

《 津波時の漁船係留索に働く張力について 》

Tension in a Mooring Rope of Fishing Boat under the Influence of Tsunami

業務名	漁業地域における防災対策検討 (19-9040)
委託者	水産庁漁港漁場整備部
担当者	坪田幸雄, (三宅健一), 齋藤正文

In landfall of tsunami in fishing communities, many fishing vessels may be lost due to break of mooring rope or float away, and some may rampage in the community and inflict damage to property or endanger human lives as they are set adrift. In addition, these drifting vessels may block the sea lane of the returning vessels to access the port. Against such predictable danger of drifting vessels, it is important to develop alternative mooring methods or devices that would stand the force of the tsunami in the disaster prevention plan. In the present survey, through site inspection and questionnaires addressed to fishing associations, the mooring systems in common use were scrutinized and a simplified system of estimating the tension for the mooring rope in case of tsunami by a hydraulic model test was suggested. Furthermore, the specifications so obtained were used in combination with estimated data on the vessel, mooring rope and the flow rate of the seawater in tsunami to derive the diameter of the mooring rope.

Key words: fishing area, disaster readiness plan, tsunami, mooring rope

1. 調査の目的

スマトラ沖地震では、陸上に遡上した津波が巨大な漂流物となった漁船を押し流し、家屋を破壊し、津波が去った後も道路を遮断するといった被害が多発した。漁業地域では、津波来襲時に漁船の係留索の破断による喪失、あるいは漁船が漂流物となって漁港・漁村の人命や財産へ被害を与える恐れがある。さらに漂流物は被災した漁港・漁村への海路からのアクセス障害となる恐れもある。

このようなことを踏まえて、水産庁は、平成18年3月に「災害に強い漁業地域づくりガイドライン」¹⁾を作成した。同ガイドラインでは、漁船・養殖筏等の漂流防止対策のひとつとして、係留方法の強化（係留索を太くする）が挙げられているが、係留索の仕様等、具体的には示されていない。津波に耐えうる係留方法や係留索を提案することは防災上重要である。そこで、本調査では、現地調査および全国漁協へのアンケート調査により漁船係留の現状把握を行うとともに、水理模型実験により津波時における船舶係留索の簡易的な張力の推定式を提案する。さらに、その推定式を用い、船体・係留索の諸量および津波の流速を想定し係留索の試算を行った。

2. 調査の内容と方法

2.1 現地調査

海域や大地震想定地域別の現地調査を実施し、漁船係留実態及び係留索仕様について整理を行なった。現地調査は三陸沖地震が予想される岩手県、東海地震が予想される静岡県、日本海側で最近の頻発状況から石川県を、さらに東南海・南海地震が予想される高知県を対象とした。各県とも小型船の係留が主で漁船数の少ない規模の小さな漁港と大型船の係留が主で漁船数の多い規模の大きい漁港のそれぞれ2漁港を選定して行った。調査対象漁港の一覧を表-1に、位置図を図-1に示す。

表-1 調査漁港一覧

県名	規模の小さい漁港	規模の大きい漁港	摘要
岩手県	音部漁港(1種)	広田漁港(2種)	三陸沖地震
静岡県	地頭方漁港(1種)	焼津漁港(3種)	東海地震
石川県	藤波漁港(1種)	蛸島漁港(3種)	日本海側で最近の頻発状況考慮
高知県	深浦漁港(1種)	佐賀漁港(3種)	東南海・南海地震

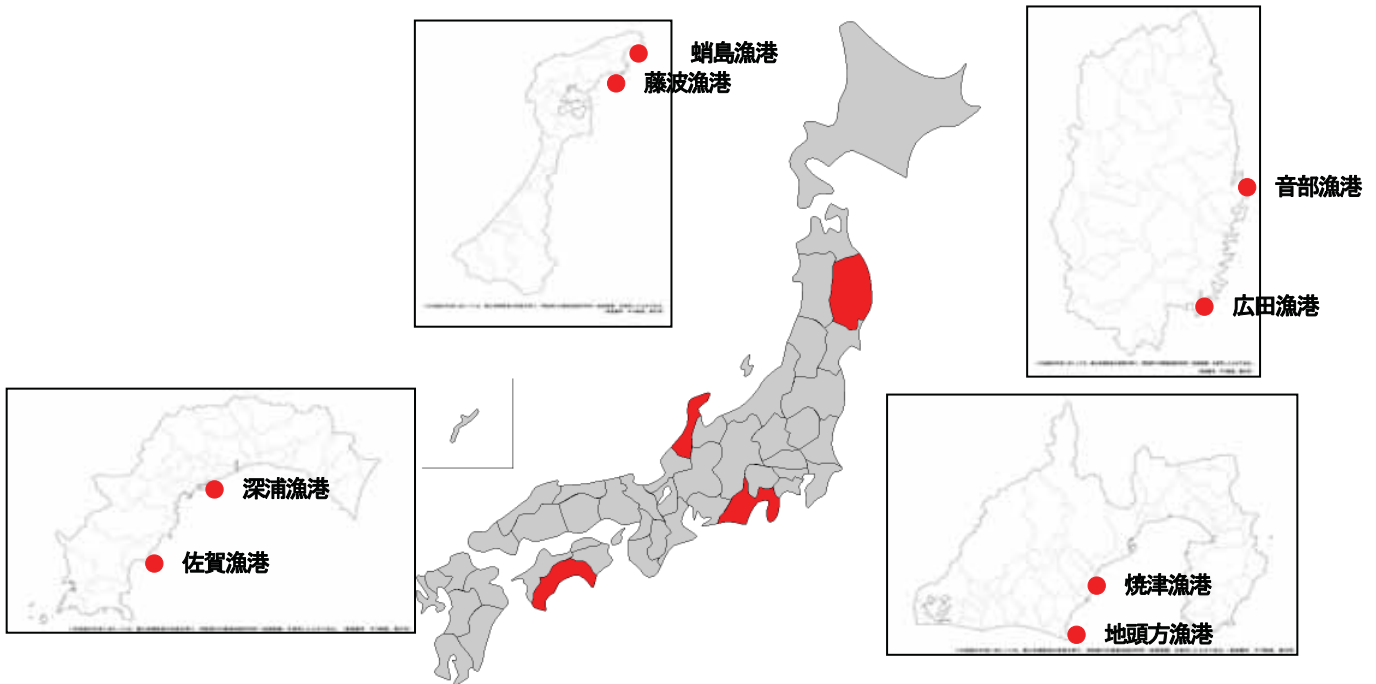


図-1 調査漁港位置図 (<http://www.freemap.jp/>より引用)

2.2 全国漁協へのアンケート調査による漁船係留の現状把握

全国の漁協へ対して、漁船係留の実態に関するアンケート調査を実施した。主な調査項目は、係留索の材質と長さ及び漁船のトン数等である。

2.3 水理模型実験

(1) 実験装置

水理模型実験は、防衛大学校理工学総合実験棟内の断面水槽（幅 0.4m×長さ 12m×高さ 0.3m）を用いて漁船模型を 1 点係留し、定常流速中における係留力の測定を行った。また、船体模型は漁船を模した木製モデルを使用した。図-2 に実験水槽の概念図を、図-3 に測定概念図を、図-4 に船体模型を示す。

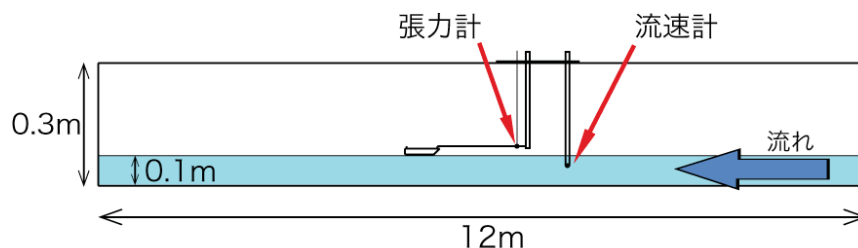


図-2 実験水槽の概念図

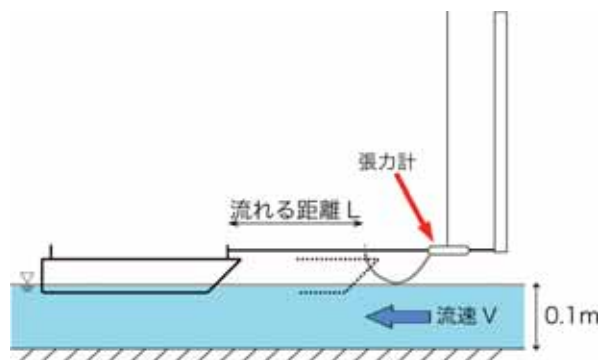


図-3 測定の概念図



図-4 船体模型

(2) 実験方法

静水深 10cm, 水平床の定常流場に対し, 船首を係留した船体模型を初期位置から静かに下流に流し, その間, 係留索に働く張力と船体模型の速度の時系列を測定した. 張力の測定には定格容量 1kg の張力計を使用し, サンプリング周波数は 2,000Hz とした. 一方, 船体速度については, 実験水路の上部から船体運動の動画をデジタルビデオカメラで撮影し, 赤色のマーカーによって記した船体の重心位置を, 運動解析ソフトウェア (DIPP-MOTION XD, ディテクト社製) を使用することにより算出した. 実験のパラメータとしては, 表-2 に示すように係留索の材質 (ヤング率と索の断面積との積 $E \times a$) を 4 種類, 係留の条件 (船の質量 m と係留索の長さ l_0) を 5 通り, そして船体速度 (定常流の流速と船舶の流下距離) を 12 通り設定し, 全 240 ケース実施した.

表-2 実験条件

係留索の種類 Ea (N)	坪糸	98.6
	絹糸	65.8
	釣り糸 6 号	98
	釣り糸 1.5 号	50
係留の条件	船の質量(g)	60, 90, 120
	係留索の長さ (cm)	40, 50, 60
船体速度	定常流場の流速 (cm/s)	40, 50
	船体が行ける距離 (cm)	5, 10, 15, 20, 25, 30

3. 主な調査結果

3.1 現地調査

(1) 岩手県 (音部漁港, 広田漁港)

音部漁港は, 古くからアワビ, ウニ, ワカメ等磯根漁業の根拠地として利用されてきた. 漁船は小型のものが多く, 係留状況は全て縦付けであった. 漁協へのヒアリングによると, 台風や高潮の異常時には, 基本的には漁船を陸揚げし, 係留する場合は岸壁から離して係留するとのことであった.

広田漁港の主な漁業は, 定置網, 刺網の他, ワカメ, カキ, ホタテ等海面養殖業も盛んに行われ, 近年は, アワビ増殖にも取り組んでいる. 調査日は時化待機で普段より多い漁船が係留されていた. 係留状況は大多数が縦付けで, 横付けは数隻であった. 漁協へのヒアリングによると, 台風や高潮の異常時には, 岸壁から離してアンカーのみで係留し, 漁船を遊ばせるように係留するとのことであった.

(2) 静岡県 (地頭方漁港, 焼津漁港)

地頭方漁港の主な漁業は, しらす船曳網漁, 定置網, 刺網, 一本釣等である. 調査日は普段とは異なり, 北東の風が強く, 出漁は困難な状況であった. 係留状況は大多数が縦付けの係留で, 比較的大型の漁船が横付けされていた. 漁協へのヒアリングによると, 台風や高潮の異常時には, いかりを増やしたり, 漁船同士が衝突しないよう間隔をあけて係留し, 比較的大型の漁船は焼津漁港へ避難するとのことであった.

焼津漁港は, 全国有数の遠洋・沖合漁業の基地であり, 平成 18 年の水揚量は, 千葉県銚子漁港に次いで全国 2

位である。遠洋漁業用と見られる100tを超えるような大型漁船から、数tの小型漁船まで多くの種類の漁船が確認された。係留状況は100tを超えるような大型の漁船は、陸揚げ等の作業のため横付け状態となっており、船首、船尾ともに2点以上の係留で係留索が2重になっているものも見受けられた。小型の漁船は縦付け、横付けの両方が確認された。漁協へのヒアリングによると、台風や高潮の異常時には、焼津地区のうねりの影響の少ない奥へ避難し、他漁港からの避難漁船も多くなるので、縦付けで係留するとのことであった。

(3) 石川県（藤波漁港、蛸島漁港）

藤波漁港は石川県能登半島の中北部に位置する。周辺は26kmに及ぶ海岸線に良港が多い。係留状況は全て縦付けであった。漁協へのヒアリングによると、台風や高潮の異常時には、用心のために係留索の点数を2〜3点多くとることや、避難港へ避難することもあるとのことであった。

蛸島漁港は石川県珠洲市に位置する。調査日は天候が悪く、通常よりも多くの漁船が係留されていた。係留状況は縦付けよりも横付けの係留が多く見受けられた。漁協へのヒアリングによると、台風や高潮の異常時には、近隣の小木漁港へ避難するとのことであった。

(4) 高知県（深浦漁港、佐賀漁港）

深浦漁港は高知県須崎市に位置する。係留状況は泊地内では縦付け（船首1点係留）であるが、生け簀等では横付けである。漁協へのヒアリングによると、深浦漁港は昭和南海地震津波とチリ地震津波の被害を受けている。チリ地震津波では浦ノ内湾の湾口部（宇佐方面）からの漂流物が多数漂流したとのことであった。昭和南海地震津波では数mの浸水も体験している。台風時には、湾奥2ヶ所に鎖を用意した避難係留場所があり、湾内外の漁船が避難係留するとのことであった。

佐賀漁港は高知県黒潮町に位置する。係留状況はほとんど縦付けである。調査日は風が強いため、出漁中の大型船以外は港内の泊地で避難係留中であった。5tクラスの鰹1本釣漁船、底曳網漁船は船尾2点で係留、小型船は船首2点係留であった。漁協へのヒアリングによると、昭和南海地震津波を経験している。まだ組合として海上避難ルール作り等の津波対策は行っていないとのことであった。

3.2 全国漁協へのアンケート調査による漁船係留の状況把握

(1) 回収状況

アンケートは海域に接する39の都道府県にある1,318の漁協協同組合及びその支所に対して実施した。合計3,948通のアンケートを送付し、回答は1,130通であり、回収率は28.6%である。

(2) 係留索の材質（種類）

図-5に係留索の材質のアンケート結果を示す。使用されている係留索の材質（種類）はビニロン（クレモナ）が3割程度と最も多い。

(3) 係留索の長さ

図-6に係留索の長さのアンケート結果を示す。係留索の長さは一定の傾向を見ることは出来ないが、5.0mまでが7割近くを占めている。

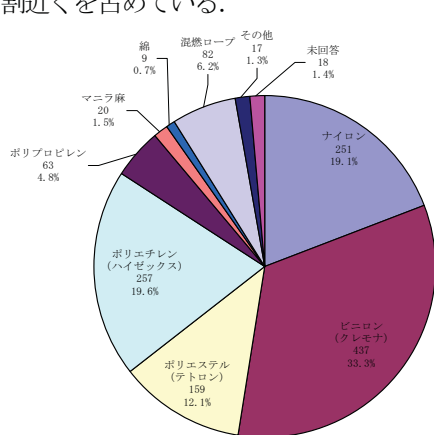


図-5 アンケート調査結果（係留索の材質）

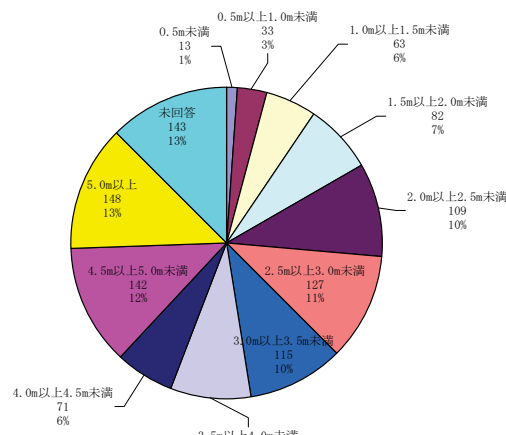


図-6 アンケート調査結果（係留索の長さ）

(4) 漁船のトン数

図-7に漁船のトン数のアンケート結果を示す。漁船のトン数は、10t未満までの漁船が8割以上を占めている。

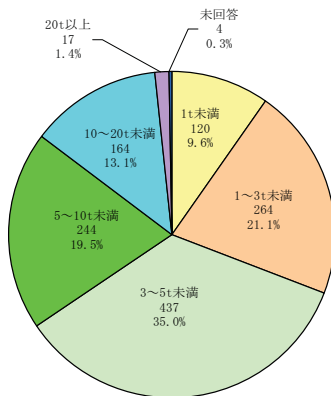


図-7 アンケート調査結果 (漁船のトン数)

3.3 係留索の諸元を変えた系統的な水理模型実験に基づく解析モデルの改良と提案

(1) 係留索に働く張力のモデル化

係留索によって繋がれた船体が津波の作用によって生じる運動を1自由度のバネ・質点系の単振動モデルとして考える。船体が係留索の自然長 l_0 になるまで流され、その瞬間に最大船体速度 V_0 に達したとすると、張力 T が最大になるのは係留索の自然長からの変位が最大になるときである。以上の関係に係留索を弾性体と仮定した場合の応力・ひずみの関係を考慮することで、以下に示すような最大張力の推定式を導出した。

$$T_{\max} = V_0 \sqrt{\frac{Ea(m+m')}{l_0}} (N) \quad (1)$$

$$m' = C_m \rho V_r \quad (2)$$

ここに、 T_{\max} は最大張力 (N)、 V_0 は最大船体速度 (m/s)、 m は船体質量 (kg)、 m' は付加質量 (kg)、 l_0 は係留索の長さ (m)、 a は係留索の断面積 (m^2)、 E は係留索のヤング率 (N/m^2)、 C_m は付加質量係数、 ρ は水の密度、 V_r は船体の排水体積である。

(2) 船体に働く付加質量についての考察

付加質量係数は船体が流下し、係留索が伸びきった時の定常流に対する船体の状態 (向き) に影響するもので、これは V_0 の大小、すなわち流下距離の長さ起因するものである。流下距離が長くなれば、その分船体は余計な外力を受け水路に対して斜めに流下する傾向にあり、このような場合には、 $C_m=0.5$ (船体モデルの船体が球状に近いことから、球の場合 $C_m=0.5$) より大きな付加質量係数を仮定することが望ましいと考える。

そこで V_0 が小さい時を $L=5, 10$ (cm)、 V_0 が中間の時を $L=15, 20$ (cm) とし、それぞれの C_m を $C_m=0, 0.5$ と仮定して、全係留索における最大漁船速度と最大張力との関係をそれぞれ図-8、図-9に示す。

これらのグラフから仮定したそれぞれの付加質量係数から算定した最大張力がほぼ一致していることから、付加質量係数には不確実性があり、流れの影響によって大きく変化することが分かる。

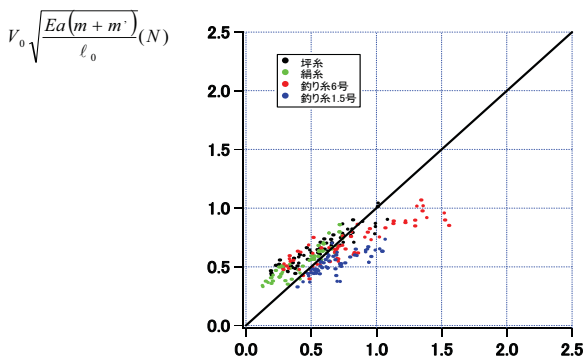


図-8 V_0 が小さい時の全係留索における最大張力の比較 ($C_m=0$)

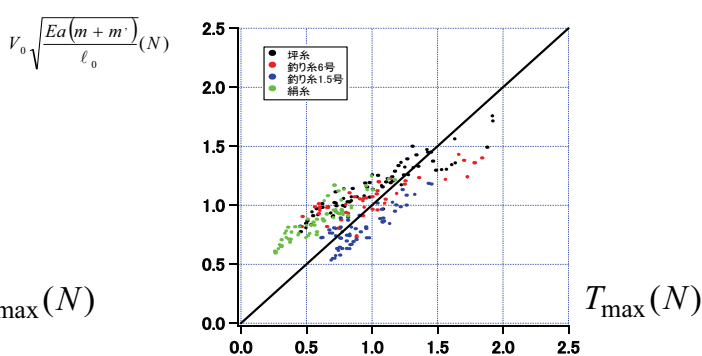


図-9 V_0 が中間時の全係留索における最大張力の比較 ($C_m=0.5$)

3.4 張力算定式による係留索径の試算

本調査では、

- ① 全国漁協へのアンケート調査による漁船係留の現状把握
- ② 係留索の諸元を変えた系統的な水理模型実験に基づく解析モデルの改良と提案

を行い、漁船漂流防止対策等について検討を行った。

水理模型実験より得られた最大張力算定式より、アンケート結果から得られた情報より条件を設定し、津波の流速に耐えることができる係留索径の試算を行った。

水理模型実験より得られた係留索に作用する最大張力算定式より、漁港における係留状況を想定することにより、津波の流速に耐えることができる係留索径を試算することができる。

最大張力算定式は、前式(1)に示すとおりである。

津波の流速と同じ大きさで漁船が流されると想定し、最大船体速度は津波の流速に等しいとする。付加質量については、「漁港・漁場の施設の設計の手引 2003年版²⁾」を参照し、係留状況により以下のように定める。

$$\text{横付け ; } m' = \frac{\pi}{4} D^2 L \rho \quad (3)$$

$$\text{縦付け ; } m' = \frac{\pi}{4} D^2 B \rho \quad (4)$$

ここに、Dは喫水 (m)、Lは船体の長さ (m)、Bは船体の幅 (m) である。

ただし、この最大張力算定式は、船首又は船尾の1点係留の状態、流れに対して係留索がしっかりと張りつめた状態の時に最大張力が発生することを前提としており、漁港内の係留漁船に適用する場合は、津波の流速の向きと漁船の移動の向きが一致した場合に、津波の流速と漁船の移動速度が一致すると仮定している。

ここでは、「災害に強い漁業地域づくりガイドライン」¹⁾の漂流開始条件 2.0m/s、4.0m/s を考慮し、漁港内での津波の流速を2.0、3.0及び4.0m/sを想定した。また、漁船の係留状況を幾つか想定して、係留索に発生する最大張力と係留索の材質から定まる破断強度を比較することにより、津波の流速に耐えることのできる係留索の径を試算した。

検討条件は、表-3に示すとおりである。なお、試算については、係留索の径は減っておらず、係留索は係船柱や係船環に強固に結びつけられていることを前提としている。

表-3 係留索の試算の検討条件

項目	値	備考
係留索の材質	クレモナ	図-5 アンケート結果より 係留索の材質より最多頻度の3割程度の回答
係留索のヤング率	$E=5.0 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$	平成18年度 漁業地域における防災対策検討調査報告書 ³⁾ より設定
係留索の長さ	10~3.0m	図-6 アンケート結果より 0~5mの中央値で設定
漁船の諸元 (質量, 長さ, 幅, 喫水)	1t, L= 7.0m, B=1.8m, D=1.0m 3t, L= 9.0m, B=2.4m, D=1.4m 5t, L=11.0m, B=2.8m, D=1.8m 10t, L=13.0m, B=3.5m, D=2.0m	図-7 アンケート結果より 10t未満が8割以上を占めたため 漁船の諸元は、「漁港・漁場の施設の設計の手引 2003 年版 ²⁾ 」を参照

漁船1tの試算結果を漁船の諸元別に図-10、11に示す。

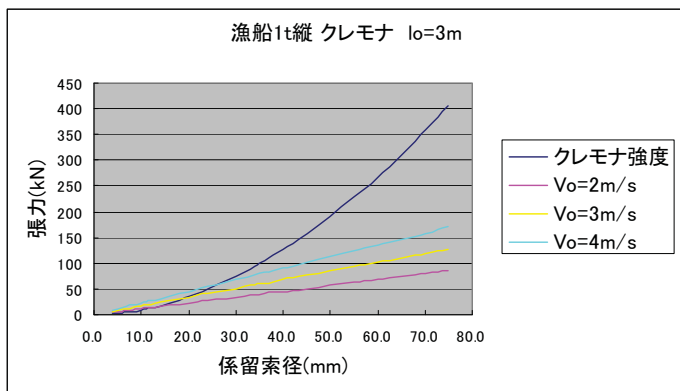


図-10 係留索の径に対する最大張力と破断強度の比較
(漁船 1t, 縦付け)

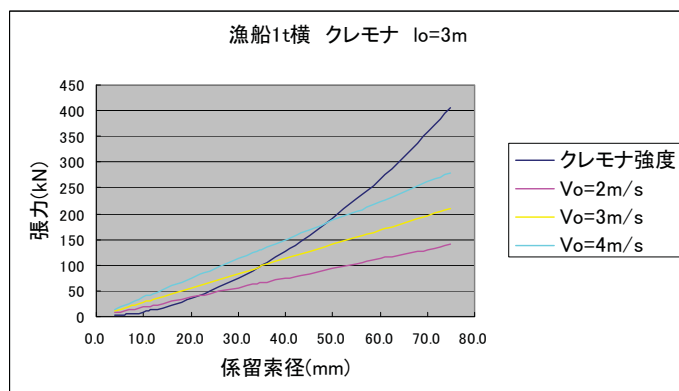


図-11 係留索の径に対する最大張力と破断強度の比較
(漁船 1t, 横付け)

図中において、横軸が係留索の径 a (mm)、縦軸が最大張力 T (kN) である。図-10, 11 より、漁船 1t の場合で $V_0=2.0\text{m/s}$ に対して、縦付けではロープ径 12mm までは破断強度よりも最大張力が大きくなって破断の可能性はあるが、14mm 以上になると、最大張力は破断強度以下となって、ロープの破断の可能性は小さい。一方、横付けではロープ径 20mm までは破断強度よりも最大張力が大きくなって破断の可能性はあるが、22mm 以上になると、最大張力は破断強度以下となって、ロープの破断の可能性は小さいことが分かる。また、付加質量の式からも明らかのように、縦付けと横付けを比較すると、横付けの場合は付加質量が大きくなり、ロープに発生する最大張力も大きくなって、必要となるロープ径も大きくなることが分かる。

4. 成果の活用

漁港内での津波の流速、漁船の係留状況を船首又は船尾の縦付け、横付け 1 点係留を想定して、係留索に発生する最大張力と係留索の材質から決まっている破断強度を比較することにより、津波の流速に耐えることのできる係留索径を試算することができた。現状の漂流シミュレーションプログラムにおいて、対象地区の船体質量、係留索（断面積、弾性係数、長さ）を考慮することにより、より詳細なシミュレーションを実施することが可能となると考えられる。そのため、現状の漂流シミュレーションプログラムの改善が望まれる。

本調査の水理模型実験は、防衛大学校システム工学群建設環境工学科藤間功司教授の協力のもとに、防衛大学校理工学総合実験棟で実施した。さらに、藤間功司教授をはじめ、鳴原良典助教、大久保暢之氏には懇切なご指導をいただいた。ここに深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 水産庁：災害に強い漁業地域づくりガイドライン，平成 18 年 3 月。
- 2) 水産庁：漁港・漁場の施設の設計の手引，社団法人全国漁港漁場協会，pp. 148-151，2003 年版。

関連情報

- 1) 平成 18 年度 漁業地域における防災対策検討調査報告書 水産庁。