

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820380

研究課題名(和文) 河川輸送に投入するバージ船団の性能開発と交通流評価

研究課題名(英文) Evaluation/development of hydrodynamic performance and ship-handling simulation of pusher and barge system for river service

研究代表者

佐野 将昭 (Sano, Masaaki)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40582763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：河川輸送はコストや環境負荷の面で利点が多い。その主要な担い手であるプッシャー・バージ(PB)は操船性も良く、近年では、バージ曳航方式による石炭輸送が盛んなマハカム川(インドネシア)への導入も検討されている。こうした潜在的活用ニーズは高い一方、一般商船とは異なる事が予想される抵抗性能・操縦運動性能(保針性・旋回性)については不明瞭な部分が多い。そこで本研究では、水槽試験、シミュレーション計算、CFD解析によりPBの諸性能を包括的に議論した。また連結部の流場に注目して、バージ船尾形状改良による抵抗低減の可能性を示した。加えてマハカム川を対象に操船シミュレーションを行い、PB方式の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to evaluate the hydrodynamic performance of pusher and barge system (PB) which is unique and different from other commercial vessels and has been rarely discussed comprehensively. The resistance characteristic and maneuverability of PB were investigated by towing tank test, maneuvering simulation and CFD analysis. Especially the effect of barge loading condition on the maneuverability was interesting and the mechanism behind deterioration of the course stability in full loading condition was revealed. The resistance performance tried to be improved as well by developing the barge stern shape with focus on the wake field shed from the barge. In addition, the applicability of PB into Mahakam River in Indonesia which has been famous for coal transport by towing barge was discussed. The result of ship handling simulation indicates the navigation safety in such a serpentine and congested river would be improved by putting PB into service.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶工学 プッシャー・バージ 抵抗性能 操縦性能 保針性能 載荷状態 河川輸送

1. 研究開始当初の背景

プッシャー・バージ (Pusher Barge : PB) による輸送方式では、1 隻あるいは連結した複数バージを 1 隻のプッシャーで押航する。バージ曳航方式 (Tug Barge : TB) と比較して、バージの振れ回り運動に注意を払う必要がなく、一体型輸送により操船性の向上を見込める。従来からミシシッピ川やエルベ川・ドナウ川を有する欧米、パナラ川 (パラグアイ) 等の南米の河川輸送の主要な担い手であったが、近年ではインドネシアやベトナムでの導入検討の話題も耳にするようになった。特にマハカム川流域 (インドネシア、東カリマンタン島) は豊富な石炭資源がある事で知られ、これまで TB による石炭輸送が活発に行われてきた。しかし屈曲した制限水域を、河川流に流されて航行する状況は潜在的に危険であり、曳航バージの橋脚への接触事故も報告されている。将来的な採掘増に伴う交通量の増加を見通すと、PB 導入による操船性の向上やバージ大型化の可能性は検討に値すると思われる。また国内に目を移せば、東京湾で PB によるコンテナフィーダー輸送が本格的に開始されている。CO₂ 排出削減、交通渋滞緩和、トラックドライバー不足の解消等、モーダルシフトの面からも大きな期待が寄せられている。このように PB は歴史ある輸送方式ではあるが、持続可能な社会を支える重要な輸送インフラストラクチャーの一つとして、今後も各方面において更なる活躍が見込まれる状況にある。

一方、一般商船と比較して PB に関する学術的研究は総じて少ない。例えばプッシャーとバージ間の流体力学的干渉、それが抵抗特性や保針性に及ぼす影響、バージ載荷状態と操縦性の関係等について、詳細に議論した報告例は見当たらない。前段で述べた通り、PB の活躍の場は広がりつつある事から、性能改善や航行安全性に寄与するデータを収集し、抵抗特性・運動性能全般に関する知見を得ておく事が必要と思われる。

2. 研究の目的

本研究では、河川輸送に従事する PB を対象に、[A]性能評価と抵抗改善案の検討 (下記項目 1~3)、ならびに[B]マハカム川への PB 投入を想定した操船シミュレーション計算 (同 4) を実施する。

(1) PB 船団の性能評価

プッシャーとバージを縦列に連結して航行する輸送形態である PB は、流体力学的干渉の観点からも興味深い。そこで複数バージを連結して押航する PB 船団を対象に、バージ連結数や配列を変化させた場合の流場・圧力場を CFD により可視化し、各船団の直進時ならびに定常斜航・旋回時の流体力学的特性のメカニズムを明らかにする。

(2) 抵抗性能の改善案の検討

PB では、プッシャーとバージ間の不連続な連結部が抵抗源と言われる。一方、バージからの後流強さ・広がりに応じて、連結部およびプッシャー周りの流場は大きく変化すると考えられ、特にバージの船尾形状によっては、全抵抗低減を図れる可能性がある。そこで CFD により、バージ船尾形状を変化させた場合に、プッシャーとバージ各々の抵抗組成ならびに PB の全抵抗がどのように変化するかを明らかにする。

(3) 操縦性に及ぼす載荷・浅水影響の解明

PB では、バージの載荷状態に応じて、連結部に大きな段差が生じ、PB 全体の操縦流体力、強いては操縦性 (保針性、旋回性) に大きな影響が及ぶと思われる。そこで、満載と空荷の 2 通りのバージ載荷状態を設定して、深水域と浅水域で操縦運動試験を行い、操縦流体力を調査する。そしてシミュレーション計算により、PB の操縦性能を評価する。

(4) マハカム川への PB 投入の可能性の検討

TB による石炭の河川輸送が盛んなインドネシア東カリマンタン島のマハカム川を対象に、PB による輸送方式を導入した場合の操船シミュレーションを実施する。そして流れがある河川屈曲部の操船および避航操船の基本的な検討を通じて、航行安全性の観点から、PB 方式の有用性を検討する。また PB では曳航索が不要な分だけ全長を短縮できる事から、バージ大型化の可能性についても検討を行う。

3. 研究の方法

(1) PB 船団の性能評価

安川等*1が設計したプッシャーとバージで構成される PB 船団を対象とする。オープンソース CFD 「OpenFOAM」を活用して、有限体積法に基づく非圧縮性・乱流の定常計算を行う。計算は実験と同じ縮尺 1/50 の模型スケールとし、実験データ*1と比較する事で計算精度を担保する。その上でバージ連結数が異なる PB 船団間の流速場、圧力場の差に着目し、船団ごとの抵抗組成 (摩擦/圧力抵抗) や操縦流体力の差を考察する。

*1 安川宏紀他, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 5 号, 2007.

(2) 抵抗性能の改善案の検討

1 艘のバージをプッシャーが押航する基本形態に着目する。バージ船尾の船底傾斜および船底形状 (直線/円弧) を計 8 通り変更し、CFD により、バージ船尾の改良に伴う抵抗低減の可能性を検討する。

(3) 操縦性に及ぼす諸影響の解明

1/22.5 スケールのプッシャーとバージ模型を新たに設計・製作する。安川等*1が用いた 1/50 模型とは異なり、プッシャー模型単体で推進機構、計測機を搭載可能な排水量を持ち、自航状態での試験が可能である。なおプッ

ヤーは2軸2舵とし、シャフトブラケット及び台形舵を装備する。またバージは、船首尾が切り上がった前後対称レーキバージを使用し、満載状態と満載喫水40%相当の空荷状態の2パターンを想定する。図1に、空荷バージと満載バージ押航時の実験の様子を図示する。同縮尺模型を用いて、広島大学曳航水槽で、抵抗試験、自航試験、舵角試験、斜航/CMT試験、整流試験を行い、一連の(操縦)流体力特性を把握ならびに操縦運動数学モデルの構築に必要な各種実験係数を同定する。また曳航水槽内に仮床を敷いて浅水域を実現し、載荷状態ごとに2つの水深で同様の試験項目を実施する。図2に、浅水域試験の様子を示す。

続いて操縦運動シミュレーション計算を行い、載荷状態の差異による操縦運動性能を考察する。まずは平水中で基本的な性能を把握した後、河川流中、および浅水域という水域環境が異なる場合の操縦性能の変化を議論する。

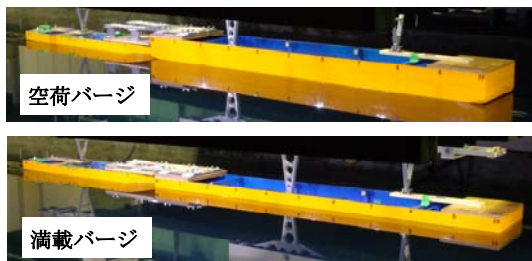


図1 空荷バージ(上図)と満載バージ(下図)をそれぞれ押航する曳航水槽試験の様子

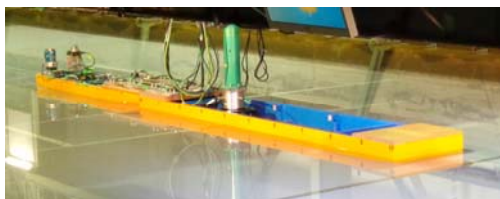


図2 曳航水槽内に仮床を敷いて実施した浅水域試験の様子

(4) マハカム川へのPB投入の可能性の検討

任意の海域で船舶交通流を統計評価できる「海上交通流シミュレーションプログラム(MTSS)^{*2}」を改良して活用する。現行プログラムでは、その目的上、船舶の運動はマクロな取扱い(KTモデル)がなされているが、河川のような制限水域では、より精微な運動モデルが必要となる。そこで本研究では、まずMMGモデルへ更新してPBの運動再現性を高めると共に、河川流の考慮ならびに曳船・被曳船系(TB)の運動方程式を導入してMTSSの改良を図る。

続いてマハカム川へのPBの導入ポテンシャルを調査した報告書^{*3}を参考に、現行TB(8000tバージ)および予想されるPBの主要目を決定する。同報告書では、可航幅や水深等の地理的制約を考慮した上でバージ大型化の指標が示されており、本研究では

10000tと12000tバージを押航する状態も検討対象に加える。MMGモデルで必要となる主船体の線形流体力微係数やプロペラ・舵力係数等は、安川等^{*1}が提案した実験回帰式や当該文献値を活用し、船体抵抗並びに非線形流体力微係数についてのみ、CFD計算結果に基づき決定する。

以上より、航走状態ごとに操縦運動数学モデルを構築後、シミュレーション計算を行う。具体的には、橋脚への衝突事故の報告例もあるサマリダ港上流の河川屈曲部を対象に、航行安全性の観点から、PB方式の有用性およびバージ大型化の可能性を検討する。また避航操船についても基礎的な検討を行う。

^{*2} 大阪大学・海上技術安全研究所と使用許諾契約済み。

^{*3} 石炭エネルギーセンター、平成22年度インフラ・システム輸出促進調査等事業・報告書、2011。

4. 研究成果

本研究では、[A]1艘もしくは連結した複数バージを押航するPB(船団)の抵抗性能・操縦性能(保針性・旋回性)を包括的に検討した。特に連結部の流場に着眼して、PB(船団)の抵抗性能と保針性のメカニズムを明らかにすると共に、バージ船尾形状改良による抵抗低減の可能性を示した。バージからの伴流利得を大きくして抵抗低減を図るという視点は新しいと思われる、今後のPBの船型開発に役立てたい。加えて[B]マハカム川へのPB投入を想定した操船シミュレーションの結果、河川流中でもドリフト量が少なく、操船が容易という点において、PB方式の優位性を確認した。また操船性の観点からは、バージ大型化も可能である事を示した。現報告書作成時点で、[A]に関わる項目の内、浅水域試験の計測データを解析中である。また[B]に関連して、交通量が多い輻輳河川域における衝突危険度の評価を引き続き実施していく。以下、各項目の成果を抜粋して報告する。

(1) PB船団の性能評価(学会発表[3][4])

PB船団では、後方配置のバージやプッシャーに流入する流れは直前のバージの影響を強く受ける。その一例として図3に、1艘及び3艘の満載バージを直列に押航する時の前後力の摩擦成分の船長方向分布(船首前方が正)を示す。横軸値は0がプッシャーの船尾端、1が船首端に相当する。図4の流速場の可視化に基づくと、バージの船底傾斜開始点で境界層が剥がれる為、それ以降のバージがその後流に覆われる様子を確認できる。結果的に、船体表面での速度勾配が緩和され、3艘直列のPB船団では、2、3艘目のバージの摩擦抵抗減少が見られる。同様にプッシャーに至る時点で後流域の厚みに差が生じ、プッシャーの摩擦抵抗にも差が見られる。この事から、摩擦抵抗が主要な成分となる直列型のプッシャー・バージ船団では、バージ数が多い程、輸送効率が高い(バージ数当たりの有効馬力が小さい)事が分かる。

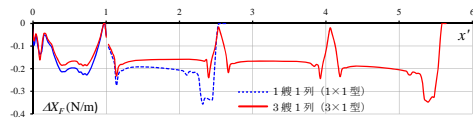


図3 各船団の前後力摩擦成分の船長方向分布

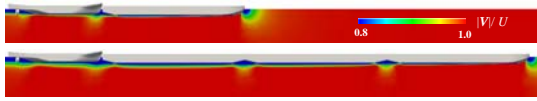


図4 1艘(上図・1×1型)と3艘(下図・3×1型)のバージを押航するPB船団の流速場

続いて定常操縦運動時の一例として、3艘直列およびそれを2列並べて計6艘としたPB船団を対象に、斜航角 10° (左斜航)における横力の圧力成分の船長方向分布(右舷方向が正)を図5に示す。横方向への船体投影面積は同じであり、バージに作用する圧力分布は重なっている。顕著な違いは連結部以降に見られ、3×2型では、図5に示す通り、幅広バージとプッシャー間のスペースの流れが淀み、プッシャー正面側に大きな正圧域が広がる結果と思われる。

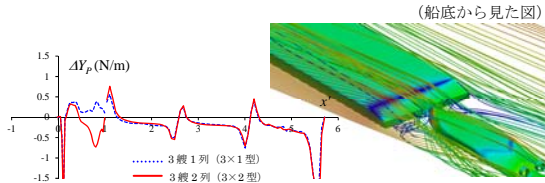


図5 各船団の横力圧力成分の船長方向分布と3×2型PB船団の連結部の流場(斜航角 10°)

(2) 抵抗性能の改善案の検討

1艘のバージを押航する基本形態を対象に、バージ船尾形状のみを8通り変化させ、抵抗性能の変化を調査した。図6に、安川等*1のオリジナルバージB0と、形状変更を施したB1~B8バージ押航時のCFDによる計算結果(模型スケール)を示す。同図には、PB及びそのプッシャーとバージそれぞれに作用する摩擦/圧力抵抗の積立グラフを示す。

例えばB4は、船尾船底をフラットにした単純箱型バージであるが、オリジナルバージB0押航時と比較して、PBの摩擦/圧力抵抗共に小さく、全抵抗は小さい。図7の流場に着目すると、B0の場合、平らな船底の終端から生じた後流が、船尾傾斜に沿って流れてプッシャーに当たると思われ、プッシャー船首部に正圧が広がる。一方、箱型バージでは、バージの船底と側壁から剥離した流れが死水域を形成しており、バージ後面ならびにプッシャー前面では負圧になる点が特徴的である。この負圧は、バージの圧力抵抗を増大させるが、プッシャーのそれを減少させる事から、結果的に、後者が勝り、PBの圧力抵抗低減に寄与した事が分かる。またバージB4押航時には、バージ終端から生じた後流がプッシャーの船体を覆う様子が見られ、プッシャー、強いてはPBの摩擦抵抗低減に寄与すると思われる。

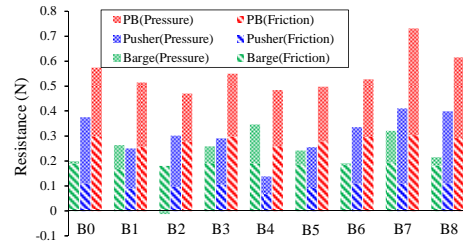


図6 オリジナルバージ(B0)と船尾改良したバージ(B1~B8)押航時における抵抗組成の比較

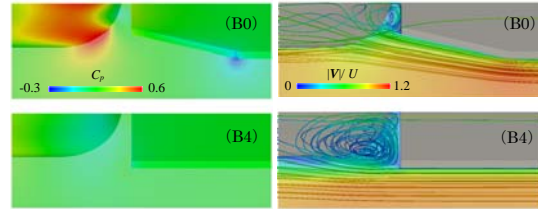


図7 B0バージ(上段)とB4バージ(下段)押航時の連結部の圧力場(左列)と流速場(右列)

実船スケールではレイノルズ数が異なる為に流場模様が模型と同じとは言えないが、バージ形状を検討する事で、後流の利得をより大きく得られる可能性を示唆している。

(3) 操縦性に及ぼす载荷・浅水影響の解明(学会発表[1])

深水域ならびに浅水域で一連の水槽試験を実施した。浅水域の結果は解析中な為、ここでは深水域の成果を抜粋して報告する。

図8に、主船体に作用する重心位置周りの回頭モーメントの無次元値を示す。無次元化の長さの次元にはPBの全長と喫水を用いた。バージの载荷状態が操縦流体力に大きな影響を及ぼす様子が明白である。斜航角に対する勾配、線形性、旋回角速度の影響、いずれも両状態で大きな違いがうかがえる。

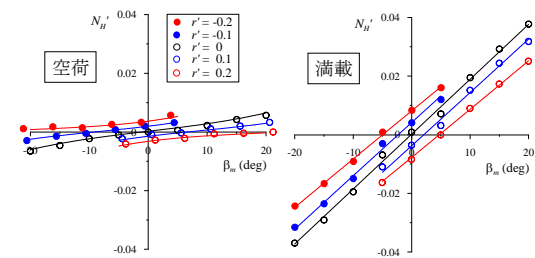


図8 斜航旋回時に主船体に働く回頭モーメント

CMT試験結果に基づき、主船体に作用する操縦流体力の線形微係数を同定した。载荷状態ごとに、微小運動時のヨー減衰力の着力点(重心から前方为正、青色)と横流れ減衰力の着力点(赤色)ならびに両着力点の差で定義される針路安定性指数(正で針路安定)を図9に示す。またCFDに基づく解析結果も併せて示す。

バージの载荷状態が増すと、横流れ減衰力の着力点が大幅に船首側へとシフトしている。その結果、保針性が大幅に悪化した事が分かる。

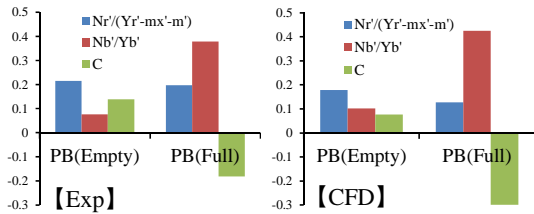


図9 各減衰力の着力点と針路安定性指数の比較

図10に微小斜航角・6度における横力の圧力成分の船長方向分布を示す。空荷時(赤実線)の連結部には大きなsway減衰力(左舷方向)が作用しているが、満載時(青点線)には顕著ではない。図11に示す圧力係数のコンター図より、段差が大きな空荷時ではプッシャー正面に速い流れが直接流入して正圧域が広がるが、満載時には、バージからの後流影響(負圧)を強く受けるからと推測される。一方、角張ったレーキバージの為に、特に満載時のバージ船首端(背面側)では強い剥離域が発達すると思われる、減衰力のピークが立っている。このようにバージの荷重量が増すと、赤実線から青点線へと横力分布が変位し、平均着力点が徐々に前方へシフトする様子がうかがえる。

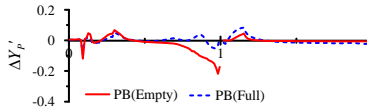


図10 空荷/満載バージを押航する各PBに作用する微小斜航時の横力圧力成分の船長方向分布

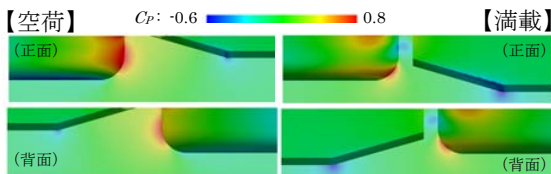


図11 荷状態に応じた連結部の圧力場の変化

続いて各種実験係数を同定し、プッシャーおよびPBの荷状態ごとに操縦運動数学モデルを構築した。そして操縦運動性能を把握する為、シミュレーション計算を実施した。初期船速は7(kt)に設定し、摩擦抵抗係数と伴流係数は実船換算値を用いた。ここでは、深水域・平水中の旋回試験について述べる。

初期旋回性能として、舵角10度の旋回航跡を図12左に示す。空荷バージを押航する方が、旋回径は際立って大きい。図4で示した通り、バージ荷重量の増大に伴い、PBの保針性は大幅に悪化すると思われる、運動が比較的小さい初期旋回状態であれば、PB(空荷)の保針性が良い分、その旋回性能は劣る事になると推測される。

次に最大旋回性能として、舵角35度の旋回航跡の比較を図12右に示す。PB(空荷)とPB(満載)の旋回径の大小関係が、初期旋回性能を表す舵角10度の時とは逆転する事が分かる。このような大舵角による強い旋

回では大きな運動に達する為、遠心力、流体力は共に増加する。船の前後力に関して、10°旋回時よりも大きな抵抗が作用する事になるが、PB(空荷)とPB(満載)では排水量差が2倍弱ある事から、PB(空荷)において顕著な減速が起こり易い。この為、斜航角の増加が促され、大きなドリフト状態での旋回となった結果、より小さな旋回径になったと解釈できる。

まとめると空荷バージを押航する場合、際立った保針性の良さ故に微小運動時の旋回性は悪いが、操舵角の増加に伴い、旋回性は急激に強まる傾向にあると思われる。

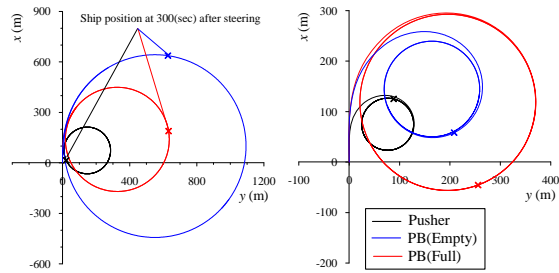


図12 プッシャーとPB(空荷と満載)の舵角10°(左図)及び35°(右図)における旋回航跡

(4) マハカム川へのPB投入の可能性の検討(学会発表[2])

図13に示すマハカム川の屈曲部(黄色丸印)を想定して、主に操船性の観点から、現行の8000t石炭バージを曳航するTB方式とPB方式との比較、ならびに押航するバージサイズの大型化の可能性を検討した。



図13 マハカム川の全景(左図)とTBによる現行の河川輸送の様子(右図)

河川流速を0.8(m/s)に設定し、同屈曲部を下る操船シミュレーションを実施した。PB(TBはタグ)の変針点に対する方位角偏差及び角速度に対してPD制御を適用し、各ゲインは1に設定した。またTBでは、曳航バージの動向をモニタリングした操船になると思われる、タグに対するバージの相対方位角と相対角速度に対してもPD制御を適用した。

航跡の比較を図14に、斜航角の時系列を図15に示す。TBが屈曲部を通航する際、曳航バージに大きなドリフトが発生し、その方位角制御が困難である事がうかがえる。実際、同流域ではアシスタントタグによる操船支援が実施されており、スムーズな交通の面からは不利な状況となっている。一方、バージと一体型で走るPBではドリフト量が小さい

事から、河口幅の狭い場所や、橋脚間を通過する状況であっても、自力で安全に航行できる可能性がある。またバージを 12000t まで大型化した場合は岸壁側へ若干流される傾向にあるが、操船は可能であり、衝突には至っていない。例えば変針点を上流側に設けて早い段階で変針を試みる事で、安全に通航する事も可能と思われる。

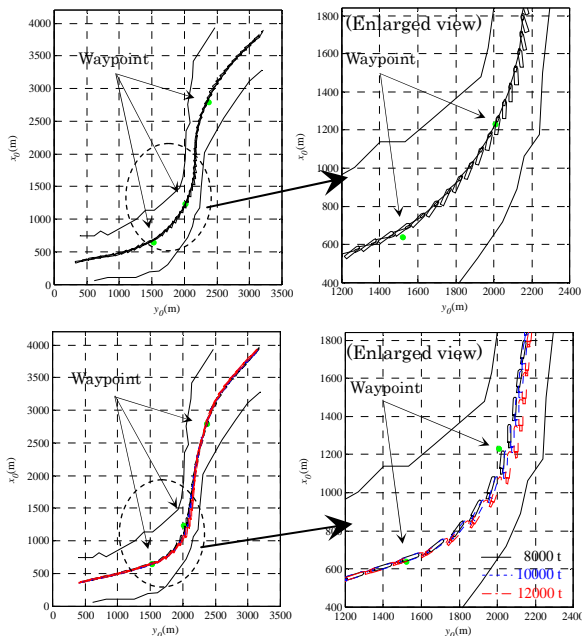


図 14 河川屈曲部を航行する TB (4kt, 上段) と PB (6kt, 下段) の航跡

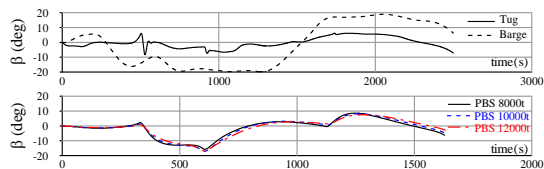


図 15 図 14 の状況における TB (上段) と PB (下段) の斜航角の時系列

サマリダ港周辺は輸送船や停泊バージで混み合い、それらの間を縫うように走る様子が見られる。TB と PB の輸送方式の違いによる避航操船を評価するべく、1 艘の停泊バージを挟んで、船が行き会う状況の計算例を図 16 (行き合い船の組み合わせは[a][b][c]の 3 パターン) に示す。避航操船は、ファジー推論に基づき、相手船との距離と時間に基づく衝突危険度により判定した。同じ避航アルゴリズムの前提ではあるが、[a]と[b]を比較すると、自律制御できないバージを曳航する TB に対して、PB 方式では小回りの避航となっている。将来的に交通量が増した輻輳海域では、航行安全性に寄与する事が期待される。

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 0 件)

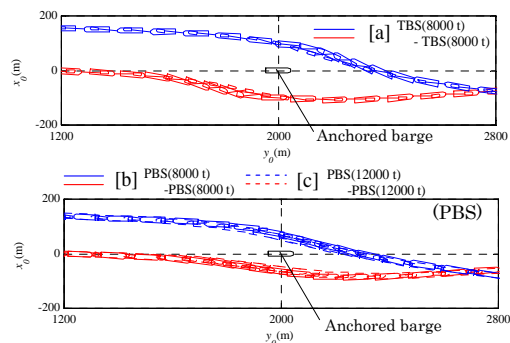


図 16 停泊バージを挟んで行き合う状況における避航操船の航跡例

[学会発表] (計 4 件)

1. 佐野将昭, 奥田晃生, 濱口友宏, 安川宏紀, 载荷状態が異なるプッシャー・バージの操縦性に関する研究, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 第 22 号, pp.179-182, 2016.5.26-27, 福岡.
2. Sano M., Hasegawa K., A fundamental study on the ship handling simulation of tug-barge and pusher-barge systems for river service, Proc. of Int. Conf. on Ship & Offshore Technology (ICSOT)-India 2015: Coastal & Inland Shipping, pp.141-149, 2015.12.10-11, Kharagpur(India).
3. Sano M., Okuda A., Yasukawa H., CFD analysis of hydrodynamic force characteristics of pusher and multi barges in steady-state maneuvers, Proc. of Int. Conf. on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability, Paper No.3.2.3, 2015.9.8-11, Newcastle(UK).
4. 奥田晃生, 佐野将昭, 安川宏紀, プッシャー・バージシステムの流体力特性に関する基礎的研究, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 第 20 号, pp.137-140, 2015.5.25-26, 神戸.

[その他]

「第 2 回プッシャー・バージに関するワークショップ」の報告 (広島大学, 海上輸送システム研究室, 安川宏紀):

http://naoe.hiroshima-u.ac.jp/3koza/topics/20141222_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 将昭 (SANO MASA AKI)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号: 40582763