

平成29年度第3回動体計測研究会  
@東京大学生産技術研究所  
2017年9月26日  
(自己紹介省略版)

UAV写真測量  
(SfM-MVSによる3次元点群生成)  
のための  
対空標識の節減方法について

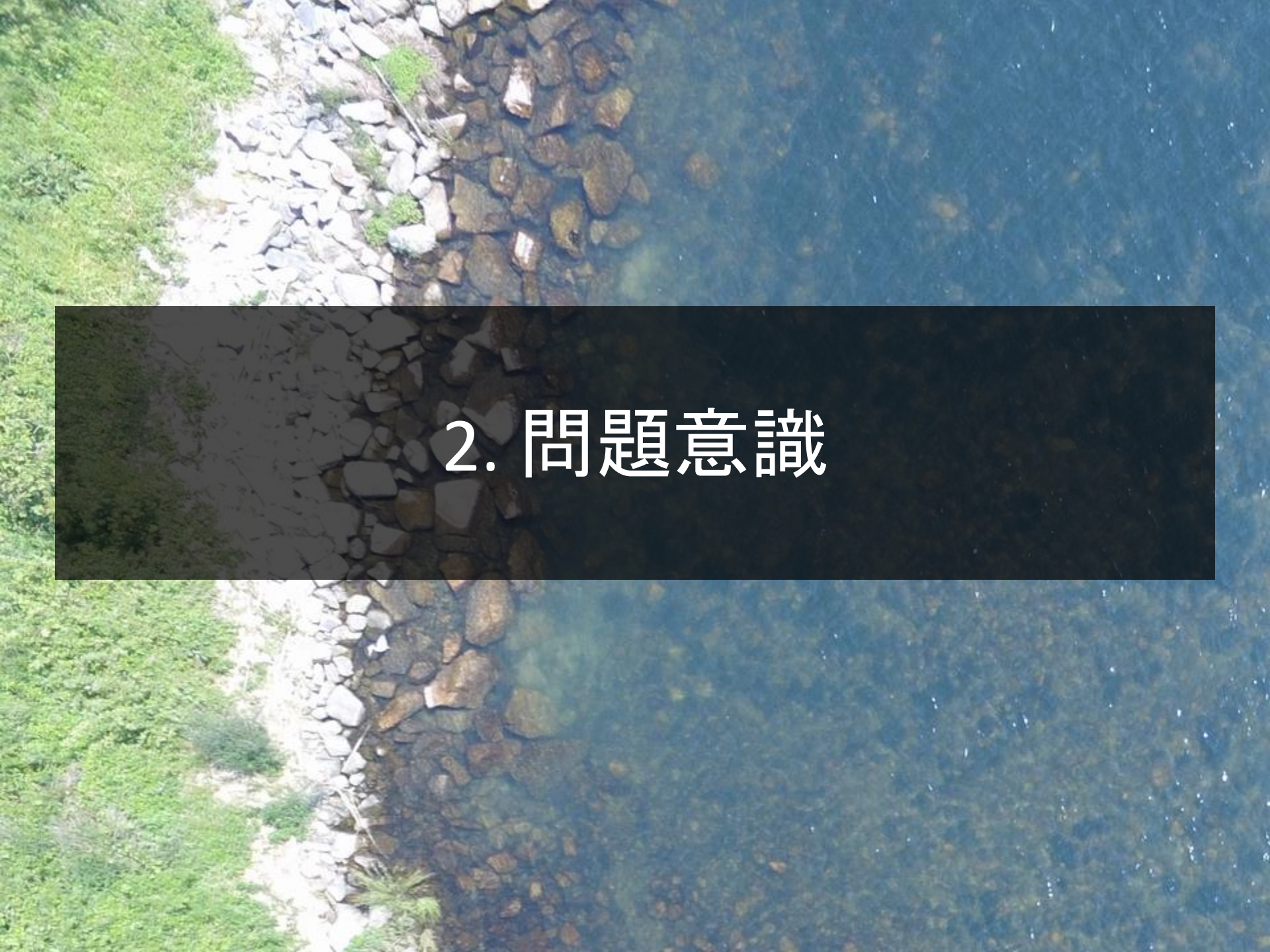
山口大学 助教  
神野 有生

※ 本発表は、空撮 → SfM → セルフキャリブレーション付きバンドル調整 → MVSによる3次元点群生成の流れによるUAV写真測量に関するものです。

# 発表の流れ

- ~~1. 自己紹介~~
2. 問題意識
3. 標定点の節減のイメージ
4. ちょっとした実験例
  1. 実験条件
  2. PhotoScanによる処理手順
  3. 結果
5. 奥の手: VPCV



An aerial photograph of a river. The river flows from the top right towards the bottom left. The left bank is lined with a wall of grey and brown stones. To the left of the stone wall is a lush green area with various plants and trees. The water is clear, showing the rocky riverbed underneath. A dark grey rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text '2. 問題意識' in white.

## 2. 問題意識

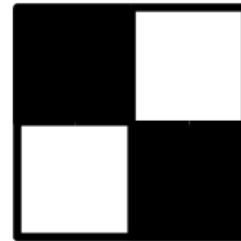
# 対空標識



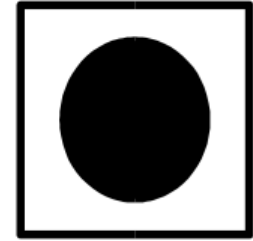
★型



X型



+型

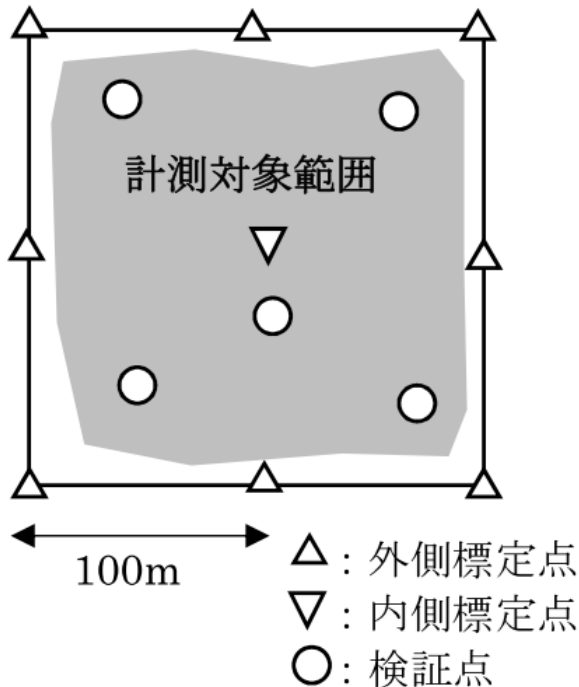


○型

- 標定点・検証点に置く
  - 地上で設置・測量・回収が必要
- **コストに直結**

(UAVの測位精度の向上で将来的にはなくせるだろうが・・・)

# 対空標識の配置のルール（現在）



## （標定点及び検証点の配置）

第53条 標定点は、計測対象範囲の形状、比高が大きく変化するような箇所、撮影コースの設定、地表面の状態等を考慮しつつ、次の各号のとおり配置するものとする。

- 一 標定点は、計測対象範囲を囲むように配置する点（以下「外側標定点」という。）及び計測対象範囲内に配置する点（以下「内側標定点」という。）で構成する。
- 二 外側標定点は、計測対象範囲の外側に配置することを標準とする。
- 三 内側標定点は、計測対象範囲内に均等に配置することを標準とする。
- 四 標定点の配置間隔は、作成する三次元点群の位置精度に応じて、以下の表を標準とする。  
なお、外側標定点は3点以上、内側標定点は1点以上設置するものとする。

| 位置精度     | 隣接する外側標定点間の距離 | 任意の内側標定点とその点を囲む各標定点との距離 |
|----------|---------------|-------------------------|
| 0.05m 以内 | 100m 以内       | 200m 以内                 |
| 0.10m 以内 | 100m 以内       | 400m 以内                 |
| 0.20m 以内 | 200m 以内       | 600m 以内                 |

五 計測対象範囲内の最も標高の高い地点及び最も標高の低い地点には、標定点を設置することを標準とする。なお、これらの標定点は、外側標定点又は内側標定点の一部とすることができる。

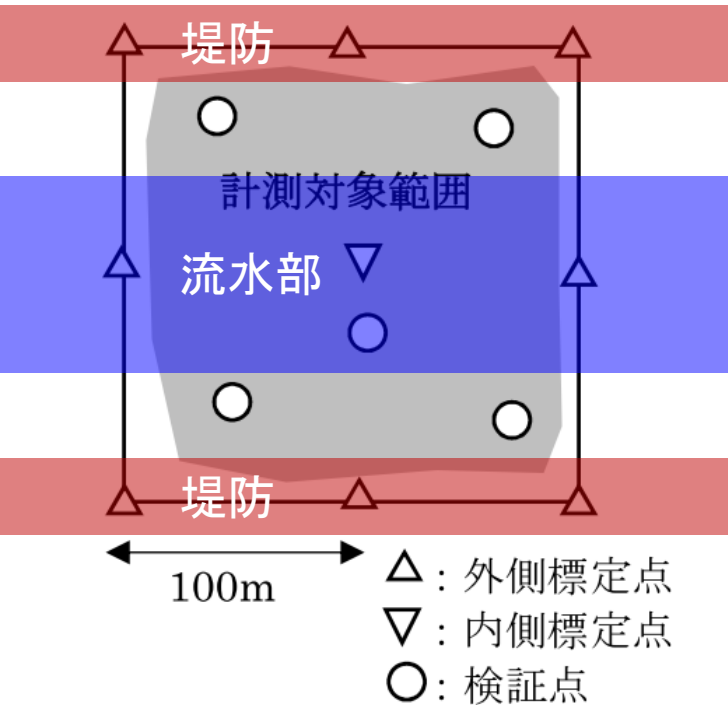
2 検証点は、標定点とは別に、次の各号のとおり配置するものとする。

- 一 検証点は、標定点からできるだけ離れた場所に、計測対象範囲内に均等に配置することを標準とする。
- 二 設置する検証点の数は、設置する標定点の総数の半数以上（端数は繰り上げ。）を標準とする。
- 三 検証点は、平坦な場所又は傾斜が一様な場所に配置することを標準とする。

- 多数の対空標識が必要
- 内部はアクセスが悪いことも



# 河道の場合



## 外側標定点

- ・ 計測対象範囲を囲むように配置
- ・ 隣り合う外側標定点の距離は 100m 以内

## 内側標定点

- ・ 内側標定点は最低 1 点とする。
- ・ 内側標定点とそれを囲む標定点との距離は 200m 以内

## 検証点

- ・ 標定点の総数の半数以上（端数は繰り上げ）
- ・ 計測対象範囲内に均等に配置

図 3\_1 標定点の配置

- 堤防には置きやすいが、冠水部には置きにくい。
- 太くない限り、河道内の標定点は省略できないか？

# 標定点の必要数は用途次第では？

## 1. ジオリファレンス

- SfMの座標系 → 世界座標系への変換(ピン止め?)
- 原点の移動、軸の回転、スケールの7自由度
- 最少3点の標定点で求まる

## 2. (バンドル調整での)カメラの外部・内部パラメータの調整

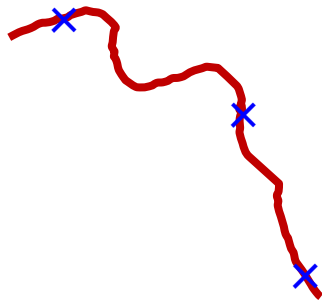
- 自動検出されるタイポイント(疎な点群)の補助
- 点群の並び(3次元形状)自体を変える → 系統誤差の抑制
- 自由度大 → 多数(見積もり困難)の標定点を要する場合がある

- 国土地理院のマニュアル(案)では、用途は規定されていない。
- 土木学会系の発表でも、用途が報告されないことが多い。
- PhotoScanのデフォルトでは2の用途(1を兼ねる)で使われる

# ジオリファレンス

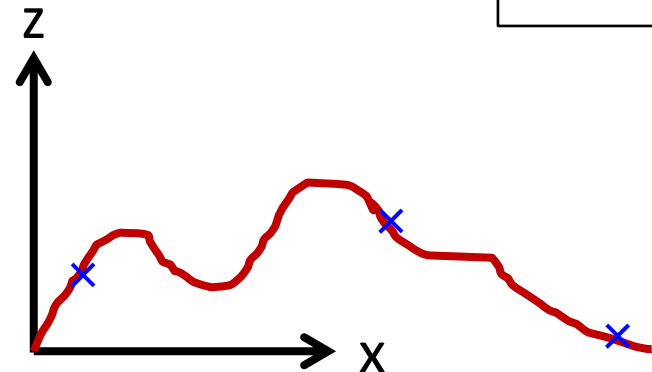
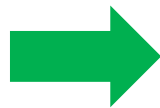
## 1. ジオリファレンス

- SfMの座標系 → 世界座標系への変換
- 原点の移動、軸の回転、スケールの7自由度
- 最少3点の標定点で求まる



SfMで得られた点群

座標変換



× 標定点

世界座標系での点群



# カメラの外部・内部パラメータの調整

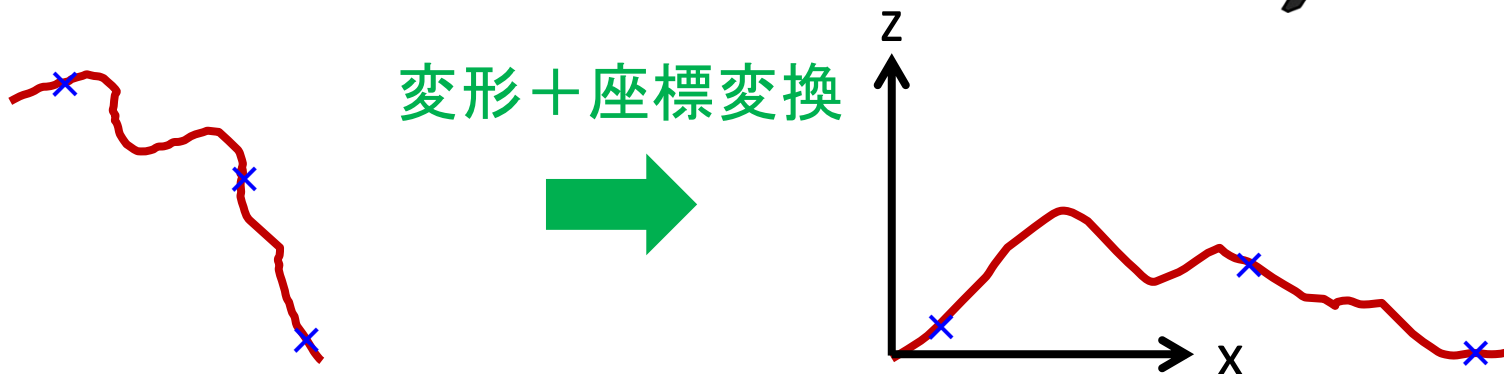
## 2. (バンドル調整での)カメラの外部・内部パラメータの調整

- 自動検出されるタイポイント(疎な点群)の補助
- 点群の並び(3次元形状)自体を変える → 系統誤差の抑制
- 自由度大: 写真数  $\times$  6 + 内部パラメータ数

→ 自動タイポイントの数・精度と重みによっては

多数(見積もり困難)の標定点を要する!

精度が標定点との距離に強く依存する!



SfMで得られた点群

世界座標系での点群

# ジオリファレンスだけに使う **利点**・**欠点**

標定点をジオリファレンスだけに使うのなら、

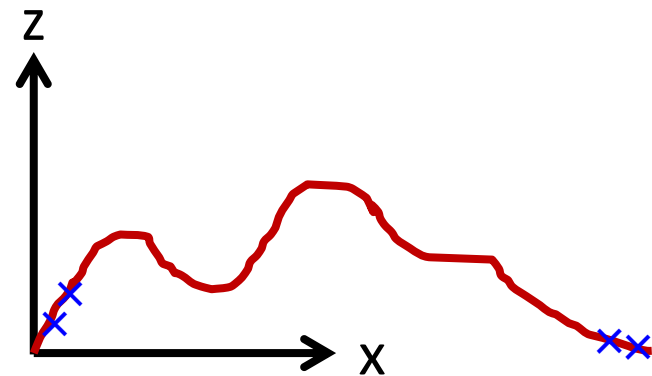
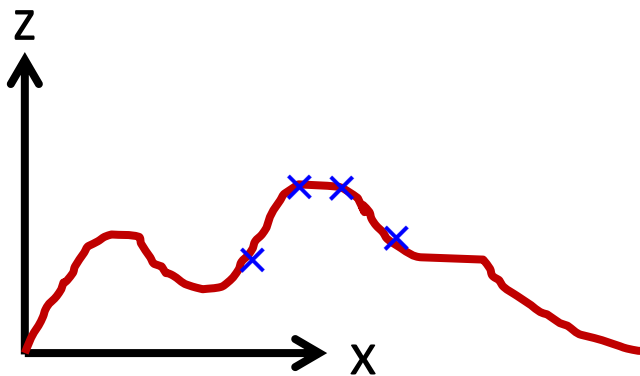
- **最少3点で済む**

- 精度に不安があれば、1箇所にも複数置けばよい

- **中心部、最高／低地点に置く必要がない**

- 中心部よりむしろ端でピン止めした方が安定

- **大きな領域では系統誤差が蓄積** (繋げば繋ぐほど少しずつ…)

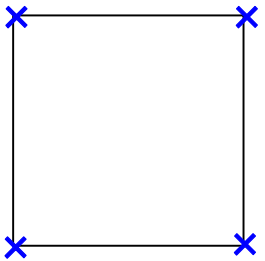
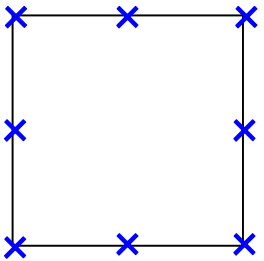
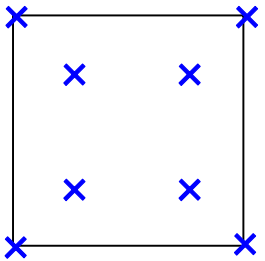
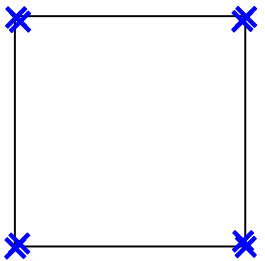


ジオリファレンスだけなら

# 標定点は端に置くのがベスト (直感通り)

- 100 × 100 mの領域のジオリファレンス誤差のシミュレーション
- 標定点に関する誤差のS.D.: x, y方向0.01 m、z方向0.03 m

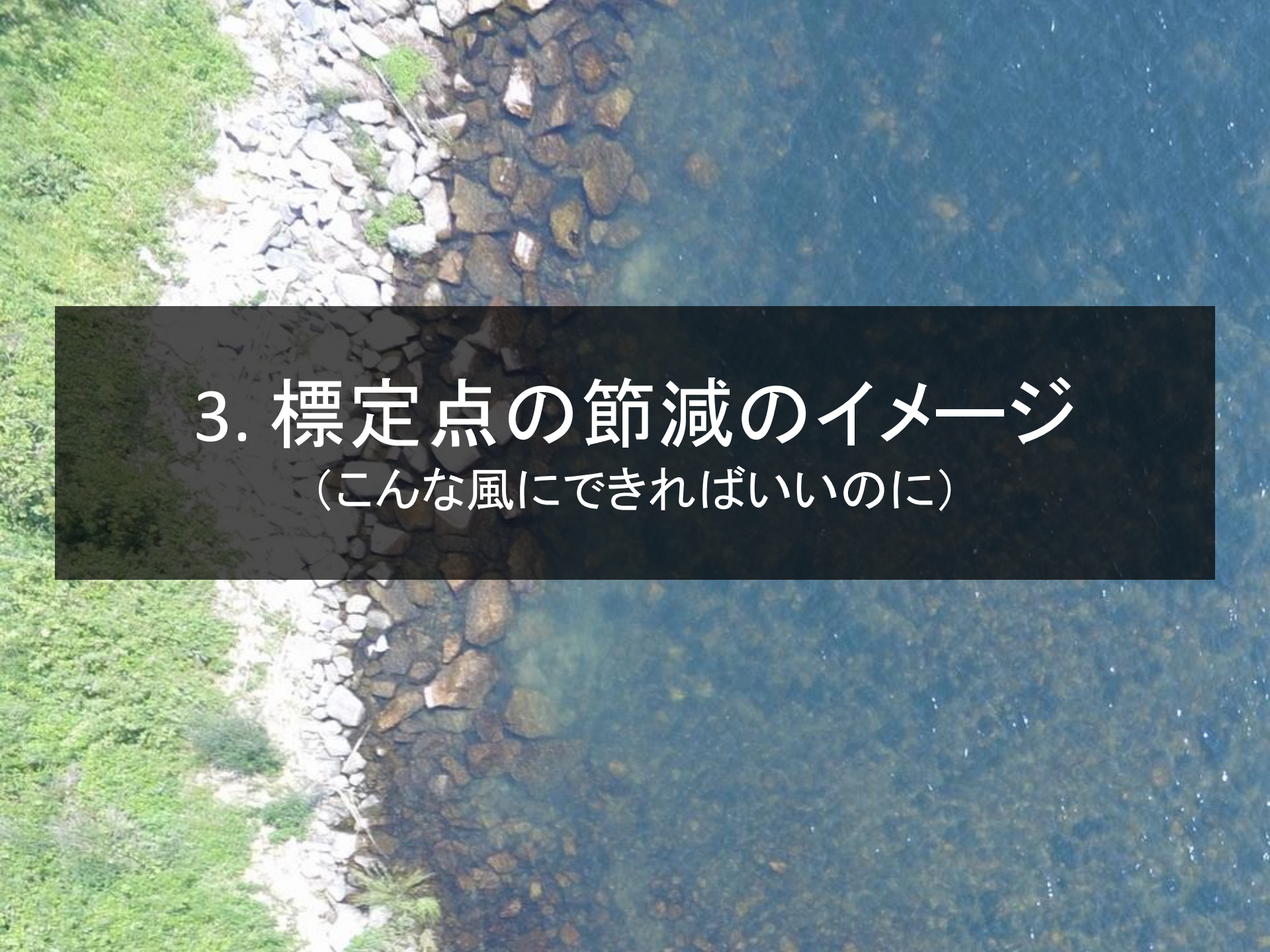
表. 100回のシミュレーションで得られたRMS誤差

|                   |   |  |  |   |
|-------------------|---|--|--|---|
| 標定点の配置            | <br>4隅のみ | <br>4隅 +<br>4辺中点 | <br>4隅 +<br>35m内側 | <br>4隅 +<br>0.7m内側 |
| スケールの<br>推定誤差 [%] | 0.00756   | 0.00616  | 0.00578  | 0.00433   |
| 原点の<br>推定誤差 [m]   | 0.03240   | 0.02387  | 0.02527  | 0.02212   |

# 問題意識のまとめ

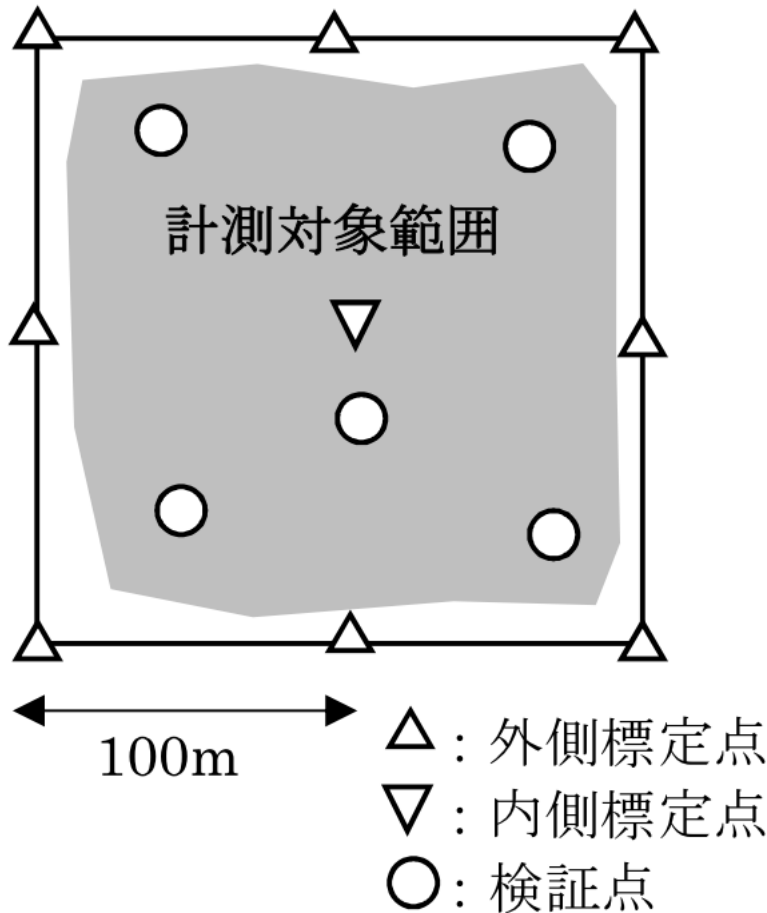
1. 標定点の必要数に関する実験結果報告／規定では、その用途も条件の1つとして記述すべきではないか。
  - 用途に触れず数だけが独り歩きすると、混乱を招く恐れ
2. 小さい or 細長い領域では、工夫によって、精度を維持したまま標定点を節減できないか。→ 手順は第4章でデモ
  - A) 標定点をジオリファレンスだけに使う
  - B) 手動タイポイント(MTP)によるSfMの設定の最適化
  - C) 標定点を使ったジオリファレンスの交差検証 (CPCV)
3. 精度不十分なら、標定点と検証点を、検証点1つを残してバンドル調整に動員し、検証点で交差検証するのはどうか (VPCV) → 第5章で説明



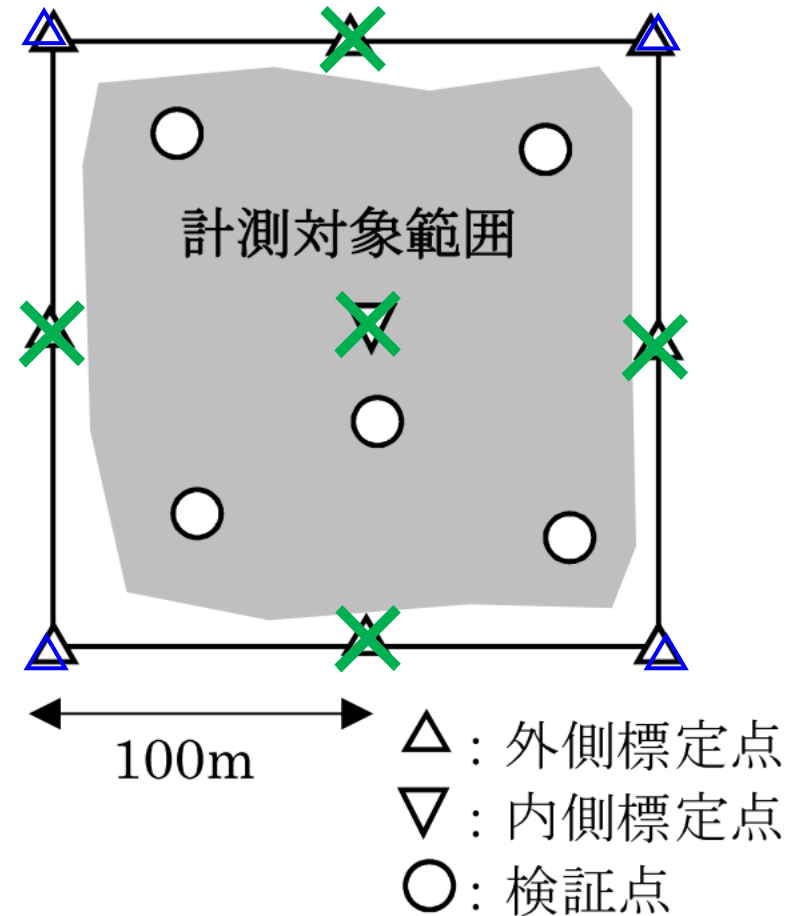
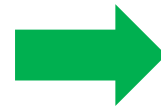
An aerial photograph of a river. The left bank is covered in lush green grass and some small plants. The riverbank is reinforced with a wall of irregularly shaped stones. The water is clear and blue, reflecting the sky. The overall scene is a natural, well-maintained waterway.

### 3. 標定点の節減のイメージ (こんな風にできればいいのに)

# 小さい領域（200 m四方）の場合



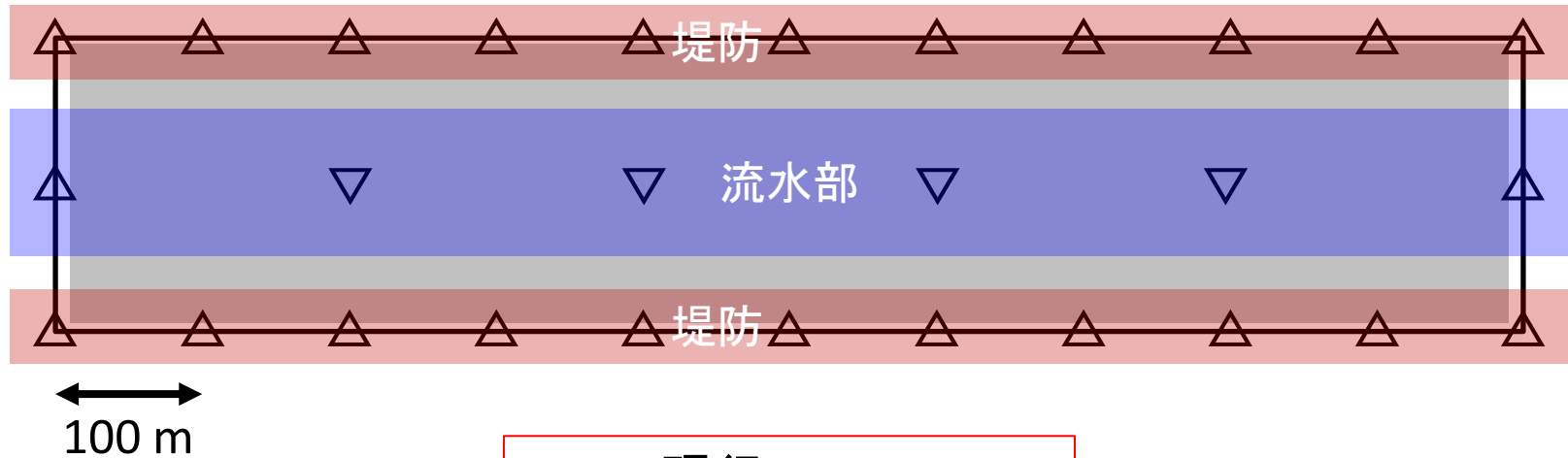
**現行ルール**  
 △ 外側標定点：8 地点  
 ▽ 内側標定点：1 地点



**節減案**  
 △ 外側標定点：4 地点（各数個）  
 ▽ 内側標定点：0 地点

# 細長い領域（河川；幅200 m）の場合

## 現行ルールによる標定点の最少配置



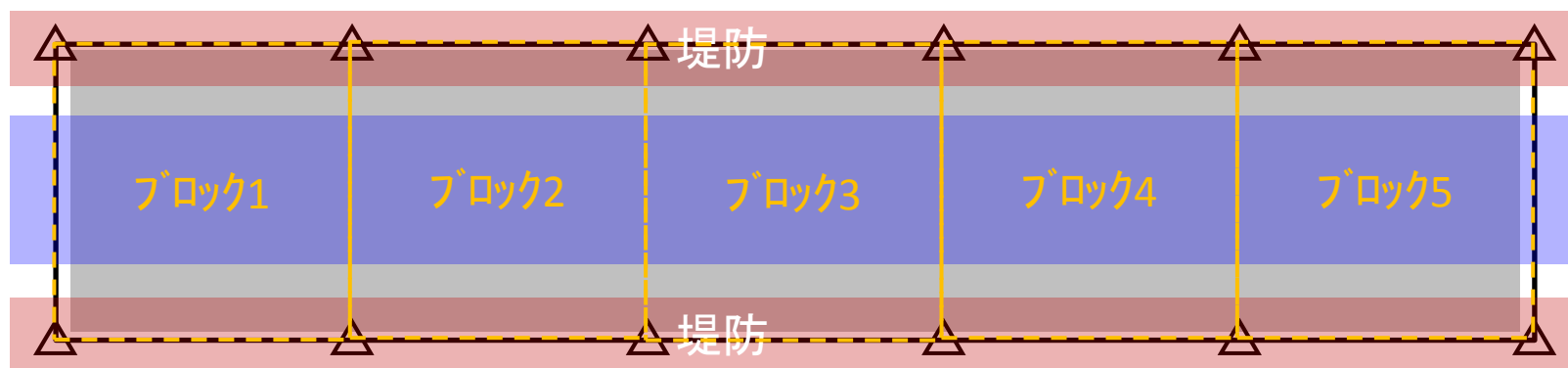
### 現行ルール

- △ 外側標定点：24 地点
- ▽ 内側標定点：4 地点

- 系統誤差を抑制するために、多数の標定点が必要。
- 特に河道内の標定点の設置・測量・回収が大変！

# 細長い領域（河川；幅200 m）の場合

## 節減案



100 m

### 節減案

△ 外側標定点：12 地点  
▽ 内側標定点：0 地点

- 小領域(ブロック)に分割して解析し、成果物を後で結合  
→ 4隅の標定点をジオファレンスのみに使用
- 標定点は堤防上に200 m間隔  
(距離標・定期横断測量と同間隔で便利！)



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 layer of grey and brown stones. The water is clear and blue, with some rocks visible beneath the surface.

## 4. ちょっとした実験例

### 4-1. 実験条件



# サイト：山口大学工学部グランド

(残念ながら200 m四方もなかった)

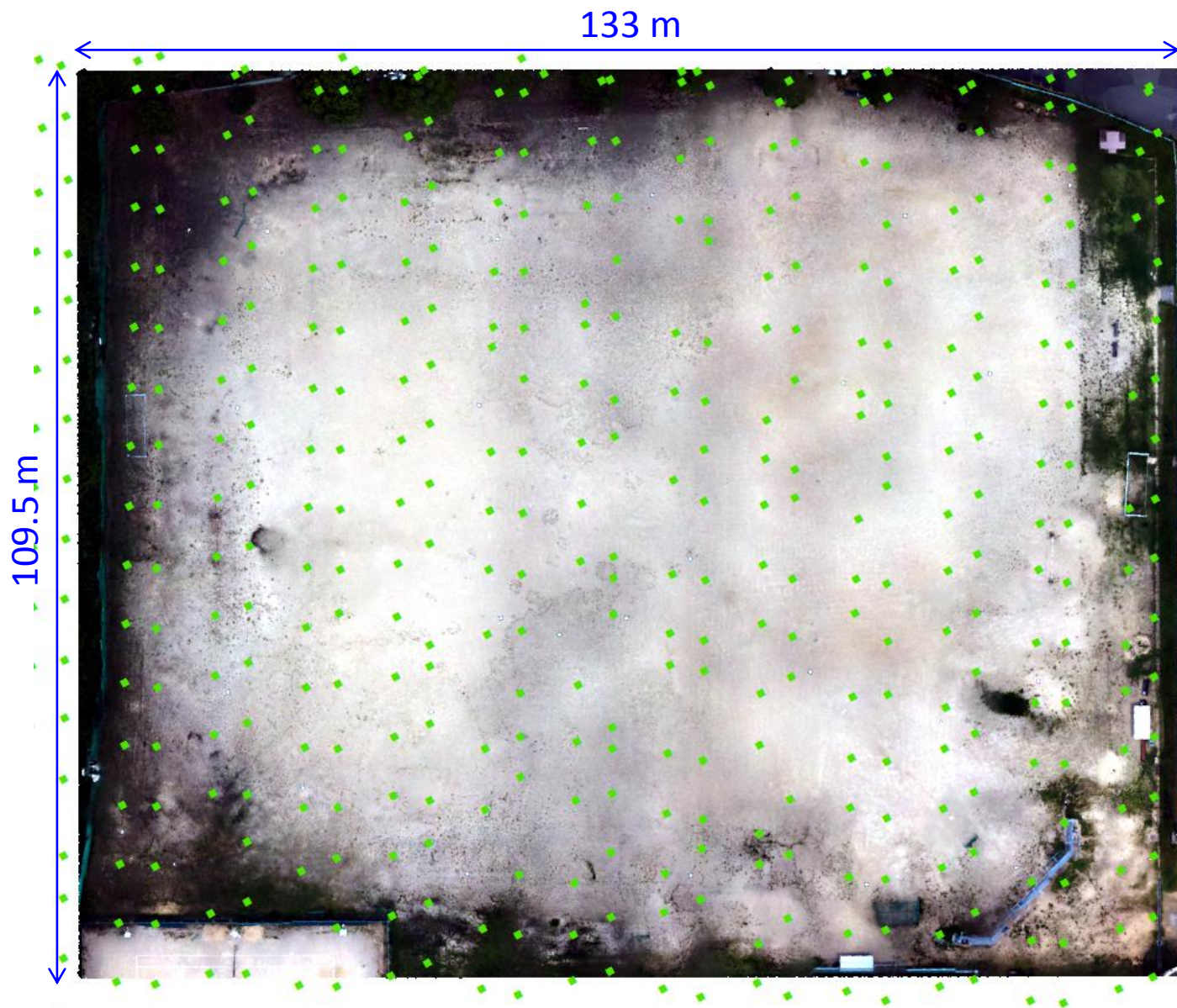
133 m



109.5 m

← オルソ画像

# 撮影条件



## ・推定撮影位置

対地高度37 m

Phantom 4 Pro.  
画角84°

フォーカス∞固定

688枚  
(周辺含む)

オーバーラップ率:  
平均約86%<sup>19</sup>



# 画像の例





An aerial photograph of a river. The river is on the right side, with clear blue water. The left bank is lined with a wall of grey and brown stones. To the left of the stone wall is a lush green area with various plants and grasses.

## 4. ちょっとした実験例

### 4-2. PhotoScanでの処理手順

# 処理の要点 1.

最初のSfM処理（写真のアライメント）の後、手動タイポイントを追加

The screenshot shows the Agisoft PhotoScan Professional interface. The main window displays a 3D model of a building in a perspective view, with five manual tie points (MTP1 to MTP5) marked on the roof. The left sidebar shows the workspace hierarchy: Workspace (1 chunks, 688 cameras) > Chunk 1 (688 cameras, 5 markers, 1,447,254 points) [R] > Cameras (688/688 aligned) > Markers (5) > Tie Points (1,447,254 points). The Reference panel shows a table of markers with columns for Markers, Projections, Error (pix), and Longitude. The error for MTP1 is circled in green. A text box indicates that world coordinates are not available. A green text box at the bottom left states that the RMS of the re-projection error for manual tie points is 0.733. A large white text box with a downward arrow says '本当はもっと多い方がいいが' (It would be better to have more, but...). The bottom of the main window shows '1,447,254 points' and a 3D coordinate system.

| Markers                       | Projections | Error (pix) | Longitude |
|-------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| <input type="checkbox"/> MTP1 | 40          | 0.780       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP2 | 43          | 0.834       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP3 | 38          | 0.879       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP4 | 41          | 0.567       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP5 | 39          | 0.538       |           |

世界座標  
はない

0.733

手動タイポイントの  
再投影誤差のRMS

本当はもっと  
多い方がいいが  
↓

1,447,254 points

# 処理の要点 2.

手動タイポイントがバンドル調整に  
使われない（フェアなテストデータとなる）よう設定

Reference Settings

Coordinate System  
WGS 84 (EPSG:4326)

Rotation angles: Yaw, Pitch, Roll

Measurement accuracy

Camera accuracy (m): 999999

Camera accuracy (deg): 2

Marker accuracy (m): 0.005

Scale bar accuracy (m): 0.001

Image coordinates accuracy

Marker accuracy (pix): 5000

Tie point accuracy (pix): 0.890419

Miscellaneous

Ground altitude (m):

OK Cancel

手動タイポイントの画素座標に関する  
RMS誤差の期待値。大きくして  
バンドル調整における重みを実質的に0に。



# 処理の要点 3.

手動タイポイントのRMS再投影誤差が最小となる設定を探す

Workspace

- Workspace (1 chunks, 688 cameras)
- ▼ Chunk 1 (688 cameras, 5 markers, 1,447,254 points) [R]
  - > Cameras (688/688 aligned)
  - > Markers (5)
    - ☐☐ Tie Points (1,447,254 points)

Reference

| Markers                       | Projections | Error (pix) | Longitude |
|-------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| <input type="checkbox"/> MTP1 | 40          | 0.820       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP2 | 43          | 0.692       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP3 | 38          | 0.900       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP4 | 41          | 0.612       |           |
| <input type="checkbox"/> MTP5 | 39          | 0.550       |           |

Total Error

Control points 0.724

Check points

Optimize Camera Alignment

General

- Fit f
- Fit cx, cy
- Fit k1
- Fit k2
- Fit k3
- Fit k4
- Fit rolling shutter
- Fit b1
- Fit b2
- Fit p1
- Fit p2
- Fit p3
- Fit p4

今回は、考慮する内部パラメータの組み合わせを色々変えてバンドル調整を繰り返した。

1,447,254 points

# 処理の要点 3.

手動タイポイントのRMS再投影誤差が最小となる設定を探す

| 内部パラメータ                               | 再投影誤差のRMS [pix]                       |                                     |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                                       | 自動タイポイント<br>(バンドル調整に使用;<br>トレーニングデータ) | 手動タイポイント<br>(バンドル調整に不使用;<br>テストデータ) |
| f                                     | 1.023                                 | 0.944                               |
| f k1                                  | 1.022                                 | 0.934                               |
| f k1 k2                               | 1.022                                 | 0.931                               |
| f k1 k2 cx cy                         | 1.014                                 | 0.930                               |
| f k1 k2 cx cy p1                      | 0.926                                 | 0.776                               |
| f k1 k2 cx cy p1 p2                   | 0.903                                 | 0.724                               |
| f k1 k2 cx cy p1 p2 k3                | 0.890                                 | 0.734                               |
| f cx cy                               | 1.016                                 | 0.944                               |
| f cx cy k1                            | 1.014                                 | 0.933                               |
| f cx cy k1 k2                         | 1.014                                 | 0.930                               |
| f cx cy k1 k2 p1                      | 0.926                                 | 0.776                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2                   | 0.903                                 | 0.724                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2 k3                | 0.890                                 | 0.734                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2 k3 b1             | 0.883                                 | 0.718                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2 k3 b1 b2          | 0.883                                 | 0.719                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2 k3 b1 b2 k4       | 0.874                                 | 0.679                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2 k3 b1 b2 k4 p3    | 0.874                                 | 0.679                               |
| f cx cy k1 k2 p1 p2 k3 b1 b2 k4 p3 p4 | 0.873                                 | 0.678                               |

今回はたまたま  
最も複雑なモデル  
が最適だった  
(自動タイポイントの  
数・品質が十分)

- 自動タイポイントの再投影誤差は、モデルが複雑になるほど減って、統計的に当たり前
- 手動タイポイントの再投影誤差は、モデルの複雑さが、自動タイポイントの数・品質を鑑みて統計的に最適なとき最小となる → 標定点・検証点に頼らずに適切な設定を突き止める！



# 処理の要点 4.

最適な設定で「公式」バンドル調整（手動タイポイントも使用可）

The screenshot shows the 'Camera Calibration' window. On the left, a list of cameras includes 'FC6310 (8.8 mm)' with '688 images, 5472x3078 pix'. The main area shows the following settings:

- Camera type: Frame
- Pixel size (mm): 0.00252687 x 0.00252687
- Focal length (mm): 8.8

Below these are three tabs: 'Initial', 'Adjusted', and 'GPS/INS Offset'. The 'Adjusted' tab is selected, showing a grid of input fields for various parameters:

|     |            |     |              |
|-----|------------|-----|--------------|
| f:  | 3692.06    | b1: | -6.63602     |
| cx: | 16.1778    | b2: | -0.305174    |
| cy: | 0.101485   | p1: | 0.00120155   |
| k1: | 0.0175832  | p2: | -0.000348927 |
| k2: | -0.0959597 | p3: | 0.642746     |
| k3: | 0.177358   | p4: | -0.718454    |
| k4: | -0.110222  |     |              |

最適な設定（今回は内部パラメータの組み合わせ）を使った  
バンドル調整で求められた内部パラメータ

# 処理の要点 5.

## 標定点を追加

The screenshot shows the Agisoft PhotoScan Professional interface. The main window displays a 3D model of a building in a perspective view. Four ground control points (GCP1, GCP2, GCP3, GCP4) are marked on the model. The left sidebar shows the workspace hierarchy, including 'Chunk 1 (688 cameras, 4 markers, 1,447,254 points)'. The bottom-left panel shows a table of marker coordinates and error values. A green box highlights the table, and green text is overlaid on the image.

| Markers                                  | Longitude  | Latitude  | Altitude (m) | Error (m) |
|--|------------|-----------|--------------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP1 | 131.271276 | 33.958237 | 64.103000    | 0.018686  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP2 | 131.272331 | 33.957669 | 63.899000    | 0.017542  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP3 | 131.271946 | 33.957120 | 63.914000    | 0.017898  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP4 | 131.270843 | 33.957650 | 64.063000    | 0.019469  |

Total Error  
Control points 0.018413  
Check points

GNSS測量した  
世界座標  
を入力

1,447,254 points

# 処理の要点 6.

標定点（のみ）がジオリファレンスに使われるよう設定

The screenshot shows the 'Reference Settings' dialog box with the following fields and values:

- Coordinate System: WGS 84 (EPSG:4326)
- Rotation angles: (empty)
- Measurement accuracy:
  - Camera accuracy (m): 999999
  - Camera accuracy (deg): 2
  - Marker accuracy (m): 0.005
  - Scale bar accuracy (m): 0.001
- Image coordinates accuracy:
  - Marker accuracy (pix): 0.1
  - Tie point accuracy (pix): 0.890419
- Miscellaneous:
  - Ground altitude (m): (empty)

Buttons: OK, Cancel

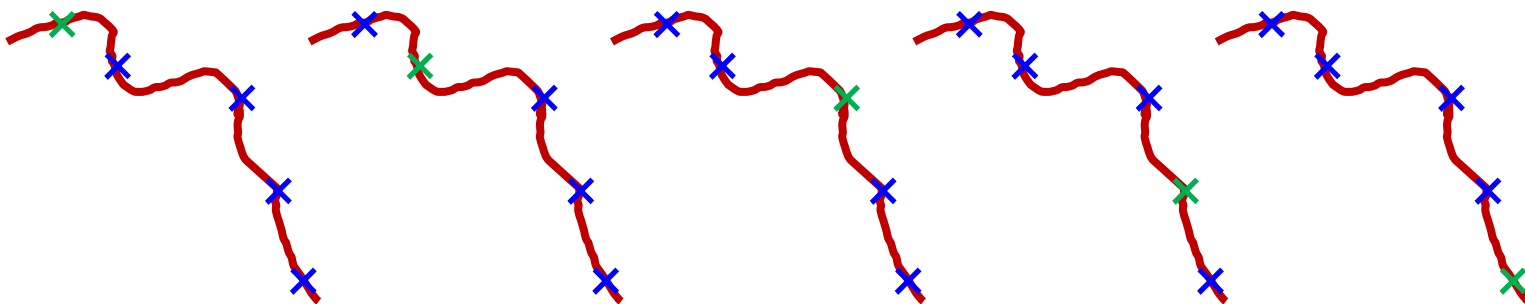
EXIFから得たカメラの世界座標に関するRMS誤差の期待値。標定点数 < 画像数 のためデフォルトの10 mではジオリファレンスに効いてしまう。非常に大きく設定するか、カメラのチェックを外す。

画素座標のRMS誤差の期待値。大きくしていた値を通常レベルに戻す

# 交差検証：標定点だけで精度検証！

## Check Point Cross Validation (便宜的に命名)

- 1点を検証点、残りの点を標定点とした試行を反復  
(4隅に各複数個置いた場合は1隅を検証点に)
- n点あればn個の誤差を得る → そのRMSを評価
- n点を標定に使ったときの誤差よりやや保守的な評価
- 標定点の役割がジオリファレンスだけなら1試行0.X秒で可能



× 標定点

× (一時的な)検証点



# 処理の要点 7.

## 「標定点」のみを使ったSfMの精度の交差検証

The screenshot shows the Agisoft PhotoScan Professional interface. The main window displays a 3D perspective view of a building model with four ground control points (GCP1, GCP2, GCP3, GCP4) marked. The left sidebar shows the workspace hierarchy: Workspace (1 chunks, 688 cameras) > Chunk 1 (688 cameras, 4 markers, 1,447,254 points) [R] > Cameras (688/688 aligned) > Markers (4) > Tie Points (1,447,254 points). Below the workspace is the Reference panel, which contains a table of markers and their coordinates.

| Markers                                  | Longitude  | Latitude  | Altitude (m) | Error (m) |
|--|------------|-----------|--------------|-----------|
| <input type="checkbox"/> GCP1            | 131.271276 | 33.958237 | 64.103000    | 0.072937  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP2 | 131.272331 | 33.957669 | 63.899000    | 0.006021  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP3 | 131.271946 | 33.957120 | 63.914000    | 0.007043  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP4 | 131.270843 | 33.957650 | 64.063000    | 0.003610  |

Total Error  
Control points: 0.005741  
Check points: 0.072937

1. 外す →

2. 押してジオリファレンスを更新

3. メモする  
GCP1で検証したSfM全体の誤差:  
GCP1の実測座標とTriangulation  
による推定座標の距離 [m]

# 処理の要点 7.

「標定点」のみを使ったSfMの精度の交差検証

The screenshot shows the Agisoft PhotoScan Professional interface. The main window displays a 3D model of a building in a perspective view. Four Ground Control Points (GCP1, GCP2, GCP3, GCP4) are marked on the model. The left sidebar shows the workspace hierarchy, including 'Chunk 1 (688 cameras, 4 markers, 1,447,254 points)'. The 'Reference' panel is open, showing a table of markers and their associated errors. A green arrow points from the 'Check points' error value in the table to a green box containing text.

2. 押してジオリファレンスを更新

1. 外す →

| Markers                                  | Longitude  | Latitude  | Altitude (m) | Error (m) |
|--|------------|-----------|--------------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP1 | 131.271276 | 33.958237 | 64.103000    | 0.004328  |
| <input type="checkbox"/> GCP2            | 131.272331 | 33.957669 | 63.899000    | 0.067968  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP3 | 131.271946 | 33.957120 | 63.914000    | 0.002813  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP4 | 131.270843 | 33.957650 | 64.063000    | 0.005094  |

Total Error  
Control points 0.004187  
Check points 0.067968

3. メモする  
GCP2で検証したSfM全体の誤差：  
GCP2の実測座標とTriangulation  
による推定座標の距離 [m]

1,447,254 points

# 処理の要点 7.

「標定点」のみを使ったSfMの精度の交差検証

The screenshot shows the Agisoft PhotoScan Professional interface. The main window displays a 3D model of a building in a perspective view. Four Ground Control Points (GCP1, GCP2, GCP3, GCP4) are marked on the model. The left sidebar shows the workspace hierarchy, including 'Chunk 1 (688 cameras, 4 markers, 1,447,254 points)'. Below the workspace, the 'Reference' panel contains a table of marker data.

| Markers                                  | Longitude  | Latitude  | Altitude (m) | Error (m) |
|--|------------|-----------|--------------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP1 | 131.271276 | 33.958237 | 64.103000    | 0.001943  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP2 | 131.272331 | 33.957669 | 63.899000    | 0.001080  |
| <input type="checkbox"/> GCP3            | 131.271946 | 33.957120 | 63.914000    | 0.069485  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP4 | 131.270843 | 33.957650 | 64.063000    | 0.001640  |

Total Error  
Control points: 0.001595  
Check points: 0.069485

The value 0.069485 is circled in green, and a green arrow points from it to a text box.

2. 押してジオリファレンスを更新

1. 外す →

3. メモする

GCP3で検証したSfM全体の誤差:  
GCP3の実測座標とTriangulation  
による推定座標の距離 [m]



# 処理の要点 7.

「標定点」のみを使ったSfMの精度の交差検証

The screenshot shows the Agisoft PhotoScan Professional interface. The main window displays a 3D model of a building in a perspective view. Four ground control points (GCP1, GCP2, GCP3, GCP4) are marked on the model. The left sidebar shows the workspace hierarchy, including 'Chunk 1 (688 cameras, 4 markers, 1,447,254 points)'. The bottom-left panel shows a table of marker data with columns for Longitude, Latitude, Altitude (m), and Error (m). The error for GCP4 is highlighted with a green circle and an arrow pointing to a text box.

| Markers                                  | Longitude  | Latitude  | Altitude (m) | Error (m) |
|--|------------|-----------|--------------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP1 | 131.271276 | 33.958237 | 64.103000    | 0.002722  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP2 | 131.272331 | 33.957669 | 63.899000    | 0.005345  |
| <input checked="" type="checkbox"/> GCP3 | 131.271946 | 33.957120 | 63.914000    | 0.004482  |
| <input type="checkbox"/> GCP4            | 131.270843 | 33.957650 | 64.063000    | 0.074545  |

Total Error  
Control points: 0.004323  
Check points: 0.074545

2. 押してジオリファレンスを更新

1. 外す →

3. メモする

GCP4で検証したSfM全体の誤差:  
GCP4の実測座標とTriangulation  
による推定座標の距離 [m]



# 処理の要点 7.

## 「標定点」のみを使ったSfMの精度の交差検証

CV.4GCPs.xlsx - Microsoft Excel

ファイル ホーム 挿入 ページレイアウト 数式 データ 校閲 表示 アドイン Team

C8  $=\text{SQRT}(\text{SUMSQ}(C3:C6)/\text{COUNT}(C3:C6))$

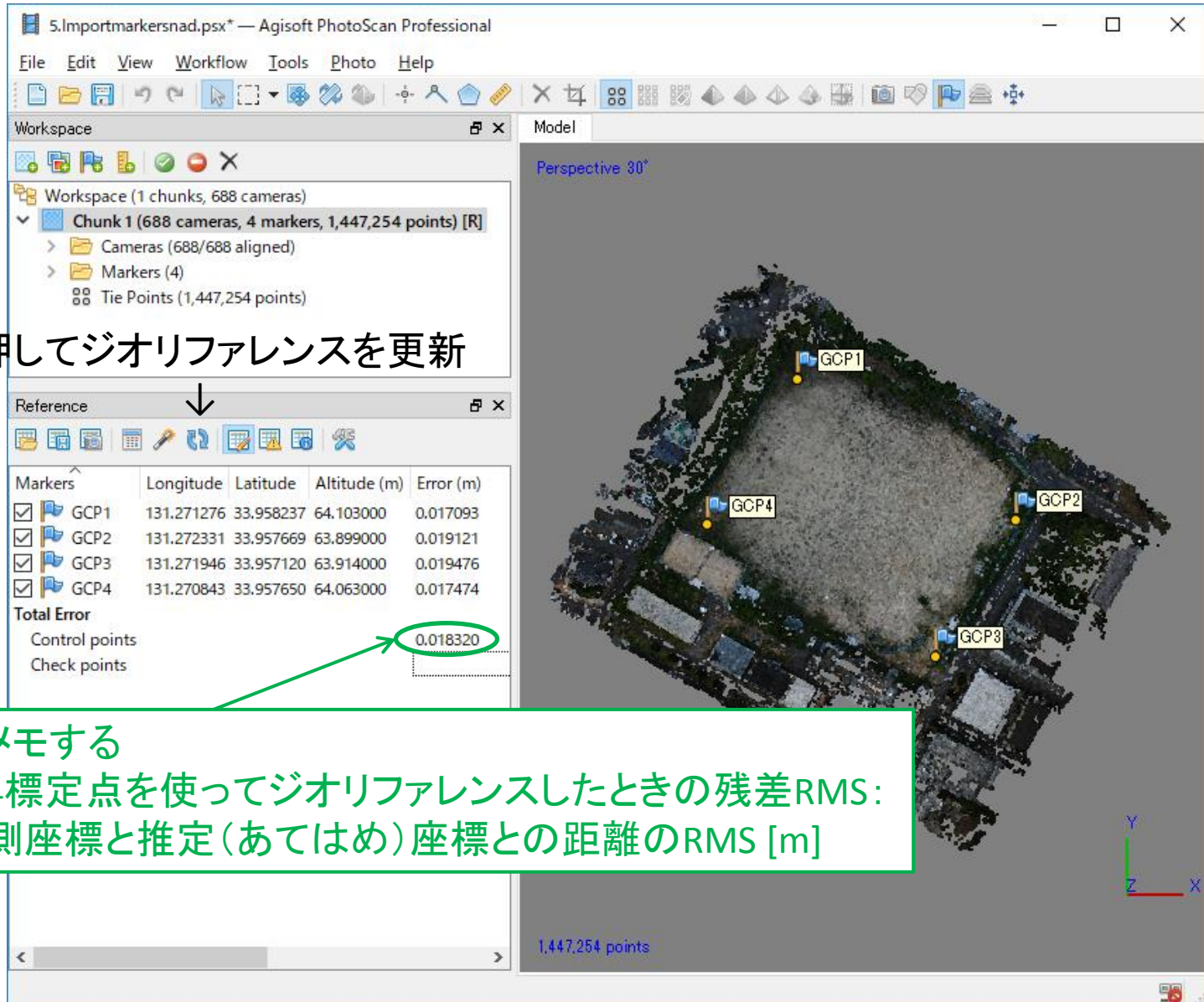
| 検証点  | SfMの誤差<br>(推定座標と実測座標の距離) [m] |
|------|------------------------------|
| GCP1 | 0.072937                     |
| GCP2 | 0.067968                     |
| GCP3 | 0.069485                     |
| GCP4 | 0.074545                     |

RMS誤差 **0.0713** m

- 交差検証により、**検証点に頼らずに、SfMの誤差の指標が得られる。**
- 検証点は、最終成果物(MVSによる3次元点群等)の精度評価のために取り置ける  
→ SfM段階での試行錯誤の参考にされないので、フェアな精度評価が可能に

# 処理の要点 8.

## 全標定点を使った「公式」ジオリファレンス



2. 押してジオリファレンスを更新

1. 戻す →

3. メモする

全4標定点を使ってジオリファレンスしたときの残差RMS:  
実測座標と推定(あてはめ)座標との距離のRMS [m]

# 処理の要点 9.

## SfMの精度の吟味

| 検証点  | SfMの誤差<br>(推定座標と実測座標の距離) [m] |
|------|------------------------------|
| GCP1 | 0.072937                     |
| GCP2 | 0.067968                     |
| GCP3 | 0.069485                     |
| GCP4 | 0.074545                     |

RMS誤差 0.0713 m

- 今回の場合、交差検証で得たRMS誤差 (0.0713 m) は大きいですが、全4標定点でジオリファレンスを行った場合の RMS残差 (0.0183 m ; 前頁) は小さい。

→ **標定点 (ピン) が足りない可能性** → **4隅に複数点ずつ置けばよかった**

- 本実験では対空標識を4隅に複数置いていなかった

→ 代わりに内側の5点を追加

→ 交差検証で得たRMS誤差 : 0.0277 m (満足なレベルに)

全9標定点でジオリファレンスを行った場合の RMS残差 : 0.0158 m



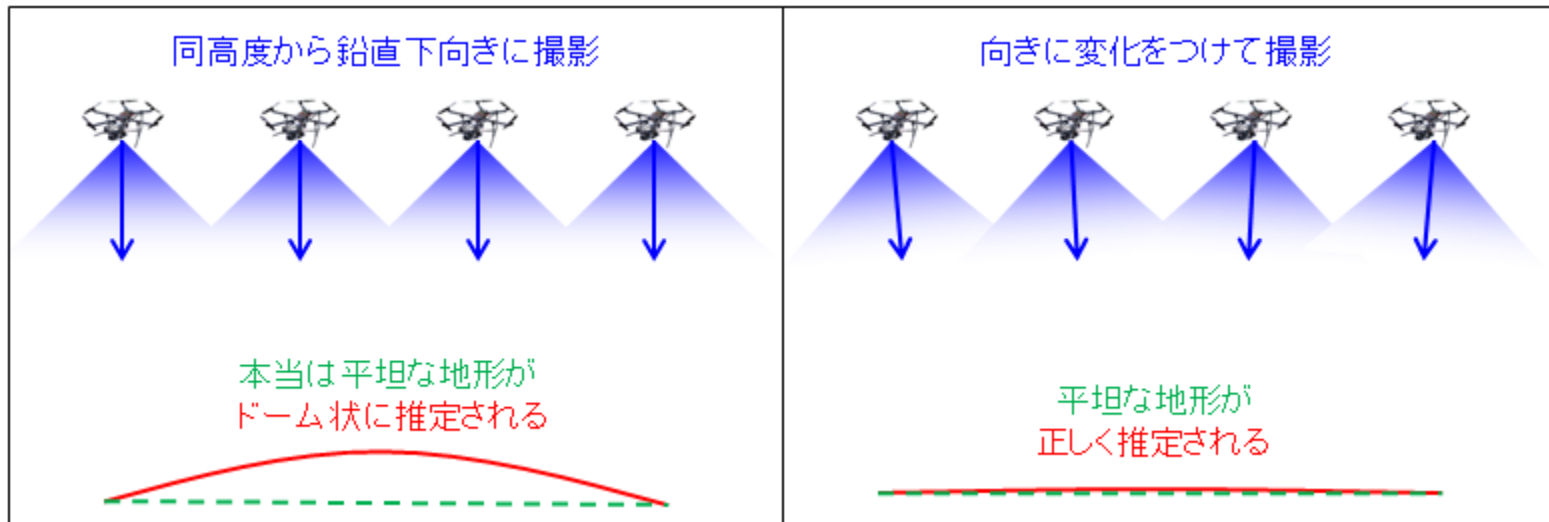
An aerial photograph of a river. The left bank is covered in lush green grass and some small plants. The riverbank is reinforced with a layer of grey and brown stones. The water is clear and blue, with some rocks visible beneath the surface.

## 4. ちょっとした実験例

### 4-3. 結果

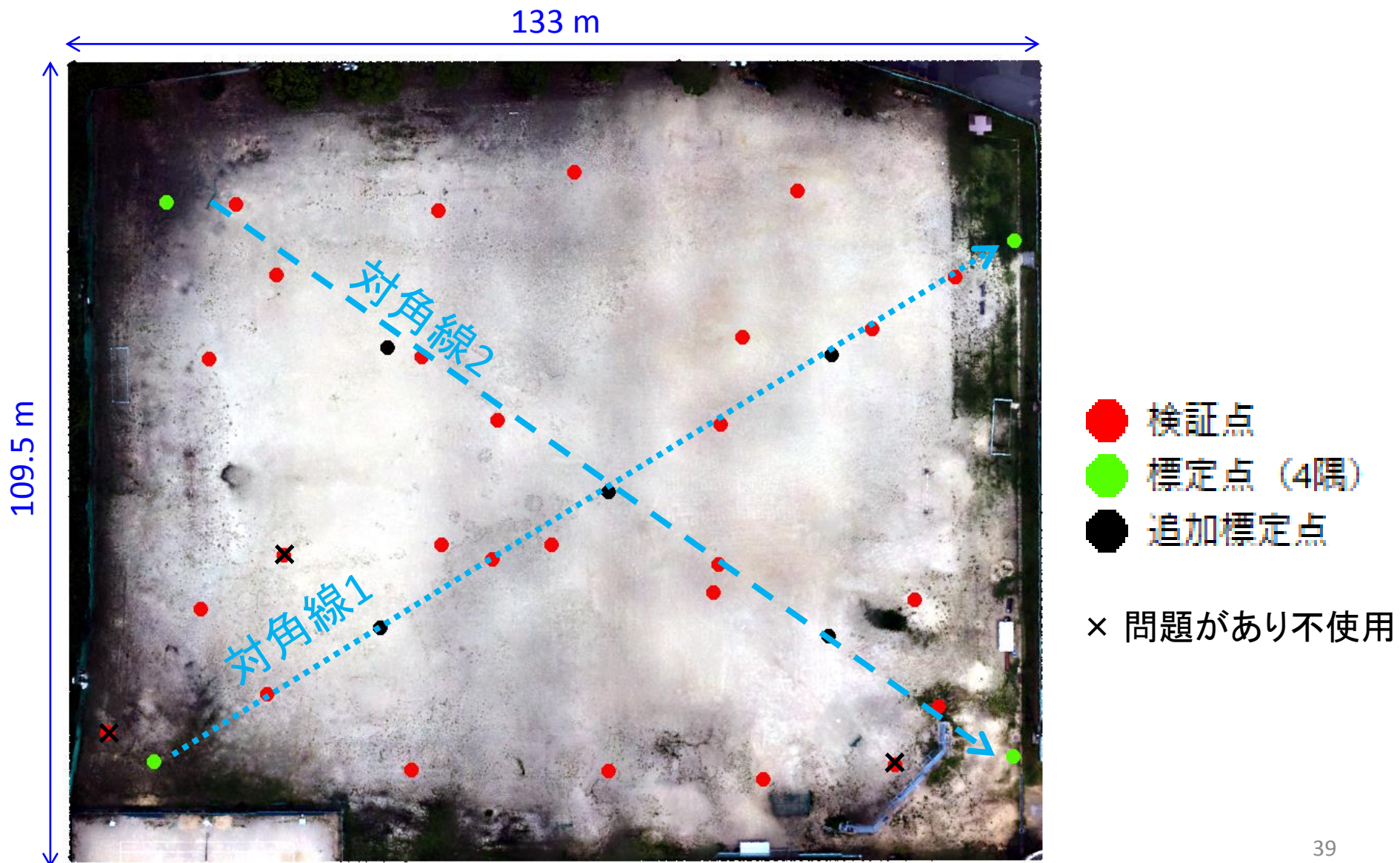


# UAV写真測量における ドーム状変形問題



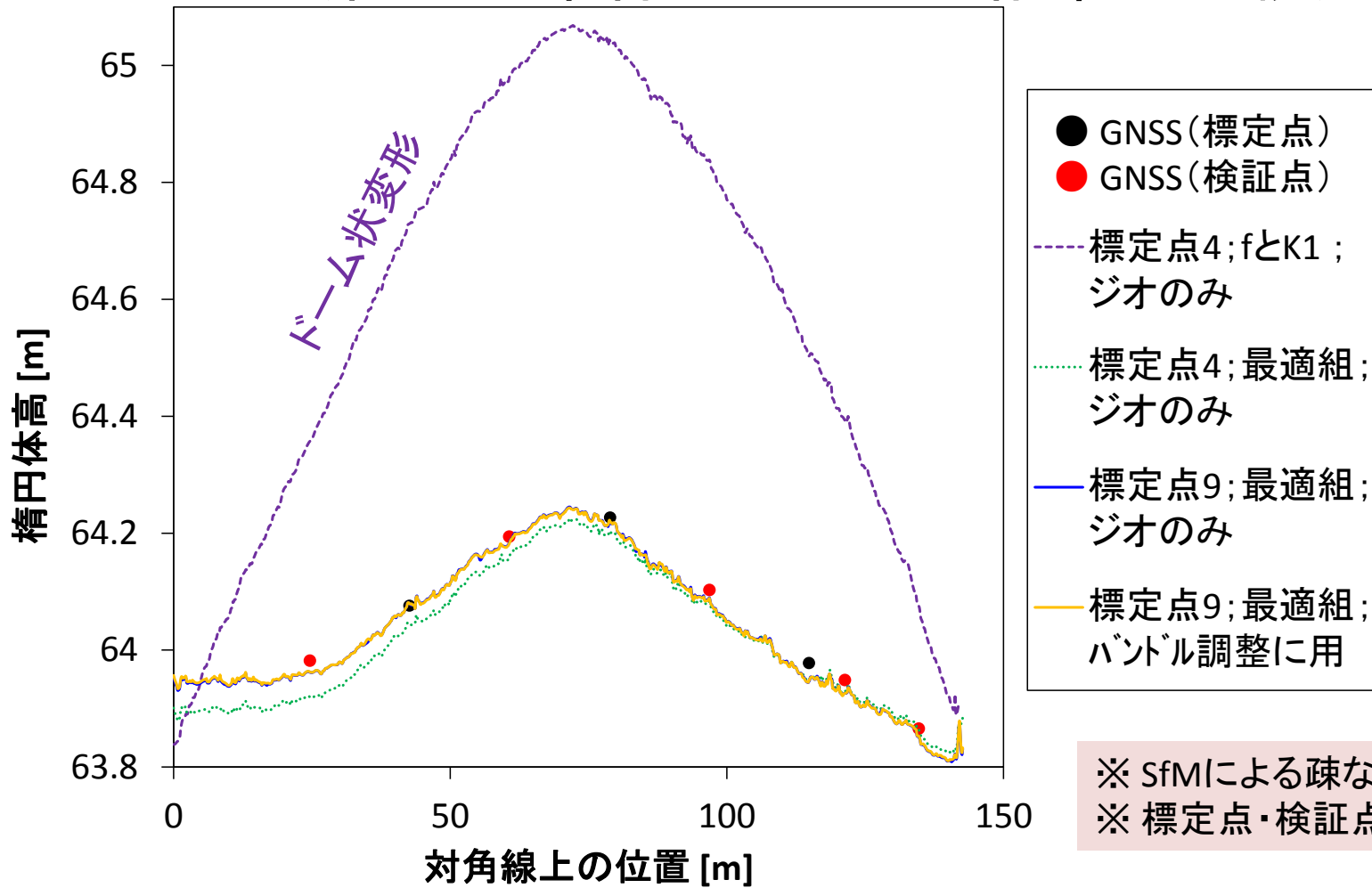
- 対象領域の中央部がドーム状に盛りあがる(or 凹む)誤差が生じる問題。
- 放射方向歪みのパラメータ(特にK1)の推定誤差等が原因とされる。
- 推奨されている対策：
  - 向きに変化をつける。
  - 対象領域の中央部を含め十分数の標定点を置いて、バンドル調整に投入する。

# 検証点と対角線



# 対角線1の鉛直断面図

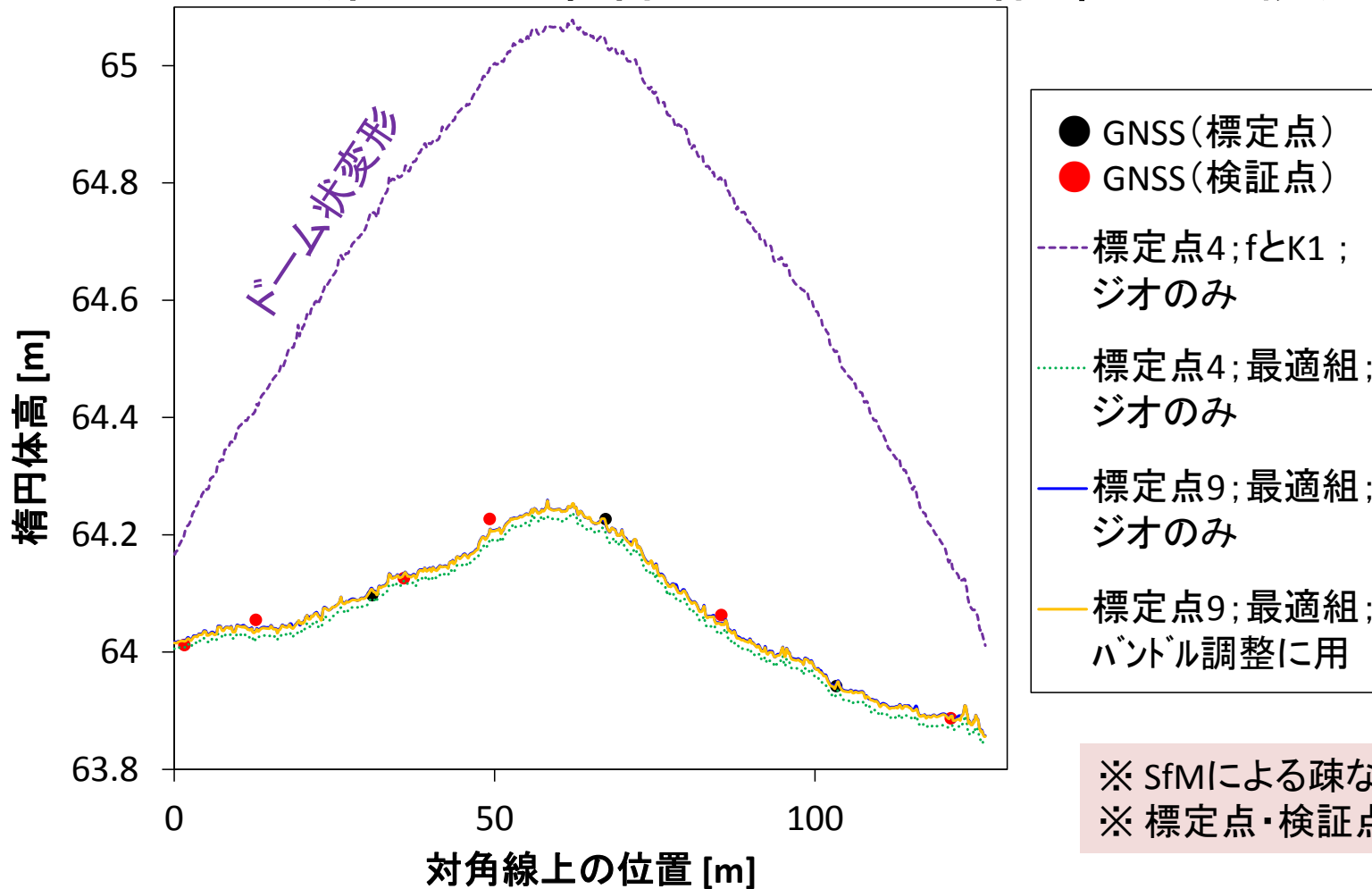
(様々な条件でのSfMの結果の比較)



- 考慮する内部パラメータの組が不適切な場合にドーム状変形発生
- 標定点をジオファレンスのみに使用し4隅だけに置いてもドーム状変形は防げる
- 今回のジオファレンスには4点では不足(9点の方がよい) → 4隅に複数置くべき

# 対角線2の鉛直断面図

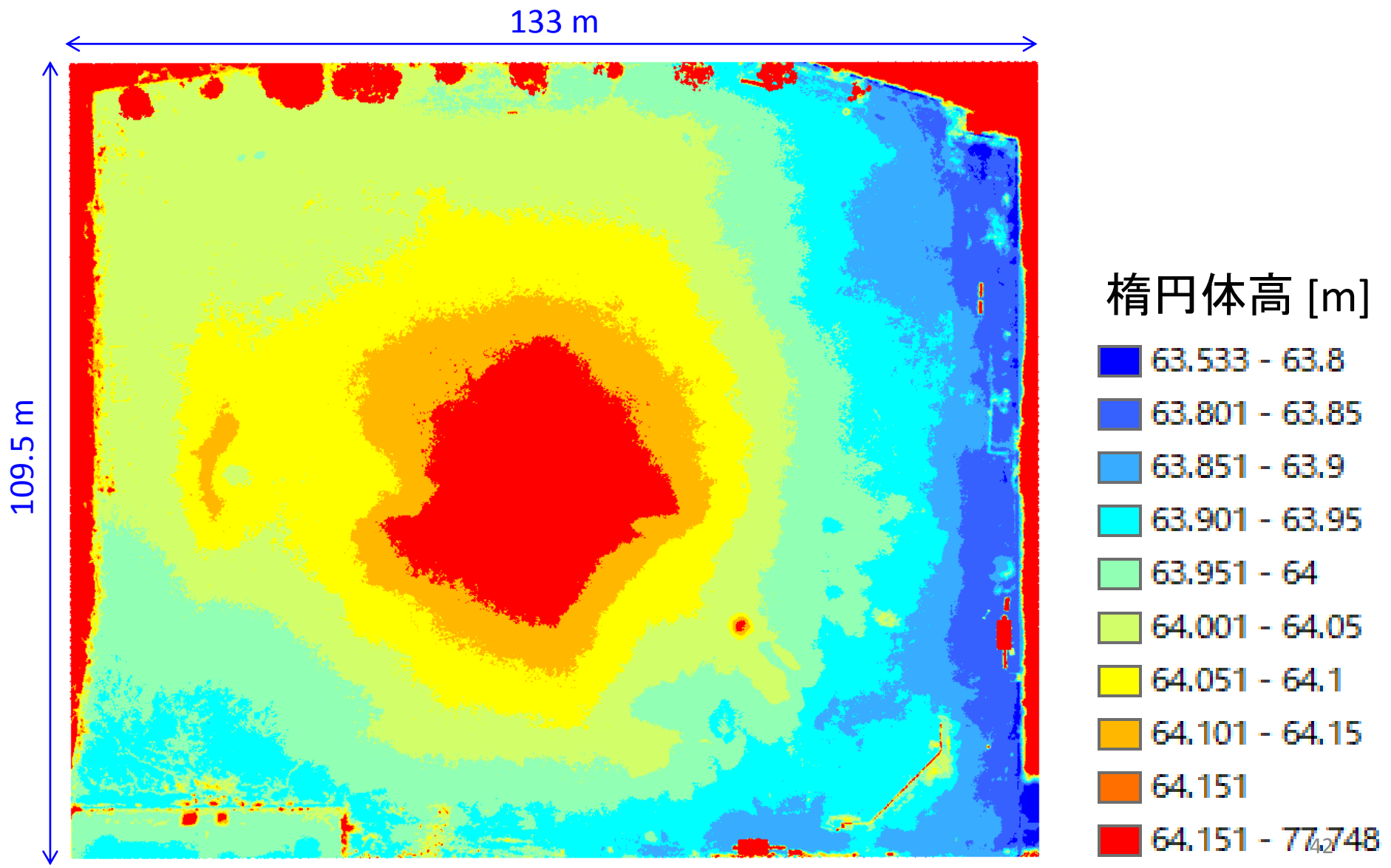
(様々な条件でのSfMの結果の比較)



- 考慮する内部パラメータの組が不適切な場合にドーム状変形発生
- 標定点をジオファレンスのみに使用し4隅だけに置いてもドーム状変形は防げる
- 今回のジオファレンスには4点では不足(9点の方がよい) → 4隅に複数置くべき<sup>41</sup>



# DEM (密な点群由来)

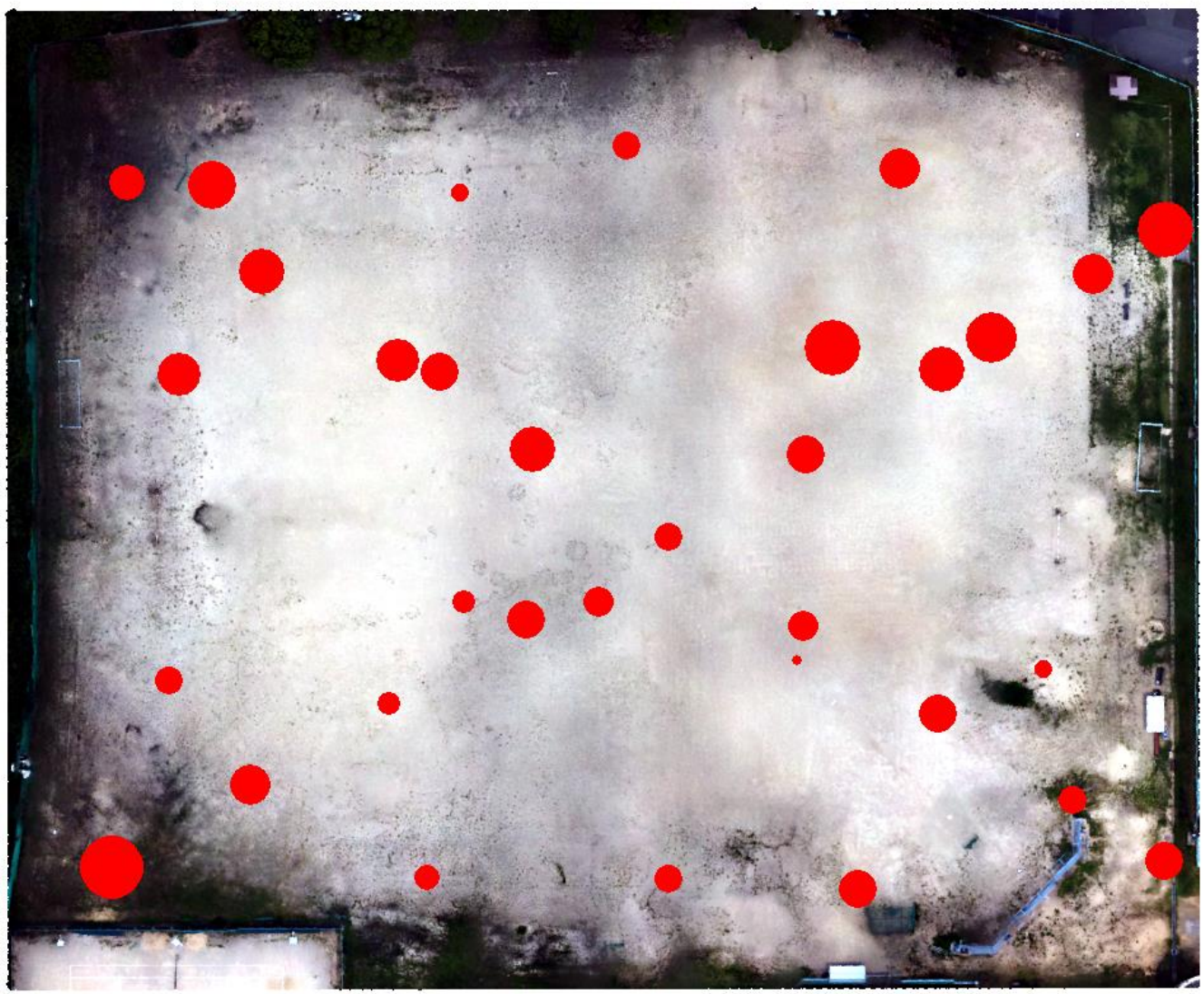


# DEMのバルク誤差

(測量で得たx,y座標における DEMの値 - GNSS測量したz座標)

133 m

109.5 m



## 【標定点】

N = 9

RMS: 0.0154 m

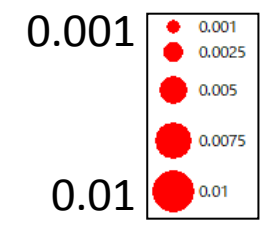
max: 0.0303 m

## 【検証点】

N = 24

RMS: 0.0110 m

max: 0.0227 m



# DEMのバルク誤差

(測量で得たx,y座標における DEMの値 - GNSS測量したz座標)

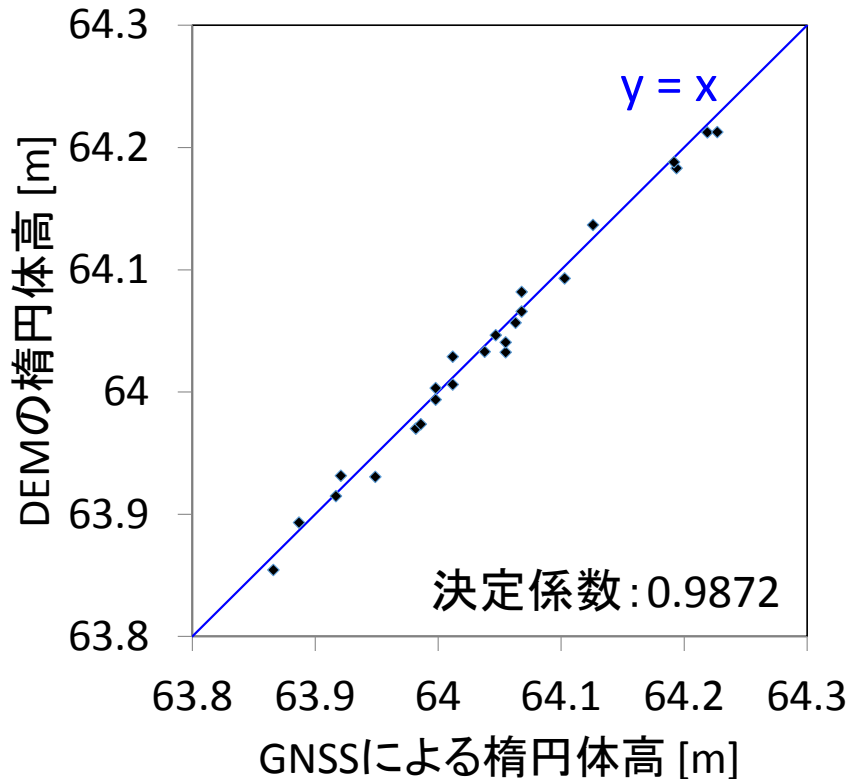


図. DEMとGNSS測量値の比較

表. 対空標識のタイプ別のバルク誤差

| 対空標識のタイプ | 用途  | 数  | RMS誤差 [m] |
|----------|-----|----|-----------|
| 1        | 標定点 | 3  | 0.0130    |
| 2        | 標定点 | 2  | 0.0043    |
| 3        | 標定点 | 4  | 0.0200    |
| 1        | 検証点 | 6  | 0.0111    |
| 2        | 検証点 | 18 | 0.0109    |

対空標識のタイプに影響を受けてしまっているが、  
検証点でRMS 0.011 mと、GNSS測量の較差(※)と大差ない高精度！

※ 当日のRTK-GNSS測量の3軸合成の標準偏差: 0.0073 m

# デモのまとめ

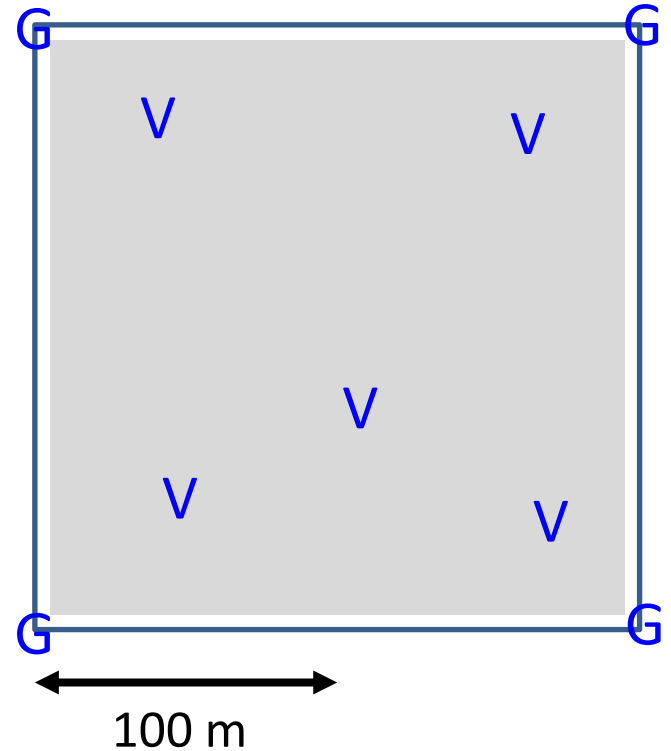
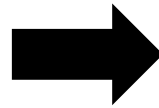
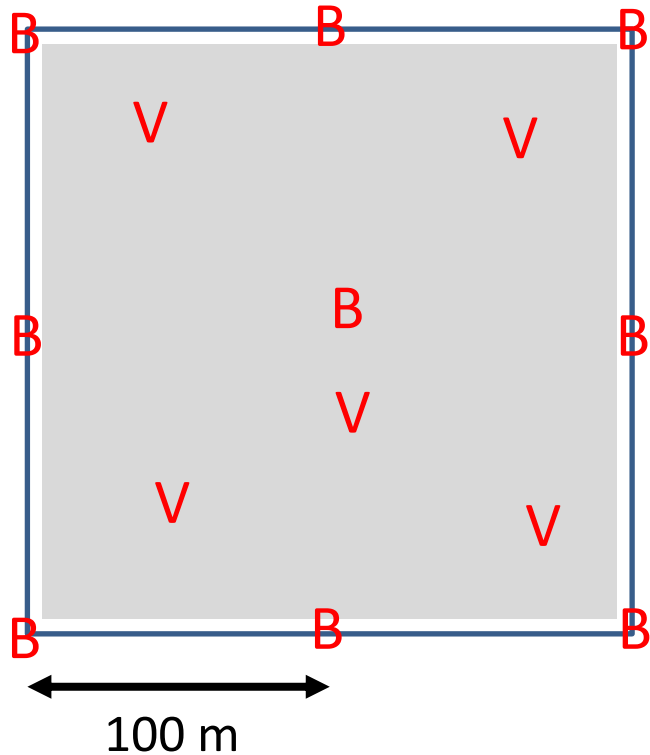
1. 小さな／細長い領域を対象とする際に、対空標識の数を節減するための工夫案を示した。
  - 標定点をジオリファレンスのみに用いる  
→ 小さな領域なら4隅のみで十分(いや、4隅が最適に)
  - 手動タイポイントでSfMの設定を最適化  
(後で自動タイポイントの補強にも流用可)
  - SfM後に(小さな領域の場合)4隅の標定点で交差検証  
→ 検証点を消費せずに精度確認が可能
2. 小規模な現地実験例を示した。
  - 対象領域内部に標定点がなくてもドーム状変形を防げた。
  - 標定点をジオリファレンスのみに用いても高い精度を得た。
  - 有効性の実証にはもっと大きな実験が必要。



An aerial photograph of a river. The left bank is lined with a wall of grey and brown stones. The water is clear and blue, reflecting the sky. A black rectangular box is overlaid on the center of the image, containing white Japanese text.

## 5. 最後の手段: VPCV

# 以上で述べた節減案



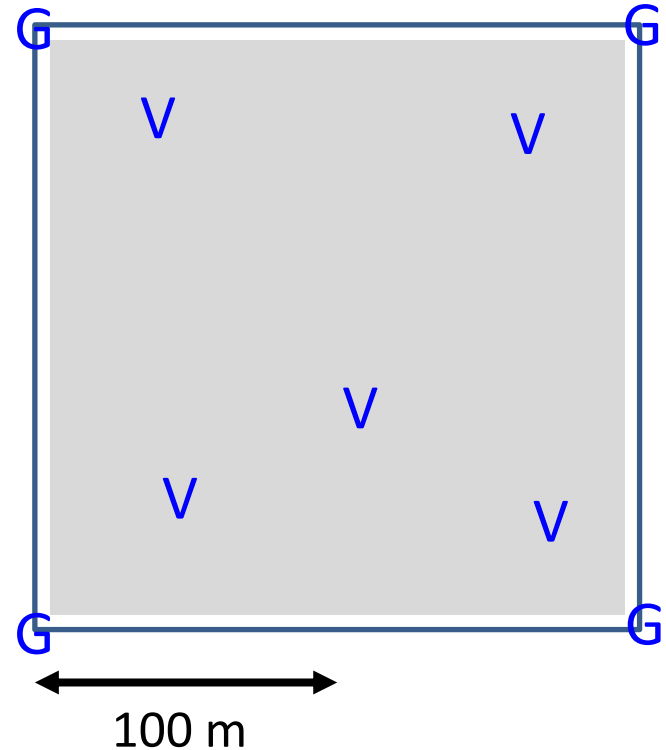
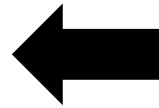
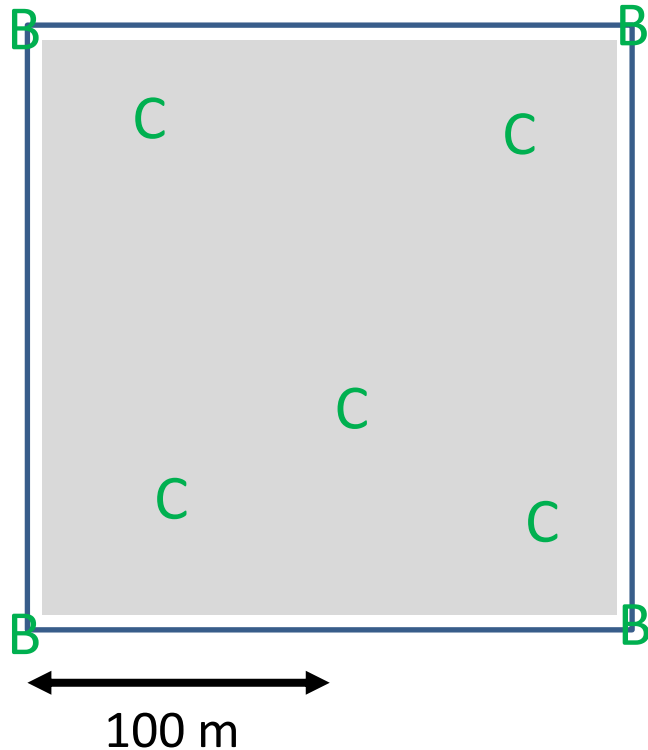
## 現行ルールでの最少配置例

- B バンドル調整にも使われる  
標定点: 9 地点
- V 検証点: 5 地点

## 節減案の配置例

- G ジオファレンス専用標定点:  
4 地点 (各2)
- V 検証点: 5 地点

# もし精度が不十分なら、奥の手: Validation Point Cross Validation



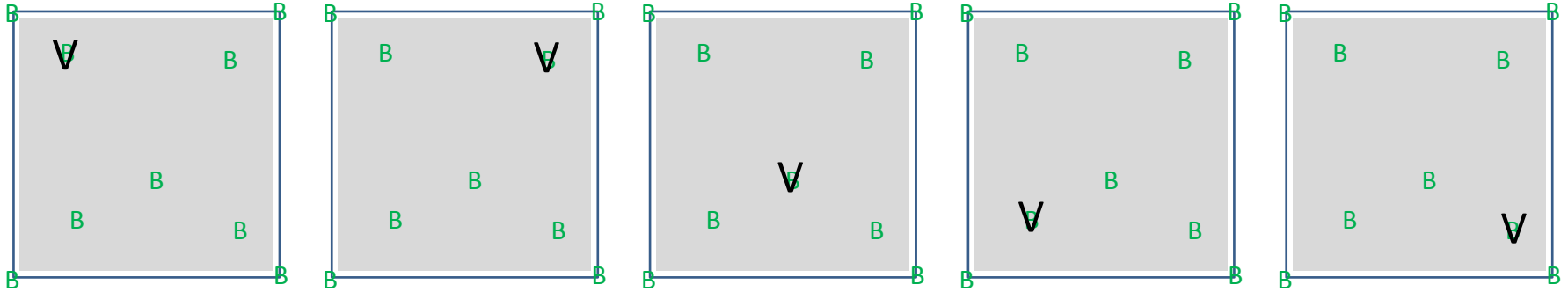
## 奥の手 (VPCV)

- B バンドル調整にも使われる  
標定点: 4 地点
- C Bと同じだが、交差検証で1回  
ずつ検証点になる点: 5 地点

## 節減案

- G ジオリファレンス専用標定点:  
4 地点 (各2)
- V 検証点: 5 地点

# もし精度が不十分なら、奥の手: Validation Point Cross Validation (便宜的に命名)



↑ 検証点が5点なら、5試行の検証となる

各検証点について反復

検証点1つ (V) を除く全点で  
バンドル調整

除いた1検証点の近傍のみで  
密な点群 and/or DSMを作成

除いた1検証点に関する  
密な点群 and/or DSMの  
誤差評価

全検証点で誤差統計量を評価  
(例: RMS, 平均)

- 対空標識を置いたすべての点-1をバンドル調整に動員
- 統計学的には正当な検証
- 最終的に全点動員して成果物を作る場合、交差検証は1点ぶん保守的
- 標定点を用いたジオリファレンスに関する交差検証(CPCV)よりは時間がかかるが、自動化によりカバー可能か
- 検証点の節減策とも言える



# 問題意識のまとめ（再掲）

1. 標定点の必要数に関する実験結果報告／規定では、その用途も条件の1つとして記述すべきではないか。
  - 用途に触れず数だけが独り歩きすると、混乱を招く恐れ
2. 小さい or 細長い領域では、工夫によって、精度を維持したまま標定点を節減できないか。→ 手順は第4章でデモ
  - A) 標定点をジオリファレンスだけに使う
  - B) 手動タイポイント(MTP)によるSfMの設定の最適化
  - C) 標定点を使ったジオリファレンスの交差検証 (CPCV)
3. 精度不十分なら、標定点と検証点を、検証点1つを残してバンドル調整に動員し、検証点で交差検証するのはどうか (VPCV) → 第5章で説明