

波浪による振動を低減した耐波性かき養殖筏の開発と それを用いた養殖マガキの生産

中川 浩一・上妻 智行^a・佐藤 利幸^b・江藤 拓也・俵積田 貴彦
(豊前海研究所)

マガキの成長が遅く、収益性が低い「波浪漁場」での養殖拡大を目的として、波浪による振動を低減した、耐波性があり、かつ生産性の高い筏の開発を行った。試験筏は耐久性に優れたFRP製パイプと浮力調整フロートで構成され、既存の竹筏より浮力の低い状態で養殖を行った。加速度計を用いた振動測定試験から、試験筏は竹筏と比較して波浪による振動が低減されていることや、竹筏で明瞭に観測された微振動がほとんど発生しないことが観測された。また、2年の試験期間中、試験筏は台風時の破損や材質の劣化が殆どみられなかった。試験筏によるマガキの成長は良好で、個体重量と最大加速度との間に負の相関 ($R^2=0.846$) がみられたことから、成長には筏の振動が大きく影響していることが分かった。品質の低下を招く卵巣肥大症の異常膨瘍は、軟体部へのグリコーゲン蓄積に伴って成長の良い試験筏での視認率が低下した。一連の結果から、今回作成した試験筏は耐波性があり、波浪による振動が少なく、かつ生産性の高いことが明らかとなった。

キーワード：マガキ、養殖筏、耐波性、振動、成長、卵巣肥大症

福岡県豊前海区でのかき養殖は、1983年に恒見漁協(現豊前海北部漁協恒見支所)で試験養殖が開始されてから急速に発展し、現在では「豊前海一粒かき」というブランド名で年間1,000トンを超える生産を揚げ、冬季の主幹漁業に成長している。

「豊前海一粒かき」の養殖は図1に示すように海区全域で行われているが、新北九州空港西側に広がる人工島周辺漁場(静穏漁場)を除き、多くは開放的で風波の影響を強く受ける漁場(波浪漁場)である。波浪漁場では台風等による養殖筏の破損被害が大きく、成長が遅いため漁場が有効に活用されておらず、表1に示すように生産の約80%は静穏漁場で行われている現状がある。

当研究所ではこれまでに波浪漁場におけるかき養殖の普及を推進するため、FRP製パイプを用いた「耐波性筏」を開発¹⁾し、筏の破損被害防止策についてはめどが立ったものの、成長が遅く収益性が低い問題は解消されていない。当海域の漁場間でのマガキ成長差については環境特性に起因するのではなく、主に筏の振動による摂餌障害によるものとの報告²⁾がなされており、その対策が課題である。

そこで、今回は筏の振動を低減させる方法として浮力に着目し、図2に示すように浮力を軽減させると筏が波

に乗って浮上する力が減少し、結果的に筏の上下動が低減されることを想定した。本研究ではその実証のために、

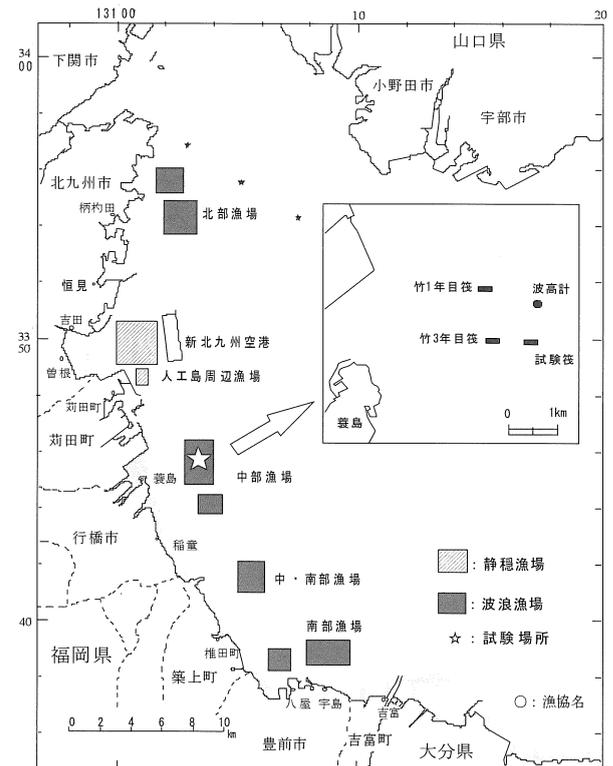


図1 かき養殖漁場及び試験位置図

a現所属：水産振興課

b現所属：漁政課

表 1 漁場とマガキ生産量（'04 豊前海研究所調べ）

	漁場面積 (ha)	筏台数 (台)	1筏占有面積 (ha)	カキ生産量 (t)
静穏漁場	750	141	5	936
波浪漁場	2,005	52	37	186

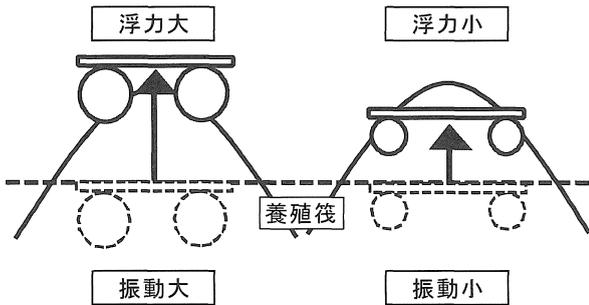


図 2 波浪による筏の振動と浮力との関係

浮力調節が可能な耐波性養殖筏を新たに開発・設置し、従来の孟宗竹製筏との振動や成長差に関する比較試験を実施した。

方 法

1. 耐波性があり、生産性の高い筏の開発

試験に使用した筏（試験筏）は図3に示すとおり、上妻ら¹⁾が開発した耐波性筏を改良して部材はすべてFRP

製パイプ（宇部日東化成㈱：コンポーズパイプ直径76mm）で構成し、負荷を伴う通称「レール」や「添え」中央部にはパイプを数本抱き合わせて強度を増加させた。また、筏の浮力を調整するためにモルフロート（㈱モルテン：モルフロート400V型）を使用した。このフロートは硬質樹脂製で、下部には内部に海水が入り込む直径10cm程度の穴が空いており、上部のコックから内部に空気を注入することで浮力調整が可能な構造となっている。

試験筏は'05年3月に図1に示す中部漁場において、他の孟宗竹製筏（竹筏）と同様、東西に向くように設置した。試験は4月から翌年3月にかけて1連に15枚のコレクターを挟み込んだ垂下連約1,000本を垂下して行った。なお、試験筏の浮力設定について、通常「横竹」は竹の腐食を防ぐために水面上にあるが（一部の筏はマガキの成長に伴う重量増加等により、次第に「横竹」下部が水面に浸る）、常に「横竹」上部が水面に隠れる低浮力状態となるように調節を行った。

筏の性能把握については、まず垂下したマガキが80mm程度に成長し、更にホヤ等付着生物の影響で垂下ロープの重量が増加した'05年10月5日にすべてのモルフロートに潜水用ポンプを用いて空気を注入し、最も浮力の高い状態として筏の浮力調整性能の測定を行った。また、台風通過時の筏の破損状況や2回目の養殖試験が終了した'07年4月に施設の状況を調査して、試験筏の耐波性や耐久性についての判定を行った。

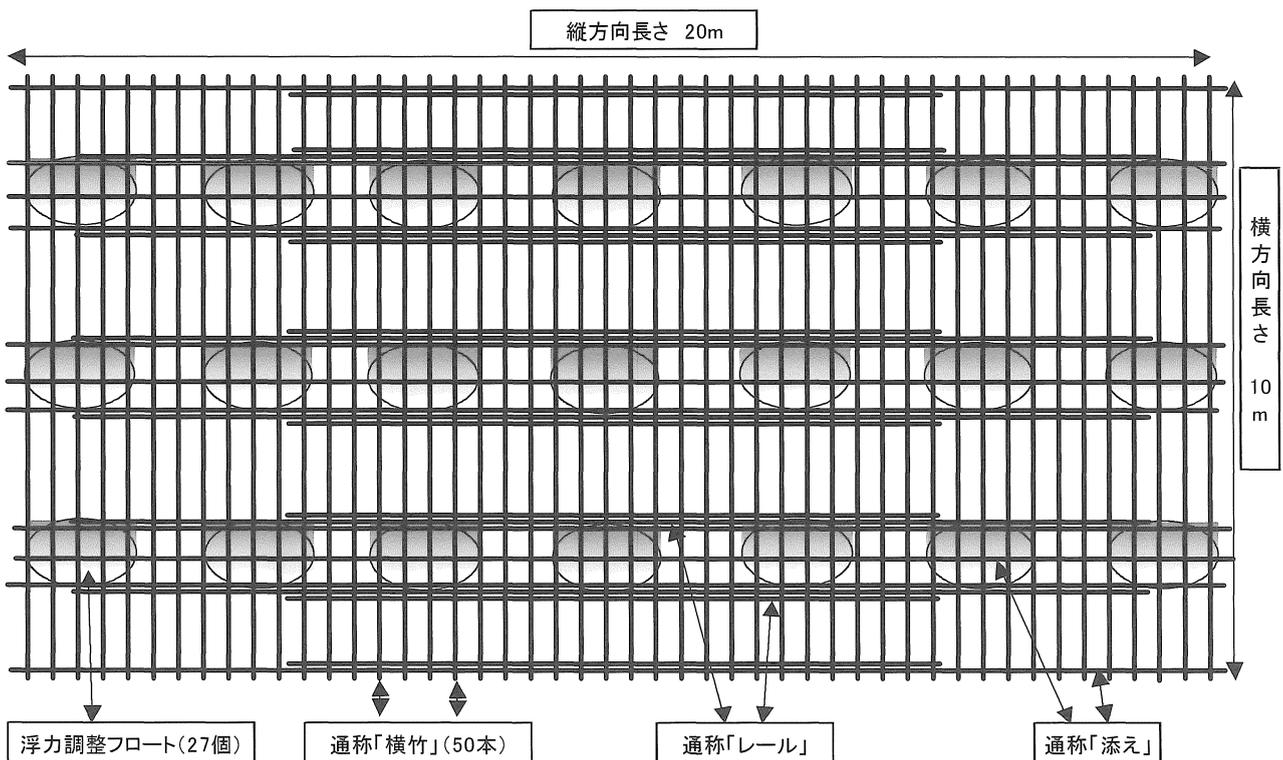


図 3 試験筏（総FRPパイプ製）の見取図

2. 波浪の把握

'06年9月12日10時から9月26日7時にかけて、図1の場所に水圧波高計（アレック電子㈱：AWH-16M）を海底に設置し、波高の連続観測を行った。波高計の設定は、バースト180分、インターバル0.1秒の10分間測定（サンプル数6,000個）とした。

3. 筏振動の把握

(1) 筏別振動比較試験

図1に示す試験筏と竹筏（設置後1年目及び3年目）の中央部及び縁辺部（東側の中央）の「横竹」に、図4のように三軸方向加速度計（IMV㈱：VP-5123HHV）を設置し、筏の振動を測定した。また、各筏の浮き上がり状況を把握するため、加速度計直下の「横竹」下部から水面までの高さを測定した。試験は'06年9月14日に実施し、加速度計の設定はインターバル0.002秒の10分間測定（サンプル数300,000個）とし、観測状況は表2に示した。なお、測定結果は調査船内に設置したパソコンに取り込み、解析は㈱東京久栄に委託した。

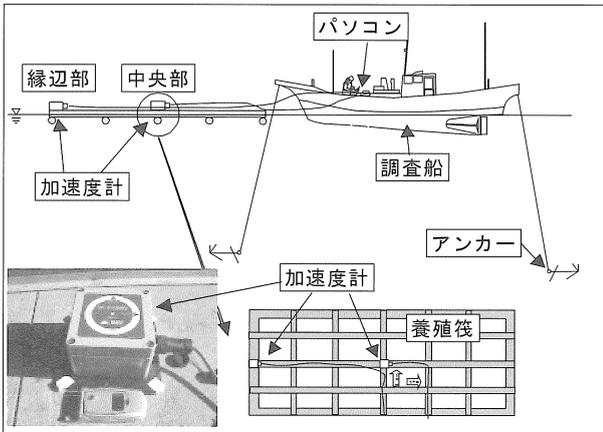


図4 筏の振動観測状況

表2 筏別振動比較試験

試験区	対象筏 (筏年数)	開始 時間	終了 時間	風速 (m/s)	風向
試験筏	試験筏 (2年目)	11:33	11:43		
竹1年目	孟宗竹製筏 (1年目)	10:20	10:30	6	北東
竹3年目	孟宗竹製筏 (3年目)	11:00	11:10		

表3 浮力別振動比較試験

試験区	対象筏 (筏年数)	開始 時間	終了 時間	風速 (m/s)	風向
浮力小	試験筏 (2年目)	10:30	10:40	4	東
浮力大		11:14	11:24		

(2) 浮力別振動比較試験

試験筏において、モルフロートに空気を適量注入して筏全体を約5cm上昇させて浮力を変化させ、空気注入前と後の振動状況を観測した。なお、振動の測定は'06年9月15日に筏別振動比較試験と同様の方法で実施し、観測状況は表3に示した。

4. マガキの成長比較試験

マガキの収穫が本格化する'06年12月5日に、先に振動状況を測定した試験筏及び竹筏の中央部及び縁辺部直下の垂下ロープを1本取り上げ、試験中に後から付着した天然地ガキを取り除いたのちに、すべてのマガキの殻高、個体重量及び軟体部重量の測定と卵巣肥大症の有無について視認した。なお、卵巣肥大症の視認については、むき身状態において肉眼で行った。

結果

1. 耐波性があり、生産性の高い筏の開発

試験筏の浮力調整性能については、浮力の低い状態を図5に、モルフロートに空気を注入して浮力を高めた状



図5 低浮力状態の試験筏（空気注入前）

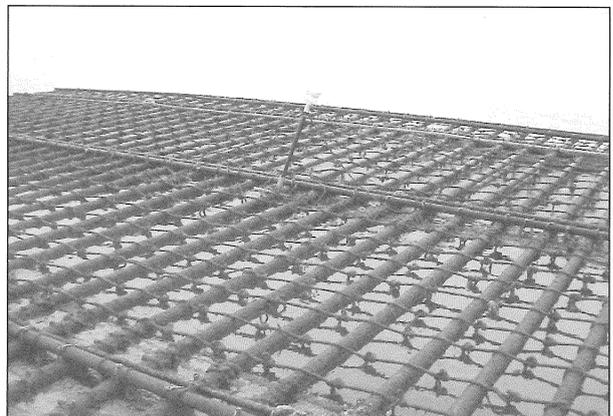


図6 高浮力状態の試験筏（空気注入後）

態を図6に示した。試験開始前には「横竹」は海面下に沈んでいたが、空気注入後には中心部が約15cm浮上して水面上に現れ、通常の竹筏と同様の状態にまで回復することが確認された。なお、1つのモルフロートに空気を注入するために要した時間は2分程度であった。台風通過時の耐波性については、表4に示すように試験期間中に2度の台風直撃を受け、周辺の竹筏には破損被害が生じたが、試験筏には被害が生じなかった。

また、試験終了時の施設概況については、FRPパイプの状況はカキ等の付着がみられたものの、腐食したり折れたものはなく、パイプの入れ替えや補強が伴う大がかりな補修作業は不要であった。しかしながら、図7に示すようにパイプ同士を接合するために用いた番線の締めがゆるんでパイプとの間にスレが生じ、表面1~2mmが削れている箇所が多くみられた。モルフロートの状況は、流失や破損など交換が必要な被害は発生しなかったが、ムラサキイガイ等の付着生物がモルフロート外部を覆っており、更に内部にも20kg程度が侵入していた。また、上部コック周辺にカキやホヤ等が付着して空気注入時の作業に支障が生じていた。

2. 波浪の把握

3時間毎に測定された波高データから3時間毎の有義波高を算出し、その出現頻度を図8に示した。図8に示すとおり、有義波高の出現は0~0.05m、0.05~0.1m、

表4 竹筏（中部漁場内）の台風被害状況

台風通過日	竹筏数 (台)	竹筏の破損(台)		
		大破	中破	小破
'05.9.6	16	1	1	5
'06.9.17	18	1	1	7

大破：レールが破損し、海上での修復が困難なもの
 中破：レールや横竹が破損し、海上での修復が可能なもの
 小破：フロートの流失や横竹の小規模な破損があるもの

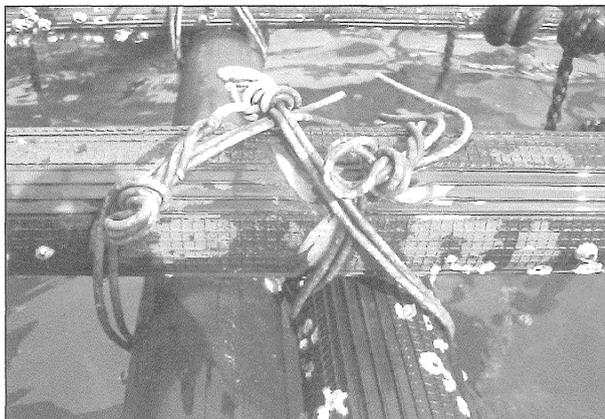


図7 2年経過後の番線のスレ

0.1~0.15m, 0.15~0.2m, 0.2~0.25m, 0.25~0.3m及び0.3m以上で各々1.8, 47.3, 27.7, 8.9, 5.4, 0及び8.9%であった。観測中の9月17日に台風が通過して有義波高2.9m, 最大波高3.9mの猛烈な時化を観測したが、通常時の有義波高はほとんどが0.3m以下であった。また、台風通過時の9月17日を除いた平常時の有義波高の平均値は0.12mであった。

3. 筏振動の把握

(1) 筏別振動比較試験

まず、各筏の加速度計直下の「横竹」下部から水面までの高さや波浪状況を表5に示した。水面までの高さをみると、竹1年目、竹3年目、試験筏区の順に浮力が大きいことや、各筏ともに縁辺部の方が中央部と比較して10cm程度浮いていることが分かった。また、波浪状況は平常時の観測平均値（有義波高0.12m）と比べて若干の

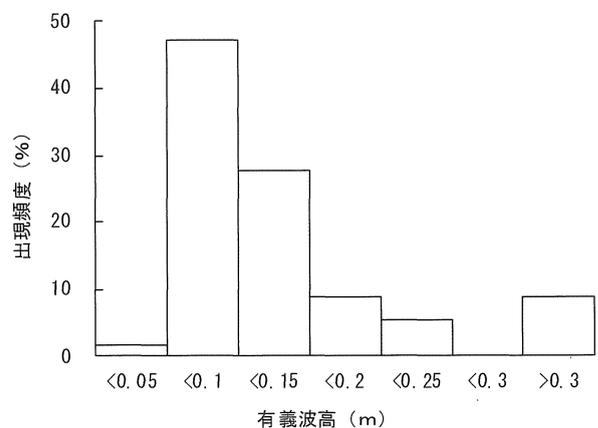


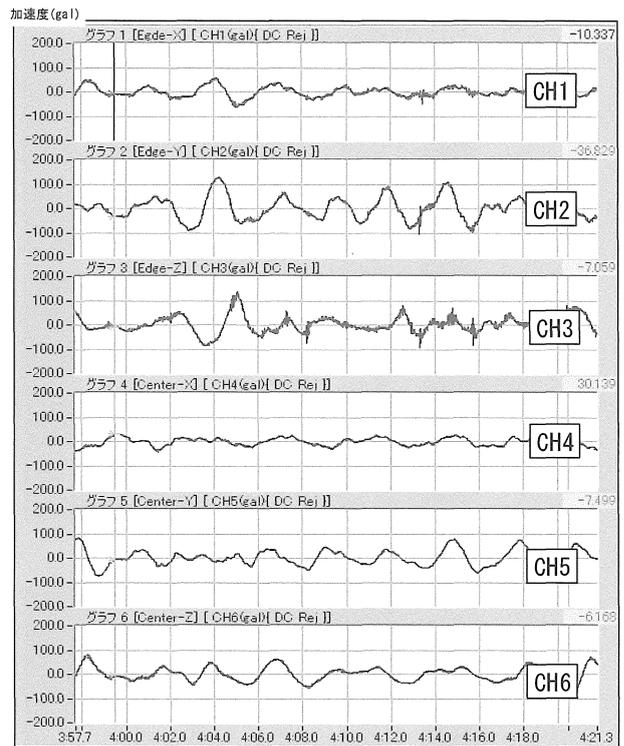
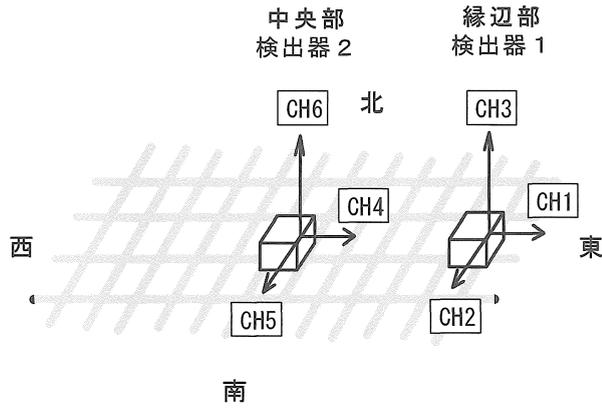
図8 漁場での波浪出現状況 ('06.9.12~9.26)

表5 各筏の浮力及び測定時の波浪 ('06.9.14)

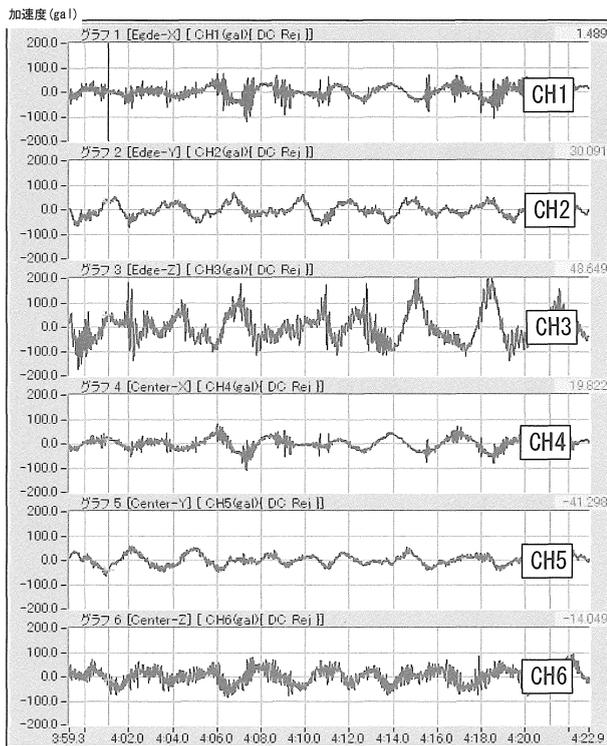
試験区	水面までの高さ		波浪の状況	
	縁辺部 (cm)	中央部 (cm)	有義波高 H _{1/3} (m)	有義波周期 T _{1/3} (秒)
試験筏	0	-11		
竹1年目	+16	+7	0.14	3.9
竹3年目	+10	0		

表6 加速度の頻度分布(鉛直方向) (単位: %)

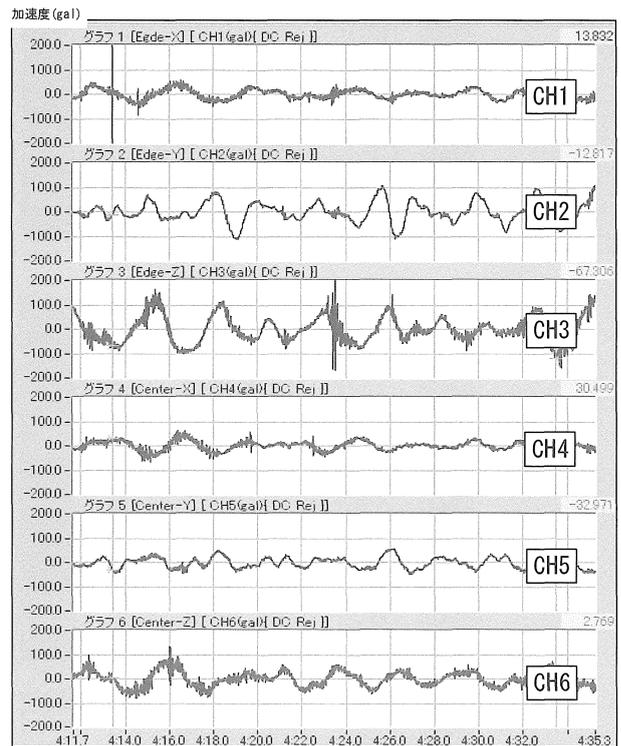
加速度 (gal)	試験筏		竹1年目		竹3年目	
	縁辺部	中央部	縁辺部	中央部	縁辺部	中央部
0~50	85.6	88.1	57.9	82.4	60.1	77.4
50~100	13.8	11.6	30.2	16.2	31.4	21.1
100~150	0.6	0.2	8.7	1.4	7.0	1.5
150~200	0.0	0.0	2.1	0.1	1.2	0.1
200≤	0.0	0.0	1.1	0.0	0.3	0.0



試験筏区



竹 1 年目区



竹 3 年目区

図 9 各筏における加速度の時系列変動

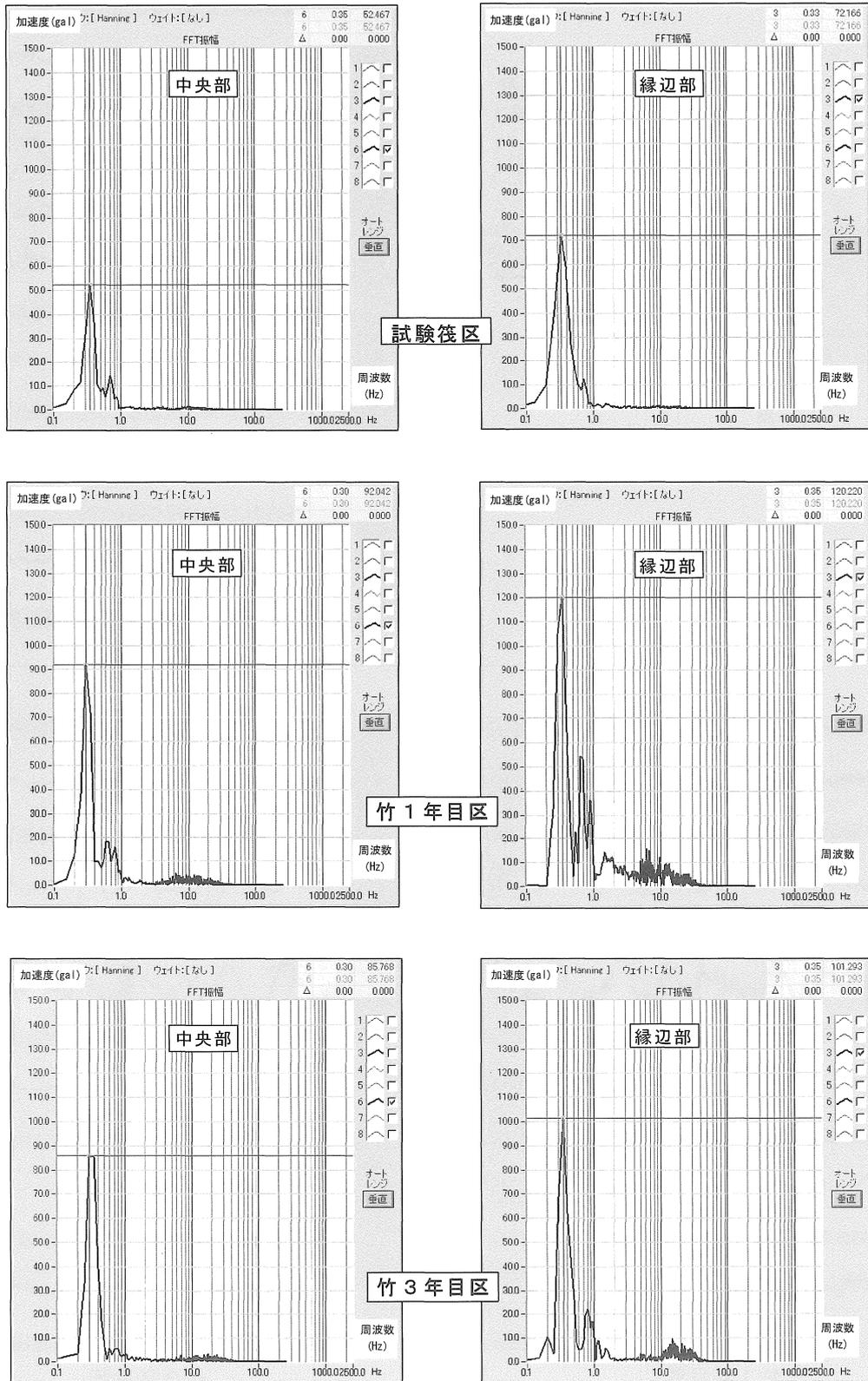


図10 最大値出現時におけるFFT振幅グラフ（鉛直方向）

時化であり、観測中の状況変化はなかった。

次に、筏の鉛直方向の加速度出現頻度を表6に示した。100gal以上の強い衝撃が観測された割合は、試験筏、竹3年目、竹1年目区の順に少なく、特に試験筏は1%以下に軽減されていた。また、各筏ともに中央部の方が縁辺部と比較して振動が少なかった。

筏の揺れ方の特徴については、図9に示す加速度の時系列変動をみると、基本的にはどの筏も3方向ともに、観測された波浪の有義波周期(3.9秒)と同調して揺れていたことが分かった。また、周期の短い細かな揺れも観測されており、それは特に竹筏区の鉛直方向(CH3及びCH6)において顕著であった。

そこで、各筏における加速度の最大値出現時の鉛直方向のFFT(高速フーリエ変換)グラフを図10に示した。観測された加速度の最大値は、試験筏、竹1年目及び竹3年目区の中央部で各々52.5、92.0及び85.8gal、縁辺部で各々72.2、120.2及び101.3galであり、試験筏、竹3年目、竹1年目区の順に値が小さく、中央部の方が縁辺部と比較して値が小さかった。また、周波数と加速度との関係についてみると、加速度の最大値は各筏ともに海域での波浪の有義波周期(3.9秒)に対応する、周波数0.3Hz(周期3.3秒)付近で観測された。更に、竹筏区では周波数10Hz(周期0.1秒)付近に加速度10gal程度の微振動が明瞭に観測されたが、試験筏区ではほとんど観測されなかった。

(2) 浮力別振動比較試験

各方向で観測された加速度の頻度分布を図11に示した。40gal以上の加速度が観測された割合をみると、浮力小区の方が浮力大区と比較して、縦、横及び鉛直方向の中央部で各々2.4、2.7及び0.5%、縁辺部で8.0、1.2及び7.1%少なかった。なお、試験時の波浪状況は、平常時の観測平均値と比較して穏やかな有義波高0.08m、有義波周期4.3秒であり、観測中の状況変化はなかった。

4. マガキの成長比較試験

各試験区ごとの測定結果を表7に示した。ここで、マ

ガキは生育状況により個体ごとの形状差が著しい³⁾ため、個体重量を指標として大きさを比較したところ、筏間では試験筏、竹3年目、竹1年目区の順に、同一筏では中央部の方が縁辺部と比較してマガキが大きい傾向がみられた。そこで、全ての測定部位での成長を比較するためにt検定を行った結果、表8に示す結果を得た。更に、ライアンの方法により対比較を行ったところ、試験筏中央部≧竹3年目中央部=試験筏縁辺部>竹3年目縁辺部=竹1年目中央部>竹1年目縁辺部の順に成長が異なることが分かった。

また、測定したマガキを漁業者の出荷状況と同様に1

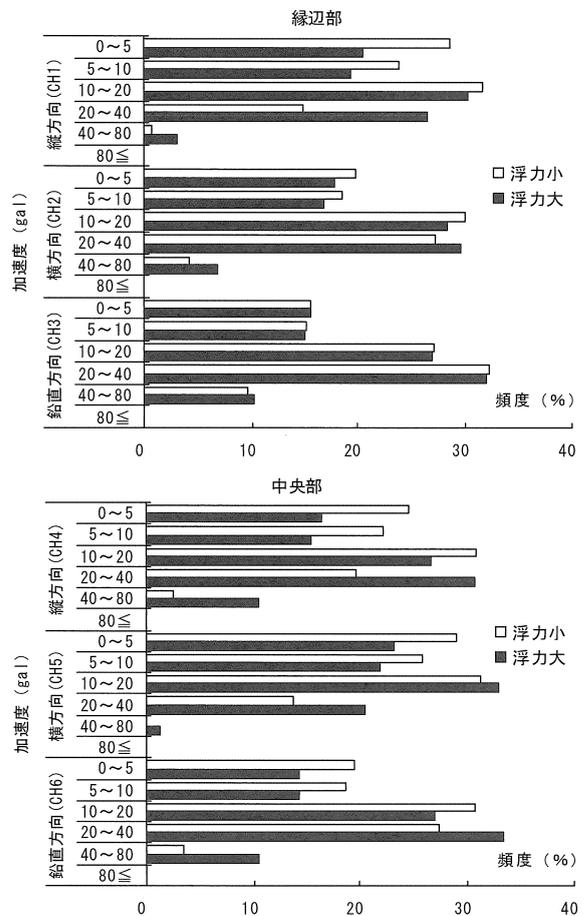


図11 加速度の頻度分布(浮力別振動比較試験)

表7 1垂下ロープあたりのマガキ測定結果('06.12.5)

試験区	測定部位	殻高±標準偏差 (mm)	個体重量±標準偏差 (g)	軟体部重量±標準偏差 (g)	付着個数 (個)	付着重量 (kg)	卵巣肥大症視認率 (%)
試験筏	縁辺部	92.4±14.6	59.2±20.5	13.9±5.0	256	15.2	10.9
	中央部	98.7±14.0	63.4±20.1	14.1±4.8	299	19.0	4.7
竹1年目	縁辺部	70.4±11.6	40.3±16.3	10.0±4.4	204	8.2	24.0
	中央部	88.6±15.4	48.9±20.6	10.4±4.9	249	12.2	19.3
竹3年目	縁辺部	84.8±13.7	51.4±19.4	12.8±5.0	247	12.7	18.2
	中央部	92.4±17.8	59.8±21.1	13.3±4.7	239	14.3	17.2

個体あたりの重量が85g以上を「大銘柄」、65g以上85g未満を「中銘柄」、50g以上65g未満を「小銘柄」、50g未満を商品とならない「規格外」と区分し、試験区ごとに1垂下ロープあたりの収穫量を集計したところ、試験筏は図12に示すように竹1年目及び竹3年目区と比較して、縁辺部で約1.8及び1.2倍、中央部で約1.6及び1.3倍であった。更に、「大銘柄」を700円/kg、「中銘柄」を600円/kg、「小銘柄」を500円/kg、「規格外」を0円/kgとして水揚げ金額に換算すると、試験筏は高単価な「大銘柄」の占める割合が高く、「規格外」の割合が低いために差は拡大し、図13に示すように竹1年目及び竹3年目区と比較して、縁辺部で約3.8及び1.5倍、中央部で約2.2及び1.4倍と試算された。

一方、卵巣肥大症の視認率は竹1年目縁辺部、竹1年目中央部、竹3年目縁辺部、竹3年目中央部、試験筏縁辺部、試験筏中央部の順に高く、マガキの大きさとは相反する傾向を示した。そこで、図14に示すように卵巣肥大症の視認個体と健常個体との軟体部重量を比較すると、平均軟体部重量は視認個体及び健常個体で各々11.1g及び19.6gであり、明らかに（有意水準1%）視認個体の方が健常個体と比較して大型個体の割合が少ない傾向がみられた。

考 察

試験筏の耐波性能に関しては、試験期間中に2度の台風直撃を受け、漁場内の竹筏にはそれぞれ約半数の被害が生じたものの、試験筏には被害が生じることはなかった。また、浮力調整性能については、モルフロートに空気を注入して高浮力状態にすると、筏の浮き方が竹筏と同程度にまで回復した。従って、今回開発にあたったこれら付加的な性能については、試験筏には十分に備わっているものと判断された。

この筏性能を維持するための保守・管理にあたっては、番線のスレやモルフロートの生物付着に留意する必要があることが分かった。番線のスレについては、番線の締め付けが緩んでいないところではスレがみられなかったことから、スレを防止するには普段から番線の締め付けが充分であるか点検を行い、緩みがあれば速やかに締め直すことが重要であろう。更に、試験筏を開発した当時はFRPパイプの直径は76mmが最高であり、強度を持たせるために負荷がかかる「ルール」や「添え」には数本を抱き合わせて使用したが、現在では直径89mmのものが販売されており、それを単体で使用することで強度を保ちながら番線の使用を抑えることが可能であろう。

表8 有意水準の比較（個体重量）

試験区	試験筏 (中央)	試験筏 (縁辺)	竹3年目 (中央)	竹3年目 (縁辺)	竹1年目 (中央)	竹1年目 (縁辺)
試験筏 (中央)		5%	5%	1%	1%	1%
試験筏 (縁辺)			なし	1%	1%	1%
竹3年目 (中央)				1%	1%	1%
竹3年目 (縁辺)					なし	1%
竹1年目 (中央)						1%
竹1年目 (縁辺)						

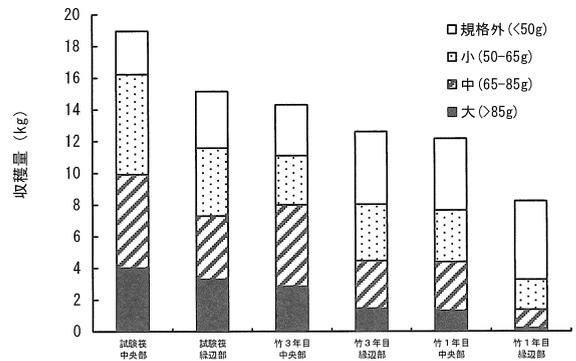


図12 銘柄別1垂下ロープあたりマガキ収穫量

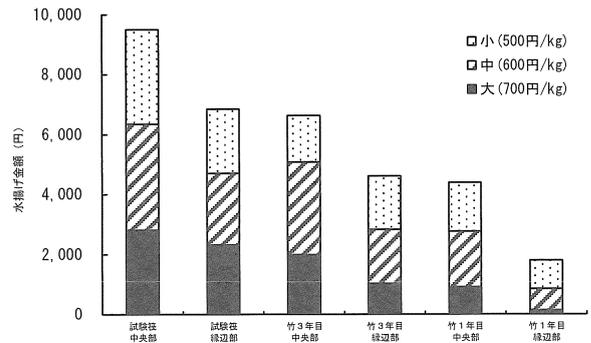


図13 銘柄別1垂下ロープあたりマガキ水揚げ金額

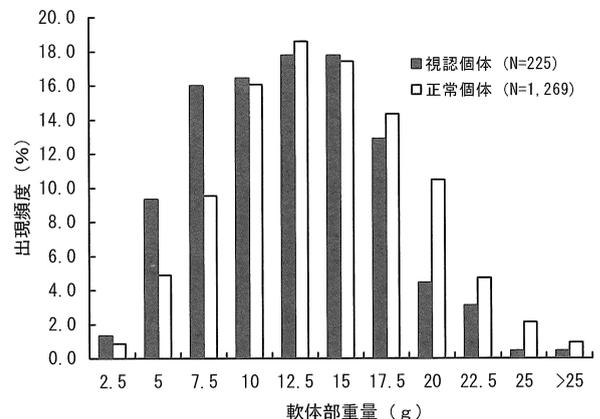


図14 卵巣肥大症視認個体と健常個体の頻度分布

また、モルフロートへの生物付着については、大量に付着した場合はその重量で浮力の低下を招くために、場合によっては除去が必要となるが、内部に付着したものは海上での除去作業は困難である。除去には、数年に1度すべてのマガキを収穫したのちに海上でモルフロートを交換したり、メンテナンスを兼ねて筏を海岸まで曳航し、陸上で干し上げるような手間が必要となるが、いずれの作業も重労働を伴うこととなる。そこで、例えばモルフロートは使用せずに、浮力の調節は出来ないが硬質樹脂で覆われた耐久性のある通称「永久フロート」を使用し、浮力の調節は筏に土嚢等の重しを積むことで行えば、フロートの保守・管理作業の軽減に繋がるであろう。

なお、これらの状況から試験筏の耐用年数について推測すると、通常の竹筏は腐食等による施設の劣化により3年程度であるが、試験筏は番線の緩みによるスレが発生したものの、FRPパイプの腐食や劣化がほとんどみられなかったことから、適度なメンテナンスを実施することで、10年以上の長期使用に耐えうるものと思われる。

筏の振動は、まず測定部位による違いをみると、筏中央部は波浪が到達する過程で減衰された結果、縁辺部と比較して振動が2～3割少ないことが観測された。また、筏は浮力が小さいほど振動が少ないことが確認された。この結果は、当初に想定した、図2のように浮力を軽減させると筏の浮上力が減少し、結果的に筏の上下動が低減される考えを支持したものである。なお、加速度の最大値をみると、試験筏は竹筏（1年目）と比較して約40%も振動が低減されており、観測時の波浪状況（0.14m）が若干の時化程度であったことを考慮すれば、この振動低減効果が日常的に発生していることが明らかとなった。

また、竹筏では周波数が10Hz（周期0.1秒）付近に加速度10gal程度の微振動が明瞭に観測されたが、FRP製パイプで構成された試験筏ではほとんど観測されず、竹筏と試験筏では振動特性が異なることが観察された。この微振動は、主に構成部材同士の接触によるきしみと推察され、竹筏に多く発生した原因は材質の違いではなく、図15に示すように当海域の竹筏は部材（孟宗竹）の大部分を補強で抱き合わせて使用しているため、接触面が多く構造的に擦れによる微振動が発生しやすいものと思われる。試験筏のこの微振動低減効果についても、マガキの成長促進に寄与するものと推察された。

マガキの成長は、試験筏中央部≧竹3年目中央部＝試験筏縁辺部>竹3年目縁辺部＝竹1年目中央部>竹1年目縁辺部の順となり、個体重量は図16に示すように加速度の最大値とは強い負の相関（ $R^2=0.846$ ）を示した。このことは、マガキの成長は筏の物理的な振動が大きく関

与し、その影響を受けて成長が阻害されていることを示唆しており、試験筏を用いて筏の振動を低減した結果、マガキの成長に影響を及ぼしたものと解釈できよう。

卵巣肥大症については、全国各地の養殖マガキ産地や天然マガキ⁴⁾において幅広く発症が確認されているが、軟体部の異常膨脹が異様な外観を呈しているため、消費者の手に届くと苦情が寄せられて問題となる場合がある。しかしながら、豊前海ではほとんどが殻付きで出荷されて事前の個体選別が出来ない状況があり、特に出荷盛期の12月において養殖時の発症率を低下させることが出来れば非常に望ましいこととなる。上妻ら⁵⁾によると、卵巣肥大症の発症率は軟体部へのグリコーゲン蓄積に伴い、異常膨脹の肉眼での視認率が低下することを報告しており、今回も同様に健全個体の方が発症個体よりも軟体部重量が重い傾向がみられ、結果としてマガキの成長が良好な試験筏の視認率が低かったものと思われる。

一連の試験結果から、垂下したマガキは筏の振動の影響を受けており、浮力が小さい筏のマガキは振動が少ないために成長が良いことが明らかとなった。これを竹筏にあてはめてみると、試験結果からも分かるように、年数を経た古い筏の方が経年変化や生物付着等の影響により浮力や施設耐久性が低下する一方、成長が良いこととなる。実際に漁業者は、経験的に古い筏の方がマガキの

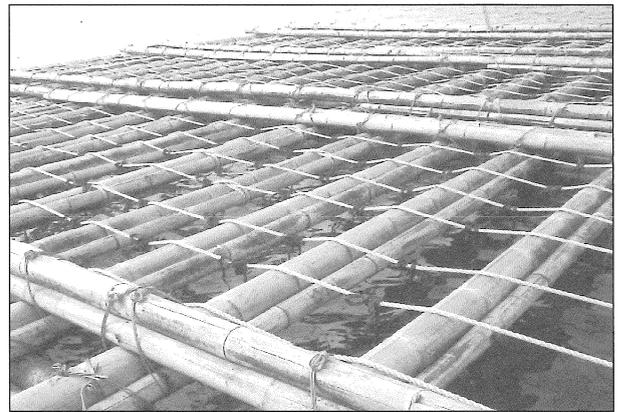


図15 竹筏の孟宗竹抱き合わせ構造

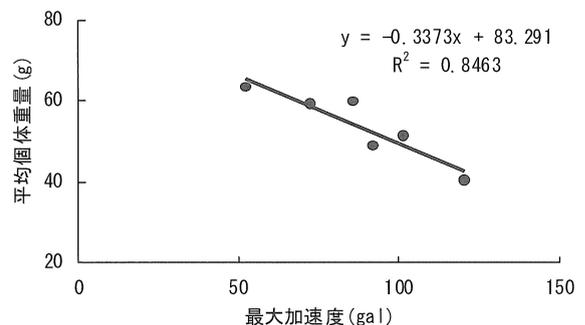


図16 筏の振動とマガキの大きさとの関係

成長が良いことを承知しており、台風等による施設倒壊の不確定なリスクを懸念しつつも、生産性の高い古い筏での養殖を好む傾向が見受けられる。

従って、今回開発した筏については、製作費用が竹筏と比較して約4倍（250万円）と初期投資は高むこととなるが、耐波・耐久性があり、筏の振動が少なく生産性に優れた特性を持つことから、長期的な視点に立てば十分に経済的であり、特に波浪漁場での「豊前海一粒かき」の安定生産に繋がることを漁業者に説明したうえで、導入及び普及を図りたい。

文 献

- 1) 上妻智行・佐藤利幸・長本篤・江藤拓也：FRPパイプを用いたカキ養殖筏の耐破性試験．福岡県水産海洋技術センター研究報告，第15号，33-37(2005)．
- 2) 上妻智行・江崎恭志・長本篤・片山幸恵・中川清：豊前海における養殖カキの成長格差と環境要因．福岡県水産海洋技術センター研究報告，第13号，31-34(2003)．
- 3) 野村正：カキ・ホタテ・アワビ，第1版，恒星社厚生閣，東京都，1995，pp. 214-215.
- 4) 草加耕司：岡山県沿岸の天然マガキにおける卵巣肥大症の発生状況．岡山県水産試験場報告，第20号，29-31(2005)．
- 5) 上妻智行・佐藤利幸・長本篤・江藤拓也：豊前海の養殖マガキにおける卵巣肥大症の発生状況．福岡県水産海洋技術センター研究報告，第14号，51-55(2004)．