

海洋バイオマス農場の一設計考察

東海大学海洋学部 正会員 長 崎 作 治

1. 概要

近年、石油代替エネルギー開発の一環として我が国においても、原子力、石炭、天然ガスはもとより核融合、太陽エネルギー、地熱エネルギー、水素エネルギー、バイオマスエネルギー、風力、波力、海洋温度差、海流・発電などの研究・開発が進められている。このうち、バイオマスについては、サトウキビなどの陸性植物を原料としてアルコールが生産され、ブラジル等では既に自動車用燃料として実用に供されている。

バイオマスの利用を我が国にあてはめてみると、四面を海に囲まれ、広大な海域を有していること、古くからコンブ、ノリ等の海藻を食してきたため、その栽培、利用技術についての基礎があることなどの理由により、海藻すなわち海洋バイオマスの利用が考えられている。この海洋バイオマス資源の大量生産、利用システムの概念は、海藻を大量栽培生産し、収穫、貯蔵、発酵させ、エネルギーに転換するというものである。なお、副産品の回収、海藻に集まってくる魚類の収穫なども期待できる。

この海洋バイオマス農場の構想は米国が最も古く、1973年から実験を行なっている。我が国でも、エネルギーとしての利用の観点から通商産業省資源エネルギー庁が所要の調査研究を進めている。

本文は1980年9月、米国エネルギー省の海洋バイオマス農場によるエネルギー資源の開発について、昭和59年3月、海洋バイオマスによる燃料油生産に関する調査成果報告書（日本海洋開発産業協会、エンジニアリング振興協会、発酵工業協会）を参考にして、海洋バイオマス農場の設計考察を述べるとともに基礎的なユニット農場の収穫時の安定実験などを行ったので、その内容を紹介するものである。

設計・施工・維持面で海洋農場は問題点が多いが、一つ一つ解決してゆくことによって実現されるものと思う。

2. 米国における海洋バイオマス農場

2・1 バイオマス農場の構想

海洋バイオマス農場計画は、ナンジエゴにある Naval Under-sea Center（現在 Naval Ocean System Center）の H. A. Wilcox の構想から出発し、エネルギー省などの政府機関およびガス協会の出資を得て始められたプロジェクトである。

構想は、生育が早く収穫の容易な種類の海藻を連続して外洋または沿岸の生育場で栽培し、これらの苗を10万エーカー（20 km × 20 km）程度の面積をもつ外洋の海面下12～24 mの所に設置した支持構造物に移植し栽培する。海藻は水深300 m程度の深層水を汲み上げて栄養分の補給と温度調節を行う。もし、その他の栄養が必要な場合は外から補給する。収穫された海藻は、加工設備によって年間メタン約40万 tonのほか、化学薬品、肥料、飼料などに変換する。なお、海藻に付着している魚類も収穫し、流通経路に乗せて販売する。

2・2 農場の要素

(1) 海藻

栽培対象候補の海藻の中から生育の速い図-2・1のジャイアントケルプ（*Macrocystis pyrifera*）が海洋農場の対象種として選ばれた。1日に50～60 cm成長し、60 mの長さにも達する。これを3ヶ月に1回程度収穫する。

(2) 栽培施設

構想では、海面下12～25 mに設けた網目構造物に海藻を適当な間隔で網目に取り付ける。深層水を汲み上げる電源は波力発電か風力発電を利用する。

(3) 海藻の収穫

海藻の収穫は農場の上を移動して海藻の葉状体の上部を切り取る収穫船で行い、加工プラントまで運搬する。

(4) 製品への変換

海藻からはメタンを主製品として生産するが、肥料、飼料、エタノール、化学薬品なども生産可能である。遠隔農場の場合、海洋プラントホームに全処理システムを設備する。

(5) 魚類の養殖

海藻は魚類の生息地となり、深層水の汲み上げが栄養源となってプランクトンが繁殖するので魚類の成育が期待できる。

2・3 確認実験農場

バイオマス農場計画は3段階に分けて実施することとして。1973～1982年の10年間を概念の確認、1983～1987年の5年間をプロセスの開発、1988～1992年の5年間を商業化の期間としている。

第一段階ではジャイアントケルプの生産性、施肥の研究、農場の技術開発、ガス生産技術の確立を行い、第二段階でパイロットテストとして500～1000エーカー ($1.4 \times 1.4 \sim 2 \times 2 \text{ km}^2$)の農場総合開発、そして最後に10万エーカー ($20 \times 20 \text{ km}^2$)の商業化を行う。研究・開発の体制を図-2・2に示す。

海藻栽培の目標としては乾燥重量当り 20 kg/m^2 /年の収穫量がなければ現在の天然ガスより経済的に劣るので、このことが農場の第一条件となっている。水温の生育に及ぼす影響は大きく南カリフォルニア産ジャイアントケルプの場合、最適温度は $10 \sim 15^\circ \text{C}$ であるがメキシコ海域の温帯では 26°C でも生存をつづけている。

海流は栄養源の供給や排泄物の放出等物質移動を促進し、成長を助ける。その最適な潮流は海藻によって異なるが $0.5 \sim 3$ ノットである。

ジャイアントケルプの場合、早い海流によって図-2・1の付着器Aが引き裂かれた例があるが保着器の保持力は20mの海底で 27 kg 以上といわれている。ケルプの移植は海水袋にに入れて移植箇所まで運搬し、そこで移植ケルプを固形物にしばりつけて固着させ、その後ケルプは付着器を出して着床し海面に向かって成長する。

1974年春、NorthとWilcoxは図-2・3に示す人工筏などでケルプの栽培実験をカリフォルニア海岸沖4ヶ所で行った。サクラメントの筏は1975年1月に船のプロペラによって、またShip Rockの筏は台風によって破損した。

ただCrystal Cove (水深46.5m) 海域での実験のみ障害なく行われた。これらの実験から海洋筏による増殖生産と生物学的問題の評価および収穫量、環境に応じた成長度を予測する数学的モデルが開発された。

1978年9月から2ヶ年間、カリフォルニアのCorona Der Marの沖合4マイルに、アメリカガス協会がスポンサーでGeneral Electricの管理による、 4000 m^2 (1エーカー) のバイオマス実験農場が設置された。

ケルプを保持する構造体と係留に関することはGroval Marine Developmentが実施した。アンブレラ型の構造体 (平面) を図-2・4に示す。ケルプの付着器が水深20mに位置するように設計され、設置水深は500m、海面下300mの深層水をポンプで揚水する構造で、設計波高は12m、潮流速は1.5ノットである。実験海域の特性を表-2・1に示す。

2・4 100,000エーカー ($20 \times 20 \text{ km}^2$) バイオマス農場構造体の設計

農場は海藻支持構造体、深層水吸上げシステムをして位置制御システムの三部分からなる。1976年、Integrated Science Co. が設計した100,000エーカー農場は、カリフォルニア南部沖合100海里、 $20 \times 20 \text{ km}^2$ の海域で水深90mから海水を吸い上げ、ケルプは水深30mに位置づけた支持構造体は図-2・5に示されるように一辺300mの三角形モジュールで1モジュール10エーカー ($40,000 \text{ m}^2$) の面積をもち、このモジュールを10,000個組合わせて100,000エーカーとする。

刈取船の吃水深、海象条件、ケルプの生長から構造体を海面下30mに位置づけ、三角形の三辺に30m間隔で直径20～40cmの小型ブイを、また三角形の頂点に、特殊ブイを取り付け、ケルプは3m間隔の網目状の網に取付けた直径15cmのボールに植付ける。なお、網の直径は $1/4 \text{ inch}$ 、ポリプロ製とする。ケルプは増殖され最終的には 9 m^2 当り1本となる。

水深90mから栄養塩を含んだ海水を汲み上げるために、モジュールの各コーナーにポンプ3台を設置する。深層水の硝酸塩濃度は $25 \sim 40 \mu \text{g-atom/l}$ で、農場全体を $3 \sim 5 \mu \text{g-atom/l}$ とするには1日、 1 m^2 当り 1.5 m^3 の揚水が必要となる。電源は平均波高0.6m、周期5secの波力発電による。

吸上げパイプは直径1.2m、長さ90m、鉄筋コンクリート製で、分散用の排出パイプはPVC製で長さ30mとする。なお、波浪が小さいときは位置制御用の動力も使えるようにする。浮体構造の位置制御はダイナミックポジショニングシステムにより、平均潮流0.3ノット、最大1ノットに対し、スクリューによる推進機をモジュールの三角形の各頂点に設置し、1エーカー当り2.3HPのディーゼルマリーンエンジンによって駆動させ、網の間隔を保持する。

3. 我が国における海洋バイオマス農場の設計考察

3・1 海藻

米国の海洋バイオマスの燃料回収を目的とした研究・実験では、まず海藻の年間生産量 500 ton湿重/ha ($50 \text{ kg/m}^2/\text{年}$) を実証すること、海藻の生育に必要な栄養塩量を明確にすることが先決問題となった。

日本の沿岸で、燃料生産を目的とする海藻の大量栽培を行う場合、海藻としてはコンブ類（コンブ科、アイヌワカメ科の海藻）、ホンダワラ類（ホンダワラ科の海藻）およびアオサ（アオサ科の海藻）が有力であるが、設計ではマコンブについて行い、他はこれと比較することとした。

3・2 農場の概念設計条件

概念設計では、面積は $10 \sim 100 \text{ km}^2$ 、離岸距離 10 km 、水深については、できるだけ浅く容易な係留から $50 \sim 100 \text{ m}$ 、対象地盤は砂とした。これより施設面積は約 40 km^2 ($5 \text{ km} \times 8 \text{ km}$)、設置方向は長手方向を海流に垂直、陸岸に対しほぼ直角とする。

実質栽培面積は約 23 km^2 、海藻の年間収穫量を 50 kg湿重/m^2 、全体で 10^6 ton湿重 と仮定した。全収穫量 10^6 ton湿重 は回収されるメタン量を次式から推算し、メタン量 10^4 ton の生産を目標としたものである。

$$\begin{aligned} & \text{海藻重量} \times 0.12 (\text{固形分含有率}) \times 2.650 (\text{固形分発熱量 kcal/kg}) \times 0.6 (\text{回収率}) \\ &= 13,300 (\text{メタン発熱量 kcal/kg}) \\ & \approx 1.4 \times 10^4 \text{ ton (メタン)} \end{aligned}$$

栽培場の基本構造は、柔構造の浮き棚をアンカーで係留する方式で、養殖網を取り付ける幹網を水深 5 m の所に設置し、養殖網は幹網から垂下し、下端に沈子を取り付け、沈子から再び幹網に向うノレン方式とする。 2.5 m 間隔に張られた幹網に 2.5 m 間隔で (6 m , 6 m) のV型養殖網ノレンを垂下し、これで海藻を成長させる。

なお種苗の移植は9月中旬から翌年1月中旬までの4ヶ月間、栽培期間は6～9ヶ月間、収穫は3月初旬から10月末までの8ヶ月間とする。施肥は底層水の栄養塩を利用できるよう湧昇装置を設置する。

3・3 海藻栽培施設

栽培施設は、海藻の幼体を付着させた養殖網を取り付ける幹網、連結網、支持網とそれらを設定水深 5 m 位置で海面と平行に展張保持するための支持構造部とからなる。

幹網は潮流に平行で長さ 980 m 、 12.5 m 間隔で取り付け、一ユニット ($980 \text{ m} \times 850 \text{ m}$) 当りの総数は69本、直径 60 mm 、比重 0.91 、強度 36.2 ton のポリプロピレン製のロープを使用し、両端は幹網と同一寸法の係留索によって、水中重量 94 ton (69 m^3) のコンクリートブロックにアンカーする。支持網は波向に平行に 5 m 間隔で取り付け、支持網間には連結網がある。支持網の両端は係留索によって水中重量 17.8 ton (13 m^3) のコンクリートブロックにアンカーする。支持網、連結網の長さは 850 m 、一ユニット当り、それぞれ197本、196本使用し、直径 16 mm 、比重 0.91 、強度 3.4 ton のポリプロピレン製のロープである。係留索は直径 26 mm 、比重 0.91 、強度 7.4 ton/本 を使用する。

支持網と幹網の交差部には直径 4 mm 、比重 0.91 、強度 220 kg/本 の吊網が取り付けられ、浮力 140 kg (ポリエチレン製) の浮子によって吊り下げられる。

浮子間の展張保持はそれぞれの係留索、アンカーの張力によって行う。

なお、浮子は所定の浮力を有し、幹網方向に 5 m 、支持網方向に 12.5 m 間隔で、吊網を介して取り付け、 580 ton の収穫船の乗り入れを考慮して配置したが、一ユニットあたりの総数は13,593個となる。

栽培施設の概念図を図-3・1、平面図を図-3・2、立面図を図-3・3に示す。

3・4 海象その他設計条件

(1) 海象条件

施設に作用する潮流力、波力は次の海象条件によった。

水深 $h = 70 \text{ m}$ 、設置水深 $Z = -5 \text{ m}$ 、波高 $H = 6 \text{ m}$ 、周期 $T = 12 \text{ sec}$ 、波長 $L = 217 \text{ m}$ 、潮流 $V_0 = 0.514 \text{ m/sec}$ とし、コンブの着生した養殖網に作用する流体力は供試コンブ群重量 34.6 kg/m を使用し、図-3・4に示されるように流向 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ とかえた流水抵抗力を実測し、養殖網垂下モデルを図-3・5のように想定し、これに流水が作用すると、コンブは流水の方向になびくので、その作用力は $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ の測定値の平均値と考え、次式から算定することにした。

$$F = (F_{0^\circ} + F_{90^\circ}) / 2 = 9 V^{1.4}$$

(2) 海藻の水中重量

海藻の水中重量は海藻の比重 1.06 、海水比重 1.025 、成長コンブ重量 45 kg/m^2 から 1.575 kg/m^2 と仮定した。

(3) 施肥施設

施肥施設は湧昇装置による方法と栄養塩散布による方法を検討したが、海底に設置する湧昇装置で栄養塩が補給できることから次のような基本設計が示された。

ユニット湧昇装置を図-3・6，ユニット栽培場における湧昇装置の配置を図-3・7，海藻栽培場における全体湧昇装置の配置を図-3・8に示す。

a. ユニット湧昇装置の設計仕様

フローティングシートの寸法は長さ170m，高さ24m（有効高さ20m）で，強度 300 kg/3cm^2 ，比重1.14，単位重量 3 kg/m^2 のナイロン帯ビニールシート被覆（補強格子 $1\times 1\text{ m}$ ）を用いる。アンカーはコンクリートブロック2.2tonを2個，シンカー（沈子）は1m間隔でコンクリート重量35kgを171個，浮子は1m間隔で，水深70mの耐圧と 30.3 kg/m の必要浮力に対し，直径39cmのABS樹脂製中通し型を171個，シート外面の補強綱は浮力を考慮し，直径20mmのポリプロピレン製ロープを，係留索は直径28mmのナイロン製日付ロープを使用する。

b. 配置計画

ユニット栽培場の計画寸法は幅850m，長さ980mである。ユニット湧昇装置の長さは170mであるから，ユニット栽培場当り5基のユニット湧昇装置が必要となる。

設置位置はユニット栽培場入口部より100m下流位置で，流水に直角に配置する。

なお，ロープの伸びによる湾曲をみて，20m間隔の千鳥配列とする。

栽培場全体に対しては一列の湧昇装置で2基のユニット栽培場をまかなうものとし，流れ方向の一列目と三列目のユニット栽培場合計14基に対して湧昇装置を配置するので，14基 $\times$ 5 計70個が必要となる。

4. テンションレグユニット農場の海藻収穫時の安定性モデル実験

4.1 目的

海中に係留されたユニット農場の安定かつ経済的な係留設計を行うため，ユニット農場が不安定となる収穫時の運動，係留力を把握することを目的としたモデル実験を行った。ユニット農場は柔構造で200～400本のテンションレグによって係留されているが，モデルでは多数のレグによって準固定されていると解し，農場を剛体とみなして6本のテンションレグで係留した。したがってモデルの1本のレグは実際では33～66本分に相当することとなる。モデル縮尺1/150の海藻部分の相似は，海藻部を不透過性と考え，比重1を保つようにした。作用波力は実際よりかなり大きく，また運動も大きくなるが，設計の手がかりが得られることを期待して実験を行った。モデルを入射波に対して，ヘッドシー（head sea），ビームシー（beam sea），収穫率は100%50%，0%とし，50%については，モデルの前後，中央，片側の3ケースの収穫状態を考え，係留索張力，ピッチング，ヒーピング，サージングを測定し，収穫時の安定性を検討した。

(1) 実験方法

大型平面水槽を用い，図-4・1の1/150モデルを水深53cmに対し，テンションレグ6点係留により水面下6.7cmに位置づけ，表-4・1の作用波浪にもとづき，表-4・2の収穫率・波向について，浮体の運動と図-4・2の係留索張力を測定した。係留索の変動張力は索下部に取り付けたリングストレインゲージで，浮体の運動はモデルに取り付けた三成分運動測定装置により計測した。

(2) 実験結果

係留索の初期張力を T_0 ，各係留索の変動張力を $T_u\sim T_e$ ，サージングの場合，計測振幅 $1/2$ 波高（ X/H ），ヒーピングの場合，モデルがテンション係留されているのでマイナス量の計測振幅 $1/2$ 波高（ $2Z/H$ ），ピッチングの場合，読み取り振幅をラジアン単位にし，水深/波高（ h/H ）を掛け， $\theta\pi h/180H$ で示した。

ヘッドシー（HS），ビームシー（BS）における運動，索張力の最大値を示すと次の通りである。

< HS に関して >		(モデル)	(実機)
・運動	サージング	$= 1.71\text{ cm}$	(2.57m)
	ヒーピング	$= 0.06\text{ cm}$	(0.09m)
	ピッチング	$= 0.37^\circ$	(0.37°)
・索張力	係留索1本平均		
	変動索張力	$= 3.4\text{ kg}$	(11,500ton)
	初期索張力	$= 8.6\text{ kg}$	(29,000ton)
・参考：索張力	実機テンションレグ200本と仮定した時，1本平均		
	変動索張力	$=$	(345ton)
	初期索張力	$=$	(870ton)

<BS に関して>

- ・運動・・・・・・サージング=2.65 cm (3.98 m)
ヒーピング=0.41 cm (0.62 m)
ピッチング=0.44° (0.44°)
- ・索張力・・・・・・係留索1本平均
変動索張力=8.6 kg (29,000 ton)
初期索張力=8.7 kg (29,400 ton)

本実験は、農場を剛体、海藻部を不透透性平板としたため、モデルの浮力が実際よりも大きくなり、係留索の初期張力も大きく、また収穫率も50%と問題点が多いが、一応収穫時の農場の安定性を保つためには、波向はヘッドシーの方向から、農場の両端から収穫し、常に浮体が対称となるようにすることが望ましい。

5. 懸垂型海藻に作用する波力(実験)

5.1 目的

海洋バイオマス農場はユニット構造体とそれに付着した海藻というまったく異質の組合せからなり、しかも海藻の成長、収穫により海藻の状態が異なり、ユニット農場全体の波浪、潮流による運動特性、作用力を算定することは難しい。この問題を解決するための第一歩として海藻一枚に作用する波力を二次元水槽で実測したので御報告する。

5.2 実験方法

実験は長さ38m、幅1m、深さ0.6mの両面ガラス張り二次元造波水路を用い、水深は0.4mとした。波高、波力の測定はそれぞれ容量式波高計、I型アームに貼付したストレーンゲージを用いてペン書きオシログラフに記録させた(波力はアームに生じたひずみ)。また、同時に連続写真撮影によって海藻の運動も解析した。なお、計画波浪諸元は波高4, 8, 10cm、周期1, 1.5, 2 secで、海藻にコケムシが付着した場合と除去した場合の合計18ケースである。

5.3 実験結果

実験に使用した海藻は、実験水槽の都合から成長したマコンブを根元から40cmの長さに切りとったもので、表面積は約1.120cm²あり、またその75%にコケムシが付着している。コンブの重量は、実験前(コケムシ有り)192g、実験後(コケムシ除去)235gで、コケムシを取り除いたのに重量が増加しているのは、コンブの成分であるアルギン酸のナトリウム塩が水を吸収したためと思われる。

図-5.1の抗力 $D(3\pi/2)$ 、質量力 $M(\pi)$ は波形の位相 $3\pi/2, \pi$ の位置における波力を示したものである。

コケムシ有り $D(3\pi/2)$ の周期1.5 sec, 2.0 secについては計測値3点がほぼ直線上に並び、この3点を結ぶ線は(注)の円形柱体波圧理論にて、海藻実測表面積1.120cm²を換算円柱表面積1.130cm²に相対する直径9cm, $C_D=1$ の円柱について円形柱体波圧理論値とほぼ一致した。また $M(\pi)$ についても全周期において3点が直線上に並び理論値に近い値を示した(ただし、周期1, 1.5 secのとき $C_M=0.33$, 2.0 secのとき $C_M=0.6$ とする)。

コケムシ除去の場合、 $D(3\pi/2)$ は、周期1 secでは波高に比例して作用波力は増加するが、周期1.5, 2 secでは波高に反比例して波力は小さくなり、周期1.5 sec、波高10cmにおいて作用波力の方向が反対になった。

コケムシ除去の波力はコケムシ有りの波力の1/2以下であることから海藻に生物が付着しないようにすることが望ましい。

$M(\pi)$ についても、周期1.5, 2 secで、作用波力の方向が逆になっている。このことは、周期による海藻のフレキシブル性による特性と思われる。

なお、実験結果値を表-5.1に示す。

海藻の挙動に関しては、波高、周期の増大とともにその運動も大きくなる傾向を示した。

(図-5.2) また、コケムシ有りについては波の進行方向に、コケムシ除去についてはそれとは逆の方向に動揺する傾向が示された。今回の実験は一枚の海藻に作用する波力がどの程度かを知るための基礎的なもので、現場スケールを考慮していないので、ユニット全体の作用波力を求めることは困難である。しかし、円形柱体波圧理論値を上まわることがないことを確認できたので、再実験のうえ適切な理論式を求めることとしたい。

注： 円形柱体波圧理論

海藻に作用する波力を算定する理論式はまだ確立されていない。

今回はあえて円形柱体波圧理論を用い、実測値と比較してみることにした。一般に流体中にある円形柱体の一小部分 dz には抗力 F_D と質量力 F_M とが作用する。この両力を加えた作用力を F とすれば

$$F = F_D + F_M = (1/2)\rho C_D u^2 dz + \rho C_M (\pi/4) D^2 (\partial u / \partial t) dz$$

ここで

ρ : 水の質量, C_D : 抗力係数, C_M : 質量係数, D : 円柱の直径, u : 水粒子の水平速度, $\partial u / \partial t$: 水粒子の水平加速度

<参考文献>

島山清, 西村貴明, 長崎作治(1984): 海洋バイオマス農場における懸垂型海藻の運動と作用波力について, 土木学会第39回年次学術講演会論文集Ⅱ

表-2・1 実験海域の特性

表層水温	20 °C 以下
波 高 (平均)	0.6 m
風 速	0.5 ~ 5 m/sec
潮 流	0.2 m/sec (70%)
最大潮流	0.8 m/sec
設計波高	12 m
水深	300 ~ 500 m
NO ₃ 濃度	25 ~ 30 $\mu g\text{-atom} / Q$
底 質	泥 - 砂 泥

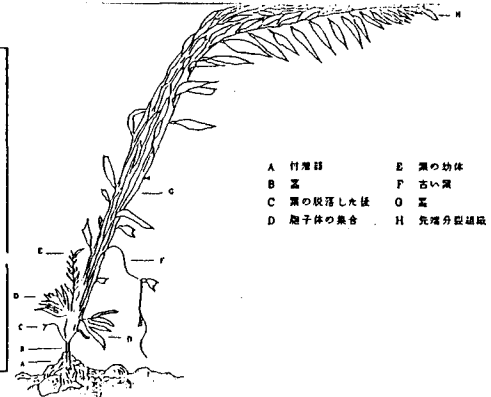


図-2・1 ジャイアントケルプの生育状態

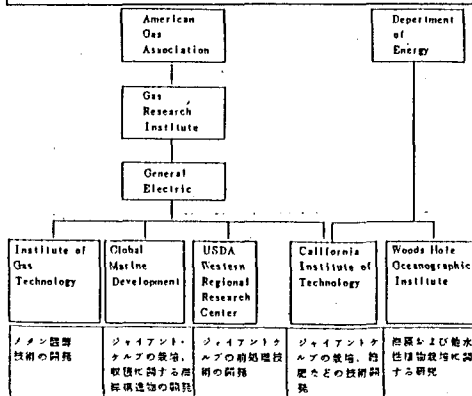


図-2・2 海洋エネルギー農場開発体制

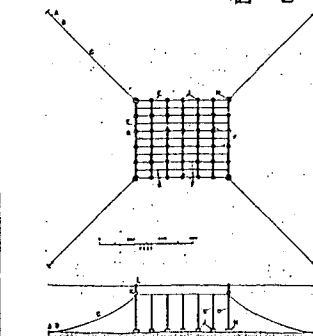


図-2・3 San Clemente Island Site における筏

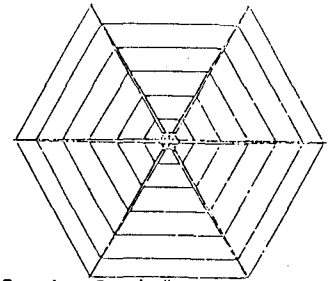


図-2・4 テスト農場でのケルプ支持構造物平面図(アンブレラ型)

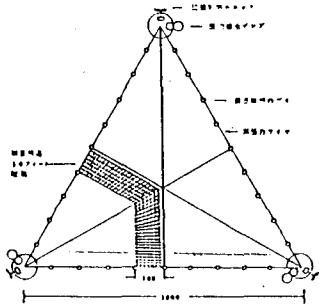


図-2・5 ケルプ支持構造物のモジュール(10エーカー)

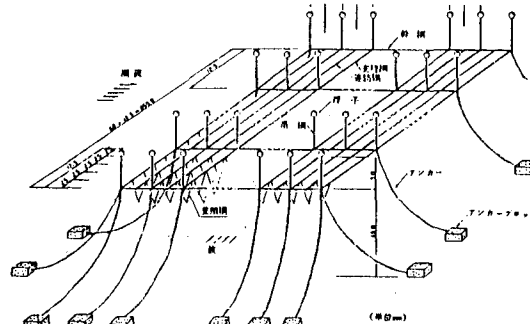


図-3・1 海藻栽培施設の概念図(単位m)

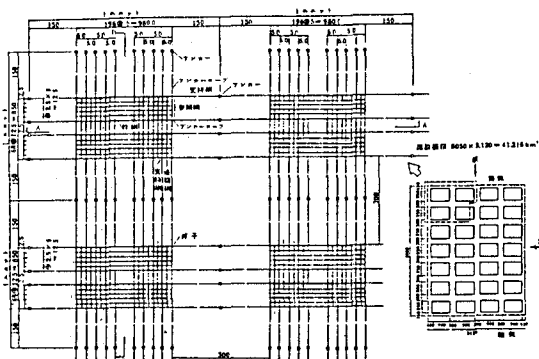


図-3・2 栽培施設平面図(単位m)

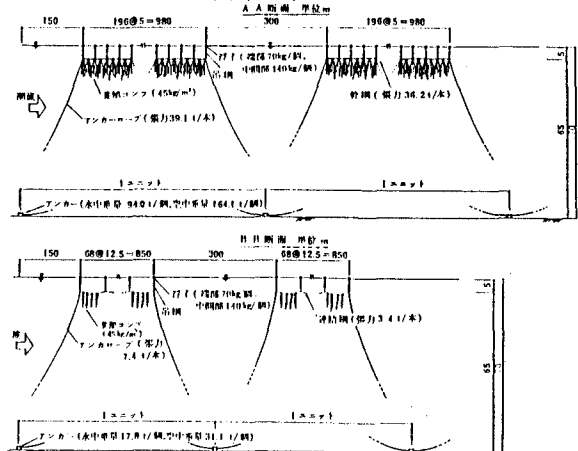
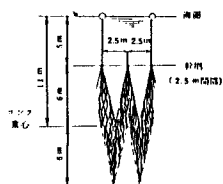
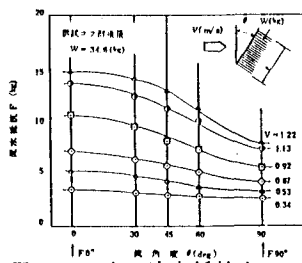
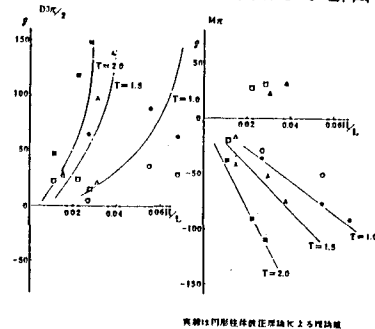
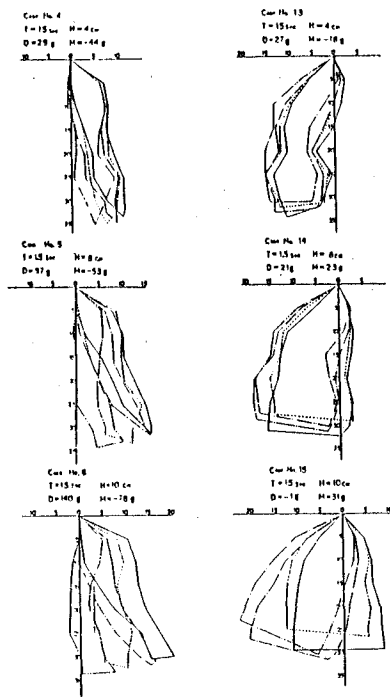
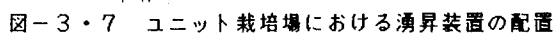
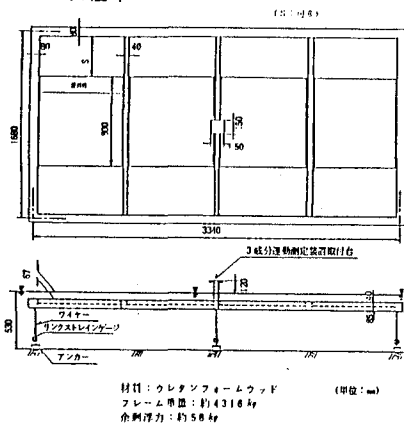
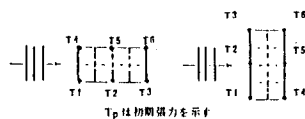
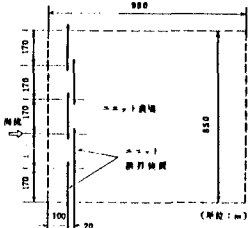
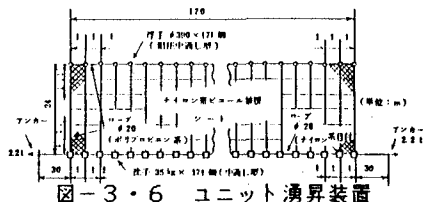


図-3・3 栽培施設立面図(単位m)



MODEL							FIELD														
水深 h [m]	波高 H [m]	波長 L [m]	周期 T [s]	波速 c [m/s]	波高 H [m]	波長 L [m]	水深 h [m]	波高 H [m]	波長 L [m]	周期 T [s]	波速 c [m/s]	水深 h [m]	波高 H [m]	波長 L [m]	周期 T [s]	波速 c [m/s]					
5.3	H _{1/10}	0.6	1.00	0.015	0.030	0.53	1/150 7.6~F 初期	2.25	H _{1/10}	0.6	1.00	0.015	0.030	0.53	8.0	H _{1/10}	0.6	1.00	0.015	0.030	0.53
		0.9	1.25	0.012	0.024	0.42				0.9	1.25	0.012	0.024	0.42			0.9	1.25	0.012	0.024	0.42
		1.0	1.52	0.010	0.020	0.35				1.0	1.52	0.010	0.020	0.35			1.0	1.52	0.010	0.020	0.35
		1.1	1.80	0.008	0.017	0.30				1.1	1.80	0.008	0.017	0.30			1.1	1.80	0.008	0.017	0.30
		1.2	2.07	0.007	0.014	0.26				1.2	2.07	0.007	0.014	0.26			1.2	2.07	0.007	0.014	0.26
		1.3	2.35	0.006	0.013	0.23				1.3	2.35	0.006	0.013	0.23			1.3	2.35	0.006	0.013	0.23
	H _{1/2}	1.4	2.62	0.006	0.011	0.20	(1/150) (1/150)	4.50	H _{1/2}	1.4	2.62	0.006	0.011	0.20	1.4	2.62	0.006	0.011	0.20		
		1.5	2.88	0.005	0.010	0.18				1.5	2.88	0.005	0.010	0.18	1.5	2.88	0.005	0.010	0.18		
		1.6	3.13	0.005	0.009	0.17				1.6	3.13	0.005	0.009	0.17	1.6	3.13	0.005	0.009	0.17		
		1.7	3.38	0.004	0.008	0.16				1.7	3.38	0.004	0.008	0.16	1.7	3.38	0.004	0.008	0.16		
		1.8	3.63	0.004	0.007	0.15				1.8	3.63	0.004	0.007	0.15	1.8	3.63	0.004	0.007	0.15		
		1.9	3.88	0.003	0.006	0.14				1.9	3.88	0.003	0.006	0.14	1.9	3.88	0.003	0.006	0.14		

表-4・2 波浪作用方向および収穫率

表-5・1 海藻の測定波力

Case	海流のみ					アームのみ				併用兼力			
	水深	波高	周期	波長	抗力	質量力	抗力	質量力	抗力	質量力	相対水深	波形分配	
	h	H	T	L	D3x/2	F	D3x/2	F	D3x/2	F	H/h	H/L	
No	cm	cm	sec	cm									
コヤメン 行き	1	4			67	-37	3	0	64	-37	0.10	0.027	
	2	8	1.0	146	102	-76	15	1	77	-77	0.20	0.055	
	3	10			86	-90	24	1	62	-91	0.25	0.068	
	4	4			31	-43	2	1	29	-44	0.10	0.015	
	5	40	8	15	261	110	-53	13	0	97	-53	0.20	0.031
	6	10			163	-78	23	0	140	-78	0.25	0.038	
	7	4			51	-38	4	2	47	-40	0.10	0.011	
	8	8	2.0	356	131	-90	13	0	118	-90	0.20	0.022	
	9	10			169	-110	20	0	149	-110	0.25	0.028	
コヤメン 戻り	11	4			7	-29	3	0	4	-29	0.10	0.027	
	12	8	1.0	146	50	-50	15	1	35	-51	0.20	0.055	
	10	10			52	-18	24	1	28	-19	0.25	0.068	
	13	4			29	-17	2	1	27	-18	0.10	0.015	
	14	8	1.5	261	34	23	13	0	21	23	0.20	0.031	
	15	10			22	31	23	0	-1	31	0.25	0.038	
	16	4			25	-17	4	2	21	-19	0.10	0.011	
	17	8	3.0	356	37	28	13	0	24	28	0.20	0.022	
	18	10			35	30	20	0	15	30	0.25	0.028	