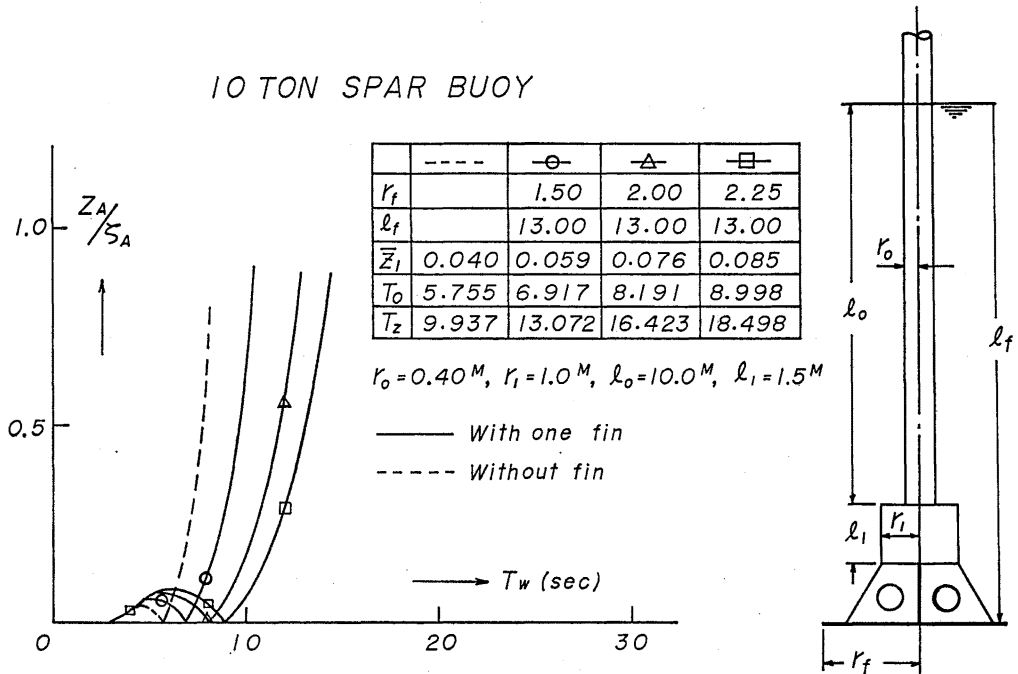


図 5.2.3 Spar buoy 型ステーションの上下揺振幅特性

ションの形状が基本形状として採用された。

なおこの形状について、(5.2.32) 式の C_D を用い (5.2.39) 式によって、最大波高を 5 m とし、周期 12 sec 以下の規則波に対する $\bar{z}$ を計算した。その結果によれば、波無し周期 T_0 で $\bar{z}$ は零にはならず小さい値を有するが、 $\bar{z}_1$ は図 4.2.3. の値と殆んど変わらない。

5.3. ステーションの設計の概要

5.3.1. 設計の基本条件

1) 設置場所と水深

浮遊式ステーションは、昭和 49 年度に設置した固定式ステーションと海象・気象の同時計測を行い、両者の計測結果を比較する目的を有することから、固定式ステーションの北方約 200 m、平均水深約 16 m の位置に設置する。従って水深 16 m に対して最良の性能を有するステーションの設計を意図した。

2) 海象・気象条件

設置海域 (図 3.1.1.) では、潮流速力最大 1 knot、瞬間最大風速 40 m/sec、最大波高 5 m で、かつ周期 10 sec 以上の長周期の波のエネルギーは極めて小さいと推定した。

3) 係留方式

今回設置される海域の水深は約 16 m であるが、将来大洋で使用される小型の Spar buoy 型ステーション開発の実験研究であることを考え、設置容易な一点係留方式とした。

4) 計測項目

風速、風向及び波の記録の外に、ステーションの動揺 (横揺、縦揺)、加速度 (上下、左右、前後) 及び方位と、ロープの張力並びにステーション本体の応力を計測する。

ここでステーションの横揺 (Roll)、縦揺 (Pitch)、左右揺 (Sway) 及び前後揺 (Surge) は図 5.3.1 のように定義する。図 5.3.1 でステーション本体と係留ラインとなす面を YZ 面とすれば、これに直角方向、すなわち X 軸方向の動揺を前後揺、 Y 軸方向を左右揺、 X 軸及び Y 軸周りを夫々横揺及び縦揺とする。

5) 海面上高さ

海上風速の標準計測位置を海面上 10 m とし、この位置を海面上の最高高さとする。

7) 計測システム

予算の都合上、地上へのデータ電送が不可能だったので、風速及び時間制御装置を使用し、ステ-

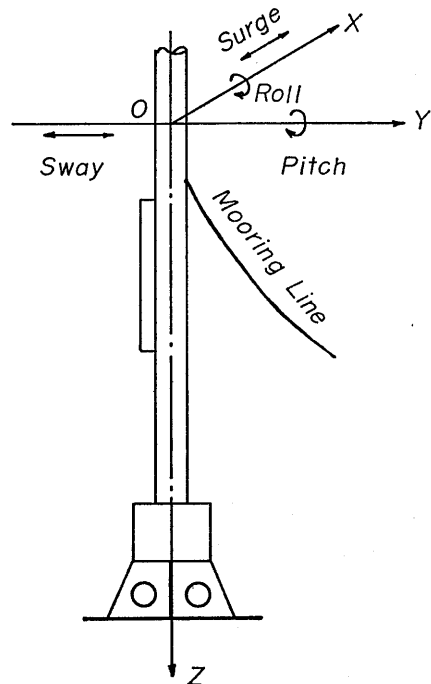


図 5.3.1 ステーション座標軸

ションに設置したデジタル・カセット・データレコーダーにて記録し、計測終了時を見はからって、テープを取り変えることにする。従って、常時、かつ連続記録をとることはできない。

7) 電力

安全灯 2 ケの電池は空気式 (6 ヶ月有効) を用い、計測用は充電可能な電池とする。計測器用電力は a) ステーション上の電池ボックスより、b) パワー・ブイ内の電池より給電ケーブルにて、ステーション上に供給する 2 通りの方法が使用可能であるようにする。

5.3.2. ステーション本体

1) 動揺の固有周期

本海域の海象、気象条件の設定から考えて、動揺の小さい Spar 型ステーションの固有周期としては、上下揺 $T_z > 15 \text{ sec}$, 横揺 $T_\phi > 12 \text{ sec}$ を目標値とした。

2) 水面下の基本形状

ステーションの水面下形状は、5.2. にのべた流体力学的考察及び大傾斜時の復原性等を考慮して、カラム部、フーティング部及び 3 種のフィンから成る形状を採用した。(図 5.3.2. 参照)

3) 排水量とメタセンター高さ

W =排水量, GM =メタセンター高さ, ϕ =ステーション傾斜角, M =風, 潮流, 波の漂流力などの外力による G 点周りの定常傾斜モーメント

とすれば、係留ロープが無い場合、小角度のステーション傾斜の平衡式は次式で与えられる。

$$W \cdot GM \cdot \sin \phi = M \quad (5.3.1)$$

係留ロープがある場合は、(1) 式の左辺に、ロープ張力の重心 G まわりの復原モーメントを加えればよい。

今重心 G と浮心 B との距りを GB とすれば、Spar 型ステーションでは水線面積が小さいので BM が小さく、 $GM \doteq GB$ である。従って

(5.3.1) 式はまた

$$W \cdot GB \cdot \sin \phi = M, \quad (5.3.2)$$

と近似することができる。

一定外力 M に対して傾斜角 ϕ を小さくしようとすれば $W \cdot GB$ を大きくしなければならない。

GB は、以下 2 つの理由で余り大きくすることができない。

i) 風速計 (6 kg) は海面上 10 m の位置に、コンパスは 9.3 m の位置に、またジャイロ、風速制御装置、アンブ類及び電池など (重量約 160 kg, 計測電池をのせれば 150 kg 増加) が海面上 4 m の甲板上に設置されるのでそれらが重心 G の上昇に大きく寄与する。

ii) GB を大きくしすぎると T_ϕ が小さくなる。

そこで、i) の対策としては最下部の水平円盤フィン (Discus fin) を重くする。ii) の T_ϕ を大きくするためには斜めフィン (Bottom vertical fin) を付けることによって、横揺及び縦揺の慣性能率、付加慣性能率及び減衰モーメントを大きくする。

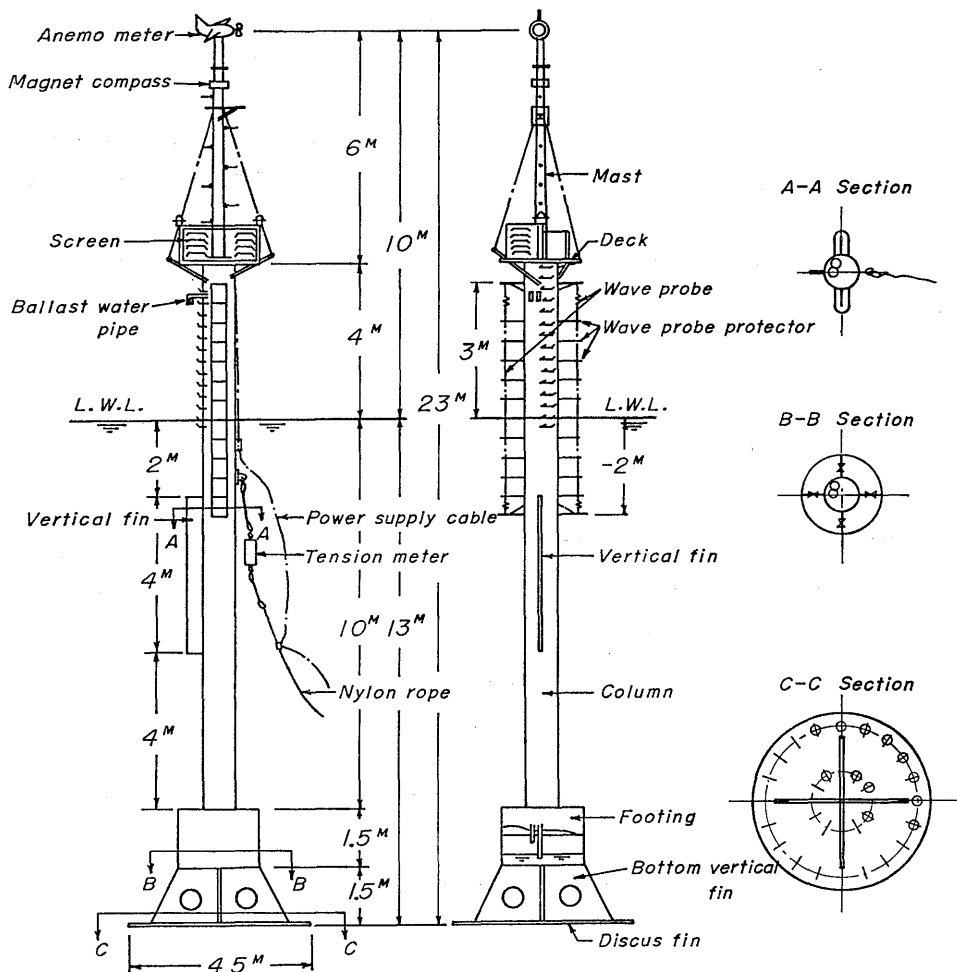


図 5.3.2 Spar buoy 型ステーション概観図

以上2つの対策によって、 T_ϕ を大きくし、かつ相当量の GB を確保することを考えた。

4) 概略の性能計算

次に、(2) の項でのべた基本形状について、カラム寸法 (半径と高さ)、フーティング寸法 (半径と高さ) 及び円盤フィン半径、斜めフィンの寸法を種々かえて、 $T_z > 15$ 秒、 $T_\phi > 12$ 秒の特性をもち、波周期 $T_w \leq 10$ 秒で (5.2.33) 式の計算による上下揺振幅 z_A が波振幅 ζ_A の 0.1 以下であることを条件とし、さらに、大略の一般配量、重心計算、風速 40 m/sec による定常傾斜角、復原力などについてシリーズ計算を行い、 $W \approx 10$ ton、 $GB \approx 1.0$ m で T_z 、 T_ϕ が所要の値を有するステーションの設計が可能であることを確めた。

5) フィン

水平の円盤フィン (Discus fin)、垂直の斜めフィン (Bottom vertical fin) 及び竪型フィン (Ver-

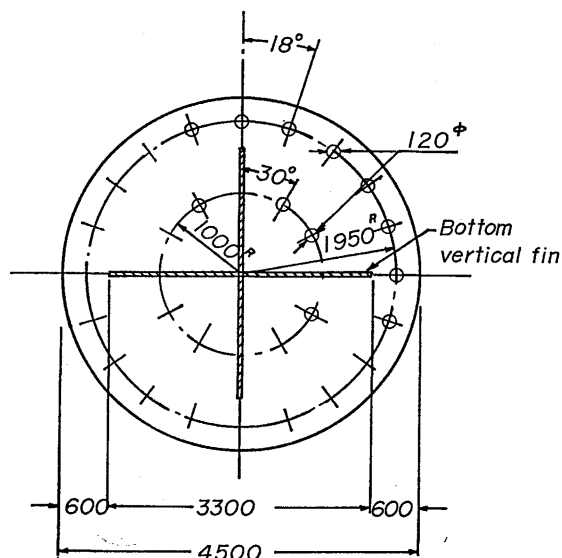


図 5.3.3 円 盤 フ ィ ン

tical fin) の 3 種のフィンを用いることにした (図 5.3.2. 参照) ことは前述の通りである。

円盤フィンは設置海域におけるステーションの上下揺性能を最良にする半径 $r_f = 2.25 \text{ m}$ のものが選ばれ、重くするために板厚 32 mm とした。図 5.3.3 に示すように円盤フィンに設けられた $120 \text{ mm} \phi$ の穴は、上下揺するときの後流の安定化をはかるとともに、上下揺の付加質量効果を減少しないで粘性減衰を増加させる機能を有している¹³⁾。

斜めフィンは前述のように横揺及び縦揺の固有周期を大きくするためである。

る。

縦形フィンは Z 軸周りのステーションの回転運動を小さくするために設けられた抵抗板である。

6) 波高計

圧力計による波高計測も考えられるが、本研究ではビニール被覆銅線を用いた容量型波高計を用いることにした。ステーションの係留ロープの伸長方向 (図 5.3.1 の $-Y$ 方向。これが波の主方向と仮定する) と $\pm 90^\circ$ の位置に、左右 2 本、ステーション本体から $e = 0.5 \text{ m}$ 離して波高計を設置した (図 5.3.2)。波高計の有効長さは海面上 3 m 、海面下 2 m の合計 5 m である。また流木の衝突などを防止するため鉄パイプの防護柵 (図 5.3.2) をつけた。

ステーション本体と波高計被覆線の距離 e は大きい方がステーションによる反射波の影響が少くてすむが、保護柵が大きくならぬよう e をなるべく短くすることと、周期が 2 sec より長い波に対して十分な精度が得られることを検討して $e = 0.5 \text{ m}$ の寸法が決められた。

7) 百葉箱 (Screen)

ジャイロほか百葉箱に収められたものは表 5.3.1 中に示されている。気温、湿度の変化や海水打込みによる計測器の不良化を防ぐ方法として、ジャイロなどを一度耐水カプセルに入れ、それらを通風のよい百葉箱に収めることとした。

8) 給排水装置

作業船からステーションへの研究員の移乗を容易にしたり、このステーションを大水深域に移設するとき、多少吃水を増すことなどのために、海水 1 m^3 (本ステーションの場合約 2 m 吃水増加) 注水可能なバラスト・タンクをフーティング内に設けた。注排水作業は作業船上で行うものである。

(この注排水作業は本ステーション設置時のアペンディングのためにも有効に使用された)。

表 5.3.1. 計測器，電池*等の重量と設置場所

品 目	数 量	重 量	設 置 場 所	静水面からの高さ
(1) 5 自由度運動計測装置(含ジャイロ)	1個	34kg	百 葉 箱	4.31m
(2) 同 上用カプセル	1個	20	〃	4.31
(3) 制御系装置	1個	10	〃	4.43
(4) 同 上用カプセル	1個	15	〃	4.43
(5) 波高計アンプ	2個	10	〃	4.23
(6) 同 上用カプセル	1個	8	〃	4.23
(7) カセットデーター(マイクロダップ-2000)	3個	6	〃	4.66
(8) 同 上用カプセル	1個	8	〃	4.66
(9) 標識灯用電池(空気湿電池)	10個	40	〃	4.23
(10) 同上用カプセル	1個	8	〃	4.23
(11) 上記(1)～(10)収納用ラック	1個	12	〃	4.33
(13) 風速風向計(V-100型)	1個	6		10.00
(14) マグネットコンパス	1個	1		9.30
(15) 同 上用カプセル	1個	4		8.70
(16) (14)と(14)用ケーブル	2個	6		6.50
(17) 標識灯(6V6W2秒1閃)	2個	2		5.25
(18) 容量型波高計センサー	2組	1		1.0
(19) 張 力 計	1個	30		-3.5
(20) 計測用電池(ポータラックPE7-6)	64個	90	甲 板 上	4.10
(21) 同 上用カプセル	1個	5	〃	4.10

*表 5.3.1 には計測用電池の重量は含まない

9) 強度計算

ステーションの強度計算は以下の方法で行われた。

図 5.2.1. で波高 5 m, 波周期 6～12 sec の規則波が—Y 方向に入射する場合について，ステーションは拘束されているとして各断面に働く Y 方向の線形及び非線形波強制力を計算した。後者は波粒子速度の水平成分の 2 乗に比例するとし， $C_D=1.0$ を用いた。これらの波強制力の和が Z 方向に分布するとして，決められた部材寸法について強度計算を行った結果，最大曲げ応力は $1,400 \text{ kg/cm}^2$ 以下となり十分満足されるものとなった。

以上の考察や計算，並びにその他の艤装関係を含めて詳細な検討が行われた。その結果設計されたステーション本体の主要寸法を表 3.5.2 に，概観図を図 5.3.2 に，また復原力曲線を図 5.3.4 に示す。

表 5.3.2. 主要寸法表 (Standard Condition)

1. ステーション本体	
排水量	11.06ton
全 高	23 m
乾 舷	3.63m
吃 水	13.37m
カラム	高さ 14m×直径 0.813m
フーティング	高さ 1.5m×直径 2.0m
機器取付マスト	高さ 4.5m
風速計取付腕	高さ 1.5m
水平円盤フィン	直径 4.5m
垂直フィン	長さ 2.0×幅0.4m(水面下2mより下方に1枚)
斜めフィン	台形 1.65m×1.0m×1.5m(4枚)
波高計	長さ 5m×2本, 水面上3m, 水面下2m
係留点	水面下 1.87mの位置
K G	4.068m
K B	5.021m
G B	1.047m
2. 中間ブイ	
排水量	約 1.0ton
寸 法	1.6m×0.95m×0.8m
余剰浮力	約 0.35ton
3. パワーブイ	
排水量	約 1.04ton
直 径	1.80m
高 さ	0.60m
吃 水	0.43m

5.3.3. 係留システム

1) 係留システム

図5.3.5に示すように、コンクリート製のシンカー、海中にある中間ブイ、海面に浮ぶパワー・ブイと係留ラインとから成る一点係留方式を採用した。

2) 中間ブイと係留ロープ

中間ブイは余剰浮力を有し、海上がおだやかな場合シンカーから中間ブイに至るチェーンを一定量引き上げ、海面下一定の位置に浮遊する。中間ブイの詳細を図5.3.6に示す。

中間ブイとステーションとは、海上が時化たとき、なるべく直線的に係留されることが望ましい(ステーションの運動に与える影響が小さい)ので、水中重量の軽い合成セニ製ロープで係留する。中間ブイとステーションとの間も小さい漁船の通行を許すため、ロープは沈下することが望ましいので、比重が海水より少し大きい $50\text{ mm}\phi$ のナイロンロープを使用することにした。従つて、このロープ全長

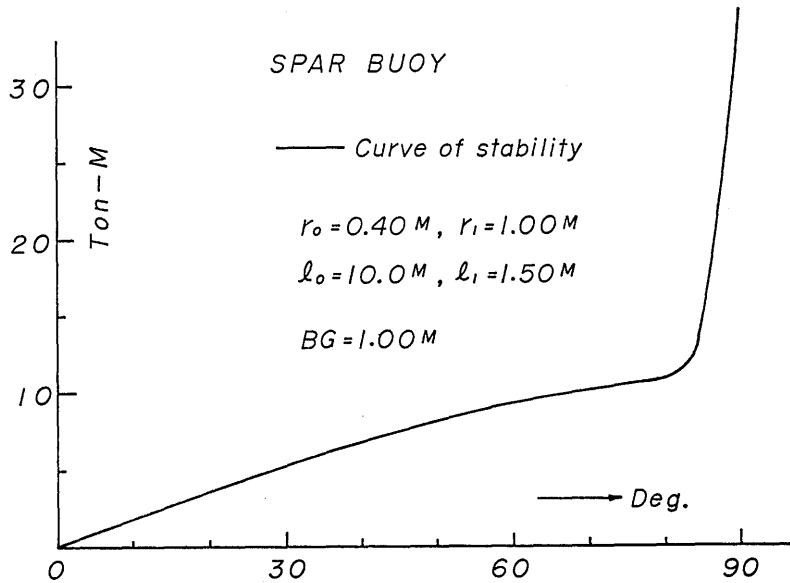


図 5.3.4 復原力曲線

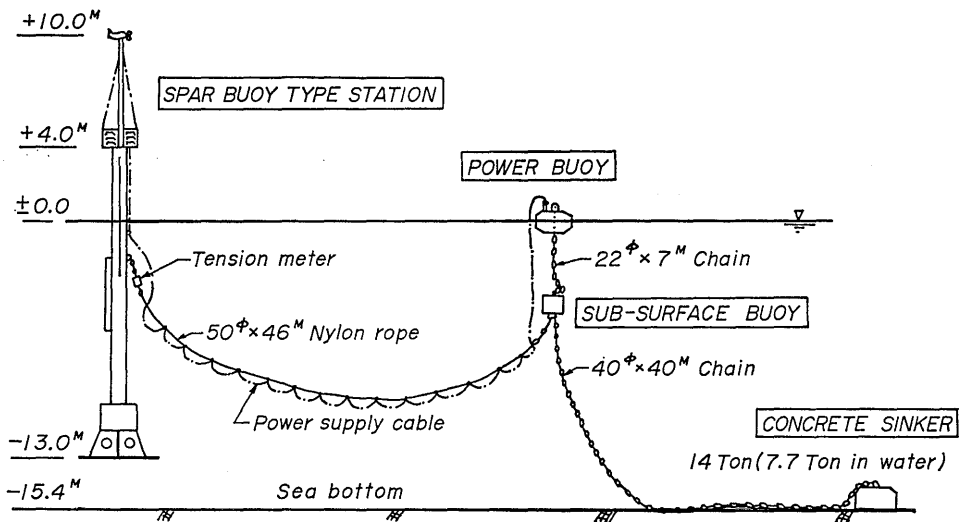


図 5.3.5 Power buoy 付き係留システム

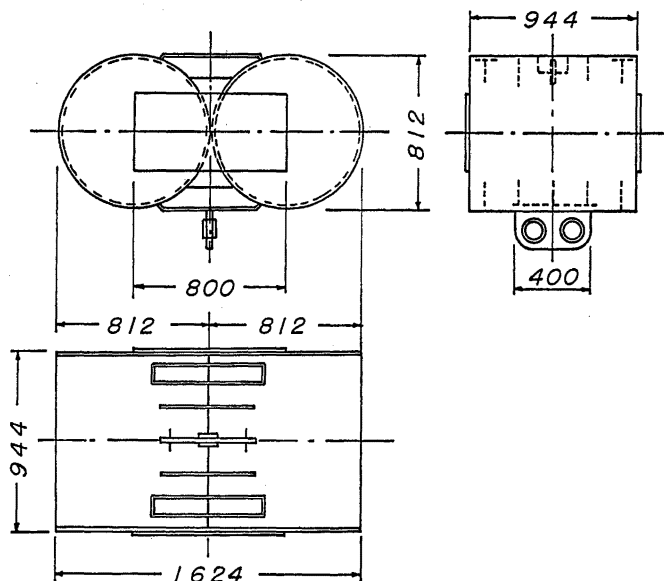


図 5.3.6 中 間 ブ イ

46m* は下にたれ下っている（後述の給電ケーブルが付加された場合はそのたれ下りも大きい）。ロープのステーション側端部はワイヤーロープ 2 m (30 mm ϕ) とし、その間に計測容量 5 ton の張力計測装置を取り付け、ステーションの係留点 C のアイブレートにシャックルにて連結する。中間ブイ側端部は、張力計が無い外はステーション側と同様 2 m のワイヤー・ロープを用いた。

3) パワーブイと給電ケーブル

ステーション甲板上の重量物をできるだけ減らして重心を下げるためには、計測用電池 150 kg を下ろして、別の方法で電力を供給できるシステムが望ましい。そのためには中間ブイの上方海面に電池格納ブイを設置し、そのブイから給電ケーブルをナイロンロープに沿わせてステーションに連結し、ステーション上の百葉箱中の計測器へ電力を供給する給電システムが考えられた。この目的で考えられた海面上の電池ブイがパワーブイである。これは円盤形の wave rider ブイである。

海上がおだやかなときを考えると、潮位が低いときまたは高いときでも、中間ブイは海底から一定の高さ（本設計の場合には約 11 m）にある。しかし中間ブイとパワーブイの垂直距離は潮位が高いときの方が潮位が低いときより大きくなるので、最高潮位を考慮して図 5.3.5 の 22 mm ϕ の係留鎖の長さは 7 m とした。従って低潮位時にはこの鎖は中間ブイの上に少したまっている。潮位が高く、かつ海上が時化てパワー・ブイと中間ブイの相対運動が大きいときに、大きい動的張力がこの鎖に作用する。

経費節減のため、パワー・ブイ内の電池は充電可能なものとし、パワーブイを 2 箇所用意して、1 箇所を海上で使用し他方は陸上で充電し、必要なとき、これを洋上で交換することとした。

* これは昭和 51 年 7 月 28 日長さ 19 m のものに新替された。5.6. 節参照

4) 係留システムと給電システム

本研究では2つの係留システムと2つの計測システムとを組み合わせ、次の3通りのシステムで計測することにした。

係留システム

計測用電力

- | | |
|---------------|--------------------|
| i) パワー・ブイ設置 | パワーブイ内の電池と給電ケーブル使用 |
| ii) パワー・ブイ設置 | ステーション上の電池使用 |
| iii) パワー・ブイ無し | ステーション上の電池使用 |

5) ナイロン・ロープの係留点 C の上下方向位置

定常風圧によるステーションの傾斜を小さくするためには、C 点はなるべく上方にある方が良い。

潮流によるステーションの傾斜を小さくするためには、流速がステーション下部まで一様であるとすれば、フーティング半径がカラム半径より大きいために C 点はなるべく下方にある方が良い。

風速及び潮流の速さを種々変えてシリーズ計算を行い（5.4.1. 参照）全風速範囲について全般的に風圧傾斜が小さくなるよう C 点の深さを 1.5 m に決めた。本ステーションは無風時には潮流のため、ごくわずかなナイロン・ロープ側に傾いている。

6) シンカーと主係留鎖

シンカーはコンクリート製とし、水中重量約 7.7 ton のものを、主係留鎖は 40 mmφ の鎖を夫々用いることにした。

以上の係留システムの設計に当っては、次節にのべる数値計算及び全システムの単純模型による風波浪中の水槽実験の結果が利用された。

尚 5.6 節にのべるように、パワー・ブイの流出、ステーションの流出その他のトラブルが発生し、それを検討した結果、昭和 51 年 8 月以降はパワー・ブイ無しの係留システムで、ナイロンロープも長さ 19 m のものに変更された。従って計測用電力は甲板上に搭載された電池によって供給されることになり、現在に至っている（図 5.6.7 参照）。

ここでステーション実機の固有周期についてのべておこう（表 5.3.3 参照）。

上下揺固有周期 T_z については、ステーション上に数人昇り、同時に海中にとび込む方法で自由上下揺試験を行い、20～22 sec の値が得られた。これは表 5.3.3 に示すように、現論計算値より約 15% 大きい。次に漁船によってステーションを引張って初期傾斜を与える方法で自由横揺試験を行い（この場合は係留ロープの影響は無視できる）、バーチカル・ジャイロで計測して得た T_θ は約 18.8 sec で、係留ライン無しの理論計算値より約 15% 大きい。

表 5.3.3 中で係留ライン無しの T_z は (5.2.11) 式による計算値であり、その他の理論計算値は 5.4.2 節の方法によって求めたものである。理論計算は何れの場合も減衰力を省略したものである。したがって固有周期についての理論値と実測値の差異は、主として減衰力の有無によるものであると思われる。

5.3.4. 計測項目と計測システム

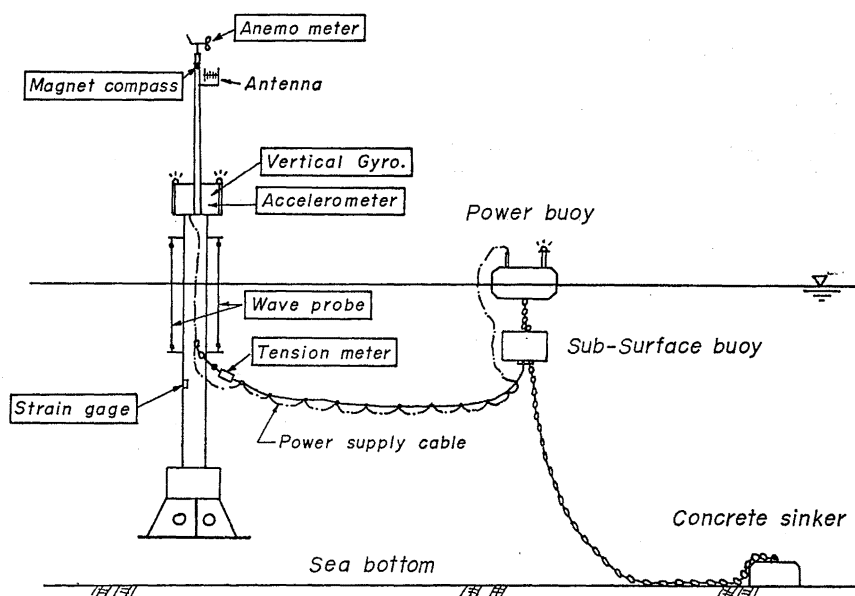


図 5.3.7 計測器配置図

表5.3.3. ステーション実験の動揺固有周期

		理論計算 (sec)	実 測 (sec)
上 下 揺 T_z	係 留 ラ イ ン 有	18.4	20~22*
	係 留 ラ イ ン 無	18.5	
横 揺 T_ϕ	係 留 ラ イ ン 有	13.4	18.8**
	係 留 ラ イ ン 無	15.8	

*自由上下揺試験時にストップ・ウォッチにて計測した値

**係留ラインの影響の無い状態で自由横揺試験を行い、パーチカル・ジャイロの計測値から求めた値

浮遊式ステーションによる計測項目は次の通りである。

(1) 気象及び海象要素

海面上 10 m における風向, 風速及び波浪。

(2) ステーションの動揺

ピッチ, ロール, 方位角。

X, Y, Z 方向加速度。

係留索の張力。

ステーションの曲げ応力。

表 5.3.4. 計測項目及び計測機器一覧

No.	計 測 項 目	セ ン サ ー 様 式	測 定 範 囲
1	ピ ッ チ	バーチカルジャイロ, ポテンショ	0~±40deg
2	ロ ー ル	〃	0~±40deg
3	加 速 度 (X)	ストレーンゲージ	0~2G
4	〃 (Y)	〃	0~2G
5	〃 (Z)	〃	0~2G
6	波 高 (1)	容量型, 電極 5φm/m	-2~+3m
7	〃 (2)	〃	-2~+3m
8	ロープテンション	ストレーンゲージ	0~5ton
9	ベンディングストレス	〃	
10	方 位	光学式マグネットコスパス	0~360deg
11	風 向	プロペラ型直流シンクロ	0~540deg
12	風 速	〃 直流発電機	0~60m/sec

No.	セ ン サ ー 出 力	電 源	メ ー カ ー
1	DC-5V~+5V	DC24V, 3.5A	東京航空計器
2	DC-5V~+5V		
3	DC-5V~+5V		
4	DC-5V~+5V		
5	DC-5V~+5V		
6	DC-1V~+1V	DC24V, 400mA	新興通信・横河電機
7	DC-1V~+1V		
8	DC 0~+1V	DC12V, 600mA	電子工業
9			
10	DC 0~3.6V	DC12V, 510mA	鶴見精機
11	DC 0~1V		
12	DC 0~6V		

以上の計測を行うための計測器を列記すれば表 5.3.4 の通りである。これらの計測器のステーション上の配置は図 5.3.7 に示されている。この図に示す計測器によるデータは、図 5.3.8 のシステムにより処理され、鶴見精機 K.K. のデジタル型データレコーダに記録される。

計測の制御に関しては時計制御、風速制御、時計・風速制御及び無線制御のいずれかを選ぶことが可

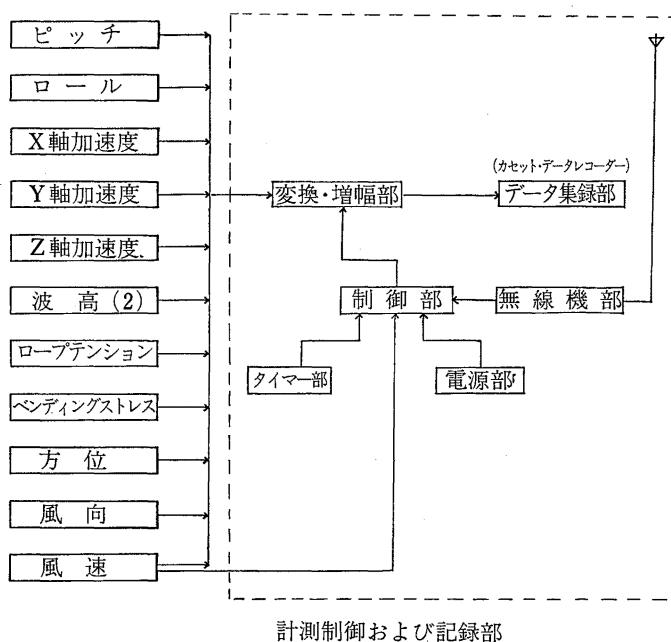


図 5.3.8 計測システムのブロック図

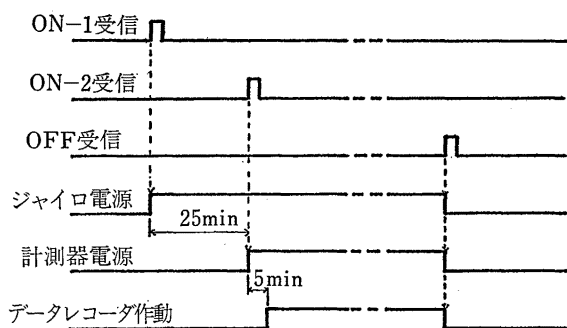


図 5.3.9 無線制御のタイムシーケンス

能であり、固定式ステーションとの同時計測ができる。なおこれらの制御の詳細はすでに 4.5 で説明されているが、参考のため無線制御のタイム・シーケンスを図 5.3.9 に示す。ジャイロ電源が入ってから 25 分間はジャイロが自立するのに要する時間であり、固定式ステーション及び浮遊式ステーションの計測回路電源は、ジャイ

ロ自立後、on-2 の信号で同時に入って計測がスタートする。

計測器システムに必要な電源は、最初、パワーバイ中に納められた密閉形鉛蓄電池からキャプタイヤケーブルによって供給されたが、現在はステーションデッキ上に鉛蓄電池 (24 V, 180 AH) を搭載している。この電池により 17~18 回 (1 回 20 分) の計測が可能である。

5.4. ステーションの風波浪中の運動及び係留索張力

本節では 5.3 節で定められたステーション、パワーバイ及び中間バイからなる観測ステーションの風、波、潮流中での運動及びその時、係留鎖、係留ロープに加わる力を計算する。

計算は定常力による定常変位及び係留鎖、係留ロープに加わる定常張力の計算と波によるステーショ

ンの運動及び変動張力の計算に分けられる。

5.4.1. 定常流によるステーションの変位と係留鎖及び係留ロープの張力

本節においては、潮流と風及び風による表層流によって5.3節で決定されたシステム全体に加わる定常的な流体力を求め、更に、ステーション、中間ブイの変位と係留鎖、係留ロープの張力を計算する。

図5.4.1に示すような記号を用いる。

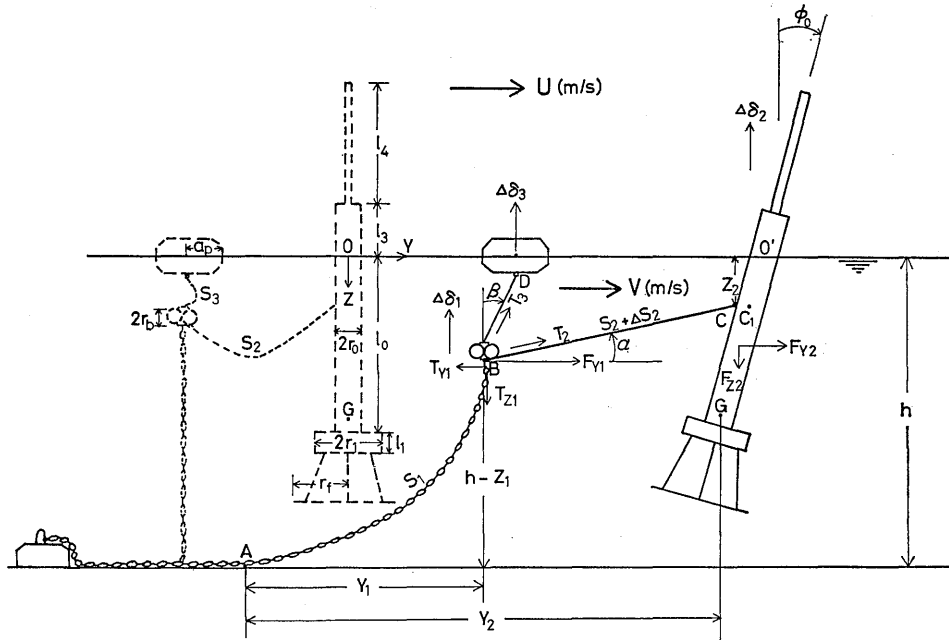


図 5.4.1 係留システムの概略と計算の記号

中間ブイの下端 B 点での水平方向の力の釣合いから次式が成り立つ

$$T_{Y1} = T_2 \cos \alpha + T_3 \sin \beta + F_{Y1}. \quad (5.4.1)$$

ただし、一般に T は鎖又はロープの張力、 F は各物体に働く流体力を表す。また添字 Y は水平方向、 Z は鉛直方向を意味し、数字1で AB 間の鎖、2で BC 間のロープ、3で BD 間の鎖を表す。

(5.4.1.) 式の右辺の T_2 はステーションの係留ロープの張力、 T_3 はパワーブイと中間ブイ間の鎖の張力、 α, β は中間ブイと、ステーション及びパワーブイの相対位置によって定まるロープ及び鎖の角度である。

風速が U である時の風による表層流 V_U は海面における剪断力が連続であることと、帰還流が存在すること、更に流れが層流であって、 Z の2次式で近似できると仮定すれば次式で求められる。

$$V_U(Z) = 0.03U \left(\frac{3Z^2}{h^2} - \frac{4Z}{h} + 1 \right), \quad (5.4.2)$$

したがって中間ブイに働く水平方向の抗力 F_{Y1} は潮流の流速を V , 中間ブイの断面積を A_1 , 中間ブイの抵抗係数を C_{D1} とすれば, 次のように求められる.

$$F_{Y1} = \frac{1}{2} \rho A_1 C_{D1} [V + V_v(Z_1)] |V + V_v(Z_1)|, \quad (5.4.3)$$

ただし, Z_1 は中間ブイの深さである.

海底に係留鎖が接する点を A とする. AB 間の係留鎖にカテナリーの理論を適用すれば, (5.4.1) 式で求めた T_{Y1} と中間ブイの深さ Z_1 を使って, カテナリー部分の鎖の長さ S_1 と水平長さ Y_1 , 鎖の張力の鉛直成分 T_{Z1} は次のように求める.

$$S_1 = \sqrt{(h - Z_1)(h - Z_1 + 2a)}, \quad (5.4.4)$$

$$Y_1 = a \log [s_1/a + \sqrt{(S_1/a)^2 + 1}] \quad (5.4.5)$$

$$T_{Z1} = w_1 S_1, \quad (5.4.6)$$

ただし, W_1 は係留鎖の単位長さ当りの水中重量, $a = T_{Y1}/w_1$ である.

また B 点での鉛直方向の力の釣合いから, 次式が成立する.

$$T_{Z1} = T_2 \sin \alpha + T_3 \cos \beta + \delta_1. \quad (5.4.7)$$

ただし, δ_1 は中間ブイの余剰浮力である.

次にパワーブイに加わる水平方向の力の釣合の式は, 海面上の風速は小さいので, その影響を無視すれば次式のようになる.

$$T_3 \sin \beta = \frac{1}{2} \rho A'_3 \cdot C_{D3} (0.03U + V) |0.03U + V|, \quad (5.4.8)$$

ただし A'_3 はパワーブイが $4Z_3$ だけ沈下した時の海中部分の流れ方向の投影面積であり, パワーブイの半径を a_p , 沈下しない時の投影面積を A_3 とすれば次式で求められる.

$$A'_3 = A_3 + 2a_p \cdot 4Z_3. \quad (5.4.9)$$

次に鉛直方向の力の釣合いから次式が得られる.

$$T_3 \cos \beta = \pi a_p^2 \cdot \rho g 4Z_3, \quad (5.4.10)$$

またパワーブイと中間ブイの位置には次の幾何学的な条件がある.

$$Z_1 = 4Z_3 + S_3 \cos \beta + 2r_b + b_p, \quad (5.4.11)$$

更に BC 間のロープの伸び ΔS_2 はロープの弾性係数を E_2 , 断面積を A_r とすれば

$$\Delta S_2 = \frac{T_2 \cdot S_2}{E_2 \cdot A_r}, \quad (5.4.12)$$

で表される.

浮遊式ステーションの水平方向の力の釣合いから次式が成立する.

$$T_2 \cos \alpha = F_{Y2}, \quad (5.4.13)$$

F_{Y2} は海面上にあるステーションの部分に働く風による力 F_a , 海中にあるカラム及びフーティングに潮流及び表層流によって働く力 F_w , 斜めフィンに加わる力 F_{fV} , 円盤フィンに加わる力 F_{fH} の水平成分の和であり, ステーションの傾斜角を ϕ_0 とすれば次式で求められる.

$$F_{Y2} = (F_a + F_w + F_{fV}) \cos \phi_0 + F_{fHY}. \quad (5.4.14)$$

更に, 空気の密度を ρ_a , ステーションのカラム部及びフーティング部の抵抗係数を C_{D2} , マストの投影面積を A_2 , 百葉箱の投影面積を ΔA , 斜めフィンの2枚の面積を A_{fV} ・抵抗係数を C_{DV} ・深さを Z_V ・円盤フィンの面積を A_{fH} , 深さを Z_H とすれば F_a , F_w , F_{fV} , F_{fHY} は次式で求められる.

$$\left. \begin{aligned} F_a &= \frac{1}{2} \rho_a C_{D2} U^2 \cos^2 \phi_0 (2r_0 l_3 + A_2 + \Delta A), \\ F_w &= \frac{1}{2} \rho C_{D2} \cos^2 \phi_0 \left\{ 2r_0 \int_0^{l'_0} [V + V_U(Z)] |V + V_U(Z)| dZ \right. \\ &\quad \left. + 2r_1 \int_{l'_0}^{l'_2} [V + V_U(Z)] |V + V_U(Z)| dZ \right\}, \\ F_{fV} &= \frac{1}{2} C_{DV} A_{fV} \cos^2 \phi_0 [V + V_U(Z_V)] |V + V_U(Z_V)|, \\ F_{fHY} &= \frac{1}{2} \rho C_{DH} A_{fH} [V + V_U(Z_H)] |V + V_U(Z_H)|. \end{aligned} \right\} \quad (5.4.15)$$

ただしステーションの沈下量を ΔZ_2 とすれば l_0 , l_2 , l_3 は次式で定義される.

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= l_0 + \Delta Z_2, \\ l_2 &= l_2 + \Delta Z_2, \\ l_3 &= l_3 - \Delta Z_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.4.16)$$

浮遊式ステーションの鉛直方向の力の釣合いから次式が成立する.

$$\Delta \delta_2 = \rho_g \pi r_0^2 \Delta Z_2 = T_2 \sin \alpha + F_{Z2}. \quad (5.4.17)$$

(5.4.17) 式中の F_{Z2} は次式で求められる.

$$F_{Z2} = (F_a + F_w + F_{fV}) \sin \phi_0 + F_{fHZ} \quad (5.4.18)$$

F_{fHZ} は円盤フィンに働く鉛直方向の力であり次式で表される.

$$F_{fHZ} = -\frac{1}{2} \rho A_{fH} C_L [V + V_U(Z_H)] |V + V_U(Z_H)|. \quad (5.4.19)$$

円盤フィンの C_L , C_{DH} は Slender-body theory に従えば次式で求められる¹⁵⁾

$$C_L = \frac{1}{2} \pi \frac{4r_f^2}{A_{fH}} \phi_0 = 2\phi_0,$$

$$C_{DH} = \frac{1}{2} C_L \phi_0 = \phi_0^2.$$

ステーションが変位した後の水線面積中心を O' , マストの長さを l_4 , 重心から百葉箱までの長さを $\bar{l}$ とすれば, 係留ロープによる復原モーメント M_c , 風による傾斜モーメント M_a , カラム及びフーティングに加わる水流による傾斜モーメント M_w , 斜めフィンに加わる傾斜モーメント M_{fV} , 円盤フィンに加わる傾斜モーメント M_{fH} は次式で求められる.

$$\left. \begin{aligned} M_c &= T_2 \cos(\alpha + \phi_0) C_1 G + T_2 \sin(\alpha + \phi_0) C_1 C, \\ M_a &= \frac{1}{2} \rho_a C_{D2} U^2 \cos^2 \phi_0 \left[2r_0 k_3 \left(\frac{k_3}{2} + O'G \right) + A_2 \left(O'G + k_3 + \frac{l_4}{2} \right) + 4A \cdot \bar{l} \right], \\ M_w &= \rho r_0 C_{D2} \cos^2 \phi_0 \int_0^{l'_0} [V + V_U(Z)] |V + V_U(Z)| (O'G - Z) dZ \\ &\quad + \rho r_1 C_{D2} \cos^2 \phi_0 \int_{l'_0}^{l'_2} [V + V_U(Z)] |V + V_U(Z)| (O'G - Z) dZ, \\ M_{fV} &= (O'G - Z_V) F_{fV}, \\ M_{fH} &= (O'G - Z_H) F_{fHZ} \sin \phi_0 + (O'G - Z_H) F_{fHY} \cos \phi_0. \end{aligned} \right\} \quad (5.4.21)$$

更に浮遊式ステーションの G 点まわりのモーメントの釣合いから次式が成立する.

$$(4 + 4\delta_2) GM \cdot \sin \phi_0 + M_c = M_a + M_w + M_{fV} + M_{fH}. \quad (5.4.22)$$

ステーション, 中間ブイ及びパワーブイの定常変位, 並びにそれらに加わる定常流体力と係留鎖, 係留ロープの張力を求めるには以上に述べた (5.4.1) ~ (5.4.22) 式から得られる連立方程式を解かねばならない. 本論文ではくり返し計算によって解いた. 図 5.4.2 にその手順を示す.

計算はカラム, フーティング, 円盤フィン, パワーブイの寸法, 係留鎖の水中重量, 係留ロープの長さ等の数値を種々に変えて行った. 以下にその数例を示す.

表 5.4.1 はパワーブイ付のシステムについての計算結果である. ステーション及びその他のシステムの寸法は 5.3 節で示した通りである. 計算は風速と潮流の速度を変えて行った. 計算からわかるように設計条件である風速 40 m/s, 潮流 0.5 m/s の時の係留ロープの張力 $T_2 = 0.651$ ton, ステーションの傾斜角 $\phi_0 = 16^\circ$, 水平移動距離 $Y_2 = 72.2$ m であった. またステーションの傾斜に関しては風の方向と潮流の方向が逆になった場合が, より厳しい条件となる. 例えば風速 40 m/s, 潮流の速度 -0.5 m/s の場合には, 係留ロープの張力 $T_2 = 0.012$ ton, 水平移動距離 $Y_2 = -51.5$ m で, 風と潮流の方向が一致している場合よりも小さいが, ステーションの傾斜角は $\phi_0 = 30^\circ$ と大きくなる (ただし, 本計算に於いては Y 軸の正の方向は風の方向と一致させている.)

更に表 5.4.2 にパワーブイをはずした時の計算結果を示す. 潮流と風向が逆になった場合の傾向はパワーブイがある時と同様であるので省略し, 係留ロープの長さを変化させて, その影響を調べた. 係留ロープが短くなると, 係留ロープの張力 T_2 , ステーションの傾斜角 ϕ_0 等についてはロープが長い時と差がないが, ステーションの沈下量 $4Z_2$ は増大する傾向にある. 例えば風速 40 m/s, 潮流 0.5 m/s の場合に $S_2 = 50$ m では $T_2 = 0.661$ ton, $\phi_0 = 16^\circ$, $4Z_2 = 0.442$ m であるが, $S_2 = 20$ m の場合は $T_2 = 0.652$ ton, $\phi_0 = 17^\circ$, $4Z_2 = 0.727$ m であった. またパワーブイがある時とない場合のステーションの

計 算 手 順

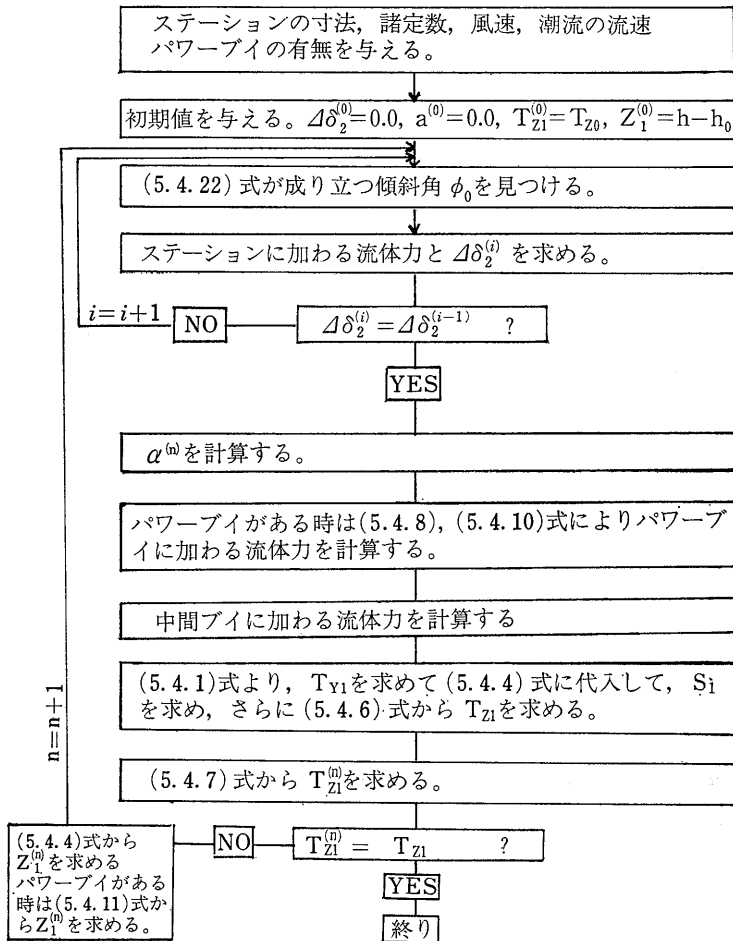


図 5.4.2 浮遊式ステーションの移動と傾斜の記算の手順

変位及び係留鎖, 係留ロープの張力の差異は以下の通りである。 $S_2=50$ m, 風速 40 m/s, 潮流 0.5 m/s の場合に比較すると, パワーブイを取りはらずと水平移動量 Y_2 は 72.2 m から 65.1 m, 係留鎖の垂直張力 T_{Z1} は 0.733 ton から 0.505 ton, 水平張力 T_{Y1} は 0.810 ton から 0.659 ton へそれぞれ小さくなる。係留ロープの張力, ステーションの傾斜角は変化がない。しかし中間ブイの深さ Z_1 が風速及び潮流の大小によって影響を受けやすくなる。すなわちパワーブイがある時は風速, 潮流が大きくなっても, Z_1 はほとんど変化しないが, パワーブイがない場合は風速 40 m/s, 潮流 0.5 m/s の時に 4 m も増大する。

表 5.4.3 は係留ロープが 24 m の場合に, 風速, 潮流を種々に変化させて計算したものである。 $S_2=50$ m の場合と比較して, 前述のように ΔZ_2 が大きくなる事他に, ステーションの性能に関して殆

表 5.4.1. 浮遊式ステーションの移動と傾斜の計算 (Power buoy 有)

U (m/s)	V (m/s)	Y_1 (m)	S_1 (m)	Y_2 (m)	$h-Z_1$ (m)	ϕ_0 (deg)	ΔZ_2 (m)	T_2 (ton)	ΔZ_3 (m)	T_{Y1} (ton)	T_{Z1} (ton)
10	-0.5	-9.4	13.7	-59.0	8.9	10.0	0.155	0.160	0.004	-0.181	0.411
	0	3.5	10.0	53.2	8.8	2.0	0.009	0.034	0.002	0.038	0.299
	0.5	11.1	15.4	61.0	9.6	-3.0	0.048	0.189	0.021	0.230	0.463
20	-0.5	-8.5	13.0	-58.1	8.8	15.0	0.314	0.125	0	-0.155	0.385
	0	8.3	12.8	58.1	8.8	5.0	0.053	0.135	0.006	0.148	0.384
	0.5	14.3	17.8	64.2	9.4	1.0	0.054	0.298	0.045	0.364	0.535
30	-0.5	-4.7	10.6	-54.4	8.8	22.0	0.131	0.027	0.003	-0.060	0.318
	0	13.0	16.6	63.0	9.2	11.0	0.187	0.282	0.038	0.314	0.498
	0.5	18.3	21.1	68.4	9.3	7.0	0.173	0.474	0.081	0.578	0.633
40	-0.5	-1.9	9.3	-51.5	8.8	30.0	0.372	0.012	0.009	-0.015	0.278
	0	16.7	19.7	66.8	9.2	19.0	0.381	0.433	0.066	0.495	0.592
	0.5	21.9	24.4	72.2	9.4	16.0	0.443	0.651	0.113	0.810	0.733

但し、潮流の流速 V 及び Y 軸の正の方向は風向と一致させる。

表 5.4.2. 浮遊式ステーションの移動と傾斜の計算 (Power buoy 無)

S_2 (m)	U (m/s)	V (m/s)	Y_1 (m)	S_1 (m)	Y_2 (m)	$h-Z_1$ (m)	ϕ_0 (deg)	ΔZ_2 (m)	T_2 (ton)	T_{Y1} (ton)	T_{Z1} (ton)
50	40	0	13.2	15.1	62.8	6.5	19.0	0.381	0.437	0.430	0.453
		0.5	15.0	16.8	65.1	5.6	16.0	0.442	0.661	0.659	0.505
40	40	0	13.3	15.4	52.9	6.8	19.0	0.442	0.434	0.424	0.461
		0.5	15.7	17.1	17.1	5.9	16.0	0.558	0.654	0.653	0.513
30	40	0	13.7	16.0	43.1	7.3	19.0	0.478	0.436	0.420	0.481
		0.5	16.4	18.1	45.8	6.6	16.0	0.612	0.657	0.645	0.543
20	40	0	14.2	17.0	33.4	8.2	20.0	0.543	0.430	0.404	0.509
		0.5	17.4	19.4	36.5	7.7	17.0	0.727	0.652	0.623	5830.

んど変化がない。

5.4.2 ステーションの動揺及び係留索の変動張力の理論計算

表 5.4.3. 浮遊式ステーションの移動と傾斜の計算 (Power buoy 無, $S_z=24\text{m}$)

U (m/s)	V (m/s)	Y_1 (m)	S_1 (m)	Y_2 (m)	$h-Z_1$ (m)	ϕ_0 (deg)	ΔZ_2 (m)	T_2 (ton)	T_{Y1} (ton)	T_{Z1} (ton)
10	-0.5	-9.5	13.9	-32.9	9.1	10.0	0.189	0.164	-0.184	0.417
	0	3.5	12.8	27.3	11.7	2.0	0.090	0.034	0.033	0.384
	0.5	10.0	14.1	33.4	9.0	-3.0	0.096	0.193	0.200	0.424
20	-0.5	-8.8	13.6	-32.2	9.3	15.0	0.338	0.128	-0.158	0.407
	0	8.1	13.5	31.7	9.9	5.0	0.073	0.136	0.131	0.406
	0.5	12.1	15.3	35.4	8.2	1.0	0.146	0.305	0.303	0.458
30	-0.5	-5.7	12.8	-29.3	10.7	22.0	0.133	0.027	-0.071	0.385
	0	11.6	15.0	35.0	8.5	11.0	0.259	0.286	0.273	0.450
	0.5	14.8	17.1	38.0	7.6	8.0	0.335	0.481	0.469	0.513
40	-0.5	-4.9	12.7	19.1	10.9	31.0	0.384	0	-0.056	0.280
	0	13.9	16.5	37.2	7.8	20.0	0.516	0.428	0.407	0.495
	0.5	16.9	19.8	40.1	7.2	17.0	0.689	0.648	0.627	0.563

前節では風、潮流及び表層流中における浮遊式ステーション・システムの静的な平衡位置が求められた。本節では、それに加えて波浪がある時のステーション・システムの平衡位置のまわりの動揺と係留索に生ずる変動張力を理論計算する。

(I) システムの運動方程式を導くための基本的な仮定。

(1) 規則波中のシステムの周波数応答を計算する。その際、波の振幅、動揺の振幅ともに微小であるとし、いわゆる線型運動理論を用いる。

(2) 海底と中間ブイをつなぐ係留鎖に生ずる張力は中間ブイの変位だけによって決定されるとし、動的な影響は考慮しない。すなわち係留鎖は動揺中、カタナリーの形状を保つものとし、さらに中間ブイの変位を小さいとして係留鎖の変動張力は中間ブイの変位に比例するとする。

(3) 中間ブイとステーションあるいはパワーブイをつなぐ係留ロープ（理論計算ではパワーブイと中間ブイは鎖でなくロープでつながれているとしている）に生ずる変動張力は各ブイの変位にもとづくロープの伸びに比例するものとし、動的影響は鎖の場合と同様無視する。

(4) ステーション及び各ブイに作用する波強制力は、波長がそれらの寸法に比べて十分大きいとして計算する。また波強制力や付加質量などの流体力は、ステーションやパワーブイの静的な平衡状態における傾斜角を無視して計算する。

中間ブイの形状は同体積の球で代用し、重心はその球の中心に、係留索の固着点は重心に一致するものとする。

(5) 流体力の計算では自由表面の影響を無視し, さらに造波減衰, 粘性減衰をとともに無視しているが, パワーブイ及びステーションの上下揺と横揺に対しては次節に述べる模型実験で得られた減衰係数を実機に換算して用いた.

(II) システムの動揺の運動方程式

浮遊ステーション・システムの図を再録したものが図 5.4.3 である. この図で B の中心点, C 点及び D 点の平衡状態における y, z 座標を各々 (X_1, X_4) , (X_2, X_5) , (X_3, X_6) とし, ステーションの平衡状態における定常傾斜角を $X_7 (= \phi)$ とし, パワーブイのそれを X_8 とする. ただし $X_8 = 0$ である.

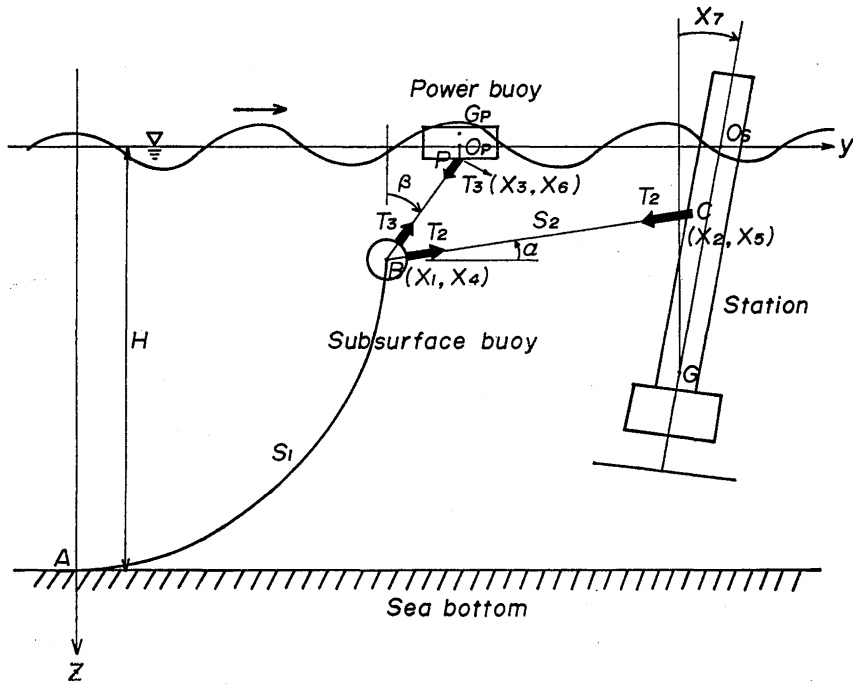


図 5.4.3 ステーション・システムの座標系

ステーション, 中間ブイ及びパワーブイからなる全システムの規則波中の連成運動方程式は次の通りである.

$$\left(\frac{\Delta P}{g} + M_{PH} \right) \frac{d^2(\Delta X_6)}{dt^2} + N_{PH} \frac{d(\Delta X_6)}{dt} + \rho \pi a^2 P \cdot \Delta X_6 = F_{PH} + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (T_3 \cdot \cos \beta) \cdot \Delta X_i, \quad (5.4.23)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{g} + M_{PS} \right) \frac{d^2(\Delta X_2)}{dt^2} + (M_{PS} \cdot \overline{OG_P} + M_{PRS}) \frac{d^2(\Delta X_8)}{dt^2} = F_{PS} - \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (T_3 \cdot \sin \beta) \cdot \Delta X_i, \quad (5.4.24)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{I_P}{g} + M_{PR} + 2M_{PRS} \cdot \overline{OG}_P + M_{PS} \cdot \overline{OG}_P^2 \right) \frac{d^2(\Delta X_8)}{dt^2} + N_{PR} \cdot \frac{d(\Delta X_8)}{dt} + \Delta_P \cdot \overline{GM}_P \cdot \Delta X_8 \\ & + (M_{PRS} + M_{PS} \cdot \overline{OG}_P) \frac{d^2(\Delta X_3)}{dt^2} = F_{PR} + \overline{OG}_P \cdot F_{PS} + \overline{G}_P D \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (T_3 \sin \beta) \Delta X_i, \quad (5.4.25) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{W}{g} + M_{SH} \right) \frac{d^2(\Delta X_5)}{dt^2} + N_{SH} \frac{d(\Delta X_5)}{dt} + \rho \pi r_0^2 \cdot \Delta X_5 = F_{SH} + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (T_2 \sin \alpha) \cdot \Delta X_i, \quad (5.4.26)$$

$$\left(\frac{W}{g} + M_{SS} \right) \frac{d^2(\Delta X_2)}{dt^2} + (M_{SS} \cdot \overline{OG} + M_{SS} \cdot \overline{OG}^2) \frac{d^2(\Delta X_7)}{dt^2} = F_{SS} - \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (T_2 \cos \alpha) \cdot \Delta X_i, \quad (5.4.27)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{J}{g} + M_{SR} + 2M_{SRS} \cdot \overline{OG} + M_{SS} \cdot \overline{OG}^2 \right) \frac{d^2(\Delta X_7)}{dt^2} + N_{SR} \frac{d(\Delta X_7)}{dt} + W \cdot \overline{GM} \cdot \Delta X_7 \\ & + (M_{SS} \cdot \overline{OG} + M_{SRS}) \cdot \frac{d^2(\Delta X_2)}{dt^2} = F_{SS} \cdot \overline{OG} + F_{SR} + \overline{GC} \cdot \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} [T_2 \cos(X_7 + \alpha)] \Delta X_i, \quad (5.4.28) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{W_1}{g} + M_{1H} \right) \frac{d^2(\Delta X_4)}{dt^2} = F_{1H} - \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (-T_{Z1} + T_2 \sin \alpha + T_3 \cos \beta) \cdot \Delta X_i, \quad (5.4.29)$$

$$\left(\frac{W_1}{g} + M_{1H} \right) \frac{d^2(\Delta X_5)}{dt^2} = F_{1S} + \sum_{i=1}^8 \frac{\partial}{\partial X_i} (-T_{Y1} + T_2 \cos \alpha + T_3 \sin \beta) \Delta X_i. \quad (5.4.30)$$

なお主な記号は以下の通りである。

OG : 静止水面からステーションの重心 G までの垂直距離。

OG_P : 静止水面からパワーブイの重心 G_P までの垂直距離。

$\Delta X_1, \Delta X_4$: 中間ブイの重心の y 方向, z 方向の動揺変位。

$\Delta X_2, \Delta X_5, \Delta X_7$: ステーションの重心の y 方向, z 方向の動揺変位及び重心まわりの横揺角。

$\Delta X_3, \Delta X_6, \Delta X_8$: パワーブイの重心の y 方向, z 方向の動揺変位及び重心まわりの横揺角。

W : ステーションの排水量。

J : ステーションの重心まわりの慣性モーメント。

Δ_P : パワーブイの排水量。

I_P : パワーブイの重心まわりの慣性モーメント。

W_1 : 中間ブイの重量。

$\overline{GM}$: ステーションのメタセンタ高さ。

$\overline{GM}_P$: パワーブイのメタセンタ高さ。

M_{PH}, M_{PS}, M_{PR} : パワーブイの上下揺, 左右揺の付加質量及びパワーブイの浮面心 O_P 点まわりの横揺の付加慣性モーメント。

M_{SH}, M_{SS}, M_{SR} : ステーションの上下揺, 左右揺の付加質量及びステーションの浮面心 O_S 点まわりの横揺の付加慣性モーメント。

M_{1H} : 中間ブイの上下揺の付加質量。中間ブイは球形とし自由表面の影響を無視するので左右揺の付加

質量は上下揺のそれと同一である.

M_{PRS} , M_{SRs} : パワーブイ及びステーションにおける横揺と左右揺の連成係数.

F_{PH} , F_{PS} , F_{PR} : パワーブイに作用する y 方向, z 方向の波浪強制力及び O_P 点まわりの波浪強制力のモーメント.

F_{SH} , F_{SS} , F_{SR} : ステーションに作用する y 方向, z 方向の波浪強制力及び O_S 点まわりの波浪強制モーメント.

F_{1H} , F_{1S} : 中間ブイに作用する y 方向, z 方向の波浪強制力.

その他の記号の意味は前節と全く同一である.

上記の運動方程式において Σ の項が変位による係留ロープ, 鎖の張力であり, それは次のようにして計算する.

$$T_2 = E_2 A_R \cdot \frac{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (X_5 - X_4)^2} - S_2}{S_2}, \quad (5.4.31)$$

$$T_3 = E_2 A_R \cdot \frac{\sqrt{(X_3 - X_1)^2 + (X_6 - X_4)^2} - S_3}{S_3}, \quad (5.4.32)$$

である. ただし E_2 はロープのヤング率, A_R はロープの断面積である. X_i は前節の静的平衡状態の計算で得られているから, 上式から簡単に $\partial T_{2,3}/\partial X_i (i=1, 2, \dots, 6)$ が計算できる. また

$$\frac{\partial}{\partial X_7} = -\overline{GC} \left(\cos X_7 \cdot \frac{\partial}{\partial X_2} + \sin X_7 \cdot \frac{\partial}{\partial X_5} \right), \quad (5.4.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_8} = -\overline{GD} \frac{\partial}{\partial X_3}, \quad (5.4.34)$$

の関係があるから $\partial T_{2,3}/\partial X_{7,8}$ も容易に求めることができる. 更に

$$\tan \alpha = (X_4 - X_5)/(X_2 - X_1), \quad (5.4.35)$$

$$\tan \beta = (X_3 - X_1)/(X_4 - X_6), \quad (5.4.36)$$

であるから

$$\frac{\partial \alpha}{\partial X_i} = \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial X_i} \cdot \frac{(X_4 - X_5)}{(X_2 - X_1)}, \quad (5.4.37)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial X_i} = \frac{\cos^2 \beta}{\sin \beta} \cdot \frac{\partial}{\partial X_i} \cdot \frac{(X_3 - X_1)}{(X_4 - X_6)}. \quad (5.4.38)$$

これらの式を用いれば $\frac{\partial}{\partial X_i} (T_3 \cos \beta)$, $\frac{\partial}{\partial X_i} (T_3 \sin \beta)$, $\frac{\partial}{\partial X_i} (T_2 \cos \beta)$, $\frac{\partial}{\partial X_i} (T_2 \sin \beta)$ の全てが求められる.

次に $\frac{\partial T_{Y1}}{\partial X_{1,4}}$, $\frac{\partial T_{Z1}}{\partial X_{1,4}}$ の求め方に関しては以下の通りである. なお T_{Y1} , T_{Z1} の他の X_i に関する導関数は 0 であることは明らかである.

係留鎖のカテナリー方程式は

$$h - X_4 = a \cosh [(X_1 - Y_0)/a] - a, \quad (5.4.39)$$

$$S_1 - Y_0 = a \sinh [(X_1 - Y_0)/a], \quad (5.4.40)$$

である。ただし Y_0 は鎖が海底に接する点 A の y 座標であり、静的平衡状態では0である。

(5.4.39) 及び (5.4.40) 式の両辺を X_1 及び X_4 で微分すると次の $\frac{\partial a}{\partial X_{1,4}}$, $\frac{\partial Y_0}{\partial X_{1,4}}$ に関する2組の連立方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \cosh [(X_1 - Y_0)/a] - (X_1 - Y_0)/a \cdot \sinh [(X_1 - Y_0)/a] - 1, \\ \sinh [(X_1 - Y_0)/a] - (X_1 - Y_0)/a \cdot \cosh [(X_1 - Y_0)/a], \\ -\sinh [(X_1 - Y_0)/a] \\ 1 - \cosh [(X_1 - Y_0)/a] \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial a}{\partial X_1}, \frac{\partial a}{\partial X_4} \\ \frac{\partial Y_0}{\partial X_1}, \frac{\partial Y_0}{\partial X_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sinh [(X_1 - Y_0)/a], -1 \\ -\cosh [(X_1 - Y_0)/a], 0 \end{pmatrix}. \quad (5.4.41)$$

この連立方程式を解いて求められる $\partial a / \partial X_{1,4}$, $\partial Y_0 / \partial X_{1,4}$ と $T_{Y1} = w_1 a$, $T_{Z1} = w_1 a \cdot \sinh [(X_1 - Y_0)/a]$

の関係をを用いれば、

$$\frac{\partial T_{Y1}}{\partial X_{1,4}} = w_1 \frac{\partial a}{\partial X_{1,4}}, \quad (5.4.42)$$

$$\frac{\partial T_{Z1}}{\partial X_1} = w_1 \cdot \frac{\partial a}{\partial X_1} \cdot \sinh [(X_1 - Y_0)/a] + w_1 \left[\left(1 - \frac{\partial Y_0}{\partial X_1} \right) - \frac{\partial a}{\partial X_1} \cdot \frac{X_1 - Y_0}{a} \right] \cdot \cosh [(X_1 - Y_0)/a], \quad (5.4.43)$$

$$\frac{\partial T_{Z1}}{\partial X_4} = w_1 \cdot \frac{\partial a}{\partial X_4} \cdot \sinh [(X_1 - Y_0)/a] + w_1 \left[\left(-\frac{\partial Y_0}{\partial X_4} \right) - \frac{\partial a}{\partial X_4} \cdot \frac{X_1 - Y_0}{a} \right] \sinh [(X_1 - Y_0)/a], \quad (5.4.44)$$

が得られる。

(Ⅲ) 数値計算例

前節で風及び潮流中の静的平衡状態を計算したステーション・システムに対して、その規則波中の動揺を本節で示した理論的方法で計算した。そのうち、次の場合の計算例について示す。

Case	S_2	風速	潮流の速度	パワーブイの有無
1	50m	40m/sec	0.5m/sec	有
2	50m	40m/sec	0.5m/sec	無
3	25m	40m/sec	0.5m/sec	無

理論計算にあたっては、ステーション及びパワーブイの上下揺と横揺に対してのみ減衰力を考慮した。減衰係数は次節に述べるように模型実験における自由動揺試験から求められた値を実機の場合に換算して用いた。

図5.4.4はステーションの上下揺の振幅を入射波の振幅で無次元化したものである。横軸は入射波の

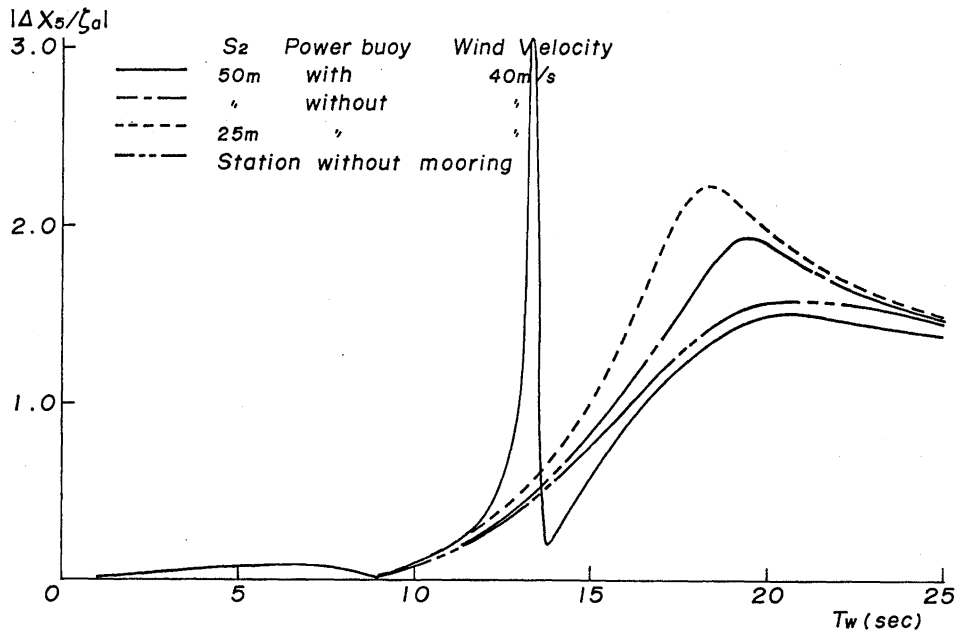


図 5.4.4 ステーションの上下揺振幅

周期 T_w (sec) である. パワーブイがある場合もない場合も, ステーションの設置海域において, 我々の最も関心の深い周期 10 sec 以下の波に対する応答は, ステーションが係留されていない場合のそれ

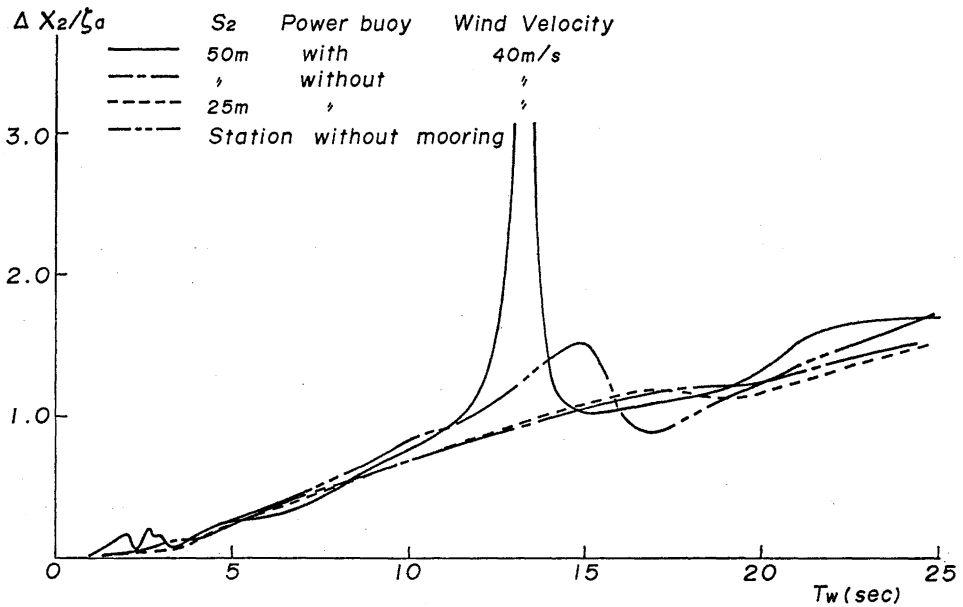


図 5.4.5 ステーションの左右揺振幅

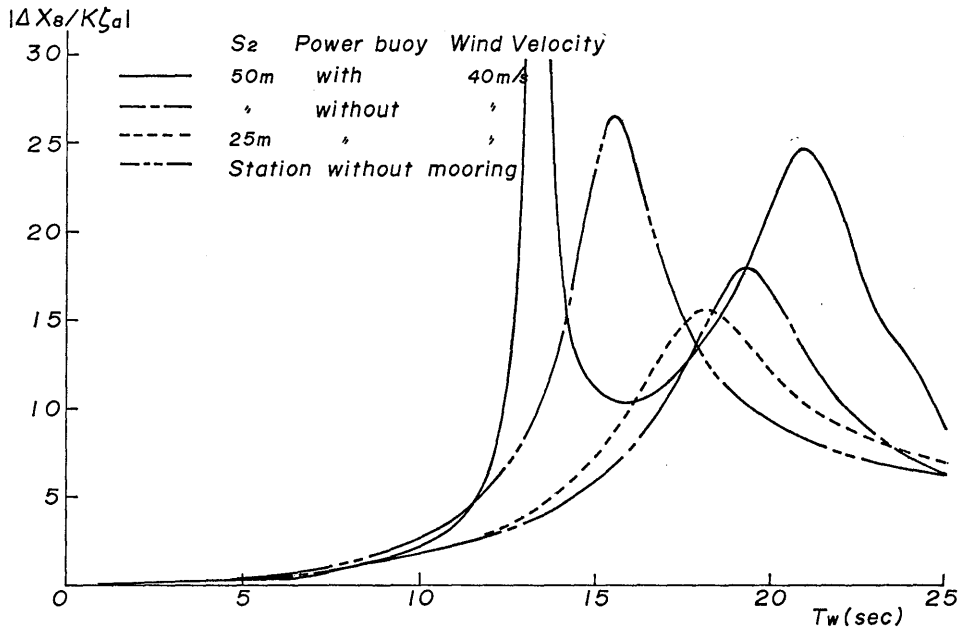


図 5.4.6 ステーションの横揺振幅

とはほとんど同一で所期の要求を十分満足している。なおパワーブイが存在する場合は周期約 13 sec の点に上下揺のピークがあり、図 5.4.5, 5.4.6 に示す 左右揺 や横揺 の振幅の無次元値及び図 5.4.7, 5.4.8 に示すシンカーと中間ブイを結ぶ係留鎖の変動張力の水平成分及び 中間ブイとステーションを結ぶナイロンロープの変動張力にも悪い影響をおよぼす。

左右揺や横揺についても周期 10 sec 以下の波に対しては、係留索の有無はステーションの動揺に影響がなく、10 sec 以上になると種々の連成動揺の固有値のために応答曲線はロープの長さ、パワーブイの有無によって複雑に変化する。

ここで行われた理論計算は、シンカー、中間ブイ、ステーションそれぞれの間を結ぶ鎖やロープに生じる変動張力が変位に比例すると仮定している。一般に係留索、特に中間ブイとステーションあるいはパワーブイを結ぶロープはステーションその他の運動が激しくなれば伸びたりたるんだりし、その張力は線型とは考えられない。したがってステーションの動揺の詳しい点についてまで本節の理論計算結果は信用することはできないが、10 sec 以下の周期の波に対して所期の性能を十分に満足していること、動揺性能に関する限りどちらかと言えばパワーブイがない方が良いということは結論できる。

図 5.4.7 はシンカーと中間ブイをつなぐ係留鎖の変動張力の水平成分の振幅 (ton) を、入射波の振幅 (m) で除したものであり、図 5.4.8 は中間ブイとステーションを結ぶナイロンロープの変動張力の振幅を波の振幅で除したものである。

いずれの場合もパワーブイが無ければ、張力は小さく、設計されたロープ及び鎖は、設計条件の海象に対して十分の強度をもつことが示されている。

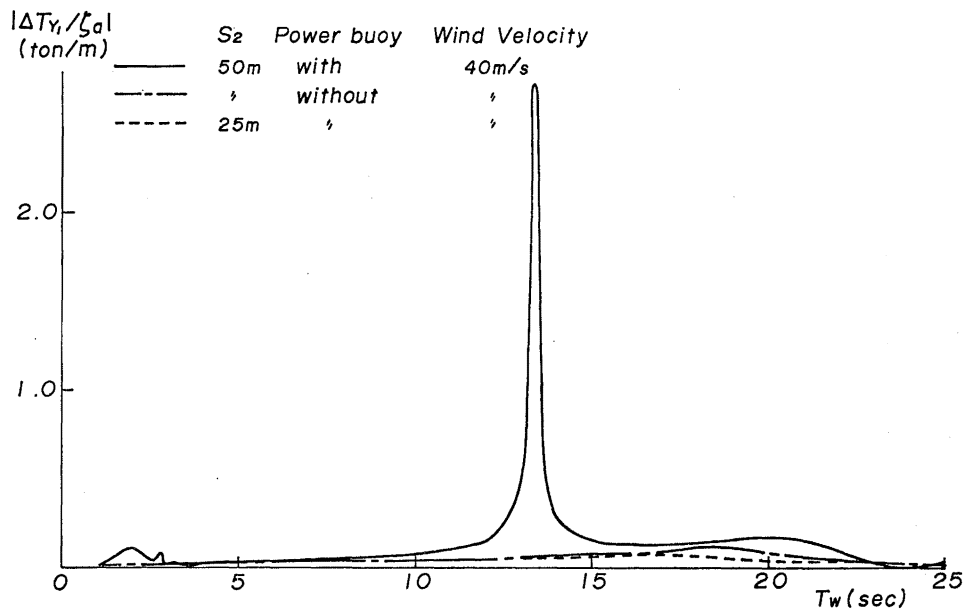


図 5.4.7 係留鎖の変動振力の水平成分

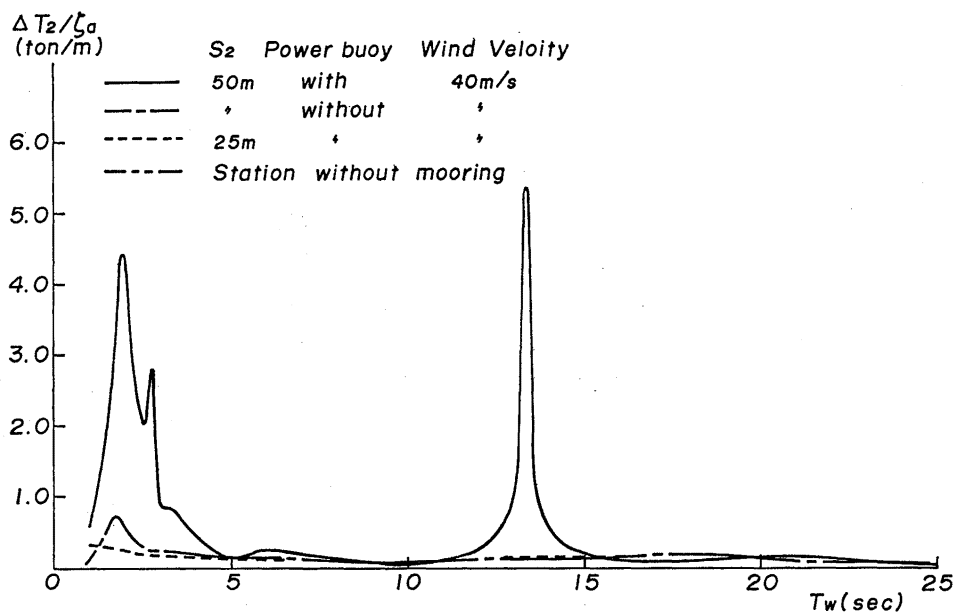


図 5.4.8 係留ロープの変動振幅

5.4.3 模型実験と計算の比較

5.3 節で決定されたステーション、パワーブイ及び中間ブイからなる観測システムの模型実験を水槽

（応用力学研究所津屋崎海岸災害実験所大水槽）において行った。

実験に使用した模型は実機の1/6の寸法であるが、工作上の都合で完全なる相似模型ではない。ステーションの上部構造物（マスト、百葉箱）は運動計測装置を取り付けるために省略し、それと風圧抵抗に関して等価な平板をとりつけた。またパワーブイは簡単の為に円柱形のものを使用し、中間ブイは球状の浮子で代用した。ステーションと中間ブイの間の係留ロープは長さ8mのクレモナロープ、中間ブイとシンカー間の係留鎖は水中重量0.121kg/m、長さ10mの鎖、中間ブイとパワーブイ間は長さ0.3mのナイロンロープを使用し、シンカーとして40kgの重りを使用した。それらの主要目を表5.4.4に、実験状態を図5.4.9及び写真5.4.1に示す。更に、運動及び張力の計測の為に計測器の概略図を図5.4.10に示す。

表 5.4.4. 模型の主要寸法

ステーション			
排水量	$\Delta_S=47.55\text{kg}$		
吃水	$d=l_f=2.167\text{m}$		
カラム半径	$r_0=0.066\text{m}$,	カラム長さ	$l_0=1.666\text{m}$
フーティング半径	$r_1=0.166\text{m}$,	フーティング長さ	$l_1=0.25\text{m}$
水平フィン半径	$r_f=0.375\text{m}$,		
$\overline{KG}=0.648\text{m}$, $\overline{KB}=0.807\text{m}$, $\overline{BG}=0.160\text{m}$, $\overline{OG}=1.519\text{m}$			
パワーブイ			
排水量	$\Delta_P=4.427\text{kg}$		
吃水	$b_P=0.051\text{m}$,	半径	$a_P=0.333\text{m}$
高さ	$h_P=0.10\text{m}$		
中間ブイ			
排水量	$\Delta_1=0.382\text{kg}$,	半径	$r_b=0.045\text{m}$
余剰浮力	$\delta_1=0.250\text{kg}$		
係留鎖			
長さ	$S_1=10.0\text{m}$,		
単位長さ当りの水中重量	$w_1=0.127\text{kg/m}$		
係留ロープ			
長さ	$S_2=8.0\text{m}$		

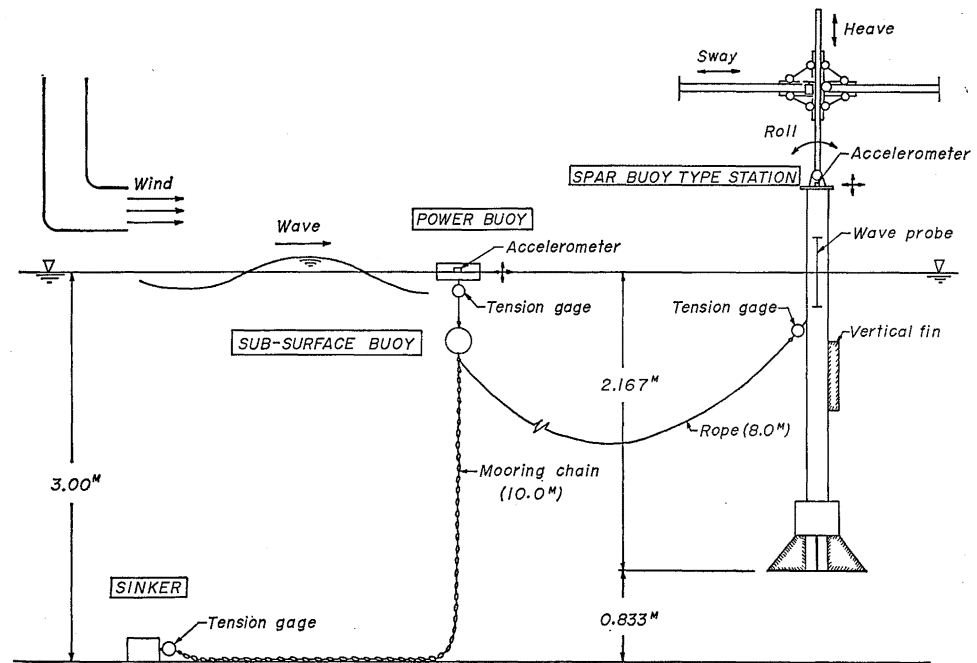


図 5.4.9 模型実験の概略図

(1) 定常風中での実験

水槽備え付けの送風機によりシステム全体に定常風をあてて、ステーションの傾斜角 ϕ_0 、係留ロープの張力 T_2 、パワーブイと中間ブイ間のロープの張力 T_3 、係留鎖のシンカー部での張力 T_4 を計測した。実験した定常風の風速は 9.1 m/sec と 10.5 m/sec である。実験に使用した模型について 5.4.1 節で示した計算法で計算した結果を表 5.4.5 に示す。また図 5.4.11, 5.4.12 に実験結果と計算値の比較を示す。

ステーションの傾斜角 ϕ_0 に関しては計算値が実験値よりも大きい傾向にある (図 5.4.11)。この原因は計測器の摩擦力によって傾斜が小さくなっているものと考えられる。

係留ロープの張力 T_2 に関しては、実験と計算はほぼ一致している (図 5.4.11)。

パワーブイの係留ロープの張力 T_3 は実験値の計算値よりもかなり大きい (図 5.4.12)。この理由は風が水面に当たることによって波が起り、その波の漂流力が風による力に加わっている事、さらに風が水面へ吹きつけているので、通常の表層流よりも、かなり大きい水流がパワーブイ近辺で起っていた事によるものである。

シンカーの近くでの係留鎖の張力 T_4 に関しては実験値は計算値に比較してかなり大きい (図 5.4.12)。この理由はパワーブイに加わる流体力が計算よりも大きい事、さらに鎖に加わる水底からの摩擦力が計算には入っていない事によるものと思われる。

(2) 自由動揺実験

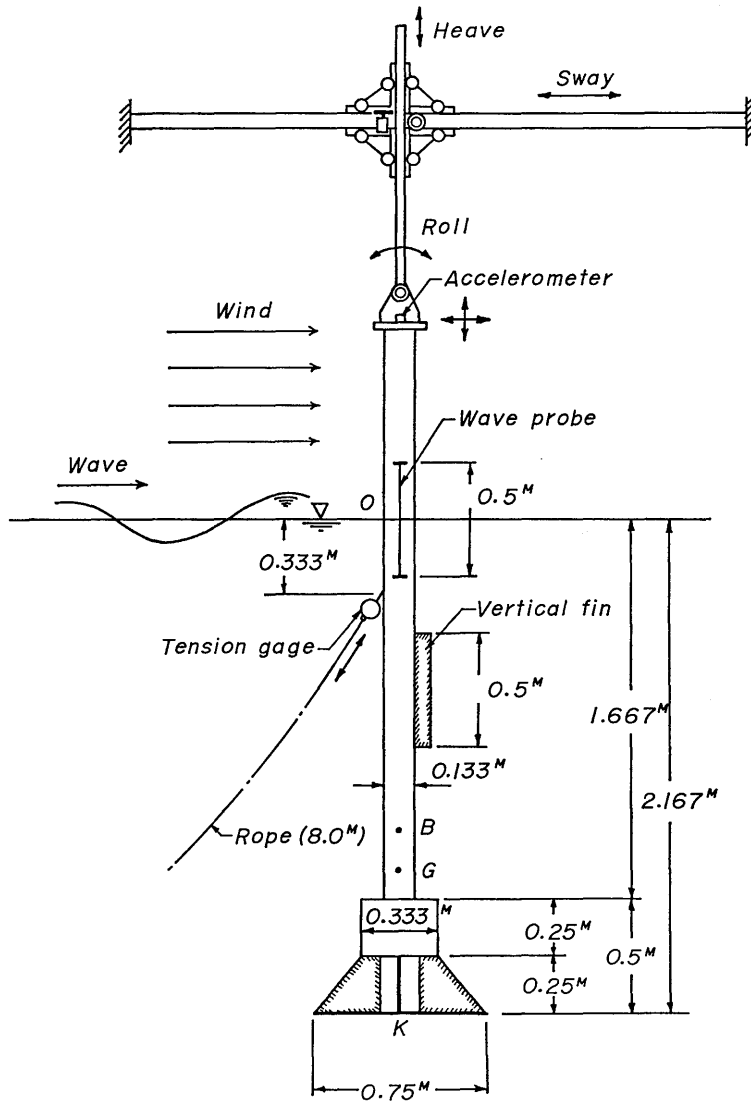


図 5.4.10 ステーション模型の主要寸法と運動計測装置

図 5.4.9 のように係留状態のままで自由上下揺、自由横揺実験を行いステーション、パワーブイの固有周期及び減衰係数を求めた。

ステーション、パワーブイの上下揺の減衰係数 N_{SH} , N_{PH} は

$$N_{SH, PH} = \rho g A_W \cdot a_z T_z / \pi^2 \quad (5.4.45)$$

(A_W : ステーション or パワーブイの水線面積, T_z : ステーション又はパワーブイの上下揺固有周期) で表される。

横揺の減衰係数 N_{SR} , N_{PR} は

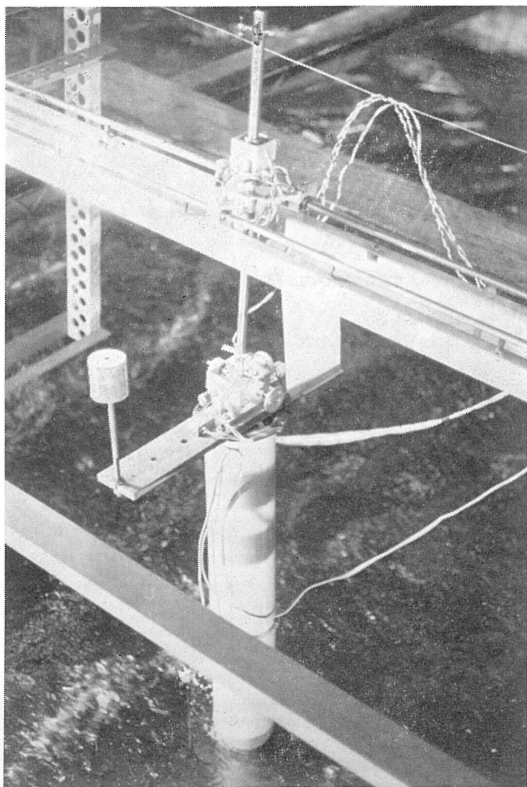


写真 4.1.1 固定式海洋観測ステーション

高と水槽に固定した波高計で計測した入射波の波高を比較する。

まず最初に風と規則波の中で実験を行った。図 5.4.13 の実線は模型にとりつけた波高計による計測値 r_a を入射波の振幅 ζ_a で割ったものである。波周期が 2.5 sec 前後では $r_a/\zeta_a = 0.8$ で、1.0 にならない。これは、模型の排除効果と反射波が波高計に影響している事と模型が上下揺、横揺する事によ

$$N_{SR, PR} = W \cdot GM \cdot a_\phi T_\phi / \pi^2$$

$$(5.4.46)$$

(W :ステーション又はパワーブイの排水量, GM :ステーション又はパワーブイの GM , T_ϕ :同横揺固有周期)で表すことができる。

実験から得られた T_z , a_z , T_ϕ , a_ϕ を表 5.4.6 に示す。表中には実験で求めた減衰係数を用いて計算した固有周期も同時に示す。実験は係留状態で行ったが、定常力が加わっていなかったの、係留ロープの張力は小さい。したがって計算は無係留状態として行った。計算と実験は大略一致する。

(3) 定常風と波の中での実験

風及び波浪中にある模型の運動と係留鎖。係留ロープの変動張力の計測を行い、5.4.2 で述べた計算法で計算した結果と比較する。さらに、実機と同じ位置に模型に取り付けた波高計で計測した波

表 5.4.5. 浮遊式ステーションの移動と傾斜の計算(模型)

U (m/s)	Y_1 (m)	S_1 (m)	Y_2 (m)	$h-Z_1$ (m)	$h-Z_2$ (m)	α (deg)	ϕ_0 (deg)	ΔS_2 (m)	ΔZ_2 (m)	T_2 (kg)
9.1	5.97	6.55	14.0	2.35	2.66	2.27	7.0	0.058	0.012	0.869
10.5	6.85	7.36	14.9	2.35	2.66	2.29	10.0	0.075	0.019	1.12

U (m/s)	F_{Y2} (kg)	F_{Z2} (kg)	$M_{\phi 0}$ (kg-m)	ΔZ_3 (m)	β (deg)	T_{Y1} (kg)	T_{Z1} (kg)	F_{Y3} (kg)	T_{z3} (m)	T_3 (kg)
9.1	0.869	0.130	1.98	$\times 10^{-2}$ 0.562	10.3	0.962	0.793	0.091	0.503	0.511
10.5	1.12	0.256	2.59	$\times 10^{-2}$ 0.659	12.2	1.250	0.891	0.128	0.590	0.603

表 5.4.6. 浮遊式ステーションの上下揺及び横揺固有周期（模型実験と計算）

上 下 揺			横 揺		
a_ϕ	0.70	(実験値)	a_ϕ	0.24	(実験値)
T_z	8.9	(実験値)	T_ϕ	6.0	(実験値)
	9.0	(計算値)		5.4	(計算値)

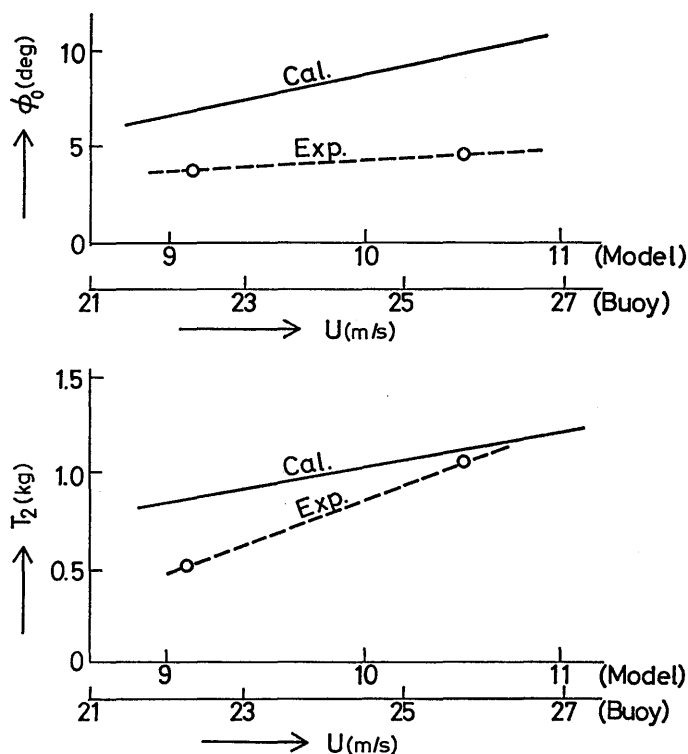


図 5.4.11 浮遊式ステーション模型の定常傾斜角と係留ロープの張力

と考えられる。図中の点線はこれらの影響の中でもっとも大きいと思われる上下揺の影響を実験値を使用してとり除いたものである。周期が1.0～3.0 secの間では上下揺の修正を行うと、かなり値が改善される事がわかる。以上のことからステーションで計測した波高は、高々10%の誤差しかふくまないことが結論できる。

次に自由動揺試験で得られたステーション模型、パワーブイ模型の減衰係数 N_{SH} , N_{SR} , N_{PH} , N_{PR} （本節のⅡを参照）を用いてステーションの波浪中の運動と係留ロープの張力を計算し、実験値と比較した。なお模型の主要目は表5.4.4に示す通りであり、風速は $U=9.1$ m/secとした。その結果が図5.4.14から図5.4.17に示されている。

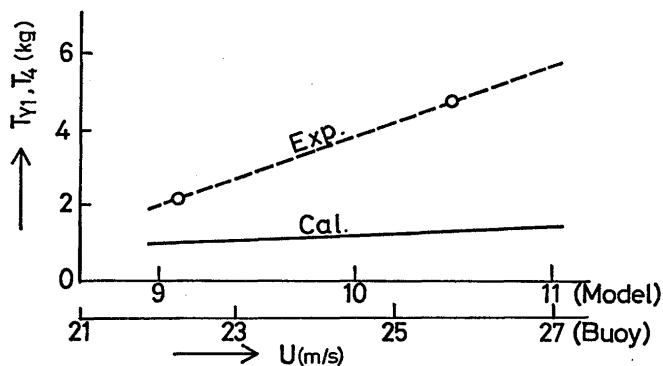
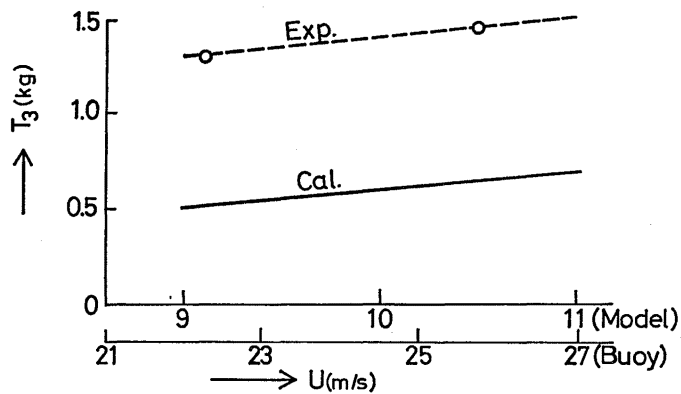


図 5.4.12 パワーバイ係留ロープ張力と係留鎖の水平張力

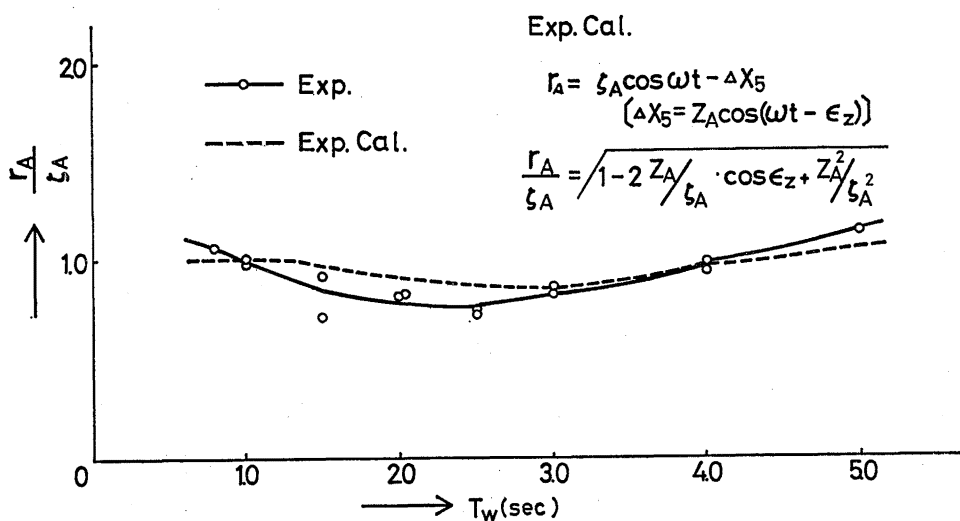


図 5.4.13 ステーション模型により計測した波高と入射の波高の比較

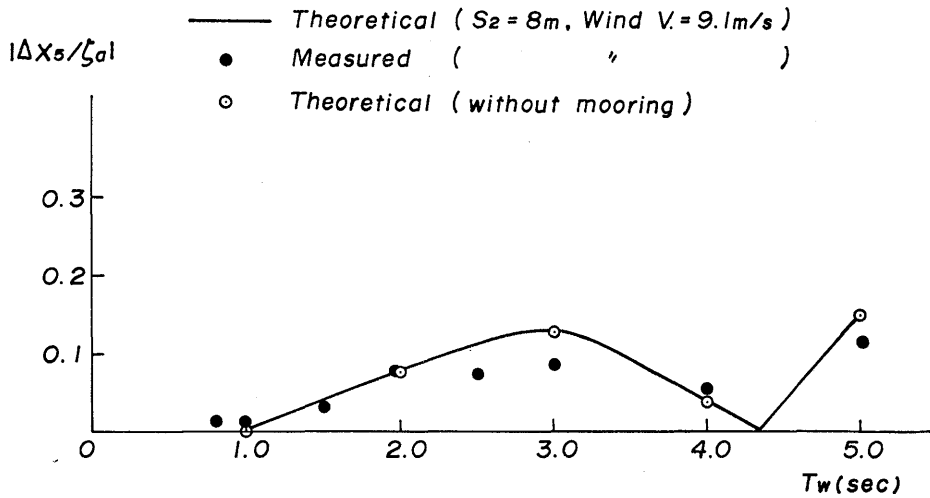


図 5.4.14 ステーション・モデルの上下揺振幅

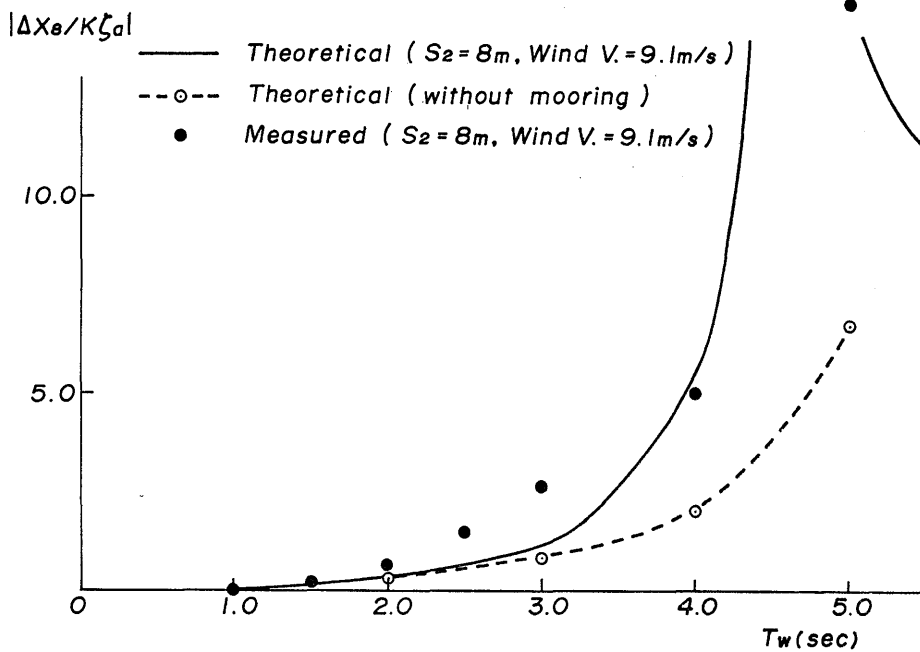


図 5.4.15 ステーション・モデルの左右揺振幅

図 5.4.14 はステーションの上下揺の振幅を入射波の振幅で無次元化したものである。横軸 T_w は入射波の周期 (sec) である。同図で実線は理論値、黒丸は実験値である。両者は良く一致している。

図 5.4.15 はステーション模型の横揺の振幅を波傾斜で無次元化したものである。この場合も理論値と実験値は良く一致している。なおこの場合の横揺の固有周期は 4.6 sec であり、ステーション模型の

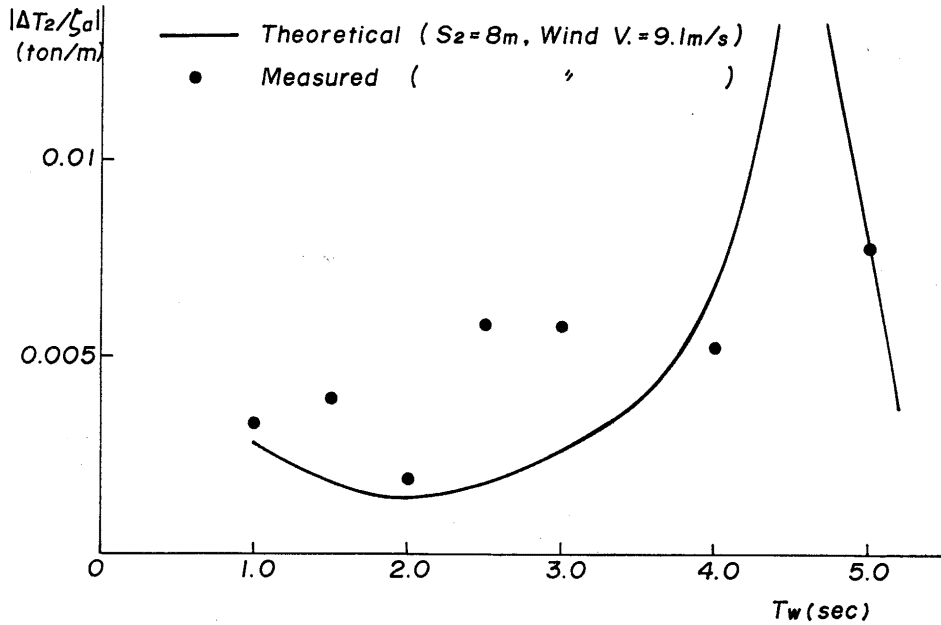


図 5.4.16 ステーション・モデルの左右揺振幅

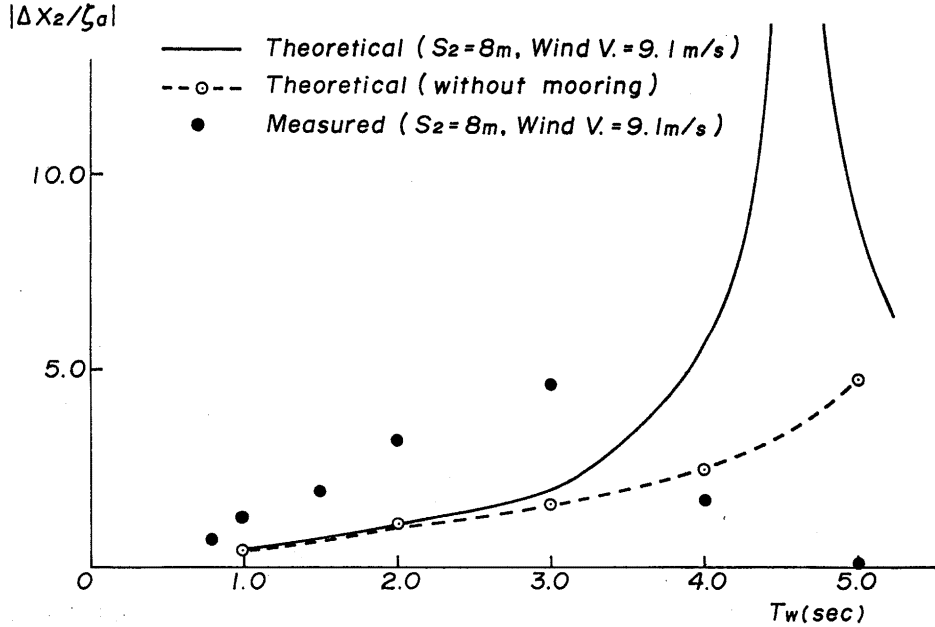


図 5.4.17 係留ロープの変動張力

単独時のそれ4.0 sec より短くなっている。

図 5.4.16 の左右揺では計算と実験の一致は良くない。この左右揺はステーション模型の重心上 2.41

m の点の左右揺である。なおこの不一致は横揺と左右揺の位相的關係が理論と実験とで一致しないことに起因すると思われるが、左右揺の計測方法にやや問題があることもあり、今後検討の余地がある。

図 5.4.17 は中間 ブイとステーションを結ぶロープに生ずる変動張力の振幅 (ton) を入射波の振幅 (m) で除したものである。両者は大略一致する。

以上の結果から、5.4.2 で示したステーション・システムの動揺の理論的モデルは、種々検討の余地はあるものの、システムの波浪中の挙動推定を可能ならしめるものであることが結論できる。したがって、5.4.2 節で計算されたステーション実機の理論的動揺特性を考慮したステーションの設計は、十分信頼できるものであろう。

(4) 不規則波中での実験

水槽中に造波機によって不規則波を発生させ、水槽に固定した波高計及びステーション模型に取り付けた波高計で波高を計測し、両者を比較して、図 5.4.18 に示す。図中の諸量は以下の式で計算した。

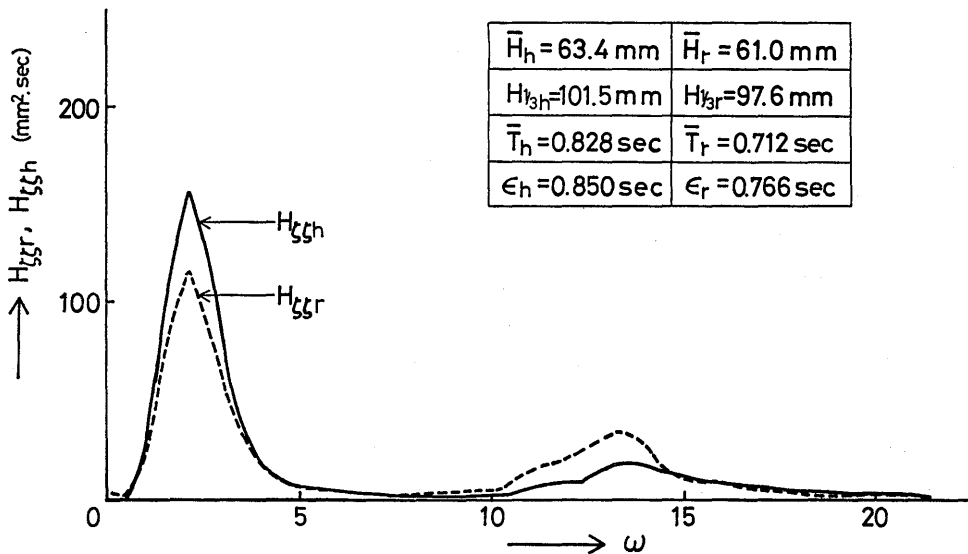


図 5.4.18 ステーション模型にたり計測された波高と入射波の波高のピワースペクトルノ比較

波のエネルギー Spektrum を $H_{\zeta\zeta}(\omega)$ とすれば、標準偏差 σ は次式で表わされる。

$$\sigma^2 = \int_0^\infty H_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega = m_0$$

平均波高を $\bar{H}$ 、有義波高を $H_{1/3}$ 、平均波周期を $\bar{T}$ で、それぞれ表わせば、スペクトラムの狭帯域指数 $\epsilon (= \sqrt{(m_0 m_4 - m_2^2)} / m_0 m_4) \rightarrow 0$ の時、それらは次のように求められる。

$$\bar{H} = 2.5\sqrt{m_0}, \quad H_{1/3} = 4\sqrt{m_0}, \quad \bar{T} = 2\pi\sqrt{m_0/m_2},$$

ただし

$$m_n = \int_0^{\infty} H_{\zeta\zeta}(\omega) \omega^n d\omega.$$

水槽に固定した波高計による値（添字 h で表わす）と、ステーション模型に取り付けた波高計による値（添字 r で表わす）は、平均波高、有義波高等はよく一致しているが、平均周期に関してはステーション模型に取り付けた波高計によるものが短い。これは前述のようにステーション模型からの反射波等の影響であると考えられる。

5.5. ステーションの建造及び設置工事

昭和 50 年 7 月中旬より、浮遊式海洋観測ステーション式の製作が三井海洋開発（株）によって開始された。岡山県のナйка興業（株）玉野工場において、ステーション本体、パワーブイ、中間ブイ等の製作を行い、9 月初め、一部洋上組立部分を除き工場における製作、塗装を完了した。その後、9 月 12 日関係者立会のもとに、主要部寸法、重量、重心査定等の各検査が実施され、無事日比港へ運搬できる運びとなった。

9 月 15 日、16 日の 2 日間にわたりステーション式、資機材その他必要物品の積み込み、ラッシング作業のあと、17 日 9 時船団が日比港を出港、ステーション据え付け現場へと向った。翌 18 日 13 時 40 分、シンカー投入予定位置に到着、14 時 30 分、船団の仮係留を終えた。船団は、1000 ton デッキバージ、第 28 栄吉丸 350 馬力曳船（乗員 3 名）及び東丸 35 馬力通船（乗員 2 名）であった。

19 日（金）8 時からシンカー投入地点の位置出し作業、続いてシンカーの投入、40 mmφ チェインの敷設、中間ブイ、パワーブイの投入作業を終り、夕方からステーション本体の投入が行われた。作業は極めて順調に進み予想を上回る作業能率であった。20 日（土）午前中、直立したステーション本体の自由動揺試験を実施した。残るは、バラスト注排水テストその他調整だけと思われたが、午後 2 時過ぎ、ダイバーによって海中のテンションメータ取付部付近の給電ケーブルの切断が報告された（給電ケーブル事故 No. 1 とする。後出 5.6.2 参照）。直ちに前後策を協議の上、この日は、ケーブル及びそれを取付けているナイロンロープを回収し、船団備えつけの麻ロープ（50 mmφ）にてステーションと中間ブイに係留することとした。

このころより低気圧接近で海象が悪化したので、船団は係留をとき大島港に（図 5.6.5 参照）避難した。翌 21 日も、依然低気圧の影響が残っており、船団は午前中大島港に待機を余儀なくされた。この間、固定式ステーションの波圧計取付工事を通船により行った。昼ごろより天候がやや回復したので、午後に入り作業を再開した。この日の作業は、前日取りはずしたナイロンロープの取り付けであった。給電ケーブルについては、新品と取り換えて後日取付けることとして、この日はステーション側の一部とパワーブイ側の一部を残して、全て取りはずした。中間ブイとパワーブイ間の 22 mmφ チェインが予想よりも緊張し初期張力が大きいと判断されたため、ジョイニングシャックルにより 3 m 程つぎ足し計 7 m とし、今回の工事を終えた。工事中的写真を写真 5.5.1～5.5.10 に示す。

現場据付工事におけるステーション自由動揺試験の際発生した、給電ケーブル切断事故に対する補修工事を凡そ 1 ヶ月後の 10 月に実施した。この補修工事においては、パワーブイ防水コネクター受台の改造を行うとともに、特に耐摩耗性を強化（図 5.5.1 参照）した給電ケーブルを取り付けた。

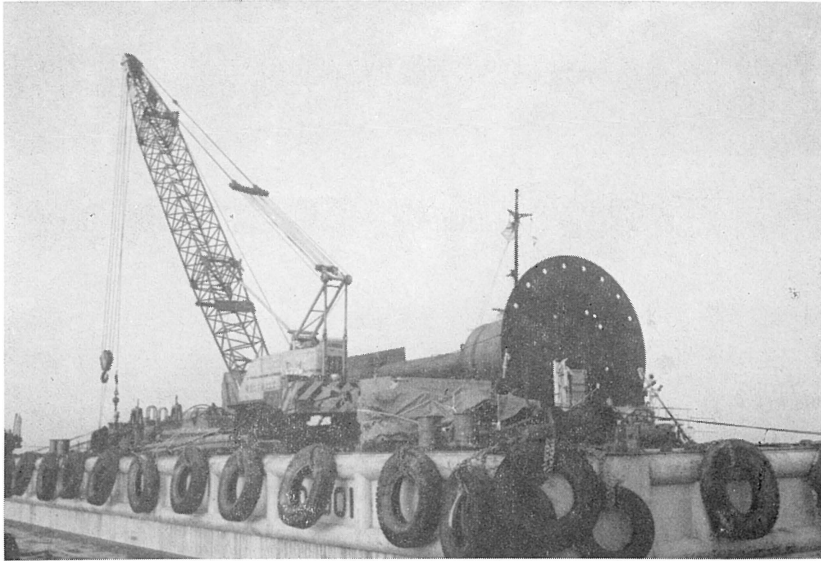


写真 5.5.1 バージに積込まれたステーション

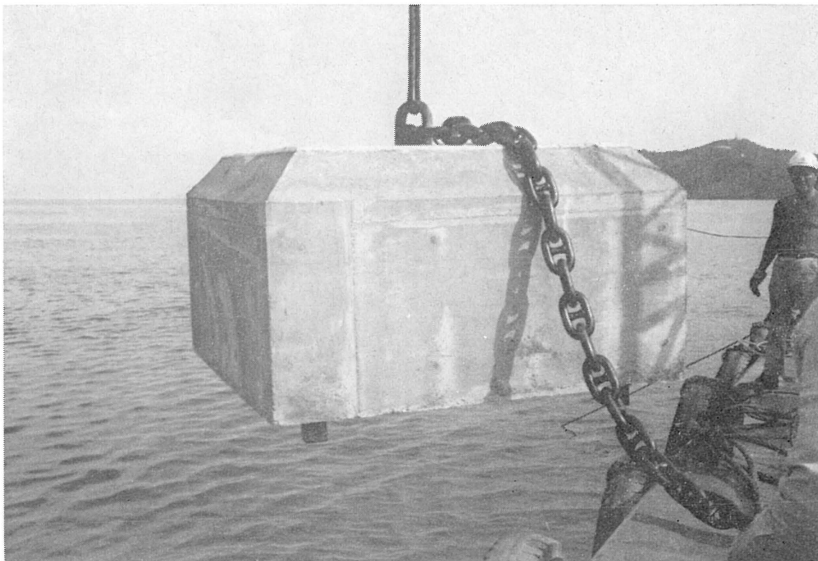


写真 5.5.2 シ ン カ ー



写真 5.5.3 パワーパイと中間パイ その1

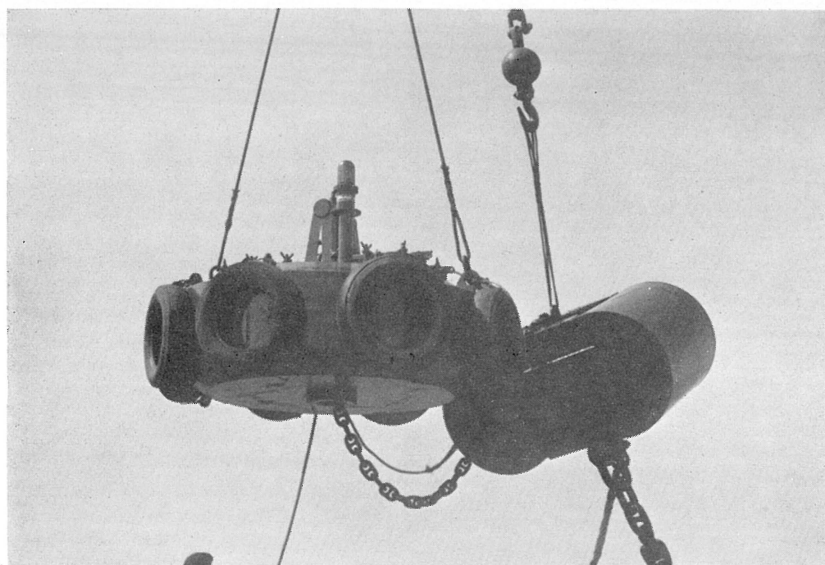


写真 5.5.4 パワーパイと中間パイ その2

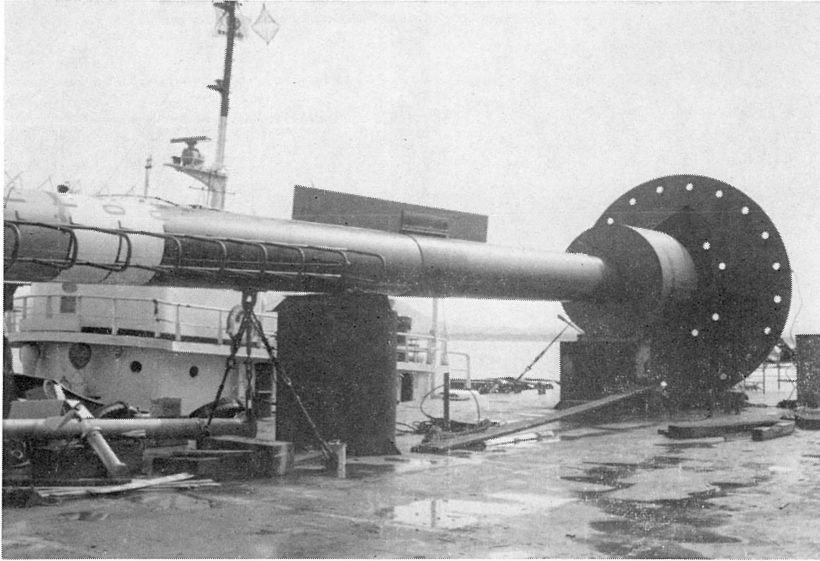


写真 5.5.5 ステーション本体下部

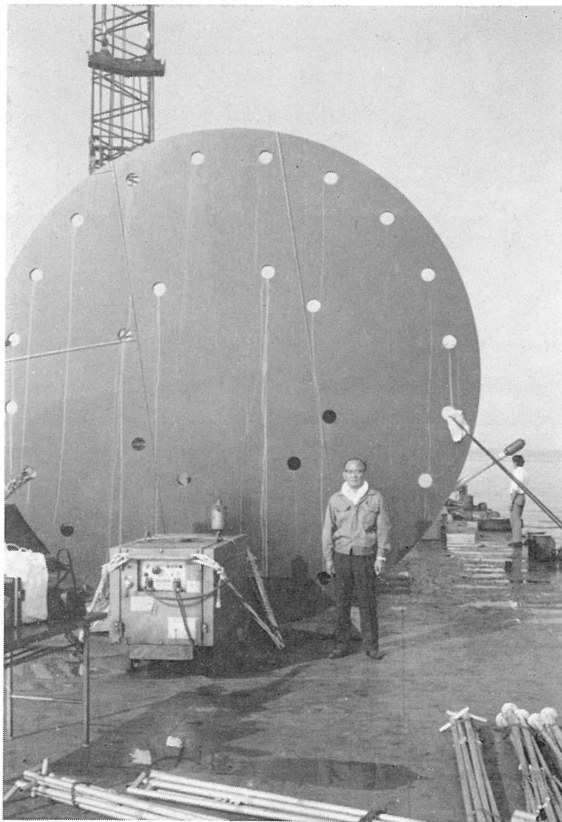


写真 5.5.6 円 盤 フ ィ ン



写真 5.5.7 百葉箱, マグネットコンパス, 及び風速計

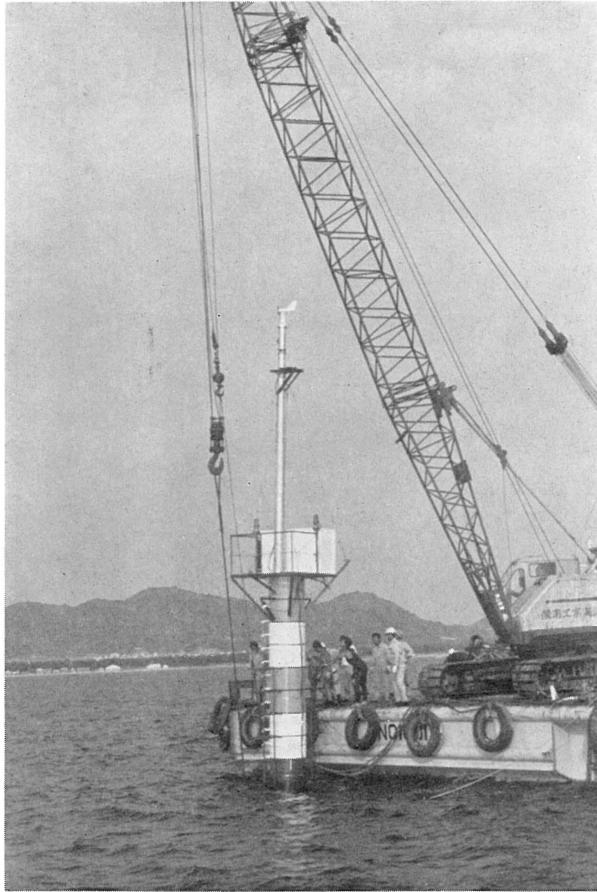


写真 5.5.8 ステーション本体の投入



写真 5.5.9 計測器調整作業 その1

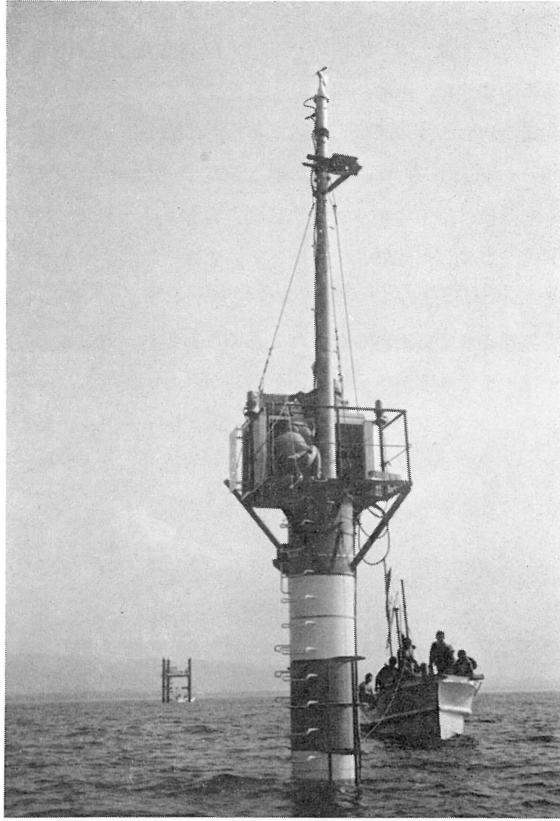


写真 5.5.10 計測器調整作業 その2
遠方に見えるのが固定式観測ステーション

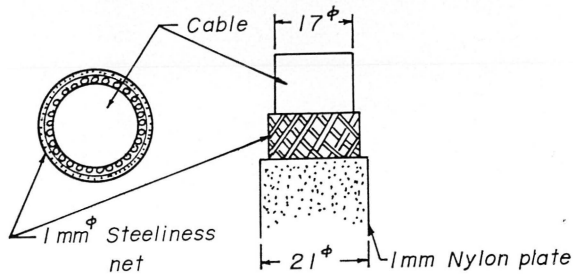


図 5.5.1 給電ケーブルの補強

5.6. 事故及びその対策と係留システムの変遷

昭和50年9月21日、浮遊式ステーションの設置工事が終了して以来、今日まで数回の事故が発生した。その都度検討と対策を講じた結果、現在の係留及び計測システムは最初のものとは多少異なったものとなっている。

5.6.1. パワーブイの流出

北西の強風と大きなうねりが発達していた昭和 50 年 12 月 21 日朝, 地元の旅館正直亭から パワーブイが漂流中であるとの通報をうけた. 海象が悪く曳行船を仕立てることができなかったので監視を行っていた所, 昼すぎに実験所西方の海浜に漂着した. 早速砂浜に杭を打ち, これにパワーブイを固縛して海への流出を防ぎ監視をつづけた. 翌 22 日もなお時化がつづいており船が出港できる状態ではなかった. その為係留システムの点検は出来なかったが, 望見する所ステーションの性能には変化が見られなかった. 一方, パワーブイを点検した結果, パワーブイは切断された給電ケーブルの残片及び中間ブイとパワーブイを連結する 22 mm 直径のチェーン 7m を曳きづっており, チェインには切断箇所が無かつパワーブイ本体にも異常のないことがわかった. このことから, 波浪によるパワーブイの運動のために, 中間ブイとパワーブイを連結するチェーンに衝撃的な外力が作用し, その結果先ず中間ブイ上部のシャックル (図 5.6.1 の No. 8) のピンが脱落, その後給電ケーブルが切断され, 上述のようにパワーブイは長さ 7m のチェーンとケーブルの残片を曳きづって流出したと判断された. このことは後日ダイバーによる点検によって確認された.

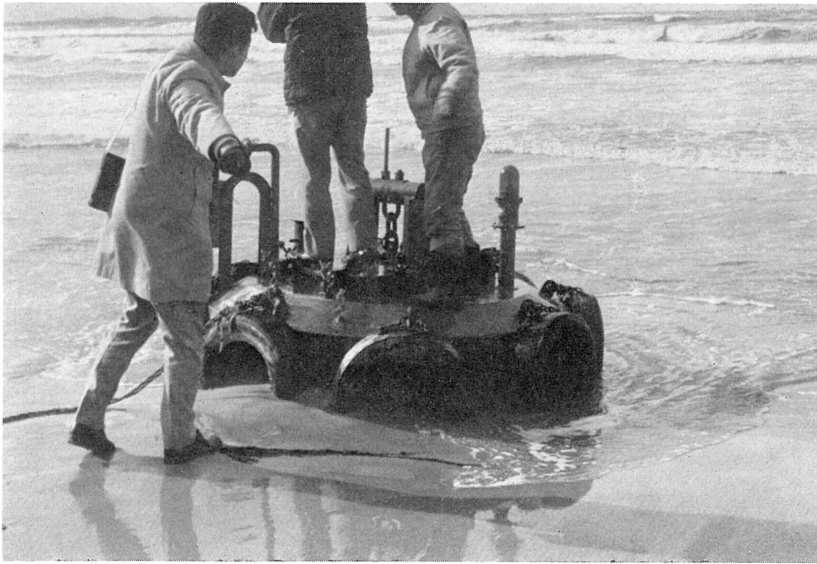


写真 5.6.1 実験所西方海岸に打ちあげられたパワーブイ (昭和 50 年 12 月 21 日)

12 月 25 日, 曇天, 北西の風が強く, うねりも大きい. 各シャックル部を点検する為, 北九州市よりダイバー 2 名を呼び寄せた. 漁船 (7 ton) を使用して全システムの総点検を行った. 図 5.6.1 に示すように全部で 9 枚のシャックルが用いられていた. 事故は No. 8 のシャックルピンがはずれたことによるものであることが確認された. また全シャックルについては別表 5.6.1 のような異常が認められたので, ピンが抜けないように針金を用いて補強をした.

12 月 26 日, 晴天, 風も強いだが波高約 1 m のうねりがあった. 再度, ダイバーによるシャックル

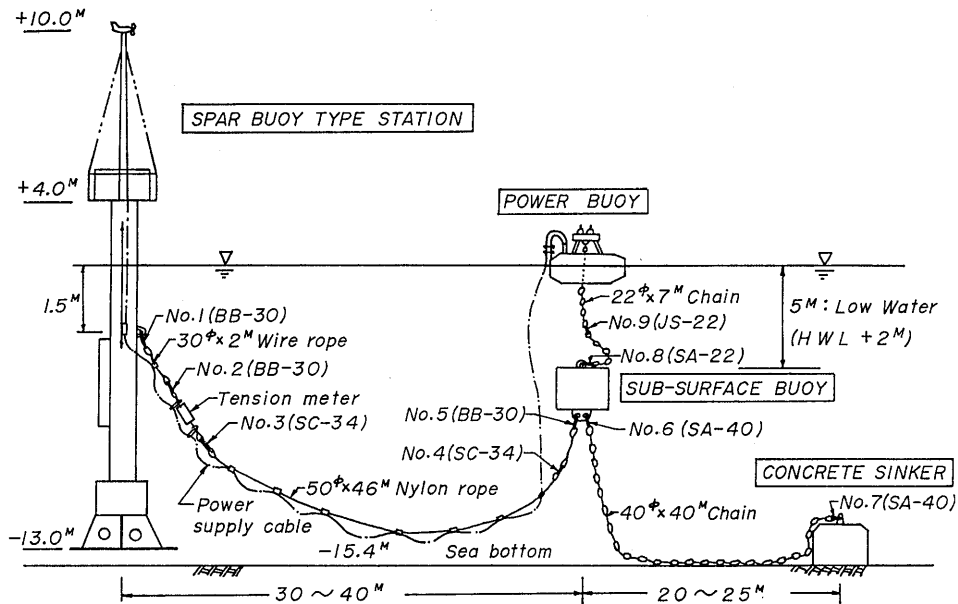


図 5.6.1 係留システム1 自昭和50年9月21日 至昭和51年6月3日

ピンの補強と、給電ケーブルの取りはずしを行うことともに、ステーション、中間ブイ等、各部の詳細な点検を行った。作業時の透明度は約10mであった。

シャックルピン脱落防止の為に補強工事について検討を行った結果、1ヶ月毎のダイバーによる点検を実施することにすれば、ここしばらくは針金の補強で十分であろうと判断した。尚シャックルピン脱落防止用補強工事、パワーブイ及び給電ケーブルの取付工事は3月に実施することにした。

昭和51年3月24日、ダイバー4名によって、パワーブイ係留システムの復元作業を行った。シャックルピンについては図5.6.2(b)のように保護プレートを溶接することにした。

5.6.2. 給電ケーブルの切断

昭和51年4月、ダイバーによる点検によって、パワーブイ及び中間ブイとの途中で、給電ケーブルのステンレスネットが長さ約50cmにわたって破損していることが発見された。この為、4月下旬長さ2mに亘って給電ケーブルにゴムホースを巻いて補強した。

昭和51年6月3日の点検によって、給電ケーブルはパワーブイ側から約8mの位置で切断し、ゴムホースは脱落し、なお切断箇所は長さ20cmにわたってケーブルの直径が規格より3mm程度小さくなっていることが発見された。これをまとめると

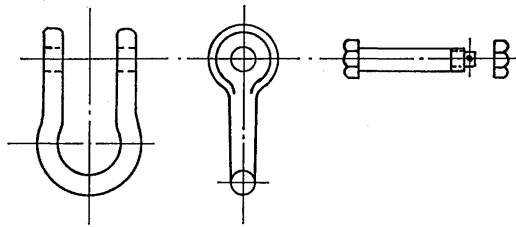
- i 切断箇所が中間ブイの上端付近である
- ii ケーブルの先端が細くなっている
- iii 補強用のゴムホースが脱落している

となる。これから切断箇所が何らかの理由で中間ブイにおしつけられ、さらにその箇所に大きな張力が

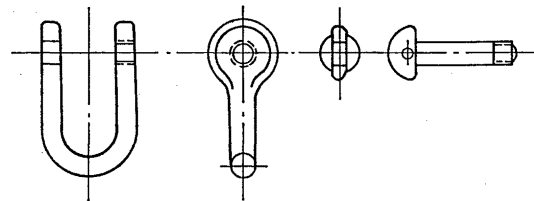
表 5.6.1. シャックルピンの異常とその応急補強策 昭和 50 年 12 月 26 日決定

シャックル 番 号	種 類	状 況	処 置	
			12 月 25 日	26 日
1	B B	ナットの緩みなし 割りピン正常	現状のまま	4 mm ϕ 針金を 2~3 重に巻いて補強する
2, 5	B B	ナットに若干の緩み あり割りピンは欠損	2 mm ϕ の針金を ナット部に巻く	同 上
3, 4	S C	ネジの緩みなし	念の為針金を巻く	同 上
6, 7	S A	異常なし		

BB Shackle



SC Shackle



SA Shackle

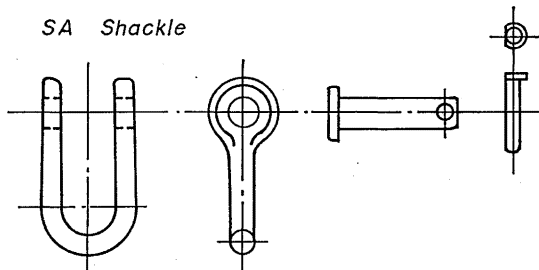


図 5.6.2 (a) シャックル

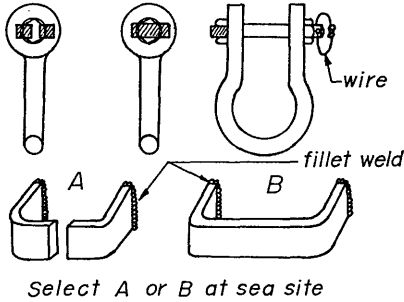
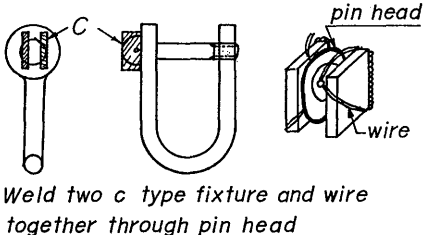
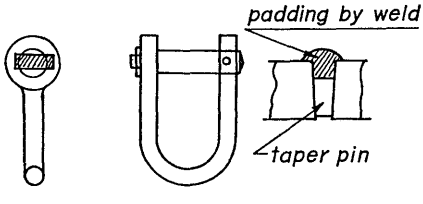
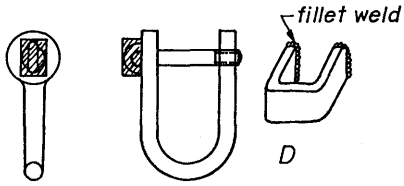
Shackle No.	Shackle Type	Fixture	Reinforced Mooring Shackle
1	BB-30	A or B	 fillet weld Select A or B at sea site
2	BB-30	A or B	
5	BB-30	A or B	
3	SC-34	C	 pin head wire Weld two c type fixture and wire together through pin head
4	SC-34	C	
6	SA-40	B	 padding by weld taper pin
7	SA-40	B	
8	SA-22	D	
9	JS-22	D	 fillet weld D

図 5.6.2 (b) シャックルピン脱落防止用補強

作用して切断したものと推定される。その原因として中間ブイとパワーブイの間で給電ケーブルが両者を連結する 22 mm 直径のチェーンに巻きついたことが考えられる。

昭和 50 年 12 月 21 日、シャックルピン No. 8 がはずれてパワーブイが流出した際に、パワーブイは給電ケーブルの残片 8.4 m を曳きずっていた。これも No. 8 のシャックルピンがはずれた後、給電ケーブルと中間ブイとがからみ、パワーブイの付近で切断したものと判断された。給電ケーブルの実測破断荷重は約 1100 kg であることから切断時に加わった張力の大きさが推定できる。

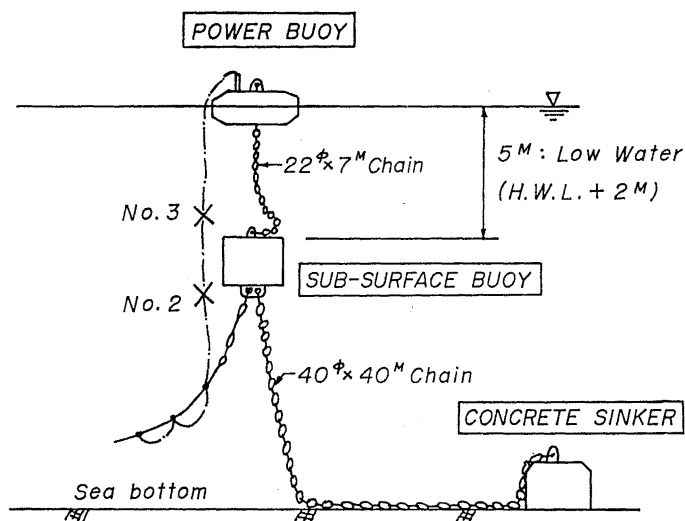


図 5.6.3 給電ケーブルの切断箇所

図 5.6.3 に昭和 50 年 12 月 21 日の事故 (No. 2) 及び 51 年 6 月 3 日発見された事故 (No. 3) の切断箇所を示す。既述のように何れも中間ブイの付近で切断されている。

以上 6 月 3 日 No. 3 の事故により、システムを抜本的に変更しない限り、給電ケーブルを単に新替しただけでは、再度断線するおそれがあると判断された。これにより給電ケーブルシステムは再検討することにして、残存ケーブルを取りはずした。

パワーブイは暴風時、ステーションが移動し、ナイロン・ロープに大きい張力が加わった際の中間ブイの沈下を防ぐ役目をもつので後述オーバーホール工事までこれは残すことにして、図 5.6.4 に示す状態で研究を続けることにした。したがって計測はステーション甲板上の電池ボックス内の電池によって行うこととなった。なお、この事故を機会に海上作業の安全のための規則、各種作業の手順及び全システムの保守、点検のマニュアルを検討した。又台風シーズンも近まったので、7 月にはステーションをはじめ全システムの詳細な点検並びに整備を行うことにした。

5.6.3. ステーションの漂流事故とその対策

1 オーバホール工事の計画

昭和 51 年 6 月 23 日、台風シーズンが近まったので、大楠助教授他、三井海洋開発 (株) の担当技師と打ち合わせ、7 月 25 日～31 日にかけて、以下に示す内容で浮遊式ステーション全システムのオーバーホール工事 (予算の範囲内) を実施することにした。

- 1) ステーションの点検と水面近くの付着物の揺落し、付着物はフジツボとカラス貝が主である。
- 2) 中間ブイの点検とカキ落し、更に端部にゴムを巻く。
- 3) 計算によればパワーブイが無い方がステーションの動揺性能が良くなるので、これを徹収し、給電ケーブル方式は取り止める。

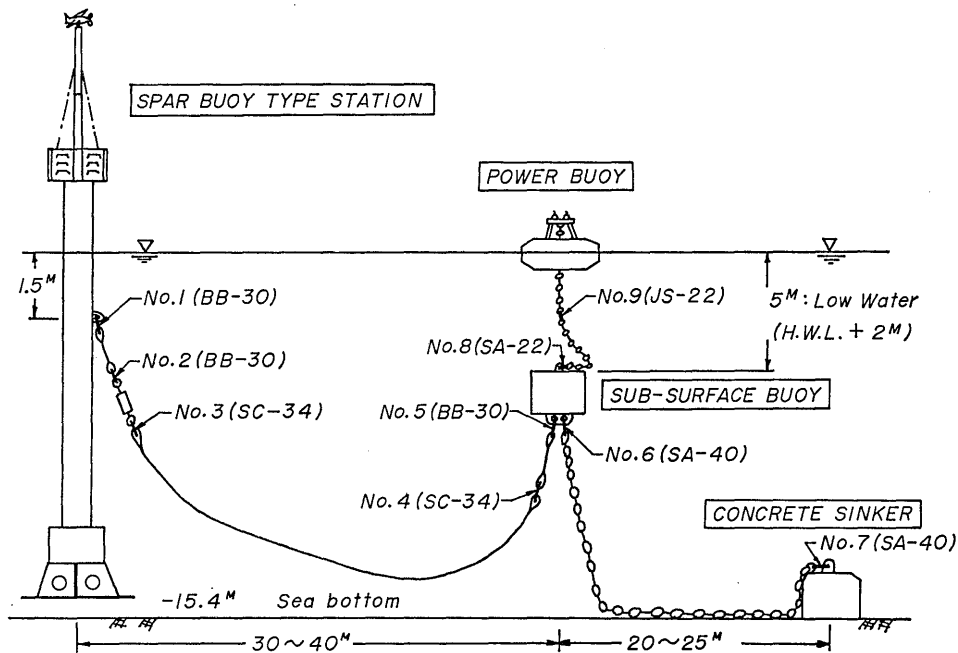


図 5.6.4 係留システム 2 自昭和 51 年 6 月 3 日 至昭和 51 年 7 月 27 日

4) 50 mm ナイロンロープ, 30 mm ワイヤロープ及びシャックルの新替.

5) 甲板上の計測用電池ボックスを新たに作る.

6) ペイント塗りかえ, その他.

以上のことを海上保安部に届け出て, 工事の準備を進めていた.

2 ステーションの流出事故

1) 7月22日午前7時すぎ, 海上保安部より「浮遊ステーションが大島近傍に漂流しているので処置するように」との電話があった.

2) 午前8時すぎ, 農学部水産実験所の古川船長運転の「わかすぎ」(15 ton) に研究所の富岡助手が便乗し, 津屋崎港を出港して現地に向った.

3) 8時30分, 福岡漁業組合の漁船をチャーターし, 大楠助教授, 安永技官, 安部事務官が便乗して現地に向った.

4) 10時頃, 三井海洋開発(株)が救援用の曳船を北九州市より出港させるよう手配した.

5) 10時30分頃, 「わかすぎ」は現地に到着した. ステーションは福岡県宗像郡大島の南東約800mの沖合, 水深約13mの海上に漂着し着座していた(図5.6.5). 「わかすぎ」はステーションをロープで引き起し, 曳航を開始した.

6) 11時頃, 漁船も到着し, 2隻で曳船した.

7) 午後1時, 「わかすぎ」と漁船の乗員への飲料水及び食料補給のため水産実験所の「いそしぎ」(1.5 ton) を使用して農学部中園助手を船長とし, 川建助教授, 小寺山助手(当時)及びダイバー 1

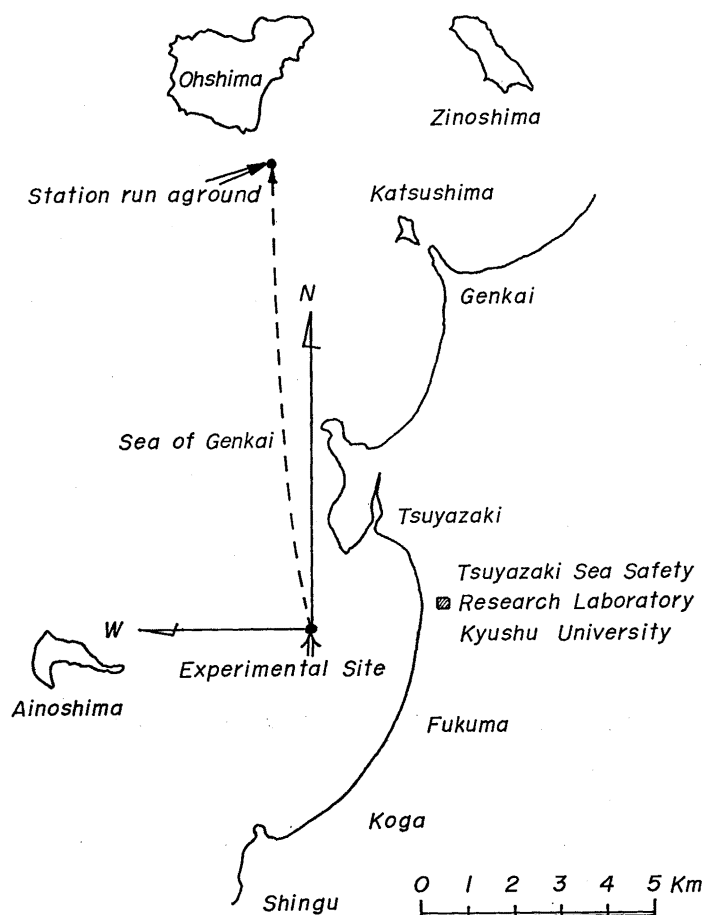


図 5.6.5 ステーションの漂着点

名が出港した。

8) 午後 1 時 45 分, 救援用曳船が小倉港を出発した。しかしこの曳船が現地に到着した時には, すでにステーションは津屋崎へ曳航された後であったため曳航作業には参加しなかった。後述 11)。

9) 午後 1 時 20 分, 「いそしぎ」は先発の「わかすぎ」及び漁船に出会った。昼食後「わかすぎ」には大楠助教授, 小寺山助手(当時)が, 漁船には川建助教授が夫々乗船し, 2 隻縦列でステーションを曳航した。なお, 福岡助手, 安永技官, 安部事務官は「いそしぎ」にて帰路につき午後 2 時すぎ, 津屋崎に帰着した。

10) 午後 4 時すぎ, 「わかすぎ」はステーションを曳航して帰着。直ちにパワーブイに仮係留した。ダイバーによる点検の結果, ステーションの漂流は係留用ナイロンロープの切断によるものであることが判った。詳しい調査は翌 23 日行うことを決めた。

11) 午後 5 時, 前記の曳船は津屋崎に到着したが, ステーションはすでに仮係留された後であったの

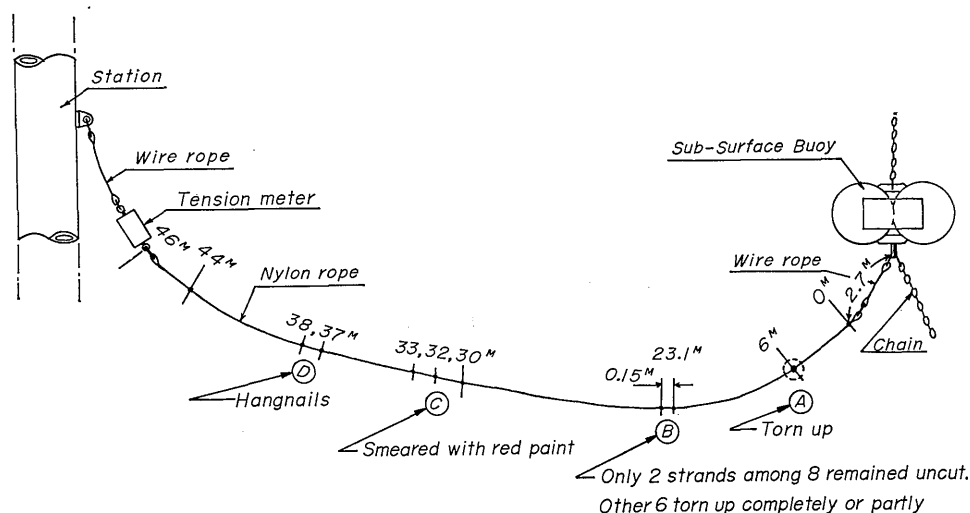


図 5.6.6 ナイロンロープの損傷箇所

で小倉への帰途についた。

12) 田才応研所長，栖原実験所長，光易臨時事業委員長は，古川船長，中園助手に救援活動の協力を謝礼をのべた。また，津屋崎及び福岡の漁業組合長に事故を説明し，定置網などには何等の異状をも与えなかったことを報告して了解を得た。

13) 翌 23 日午前中，田才，栖原，光易三教授は海上保安部に出頭して，事故の経過を報告し，ロープ切断の原因の究明とその対策の実施を約束した*。一方事故原因調査の為，同日午前中 ナイロンロープ引き揚げ作業に着手した。正午過ぎ津屋崎港に揚収，切断箇所等計測後，実験所へ運搬した。後スタッフにダイバーをまじえ，事故原因調査に入り，後述のような結論を得た。

14) 7 月 24 日，三井海洋開発（株）の五十嵐部長が来福し，今後の復旧工事の打合わせを行った。以上がステーション流出事故に関連した復旧作業及び事後処理のあらましである。

3 事故原因調査

7 月 23 日 ナイロンロープを引揚げ，事故原因の調査を行った。その結果を図 5.6.6 に示す。

図中 A は，ロープの切断箇所で，約 10 cm に亘ってひどく擦れた跡がある。中間ブイのアイプレートから約 8.7 m の位置である。またこれは平均海面から約 15 m に相当する位置になり，平均水深 16 m であることを考慮すると，この部分がシンカーにひっかかっていたものと推定される（写真 5.6.2 参照）。B 部はひどく擦れており，B 点を中心に 15 cm の間は，8 本の縊り糸（strand）の内，切断されていないものは僅か 2 本しかなかった（写真 5.6.3 参照）。C 部はステーションのアイプレートから約 15 m の位置にあり，赤い塗料が付着していた（写真 5.6.4 参照）。D 部はステーションのアイプレートから約 11 m の位置で，小さいさくれがあった（写真 5.6.5 参照）。

*同年 8 月 12 日光易教授，川建助教授，及び小寺山助手（当時）が海上保安部を訪れ，後述事故原因調査結果，対策，監視及び点検体制について報告した。



写真 5.6.2 (a) ナイロンロープ切断箇所



写真 5.6.2 (b) ナイロンロープ切断箇所



写真 5.6.3 ナイロンロープ損傷部 B



写真 5.6.4 ナイロンロープ損傷部 C

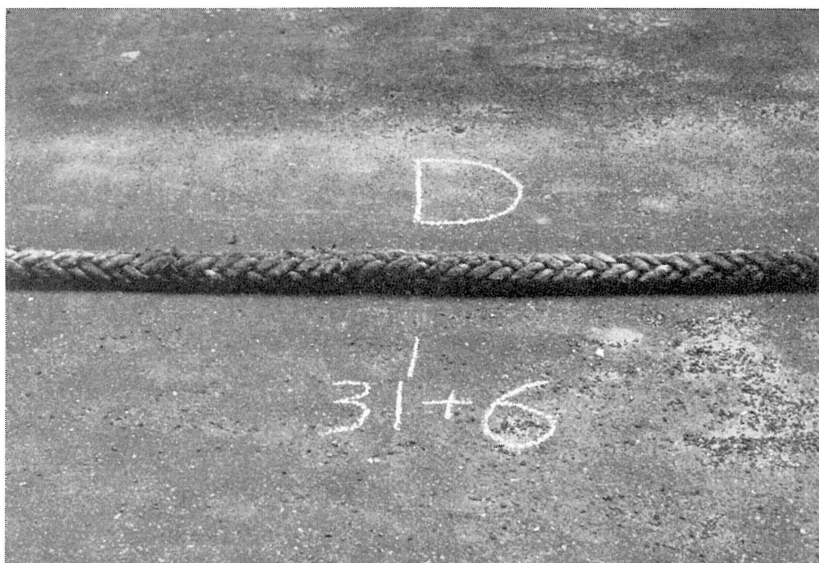


写真 5.6.5 ナイロンロープ損傷部 D

この結果、ナイロンロープがA部で切断され、ステーション長さ約 38 m の残存ロープを曳きづり乍ら漂流したことが判明した。シンカー (2.2 m×2.2 m×1.2 m) には、投入時既に、その一端に切り欠きがあった。ダイバーの点検により、その他にも小さな欠けがあること、及びロープが擦ったと見られる形跡のあることが明らかになった (写真 5.6.6 参照)。これらの諸点に立脚して、事故の原因を次の様に推定した。

1) A部でのロープの切断. 過ぐる 6 月 3 日の点検その他を総合すると、先ず平穏な海象時に、潮流によるステーションの移動に伴ってロープがシンカーを取り巻き、シンカーの欠けた部分に引っかかった。その後作用する波力等の外力の為にパワーブイ及び中間ブイが上下に揺れると共にステーションが移動し、ロープに張力が働く状態になった。すなわちロープはA点においてシンカーにより束縛された状態のまま張力を受け、この繰返しによりA点で切断された。

2) A～B間、平穏な海象時に垂れ下がり、潮流の為に海底で繰返し擦れていた。

3) B部でのロープ損傷が著しいのも、A部と同じ原因によるものと思われる。すなわち、ステーション本体に作用する荷重の為、ロープがシンカーにB部で束縛された状態になって張力を受けた。これが繰返され、B部の損傷は著しく、破断分離寸前の状態に至った。

4) ロープがステーション下部円盤フィンに接触し擦れた為、C部に赤ペンキが付着した。

5) ステーションのフーティング部にロープが接触し擦れた結果、D部にみられる様なささくれが生じた。

以上のように、ステーションの漂流はナイロンロープの切断によるものである。ロープがシンカーに巻き付いたまま張力を受けた為、波浪による負荷の繰返しにより、シンカー隅部に接触する箇所におい

て切断されたものであることが判明した。

ステーションは7月21日夜漂流し始めたと判断される。この時、通行船舶及び漁網へ損傷を与えなかったことは何よりであった。ステーション本体及び計測機器には異常なく、研究航行に何ら差支えないことが確認された。

5.6.4. 事故対策及びオーバーホール工事

この工事は、年度頭初に計画され、6月下旬には既に工事細目が決定されていた。前節に述べたように流出事故の発生を見たので、その対策を兼ねて若干の変更を行い、以下に述べるように実施した。

- 1 工事日 昭和51年7月27・28日
- 2 施工業者 三井海洋開発株式会社（現場担当 株式会社塩見組）
- 3 工事細目

1) パワーブイ撤去

これまでの給電ケーブルに関する事故（5.6.1参照）は、それが海中に垂れ下がっており、他の索類とからんだ等の為に生じたものと考えられる。それを完全に避ける為には、今後長期に亘って検討を続ける必要があるとの結論に到達した。結局、給電ケーブル方式は当分これを用いないこととした。なお、パワーブイが無い時は、有る時に比べて、ステーションの性能が良くなることは既に5.4.に示されている。

2) 中間ブイ点検及び作業

点検

- i) 40 mm ϕ シャックルの摩耗少なく且つピンの緩みなし、機能逐行上良好な状態にあった。
- ii) ムアリングアイ部等異常なし
- iii) 中間ブイ全般に貝類が付着していた。シンカーに繋がるチェーンの途中にある、スゥイベル部は、貝の付着により回転できなくなっていた。

作業

- i) カキ落とし（写真5.6.7）この結果、スゥイベル部は回転するようになった。
 - ii) ロープが角に触れても擦れないように、角口保護用ガス管（SGP-15）を熔接した。
 - iii) パワーブイを撤去したので、標識用ブイ（300 mm ϕ 球形）を取り付けた。
- ##### 3) 中間ブイとステーション間の繫留索等の取替等
- i) ナイロンロープ 50 mm ϕ 19 m 長。ロープが海底及びシンカーに触れないよう、これまで46 mであったものを19 m とした。このようにロープを短くしてもステーションの性能に大きな影響がないことは既に明らかにされていた（5.4.参照）。
 - ii) ワイヤロープ6号メッキ 30 mm ϕ 2 m 長2本
 - iii) テンションメータ 1 m 長。カキ落とし及び作動テスト（良好）。
 - iv) シャックル 金具を熔接して補強した（なお、揚船時の点検により、古いシャックルの水中溶接部はすべて良好な状態にあったことが確認された）

4) ステーション点検及び関連作業



写真 5.6.6 シンカー隅部 ナイロンロープにより擦った跡がある

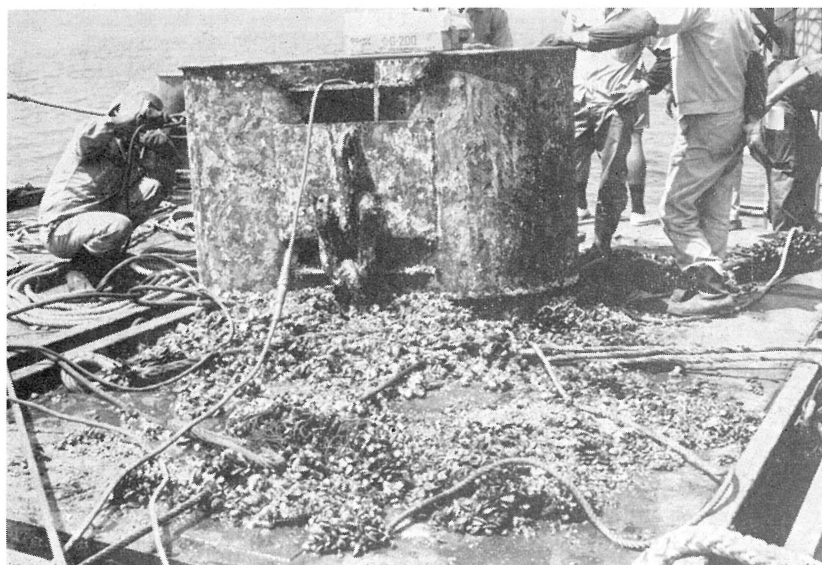


写真 5.6.7 カキ落としをした中間ブイ

- i) マスト支線締め直し及び取付部ボルト点検
- ii) 百葉箱の改善改装 (手直しの修理及びペンキ塗)
- iii) 波高計防護柵の変形部復旧
- iv) ムアリングアイ部の観察 良好
- v) スプラッシュゾーン附近の汚れ除去
- vi) カキ落とし
- vii) 遠くから識別可能なように、海面上 1.5m から上方、甲板までの部分をオレンジ色に塗り換えた。
- viii) ナイロンロープが円盤フィン (直径 4.5 m) の角で擦れないようにフィンの端部に散水用ゴムホース (直径 50 mm, 長さ 14 m) を巻き付けた。

5) ダイバーによる水中観察及び写真撮影

- i) シンカーフック部異常なし
- ii) 40 mm ϕ アンカーシャックルの摩耗及びピンの緩みは共に認められなかった。
- iii) テンションメータ保護の為 プイ本体に巻き付けたゴム板 異常なし
- iv) 円盤フィン, 斜めフィン共に異常なし
- v) 全般に異常なし

この工事の結果, 係留システムは図 5.6.7 に示すようになった。

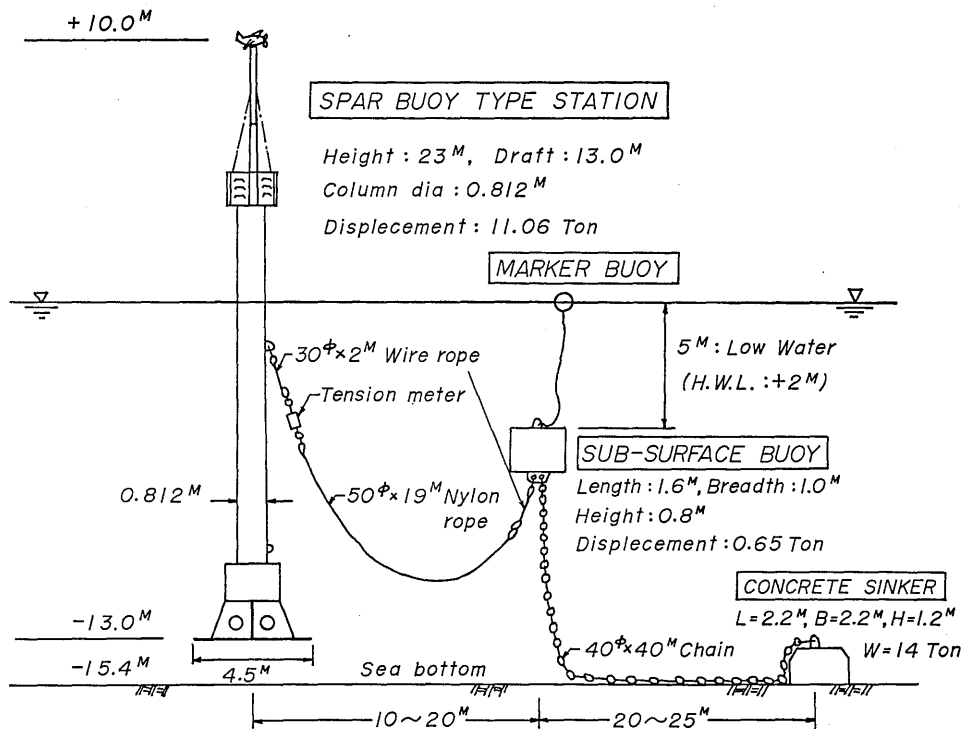


図 5.6.7 係留システム 3 自昭和 51 年 7 月 28 日 至現在

5.7. 監視及び点検

昭和 51 年 8 月以降, ステーションの流出防止と安全を保持するために, 常時監視態勢を整えると共に, 定期点検を行うことになった。以下, 実施マニュアルの一部を抜粋する。

5.7.1. 監視

- 1 毎日, 肉眼あるいは双眼鏡により陸上における所定の位置から監視する*。
- 2 視界不良の為, 陸上からの監視が不能な場合には, 状況に応じて船を出動し, 異常の有無を調べる。
- 3 異常事態が発見された場合は, 関連部署に連絡を行うと共に, 直ちに必要な措置をとる。

5.7.2. 点検

- 1 毎月 1 回, SCUBA ダイビング法により海中に入り浮遊式観測ステーションの海中部分における状況を点検する**。
- 2 点検は下記項目について行う
 - 1) アイプレート (本体及び中間ブイ)
摩耗及び変形の有無。
溶接箇所の異常の有無。
 - 2) シャックル (30 ϕ ×3, 38 ϕ ×2, 22 ϕ ×1, 20 ϕ ×1, 40 ϕ ×2)
ピンのゆるみ, 摩耗, 及び変形の有無。
ピンの脱落防止用金具の異常の有無。
 - 3) ワイヤロープ (30 mm ϕ ×2m×2)
腐食摩耗の有無。
シンブルの脱落, 摩耗, その他異常の有無。
 - 4) ナイロンロープ (50 mm ϕ ×19 m×1 本, 9 mm ϕ ×9 m×1 本) 摩耗, 亀裂の有無。
シンブルの脱落, 摩耗, 及びその他異常の有無。巻きつき, もつれの有無。
 - 5) チェイン (40 mm ϕ ×40 m×1 本)
摩耗, 及びスタッド脱落の有無。
スウィベルの作動確認。
 - 6) ステーション本体の海中部分の異常の有無。
 - 7) 中間ブイ

*昭和 51 年 9 月 12 日 (日) 夜から翌 13 日 (月) 午前中にかけて台風 17 号が福岡を直撃した時は (固定ステーションのデータによれば 10 分間の平均速度 20 m/s であった。) 大楠助教, 富岡助手, 安部事務官が実験所において徹夜で監視を続けた。このように台風時などには緊急体制をとり終日監視することになっている。

**昭和 51 年 8 月 31 日, 医学部付属病院集中治療部森田英生氏を招き, 海洋災害部全員が人工呼吸法の講習を受けた。翌昭和 51 年 9 月 1 日, 川建・小寺山各助教授及び田代・安永・田中各技官, 計 5 名が, SCUBA ダイビングの講習を受けた。これにより必要な場合には研究所自らの手によって直接点検することができるようになった。

変形の有無.

海底からの距離測定.

8) シンカーの異常の有無

3 以上の点検により異常が発見された場合には、直ちに適当な措置をとる.

4 必要と認められる場合は、定期点検以外にも随時実施する.

5 下記の予備品を備える.

クロスナイロンロープ (両端シンプル付) 50 mm ϕ ×13 m 1本

ワイヤロープ 30 mm ϕ ×2 m 2本

ナイロンロープ 20 mm ϕ ×100 m 1

ナイロンロープ 9 mm ϕ ×100 m 1

各種シャックル 1式

マーカースフィア 300 mm ϕ 球

5.7.3. 実施例

1 昭和52年1月6日18時、標識灯の閃光が弱くなっていることを荒川助手が発見した。7日、小寺山助教授・田代技官が「いそしぎ2世 (農学部中園助手運転)」にて現場に直行、調査の結果、湿気吸入過大の為、空湿電池10箇のうち4箇が、パンク寸前なることを見付けた。12日、小寺山助教授、長浜助手、田代・安永・稲田技官が、「わかすぎ (古川船長運転)」にてステーションに行き、空湿電池を乾電池と交換した。

2 SCUBA ダイビングにより昭和51年9月から現在昭和52年5月まで、月1回点検を行った。何れの場合も異状は認められなかった。

6. 計測データの処理及び解析

6.1. データ解析システム

すべての計測データは、2トラックのデジタル・カセットレコーダー (鶴見精機 MICRO-DAP-2000) を使用してカセットテープに密に記録されている。固定式海洋観測ステーション及び浮遊式海洋観測ステーションにはそれぞれ3台のカセットレコーダーが並列に使用されている。

カセットテープに記録されたすべてのデータは、専用のカセット解析装置 (鶴見精機 TS-9) を使用して、電子計算機 FACOM 230-48 で処理可能な形式のオープン磁気テープに変換される。現在使用している流向流速計 (鶴見精機 MTCM-3 および MTCM-5) の信号も類似のカセットテープに記録されているので、このカセット解析装置を使用してオープン磁気テープに変換することができる。このカセット解析装置の内部構成は図6.1.1に示したようなもので、各部の仕様は次のとおりである。

カセットテープリーダー：ダブルトラック

オープン磁気テープ装置：TEAC, MT8A 9トラック 800 BPI

ミニコンピューター：AICOM C-4, メモリー 4kw 12 bit/語

紙テープリーダー：USAC UTR-50 50文字/秒 タイプライター：ASR-33 (テレタイプ社製)

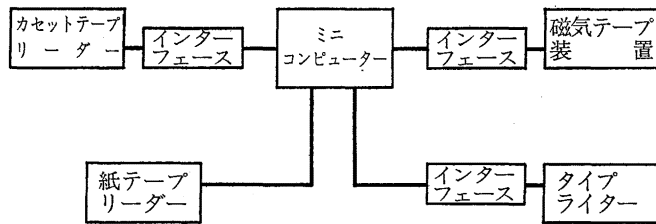


図 6.1.1 カセット解析装置ブロック図

(外部接続)

このカセット解析装置に対するプログラムはすべて紙テープを介して読み込ませる。現在次のようなプログラムを所有している。

- (1) カセットテープ (両ステーション及び MTCM-3, MTCM-5 の記録) をオープン磁気テープに変換
- (2) カセットテープ (両ステーション及び MTCM-3, MTCM-5 の記録) をタイプライターに出力する。
- (3) オープン磁気テープの内容をタイプライターに出力する。
- (4) バイナリー・ダンプ：オープン磁気テープの内容をチェックする。
- (5) ミニコン用ソフトウェア

オープン磁気テープに移し換えられたデータはすべて現在応用力学研究所が保有している電子計算機 FACOM 230-48 によって処理される。

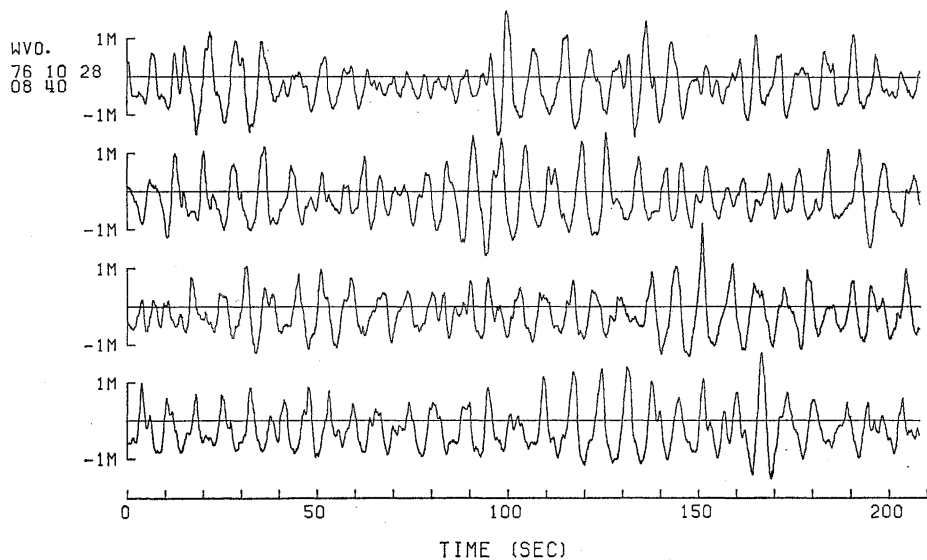


図 6.2.1 海洋波のデータ (1976 年 10 月 28 日・8 時 40 分)

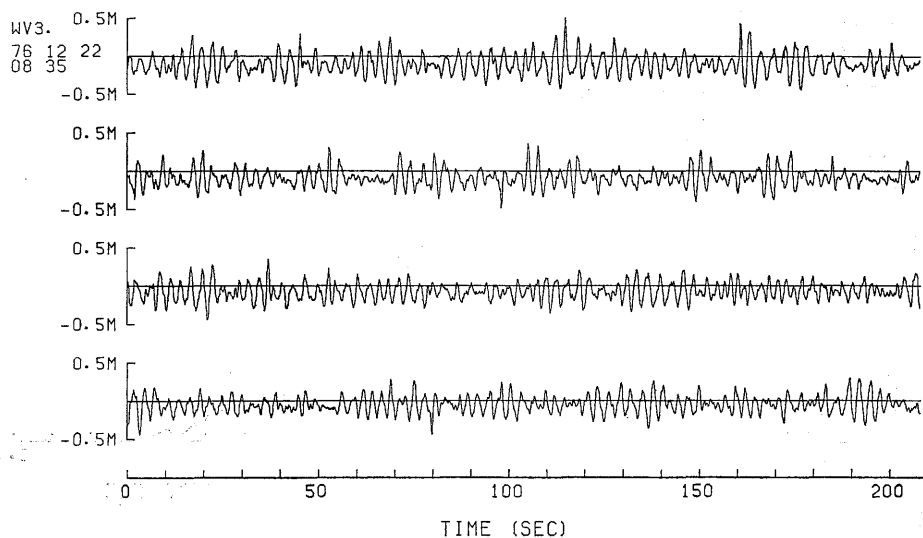


図 6.2.2 海洋波のデータ (1976年12月22日・8時35分)

6.2. 計測データ

図 6.2.1 及び図 6.2.2 は、固定ステーションで計測された波のデータを示したものである。この場合のデータ例についてその処理の流れを示すと次のようになる。波は容量型波高計で計測され、10 Hz のサンプリング周波数で A—D 変換されてディジタル・カセットレコーダーに記録された。カセットテープの内容は、カセット解析装置を使用してオープン磁気テープに移し換えられた。このオープン磁気テープの内容を計算機 FACOM 230-48 で処理して X—Y プロッターで図化したものが図 6.2.1 及び図 6.2.2 である。対応する波のパワースペクトルは図 6.2.3 及び図 6.2.4 に示されている。

図 6.2.3 は外海より来襲したうねりが卓越した場合の波のスペクトルに対応し、図 6.2.4 は局地風浪のスペクトルに対応する。

図 6.2.5 は浮遊ステーションで計測された波およびステーション本体の運動のデータである。ステーション本体の動揺特性ならびに本ステーションで計測された風および波のデータの動揺補正の方法などに関しては現在研究中である。

7. 結 語

7.1. 研究経過のまとめ

本研究が昭和 49 年 4 月に始められて、満 3 年を経過した。この期間における研究の経過をまとめておくと次の通りである。

昭和 49 年度には、浮遊式海洋観測ステーションの最適形状を決定するために、理論解析ならびに水槽実験が行われた。また、このステーションの係留法に関する検討も行われた。一方、昭和 50 年度より始まる浮遊式海洋観測ステーションに関する海上実験にそなえて、実験海域の設査、設計並びに同海

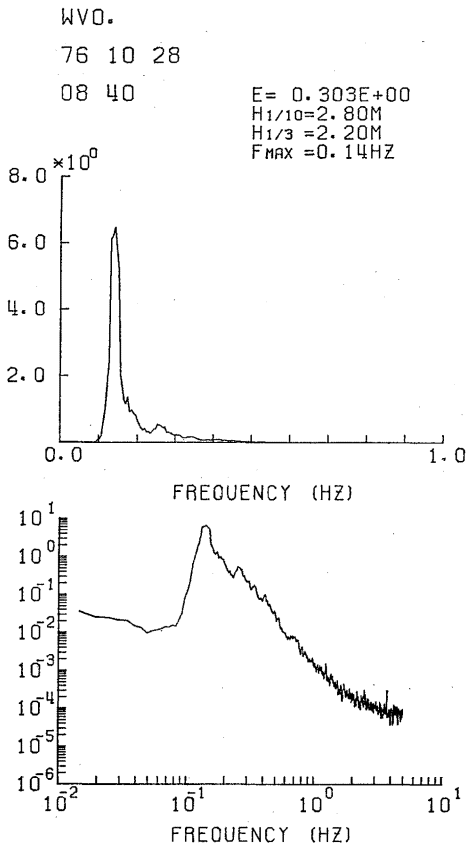


図 6.2.3 海洋波のスペクトル
(図 6.2.1 のデータに対応)

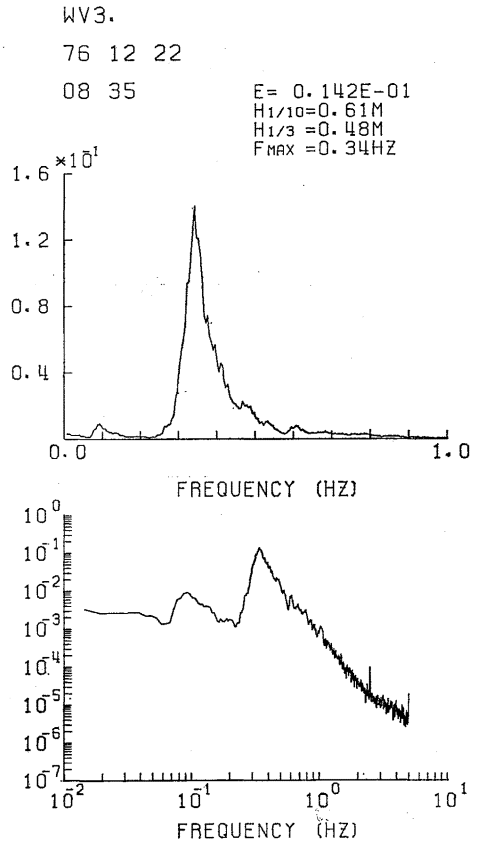


図 6.2.4 海洋波のスペクトル
(図 6.2.2 のデータに対応)

域への固定式海洋観測ステーションの設置が行われた。

昭和 50 年度には、浮遊式海洋観測ステーションが製作され、実験海域の固定式海洋観測ステーションに隣接した地点に設置された。そして、各種の計測システムが整備されて、海上実験が始まった。

昭和 51 年度には、固定式及び浮遊式の両ステーションにおける本格的な計測が行われた。また、昭和 51 年 10 月には、両ステーションを利用した沿岸部の気象・海象の計測と、観測船を利用した外海の気象・海象の観測とが同時に行われた。

7.2. 結論

研究は現在も継続中であるが、現在までに得られた主要な結論を列記すると次の通りである。

(i) 非常に精度の高い海洋観測を可能にする 1 点係留スパー型海洋観測ステーションの設計法が確立された。

(ii) 本設計法によって排水量約 11 ton のステーションを設計、建造し、水深 16 m の実験海域に設置した。海上実験の結果、浮遊ステーションが目標とする性能を十分に発揮し、全システムが完全に作動していることが確認された。

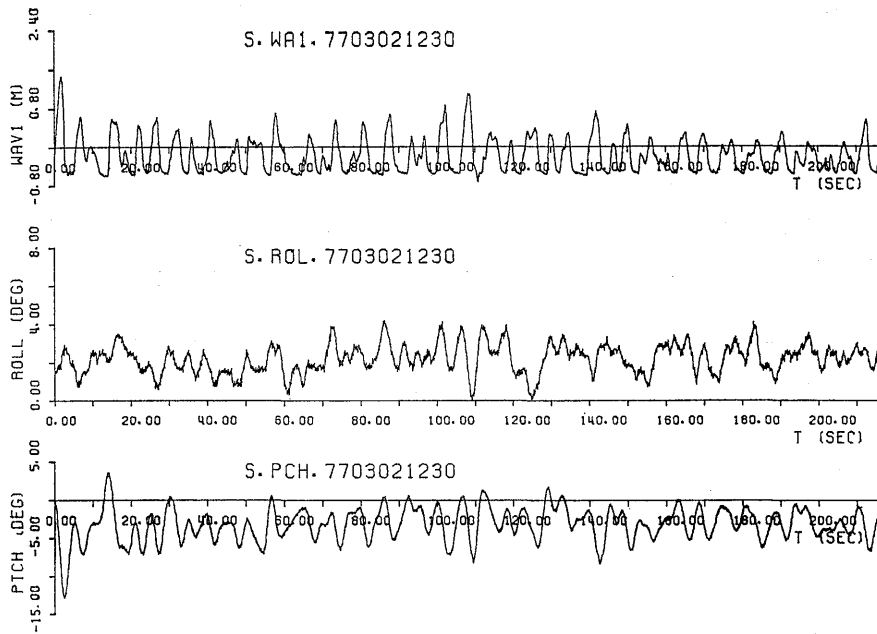


図 6.2.5 浮遊式ステーションの運動及び波のデータ (1977年3月2日12時30分)
(上より波, ステーションのローリングおよびピッチング)

(iii) 浮遊ステーションの設置後継続されている海上実験の結果, 海洋観測ステーションを構成する係留システムや計測システム等の要素技術に関しては, 多くの設計上の指針を得ることが出来た。

(iv) 固定ステーションにおける各種の計測も順調に進行している。ステーション本体の振動を計測した結果, その値が設計時に目標とした値に極めて良い一致を示すことがわかり, この種の海洋構造物の振動特性の計算法に関し新しい知見が得られた。

(v) 両ステーションにおける計測の結果, 台風時における波や海上風の構造, 冬期風浪の構造などに関して貴重なデータを得ることが出来た。これらのデータは, 今後詳細に解析され, 基礎研究並びに応用面において利用される予定である。

7.3. 今後の研究

海上実験で得られた各種のデータは現在解析中であるため本報告にはほとんど含まれていない。これらに関しては第2報で詳しく述べる予定である。

例えば, 固定ステーションに関しては, 計測データを解析して, 海上風の構造, 冬期風浪の特性, 円柱に作用する波力の特性, 附着生物その他の影響によるステーションの振動特性の変化などを明らかにしてゆく予定である。浮遊ステーションに関しては, 各種の計測量に対するステーションの動揺の補正に一つの重点がおかれるであろう。すなわち, 浮遊ステーションの動揺は極めて小さいので, このステーションで計測された風や波の測定値に対するステーションの動揺の影響は極めて小さいことが予想される。しかし, 更に測定値の精度を向上させるために, 固定ステーションで同時に計測された風及び波

のデータを基準として、浮遊ステーションで計測されたこれらの量の動揺補正を行う方法を研究してゆく予定である。これに関しても、第2報において述べる予定である。

謝 辞

この大型研究の内容は、極めて多岐にわたっているため、非常に多くの方々の助力を得た。まず最初に、この研究組織に参加して、研究の立案及び実施に際して貴重な意見をいただいた海洋流体力学部門の竹松正樹教授及び力石国男助教授、並びに海底土床力学部門の本地助教授に対し心より謝意を表する。

また、この研究組織に加わっている各研究部門の技官の諸君よりは全面的な協力を得た。すなわち、船舶安全性部門の稲田勝技官は、浮遊ステーションの計測システムの設計、整備並びに計測作業を担当し、安永誠技官は計測システムの設計、及び整備を援助するとともに計測データの解析のためのソフトウェアの開発を担当した。大型水槽所属の田代昭正技官は、浮遊ステーションのシステム設計並びに維持管理を担当し、耐波浪構造学部門の篠崎高茂技官は浮遊ステーションの維持管理並びに計測作業を担当した。一方沿岸海象力学部門の江藤賢次技官は、固定ステーションの計測システムの設計、整備並びに計測作業を担当し、田中道芳技官は計測作業の援助を行うとともに固定ステーションの全計測データの処理及び解析を担当した。弾性学部門の古賀洋治技官並びに塑性学部門の堤哲男技官は、固定ステーションに働く波圧の計測並びにステーション本体の振動の計測を担当した。海洋流体力学部門の北統夫技官は、固定及び浮遊の両ステーションの開発及び維持管理を担当した。更にまた、津屋崎海洋災害実験所の安部哲二事務官は、両ステーションの維持管理に協力した。この大型研究が順調に進行したのはこれらの技官の諸君の卓越した技術と全面的な協力のたまものである。ここに記して謝意を表する。

現地計測並びにステーションの維持管理に際しては、九州大学農学部水産実験所の調査艇「わかすぎ」及び「いそしぎ」をしばしば利用させていただいた。水産実験所長米康夫教授をはじめとして、中園明信助手、古川哲二船長並びに関係者の方々に対して心より謝意を表する。

一方、固定及び浮遊の両観測ステーションが設置されている実験海域は、沿岸漁場並びに漁場への通路にあたる。関連した漁業協同組合、すなわち、福岡、津屋崎、勝浦、神湊、大島、鐘崎、並びに地島の各漁業協同組合よりは心よく海域の使用に同意をいただいた。中でも、津屋崎漁業協同組合の組合長西地善蔵氏及び組合員の方々、並びに福岡漁業協同組合の組合長井原仙一郎氏及び組合員の方々には並々ならぬ協力を得た。ここに記して関連漁業協同組合の各位に謝意を表する次第である。

更に、この両ステーションの設置、維持及び管理に際しては、福岡海上保安部の関係者の方々、地元の津屋崎町の赤間誠町長をはじめとする関係者の方々、並に福岡町の井原元彦前町長及び的場重郎町長をはじめとする関係者の方々に色々協力を得た。心より謝意を表する。

また、本研究に対し、終始御援助を頂いている応用力学研究所の所員各位に厚く感謝する。本研究が文部省より臨時事業費の援助を受けて実施されたことを再記し、文部省、九州大学事務局並びに応用力学研究所事務室の関係各位に対し心より感謝する。

また、この研究の期間を通して、中村浩行君には各種の技術的援助を受けた。更に、本報告書の作成に際しては、北条万寿代、森田多美子、横林晴美、浦口信子、杉野尚子の諸君の援助を受けた。ここに、記して謝意を表する。

最後に、両ステーションの建造並びに極めて巧みな設置工事を行った三井海洋開発株式会社並びに両ステーションの計測システムの設計と製作を行った鶴見精機株式会社に対して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 光易恒, 田才福造, 栖原寿郎, 水野信二郎, 大楠丹, 本多忠夫, 力石国男, 高木幹雄, 肥山央, 海洋波の計測法の開発研究 (1). 九州大学応用力学研究所所報第 39 号. 1973, 105-181.
- 2) 光易恒, 田才福造, 栖原寿郎, 水野信二郎, 大楠丹, 本多忠夫, 力石国男, 海洋波の計測法の開発研究 (2) —海洋波の方向スペクトルについて—九州大学応用力学研究所所報. 第 40 号, 1973, 295-329.
- 3) Mitsuyasu, H., Tasai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T. and Rikishi, K.: Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Physical Oceanography, Vol. 5, No. 4, 1975, 750-760.
- 4) Wilson, B. W. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959, Dtsch. Hydrogr. Z. 18, 3, 1965, 114-130.
- 5) 合田良実, 海中構造物の設計波力について, 土木学会誌. 第 50 巻, 2 号, 1965, 57-61.
- 6) 土木学会編, 土木工学ハンドブック, 技報堂, 昭和 39 年, P. 2275.
- 7) 村山朔郎, 大崎順彦編, 基礎工学ハンドブック, 朝倉書店, 昭和 49 年, pp. 481-488.
- 8) 大崎順彦「鋼くい基礎」: 最近の基礎工法, 土木学会編, 1962, 8.
- 9) 河野幸男, ブイロボット 3 号機, 測候時報, 41・5, 1974.
- 10) 海洋開発辞典, 東洋経済新報社, 185-186 頁, 昭 46.
- 11) 海洋開発機器, 日本舶用機器開発協会, Vol. 6, No. 3, 1974.
- 12) 田才福造, 波浪に対する浮遊構造物の動的応答, 第 1 回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 昭 49/11.
- 13) 小寺山亘, 動揺する没水円盤に働く流体力について. 九州大学応用力学研究所所報, 第 45 号, 昭 51/11.
- 14) Morison, J. R., et. al, The forces exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans., Vol. 189, 1950.
- 15) Thwaites, B. Incompressible Aerodynamics, Oxford at the Clarendon Press, 1960.

(昭和 52 年 6 月 14 日 受理)