

令和 5 年 4 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04704

研究課題名(和文) ロボットボート技術を新展開する次世代・大河川観測システムの実践開発

研究課題名(英文) Practical development of cutting edge system for large-river observation based on robot-boat technology

研究代表者

山上 路生 (Sanjou, Michio)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：初年度はロボットボート技術の継続開発と、ドローンを用いたGPS浮子法の開発にも着手した。基本の原理は通常の浮子法と同様であるが、本研究では浮子にGPSを搭載することで、GPSの位置座標データから浮子の軌跡を確認し、流下速度を算出する。また浮子に水深計測ソナーをとりつけることで、流速計測と同時に水深計測を行い、河川断面積を導出可能とした。2年目以降は、浮子にロボットボートに、GPSや水深計測ソナーといった新技術を組み合わせて、自律航行型ロボット浮子を開発した。これにより、比較的速い流れ場への対応と、流向の検知を可能とした。また風による流量評価への影響について、室内水路試験より詳しく検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川観測の現状を根本的に解決する新手法の開発が急務である。本研究の目的は、流れに対して船体が静止するために要する推進力から流速を評価できるアイデアを拡張し大河川観測に実装することである。本研究の学術的独自性は、大河川の洪水場というシビアコンディションにおける自動観測法の確立にある。これらの着眼点は、既存の観測機器では成し遂げられない課題をブレイクスルーするもので、独自性と創造性に富む大河川の自動観測を実現する次世代のポータブルシステムである。

研究成果の概要(英文)：In first year, improvement of robot boat technology and development of the drone type float with GPS receiver were conducted. The basic principle is the same as that of a standard floating method. The trajectory of the float and the traveling velocity could be evaluated by using the time-series of the position coordinates of the GPS. A sonar could measure the water depth and cross-sectional area of a river. In second year onward, installing the GPS receiver and the sonar in the robot boat, an autonomous robot float could be developed. This can measure comparatively fast flow and detect the flow direction. Furthermore, a flume measurement in the laboratory was performed to consider effects of wind on the discharge evaluation.

研究分野：水工水理学

キーワード：河川流の自動観測装置 流量観測 自律移動型浮子 ロボットボート

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

河川のリアルタイムシステムとして、ライブカメラの普及が進んでおり一定の成果が得られているが、表面流況の情報しか得られず河床高や水面下の流況がわからない。このため 正確な流量値の算定が難しい。超音波測位法 (ADCP) は水面下の情報を得られるが、計測精度がセンサと計測点までの距離に依存する点や設置コストの課題がある。いずれも大がかりな固定式デバイスであるので、任意地点での観測に長けた携帯型のシステムが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大河川の洪水場というシビアコンディションにおける自動観測法の確立である。これを実現するため、これまでの実験レベルの検討を基盤に、高精度姿勢センサを組み込んだ cm 級 GNSS レシーバーを搭載し、荒れた洪水河川においても長距離を自動航行して目的地で静止するロボットボートを開発する。また流向検知システムを開発し、湾曲域や突発的な大規模乱流への対応を目指す。さらに潜航子機による水面下の流速を計測し、流量観測の飛躍的な精度向上につなげる。これら全てのシステムを組み込んで船体の全長は 1m 程度と携行性が高く、計測点を選ばず緊急対応できるという大きな長所を有する。これらの着眼点は、既存の観測機器では成し遂げられない課題をブレイクスルーするもので、独自性と創造性に富む大河川の自動観測を実現する次世代のポータブルシステムである。

3. 研究の方法

本研究では大きく 2 種類の観測システムを試作開発した。1 つはドローン型浮子、もう 1 つはロボットボートをベースにした自律移動を可能とする浮子である。それぞれ室内水路と実河川において開発を進めた。以下、紙面制約の都合上、後者について研究成果をまとめる。

4. 研究成果

(1)GPS ドローンを活用した浮子開発と河川流量の評価

(a)計測原理

基本の原理は通常の浮子法と同様であるが、本研究では浮子に GPS を搭載することで、GPS データから浮子の軌跡を確認し、流下速度を算出する。これにより観測者の主観によらない信頼性のある計測が可能となる。また浮子にソナーをとりつけ、流速と同時に水深計測を行った。したがって流速計測結果と組み合わせることで、流量が導出される。さらに、浮子の回収・投下を安全かつ迅速にするためにドローンを使用する手法をとる。ドローンに GPS、ソナー、浮き輪を取り付け、操縦者のいる河岸から飛行させる。そしてドローンごと浮子として着水させ、一定時間流下させる。その後、ドローンを操縦し離水させ次の測線で同様の手順を踏む。川幅に応じた測線数計測を行った後にドローン浮子を河岸へと帰還させる。計測システムのイメージを図-1 に、ドローン浮子を図-2 に示す。

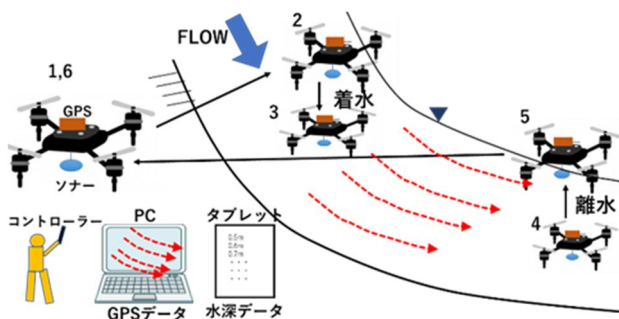


図-1 ドローン浮子のイメージ



図-2 開発したドローン浮子

(b)流速・流量導出方法

GPS 座標データから緯度経度 1 秒当たりの実距離がそれぞれ 30.906m ,25.321m であることを利用し、各測線における dt 秒間の浮子流下速度(m/s)を以下の式より求める。

$$v = \{(dN \times 3600 \times 30.906)^2 + (dE \times 3600 \times 25.321)^2\}^{0.5} / dt \quad (1)$$

ここで dN , dE は dt 秒間の变化緯度経度である。しかしながら、製作したドローン浮子は水面より上部の表面積が大きいため空気抵抗を受けやすく浮子流下速度と河川流速が一致しない。そこで運動方程式から解析的に導出する理論補正式(2)と室内水路試験データから導出する実験補正式(3)の 2 つを利用し、浮子流下速度 v を河川表面流速 V へと変換する。

$$V = \left(1 + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}\right)v - \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}c \quad (2)$$

ここで c : 風速 , m : ドローン浮子の重量 , ρ_1 : 水の密度 , ρ_2 : 空気の密度 , S_1 : 機体の水面下部の投影面積 , S_2 : 機体の水面より上部の投影面積 , C_{D1} : 水面下の機体の抗力係数 , C_{D2} : 水面上部の機体の抗力係数で , $k_1 = \rho_1 S_1 C_{D1} / 2m = 1.50$, $k_2 = \rho_2 S_2 C_{D2} / 2m = 0.0104$ を得る。

$$V = 1.1079v - 0.0004 \quad (3)$$

次に、べき乗則近似式により河川表面流速から平均断面流速を算出し対応する分割区断面面積を乗じてその総和より流量を計算する。各分割区間の横断面長さは GPS データ、水深はソナーデータを利用し断面面積を算出した。

(c)実河川への適用

ドローン浮子を用いて桂川及び淀川で計測を実施した。桂川計測時のドローン浮子の全体の軌跡及び流速を導出する 1m 計測区間を抜粋したものを図-3 に示す。右岸からドローン浮子を飛ばし 6 測線計測を実施しその測線番号を右岸から順に 1,2,3,4,5,6 とした。しかし測線 2~5 は間隔が非常に狭くなってしまったため測線 3,4 を取り除いた 4 測線で流速・流量を導出した。理論補正式、実験補正式によって導出された流速をそれぞれ理論値、実験値とし、電磁流速計による計測値を実流速と定義した。理論値と実流速との計測誤差は 6.0~17.8%、実験値と実流速との誤差は 17.6~31.4%となった。この精度差の要因として風の影響が考えられる。流量誤差は 11.9% となり比較的良好な結果とであった。また計測に要した時間は約 19 分であり従来の浮子法と比較し迅速な計測が可能であった。

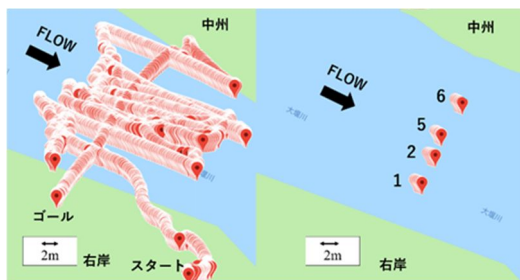


図-3 桂川ドローン浮子軌跡



図-4 淀川ドローン浮子軌跡

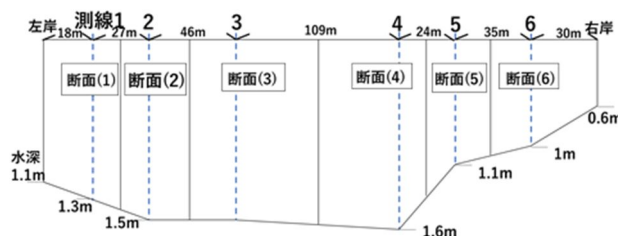


図-5 淀川計測の各断面概略図

次に淀川計測時のドローン浮子の全体の軌跡及び 1m 計測区間を図-4 に示す。計測地点の川幅

は約 290m であり、ドローン浮子を目視で安全に操縦可能な距離は約 150m 程度であったため、左岸から飛ばし 3 測線、右岸から 3 測線計測し、測線番号は左岸から順に 1,2,3,4,5,6 とした。計測された各分割区間断面図を図-5 に、各断面の理論・実験補正後流速、ソナー計測水深、流量及び総流量を表-3 に示す。なお、測線 6 では計測地点下流部での護岸工事の影響で流れが逆流していたため、断面 6 の流量は 0 とした。流量計測結果は理論値ベースのものが 181m³/s、実験値ベースで 159m³/s となり河川事務所が高浜地点で H-Q 式により算出した流量との誤差はそれぞれ約 33%、17%となった。高浜地点と枚方地点間には複数の支流があることを考慮すると実際の計測誤差はさらに小さくなると考えられ、良好な精度の計測結果であった。

(2) ロボットボートをベースとした自律移動浮子の開発

(a) 計測原理

基本的な原理は通常の浮子法と同様であるが、本計測では浮子に GPS を搭載し、得られる位置座標のデータをもとに流速を算出する。なお、浮子は移動時の自律制御を簡単にするため、ボート型を採用する。計測開始後、ロボット浮子は流速計測ポイントまで自律移動し、目標点到達後に一定距離自由流下するが、この際の位置座標データから軌跡を求め、浮子の流下速度を算出する。また、流下後は次の計測ポイントまで再び自律移動して自由流下を行う。この手順を横断方向に繰り返し、すべての測線での計測が終了した後、予め設定した地点へ帰還する。観測者は河岸から計測ポイントと帰還ポイントを設定するだけで良く、またボート型ロボットを使用することで浮子の投入が難しいポイントでも計測することが可能である。計測システムのイメージを図-6 に示す。

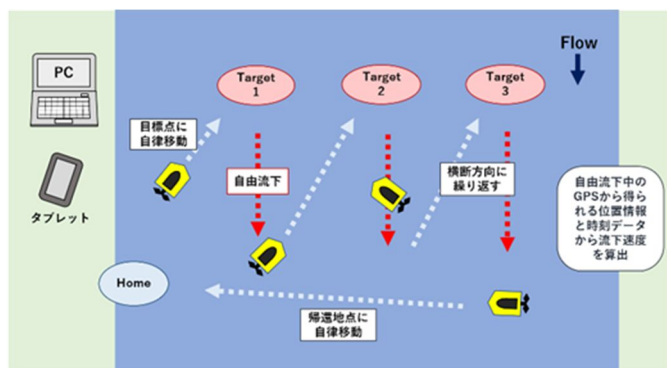


図-6 自律移動浮子のイメージ図

(b) 流速の評価方法

まず、GPS から得られる緯度経度の位置座標データと式(1)を用いて、各測線における dt 秒間のボート型浮子の流下速度 v を求める。通常の浮子法では浮子の流下速度を河川流速とみなすが、ボート型浮子は水面上部の表面積が大きいいため流下時に空気抵抗を受けやすく、浮子流下速度と河川流速が一致しない。そこで流下中の浮子の運動方程式から導出した式(2)を使用し、浮子流下速度 v を河川流速 V へと変換する。

本研究では、この係数の値を室内水路および実河川において実施した流下試験の結果をもとに算出し、補正式を導出した。以下の式に、室内水路での試験結果、実河川での試験結果、その両方の結果を用いて導出した補正式をそれぞれ示す。

$$V = 1.0659v - 0.0301c \quad (4)$$

$$V = 1.0394v - 0.0394c \quad (5)$$

$$V = 1.0408v - 0.0408c \quad (6)$$

実河川における自動観測試験ではそれぞれの補正式を用いて予測流速を算出し、実流速との

比較を行った。

(3)浮子の試作と自律制御

試作したロボット浮子は船体に市販のラジコンボートを使用し、全長約 64.0cm、横幅約 16.5cm、高さ約 14cm で、重さ約 1.7kg、静水時の吃水は約 7cm である。外観を図-7 に示す。ロボットの自律制御には、マイコンボードの Arduino およびオープンソースソフトウェアの Processing を用いた。Processing は浮子に搭載したスティック型 PC によって起動し、観測者がリモートデスクトップソフトウェアである AnyDesk を介して河岸から遠隔操作することで、ロボットの位置情報の確認や計測・帰還地点の設定などを行った。また、自律制御中は、ロボットに搭載した GPS およびコンパスセンサーからロボットの位置情報とヨー角を取得し、それを元に適当なメインモーターの出力およびラダー角度を算出した。



図-7 自律移動型浮子の外観

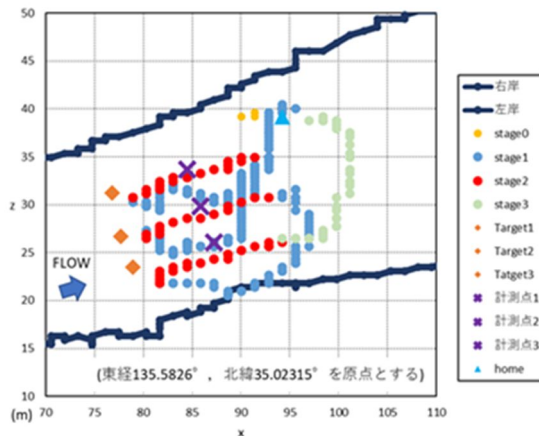


図 8 計測中の浮子の軌跡

(4)実河川における自動観測試験

京都府亀岡市の桂川において、自律移動型浮子の試作機を用いた自律制御による自動観測試験を実施した。なお、計測時の河岸は風速 1m/s 以下の無風に近い状態であった。自動計測中のロボットの軌跡を図-8 に示す。従来の浮子法を参考にし、計測目標地点を河川横断方向に等間隔になるように 3 点設定し、左岸側からロボットの自動計測を開始した。帰還地点はリリース地点とほぼ同じ地点に設定した。自動計測開始からロボットの帰還までの一連の計測に要した時間は、およそ 3 分半であった。

また、それぞれの測線におけるロボットの流下速度、補正式を用いて流下速度を河川表面流速へと変換した予測流速、電磁流速計で計測した計測点の流速をまとめたものを表-1 に示す。測線番号は左岸側から順に 1~3 とした。予測流速と電磁流速計で計測した計測点の流速との相対誤差は、測線 1 においては 18.9~21.9%とやや大きくなったが、測線 2 と測線 3 ではともに相対誤差が 0.67~7.03%と良好な結果となった。

<引用文献>

山上路生・岡本隆明・金子泰洸ポール：自律制御ボート型ロボットの開発と河川流速計測の試み，計測自動制御学会論文集，Vol.52(12)，pp.721-726，2016。
<https://doi.org/10.9746/sicetr.52.721>

Sanjou, M. and Nagasaka, T.: Development of autonomous boat-type robot for automated velocity measurement in straight natural river, *Water Resources Research*, AGU Publications, Vol.53(11), pp.9089-9105, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017WR020672>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sanjou, M., Shigeta, A., Kato, K. and Aizawa, W.	4. 巻 80
2. 論文標題 Portable unmanned surface vehicle that automatically measures flow velocity and direction in rivers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Flow Measurement and Instrumentation	6. 最初と最後の頁 101964
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 相澤航・山上路生・岡本隆明・重田明日香	4. 巻 CD-ROM
2. 論文標題 河川流計測ロボットにおける姿勢制御の高度化に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sanjou, M., Kato, K., Aizawa, W. and Okamoto, T.	4. 巻 22
2. 論文標題 Development of drone-type float for surface-velocity measurement in rivers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Environmental Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 955-969
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10652-022-09874-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤村直樹・山上路生・相澤航	4. 巻 オンライン
2. 論文標題 河川流の自動計測を目的とする自律移動型浮子の試作	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022年度土木学会全国大会	6. 最初と最後の頁 オンライン
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 相澤 航
2. 発表標題 ドローン型浮子の開発と淀川の表面流観測
3. 学会等名 令和2年土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Michio Sanjou
2. 発表標題 Development of portable USV automatically measures flow velocities in turbulent rivers
3. 学会等名 3rd JSCE- CCES JOINT SYMPOSIUM OF CIVIL ENGINEERING (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相澤 航
2. 発表標題 ドローン型浮子による淀川の表面流・水深計測
3. 学会等名 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相澤 航
2. 発表標題 河川流計測ロボットにおける姿勢制御の高度化に関する研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤村直樹
2. 発表標題 河川流の自動計測を目的とする自律移動型浮子の試作
3. 学会等名 2022年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Michio Sanjou	4. 発行年 2022年
2. 出版社 CRC press, Taylor and Francis Group	5. 総ページ数 302
3. 書名 Turbulence in open-channels and river flows	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------