ケーブルと海底の接触を考慮したクローラ型 ROV の可動領域推定法

正会員 勝 井 辰 博* 坂 本 竜 一**
明 石 雅 成** 正会員 井 上 朝 哉***

Estimation of the movable area of the crawler driven ROV considering the cable in contact with sea bottom

by Tokihiro Katsui, *Member* Ryuichi Sakamoto
Masanari Akashi Tomoya Inoue, *Member*

Summary

Remotely Operated vehicle, so called ROV is widely used for the seafloor explorations. The most of the existing ROVs are the hover type ones which is suspended in the sea. However, the hover type ROV is not suitable for the operations such as moving along the seafloor, stopping at a certain location on the seafloor and doing the heavy works like digging the seafloor. The crawler driven ROV is considered to be an applicable system for those operations. It is known that the crawler driven ROV is easy to run in unsteady attitude due to the buoyancy and the hydrodynamic force acting on the ROV and sometimes causes a turn over. Therefore, we have to know the precise moving capability to design the crawler ROV. Additionally, as the ROV is under the restrictions of the cable, it is necessary to know the movable area of the crawler ROV considering the cable tension. The authors have developed a simple method to estimate the movable area of the ROV based on the simple statics. The cable of the crawler driven ROV sometimes touches the seafloor. Therefore, the cable tension should be calculated considering the contact of the cable with the seafloor. However, in the previous research, the effects of the cable contact with the seafloor was not taken into account. The present study shows a numerical procedure to estimate the cable tension considering the contact of the cable with the seafloor and also the bending stiffness of the cable. Adapting this procedure, a method to estimate the movable area of the crawler ROV is shown. The model experiments are conducted to validate this method.

1. 結 言

ROV(Remotely Operated Vehicle)は海中探査を目的として数多くの建造実績がある。その多くは Hover タイプと呼ばれる浮遊式のものであるが、近年クローラを有するタイプの開発が行われるようになってきている^{1),2),3),4)}。クローラ型の特徴は、海底面を走行し、定点に停止することができること、また簡単な重作業が可能となる事である^{5),6),7),8)}。これにより、Hover 型では難しい作業が可能となるため、海中探査の多様性に資することができる。しかし、クローラ型の ROV は軽量になると海底面での走行性能が悪くなることが知られており、転倒のリスクが高くなる。著者らは準定常状態を仮定したクローラ型 ROV の簡便な走行性能推定法を示した⁹⁾⁻¹⁵⁾。この手法では、ROV の形状、重量、排水量、重心位置、浮

心位置に応じてどの程度の速度まで ROV が安定的に走行可能であるかを簡単に評価することが可能である。ROV はケーブルにつながれており、これによって電力の供給、通信を行っているため、ケーブルが ROV の走行可能範囲に大きく影響を与える。これまでの研究で、ケーブル影響を一部取り入れてはいる^{16),17)}ものの、ROV に特徴的な、ケーブルが海底面を這うような条件下でケーブル影響を考慮して ROV の走行可能範囲を推定することはできていない。本研究は、ケーブルが海底を這うような状況下を含めて、ケーブルが ROV に与える影響を評価し、ROV の走行可能範囲を推定する手法を提案し、それを小型模型試験によって検証したものである。

2. クローラ型 ROV の可動範囲推定法

2.1 クローラ型 ROV の通常走行判定法

Fig.1 は水平な水底面上を走行するクローラ型 ROV とそれに作用する力を模式的に示したものである。 xz 座標系は ROV 固定座標系であり、ROV の上端前縁を原点として進行方向の逆向きを x 軸、鉛直下向きを z 軸とする。本研究では、ROV のクローラの一部が浮き上がることなく完全に接地して走行している状態を通常走行と定義する。ROV に作用す

* 神戸大学大学院海事科学研究科
** 研究当時 神戸大学海事科学部
*** 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

る力は Fig.1 に示すように ROV の重心に働く重力 W 、ROV の浮心に働く浮力 B 、クローラに作用する垂直抗力 N およびスラスト T 、流体から受ける流体抵抗 R_w 、ROV のケーブル接続点に作用する張力 F_T の 6 つのみでそれぞれ集中荷重として取り扱う。これらの力は ROV が定常走行しているとき釣り合い状態にあると考える。なお、スラストと垂直抗力は同一の点 (x_N, z_N) に作用すると考える。このとき ROV が通常走行をする条件は、地面からクローラに働く垂直抗力 N の作用点の x 座標、 x_N がクローラ接地面の前端である x_F と後端である x_A の間にあることである。もし、 x_N が x_A より大きい場合、クローラ前方が浮き上がるようなウイリー状態での走行になり、その一方 x_N が x_F より小さい場合は、クローラ後方が浮き上がる走行状態となる。

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

水底で通常走行するクローラに働く力は先に述べた 6 つのみとし、それぞれの作用点位置は Fig.1 に示すとおりとする。ここで、水底面から受ける垂直抗力の作用点位置 x_N は力のつり合いから導くことができる。ROV の固定座標系における x 方向及び z 方向の力の釣り合い式は、(1), (2) 式となる。また、原点周りの右回りモーメントが 0 となる条件は、(3) 式で表される。

$$F_{Tx} + R_w - T = 0 \quad (1)$$

$$W - B - N - F_{Tz} = 0 \quad (2)$$

$$F_{Tz}x_T + R_wz_H - Tz_N - Wx_G + Bx_B + Nx_N = 0 \quad (3)$$

(1)~(3) 式より垂直抗力の作用点位置 x_N は (4) 式で表される。

$$x_N = \frac{Wx_G - Bx_B + R_w(z_N - z_H) + F_{Tz}z_N - F_{Tz}x_T}{W - B - F_{Tz}} \quad (4)$$

先に述べた通り、通常走行条件は垂直抗力の作用点位置 x_N がクローラ接地面内である x_F と x_A の間にあること、すなわち $x_F < x_N < x_A$ を満たすことである。したがって、(5) 式を満足する必要がある。

$$x_F < \frac{Wx_G - Bx_B + R_w(z_N - z_H) + F_{Tz}z_N - F_{Tz}x_T}{W - B - F_{Tz}} < x_A \quad (5)$$

ここで、流体抵抗 R_w は ROV の移動速度が比較的低速であれば ROV の進行方向投影面積を基準とする抵抗係数を 1 として概ね推定できることがこれまでの研究^{9)~15)}で分かっている。しかし、可動限界近傍では、ケーブル張力が支配的な外力となると仮定し、流体抵抗については無視した。オペレーション中の ROV の重量、排水量、幾何形状、重心・浮心位置が既知であり、さらに水底で通常走行するときの ROV に働くケーブル張力 $F_T = (F_{Tx}, F_{Tz})$ を推定することができれば、(5) 式を満足するか否かで ROV が通常走行が可能になり、ケーブル拘束下で (5) 式を満足しなくなった場所が ROV の可動限界となる。

2.2 ROV に作用するケーブル張力推定法

ROV に接続されたケーブルの変形と端点に作用する張力の数値解析手法を示す。ROV のケーブルは通常弾性体であり、その影響は無視できない。また、海底に相当な部分のケーブルが接触することも想定される。したがって、本研究では (1) ケーブルの弾性影響を考慮できる、(2) ケーブルの弛み、ケーブル途中での変位の拘束、海底面との接触を計算できる、(3) 計算時間が短い、の 3 点を重要視した数値解析法の開発を行った。

Fig. 2 は、ケーブルが接続されている ROV の概略図と空間固定座標系である。ケーブルの係留点を原点にとり、鉛直下向きに Z 軸、水平面内の ROV の前進方向に X 軸を取る。この座標系は先に示した、ROV 固定座標系 (xz 座標系) とは独立である。ROV のケーブル接続点の座標は (X_T, Z_T) とする。簡単のためケーブルは XZ 平面内の 2 次元変形のみを考える。ケーブルの長さ、水中重量の密度分布、ケーブルの材料剛性、ROV への接続点の位置 (X_T, Z_T) が与えられたときのケーブルの変形および端点でのケーブル張力 $F_T = (F_{Tx}, F_{Tz})$ を下記の手順で求める。

Fig. 2 Definition of coordinate system for the ROV cable.

まず、ケーブルを N 個の離散要素に分割する。 i 番目の要素の端点には、Fig. 3 に示すような力およびモーメントが作用している。 ROV が移動中はケーブルそのものも運動するが、一般的に ROV の運動は低速であるため各状態でケーブル要素に作用する力はバランスしていると考えられる。

Fig. 3 The Forces acting on a cable element.

このとき、次式(6)~(9)を満たす。

$$F_{Xi} = F_{Xi-1} \quad (6)$$

$$F_{Zi-1} = F_{Zi} + w_i \quad (7)$$

$$-F_{Zi-1} l_i \cos \theta_i + F_{Xi-1} l_i \sin \theta_i - \frac{1}{2} w_i l_i \cos \theta_i + M_i - M_{i-1} = 0 \quad (8)$$

$$M_i = -EI \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{l_i} \quad (9)$$

(9)式中の EI はケーブルの曲げ剛性であり、ケーブルの傾斜角 θ の長手方向の変化率については差分で評価している。 ROV に作用するケーブル張力 $F_T=(F_{Tx}, F_{Tz})$ が仮に与えられたとすると、(6), (7)式より、

$$F_{Xi} = F_{Tx} \quad (10)$$

$$F_{Zi} = F_{Tz} + \sum_{j=i+1}^N w_j \quad (11)$$

となって張力分布が確定する。これを用いれば、(8), (9)式によりケーブル要素の傾斜角 θ_i 分布が決定され、ケーブル形状を求めることができる。しかし ROV に作用するケーブル張力 $F_T=(F_{Tx}, F_{Tz})$ を適当に与えてしまうと、得られるケーブル形状の端点の位置は、当然ながら ROV 接続点 (X_T, Z_T) に一致しない。 ROV に作用するケーブル張力 $F_T=(F_{Tx}, F_{Tz})$ を正しく求めるためには、そのケーブル張力から得られるケーブル端点位置が ROV 接続点に一致する必要がある。本研究ではニュートン・ラプソン法による逆解析を行うことで、これを数値的に解く。すなわち適当な $F_T=(F_{Tx}, F_{Tz})$ の初期値に対して得られるケーブル端点の座標と ROV 接続点との差を求め、これが 0 に漸近するように 2 変数 (F_{Tx}, F_{Tz}) のニュートン法を行うものである。ただし、ケーブルの曲げ剛性については、最初から厳密に考慮すると計算の収束性が落ちるため、最初

は曲げ剛性を 0 としてケーブル張力を求め、これを初期値として曲げ剛性を徐々に上げながら最終的な解を求めていく手法を取る。

計算結果の一例を Fig. 4 に示す。これは、長さ 130m、単位長さ当たりの質量 1.0kg のケーブルの張力とケーブルの曲げ剛性の関係を示したものである。なお、ケーブル端点は $(X_T, Z_T)=(80\text{m}, 90\text{m})$ である (Fig. 2 参照)。張力の向きの定義は Fig. 2 に示した通りである。 Fig. 4 を見ると、進行方法逆方向の張力はケーブルの曲げ剛性が上がると小さくなり、鉛直下向きの張力は剛性が上がると大きく、すなわち ROV を下方に押す力が大きくなる。

Fig. 4 Calculated cable tension. (Length:130m, Weight density: 1.0kg/m, $(X_T, Z_T)=(80\text{m}, 90\text{m})$)

2.3 ケーブルと海底の接触効果

ROV が広範囲を走行するためには長尺のケーブルを使用する必要があるが、クローラ型 ROV の場合、機体は海底面上を走行するため、走行中にケーブルが海底面を這うことは避けられない。したがって、ケーブルが海底に接触する状態を含めてケーブル張力を推定する必要がある。前節で示したケーブル張力推定手法ではケーブルと海底面の接触は考慮できず、ケーブルが長い場合はケーブルが ROV よりも、言い換えれば海底面よりも下方に垂れ下がってしまうことになる。そこで、本研究では前節で示した手法を拡張してケーブルが海底に接触する場合のケーブル形状と張力を簡便に推定する方法を示す。

Fig. 5 の破線は、長さ $L=1.4\text{m}$ 、1m 当たりの中重量 $w_w=0.375\text{kg}$ で $E=0\text{Pa}$ のケーブルが、原点を端点として水中に吊るされており、もう一方の端点 (ROV に接続される位置 (X_T, Z_T) に相当する) が $(X_T, Z_T)=(0.60\text{m}, 0.94\text{m})$ にあるときのケーブル形状の計算結果を表している。このケーブルの長さや重量等は後述する模型実験においてケーブルとして使用されるチェーンと同等のものである。これを見ても分かるようにケーブルは海底面と想定される $Z_T=0.94\text{m}$ よりも下方に垂れ下がっており、現実に則さない。そこで、このような計算結果となった場合には、次のような繰り返し計算を実施して、

ケーブルが海底面に沿った形状となるようにした。すなわち、ケーブル形状が海底面より下方に垂れ下がった場合は、垂れ下がり長さに応じてケーブル長を暫定的に短くする。その短くした長さ分だけ、ケーブル端点位置(ROV 接続点(X_T, Z_T))をもう一方のケーブル端点側に水平移動させ、再度ケーブル形状とケーブル張力を計算する。Fig. 5 の場合でいえば、破線のようなケーブル形状が計算された場合、海底下に垂れ下がったケーブルの長さは概ね 0.35m 程度であるから、この長さ分だけ全ケーブル長を短くし、その代わりにケーブル端点位置(X_T, Z_T)は(0.60m, 0.94m)から(0.25m, 0.94m)に変更して再度計算を行う。無論、再計算後も若干の垂れ下がりはあるので、これが無くなるまで繰り返し計算を行う。この方法で得られたケーブル形状が Fig. 5 の実線である。最終の計算結果では(X_T, Z_T)=(0.195m, 0.94m)となり、1.4m のケーブルの内、0.405m が海底面を這うという結果が得られる(ケーブルが海底に接する長さを L_G と呼ぶことにする)。ケーブル張力として ROV に作用する力は、この計算上最終の(X_T, Z_T)の位置でのケーブル張力に、海底を這うケーブルに作用する海底からの摩擦力加えることで算出できるとするのが本手法の立場である。摩擦力の推定には新たに実験等を行う必要があるが、これは今後の課題とし、本研究では摩擦力の考慮は行わない。

Fig. 6 は 1.2m と 1.4m の 2 種類のチェーンを用いて、設定したケーブル端点位置 X_T と海底にケーブルが接する長さ L_G の関係についての計算結果と計測結果を比較したものである。実験は水深が 0.94m の水槽内で実施したものであり、 $Z_T=0.94\text{m}$ として計算は行っている。これを見ても分かるように、計算結果と計測結果はよく一致している。

Fig. 5 Calculated cable shape. ($L=1.4\text{m}$, $w_t=0.375\text{kg}$, $E=0\text{Pa}$)

Fig. 6 Comparison of grounded cable length.

以上のように、クローラ型 ROV の重量、排水量、重心位置、浮心位置、クローラ形状、ケーブル長さ、ケーブル水中重量、ケーブル剛性が与えられれば、2.2 および 2.3 節に示した手法によって ROV に作用するケーブル張力を海底面との接触も考慮に入れて推定することができ、それを用いれば 2.1 節に示した手法によってクローラ型 ROV の可動範囲を推定することができる。

ただし、ROV 実機に対して相当長尺なケーブルを使用する場合、ケーブルに作用する流体力は ROV に作用するケーブル張力に大きく影響することが考えられるため、注意が必要である。本手法では、ROV の位置に応じてケーブルの各要素(数値計算上の離散要素)の位置や傾きが計算できるから、各要素の進行方向投影面積や対水速度が求められる。ケーブルは円柱状であるから、流体抵抗の抵抗係数は概ね既知であり、ケーブルに作用する流体力の概算は可能であると考えられる。これについては、今後詳細に検討していきたい。

3. 模型実験

3.1 ROV 模型と走行条件

前節までに示したケーブル拘束下にあるクローラ型 ROV の可動範囲推定法の精度を検証するために、小型のクローラ型 ROV 模型を作成して水槽内で走行可能範囲を測定し、本手法の推定結果との比較検討を行った。製作した小型 ROV 模型を Fig. 7 に示す。Table 1 は模型の主要目を示している。

ROV 模型のデッキ上には水中重量を調整できる錘を搭載し、上部には自重がほぼ 0kgf で浮力が 0.30kgf の発泡ウレタン製の浮力材を搭載している。この 2 つを模型内部で前後方向に水平移動させることにより、自重を変化させず重心および浮心の位置を変更することが可能となっている。

ROV 模型に接続するケーブルとしては剛性が無視できるチェーンを使用した。塩化ビニル管による実験の実施も試みたが、再現性の高い計測ができなかったため今回は断念している。ケーブル(チェーン)の質量は 1m あたり 0.375kg、長さ

は 1.2m と 1.4m の 2 種類で計測を実施した。模型を走行させる水槽は幅 1.5m, 高さ 1.0m, 奥行き 0.5m のアクリル製で、水面高さは水槽底面から 0.94m 上方である。ケーブル係留点は水槽端点の水面上に設定し、もう一方のケーブル端点を ROV 模型に接続して、水槽底面上を極低速で走行させた。ケーブル係留点から遠ざかる方向に模型を走行させ、クローラ前方が水槽底面から浮き上がった状態になった地点を計測し、この地点とケーブル係留点の水平距離を走行限界距離 X_T とした。水槽底面には目盛り入りテープが張り付けられており、ROV 模型が走行する様子を上方からビデオカメラで撮影することにより、クローラ前方が浮き上がる瞬間の X_T を撮影された画像から読み取った。ROV 模型の重心 x_G 、浮心位置 x_B については Table 2 に示す各条件で走行限界距離の計測を実施している。重心、浮心位置は Fig.1 のとおり ROV 模型の前端を基準としており、それらの位置の具体的な計測法は著者らがこれまでの研究で示した模型の空中および水中での 2 点吊り法¹²⁾による。

Fig. 7 Crawler type ROV model.

Table 1 Principal dimensions of ROV model.

Weight	0.95	[kg]
Displacement	0.85	[kg]
Weight in water	0.10	[kg]
Weight of ballast weight	0.50	[kg]
Displacement of ballast weight	0.43	[kg]
Displacement of float	0.30	[kg]
Height	0.195	[m]
Length	0.240	[m]
Width	0.110	[m]

なお、ROV 模型の作動条件は実機との相似性を考慮しておらず、本模型試験は 2 節で示した、クローラ型 ROV の可動範囲推定法の検証実験として位置付けている。本手法で用いた ROV に作用する外力推定法は、概ねスケールに依存し

ないから ROV 実機への適応も可能であると考えている。しかし、先に述べたように、ケーブルに作用する流体力などは考慮されておらず、実機の走行特性データの蓄積および比較検証が望まれる。

Table 2 Experimental conditions.

Case Name	Cable length L [m]	x_G [m]	x_B [m]
Case 1-1	1.2	0.093	0.108
			0.123
			0.139
Case 1-2		0.110	0.108
			0.123
			0.139
Case 1-3		0.125	0.108
			0.123
			0.139
Case 2-1	1.4	0.093	0.108
			0.123
			0.139
Case 2-2		0.110	0.108
			0.123
			0.139
Case 2-3		0.125	0.108
			0.123
			0.139

3.2 模型試験結果と推定結果の比較検証

Fig. 8 から Fig. 11 に ROV 模型の走行限界距離の計測値と本手法による計算結果の比較を示す。Fig. 8, 9 はケーブル長さが 1.2m の場合、Fig. 10, Fig. 11 はケーブル長さが 1.4m の場合の結果である。また、Fig. 8, 10 の計算結果はケーブル張力の計算に際して、ケーブルと水槽底面との接触を考慮したもの、Fig. 9, 11 は考慮していないものである。各図の横軸は模型の前端から浮心までの水平距離、縦軸は走行限界距離である。一般的に言えることは ROV の重心位置が前方にあるほど、また浮心位置が後方にあるほどケーブル張力を受けてもクローラは浮き上がりにくく、より遠方まで走行することができる。

各ケースの結果を詳しく見てみると、Fig. 8, 9 のケーブル長さが 1.2m の場合、Case 1-3 で浮心位置 $x_B=0.108$ の条件では ROV が走行を開始すると同時にクローラ前方が浮き上がってしまうため走行限界距離は測定不能であった。一方、この条件では、計算でも走行限界距離の解は得られない。それ以外のケースではケーブルと水槽底面との接触を考慮しても (Fig. 8) しなくても (Fig. 9) でも計算結果に大きな違いはなく、いずれも計測結果に概ね一致している。これは、Fig. 6 を見

Fig. 8 The comparison of the horizontal movable distance from the mooring point. (The cable length $L=1.2\text{m}$, The cable tensions are calculated considering the contact of the cable with the bottom.)

Fig. 9 The comparison of the horizontal movable distance from the mooring point. (The cable length $L=1.2\text{m}$, The cable tensions are calculated without considering the contact of the cable with the bottom.)

Fig. 10 The comparison of the horizontal movable distance from the mooring point. (The cable length $L=1.4\text{m}$, The cable tensions are calculated considering the contact of the cable with the bottom.)

Fig. 11 The comparison of the horizontal movable distance from the mooring point. (The cable length $L=1.4\text{m}$, The cable tensions are calculated without considering the contact of the cable with the bottom.)

でもわかるようにケーブル長が 1.2m の場合, ROV 模型が走行限界に達する位置付近にあるときのケーブルの接地長さは $0.1\sim 0.2\text{m}$ 程度であり, その影響が小さいためと推察される. 一方, Fig. 10, 11 に示したケーブル長が 1.4m の場合の結果を見ると, 計算による ROV 模型の走行限界距離はケーブルと水槽底面との接触を考慮した場合 (Fig. 10) としない場合 (Fig. 11) で大きな差が生じる. 特に Case2-2 の $x_B=0.108$, Case2-3 の $x_B=0.123$ の 2 つのケースでは, ケーブルと水槽底面との接触を考慮しない場合は解が得られないのに対して, 考慮した場合は解が得られ, かつ実験結果によく一致する. これは, ケーブルが水槽底面に接地している長さが長い場合, その影響がケーブル張力の計算結果に顕著に表れたものと考えられる. ケーブルと水槽底面との接触を考慮しない場合, ケーブル張力は Fig. 5 の破線で示したように下方に垂れ下がる状態で算定される. この場合, ケーブルの全重量をケーブル両端点で支える必要があるため, 張力は過大に算定される. 結果として ROV の走行限界距離を過小評価してしまう. その意味では広い活動範囲が求められる長尺ケーブルを有するクローラ型 ROV に対しては, 本手法による走行可能範囲の推定が有効であると考えられる.

実際の ROV の場合, 海底に接地したケーブルが海底面から受ける摩擦力を考慮してケーブル張力を求める必要があるが, これについても本手法で求められるケーブル接地長さやケーブル重量が摩擦算定の一つの指標になると考えられる. これについては今後検討していきたい.

4. 結 言

本研究は次世代の海底探査機として注目されているクローラ型 ROV に着目し, その走行可能範囲を簡便に推定する手法を開発するとともに模型実験によってその推定精度を検証したものである. 静力学的観点から低速定常走行時に

ROV に作用する力はいずれの状態にあると仮定し、クローラ型 ROV が通常走行可能であるためには、海底面からの垂直抗力の作用点がクローラの接地面の範囲内にある必要があるとして、走行可能範囲推定法を構築した。ROV に作用する力は、重力、浮力、海底面からの垂直抗力、推力、流体抵抗、ケーブル張力とし、これらを集中過重としてモデル化した。本研究では、特に海底面との接触を考慮したケーブル張力推定法に着目し、その簡便な数値計算法を示した。

本研究で示した走行可能範囲推定法を検証するため、ROV 模型を作成して小型水槽内で走行実験を行い、ケーブル拘束下での走行限界水平距離を計測した。推定結果との比較を行ったところ妥当な精度で本手法がクローラ型 ROV の走行可能範囲を推定できることが確認できた。長尺のケーブルを使用する場合、ケーブル張力の推定に海底面との接触影響を考慮することが不可欠であることが分かり、本手法の有効性が示された。本手法は、例えば ROV の実海域利用を計画する際、可動範囲と走行条件の関係を簡便に推定することが可能であるため、ROV の運用計画に有益な情報を提供できると考えられる。しかしながら、ケーブルが相当長尺になる場合や流速の大きな海域で ROV を運用する場合については、ケーブルに作用する流体力の影響評価が必要となるため、本手法では不十分である。さらに、海底と接触したケーブルに作用する摩擦力の評価も重要と考えられる。

今後、本手法を拡張して接地したケーブルに作用する海底面からの摩擦力影響やケーブルに作用する流体力の影響を考慮することを検討し、本手法の精度の向上を図る予定である。

参考文献

- 1) T. Inoue, H. Osawa, H. Yoshida, J. Tahara, S. Ishibashi, K. Ito, Y. Watanabe, T. Sawa, T. Hyakudome : Sea Trial Results of ROV "ABISMO" for Deep Sea Inspection and Sampling, Proc ASME 27th Int Conf Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2008.
- 2) T. Inoue, T. Katsui, H. Murakami, J. Tahara, T. Shinbori: Preliminary Research on the Thruster Assisted Crawler System for a Deep Sea ROV, Proc. IEEE Oceans Conf., 2009.
- 3) T. Inoue, K. Takagi, T. Shiosawa: Flipper Type Crawler System for Running on the Irregular Seafloor, Proc. IEEE Oceans Conf., 2010.
- 4) T. Inoue, K. Takagi, T. Shiosawa: Experiments of Flipper Type Crawler System at Sea to Verify Running Performance on Sandy or Irregular Steep Terrain Seafloor, Proc. IEEE Oceans Conf., 2011.
- 5) T. Inoue, T. Shiosawa, K. Takagi: Dynamic Motion of Crawler-Type ROV," Proc. Underwater Technology Conf., 2011.
- 6) T. Inoue, H. Osawa, K. Takagi, A. Asada, M. Mochizuki, T. Katsui, S. Tsukui: Hard Rock Coring at the Steep Terrain Seafloor with the Flipper Crawler ROV," Proc. Int. Sym. on Underwater Intervention, 2012.
- 7) T. Shiosawa, K. Takagi, T. Inoue: Experimental and Theoretical Study on the Motion of ROV with Crawler System, Proc. MTS/IEEE Oceans Conf., 2010.
- 8) S. Wood: Modular Amphibious Research Crawler – Characterization of the Coastal Environment Using a Portable Remotely Operated Vehicle," Sea Technology, 2006.
- 9) T. Inoue, T. Katsui, J. Tahara, K. Ito, H. Yoshida, S. Ishibashi, K. Takagi : Experimental Research on Movability Characteristic of Crawler Driven ROV, Proc. MTS/IEEE Oceans Conf., 2008.
- 10) T. Inoue, T. Katsui, H. Murakami, K. Takagi: Crawler System for Deep Sea ROVs," Marine Technology Society Journal, Vol. 43, No. 5, pp 1-8. 2009.
- 11) T. Inoue, T. Katsui, H. Murakami, J. Tahara: Research on Stability of Crawler System for Deep Sea ROV," Proc. ASME 28th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2009.
- 12) T. Katsui, H. Murakami, S. Kajikawa, T. Inoue: Moving Performance of Crawler Driven ROV on the Inclined Sea Bottom, Proceedings of OMAE2010, 2010.
- 13) T. Katsui, M. Akashi, S. Kajikawa, T. Inoue: The Motion Characteristics of Crawler Driven ROV Moving over Bumps, Proceedings of OMAE2011, 2011.
- 14) T. Katsui, S. Kajikawa, T. Inoue: Numerical Investigation of Flow around a ROV with Crawler Based Driving System, Proceedings of OMAE2012, 2012.
- 15) 勝井辰博, 西野真依子, 井上朝哉: フリッパークローラ型 ROV の段差踏破性能評価法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 20 号, pp.165-172, 2014.
- 16) 明石雅成, 勝井辰博, 井上朝哉: ケーブル張力を考慮したクローラ型 ROV の可動範囲解析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 13 号, pp.373-376, 2011.
- 17) T. Katsui, T. Inoue, M. Akashi: Evaluation of moving capability of crawler driven ROV considering cable tension, Proceedings of OMAE2013, 2013.