

## イライト結晶度データのCIS標準化： 静岡大学理学部地球科学教室の場合

小西祐作<sup>1</sup>・鈴木誠之<sup>2</sup>・狩野謙一<sup>3</sup>

### CIS standardization of illite crystallinity data : case in the Institute of Geosciences, Shizuoka University

Yusaku KONISHI<sup>1</sup>, Masashi SUZUKI<sup>2</sup> and Ken-ichi KANO<sup>3</sup>

**Abstract** While measuring illite crystallinity (IC) on the same slides, significant differences in results were recognized between two different X-ray diffractometers. Hence, standardization of IC data has been performed using Crystallinity Index Standard (CIS) samples. The measured IC values show good linear correlation with the CIS values. No significant differences existed in the high crystallinity range belonging to epizone, whereas in the low crystallinity range between the lower anchizone and the diagenetic zone, the CIS calibrated values indicate lower crystallinity (higher IC values) than the non-calibrated ones. According to these results, we re-evaluate the IC values previously presented.

**Key words:** illite crystallinity, CIS standardization, epizone, anchizone, diagenesis

#### まえがき

付加体の造構史，特に広域的な地質構造と続成・弱変成度の関連の議論に，泥質岩中のイライト結晶度 (illite crystallinity, 以下 IC) が広く用いられるようになってきた。特に日本においては，付加体の古地温構造を解析するために1990年代に入って急速に普及するようになった (UJIE, 1997; 原ほか, 1998; HISADA & HARA, 1998; 木村, 1998; 松田ほか, 1998; 長江・宮下, 1999; 狩野・竹田, 1999; 原・木村, 2000; 1996年以前の文献は狩野 (1997) を参照)。これは，付加体中には泥質岩が普遍的に分布することと，X線回折装置さえあれば比較的短時間に，費用をかけず，かつ容易に結果が得られるためである。

しかしながら得られる IC 値は，試料調整法，X線回折装置の計測条件，回折装置の光学系ジオメトリ

の違いなどによって異なってくることが知られている (KISCH & FRY, 1987; ROBERTS *et al.*, 1990; KISCH, 1990, 1991; KRUMM & BIGGISCH, 1991; WARR & RICE, 1994; など)。できるだけ同一の規格で IC 値を求めるための試料調整・X線光学設定及び IC 値の標準化についての提言は，KISCH (1991) によってなされており，泥質岩の研磨面試料が，IC 値の標準化のためのサンプルとして提唱された。その後，WARR & RICE (1994) によって CIS (Crystallinity-Index Standard) サンプルを用いた標準化が提唱された。1990年代後半には，この CIS サンプルが全世界に配布され，IC 値の標準化のための試料として普及するようになった (KRUMM & WARR, 1995)。

日本国内では従来より IC 値の研究室間の比較がなされていなかったが，付加体の研究に有効な道具として IC が認知されるような状況に至り，IC 値の研究室間で

石油公団，100 東京都千代田区内幸町2-2-2

<sup>1</sup>Japan National Oil Corporation, 2-2-2 Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 100 Japan

<sup>2</sup>静岡新聞社編集局，422-8670 静岡市登呂3-1-1

<sup>3</sup>Editorial board, Shizuoka Newspaper Publishing Company, 3-1-1 Toro, Shizuoka, 422-8670 Japan

<sup>3</sup>静岡大学理学部地球科学教室，422-8529 静岡市大谷836

<sup>3</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: sekkano@ipc.shizuoka.ac.jp(K.K.)

の差について具体的に検討してみる必要が出てきた。そこで国内における IC 値の標準化の第一歩として、静岡大学と地質調査所の試料調整法及び機器間誤差を、同一試料・同一スライドを用いて検討した。その結果、IC 値は続成～弱変成度の相対的な指標としては極めて優秀であるが、露頭内でのサンプル間誤差や、試料調整法の相違による誤差に比べると、機器間誤差が極めて大きく、標準化が必要不可欠であることが明らかとなった(小西ほか, 2000)。本論では、これらの結果のうち、静岡大学理学部地球科学教室にある2台のX線回折装置間の機器間誤差、CISサンプルを用いた静岡大学データのCIS標準化、ならびにCIS標準化に基づく公表済みデータの再評価の結果を報告する。

### 機器間誤差

静岡大学理学部地球科学教室に所属する日本電子製 JEOL8000 (DX-GE3SC: 以下, JEOL) と理学電機製 RINT2200 (以下, RIGAKU) のX線回折装置を用いて、同一スライドの IC 値を計測し、両者の機器間誤差を検討した。使用した計19の泥質岩サンプルは、CISの4サンプルのほかに、赤石山地四万十帯の古第三系～下部中新統瀬戸川層群9試料、同最上部白亜系～最下部古第三系大居層群2試料およびニュージーランド南島のトレス帯ジュラ系～下部白亜系4試料である。本論の内容とは直接関係しないので、試料採集地の地質状況についての記載は省略する。また、試料調整法については、CISサンプルを除いて TANABE & KANO (1996) にしたがっている。すなわち、試料約150gをステンレス乳鉢で粉碎した後、水ひ方により $2\mu\text{m}$ 以下の粒子を取り出して定方位スライドを作成し、一晚乾燥させた後にエチレングリコール (EG) 処理を行った。一つのスライドにつき10回繰り返し測定を行い、その平均値と標準偏差 $1\sigma$ を求めた。CISサンプルの取扱いについては次項に説明する。IC値はKübler Indexに従い、イライト [001] 面のピークの半値幅を $\Delta^\circ 2\theta$ で示した。以下で示す IC 値は、小数点以下2桁までとし、単位の表示を省略する。

JEOLは従来から本教室でIC値の計測に用いられてきたもので、その計測条件はTANABE & KANO (1996) にしたがっている。すなわち、電圧: 40kV, 電流: 20 mA, 対陰極元素・X線:  $\text{CuK}\alpha$ , 発散スリット:  $1^\circ$ , 散乱スリット:  $1^\circ$ , 受光スリット: 0.2mm, ステップ角度:  $0.02^\circ$ , スキャン速度:  $1.2^\circ/\text{min.}$ , 計測時間: 1秒, 測定:  $6\sim 12^\circ 2\theta$ , である。

RIGAKUの計測条件も上記のJEOLにしたがったが、機器の構造自体が異なるために受光スリットについてはJEOLと同じ0.2mmが設定されていないので、最も近い0.15mmに設定した。

JEOL (X)とRIGAKU (Y)のIC値の間では、図1に示すとおり、以下の直線回帰式(1)が得られた

$$Y = 1.12X - 0.11 \quad r = 0.97 \quad (1)$$

JEOLとRIGAKUの間で計測値は、異なる地点で得られたサンプルが混在しているにもかかわらず、良好な相関関係を示している。ただし、JEOLで得られるIC値に対して、RIGAKUでは一様に0.05～0.1ほど低い値にシフトし、高い変成度(低いIC値)のものほど機器間誤差の割合が大きくなっていく。そして、前者が0.25の値を取るときには、後者は0.17と30%以上の低い値を示すことになる。この誤差は、いままで

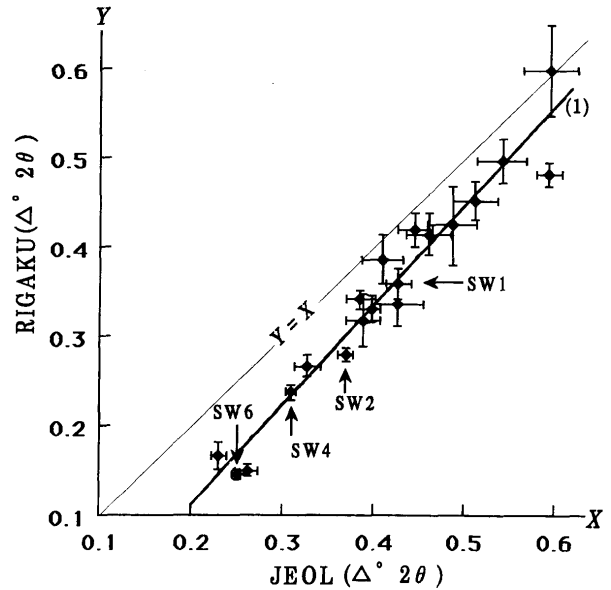


図1 同一スライドを用いたJEOL 8000 (JEOL)とRIGAKU RINT 2000 (RIGAKU)との間でのイライト結晶度計測データの対比 (エラーバー= $1\sigma$ )。SW1, SW2, SW4, SW6はCISサンプル。(1)を示す式は本文中。

Fig. 1 Correlation of illite crystallinity values between JEOL 8000 (JEOL) and RIGAKU RINT 2000 (RIGAKU) (Error bars =  $1\sigma$ ). SW1, SW2, SW4 and SW6 indicate CIS samples. Equation (1) is given in the text.

報告されている露頭内誤差、スライド間誤差、計測誤差およびそれらが複合した誤差など (ROBINSON *et al.*, 1990; TANABE & KANO, 1996; など) に比べて約2倍あるいはそれ以上の大きさとなる。したがって、同一機器を用いている限りでは、ICの高低についての相対的評価には大きな影響を与えないが、異なる機器間のIC値を直接比較をすることはできず、特に高変成度領域での議論に使用する際には十分な配慮が必要となる。そしてJEOLとRIGAKUのIC値を数値として比較するためには、回帰式(1)を用いてどちらか一方にあわせるか、それに替わるなんらかの標準化が必要になる。

### CIS標準化

CISサンプルは、イングランド南西部、コーンウォール地方北部のバリスカン低変成帯の古生界から採集された4つの泥質岩岩屑試料と、インドのペグマタイト中の白雲母フレックからなる。サンプル名及び結晶度(エチレングリコール未処理 (Dry): 同処理後 (Wet))はそれぞれSW1 (0.63 : 0.57), SW2 (0.47 : 0.44), SW4 (0.38 : 0.38), SW6 (0.25 : 0.25), MF1 (0.11: no data)となっている(表1)。それぞれの試料の岩石学的記載はWARR & NIETO (1998)に詳しい。このCISサンプルの入手法は、以下にアドレスを示すKRUMM & WARR (1995)のVLGM (Very Low Grade Metamorphism) ホームページに掲載されている。  
<http://www.geol.uni-erlangen.de/vlgm/index.html>

このホームページには1996年12月の時点での、世界の21研究室におけるCISサンプルの計測結果が掲載され、IC値には数10%に達する研究室間誤差があること

表 1 CIS サンプルの標準値と JEOL および RIGAKU による計測値。

Table 1 IC standard values of CIS samples, and their measured IC values by JEOL and RIGAKU.

Sample No.		SW1		SW2		SW4		SW6		MF1	
		aver.	1σ	aver.	1σ	aver.	1σ	aver.	1σ	aver.	1σ
CIS	Dry	0.63	—	0.47	—	0.38	—	0.25	—	0.11	—
	Wet	0.57	—	0.44	—	0.38	—	0.25	—	—	—
JEOL	Dry	0.49	0.02	0.40	0.01	0.34	0.01	0.27	0.01	0.12	0.00
	Wet	0.43	0.01	0.37	0.01	0.31	0.01	0.25	0.01	—	—
RIGAKU	Dry	0.41	0.03	0.31	0.01	0.25	0.01	0.16	0.11	0.10	0.00
	Wet	0.36	0.02	0.28	0.01	0.24	0.01	0.14	0.01	—	—

CIS: CIS standard value, Dry: non-glycolated, Wet: glycolated, aver.: average, 1σ: standard deviation, —: no data

が示されている。この誤差には機器間誤差のほかに試料調整法の違いによる誤差が含まれている。この5サンプルの計測値と CIS 値との回帰式に基づいて、各サンプルの計測値を CIS 標準化することになる。上記のホームページには、1998年10月の時点での CIS を用いた公表論文リストも掲載されている。

一般に IC 値を用いた 続成～弱変成度は、高温側からエピ変成帯 (epizone < 0.25), アンキ変成帯 (0.25 ≤ anchizone ≤ 0.42), 続成帯 (0.42 < diagenetic zone) の三帯に分帯されている (BLENKINSOP, 1988; UNDERWOOD *et al.*, 1993; など)。なお、エピ帯、アンキ帯、および続成帯は、変成鉱物組み合わせに基づく変成相のうち緑色片岩相、プーナイトーパンペリアイト相および沸石相にそれぞれ相当する。CIS におけるエピ/アンキ及びアンキ/続成帯の境界値はそれぞれ 0.25 と 0.42 で、従来からのものと同じである (WARR, 1996)。ニュージーランド南島南部の試料を用いた変成鉱物組み合わせによる変成相からの CIS 標準値での温度の見積もりは、それぞれ 320℃ および 175℃ とされている (WARR, 1996)。なお、四国の四万十帯の付加体試料を用いてビトリナイト反射率との対応から求めたアンキ変成帯の範囲は、おおよそ 320℃ から 265℃ とされている (UNDERWOOD *et al.*, 1993)。すなわち、上限の温度はほぼ同じであるが、下限の温度が大きく異なっている。

**CIS 標準化のための計測結果**

CIS サンプルでの試料調整については、以下の点で従来と異なっている。従来は遠心分離によって集められた泥を薄めて、小型の薬匙でスライドガラスへ塗布してスライドを作成してきたが、今回から地質調査所で採用されている方法にしたがった。この方法では、小型の注射器 (たとえばツベルクリン用) で泥を秤量しながらスライドガラスへの塗布を行う。この方法で得られる計測値の平均値は従来のもものとほとんど変わりはない。しかし、その平均値に対する標準偏差 (1σ) は従来の方法では 5% 前後、一部はそれ以上に達するが (TANABE & KANO, 1996), この方法ではその 1/2~1/3 程度に抑えることができる (表 1, 図 1; 小西ほか, 2000)。

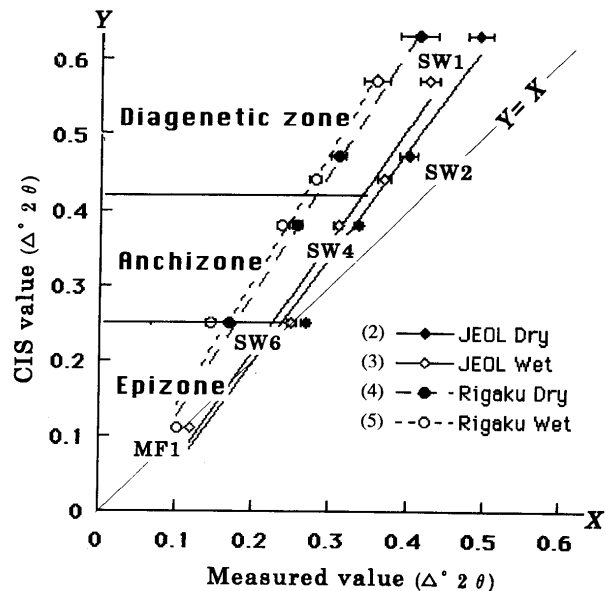


図 2 JEOL 8000 (JEOL) および RIGAKU RINT 2000 (RIGAKU) での CIS サンプル計測値と CIS 標準値との対比。Dry: エチレングリコール処理前, Wet: 同処理後 (エラーバー = 1σ)。 (2), (3), (4) および (5) を示す式は本文中。

Fig. 2 Correlation of measured IC values of CIS samples by JEOL 8000 (JEOL) and RIGAKU RINT 2000 (RIGAKU) with the CIS standard values. Wet: non-glycolated, Dry: glycolated (Error bars = 1σ). Equations (2), (3), (4) and (5) are given in the text.

上記した機器設定にしたがい、MF1 を除く 4 つの CIS サンプルについて、乾燥試料 (Dry) のスライドおよびエチレングリコール処理後 (Wet) のスライドを 10 回繰り返して計測し、その平均値を前述した CIS 標準値と比較した (表 1)。なお、MF1 については、フレークのまま計測している。

図 2 が示すように、CIS 標準値 (Y) と JEOL および RIGAKU による計測値 (X) は以下の (2)~(5) 式で示される直線関係を示し、その相関係数 r は 0.99 以上のきわめて高い値をもつ。

$$\text{Dry (JEOL)} \quad Y = 1.41X - 0.09 \quad r = 0.99 \quad (2)$$

$$\text{Wet (JEOL)} \quad Y = 1.48X - 0.09 \quad r = 0.99 \quad (3)$$

Dry (RIGAKU)  $Y=1.65X-0.04$   $r=1.00$  (4)

Wet (RIGAKU)  $Y=1.70X-0.03$   $r=0.99$  (5)

このことは、CIS サンプルによる計測データの標準化の信頼性を十分に保証している。ただし、Wet での (3) および (5) 式は、結晶度の高い領域では Wet と Dry の計測値の差がほとんどゼロとなるので、MF1 の雲母フレークの Dry の IC 値を代用させた回帰式である。当然ながら IC 値が小さくなる高変成度のものほど、計測値と CIS 標準値との差が数値上は少なくなる。そして、IC 値が大きくなる続成帯の領域では CIS 標準値のほうが値が大きくなる。すなわち、続成領域ほど CIS 標準化による影響が大きくなる。Dry および Wet ともに JEOL よりも RIGAKU のほうが約 0.05~0.10 少ない値を示す。

後述するように既存データの多くは JEOL を用いて Wet のスライドで計測されている。したがって、(3) 式を用いて CIS 標準値に換算することになるが、その時のエビ/アンキ帯の境界の計測値は 0.24、アンキ帯/続成帯では 0.34 となる。すなわち、計測値ではアンキ帯低温部に属するとされた 0.35~0.42 を示す試料が、CIS 標準化に伴って続成帯に移行することになる。なお、JEOL を用いた Wet のスライドでは、計測値の CIS 標準化にともなって  $1\sigma$  が約 1.5 倍大きくなる。

### 既存データの再評価

静岡大学では JEOL を用いて最近 10 年間で数多くの IC 値の計測がなされてきた。この間に卒論・修論および学会における講演要旨を除いて、以下の IC データを含んだ論文が公表されている。これらの結果について、計測値を CIS 標準化した場合の再評価の結果を以下に記す。

#### 竹内・狩野 (1991)

赤石、四国、九州での四万十帯及び南西アラスカのコーディアック島のメランジュの造構環境を、IC を指標の一つとして比較した論文。ここでは IC 値として、Wet のスライドの三回測定の平均値を用いている。計測数が少なく、サンプルの採取位置や個々の計測結果が公表されていないので、呈示データとしては不十分である。現状からみても続成/変成度の相対的な比較と大局的な議論には変更はないものの、厳密な続成・弱変成度の比較に使えるデータではなくなっている。

#### 唐沢・狩野 (1992)

赤石山地東部の四万十帯に属する瀬戸川帯北部のスレートの形成過程について、IC 値を変成度の指標として議論した論文である。全体として緑色片岩相に属するとされてきた地域であり、EG 処理の効果は少ないと判断できたので、Dry のスライドを用いた三回測定の平均値を採用している。34 地点のサンプルが 0.18~0.28 の範囲に入るので、地域のほとんどがエビ変成帯に属すると解釈された。

(2) 式を用いた CIS 換算値は 0.17~0.33 となり、エビ変成帯からアンキ変成帯の高温部に入ることになるが、この論文での主要な議論には大きく影響しない。接触変成作用による黒雲母晶出の影響と解釈したエビ帯の中に挟まれる続成帯を示す 2 地点での異常値 0.46 は、CIS 標準化では 0.56 となる。

#### 田邊・狩野 (1994)

紀伊半島東部海山地域の四万十帯白亜系の地質構造を記載するとともに、続成・弱変成度を示した論文である。Wet のスライドを用いた三回測定の平均値で IC 値を示した。ここでは計 22 地点の試料は 0.35~0.76 の範囲にあるので、アンキ変成帯の弱変成部から続成帯に及ぶ続成・変成作用を受けたとし、これが最高被熱温度を示すものならば、付加の深度は 10km 以浅であったとした。

(3) 式を用いた CIS 換算値は 0.43~1.04 の範囲となり、すべての試料が続成帯に含まれることになる。したがって、最大被熱温度は低くなるので、付加の推定深度は浅くなり、数 km 程度に訂正する必要がある。なお、この地域の南西方の前期中新世の後期~中期中新世の前期の堆積年代を持ち四万十帯の地層を不整合に覆う熊野層群が分布する。その中に含まれる炭質物のビトリナイト反射率は 200℃ 以上の被熱温度を示している (CHIJIWA, 1988)。したがって、これよりも最大被熱温度が低かったと推定される調査地域を含めた四万十帯の地層も、熊野層群の被熱時と同時期にそれよりも低い温度で再被熱している可能性が大きい。

#### TANABE & KANO (1996)

赤石山地南部の四万十帯の試料を用いて、スライド間誤差、サンプル間誤差、露頭間誤差などを推定し、その結果に基づいて、数 10km オーダーでの続成・変成度の変化を検討した論文である。約 200 地点の試料を扱い、Wet のスライドの 10 回測定の平均値とその標準偏差もしくは 95% 信頼区間を求めている。ここでは 0.78 という飛び抜けて大きな値を持つ試料を除けば 0.28 から 0.60 程度の範囲の値をもち、アンキ帯の高温部から続成帯にわたるとみなした。

CIS 換算値では 0.78 が 1.07、それ以外が 0.33~0.80 の範囲となる。したがって、試料全体としてはアンキ変成帯の低温部から続成帯にわたり、アンキ帯の低温部とした試料は続成帯に移行することになる。標準化に伴って続成・変成度の評価が、全体に低温側に移行することになるが、大局的な議論には影響しない。

#### 狩野・竹田 (1999)

琵琶湖北方、野坂山地の丹波帯スレートの変成度を見積もり、屈曲構造との関係を議論した論文である。ここでは前述した TANABE & KANO (1996) の方法にしたがっている。この地域の 18 地点の試料の IC 値は 0.22~0.36 の範囲であり、エビ変成帯からアンキ変成帯の高温部に属するとした。

CIS 換算値では 0.24~0.45 となり、大部分がアンキ帯の試料であり、一部にエビ帯と続成帯の試料を含むことになる。したがってデータは低温側に移行することになるが、本論での大局的な議論にはほとんど影響しない。

### まとめ

1. 付加体の泥質岩から得られた同一のイライト結晶度 (IC) 計測用スライドを用いて、静岡大学理学部地球科学教室所属の日本電子製 JEOL8000 および理学電気製 RINT2000 の二つの X 線回折装置で得られる計測値の差を検討した。その結果、同一機器を用いて相対的に結晶度の比較をする際には、IC 値は続成一

弱変成度の指標として信頼性が高いが、機器が異なる場合には他の要因による誤差よりも大きな誤差が生じる可能性が高いので、計測値については何らかの標準化が必要であることが確認された。

- IC 値の標準化で世界的に普及しつつある CIS サンプルを用いて、CIS 標準値と上記の 2 台の機器におけるエチレンジグリコール処理前および処理後の IC の計測値との相関関係を求めた。その結果、CIS 標準値と各機器による計測値とはきわめて高い相関で、直線関係を示すことが確認できた。したがって、CIS サンプルによる標準化は、機器間誤差によって生じる IC 値の相互比較のために有効な手順であることが確認された。
- 2 の結果にしたがって、既存の公表データとそれに基づく議論について、CIS 標準化を施した場合の再評価を行った。エピ変成帯に属する比較的変成度の高い領域では標準化の影響は大きくないが、アンキ変成帯の低温部から続成帯の領域になるほど、CIS 標準化によって IC 値が低温側 (IC 値が増加する方向) に移行する。

## 謝 辞

ハイデルベルクのルプレヒト・カールス大学の L. N. WARR 教授には CIS サンプルを提供していただくとともに、文献についてのご教示を受けた。地質調査所木村克己博士および静岡大学和田秀樹教授には本原稿を査読していただいた。これらの方々には感謝する。

## 引用文献

- BLENKINSOP, T. G. (1988), Definition of low-grade metamorphic zones using illite crystallinity. *Journal of Metamorphic Geology*, **6**, 623-636.
- CHUJIWA, K. (1988), Post-Shimanto sedimentation and organic metamorphism: an example of the Miocene Kumano Group, Kii Peninsula. *Modern Geology*, **12**, 363-387.
- 原 英俊・久田健一郎・木村克己 (1998), イライト結晶度からみた関東山地秩父帯・四万十帯の古地温構造. *地質学雑誌*, **104**, 705-717.
- 原 英俊・木村克己 (2000), イライト結晶度の測定誤差の評価: 付加コンプレックスに適用する際の限界と問題点. *地質学雑誌*, **105**, 264-279.
- HISADA, K. & HARA, H. (1998), Two-story structure of Chichibu Terrane in Kanto Mountains, central Japan: two lithologic units and illite crystallinity. *Prof. H. IGO Commem. Volume*, 55-62.
- 狩野謙一 (1997), イライト結晶度からみた付加体泥質岩の続成~弱変成度. *月刊地球*, **19**, 173-178.
- 狩野謙一・竹田正司 (1999), 美濃-丹波帯に発達する急傾斜した軸を持つ地質図規模の褶曲-琵琶湖北方の野坂山地に見られる例-. *地質学雑誌*, **105**, 435-449.
- 唐沢 譲・狩野謙一 (1992), 赤石山地東部の四万十帯, 瀬戸川層群中のスレート帯の形成とその変形過程. *地質学雑誌*, **98**, 761-777.
- 木村克己 (1998), 付加体の Out-of-Sequence Thrust. *地質学論集*, **50**, 131-146.
- KISCH, H. J. (1990), Calibration of the anchizone: a critical comparison of illite 'crystallinity' scales used for definition. *Journal of Metamorphic Geology*, **8**, 31-46.
- KISCH, H. J. (1991), Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. *Journal of Metamorphic Geology*, **9**, 665-670.
- KISCH, H. J. & FREY, M. (1987), Appendix: Effect of sample preparation on the measured 10 Å peak width of illite (illite 'crystallinity'). In: FREY, M. (ed.) *Low Temperature Metamorphism*, Blackie, Chapman and Hall, New York, 301-304.
- 小西祐作・鈴木誠之・狩野謙一・原 英俊・木村克己 (2000), イライト結晶度の研究室間誤差と標準化. *日本地質学会第107年総会・討論会講演要旨*, **47**.
- KRUMM, S. & BUGGISH, W. (1991), Sample preparation effects on illite crystallinity measurement: grain-size gradation and particle orientation. *Journal of Metamorphic Geology*, **9**, 661-677.
- KRUMM, S. & WARR, L. N. (1995), VLGM standards, calibration and reference material. <http://www.geol.uni-erlangen.de/vlgm/index.html>
- 松田達生・小泉雅一・杉山雄一・坂 幸恭 (1998), イライト結晶度測定における碎屑性雲母粒子の影響. *地質学雑誌*, **104**, 718-721.
- 長江 晋・宮下純夫 (1999), 九州四万十帯北帯の低圧高温型変成作用と変形作用. *地質学論集*, **52**, 255-272.
- ROBERTS, B., MORRISON, C. & HIRONS, S. (1990), Low grade metamorphism of the Manx Group, Isle of Man: a comparative study of white mica 'crystallinity' techniques. *Journal of Geological Society, London*, **147**, 271-277.
- ROBINSON, D., WARR, L. N. & BEVINS, R. E. (1990), The illite 'crystallinity' technique: a critical appraisal of its precision. *Journal of Metamorphic Geology*, **8**, 333-344.
- 竹内真司・狩野謙一 (1991), 四万十帯メランジュの変形過程 - 地質学的データに基づく比較沈み込み学. *静岡大学地球科学研究報告*, **17**, 87-129.
- 田邊裕高・狩野謙一 (1994), 紀伊半島東部, 海山地域の四万十帯上部白亜系. *静岡大学地球科学研究報告*, **21**, 1-10.
- TANABE, H. & KANO, K. (1996), Illite crystallinity study of the Cretaceous Shimanto Belt in the Akaishi Mountains, eastern Southwest Japan. *The Island Arc*, **5**, 56-68.
- UJIE, K. (1997), Tectonics of the offscraped Eocene Kayo Formation of the Ryukyu Arc and its thermal imprint. *Tectonics*, **16**, 305-322.
- UNDERWOOD, M. B., LAUGHLAND, M. M. & KANG, S. M. (1993), A comparison among organic and inorganic indicators of diagenesis and low-temperature metamorphism, Tertiary Shimanto Belt, Shikoku, Japan. *Geological Society of America, Special Paper*, **273**, 45-61.
- WARR, L. N. (1996), Standardized clay mineral crystallinity data from the very low-grade metamorphic facies rocks of southern New Zealand. *European Journal of Mineralogy*, **8**, 115-127.
- WARR, L. N. & NIETO, F., (1998), Crystallite thickness and defect density of phyllosilicates in low-temperature metamorphic pelites: a TEM and XRD study of clay-mineral crystallinity-index standards. *The Canadian Mineralogists*, **36**, 1453-1474.
- WARR, L. N. & RICE, A. H. N. (1994) Inter-laboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. *Journal of Metamorphic Geology*, **12**, 141-152.