

# Laser Irradiation Experiments for Reproduction of Space Weathering Effects by Micrometeoroid Bombardments on Carbonaceous Asteroids

Moe Matsuoka

## Abstract

Micrometeoroid bombardments on the surfaces of airless bodies were demonstrated by pulse-laser irradiation experiments using various meteorites and minerals. In this study, we aimed to describe effects of space weathering due to micrometeoroid bombardments on the surface of C-type asteroids, especially focusing on the effect of energy set lower than the energy in the previous study (Matsuoka et al., 2015), whose energy range was 5–15 mJ. The Murchison pellet samples were irradiated by the pulse laser with various energy levels (0.7, 1, 2, and 5 mJ). We measured the reflectance spectra, chemical compositions, and micro-structures of the surface of the laser irradiated samples. Due to laser heating, Murchison spectra show flattening and darkening in ultraviolet (UV) - visible (Vis) - infrared (IR) range. With increasing laser energy from 0.7 to 5 mJ, the absorption bands in Murchison spectra due to iron rich hydrous minerals, such as Cronstedtite, exist at 0.7 and 3  $\mu\text{m}$  decrease. The surface of the Murchison grain selected from 5-mJ irradiated area show melted and bubbled structures, which indicates the high temperature heating followed by rapid cooling. The chemical composition of the melted and bubbled structures is similar to FeS-rich amorphous silicate particles previously observed in the high-energy laser irradiation experiments. Each mineralogical change of Murchison due to short duration heating would cause spectral flattening, darkening, and band depth decreasing.

Laser Irradiation Experiments for  
Reproduction of Space Weathering Effects  
by Micrometeoroid Bombardments on  
Carbonaceous Asteroids

有機物に富む小惑星（C型小惑星）における  
微小隕石衝突による宇宙風化再現実験

ISAS/JAXA

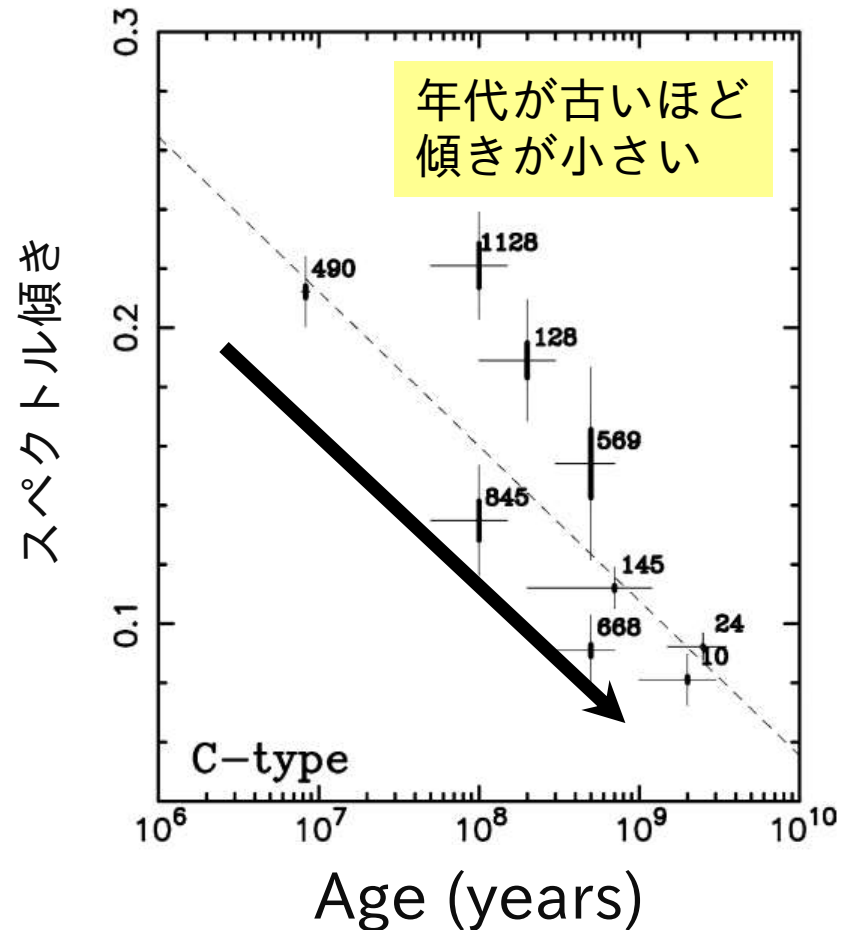
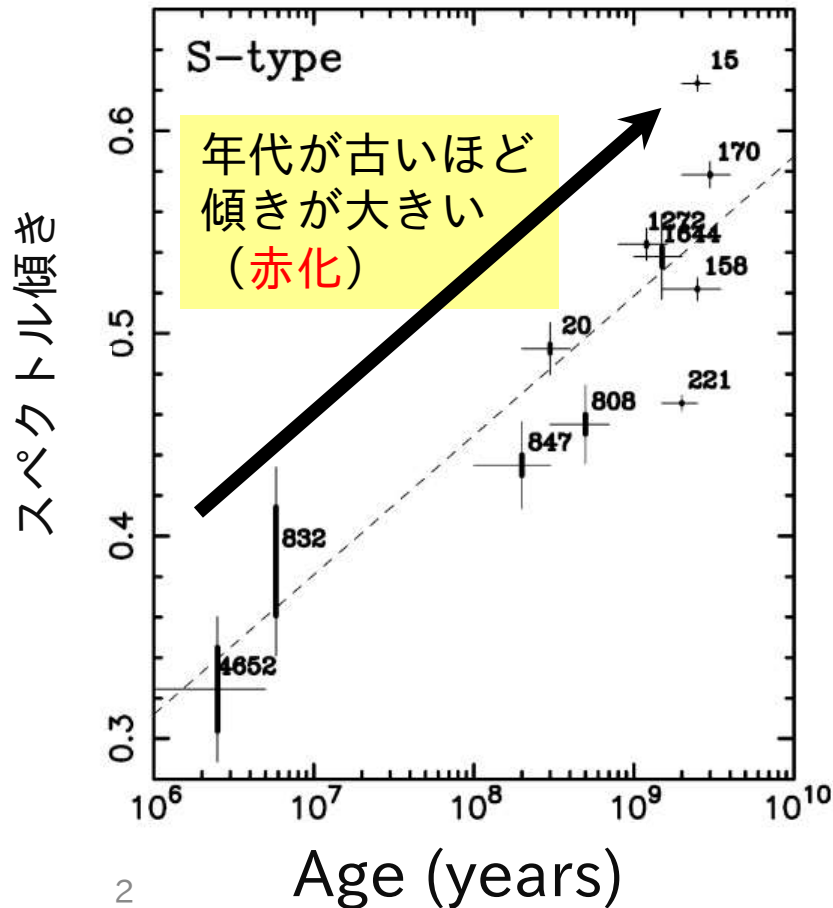
松岡萌

# 宇宙風化により反射スペクトルが変化する

**S型** 赤化

可視の傾き (波長0.35-0.90  $\mu\text{m}$ )

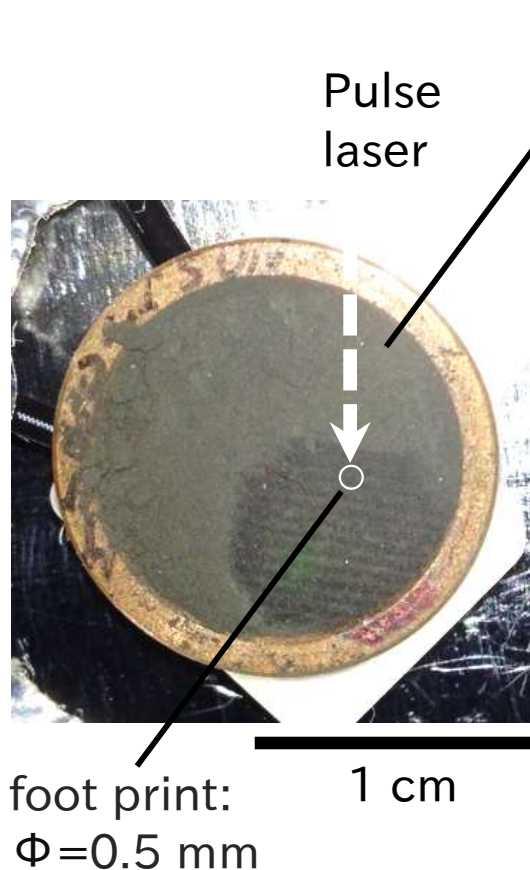
**C型** 青化



# 研究目的

C型小惑星における微小隕石衝突を  
模擬した宇宙風化再現実験試料の  
分光学的・物質科学的特徴の解明

# 宇宙風化作用（微小隕石衝突）再現実験 試料と実験条件



Murchison隕石粉末

$\Phi < 63 \mu\text{m}$

真空チャンバ（圧力:  $2 \times 10^{-5} \text{ torr}$ ）内で  
試料にパルスレーザを照射

YAGレーザ設定条件

$\lambda = 1.064 \mu\text{m}$

パルス幅: 6.0–8.0 ns

レーザエネルギー:

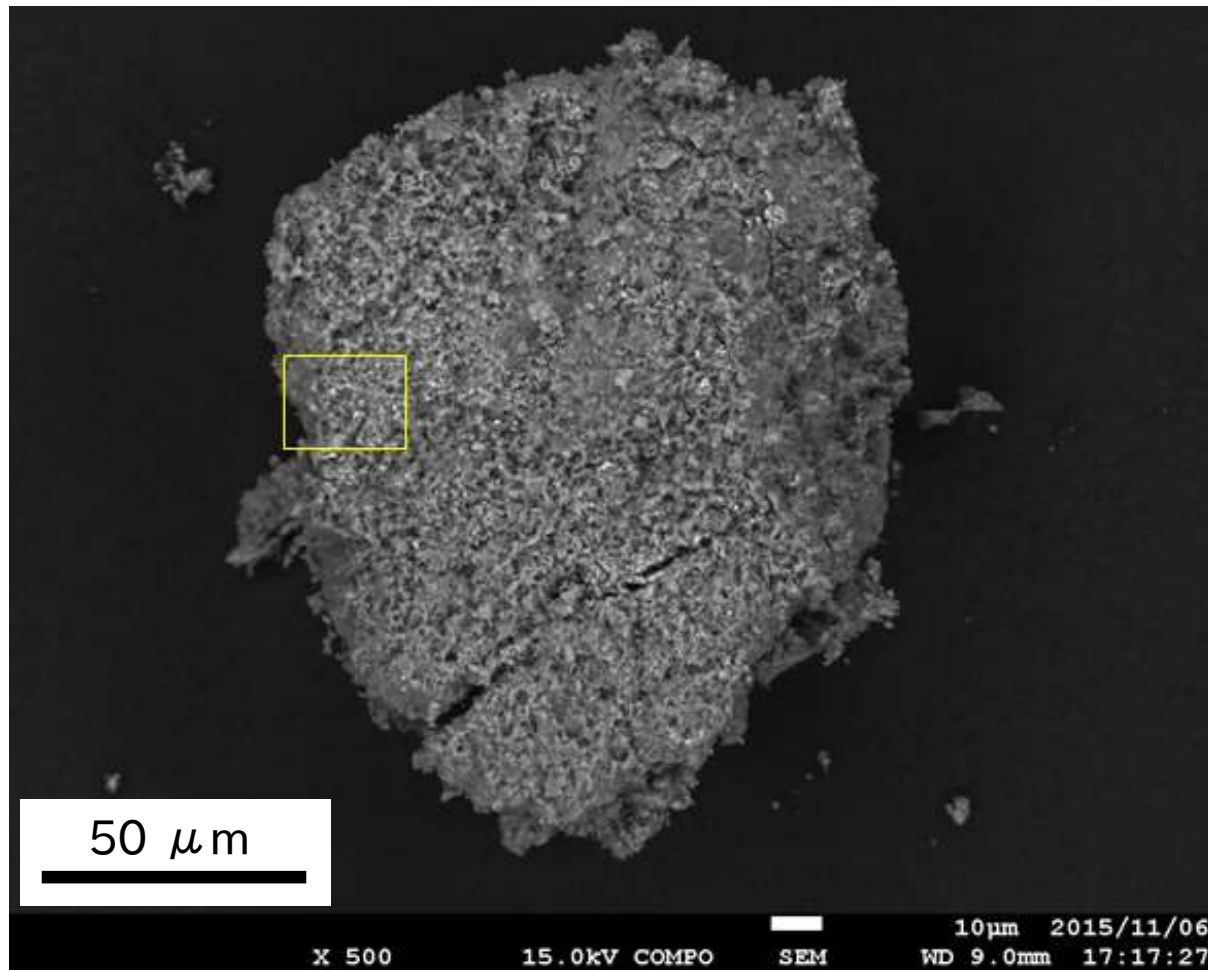
0.7, 1, 2, 5, 10, 15 mJ

宇宙風化年代換算で

15 mJ照射 = 1億年分の風化に相当

# 結果：レーザー加熱による物質科学的変化 (5 mJ)

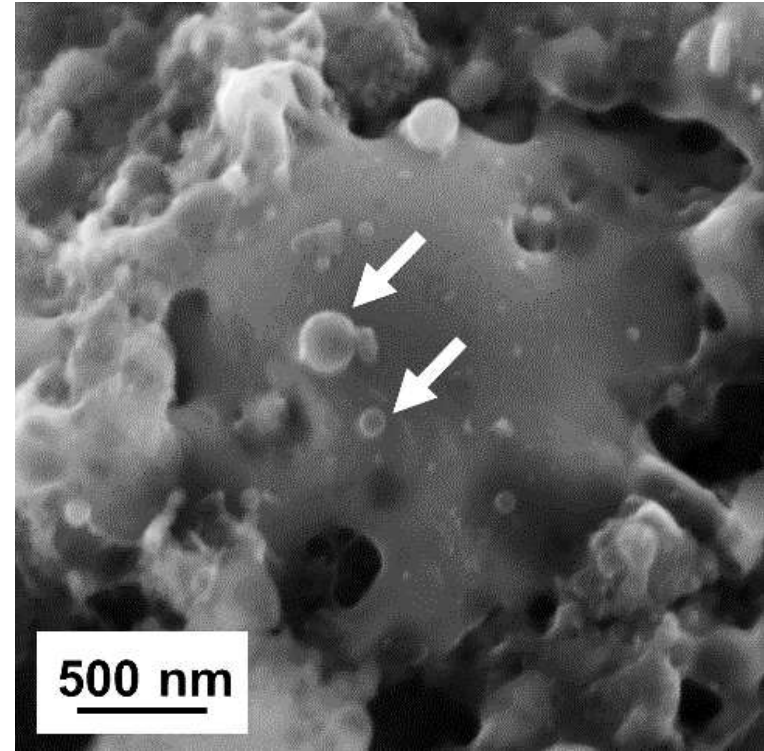
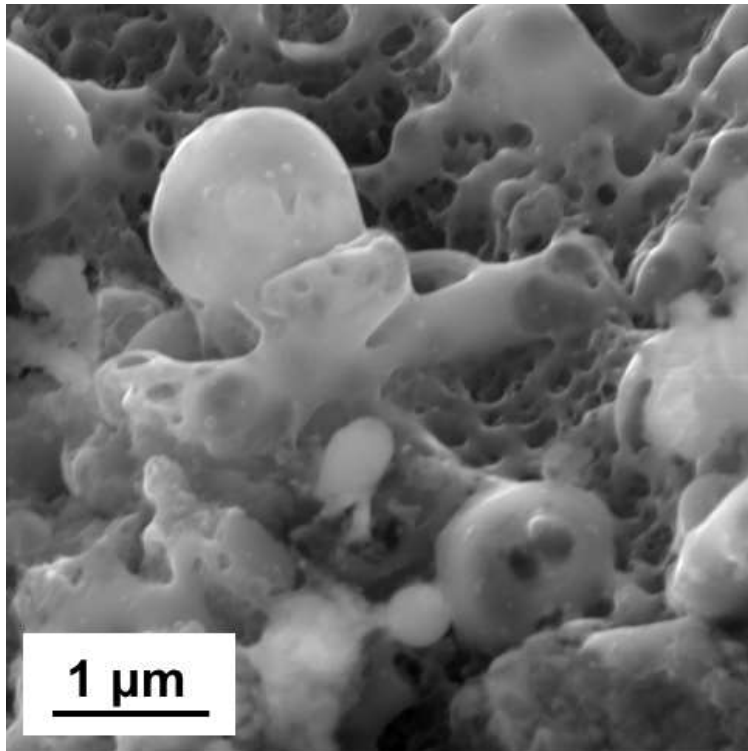
照射域表層から採取した粉末(FE-SEM像)



Matsuoka+ (2020)

## 結果： レーザ加熱による物質科学的变化 (5 mJ)

融点を超える昇温と急冷によって生じたと考えられる  
溶融発泡構造や粒子  
→FeSに富む組成

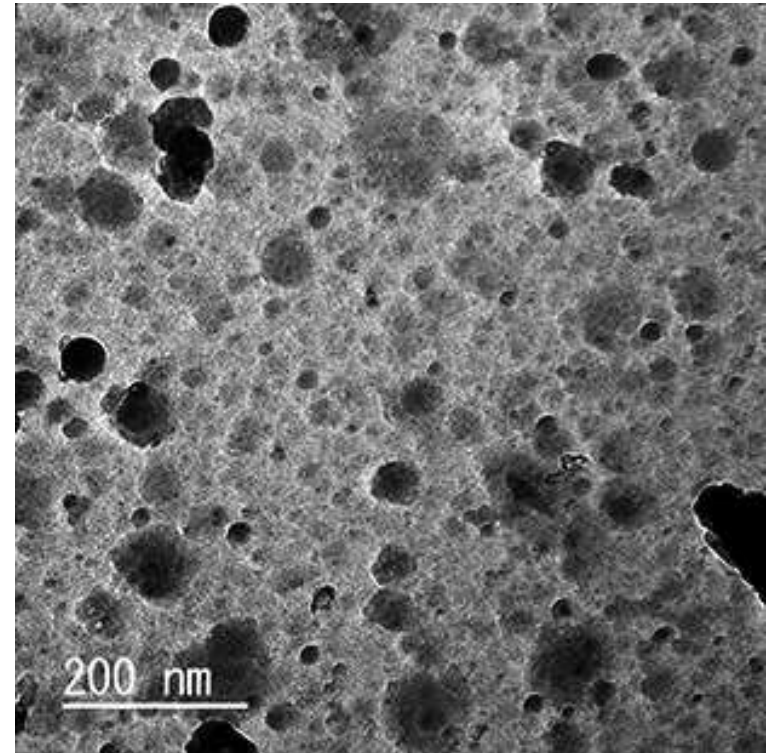
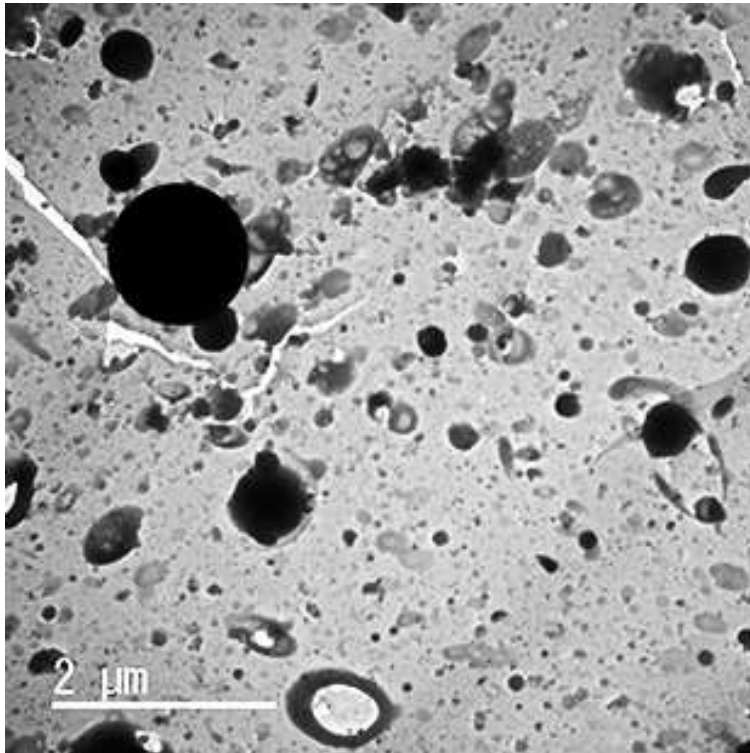


(FE-SEM観察像) Matsuoka+ (2020)

## 結果： レーザ加熱による物質科学的变化 (15 mJ)

---

試料から飛散・捕獲された非晶質シリケート粒子  
Φ数十 nm - 最大1 μm程度  
→FeSに富む組成



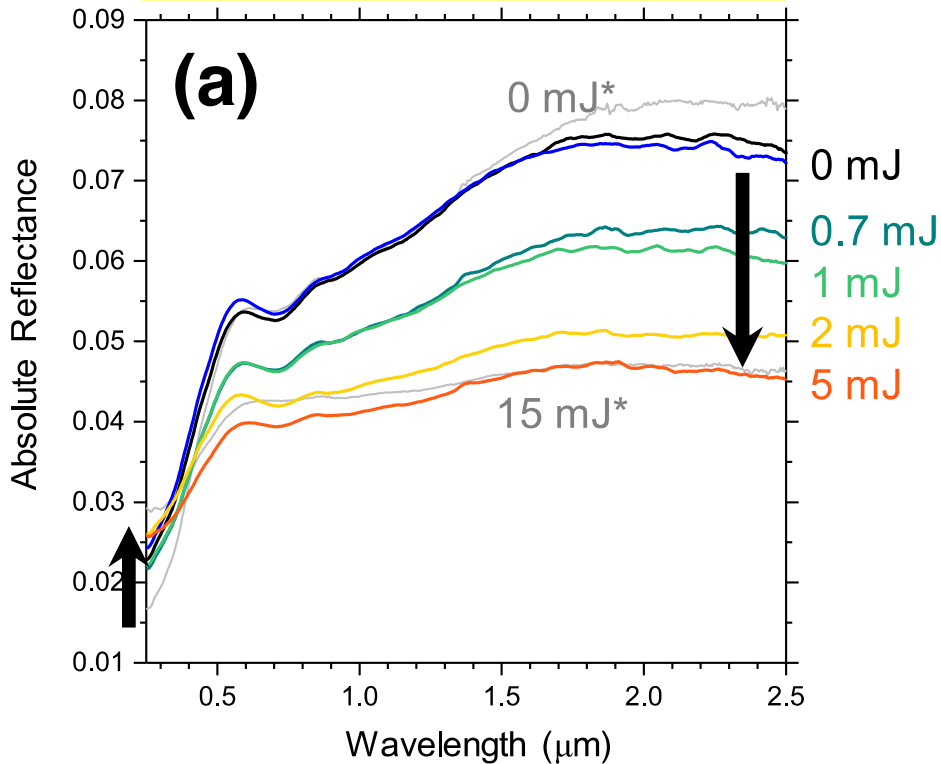
(TEM明視野像) Matsuoka+ (2015)



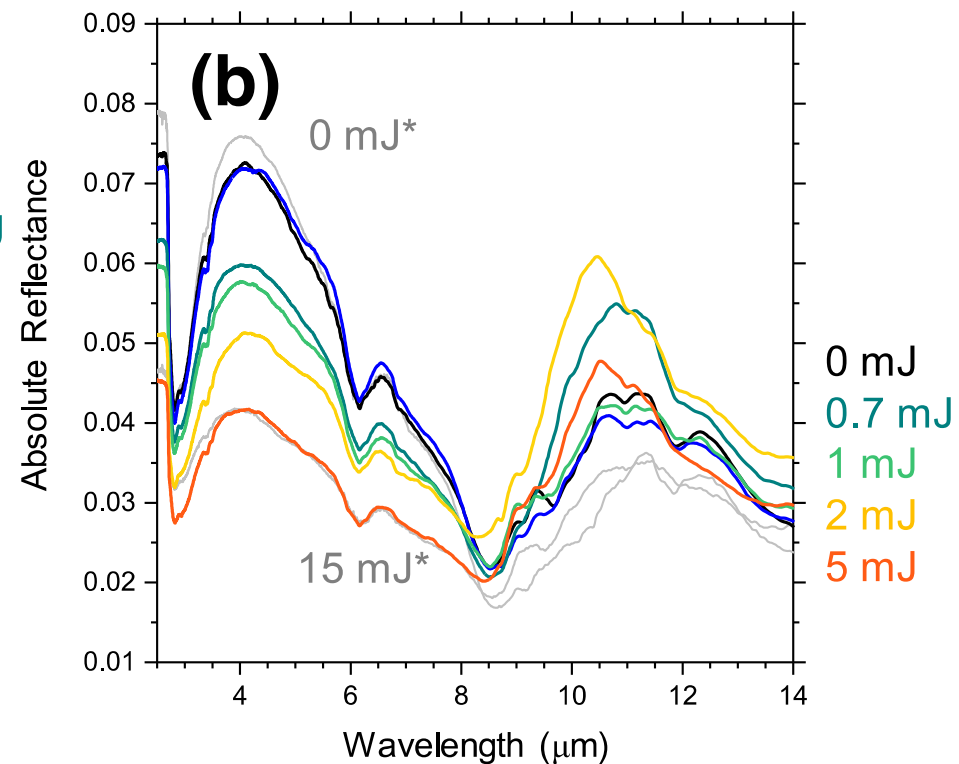
# 結果：レーザー加熱によるスペクトル変化

暗化・青化・吸収深さの弱化が進行（ただし暗化は5 mJで停止→考察）

紫外～赤外域  
反射率低下、最短波長側は上昇

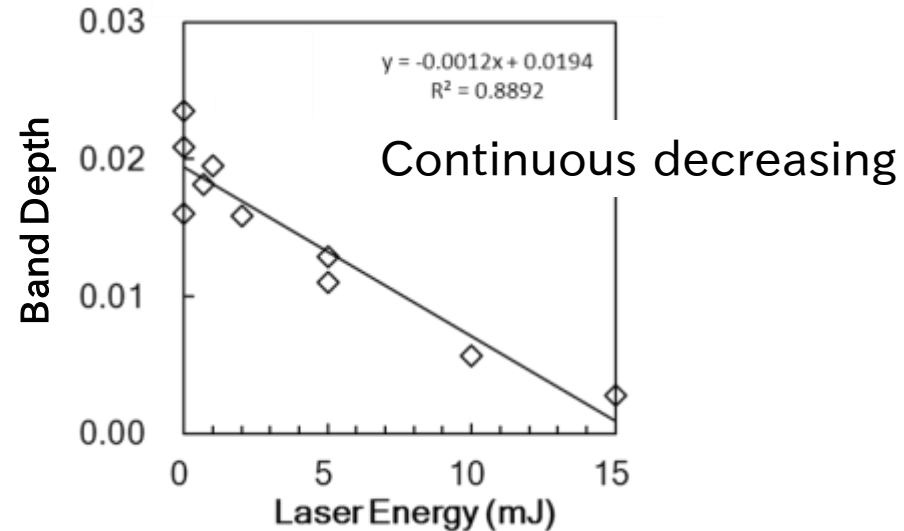
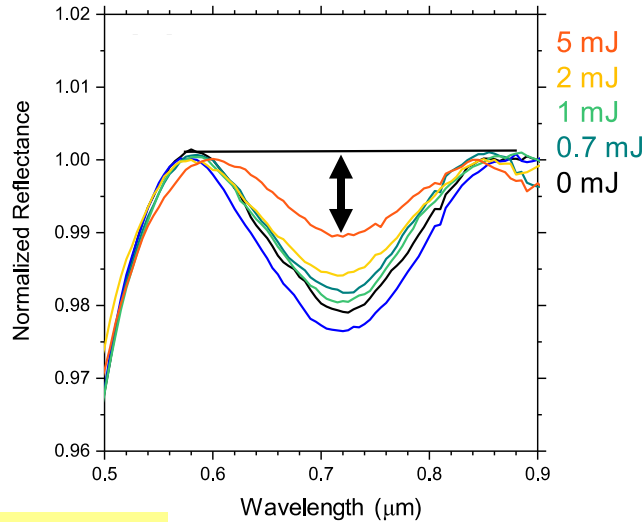


赤外域  
反射率低下、吸収弱化

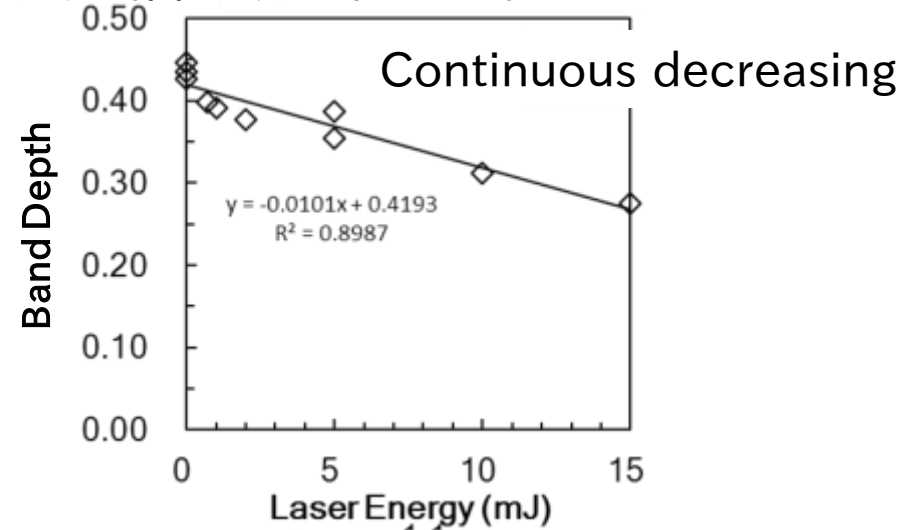
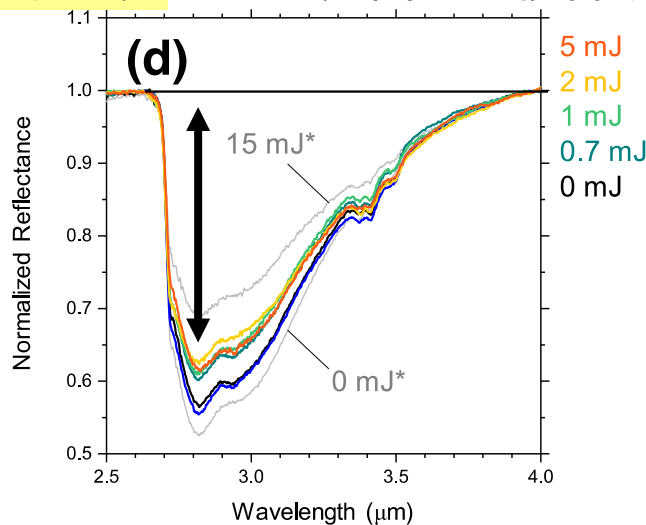


レーザー照射によって吸収帯はピーク位置不変のまま深さが減少

0.7- $\mu\text{m}$ 帯深さ ;  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$ 電子遷移 (含水鉱物Cronstedite中のFe)

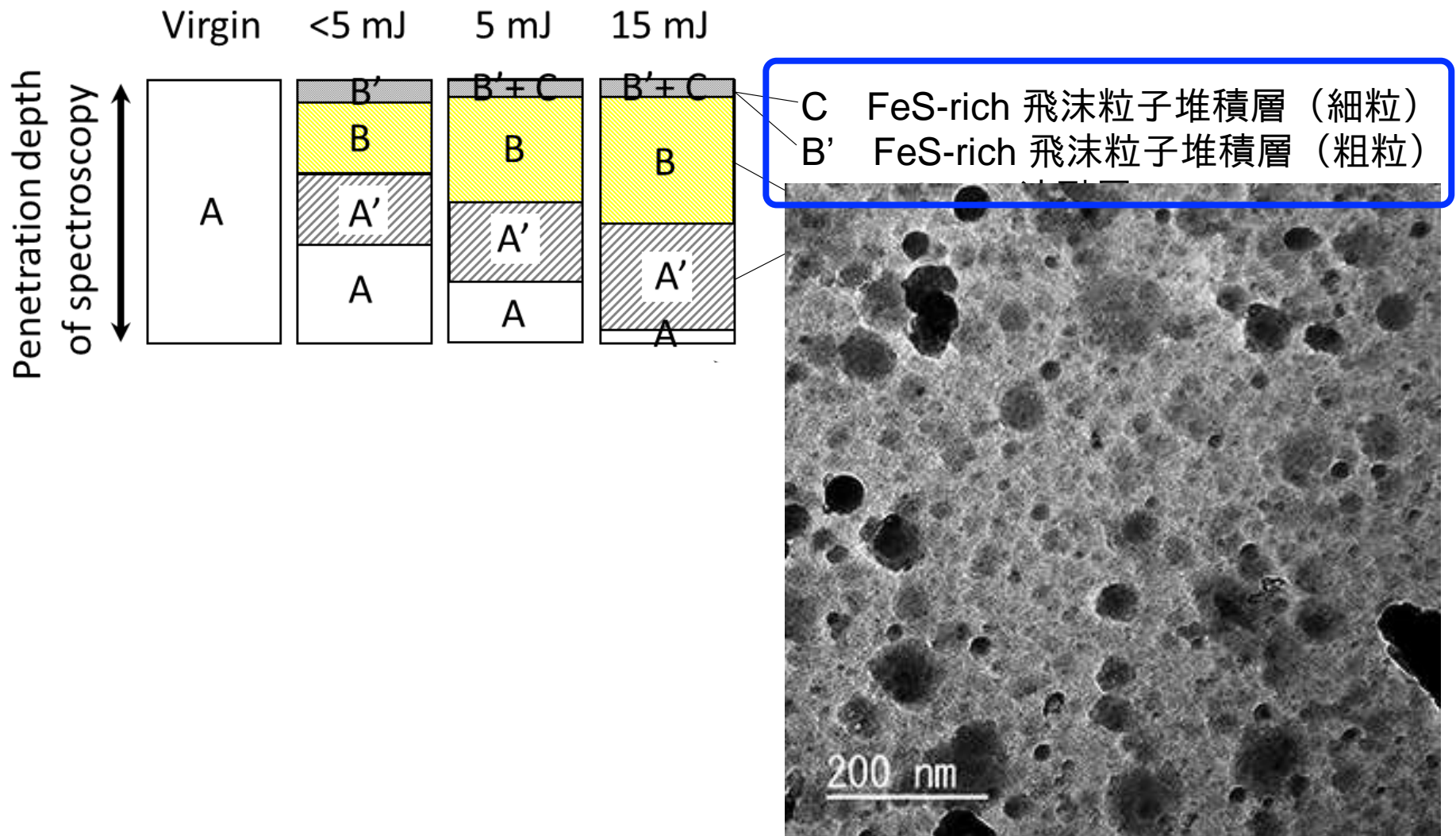


3- $\mu\text{m}$ 帯深さ ; OH基に起因する複合吸収帯 (含水鉱物中のOH)

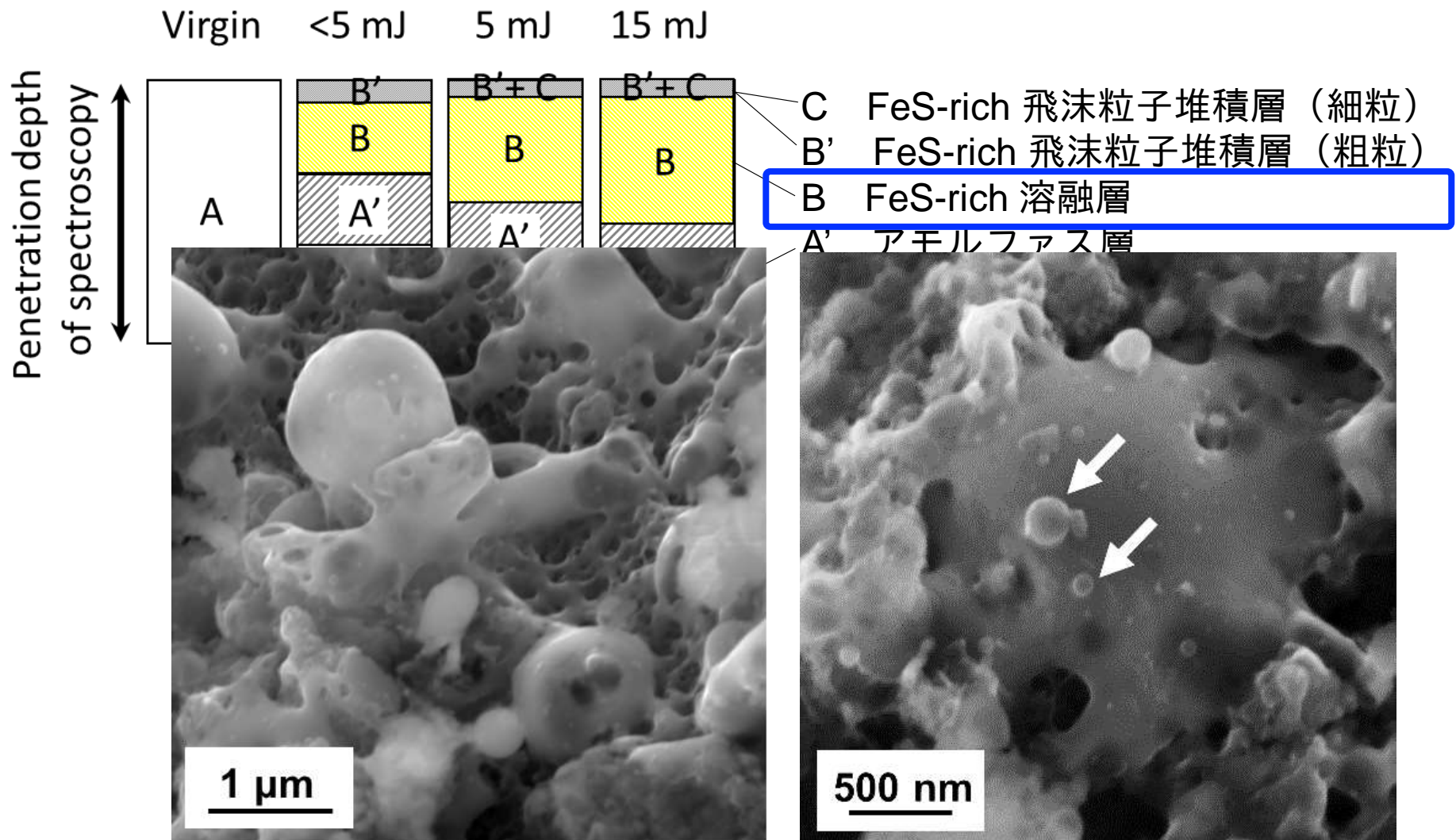


\*吸収帯深さはコンティニウムからの差として定義

# 考察: レーザ照射によるMurchisonにおける 物質科学的・分光学的変化の相関

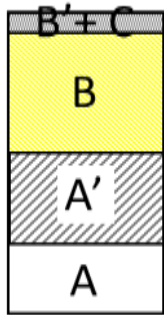


# 考察: レーザ照射によるMurchisonにおける 物質科学的・分光学的変化の相関



# 微小隕石衝突再現実験における 炭素質隕石の分光学的・物質科学的变化

## レーザー加熱で生じた層構造



B'+C FeS-richな飛沫粒子（アモルファス）  
B FeS-richなメルト層  
A' アモルファス層  
A

## 各層で生じた鉱物変化 → スペクトルへ与える影響

- ・ 含水鉱物の脱水とアモルファス化 → 暗化 + 青化
- ・ FeS量の増加 → 暗化 + 青化
  
- ・ 表面の粗さの増加 → 反射率上昇
- ・ （気相から生成した細粒な飛沫粒子）炭素量減少 → 反射率上昇

# 微小隕石衝突再現実験における 炭素質隕石の分光学的・物質科学的变化

---

## 鉍物変化

- ・ 表層付近で起こる変化  
FeS-rich非晶質シリケート粒子の生成（溶融発泡）と  
最表面への再堆積
- ・ 表層よりも内部で起こる変化  
含水鉍物のガラス化・脱水

## スペクトル変化

- ・ 青化, 含水鉍物起因の0.7-, 3- $\mu\text{m}$ 吸収の弱化  
(15 mJ ~1億年まで進行し続ける)
- ・ 暗化  
( $<5$  mJ ~数千万年まで進行, 以降は進まない)

# 種々の天体における宇宙風化の影響

- 地球の**月**; melt, vapor生成  
nanophase iron "**npFe<sup>0</sup>**",  
glass-bonded soil particles "**agglutinate**"
- **小惑星Itokawa** ; 宇宙風化リム、発泡構造、 **npFe<sup>0</sup>**, **npFeS**生成  
(太陽風照射による) (Noguchi+2014)

## **Ryugu, Bennu** (現行の探査)

- 水星; melt, vapor生成  
地磁気の影響により
  - ・ 太陽風よりも微小隕石衝突の効果が大きい
  - ・ 風化度の地域差が大きいようである
- 火星の月**Phobos, Deimos**; ? (MMX)

# 種々の試料を用いたレーザー照射実験とスペクトル変化

Sample	Spectral responses	Simulation of	Ref
Olivine, Pyroxene <i>Powder pellet</i>	赤化・暗化	月、 S型小惑星	Yamada+1999; Sasaki+2001; Loeffler+2016
C chondrites, Tagish Lake, HED meteorites <i>Powder pellet</i>	青化・暗化, 青化・暗化, 赤化・暗化	C, D型小惑星、  Vesta	e.g., Hiroi+ 2013
Murchison (CM chondrite) <i>powder pellet</i>	青化・暗化	C型小惑星	Matsuoka+2015; 2020
Allende (CV) <i>powder</i>	赤化・暗化	C型小惑星	Gillis-Davis+ 2017
Olivine <i>grain</i>	赤化・暗化	月、S型小惑星	Fazio+ 2018
Murchison <i>chip</i>	青化・暗化	C型小惑星	Thompson+2019



# 結言（今後の課題）

レゴリスを模擬した風化実験は様々な粉末サンプルを用いて行われてきた

一方、サンプルの組成のちがい以前に、物理的なちがい（表面状態）も風化の効果に影響するらしいことがわかってきつつあるが、**実験例はまだ多くない**  
隕石岩片を用いたレーザー照射実験

例えば; Thompson+2019（レーザー）、  
Nakamura+2019（イオン照射）

さらなる実験や観測との連携もより重要

- 条件を変えた室内実験で物質・スペクトル変化を詳細に調べる  
→広い波長域のスペクトルを一定条件下で取得できることが強み
- 様々な実験データを揃えておき、リモセンデータ（UV-Vis-IR）と比較；熱補正・測光補正など必要