

不規則波浪下の延縄式養殖施設の動的応答

鳥取大学 工学部 土木工学科 正員 松原雄平
鳥取大学 工学部 土木工学科 正員 野田英明
西 松 建 設 技 術 研 究 所 正員 西平福宏

1. はじめに

わが国の内海・内湾部には各種の水産構造物が設置されており、水産資源の保護・培養を行いつつ、同時に効率的に漁業生産高を向上させる、いわゆる海面養殖事業が行われている。これには魚類を対象とする養殖いけす施設や貝類や海藻類を対象とする筏施設など多種多様である。こうした海面養殖施設の一つである延縄式養殖施設は、わが国沿岸部でホタテ貝やイタヤ貝養殖あるいはワカメ養殖等に広く用いられている養殖施設である。著者らは、すでに延縄式養殖施設の波浪応答問題に関して理論的検討あるいは模型実験、現地観測による実証的検討など、種々の面から検討してきた。しかしながらこれまでは対象波浪を規則波のみに限定してきた。そこで、この研究では不規則波の作用下での延縄施設の動的応答現象に関して実験的検討を行うとともに、従来の波浪応答モデルを不規則波浪条件に適用するものである。

2. イタヤ貝ならびに養殖施設の概要

イタヤ貝は、北海道南部から、中国、九州地方に分布し浅海の細砂底にすむイタヤガイ科の二枚貝である。形はホタテ貝に似て、片面は平らで一方は深く湾曲する。殻長約12cmで幅が広くて低い放射肋が8～13条あり板葺屋根の棧に似ている。昭和50年代になって山陰ならびに隠岐地方の沿岸部においても、イタヤ貝の養殖を目的として、延縄施設が設置されるようになってきている。図-1は、島根県におけるこの10年間のイタヤ貝の採苗(稚貝)枚数ならびに生産枚数の推移を示したものである¹⁾。これより、1983、1984の両年に生産数がピーク値をとり、その後、採苗数の減少とともに生産数も減少している。1987年には最低の採苗実績となって最盛時の1割程度となっている。その後若干採苗数が増加する傾向にあるが必ずしも安定的な採苗数となっていない。しかしながら、ここ数年、生産技術も向上しており、採苗数に対する生産数の割合も増大しつつある。また、こうした天然採苗の不安定性から、人為的に稚貝を採苗する方法も確立されようとしていることから、今後、生産数は増大して行くものと思われる。

延縄式養殖施設は、2点又は4点係留方式で海面又は海中に張られたロープに、貝、海草類をいれた籠を懸垂し、人為的な給餌はおこなわなくとも、貝は海水中のプランクトンを摂餌して、約一年程で出荷できる程度にまで成長する。このため無給餌養殖施設ともよばれる。この延縄式養殖施設を使用して、東北、北海道の内湾域では、ホタテ貝の養殖が盛んに行われていることはよく知られたところである。

図-2は、現在実用化されている延縄養殖施設を模式的に示したものであって、水深20m～40mの海域にロープ・ブイ等で係留されている。メインロープから、ほぼ等間隔に懸垂された養殖籠にイタヤ貝を入れて、長期間、海中の中層にこれを保持して、貝の育成を促進するものである。養殖籠自体には浮力がないため、その上部にブイを設置しほぼ中立となるように調整されている。養殖籠は同図に示すように円柱形状をしており、外側は網で覆われている。籠の内部はブロック分けされていて、そのブロック内にイタヤ貝の稚貝が重ならないように10～20枚入れられている。山陰沖の延縄施設の場合では、その養殖籠が約180mのメインロープに36連

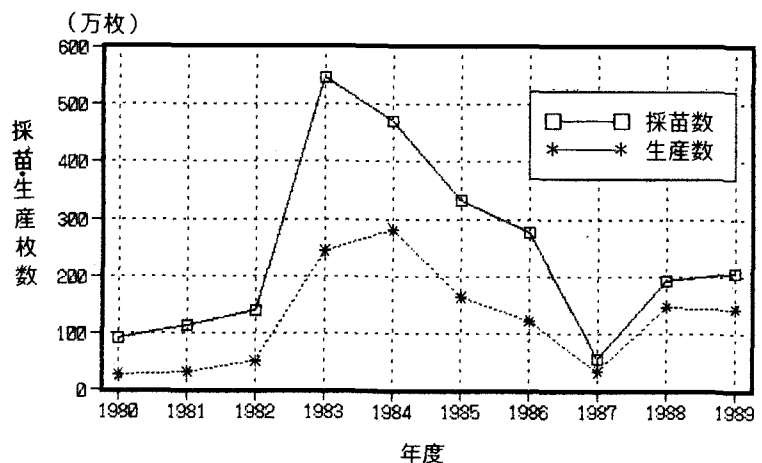


図-1 イタヤ貝の採苗・生産数推移

り、外側は網で覆われている。籠の内部はブロック分けされていて、そのブロック内にイタヤ貝の稚貝が重ならないように10～20枚入れられている。山陰沖の延縄施設の場合では、その養殖籠が約180mのメインロープに36連

釣り下げられている。しかしながら隠岐島の西郷沿岸の施設を除けば山陰地方の各施設は設置地点が日本海の外海域であるため、冬期季節風による波浪の影響を受け長期間にわたる波浪動揺ならびに係留施設に対する強大な外力作用が考えられる。

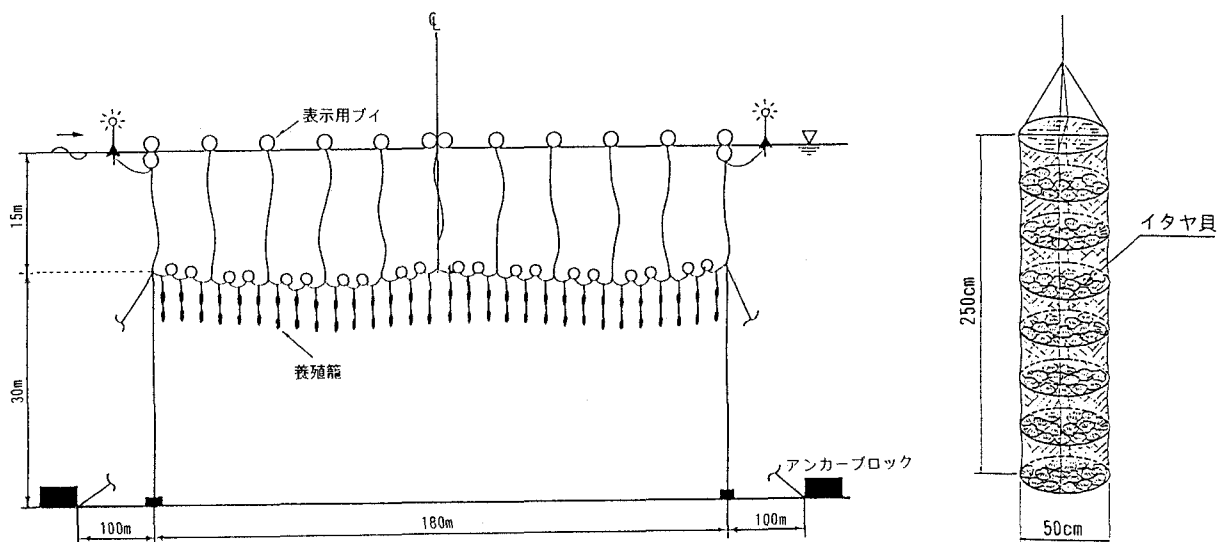


図-2 延縄式養殖施設ならびに養殖籠の概要

3. 養殖施設の波浪応答解析モデル

図-2からもわかるように施設はメインロープ部ならびにアンカーロープ部からなっている。またメインロープ部には、中間ブイあるいは養殖物を収める籠が等間隔に係留されており、多質点系の構造物となっている。この延縄施設の運動方程式を誘導するに先だって以下の基礎仮定を設定している。

- 1) 施設は波向に平行に係留されている。
- 2) 養殖籠は球形の沈子で表され、籠に作用する流体力は沈子に作用する流体力で代表される。
- 3) 浮子および沈子の運動は波の進行方向を含む二次元平面内に限られる。
- 4) 索の伸縮は微小で無視できる。また要素間のロープはたわむことはない。
- 5) 両端ブイの水平ならびに鉛直方向の変位は微小で一種の固定端とみなせる。

上記の仮定2)は、現地の施設が来襲波浪の卓越方向に並行に設置されていることに基づいている。これらの仮定に基づき、延縄式養殖施設を図-3に示すようにモデル化した。モデルは、メインロープ上の各浮子の間の養殖籠をそれぞれ球形の沈子とし、両端ブイを固定点としている。以下これらの浮子および沈子を要素と呼び、沖測から i 番目の要素を要素(i)と記すことにする。

図-4は、このモデルの要素($i-1$)と要素(i)の部分を取り出し x - y 座標系で表したものであり、 x 軸の正方向は水平岸側向きに、 y 軸の正方向は鉛直上向きに対応するものとし、要素(i)の座標を (x_i, y_i) で表すものとする。 $\dot{x}$ あるいは $\dot{y}$ は、それぞれ変位 x の時間に関する一階微分、二階微分を表わし、 y についても同様である。

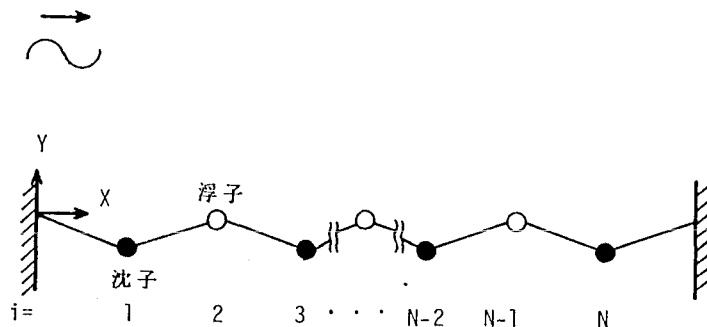


図-3 応答計算モデル

さて、要素(i) に関する xおよびy 方向の運動方程式はそれぞれ次のようになる。²⁾

$$m_i \ddot{x}_i = F_{Hi} + T_i \cos(\phi_i) - T_{i-1} \cos(\phi_{i-1}) \dots\dots\dots(1)$$

$$m_i \ddot{y}_i = F_{Vi} + T_i \sin(\phi_i) - T_{i-1} \sin(\phi_{i-1}) - w_{fi} \dots\dots(2)$$

ここに、 m_i および w_{fi} はそれぞれ要素(i) の質量(付加質量を含まない) および水中重量であり、 T_i および ϕ_i はそれぞれ要素(i) と要素(i+1) を結ぶロープの張力およびロープがX軸と成す角度を表し、 ϕ_i は反時計回りを正としてある。 F_{Hi} および F_{Vi} は、それぞれ要素(i) に作用する水平波力および鉛直波力を表し、相対速度を考慮したモリソン公式を用いて次式で表される。

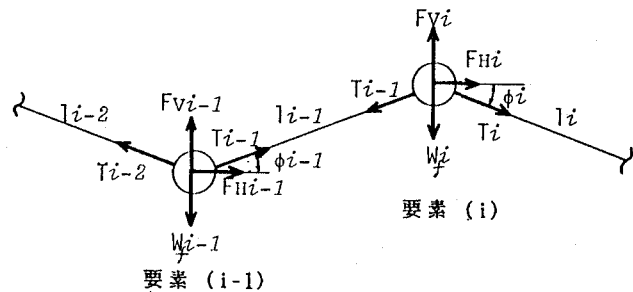


図-4 要素に作用する外力

$$F_{Hi} = C_{mi} \rho_0 v_i \dot{u}_i - C_{vi} \rho_0 v_i \dot{x}_i + (1/2) C_{Dxi} \rho_0 S_{xi} |u_i - \dot{x}_i| (u_i - \dot{x}_i) \dots(3)$$

$$F_{Vi} = C_{mi} \rho_0 v_i \dot{w}_i - C_{vi} \rho_0 v_i \dot{y}_i + (1/2) C_{Dyi} \rho_0 S_{yi} |w_i - \dot{y}_i| (w_i - \dot{y}_i) \dots(4)$$

ここに、 ρ_0 は水(あるいは海水)の密度で、 v_i 、 S_{xi} および S_{yi} はそれぞれ要素(i) の体積およびX方向へならびにY方向への投影面積である。 C_{mi} 、 C_{vi} 、 C_{Dxi} および C_{Dyi} は、それぞれ要素(i) の慣性力係数、実質付加質量係数、X方向の抗力係数およびY方向の抗力係数である。また u_i 、 w_i は、それぞれ微小振幅波理論における座標(x_i , y_i) での水平および鉛直方向の水粒子速度である。

さて T_{i-1} を消去すると次式を得る。

$$m_i (\ddot{x}_i \sin \phi_{i-1} - \ddot{y}_{i+1} \cos \phi_{i-1}) = F_{Hi} \sin \phi_{i-1} - F_{Vi} \cos \phi_{i-1} - T_i (\sin \phi_{i-1} \cos \phi_i - \sin \phi_i \cos \phi_{i-1}) + W_i \cos \phi_{i-1} \dots\dots(5)$$

さらに式(1) および式(2) を要素(i+1) に適用し、両式から T_{i+1} を消去すると次式を得る。

$$m_{i+1} (\ddot{x}_{i+1} \sin \phi_{i+1} - \ddot{y}_{i+1} \cos \phi_{i+1}) = F_{Hi+1} \sin \phi_{i+1} - F_{Vi+1} \cos \phi_{i+1} - T_i (\sin \phi_{i+1} \cos \phi_i - \sin \phi_i \cos \phi_{i+1}) + W_{i+1} \cos \phi_{i+1} \dots\dots(6)$$

したがって、式(5)および式(6)より T_i を消去し、 $\sin \phi_i = (y_{i+1} - y_i) / l_i$ 、 $\cos \phi_i = (x_{i+1} - x_i) / l_i$ を考慮して、 x_i 、 x_{i+1} 、 y_i および y_{i+1} の各項ごとに整理すると、要素(i) ならびに要素(i+1) に対する運動方程式が得られることになる。

一方、各要素は互いにロープで結ばれているためその運動は自ら拘束をうけることになる。そこで、基礎仮定(5) に示したように各要素間のロープが非伸性であり、たわむことがないと考えられるならば、要素(i) と要素(i+1) 間の距離は常に一定に保たれることになる。すなわち、拘束条件式として次式を得る。³⁾

$$(x_{i+1} - x_i)^2 - (y_{i+1} - y_i)^2 = l_i^2 \dots(7)$$

以上の運動方程式ならびに拘束条件式より各要素の変位量が算定されることになる。
 応答計算では、前進差分法を用いて運動方程式ならびに拘束条件式の線形化を行なった。個々の要素から得られた連立方程式を解くにあたり、初期条件として要素(i) の初期位置をそれぞれ静水中における平衡状態での位置座標として与え、各要素の初速度を0とした。また波力算定式の中の慣性力係数ならびに抗力係数としては静水

中での模型施設の減衰振動実験に最もよく一致する係数値を用いている。

4. 実験装置および方法

実験は、長さ 29m，幅 0.5m，深さ 0.75m の両面ガラス張りの不規則造波水槽を用いて行われた。図-5 に示すように直径 0.8mm のステンレステグスならびにプラスチック製浮子を用いて延縄養殖施設の模型を作成し水槽中に係留した。施設は、7 個の可動要素からなるもので、これに、不規則波を作用させ、施設のメインロープの動揺状況を水槽外部からビデオカメラで撮影するとともに両端のアンカーロープ張力を測定した。動揺測定は、要素 3，5 および 7 の 3 点について行った。また、水面変動と水粒子速度の測定もあわせて行った。

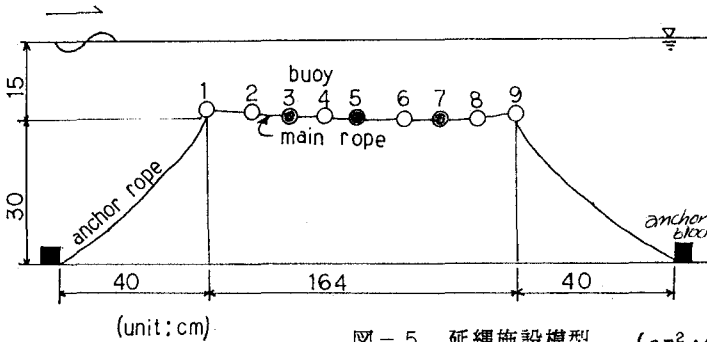


図-5 延縄施設模型

表-1 模型諸元

形状	単位	要素1,9	要素2~8
形状		球	
材質		プラスチック	
直径	cm	3	
重量	g・f	3.91	14.66
水中重量	g・f	0.522	-10.22 (浮力)
メインロープ設置間隔 163.5(cm)			
メインロープ長 164.0(cm)			
要素間隔	要素1~2間, 8~9間 22(cm)		
	要素2~3間, 7~8間 20(cm)		

5. 結果の検討

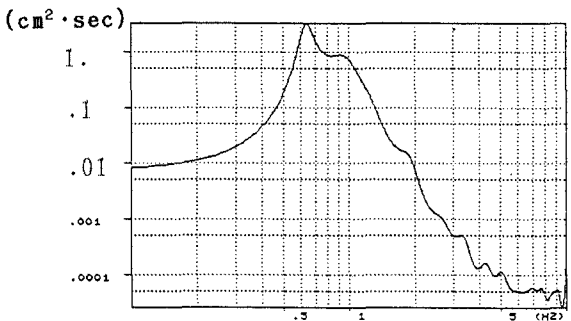
5. 1 応答スペクトル

図-6 (a) ~ 図-6 (c) は、それぞれ不規則波の実験から得られた、水面波形ならびに要素 3 および 5 の動揺スペクトルを示したものである。これより要素 3 の動揺では、0.55 Hz 付近に卓越周波数が現れているが、要素 5 のそれは 0.84Hz となっており、要素の場所によってその動揺状況は異なって現れることがわかる。

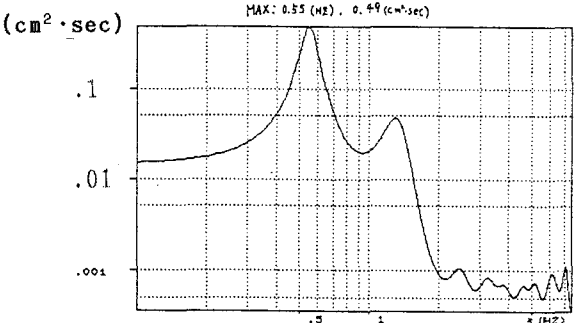
一方、図-7 (a) および図-7 (b) は、係留索張力の測定結果から得られた岸側ならびに沖側の係留索張力のスペクトル解析結果である。この図から、係留索張力の卓越周期は、岸側・沖側いずれも、ほぼ水面波形に近く 0.72Hz、0.80Hz となっていること、また沖側係留索張力がわずかに大きく生じていることなどが明らかになった。

5. 2 不規則波浪応答計算

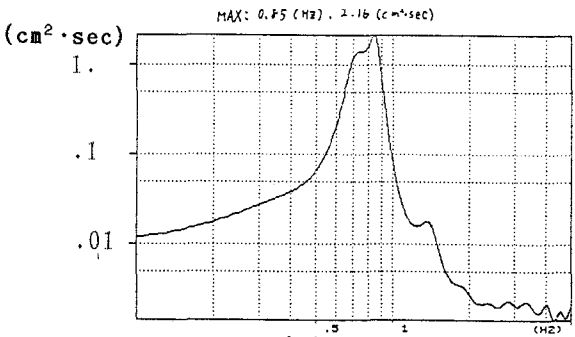
前述した延縄施設の応答解析モデルを不規則波浪場に適用した。不規則波浪条件での応答計算では、まず水面波形の測定結果をフーリエ変換し、寄与率の大きいほうから 6 成分波を抽出し、これらに対して微小振幅波理論を適用して水粒子速度および加速度を算定した。これらの成分波の値を合成することで、不規則波浪の水粒子速度および加速度とした。応答計算では、以上のように算定された水粒子速度および加速度の時系列を運動方程式に入力して、差分法により数値計算を行って、各要素の波浪動揺を算定した。



(a) 水面波形

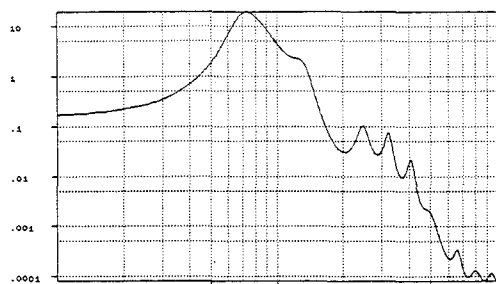


(b) 要素3

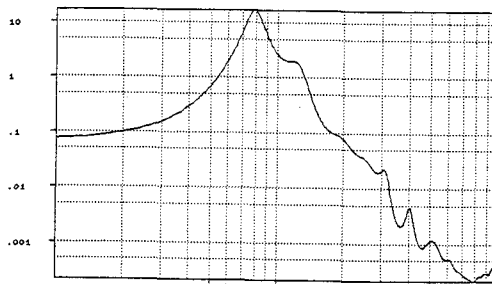


(c) 要素5

図-6 表面波、要素の振幅スペクトル



(a) 沖側係留索



(b) 岸側係留索

図-7 係留索張力のスペクトル

図-8は、水位変動の時系列記録から計算されたメインロープ中央の要素5の動揺量の一例であるが、実測値と、若干の位相の差は見られるが、両者はほぼ一致していることがわかる。

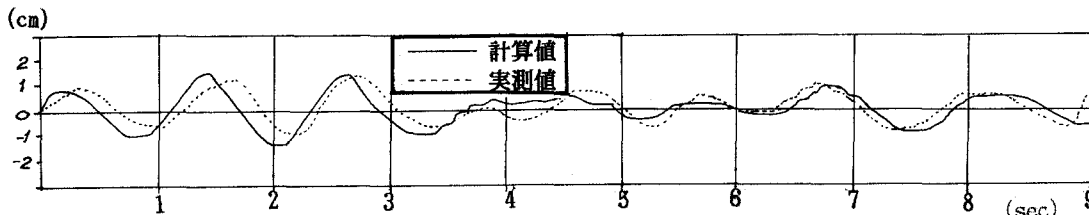


図-8 計算応答値と実験値の比較

5. 3 代表波による応答量の推定

著者らは、これまで現地延縄施設の動揺観測結果の取扱にあたっては、観測期間中の有義波高、有義波周期を代表波として現地施設の応答シミュレーションを行ってきた。そこで、今回の不規則波浪条件において代表波による応答量の取扱いの妥当性の検証を行った。図-9は、要素3の鉛直変位量とメインロープ長・波長比との関係を規則波の結果と同様に示したものである。ここで、不規則波の実験結果（図中*印）については、有義波高3.2cm有義波長230.7cmの各有義値を用いて示している。したがって不規則波の波形勾配 $(H/L)_{1/3} = 0.015$ となる。同図の、実線、鎖線は、規則波に対して算定された計算動揺量また○印は規則波での実験結果である。この図より、不規則波の条件での結果と規則波の結果とは、ほぼ一致しており、有義波を代表波として、不規則波の作用下での動揺量が見積れることがわかる。また図-10は、係留索張力(1/3最大値、図中*印)について同様な表示を行ったものである。この結果からも、代表波を用いて索張力がほぼ計算できるといえる。

6. まとめ

不規則波の条件のもとで延縄施設の応答特性を検討した。表面波のフーリエ変換によって不規則波浪に対する応答計算が可能であること、また代表波によっても、ほぼ応答量の概略的な見積りが可能であることが明かとなった。参考文献

- 1) 島根県魚連イタヤ貝養殖振興協会
- 2) 永井莊七郎、倉田克彦、伊藤忠：潮流中のアンカチェーンの形状およびその両端に働く張力に関する研究、第20回海岸工学講演会論文集、PP.305-312,1973
- 3) 小田一紀：水工学に関する夏期研修会講義集、B-2-1 - B-2-25,1980

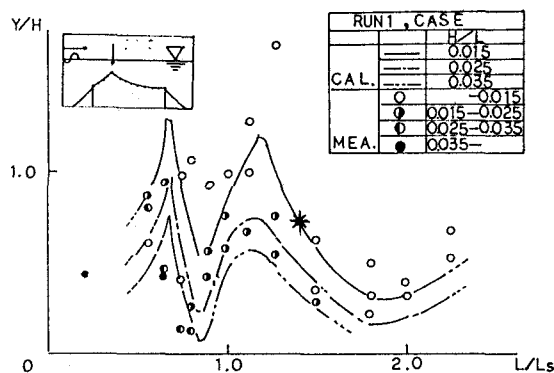


図-9 要素3の動揺量

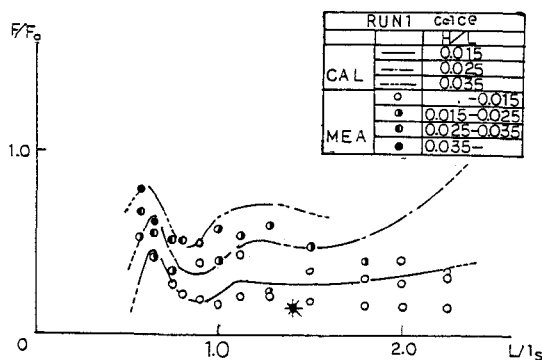


図-10 最大係留索張力