



# Remote Sensing Data Analysis Part 1

N. Hirata

# Contents



- リモートセンシングデータの特徴
- 輝度較正
  - 輝度変換, 反射率変換
  - MTF, PSFとdeconvolution
- 幾何補正
  - 地図投影法
  - リサンプリング
  - モザイク

# リモートセンシング

- 遠隔の対象物の非接触的な手法による計測
- 多くの場合光を含む電磁波による受動的な観測手法
  - その他: レーダ観測, レーザ測距, 重力場計測など
- 観測機器のプラットフォーム
  - 飛行機, 人工衛星, 探査機など
- 本講義では探査機, 衛星による画像計測を主に扱う

# データの種類

- データ構造による分類
  - 1Dデータ
    - スペクトル
    - 時系列データ
  - 2D (ラスタ) データ
    - 画像
  - 3D or more
    - マルチバンドデータ
    - ハイパースペクトルデータ

- 観測手法, 手段による分類
  - 可視光
  - 紫外, 近赤外, 中間赤外, 遠赤外
  - パンクロマチック画像
  - 分光画像
  - レーダ
- データ内容による分類
  - 反射率データ
  - デジタル地形モデル
  - その他の派生データ

# ラスターデータ

- 二次元に配列されたデータの集合
  - 複数のラスターデータをセットにする場合も
- いわゆる「画像」データ
- 画素値は単に画素の明暗を示すのではなく、物理的な意味を持つ
  - 「画像」として表示、印刷する際にはじめて画素値を明暗などに対応させることになる
  - 対応の方法は一意ではない
  - その意味では「画像」と呼ぶのはあまり適当ではない

# リモートセンシング画像の画素値

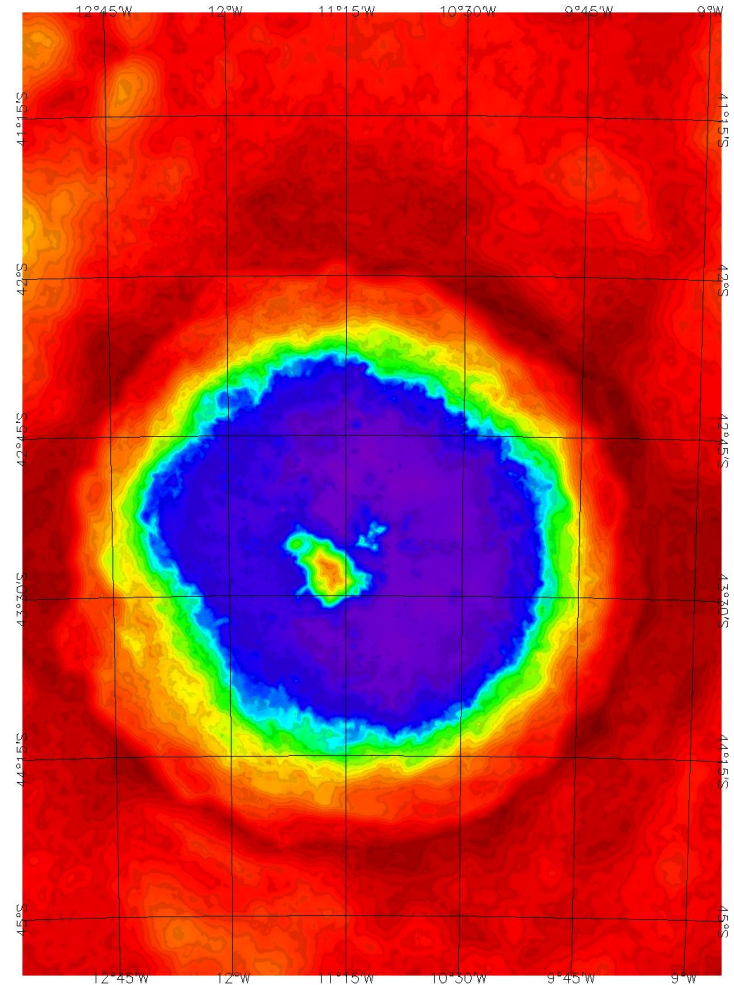
- **物理量**
  - 単位を持ち，測定可能な量
  - 例：輝度，反射率，標高
- **何らかの相対的な尺度**
  - 科学的に取り扱い可能な量で，物理量に準じる
  - 例：宇宙風化度
- **画素値そのものに重要な意味がある**
  - 勝手に変えてはいけない
  - 表示と保存は分離される
- **センサ出力から有用かつ正確な物理量を導くためには校正が必要**

# 画素値 (Digital Number: DN)

- 一般的なカラー画像では256階調 (8bit)
  - カラーの場合はRGBの三原色で $8 \times 3 = 24$ bit
  - 一般的なディスプレイの表示可能階調も同じ
- リモートセンシングデータの場合
  - 8bitでは階調数が不足
  - 物理量は一般に実数を取る
  - (long) int型, float型, double型で保存
  - 整数型で保存する場合は, 実数値への変換方法も保存する必要がある (一般には線形変換)

# リモートセンシングデータにおける 保存形態と表示の切り離しの例

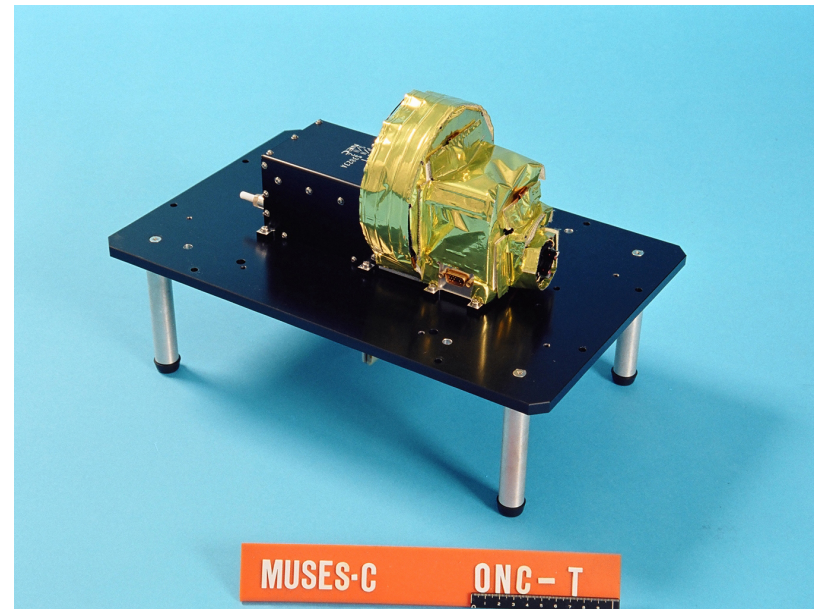
- デジタル地形モデル  
(digital terrain model)
  - 画素値は標高値[m]
  - 数値を一定の方法で色に割り当て
- 地理座標グリッド
  - 地図投影済み
  - 表示ソフトが描画





# データ処理の流れ

- データ取得（撮像）
  - 観測機器でデータを取得
- 輝度較正
  - 生データへの値付け（物理量に変換）
- 幾何補正
  - 画像座標と幾何条件（対象の地理座標など）の対応付け
- 解析
  - 具体的な情報の読み取り



はやぶさ搭載カメラ  
AMICA（別名ONC-T）

# 輝度較正

# Radiometric Calibration

- 較正 (calibration)
  - 測定データの見盛り付け
  - 例：バネばかりの伸び量から重量への変換
- 狭義の較正
  - センサ出力量からセンサ計測物理量への変換
  - 光学センサはデジタル値を出力
  - 計測物理量は輝度 (センサへの入射光量)
- 広義の較正
  - 輝度から反射率などへの変換も
  - 解析上重要なのは、対象の物性としての物理量
  - または「反射率変換 (conversion)」と呼ぶ
- 較正結果の確認, 評価作業が検証 (Validation)
  - まとめてCal/Valとも呼ぶ

# 光学センサ

- **CCD (Charge Coupled Device), CMOS**
  - ダイオードによる光起電力効果によって、光子を電荷に変換する
  - 入射光子数と発生電荷量は比例
- **暗時信号（電流）**
  - 入射光がない場合（暗時）でも発生する電荷
  - 出力信号は、正味の信号電荷と暗時信号の和
  - ほとんどの場合、暗時電流量は温度に比例する
  - センサを冷却して低減可能

# 光学センサの出力値

- 光子の入射と電荷の発生は量子化されている
  - 光子数, 電荷量が少ないとノイズが増える
  - ノイズ量はイベント数の平方根
- センサ感度
  - 入射光子数と発生電荷量の比
- 蓄積（露出）時間
  - 長ければ入射光子数も増える
  - 暗時信号も増える
  - 被写体やセンサが移動している場合は長くできない
- 光学系
  - 集光力の大きな光学系は多くの光子をセンサに導く
  - F値（=口径/焦点距離）で表す

# センサ出力の処理

- センサ出力はアナログ信号
  - 電流
  - または電圧へ変換
  - 必要に応じてアンプ増幅を施す
- アナログ-デジタル変換（A/D変換）
  - センサごとのビット分解能
    - はやぶさのAMICA: 12bit
    - かぐやの地形カメラ: 10bit
    - かぐやのスペクトルプロファイラ: 16bit
- デジタル信号が外部出力となる

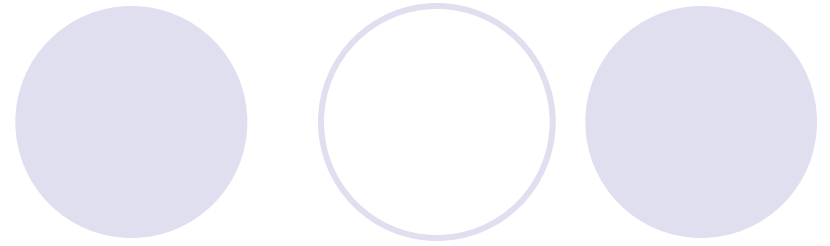
# 輝度較正の手順

- センサ内での処理の逆を行う
- 乗除算による
  - $DN \rightarrow (D/A \text{変換}) \rightarrow \text{電荷量}$
  - $\text{電荷量} \rightarrow (\text{感度較正}) \rightarrow \text{光子数/輝度}$
  - $\text{蓄積時間}^{-1}$ , 画素の視野 (画素サイズ, F値)
- 暗時信号の補正は加減算による
  - 暗時補正 (ダークフィールド補正, オフセット除去)

# 校正係数の決定

- 打上前校正: pre-flight calibration
  - センサ製造時に試験を行い，校正係数を調べる
  - 環境温度や光源のスペクトルなどの制御が重要
  - 試験できない場合はカタログ値や設計値を用いる
- 打上後校正: in-flight calibration
  - 運用中に校正観測を行い，係数を調べる
  - 打上後や運用中に係数が変化する可能性がある
  - 校正観測の対象は対象センサ以外の手段で物性を調べておく必要がある

# 画素単位での較正

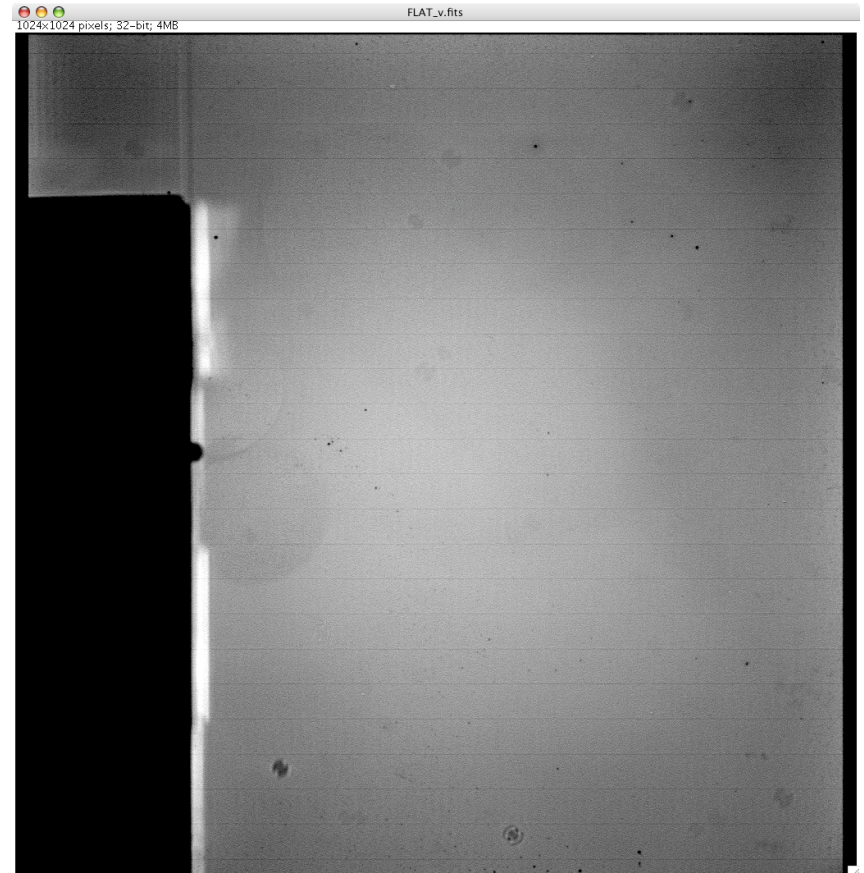


- 複数の画素からなるセンサの場合，感度は一様とは限らない
  - 光学系の周辺減光
  - 検出器の画素間感度偏差
  - 検出器，光学系のゴミ
- フラットフィールド (flat field) 補正

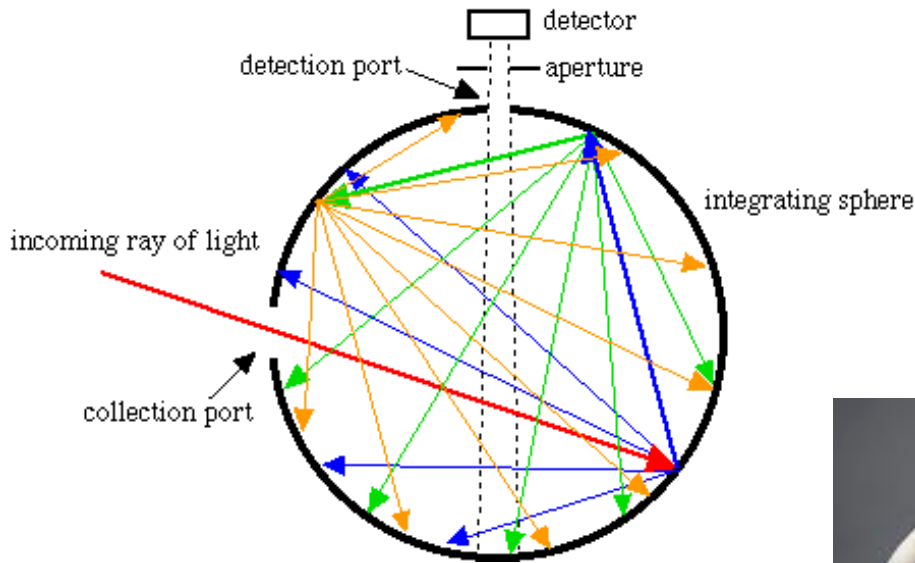


# はやぶさ搭載カメラAMICAの フラットフィールドデータ

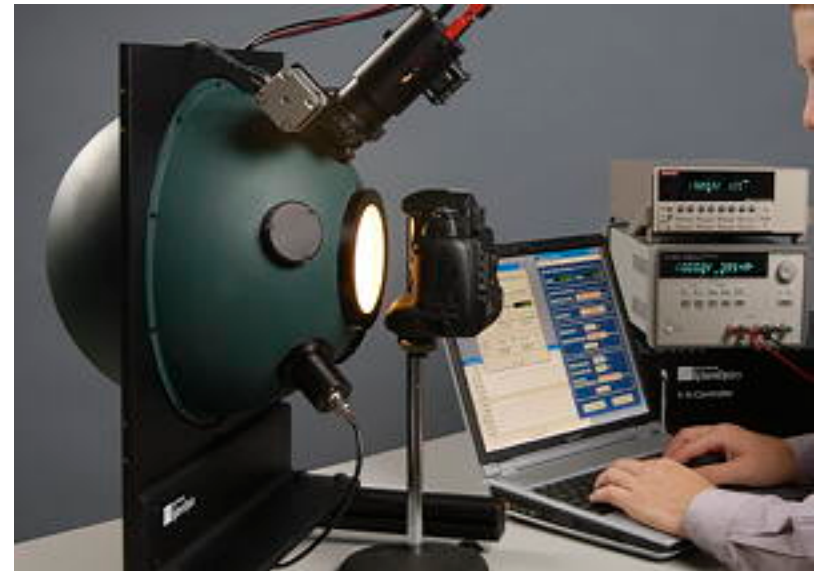
- 画素間の相対感度偏差  
マップ
- 均質な光源を撮像して  
取得
  - 積分球
  - 空
  - 望遠鏡ドームの内側
  - 多数の画像のスタック
- 観測データをフラット  
フィールドデータで  
割って感度偏差を補正



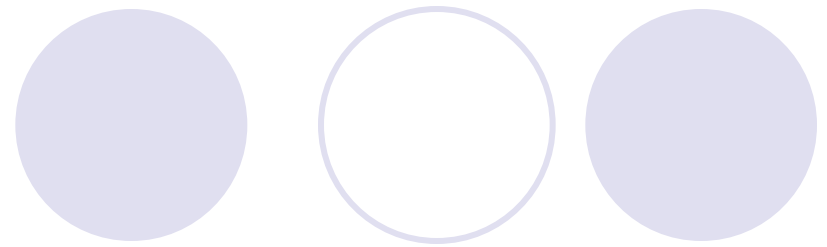
# 積分球



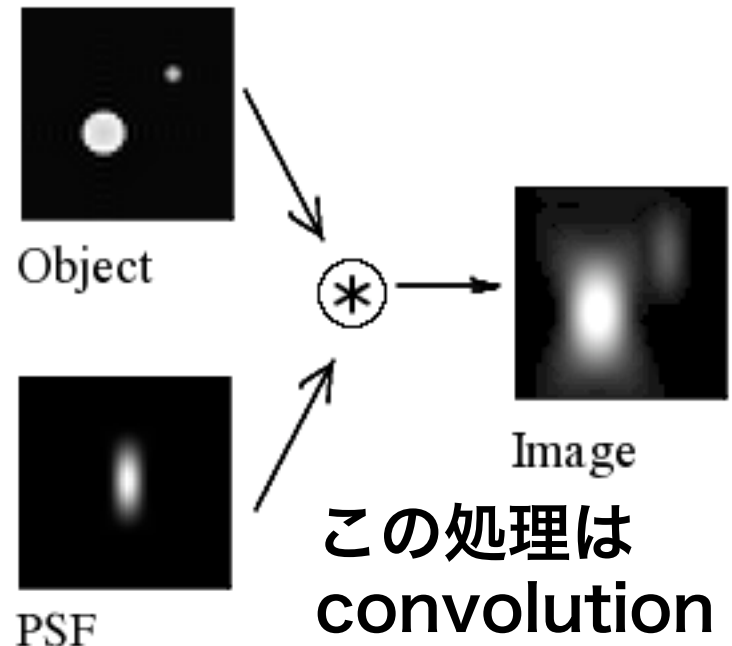
- 球体の内部で光を何度も散乱させて均質な光源とする



# 像のにじみ



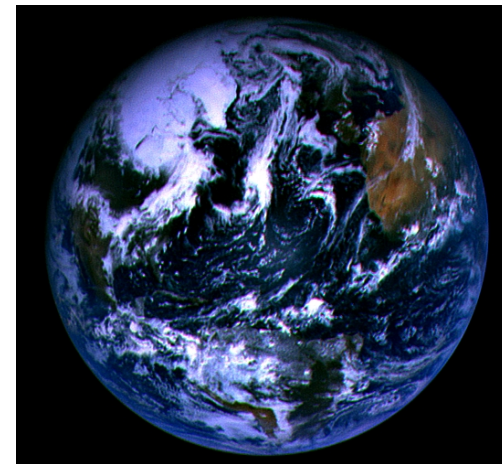
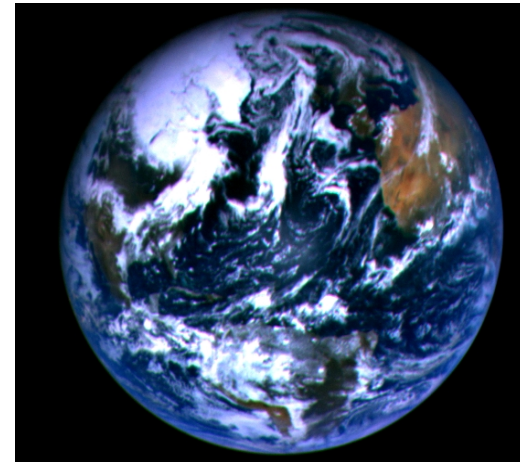
- 光学系には必ず収差がある
  - 点光源もにじんで大きさを持つ像になる
  - 面光源も隣接する画素同士にじみの影響を受ける
- 光学系の収差量の表現
  - 点光源のにじみ: point spread function (PSF)
  - 繰り返しパターン（縞, 波）のにじみ: modulation transfer function (MTF)



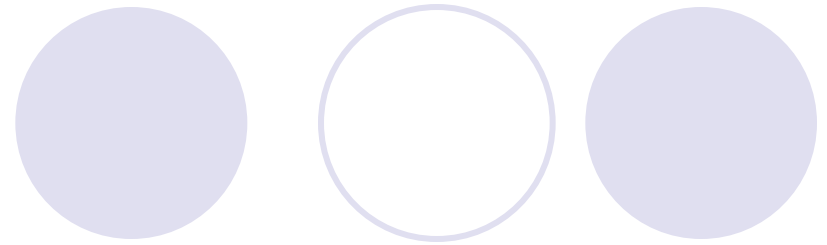
[http://en.wikipedia.org/wiki/Point\\_spread\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Point_spread_function)

# 面光源対象のdeconvolution

- PSFのモデル化によるdeconvolution
  - 画素同士のにじみ量を逆算し，取り除く
  - 理想的な像の再現
  - 各画素ごとの真の入射光量を推定
  - モデルの精度によっては却って誤差を生む
- 一般的なシャープフィルタによる処理
  - 輝度情報が失われる
  - アーティファクトの発生
  - 輝度校正の観点からは不適

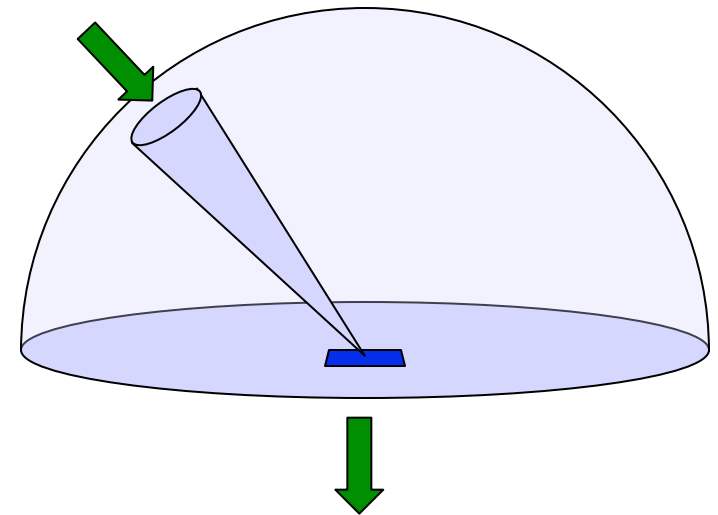


# 放射量と輝度



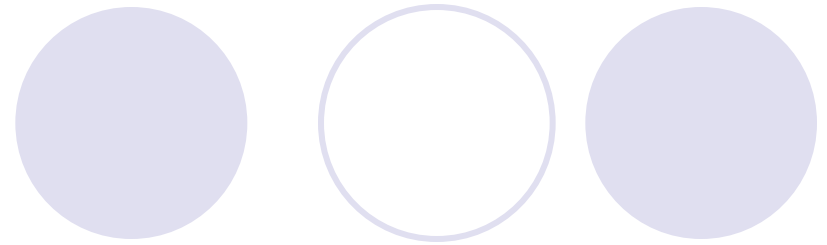
- 放射エネルギー
  - 総入射光量
  - 単位: J
- 放射フラックス
  - 単位時間あたりの放射 (入射) エネルギー
  - 単位: W (J sec<sup>-1</sup>)
- 放射輝度
  - 光学系を通過してセンサ上に入った放射フラックス
  - 単位立体角あたり, かつ単位面積あたりのフラックス
  - 単位: W m<sup>-2</sup> str<sup>-1</sup>

放射輝度

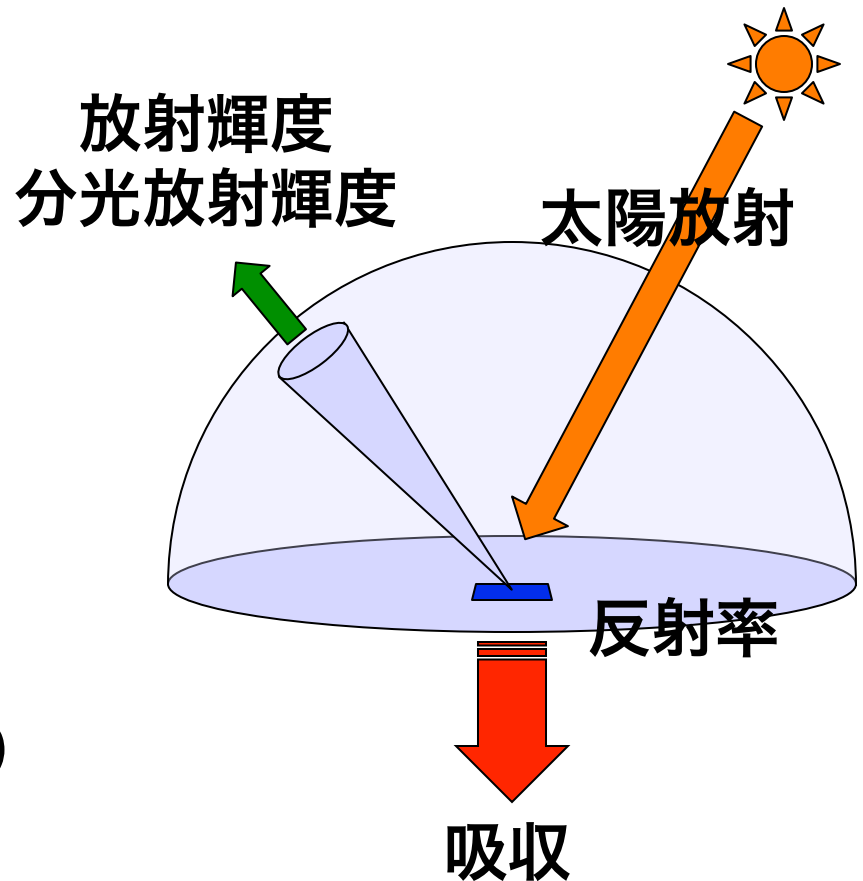


放射エネルギー  
フラックス

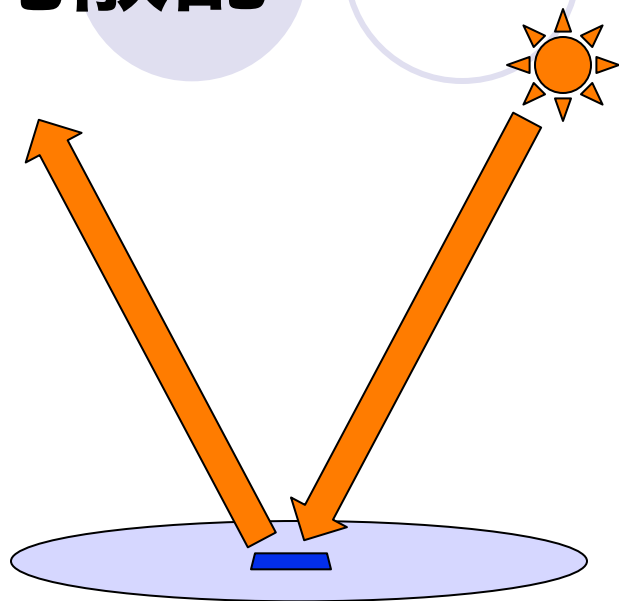
# 放射量と輝度



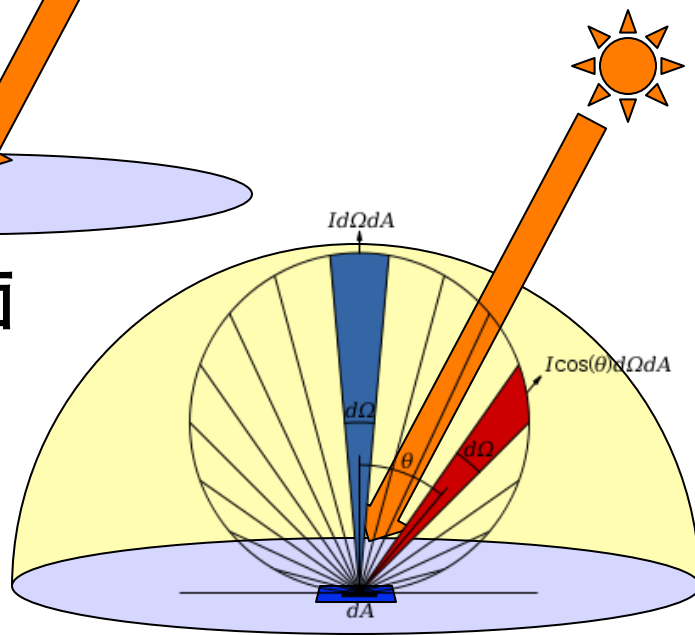
- 太陽を光源とする
  - 太陽放射はほぼ一定
    - 太陽常数 (定数)
  - 単位面積あたりの放射フラックス (照度) :  $W m^{-2}$
- 太陽光の一部が観測者の方向に反射・散乱される
  - 反射率
- 分光放射輝度
  - ある波長帯に着目した放射輝度
  - 単位:  
 $W m^{-2} str^{-1} \mu m^{-1}$  (波長:  $\mu m$ )  
 $W m^{-3} str^{-1}$  (波長:  $m$ )



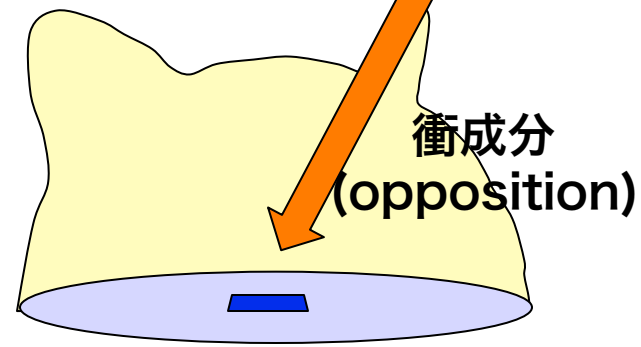
# 光散乱



鏡面



鏡面反射成分



吸収

自然界の光散乱

完全散乱面 (Lambert面)  
どの方向から見ても同じ輝度

# 反射率

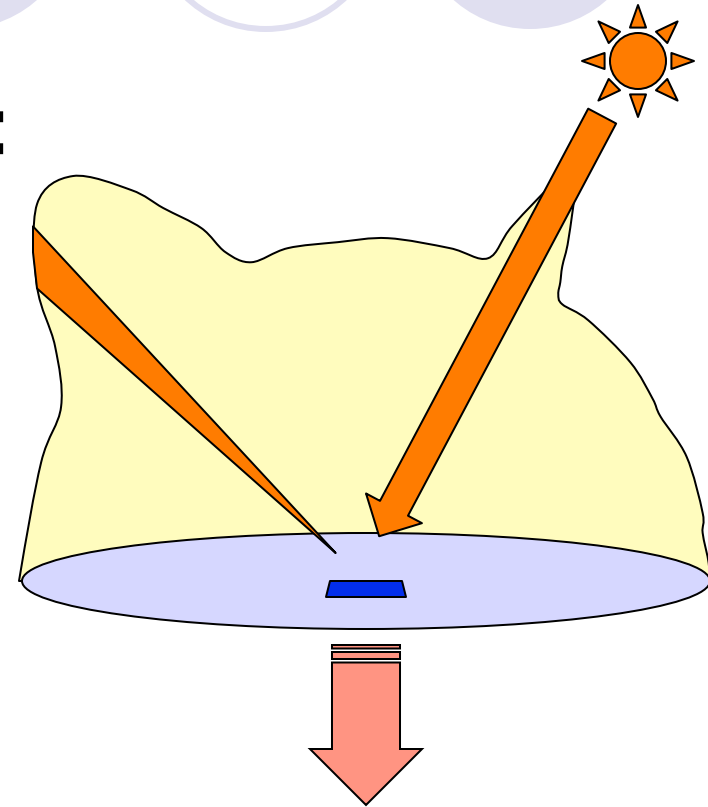


- 入射光強度と反射光強度の比
- 定義
  - 「反射光強度」の定義や基準によってさまざまな「反射率」が定義されている
  - bidirectional reflectance (双方向反射率)
  - hemispherical reflectance (半球反射率)
- アルベド (albedo) とも

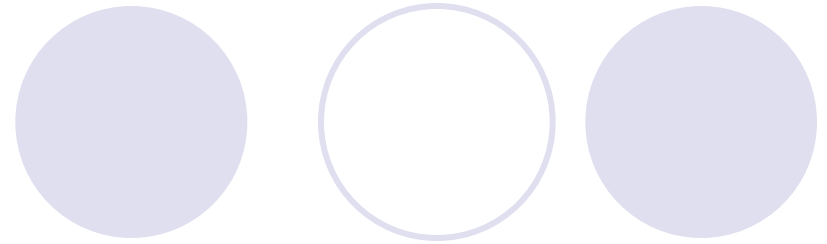


# 双方向反射率

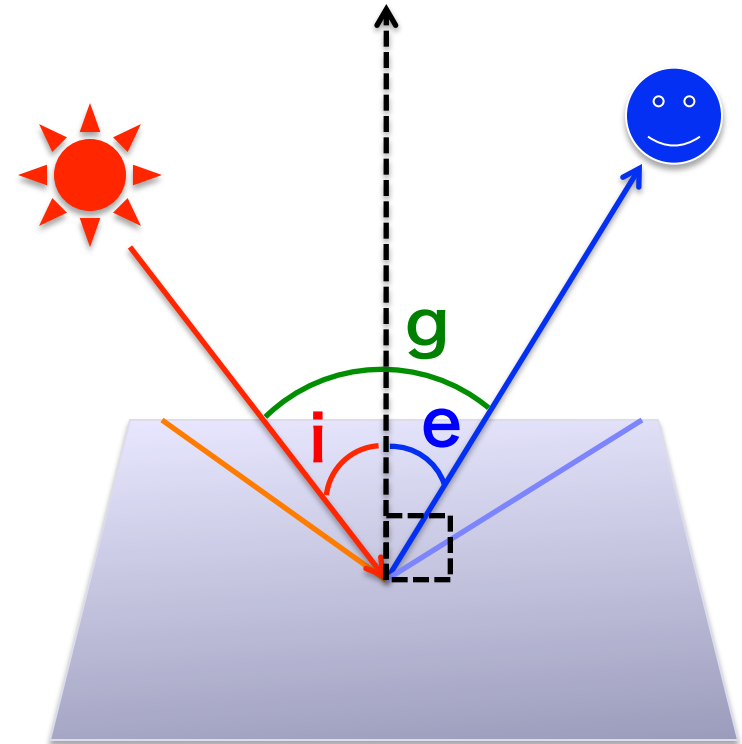
- bidirectional reflectance:  $r$
- ある1方向から光（平行光）を照射した時の，特定の方向に出てくる散乱光強度（輝度）と入射光強度（照度）の比
  - 入射光，反射光の方向（入射角  $i$ ，出射角  $e$ ）の定義が必要
  - 位相角  $\alpha/g$  にも依存



# 日照条件の定義

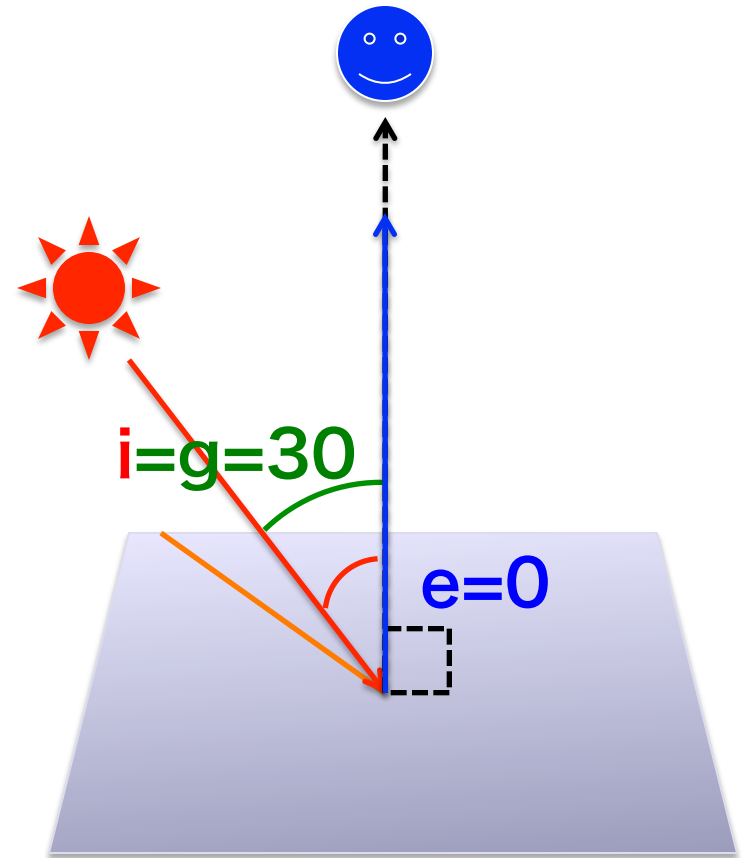


- 入射角・出射角
  - 法線に対して入射光ベクトル・視線ベクトルがなす角度
- 位相角
  - 入射光ベクトルと視線ベクトルがなす角度
- 光散乱の物理において基本的なパラメータ



# 双方向反射率の標準条件

- 特定の条件下での反射率は観測対象の物性の一つと見なす
  - 入射光, 反射光の方向 (入射角  $i$ , 出射角  $e$ ) と位相角  $\alpha/g$  の定義が必要
  - 一般的な標準条件:  $\{i, e, g\} = \{30^\circ, 0^\circ, 30^\circ\}$

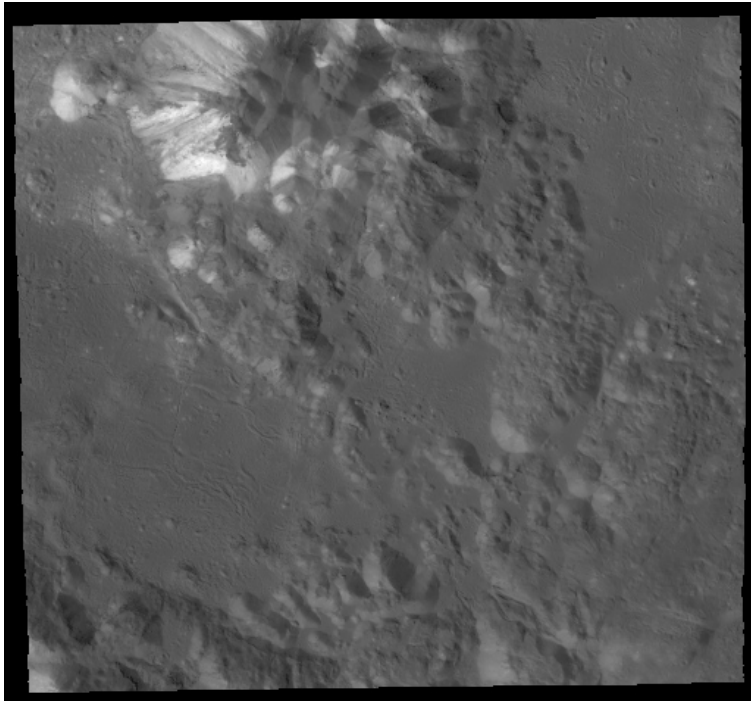


# 標準条件での双方向反射率への変換

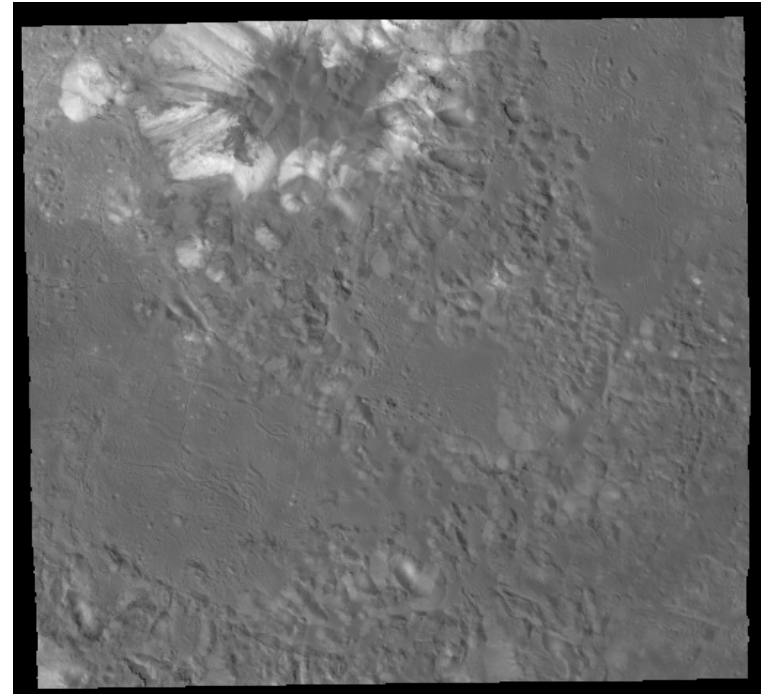
- 実際には常に標準条件で観測できるわけではない
- 実際の観測条件と光散乱のモデルから、観測値から得られた反射率を標準条件での反射率に変換する
  - 観測条件（幾何条件）の情報が必要
- 変換のための関数を位相関数 (phase function or photometric function) と呼ぶ

# 位相関数補正と地形効果

- 一つの画像内でも地形の起伏に応じて日照条件は異なる
- 地形が既知であれば位相関数による補正の際に，地形の効果を取り除くことができる
  - 完全に物質の違いだけを観察可能



地形効果補正なし



地形効果補正あり

# 幾何補正

## Geometric Correction

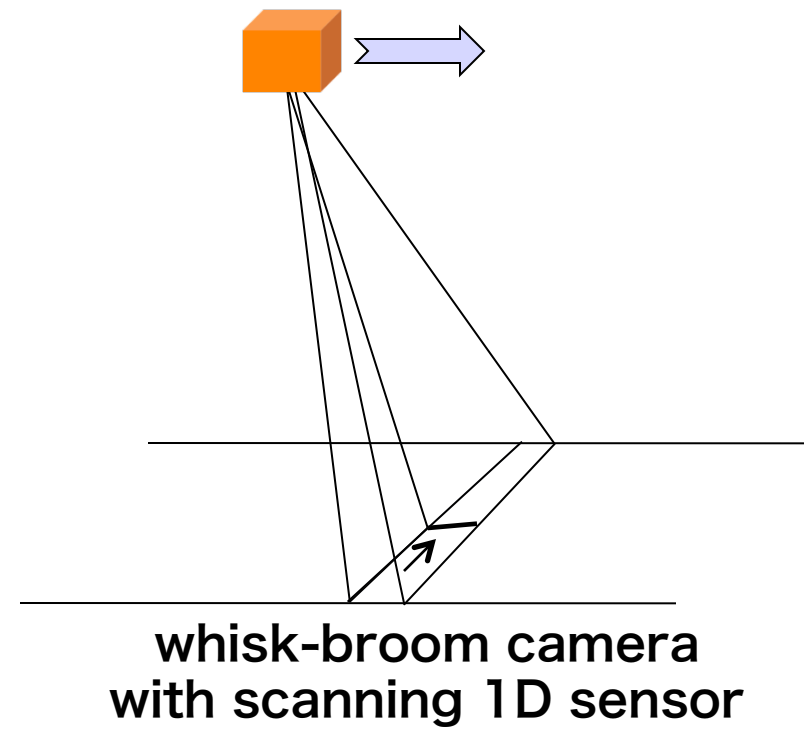
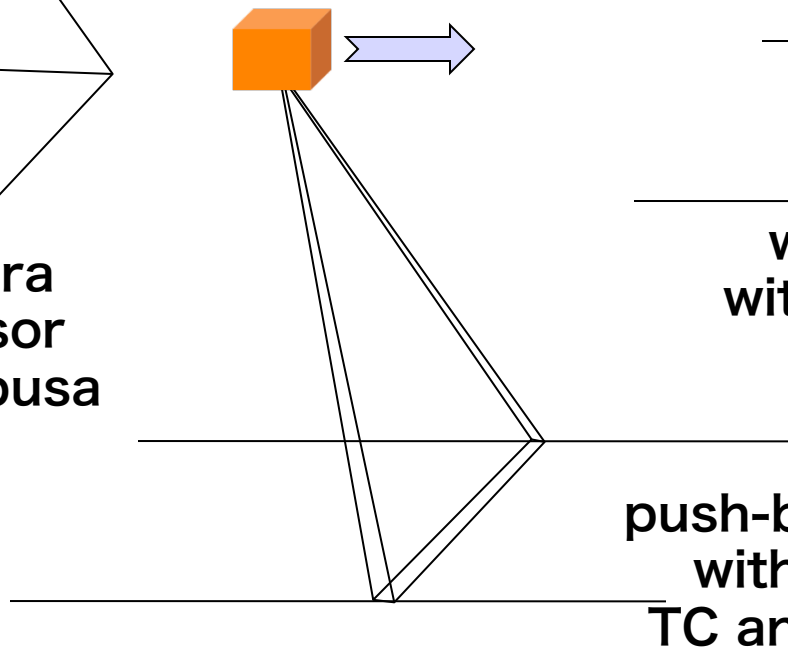
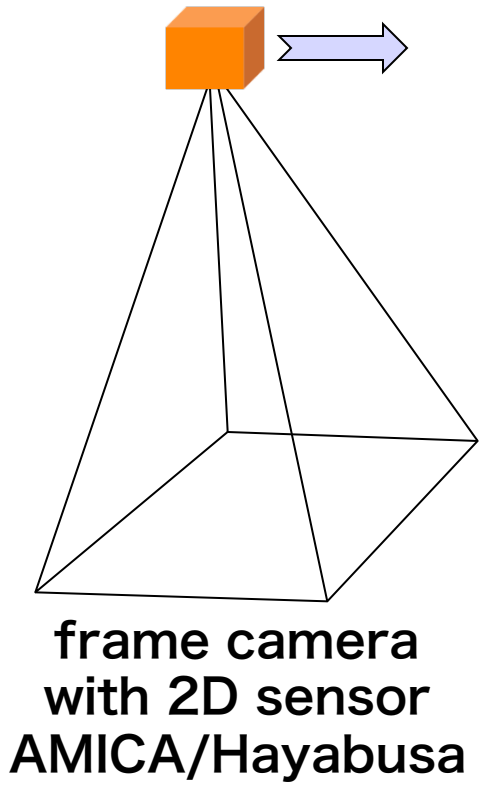
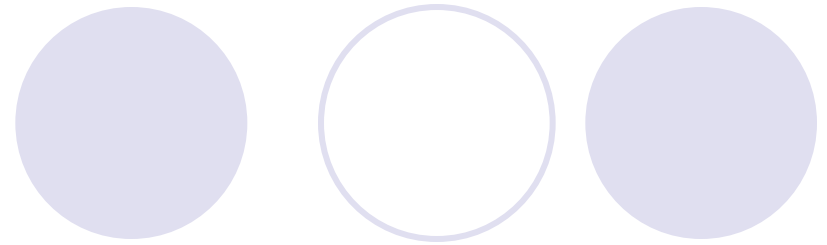
- データ取得時の幾何学的条件による歪みなどを補正
  - 幾何学的条件の算出 (georeferencing)
  - 実際の補正 (geocoding)
- 観測時期や観測手法の異なる複数種のデータを比較するために必須の補正

# 幾何補正

# Geometric Correction

- 画像の幾何学的性質を決める要素
  - カメラとその光学系
    - カメラの各画素の視線ベクトル（カメラ座標系）
  - プラットフォーム（探査機）
    - カメラの取り付け方向（探査機の構体座標系）
    - 探査機の位置，姿勢（慣性座標系など，外部の座標系）
  - 撮影対象物
    - 対象物の形状，運動，位置（慣性座標系，または天体固定座標系: body-fixed)
- 月惑星探査ではSPICEで管理される

# Orbital imaging





# Georeferencing

- 各画素の経緯度（と標高）を知ることに対応
- 全ての幾何学的要素が既知なら自ずと可能
  - 系統的補正
- 未知要素がある場合
- 座標が既知の物体を選び、GCP (ground control point) として、歪を推定
  - 非系統的補正
- 通常は系統的補正と非系統的補正を併用する

# 位置情報の保存方法

- 位置情報の形式
  - 緯度経度 (+ 標高) , body-fixed系でのx, y, z座標
- 画素毎に位置情報を与える
  - 最も詳しい (オーバースペック)
  - 間引きを行い, データ量を削減
  - geocodeを行う場合, 新たに変換式を求める必要がある
- 画像座標-位置情報の変換式を与える
  - 画像全体の変換を一つの変換式, 一セットの変換係数で表現するのは困難
- 位置情報は保持せず, 直ちにgeocodeを行う
  - リサンプリングに伴う質の劣化

# Geocoding

- georeferenceの結果を元に，画像全体を一定の投影法でリサンプリング
  - 通常は何らかの地図投影を行う
    - メルカトル図法，UTM（ユニバーサル横メルカトル）図法
    - 等緯経度図法，Sinusoidal（サンソン）図法
    - ポーラーステレオ図法

画像座標系 → 地理座標系 → 地図座標系  
の変換を行う

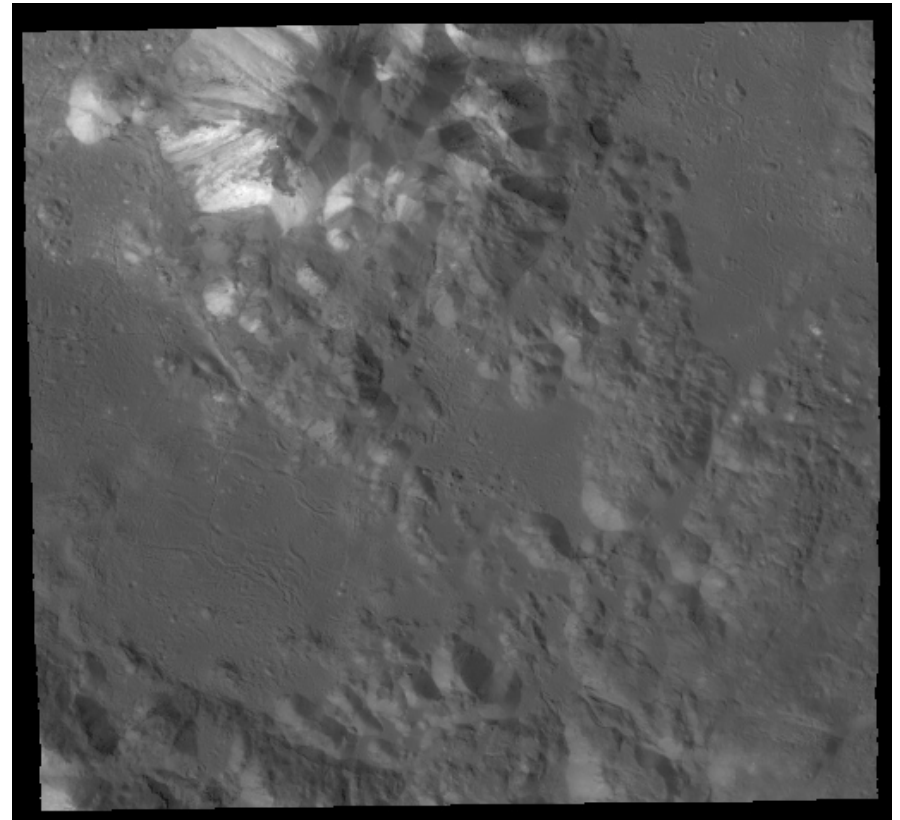
# Georeferenced data and Geocoded data

↑ along-track direction



MI L2C (georeferenced)

↑ north direction



MI L2C (georeferenced)

# 座標系

- **画像座標系**

- ラスターデータ（配列）のデータ並び
- 原点：多くの場合画像左上（例外もある）

- **地理座標系**

- 天体表面の位置を一意に示す
- 代表例：緯度，経度
- 原点：本初子午線と赤道の交点

- **地図座標系**

- 特定の地図投影法における地図平面上の座標
- 投影法と縮尺や投影中心が与えられれば地理座標系との相互変換は容易
- 投影中心

# 地図投影法

- 曲面を平面に投影する地図投影では，方位（形状），面積，距離の全てを保存することはできない
  - 正角図法，正積図法，正距図法
- 目的に応じて適切な投影法を選択する必要がある

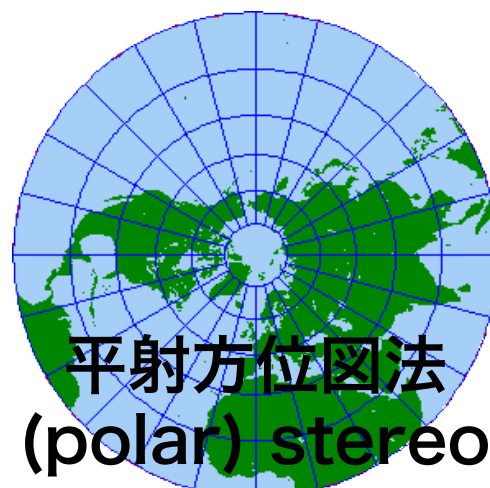
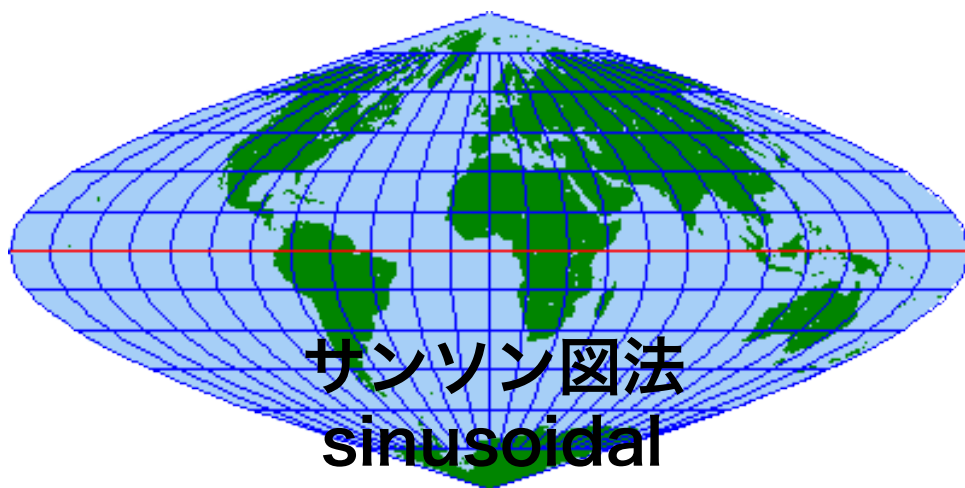
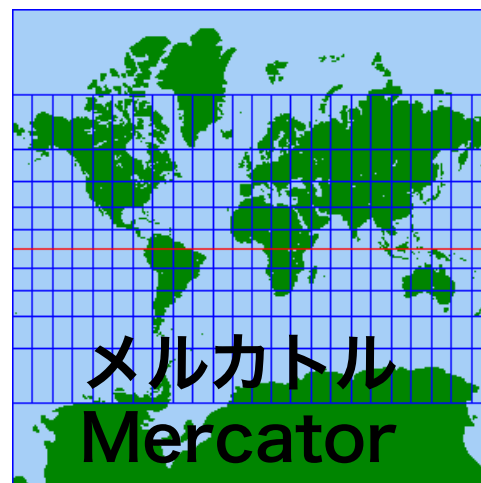
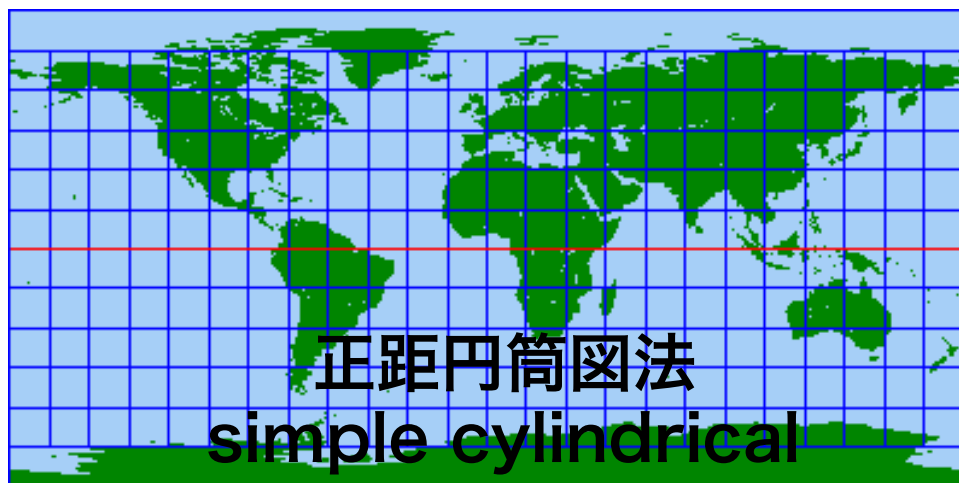
# 分類



- 投影面の形状によるもの
  - 平面, 円筒, 円錐
- 投影光源の位置によるもの
  - 心射 (中心), 平射 (反対面上), 正射 (平行光), 内射, 外射
- その他
  - 非投射図法, 偽図法

# 月惑星科学でよく出現する図法

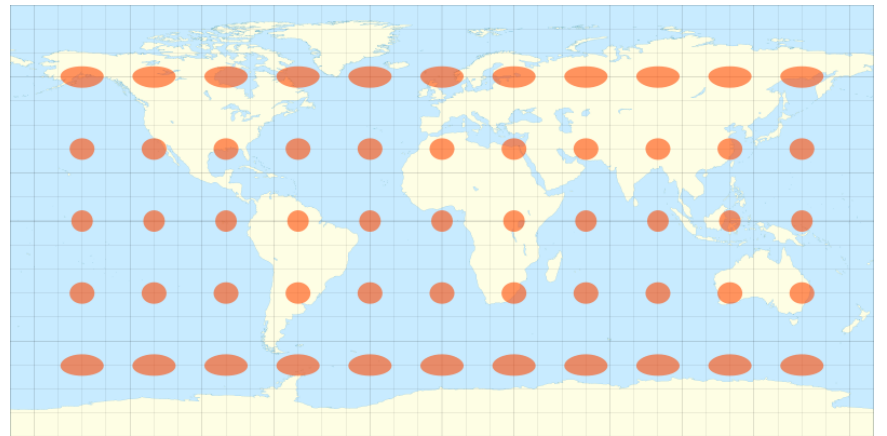
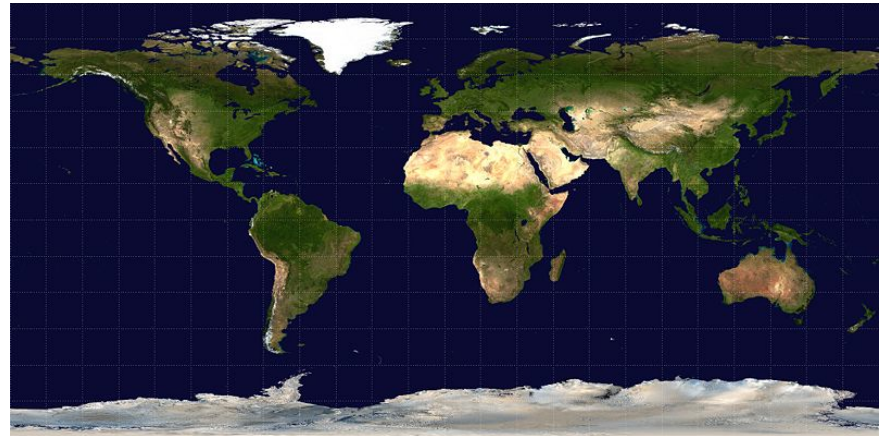
<http://www7b.biglobe.ne.jp/~ptolemy/>





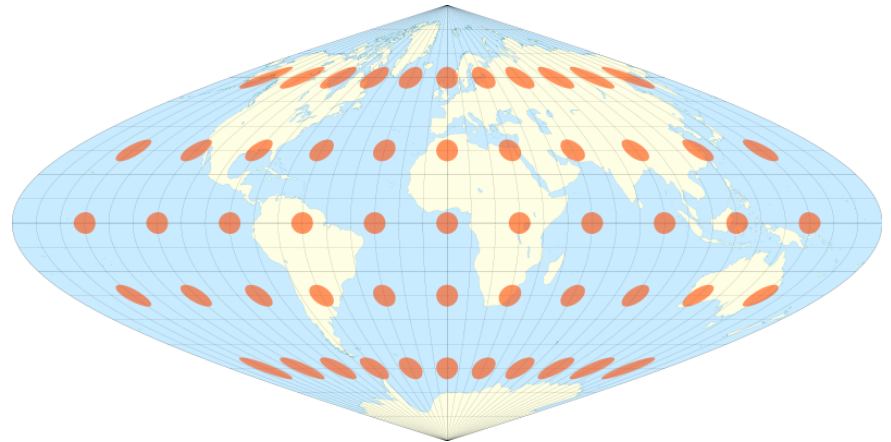
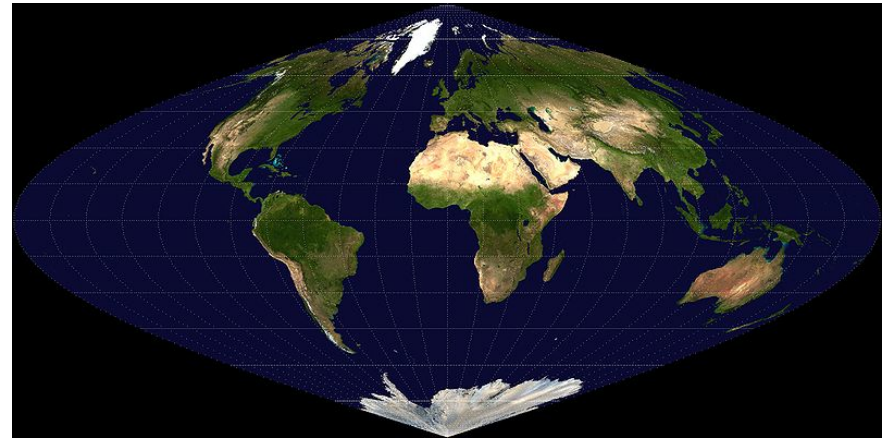
# Simple cylindrical projection

- 別名
  - Equirectangular/  
Equidirectional/  
Equidistant projection,
- 全球を2:1の長方形で表現
- 緯線と経線が直交する
- 南北方向の距離は正しい
- 高緯度帯の歪みが大きい
- 投影式が単純
  - GISなど地図情報の電子的保存に適する



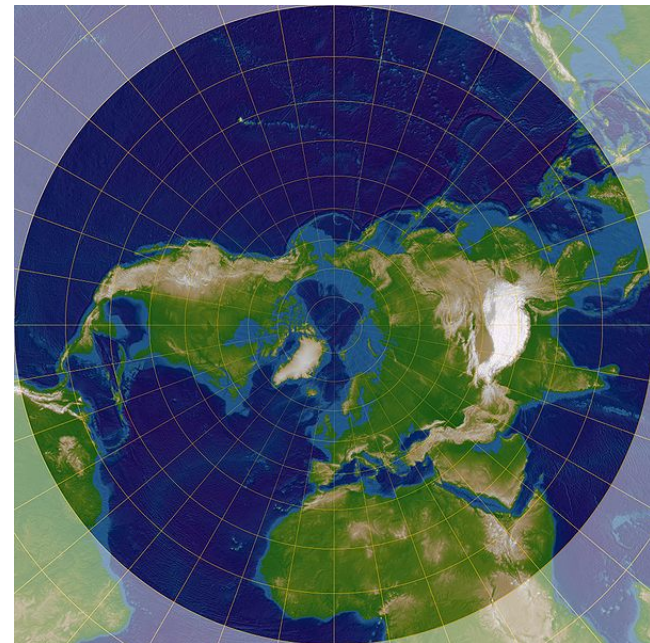
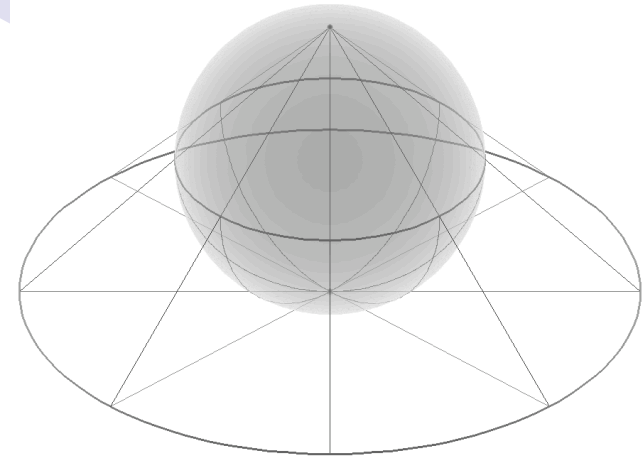
# Sinusoidal projection

- 別名
  - Sanson(-Flamsteed) projection
- Simple cylindricalに対して経度方向を緯度のsin分縮小
- 投影中心経度を定義
- 面積は正しい
- 高緯度帯と投影中心から離れた経度帯の歪みが大きい



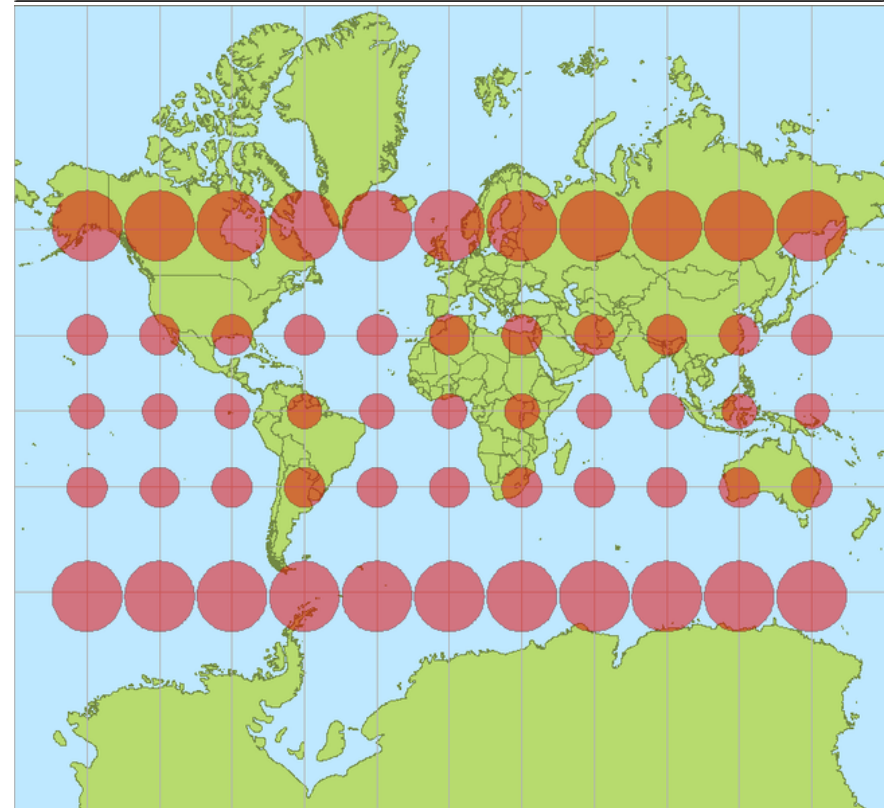
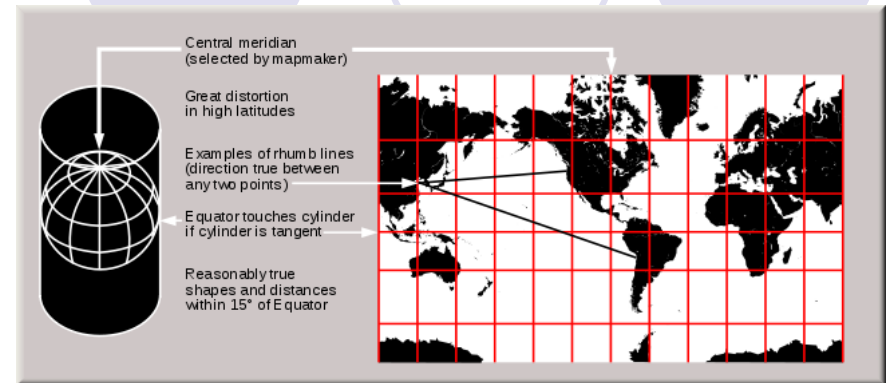
# Stereo projection

- 投影基準の対蹠点を投影中心とする
- 極を投影基準とする場合が多い
  - polar stereo
- 半球分までしか表現できない
- 正角図法（形が正しい）



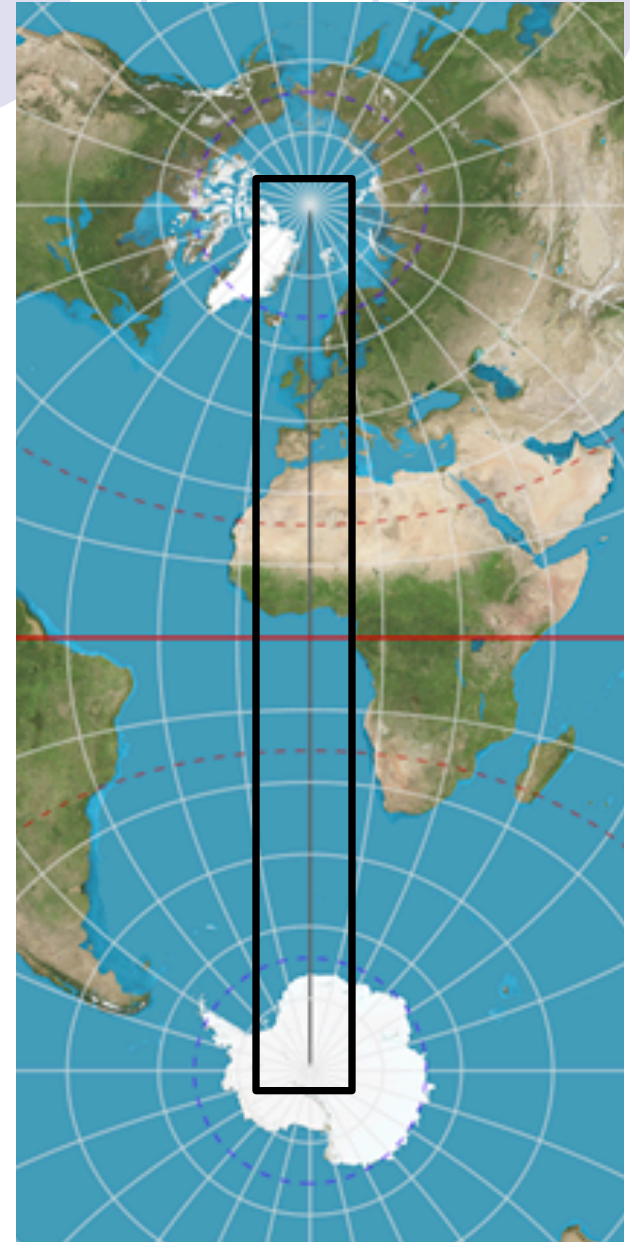
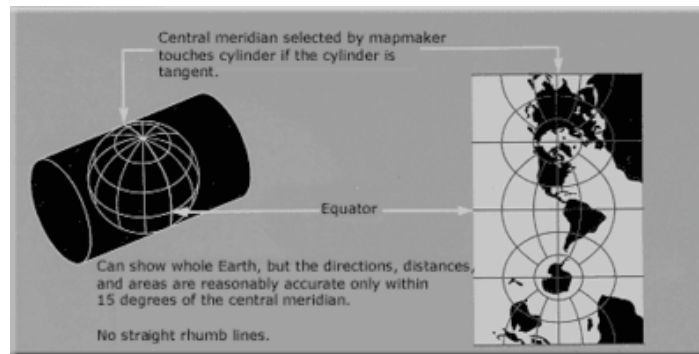
# Mercator projection

- 円筒図法の一つ
  - 円筒は赤道で球と接する
- Simple cylindrical  
に対して緯度方向を  
拡大して正角化
- 全球で形状が保存されるため、大縮尺に向く
- 面積は正しくない



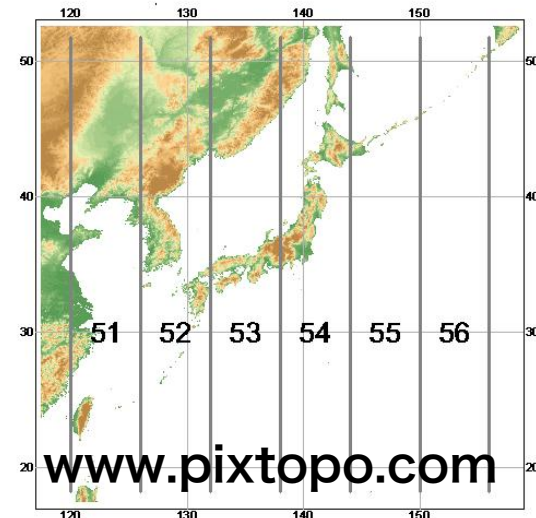
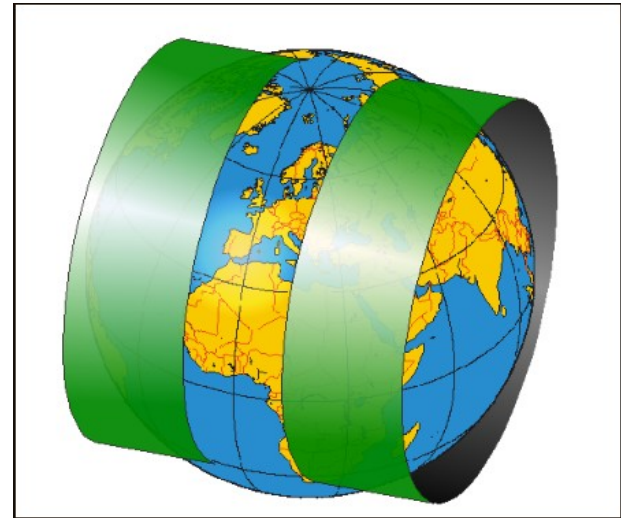
# Transverse Mercator projection

- 円筒図法の一つ
  - 円筒が横向き
  - 基準子午線で球と接する
- 歪みなどの特徴はメルカトルと同じ
- 正角図法ではあるが直感的な形状と比較すると歪んでいる
- 基準子午線上での歪みは小さい
- 中～小縮尺の地図に適する



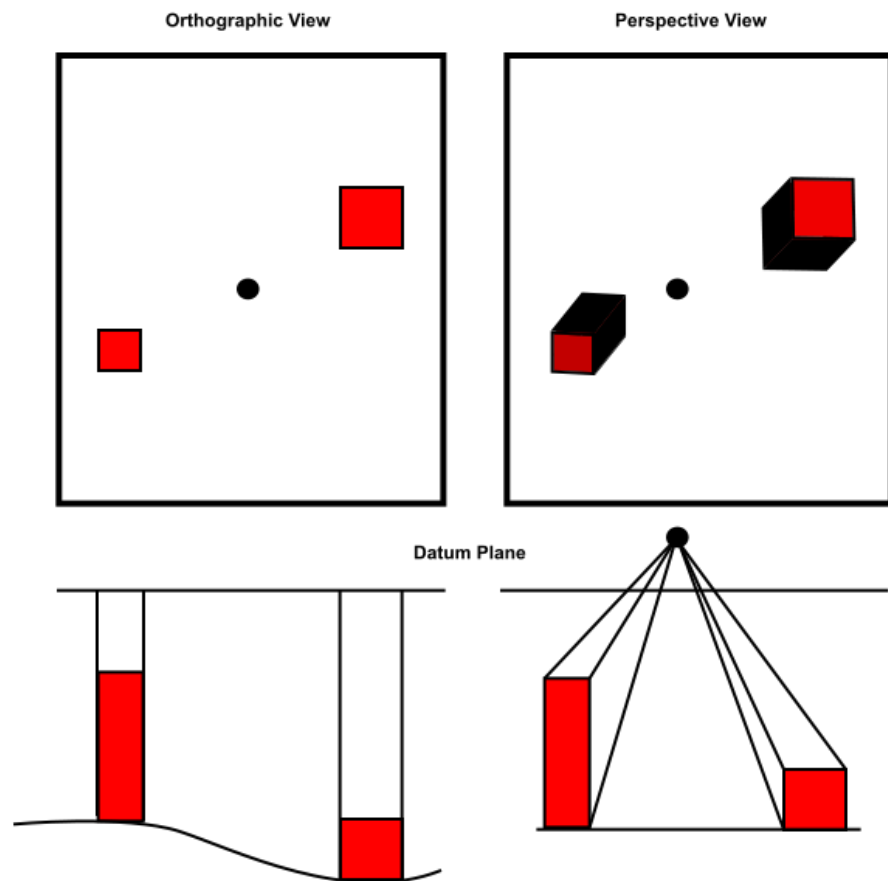
# ユニバーサル横メルカトル図法

- Universal Transverse Mercator (UTM)
  - 地球における統一的図法のシステム
  - 投影中心をゾーンで管理
  - 中縮尺の地図向け
  - 1/25000地形図などで使用
  - 円筒の径を0.9996倍することで広範囲で面積の歪みを最小化



# オルソ化 (Orthorectification)

- ローカルな起伏などによって生じる倒れ込みを補正し，全ての地物を投影面に平行な光線で投影したもの
  - 地図投影の投影とは別に実施
- 標高値が既知の場合に処理することができる



# バンド間レジストレーション

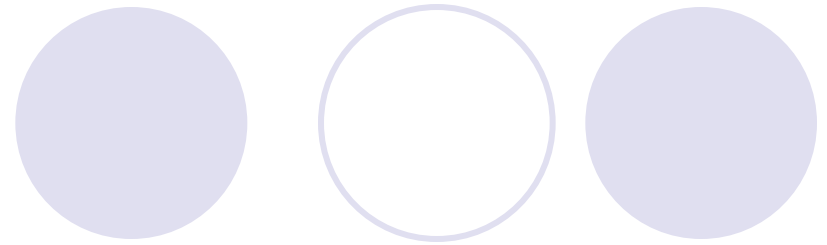
- マルチバンド画像のセットについて，各バンドの撮像対象物が画像座標系上で一致するようにする処理
  - 地図投影とオルソ化によって系統的補正で実現
    - 多くの場合非系統的補正も併用
  - 基準画像に対して合わせるよう，非系統的補正で実現
- 実施後のデータは画像座標平面に波長方向の次元が加わった3次元データとなる
  - 波長方向の串刺しデータ抽出でスペクトルを得る



# 投影変換に必要な情報

- 基準測地系
- 投影法
- 投影中心（基準地理座標）
- 地図平面原点の地理座標
- 方位（地図の北方向など）
- 解像度（縮尺）
- その他，投影法に固有のパラメータ

# リサンプリング

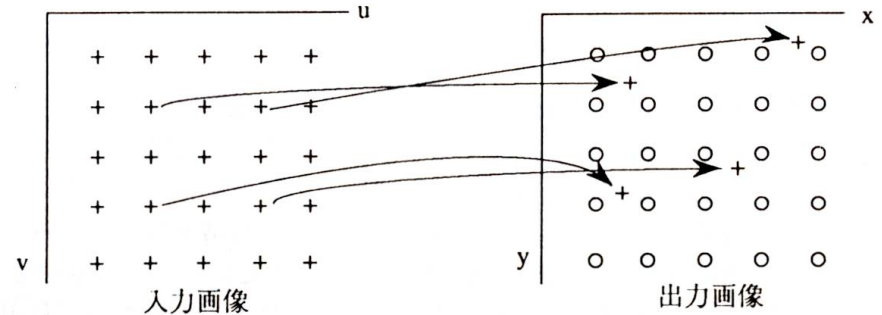


- 通常はまず画像座標系→地図座標系の変換が与えられる

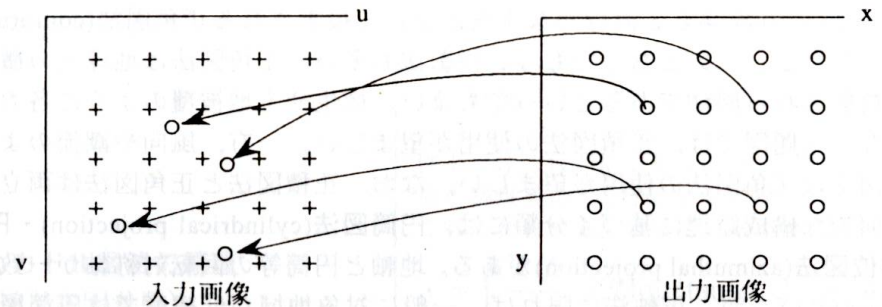
- 出力側の画素メッシュは固定
- 投影の逆変換を求め、入力画像上の画素値から内挿

- 小領域分割法

- 画像全体を小領域に分割し、小領域内の変換をアフィン、疑似アフィン等の単純な変換に還元
- 領域間を滑らかに繋ぐ



(a) 入力画像の各要素を出力画像上に投影



(b) 出力画像の各要素に対応する入力画像上での位置の計算

図9.5.1 再配列の方法

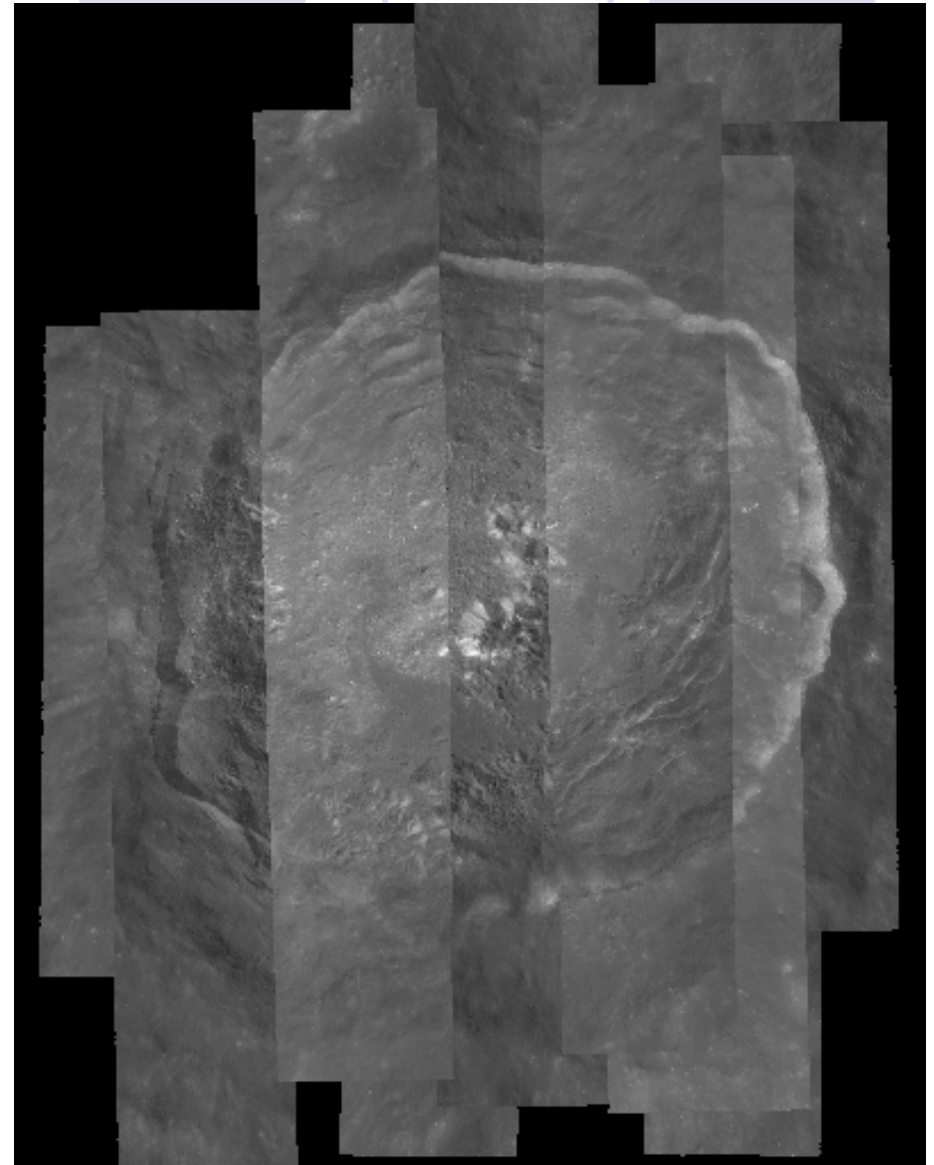
# 内挿法



- 最近隣内挿法: Nearest Neighbor
- 共一次内挿法: Linear Interpolation
- 三次畳み込み内挿法: Cubic Convolution
  
- 高次の内挿法は出力の「美しさ」に優れるが、画素値は保存されない
- 内挿による解析への悪影響を避けるために方法の選択や回数最小化が重要になることがある

# モザイク Mosaic

- 複数のデータを張り合わせることで広い領域をカバー
  - 幾何精度が十分なら系統的補正で接合可能
  - 誤差がある場合は非系統的な現物合わせ
  - 多数のデータからモザイクを作成する場合、誤差の均等な配分が重要
  - 輝度較正・反射率変換の精度が十分でないとき継ぎ目が目立つ



# データ処理のレベル



- データ処理の進行度によってレベル分けを行う
  - 生データ
  - 輝度較正済みデータ
  - 反射率変換済みデータ
  - 幾何補正済みデータ
  - モザイク済みデータ

# 「かぐや」データの処理レベル

- Level 0, Level 1
  - データ転送用のパケットの状態
- Level 2A (L2A)
  - 生データ
- Level 2B (L2B)
  - 輝度較正済みデータ
- Level 2C (L2C)
  - 反射率変換済みデータ
- Level 3B/C (L3B/C)
  - 幾何補正済みデータ
- Mosaic
  - モザイク済みデータ

# 地球観測分野での処理レベル定義

- Level 0
  - 生データ
- Level 1A
  - 輝度較正済みデータ
- Level 1B
  - 幾何補正済みデータ
- Level 2 and higher
  - さらに処理を進めたデータ
- 分野によって方言があるので注意すること