

平成 26 年度

原子力施設等防災対策等委託費

(断層破碎物質の色彩・鉱物化学組成を利用した年代評価手法の整備)

事業

技術資料

平成 27 年 3 月

国立大学法人 東京大学

平成 26 年度

原子力施設等防災対策等委託費

(断層破碎物質の色彩・鉱物化学組成を利用した年代評価手法の整備)

事業

目 次

1. 文献調査

- 1.1 活断層の活動性評価法についての文献調査 1- 1
- 1.2 国内での年代測定技術の実態調査 1-12

2. 年代測定及び測定手法の適用性の検討

- 2.1 鍾乳石露頭調査 2- 1
- 2.2 鍾乳石試料の詳細観察 2- 6
- 2.3 まとめ 2-32

3. 岩石の色彩変化に関するデータ拡充

- 3.1 標準試料の色彩測定 3- 1
- 3.2 実験試料の色彩測定 3-20
- 3.3 加熱実験結果の整理・解析 3-29
- 3.4 年代測定手法の妥当性の検証 3-42

業務概要

目的

断層の活動性年代は通常、断層の上部に堆積した地層の年代に基づき特定あるいは推定する(いわゆる上載地層法)。しかし、地質・地形条件によってはそのような地層が欠如または極端に薄いなどの理由により、通常の方法を適用することが困難な場合がある。したがって、上載地層法の適用が困難な場合における活断層の活動性評価手法の高度化が必要である。上載地層のない断層において活断層の活動年代を特定する評価手法としては、従来から断層破砕物質を用いた年代測定が行われてきた。これらの年代測定法の適用にあたっては、断層活動時に生じた摩擦熱が少なくとも対象鉱物の閉鎖温度に達していることが必要条件となる。しかし、地表付近の低圧条件下で採取した試料では、断層活動時に十分に摩擦熱が上がらず、得られた年代値が断層活動時のものを示しているのかどうかの不確かさが残っている。そのため、高圧条件下で採取した試料を対象にした年代測定を行う必要があるが、利用できる試料の量が限られているため、分析手法の適用性を事前に把握する必要がある。本事業では、活断層の活動性評価のうち断層破砕物質を用いた年代測定技術についての文献調査を行い、適用条件等を整理する。そのうえで、それらのうちの有効な手法について断層破砕物質への適用を想定した年代測定を通して適用性を把握し、次年度以降に実施する予定の、高圧条件下で採取される試料を対象にした年代測定に備える。さらに、昨年度まで実施してきた岩石の色彩変化に関するデータについてのさらなる拡充を図る。

調査内容

文献調査

(1) 活断層の活動性評価法についての文献調査

活断層の活動性評価法として有効な手法を抽出するための文献調査を行う。対象とする文献については、1990年以降の国内誌を中心に断層破砕帯の調査・研究に関する情報を収集し、活断層の活動性評価のうち、特に年代測定技術の観点から整理する。整理した情報は、著者名、公表年、手法、対象となる断層または試料が分かるように表に取りまとめる。

(2) 国内での年代測定技術の実態調査

上記(1)で取りまとめた表から抽出された手法について、国内で実施できる機関の実態調査を行う。機関名、手法、所用機器・装置等、研究実績などを表に取り纏める。調査の結果は2章における検討の他、次年度以降に実施予定の高圧条件下で採取される試料を対象にした年代測定に資するものとする。

(3) 断層およびその近傍の岩石に関する文献調査

文献調査については、上記の観点に加え、断層およびその近傍の岩石の物理化学特性に関する調査も行う。

年代測定及び測定手法の適用性の検討

新たな断層年代の評価方法の確立に向けて、断層およびその近傍の岩石に関する現地調査および試料採取、観察、年代測定等を行い、断層の活動評価の可能性、可能であるとしたらどのような方法が適しているのかを検討するための基礎調査を行う。本年度は、特に文献調査と野外調査および予察的年代測定を中心に、以下に沿って行う。将来的に U-Th-He で計測するために質量分析計の駆動電源の改造を行う。

(1) 測定試料の入手

文献調査で得られた結果をもとに、断層近傍の岩石調査を行う。年代測定を断層破砕物質へ適用することを踏まえて測定試料を入手する(図 1)。年代測定範囲と分布普遍性に鑑みて、また今回は基礎データ収集を目的とするため、本年度は断層近傍の鍾乳石炭酸塩試料を中心に採取する。入手試料の数量は 10 試料程度とする。

(2) 試料の詳細観察

入手した試料を詳細に観察し、年代試料を採取する箇所付近の構成鉱物や微細組織、色調等を記載する。これらの観察結果は写真及びスケッチ等で整理する。また、測定箇所の位置の詳細及び微細構造の観察結果を整理する。

(3) 年代測定の実施

入手した試料に対し、各種の放射性年代測定法を検討するが、本提案では予察的に放射性炭素年代測定を行う。炭酸塩鉱物は地表付近で沈殿を生成し、それは成長方向に直交する縞模様を作る(図 2)。(2)の観察結果を踏まえ、成長縞の各部分より微量分析による年代測定を実施し、測定結果及び測定条件を整理する。測定試料の数量は 10 試料程度とする。

(4) 測定結果の整理と断層破砕物質への適用性の検討

上記の測定結果を整理し、その結果及び測定条件を、過去の調査事例と比較し微量分析による年代測定精度の向上及び高圧条件下で採取される断層破砕物質への適用性について検討する。

(5) 測定結果の妥当性の検証

得られた年代値と、既存の文献や地質調査で調べられている断層が活動した年代値を比較する。

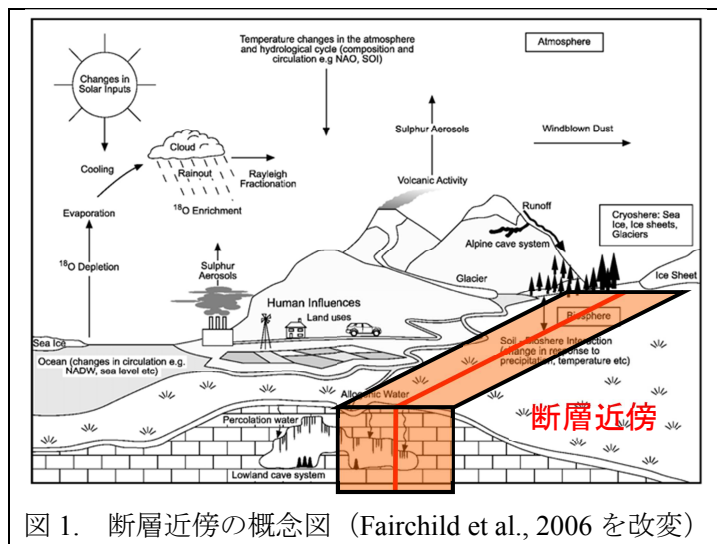


図 1. 断層近傍の概念図 (Fairchild et al., 2006 を改変)

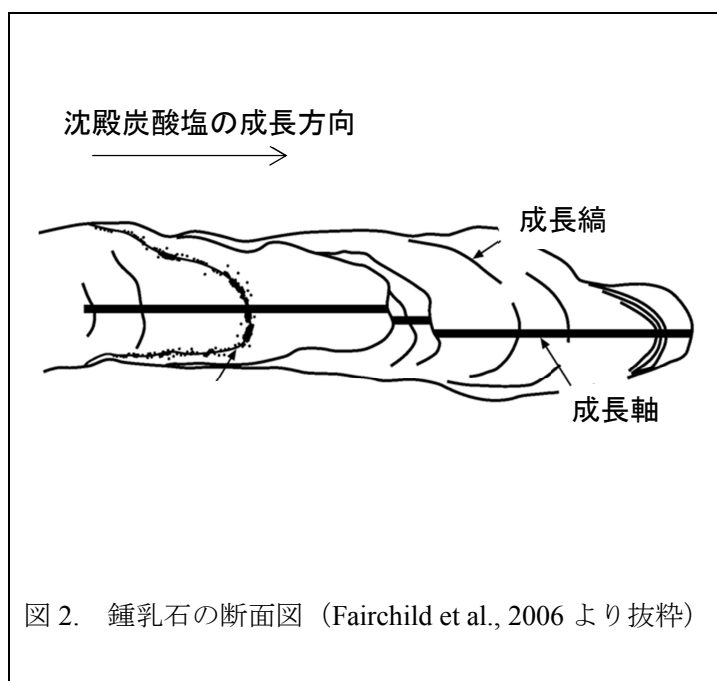


図 2. 鍾乳石の断面図 (Fairchild et al., 2006 より抜粋)

岩石の色彩変化に関するデータ拡充

岩石の色彩変化に関する過去の調査のデータ拡充を図るため、主として花崗岩地域における横ずれ断層を対象に郷村断層帯、淡路断層帯、山崎断層帯、警固一西山断層帯の 4 断層帯の母岩の性質に近い標準試料を用いて、色彩変化に関する実験及び分析等を行う。

(1) 標準試料の色彩測定

郷村断層帯、淡路断層帯、山崎断層帯、警固一西山断層帯の 4 断層帯の母岩の性質に近い標準試料を実験に用いる試料として用意 (各断層帯を 1 種類とし、計 4 種類用意) し、標準試料について、加熱色彩変化実験を実施する。

標準試料については、各断層帯において厚さ 10mm を目安にスライスした岩石を、1 種類あたり 4 個 (試料) (4 種類 × 4 試料 = 計 16 試料) 用意する (図 3)。この用

意した試料全てに対して、次の手順で加熱色彩変化実験を行う。

まずは、標準試料の観察及び分光色彩計を用いて色彩測定を行う。さらに、表面の変化が把握できるように写真撮影を行う。

次に、試料を入れた純水に半日程度浸漬させ、その後、温度設定したインキュベーター内に入れ、1 時間以上保温する。試料をインキュベーターから取り出し、分光色彩計を用いて色彩を測定し、変質部分に着目した試料観察及び写真撮影を行う。同じ試料を用いて、これら一連の作業を計 8 回行う。すなわち、標準試料の色彩測定対象は、4 試料 x 4 温度、計 16 試料について加熱色彩変化実験を行う。

(2) 実験試料の色彩測定

供試体の色彩の測定を行い、色彩変化に関するデータを取得する。試料の色彩測定にあたっては、分光色彩計または画像処理ソフトを用いて測定を行う。画像処理ソフトを用いる場合は、分光色彩計による色彩校正を行う。色彩は CIE1976(L*a*b*)表色系(明度を L*、色彩と彩度を表す色度を a*及び b*で表す)で表記する(表 1)。

(3) 加熱実験結果の整理・解析

本業務で取得した加熱実験結果(色彩データ等)を整理し、岩石試料及び温度毎に色彩分布図を作成し、反応温度式を算出する。原子力規制庁が貸与する技術資料に基づく結果と合わせ、色彩変化、温度、時間との関連性を分析し(図 4)、断層の活動時期と岩石の色彩変化との関連性を整理する。色彩測定の結果の解釈にあたっては、平均値のみでなく、誤差範囲と全体のばらつきを考慮する。

(4) 年代測定手法の妥当性の検証

得られた色彩測定結果の解釈については、反応速度定数が温度に依存するかを確かめるため、アレニウスプロット(図 5)等を用いて、年代測定法としての妥当性を検証する。また、色彩測定による年代測定が断層の活動性と関連があるかどうか、文献調査結果と比較し、検討する。

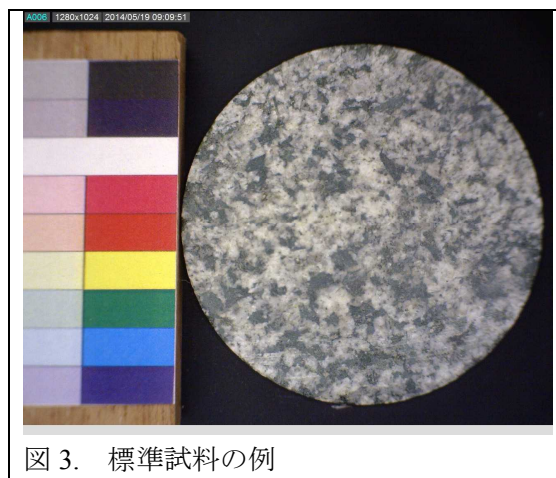


図 3. 標準試料の例

表 1 加熱実験結果の例

試料 A	L*	a*	b*
1 回目	41.06	-0.92	-1.95
2 回目	41.53	-0.96	-2.01

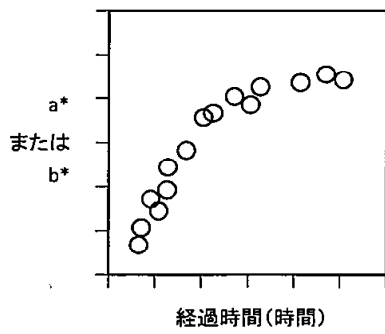


図 4. 色彩変化、温度、時間との関連性の分析 (中嶋, 1994)

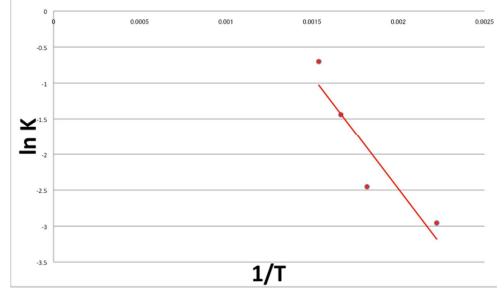


図 5. アレニウスプロットの例

1. 文献調査

1.1 活断層の活動性評価法についての文献調査

活断層の活動性評価法として有効な手法を抽出するための文献調査を行った。対象とする文献については、1990年以降の国内誌を中心に断層破碎帯の調査・研究に関する情報を20文献収集し、活断層の活動性評価のうち、特に年代測定技術の観点から整理した。また、上記の観点に加え、断層およびその近傍の岩石の物理化学特性に関する調査も行った。

整理した情報は、著者名、公表年、手法、対象となる断層または試料が分かるように表に取りまとめた。文献の収集・整理結果を表 1.1.1～1.1.10 に示した。

表 1.1.1 文献整理表

文献番号：1			手法：文献値（黒雲母 K-Ar 法）
公表年：1999			対象：棚倉構造線、大井沢断層
著者：高橋浩			年代測定技術に関する情報： 先行研究から、日本国－三面マイロナイト帯の構造発達史を復元。基盤岩の年代値（文献値）から、断層の発達史を検討している。
表題：棚倉構造線の北方延長問題の再検討－日本国三面マイロナイト帯を中心に－			
出典：構造地質			
巻：	号：43	ページ：69 - 78	

文献番号：2			手法：フィッシュトラック法、K-Ar 法
公表年：2002			対象：ヒマラヤ（衝突前縁褶曲－衝上断層帯）
著者：在田一則、大平寛人、板谷徹丸、松田高明、高木秀雄			年代測定技術に関する情報： ヒマラヤにおける試料採取の報告を行った。異なる高度の試料を採取し、複数の年代測定手法（フィッシュトラック法、K-Ar 法）を用いることで、ヒマラヤ主稜部の上昇（削剥）速度を推定できるとしている。また、スラストを跨いだ標高の等しい試料を採取し、年代値の違いからスラストの動きを推定できるとしている。
表題：ヒマラヤの上昇と断層運動に関する熱放射年代学的研究(予報)			
出典：地学雑誌			
巻：111	号：3	ページ：430 - 435	

表 1.1.2 文献整理表

文献番号：3			手法：粘土鉱物（モンモリロナイト）ESR 法
公表年：2010			対象：三川モンモリロナイト（標準試料） 台湾チェルンプ断層深部掘削コア試料
著者：福地龍郎			年代測定技術に関する情報： 地震断層の ESR 年代測定を行う場合には、以下の方法があるとしている。 ①断層摩擦熱による ESR 信号のリセットを利用する方法 ②断層作用で新たに生成される鉱物や格子欠陥中心を利用する方法 ①については、台湾チェルンプ断層深部掘削コアより、断層破碎帯を通過する高温熱水流体によって信号がリセットされることが確認された。②については、モンモリロナイトの四重新信号から得られる年代値が熱水活動の年代を示すと考えられるが、地殻の隆起速度に依存する。
表題：ESR 法による地震断層の絶対年代測定			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：16 - 23	

文献番号：4			手法：フィッシュントラック法
公表年：2010			対象：ネパールランタン地域、三重県多気
著者：高木秀雄、岩野英樹、檀原徹			年代測定技術に関する情報： 先行研究によって、シュードタキライトの形成条件である高温短時間加熱によって、フィッシュントラックの年代値がリセットされることが示されている。著者らは、これまで実施された野島断層および足助剪断帯におけるフィッシュントラック年代測定の成果をレビューし、ネパールランタン地域および三重県多気で実施した年代測定結果を報告した。その結果、シュードタキライトの形成年代が得られた。一般的に断層は粉碎を伴っているため、採取できるジルコン試料の量が少ないが、厚い脈を採取できれば、断層の年代測定が可能である。
表題：シュードタキライトのフィッシュントラック年代測定			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：46 - 51	

表 1.1.3 文献整理表

文献番号：5			手法：(U-Th)/He 年代法
公表年：2010			対象：三重県多気
著者：山田国見			<p>年代測定技術に関する情報：</p> <p>(U-Th)/He 法の概説を行っている。三重県多気地域に産するシュードタキライトに含まれるジルコンを用い、(U-Th)/He 年代測定を行った。また断層の母岩の年代も同様に求めた。その結果、シュードタキライトと母岩の形成年代が得られた。年代は先行研究で行われた同地域のシュードタキライトのジルコンフィッシュントラック年代と一致した。同地域の母岩について先行研究のフィッシュントラック法や U-Pb 法によって得られた年代と比較することにより、断層岩の生成年代およびその背景である母岩を含めた熱史が議論できるとしている。</p>
表題：三重県多気地域領家花崗岩中のシュードタキライトの(U-Th)/He 年代測定			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：30 - 39	

文献番号：6			手法：ウラン放射非平衡年代測定法
公表年：2010			対象：野島断層
著者：渡邊裕美子、中井俊一、林愛明			<p>年代測定技術に関する情報：</p> <p>野島断層中に沈殿した炭酸塩鉱物の年代測定結果を報告している。著者はウラン放射非平衡年代測定法の原理を解説し、ウラントリウム同位体組成の分析方法では、最近では地場型の誘導結合プラズマ質量分析計 MC-ICP-MS が注目されているとし、その利点を列挙している。用いる年代測定法の式は不純物を含む場合はそのまま適用できない。野島断層では不純物を含むので、著者はアイソクロン法を用いて端成分を決定し、IsoPlot プログラムを使用してモンテカルロシミュレーションを行い年代決定を行った。</p>
表題：ウラン系列放射非平衡による断層破碎帯の炭酸塩鉱物の年代測定			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：40 - 45	

表 1.1.4 文献整理表

文献番号：7			手法：K-Ar 法、レーザー加熱 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法
公表年：2010			対象：赤石裂線、ルイス断層（カナディアンロッキー）
著者：板谷徹丸、兵藤博信			年代測定技術に関する情報： K-Ar 系放射年代測定法の原理の解説と、断層に適用された結果をレビューしている。信頼できる年代値が得られるには粘土鉱物種類が少ない場合で、粘土鉱物が複数ある場合には解析が難しいと報告している。
表題：地震のアルゴン年代測定			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：10-15	

文献番号：8			手法：フィッシュントラック法
公表年：1997			対象：野島断層
著者：蒲原秀典、長谷部徳子、田上高広、竹村恵二			年代測定技術に関する情報： ボーリングコアから採取した断層近辺の試料において、ジルコン中のフィッシュン・トラックが短縮していた。断層近傍でトラックを短縮させる原因として、（1）断層沿いにおける摩擦・もしくは熱水などの循環のための熱異常、（2）上盤の深い所からの上昇が考えられるとしている。
表題：野島断層ボーリングコアを用いた断層活動における発熱の研究			
出典：フィッシュン・トラック ニュースレター			
巻：	号：10	ページ：35-36	

表 1.1.5 文献整理表

文献番号：9		手法：フィッシュントラック法
公表年：2001		対象：サンアンドレアス断層 (ロジャースクリーク断層)
著者：堀口高士、長谷部徳子		年代測定技術に関する情報： サンアンドレアス断層の熱影響が小さいという熱力学的矛盾をフィッシュントラック法を用いた温度履歴解析から検討した。 フィッシュントラック解析の結果得られた年代値は 7Ma よりも若い時期に熱イベントを示唆している。これは、貫入年代 (7Ma) と一致しないことから、貫入以後の熱イベントを示唆していると考えられる。
表題：フィッシュントラック (FT) を用いたサンアンドレアス断層系列ロジャースクリーク断層の熱履歴解析		
出典：フィッシュン・トラック ニュースレター		
巻：	号：14	

文献番号：10		手法：ESR 法
公表年：2003		対象：野島断層、高速摩擦試験
著者：福地龍郎		年代測定技術に関する情報： ESR 年代測定法の原理と ESR 法による断層活動年代測定の原理を説明し、断層ガウジ中に生成される粘土鉱物を使った「ガウジの生成年代測定」を紹介した。 野島断層の分析の結果、地表付近の試料を仮に採取したとしても、ESR 信号は完全にリセットしていないだろうということが分かった。しかし、地下深部の試料の ESR 信号は摩擦熱によってリセットされている可能性が高いので、より深部までボーリングを掘って試料を採取する必要があるとしている。
表題：ESR 法による断層活動年代測定 —その原理と実践—		
出典：第 63 回深田研談話会		
巻：	号：	

表 1.1.6 文献整理表

文献番号：11			手法：残留磁化
公表年：2006			対象：室内試験
著者：酒井英男、正和紗央里、岸田徹、伊藤孝、飯田肇			年代測定技術に関する情報： 地震跡としての液状化の痕跡や噴砂を、残留磁化や磁化特性を用いて古地震の年代推定を行った。その結果、地震時の液状化現象の再現実験で得られた試料は、磁化方向がほとんど変わらず、安定な磁化を示した。また、堆積物の残留時間は、液状化を生じた地点の地場方向を正しく記録しており、時間が経っても保存されていることが分かった。地震の痕跡の年代を測る手法として活用できると考えている。
表題：噴砂や断層近傍の土壌の磁化特性の研究—ペットボトルによる液状化の実験と古地震の年代推定—			
出典：立山カルデラ研究紀要			
巻：	号：7	ページ：31-36	

文献番号：12			手法：ウラントリウム法
公表年：2010			対象：野島断層
著者：渡邊裕美子、中井俊一、林愛明			年代測定技術に関する情報： 流体の痕跡である炭酸塩鉱物脈のウラン放射非平衡年代は、断層近傍における流体移動のタイムスケールに新たな制約を与える可能性があると考えられる。 野島断層の例では、方解石がほぼ現在の地温で形成したと仮定したが、方解石の形成温度は流体包有物の均質化温度などにより正確に見積もることができる。今後は、流体の移流過程についてもより綿密な年代決定が可能になるかもしれないとしている。
表題：ウラン系列放射非平衡による断層破碎帯の炭酸塩鉱物の年代測定			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：40-45	

表 1.1.7 文献整理表

文献番号：13			手法：断層ガウジの色調、希ガス同位体組成
公表年：2010			対象：鳥取県西部地域など
著者：梅田浩司、安江健一、浅森浩一			年代測定技術に関する情報： 地層処分システムの安全性を評価する中で、これまで地層処分技術の分野で進められてきた断層研究の取り組みや主な研究成果について紹介した。具体的には断層ガウジの色調、地下水中の希ガス同位体組成に基づく地球科学的手法、など。
表題：高レベル放射性廃棄物の地層処分における断層の研究の現状と今後の展望			
出典：月刊地球			
巻：32	号：1	ページ：52-63	

文献番号：14			手法：フィッシュントラック法
公表年：2011			対象：跡津川断層
著者：筒井宏輔、高木秀雄、新井宏嘉、岩野英樹、檀原 徹			年代測定技術に関する情報： 跡津川断層真川露頭のシュードタキライトのフィッシュントラック年代を測定した。その結果、以下の変形史が明らかになった：(1) ジュラ紀の飛驒花崗岩の貫入とマイロナイト化、(2) 白亜紀後期～古第三紀の花崗岩類の貫入によるフィッシュントラック年代のリセットと跡津川断層の発生、(3) 50-40 Ma ころの跡津川断層沿いのシュードタキライトの生成、(4) 現在に至るまでの繰り返される断層活動とシュードタキライトの破碎・ガウジ化。
表題：跡津川断層真川露頭のシュードタキライトの産状とフィッシュントラック年代			
出典：日本地質学会講演要旨			
巻：	号：	ページ：T13-P-3	

表 1.1.8 文献整理表

文献番号：15			手法：K-Ar 法
公表年：2013			対象：シュードタキライト、イライトなど
著者：田村肇、佐藤佳子			年代測定技術に関する情報： 断層活動の年代を与える物質として、シュードタキライトと断層ガウジ中の自生イライトが着目されている。シュードタキライトの年代測定はレーザー融解 40Ar-39Ar 法によってガラス質基質のみの年代を得る見通しがあるのに対し、イライトの年代測定では断層ガウジから自生イライトのみを取り出すことが困難である。断層活動による生成物としては断層ガウジがシュードタキライトに比べ一般的であり、断層ガウジに広範に適用できる年代測定手法が開発されることが望まれるとしている。
表題：断層の K-Ar 年代学			
出典：地質技術			
巻：	号：3	ページ：21-25	

文献番号：16			手法：UV-TL 法
公表年：2014			対象：ガウジ試料、角礫帯試料
著者：三浦知督、雁澤好博、長谷部徳子			年代測定技術に関する情報： 紫外領域の熱ルミネッセンス法(UV-TL 法)を用いて活断層試料の熱履歴を解析した。その結果、広域的に 130～160ka の期間において 320°C ピークのシグナルを消去するほどの熱を被ったと考えられ、その後、ガウジの 270°C ピークのみが 48ka でリセットされたと推定できたとしている。
表題：活断層ガウジの UV-TL 法を用いた熱履歴解析			
出典：日本地質学会講演要旨			
巻：	号：	講演番号：R22-P-9	

表 1.1.9 文献整理表

文献番号：17		手法：放射性炭素年代
公表年：2014		対象：阿寺断層の黒色土
著者：安江健一、廣内大助、松原章浩、國分(齋藤)陽子		年代測定技術に関する情報： 岐阜県東部に分布する阿寺断層におけるトレンチ掘削の壁面から採取された黒色土を用い、放射性炭素年代測定を行った。その結果、黒色土の年代値は約1万～2千年前を示し、深度が浅くなるに連れて若くなる傾向が認められることから、これらが堆積した年代を反映していると考えられる。堆積速度の変化や年代値の逆転は、地質イベントを示している可能性があり、その一つとして断層変位が考えられるとしている。
表題：活断層露頭における黒色土の放射性炭素年代の深度分布によるイベント認定の試み		
出典：日本地質学会講演要旨		
巻：	号：	

文献番号：18		手法：K-Ar法、フィッシュオントラック法など
公表年：1999		対象：赤石裂線、四万十付加体など
著者：板谷徹丸、兵藤博信、田中秀実、宮下由香里		年代測定技術に関する情報： 震源域物質としての断層岩の研究を背景に、断層活動年代の成功例を紹介した。例として、K-Ar法、Ar-Ar法、フィッシュオントラック法、ESR法、熱ルミネッセンス法を挙げている。
表題：地震の時代決定学		
出典：月刊地球		
巻：21	号：1	

表 1.1.10 文献整理表

文献番号：19			手法：K-Ar 法
公表年：1992			対象：赤石裂線の断層ガウジ
著者：田中秀実、坂幸恭、安部武史、小浜俊介、板谷徹丸			<p>年代測定技術に関する情報：</p> <p>雲母粘土鉱物の K-Ar 年代は、雲母粘土鉱物が生成された年代か、または最も新しい熱的事変を受けた年代を表すと考えられる。</p> <p>赤石裂線と中央構造線の断層ガウジの性質の検討とその細粒部の K-Ar 年代測定を行った結果、得られた 23~29Ma の K-Ar 年代は最終熱水変質の時期であると考えられる。赤石裂線と中央構造線はこの時代以前から脆性剪断帯として活動していたことが示唆されるとしている。</p>
表題：赤石裂線の断層ガウジとその K-Ar 年代			
出典：地質学雑誌			
巻：98	号：1	ページ：39-48	

文献番号：20			手法：フィッシュントラック法
公表年：2003			対象：ジルコン
著者：村上雅紀、山田隆二、田上高広			<p>年代測定技術に関する情報：</p> <p>断層運動は短時間で起こる現象であるため、断層岩のフィッシュントラックデータを解釈するためには、短時間での加熱実験を行い、モデルの検証を行う必要がある。そこで、550~1200°Cの温度条件下で 1~100 秒間の加熱実験を行った結果、950°C1 秒間の加熱でジルコン中のフィッシュントラックが消滅（リセット）することが分かった。天然のシェードタキライトは 1200°Cまで達したとも考えられ、ジルコンフィッシュントラック法はシェードタキライトの年代測定に有効であることが示された。</p>
表題：ジルコンフィッシュントラックの高温短時間アニーリング実験			
出典：フィッシュン・トラック ニュースレター			
巻：	号：16	ページ：17-18	

1.2 国内での年代測定技術の実態調査

文献調査結果などから、国内で実施できる機関の実態調査を行った。機関名、手法、所用機器・装置等、研究実績などを表 1.2.1 に取り纏めた。

表 1.2.1 年代測定の実施機関

手法	著者	所属
TL法	鴈澤 好博	北海道教育大学函館校
OSL法	鴈澤 好博	北海道教育大学函館校
	幡谷 竜太	電力中央研究所
	田中 和広	電力中央研究所
ESR法	郷津 知太郎	株式会社蒜山地質年代学研究所
	谷 篤史	大阪大学 理学研究科 宇宙地球科学専攻
	福地 龍郎	山梨大学
	田中 和広	電力中央研究所
K-Ar法	佐藤 佳子	独立行政法人海洋研究開発機構, 地球内部変動研究センター
	山崎 誠子	産業技術総合研究所技術部
	ホースト・ツヴィングマン	京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
Ar-Ar法	岩田 尚能	山形大学理学部地球環境学科
	佐藤 佳子	独立行政法人海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域
	兵藤 博信	岡山理科大学自然科学研究所
FT法	山田 隆二	防災科学技術研究所
	檀原 徹	株式会社京都フィッシュン・トラック
	岩野 英樹	株式会社京都フィッシュン・トラック
	田上 高広	京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
	長谷部 徳子	金沢大学自然計測応用研究センター
U-Th法	中井 俊一	東京大学地震研究所
	渡邊 裕美子	京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
(U-Th)/He法	田上 高広	京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
	山田 隆二	独立行政法人防災科学技術研究所
	梅田 浩司	独立行政法人日本原子力研究開発機構
	伊藤 久敏	電力中央研究所
He/He法	-	
C14法	山岡 俊樹	和歌山大学システム工学部
	齋藤 龍郎	独立行政法人 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 自然事象研究グループ
	北川 浩之	名古屋大学大学院環境学研究所
	中村 俊夫	名古屋大学 年代測定総合研究センター
	高田 茂	東京都立産業技術研究所精密分析技術グループ(現技術評価室)
	齋藤 正明	東京都立産業技術研究所精密分析技術グループ
	富岡 祐一	地球工学研究所 バックエンド研究センター
	奥野 充	福岡大学理学部地球圏科学科 教授
	増田 公明	名古屋大学太陽地球環境研究所
	土屋 理恵	静岡大学理学部生物地球環境科学科
	和田 秀樹	静岡大学理学部地球科学教室

2. 年代測定及び測定手法の適用性の検討

断層付近は亀裂が多く、断層付近において鍾乳洞が発達する場合がある。そこで、断層面に沿って形成されたと考えられる栃木県「葛生鍾乳洞」、岐阜県「大滝鍾乳洞」と、プレート境界地震に影響を受けると考えられる沖縄トラフ近傍の沖縄県「石垣島鍾乳洞」、南海トラフ近傍の高知県「龍河洞」に着目した。「大滝鍾乳洞」、「龍河洞」では鍾乳洞現地露頭調査を行った。試料は「葛生鍾乳洞」からつらら石を、「石垣島鍾乳洞」から石筍を得た。

2.1 鍾乳石露頭調査

鍾乳石の形成・成長状況を確認するため、岐阜県「大滝鍾乳洞」と高知県「龍河洞」において現地露頭調査を行った。「大滝鍾乳洞」は断層亀裂によって形成された鍾乳洞であり活断層が多い新潟－神戸歪集中帯に含まれる事から、内陸地震の影響を受けやすい鍾乳洞であると考えられる。一方「龍河洞」はプレート境界地震である南海・東南海地震の影響を受けると考えられる。鍾乳洞の露頭調査では鍾乳石の形態観察と鍾乳洞を流れる水の流量調査を行った。「龍河洞」では形態観察の一環として石筍のサイズを測定した。

2.1.1 鍾乳石露頭調査の調査準備

「大滝鍾乳洞」では調査にあたり、郡上観光株式会社大滝鍾乳洞管理者に案内を依頼した。両鍾乳洞の調査にあたり、事前に鍾乳洞および周辺地域の地質などに関して文献調査を行った。文献は巻末試料にまとめている。鍾乳石の主な種類を示す用語を表 2.1.1 にまとめた。鍾乳洞に形成される鍾乳石の発達モデルを作るため、鍾乳石の形態観察を行った。

表 2.1.1 鍾乳石の主な分類表

分類	形状・でき方。	
ドリップストーン (滴り落ちる水滴 によって形成され る鍾乳石)	鍾乳管	管状の鍾乳石。水滴の円周に沿って形成される。
	つらら石	つらら状に垂れ下がった鍾乳石。鍾乳管の外側に沈積し形成される。
	石筍	床面から円錐状、長柱状に成長した鍾乳石。天上面の鍾乳石から滴る水滴によって床面から上方へと成長し形成される
	石柱 幕状鍾乳石	柱状の鍾乳石。つらら石と石筍が繋がり形成される。 カーテン状に沈積した鍾乳石。斜めの天上や壁を水滴がつたう事により形成される。
フローストーン (流れる水によっ て形成される鍾乳 石)	畦石	棚田の畦のように発達する鍾乳石。ゆるやかな傾斜面でいくつも水たまりができる事によって形成される。
	流れ石	床や壁面を覆うように発達する鍾乳石。水が床面や壁面を流れる事により形成される

2.1.2 調査結果

(1) 大滝鍾乳洞調査結果

- ・ つらら石、石筍、石柱、鍾乳管、幕状鍾乳石、流れ石、流れ石が観察された（図 2.1.2-1～図 2.1.2-3）。
- ・ 褐色を呈するつらら石、石筍が多い（図 2.1.2-1、図 2.1.2-2）。
- ・ 鍾乳石の一部は乳白色を呈する沈殿層に覆われている（図 2.1.2-3）。
- ・ 母岩は脈を含む石灰岩であった。
- ・ 折れた鍾乳石（特につらら石）が多く観察された。
- ・ 鍾乳洞の流水量は滝以外では見た目にも多くなく、流量も少ない（表 2.1.1）。

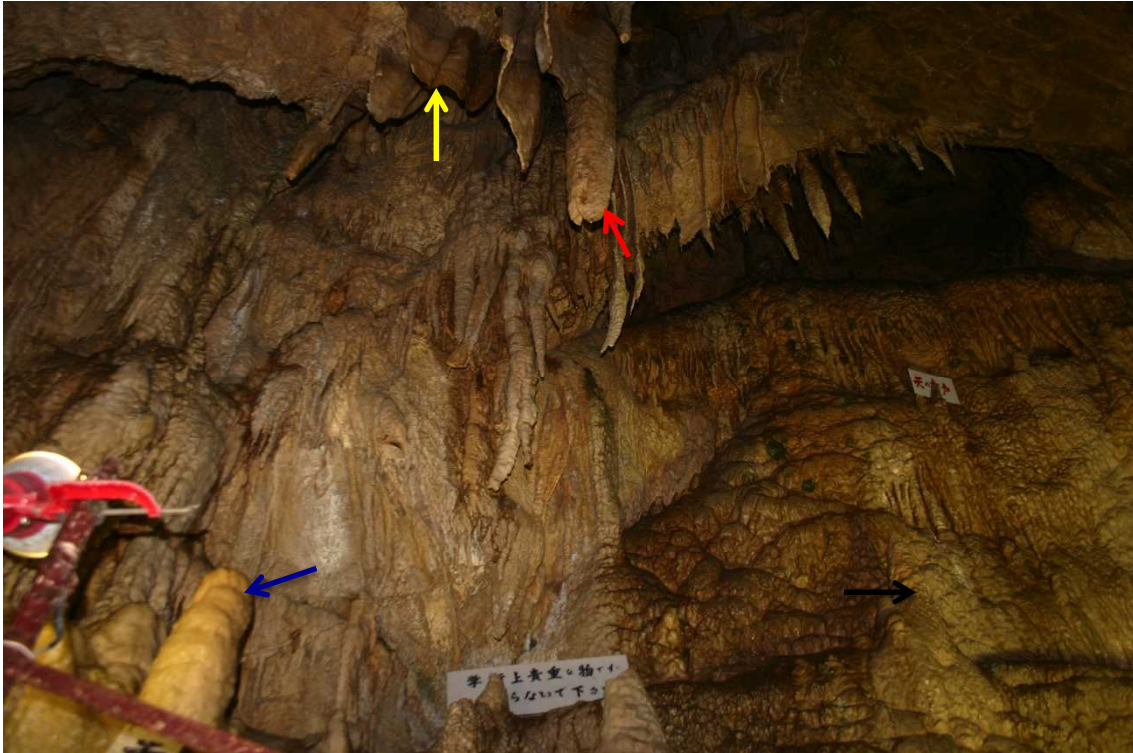


図 2.1.2-1 大滝鍾乳洞写真

つらら石（赤矢印）、石筍（青矢印）、幕状鍾乳石（黄色矢印）、流れ石（黒矢印）が観察される。



図 2.1.2-2 褐色を呈するつらら石
つらら石の周辺に鍾乳管が観察される。



図 2.1.2-3 流れ石
一部が乳白色を呈する。

表 2.1.2 大滝鍾乳洞の流量測定結果

観測日	Sample#	採取位置	測定	流量	単位
2015.01.13	#1	洞口付近、竜王洞下	滴下量	2.79	L/h
2015.01.13	#2	栗のいが下方	滴下量	9.23	L/h
2015.01.13	#3	大滝	流量	36	L/min

(2) 龍河洞調査結果

- ・ 洞窟の入口と出口の落差は 80m あり、上部に行くほど鍾乳石が発達している。
- ・ つらら石、石筍、石柱、鍾乳管、幕状鍾乳石、流れ石、畦石、石花など様々な形態を持つ鍾乳発達している。
- ・ つらら石、石筍、石柱、膜状鍾乳のが大きく、全体的に鍾乳石の規模が大きい。
- ・ 乳白色を呈するつらら石、石筍が多く確認される。
- ・ 褐色を呈する鍾乳石においても 1~3mm 程度の薄い白色の炭酸塩結晶に覆われている。
- ・ 母岩は脈を含む石灰岩である。
- ・ 鍾乳洞の流量は多く、流量も多い。季節により流量は変化し、雨期には水没する箇所もある（ガイドによる）。
- ・ 鍾乳石の剥落、折れは殆ど見られない。



図 2.1.2-4 茶褐色を呈する石筍



図 2.1.2-5 乳白色の鍾乳管が観察される



図 2.1.2-6 幕状鍾乳石



図 2.1.2-7 図 2.1.2-6 の鍾乳石に裏から光を当てたもの 茶褐色の縞が確認できる。



図 2.1.2-8 石花

炭酸塩鉱物が壁面から析出している。



図 2.1.2-9 石柱

上部はカーテン状となっている。

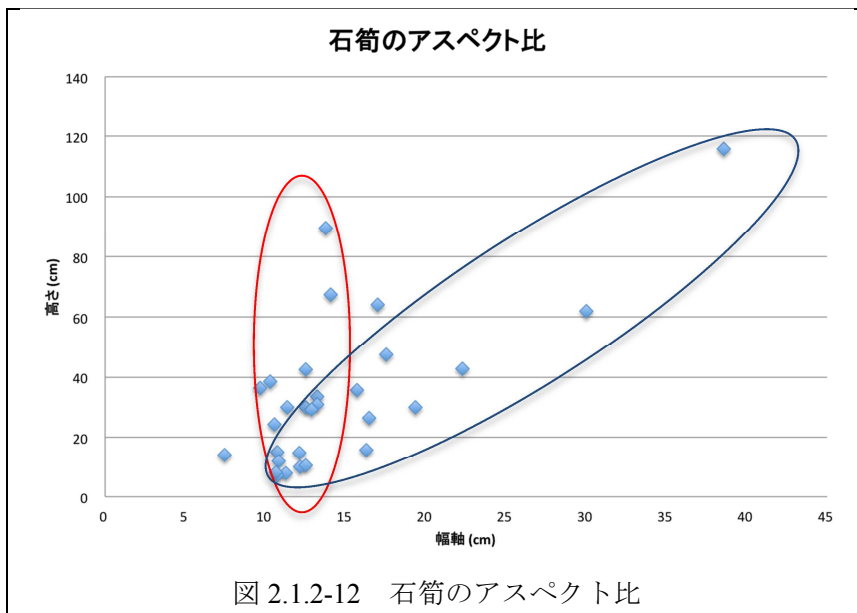


図 2.1.2-10 茶褐色鍾乳石に新たに覆う乳白色の鍾乳石



図 2.1.2-11 茶褐色石筍に乳白色の石筍が覆う

鍾乳石の発達モデルを作るため、鍾乳石の形に関するデータを測定した。つらら石は形状が多岐に渡り、形状測定は困難であった。そこで比較的単純な形である石筍の幅（根元部分）と高さを計測した。計測データは図 2.1.2-12 にまとめている。図 2.1.2-12 において、石筍が円錐形に成長するもの（青枠でかこまれたグループ）と円筒形に成長するもの（赤枠で囲まれたグループ）に別れるように見える。特に円錐計に発達する石筍には幅と高さの相関がよいので今後のモデル作成に使用できると考えられる。



2.2. 鍾乳石試料の詳細観察

2.2.1. 鍾乳石試料詳細観察の準備

鍾乳石の微細構造観察及び化学組成分析のため、つらら石と石筍の試料を得た。栃木県葛生地域の鍾乳洞の鍾乳石は佐野市葛生化石館からつらら石の提供を受けた。沖縄県石垣島鍾乳洞では石筍を採取した。それぞれの地質情報と試料状況を以下に記す。

(1) 葛生地域の地質と鍾乳洞

葛生地域は足尾帯とよばれる緑色岩・石灰岩・チャートかななる堆積岩コンプレックスが分布している（図 2.2.1-1）。足尾帯は西南日本内帯の美濃・丹波帯の東方延長と考えられている。



図 2.2.1-1. 葛生地域の地質（鎌田 1997）。赤丸は葛生鍾乳洞位置を示す。

足尾帯は軸が北東－南西方向で南西にプランジした向斜構造を持ち、馬蹄形を呈して分布し（図 2.2.1-2）、年代と岩石種によってユニット 1 からユニット 3 に分類される。ユニット 1 及びユニット 3 は砂岩・頁岩・チャートからなり下部三畳系から上部ジュラ系の年代を示す。それらに挟まれるユニット 2 は石灰岩・緑色岩からなりペルム紀の年代を示す（鎌田，1997）（図 2.2.1-3）。葛生鍾乳洞は足尾帯のユニット 2 に相当する石灰岩層に形成されている。

葛生地域のペルム系緑色岩、炭酸塩岩の特徴として以下が挙げられる。

- 成層する石灰岩は単層 5 cm～20 cm 厚の乳白色、白色、灰白色を呈し、泥質部と互層する事もある。
- フズリナ、海ユリ、石灰藻などの化石を豊富に含む（図 2.2.1-4）。

- ・ 数 cm～30 cm の黒色チャートノジュールを含む。
- ・ ペルム系石灰岩の上部に三畳系礫質石灰岩が不整合で覆う。
- ・ 美濃・丹波帯においてペルム系緑色岩・炭酸塩岩はペルム系チャートを伴うが、葛生地域ではチャートを伴わず、付加様式が異なる可能性がある。

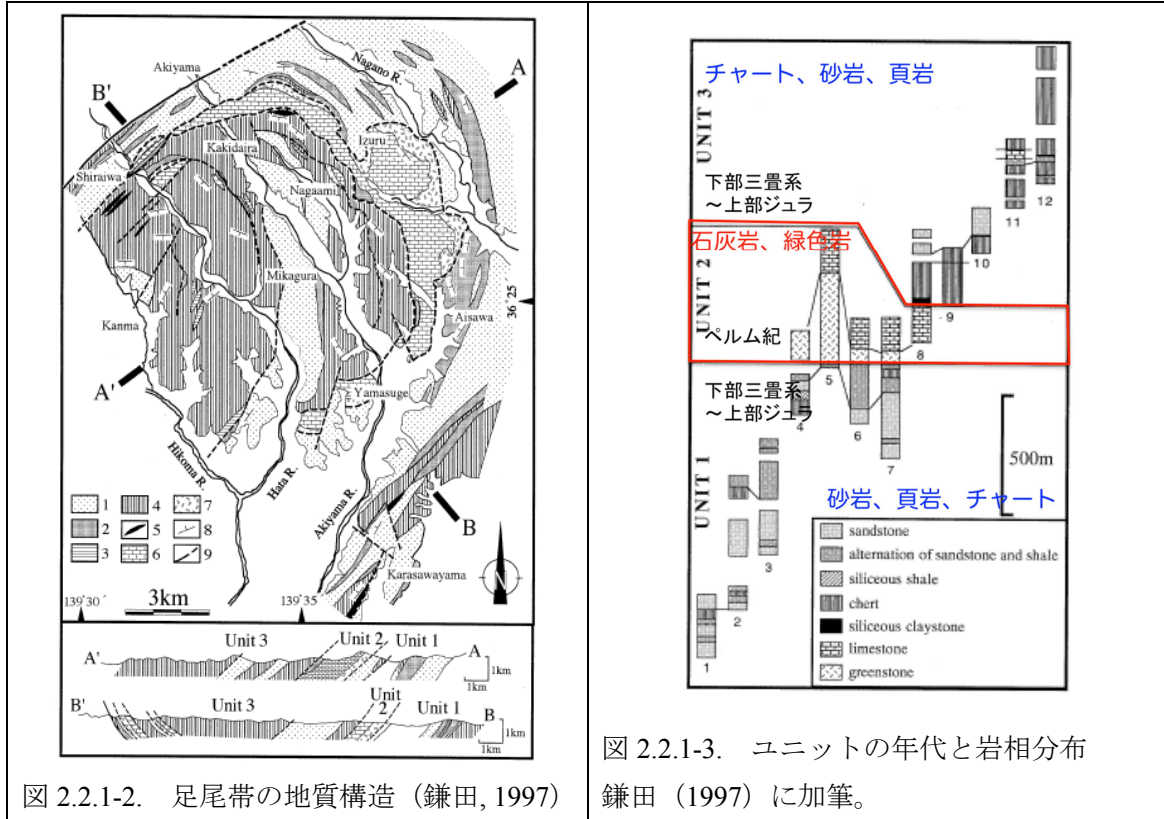


図 2.2.1-2. 足尾帯の地質構造 (鎌田, 1997)

図 2.2.1-3. ユニットの年代と岩相分布 鎌田 (1997) に加筆。



図 2.2.1-4. フズリナ化石を含む葛生石灰岩

鍾乳洞内に落下していたつらら石の提供を受けた（図 2.2.1-5、図 2.2.1-6）。このつらら石からチップを切り出し、薄片観察、ICP-MS 分析、EPMA 分析、年代測定に用いた。



図 2.2.1-5. 葛生鍾乳洞の鍾乳石（つらら石）



図 2.2.1-6. 葛生鍾乳洞鍾乳石（つらら石）の断面

（2）石垣地域の地質と鍾乳洞

調査対象となる洞窟は、石垣島東部の標高+40 m 付近に位置する（図 2.2.2-7、図 2.2.2-8）。非石灰岩分布域を含めた集水域は比較的狭い。石垣島の地質は基盤岩と第四系の琉球層群からなる。鍾乳洞は琉球層群の大浜層中に発達している（図 2.2.1-9）。大浜層は琉球石灰岩であり、碎屑性石灰岩も含む（遅澤ほか，2013）。石灰岩のほとんどは珊瑚石灰岩である。

石筍試料は、洞口から 7~8 m 程度のところの斜洞で見つかったものが採取された（図 2.2.1-10、図 2.2.1-11）。

洞内は比較的乾いている上、現洞内河川よりも高い位置にあり、採取された石筍は比較的古いことが予想される。滴下水がないことと、表面が乾いている特徴から、現在は成長していないことがわかる。



図 2.2.1-7. 洞窟の位置

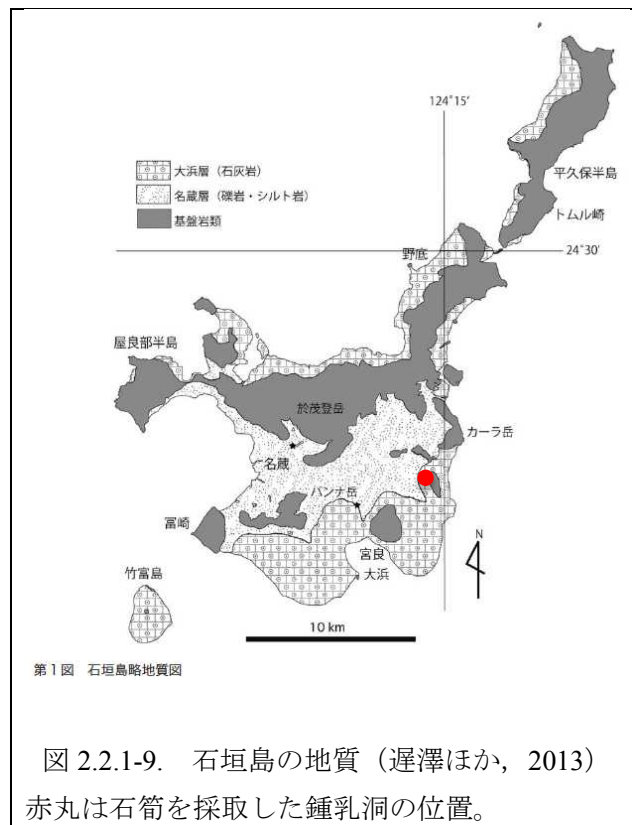
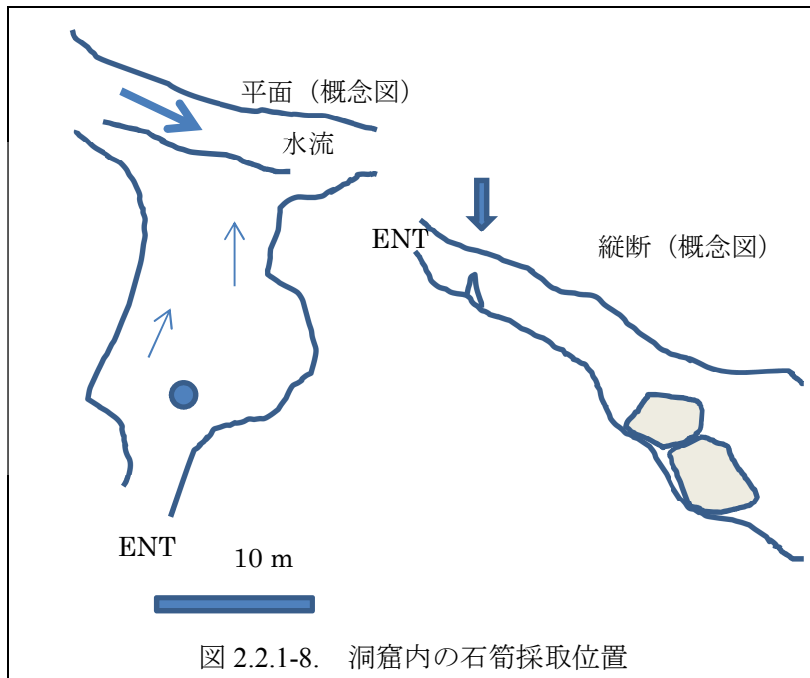




図 2.2.1-10. 採取された石筈（洞窟内）



図 2.2.1-11. 石筈の断面

2.2.2. 観察・分析手法

鍾乳石の形態、微細構造観察のため薄片観察を行い、誘導結合プラズマ質量分析計 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry : ICP-MS) ELEMENT XR (Thermo Scientific 社製) と電子線マイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) JEOL JXA-8230 により化学組成分析を行った。

・薄片観察

つらら石を切断し、チップ状にした後、0.03mm 厚の薄片に成形し偏光顕微鏡により観察を行った。観察は主に鹿児島大学・東京大学で行った。

・ ICP-MS 分析

ICP-MS ELEMENT XR には、エキシマレーザーアブレーションシステムが連結され、レーザーを試料に照射して生成されたガスの元素濃度を測定した。分析を行なった元素は、Mg24, Al27, Ca44, Mn55, Fe56, Sr88, Ba137, Th232, U238 の9元素である。

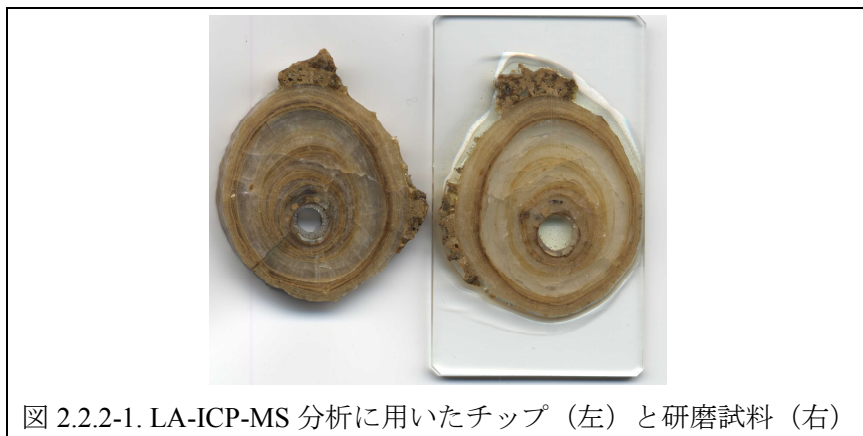
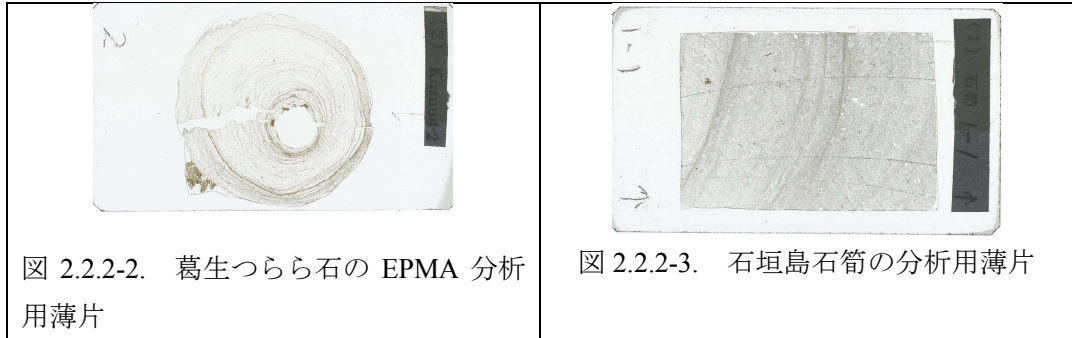


図 2.2.2-1. LA-ICP-MS 分析に用いたチップ（左）と研磨試料（右）

• EPMA 分析

薄片状の研磨試料に炭素をコーティングし分析した（図 2.2.2-2、図 2.2.2-3）。葛生鍾乳洞のつらら石試料では褐色層を含む領域の MAP 分析を行った。MAP 分析ではビーム範囲 $3\mu\text{m}$ 四方で分析を行った。石垣島石筍試料では暗灰色層を横断するようにライン分析を行った。それぞれ Si, Al, Ca, Mg, Fe, Ti の 5 元素の分析を行った。葛生つらら石の MAP 分析では Area1 から Area3 に分けて測定された（図 2.2.2-4）。



2.2.3. 観察・分析結果

(1) 葛生鍾乳石観察・分析結果

葛生つらら石の切断面には茶褐色の縞が多数確認される（図 2.2.3-1）。茶褐色縞はまとまりを持っているように観察され、肉眼では4層確認できる。それぞれ A1~A4 と名付けた。

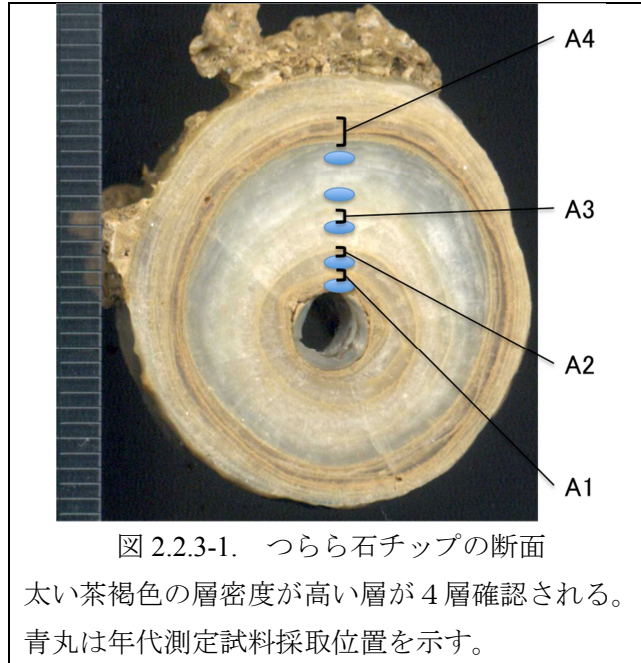


図 2.2.3-1. つらら石チップの断面
太い茶褐色の層密度が高い層が4層確認される。
青丸は年代測定試料採取位置を示す。

薄片の顕微鏡観察においても連続性のよい茶褐色層が多数観察される（図 2.2.3-2）。肉眼で認められた茶褐色層（A1~A4）では層の密度が高い。茶褐色層は更に幅の大きさによって DB（Dark Band）1~3 の3種類に分類した。DB1 は 0.005mm より細かい層（図 2.2.3-3）、DB2 は約 0.005mm 幅の層（図 2.2.3-3）、DB3 は 0.02mm 以上の幅を持つ層とした（図 2.2.3-4）。顕微鏡下では茶褐色層の一部は炭酸塩鉱物から構成されている。特に細かい DB1 では層上に炭酸塩鉱物の配列が見られる（図 2.2.3-5）。最も多く観察される DB2 層では茶褐色層より外側に小さい炭酸塩鉱物が成長している事が多い（図 2.2.3-6）。DB3 層では層上に炭酸塩鉱物が見られる層と確認できない層が存在する。また、層の外側に炭酸塩鉱物の成長が見られる事が多い。他に特徴的な構造として、溶食された様な跡が観察される（図 2.2.3-7）。図 2.2.3-7 内において青色破線と黄色破線、黄色破線と赤色破線に挟まれた部分が赤色破線によって構造が切られている。内側に向かって不規則で比較的ゆるやかな境界を持つことから、削られるより溶食の可能性が高いと推測される。また溶食状構造周辺において、赤破線と緑破線で挟まれた領域の茶褐色層では小さい炭酸塩後部が含まれるのに対し、その内側の青色破線と赤色破線で囲まれた茶褐色層部分には炭酸塩鉱物が認められない。同じ茶褐色層でも含まれる物質が異なるという組み合わせは他の DB3 層においても認められる（図 2.2.3-8）。これらの層は茶褐色層が全て同一物質、同一要因で形成されていない事を示している。

茶褐色層の分類・分布図を図 2.2.3-9 に示す。この図から DB1 に分類される細い茶褐色層は茶褐色層密集帯 A3 周辺で多く、同密集帯 A4 の手前までしか分布しない。一方 DB3 に分類される太い層は A4 とその外側に多い。この事は A4 を挟んで内側と外側では何らかの環境が異なる可能性を示している。

炭酸塩鉱物結晶成長に着目すると、茶褐色層上やその外側で小さい炭酸塩鉱物粒子が形成されているが、全体的には茶褐色層には規制されず内側から外側へ緻密に成長している（図 2.2.3-2）。このことから、茶褐色層は結晶成長の規制要因とはならない様である。

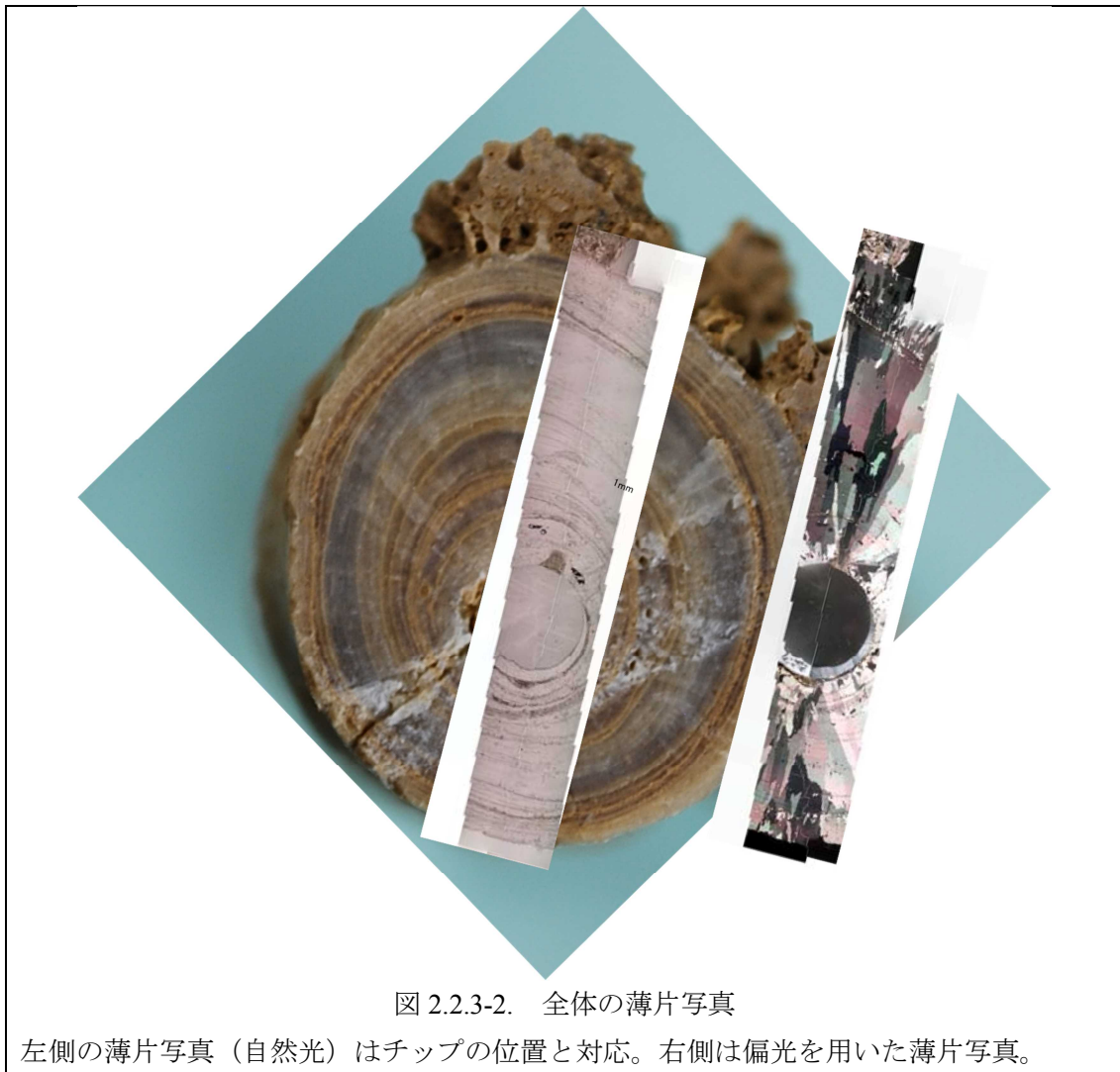


図 2.2.3-2. 全体の薄片写真

左側の薄片写真（自然光）はチップの位置と対応。右側は偏光を用いた薄片写真。

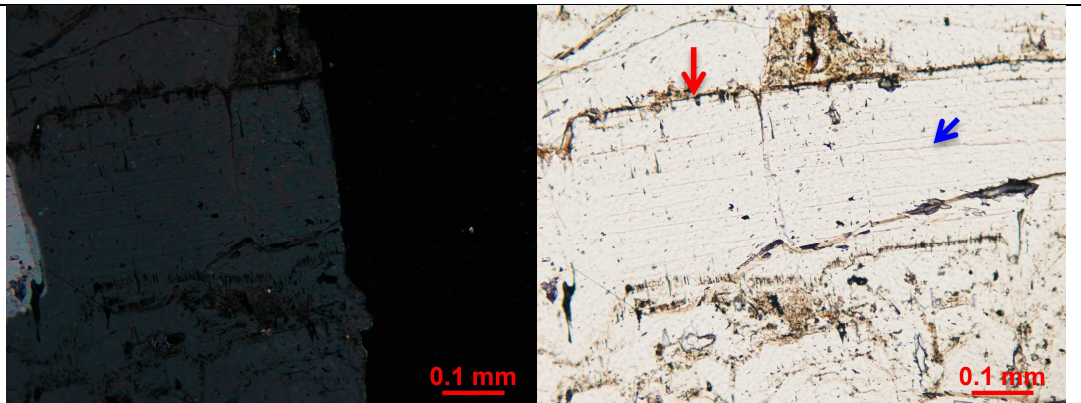


図 2.2.3-3. BD1 (青矢印) と BD2 (赤矢印) の例
左は偏光、右は通常光を用いた顕微鏡写真。

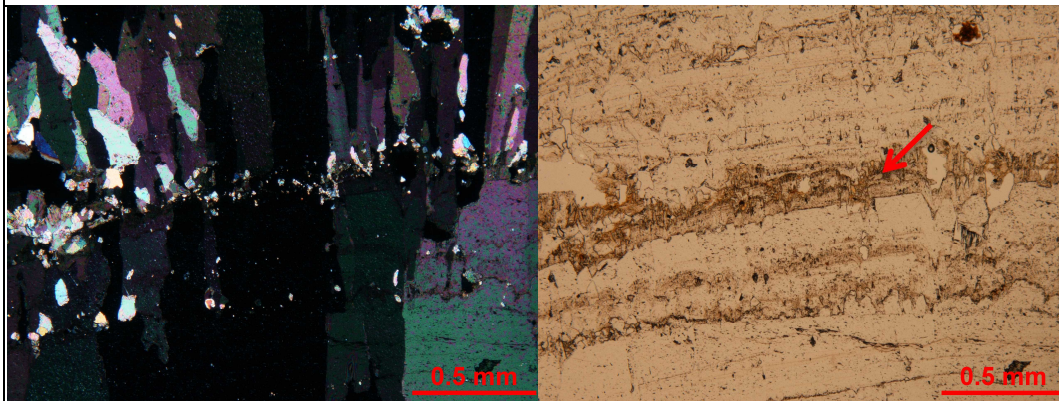


図 2.2.3-4. BD3 (赤矢印) の例
左は偏光、右は通常光を用いた顕微鏡写真。

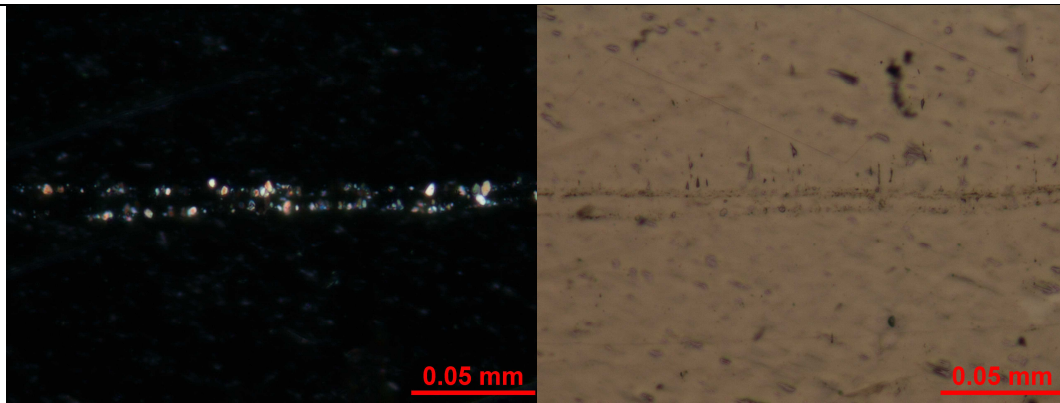


図 2.2.3-5. BD1 上に観察される炭酸塩鉱物

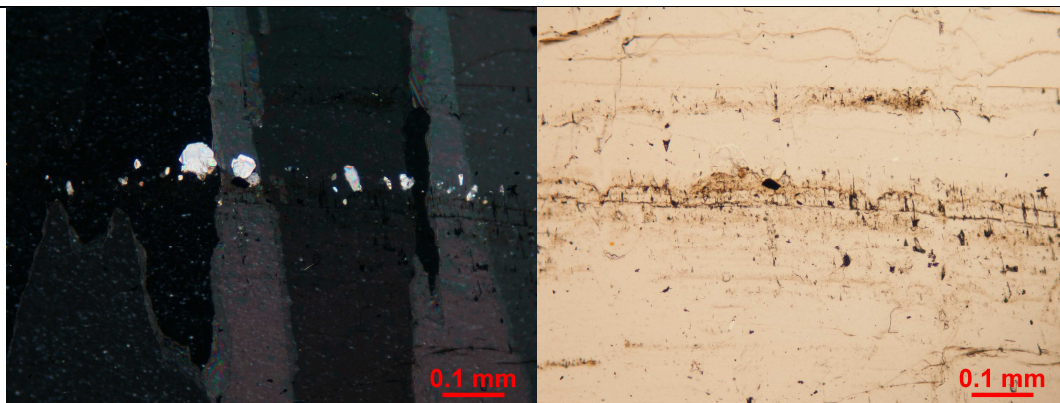


図 2.2.3-6. BD2 周辺に観察される炭酸塩鉱物

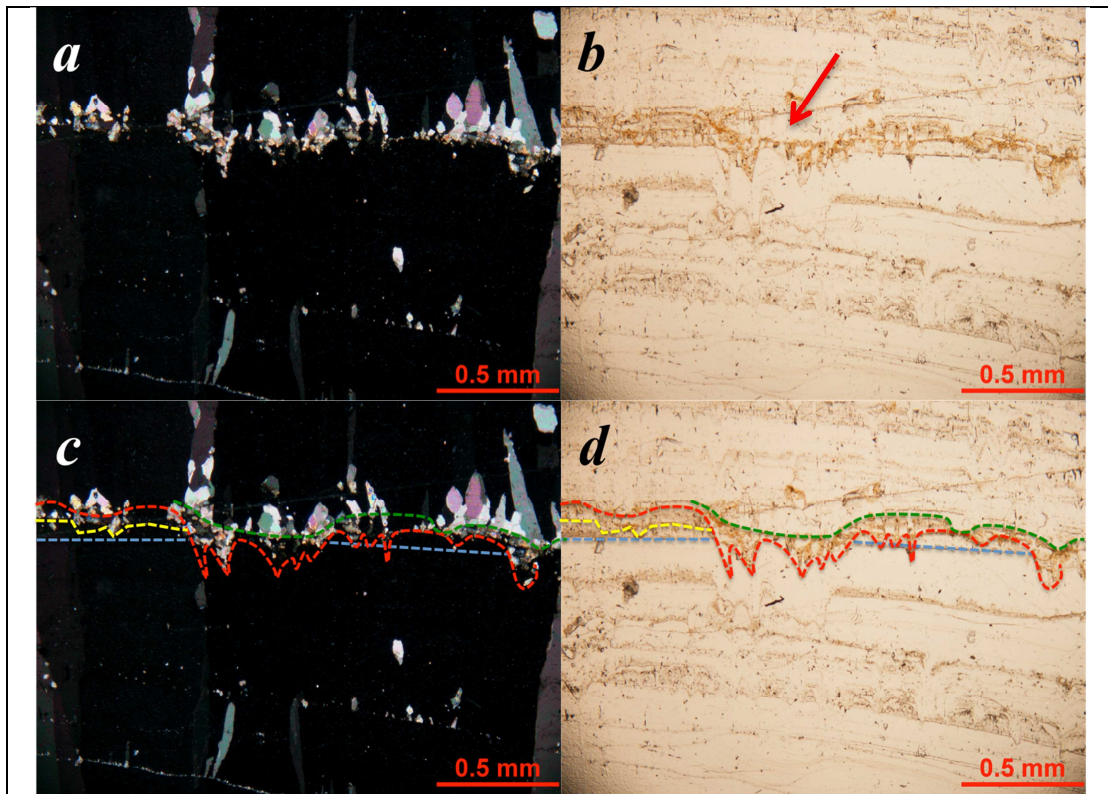


図 2.2.3-7. 溶食状構造（赤矢印）と茶褐色レイヤーに対する炭酸塩鉱物

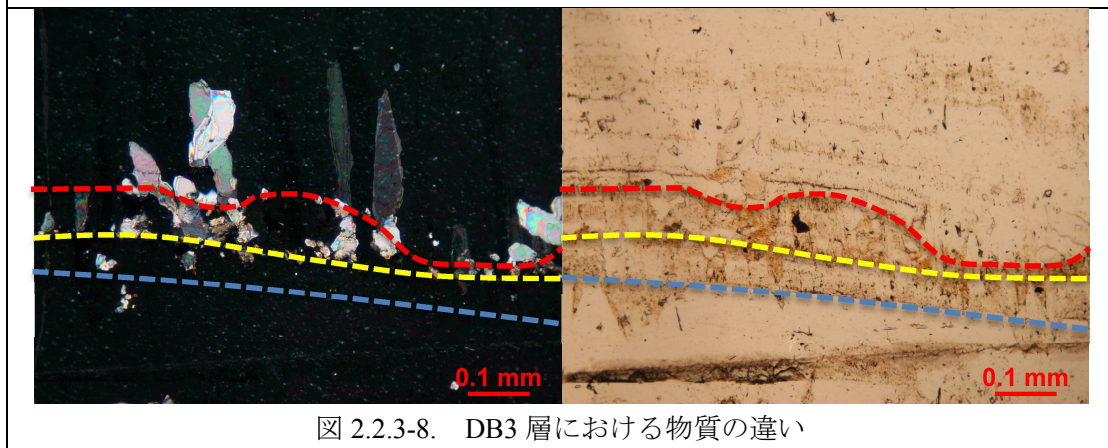
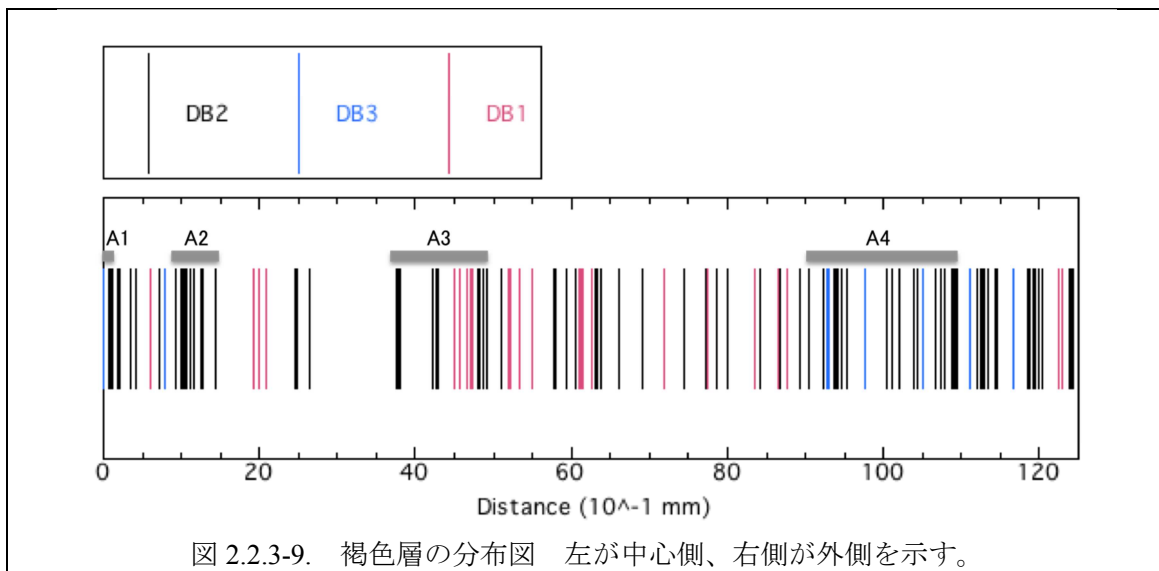


図 2.2.3-8. DB3 層における物質の違い



(2) ICP-MS 結果

Mg24, Al27, Mn55, Fe56, など、碎屑物起源だと考えられる元素の濃度は、茶褐色層で高くなる傾向が確認された (図 2.2.3-10)。

Stalactite in Kuzuu
Major element analyses with laser ablation ICP-MS

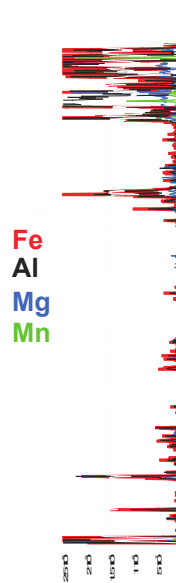


図 2.2.3-10. 縞と元素の対応関係

白線は Ca, 赤線は Fe, 黒線は Al, 青線は Mg, 緑線は Mn の元素濃度を示す。

(3) EPMA 結果

試料のほとんどが炭酸塩鉱物の結晶であるため、Ca 分析結果において低 Ca 濃度を示す層状部分が茶褐色層と判別できる (図 3.2.3-11)。Area1 の分析結果では茶褐色層のうち、広い幅をもつ層に Al, Si, Mg の濃集が見られた (図 3.2.3-11)。Area2 では茶褐色層も不鮮明であり、どの元素も濃集していない (図 3.2.3-12)。Area3 では Ca

分析結果から茶褐色層が明瞭であり、茶褐色層上に Al, Si, Mg, Fe が濃集している (図 3.2.3-13)。Al、Si が含まれる事から、茶褐色層は粘土鉱物の付着によるものと推定される。

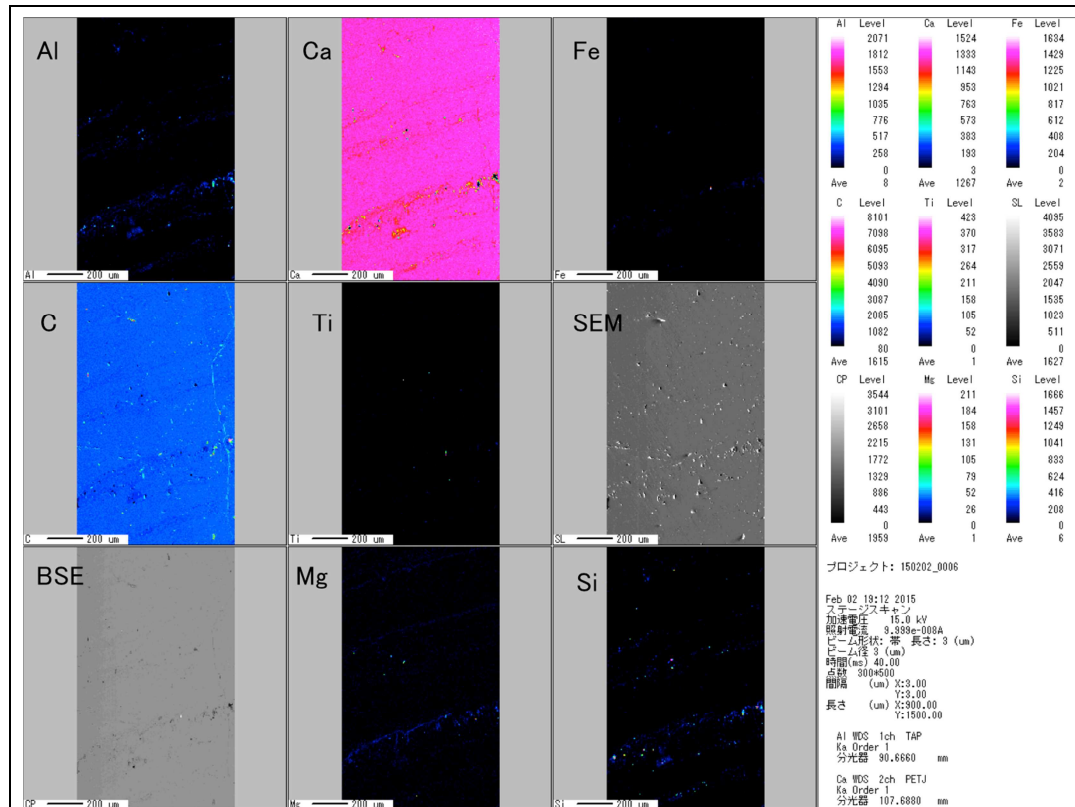


図 3.2.3-11. Area 1 における MAP 分析結果

Ca の赤色、黄色部分が茶褐色層を示す。太い茶褐色層に Al, Si, Mg の濃集が認められる。

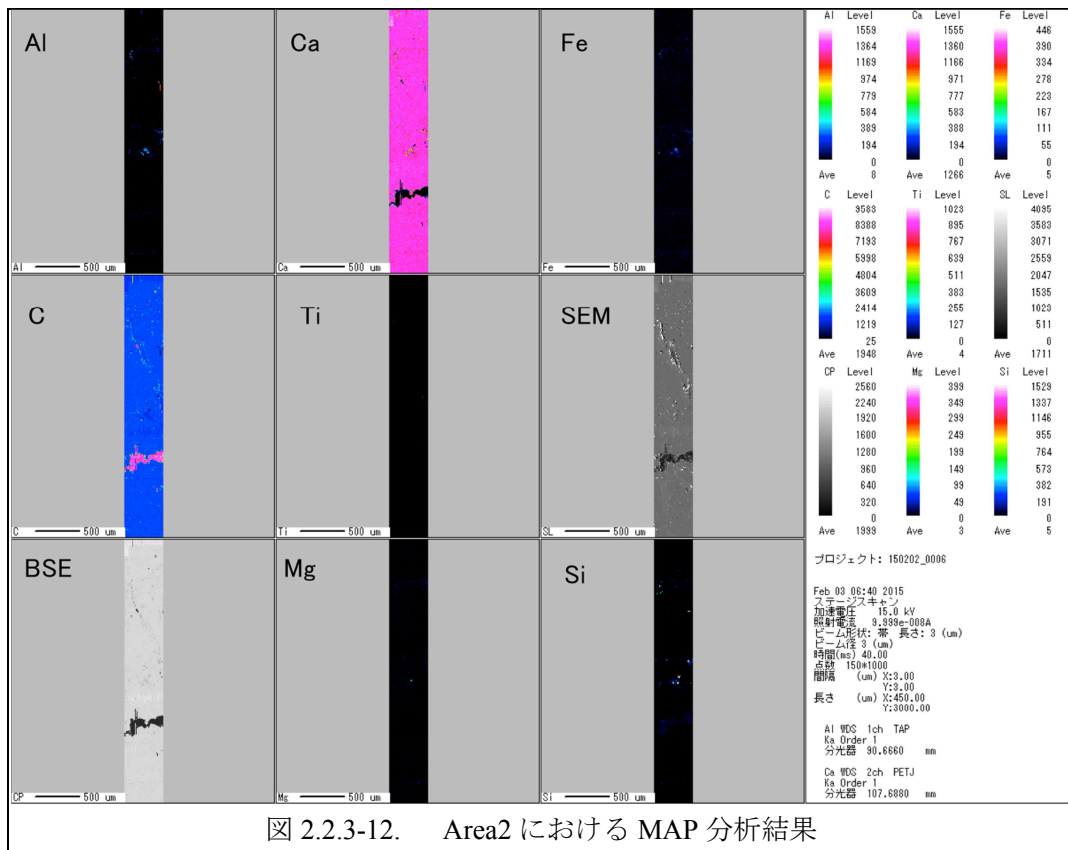


図 2.2.3-12. Area2 における MAP 分析結果

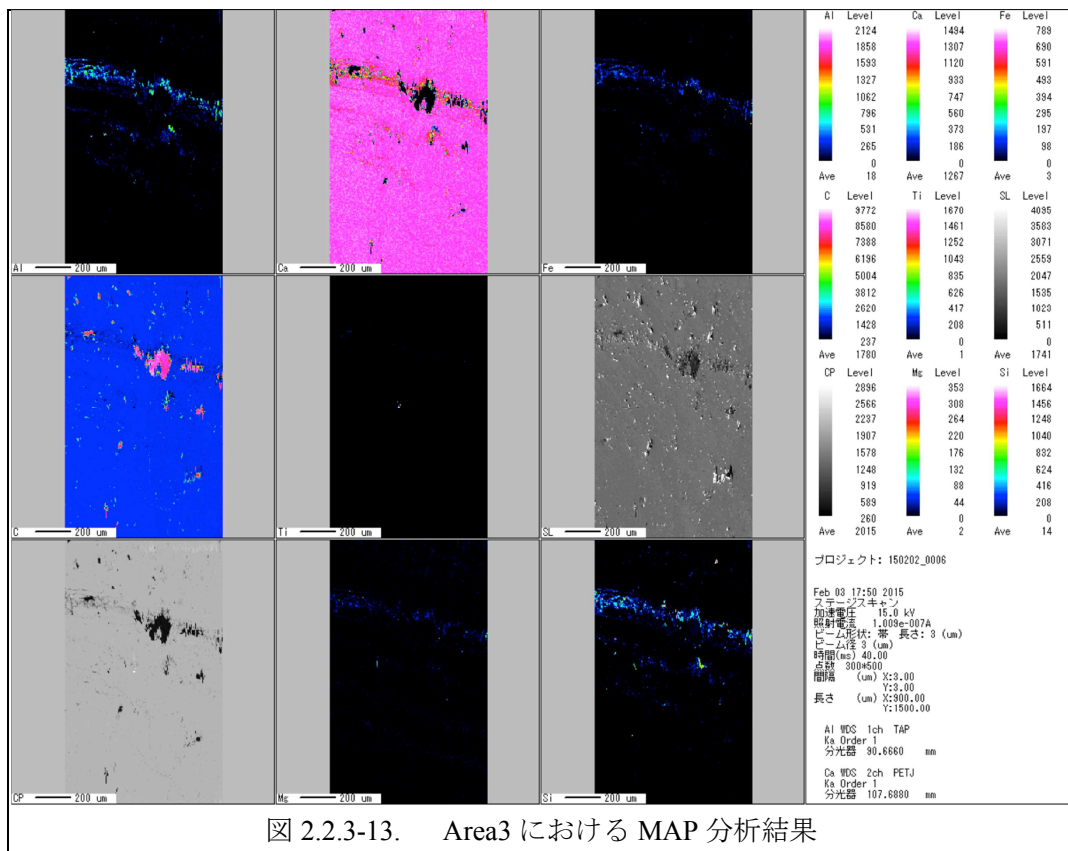


図 2.2.3-13. Area3 における MAP 分析結果

(4) 石垣島鍾乳石観察・分析結果

石垣島石筍の切断面には肉眼で薄い暗色の縞状構造が7層観察される(図 2.2.3-14)。暗色の層は顕微鏡下の観察においては茶褐色の層として認められる(図 2.2.3-15)。葛生つらら石に比べて、層の数は少ない。また炭酸塩鉱物は短冊状の形を呈し、結晶間に隙間が多く見られる(図 2.2.3-15)。結晶の大きさは茶褐色層を挟んで変化する(図 2.2.3-15)。これは茶褐色層形成前後でなんらかの環境が変化した可能性を示す。



図 2.2.3-14. 石垣島石筍の切断面
暗灰色縞が7層確認できる。

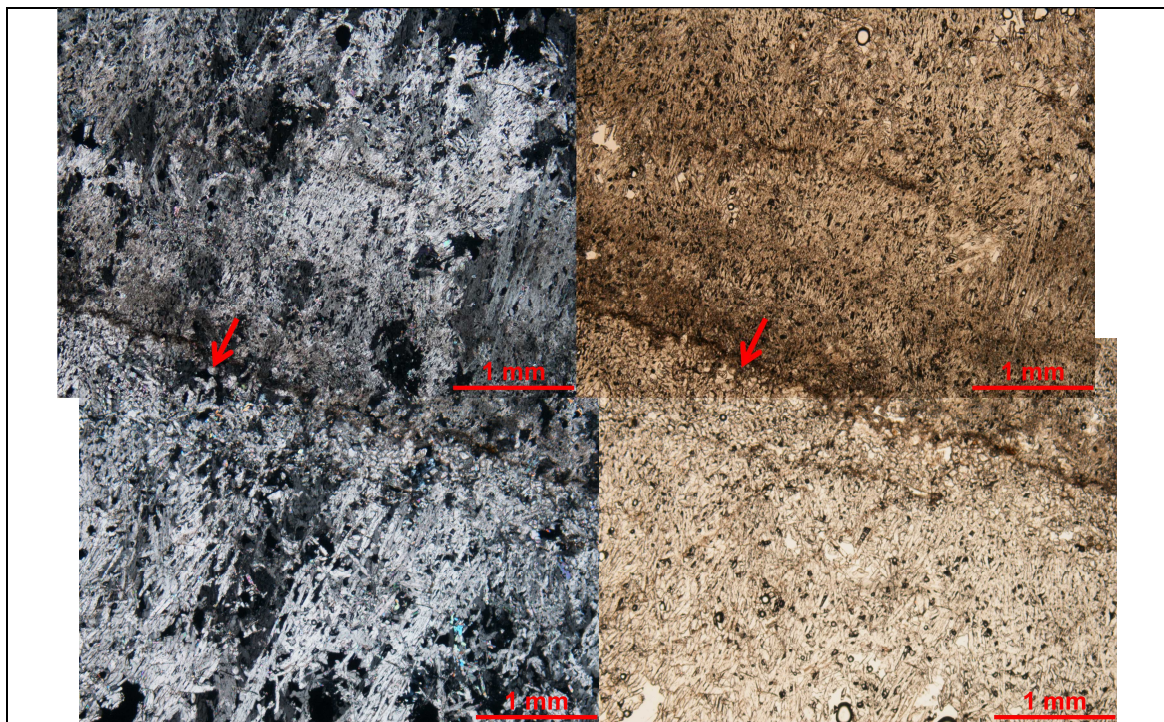


図 2-2-3-15. 石筍の薄片写真
左は偏光、右は通常光を用いた顕微鏡写真。赤は茶褐色層を示す。

EPMA の Line 元素分析（定性分析）の結果を図 2.2.3-16 に示す。茶褐色層において、Si, Al, Mg, Fe のカウントが高くなる傾向が示された。Si, Al を含む事から茶褐色層は粘土鉱物によるものと推測される。

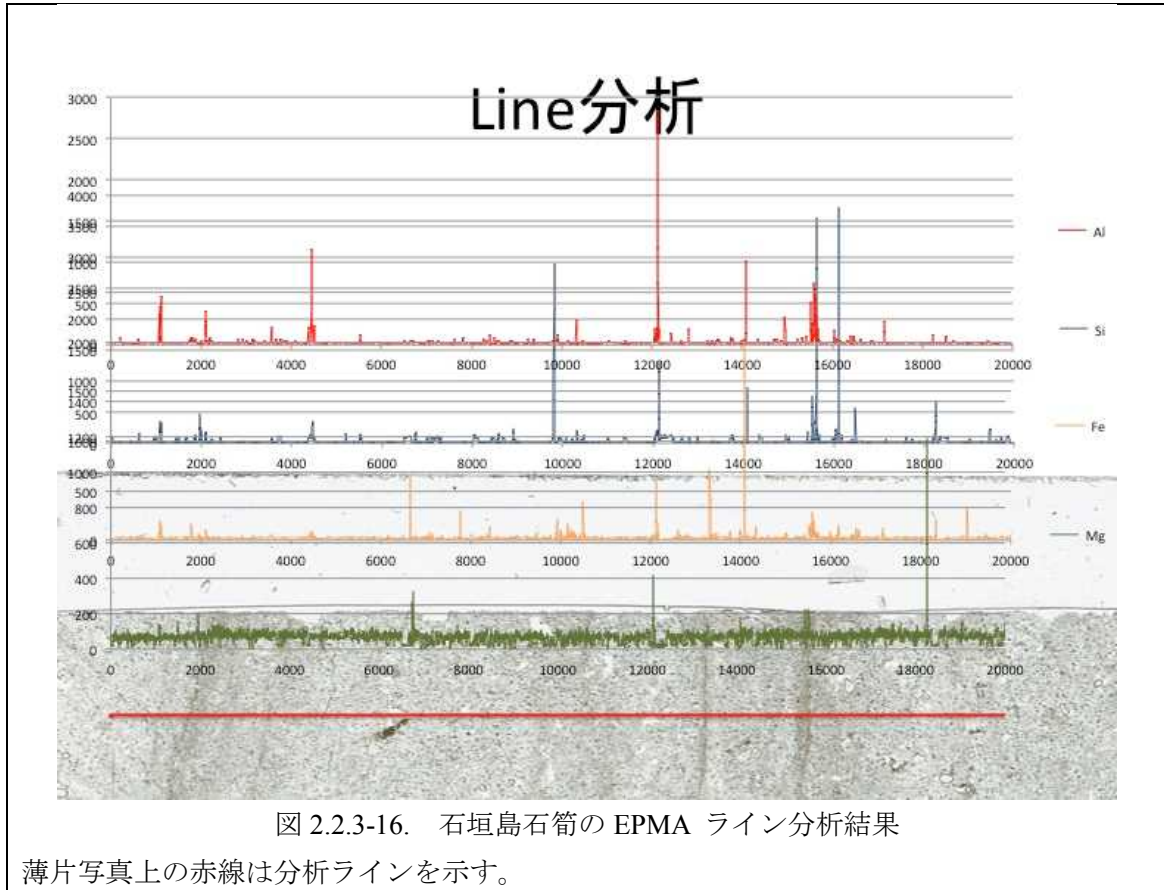


図 2.2.3-16. 石垣島石筍の EPMA ライン分析結果

薄片写真上の赤線は分析ラインを示す。

2.2.4. 年代測定方法

(1) 放射性炭素年代測定

放射性炭素年代法は過去5万年間について年代を決めるツールとして有効である。一般に、放射性炭素年代を暦年代に換算するには、以下の補正を行なう必要がある(例えば、町田ほか, 2003)。

- 1) ^{14}C 生成率の変動：大気中の ^{14}C は、大気中に大量に存在する ^{14}N が宇宙線に衝突することで生成される。 ^{14}C 年代決定法は、この生成率が一定であるという仮定のもと成り立つが、実際は、地球の地磁気変動や太陽活動の影響により、生成率は変動することが知られている。これまで、樹木の年輪や湖の堆積物を使って年代に対応した大気中の ^{14}C 曲線が得られており(最新のものは IntCal13; Reimer et al., 2013, Radiocarbon, Vol 55, Nr 4, p 1869–1887)、この曲線との比較によって補正を行なって暦年代に換算する。
- 2) 同位体分別：同位体比分別は光合成や大気や海水中での二酸化炭素循環の過程で起こる。この効果を評価するため、標準物質(PDB)との濃度比の差 $\delta^{13}\text{C}$ を求め、補正する。
- 3) Dead carbon：鍾乳石は滴下水中の二酸化炭素が脱ガスすることで炭酸塩が沈殿する(図 2.2.4-1)。

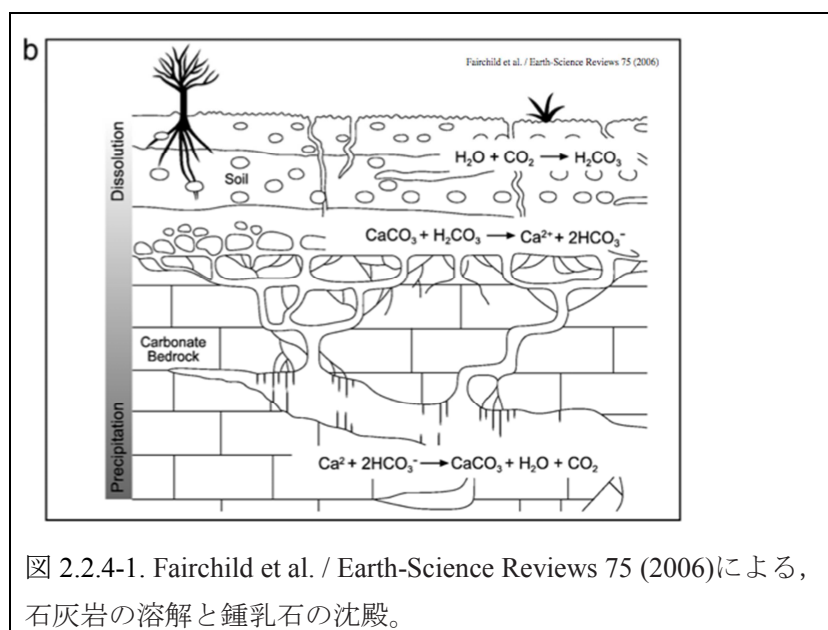
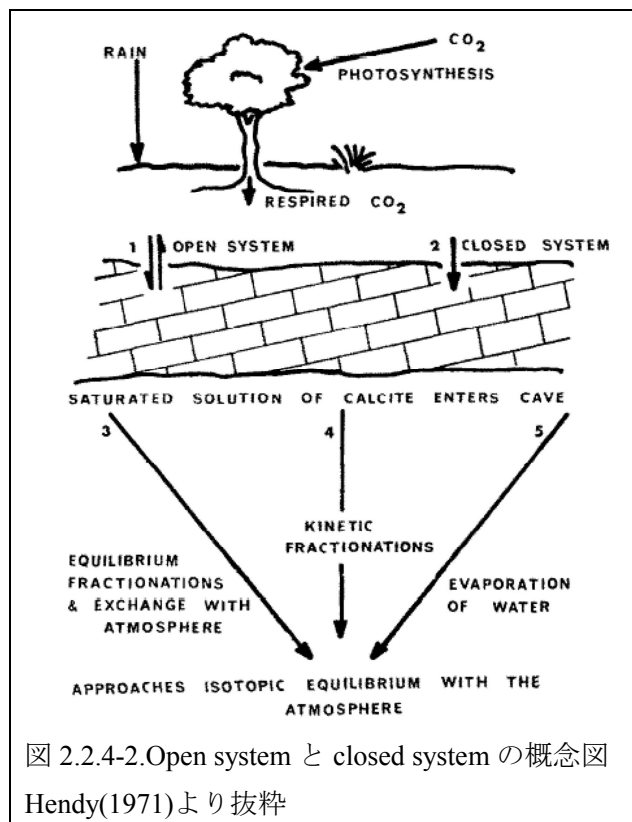


図 2.2.4-1. Fairchild et al. / Earth-Science Reviews 75 (2006)による、石灰岩の溶解と鍾乳石の沈殿。

滴下水中の炭素は、土壌や母岩から溶解した炭素であるが、それらが大気中の ^{14}C よりも古い年代を持っているため、鍾乳石の ^{14}C 年代は真の年代値よりも古く見積もられる。これらの古い炭素のことを **dead carbon** と呼ぶ。中国とバハマで採取された鍾乳石では、**dead carbon** の影響がそれぞれ 450 ± 40 年 (Southern et al., 2012)、1500~2100 年程度 (Hoffmann et al., 2010) と見積もられている。葛生と同じ東アジア夏季モンスーンに影響を受ける中国湖北省 Heshang Cave ($30.44^\circ\text{N}, 110.42^\circ\text{E}$) では、過去1万年間を通して 875 ± 130 ^{14}C 年となることを明らかにした (Noronha et al., 2014)。このように、地域によって **dead carbon** の影響が異なることを説明する概念として Hendy (1971) による、**open system** と **closed system** がある (図 2.2.4-1)。Open system では常に大気中の ^{14}C と平衡状態にあるため、**dead carbon** の影響は 0 である

が、closed system では、大気とのやりとりがない状態で古い年代をもった母岩や土壌中有機物が溶解するため 1 mol の二酸化炭素を中和するための炭酸塩は 1 mol 必要であることから、理論上では dead carbon の混入率が 50% となる。自然界では、こうした極端なシステムは考えられないのでその間に落ち着き、Genty et al. (1999) の見積りによると dead carbon の混入率は自然界で平均して $15 \pm 5\%$ である。



(2) (U-Th)/He 年代測定法による断層年代の測定

放射線元素を用いた年代測定法は数多く開発されている (図 2.2.4-3)。断層年代測定手法として最も事例のある K-Ar 法は、 10^6 年オーダー以上の年代測定が可能である。その一方で、(U-Th)/He 法は 2000 年代に開発された新しい手法で、 10^4 年オーダーの年代測定が可能としながらも、He 定量の難しさから、断層の年代測定に適用した例はほとんどない。そこで、本業務では、He を精度よく定量するため、測定装置を改良した。(U-Th)/He 法において、 ^4He の濃度は以下の式で決定されている。

$$^4\text{He} = 8^{238}\text{U}(\exp(\lambda_{238}t) - 1) + 7^{238}\text{U}/137.88(\exp(\lambda_{235}t) - 1) + 6^{232}\text{Th}(\exp(\lambda_{232}t) - 1)$$

λ はそれぞれ半減期を示す。この式では ^{238}U , ^{232}Th , ^4He の濃度が決まれば時間が決定できる。 ^{238}U と ^{232}Th 濃度は ICP-MS で計測可能であり、 ^4He の濃度が精度よく決まればこの手法を適用する事ができる。

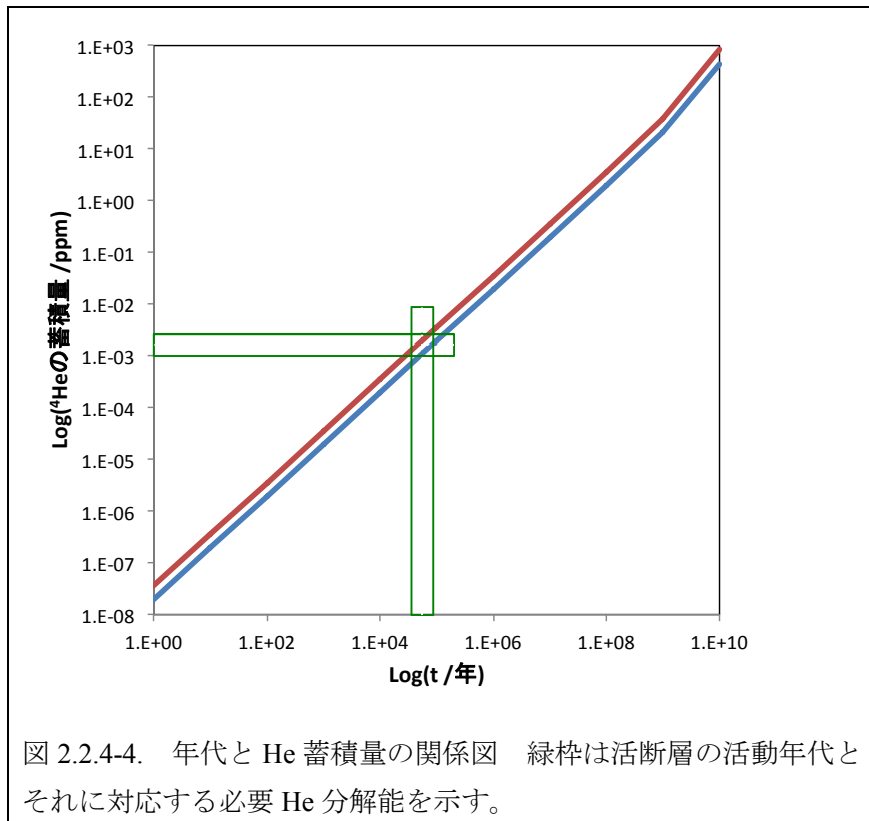
現在、 ^{238}U と ^{232}Th は ICP-MS によって 3% の精度で測定が可能である (図 2.2.4-4)。

濃度の精度が 50%程度も変化する場合、上記式によって導かれる ^4He 直線は大きく変わるが、3%の精度ならほとんど直線の位置は変わらない。そこで、 ^{238}U と ^{232}Th の測定値によって、一意の ^4He 蓄積曲線を描くことができる(図 2.2.4-4)。図 2.2.4-6 の縦軸上に ^4He の測定値をプロットし、そこから横軸に並行に線を引きグラフとの交点で縦軸に線を下ろし、横軸との交点が求める年代値となる。 ^4He 精度が低い(図中の緑枠の大きさが精度)と、年代の精度が低くなる。したがって、年代の精度を上げるため、 ^4He の測定精度を上げる必要がある。 ^4He を ppt のレベルで精度よく測る方法は質量分析しかなく、四重極質量分析計 (Quadrupole Mass Spectrometer : QMS) の ^4He 測定能力を向上させる。

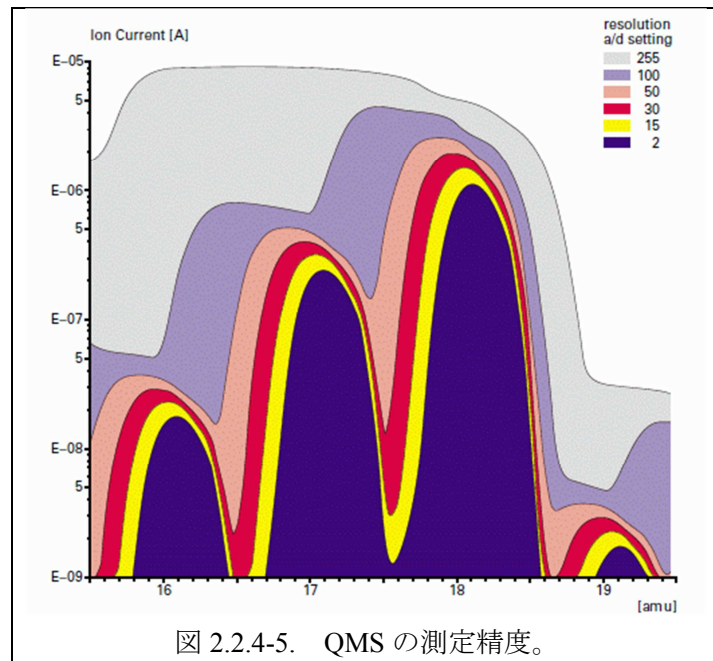
使用元素	適用年代										適用物質	
	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	10 ⁰		
K/Ar	■	■	■	■	◇	◇						地球外、火成岩、変成岩、堆積岩
Rb/Sr	■	■	■	◇								地球外、火成岩、変成岩
Sm/Nd	■	■	◇									地球外
U/Pb、Th/Pb	■	■										地球外、火成岩、変成岩
14C						■	■	■	◇	◇		生物起源、河川堆積物、生体物質
3H/3He									■	■		地下水
10Be			■	■	■							地球外、地下水
36Cl				■	■							地球外
39Ar									◇	◇		地球外
53Mn			■	■	■							地球外
Th/U					■	■	■					火成岩、海洋沈殿物、生物起源
210Pb									■	■	■	海洋沈殿物、生物起源、河川堆積物
(U-Th)/He				◇	◇							生物起源炭酸塩
熱蛍光					■	■	■	■				地上堆積物、陶器
ESR					■	■	■	■				生物起源炭酸塩
フィッシュオントラック	■	■	■	■	■	◇	◇	◇				火成岩、変成岩、堆積岩、ガラス

図 2.2.4-3. 放射年代測定法

■ : 適用可能、◇ : 制限付き適用。赤枠が断層活動年代に対応する。



QMS での He 測定精度は、質量数スペクトルにおける横軸の質量数分解能と縦軸の検出感度で決まる。つまり、質量数分解能と検知限界能を向上させる方法がある。⁴He を精度よく測定するためには、水素や水から供給される D2 を分離する必要があるので、質量数分解能を向上させることが重要である。図 2.2.4-5 では、質量数分解能が悪いと灰色のスペクトルになるが、分解能をあげると濃紫のスペクトルになって、分子を分離できるようになる。したがって、精度向上のために、既存の分析計の精度を上げる必要がある。



具体的には、質量分析計 STANDAM（図 2.2.4-6）において ^4He 周囲の精度を上げる必要がある。このため電源部の心臓部を改造する。第二安定領域で測定するための駆動電源改良を行う。第二安定領域での測定を実現するためには、表 2.2.4 のような電気的条件を満たす必要がある。



図 2.2.4-6. 四重極質量分析計 STANDAM

右端に写っている四角いボックスが、通常の駆動電源回路である。

表 2.2.4 第二安定領域を実現する電気的條件

化学記号	質量数	交流振幅[V]	直流電圧[V]
^4He	4.0026	92.83	41.94
D2	4.0282	93.42	42.21

2.2.5. 放射性炭素年代測定結果

(1) 葛生鍾乳石

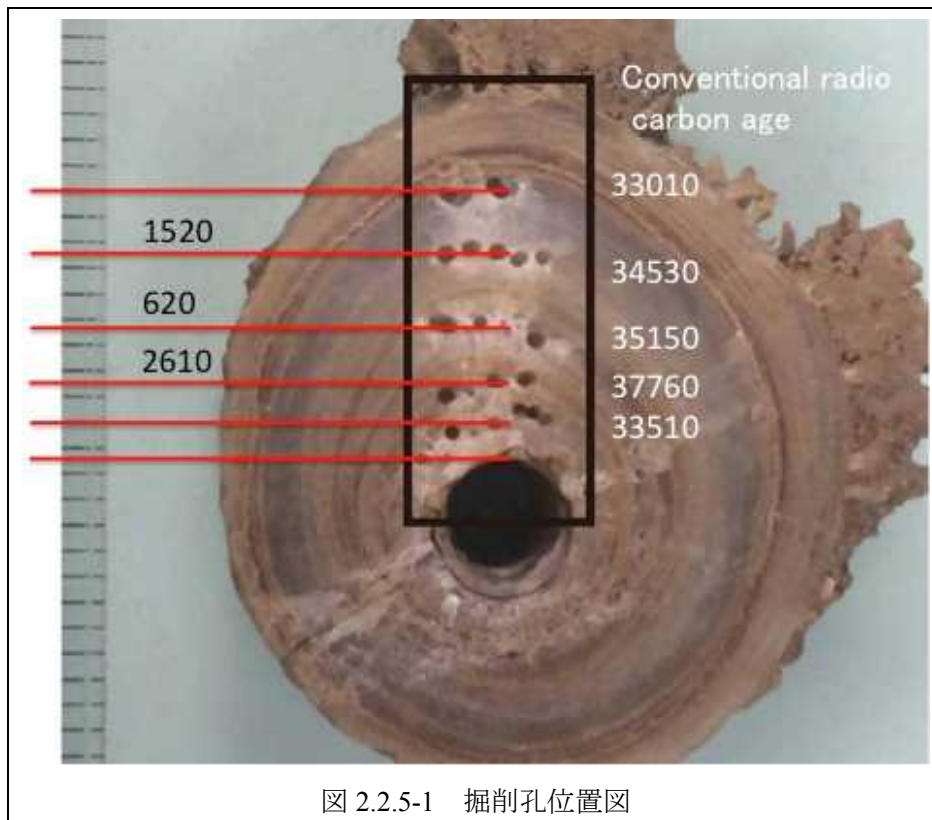
^{14}C 測定のための試料の削りだしは、高精度マイクロミル「GEOMILL326」を用いて行なった。 ^{14}C 測定は、通常 10 mg 以上の炭酸塩が必要なので、直径 1mm 程度の掘削孔をいくつか開けながら必要量に達するまで削りだした (図 2.2.5-1)。削り出しは、図 2.2.5-1 に示す通り、つらら石の中心から外側にかけて、縞の明色部分について行なった。 ^{14}C 測定は、株式会社地球科学研究所に依頼した。加速器質量分析法(AMS 法)で行なった。得られた年代値と中心からの距離の対応は、表 2.2.5-1. に示す。

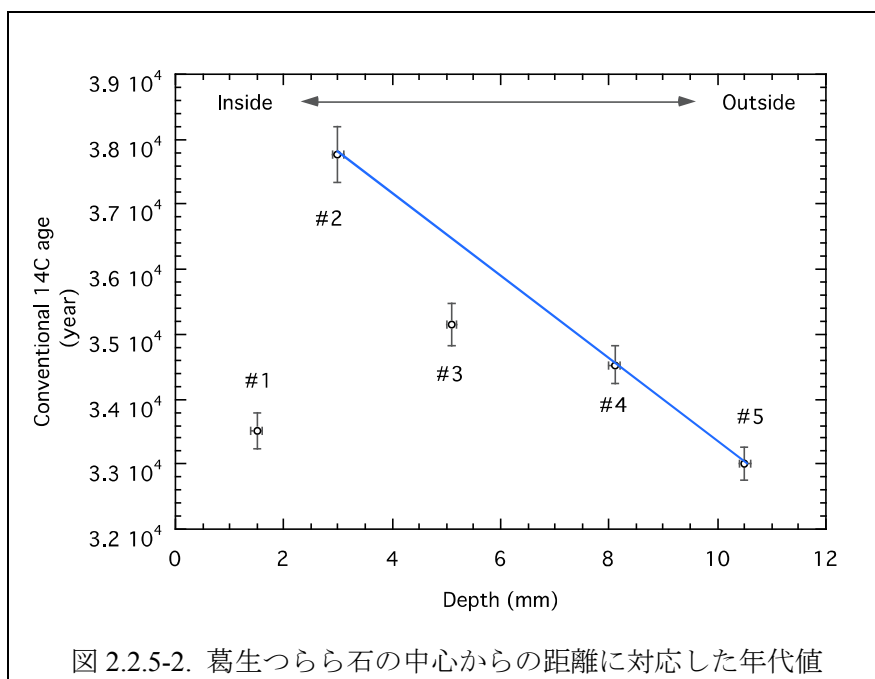
Dead carbon の影響を正確に知るには、U-Th 年代測定法で真の年代値を決める必要があるが、今回は U-Th 年代測定は行なっていない。しかし、おおまかな形成年代を推定することは可能である。これまで報告された dead carbon の影響はバハマの鍾乳石で求められたもので、誤差を含めた最大で約 2500 年である (Hoffmann et al., 2010)。平均は約 1300 年とそれよりも小さい。したがって、最大の dead carbon の影響を 2500 年とすると、葛生のつらら石の形成年代は、暦年代で約 41000 年前～35000 年の間 (IntCal13, Calib7.1 を用いて計算した) であると推定できる。

Dead carbon の影響は、これまでの先行研究で、降水量変動の大きかった東アジア夏季モンスーン地域においても、時代によって大きく変動しないこと (中国湖北省で ± 130 年) が分かっている (Noronha et al., 2014)。したがって、 ^{14}C の年代値が数百年を大きく上回るアノマリは、鍾乳石の成長速度の変化と考えることができる。図 2.2.5-2 には、中心からの距離に対応した ^{14}C 年代値がプロットされている。#1 を除くと、#2～#5 にかけては、つらら石の中心から外側にむかって年代が若くなり、つらら石の成長モデルとも一致する。#2～#3 にかけて成長速度が遅く、#3～#4 にかけて成長速度が速い。各国での、鍾乳石の成長速度に関する報告には、降水や滴下水が成長を阻害する地域と促進する地域がある。成長を阻害する要因として、1) 滴下頻度の上昇が、鍾乳石表面での脱ガスを阻害する、2) 降水の増加する時期に地下水の浸透経路が変わり、滴下水の化学組成が変化する可能性、3) 降水の増加する時期に日射量と気温がともに低下することで土壌二酸化炭素濃度が低下する可能性を挙げている (加藤ほか, 2013)。一方で、滴下水の増加は、鍾乳石の成長を促す場合も考えられる。実際に、亜熱帯湿潤気候、モンスーン地域では、報告例がある。夏の降水量の指標となる酸素同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ は、#3 に、小さい値を示し、降水量の減少を示唆する。測定の時間解像度は高くないが、#3 の時期の ^{14}C のアノマリと $\delta^{18}\text{O}$ の減少は、滴下水の減少が鍾乳石の成長速度にも影響を与えていたことを示唆するものである。

表 2.2.5-1. 試料番号と中心からの距離 conventional 14C age, および $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$

Stalactite	Depth (mm)	Error	Conventional 14C age (year)	Error \pm	$\delta^{13}C$ (‰, VPDB)	Std Dev	$\delta^{18}O$ (‰, VPDB)	Std Dev
Kuzuu 4-1								
#1	1.5	0.1	33510	270				
#2	3	0.1	37760	430	-11.024	0.02	-8.325	0.03
#3	5.1	0.1	35150	320	-10.767	0.022	-8.112	0.008
#4	8.1	0.1	34530	290	-10.426	0.016	-8.459	0.027
#5	10.5	0.1	33010	250	-10.383	0.009	-8.569	0.015





(2) 石垣島鍾乳石

葛生鍾乳石と同じく、高精度マイクロミル「GEOMILL326」を用いて ^{14}C 測定のための試料の削りだしを行なった (図 2.2.5-3)。石垣鍾乳石の ^{14}C 年代測定結果を表 2.2.5-2 に示す。葛生のつらら石に比べて、成長方向に対する ^{14}C の変動が非常に大きい (図 2.2.5-4)。#5 から#4、#3 にかけて、 ^{14}C 測定の誤差の範囲を超えて年代の逆転が occurring。これは、dead carbon の混入率が変動したことを示唆するものである。

表 2.2.5-2. 石垣島石筈の ^{14}C 年代値と深度対応表

sample	Depth (mm)	Error \pm	conventional ^{14}C age (year)	Error \pm	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)
Ishigaki #2	17	0.5	5230	30	-11.4
Ishigaki #3	24.5	0.5	5590	30	-10.5
Ishigaki #4	27.5	0.5	5850	30	-10.4
Ishigaki #5	41	0.5	5560	30	-11.1
Ishigaki #6	45.5	0.5	5870	30	-11.4
Ishigaki #7	52	0.5	5980	30	-11.7



図 2.2.5-3. 石垣島石筈の試料採取位置

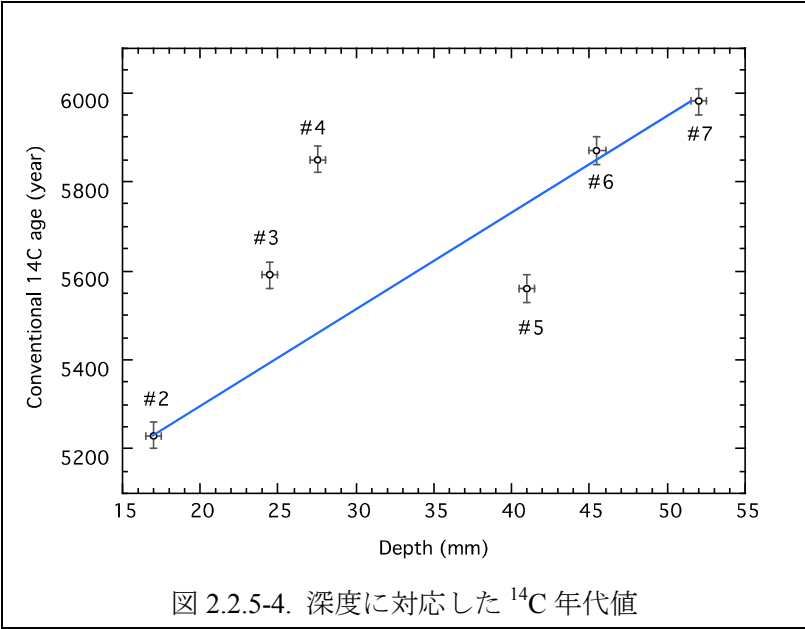


図 2.2.5-4. 深度に対応した ^{14}C 年代値

2.2.6. 電源回路開発結果

改造を行った駆動電源を図 2.2.6 に示す。この駆動電源の出力の実測値と理論値の比較を表 2.2.6 に示す。表 2.2.6 に示されているように、1/100[V]の精度で電圧決定を行うことができた。したがって質量スペクトルにおける質量数分解能が向上できるようになっていると期待される。



図 2.2.6. 改造を行った駆動電源回路。図 2.2.4-6 の駆動電源回路を置換して用いる。

表 2.2.6. 改造した結果実現できた電気的特性

化学記号	質量数	交流振幅[V] 理論値/実測値	直流電圧[V] 理論値/実測値
4He	4.0026	92.83/92.82	41.94/41.94
D2	4.0282	93.42/93.41	42.21/42.21

2.3. まとめ

鍾乳洞調査では様々な種類の鍾乳石が観察された。鍾乳石には様々な形態を示すものが多いが、石筍は円錐形もしくは円筒形と比較的単調な形態を示した。石筍のアスペクト比計測結果から円錐形と円筒形のグループに分類し石筍の成長線を描ける可能性が高く、鍾乳石（石筍）発達モデルに適用できると期待される。鍾乳石、特につらら石の強度に関して、内陸地震に影響を受けるであろう「大滝鍾乳洞」では落下したつらら石がたやすく発見されるのに対し、プレート境界地震に影響を受ける「龍河洞」では確認されなかった。これは内陸地震とプレート境界地震から到達する地震波の特性の違いによって生じているかもしれない。しかしサンプル数が少ないので、他の鍾乳洞においても今後現地調査や聞き取り調査を必要とする。

薄片観察と化学組成分析によって茶褐色層の特徴が明らかになった。茶褐色層はその幅によって3種類に分類された。茶褐色層の実体については、炭酸塩鉱物の配列によるものと粘土鉱物の付着と推定されるものがある。粘土鉱物の付着により茶褐色層が形成される場合、流水が停止した事を示すと考えられる。層の分布に関しては、明らかに茶褐色層密集帯 A4 付近から DB3 に分類される太い茶褐色層が急激に増加する。一方、DB1 に分類される細かい層は見られなくなる。このことは A4 付近で層を形成するなんらかの要因が変化したと考えられる。DB3 など太い茶褐色層には粘土鉱物が含まれる事が多い事から DB3 の急激増加は A4 付近で流水の停止、もしくは極端な減少を伴う何らかのイベントが発生した可能性がある。

つらら石を構成する炭酸塩鉱物は円の中心から放射状にのびており、茶褐色層に規制されずに成長している。これは絶えず水が存在する（つたう）環境における結晶成長によるものと考えられる。その中でも、A4 では茶褐色レイヤーから結晶方向・サイズの異なる炭酸塩鉱物が成長しており、やはり A4 付近におけるイベントの存在が推測される。つらら石と石筍では炭酸塩鉱物の成長が全く異なる。つらら石は緻密で隙間なく大きく成長しているのに対し、石筍では短冊状の小さい鉱物粒子が多数確認される。鉱物間の隙間も多い。つらら石では常に水が供給され、水流の少ない場合でも先端部に滞留しつらら石を覆っている事が多いが、石筍では落ちて来た水滴の量に結晶成長が左右されると考えられる。

炭酸塩鉱物を用いた放射性炭素年代測定により、葛生のつらら石の形成年代は、最大の dead carbon の影響を 2500 年とすると、暦年代で約 41000 年前～35000 年の間であると推定された。つらら石では中心から外側にむかって年代が若くなり、つらら石の成長モデルとも一致した。しかし、#2～#3 にかけて成長速度が遅く、#3～#4 にかけて成長速度が速い。成長速度は流量に左右されると考えられるが、先行研究では降水や滴下水が成長を阻害する地域と促進する地域がある事が分かっている。しかし、本つらら石では酸素同位体比 $\delta 18O$ が #3 で小さい事から、降水量の減少が示唆されている。#3 の時期の ^{14}C の成長速度異常と $\delta 18O$ の減少から、滴下水の減少が鍾乳石の成長速度にも影響を与えていたことが示唆される。

石垣島石筍の放射性年代測定結果では葛生のつらら石に比べて、成長方向に対する

^{14}C の変動が非常に大きいことが明らかとなった。年代の逆転がおこっている箇所が見られる。これは、dead carbon の混入率が変動したことによると考えられる。

放射性炭素同位体年代測定結果と微細構造観察を比較すると、#2~#3 は茶褐色密集帯 A2 を含む。A2 には太い茶褐色層 DB3 が存在し Al, Si 元素が含まれている事が EPMA 分析により確認されている。これは粘土鉱物の付着の可能性が高く、A2 付近で流水が停止したと考えられる。これは#2~#3 の遅い結晶成長と矛盾しない。またこれは#3 における滴下量減少とも矛盾しない。#3~#4 は A3 を含む。A3 や、その外側の#4 を含む部分では DB3 太など太い茶褐色層は観察されず、DB1 に分類される薄い茶褐色レイヤーが多数見られる。これらの DB1 は炭酸塩鉱物で形成されており、粘土鉱物は含まれない。このことから#3~#4 に至るまで流水の停止など成長阻害要因は発生していないと考えられる。流量の増加や地下水の浸透経路の変化による流水の化学組成変化など成長を促進する要因があった推測される。

(U-Th)/He 年代測定法の活断層年代測定への適用を目指し、QMS における 4He 分解能の向上のため駆動電源の改良を行い、その結果 1/100[V]の精度で電圧決定を行うことに成功し、質量スペクトルにおける質量数分解能が向上できるようになっていると期待される。今後、実際に測定を行い質量数分解能が向上を確かめ、鍾乳石の炭酸塩鉱物への適用する事により、より正確な年代決定を得る事ができる。また放射性炭素同位体年代測定結果と比較することにより、炭酸塩鉱物の年代決定にネックとなる dead carbon の影響を見る事もできる。

3. 岩石の色彩変化に関するデータ拡充

3.1 標準試料の加熱試験

3.1.1 標準試料の調整

加熱色彩変化実験を実施した。実験に用いる試料として、郷村断層帯（試料 A）、山崎断層帯（試料 B）、警固－西山断層帯（試料 C）、淡路断層帯（試料 D）の母岩の性質に近い試料（標準試料）を用意した。まず、標準試料について、各断層帯において厚さ 10mm を目安にスライスした岩石を 4 個用意し、試料の観察及び分光色彩計を用いて色彩測定を行った（計 16 試料）。さらに、表面の変化が把握できるように写真撮影を行った。作成した岩石試料を図 3.1.1 に示す。

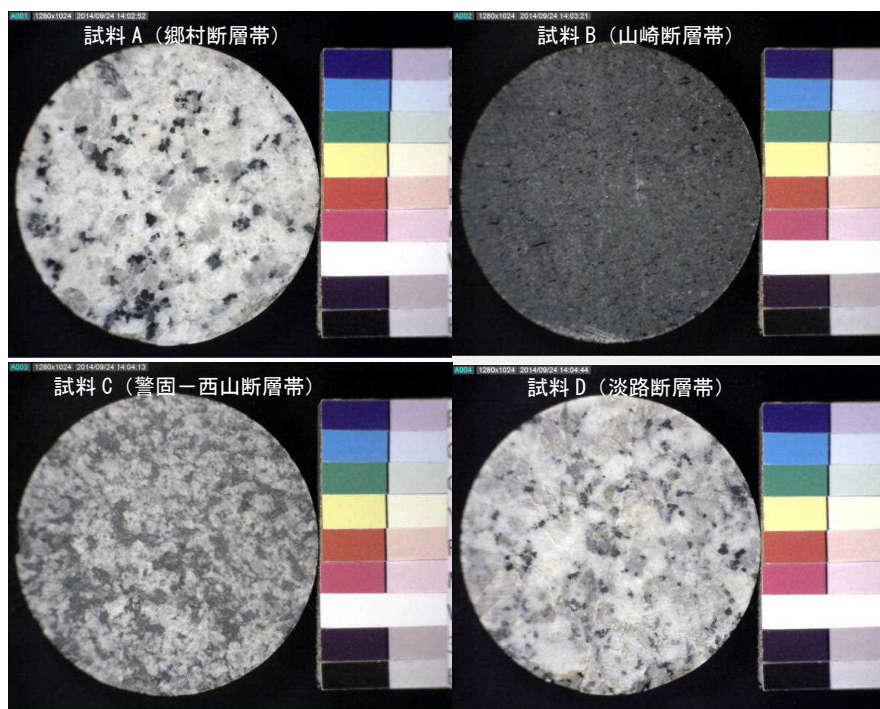


図 3.1.1 スライスした標準試料

(岩石試料の直径はすべて 5 c m)

3.1.2 標準試料の加熱試験

作製した標準試料を純水に半日程度浸漬させ、その後、温度設定したインキュベーター内に入れ保温した。試料をインキュベーターから取り出し、分光色彩計を用いて色彩の測定し、試料観察及び写真撮影を行った。色彩測定の方法については、3.2 節「標準試料の色彩測定」に示す。同じ試料を用いて、これら一連の作業を計 8 回行った。なお、インキュベーターの温度は 100℃ (373K)、127℃ (400K)、177℃ (450K)、227℃ (500K) とした。加熱温度と保温時間一覧を表 3.1.1 に示す。

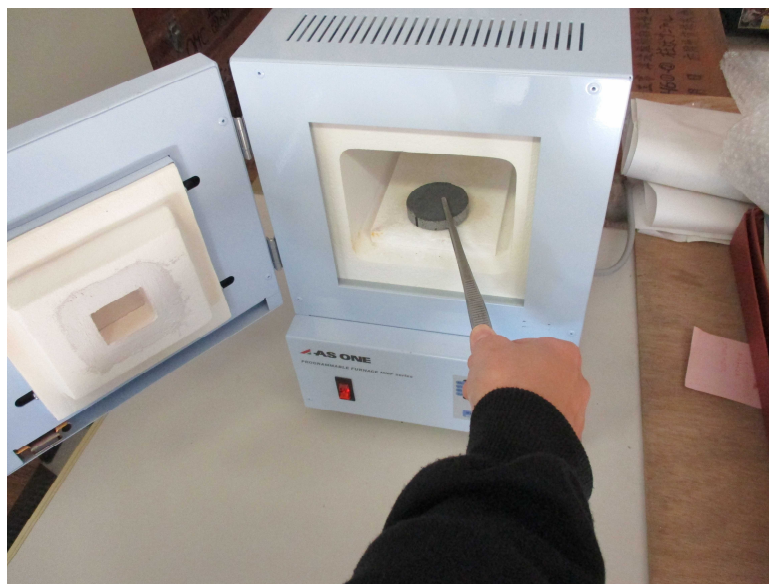


図 3.1.2 試料投入



図 3.1.3 試料加熱中

表 3.1.1 本業務で実施した加熱温度と保温時間一覧

加熱温度		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目
100℃	加熱時間	5 時間	5 時間	5 時間	5 時間	20 時間	20 時間	50 時間	50 時間
	合計	5 時間	10 時間	15 時間	20 時間	40 時間	60 時間	110 時間	160 時間
127℃	加熱時間	5 時間	5 時間	5 時間	5 時間	20 時間	20 時間	50 時間	50 時間
	合計	5 時間	10 時間	15 時間	20 時間	40 時間	60 時間	160 時間	160 時間
177℃	加熱時間	5 時間	5 時間	5 時間	5 時間	20 時間	20 時間	50 時間	50 時間
	合計	5 時間	10 時間	15 時間	20 時間	40 時間	60 時間	110 時間	160 時間
227℃	加熱時間	5 時間	5 時間	5 時間	5 時間	20 時間	20 時間	50 時間	50 時間
	合計	5 時間	10 時間	15 時間	20 時間	40 時間	60 時間	110 時間	160 時間

3.1.3 加熱試験結果

加熱した試料の写真を図 3.1.4～3.1.19 に示す。

試料 A（郷村断層帯）は、肉眼での色彩変化は確認できなかった。試料 B（山崎断層帯）は、177℃および 227℃加熱試料で、時間の経過および温度の上昇とともに暗褐色化した。100℃および 127℃加熱試料については、肉眼での色彩変化はほとんど確認できなかった。試料 C（警固－西山断層帯）は、肉眼での色彩変化は確認できなかった。試料 D（淡路断層帯）は、時間の経過および温度の上昇とともに暗褐色化した。また、長石など鉱物の境界部分が白く変色した。

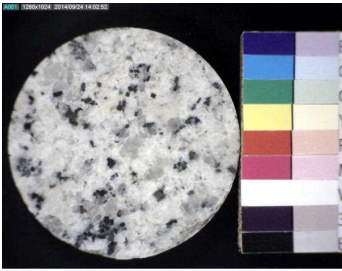
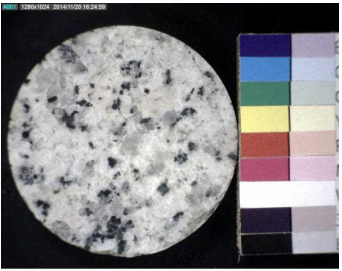

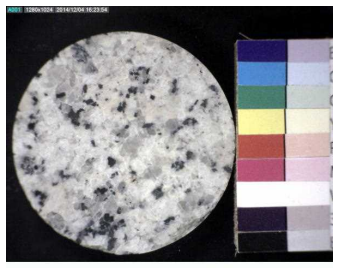
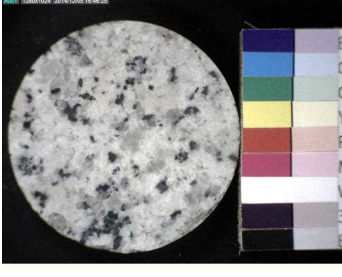

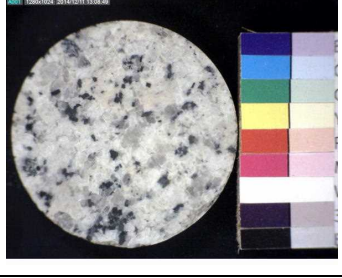
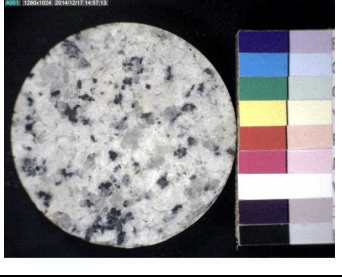
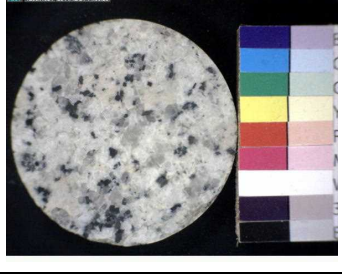
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.4 標準試料 A 試料 100°C加熱試験結果








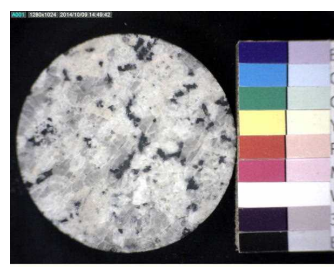

非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.5 標準試料 A 試料 127°C加熱試験結果

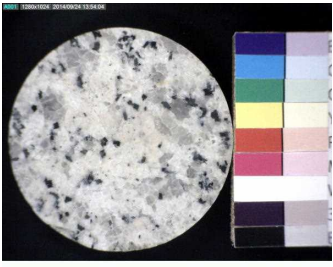




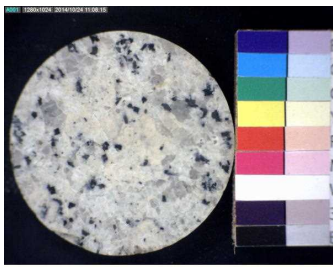



非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.6 標準試料 A 試料 177°C加熱試験結果


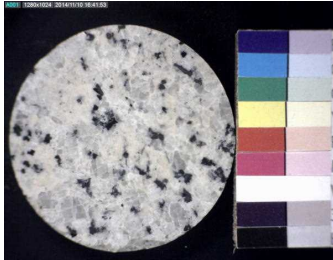
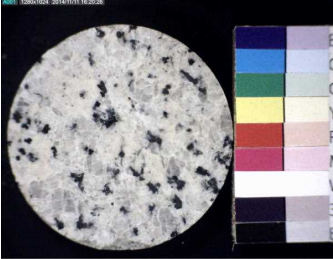
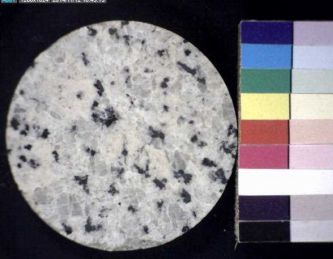
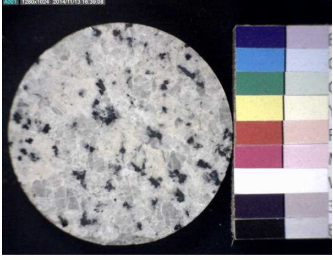
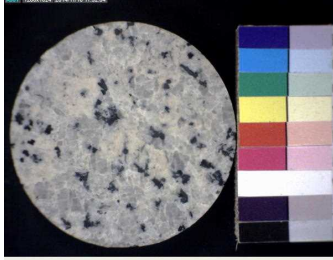
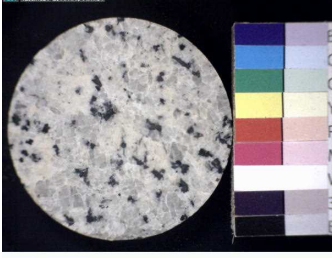
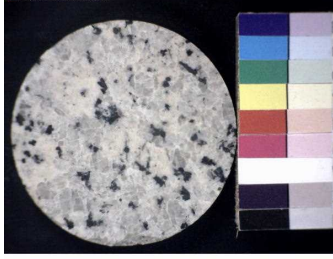
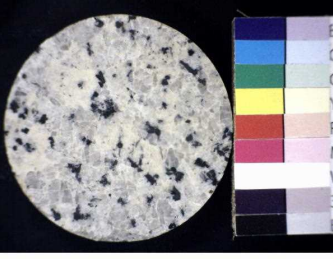
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.7 標準試料 A 試料 227°C加熱試験結果

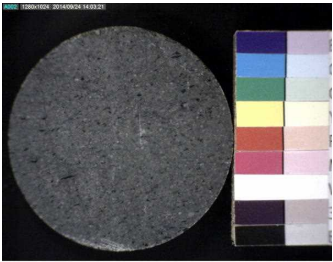
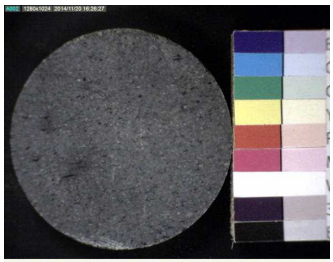
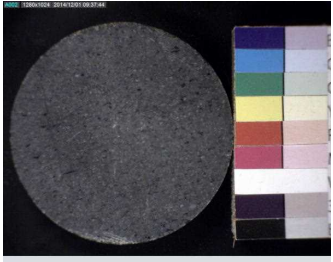
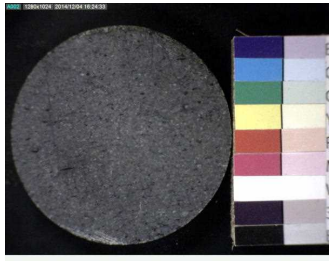
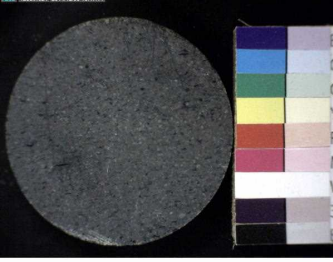
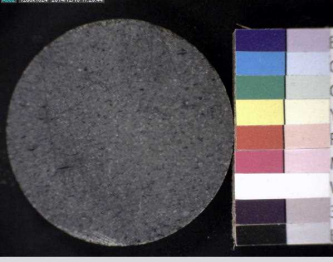
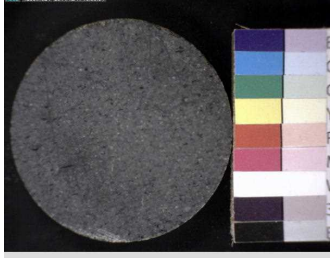
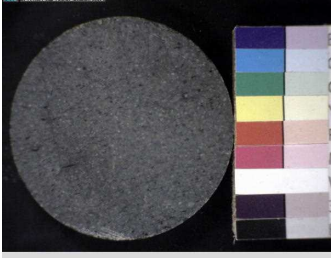
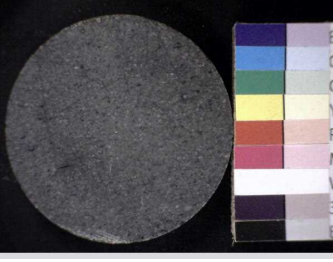
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.8 標準試料 B 試料 100°C加熱試験結果

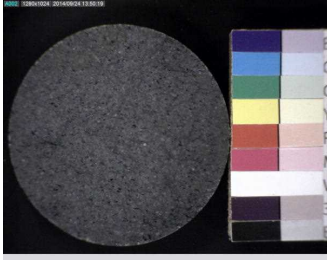
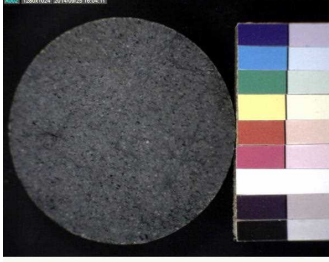
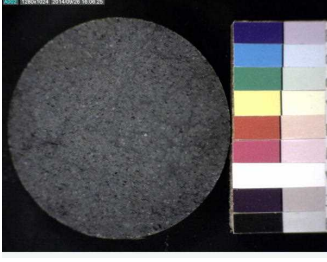
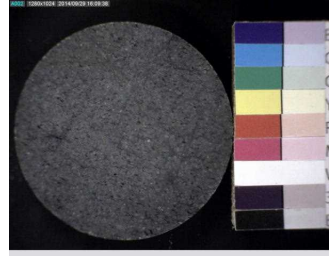
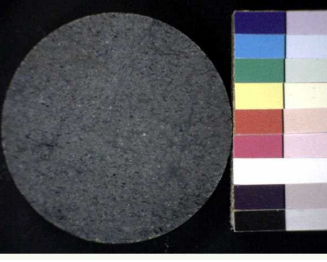
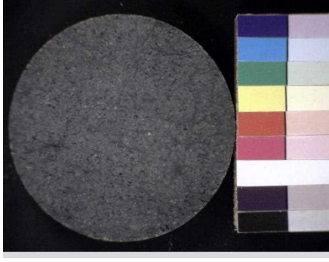
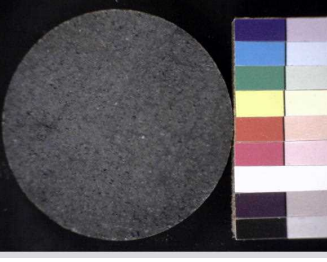
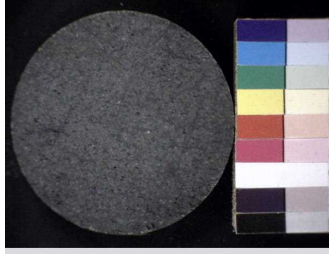
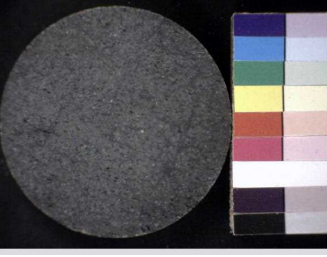
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.9 標準試料 B 試料 127°C加熱試験結果

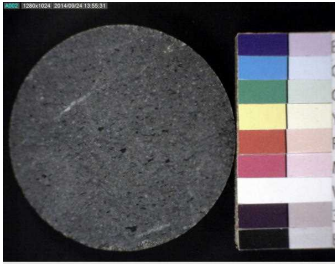
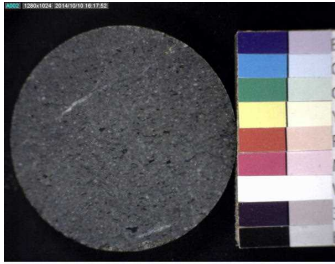
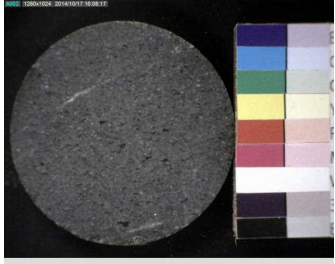
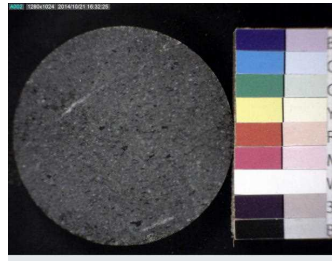
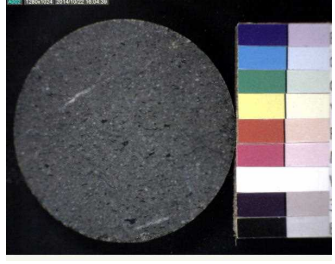
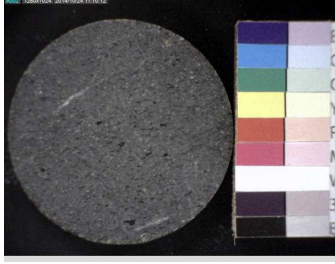
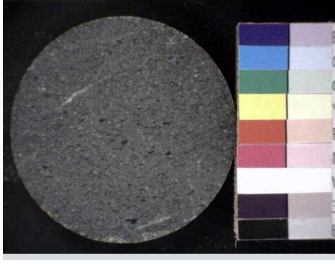
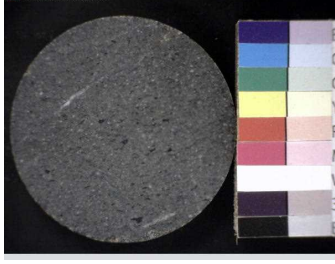
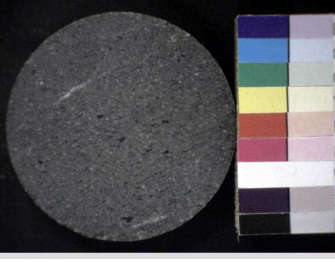
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.10 標準試料 B 試料 177°C加熱試験結果

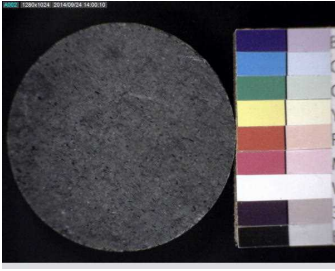
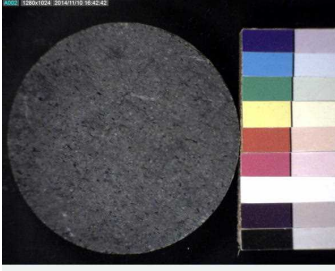
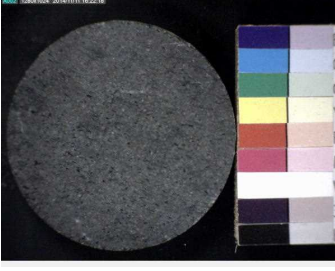
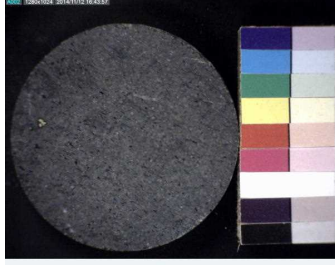
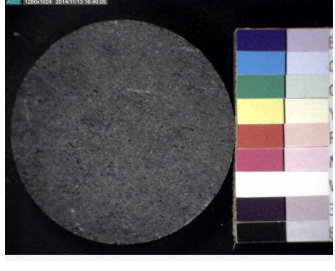
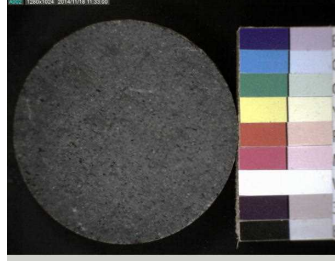
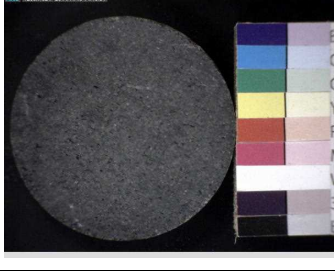
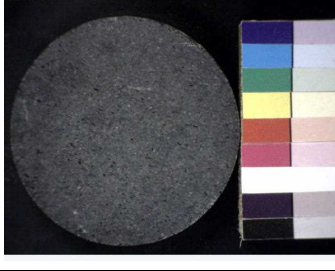
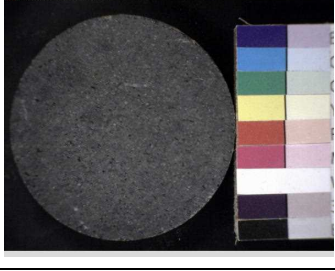
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.11 標準試料 B 試料 227°C加熱試験結果

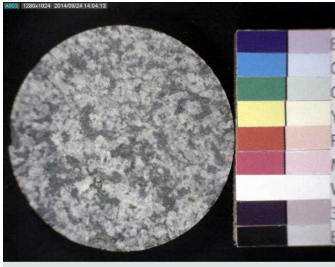
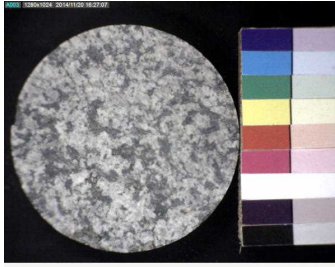

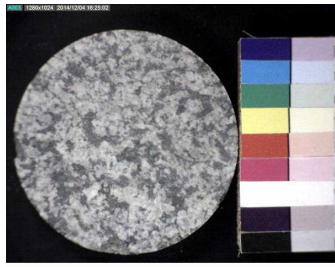
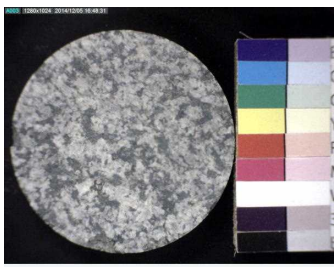
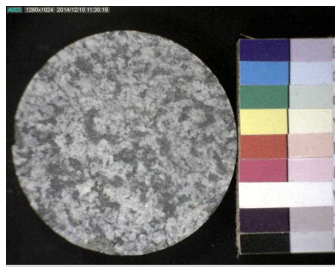
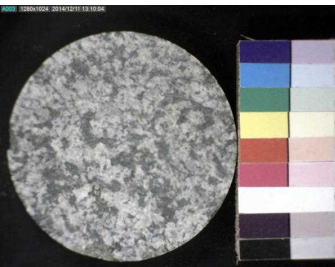
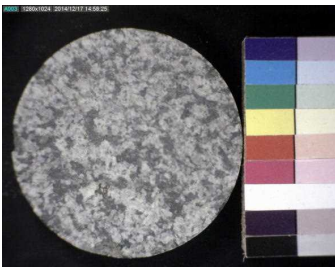
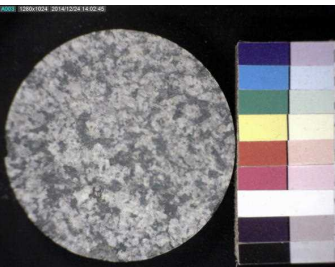
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.12 標準試料 C 試料 100°C加熱試験結果


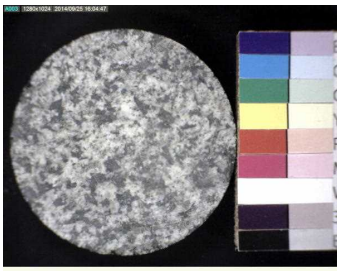
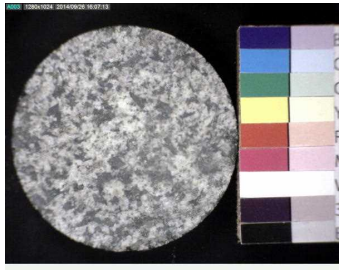
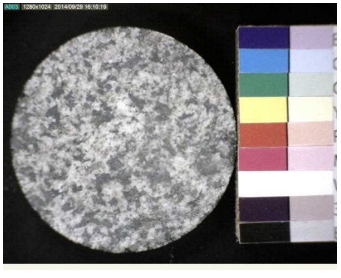
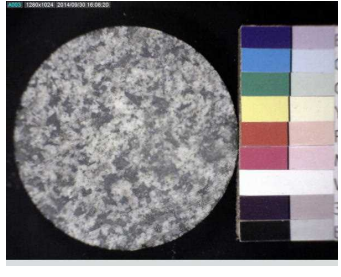
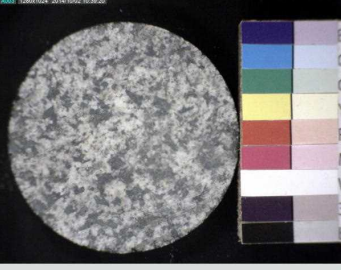
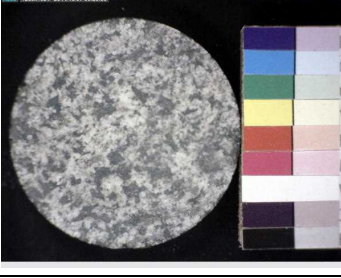
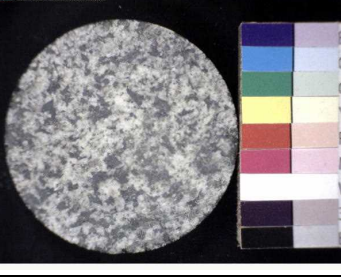
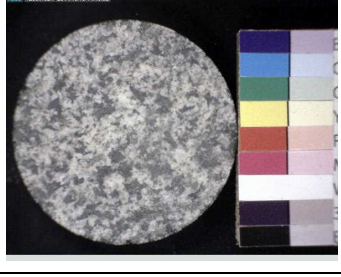
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.13 標準試料 C 試料 127°C加熱試験結果


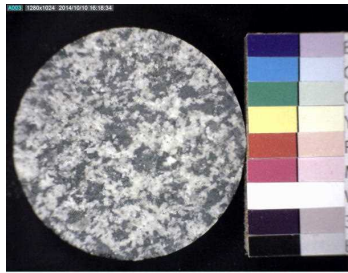

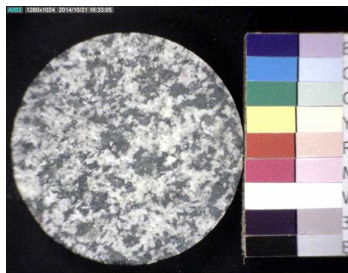

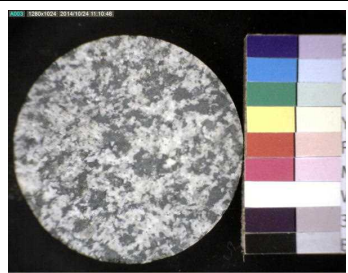


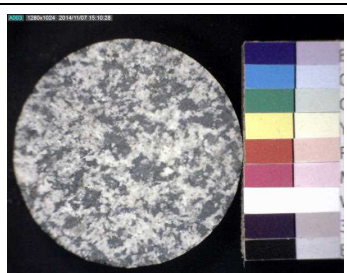
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.14 標準試料 C 試料 177°C加熱試験結果

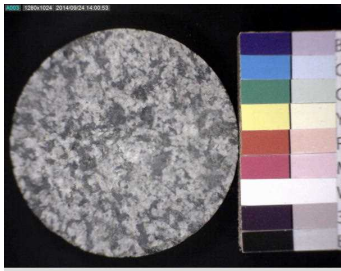
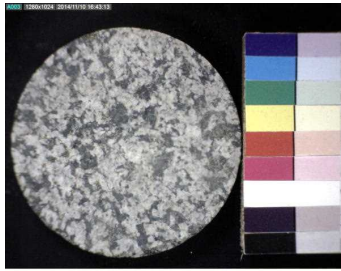


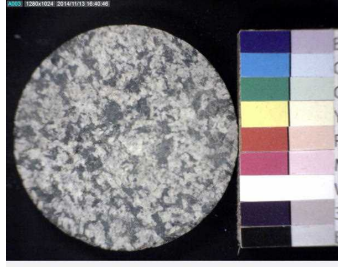

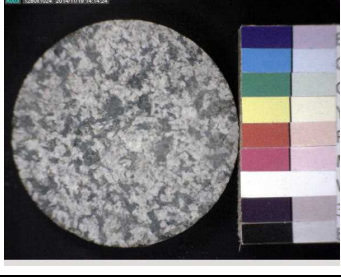
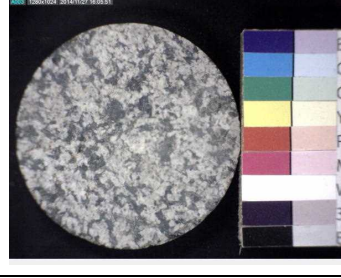

非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.15 標準試料 C 試料 227°C加熱試験結果










非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.16 標準試料 D 試料 100°C加熱試験結果








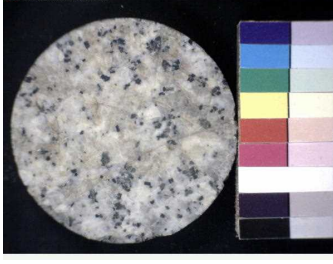
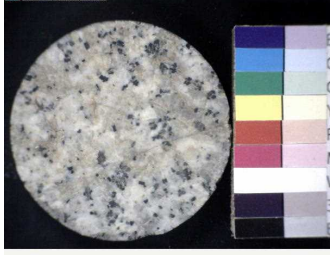
非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.17 標準試料 D 試料 127°C加熱試験結果


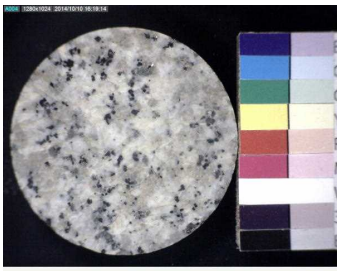







非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.18 標準試料 D 試料 177°C加熱試験結果

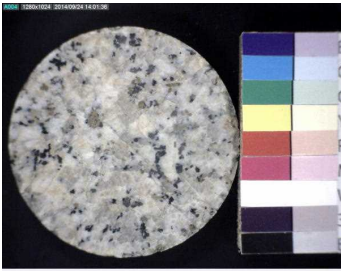








非加熱試料	5 時間加熱後
	
1 0 時間加熱後	1 5 時間加熱後
	
2 0 時間加熱後	4 0 時間加熱後
	
6 0 時間加熱後	1 1 0 時間加熱後
	
1 6 0 時間加熱後	
	

図 3.1.19 標準試料 D 試料 227°C加熱試験結果

3.2 実験試料の色彩測定

3.2.1 色彩測定

(1) 色彩値の表記

色彩値の表記方法としては、マンセル表色系、XYZ表色系、L*C*h表色系、L*a*b*表色系などが挙げられるが、本業務では現在最も用いられているL*a*b*表色系で色彩を表記することとした。L*a*b*表色系では、明度をL*、色彩と彩度を表す色度をa*、b*で表し、a*は赤方向、-a*は緑方向、そしてb*は黄方向、-b*は青方向を示す。数値が大きくなるに従って色あざやかになり、中心になるに従ってくすんだ色になる(図3.2.1)。L*a*b*表色系は、1976年に国際照明委員会(CIE)で規格化されており、本業務においてもCIE1976(L*a*b*)表色系で計測した。

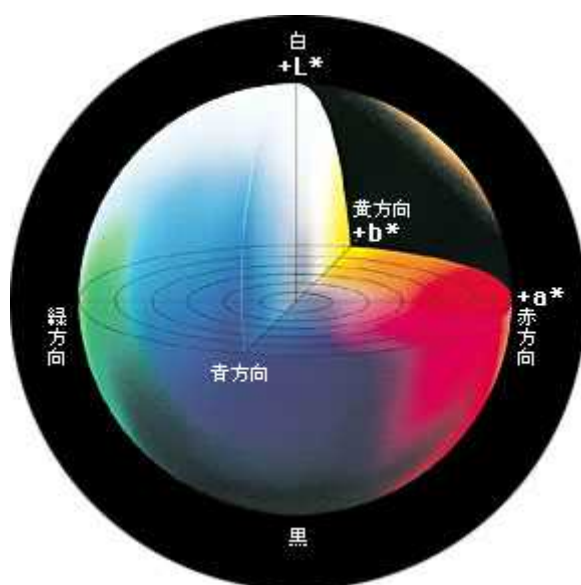


図 3.2.1 L*a*b*表色系の色空間立体イメージ (コニカミノルタ社 Web ページ)

(2) 試料の色彩測定方法

色彩測定には、コニカミノルタ社製分光測色計 CM-700d (図 3.2.2) を用いて実施した。



図 3.2.2 コニカミノルタ社製分光測色計 CM-700d (コニカミノルタ社 Web ページ)

3.1 で作成・加熱試験を実施した標準試料および断層帯試料を、図 3.2.3 のように分光測色計を上下左右移動させて複数点測定した（測定風景：図 3.2.4～3.2.5）。

色彩測定後ただちに内部データを PC に取り込み、得られた色彩データを測線毎に $L^*a^*b^*$ の順でデータを表にまとめた。得られた色彩データから平均値、標準偏差値、標準誤差値を求め、それらの値を試料の色彩値とした。

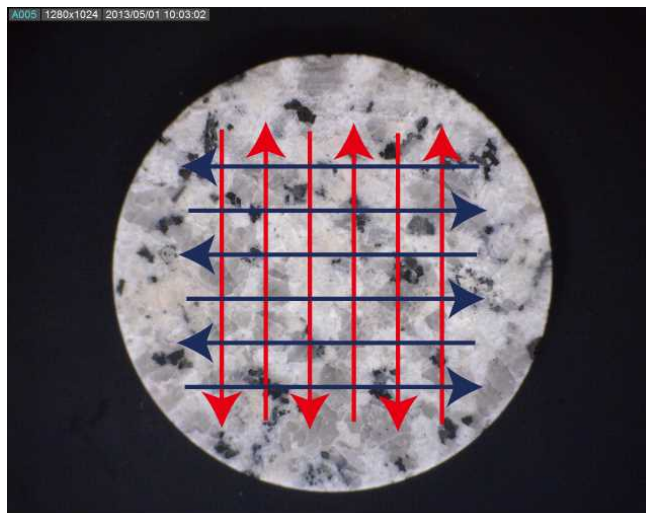


図 3.2.3 色彩測定における測線例



図 3.2.4 色彩測定状況



図 3.2.5 色彩測定状況

なお、岩石試料の色彩を測定するにあたり、岩石試料は様々な色彩・形状・大きさの結晶をもつことから、同一試料を複数点測定し、統計的に岩石試料（母集団）の色彩値を求めた。岩石試料の色彩値を求めるために必要な測定（サンプリング）数を、以下のように計算した。

岩石の色彩値が信頼度 95%の正規分布に従うとすると誤差は以下のように計算される。

$$E = 1.96 \sqrt{\frac{N-n}{N-1} \times \frac{P(100-P)}{n}} \dots \dots \dots (1)$$

E：サンプリング誤差の最大値、N：母集団の大きさ、n：標本数、P：母集団の赤色（もしくは黄色）データの割合

式(1)は以下のように変形される。

$$E = 1.96 \sqrt{\frac{N-n}{N-1} \times \frac{P(100-P)}{n}} \leq 2 \sqrt{\frac{P(100-P)}{n}} \dots \dots \dots (2)$$

色彩値が赤色と判断される（もしくは黄色と判断される）割合が 50%であるとする
と、式(2)は、

$$E \leq 2 \sqrt{\frac{50(100-50)}{n}} = \frac{100}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (3)$$

となる。この時、誤差 E に 15%を代入すると

$$n = \left(\frac{100}{E}\right)^2 = \left(\frac{100}{15}\right)^2 \cong 44.4 < 50 \dots \dots \dots (4)$$

となり、1 試料あたり n=50 個のサンプリング数があれば、誤差 E を 15%未満にすることが
できる。色彩分布が単一の正規分布（ユニモーダル分布）を持つと仮定した時の
測定数と最大誤差の関係を表 3.2.1 に示す。本業務では 1 試料につき 50 点の色彩
を測定することとした。

表 3.2.1 色彩分布が単一分布であると仮定した時の測定数と最大誤差の関係

測定数 n	3	10	30	50	100	400	2500
最大誤差 E	58%	32%	18%	14%	10%	5%	2%

3.2.2 色彩測定結果

標準試料の色彩測定結果を表 3.2.2～表 3.2.17 に示す。

試料 A (郷村断層帯) は、定温条件下では時間の経過とともに a*値および b*値が増加する傾向が認められた。また、標準偏差は加熱温度によって大きな違いは見られなかった。標準偏差で示される測定値のばらつきは、色彩変化による確率論的ばらつきと試料や測定条件に依存した測定誤差にもとづくばらつきの両方を含んでいると考えられる。試料 A の場合、加熱温度の異なる試料間に大きな違いが認められなかったことから、色彩変化によるばらつきは、測定誤差の影響よりも小さいと考えられる。

試料 B (山崎断層帯) は、試料 A と同様に定温条件下では時間の経過とともに a*値および b*値が増加する傾向が認められた。標準偏差については、試料 A よりも低い値を示した。これは、試料 A の母岩が花崗岩で結晶の粒径が多様である一方で、試料 B は泥岩で結晶が細粒で均質であるためだと考えられる。また、b*値の標準偏差に大きな変化が認められない一方で、a*値は高温で加熱した試料ほど時間の経過とともに標準偏差が増える傾向が認められた。これは、色彩の変化に伴って色彩値がばらつく傾向を示し、測定誤差によるばらつきを上回ったためと考えられる。

試料 C (警固－西山断層帯) は、試料 A、試料 B と同様に定温条件下では時間の経過とともに a*値および b*値が増加する傾向が認められた。標準偏差については試料 A と同様の値を示し、花崗岩の特徴を示していると考えられる。また、277°C加熱試料、327°C加熱試料では標準偏差が若干高くなる傾向が見られる一方で、377°C加熱試料では減少に転じた。このばらつきが色彩の変化に依存すると考えると、377°C加熱試料は色彩がこれ以上変化しない状態 (飽和状態) に近づいていることを示唆している。

試料 D (淡路断層帯) は、定温条件下では時間の経過とともに a*値が増加する傾向が見られる一方で、b*値についてはほとんど変わらない試料 (たとえば 377°C加熱試料) や、減少傾向を示す試料 (たとえば 277°C加熱試料) が見られた。標準偏差については試料 A (a*値)、試料 B (a*値、b*値)、試料 C (a*値、b*値) と比較して数値が大きく、標準試料そのものの色彩値のばらつきが大きいことを示している。その一方で、高温加熱試料 (327°C加熱試料、377°C加熱試料) は他 2 つの加熱試料と比較して標準偏差の減少傾向が認められ、色彩値が飽和状態に近づいていると思われる。

(a) 郷村断層帯 (試料 A)

表 3.2.2 標準試料 試料 A 100°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	69.08	6.51	0.92	-0.74	0.61	0.09	2.55	1.19	0.17
1	5	5	69.29	6.60	0.93	-0.58	0.63	0.09	3.01	1.14	0.16
2	5	10	68.70	6.33	0.89	-0.62	0.65	0.09	2.74	1.26	0.18
3	5	15	68.85	4.40	0.62	-0.38	0.82	0.12	3.18	1.53	0.22
4	5	20	67.75	5.36	0.76	-0.36	0.67	0.09	2.93	1.38	0.20
5	20	40	68.52	4.84	0.68	-0.42	0.67	0.09	2.55	1.13	0.16
6	20	60	67.74	5.22	0.74	-0.53	0.61	0.09	2.45	1.06	0.15
7	50	110	66.94	6.95	0.98	-0.32	0.68	0.10	2.98	1.39	0.20
8	50	160	65.06	6.86	0.97	-0.34	0.60	0.09	2.77	1.21	0.17

表 3.2.3 標準試料 試料 A 127°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	68.88	7.70	1.09	-0.77	0.57	0.08	2.73	1.42	0.20
1	5	5	70.06	8.62	1.22	-0.84	0.62	0.09	2.77	1.56	0.22
2	5	10	68.17	7.33	1.04	-0.46	0.58	0.08	3.00	1.42	0.20
3	5	15	69.91	7.16	1.01	-0.59	0.54	0.08	3.06	1.43	0.20
4	5	20	70.67	6.16	0.87	-0.47	0.55	0.08	3.68	1.27	0.18
5	20	40	69.99	6.07	0.86	-0.58	0.58	0.08	3.20	1.43	0.20
6	20	60	69.71	8.14	1.15	-0.53	0.54	0.08	3.43	1.50	0.21
7	50	110	70.91	6.05	0.86	-0.49	0.59	0.08	3.62	1.23	0.17
8	50	160	69.38	7.52	1.06	-0.48	0.58	0.08	3.45	1.51	0.21

表 3.2.4 標準試料 試料 A 177°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	69.43	6.03	0.85	-0.19	0.71	0.10	3.76	1.40	0.20
1	5	5	70.07	4.56	0.65	0.17	0.80	0.11	4.27	1.54	0.22
2	5	10	70.02	5.07	0.72	0.20	0.73	0.10	4.24	1.43	0.20
3	5	15	69.13	4.70	0.66	0.28	0.70	0.10	4.30	1.75	0.25
4	5	20	70.53	4.68	0.66	0.29	0.74	0.10	4.81	1.54	0.22
5	20	40	69.58	5.01	0.71	0.47	0.66	0.09	4.95	1.46	0.21
6	20	60	70.58	4.26	0.60	0.37	0.72	0.10	5.17	1.47	0.21
7	50	110	69.82	4.29	0.61	0.37	0.57	0.08	5.05	1.26	0.18
8	50	160	68.68	4.87	0.69	0.45	0.68	0.10	4.78	1.66	0.23

表 3.2.5 標準試料 試料 A 227°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	66.16	7.73	1.09	-0.55	0.84	0.12	2.57	1.81	0.26
1	5	5	67.43	5.75	0.81	0.19	0.56	0.08	3.82	1.47	0.21
2	5	10	68.44	4.68	0.66	0.38	0.50	0.07	4.34	1.29	0.18
3	5	15	67.51	6.42	0.91	0.50	0.73	0.10	4.47	1.72	0.24
4	5	20	66.16	6.25	0.88	0.38	0.60	0.08	4.03	1.74	0.25
5	20	40	67.11	5.17	0.73	0.65	0.60	0.09	4.53	1.54	0.22
6	20	60	66.37	5.47	0.77	0.61	0.55	0.08	4.32	1.58	0.22
7	50	110	66.57	4.99	0.71	0.85	0.56	0.08	4.49	1.61	0.23
8	50	160	66.14	5.82	0.82	0.90	0.58	0.08	4.46	1.54	0.22

(b) 山崎断層帯 (試料 B)

表 3.2.6 標準試料 試料 B 100°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	41.36	0.74	0.11	-1.10	0.07	0.01	-2.26	0.16	0.02
1	5	5	41.14	0.87	0.12	-0.84	0.13	0.02	-2.34	0.27	0.04
2	5	10	40.78	0.94	0.13	-0.82	0.10	0.01	-2.51	0.23	0.03
3	5	15	40.75	0.84	0.12	-0.80	0.12	0.02	-2.30	0.26	0.04
4	5	20	41.12	0.92	0.13	-0.80	0.12	0.02	-2.36	0.23	0.03
5	20	40	41.58	1.18	0.17	-0.80	0.13	0.02	-2.38	0.27	0.04
6	20	60	41.51	0.89	0.13	-0.77	0.10	0.01	-2.28	0.23	0.03
7	50	110	42.39	0.98	0.14	-0.77	0.09	0.01	-2.14	0.22	0.03
8	50	160	41.56	0.85	0.12	-0.78	0.07	0.01	-1.83	0.26	0.04

表 3.2.7 標準試料 試料 B 127°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	40.31	0.81	0.11	-0.87	0.10	0.01	-2.42	0.28	0.04
1	5	5	41.20	0.93	0.13	-0.91	0.06	0.01	-2.52	0.22	0.03
2	5	10	41.36	1.03	0.15	-0.76	0.11	0.02	-2.21	0.34	0.05
3	5	15	41.51	0.96	0.14	-0.81	0.10	0.01	-2.29	0.29	0.04
4	5	20	41.06	0.84	0.12	-0.76	0.07	0.01	-2.08	0.23	0.03
5	20	40	41.66	0.96	0.14	-0.85	0.08	0.01	-2.18	0.22	0.03
6	20	60	40.78	1.01	0.14	-0.74	0.11	0.02	-2.16	0.32	0.05
7	50	110	41.83	0.74	0.10	-0.84	0.06	0.01	-2.01	0.24	0.03
8	50	160	42.10	0.87	0.12	-0.83	0.06	0.01	-2.08	0.27	0.04

表 3.2.8 標準試料 試料 B 177°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	40.75	0.95	0.13	-1.13	0.07	0.01	-2.11	0.24	0.03
1	5	5	40.89	0.88	0.12	-0.95	0.05	0.01	-1.51	0.31	0.04
2	5	10	41.01	0.88	0.12	-0.91	0.06	0.01	-1.62	0.31	0.04
3	5	15	40.89	0.85	0.12	-0.85	0.05	0.01	-1.30	0.34	0.05
4	5	20	40.89	0.75	0.11	-0.82	0.05	0.01	-1.15	0.26	0.04
5	20	40	41.33	0.85	0.12	-0.81	0.06	0.01	-0.93	0.31	0.04
6	20	60	41.40	0.77	0.11	-0.79	0.05	0.01	-0.86	0.31	0.04
7	50	110	40.68	0.91	0.13	-0.76	0.06	0.01	-0.91	0.36	0.05
8	50	160	41.45	0.83	0.12	-0.74	0.06	0.01	-0.74	0.29	0.04

表 3.2.9 標準試料 試料 B 227°C加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	40.60	1.35	0.19	-0.99	0.10	0.01	-2.62	0.19	0.03
1	5	5	40.72	1.07	0.15	-0.77	0.07	0.01	-1.71	0.24	0.03
2	5	10	40.13	1.07	0.15	-0.67	0.05	0.01	-1.63	0.25	0.04
3	5	15	40.01	0.89	0.13	-0.60	0.07	0.01	-1.30	0.27	0.04
4	5	20	40.18	1.07	0.15	-0.59	0.07	0.01	-1.27	0.27	0.04
5	20	40	40.12	1.00	0.14	-0.49	0.06	0.01	-1.17	0.26	0.04
6	20	60	40.21	1.06	0.15	-0.47	0.08	0.01	-1.16	0.27	0.04
7	50	110	40.08	0.76	0.11	-0.37	0.08	0.01	-1.23	0.27	0.04
8	50	160	40.13	0.69	0.10	-0.30	0.07	0.01	-1.27	0.25	0.04

(c) 警固－西山断層帯 (試料 C)

表 3.2.10 標準試料 試料 C 100℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	60.17	4.23	0.60	-1.75	0.42	0.06	0.54	0.74	0.10
1	5	5	59.49	4.77	0.68	-1.65	0.48	0.07	0.48	0.76	0.11
2	5	10	59.42	4.25	0.60	-1.63	0.43	0.06	0.44	0.80	0.11
3	5	15	58.15	4.40	0.62	-1.64	0.47	0.07	0.54	0.78	0.11
4	5	20	58.97	4.54	0.64	-1.55	0.48	0.07	0.50	0.73	0.10
5	20	40	59.17	4.22	0.60	-1.51	0.47	0.07	0.47	0.68	0.10
6	20	60	59.46	4.39	0.62	-1.49	0.41	0.06	0.52	0.77	0.11
7	50	110	59.51	3.57	0.51	-1.43	0.44	0.06	0.53	0.63	0.09
8	50	160	59.23	4.72	0.67	-1.52	0.40	0.06	0.86	0.79	0.11

表 3.2.11 標準試料 試料 C 127℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	61.81	6.43	0.91	-2.11	0.49	0.07	1.88	1.13	0.16
1	5	5	61.21	5.42	0.77	-2.03	0.47	0.07	1.21	1.04	0.15
2	5	10	61.33	5.01	0.71	-1.79	0.38	0.05	1.61	1.12	0.16
3	5	15	61.30	4.33	0.61	-1.65	0.38	0.05	1.65	0.94	0.13
4	5	20	60.83	4.62	0.65	-1.68	0.35	0.05	1.84	1.05	0.15
5	20	40	60.82	5.14	0.73	-1.79	0.48	0.07	1.50	1.07	0.15
6	20	60	61.85	5.41	0.76	-1.68	0.45	0.06	2.00	1.27	0.18
7	50	110	61.62	5.58	0.79	-1.77	0.42	0.06	1.91	1.14	0.16
8	50	160	62.68	4.87	0.69	-1.62	0.44	0.06	2.02	1.05	0.15

表 3.2.12 標準試料 試料 C 177℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	62.03	6.32	0.89	-2.19	0.38	0.05	1.13	1.12	0.16
1	5	5	62.54	6.51	0.92	-2.00	0.37	0.05	1.50	1.03	0.15
2	5	10	63.66	5.67	0.80	-1.87	0.37	0.05	1.34	1.08	0.15
3	5	15	62.25	6.42	0.91	-1.89	0.47	0.07	1.69	1.20	0.17
4	5	20	61.57	5.89	0.83	-1.84	0.60	0.08	1.81	1.33	0.19
5	20	40	64.85	6.12	1.70	-1.64	0.54	0.15	2.50	1.15	0.32
6	20	60	63.89	5.64	1.57	-1.59	0.43	0.12	2.44	1.24	0.34
7	50	110	63.60	5.91	1.64	-1.64	0.50	0.14	2.72	1.33	0.37
8	50	160	63.61	6.61	1.83	-1.54	0.59	0.16	2.75	1.34	0.37

表 3.2.13 標準試料 試料 C 227℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	59.11	5.85	0.83	-2.08	0.49	0.07	0.64	0.77	0.11
1	5	5	61.68	5.39	0.76	-1.44	0.51	0.07	2.08	0.97	0.14
2	5	10	60.29	4.82	0.68	-1.35	0.46	0.07	2.34	0.79	0.11
3	5	15	59.85	5.69	0.80	-1.18	0.61	0.09	2.54	0.79	0.11
4	5	20	59.11	6.06	0.86	-1.23	0.70	0.10	2.50	1.03	0.15
5	20	40	60.71	5.47	0.77	-1.04	0.66	0.09	2.86	1.00	0.14
6	20	60	60.11	6.15	0.87	-1.13	0.70	0.10	2.63	1.08	0.15
7	50	110	60.03	5.43	0.77	-0.95	0.61	0.09	2.87	1.03	0.15
8	50	160	60.78	4.50	0.64	-0.81	0.55	0.08	2.97	0.74	0.10

(d) 淡路断層帯 (試料 D)

表 3.2.14 標準試料 試料 D 100℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	66.37	6.19	0.88	-0.49	0.78	0.11	3.65	1.62	0.23
1	5	5	65.30	5.48	0.78	-0.04	0.91	0.13	3.30	2.09	0.30
2	5	10	63.04	5.50	0.78	0.03	0.69	0.10	3.21	1.69	0.24
3	5	15	63.52	5.69	0.81	0.01	0.61	0.09	3.08	1.53	0.22
4	5	20	63.48	5.86	0.83	0.09	0.61	0.09	2.99	1.84	0.26
5	20	40	63.84	5.11	0.72	0.19	0.79	0.11	3.01	1.71	0.24
6	20	60	62.38	5.48	0.78	0.52	0.87	0.12	3.53	2.13	0.30
7	50	110	64.43	5.93	0.84	0.29	0.51	0.07	3.53	1.35	0.19
8	50	160	64.09	5.88	0.83	0.32	0.60	0.08	4.05	1.44	0.20

表 3.2.15 標準試料 試料 D 127℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	65.53	4.63	0.65	0.68	0.90	0.13	6.79	2.05	0.29
1	5	5	65.51	5.07	0.72	1.02	0.91	0.13	6.82	2.20	0.31
2	5	10	63.57	5.59	0.79	1.09	0.87	0.12	6.40	2.03	0.29
3	5	15	64.04	4.99	0.71	1.20	0.87	0.12	6.32	2.04	0.29
4	5	20	64.03	4.59	0.65	1.48	0.92	0.13	7.16	2.31	0.33
5	20	40	63.71	4.68	0.66	1.20	0.92	0.13	6.15	2.16	0.30
6	20	60	63.46	4.70	0.66	1.31	1.15	0.16	6.57	2.56	0.36
7	50	110	64.27	3.87	0.55	1.60	0.90	0.13	7.19	2.04	0.29
8	50	160	64.29	4.95	0.70	1.54	0.92	0.13	6.71	1.93	0.27

表 3.2.16 標準試料 試料 D 177℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	64.89	4.98	0.70	-0.81	0.44	0.06	3.85	1.29	0.18
1	5	5	64.71	4.48	0.63	0.02	0.59	0.08	4.72	1.54	0.22
2	5	10	64.08	4.43	0.63	0.12	0.58	0.08	4.89	1.50	0.21
3	5	15	64.81	4.31	0.61	0.38	0.57	0.08	5.21	1.49	0.21
4	5	20	62.93	5.28	0.75	0.55	0.69	0.10	5.40	1.72	0.24
5	20	40	64.59	5.03	1.40	0.58	0.59	0.16	5.61	1.55	0.43
6	20	60	64.03	4.16	1.15	0.82	0.68	0.19	5.75	1.47	0.41
7	50	110	62.57	4.75	1.32	0.97	0.76	0.21	6.01	1.63	0.45
8	50	160	63.36	4.71	1.31	1.09	0.61	0.17	5.79	1.23	0.34

表 3.2.17 標準試料 試料 D 227℃加熱試料 色彩測定結果

試験回数 (回)	加熱時間 (時間)	総加熱時間 (時間)	L*			a*			b*		
			平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差	平均	標準偏差	標準誤差
0	0	0	63.83	5.39	0.76	0.71	0.90	0.13	5.10	1.98	0.28
1	5	5	61.27	4.34	0.61	1.40	0.83	0.12	4.80	1.40	0.20
2	5	10	60.44	4.09	0.58	1.68	1.04	0.15	4.86	1.42	0.20
3	5	15	61.11	3.08	0.44	1.96	0.74	0.11	5.49	1.18	0.17
4	5	20	60.10	3.59	0.51	1.77	0.90	0.13	5.05	1.27	0.18
5	20	40	59.79	3.41	0.48	1.93	0.80	0.11	5.23	1.09	0.15
6	20	60	58.83	3.85	0.55	1.82	0.84	0.12	4.79	1.17	0.17
7	50	110	58.68	3.36	0.47	2.10	0.83	0.12	4.92	1.23	0.17
8	50	160	59.03	3.69	0.52	2.29	0.80	0.11	4.94	1.18	0.17

3.3 加熱実験結果の整理・解析

(1) 加熱時間－色彩値プロット

3.2 で測定された標準試料の色彩測定結果について、総加熱時間に対する色彩値を図 3.3.1～3.3.8 に示した。なお、「平成 25 年度断層破碎物質の色彩に基づく活断層の活動性評価法の整備」に関する業務報告書（旧(独)原子力安全基盤機構）に取りまとめられた分析結果も含めて図示し、平成 25 年度報告書の実験結果を△印で、本業務の実験結果を○印で示した。

郷村断層帯試料（試料 A）は、時間経過とともに a*値、b*値が増加する傾向が見られた。H25 年度報告の結果を合わせて見ても、加熱温度が高いほど色彩値が増加するという傾向が低温度域（100～227℃）でも認められた。一部の結果で、温度と色彩値の上下関係が逆転している箇所も見られるが、これは、色彩値のばらつきの影響と加熱実験をする前の色彩値（初期値）の違いによる影響だと考えられる。

山崎断層帯試料（試料 B）は、時間経過とともに a*値、b*値が増加する傾向が見られた。H25 年度報告の結果を合わせて見ても、加熱温度が高いほど色彩値が増加するという傾向が低温度域（100～227℃）でも認められた。b*値については 227℃実験よりも 177℃実験の方が高い色彩値を示しているが、これは初期値が異なるためと考えられる。H25 年度に実施した 177℃実験と本業務の 177℃実験が全くの同一結果とならないのも、先ほどの理由と同様、初期値が異なるためと考えられる。

警固－西山断層帯（試料 C）は、時間経過とともに a*値、b*値が増加する傾向が見られると同時に、加熱温度が高いほど色彩値が増加する傾向も認められた。他試料同様、温度と色彩値の上下関係が逆転している箇所も見られた。

淡路断層帯（試料 D）は、本業務で実施した低温度域（100～227℃）の範囲内では時間経過とともに a*値、b*値が増加する傾向が見られた。他試料同様、温度と色彩値の上下関係が逆転している箇所も見られた。

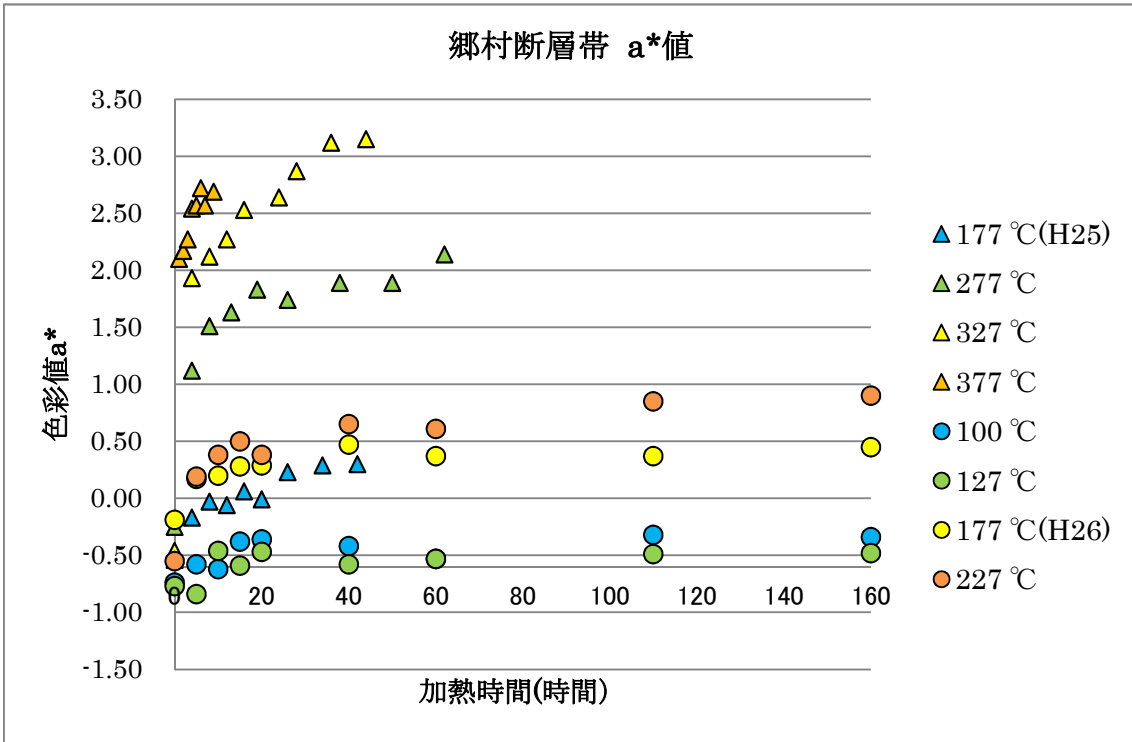


圖 3.3.1 鄉村斷層帶 標準試料 (試料 A) a*值

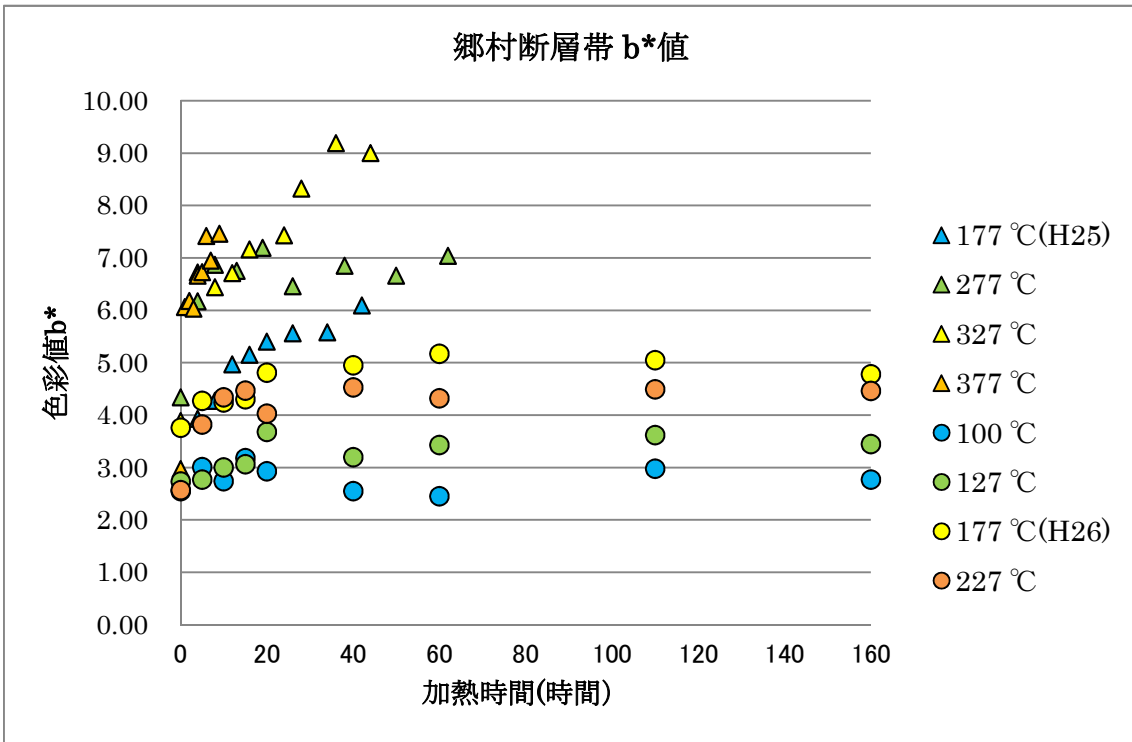


圖 3.3.2 鄉村斷層帶 標準試料 (試料 A) b*值

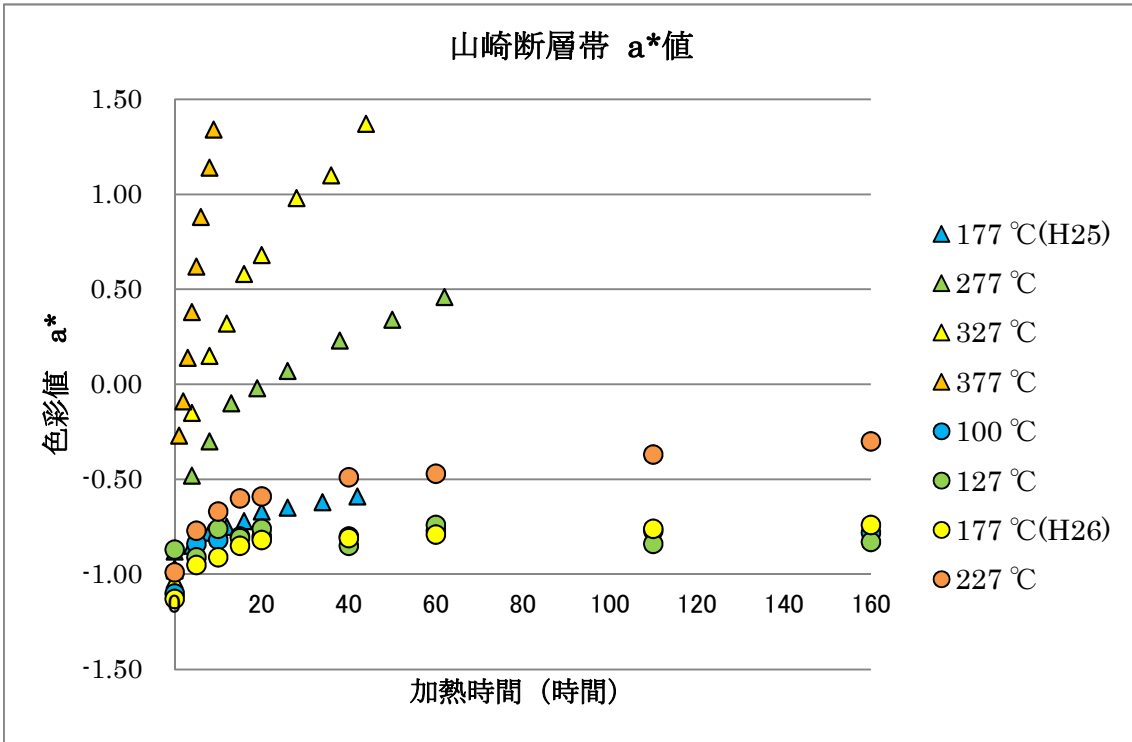


図 3.3.3 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) a*値

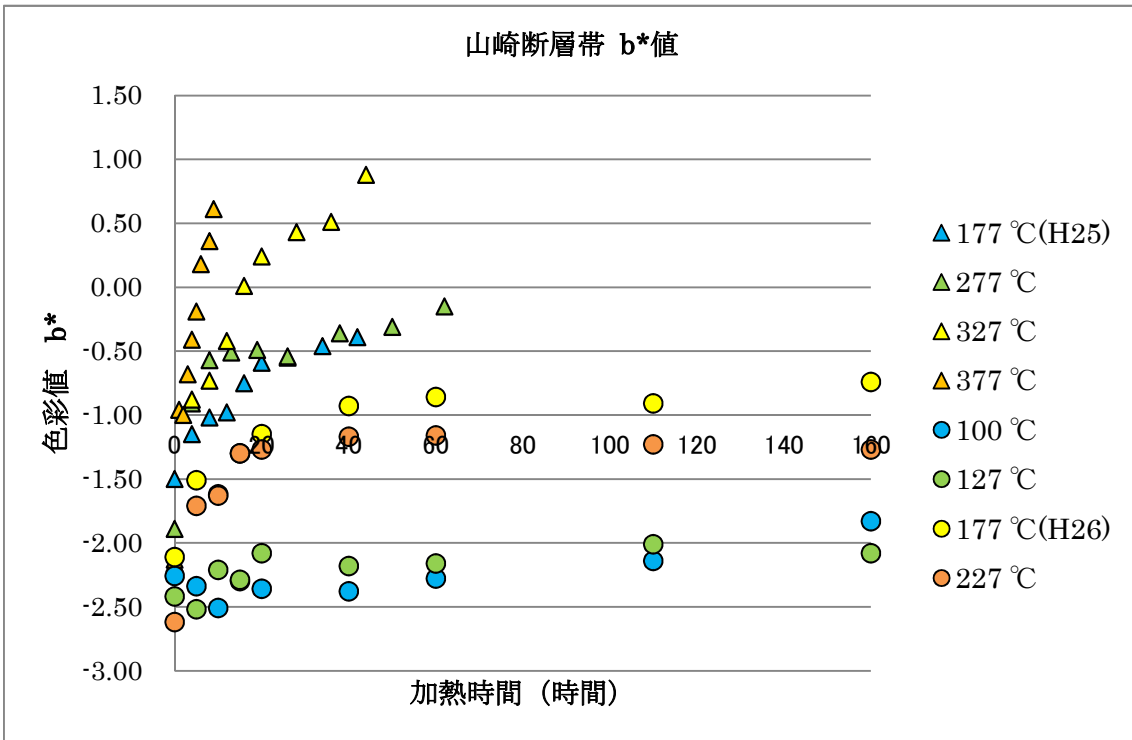


図 3.3.4 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) b*値

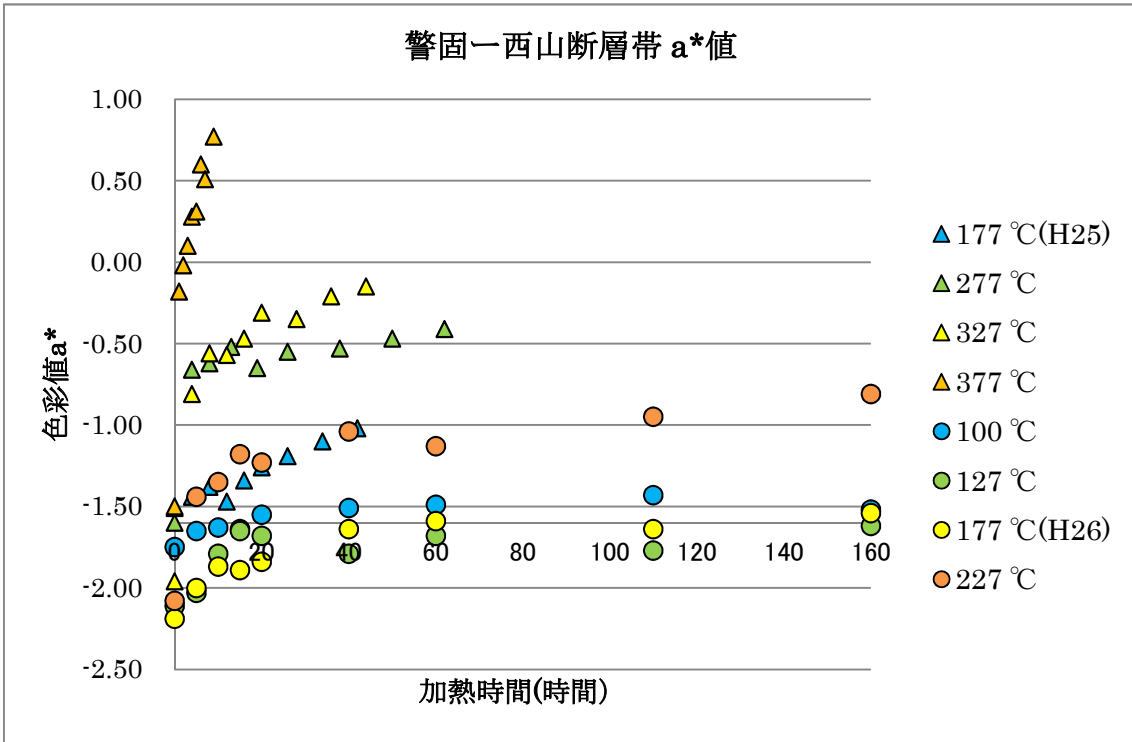


圖 3.3.5 警固 - 西山断層帶 標準試料 (試料 C) a*值

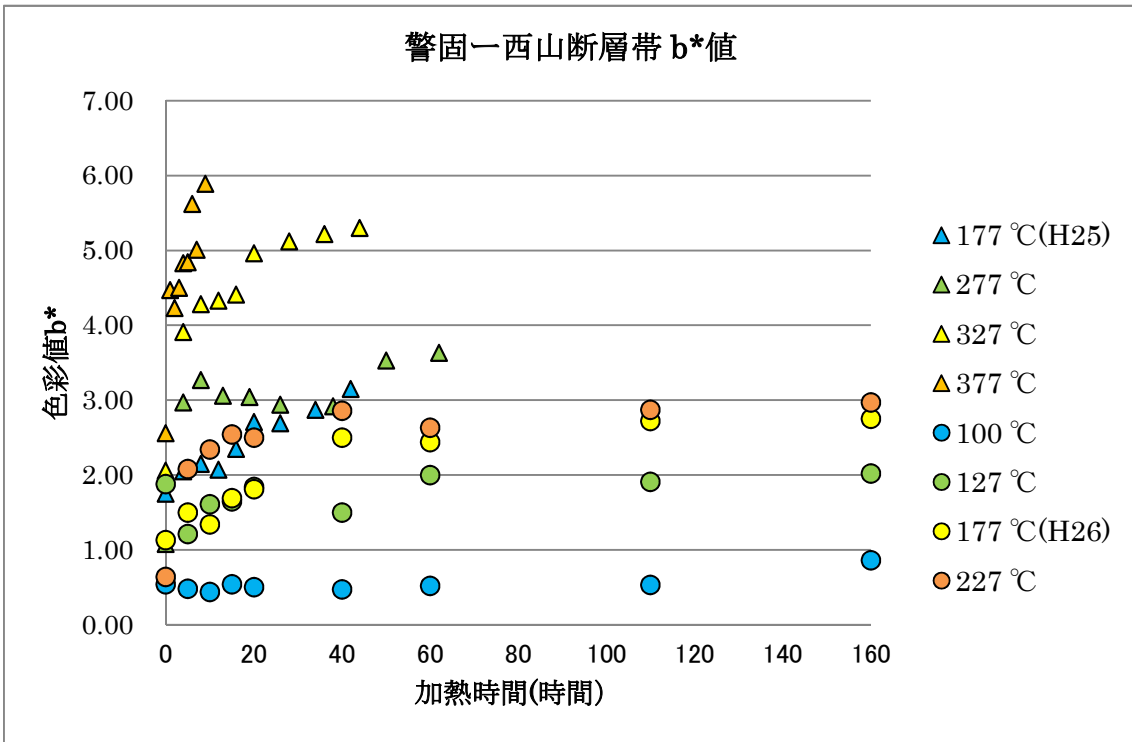


圖 3.3.6 警固 - 西山断層帶 標準試料 (試料 C) b*值

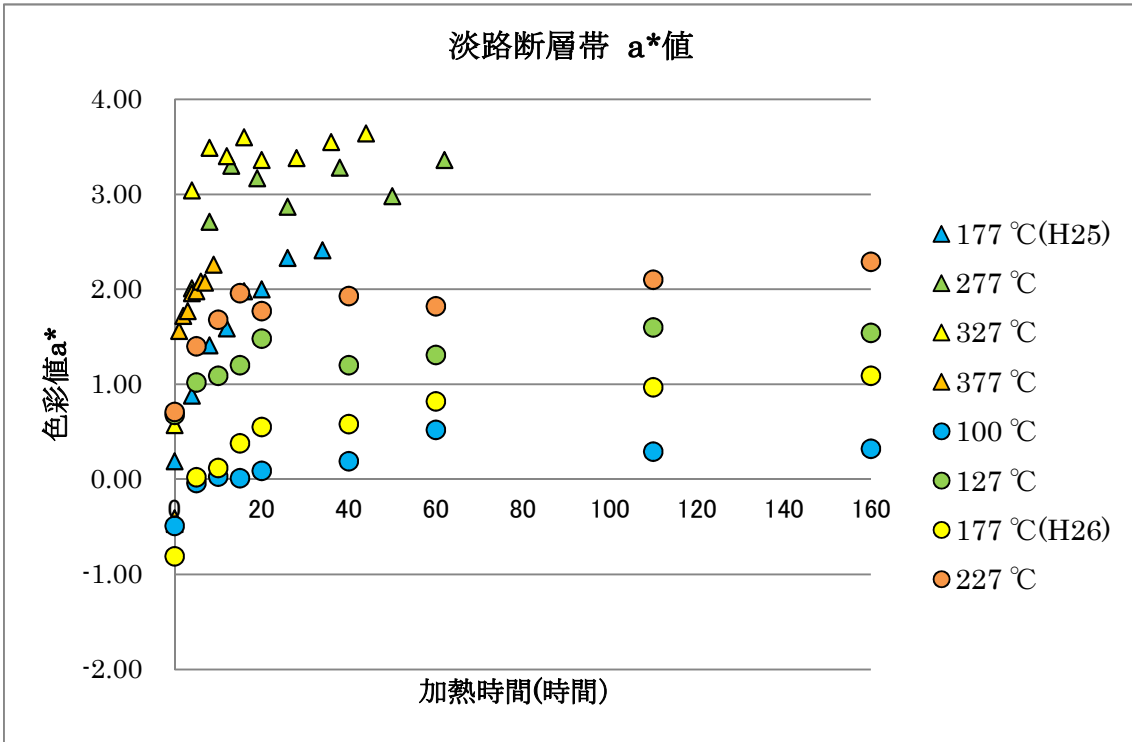


図 3.3.7 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) a*値

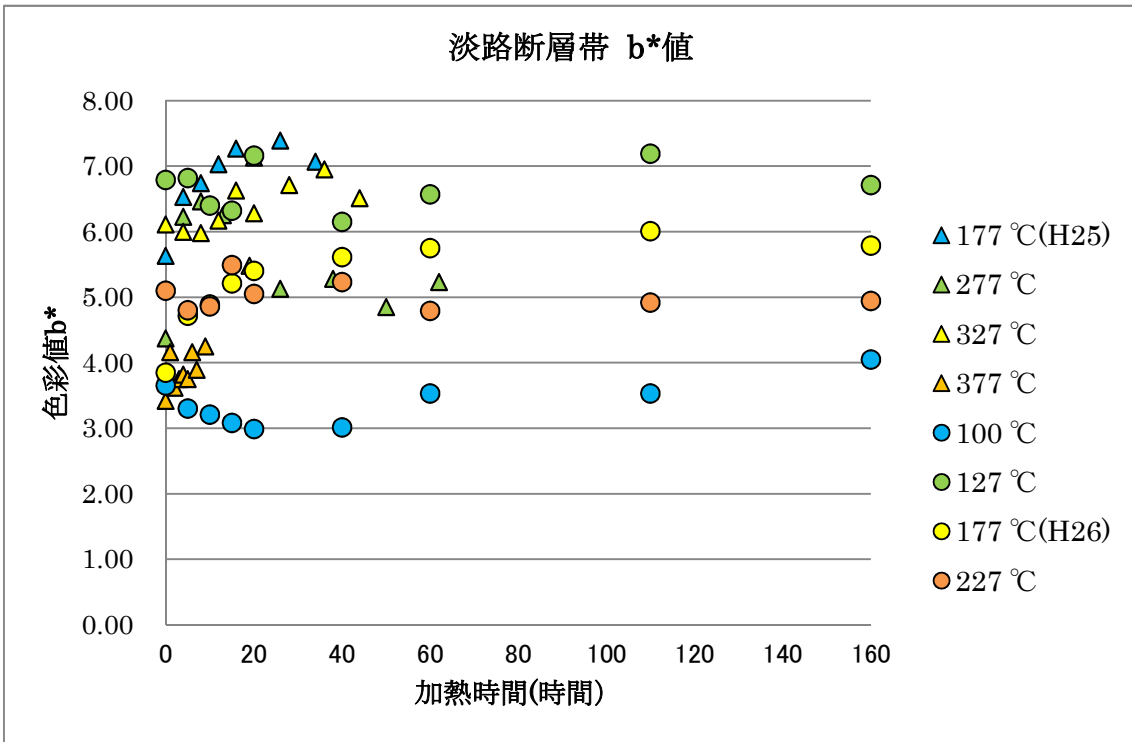


図 3.3.8 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) b*値

図 3.3.1～3.3.8 は、色彩値の生データをプロットしたもので、初期値のばらつきの影響は考慮されていない。そこで、初期値（加熱時間 0 時間）の色彩値を基準とした色彩値の変化量を示す図を図 3.3.9～3.3.16 に示した。

郷村断層帯試料（試料 A）は、加熱温度が高いほど色彩値が増加するという傾向が鮮明になった。a*値については、H25 年度に実施した 177℃実験と本業務の 177℃実験の再現性が良かった一方で、b*値については a*値ほどよい再現性は見られなかった。

山崎断層帯試料（試料 B）は、加熱温度が高いほど色彩値が増加するという傾向が鮮明になった。H25 年度に実施した 177℃実験と本業務の 177℃実験についても再現性が良く、同様の結果が得られた。

警固－西山断層帯（試料 C）は、加熱温度が高いほど色彩値が増加するという傾向が鮮明になった。H25 年度に実施した 177℃実験と本業務の 177℃実験についても再現性が良く、同様の結果が得られた。

淡路断層帯（試料 D）は、他の 3 試料と比べて、加熱温度が高いほど色彩値が増加する傾向がはっきりと現れなかった。特に b*値については色彩変化が不規則であった。

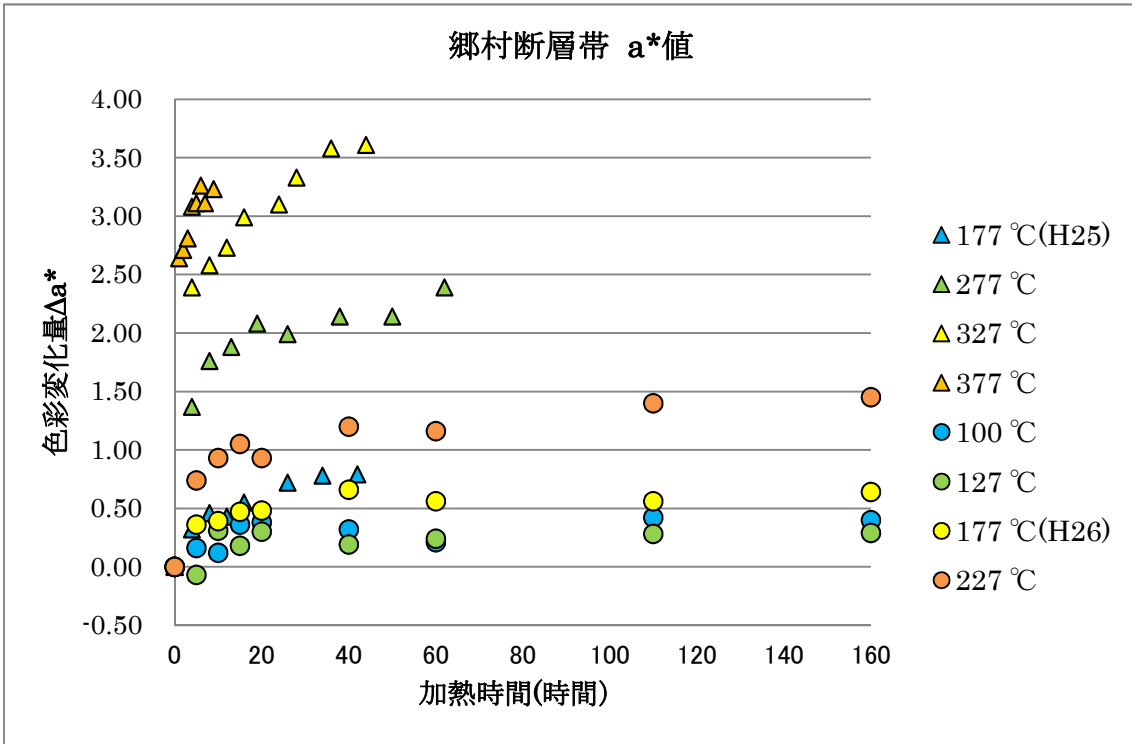


図 3.3.9 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) a*色彩変化量

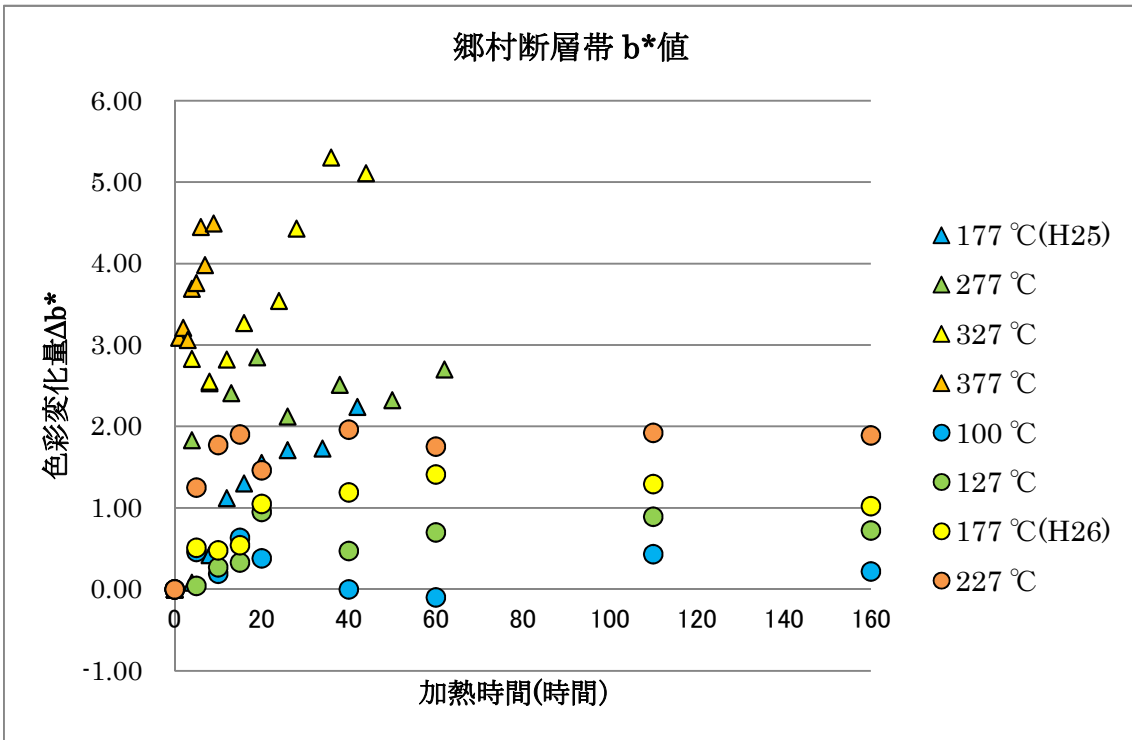


図 3.3.10 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) b*色彩変化量

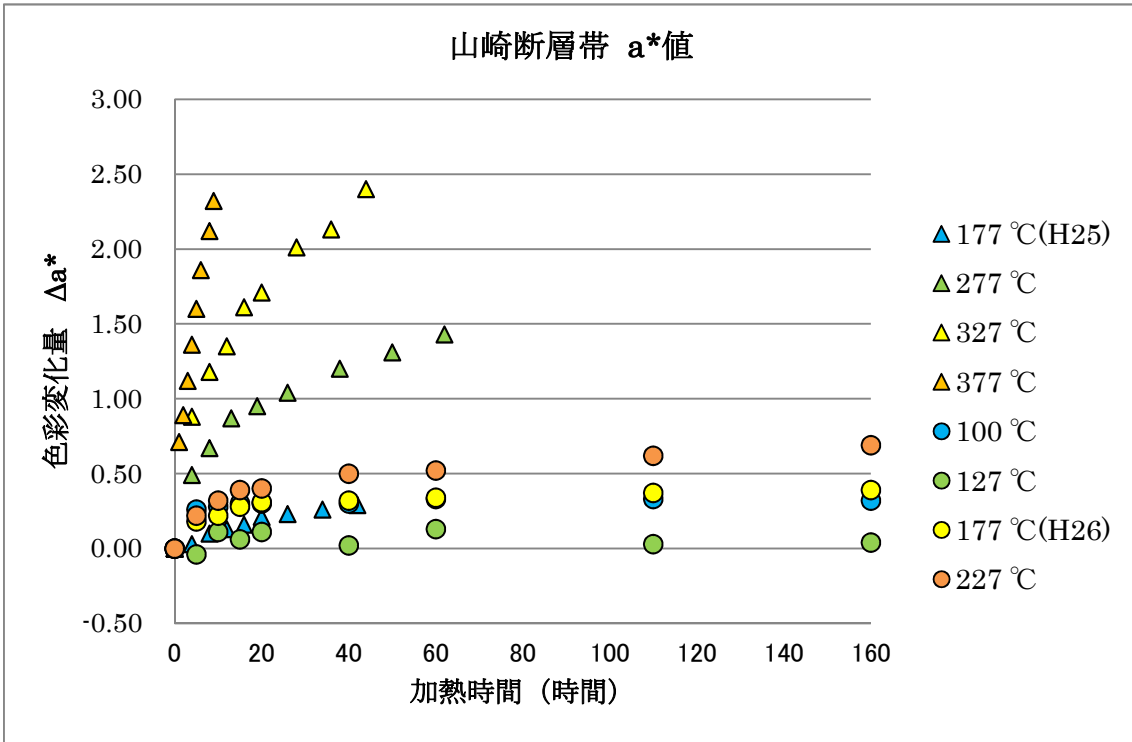


図 3.3.11 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) a*色彩変化量

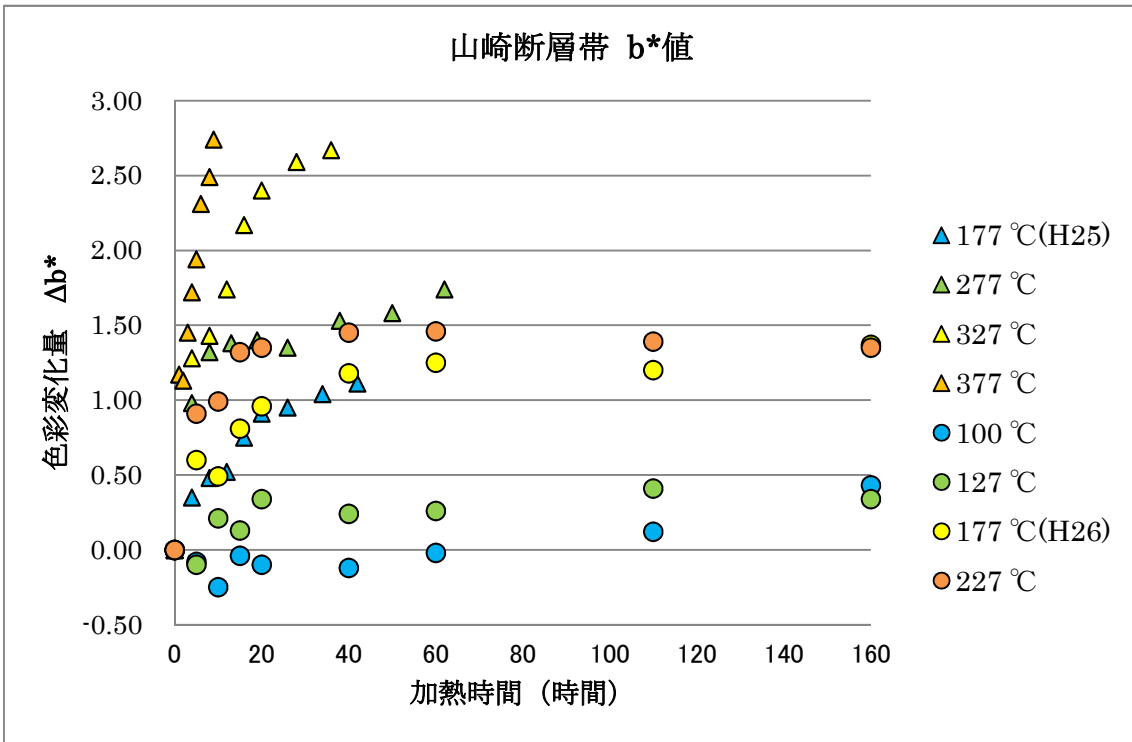


図 3.3.12 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) b*色彩変化量

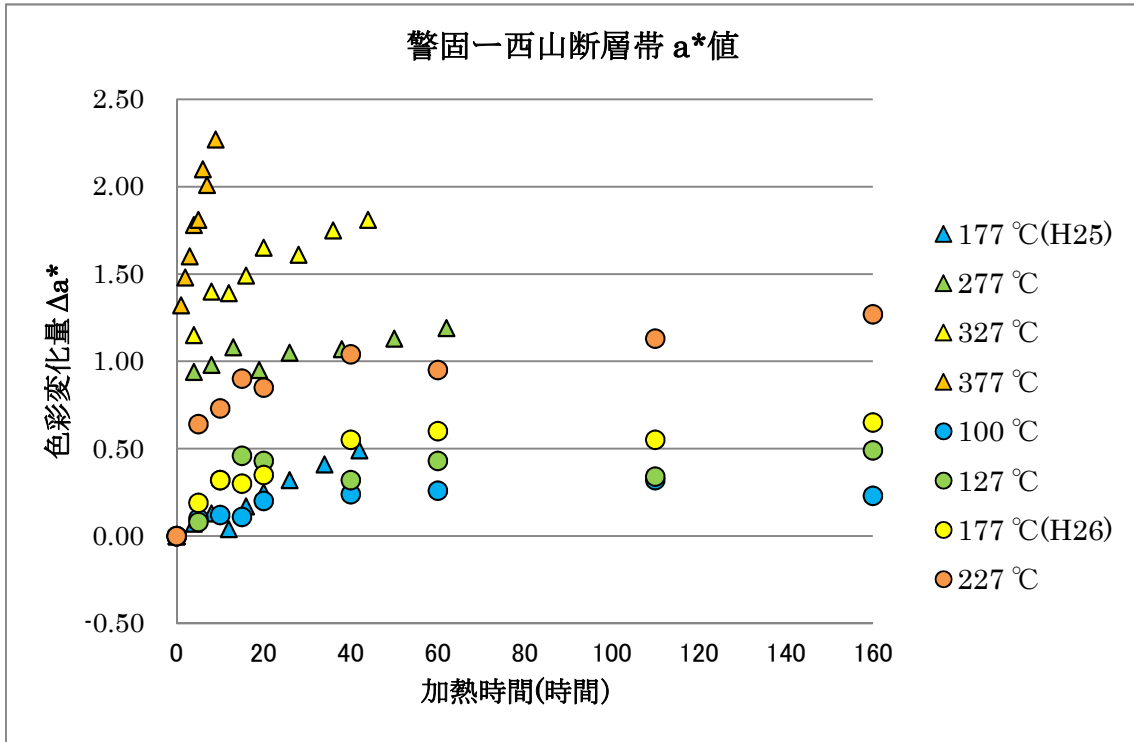


图 3.3.13 警固一西山断層帶 標準試料 (試料 C) a*色彩变化量

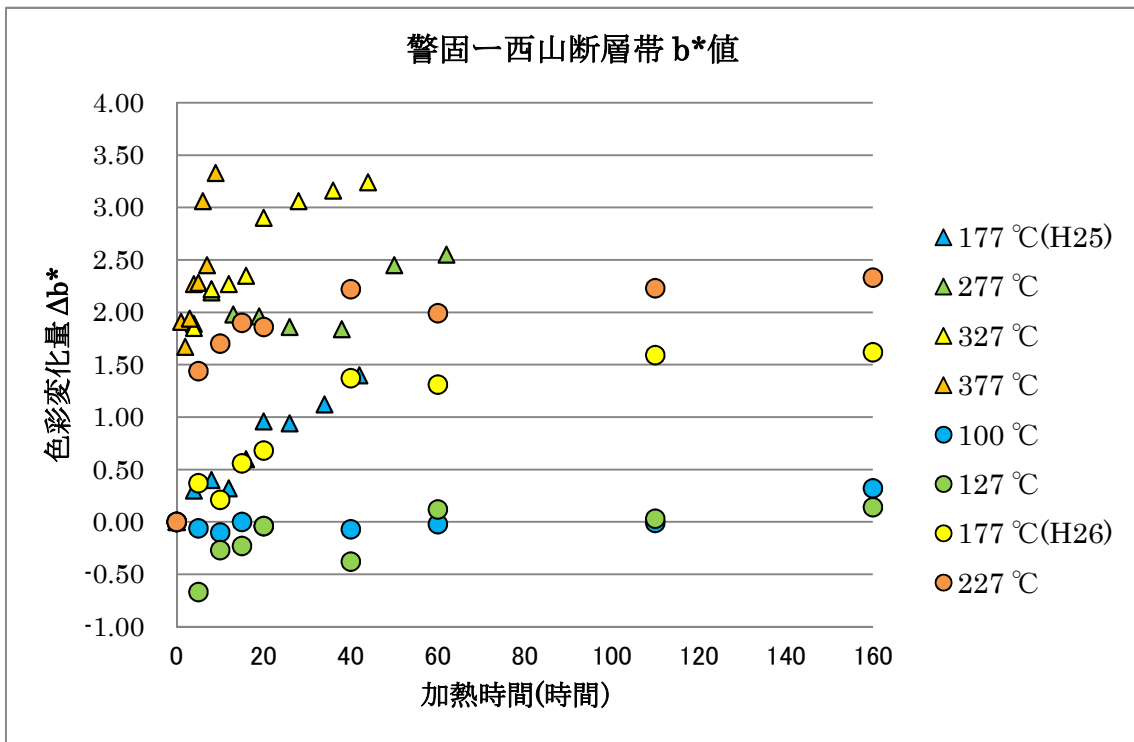


图 3.3.14 警固一西山断層帶 標準試料 (試料 C) b*色彩变化量

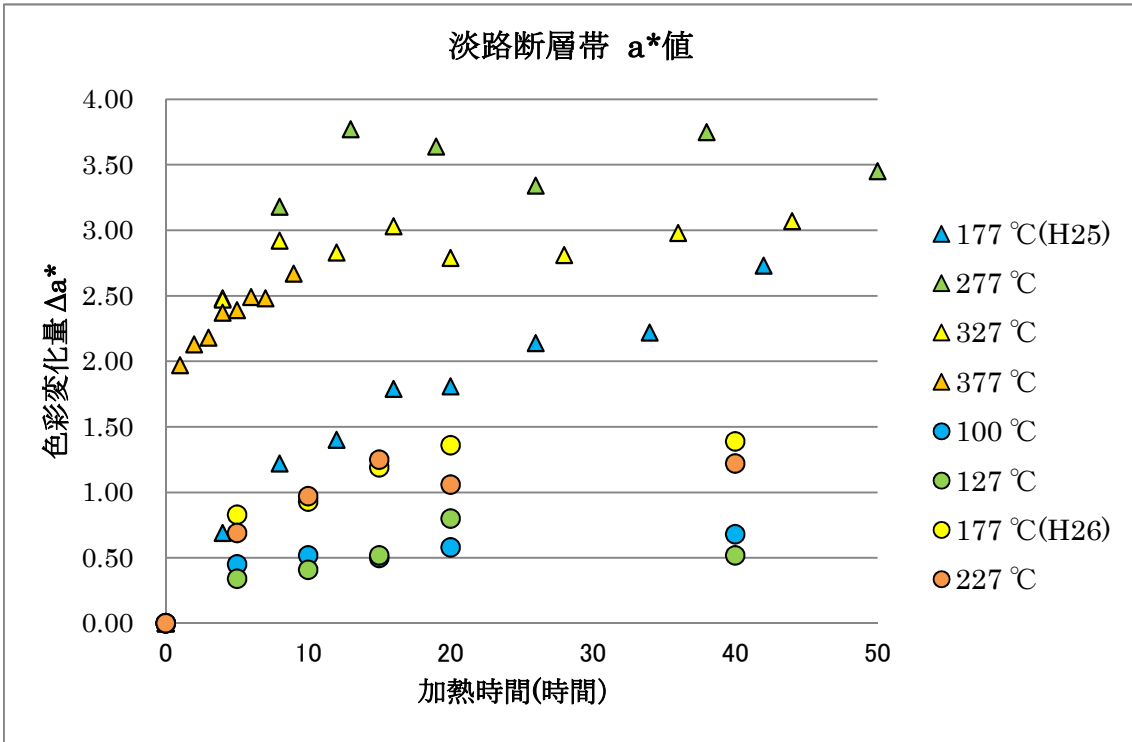


図 3.3.15 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) a*色彩変化量

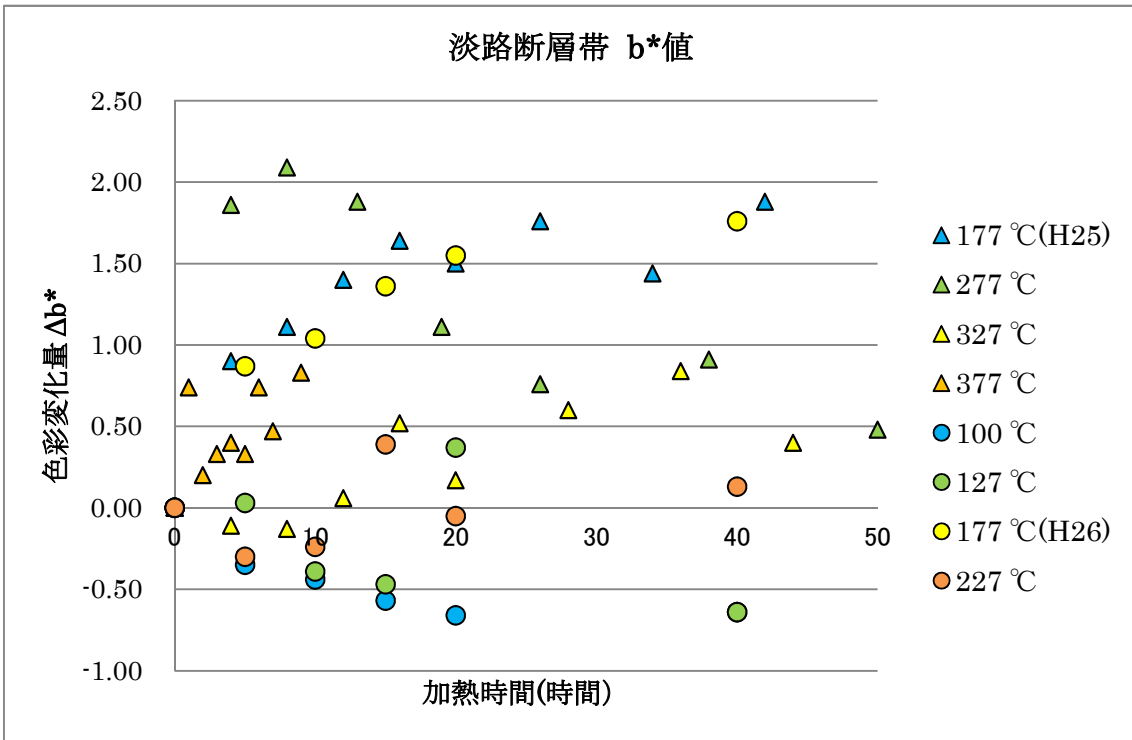


図 3.3.16 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) b*標準偏差値

(2) a*-b*プロット

横軸に a*値、縦軸に b*値をとり、色彩変化の傾向を調べた (図 3.3.17～図 3.3.20)。a*-b* 近似直線の傾きと相関係数 (R² 値) を表 3.3.1 にまとめた。表 3.3.1 には H25 年度業務における結果も併記した。

100℃実験および 127℃実験結果については、R² 値は低い値を示した。これは、岩石の色彩が十分に变化しておらず、ばらつきの方が大きいためと考えられる。177℃以上の実験試料については、試料 A~C で a*値と b*値に正の相関が見られた。その一方で、試料 D については、得られた近似直線の R² 値は低い値を示した。

表 3.3.1 a*b* 近似直線の傾きと相関係数 (R²)
赤字は相関係数 (R²) が低く、ばらつきが大きいことを示す。

		H26 年度業務 (本業務)				H25 年度業務			
試料		100℃	127℃	177℃	227℃	177℃	277℃	327℃	377℃
A	傾き	0.77	2.02	2.04	1.36	2.79	1.15	1.38	1.29
	R ²	0.21	0.63	0.75	0.89	0.78	0.92	0.90	0.95
B	傾き	0.21	1.68	3.56	1.95	3.58	1.08	1.27	1.13
	R ²	0.01	0.33	0.94	0.77	0.96	0.88	0.99	0.99
C	傾き	0.24	0.69	2.72	1.90	2.63	2.00	1.80	1.39
	R ²	0.04	0.19	0.88	0.97	0.96	0.93	0.97	0.95
D	傾き	0.15	0.43	1.14	0.03	0.64	0.25	0.13	0.23
	R ²	0.02	0.12	0.97	0.00	0.88	0.19	0.14	0.43

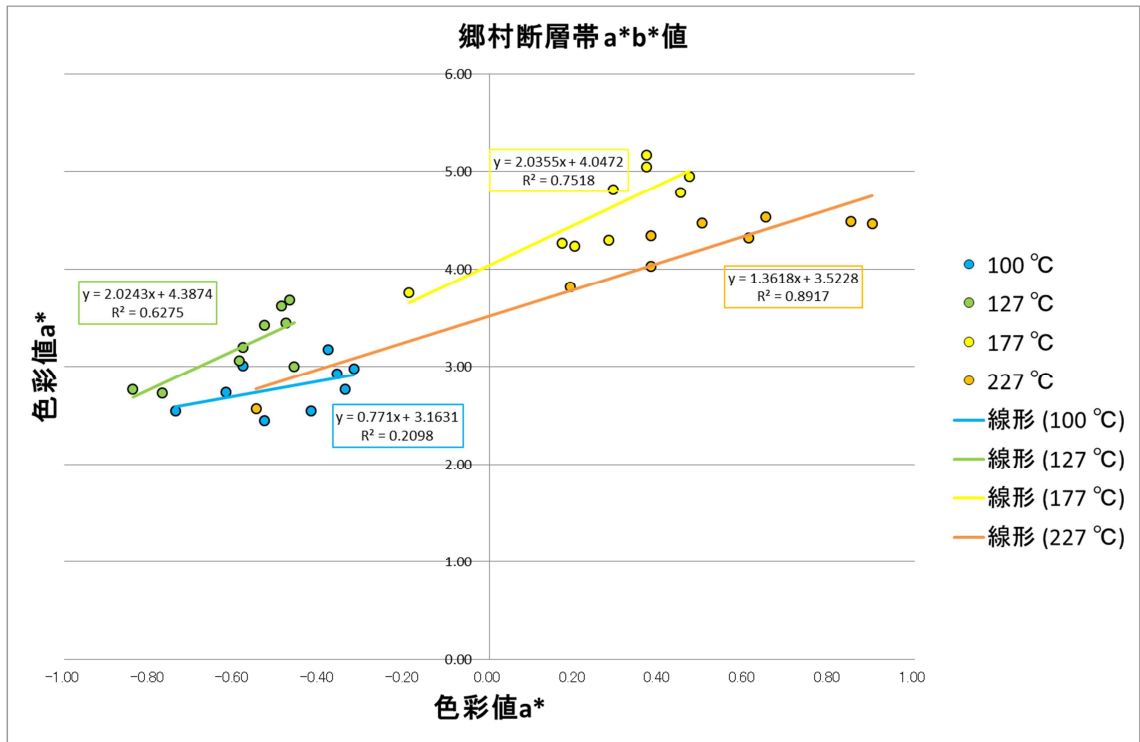


図 3.3.17 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) a*-b*プロット

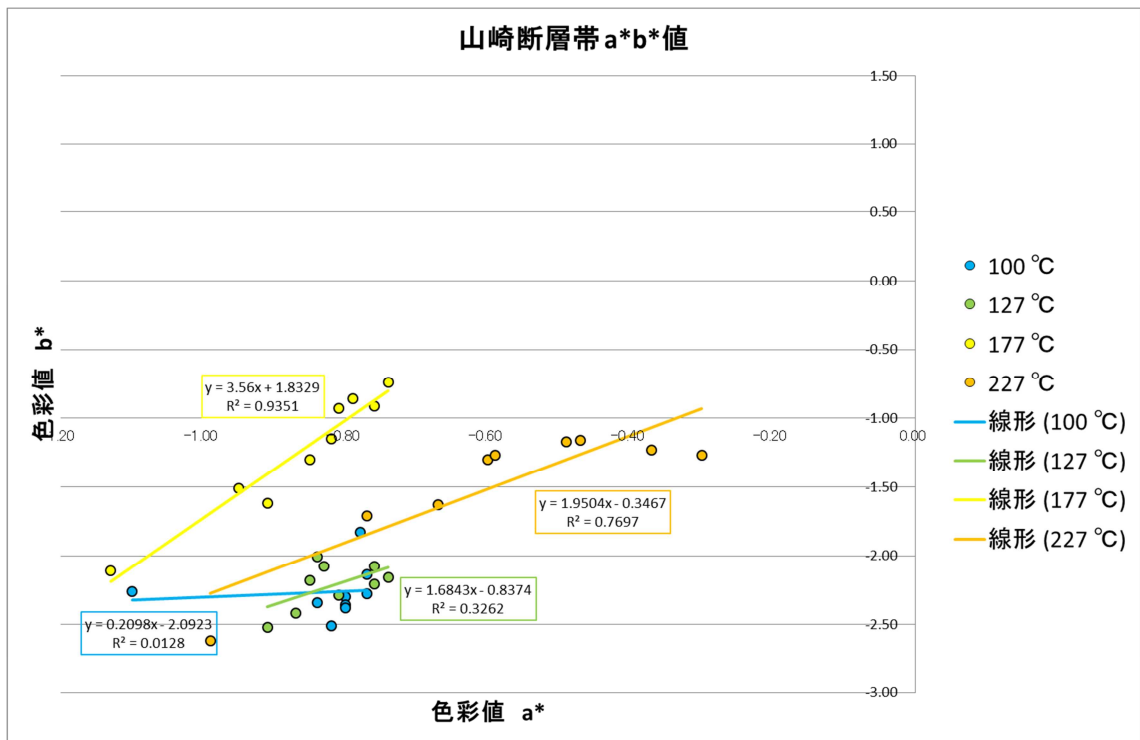


図 3.3.18 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) a*-b*プロット

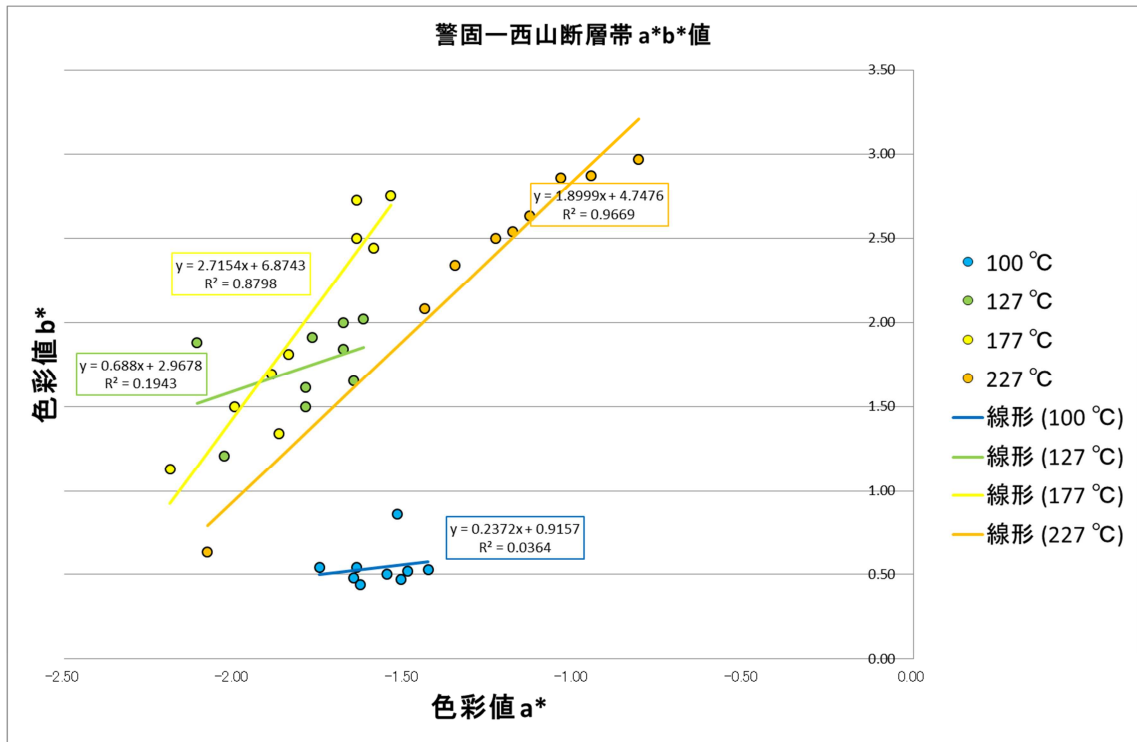


図 3.3.19 警固一西山断層帯 標準試料 (試料 C) a*-b*プロット

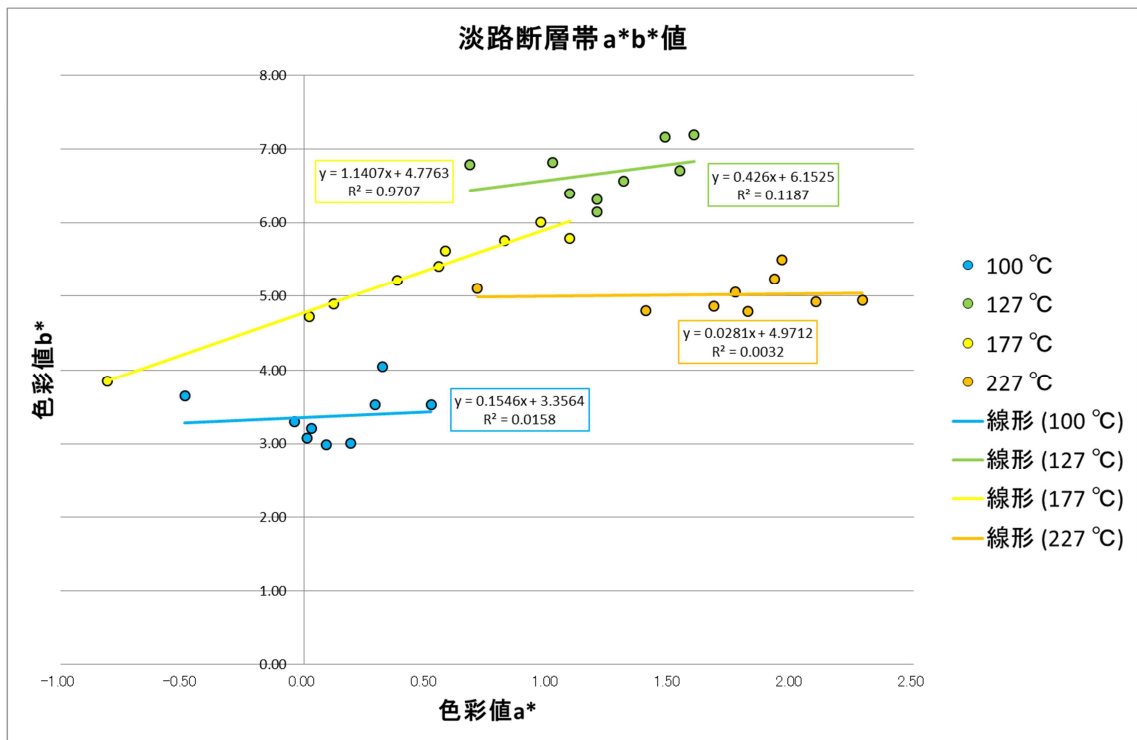


図 3.3.20 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) a*-b*プロット

3.4 年代測定手法の妥当性の検証

岩石の変質による色相の変化は、岩石中に含まれる鉄成分の酸化が主な原因となっていると考えられている。この岩石の色彩変化が鉄成分の化学変化によるものであると仮定すると、色彩値は化学反応速度論に従って変化する。そこで、化学反応速度論から年代標準式を算定し、加熱実験から各パラメータを求め、年代式を算定した。

3.4.1 年代標準式の算定

岩石の色彩変化が1次反応であると仮定し、反応によって物質Aが物質Bに変化したとすると、その時の速度式は、 $A \rightarrow B$ として表される。この時、物質Aの濃度を[A]、物質Bの濃度を[B]とすると、この1次反応における反応速度Vは次の式で表される。

$$V = -\frac{d[A]}{dt} = \frac{d[B]}{dt} = k[A] \quad (1)$$

V：反応速度、[A]：物質Aの濃度、[B]：物質Bの濃度、k：速度定数

式(1)は物質Aが減少する速度と物質Bが増加する速度が等しいことを意味し、その反応速度VはAの濃度[A]と速度定数kを用いて、 $k[A]$ で表される。式(1)より式(2)が導き出される。

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A] \quad (2)$$

この微分方程式を、濃度[A]を左辺に、微小時間 dt を右辺に移項すると式(3)が導き出される。

$$\frac{d[A]}{[A]} = -k dt \quad (3)$$

ここで、時間 t の間に濃度[A]₀が[A]に減少したとすると、両辺を [A]₀ から [A]、0 から t で積分し、式(4)が導き出される。

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = -k \int_0^t dt \quad (4)$$

これを解くと、式(5)となる。

$$\ln\left(\frac{[A]}{[A]_0}\right) = -kt \quad (5)$$

ここで、時間 t における物質 A の濃度 $[A]$ は式(6)で表される。

$$[A] = [A]_0 e^{-kt} \quad (6)$$

同様にして、時間 t における物質 B の濃度 $[B]$ は $[B] = [A]_0 - [A]$ より式(7)で表される。

$$[B] = [A]_0(1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

色彩値の変化量が 1 次反応に従い、 $[B]$ の増加量が色彩値の増加量と対応させることができれば、色彩値 ($[B]$) を測定することによって、色彩変化にかかった時間 t を得ることができる。

$$t = \ln\left(\frac{[A]_0}{[A]_0 - [B]}\right) / k \quad (8)$$

このとき、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [B] = [A]_0 \quad (9)$$

である。式(9)は、濃度 $[B]$ の飽和量が濃度 $[A]_0$ に等しいことを示している。式(8)に基づき、 $[A]_0 = a^*_{\max} \cdot a^*_0$ 、 $[B] = a^* \cdot a^*_0$ (ただし、 a^*_{\max} : a^* の最大値、 a^*_0 の初期値と置き換えると、 a^* については年代標準式が式(10)で示される。

$$t = \ln\left(\frac{a^*\max - a^*_0}{a^*\max - a^*}\right) / ka \quad (10)$$

ka : a*の速度定数、a* : a*値、a*max : a*の最大値、a*_0 : a*の初期値

同様に、b*の場合、式(11)で示される。

$$t = \ln\left(\frac{b^*\max - b^*_0}{b^*\max - b^*}\right) / kb \quad (11)$$

kb : b*の速度定数、b* : b*値、b*max : b*の最大値、b*_0 : b*の初期値

すなわち、加熱実験から色彩値の最大値 a*max(b*max)、速度定数 ka(kb)、初期値 a*_0 (b*_0) を求めることができれば、岩石の色彩変化にかかる時間を求めることができることを意味する。

本業務では、色彩値の最大値 a*max(b*max)と速度定数 ka(kb)を算定するために、色彩値の最大値 a*max(b*max)からの差分 Δa*と最大値に到達するまでの時間 t (理論上は最大値に到達しないため、解析上の t を算定した) を求めた。

3.4.2 加熱実験データの解析

加熱実験データの解析結果を示す。色彩値プロットは3.4.1で述べたように縦軸と縦軸を反転させた。解析結果では、色彩値の最大値 $a^*_{max}(b^*_{max})$ と色彩値が最大となる到達時間 $t_a(t_b)$ と速度定数 $k_a(k_b)$ を示した。

(1) 郷村断層帯

郷村断層帯（試料 A）の解析結果を表 3.4.1 および図 3.4.1～3.4.4 に示した。色彩値 a^* については、 $a^*_{max}=4.0$ と仮定し、速度定数 k_a の値を求めた。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.2 および図 3.4.5～3.4.8 に示した。

表 3.4.1 郷村断層帯 標準試料（試料 A）色彩 a^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	t_a (時間)	k_a
試料 A	100°C	4.0	7000	0.00090
	127°C	4.0	6000	0.0010
	177°C	4.0	4000	0.0015
	227°C	4.0	3000	0.0020

表 3.4.2 郷村断層帯 標準試料（試料 A）色彩 a^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	t_a (時間)	k_a
試料 A (H25 業務)	177°C	4.0	4000	0.0015
	277°C	4.0	1000	0.0056
	327°C	4.0	240	0.023
	377°C	4.0	100	0.053

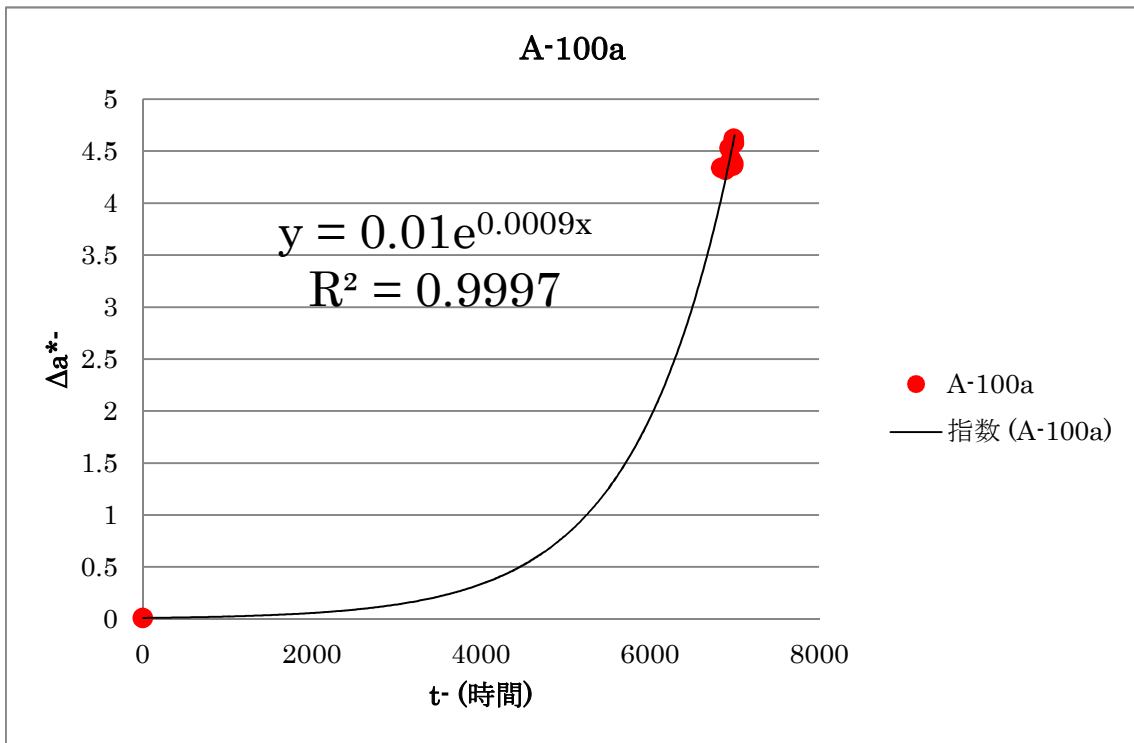


図 3.4.1 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 100°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果

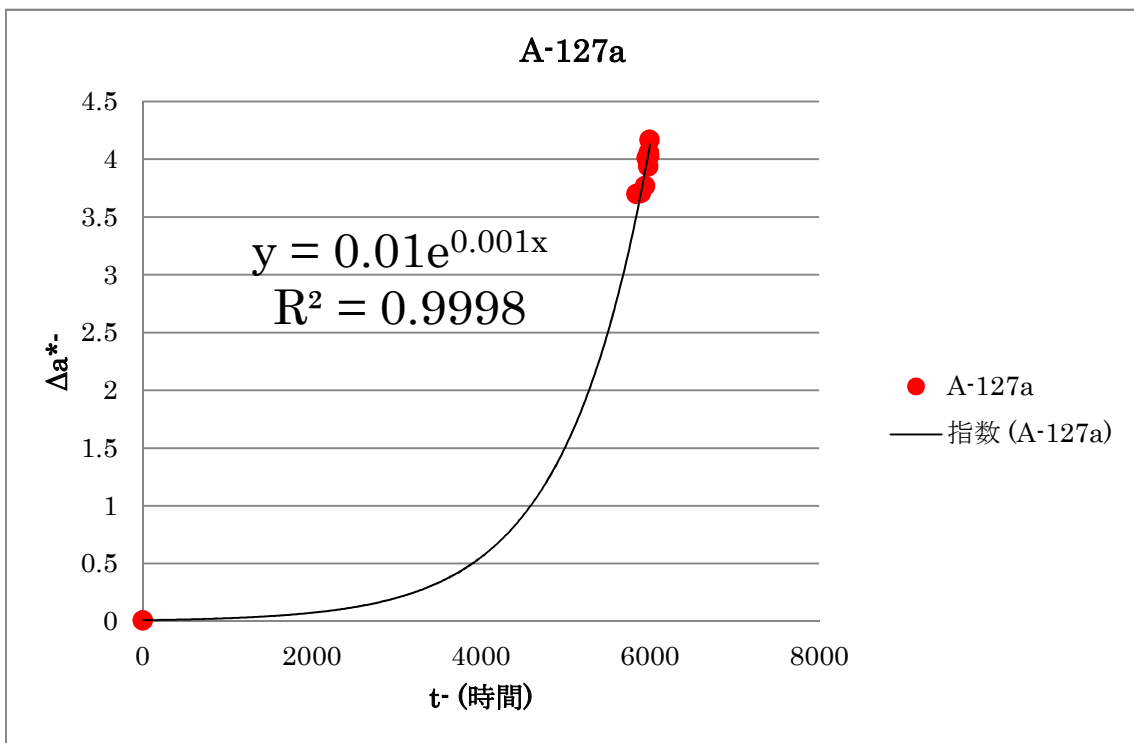


図 3.4.2 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 127°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果

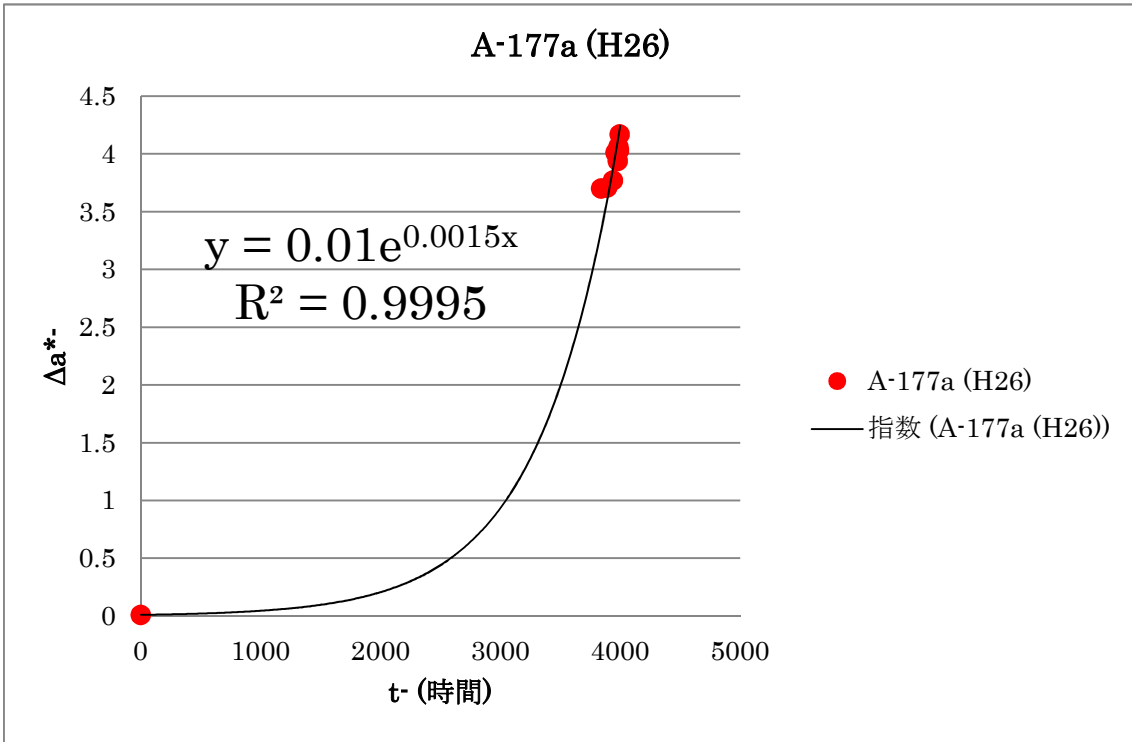


図 3.4.3 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 177°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果

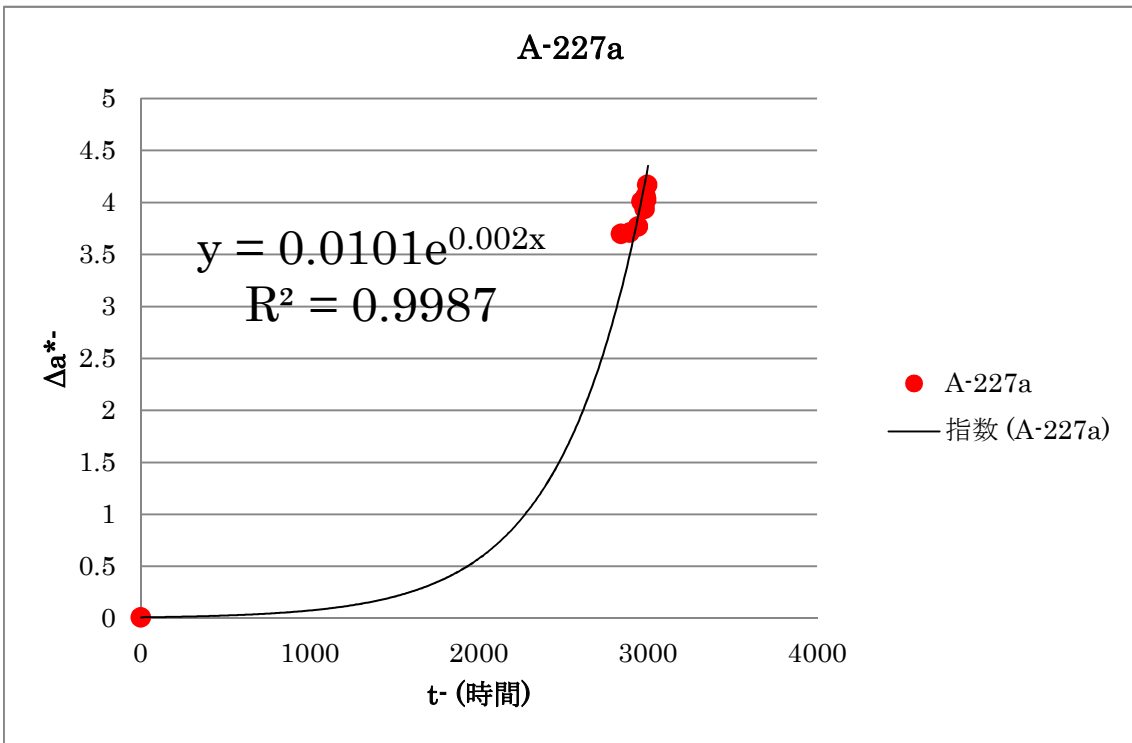


図 3.4.4 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 227°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果

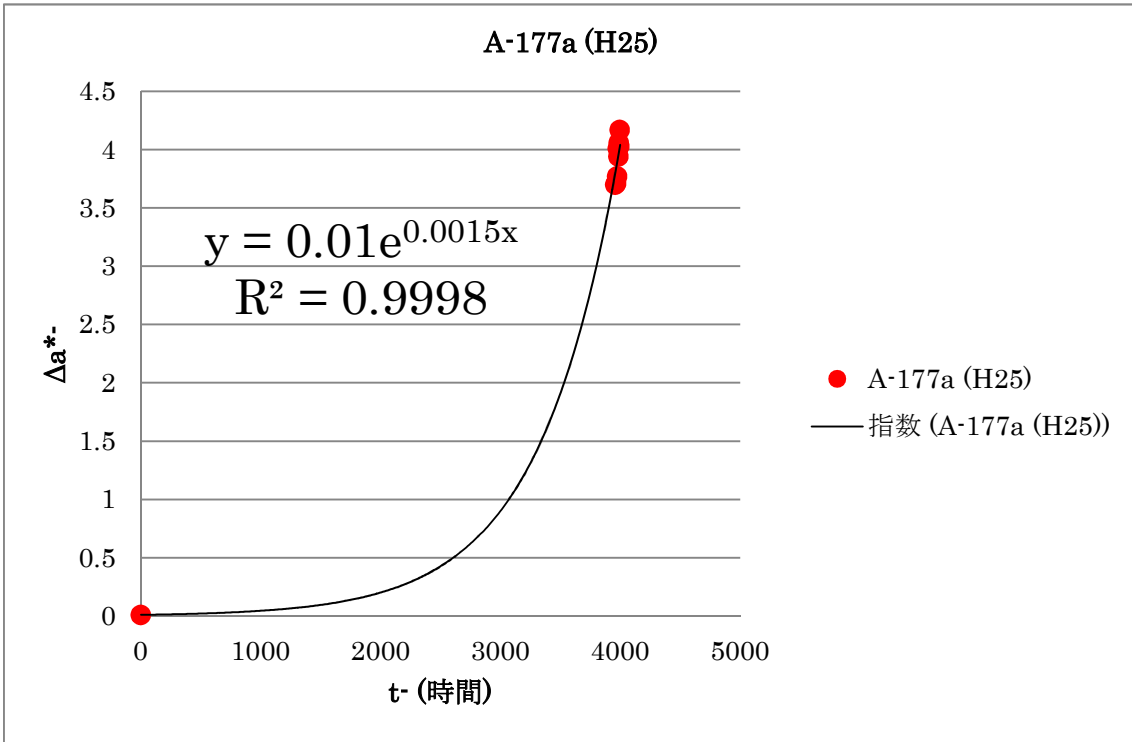


図 3.4.5 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 177°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果 (再解析)

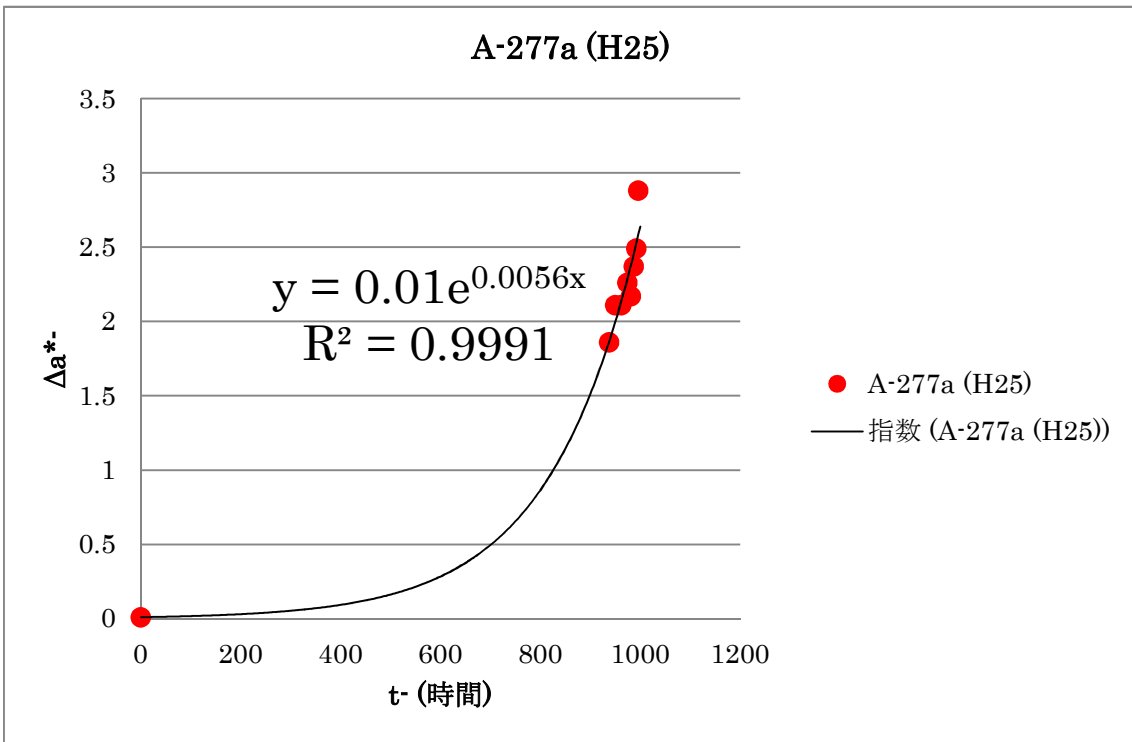


図 3.4.6 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 277°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果 (再解析)

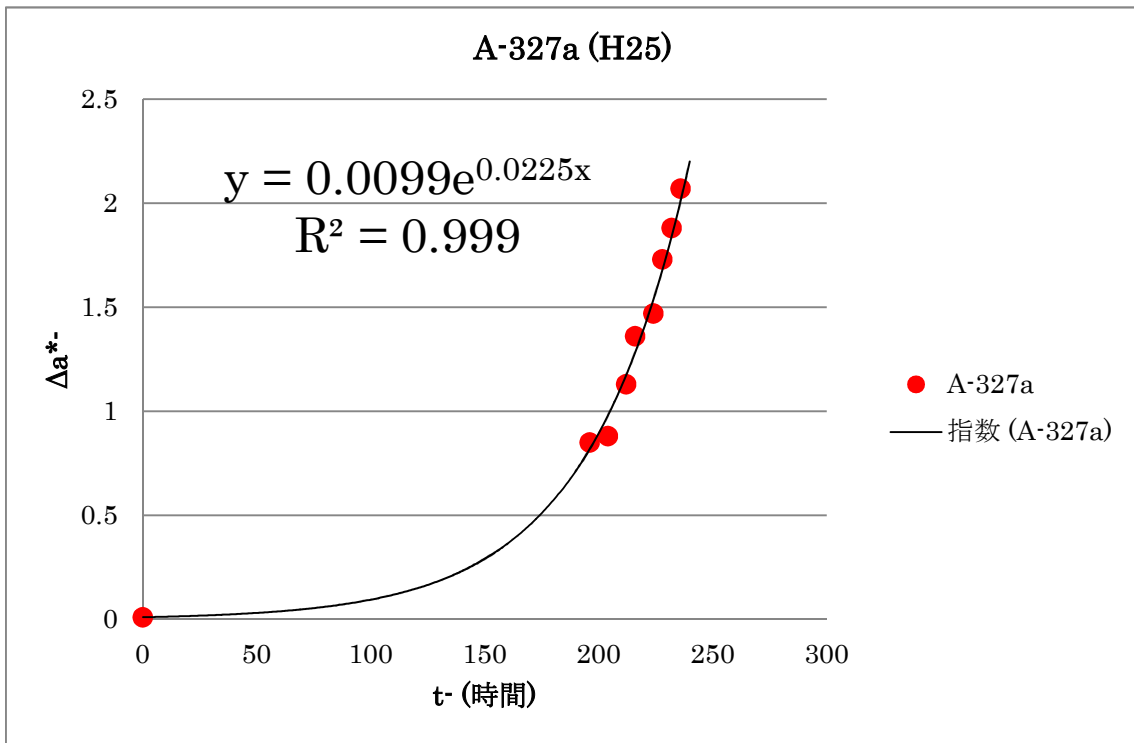


図 3.4.7 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 327°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

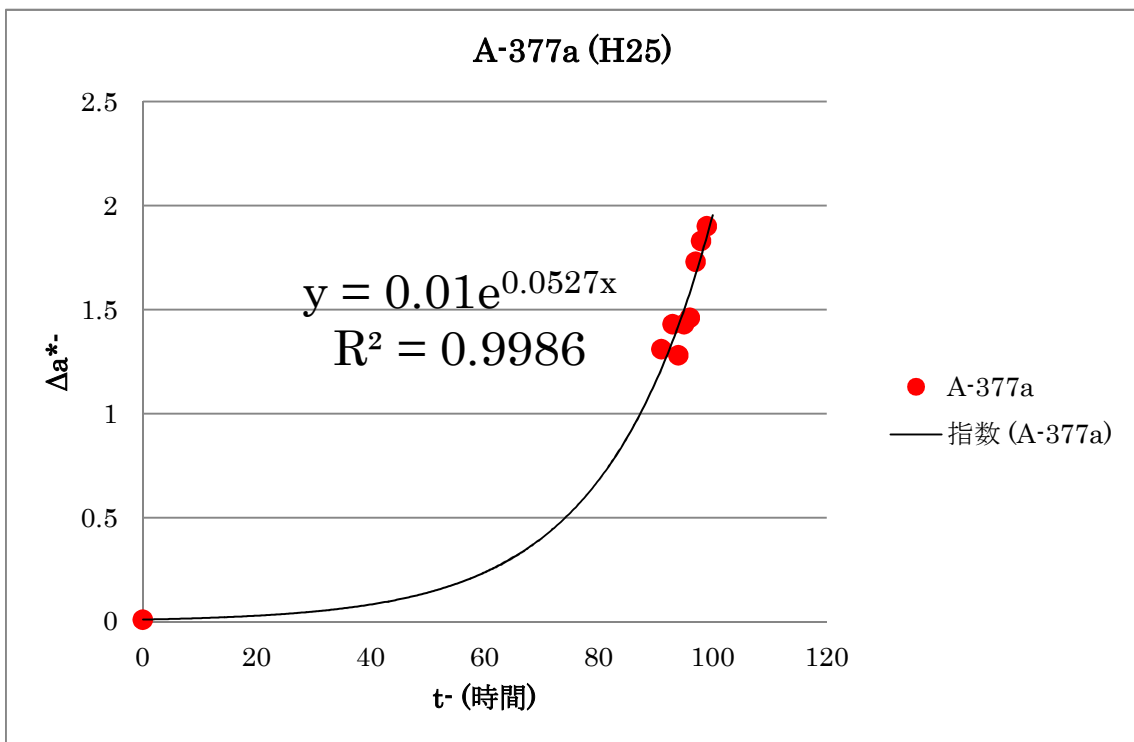


図 3.4.8 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 377°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

また、色彩値 b^* については、 $b^*_{\max}=11.0$ と仮定し、速度定数 kb の値を求め、表 3.4.3 および図 3.4.9～3.4.12 に示した。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.4 および図 3.4.13～3.4.16 に示した。

表 3.4.3 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 色彩 b^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{\max}	tb (時間)	kb
試料 A	100°C	11.0	8000	0.00080
	127°C	11.0	6000	0.0011
	177°C	11.0	4000	0.0016
	227°C	11.0	3500	0.0019

表 3.4.4 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 色彩 b^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{\max}	tb (時間)	kb
試料 A (H25 業務)	177°C	11.0	1000	0.0065
	277°C	11.0	2000	0.0031
	327°C	11.0	250	0.025
	377°C	11.0	150	0.042

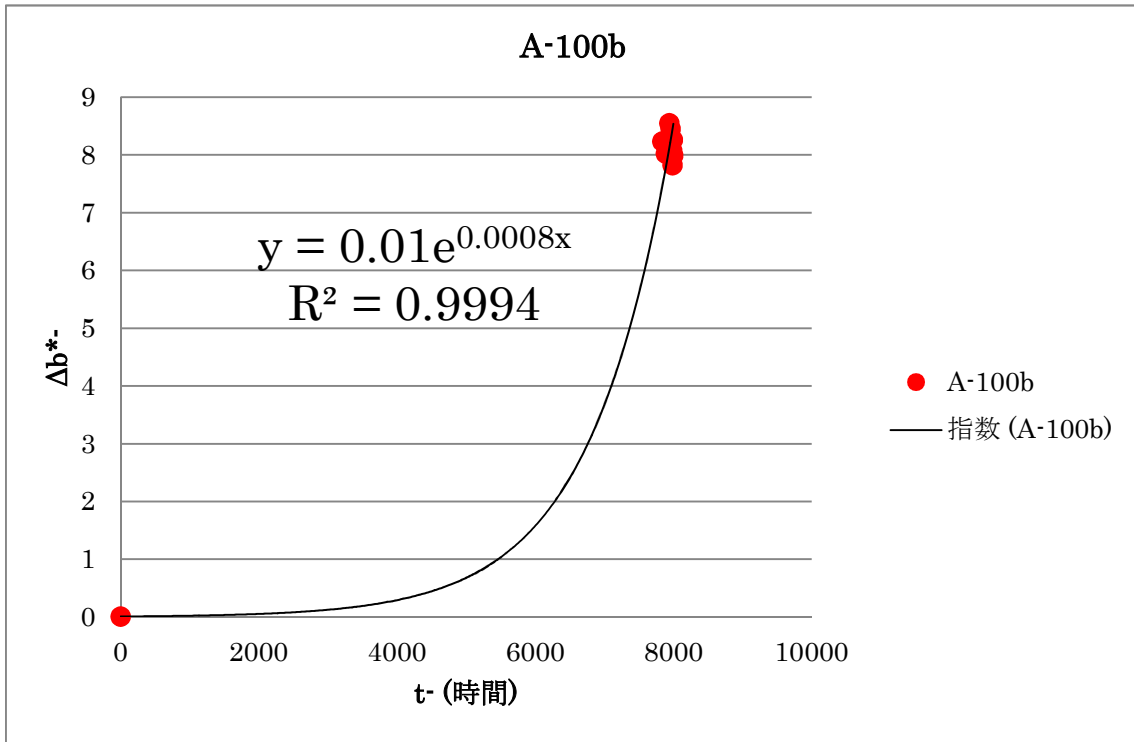


図 3.4.9 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 100°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果

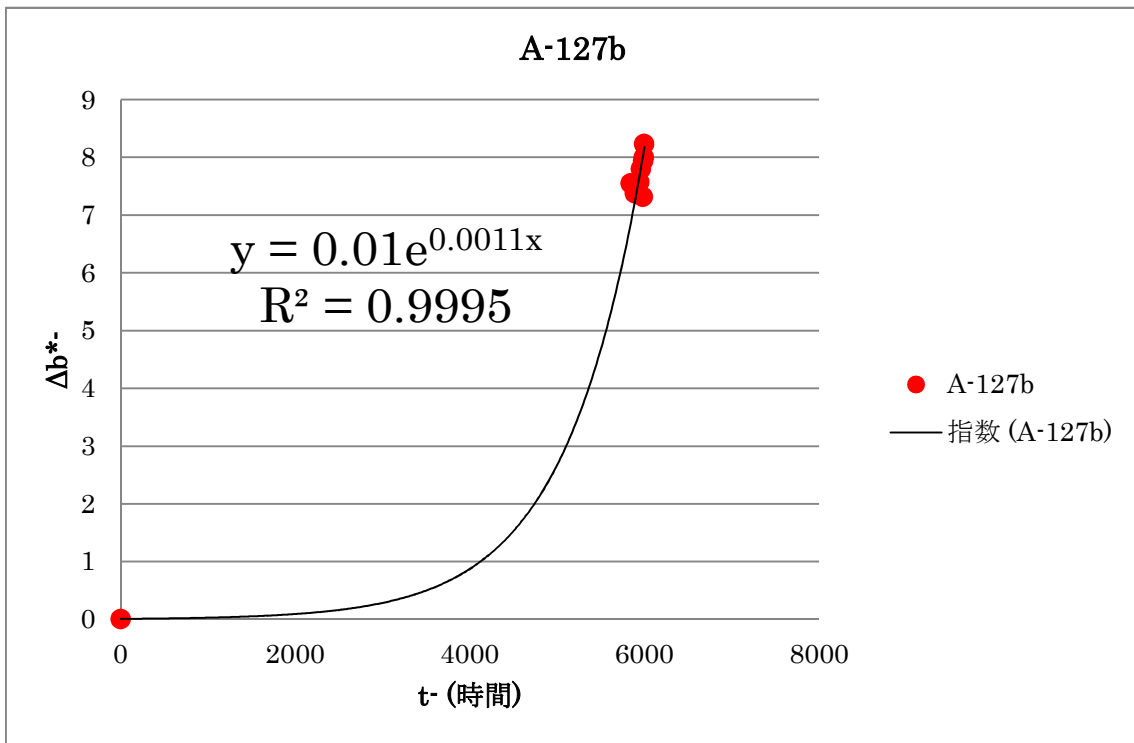


図 3.4.10 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 127°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果

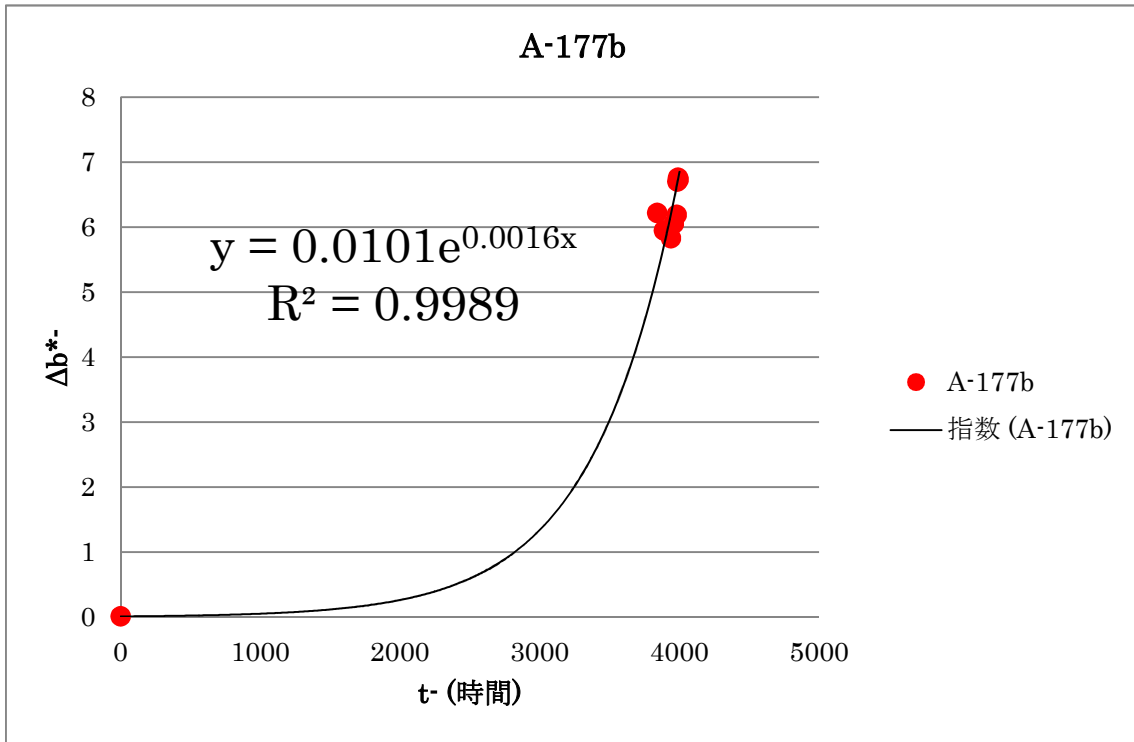


圖 3.4.11 鄉村斷層帶 標準試料 (試料 A) 177°C 色彩值 b^* 加熱實驗解析結果

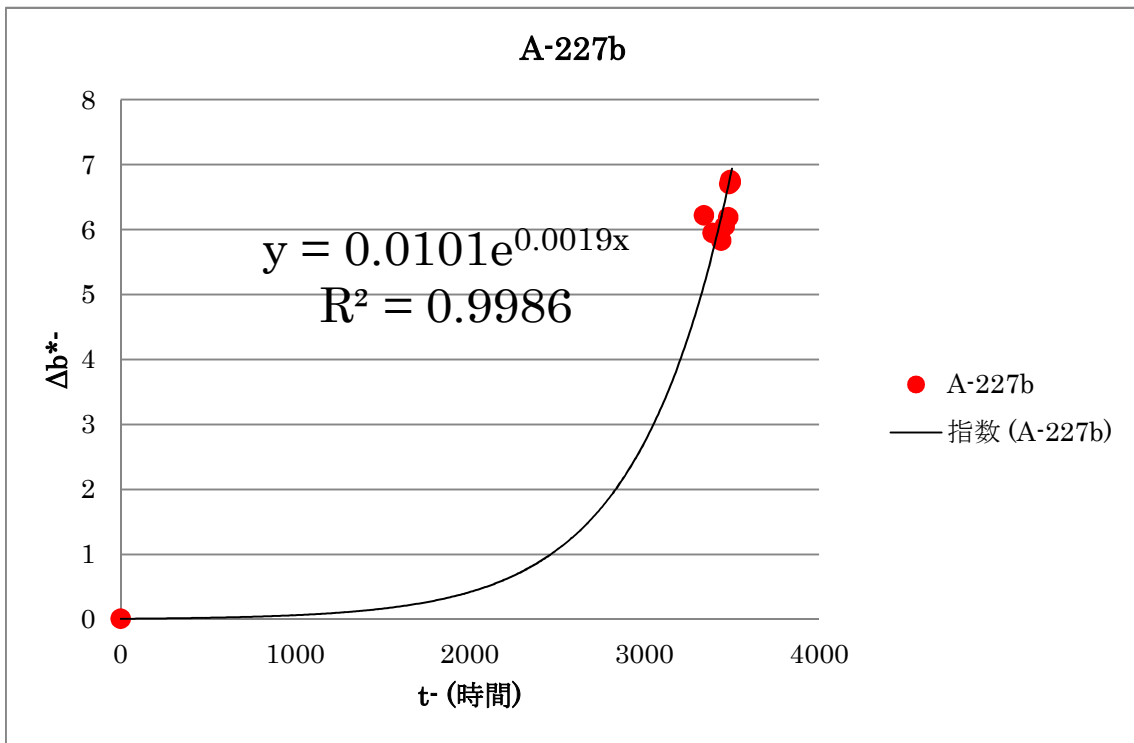


圖 3.4.12 鄉村斷層帶 標準試料 (試料 A) 227°C 色彩值 b^* 加熱實驗解析結果

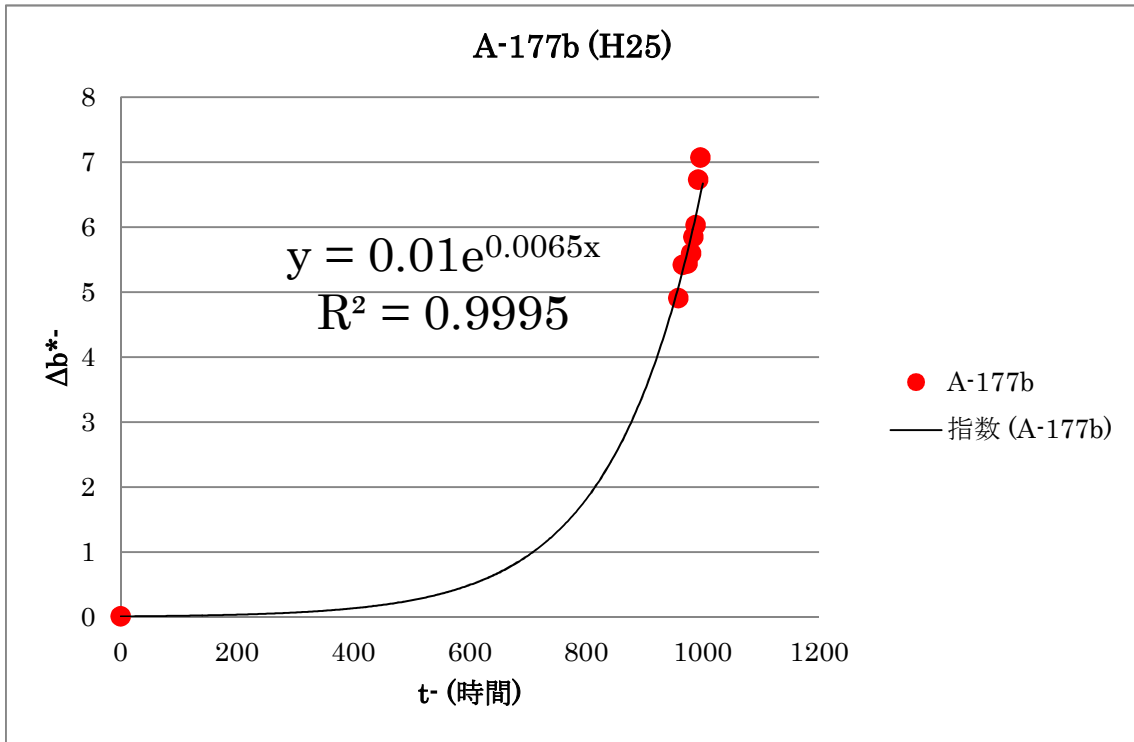


図 3.4.13 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 177°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

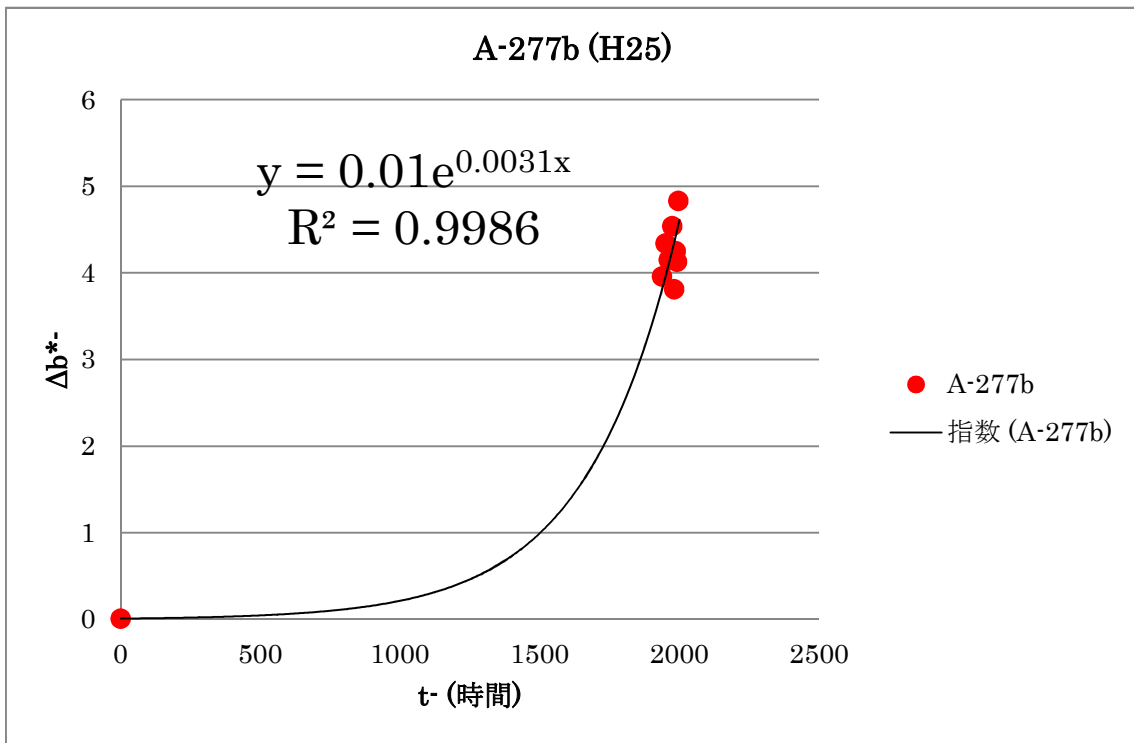


図 3.4.14 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 277°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

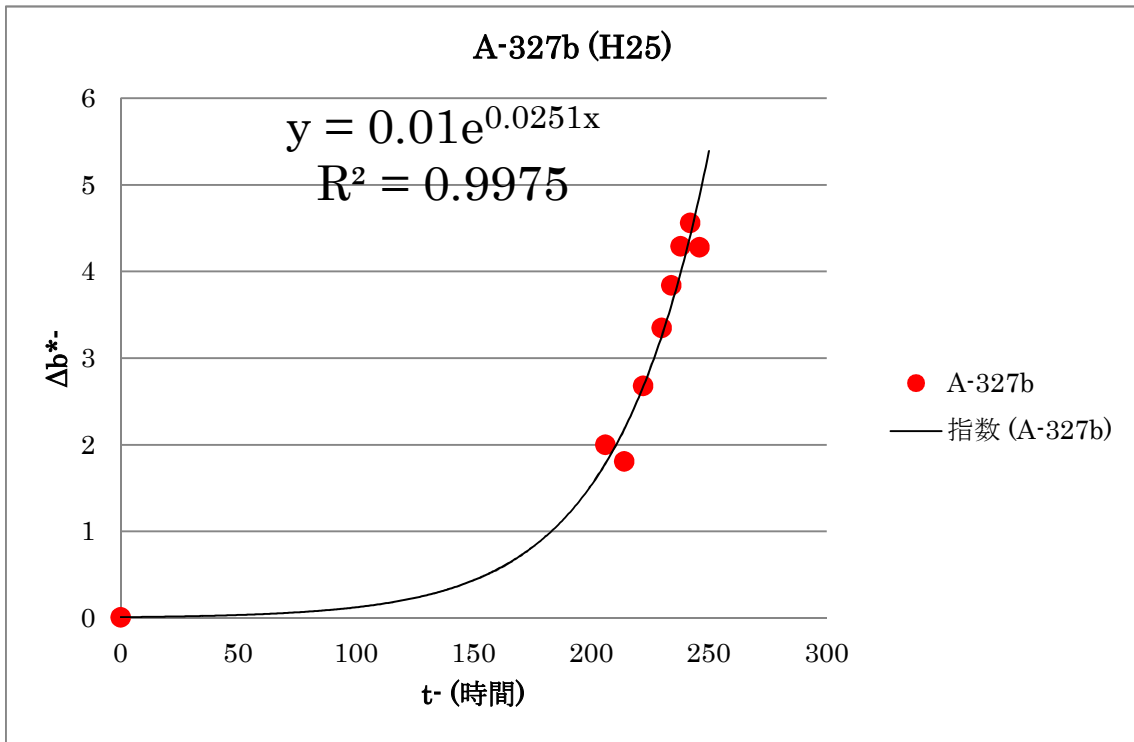


図 3.4.15 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 327°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

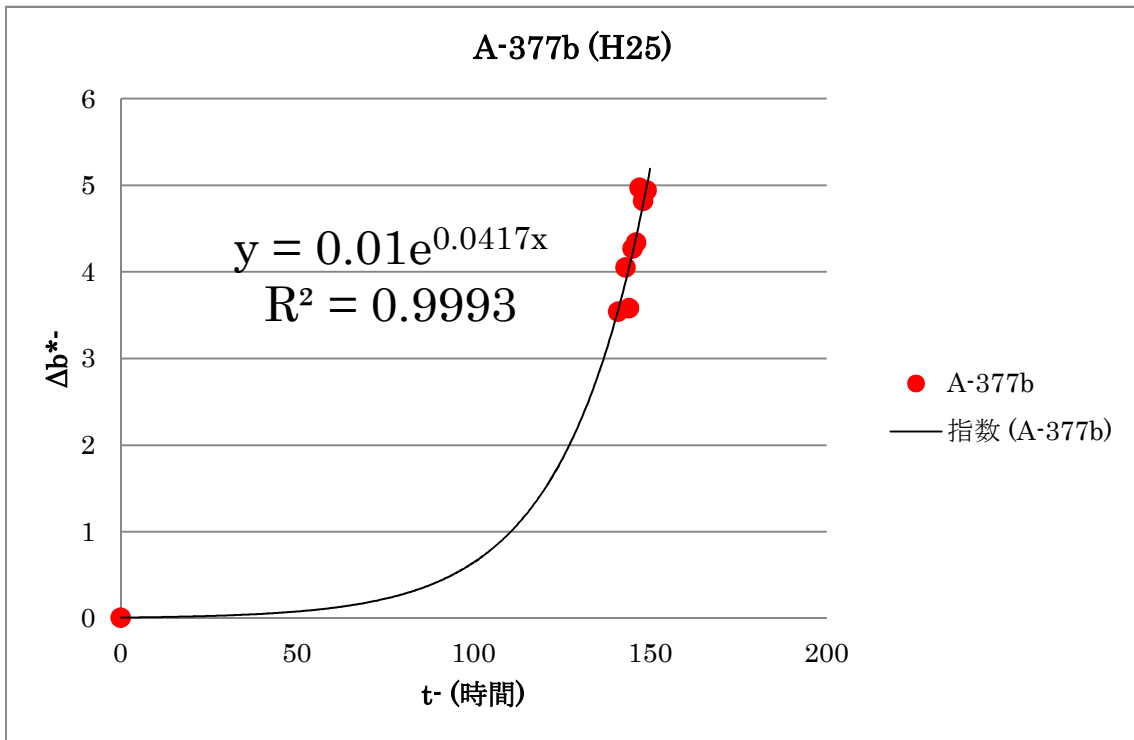


図 3.4.16 郷村断層帯 標準試料 (試料 A) 377°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

山崎断層帯（試料 B）の解析結果を表 3.4.5 および図 3.4.17～3.4.20 に示した。色彩値 a^* については、 $a^*_{max}=2.5$ と仮定し、速度定数 ka の値を求めた。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.6 および図 3.4.21～3.4.24 に示した。

表 3.4.5 山崎断層帯 標準試料（試料 B）色彩 a^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	ta (時間)	ka
試料 B	100°C	2.5	20000	0.00030
	127°C	2.5	10000	0.00060
	177°C	2.5	6000	0.0010
	227°C	2.5	6000	0.0014

表 3.4.6 山崎断層帯 標準試料（試料 B）色彩 a^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	ta (時間)	ka
試料 B (H25 業務)	177°C	2.5	6000	0.0010
	277°C	2.5	1000	0.0057
	327°C	2.5	250	0.023
	377°C	2.5	50	0.12

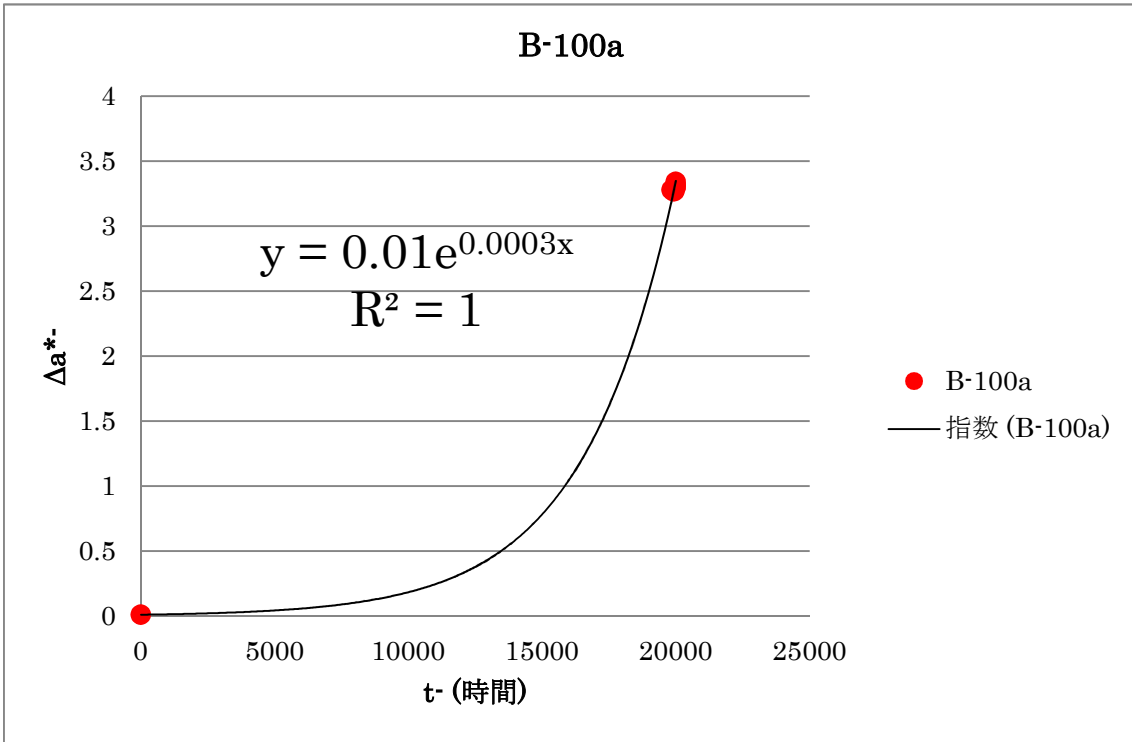


図 3.4.17 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 100°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果

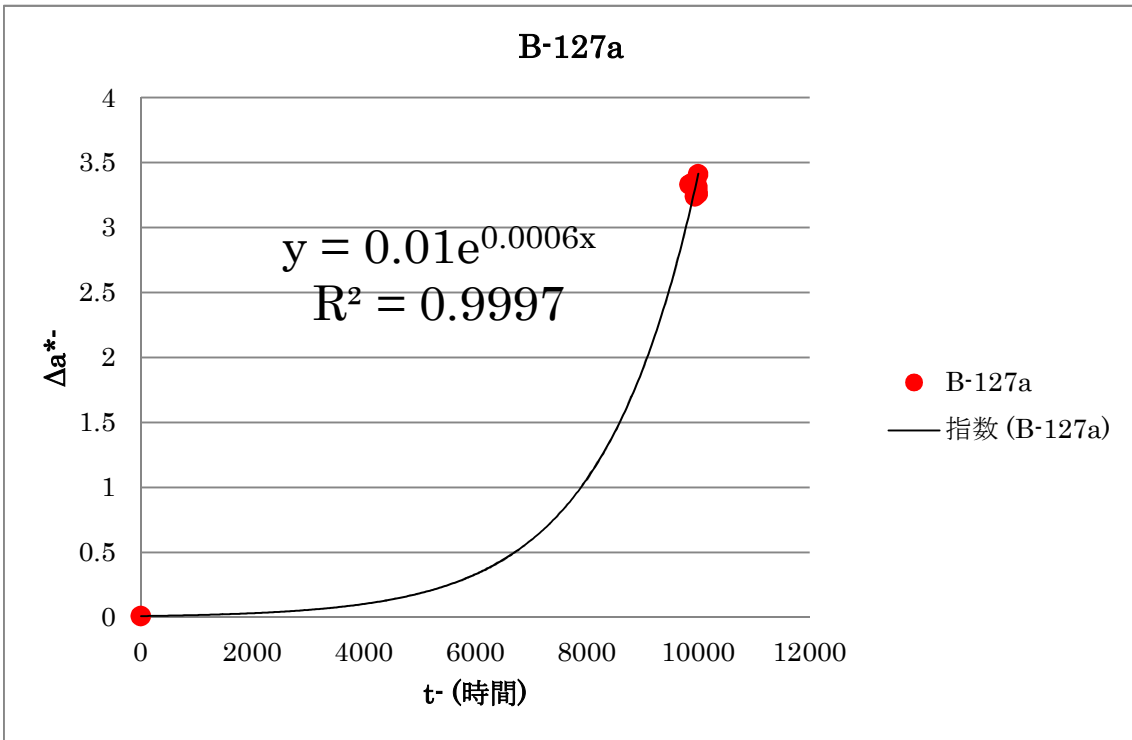


図 3.4.18 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 127°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果

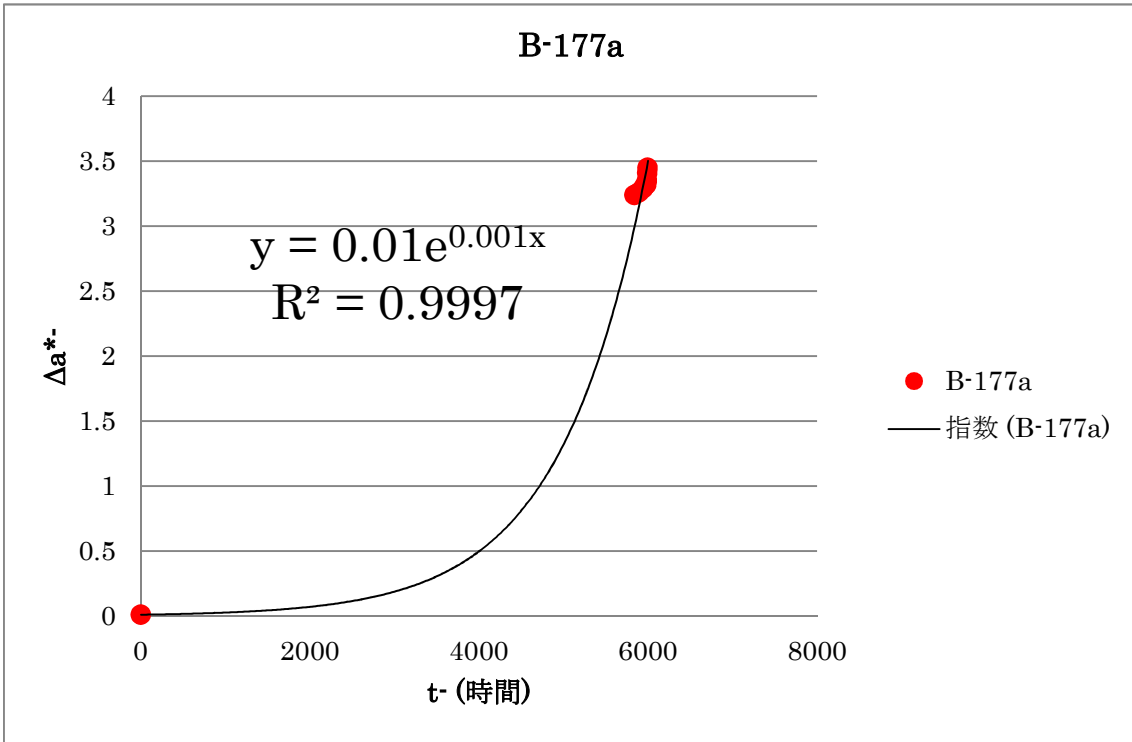


図 3.4.19 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 177°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果

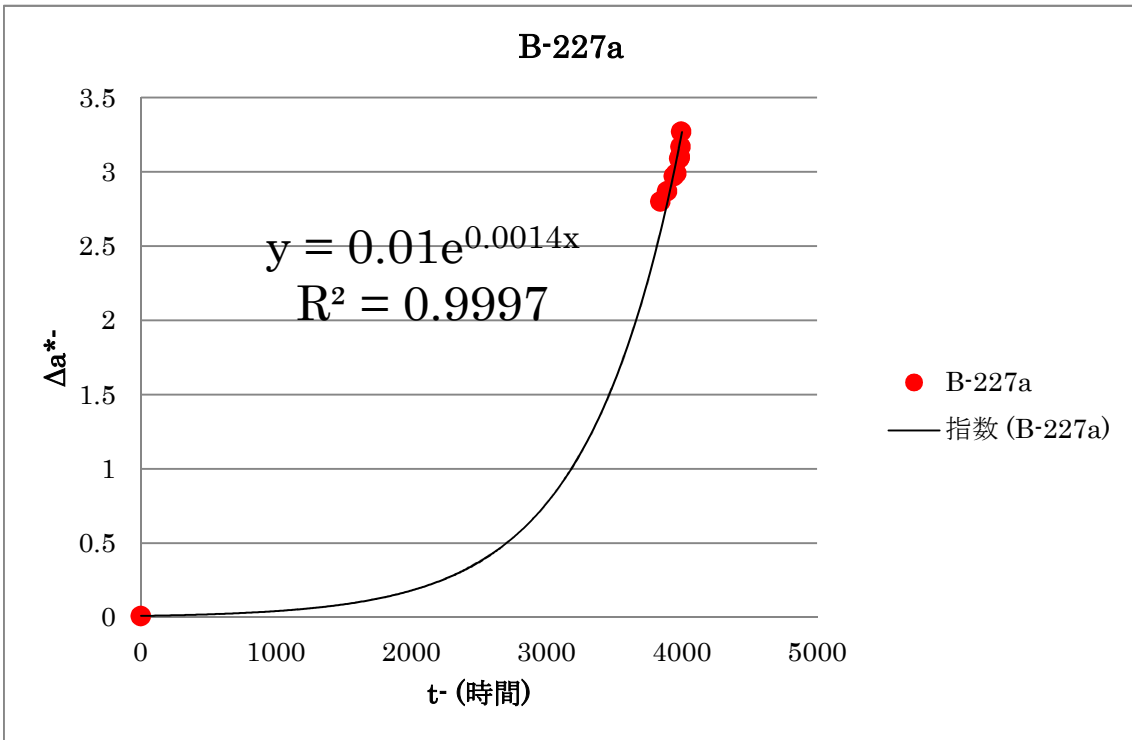


図 3.4.20 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 227°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果

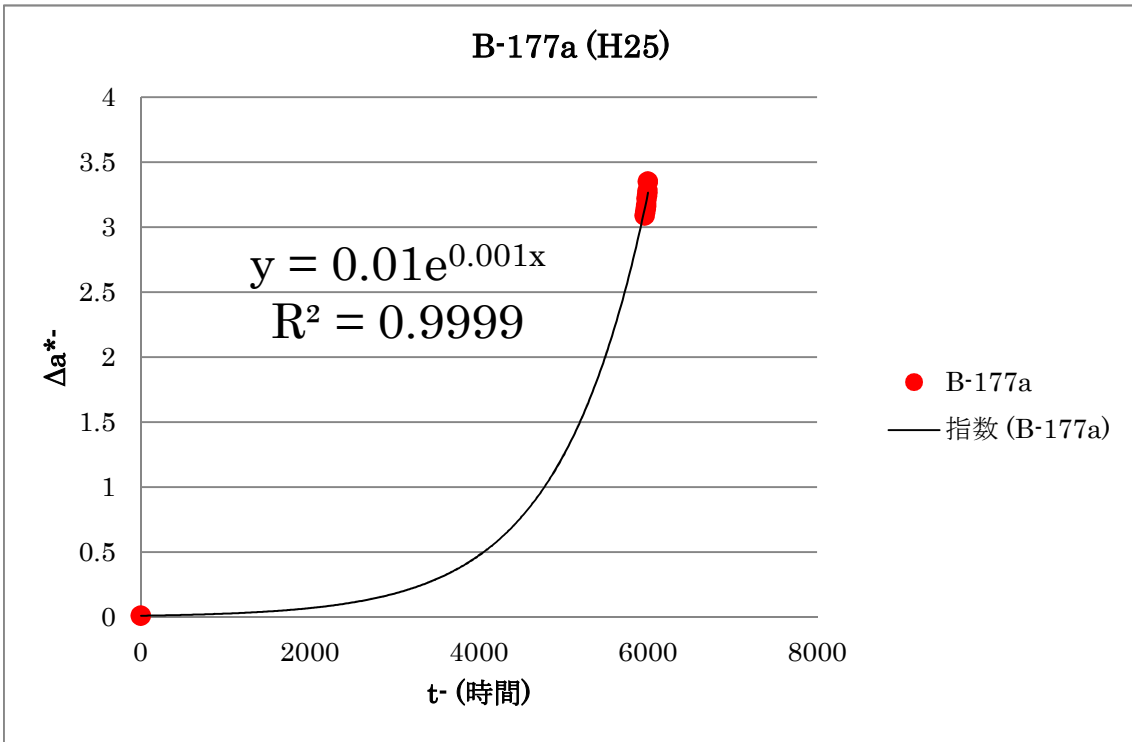


図 3.4.21 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 177°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

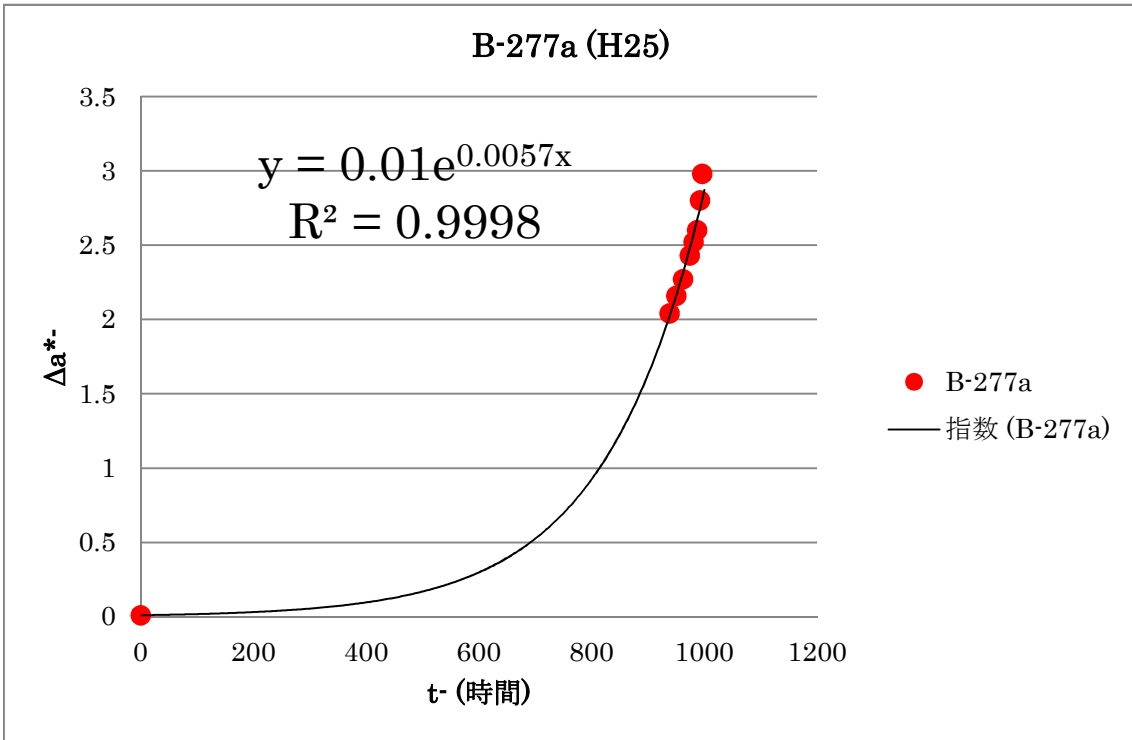


図 3.4.22 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 277°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

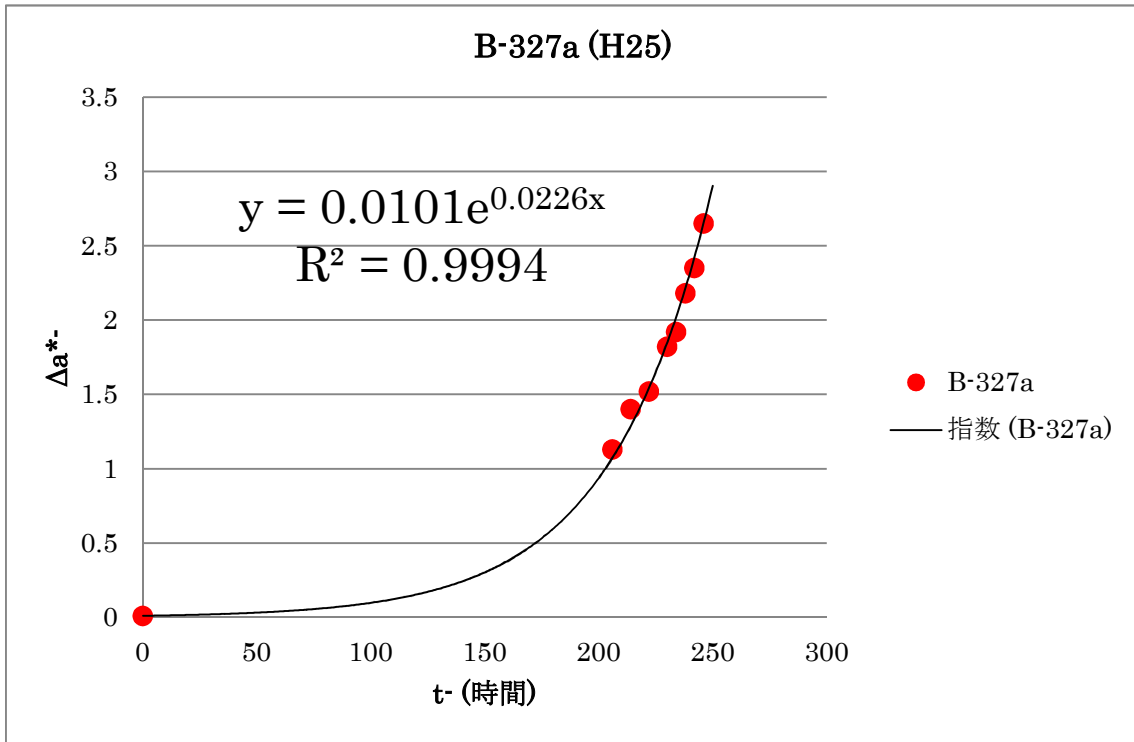


図 3.4.23 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 327°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

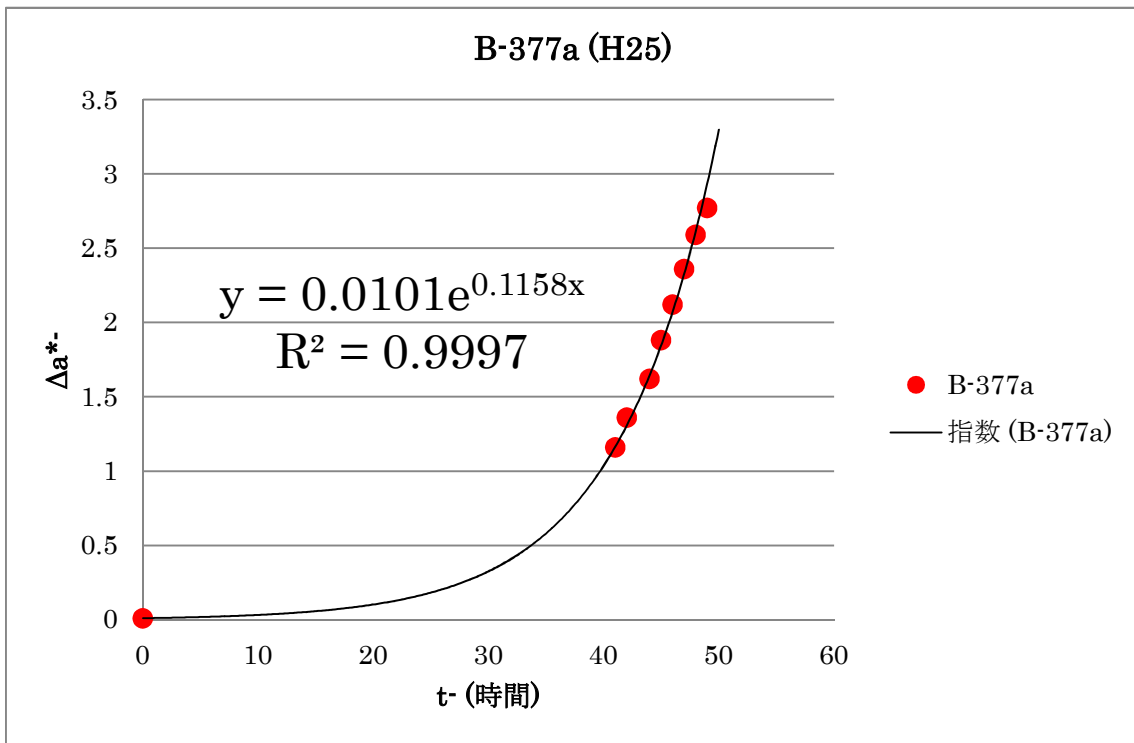


図 3.4.24 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 377°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

また、色彩値 b^* については、 $b^*_{max}=2.0$ と仮定し、速度定数 kb の値を求め、表 3.4.7 および図 3.4.25~3.4.28 に示した。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.8 および図 3.4.29~3.4.32 に示した。

表 3.4.7 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 色彩 b^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{max}	tb (時間)	kb
試料 B	100°C	2.0	8000	0.00080
	127°C	2.0	6000	0.0010
	177°C	2.0	4000	0.0015
	227°C	2.0	3000	0.0020

表 3.4.8 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 色彩 b^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{max}	tb (時間)	kb
試料 B (H25 業務)	177°C	2.0	1500	0.0038
	277°C	2.0	1500	0.0037
	327°C	2.0	250	0.023
	377°C	2.0	50	0.12

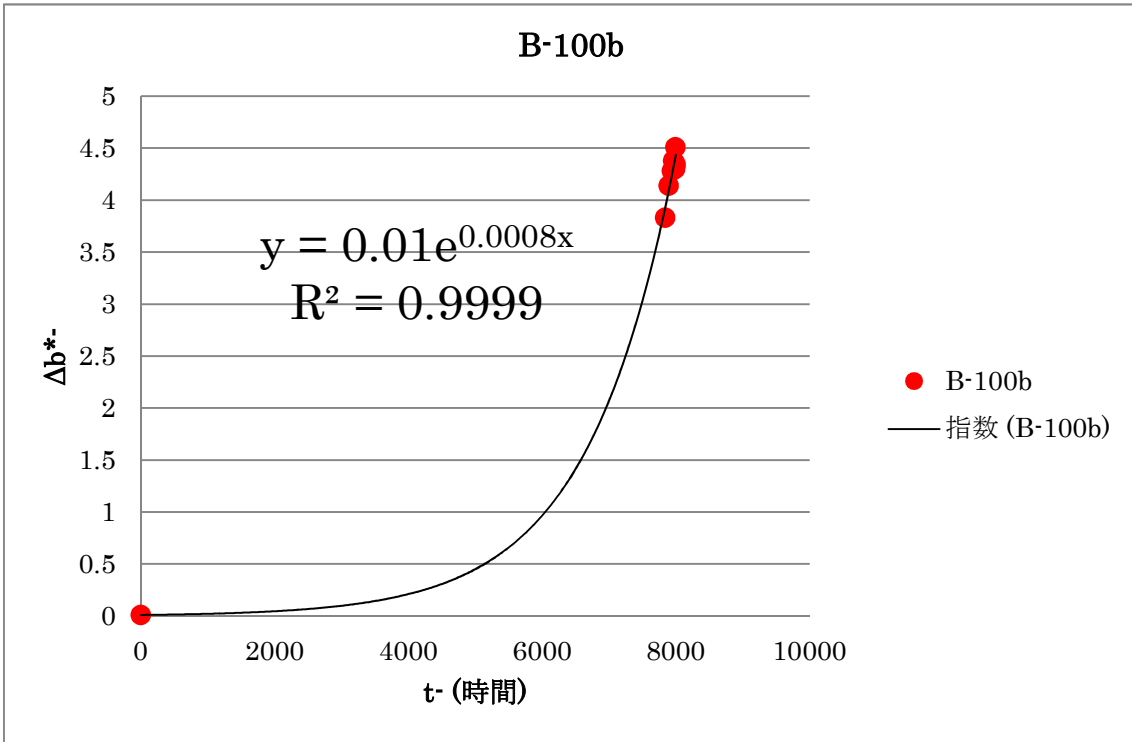


図 3.4.25 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 100°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果

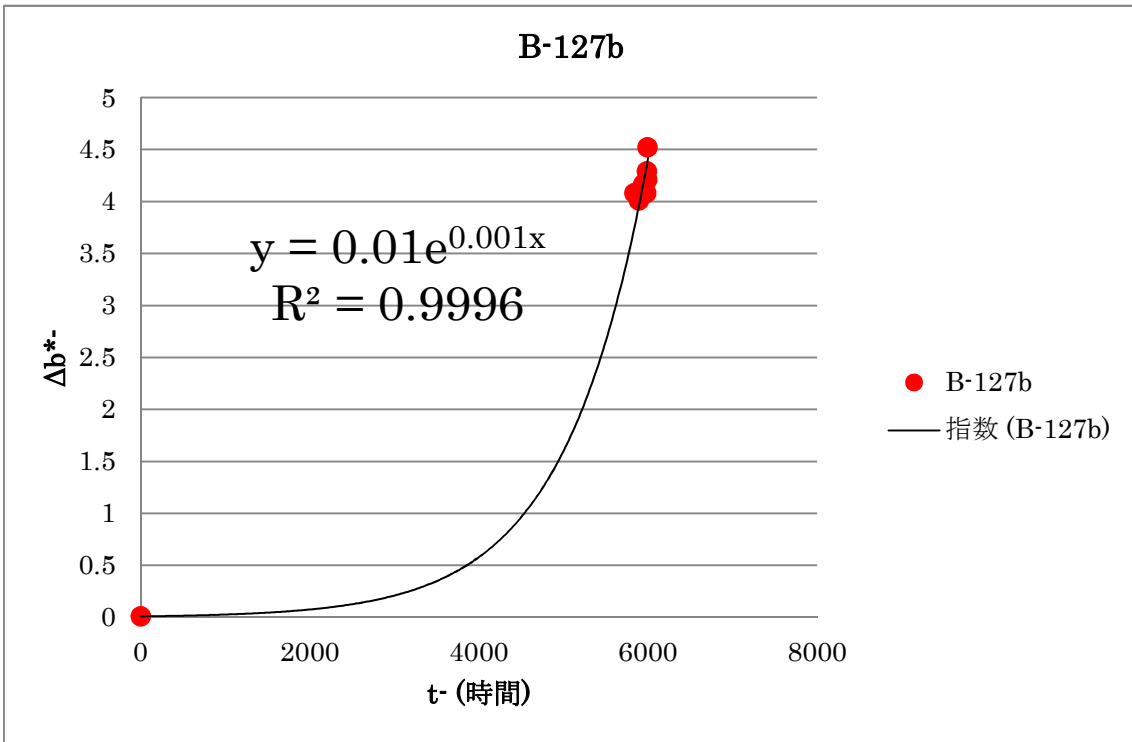


図 3.4.26 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 127°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果

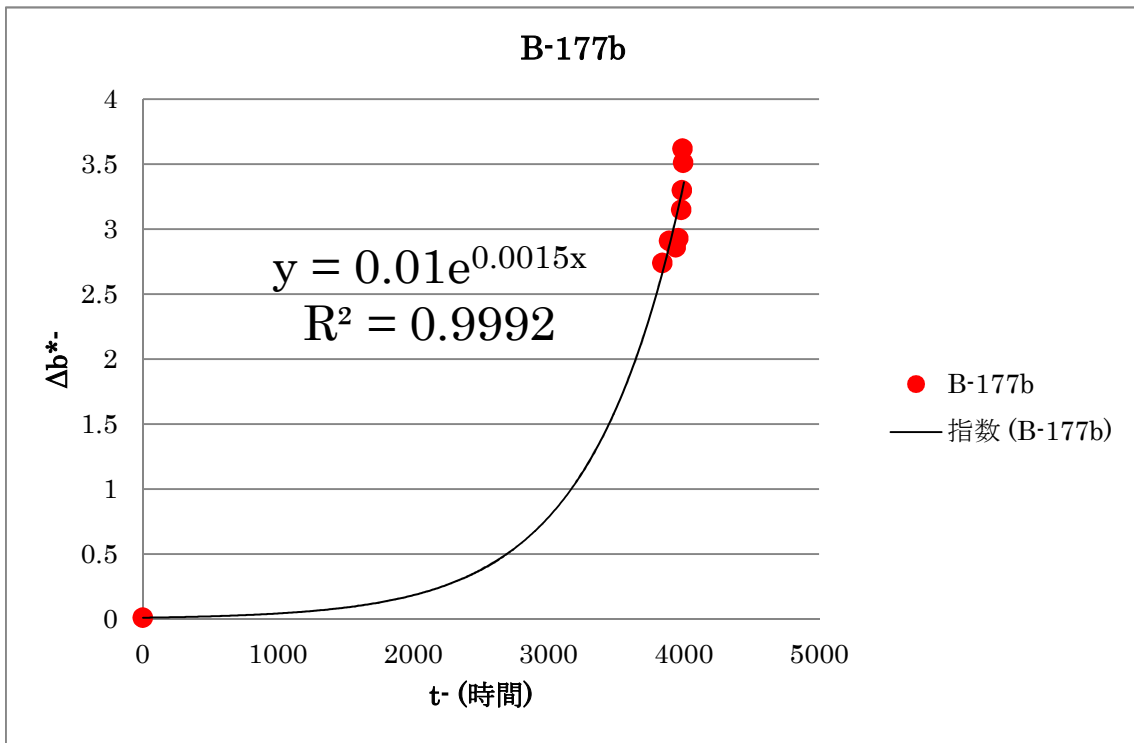


図 3.4.27 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 177°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果

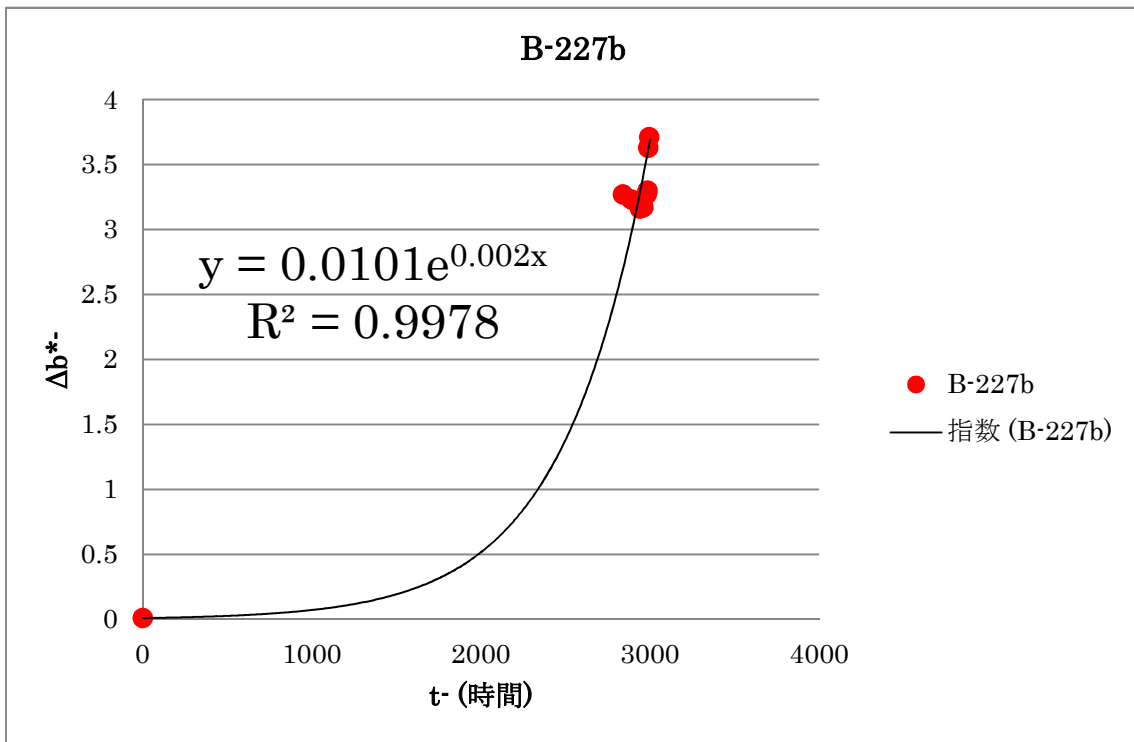


図 3.4.28 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 227°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果

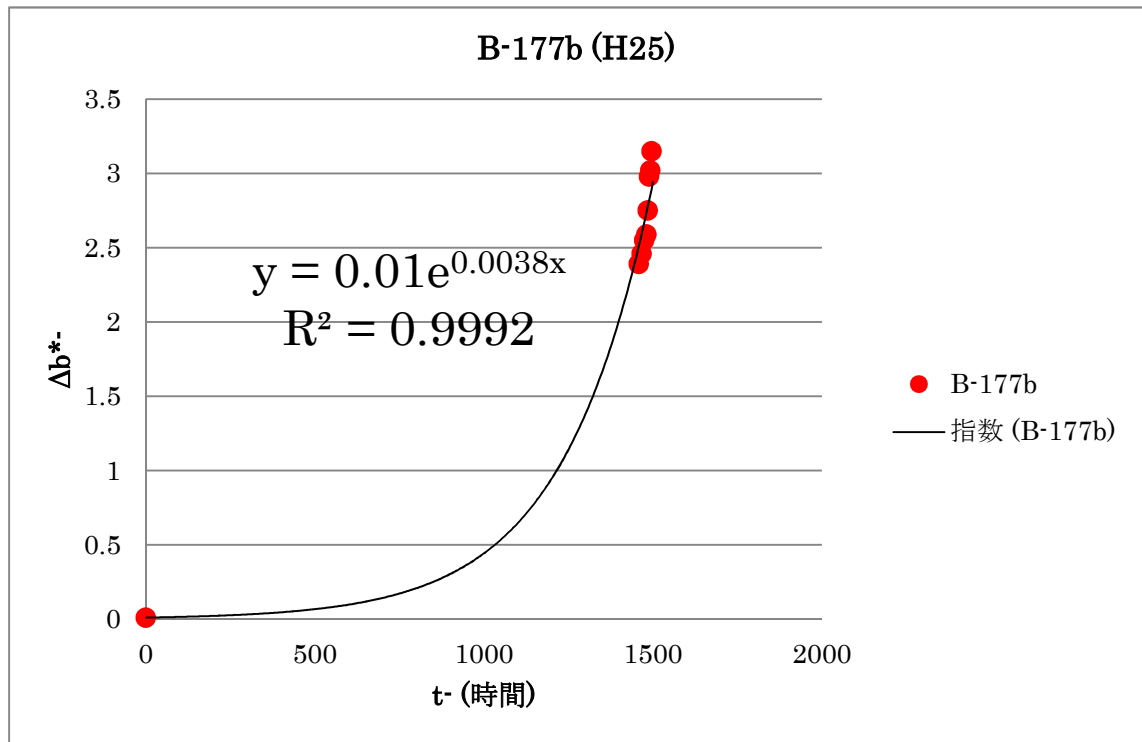


図 3.4.29 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 177°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

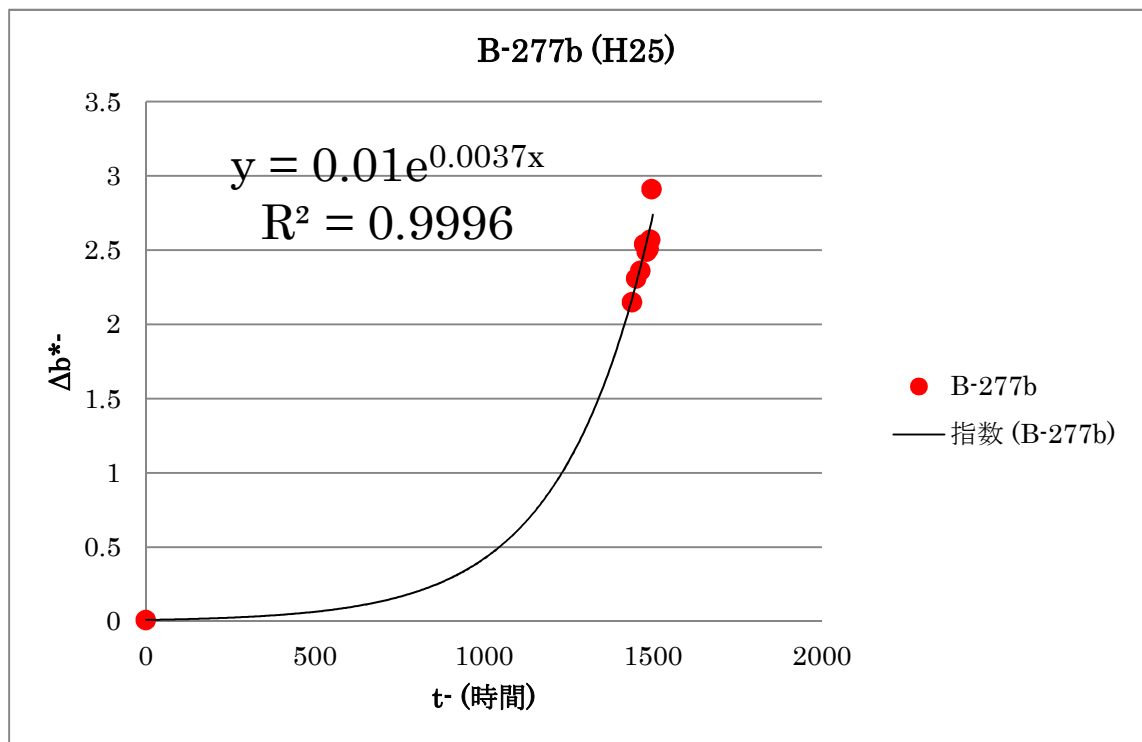


図 3.4.30 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 277°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

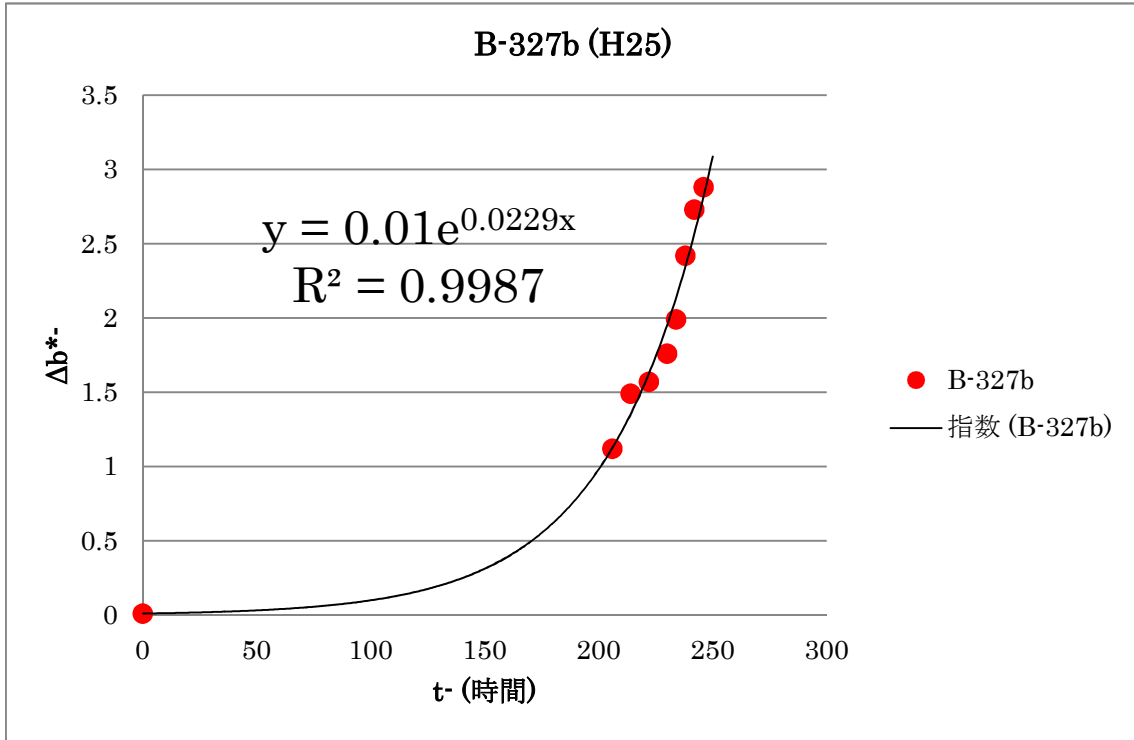


図 3.4.31 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 327°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

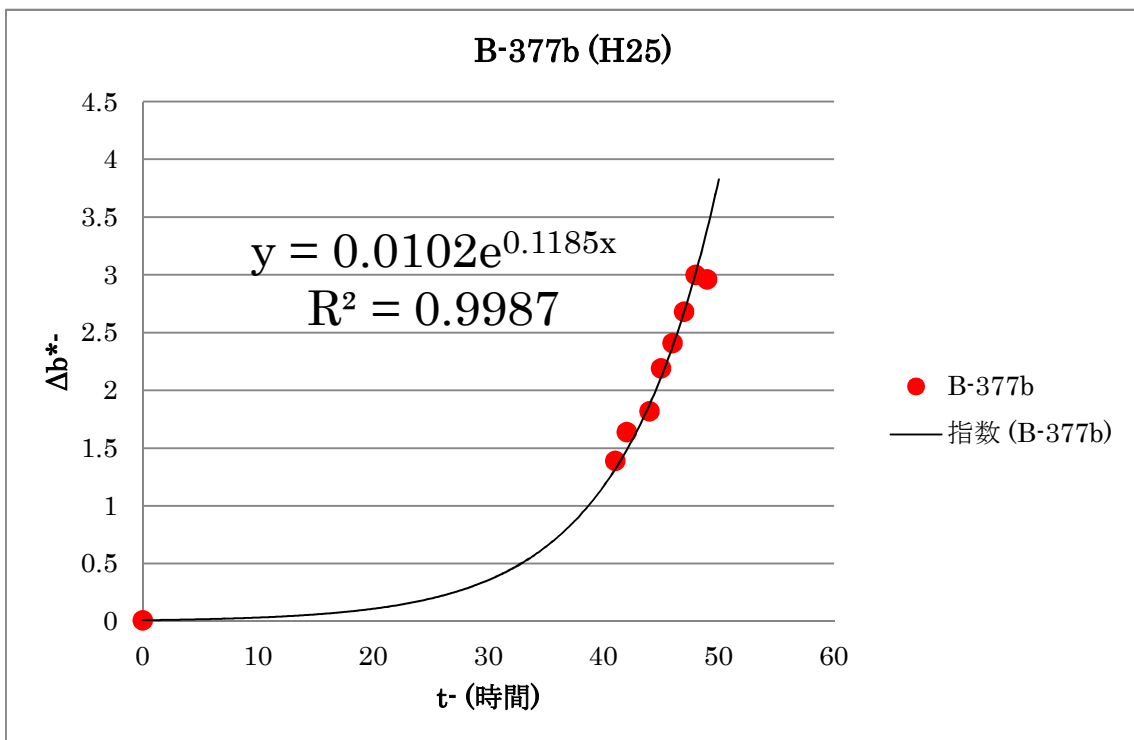


図 3.4.32 山崎断層帯 標準試料 (試料 B) 377°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

警固－西山断層帯（試料 C）の解析結果を表 3.4.9 および図 3.4.33～3.2.36 に示した。色彩値 a^* については、 $a^*_{max}=2.0$ と仮定し、速度定数 ka の値を求めた。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.10 および図 3.4.37～3.4.40 に示した。

表 3.4.9 警固－西山断層帯 標準試料（試料 C）色彩 a^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	t_a (時間)	ka
試料 C	100°C	2.0	10000	0.00060
	127°C	2.0	7000	0.00090
	177°C	2.0	6000	0.0010
	227°C	2.0	4000	0.0015

表 3.4.10 警固－西山断層帯 標準試料（試料 C）色彩 a^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	t_a (時間)	ka
試料 C (H25 業務)	177°C	2.0	4500	0.0013
	277°C	2.0	2500	0.0022
	327°C	2.0	1000	0.0056
	377°C	2.0	70	0.078

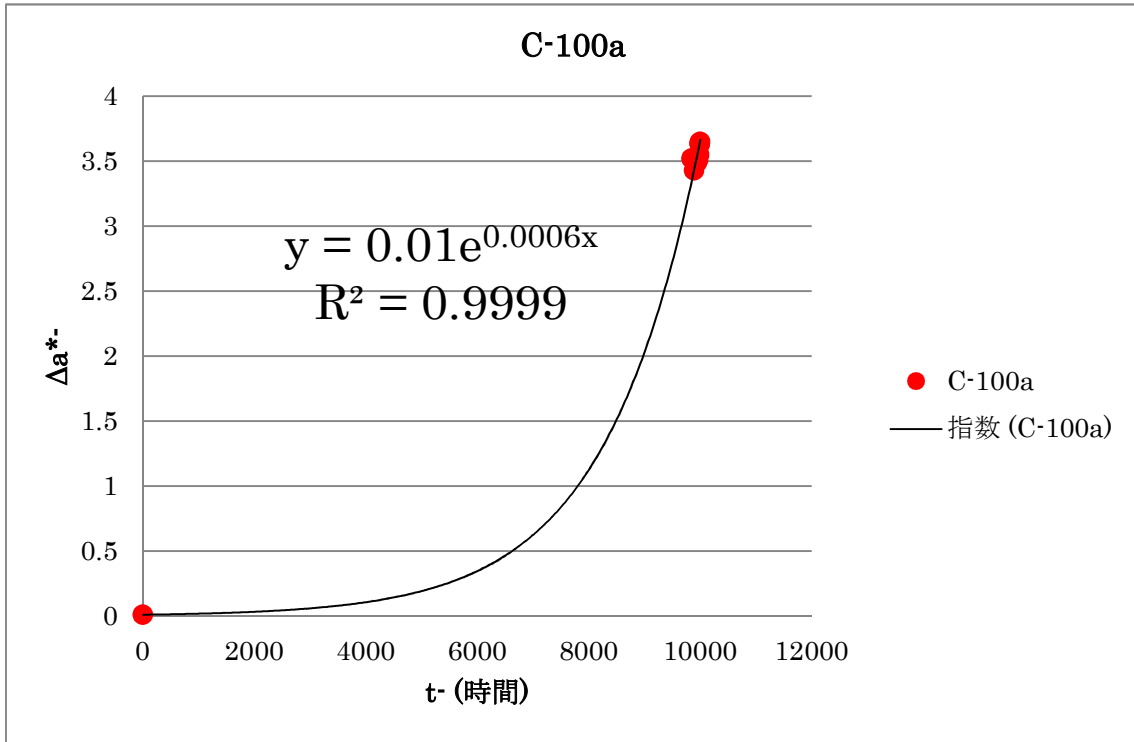


圖 3.4.33 警固－西山斷層帶標準試料（試料 C）100°C 色彩值 a* 加熱實驗解析結果

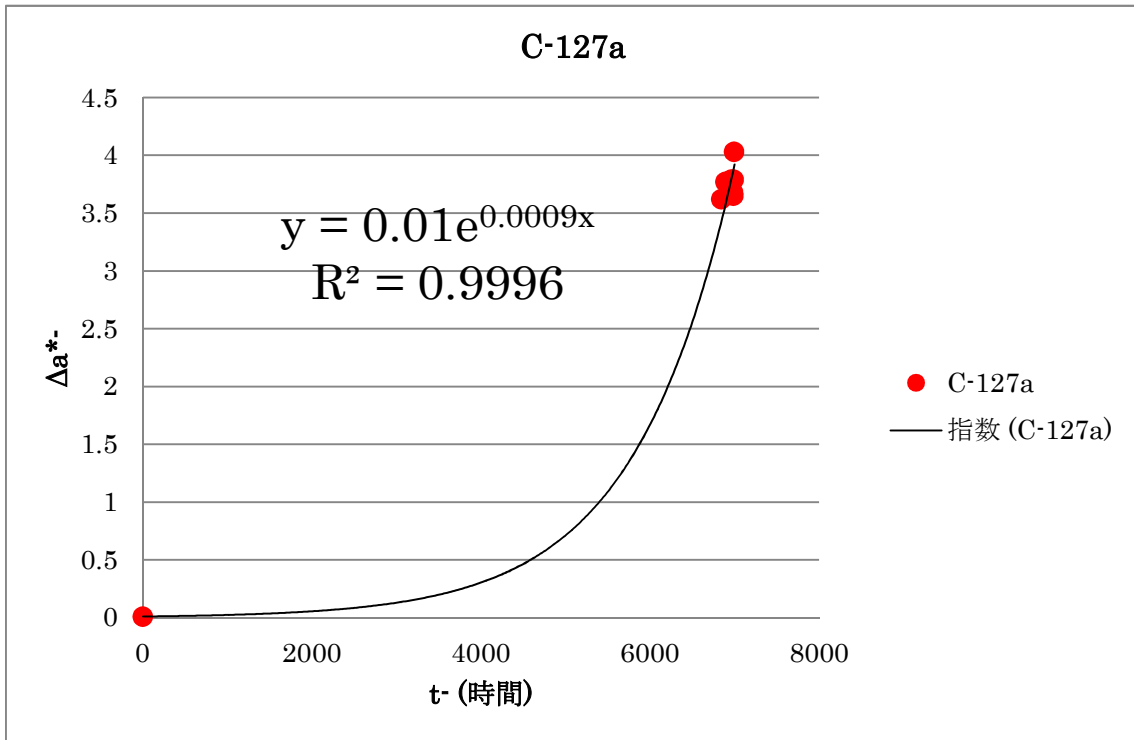


圖 3.4.34 警固－西山斷層帶標準試料（試料 C）127°C 色彩值 a* 加熱實驗解析結果

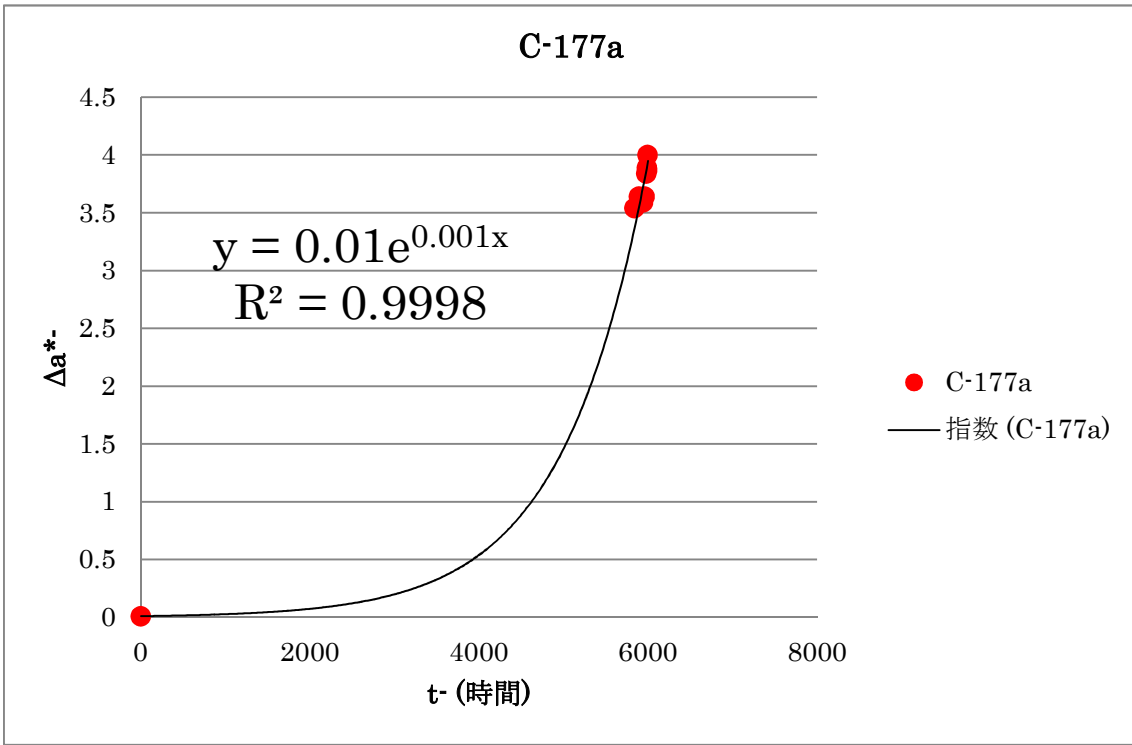


図 3.4.35 警固－西山断層帯標準試料（試料 C）177°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果

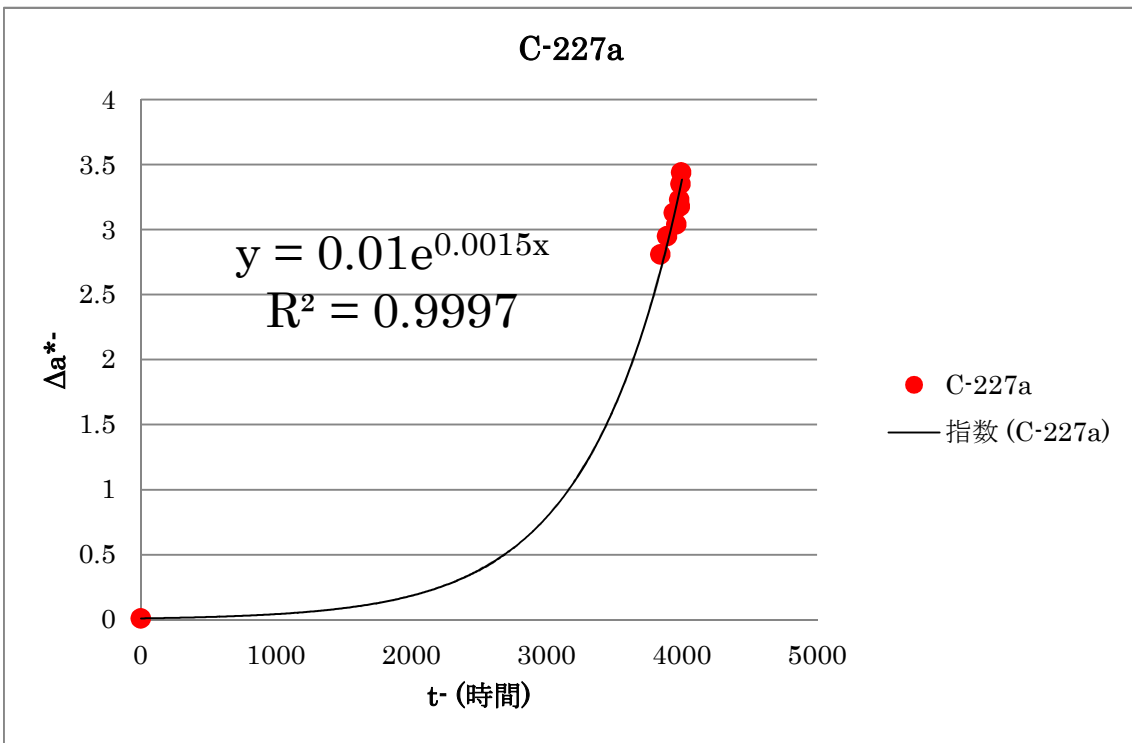


図 3.4.36 警固－西山断層帯標準試料（試料 C）227°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果

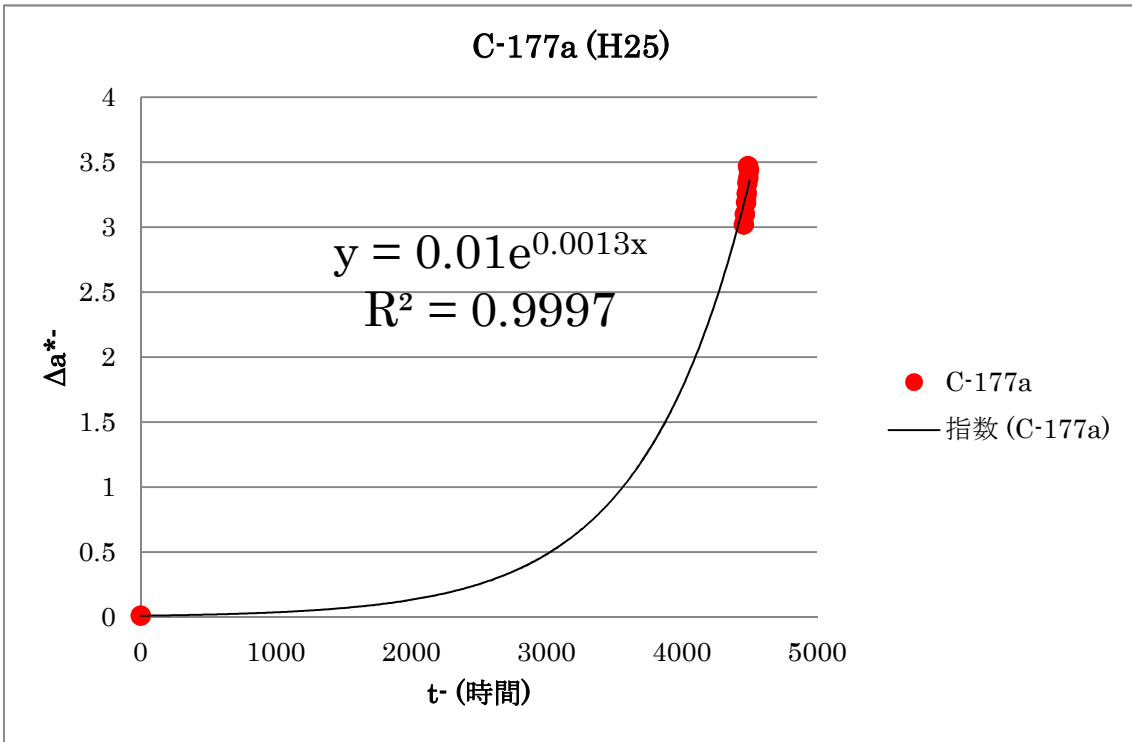


図 3.4.37 警固－西山断層帯標準試料（試料 C） 177°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果
(再解析)

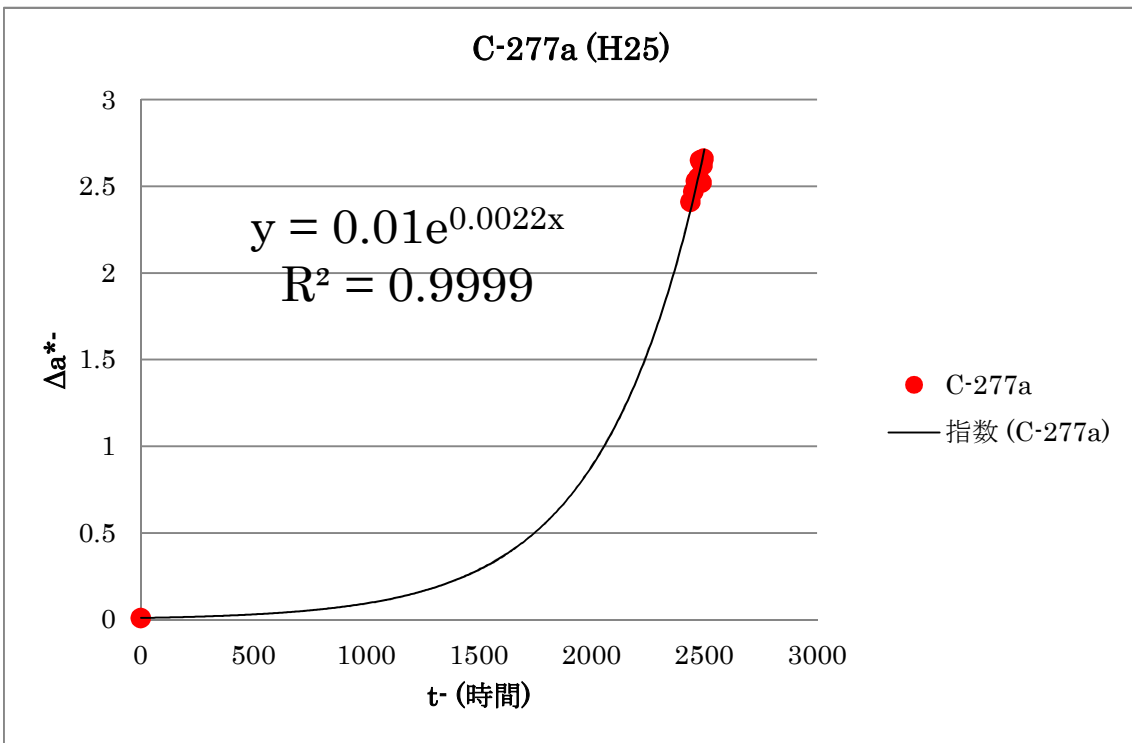


図 3.4.38 警固－西山断層帯標準試料（試料 C） 277°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果
(再解析)

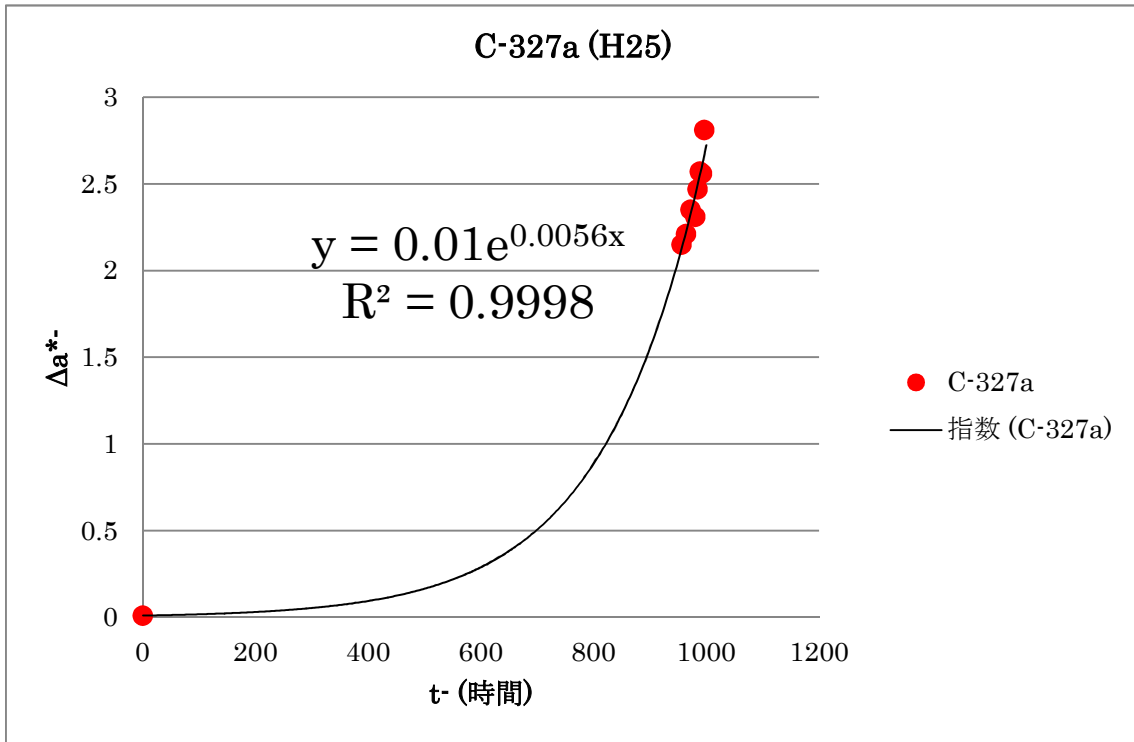


図 3.4.39 警固－西山断層帯標準試料（試料 C） 327°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果
(再解析)

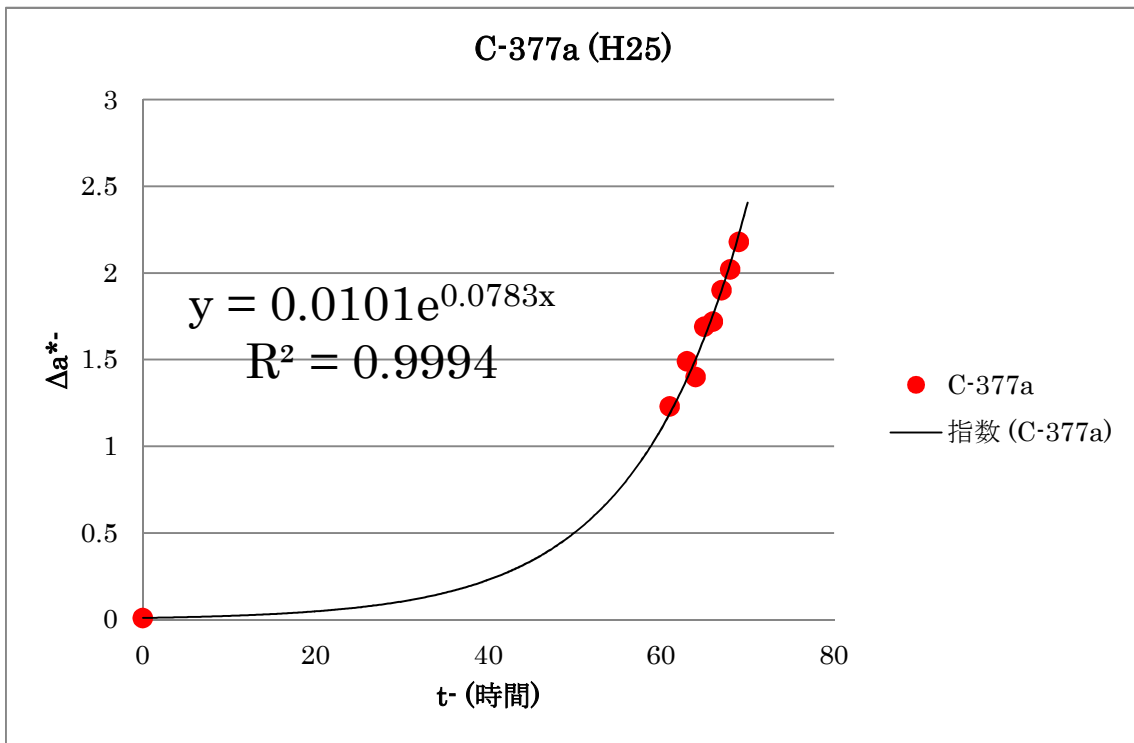


図 3.4.40 警固－西山断層帯標準試料（試料 C） 377°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果
(再解析)

また、色彩値 b^* については、 $b^*_{max}=8.0$ と仮定し、速度定数 kb の値を求め、表 3.4.11 および図 3.4.41~3.4.44 に示した。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.12 および図 3.4.45~3.4.48 に示した。

表 3.4.11 警固－西山断層帯 標準試料（試料 C）色彩 b^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{max}	tb (時間)	kb
試料 C	100°C	8.0	8000	0.00080
	127°C	8.0	6000	0.0010
	177°C	8.0	4000	0.0015
	227°C	8.0	3000	0.0020

表 3.4.12 警固－西山断層帯 標準試料（試料 C）色彩 b^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{max}	tb (時間)	kb
試料 C (H25 業務)	177°C	8.0	1500	0.0043
	277°C	8.0	1500	0.0042
	327°C	8.0	1000	0.0059
	377°C	8.0	70	0.087

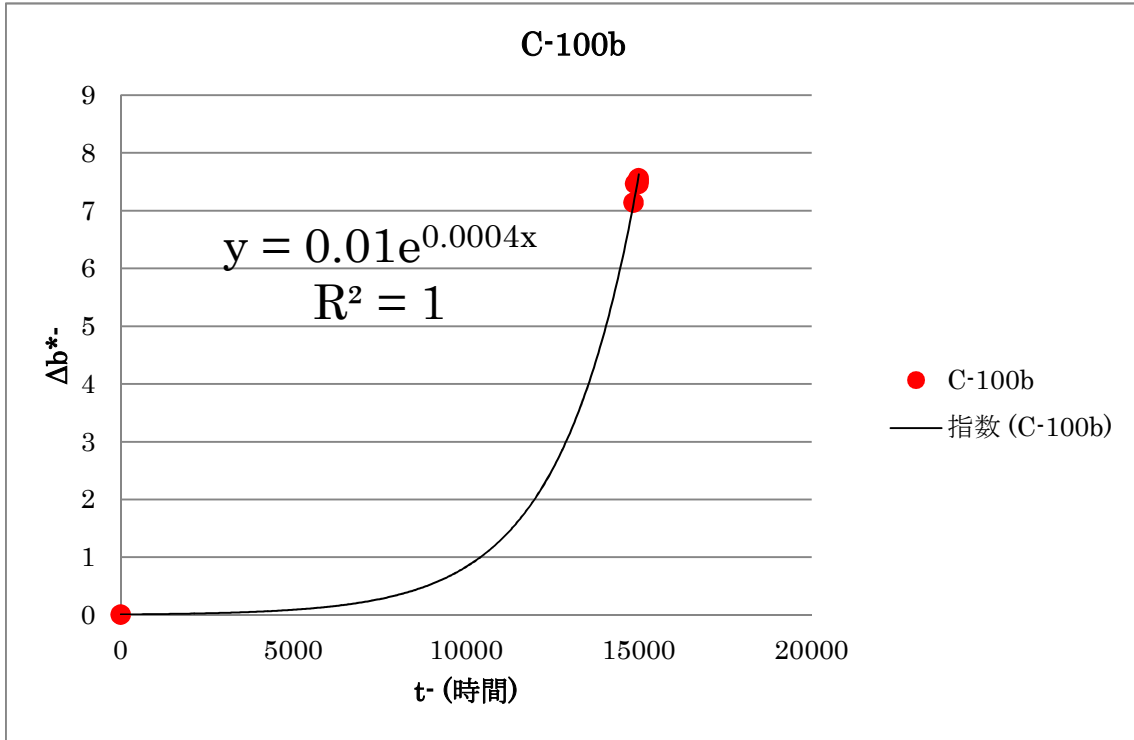


図 3.4.41 警固一西山断層帯標準試料 (試料 C) 100°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果

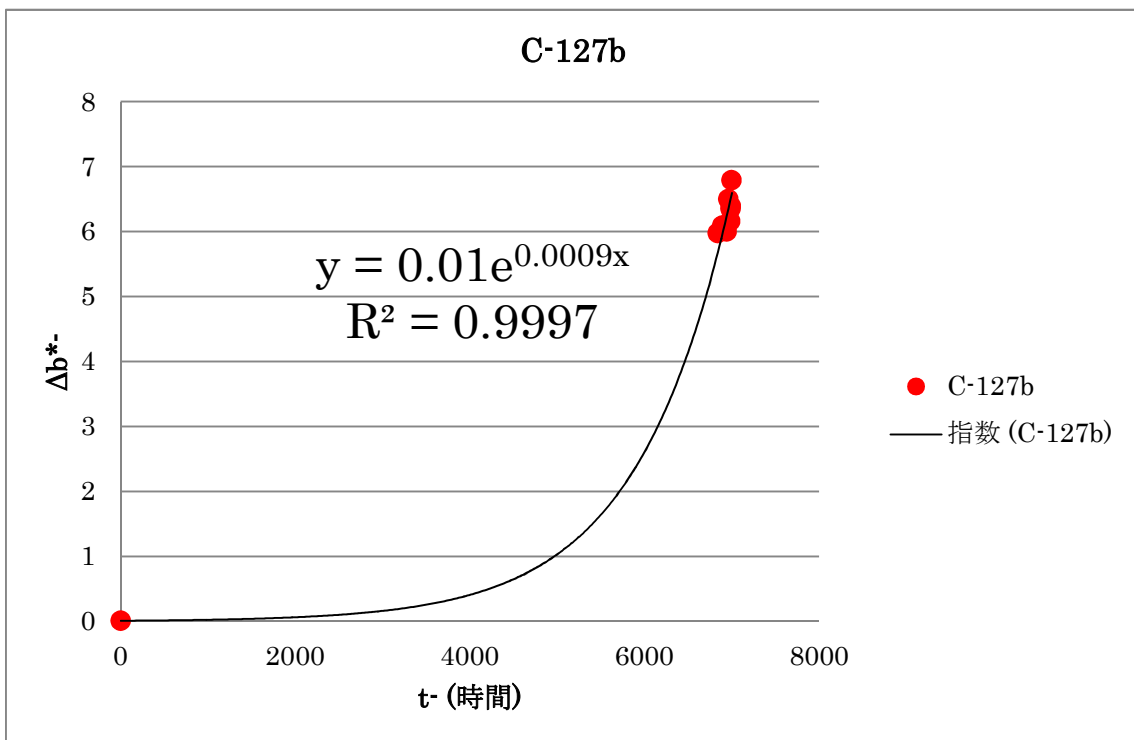


図 3.4.42 警固一西山断層帯標準試料 (試料 C) 127°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果

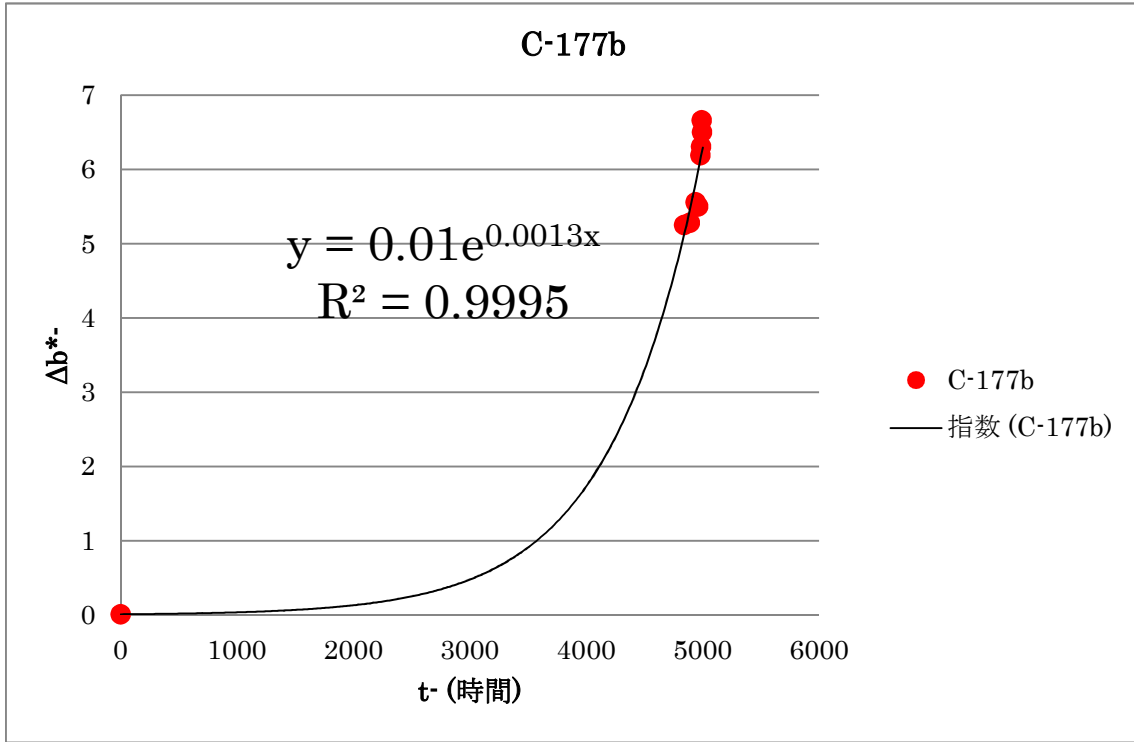


圖 3.4.43 警固－西山断層帶標準試料（試料 C）177°C 色彩值 b^* 加熱實驗解析結果

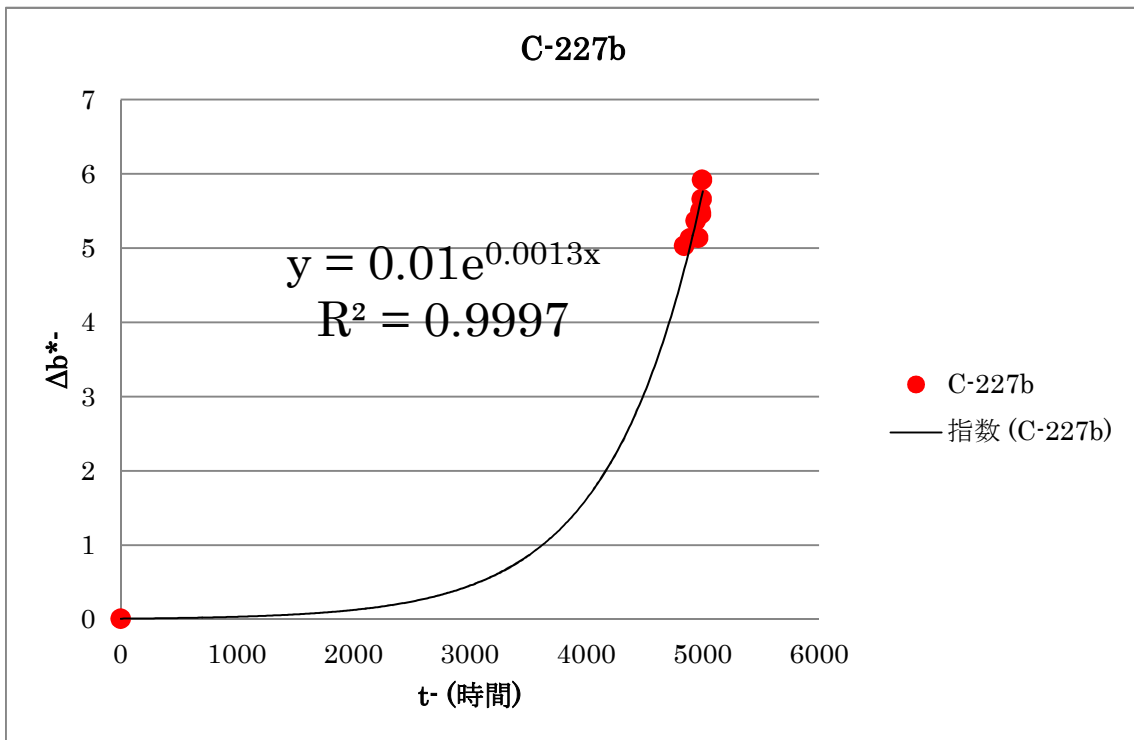


圖 3.4.44 警固－西山断層帶標準試料（試料 C）227°C 色彩值 b^* 加熱實驗解析結果

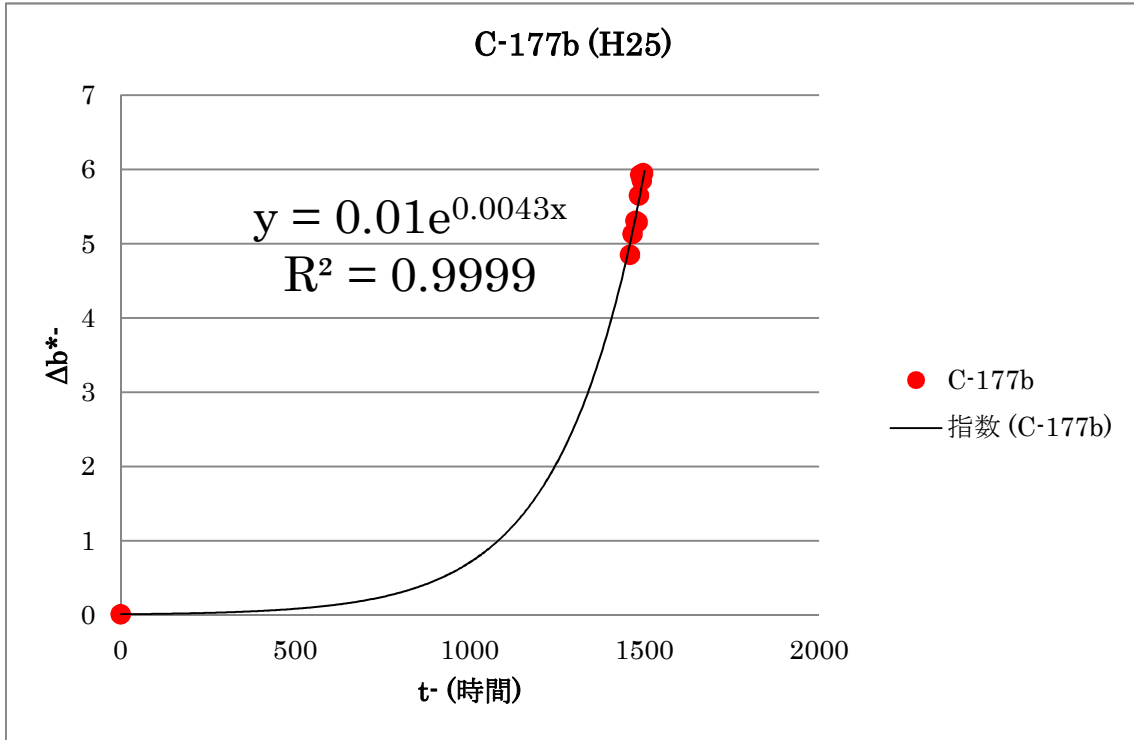


図 3.4.45 警固一西山断層帯標準試料 (試料 C) 177°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

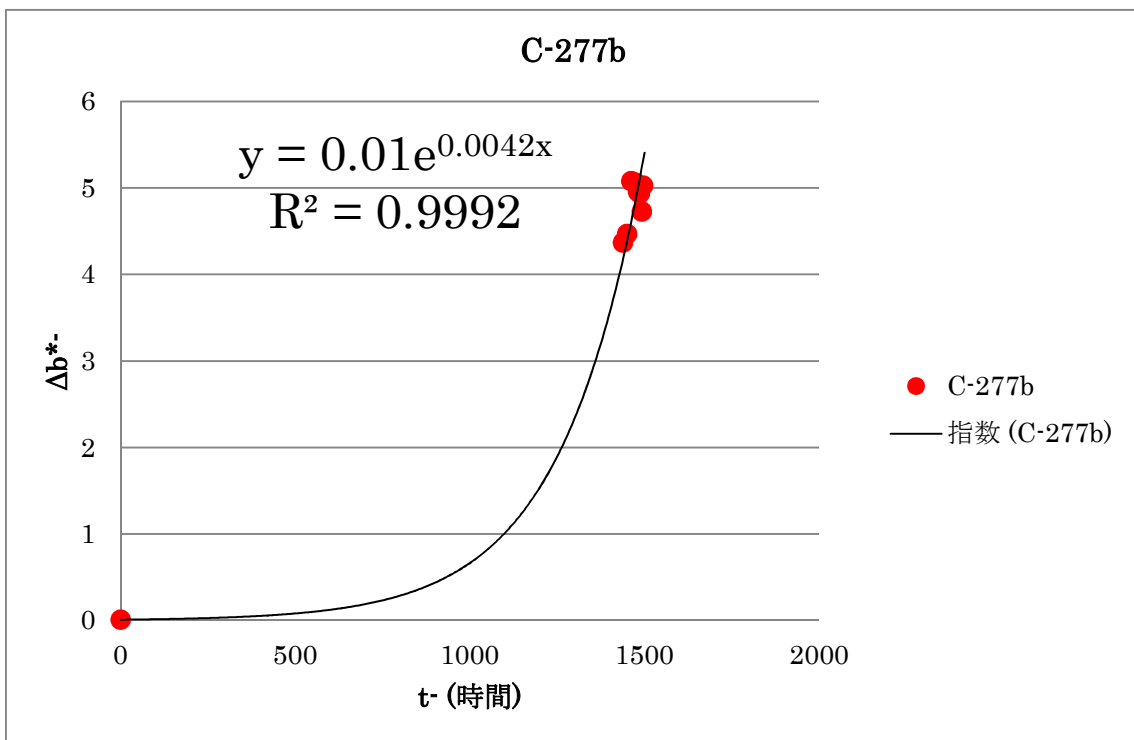


図 3.4.46 警固一西山断層帯標準試料 (試料 C) 277°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

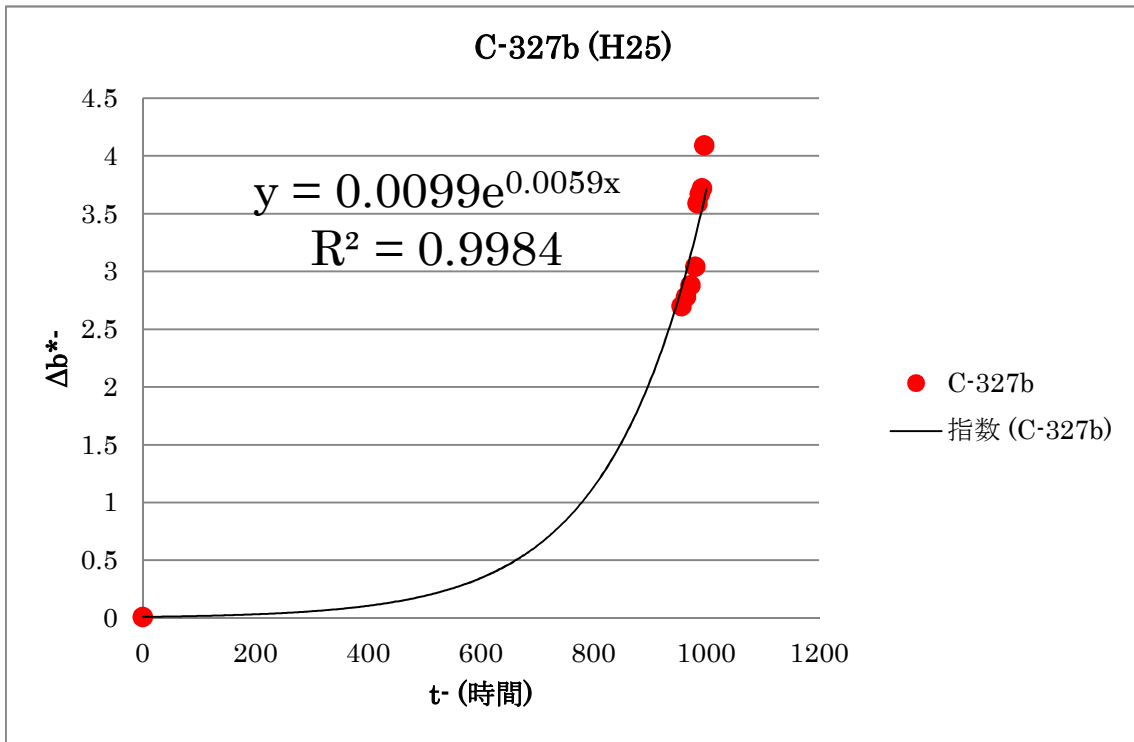


図 3.4.47 警固一西山断層帯標準試料 (試料 C) 327°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

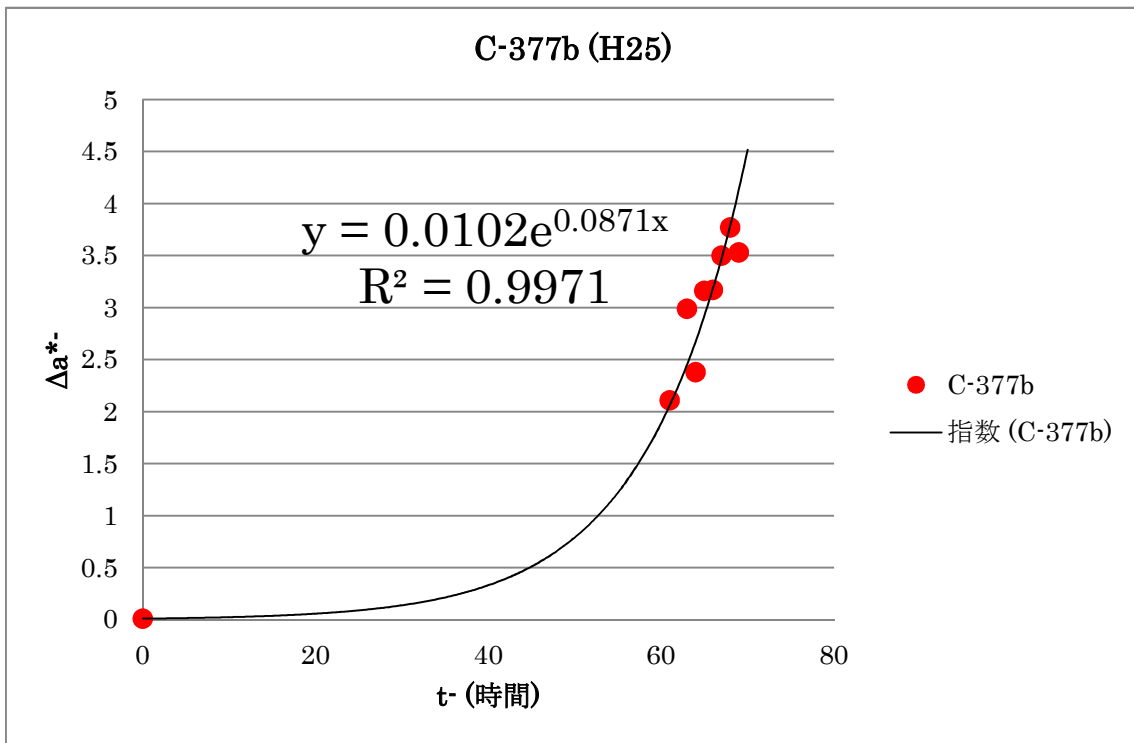


図 3.4.48 警固一西山断層帯標準試料 (試料 C) 377°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

淡路断層帯（試料 D）の解析結果を表 3.4.13 および図 3.4.49～3.2.52 に示した。色彩値 a^* については、 $a^*_{max}=7.0$ と仮定し、速度定数 ka の値を求めた。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.14 および図 3.4.53～3.4.56 に示した。

表 3.4.13 淡路断層帯 標準試料（試料 D）色彩 a^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	t_a (時間)	ka
試料 D	100°C	7.0	10000	0.00070
	127°C	7.0	8000	0.00080
	177°C	7.0	6000	0.0011
	227°C	7.0	50000	0.0013

表 3.4.14 淡路断層帯 標準試料（試料 D）色彩 a^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	a^*_{max}	t_a (時間)	ka
試料 D (H25 業務)	177°C	7.0	2000	0.0032
	277°C	7.0	2000	0.0030
	327°C	7.0	1000	0.0060
	377°C	7.0	400	0.016

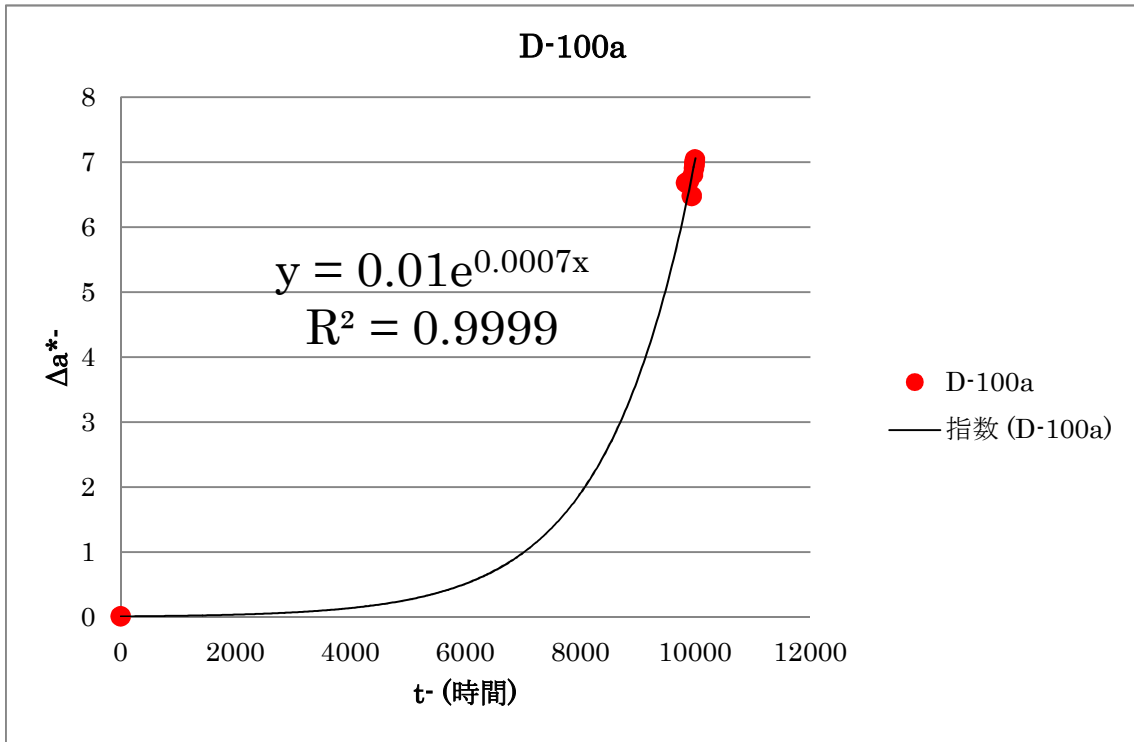


図 3.4.49 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 100°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果

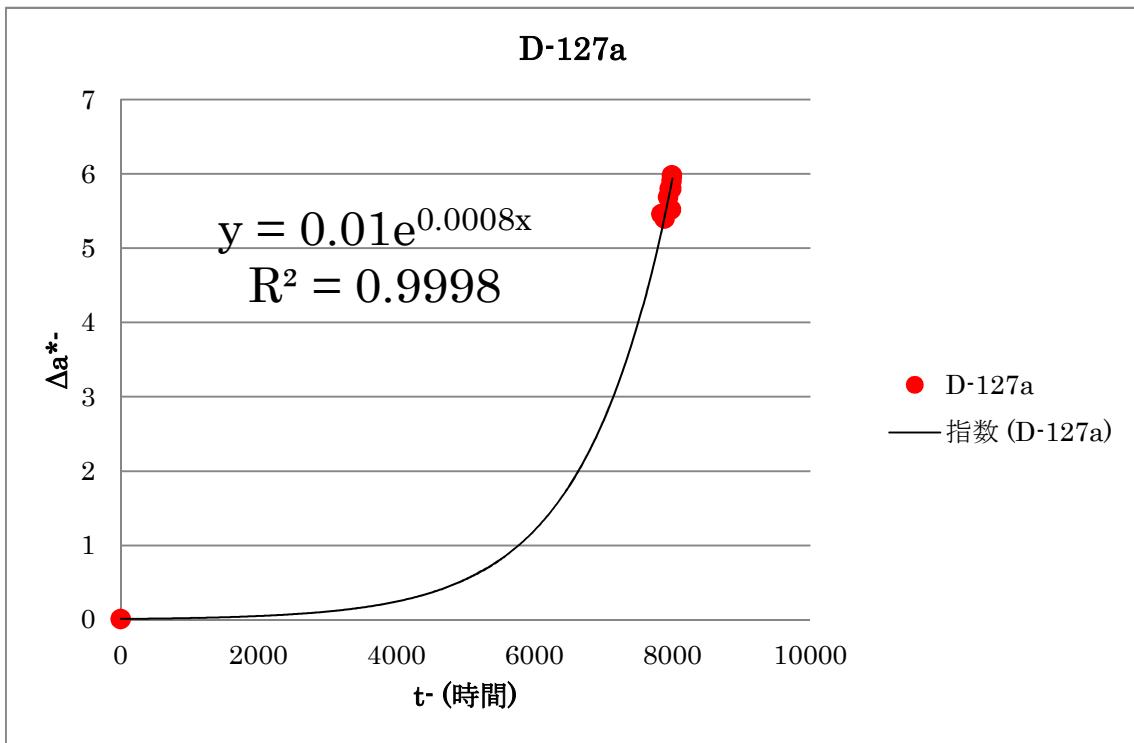


図 3.4.50 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 127°C 色彩値 a^* 加熱実験解析結果

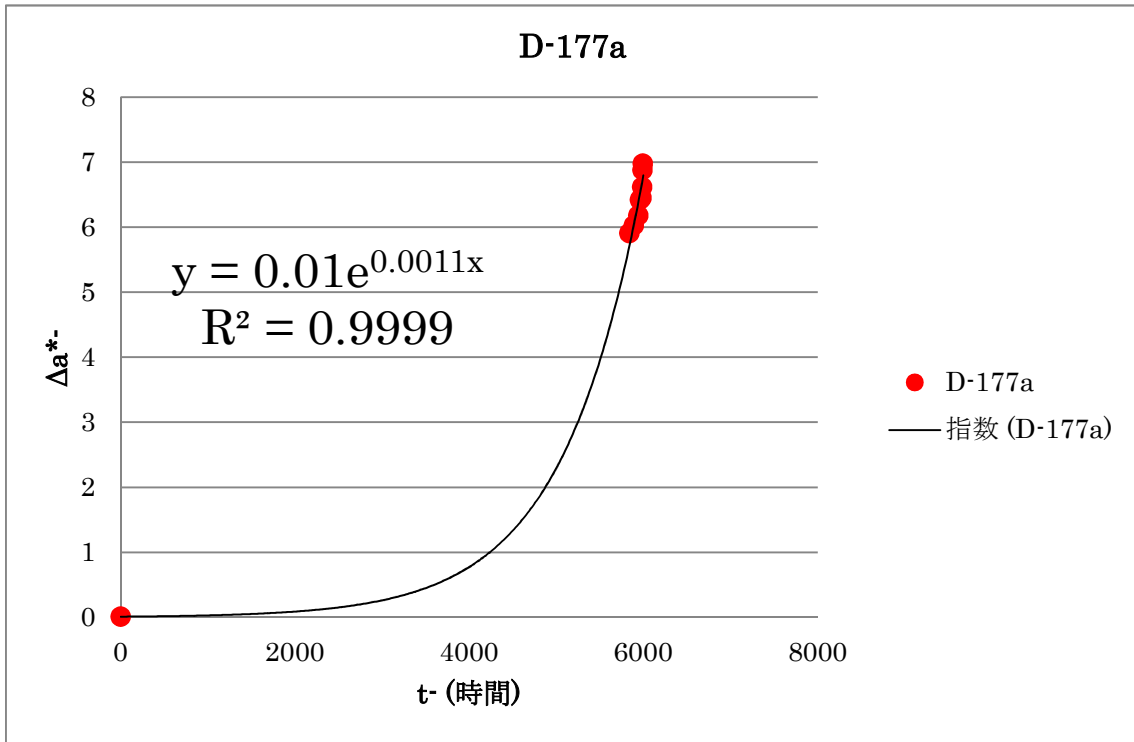


圖 3.4.51 淡路断層帶 標準試料 (試料 D) 177°C 色彩值 a^* 加熱實驗解析結果

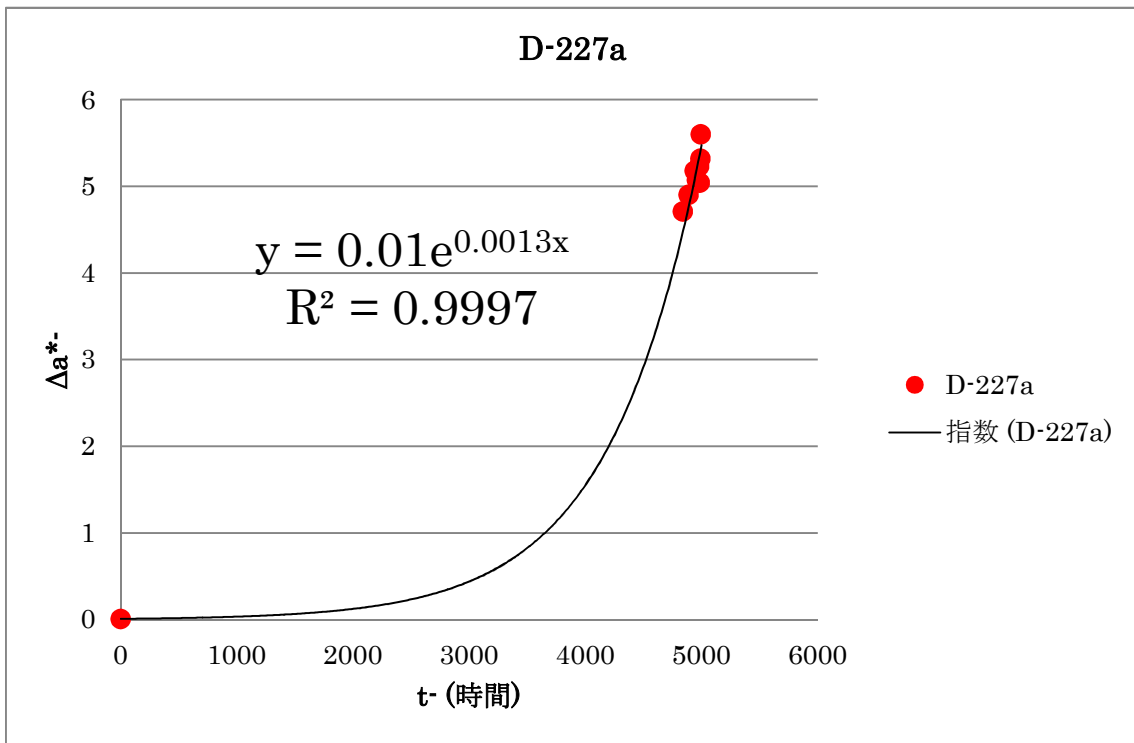


圖 3.4.52 淡路断層帶 標準試料 (試料 D) 227°C 色彩值 a^* 加熱實驗解析結果

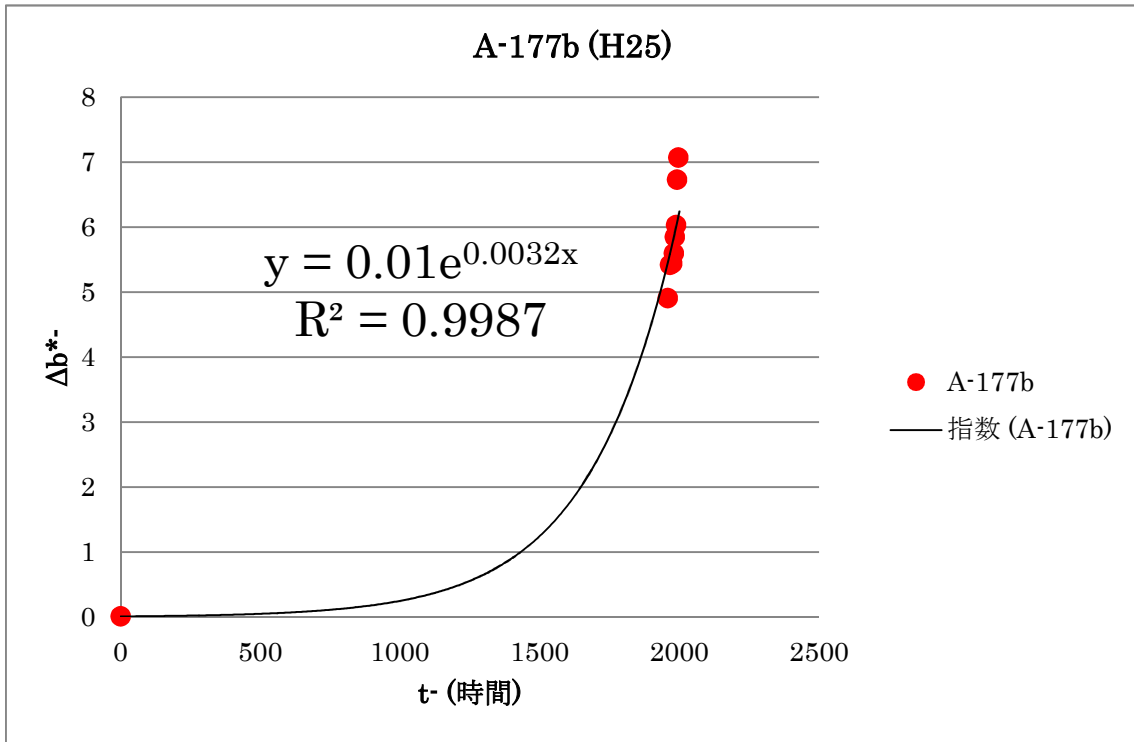


図 3.4.53 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 177°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

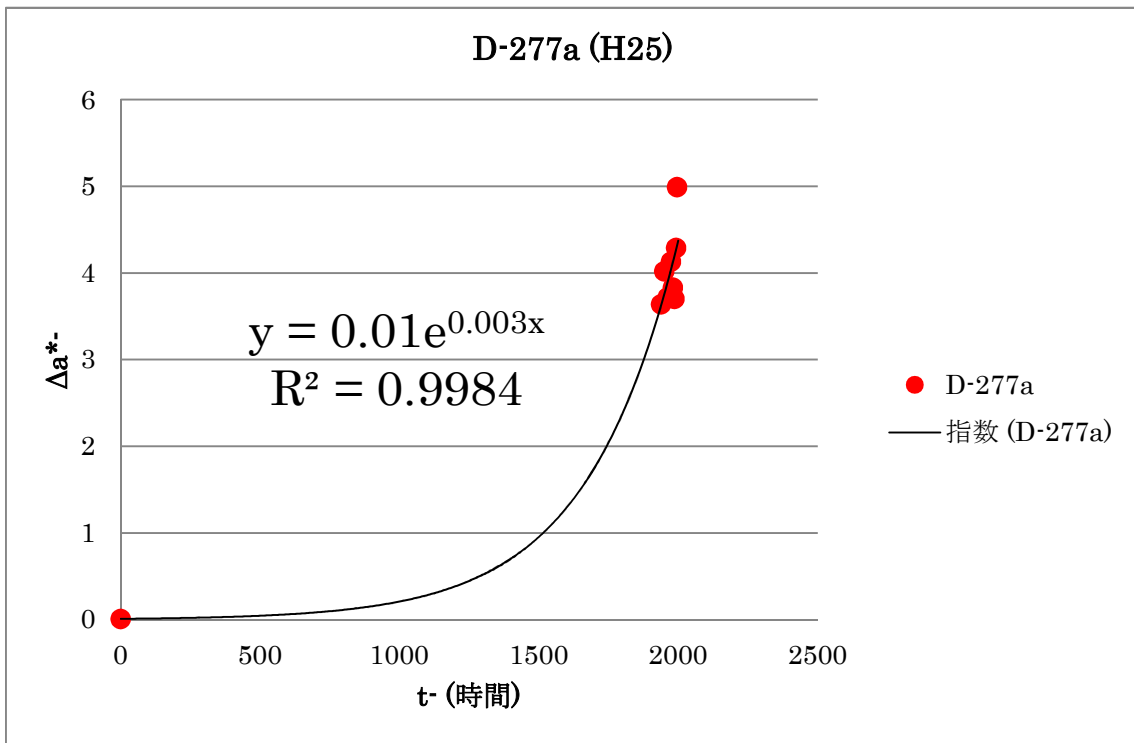


図 3.4.54 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 227°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

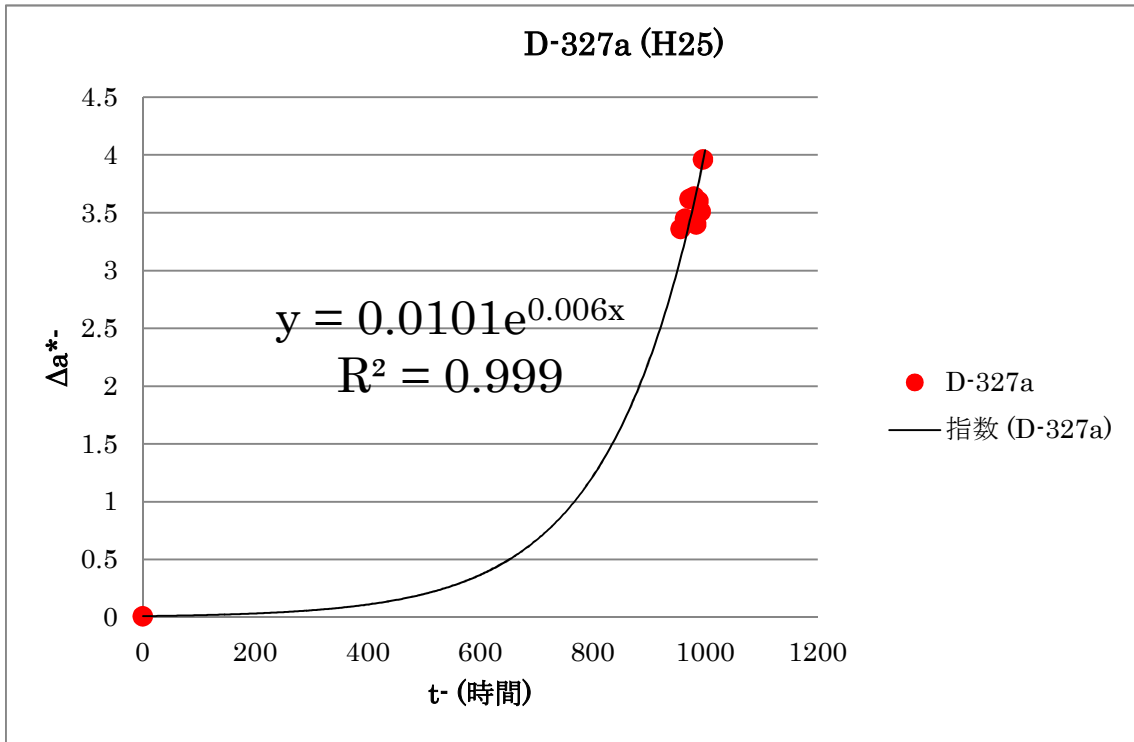


図 3.4.55 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 327°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

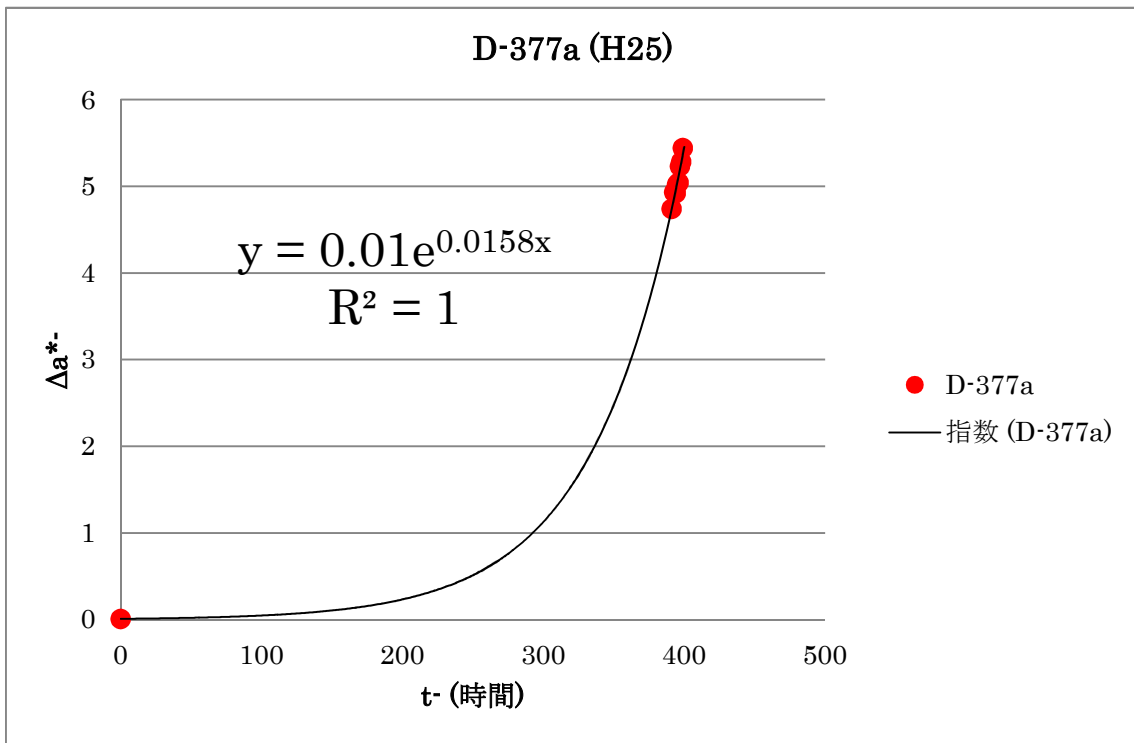


図 3.4.56 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 377°C 色彩値 a* 加熱実験解析結果 (再解析)

また、色彩値 b^* については、 $b^*_{max}=9.0$ と仮定し、速度定数 kb の値を求め、表 3.4.15 および図 3.4.57~3.4.60 に示した。H25 業務の測定結果についても同様の解析手順で再解析し、表 3.4.16 および図 3.4.61~3.4.64 に示した。

表 3.4.15 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 色彩 b^* 値 解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{max}	tb (時間)	kb
試料 D	100°C	9.0	8000	0.00080
	127°C	9.0	2000	0.0028
	177°C	9.0	2000	0.0030
	227°C	9.0	1000	0.0061

表 3.4.16 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 色彩 b^* 値 再解析結果

試料名	加熱温度	b^*_{max}	tb (時間)	kb
試料 D (H25 業務)	177°C	9.0	500	0.011
	277°C	9.0	400	(0.015)
	327°C	9.0	500	0.012
	377°C	9.0	800	0.078

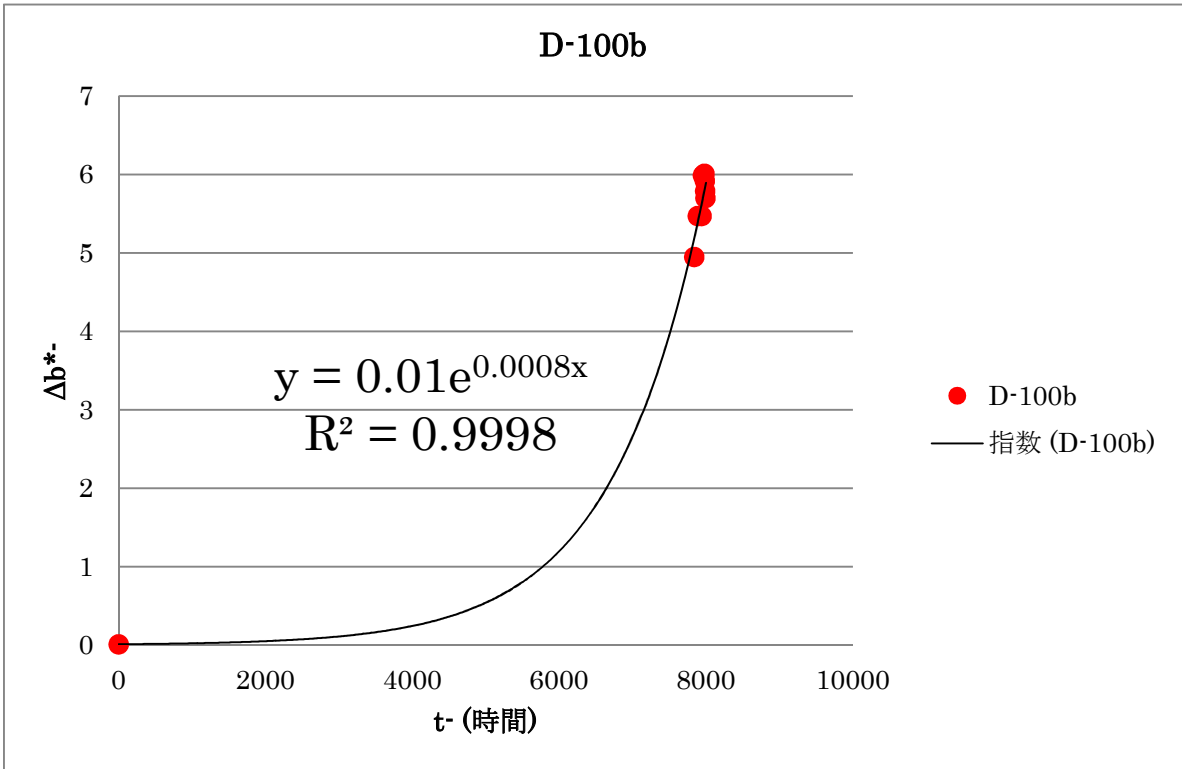


图 3.4.57 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 100°C 色彩值 b* 加熱実験解析結果

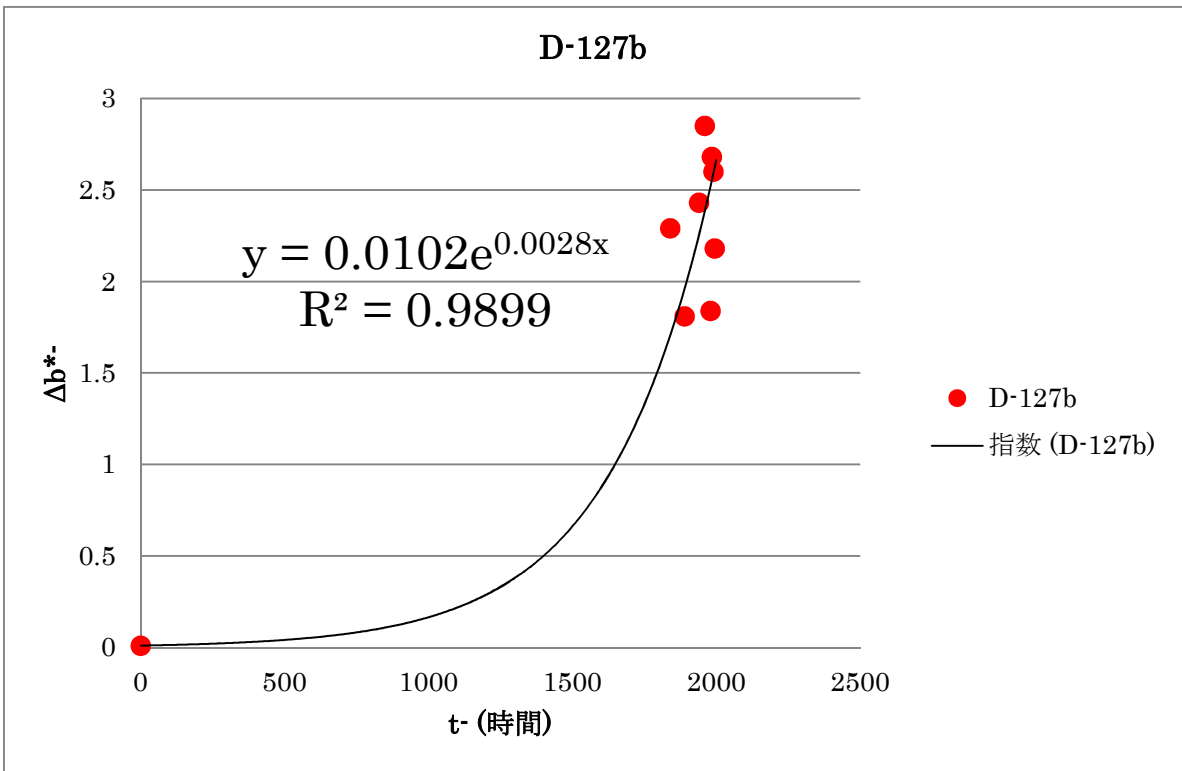


图 3.4.58 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 127°C 色彩值 b* 加熱実験解析結果

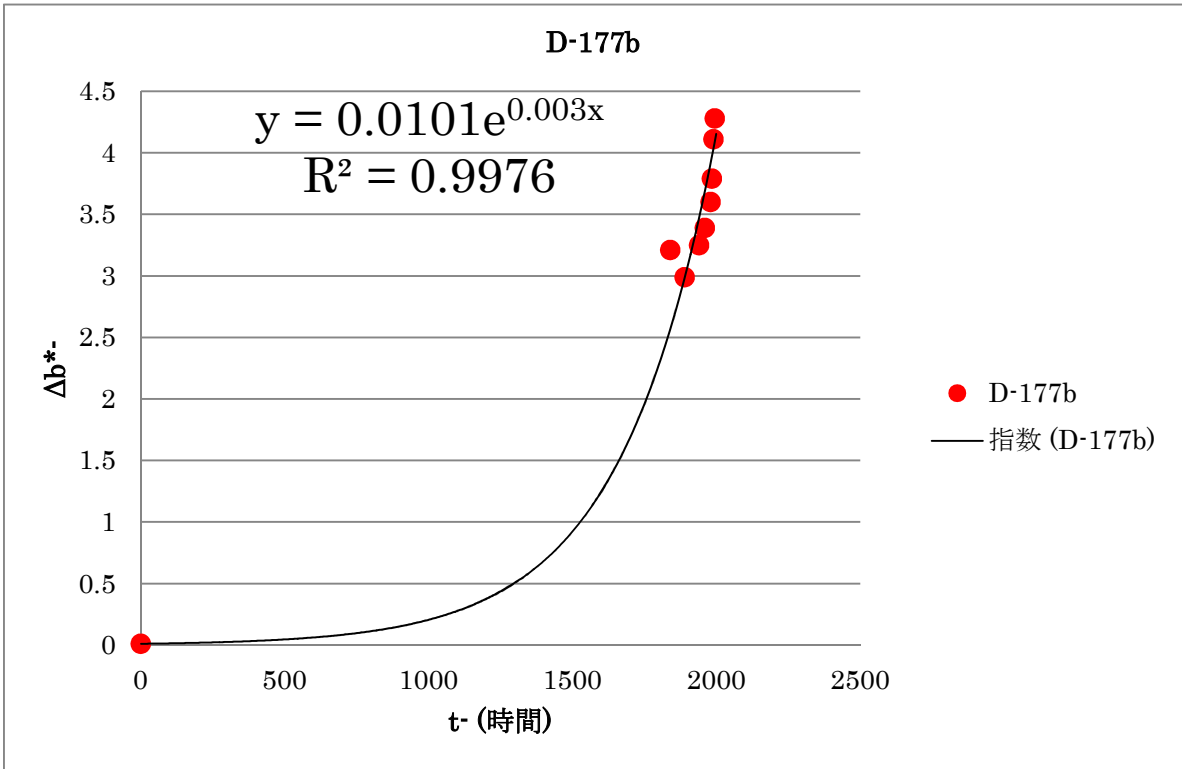


図 3.4.59 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 177°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果

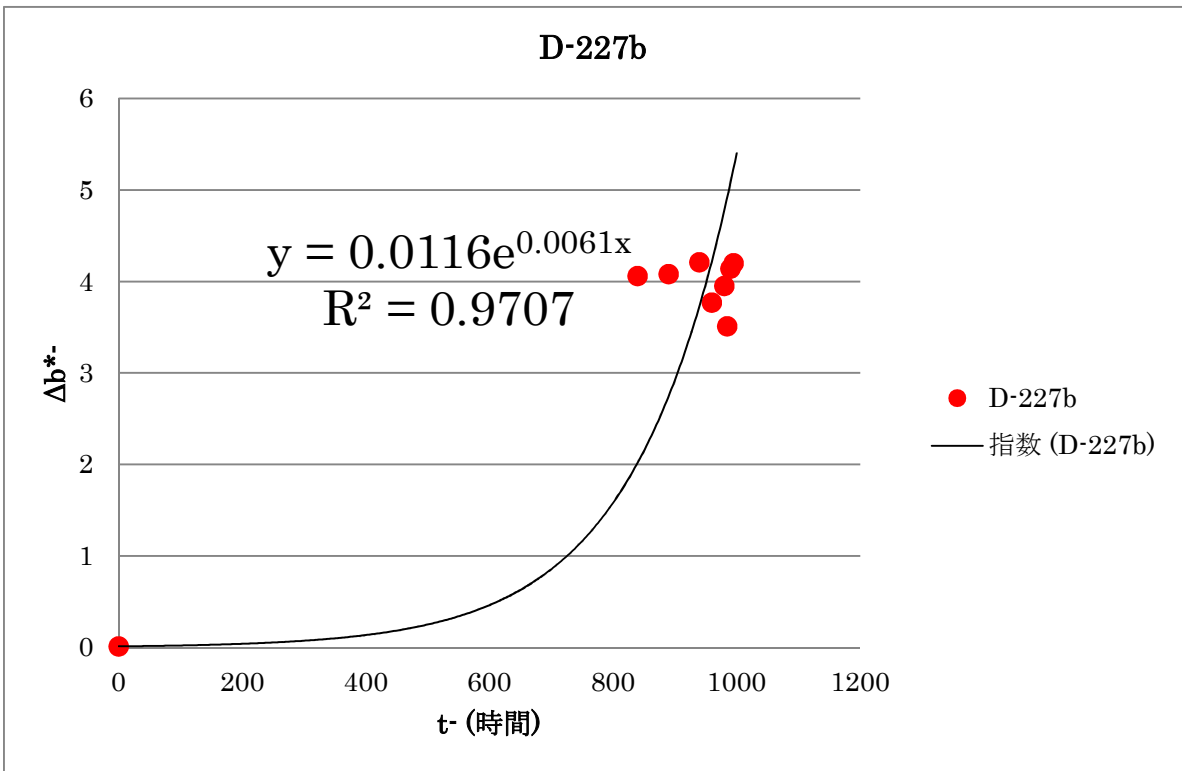


図 3.4.60 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 227°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果

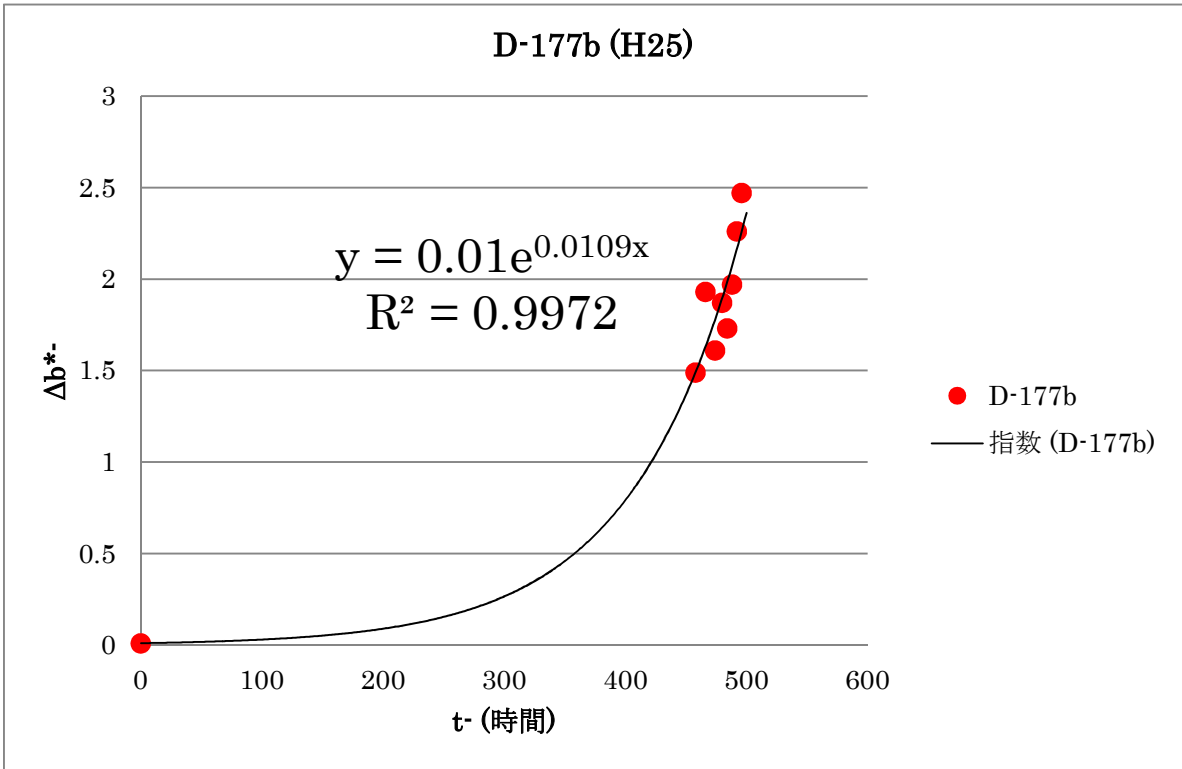


図 3.4.61 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 177°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

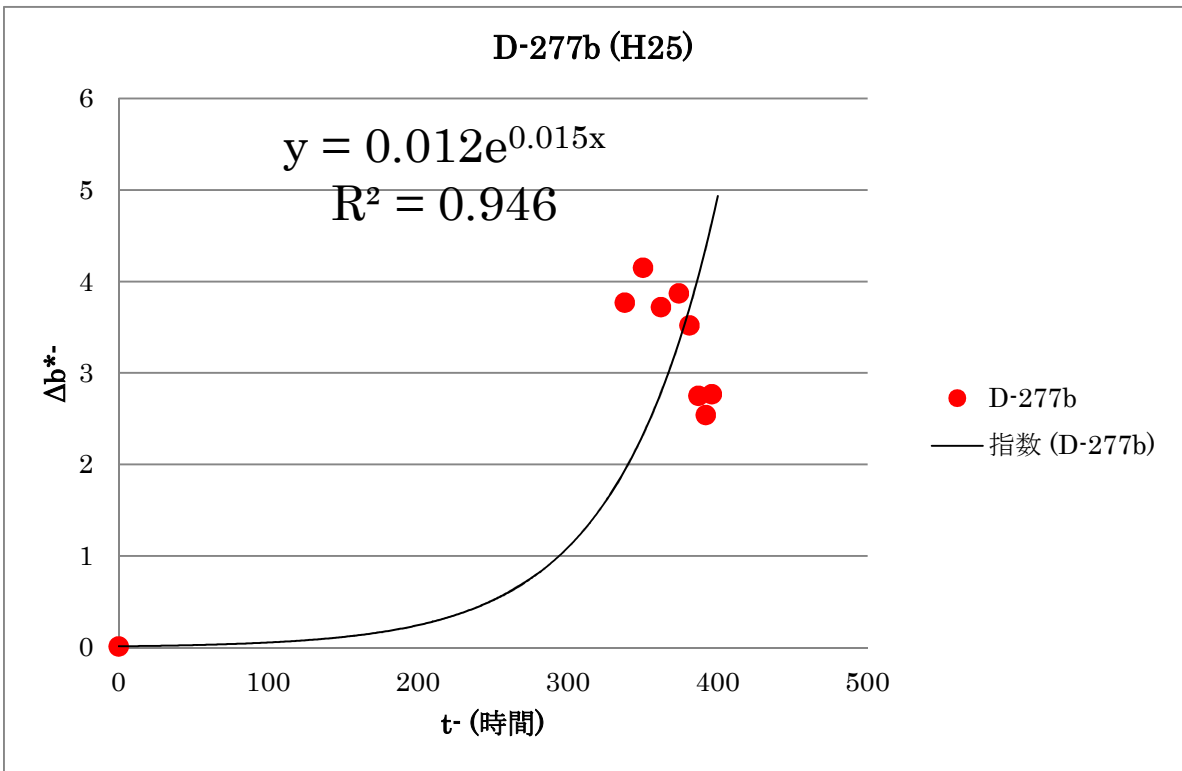


図 3.4.62 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 277°C 色彩値 b* 加熱実験解析結果 (再解析)

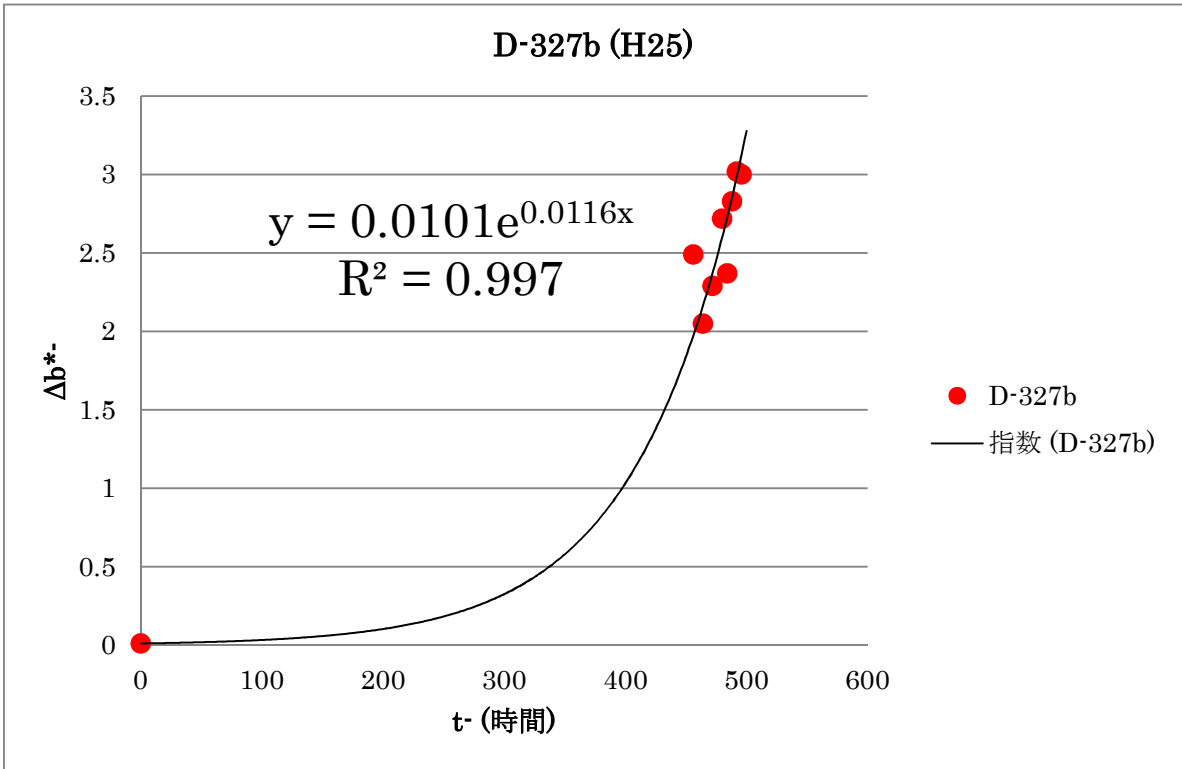


図 3.4.63 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 327°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

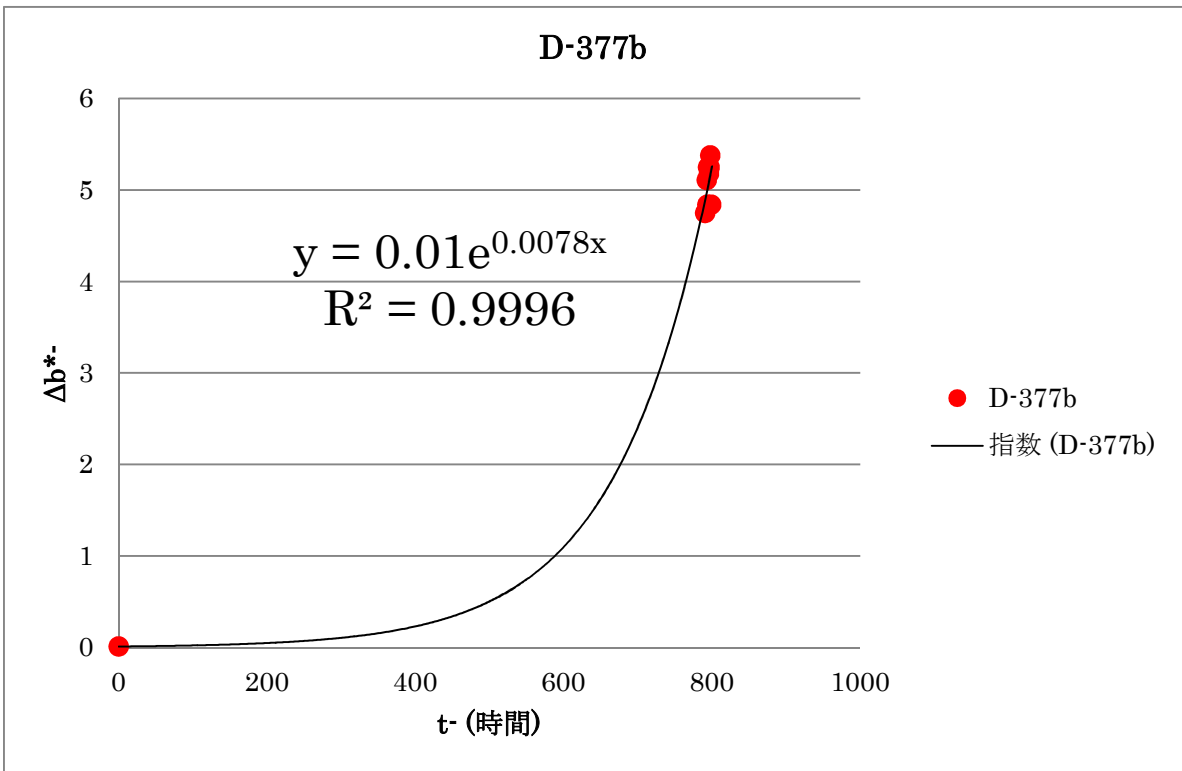


図 3.4.64 淡路断層帯 標準試料 (試料 D) 377°C 色彩値 b^* 加熱実験解析結果 (再解析)

3.4.3 加熱実験データの解釈

3.4.2 で得られた解析結果に基づき、年代測定法としての適用できるかどうか評価する。まず、3.4.2 で得られた速度定数を表 3.4.17 および 3.4.18 に示した。

表 3.4.17 速度定数 ka 一覧

		標準試料 ka 値			
	加熱温度	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
H26 業務 (本業務)	100°C	0.00090	0.00030	0.00060	0.00070
	127°C	0.0010	0.00060	0.00090	0.00080
	177°C	0.0015	0.0010	0.0010	0.0011
	227°C	0.0020	0.0014	0.0015	0.0013
H25 業務	177°C	0.0015	0.0010	0.0013	0.0080
	277°C	0.0056	0.0057	0.0022	0.0030
	327°C	0.023	0.023	0.0056	0.0060
	377°C	0.053	0.12	0.078	0.016

表 3.4.18 速度定数 kb 一覧

	加熱温度	標準試料 kb 値			
		試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
H26 業務 (本業務)	100℃	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080
	127℃	0.0011	0.0010	0.0010	0.0028
	177℃	0.0016	0.0015	0.0015	0.0030
	227℃	0.0019	0.0020	0.0020	0.0061
H25 業務	177℃	0.0065	0.0032	0.0043	0.011
	277℃	0.0031	0.0037	0.0042	(0.015)
	327℃	0.025	0.023	0.0059	0.012
	377℃	0.042	0.12	0.087	0.078

反応速度式で示される速度定数 k_a および k_b は温度に依存し、一般的にアレニウスの式によって、式(12)で与えられる。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (12)$$

k : 反応速度、 A : 頻度因子 (実験的に求まる定数)

E : 活性化エネルギー (実験的に求まる定数)、 R :気体定数、 T : 温度 (ケルビン)

両辺に対数をとると、式(13)に変換される。

$$\begin{aligned} \ln k &= \ln A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \\ &= \ln A + \ln \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \\ &= (\ln A) - \frac{E}{RT} \\ \ln k &= \ln A - \frac{E}{R} \frac{1}{T} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)は横軸に温度の逆数 $-1/T$ を、縦軸に反応速度の対数 $\ln k$ をとり、反応速度をプロットすると、その切片が $\ln A$ 、傾きが $-E/R$ となることを示している (図 3.4.65)。得られたアレニウス式から、地表面での環境温度 (たとえば 15°C) における反応速度定数を求める。

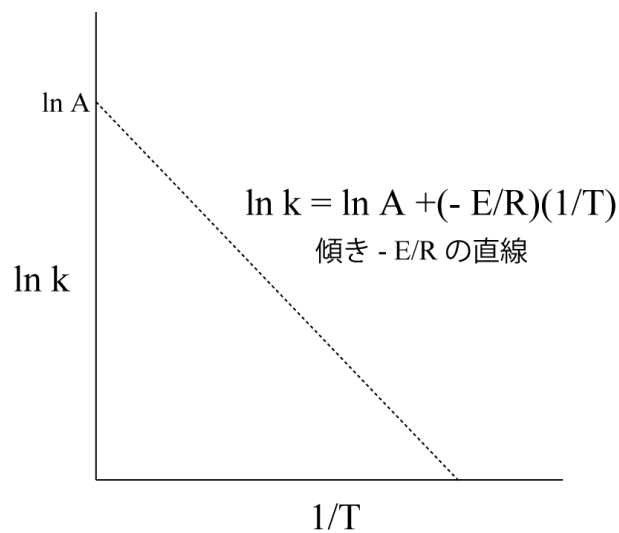


図 3.4.65 アレニウス式の概念図

式(13)に基づき、加熱実験より求められた速度定数をプロットした。

(1) a^* について (速度定数 k_a について)

速度定数 k_a についてのアレニウスプロットを図 3.4.66~3.4.69 に、アレニウスプロットで示された近似直線の傾きと切片を表 3.4.19 に示す。試料 D の 1 点のみ外れているが、概ね傾向は一致している。得られた近似直線から地表面での環境温度 (15°C) における速度定数を得た (表 3.4.20)。速度定数は試料によってオーダーが異なり、試料 D がもっとも赤くなりやすいことが分かった。

表 3.4.19 速度定数 k_a におけるアレニウス式の傾きと切片一覧

	標準試料			
	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
傾き -E/R	-3502	-4761	-3251	-2290
切片 ln A	1.658	4.036	0.7231	-1.203

表 3.4.20 環境温度(15°C)における速度定数 k_a

	標準試料			
	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
15°Cの 速度定数	2.75×10^{-5}	3.74×10^{-6}	2.58×10^{-5}	1.06×10^{-4}

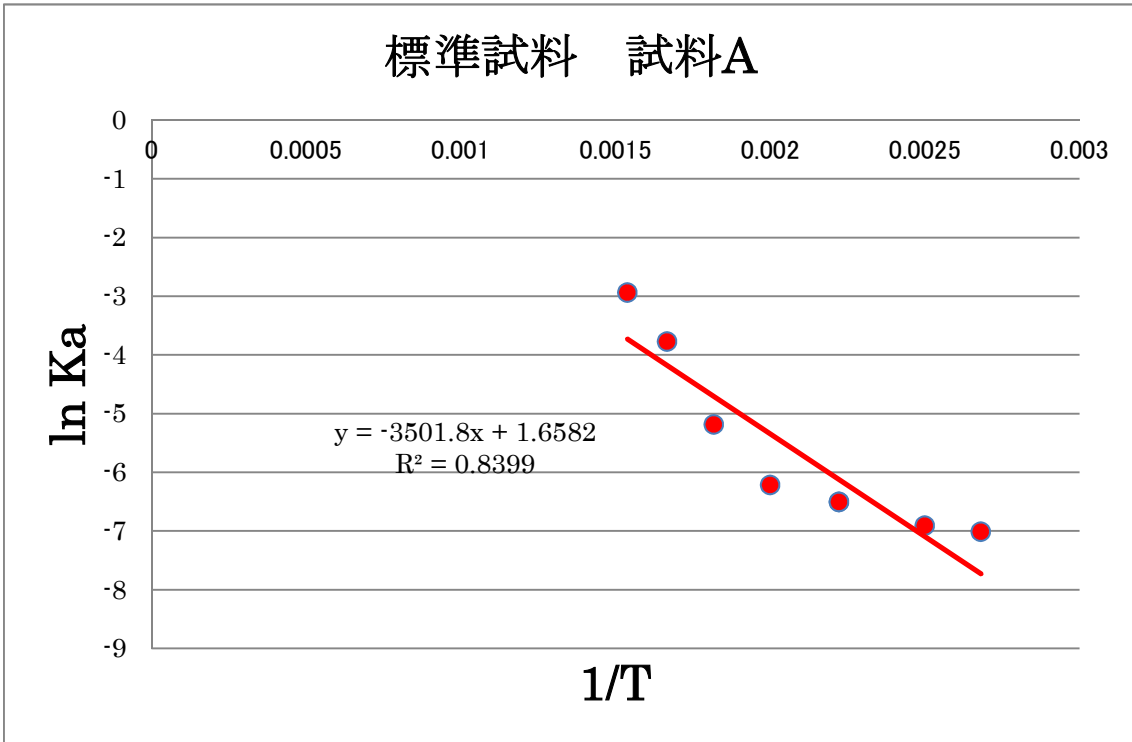


図 3.4.66 標準試料 試料 A アレニウスプロット

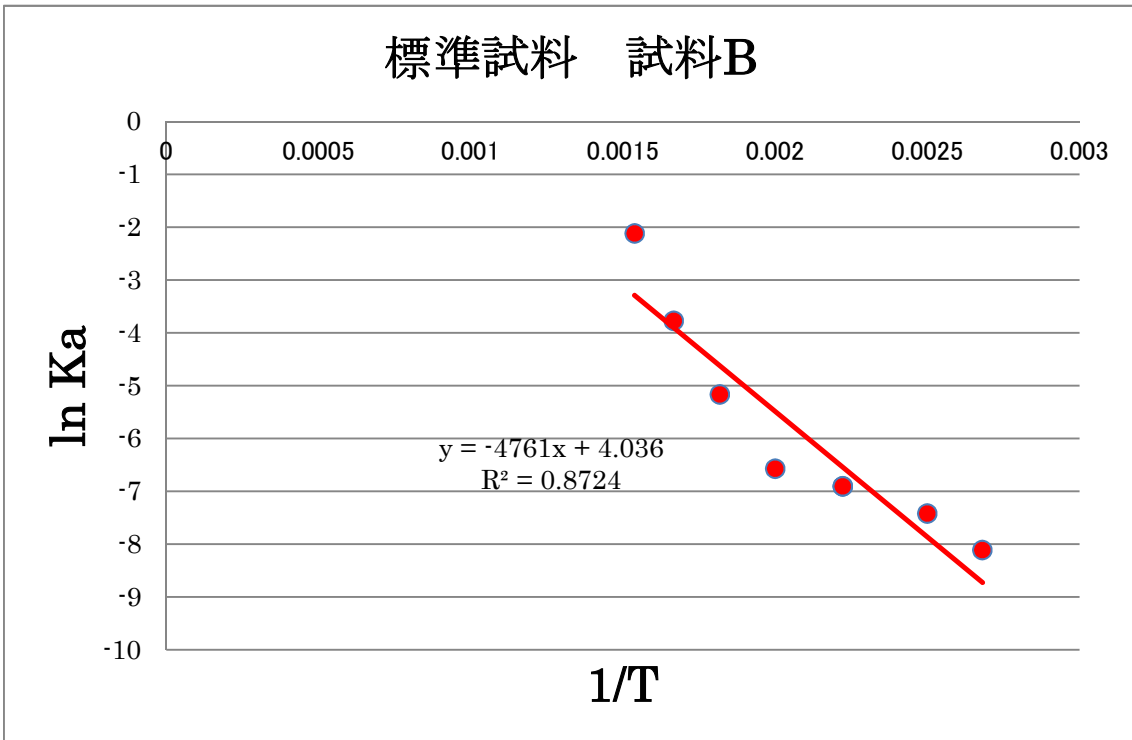


図 3.2.67 標準試料 試料 B アレニウスプロット

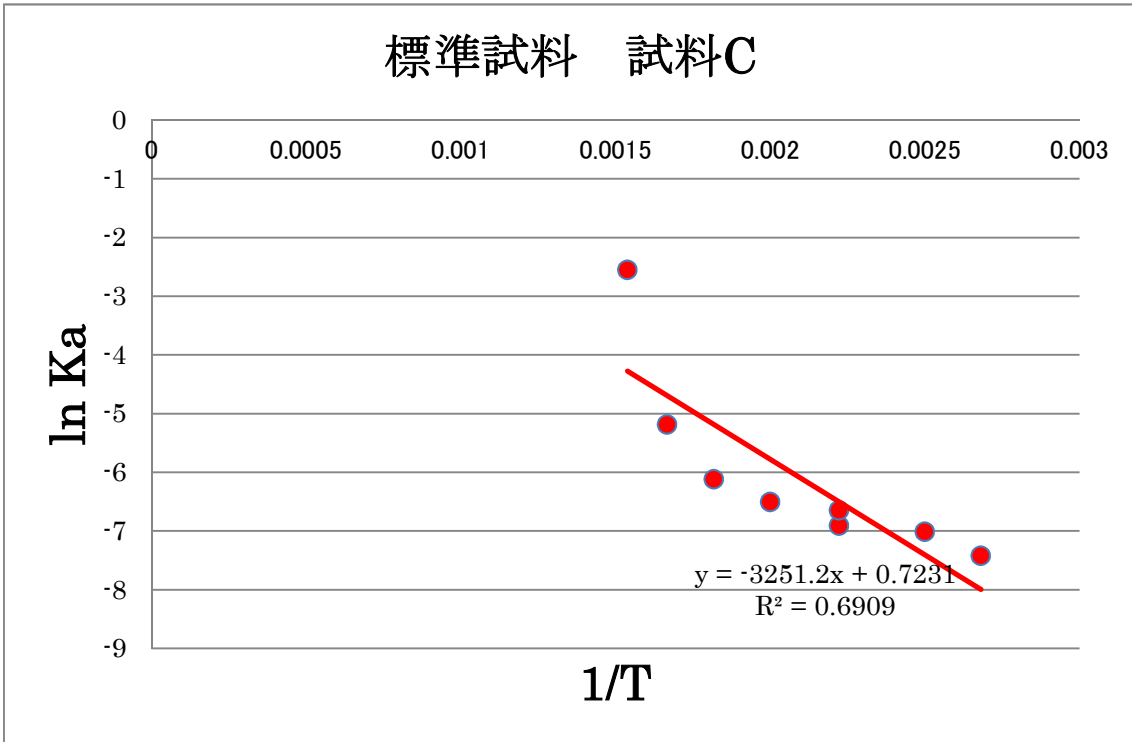


図 3.2.68 標準試料 試料 C アレニウスプロット

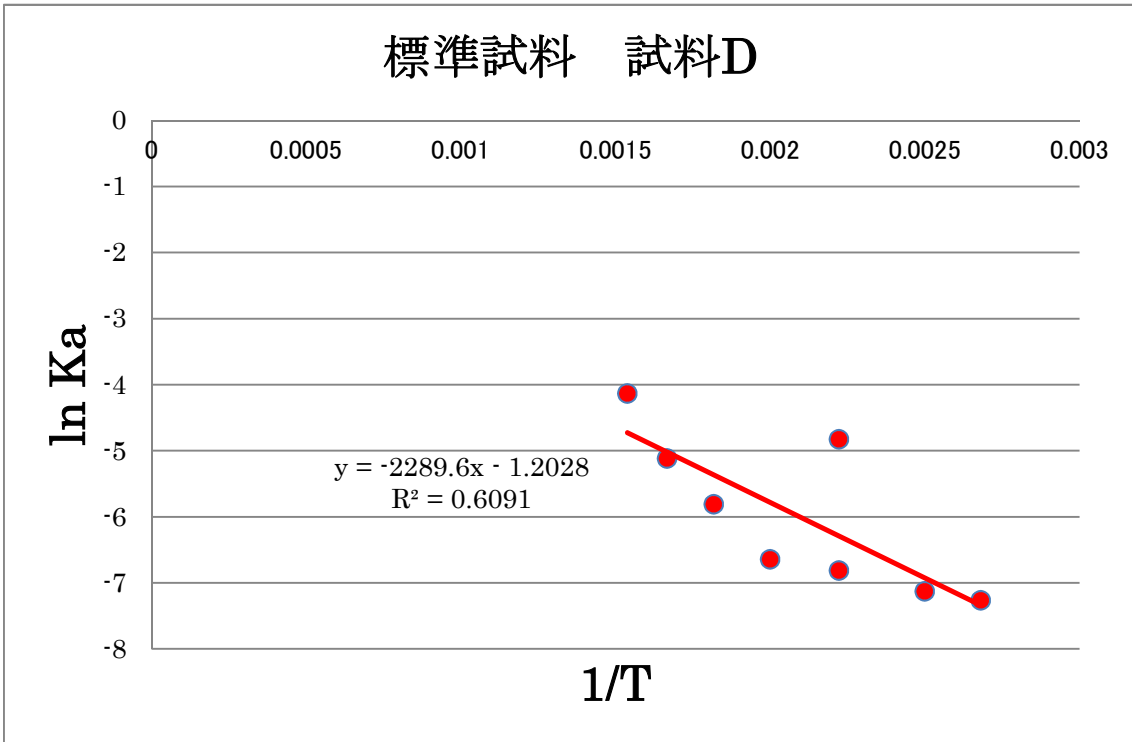


図 3.2.69 標準試料 試料 D アレニウスプロット

(2) b^* について (速度定数 k_b について)

速度定数 k_b についてのアレニウスプロットを図 3.4.70~3.4.73 に、アレニウスプロットで示された近似直線の傾きと切片を表 3.4.21 に示す。得られた近似直線から地表面での環境温度 (15°C) における速度定数を得た (表 3.4.22)。 a^* 値とは異なり、 b^* の速度定数は試料によってほとんど違いがなく、色彩変化の試料依存性がほとんど無いことが分かった。

表 3.4.21 速度定数 k_b におけるアレニウス式の傾きと切片一覧

	標準試料			
	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
傾き - E/R	-3111	-3769	-3100	-3117
切片 ln A	0.9343	2.344	0.7954	1.547

表 3.4.22 環境温度(15°C)における速度定数 k_b

	標準試料			
	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
15°Cの 速度定数	5.18×10^{-5}	2.16×10^{-5}	4.69×10^{-5}	9.37×10^{-5}

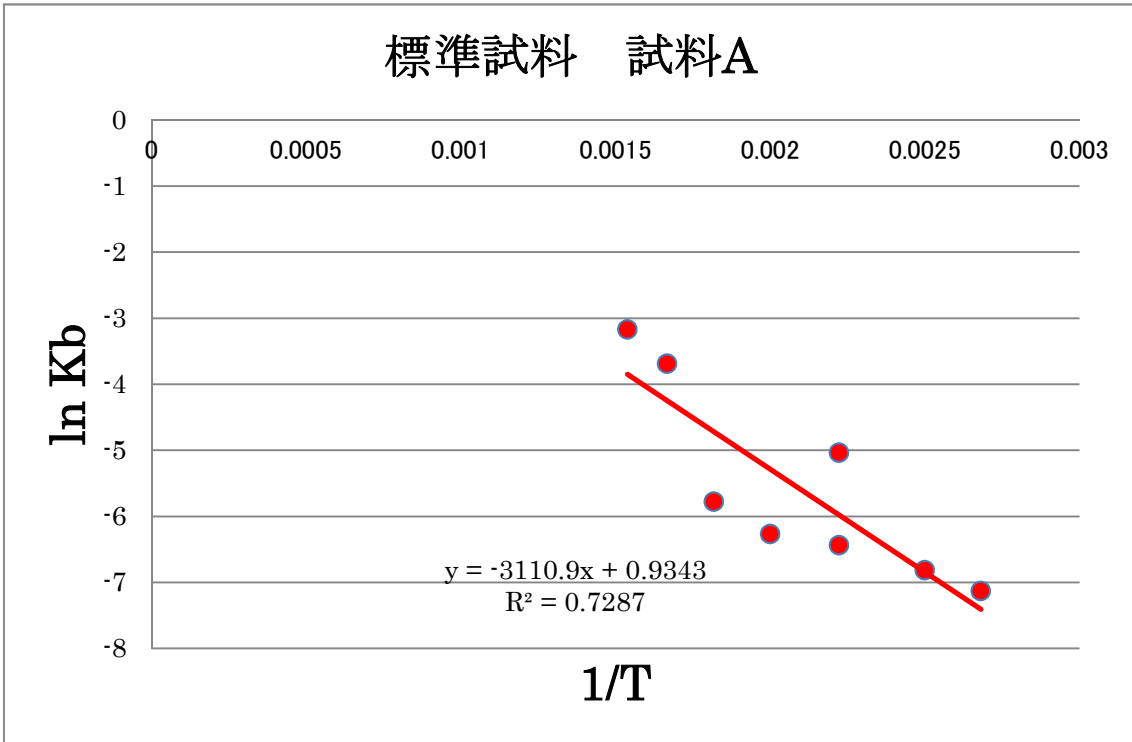


図 3.4.70 標準試料 試料 A アレニウスプロット

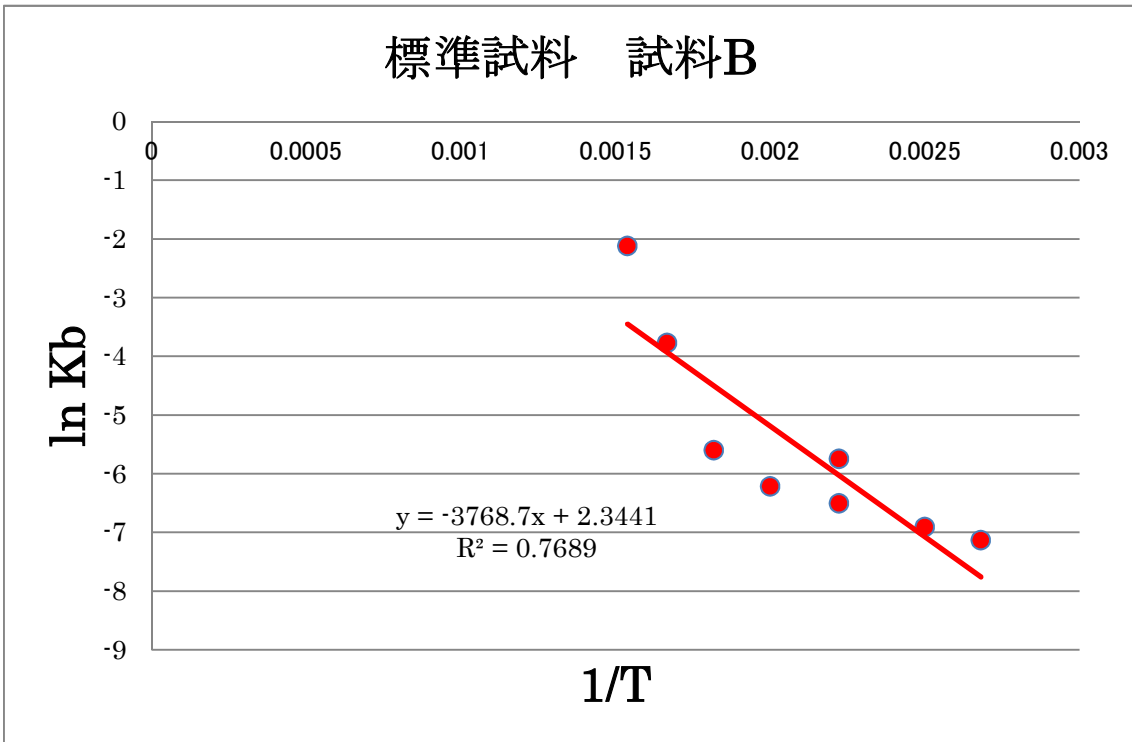


図 3.4.71 標準試料 試料 B アレニウスプロット

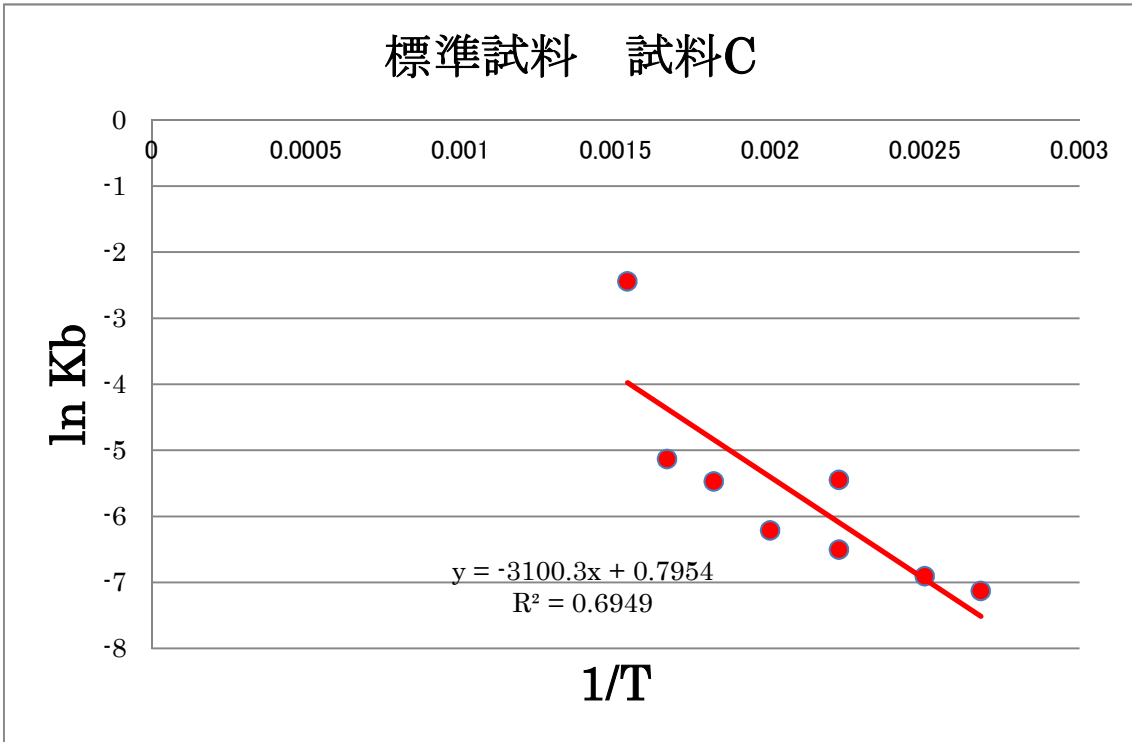


図 3.4.72 標準試料 試料 C アレニウスプロット

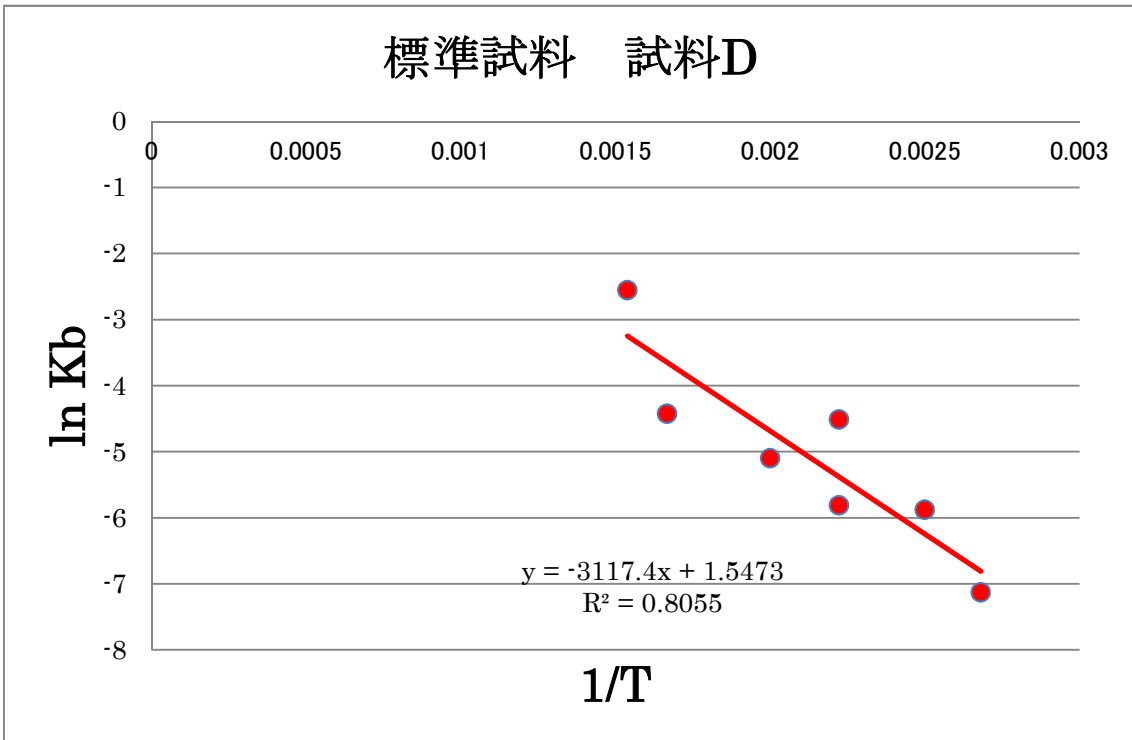


図 3.4.73 標準試料 試料 D アレニウスプロット

3.4.4 断層破碎帯への適用について

(1) 色彩変化の特徴について

本業務で実施した加熱実験は、断層破碎帯の母岩の性質に近い試料を使って行われた。結果として、15°C環境下での速度定数が得られた（表 3.4.23）。

表 3.4.23 算定された 15°C環境下での速度定数

15°Cの速度定数	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
ka	2.75×10^{-5}	3.74×10^{-6}	2.58×10^{-5}	1.06×10^{-4}
kb	5.18×10^{-5}	2.16×10^{-5}	4.69×10^{-5}	9.37×10^{-5}

算定結果より、以下の特徴が読み取れた（図 3.4.74）。

- ・ b*値の変化速度に大きな違いはない。
- ・ a*値の変化速度は試料に依存する。
- ・ a*-b*値の傾きは、a*値の変化速度に依存する。
- ・ 岩石の色彩変化に要する時間は、b*値によって単純比較することができる。
- ・ a*値の変化速度が等しい試料であれば、a*値でも単純比較できる。

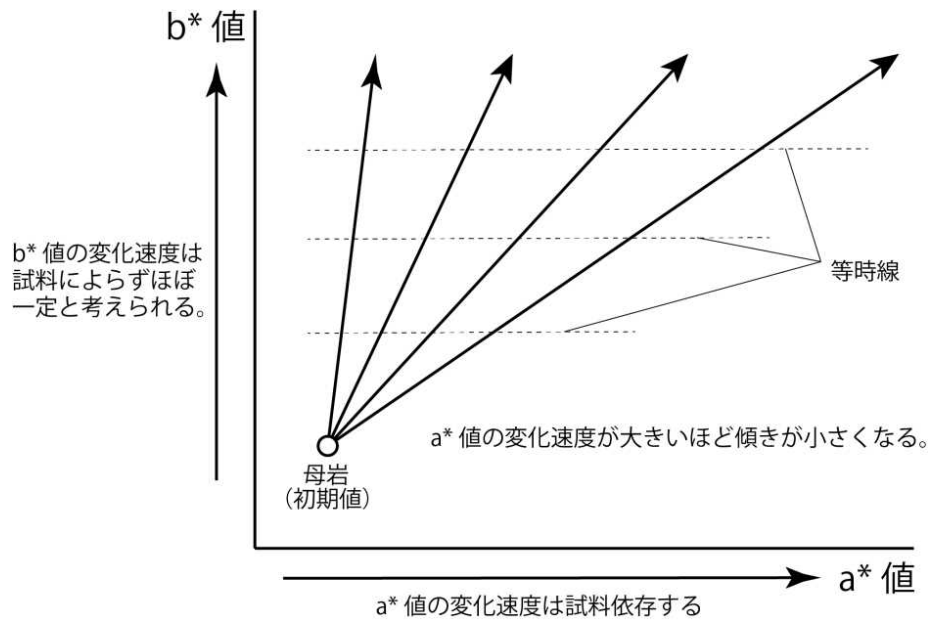


図 3.4.74 岩石色彩変化の特徴

(2) 色彩値から算定した年代値の評価について

H23年度に実施された「断層の活動年代評価手法の高度化—断層破碎物質を用いた評価法開発のためのデータ拡充—」の色彩測定結果から、断層破碎帯の年代的検討を行った。

3.4.1より、年代標準式を以下のように算定した。

a*の場合、

$$t = \ln\left(\frac{a^* \max - a^* 0}{a^* \max - a^*}\right) / ka$$

ka : a*の速度定数、a* : a*値、a*max : a*の最大値、a*0 : a*の初期値

b*の場合、

$$t = \ln\left(\frac{b^* \max - b^* 0}{b^* \max - b^*}\right) / kb$$

kb : b*の速度定数、b* : b*値、b*max : b*の最大値、b*0 : b*の初期値

この2式は、色彩値の最大値 a*max(b*max)、速度定数 ka(kb)、初期値 a*0 (b*0) および色彩値 a*値 (b*値) を求めることができれば、岩石の色彩変化にかかる時間を求めることができる。そこで、H23年度に実施された色彩測定結果から、以下のルールに従って上記パラメータを算定した。

- (i) 色彩値の最大値 a*max(b*max)は、実測上の最大値を参照した。
- (ii) 速度定数 ka(kb)は、本業務で算定した 15℃環境下のもの (表 3.4.23) を参照した。
- (iii) 初期値 a*0 (b*0) は、花崗岩試料の初期値として 0 とした。
- (iv) a*値 (b*値) は、色彩分布が単峰分布であれば平均値とし、複峰分布であれば各ピーク値を図面から読み取った。(複峰分布は重なりを伴い、各ピークの平均値を求める事が難しいため、本業務ではピーク値を採用した。)

次頁より、算定結果を示す。なお、山崎断層帯については測定試料が砂岩で、花崗岩ではなかったため、本業務では郷村断層帯 (試料 A)、警固—西山断層帯 (試料 C)、淡路断層帯 (試料 D) の年代を算定した。

(a) 郷村断層帯 (試料 A)

a^* : 単峰分布を示すので、 a^* の平均値 6.61 とした。

(平均値は H23 年度技術資料 表 5.2-1 より算定)

a^*_{max} : 測定結果 (図 3.4.75) から読み取れる a^* の最大値=25

k_a : 淡路断層帯の速度定数 (15°C) = 2.75×10^{-5}

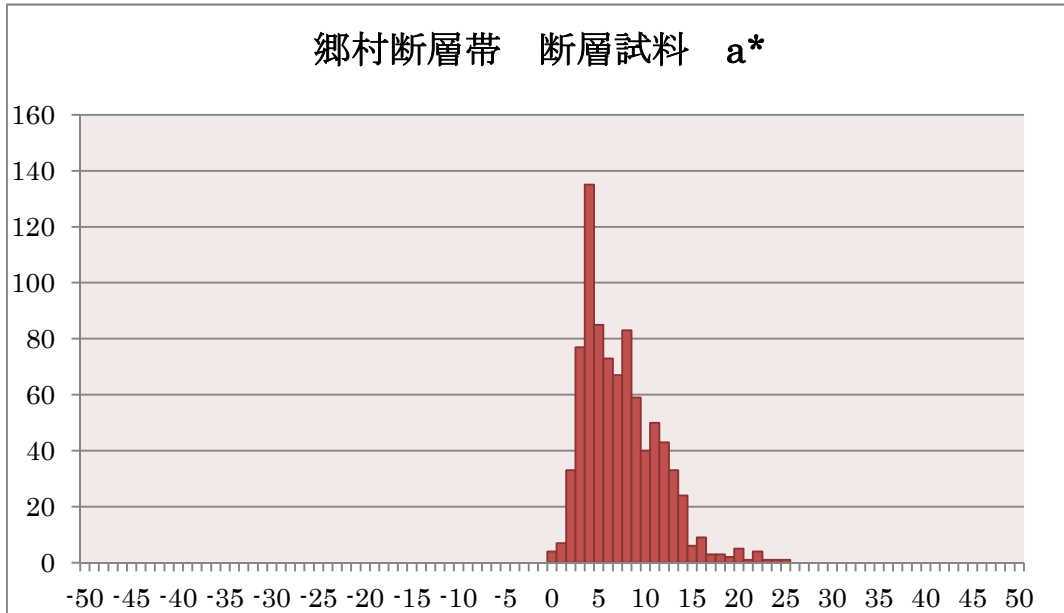


図 3.4.75 郷村断層帯における断層試料 a^* 頻度分布 (H23 年度技術資料 図 5.2-4)

$a^*=6.61$ を示すまでの時間 T_a は

$T_a=1.12 \times 10^4$ 時間 \approx 470 日

と算定された。

b^* : 双方分布を示すので、 b^* のピーク値 15, 26 とした。

b^*_{\max} : 測定結果 (図 3.4.76) から読み取れる a^* の最大値=34

k_b : 郷村断層帯の速度定数 (15°C) = 5.18×10^{-5}

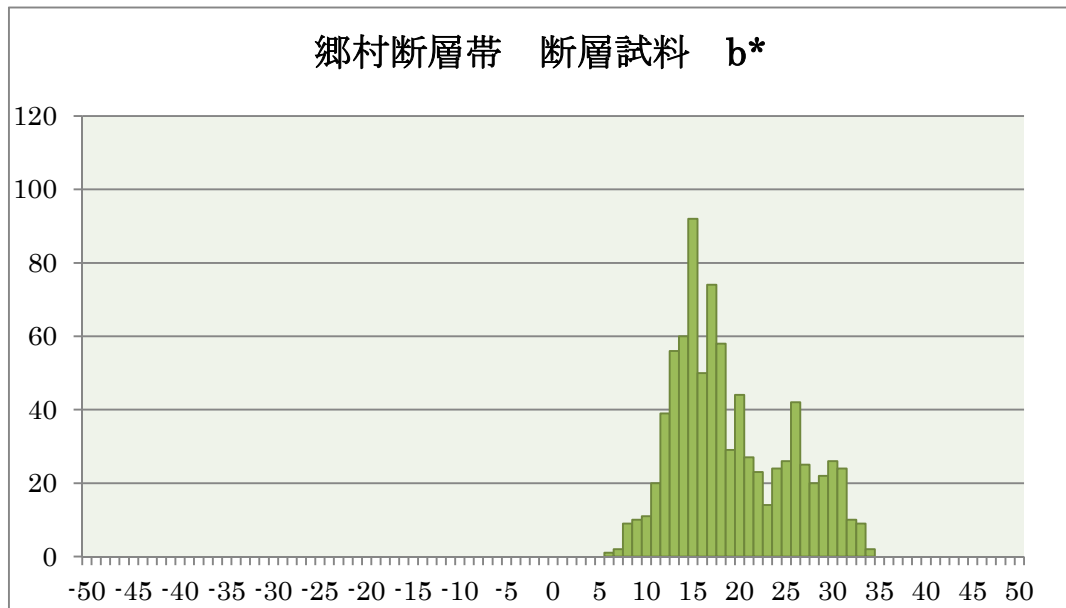


図 3.4.76 郷村断層帯における断層試料 b^* 頻度分布 (H23 年度技術資料 図 5.2-6)

$b^*=15, 26$ を示すまでの時間 T_b は、

$$T_b(15) = 1.12 \times 10^4 \text{ 時間} \approx 470 \text{ 日}$$

$$T_b(26) = 2.79 \times 10^4 \text{ 時間} \approx 1200 \text{ 日}$$

と算定された。

(b) 西山断層帯 (試料 C)

a^* : 双峰分布を示すので、 a^* のピーク値を 5, 11 とした

a^*_{\max} : 測定結果 (図 3.4.77) から読み取れる a^* の最大値=18

k_a : 西山断層帯の速度定数 (15°C) = 2.58×10^{-5}

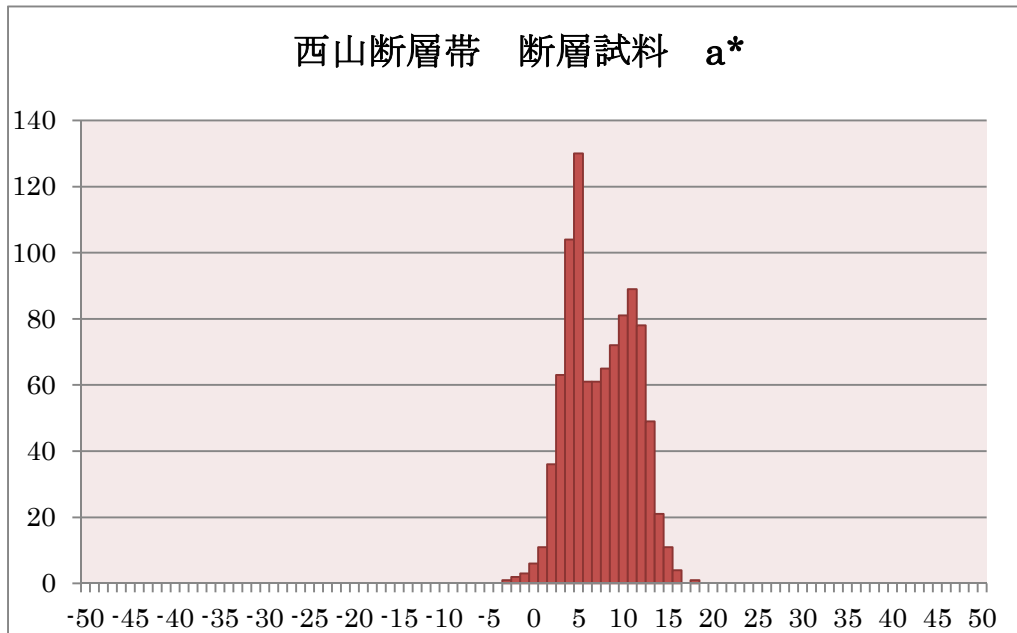


図 3.4.77 西山断層帯における断層試料 a^* 頻度分布 (H23 年度技術資料 図 5.4-4)

$a^*=5, 11$ を示すまでの時間 T_a は、

$$T_a(5) = 1.26 \times 10^4 \text{ 時間} \approx 530 \text{ 日}$$

$$T_a(11) = 3.66 \times 10^4 \text{ 時間} \approx 1500 \text{ 日}$$

と算定された。

b^* : 単峰分布を示すので、 b^* の平均値 22.1 とした。

(平均値は H23 年度技術資料 表 5.4-1 より算定)

b^*_{max} : 測定結果 (図 3.4.78) から読み取れる a^* の最大値=35

k_b : 西山断層帯の速度定数 (15°C) = 4.69×10^{-5}

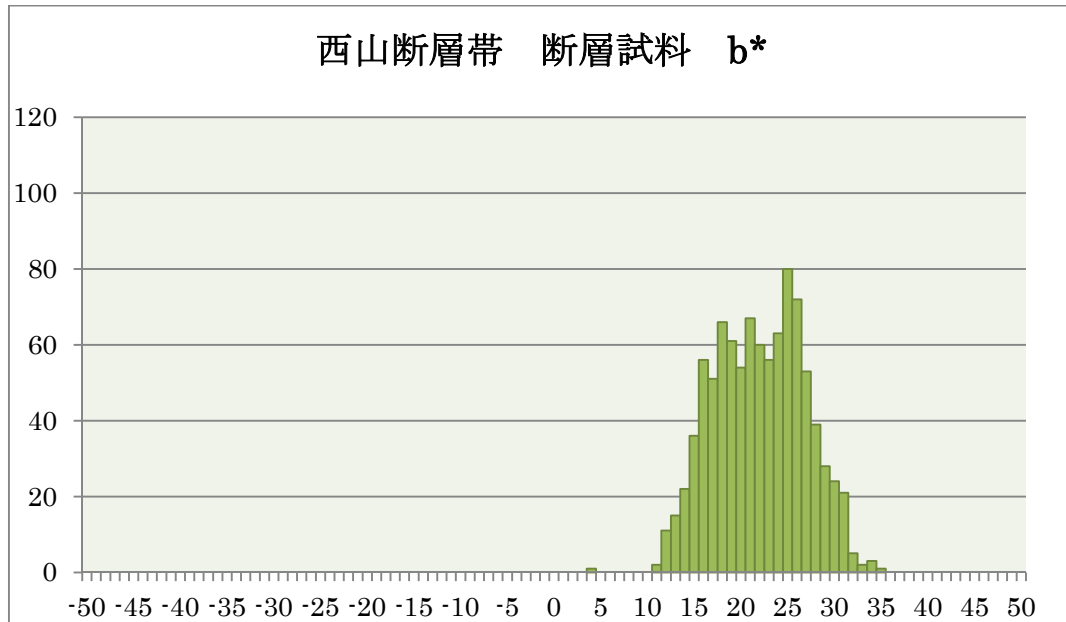


図 3.4.78 野島断層における断層試料 a^* 頻度分布 (H23 年度技術資料 図 5.4-6)

$b^*=22.1$ を示すまでの時間 T_b は、

$$T_b = 2.13 \times 10^4 \text{ 時間} \approx 890 \text{ 日}$$

と算定された。

(c) 淡路断層帯 (試料 D)

a^* : 単峰分布を示すので、 a^* の平均値 5.28 とした。

(平均値は H23 年度技術資料 表 5.1-1 より算定)

a^*_{max} : 測定結果 (図 3.4.79) から読み取れる a^* の最大値=15

k_a : 淡路断層帯の速度定数 (15°C) = 1.06×10^{-4}

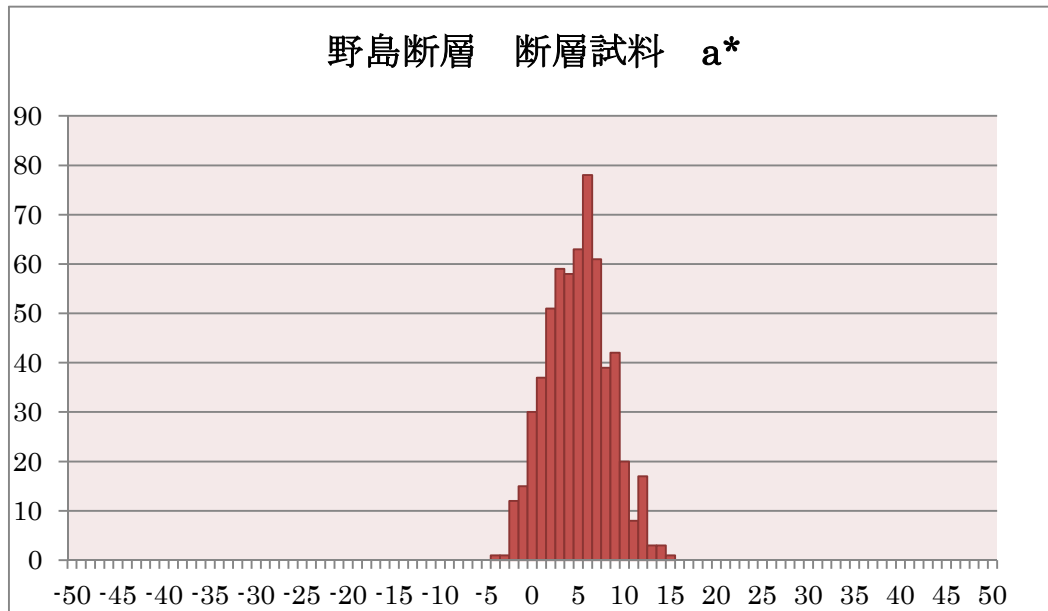


図 3.4.79 野島断層における断層試料 a^* 頻度分布 (H23 年度技術資料 図 5.1-5)

$a^*=5.28$ を示すまでの時間 T_a は、

$T_a=4.10 \times 10^3$ 時間 \approx 170 日

と算定された。

b^* : 双方分布を示すので、 b^* のピーク値 3, 7, 17 とした。

b^*_{max} : 測定結果 (図 3.4.80) から読み取れる a^* の最大値=32

k_b : 淡路断層帯の速度定数 (15°C) = 9.37×10^{-5}

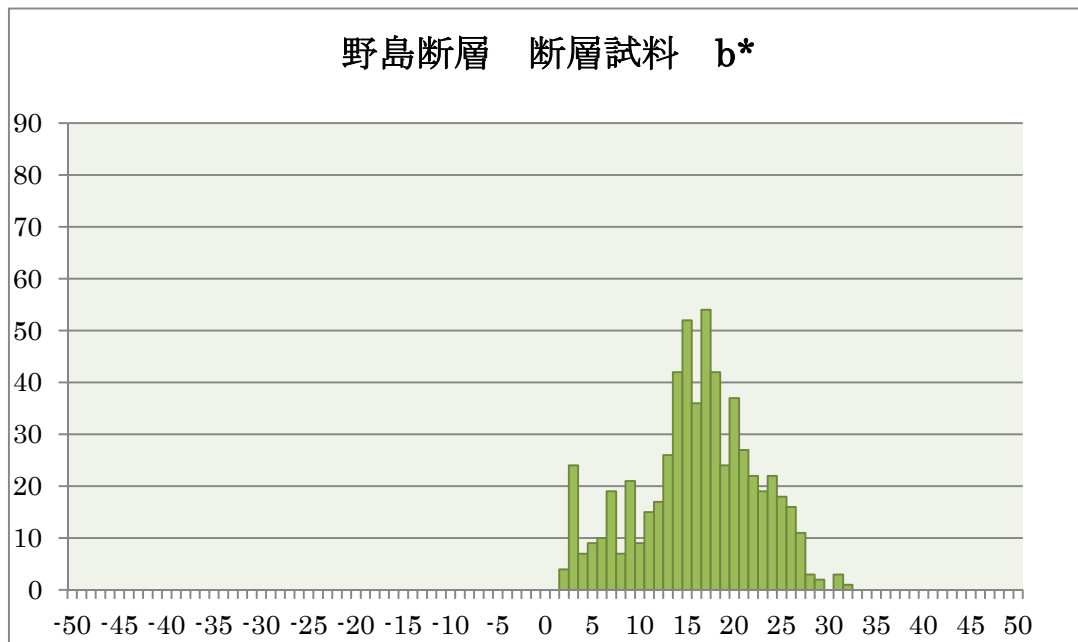


図 3.4.80 野島断層における断層試料 b^* 頻度分布 (H23 年度技術資料 図 5.1-7)

$b^*=3, 7, 17$ を示すまでの時間 T_b は

$$T_b(3)=1.05 \times 10^3 \text{ 時間} \approx 44 \text{ 日}$$

$$T_b(7)=2.63 \times 10^3 \text{ 時間} \approx 110 \text{ 日}$$

$$T_b(17)=8.08 \times 10^3 \text{ 時間} \approx 340 \text{ 日}$$

色彩値から見積もられた破砕帯の年代値を文献値とともに表 3.4.24 に示した。

表 3.4.24 色彩値から見積もられた破砕帯の年代値

	試料 A (郷村)	試料 C (警固－西山)	試料 D (淡路)
a*値より算定した年代	470 日	530 日 1500 日	170 日
b*値より算定した年代	470 日 1200 日	890 日	44 日 110 日 340 日
文献値 (最新活動) ※1	1927 年	13000 年前以降 2000 年前以前	1995 年
文献値 (活動間隔) ※2	10000～15000 年	不明	1800～2500 年

※1、※2：文献値は、地震調査研究推進本部の報告を参照した。

色彩値から算定された年代値は、温度 15℃一定の理想的な環境下での値であるため、現実的な年代値を得るためには、さらに検討が必要である。しかしながら、試料によって変化速度が異なる色彩値を、等価な時間に置き換えることによって、試料間の相対的な比較検討が可能になると考えられる。

本業務では、表 3.4.24 から次の特徴が読み取れた：①他試料と比べて活動間隔が短い淡路断層帯は、色彩分布ピーク値の時間間隔も短いことが分かった。②郷村断層帯は a*値でも b*値でも同じ年代値 (470 日) が得られた。これは、同じ時代の現象を示していると考えられる。上記②については、理論的には他試料でも a*値、b*値で同じ年代値が得られるはずである。しかし、警固－西山断層帯や淡路断層帯ではその結果が得られなかった。その理由として、複峰分布のピーク間隔が狭く、単峰分布とみなしてしまったためと考えられる。おそらく、警固－西山断層帯の b*値年代 (890 日) は 2 つのピーク (530,1500 日) の平均、淡路断層帯の a*値年代 (170 日) は 3 つのピーク (44,110,340 日) の平均を示しているのではないかと思われる。