

東濃地科学センターにおける蛍光 X 線分析装置を用いた岩石試料の主要元素および微量元素の定量分析

Quantitative X-ray Fluorescence Analysis of Major and Trace Elements
in Rock Samples at Tono Geoscience Center

清水 麻由子 佐野 直美 柴田 健二

Mayuko SHIMIZU, Naomi SANO and Kenji SHIBATA

バックエンド研究開発部門

東濃地科学センター

Tono Geoscience Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

February 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

東濃地科学センターにおける
蛍光 X 線分析装置を用いた岩石試料の主要元素および微量元素の定量分析

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

清水 麻由子，佐野 直美[※]，柴田 健二^{*1}

(2016 年 12 月 5 日受理)

蛍光 X 線 (XRF: X-ray fluorescence) による全岩化学組成の分析は，地質学や地球化学等の研究分野において岩石試料の基礎情報を得るために幅広く利用されている。本報告では，前処理手法であるガラスビード作製方法，および東濃地科学センターに設置した XRF 装置（株式会社リガク製 ZSX Primus II）による岩石試料の主要元素と微量元素の定量分析方法について記述する。

東濃地科学センター：〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

※ 技術開発協力員

*1 九電産業株式会社

**Quantitative X-ray Fluorescence Analysis of Major and Trace Elements in Rock Samples
at Tono Geoscience Center**

Mayuko SHIMIZU, Naomi SANO[※] and Kenji SHIBATA^{*1}

Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received December 5, 2016)

X-ray fluorescence (XRF) spectrometry is widely used for whole-rock composition analysis in geological and geochemical studies. This report provides a description of preparation method for glass bead samples and instrumental analysis of major and trace elements in rock samples by XRF spectrometry system (ZSX Primus II, Rigaku Corp.) in the Tono Geoscience Center.

Keywords: X-ray Fluorescence, Whole-rock, Glass Bead

※ Collaborating Engineer

*1 Kyuden Sangyo Co., Inc.

目次

1. はじめに	1
2. 全岩化学組成の分析方法	1
2.1 試料	1
2.2 前処理（ガラスビード作製方法）	5
2.3 測定（蛍光 X 線分析法）	7
2.3.1 蛍光 X 線分析装置の概要	7
2.3.2 測定条件	7
2.3.3 装置状態の評価	9
2.3.4 検量線	9
2.3.5 ドリフト補正	16
3. 精度と正確度	17
3.1 精度	17
3.2 検出限界値および定量下限値	17
3.3 正確度	19
謝 辞	25
参考文献	26
付録	27

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical method for whole-rock chemistry	1
2.1 Materials	1
2.2 Preparation of glass beads	5
2.3 Measurement (X-ray fluorescence analysis)	7
2.3.1 Instrument.....	7
2.3.2 Measurement condition.....	7
2.3.3 Spectrometer condition	9
2.3.4 Calibration curve.....	9
2.3.5 Drift correction	16
3. Precision and accuracy	17
3.1 Precision.....	17
3.2 Detection limit and determination limit.....	17
3.3 Accuracy.....	19
Acknowledgement	25
References	26
Appendix.....	27

1. はじめに

火成岩の全岩化学組成の分析は、固結前のマグマの化学組成を知る最も一般的な手法として、その起源や形成過程の解析に広く用いられている¹⁾。また、全岩化学組成と鉱物組成や変形構造などと比較することにより、断層の発達過程を推定する研究もなされている²⁾。全岩化学組成を知る方法としては、岩石を溶液化したのち誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) などで測定する湿式分析と、岩石を粉末化し加圧成形したブリケット若しくは、粉末試料と融剤を混合して作製するガラスビードを蛍光 X 線 (XRF) 分析装置で測定する乾式分析が一般的に用いられる。

湿式分析は、岩石試料を溶液化するので作業者による系統誤差が生じやすく、また、試料の溶解には数日間の時間を要する。一方、乾式分析である XRF のガラスビード法は、1 日に十数個作製でき多くの試料を迅速かつ簡便に分析することができる。ガラスビード法は試料を融剤とともに融解して均質化するため、粉末加圧成形試料で生じる鉱物効果、粒度効果といった誤差要因を排除することができる。ガラスビード法では試料が融剤によって希釈されて蛍光 X 線の強度低下が生じるため、従来は主に主要元素の定量に用いられてきたが、近年は低希釈率ビードを作成することで微量元素を含めた定量分析にも適用されている³⁾。

東濃地科学センターでは、平成 26 年 2 月に XRF 装置 (株式会社リガク製 ZSX Primus II) を導入した。従来機では、主要元素 (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) の定量を主目的として、ガラスビードの作製は試料：融剤比を 1：10 の高希釈率で行っていた⁴⁾が、今後は微量元素 (Ba , Ce , Cl , Co , Cr , F , Ga , Nb , Ni , Pb , Rb , S , Sc , Sr , Th , U , V , Y , Zr) の定量も行うことができるよう、試料：融剤比を 1：2^{3),5)}とした低希釈率のガラスビードを用いた XRF の測定条件を検討した。

本稿では、これらの検討結果を取りまとめるとともに、分析のマニュアルとして活用できるように前処理 (ガラスビード作製) から分析精度の評価までを記した。

2. 全岩化学組成の分析方法

2.1 試料

XRF を用いた定量分析を行うための検量線作成試料として、産業技術総合研究所地質調査総合センターが提供している岩石標準試料 (JG-1, JG-2, JG-3, JR-1, JR-2, JR-3, JA-1, JA-2, JA-3, JB-1b, JB-2, JB-3, JG-1a) 13 試料、アメリカ地質調査所が提供している岩石標準試料 (GSP-2) 1 試料を用いた。岩石標準試料の標準値⁶⁾は、JG-1, JG-2, JG-3, JR-1, JR-2, JA-1, JA-2, JA-3, JB-2, JB-3, JG-1a については Imai et al. (1995)⁷⁾を、JR-3 については Imai et al. (1999)⁸⁾を、JB-1b については Terashima et al. (1998)⁹⁾を、GSP-2 については Wilson et al. (1998)¹⁰⁾を引用し、(1)式より吸着水を除いた標準値に換算した³⁾。なお、吸着水および結晶水の標準値が公開されていない岩石標準試料 (GSP-2) については、換算しないこととする。測定元素は、主要元素である SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 と微量元素である Ba , Ce , Cl , Co , Cr , F , Ga , Nb , Ni , Pb , Rb , S , Sc , Sr , Th , U , V , Y , Zr の合計 29 元素である。また Fe_2O_3 は、全酸化鉄 ($\text{T-Fe}_2\text{O}_3$) の標準値を使用する。岩石標準試料の吸着水を除いた標準値を表 2.1-1 に示す。

$$W_i = V_i \times \frac{H_2O^+ + H_2O^- + \Sigma V_{mj}}{H_2O^+ + \Sigma V_{mj}} \quad (1)$$

- W_i : 元素 i の含有率の吸着水を除いた標準値 (mass%,ppm)
 V_i : 元素 i の含有率の標準値 (mass%,ppm)
 ΣV_{mj} : 全測定対象元素 (29 元素) の含有率の標準値の合計 (mass%)
 H_2O^+ : 結晶水の含有率の標準値 (mass%)
 H_2O^- : 吸着水の含有率の標準値 (mass%)

表 2.1-1 岩石標準試料の主要元素および微量元素の標準値

Element	JG-1	JG-2	JG-3	JR-1	JR-2	JR-3	JA-1
(mass%)							
SiO ₂	72.35	76.92	67.40	75.60	75.86	72.93	64.16
TiO ₂	0.26	0.04	0.48	0.11	0.07	0.21	0.85
Al ₂ O ₃	14.25	12.48	15.51	12.86	12.75	11.93	15.27
T-Fe ₂ O ₃	2.18	0.97	3.70	0.89	0.77	4.73	7.09
MnO	0.06	0.02	0.07	0.10	0.11	0.08	0.16
MgO	0.74	0.04	1.79	0.12	0.04	0.05	1.57
CaO	2.20	0.70	3.70	0.67	0.50	0.09	5.72
Na ₂ O	3.38	3.54	3.97	4.03	4.00	4.70	3.85
K ₂ O	3.98	4.72	2.64	4.42	4.46	4.30	0.77
P ₂ O ₅	0.10	0.00	0.12	0.02	0.01	0.02	0.17
(ppm)							
Ba	466	81.1	467	50.4	39.6	66.0	312
Ce	45.8	48.4	40.4	47.3	38.9	328	13.3
Cl	58.1	—	(156)	922	(738)	—	43.1
Co	4.06	3.62	11.7	0.83	0.46	0.98	12.3
Cr	53.2	6.38	22.4	2.84	3.11	3.51	7.85
F	498	(973)	(318)	993	1111	—	161
Ga	17.8	18.6	17.1	16.1	17.9	36.7	16.8
Nb	12.4	14.7	5.89	15.2	18.7	511	1.86
Ni	7.48	(4.36)	14.3	(1.67)	(1.99)	(1.60)	(3.50)
Pb	25.4	31.5	11.7	19.3	21.5	32.9	6.57
Rb	182	301	67.4	258	304	454	12.3
S	10.9	(7.01)	(54.8)	13.3	(9.62)	(39.1)	21.7
Sc	6.53	2.42	8.77	5.08	5.60	0.50	28.6
Sr	184	17.9	380	29.2	8.13	10.4	264
Th	13.2	31.6	8.29	26.8	31.5	112	0.82
U	3.47	11.3	2.21	8.90	10.9	21.2	0.34
V	25.2	3.78	70.2	7.01	3.01	4.21	105
Y	30.6	86.6	17.3	45.2	51.2	166	30.7
Zr	111	97.7	144	100	96.5	1498	88.6

() は参考値を示す。

表 2.1-1 (続き)

Element	JA-2	JA-3	JB-1b	JB-2	JB-3	JG-1a	GSP-2
(mass%)							
SiO ₂	57.13	62.34	51.65	53.32	51.00	72.39	66.60
TiO ₂	0.67	0.70	1.27	1.19	1.44	0.25	0.66
Al ₂ O ₃	15.60	15.58	14.53	14.66	17.21	14.32	14.90
T-Fe ₂ O ₃	6.29	6.61	9.12	14.27	11.83	2.00	4.90
MnO	0.11	0.10	0.15	0.22	0.18	0.06	0.04
MgO	7.70	3.72	8.23	4.63	5.19	0.69	0.96
CaO	6.37	6.25	9.70	9.83	9.80	2.13	2.10
Na ₂ O	3.15	3.19	2.66	2.04	2.73	3.39	2.78
K ₂ O	1.83	1.41	1.33	0.42	0.78	3.96	5.38
P ₂ O ₅	0.15	0.12	0.26	0.10	0.29	0.08	0.29
(ppm)							
Ba	325	323	—	222	245	471	1340
Ce	33.1	22.8	—	6.77	21.5	45.1	410
Cl	—	—	—	281	(259)	(65.1)	—
Co	29.9	21.1	40.7	38.0	34.3	5.91	7.30
Cr	442	66.3	444	28.1	58.1	17.6	20.0
F	(226)	(286)	—	98.6	253	440	3000
Ga	17.1	16.3	—	17.0	19.8	16.5	22.0
Nb	9.59	3.41	—	(1.58)	2.47	11.4	27.0
Ni	132	32.2	150	16.6	36.2	6.92	17.0
Pb	19.4	7.71	6.87	5.37	5.58	26.4	42.0
Rb	73.8	36.7	39.5	7.38	15.1	178	245
S	(8.10)	(214)	10.1	17.9	9.87	(11.0)	—
Sc	19.8	22.0	—	53.6	33.8	6.22	6.30
Sr	251	287	444	178	403	187	240
Th	5.09	3.25	—	0.35	1.27	12.8	105
U	2.24	1.18	—	0.18	0.48	4.70	2.40
V	128	169	216	576	372	22.7	52.0
Y	18.5	21.2	—	24.9	26.9	32.1	28.0
Zr	117	118	—	51.3	97.9	118	550

() は参考値を示す。

2.2 前処理（ガラスビード作製方法）

試料は、秤量前に 110℃で 2 時間以上加熱し、吸着水 (H_2O^-) を取り除くための前処理を行う（図 2.2-1）。融剤（Spectroflux 100B : LiBO_2 80% + LiB_4O_7 20%, Johnson Matthey 製）は、吸着水および結晶水を取り除くため 500℃で 5 時間以上加熱する。電子天秤に薬包紙を乗せ風袋引きを行った後、試料を 2 g 秤量し記録する。さらに風袋引きを行った後、融剤を 4 g 秤量し記録する。ただし、雨天時など湿度が高い日は、試料および融剤が大気中の湿分を吸着し、質量が安定しない場合がある。その際は、試料は 2 g、融剤は 4 g を目標値とし、計量物を天秤に乗せ目標値付近で安定した質量を素早く記載する。試料質量および融剤質量の秤量値は、測定の際に XRF に入力し、希釈率の算定に用いる。秤量した試料および融剤をめのう乳鉢に移し、酸化剤（和光純薬工業：硝酸アンモニウム 特級）をスパーテルで 100 mg 程度加え乳鉢で良く混合する。これを白金るつぼ（Pt 95%, Au 5%）に移し、剥離剤（よう化リチウム 無水 98%, Strem Chemicals 製を 50%よう化リチウム水溶液に調整したもの）をマイクロピペットで 60 μL 加える。白金るつぼに蓋をかぶせ、東京科学株式会社製ビード&フューズサンプラ（高周波溶融装置：TK - 4100 型）で溶融してガラスビードを作製する。ビード&フューズサンプラによる溶融条件は、初段加熱を 860℃で 120 秒、本加熱溶融を 1050℃で 360 秒、揺動加熱を 1050℃で 240 秒行う。試料によっては、ガラスビードの形が三日月型となるものがある。その場合は、本加熱時間を 260 秒に変更して再溶融を行い、揺動加熱時に OFF ボタンで装置を停止させた後、素早く白金るつぼの蓋を取り、るつぼばさみでるつぼを掴んでビードが円型となるように白金るつぼを回す。また、ガラスビードに試料の溶け残りがあつたり、X 線が照射される面に気泡がある場合は、再度溶融する。冷却は、装置の冷却部に白金るつぼを移し空冷する。作製したガラスビードは、裏面（白金るつぼの底面に接しない面）に試料名を油性マジックで記載し、チャック付ビニール袋に入れ、デシケータで保管する。

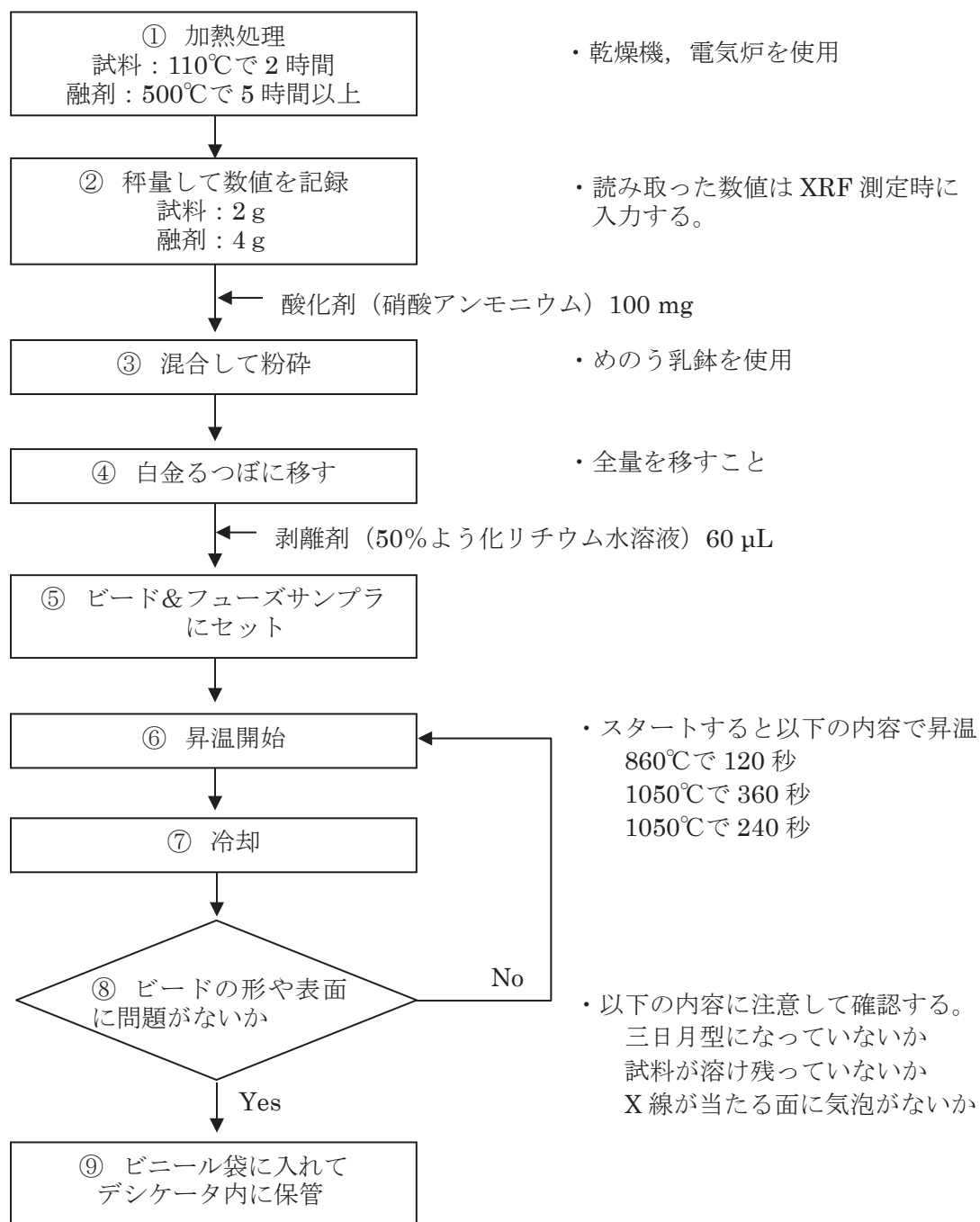


図 2.2-1 ガラスビード作製方法

2.3 測定（蛍光 X 線分析法）

2.3.1 蛍光 X 線分析装置の概要

本測定で使用する装置は、株式会社リガク製の蛍光 X 線分析装置 ZSX Primus II である。X 線管はエンドウィンド型 Rh 管球で最大出力は 4 kW であるが、X 線管球の寿命の延命を考え 3 kW で使用した。分光室および試料測定室は真空となっており、分光室・測定室用と試料投入口下の予備真空室用にそれぞれ独立した真空ポンプが装備されている。X 線管から発生する連続 X 線あるいは特性 X 線の分析線への妨害を軽減するために使用する一次 X 線フィルターは、Ni40, Ni400, Al25, Al125 の 4 種類があり、分光結晶は、LiF (200), LiF (220), Ge, PET, RX25, RX40, RX61, RX75 が装着されている。試料から発生する蛍光 X 線を平行束にするスリットは S2（高分解能）、S4（標準）、S8（高感度）の 3 種類から選択できる。検出器は重元素分析に使用するシンチレーションカウンター（SC）と軽元素分析に使用するガスフロー型プロポーションナルカウンター（F-PC）があり、F-PC には芯線クリーニング機構が付属している。試料交換機には、48 試料分のトレーが用意されているが、このうち最後のポジションは波高分析器（PHA）調整用試料の固定位置としたため、47 試料までの試料を一度に配置可能である。

2.3.2 測定条件

X 線管球の加速電圧と電流はそれぞれ 50 kV, 60 mA で出力 3 kW とし、主要元素、微量元素とも同一とした。各元素の分析線に用いる特性 X 線、1 次 X 線フィルターの有無、スリットサイズ、分光結晶、検出器、PHA 幅、ピーク位置およびバックグラウンド測定位置の測定条件を表 2.3.2-1 に示す。なお、本測定条件による測定時間は、1 試料あたり約 100 分である。

表 2.3.2-1 測定条件

Element	Line	Target	Filter	Slit	Crystal	Counter	PHA	Angle (2 θ)		
								Peak/s	BG1/s	BG2/s
SiO ₂	K α	Rh	OUT	S4	PET	PC	100-なし	109.058/40	112.000/10	—
TiO ₂	K α	Rh	OUT	S2	LiF(200)	SC	85-345	86.144/20	87.820/10	—
Al ₂ O ₃	K α	Rh	OUT	S4	PET	PC	80-480	144.782/40	148.000/10	—
T-Fe ₂ O ₃	K α	Rh	OUT	S2	LiF(200)	SC	100-なし	57.516/20	58.980/10	—
MnO	K α	Rh	OUT	S2	LiF(200)	SC	90-335	62.970/20	63.840/10	—
MgO	K α	Rh	OUT	S4	RX25	PC	100-450	38.110/40	40.100/10	—
CaO	K α	Rh	OUT	S4	LiF(200)	PC	110-300	113.104/40	115.950/10	—
Na ₂ O	K α	Rh	OUT	S4	RX25	PC	100-320	46.310/40	48.450/10	—
K ₂ O	K α	Rh	OUT	S4	LiF(200)	PC	100-300	136.660/40	140.000/10	—
P ₂ O ₅	K α	Rh	OUT	S4	Ge	PC	150-350	141.066/40	144.000/10	—
Ba	L α	Rh	Al125	S2	LiF(200)	SC	115-310	87.158/200	88.060/100	—
Ce	L81	Rh	Al125	S2	LiF(200)	SC	130-300	71.614/200	70.960/100	—
Cl	K α	Rh	Al25	S2	Ge	PC	150-300	92.874/200	93.900/100	—
Co	K α	Rh	Al125	S2	LiF(200)	SC	100-300	52.690/200	52.460/100	53.240/100
Cr	K α	Rh	Al125	S2	LiF(200)	SC	100-300	69.350/200	70.100/100	—
F	K α	Rh	OUT	S4	RX25	PC	100-250	74.358/400	75.500/200	—
Ga	K α	Rh	Ni40	S2	LiF(200)	SC	95-280	38.906/200	39.560/100	—
Nb	K α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	95-310	30.424/100	30.960/50	—
Ni	K α	Rh	Al125	S2	LiF(200)	SC	120-280	48.644/200	47.740/100	49.780/100
Pb	L81	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	140-250	40.372/200	40.140/100	40.780/100
Rb	K α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	100-280	37.978/200	36.760/100	38.680/100
S	K α	Rh	OUT	S4	Ge	PC	150-350	110.734/200	108.850/100	113.000/100
Sc	K α	Rh	Al125	S4	LiF(200)	PC	100-240	97.750/200	96.850/100	—
Sr	K α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	100-290	35.844/100	35.240/50	36.640/50
Th	L α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	120-275	39.224/200	39.680/100	—
U	L α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	100-280	37.294/200	37.540/100	—
V	K α	Rh	Al125	S2	LiF(200)	SC	95-320	77.020/200	75.980/100	—
Y	K α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	100-300	33.864/100	33.140/50	34.600/50
Zr	K α	Rh	Ni40	S2	LiF(220)	SC	100-300	32.088/100	31.540/50	32.820/50

PC: proportional counter, SC: scintillation counter, BG: background.

2.3.3 装置状態の評価

作成した検量線による精度評価を行う前に装置状態の評価を行う。岩石標準試料ビードを用いて 10 回繰り返し強度測定を行い、その平均値より理論的に得られる計数値上の標準偏差 (σ_{cal}) と各計数値の強度より実測の標準偏差 (σ_{obs}) を求め、標準偏差の比 ($\sigma_{obs}/\sigma_{cal}$) から装置や試料に異常がないか確認する。評価にはバックグラウンド補正をしていないグロス強度を用いる。

それぞれの標準偏差は、次式によって表される。

$$\sigma_{cal} = \sqrt{\frac{I_{ave}}{t \times 1000}} \quad (2)$$

$$\sigma_{obs} = \sqrt{\frac{\sum(I_i - I_{ave})^2}{n-1}} \quad (3)$$

I_{ave} : 各計数値 I_i の平均値

t : 測定時間 (秒)

n : 繰り返し測定回数

信頼度 90% (危険率 10%) で繰り返し測定回数を 10 回 ($n=10$) とすると、標準偏差の信頼区間は、“ $0.73\sigma < \sigma < 1.64\sigma$ ”である。そこで、“ $0.7 < \sigma_{obs}/\sigma_{cal} < 2.0$ ”を判定基準とし、装置や試料の異常を評価した。標準偏差の比が、0.7 以下については、精度が判定基準より高いことを表しており、問題視する必要はない。また、X 線強度が 200 kcps を超える元素であれば、“ $0.7 < \sigma_{obs}/\sigma_{cal} < 3.0$ ”を判定基準とした¹¹⁾。

強度測定には、それぞれの元素ごとに X 線強度の高、中および低強度で評価できるよう組成の異なる 3 点の岩石標準試料 (JG-2, JA-1, JB-2) を用いた。強度測定の結果は、付録表 A1-1～A1-3 に示す。いずれの岩石標準試料、元素ともに判定基準値を満たしており、このことから装置の異常およびガラスビードの測定面の損傷や汚染はないものと判断できる。

2.3.4 検量線

岩石試料は、さまざまな元素が共存しているため、共存元素の影響による測定強度の変化 (マトリックス効果) を考慮する必要がある。このため、全ての測定元素について、付属のソフトウェア (ZSX Version7.42) を用いてマトリックス補正を行う。本装置に付属するソフトウェアには理論マトリックス補正計算として、Lachance-Traill モデル (分析元素を除く全ての成分で補正する方法)、de Jongh モデル (ベース成分を除く分析元素自身を含んだ全ての元素で補正する方法)、JIS モデル (分析成分とベース成分を除く全ての成分で補正する方法)¹²⁾の 3 モデルが収録されており、このうち de Jongh モデルを用いて理論マトリックス補正係数を求め、検量線を作成する。理論マトリックス補正係数の計算時にはガラスビード作成時の揮散分 (強熱減量分) をバランス成分に設定した。これにより強熱減量を考慮した補正係数が得られるため、分析時に強熱減量を別途求めることは必要ない。また、微量元素の特性 X 線のうち、Ce-Lb1 には Zr-Ka (3 次線)、

Cr-K α には V-K β , F-K α には Fe-La と Ce-M ζ , Nb-K α には Y-K β 1, V-K α には Ti-K β 1, Y-K α には Rb-K β 1, Zr-K α には Sr-K β 1 が干渉するため, 付属のソフトウェアを用いて重なり補正を行う¹²⁾。

マトリックス補正と重なり補正を組み込んだ検量線は次式によって表される。

$$W_i = (a_i + b)(1 + \sum A_{ij}W_j) + \sum B_{ij}W_j \quad (4)$$

W_i : 共存元素 (i) の含有量

a, b : 検量線定数

I_i : 分析元素 (i) の X 線強度

A_{ij} : 分析元素 (i) に対する共存元素 (j) のマトリックス補正係数

B_{ij} : 分析元素 (i) に対する共存元素 (j) の重なり補正係数

W_j : 共存元素 (j) の含有量

(4)式を用いて作成した検量線グラフを図 2.3.4-1 に示す。グラフ上の白丸のプロットは, 補正前を示し, 青のひし形のプロットは, マトリックス補正および重なり補正後を示す。また黄色のプロットは, 標準値が参考値となっている試料で, 赤色のプロットは, 検量線から除外した試料を示す。グラフに併記した正確度は検量線正確度と呼ばれ, 次式により求められる。

$$\text{検量線正確度} = \sqrt{\frac{\sum (C_i - W_i)^2}{(n-m)}} \quad (5)$$

C_i : 元素の標準値

W_i : X 線分析値

n : サンプル個数

m : 1 次式は $m=2$, 2 次式は $m=3$

(今回は 1 次式なので $m=2$)

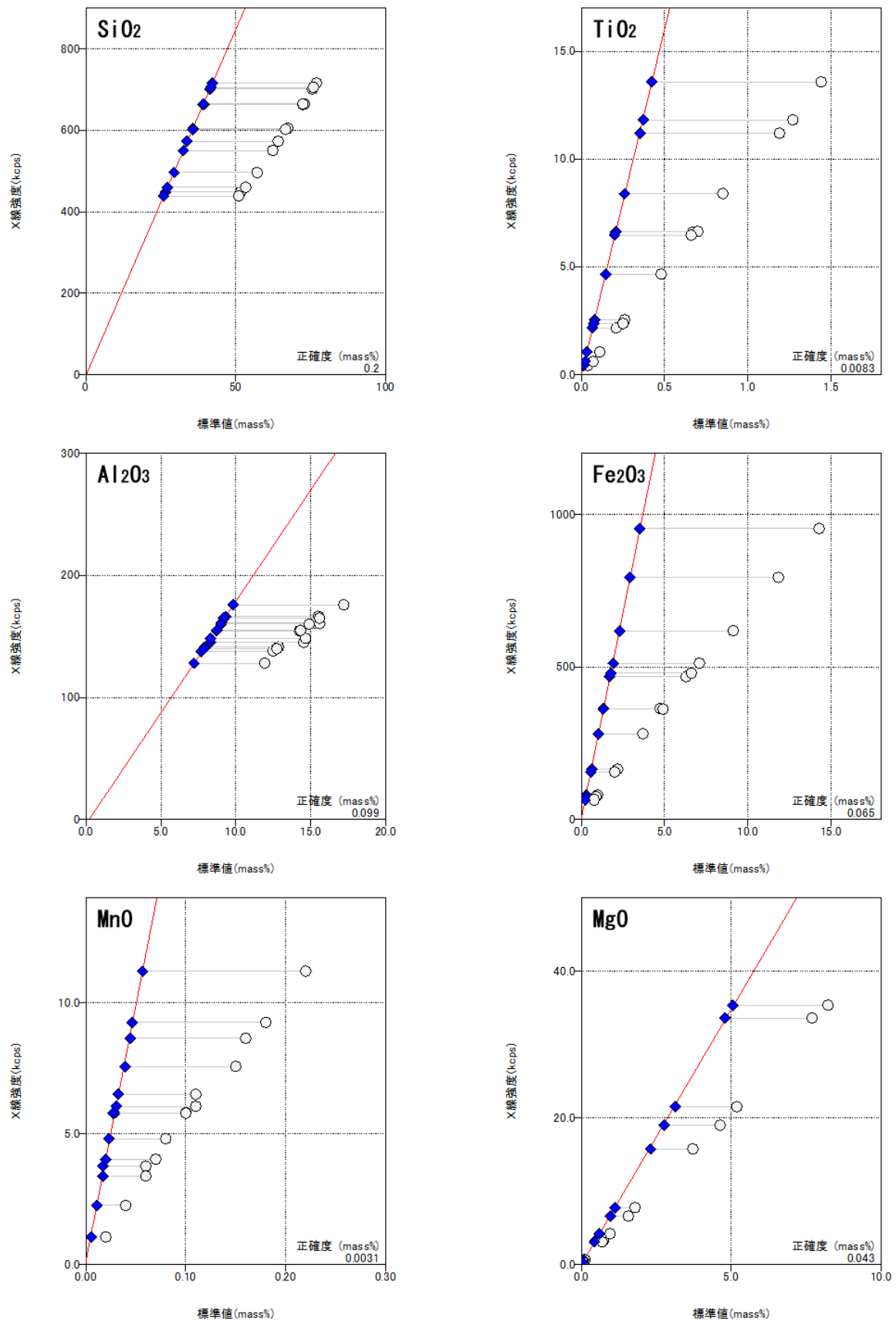


図 2.3.4-1 主要元素および微量元素の検量線 (1/5)

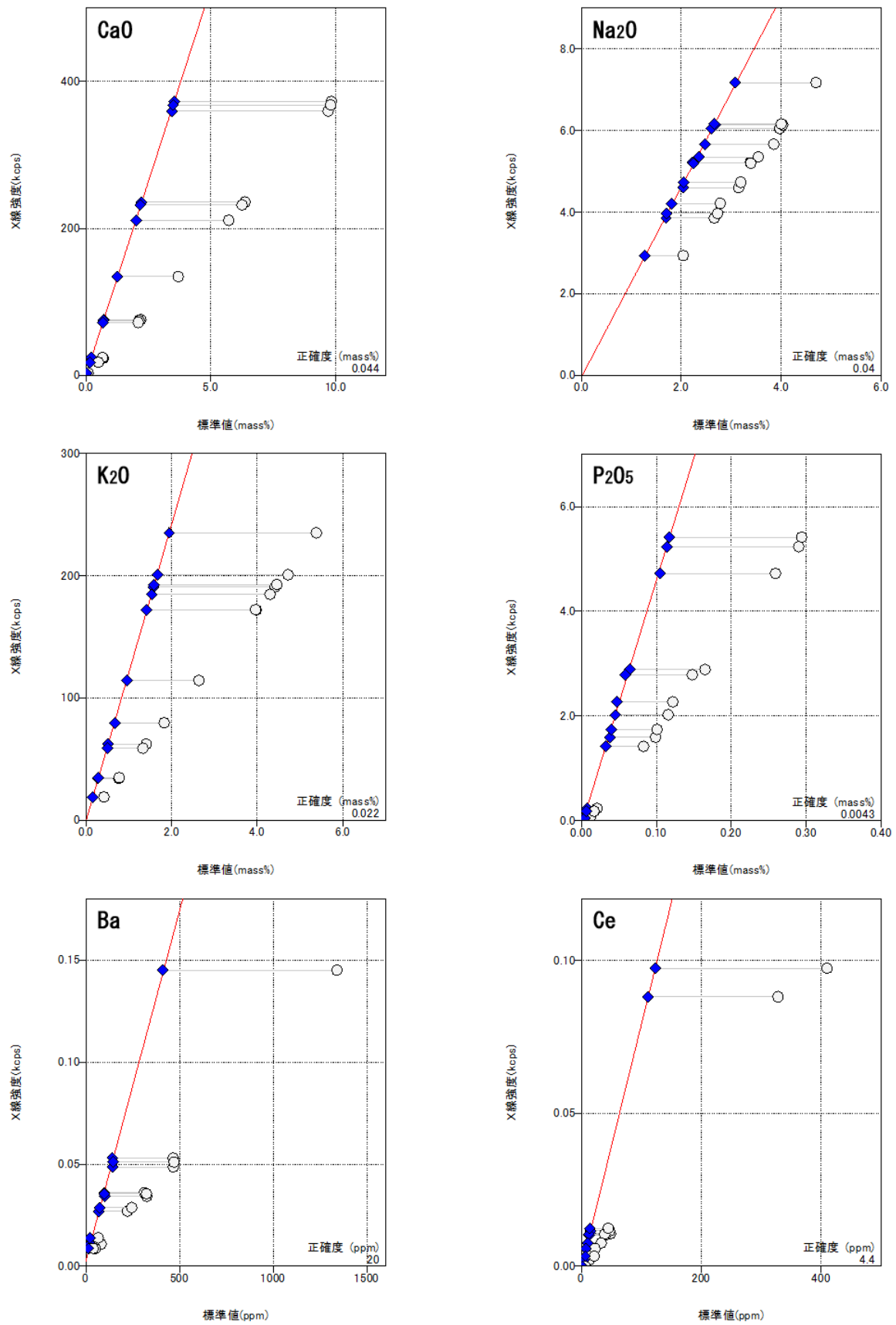


図 2.3.4-1 主要元素および微量元素の検量線 (2/5)

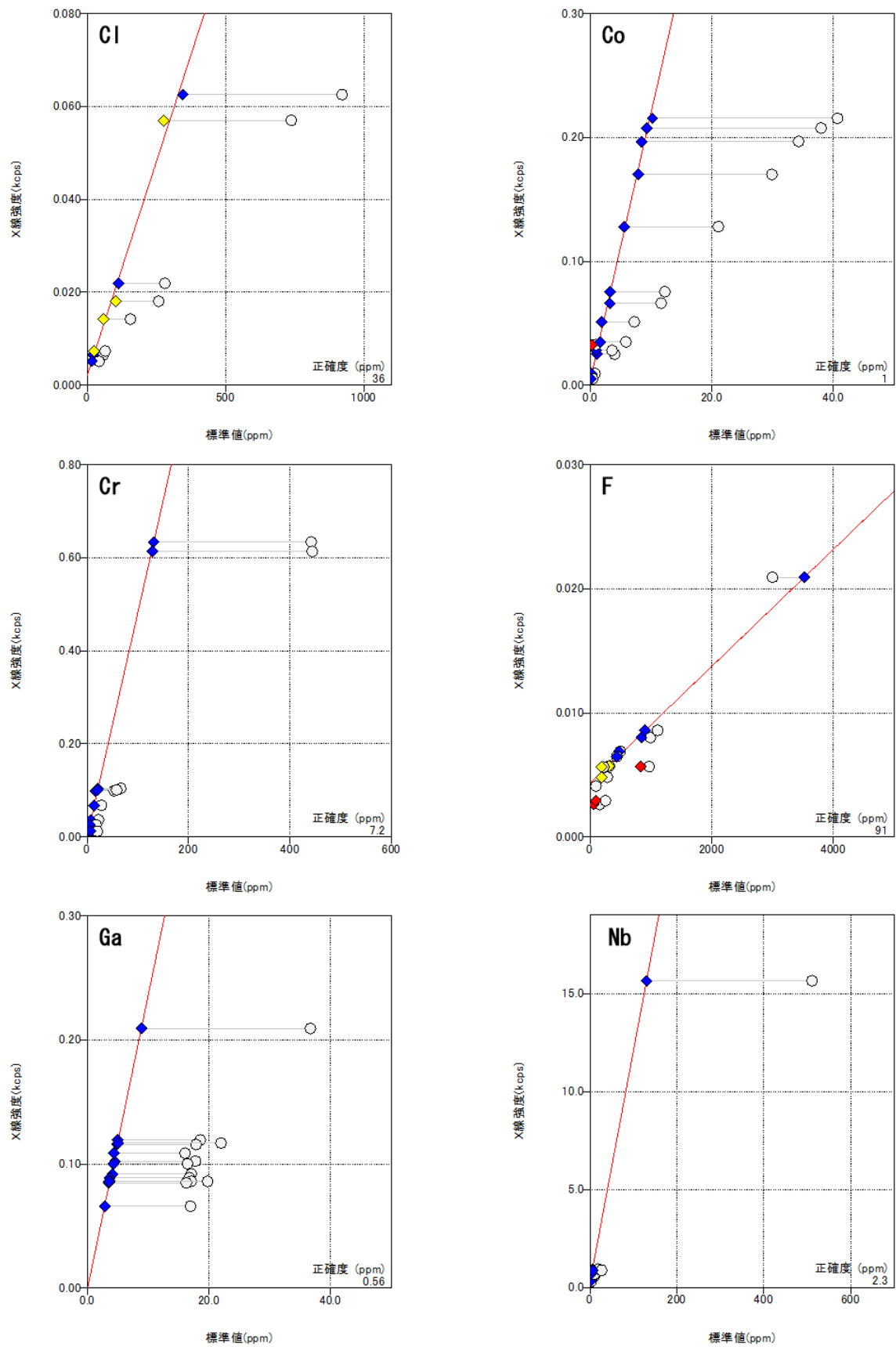


図 2.3.4-1 主要元素および微量元素の検量線 (3/5)

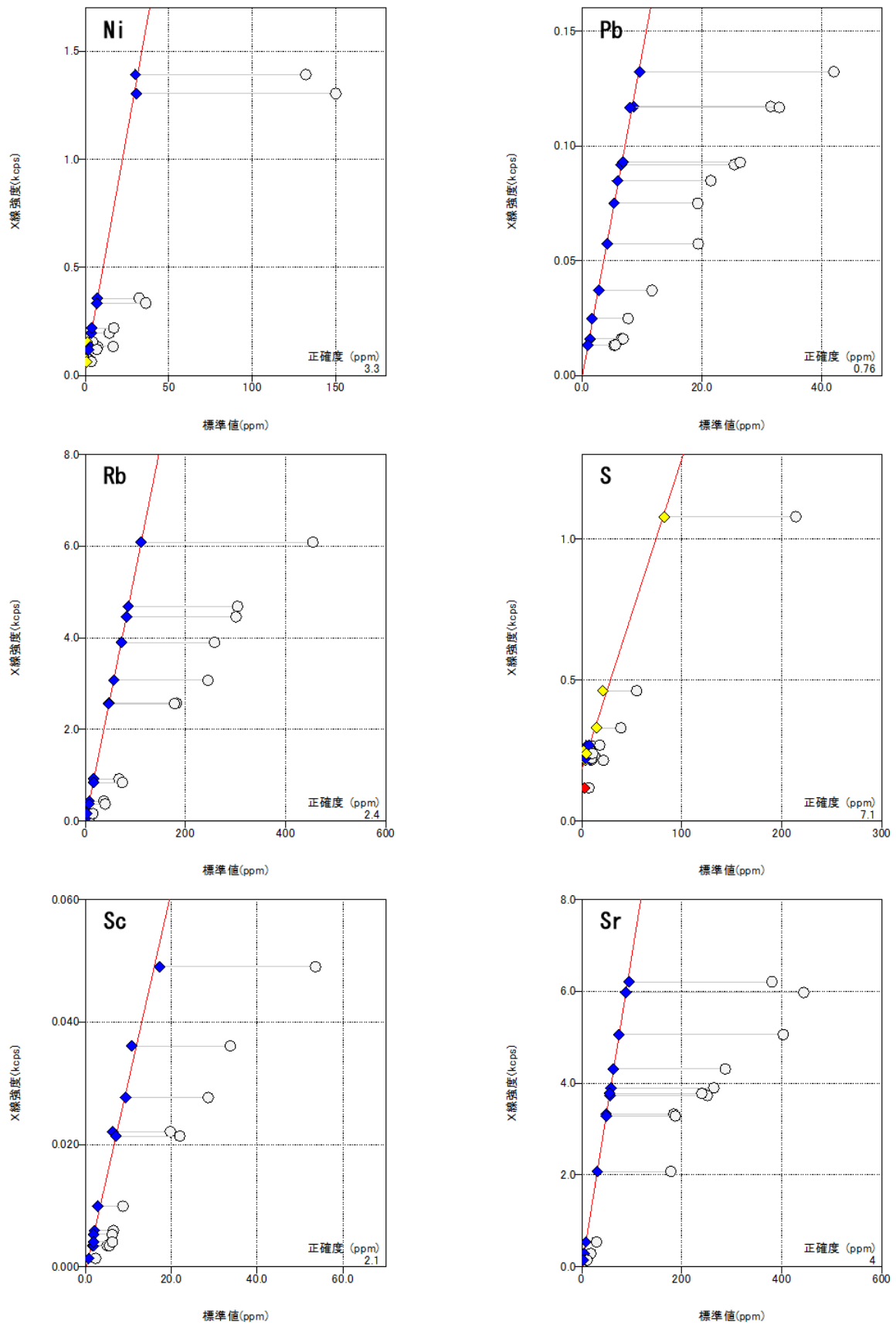


図 2.3.4-1 主要元素および微量元素の検量線 (4/5)

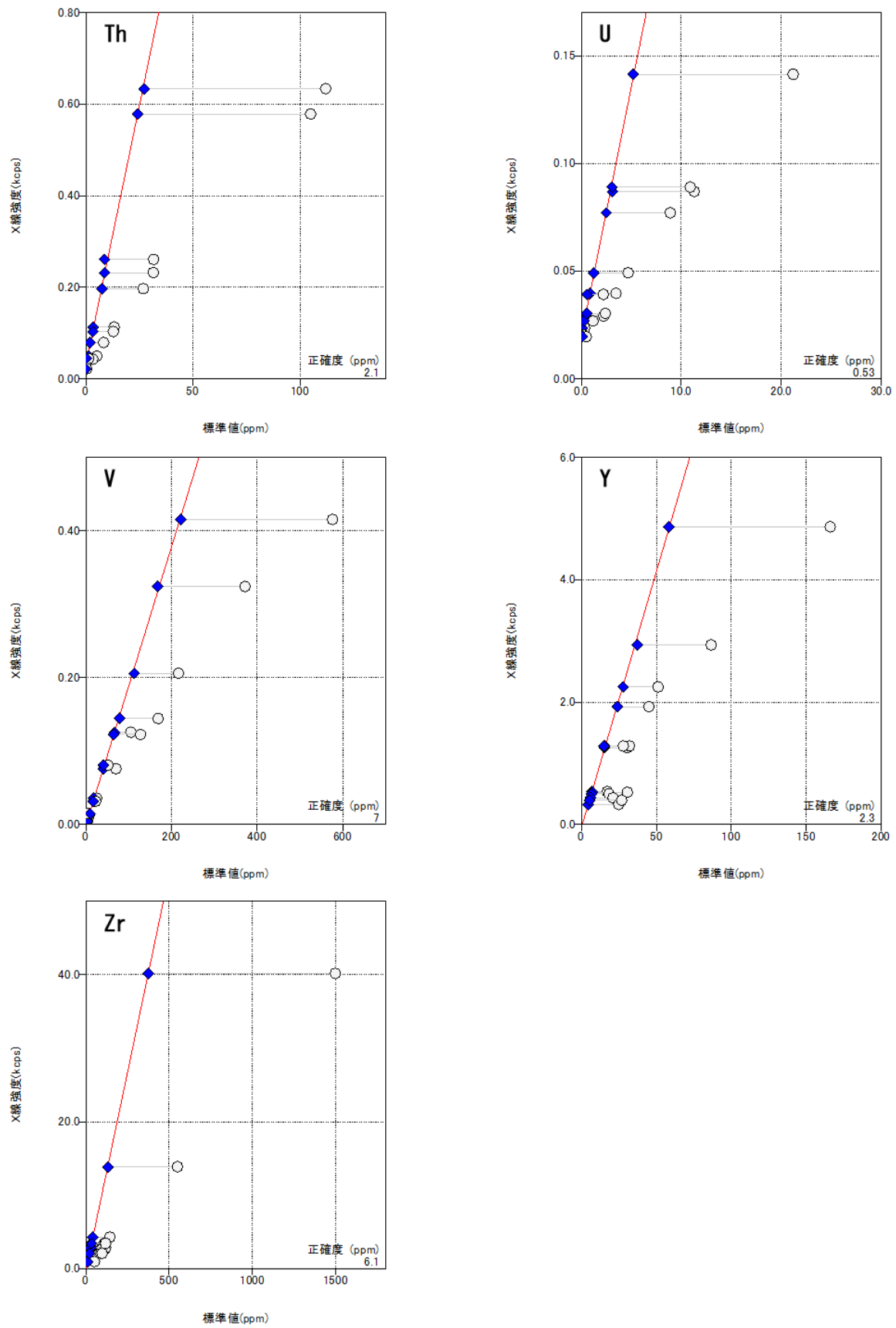


図 2.3.4-1 主要元素および微量元素の検量線 (5/5)

2.3.5 ドリフト補正

X線強度は、装置を長期間使用することにより変動（ドリフト）を伴う。このため、作成した検量線を長期的に利用するためには、この変動を補正（ドリフト補正）する必要がある。ドリフト補正を行うには、まず検量線作成時にドリフト補正試料を測定し、基準となるX線強度を登録する。そして、ドリフト補正の必要性が確認された時に検量作成時に基準強度登録を行ったドリフト補正試料を測定する。つまり、検量線を作成したときに測定したドリフト補正試料の強度を基準強度として、未知試料測定前のドリフト補正試料の強度との比からドリフト補正係数を求め、未知試料のX線強度に係数を乗じて補正を行う。

ドリフト補正には、二つの方法がある。一つは α 法（1点法）で、検量線の最高X線強度の約60%程度のX線強度が得られる試料を設定する。もう一つは $\alpha\beta$ 法（2点法）で、含有率範囲内で高い強度および低い強度が得られる2点の試料を設定する。 $\alpha\beta$ 法は、含有率範囲が広い場合や、分析にバックグラウンド強度を含んだX線強度（グロス強度）を用いる場合に使用する¹²⁾。

本稿では、 α 法を用いたドリフト補正を採用する。ドリフト補正試料には、検量線の作成に用いたJR-3とJB-3を用いる。ただしJB-3については、いくつかの元素がドリフト補正試料としては含有量が低くX線強度が不足しているため、試薬を添加し強度を補う必要がある。その元素と添加試薬を表2.3.5-1に示す。

ドリフト補正試料は、得られるX線強度が均一で長期的に安定であることが求められるため、ブリケットではなくガラスビードを用いる。ガラスビードは大気中で放置すると表面が潮解する可能性があるため、デシケータで保管する。ドリフト補正後のX線強度は、(6)式によって表される。

$$I_c = \alpha \cdot I \quad (6)$$

I_c : ドリフト補正後のX線強度

α : ドリフト補正係数

I : ドリフト補正前のX線強度

表 2.3.5-1 ドリフト補正試料 JB-3 の添加試薬

元素	添加試薬	添加量
Ba, S	関東化学 硫酸バリウム（鹿特級）	0.01 g
Cr	関東化学 クロム標準液 Cr-100（化学分析用）	6 ml
Ni	関東化学 ニッケル標準液 Ni-1000（化学分析用）	0.5 ml
Cl	和光純薬工業 塩化ナトリウム（特級）	0.01 g
F	和光純薬工業 フッ化カルシウム（特級）	0.01 g

3. 精度と正確度

3.1 精度

同一試料を繰り返し測定することによって求められる精度は、装置の測定再現性を示す。岩石標準試料 3 点 (JG-1, JA-2, JG-1a) を用いて 10 回繰り返し測定を行った。結果を付録表 A2-1～A2-3 に示す。これらの表には測定結果から得られる各統計量も合わせて示した。

3.2 検出限界値および定量下限値

X 線強度の変動はランダムな現象でその分布は正規分布である。つまりバックグラウンド強度を測定したとき、この強度も変動する。バックグラウンド強度の標準偏差の 3 倍以上のピーク強度が得られたとき、99.87%の信頼度で検出ができたと言える¹³⁾。検出限界値 (LLD) を求める際のバックグラウンド強度は、共存元素の干渉が無いブランク試料を用いて求めるのが望ましいが、測定線ごとに準備するのは困難であるため、実試料を用いる。ただし、分析線のピーク角度のバックグラウンド強度は特性 X 線の干渉を受け計測できないため、バックグラウンド角度のバックグラウンド強度を用いる。標準偏差は(2)式より求めた。バックグラウンド補正を行うネット強度で分析を行う場合は、標準偏差の算定の際、バックグラウンド角度の測定に伴う変動も考慮する必要がある。したがってピーク角度のバックグラウンドの標準偏差は、ピーク、バックグラウンドの各測定に対する標準偏差から(7)式を用いて求める。この標準偏差の 3 倍値に検量線定数 (傾き) を乗じて検出限界値を求める。また、検出限界値にさらに 3 倍乗じたものが定量下限値 (LLQ) となる¹³⁾。それぞれは、次式によって表される。表 3.2-1 に検量線作成時 (2.3.4 項参照) の X 線強度を用いて求めた検出限界および定量下限を示す。

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_{PB}^2 + \sigma_{B1}^2 + \cdots + \sigma_{Bn}^2} \quad (7)$$

$$\text{検出限界 (LLD)} = a \cdot K \cdot \sigma_B \quad (8)$$

$$\text{定量下限 (LLQ)} = 3 \cdot \text{LLD} \quad (9)$$

a	: 検量線定数
K	: $K=3$ (3σ の信頼度)
σ_B	: バックグラウンド強度の標準偏差
σ_{PB}	: 分析線のピーク角度におけるバックグラウンド標準偏差
σ_{B1}, σ_{Bn}	: バックグラウンド角度におけるバックグラウンド標準偏差

表 3.2-1 検出限界および定量下限の評価

Element	BG /kcps	slope	Peak /s	BG1 /s	BG2 /s	Stdev Peak	Stdev BG1	Stdev BG2	LLD	LLQ
(mass%)										
SiO ₂	1.52	0.0589	40	10		0.0062	0.012		0.0024	0.0073
TiO ₂	0.233	0.0312	20	10		0.0034	0.0048		0.00055	0.0017
Al ₂ O ₃	0.768	0.0547	40	10		0.0044	0.0088		0.0016	0.0048
T-Fe ₂ O ₃	7.16	0.00371	20	10		0.019	0.027		0.00036	0.0011
MnO	0.871	0.00512	20	10		0.0066	0.0093		0.00018	0.00053
MgO	0.499	0.144	40	10		0.0035	0.0071		0.0034	0.010
CaO	0.868	0.00950	40	10		0.0047	0.0093		0.00030	0.00089
Na ₂ O	0.144	0.429	40	10		0.0019	0.0038		0.0055	0.016
K ₂ O	0.585	0.00823	40	10		0.0038	0.0076		0.00021	0.00063
P ₂ O ₅	0.229	0.0213	40	10		0.0024	0.0048		0.00034	0.0010
(ppm)										
Ba	0.0220	2912	200	100		0.00033	0.00047		5.0	15
Ce	0.0331	1254	200	100		0.00041	0.00057		2.6	7.9
Cl	0.0264	5430	200	100		0.00036	0.00051		10	31
Co	0.251	46.2	200	100	100	0.0011	0.0016	0.0016	0.35	1.04
Cr	0.0363	208	200	100		0.00043	0.00060		0.46	1.38
F	0.0236	211967	400	200		0.00024	0.00034		268	803
Ga	0.0549	42.1	200	100		0.00052	0.00074		0.11	0.34
Nb	1.66	8.45	100	50		0.0041	0.0058		0.18	0.54
Ni	0.300	23.2	200	100	100	0.0012	0.0017	0.0017	0.19	0.57
Pb	0.0930	70.9	200	100	100	0.00068	0.00096	0.0010	0.32	0.97
Rb	0.244	18.3	200	100	100	0.0011	0.0016	0.0016	0.14	0.41
S	0.242	91.0	200	100	100	0.0011	0.0016	0.0016	0.67	2.0
Sc	0.0254	322	200	100		0.00036	0.00050		0.60	1.8
Sr	0.695	14.7	100	50	50	0.0026	0.0037	0.0037	0.26	0.78
Th	0.142	44.2	200	100		0.00084	0.0012		0.19	0.58
U	0.256	43.2	200	100		0.0011	0.0016		0.25	0.76
V	0.0365	526	200	100		0.00043	0.00060		1.2	3.5
Y	1.10	11.9	100	50	50	0.0033	0.0047	0.0047	0.27	0.80
Zr	1.24	9.26	100	50	50	0.0035	0.0050	0.0050	0.22	0.66

slope : 検量線の傾き, Peak/s : ピーク強度の測定時間, BG1/s および BG2/s : バックグラウンド強度測定時間, Stdev Peak : 分析線のピーク角度におけるバックグラウンド標準偏差, Stdev BG1 および Stdev BG2 : バックグラウンド角度におけるバックグラウンド標準偏差, LLD : 検出限界, LLQ : 定量下限

3.3 正確度

正確度は、真値からのずれを表す尺度で、一般に標準分析値（化学分析値）と X 線分析値の差から算出される標準偏差で定義される¹³⁾。ここでは、標準分析値（化学分析値）の代わりに岩石標準試料の標準値を使用する。岩石標準試料の標準値は、2 章で記した通り、吸着水を除いた値に換算した値である。本法で作成した検量線を用いて岩石標準試料全点を定量分析し、(10)式から正確度を算出した。図 3.3-1 および付録表 A3 に結果を示す。

$$\text{正確度} = \sqrt{\frac{\sum (C_i - W_i)^2}{n}} \quad (10)$$

C_i : 標準値

W_i : X 線分析による定量値

n : サンプル個数

F については検出感度が低いため、融剤によって希釈されるガラスビード法では他の元素に比べて測定値のばらつきが大きく、その正確度は 240 ppm となる。したがって、F をガラスビード法で測定する際には、この点に留意して測定値を取り扱う必要がある。F のような低感度元素を測定するには、試料の希釈を必要としない粉末試料を加圧形成するブリケット法について検討する必要がある。

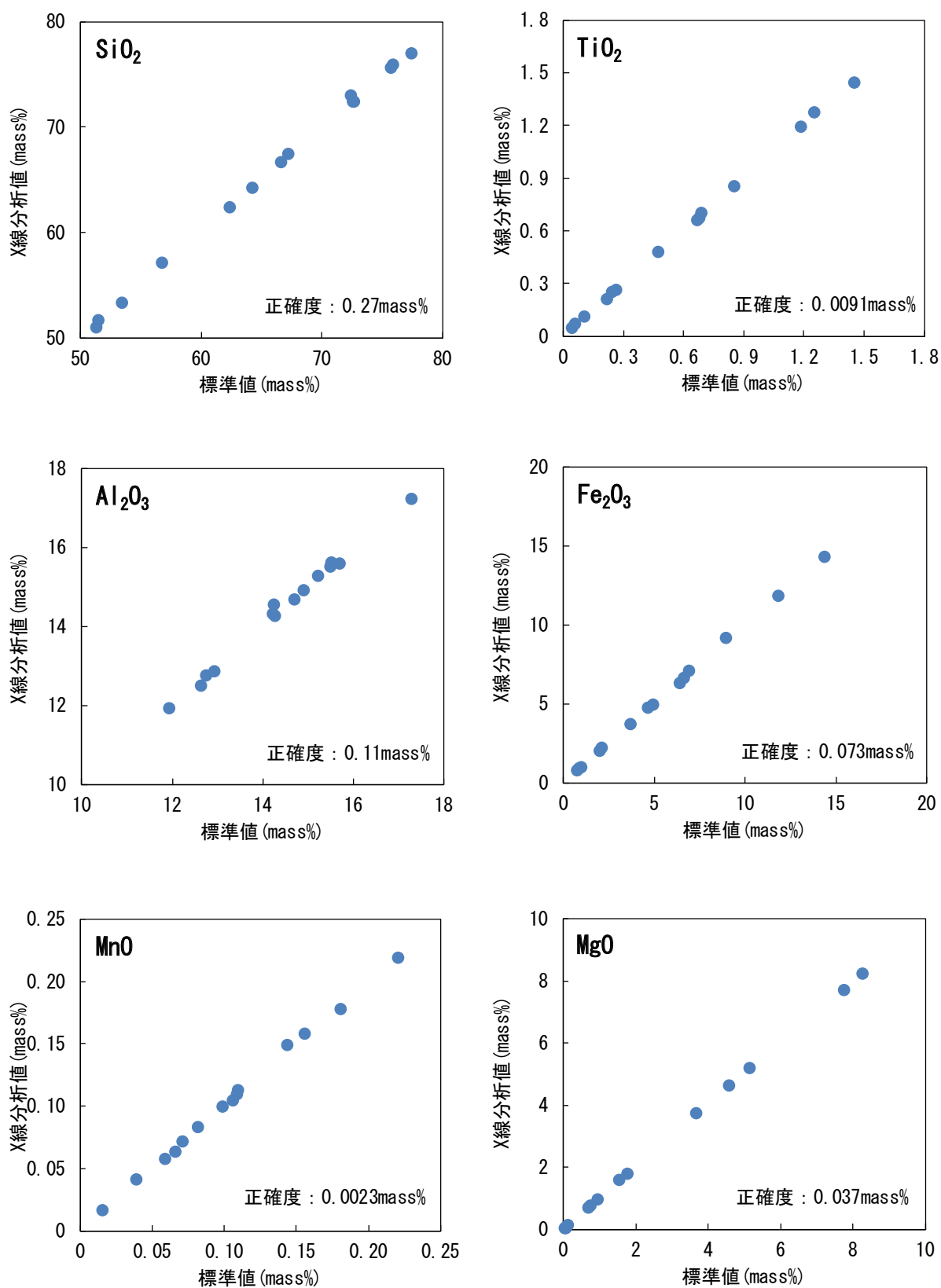


図 3.3-1 主要元素および微量元素の正確度 (1/5)

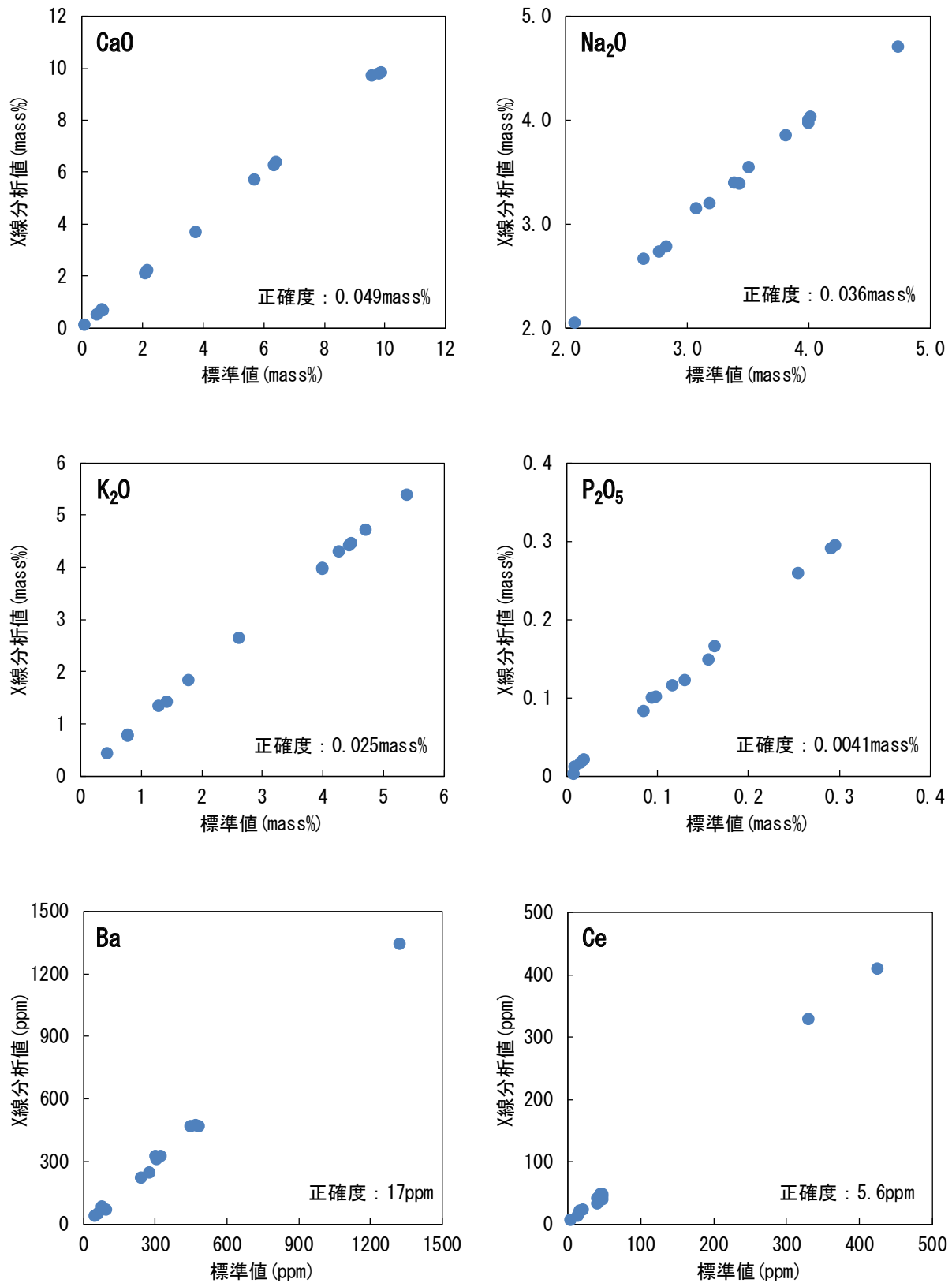


図 3.3-1 主要元素および微量元素の正確度 (2/5)

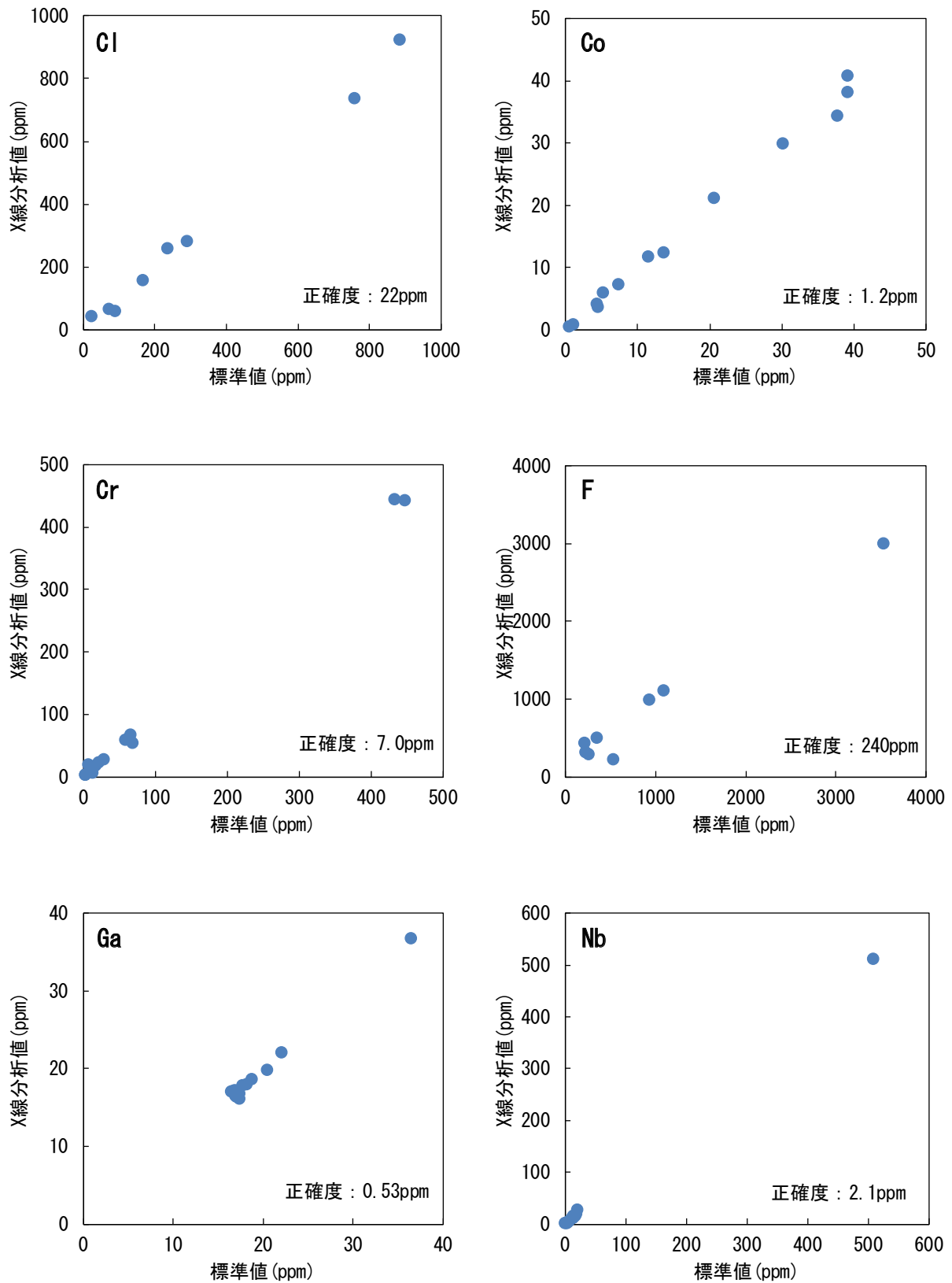


図 3.3-1 主要元素および微量元素の正確度 (3/5)

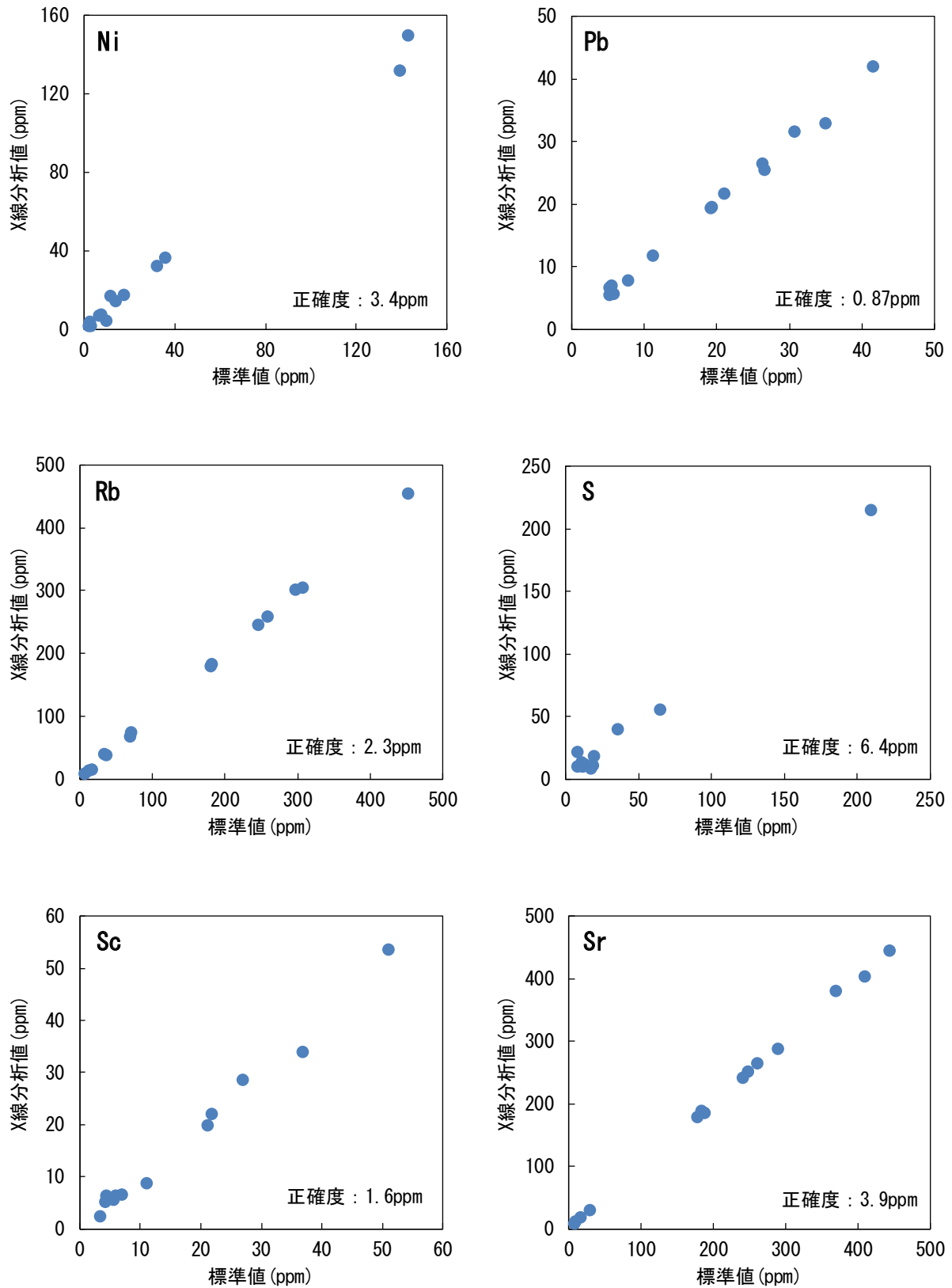


図 3.3-1 主要元素および微量元素の正確度 (4/5)

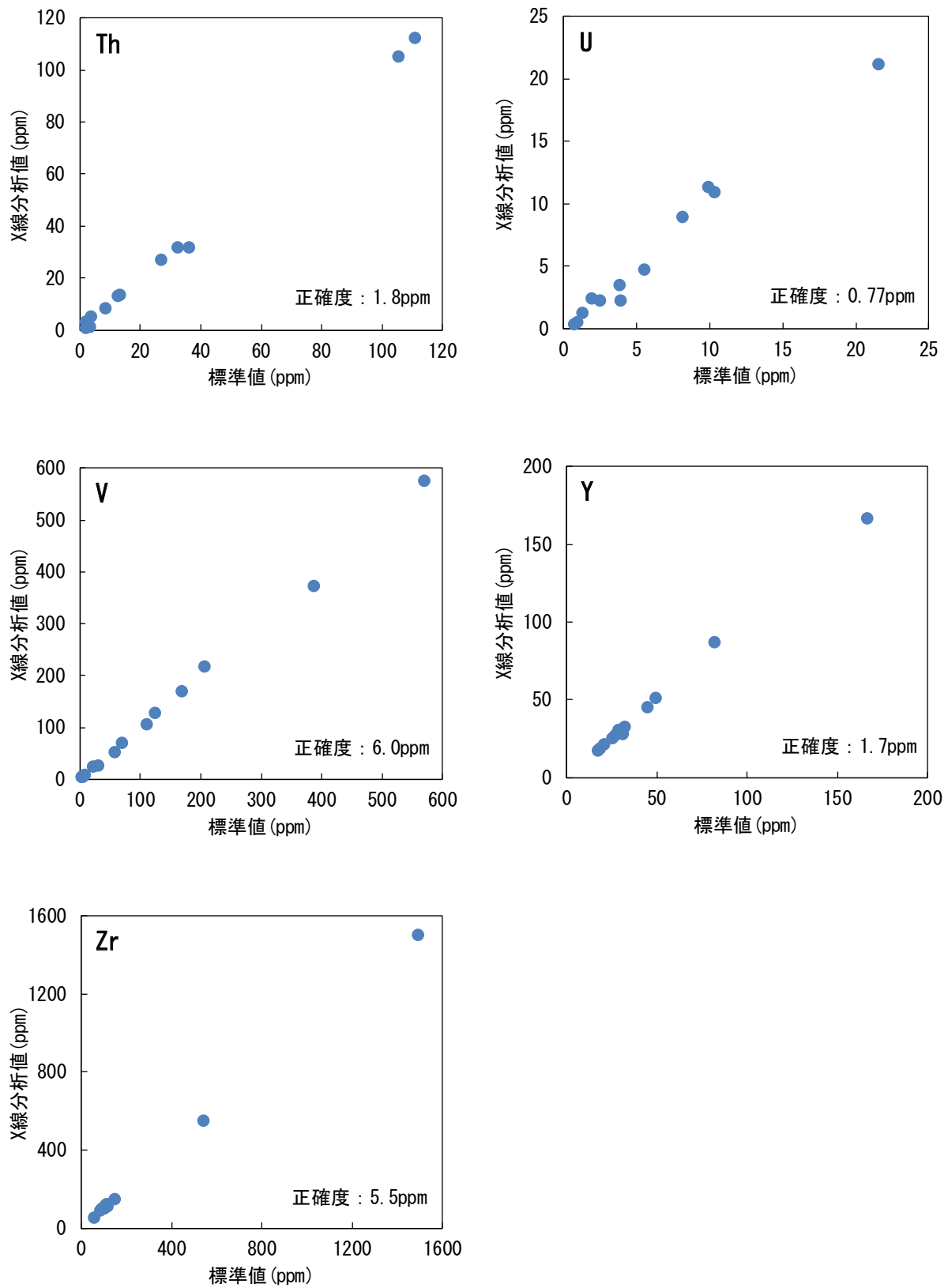


図 3.3-1 主要元素および微量元素の正確度 (5/5)

謝 辞

株式会社リガクの本間 寿博士には、前処理（ガラスビード作製）から測定条件の検討（検量線作成）、分析精度の評価までご指導いただくとともに、本稿の作成にあたり有益なコメントをいただいた。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 末岡茂・梅田浩司・安江健一・丹羽正和・島田耕史・石丸恒存・檀原 徹・岩野英樹・八木公史, 複数の熱年代学的手法に基づいた江若花崗岩敦賀岩体の冷却・剝削史, 地学雑誌, Vol.125, 2016, pp.201-219.
- 2) Niwa, M., Mizuochi, Y., Tanase, A., Changes in chemical composition caused by water–rock interactions across a strike-slip fault zone: case study of the Atera Fault, Central Japan, *Geofluids*, Vol.15, 2015, pp.387-409.
- 3) 隅田祥光・奥平敬元・古山勝彦, 低希釈ガラスビード法による蛍光 X 線分析装置 (RIX-2100) を用いた珪酸塩岩石中の主成分, 微量成分の定量分析, *Magma*, No.92, 2010, pp.21-39.
- 4) 本吉洋一・白石和行, 蛍光 X 線分析装置による岩石の定量化学分析 : (1) 主要元素, 南極資料, Vol.39, No.1, 1995, pp.40-48.
- 5) Kimura, J., Yamada, Y., Evaluation of major and trace element XRF analyses using a flux to sample ratio of two to one glass beads, *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, Vol.91, No.2, 1996, pp.62-72.
- 6) 山田康次郎・河野久征・村田守, 低希釈率ガラスビード法による岩石の主成分と微量成分分析, X 線分析の進歩, Vol.26, 1994, pp.33-44.
- 7) Imai, N., Terashima, S., Itoh, S., Ando, A., 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, “Igneous rock series”, *Geostandards Newsletter*, Vol.19, 1995, pp.135-213.
- 8) Imai, N., Terashima, S., Itoh, S., Ando, A., 1998 compilation of analytical data for five GSJ geochemical reference samples: the “Instrumental analysis series”, *Geostandards Newsletter*, Vol.23, 1999, pp.223-250.
- 9) Terashima, S., Taniguchi, M., Mikoshiba, M., Imai, N., Preparation of two new GSJ geochemical reference materials: basalt JB-1b and coal fly ash JCFA-1, *Geostandards Newsletter*, Vol.22, 1998, pp.113-117.
- 10) Wilson, S.A., Data compilation for USGS reference material GSP-2, Granodiorite, Silver Plume, Colorado, US Geological Survey Open-File Report, 1998.
- 11) 中井泉, 蛍光 X 線分析の実際, 朝倉書店, 2005, p.216.
- 12) 株式会社リガク, 蛍光 X 線分析装置 ZSX Primus シリーズ取扱説明書.
- 13) 株式会社リガク, 蛍光 X 線分析の手引, 2008.

付録表 A1-1 岩石標準試料 JG-2 の測定強度 (1/2)

測定回数	単位 : kcps														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Ce	Cl	Co	Cr
1	713.55489	0.67565	137.50474	87.37923	1.91766	0.75955	24.05340	5.97192	202.93928	0.26455	0.03361	0.03702	0.03223	0.29291	0.05518
2	713.77849	0.66784	137.53838	87.29980	1.90538	0.75920	24.10537	5.96160	202.74687	0.26050	0.03376	0.03743	0.03142	0.29391	0.05459
3	713.34687	0.67239	137.42680	87.40407	1.94039	0.75027	24.07641	5.95355	202.77409	0.26648	0.03356	0.03762	0.03165	0.29072	0.05494
4	713.38955	0.68100	137.29648	87.18493	1.90363	0.76368	24.07177	5.97261	202.75318	0.26320	0.03282	0.03684	0.03182	0.29173	0.05503
5	712.97618	0.68110	137.30149	87.43732	1.90771	0.76098	24.06476	5.94049	202.85907	0.25957	0.03345	0.03684	0.03142	0.29355	0.05480
6	713.37598	0.68095	137.23226	87.36153	1.91504	0.75885	24.01217	5.98623	202.65931	0.25995	0.03362	0.03746	0.03167	0.29492	0.05531
7	713.00450	0.66859	137.29379	87.40498	1.91421	0.76038	24.02592	5.96968	202.67079	0.26683	0.03422	0.03771	0.03129	0.29596	0.05446
8	713.29391	0.67659	137.41194	87.33059	1.91611	0.75680	24.02008	5.97605	202.67727	0.26966	0.03254	0.03696	0.03168	0.29134	0.05519
9	713.05455	0.67294	137.42424	87.19120	1.91615	0.75745	24.04166	5.95692	202.70093	0.25970	0.03258	0.03751	0.03187	0.29417	0.05671
10	713.42789	0.67930	137.37499	87.33611	1.90628	0.75780	24.05397	5.96843	202.65732	0.26508	0.03270	0.03709	0.03215	0.29205	0.05501
平均強度(kcps)															
測定時間(s)	40	20	40	20	20	40	40	40	40	40	200	200	200	200	200
	O _{cal}	0.13	0.0058	0.059	0.066	0.010	0.0044	0.025	0.012	0.071	0.0026	0.00041	0.00043	0.00040	0.0012
O _{obs}	0.25	0.0050	0.099	0.086	0.011	0.0035	0.029	0.013	0.094	0.0035	0.00058	0.00033	0.00031	0.0017	0.00062
O _{obs} /O _{cal}	1.9	0.87	1.7	1.3	1.1	0.80	1.2	1.1	1.3	1.4	1.4	0.77	0.77	1.4	1.2

付録表 A1-1 岩石標準試料 JG-2 の測定強度 (2/2)

単位 : kcps														
測定回数	F	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zr
1	0.02188	0.17167	3.42446	0.47192	0.28531	4.90125	0.40371	0.02251	0.97929	0.51251	0.52948	0.03910	4.17540	4.89418
2	0.02192	0.16937	3.41796	0.47180	0.28413	4.90187	0.40498	0.02333	0.98400	0.51382	0.53263	0.03890	4.18060	4.90262
3	0.02171	0.17277	3.42249	0.47150	0.28551	4.91220	0.40603	0.02272	0.98044	0.51682	0.53430	0.03789	4.17745	4.90429
4	0.02204	0.17096	3.43074	0.47504	0.28558	4.90441	0.40506	0.02297	0.98008	0.51636	0.53278	0.03934	4.18803	4.88705
5	0.02180	0.17204	3.42739	0.47154	0.28497	4.89925	0.40553	0.02298	0.98046	0.51300	0.53123	0.03878	4.18312	4.89864
6	0.02174	0.17189	3.43308	0.47352	0.28293	4.91102	0.40776	0.02245	0.97836	0.51576	0.53277	0.03868	4.18086	4.89343
7	0.02144	0.17201	3.42675	0.47397	0.28671	4.90445	0.40763	0.02321	0.98379	0.51366	0.53157	0.03834	4.17185	4.88532
8	0.02161	0.17273	3.42182	0.47360	0.28398	4.90876	0.40649	0.02279	0.97863	0.51239	0.53016	0.03799	4.18767	4.89170
9	0.02159	0.17085	3.41431	0.46902	0.28517	4.91606	0.41045	0.02370	0.98451	0.51602	0.53445	0.03958	4.17237	4.90312
10	0.02192	0.17196	3.42757	0.47247	0.28624	4.91285	0.40863	0.02259	0.98370	0.51505	0.53299	0.03864	4.19452	4.87029
平均強度(kcps)														
	0.02177	0.17163	3.42466	0.47244	0.28505	4.90721	0.40663	0.02293	0.98133	0.51454	0.53224	0.03872	4.18119	4.89306
測定時間(s)														
	400	200	100	200	200	200	200	200	100	200	200	200	100	100
σ _{cal}														
	0.00023	0.00093	0.0059	0.0015	0.0012	0.0050	0.0014	0.00034	0.0031	0.0016	0.0016	0.00044	0.0065	0.0070
σ _{obs}														
	0.00018	0.0010	0.0057	0.0017	0.0011	0.0057	0.0020	0.00040	0.0024	0.0017	0.0016	0.00055	0.0073	0.010
σ _{obs} /σ _{cal}														
	0.79	1.1	1.0	1.1	0.94	1.2	1.4	1.2	0.77	1.0	1.0	1.2	1.1	1.5

付録表 A1-2 岩石標準試料 JA-1 の測定強度 (1/2)

測定回数	単位 : kcps														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Ce	Cl	Co	Cr
1	572.27576	8.68128	160.87954	521.56627	9.52881	7.18183	212.86235	6.39347	34.63432	3.10407	0.05851	0.03137	0.02920	0.77828	0.05645
2	571.79220	8.62271	160.71373	521.41656	9.55985	7.16528	212.91938	6.34390	34.61378	3.11647	0.05834	0.03219	0.02956	0.77571	0.05696
3	572.06616	8.65446	160.81700	521.30383	9.55807	7.20697	212.77395	6.36622	34.63448	3.10932	0.05843	0.03202	0.02896	0.77907	0.05666
4	572.04736	8.64263	160.61285	520.97143	9.56080	7.17712	212.76976	6.35582	34.61009	3.11792	0.05772	0.03218	0.02896	0.77934	0.05661
5	571.70977	8.63841	160.53897	520.89150	9.53369	7.18223	212.75808	6.37503	34.62409	3.11561	0.05821	0.03129	0.02881	0.77602	0.05629
6	571.68424	8.61939	160.68483	521.03073	9.55164	7.16921	212.90783	6.36530	34.61009	3.09258	0.05780	0.03132	0.02878	0.77827	0.05623
7	571.88111	8.64729	160.57234	521.07699	9.58295	7.18121	212.80797	6.37383	34.58810	3.12140	0.05806	0.03155	0.02934	0.78232	0.05579
8	571.43784	8.63777	160.55135	520.98929	9.51907	7.19641	212.88122	6.36787	34.53690	3.10677	0.05912	0.03125	0.02927	0.77649	0.05561
9	571.61165	8.63133	160.51550	521.39358	9.57180	7.19463	212.78580	6.38356	34.62643	3.09617	0.05982	0.03115	0.02897	0.78013	0.05620
10	571.75223	8.64221	160.69716	520.92952	9.51218	7.20126	212.79447	6.38949	34.60299	3.10155	0.05900	0.03158	0.02922	0.77940	0.05661
平均強度(kcps)															
測定時間(s)															
O _{cal}	40	20	40	20	20	40	40	40	40	40	200	200	200	200	200
O _{obs}	0.12	0.021	0.063	0.16	0.022	0.013	0.073	0.013	0.029	0.0088	0.00054	0.00040	0.00038	0.0020	0.00053
O _{obs}	0.25	0.017	0.12	0.24	0.023	0.014	0.061	0.015	0.029	0.010	0.00065	0.00040	0.00025	0.0020	0.00041
O _{obs} /O _{cal}	2.1	0.84	1.9	1.5	1.1	1.0	0.83	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0	0.66	1.0	0.77

付録表 A1-2 岩石標準試料 JA-1 の測定強度 (2/2)

単位 : kcps														
測定回数	F	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zr
1	0.02060	0.13803	2.44598	0.34538	0.13658	0.44142	0.52600	0.05349	4.48328	0.20850	0.36622	0.15959	1.48908	3.67321
2	0.02076	0.13774	2.45191	0.34708	0.13784	0.43863	0.52774	0.05324	4.49105	0.20738	0.36645	0.16043	1.49446	3.67278
3	0.02064	0.13888	2.44387	0.34799	0.13596	0.44191	0.52830	0.05215	4.49472	0.21013	0.36676	0.16103	1.49188	3.66657
4	0.02063	0.13794	2.44474	0.34808	0.13707	0.44363	0.52930	0.05202	4.49099	0.21082	0.36494	0.16149	1.48358	3.67355
5	0.02041	0.13872	2.45486	0.34956	0.13662	0.44184	0.52995	0.05206	4.48883	0.20858	0.36368	0.16049	1.49043	3.66347
6	0.02046	0.13796	2.45080	0.34787	0.13805	0.44298	0.53216	0.05129	4.48751	0.20829	0.36633	0.16071	1.49084	3.67154
7	0.02048	0.13869	2.45176	0.34814	0.13522	0.44399	0.53114	0.05205	4.49298	0.21126	0.36499	0.16077	1.49857	3.67697
8	0.02081	0.13893	2.44506	0.34720	0.13618	0.44115	0.53053	0.05186	4.48661	0.20963	0.36493	0.16126	1.48839	3.67603
9	0.02094	0.13742	2.44555	0.34679	0.13583	0.44257	0.53186	0.05197	4.49322	0.20774	0.36623	0.15908	1.49711	3.65724
10	0.02052	0.13743	2.44897	0.34794	0.13704	0.44475	0.52975	0.05173	4.50246	0.20950	0.36732	0.16026	1.48760	3.68399
平均強度(kcps)														
	0.02063	0.13817	2.44835	0.34760	0.13664	0.44229	0.52967	0.05219	4.49117	0.20918	0.36579	0.16051	1.49119	3.67154
測定時間(s)														
	400	200	100	200	200	200	200	200	100	200	200	200	100	100
σ_{cal}	0.00023	0.00083	0.0049	0.0013	0.00083	0.0015	0.0016	0.00051	0.0067	0.0010	0.0014	0.00090	0.0039	0.0061
σ_{obs}	0.00017	0.00058	0.0038	0.0011	0.00089	0.0017	0.0019	0.00067	0.0053	0.0013	0.0011	0.00073	0.0045	0.0075
$\sigma_{\text{obs}}/\sigma_{\text{cal}}$	0.75	0.70	0.77	0.83	1.1	1.2	1.2	1.3	0.79	1.3	0.82	0.82	1.2	1.2

付録表 A1-3 岩石標準試料 JB-2 の測定強度 (1/2)

測定回数	単位 : kcps														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Ce	Cl	Co	Cr
1	457.82154	11.39187	147.95125	969.69598	12.08694	19.65020	372.96361	3.36182	19.39667	1.92171	0.04952	0.03220	0.04463	1.36557	0.10812
2	458.01646	11.40240	147.91111	968.96011	12.06133	19.60738	372.82563	3.36903	19.40545	1.90914	0.04959	0.03225	0.04491	1.36488	0.10905
3	458.02444	11.42879	147.94925	969.15617	12.10817	19.66764	373.05352	3.36452	19.43738	1.90389	0.04976	0.03250	0.04415	1.36668	0.10967
4	458.00444	11.40513	148.08043	968.38364	12.08727	19.62062	373.10087	3.37394	19.42439	1.91540	0.05025	0.03166	0.04526	1.36473	0.10831
5	458.14007	11.37096	148.15495	968.90529	12.09134	19.63276	373.40662	3.36771	19.40612	1.91194	0.04879	0.03265	0.04395	1.36040	0.10987
6	458.08017	11.38776	148.11865	968.84953	12.02955	19.63397	373.14468	3.35966	19.39548	1.92719	0.04792	0.03243	0.04474	1.36389	0.10936
7	457.87131	11.37035	148.02233	969.16527	12.04720	19.67050	373.10859	3.37181	19.43722	1.90432	0.04904	0.03265	0.04470	1.36236	0.10923
8	458.12900	11.38234	148.01130	968.65687	12.06694	19.61218	373.23299	3.36319	19.41523	1.90185	0.04913	0.03208	0.04526	1.36462	0.10975
9	458.13328	11.39388	148.13861	967.96461	12.04354	19.65046	373.11768	3.36164	19.42881	1.91786	0.04983	0.03231	0.04458	1.36909	0.10969
10	457.72819	11.46573	148.00124	968.62959	12.07475	19.67778	373.15492	3.36575	19.41970	1.90166	0.04881	0.03288	0.04447	1.36299	0.10905
平均強度(kcps)															
測定時間(s)															
σ _{cal}	0.11	0.024	0.061	0.22	0.025	0.022	0.097	0.0092	0.022	0.0069	0.00050	0.00040	0.00047	0.0026	0.00074
σ _{obs}	0.14	0.029	0.085	0.47	0.025	0.025	0.15	0.0047	0.015	0.0089	0.00067	0.00035	0.00042	0.0024	0.00060
σ _{obs} /σ _{cal}	1.3	1.2	1.4	2.1	1.0	1.1	1.6	0.51	0.70	1.3	1.3	0.86	0.89	0.91	0.81

付録表 A1-3 岩石標準試料 JB-2 の測定強度 (2/2)

測定回数	単位 : kcps										
	F	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	Zr
1	0.02402	0.11167	1.92944	0.36564	0.10753	0.29597	0.44305	0.08085	2.52566	0.16110	2.19105
2	0.02405	0.11177	1.93164	0.36716	0.10726	0.29805	0.44291	0.08082	2.52985	0.16142	2.18445
3	0.02400	0.11143	1.93115	0.37010	0.10667	0.29850	0.44293	0.08177	2.53563	0.16072	2.18859
4	0.02392	0.11082	1.93363	0.36615	0.10807	0.29539	0.44588	0.08152	2.52432	0.16097	2.17805
5	0.02368	0.10994	1.93446	0.36832	0.10869	0.29578	0.44730	0.08089	2.52025	0.16081	2.18778
6	0.02376	0.11063	1.93748	0.36894	0.10849	0.29570	0.44304	0.08057	2.53429	0.16027	2.19607
7	0.02352	0.11166	1.94463	0.37013	0.10759	0.29612	0.44556	0.08091	2.51864	0.16151	2.18237
8	0.02344	0.11136	1.93360	0.36780	0.10741	0.29545	0.44318	0.08183	2.52202	0.16093	2.19140
9	0.02392	0.10998	1.93733	0.36905	0.10754	0.29523	0.44410	0.08101	2.52717	0.16013	2.18528
10	0.02378	0.11092	1.93238	0.36723	0.10716	0.29671	0.44402	0.07994	2.52622	0.16143	2.20154
平均強度(kcps)											
	0.02381	0.11102	1.93457	0.36805	0.10764	0.29629	0.44420	0.08101	2.52641	0.16093	2.18866
測定時間(s)											
	400	200	100	200	200	200	200	200	100	200	100
σ_{cal}	0.00024	0.00075	0.0044	0.0014	0.00073	0.0012	0.0015	0.00064	0.0050	0.00090	0.0047
σ_{obs}	0.00021	0.00068	0.0044	0.0015	0.00061	0.0011	0.0015	0.00057	0.0056	0.00047	0.0068
$\sigma_{obs}/\sigma_{cal}$	0.87	0.91	1.0	1.1	0.84	0.93	1.0	0.9	1.1	0.52	1.5

付録表 A2-1 岩石標準試料 JG-1 の定量分析結果 (1/2)

測定回数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Ce	Cl	Co	Cr
	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	72.8	0.265	14.3	2.15	0.065	0.762	2.18	3.45	4.01	0.094	475	42.3	103	3.85	70.5
2	72.7	0.264	14.3	2.14	0.066	0.759	2.18	3.45	4.01	0.094	477	49.8	88.6	3.27	69.6
3	72.8	0.264	14.3	2.14	0.066	0.760	2.18	3.46	4.01	0.093	481	49.1	69.2	4.22	68.0
4	72.7	0.264	14.3	2.15	0.065	0.755	2.18	3.43	4.01	0.093	475	46.0	94.7	4.45	69.7
5	72.7	0.264	14.3	2.14	0.065	0.756	2.18	3.46	4.00	0.093	473	40.9	64.7	4.09	70.6
6	72.7	0.265	14.3	2.14	0.065	0.756	2.18	3.44	4.01	0.094	475	48.7	83.9	3.66	69.9
7	72.7	0.264	14.3	2.14	0.065	0.763	2.18	3.43	4.00	0.094	472	41.9	81.7	4.24	68.2
8	72.7	0.266	14.3	2.14	0.065	0.754	2.18	3.43	4.00	0.094	478	54.5	70.9	4.27	68.6
9	72.7	0.263	14.3	2.14	0.065	0.759	2.18	3.45	4.01	0.094	470	49.7	74.9	4.11	68.2
10	72.7	0.266	14.3	2.14	0.065	0.756	2.18	3.44	4.01	0.092	473	45.7	85.9	3.67	70.5
平均	72.7	0.265	14.3	2.14	0.065	0.758	2.18	3.44	4.01	0.094	474.7	46.9	81.8	3.98	69.4
最大	72.8	0.266	14.3	2.15	0.066	0.763	2.18	3.46	4.01	0.094	480.5	54.5	103	4.45	70.6
最小	72.7	0.263	14.3	2.14	0.065	0.754	2.18	3.43	4.00	0.092	469.8	40.9	64.7	3.27	68.0
範囲	72.7~	0.263~	14.3~	2.14~	0.065~	0.754~	2.18~	3.43~	4.00~	0.092~	470~	40.9~	64.7~	3.27~	68.0~
	72.8	0.266	14.3	2.15	0.066	0.763	2.18	3.46	4.01	0.094	481	54.5	103	4.45	70.6
標準偏差	0.041	0.0010	0.011	0.0021	0.00042	0.0031	0.0013	0.012	0.0028	0.00071	3.2	4.3	12	0.36	1.0
変動係数	0.056%	0.37%	0.077%	0.10%	0.65%	0.40%	0.058%	0.35%	0.069%	0.76%	0.68%	9.2%	15%	9.1%	1.5%

付録表 A2-1 岩石標準試料 JG-1 の定量分析結果 (2/2)

測定回数	F	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	573	17.3	14.2	7.94	26.1	183	19.8	7.91	189	13.1	3.77	30.4	32.0	119
2	573	17.1	14.3	7.94	26.0	183	19.4	8.75	189	12.5	2.97	28.6	31.6	119
3	701	17.0	13.8	7.67	26.1	182	20.8	6.50	189	13.1	4.15	27.8	31.5	119
4	775	16.9	14.1	8.34	25.9	182	20.2	7.41	189	13.8	3.43	28.5	31.5	119
5	933	17.2	13.6	8.06	27.2	183	19.8	7.05	190	13.5	3.28	25.5	31.5	118
6	843	16.9	13.7	7.83	26.5	182	21.2	7.50	189	13.6	3.24	25.4	32.1	119
7	588	17.3	13.2	7.98	26.6	182	19.8	7.38	189	13.0	4.15	26.5	31.3	119
8	691	17.5	13.0	7.97	25.8	182	21.3	8.06	189	12.9	3.67	25.4	31.8	119
9	753	17.4	13.3	7.91	26.0	182	20.5	7.38	189	13.4	3.37	30.0	31.4	119
10	648	17.2	13.3	7.96	25.7	181	21.0	8.10	189	13.6	3.59	27.2	31.5	118
平均	707.7	17.2	13.6	8.0	26.2	182	20.4	7.60	189	13.2	3.56	27.5	31.6	119
最大	933.3	17.5	14.3	8.3	27.2	183	21.3	8.75	190	13.8	4.15	30.4	32.1	119
最小	572.6	16.9	13.0	7.7	25.7	181	19.4	6.50	189	12.5	2.97	25.4	31.3	118
範囲	573~ 933	16.9~ 17.5	13.0~ 14.3	7.67~ 8.34	25.7~ 27.2	181~ 183	19.4~ 21.3	6.50~ 8.75	189~ 190	12.5~ 13.8	2.97~ 4.15	25.4~ 30.4	31.3~ 32.1	118~ 119
標準偏差	120	0.20	0.45	0.17	0.47	0.42	0.65	0.63	0.30	0.40	0.38	1.9	0.26	0.21
変動係数	17%	1.2%	3.3%	2.1%	1.8%	0.23%	3.2%	8.3%	0.16%	3.0%	11%	6.8%	0.81%	0.18%

付録表 A2-2 岩石標準試料 JA-2 の定量分析結果 (1/2)

測定回数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Ce	Cl	Co	Cr
	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	56.9	0.682	15.5	6.42	0.109	7.76	6.41	3.09	1.79	0.155	312	27.4	—	29.8	443
2	56.8	0.680	15.5	6.43	0.109	7.76	6.41	3.10	1.79	0.155	312	35.3	—	29.1	443
3	56.9	0.680	15.6	6.43	0.109	7.75	6.41	3.10	1.79	0.156	315	28.9	—	29.3	442
4	56.8	0.682	15.5	6.43	0.110	7.75	6.41	3.09	1.79	0.156	305	28.9	—	29.2	441
5	56.8	0.679	15.5	6.42	0.110	7.76	6.41	3.09	1.79	0.154	311	24.0	—	29.3	443
6	56.9	0.681	15.6	6.43	0.109	7.76	6.41	3.11	1.79	0.156	307	27.0	—	29.5	444
7	56.8	0.680	15.5	6.43	0.111	7.76	6.41	3.10	1.79	0.155	307	29.1	—	28.3	443
8	56.8	0.679	15.6	6.43	0.109	7.77	6.41	3.09	1.79	0.155	312	31.9	—	30.4	441
9	56.8	0.684	15.5	6.43	0.110	7.75	6.40	3.10	1.79	0.156	315	28.3	—	28.2	441
10	56.8	0.681	15.5	6.43	0.110	7.76	6.40	3.11	1.79	0.155	302	31.6	—	30.4	441
平均	56.8	0.681	15.5	6.43	0.110	7.76	6.41	3.10	1.79	0.155	310	29.3	—	29.4	442
最大	56.9	0.684	15.6	6.43	0.111	7.77	6.41	3.11	1.79	0.156	315	35.3	—	30.4	444
最小	56.8	0.679	15.5	6.42	0.109	7.75	6.40	3.09	1.79	0.154	302	24.0	—	28.2	441
範囲	56.8～ 56.9	0.679～ 0.684	15.5～ 15.6	6.42～ 6.43	0.109～ 0.111	7.75～ 7.77	6.40～ 6.41	3.09～ 3.11	1.79～ 1.79	0.154～ 0.156	302～ 315	24.0～ 35.3	—	28.2～ 30.4	441～ 444
標準偏差	0.024	0.0015	0.006	0.0037	0.00070	0.0066	0.0037	0.007	0.0015	0.00067	4.3	3.1	—	0.74	1.0
変動係数	0.042%	0.23%	0.036%	0.06%	0.64%	0.085%	0.058%	0.22%	0.083%	0.43%	1.4%	11%	—	2.5%	0.23%

付録表 A2-2 岩石標準試料 JA-2 の定量分析結果 (2/2)

測定回数	F	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	921	16.8	10.2	139	19.5	70.2	18.2	22.6	248	2.66	2.70	127	18.6	111
2	720	16.7	10.4	138	18.9	70.2	17.9	23.5	248	2.98	3.16	124	18.9	111
3	494	17.1	10.9	138	19.3	70.2	17.8	23.0	248	3.90	2.40	123	18.8	111
4	776	16.4	10.3	138	18.8	71.0	18.1	21.3	248	3.75	2.53	127	19.1	112
5	484	16.9	10.8	138	19.5	70.8	18.1	22.0	248	3.70	3.25	124	19.1	112
6	831	16.6	10.9	138	19.6	70.3	18.1	22.2	249	3.98	2.00	124	19.3	111
7	795	16.4	10.7	139	18.8	70.9	18.2	22.5	248	3.71	2.50	123	19.1	112
8	578	16.9	10.5	139	19.3	70.6	18.4	21.7	248	3.28	2.38	125	18.5	111
9	447	16.5	10.5	139	19.3	70.4	17.9	22.2	248	3.74	1.67	124	19.0	111
10	571	16.8	10.7	138	19.4	70.7	18.0	22.6	247	3.54	2.18	128	18.9	112
平均	662	16.7	10.6	138	19.2	70.5	18.1	22.4	248	3.52	2.48	125	19.0	111
最大	921	17.1	10.9	139	19.6	71.0	18.4	23.5	249	3.98	3.25	128	19.3	112
最小	447	16.4	10.2	138	18.8	70.2	17.8	21.3	247	2.66	1.67	123	18.5	111
範囲	447~ 921	16.4~ 17.1	10.2~ 10.9	138~ 139	18.8~ 19.6	70.2~ 71.0	17.8~ 18.4	21.3~ 23.5	247~ 249	2.66~ 3.98	1.67~ 3.25	123~ 128	18.5~ 19.3	111~ 112
標準偏差	167	0.24	0.24	0.42	0.30	0.30	0.18	0.61	0.38	0.42	0.48	1.8	0.25	0.23
変動係数	25%	1.4%	2.3%	0.31%	1.6%	0.43%	1.0%	2.7%	0.15%	12%	19%	1.5%	1.3%	0.21%

付録表 A2-3 岩石標準試料 JG-1a の定量分析結果 (1/2)

測定回数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ba	Ce	Cl	Co	Cr
	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	72.6	0.244	14.2	2.01	0.059	0.708	2.14	3.42	3.99	0.085	464	46.4	81.7	4.96	17.6
2	72.5	0.244	14.2	2.01	0.059	0.707	2.14	3.43	3.98	0.084	463	45.3	53.9	5.30	17.9
3	72.5	0.244	14.2	2.01	0.059	0.709	2.14	3.42	3.99	0.085	456	43.2	62.3	6.07	16.5
4	72.5	0.244	14.2	2.01	0.059	0.707	2.14	3.43	3.99	0.085	480	45.3	63.4	5.73	18.2
5	72.6	0.246	14.2	2.01	0.058	0.708	2.14	3.43	3.99	0.085	462	45.7	66.5	6.04	16.5
6	72.5	0.246	14.2	2.01	0.059	0.709	2.14	3.43	3.99	0.084	479	49.8	58.1	5.10	17.6
7	72.5	0.244	14.2	2.01	0.059	0.706	2.14	3.42	3.98	0.084	460	47.7	69.1	5.79	17.2
8	72.5	0.245	14.2	2.01	0.059	0.708	2.14	3.43	3.99	0.085	462	42.5	74.0	5.82	17.8
9	72.5	0.244	14.2	2.00	0.059	0.706	2.14	3.42	3.99	0.085	465	45.5	74.7	5.92	17.8
10	72.5	0.246	14.2	2.01	0.059	0.712	2.14	3.41	3.99	0.086	467	54.2	74.0	5.54	17.6
平均	72.5	0.245	14.2	2.01	0.059	0.708	2.14	3.42	3.99	0.085	466	46.6	67.8	5.63	17.5
最大	72.6	0.246	14.2	2.01	0.059	0.712	2.14	3.43	3.99	0.086	480	54.2	81.7	6.07	18.2
最小	72.5	0.244	14.2	2.00	0.058	0.706	2.14	3.41	3.98	0.084	456	42.5	53.9	4.96	16.5
範囲	72.5~	0.244~	14.2~	2.00~	0.058~	0.706~	2.14~	3.41~	3.98~	0.084~	456~	42.5~	53.9~	4.96~	16.5~
	72.6	0.246	14.2	2.01	0.059	0.712	2.14	3.43	3.99	0.086	480	54.2	81.7	6.07	18.2
標準偏差	0.048	0.0009	0.012	0.0020	0.00032	0.0018	0.0021	0.0069	0.0030	0.00063	7.7	3.4	8.5	0.39	0.59
変動係数	0.067%	0.339%	0.081%	0.10%	0.54%	0.25%	0.099%	0.20%	0.076%	0.75%	1.6%	7.2%	13%	6.9%	3.4%

付録表 A2-3 岩石標準試料 JG-1a の定量分析結果 (2/2)

測定回数	F	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	320	17.4	13.5	6.96	26.2	180	11.3	7.13	185	13.1	5.48	24.5	32.8	120
2	232	16.9	12.8	6.56	26.8	180	11.9	7.12	185	12.2	4.58	24.8	33.1	119
3	96.4	16.6	13.0	6.82	26.6	180	12.1	7.10	185	12.4	5.06	24.7	33.0	120
4	99.1	16.7	12.8	6.64	26.8	181	11.9	6.94	184	12.1	4.77	22.7	32.8	120
5	224	16.8	13.0	7.22	25.7	181	12.0	7.77	186	12.7	4.60	24.3	33.0	120
6	316	17.0	12.9	6.85	25.5	180	11.9	6.59	185	12.7	4.85	22.1	32.4	120
7	93.9	17.0	13.0	6.91	26.4	180	12.7	6.83	185	13.0	4.75	24.3	32.6	119
8	126	17.0	13.7	6.77	26.5	180	12.8	6.20	185	13.0	5.11	26.3	33.1	120
9	75.7	16.8	13.4	7.06	25.7	180	12.4	7.84	185	11.9	5.65	25.5	32.8	120
10	196	17.2	13.2	6.94	26.0	181	12.0	7.00	185	13.0	4.64	22.7	32.7	120
平均	178	17.0	13.1	6.87	26.2	180	12.1	7.05	185	12.6	4.95	24.2	32.8	120
最大	320	17.4	13.7	7.22	26.8	181	12.8	7.84	186	13.1	5.65	26.3	33.1	120
最小	75.7	16.6	12.8	6.56	25.5	180	11.3	6.20	184	11.9	4.58	22.1	32.4	119
範囲	75.7~ 320	16.6~ 17.4	12.8~ 13.7	6.56~ 7.22	25.5~ 26.8	180~ 181	11.3~ 12.8	6.20~ 7.84	184~ 186	11.9~ 13.1	4.58~ 5.65	22.1~ 26.3	32.4~ 33.1	119~ 120
標準偏差	93	0.22	0.30	0.19	0.47	0.31	0.43	0.49	0.47	0.45	0.37	1.3	0.22	0.29
変動係数	52%	1.3%	2.3%	2.8%	1.8%	0.17%	3.6%	6.9%	0.26%	3.6%	7.5%	5.5%	0.66%	0.24%

付録表 A3 岩石標準試料の測定結果から求めた正確度 (1/2)

岩石標準試料	SiO ₂		TiO ₂		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		MnO		MgO		CaO		Na ₂ O		K ₂ O		P ₂ O ₅		Ba		Ce		Cl		Co		Cr	
	mass		mass		mass		mass		mass		mass		mass		mass		mass		mass		ppm		ppm		ppm		ppm		ppm	
JG-1	標準値	72.4	0.260	14.2	2.18	0.063	0.741	2.20	3.38	3.98	0.099	466	58.1	40.6	53.2															
	測定値	72.7	0.263	14.3	2.14	0.066	0.756	2.18	3.43	4.00	0.094	485	90.4	4.32	68.9															
JG-2	標準値	76.9	0.044	12.5	0.97	0.016	0.037	0.701	3.54	4.72	0.002	81.1	48.4	3.62	6.38															
	測定値	77.4	0.046	12.7	1.00	0.016	0.063	0.674	3.51	4.71	0.008	79.7	48.2	4.53	13.3															
JG-3	標準値	67.4	0.481	15.5	3.70	0.071	1.79	3.70	3.97	2.64	0.122	467	40.4	11.7	22.4															
	測定値	67.3	0.475	15.5	3.70	0.071	1.78	3.75	4.00	2.62	0.130	447	41.1	11.5	20.9															
JR-1	標準値	75.6	0.110	12.9	0.89	0.099	0.120	0.671	4.03	4.42	0.021	50.4	47.3	0.832	2.84															
	測定値	75.8	0.107	12.9	0.91	0.099	0.148	0.690	4.02	4.44	0.019	60.4	45.7	1.07	2.50															
JR-2	標準値	75.9	0.070	12.7	0.77	0.112	0.040	0.501	4.00	4.46	0.012	39.6	738	0.461	3.11															
	測定値	75.9	0.059	12.8	0.78	0.110	0.069	0.499	4.00	4.48	0.009	45.8	47.3	0.617	3.52															
JR-3	標準値	72.9	0.211	11.9	4.73	0.083	0.050	0.093	4.70	4.30	0.017	66.0	328	-	3.51															
	測定値	72.5	0.217	11.9	4.67	0.082	0.071	0.077	4.74	4.26	0.016	94.0	330	-	-6.50															
JA-1	標準値	64.2	0.853	15.3	7.09	0.157	1.57	5.72	3.85	0.772	0.165	312	13.3	12.3	7.85															
	測定値	64.3	0.854	15.2	6.96	0.156	1.54	5.69	3.82	0.787	0.163	307	14.2	13.6	8.57															
JA-2	標準値	57.1	0.668	15.6	6.29	0.109	7.70	6.37	3.15	1.83	0.148	325	33.1	-	442															
	測定値	56.8	0.682	15.5	6.43	0.109	7.77	6.40	3.08	1.79	0.156	303	40.3	-	447															
JA-3	標準値	62.3	0.701	15.6	6.61	0.104	3.72	6.25	3.19	1.41	0.116	323	22.8	-	66.3															
	測定値	62.4	0.690	15.7	6.63	0.106	3.68	6.35	3.19	1.42	0.117	324	20.6	-	65.7															
JB-1b	標準値	51.7	1.27	14.5	9.12	0.149	8.23	9.70	2.66	1.33	0.259	-	-	444																
	測定値	51.5	1.26	14.3	8.99	0.144	8.28	9.59	2.64	1.30	0.255	-	-	434																
JB-2	標準値	53.3	1.19	14.7	14.3	0.218	4.63	9.83	2.04	0.421	0.101	222	6.77	281	28.1															
	測定値	53.5	1.19	14.7	14.4	0.221	4.58	9.87	2.08	0.438	0.099	242	4.59	291	28.2															
JB-3	標準値	51.0	1.44	17.2	11.8	0.177	5.19	9.80	2.73	0.781	0.294	245	21.5	259	58.1															
	測定値	51.4	1.45	17.3	11.9	0.181	5.15	9.83	2.77	0.788	0.296	275	16.4	235	58.9															
JG-1a	標準値	72.4	0.250	14.3	2.00	0.057	0.691	2.13	3.39	3.96	0.083	471	45.1	5.91	17.6															
	測定値	72.6	0.246	14.2	2.01	0.059	0.714	2.14	3.39	3.99	0.085	470	47.3	5.27	17.6															
GSP-2	標準値	66.6	0.660	14.9	4.90	0.041	0.960	2.10	2.78	5.38	0.290	1340	410	7.30	20.0															
	測定値	66.7	0.672	14.9	4.94	0.039	0.967	2.08	2.83	5.39	0.291	1322	425	7.36	7.71															
正確度		0.27	0.0091	0.11	0.073	0.0023	0.037	0.049	0.036	0.025	0.0041	17	5.6	22	7.0															

付録表 A3 岩石標準試料の測定結果から求めた正確度 (2/2)

岩石標準試料	F														Zr
	ppm	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	ppm	
JG-1	標準値	498	17.8	12.4	7.48	25.4	182	6.53	184	13.2	3.47	25.2	30.6	111	
	測定値	350	17.7	13.9	7.75	26.6	182	6.94	189	13.3	3.85	31.2	31.1	118	
JG-2	標準値	-	18.6	14.7	4.36	31.5	301	2.42	17.9	31.6	11.3	3.78	86.6	97.7	
	測定値	-	18.7	14.5	10.1	30.8	297	-	17.0	36.3	9.94	5.28	82.2	106	
JG-3	標準値	318	17.1	5.89	14.3	11.7	67.4	54.8	380	8.29	2.21	70.2	17.3	144	
	測定値	229	16.9	7.77	14.1	11.2	69.4	65.4	369	8.64	3.89	69.5	17.8	151	
JR-1	標準値	993	16.1	15.2	1.67	19.3	258	13.3	5.08	26.8	8.90	7.01	45.2	100	
	測定値	927	17.4	16.9	2.25	19.2	259	11.1	4.29	27.1	8.19	7.99	45.2	94.4	
JR-2	標準値	1111	17.9	18.7	1.99	21.5	304	9.62	8.13	31.5	10.9	3.01	51.2	96.5	
	測定値	1092	18.1	18.8	2.64	21.1	307	8.15	8.63	32.5	10.4	2.98	49.7	90.3	
JR-3	標準値	-	36.7	511	1.60	32.9	454	39.1	0.50	112	21.2	4.21	166	1498	
	測定値	-	36.5	508	3.27	35.0	453	35.9	-0.84	111	21.6	3.46	167	1493	
JA-1	標準値	-	16.8	1.9	3.50	6.57	12.3	21.7	28.6	0.82	0.341	105	30.7	88.6	
	測定値	-	17.4	3.46	2.78	5.32	13.4	8.73	27.1	2.06	0.762	111	29.0	84.5	
JA-2	標準値	226	17.1	9.59	132	19.4	73.8	8.10	19.8	5.09	2.24	128	18.5	117	
	測定値	536	16.9	10.0	139	19.4	71.1	17.9	21.2	3.87	2.53	126	18.5	111	
JA-3	標準値	286	16.3	3.41	32.2	7.71	36.7	21.4	22.0	3.25	1.18	169	21.2	118	
	測定値	253	17.0	5.49	32.2	7.84	37.3	21.0	21.8	2.17	1.30	169	21.2	115	
JB-1b	標準値	-	-	-	150	6.87	39.5	10.1	-	-	-	216	-	-	
	測定値	-	-	-	143	5.56	35.0	11.9	-	-	-	207	-	-	
JB-2	標準値	-	17.0	1.58	16.6	5.37	7.38	17.9	53.6	0.350	0.180	576	24.9	51.3	
	測定値	-	16.5	0.39	11.9	5.19	7.50	19.9	51.1	-2.20	-0.485	570	25.8	56.8	
JB-3	標準値	-	19.8	2.47	36.2	5.58	15.1	9.87	33.8	1.27	0.480	372	26.9	97.9	
	測定値	-	20.5	2.14	36.2	5.79	17.5	12.3	36.9	3.33	0.969	388	27.5	98.3	
JG-1a	標準値	440	16.5	11.4	6.92	26.4	178	11.0	6.22	187	4.70	22.7	32.1	118	
	測定値	211	17.0	12.4	6.70	26.3	181	13.2	5.95	184	5.52	23.0	32.5	120	
GSP-2	標準値	3000	22.0	27.0	17.0	42.0	245	-	6.30	105	2.40	52.0	28.0	550	
	測定値	3531	22.1	21.3	17.8	41.5	246	-	4.45	105	1.96	57.8	31.1	544	
正確度	240	0.53	2.1	3.4	0.87	2.3	6.4	1.6	3.9	1.8	0.77	6.0	1.7	5.5	

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

