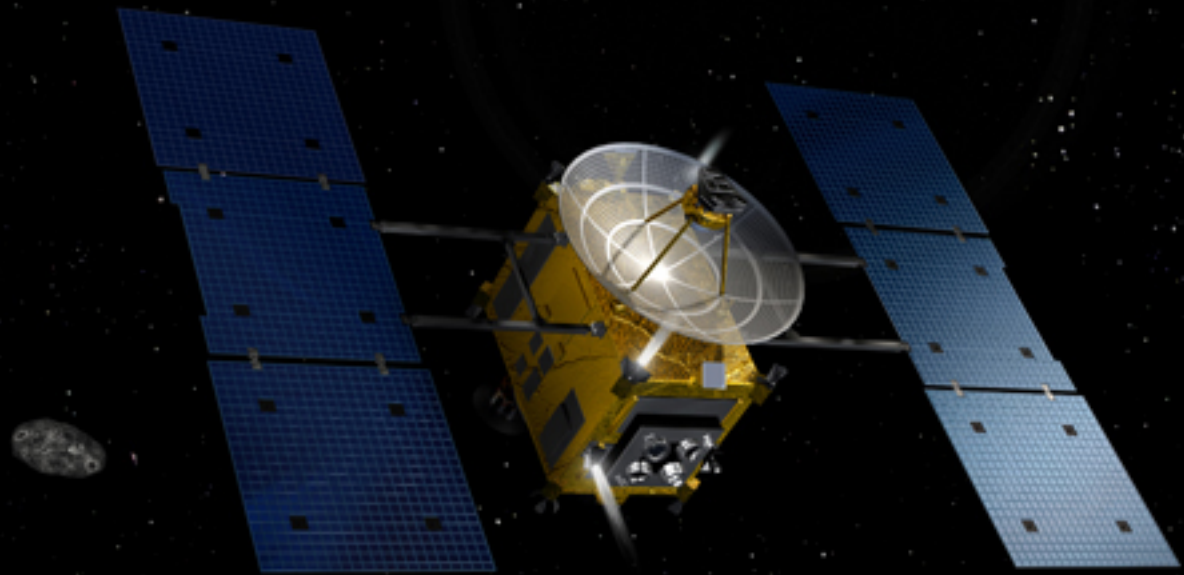


第一回 惑星探査データ解析実習会
小惑星探査機はやぶさのデータ解析



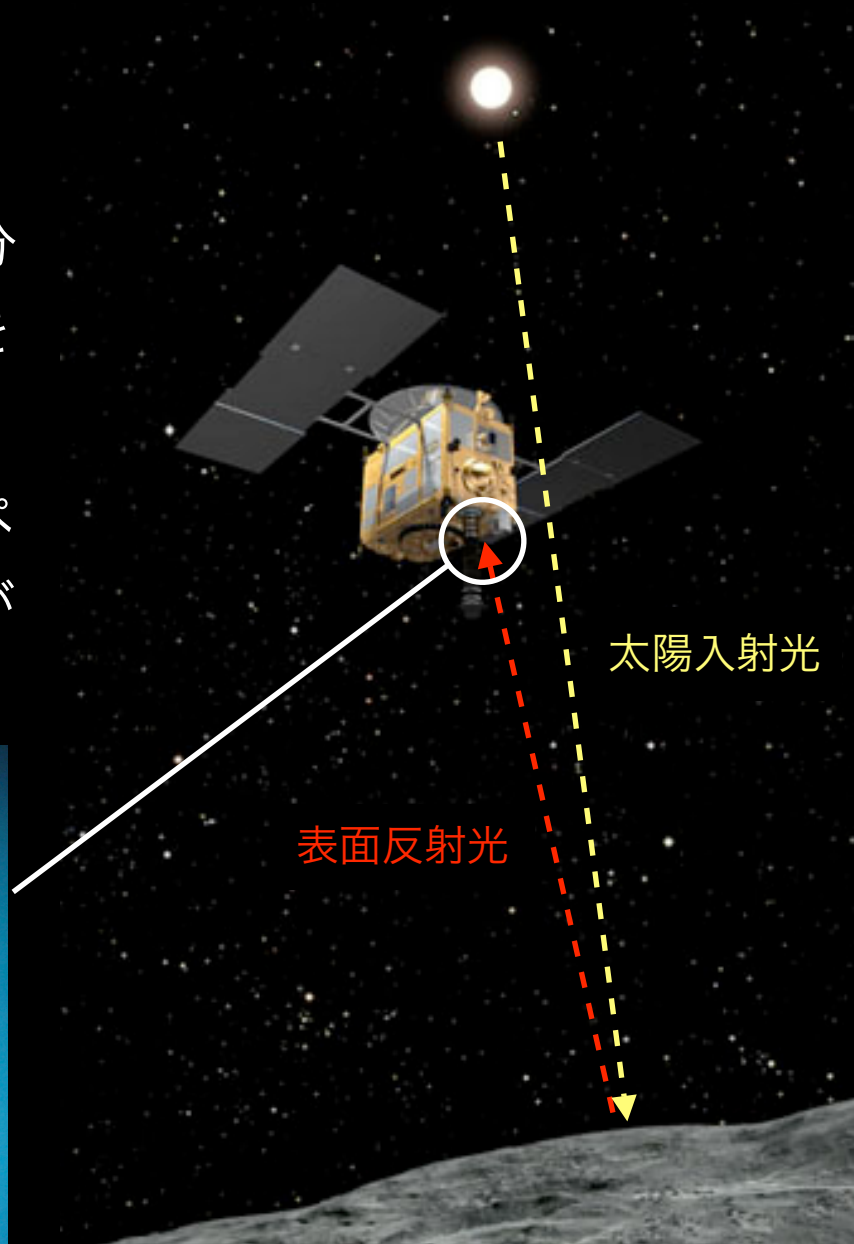
NIRS：分光データ処理 基礎編

北里 宏平（神戸大学）

はやぶさ近赤外線分光器 NIRS

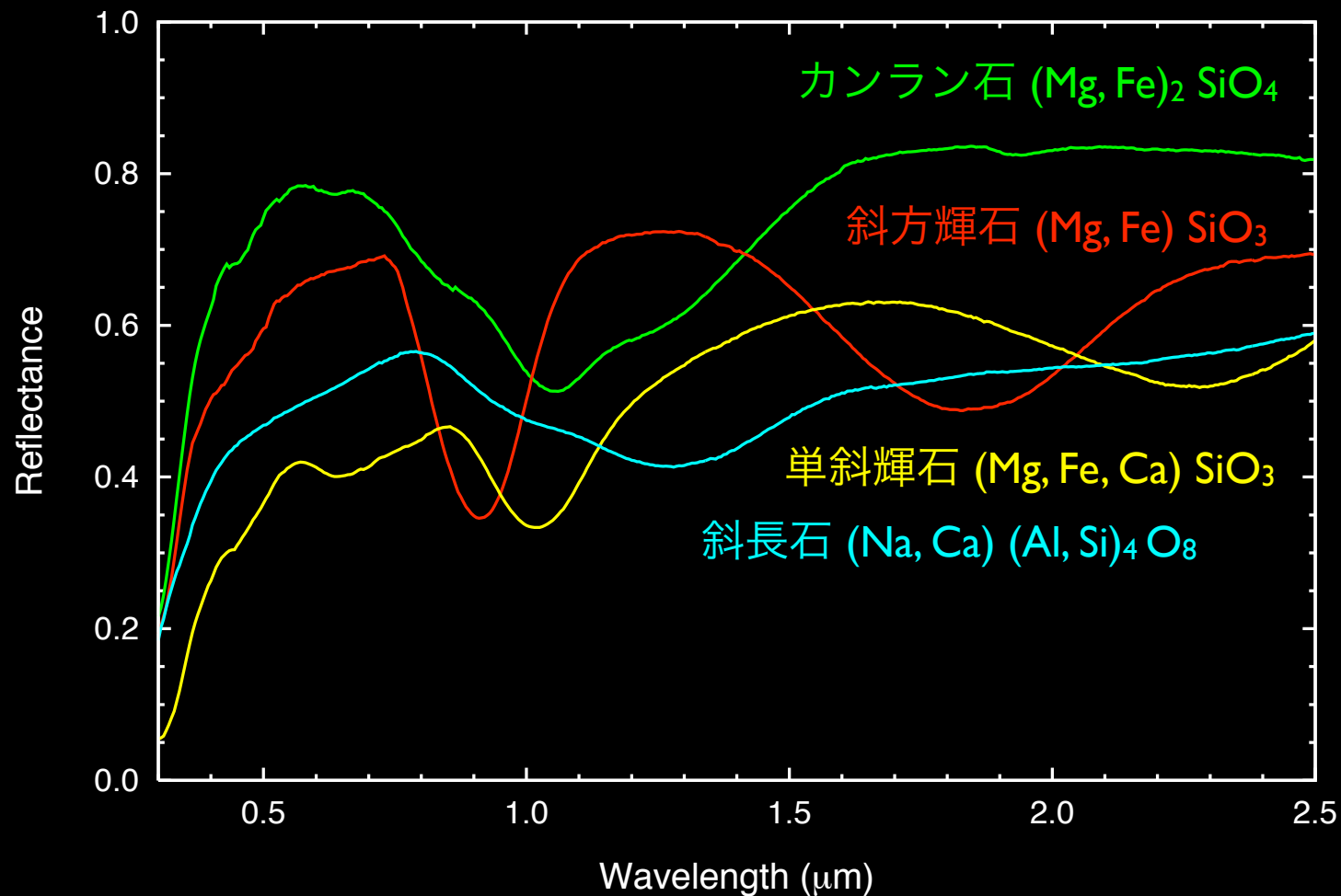
NIRS (Near-InfraRed Spectrometer)

- 探査機の-Z軸向きに搭載
- 太陽光に照らされた小惑星表面の波長分解した反射光強度（**反射スペクトル**）を測定
- 実験室で測定した隕石や鉱物の反射スペクトルとの比較から小惑星表面の物質が推定可能



小惑星表面に存在すると考えられる 主要な珪酸塩鉱物の反射スペクトル

鉱物によって位置・幅・深さの異なる吸収バンドをもつ



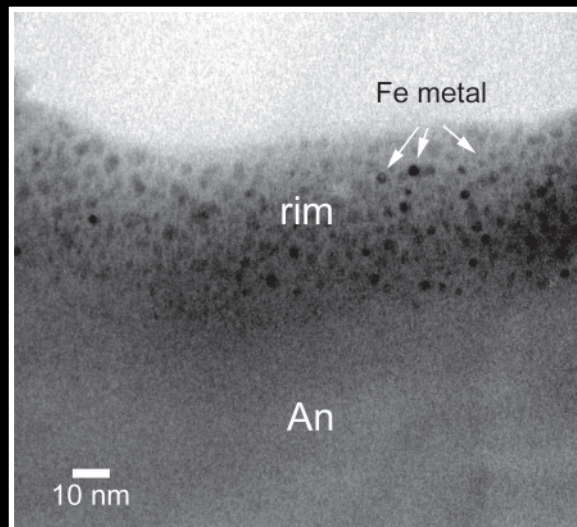
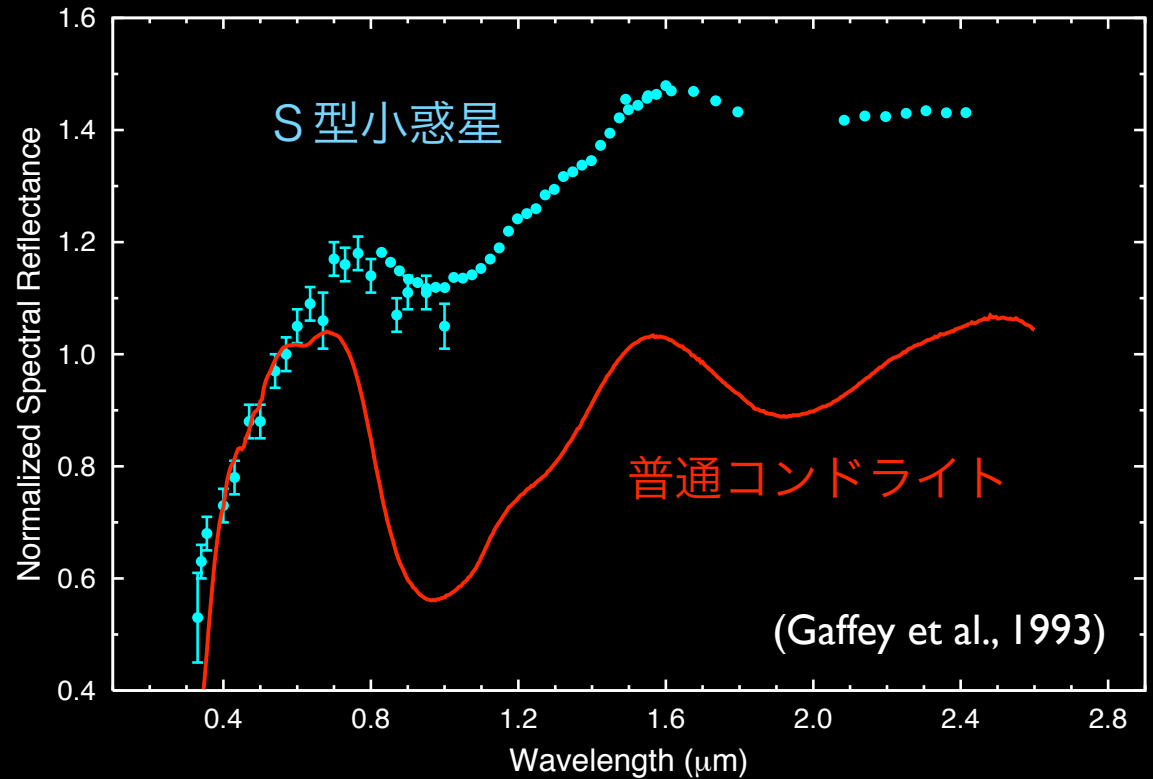
小惑星の宇宙風化作用

大気のない小惑星表面では

- 太陽風の照射
- 微小隕石の高速衝突

小惑星表面の反射スペクトル

▶ 暗化, 赤化, 吸収帯の減衰



光学特性変化の原因

粒子表面に生成される微小還元鉄粒子

◀ 月ソイル表層にみられる微小還元鉄粒子

(Keller et al., 1999)

近赤外線分光観測の意義

近赤外線スペクトルに影響を与える要因

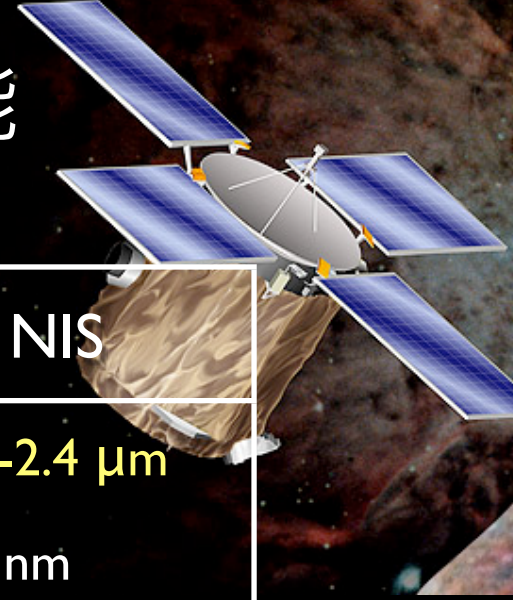
- 化学組成（鉱物組成）
- 宇宙風化作用
- 粒子状態（サイズ・形状・空隙率）
- 照明条件
- 表面温度

NIRS の科学目的

小惑星の反射スペクトルを空間分解して測定することで
表面の物理的・化学的特徴の分布を調べる

- ▶ 天体がどのような形成・進化の過程を経たかの理解につなげる

NIRS : 小惑星用分光器としての性能

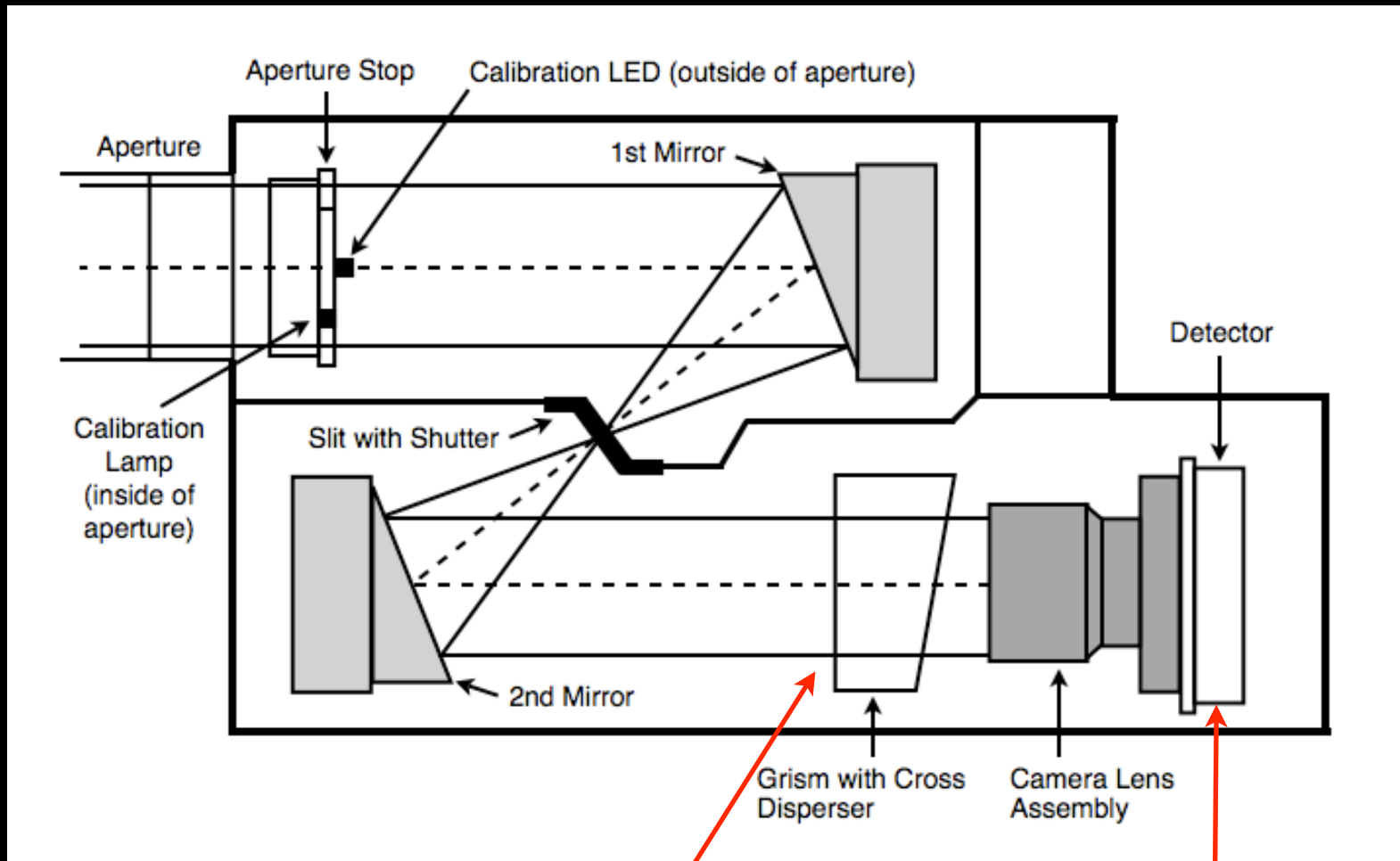


	はやぶさNIRS	NEAR NIS
波長範囲	0.76-2.25 μm	0.8-1.5, 1.5-2.4 μm
波長分解能	23.56 nm	22, 44 nm
ピクセル数	64 channel	64 channel
視野	0.1° x 0.1°	0.76° x 0.76°
空間分解能	17 x 17 m @ 10km	1.3 x 1.3 km @ 100 km
ダイナミックレンジ	14 bits	12 bit
重量	1.53 kg	15.2 kg

- カンラン石や輝石の吸収バンドをカバーする波長範囲
- NEAR NIS よりも高い空間分解能での観測が可能
- 重量はNEAR NIS の 1/10

NIRS : 測定原理

入射光
→

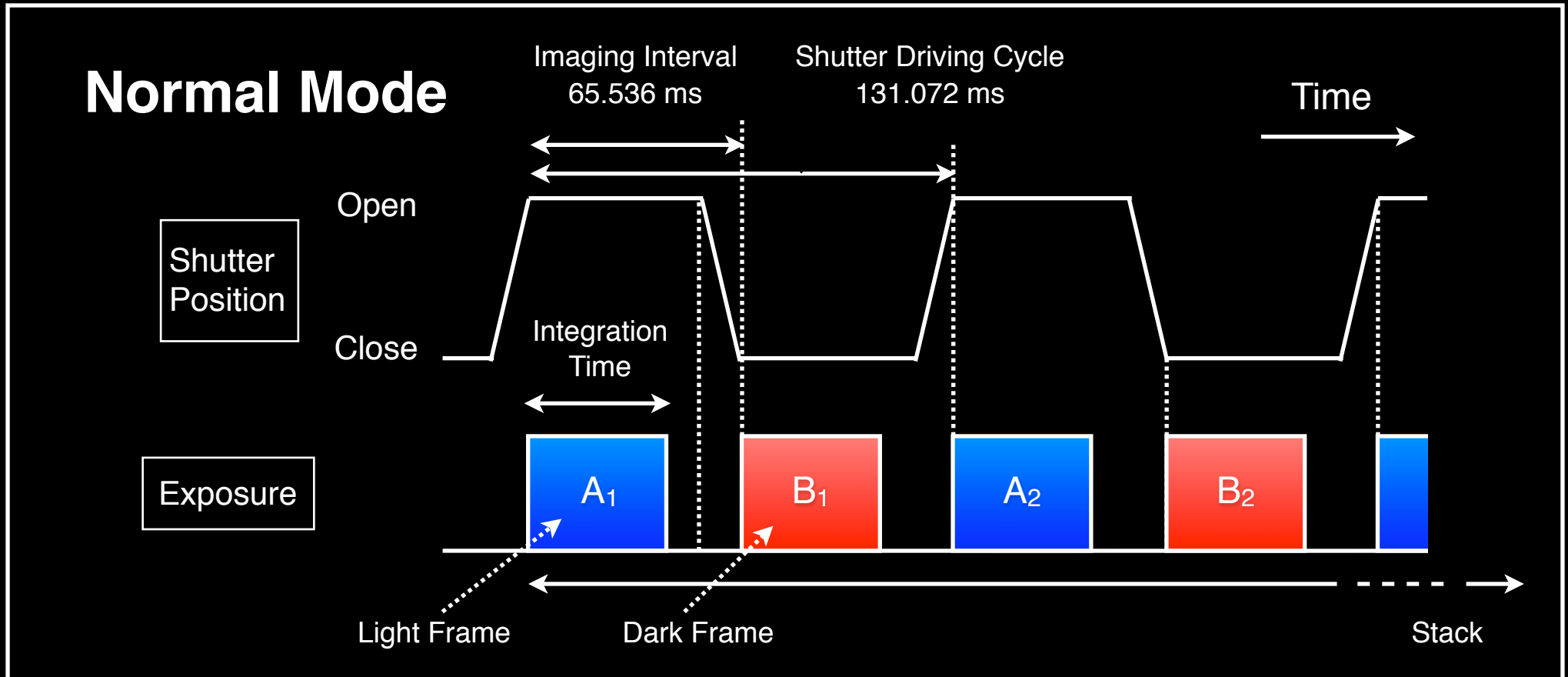


波長分散素子
(グリズム)

フォトダイオードアレイ
64-channel



NIRS : 観測モード



- ライトフレームの暗電流ノイズは後ろのダークフレームで差し引き
- 1本のスペクトルデータにつき 2^N 個のフレームデータを機上でスタック
- スタックデータの **平均・偏差・最大・最小 (64 channel 分)** を地上に降るす

NIRS : データ内容

NIRS FITS Level-1.0 データ

ヘッダ : 観測パラメタ情報 (時間, モード, 温度)

データ配列 : ピクセル電圧値 (1- 64-ch, 昇順)

1 行目 : 平均, 2 行目 : 偏差

(3 行目 : 最大, 4 行目 : 最小)

NIRS データの反射スペクトル変換処理

1. 観測時間変換
2. ピクセル番号 - 波長変換
3. 電圧値 - フラックス・反射率変換

NIRS : 観測時間

- NIRS FITS ヘッダにある時間情報

TIME : 観測終了時刻 (探査機時刻)

STACK : フレームスタック数の冪指数 (2^N)

INTEG : 1 フレームの積分 (露光) 時間 (10^{-3} s)

- 解析に必要なとなる時間情報

観測中央時刻 :

$$t_{\text{mid}} = t_{\text{end}} - \underset{\substack{\uparrow \\ \text{フレーム長}}}{T_{\text{frame}}}(2^{\overset{\substack{\swarrow \text{スタック数}}}{N}} - 1) + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{積分時間}}}{T_{\text{integ}}}$$

積分時間 : 電圧値はスタック数で平均化しているので
1 フレームの積分時間

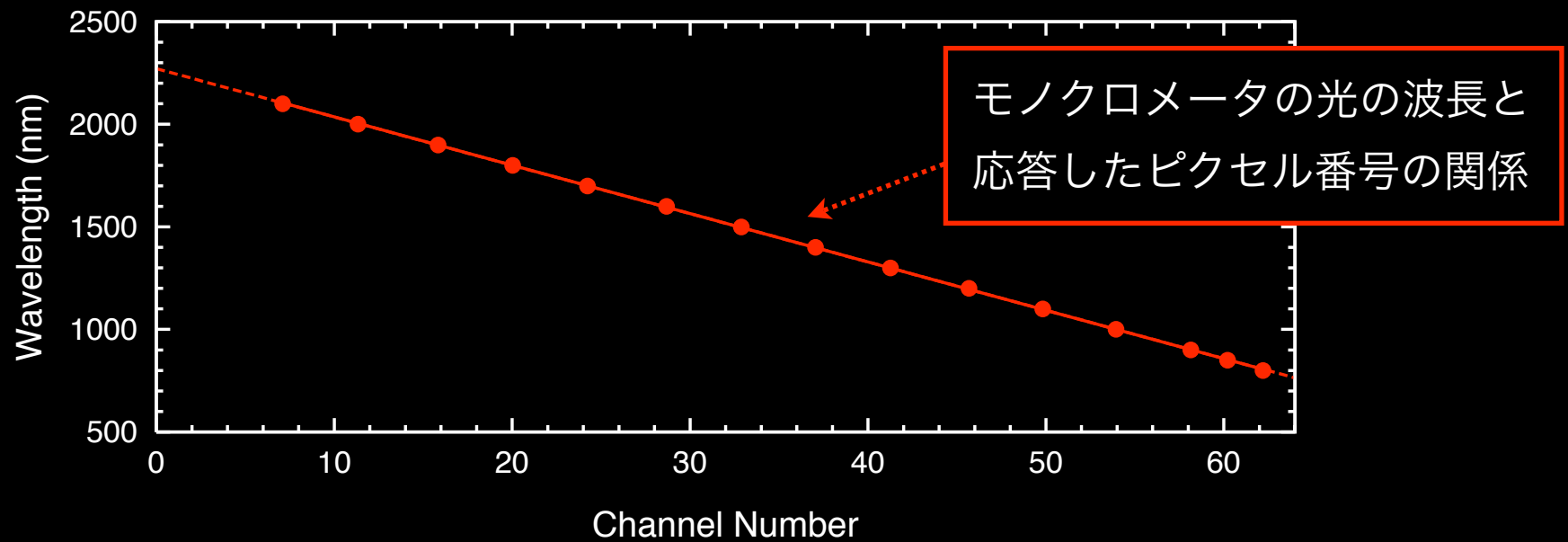
NIRS : 波長較正

- NIRS ピクセルー波長変換

NIRS FITS データ配列には波長情報は格納されていない

地上試験で測定した関係式から変換

NIRS のピクセルー波長関係は打ち上げ後も変化なし



$$\lambda = 2271.44 - 23.56n \text{ (nm)} \quad (n = 1, \dots, 64)$$

NIRS : 反射率変換

面光源

ラディアンズ・ファクター :

ランベルト面 (完全拡散反射) に対する相対反射率 (入出射角は任意)

$$(I/F)_\lambda = \frac{V_\lambda / C_{p,\lambda} T}{F_{\odot,\lambda} / D^2} \cdot \pi$$

↑
ランベルト面のバイディレク
ショナル反射率の逆数

V_λ ピクセル電圧値

$C_{p,\lambda}$ 感度特性 (面光源)

T 積分時間

$F_{\odot,\lambda}$ 太陽フラックス@IAU

D 日心距離 (AU)

点光源

ジオメトリック・アルベド :

ランベルト面に対する天体半球の相対反射率 (位相角 0°)

$$A_{g,\lambda} = \frac{V_\lambda / C_{a,\lambda} T}{F_{\odot,\lambda} / D^2} \cdot \frac{\pi \Delta^2}{2R^2}$$

$C_{a,\lambda}$ 感度特性 (点光源)

Δ 探査機 - 天体間距離

R 天体半径

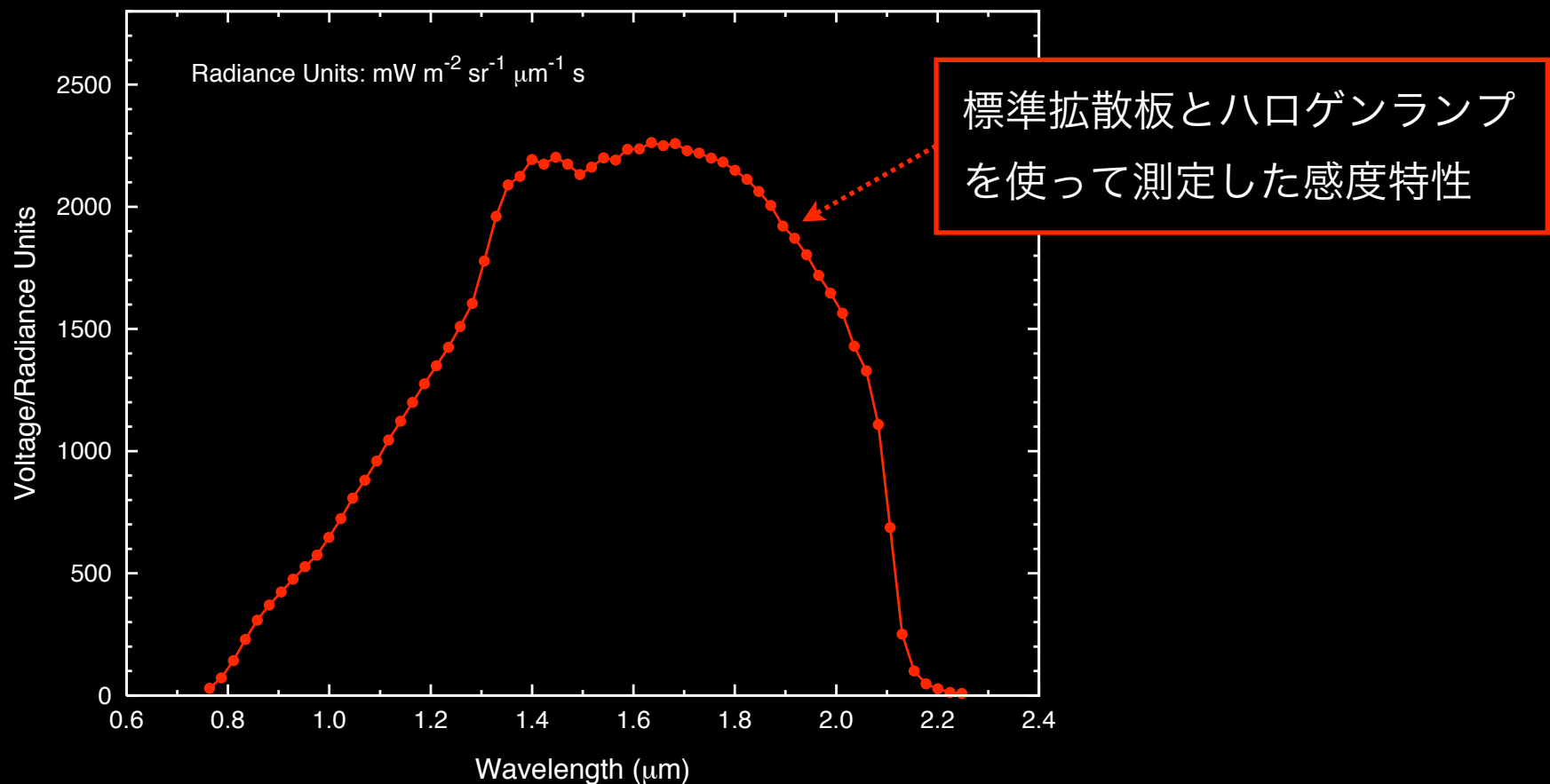
NIRS : 感度特性

- NIRS 電圧値—輝度変換

地上試験で測定した感度特性から変換

波長較正と同様に感度特性も打ち上げ後変化なし

データファイル : nirs_vol2rad_als.tab (面光源) nirs_vol2rad_pls.tab (点光源)



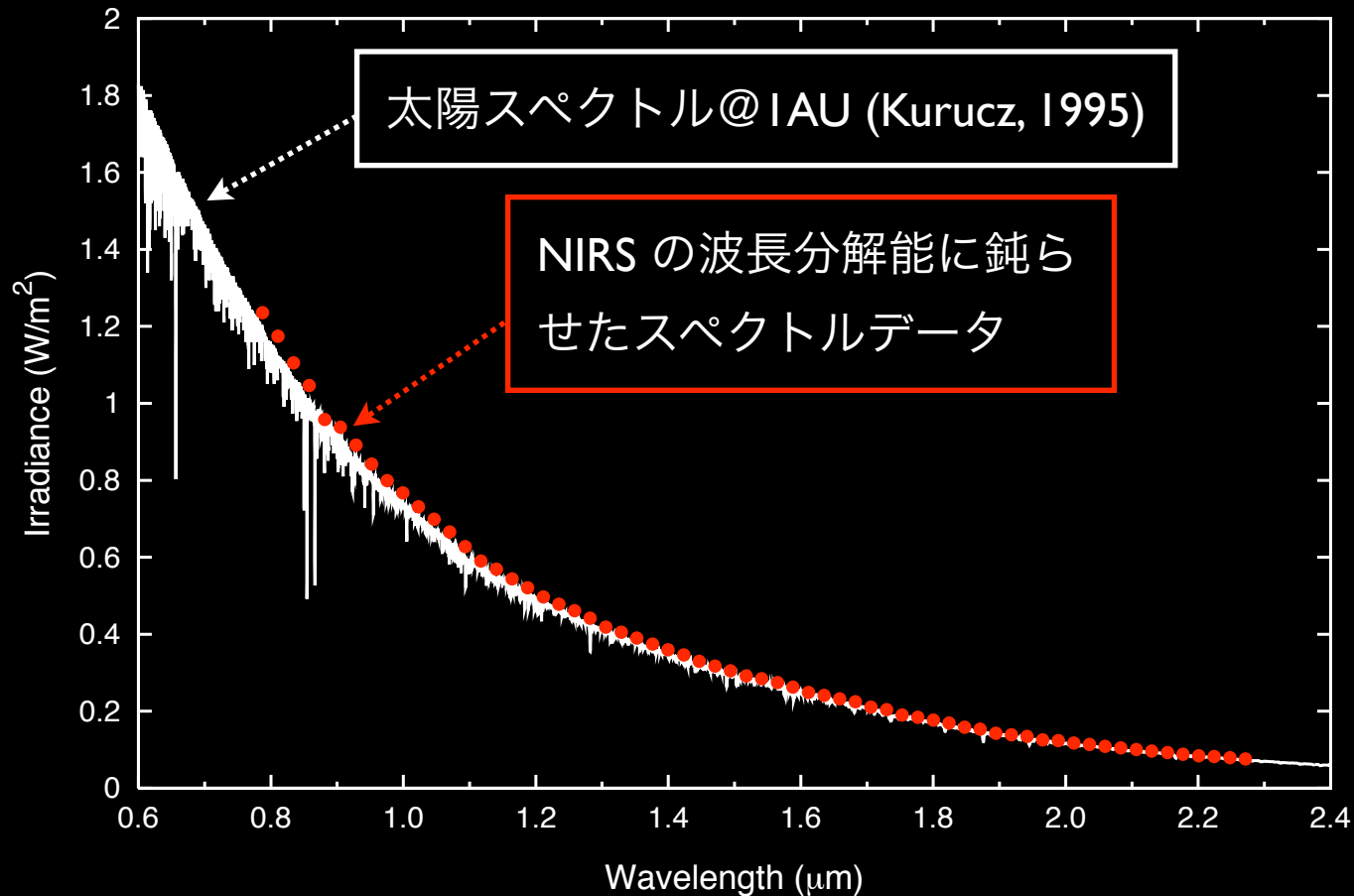
NIRS：太陽スペクトル

- 小惑星表面に入射する太陽光

フラックスは太陽からの距離の2乗に反比例

標準太陽スペクトルをNIRSの波長分解能に鈍らせて使用

データファイル：nirs_solar_spc.tab



木星の反射スペクトル - 1

点光源データの反射スペクトル変換の流れ

1. NIRS FITS から時間・ピクセル値情報を出力
2. 観測中央時刻・距離を計算
3. ピクセル→波長変換
4. フラックス・反射率変換

木星の反射スペクトル作成に必要なデータ

NIRS : 木星観測データ (nirs_jupiter_ave.fits)

SPICE : generic_kernels (LSK, PCK, SPK)

HAYABUSA (FK, SCLK, SPK=[itokawa_cruise.bsp](#))

木星の反射スペクトル - 2

NIRS FITS から時間・ピクセル値情報を出力

```
% gethead nirs_jupiter_ave.fits TIME STACK INTEG
```

```
% getpix -n 1 %.8e nirs_jupiter_ave.fits 0 1 > ave.dat
```

```
% getpix -n 1 %.8e nirs_jupiter_ave.fits 0 2 > dev.dat
```

観測中央時刻および距離情報を出力

```
% source ./bin/setpath.sh
```

```
% ti2et TIME # ET_END
```

```
# ET_MID = ET_END - (65.536 * (2^STACK - 1) + INTEG / 2) / 1000
```

```
% range ET_MID TARGET(5) # Jupiter-Sun, Jupiter-S/Cを計算
```

ピクセル番号-波長変換

```
% wl.pl > wl.dat
```

```
# WL = -23.56 * PIXEL + 2271.44 (PIXEL = 1-64)
```

フラックス・反射率変換

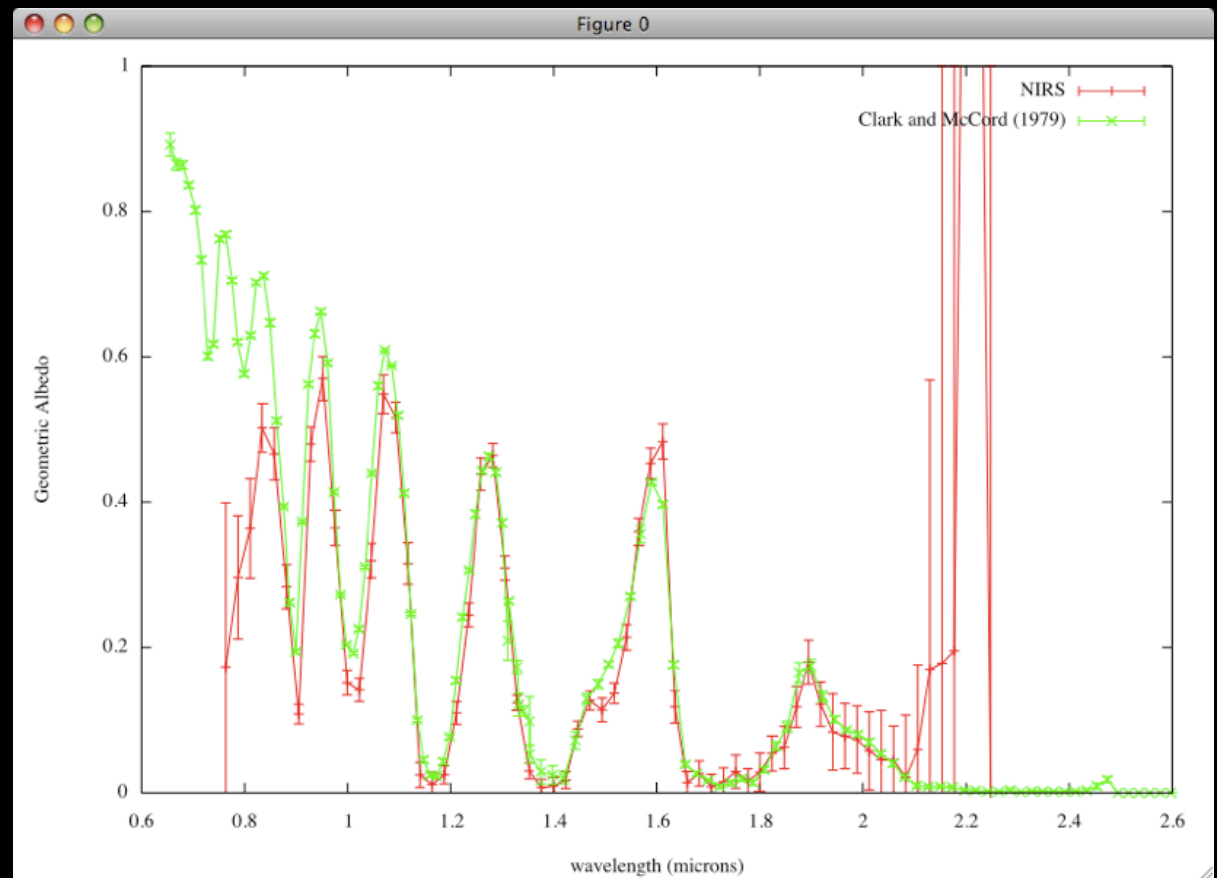
各自計算してみてください

木星の反射スペクトル - 3

NIRSスペクトルを地上観測と合わせてプロット

```
gnuplot> plot 'nirs_jupiter_ave.spc' using ($1/1000):  
2:3 with lines  
gnuplot> replot 'jupiter_albedo.dat' using 1:2:3 with  
errorlines
```

吸収バンドは
主に CH_4 , NH_3



月の反射スペクトル - 1

面光源データのマッピングの流れ

1. NIRS FITS から反射スペクトルに変換
(mkspc.pl を使って一括処理)
2. フットプリント・照明条件を計算

月の反射スペクトル作成に必要なデータ

NIRS : 月観測データ (20040517/*.fits, 553本)

SPICE : generic_kernels (LSK, PCK, SPK)

HAYABUSA (FK, SCLK, PCK, IK=nirs10.ti,

SPK=itokawa_20040516-2004-531.bsp)

月の反射スペクトル - 2

mkspc.pl の編集

% vi mkspc.pl

```
#!/usr/bin/env perl
use Math::Trig;

# set the absolute paths
$PATH_SPICE_KERNEL = "/home/xxx/kernels";
$PATH_NIRS_BIN      = "/home/xxx/bin";
$PATH_NIRS_CAL      = "/home/xxx/nirs_calib";

$target = moon; # target name or id number
...
```

一括変換処理

% mkspc.pl moon/20040517/*.fits

```
1035201721_lv11.0.fits -> 1035201721.spc
1035201856_lv11.0.fits -> 1035201856.spc
1035201990_lv11.0.fits -> 1035201990.spc
1035202124_lv11.0.fits -> 1035202124.spc
...
```

月の反射スペクトル - 2

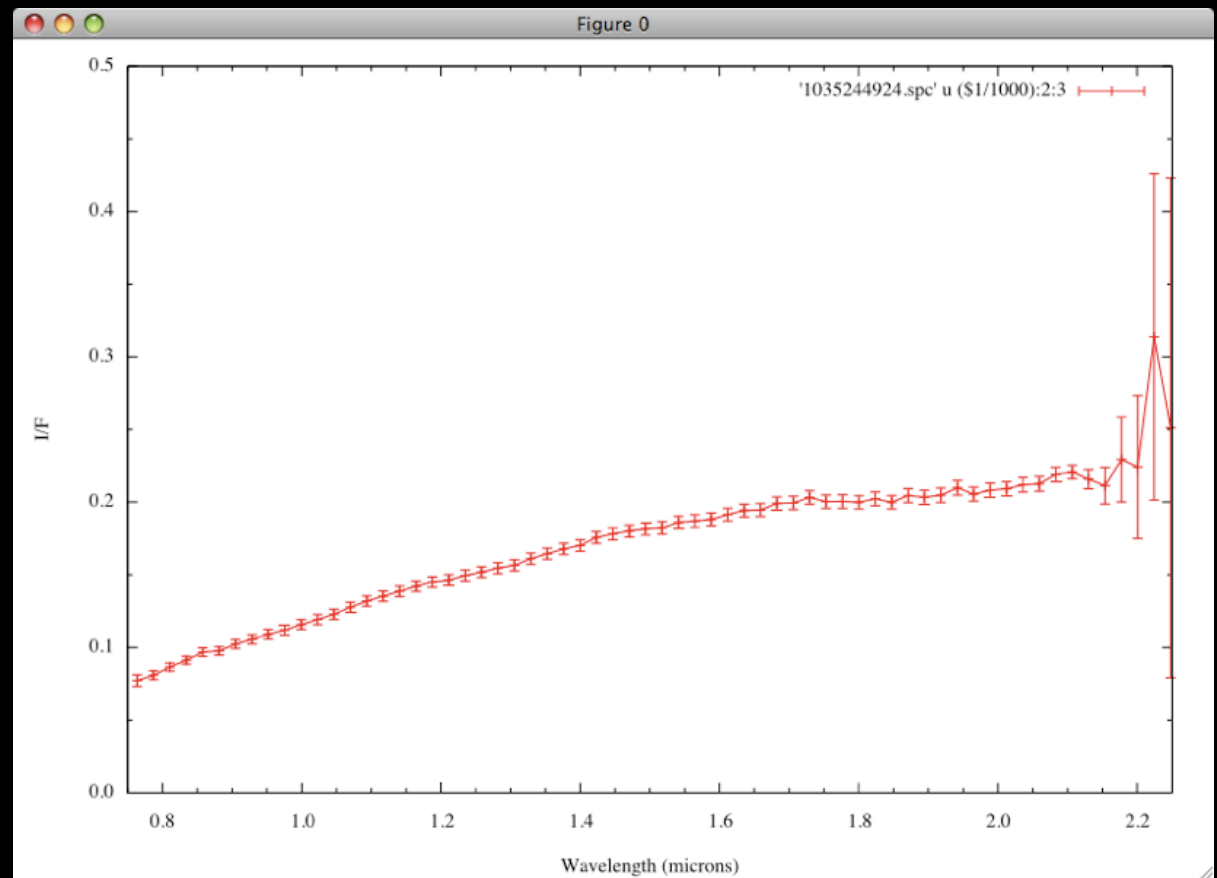
gnuplotで簡単なアニメーションを作ってみる

```
% cd $(nirs_package)/moon/20040517
```

```
% mkgp.pl
```

```
% gnuplot
```

```
gnuplot> load "spc.gp"
```



月の反射スペクトル - 3

照明条件 (フットプリント位置, 入射角, 出射角, 位相角)

各自計算してみてください

計算できたら, NIRSスペクトル反射率と照明条件の関係をプロット

