

文部科学省
令和 3 年度地球観測技術等調査研究委託事業

「都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための水上屋内外シームレス測位」
委託業務成果報告書

令和 4 年 5 月

学校法人 芝浦工業大学

本報告書は、文部科学省の令和3年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、学校法人 芝浦工業大学が実施した令和3年度「都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための水上屋内外シームレス測位」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の概要	ページ番号 4
1.1 委託業務の目的	ページ番号 4
1.2 実施体制および役割分担	ページ番号 5
2. 実施内容(手法)	ページ番号 6
2.1 令和 3 年度における業務方法	ページ番号 6
2.2 提案手法(CLAS/SLAM)	ページ番号 7
2.2.1 LiDAR の初期位置方位推定	ページ番号 8
2.2.2 SLAM による精密位置方位推定	ページ番号 9
3. 実施内容(実験)	ページ番号 12
3.1 電池推進船搭載 3D 計測ユニットの構築	ページ番号 13
3.2 都市河川における測位環境の整理	ページ番号 15
3.3 CLAS/SLAM の実証と検証	ページ番号 16
4. 実施内容(結果)	ページ番号 17
4.1 測位結果	ページ番号 17
4.2 点群取得結果	ページ番号 20
5. 実施内容(考察)	ページ番号 21
5.1 CLAS/SLAM 処理結果	ページ番号 21
5.2 現地踏査時における初見・課題	ページ番号 27
5.3 令和 4 年度に実施する課題	ページ番号 28
6. まとめ	ページ番号 29
参考文献	ページ番号 29

1. 委託業務の概要

本業務は、Centimeter level augmentation service (CLAS)利用の GNSS 測位, LiDAR-SLAM, および, 画像計測を主として組み合わせた 3D 計測システムによって, 自律型船舶を利用した水上から行えるインフラ点検システムを構築するものである。特に, 主管実施機関が開発した LiDAR-SLAM 技術, および, 共同研究機関が開発したリチウムイオン電池推進船を活用するものである。LiDAR-SLAM 技術は, 自動運转向け LiDAR の利用を主とする点群処理で, 3D 計測に必須となる IMU を省略することで低コスト化を実現したものであり, すでに軽量 UAV-LiDAR や簡易 MMS-LiDAR に搭載している。インフラ点検に知見のある大学機関, 自治体, 土木コンサルおよびゼネコンと連携し, 都市河川を対象に提案システムの有効性を検証するために, 図 1-1 に示す手順でシステムの構築を実施している。

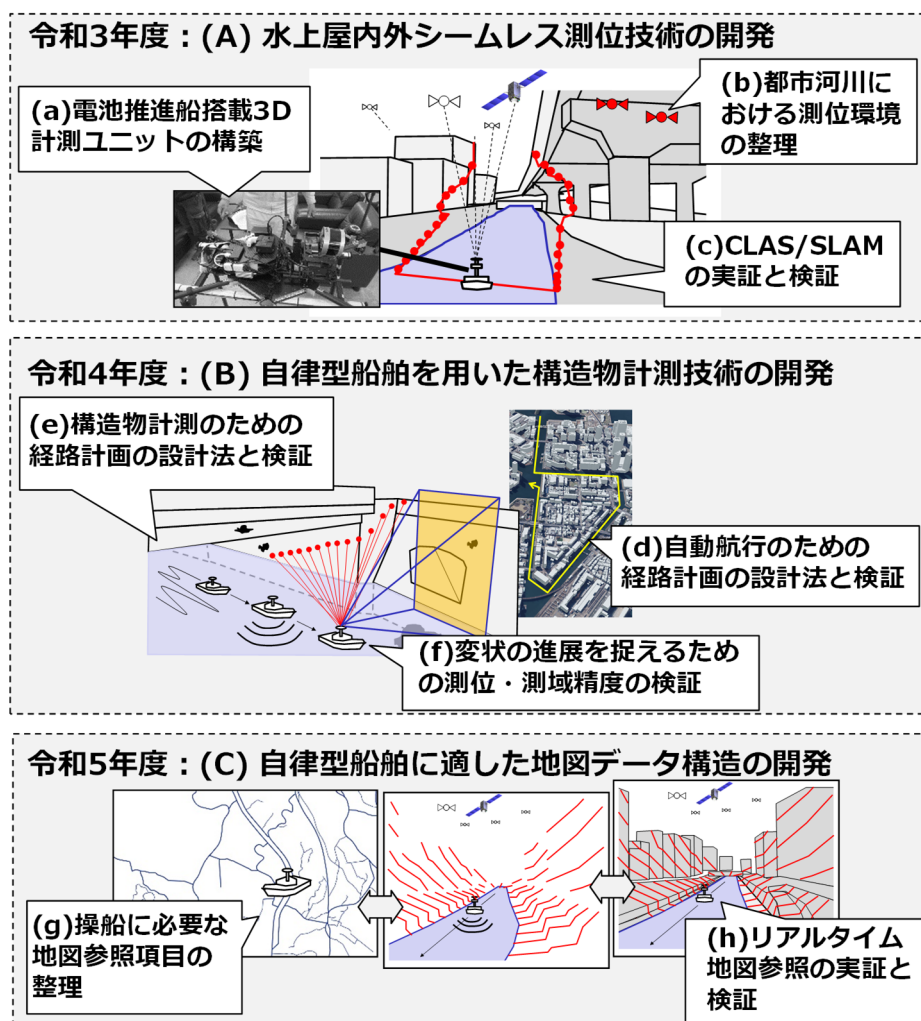


図 1-1. 業務計画(各年度)

1.1 委託業務の目的

本提案は, CLAS 利用の GNSS 測位, LiDAR-SLAM, および, 画像計測を主として組み合わせた 3D 計測システムによって, 自律型船舶を利用した水上から行えるインフラ点検システムを構築することを目的とする。従来型船舶による巡視による目視点検や UAV を利用した点検では困難であった日常点検の無人化が可能になり, 陸空水域統合型の 3D 計測によるインフラ点検の高度化・効率化や, 陸空水域統合型 MaaS を実現するうえで事例が少ない水上 MaaS の基盤構築に寄与する。自動運转向け LiDAR の利用を主とする点群処理で, 3D 計測に必須となる IMU を省略することで低コスト化を実現し, すでに軽量 UAV-LiDAR や簡易 MMS-LiDAR に搭載している, 主管実施機関が開発した LiDAR-SLAM 技術を活用し, インフラ点検に知見のある大学機関, 自治体, 土木コンサルおよびゼネコンと連携しつつ, 都市河川を対象に提案システムの有効性を検証する。

1.2 実施体制および役割分担

実施体制および役割分担を図 1-2 に示す。芝浦工業大学(中川)が研究代表者となり、東京海洋大学(清水)と東京海洋大学(久保)が共同参画者、東京大学(柴崎)が主協力機関である。◎は主たる担当、○は副担当を示す。本提案には、3D 計測・データ処理や、インフラ点検高度化、電池推進船、自動航行、CLAS 利用 GNSS 測位、オープンデータ活用に関する要素技術が求められる。各研究分担者の保有技術および実績には、3D 計測・データ処理とインフラ点検高度化(芝浦工業大学)、電池推進船と自動航行(東京海洋大学)、CLAS 利用 GNSS 測位とオープンデータ活用(東京海洋大学および東京大学)がある。

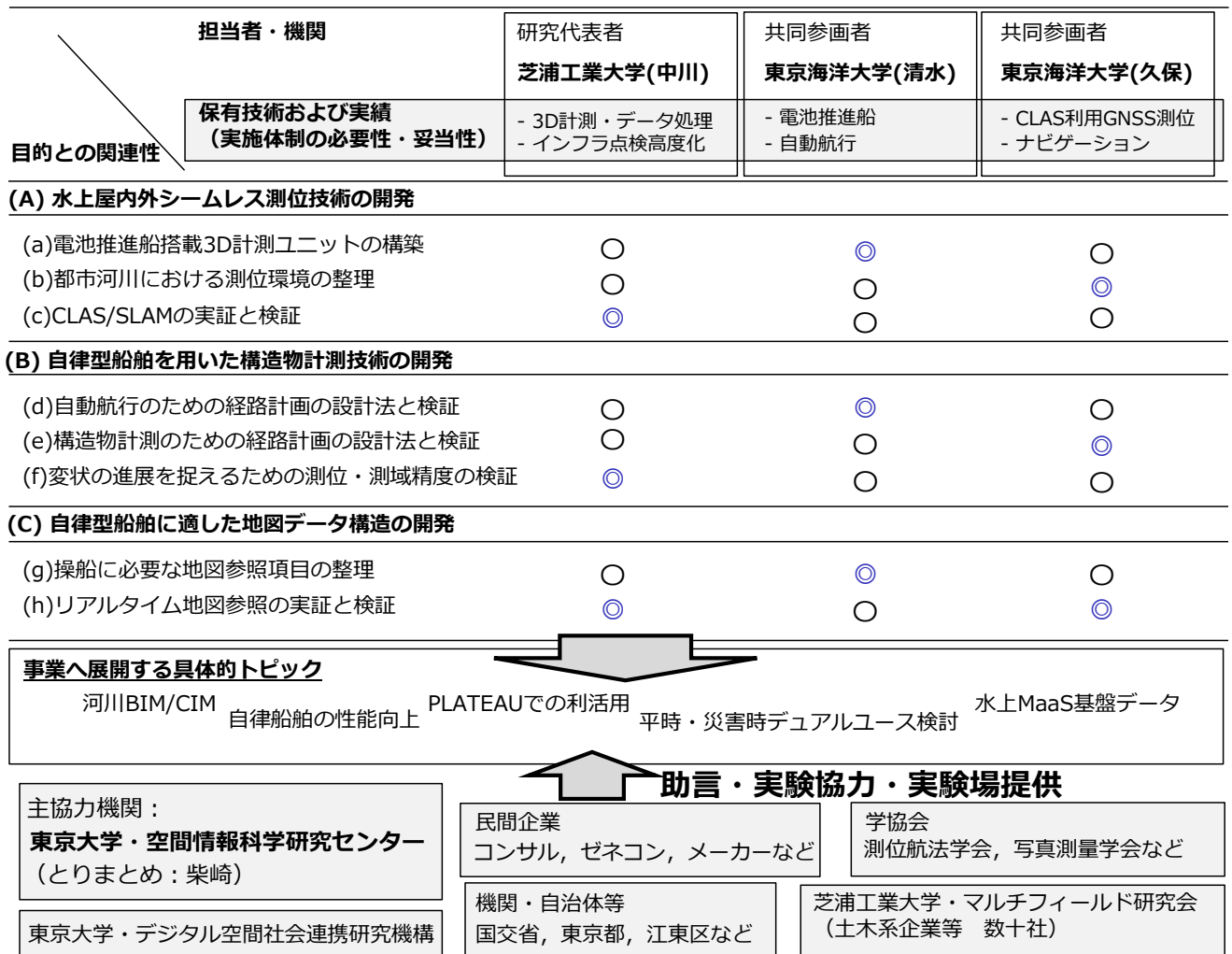


図 1-2. 実施体制・役割分担

2. 実施内容(手法)

2.1 令和3年度における業務方法

令和3年度においては、図2-1に示す項目のうち、(A) 水上屋内外シームレス測位技術の開発に関する業務を実施した。

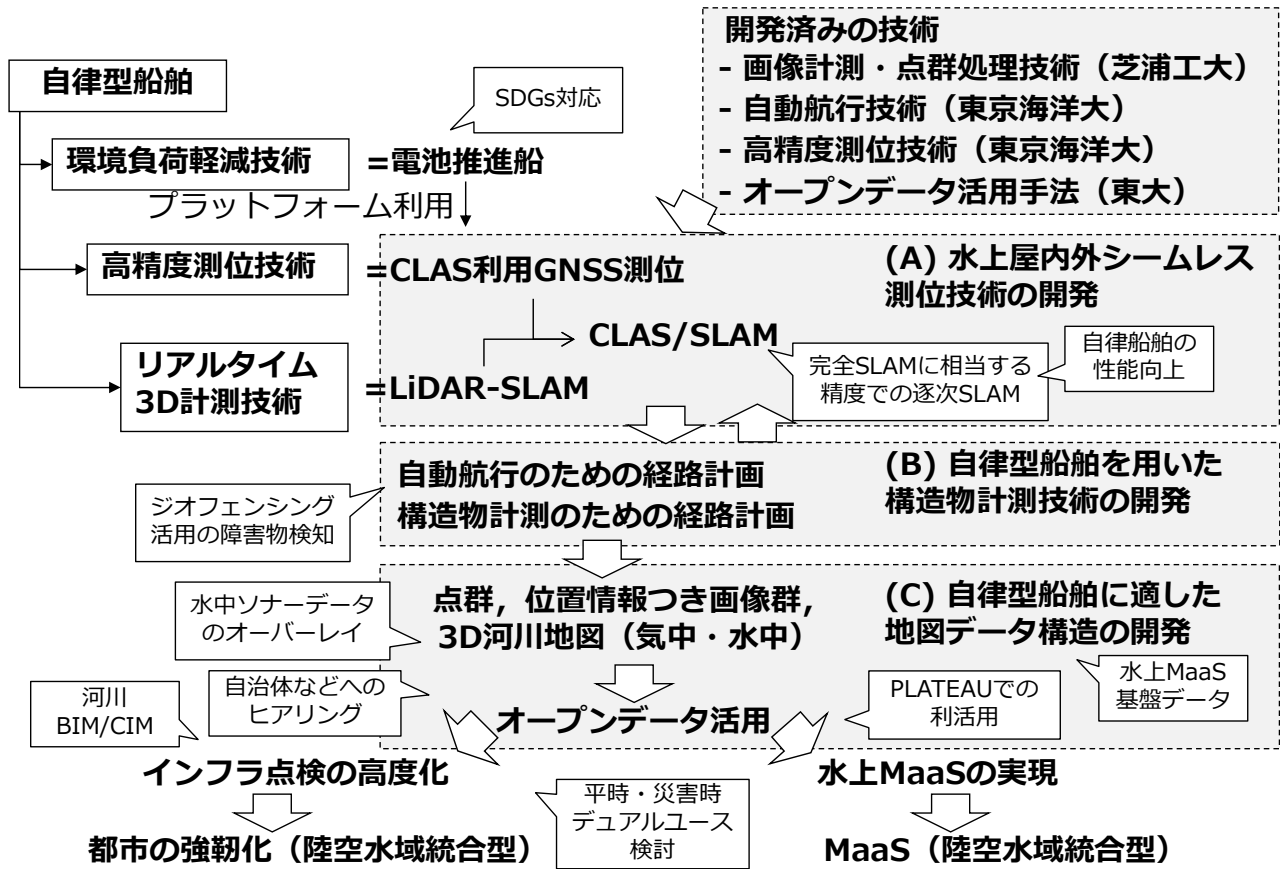


図2-1. 実施項目

開発済みの技術として、画像計測・点群処理技術(芝浦工大)、自動航行技術(東京海洋大)、高精度測位技術(東京海洋大)、オープンデータ活用技術(東大)があり、これらを基盤とすることで、点群、位置情報つき画像群、および、3D河川地図のオープンデータ活用をとおした、都市の強靱化や水上MaaSの実現を目標としている。この目標を実現するために、令和3年度においては、高精度測位技術であるCLAS利用GNSS測位と、リアルタイム3D計測技術であるLiDAR-SLAMを組み合わせたCLAS/SLAMを開発し、自律船舶の性能向上を可能とする逐次SLAM手法を構築するとともに、電池推進船をプラットフォームとして利用する水上屋内外シームレス測位技術を開発した。具体的には、下記の内容を実施した。

- 電池推進船搭載3D計測ユニットの構築(主担当:清水・東京海洋大学, 研究参画者): LiDAR (Velodyne LiDAR, 1~3台)とマルチビームソナー, CLAS対応GNSS受信機・アンテナで構成する3D計測ユニットを電池推進船に搭載した。
- 都市河川における測位環境の整理(主担当:久保・東京海洋大学, 研究参画者): 実験対象でのDOP値や可視衛星数, FIX率, 天空率を観測し, 取得点群精度との関連を可視化した。
- CLAS/SLAMの実証と検証(主担当:中川・芝浦工業大学, 研究代表者): 船舶から取得したLiDARデータにCLAS/SLAM処理(CLASを利用したGNSS測位とLiDAR計測を組み合わせたSLAM処理)を適用した。

2.2 提案手法 (CLAS/SLAM)

自律航行型船舶は、GNSS 測位で得た位置データを利用するものが多く、携帯端末を利用した船舶衝突防止¹⁾や RTK-GNSS 測位による数 cm 精度での自動着桟²⁾の研究などがある。しかしながら都心部の河川は、建築物や橋梁などが周囲に密集するため GNSS 測位環境が劣悪であり、GNSS 測位による自律航行は困難である。そこで本研究では、都市河川での測位手法を研究対象とし、GNSS 測位と LiDAR を用いた Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) による自己位置推定の組み合わせ (GNSS/SLAM) による屋内外シームレス測位を検討する。特に、GNSS 測位において RTK-GNSS 測位結果や CLAS 利用の測位結果を利用できるように設計しているが、本業務では CLAS 利用の測位結果を利用する GNSS/SLAM として、CLAS/SLAM を手法提案・構築し、実験をととして、その性能を検証する。

本研究での GNSS 測位には、CLAS を利用した高精度単独測位 (Precise point positioning : PPP) 方式の Real-time kinematic (RTK) 測位 (PPP-RTK)³⁾を適用する。CLAS を利用した PPP-RTK 測位とは、電子基準点のデータから計算した測位補強情報 (衛星時計や軌道情報など) を準天頂衛星みちびきから L6 信号で送信し、移動局での単独測位を補強する測位である。移動局上空の電離層などで生じる測位誤差の影響を減少させることで、数 cm 程度の測位精度を確保できる。CLAS 利用の PPP-RTK 測位は、国外では利用できず、RTK-GNSS 測位と比較して測位精度はやや低いものの、基準局の新規設置が不要である点や、基準局との常時通信が不要である点、測位精度を確保するための基線長の制約に配慮しなくてよい点で、測位の利便性が高い。また、再 FIX に必要な時間が短く、みちびきからの測位補強情報の受信の有無によって、屋内外シームレス測位における測位モードの切り換えを簡便化できる可能性が高い。

SLAM とは、自己位置推定と点群統合を同時に行う処理である。SLAM は、使用するセンサによって、LiDAR を主センサとする LiDAR-SLAM や、TOF カメラやデプスカメラを主センサとする Depth-SLAM、光学カメラを主センサとする Visual-SLAM に分類できる。河川計測では、船舶から計測対象までの距離が 5m 以上である箇所がほとんどであり、TOF カメラやデプスカメラでは計測可能範囲を超える課題があるため、LiDAR か光学カメラを主センサとすることが妥当である。また都心部の都市河川は、オープンスカイ環境と非 GNSS 測位環境間の明るさ変化が大きく、カメラよりも LiDAR を主センサとするほうが SLAM において優位である可能性に考慮し、本研究では LiDAR-SLAM を適用する。

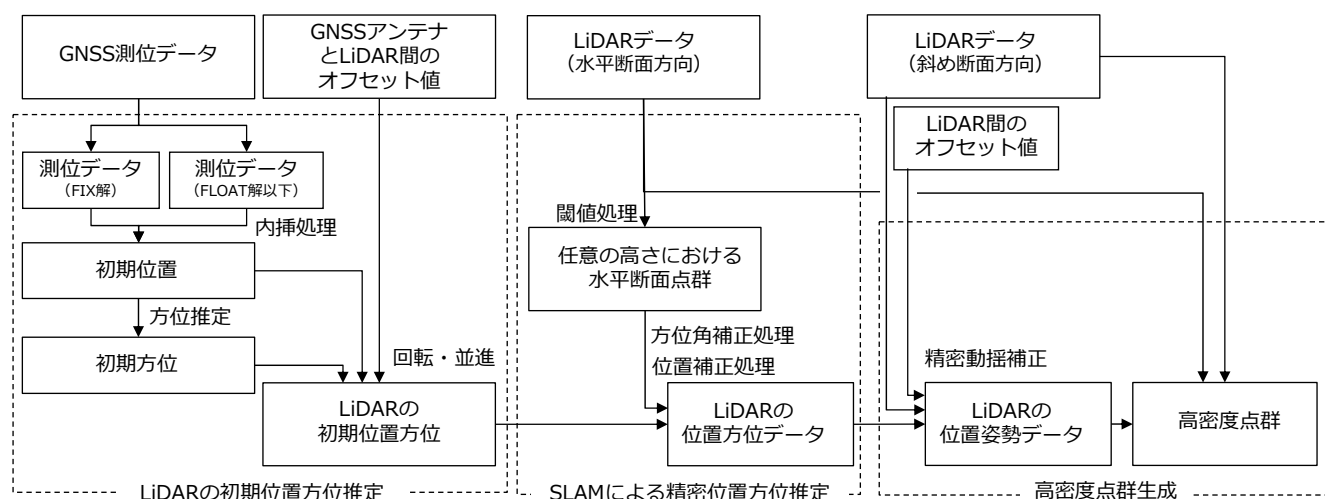
屋内外シームレス測位とは、屋外空間と屋内空間の測位モードを自動で切り換えることで、屋内外空間における移動時における連続測位を実現する技術である⁴⁾。GNSS 測位のサービス範囲が屋外空間のみ、屋内測位のサービス範囲が屋内空間とその近傍のみに限定されるため、屋外空間では GNSS 測位、屋内空間では屋内測位を測位モードとして適用する。この測位モードの切り換えを自動化することで、歩行者ナビゲーションにおいては、空間情報サービス利用の利便性が向上できている。また、屋内外シームレス測位は、屋内外空間における UAV の飛行制御や自律移動ロボットのナビゲーションなどにおいて、必須となる測位技術である。

屋内外シームレス測位の一部となる屋内測位は、電波航法と自律航法 (慣性航法) に分類できる。電波航法は、測位のサービス範囲において発信機を面的に設置し、移動体上の受信機を利用して、移動体の位置を推定する手法であり、Wi-Fi 測位やビーコン測位、Indoor MESSaging System 測位などがある。自律航法は、加速度センサやジャイロセンサ、電子コンパス、カメラ、レーザースキャナなどのうち、1 つもしくは複数のセンサで取得したデータを利用して、計測開始点からの相対位置を推定する手法であり、Pedestrian dead reckoning⁵⁾や SLAM などがある。電波航法では送信機などの屋内測位インフラが必要となることに対して、自律航法では屋内測位インフラは不要である。都市河川空間のうち橋梁や高架道路の下などの屋外空間は、屋内測位の適用が必須となる非 GNSS 環境であるとともに、上空に地物がある空間であるため、屋内空間と定義するのが好ましい。しかしながら、このような区間では、屋内測位インフラが未整備である点で電波航法は現段階では現実的ではないため、屋内測位インフラが不要である自律航法を適用することが妥当である。

水上移動レーザー計測に関する既往研究において、都市河川における GNSS 測位と SLAM に関する課題整理を行っている⁶⁾。GNSS 測位の欠測のほか、退化問題により SLAM が不安定となることを確認している。SLAM における退化問題とは、取得データから形状特徴を読み取れない場合に、自己位置推定を失敗することである。提案手法によって、退化問題が生じる区間においても、安定して測位や点群計測がオフライン処理でできるようになる。

提案手法である CLAS/SLAM (図2-2) は、LiDAR の初期位置方位推定と、SLAM による精密位置方位推定、高密度点群生成で構成される。船舶ナビゲーションを目的とするオンライン処理と、マッピングを目的とするオフライン処理を想定している。CLAS/SLAM で得た位置方位データは、高密度点群の生成処理における精密

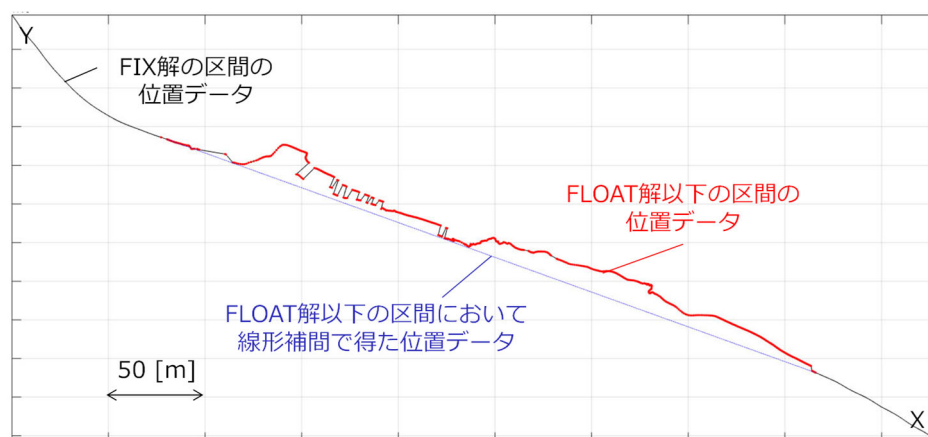
動揺補正(斜め断面方向をスキミングしたLiDARデータを利用したロール角・ピッチ角・高さの補正)⁷⁾を含む初期値として利用する。



2.2.1 LiDAR の初期位置方位推定

CLAS/SLAM は、GNSS 測位ができる区間(屋外区間)に対応する処理と、GNSS 測位の欠測区間(屋内区間)に対応する処理で構成される。本手法では、PPP-RTK 測位や RTK-GNSS 測位において FIX 解を得た区間を屋外区間、FLOAT 解以下を得た区間を屋内区間とすることで、屋内外シームレス測位における測位モードの切換えを簡素化する。さらに屋内区間については、航行軌跡が直線的となると想定できる屋内区間(短い屋内区間)と、航行軌跡が曲線を描くと想定できる屋内区間(長い屋内区間)で分類し、それぞれに対応する処理で構成する。短い屋内区間は橋梁下のような数 m～数十 m 以内の屋内区間が該当し、移動計測において障害物回避がなければ、航行軌跡が直線状となる。長い屋内区間は河川の上空に並走する道路・鉄道橋の下のような数十 m～数 km 程度の屋内区間が該当し、河川の形状や障害物回避を考慮して、航行軌跡が曲線を描くと想定する。長い屋内区間では、GNSS 測位データのみでは高精度な航行軌跡を推定できないため、従来型の SLAM で測位データを取得し、屋外区間で得た GNSS 測位結果を用いた開放トラバースにもとづいた誤差調整を適用する。そのため本手法で扱う CLAS/SLAM では、屋内区間のうち、短い屋内区間を対象とする。

PPP-RTK 測位や RTK-GNSS 測位において、FIX 解を得た位置の測位精度は数 cm である。これにもとづき、屋外区間では、GNSS 測位で得た GNSS アンテナ位置を初期位置推定に利用する。屋内区間では、移動計測時の航行が等速航行であることにもとづき、前後の屋外区間で取得された GNSS 測位データから、屋内区間における GNSS アンテナ位置を内挿処理(線形補間)で推定し、初期位置とする(図 2-3)。



また、GNSS 測位もしくは内挿処理で推定した任意の 2 点間の位置(任意の測位点の前後の測位位置など)を用いて、GNSS アンテナの方位を推定する。船舶の停止・回転時には方位推定ができないが、マッピングを目的とする処理では、船舶の停止・回転時のデータを利用しないため、移動速度を正しく推定できていれば、推定した方位の利用に関する可否を判断でき、GNSS/SLAM 上で問題はない。これらの処理で推定された位置方位に対して、GNSS アンテナと LiDAR 間のオフセット値を回転変換・並進移動することで、LiDAR の初期位置方位を推定する。

CLAS/SLAM では、GNSS 測位結果もしくは内挿処理で推定した位置を初期位置として SLAM を適用する。このアプローチによって、SLAM のみで生じる蓄積誤差問題の解消を狙う。蓄積誤差については、従来型の SLAM ではループ閉じこみによって補正するが、都市河川では船舶の旋回が困難であるため、短距離の路線長でのループ閉じこみを適用できない。また、都市河川は複数の河川が接続しているため、ループ閉じこみのための周回経路を設計できるが、ループ閉じこみの周回路線長が数 km～数十 km に及ぶため、特に経路中間付近において、経路蓄積誤差の解消効果を十分に発揮できない。そのため、橋梁下のような数 m～数十 m 程度の区間において、GNSS 測位結果もしくは内挿処理で推定した位置を初期位置とした SLAM を適用することで、短距離の路線長でのループ閉じこみと同等の蓄積誤差補正効果を狙う。

2.2.2 SLAM による精密位置方位推定

LiDAR の初期位置を推定した後は、SLAM による精密位置方位推定を適用する。屋外区間では、LiDAR の初期位置を固定値とし、方位角を SLAM で補正した後、SLAM で LiDAR の推定位置を微調整することで、LiDAR の精密位置方位を推定する。屋内区間についても、屋外区間と同様の処理で、LiDAR の精密位置方位を推定する。ただし、長い屋内区間での処理では、軌跡が曲線状であることを考慮し、LiDAR の初期位置ではなく、LiDAR の初期位置に対して移動速度と方向から推定した位置を固定値としたうえで、SLAM での方位角補正と、LiDAR の推定位置の微調整処理を適用する。

SLAM は、処理によって、Extended kalman filter (EKF)-SLAM⁸⁾や Rao-blackwellized particle filter (RBPF)-SLAM⁹⁾などのベイズフィルタを用いるリアルタイム処理の SLAM と、自己位置や地物の位置関係のグラフを最適化する非リアルタイム処理の Graph-based SLAM、スキャンマッチングにもとづく SLAM に分類できる。EKF-SLAM はスケーラビリティに課題があるため大規模点群処理には適さず、RBPF-SLAM は 2D SLAM であるため点群処理における拡張性に乏しい。また、Graph-based SLAM はポーズグラフの路線長が長距離となる河川計測には適さない。そのため本研究では、スキャンマッチングにもとづく SLAM を適用する。

スキャンマッチングにもとづく SLAM は、点群を最適化計算で位置合わせするリアルタイム処理の SLAM であり、初期値の有無で分類できる。初期値を与える手法として、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム¹⁰⁾と Normal Distributions Transform (NDT) アルゴリズム¹¹⁾がある。初期位置を与えずに大域最適を保証する手法として、Globally optimal ICP アルゴリズム¹²⁾がある。本研究では、PPP-RTK 測位結果を良好な初期値として扱えるため、ICP アルゴリズムと NDT アルゴリズムが有力な候補となる。

ICP アルゴリズムは、基準データと対象データ間の各点の距離を最小化する相対位置姿勢を繰り返し処理で求める点群マッチングであり、初期値の品質が低い場合は局所最適解に停留する傾向がある。NDT アルゴリズムは、点群を格子状に分割し、各格子に含まれる点の集合を正規分布で近似する処理にもとづいた点群マッチングであり、計算コストが小さい特徴がある。本手法では、良好な初期値を扱える点と、格子サイズの最適化が不要である点、高い点群マッチング精度が期待できる点から、ICP アルゴリズムを適用する。ただし従来型の ICP アルゴリズムには、点群量に依存する計算コストの高さと、点群にスパイクノイズが含まれる場合に局所最適解で停留する課題がある(図 2-4)。そこで、計算コストの削減と、スパイクノイズへの冗長性(ノイズが含まれる点群でも正しくマッチングできること)の改善を試みた(図 2-5)。

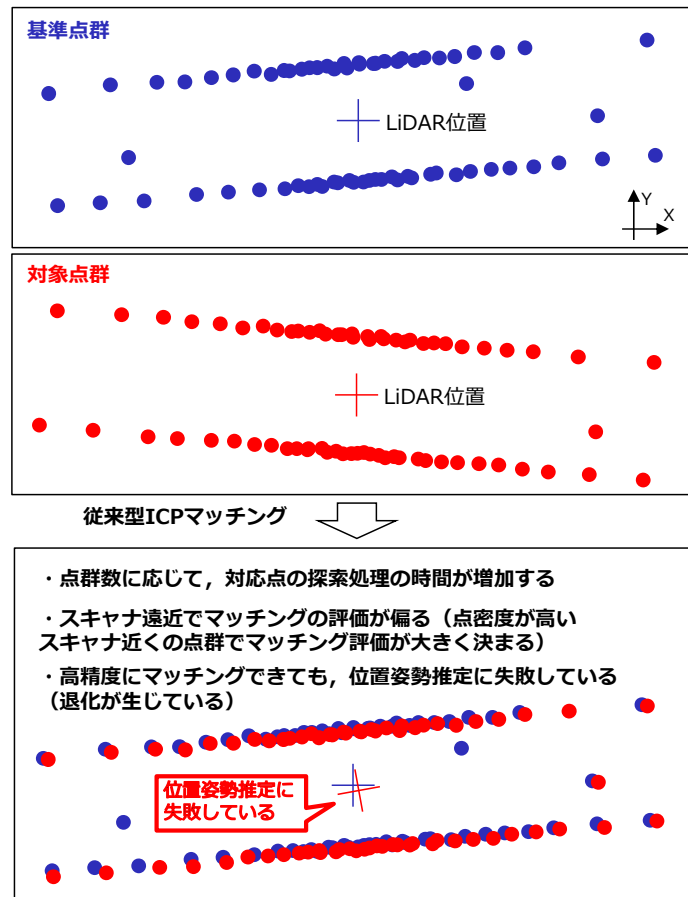


図 2-4. 局所最適解で停留する課題

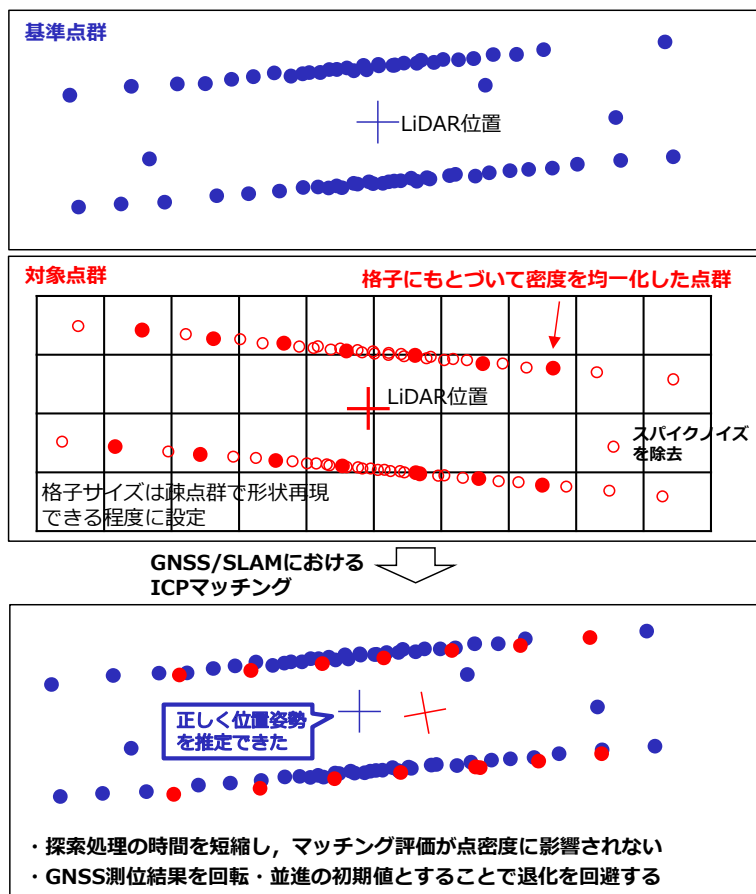


図 2-5. 提案手法における ICP アルゴリズムの改善

ICP アルゴリズムにおいて、精度をそれほど落とさずに計算コストを削減する方法として、基準データもしくは対象データのどちらかをサンプリング処理することが有効である。その際に、形状特徴点を抽出する手法を適用することが多い。しかしながら、LiDAR からの距離に応じて点密度に疎密が生じている点群中からの形状特徴抽出では、明瞭に形状が表現されている近距離の点群からの抽出に偏ることが多い。また、直線性の高い形状特徴を多く含む都市河川を対象とする場合、形状特徴点の抽出は、ほとんどの計測箇所では期待できない。そのため、点密度に疎密が生じている点群から、遠近点を均等に含みつつ、非ノイズ領域を選択しつつ、かつ、密度が均一になるように点群をサンプリングし、この点群をマッチング対象とするアプローチを適用する。具体的には、点群上にボクセル空間を生成し、一定数の点群を含む各ボクセルから代表点を選択することで、計測した空間から均一に点群をサンプリングする。これによって、計算コストの削減のみならず、スパイクノイズを排除したサンプリングが同時に可能となる。

サンプリング処理により、スパイクノイズを排除したとしても、サンプリング処理をしていない基準データもしくは対象データのどちらかには、スパイクノイズが含まれている状態である。そのため、点群マッチングにおける評価関数に、評価における閾値の事前設定が不要な Least Median of Squares (LMedS)を適用することで、スパイクノイズへの冗長性を改善する。

高精度な ICP アルゴリズムでは、点と平面の距離の二乗和が最小となる回転行列と並進ベクトルを求める **point-to-plane** が適用されるが、前処理である法線推定に計算時間が必要となる。また、複数の断面情報を含む点群を取得できる多層 LiDAR を利用する場合は、SLAM に十分な量の点群を取得でき、高精度な点群マッチングを期待できる。そのため本研究では、計算コストの低さを考慮して、対応点間の距離の二乗和が最小となる回転行列と並進ベクトルを求める **point-to-point** を適用する。

3. 実施内容(実験)

令和3年度において実施した実験を表3-1に示す。実験日時は、東京湾の潮位が低い時期を選定した。これらの実験日時にあわせて、リチウムイオン電池推進船(図3-1)上に各種センサを搭載する準備を順次進めるとともに、取得したデータを処理するためのソフトウェア開発を実施した。また、これらの実験をとおりて、点群取得や衛星測位を十分に行えるよう、センサ間の干渉度合いを確認しながら、センサ配置を調整した。航行ルートを選定も兼ねた踏査においては、建設コンサルタントからの技術コメントの収集を実施した。令和3年度はシリコン不足の問題により物品調達が難航した課題があり、調達できたセンサから船舶へ搭載する流れとなった。令和3年度中に搭載できたセンサは、主として、GNSS測位装置、LiDAR、および、全方向カメラである。研究対象として選定した河川には、神田川、日本橋川、隅田川、江東区内の河川・運河を挙げたが、実験に使用した電池推進船が航行可能な河川として、神田川、日本橋川、隅田川、汐浜運河、汐見運河、豊洲運河、および、砂町運河を選定した。各実験において、リチウムイオン電池推進船らいちようIからの水上計測を実施し、4.6～5.4 kn程度の速度で航行し、CLAS利用のPPP-RTK測位による測位データ、水平断面のレーザースキャニングによる点群、および、全周囲映像を取得した。

表3-1. 令和3年度において実施した実験

実施日時	実験場所	実施概要
2021/11/19 9:00-12:30	・カメラ艀装:東京海洋大・越中島(15分) ・隅田川-神田川-日本橋川-隅田川	・センサ群艀装(9:00-9:15):カメラ×2 ・踏査での建設コンサルからの技術コメント収集 ・全周囲映像の取得
2021/12/3 8:30-12:00	・艀装:東京海洋大・越中島(1時間) ・隅田川-日本橋川-神田川-隅田川	・センサ群艀装(8:30-9:30):LiDAR×2,GNSS×5,カメラ×2 ・衛星測位データの取得(CLAS, RTKなど) ・LiDARデータおよび全周囲映像の取得
2021/12/22 11:00-14:30	・艀装:東京海洋大・越中島(1時間) ・汐浜運河-汐見運河-豊洲運河-砂町運河	・センサ艀装(11:00-12:00):LiDAR×2,GNSS×5,カメラ×2 ・衛星測位データの取得(CLAS, RTKなど) ・LiDARデータおよび全周囲映像の取得



図 3-1. リチウムイオン電池推進船

3.1 電池推進船搭載 3D 計測ユニットの構築

図2-2に示した処理を実現するために、GNSS測位装置、LiDAR、全方向カメラなどをリチウムイオン電池推進船らいちょうIへ機装した結果を図3-2および図3-3に示す。また、データ解析は令和3年度内に実施できなかったものの、機装したマルチビームソナーを図3-4に、計測例を図3-5に示す。

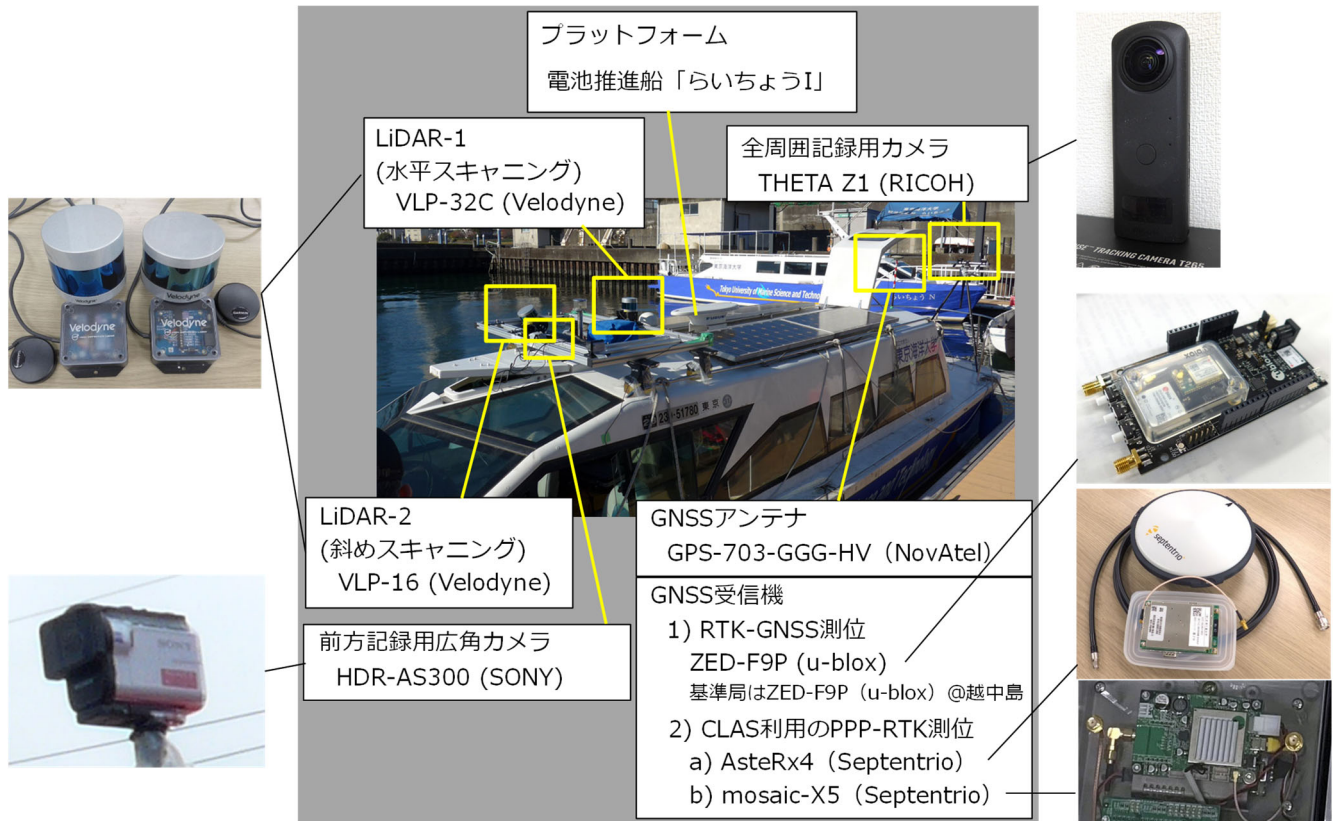


図3-2. 計測装置



図 3-3. 船内風景

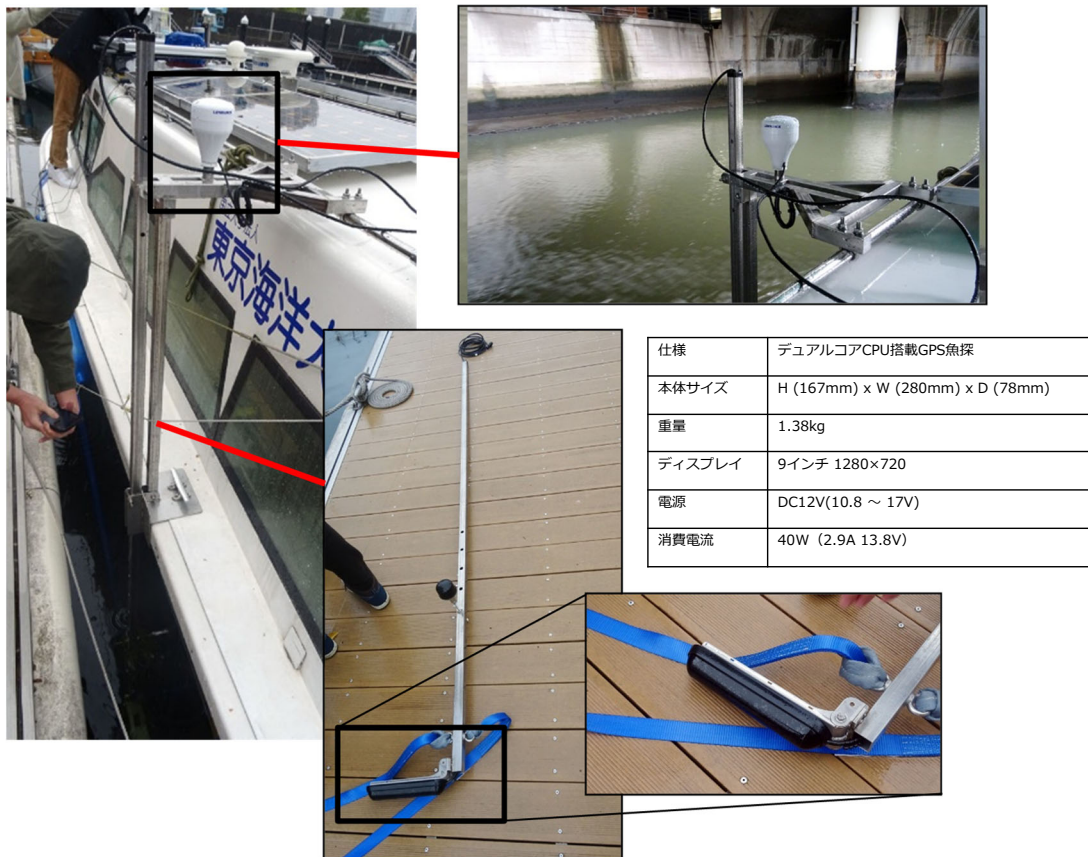


図 3-4. 船舶搭載マルチビームソナー (HSD-9 LIVE)

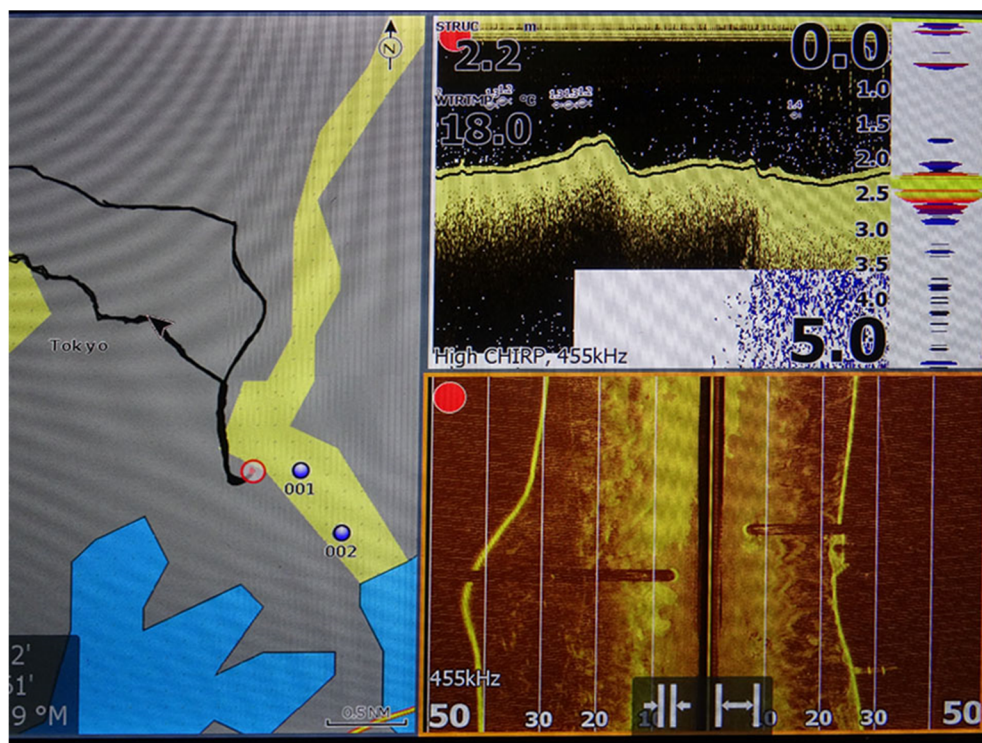


図 3-5. マルチビームソナーによる測深結果例

3.2 都市河川における測位環境の整理

電池推進船らいちよう I へ機装した GNSS 測位装置により, CLAS 利用の PPP-RTK 測位による測位データを航行中に得ることで, オープンスカイ区間や, 高層ビルに囲まれた区間, 橋梁区間, 首都高が直上にある区間など, 都市河川における測位環境の整理を試みた. さらに, 同時に RTK-GNSS 測位による測位データを取得し, 5Hz で取得した測位結果を相対的に比較することで, CLAS 利用の PPP-RTK 測位の測位性能を検証した. 隅田川と日本橋川, 神田川を計測対象とし, 永代橋から神田橋, 水道橋, 浅草橋の経路を設定した(図 3-6). 経路は, 上空視界がほぼ確保できる区間(隅田川)と, 上空視界が連続的に遮られる区間(日本橋川), 上空視界が断続的に遮られる区間(神田川)で構成される.

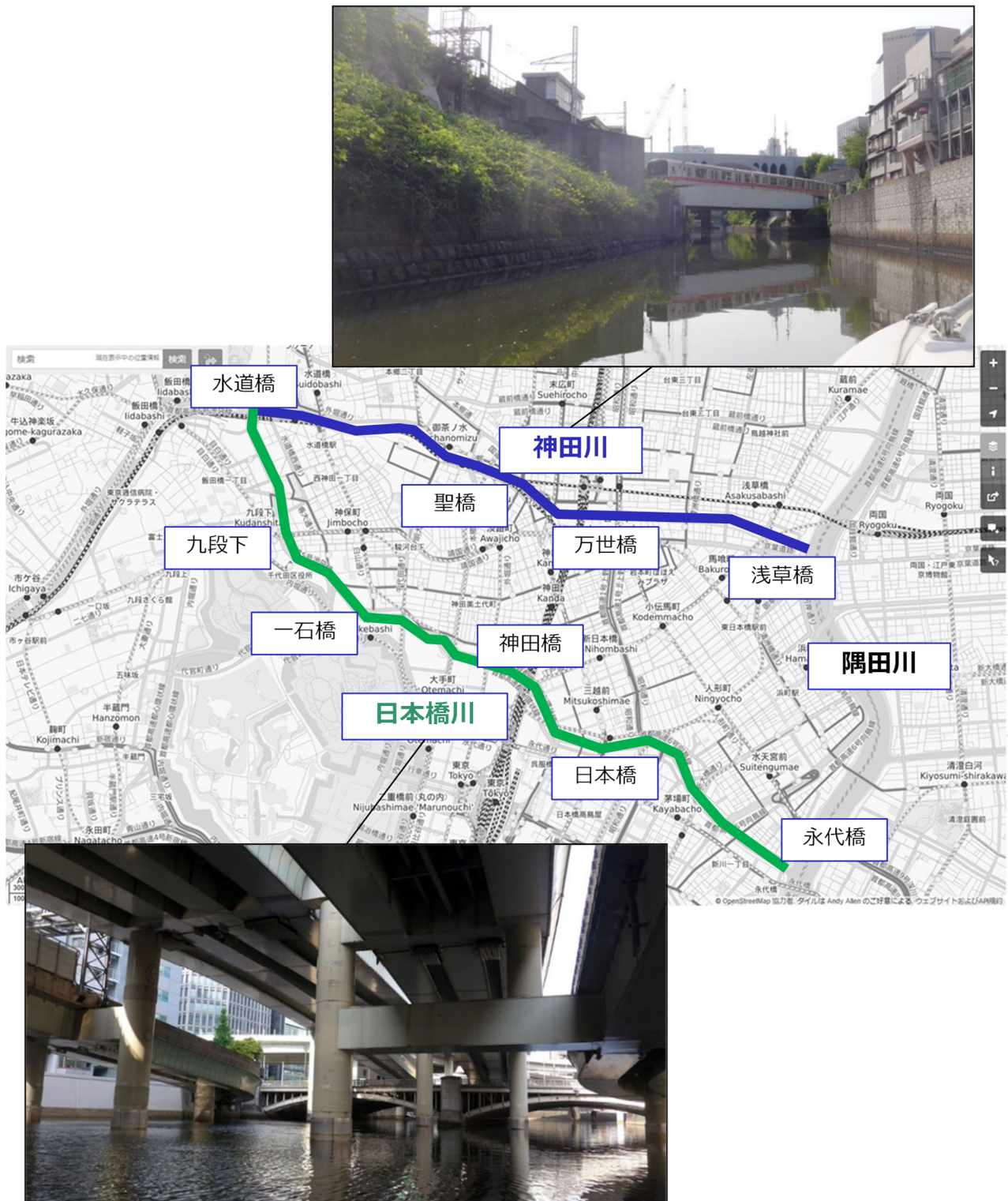


図3-6. 計測対象区間