

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560970

研究課題名(和文) クローラ型ROVの実海域走行性能評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of a method to estimate the running performance of the crawler driven ROV on the actual sea bottom

研究代表者

勝井 辰博(Katsui, Tokihiro)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80343416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はクローラ型ROVの実海域走行性能評価法を開発し、その設計高度化資することを目的とする。これまでに準定常状態を仮定した簡便なROVの走行性能評価法が開発されているが、実海域性能評価のためには複雑なROV形状に対応した流体力評価、海底の凹凸の影響、ケーブル張力の影響の評価が必要であった。本研究ではCFD解析による詳細な形状に対応する流体力の評価、クローラ後端位置での垂直抗力の履歴に着目したROVの段差踏破性能評価法の開発、弾性影響および海底との干渉を考慮したケーブル張力推定法の開発を行い、これらを統合してクローラ型ROVの実海域性能評価法を開発し、模型試験によってその精度の検証を行った。

研究成果の概要(英文)：The present study develops a method to estimate the moving capability of the crawler driven ROV on the actual sea bottom for the efficient ROV design. A simple method to estimate the moving capability of the crawler ROV was developed by the authors, however the exact estimation on the actual sea bottom was needed. The present study conducted CFD analysis around a ROV model which reproduce the detail of ROV geometry and evaluated the hydrodynamic forces acting on the ROV. The method to estimate the bump-up capability of the crawler ROV was newly developed by focusing on the attitude of reaction acting on the rear crawler. The elastic cable tension force acting on the ROV considering the interruption from the sea bottom was evaluated by a new numerical procedure. Integrating those schemes, a new methods to estimate the moving capability of the crawler driven ROV was developed and it was validated with the model experiments. The estimations agreed well with model experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：ROV クローラ 海底探査 海底資源 CFD ケーブル張力

1. 研究開始当初の背景

深海底の探査は地質学的あるいは生物学的に重要なミッションであり、そのための研究開発が活発に行なわれている。特に巨大地震の危険にさらされている我が国にとっては海底の地質学的調査は地震被害の軽減のために不可欠である。加えて、日本近海には多くの海底鉱物資源が存在することが確認されており、将来的なエネルギー問題の解決のためにも海底探査の重要性はますます高まっていると考えられる。

このような海底の地質学的な調査や海底資源開発のためには、重作業が可能な海底探査機が必要になるが、その一つの方法と目されているのがクローラ型の ROV (Remotely Operated Vehicle) である。(独) 海洋研究開発機構で開発されているクローラ型 ROV システムでは母船より 1 次ケーブルを介してランチャー、さらに 2 次ケーブルを介して ROV 本体と接続されており電力等の供給を受けて作動する仕組みを持つ。クローラとは重機等に用いられる、いわゆるキャタピラであり、陸上では悪路での重作業に適していることはよく知られているが、水中での走行特性については不明な点が多く、この解明が望まれている。

ROV の水中重量はケーブルに作用する荷重を軽減させるために制限を受けるが、これまでに行なわれた ROV の実機と模型の水底走行実験によって、特に水中重量が軽い ROV は走行中に容易に前部が持ち上がった状態で走行(パウアップ走行と呼ぶ)することが確認されている。場合によっては転倒の恐れもあり、ROV の水中走行性能は陸上に比べて極端に悪化する。水中走行性能の悪化は浮力と走行時に作用する流体力に起因すると考えられるが、どのような条件下でパウアップ走行が発生するかを正確に把握することが ROV 設計には不可欠である。しかし、これまでを示された通常走行限界推定法は水底が水平面で、かつ定常走行の場合に限られる。実機的设计のためには、実際に ROV が走行する海底地質や複雑な海底形状の影響を考慮することが重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究ではクローラ型 ROV の実海域での基本走行特性の評価法の開発を目的とし、下記の 3 項目の研究を実施する。

(1) 実海域環境下でクローラ型 ROV に作用する流体力の高精度推定と ROV の通常走行推定法への組み込み

(2) 段差等、実海域を模擬した海底上を走行するクローラ型 ROV の走行性能評価法の確立  
 (3) ケーブル拘束下にあるクローラ型 ROV の可動範囲の推定法の確立

(1) ではオープンソース CFD コードである OpenFOAM を導入し、任意形状の ROV に作用する流体力特性を CFD によって精度よく推定する。ヘキサ型非構造格子を用いることで複雑

形状に対応した CFD 計算を試みる。この計算結果を著者らがこれまでに確立した、クローラ型 ROV の通常走行条件式に組み込むことにより高精度に ROV の走行性能の推定が可能な手法の確立を目指す。

(2) では、段差等を走行しようとするクローラ型 ROV の後部クローラに作用する垂直抗力の履歴に着目し段差踏破の可否を判断する評価する手法の確立を目的とする。

(3) では、ROV に例外なく作用するケーブル張力の評価法を確立し、ROV の通常走行条件に組み込むことでケーブル拘束下にあるクローラ型 ROV の可動範囲の高精度推定を目指す。なお、ケーブルは海底に接地し引きずられることも想定したケーブル張力の推定法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 実海域環境下でクローラ型 ROV に作用する流体力の高精度推定と ROV の通常走行推定法への組み込み

本研究ではクローラが浮かずに接地して ROV が走行している状態を、通常走行と定義する。また斜面を通常走行する ROV に作用する力を、Fig. 1 に示すように、流体抵抗  $R_w$ 、揚力  $L$ 、ROV に働く浮力  $B$ 、重力  $W$ 、スラスト  $T$ 、垂直抗力  $N$ 、ケーブル張力  $F_T$  の 7 つのみで、それぞれが集中荷重であると仮定する。ただし、本節ではケーブル張力は考慮しない。揚力  $L$  はこれまでの研究では微小であるとし無視していたが、本研究では走行特性に影響があるとし考慮に入れた。ROV が通常走行をする条件はクローラに働く垂直抗力  $N$  がクローラの接地面内である  $x_F$  と  $x_A$  の間にあること、つまり  $x_F \leq x_N \leq x_A$  と考える。

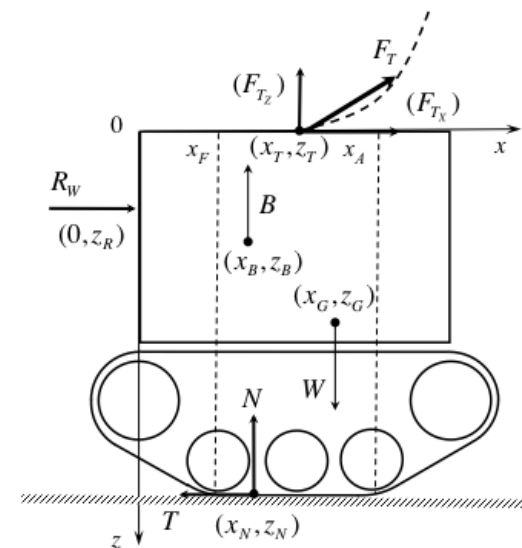


Fig. 1 Definition of coordinate system and the forces acting on ROV in steady motion.

ROV に働く力のつり合い式と、y 軸まわりのモーメントが 0 になる条件を計算し、重心

と浮心の関係を整理した式が(1)式である。(1)式を満足する状態のとき ROV は通常走行が可能である。

$$x_N = \frac{1}{W - B - F_{Tz}} \times \{W \cdot x_G - B \cdot x_B + R_W(z_N - z_R) + F_{Tx} \cdot z_N - F_{Tz} \cdot x_T\} \leq x_A \quad (1)$$

水底を走行する ROV に作用する流体力の計測は困難であるため、CFD 解析を用いて流体力の推定を行った。CFD 解析結果の検証は、水路の中央を走行する ROV の抵抗試験と、同じ条件を用いた CFD 解析とを用いて行った。使用したコードは OpenFOAM の simple 法をベースとした定常流ソルバーである。

(2)段差等、実海域を模擬した海底上を走行するクローラ型 ROV の走行性能評価法の確立

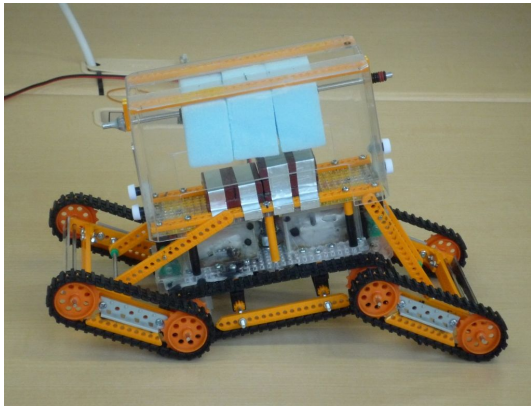


Fig. 2 Flipper type crawler driven ROV model.

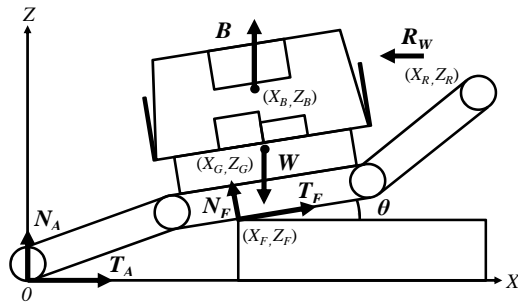


Fig. 3 The static model of ROV on the bump.

段差踏破性能計測実験のために用いた ROV 模型は、Fig.2 に示すように模型後部に振り下げ可能なフリッパークローラを装備したものである。重心・浮心位置を変更するため、搭載された重りと浮力材を水平方向に移動することができる。

ROV が段差踏破する状態の静力学モデルを Fig. 3 に示す。作用する力はすべて集中荷重とし、段差走行の各状態において ROV に作用する力はつり合い状態であると考えられる。Fig. 3 の状態は、中央のメインクローラが段差の角に接している場合である。

ここで、クローラ後端に作用する垂直抗力  $N_A$  に注目する。 $N_A$  の値は ROV の姿勢によって変

化するが、段差踏破に成功する場合、クローラ後端が浮き上がって段差を乗り越えるため、 $N_A$  は値 ROV の前進とともに 0 に近づくはずである。一方、踏破に失敗する場合 ROV は転倒し、 $N_A$  が 0 の値にならない。これより、 $N_A$  の挙動に着目することにより段差踏破の可否の推定ができると考えるのが本研究の立場である。

(3)ケーブル拘束下にあるクローラ型 ROV の可動範囲の推定法の確立

船舶や海洋構造物の係留に使用されるケーブルの張力を計算するためによく使われている手法であるカテナリー理論は、ケーブルの重量分布が不均一な場合や曲げ剛性の影響を考慮する場合は、計算することができなかった。そのため、本研究は両者を考慮できる張力の数値的計算手法を示す。

Fig.4 に示すように、ケーブルと ROV の接続点  $(X_T, Z_T)$  には、張力  $F_T$  (X 方向には  $F_{Tx}$ 、Z 方向には  $F_{Tz}$ ) が作用している。ここで、ケーブルを  $N$  個の要素に分割する。それぞれの要素には、Fig.4 に示す力が作用している。これらの力は全要素でつり合っているから、次式を満たす必要がある。

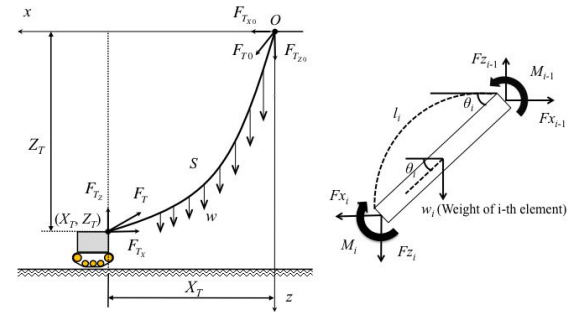


Fig. 4 The schematic view of the mechanical model of the cable tension.

$$F_{x_i} = F_{x_{i-1}} \quad (2)$$

$$F_{z_{i-1}} = F_{z_i} + w_i \quad (3)$$

$$-F_{z_{i-1}} l_i \cos \theta_i + F_{x_{i-1}} l_i \sin \theta_i \quad (4)$$

$$-\frac{1}{2} w_i l_i \cos \theta_i + M_i - M_{i-1} = 0$$

$$M_i = -EI \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{l_i} \quad (5)$$

ここで、(5)式の  $EI$  は曲げ剛性である。 $F_{x_i}$  と  $F_{z_i}$  は(2)、(4)式と境界条件から以下のよう解ける。

$$F_{x_i} = F_{Tx} \quad (6)$$

$$F_{z_i} = F_{Tz} + \sum_{j=i+1}^N w_j \quad (7)$$

ケーブルの曲げ剛性を考慮したケーブルと ROV の接続点に作用する張力  $F_T=(F_{Tx}, F_{Tz})$  とケーブル形状は、以下の数値的手法(手順

- )により得ることができる。

ケーブル長さ  $S$ , 分割要素数  $N$ , 重量分布  $w_i$ , 曲げ剛性  $EI$ , ROV 接続点の位置  $(X_T, Z_T)$  などの計算条件を設定する。

ROV のケーブル接続点の座標  $(X_T, Z_T)$  に作用するケーブル張力  $F_T=(F_{TX}, F_{TZ})$  の初期値を設定する。

(6), (7)式より,  $F_{xi}$  と  $F_{zi}$  を計算する。

(4)式より,  $EI=0(M_i=0)$  のときのケーブル形状を計算する。

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{F_{z_{i-1}} + \frac{1}{2} w_i}{F_{TX}} \right) \quad (8)$$

(8)式を用いて,  $(\bar{X}_T, \bar{Z}_T)$  を計算する。

$$(\bar{X}_T, \bar{Z}_T) = \left( \sum_{i=0}^N l_i \cos \theta_i, \sum_{i=0}^N l_i \sin \theta_i \right) \quad (9)$$

手順 - により  $F_T=(F_{TX}, F_{TZ})$  の関数としてケーブル形状 ( $\theta_i$  分布) と ROV 接続点の位置を得る。しかし, (9)式で計算した接続点の位置は目標の  $(X_T, Z_T)$  の位置に常に一致するとは限らない。よって, ニュートン・ラプソン法を用い,  $(X_T, Z_T)$  と一致する ROV 接続点の座標を導くための  $F_T=(F_{TX}, F_{TZ})$  の値を探す。

(8), (9)式から, 有限差分法により  $F_{TX}$  と  $F_{TZ}$  に対する (9)式で与えられる接続点座標の微分係数を計算する。

(10), (11)式を満足する変分量を解き, 収束条件を満たすまで緩和係数つきの変分量を加算し,  $F_{TX}$  と  $F_{TZ}$  を更新する。

$$\frac{\partial \bar{X}_T}{\partial F_{TX}} \delta F_{TX} + \frac{\partial \bar{X}_T}{\partial F_{TZ}} \delta F_{TZ} = X_T - \bar{X}_T \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{Z}_T}{\partial F_{TX}} \delta F_{TX} + \frac{\partial \bar{Z}_T}{\partial F_{TZ}} \delta F_{TZ} = Z_T - \bar{Z}_T \quad (11)$$

$EI$  を非常に小さな値に設定して, 過去の分布を用い, (8)式より  $M_i$  分布を評価する。

手順 で計算した  $M_i$  を (4)式に入れ, (4)式を満たすケーブル形状を再計算する。

収束するまで手順 と を反復し, ケーブル形状を更新する。

手順 によって求めた収束解のケーブル形状から計算した ROV のケーブル接続点の座標は, 曲げ剛性の影響のため目標の  $(X_T, Z_T)$  と一致しない。そのため, 一致するまで手順 - を反復して  $F_T=(F_{TX}, F_{TZ})$  を更新する。

$EI$  の値を少しずつあげ, 手順 で設定した値に  $EI$  の値が達するまで, 手順 - を繰り返す。

#### 4. 研究成果

(1) 実海域環境下でクローラ型 ROV に作用する流体力の高精度推定と ROV の通常走行推定法への組み込み

対象とした小型 ROV に働く抵抗  $R_w$ , 揚力  $L$ , ピッチングモーメント  $M_y$  の計算結果と走行速度の関係を実験結果比較すると, 計算を実

施した走行速度 1.2m/s 以下の範囲で計算値は速度によらず実験値より約 5%低い値であり, 抵抗はある程度正確に推定できているといえる。Fig. 5 に示した図は速度 0.592 m/s における, 小型 ROV 表面と中心断面の圧力係数分布である。水底を走行する際の接地面付近の圧力係数は顕著に大きくなり ROV に作用する揚力が, 水路中央を走行する場合と水底を走行する場合では水底を走行の方が 10 倍程大きい。

速度 0.592m/s, 重量 60kg, 浮力 30kg のときの通常走行が可能な重心, 浮心位置の関係を Fig. 6 に示す。水路の中央を走行する場合 (赤線) に比べ水底を走行する場合 (青線) の方が通常走行可能な範囲が狭まっているのがわかる。これは水底の影響によって ROV が転倒しやすくなること示している。

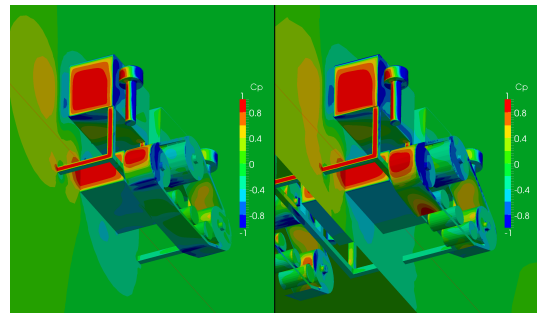


Fig. 5 The comparison of  $C_p$  distribution on the body surface of small-sized ROV. ( $U=0.592$ m/s, Left: in water channel, Right: on water bottom)

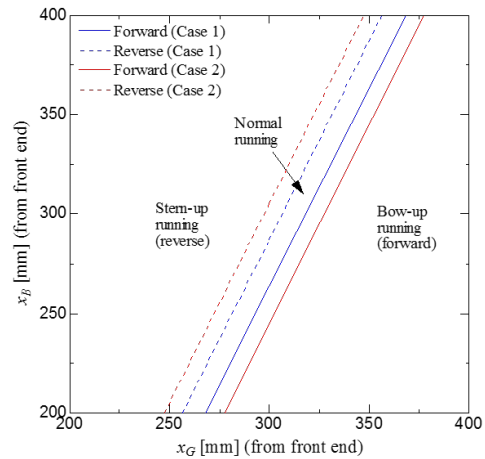


Fig. 6 The estimation of normal running condition of small-sized ROV. ( $W=60$ kg,  $B=30$ kg,  $U=0.592$ m/s)

(2) 段差等, 実海域を模擬した海底上を走行するクローラ型 ROV の走行性能評価法の確立

評価法の検証のため Fig.2 の模型を用いて実験を行った。重量, 段差高さ, 重心・浮心位置, 後フリッパーの振り下げ角度を系統的に変化させ走行実験を実施した。



ROV 重量 1.30[kgf], 重心位置が模型中心より 18.5[mm]後方にある状態で高さ 6[cm]の段差踏破を対象とする。Fig. 7 に後フリッパーの振り下げなしの条件での段差踏破の推定結果を示す。模型中心に浮心位置がある状態を Ex.3 とし, Ex.1 から Ex.5 へと浮心位置を模型前方から後方へと変更した条件とする。横軸を ROV の前進移動距離  $X_A$ , 縦軸を垂直抗力  $N_A$  としている。段差踏破成功と推定されるものを Succeed, 段差踏破失敗と推定されるものを Fail と表す。

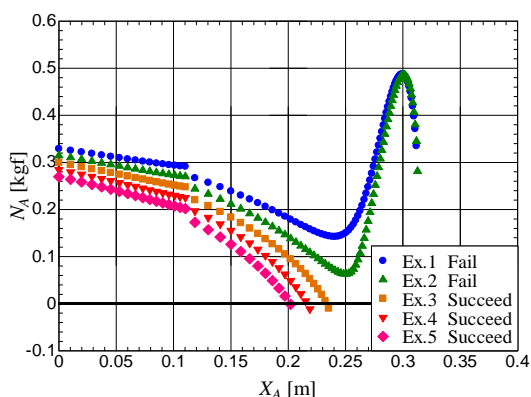


Fig. 7 The estimations of  $N_A$  variation on buoyancy center location.

Fig. 7 で段差踏破失敗と判定された Ex.1 の条件下で後フリッパーを振り下げた場合の推定結果を Fig.8 に示す。Ver.0 は振り下げなしの条件で, Ver.1 は 5.8[deg], Ver.2 は 13.0[deg] と振り下げ角度を大きくしていく。

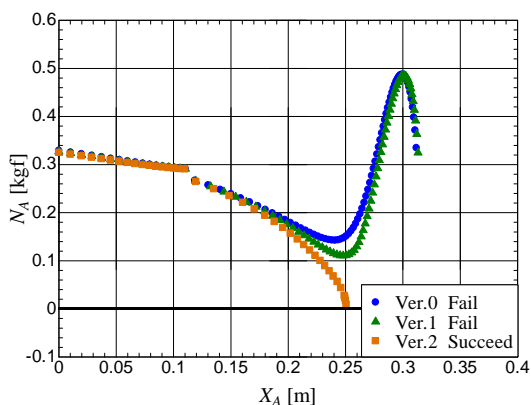


Fig. 8 The estimations of  $N_A$  variation on flipper angle.

Table 1 で推定結果と実験結果を比較したところ, Fig.7 の Ex.2, Fig. 8 の Ver.1 の条件のみ推定結果と異なり模型実験で段差踏破に成功した。これらは, 踏破失敗と成功の境界に位置する条件であり, 流体力などが作用したため推定結果と実験結果に誤差が生じたと考えられる。しかし, 後フリッパーを振り下げることによって段差踏破性能が上がることは確認できた。

Table1 The comparisons between the estimations and experiments.

	Estimation	Experiment		Estimation	Experiment
Ex.1	Fail	Fail	Ver.0	Fail	Fail
Ex.2	Fail	Succeed	Ver.1	Fail	Succeed
Ex.3	Succeed	Succeed	Ver.2	Succeed	Succeed
Ex.4	Succeed	Succeed			
Ex.5	Succeed	Succeed			

### (3) ケーブル拘束下にあるクローラ型 ROV の可動範囲の推定法の確立

前節で示した, ROV に作用するケーブル張力算定法を用い, 前節までに示した ROV の通常走行条件に組み込むことにより, ケーブル拘束下にあるクローラ型 ROV の可動範囲を推定することが可能となる。本手法の正当性を検証するため, 実機を模擬した模型(高さ 192mm × 長さ 230mm × 幅 130mm, 重量 1.21kg, 排水量 1.01kg)を作製し, 水槽実験を実施した。模型にはデッキ上に 0.5kg の錘を, 上部構造に 0.43kg の浮力を発生する浮力材を搭載している。実験で供した水槽は, アクリル製で長さ 1500mm × 幅 500mm × 1000mm である。水深 0.94m まで水を張り, ROV が転倒した係留点からの水平距離を水槽正面に貼った目盛りを読み取った。

ROV 模型の水中走行実験の実施にあたり, 錘を前後方向に移動させ ROV の重心位置を 3 条件で変更した。また, それぞれの重心位置に対して上部構造の中の浮力材を前後方向に移動させ浮心位置も 3 つの条件で実験を行った。ケーブルには単位長さ当たりの水中重量 0.375kg/m のチェーンを用い, 長さを 1.0m と 1.2m を変更させて計測を実施した。

ケーブル張力の影響により転倒するときの係留点からの最大水平移動距離の実験結果と計算結果の比較を Fig.9 に示す。ケーブルはチェーンなので曲げ剛性 EI は 0 として計算している。横軸に ROV 模型の前方からの浮心位置をとり, 縦軸に転倒したときの係留点からの ROV の水平移動距離である可動範囲をとった。

先に示した, ケーブル形状と張力の算定法では ROV 接続点以下に弛む形状をとることがあるが, 実際はその部分は海底面上に這っているはずである。よってその場合にある時はケーブル長さを数%短くし, その修正した長さ分だけケーブル端点位置の座標を小さくして再度ケーブル形状と張力の計算を行う。これをケーブル分布が ROV 接続点以下に弛む部分がなくなるまで行い, その時のケーブル端点から ROV 接続点までの長さを接地長さとする。また, 接地長さが生じた場合は長さに比例する摩擦係数をかけた摩擦力をケーブル張力に加算する事で, 海底の干渉を考慮した走行可能範囲が解析可能となる。この手法を用いてケーブル張力を算定した場合の ROV の可動範囲の推定結果と実験結果の比較の一例を Fig.9 示す。この計算結果では, ケー

ブルが海底を這うが、この効果を考慮しない計算ではROVの可動範囲を大幅に過小評価するのに対し、本計算結果は妥当な精度でROVの可動範囲を推定できている。

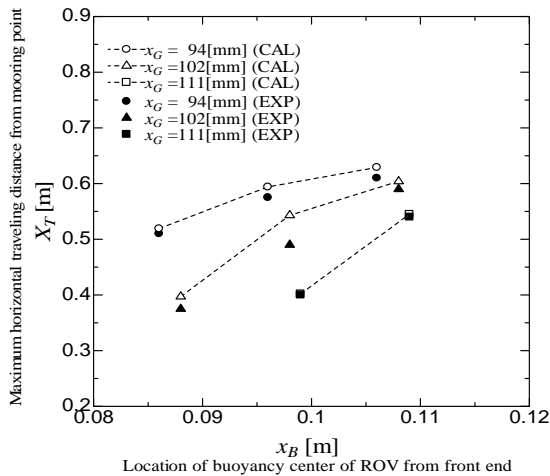


Fig. 9 Comparison of maximum horizontal traveling distance from the mooring point.

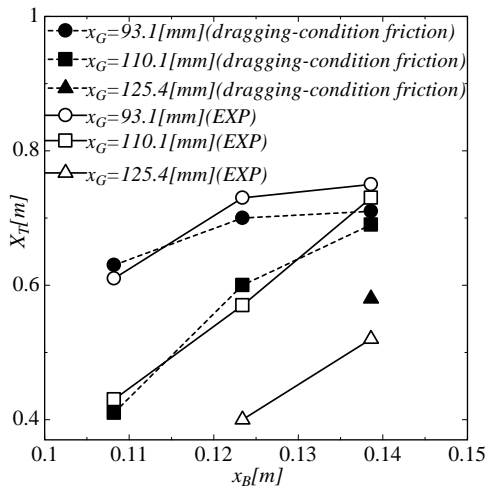


Fig. 10 Comparison of maximum horizontal traveling distance from the mooring point. (In case that the cable touches the sea bottom)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

Tokihiro Katsui, Tomoya Inoue, Masanari Akashi: Evaluation of moving capability crawler driven ROV considering cable tension, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, CD-ROM, 2013.

Tokihiro Katsui, Satoshi Kajikawa, Tomoya Inoue: Numerical Investigation of Flow around a ROV with Crawler Based Driving System, Proceedings of the

ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, CD-ROM, 2012.

Tokihiro Katsui, Masanari Akashi, Satoshi Kajikawa, Tomoya Inoue: The Motion Characteristics of Crawler Driven ROV Moving Over Bumps, Proceedings of ASME2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, CD-ROM, 2011.

〔学会発表〕(計7件)

Tokihiro Katsui, Tomoya Inoue, Masanari Akashi: Evaluation of moving capability crawler driven ROV considering cable tension, 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France, 2013年6月10日.

Tokihiro Katsui, Satoshi Kajikawa, Tomoya Inoue: Numerical Investigation of Flow around a ROV with Crawler Based Driving System, Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio De Janeiro, Brazil, 2012年7月2日.

Tokihiro Katsui, Masanari Akashi, Satoshi Kajikawa, Tomoya Inoue: The Motion Characteristics of Crawler Driven ROV Moving Over Bumps, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, the Netherlands, 2011年6月21日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等: なし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

勝井 辰博 (KATSUI TOKIHIRO)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号: 80343416

(2)研究分担者

井上 朝哉 (INOUE TOMOYA)  
(独)海洋研究開発機構・地球深部探査センター 技術部・主任技術研究員  
研究者番号: 10359127