

月極域探査における探査機の走行経路 を考慮した着陸地点の選定手法

中島康平¹, 井上博夏², 山本光生², 山本幸生²,
大嶽久志², 荒木徹也³, 廣田雅春⁴, 石川博³

1. 首都大学東京システムデザイン学部 2. 宇宙航空研究開発機構
3. 首都大学東京システムデザイン研究科 4. 岡山理科大学総合情報学部

- ・ 研究背景・目的
- ・ 選定手法
- ・ 実験
- ・ 今後の課題

- ・ 研究背景・目的
- ・ 選定手法
- ・ 実験
- ・ 今後の課題

月極域探査ミッション

◆時期

2020年代, 初頭から半ばに予定されている

◆ミッションの目的

月極域に存在する水氷, 揮発性物質などの分布, 分量の調査

◆水氷

将来の有人探査, 深宇宙探査などで, エネルギー資源としての利用が期待されている

探査機の着陸地点の選定

月面の環境

- 日照, 地球との通信, 傾斜角度
 - ✓ 探査機の着陸
 - ✓ 探査機の移動

着陸誤差楕円

実際の着陸では, 定めた地点に着陸するとは限らない
→ 着陸地点は, 点ではなく領域



探査機を月面上のどこに着陸させるべきかを決定

- ・ 研究背景・目的
- ・ 選定手法
- ・ 実験
- ・ 今後の課題

```
graph TD; A[ ] --- B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --- C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --- D[3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る]; D --- E[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る

```
graph TD; A[ ] --- B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --- C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --- D[3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る]; D --- E[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る

ミッション要求

探査機が着陸可能な地点

1. 傾斜角度 10° 以下である地点
2. 着陸後, 1週間以上連続で日照が当たる地点
3. 着陸後, 1週間以上連続で地球と通信が可能な地点

探査機は, すべての条件を満たす地点にのみ着陸可能

```
graph TD; A[ ] --- B[ ]; B --- C[ ]; C --- D[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

3. 着陸誤差楕円を考慮して、さらに候補地点を絞る

探査機の走行可能な地点

1. 傾斜角度 25° 以下である地点

→ 探査機の転倒を防止

2. 地球と通信が可能な地点

→ 探査機の状況、位置の把握

3. 日照が当たる地点

→ 探査機の稼働エネルギー確保

探査機は、すべての条件を満たす地点のみ走行可能

着陸地点から調査地点まで到達可能かどうかを判定

◆ 経路探索手法

- 幅優先探索

◆ 移動の制限

- 一度通った地点を再度通ることはできない
→ 計算コスト削減のため
- 特定の地点にとどまることは可能
→ 環境の時間変化を考慮するため

◆ 探索時間の制限

- 経路探索時間は最大で1週間

探索手法・制限

$(x, y, t) = (x\text{座標}, y\text{座標}, \text{時間})$

として, 探査機の位置, 時間を保持

◆ 移動の制限

一度通った地点を再度通ることは不可

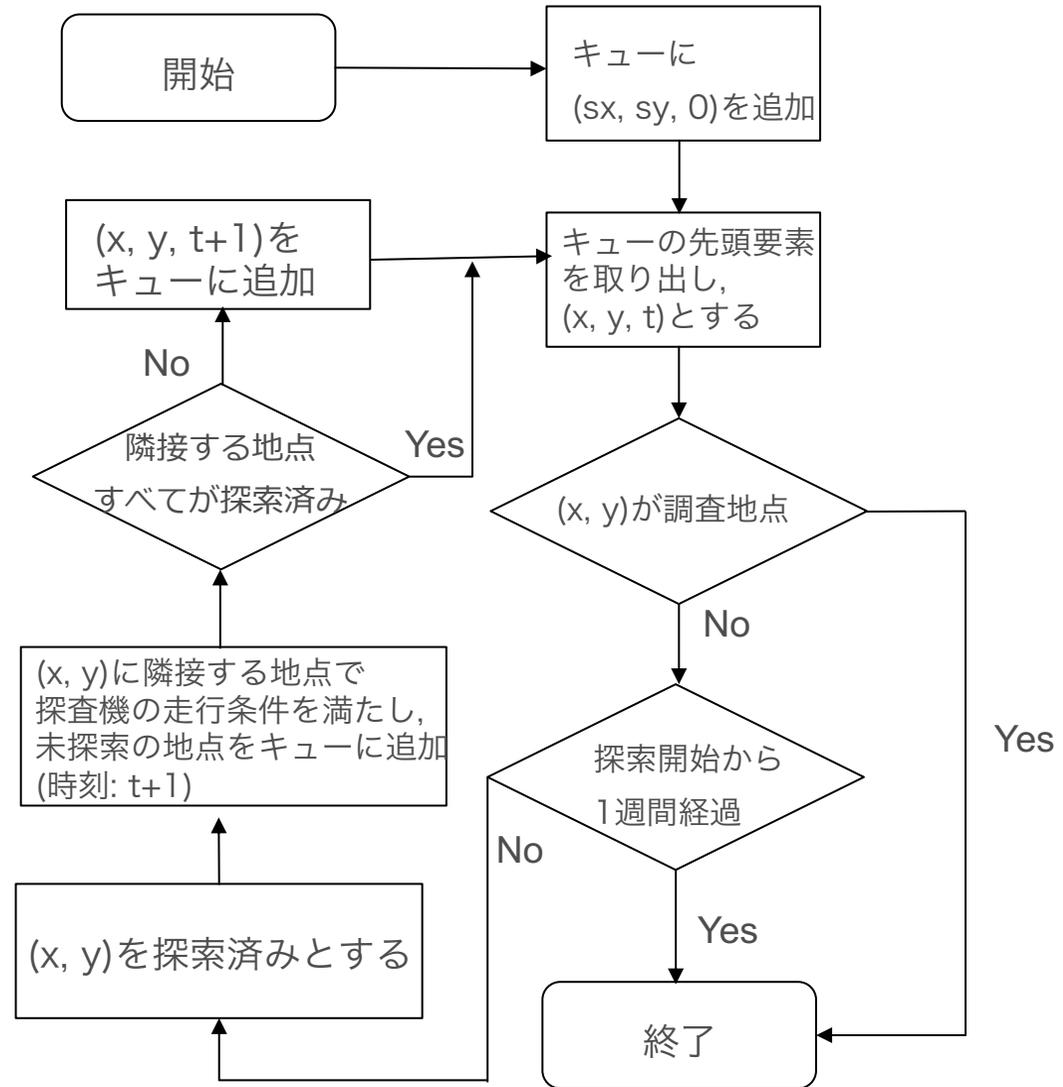
→ 計算コスト削減のため

特定の地点にとどまることは可能

→ 環境の時間変化を考慮するため

◆ 探索時間の制限

経路探索は1週間まで行う



```
graph TD; A[ ] --- B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --- C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --- D[3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る]; D --- E[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

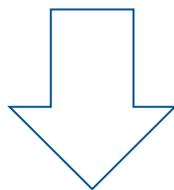
3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る

着陸目標地点を定めても、実際に
その地点に着陸できるわけではない。
着陸目標地点を中心とした円形の、
着陸誤差領域内のどこかに着陸する。

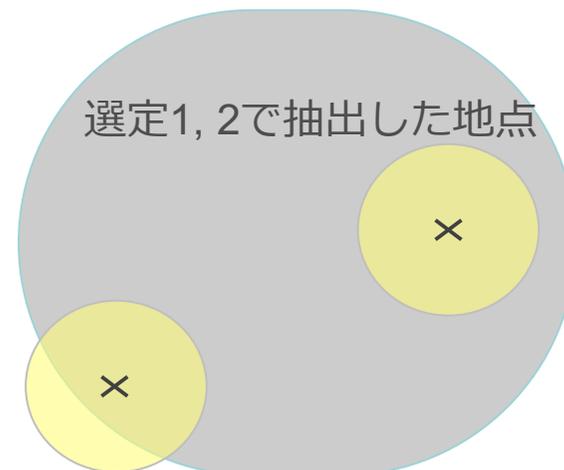


3. 着陸誤差楕円の考慮

着陸目標地点を定めても、実際にその地点に着陸できるわけではない。着陸目標地点を中心とした円形の、着陸誤差領域内のどこかに着陸する。

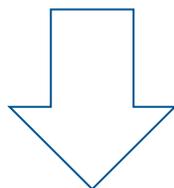


着陸目標地点としたときに発生する着陸誤差楕円の範囲内全ての地点が条件1, 2を満たす地点のみを着陸候補地点として残す。

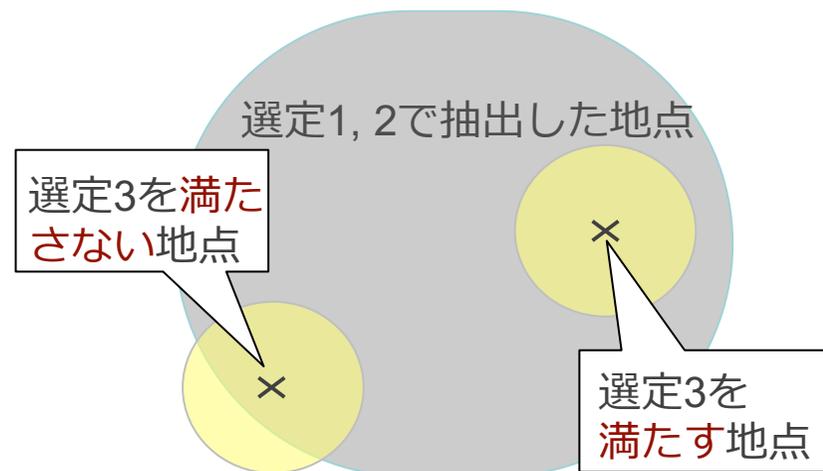


3. 着陸誤差楕円の考慮

着陸目標地点を定めても、実際にその地点に着陸できるわけではない。着陸目標地点を中心とした円形の、着陸誤差領域内のどこかに着陸する。



着陸目標地点としたときに発生する着陸誤差楕円の範囲内全ての地点が条件1, 2を満たす地点のみを着陸候補地点として残す。



- ・ 研究背景・目的
- ・ 選定手法
- ・ 実験
- ・ 今後の課題

- **着陸候補領域**

- 中心座標 CR1 (89.4391S, 137.1345W) の3km四方 (10m/px)
- 1ピクセル = 1地点 (10m四方の領域を1地点とする)

- **調査地点**

- 着陸候補領域内の1地点

- **月面環境データ**

- 2020年10月から12月までのシミュレーションデータ (3時間毎に記録)
- 開始時刻: 2020年11月6日6時

- **探査機の速度**

- 0.06 km/h (18ステップで3時間経過)

- **着陸誤差楕円**

- 直径100 m

```
graph TD; A[ ] --- B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --- C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --- D[3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る]; D --- E[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る

```
graph TD; A[ ] --- B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --- C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --- D[3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る]; D --- E[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る

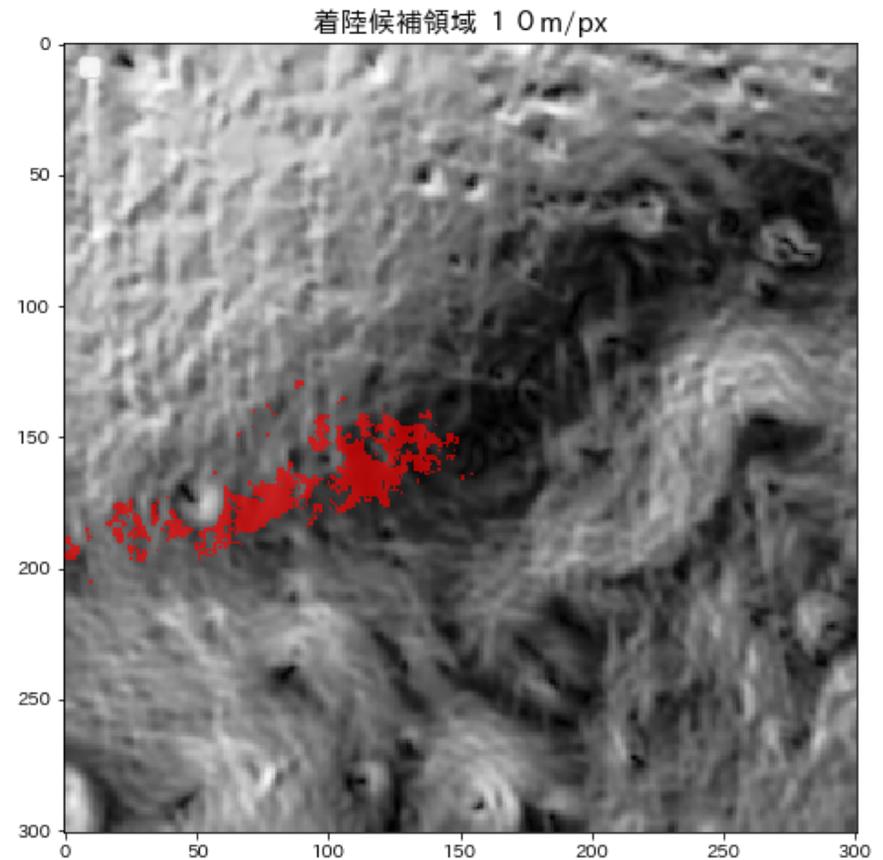
着陸候補領域の中から、
探査機のミッション要求を
満たす地点を抽出して可視化

(開始時刻: 2020年11月6日6時)

ミッション要求

探査機が着陸可能な地点

1. 傾斜角度 10° 以下である地点
2. 着陸後, 1週間以上連続で日照が当たる地点
3. 着陸後, 1週間以上連続で地球と通信が可能な地点



■ ミッション要求を満たす地点

```
graph TD; A[ ] --> B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --> C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --> D[3. 着陸誤差楕円を考慮して、さらに候補地点を絞る]; D --> E[ ]
```

1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

3. 着陸誤差楕円を考慮して、さらに候補地点を絞る

◆ 探査機の走行可能な地点

1. 傾斜角度 25° 以下である地点
2. 日照が当たる地点
3. 地球と通信が可能な地点

◆ 経路探索手法

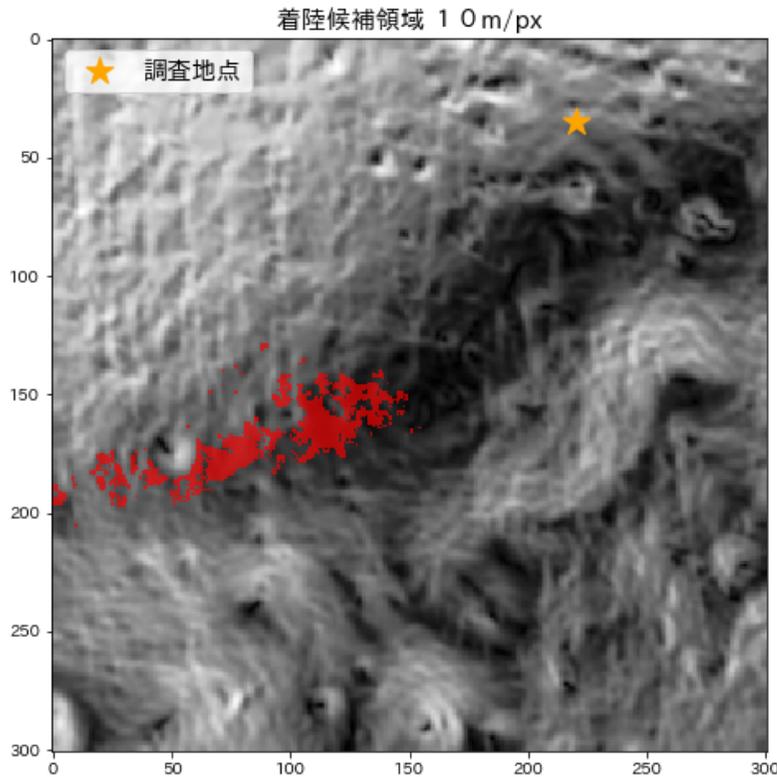
- 幅優先探索

◆ 移動の制限

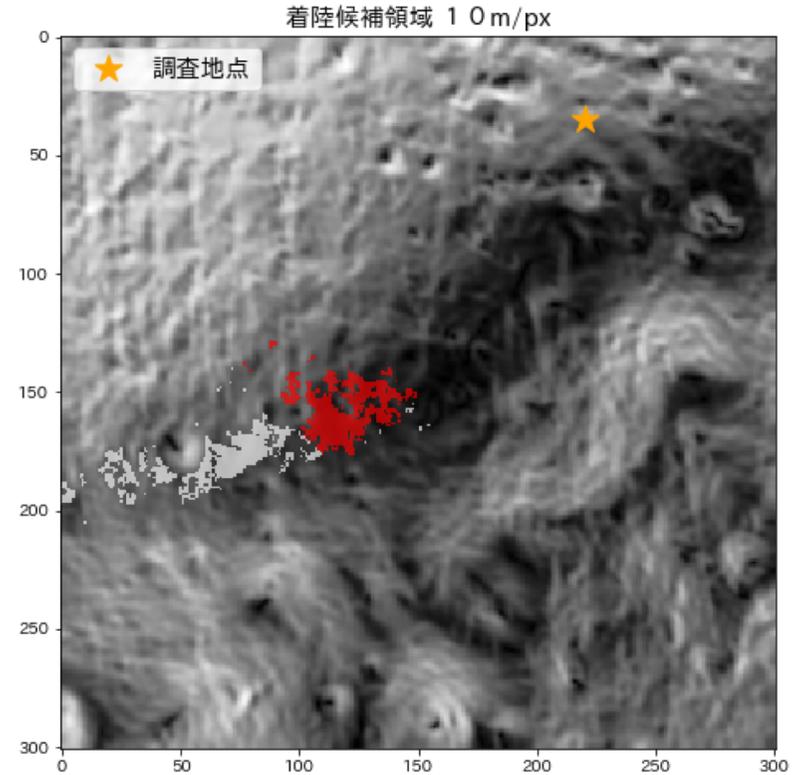
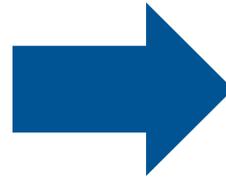
- 一度通った地点を再度通ることはできない

◆ 時間の制限

- 経路探索は1週間まで行う



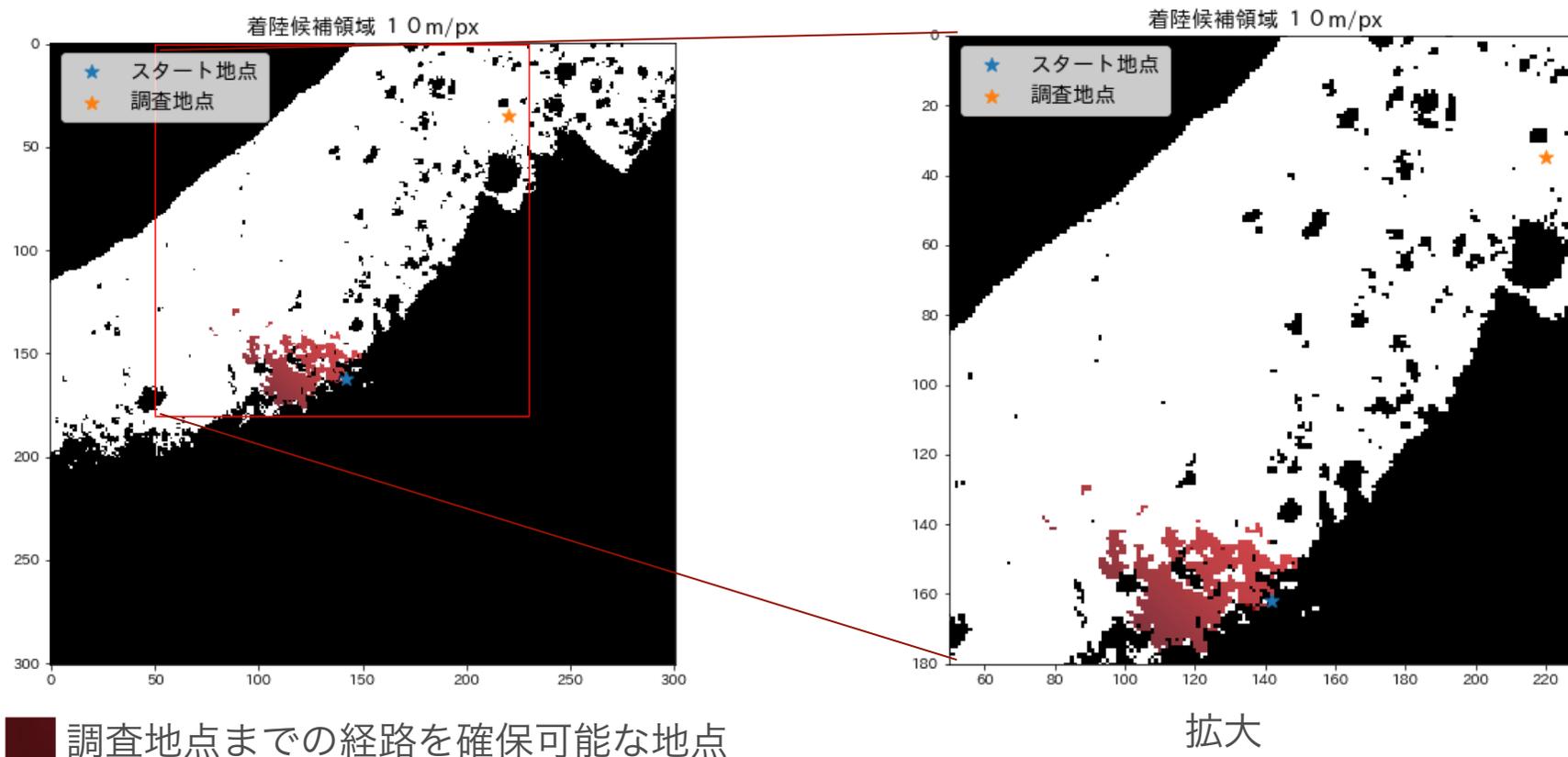
■ ミッション要求を満たす地点



■ 調査地点までの経路を確保可能な地点

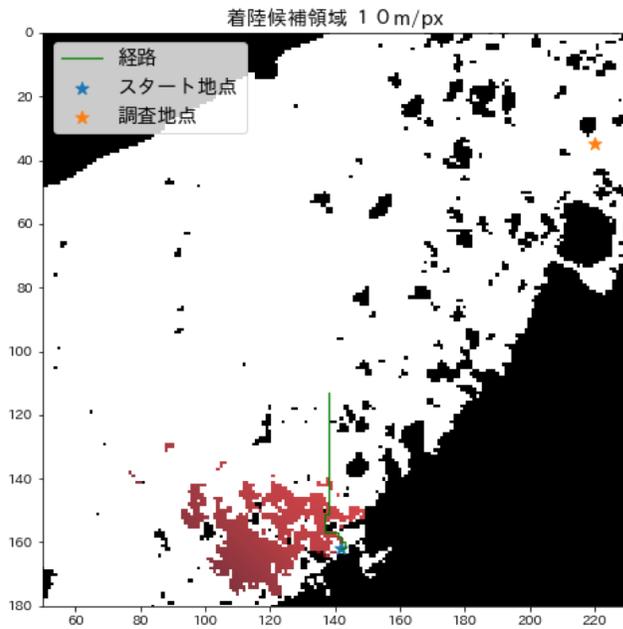
探査機が着陸可能な地点の中から、
調査地点までの経路が確保可能な地点を抽出

選定2で抽出した地点, 調査地点, 探査機が走行可能な地点を可視化

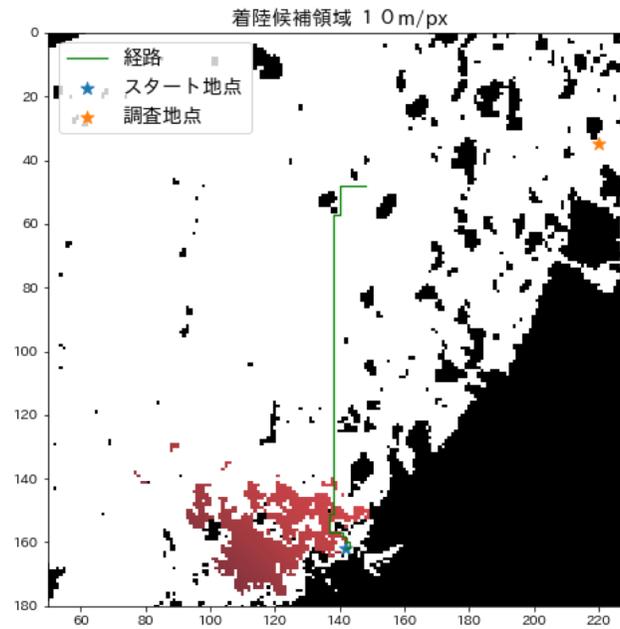


〔 白い領域: 探査機が走行可能な地点 黒い領域: 探査機が走行不可能な地点 〕

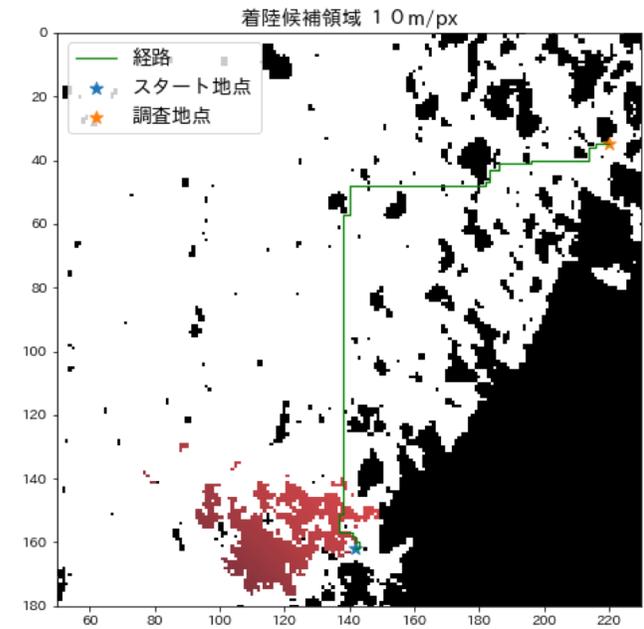
時間ごとの探査機の位置, 走行可能地点の可視化



2020年11月6日18時



2020年11月7日7時



2020年11月8日0時

探査機は走行可能な地点を通り, 最短経路のうちの一つを通っている

〔白い領域: 探査機が走行可能な地点 黒い領域: 探査機が走行不可能な地点〕

```
graph TD; A[ ] --- B[1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出]; B --- C[2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出]; C --- D[3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る]; D --- E[ ]
```

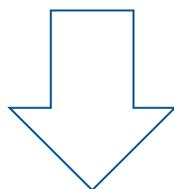
1. 探査機のミッション要件を満たす地点を抽出

2. 調査地点までの経路を確保可能な地点を抽出

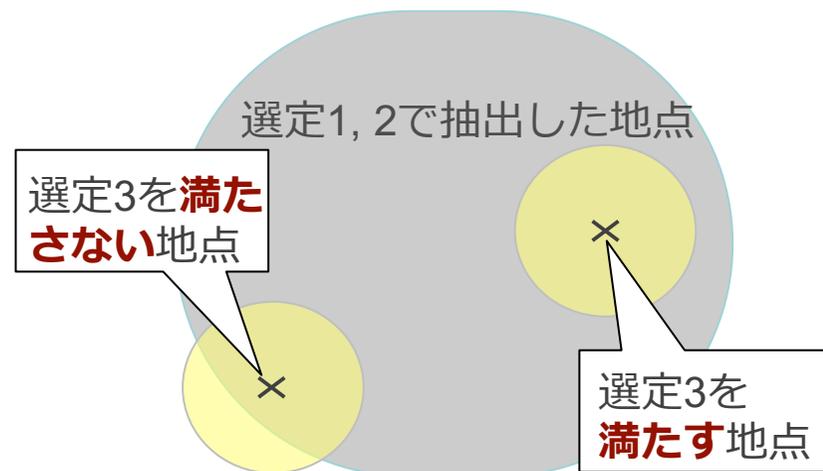
3. 着陸誤差楕円を考慮して, さらに候補地点を絞る

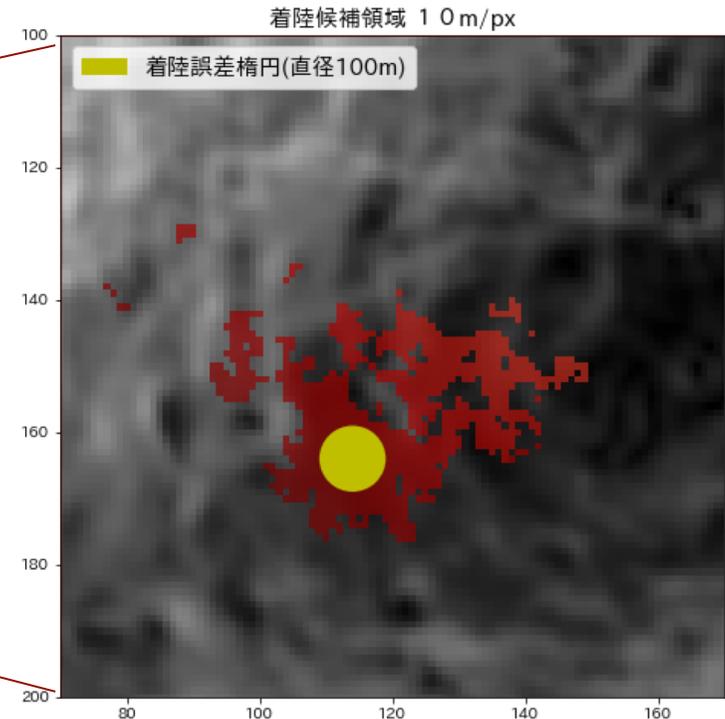
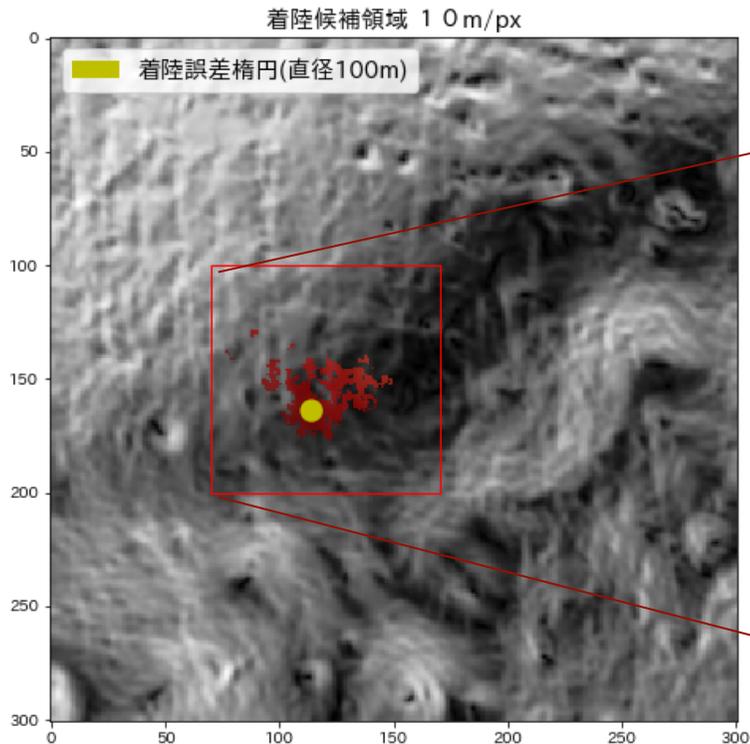
3. 着陸誤差楕円の考慮

着陸目標地点を定めても、実際にその地点に着陸できるわけではない。着陸目標地点を中心とした円形の、着陸誤差領域内のどこかに着陸する。



着陸目標地点としたときに発生する着陸誤差楕円の範囲内全ての地点が条件1, 2を満たす地点のみを着陸候補地点として残す。

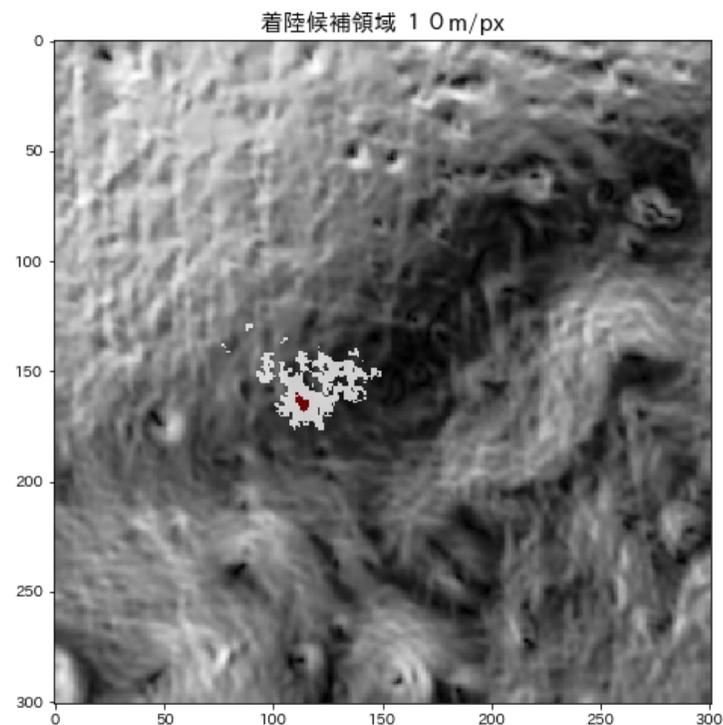
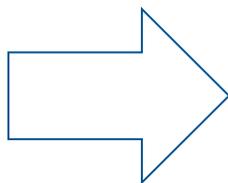
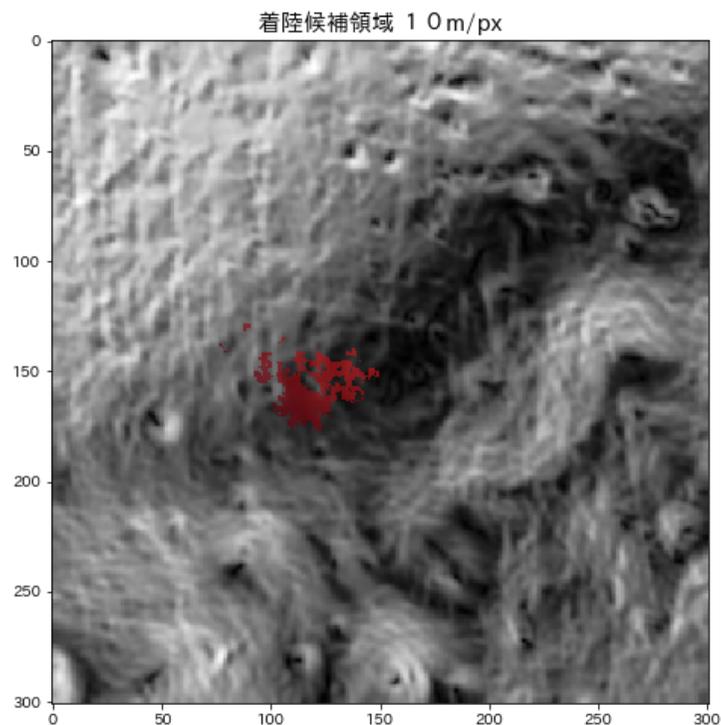




■ 調査地点までの経路を確保可能な地点

■ 着陸誤差楕円

直径100mの着陸誤差楕円を想定して、中心としたときに発生する誤差楕円領域内の地点すべてが、**1, 2の条件を満たす地点を選出**

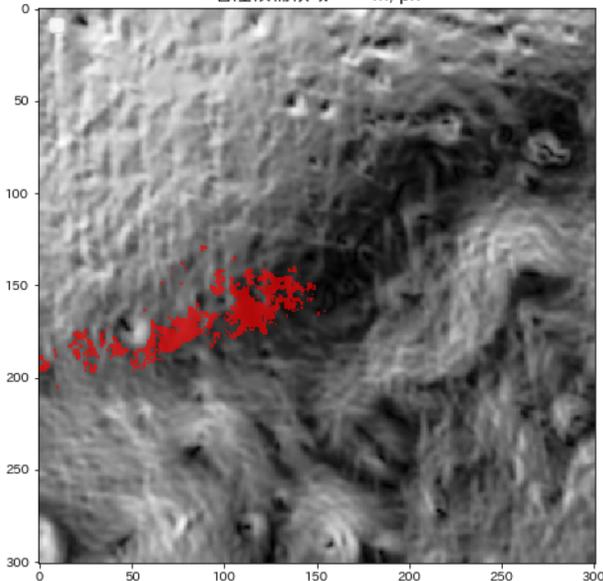


■ 調査地点までの経路を確保可能な地点

■ 着陸誤差楕円を考慮した地点

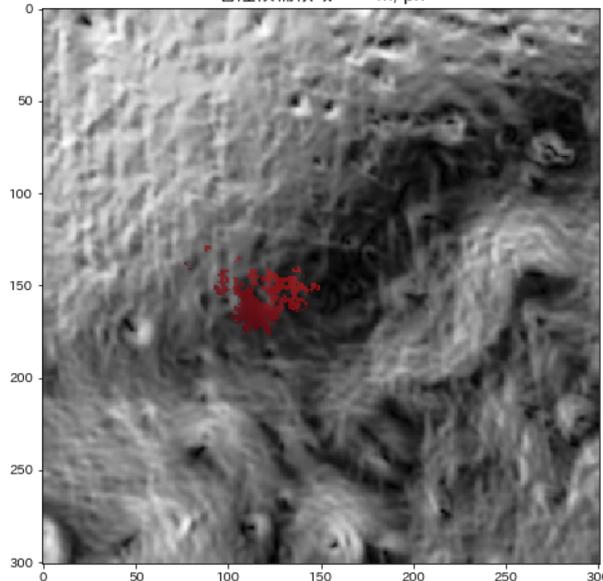
全ての地点が選定1, 2を満たす誤差楕円領域の**中心地点**を選出

着陸候補領域 10m/px



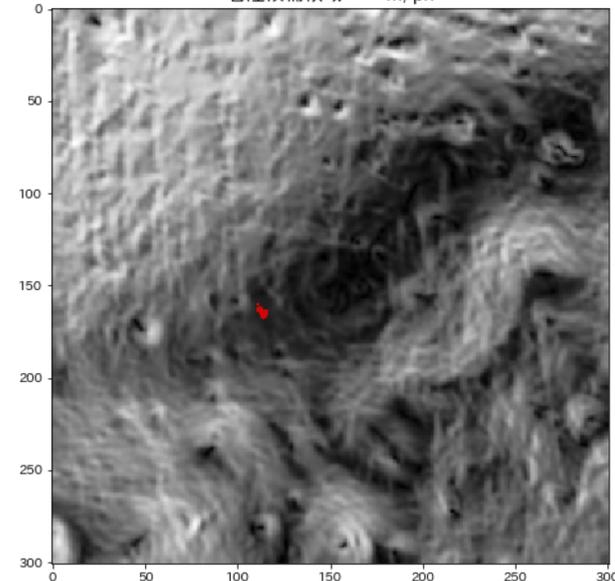
選定1

着陸候補領域 10m/px



選定2

着陸候補領域 10m/px



選定3

ミッション要求を
満たす地点

候補地点数: **1726**



調査地点までの経路を
確保可能な地点

候補地点数: **856**



着陸誤差楕円を
考慮した地点

候補地点数: **30**

- ・ 研究背景・目的
- ・ 選定手法
- ・ 実験
- ・ 今後の課題

1. 探査機の走行可能地点の見直し

- 探査機は日照が当たらない地点でも走行は可能

2. 目的地点が複数の場合への対応

- 実際の探査では、目的地点が複数あることが予想される

3. ロバストな経路の選択

- 探査機が想定外の動きをした場合にも、対応できる経路

→ 重み付きグラフ，強化学習の利用

◆ 発表内容

- 極域探査における着陸地点の選定手法の提案

◆ 選定手法

- ミッション要求, 走行経路, 誤差楕円を考慮して着陸候補地点を絞る

◆ 実験結果

- 候補領域の中から, 候補地点を30地点まで絞ることができた

◆ 今後の課題

- 探査機の走行可能条件の再検討,
- 目的地点が複数の場合への対応
- ロバストな経路の選択