作業船自動自律化に向けたデータ分析に関する研究

琴浦　毅[1]・宮本　憲都[2]・延田　篤彦[3]・磯山　直也[4]・小島　浩昭[5]

[1] 正会員　五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部
（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail:tsuyoshi.kotoura@mail.penta-ocean.co.jp　(Corresponding Author)
[2] 正会員 東亜建設工業（株）機電部（〒230-0035 横浜市鶴見区安善町 1 丁目 3）
[3] 東洋建設（株）土木事業本部機械部（〒101-0051　東京都千代田区神田神保町 1-105）
[4]（株）小島組　船舶管理本部船舶機電部（〒455-0021　名古屋市港区木場町 1 番の 6）
[5]（株）SKK　技術部（〒781-0242 高知市横浜西町 1-3）

建設業界の労働力不足による生産性低下を解消するために，海上工事で使用する作業船においても自動自律化に向けた取り組みも始まりつつある．自動自律化においては熟練オペレーターの技術を踏まえた実施が不可欠となる中で，作業船自動自律化の施工能力向上に必要になる熟練オペレーターの施工記録を分析した事例は少ない．

本研究ではグラブ浚渫船を対象として，複数の熟練オペレーターの実績を収集し，その技術を関数によりデジタルに変換・分析することで熟練オペレーターの技術をデータ化する手法を確立した．その結果，熟練オペレーターの分析結果を踏まえた動作時系列の作成が可能となり，作成した時系列を参考に浚渫動作の自動運転を実施したところ，熟練オペレーター2 割増の作業時間となり，作業能力としては 8 割程度の結果が得られた．

Key Words : *work vessel, dredger, automation, digitization*

1.　はじめに

2024 年に国土交通省から公表された i-Construction2.0 では施工現場のオートメーション化を実現し，生産性の高い建設現場を目指すことや，業務，組織，プロセス，文化・風土や働き方改革を目指すことが明記されている．この取り組みより国民生活や経済活動の基盤となるインフラ整備・維持管理の重要な役割を担う建設現場の ICT 化や，労働力不足による省人化対策の取り組みが加速すると考えられる．近年の建設現場における ICT の活用の例として，発達著しい技術の一つである UAV を用いた測量や現場状況把握があり，これらの活用に向けた法整備や要領の整備が進むことで一般的に用いられる技術になっている [1)]．また，バックホウなどの陸上建設機械の自動自律化 [2)]や遠隔化 [3)]の取り組みも進み，自動施工における安全ルールの議論・整備が始まるなど，ICT 化による省人化対策は着実に進みつつある [4)]．ところで，陸上建設機械は陸上の固定された地面上で，掘削するバケツが剛体である鋼製のアームに接続され，目視確認可能な状態で作業をすることが多い．それに対し，海上工事で使用する浚渫船や起重機船は，波浪などによる動揺が発生する船体上において，海底を掘削する浚渫バケツがクレーンからのワイヤーで吊るされた不安定な状態で，作業箇所が水中で直接目視確認ができないため，不可視部分を各種センサーの計測値や熟練オペレーターの経験に基づき作業を行う点が陸上とは大きく異なる点である．これらの要因も影響した結果，自動運航船技術の取り組み事例はあるものの [5)]，作業船の自動化の取り組み事例は少なかったが，今後の海上工事における生産性向上には作業船の自動化の取り組みは不可欠と考えられる．しかし，作業船自動自律化に向けた取り組みやデータ収集・分析が十分に行われてこなかったなかで，まずは作業船の自動自律化の施工能力向上に欠かせない熟練オペレーターの暗黙知である技術をデータ化して分析することが自動化による生産性向上に資すると考えた．熟練技能者の技術のデータ化や分析する取り組みは複数分野で実施されているが [6)]，作業船の熟練オペレーターを対象にした事例は存在しない．

そこで，本研究では，熟練オペレーターの施工記録のデータ化と，データの評価・分析する手法を確立し，作業船の自動自律化の施工能力向上に資することを目的とする．

2. グラブ浚渫について

グラブ浚渫は**図-1** に示すようにグラブ浚渫船，土運船に加え，汚濁拡散が懸念される場合は水中に垂下した汚濁防止膜（図中では非表示）を有する汚濁防止枠を用いて実施される．グラブ浚渫船は 3 本のスパッドを海底に貫入し，位置を固定した状態で浚渫船前方にグラブバケットを巻下げ後に閉口して海底土砂をつかみ，巻上げながら旋回し，土運船上でグラブバケットを開口して放土するサイクルで作業を行う．そして浚渫する旋回角度をずらしながらこのサイクルを繰り返す結果，浚渫船前面の浚渫済海底地形は扇状となる（**図-1** 下平面図）．そして，当該位置で扇状の浚渫完了後は，左右 2 本のスパッドを海底から引き上げ，中央後方のスパッドを海底に貫入状態で前後に倒して浚渫船を次の位置への移動を繰り返すことで対象範囲の浚渫を進めている．

本研究では他の作業船舶のクレーン作業への展開も視野に入れ，自動化機構が搭載された浚渫船の浚渫作業サイクルのクレーン動作を対象としたデータ分析を行うこととし，スパッドによる移動は対象外とした．

3. データ分析

(1) データ化手法

オペレーターによる施工技術のデータ分析は，浚渫船に 1 Hz で記録されているクレーン動作のログデータを用いた．ログデータの例として，**図-2** に 1 つの位置において扇状に 3 回浚渫した旋回，昇降，開閉の時系列データを示す． 0 秒は深度-15 m，旋回角は浚渫船正面を 0 度で時計回りを正としたときの-35 度の条件で，浚渫するためにグラブを閉口して開口度 0%になったタイミングである．その後，時間が経過することで巻上，右旋回，開口をして放土した後，次浚渫に向けて左旋回，巻下をして，130 秒の開口度 0%になるまでが 1 サイクルである．また，130 秒，250 秒の開口度 0 %のタイミングでは，浚渫深度は-15 m と変わらないものの，浚渫旋回角度は-15 度，0 度と 15 度ずつ変化していることが確認できる．

この時，1 サイクルにおけるそれぞれの動作時系列に着目すると，例えば旋回は放土時角度が極大値の凸型曲線になっており，極大値前後はそれぞれ S 字時系列曲線とみなすことができると考えた．そこで，4 個のパラメータを用いることで任意の S 字時系列曲線を表現できる式（1）のシグモイド関数を用いたデータ分析を検討した．

$$y(t) = \frac{K}{1 + \exp\left(-a(t - t_a)\right)} + y_0 \qquad (1)$$

ここで， t : 時間，$y(t)$: 時系列曲線，K : 移動量，a : 移動速度係数，t_a : S 字曲線中央の位相時間，y_0 : 初期値に関するパラメータである．時間 0 から放土までの旋回を例にすると，K は浚渫角度から放土角度までの旋回角度，a は旋回角速度係数，t_a は位相時間，y_0 は浚渫角度に関するパラメータとなる（**図-3**）．

データ分析は，海底でグラブが閉口したタイミングを基準として，閉口から次の浚渫時の閉口までの間を 1 サイクルとして分割したデータを用いた．そして，1 サイクルのデータにおいて，昇降，旋回，開閉のそれぞれの極大値を抽出し，その極大値間の曲線に近似可能なシグモイド関数となる 4 個のパラメータを特定した．例として旋回について放土角度を極大値としてその前後で 2 分割して関数を当てはめると，合計 8 個のパラメータが取得できた（**図-4**）．

同様に昇降は 4 関数，開口 3 関数で近似可能であることを明らかにし，それぞれの関数でのパラメータを得ることができた．つまり，熟練オペレーターの暗黙知である技術的ノウハウが詰まった動作時系列を，シグモイド関数を用いることで再現可能であり，関数化によるパラメータでデータ化できる手法が確立できた．

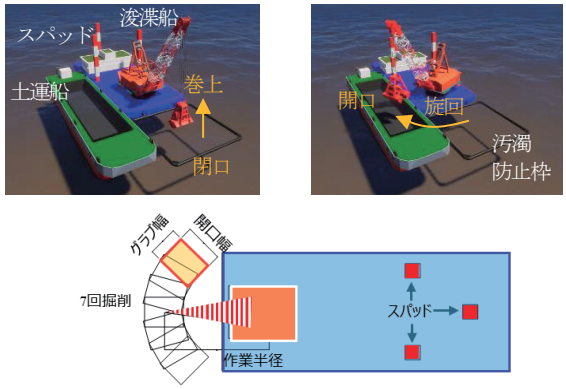


図-1 グラブ浚渫のイメージ

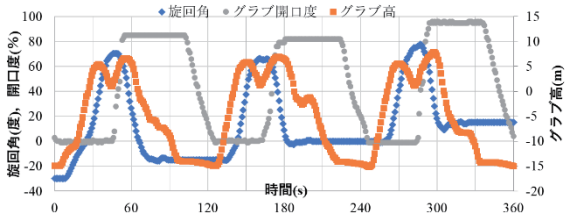


図-2 旋回・昇降・開閉の時系列

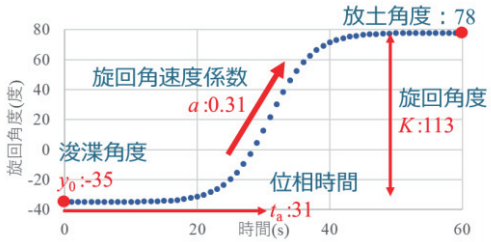
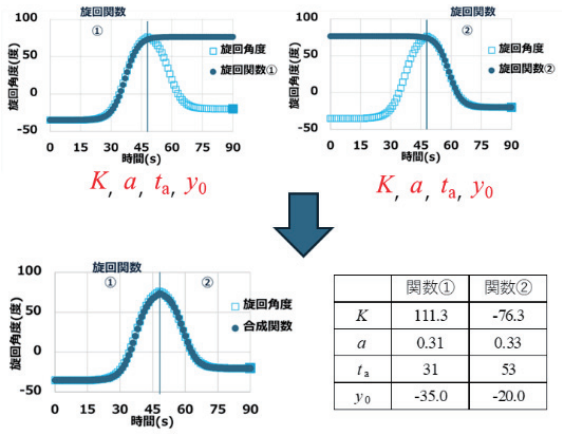


図-3 シグモイド関数時系列（放土までの旋回）



	関数①	関数②
K	111.3	-76.3
a	0.31	0.33
t_a	31	53
y_0	-35.0	-20.0

図-4　旋回の関数化

表-1 データ取得条件

工事	船舶	水深	サイクル数
A	I	-15m	オペ①：349 オペ②：318
B	I	-20m	2013
C	II	-26m	2476
D	III	-15m	931

(2)　使用データ

船舶や施工水深などの施工条件の相違による分析を目的とするために**表-1** に示すA～D工事のデータを対象とした．船舶Ⅰ～Ⅲは同一規格ではあるが異なる船舶であり，浚渫作業に従事しているオペレーターも異なっている．また，A工事を基準とすると，B工事は同一船舶で水深条件が異なり，C工事は船舶・水深条件ともに異なり，D工事は同一水深であるが船舶が異なる条件となる．それぞれの工事では600を上回るサイクル数が含まれており，全体では6000を超えるサイクル数が今回の検討の対象である．また，A工事のデータは，当該浚渫船で従事する2名のオペレーターのデータをそれぞれ別に評価することで，同一船舶における異なるオペレーターの影響を検討した．

(3)　昇降データ分析結果

昇降の4関数のうち，浚渫後の巻上動作となる1つ目の関数（昇降関数①）のパラメータのうち，K（巻上量＝浚渫深さ+土運船高さ）とa（巻上速度係数）を**図-5** に整理したところ，巻上量Kが増加するにつれて巻上速度係数aが低下する明確な関係が得られた．この図においてA工事にはオペレーター2名のデータを表示しているが，それぞれがほぼ重なった結果であることに加え，浚渫船が異なるD工事の結果がA工事とほぼ重なっており，それぞれの船舶の熟練オペレーター同士の動作には有意な差は無いことがデータで示された．また，水深条件が異

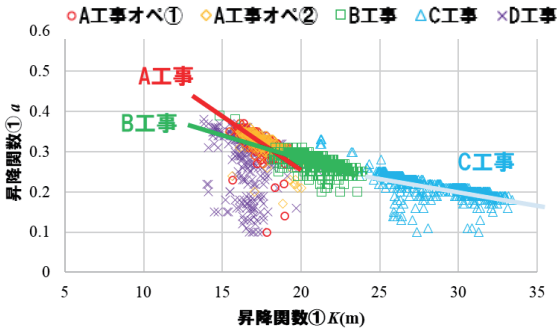


図-5　巻上量Kと速度係数aの関係（昇降関数①）

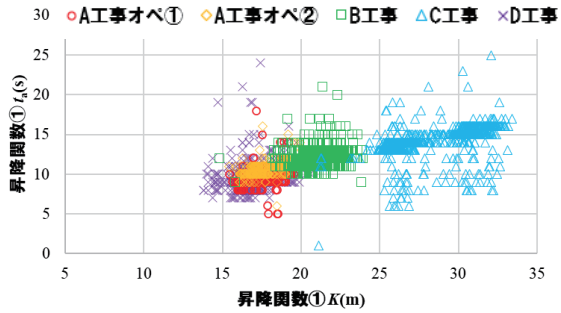


図-6　巻上量Kと位相時間t_aの関係（昇降関数①）

なるB工事，施工条件，浚渫船が異なるC工事の主要なプロット部は，A工事も含めておおよそ一つの曲線で近似できることが結果となっている．なお，巻上量Kが大きくなると速度係数aが小さくなる傾向となったが，熟練オペレーターが施工条件に応じて巻上速度を経験に基づき動作している状況をパラメータで評価していると考えられる．

ところで，D工事では巻上量Kが17程度において巻上速度係数aが小さい方向にばらついているのは同じ巻上量Kでも巻上速度が遅いことを示しているが，これは汚濁防止枠下側を浚渫した時のデータであり，汚濁防止枠下の施工時のデータ評価方法は別途検討する必要があることを示唆している．

次に**図-6** に昇降関数①の巻上量Kとt_a（位相時間）を整理したところ，巻上量Kが増加するにつれて位相時間t_aが増加する明確な関係が得られた．これは，巻上量が大きくなるほど巻上時間が必要であることを反映した結果であり，施工時間についてもパラメータで評価できることを確認した．なお，C工事では巻上量Kが25以上においてt_a（位相時間）が小さい方向にばらついている．これは，1サイクルの基準を閉口度の0%とするときに，閉口状況によっては0～1%で変動することが影響しているため，評価時には留意が必要である．

(4)　旋回データ分析結果

旋回の1つ目の関数（旋回関数①）のK（旋回角度＝浚渫角度～放土角度）とa（旋回角速度係数）を**図-7** に整理した．横軸のK>0は浚渫船の右舷の土運船に放土

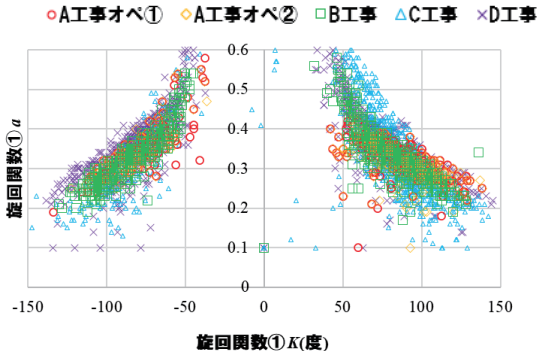


図-7　旋回角度 K と旋回角速度係数 a の関係（旋回関数①）

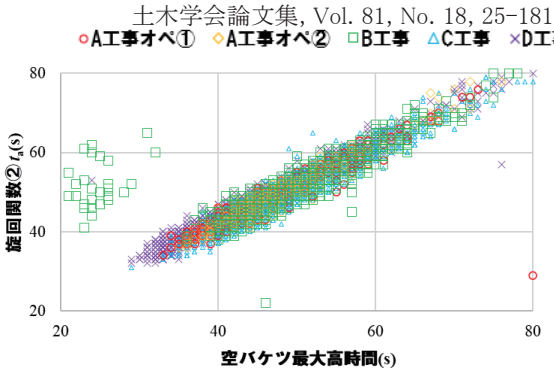


図-9　空バケツ最大高時間と旋回関数② t_a の関係

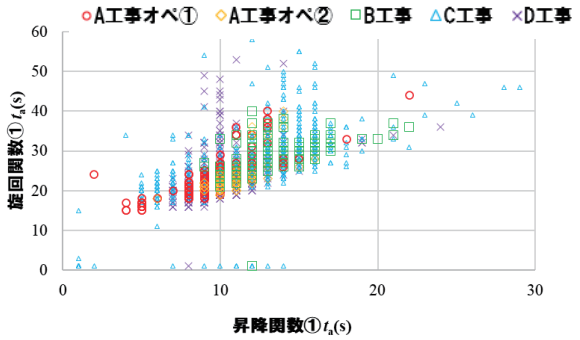


図-8　昇降関数① t_a と旋回関数① t_a の関係

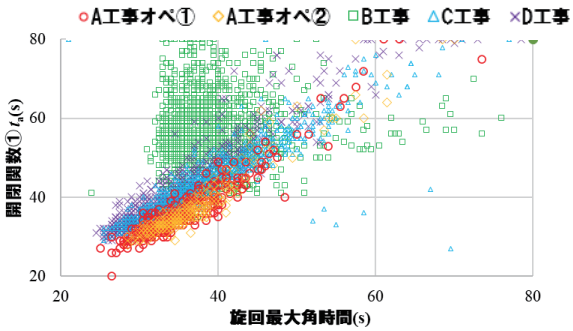


図-10　旋回最大角時間と開閉関数① t_a の関係

するために右旋回を行い，$K<0$ は浚渫船の左舷の土運船に放土するために左旋回を行った結果のデータであるが，旋回角度 K の絶対値が増加するにしたがって旋回角速度係数 a が低下するのは左右で同様の傾向である．また，A～D 工事でのプロットはほぼ重なっており，各浚渫船の旋回における動作の差は小さいことを評価した結果と考えられる．

また，旋回においても浚渫角度，放土角度に応じて変化する旋回角 K に応じて速度係数 a が変化しており，熟練オペレーターが施工状況に応じて旋回角速度を経験に基づき動作している内容をパラメータで評価していると考えられる．

図-8 は昇降関数①と旋回関数①の位相時間 t_a の関係を示しており，ばらつきはあるもののそれぞれのパラメータに一定程度の相関があることが確認できる．熟練オペレーターは巻上しながら旋回するなど同時に複数動作を行うことで作業時間の短縮を実現しているが，この図は昇降関数①と旋回関数①がどのような時間差で動作しているかの関係をパラメータで評価できた結果である．

図-9 は放土完了後に土運船に接触しないように巻き上げて高さが極大になった時間と，次浚渫への旋回である旋回関数②の位相時間 t_a の関係である．この図においては明確な相関が確認できるとともに，A～D 工事での差が非常に小さいことが確認できる．これは，高さ極大時に旋回最大速度になっていることを示しており，放土後の動作については浚渫水深，土質条件などの施工条件に関係なく，それぞれの熟練オペレーターが同一動作を同一のタイミングで実施していることが明らかになった．

(5)　開閉データ分析結果

図-10 は旋回最大角時の時間と，放土時の開閉関数①の位相時間 t_a の関係である．この図では A 工事ではオペ①②の差は小さいものの，C, D 工事では傾きは同様でありつつ上方にシフトしている．また，B 工事では旋回最大角時間は 35～40 秒前後に集中している点は他工事と同様であるが，位相時間 t_a は大きくばらついている．各工事における開口動作時系列を比較すると，放土時の開口動作の違いであることが確認された．これは浚渫土の含水量が多く粘性が低い浚渫土の時には小さく開口したのちに大きく開口するのに対し，砂質土の場合には**図-2** のように 1 回で大きく開口して放土するなど，浚渫対象土の土質条件によって開口動作を変化するオペレーターの技術がパラメータで表現された結果となっていた．つまり，土質条件は港湾によって異なることも多いことを考慮すると，港湾ごと・土質ごとに開口動作の分析評価が必要であると考えられる．

4.　動作標準時系列

前章までの成果と施工時に入手できる情報を用いることで，昇降，旋回，開閉のシグモイド曲線の作成を試みた．たとえば，昇降関数①について，浚渫水深-14 m，土運船高さ 3m という施工条件の場合，初期値 y_0 は-14 m，浚渫後の巻上げ高さ K は 17 m となり，**図-5**，**6** のばらつきのある中での平均的な値を採用すると，速度係数 a は 0.32，位相時間 t_a は 10 と算定できる．その結果，式 (1)

の 4 個のパラメータが特定できるため昇降関数①の巻上げの時系列が作成できる．同様に旋回関数①について，浚渫角度 0 度，放度角度 70 度とすると，初期値 y_0 は 0 度，旋回角度 K は 70 度となり，**図-7** から速度係数 a は 0.40，位相時間 t_a は昇降関数①の t_a との関係である**図-8** から 24 と算定できる．

このように浚渫深度-14 m，浚渫角度 0 度，放土角度 70 度とした施工条件と前章までの成果を用い，昇降 4 関数，旋回 2 関数の各関数に関するパラメータの算定を行うことで，各関数それぞれの時系列を作成した．その作成されたすべての関数の時系列を重ね合わせ，それぞれの動作の極値を基準に接続することで昇降，旋回の時系列を作成したのが**図-11** である．この時系列は複数船舶・複数施工条件の熟練オペレーターの動作分析の平均的な結果に基づいて作成されたものであるため，浚渫作業の動作に関する標準時系列として扱うことができると考えられる．

次に，前述した標準時系列と同程度の施工条件におけるオペレーターの記録と，標準時系列を参考に浚渫船の昇降・旋回速度や動作タイミングを設定して自動運転を実施した自動化①と，図中のオペレーターの記録を参考に設定して自動運転を実施した自動化②を**図-12** に示す．この図では標準時系列と比較するとオペレーターの作業時間は 20 秒以上短い結果となっている．これは標準時系列が複数施工条件のばらつきのある施工記録の平均的な結果に基づいているためであり，個別の施工条件のオペレーターの記録と比較すると乖離が生じるためであると考えられる．

また，標準時系列を参考に自動化の設定を行った自動化①は，標準時系列と概ね対応した動作となっているのに対し，自動化②は標準時系列より動作が早く，オペレーターと比較しても放土後の巻上の 70 秒ごろまではとほぼ同等の動作となっている．自動化②についてはオペレーター作業時間で 1.2 倍程度，作業効率で 8 割程度の結果となっているが，熟練オペレーターと比較して新人オペレーターの作業効率が 5〜7 割程度と想定されることを考慮すると有用な技術になっていると考えられ，100 秒ごろの巻き下げ速度をオペレーター動作と同程度にすることでさらなる時間短縮と作業効率向上が期待できる結果である．つまり，自動運転の設定を変更することで，ばらつきを含んだ分析結果に基づく平均的な標準時系列を目標動作とすることや，ある特定の施工条件に特化したオペレーターの動作を対象に動作させることも可能であるため，今後は特定港湾に特化したパラメータ分析を行い，その結果に基づく動作時系列を用いることで自動運転の作業効率向上が期待できると考えられる．

5. 結論

熟練オペレーターの動作記録をシグモイド関数による関数化することでパラメータ化し，分析，評価できる手法を確立し，複数船舶，複数港湾の施工条件が異なる記録に対し適用した．施工条件やそれぞれのパラメータの相互関係を評価した結果，オペレーターの暗黙知である動作速度，タイミングに関する関係をデータで表現可能であることを明らかにする貴重な成果が得られた．また，

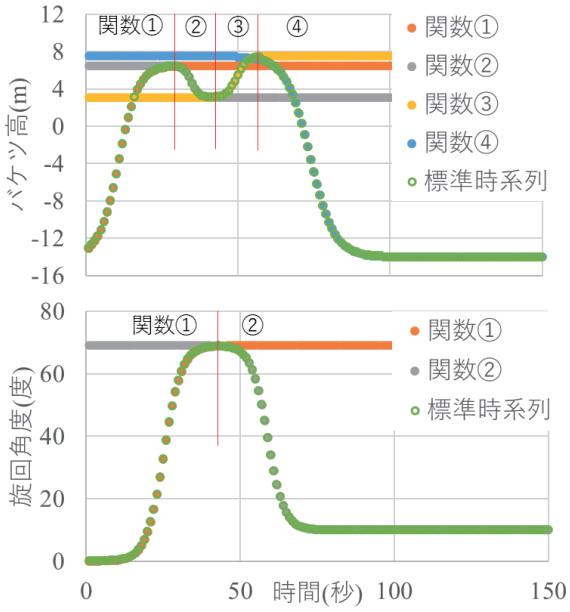


図-11 昇降・旋回の標準動作時系列

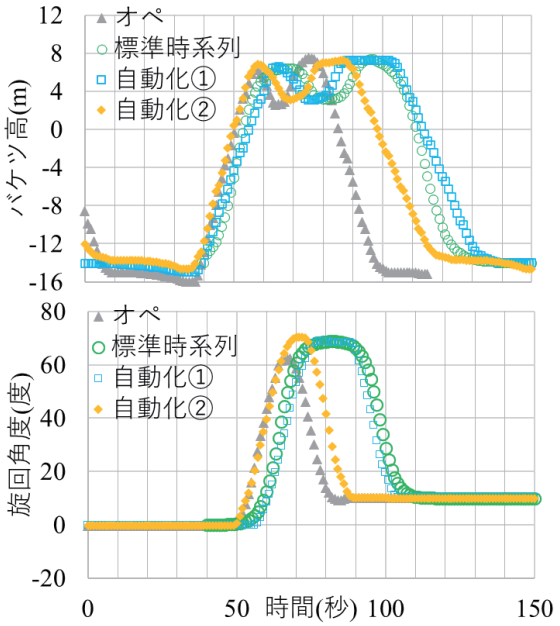


図-12 昇降・旋回時系列の比較

得られた成果を活用することで施工条件に応じた標準的な動作時系列の作成が可能となり，この時系列を参考にした作業船の自動運転も実施した．

しかし，特定の条件下でのオペレーターの動作時系列と比較すると，自動運転の標準動作時系列の作業時間は増加する結果となっている．そのため，今後は汚濁防止枠や土質条件等の条件の相違や，港湾ごとに整理を行うことで，施工条件に応じた最適な標準時系列の作成することを目指し，データ収集・分析を継続して自動自律化による生産性向上に寄与できる取り組みを加速させる予定である．

REFERENCES

1) 西 広人, 琴浦 毅, 堺 浩一, 石塚 淑大：消波ブロックを対象とした UAV 写真測量の適用性検討，土木学会論文集特集号(海洋開発)，第 77 巻，2 号, pp. 691-696, 2021. [Nishi, H., Kotoura, T., Sakai, K. and Ishitsuka, Y.: UAV photogrammetry for wave disspationg blocks applicability study, *Japanese J. Jpn. Soc. Civil Eng., Special Issue (Ocean Engineering)*, Vol. 77, Issue 2, pp. 691-696, 2021.]
2) 石田 仁, 矢吹 信喜, 大森 禎敏, 森屋 陽一, 藤田 真司：山岳トンネルの切羽コソク作業を対象とした非 GNSS 環境下の自動運転手法の開発，土木学会論文集特集号(土木情報学)，第 79 巻，22 号，22-22020，2023. [Ishida, H., Yabuki, N., Oomori, S., Fujita, S. and Moriya, Y.: Development of automated driving method for rock scaling in mountain tunnels in GNSS-denied environment, *Japanese J. Jpn. Soc. Civil Eng., Special Issue (Civil engineering Informatics)*, Vol. 79, Issue 22, 22-22020, 2023.]
3) 伊藤禎宣，坂野雄一，藤野健一，安藤広志：無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 73，No. 1，pp. 15-24，2017．[Ito, S., Sakano, Y., Fujino, K. and Ando, H.: Remote controlled construction equipment by using highresolution stereoscopic 3D images, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series F3 (Civil Engineering Informatics)*, vol. 73, No. 1, pp. 15-24, 2017.]
4) 大槻 崇：建設機械の誕生と進化、i-Construction と施工の自動化に向けた取り組み，国際交通安全学会誌，第 49 巻，3 号，pp. 280-289，2025. [Ootsuki, T: The Birth and Evolution of Construction Machinery and Initiatives toward i-Construction and the Automation of Construction, *IATSS Review*, Vol. 49, pp. 280-289, 2025.]
5) 南 真紀子，佐藤 圭二，澤田 涼平，平田 宏一：自動運航船技術の実装と評価に向けて，海上技術安全研究所報告，第 23 巻，別冊（令和 5 年度）第 23 回研究発表会 講演集，pp. 133-136，2023． [Minami, M., Sato, K., Sawada, R. and Hirata, K.: Implementation and safety evaluation of autonomous navigation technologies, *Papers of National Maritime Research Institute,* vol. 23, pp. 133-136, 2023.]
6) 藤野 健一，橋本 毅，油田 信一，建山 和由：無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 74，No. 1，pp. 11-17，2018． [Fujino, K., Hashimoto, T., Yuta, S. and Tateyama, K.: Study on effective method to select a suitable operator for unmanned construction system, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series F3 (Civil Engineering Informatics),* vol. 74, No. 1, pp. 11-17, 2017.]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

RESEARCH ON DATA ANALYSIS FOR AUTOMATIC AUTONOMY OF WORK VESSELS

Tsuyoshi KOTOURA, Kento MIYAMOTO, Atsuhiko NOBETA, Noya ISOYAMA and Hiroaki OJIMA

We establish a method for analyzing and generalizing the skills of expert operators of dredgers by using sigmoid functions. As a result, it became possible to create an operation time series based on the analysis results of expert operators according to the construction conditions, and when a series of dredging operations were performed automatically with reference to the created time series, the work time was 20% longer than that of a skilled operator, and results of about 80% in terms of work capacity were obtained.