

小惑星の可視・近赤外反射 スペクトル解析法とその応用

二村 徳宏

日時: 2012年2月8日水曜日 15:00-16:00

場所: CPSセミナー室

目次

- はじめに
- 宇宙風化モデル
- 鉱物の吸収帯の特徴を組み込んだ
修正ガウス関数モデル

目的

- 6 Hebe, 433 Eros, 25143 Itokawaの
宇宙風化度および組成の推定と解釈

はじめに

- 固体天体の岩石、それを構成する**鉱物**、鉱物を構成する**化学組成**、レゴリスの**粒子サイズ**、および**宇宙風化作用**等の物質科学に関する研究

➡ 対象天体が起源と進化の過程において

小惑星の物質科学探査から
太陽系の起源と進化を解明する。

解

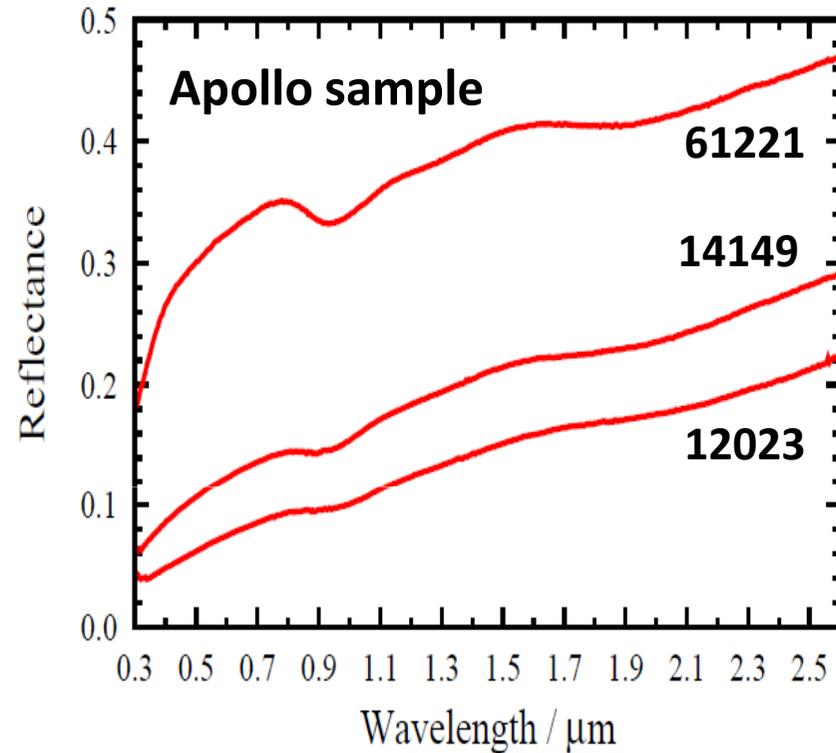
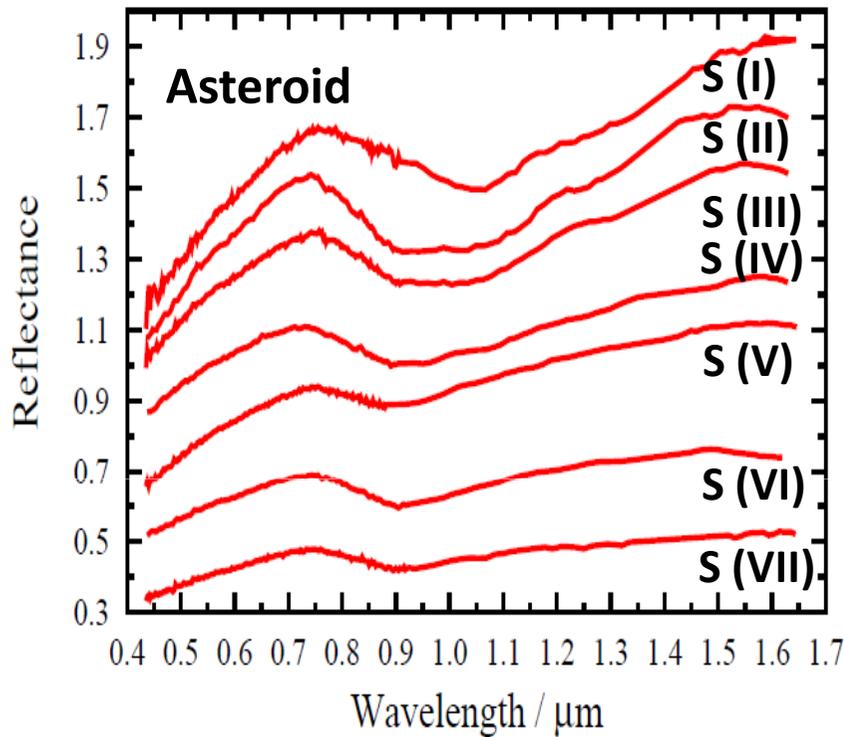
解明するための観測手段

可視・近赤外反射スペクトル測定

これまで、衛星・探査機および地上観測による
精力的な調査が行われている

[e.g., Chapman and Gaffey, 1979; McFadden, 1984; Xu, 1994; Xu *et al.*, 1995; Bus, 1999; Burbine, 2000; Binzel *et al.*, 2001a,b; Bus and Binzel, 2002a,b; Burbine and Binzel, 2002; Binzel *et al.*, 2004a,b,c]。

固体天体表面物質の可視・近赤外反射スペクトル



- 1 μm および2 μm 付近に特徴的な吸収

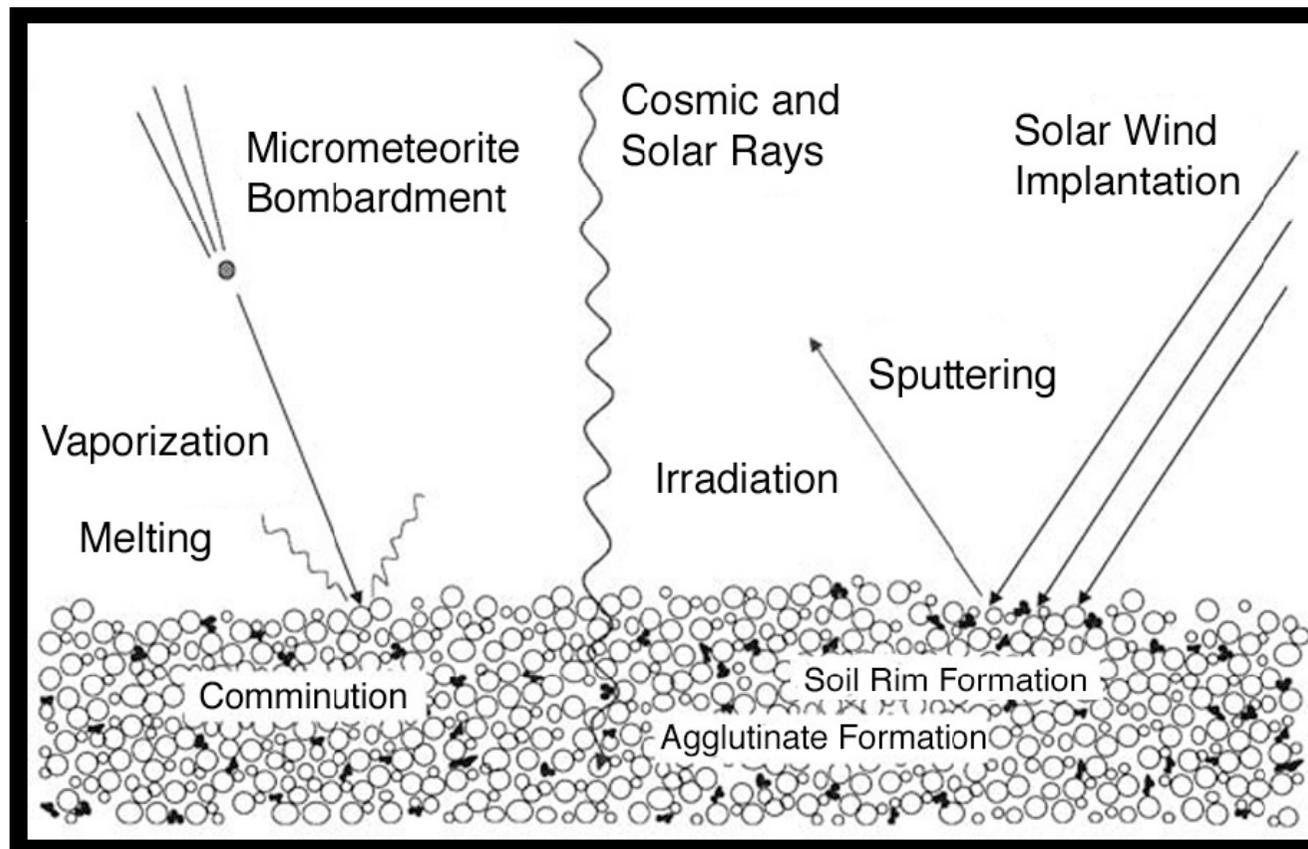
可視・近赤外反射スペクトル解析には、

2つの問題点がある

可視・近赤外反射スペクトル解析の問題点1

- 宇宙風化作用

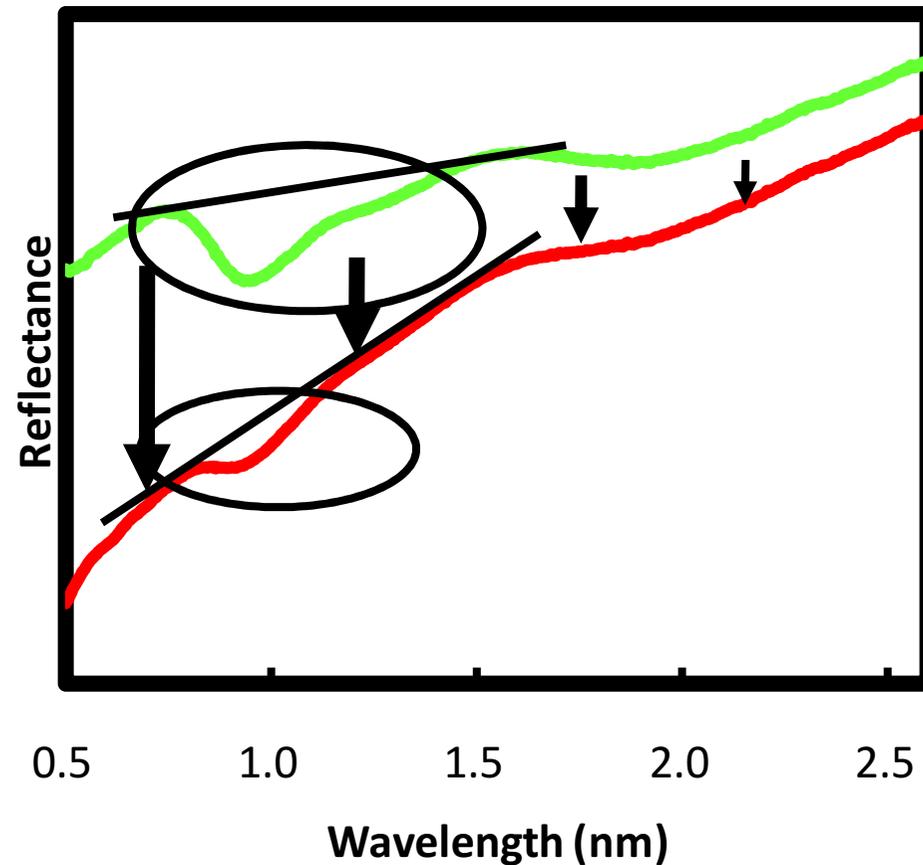
大気のない固体天体表面に太陽風、宇宙線、および微小隕石が衝突することによって生じる効果の総称。



Noble (2004) *Ph.D. Thesis*

宇宙風化作用が 可視・近赤外反射スペクトル解析に与える影響

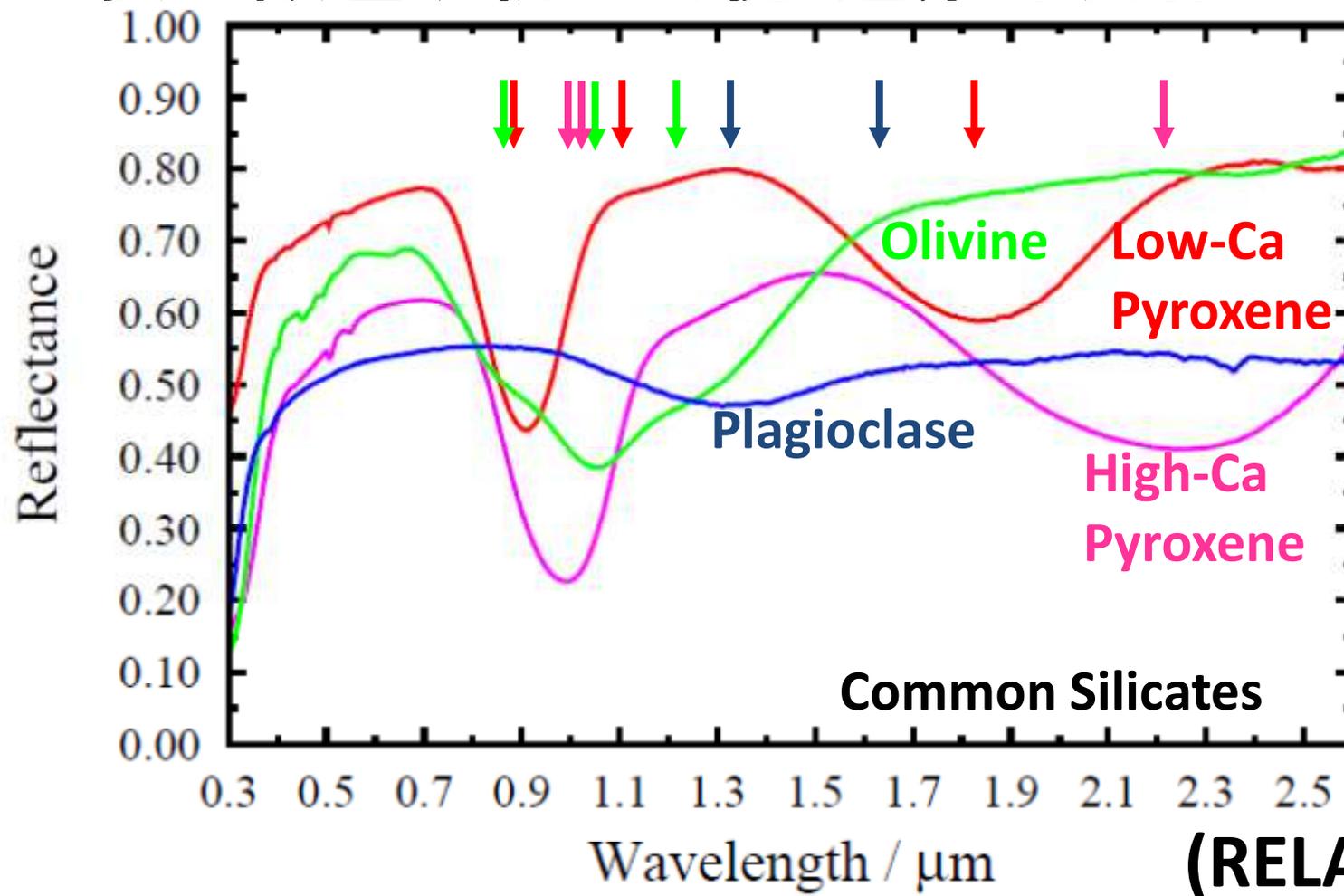
- 暗化
- 赤化
- 吸収帯の弱化



鉱物の特徴的な吸収を解析することが困難

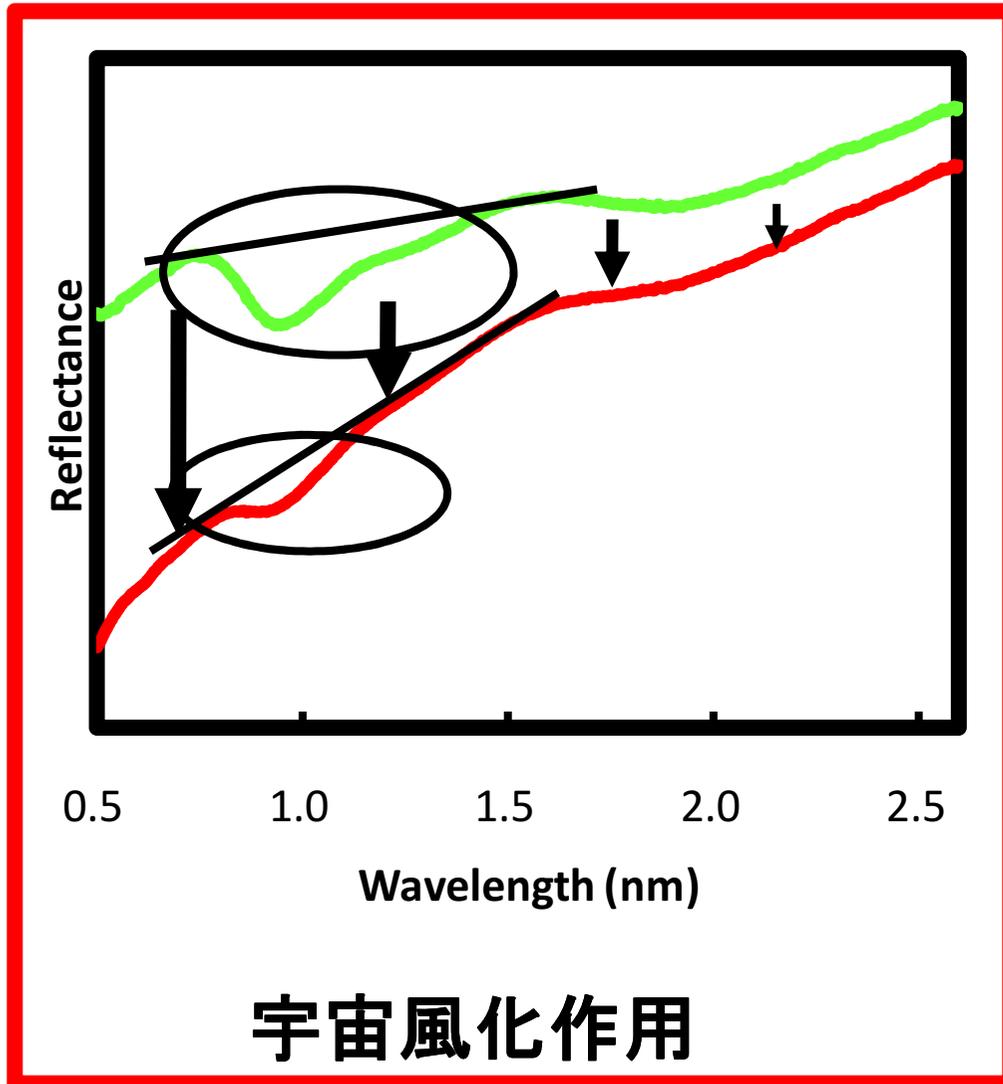
可視・近赤外反射スペクトル解析の問題点2

主要珪酸塩鉱物の可視・近赤外反射スペクトル



多種の鉱物に起因する複数の幅広い吸収帯が接近して複合吸収帯を形成

問題点のまとめ



解決方策

暗化・赤化・吸収帯の弱化
の原因物質は何か？

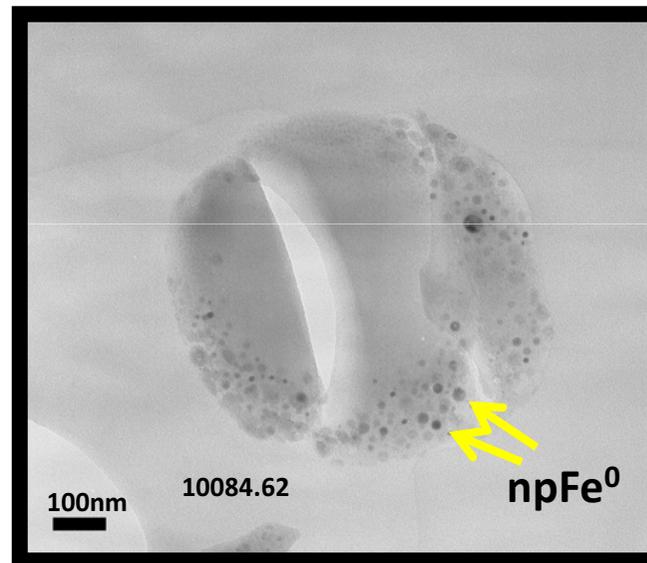


その物質が
可視・近赤外反射
スペクトルに与える影響
をモデル化する。
(宇宙風化モデルの作成)

宇宙風化作用の生成物

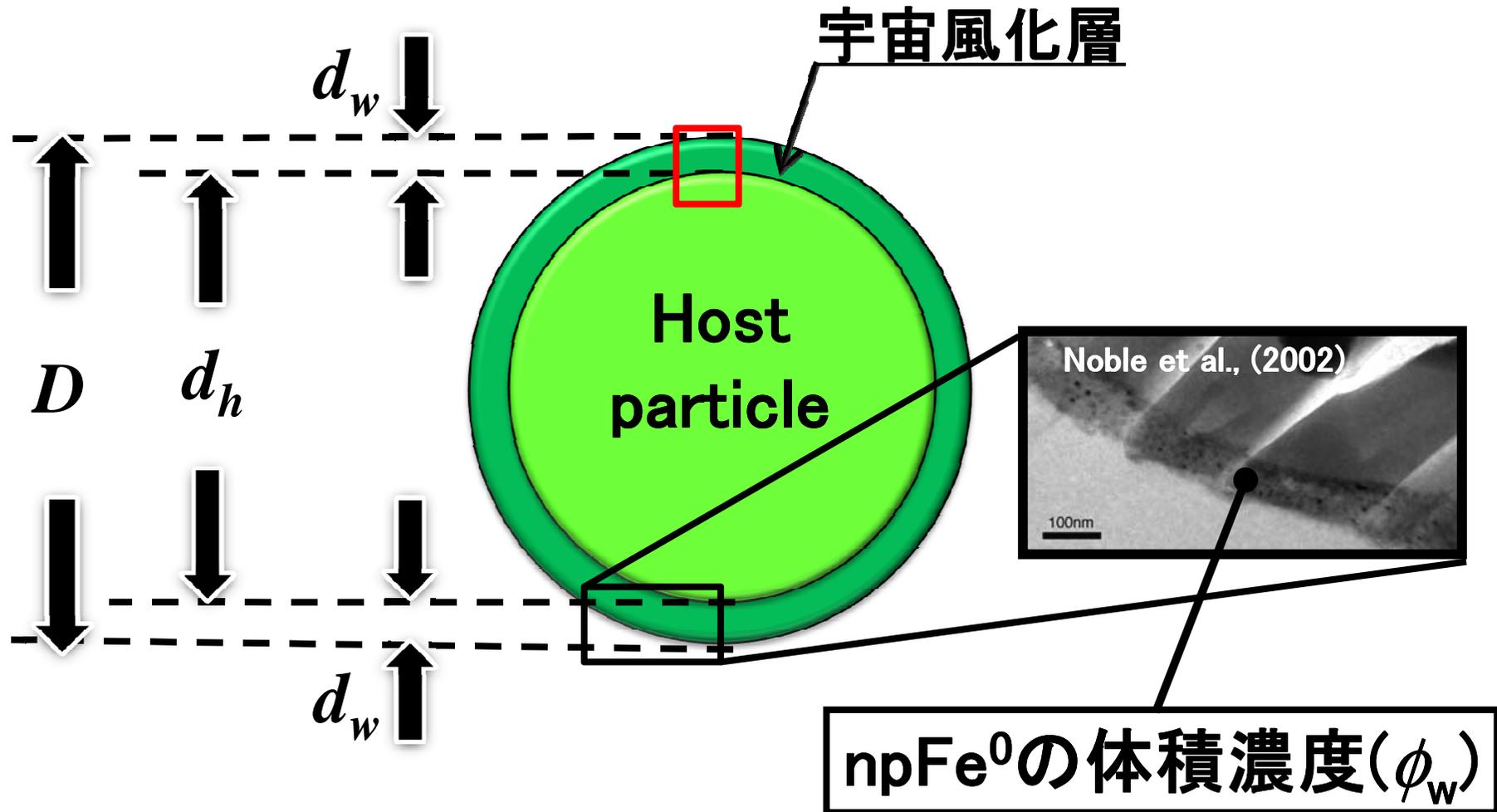
- ・月試料中のナノ還元鉄微粒子 (npFe⁰)

(Keller & McKay 1993).



月試料 10084. (Photo courtesy Sarah Noble).

宇宙風化作用モデル粒子

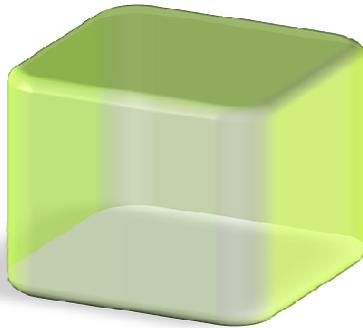


D : レゴリスの直径
 d_h : Host particleの直径
 d_w : 宇宙風化層の厚さ

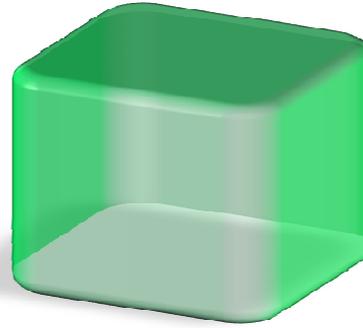
npFe^0 の体積濃度(ϕ_w)

宇宙風化層の吸収係数

Host



Fe



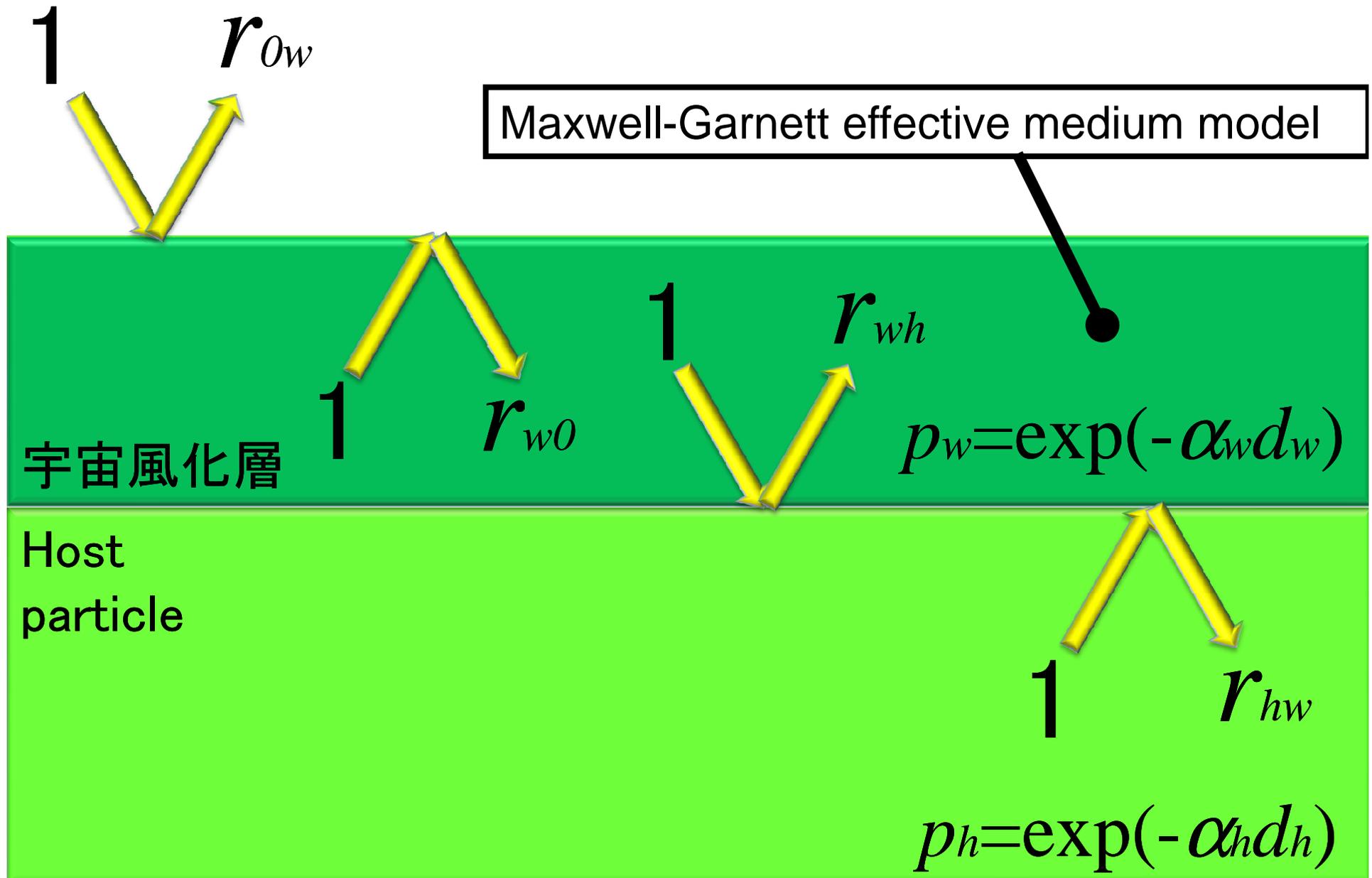
Maxwell-Garnett effective medium model

$$K_w = K_h \left(1 + \frac{3\phi_w \frac{K_{Fe} - K_h}{K_{Fe} + 2K_h}}{1 - \phi_w \frac{K_{Fe} - K_h}{K_{Fe} + 2K_h}} \right)$$

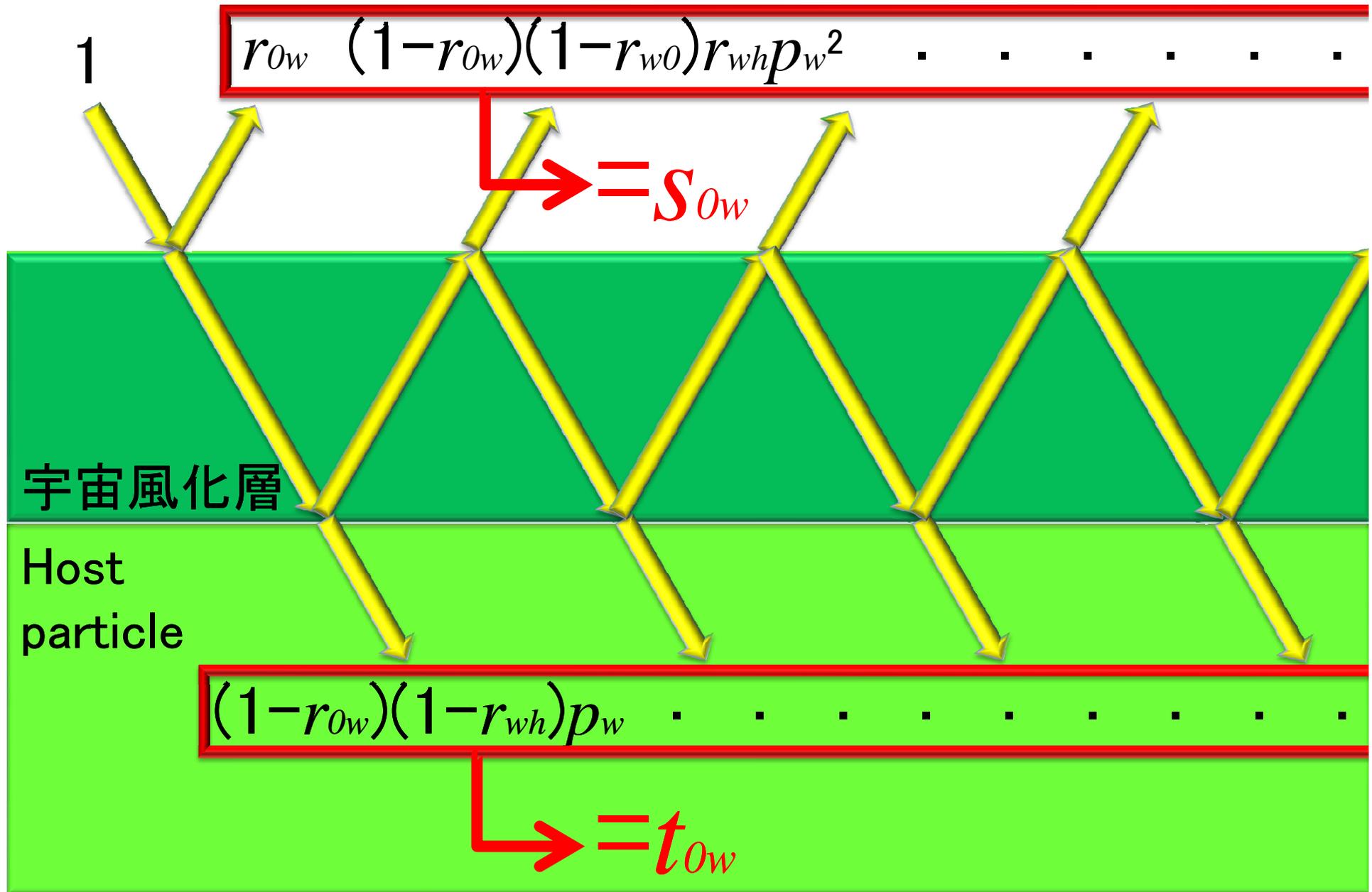
$$K_w = (n_w + ik_w)^2, K_h = (n_h + ik_h)^2, K_{Fe} = (n_{Fe} + ik_{Fe})^2,$$

$$\alpha_w = \frac{4\pi k_w}{\lambda}$$

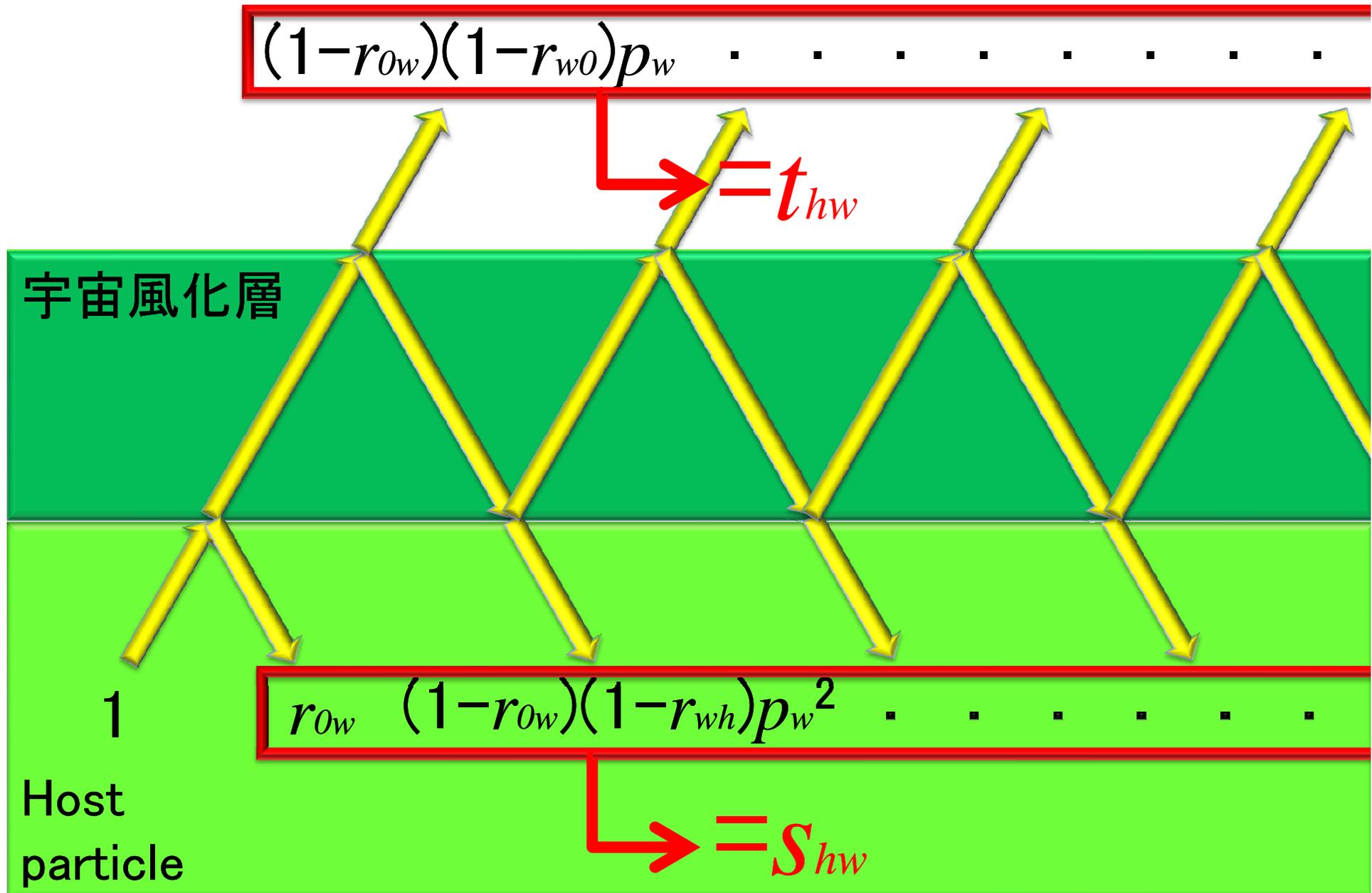
Surface reflectance



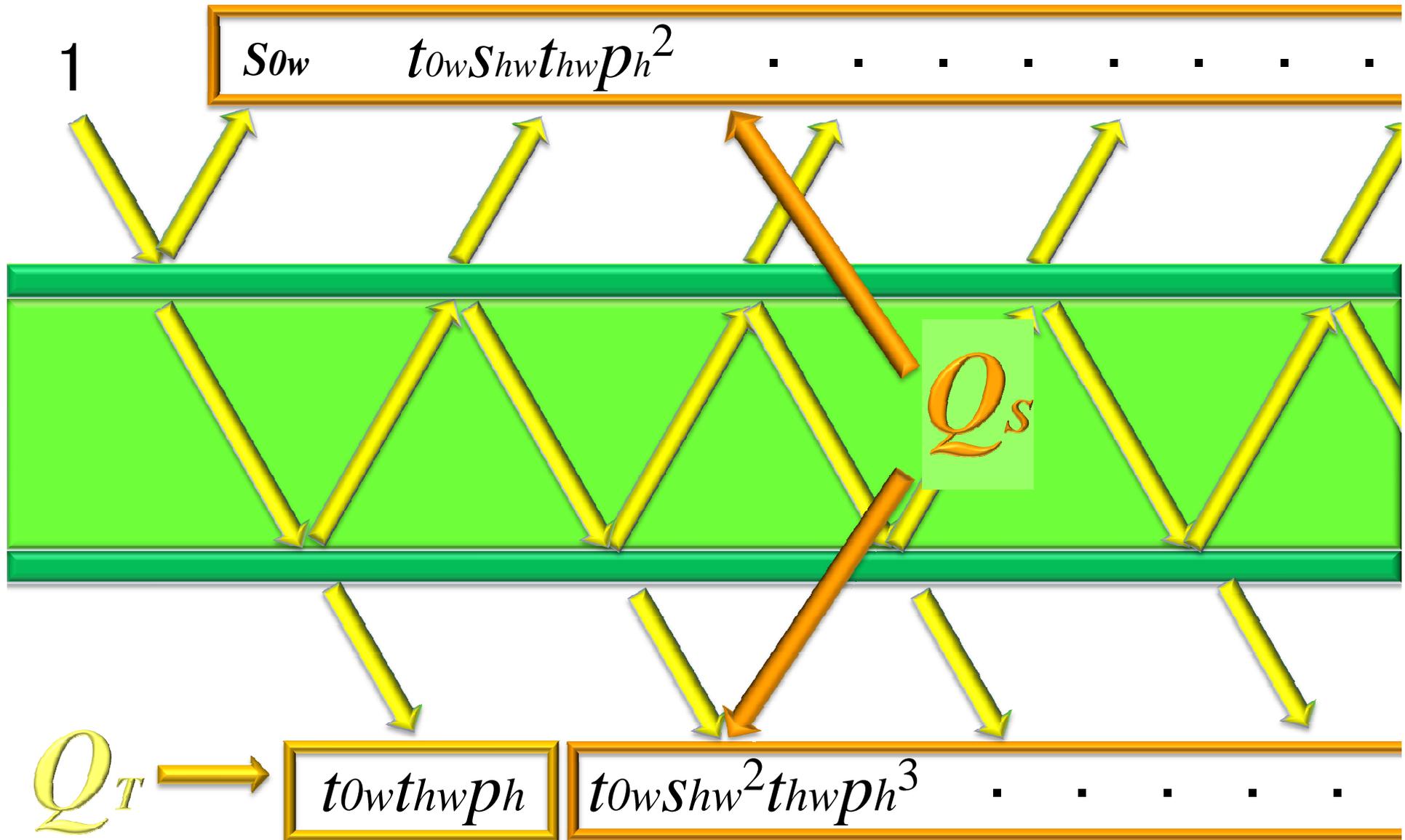
Parallel Plate Model for Vapor Coating Layer 1



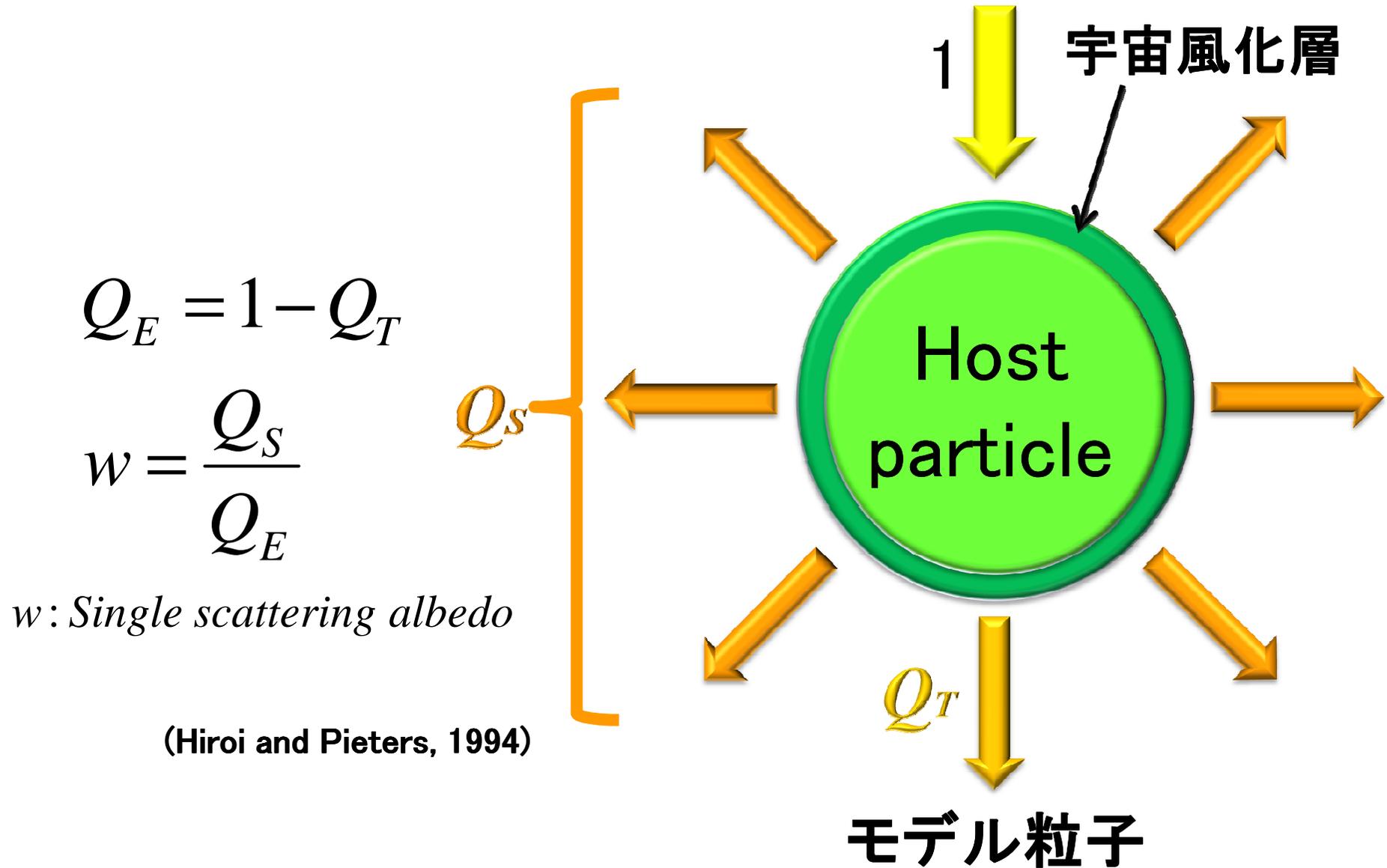
Parallel Plate Model for Vapor Coating Layer 2



Scattering and transmitting efficiencies



Single scattering albedo



物質の反射 (Hapke, 1993)

$$R(\theta_i, \theta_e, \theta_g, w) = \frac{w}{4} \frac{1}{\mu_i + \mu_e} H(\mu_i, w) H(\mu_e, w)$$

$$H(\mu, w) = \left[1 - (1 - \sqrt{1-w}) \mu \left\{ r_0 + \left(1 - \frac{r_0}{2} - r_{0w} \right) \ln \left(1 + \frac{1}{\mu} \right) \right\} \right]^{-1}, \quad r_0 = \frac{2}{1 + \sqrt{1-w}} - 1,$$

$$\mu_i = \cos \theta_i, \mu_e = \cos \theta_e.$$

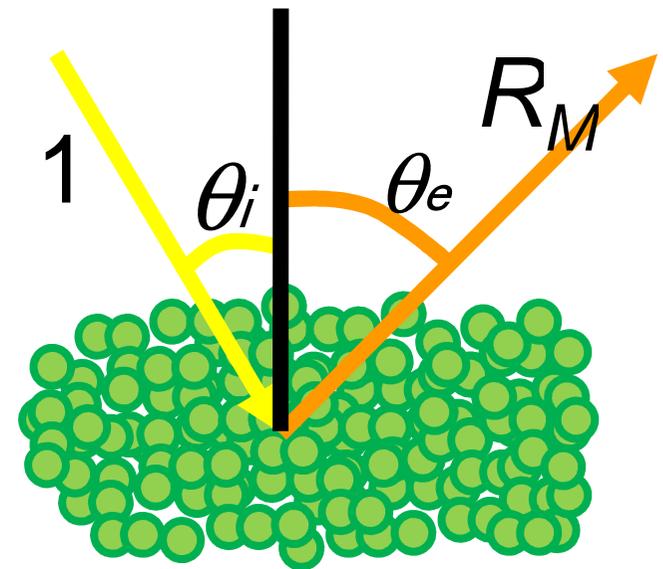
反射率 $R_C = \frac{R(\theta_i, \theta_e, \theta_g, w)}{R(\theta_i, \theta_e, \theta_g, w=1)}$

モデル反射率:

$$R_M \cong c R_C$$

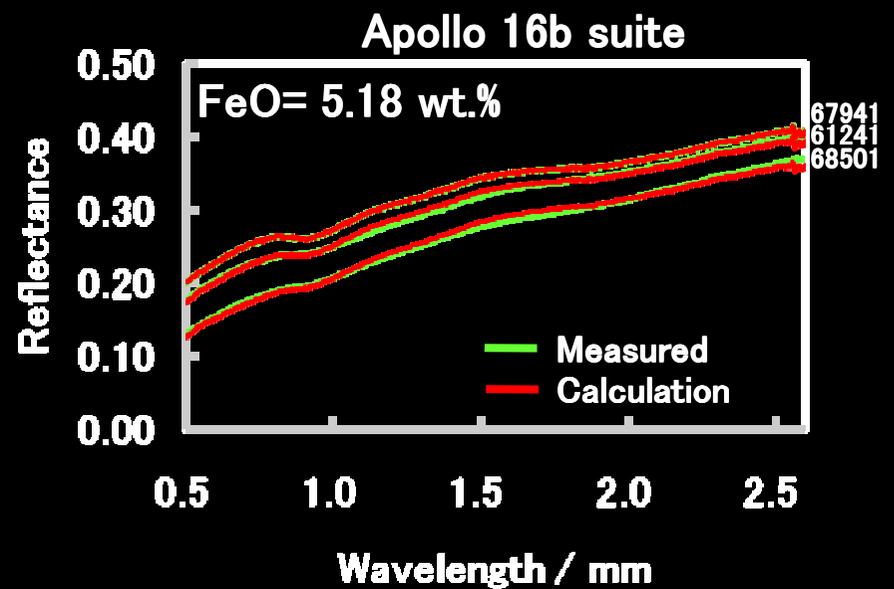
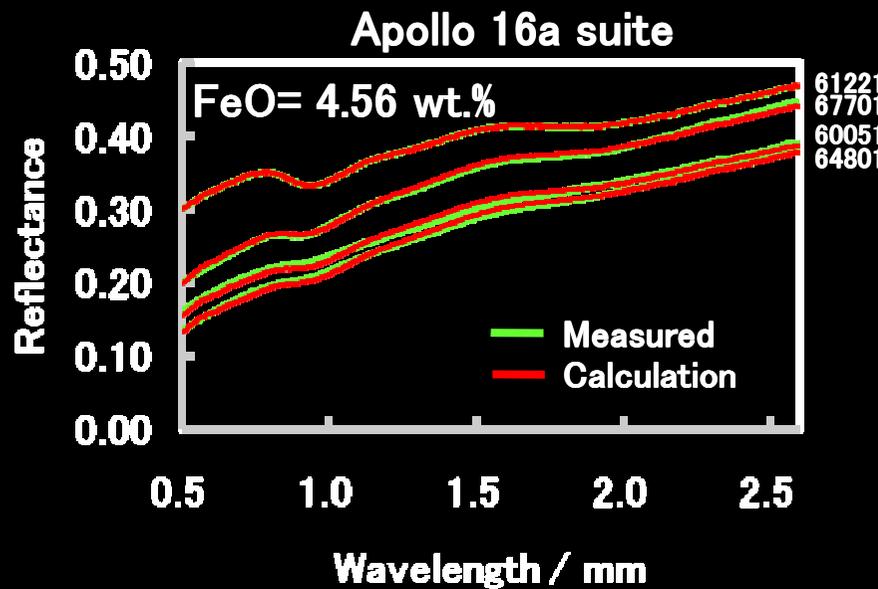
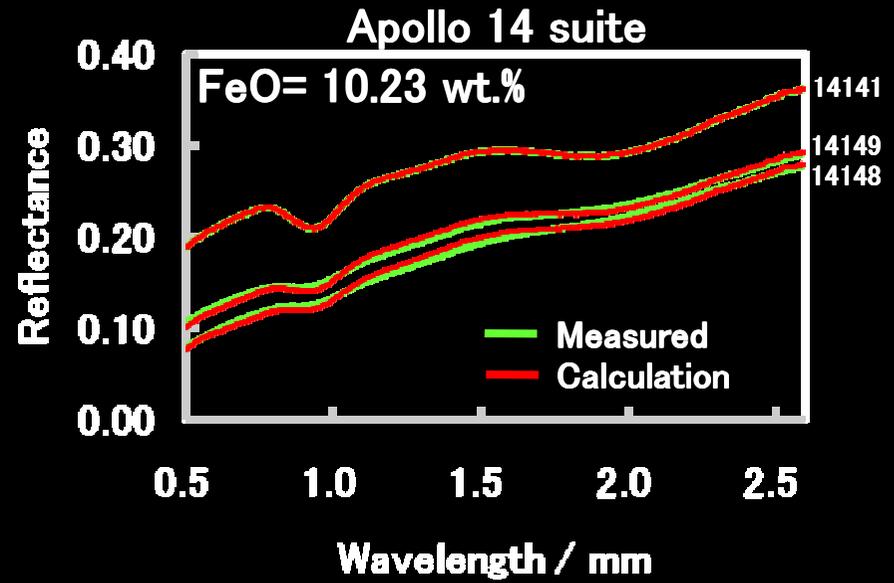
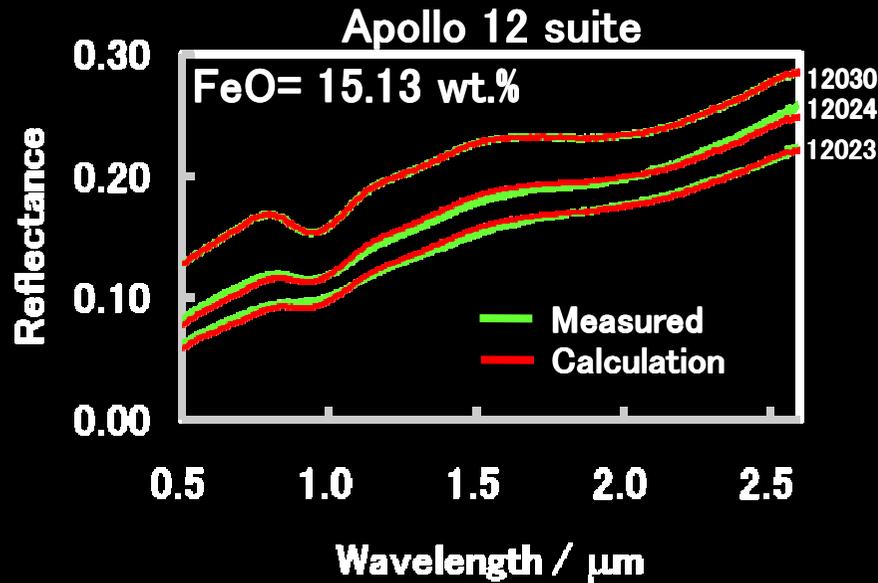
c : 暗化係数

(*e.g.*, 表面の凹凸、ガラス化)



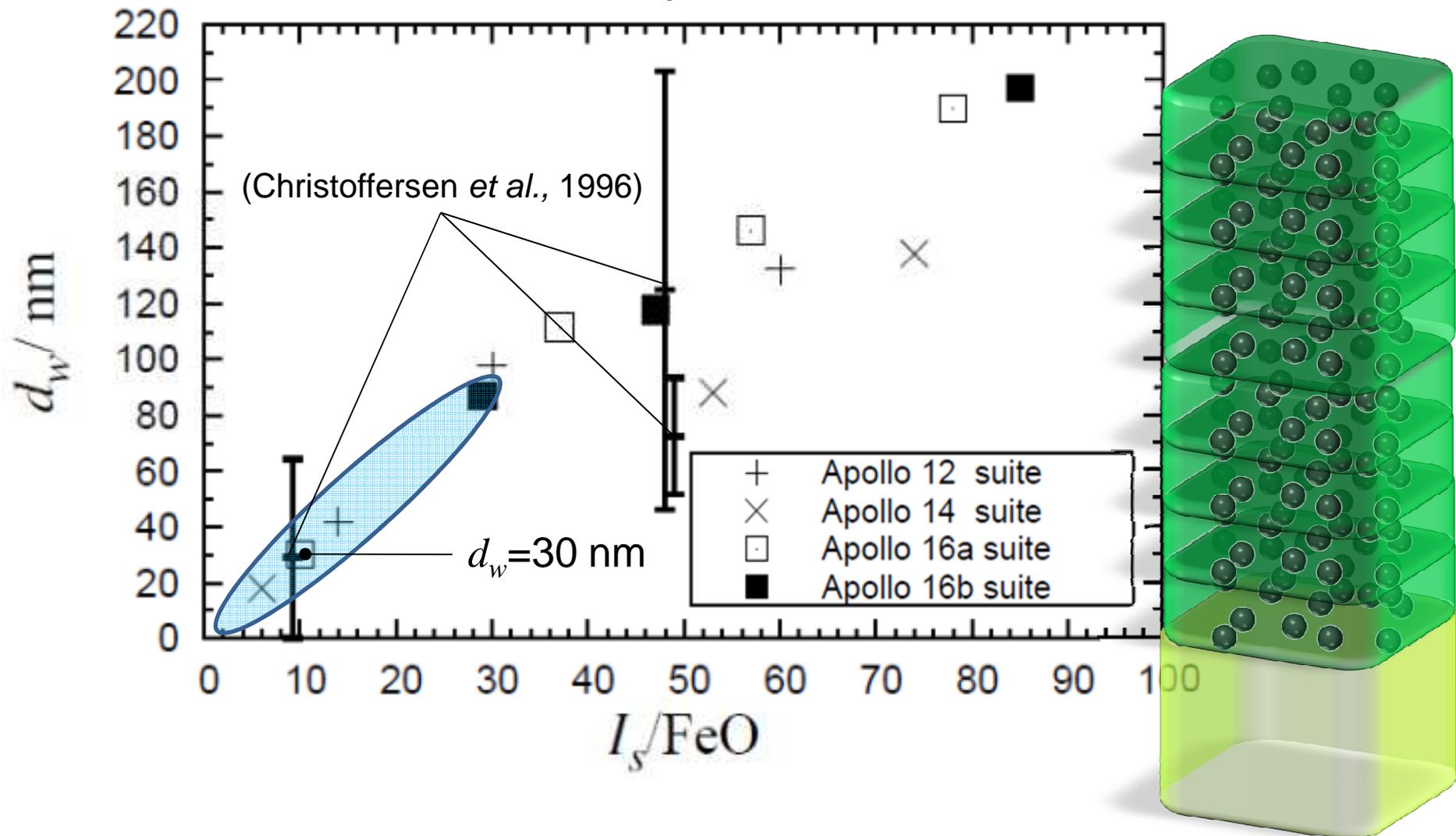
Results

Model fitting of four Apollo soil sites spectra



Measured spectra data from Fischer (1995)

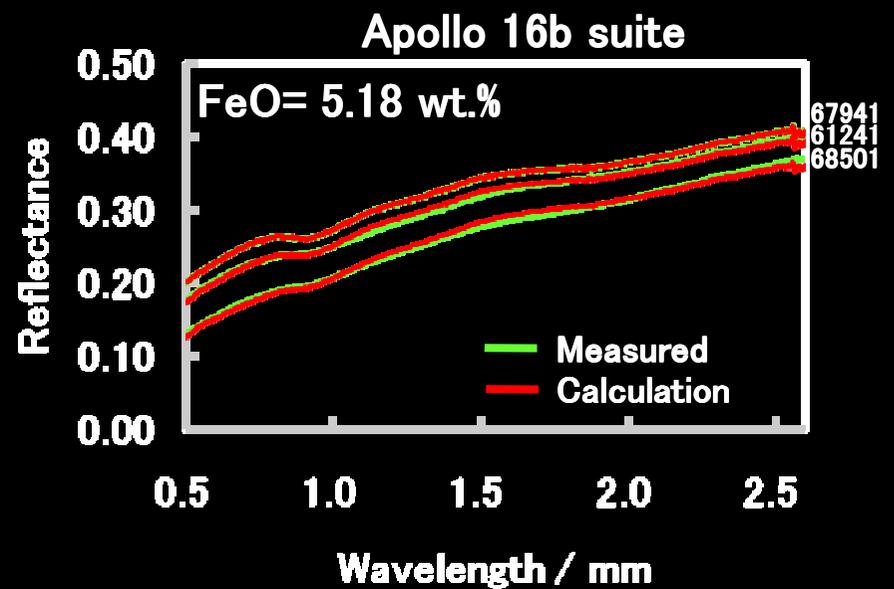
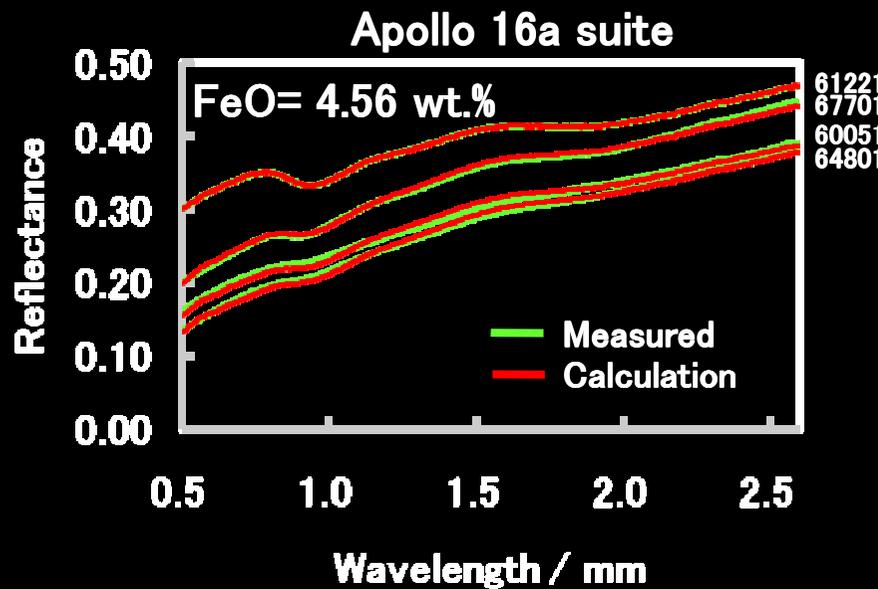
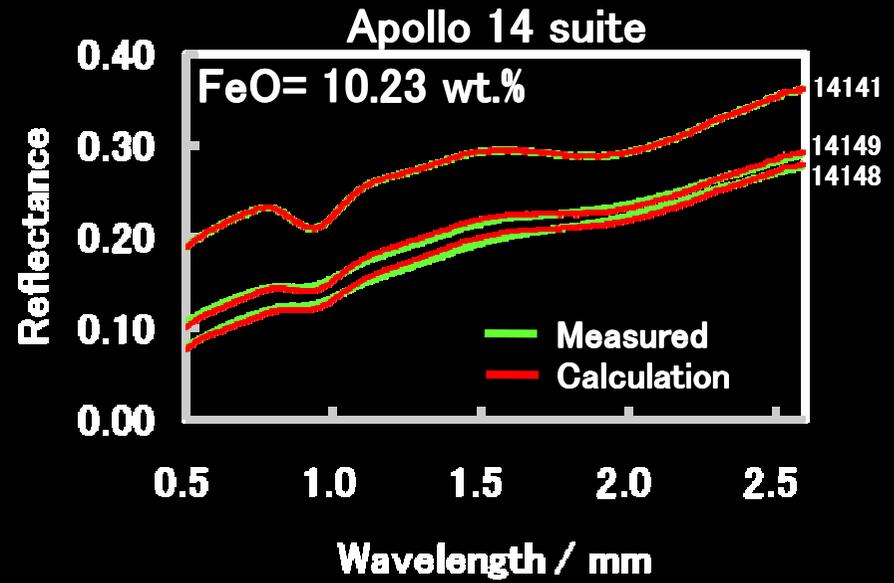
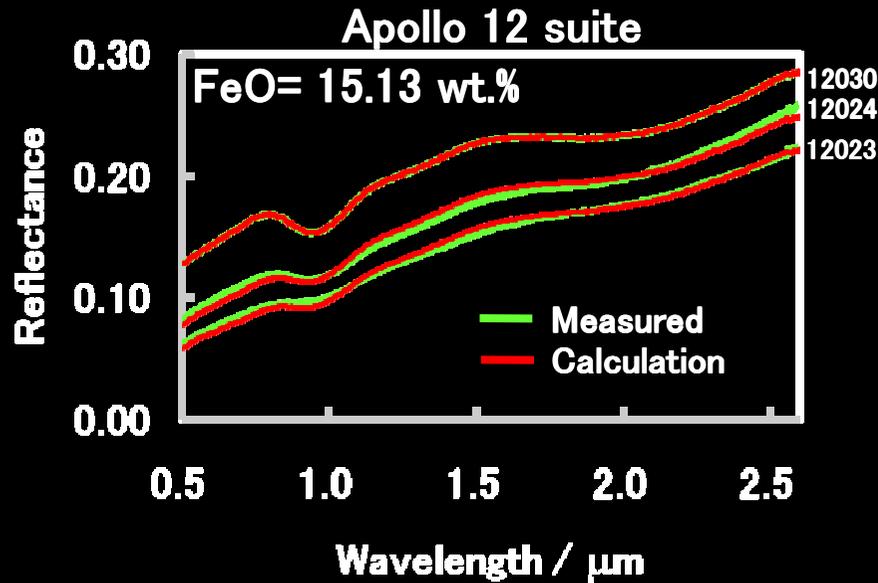
Optimized values of d_w plotted against I_s/FeO for four Apollo soil suites.



d_w has a good positive correlation with the I_s/FeO .

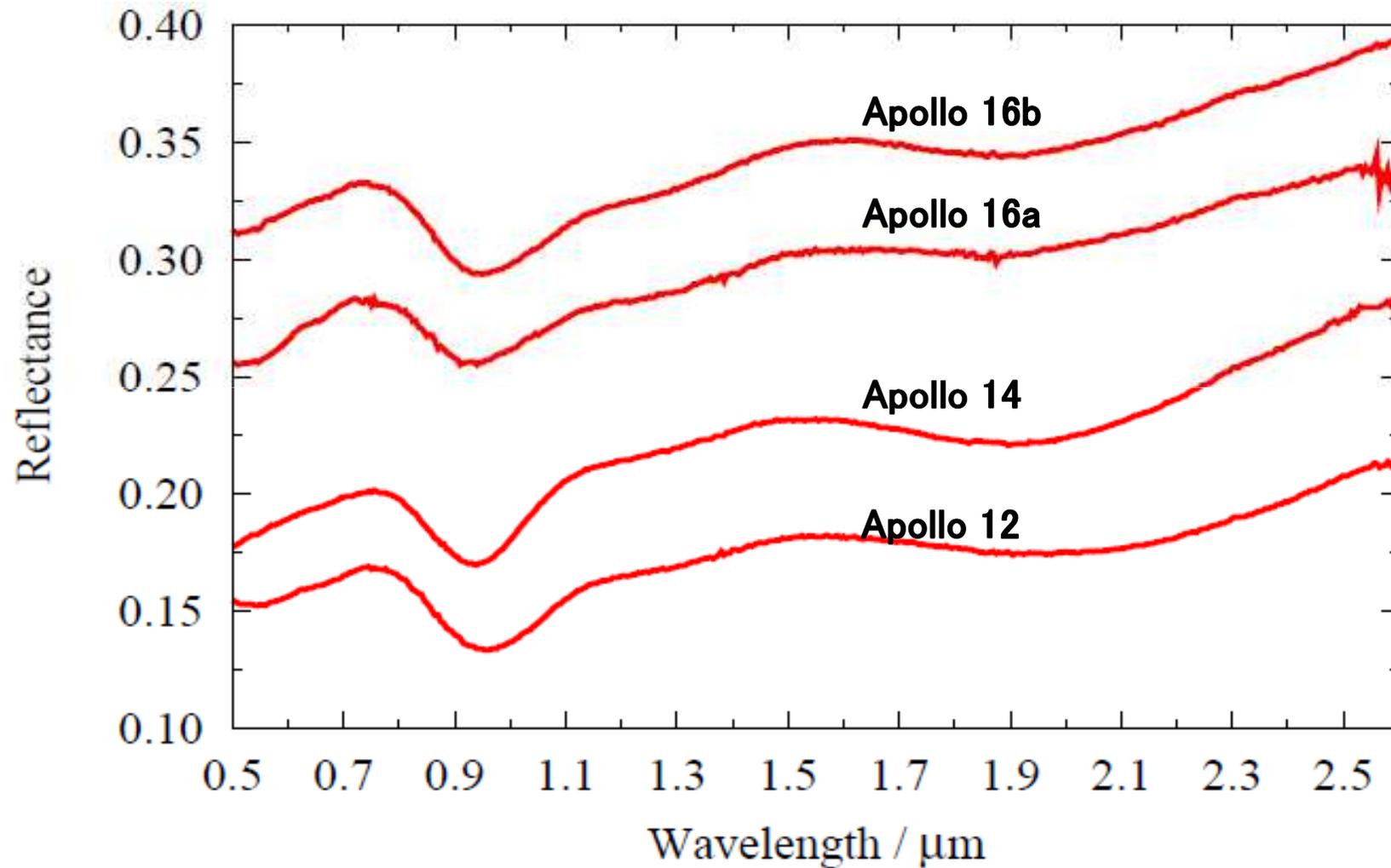
Results

Model fitting of four Apollo soil sites spectra



Measured spectra data from Fischer (1995)

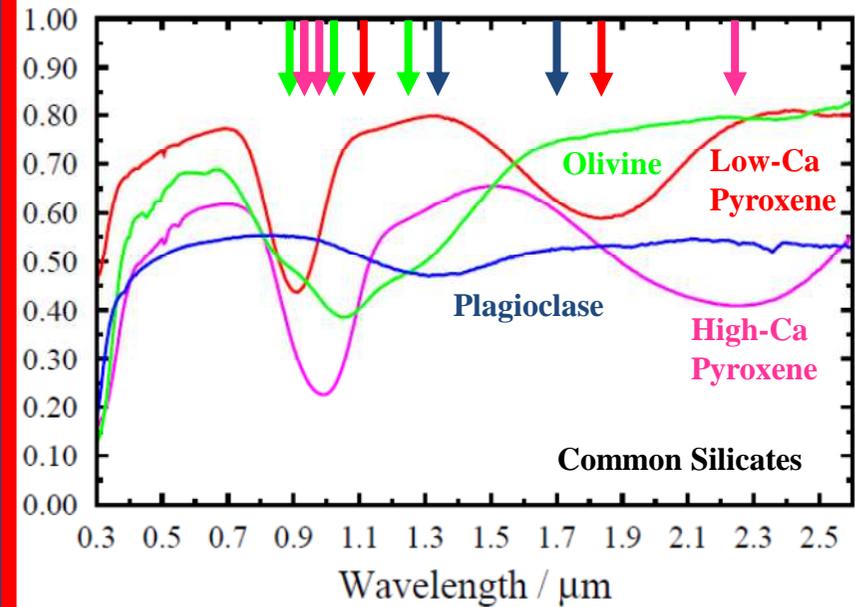
Reflectance spectra of four lunar soils except space weathering effect R_h



問題点のまとめ

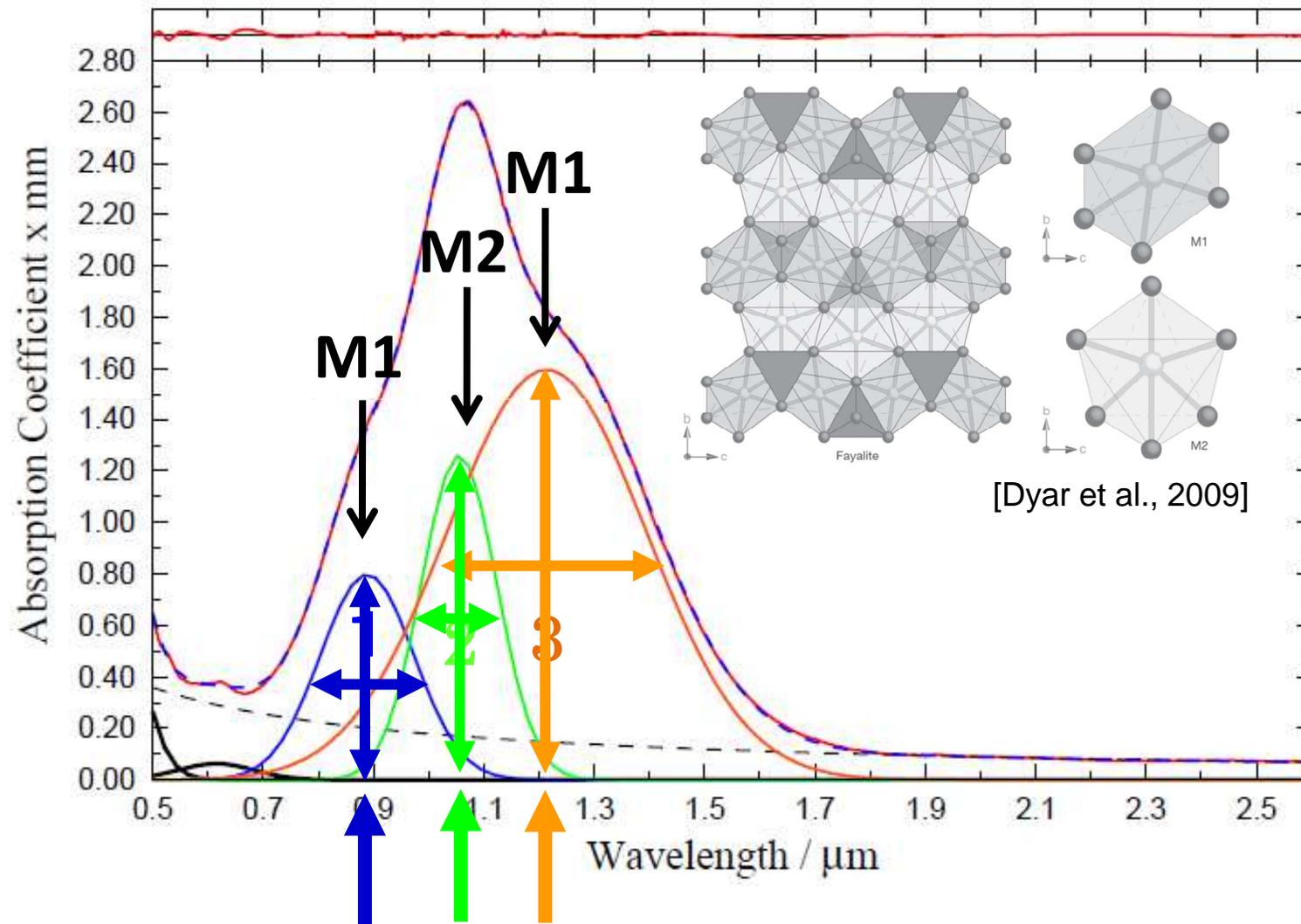
解決方策

各鉱物の
吸収帯の特徴を
定式化

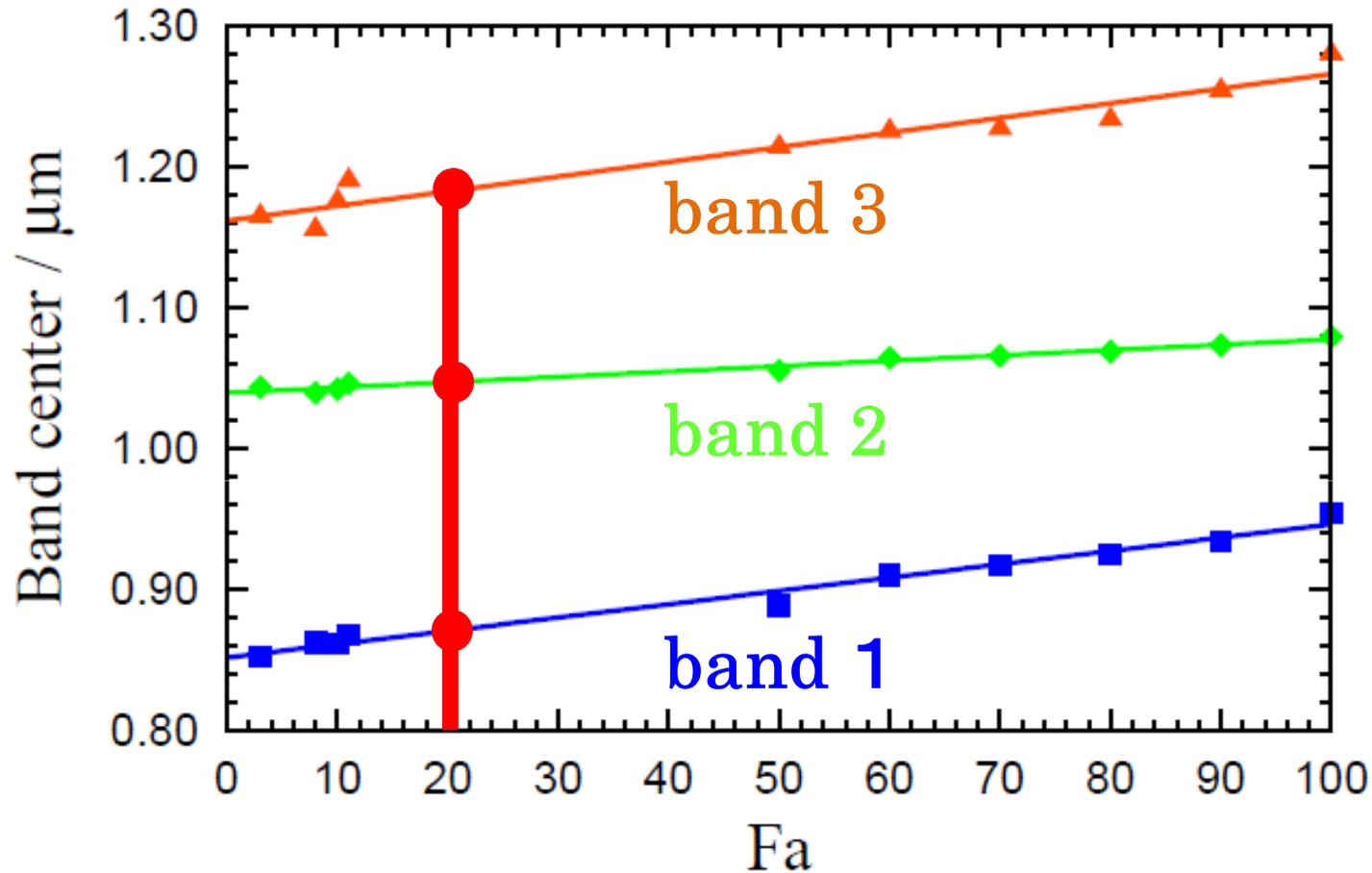


複合吸収帯

カンラン石の可視・近赤外反射スペクトル解析

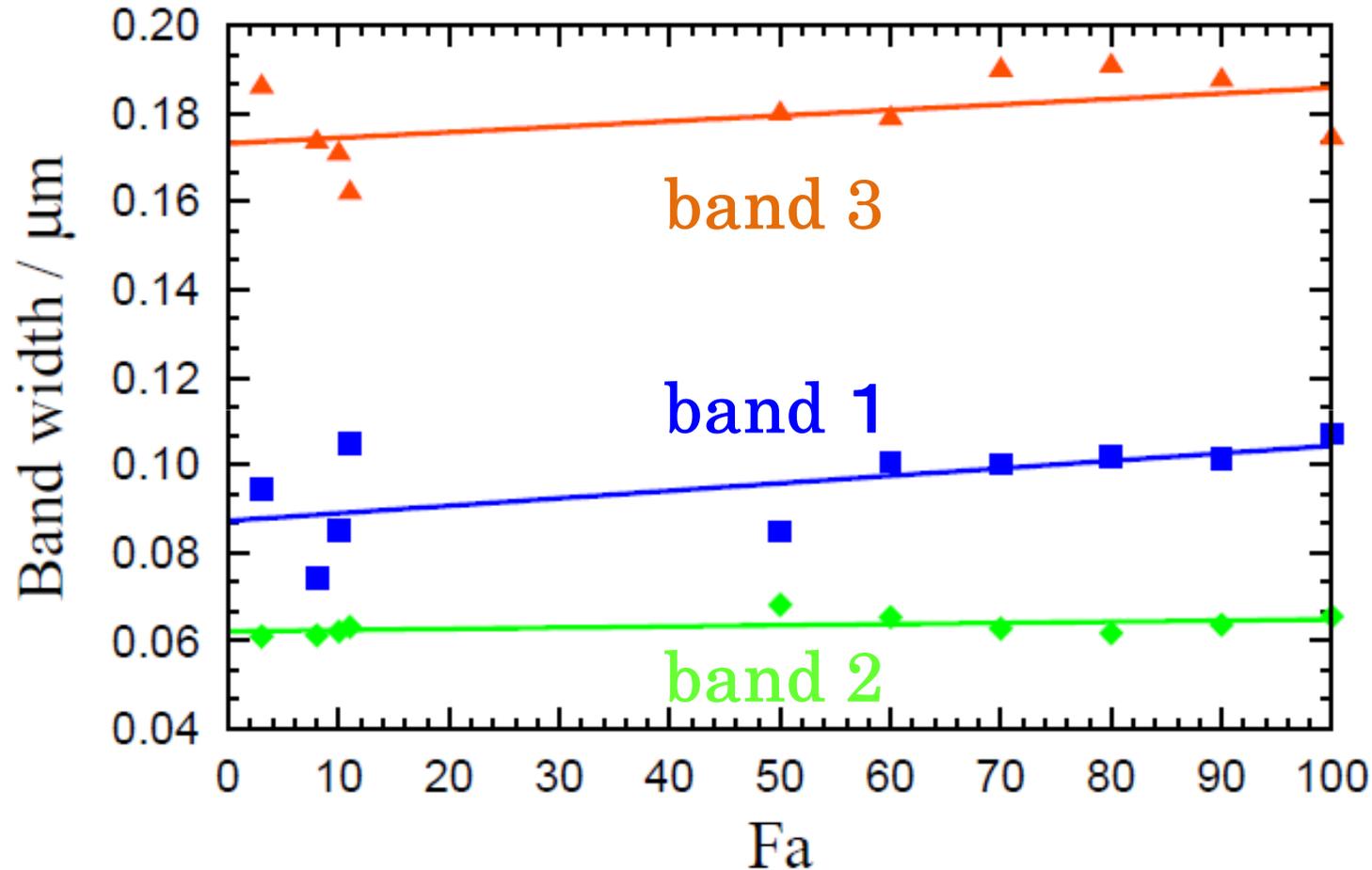


カンラン石の3つの吸収帯の中心波長



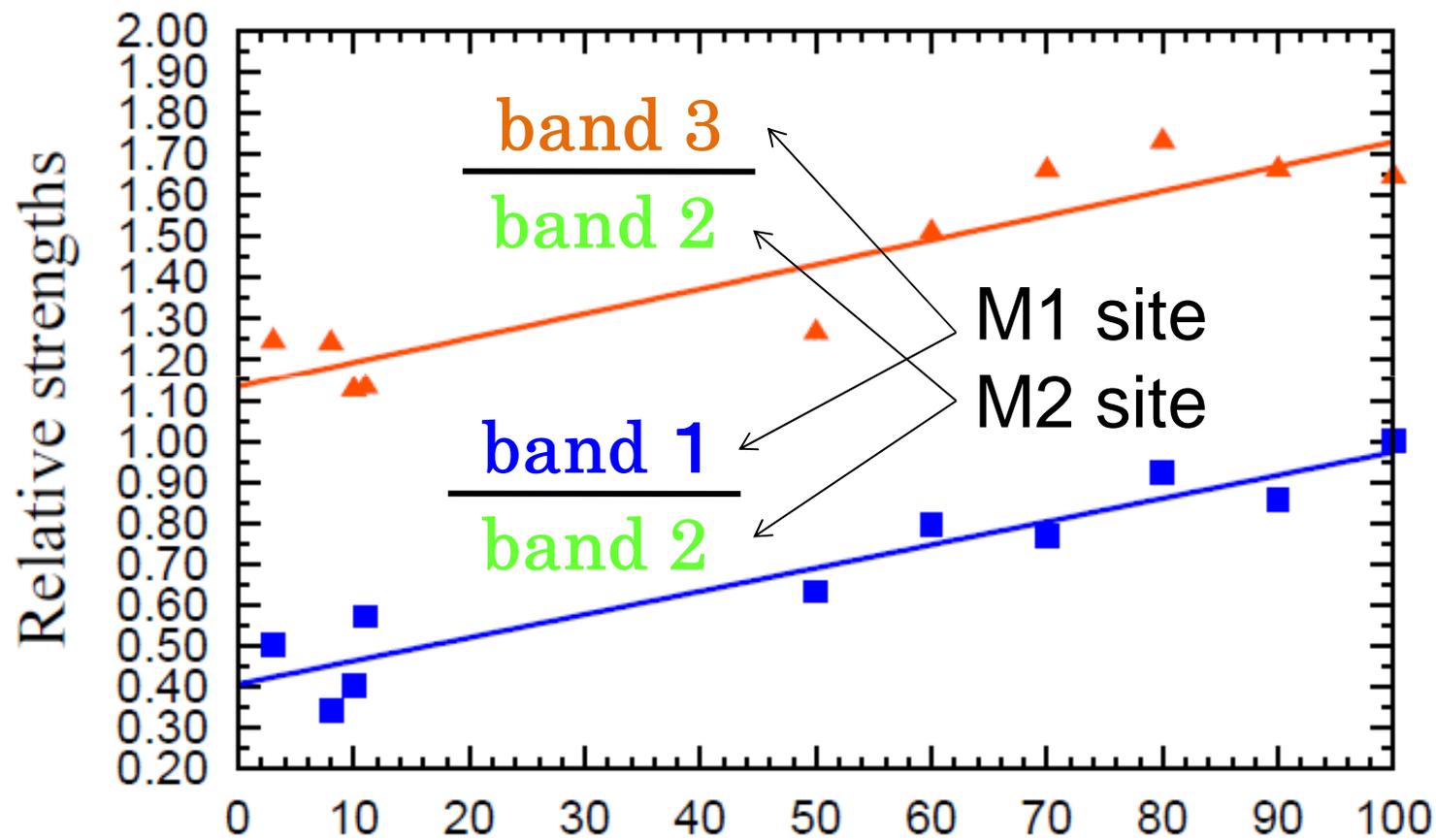
$$\mu_{oli} = L_{oli} \cdot Fa + L_{oli}$$

カンラン石の3つの吸収帯の幅



$$\sigma_{oli} = M_{Fai} \cdot Fa + M_{oli}$$

カンラン石の3つの吸収帯の吸収帯強度比



$$s_{oli} = (N_{Fai} \cdot Fa + N_{oli}) s_{ol2}$$

鉱物の吸収帯の特徴を組み込んだMGM

従来のMGM (Sunshine *et al.* 1990)

Band 1 Band 2 Band 3

$$\alpha_{ol}(\mu_{ol1}, \mu_{ol2}, \mu_{ol3}, \\ \sigma_{ol1}, \sigma_{ol2}, \sigma_{ol3}, \\ s_{ol1}, s_{ol2}, s_{ol3})$$

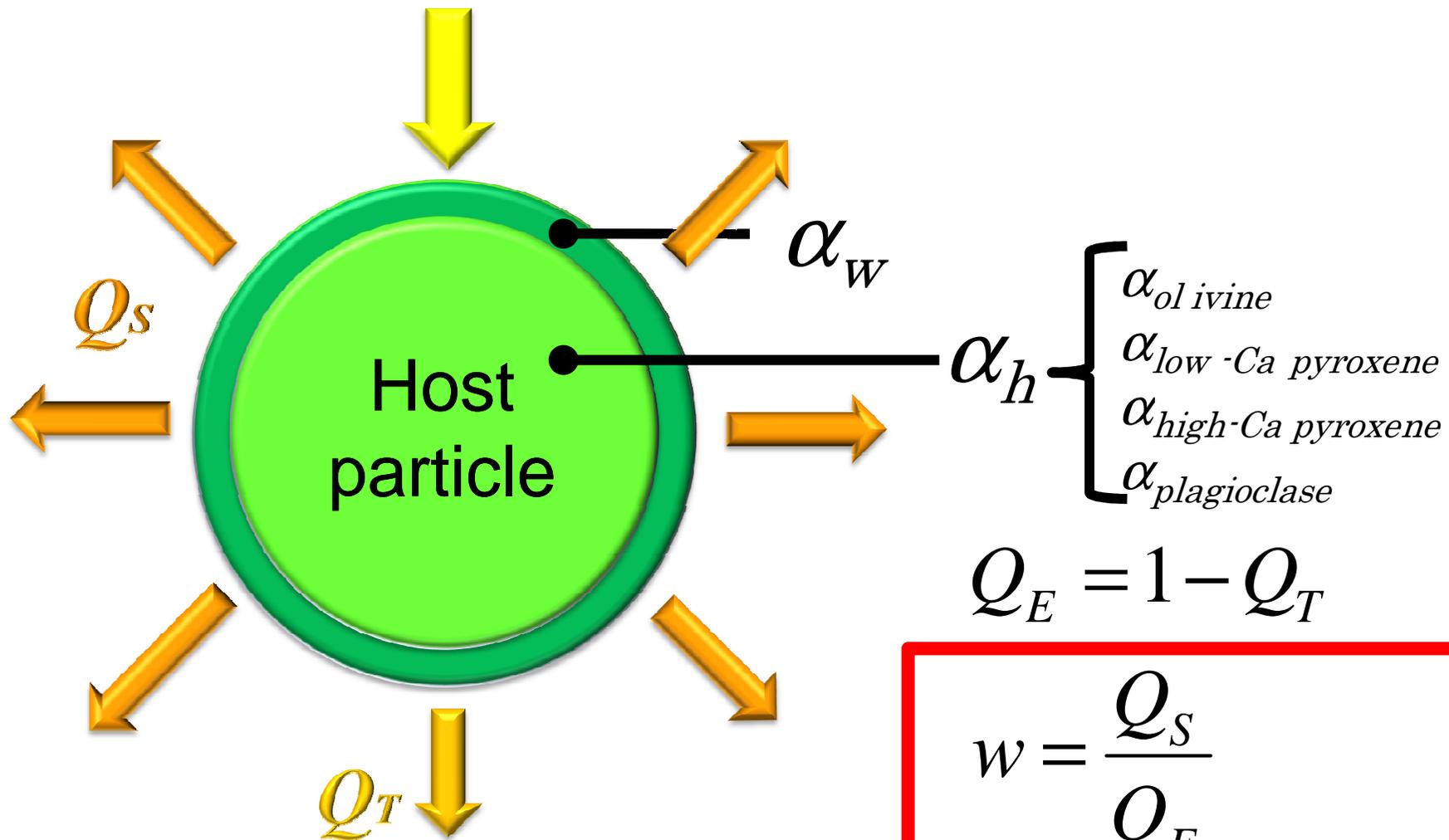
$$= \sum_i^3 s_{oli} \exp\left[-\frac{(\lambda - \mu_{oli})^2}{2\sigma_{oli}^2}\right]$$

カンラン石の吸収帯 の特徴を組み込んだ MGM

$$\mu_{oli} = L_{Fai} Fa + L_{oli}$$
$$\sigma_{oli} = M_{Fai} Fa + M_{oli}$$
$$s_{oli} = (N_{Fai} \cdot Fa + N_{oli}) s_{ol2}$$

変数はFa および s_{ol2} のみ

レゴリス粒子の吸収係数



$$Q_E = 1 - Q_T$$

$$w = \frac{Q_S}{Q_E}$$

w: Single scattering albedo
(Hiroi and Pieters, 1994)

鉱物混合物のSingle scattering albedo

カンラン石、低Ca輝石、高Ca輝石、斜長石の割合が

$$m_{ol}:m_{opx}:m_{cpx}:m_{pl}$$

とすると、

$$w = \frac{\sum_j m_j Q_{Sj}}{\sum_j m_j Q_E} = \frac{m_{ol} Q_{Sol} + m_{opx} Q_{Sopx} + m_{cpx} Q_{Scpx} + m_{pl} Q_{Spl}}{m_{ol} Q_{Eol} + m_{opx} Q_{Eopx} + m_{cpx} Q_{Ecpx} + m_{pl} Q_{Epl}}$$

物質の反射 (Hapke, 1993)

$$R(\theta_i, \theta_e, \theta_g, w) = \frac{w}{4} \frac{1}{\mu_i + \mu_e} H(\mu_i, w) H(\mu_e, w)$$

$$H(\mu, w) = \left[1 - (1 - \sqrt{1-w}) \mu \left\{ r_0 + \left(1 - \frac{r_0}{2} - r_{0w} \right) \ln \left(1 + \frac{1}{\mu} \right) \right\} \right]^{-1}, \quad r_0 = \frac{2}{1 + \sqrt{1-w}} - 1,$$

$$\mu_i = \cos \theta_i, \mu_e = \cos \theta_e.$$

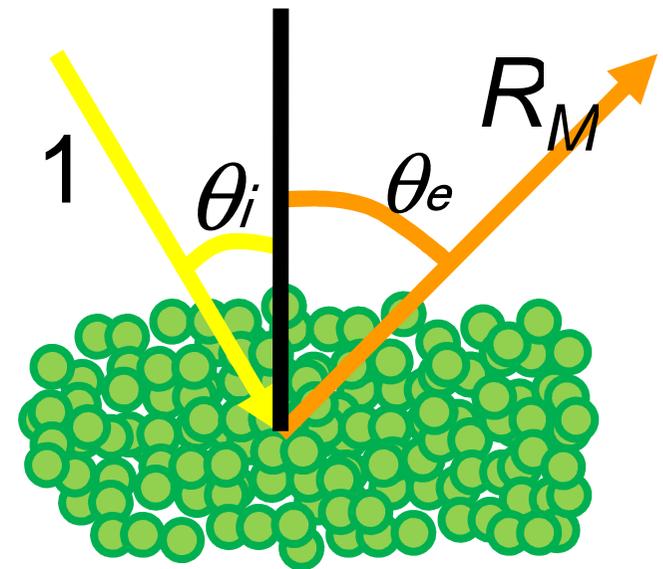
反射率 $R_C = \frac{R(\theta_i, \theta_e, \theta_g, w)}{R(\theta_i, \theta_e, \theta_g, w=1)}$

モデル反射率:

$$R_M \cong c R_C$$

c : 暗化係数

(*e.g.*, 表面の凹凸、ガラス化)



可視・近赤外反射スペクトル解析法で用いる変数

| Name of parameter | Number |
|--|--------|
| 暗化係数(c) | 1 |
| 宇宙風化層の厚さ (d_w) | 1 |
| ナノ還元鉄微粒子(npFe ⁰)の体積濃度 (ϕ_w) | 1 |
| Host particleの直径(d_h) | 1 |
| 鉱物混合比 ($v_{ol} \cdot v_{low-Ca} \cdot v_{high-Ca} \cdot v_{pl}$) | 4 |
| コンティニウム(c_{0h}, c_{1h}) | 2 × 4 |
| カンラン石のband 2の吸収帯強度(s_{ol2}) | 1 |
| 輝石のband 1, 2 の吸収帯強度(s_{px1}, s_{px2}) | 2 × 2 |
| 斜長石のband 1の吸収帯強度(s_{pl1}) | 1 |
| カンラン石のFa#(Fa#) | 1 |
| 輝石のWo#(Wo#) | 2 |

6 Hebe, 433 Eros, 25143 Itokawaの 宇宙風化度および組成の推定と解釈

解析に用いた小惑星の可視・近赤外反射スペクトル

- **6 Hebe**

- 主ベルト小惑星

- Hコンドライト的

- 24色および52色小惑星サーベイ

[*e.g.*, Chapman and Gaffey, 1979; McFadden *et al.*, 1984]

- **433 Eros、25143 Itokawa**

- 近地球小惑星

- LLコンドライト的

- 小型主ベルト小惑星分光サーベイ(SMASS)

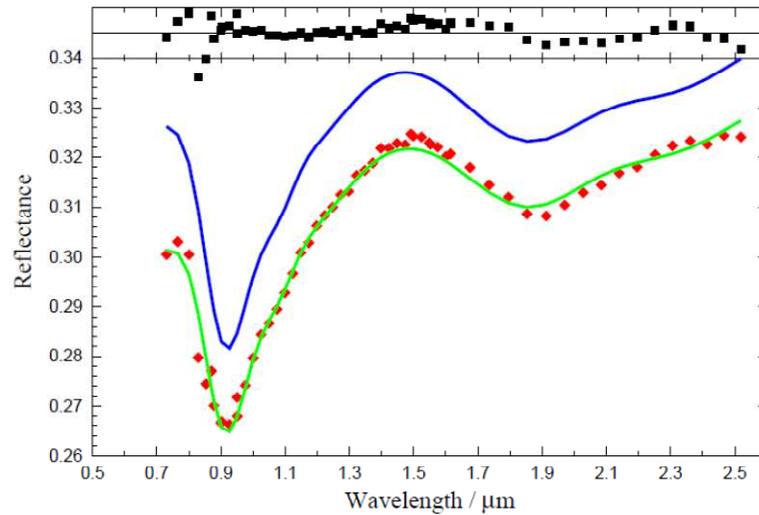
[Binzel *et al.*, 2001; Rivkin *et al.*, 2004]

- はやぶさ探査機のNIRSのデータ (25143 Itokawa)

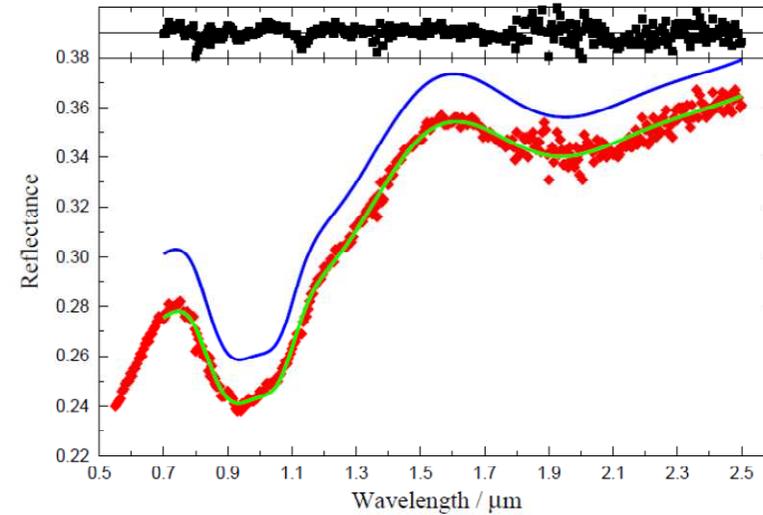
[Abe *et al.*, 2006]

モデルの可視・近赤外反射スペクトルへの応用

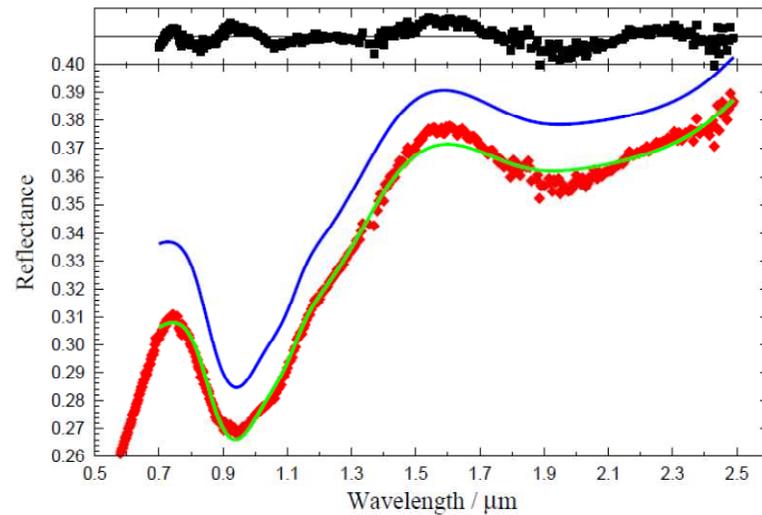
6 Hebe



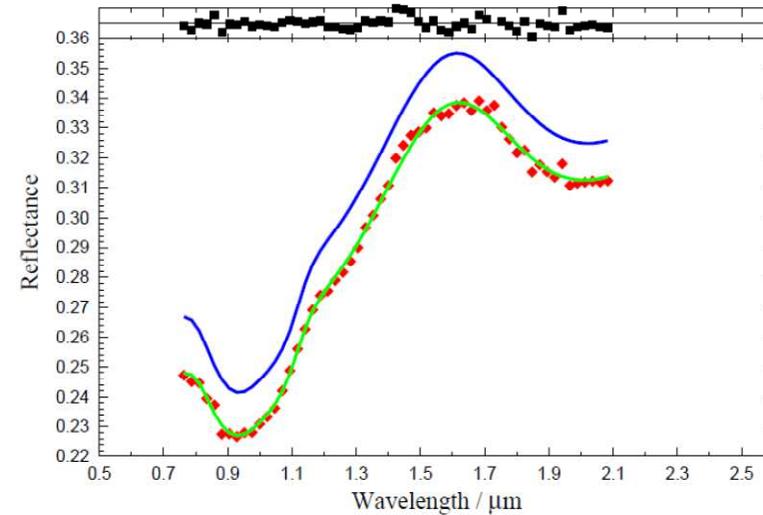
25143 Itokawa (Telescopic)



433 Eros

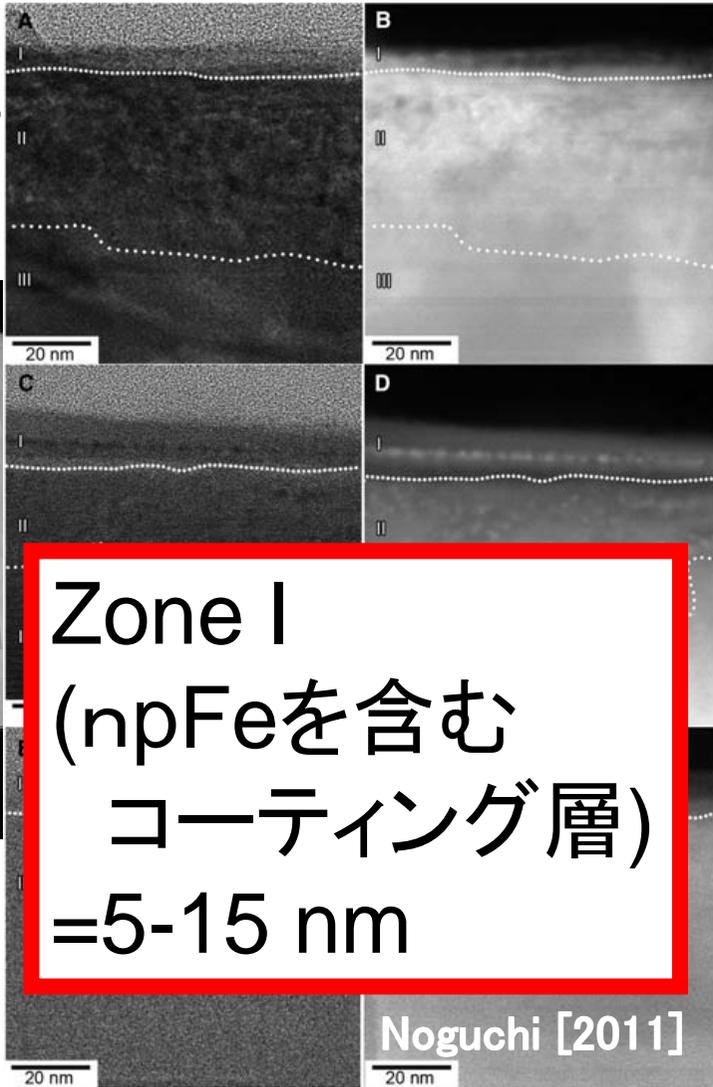


25143 Itokawa (Hayabusa NIRS)



2514

赤外反射スペクトル解析

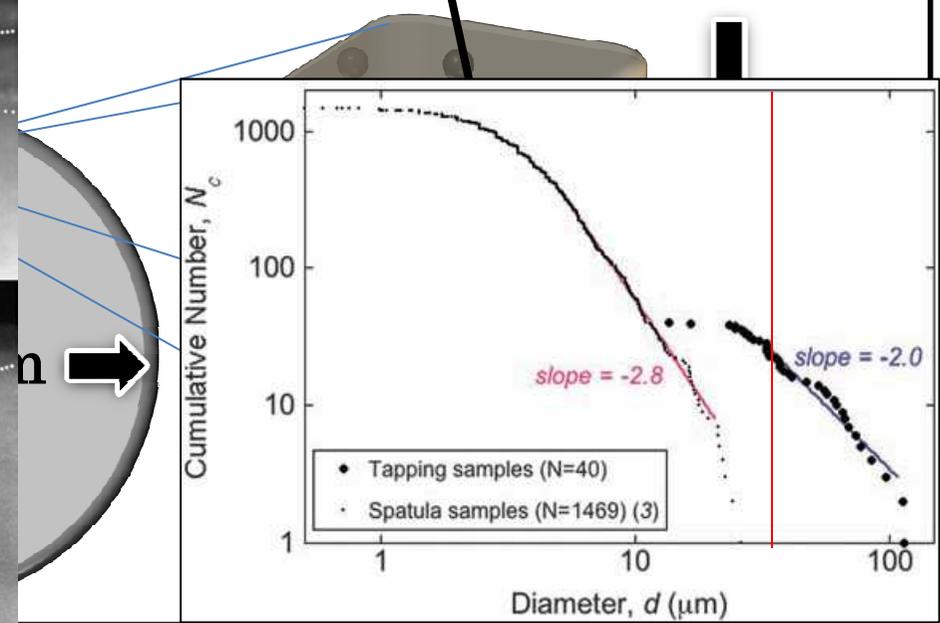


Zone I
 (npFeを含む
 コーティング層)
 =5-15 nm

Noguchi [2011]

元鉄微粒子($npFe^0$)の体積濃度

$$\phi_w = 1.1 \text{ vol.}\%$$



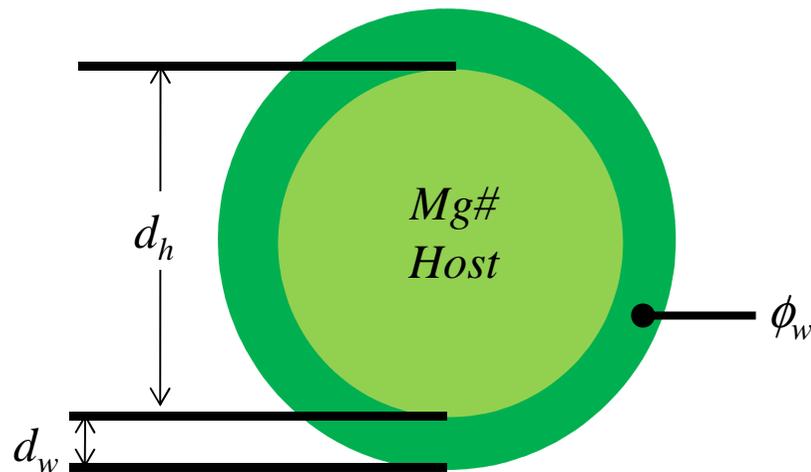
Tsuchiyama [2011]

| d_h | d_w | ϕ_w |
|------------------|-------|----------|
| 60 μm | 8 nm | 1.1vol.% |

| Mg# | olivine | low-Ca pyroxene | high-Ca pyroxene | Plagioclase |
|-----|---------|-----------------|------------------|-------------|
| 75 | 58 % | 21 % | 6 % | 15 % |

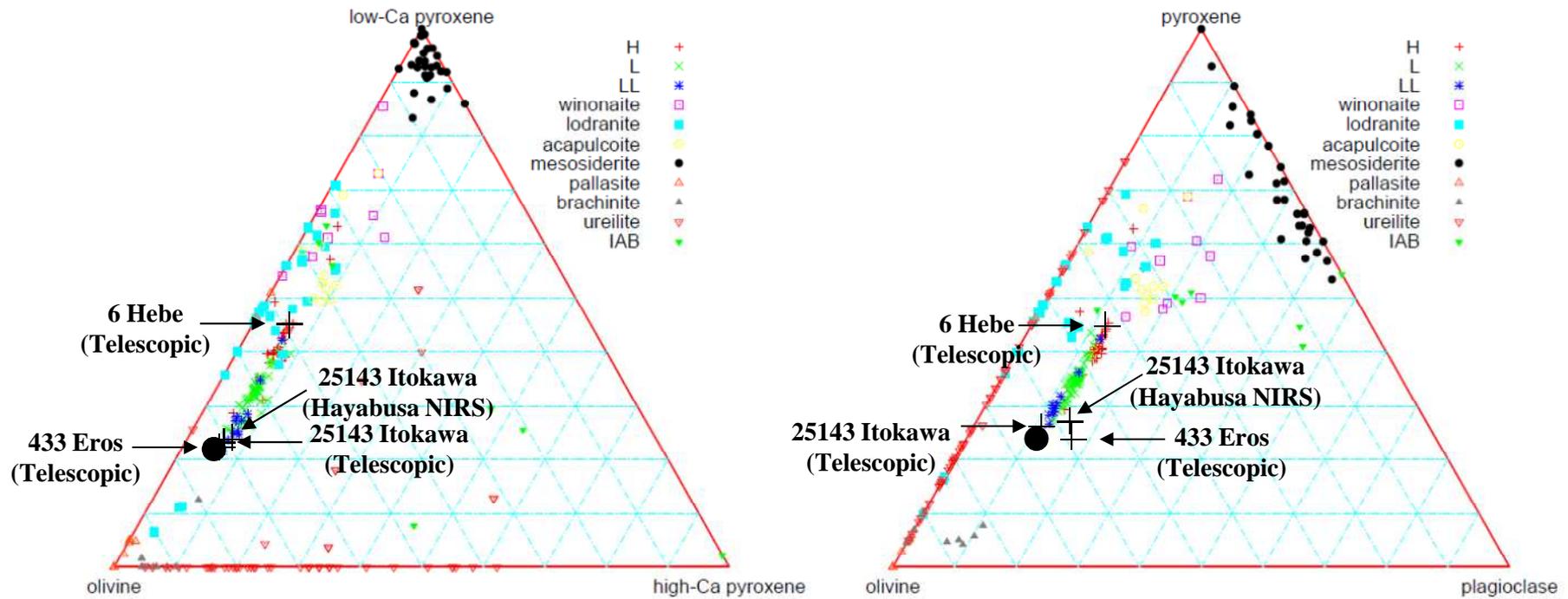
モデルの応用結果

| | 6 Hebe (Telescopic) | 433 Eros (Telescopic) | 25143 Itokawa (Telescopic) | 25143 Itokawa (Hayabusa NIRS) |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|
| d_h (μm) | 40 | 40 | 50 | 60 |
| d_w (nm) | 6 | 7 | 9 | 8 |
| ϕ_w (vol. %) | 1.6 | 1.3 | 0.9 | 1.1 |
| Mg# (mol%) | 83 | 75 | 75 | 75 |
| ol:op:cp:pl | 43:39:6:12 | 58:19:5:18 | 62:21:5:11 | 58:21:6:15 |



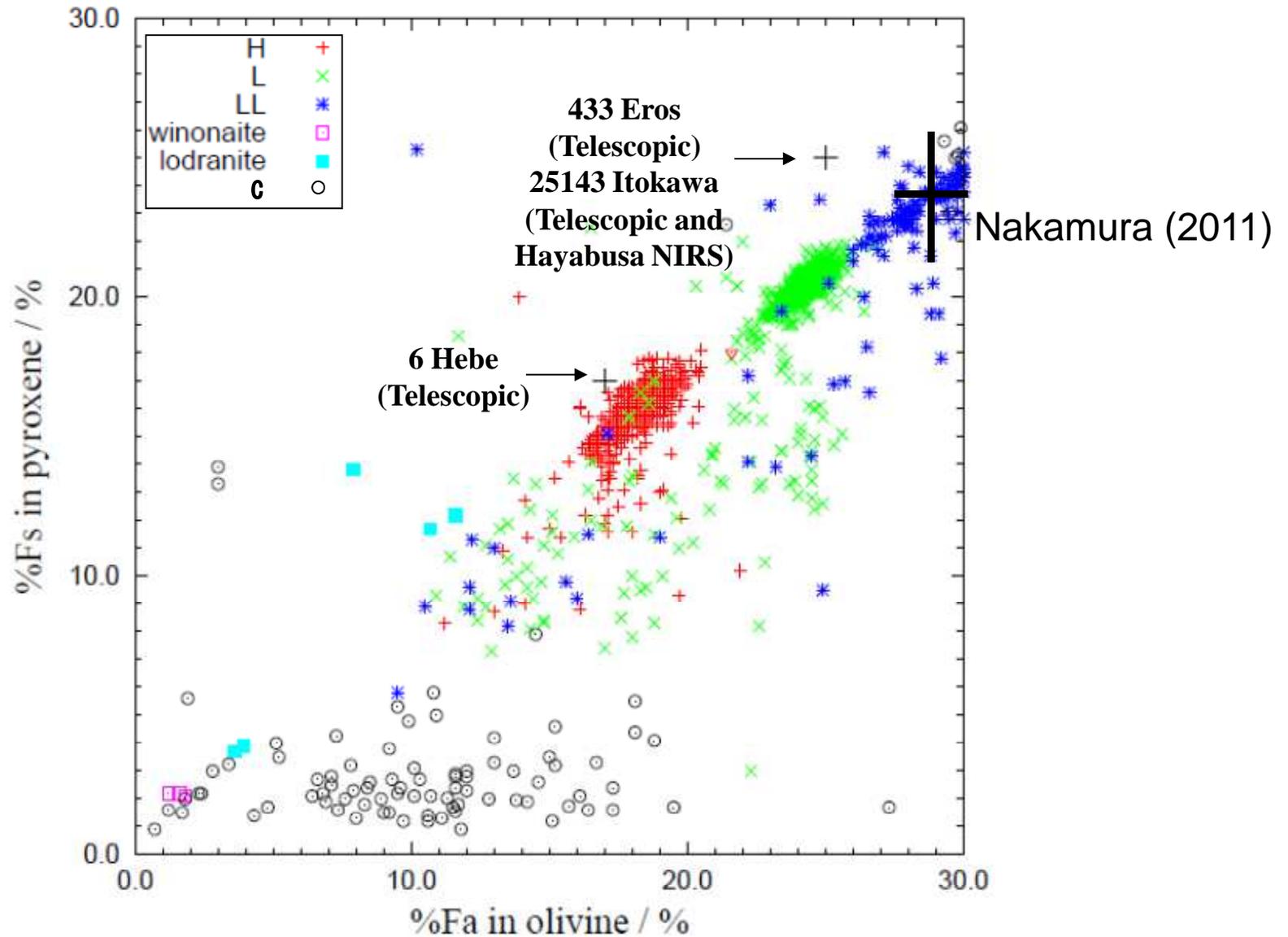
d_h = Host particleの直径
 d_w = 宇宙風化層の厚さ
 ϕ_w = 宇宙風化層中の npFe^0
 の体積濃度
 ol:op:cp:pl = 鉱物比(体積比)

隕石の鉱物比



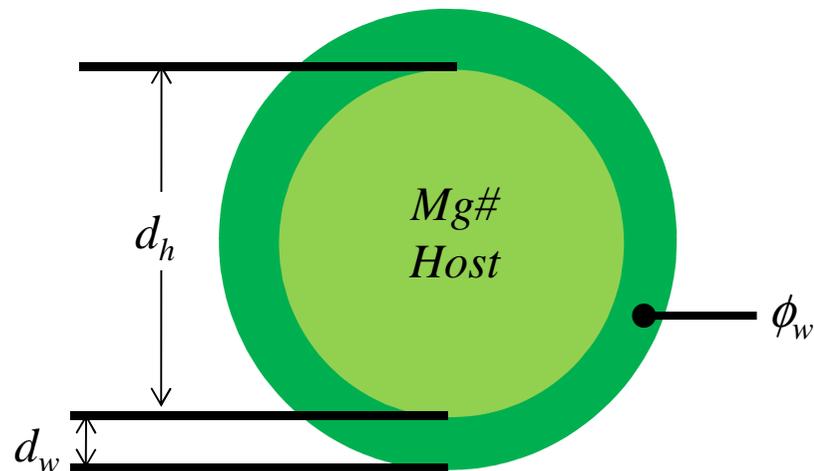
- 25143 Itokawa試料の結果 [Tsuchiyama 2011]

小惑星および南極隕石の カンラン石および輝石中のFe量



モデルの応用結果

| | 6 Hebe (Telescopic) | 433 Eros (Telescopic) | 25143 Itokawa (Telescopic) | 25143 Itokawa (Hayabusa NIRS) |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|
| d_h (μm) | 40 | 40 | 50 | 60 |
| d_w (nm) | 6 | 7 | 9 | 8 |
| ϕ_w (vol. %) | 1.6 | 1.3 | 0.9 | 1.1 |
| Mg#(mol%) | 83 | 75 | 75 | 75 |
| ol:op:cp:pl | 43:39:6:12 | 58:19:5:18 | 62:21:5:11 | 58:21:6:15 |
| Meteorite type | H | LL | LL | LL |



d_h =Host particleの直径

d_w =宇宙風化層の厚さ

ϕ_w =宇宙風化層中のnpFe⁰
の体積濃度

ol:op:cp:pl=鉱物比(体積比)

HおよびLLコンドライト的小惑星間の違い

結果

- 宇宙風化層内のnpFe⁰の体積濃度(ϕ_w)が
6 Hebeは1.6 vol.%と433 Eros(1.3 vol.%)および
25143 Itokawa(0.9-1.1 vol.%)に比べて大きい

解釈

HコンドライトはLLコンドライトよりも金属鉄に富むために、微小隕石の衝突や太陽風によるスパッターリングによって生成された蒸気がFeに富むようになったためであると考えられる。

LLコンドライト的な小惑星 433 Erosおよび25143 Itokawa

結果

- 宇宙風化層の厚さ(d_w)
25143 Itokawa(8-9 nm) > 433 Eros (7 nm)

解釈

- 25143 Itokawaの方が433 Erosより長時間近地球軌道に存在した可能性。
- 25143 Itokawaは、岩石や粗いレゴリスが長時間宇宙風化を受けている。
(25143 Itokawaは433 Erosより重力が小さく細かいレゴリスを保持できない)

LLコンドライト的な小惑星 433 Erosおよび25143 Itokawa

結果

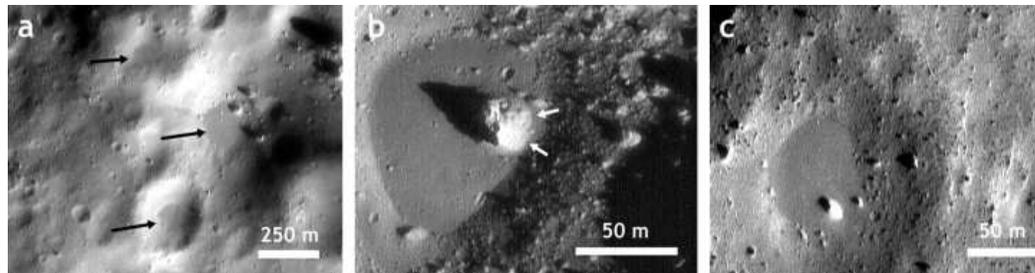
- 宇宙風化層の npFe^0 の体積濃度

433 Eros (1.3 vol. %) > 25143 Itokawa (0.9-1.1 vol.%)

解釈

322 Erosの方が25143 Itokawaよりも細かいレゴリスが存在し、金属鉄が珪酸塩から分離して、珪酸塩ほど細粒にならない金属鉄が表面に濃集

- ➔
- NEAR-Shomaker探査機で観測されたPondはそのような金属鉄に富む部分である可能性



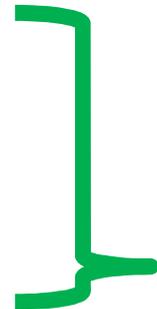
(Dombard et al., 2010)

まとめ

本研究の手法の斬新性

□従来の研究

- 宇宙風化作用の効果を考慮していない。
- 未知変数が多い。
- 端成分鉱物を仮定しなければいけない。



□本研究

- 宇宙風化モデルを考慮
 - ・宇宙風化層の厚さ
 - ・宇宙風化層内の npFe^0 の体積濃度
- 鉱物の吸収帯の特徴を定式化

未知の固体天体表面物質から、物質科学的情報(粒子サイズ・宇宙風化作用・組成等)を得ることができるモデルの構築に成功。

まとめ

新しく得られた知見

- HおよびLLコンドライト的な小惑星の間で宇宙風化層中の npFe^0 の体積濃度に違い。

組成の違いによる宇宙風化作用のしやすさ

組成・サイズ・軌道要素の違いと宇宙風化の関係

宇宙風化層の厚さ、

および npFe^0 の体積濃度に違い。

天体のサイズ・(軌道要素)の違いによる宇宙風化作用の違い。