

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450275

研究課題名(和文) 海上浮体施設の動揺抑制と水産資源生産力向上技術の開発

研究課題名(英文) Development of Movement Restraint Device for Aquaculture Facilities and Fisheries Resources Production Enhancement Technology

研究代表者

末永 慶寛 (Suenaga, Yoshihiro)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：00284349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：全国沿岸海域で展開されている海面養殖漁業や栽培漁業で多く用いられる生簀は、海上浮体構造物であるため、波浪によって動揺する。この生簀の動揺に伴い、生簀内で飼育されている有用魚種が網と接触した損傷に伴う商品価値の低下、魚がストレスを感じて死に至ることによる水産資源生産力の低下が問題となっている。本研究では、実海域の不規則波に対応すべく、固有周期の異なる複数の振動水柱を有する波浪エネルギー吸収型動揺抑制装置の開発を行い、その有効性を検証した。本装置を既存の海上魚類養殖生簀(浮体施設)に装着し、波浪による生簀の動揺を抑制することができ、有用稚魚の生産効率を向上させた。

研究成果の概要(英文)：Floating aquaculture facilities are often used in culture fisheries and fish farming. In the case of rearing fish juveniles that have hiding behavior in the floating aquaculture preserves, the number of fish juveniles decreases due to the stress from movement of preserves caused by the waves.

In this study, we invented the wave energy absorption gadget operates on the principle that the natural frequency of the oscillating wave column is determined not by its volume but by its length.

We have conducted some field experiments in different conditions and acquired high wave energy absorption ratio besides better survival rate of fish juveniles in the floating rearing facilities.

研究分野：水圏環境工学

キーワード：振動水柱 波浪エネルギー 動揺抑制 稚魚 生残率

1. 研究開始当初の背景

我が国沿岸海域では、安定した生産量を見込むことのできる養殖漁業や栽培漁業が盛んに行われてきた。特に、メバル、キジハタ等の岩礁性魚種は、海中では岩や海藻などに寄りついて生活する習性があり、養殖生簀中では生簀の隅に集まって生息するため、生簀の動揺による魚類生息環境への影響が大きい。海上浮体施設である生簀の動揺により生簀の網が変形し、魚類が安定して身を寄せる場所が確保されず、繰り返し網に接触することで魚が傷つき、ストレスによりほぼ全滅に近い状態で死亡してしまうことが深刻な問題となっている。

このことから、自治体および漁業関係者の声として、波浪による生簀の動揺が抑えられ、現状の養殖生簀に装着が可能な動揺抑制装置の開発が強く求められている。これまで、生簀の動揺を抑制するための技術開発は、ほとんど行われておらず、僅かに応募者が振動水柱を用いた基礎的な実験を経て、波浪エネルギー吸収による手法の妥当性を検証した例があるのみである。

2. 研究の目的

全国沿岸海域で展開されている海面養殖漁業や栽培漁業で多く用いられる生簀は、海上浮体構造物であるため、波浪によって動揺する。この生簀の動揺に伴い、生簀内で飼育されている有用魚種が網と接触した損傷に伴う商品価値の低下、魚がストレスを感じて死に至ることによる水産資源生産力の低下が問題となっている。

そこで本研究では、広い周波数帯の不規則波に対応すべく、固有周期の異なる複数の振動水柱を有する、独創的な波浪エネルギー吸収型動揺抑制装置の開発を行い、その有効性を検証する。この装置では、U字管内の単一水柱の固有周期が水柱の長さによって決定されることに着目した。これにより、既存の魚類養殖生簀に装着し、波浪による生簀の動揺を抑制することができ、有用稚魚の生産効率が飛躍的に向上させる技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

平成 25 年度には、対象海域の海象観測および実機生簀に装着するための基本設計を行い、実海域実験装置を製作した。次に、水理実験による不規則波中の波浪エネルギー吸収効率の検討を行った。これらの結果から、次年度に向けた研究の改善点、計画・方法について再検討を行った。

平成 26 年度には、実機装置を浮体施設に装着して現地実験を実施し、実海域における波浪エネルギー吸収効率に関する定量的評価を行った。さらに、対象水域で深刻化している稚魚の畜養期における生存率向上機能について、既存技術との比較検討を行い、本研究における優位性および評価方法の特徴

を明確にした。

最終年度の**平成 27 年度**には、対象海域の特性、魚種に応じた装置仕様の決定および振動水柱型波浪エネルギー吸収システムを構築した。

4. 研究成果

(1) 波浪エネルギー吸収型消波構造物の特徴

本研究で用いる振動水柱の運動を空気エネルギーに変換する方法は、装置を単純な形状で作成することが可能であるとともに、簡単に流体力を求めることができ、長周期の波も吸収することができる装置形状である。これまで筆者らは、図-1 に示すような U 字管内における単一の振動水柱の固有周期が、水中の体積ではなくその長さのみによって決定され、管口の向きに関係なく存在することを解明している。この水柱の固有周期と入射波の周期に近い値になったとき、水柱内の変位が最大となり波浪エネルギーを吸収できるという仕組みである。これらの手法を基に、振動水柱を格納した消波装置模型を製作し、水理実験による振動水柱の内部水柱変位を測定および理論計算手法の妥当性を検証した後、提案した消波装置による波浪エネルギー吸収効率を算定した。

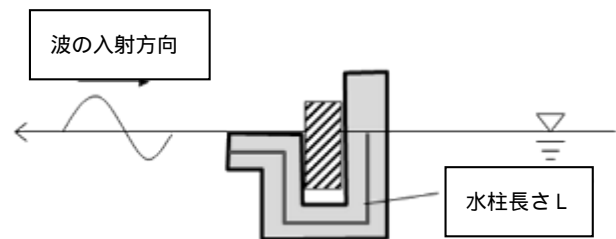


図-1 振動水柱

(2) 内部水柱変位

本研究では、振動水柱の固有周期が水柱の体積でなくその長さによって決定され、管口の向きに関係なく存在することが確認されていることに着目し、水柱の固有周期は以下の式で算定した。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

(3) 水理実験による波浪エネルギー吸収機能の検証

実験は、実機構造物の 1/25 を想定して、模型寸法を幅 45cm、高さ 30cm、長さは、振動水柱の長さに応じて $L = 38.0\text{cm}$ 、 60.0cm 、 72.5cm の 3 種類の模型を用いて香川大学工学部と香川県水産試験場の実験水槽で行なった(図 2~4)。それぞれの水柱における推定固有周期は、それぞれ 1.24sec、1.55sec、

1.72sec である．水理実験に用いた水路に振動水柱を格納した模型を設置し，模型の上流側で造波装置により波の周期 $T=0.6 \sim 2.0$ sec までの波を発生させ，波高は，瀬戸内海での有義波高を想定し，4.0cm (実機 $H_{1/3}=1.0$ m) として周期毎に測定を行なった．図 5, 6 に内部水柱変位に関する水理実験の結果 ($L=60.0$ cm, 72.5 cm の場合) を示す．グラフの縦軸は，入射波振幅に対する内部水柱変位との比で，横軸は波周期である．水理実験の結果から，内部水中変位は，いずれの水柱長さにおいても理論計算により推定した固有周期近傍で最大値を示し，実験値と理論値は極めて良い一致を示した．このことから，内部水柱変位を推定するための本理論の妥当性が検証された．

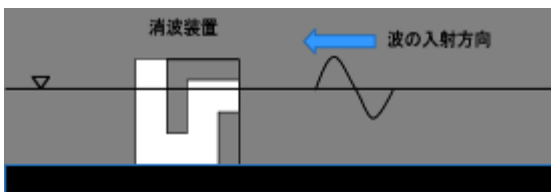


図-2 実験概要 (内部に振動水柱を格納)



図-3 実験状況 (側面)



図-4 実験状況 (側面)

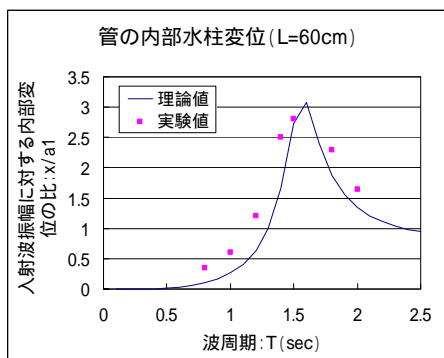


図-5 内部水柱変位 (水柱長さ:L=60.0cm)

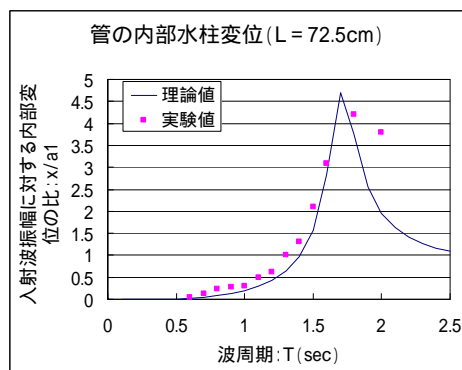


図-6 内部水柱変位 (水柱長さ:L=72.5cm)

(4) 波浪エネルギー吸収効率の検証

入射波の持つエネルギー，振動水柱による吸収エネルギーを求め，このエネルギーの比により装置による波浪エネルギー吸収効率を算定した．その結果，いずれの水柱においても，推定した固有周期近傍でエネルギー吸収効率はピークを示し，それぞれの水柱によるエネルギー吸収帯が確認できた(図-7,8)．また，反射波高および透過波高を測定し，それぞれの反射波係数 C_r ，透過波係数 C_t からエネルギー吸収効率を求めた．

波浪エネルギー吸収効率に関する実験の結果 水柱長さ $L=38.0$ cm の場合は， $C_r=0.41$ ， $C_t=0.45$ となり，この時のエネルギー吸収効率は約 64% となった．水柱長さ $L=60.0$ cm の場合は， $C_r=0.23$ ， $C_t=0.28$ となり，この時のエネルギー吸収効率は約 87% となったことから，いずれの場合も理論計算によるエネルギー吸収効率の値とほぼ一致した．

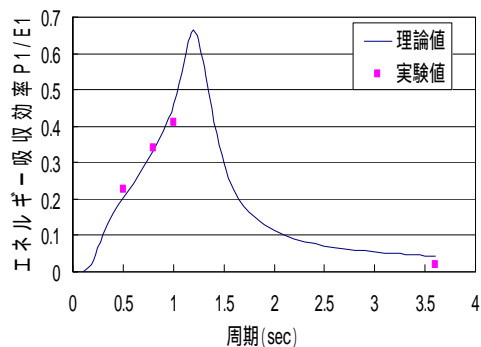


図-7 エネルギー吸収効率 (L:38.0cm)

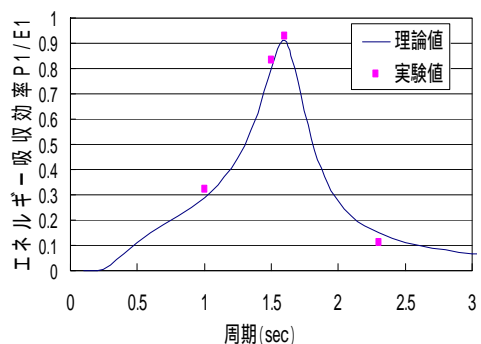


図-8 エネルギー吸収効率 (L:60.0cm)

(5)複数の振動水柱を有する消波装置による不規則波への対応方法の検討

実海域への構造物を適用する場合には、幅広い周波数帯を持つ不規則波中に対応可能な装置形状を検討する必要があるため、同一構造物内に複数の振動水柱を設けた場合の内部水中変位および波浪エネルギー吸収効率を理論計算により検討した。ここでは、水柱長さ $L=60.0\text{cm}$ と装置に $L=72.5\text{cm}$ の装置を合体させ、図-9 に示すような2本の水柱を有する形状について、前章と同様に水路内に複数の振動水柱を有するモデルを設置し、模型の上流側で造波装置により波の周期 $T=0.8 \sim 2.0\text{sec}$ までの波を発生させ、波高 4.0cm (実機 $H_{1/3}=1.0\text{m}$) として周期毎に内部水中変位を測定した。

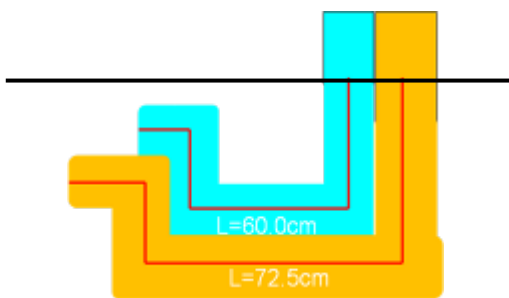


図-9 複数の振動水柱を有する装置形状

図-10 に2本の水柱を有する装置の内部水柱変位に関する実験結果を示す。同一装置内に複数の水柱を有する場合でも、単一の水中の場合と同様に、水柱長さ $L=60.0\text{cm}$ では、 $T=1.5\text{sec}$ 付近、 $L=72.5\text{cm}$ では、 $T=1.8\text{sec}$ 付近それぞれの水柱の固有周期付近で変位がピークとなることが確認された。この結果は、それぞれの水柱によって波浪エネルギー吸収効率がピークとなる周波数帯に対応できることを示唆するものである。

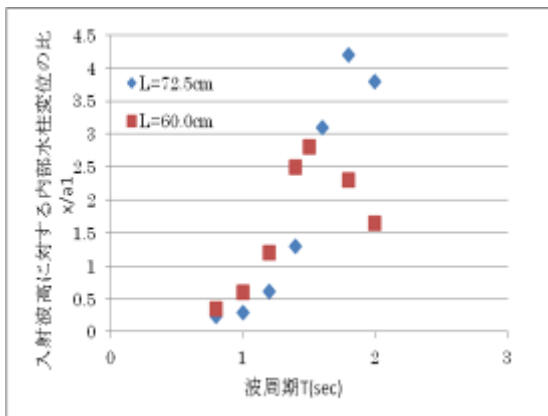


図-10 複数の振動水柱を有する場合の内部水柱変位

図-11 に複数の振動水柱を有する場合の波浪エネルギー吸収効率を示す。内部水柱変位の結果と同様に、複数の水柱を同一装置内に設けても波浪エネルギー吸収効率はそれぞれの水柱の持つ固有周期付近でピークを迎え、対応できる周波数帯の幅が広がっていることが分かる。これにより、幅広い周波数帯を持つ実海域における不規則波への対応が可能となることが示唆された。

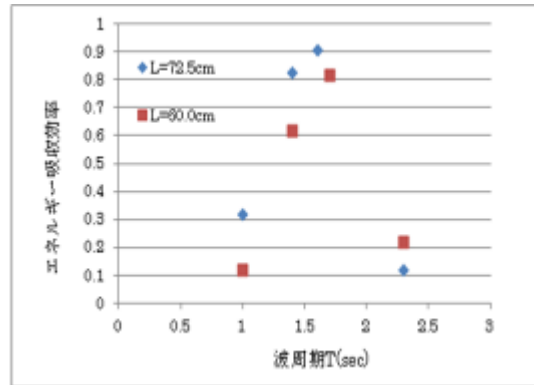


図-11 複数の振動水柱を有する場合のエネルギー吸収効率

(6)実海域における波浪エネルギー吸収効率の検討

規則波中のエネルギー吸収特性の評価とは異なり、本章の実験では、実海域の不規則波中におけるエネルギー吸収効率をスペクトル法によって評価した。

実海域実験は、2013年10月に香川県高松市屋島湾地先海域で実施し、装置を海底に固定することが困難であったため、図-12 のように海面で装置ができるだけ移動しないように固定し、波高計 (JFE-ADVANTEC 製 ACH-600RS) を用いて入射波と装置背後の波浪を観測した。

入射波の有義周期 $T_{1/3}$ および有義波高 $H_{1/3}$ を算出した結果、 $T_{1/3}=1.88\text{sec}$ 、 $H_{1/3}=0.64\text{m}$ であった。



図-12 実海域における波浪エネルギー吸収効率測定実験

図-13 に装置前後において測定した波浪データから算定したエネルギースペクトルを示す。2つのスペクトルの図を比較すると、入射波に比べて装置背後の波のエネルギーは著しく減少していること、実海域実験で用いた模型の動揺抑制装置は、入射波のエネルギーを $\omega=2.0\sim 3.8$ の範囲において、特に吸収していることが分かる。また、スペクトル図から入射波と装置背後の波のエネルギーの面積比からエネルギー吸収効率を算出すると、約 72%であった。

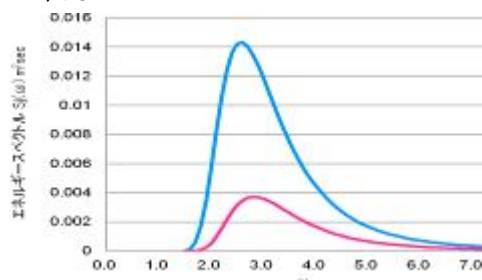


図-13 装置前後におけるエネルギースペクトル（青：入射波，赤：装置背後）

この結果を基に、3本の水柱を持ち、固有周期がそれぞれ $T_1=1.3\text{sec}$, $T_2=2.8\text{sec}$, $T_3=4.3\text{sec}$ になるような装置形状を想定した場合のエネルギースペクトルを算定した結果を図-14 に示す。また、水柱が2本の場合と3本の場合の合計値を図-15 に示す。ここでは、太平洋沿岸（高知県大月町古満目地先海域）で観測したデータを用いて $T_{1/3}=1.67\text{sec}$, $H_{1/3}=0.72\text{m}$ とした。これらの結果から、1本目の水柱では $\omega=3.5\sim 4.5$, 2本目の水柱では $\omega=1.5\sim 2.5$, 3本目の水柱では $\omega=0.8\sim 1.5$ という範囲で高いエネルギー吸収効率が確保されると推察される。

これにより、水柱が増えることにより、各水柱で対応できない周波数帯を他の水柱で補うことで波浪エネルギーを吸収可能な周波数帯が広がり、実海域における不規則波中でも波浪エネルギーが吸収可能だと考えられる。

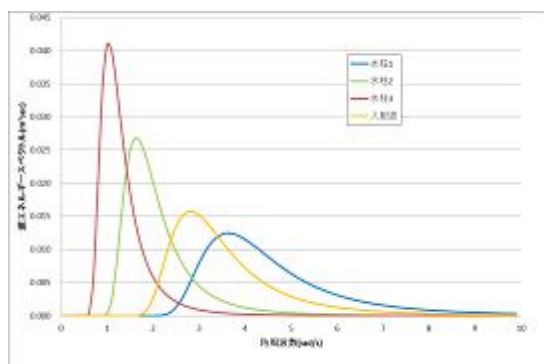


図-14 3本の水柱を有する場合のエネルギースペクトル

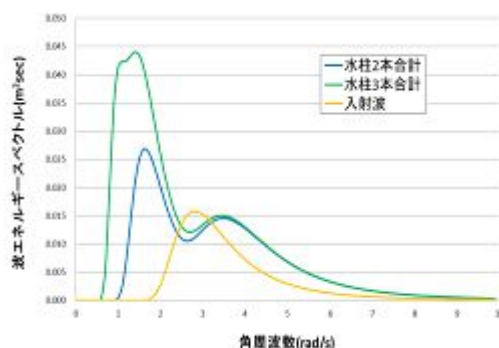


図-15 水柱本数別のエネルギースペクトルの合計値

(7) 稚魚飼育実験（室内水槽実験による体重変化と肥満度の検討）

生簀の動揺が稚魚へのストレスの大きな原因となっていることを確認し、生簀の動揺を抑制することが有用魚種の安定した種苗生産に繋がるものと考えた。そこで、500 L 水槽内に設置した生簀内にタケノコメバル (*Sebastes oblongus*) の稚魚 50 個体を投入し、飼育実験を行なった。実験に用いた稚魚は、香川県水産試験場において産仔から育成したものである。造波装置により生簀を動揺させ、動揺条件下の生簀と静穏条件下の生簀において投入前後の全長(mm)、体長(mm)、体重(g)、肥満度について測定を行った。また、実験時は両条件下でも稚魚には餌を与えずに行った。肥満度については以下の式で算定した。

$$\text{肥満度} = \frac{\text{体重}}{\text{体長}^3} \times 10^6$$

実験の結果、それまで個々で泳いでいた稚魚が、一箇所に固まってほとんど動かない状態となった。また、実験開始直後は、生簀の網に触れないよう泳いでいたが、時間の経過と共に網と接触する稚魚が増加した。特に、数個体においては体色の変わる平衡感覚失調から瀕死状態になる稚魚もいた（図-16）。目視からも、生簀の動揺により稚魚が衰弱していく様子が認められ、生簀の動揺が稚魚にストレスを与える要因となっていることが確認できた。



図-16 体色が変わり平衡感覚失調の稚魚

動揺生簀投入前では、稚魚の平均体長が 97.6 mm、平均体重が 32.2 g で平均肥満度が、34.2 であった。動揺生簀投入後 15 日目に測定した結果、平均体長が 97.9 mm、平均体重が 29.4 g、平均肥満度が 30.9 であった。これより肥満度の減少率を算定した結果、90.4 % であった。一方、静穏条件下生簀投入前では、稚魚の平均体長が 91.8 mm、平均体重が 25.0 g で平均肥満度が、31.6 であった。静穏生簀投入後 15 日目に測定した結果、平均体長が 91.2 mm、平均体重が 23.5 g、平均肥満度が 30.2 であった。これより肥満度の減少率を算定した結果、95.5 % であった。実験結果より、動揺条件下の生簀に投入した稚魚は、静穏条件下の生簀に投入した稚魚よりも肥満度の減少が顕著であったことから、装置の無い生簀は、稚魚の生育に悪条件となることが検証された。

以上より、生簀の動揺は稚魚にストレスを与え、稚魚の生育に支障をきたしていることが確認できた。

(8) 実海域実験による稚魚生残率の検討

波浪エネルギー吸収実験における内海実験フィールドにおいて、海水温が 10 を越える時期を選んでキジハタ (*Epinephelus akaara*) 稚魚を用いた実海域での飼育実験を行った。装置を取り付けた生簀と装置を取り付けていない生簀で、それぞれ 30 匹の稚魚を 15 日間無給餌で飼育し、その間の死亡個体数を計数した。

実験に用いた稚魚は無作為に選定し、各生簀の稚魚の全長・体長・体重の平均値の差は極めて少なかった。

実験の結果、期間中の最大波高 40 cm の条件下で、装置を取り付けた生簀においては、15 日飼育後の稚魚の死亡個体数が 8 尾であったのに対し、装置の無い生簀においては、死亡個体数 14 尾であった(図-17)。また、装置のない場合に生簀内の稚魚が身を寄せる場所の選択に戸惑う行動も見られ、死亡個体数に差が生じた一因と考えられる。

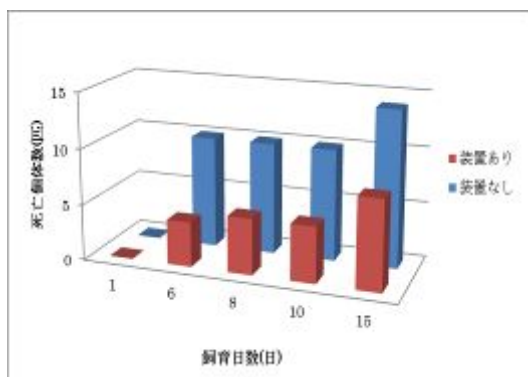


図-17 実海域稚魚飼育実験結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Aoki, K., K. Sogo, K. Kimigawa, Y. Suenaga, H. Kawata, N. Yamaji, DEVELOPMENT OF PROTECTIVE AND FEEDING FACILITY IN THE ARTIFICIAL REEF FOR STOCKED ROCK FISH JUVENILES, Recent Advances in Marine Science and Technology 2014. Vol.12, pp.16-30, December, 2015.

末永慶寛, 小泉勝彦, 山中稔, 長谷川修一, 振動水柱を格納した波浪エネルギー吸収型消波構造物に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_277-282, 2014. DOI:http://doi.org/10.2208/jscejoe.70.I_277

〔学会発表〕(計 3 件)

青木響子, 末永慶寛, 多孔質体を用いた水産資源生産力向上技術, 香川大学社会連携・知財センター技術交流会, 2016年3月, 香川県高松市。

Aoki, K., K. Sogo, K. Kimigawa, Y. Suenaga, H. Kawata, N. Yamaji, DEVELOPMENT OF PROTECTIVE AND FEEDING FACILITY IN THE ARTIFICIAL REEF FOR STOCKED ROCK FISH JUVENILES, Pacific Congress on Marine Science and Technology 2014. August, 2014. Tokyo, JAPAN.

末永慶寛, 振動水柱を格納した波浪エネルギー吸収型消波構造物に関する研究, 土木学会第 69 回海洋開発シンポジウム. 2014 年 6 月, 新潟県新潟市。

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 浮体動揺抑制装置および生簀

発明者: 末永慶寛・掛川寿夫・服部郁弘・山本義久・森田哲男・濱田和久・宮川昌志・榎野元秀・藤原宗弘・松山哲也・山地功二・君川佳司

権利者: 香川大学, 水産総合研究センター, 香川県水産試験場, 香川県漁連, 日本興業(株)

種類: 特許

番号: (出願番号) 特開 2014-132843

出願年月日:

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.fra.affrc.go.jp/tokkyo/patent/list/t239.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末永 慶寛 (SUENAGA YOSHIHIRO)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 00284349

(2) 研究分担者

山中 稔 (YAMANAKA MINORU)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 502642056.