

波動下における沖合養殖いけすの係留索張力の 算定法について

木村 晴保*・宗景 志浩**

1. まえがき

わが国の魚類養殖は主として内湾で急速な発達をとげたが、漁場の過密化、漁場の荒廃、魚病被害の増大、養殖魚の成長率の低下などによって漁場の生産性が漸減し、在来の漁場に現在以上の発展を期待することは困難となってきている。

一方、外海性の海域、特に水深 30~100 m の広範な沿岸沖合域は未利用の状態にある。その主な原因は、これら海域は内湾とは異なり流れや波など海象状況が厳しいためである。

沖合養殖いけす¹⁾は海象の厳しい海域を対象に開発されつつある養殖施設で、これは養魚を包容するための網地及び浮子からなるいけす施設とこれを懸垂、維持するためのロープ及び浮子からなる枠組施設とで構成されている。

ここではこれら施設の波動下における係留索張力の算定法を示す。

2. 支配的物理因子の抽出

石田は台風 (1980. 9. 12: 13 号台風) 時に、図-1 に示す沖合養殖いけすの挙動を 8 mm カメラに納めた。天候が悪く、かつ遠距離からの撮影ということもあって、いけすや緩衝浮子の詳細な挙動は不明ではあるが、おおよそ次のことが観察される。

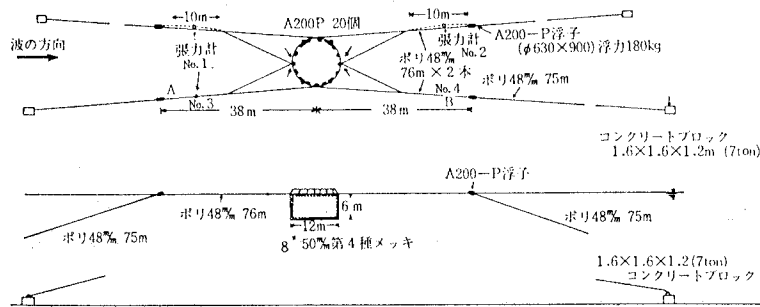


図-1 沖合養殖試験施設 (高知県)

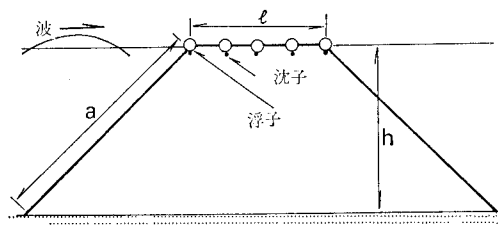


図-2 基礎実験模式図

i 目視観測で波高が 4~5 m のときには、両端の緩衝浮子は波間に見え隠れするものの、いけす上部は絶えず水面上に見られる。

ii 波高が 7~8 m と大きくなると、波はいけすの上で砕け、その間しばらくの間いけす及び入射側の緩衝浮子は水面下に隠れる。

図-2 は係留索張力に関する基礎実験の模式図で、実験条件は表-1 に示す。各ケースは空中重量 108 g の鉛沈子を直径 10.5 cm、空中重量 285 g、浮力 225 g の球形浮子に 0 個 (Case A, D), 1 個 (Case B, C) ないし 2 個 (Case E, F) 固定したものを 50 cm 間隔で 5 個 (Case C, D) ないし 9 個 (Case A, B, E, F) を太さ 0.7 mm の釣糸で連結し、両端の浮子 (緩衝浮子) がほぼ水面下に没するよう水深 2.52 m の 2 倍長 (Case A~E) ないし 3 倍長 (Case F) の係留索で 2 点係留されている。これら各ケースに表-1 に示す波を作用させ、浮子の観察及び係留索張力を実測した。

張力は波の入射側 (前部) については水平分力と鉛直分力を、透過側 (後部) については鉛直分力のみを実測した。主な結果は

i 緩衝浮子、特に前部の浮子は波高が大きくなるほど水面下に深く潜る。それ以外の浮子はほとんど水面に追従して上下動し、水面下に没することはない。

ii 前部係留索張力の水平及び鉛直分力の経時的変動は類似していて、これらの最大値はほぼ同時に生じる。

* 正会員 農博 高知大学教授 農学部栽培漁業学科

** 正会員 農修 高知大学講師 農学部栽培漁業学科

表-1 基礎実験条件

Case	Pretension		N (個)	l (m)	T_{H0}/N (g)	Wave			l/L	h/a
	T_{V0} (g)	T_{H0} (g)				L (m)	H (cm)	H/L		
A	272	512	9	4	57	3.51	8~30	0.02~0.09	1.15	1/2
						4.50	12~33	0.03~0.09	0.90	
						6.75	8~35	0.01~0.05	0.60	
						10.85	22~63	0.02~0.06	0.36	
						12.70	10~46	0.01~0.04	0.32	
B	163	293	9	4	33	3.63	8~32	0.02~0.09	1.10	
						3.65	8~30	0.02~0.08	1.10	
						4.76	6~27	0.01~0.06	0.85	
						6.75	11~22	0.02~0.04	0.60	
						11.12	27~61	0.02~0.05	0.36	
C	150	264	5	2	53	1.96	8~18	0.03~0.09	1.02	
						2.52	8~19	0.03~0.07	0.79	
						3.56	8~28	0.02~0.08	0.56	
						6.75	12~30	0.02~0.04	0.29	
						8.97	17~37	0.02~0.04	0.22	
D	225	384	5	2	77	1.96	8~10	0.03~0.05	1.02	
						2.52	8~10	0.03~0.08	0.79	
						3.56	8~28	0.02~0.08	0.56	
						5.26	7~25	0.01~0.05	0.38	
						6.75	11~29	0.02~0.04	0.29	
E	63	125	9	4	14	8.91	15~35	0.02~0.04	0.22	
						3.99	13~24	0.03~0.06	1.00	
						5.31	19~30	0.04~0.06	0.75	
						6.17	22~34	0.04~0.06	0.64	
						7.35	18~29	0.02~0.04	0.54	
F	55	205	9	4	23	9.15	17~37	0.02~0.04	0.43	
						3.99	20~26	0.05~0.07	1.00	1/3
						5.31	23~31	0.04~0.06	0.75	
						6.17	31~33	0.05~0.06	0.64	
						7.35	28~30	0.03~0.04	0.54	
						9.15	14~30	0.02~0.03	0.43	

注) T_{V0} : 係留索初期張力の鉛直分力
 T_{H0} : " 水平分力
 N : 浮子の数
 l : 緩衝浮子間距離
 L : 波 長
 H : 波 高
 h : 水 深 (2.52 m)
 a : 係留索長

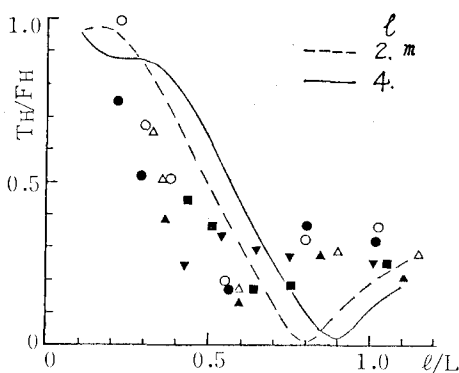


図-3 各種ケースにおける最大波高の波による前部係留索張力の最大水平分力 T_H (初期張力を差引いた値)

△: Case A, ▲: Case B, ●: Case C,
○: Case D, ▼: Case E, ■: Case F

iii 鉛直分力の最大値はほとんどのものが最大水平分力の $\{(a/h)^2 - 1\}^{-1/2}$ 倍ないしそれ以下である。ここに a は係留索長, h は水深である。

iv 同一ケースに同一周期の波を作用させた場合, 前部水平分力の最大値は波高の大きなものほど大きい。

図-3 は表-1 に示す同一波長の作用波のうちで最大波高の波のみによる前部水平分力の最大値 T_H (初期の水平分力を差引いたもの) を示したものである。図中 F_H は静水時の位置に浮子が固定されているものとして, 各浮子に働く波力の最大水平分力を Morison-O'Brien の算定式より求め, これらを総和したもの, 実線と破線は各浮子が静水時の位置に一体として固定されていて, これに働く波力を上記算定式より求め, その最大値を示す。これら算定値は波形勾配によって多少異なる。ここでは波形勾配 0.05 の結果を図示した。これより,

i l/L が 0.6 以下では, Case D の 1 点を除きすべてのものが計算値以下である。 l/L が 0.6 以上ではほとんどのものが計算値以上である。ここに, l は緩衝浮子間の距離, L は波長。

ii 係留索長が水深の 2 倍のものと (Case A~E) についてみると, l/L が 0.6 以下では l に関係なくて浮子 1 個当りの初期張力が小さいものほど小さい。

iii しかし, Case B と F を比較すると, 初期張力は後者 (22.8 g) は前者 (32.6 g) よりも小さいにもかかわらず, 張力は後者の方が大きい。これは係留索長が Case B は水深の 2 倍であるのに対し Case F は 3 倍であるため, 波による浮子の水平移動が後者は前者に比べて小さかったためと考えられる。

iv 波のみによる前部の最大鉛直分力 T_{JV} と後部の最大鉛直分力 T_{rv} とを比べてみると T_{rv} は必ずしも T_{JV} より小さくなるとは言えない。 $T_{rv} > T_{JV}$ なるものは, l や係留索長に関係なくて初期張力の小さいものほど数多くみられることから, この原因としては係留索が弛緩したことによるためと考えられる。

以上のことから波動下における沖合養殖施設の係留索張力は枠組ロープに固定ないし懸垂されている浮子やいけす (以下これらを部材と呼ぶことにする) の移動の難易に大きく支配されることが分る。

3. 係留索張力の算定法

3.1 算定式の誘導

(1) 緩衝浮子の変位と係留索張力

係留索は弛緩することなく、かつ変位量も微小とすると図-4を参考にして次式を得る。

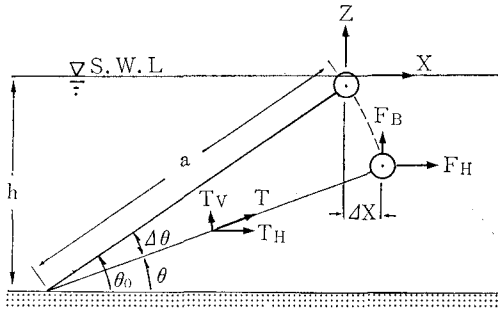


図-4 緩衝浮子の変位量と水平波力との関係

$$\Delta x = -a\Delta\theta \sin\theta_0 = -h\Delta\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

Δx : 緩衝浮子の静水時からの水平移動量

a : 係留索長

h : 敷設海域の水深

θ_0 : 静水時に係留索が水平となす角度

また、係留索の水中重量及び流水抗力を無視すると

$$\cot\theta = \frac{T_H}{T_V} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

T_H : 係留索張力の水平分力

T_V : 係留索張力の鉛直分力

θ : 係留索が水平となす角度

さらに

$$T_V = F_B = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (3)$$

とし、 θ が θ_0 のときの T_H を T_{H0} で、 $\theta_0 + \Delta\theta$ のときを T_H で表わすと、式 (2) より

$$\cot\theta_0 = T_{H0}/F_B, \quad \cot(\theta_0 + \Delta\theta) = T_H/F_B$$

すなわち

$$\Delta\theta = -\frac{T_H - T_{H0}}{F_B} \sin^2\theta_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

結局、緩衝浮子の水平変位と係留索張力の水平分力 T_H との関係式は式 (1), (4) より次式を得る。

$$T_H = \left(1 + \frac{2}{\sin 2\theta_0} \frac{\Delta x}{h}\right) T_{H0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2) 部材に働く水平波力

一般に流体の場の速度変化が物体の大きさの範囲内で無視できるような流体中を物体が流体と相対運動をするとき、物体に働く流体力は次の3成分より成る²⁾。

$$\left. \begin{aligned} p &= \rho V_0 \dot{u} \\ f_m &= \rho(C_M - 1)V_0(\dot{u} - \dot{v}) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} f_D &= \frac{1}{2} \rho C_D S_0 |u - v|(u - v) \div \frac{\alpha}{2} \rho C_D S_0 (u - v) \\ \therefore \alpha &= 8/3\pi \cdot [u - v] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

V_0 : 物体の体積

S_0 : 物体の射影面積

C_M : 付加質量係数

C_D : 抗力係数

u : 流体の速度

v : 物体の速度

$\dot{}$: 時間微分を表わす

$[u - v]$: $u - v$ の振幅を表わす

従って、 i 部材に働く水平波力 F_i は

$$\left. \begin{aligned} F_i &= [p + f_m + f_D]_i \\ &= \rho C_{Mi} V_i \dot{u}_i + \frac{\alpha_i}{2} \rho C_{Di} S_i u_i \\ &\quad - \rho(C_{Mi} - 1)V_i \Delta \ddot{x} - \frac{\alpha_i}{2} \rho C_{Di} S_i \Delta \ddot{x} \\ u_i &= \frac{1}{2} \omega H \frac{\cosh k(z_i + h)}{\sinh kh} \cos(kx_i - \omega t) \\ \alpha_i &= \frac{8}{3\pi} [u_i - \Delta \ddot{x}] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

V_i : i 部材の体積

S_i : i 部材の水平流に対する射影面積

C_{Mi} : i 部材の水平流に対する付加質量係数

C_{Di} : i 部材の水平流に対する抗力係数

u_i : i 部材の中心位置での波による水平流速

H : 波高

ω : 角周波数 ($2\pi/T$)

k : 波数 ($2\pi/L$)

t : 時間

x_i, z_i : i 部材の中心座標 (図-4 参照)

(3) 運動方程式

各部材は一体として運動するものとする、これらに作用する外力は式 (5) による係留索張力と式 (7) による水平波力であり、運動方程式として次式を得る。

$$\sum [\sigma_i V_i] \Delta \ddot{x} = \sum [F_i] - 2(T_H - T_{H0}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

σ_i : i 部材の密度

$\sum [\sigma_i V_i]$: 部材質量の総和

$\sum [F_i]$: 部材に働く水平波力の総和

式 (2) で $2(T_H - T_{H0})$ としたのは係留索張力は両端で互に逆向に作用するためである。

$$\left. \begin{aligned} p_{0i} &= \rho(C_{Mi} + \sigma_i/\rho - 1)V_i/T_{H0} \\ p_i &= \rho C_{Mi} V_i/T_{H0} \\ q_i &= \alpha_i \rho C_{Di} S_i/T_{H0} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表わし、さらに式(5)、(7)を式(8)に代入し、 Δx で整理すると

$$\Sigma [p_{0i}] \Delta \ddot{x} + \Sigma [q_i] \Delta \dot{x} + \frac{4}{h \sin 2\theta_0} \Delta x = \Sigma [p_i \ddot{u}_i] + \Sigma [q_i \dot{u}_i] \quad \dots\dots\dots (10)$$

(4) 係留索張力算定式

式(10)は係数 q_i が α_i すなわち $\Delta \dot{x}$ の関数であるため、厳密には解析解は得られない。しかし、 α_i を仮定し q_i を定数とみなせば式(10)は定係数線形な強制振動方程式となり、解析解として次式を得る。

$$\Delta x = \Sigma [A_i \sin(kx_i - \omega t)] + \Sigma [B_i \cos(kx_i - \omega t)] \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 A_i, B_i は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \frac{\omega p_i \{4/(h \sin 2\theta_0) - \omega^2 \Sigma [p_{0i}] - \omega q_i \Sigma [q_i]\}}{\{4/(h \sin 2\theta_0) - \omega^2 \Sigma [p_{0i}]\}^2 + \{\omega \Sigma [q_i]\}^2} u_{0i} \\ B_i &= \frac{q_i \{4/(h \sin 2\theta_0) - \omega^2 \Sigma [p_{0i}]\} + \omega^2 p_i \Sigma [q_i]}{\{4/(h \sin 2\theta_0) - \omega^2 \Sigma [p_{0i}]\}^2 + \{\omega \Sigma [q_i]\}^2} u_{0i} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

$$u_{0i} = \frac{\omega H}{2} \frac{\cosh k(z_i + h)}{\sinh kh}$$

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \Sigma [\omega A_i \cos kx_i] & A_s &= \Sigma [\omega A_i \sin kx_i] \\ B_0 &= \Sigma [\omega B_i \cos kx_i] & B_s &= \Sigma [\omega B_i \sin kx_i] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

で表わし、式(7)の第3式に式(11)を代入することにより

$$\alpha_i = \frac{8}{3\pi} \{ (u_{0i} \cos kx_i + A_0 - B_s)^2 + (u_{0i} \sin kx_i + A_s + B_0)^2 \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

また、式(11)より Δx の最大値 $\Delta x_{\max}$ は

$$\Delta x_{\max} = \frac{1}{\omega} \{ (A_s + B_0)^2 + (A_0 - B_s)^2 \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となり、係留索張力の最大水平分力は式(15)を式(5)の Δx に代入することにより求まる。

3.2 数値計算法

係留索の最大水平張力は、式(12)の A_i, B_i より算定できる。しかし、 A_i, B_i は q_i すなわち α_i の関数であり、 α_i は A_i, B_i の関数(式(14))であることから次の手順により A_i, B_i を求め、最大水平張力を算定した。

(1) 設計条件である次の諸量を与える。

- i 海域諸量 (ρ, h, H, T)
- ii 施設諸量 (a : 係留索長, F_B : 4.1項に示す。(x_i, z_i), $S_i, V_i, C_{Di}, C_{Mi}, \sigma_i$)

(2) 上記の諸量と算定式より u_{0i}, θ_0, T_{H0} を求める。

i $h, H, T, (x_i, z_i)$ — 式(12) — u_{0i}

ii h, a — 式(1) — θ_0

iii F_B — $\cot \theta_0 = T_{H0}/F_B$ — T_{H0}

(3) A_i, B_i を試算する。

i $A_i=0, B_i=0$ とおき — 式(13), (14) — $\alpha_{i0}=\alpha_i$

ii $\alpha_i=\alpha_{i0}, S_i, V_i, C_{Di}, C_{Mi}, \sigma_i, \rho$ — 式(9) — p_{0i}, p_i, q_i — 式(12) — A_i, B_i — 式(13), (14) — $\alpha_{i1}=\alpha_i$

iii $|\alpha_{i1}-\alpha_{i0}| < \epsilon$ (許容誤差)であれば(4)へ、さもなければ $\alpha_{i0}=\alpha_{i1}$ とおきiiへ戻る。

(4) 係留索に働く張力の最大水平分力 $T_{H\max}$ を求める。

— 式(15) — $\Delta x = \Delta x_{\max}$ — 式(5) — $T_{H\max} = T_H$

4. 算定法の検討

4.1 基礎実験結果との比較検討

表-1、図-2を参考にして3.2(1)項の諸量を与えた。ただし F_B については

計算(1)では

F_B =緩衝浮子の浮力(B_0)

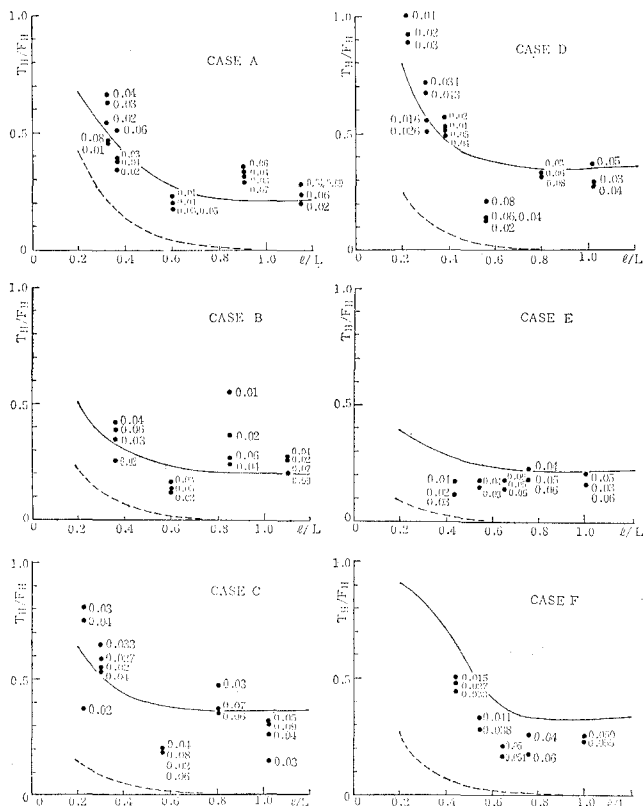


図-5

計算 (2) では

$F_B = B_0 +$ 緩衝浮子に働く波力の最大鉛直力 (B_W)
で, B_W は緩衝浮子が水面に固定されているものとして,
Morison-O'Brien の算定式より求めた。

図-5 は実験値 (● 印で添字は波形勾配) と計算値を比較したもので, 計算 (2) (実線) は計算 (1) (破線) に比べてはるかに優れている。しかも実験条件が異なることによる水平張力の特性, 例えば l/L と T_H/F_H との関係 (全ケース), 部材密度 σ_i の増加に伴う T_H/F_H の変化 (Case A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ E), h/a の減少と T_H/F_H の関係 (Case E $\rightarrow$ F) など, 計算 (2) は実験結果の特性とよく対応した。

4.2 現地観測結果との比較

資料には, 1979 年 9 月 30 日 (台風 16 号) に石田らが図-1 に示す施設で実測した緩衝浮子といけすとの連結ロープに働く張力及びこれより北方約 20 km 離れた上川口地先, 距岸約 1.1 km, 深さ 25 m で第三港湾が実測した波を使用した。これに基づき計算 (2) により最大水平張力を求めた。結果は $F_H = 16.3$ ton, $\Delta x_{\max} = 6.47$ m, $T_H/F_H = 0.0756$ すなわち, 波による係留索の最大水平張力 T_H は 1.22 ton を得る。これは波のみによる張力で, さらに初期張力 $T_{H0} = 0.58$ ton を加えた力 1.80 ton が係留索に実際に働いたことになる。一方実測値は 1.07 ton であったことから, 計算 (2) は 1.8 倍大きな値を与えたことになる。

5. む す び

沖合養殖いけすとは, 波や流れの厳しい外洋性の海域に魚類養殖を目的として敷設される養殖施設である。ここでは波によりこれら施設の係留索に働く張力の算定基本式及び算定法を提起し検討した。

基本式は基礎実験と石田らによる現地観測の結果を参考にして, 次の仮定の下で導きたいけすと浮子 (部材)

に関する運動方程式である。

- 仮定 i. 施設は波向に平行に係留されている。
- ii. ロープは弛緩することなく, 各部材は一体として水平に移動し, その移動量は微小とする。
- iii. 各部材に働く波力は水平移動を考慮した水平波力のみとする。
- iv. 緩衝浮子については, さらに一定な大きさの鉛直力が作用するものとする。

係留索張力の算定は, 基本式の解析解を求め, 入力データとして海域諸量 (水深, 波高, 周期) 及び施設諸量 (係留索長, 各部材の諸元である射影面積, 体積, 密度, 付加質量係数, 抗力係数, 部材位置) を与え, また, 緩衝浮子に働く一定な大きさの鉛直力には, 緩衝浮子の浮力とそれに働く鉛直波力の最大値との和で与え, 数値計算によった。

施設規模, 部材の密度, 係留索長を異にした 6 ケースについて行なった基礎実験及び現地観測の結果と比較, 検討することにより, 上記算定法による張力の妥当性を確認した。

基礎実験は東海大学学生森淳志君 (現在漁港浅海コンサルタンツ) の協力により農林水産省水産工学研究所で行なった。算定式の数値計算は高知大学学生原田道洋君の協力を得た。現地観測データは高知県水試石田善久漁業科長 (現在室戸漁業指導所長) の提供によるもので, これらの方々に対し深謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 高知県水産試験場: 沖合漁場利用養殖技術開発企業化試験, 昭和 55 年度研究成果報告書, pp. 61~78, 1981.
- 2) 木村晴保: 浮魚礁係留のための浮体に働く波力と係留張力の基礎的研究, 農業土木試験場報告 第 16 号, pp. 123~126, 1977.