

## イライト結晶度測定における標準試料の提唱: 古地温度指標としての有効性

原 英俊<sup>1</sup>・木村克己<sup>1</sup>

Hidetoshi HARA<sup>1</sup> and Katsumi KIMURA<sup>1</sup> (2003) New proposal of standard specimens for illite crystallinity measurement : its usefulness as paleo-geothermal indicator. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 54(7/8), p.239 - 250, 7 figs., 7 tables.

**Abstract:** Japanese Illite Crystallinity standard (JIC) is proposed as the standard specimens of Illite Crystallinity (IC) for paleo-geothermal indicator. The JIC composed of six specimens is collected from the Sambagawa metamorphic rocks and the Cretaceous Shimanto accretionary complex in the Kii Peninsula, Southwest Japan. Each specimen consists of pelitic rock fragments of 2-3 cm in length. The six JIC specimens measured at our laboratory indicate the following IC values; 0.25, 0.28, 0.33, 0.44, 0.48 and 0.56  $^{\circ}$ , respectively. The IC values measured at our laboratory show a well linear correlation with the international standard of the CIS (Crystallinity Index Standard). In addition, the epizone corresponds to metamorphic temperature of the pumpellyite-actinolite facies, and the anchizone is equivalent to metamorphic temperature of the prehnite-pumpellyite facies. According to the CIS calibration and comparison with metamorphic facies, the JIC would be the most useful paleo-geothermal indicator. As a result of calibration by the JIC, it is possible to compare the IC values measured at different laboratories.

**Keywords:** illite crystallinity, standard specimen, JIC (Japanese Illite Crystallinity standard), CIS (Crystallinity Index Standard), paleo-geothermal indicator

### 要 旨

古地温度指標に対するイライト結晶度測定のための標準試料として、JIC (Japanese Illite Crystallinity standard) を提唱する。JICは6つの泥質岩試料から構成され、紀伊半島三波川変成岩類と四万十帯白亜系より採取された。それぞれの泥質岩試料は、長さ2-3cm以下の岩石片からなる。地質調査総合センターで測定された6つのJIC試料のIC値は、それぞれ0.25, 0.28, 0.33, 0.44, 0.48, 0.56  $^{\circ}$ を示す。また当センターで測定されたIC値は、国際標準であるCIS (Crystallinity Index Standard) と線型比例の関係にある。そして、epizoneがパンペリー石-アクチノ閃石相、anchizoneがぶどう石-パンペリー石相の変成温度にそれぞれ相当する。CIS換算と変成温度との対比により、JIC試料は有効な古地温度指標であるといえる。そしてこのJIC試料を測定することで、異なる研究室で測定されたIC値の比較が可能となる。

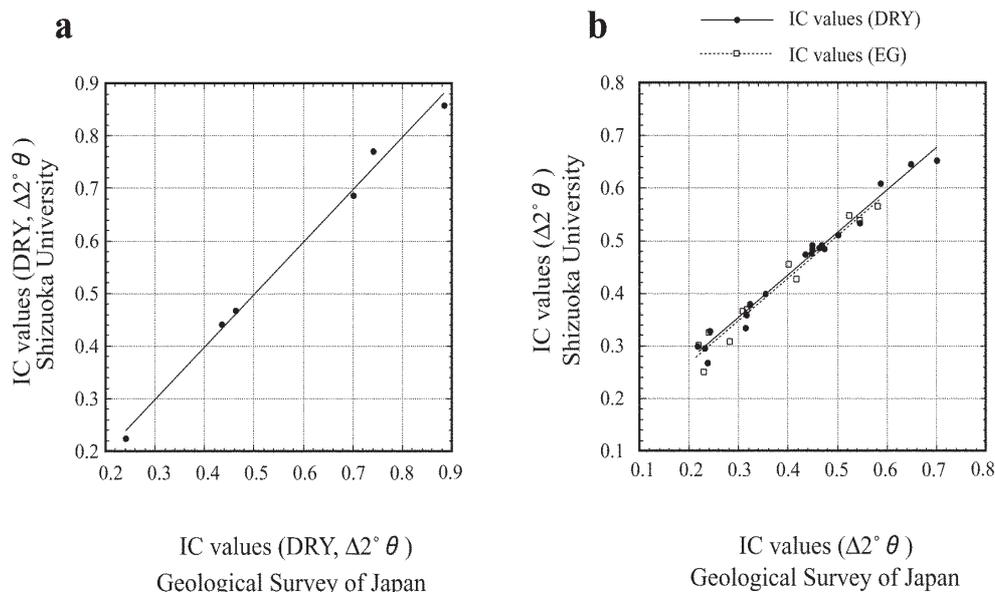
### 1 はじめに

付加コンプレックスにおける最大被熱温度の評価および古地温構造解析に、イライト結晶度 (illite crystallinity, IC) が広く用いられている (大塚・渡辺, 1992; Underwood *et al.*, 1993; Awan and Kimura, 1996; Tanabe and Kano, 1996; 原ほか, 1998; 金本・大塚, 2000; Ueda *et al.*,

2001; 小林・大塚, 2002など)。イライト結晶度は、X線回折チャートから読みとれるイライトの(001)面ピークの鋭さから、イライトの結晶化ないし成長の相対的強度を導くものである。このイライト結晶度の値(以後、IC値と呼ぶ)として、(001)面ピークの半価幅を  $2^{\circ}$  で表すKübler Index (Kübler, 1968) が広く用いられている。一般にIC値は、雲母格子の積層厚に反比例して低下する (Kisch, 1980; Robinson *et al.*, 1990; Merriman *et al.*, 1990) また膨潤層の割合が減少することによっても、IC値は低下する。イライト結晶度の解析は、泥質岩を分析試料とすることから、付加コンプレックスでは、連続的かつ高密度な試料採取ができ、広範囲に及ぶ古地温度の相対的評価が可能となる。そしてTanabe and Kano (1996) や原・木村 (2000) では、イライト結晶度の測定精度が検討され、付加コンプレックスにおける古地温構造解析の有効性が議論されている。

その一方で、IC値は測定・試料調整方法の違いにより測定値が変化するため、異なる研究室間で得られたIC値を直接比較できない (Frey, 1987; Robinson *et al.*, 1990; Kisch, 1991など)。そのため、ヨーロッパにおけるイライト結晶度の研究では、測定・試料調整方法の規格化が行われ、さらに標準試料を用いることによってIC値の研究室間対比が行われている (Frey, 1987; Kisch, 1991; Warr and Rice, 1994; Merriman and Peacor, 1999など)。初め標準試料として、泥質岩の研磨片が用いられた。この標準試料

<sup>1</sup>地球科学情報研究部門 (Institute of Geoscience, GSJ)



第1図 当センターと静岡大学で測定されたIC値の比較。  
 a:異なる手法で作成された方位スライドにおけるIC値の変化。  
 b:異なるX線回折装置と測定条件で測定されたIC値の変化。

Fig. 1 Correlation of measured IC values between Geological Survey of Japan and Shizuoka University.  
 a: Variation of IC values for orientated slides prepared by different methods.  
 b: Variation of IC values measured by different X-ray diffractometers and their measurement conditions.

の形状などについてはKisch(1991)やMerriman and Peacor(1999)などで簡単に触れられている程度で詳細は不明である。そこでWarr and Rice(1994)によって、CIS (Crystallinity Index Standard) 試料が提唱された(詳しくはホームページを参照, <http://www.geol.uni-erlangen.de/vlgm/>)このCIS試料は、長辺約1cm以下の大きさの泥質岩片からなり、これを各研究室の手法により、粉碎・試料調整して測定を行う。これにより、試料調整・測定誤差を含めた研究室間でのIC値の違いが表現でき、IC値の研究室間対比が可能となった。上記ホームページには、21研究室におけるCIS試料の測定結果が示されている。日本では、静岡大学理学部地球科学教室にてCIS試料の測定が行われ、その有効性が示されている(小西ほか, 2000)。このCIS試料によって、異なる研究室間の測定・試料調整方法で生じたIC値の違いを補正し、さらにIC値の国際比較が可能となる。しかしCIS試料は有料であり、国内で入手している研究室も少ないのが現状である。

本報告では、付加コンプレックスの泥質岩から標準試料を作成することを目的とする。まず標準試料の作成に先立ち、IC値測定方法の研究室間比較を、産業技術総合研究所地質調査総合センターと静岡大学理学部地球科学教室との間で行い、両研究室間での測定値の違いの原因を明らかにする。そして、当センターで測定されるIC値について、CIS試料を用いて標準化を行い、すでに公表されているCIS試料の測定値と比較する。その上で、付加コンプレックスの泥質岩を用いた新たな標準試料(Japanese Illite Crystallinity standard; JIC)を作成する。そして、CIS試料によるIC値の研究室間比較や変成相との対比を行い、地

質調査総合センターで測定されるIC値およびJIC試料が、有効な古地温度指標になることを示す。

なお地質調査総合センターにおける試料調整方法を含めたイライト結晶度の測定方法については、原・木村(2000)で詳しく報告した。IC値はKübler Indexを用い、小数点以下2桁まで表し、単位である  $2^\circ$  は省略する。なおIC値は、断りのない限り、エチレングリコール処理を施したスライド(EG)を用いた測定による。一部、自然乾燥スライド(DRY)による値も合わせて示す。またKübler(1968)に従い、IC値は変成度の低い方から、diagenetic zone (IC > 0.42)、anchizone (0.42 < IC < 0.25)、epizone (IC < 0.25) に区分する。

## 2. IC値の研究室間対比

産業技術総合研究所地質調査総合センター(以下、当センターないしGeological Survey of Japan, AIST)と静岡大学理学部地球科学教室(以下、静岡大学ないしShizuoka University)との間で、IC値が測定方法の違いによって、どのように変化するかを見積もるため、大きく2つの段階にわけて測定方法を検討した。すなわち、試料を調整し方位スライドを作成する段階とX線回折装置でIC値を測定する段階である。静岡大学での試料調整方法およびX線回折装置とその測定条件は、Tanabe and Kanô(1996)および小西ほか(2000)に記載されている。なお当センターと静岡大学でのIC値の測定値を第1表に示した。

イライ結晶度測定標準試料(原ほか)

a			b				
no.	GSJ	Shizuoka Univ.	no.	DRY data		EG data	
				GSJ	Shizuoka Univ.	GSJ	Shizuoka Univ.
1	0.240	0.224	1	0.219	0.3	0.219	0.302
2	0.435	0.441	2	0.232	0.296		
3	0.462	0.468	3	0.237	0.268	0.229	0.25
4	0.700	0.687	4	0.24	0.33	0.24	0.326
5	0.741	0.770	5	0.313	0.335	0.282	0.309
6	0.885	0.858	6	0.315	0.359		
			7	0.323	0.381	0.309	0.367
			8	0.323	0.379		
			9	0.354	0.4	0.317	0.369
			10	0.435	0.475		
			11	0.446	0.477		
			12	0.449	0.493	0.401	0.456
			13	0.449	0.485		
			14	0.462	0.487		
			15	0.468	0.493	0.416	0.427
			16	0.473	0.486		
			17	0.501	0.511		
			18	0.544	0.534		
			19	0.587	0.61	0.524	0.549
			20	0.648	0.646	0.545	0.54
			21	0.7	0.654	0.581	0.565

第1表 当センターと静岡大学で測定されたIC値。  
a:異なる手法で作成された定方位スライドのIC値。  
b:異なるX線回折装置と測定条件で測定されたIC値。

Table 1 List of IC values measured at Geological Survey of Japan and Shizuoka University.  
a: IC values of orientated slides prepared by different methods.  
b: IC values measured by different X-ray diffractometers and their measurement conditions.

2.1 試料調整方法の違いがIC値に及ぼす影響

同一岩石試料から、当センター及び静岡大学におけるそれぞれの方法で、X線回折用の定方位スライドを作成した。それを当センターに設置されているX線回折装置(日本電子製JDX-8030W)にて測定した。なお本測定は、EG処理を施していない、自然乾燥スライドにて行った。

その結果、2つの研究室にて異なる方法で作成された定方位スライドのIC値は、相関係数R=0.9996を示し、誤差の範囲内ではほぼ一致する(第1図a,第1表a)。当センターと静岡大学における試料調整方法の違いは、IC値に影響を及ぼさないと見える。

2.2 X線回折装置および測定条件の違いがIC値に及ぼす影響

X線回折装置および測定条件の違いがIC値に及ぼす影響を見積もるために、21個の泥質岩試料から作成された各々の定方位スライドを、当センターと静岡大学にて測定した。その結果、自然乾燥スライド(21枚)とEG処理スライド(11枚)の測定結果から、以下の回帰式を得た(第1図b)なお当センターと静岡大学から得られたIC値に対して、その回帰式を示す場合に、測定された研究室を併記してICを表現する。すなわち、当センターはIC<sub>(GSJ)</sub>とし、静岡大学はIC<sub>(Shizuoka)</sub>とする。以下、他大学から得られたIC値の回帰式についても、同様に表記する。

DRY: IC<sub>(Shizuoka)</sub> = 0.81 × IC<sub>(GSJ)</sub> + 0.11, R = 0.98 (1)

EG: IC<sub>(Shizuoka)</sub> = 0.81 × IC<sub>(GSJ)</sub> + 0.11, R = 0.99 (2)

自然乾燥とEG処理スライドから得られた回帰式は、ともに線型比例の関係にあり、高い相関係数を示す。IC値は、

anchizoneからepizoneにかけて、当センターの方が静岡大学より低い値を示す傾向がある(第1図b)。両研究室間において、試料調整方法の違いがIC値に影響を及ぼさないことから(第1図a)、これらの回帰式は、X線回折装置および測定条件の違いを反映している。

以上の検討から、当センターと静岡大学とのIC値の研究室間対比の場合、試料作成手順より、X線回折装置と測定条件の違いが大きく反映されると見える。

3 .CIS試料の測定

CIS試料は、イングランド南西部、パリスカン変成帯の低変成度部の泥質岩試料4個(SW1, SW2, SW4, SW6)とインドのペグマタイト中の白雲母フレーク(MF)からなる。なお試料についての詳細は、Warr and Rice(1994)およびWarr and Nieto(1998)で述べられている。当センターでの測定結果(EG処理後)は、SW1は0.42, SW2は0.32, SW4は0.28, SW6は0.23, MFは0.11である(第2表)。なおMFはEG処理を施していない。当センターでの測定結果は、

		SW1	SW2	SW4	SW6	MF
CIS	DRY	0.63	0.47	0.38	0.25	0.11
	EG	0.57	0.44	0.38	0.25	-
GSJ	DRY	0.47	0.35	0.31	0.24	0.11
	EG	0.42	0.32	0.28	0.23	-

第2表 CIS標準値と当センターにおけるCIS試料の測定値。

Table 2 Standard IC values of CIS and their values measured at Geological Survey of Japan.

Warr and Rice(1994)で公表されたCIS試料の標準値(以下、CIS標準値)と線形比例の関係にあり(第2図)、次の回帰式が導かれる。なお $IC_{(CIS)}$ はCIS標準値を、 $IC_{(GSJ)}$ は当センターでのCIS試料の測定値を示す。

$$IC_{(CIS)} = 1.55 \times IC_{(GSJ)} - 0.07, R = 0.99 \quad (3)$$

すなわち上式により、当センターで測定されたIC値は、CIS標準値に換算することが可能である。また、当センターで測定されたIC値は、CIS標準値に比べ低い値を示す傾向がある。epizone/anchizone境界では、 $IC_{(CIS)} = 0.25$ に対し $IC_{(GSJ)} = 0.23$ と0.02の違いがある。またanchizone/diagenetic zone境界では $IC_{(CIS)} = 0.42$ に対し $IC_{(GSJ)} = 0.32$ と0.1の違いが認められる。このIC値の違いの傾向は、diagenetic zoneほど顕著である。そのため当センターのIC値は、従来anchizoneとして取り扱ってきた値のほとんどが、CIS標準値でのdiagenetic zoneに属することになる。すなわちCIS標準値への換算の結果、当センターで測定されるIC値では0.23-0.32の範囲が、CIS標準値のanchizoneの範囲に相当する。

#### 4 JIC試料の作成

##### 4.1 標準試料について

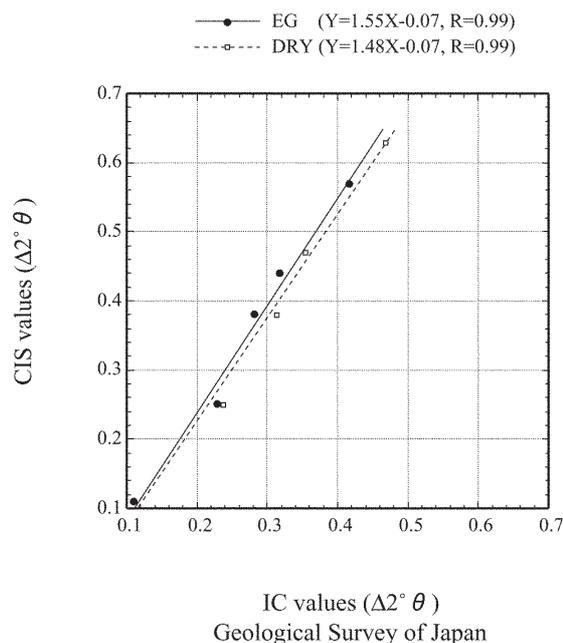
イライト結晶度測定に関する汎用性の高い標準試料(Japanese Illite Crystallinity standard; JIC)を作成する。JIC試料の採取は、Awan and Kimura(1996)によりすでにIC値の報告がある紀伊半島中央部の三波川変成岩類および四万十帯の白亜系花園層と湯川層を対象とした(第3図)。

一般に四万十帯の白亜系は、付加した後に、海嶺ないし生成年代が若く熱い海洋プレートの沈み込みによる熱事変を被り、古地温度構造が再構築されている(例えばSakaguchi, 1996; Ohmori *et al.*, 1997など)。しかし花園層は、この様な熱事変が起きた時すでに隆起を開始しており、熱重複の影響が少なく付加に伴う初生的な古地温度構造を保持していると考えられている(Awan and Kimura, 1996)。そのため泥質岩のIC値と古地温度の関係を評価するのに適している。またIC値は0.21-0.72の範囲を示し、北から南にかけて値が連続的に減少する傾向がある(第3図)。そのため、異なるIC値を示す泥質岩試料を系統的に選択できる利点がある。これらのことから、紀伊半島中央部の三波川変成岩類および四万十帯白亜系の泥質岩を標準試料として採用した。

なおAwan and Kimura(1996)により報告されたIC値( $IC_{(GS, Awan)}$ )と、本報告のIC値( $IC_{(GSJ)}$ )は次の回帰式に基づく相関関係がある。これは、X線回折装置(日本電子社製JDX-8030W)の管球劣化の影響およびX線回折装置に付属のソフトウェアでのスムージング処理の違いによるものである(原・木村, 2000)。

$$IC_{(GSJ)} = 1.06 \times IC_{(GS, Awan)} - 0.04, R = 1.00 \quad (4)$$

第3図には、Awan and Kimura(1996)で報告されたIC値



第2図 CIS標準値と当センターにおけるCIS試料の測定値との比較。

Fig. 2 Correlation between standard IC values of CIS and their values measured at Geological Survey of Japan.

と、合わせて未公表の測定結果を示している。これらの値は、(4)式を用いて、本報告のIC値に換算している。

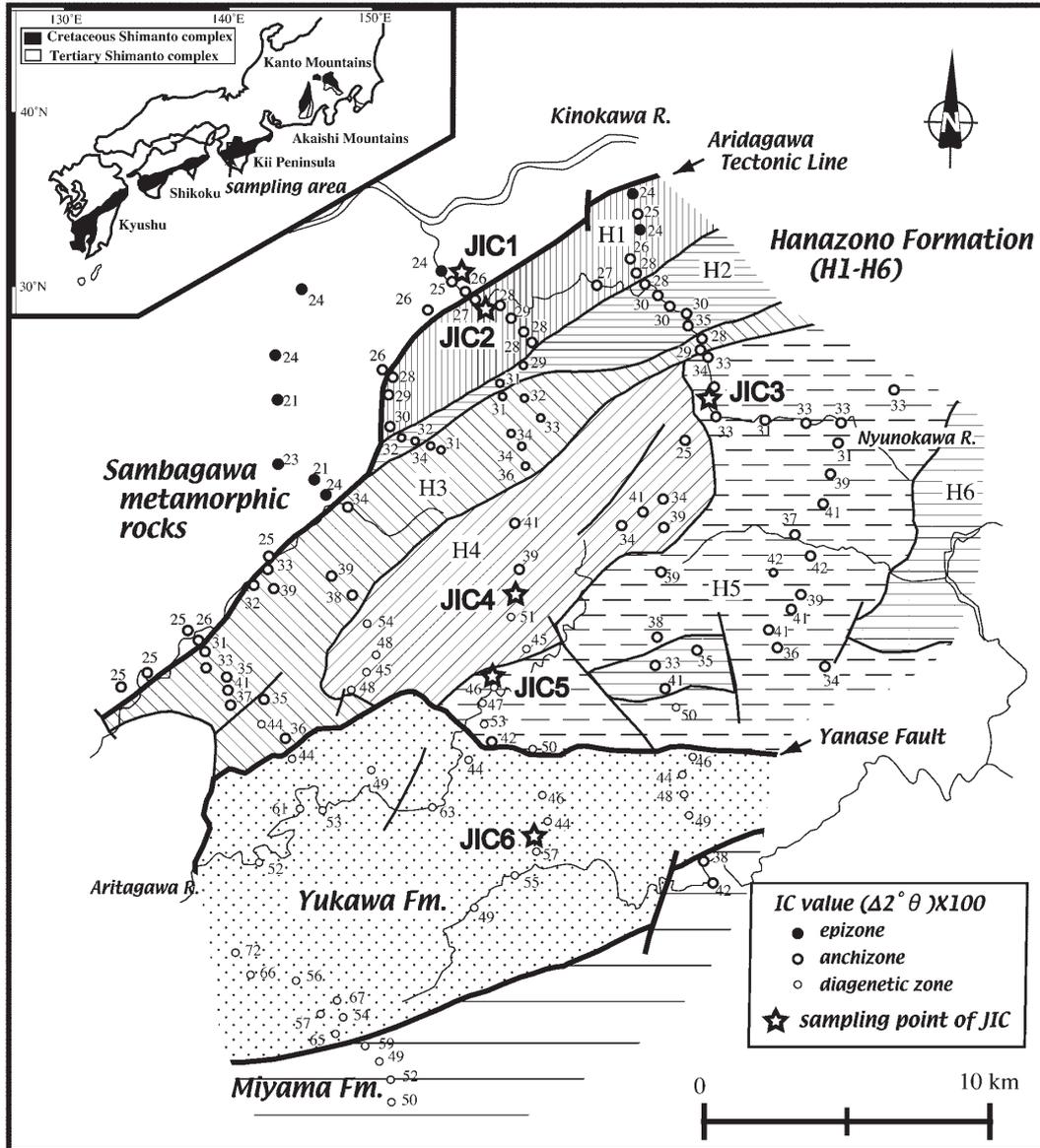
##### 4.2 地質概略と岩石記載

紀伊半島中央部では、有田川構造線を介して三波川変成岩類と四万十帯花園層が、また梁瀬断層を介して四万十帯花園層と湯川層が接する(栗本ほか, 1998; 紀州四万十帯団体研究グループ, 1991)。検討地域に分布する三波川変成岩類は無点紋帯に属し、主に泥質片岩と緑色片岩からなり、一部砂質片岩や石英片岩を伴う(Kurimoto, 1994など)。花園層は、緑色岩およびチャートを含む泥質混在岩を主体とし、一部砂岩や砂岩頁岩互層からなる。堆積年代は、Coniacian-Campanianである(栗本, 1982; Kurimoto, 1994)。湯川層は、主に砂岩や砂岩頁岩互層からなり、堆積年代はHauterivian-Turonianである(紀州四万十帯団体研究グループ, 1991)。

今回、JIC試料として6つの泥質岩試料(JIC1-JIC6)を作成した。それぞれの試料は、長径2-3cm以下の岩石片からなる。以下、JIC試料の岩相記載と当センターでの測定値(標準値)を示す。また薄片写真(単ニコル)を第4図に示す。

JIC1: 無点紋帯に属する三波川変成岩類の泥質片岩で、IC値は0.25を示す。主に泥質部と石英分結脈からなる。泥質部は、定向配列をなし高い干渉色を示す粘土鉱物と黒色不透明な筋からなる。またシルト大(径50 $\mu$ m程度)の石英・長石粒子を含む。石英分結脈は、微細な石英粒子からなり、膨縮・伸張を繰り返し一部で分断する。泥質部と石英分結脈は、0.3mm以下の幅で互いに平行配列し、これら

イライ結晶度測定標準試料(原ほか)



第3図 紀伊半島三波川変成岩類・四万十帯白亜系のIC値とJIC試料の採取地点 地質図の編纂は Kurimoto (1994)と栗本ほか(1998)に基づく。

Fig. 3 IC values from the Sambagawa metamorphic rocks and the Cretaceous Shimanto complex, and sampling points of JIC specimens in the Kii Peninsula, Southwest Japan. The geological map is compiled from Kurimoto (1994) and Kurimoto *et al.* (1998).

が泥質片岩の片理を形成する。

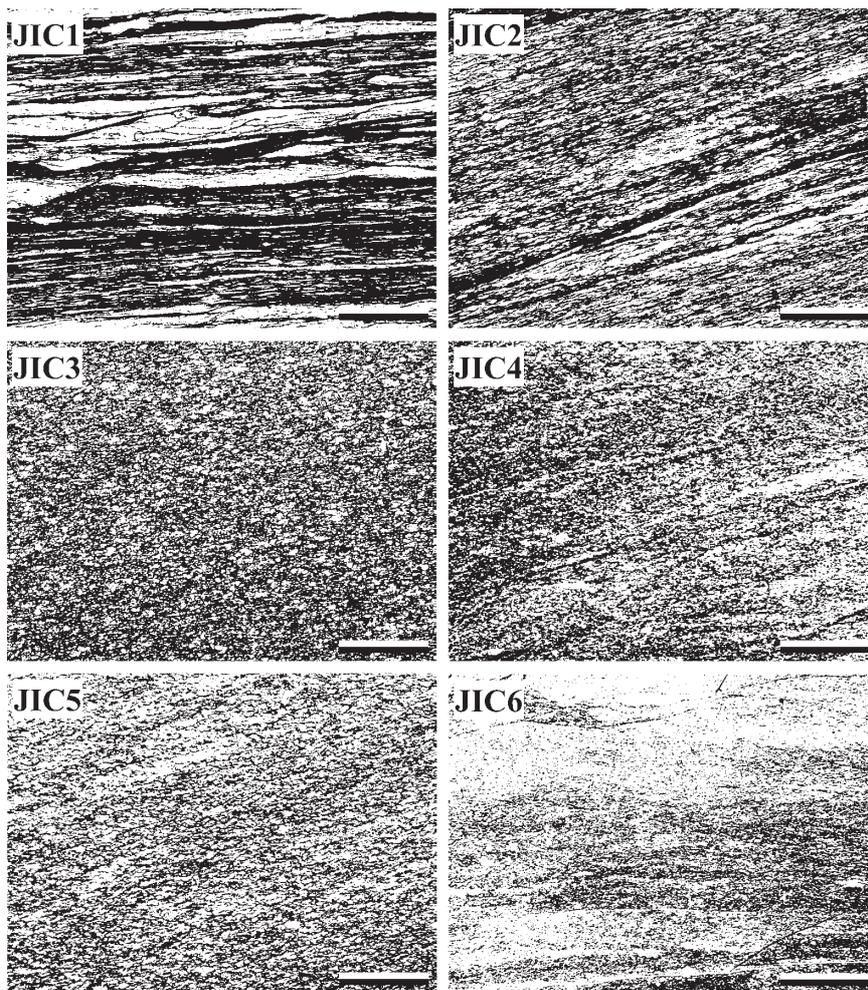
JIC2: 四万十帯花園層の千枚岩で、IC値は0.28を示す。定向配列をなし干涉色を示す粘土鉱物と黒色不透明な筋からなる。両者はほぼ並行に配列する。またシルト大の石英・長石を含み、特に石英粒子は劈開面に沿って引き延ばされ、一部ではレンズ状の形態をなす。

JIC3: 四万十帯花園層の黒色頁岩で、IC値は0.33を示す。定向配列をなす粘土鉱物とシルト大の石英・長石・不透明鉱物からなる。稀に長径10-20 μm程度の雲母鉱物類を含む。また黒色不透明な筋からなる劈開を伴う。部分的に、シルト大粒子からなる葉理が発達することがある。

JIC4: 四万十帯花園層の黒色頁岩で、IC値は0.44を示す。弱い定向配列を示す極微細な粘土鉱物からなり、少量ながら石英・長石を含む。また黒色不透明な筋からなる劈開が、不連続にわずかに認められる。

JIC5: 四万十帯花園層の黒色泥岩で、IC値は0.48を示す。極微細な粘土鉱物とシルト大の石英・長石・不透明鉱物からなる。粘土鉱物は弱い定向配列を示す。

JIC6: 四万十帯湯川層の黒色暗灰色泥岩で、IC値は0.56を示す。極微細な粘土鉱物からなり、シルト大の石英・長石・不透明鉱物を少量含む。また黒色不透明な筋からなる劈開が、弱く不連続に認められる。部分的に、シルト大粒



第4図 JIC試料の顕微鏡写真.

Fig. 4 Photomicrographs of JIC specimens (plane polarizer). Length of scale bars indicate 1mm.

子からなる葉理が発達することがある。

#### 4.3 JIC試料と変成相との対比

JIC試料の採取地域である紀伊半島中央部では(第3図),三波川変成岩類(無点紋帯)の緑色岩からはパンペリー石・緑泥石,一部アクチノ閃石およびローソン石の産出からパンペリー石・アクチノ閃石相(以下PA相),花園層(H1)はパンペリー石と緑泥石の産出からぶどう石・パンペリー石相(以下PP相)とされる(Kurimoto, 1994; 栗本, 1995)また第3図でIC値は,三波川変成岩類(無点紋帯)では0.21-0.26(mean=0.24,  $\sigma=0.016$ ),花園層(H1)では0.24-0.30(mean=0.27,  $\sigma=0.018$ )を示す.以上のことから,PA相の三波川変成岩類がepizoneに,PP相の花園層がanchizoneに相当する.

当センターで測定されるIC値と変成相との対応関係について,関東山地万場地域の秩父帯の例も挙げる.第5図には,万場地域の秩父帯におけるIC値を新に示す.この地域には,構造的低位から柏木層,万場層,上吉田層が分布する(大久保・堀口, 1969)また,玄武岩中の変成鉱物組み

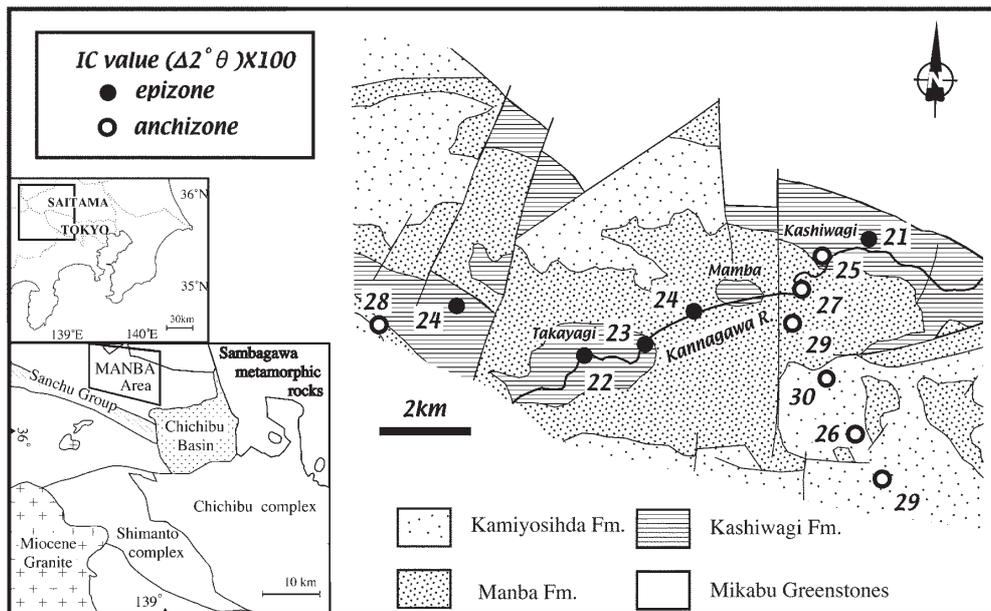
合わせによる変成度の検討がなされており,柏木層がPA相,万場層と上吉田層がPP相である(Hirajima and Banno, 1989).この地域の泥質岩試料(柏木層5個,万場層4個と上吉田層3個)について,IC値の測定を行った.柏木層は,0.21-0.25(mean=0.230,  $\sigma=0.016$ ,  $n=5$ )を示す.一方,万場層と上吉田層は,0.24-0.30を示す(mean=0.276,  $\sigma=0.021$ ,  $n=7$ ).その結果,上述の紀伊半島三波川変成岩類と四万十帯白亜系の例と同様に,epizoneがPA相に,anchizoneがPP相にほぼ相当する.

すなわちJIC標準値のepizone/anchizone境界は,PA相とPP相の境界にほぼ一致すると判断できる.一方,anchizone/diagenetic zone境界については,変成相のデータが乏しいこと,IC値のデータにばらつきが生じていることから,現段階では変成相との対比は行わない.

#### 4.4 ポリタイプとの関係

イライトのポリタイプは,温度に依存して一般に1Md, 1M, 2Mと変化することが知られている(Maxwell and Hower, 1967; Frey, 1987; Dalla Torre et al., 1994).こ

イライト結晶度測定標準試料(原ほか)



第5図 関東山地万場地域における秩父帯柏木層・万場層・上吉田層のIC値。地質図は、大久保・堀口(1969)に基づく。

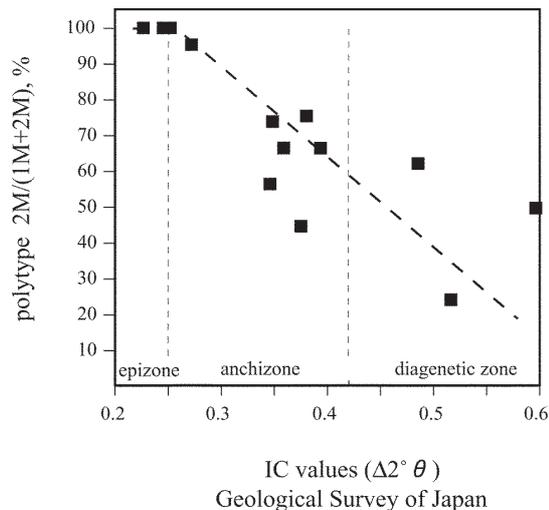
Fig. 5 IC values of the Kashiwagi, Manba and Kamiyoshida Formations in the Jurassic Chichibu complex from the Mamba area in the Kanto Mountains, central Japan. The geological map is compiled from Okubo and Horiguchi (1969).

これらのポリタイプの変化は、合成実験によって125-350の間で認められ(Velde, 1965), 古地温度を知る有効な手がかりとなる。そこで、当センターで測定されるIC値とポリタイプから、JIC標準値とポリタイプとの関係を見積もる。今回ポリタイプをTogashi(1979)に従い、1M(112)と2M(025)から2M/(2M+1M)比を求めた。2M/(2M+1M)比は全ポリタイプ中に対する2Mポリタイプの割合を示し、IC値が低下すると、この比が高くなる。

IC値と2M/(2M+1M)比の関係を第6図に示す。なお測定には、関東山地埼玉県名栗地域の秩父帯から採取した13個の泥質岩試料(原ほか, 1998)を用いた。2M型ポリタイプの割合は、diagenetic zoneからepizoneを通してIC値の減少に伴い増加する。epizoneでは、イライトはすべて2M型ポリタイプである。anchizoneでは約50-100%の2M型ポリタイプを含み、diagenetic zoneでは2M型ポリタイプの含有量は60%以下である。

4.5 JIC試料の研究室間対比

イライト結晶度の研究を進めている北海道大学・岡山大学・信州大学・静岡大学・早稲田大学・山口大学にJIC試料の測定を依頼した。すでに指摘したようにIC値の比較においては、試料調整方法より、X線回折装置や測定条件の違いがIC値に反映される可能性が高い(第1図)。そこで、各大学のX線回折装置と測定条件、さらに参考文献を第3表に示す。なお、北海道大学におけるJIC試料の測定は、Ueda et al. (2001)で示されているIC値と使用したX線回折装置と異なる。また静岡大学でのJIC試料の測定は、理



第6図 IC値とイライトポリタイプとの関係。

Fig. 6 Relation between IC values and illite polytypes.

学社製Rint2200を用いて行われた(小西ほか, 2000)。

JIC試料の測定結果を第7図および第4表に示す。以下に、測定結果から得られた関係式を示す。

$$IC_{(Hokkaido)} = 0.84 \times IC_{(JIC)} + 0.04, R = 0.98 \quad (5)$$

$$IC_{(Okayama)} = 0.89 \times IC_{(JIC)} + 0.06, R = 0.93 \quad (6)$$

$$IC_{(Shinshu)} = 0.66 \times IC_{(JIC)} + 0.06, R = 0.99 \quad (7)$$

$$IC_{(Shizuoka)} = 1.08 \times IC_{(JIC)} - 0.07, R = 0.99 \quad (8)$$

$$IC_{(Waseda)} = 1.25 \times IC_{(JIC)} - 0.05, R = 1.00 \quad (9)$$

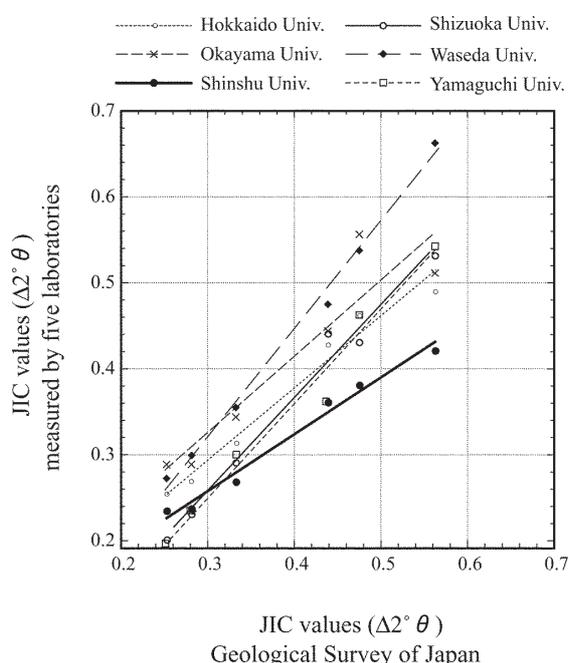
$$IC_{(Yamaguchi)} = 1.09 \times IC_{(JIC)} - 0.08, R = 0.99 \quad (10)$$

この様に、JIC試料の測定値から直線回帰式を求めること

laboratory (reference)	Diffractometer	voltage, ampere	divergence-scatter-receiving slits, scan speed
Geological Survey of Japan, AIST (Hara & Kimura,2000)	Jeol, JDX-8030W	40kV, 40mA	1°-1°-0.2mm, 0.01°/s
Division of Earth and Planetary Science, Hokkaido Univ. (Ueda <i>et al.</i> , 2001)	MAC Science, MX-Labo	35kV, 20mA	1°-0.8°-0.3mm, 0.5°/min
Department of Earth Sciences, Okayama Univ.	Rigaku, RAD-ICA	30kV, 15mA	1°-1°-0.3mm, 1°/min
Institute of Geoscience, Shizuoka Univ. (Konishi <i>et al.</i> , 2000)	Jeol, DX-GE3SC	40kV, 20mA	1°-1°-0.2mm, 0.02°/s
	Rigaku, Rint2200	40kV, 20mA	1°-1°-0.15mm, 0.02°/s
Department of Geology, Shinshu Univ. (Kanemoto & Otsuka, 2000)	Rigaku, Geiger-Flex RAD-III	40kV, 20mA	1°-1°-0.2mm, 1°/min
Institute of Earth Science, Waseda Univ.	Rigaku, Geiger Flex RAD-1B	40kV, 20mA	0.5°-0.5°-0.3mm, 0.01°/s
Department of Earth Sciences, Yamaguchi Univ.	Rigaku, Rint2500V	40kV, 40mA	1°-1°-0.15mm, 0.01°/s

第3表 各研究室で使用されているX線回折装置とその測定条件.

Table 3 X-ray diffractometer and measurement conditions using by each laboratory.



第7図 JIC標準値と6研究室によるその測定値の比較.

Fig. 7 Correlation between standard IC values of JIC and their values measured at six laboratories.

		JIC1	JIC2	JIC3	JIC4	JIC5	JIC6	equation
Geological Survey of Japan	DRY	0.26	0.29	0.35	0.50	0.54	0.67	
	EG	<b>0.25</b>	<b>0.28</b>	<b>0.33</b>	<b>0.44</b>	<b>0.48</b>	<b>0.56</b>	
Hokkaido Univ.	DRY	0.26	0.27	0.34	0.44	0.48	0.60	IC (Hokkaido) = 0.82 x IC (JIC) + 0.04, R=1.00
	EG	<b>0.26</b>	<b>0.27</b>	<b>0.31</b>	<b>0.43</b>	<b>0.46</b>	<b>0.49</b>	IC (Hokkaido) = <b>0.84 x IC (JIC) + 0.04, R=0.98</b>
Okayama Univ.	DRY	0.30	0.32	0.34	0.49	0.58	0.59	IC (Okayama) = 0.79 x IC (JIC) + 0.09, R=0.97
	EG	<b>0.29</b>	<b>0.29</b>	<b>0.34</b>	<b>0.44</b>	<b>0.56</b>	<b>0.51</b>	IC (Okayama) = <b>0.89 x IC (JIC) + 0.06, R=0.93</b>
Shinshu Univ.	DRY	0.24	0.24	0.29	0.40	0.04	0.51	IC (Shinshu) = 0.70 x IC (JIC) + 0.05, R=1.00
	EG	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.27</b>	<b>0.36</b>	<b>0.38</b>	<b>0.42</b>	IC (Shinshu) = <b>0.66 x IC (JIC) + 0.06, R=0.99</b>
Shizuoka Univ.	DRY	0.22	0.25	0.32	0.50	0.51	0.71	IC (Shizuoka) = 1.164x IC (JIC) - 0.09, R=1.00
	EG	<b>0.20</b>	<b>0.23</b>	<b>0.29</b>	<b>0.44</b>	<b>0.43</b>	<b>0.53</b>	IC (Shizuoka) = <b>1.08x IC (JIC) - 0.07, R=0.99</b>
Waseda Univ.	DRY	0.28	0.31	0.38	0.52	0.60	0.80	IC (Waseda) = 1.22 x IC (JIC) - 0.05, R=0.99
	EG	<b>0.27</b>	<b>0.30</b>	<b>0.36</b>	<b>0.48</b>	<b>0.54</b>	<b>0.66</b>	IC (Waseda) = <b>1.25 x IC (JIC) - 0.05, R=1.00</b>
Yamaguchi Univ.	DRY	0.21	0.23	0.32	0.44	0.51	0.66	IC (Yamaguchi) = 1.09 x IC (JIC) - 0.08, R=1.00
	EG	<b>0.19</b>	<b>0.24</b>	<b>0.30</b>	<b>0.36</b>	<b>0.46</b>	<b>0.54</b>	IC (Yamaguchi) = <b>1.09 x IC (JIC) - 0.08, R=0.99</b>

第4表 JIC標準値と6つの研究室におけるその測定値.

Table 4 Standard IC values of JIC and their values measured at six laboratories.

で,研究室間におけるIC値の対比が可能である.

### 5. 考察

#### 5.1 CIS試料によるIC値の比較

今までに論文で公表されたCIS試料の測定値をまとめ,当センターの測定結果を比較する.なお直線回帰式の引用には,論文の筆頭著者名をICに併記した.

研磨泥質岩片を用いた標準試料により,Kisch(1980)とKübler(1968)の研究室間におけるIC値の相関関係は以下の通りに表された(Warr and Rice,1994).

$$IC_{(Kübler)} = IC_{(Kisch)} + 0.04 \quad (11)$$

Warr and Rice(1994)は,CIS試料を提唱する際,Kisch(1991)による研磨泥質岩の標準試料も合わせて測定し,以下の相関関係を得ている.

$$IC_{(Warr)} = 1.511558 \times IC_{(Kisch)} - 0.029329 \quad (12)$$

これによると,CIS標準値でのanchizoneの範囲(0.25-0.42)は,Kisch(1991)の示すIC値では,0.18-0.30となる.

CIS試料の測定結果は,ホームページ上で21研究室の測

イライ結晶度測定標準試料(原ほか)

	regression equation	range of anchizone	
CIS; Warr and Rice (1994)	—	0.25	0.42
Heidelberg, Germany	—	0.25	0.42
this study (GSJ)	IC(CIS)=1.55 x IC(GSJ) -0.07	0.23	0.32
Ibaraki, Japan	—	0.23	0.32
Warr and Rice (1994)	IC(CIS)=1.511558 x IC(Kisch) -0.029329	0.19	0.30
Heidelberg, Germany	—	0.19	0.30
Merriman and Peacor (1999)	IC(CIS)=1.511564 x IC(Merriman) -0.02956	0.19	0.30
Nottingham, UK	—	0.19	0.30
Konishi <i>et al.</i> (2000)	IC(CIS)=1.48 x IC(Konishi) -0.09	0.24	0.34
Shizuoka, Japan	—	0.24	0.34
Ji and Browne (2000)	IC(CIS)=1.619800 x IC(Ji) -0.049909	0.19	0.29
Auckland, New Zealand	—	0.19	0.29
Jaboyedoff <i>et al.</i> (2001)	—	0.18	0.36
Lausanne, Switzerland	—	0.18	0.36

第5表 CIS標準値への換算後における各研究室でのanchizoneの範囲. 各研究室におけるanchizoneの範囲は, CIS標準値への換算によって与えられた回帰式より求められている.

Table 5 Range of anchizone after CIS calibration at each laboratory. Range of anchizone is estimated from the regression equation given by CIS calibration at each laboratory.

定値が示されているほか, 公表論文の中でも報告されている. 以下に, その例を挙げる.

Merriman and Peacor(1999)は, IC値とその他の古地温度指標との比較の中で, 以下の回帰式を示した.

$$IC_{(CIS)} = 1.511564 \times IC_{(Merriman)} - 0.02956 \quad (13)$$

この式から, CIS標準値でのanchizoneの範囲(0.25-0.42)は, Merriman and Peacor(1999)の示すIC値では0.18-0.30となる. その他, 小西ほか(2000)やJi and Browne(2000)によって, 以下の回帰式が求められている.

$$IC_{(CIS)} = 1.48 \times IC_{(Konishi)} - 0.09 \quad (14)$$

$$IC_{(CIS)} = 1.619800 \times IC_{(Ji)} - 0.049909 \quad (15)$$

またJaboyedoff *et al.*(2001)は, CIS標準値への換算で, anchizoneが0.18-0.36になることを示している. これら, すでに各研究室から報告されたCIS試料の測定値について, CIS標準値におけるanchizoneを中心に対応をまとめると第5表の様になる. CIS標準値への換算によるanchizoneの範囲は, 当センターを含めた6研究室では, 0.25-0.42より低い値を示す.

5.2 JIC標準値の評価

当センターで測定されたJIC試料について, CIS試料との比較と変成相への対比を行い, 古地温度指標としての有効性について評価を行う.

CIS標準値と変成相との関係は, Warr(1996)によるニュージーランド南島の泥質岩の検討により, epizone(<0.25)が緑色片岩相(以下GS相)に, anchizone(0.25-0.42)がPA相ないしPP相に, diagenetic zone(0.42<)が沸石相(以下ZL相)に対応された. CIS標準値とJIC標準値の間では, epizone/anchizone境界での値は, CIS標準値が0.25に対し, JIC試料により標準化したJIC試料の値は0.21を示す(第6表). またepizone/anchizone境界と変成

JIC			CIS	
metapelitic zone	metamorphic facies	calibrated GSJ data by equation (3)	metapelitic zone	metamorphic facies
diagenetic zone	zeolite facies		diagenetic zone	zeolite facies
0.42			diagenetic zone	zeolite facies
anchizone	prehnite - pumpellyite facies	0.32		
0.25			anchizone	prehnite - pumpellyite facies / pumpellyite - actinolite facies
epizone	pumpellyite - actinolite facies	0.23		
			epizone	greenschist facies

第6表 CIS標準値とJIC標準値および変成相の比較.

Table 6 Correlation between standard IC values of JIC and CIS, and metamorphic facies.

相との対応は, CIS標準値ではGS相とPA相の境界に, JIC標準値ではPA相とPP相の境界に相当し, 若干異なる変成相を示す(第6表). 一般には, epizoneがGS相ないしPA相に, anchizoneがPA相-PP相に, diagenetic zoneがZL相に対応する(Kisch, 1987). epizone/anchizone境界については, IC値と変成相との対応はある程度の幅をもって表現されているため, JIC標準値とCIS標準値における変成相との対応は概ね一致しているといえる. なお, JIC試料のdiagenetic zoneについては, 変成相の資料がないので, ZL相とみなした. また当センターで測定されるIC値とイライタイプとの関係から, JIC標準値は, 2M型ポリタイプの割合が, epizoneでは100%, anchizoneで50-100%になるといえる.

anchizoneの温度条件は, Warr(1996)は変成相との対応から175-320, Kisch(1987)はビトリナイト反射率や流

体包有物との比較・検討から200-300 として  
 いる。しかし両者のIC値は(12)式の関係にある  
 ため、1対1の対応ではない。IC値での温度条  
 件の評価は、研究室間で異なる値を示すこと  
 のほかに、検討を行った地質体によっても変  
 化する。極端な例では、高い地温勾配を有す  
 る現在の地熱地帯、ニュージーランドのタウ  
 ボ火山地域では、ドリルホールでの温度実測  
 値とコア試料から得られたIC値との相関関  
 係において、anchizoneの最低温度が280  
 以上と高い値を示す(Ji and Browne, 2000)。  
 IC値の温度評価は、地温勾配や、被熱温度  
 と時間の関係、岩石の熱伝導度、さらに熱事  
 変の回数など、対象とする地質体が経験した  
 熱変成履歴によって変化することを加味しな  
 ければならない。厳密な意味では、各研究  
 室や地質体ごとに古地温度計を構築しなけ  
 ればならないが、実際は試料採取などの点  
 で、地質体に適応される古地温度計の種類  
 が制限されることから困難である。すなわ  
 ち、より条件に近いものを適用していくこ  
 とが必要になる。

anchizone/diagenetic zone境界は炭化水  
 素の熟成度により、anchizone/ epizone  
 境界はクロリトイドの産出により定義され  
 た(Kisch, 1991)。一方、本来のイライ  
 ト結晶度の定義である結晶格子面間隔の厚  
 さからanchizoneの範囲を求めることが  
 進められている(例えば、Merriman et al.,  
 1990; Jiang et al., 1997; Jaboyedoff et  
 al., 2001など)また複数の古地温度指標  
 を組み合わせて、総合的に評価することが  
 求められている(Kisch, 1987; Merriman  
 and Frey, 1999)。Merriman and Frey  
 (1999)とMerriman and Peacor (1999)  
 は、イライト結晶度とイライト結晶格子の  
 厚さの関係、さらにイライト/スメクタイト  
 混合層におけるイライトの割合、ポリタイ  
 プとの相関、他の古地温度指標(ビトリナイ  
 ト・炭化水素の熟成度・コドントカラーイン  
 デックス)との対応関係をまとめて示して  
 いる。CIS標準値への換算の結果、当セン  
 ターから得られた(3)式とMerriman and  
 Peacor (1999)で示された(13)式は、他  
 の研究室に比べ非常に良い相関関係を示  
 す。Merriman and Peacor (1999)とのデ  
 ータの相関式は(3)と(13)式より、以下が  
 導かれる。

$$IC_{(GSJ)} = 0.975 \times IC_{(Merriman)} + 0.026 \quad (16)$$

これにより、Merriman and Frey (1999)と  
 Merriman and Peacor (1999)が示したIC  
 値の対応表と当センターのIC値をまとめる  
 (第7表)。

第7表は、当センターで測定されたIC値  
 およびJIC標準値において、現在の段階で  
 一番適した他の古地温度指標との対応表  
 である。しかしanchizone/diagenetic zone

JIC, this study					Merriman and Frey (1999)										
JIC	metapelitic zone	metamorphic facies	polytype 2M/(1M+2M)%	calibrated GSJ data by equation (16)	IC values of Merriman and Frey (1999)	temperature (°C)	TEM mean illite crystallite thickness (Å)	% illite in I/S	vitritite reflectance R <sub>v</sub> %	conodont alternation index (CAI)					
0.42	diagenetic zone	zeolite facies	50	0.44	~ 1.0	~ 100	220	95	0.5	1, yellow					
					0.6	~ 200					2	2, 3, light brown- brown			
					0.42								380	3	4, dark brwn
					0.3										
0.27	0.25	~ 300	>99	5.5											
0.36	low	anchizone	prehnite - pumpellyite facies	100	0.27	~ 300	520	>99	4	5.5					
0.3	middle										3	4, dark brwn			
0.25	high												5, black		
0.25	epizone	pumpellyite - actinolite facies	100	0.27	0.25	~ 300	520	>99	4	5.5					

第7表 JIC標準値の変成温度区分と他の温度指標との比較。他の温度指標の資料は、Merriman and Frey(1999)による。

Table 7 Metamorphic temperature zone of JIC standard values and comparison with other paleo-geothermal indicators. Data of other paleo-geothermal indicators are based on Merriman and Frey(1999).

については、今回提示できる変成相との関係を示す資料がなく、今後の検討を要する。そしてさらに他の古地温度指標を組み入れ、JIC試料の古地温度指標としての価値を高める必要がある。

## 6 まとめ

イライト結晶度測定における標準試料であるJIC試料を作成した。また国際標準試料であるCIS試料による研究室間比較をふまえ、JIC試料の標準試料としての有効性について評価を行った。その結果は、以下の通りである。

1) 当センターと静岡大学とのIC値の研究室間対比の場合、試料作成方法よりも、X線回折装置と測定条件の違いが大きく反映される。

2) Warr and Rice(1994)の提唱したCIS試料の標準値

## イライト結晶度測定標準試料(原ほか)

と当センターのCIS試料の測定値は、線型比例の関係にあり、高い相関関係を示す。CIS標準値への回帰式は、 $I_{C(CIS)} = 1.55 \times I_{C(GSI)} - 0.07$  ( $R=0.99$ )である。CIS標準値への換算の結果、当センターのIC値は0.23-0.32の範囲が、CIS標準値のanchizoneの範囲に相当する。

3) イライト結晶度測定における標準試料としてJIC試料を作成した。JIC試料は、紀伊半島中央部の三波川変成岩類および四万十帯花園層と湯川層から採取された泥質岩6試料からなり、IC値はそれぞれ0.25、0.28、0.33、0.44、0.48、0.56を示す。

4) JIC標準値は、epizoneがパンペリー石-アクチノ閃石相、anchizoneがぶどう石-パンペリー石相の変成温度に対応する。

5) JIC標準値とイライトポリタイプとの関係は、2M型ポリタイプの割合が、epizoneでは100%、anchizoneで50-100%になる。

6) CIS標準値への換算による研究室間比較と変成温度との対比から、JIC試料はイライト結晶度の解析において、有効な標準試料となりうる。そしてJIC標準値へ換算することにより、異なる研究室で測定されたIC値の比較が可能となる。

**謝辞:** 本研究を進めるにあたり、静岡大学理学部地球科学教室の狩野謙一教授および小西祐作氏(現石油公団)には、研究当初から議論をしていただき、また研究室間対比の資料を提供して頂いた。ドイツ、ハイデルベルグのルプレヒト・カールス大学L. N. Warr教授にはCIS試料を提供していただいた。またJIC試料の測定は、北海道大学理学部の植田勇人博士(現新潟大学院自然科学研究科)、岡山大学大学院自然科学研究科の三上禎次氏、信州大学理学部の大塚 勉助教授および金本高明氏(現(株)日さく)、静岡大学理学部地球科学教室の福井亜希子氏、早稲田大学教育学部地球科学教室の淡路勲太氏、山口大学理学研究科の鎌田祥仁博士および岡村俊明氏(現(株)パスコ)に御協力をいただいた。また地球科学情報研究部門の中江 訓博士には本稿を査読して頂き、大変有益な御意見を頂いた。以上の方々に、感謝いたします。

## 文 献

- Awan, M. A. and Kimura, K.(1996) Thermal structure and uplift of the Cretaceous Shimanto Belt, Kii Peninsula, Southwest Japan: An illite crystallinity and illite b<sub>0</sub> lattice spacing study. *The Island Arc*, **5**, 69-88.
- Dalla Torre, M., Stern, W. B. and Frey, M.(1994) Determination of white K-mica polytype ratios: comparison of different XRD methods. *Clay Minerals*, **29**, 717-726.
- Frey, M. (1987) Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In Frey M. ed., *Low temperature metamorphism*, Chapman and Hall, New York, 9-58.
- 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. *地質雑*, **106**, 264-279.
- 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. *地質雑*, **104**, 705-717.
- Hirajima, T. and Banno, S. (1989) Records of high pressure metamorphism in the so-called "superficial nappe" in the Chichibu belt, Japan. *Bull. Soc. geol. France*, **8**, 661-664.
- Jaboyedoff, M., Bussy, F., Kübler, B. and Thelin, Ph. (2001) Illite "Crystallinity" revisited. *Clays and Clay Minerals*, **49**, 156-167.
- Ji, J. and Browne, P. R. L.(2000) Relationship between illite crystallinity and temperature in active geothermal system of New Zealand. *Clays and Clay Minerals*, **48**, 139-144.
- Jiang, W. T., Peacor, D. R., Arkai, P., Toth, M. and Kim, J. W.(1997) TEM and XRD determination of crystallite size and lattice strain as a function of illite crystallinity in pelitic rocks. *J. Metamorphic Geol.*, **15**, 267-281.
- 金本高明・大塚 勉(2000)イライト結晶度からみた長野県諏訪湖南方における三波川帯・秩父帯・四万十帯の弱変成作用. *信州大学理学部紀要*, **35**, 11-29.
- Kisch, H. J.(1980) Illite crystallinity and coal rank associated with lowest-grade metamorphism of the Tavayanne greywacke in the Helvetic zone of the Swiss Alps. *Eclogae geol. Helv.*, **73**, 753-777.
- Kisch, H. J.(1987) Correlation between indicators of very low-grade metamorphism. In Frey M. ed., *Low temperature metamorphism*, Chapman and Hall, New York, 227-300.
- Kisch, H. J.(1991) Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction setting, and interlaboratory samples. *J. Metamorphic Geol.*, **9**, 665-670.
- 紀州四万十帯団体研究グループ(1991)和歌山県中東部の日高川層群湯川層・美山層 紀伊半島四万十帯帯の研究(その12) *地球科学* **A5**, 19-38.
- 小林祐哉・大塚 勉(2002)変形構造とイライト結晶度からみた美濃帯左門岳ユニットの形成過程. *地質雑*, **108**, 59-73.
- 小西祐作・鈴木誠之・狩野謙一(2000)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. *静岡大学地球科学研究報告* **27**, 11-15.

- Kübler, B.(1968) Evaluation quantitative du metamorphism par la cristallinité de l'Illite. *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, **2**, 385-397.
- 栗本史雄(1982)和歌山県高野山南西方のいわゆる秩父系-上部白亜系花崗層. *地質雑* **88**, 901-914.
- Kurimoto, C.(1994) Geology of the Kudoyama area in the western Kii Peninsula, Southwest Japan, with reference to disappearance of the Chichibu terrane. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **45**, 235-255.
- 栗本史雄(1995)和歌山県北部の三波川変成岩類のK-Ar年代. *地質調査所月報* **A6**, 517-525
- 栗本史雄・牧本 博・吉田史郎・高橋裕平・駒沢正夫(1998)20万分の1地質図幅和歌山. *地質調査所*.
- Maxwell, D. T. and Hower, J.(1967) High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian belt series. *Am. Mineral.*, **52**, 843-857.
- Merriman, R. J. and Frey, M. (1999) Patterns of low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In Frey, M. and Robinson, D. eds., *Low-grade Metamorphism*, Blackwell, 60-107.
- Merriman, R. J. and Peacor, D. R.(1999) Very low-grade metapelite: mineralogy, microfabrics and measuring reaction progress. In Frey, M. and Robinson, D., eds., *Low-grade Metamorphism*, Blackwell, 10-60.
- Merriman, R. J., Roberts, B. and Peacor, D. R.(1990) A transmission electron microscope study of white mica crystallite size distribution in mudstone to slate transitional sequence, North Wales, UK. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **106**, 27-40.
- 大久保雅弘・堀口万吉(1969)万場地域の地質. *地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)*, 地質調査所, 66p.
- Ohmori K., Taira A., Tokuyama H., Sakaguchi A., Okamura M. and Aihara A.(1997) Paleothermal structure of the Shimanto accretionary prism, Shikoku, Japan: Role of an out-of-sequence thrust. *Geology*, **25**, 327-330.
- 大塚 勉・渡辺晃二(1992)イライト結晶度からみた美濃帯泥質岩の弱変成作用. *地質学論集*, no.32, 135-145.
- Robinson, D. , Warr, L. N. and Bevins, R. E.(1990) The illite 'crystallinity' technique: a critical appraisal of its precision. *J. Metamorphic Geol.*, **8**, 333-344.
- Sakaguchi A. (1996) High paleogeothermal gradient with ridge subduction beneath the Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Geology*, **24**, 795-798.
- Tanabe, H. and Kano, K.(1996) Illite crystallinity study of the Cretaceous Shimanto Belt in the Akaishi Mountains, eastern Southwest Japan. *The Island Arc*, **5**, 56-68.
- Togashi, Y.(1979) Polytypes and expandability of sericite from the Itaya Kaolin clay deposit, Northeast Japan. *Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **74**, 100-113.
- Ueda, H., Kawamura, M. and Iwata, K. (2001) Tectonic evolution of Cretaceous accretionary complex in the Idonnappu Zone, Urakawa area, central Hokkaido, northern Japan: with reference to radiolarian ages and thermal structure. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **107**, 81-98.
- Underwood, M. B., Laughland, M. M. and Kang, S. M.(1993) A comparison among organic and inorganic indicators of diagenesis and low-temperature metamorphism, Tertiary Shimanto Belt, Shikoku, Japan. *Geol. Soc. Amer., Special Paper*, no.273, 45-61.
- Velde, B.(1965) Experimental determination of muscovite polymorph stabilities. *Am. Mineral.*, **50**, 436-449.
- Warr, L. N.(1996) Standardized clay mineral crystallinity data from the very low-grade metamorphic facies rocks of southern New Zealand. *Eur. Jour. Mineral.*, **8**, 115-127.
- Warr, L. N. and 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 Mineralogist*, **36**, 1453-1474.
- Warr, L. N. and Rice, A. H. N.(1994) Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. *J. Metamorphic Geol.*, **12**, 141-152.

(受付:2003年7月14日;受理:2003年9月25日)