

# インド、カピラ城を構築していた レンガのX線回折分析

沢 勲 Isao SAWA (大阪経済法科大学教授)  
河野 久征 Hisayuki KOHNO (理学電機工業大阪分析センター長)  
網干 善教 Yoshinori ABOSHI (関西大学文学部教授)

Analysis by X-Ray Diffraction Method of  
Brick Sample from Kapilavastu, India

## ABSTRACT

Kapilavastu(Gorakhpur).—lying between  $26^{\circ} 5' 15''$  and  $27^{\circ} 28' 45''$  N.lat, and between  $83^{\circ} 7'$  and  $84^{\circ} 29'$  E.long.; with an area of 4578 square miles. Kapilavastu—ancient City and the capital of the Sakyas, Uttar Pradesh State, north-eastern of India. It was the birth-place of the Buddha. It is also known as Kapilavastu, Kapilapura or Kapilahvayapura.

It can be suggested that these facts are related to the chemical composition formation; the crystal structure (Hexagonal System) and lattice constants brick sample in Kapilavastu by analysis of X-Ray diffraction method. The lattice constants [ $a=4.8764 \text{ \AA}$  and  $c=5.4109 \text{ \AA}$  or  $(c/a)=1.1096$ ] were obtained by the method of least squares from the reflection patterns of the diffractometer.

## 1 はじめに

Kapilavastuは、インドの東北地方にあり、ウッタル・プラデッシュ州(Uttar Pradesh state)、バスティ県(Vastu)、カピラバースト・アンシート市(Kapilavastu・Ancient City)にある。Kapilavastu(Gorakhpur)は、北緯( $26^{\circ} 5' 15'' \sim 27^{\circ} 28' 45''$ )と東経( $83^{\circ} 7' \sim 84^{\circ} 29'$ )の地点にある<sup>1)</sup>。Kapilavastuとは、釈迦が、29年にわたって人類救済のために考え続けながら、生活し

ていた場所である<sup>2)</sup>。釈迦は、釈迦族の王シュッドーダナ(Suddhodana)とその妃マヤー(Māyā)の子として、紀元前654年ルンビニで生まれた。ルンビニは、現在、ネパール王国のバスティ地方のバタリヤ村である。釈迦族は、インド・ネパール国境沿いの小国であるKapilavastuを支配していた<sup>2)</sup>。

ゴータマ・シッタルタの姓はゴータマ(Gotama: 釈迦族全体の姓)、名はシッタルタ(Siddhārta: 悉達多)である。シッタルタは、生後7日目に母を失い、その後は叔母のマハーブラジャーパティーに育てられた。釈迦とは、仏教の開祖者であり、サンスクリット語のシャーキャムニ:Sākyamuni: 釈迦牟尼)の略称である。一方、釈尊とは、釈迦牟尼世尊の略称である。人は、ゴータマ・シッタルター釈迦牟尼仏とも言っている。ゴータマ・シッタルター釈迦牟尼仏に関する学問上の問題は、いろいろある。その中で、人種はモンゴル系あるいはアーリヤ系である。一方、死没年は、前483年か、前383年あるいは前543年かである。

筆者は、ゴータマ・シッタルタにとって29年間にわたる居住のカピラ城に心が動かされた。カピラ城の地下室において、瞑想に耽ることが多い釈迦の周辺にあるレンガとは、どれだけ幸せなのかを感じた。そのレンガの結晶構造とは、格子定数とは、「……を……」どうなっているのかを分析するため、X線回折を行った<sup>7)~11)</sup>。

X線回折の分析とデータ処理に関しては、コンピュータのフォートラン、C言語およびBASICを用いた<sup>12)~14)</sup>。コンピュータによる定性分析には、3種類を用いた。すなわち、①ピーク・サーチ、②1次検索、③2次検索である。その結

果、次の結果を得ることができた。結晶構造は六方晶系であり、格子定数のa軸は $a = 4.8764 \text{ \AA}$ であり、c軸は $c = 5.4109 \text{ \AA}$ である。そして軸比( $c/a$ )は1.1096であることが分かった。

## 2 実験方法と実験結果

### 2. 1 ピーク・サーチの定性分析

試料は、インドの東北地方にあるカピラ城に構築していたレンガである(付録Fig. 5と6)。このレンガをボールミルで200メッシュ以下に粉碎した。測定装置は、理学電機製のX線回折装置RINT-1500(モノクロメータ使用)である。ピーク・サーチの定性分析の測定条件は、次のとおりである<sup>3), 6)</sup>。

①管球(Cu) ②管電圧(50kV) ③管電流(200mA) ④ゴニオメータ(広角ゴニオメータ) ⑤サンプリング幅( $0.020^\circ$ ) ⑥走査速度( $3,000^\circ/\text{min}$ ) ⑦発散スリット( $1^\circ$ ) ⑧散乱スリット( $1^\circ$ ) ⑨受光スリット( $0.30\text{mm}$ ) ⑩アタッチメント(標準試料ホルダー)であり、平滑化点数は9である。データ処理の波長は $1.54056 \text{ \AA}$ である<sup>3), 6)</sup>。

このデータ処理に用いたコンピュータのプログラム言語は、FORTRAN, BASICおよびC言語である。その結果、この定性分析のチャートはFig.1のとおりである。

回折角度は、 $\text{CuK}\alpha$ 線の $2\theta$ を( $3,000 \sim 80,000$ ) degの範囲で行った。Fig.1の定性分析を行うため、ピーク・サーチを行ったものがTable 1である。

Table 1における定性分析のピーク・サーチの番号を1から78までの範囲内でカウントを行った。この時、回折角度( $2\theta$ )は、( $8,760 \sim 79,840$ ) degの範囲である。面間隔 $d$  ( $\text{\AA}$ )は、ブラッグの反射条件式として

$$n\lambda = 2d \sin \theta \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\lambda$  : 波長 ( $\text{\AA}$ )  
 $d$  : 面間隔 ( $\text{\AA}$ )  
 $\theta$  : 回折角度 (deg)

が求められる。

この角折角度と波長によって計算した面間隔の範囲は、Table 1のとおりで、( $10.08604 \sim 1.20034$ )  $\text{\AA}$ である。Table 1における相対強度が7以上になっているピーク番号は、No.7(31075cps=26%), No.22(122374cps=100%), No.36(7900cps=7%), No.46(7910cps=7%), No.55(10409cps=9%), およびNo.62(7712cps=7%)である。

一方、半値幅の大きい値は、 $0.30^\circ$ 以上の場合、ここでは、4通りのグループに分類できる。第1グループでは $0.300^\circ$ である。すなわちNo.34, No.35, No.42, No.43, No.46およびNo.64の5ピークである。第2グループでは、 $0.330^\circ$ である。すなわち、No.4とNo.21のピークである。第3グループでは、 $0.360^\circ$ である。すなわち、No.33, No.34およびNo.58のピークである。そして、第4グループでは、 $0.390^\circ$ である。すなわち、No.6のピークである。Table 1における $\text{SiO}_2$ (Quartz, Low)項目は格子定数の計算を行なうために用いた表である。

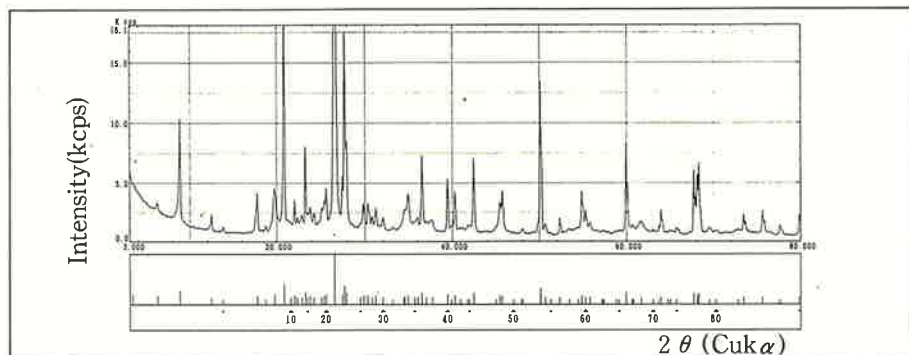


Fig.1 X-Ray Diffraction Chart of Peak Search System of Brick Sample from Kapilavastu, India

Table 1 X-Ray Diffractograms of Brick Sample from Kapilavastu by Qualitative Analysis of Peak Search

ピークNo.	回折角度 $2\theta (^{\circ})$	面間隔 $d (\text{\AA})$	強度値 $I (\text{cps})$	半価幅 $\Delta (^{\circ})$	相対強度 $I/I_0$	SiO <sub>2</sub> (Quartz, Low)		
						面間隔 $d (\text{\AA})$	相対強度 $I/I_0$	面指数 $hkl$
1	8.760	10.08604	3825	0.180	4			
2	13.620	6.49603	1121	0.120	1			
3	13.820	6.40246	1204	0.150	1			
4	14.900	5.94073	1012	0.330	1			
5	17.580	5.04067	3272	0.210	3			
6	19.660	4.51181	2678	0.390	3	4.257	22	1 0 0
7	20.840	4.25893	31075	0.210	26			
8	21.120	4.20310	2334	0.120	2			
9	21.980	4.04055	2056	0.210	2			
10	22.200	4.00100	1955	0.180	2			
11	22.380	3.96923	2152	0.150	2			
12	22.640	3.92423	2107	0.210	2			
13	23.220	3.82750	2506	0.150	3			
14	23.500	3.78253	3117	0.210	3			
15	24.020	3.70181	2487	0.240	3			
16	24.300	3.65978	2387	0.270	2			
17	24.560	3.62163	1948	0.180	2			
18	24.840	3.58143	1944	0.240	2			
19	25.140	3.53937	2258	0.180	2			
20	25.300	3.51735	2440	0.150	2			
21	25.600	3.47681	2457	0.330	3	3.342	100	1 0 1
22	26.600	3.34832	122374	0.210	100			
23	27.080	3.29005	3270	0.150	3			
24	27.460	3.24538	5224	0.210	5			
25	27.880	3.19744	5336	0.270	5			
26	29.460	3.02945	1980	0.180	2			
27	30.200	2.95688	2071	0.180	2			
28	30.480	2.93035	1959	0.150	2			
29	30.780	2.90247	2247	0.150	2			
30	31.240	2.86078	1999	0.120	2			
31	31.700	2.82030	1699	0.120	2			
32	31.800	2.81166	1624	0.180	2			
33	33.220	2.69465	2290	0.360	2			
34	34.440	2.60194	2030	0.360	2			
35	35.640	2.51703	3430	0.300	3			
36	36.520	2.45837	7900	0.240	7	2.457	8	1 1 0
37	36.880	2.43520	2426	0.120	2			
38	37.000	2.42758	2401	0.150	2			
39	37.660	2.38653	1390	0.180	2			
40	38.560	2.33288	1052	0.240	1			
41	38.760	2.32130	1102	0.210	1	2.282	8	1 0 2
42	39.420	2.28394	7119	0.300	6			
43	40.260	2.23820	3976	0.300	4			
44	40.900	2.20465	1195	0.240	1			
45	41.780	2.16022	1291	0.240	2			

ピークNo.	回折角度	面間隔	強度値	半価幅	相対強度	SiO <sub>2</sub> (Quartz, Low)		
	2θ (°)	d (Å)	I (cps)	Δ (°)	I / I <sub>0</sub>	面間隔 d (Å)	相対強度 I / I <sub>0</sub>	面指数 h k l
46	42.420	2.12910	7910	0.300	7	2.127	6	2 0 0
47	43.340	2.08601	1031	0.150	1			
48	44.100	2.05181	936	0.210	1			
49	44.740	2.02393	1740	0.120	2			
50	45.000	2.01284	2387	0.210	2			
51	45.760	1.98116	4016	0.210	4	1.9792	4	2 0 1
52	47.760	1.90276	842	0.180	1			
53	48.120	1.88936	825	0.210	1			
54	49.220	1.84968	1025	0.150	1			
55	50.100	1.81924	10409	0.180	9	1.8179	14	1 1 2
56	50.580	1.80309	1258	0.240	2	1.8021	< 1	0 0 3
57	52.460	1.74281	819	0.150	1			
58	54.200	1.69090	1263	0.360	2			
59	54.820	1.67323	4310	0.180	4			
60	55.280	1.66039	2044	0.180	2	1.6591	2	1 0 3
61	57.220	1.60862	1013	-----	1	1.6802	< 1	2 1 0
62	59.920	1.54243	7712	0.180	7	1.5418		
63	61.660	1.50301	1229	0.150	2			
64	62.500	1.48481	967	0.300	1			
65	62.800	1.47844	1019	0.180	1			
66	63.420	1.46547	1012	0.210	1	1.4536	1	1 1 3
67	64.000	1.45358	2447	0.210	2			
68	64.940	1.43480	1250	0.180	2			
69	65.380	1.42620	1540	0.120	2			
70	65.740	1.41926	1740	0.180	2	1.4189	< 1	3 0 0
71	67.700	1.38286	4059	0.180	4	1.3820	6	2 1 2
72	68.100	1.37571	4606	0.150	4	1.3752	7	2 0 3
73	68.260	1.37287	5384	0.180	5	1.3718	8	3 0 1
74	72.560	1.30174	842	0.240	1	1.2880	2	1 0 4
75	73.440	1.28830	2197	0.210	2			
76	75.620	1.25648	2959	0.210	3	1.2558	2	3 0 2
77	77.600	1.22930	1267	0.240	2	1.2285	1	2 2 0
78	79.840	1.20034	2213	0.210	2	1.1999	2	2 1 3

## 2.2 一次検索の定性分析

一次検索の定性分析は、ピーク・サーチの定性分析と異って、次のような測定条件を設定した。

①管球：Cu②管電圧：50kV③管電流：200mA④モノクロメーター（使用）⑤受光スリット：0.60mm⑥ゴニオメータ：広角ゴニオメータ⑦サンプリング幅：0.020°⑧走査速度：3,000°/min⑨発散スリット：1°⑩散乱スリット：1°および⑪アタッチメント：標準試料ホルダーである。一方、データ処理に関しては、波長：1.

54066 Åおよび平滑化点数は9として行った<sup>3),6)</sup>。

一次検索の定性分析を行うため、回折角度( $2\theta=3,000\sim80,000$ )の範囲を示したのがFig. 2である。

Fig.2におけるX線強度値として7000cps以上になっている回折角度( $2\theta$ )は、No.7の $2\theta=20.840$ で31075cps, No.22の $2\theta=26.600$ で122374cps, No.36の $2\theta=36.520$ で7900cps, No.42の $2\theta=39.420$ で7119cps, No.46の $2\theta=42.420$ で7910cps, No.55の $2\theta=50.100$ で10409cpsおよびNo.62の $2\theta=59.920$ で7712cpsである。この中で10kcps以上は、No.22とNo.55である。

検索条件として、①検索ファイルは鉱物ファ

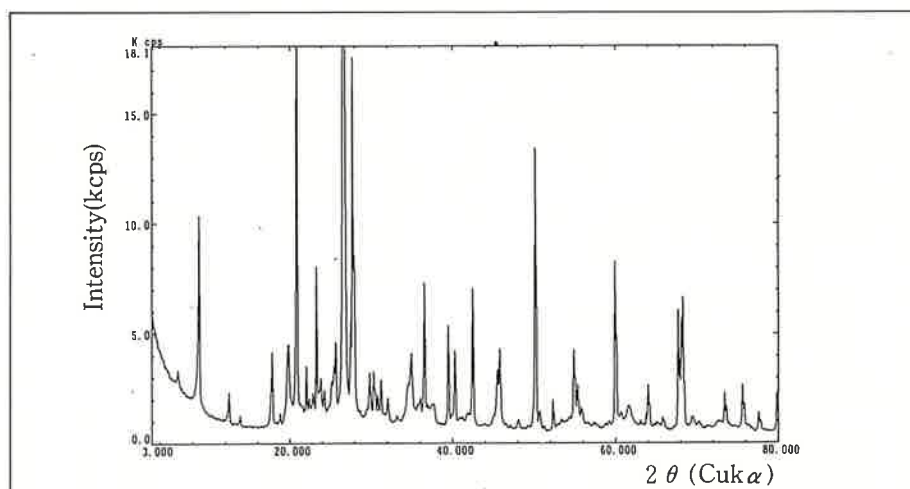


Fig.2 X-Ray Diffractograms of Brick Sample from Kapilavastu by Qualitative Analysis of 1st Search-Match

イル ②検索方法はファイル1だけ検索する ③  
元素指定方法は指定元素のみから成るものを選  
定した。主成分はAl, SiおよびFeであり、微成  
分はMg, Na, K, TiおよびPであり、不確定成  
分はH, OおよびCである<sup>4)</sup>。

信頼性係数計算方法は、角度および強度因子  
を用いた、さらに、信頼性係数の再評価を行っ  
た。この時、元素標準ピーク本数は12本以上で、  
最低一致本数は8本以上および信頼性係数を2  
以上とした。これらの条件を満足させて表示し  
たのがTable 2である。

Table 2において、一次検索として50個の化学  
式を引き出すことができた。Table 2における化  
学式の中で、元素標準ピーク本数は(12~18)  
であり、一致本数は、(8~18)であり、そして、  
信頼性係数は(2~860)の広範囲にわたっている。  
この信頼性係数が50個以上のものは、15個の化  
学式が含まれている。信頼性の大きいのが860で  
ある。すなわち、カードNo.33-1161で、化学  
式がQUARTZ, LOWである。QUARTZ, LOW  
の元素標準ピーク本数や一致本数が、共に、16  
である。その結果、カピラ城の主成分は、  
QUARTZ(石英)の鉱物名であることが判明でき  
た。これは、祇園精舎の土質やレンガと同種の  
タイプであることも判明できた。

### 2.3 二次検索の定性分析

二次検索の定性分析を行うため、測定条件と  
データの処理方法は、2.2と同様である。カピ  
ラ城と同類型の化学式をプロットしたのがFig.3  
である。カピラ城のレンガに近い波形は、カー  
ドNo.33-1161(QUARTZ, LOW), カードNo.31-  
0966(ORTHOCLASE), カードNo.22-  
0687(MICROCLINE, MAX) およびカード  
No.26-0911(ILLITE-2M1)である。

Fig.3において、祇園精舎の土質に近い波形は、  
カードNo.33-1161(QUARTZ, LOW), カード  
No.26-0911(ILLITE-2MI), カードNo.19-  
0926(MICROCLINE-MAX), およびカード  
No.7-0025(MUSCOVITE-1M, SYN)であ  
る。祇園精舎のレンガに近いピークの波形は、  
カードNo.33-1161(QUARTZ, LOW), カード  
No.31-0966(ORTHOCLASE), カードNo.7-  
0025(MUSCOVITE-1M, SYN)である。こ  
の3つのカードNo.において、No.33-1161が共に  
信頼性が大であることが判明できた。次に、カ  
ードNo.31-0966は、祇園精舎のレンガと同様に  
第2位の信頼性である。

Table 2 Qualitative Analysis of 1st Search—Match for Brick Sample from Kapilavastu, India

No.	カードNo.	化 学 式	元素 標準ピーク本数	一致本数	信頼性係数
1	33-1161	QUARTZ. LOW	16	16	860
2	20-0452	GISMONDINE	18	12	218
3	26-0966	ORTHOCLASE	18	15	120
4	22-0687	MICROCLINE, MAX	18	17	114
5	19-0926	MICROCLINE, MAX	18	18	114
6	32-0261	SCAWTITE	18	14	78
7	19-0605	ENSTATITE, FERROAN	18	12	48
8	20-0528	ANORTHITE, SODIAN, LOW	18	17	46
9	19-1184	ALBITE, LOW	18	16	43
10	22-0138	ALUMOHYDROCALCITE	18	11	42
11	11-0313	KALIOPHILITE	18	16	34
12	26-0911	ILLITE-2M1	18	15	28
13	33-1205	TETRANATROLITE	18	11	25
14	9-0478	ALBITE, POTASSIAN, HIGH, HEATED	18	13	25
15	29-1360	BROOKITE	18	14	25
16	22-0533	VESUVIANITE, FERRIAN	18	12	19
17	24-0495	ILLITE-2M2	18	16	17
18	12-0625	YODERITE	18	13	16
19	17-0514	EPIDOTE	18	15	15
20	12-0229	GMELINITE, SYN	18	13	14
21	35-0704	VASHEGYITE	18	12	11
22	16-0333	HYDROCALUMITE	18	12	10
23	15-0700	NAHCOLITE, SYN	18	12	10
24	22-0675	MICROCLINE, INTER	18	15	10
25	27-1056	WOLLASTONITE-1TR, FERROAN	18	13	10
26	16-0167	HOGBOMITE-18R	18	12	10
27	25-0156	PUMPELITE	18	11	9
28	10-0495	PHLOGOPITE-1M	18	13	9
29	29-0288	PIEMONTITE	18	13	9
30	21-1272	ANATASE, SYN	18	7	8
31	14-0426	USSINGITE	18	13	8
32	29-1410	CHANTALITE	18	13	7
33	22-0700	HYDROTALCITE, SYN	11	8	7
34	26-1063	COLLINSITE	18	12	7
35	21-1365	YAGITE	18	12	6
36	25-0618	SANIDINE, HIGH	18	15	6
37	31-0300	PSEUDOWOLLASTONITE	18	12	6
38	19-1227	SANIDINE	18	14	5
39	20-0223	STANFIELDITE	18	13	5
40	29-1424	PARAUAUXITE	18	12	4
41	20-0669	NESQUEHONITE, SYN	18	13	4
42	9-0343	ILLITE (TRIOCTAHEDRAL)	16	13	4
43	8-0151	TINTICITE	18	12	3
44	15-0800	NATRON, SYN	18	14	3
45	11-0265	GREENALITE-1T	10	6	3
46	15-0653	WEGSCHEIDERITE	18	12	3
47	29-0308	FUKALITE	18	12	3
48	19-1178	HERSCHELITE	18	13	3
49	25-0808	RICHTERITE, SYN	18	13	3
50	5-0616	VISEITE	12	8	2



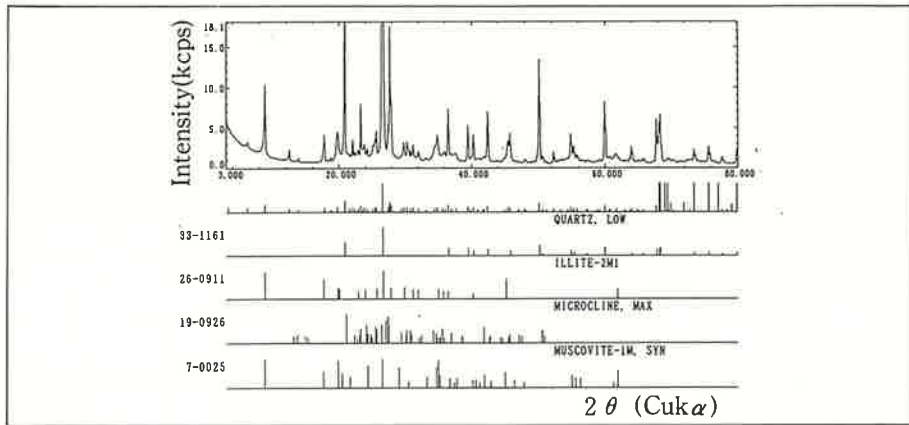


Fig.3 Qualitative Analysis of 2nd Search—Match of Brick Sample from Kapilavastu, India

## 2.4 顕微鏡写真

サンプルは、200メッシュ以下に粉碎された供試料を、さらに、メノウの乳鉢を用いて粉碎した。そして、顕微鏡写真に用いた装置および実験方法は、次のとおりである<sup>3), 6)</sup>。

### 2.4.1 実験装置名

オリンパス光学工業製 走査型レーザ顕微鏡

### 2.4.2 実験の条件

- (イ)使用レーザ ; Ar<sup>+</sup>レーザ  
(アルゴンレーザ)
- (ロ)使用の波長 ; 488nm
- (ハ)対物レンズ ; MSPlan 40×
- (ニ)走査の範囲 ; サンプル上で0.1mm×0.075mm

(ホ)写真の長辺 ; 0.1mm

(ヘ)写真の倍率 ; 約850倍

### 2.4.3 観察の方法

(イ)反射像 ; 通常の落射型顕微鏡と同様に、反射光を観察した。その結果、肉眼で、カラー顕微鏡写真では、金色の小粒が沢山見られた。それは、蛍光X線分析においてAu<sub>2</sub>Oの存在を認められたから、理解することが可能になった。(Fig. 4左)。

(ロ)蛍光像 ; Ar<sup>+</sup>レーザの波長488nmの光で、励起させて行った。蛍光像における蛍光は515nmより短い波長の光をカットするバリアフィルターを用いた。けれども、本実験においては、明白な写真を得ることができなかった。



(a) 反射法によるレーザ顕微鏡写真



(b) 偏光法によるレーザ顕微鏡写真

Fig.4 Scanning Ar<sup>+</sup> Laser Photomicrographs of Brick Sample from Kapilavastu, India

(イ)偏光像；直線偏光された光をサンプルに入射し、その反射光の中から偏光成分に垂直な偏向成分のみを用いた。

実験には、カラー写真と白黒の写真を観察し、写真を写した。論文では、白黒の反射法と偏光法をFig.4右のように示すことができた。偏光法による顕微鏡写真では鮮明に見られた。けれども、白黒の写真では、見られないのが残念であった。

### 3 検 討

#### 3.1 結晶構造の決め方

カピラ城のレンガの鉱物名は2.2の一次検索の定性分析によってTable 2のNo.1のカードNo33-1161のQuartz, Lowによって分った。それは、元素標準ピーク本数(16)、一致本数(16)および信頼性係数(860)につて説明することができる。すなわち、主成分はカードNo33-1161 QUARTZ, LOW (石英)である。カードNo20-0452GISMONDINE(長石)やカードNo31-0966ORTHOCLASE(長石)等が含まれている。

一方、2.3の2次検索の定性分析において、Fig. 3のようにプロットしたチャートからも十分に説明することができる。

したがって、石英は六方晶系である祇園精舎のレンガおよび土質と同様に、カピラ城の結晶構造は六方晶系になっていることが分った<sup>3),6)</sup>。

#### 3.2 六方晶系の格子定数の決め方

六方晶系の格子定数は、面間隔(d)と面指数(hkl)によって求められる。これらの関係式は、式(1)にも関係した式である。

$$d(hkl) = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2+k^2+hk) + \frac{a^2}{c^2}l^2}} \quad \dots\dots(2)$$

面間隔(d)は、ブラッグの反射条件式(式1)によって、波長が与えられると求められる。面指数(hkl)は、結晶構造によって異なるため、面間隔に対応して決定できる。面間隔(d)と面

指数(hkl)から最小2乗法によって、格子定数のa軸とc軸が求められた。a軸とc軸の値は、コンピュータのFORTRAN言語を用いて、次のとおりに情報処理の演算を行った<sup>12)</sup>。

コンピュータ処理の手順は次のとおりに処理を行った。

式2を書きかえると、次のようになる。

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3a^2}(h+k+hk) + \frac{1}{c^2} \quad \dots\dots(3)$$

この式3において、第1項 第2項をまとめると

$$X = \frac{4}{3a^2} \quad \dots\dots(4)$$

あるいは

$$Y = \frac{1}{c^2} \quad \dots\dots(5)$$

となる。これを式3に代入すると

$$\frac{1}{d^2} = X(h+k+hk) + Yl^2 \quad \dots\dots(6)$$

のようになる。ここで、 $(1/d) = m$ ,  $h+k+hk = \alpha$ , および  $l^2 = \beta$  をおきかえると、Table 3のようになる。Table 3は、面間隔と面指数により行列式を作成した表である。このTable 3により、次のような行列式によって計算することができる。

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum \alpha^2 & \sum \alpha \beta \\ \sum \beta \alpha & \sum \beta^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 679 & 250 \\ 250 & 733 \end{vmatrix} \\ = \sum \alpha^2 \times \sum \beta^2 - (\sum \alpha \beta) \\ = 435207 \quad \dots\dots(7)$$

$$X = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \sum \alpha m & \sum \alpha \beta \\ \sum \beta m & \sum \beta^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 46.611 & 250 \\ 39.054 & 733 \end{vmatrix} \\ = \frac{1}{\Delta} (\sum \alpha m \times \sum \beta^2 - \sum \beta m \times \sum \alpha \beta) \\ = 0.056070704 \quad \dots\dots(8)$$

式(4)より

$$a^2 = \frac{4}{3X} = \frac{4}{0.1682121}$$

$$a^2 = 23.779502$$

$$a = 4.8764 \text{ \AA}$$

となる。すなわち、a軸の値は  $a = 4.8764 \text{ \AA}$  である。



Table 3 Lattice Constants Calculated Lattice Distance on the Reflection Patterns

面 間 隔 d (Å)	相対強度 I / I <sub>0</sub>	面 指 数 h k l	$\frac{1}{d^2} = m$	$\alpha = \frac{h^2 + k^2}{h k}$	$\beta = l^2$	$\alpha\beta$	$\alpha^2$	$\beta^2$	$\alpha m$	$\beta m$	備考
4.2589	26	1 0 0	0.055	1	0	0	1	0	0.055	0.055	△
3.3483	100	1 0 1	0.089	1	1	1	1	1	0.089	0.089	○
2.4584	7	1 1 0	0.165	3	0	0	9	0	0.495	0.000	△
2.2839	6	1 0 2	0.192	1	4	4	1	16	0.192	0.768	○
2.1291	7	2 0 0	0.221	4	0	0	16	0	0.884	0.000	×
1.9812	4	2 0 1	0.255	4	1	4	16	1	1.020	0.255	△
1.8192	9	1 1 2	0.302	3	4	12	9	16	0.906	1.208	○
1.8031	2	0 0 3	0.308	0	9	0	0	81	0.000	2.772	△
1.6732	4	2 0 2	0.357	4	4	16	16	16	1.428	1.428	○
1.6604	2	1 0 3	0.363	1	9	9	1	81	0.363	3.267	×
1.6086	1	2 1 0	0.386	7	0	0	49	0	2.702	0.000	×
1.5424	7	2 1 1	0.420	7	1	7	49	1	2.940	0.420	○
1.4536	2	1 1 3	0.473	3	9	27	9	81	1.419	4.257	△
1.4193	2	3 0 0	0.496	9	0	0	81	0	4.464	0.000	△
1.3829	4	2 1 2	0.523	7	4	28	49	16	3.661	2.092	○
1.3757	4	2 0 3	0.528	4	9	36	16	81	2.112	4.752	○
1.3729	5	3 0 1	0.531	9	1	9	81	1	4.779	0.531	△
1.2883	2	1 0 4	0.603	1	16	16	1	256	0.603	9.648	×
1.2565	3	3 0 2	0.633	9	2	18	81	4	5.697	1.266	△
1.2293	2	2 2 0	0.662	12	0	0	144	0	7.944	0.000	□
1.2003	2	2 1 3	0.694	7	9	63	49	81	4.858	6.246	□
						250	679	733	46.611	39.054	

ある。

$$Y = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Sigma \alpha^2 & \Sigma \alpha m \\ \Sigma \beta \alpha & \Sigma \beta m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 679 & 46.611 \\ 250 & 39.054 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{\Delta} (\Sigma \alpha^2 \times \Sigma \beta m - \Sigma \beta \alpha \times \Sigma \beta m)$$

$$= 0.034155967 \dots \dots \dots (9)$$

式(5)より

$$C = \sqrt{\frac{1}{0.034155967}}$$

$$= \sqrt{29.27746}$$

$$= 5.41086 \text{ Å}$$

となる。したがって、C軸の値としては、

C=5.41086 Åである。

この行列式の値を、式4と5に代入することによって求められる格子定数のa軸の値は、a = 4.8764 Åであり、c軸の値は、c = 5.4109 Åである。この両軸の軸比は、すなわち、(c/a)は1.1096であることが分かった。

文献中のα-石英(SiO<sub>2</sub>)の格子定数は、a = 4.

903~4.913 Å および c = 5.393~5.405 Å の範囲に含まれていることが多い。ASTMカードによるSilicon Oxide(SiO<sub>2</sub>)のNo.33-1161のQuartz, Lowがある。すなわち、六方晶系においてはa = 4.9133 Å と C = 5.4053 (Å) であり、軸比は1.1001である。この格子定数により求められた密度は、2.649 (g/cm<sup>3</sup>) である。このシリコンの格子定数は5.43088 Å であることから、カピラ城のレンガは、Quartz, groupと認められる。一般のα-石英と比較すれば、カピラ城のa値は小さくなり、c軸は大きくなっている。これは、蛍光X線分析値によるとSiO<sub>2</sub>の含有量が71.18Wt%で、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が15.49Wt%が含まれており、他に10余種の成分が含まれた要因であると考えられる。

SiO<sub>2</sub>からAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に原子の占有率が場所ごとに置き換えることによって、その軸も1.1001から1.0851に変わって小さくなっていることが分った。

## 4 お わ り に

インドの東北地方にある祇園精舎の土質に対して、X線回折図形とコンピュータの情報処理によって、化合物の格子定数を決定することができた。その結果は、次の通りである。

### 4.1 ピーク・サーチの定性分析

回折角度の  $2\theta$  (8.76~79.84) Å の範囲において、それぞれ78個のピークをサーチし、これに対応した面間隔 (d), X線強度値 (I), 半価幅 ( $\Delta$ ) および相対強度 ( $I/I_0$ ) を求めることができた。

Table 3において、カピラ城と祇園精舎のレンガについて比較が可能になった。備考中の表示〔○〕は両材料において同値の面間隔 (d) であり、表示〔△〕は  $m = (1/d^2)$  の値が同じであり、そして、表示〔×〕は、相互が異なっている値である。一方、表示〔□〕は祇園精舎の面指数より多いところである。

### 4.2 一次検索の定性分析

祇園精舎の土質成分に近い化学式を決定することができた。その決定に対して、元素標準ピーク本数、一致本数および信頼性係数から確認することができた。このレンガに近い化

学式は50個がある。その中では、No.1のカードNo.33-1161の化学式(Quartz, Low)が最も近いことが分った。それは、信頼性係数が860であるからである。石英(Quartz,  $\text{SiO}_2$ )はこのレンガの中で71.18Wt%も含まれていることを蛍光X線分析によって確認できた<sup>3)</sup>。この他に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.49Wt%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (6.37Wt%) および  $\text{K}_2\text{O}$  (3.10Wt%) などが含まれている。

### 4.3 結晶構造と格子定数

カピラ城のレンガは、石英と同質であることが、蛍光X線分析の含有率とX線分析によって認められた。ゆえに、結晶構造は六方晶系であることを判定することができた。この六方晶系の格子定数は、回折角度より求めた面間隔と面指数を用いて、コンピュータ処理を行った。その結果  $a = 4.8764 \text{ Å}$  と  $c = 5.4109 \text{ Å}$  で、軸比は  $(c/a) = 1.1096$  である。

Table 4では、カピラ城のレンガに対して、祇園精舎のレンガと土質を比較することができた。まず、格子定数のa軸では、祇園精舎のレンガよりも0.58%, 土質よりも1.12%小さい。そして、一般のけい酸 ( $\text{SiO}_2$ ) よりも0.55~0.76%も小さい。格子定数のC軸では、祇園精舎のレンガよりは0.52%, 土質よりは1.10%大きい。そして、一般の  $\text{SiO}_2$  よりも0.10~0.33%大きい値になっている。以上のことをまとめると、カ

Table 4 Lattice Constants and Lattice Ratio of Brick Sample in Kapilavastu, India

		Lattice Constants				Lattice Ratio		Remarks
		格 子 定 数				軸 比		
		a (Å)	(%)	C (Å)	(%)	c/a	(%)	
Kapilavastu	Brick	4.8764	100.00	5.4109	100.00	1.1096	100.00	
Jetavanavihara	Brick	4.9047	0.58	5.3829	-0.52	1.0975	-1.09	経法論集 Vol. 39
Jetavanavihara	Soil	4.9312	1.12	5.3512	-1.10	1.0852	-2.20	アジア研究所年報創刊号
ASTM	SiO <sub>2</sub>	4.9133	0.76	5.4053	-0.10	1.1001	0.86	
General	SiO <sub>2</sub>	4.903	0.55	5.393	-0.33	1.0999	-0.87	

ピラ城のa軸は小さく, c軸は大きいことがわかった。軸比としては, 祇園精舎のレンガと土質に比べると, それぞれ1.09%と2.20%大きくなっている。これは, けい酸( $\text{SiO}_2$ )と酸化アルミニウム( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )成分比で考察するのではなく, 酸化ナトリウム, 酸化マグネシウム, 五酸化燐, 酸化カリウム, 酸化カルシウムおよび酸化第二鉄等も考慮に入れる必要がある。

## 謝 辞

本論文の試料採集に当り, 関西大学創立100周年記念事業の関係者および現地調査に同行した校友会事業部長・上原洋允(弁護士)団長をはじめ団員に対して, 特に, ご協力をいただきました。この報告の作成に当り, 関西大学工学部教授の片山佐一博士および関西大学総合図書館藤井収課長に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) W, W, Hunter, C.I.E., LL.D.,: *The Imperial Gazetteer of India*, P107 London(1981)
- 2) 高橋信次「偉大なる悟り」三宝出版 (1973)
- 3) 沢勲, 網干善教・村田守 : 「インド, 祇園精舎に構築していたレンガのX線回折分析」大阪経済法科大学論集, **39**, P23 (1990)
- 4) 沢勲, 網干善教・村田守 : 「インド, 祇園精舎に構築していたレンガの蛍光X線分析」大阪経済法科大学論集, **40**, P25 (1990)
- 5) 沢勲, 網干善教・村田守 : 「インド, 祇園精舎に構築していた土質の蛍光X線分析」大阪経済法科大学論集, **41**, P1 (1990)
- 6) 沢勲, 網干善教・村田守 : 「インド, 祇園精舎に構築していた土質のX線回折分析」大阪経済法科大学アジア研究所年報, 創刊号, P79 (1990)
- 7) Kyong-Hun KIM・Saichi KATAYAMA : 「*Lattice constants and Dencities of  $(\text{Bi} \cdot \text{Sb})_2(\text{Te} \cdot \text{Se})_3$  Compound Prepared by the Anealing Technique*」*Technology Report of Kansai University*, **16**, P75 (1975)
- 8) 金景勲・片山佐一 : 「急冷法で作った( $\text{Bi} \cdot \text{Sb})_2(\text{Te} \cdot \text{Se})_3$ 系の格子定数と密度」応用物理, **39**, P1026 (1970)
- 9) 金景勲・片山佐一 : 「( $\text{Bi} \cdot \text{Sb})_2(\text{Te} \cdot \text{Se})_3$ 系の蛍光X線分析」分析化学, **20**, P29(1971)
- 10) 金景勲・片山佐一 : 「化合物( $\text{Bi} \cdot \text{Sb})_2(\text{Te} \cdot \text{Se})_3$ の原子パラメータと結合間隔」応用物理, **41**, P55 (1971)
- 11) 金景勲・片山佐一 : 「化合物( $\text{Bi} \cdot \text{Sb})_2(\text{Te} \cdot \text{Se})_3$ の温度因子と性能指数」応用物理, **41**, P1327 (1971)
- 12) 沢 勲 : 『*THE FORTRAN*』P196 弘文社 (1987)
- 13) 沢 勲 : 『ザ・パソコン PC-9801』大阪経済法科大学出版部 (1988)
- 13) 沢 勲・富川国広 : 『*THE BASIC*』弘文社 (1987)



付録 Fig.5 カピラ城における上部の右側が筆者たちである。  
Fig.6の人が立っている所から撮影した。



付録 Fig.6 カピラ城における城壁の前面である。ゴードマ・  
シッタルタは、この門を通して修行をしていた。