

ドローン CTD 観測の最適手法の実験的解明

市川 香 (九州大学応用力学研究所)

酒見 亮祐 (九州大学応用力学研究所)

森本昭彦 (愛媛大学沿岸環境科学研究センター)

1. 研究目的

本研究では、機動性の高いドローンを用いて、任意の場所や時刻で海面高度の計測を行う手法を開発してきた。さらに、ドローンによる海洋観測をさらに拡張するため、他の物理量の計測方法も模索している。高所からの広域撮影というドローンの特性を活かした可視画像や赤外線による海面水温画像のほかにも、任意の場所の海面へ水中を乱すことなく接近できるという特性を活かして、海面採水や水温塩分の鉛直プロファイル計測なども試行している。

昨年度に試行したドローンによる CTD 観測では、降下時と上昇時に海面付近で計測値に差異が生じることなどを報告した。そこで今年度は、CTD 観測に影響する要因や注意点を割り出し、最適な手法を検討した。

図 1 約 5m のロープで
CTD センサーを吊り
下げた防水ドローン



2. 研究内容

SwellPro 社の防水ドローン Sprash Drone 4 から、電気伝導度と水温と圧力を記録するセンサー(CTD)を約 5m のロープで吊し、ドローン本体の高度をゆっくりと上下させることで CTD を海中で上下させて鉛直プロフ

ファイルを計測する（図 1）。ドローンには飛行荷重制限があるため、今回は SonTek 社の小型軽量の CTD センサーである Castaway CTD を用いた。なお、バイオロギング用のロガーなど軽量の水温センサーは他にもあるが、一般に小型のセンサーは応答速度が遅いため、短時間での鉛直プロファイル取得には不向きである。重量と応答速度の実用的なバランスを考えると、利用できる CTD の選択肢は限定されてしまう。

昨年の 12 月 10 日に「いさな」で行った森漁港の約 8.5km 西南西 (33.727° N, 132.5868° E) の海域の結果と比較するため、今回は同海域の 2025 年 1 月 14 日の実験に加えて、2024 年 11 月 14 日に北海道厚岸町の厚岸大橋付近で、厚岸湖からの淡水と太平洋に面する厚岸湾からの海水が接する河川フロント域でも実験を行った。

フロントが明確に目視できる場合、ドローン底部に設置したカメラ画像（図 2）を飛行中に確認することで、フロントのどちら側に CTD を投入するかを調整できる。これは、場を乱さずに上空から接近して CTD を投入できるドローン観測の利点である。

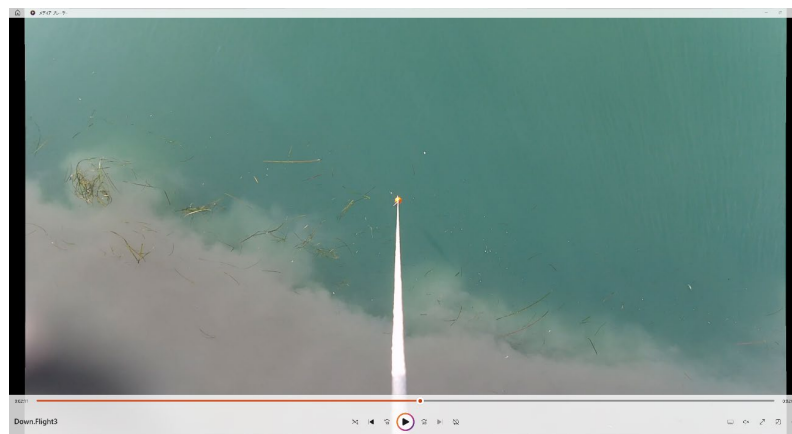


図 2 底部カメラから撮影した直下の CTD と河川フロント

3. 研究成果

厚岸大橋での観測では、川幅を横断する 1 回のフライトで 4 ～ 5 地点でのキャストを行い、3 フライト合計で 13 キャストを行った。観測で得られた鉛直プロファイル例を図 3 に示す。CTD の測定間隔は 0.2 秒である。

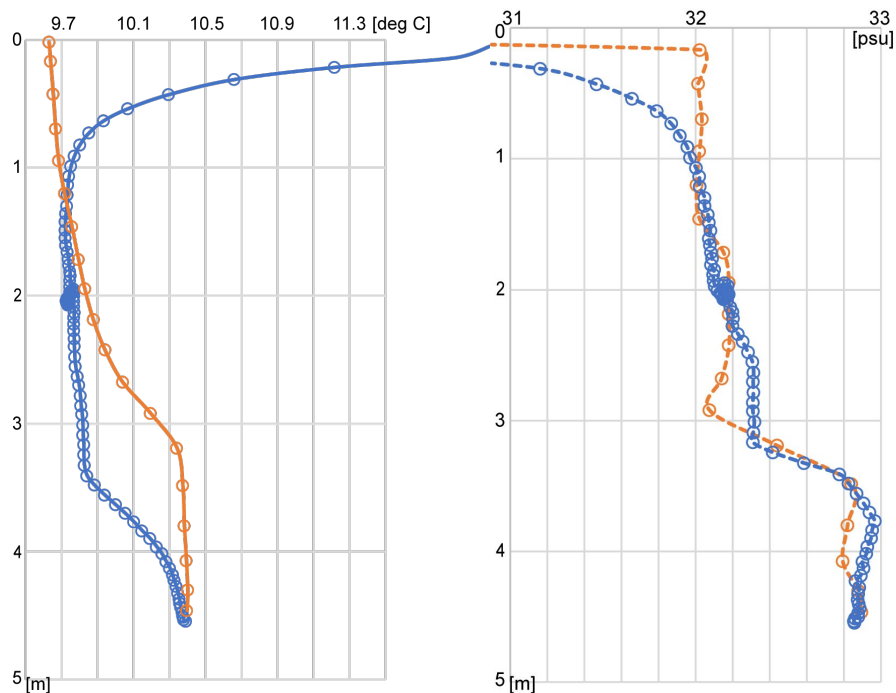


図 3 CTD の鉛直プロファイル例(2025 年 1 月 14 日 10:25, 43.048° N, 144.855° E)。左が水温, 右が塩分の値。降下時の結果を青で, 上昇時の測定結果を赤で示す。丸印は, 0.2 秒間隔の測定値。

昨年の結果でも示唆されていたように、海面付近で降下時にのみ急激な温度変化が認められた（図 3 左）。ただし、昨年の瀬戸内海では海面に近いほど水温が低かったが、厚岸湾では海面から離れるほど水温が低下していた。いずれの場合も、気温から水温に急激に温度変化した際に CTD の応答が遅れるために生じたことが示唆される。昨年の瀬戸内海では約 0.6℃の温度変化が収束するのに約 1 秒程度かかっていたが、厚岸湾の結果では約 2℃の温度変化に対して 1.5 秒ほど要していた。これより、CastawayCTD の水温応答には秒単位の遅れがあり、温度変化が大きいほど正しい環境温度に追従するのに時間を要することがわかる。

気温との温度差の応答遅延の影響を受けない水深 1m 以深における水温プロファイルは、昨年の瀬戸内海では鉛直混合していて上昇時と下降時に変化がなかったが、厚岸湾の河川フロントでは違いが生じている。図 3 左の下降時のプロファイル（青線）を見ると、水深 1～3.4m の亜表層では水温 9.7℃で鉛直に一様な冷水があり、水深 3.4m 以深から比較的暖かい

水へと遷移している。上昇時のプロファイル（赤線）でも、下層の暖水と亜表層の冷水という構造は同じく確認できるが、その境界は 3.1m 付近にあり、亜表層の水温は鉛直一様ではない。一方、図 3 右の塩分のプロファイルを見ると、上昇時にも下降時にも厚さ約 0.6m で塩分が 0.8psu ほど変化する躍層が存在しており、下層に存在していたのは比較的暖かい海水であると示唆される。前述の水温境界は躍層内にあり、その深度の違いは下降時の躍層深度（3.2～3.8m）が上昇時（2.9～3.5m）よりやや深いことを反映している。

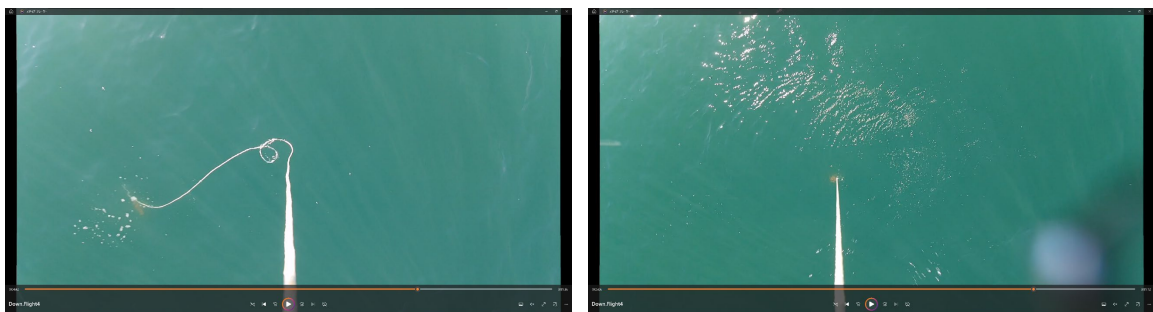


図 4 下降時（左）と上昇時（右）の CTD の下垂ロープ

下降時と上昇時のロープの状態を示したのが図 4 である。右図の上昇時にはロープに張力がかかっているが、左図の下降時にはドローン本体の下降速度よりも遅い速度で CTD が自由落下したためにロープが弛み、かつ流下方向に移流している。このため、特に下降時ではドローンの位置とは異なる水平位置の測定を行っている可能性があり、図 3 の鉛直構造の差を生じる要因の 1 つであると考えられる。

また、図 3 の丸印の間隔を見ても明らかなように、自由落下した下降時に比べて、張力がかかった上昇時の方が短時間で CTD が引き上げられている。上述したように CTD の水温応答が遅いことを考えると、図 3 左の上昇時の赤線で水深 3m から上の温度変化がなだらかに変化しているのは、本来は下降時のように 9.7℃ 付近の鉛直一様層があるのに応答が遅いため生じている可能性もある。つまり、ドローン本体の上昇下降を CTD のウインチとして使用して鉛直プロファイルを求める方法は、本体の鉛直移

動速度に結果が依存する可能性があることが示唆された。

そこで、2025 年 1 月の実験では、図 5 のようにドローンのコントローラーと連動した防水ウインチを設置し、移動して水上に着水させたドローンから CTD を一定速度でゆっくりと上昇・下降する観測を試みた。これにより、上述した CTD の応答遅延の問題や、上昇と下降での鉛直速度の不一致の問題を解決することができる。しかし、残念ながらウインチが正常に動作せず、検証観測は次回以降に引き継ぎとなった。



図 5 防水ウインチを取付けたドローン

4. まとめ

CTD センサーをドローンに吊り下げて上下させることでウインチの代用として鉛直プロファイルを取得する実験を行った。特に厚岸湾の河川フロント域では、水深 3m 付近に塩分躍層が存在し、亜表層に湖水の影響を受けた相対的に低温低塩分の水塊と、下層に厚岸湾からの高温高塩分の水塊の層構造を成すことを明瞭に捕捉することができた。

一方、CTD の水温への応答が遅いために、特に温度差が大きいと秒単位の遅延が生じることが確認された。また、CTD の下降時には自由落下となるため、ドローン本体の下降速度にかかわらず比較的ゆっくりと降下することができるが、上昇時にはロープに張力がかかり上昇速度が早くなって CTD の応答速度の影響を受けることが示唆された。今後は、ウインチを用いたシステムを検討していく予定である。