

第3回 CPS 実験実習 テーマA

レーザーアブレーションによる衝突蒸気の高速分光実験

惑星探査

* 目的 : 惑星を構成する物質を知ること

→ サンプルリターンミッション

<問題点>

- 技術的に非常に難しい
- サンプルのリターンに時間がかかる



人工天体の衝突による発光の観測

※ Deep Impact探査、Lcross探査

分光計測

* 分光計測

衝突時の発光現象から元素組成を調べる

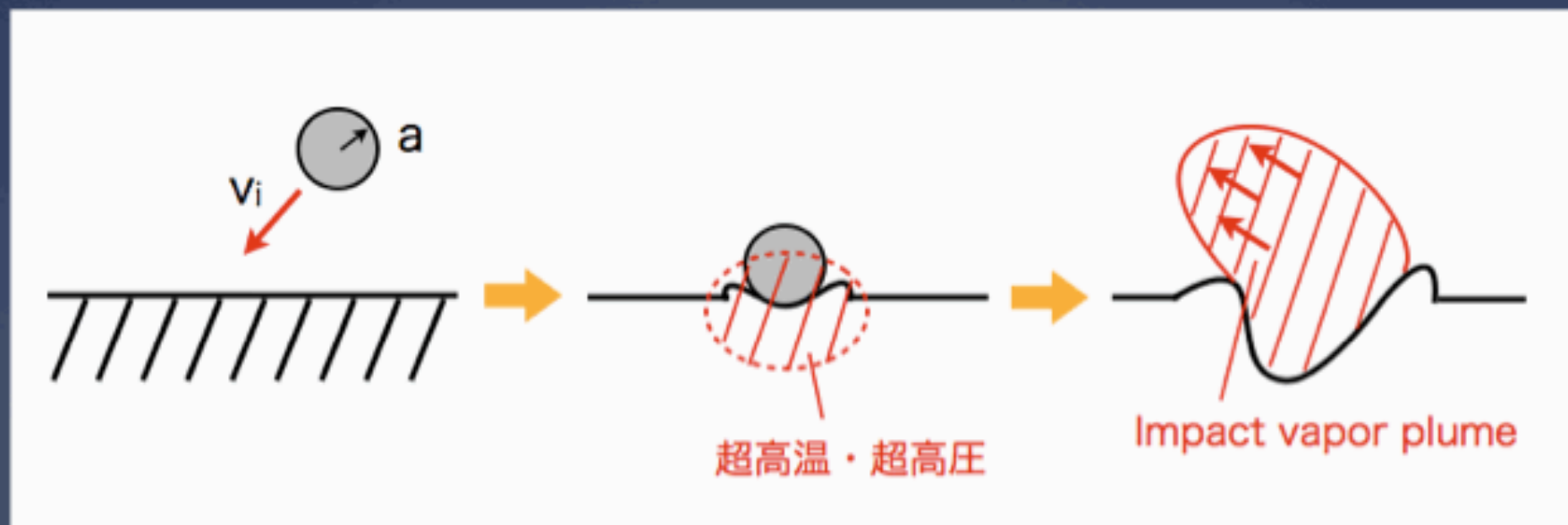
Impact vapor plume

(固・液・気の混合物)



原子発光

分子発光



分光計測

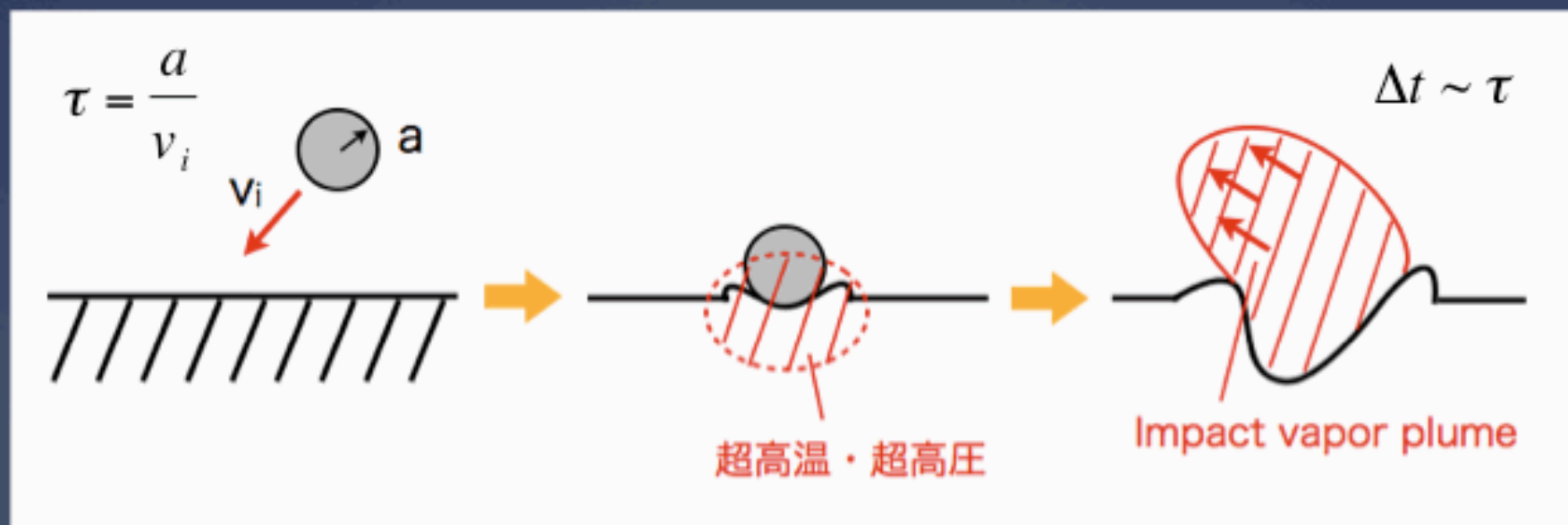
* 超高速衝突の観測にも役に立つ

※ 現象のタイムスケール： $\sim \tau$

光計測は高速で元素組成、T、Pを測定することができる



衝突現象の物理過程の解明に有効



LIBS - Laser Induced Breakdown Spectroscopy -

* LIBS

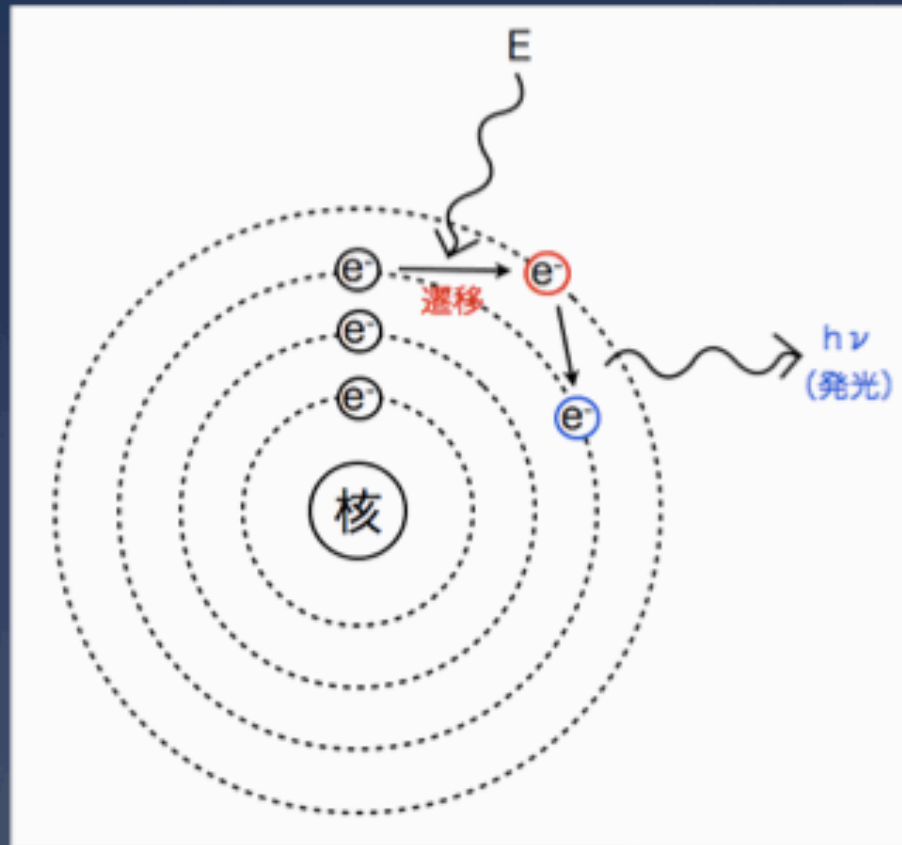
レーザーアブレーションによって生じた蒸気雲を
分光計測する手法

< 探査手法としての利点 >

- 装置が小型化できる(ローバーに搭載可能)
- その場で分析が可能
- 狙ったポイントを観測できる

原子スペクトルの原理

* 原子発光



(原子発光)

エネルギー準位間のジャンプ

↓
発光

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n$$

ν_{mn} : m→n遷移で出る光の振動数

原子の発光スペクトルの形は

スパイク状になる

発光強度

* 原子スペクトルの発光強度

$$I_{mn} = h\nu_{mn} \cdot A_{mnn} \cdot N_n$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{mn} : \text{発光強度 [W]} \\ h\nu_{mn} : \text{1光子あたりのエネルギー [J/コ]} \\ A_{mnn} : \text{遷移確率(アインシュタイン係数:A係数) [1/s]} \\ N_n : \text{準位にある原子の数 [コ]} \end{array} \right.$$

$$N_n = \left(\frac{g_n \cdot e^{-\frac{E_n}{kT}}}{Z(T)} \right) \cdot N_{tot}$$

g_n : 統計的重率

k : ボルツマン係数

N_{tot} : 計測対象の原子総数

$Z(T)$: 分配関数

$$Z(T) = \sum_{n=1}^{n_{max}} g_n e^{-\frac{E_n}{kT}}$$

※ 衝突のとき: ~ 1

発光強度

* 原子スペクトルの発光強度

$$I_{mn} = \frac{h\nu_{mn} A_{mnn} g_n e^{-\frac{E_n}{kT}} \cdot N_{tot}}{Z(T)}$$

(ボルツマンプロット)

$Z(T) \approx 1$ のとき

$$\hat{I}_{mn} = \frac{I_{mn}}{h\nu_{mn} A_{mnn} g_n} = N_{tot} \cdot e^{-\frac{E_n}{kT}}$$

それぞれの E_n に対して左辺の値をプロット



$$\ln \hat{I}_{mn} = \ln N_{tot} - \frac{E_n}{kT}$$

グラフの傾きから、プラズマ温度がわかる
各元素について N_{tot} を求めると化学組成が
得られる

MISSION

ある秘密機関が水星、金星、月、火星それぞれで採取した複数の特徴的岩石サンプルを独自のルートで入手した。

AからDまでの4つのサンプルグループからひとつ選び、そのグループがどの天体からリターンされたかを明らかにせよ！



T大 S教授

※ 本件には重要な情報が含まれているため
依頼人の名前は伏せています

MISSION : Methods

- * レーザーアブレーションによる衝突蒸気を分光観測し、サンプルに含まれる元素を同定し、岩石学見地と合わせて岩石種を特定
- * ボルツマンプロットを作成し、プラズマの温度を見積もる



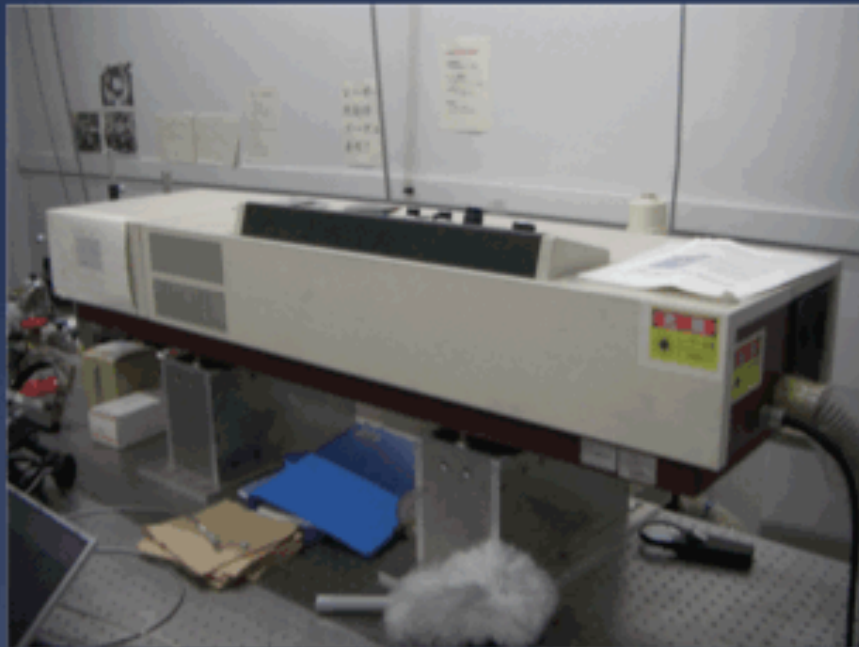
判別した岩石から、採取された天体を特定する

MISSION : Setup

* 本実験では以下の装置を用いた

<レーザー>

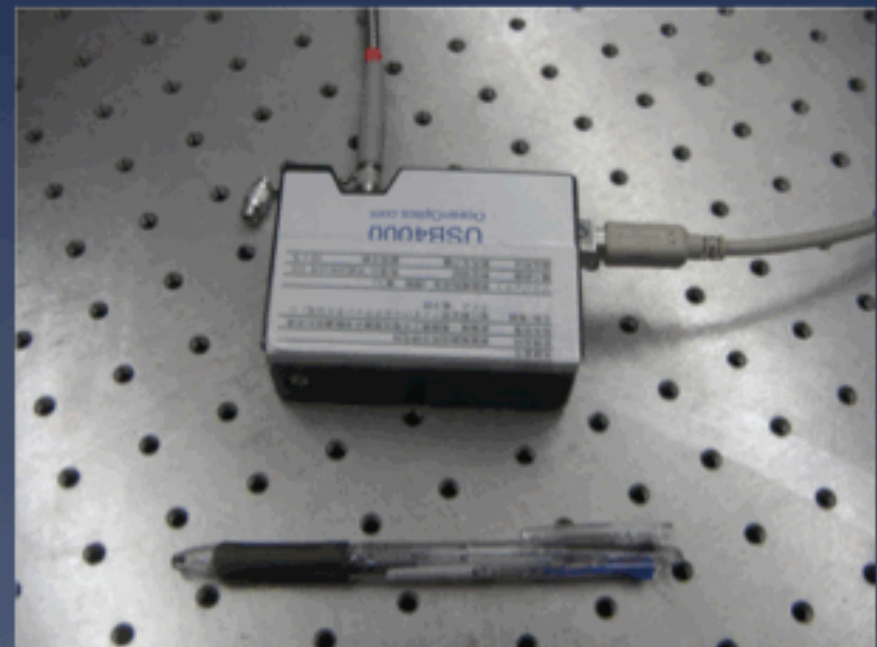
Quanta-Ray DCR-2 Pulsed Nd:YAG Laser



エネルギー : 最大 420 mJ
パルス幅 : 13 ns
パルス周波数 : 0.1 ~ 50 Hz

<分光器>

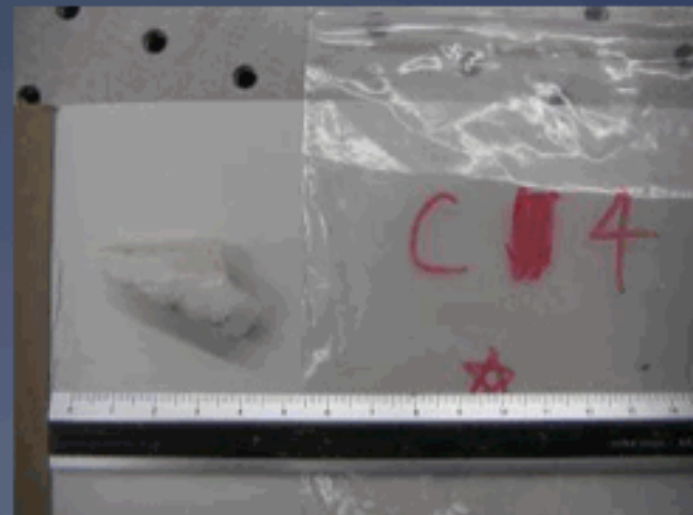
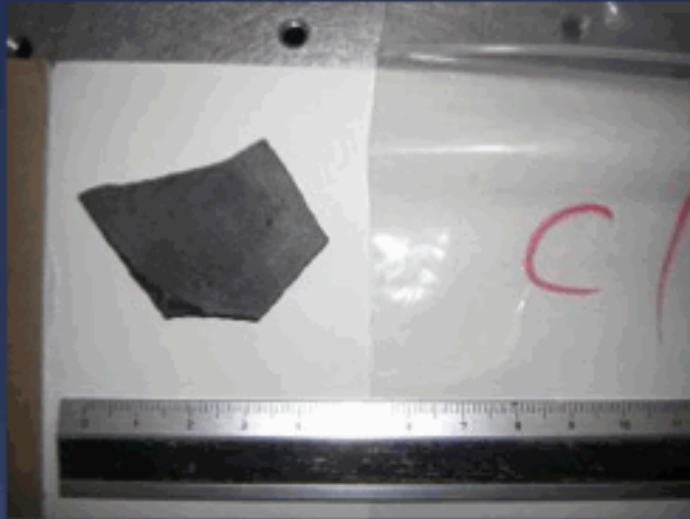
Ocean Optics(簡易分光計)



CCD : 2048 pixel
実行波長分解能 : ~1.0 nm

MISSION : Setup

* 岩石サンプル : C



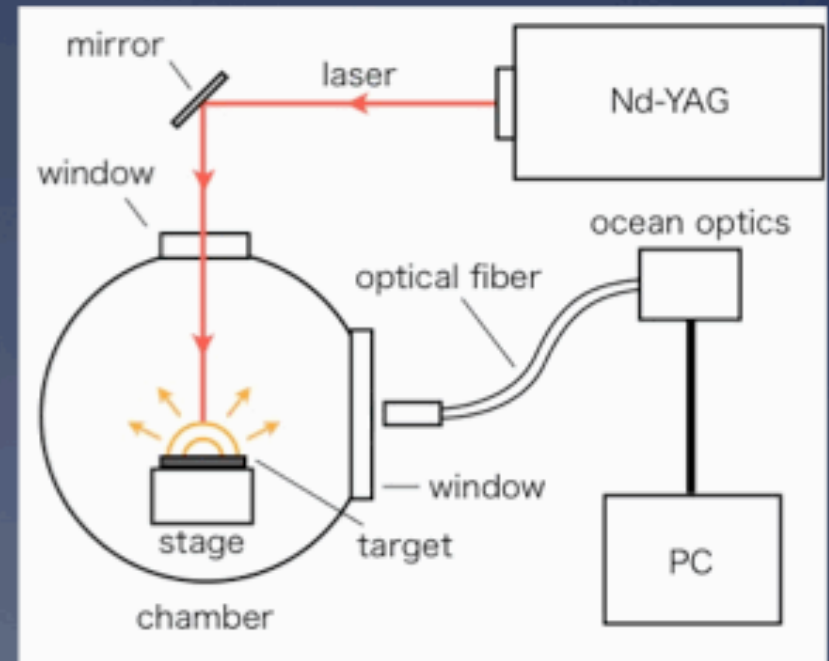
MISSION : Setup

※ 実験の手順は以下の通りである

1. チャンバー内の汚染を防ぐために内部にアルミホイルを敷く
2. ビューポートから光が入るようにレーザーを照射しながら位置を合わせる
3. レーザーのセットアップと分光器のセットアップ
4. サンプルをチャンバー内のステージのセットし、レーザーの照準を合わせる
5. チャンバー内をロータリーポンプで真空引きする
6. オペレーション開始

※ 分光器の校正には波長、強度それぞれについてアルゴンランプと水銀灯を用いた

実験系全体図



MISSION : Setup

* サンプルそれぞれについて以下の条件で実験を行った

(今回はグループCを選択)

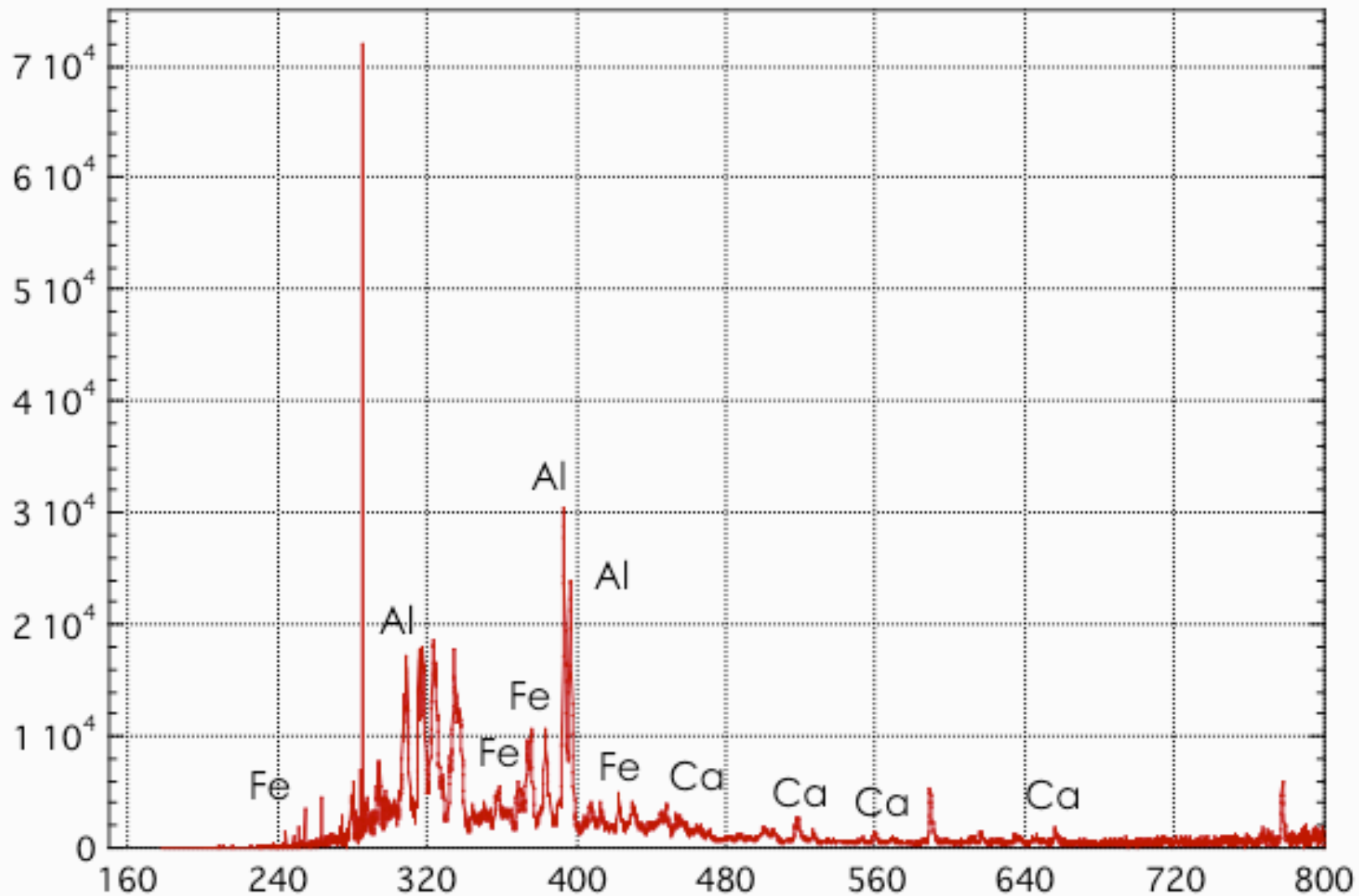
Table 1 : experimental condition

| sample | energy [J] | pulse frequency [Hz] | integral time [ms] |
|--------|------------|----------------------|--------------------|
| C1 | 40 | 2 | 1000 |
| C2 | 40 | 1 | 2000 |
| C3 | 40 | 2 | 4000 |
| C4 | 40 | 4 | 4000 |

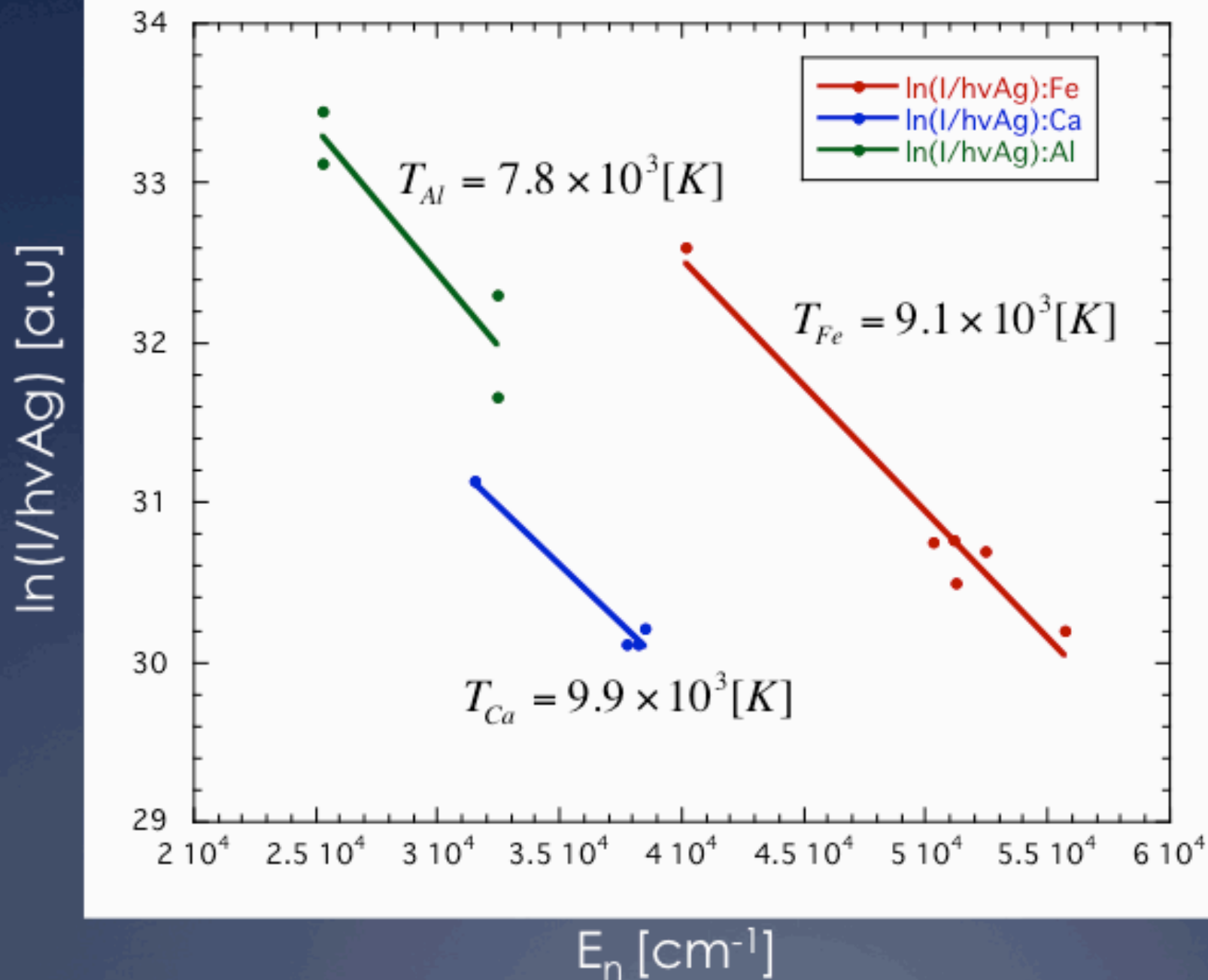
※ 各Runはチャンバー内の圧力を10mbar程度まで真空引きして行った

MISSION : Results

* 分光スペクトル : C2



MISSION : Result



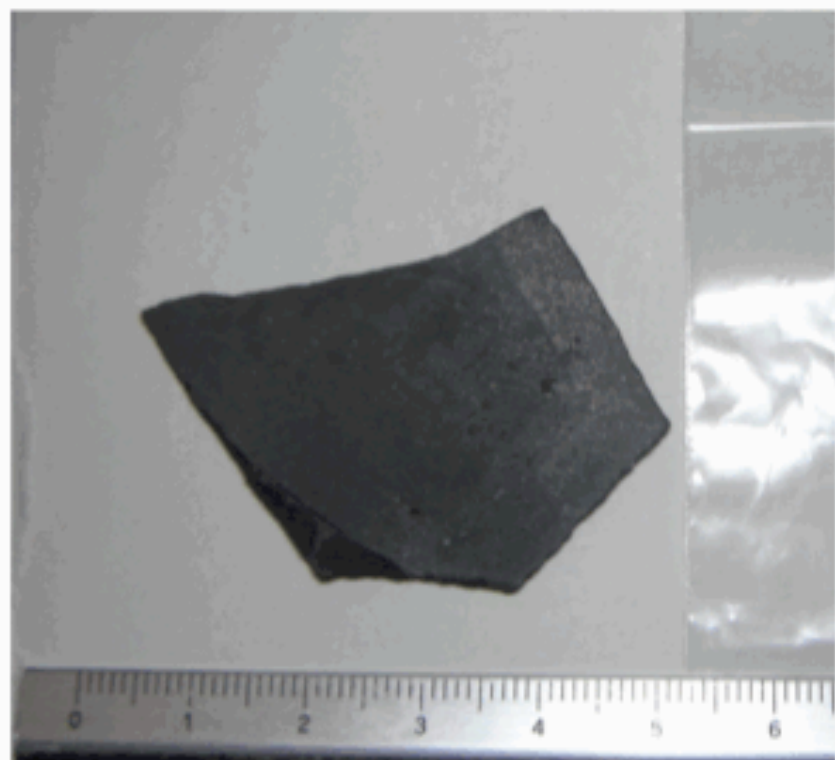
MISSION : Results

* サンプル:C2について

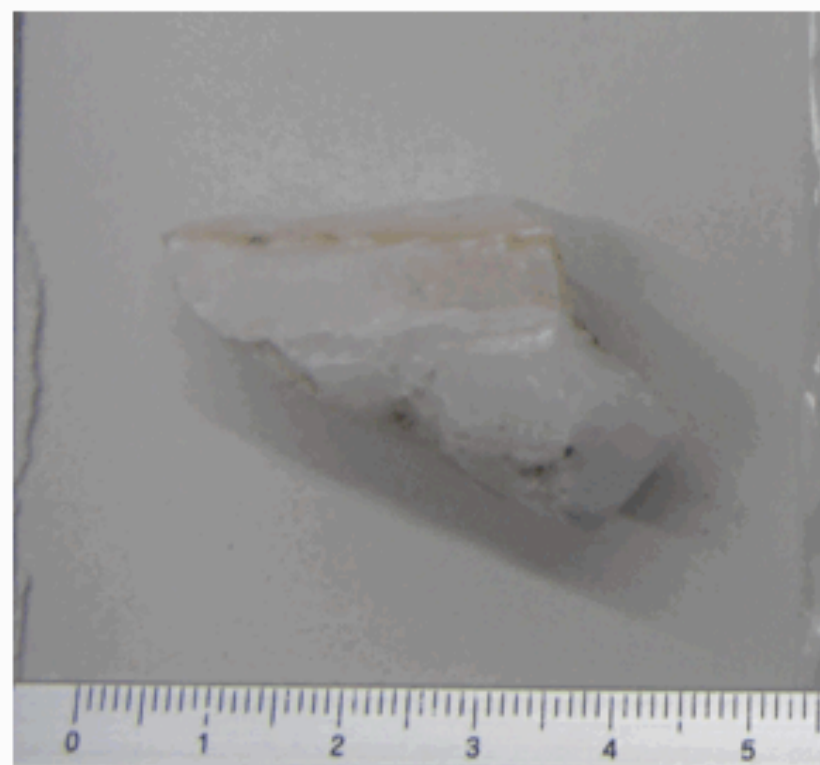
- Fe, Ca, Alのスペクトルが多く見られる
- Fe, Ca, Alの組成比が1:1:1に近い
- KやNaのスペクトルは確認できない
- 全体的に黒っぽい
- ガスが抜けたような穴が見られる



火山性の岩石である可能性大

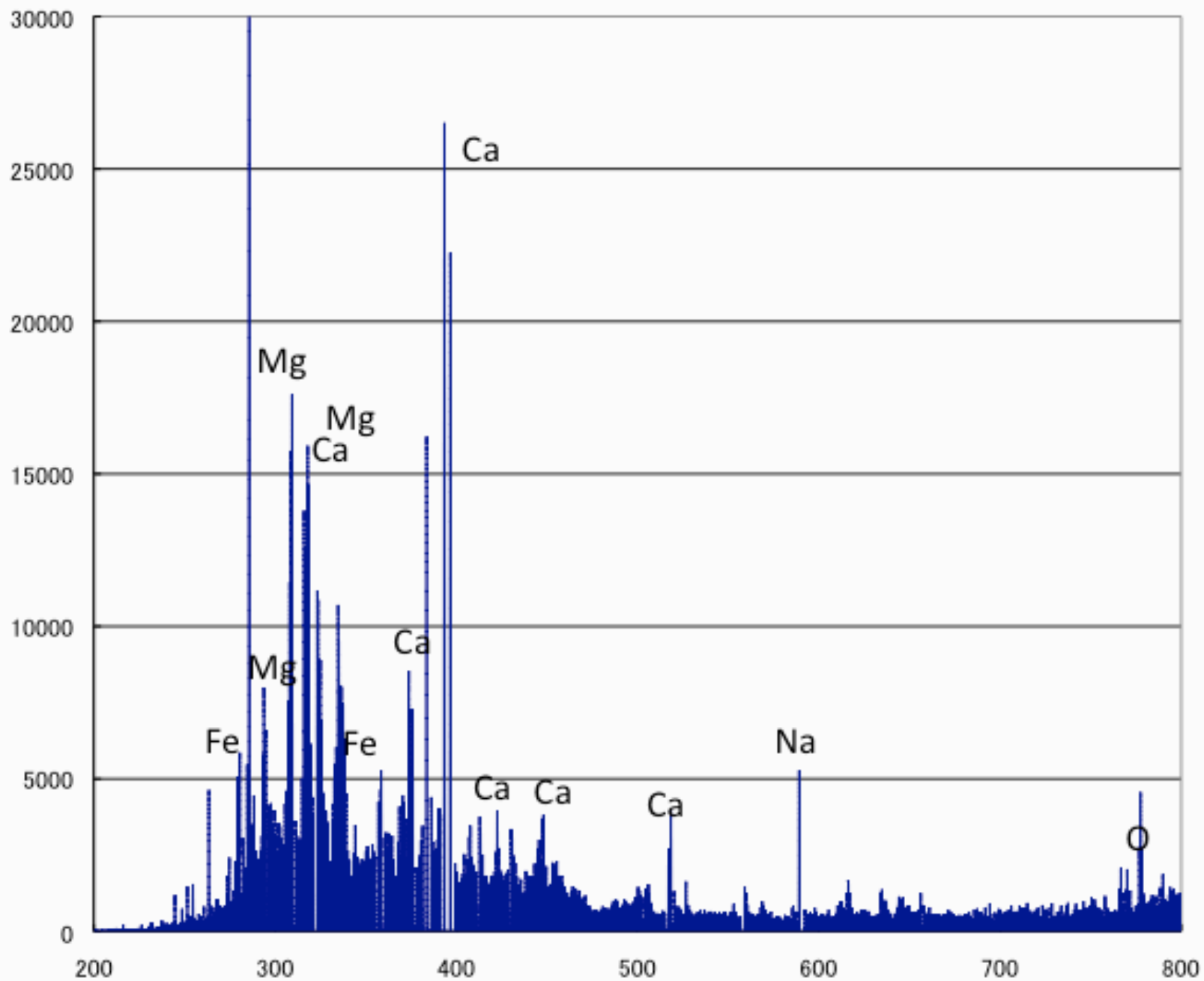


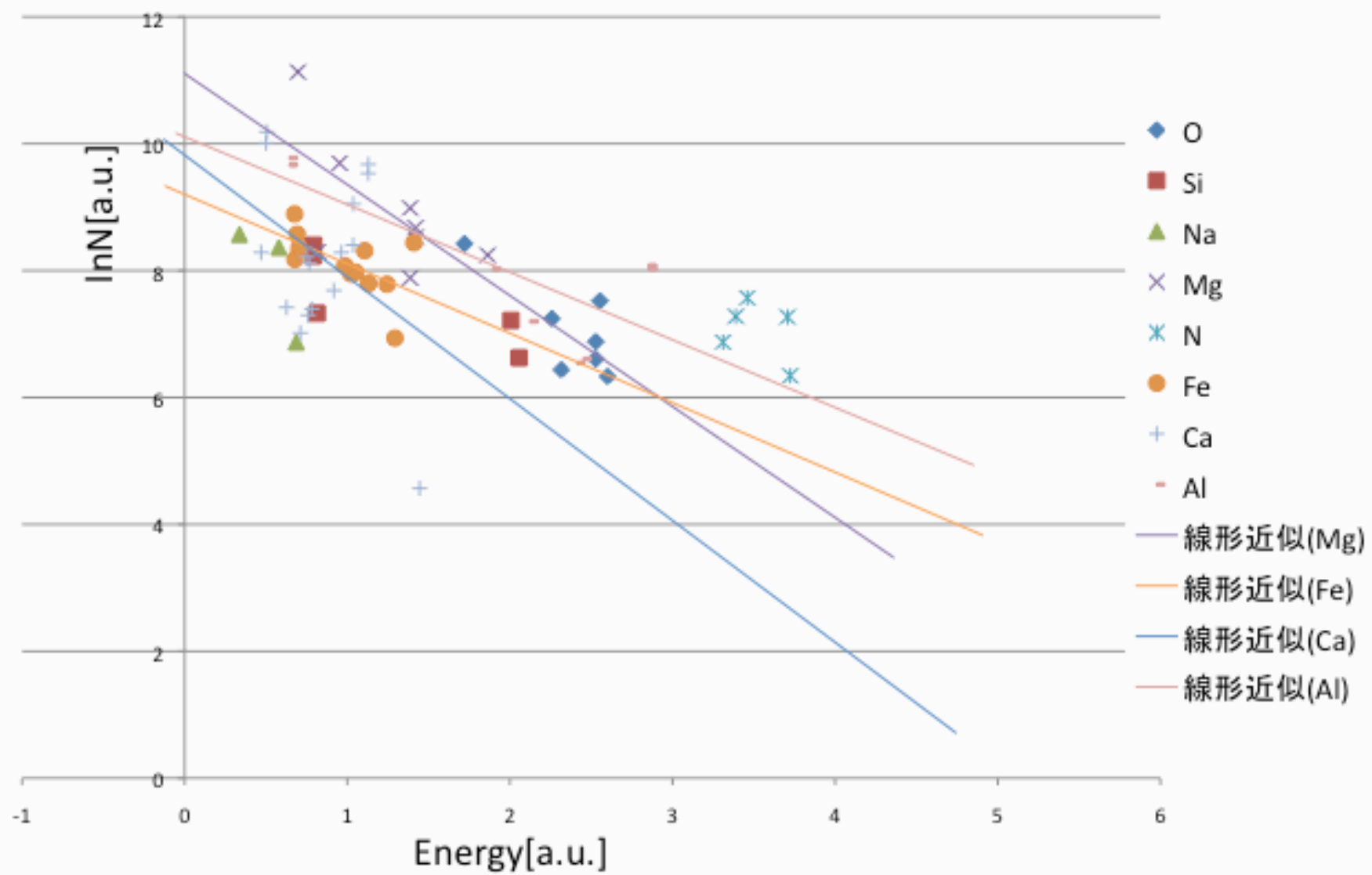
C1



C4

C1



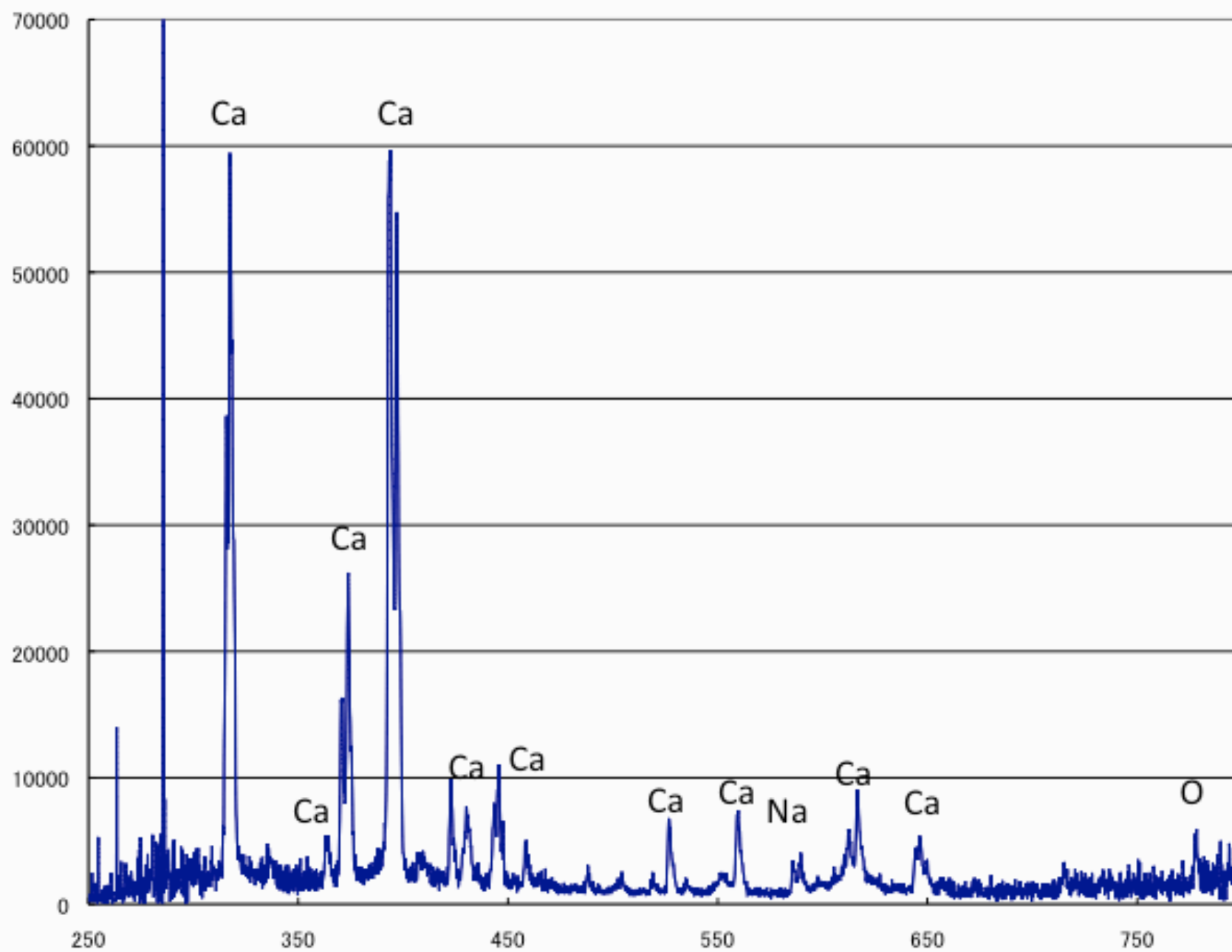


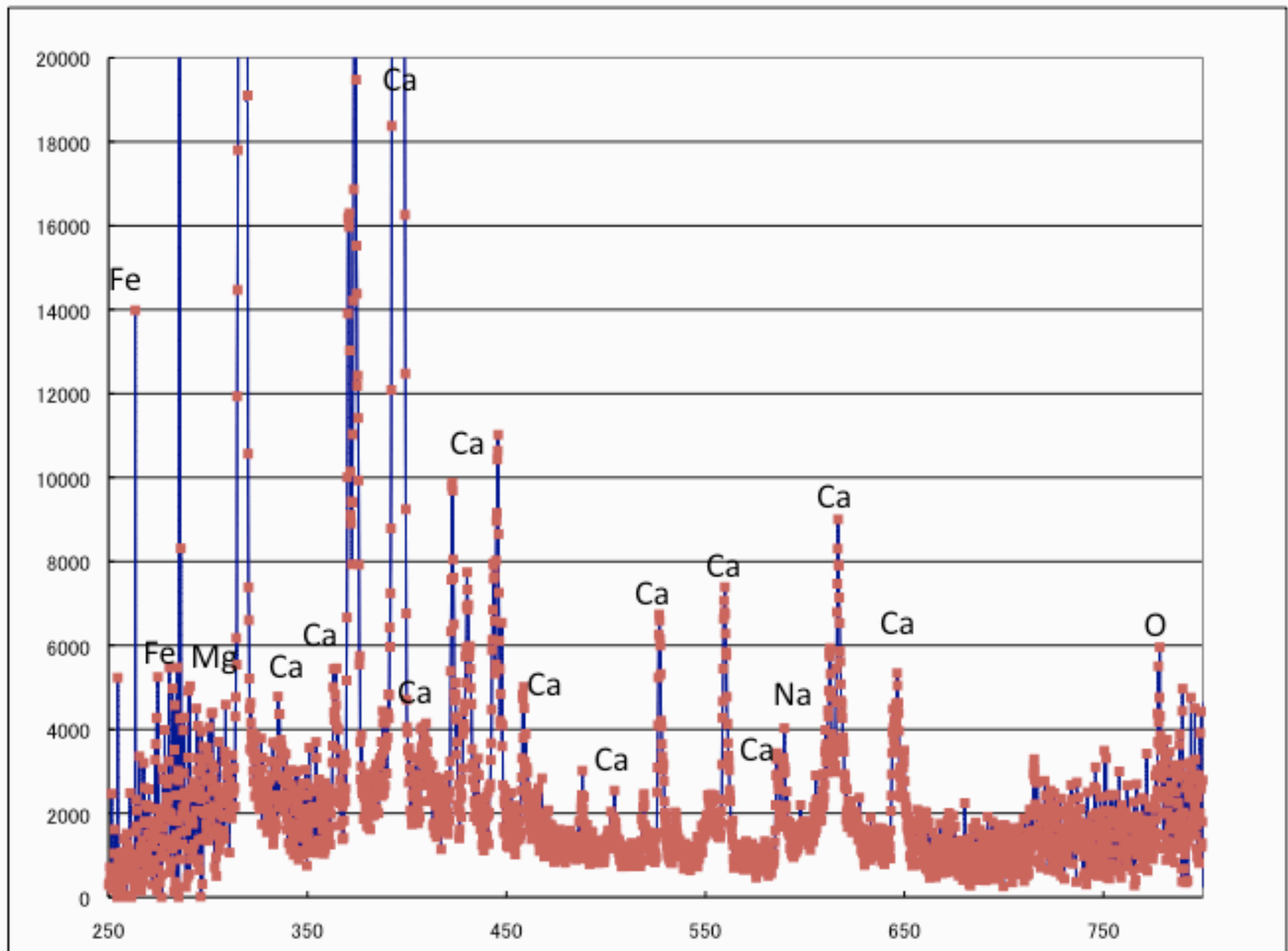
| | Na | O | Si | Mg | Fe | Ca | Al |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 傾き | -3.3427E +17 | -1.8413E +18 | -7.2374E +17 | -1.7498E +18 | -1.9206E +18 | -1.9206E +18 | -1.0670E +18 |
| 切片 | 8.7488 | 11.4050 | 8.7806 | 11.1040 | 9.8201 | 9.8201 | 10.1080 |
| T[K] | 2.1678E+05 | 3.9355E+04 | 1.0012E+05 | 4.1413E+04 | 3.7730E+04 | 3.7730E+04 | 6.7914E+04 |
| N | 6303 | 89769 | 6507 | 66436 | 18400 | 18400 | 24539 |
| 比率 | 0.96870 | 13.79629 | 1.00000 | 10.21033 | 2.82780 | 2.82780 | 3.77123 |

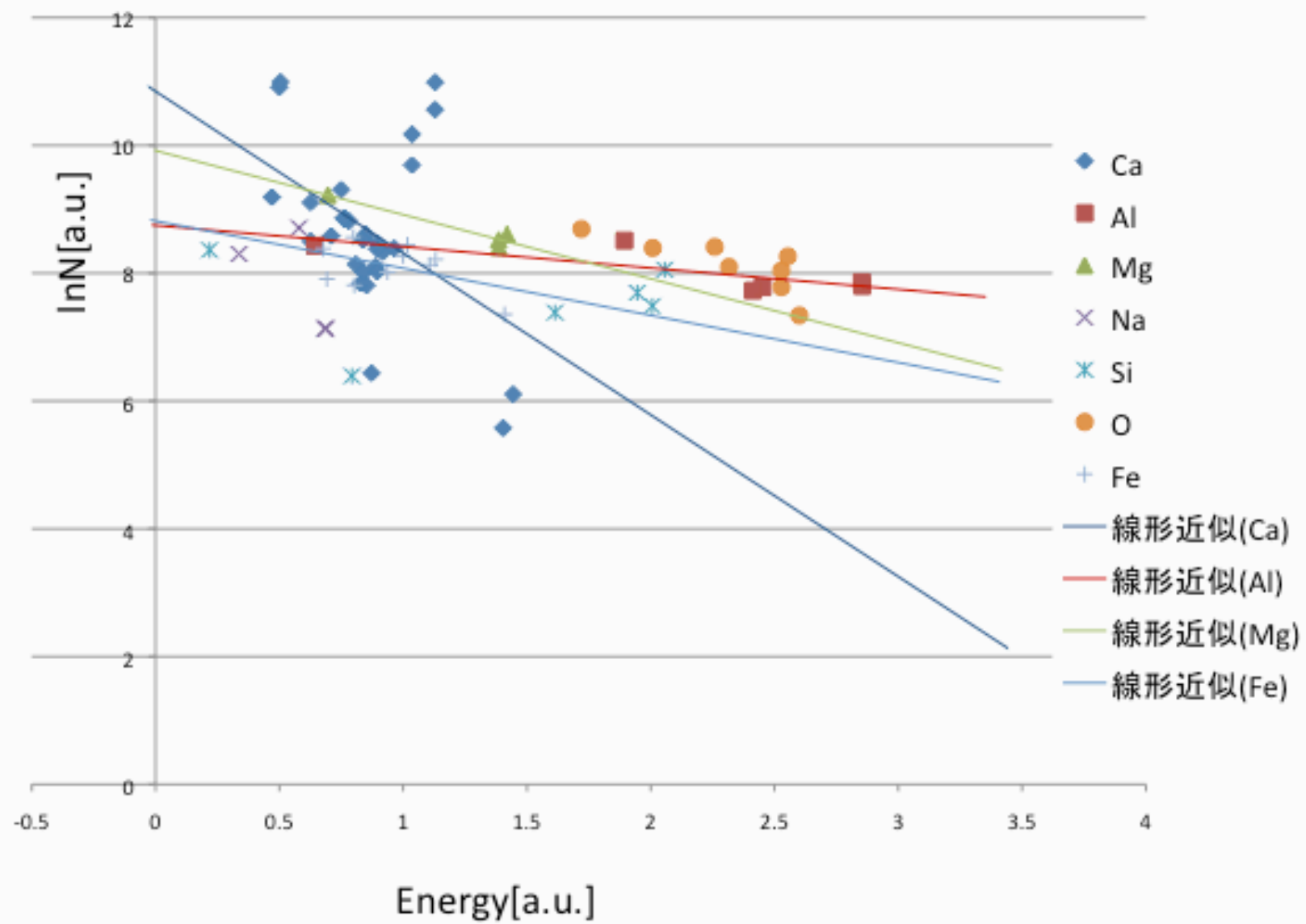
MgとAlが多い
岩石 黒色

玄武岩

C4







| | Al | Ca | Mg | Na | Si | O | Fe |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 傾き | -3.3427E+17 | -2.5331E+18 | -3.3427E+18 | -3.2390E+18 | -3.4631E+17 | -1.0570E+18 | -7.3985E+17 |
| 切片 | 8.7488 | 1.0847E+01 | 9.9177 | 9.672 | 8.3396 | 10.574 | 8.8171 |
| T[K] | 2.17E+05 | 2.8607E+04 | 2.17E+04 | 2.24E+04 | 2.09E+05 | 6.86E+04 | 9.79E+04 |
| N | 6303.11982 4 | 51379.7805 7 | 20286.2784 9 | 15867.0514 1 | 4186.41484 1 | 39104.7804 2 | 6748.66509 1 |
| 比率 | 1.50561281 3 | 12.2729788 | 4.84574015 3 | 3.79012879 | | 9.34087564 5 | 1.61203926 2 |

Caが非常に多い
岩石 白色

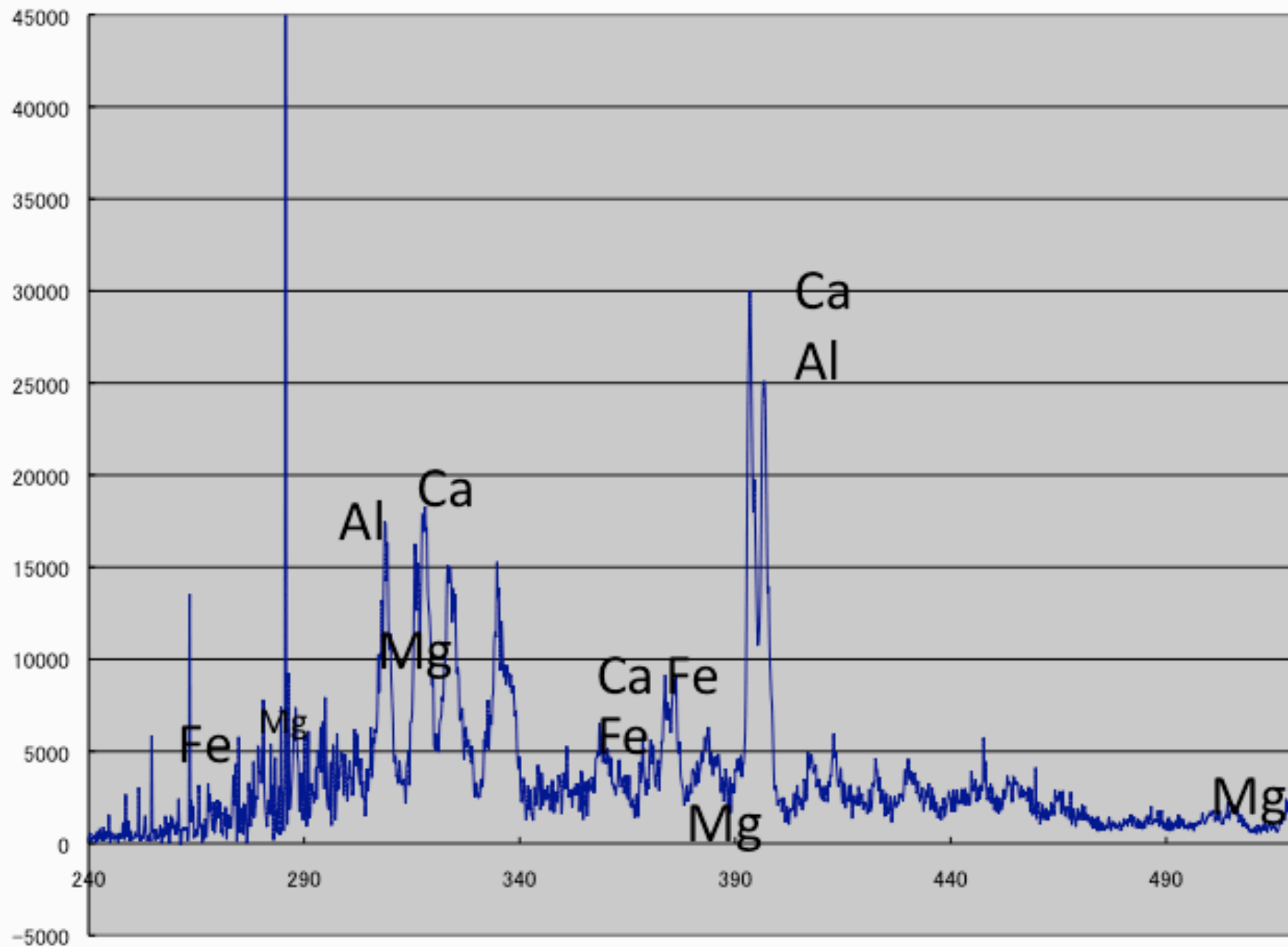


石灰岩



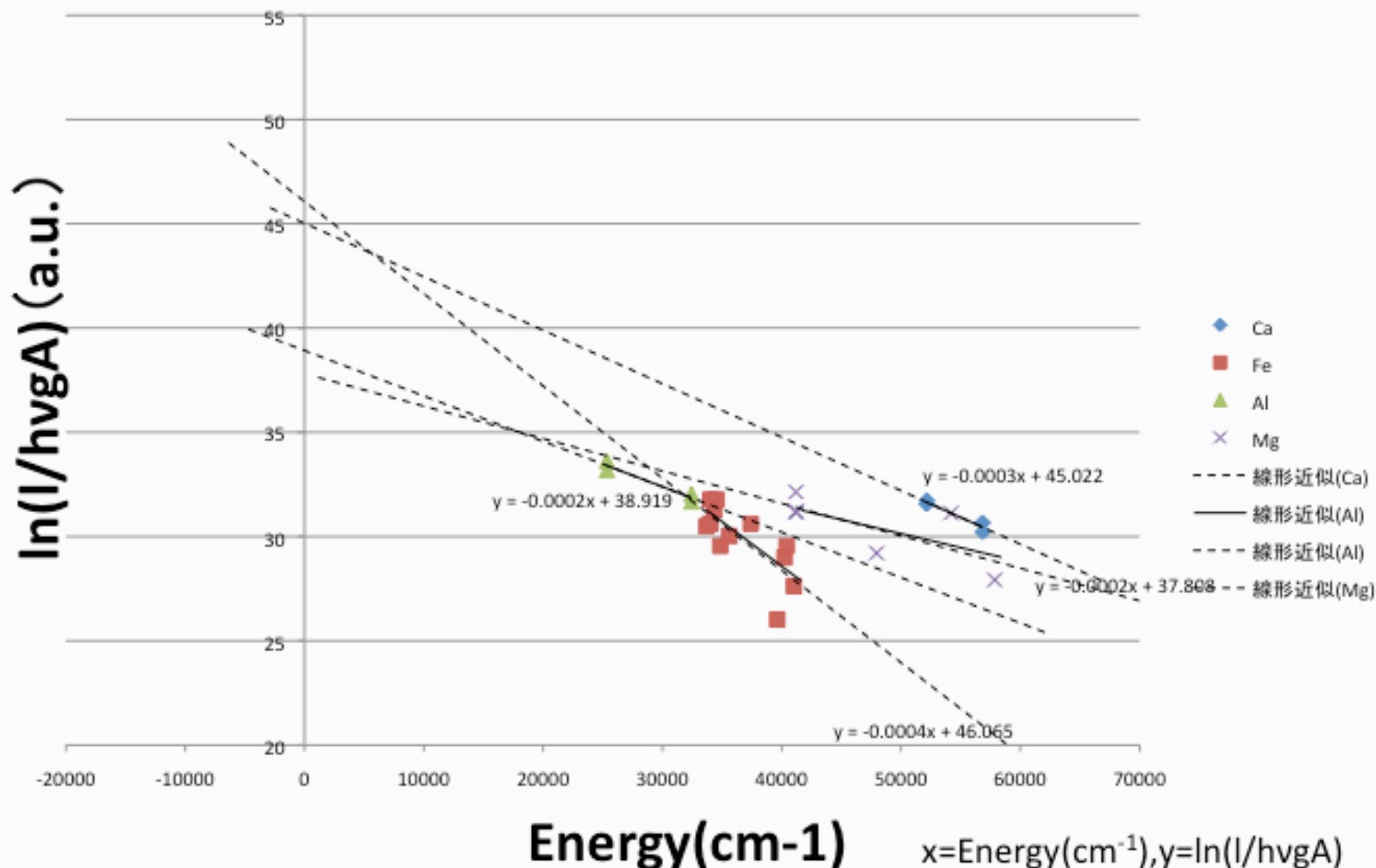
coffee break / MIDC

石3



同定した各元素についてのボルツマンプロットは以下
のようになる。

ボルツマンプロット(C3)



ボルツマンプロットから岩石蒸気中の原子総数と温度を測定する。

| | Ca | Fe | Al | Mg |
|----------|----------|-------------|-------------|-------------|
| 傾き (絶対値) | 0.000257 | 0.000442 | 0.000218 | 0.0001556 |
| 温度 | 5639.204 | 3278.903535 | 6648.052121 | 9314.109012 |
| 切片 | 45.02 | 46.07 | 38.92 | 37.81 |
| 比率 | 1.00 | 1.02 | 0.86 | 0.84 |

比率はCaを1とした。

$$T(K) = 2 * 10^{(-23)} / ka \quad k: \text{ボルツマン定数} \quad a: \text{傾き}$$

各元素の比率と岩石中の化学組成を考え、下の岩石組成の表と比較する。



→サンプル3は玄武岩である。

MISSION : Results

<問題点>

- 同定したスペクトルの信頼度
(分光器の分解能)
- ボルツマンプロットから計算した温度が
全体的に高い
(元素の同定が間違っている)
- レーザーのを照射する場所によって
スペクトルが異なる可能性
(全体の組成が見えている訳ではない)

MISSION : Conclusion

<考察>

- 月の可能性

玄武岩に T_1 と思われるスペクトルが見られない
C4が斜長岩だとすると、Alのスペクトルが少なすぎる

- 火星の可能性

鉄は多く見られるが、火星の岩石のように赤くない
Sのスペクトルは見られない(硫酸塩岩の可能性低い)