

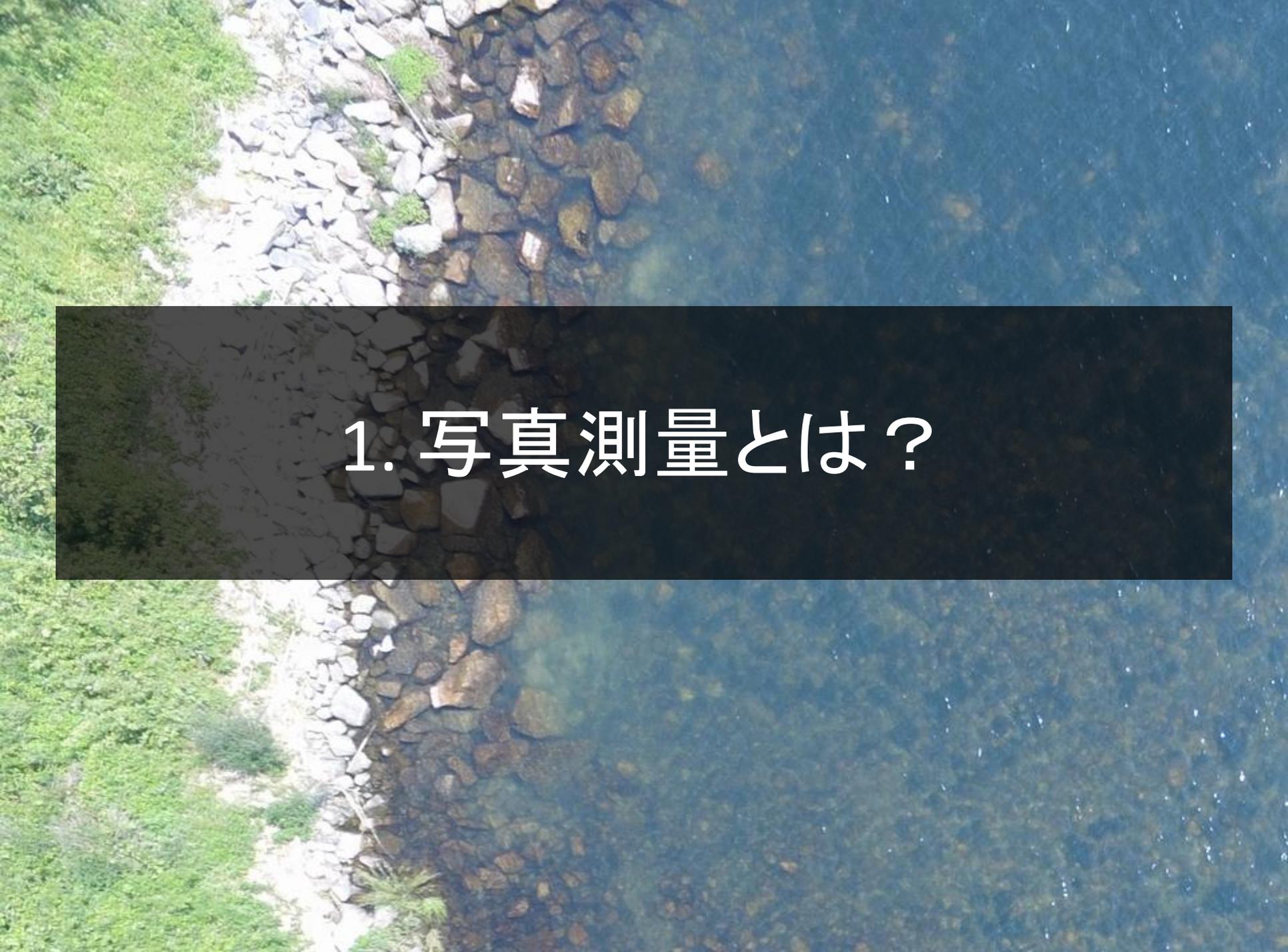
UAVを用いた水面下の写真測量： 佐波川での検証例と今後の展開

山口大学大学院 助教
神野 有生

本資料は、2016年7月30日に山口大学で開かれた講演会「防災・環境分野における UAV 活用の現状と将来」における神野有生の発表資料です。
論文投稿のため、現時点で公開できない部分は除いております。

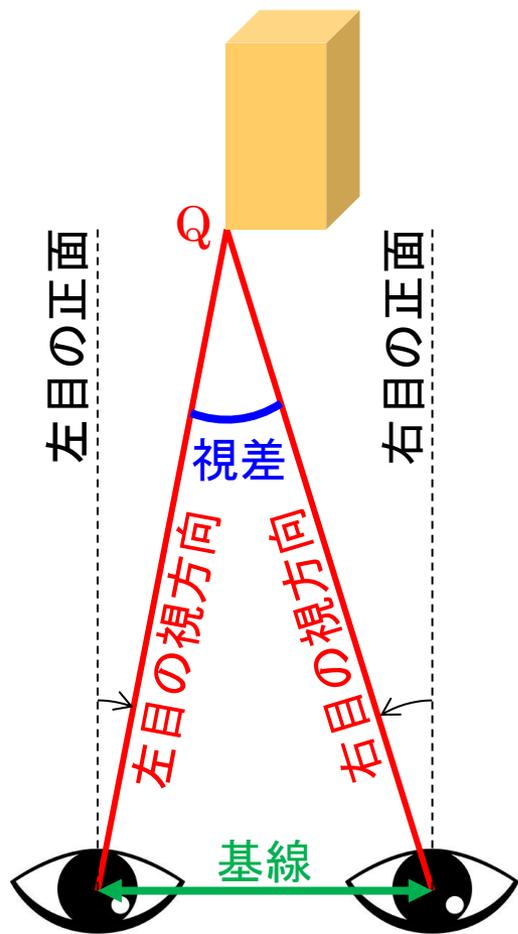
発表の流れ

1. 写真測量とは？
2. 水面下への応用
3. 佐波川での検証例(一部のみ公開)
4. まとめ(一部のみ公開)と今後の課題

An aerial photograph of a river. The left bank is covered in lush green vegetation. The riverbank is composed of numerous light-colored, irregularly shaped rocks. The water is clear and blue, with some darker patches visible beneath the surface. A black rectangular box is overlaid on the center of the image, containing white text.

1. 写真測量とは？

人間が視界を立体的に認識できるわけ



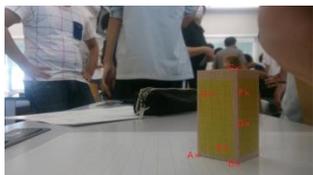
- もし目が1つなら...

着目点(Q)の向きは分かるが
距離はわからない

- 目が2つあると...

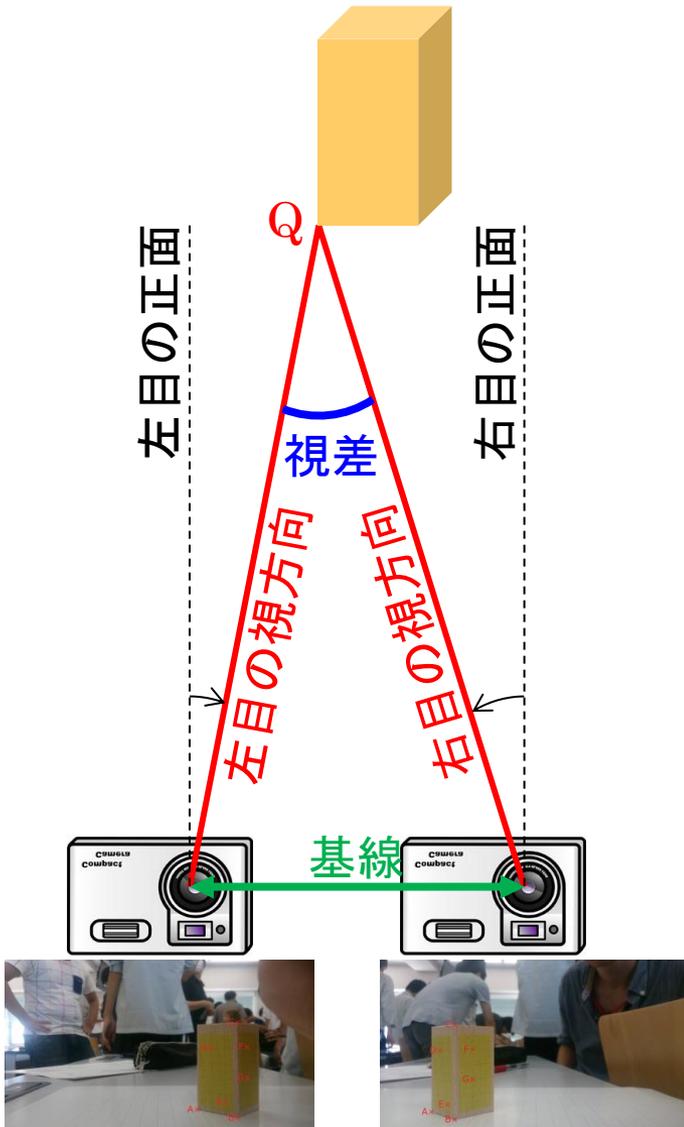
着目点(Q)の見える向きが左右の目で異なる → 距離がわかる

幾何学的には、
着目点(Q)と両目がなす三角形の、
底辺とそれをはさむ角がわかる
→ 三角形の形が決まる
→ 点Qの位置が決まる

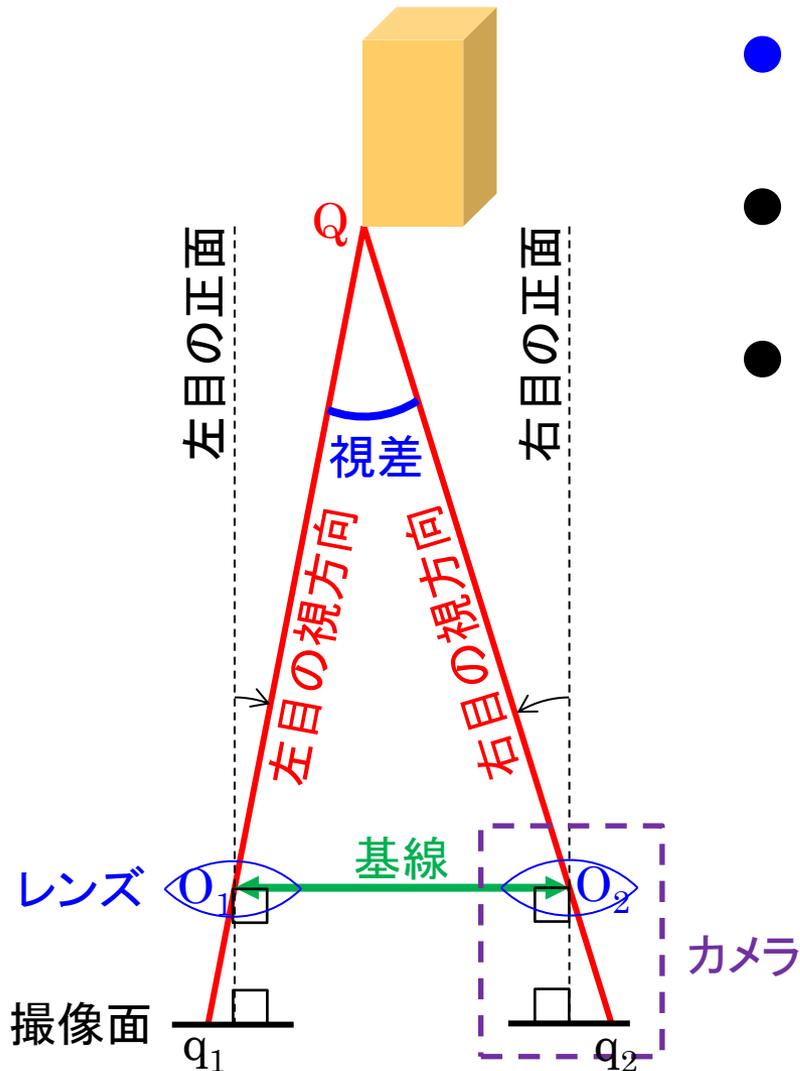


写真測量を一言でいうと

- 人間の目を, カメラに置き換えたもの
- 写真を使って, 地物の座標・形・大きさ, 地物間の距離などを測ること.

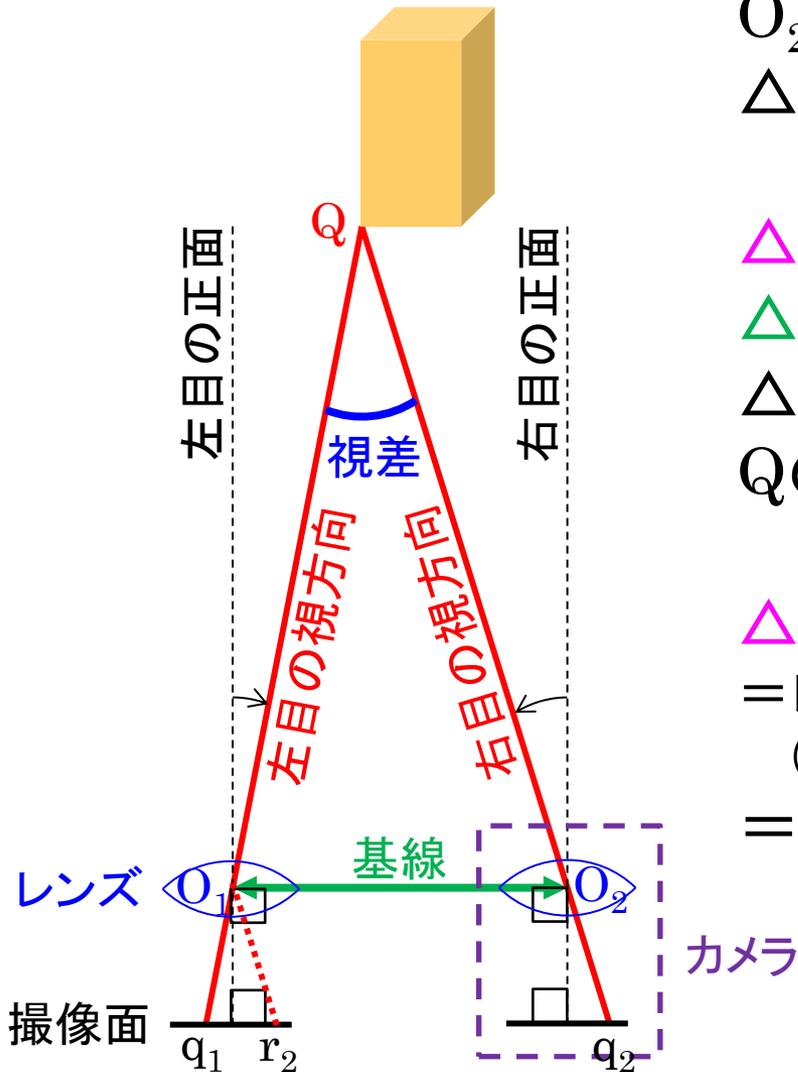


最も単純な写真測量（上から見た図）



- 同じ向きに撮った2枚の写真
- 基線と撮像面（イメージセンサ）が平行
- レンズの歪みを無視（対象点Q, レンズ中心 O_1 , 結像点 q_1 が一直線上にある）

最も単純な写真測量（上から見た図）



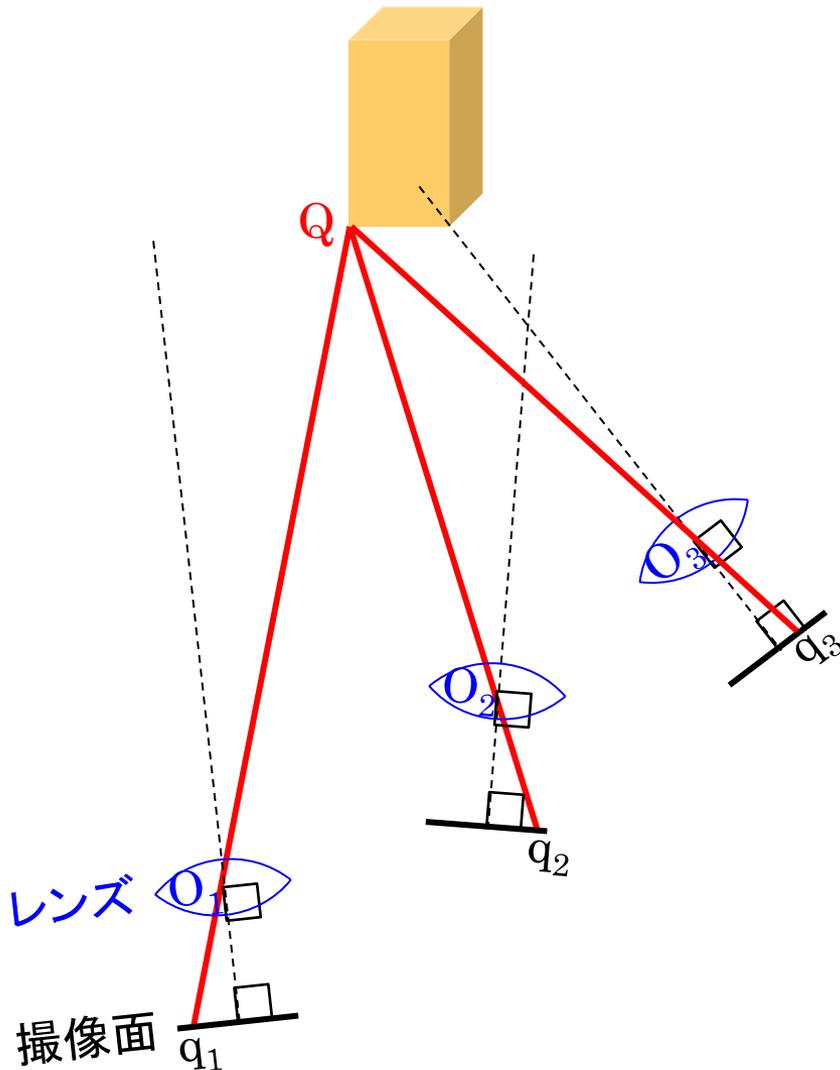
O_2q_2 に平行に O_1r_2 を引くと
 $\triangle QO_1O_2 \sim \triangle O_1q_1r_2$

$\triangle O_1q_1r_2$ の形（高さ／底辺長）と
 $\triangle QO_1O_2$ の底辺長（基線長）がわかれば
 $\triangle QO_1O_2$ の大きさ・形が決まる：
Qの位置は求まる！ ←写真測量の原理

$\triangle O_1q_1r_2$ の高さ／底辺長
= レンズと撮像面の距離(f) /
(1画素の1辺の長さ d × 底辺 q_1r_2 の画素数)
= f/d (カメラによる) ÷ 底辺 q_1r_2 の画素数 (測れる)

「画素単位で表した焦点距離」
カメラ・レンズ・設定による
キャリブレーション(内部標定)で得る

現代的な写真測量（上から見た図）



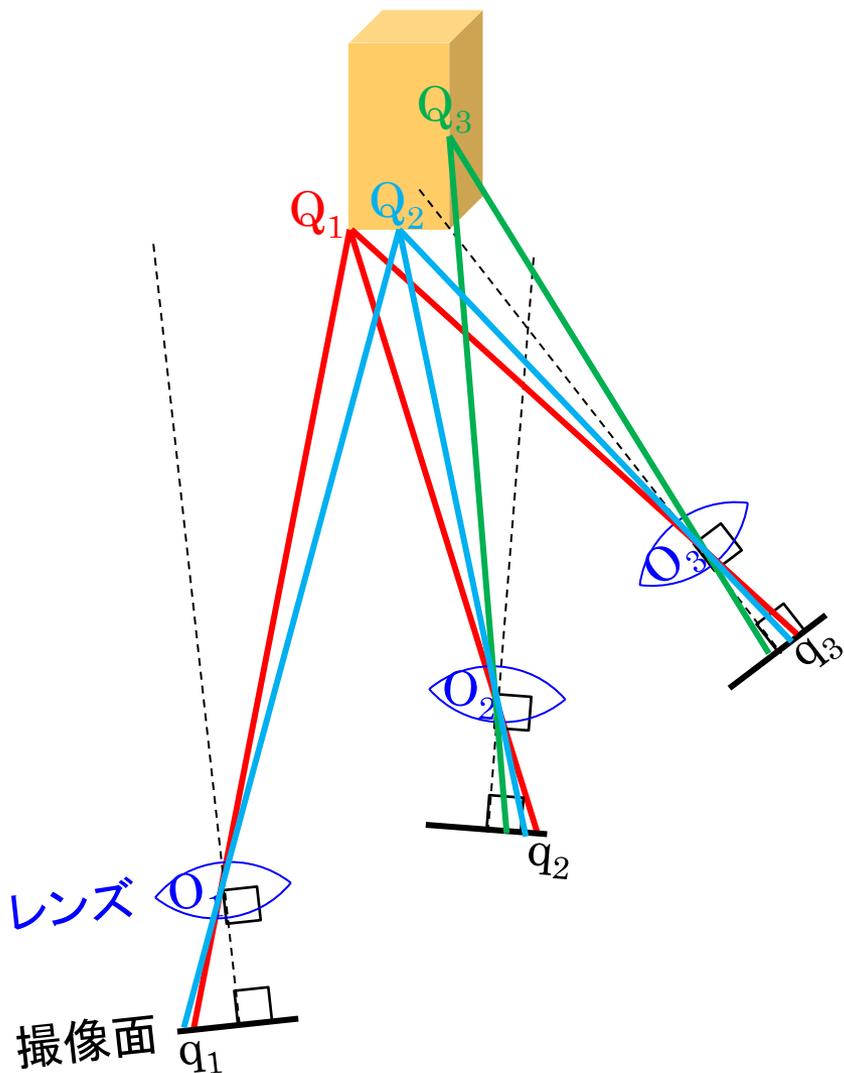
- 向きが**バラバラ**な**多数**の写真
- カメラの座標・向きが**未知**
- カメラの f/d が**未知**
- レンズの**歪み**を考慮(**未知**)

拘束条件(相似関係;
正確には Q, O_i, q_i の共線関係)
が3つだが未知数は多数! 無理?



複数のカメラに共通して写った点
(Q ; 特徴点)を多数見つければ可能

Structure from Motion (SfM)



複数のカメラに共通して写った点
(Q ; 特徴点)を
多数, 自動検出し(マッチング),

多数の相似関係を拘束条件に,
未知パラメータ:

- カメラの座標・向き
- カメラの f/d
- レンズの歪み特性
- 特徴点の座標

を同時に推定(最適化)!

SfMの例 ステップ1：撮影



十分な重なりのある多数の写真を撮影

SfMの例 ステップ2：マッチング

Matches

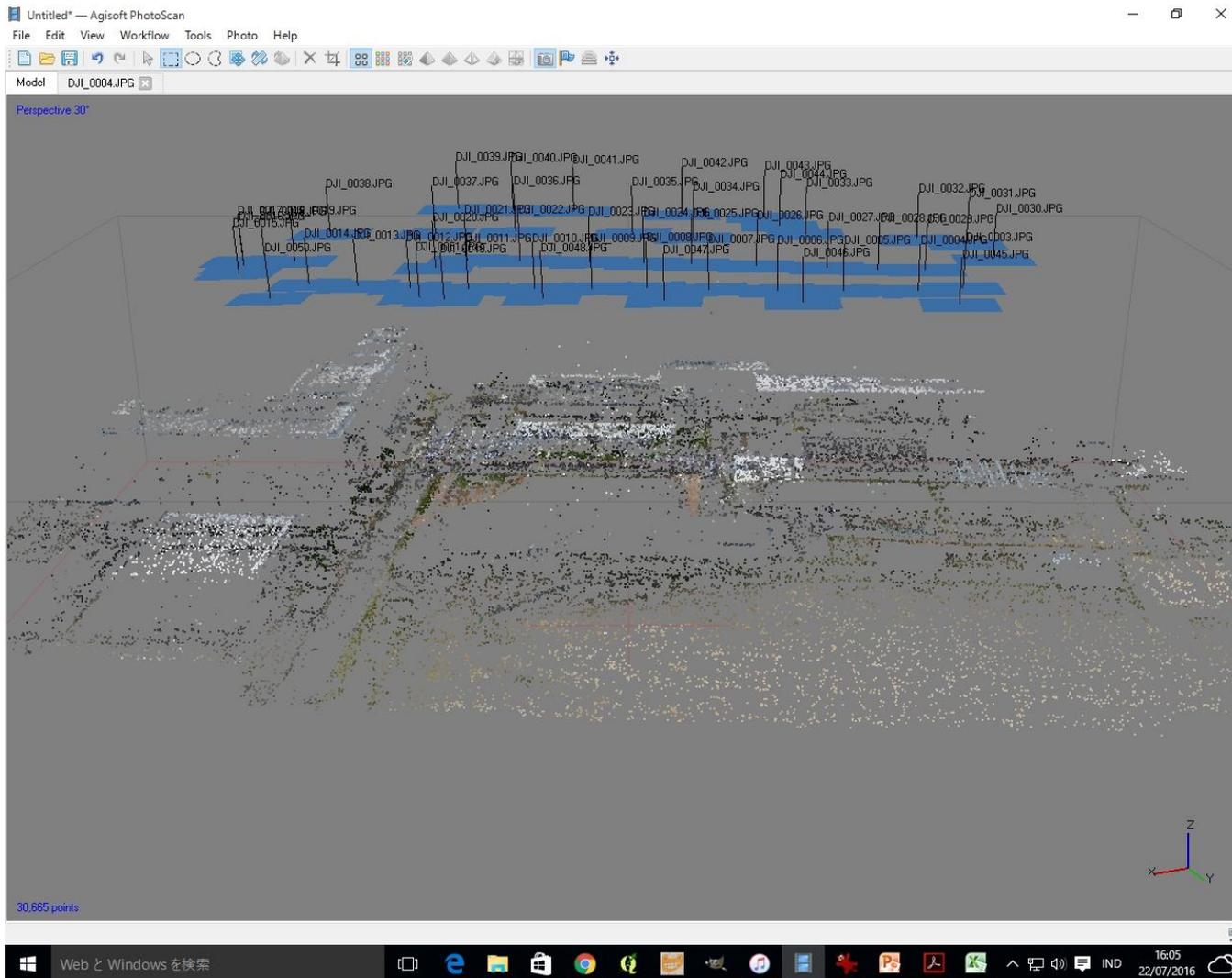
DJI_0040.JPG

Photo	Total	Valid	Invalid
DJI_0039.JPG	2767	2667	100
DJI_0041.JPG	2572	2453	119
DJI_0042.JPG	1389	1301	88
DJI_0036.JPG	1055	1010	45
DJI_0037.JPG	962	922	40
DJI_0043.JPG	910	848	62
DJI_0035.JPG	668	624	44
DJI_0038.JPG	613	589	24
DJI_0044.JPG	502	474	28
DJI_0034.JPG	399	364	35
DJI_0033.JPG	203	192	11
DJI_0022.JPG	153	146	7
DJI_0021.JPG	149	142	7
DJI_0023.JPG	113	105	8
DJI_0019.JPG	94	87	7
DJI_0018.JPG	94	88	6
DJI_0017.JPG	90	87	3
DJI_0024.JPG	87	80	7
DJI_0020.JPG	59	55	4
DJI_0032.JPG	58	49	9
DJI_0016.JPG	49	47	2
DJI_0031.JPG	45	39	6
DJI_0025.JPG	26	22	4
DJI_0030.JPG	11	9	2
DJI_0015.JPG	11	0	11
DJI_0026.JPG	10	7	3
DJI_0029.JPG	7	4	3
DJI_0028.JPG	5	2	3
DJI_0027.JPG	5	4	1
DJI_0014.JPG	2	1	1
DJI_0013.JPG	2	1	1
DJI_0011.JPG	2	1	1
DJI_0006.JPG	2	0	2
DJI_0005.JPG	2	0	2
DJI_0051.JPG	1	0	1
DJI_0010.JPG	1	0	1
DJI_0009.JPG	1	0	1
DJI_0008.JPG	1	0	1
DJI_0007.JPG	1	0	1
DJI_0004.JPG	1	0	1
DJI_0003.JPG	1	0	1

16:19 22/07/2016

複数のカメラに共通して写った点(特徴点)を自動検出

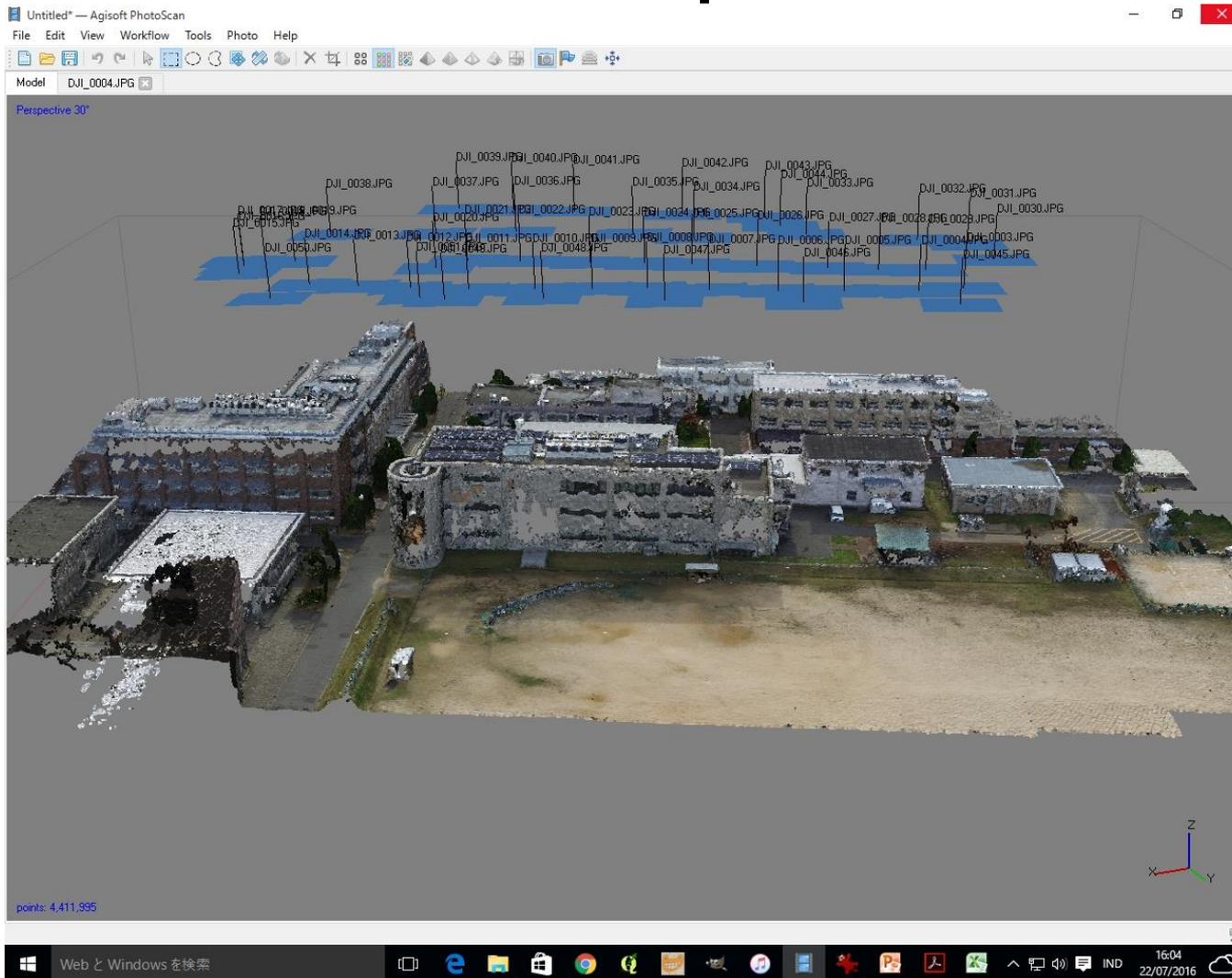
SfMの例 ステップ3：推定



f:	2311.25
cx:	56.654
cy:	165.045
k1:	-0.0126423
k2:	0.0146359
k3:	0
k4:	0

拘束条件ができるだけ満たされるように、
カメラの座標・向き, f/d , レンズの歪み特性, 特徴点の座標を最適化

その後 : Multiple View Stereo-vision



→あとは煮るなり焼くなり

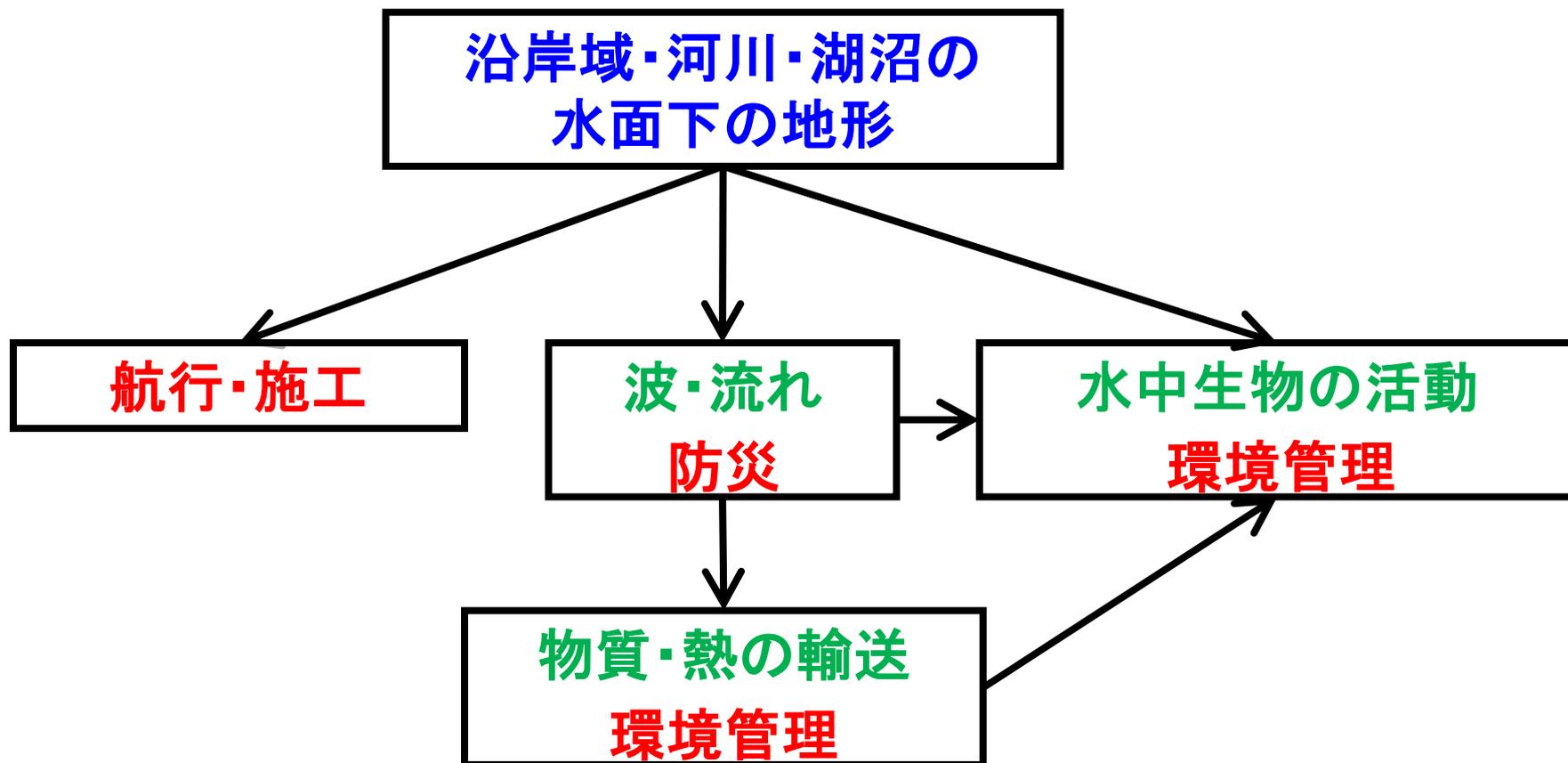
GCP(対空標識)の座標を
使って世界座標を与える
メッシュ化する
テクスチャを張り付ける
CADに出力する

推定されたカメラパラメータに基づき,
密なマッチングによる特徴点群(Dense point cloud)を生成

An aerial photograph of a river. The left bank is covered in green grass and some small plants. The riverbank is lined with a row of grey and brown stones. The water is clear and blue, with some rocks visible underneath. A large, dark grey rectangular box is overlaid on the center of the image, containing white Japanese text.

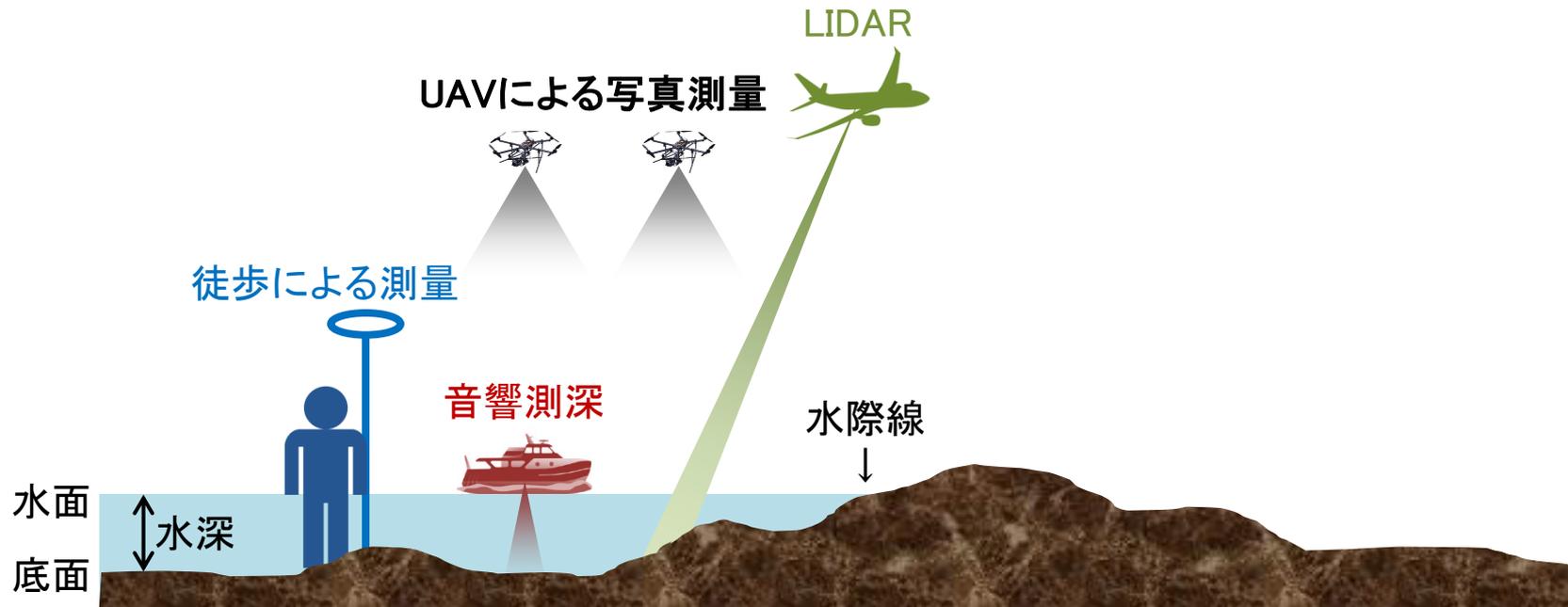
2. 水面下への応用

水面下の地形と水環境・人間活動



水面下の地形は多くの人間活動の基盤情報
経時変化するため、
十分な空間密度・頻度でのモニタリングが重要。

浅水帯における水面下の地形測量



従来の測量方法：**労力・コスト大** → **空間密度・頻度の不足**

例) 河川の定期縦横断測量：約5年に1回，200 m間隔

UAVによる写真測量が実現すれば，従来より**安価・迅速・簡便**に！

→ 実証研究が国内外でスタート(例：Woodget et al. (2015))

問題点

1. 光の水面屈折により、底面上の点が正しい位置に写らない
→ 水深を過小評価する & 水平方向にも位置がずれる
(詳しく説明)
2. 光の水面反射, 水深や濁りによる光の消散, 波によってできる
底面上の模様により, 底面が明瞭に写らないことがある
→ マッチングに失敗する



光は水面で屈折する

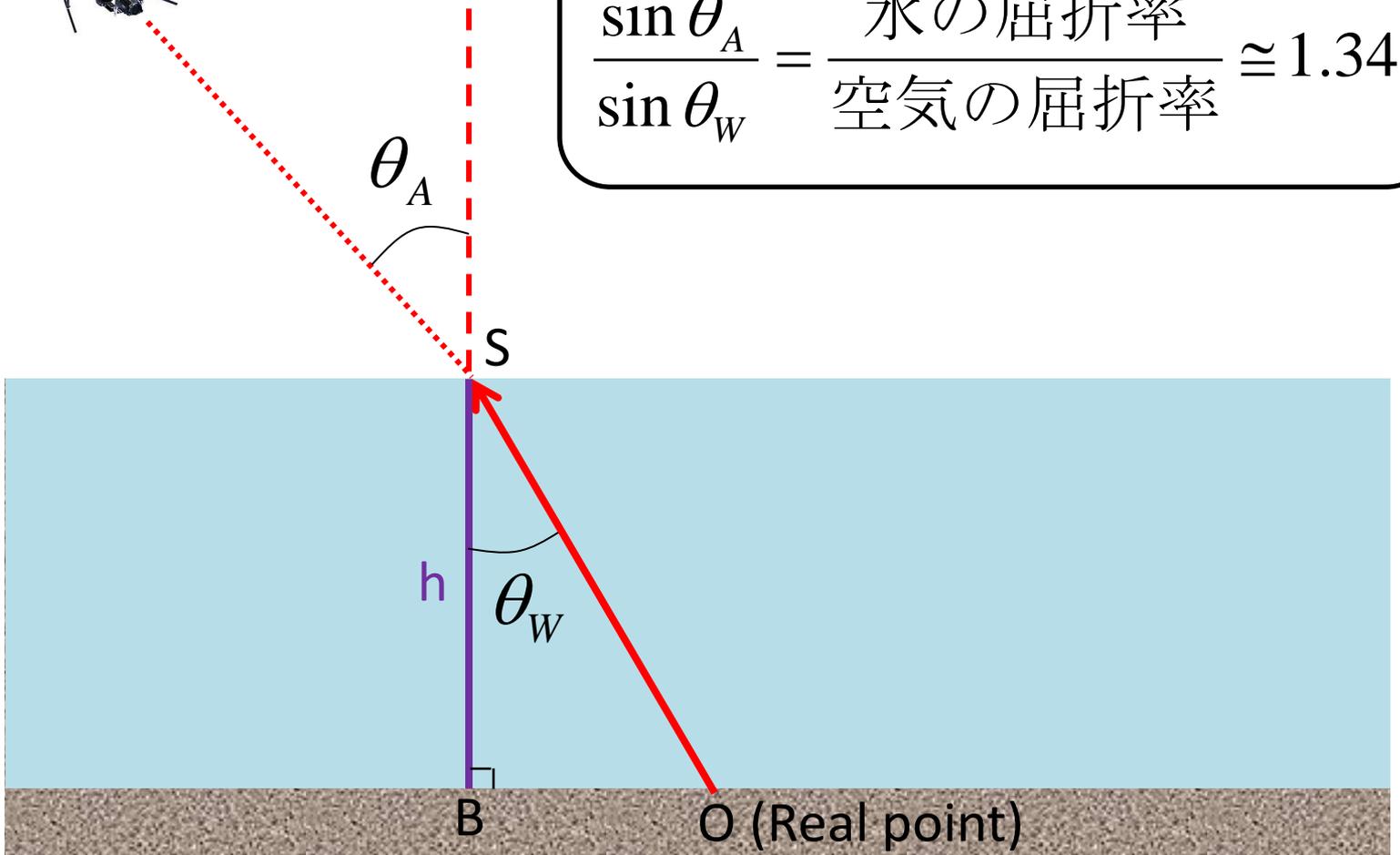


スネルの法則

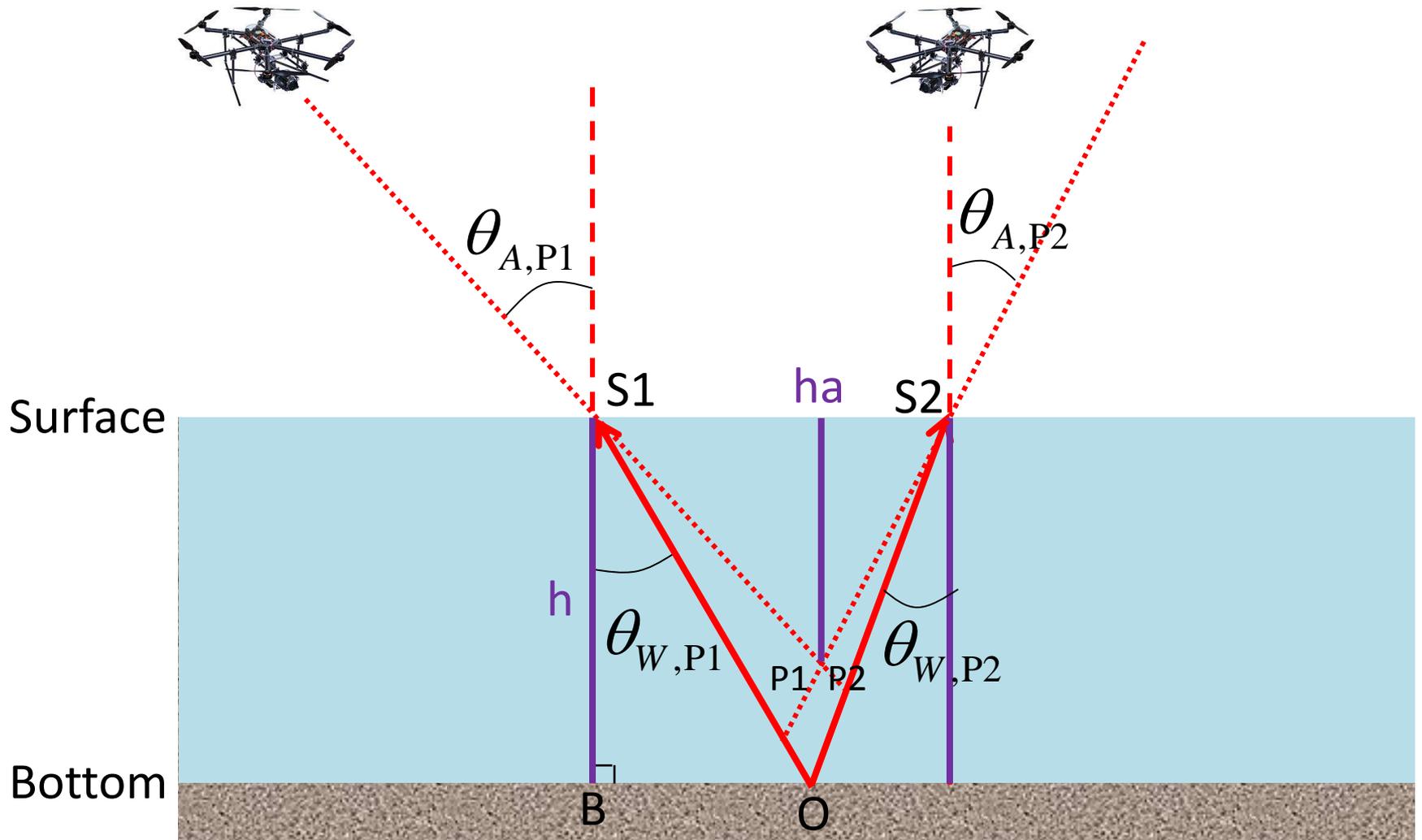
$$\frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_W} = \frac{\text{水の屈折率}}{\text{空気の屈折率}} \cong 1.34$$

Surface

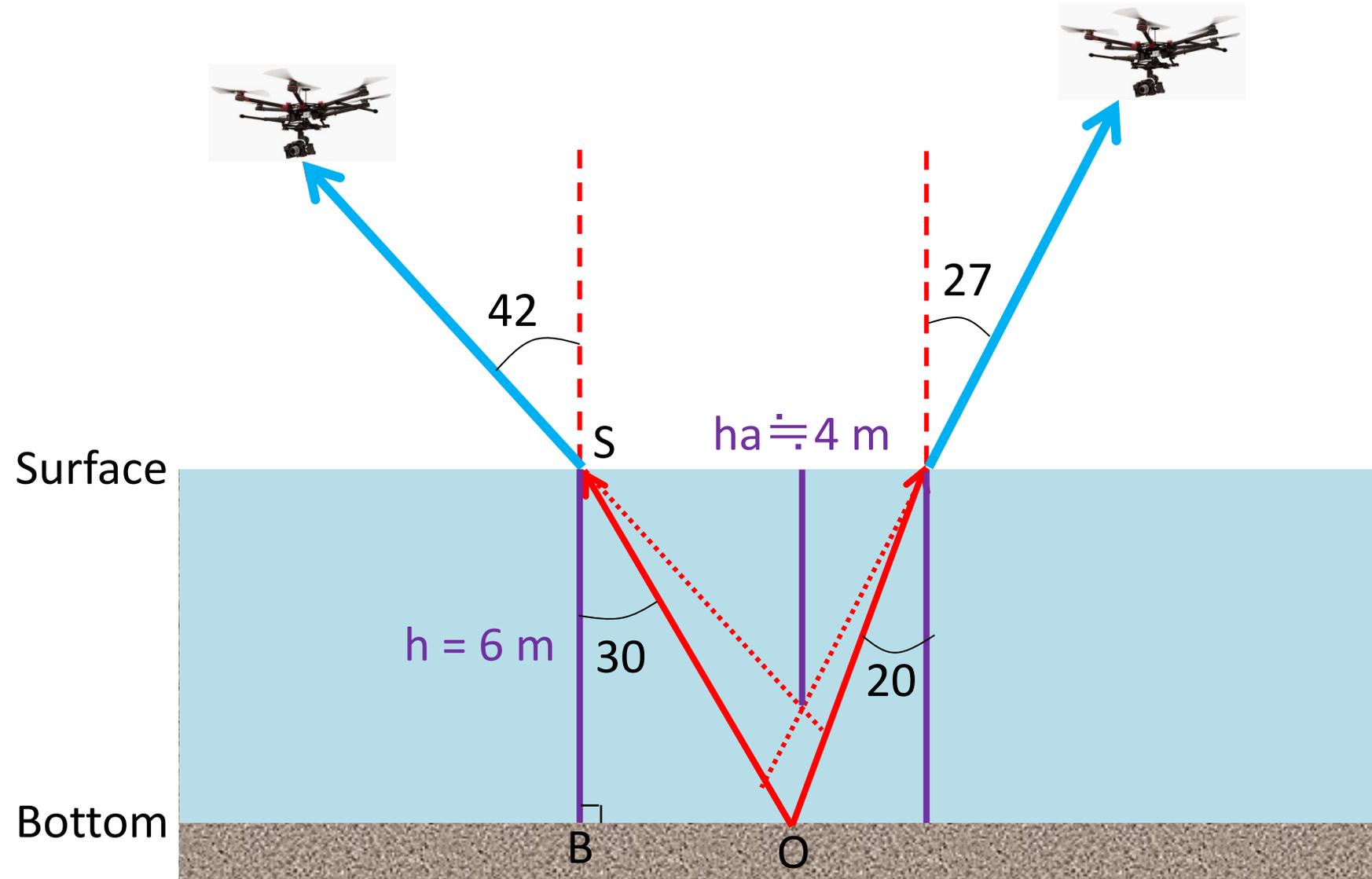
Bottom



底面上の点は浅く見える

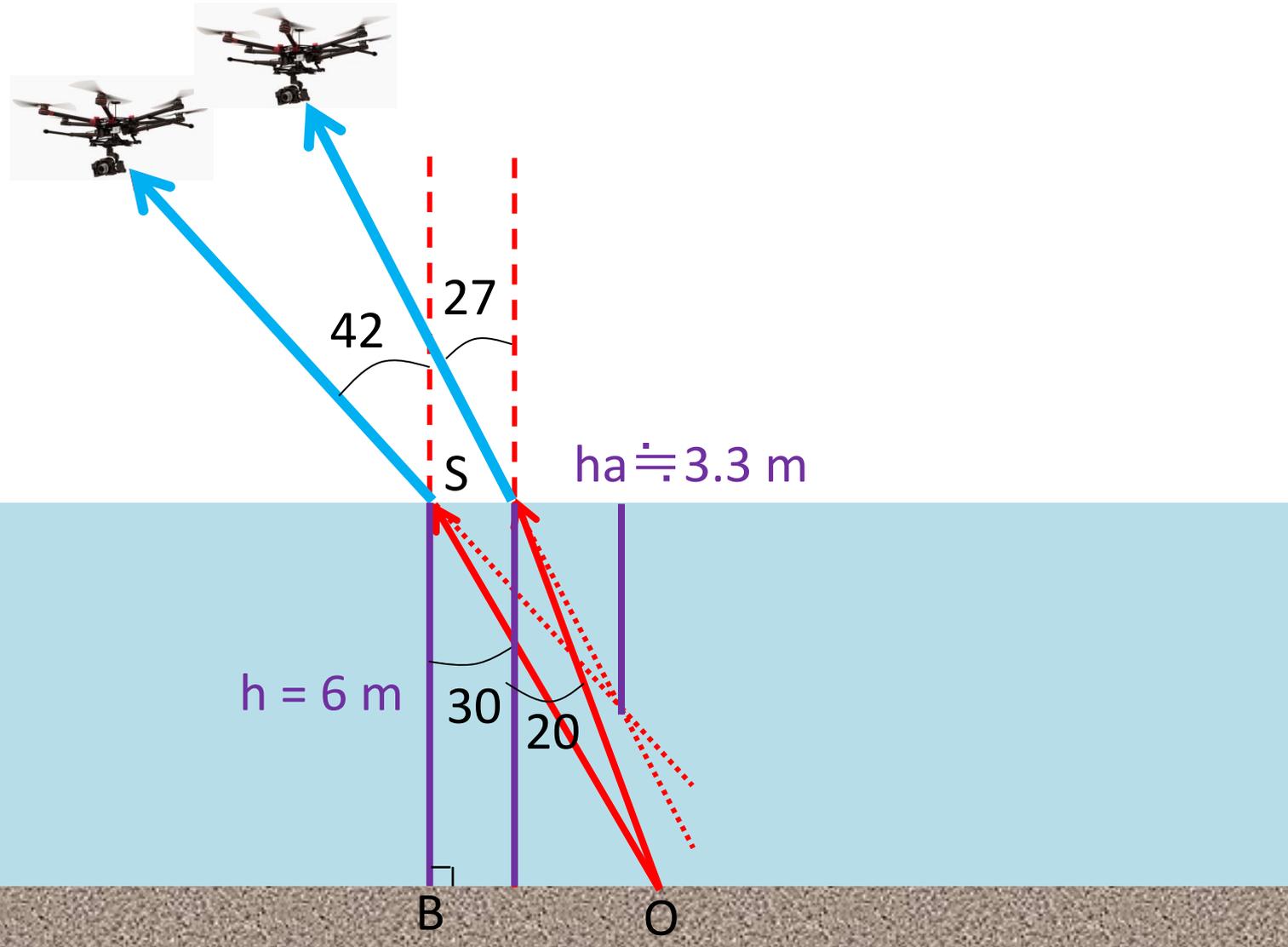


例：2視点が正対する場合



「見かけの水深と真の水深の比」(ha/h) $\doteq 0.67$

例：2視点が同じ側にある場合



「見かけの水深と真の水深の比」(h_a/h) $\doteq 0.55$

水面屈折の影響

撮影位置により、浅く見える度合い、つまり「見かけの水深と真の水深の比」(h_a/h)が**変わる**。

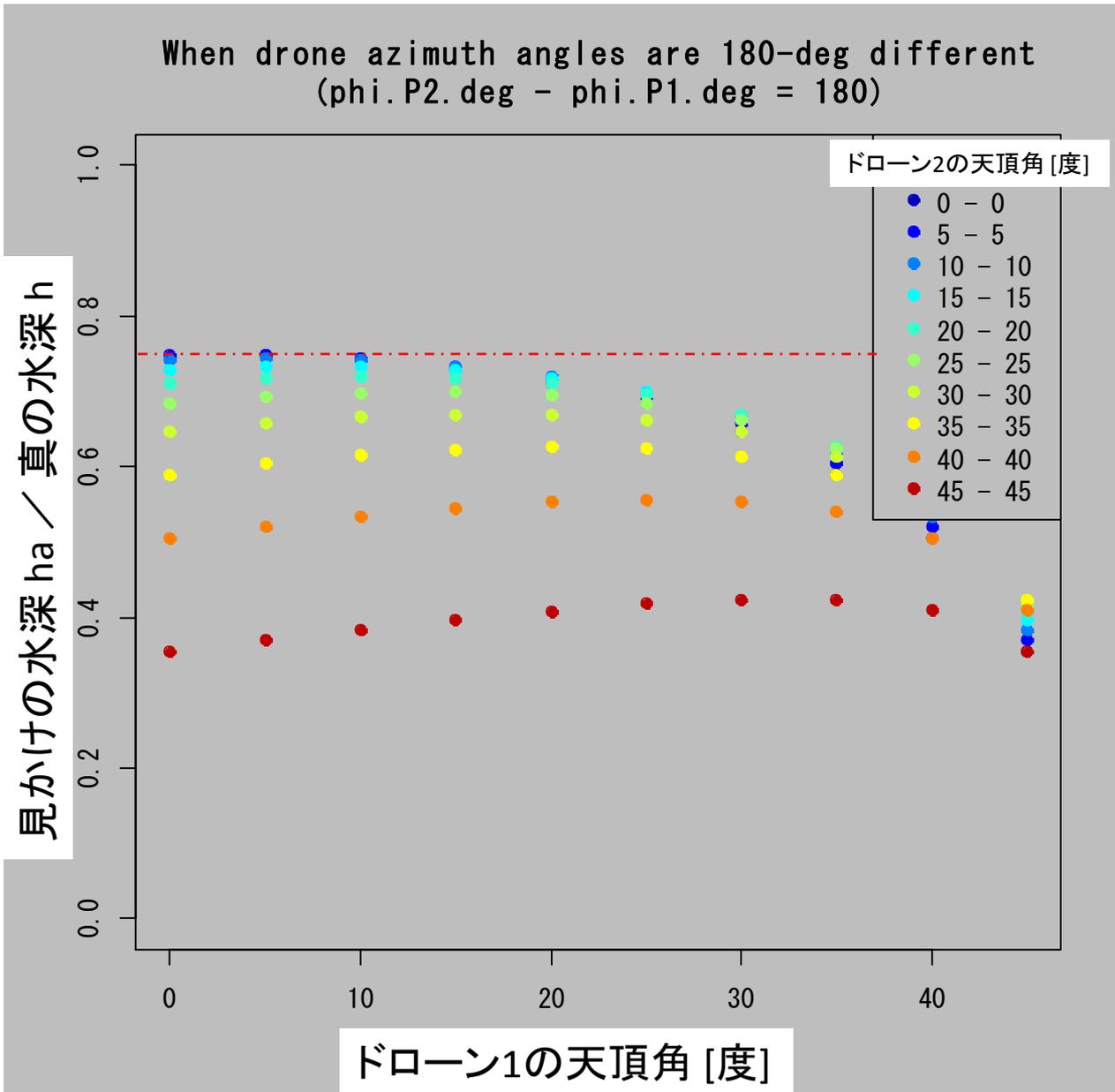
が、多くの既往研究では、一定値：

h_a/h として **$1/1.34 \doteq 0.75$** (全カメラが天頂にあるときの値) を使っている！

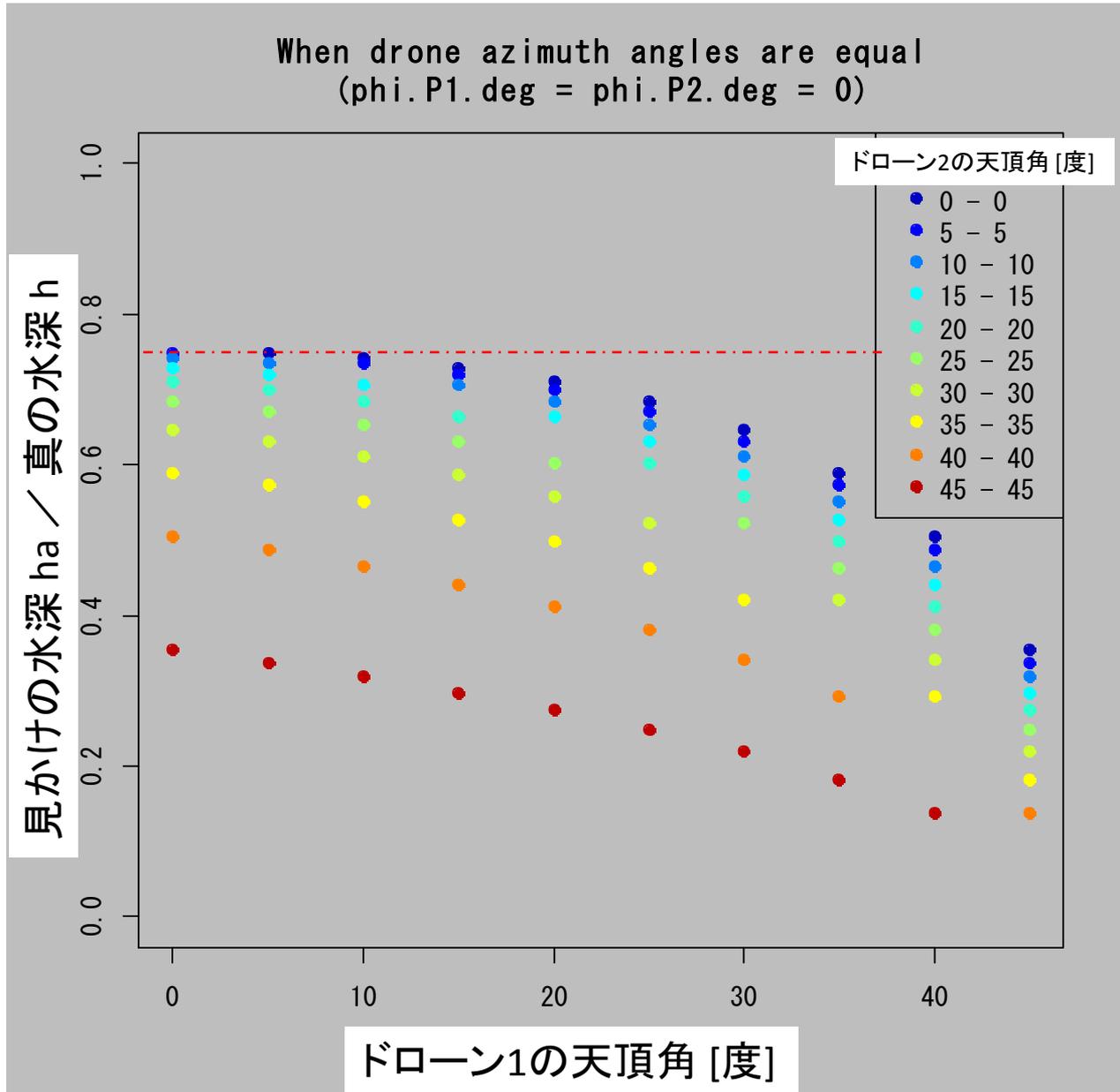
既往研究での水面屈折補正：

真の水深 = 見かけの水深 × 水面屈折補正係数
= 見かけの水深 × 1.34

シミュレーション: 2視点が正対する場合



シミュレーション: 2視点が同じ側にある場合



水面屈折の影響

撮影位置により、浅く見える度合い、つまり「見かけの水深と真の水深の比」(h_a/h)が**変わる**。

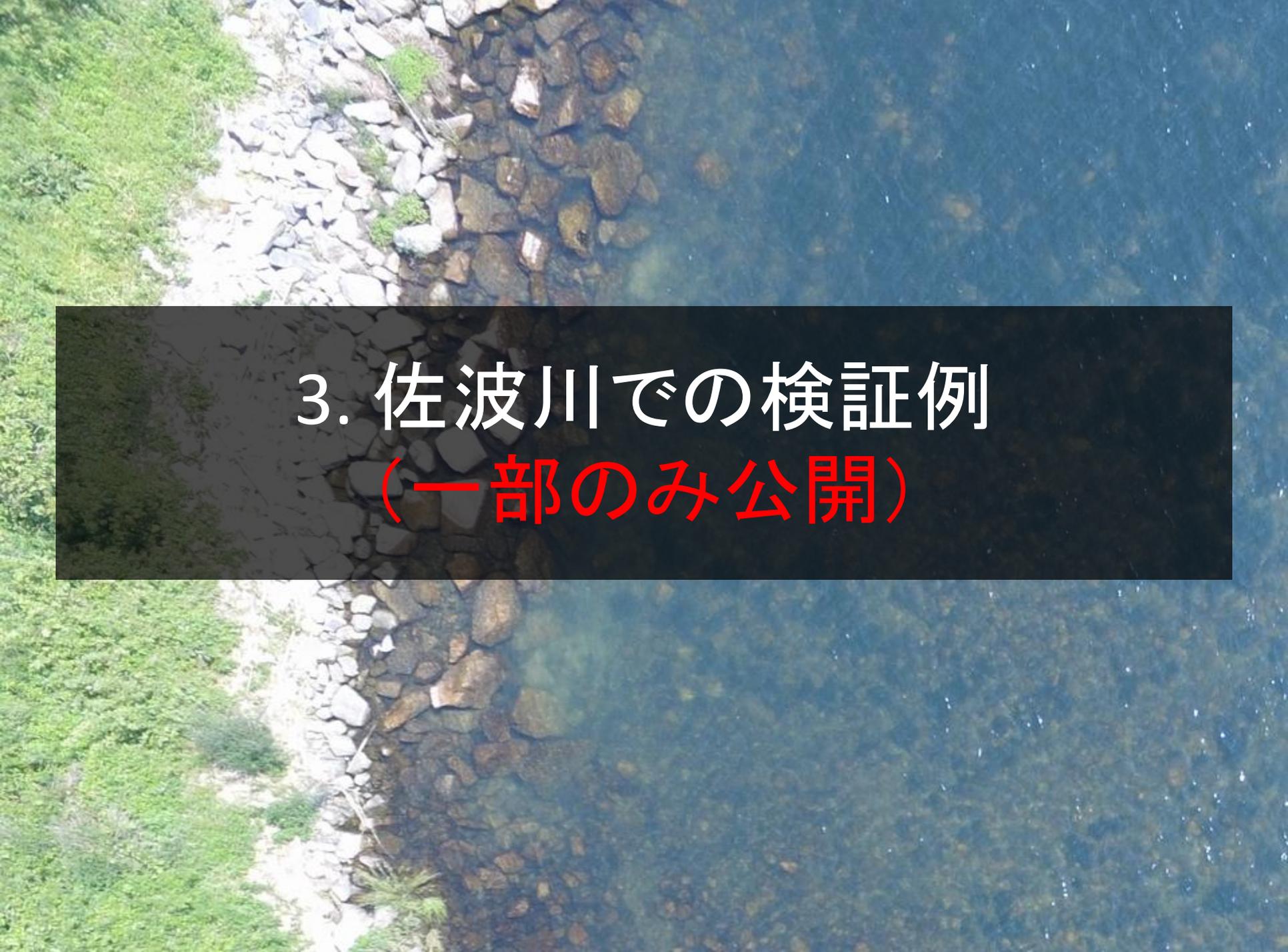
が、多くの既往研究では、一定値：

h_a/h として **$1/1.34 \doteq 0.75$** (全カメラが天頂にあるときの値) を使っている！

理想的には、

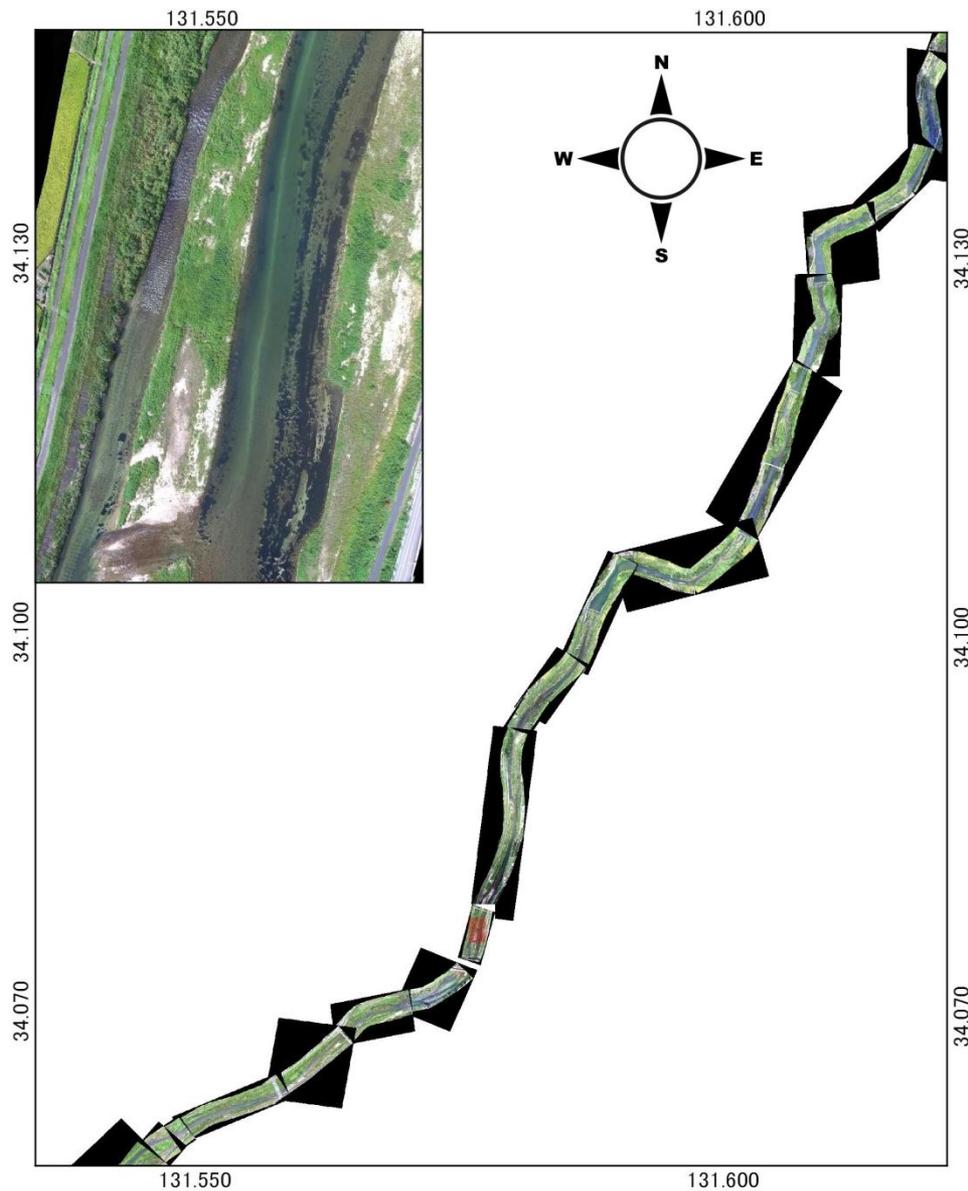
その点のマッチングに使われた写真の撮影位置をもとに、**最適な値を幾何学的に求めるべき**

(開発課題)

An aerial photograph of a river. The left bank is covered in lush green vegetation. The riverbank is reinforced with a wall of grey and brown stones. The water is clear and blue, with some rocks visible beneath the surface.

3. 佐波川での検証例 (一部のみ公開)

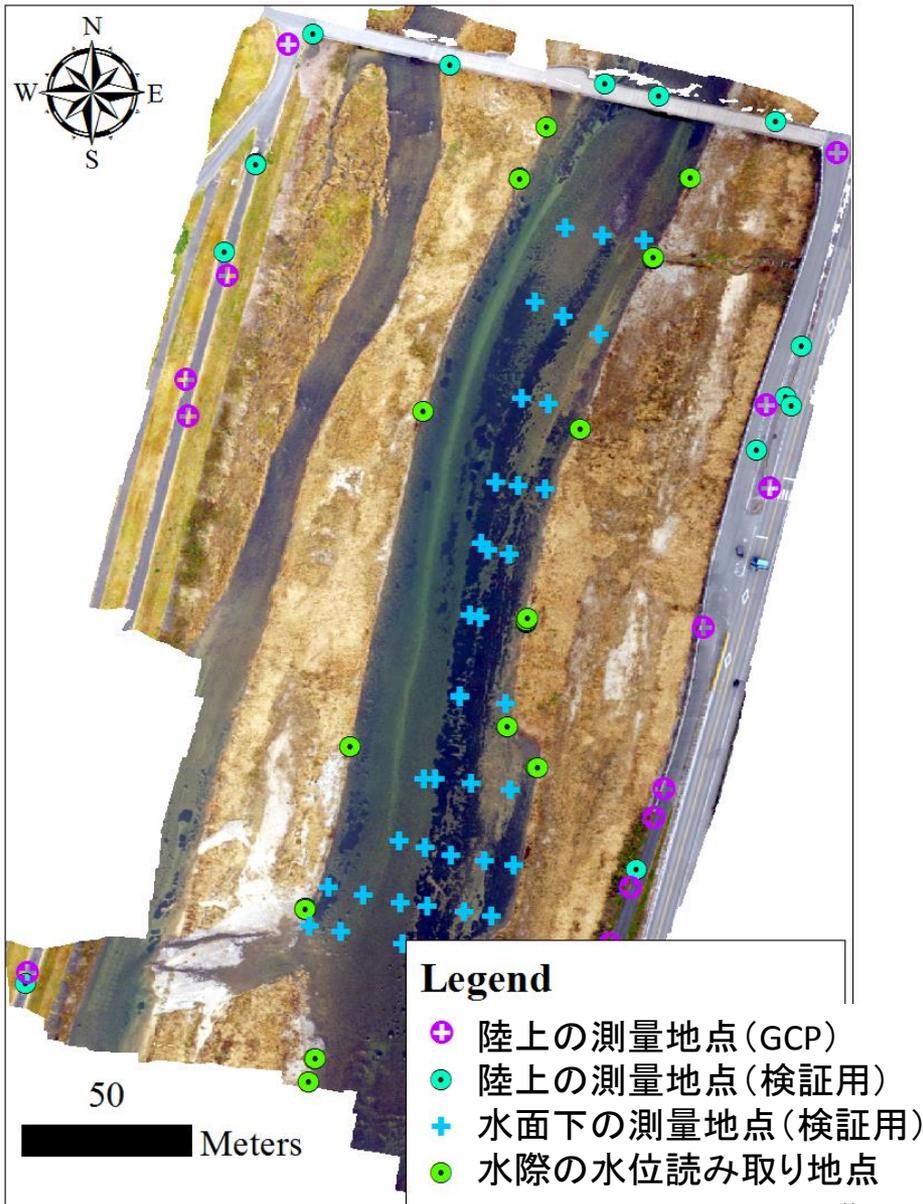
3.1 サイト1（人丸橋下流）での検証



撮影条件

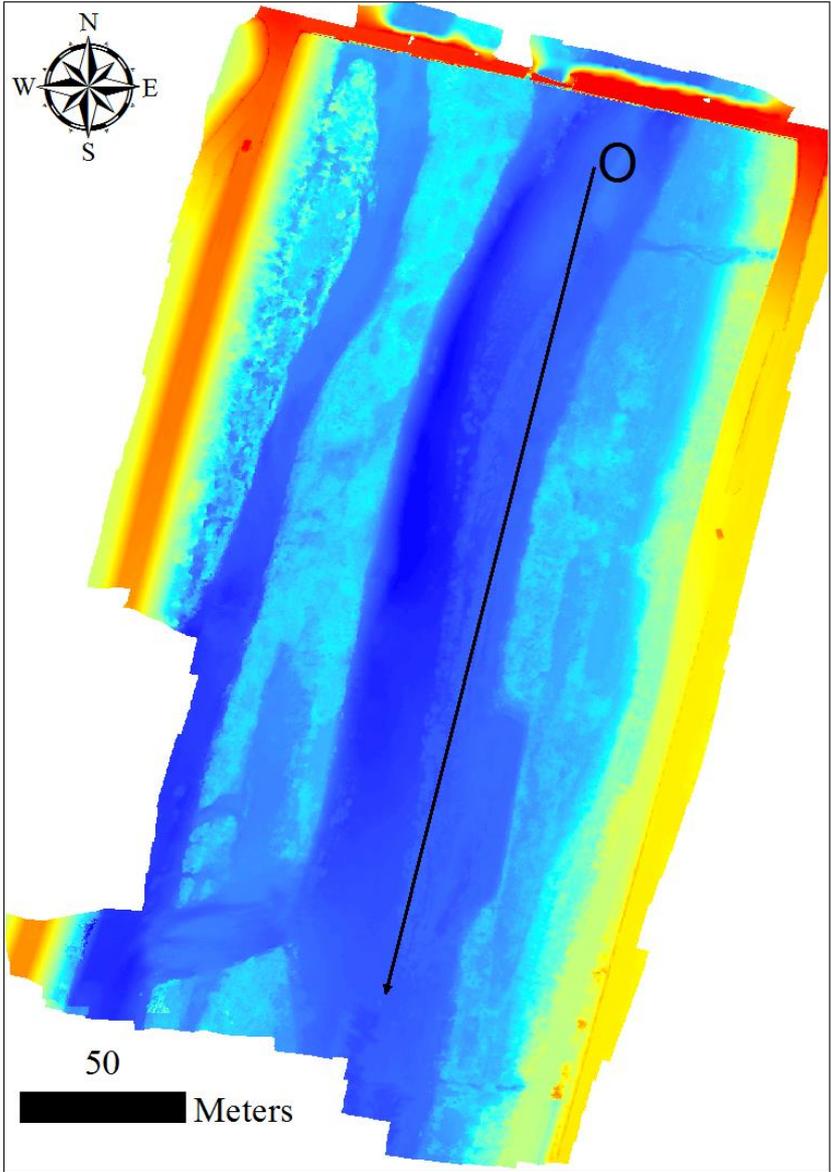
環境条件	内容
日	06.01.2016
時刻	15:47-16:15
太陽高度	23.4°
太陽方位角	217.2°
天気	Overcast
飛行条件	内容
飛行高度	29 m
撮影枚数	270
撮影面積	4.85e+04 m ²
進行方向の平均重複率	79.84 %
横方向の平均重複率	57.24 %

現地RTK-GPS測量地点 (GCPと検証用)

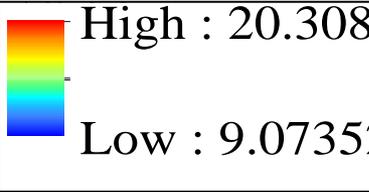


GCP: Ground Control Point
主に写真測量の結果に
X, Y, Zの座標系を与えるために
測量を行う地点

生成されたDSM (デジタル表面高モデル)



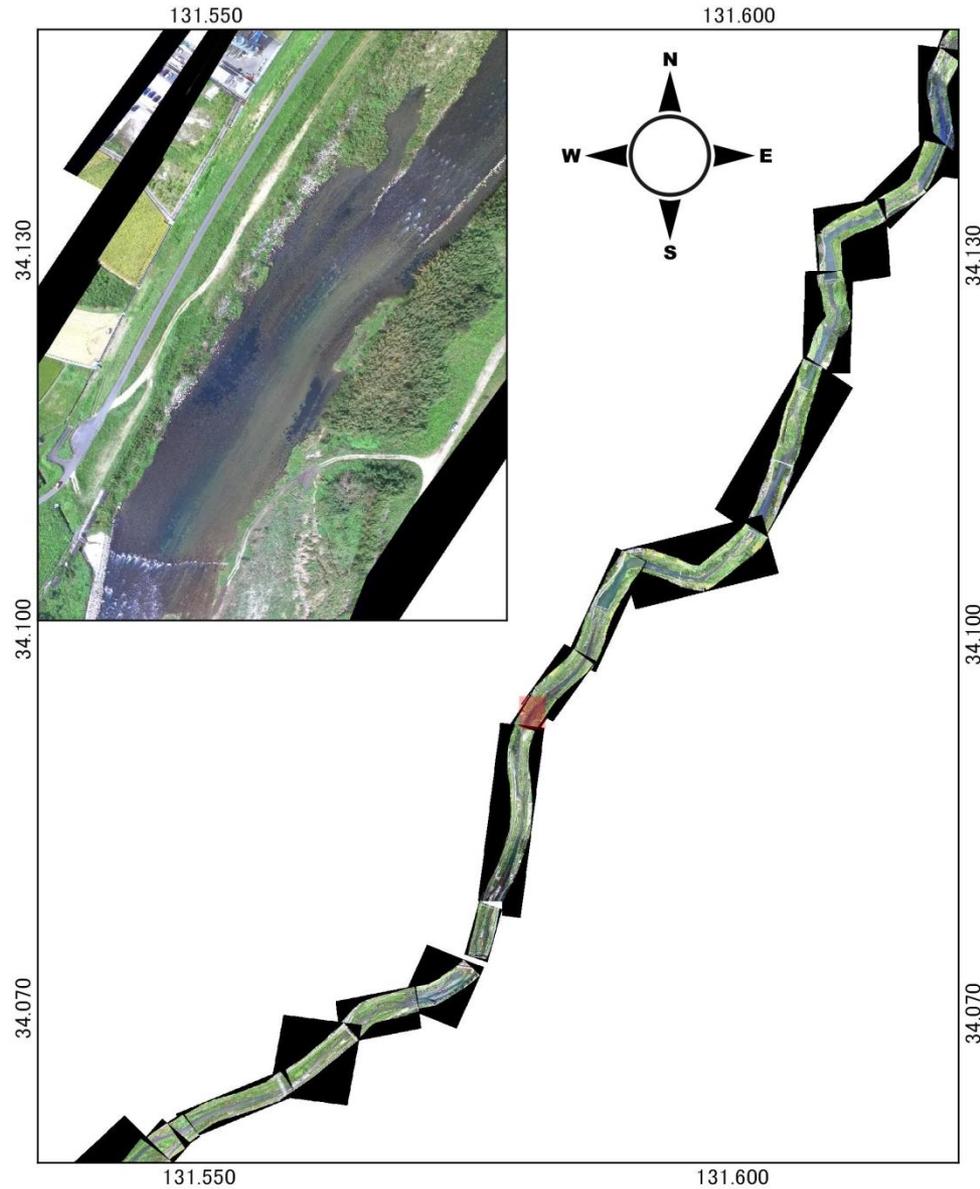
標高 [m]



以降の結果は公開不可

- 水面高分布の推定
- 水面屈折の補正結果
- 陸上・水中のX, Y, Z軸方向の精度検証
- 水面屈折補正係数による精度の違い

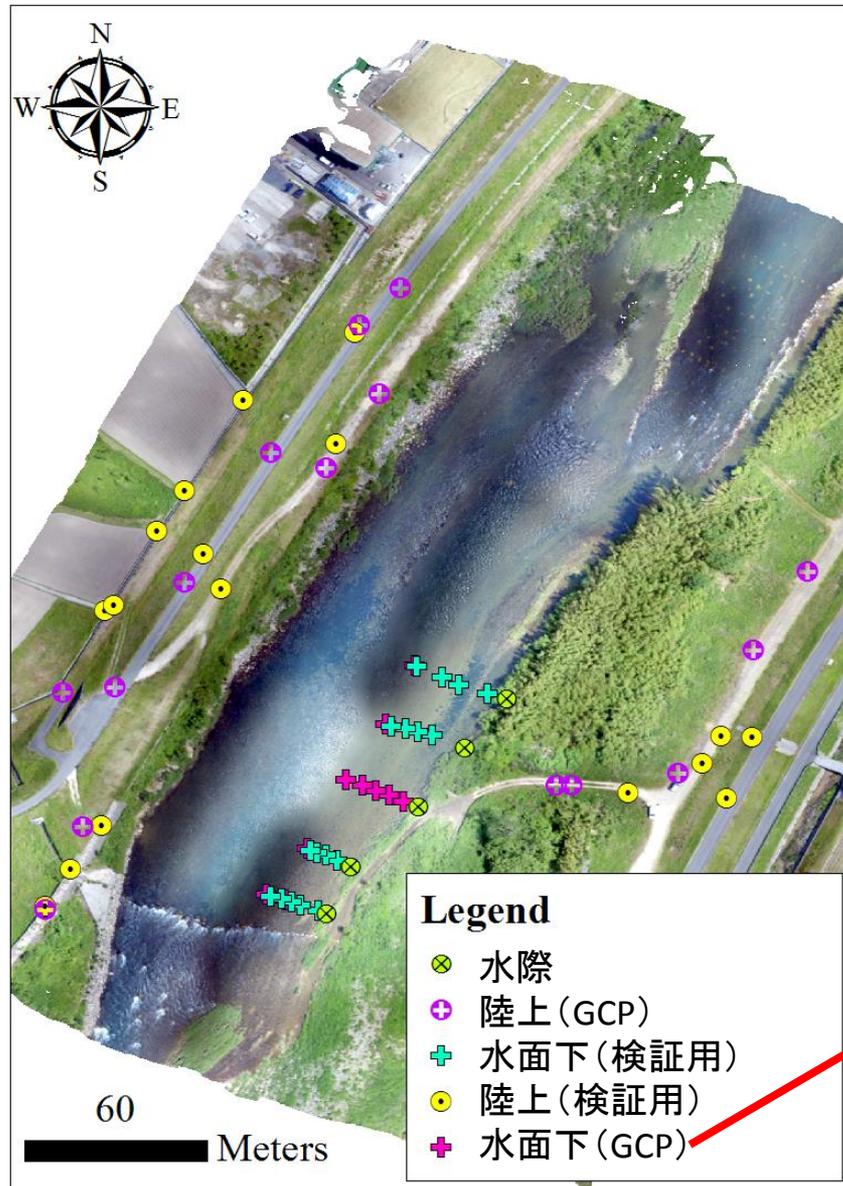
3.2 サイト2（金波堰跡付近）での検証



撮影条件

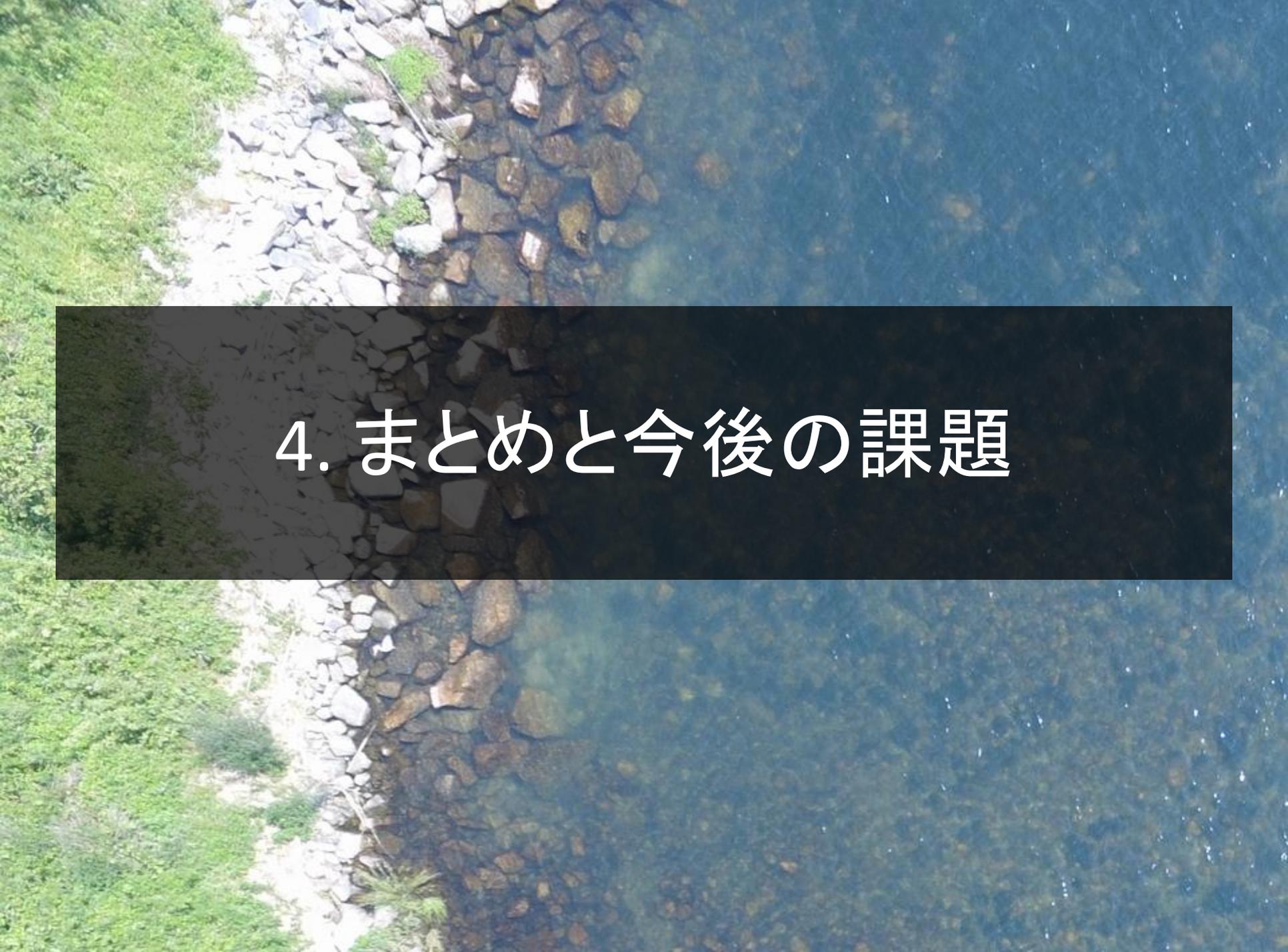
環境条件	内容
日	23.05.2016
時刻	09:31-09:45
太陽高度	40.4°
太陽方位角	90.8°
天気	晴れ
飛行条件	内容
飛行高度	32.9 m
撮影枚数	424
撮影面積	7.81e+04 m ²
進行方向の平均重複率	70.49 %
横方向の平均重複率	68 %

現地RTK-GPS測量地点 (GCPと検証用)



以降の結果は公開不可

- 水面高分布の推定
- 水面屈折の補正結果
- 陸上・水中のX, Y, Z軸方向の精度検証
- 水面屈折補正係数による精度の違い

An aerial photograph of a river. The left bank is covered in lush green grass and some small plants. The riverbank is reinforced with a wall of irregularly shaped stones. The water is clear and blue, reflecting the sky. The overall scene is a natural, well-maintained waterway.

4. まとめと今後の課題

まとめ(一部のみ公開)

UAVを用いた水面下の写真測量の試みについて、
2河川区間での精度検証を例に紹介した。

今後の開発課題（水面下の写真測量）

1. 現地測量に頼らない水面屈折補正係数の最適化方法

- 各点のマッチングに使われた写真の撮影位置の配置から、幾何学的に最適な水面屈折補正係数を計算。

2. 水面下に適したSfM（マッチング・最適化）の設定

- 波による底面像のぶれや光の帯に頑健な設定。
- 例：視点による位置の矛盾に関する許容値を増やす、など。

3. 河川の写真測量の現実的ワークフローの確立

- 例：河川では対空標識を両岸の堤防のみに配置できない
→ 対空標識によるカメラの内部パラメータ(f/d ・歪み特性など)の調整は行わない、など。

UAVを使った他の研究展開

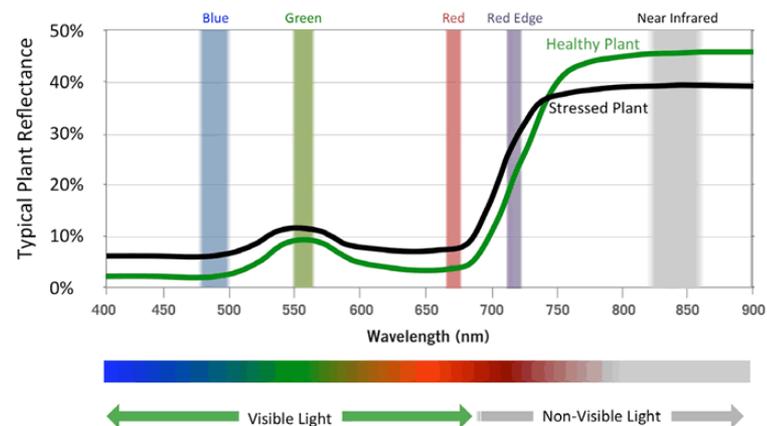
1. 河川・干潟の温熱環境のマッピング

- UAV＋赤外線カメラ
- 放射率と温度の分離が課題



2. 河川における植生分布のマッピング

- UAV＋マルチスペクトルカメラ
- 水深の影響の補正にリモートセンシングの理論的手法を利用



<http://www.skyrobot.co.jp/vuepro.html>

http://www.cybernetech.co.jp/product/flycyber_df_micasense.html