

月周回衛星「かぐや」の データを用いた 多目的最適化による 月着陸最適候補地の選定

西山万里 (東京大学)
大嶽久志 星野健 橋本樹明
渡辺毅 立川智章 大山聖
(ISAS/JAXA)

月面探査における 着陸地点への要求

- 技術的要求：探査機の維持に必要な要求
(例...日照条件、通信条件、地面の傾斜等)
- ミッション的要求：有意義な探査に必要な要求
(例...氷の存在 etc.)

技術的要求

連続夜時間の
最小化

傾斜角の最小化

地球と通信可能
な時間の最大化

ミッション的 要求

氷の存在する地点
までの距離最小化

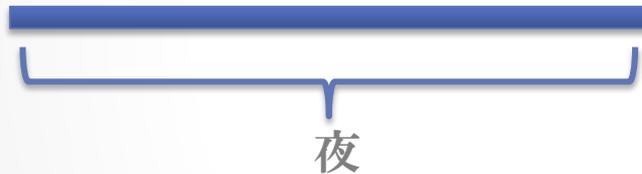
技術的要求

月面探査における日照の重要性

- 月面探査機の多くは太陽電池を使用
- 月面において長期間続く夜

➡ 太陽電池による充電が不可能

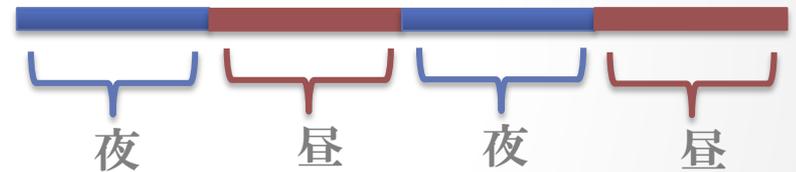
夜が連続する場合



常に充電が不可能な状態
→ 電力が不足する



昼夜が交互に訪れる場合

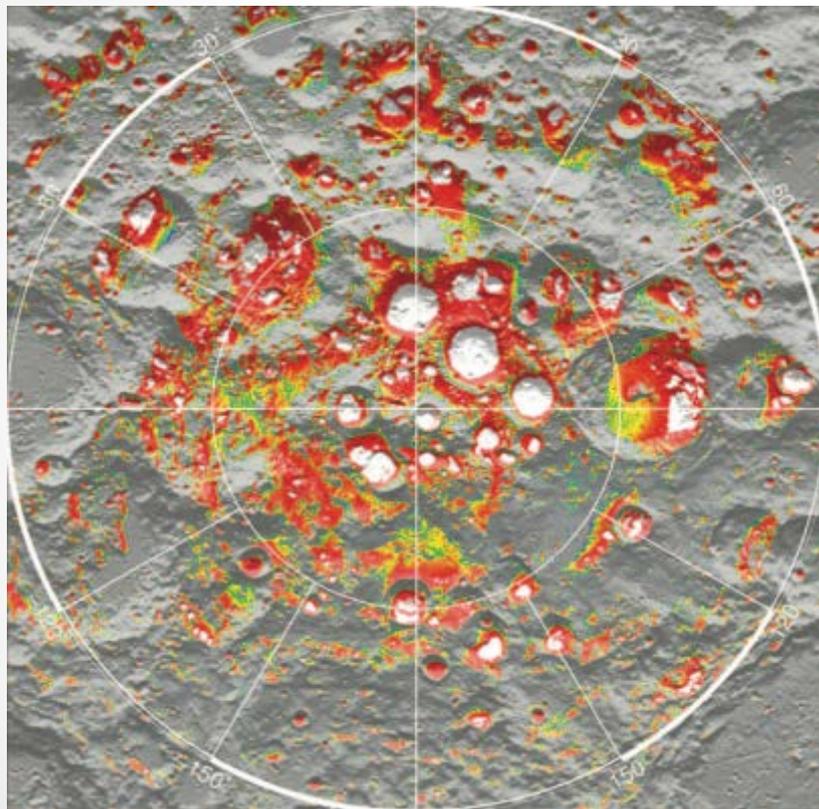


昼の間に充電が可能

➡ 昼が長く連続した夜の短い着陸地点が望ましい

ミッション的要求

月面における氷の存在



Paige et al., 2010.

- 南極における氷の存在が示唆
- 科学観測の観点から着陸が望まれる
- 問題点：日照が存在すれば氷は溶解する



日照条件の良さと
氷の存在は両立しがたい

着陸候補地に対する 相反した要求の扱い

技術的要求

連続夜時間の
最小化

傾斜角の最小化

地球と通信可能
な時間の最大化

ミッション的 要求

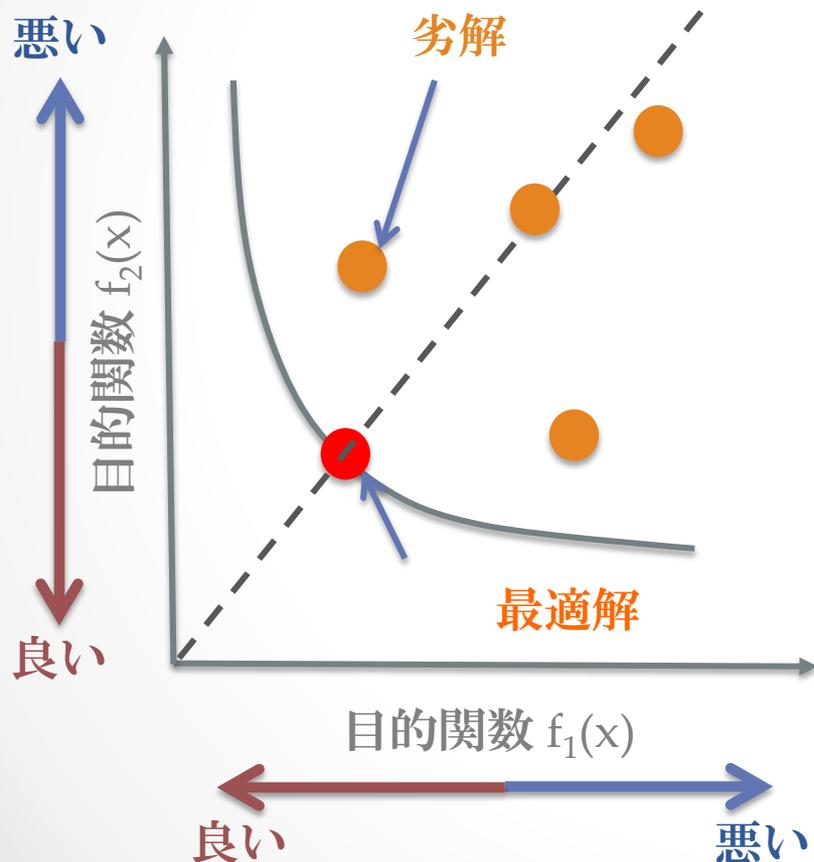
氷の存在する地点
までの距離最小化

全要求を満たすような地点を発見したい

どのように探索すべきか？ ➡ **多目的最適化**

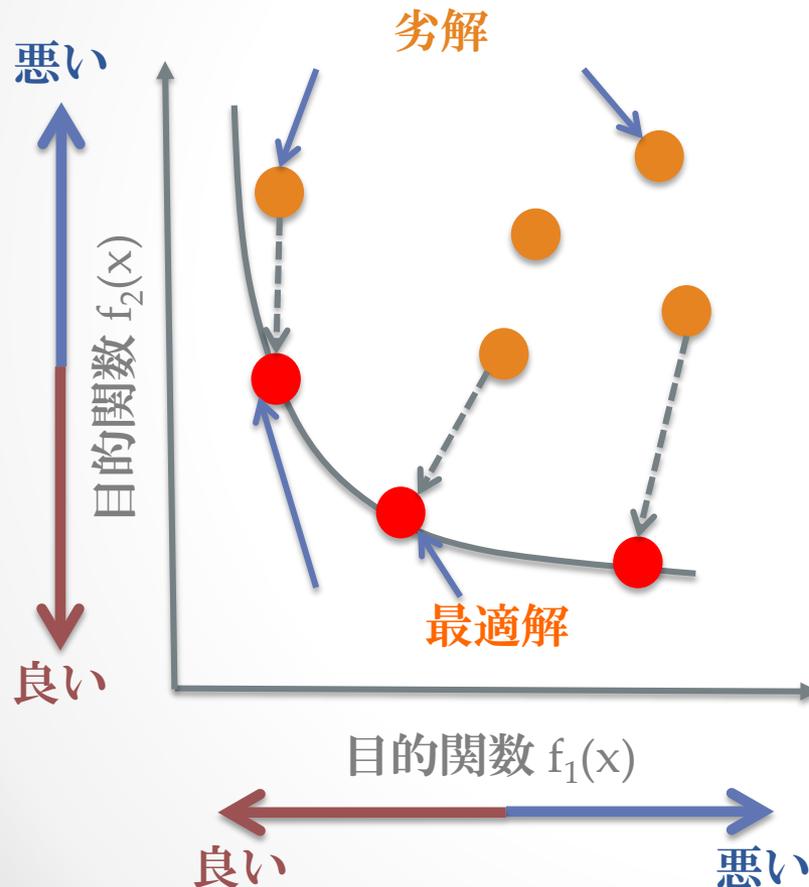
単目的最適化

$$F(x) = af_1(x) + bf_2(x) + cf_3(x) + \dots$$



- 重み付け係数の決定が難しい
 - 異なる単位の評価をどう行う？ (ex. 距離と日照量)
- 一度の探索で一つの解しか求められない

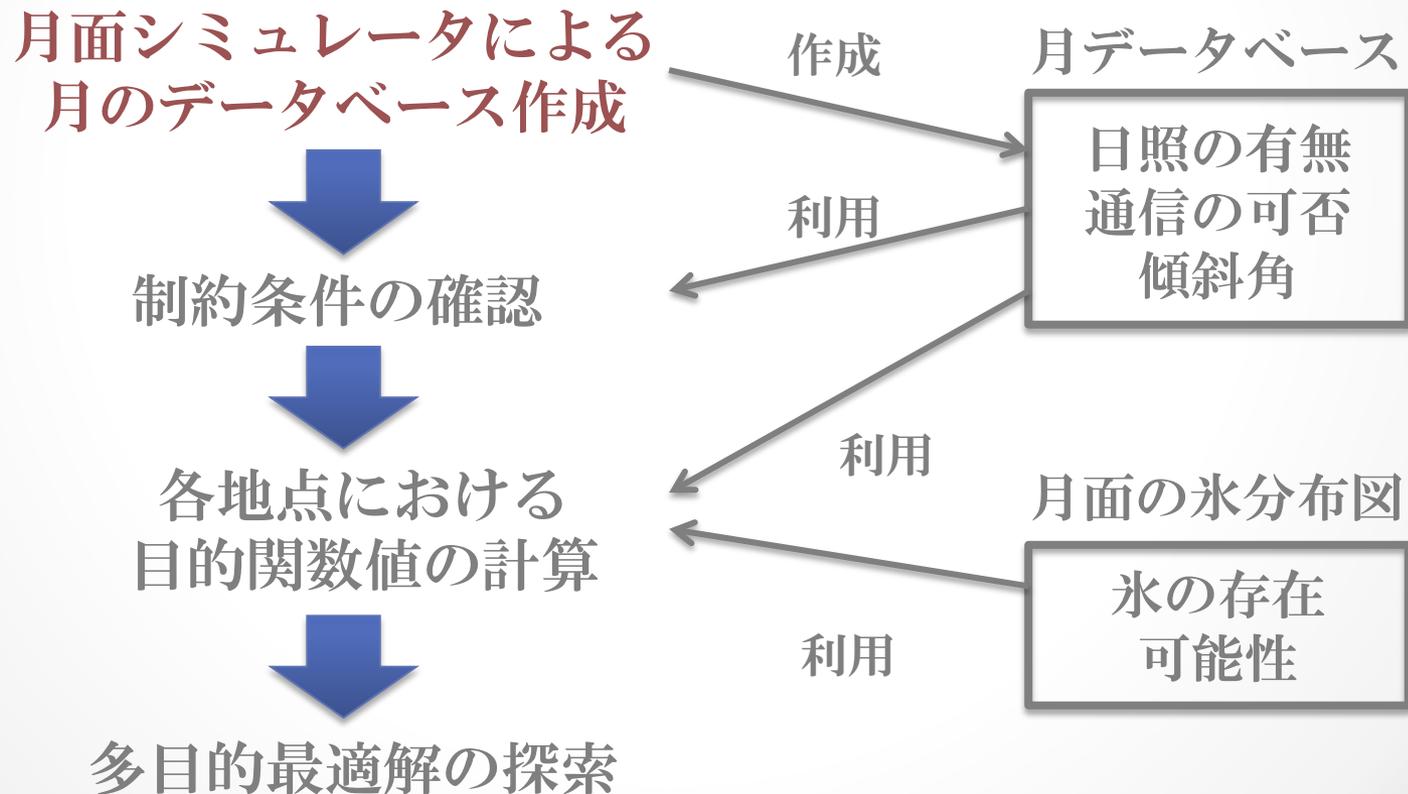
多目的最適化



- 重み付け不要
 - 各目的関数値は別個に評価される
- 複数の最適解を同時に発見できる
- 人間が目的に応じた解を選択可能

多目的最適化による 着陸候補地探索の流れ

考慮する目的：日照、通信、傾斜角、氷の存在



月のデータベース作成

- 日照の有無
通信の可能
傾斜角
- シミュレーションにより計算

月面の一地点におけるデータベース
(10m解像度)

シミュレーション結果画像



1日目

2日目

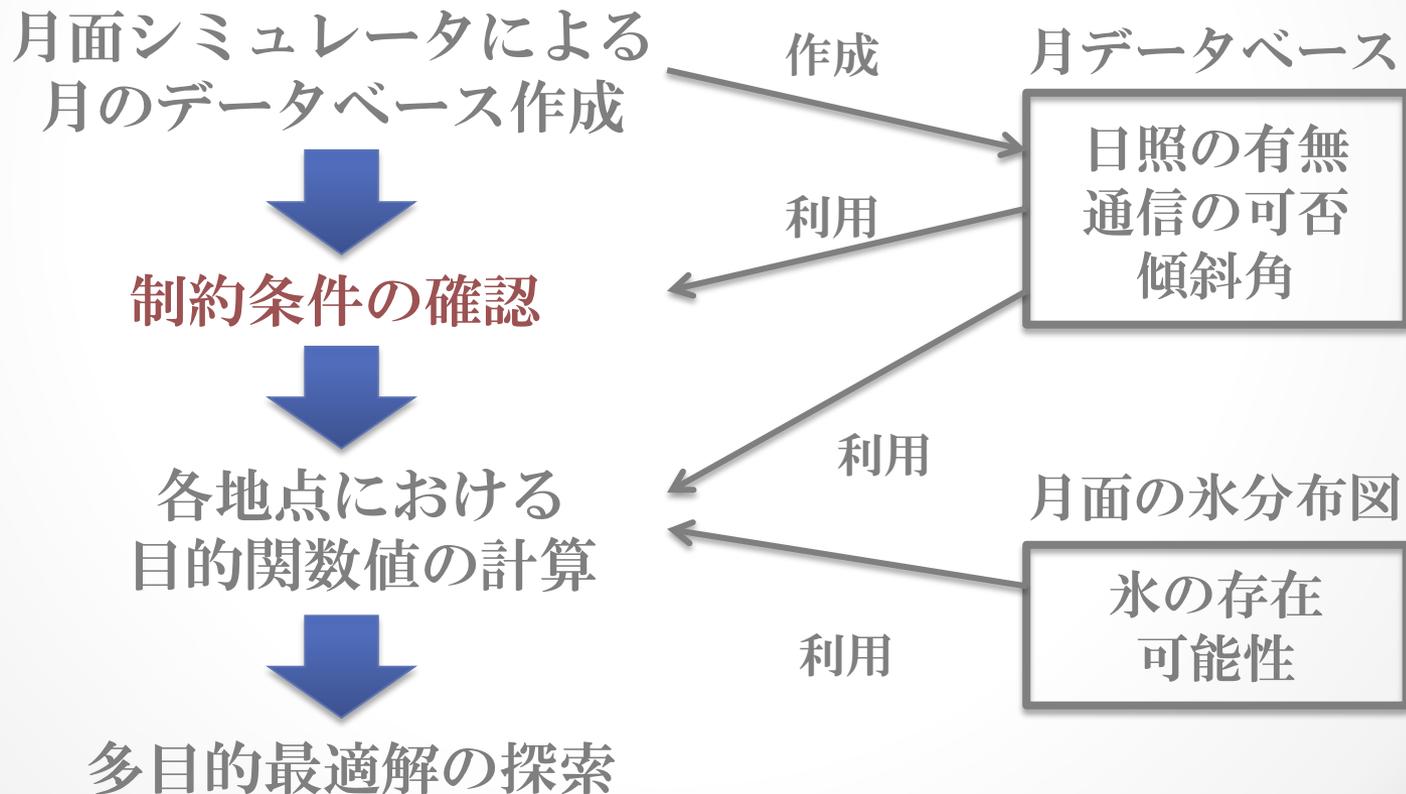
3日目

...

日数	1	2	3	4	5	6	7	...
日照の有無	0	1	1	0	0	0	1	...
通信の可能	1	1	0	0	0	0	1	...
傾斜角	10.5							

多目的最適化による 着陸候補地探索の流れ

考慮する目的：日照、通信、傾斜角、氷の存在



制約条件

制約条件 1 : 傾斜角 15° 以下

制約条件 2 : 連続夜14日以下

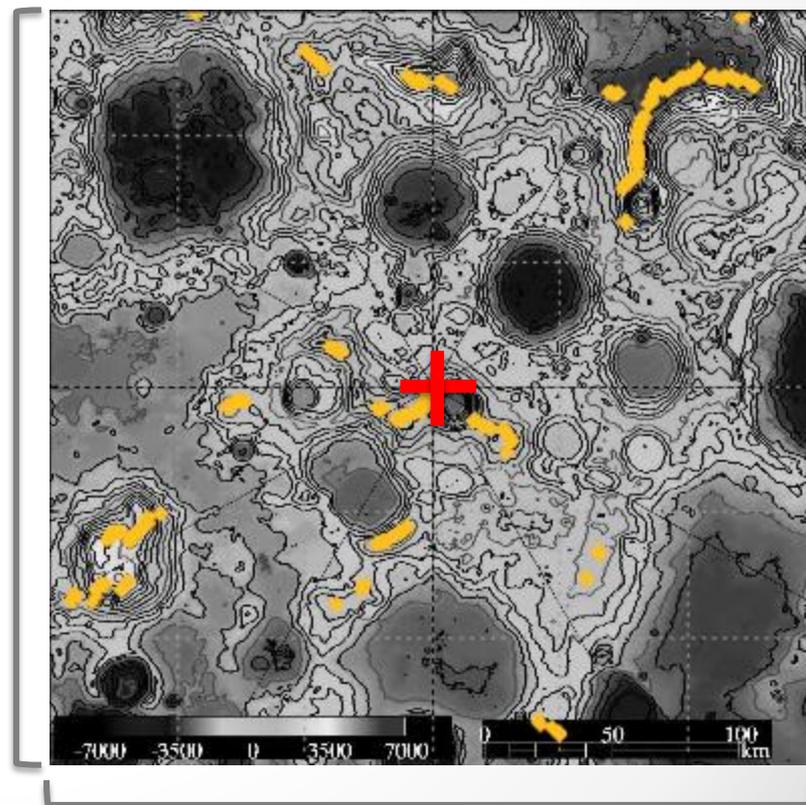
制約条件を満たさない地点を
探索候補から除外

全地点 : 約9億点

制約条件下 : 約17万点

➡ 全探索を可能に

黄色の点 : 実行可能解 (174193 点)
赤い十字 : 月の南極点

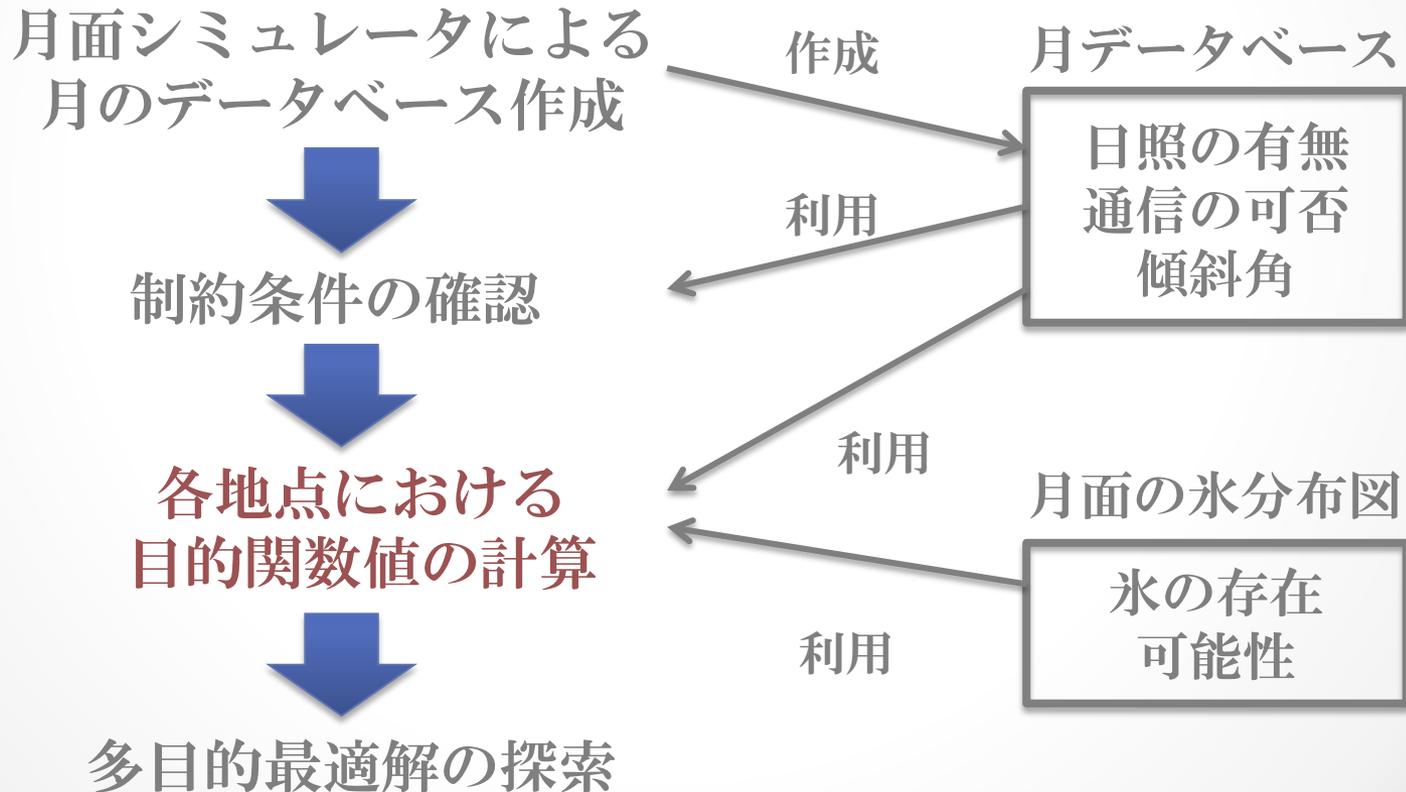


300km

2015/02/13 ● 11

多目的最適化による 着陸候補地探索の流れ

考慮する目的：日照、通信、傾斜角、氷の存在



目的関数値の定義

- 0~1までの値、どれも小さくなるほど良くなるよう定義

日照の有無

$(\text{最大連続夜日数}) / (\text{制限連続夜日数})$

通信可能性

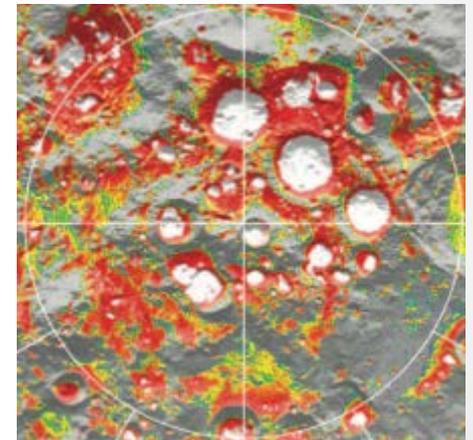
$1 - (\text{通信可能かつ日照のある日数}) / 365$

傾斜角

$(\text{傾斜角}) / (\text{制限傾斜角})$

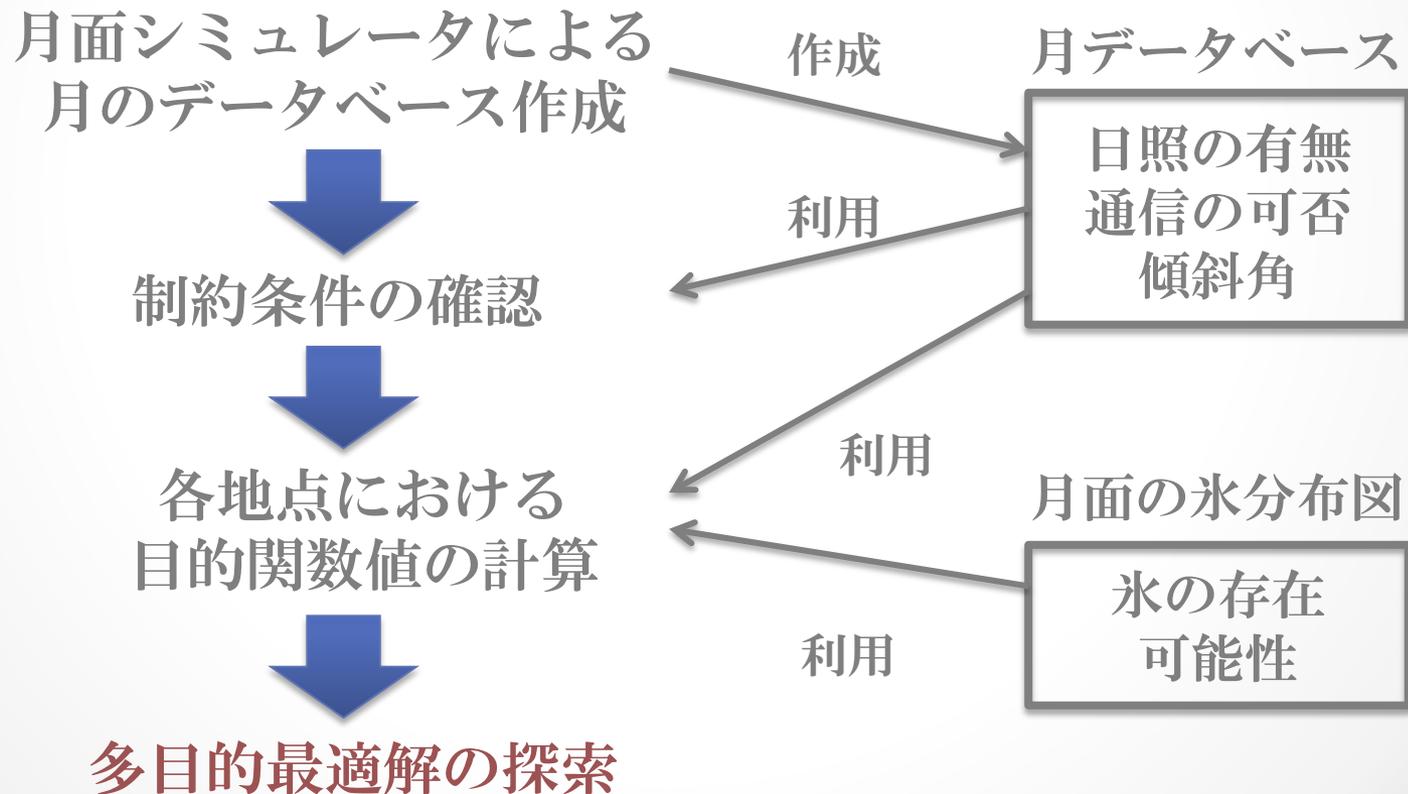
氷の存在

$(\text{氷までの距離}) \times (\text{氷の存在する深さ})$
氷の存在可能性を示した地図を参照
(Paige et al., 2010)



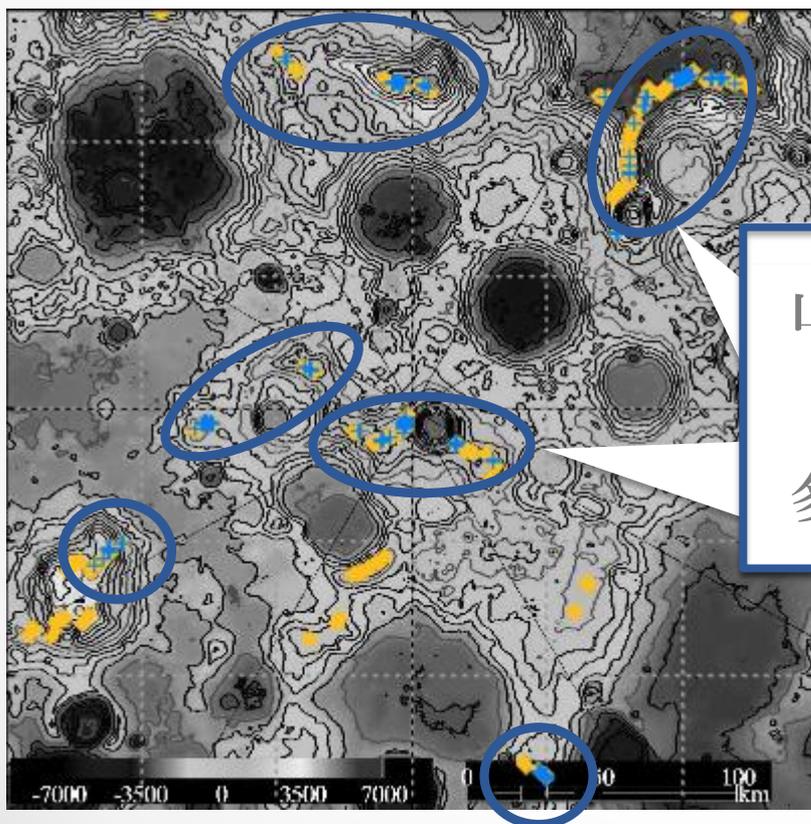
多目的最適化による 着陸候補地探索の流れ

考慮する目的：日照、通信、傾斜角、氷の存在



探索結果

- 黄点：全実行可能解 (174193 点)
- 青点：多目的最適解 (17413 点)



地球の
方向 →

通信がしやすい
ため解が集中

山の上や
南極点
付近に
多く分布

南極点
付近 →

周囲に日照を
遮る障害物が
少ないため
解が集中

目的ごとの地点の傾向

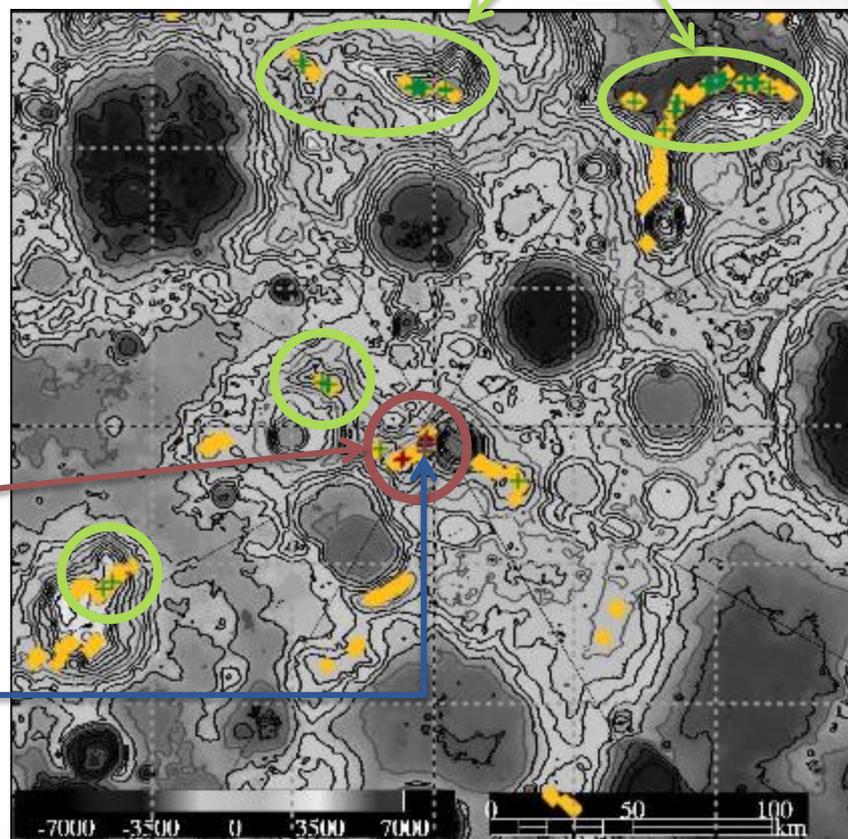
- 各目的関数による地点の傾向分類

③ 地上と頻繁に通信する
探査機の着陸地点に適する

日照	通信	傾斜	氷	地点
○	○	○	○	なし
○	○	×	○	① (6点)
○	×	○	○	② (745点)
×	○	○	○	③ (4073点)

② 自律性の高いローバを
伴う探査に適する

① きわめて範囲が狭いが、
着陸できれば良好な環境

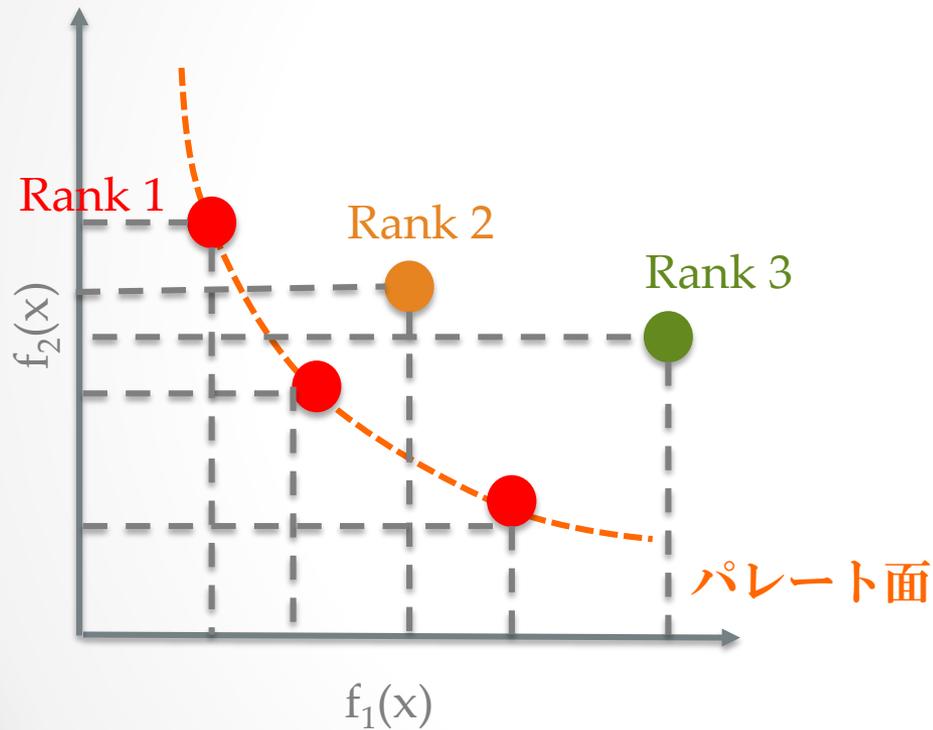


本研究のまとめ

- 多目的最適化を用いた相反する要求を満たす着陸地探索
 - 目的：日照条件、通信条件、傾斜角、氷の存在可能性
- 複数発見した多目的最適地点を目的ごとに傾向分類
 - ➡ それぞれに適したミッションを分析
 - 南極点中心部：傾斜以外の条件良好
機能維持および探査に適した環境
 - 南極点周囲20km圏内：通信以外の条件良好
自律性の高いローバを用いた探査
 - 地球側に位置する山上：日照以外の条件良好
地上との頻繁な通信・制御を要する探査

ご清聴ありがとうございました

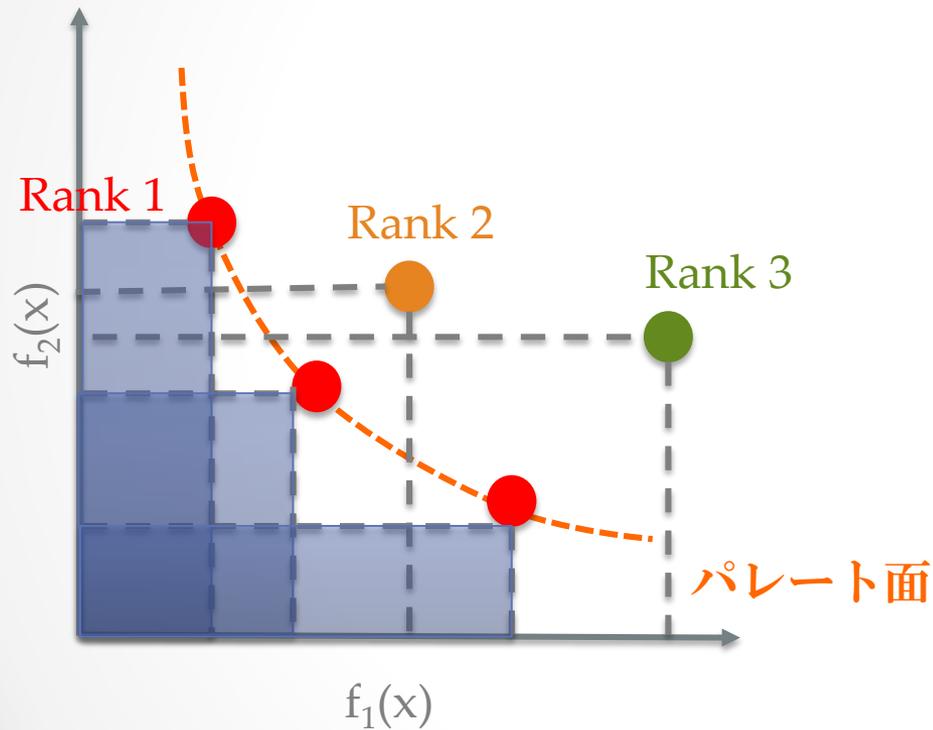
パレートランキング法



- ランクの定義
 $r(X_i) = 1 + n_i$

n_i : 解 X_i よりも
優越する解の個数

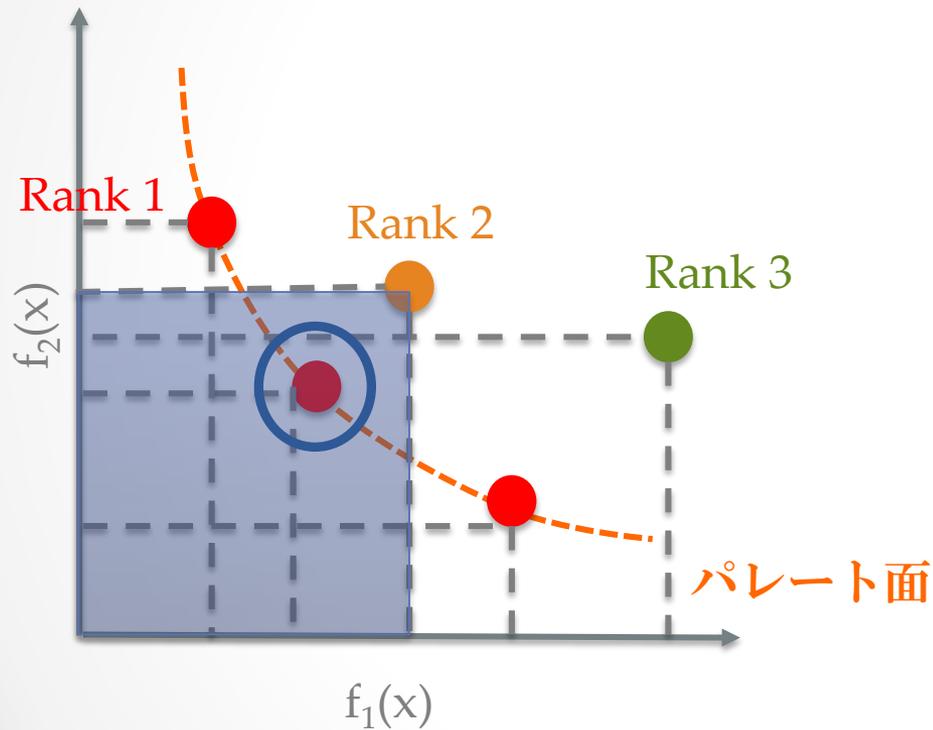
パレートランキング法



- ランクの定義
 $r(X_i) = 1 + n_i$

n_i : 解 X_i よりも
優越する解の個数

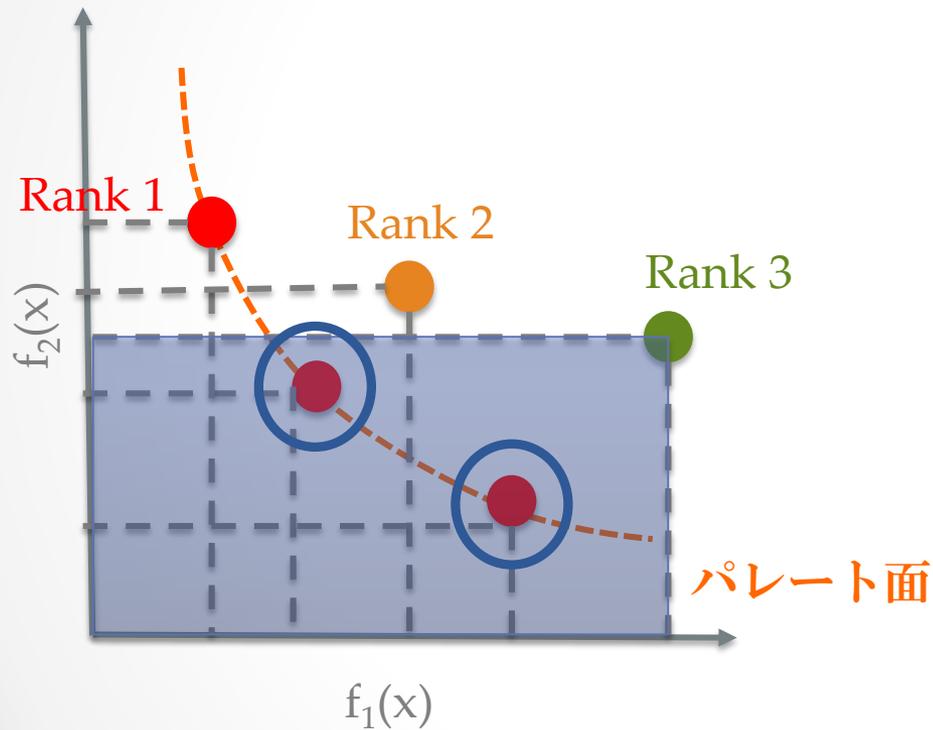
パレートランキング法



- ランクの定義
 $r(X_i) = 1 + n_i$

n_i : 解 X_i よりも
優越する解の個数

パレートランキング法



- ランクの定義
 $r(X_i) = 1 + n_i$

n_i : 解 X_i よりも
優越する解の個数

目的関数値の定義

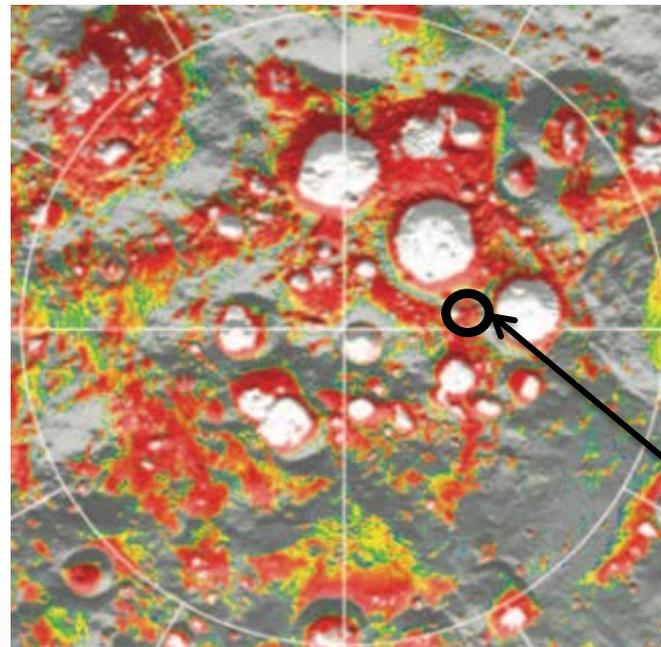
日照の有無

通信可能性

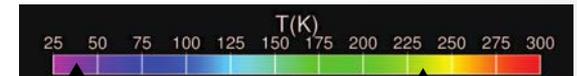
傾斜角

氷の存在

- (氷までの距離) × (氷の存在する深さ)
- 氷の存在可能性を示した地図を参照
 - 探索地点とのRGB値の差分値



Paige et al., 2010.



R : 255
G : 0
B : 0

R : 0
G : 0
B : 255

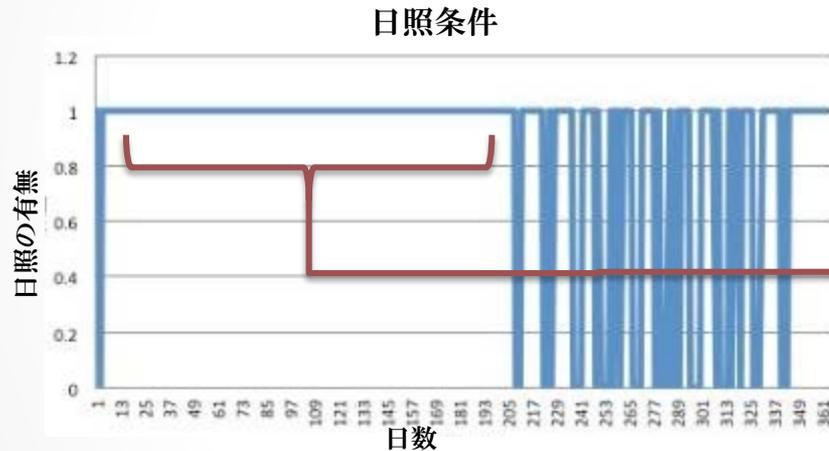
$$15 + 10 + 5 = 30$$

~~$$240 + 10 + 250 = 500$$~~

R : 240
G : 10
B : 5

今後の課題

- 制約条件による解の極端な絞り込みを防止
(ex. 最大連続夜は14日以上存在するが、
他の日は常に日照が存在する場合など)

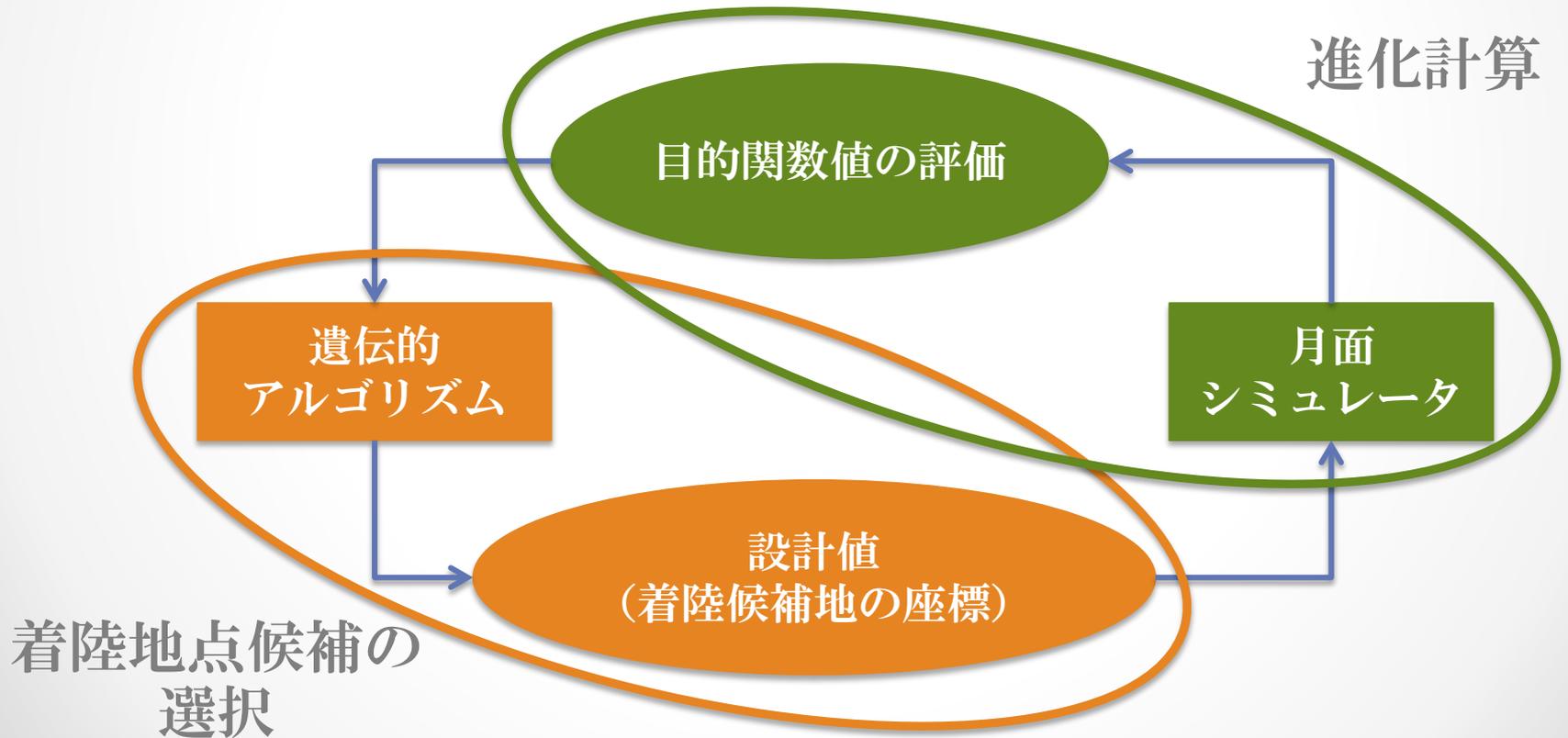


この期間にミッションが
完了すれば、連続夜の長さの
考慮は不要

- 制約条件を減らしながら計算速度を向上させるため、
多目的進化計算を導入する

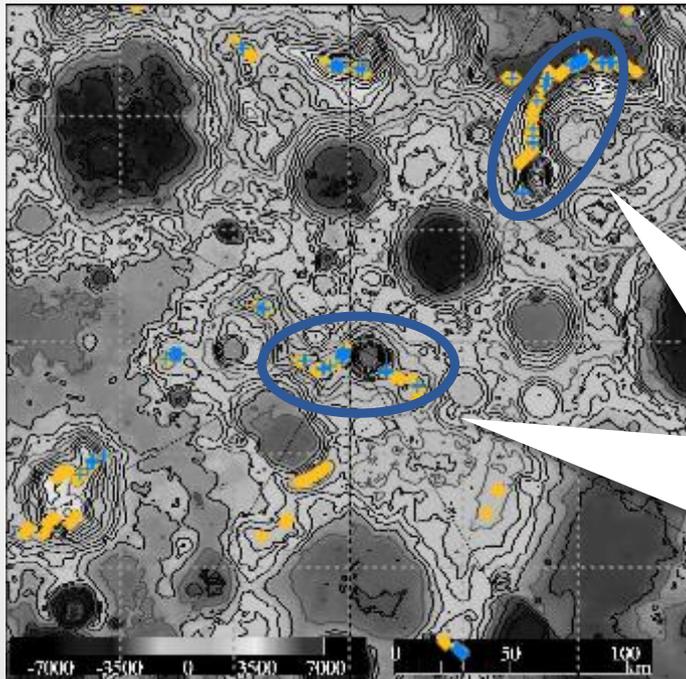
進化計算の流れ

- 着陸候補地点探索における多目的最適進化計算の導入



探索結果

- 黄点：全実行可能解 (174193 点)
- 青点：多目的最適解 (17413 点)



↑ 地球の
方向

山の上や
南極点
付近に
多く分布

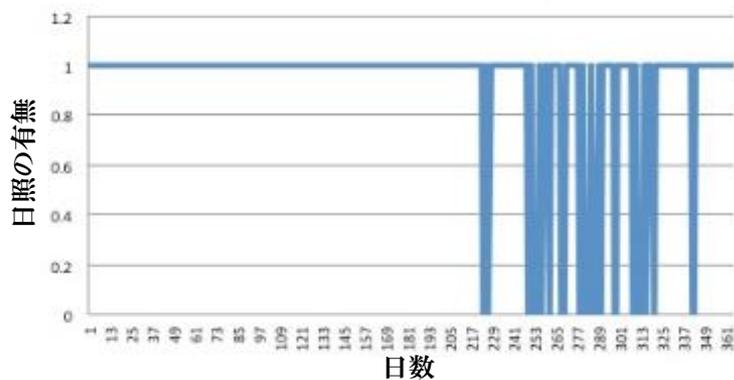
各目的関数間の相関

目的関数	相関係数
日照 & 通信	0.430
日照 & 傾斜	0.124
通信 & 傾斜	0.384
日照 & 氷の存在	-0.300
通信 & 氷の存在	-0.600
傾斜 & 氷の存在	-0.250

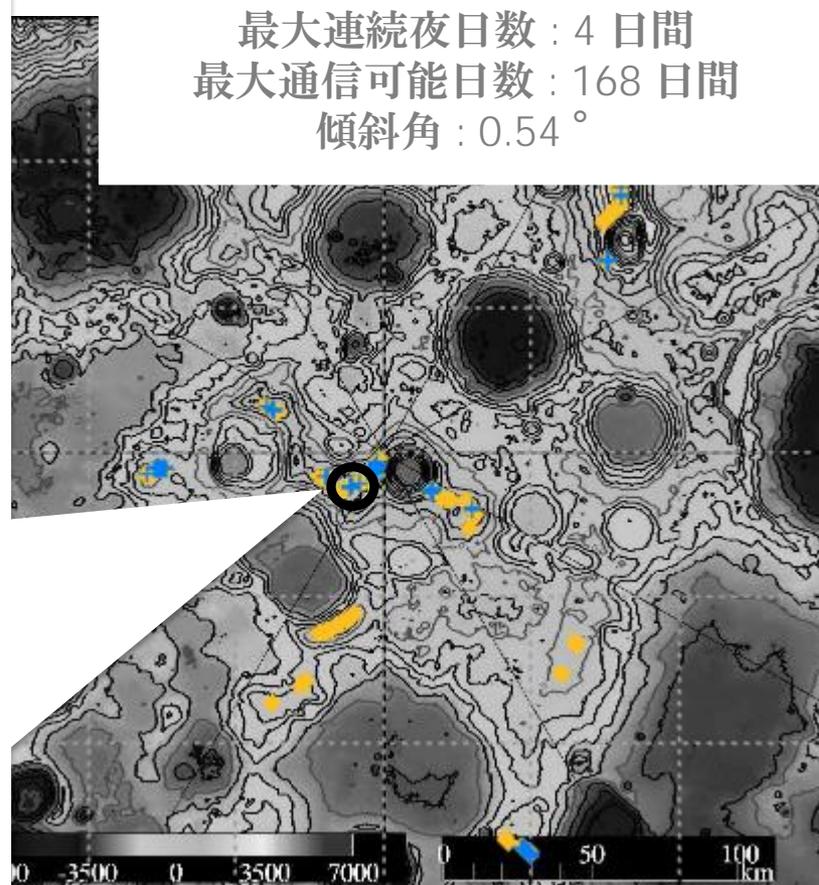
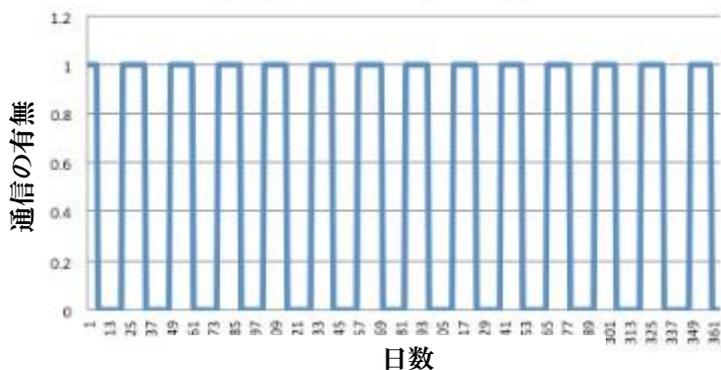
他と比べ
目立った相関を示した

探索結果

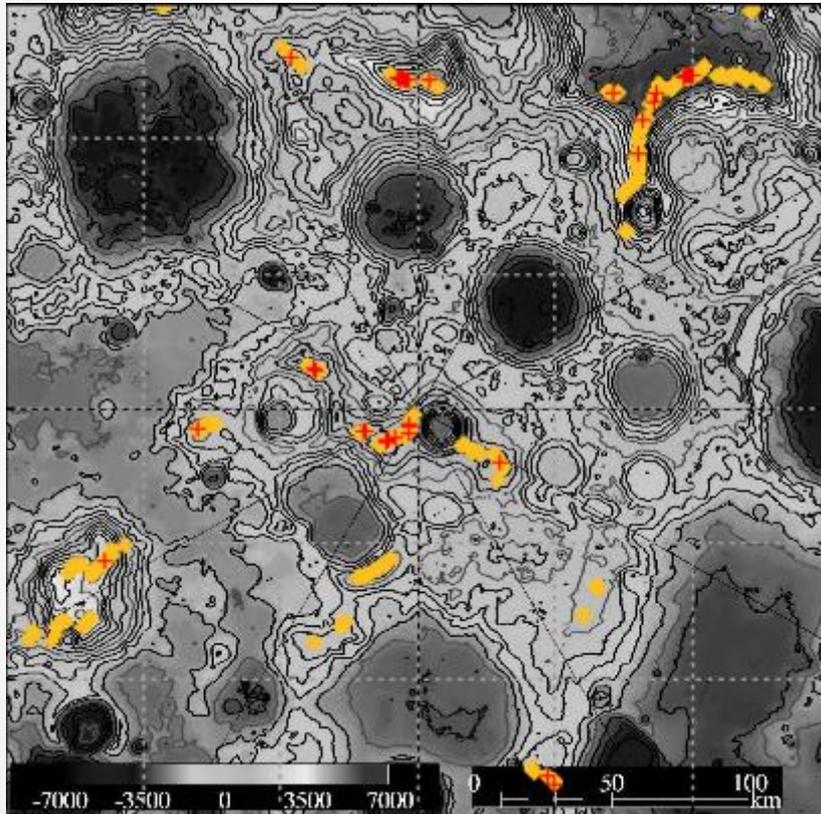
日照条件



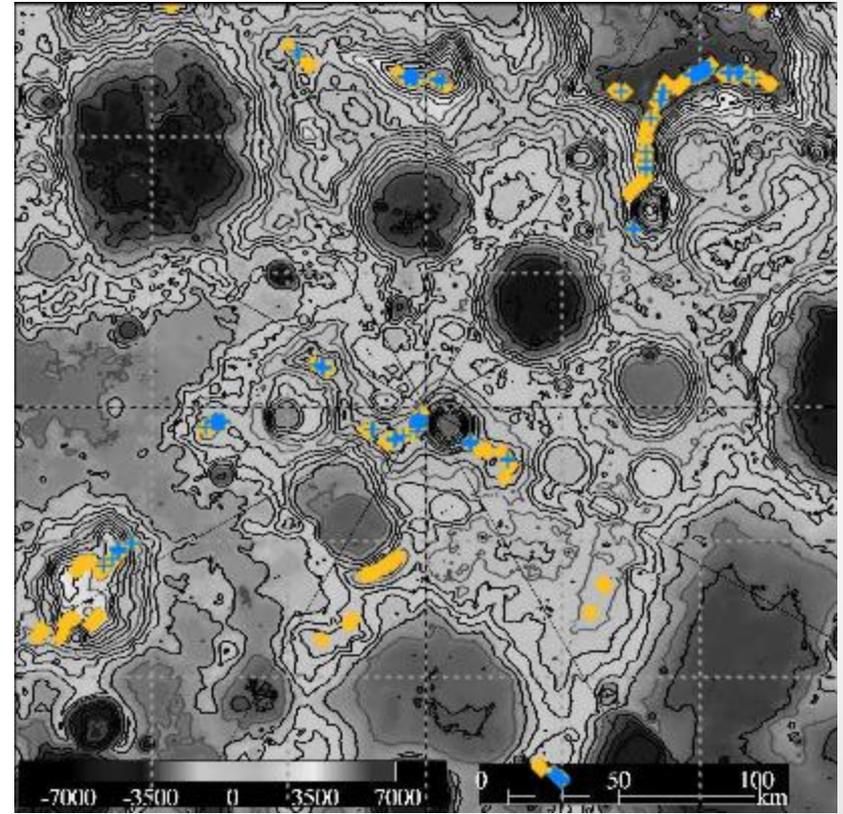
通信条件



パレート最適解および 弱パレート最適解との比較

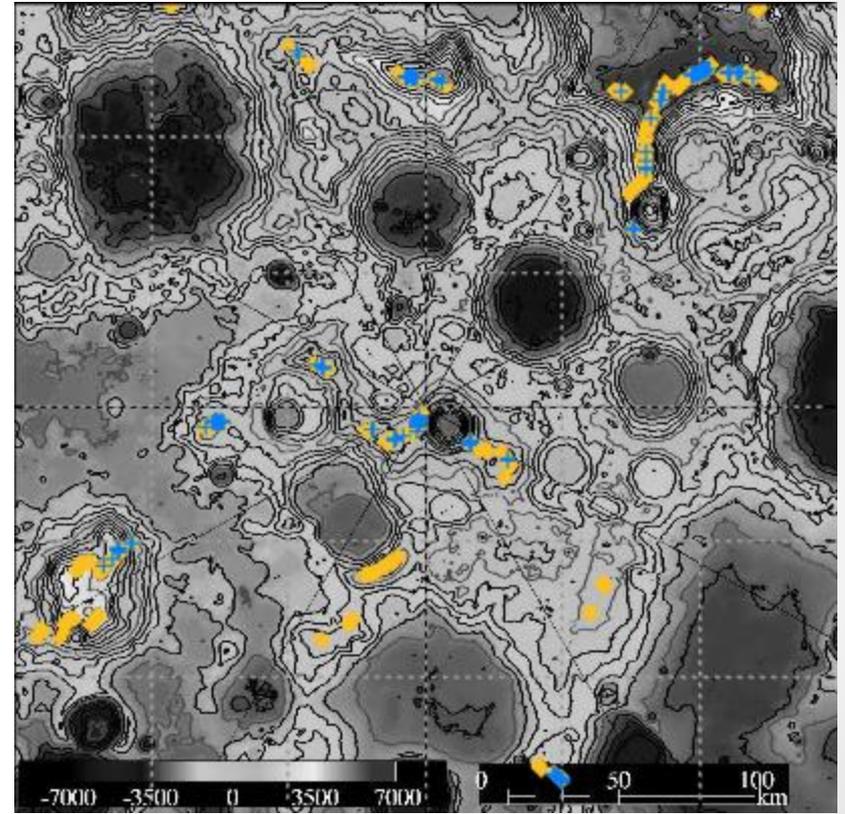
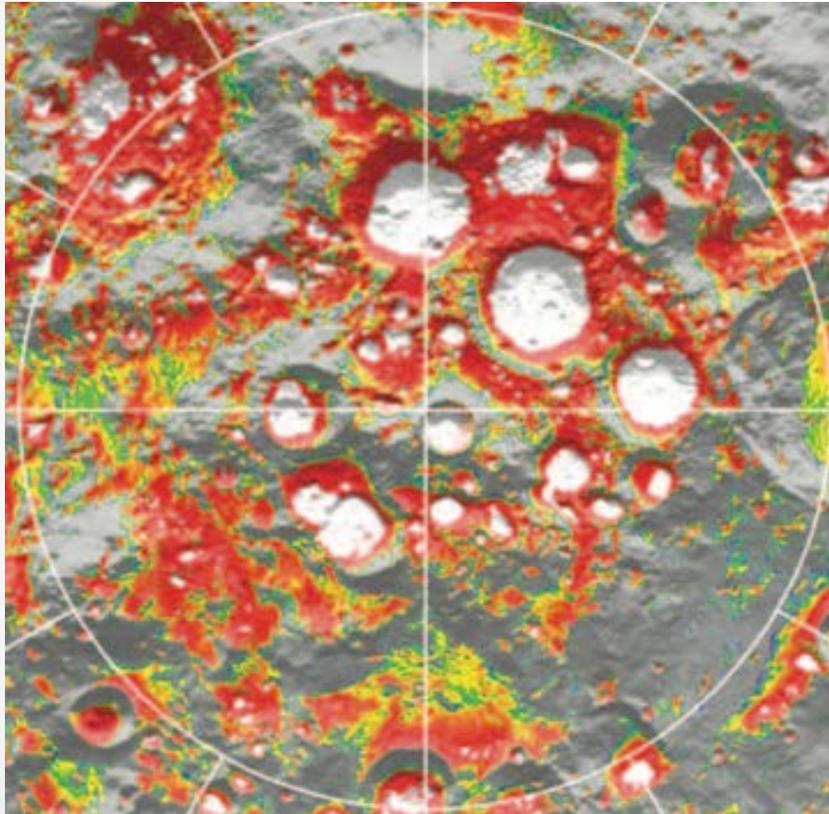


パレート最適解



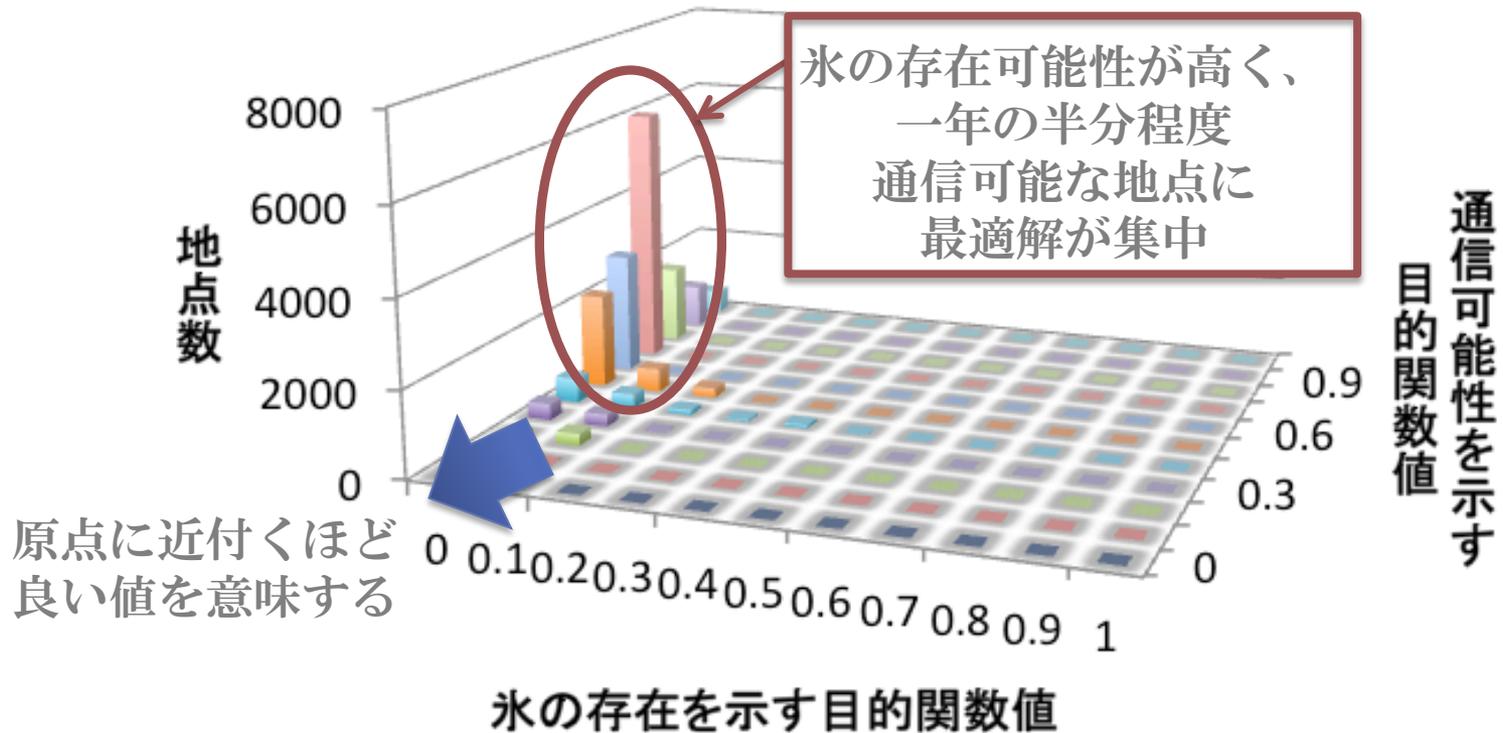
弱パレート最適解

氷の分布と多目的最適解

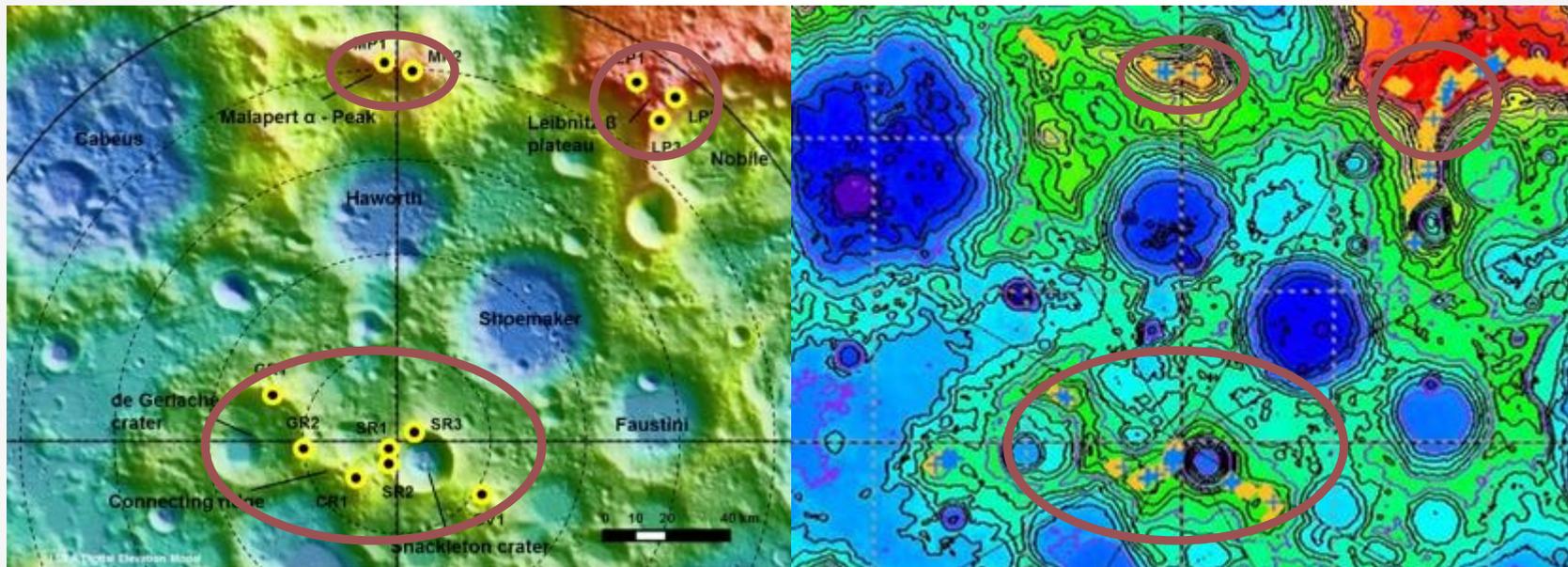


探索結果

通信と氷の関係



ESAによる探索結果との比較



ESAによる探索結果
(日照量のみ考慮)
Rosa et al., 2012.

本研究による探索結果

