
カンボジアおよびタイのクメール建造物の石材並びに
石材劣化に関する研究

(課題番号 14404016)

平成 14 年度～平成 16 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)海外)研究成果報告書

平成 17 年 3 月

研究代表者 内田悦生
(早稲田大学理工学術院教授)

はしがき

本研究では、カンボジア、タイおよびラオスにまたがって分布するクメール遺跡の石材および石材劣化に関する研究を行なった。

カンボジアのクメール遺跡(アンコール遺跡)では、主たる建築材料である砂岩材に注目し、帯磁率、形、層理面方向等砂岩材の特徴の時代変化を明らかにすることにより、建造物細部における建造順序の推定が可能となった。特に、建造年代に関して不明であったプラサート・スープラの建築年代をこれら砂岩材の特徴およびスタッコやラテライト材充填物中の木炭片に対する放射性炭素年代測定から明らかにすることができた。また、イオウおよびストロンチウムの安定同位体を利用してアンコール遺跡における石材劣化の中でも最も重要な塩類風化における塩類の供給源を突き止めることができた。

タイおよびラオスのクメール遺跡に関しては、使用石材を明らかにするとともに遺跡周辺の地質調査を行ないその供給源を明らかにすることができた。また、カンボジアのクメール遺跡(アンコール遺跡)との比較を行ない、クメール建築における石材利用の特徴を明らかにすることができた。

本報告書では、これらの研究成果に関して報告する。

研究組織

- 研究代表者：内田悦生（早稲田大学理工学術院教授）
研究分担者：輿石直幸（早稲田大学理工学術院助教授）
研究分担者：細野高啓（早稲田大学理工学術院助手）
研究分担者：下田一太（早稲田大学理工学術院助手）

交付決定額(配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	6,700	0	6,700
平成 15 年度	3,100	0	3,100
平成 16 年度	1,400	0	1,400
総計	11,200	0	11,200

研究発表

(1) 学会誌等

1. E. Uchida, O. Cunin, I. Shimoda, C. Suda, T. Nakagawa, The construction process of the Angkor monuments elucidated by the magnetic susceptibility of sandstone, *Archaeometry*, 45(2), 2003/3
2. 内田悦生、アンコール遺跡(カンボジア)における砂岩材の劣化現象、地質学雑誌、106(6), 2003/6

(2) 口頭発表

1. 須田千幸、内田悦生、オリヴィエ・クニン、砂岩材の帯磁率から推定されるアンコール遺跡の建造過程、日本文化財科学会、2004/5
2. 大川智也、内田悦生、川口琢磨、下田一太、仙波典子、サンボール・プレイ・クック遺跡における石材劣化、日本文化財科学会、2004/5

THE CONSTRUCTION PROCESS OF THE ANGKOR MONUMENTS ELUCIDATED BY THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SANDSTONE*

E. UCHIDA¹, O. CUNIN², I. SHIMODA³, C. SUDA¹ and T. NAKAGAWA³

¹*Department of Resources and Environmental Engineering, Waseda University, Ohkubo 3-4-1, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan*

²*C.R.A.I., École d'Architecture de Nancy, 2, rue Bastien Lepage BP435 54001, Nancy Cedex, France*

³*Department of Architecture, Waseda University, Ohkubo 3-4-1, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan*

The Angkor monuments in Cambodia are mainly constructed of grey to yellowish-brown sandstones. No differences in the constituent minerals and in the chemical composition of the sandstones have been confirmed among the monuments. However, we have found their magnetic susceptibility a useful parameter by which to distinguish them. The principal monuments of Angkor Wat, Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon, constructed from the Angkor Wat period to the Bayon period (from the beginning of the 12th century to the beginning of the 13th century AD), were investigated in detail using a portable magnetic susceptibility meter. We succeeded in dividing the periods of construction into stages. This elucidated the enlargement process of the monuments and correlated their construction stages.

KEYWORDS: ANGKOR MONUMENTS, SANDSTONE, MAGNETIC SUSCEPTIBILITY, ANGKOR WAT, TA PROHM, PREAH KHAN, BANTEAY KDEI, BAYON, WORLD CULTURAL HERITAGE, CAMBODIA

INTRODUCTION

The Khmer people constructed the Angkor monuments, which are widely distributed in Cambodia and Thailand, between the ninth and the 13th centuries AD. The main monuments are concentrated around Siem Reap City, Cambodia (Fig. 1), and in 1992 UNESCO registered them on the World Cultural Heritage List. Since construction, the monuments have had to resist decay caused by the tropical climate. The École Française d'Extrême-Orient (EFEO) of France initiated the restoration of the Angkor monuments in 1907. Many teams from different countries, including the USA, Italy, Germany, India and the Republic of China, are contributing to the restoration and conservation works. The Japanese government created the Japanese Government Team for Safeguarding Angkor (JSA) in 1994. JSA finished the restoration of the Northern Library of Bayon in 1999 (Nakagawa 2000), and the restoration of Prasat Suor Prat and the Northern Library of Angkor Wat is now in progress. In a fundamental investigation of the Angkor monuments, a petrological study of the stone materials, based on detailed measurements of the magnetic susceptibility of sandstones, has succeeded in elucidating the enlargement process of the monuments that were constructed from the Angkor period to the Bayon period (from the beginning of the 12th century to the beginning of the 13th century), especially Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon. Previous studies, based on epigraphy, art and

* Received 9 April 2002; accepted 17 October 2002.

© University of Oxford, 2003

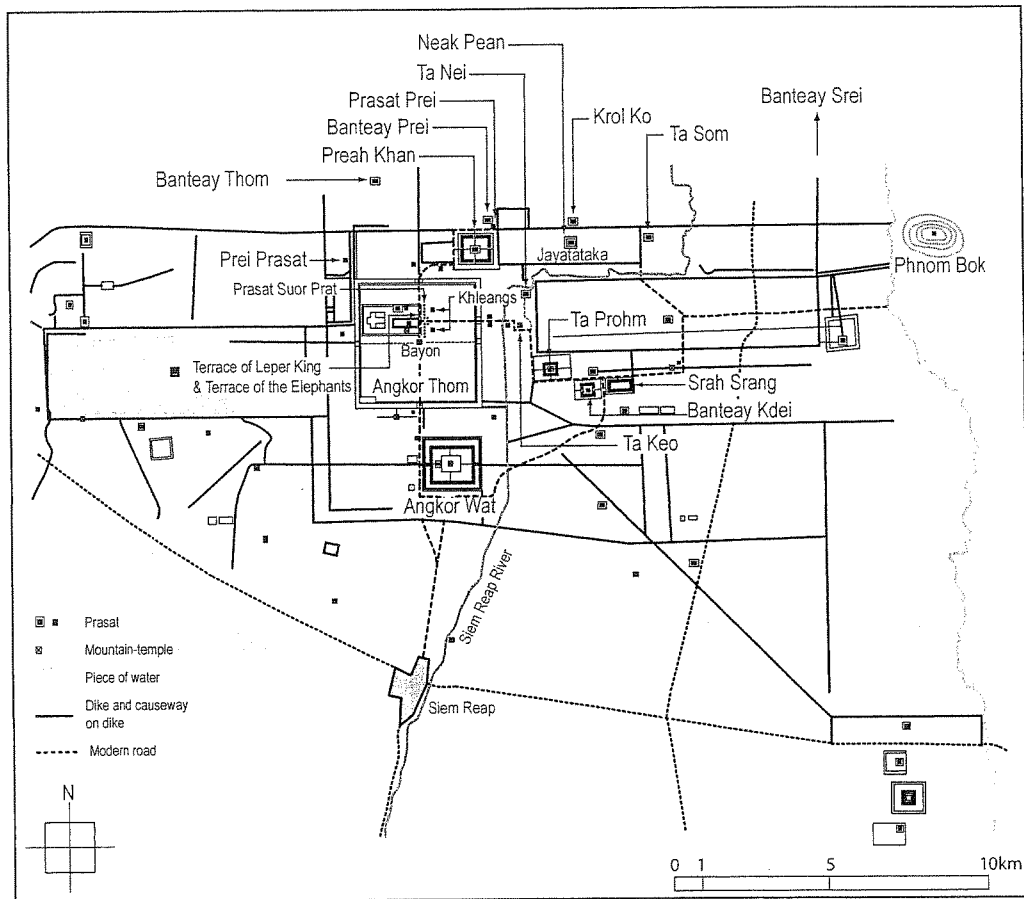


Figure 1 A map of the Angkor monuments, showing the distribution of the monuments investigated.

architectural history, have revealed that the monuments were constructed in the order of Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon (Stern 1965; Dumarçay and Groslier 1973). The usefulness of magnetic susceptibility in the provenancing of Roman granite columns has already been shown by Williams-Thorpe and Thorpe (1993) and Williams-Thorpe *et al.* (1996).

THE STONE MATERIALS

The stone materials used for the Angkor monuments are sandstone and laterite. Brick is also used in the relatively old monuments constructed in the ninth and tenth centuries. We distinguished three types of sandstone on the basis of colour and constituent minerals: grey to yellowish-brown sandstone, red sandstone and greenish greywacke (Uchida *et al.* 1998). These correspond to the grey sandstone, red sandstone and green sandstone, respectively, of the classification by Delvert (1963). Red sandstone is used only for Banteay Srei and for a part of North and South Khleangs, and greenish greywacke only for the sanctuaries on the top of Ta Keo. Grey to yellowish-brown sandstone, consisting mainly of quartz, plagioclase, alkali feldspar, biotite, muscovite and rock fragments, is the main sandstone used for almost all of the

The construction process of the Angkor monuments

monuments. No differences in the constituent minerals, and also in the bulk chemical composition for 50 elements, were recognized among the grey to yellowish-brown sandstones used for the Angkor monuments (Uchida *et al.* 1998).

As for laterite, two types can be distinguished: porous laterite and pisolitic laterite. Both types of laterite consist of the same minerals: kaolinite, quartz, hematite and goethite. However, differences in the contents of the minor elements As, Sb, V and Sr were observed between them (Uchida *et al.* 1999). Based on their contents and on their pore size, the investigated 30 main monuments were classified into five groups. This suggests that there were at least five quarries for laterites, and that the quarries changed over time (Uchida *et al.* 1999).

THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE SANDSTONES

The grey to yellowish-brown sandstone is a primary stone material in the Angkor monuments and is used for almost all of the monuments. This sandstone shows no variation in the constituent minerals and in its bulk chemical composition. However, we found significant differences in the magnetic susceptibility of the sandstone. Biotite is one of the main constituent minerals of the sandstone, but because biotite shows extremely low magnetic susceptibility compared with magnetite (Carmichael 1982), magnetite—in spite of its small quantity—is considered to be the main reason for the magnetic susceptibility of the sandstone. The magnetic susceptibility can be measured rapidly and non-destructively using a portable magnetic susceptibility meter (Geofyzika Model KT-5 and SM-20, Czech). The principle of the magnetic susceptibility measurement and the instrumentation were described in detail in Williams-Thorpe and Thorpe (1993) and Williams-Thorpe *et al.* (1996, 2000). The sandstone blocks showed a considerable variation in magnetic susceptibility from block to block, so an average value for 50 blocks was obtained at each location. For accuracy of measurement, the measurements were carried out selectively on the flat surface of the sandstone blocks. No correction was made for magnetic susceptibility, because the sandstone blocks are large (in general, larger than $25 \times 40 \times 70$ cm). On the basis of magnetic susceptibility, Uchida *et al.* (1998) had already classified the 30 main Angkor monuments into eight groups and revealed that the sandstones were supplied from seven quarries. The sandstones of the monuments in group six are thought to have been quarried from the same two quarries as those used for the monuments in groups five and seven. Angkor Wat is a representative monument of group five, and Bayon of group seven (Fig. 1). The sandstone blocks used for the group five monuments showed an average magnetic susceptibility of more than 3.1×10^{-3} SI units. Those in group seven showed a lower average magnetic susceptibility, being less than 1.3×10^{-3} SI units. Ta Prohm, Preah Khan and Banteay Kdei (Fig. 1), in group six, all showed magnetic susceptibilities between these two values. The present detailed study of magnetic susceptibility for the sandstones used for the monuments in groups five, six and seven elucidated the enlargement process of Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon and correlated the construction stages among them. However, we do not have enough information on the quarries, due to landmines buried during the civil war.

THE CONSTRUCTION PROCESS ELUCIDATED BY THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE SANDSTONE BLOCKS

The previous study revealed that the sandstone blocks used for the monuments of group six, Ta Prohm, Preah Kahn and Banteay Kdei, were supplied from at least two different quarries, and that the average magnetic susceptibility changes systematically from group five to group seven

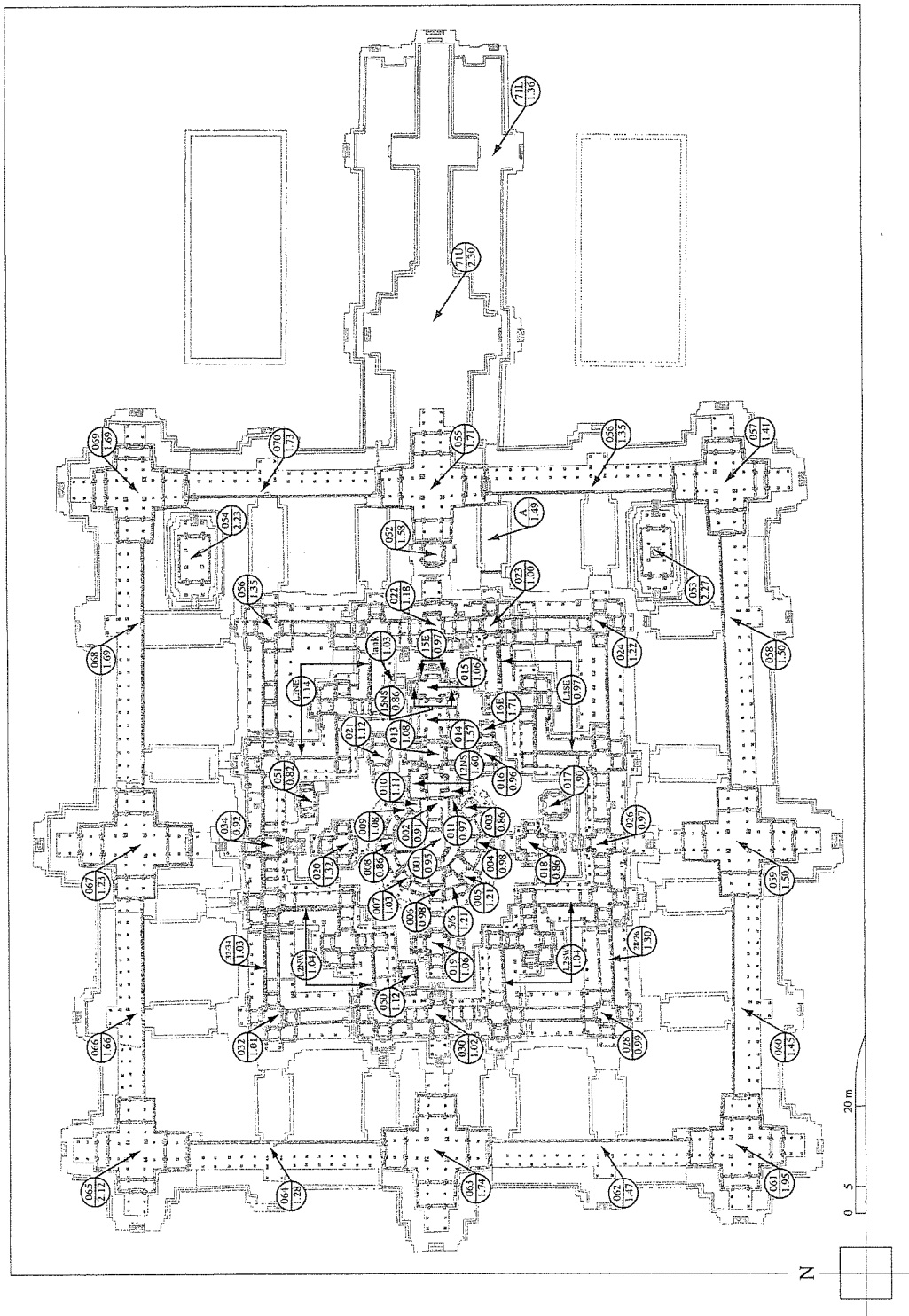


Figure 2. A plan of Bayon, showing the distribution of the magnetic susceptibilities of the grey to yellowish-brown sandstones. The upper number in the circles is the identification number of the structure and the lower is the average magnetic susceptibility in 10^{-3} SI units.

The construction process of the Angkor monuments

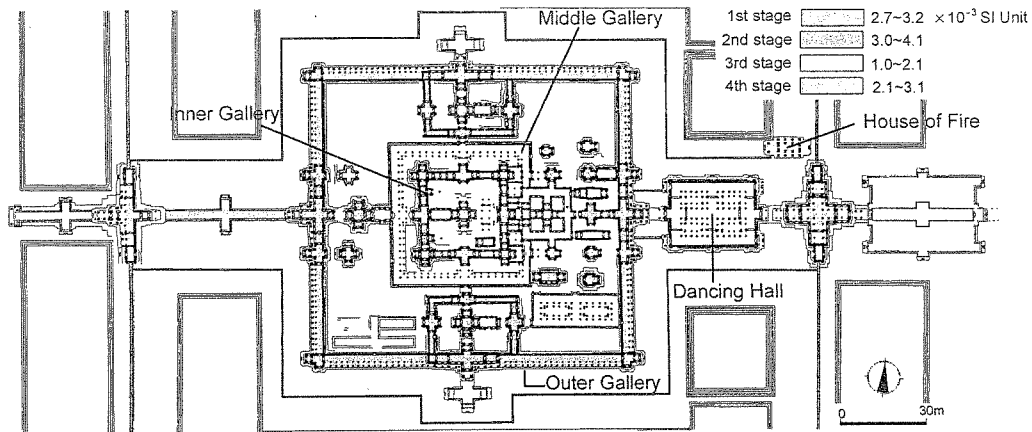


Figure 3 The construction sequence of Ta Prohm deduced from the magnetic susceptibilities of the sandstones. Four stages can be distinguished (drawn using the same colours as in Table 1).

(Uchida *et al.* 1998). These results indicate the possibility that the magnetic susceptibility is a useful parameter for elucidating the construction process of these monuments. Thus the detailed measurements of the magnetic susceptibility of the grey to yellowish-brown sandstone blocks were carried out for Angkor Wat, Ta Prohm, Preah Kahn, Banteay Kdei and Bayon. The measurements were performed at each of 28 locations in Angkor Wat, 83 locations in Ta Prohm, 128 locations in Preah Khan, 36 locations in Banteay Kdei and 77 locations in Bayon (Fig. 2). Fifty stone blocks were measured at each location and the average magnetic susceptibility was obtained for each location. The results of the stage division based on the magnetic susceptibility for Angkor Wat, Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon are as follows.

Angkor Wat, in spite of its large scale, has a homogeneous average magnetic susceptibility ($3.1-4.0 \times 10^{-3}$ SI units), except for the small extension in the central part (2.3×10^{-3} SI units), and no systematic difference was observed. This suggests that the sandstone blocks of Angkor Wat were almost all supplied from just one quarry.

Ta Prohm differs from Angkor Wat. In Ta Prohm, the average magnetic susceptibility of the sandstone blocks showed a distinct variation from place to place. On the basis of the average magnetic susceptibility, and also taking into account architectural and ornamental evidence, it is considered that Ta Prohm was constructed in four stages (Fig. 3). The average magnetic susceptibility for 50 blocks at each location ranges from 2.7×10^{-3} to 3.2×10^{-3} SI units for the first stage, from 3.0×10^{-3} to 4.1×10^{-3} SI units for the second, from 1.0×10^{-3} to 2.1×10^{-3} SI units for the third, and from 2.1×10^{-3} to 3.1×10^{-3} SI units for the fourth stage. The average magnetic susceptibility generally decreases with time, except in the fourth stage. The Central Tower, the Inner Gate Towers, the Inner Gallery and ponds inside the Inner Enclosure were built in the first stage. The Outer Gallery and the two small galleries connected to it were constructed in the second stage. Several small towers distributed between the Middle Gallery and the Outer Gallery were built in the second or third stage. The Middle Gallery, the Dancing Hall, the Outer Gate Towers and many connecting parts are considered to belong to the third stage. The fourth stage is restricted to the House of Fire near the east Inner Gate.

Preah Khan (Fig. 4) is complex, and four stages were distinguished on the basis of the average magnetic susceptibility, taking into account architectural and ornamental evidence. The average magnetic susceptibility ranges from 2.5×10^{-3} to 3.3×10^{-3} SI units for the first stage,

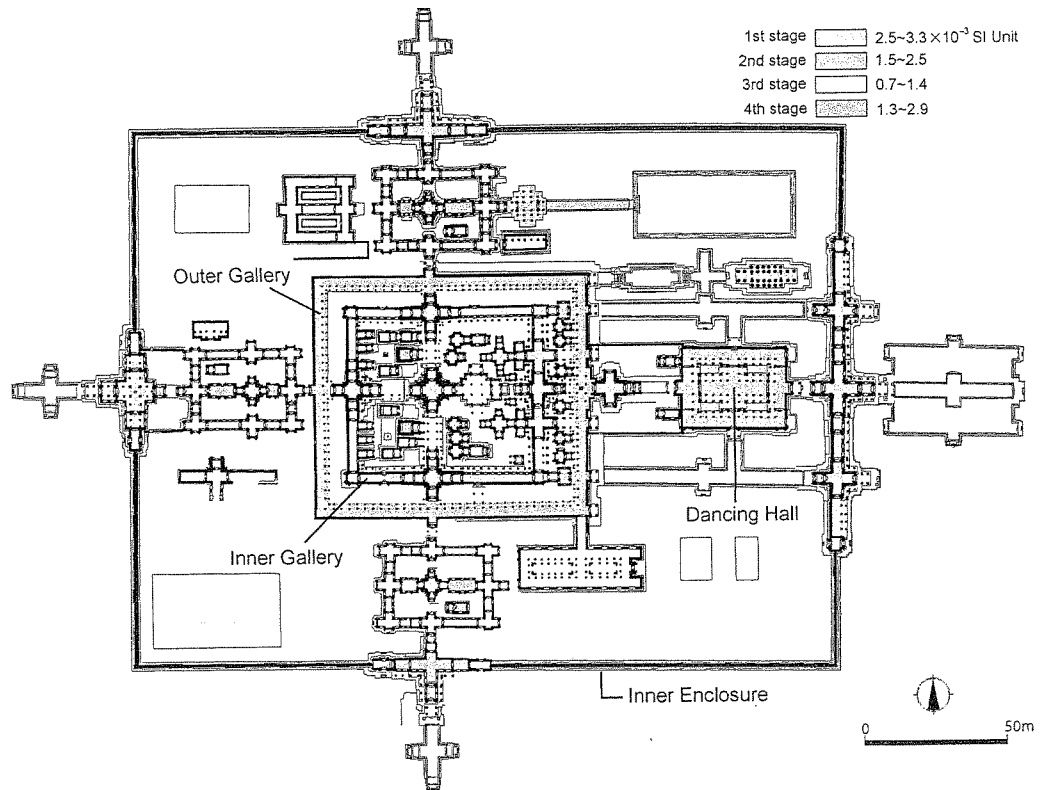


Figure 4 The construction sequence of Preah Khan deduced from the magnetic susceptibilities of the sandstones. Four stages can be distinguished (drawn using the same colours as in Table 1).

from 1.5×10^{-3} to 2.5×10^{-3} SI units for the second, from 0.7×10^{-3} to 1.4×10^{-3} SI units for the third and from 1.3×10^{-3} to 2.9×10^{-3} SI units for the fourth. As at Ta Prohm, the magnetic susceptibility decreases with time, but increases in the fourth stage. Decorations on the stone surface of Preah Khan were taken into account for its classification of stages, because the second stage had the same average magnetic susceptibility range as that of the fourth stage. Figure 5 is a frequency diagram of the magnetic susceptibility for each stage. The sandstones of the first stage have a peak between 2.5×10^{-3} and 3.0×10^{-3} SI units, and those of the third stage between 0.5×10^{-3} and 1.0×10^{-3} SI units. On the other hand, the second stage shows two peaks between 0.5×10^{-3} and 1.0×10^{-3} SI units and between 2.5×10^{-3} and 3.0×10^{-3} SI units. This suggests that the sandstone blocks of the second stage were supplied from two different quarries. The sandstones used for the first stage are homogeneous in colour (almost grey) and have almost no lamina texture, whereas those for the third and fourth stages show a colour variation from grey to yellowish-brown and frequently have lamina. The sandstones of the first stage are similar to those used for Angkor Wat. The first stage covered the Central Tower, the Inner Gallery and the two big towers inside the Inner Gallery, and the tower on the east side of the Outer Gallery. The second stage included the Inner Gate Towers and three central towers of the three small galleries between the Outer Gallery and the Inner Enclosure. The third stage included many small buildings inside the Inner Gallery, the Outer Gate Towers, the Causeways connecting the Outer Gallery to the east Inner Gate Tower, and three small galleries

The construction process of the Angkor monuments

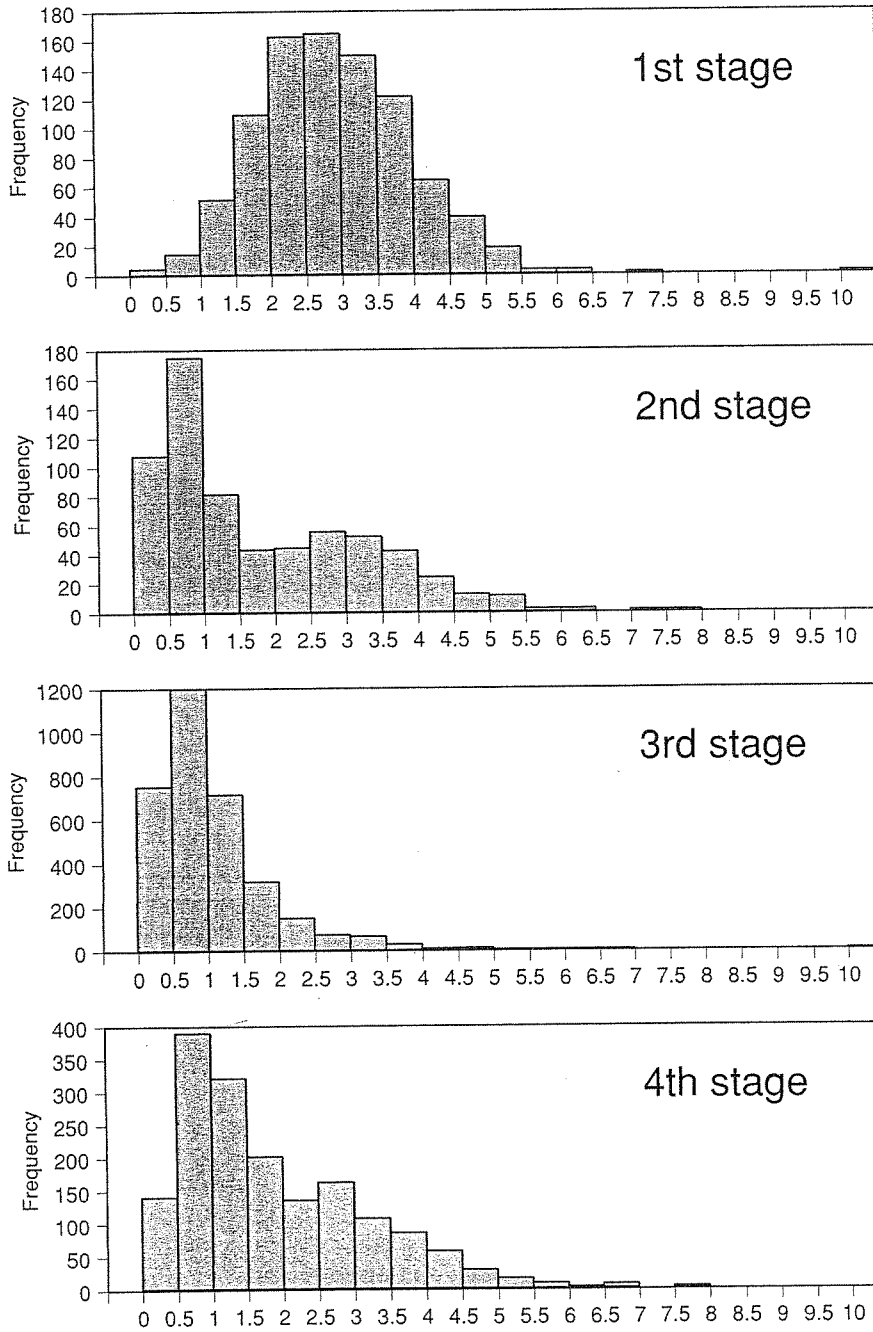


Figure 5 The frequency diagram of the magnetic susceptibilities of the sandstone blocks used for Preah Khan.

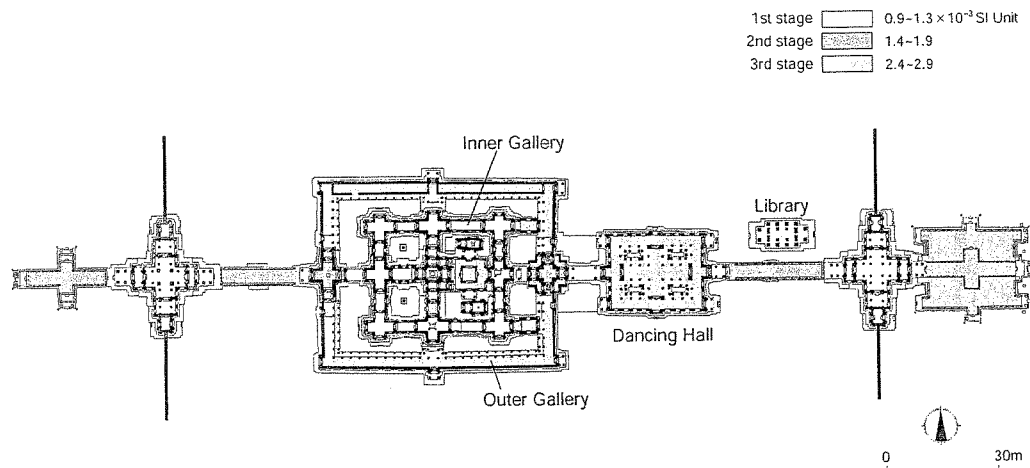


Figure 6 The construction sequence of Banteay Kdei deduced from the magnetic susceptibilities of the sandstones. Three stages can be distinguished (drawn using the same colours as in Table 1).

between the Outer Gallery and the Inner Enclosure. The Dancing Hall, the Outer Gallery and the connecting parts between the Inner Gallery and the Outer Gallery were built in the fourth stage.

Banteay Kdei is a simple case. It seems to have been constructed in three stages (Fig. 6). The Central Tower, the Inner Gallery and the Inner Gate Towers were built in the first stage ($0.9-1.3 \times 10^{-3}$ SI units). The east and west Gate Towers of the Outer Gallery and the Causeways were built in the second stage ($1.4-1.9 \times 10^{-3}$ SI units). The third stage included the Outer Gallery, the Dancing Hall and the Library ($2.4-2.9 \times 10^{-3}$ SI units). The magnetic susceptibility increases with time.

Dumarçay and Groslier (1973) recognized four stages for Bayon. That does not basically contradict the present study, but our magnetic measurement revealed just three stages (Fig. 7). Except for some extended parts and the Inner Gallery, the Central Tower was built in the first stage ($0.8-1.3 \times 10^{-3}$ SI units), which corresponds to Dumarçay and Groslier's (1973) first and second stages. The Inner Gallery seems to show a slightly higher magnetic susceptibility compared with other locations (Fig. 2). The five Gate Towers and the four Corner Towers of Angkor Thom also belongs to the first stage. The Outer Gallery, including the extended parts of the Central Tower, was built in the second stage ($1.3-2.1 \times 10^{-3}$ SI units). The Northern and Southern Libraries and the central part of the Eastern Terrace can be assigned to the third stage ($2.2-2.3 \times 10^{-3}$ SI unit). The magnetic susceptibility for Bayon increases with time in the same way as at Banteay Kdei.

THE CORRELATION OF THE CONSTRUCTION STAGES AMONG THE MONUMENTS CONSTRUCTED IN THE BAYON PERIOD

The enlargement process of the monuments had not previously been established—except for Bayon, on the basis of architectural evidence, by Dumarçay and Groslier (1973)—and the correlation of the construction stages among the monuments had remained unresolved. The present study, however, has succeeded in elucidating the enlargement process, and also the correlation of the construction stages among the monuments investigated. The correlation of

The construction process of the Angkor monuments

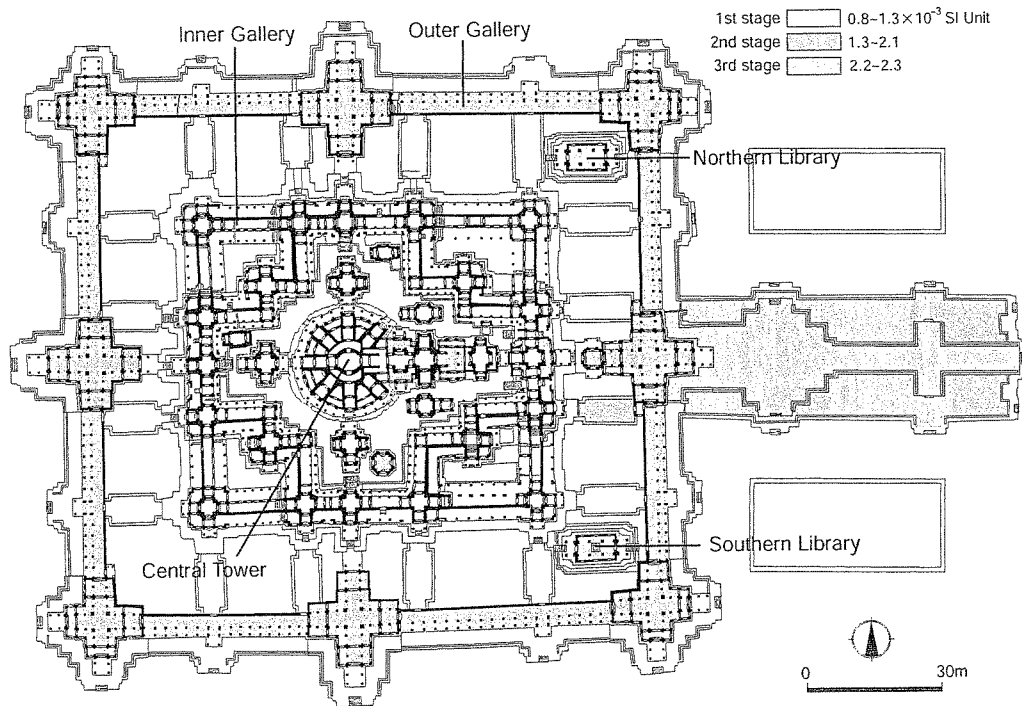


Figure 7 The construction sequence of Bayon deduced from the magnetic susceptibilities of the sandstones. Three stages can be distinguished (drawn using the same colours as in Table 1).

the construction stages based on the present study is shown in Table 1, where the same colours as those used in Figs 3, 4, 6 and 7 are employed. The results suggest, for example, that the third stage of Preah Khan corresponds to the third stage of Ta Prohm and also to the first stage of Banteay Kdei and Bayon, and that Banteay Kdei was constructed in approximately the same period as Bayon. From the Angkor Wat period to the Bayon period, the magnetic susceptibility of the sandstones generally decreases from 4×10^{-3} SI units to 1×10^{-3} SI units, but then increases to 3×10^{-3} SI units. Table 1 also shows the results of the magnetic susceptibility measurements for other monuments with a Bayon style: Neak Pean, Ta Nei, Banteay Prei, Banteay Thom, Ta Som, Krol Ko, Prasat Prei, Prei Prasat, the Terrace of the Leper King and the Terrace of the Elephants. The construction period of their simple and small-scale structures was deduced from the magnetic susceptibility of the sandstones on the assumption that the central part was constructed first, and by taking into account architectural and decorative styles. In Neak Pean, the Central Sanctuary has an average magnetic susceptibility of 3.0×10^{-3} SI units except for some later additions, but the other surrounding buildings show an average magnetic susceptibility ranging from 1.2×10^{-3} to 2.0×10^{-3} SI units. In the case of Ta Nei, the average magnetic susceptibility is slightly dispersed from 1.1×10^{-3} to 1.7×10^{-3} SI units. The average magnetic susceptibility of the Central Sanctuary of Banteay Prei is 1.5×10^{-3} SI units, but those for the Gallery and the Gate Towers range from 0.7×10^{-3} to 1.0×10^{-3} SI units. In Banteay Thom, the two Main Towers show an average magnetic susceptibility of 1.6×10^{-3} SI units, but the other locations, such as the Libraries, the Gallery and the Gate Tower, range from 0.8×10^{-3} to 1.3×10^{-3} SI units. In Ta Som, all structures such as the Central Tower, the Gallery and the Gate

Table 1 The correlation of the construction stages among Angkor Wat, Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei, Bayon and the other Bayon-style monuments (magnetic susceptibilities in 10^{-3} SI units)

Group	V	Vla	Vlb	Vlc	Vld	Vle	Vlla	Vllb
Angkor Wat	First stage, 3.1-4.0							
Ta Prohm		First stage, 2.7-3.2	Second stage, 3.0-4.1					
Preah Khan				First stage, 2.5-3.3	Second stage, 1.5-2.5	Third stage, 0.7-1.4	Third stage, 1.0-2.1	Fourth stage, 2.1-3.1
Neak Pean				First stage, 3.0			Second stage, 1.2-2.0	Fourth stage, 1.3-2.9
Ta Nei					First stage, 1.1-1.7		Second stage, 1.6-1.7	
Banteay Prei					First stage, 1.5	Second stage, 0.7-1.0		
Banteay Thom					First stage, 1.6	Second stage, 0.8-1.3		
Banteay Kdei						First stage, 0.9-1.3	Second stage, 1.4-1.9	Third stage, 2.4-2.9
Bayon						First stage, 0.8-1.3	Second stage, 1.3-2.1	Third stage, 2.2-2.3
Ta Som						First stage, 0.7-1.2		
Krol Ko						First stage, 1.0-1.1		
Prasat Prei						First stage, 0.7		
Prei Prasat						First stage, 1.0		
Terrace of the Elephants							First stage, 1.4-1.7	Second stage, 1.7-2.3
Terrace of the Leper King								First stage, 1.9

The construction process of the Angkor monuments

Towers show a narrow range of average magnetic values, from 0.7×10^{-3} to 1.2×10^{-3} SI units. Prasat Prei and Prei Prasat show 0.7×10^{-3} and 1.0×10^{-3} SI units, respectively, in the average magnetic susceptibility. In the case of the Terrace of the Elephants, the central part has an average magnetic susceptibility of $1.4\text{--}1.7 \times 10^{-3}$ SI units, whereas the other parts have values in the range $1.7\text{--}2.3 \times 10^{-3}$ SI units. On the other hand, the Terrace of the Leper King is homogeneous (1.9×10^{-3} SI units). Almost all of the monuments except for Neak Pean, the Terrace of the Leper King and the Terrace of the Elephants have sandstone blocks with an average magnetic susceptibility of between 0.7×10^{-3} and 1.3×10^{-3} SI units. These values are representative for the Bayon-style monuments. No other monuments constructed before the Angkor Wat period used sandstone blocks with such a low average magnetic susceptibility (Uchida *et al.* 1998).

CONCLUSIONS AND FURTHER WORK

The magnetic susceptibility of the grey to yellowish-brown sandstone, which is the most popular sandstone used for the Angkor monuments, has been shown to be a suitable parameter for the elucidation of the construction process and the correlation of the construction stages of the monuments. The sandstone blocks of Angkor Wat show a homogeneous magnetic susceptibility in spite of its large scale. This may suggest that the sandstone blocks were supplied from one quarry. On the other hand, the sandstone blocks of Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon show a variation in the magnetic susceptibility from place to place. On the basis of the magnetic susceptibilities, their construction process was divided into four stages for Ta Prohm and Preah Khan and into three stages for Banteay Kdei and Bayon. We succeeded in correlating the construction stages among the various monuments, including other monuments with a Bayon style.

The information obtained on magnetic susceptibility will be indispensable in identifying the quarries. The sandstone blocks are said to be derived from the south-east foot of Mt Koulen, situated 40 km to the north-east of Siem Reap City (Boulbet 1979). Unfortunately, we could not get enough information about the quarries, because of the danger due to landmines buried during the civil war. However, there were probably multiple quarries for the investigated monuments. Future investigation of the quarries is expected to clarify the number of quarries as well as the reason for the changes in magnetic susceptibility.

ACKNOWLEDGEMENTS

We sincerely thank Namiko Yamauchi of JSA for the arrangement of this joint research between JSA, CRAI and EFEO. We also thank one anonymous reviewer for useful suggestions and comments that have improved the manuscript.

REFERENCES

- Boulbet, J., 1979, Le Phnom Koulen et sa région, *Collection de textes et documents sur l'Indochine*, **IXI**, École Française d'Extrême-Orient.
- Carmichael, R. C., 1982, *Handbook of physical properties of rocks*, vol. II, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Delvert, J., 1963, Recherches sur l'érosion des grès des monuments d'Angkor, *Bulletin de l'École Française d'Extrême-Orient*, **LI-2**, 453–534.
- Dumarçay, J., and Groslier, B. P., 1973, Le Bayon, histoire architecturale du temple, inscription du Bayon, *Mémoire archéologiques*, **III-2**, École Française d'Extrême-Orient.

E. Uchida et al.

- Nakagawa, T., 2000, *Report on the conservation and restoration work of the Northern Library of Bayon, Angkor Thom, Kingdom of Cambodia*, Japanese Government Team for Safeguarding Angkor.
- Stern, Ph., 1965, Les monuments khmers du style du Bayon et Jayavarman VII, *Recherches et documents d'art et d'archéologie*, XI, Publications du Musée Guimet, Paris.
- Uchida, E., Maeda, N. and Nakagawa, T., 1999, The laterites of the Angkor monuments, Cambodia. The grouping of the monuments on the basis of the laterites, *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **94**, 162–75.
- Uchida, E., Ogawa, Y., and Nakagawa, T., 1998, The stone materials of the Angkor monuments, Cambodia. The magnetic susceptibility and the orientation of the bedding plane of the sandstone, *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **93**, 411–26.
- Williams-Thorpe, O., and Thorpe, R. S., 1993, Magnetic susceptibility used in non-destructive provenancing of Roman granite columns, *Archaeometry*, **35**, 185–95.
- Williams-Thorpe, O., Jones, M. C., Tindle, A. G., and Thorpe, R. S., 1996, Magnetic susceptibility variations at Mons Claudianus and in Roman columns: a method of provenancing to within a single quarry, *Archaeometry*, **38**, 15–41.
- Williams-Thorpe, O., Jones, M. C., Webb, P. C., and Rigby, I. J., 2000, Magnetic susceptibility thickness corrections for small artefacts and comments on the effects of background materials, *Archaeometry*, **42**, 101–8.

**Estimation of the Construction Period of
Prasat Suor Prat in the Angkor Monuments, Cambodia,
Based on the Characteristics of its Stone Materials
and the Radioactive Carbon Age of Charcoal Fragments**

E. Uchida^{a*}, C. Suda^a, A. Ueno^a, I. Shimoda^b, T. Nakagawa^b

^a Waseda University, School of Science and Engineering, Department of Resources and Environmental Engineering, Okubo 3-4-1, Shinjuku, 169-8555 Tokyo, Japan

^b Waseda University, School of Science and Engineering, Department of Architecture, Okubo 3-4-1, Shinjuku, 169-8555 Tokyo, Japan

*Corresponding author. Tel.: +81 3 5286 3318; fax +81 3 5286 3491. E-mail address: weuchida@waseda.jp (E. Uchida).

Abstract

Prasat Suor Prat in the Angkor monuments, Cambodia, is situated at the east end of the Royal Plaza and consists of 12 towers numbered N1 to N6 and S1 to S6 that are mainly made of laterite. Sandstone is also used for pediments, door and window frames, and balusters, etc. Until now, it was thought that Prasat Suor Prat was constructed in the Bayon period. However, the characteristics of the stone materials used for the Angkor monuments suggest that Prasat Suor Prat was constructed in the Angkor Wat period. This is supported by the radioactive carbon age obtained for charcoal fragments collected from the soil between the laterite blocks in the N1 tower and also from the stucco on the inner wall of the N2 tower.

Keywords: Angkor monument; Prasat Suor Prat; Sandstone; Laterite, Radioactive carbon age; Cambodia

1. Preface

The Royal Plaza spreads to the north of Bayon, situated in the center of Angkor Thom, which is one of the representative Angkor monuments. The 12 towers of Prasat Suor Prat are arranged in a row at the east end of the Royal Plaza and face the Terrace of the Elephants at the west end of the Royal Plaza (Fig. 1). The Royal Road leading to the Gate of Victory separates the towers into north and south groups. The six towers of the north group are called N1 to N6, from south to north, and the six towers of the south group are called S1 to S6, from north to south. The stacking of the stone blocks was completed, but their decoration was left incomplete. The North and South Khleangs are situated to the east of the N4, N5, and N6 towers and the S4, S5, and S6 towers, respectively. Bathing ponds are located to the south of the North Khleang and to the north of the South Khleang. The N1, N2, N3, S1, S2, and S3 towers, which are adjacent to the bathing ponds, slightly incline toward the ponds. The clearance of the towers was carried out by J. Commaille in 1908 and by H. Marchal from 1919 to 1920. The N3 tower was repaired in the 1950s by École Française d'Extrême-Orient (EFEO), but its inclination toward the pond continued afterwards. Restoration of the entire N1 tower and the antechamber of the N2 tower (Fig. 2-a) was carried out from 2000 to 2005 by the Japanese Government Team for Safeguarding Angkor (JSA). Prasat Suor Prat is made almost entirely of laterite. This is a rare case among the Angkor monuments. Sandstone is also used, but only for pediments, door and window frames, and balusters, etc.

There are differing theories regarding the original purpose of Prasat Suor Prat, and thus this issue still causes controversy. Due to the fact that buildings made mostly of laterite are rare among buildings constructed before the Bayon period, it has generally been believed that Prasat Suor Prat was constructed in the Bayon period. Regarding possible builders of Prasat Suor Prat, Glaize [1] has suggested Jayavarman VII, while Jacques [2] has suggested his successor, Indravarman II. Based on the fragments of Chinese ceramics excavated from the inside of the foundation of the antechamber of the N2 tower, Shimizu [4] has concluded that Prasat Suor Prat was constructed after the latter half of the 12th century. Thus Prasat Suor Prat has been thought of as a structure of the Bayon period. Further, due to the presence of a description of Prasat Suor Prat in "The Customs of Cambodia," written by Zhou Daguan in 1296, we know that it existed when he visited the Angkor region in 1296. Thus it is evident that Prasat Suor Prat was constructed before the end of the 13th century at the latest.

However, based on our investigations of stone materials used for the construction of the Angkor monuments, we have reached the conclusion that Prasat Suor Prat was actually constructed during the Angkor Wat period. The evidence for this conclusion will be shown in this paper. In addition, radioactive carbon age dating by accelerator mass spectrometry was carried out for charcoal fragments collected from the N1 and N2 towers of Prasat Suor Prat.

2. Estimation of the construction period of Prasat Suor Prat based on the characteristics of its stone materials

Prasat Suor Prat is made of laterite and sandstone. Laterite is the chief construction material, and sandstone was used only for door and window frames, pediments, and balusters, etc. In this study the period that Prasat Suor Prat was constructed will be estimated based on the quality, magnetic susceptibility, stacking method, shape, size, and orientation of the bedding planes of the sandstone and laterite blocks. Table 1 shows a chronological table of the principal Angkor monuments based on the characteristics of their two main stone materials (sandstone and laterite) [7, 8, 10]. Remusat's [3] chronological table of the order of the construction of the Angkor monuments was used as a reference in the creation of the table, but there was no contradiction found between the change in characteristics of the stone materials elucidated in this study and Remusat's chronological table.

2.1 Quality of the sandstone

The sandstone used for the construction of Prasat Suor Prat can be classified as gray to yellowish brown sandstone (feldspathic arenite) according to Uchida's classification [7]. The main constituent particles are fine- to medium-grained quartz, feldspar, mica, and rock fragments. This kind of sandstone was commonly used as a main construction material for the Angkor monuments. Until the early Bayon period (VIc in Table 1) the sandstone was generally gray in color and homogeneous, rarely showed a lamina structure, and was of relatively good quality, whereas afterward the sandstone was frequently yellowish-brown in color, was of low quality, and frequently showed a lamina structure. The gray color, homogeneity, and lack of lamina structure of the sandstone used in Prasat Suor Prat suggest that it was constructed before the early Bayon period (VIc).

2.2 Magnetic susceptibility of the sandstone

Systematic measurement of magnetic susceptibility was carried out for the sandstone blocks used for the main Angkor monuments. Results confirmed that the average magnetic susceptibility of the sandstone blocks has changed over time [7]. The investigation revealed that the magnetic susceptibility changed six or seven times during the Angkor period, suggesting that there were six or seven different quarries from which the gray to yellowish-brown sandstone was taken.

The average magnetic susceptibility of the sandstone blocks used for the door and window frames and pediments of Prasat Suor Prat ranged from 3.3 to 3.6×10^{-3} SI units, and no remarkable difference in average magnetic susceptibility was observed among the towers. The values of the average magnetic susceptibility for Prasat Suor Prat correspond to those of the monuments of the early Angkor Wat period (IVb) to the early Bayon period (VIc). Further, taking homogeneity into account with regard to magnetic susceptibility, it is highly probable that Prasat Suor Prat was constructed in the main Angkor Wat period (V).

2.3 Quality of the laterite

Laterite can be classified roughly into porous laterite and pisolitic laterite based on its texture. Porous laterite has large holes of several cm in diameter on its surface and is of low quality. Pisolitic laterite, on the other hand, consists mainly of pisolites of 5-10mm in diameter and is comparatively homogeneous. Small holes are also observed on the surface of pisolitic laterite. In addition, there is also an intermediate type of laterite. Thus, the size of the holes on the surface of laterite is a good index for its classification. Uchida et al. [8] divided the main Angkor monuments into five groups based on the average pore size of their laterite blocks. The laterite blocks used for Prasat Suor Prat have relatively large holes averaging 15.5mm in diameter (Fig. 2-b). This suggests that Prasat Suor Prat was constructed sometime during the Bakheng period (II) to the transition period (III) or sometime during the early Angkor Wat period (IVb) to the late Bayon period (VIIIa).

2.4 Magnetic susceptibility of the laterite

Magnetic susceptibility measurements were performed on the laterite blocks, and their average magnetic susceptibility was obtained. As a result, a value of $0.44 \times$

10^{-3} SI units was obtained for Prasat Suor Prat. Based on this average magnetic susceptibility value of the laterite blocks, Uchida et al. [8] divided the main Angkor monuments into five groups. These results suggest that Prasat Suor Prat was constructed sometime during the Bakheng period (II) to the transition period (III) or sometime during the early Angkor Wat period (IVb) to the late Bayon period (VIIIa).

2.5 Stacking method of the laterite blocks

Until the early Bayon period (VIc), the stone blocks of monuments were stacked so that they were of uniform height and had a successive bed joint. This style of stacking is known as range ashlar masonry. Stone blocks from after this period, however, have different shapes and sizes, and they show a non-successive bed joint. This style of stacking is known as random range ashlar masonry. In Prasat Suor Prat, the laterite blocks show a successive bed joint, and their shapes and sizes are comparatively uniform (Fig. 2-b). These facts suggest that Prasat Suor Prat was constructed sometime before the early Bayon period (VIc).

2.6 Shape of the laterite block

Except for the Roluos monuments, the sandstone and laterite blocks of the relatively older monuments have square ends, whereas relatively new monuments have rectangular ends [9]. In Banteay Samre, both types of laterite blocks are present. Therefore the transition between them seems to have occurred during the Angkor Wat period (IVb to V). Regarding sandstone, Phimai in Thailand, which was constructed in the Angkor Wat period (AD1108), seems to be the last monument constructed with sandstone blocks having square ends.

The laterite blocks of Prasat Suor Prat have square ends (Fig. 2-b). This fact suggests that Prasat Suor Prat was constructed sometime before the main Angkor Wat period (V).

2.7 Size of the laterite blocks

As mentioned above, the shape of the stone blocks has changed over time. However, except for the large sandstone blocks in Angkor Wat, Boeng Mea Lea, and Wat Athvea, all of which were constructed in the Angkor Wat period (IVb to V), the stone blocks of the Angkor monuments have a nearly constant width of 40 to 50 cm and

length of 80 to 100 cm [9]. The laterite blocks of Prasat Suor Prat are relatively large, averaging 120cm in length. This is evidence supporting the theory that Prasat Suor Prat was constructed in the Angkor Wat period (IVb to V).

2.8 Orientation of the bedding planes of the laterite blocks

Regarding both the sandstone and the laterite blocks, the ratio of stone blocks with vertical bedding planes is high (30 to 50%) in monuments constructed before the Baphuon period (IVa). On the other hand, in monuments constructed after the Angkor Wat period (IVb), the ratio is lower and the stone blocks are stacked so that the bedding planes are almost horizontal [8]. In other words, after the Angkor Wat period (IVb), stone blocks were stacked so as to take into consideration the orientation of the bedding planes. As mentioned above, the stone blocks have nearly square ends before the Baphuon period (IVa) but rectangular ends after the Angkor Wat period (IVb). In Prasat Suor Prat, though the laterite blocks have square ends, the orientation of the bedding plane is basically horizontal. Banteay Samre (the Outer Gallery; Fig. 2-c) and Wat Athvea (Enclosure; Fig. 2-d) can be noted as monuments using laterite blocks with square ends but horizontal bedding planes. It is certain that Banteay Samre and Wat Athvea were constructed in the Angkor Wat period, and we can therefore deduce that Prasat Suor Prat was also constructed in the Angkor Wat period (IVb to V). As for the sandstone blocks, there is no monument made of sandstone blocks with square ends and horizontal bedding planes in the Angkor region. However, in Phimai, which is one of the Khmer monuments in Thailand, the sandstone blocks have square ends but are settled so that their bedding planes are horizontal. Phimai is generally thought to have been constructed around AD1108, which was during the Angkor Wat period. Thus, the use of stone blocks with square ends but horizontal bedding planes was a transitional phenomenon in the Angkor Wat period.

Taking into consideration the common features of the above results obtained based on the characteristics of the stone materials, it can be concluded that Prasat Suor Prat was constructed in the Angkor Wat period (IVb to V). Moreover, based on the color, quality, and magnetic susceptibility of the sandstone blocks and also the shape, orientation of the bedding planes, and stacking method of the laterite blocks, it is impossible to conclude that Prasat Suor Prat was constructed in the Bayon period.

3. Radioactive carbon age of charcoal fragments from Prasat Suor Prat

Stucco of pale yellowish brown color remains on the inner wall of Prasat Suor Prat and seems to have been used as an indoor finishing material. Its thickness differs from tower to tower and from place to place but is at most about 1cm thick. The stucco consists mainly of quartz grains (with a diameter of around 1mm) and soil (mainly kaolinite), and it contains small amounts of laterite and sandstone fragments. Charcoal fragments of several mm to 1cm in diameter are also often found in the stucco. Moreover, when the N1 and N2 towers were dismantled, charcoal fragments were discovered in the soil that was put in the interstices of the laterite blocks.

It is not clear why such charcoal fragments were put into the stucco and the soil, but the charcoal provides a clue for estimating the period of the construction of Prasat Suor Prat. Thus radioactive carbon dating was carried out for 3 pieces of the charcoal fragments, that is, two fragments (No. 1624, No. 1625) from the soil between the laterite blocks of the N1 tower and one fragment (No. 1615) from the stucco on the inner wall of the N2 tower (Fig. 2-e and -f). The weight of the charcoal fragments ranged from 65 to 124mg. The radioactive carbon age determination was carried out by Paleo Labo Co., Ltd., using an accelerator mass spectrometer (AMS). The result is shown in Table 2.

The obtained ^{14}C ages were calibrated using the INTCAL98 calibration curve [6]. The calibration was carried out using the program CALIB 4.3 [5]. Because the INTCAL98 calibration curve shows fluctuation around the obtained ^{14}C ages, five calibrated ages ranging from AD1040 to AD1160 were obtained for the analyzed samples. The 1σ ranges for the obtained calibrated ages were calculated using the same program. The 1σ ranges for the three charcoal fragments are distributed from AD1030 to AD1185, but the probability of their ranging from AD1040 to AD1125, which was a common result for all three samples, is high.

The differences in the radioactive carbon ages for the three charcoal fragments fall within the range of measurement error. Thus the obtained radioactive carbon ages of the charcoal fragments seem to indicate the approximate construction age of Prasat Suor Prat. The obtained age range of AD1040 to AD1125 corresponds to the Baphuon period to the Angkor Wat period. This result does not contradict the results of the estimation of the construction period of Prasat Suor Prat based on the characteristics of the stone materials.

4. Conclusion

Based on the characteristics of the stone materials used for the construction of Prasat Suor Prat, it can be deduced that Prasat Suor Prat was constructed in the Angkor Wat period (IVb to V). In addition, the radioactive carbon ages of the charcoal fragments found in Prasat Suor Prat indicate that the period of construction was from the Baphuon period to the Angkor Wat period, and this result does not contradict the conclusion obtained through the analysis of the characteristics of the stone materials of the monuments. Thus it is concluded that Prasat Suor Prat was constructed in the Angkor Wat period and not in the Bayon period, as is commonly believed.

Acknowledgements

This study was financially supported by the UNESCO/Japanese Trust Fund for the Preservation of the World Cultural Heritage and also by a Grant-in-Aid for Scientific Research from the Ministry of Education, Science and Culture of Japan (Project No.14404016: E. Uchida). We would like to express our sincere thanks to all the members of the Japanese Government Team for Safeguarding Angkor for their helpful discussions and encouragement.

References

- [1]M. Glaize, Les monuments du groupe d'Angkor, Paris, A. Portail, 1944.
- [2]C. Jacques, Angkor, Paris, Bordas, 1990.
- [3]G.C. Remusat, Les villes d'Angkor et le problème de la chronologie. L'ART KHMER les grandes étapes de son evolution, Étude d'Art et d'Ethnologie Asiatiques (1940) 27-33.
- [4]N. Shimizu, Archaeological investigation for 2000 –4-. Interim report on excavations and investigations at the Northern Group of Prasat Suor Prat. Original morphology and successive modifications of the Suor Prat Terraces, Annual Report on the Technical Survey of Angkor Monument 2001 of Japanese Government Team for Safeguarding Angkor, Japan International Cooperation Center (2001) 93-101.
- [5]J. Stuiver, P.J. Reimer, Extended ¹⁴C database and revised CALIB3.0 ¹⁴C age calibration program, Radiocarbon, 35 (1993) 215-230.
- [6]J. Stuiver,, P.J. Reimer, E. Bard, J.W. Beck, G.S. Burr, K.A. Hughen, B. Kromer, F.G. McCormac, J. Plicht, M. Spurk, INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000 – 0 cal BP., Radiocarbon, 40 (1998) 1041-1083.
- [7]E. Uchida, Y. Ogawa, T. Nakagawa, The stone materials of the Angkor monuments,

- Cambodia. The magnetic susceptibility and the orientation of the bedding plane of the sandstone, *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, 93 (1998) 411-426.
- [8] E. Uchida, N. Maeda, T. Nakagawa, The laterites of the Angkor monuments, Cambodia. The grouping of the monuments on the basis of the laterites, *J. Min. Pet. Econ. Geol.*, 94 (1999) 162-175.
- [9] E. Uchida, D. Ando, Petrological survey 2000, Annual Report on the Technical Survey of Angkor Monument 2001 of Japanese Government Team for Safeguarding Angkor, Japan International Cooperation Center, (2001) 225-247.
- [10] E. Uchida, O. Cunin, I. Shimoda, C. Suda, T. Nakagawa, The construction process of the Angkor monuments elucidated by the magnetic susceptibility of sandstone, *Archaeometry*, 45 (2003) 221-232.

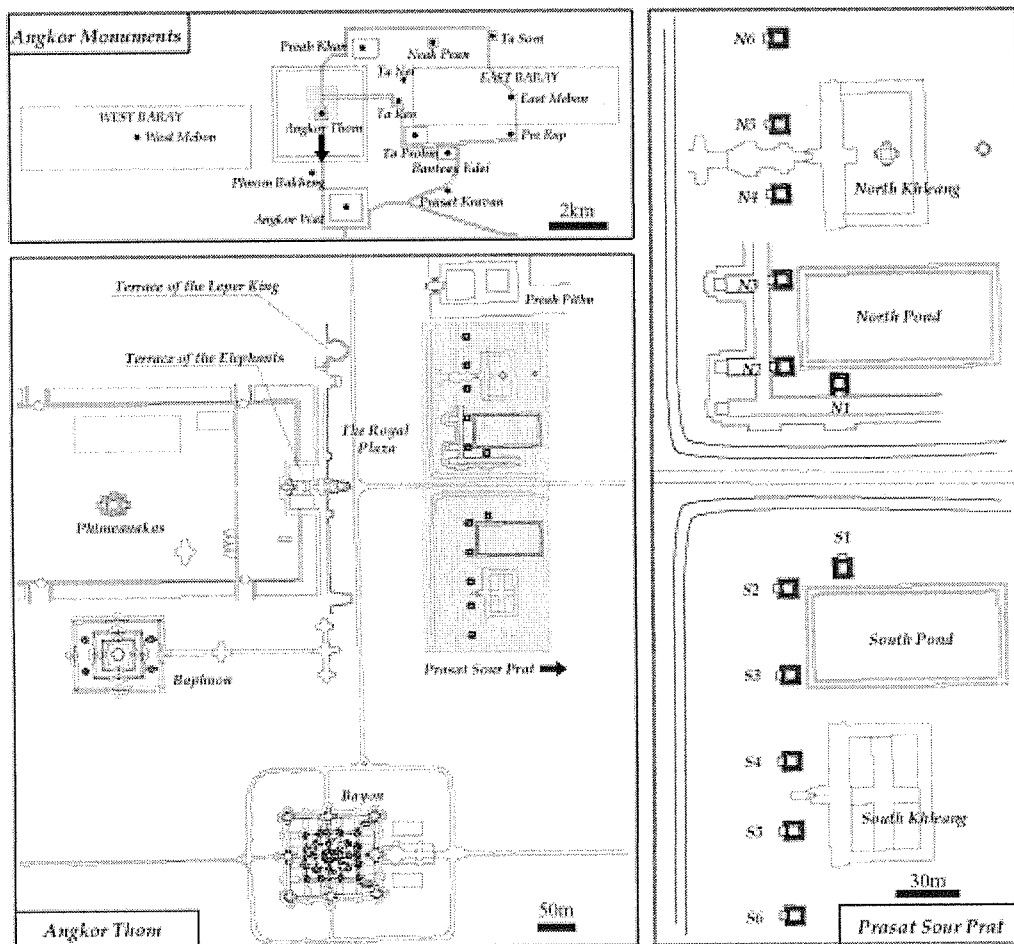


Fig. 1. Location map of Prasat Suor Prat in the Angkor region.

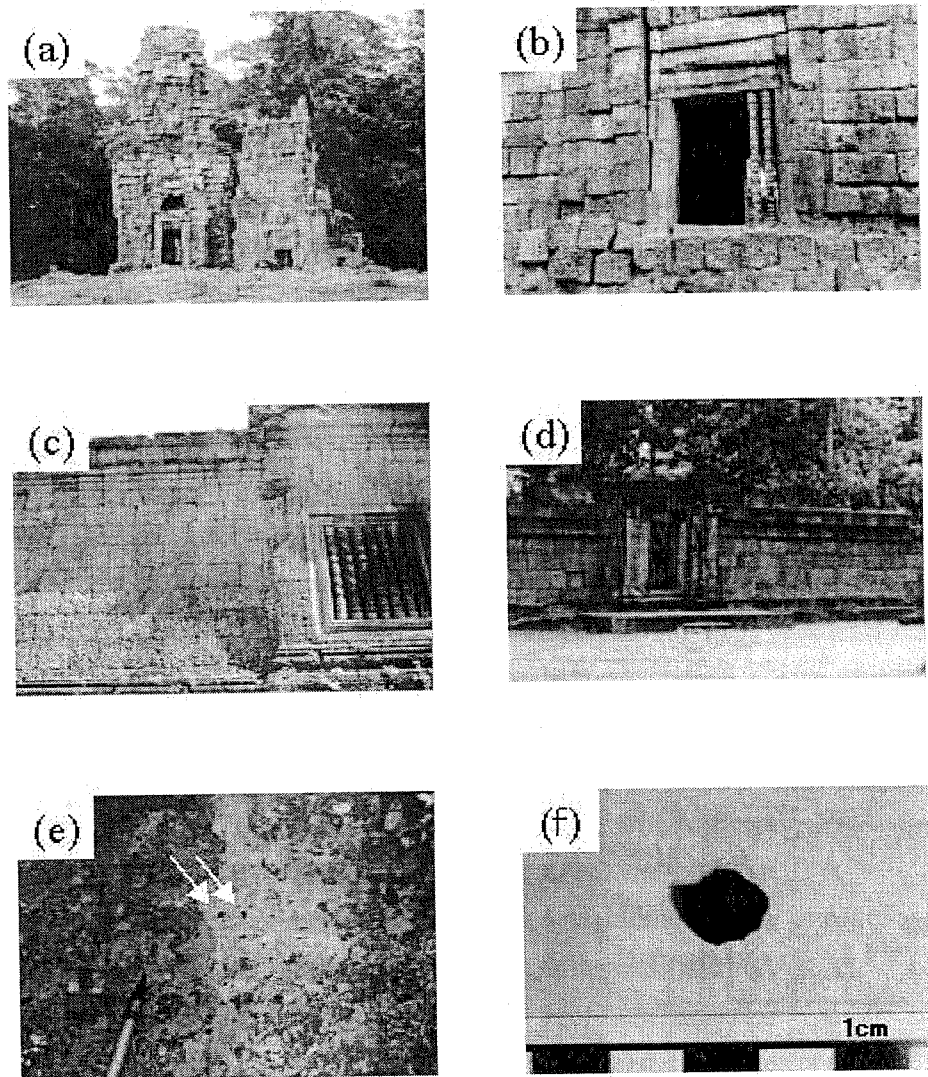


Fig. 2. (a) The N1 (right) and N2 (left) towers of Prasat Suor Prat, (b) north face of the N2 tower of Prasat Suor Prat, (c) Outer Gallery of Banteay Samre, (d) enclosure of Wat Athvea, (e) occurrence of charcoal fragments in the stucco on the inner wall of the N2 tower of Prasat Suor Prat and (f) charcoal fragment (sample No.1615) from the stucco on the inner wall of the N2 tower of Prasat Suor Prat.

Table 2 Radioactive carbon ages for the charcoal fragments collected from the N1 and N2 towers of Prasat Suor Prat, determined by the accelerator mass spectrometry

Sample No	Sampling Point	$\delta^{13}\text{C}$	^{14}C Age	Calibrated ^{14}C	1σ calibrated ^{14}C age
		(‰)	(yrBP $\pm 1\sigma$)	age	(Probability)
1615	Charcoal in the stucco on the inner wall of the 1 st story of the N2 tower	-26.7	940 \pm 40	cal AD 1,040	
				cal AD 1,100	cal AD 1,030 - 1,065 (36.1%)
				cal AD 1,115	cal AD 1,080 - 1,125 (42.4%)
				cal AD 1,140	cal AD 1,135 - 1,155 (21.4%)
				cal AD 1,150	
1624	Charcoal found in the hole of the laterite block 2.3.3.20 of the N1 tower	-32.6	940 \pm 40	cal AD 1,040	
				cal AD 1,105	cal AD 1,030 - 1,065 (36.1%)
				cal AD 1,115	cal AD 1,080 - 1,125 (42.4%)
				cal AD 1,140	cal AD 1,135 - 1,155 (21.5%)
				cal AD 1,150	
1625	Charcoal found under the laterite block 3.3.1.27 of the N1 tower	-28.1	910 \pm 35	cal AD 1,070	cal AD 1,040 - 1,095 (55.0%)
				cal AD 1,080	cal AD 1,115 - 1,140 (23.9%)
				cal AD 1,130	cal AD 1,150 - 1,165 (10.9%)
				cal AD 1,135	cal AD 1,170 - 1,185 (10.2%)
				cal AD 1,160	

アンコール遺跡における塩類風化プロセス

細野高啓・内田悦生・須田千幸・上野晃世

1. はじめに

アンコール遺跡の主要な建材である砂岩には、様々な要因による劣化がみられるが、中でも塩類風化による劣化は深刻な問題となっている(註1)。報告されている塩類は硫酸塩鉱物、リン酸塩鉱物、炭酸カルシウムの三種類であり、塩類風化プロセスを解明する上で、S(硫黄)、P(リン)、Ca(カルシウム)など、塩類を構成する元素の供給源を明らかにすることが重要な課題となっている。これまでに行なわれた記載調査・元素分析の結果から、これら三元素のうち、硫酸塩とリン酸塩を構成するSやPは遺跡内に生息するコウモリの排泄物から、また、炭酸カルシウムを構成するCaは雨水によって溶出された砂岩材からそれぞれもたらされたことが推定されている(註2)。しかし、雨水、コウモリの排泄物や砂岩材の介在した複雑なプロセスにおいて、観察事実や元素の量比のみからでは詳しい塩類の起源を特定するには限界があった。

SとSr(ストロンチウム)には ^{32}S 、 ^{33}S 、 ^{34}S 、 ^{36}S と、 ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{87}Sr 、 ^{88}Sr のそれぞれ四つの安定同位体が存在する。多様なプロセスを経て形成された地球上の岩石や、水、生物といった物質は、それぞれ固有のS同位体比($\delta^{34}\text{S}$)(註3)やSr同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)を持つ。そのため、これら同位体比は物質の起源やその混合割合を知るトレーサーとして地球化学分野において広く利用されている(註4)。したがって、この同位体比のもつトレーサビリティを利用し、たとえば硫酸塩に含まれるSの起源を知ることができると期待される。また、Sと並び塩類の重要な構成元素であるP(リン)に関しては安定同位体が一つしかないため同位体比は存在しないが、Srはその化学的挙動がCaと類似するため(註5)、Sr同位体比は環境中のCaのトレーサーとして多用されている(註6)。したがって、今回はこのSr同位体比を用いて三種類の塩類の主要構成元素であるCaの起源を知ることができると期待される。

本研究では塩類の起源についてより理解を深めるため、上記三種類の塩類に加え、考えられる様々な寄与物質・比較物質についてS・Sr同位体比を測定した。さらに、元素組成分析結果を合わせ、アンコール遺跡における塩類風化プロセスについて議論する。

2. 採取試料

アンコール遺跡にみられる塩類風化には、析出塩類および産状に基づき大きく二つのタイプに分けられている(註2)。一つは遺跡室内の壁や柱材下部などで起こる硫酸塩とリン酸塩を主体とした塩類風化で、もう一つは建物基壇で特徴的に起こる炭酸カルシウムの析出による石材表面の剥離である。ここでは便宜的に前者を「硫酸塩-リン酸塩タイプ」、後者を「カルサイトタイプ」とよぶ。元素組成およびS・Sr同位体比の分析用として、(A)塩類5試料、(B)塩類の析出している劣化砂岩材8試料を採取した。また、考えられる寄与物質や比較試料として、(C)新鮮砂岩材4試料、(D)方解石脈1試料、(E)コウモリの排泄物5試料、(F)雨水1試料、(G)環濠水2試料、(H)聖池のたまり水2試料、(I)河川水1試料、(J)湖水1試料を採取した。各試料の採取は2003年8月(JSAミッション第36次調査)および2004年8月(JSAミッション第41次調査)の二回にて行った。各試料の採取地点と肉眼での特徴をTable 1に示す。また、劣化砂岩材および岩石試料の写真をPl. 1に示す。以下、試料採取の詳細について述べる。

(A)・(B)塩類または塩類の析出している劣化砂岩材:遺跡室内の壁および柱下部には床面から60 cmまでの高さ、しばしば白色塩類を伴う石材の剥離が観察される(Pl. 1-1, 7, 12, 13)。アンコール・ワットからは壁面におけるこうした部分を北経蔵(Pl. 1-1; sample 1501)と中回廊(Pl. 1-7; sample 1505)から、また白色から灰色の塩類が析出した劣化砂岩材をゴープラ窓枠下部から採取した(Pl. 1-3, 10; samples 1502, 1506)。また、柱材は床面から数十 cm にわたりかなりの剥離が進行している(Pl. 1-4)。外回廊において床面より3 cmの部分より白色の析出塩類を採取した(Pl. 1-5; sample 1503A)。同様に、パイオンからも壁下部(Pl. 1-12, 13; samples 1508, 1509)および回廊屋根材の内側から劣化砂岩材(Pl. 1-11; sample 1507)を採取した。

プノン・クロムは他の遺跡と比較して特に塩類析出による劣化が深刻な遺跡である。建築に使用されている

石材の境界部分はそのほとんどが褐色に変色し、強い変質を受けている(Pl. 1-14, 15; sample 1512)。黄色から茶褐色を示す多量の塩類はこうした境界に沿うようにして外壁(Pl. 1-16, 17; sample 1511)、内壁(Pl. 1-18, 19; sample 1514)を問わず析出している。ここでは塩類そのものからなる試料を採取した。

プノン・バケンとタ・ケウの基壇の石材は炭酸カルシウムの析出(弱酸による反応を見ることで容易に確認できる)により、約5~10 mmの厚さで石材の剥離が起こっている。それぞれの遺跡から白色の炭酸カルシウムが析出した劣化砂岩を採取した(Pl. 1-20, 21; samples 1620, 1622)。

(C)新鮮砂岩材:アンコール・ワット北経蔵の修復用に JSA がクレン山南東斜面から切り出した砂岩材(Pl. 1-22; sample 1515)、および遺跡建築に用いられたオリジナルの砂岩材(Pl. 1-23; sample 1517)を分析用試料として得た。前者は明灰色から灰色を示し、後者は全体的に暗灰色を示す。共に塩類の析出や石材の劣化はみられない。

前述の通り、砂岩柱材の風化・剥離は床面から約60 cmまで見られ(Pl. 1-4)、塩類の析出はその下部3 cm程度までであり、それより上部では既に剥離が進行しているため肉眼では観察されない(Pl. 1-6; sample 1503B, 床面から30 cmの部分)。同様に、プノン・クロム遺跡の石材表面の中心部分(Pl. 1-15)には顕著な変色や塩類の析出は認められない(sample 1513)。劣化石材との関係を検証するため、これらの試料を採取した。

(D)方解石脈:アンコール・ワット北経蔵の修復用に JSA がクレン山南東斜面から切り出した砂岩材中には、しばしば幅1~5 mm程度の方解石脈がみられる(Pl. 1-24)。炭酸カルシウムの析出に伴う劣化砂岩材に対する比較試料として、こうした方解石1試料を採取した(Pl. 1-24; sample 1613)。

(E)コウモリの排泄物:コウモリの排泄物は長軸5 mm程度の楕円体をなし、褐色~黒色で異臭をはなつ。アンコール・ワット中回廊北東塔から2試料、バイオン中央祠堂から2試料、プノン・クロムの祠堂から1試料、床面に散在しているこれらを10 gずつ採取した(Table 1; samples 1504, 1510, 1617, 1618, 1619)。

(F)雨水:塩類風化現象は雨水などへの元素の溶出を介して起こるので、そのプロセスを理解する上で雨水の化学組成を知ることが重要となる。スコールによる雨水をJSA オフィス内において1試料採取し(2004年8月)、これらをアンコール地域雨水の代表的組成とみなした(Table 1; sample 1637)。

(G)環濠水:比較試料として、アンコール・ワットおよびアンコール・トムの環濠水をそれぞれ1試料ずつ採取した(Table 1; samples 1631, 1636)。

(H)聖池のたまり水:比較試料として、アンコール・ワット最外周壁内およびバイオンの聖池の水をそれぞれ1試料ずつ採取した(samples 1633, 1634)。

(I)河川水:比較試料として、スピアン・トマ付近を流れるシエムリアップ川の水を1試料採取した(Table 1; sample 1635)。

(J)湖水:比較試料として、トンレサップ湖の水1試料を湖畔北側にて採取した(Table 1; sample 1632)。

3. 試料調整および分析方法

採取した塩類、劣化砂岩材および新鮮砂岩材は、筑波大学設置のタングステンカーバイト製自動粉末作製機 Herzog HSM-F36 を用い粉末にし、これを各種分析用とした。ただし、炭酸カルシウムによる劣化砂岩材については、1999年と2000年(JSA ミッション第21および23次調査)に採取した4試料(samples 809, 813, 820, 822)(註7)を用いた。

炭酸カルシウムそのものの分析を行う目的で、今回採取した劣化砂岩材および方解石脈について、酢酸を用いて試料中から炭酸カルシウム成分だけを溶解・抽出し(註8)、これをSr 同位体比分析用とした。

雨水により溶出される新鮮砂岩材成分を調べるため、この粉末 0.5 g を蒸留水 100 ml に浸漬し、12 時間ごとに 1 分間攪拌させ、開始から 72 時間経過した上澄みを直径 0.2 μm のフィルターで濾過し、この溶液を成分分析用とした。

コウモリの排泄物は 100°C に設定した乾燥機で一昼夜乾燥させ、メノウ乳鉢を用いて粉末にし、これを S・Sr 同位体比分析用とした。さらに、雨水による溶出成分を調べるため、新鮮砂岩材の場合と同様の方法を用いて溶出溶液を作った。

水試料(雨水、環濠水、聖池のたまり水、河川水、湖水)はいずれも直径 0.2 μm のフィルターで濾過し、一部は成分分析用とした。また、これに HCl と BaCl₂ を加えて生じさせた BaSO₄ 沈殿物を回収し、これを S 同位体比分析用とした。Sr 同位体比分析用にはこの濾過試料を蒸発乾固させて生じた残渣物を用いた。

塩類の同定には、早稲田大学理工学部設置の粉末 X 線回折装置 (XRD) Rigaku RINT-ULTIMA3 および、X 線マクロアナライザー (EPMA) Oxford INCAx-sight (SEM 部分は JOEL JSM-6360) を使用した。また、成分分析、S・Sr 同位体比分析に関しては、以下に述べる試料以外はすべてカナダの Activation Laboratories Ltd. に依頼した。

塩類(硫酸塩・磷酸塩)、劣化砂岩材、新鮮砂岩材、コウモリの排泄物の Sr 同位体比については、筑波大学設置の表面電離型質量分析装置 (TIMS) Finnigan MAT 262RPQ を用いて測定を行った(註 9, 10)。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の測定値は ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 の値で補正し、分析期間中の標準試料 NIST-SRM987 の ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 値は 0.710240±0.000010 (2 σ , n=4) であった。XRD および EPMA による塩類の同定結果を Table 2 に、化学組成および S・Sr 同位体比の分析結果を Tables 3, 4 に示す。

4. 結果と考察

4.1. 析出塩類

XRD および EDS による析出塩類の同定結果より、アンコール遺跡における析出塩類は硫酸塩鉱物(石膏、バッサナイト、バライト)、磷酸塩鉱物(ニューベリアイト、ブルツシャイト)、カルシウム炭酸塩(カルサイト)の大きく三種類からなることが明らかとなった (Table 2)。硫酸塩と磷酸塩鉱物はアンコール・ワット、パイオン、プノン・クロムから採取したほとんど全ての塩類・劣化砂岩材試料において検出された。石膏はこれらのいずれの遺跡にも含まれており、他の塩類と比べて量的に多い (Table 2)。ブルツシャイトは特徴的にアンコール・ワットで見られるが、プノン・クロムではバッサナイトが卓越している。一方、若干の石膏やバライトなどの硫酸塩鉱物は含むが、プノン・バケンとタ・ケオの基壇表面の劣化砂岩材中にはカルシウム炭酸塩(カルサイト)が特徴的に検出された (Table 2)。

光学顕微鏡下での観察および SEM 観察によると、石膏は長さ 0.01 から 0.2 mm の針状結晶として劣化砂岩中に存在しており、幅約 0.05 から 0.2 mm の脈をつくり亀裂を埋めている (Pl. 2-1)。大きな塩類結晶に関してはしばしば葡萄状構造を形成する (Pl. 2-2)。対照的に、ブルツシャイトは隠微晶質で粒間や、エフロレッセンスとして劣化砂岩材表面に存在している (Pl. 2-3)。バッサナイトは一般に塩類中の石膏と共存しておりプノン・クロムにおいて見られる。また、バライトは直径約 0.01 mm 以下の細粒結晶としてしばしば劣化砂岩の粒間に含まれる (Pl. 2-4)。ニューベリアイトは石膏やブルツシャイトと共に晶出している。カルサイトは長さ約 0.1 mm の結晶として粒間に成長しており、劣化砂岩材の剥離面に沿って幅約 0.5 から 2 mm の層を成している (Pl. 2-5, 6)。

以上の観察結果から、アンコール遺跡の硫酸塩 - 磷酸塩タイプの石材劣化に最も本質的に関与した塩類は石膏 (CaSO₄·2H₂O) であると考えられる。一方、カルサイト (CaCO₃) の析出はカルサイトタイプの岩石剥離の最も主要な原因となっている。

4.2. 劣化砂岩材の地球化学的特徴

塩類および劣化砂岩材試料に対し、新鮮な砂岩材 (sample 1305B) で規格化した元素濃度のパターンを Fig. 1 に示す。全ての新鮮砂岩材 (samples 1513, 1515, 1517) はこの図においてフラットなパターンを示し、これらが全て化学的には未変質であることを意味している。硫酸塩 - 磷酸塩タイプの試料は相対的に Mn, Mg, Ca, P, S, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb の 10 元素に富み、Si, Ti, Al, Fe, Na, K など、砂岩を構成する主な元素に関して減少しているかもしくは変化していない。一方、カルサイトタイプの試料は Ca, Cu, Sr, Ba の 4 元素に富んでいる。

前節で説明した塩類の析出から、Mg, Ca, P, S, Ba の濃集はニューベリアイト ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、バッサナイト ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)、ブルツシャイト ($\text{CaPO}_3(\text{OH})$)、カルサイト (CaCO_3)、バライト (BaSO_4) などの塩類形成によると解釈できる。他の元素は塩類鉱物の結晶格子に不純物として含まれているか、他の化合物として存在していると考えられる。

Fig. 1 には比較のために水試料データも合わせて示してある。注目すべきは、コウモリの排泄物の溶出液が他の水試料と比較して 10 倍から 1000 倍 Mn, Mg, P, S, Cu, Zn の元素に富んでいるということである。この結果はこれらの元素に関し、コウモリの排泄物が塩類の起源として石材劣化の原因となっているという考え(註 2, 11)を支持する。しかし、排泄物中の元素濃度は Ca, Sr, Ba, Pb に関してはそれ程高くなく、これらの元素に関しては他の起源物質の寄与が考えられる。雨水や環濠水、たまり水、河川水、湖水などの地表水の試料は、いずれもコウモリの排泄物の溶出液と比べると濃度は低いが、相対的に Ca, S, Cu, Sr, Ba の元素に富んでいる。更に、これらの元素は雨水により選択的に砂岩材から溶出されると考えられるので(Fig. 1)、建材として使用されている砂岩材は雨水や地表水などと並び、塩類へのこうした元素の供給源となっている可能性が考えられる。

4.3. 塩類を構成する各元素の起源

アンコール・ワットにおける最近の含水率調査から(註 2)、遺跡石材内では降水や日照りなどの気象変化に伴い水の浸透・蒸発が繰り返し起こっていることが示唆されている。一般に、塩類はこうした浸透水が毛管現象により柱や壁を上昇し、最終的に蒸発することにより析出し、劣化はこの時の結晶圧によって起こると考えられている(註 12)。ここでは S と Sr の同位体トレーサーに着目し、浸透水に溶存したと考えられる Mn, Mg, Ca, P, S, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb の 10 元素について、考えられる寄与物質との比較・検討を通しその由来について議論する。

硫酸塩の主要構成元素である S についてその同位体比をみると(Fig. 2)、硫酸塩-リン酸塩タイプの塩類および劣化砂岩材の $\delta^{34}\text{S}$ は一つの試料(sample 1507; 3.8%)を除き非常に均一で(6.1-7.7%)、起源物質の $\delta^{34}\text{S}$ がおよそそれらの平均値(6.4%)と近いことを示唆している。これらの同位体比は、新鮮砂岩材の値($\delta^{34}\text{S}=0.6\%$)と比べて有意に高く、また海水起源物質を多く含むこの地域の雨水の値($\delta^{34}\text{S}=15\text{-}21\%$)(註 13)と比べて明らかに低い。したがって、塩類を構成する S が直接雨水もしくは溶出された砂岩成分から供給されたとは考えにくい。雨水と溶出された砂岩材成分の両者の混合溶液は、S 同位体的には塩類の起源となるが、この場合カルサイトタイプの劣化がほとんど硫酸塩鉱物を伴わない事実と矛盾する。地表水試料は S 濃度が低いため測定できたのはアンコール・ワットの環濠より採取した一試料($\delta^{34}\text{S}=4.1\%$)のみであるが、これも S 同位体的に塩類の起源とはなりえない。

一方、遺跡に生息するコウモリの排泄物の S 同位体比は、ややばらつきが見られるが($\delta^{34}\text{S}=5.3\text{-}10.0\%$)、それらの平均値($\delta^{34}\text{S}=6.8\%$)は塩類および劣化砂岩材の値と酷似し、これが塩類中の S の供給源となっている可能性が高い。カルサイトタイプの劣化材に含まれる石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) およびバライト (BaSO_4) 中の微量な S の供給源として、砂岩成分や雨水からの寄与が考えられるが、これが劣化に及ぼす影響は極めて小さいと思われる。続いて、リン酸塩の主要構成元素である P は、S と同様に新鮮砂岩材中には少量しか含まれず(Table 3; $\text{P}_2\text{O}_5=0.18\text{-}0.34$ wt.%), S と比べても砂岩材からの溶出は起こりにくい結果となった(Tables 3, 4)。P は S とは異なり周辺環境水にも含まれないため(Table 4)、唯一多量に含むコウモリの排泄物からもたらされた可能性が高い。

今回測定した試料のうち、新鮮砂岩材の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は均質で最も高く(0.71812-0.71886)、逆に雨水のものは最も低く(0.70915)、両者はこの地域の Sr 同位体的端成分となっている(Fig. 3)。雨水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は現在の海水のもの($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70916$)(註 6)と誤差の範囲で一致するため、雨水中の Sr はモンスーンによって海水から供給されると考えて良い。また、トンレサップの湖水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.70968)がこれらの値と近いことは、雨水もしくは湖に逆流した海水の影響が考えられる。ここで、塩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ はタイプに関わらず全体として狭い範囲に集中し、雨水と砂岩の中間の組成にプロットされ(Fig. 3; 0.71105-0.71196)、その起源物質の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ がこれらの平均値(0.71146)と近いことを示唆している。また、劣化砂岩材は塩類と砂岩の様々な割合の混合物であるため、両者の中間組成に幅広くプロットされる(Fig. 3)。

塩類の組成を詳しく見ると、硫酸塩－リン酸塩タイプの塩類試料には SiO_2 が 10 wt.%以下でほとんど塩類のみからなるものと (samples 1503A, 1514), SiO_2 を 15-30 wt.%程度含みわずかながら砂岩粒子を含むもの (samples 1505, 1506, 1511) が存在する (Table 3)。このことは前者の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が非常に均一で (0.71105-0.71107), 一方、後者の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を持つ砂岩成分の混入によりわずかに上昇している (0.71176-0.71196) ことから明らかである (Fig. 4)。また、カルサイトタイプ試料の塩類溶出成分の分析結果を合わせると、塩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は厳密には 0.71105-0.71139 と見積られる。アンコール地域周辺の地表水は、大まかにはその $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.71085-0.71209) が上記塩類の組成範囲と重なることから、Sr 同位体的には起源物質の候補となる。しかし、シエムリアップ川やその影響を受けたアンコール・トム東側の環濠水 (sample 1636) は、これら塩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ よりも明らかに高い値を示す (0.71156-0.71209)。このことから、Sr が河川や環濠水から直接もたらされたとは考えられず、むしろ Sr 同位体的には遺跡周辺のたまり水が塩類の起源となりうる。しかし、アンコール・ワットとバイオンはそれぞれ 65 m と 43 m の高さを有し、プノン・バケンやプノン・クロムは山の上に築かれた堂山型の遺跡であるため、遺跡の大部分において周辺のたまり水が毛管現象により石材に浸透することは不可能である。また、砂岩中の方解石脈の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は塩類の値と大きく異なり (0.710956), もともと建材中には含まれないためこれも塩類の起源にはなりえない。

食物連鎖の過程で様々な環境水を通じて栄養分を摂取したことを反映し、コウモリの排泄物は同位体的に雨水と地表水の間組成を示す (Fig. 3; 0.70915-0.7105)。また、新鮮砂岩材からの溶出液の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は、溶出される鉱物 (方解石や斜長石) やその量比によりある程度幅を持つが、塩類と新鮮砂岩材の中間の値を示す (Fig. 3; 0.71174-0.71398)。したがって、雨水、コウモリの排泄物、砂岩材からの溶出成分が均一に混ざり合うプロセスを考えれば、それらの中間的同位体組成を持つ塩類の同位体比を説明することができる。最近の生物学的研究によると (註 11, 14), コウモリの排泄物を栄養源とした硫黄酸化細菌が作り出す硫酸により石材の劣化が起こることが報告されており、石材中では主として斜長石などの珪酸塩鉱物に含まれる Sr は、こうした細菌の活動を介した反応によって砂岩材から溶出されると考えられる。一方、カルサイトタイプの劣化は直接コウモリの排泄物と関係しないため、塩類中の Sr は雨水により溶解した砂岩成分からもたらされたと考えられる。このタイプの劣化は硫黄酸化細菌の活動を伴わず、雨水中の Sr 濃度は他の物質と比較して低いため (Fig. 1), 硫酸塩－リン酸塩タイプと比べて塩類の晶出は比較的小規模で、劣化の進行は遅いと推測される。

以上から、典型的なリン酸塩－硫酸塩タイプの塩類であっても、Sr はコウモリの排泄物以外に砂岩材からも多くもたらされていること、カルサイトタイプの塩類中の Sr は雨水と砂岩材からもたらされた可能性が高いことが明らかとなった。降水によって遺跡を流れ下ったこうした混合溶液は、最終的には遺跡周辺のたまり水となったことが両者の Sr 同位体比の類似性からも示唆される (Fig. 3)。同じアルカリ土類金属に属する Ca と Ba が Sr と似た挙動を持つと仮定すると、塩類中の Ca, Sr, Ba はコウモリの排泄物以外に、雨水と砂岩材からもたらされた可能性が高いと考えられ、これらのことは元素濃度の特徴 (Fig. 1) と矛盾しない。

塩類および劣化砂岩材中に濃集する遷移金属元素 (Mn, Cu, Zn, Pb) のうち、Mn, Cu, Zn の元素は雨水、周辺環境水、砂岩材からの溶出成分中にはほとんど含まれないため (Tables 2, 3), 人為的作用など特別な場合を考えない限り、唯一多量に含まれるコウモリの排泄物からもたらされたと考えられる。ただし、プノン・バケンやタ・ケオの基壇の様に、コウモリの排泄物が存在しない場所でも Cu は劣化材に濃集するため (Fig. 1), 一部は砂岩材から溶出する場合も考えられる。一方、Pb はいずれの周辺寄与物質にも含まれないため (検出限界以下のため表には載せていない), 人為的寄与など自然の作用以外に原因があると予想されるが、詳しくは後の Pb 同位体比による検討が待たれる。最後に Mg に関しては、塩類および劣化砂岩材中に濃集する元素としては最も含有量の少ない元素であり (Fig. 1), これを多量に含むコウモリの排泄物から遺跡内部の局所レベルにおいて寄与があると考えられる。

5. まとめ

本研究の結果から、アンコール遺跡の石材に浸透する水は Mn, Mg, Ca, P, S, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb の 10 元素に富み、主として硫酸塩鉱物、リン酸塩鉱物、炭酸カルシウムの三種類の塩類鉱物が析出することにより石材の劣化が引き起こされたことが明らかとなった。S・Sr 同位体比を合わせた検討により、石材の劣化に最も甚大な被害をもたらす石膏中 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) の S の多くは、遺跡内に散在するコウモリの排泄物からもたらされ、

Ca はコウモリの排泄物に加え、バクテリアの活動により溶出された砂岩材成分からも多くもたらされていると考えられる。一方、遺跡の基壇部分に顕著な石材剥離に影響を及ぼすカルサイト中(CaCO₃)のCaの多くは、雨水とそれによって溶出された砂岩材成分からもたらされたと考えられる。コウモリの排泄物が塩類風化の一大起源および原因となっていることは明らかで、遺跡室内の清掃は特に硫酸塩と磷酸塩の析出を和らげる効果があると考えられ、今後も継続する必要があるといえる。本研究を通じ、遺跡における塩類風化の原因を知る手がかりとして、S・Sr 同位体比が有効な手段となることが示された。残された課題として、今後は Pb 同位体比を用いた Pb の起源の評価を行う予定である。

註

- 註 1: Delvert J. (1963) Recherches sur l'érosion des grès des monuments d'Angkor. *Bull. École Française d'Extrême-Orient* **2**, 453-534.
- 註 2: Uchida E., Ogawa Y., Maeda N., and Nakagawa T. (1999) Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia. *Engineering Geology* **55**, 101-112.
- 註 3: $\delta^{34}\text{S}$ は $[(\text{試料の } ^{34}\text{S}/^{32}\text{S} - \text{標準物質の } ^{34}\text{S}/^{32}\text{S}) / (\text{標準物質の } ^{34}\text{S}/^{32}\text{S})] \times 1000$ と定義されており、単位は‰ (千分率) である。また、標準物質には隕鉄 (Canyon Diablo) に含まれるトロイライト (FeS) を使用し、その値は $^{34}\text{S}/^{32}\text{S} = 22.22$ とされている。
- 註 4: Faure G. (1986) Principles of isotope geology. *John Wiley and Sons, New York*, 589 pp.
- 註 5: Capo R.C., Stewart B.W., and Chadwick O.A. (1998) Strontium isotopes as tracer of ecosystem process: theory and methods. *Geoderma* **82**, 197-225.
- 註 6: Banner J.L. (2004) Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews* **65**, 141-194.
- 註 7: 内田悦生・安藤大介 (2001) 2000 年度岩石学調査. アンコール遺跡調査報告書, 195-214.
- 註 8: Murakami H., Nakano T., and Morishita Y. (1999) Hydrothermal alteration of limestone and mineral exploration of Zn-Pb skarn deposits in the Sako-nishi area of the Kamioka mine, central Japan. *Resource Geology* **49**, 259-280.
- 註 9: Nakano T., Yin J., Kajiwaru Y., and Fujii T. (1988) A method for the analysis of rock samples by ICP-OES. *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba* **14**, 78-80.
- 註 10: Na C., Nakano T., Tazawa K., Sakagawa M., and Ito T. (1995) A systematic and practical method of liquid chromatography for the determination of Sr and Nd isotopic ratios and REE concentrations in geological samples. *Chemical Geology* **123**, 225-237.
- 註 11: Fusey P. (1991) Altération biologiques des grès Cambodgiens et recherche de moyens de protection. *École Française d'Extrême-Orient, Paris*, 91 pp.
- 註 12: Goudie A. and Viles H. (1997) Salt weathering Hazards. *John Wiley and Sons, New York*, 241 pp.
- 註 13: Rees C.E., Jenkins W.J., and Monster J. (1978) The sulfur isotopic composition of ocean water sulphate. *Geochim. Cosmochim. Acta* **42**, 377-381.
- 註 14: 片山葉子・下田太一・新井英夫 (2003) 保存科学調査(2) 微生物学的調査. アンコール遺跡調査報告書, 173-182.

写真解説

- Pl. 1: Photos of sampling sites and samples of salts, weathered sandstones, fresh sandstones, and calcite vein. The circle in the figure indicates the sampling area.
- Pl. 2: Photomicrographs of salt minerals. (1) gypsum vein (crossed polars; sample 1502), (2) gypsum with botryoidal structure (crossed polars; sample 1511), (3) brushite crystals (crossed polars; sample 1506), (4) barite crystals (SEM image; sample 1502), (5) calcite layer (stereoscope; sample 822), (6)

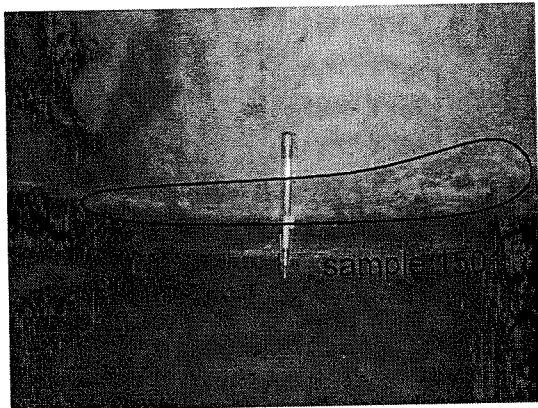
calcite crystals (crossed polars). Abbreviations: Qz=quartz, Gyp=gypsum, Bru=brushite, Bar=barite, Cal=calcite, K-f=Potassium feldspar.

図版解説

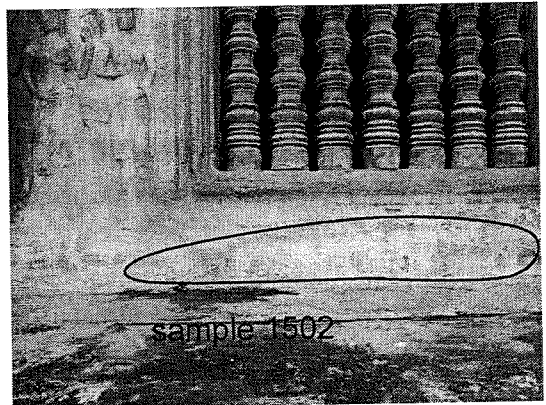
- Fig. 1: Fresh sandstone (sample 1503B)-normalized element concentrations for samples from the Angkor area.
- Fig. 2: S isotopic compositions for samples from the Angkor area.
- Fig. 3: Sr isotopic compositions for samples from the Angkor area.
- Fig. 4: Sr isotopic composition for samples of salts and some water samples from the Angkor area.

表解説

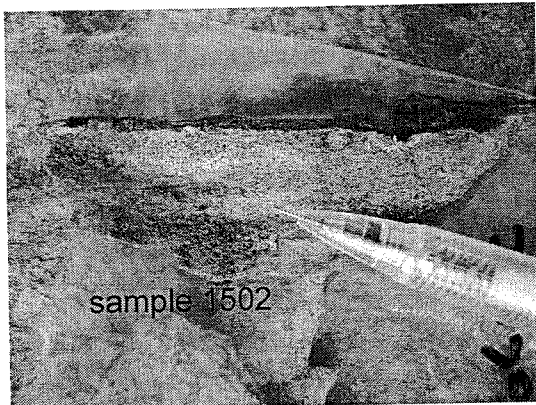
- Table 1: Sample list of salt and deteriorated sandstone from the Angkor monuments and bat guano, fresh sandstone, calcite vein, and water for comparison.
- Table 2: Mineral assemblage of salt and weathered sandstone from the Angkor monument, Cambodia.
- Table 3: Major and trace elements concentrations and S and Sr isotopic compositions of salt, weathered sandstone, and calcite vein of the Angkor monuments.
- Table 4: Major and trace elements concentrations and S and Sr isotopic compositions of dissolved water and surface water samples from the Angkor area.



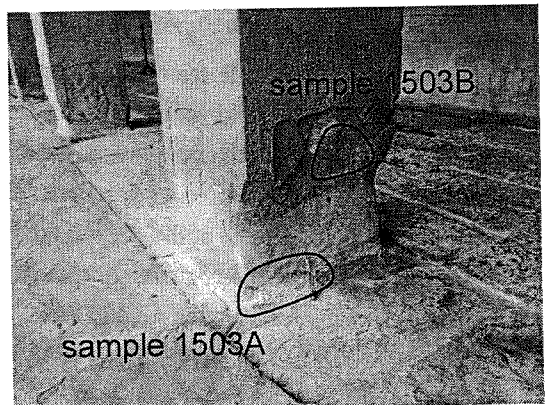
Pl. 1-1



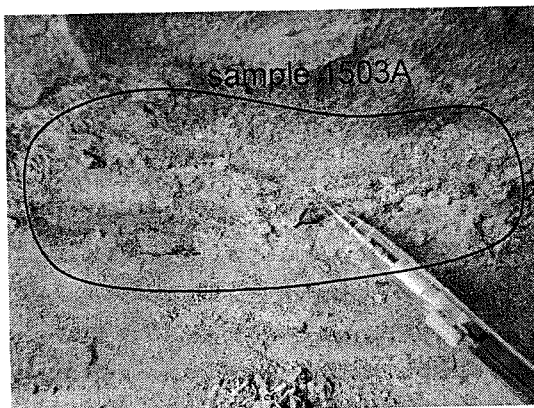
Pl. 1-2



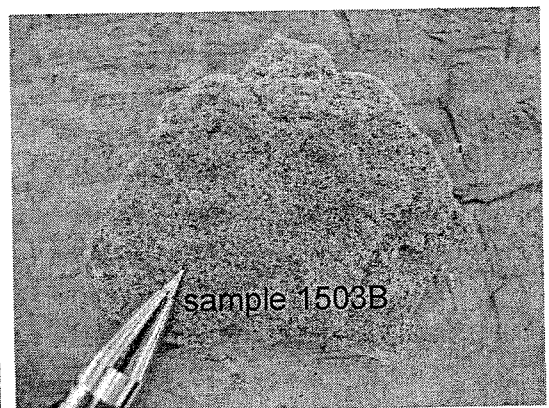
Pl. 1-3



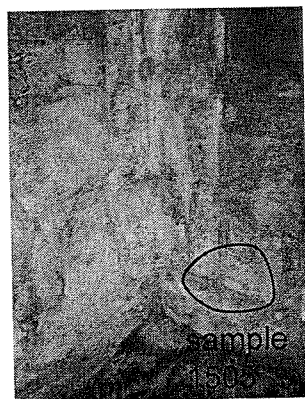
Pl. 1-4



Pl. 1-5



Pl. 1-6



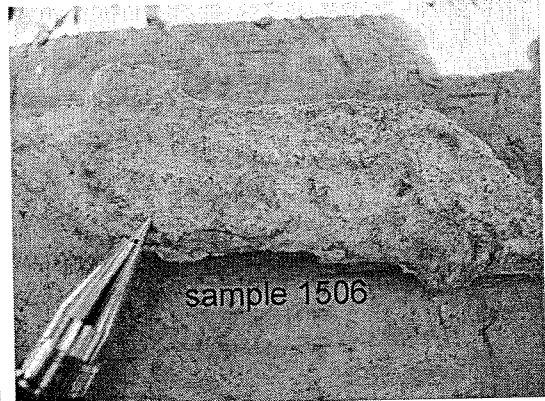
Pl. 1-7



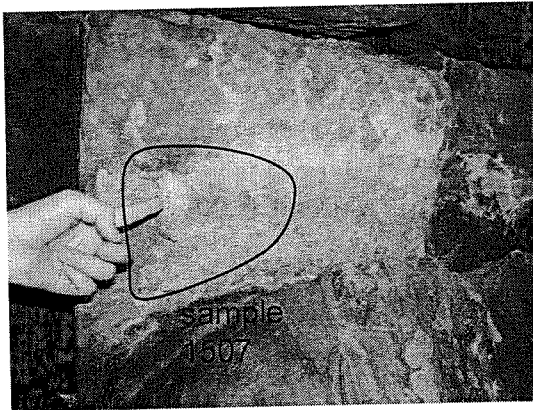
Pl. 1-8



Pl. 1-9



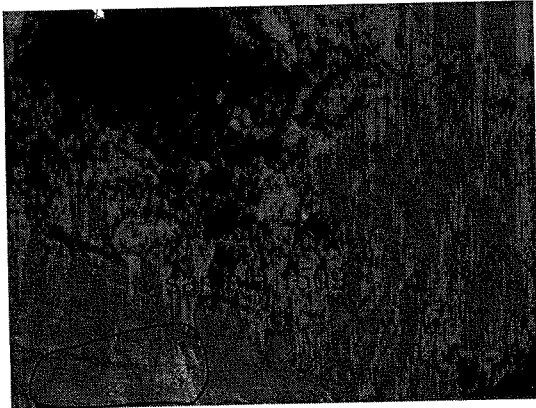
Pl. 1-10



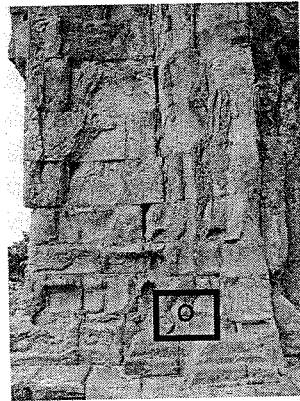
Pl. 1-11



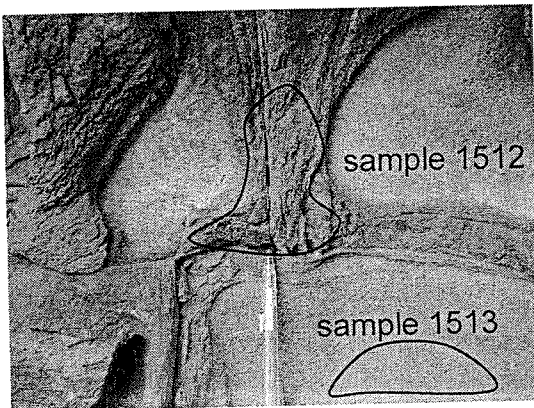
Pl. 1-12



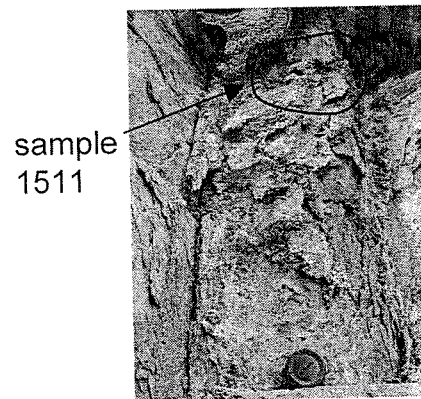
Pl. 1-13



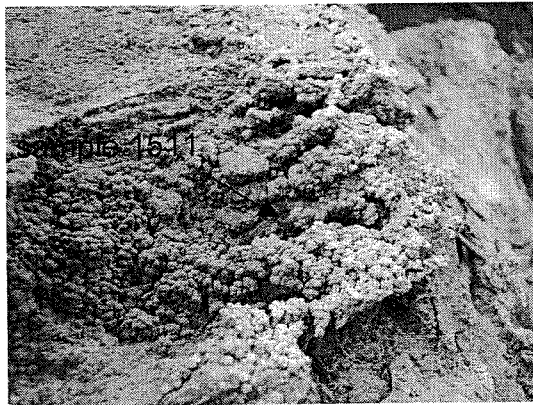
Pl. 1-14



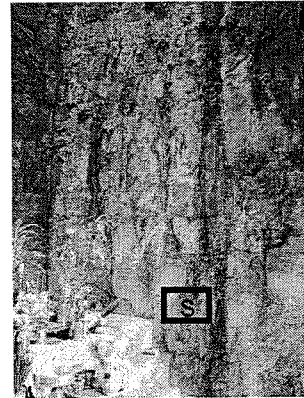
Pl. 1-15



Pl. 1-16



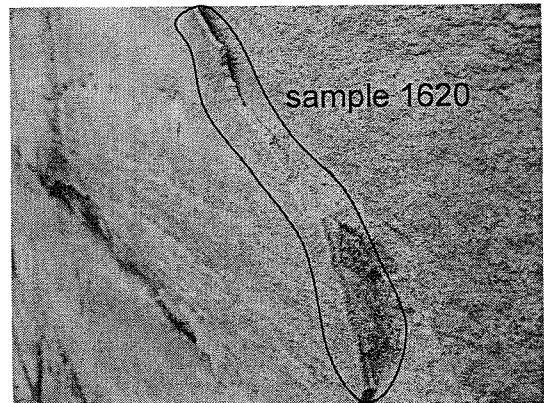
Pl. 1-17



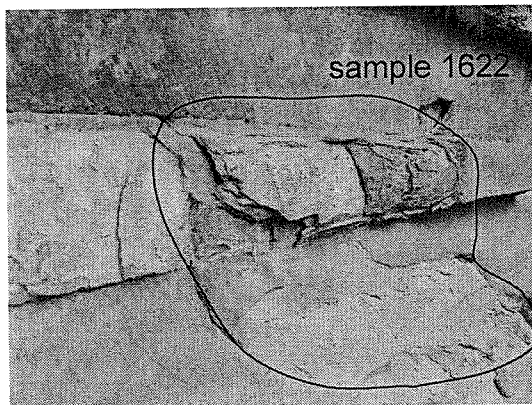
Pl. 1-18



Pl. 1-19



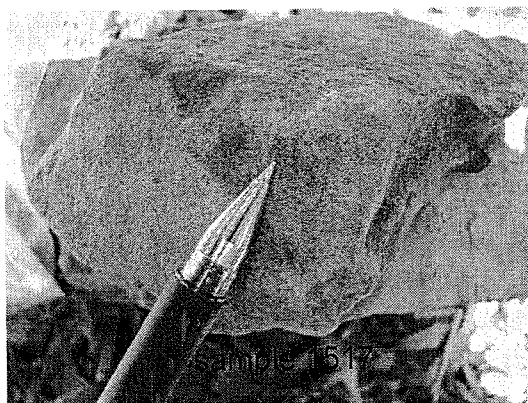
Pl. 1-20



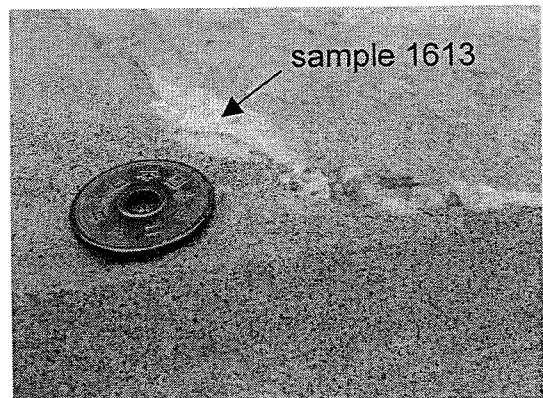
Pl. 1-21



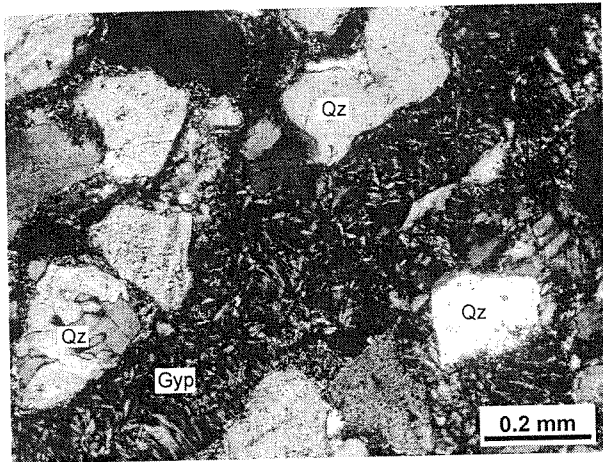
Pl. 1-22



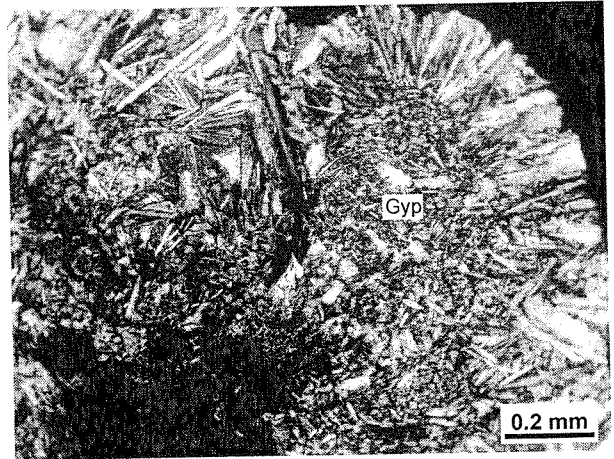
Pl. 1-23



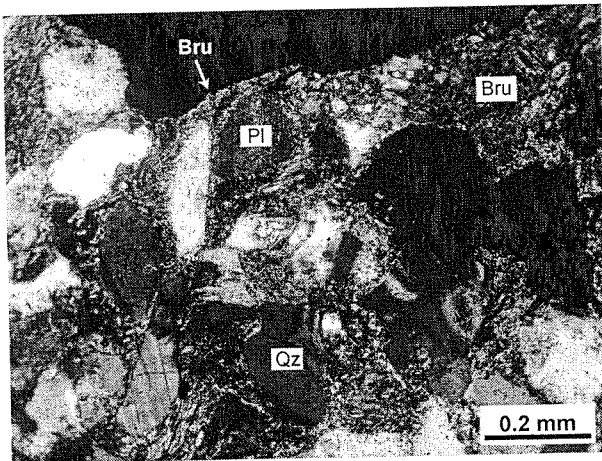
Pl. 1-24



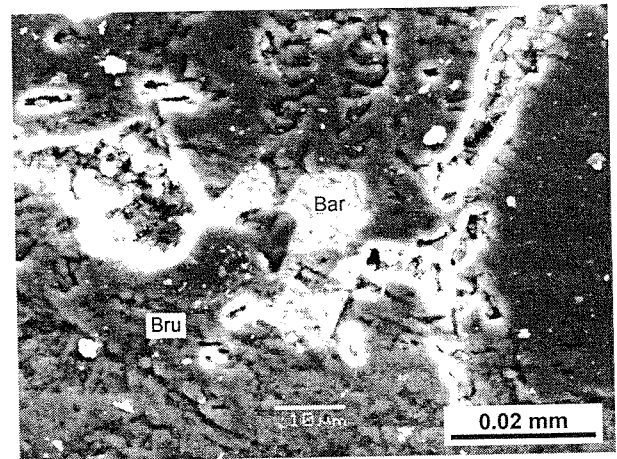
Pl. 2-1



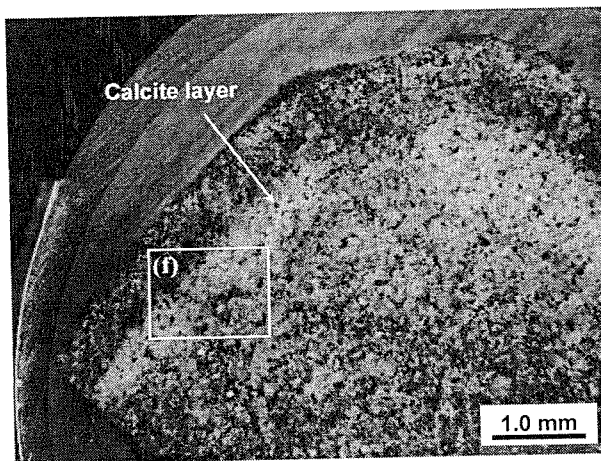
Pl. 2-2



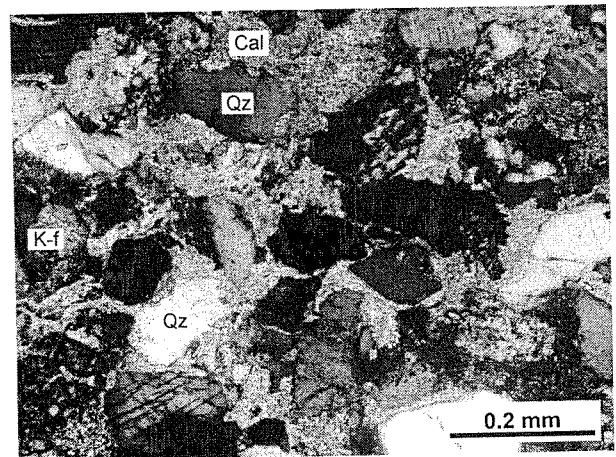
Pl. 2-3



Pl. 2-4



Pl. 2-5



Pl. 2-6

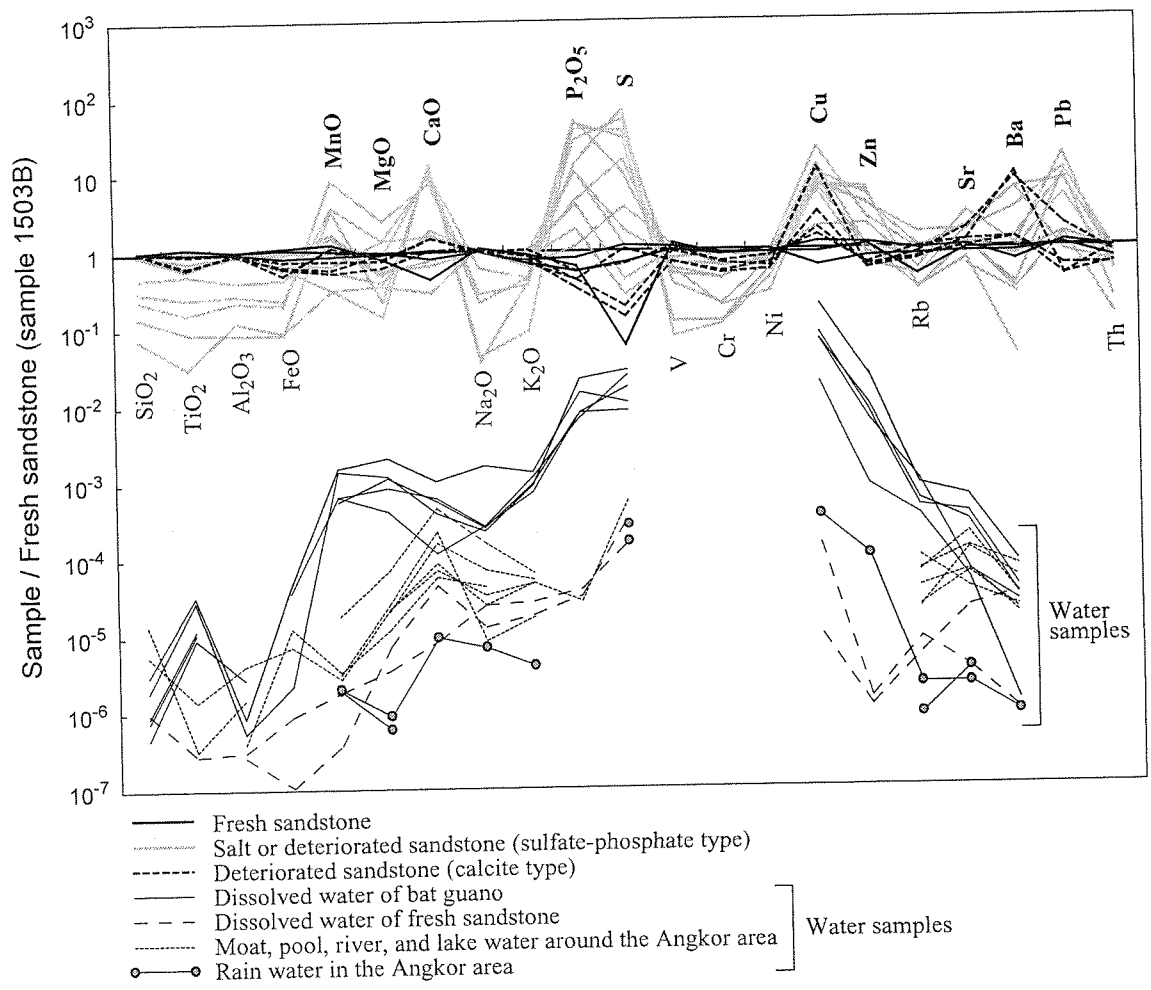


Fig. 1

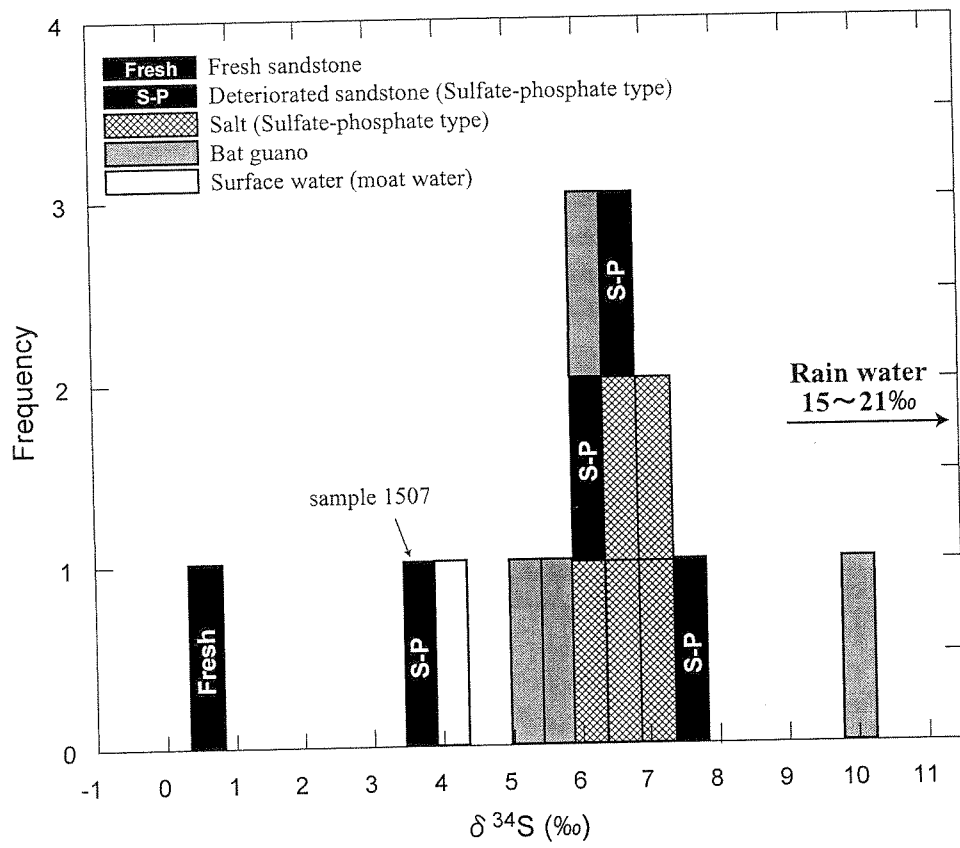


Fig. 2

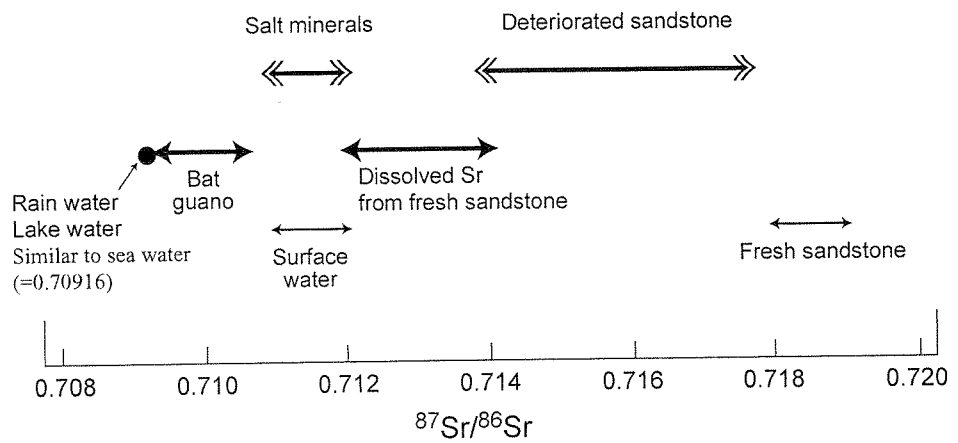
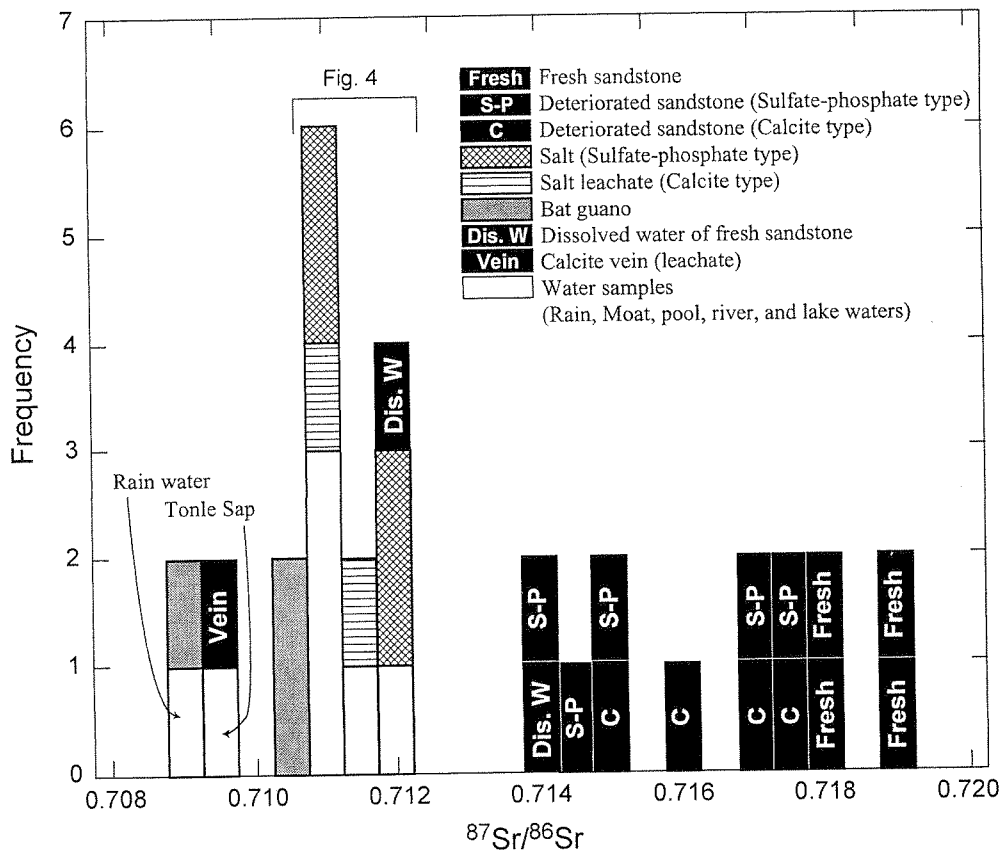


Fig. 3

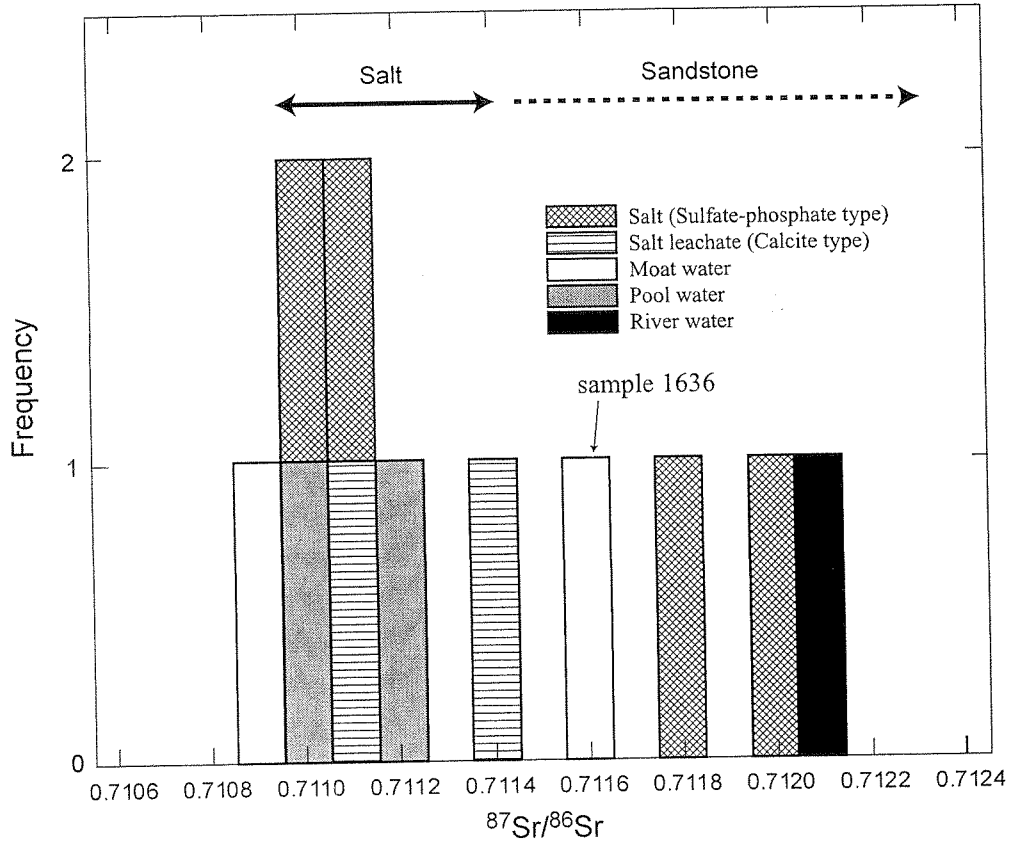


Fig. 4

Table 1 : Sample list of salt and deteriorated sandstone from the Angkor monuments and bat guano, fresh sandstone, calcite vein, and water for comparison.

Sample no.	Monument	Sample type	Sample locality	Remarks
<i>Collected at 3rd-16th of August, 2003</i>				
1501	Angkor Wat	B	lower part of the interior wall of the main chamber of the Northern Library	deteriorated sandstone with white fine salt efflorescence
1502	Angkor Wat	B	under part of the window frame of the western gopula of the outer gallery	deteriorated sandstone with white to gray efflorescence
1503A	Angkor Wat	A	lower part of the pillar of the outer gallery, 3 cm high from the base	white salt efflorescence
1503B	Angkor Wat	C	lower part of the pillar of the outer gallery, 30 cm high from the base	grayish sandstone without salt in visible
1504	Angkor Wat	E	northeast tower of the middle gallery	fresh bat guano, brown to black in color, 5 mm in length
1505	Angkor Wat	A	interior wall of the northeast tower of middle gallery	brown to dark-yellow salt deposition
1506	Angkor Wat	A	under part of the window frame of the northern gopula of the inner gallery	white to gray efflorescence
1507	Bayon	B	interior surface of the northwest roof of the inner gallery (tower 33)	deteriorated sandstone with white to gray efflorescence
1508	Bayon	B	lower part of the interior wall of the inner gallery	deteriorated sandstone with white fine salt efflorescence
1509	Bayon	B	northwest small chamber (the 7th) around the central sanctuary	deteriorated sandstone with white fine salt efflorescence
1510	Bayon	E	northwest small chamber (the 7th) around the central sanctuary	fresh bat guano, brown to black in color, 5 mm in length
1511	Phnom Krom	A	upper part of the false door frame of the central sanctuary	yellow to dark-brown botryoidal salt crystal
1512	Phnom Krom	B	southern exterior wall of the central sanctuary	brownish sandstone
1513	Phnom Krom	C	southern exterior wall of the central sanctuary	grayish sandstone without salt in visible
1514	Phnom Krom	A	northern interior wall of the central sanctuary, 1.7m high from the base	yellow to brown salt deposition
1515	Angkor Wat	C	sandstone supplied from the Kulen Mountain for restoration of the Northern Library	grayish sandstone without salt in visible
1517	Angkor Wat	C	northern part of the roof	gray to brown sandstone without salt in visible
<i>Collected at 8th-20th of August, 2004</i>				
1613	Angkor Wat	D	hosted in the sandstone supplied from the Kulen Mountain	5 mm width with white to pinkish in color
1617	Phnom Krom	E	southern part of the central sanctuary	fresh guano, brown to black in color, 5 mm in length
1618	Bayon	E	small chamber around the central sanctuary	fresh bat guano, brown to black in color, 5 mm in length
1619	Angkor Wat	E	northeast tower of the middle gallery	fresh bat guano, brown to black in color, 5 mm in length
1620	Phnom Bakheng	B	rock surface of northern side of the 1st platform	exfoliated sandstone with white fine salt efflorescence
1622	Ta Keo	B	rock surface of eastern side of the 2nd platform	exfoliated sandstone with white fine salt efflorescence
1631	Angkor Wat	G	the moat at northern side of the western causeway	transparent with yellowish color
1632	Tonle Sap	J	northern end of the Tonle Sap lake	turbid with brown color
1633	Angkor Wat	H	northern side of the holy pool	transparent with greenish color
1634	Bayon	H	northern side of the holy pool	transparent with greenish color
1635	Siem Reap River	I	near the Spean Thma	turbid with brown color
1636	Angkor Thom	G	eastern side of the moat at south of the east gate	transparent with yellowish color
1637	Siem Reap City	F	office of JSA (Japanese Government Team for Safeguarding Angkor), Siem Reap	transparent

A=salt, B=deteriorated sandstone, C=fresh sandstone, D=calcite vein, E=bat guano, F=rain water, G=moat water, H=pool water, I=river water, J=lake water

Table 2. Mineral assemblage of salt and weathered sandstone from the Angkor monument, Cambodia.

Sample no.	Monument	Sample type	Sulfate			Phosphate		Cal	Comments on EPMA analysis
			Gyp	Bas	Bar	New	Bru		
<i>Sulfate-phosphate type</i>									
1501	Angkor Wat	B	-	-	-	-	-	-	some Ca phosphoric minerals in matrix
1502	Angkor Wat	B	-	-	-	-	-	-	some Ca and Al phosphoric minerals
1503A	Angkor Wat	A	++	-	-	-	-	-	
1505	Angkor Wat	A	+++	-	-	-	-	-	some Mg and Ca sulfate and phosphoric minerals
1506	Angkor Wat	A	+	-	-	-	-	-	
1507	Bayon	B	-	-	-	-	-	-	some K and Al phosphoric minerals, Fe in matrix
1508	Bayon	B	-	-	-	-	-	-	presence of berlinite (AlPO ₄)?
1509	Bayon	B	-	-	-	-	-	-	
1511	Phnom Krom	A	+++	+	-	++	-	-	some K and Al phosphoric minerals
1512	Phnom Krom	B	+++	-	-	-	-	-	some K and Al phosphoric minerals
1514	Phnom Krom	A	+++	+	-	-	-	-	some K and Al phosphoric minerals
<i>Calcite type</i>									
809	Phnom Bakheng	B	-	-	-	-	-	++	
813	Phnom Bakheng	B	-	-	-	-	-	++	
1620	Phnom Bakheng	B	-	-	-	-	-	++	
820	Ta Keo	B	-	-	-	-	-	++	
822	Ta Keo	B	-	-	-	-	-	++	
1622	Ta Keo	B	-	-	-	-	-	++	

Sample type: A=salt, B=deteriorated sandstone

Abbreviation: Gyp=gypsum (CaSO₄·2H₂O), Bas=bassanite (CaSO₄·0.5H₂O), Bar=barite (BaSO₄), New=newberyite (MgHPO₄·3H₂O),

Bru=brushite (CaPO₃(OH)), Cal=calcite (CaCO₃).

Qualitative composition analysis: +++; major, ++; medium, +; minor by SEM, -; by EPMA

Table 4: Major and trace elements concentrations and S and Sr isotopic compositions of dissolved water and surface water samples from the Angkor area.

Sample type	C		E		E		E		F		G		H		I		J						
	Angkor Wat	W1517†	Angkor Wat	1619†	Angkor Wat	1504†	Bayon	1510†	Bayon	1618†	Phnom Krom	SR city	Angkor Wat	1631	Angkor Thom	1633	Angkor Wat	1634	Bayon	SR river	1635	Tonle Sap	
Montument	Angkor Wat	W1517†	Angkor Wat	1619†	Angkor Wat	1504†	Bayon	1510†	Bayon	1618†	Phnom Krom	SR city	Angkor Wat	1631	Angkor Thom	1633	Angkor Wat	1634	Bayon	SR river	1635	Tonle Sap	
Cl (mg/L)	0.1	0.3	8.1	8.1	9.1	24.6	24.6	24.6	9.2	12.1	0.2	3.0	3.0	1.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	1.6	1.6	6.3	
PO ₄ (as P)	0.1	0.1	25.3	25.3	47.0	69.8	69.8	24.6	24.6	21.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
SO ₄	0.5	0.2	11.9	11.9	15.0	40.0	40.0	23.8	23.8	33.5	0.4	0.5	0.5	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.8	0.8	3.7	
Si (µg/L)	389	647	600	600	2,000	1,232	500	500	500	300	—	—	600	600	1,500	2,530	3,695	3,695	3,695	3,695	9	9	9,060
Ti	0.2	1.7	68	68	194	161	63	63	63	53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
Al	31	37	—	—	100	64	318	318	318	318	—	—	—	—	47	282	469	469	469	469	312	312	170
Fe	5	38	—	—	1,865	97	1,590	1,590	1,590	454	—	—	—	—	551	—	—	—	—	—	2	2	12
Mn	0.3	1.3	377	377	1,083	966	457	457	457	454	1	—	—	—	2	2	2	2	2	2	2	2	12
Mg	167	84	26,500	26,500	47,800	28,400	19,400	19,400	19,400	9,540	22	490	490	279	617	516	532	532	532	532	532	532	1,630
Ca	962	181	11,800	11,800	22,400	8,300	12,900	12,900	12,900	2,500	200	3,300	3,300	1,200	4,900	1,800	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	9,800
Na	323	635	6,660	6,660	42,600	5,800	7,000	7,000	7,000	6,760	178	1,820	1,820	1,120	221	643	843	843	843	843	843	843	4,030
K	420	631	21,500	21,500	30,200	19,920	16,600	25,600	25,600	25,600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,440
Cu	0.02	0.36	164.9	164.9	502.2	48.3	203.8	164.4	164.4	164.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.5
Zn	0.1	0.1	621.6	621.6	1589.4	55.5	524.7	391.2	391.2	391.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Rb	0.4	0.6	40.2	40.2	64.1	26.4	32.7	72.8	72.8	72.8	0.1	4.8	4.8	1.7	1.6	7.2	3.0	7.2	7.2	3.0	3.0	4.7	4.7
Sr	4.0	0.7	52.4	52.4	113.4	9.7	67.5	12.3	12.3	12.3	0.6	23.3	23.3	10.9	22.9	7.1	11.8	7.1	7.1	11.8	11.8	11.8	38.0
Ba	23.6	0.7	22.4	22.4	58.8	0.9	28.3	12.5	12.5	12.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22.3
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.71398	0.71174	0.71050	0.71050	—	—	0.70914	0.71038	0.71160	0.71160	0.71160	0.71085	0.71156	0.71156	0.71095	0.71124	0.71209	0.71124	0.71124	0.71209	0.71209	0.71209	0.70968
δ ³⁴ S (‰)	—	—	5.8	5.8	5.3	—	6.0	10.0	—	—	—	4.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Abbreviation: SR city=Siem Reap city, SR river=Siem Reap river

C=fresh sandstone, E=bat guano, F=rain water, G=moat water, H=pool water, I=river water, J=lake water

† dissolved water

タイおよびラオスに分布するクメール遺跡の石材

および石切り場調査報告

内田悦生・下田一太・伊藤公範(早稲田大学・理工学部)

1. はじめに

9世紀から15世紀に渡るアンコール時代にカンボジア国内に多くの石造建造物が建造された。特にトンレサップ湖北岸近くのシェム・リアップ周辺に多くの建造物が造られ、これらは現在、アンコール遺跡群と称されている。アンコール王朝は次第に勢力範囲を拡大し、ジャヤバルマン7世が君臨した最盛期にはタイの大部分およびラオス南部をもその勢力範囲とし、石造建造物が建造された。アンコール時代にクメール民族によって建造された石造建造物はクメール遺跡と総称されるが、本研究では、タイおよびラオスに存在する主要なクメール遺跡の石材調査を行なうとともに、クメール遺跡周辺に分布しているタイ東北部のコラート層群の地質調査を実施し、石材供給地の推定を行なった。また、カンボジアのアンコール遺跡の石材との比較も行なった。

調査は、2002年9月2日～7日、2003年3月17日、2003年6月5日～11日、2003年8月26日～31日、2003年12月23日～2004年1月6日、2004年6月26日～7月3日、2004年8月20日～23日、2004年12月22日～31日の8回実施し、石切り場を含む32遺跡で石材調査を行なうとともに、その石材供給地を推定するために主としてタイ東北部に位置し、カンボジアおよびラオスとの国境を形づくっているコラート高原にて構成岩の調査を行なった。調査を行なった遺跡の分布を図1に示す。また、カンボジア、タイ、ラオス国境地域における地質図を図2に示す。また、各遺跡で測定した石材サイズおよび層理面方向の割合を表1に示す。

2. 遺跡の石材調査

(1) Kamphaeng Noi

2002年9月2日調査

バイヨン様式(施療院)

緯度、経度: 15° 08.677' N, 104° 15.051' E

構成石材

中央祠堂、南経蔵、東ゴープラおよび周壁より構成される。いずれの建造物も主としてラテライトから構成されるが(写真1)、これらの扉開口部は砂岩で構成される。

ラテライト：ピソライト質のものが優勢。断面は正方形のものが多く、縦横比 1:1.23 程度のもも混在している。小礫が認められる。層理面が縦になっているものが多く、30% が縦層理を有する。石の積み方は揃っている。

帯磁率： 1.119×10^{-3} SI Unit (中央祠堂、測定石材数：41 個)

断面サイズ：41.3×51.0cm (中央祠堂、測定石材数：25 個)

砂岩：開口部およびリントルにのみ使用されている。やや赤みを帯びた灰色砂岩。

帯磁率： 0.162×10^{-3} SI Unit (中央祠堂、南経蔵、東ゴープラ、測定石材数：32 個)

Sample TH-1

(2) Kamphaeng Yai

2002 年 9 月 2 日調査

バプーオン様式

緯度、経度：15° 05.999' N、104° 07.901' E

構成石材

回廊とその内側の 6 基の塔よりなる。回廊はラテライトより構成されるが(写真 2)、その開口部には砂岩が使われている。中央塔以外の 5 基は基壇がラテライト、上部構造はレンガ、開口部は砂岩より構成される。中央塔は、基壇とポーチ部が砂岩で構成され、塔本体はレンガ造である。

ラテライト：ややピソライト質～やや多孔質であり、後者が多い。Kamphaeng Noi と比べて多孔質なものが多い。小礫を含有している。断面は正方形に近いが、縦長置き of ラテライトも多い。縦層理の石材の割合は約 50% である。

帯磁率： 0.617×10^{-3} SI Unit (回廊東面、測定石材数：42 個)、Kamphaeng Noi とはかなり異なり(1.119)、Kamphaeng Yai には多孔質ラテライトが多いことを反映している。

断面サイズ：45.2×52.7cm (1:1.17 東側回廊、測定石材数：42 個)、Kamphaeng Noi とほぼ同じ大きさである。ただし、東ゴープラ(だけ?) のラテライトは相対的にサイズが大きくなっている。

砂岩：やや赤みを帯びた灰色砂岩である。均質で、薄い表面剥離が見られるだけで、劣化は顕著でない。上枠材の下面には方解石の析出によると思われる若干の剥離が認められる。石材断面は様々で特徴なし。窓枠材では層理面方向の亀裂が稀に見られる。

帯磁率： 0.220×10^{-3} SI Unit (中央祠堂ポーチ部、測定石材数：42 個)、Kamphaeng Noi と近い値(0.162) である。

Sample TH-2

(3) Prasat Sikhoraphum

2002年9月2日調査

アンコール・ワット様式

緯度、経度：14° 56.567' N、103° 48.156' E

構成石材

中央祠堂とそれを取り囲む4基の塔より構成される(写真3)。これらの5基の塔はラテライトよりなる基壇の上に構築されている。各塔の基壇もラテライトよりなる。塔はレンガ造であるが、開口部は砂岩より構成される。

ラテライト：ピソライト質～多孔質であり、小礫を含有する。約20%が縦層理であり、縦長材が多い。大きさ、形が一定ではなく、正方形のものと縦横比1:1.5程度のものが半々存在する。

帯磁率： 0.522×10^{-3} SI Unit (基壇、測定石材数：45個)

断面サイズ：32.7×48.3cm (基壇、測定石材数：35個)、やや小さい。

砂岩：淡灰色～淡黄褐色～黄褐色を呈する。黄褐色のものは表面での酸化によるものであり、内側は淡灰色と思われる。層理面の見えるものが存在する。劣化はあまり見られない。

帯磁率： 0.066×10^{-3} SI Unit (開口部、測定石材数：50個)

レンガ：下部のものは赤褐色で、上部ではやや色が淡くなる(上部は増築)。下部のレンガは、隙間無く積まれているが、上部ではやや隙間が開いている。一部表面にスタッコが存在している。

(4) Prasat Yai Ngao

2002年9月3日調査

アンコール・ワット様式

緯度、経度：14° 37.062' N、103° 53.492' E

構成石材

2基の塔よりなる。両方の塔ともレンガ造であり、開口部は砂岩よりなる(写真4)。ただし、北側の塔の基壇はラテライトよりなる。

ラテライト：やや多孔質～ピソライト質である。

帯磁率： 0.485×10^{-3} SI Unit（北側塔基壇、測定石材数：22 個）

砂岩：やや赤みを帯びた灰色砂岩。入口の縦枠材では層理面に沿った剥離が顕著である。

帯磁率： 0.212×10^{-3} SI Unit（開口部、測定石材数：14 個）、Kamphaeng Yai (0.220) および Kamphaeng Noi (0.162) のものと近い値である。

レンガ：赤褐色～淡赤褐色

(5) Prasat Phum Phon

2002 年 9 月 3 日調査

Prei Kmeng 様式(7 世紀)

緯度、経度： $14^{\circ} 32.805' N$ 、 $103^{\circ} 52.821' E$

構成石材

南側に 3 塔と北側にやや離れて 1 塔が存在する。中央塔以外はほとんど倒壊している。北側の 1 塔はレンガ造であるが、開口部には砂岩が使用されている。南側 3 塔の北の塔はレンガ造の基壇と開口部の砂岩製の枠のみ残存している(写真 5)。中央塔はレンガ造であり、最もよく残存している。その開口部および階段は砂岩よりなる。南側の構造物はラテライトよりなる基壇のみ残っている。

ラテライト：やや多孔質～ピソライト質である。大きさはまちまちで、横長のもの～正方形のものが存在する。正方形の断面を示すものでは、その約 10%が縦層理を示す。

帯磁率： 0.389×10^{-3} SI Unit（最も南側の基壇、測定石材数：30 個）、ラテライトとしてはかなり低い帯磁率である。

断面サイズ： $15 \times 25 \sim 35 \times 70$ cm 程度

砂岩：2 種類の砂岩が認められる。南側中央塔の階段および入口砂岩は灰色～淡褐灰色を呈し、若干の雲母を含有？。

帯磁率： 0.115×10^{-3} SI Unit（中央塔階段、測定石材数：7 個）

Sample TH-4：中央塔剥離片

南側北塔と北側塔の砂岩は、灰白色、石英質で、やや粗粒である。劣化は見られない。

帯磁率： 0.013×10^{-3} SI Unit（南側北塔と北側塔、測定石材数：8 個）、きわめて低い帯磁率を示す。

Sample TH-5 : 転石(表面茶褐色化)

レンガ : 赤褐色~淡赤褐色

(6) Ta Muen Thom

2002年9月3日、2004年12月25日調査

バプーオン様式~アンコール・ワット様式初期

緯度、経度 : 14° 20.832' N、103° 16.221' E

構成石材

南向きの建造物で、回廊によって取り囲まれている。回廊内中央には前室を伴う中央祠堂があり、その北側東西に同形式の塔が建ち、中央祠堂の東西に異なった様式の建造物が存在する。西側のものは経蔵であると思われる。Ta Muen Thom 全体は、ラテライトの基壇の上に構築されている。回廊内には大きな丸みを帯びた砂岩の巨礫(基盤岩)が露出している(写真 6)。回廊は、主として砂岩で構成されているが、北側の一部分ではラテライトが使用されている。中央祠堂およびその前室はすべて砂岩で構成されている(写真 7)。北側東西の塔は砂岩でできているが、内部にはラテライトが使われている。中央祠堂東西に分布する 2 つの建造物はラテライト造で、開口部には砂岩が使われている。ラテライトは基本的に正方形断面を持つが、それに対し、砂岩の形は変化に富み、長方形の断面を呈するものが主である。

ラテライト : ピソライト質~多孔質であり、基壇では 38% が縦層理を示している。断面は正方形に近いものが多いが、縦横比 1.2 位のものも多い。回廊のラテライトでは基壇のラテライトと比べてやや大きさの変化があり、積み方も若干雑である。縦層理の割合はほぼ同じで 30% くらいである。

帯磁率 : 0.553×10^{-3} SI Unit (中央祠堂東側建造物、測定石材数 : 40 個)

断面サイズ : 41.5×46.6cm (基壇、測定石材数 : 30 個)

砂岩 : 赤色(若干)~灰白色~淡黄褐色~褐色(若干)のものが存在する。層理のはっきりしたものが見られる。回廊内の砂岩材は回廊内建造物の砂岩と比べて小さい。形・大きさは変化が大きく、やや細長いものが多い(正方形のものが多い)。約 20% の石材が縦層理を有する。回廊の砂岩の積み方は水平面があまり揃っていない。

帯磁率 : 0.040×10^{-3} SI Unit (開口部、測定石材数 : 35 個)

断面サイズ : (正方形に近いものでは)55×60cm 位のものが多い。

Sample TH-6 : 赤色砂岩

Sample TH-7 : 褐色砂岩

砂岩(基盤岩) : 自然石を基盤に利用しており、周壁内、中央部にかなり露出している。白色～褐色砂岩であり、層理面が顕著。

帯磁率 : $0.040 \times 10^{-3} \text{SI Unit}$ (開口部、測定石材数 : 10 個)、建造物に使用されている砂岩と同じ、帯磁率、組織、色を持つことから、建造物の砂岩材は近隣から切り出されたことが推測される。

(7) Ta Muen Toch

2002年9月3日、2004年12月25日調査

バイヨン様式

緯度、経度 : $14^{\circ} 21.137' \text{ N}$ 、 $103^{\circ} 15.909' \text{ E}$

構成石材

東ゴープラを有する周壁の中に中央祠堂と南経蔵が分布している。周壁はラテライト製で(写真8)、東ゴープラも砂岩でできた開口部を除いてラテライトよりなる。中央祠堂は、基壇がラテライト、祠堂下部が砂岩、そして上部がラテライトよりなる(写真9)。ただし、最上部は砂岩よりなる。中央祠堂上部のラテライトの形は正方形に近い形をしており、ラテライトがバイヨン期以前のものであると考えることは不可能である。南経蔵はラテライト製であるが、開口部は砂岩よりなる。

ラテライト : 多孔質～ややピソライト質であり、断面が正方形のものと長方形のものが混在する (1:1～1:1.3 が主)。外周壁では 31%が、東ゴープラおよび南経蔵では 16%が縦層理を示している。

帯磁率 : $0.569 \times 10^{-3} \text{SI Unit}$ (東ゴープラ、測定石材数 : 30 個)、Ta Muen Thom のラテライトとほぼ同じ帯磁率である。

断面サイズ : 厚さ約 30～40cm

砂岩 : 淡黄褐色で、色のバリエーションは見られず、Ta Muen Thom の砂岩とはこの点が異なる (赤色のものは認められない)。層理面の認められるものが多い。横長のものが一般的で、縦層理は少ない (10%以下)。

帯磁率 : $0.041 \times 10^{-3} \text{SI Unit}$ (開口部、測定石材数 : 27 個)、色のバリエーションに関しては異なるが、Ta Muen Thom の砂岩とほぼ同じ帯磁率あり、同じ石切り場から採掘された可能性がある。

断面サイズ : 25～30cm の厚さ。

(8) Ta Muen

2002年9月3日、2004年12月25日調査

バイヨン様式

緯度、経度：14° 21.243' N、103° 15.735' E

構成石材

ラテライト製の主塔のみよりなる(写真 10；東北東向き)。ただし、塔最上部は砂岩よりなる。東西の出入り口と南側だけにある窓枠は砂岩製である。開口部縦枠材 1 本材ではなく、複数の砂岩材よりなる。縦層理のものが多く、35%が縦層理である。^は

ラテライト：ピソライト質～やや多孔質であり、正方形～やや長方形の断面を示す石材が混在している。

帯磁率：0.488×10⁻³SI Unit (主塔、測定石材数：35 個)、Ta Muen Thom(0.553) および Ta Muen Toch(0.569)のラテライトより若干低い値であるが、同じ石切り場由来する可能性がある。

断面サイズ：厚さ 40 数 cm

砂岩：淡黄褐色であり、Ta Muen Toch のものと色が似ている。

帯磁率：0.043×10⁻³SI Unit (開口部、測定石材数：35 個)、Ta Muen Thom(0.040) および Ta Muen Toch(0.041)のものとはほぼ同じ帯磁率であり、近隣から採掘されたと推定される。

(9) Prasat Ban Phluang

2002年9月4日、2005年12月25日調査

バプーオン様式

緯度、経度：14° 36.505' N、103° 25.679' E

構成石材

ラテライト製の T 字型基壇の上に、1 基祠堂が建てられている。祠堂の表面は砂岩よりなるが、内側にはラテライトが使われている(写真 11)。基壇は 4 段で、最下部は縦長・縦層理、下から 2・3 段目はやや横長・横層理で、最上段は横長・横層理である。

ラテライト：ピソライト質～やや多孔質であり、高い帯磁率を示す。正方形と長方形の断面(1～1.2～1.3、主として 1～1.2)を持つ石材が共存している。縦長のものでは縦層理のものが多く、基壇一段の高さは 50cm である。

帯磁率：1.680×10⁻³SI Unit (基壇、測定石材数：35 個)

断面サイズ：基壇 1 段の高さ 50cm

砂岩：淡黄褐色～一部灰色（縞状に入っている）。層理面が見られるものがあり、また、層理面に沿った割れが若干見られる。また、応力集中による割れも見られる。石材そのものには劣化はほとんど見られない。ただし、極一部に剥離あり。断面が正方形のものと長方形のものが存在しているが、正方形のものがやや多い。縦層理の割合は 50% で、縦層理のものに亀裂が多く見られる。修復材の混入有り。

帯磁率： 0.068×10^{-3} SI Unit（祠堂、測定石材数：35 個）、Prasat Sikhorphum のものと帯磁率（0.066）および色？が似ている。

断面サイズ：1 段の高さ 45cm（基本的な高さ）

Sample TH-509

(10) Bai Baek

2002 年 9 月 4 日調査

バプーオン様式

緯度、経度： $14^{\circ} 20.677'$ N、 $103^{\circ} 09.972'$ E

構成石材

3 基の塔よりなる。基本的にレンガ造であるが、出入り口のみには砂岩が使用されている。塔外壁では上部と下部とでレンガの色が異なっている。

砂岩：白色～淡褐色であり、石英の小礫を含んでいる。小礫は層理面方向に並んでいる（写真 12）。

帯磁率： 0.002×10^{-3} SI Unit（開口部、測定石材数：15 個）、極めて低い帯磁率を示す。

Sample TH-8

転石：巨礫として散在している。遺跡に使用されている砂岩材と極めてよく似ている（写真 13）。

帯磁率： 0.000×10^{-3} SI Unit（遺跡周囲、測定石材数：5 個）、極めて低い帯磁率を示し、遺跡の石材と同じものと思われる。

レンガ：

外壁下部 灰白色～淡赤褐色であり、石英粒子を多く含有している（写真 14）。

帯磁率： 0.512×10^{-3} SI Unit（中央塔、測定石材数：25 個）

Sample TH-10

外壁上部 赤褐色～茶褐色で、黒い粒子を含んでいる。

帯磁率： 1.763×10^{-3} SI Unit (中央塔、測定石材数：25 個)、下部よりも鉄分が多いことを反映して、帯磁率が高くなっている？。

Sample TH-9

内壁 灰色～淡赤褐色で、一部に赤褐色のものが存在する。

(11) Ban Kruat (Quarry)

2002 年 9 月 4 日調査

緯度、経度： $14^{\circ} 21.779'$ N、 $103^{\circ} 05.367'$ E

石材産状

砂岩の円礫状大塊が丘陵斜面に散在している(写真 15)。淡褐色～灰色砂岩であり、所々に石英質の円礫を含有する。層理(葉理)が発達している。石材がこのような砂岩の大塊から切り出された後が残っている(写真 16、写真 17)。石材の幅は 80cm くらいのもが多く、55cm のものも確認された。溝幅はおよそ (10～) 20cm である。看板には Prasat Phnom Rung(0.024、0.018)および Prasat Muang Tam(0.030)の石切り場であると記述されているが、これらより帯磁率は若干低くなっている。

帯磁率： 0.012×10^{-3} SI Unit (測定石材数：22 個)

Sample TH-11

Sample TH-12

(12) Prasat Ban Bu

2002 年 9 月 4 日調査

バイヨン様式

緯度、経度： $14^{\circ} 31.923'$ N、 $102^{\circ} 58.968'$ E

構成石材

ラテライト製の主塔のみより構成される(写真 18)。ただし、東西出入り口および南側のみに存在する窓枠には砂岩が使用されている。主塔周囲は田んぼとなっているためアクセスすることができなかった。

ラテライト：ピソライト質～やや多孔質である。大きさは様々で、断面も正方形～長方形のものが存在する。最大の大きさは 40×50 cm 程度である。下部では断面比が 1:1～1:1.3 程度であるが、上部では扁平なものが多く縦横比は 1:2 程度であり、また、厚さはおよそ 20cm である。また、下部では縦層理を示す石材の割合は 15～20%程度である。

帯磁率： 1.842×10^{-3} SI Unit (北側の散乱材、測定石材数：35 個)

砂岩：淡褐色砂岩である。開口部縦枠材は一本柱ではなく、複数の石材よりなる。赤色～灰白色～淡褐色～褐色のものが存在する。

帯磁率： 0.028×10^{-3} SI Unit (開口部、測定石材数：35 個)

(13) Muang Tam

2002年9月5日、2004年12月27日調査

クレーンおよびバプーオン様式(バプーオン初期：現地看板による)

緯度、経度： $14^{\circ} 29.672' N$ 、 $102^{\circ} 59.167' E$

構成石材

東西南北にゴープラを持つ外周壁、同様に東西南北にゴープラを持つ内回廊およびその内側の南北経蔵と5基の祠堂より構成される。外周壁はラテライトより成るが、頂部装飾は砂岩製である。また、そのゴープラは基壇がラテライトで上部構造は砂岩造である。内回廊基壇は、ゴープラを含めてラテライトであり、これらの上部構造は砂岩より成る。内回廊内の南北経蔵は基壇がラテライト、上部構造がレンガより成るが、その開口部には砂岩が使用されている。また、5基の祠堂も同様な構成に成っており、基壇がラテライト、上部構造がレンガ、開口部が砂岩より成る。東列中央塔はほぼ崩壊している。

ラテライト：ピソライト質～やや多孔質であり、43%が縦層理を示している(外周壁)(写真19)。断面は正方形のものが主であるが、やや縦長のものも数割程度混在している。

帯磁率： 1.683×10^{-3} SI Unit (外周壁東ゴープラ、測定石材数：50 個)、Prasat Ban Phluang(1.680)およびPrasat Ban Bu(1.842)のラテライトと同様に高い帯磁率を示す。

断面サイズ： 45.8×48.2 cm(内回廊東ゴープラ、測定石材数：13)

砂岩：赤色(稀)～灰色～淡黄褐色～黄褐色(表面は赤褐色がかっている)である(写真20)。まれに小礫を含むものが存在。赤色のものは少なく、褐色系が主である。層理面はしばしば顕著である。縦層理の砂岩が多く見られるが(外周壁南ゴープラ45%、東ゴープラ29%、平均37%)、層理面がはっきりしている石材は少ないためその割合は不明である。断面は正方形～やや長方形(1:1.3)である。外周壁の窓縦枠材は多材よりなるが、内回廊の窓縦枠材では一本材と多材が存在する。池護岸最上段(それ以外はラテライト)の砂岩材ではかなり(半分以上?)縦層理であり、層理面に沿った亀裂や破壊が顕著である(写真21)。

帯磁率： 0.030×10^{-3} SI Unit (外周壁東ゴープラ、測定石材数：50 個)

断面サイズ： 46.7×53.3 cm(外周壁東ゴープラ南面での正方形の石材、測定石材数：13)

レンガ：赤褐色～淡赤褐色、厚さ約 58mm

Sample TH-510、TH-511

(14) Prasat Phnom Rung

2002年9月5日、2004年12月27日

バプーオン～アンコール・ワット様式

緯度、経度：14° 31.021' N、102° 56.623' E

構成石材

多孔質暗灰色の玄武岩からなる死火山の頂部に建造されている。

主たる構造物は、東西南北にゴープラと隅楼を持つ回廊と前室を持つ中央祠堂である。回廊、東西南のゴープラおよび南東、南西、北東の隅楼は砂岩造であるが、回廊北側、北ゴープラおよび北西隅楼はラテライトよりなる。東側の砂岩は横長積みが主であるのに対し、南側、西側の砂岩は正方形の断面が見られ、表面は仕上げられていない。このことから、東側が先に建造され、続いて他の回廊が建造されたと考えられる。中央塔は正方形の断面を示すものが多い。中央祠堂およびその前室は砂岩造である。回廊内、中央祠堂の南東にはラテライト造の経蔵が存在する。ただし、その開口部は砂岩よりなる。ラテライトの積み方、大きさが不揃いで、かつ横長、横層理で、水平目地もそろいが悪くバイヨン期の建造であると思われる。南西には砂岩造の塔(Prasat Noi; 10世紀建造)が一基存在する。北東側には、3つの構造物基礎が存在し、東側にラテライト造の構造物とその西側にレンガ造の構造物2つが存在する。いずれの開口部も砂岩から成る。中央塔の南北西側がーチの砂岩の大きさ、形にバリエーションがあり、Ta Muan Thomの中央塔に似ている。装飾跡からこれらの石材はオリジナルであると思われる。

ラテライト：ピソライト質～やや多孔質であり、約60%(上部42%、基壇81%)が縦層理を示している(回廊北側)。砂岩よりもやや小さく、基壇では縦長で縦層理のものが圧倒的に多い。壁のものでは縦長、横長のものがあり、大きさにややバリエーションがある。縦層理のものが多い。

帯磁率： 1.261×10^{-3} SI Unit (回廊北西部、測定石材数：50個)

断面サイズ：35.0×44.7cm(回廊北西部、測定石材数：40)

断面サイズ：39.1×49.5cm(回廊北基壇、測定石材数：50)

砂岩：赤褐色～淡黄褐色のものが主で、黄褐色の砂岩も混在する。層理面が顕著なものが多く、特に、赤褐色のものに顕著である(写真22)。Muang Tamのものに比べて赤みが強く、小礫を含むものが多い。赤褐色砂岩に小礫を含むものが多い、これらは葉理に沿っ

ている。断面は一般的に正方形であり、縦層理が約 40%(東回廊 35% ただし、長材はほとんどが水平層理、南回廊 42%、中央塔 41%)である。

帯磁率： 0.024×10^{-3} SI Unit (回廊東ゴープラ、測定石材数：50 個)

0.018×10^{-3} SI Unit (中央祠堂および前室、測定石材数：50 個)

いずれも Muang Tam の砂岩より若干低い値である。

断面サイズ：41.1×45.7cm(回廊南ゴープラ、測定石材数：40)

断面サイズ：48.4×89.9cm(回廊東ゴープラ、長材、測定石材数：50)

断面サイズ：45.1×53.0cm(回廊東ゴープラ、正方形、測定石材数：50)

Sample TH-13：淡褐色砂岩

Sample TH-14：赤(褐)色砂岩

(15) Prasat Phimai

2002 年 9 月 6 日、2004 年 8 月 22 日、2004 年 12 月 28 日調査

バプーオン〜アンコール・ワット様式(1108 年ごろ建造)

緯度、経度：15° 13.148' N、102° 29.838' E

構成石材

主とした構造物は、東西南北のゴープラを持った外周壁、同様にゴープラを伴う内回廊とその内側に前室を伴う中央祠堂よりなる。中央祠堂の南東と南西にそれぞれ一基の塔がある。また、前室西側に経蔵が位置している。内回廊の西外側には双建造物が存在している。外周壁は赤色砂岩および一部ラテライトで構成され、そのゴープラも基本的に赤色砂岩より成るが、開口部や柱などは白色砂岩よりなる。内回廊およびそのゴープラも同様な石材構成である(写真 23)。ただし、内回廊開口部(窓枠および出入口)も下枠材に関しては赤色砂岩の方が多く使用されている。内回廊の屋根頂部では扁平な赤色砂岩(20×40cm 程度)が使用され、外周壁のものと大きさが似ている。それ以外は正方形の断面を持つ。中央祠堂および前室は白色砂岩ないし一部淡黄褐色砂岩よりなる。経蔵は基壇が赤色砂岩で、南北壁面がラテライト、開口部が白色砂岩より成る。南東塔は、ラテライト造で、開口部は白色砂岩より成る。水平目地はあまり揃っていない、大きさ・形にもややバリエーションが見られ、バイヨン期の建造?と思われる。南西塔は赤色砂岩造で、開口部は白色砂岩である。扁平なものが多く、水平目地が揃っておらず、大きさ・形のバリエーションがおおきく、バイヨン期の建造と思われる。内回廊西外側の双建造物は基壇および開口部が赤色砂岩で、壁体はラテライトである。

外周壁は赤色砂岩から成り、基壇部は正方形の断面を示すが、主たる部分は扁平な砂岩(約 20×40cm)よりなり、大きさも不揃いである。

外回廊ゴープラ内部には切り石積みの柱があるが、大きな 3 つのブロックからなる(水

平層理)。

ラテライト：ピソライト質～やや多孔質である。双建造物では32%が縦層理を持ち(サイズ：39.4×45.8cm)、経蔵では水平層理面を持つ石材が卓越している(縦層理 4%)。南東塔では、約10%が縦層理を持つ(楔石的なもの)。経蔵および双建造物のラテライトは正方形の断面を示すが、南東塔では形・大きさが様々で、断面も正方形～長方形を示している。

帯磁率： 1.077×10^{-3} SI Unit(経蔵、測定石材数：41 個)

0.948×10^{-3} SI Unit(南東塔、測定石材数：50 個)

断面サイズ：40.2×44.3cm(経蔵、測定石材数：40 個)

砂岩：

赤色砂岩 中央祠堂以外の建物主要部に使用されている。やや淡い赤色を呈し、均質、細粒でシルト的である。礫や葉理は認められない。葉理に沿って白雲母が定向配列している。層理面に沿った剥離が顕著に見られる(スレーキング)。特に、基壇部および外周壁で著しい。内回廊では屋根頂部を除いて断面は正方形が主で、層理面は水平(100%)である。

帯磁率： 0.133×10^{-3} SI Unit (内回廊西側、測定石材数：40 個)

断面サイズ：44.5×50.3cm(内回廊南ゴープラ、測定石材数：30 個)

20.0×46.5cm(外周壁南面赤色砂岩)

Sample TH-15

Sample TH-301 (外周壁南)

白色砂岩 白色～淡黄褐色を呈する(写真 24)。黄褐色や黒の縞(筋)が層理面に沿って見られる。やや粗粒で、層理面が顕著に認められる。層理面に沿った亀裂が少し認められる。中央祠堂では楔石を除いてすべて層理面は水平(99%横層理)である。断面の形は正方形であるが、層理面方向は意識されている(赤色砂岩も含めて)。

帯磁率： 0.038×10^{-3} SI Unit (中央祠堂、測定石材数：50 個)、Muang Tam のものと帯磁率は近いが、色は若干異なる。

断面サイズ：49.1×54.2cm(中央祠堂、測定石材数：30 個)

Sample TH-16

Sample TH-402(マンダパ基壇剥離)

Sample TH-403(中央祠堂基壇剥離)

Sample TH-404(内回廊東ゴープラの石材集積所から)

Sample TH-405(内回廊と外周壁中間北西部石材集積所から)

(16) Phnom Wan

2002年9月6日、2004年8月22日、2004年12月28日調査

プラ・コー、バケン、バプーオン様式(1082年以前にはほとんど完成)

緯度、経度：15° 01.406' N、102° 11.825' E

構成石材

東西南北にゴープラを伴う回廊と前室を伴う中央祠堂より構成される。中央祠堂の南西には上部が崩れ落ちた塔が存在する。回廊の基壇はラテライトからなり、上部構造は赤色砂岩および淡黄褐色砂岩よりなる。ただし、開口部は淡黄褐色砂岩より成り、赤色砂岩は使用されていない。回廊上部構造の内側や隅の内壁にはレンガが使用されている。マンダパの基盤はラテライトであり、基壇1段目は赤色砂岩で、それ以外の下部は主として淡黄褐色砂岩よりなるが、上部では赤色砂岩がかなり混在している。連子は赤色砂岩よりなる。中央祠堂の基盤もやはりラテライトよりなり、基壇一段目は赤色砂岩で本体構造物は僅かな例外を除いて淡黄褐色砂岩からなる。中央祠堂の南西にある塔は基壇がラテライトで、上部構造物は淡黄褐色砂岩および赤色砂岩よりなる(写真 25)。回廊内には9個のレンガ造の基壇が残存している。

ラテライト：ピソライト質～多孔質である。正方形およびやや長方形の断面を示すものが多い。サイズにややバリエーションがみられる。63%が縦層理を示す。Phmai のものとほぼ同じ帯磁率を示す。

帯磁率： 1.020×10^{-3} SI Unit(回廊基壇、測定石材数：50個)、

断面サイズ：31.6×40.8cm(回廊基壇、測定石材数：40個)

砂岩：

赤色砂岩 Phimai と同色（ややピンク系の赤）ないし濃い色（濃いレンガ色、赤褐色）を呈する。剥離や割れは多く見られるが、それほど顕著ではなく、Phimai とは異なる。また、Phimai の赤色砂岩より粗粒で、層理面の見られるものが多い。

帯磁率： 0.081×10^{-3} SI Unit（中央塔最下段、測定石材数：50個）

Sample TH-17

淡黄褐色砂岩 層理面の顕著なものが多い。Phimai のような黒い筋は無い。外回廊の砂岩は典型的な淡黄褐色砂岩で、層理があまり見られないが、中央祠堂・マンダパのものは淡灰色～外回廊より淡い黄褐色のものが主で、層理面もやや顕著で、層理面に沿った割れも多く見られる。

帯磁率： 0.202×10^{-3} SI Unit（中央塔、測定石材数：50個）

Sample TH-18

Sample TH-406(回廊北側)

両砂岩 中央塔では、断面は、正方形～やや長方形を呈し、若干小さく、大きさ、形にややバリエーションが見られる。基壇の赤色砂岩は 98%が縦層理を持ち、上部構造の白色砂岩は 63%が縦層理を持つ。回廊では、横長材が多く、また、扁平材もみられる。縦層理の割合も比較的高く、face bedding も多くみられる(縦層理の割合：44%)。

断面サイズ：37.9×46.3cm(中央塔、測定石材数：40 個)

(17) Prasat Non Ku

2002年9月7日調査

コーケル様式(10世紀前半)

緯度、経度：14° 54.398' N、101° 50.247' E

構成石材

東西にゴープラを持つ周壁とその内側に中央祠堂と南北経蔵が配置されている。周壁の南北はすべてレンガ造で、東西は基壇および出入り口が砂岩で、壁面はレンガでできている。中央祠堂の基壇部および出入り口は砂岩造で、本体はレンガで構成されている(写真 26)。経蔵は基壇と出入り口が砂岩でできており、本体はレンガ造である。

砂岩：黄褐色砂岩が主で、灰色砂岩を含み、稀に白色砂岩(雲母有)も見られる。鉄分がノジュール状に濃集した殻が多く見られる(写真 27)。やや大きなブロックである。断面の形はやや長方形(1:1.3)である。層理面(葉理)の見えるものが多い。楔石を除いて基本的に層理面は水平で、層理面に沿った亀裂がやや多く見られる。ただし、周壁 2 段目と経蔵の基壇は縦層理を示す。

帯磁率：0.121×10⁻³SI Unit (中央祠堂基壇、測定石材数：50 個)

断面サイズ：45.5×66.6cm(中央祠堂基壇、測定石材数：30)

Sample TH-19: 灰色砂岩

Sample TH-20: 黄褐色砂岩

レンガ：赤褐色

(18) Prasat Muang Khaek

2002年9月7日調査

コーケル様式

緯度、経度：14° 54.701' N、101° 50.232' E

構成石材

外側から北のみにゴープラを伴う外周壁、北に開いた環濠、北ゴープラを伴う内周壁、

中央祠堂と前室を載せた T 字型テラスおよびいくつかのレンガ造？構造物から成る。外周壁は北側部分のみ残存し、砂岩とレンガより構成される。外周壁北ゴープラは、基壇および開口部は砂岩よりなり、そのほかはレンガ造である。内周壁は基本的にレンガ造であり、開口部に砂岩、基盤にラテライトが一部見られる？。T 字型テラスは砂岩よりなる。東西横長基壇に北側突出部を後で付け加えており、両者で使用砂岩が異なる。上部の祠堂および前室はレンガ造で、開口部には砂岩が使用されている。テラスの北東および北西にはレンガ造建造物が配置されている？。

砂岩： T 字テラス東西横長部(写真 28) 淡黄褐色～赤色（ピンク）砂岩 相対的に細粒で、きめが細かい断面が正方形のものが多く、水平層理が主である。

帯磁率： $0.097 \times 10^{-3} \text{SI Unit}$ （赤色砂岩 東西基壇西側、測定石材数：7 個）、Phnom Wan の赤色砂岩と近い値を示す。

$0.334 \times 10^{-3} \text{SI Unit}$ （淡黄褐色砂岩 東西基壇西側、測定石材数：17 個）

断面サイズ：48.1×51.2cm(東西基壇西側基壇、正方形 測定石材数：10)

48.9×63.3cm(東西基壇西側基壇、長方形 測定石材数：9)

Sample TH-21：赤色砂岩

Sample TH-23：淡黄褐色砂岩

その他の場所の砂岩(写真 29) 淡黄褐色～灰色砂岩 鉄分の濃集による殻がまれに見られる。Non Ku と似ている。層理面がやや見られる。水平層理が主であるが、外周壁では縦層理が多く（Face bedding?）、50%位が縦層理である。

帯磁率： $0.112 \times 10^{-3} \text{SI Unit}$ （T 字型テラス北側突出部、測定石材数：50 個）、Prasat Non Ku とほぼ同じ値であり、特徴も似ている。

断面サイズ：46.5×67.9cm(T 字型テラス北側突出部前室、測定石材数：11)

Sample TH-22：

(19) Si Khiu (Quarry)

2002 年 9 月 7 日調査

緯度、経度：14° 51.297' N、101° 40.774' E

石材産状

丘陵頂部付近に砂岩の巨礫が点在している(写真 30)。白色砂岩であるが、層理（葉理）に平行に所々に淡黄褐色部が存在する。やや粗粒で、やや脆く、ハンマーでたたくと簡単に砂化する。葉理が薄く見えるが、侵食面では顕著となる。石英礫は見られない。丘陵斜面の塊状の大礫または岩盤？から石材が切り出されている(写真 31、写真 32)。岩盤には大きな亀裂が入っており、その面に鉄分が沈着し、褐色になっている。また、甌穴のような

穴が見られ、その表面も鉄分の沈着により褐色になっている。石材の採掘にはこの亀裂が利用されているようである。石材の幅は 60～80cm で、厚さは 40～60cm、溝幅は 20～30cm である。石材を切り出した跡が残っているのはほんの一角（10×20m）のみであり、規模は大きくない。石材の採掘は表層 1 層に対してのみ行われている。

帯磁率： 0.008×10^{-3} SI Unit（測定石材数：20 個）、かなり低い帯磁率である。

Sample TH-24

(20) Wat Mahathat (Lopburi)

2003 年 3 月 17 日および 6 月 10 日調査

バイヨン様式、一部バプーオン、アンコール・ワット様式

緯度、経度：14° 47.819N、100° 37.030E

構成石材

中央塔部分(写真 33)のみがクメール期の建造であり、それ以外はそれ以降に付け足されたものである。中央塔以外はレンガ造であり、局所的に白色砂岩、大理石、花崗岩、片岩？が使用されている。白色砂岩は、回廊の開口部、仏像および内回廊西側の半壊状態にある祠堂に用いられている。花崗岩は、中央塔東側にあるレンガ造建造物のリントルに使われ、大理石は、同建造物周辺の開口部等に使用されている。片岩の使用目的は不明である。中央塔はラテライト造であり、表面にはスタッコが残留している。ただし、中央塔（マンダバ）東開口部には白色砂岩が使用されている。

ラテライト：中央塔はラテライトのみで造られ、表面にはスタッコが残留している。ラテライトはピソライト質で、高い帯磁率を示す。ラテライト材は、そのサイズが小さく、断面が扁平なものが主で、層理面が横になるように置かれている。

帯磁率： 2.525×10^{-3} SI Unit（中央祠堂、測定石材数：30 個）

断面サイズ：22.9×39.4cm（中央祠堂、測定石材数：30 個）

砂岩：使用されている砂岩はいずれも白色砂岩である。白色砂岩は、中央塔（マンダバ）東開口部、内回廊西側祠堂、回廊開口部、仏像等に使用されている。内回廊西側祠堂の砂岩材は、サイズが小さく、横長材が多く、おそらく層理面は横になっていると思われる。

帯磁率： 0.031×10^{-3} SI Unit（内回廊西側祠堂、測定石材数：30 個）

断面サイズ：19.5×38.6cm（内回廊西側祠堂、測定石材数：30 個）

Sample TH-140

(21) Prang Sam Yod

2003 年 3 月 17 日および 6 月 10 日調査

バイヨン様式

緯度、経度：14° 48.083N、100° 37.053E

構成石材

南北に連なる 3 塔の祠堂よりなる(写真 34)。中央塔の東側にはクメール期の建造と考えられるレンガ造建造物が増築されている。祠堂は基本的にラテライト造であり、開口部および破風飾りは白色から黄褐色砂岩よりなる。表面にはスタッコが残留している。

ラテライト：ピソライト質～多孔質ラテライトが存在するが、多孔質ラテライトが多い。基壇部のラテライトはやや大きい、上部構造では小さくなる。横長材が主で、層理面は基本的に横になっている。

帯磁率： 1.621×10^{-3} SI Unit (祠堂、測定石材数：30 個)

断面サイズ：25.9×53.0cm (祠堂、測定石材数：20 個)

砂岩：開口部および破風飾りは淡黄褐色砂岩よりなる。

帯磁率： 0.054×10^{-3} SI Unit (祠堂開口部、測定石材数：24 個)

TH-141 赤色砂岩？

(22) Prasat Muang Singh

2003 年 8 月 28 日調査

バイヨン様式

緯度、経度：140° 02.259N、99° 14.793E

構成石材

中央祠堂と回廊(写真 35)より構成される。開口部も含めて、全てラテライトで建造されている。ただし、開口部上枠材には木が使用されている(木材は新材であり補修時に交換または挿入?)。表面にはスタッコが一部残留している。

ラテライト：典型的なピソライト質ラテライトであり、ピソライトの粒径は、3～5mm のものが一般的で、最大 10mm に達する。所々に石英質のレキを含む。ラテライト材の大きさは不揃いで、一般的な大きさのものからやや小さいものが混在する。断面は正方形に近いものからやや長方形のものが多くなっている。また、積み方も揃っていない。層理面方向に関しては、ピソライト質であり確認ができなかった。

帯磁率： 0.824×10^{-3} SI Unit (中央祠堂 測定石材数 50 個) (ピソライト質である割には小さな値である)

断面サイズ： 34.0×41.1cm(回廊 測定石材数 50 個 (比：1.2))

(23) Wat Kamphaeng Laeng

2003年8月29日調査

バイヨン／ロブリー様式

緯度、経度：13° 06.216N、 99° 57.550E

構成石材

5塔の祠堂よりなる。東に1塔、中央に3塔(写真36)、西側に1塔が配されている。東側に塔には基壇が見られない。

全てラテライト製である。開口部もラテライト製であるが、上枠材には木材が使用されている(現在は新材が用いられている)。外壁にはスタッコが一部残されているが、内壁にははっきりとした跡が見られない。

ラテライト：やや多孔質～ややピソライト質である。石英のレキが少量見られ、大きなものでは径10cmに達する。断面は長方形を呈し、厚さが薄くなっている。層理面は水平で、積み方は比較的揃っている。

帯磁率： 0.949×10^{-3} SI Unit(中央祠堂 測定石材数 50 個)(ピソライト質である Prasat Muang Singh よりも若干高い値)

断面サイズ：27.2×45.4cm(中央祠堂 測定石材数 50 個)(比：1.67)

(24) Prasat Khao Phra Viharn (Preah Vihear)

2004年12月25,26日、2004年12月26日調査

Baphuon 様式～アンコール・ワット様式

緯度、経度：14° 23.285N、 104° 41.040E(最南端)

構成石材

山の斜面に沿って建造。北向き。

北側山麓から南側に向って、第一参道(階段)、第一ゴープラ、第二参道、第二ゴープラ、第三参道、第三ゴープラ、第四参道、第四ゴープラ、中央祠堂の順に配列している。これらの遺跡は岩盤の上に建造されている。使用されている石材は全て石英質砂岩で、黄褐色を示すものが多く、白色砂岩も使用されている。階段や建物の極一部には岩盤が利用されている。砂岩材の大きさは場所により異なっている。

第一参道(階段)の石材は、比較的白く、帯磁率は中央および両端でそれぞれ 0.037 と 0.024×10^{-3} SI Unit であるが、一部岩盤が利用されているところではやや高く 0.049×10^{-3} SI

Unit である。階段の両脇では縦層理の石材が多く(28%)、正方形に近い断面(1~1.2)を示す。階段そのものは平たい石材よりなる(水平層理)。

第一ゴープラ(写真 37)の石材は、礫が多く、淡褐色で、比較的大きな石材が使用されている(55.8×61.5cm)。大きさにバリエーションがあり(1~1.2)、正方形から長方形の断面を持つ。正方形に近いものでは縦層理を示すものが多い(20~30%以上)。上部構造にも縦層理を示す石材がある。基壇の横長材でも若干縦層理を示すものがみられる。基壇表面には赤色の顔料が残っており、表面の仕上げ度が高い。くさび石が存在する。帯磁率は 0.019×10^{-3} SI Unit である。

第二参道の床石は、北側で小さく、南側で大きくなっている。大きさにバリエーションが有り、基本的に横層理である。礫が多い。帯磁率は中央及び両端でそれぞれ 0.019 と 0.012×10^{-3} SI Unit である。

第二ゴープラ(写真 38)の石材は比較的大きく、淡黄褐色で色ムラが目立ち、礫を多く含有する。層理面は横が主であるが、稀に横長でかつ縦層理(face bedding)を示すものがある(20%)。くさび石が有り、水平層理のものも存在。水平目地が良く揃っている。建物の繋ぎめで角欠け材が見られる。角だしは良い。帯磁率は 0.029×10^{-3} SI Unit である。

第三参道の床石は 40cm 角の大きさで、礫を含むものが若干存在する。中央及び両脇の石材の帯磁率はそれぞれ 0.029 と 0.033×10^{-3} SI Unit である。

第三ゴープラの石材は場所により異なっている。中央ゴープラ(写真 39)の石材は黄褐色を呈し、サイズも大きく、やや礫を含有する。長材が主で、横層理をもつ。正方形の石材では縦層理のものが多く、くさび石では主として縦層理である。帯磁率は相対的に高く 0.055×10^{-3} SI Unit の値を示す。

東西の拡張部の石材は淡黄褐色で、中央ゴープラの石材よりも小さい。西側拡張部の石材では、長材は水平層理で、正方形のものでは縦層理のものが多く、くさび石では主として縦層理である。水平目地は良く揃っており、角だしも良い。角欠け材は稀に存在する。基壇の石材は横層理である。帯磁率は 0.040×10^{-3} SI Unit である。東西拡張部の南側にはホールがあり、東西で異なる。西側ホールの石材は小さく、正方形から長方形(1~1.3)のものが主であり(およそ 40cm 角)、また、色も白く、帯磁率は 0.011×10^{-3} SI Unit と低くなっている。東側のホールは黄褐色の砂岩からなり、ラミナが顕著で、中程度の大きさである。東側ホールの基壇は正方形の断面を呈する石材が多く、縦層理を持つものも多い。表面には赤色顔料が見られる。

この西側一帯には石切り場跡が広がっている。しかしながら、地雷が残存している地帯であるため調査は行なうことができなかった。

第四参道の床石は第三参道の床石と似ており、40cm 角で、その帯磁率は中央および両端でそれぞれ 0.027 と 0.028×10^{-3} SI Unit であり、第三参道のものと似ている。

第四ゴープラと中央祠堂では、場所により使用石材が異なる。第四ゴープラの中央にある建物(G、J、L)では相対的に小さな石材が使用され、礫が見られず均質で、相対的に

高い帯磁率を示す ($0.054\sim 0.068\times 10^{-3}\text{SI Unit}$)。色は褐色で、くさび石を除いて水平層理である。これらを取り囲む建物 (A、D、K) (写真 40)では、石材が大きく、淡黄褐色でラミナが顕著で、低い帯磁率を示す ($0.017\sim 0.035\times 10^{-3}\text{SI Unit}$)。基本的に横層理であるが、縦層理のものも見られる。Face bedding も少量見られる。中央祠堂の石材は、比較的大きく、横層理、白色系で $0.037\times 10^{-3}\text{SI Unit}$ の帯磁率を示す。

最南端には、石切り場跡(写真 41)があり、比較的大きな大きな石材が切り出されている。この場所における帯磁率は $0.020\times 10^{-3}\text{SI Unit}$ である。

(25) Wat Chao Chan (Si Satchanalai)

2004年1月2日調査

バイヨン様式

緯度、経度： $17^{\circ} 25.636\text{N}$ 、 $99^{\circ} 48.473\text{E}$

構成石材

東向きの礼拝堂と中央祠堂(写真 42)および中央祠堂の北側の内壁に仏像をあしらった建造物より構成される。全てレンガ造であるが、中央祠堂北側の建造物の内外壁にはスタッコが残っている。中央祠堂のラテライトは大きく、やや多孔質であるのに対して、それ以外の建造物のラテライトは小さく (約 $12\times 20\times 45\text{cm}$)、多孔質である。中央祠堂はクメール時代のもので、その他の建造物はスコータイ時代の建造と推測される。

中央祠堂のラテライト：やや多孔質で、赤褐色を呈する。礫は少ない。表面にはスタッコが若干残存している。基壇最下部にはやや大きなラテライトが使用されている。基本的に横層理であるが、1~2割程度の縦層理材が混入している。断面は正方形に近く、積み方も揃っている。これらのことからアンコール・ワット期の建造であることが推測される。

(26) Wat Phra Sri Ratana Mahathat (Si Satchanalai)

2004年1月2日調査

バイヨン様式

緯度、経度： $17^{\circ} 25.673\text{N}$ 、 $99^{\circ} 48.906\text{E}$

構成石材

東向きの礼拝堂と中央祠堂(写真 43)および周辺に点在するストゥーパよりなる。ラテライト造であるが、中央祠堂はスタッコで覆われ、使用石材は不明である。ただし、基壇部は小さなラテライトより構成されている。また、礼拝堂およびストゥーパも小さなラテライトよりなる。それに対し、周壁は大きなラテライトよりなる。小さなラテライトの部分は、スコータイ時代の建造物で、周壁はクメール時代に造られたと推測される。

帯磁率： 0.805×10^{-3} SI Unit (50 個測定)

断面サイズ：36.8×45.0cm (比：1.22) (25 個測定)

周壁のラテライト：下は直径 80cm の円柱形を、上部は三角形を呈している。ややピソライト質～多孔質である。

帯磁率： 0.961×10^{-3} SI Unit (50 個測定)

(27) San Ta Pha Daeng (Sukhothai)

2004 年 1 月 3 日調査

アンコール・ワット様式

緯度、経度：17° 01.191N、 99° 42.408E

構成石材

ラテライト造の祠堂のみよりなる(写真 44)。内壁にはスタッコが若干残存している。開口部上枠材にはコンクリートが使われている。基本的に層理面は水平になっているが、約 15%が縦層理となっている。

ラテライト：多孔質～やや多孔質～ややピソライト質のラテライトより成る。正方形に近い断面を持つものが多く、また、積み方は良く揃っている。帯磁率はやや高い。

帯磁率： 1.40×10^{-3} SI Unit (50 個測定)

断面サイズ：34.6×46.4cm (比：1.34) (50 個測定) (アンコール・ワット期に対応)

(28) Wat Si Sawai (Sukhothai)

2004 年 1 月 3 日調査

バイヨン／ロップリー様式

緯度、経度：17° 00.721N、 99° 42.344E

構成石材

主として 3 塔の祠堂と礼拝堂よりなり(写真 45)、南向きである。祠堂の第一層、外周壁および礼拝堂(前室)の柱はラテライトよりなる。祠堂のラテライトは、大きく、多孔質～やや多孔質である。それに対し外周壁のラテライトは小さく(約 15×22×36cm)、石英礫を含む多孔質ラテライトである。礼拝堂の柱は八角形を呈し、多孔質のラテライトより成る。また、礼拝堂の床、内周壁の基壇、池の護岸の一部には、片岩が使用されている。礼拝堂の壁、内周壁および祠堂の第二層以上はレンガ造となっている。祠堂、礼拝堂の壁面および柱の表面はスタッコで覆われている。祠堂はクメール期のもので、それ以外の建

造物はスコタイ期のものと思われる。

祠堂のラテライト：第一層のみラテライトより成る。多孔質～やや多孔質で、相対的に大きい。帯磁率は極めて小さい。基本的には横層理であり、積み方は良く揃っている。断面の縦横比は 1.38 である。これらのことから祠堂のラテライト部はアンコール・ワット期のものである可能性は高い。

帯磁率： 0.286×10^{-3} SI Unit (25 個測定)

断面サイズ：35.7×49.3cm (比：1.38) (10 個測定) (アンコール・ワット期に対応?)

(29) Wat Phra Pai Luang (Sukhothai)

2004 年 1 月 4 日調査

バイヨン／ロップリー様式

緯度、経度：17° 01.664N、 99° 42.255E

構成石材

全体的に東向きであり、東門のすぐ内側の南北に仏像を伴いラテライト製の柱を持つレンガ造建築物、これらの西側中央にレンガ製の塔を持つ建築物、その西側に礼拝堂が存在する。礼拝堂の基壇下部はラテライト、上部はレンガで構成され、柱は円形でラテライト製であり、表面はスタッコで覆われている。また、礼拝堂の南北にはラテライト製の小塔が各 5 基並んでいる。最も西側には 3 塔の祠堂が南北に並んでいる。北側の祠堂のみ全体が残存している(写真 46)。これらの祠堂はラテライト製で、表面はスタッコで覆われている。また、周壁はレンガ造である。西側の 3 塔の祠堂のみクメール期の建築物であり、それ以外はスコタイ期の建築物であると思われる。

祠堂のラテライト：やや多孔質～ややピソライト質のラテライトより成る。赤褐色で、若干の礫を有する。基本的には横層理であるが、10%程度の縦層理材を伴う。また、積み方も揃っている。ラテライトはやや大きく、正方形に近いことから、アンコール・ワット期の建造であることが推測される。

帯磁率： 0.804×10^{-3} SI Unit (50 個測定)

断面サイズ：43.0×52.6cm (比：1.22) (50 個測定) (アンコール・ワット期に対応?)

(30) Wat Phu (Laos)

2004 年 6 月 28 日～7 月 1 日調査

バプーオン様式、一部バイヨン様式

緯度、経度：14° 50.911N、 105° 48.978E(第二テラス上)

構成石材

東端裾野のバライから西端山腹の主祠堂まで斜面を利用して建造され、全体として東側から6段のテラスに分けられる。

1段目のテラスには、東側からバライ、テラス、参道、南北宮殿（パレス）、参道およびナンディン（南経蔵）が、存在する。4段目テラスには6基のレンガ造建造物の基壇部分が残されている。最上段の6段目テラスには主祠堂が建造されている。1段目テラス東端のバライ護岸では、下部にピソライト質ラテライトが、上部に砂岩が使用されている。ラテライトに関しては縦層理のものが多くなっている（約40%）。砂岩材に関しては横長材が多くなっている。

バライ西側に接するテラスは砂岩造で、基壇のみ存在している。転用材が多く見られる。

南北宮殿は、それぞれ南北の2つの建造物よりなる。南宮殿の北側建造物(写真47)は砂岩造であり、正方形に近い形を持つ(43.1×51.1cm、比1.18)。縦層理を持つ石材が多くなっている(縦層理49%)。南側建造物(写真48)はラテライト造で、開口部、壁面上部、破風には砂岩材が使用されており、また、西側部分ではレンガが使用されている。ラテライト材は、ピソライト質で、やや小さく、正方形の断面を持つ(32.1×35.1cm、比1.09)。縦層理を持つものが多い(42%)。

北宮殿の南側建造物では、基壇、開口部、ポーチ、破風が砂岩造で、壁面はラテライト造である。ラテライトはピソライト質で、サイズがやや小さく、縦層理を持つものが多い(46%)。砂岩に関しては南宮殿と比較して縦層理を持つものが少なくなっている。北側建造物はピソライト質で、やや小さく、縦層理が多くなっている。開口部、壁面上部は砂岩造である。

ナンディン(写真49)は、砂岩造で、横長材が多く、石材がやや小さくなっている(30.1×54.7cm、比1.82)。層理面は基本的に横層理である。このような特徴からナンディンはバイヨン期の建造であることが推測される。

6段目テラスを構築する石垣は、ラテライト造であり、やや小さく、正方形に近い形を持ち(33.5×41.1cm、比1.23)、縦層理を持つものが多い(35%)。

6段目テラスに位置する主祠堂(写真50)は、西側がレンガ造で、東側は砂岩造である。ただし、東側の部分でも、内壁および屋根の一部にレンガが使用されている。西側部分が古く、東側の砂岩造部分が後に増築されたと思われる。砂岩は、平たく、横長材が多く使用されている(26.1×44.9cm、比1.72)。切り石積の柱が使用されている。基本的に層理面は水平であり、このような特徴から主祠堂増築部(砂岩造部分)は、バイヨン期の建造であると推測される。

砂岩材

Wat Phu で使用されている砂岩は、どの場所でも同じであり、主として赤色～淡黄褐色を呈し、層理の顕著なものも見られ、層理面に沿って白雲母が多く見られる。各場所の平均帯磁率は、 $0.21\sim 0.30\times 10^{-3}\text{SI unit}$ であり、場所による違いは見られない。

6 段目テラスの裏は崖(写真 51)となっており、主として赤色を帯びた砂岩よりなり、層理面が顕著なものも有り、層理面に沿って白雲母も見られ、Wat Phu の構成砂岩と類似している。その砂岩の帯磁率は $0.31\times 10^{-3}\text{SI unit}$ であり、Wat Phu のものに近い。Wat Phu の南側(1km 程度)の山腹に石材を切り出した跡があり、岩石が Wat Phu のものと類似し、帯磁率もほぼ同じである ($0.23\times 10^{-3}\text{SI unit}$)。このことから、Wat Phu の砂岩材は近隣の山腹から切り出されたと考えられる。この周辺の地質は、Phu Kradung 層に対応することから、Phu Kradung 層を構成する一般的な赤色砂岩が使用されていると考えられ、アンコール遺跡で使用されている Phu Kradung 層の一部を成す、灰色～黄褐色砂岩とは異なる。

南北宮殿を構成する砂岩材は、正方形に近い断面を持つとともに縦層理を持つものが多いのに対し、ナンディンおよび主祠堂を構成する砂岩材は扁平で横層理が主であることから、前者がバプーオン期に建造され、後者はバイヨン期後期に建造されたと推測される。主祠堂には切り石積の柱が存在している。

ラテライト材

ラテライトは、バライ下部、南北宮殿および 6 段目テラスの石垣に使用されており、いずれもピンライト質で、やや小型であり、正方形の断面を持ち、また縦層理が多いという共通点がある。このことからこれらの建造物はバプーオン期に建造されたと推定される。なお、南宮殿および 6 段目テラスの石垣を構成するラテライトの帯磁率がそれぞれ $1.04, 0.58\times 10^{-3}\text{SI unit}$ であり、若干異なる。

(31) Hong Nang Sida (Laos)

2004 年 7 月 1 日調査

バイヨン様式 (12～13 世紀)

緯度、経度： $14^{\circ} 50.291\text{N}$ 、 $105^{\circ} 48.892\text{E}$ (Wat Phu の約 1km 南に存在)

構成石材

祠堂のみからなる小さな遺跡である(写真 52)。西部は全壊している。構成石材は、灰色～黄褐色砂岩であり、層理が若干見られる。石材は比較的硬く、角出しが良い。石材の大きさは不揃いで ($33.9\times 44.2\text{cm}$ 、比 1.30)、水平目地の必ずしも良く揃っていない。層理面方向は基本的に水平である。切り石積の柱が存在する。これらのことからバイヨン様式の遺跡であると推定される。砂岩材の帯磁率は $0.35\times 10^{-3}\text{SI unit}$ であり、アンコール遺跡に使用されている灰色～黄褐色砂岩と比べて帯磁率が小さい。また、黒雲母も少なく、化学

組成的にも Phu Kradung 層の赤色砂岩と灰色～黄褐色砂岩の中間の組成を示す。

(32) Prasat Sdok Kok Thom

2004 年 12 月 24 日調査

バプーオン様式 (1052 年、リングによる)

緯度、経度：13° 50.621N、 102° 44.240E (WGS)

緯度、経度：13° 50.515N、 102° 44.460E (THAI)

構成石材

東西にゴープラを有する外周壁および東西南北にゴープラを有する内回廊とに囲まれ、中央に中央祠堂(東向き)(写真 53)、その南東および北東に南北経蔵(西向き)が位置する。中央祠堂および南北経蔵の基壇はラテライトよりなり、上部構造は砂岩よりなる。内回廊は、基壇がラテライトで、東ゴープラは砂岩で、南北西ゴープラおよび回廊上部構造では、内側が砂岩、外側がラテライトよりなる。ただし、回廊外側上部の 1 段目は砂岩よりなる。外周壁はラテライト造であるが、東ゴープラの上部構造は砂岩造である(写真 54)。西ゴープラは崩壊しているが、砂岩材は見られない。

砂岩材

灰白色～淡黄褐色で、若干黄褐色のものを伴う。稀に、小石(小礫)が見られる。葉理を示すものが多い。石英質で、比較的粗粒である。縦層理の割合は 49%である。

帯磁率 0.006×10^{-3} SI Unit(内回廊)

0.011×10^{-3} SI Unit(南経蔵)

大きさ 36.0×41.2 cm(縦横比 1.14)

ラテライト材

多孔質～ピソライト質の中間で、稀に大きな礫を含有する。縦層理の割合は 46%である。

帯磁率 0.663×10^{-3} SI Unit(内回廊)

大きさ 38.3×43.3 cm(縦横比 1.13)

Sample TH-501

Sample TH-502

3. 考察

(1) タイおよびラオスのクメール遺跡に使用されている石材

タイおよびラオスのクメール遺跡には、砂岩、ラテライトおよびレンガが使用されている。カンボジアのアンコール遺跡では、レンガは 11 世紀初期までしか使用されていないが、

タイおよびラオスのクメール遺跡では 12 世紀初期まで(Prasat Yai Ngao、Prasat Sikhoraphum)その使用が認められる。ラテライトは全ての時代に渡って使用され、コラート高原にある Ta Muen、Kamphaeng Noi、Ban Bu やスコータイ、シ・サチャナライ、ロップリー、カンチャナブリ、ペチャブリにあるバイヨン期の建造物でも祠堂にラテライトが使用されており、これらの地域において砂岩材の確保が困難であったことを示している。砂岩も全ての時代に使用されているが、祠堂全体に使われ始めるのはおそらく 11 世紀半ばになってからである。

(2)タイおよびコラート高原の地質

タイの地質は、東部と西部で大別される。東部はコラート高原を代表とする中生界の堆積岩から構成される。西部は主として先カンブリア界および古生界の地層および花崗岩類から構成されるが、中央部の多くは(バンコクを中心とした南北地域)は沖積層によって覆われている。本調査でコラート層群から採取した砂岩材の構成鉱物、平均粒径および帯磁率を表 2 に示す。

本研究で調査した遺跡の多く(特に砂岩造建造物)および石切り場は、コラート高原に位置する。コラート高原の地質は、中生界の非海成堆積岩(河川堆積物)より構成されたコラート層群よりなる。コラート層群は次の 11 累層より構成され、時代により 4 グループに分けられる。すなわち、下位から三畳紀の Huai Hin Lat Formation、Nam Phong Formation、ジュラ紀～白亜紀の Phu Kradung Formation、Phra Wihan Formation、白亜紀の Sao Khua Formation、Phu Phan Formation、Khok Kruat Formation、Maha Sarakham Formation、白亜紀から第三紀の Phu Thok Formation、Khao Ya Puk Formation、Phu Khat Formation である。このうち、調査したコラート高原上の遺跡は Phra Wihan Formation、Phu Phan Formation、Khok Kruat Formation、Maha Sarakham Formation 上に位置している。ただし、ラオスの Wat Phu および Sida は Phu Kradung 層上に位置している。ここでは、遺跡周辺部に分布する次の 7 層についてその概略を述べる。

Huai Hin Lat Formation: 100-400m の層厚を持ち、基底礫岩と石灰岩から構成される。上部 50m は泥岩を伴った砂岩よりなる。上部三畳紀の Carnian から Norian に対応する。アンコール遺跡で使用されている緑灰色硬砂岩は、この地層から採掘されたものである。砕屑物は角張っており、粒径も揃っていない。主要構成鉱物は石英、斜長石、岩石片である。

Phu Kradung Formation : 800-1200m の層厚を持ち、赤色のシルト岩、砂岩、礫岩よりなる。所々に層厚 5-10m の灰色砂岩を伴う。この砂岩がアンコール遺跡の灰色～黄褐色砂岩として使用されている。中部から上部ジュラ紀に対応する。中粒～細粒砂岩であり、主として石英、斜長石、カリ長石、黒雲母、白雲母、岩石片より構成される長石質砂岩である。若干の方解石を伴う。

Phra Wihan Formation : 100-250m の層厚を持ち、主として黄色～白色、細粒～中粒の

正珪岩、シルト岩、泥岩より構成される。上部ジュラ紀～下部白亜紀に対応する。石英質の細粒～中粒砂岩であり、主として石英および石英質岩石片よりなるが、若干の白雲母を伴うことが多く、稀に、斜長石を伴う。

Sao Khua Formation : 200-760m の層厚を持ち、シルト岩、細粒～中粒砂岩、礫岩を挟んだ赤茶色のシルト質粘土岩より構成される。他の地層と比べて赤茶色を呈する。石英質の細粒砂岩であり、主として石英および石英質岩石片よりなる。若干の斜長石や白雲母を伴うことが多く、また、方解石を伴うことがある。

Phu Phan Formation : 80-140m の層厚を持つ。淡灰色、中粒～粗粒の礫質砂岩、シルト岩より構成される。下部白亜紀に対応する。中粒～粗粒な石英質砂岩であり、主として石英および石英質岩石片よりなり、不純物を多く含有しない。

Khok Kruat Formation : 430-700m の層厚を持ち、赤茶色～栗色の砂岩、シルト岩、泥岩および礫岩より構成される。下部白亜紀に対応する。細粒であり、主として石英、斜長石、岩石片よりなる、石質砂岩である。若干の白雲母や方解石を伴う。

Maha Sarakham Formation : 610-1000m の層厚を持つ。Cenomanian(上部白亜紀)に対応する。岩塩、ハライト、硬石膏からなる蒸発岩を主とし、泥岩、シルト岩および砂岩層を挟む。

旧石切り場である Ban Kruat および Si Khiu は、両者とも Phu Phan Formation 上に位置しており、白色ないし淡黄褐色の正珪岩よりなる。

スコータイ、ロップリー、カンチャナブリ、ペチャブリの遺跡は、タイの西部に位置しており、これらの遺跡は主としてラテライトから構成されており、ロップリーを除き、基本的には砂岩は使用されていない。これらの遺跡は沖積平野上に位置している。

(3)砂岩材の分類

調査した遺跡から採取した砂岩材の薄片を作製し、偏光顕微鏡にて観察したところ、今回調査した遺跡の砂岩は岩石学的に 3 つに分類することができた。各遺跡から採取した砂岩材の構成鉱物、平均粒径および帯磁率を表 3 に示す。

1 つ目 (Group 1) は、石質アレナイトに分類される砂岩である。細粒～中粒の石英および岩石片を多く含有し、その他に斜長石、カリ長石および少量の白雲母、不透明鉱物を伴う。Phimai の白色砂岩には若干の黒雲母も見られる。この砂岩はやや赤みを帯びた灰色、白色～淡黄褐色および赤色を呈する。このタイプの砂岩を使用している遺跡は、Kamphaeng Noi、Ban Phluang、Kamphaeng Yai、Prasat Yai Ngao、Prasat Phum Phon の一部、Phimai、Phnom Wan、Prasat Non Ku、Prasat Muang Khaek である。これらの遺跡は Khok Kruat Formation あるいは Maha Sarakham Formation の上に位置している。帯磁率が高く、 $0.04 \sim 0.34 \times 10^{-3}$ SI Unit の値を示し、また、 SiO_2 含有量は、72～86wt%の低い値を示している。

2 つ目 (Group 2) は、Ban Kruat および Si Khiu の石切り場と同じ、正珪岩である。主として、中粒～粗粒の石英粒から構成され、珪質岩石片と若干の不透明鉱物を伴う。色は白

色～淡黄褐色～(赤色)であり、その色は岩石中の鉄成分による。すなわち、鉄分の少ないものでは白色を呈し、鉄分の多いものでは、針鉄鉱として存在するときは黄褐色を、赤鉄鉱として存在するときは赤色を呈し、色のバリエーションが見られる。Ban Kruat および Si Khiu の石切り場と同じ Phu Phan Formation 上に位置する Ta Muen Thom、Ta Muen Toch、Ta Muen および Bai Baek の石材は正珪岩であり、おそらく Phu Phan Formation から石材が供給されたと思われる。また、Khok Kruat Formation 上に位置するが同じような正珪岩が使用されている遺跡として Prasat Phum Phon の一部、Prasat Ban Bu、Muang Tam、Prasat Phnom Rung が挙げられる。これらの砂岩の帯磁率は小さく、 0.05×10^{-3} SI Unit 以下の値を示す。また、岩石中の SiO_2 含有量は高く 90～97wt% に達する。このことは Ban Kruat および Si Khiu の両石切り場についても同じである。

また、同じく正珪岩であるが、Kao Phra Wihan の砂岩材 (Group 2-2) は Phu Phan Formation より下位にある Phra Wihan Formation に由来すると思われる。Phu Phan Formation のものと比べて全体的に褐色味が強い。Kao Phra Wihan は Phra Wihan Formation 上に位置し、石切り場跡が隣接している。必ずしも Phu Phan Formation との区別は明瞭ではないが、Phu Phan Formation と比べて平均的に、粒径が小さく、帯磁率が高く ($0.010 \sim 0.068 \times 10^{-3}$ SI Unit)、 SiO_2 含有量がやや小さく (85～98%)、また、若干の白雲母が存在する点で異なる。さらに、ロップリーの砂岩材 (Group 2-3) は中粒で、斜長石、黒雲母、白雲母を若干含み、また、帯磁率も高い ($0.031 \sim 0.054 \times 10^{-3}$ SI Unit、平均値 0.043×10^{-3} SI Unit)。このことから Sao Khua Formation 由来であることが推定される。

3つ目 (Group 3) は、ラオスの Wat Phu および Sida に使用されている中粒～細粒の長石質アレナイトである。これは Phu Kradung Formation に対応し、カンボジアのアンコール遺跡で多用されている。Sida の砂岩は灰色を呈し、アンコール遺跡の灰色～黄褐色砂岩と良く似ているが、Wat Phu の砂岩は赤みを帯びている。構成鉱物は、石英、斜長石、カリ長石、岩石片、白雲母および黒雲母であるが、Wat Phu の岩石中では黒雲母はレリクト状になっており、新鮮なものはほとんど存在していない。赤みを帯びた Wat Phu の砂岩は、アンコール遺跡や Sida の砂岩と比べてやや風化の進んだ条件下で堆積したものである。Wat Phu の周辺には石材を切り出した跡が有り、Wat Phu の石材と同様の岩質であることから Wat Phu の石材は近隣から切り出されたと思われる。帯磁率は $0.200 \sim 0.400 \times 10^{-3}$ SI Unit であり、アンコール遺跡と比べて低くなっている。また、 SiO_2 含有量は 74～79% であり、アンコール遺跡のものに比べて高い。

上記したように、タイおよびラオスのクメール遺跡の砂岩材は遺跡周辺の地層に支配されているとすることができる。

(4) コラート層群および砂岩材の化学組成

コラート層群より採取した岩石の化学組成分析を行なった(表4)。試料採取の対象とした地層は、下部から Huai Hin Lat Formation, Phu Kradung Formation, Phra Wihan

Formation, Sao Kua Formation, Phu Phan Formation および Khok Kruat Formation の 6 層である。分析結果を表 7 に示す。なお、分析はカナダの Activation Laboratory Ltd. に依頼し、 H_2O を含め 50 元素の分析を行なった。その内、W と Co に関しては試料粉碎容器からの汚染があるため、この 2 元素に関しては表から削除してある。

これら各地層の岩石を区別するにあたって、 SiO_2 含有量(図 3)、 $Sr - (MgO+Fe_2O_3)$ 図(図 4) および $(Al_2O_3/SiO_2) - (MgO+Fe_2O_3)$ 図(図 5) を用いた。

Huai Hin Lat Formation は 350ppm 以上の高い Sr 含有量を示し、他の地層と区別することができる。また、Phu Phan Formation、Sao Khua Formation および Phra Wihan Formation は低い Sr 含有量(50ppm 以下)を示し、Khok Kruat Formation および Phu Kradung Formation と区別することができる。Phu Phan Formation、Sao Khua Formation および Phra Wihan Formation の区別は Sr 含有量においては必ずしも容易ではない。Phu Phan Formation は、 SiO_2 において Sao Khua Formation よりも高い傾向にあるが、必ずしも明瞭ではない。そこでこれら 3 層の区別においてはいろいろな角度から行なう必要がある。すなわち、Phu Phan Formation は白色のものが多く、石英質以外の碎屑物が少なく、粗粒のものが多く、また、帯磁率が小さい傾向にある。それに対し、Sao Khua Formation は SiO_2 含有量が少なく、赤色を呈することが多く、石英質以外の碎屑物が多く、細粒で、帯磁率が大きい傾向にある。Phra Wihan Formation は両者の中間的な性質を示し、褐色を呈するものが多い。このような特徴を加味しながら区別する必要があるが、これでも必ずしも明瞭に区別することは困難である。

Khok Kruat Formation と Phu Kradung Formation では $(MgO+Fe_2O_3)$ 含有量に違いが見られ、前者では 4% 以下、後者では 2.5% 以上となっており、重なりが見られる。また、 (Al_2O_3/SiO_2) 含有量においても重なりが見られ、化学組成上では明確に分けることはできない。しかしながら、Khok Kruat Formation は岩石片を多く含むのに対し、Phu Kradung Formation は長石質で雲母類を多く含有している点で違いが見られ、顕微鏡観察を行なうことによりこの 2 層を区別することが比較的容易にできる。

各遺跡から採取した砂岩材の化学組成を表 5 に示す。また、各遺跡からの砂岩材の組成をコラート層群と同様に SiO_2 含有量(図 6)、 $Sr - (MgO+Fe_2O_3)$ 図(図 7) および $(Al_2O_3/SiO_2) - (MgO+Fe_2O_3)$ 図(図 8) に示した。

Group 1 の砂岩材は、おおむね Khok Kruat Formation の領域にプロットされ、また、岩石片を多く含んでいることから、この地層より供給されたことが推測される。Phimai の石材に関しては Sao Kua Formation に近い組成を示すが、岩石片を多く含有していることと周辺地質を考慮に入れると Khok Kruat Formation から供給されたと推測される。

$Sr - (MgO+Fe_2O_3)$ 図 および $(Al_2O_3/SiO_2) - (MgO+Fe_2O_3)$ 図にクメール遺跡の Group 2-1 の砂岩材をプロットすると Phra Wihan Formation Sao Khua Formation および Phu Phan Formation の領域にプロットされ、これらの石材がこれらの地層より供給されたことが推測される。しかしながら、Ban Kruat および Si Khiu の両石切り場が Phu Phan

Formation 上に位置することと、正珪岩の使用されている遺跡がいずれもコラート高原上に位置しているため、下部に位置する Phra Wihan Formation から石材を高原上面まで供給するには大変な労力を必要とすることを考えに入れると、正珪岩が Phu Phan Formation から供給された可能性が高い。ただし、Kao Phra Wihan (Group 2-2) に関してはその色や周辺地質を考慮に入れると Phra Wihan Formation から供給されたと推測される。また、ロップリーのクメール遺跡(Group 2-3)の砂岩は MnO が高いといった特徴から Sao Khua Formation から供給されたと推測される。

また、Group 3 の Wat Phu および Sida の石材は Khok Kruat Formation にも近い組成を示すが、長石質であることと周辺地質から判断して Phu Kradung Formation から供給されたと考えるのが妥当である。

(5)砂岩材の帯磁率

上述したコラート高原の典型的な地層に対し、帯磁率測定を行った。測定には Geofyzika 社製(チェコ)の携帯用帯磁率計 SM-20 を用いた。測定は各箇所ごとに約 10 ポイントにおいて行ない、その平均値を求めた。測定結果を表 3 と表 4 に示す。

Huai Hin Lat Formation, Phu Kradung Formation, Phra Wihan Formation, Sao Kua Formation, Phu Phan Formation および Khok Kruat Formation の 6 層に対する平均帯磁率は、それぞれ 0.039、0.312、0.020、0.040、0.008、 0.084×10^{-3} SI unit である。

Group 1 の砂岩材は $0.04 \sim 0.34 \times 10^{-3}$ SI unit の帯磁率を示す。化学組成からこれらの岩石が Khok Kruat Formation より供給されたと推測されたが、帯磁率測定結果はこのことを支持する。

Group 2 の砂岩材の帯磁率は、上記したように 0.070×10^{-3} SI unit 以下であり、これに化学組成を考慮すると、これら正珪岩は Phra Wihan Formation、Sao Khua Formation または Phu Phan Formation より供給されたと推測される。

ラオスの Wat Phu および Sida(Group 3)に使われている長石質アレンイトの帯磁率は $0.2 \sim 0.35 \times 10^{-3}$ SI unit であり、タイおよびラオスの Phu Kradung Formation の帯磁率に近い値を示している。

(6)砂岩材の鉱物粒径

(4)で述べたコラート層群の地層に対して鉱物粒子の粒径測定を行った。測定は平均的な 20 粒子に対して行い、平均値を求めた。測定結果を表 3 と表 4 に示す。

Huai Hin Lat Formation, Phu Kradung Formation, Phra Wihan Formation, Sao Kua Formation, Phu Phan Formation および Khok Kruat Formation の 6 層に対する平均粒径は、それぞれほぼ 0.37-0.55、0.06-0.51、0.12-0.62、0.08-0.26、0.29-0.79、0.08-0.19mm の範囲にある。

Group 1 の石質アレンイトの平均粒径は、0.18-0.32mm の範囲にあり、Khok Kruat

Formation(0.08-0.19mm)よりも若干粒径が大きいように思われる。

Group 2 の砂岩材に使用されている正珪岩の平均粒径は 0.23-0.88mm の範囲にあり、Phra Wihan Formation、Sao Kua Formation、Phu Phan Formation の範囲にある。

Group 3 の長石質アレナイトの平均粒径は、0.21-0.44mm の範囲にあり、タイおよびラオスの Phu Kradung Formation の範囲内にある。

(7)ラテライト材について

タイのクメール遺跡には砂岩と並んでラテライトが多用されている。ラテライトはその見かけから大きくピソライト質ラテライトと多孔質ラテライトとに大きく分けられるが、その中間的なものも存在するとともに、同じ遺跡内でも両者が混在するのが一般的である。このことはアンコール遺跡においても同じである。残念ながら、ラテライトの試料を採取できなかったので、その顕微鏡観察や化学組成分析を行なうことは出来なかった。しかしながら、各遺跡で帯磁率を測定したので、ここではその結果について検討する。今回測定できた遺跡においてその平均帯磁率は、 $0.39\sim 1.85\times 10^{-3}$ SI Unit 範囲にある。これはアンコール遺跡のラテライトとほぼ同じ範囲である。大雑把には多孔質ラテライトで相対的に帯磁率が小さく、ピソライト質ラテライトで高くなる傾向にある。調査地域全般わたる帯磁率の傾向は認められないが、狭い地域では同様な帯磁率を示している。例えば、距離的に近い [Prasat Yai Noi と Prasat Phum Phon]、[Ta Muen Thom と Ta Muen Toch と Ta Muen] および [Prasat Ban Bu と Muang Tam と Prasat Phnom Rung] は似た帯磁率を示しており、おそらくこのことはこれらのラテライトが近隣から採掘されたことを示していると思われる。

(8)アンコール遺跡との比較

アンコール遺跡においては砂岩が多用されている。アンコール遺跡で使用されている砂岩は、その色に基づき灰色～黄褐色砂岩(長石質アレナイト)、赤色砂岩(石英質アレナイト：正珪岩)、緑灰色硬砂岩(長石質ワッケ)の 3 つに分けられるが、そのうち灰色～黄褐色砂岩が一般的で、他の砂岩はそれぞれ BanteaySrei および Ta Keo に使用されているのみである。アンコール遺跡で最も一般的な灰色～黄褐色砂岩は、今回調査したタイのクメール遺跡には全く使用されていないが、ラオスの Wat Phu および Sida には同じ岩石が用いられている。ただし、Wat Phu の砂岩材はアンコール遺跡の灰色～黄褐色砂岩と比べて赤みがかっている。それに対し、アンコール遺跡の赤色砂岩は、正珪岩であり、同様な正珪岩は多くのタイのクメール遺跡に使用されている。この赤色砂岩は、アンコール遺跡の中心部から北東約 40km に位置するクレン山の主要構成岩石であり、色も赤色、黄褐色、白色のものがあり、タイのクメール遺跡に使用されているこの種の砂岩と同様な色のバリエーションを持つ。また、アンコール遺跡の Ta Keo の祠堂に用いられている緑灰色硬砂岩は、タイの遺跡ではまだ見つかっていない。逆に、タイのクメール遺跡で多用されている石質アレナイト

は、アンコール遺跡では全く用いられていない。

(9) カンボジアのクメール遺跡(アンコール遺跡)の砂岩を供給した地層について

上述したようにカンボジアのクメール遺跡に用いられている砂岩は、次の3つに分けられる。

- (a) 緑灰色硬砂岩
- (b) 灰色～黄褐色砂岩
- (c) 赤色砂岩

これらの石材は全て、タイでコラート層群と呼ばれている中生界の地層から採掘されたのもであり、タイ、カンボジア、ラオスに跨って分布している。

(a) 緑灰色硬砂岩

上部三畳紀に属し、タイではコラート層群の最下部に位置する非海成層の Huai Hin Lat Formation に対応する。また、海成層の Pong Nam Ron Formation 中にも硬砂岩が産出する。

(b) 灰色～黄褐色砂岩

カンボジアでは、Terrain Rouge (J_{1-2}) と呼ばれ、タイでは下部コラート層群の Phu Kradung Formation に対応する。中部ジュラ紀から上部ジュラ紀に属すると考えられている。カンボジアの北東部からラオス南部にかけて多く露出しており、西に向かって徐々に消滅している。主として赤色の大陸性碎屑岩からなり、礫岩、砂岩、シルト岩より構成される。しかしながら、沿岸性ないしラグーン性の海成堆積物を挟み (5-10m の厚さ)、この中にアンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩が産出する。クレン山南東部の裾野にはこの灰色～黄褐色砂岩の石切り場跡が数多く見られる。

アンコール遺跡の灰色～黄褐色砂岩はその帯磁率に基づき、時代による石切り場の変遷が明らかとなっている。その平均帯磁率は $0.5 \times 10^{-3} \text{SI unit}$ 以上となっているが、タイの同砂岩は全平均で $0.348 \times 10^{-3} \text{SI unit}$ となり、かなり低くなっている。ラオスの同砂岩も低い帯磁率を示している。

(c) 赤色砂岩

カンボジアでは、Gres Superieurs (J_3-K) と呼ばれ、タイでは上部コラート層群に対応する。特に、Phra Wihan Formation、Sao Khua Formation および Phu Phan Formation に対応する。この地層は頂部が平坦な高地を形成し、コラート高原 (Dangreck 山地を含む)、カルダモン高地、クレン山を形造っている。主として、白色、黄灰色、赤褐色を呈する大陸性の珪質砂岩および礫岩より構成される。上部ジュラ紀から下部白亜紀に形成されたと考えられている。珪質砂岩は、Phra Wihan Formation および Phu Phan Formation に産出し、Sao Khua Formation では、赤褐色の濃い砂岩が産出する。タイのクメール期の石切り場である Ban Kruat および Si Khui は何れも Phu Phan Formation 中に位置している。

(d) 化学組成の比較

アンコール遺跡で使用されている上記3種類の砂岩材とタイのコラート層群を構成する

岩石の化学組成における比較を行なった。コラート層群を構成する岩石の分類には、上述したように Sr - (MgO+Fe₂O₃)図(図 9)および(Al₂O₃/SiO₂) - (MgO+Fe₂O₃)図(図 10)が有効であったため、アンコール遺跡の砂岩材に対しても同様のプロットを行なった。

灰色～黄褐色砂岩に関しては、Sr 含有量が 170-240ppm で、(MgO+Fe₂O₃)含有量が 4～8%と高く、コラート層群の Phu Kradung Formation と一致している。

赤色砂岩は、(MgO+Fe₂O₃)含有量が 2%以下で、Sr 含有量は 30-80ppm のものが多く、180ppm に達するものもある。大半は Sao Kua Formation の範囲にあり、構成鉱物も考慮に入れると Sao Khua Formation に大方対応すると思われる。

緑灰色硬砂岩は、Sr 含有量が高く、350—490ppm を示し、コラート層群の Huai Hin Lat Formation に対応すると思われる。

(10) 石材の大きさ・形および積み方

石材の大きさに関しては、例外があるものの 11 世紀後半までの遺跡と 11 世紀末以降の遺跡との間に違いが認められる。最も古い Prasat Phum Phon ではサイズが不揃いであるが、11 世紀後半までのそれ以外の遺跡では、断面形状が正方形に近く、厚さが 40～50cm、幅が 44～55cm 位の大きさを持つ石材が一般的である。ただし、Phnom Rung および Phnom Wan は例外で、厚さがやや薄くなっている。11 世紀末以降では扁平なものおよび大きさの不規則なものが多くなる傾向にある。これらの傾向はアンコール遺跡で見られる傾向とよく似ており、特に 11 世紀までの遺跡の石材で断面形状が正方形に近く、その大きさも類似している。また、11 世紀末以降で扁平になり、かつ大きさが不規則になる傾向も似ている。

同様に石材の積み方に関しては、12 世紀半ばまでは、石材の上下面が揃うように積まれているが、それ以降は石材の上下面が揃っていない。

(11) 使用石材種を決めた要因

上記の調査結果から、カンボジア、タイ、ラオスに跨って分布するクメール遺跡の使用石材を決めている要因は周辺地質であり、また、標高(地形)も重要な要因となっている。

バンテアイ・スレイを除くカンボジアのアンコール遺跡では、Phu Kradung Formation に産する灰色～黄褐色砂岩が使用されている。Phu Kradung Formation は、コラート高原およびクレン山の麓に産し、平地に存在するアンコール遺跡の主要遺跡とほぼ同じ水準に産する。これは、灰色～黄褐色砂岩が用いられているラオスのワット・プー遺跡に対しても同様である。クレン山の主体をなす正珪岩(赤色砂岩は正珪岩に分類される)までの距離は、上記灰色～黄褐色砂岩の供給地までの距離と変わらないが、正珪岩はアンコール遺跡よりも標高的には上位に位置するためこの石材が使用されなかったと思われる。バンテアイ・スレイの場合は、クレン山近くに位置しているため例外的に正珪岩である赤色砂岩が使用されたと推測される。

これらに対して、コラート高原上に位置している遺跡では、高原上部を構成する Phu

Phan Formation、Khok Kruat Formation および一部 Phra Wihan Formation の石材が使用され、高原の下部に位置し、アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩は全く使用されていない。

また、タイの西部に位置するクメール遺跡では、砂岩が用いられず、石材としてはラテライトが使用されている。これは、砂岩材供給地から離れているとともに、その他の適切な石材が周囲に存在していないためであると推定される。

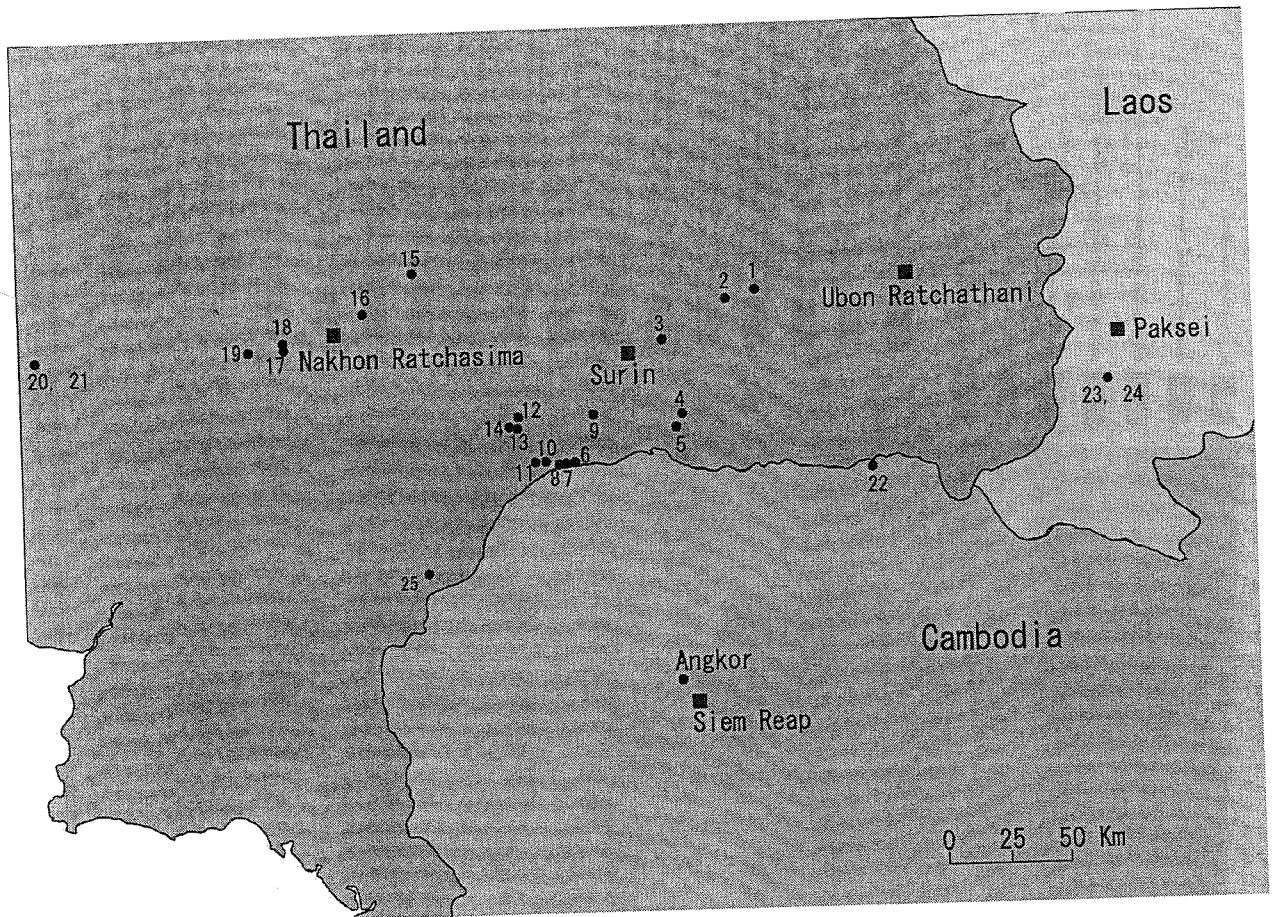
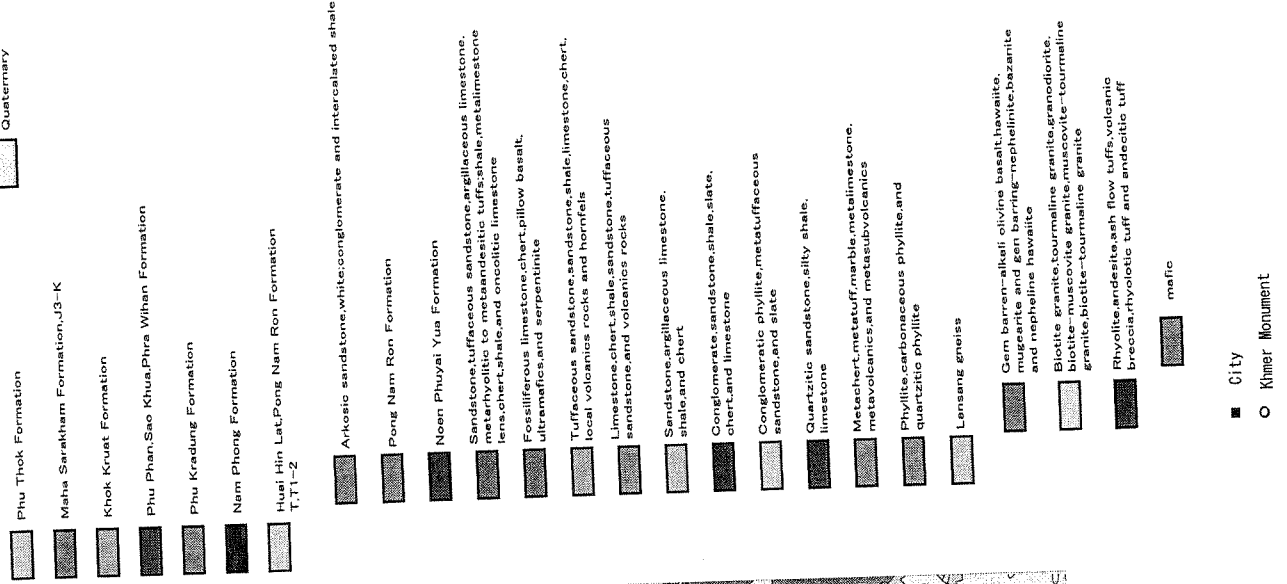


図1 調査遺跡の分布

- | | | |
|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 1. Kamphaeng Noi | 11. Ban Kruat (Quarry) | 21. Prang Sam Yod |
| 2. Kamphaeng Yai | 12. Ban Bu | 22. Khao Phra Wihan |
| 3. Prasat Sikoraphum | 13. Muang Tam | 23. Wat Phu |
| 4. Prasat Yai Ngao | 14. Phnom Rung | 24. Sida |
| 5. Phum Phon | 15. Phimai | 25. Sdok Khok Thom |
| 6. Ta Muen Thom | 16. Phnom Wan | |
| 7. Ta Muen Toch | 17. Non Ku | |
| 8. Ta Muen | 18. Muang Khaek | |
| 9. Prasat Ban Phluang | 19. Si Khiu (Quarry) | |
| 10. Bai Baek | 20. Wat Mahathat | |



- Phu Thok Formation
- Maha Sarakham Formation, J3-K
- Khok Kruat Formation
- Phu PhanSao Khua, Phra Wihan Formation
- Phu Kradung Formation
- Nam Phong Formation
- Hualu Lat, Phou Nam Ron Formation T, T1-2
- Quaternary
- Arkosic sandstone, white; conglomerate and intercalated shale
- Pong Nam Ron Formation
- Noen Phuyai Yua Formation
- Sandstone, tuffaceous sandstone, argillaceous limestone, meta-phyllite, meta-igneous tuffs, shale, metalimestone lens, chert, shale and oncoidal limestone
- Fossiliferous limestone, chert, pillow basalt, ultramafics, and serpentine
- Tuffaceous sandstone, sandstone, shale, limestone, chert, local volcanics rocks and hornfels
- Limestone, chert, shale, sandstone, tuffaceous sandstone, and volcanics rocks
- Sandstone, argillaceous limestone, shale, and chert
- Conglomerate, sandstone, shale, slate, chert, and limestone
- Conglomeratic phyllite, meta-tuffaceous sandstone, and slate
- Quartzitic sandstone, silty shale, limestone
- Metachert, metatuff, marble, metalimestone, metavolcanics, and metabasaltics
- Phyllite, carbonaceous phyllite, and quartzitic phyllite
- Lensang gneiss
- Gem barren-alkali olivine basalt, hawaite, mugearite and gen barrig-nephelinitic, basanite and nepheline hawaite
- Biotite granite, tourmaline granite, granodiorite, Biotite-muscovite granite, muscovite-tourmaline granite, biotite-tourmaline granite
- Rhyolite, andesite, ash flow tuffs, volcanic breccia, rhyolitic tuff and andesitic tuff
- mafic
- City
- Khammouang Monument
- Basalt
- Basalt, lateritic-basalt, bauxite
- Red conglomerate, sandstone, claystone, siltstone
- Rhyolite, dacite, tuffs, conglomerate
- Siltstone, conglomerate, chert and andesite, rhyolite, rhyodacite, trachyte, tuffs
- Carboniferous, Shale, chert, siltstone, limestone, coal seams
- Devonian-Carboniferous, Shale, sandstone, limestone, rhyolite, tuffs
- Gabbro-gabbrodiorite, diorite
- biotite-hornblende, granodiorite, monzonite, granite, granophyre, granoeyanite
- Diorite, quartz diorite, granodiorite and biotite hornblende

図2 タイ、カンボジア、ラオス国境地域の地質図

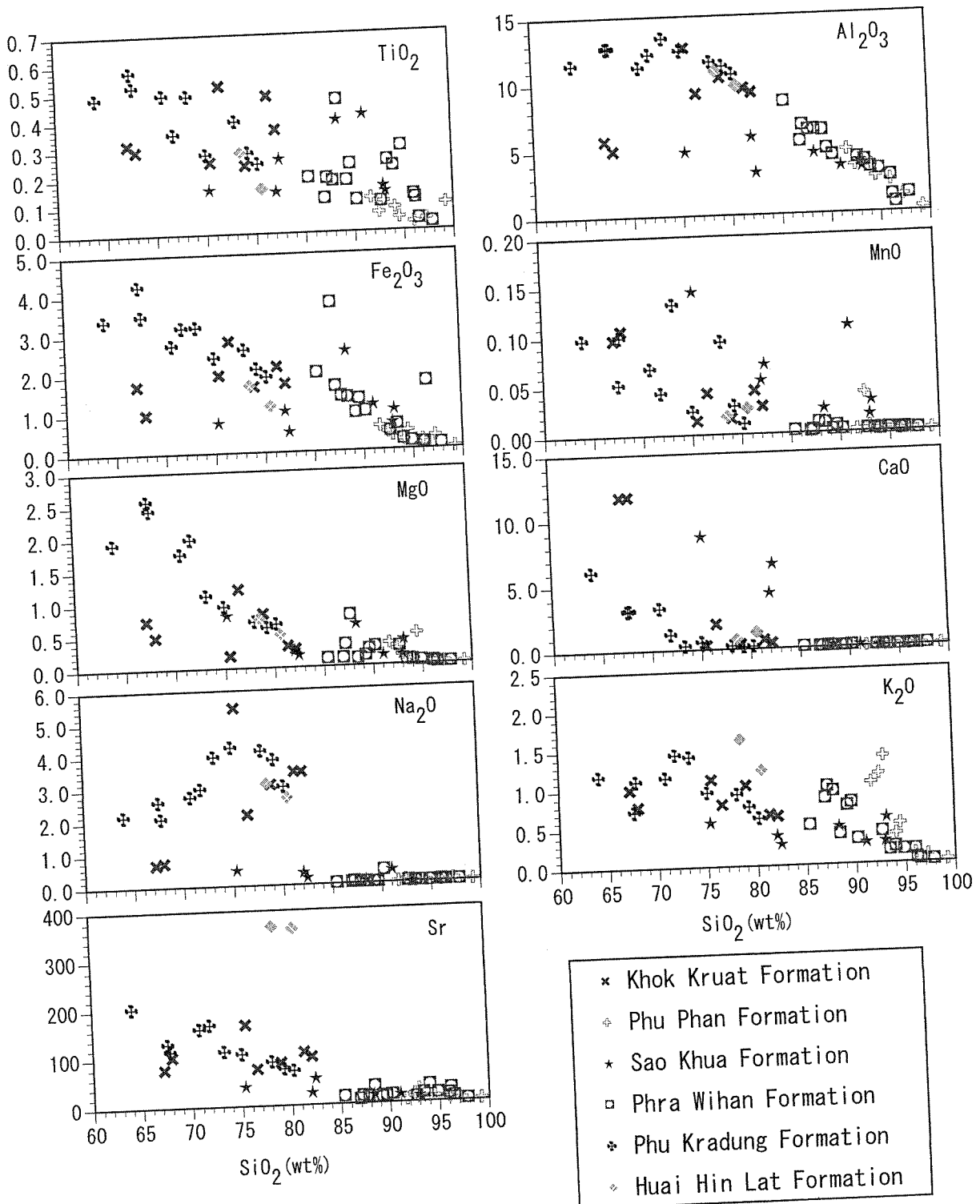


図3 コラート層群の砂岩のSiO₂に対する主要成分およびSr含有量のプロット

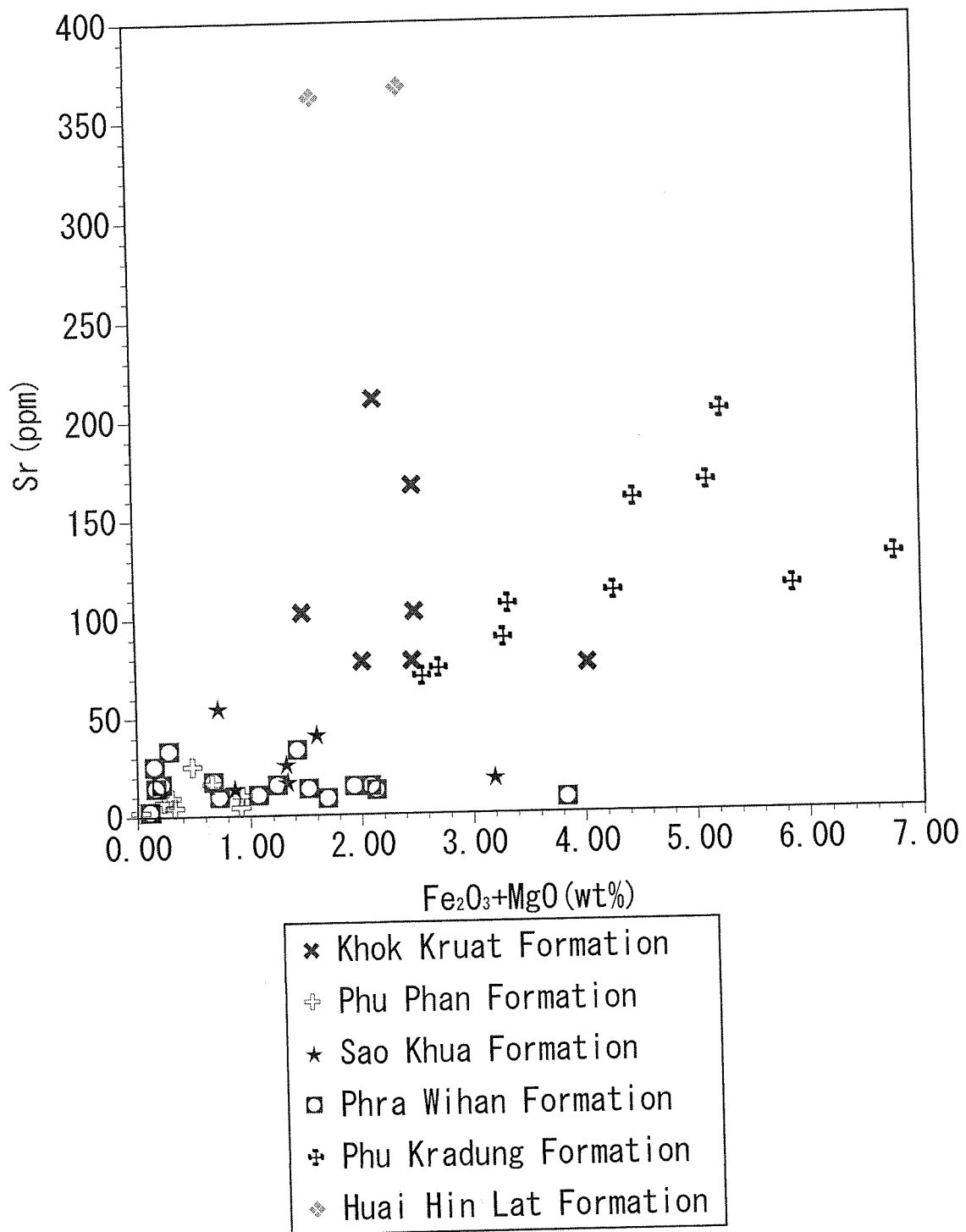
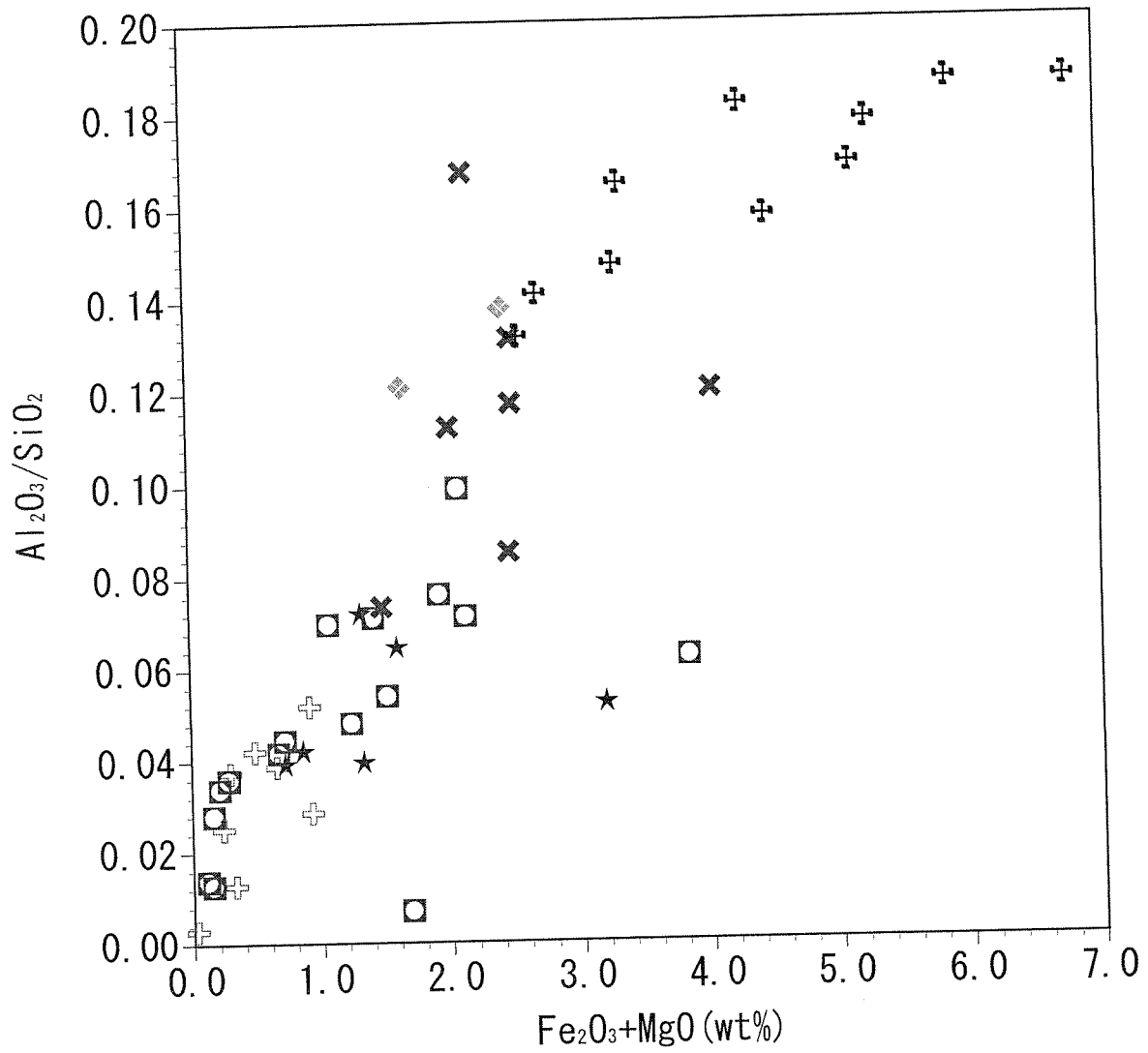


図4 コラート層群の砂岩の(Fe₂O₃+MgO)含有量に対するSr含有量のプロット



- × Khok Kruat Formation
- + Phu Phan Formation
- ★ Sao Khua Formation
- Phra Wihan Formation
- ⊕ Phu Kradung Formation
- ◊ Huai Hin Lat Formation

図5 コラート層群の砂岩の(Fe₂O₃+MgO)含有量に対する(Al₂O₃/SiO₂)比のプロット

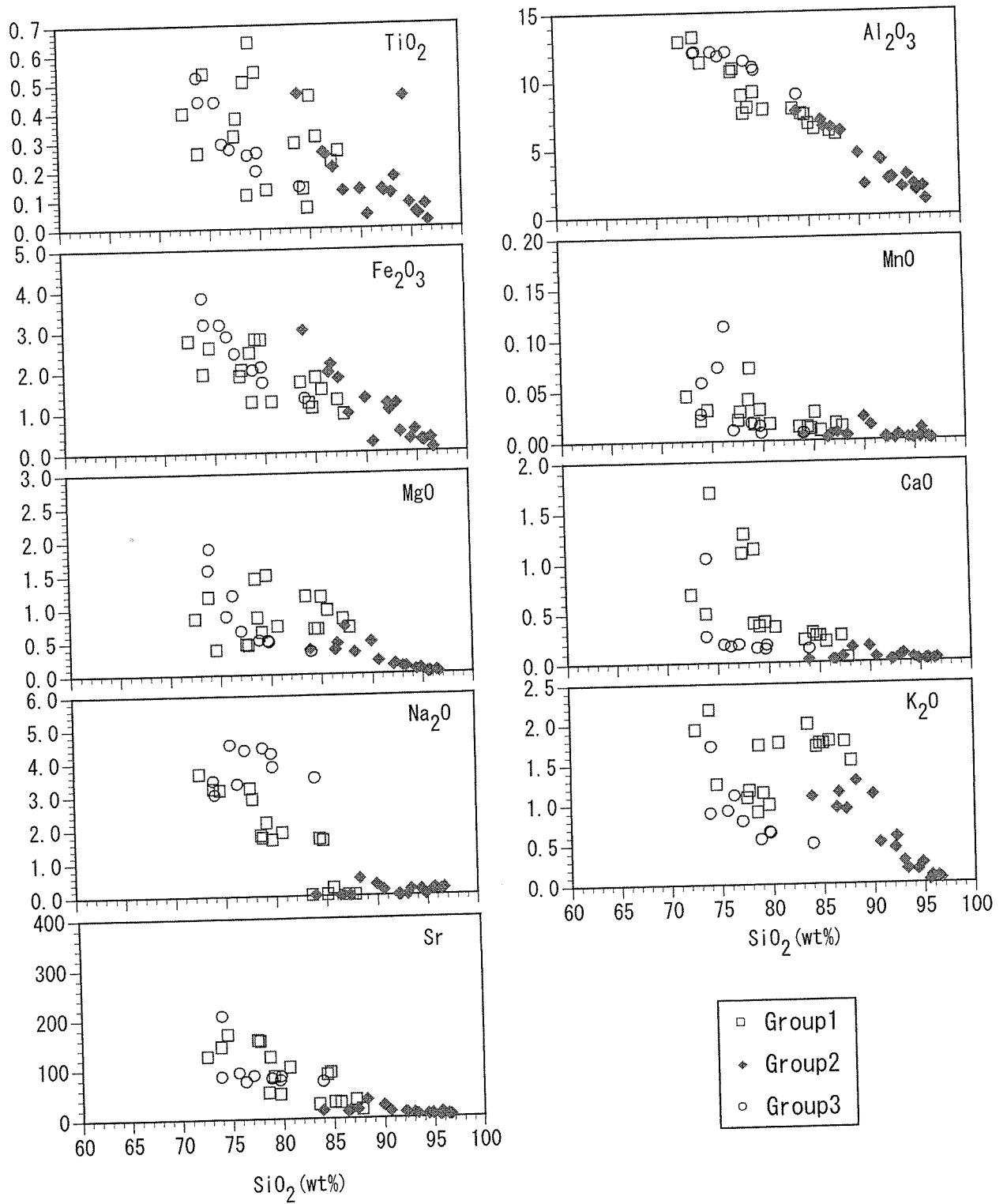


図6 タイおよびラオスのクメール遺跡の砂岩材の SiO_2 に対する主要成分およびSr含有量のプロット

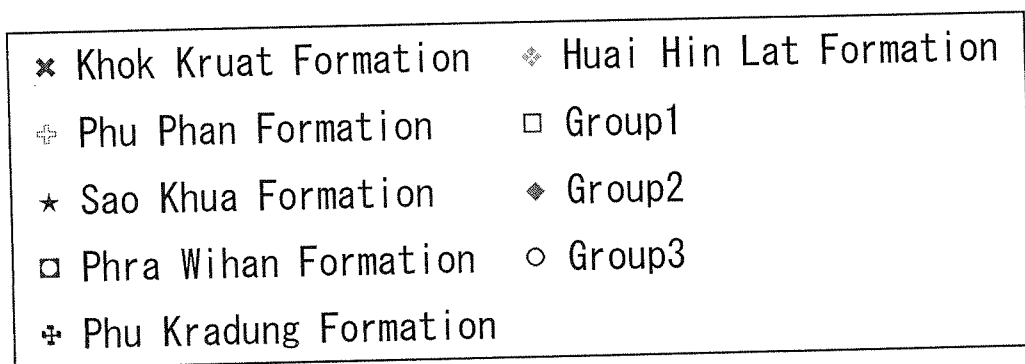
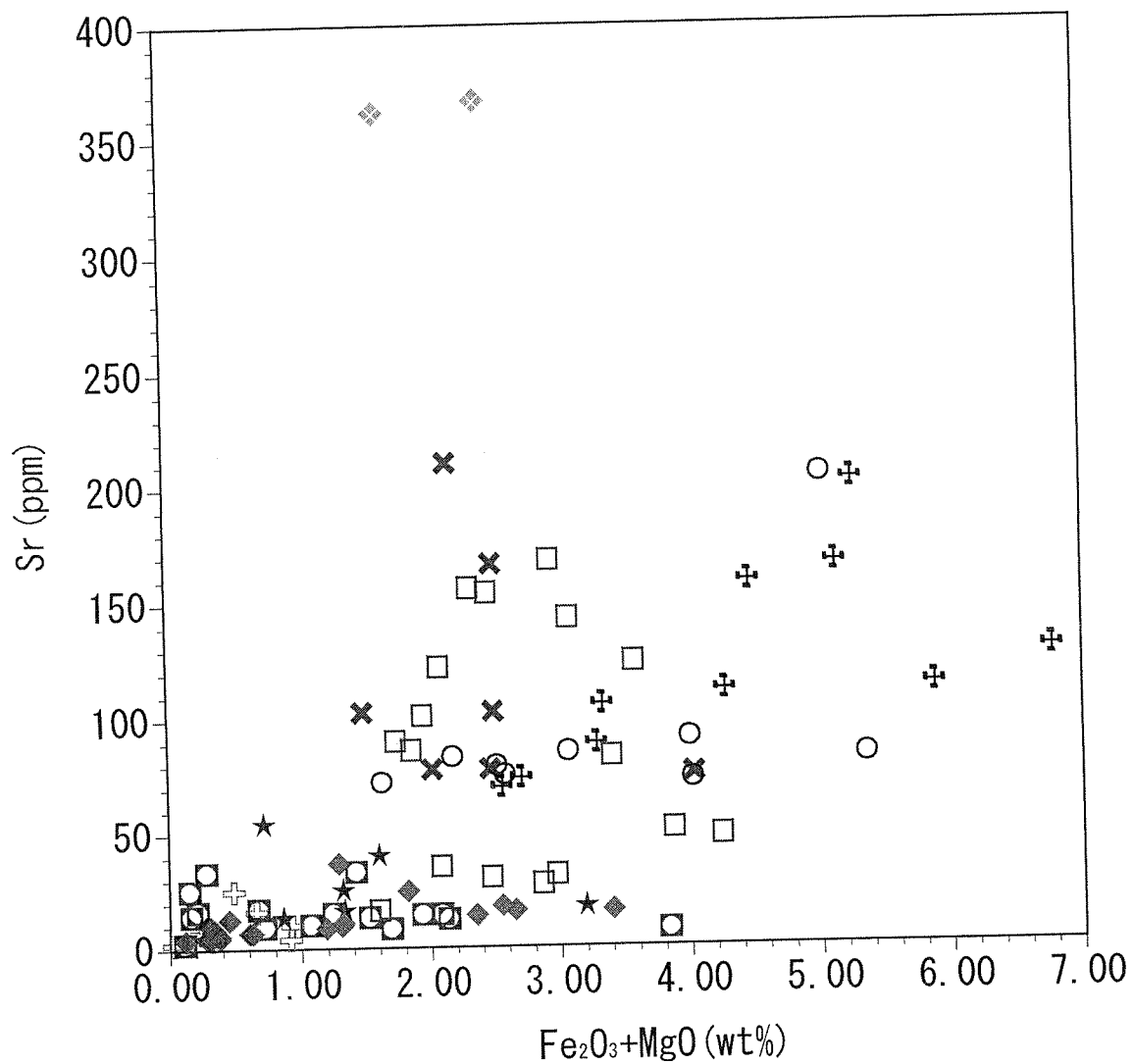
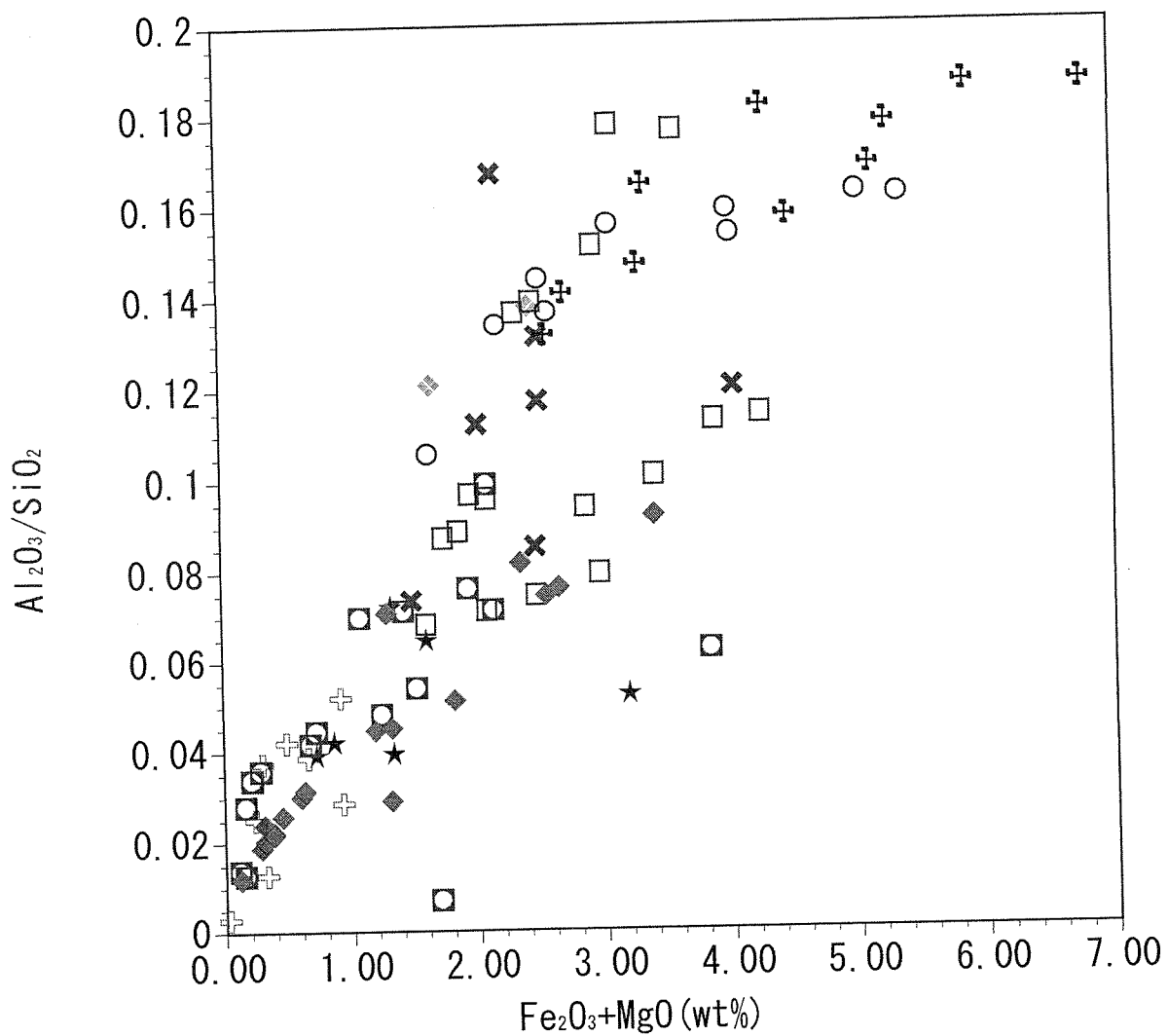
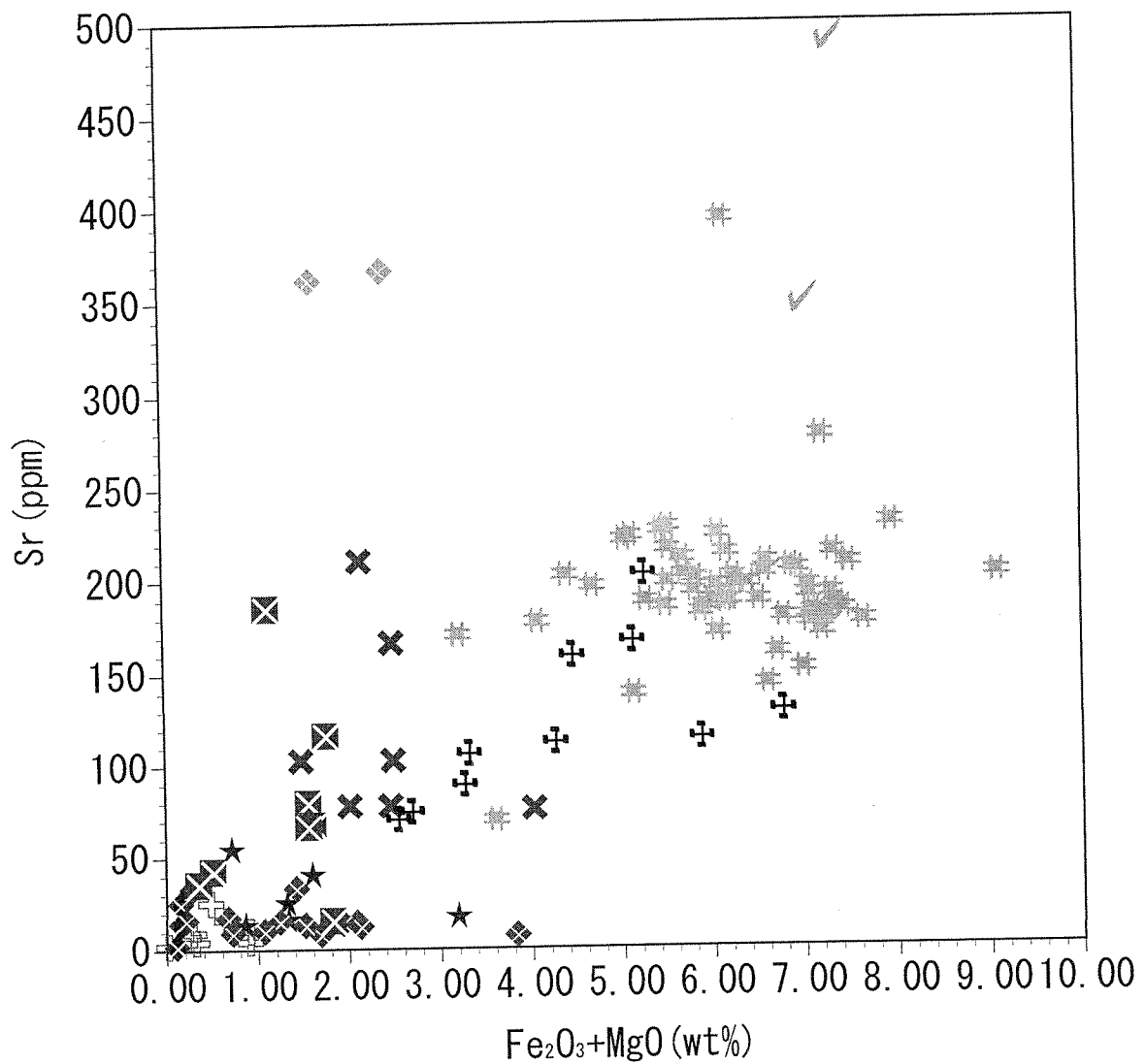


図7 タイおよびラオスのクメール遺跡の砂岩材の(Fe₂O₃+MgO)含有量に対するSr含有量のプロット



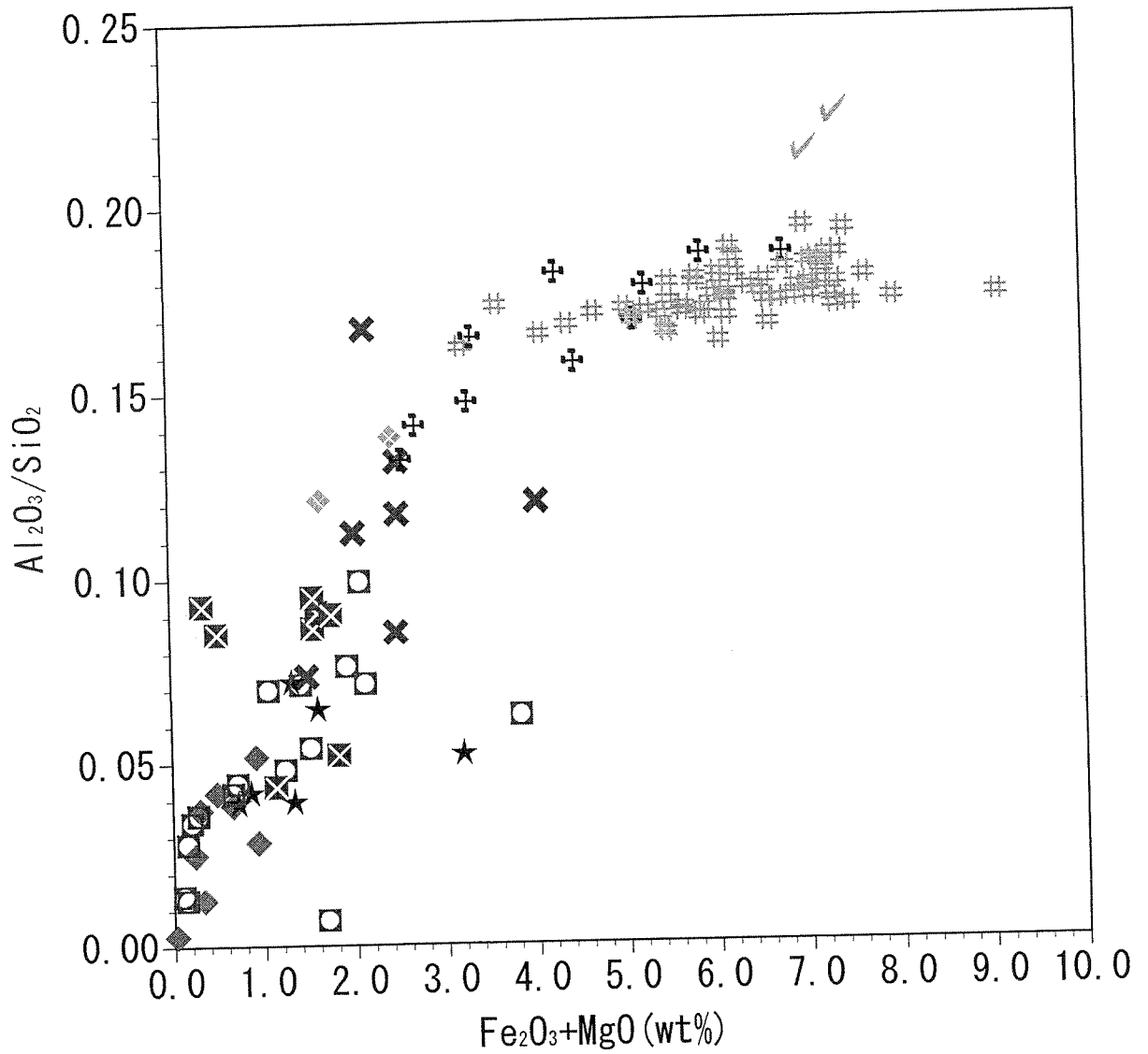
- × Khok Kruat Formation
- + Phu Phan Formation
- ★ Sao Khua Formation
- Phra Wihan Formation
- ⊕ Phu Kradung Formation
- ⊞ Huai Hin Lat Formation
- Group1
- ◆ Group2
- Group3

図8 タイおよびラオスのクメール遺跡の砂岩材の(Fe_2O_3+MgO)含有量に対する(Al_2O_3/SiO_2)比のプロット



- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| × Khok Kruat Formation | ◇ Huai Hin Lat Formation |
| + Phu Phan Formation | * Grey sandstone |
| ★ Sao Khua Formation | ⊠ Red sandstone |
| ◆ Phra Wihan Formation | ✓ Greenish grey sandstone |
| ⊕ Phu Kradung Formation | |

図9 アンコール遺跡の砂岩材の(Fe₂O₃+MgO)含有量に対するSr含有量のプロット



- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| × Khok Kruat Formation | ◈ Huai Hin Lat Formation |
| ◆ Phu Phan Formation | # Grey sandstone |
| ★ Sao Khua Formation | ⊠ Red sandstone |
| □ Phra Wihan Formation | ✓ Greenish grey sandstone |
| ⊕ Phu Kradung Formation | |

図10 アンコール遺跡の砂岩材の($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$)含有量に対する($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$)比のプロット

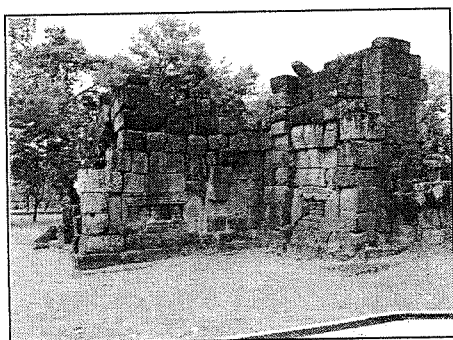


写真1 主としてラテライトからなる東ゴープラ(Kamphaeng Noi)

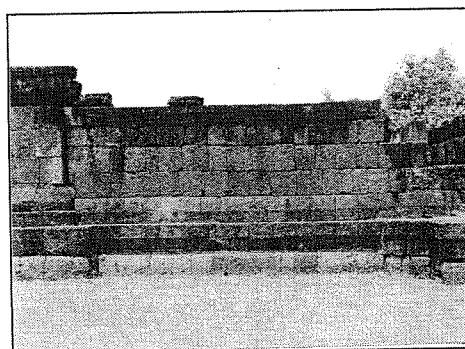


写真2 回廊を構成するラテライト(Kamphaeng Yai)

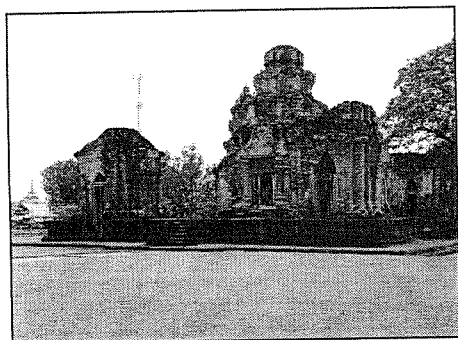


写真3 レンガ造の祠堂群(Prasat Sikhoraphum)



写真4 レンガ造の祠堂(Prasat Yai Ngao)

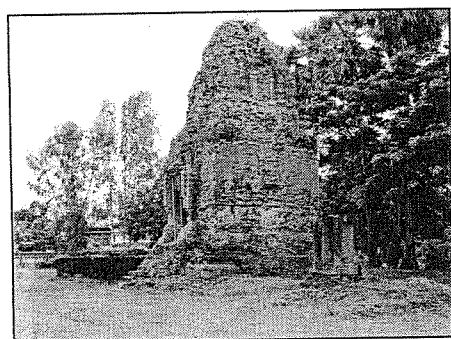


写真5 レンガ造の祠堂(Prasat Phum Phon)



写真6 敷地内に露出した岩盤(Ta Muen Thom)

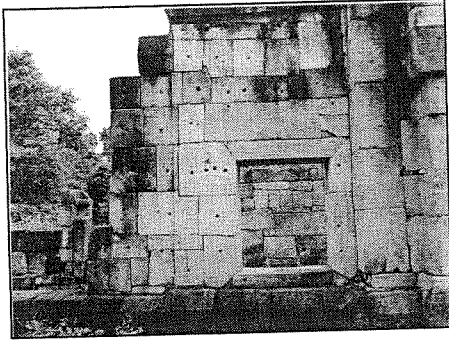


写真7 中央祠堂の砂岩材
(Ta Muen Thom)

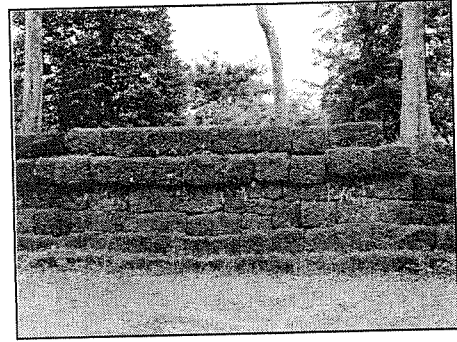


写真8 ラテライトでできた周
壁(Ta Muen Toch)

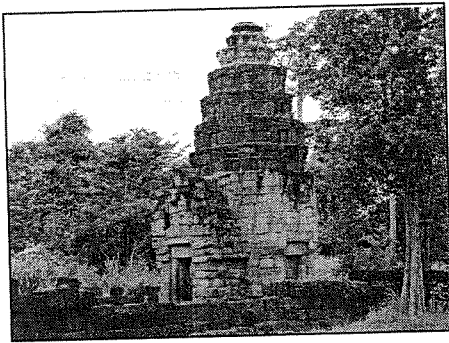


写真9 砂岩およびラテライト
でできた中央祠堂(Ta Muen
Toch)

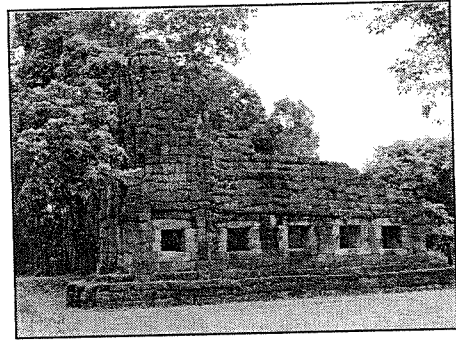


写真10 主としてラテライトで
できた祠堂(Ta Muen)

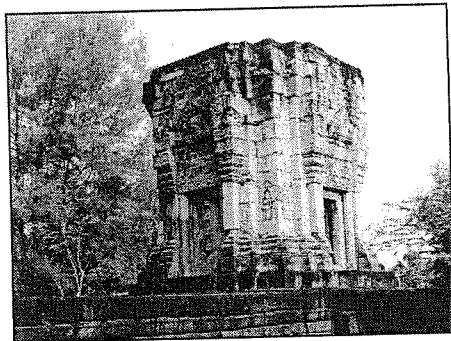


写真11 砂岩製の中央祠堂
(Prasat Ban Phluang)

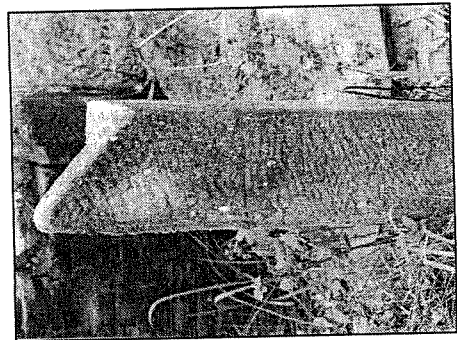


写真12 石英質の小礫を含
有する砂岩材(Bai Baek)

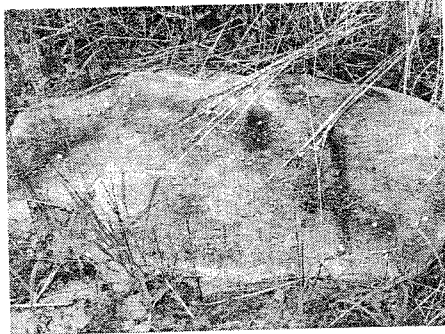


写真13 周辺に散在する巨礫(Bai Baek)

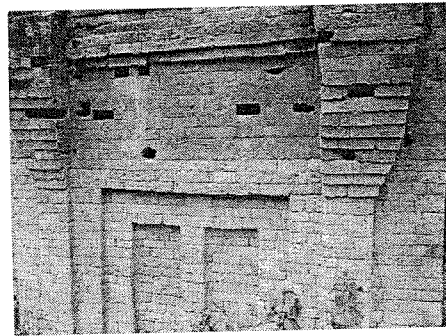


写真14 2色のレンガよりなる祠堂(Bai Baek)

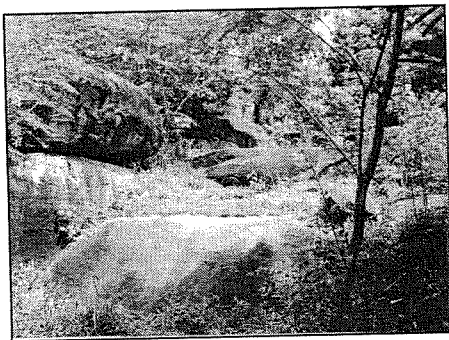


写真15 散在する巨礫(Ban Kruat)



写真16 切り出しはじめの砂岩材(Ban Kruat)



写真17 切り出し途中の砂岩材(Ban Kruat)



写真18 主としてラテライトで構成される中央祠堂(Prasat Ban Bu)

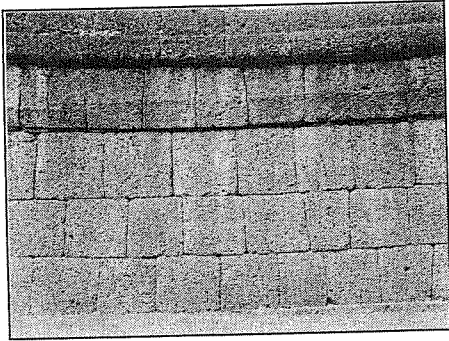


写真19 周壁を構成するラテライト(Muang Tam)

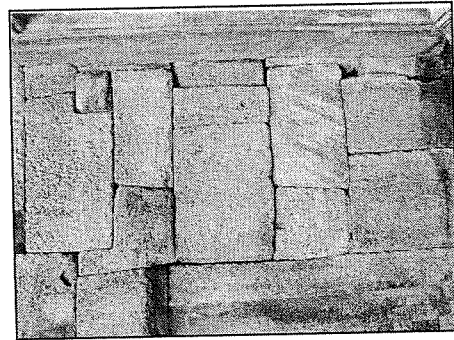


写真20 砂岩材(Muang Tam)

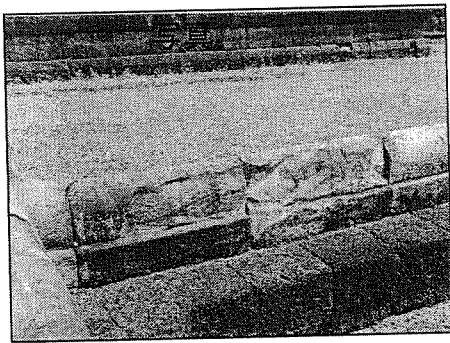


写真21 池護岸の砂岩材(Muang Tam)

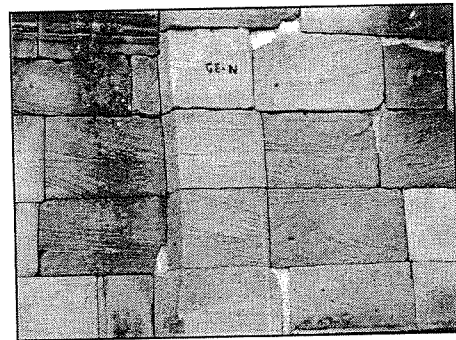


写真22 砂岩材(Prasat Phnom Rung)

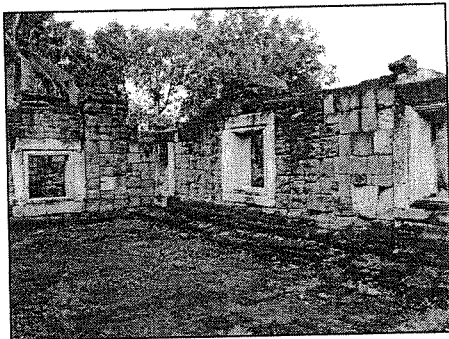


写真23 回廊を構成する砂岩材(Prasat Phimai)

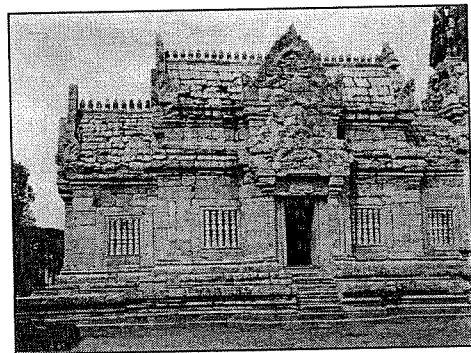


写真24 中央祠堂前室を構成する砂岩材(Prasat Phimai)

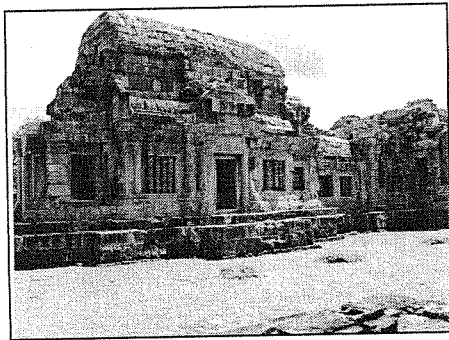


写真25 中央祠堂の砂岩材
(Phnom Wan)

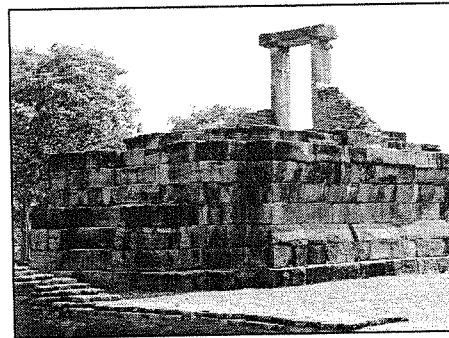


写真26 中央祠堂基壇を構
成する砂岩材(Prasat Non Ku)

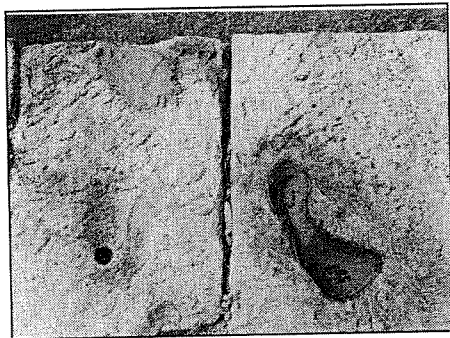


写真27 砂岩中の鉄分の濃
集部(Prasat Non Ku)

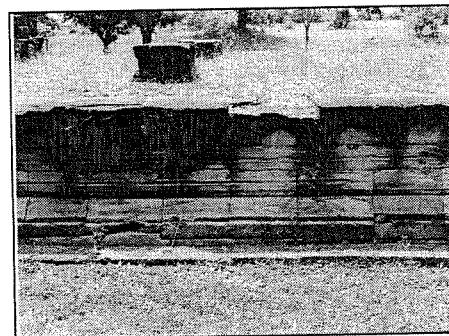


写真28 十字テラス東西基
壇の砂岩材(Prasat Muang
Khaek)

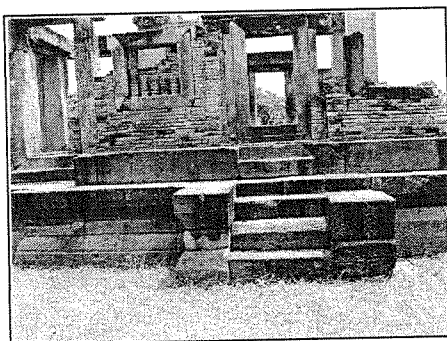


写真29 十字テラス北側基
壇(Prasat Muang Khaek)

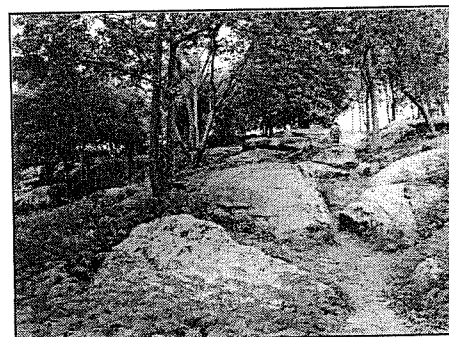


写真30 周辺に分布する巨
礫(Si Kheu)

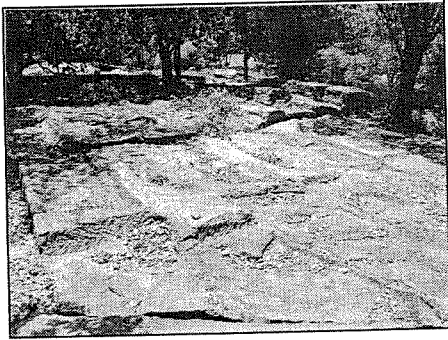


写真31 石材の切り出し跡
(Si Khiu)

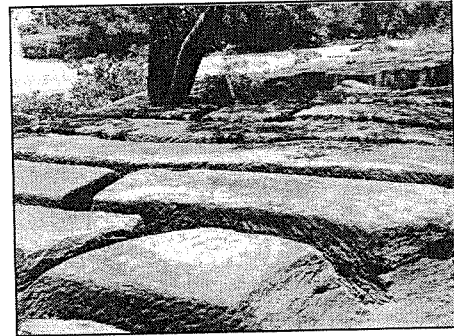


写真32 切り出しかけの砂岩
材(Si Khiu)

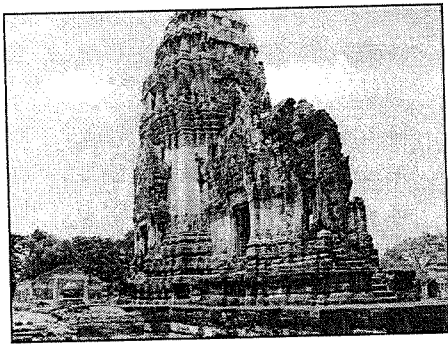


写真33 中央祠堂 (Wat
Mahathat, Lopburi)



写真34 祠堂 (Prang Sam
Yod, Lopburi)

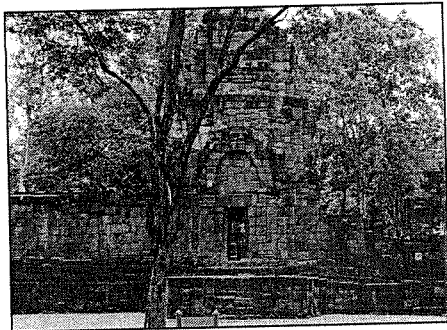


写真35 西側ゴープラ
(Prasat Muang Singh)



写真36 祠堂群 (Wat
Kamphaeng Laeng)

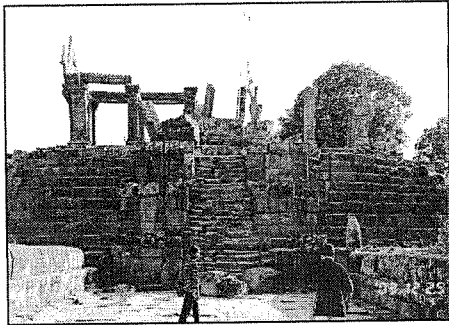


写真37 第一ゴープラ
(Prasat Khao Phra Viharn)

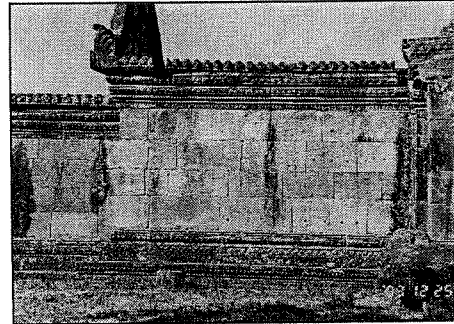


写真38 第二ゴープラ
(Prasat Khao Phra Viharn)

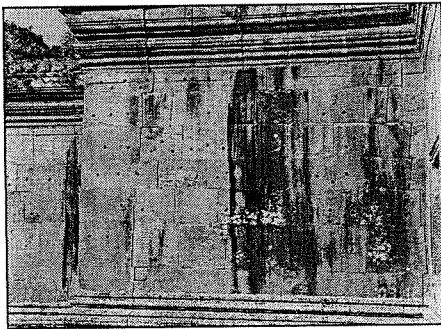


写真39 第三ゴープラ
(Prasat Khao Phra Viharn)

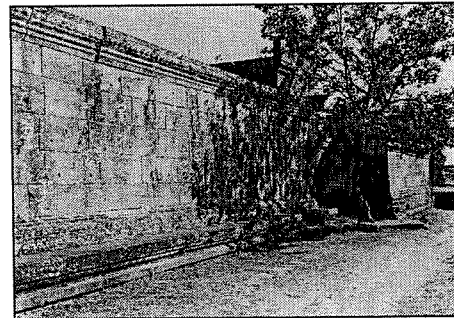


写真40 中央祠堂の周壁
(Prasat Khao Phra Viharn)

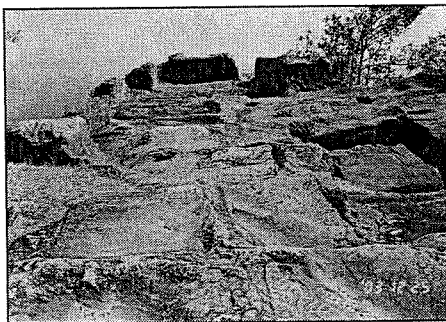


写真41 石切り場跡 (Prasat
Khao Phra Viharn)

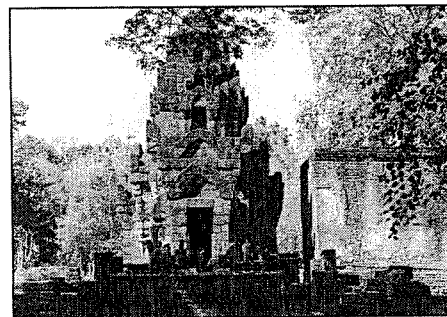


写真42 中央祠堂 (Wat
Chao Chan, Si Satchanalai)

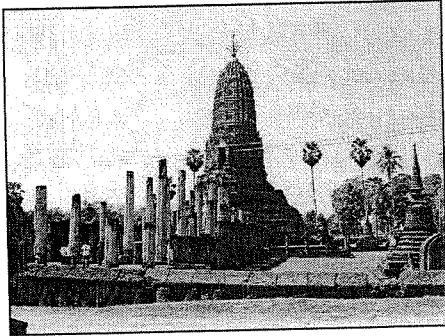


写真43 中央祠堂と礼拝堂
(Wat Phra Si Mahathat, Si
Satchanalai)

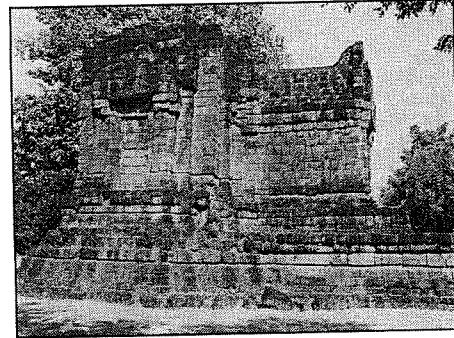


写真44 祠堂 (San Ta Pha
Daeng, Sukhothai)

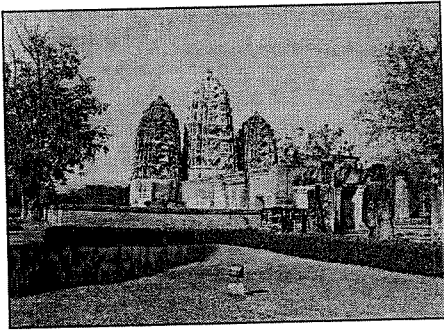


写真45 祠堂と礼拝堂 (Wat
Si Sawai, Sukhothai)

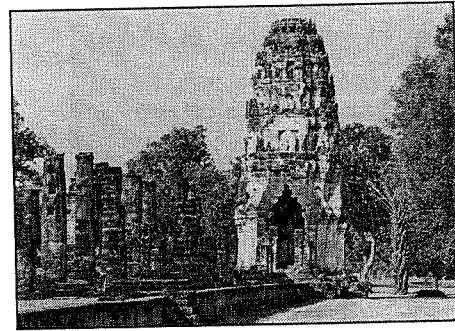


写真46 祠堂群と礼拝堂
(Wat Phra Pai Luang,
Sukhothai)

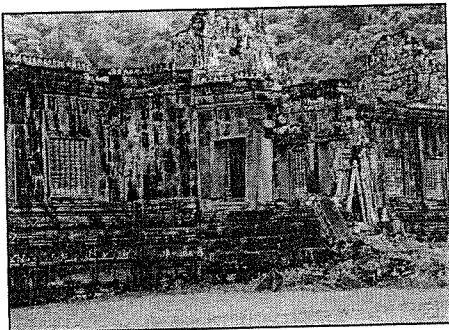


写真47 南宮殿北側建物
(Wat Phu)

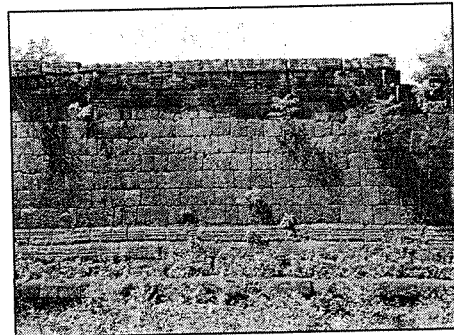


写真48 南宮殿南側建物
(Wat Phu)

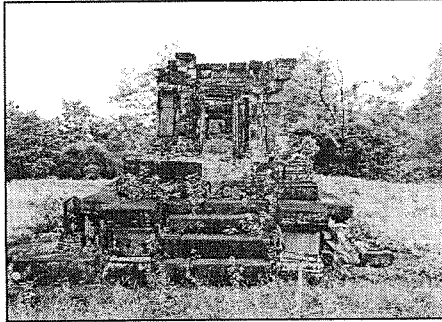


写真49 ナンディン (Wat Phu)

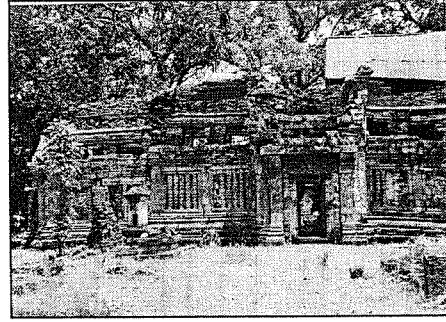


写真50 主祠堂 (Wat Phu)

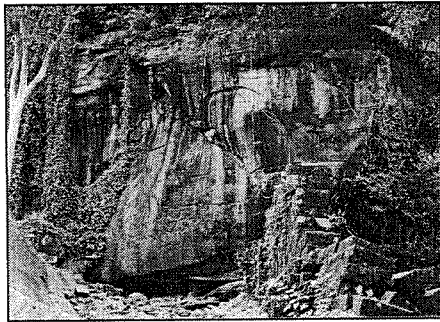


写真51 Wat Phu西側奥の崖

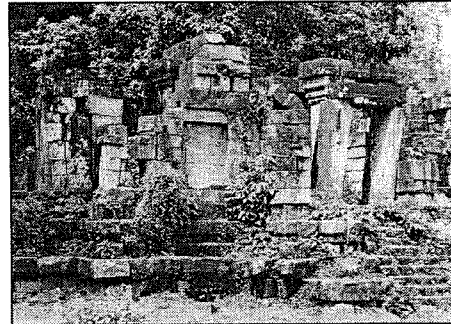


写真52 祠堂 (Hong Nang Sida)

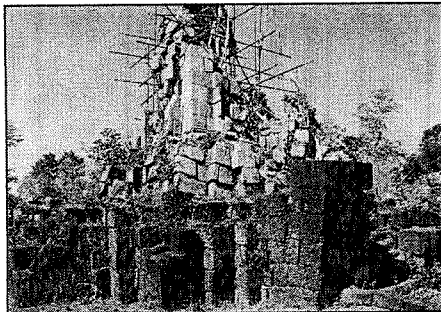


写真53 Sdok Kok Thomの中央祠堂



写真54 Sdok Kok Thomの外周壁東ゴープラ

表1-1 タイおよびラオスのクメール遺跡における石材の平均サイズおよび縦層理を持つ石材の割合

Monument	Sandstone building	size (cm)	bedding plane(vertical) %	Laterite building	size (cm)	bedding plane(vertical) %
Kamphaeng Noi	Central Tower	41.3 × 51.0				30
	East wall of outer Gallery					50
Kamphaeng Yai	North wall of outer Gallery	45.2 × 52.7				50
	base	32.7 × 48.3				20
Sikhoraphum	base	15 × 25 ~ 35 × 70				10
	East Library					30
Phum Phon	base	41.5 × 46.6	20			38
	Eastern Gopura+South Library	30 ~ 40	10			16
Ta Muen Thom	Outer Wall	30 ~ 40				31
	Central Tower	40				35
Ta Muen Toch	base	50				15 ~ 20
	Central Tower					43
Ban Phluang	Central Tower	45	50			
	Outer esat Gopura					29
Ban Bu	Inner east Gopura	46.7 × 53.3				43
	East Gopura (rectangle)	48.4 × 89.9	0			42
Muang Tam	East Gopura (square)	45.1 × 53.0	35			81
	Wall of south Gallery	41.1 × 45.7	42			
Phnom Rung	Central Tower	39.8 × 43.1	41			
	Inner south Gopura	44.5 × 50.3	0			4
Phimai	Central Tower	49.1 × 54.2	1			10
	Outer south wall	20.0 × 46.5	0			32
Phnom Wan	Tower (red sandstone)		98			63
	Tower (yellow sandstone)	37.9 × 46.3	63			
Non Ku	Central Tower	45.5 × 66.6	0			
	West part of Sanctuary (red sandstone)		0			
Muang Khaek	West part of Sanctuary (yellow sandstone)	48.1 × 51.2	0			
	North part of Sanctuary	48.9 × 63.3	0			
Wat Mahathat	base of Library?	46.5 × 67.9	0			0
	Sanctuary	19.5 × 38.6	0			0
Prang sam Yod						
Khao Phra Wihan	A	76 × 159				
	South west wall of A	68 × 161				
D		43 × 90				
	G	41 × 56				

表1-2 タイおよびラオスのクメール遺跡における石材の平均サイズおよび縦層理を持つ石材の割合

Monument	Sandstone building		Laterite building		
	size (cm)	vertical percent (%)	size (cm)	vertical percent (%)	
Wat Phu	Wall behind H ₂	44 × 128			
	K ₂	48 × 98			
	L	42 × 53			
	P	67 × 120	0		
	O ₁	43.7 × 62.9			
	N ₁	46.1 × 64.0			
	O ₂	43 × 72	0		
	N ₂	35.1 × 43.1	54		
	T	59 × 121	20		
	V		6		
	W	56 × 89			
	South Library	43.2 × 51.1	49	Baray	
	Nandin Hall	30.1 × 35.1		North Library	
	base of second stage	35.4 × 42.4		South Library	
Sanctuary	26.1 × 44.9		base in sixth stage		
Sida Monument	33.9 × 44.2				
Sdok Khok Thom	Sanctuary				
	Inner Gallery	36.0 × 41.1	49	Inner Gallery	
				38.3 × 43.3	46

表2-1 コアート層群を構成する砂岩の帯磁率、粒径および構成鉱物

Sample	susceptibility($\times 10^{-3}$ Si unit)	grain (mm)	Q	Pl	Bi	Mu	Kf	Ca	Rf	Op
<u>Huai Hin Lat Formation</u>										
TH-137	0.390	medium	△	△					◎	△
TH-138	0.390	medium	△	△					◎	△
TH-139	0.390	coarse	△	△			△		◎	△
<u>Phu Kraclung Formation</u>										
TH-109	0.204	fine	○	△	△	△			○	△
TH-110	0.144	very fine	○	△	△	△	△	△	△	△
TH-111	0.133	silt	○	△	○	△	△	△	△	○
TH-134	0.162	very fine	○	△	△	△	△	△	○	○
TH-135	1.096	very fine	○	△	△	△	△	△	○	△
TH-301	0.305	medium	○	○	△	△	△	△	○	△
TH-302	0.305	fine	○	○	△	△	△	△	○	△
TH-303	0.305	medium	○	○	△	△	△	△	○	△
TH-309	0.230	coarse	○	○	△	△	△	△	○	△
TH-310	0.230	medium	○	○	△	△	△	△	○	△
<u>Phra Wihan Formation</u>										
TH-101A	0.012	medium	◎						△	△
TH-101B	0.012	fine	◎						△	△
TH-101C	0.012	fine	◎						○	△
TH-102	0.012	fine	◎						△	△
TH-103	0.012	fine	◎	△					○	△
TH-104	0.019	medium	◎						△	△
TH-105	0.019	fine	◎						○	△
TH-106	0.019	fine	◎						○	△
TH-107	0.024	medium	◎						○	△
TH-112	0.031	fine	○						○	△
TH-113	0.010	medium	◎						△	△
TH-114	0.032	medium	◎						△	△
TH-118	0.000	coarse	◎						△	△
TH-214	0.068	fine	◎						○	△
TH-215	0.016	medium	◎						○	△
TH-216	0.042	fine	◎						○	△
TH-218	0.027	fine	◎						○	△
TH-503	0.013	coarse	◎						○	△
TH-504	0.013	coarse	◎						○	△
TH-505	0.013	coarse	◎						○	△

表2-2 コラート層群を構成する砂岩の帯磁率、粒径および構成鉱物

Sample	susceptibility($\times 10^{-3}$ Si unit)	grain	Q	Pl	Bi	Mu	Kf	Ca	Rf	Op
<u>Sao Khua Formation</u>										
TH-119	0.086	very fine	○		—				○	△
TH-120	0.035	fine	◎		—			◎	△	—
TH-121	0.050	fine	◎	—				—	△	△
TH-122	0.016	medium	◎	—	—			—	△	△
TH-123	0.021	fine	◎	—				△	△	—
TH-124	0.033	fine	○	△				△	△	—
TH-219	0.045	fine	◎		—			○	○	—
TH-506	0.041	fine	◎					○	○	△
<u>Phu Phan Formation</u>										
TH-108	0.008	medium	◎				△		△	—
TH-115	0.001	medium	◎						—	—
TH-125	0.015	medium	◎	△	—		△		△	—
TH-132	0.005	coarse	◎						△	—
TH-133	0.006	medium	◎						△	—
TH-212	0.007	medium	◎						○	—
TH-213	0.015	coarse	◎				—		△	—
TH-217	0.001	medium	◎						—	—
TH-507	0.009	medium	◎						△	△
TH-508	0.009	medium	◎						△	△
<u>Khok Kruat Formation</u>										
TH-116		very fine	○	△				—	○	△
TH-117		very fine	△	△					○	△
TH-126		fine	○	△		—		○	△	△
TH-127	0.051	fine	○	△		—		△	○	△
TH-128	0.060	fine	○	△		—		—	○	△
TH-129	0.081	fine	△	○		—		—	○	△
TH-130	0.130	fine	○	△		—		—	○	△
TH-131	0.095	fine	○	△		—		—	○	△
TH-131	0.086	fine	○	△		—		—	○	△

表3-1 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の帯磁率、粒径および構成鉱物

Sample	Monument	susceptibility($\times 10^{-3}$ SI Unit)	grain (mm)	Q	Pl	Bi	Mu	Kf	Ca	Rf	Op
Group1											
TH-1	Kamphaeng Noi	0.162	fine	○	○		△	△		◎	△
TH-2	Kamphaeng Yai	0.220	fine	○	○		—	△		◎	△
TH-3	Prasat Yai Ngao	0.212	fine	○	○		—	△	○	◎	△
TH-4	Phum Phon	0.115	fine	◎	△		—	—		○	△
TH-15	Phimai (灰)	0.133	very fine	◎	△	△	△			◎	△
TH-16	Phimai	0.038	fine	◎	△					○	△
TH-17	Phnom Wan (灰)	0.081	fine	◎	△					◎	—
TH-18	Phnom Wan	0.202	medium	◎	○		—	△		◎	△
TH-19	Non Ku	0.121	fine	○	○	—	—	△		◎	—
TH-20	Non Ku		medium	◎	○		△	—		○	△
TH-21	Muang Khaek	0.097	fine	○	○		△	—		○	—
TH-22	Muang Khaek	0.112	medium	◎	△			△	△	○	△
TH-23	Muang Khaek	0.334	fine	◎	△			△	△	○	△
TH-401	Phimai (灰)		very fine	◎	△		—	—		△	△
TH-402	Phimai		fine	◎		△	△	—		○	△
TH-403	Phimai		fine	◎		○	△	—		○	△
TH-404	Phimai		fine	◎		○	△	—		○	△
TH-405	Phimai		medium	◎		△	—	—		○	—
TH-406	Phnom Wan		medium	◎	△		△	△		○	—
TH-509	Ban Phluang	0.068	medium	○	△	—	△	△		◎	—
Group2											
TH-5	Phum Phon	0.013	fine	◎						△	△
TH-6	Ta Muen Thom	0.040	medium	◎						○	△
TH-7	Ta Muen Thom	0.040	medium	◎						○	△
TH-8	Bai Baek	0.002	fine	◎						○	—
TH-11	Ban Kruat	0.012	medium	◎						△	—
TH-12	Ban Kruat		medium	◎						△	—
TH-13	Phnom Rung	0.013	coarse	◎						△	—
TH-14	Phnom Rung (赤褐色)		medium	◎						△	—
TH-24	Si Khiu	0.008	medium	◎	—	—	—	—		○	—
TH-140	Wat Mahathat	0.031	medium	◎	△	—	—	—		△	△
TH-141	Prang Sam Yod	0.054	medium	◎	△	△				△	△

表3-2 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の帯磁率、粒径および構成鉱物

Sample	Monument	susceptibility($\times 10^{-3}$ SI Unit)	grain	(mm)	Q	Pl	Bi	Mu	Kf	Ca	Rf	Op
TH-201	Kao Phra Wihan	0.059	coarse	0.514	◎	—	—	—	—	—	○	—
TH-202	Kao Phra Wihan	0.037	coarse	0.878	◎	—	—	—	—	—	△	—
TH-203	Kao Phra Wihan	0.059	medium	0.477	◎	—	—	—	—	—	○	—
TH-204	Kao Phra Wihan	0.055	fine	0.202	◎	—	—	—	—	—	○	—
TH-205	Kao Phra Wihan	0.029	medium	0.425	◎	—	—	—	—	—	△	—
TH-206	Kao Phra Wihan	0.019	medium	0.429	◎	—	—	—	—	—	△	—
TH-207	Kao Phra Wihan	0.030	medium	0.306	◎	—	—	—	—	—	○	—
TH-501	Sdok Khok Thor	0.006	medium	0.355	◎	—	—	—	—	—	○	—
TH-502	Sdok Khok Thor	0.011	medium	0.360	◎	—	—	—	—	—	◎	—
TH-510	Muang Tam	0.030	coarse	0.526	◎	—	—	—	—	—	△	△
TH-511	Muang Tam	0.030	medium	0.413	◎	—	—	—	—	—	○	△
Group3												
TH-304	Wat Phu	0.277	medium	0.419	○	○	—	—	—	—	○	△
TH-305	Wat Phu	0.277	medium	0.418	○	○	—	△	△	△	○	△
TH-306	Wat Phu	0.272	medium	0.286	○	○	—	△	△	△	○	△
TH-307	Wat Phu	0.260	medium	0.291	○	○	—	△	△	△	○	△
TH-308	Wat Phu	0.299	medium	0.274	○	○	—	△	△	△	○	△
TH-311	Sida Monument	0.346	medium	0.278	○	○	△	△	△	△	○	△
TH-312	Sida Monument	0.346	fine	0.216	○	○	△	△	△	△	○	△
TH-313	Wat Phu	0.291	medium	0.436	△	○	—	△	△	△	○	△
TH-314	Wat Phu	0.291	medium	0.381	○	○	—	△	△	△	○	△

表4-1 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

Huai Hin Lat Formation	No.		TH-137	TH-138	TH-139	Phu Kradung Formation	TH-109	TH-110
	Sampling point		Huai Hin Lat	Huai Hin Lat	Huai Hin Lat		Phu Kradung	Phu Kradung
	SiO ₂	%	80.61	78.56	46.98		71.89	70.87
	TiO ₂	%	0.158	0.287	0.100		0.353	0.490
	Al ₂ O ₃	%	9.75	10.85	6.09		12.15	11.19
	Fe ₂ O ₃	%	1.16	1.69	0.33		3.16	2.72
	MnO	%	0.026	0.018	0.125		0.042	0.067
	MgO	%	0.50	0.75	0.24		1.97	1.75
	CaO	%	1.26	0.74	24.01		1.17	3.19
	Na ₂ O	%	2.66	3.12	1.71		2.97	2.73
	K ₂ O	%	1.22	1.62	1.56		1.43	1.14
	P ₂ O ₅	%	0.02	0.02	0.05		0.09	0.13
	LOI	%	2.59	2.42	18.95		3.71	4.68
	TOTAL	%	99.95	100.07	100.13		98.95	98.96
	S	%	>0.001	0.002	0.013		0.017	0.032
	Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3		>0.3	>0.3
	As	ppm	4	5	>2		>2	>2
	Au	ppm	>5	>5	>5		>5	5
	Ba	ppm	200	276	371		958	158
	Be	ppm	1	1	1		2	1
	Bi	ppm	>2	>2	>2		>2	>2
	Br	ppm	>1	>1	>1		>1	>1
	Cd	ppm	>0.3	0.4	0.6		0.7	0.5
	Ce	ppm	30	34	29		60	60
	Cr	ppm	8	11	6		43	54
	Cs	ppm	1.1	2.7	1.4		2	1.8
	Cu	ppm	21	20	12		21	14
	Eu	ppm	0.5	0.8	0.7		0.9	1.1
	Hf	ppm	>0.5	>0.5	>0.5		>0.5	2.8
	Ir	ppm	>5	>5	>5		>5	>5
	La	ppm	20.3	22.6	22.7		33.0	33.6
	Lu	ppm	0.29	0.41	0.26		0.22	0.26
	Mo	ppm	>5	>5	>5		>5	>5
	Nd	ppm	16	17	17		25	26
	Ni	ppm	6	11	7		27	27
	Pb	ppm	9	12	>3		14	3
	Rb	ppm	40	58	47		50	40
	Sb	ppm	0.7	1.0	0.2		0.3	>0.2
	Sc	ppm	2.7	4.2	1.8		6.5	8.6
	Se	ppm	>3	>3	>3		>3	>3
	Sm	ppm	2.9	3.1	3.3		4.1	4.5
	Sr	ppm	362	367	290		167	159
	Ta	ppm	>1	>1	>1		>1	>1
	Tb	ppm	>0.5	1.1	0.6		0.7	>0.5
	Th	ppm	9.1	11.1	7.0		5.3	8.0
	U	ppm	1.9	1.8	2.1		1.3	1.9
	V	ppm	16	24	35		43	47
	Y	ppm	13	20	17		14	18
	Yb	ppm	2	3	2		1	2
	Zn	ppm	20	29	>1		58	57
	Zr	ppm	73	160	56		94	141

表4-2 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

No.		TH-111	TH-134	TH-135	TH 301	TH 302	TH 303	TH-309	TH-310
Sampling point		Phu Kradung	Phu Kradung	Phu Kradung	Phu Kradung (Wat Phu)	Phu Kradung (Wat Phu)	Phu Kradung (Wat Phu)	Phu Kradung	Phu Kradung
SiO ₂	%	64.09	67.86	67.64	75.06	73.31	78.09	80.28	79.32
TiO ₂	%	0.481	0.520	0.572	0.280	0.487	0.395	0.245	0.284
Al ₂ O ₃	%	11.43	12.67	12.63	12.38	13.34	11.51	10.58	11.19
Fe ₂ O ₃	%	3.35	3.46	4.22	2.40	3.17	2.59	1.90	2.10
MnO	%	0.097	0.099	0.051	0.023	0.131	0.093	0.010	0.028
MgO	%	1.91	2.42	2.56	0.94	1.11	0.70	0.66	0.61
CaO	%	6.05	3.07	3.01	0.53	0.26	0.20	0.15	0.11
Na ₂ O	%	2.16	2.08	2.59	4.23	3.95	4.11	3.00	3.83
K ₂ O	%	1.17	1.10	0.71	0.94	1.40	0.91	0.60	0.75
P ₂ O ₅	%	0.13	0.13	0.16	0.08	0.12	0.09	0.03	0.03
LOI	%	7.84	6.10	5.99	1.97	2.38	1.55	2.29	1.82
TOTAL	%	98.71	99.51	100.12	98.84	99.66	100.23	99.76	100.06
S	%	0.044	0.017	0.020	0.015	0.004	0.001	0.002	0.004
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	0.4	0.7	>0.3	>0.3
As	ppm	2	4	>2	>2	3	5	3	3
Au	ppm	5	>5	>5	>5	>5	17	7	>5
Ba	ppm	1680	773	1017	781	257	169	89	125
Be	ppm	2	2	2	2	2	2	2	2
Bi	ppm	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
Cd	ppm	0.6	0.5	0.7	1.2	0.8	>0.3	>0.3	0.7
Ce	ppm	59	69	65	50	60	64	46	32
Cr	ppm	50	40	46	21.1	26.4	34.3	19.4	25.5
Cs	ppm	2	2.7	1.5	2.5	2.7	>0.5	>0.5	1.4
Cu	ppm	31	24	15	6	10	36	13	9
Eu	ppm	1.1	1.1	1	1.0	1.2	1.1	0.8	0.6
Hf	ppm	>0.5	4.9	5.2	>0.5	>0.5	>0.55	>0.5	>0.5
Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
La	ppm	33.5	36.1	36.5	31.8	38.3	34.6	26.9	21.0
Lu	ppm	0.26	0.33	0.34	0.28	0.31	0.23	0.19	0.19
Mo	ppm	>5	>5	>5	7	8	17	18	11
Nd	ppm	30	30	29	22	29	27	22	13
Ni	ppm	29	24	26	15	28	14	12	14
Pb	ppm	11	11	8	>3	8	6	4	7
Rb	ppm	46	41	39	54	32	47	29	>20
Sb	ppm	0.3	0.6	0.3	>0.2	0.7	0.3	>0.2	0.5
Sc	ppm	9.0	8.5	9.3	4.9	6.5	6.2	3.9	4.5
Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	4.9	5.7	5.3	3.3	4.9	4.2	2.8	2.0
Sr	ppm	203	114	129	106	112	89	70	74
Ta	ppm	>1	>1	>1	2	2	>1	2	2
Tb	ppm	>0.5	0.6	>0.5	>0.5	1.2	0.9	1.3	1.1
Th	ppm	8.2	9.0	8.4	6.2	6.6	7.4	5.8	3.8
U	ppm	2.2	1.1	1.5	2.8	1.4	1.2	1.3	1.9
V	ppm	75	54	60	36	44	34	24	26
Y	ppm	18	20	17	13	19	11	10	8
Yb	ppm	2	2	2	2	2	2	1	1
Zn	ppm	55	65	60	46	67	39	39	35
Zr	ppm	146	204	236	104	251	176	106	97

表4-3 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

Phra Wihan Formation	No.		TH-101A	TH-101B	TH-101C	TH-102	TH-103	TH-104	TH-105
	Sampling point		Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan
	SiO ₂	%	96.26	88.52	85.46	94.09	85.69	96.10	94.93
	TiO ₂	%	0.110	0.464	0.193	0.226	0.400	0.123	0.295
	Al ₂ O ₃	%	1.20	6.29	8.46	3.35	6.78	2.67	3.19
	Fe ₂ O ₃	%	0.14	1.33	1.98	0.24	1.59	0.14	0.18
	MnO	%	>0.001	0.009	0.002	>0.001	0.148	0.002	0.002
	MgO	%	0.02	0.10	0.11	0.05	0.32	0.03	0.04
	CaO	%	0.02	0.03	0.04	0.02	0.11	>0.01	0.01
	Na ₂ O	%	0.01	0.02	>0.01	0.01	0.54	0.02	>0.01
	K ₂ O	%	0.05	0.38	0.50	0.20	0.69	0.16	0.16
	P ₂ O ₅	%	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.01	0.02
	LOI	%	0.68	2.45	3.28	1.32	3.08	1.13	1.27
	TOTAL	%	98.51	99.62	100.05	99.52	99.40	100.40	100.07
	S	%	0.007	0.005	0.004	0.004	0.228	0.005	0.003
	Ag	ppm	>0.3	0.4	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
	As	ppm	>2	3	>2	5	9	>2	2
	Au	ppm	7	>5	>5	12	>5	>5	>5
	Ba	ppm	21	96	59	45	10510	37	41
	Be	ppm	>1	1	1	>1	1	>1	>1
	Bi	ppm	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2
	Br	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
	Cd	ppm	>0.3	0.4	>0.3	>0.3	0.5	>0.3	>0.3
	Ce	ppm	22	82	30	39	60	29	33
	Cr	ppm	19	38	23	22	34	8	21
	Cs	ppm	>0.5	1.3	1.9	1.4	3.5	>0.5	>0.5
	Cu	ppm	35	22	18	19	20	20	20
	Eu	ppm	0.3	1.2	0.3	0.4	0.8	0.4	0.5
	Hf	ppm	>0.5	16.3	>0.5	>0.5	9.3	>0.5	>0.5
	Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	La	ppm	12.6	47.2	24.2	21.0	35.6	17.3	21.0
	Lu	ppm	0.14	0.42	0.19	0.28	0.37	0.15	0.18
	Mo	ppm	10	15	8	13	6	15	14
	Nd	ppm	11	36	17	28	24	14	17
	Ni	ppm	3	17	3	5	8	2	1
	Pb	ppm	16	17	11	18	8	5	6
	Rb	ppm	>20	>20	27	>20	42	>20	>20
	Sb	ppm	0.3	0.6	0.8	0.4	0.7	0.4	0.4
	Sc	ppm	0.9	5.0	2.7	1.8	3.6	1.3	1.7
	Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
	Sm	ppm	1.3	5.7	1.8	2.7	4.3	1.8	2.1
	Sr	ppm	25	33	14	33	143	14	16
	Ta	ppm	>1	1	>1	1	>1	>1	>1
	Tb	ppm	0.5	1.3	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5
	Th	ppm	2.6	12.9	6.9	5.6	10.4	3.7	5.1
	U	ppm	1.4	3.2	1.6	1.8	2.3	>0.5	0.9
	V	ppm	>5	32	32	20	29	8	12
	Y	ppm	4	20	6	14	20	6	7
	Yb	ppm	1	3	1	2	2	1	1
	Zn	ppm	17	42	22	12	29	11	11
	Zr	ppm	178	617	90	144	356	46	83

表4-4 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

No.		TH-106	TH-107	TH-112	TH-113	TH-114	TH-118	TH-214	TH-215
Sampling point		Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan	Phra Wihan
SiO ₂	%	93.51	90.30	87.31	92.78	96.58	97.94	87.89	89.31
TiO ₂	%	0.247	0.109	0.189	0.102	0.037	0.025	0.179	0.179
Al ₂ O ₃	%	3.88	4.33	6.64	4.10	0.65	1.33	6.26	6.22
Fe ₂ O ₃	%	0.62	0.97	1.62	0.46	1.69	0.11	1.37	0.94
MnO	%	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	>0.001	0.010	0.002
MgO	%	0.06	0.28	0.32	0.27	0.01	>0.01	0.77	0.14
CaO	%	0.01	0.06	0.01	0.03	>0.01	0.04	0.06	0.02
Na ₂ O	%	>0.01	0.37	0.05	0.02	>0.01	>0.01	>0.01	>0.01
K ₂ O	%	0.16	0.31	0.99	0.40	0.03	0.02	0.93	0.74
P ₂ O ₅	%	0.02	0.03	0.04	0.02	0.06	0.01	0.05	0.03
LOI	%	1.57	2.06	2.76	1.97	1.10	0.61	2.34	2.29
TOTAL	%	100.07	98.80	99.93	100.15	100.18	100.08	99.86	99.87
S	%	0.003	0.004	0.005	0.007	0.004	0.003	0.003	0.004
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
As	ppm	2	>2	4	>2	4	4	2	3
Au	ppm	>5	>5	5	>5	6	>5	>5	6
Ba	ppm	54	44	78	67	18	19	139	115
Be	ppm	>1	>1	2	1	>1	>1	1	1
Bi	ppm	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
Cd	ppm	>0.3	>0.3	0.4	>0.3	>0.3	>0.3	0.3	>0.3
Ce	ppm	30	43	48	33	16	13	44	38
Cr	ppm	19	>1	14	4	4	>1	14	15
Cs	ppm	0.9	1.5	2.6	1.3	>0.5	>0.5	2.55	1.55
Cu	ppm	20	24	33	18	21	18	5	9
Eu	ppm	0.6	0.8	0.8	0.5	0.2	0.3	0.7	0.5
Hf	ppm	6.7	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	4.5	>0.5
Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
La	ppm	16.3	25.8	23.1	15.7	8.7	8.1	24.5	23.8
Lu	ppm	0.21	0.13	0.24	0.20	0.09	0.12	0.19	0.20
Mo	ppm	10	11	>5	16	9	18	6	>5
Nd	ppm	14	23	24	17	9	9	18	15
Ni	ppm	1	6	10	6	6	2	15	8
Pb	ppm	9	5	>3	>3	7	10	>3	>3
Rb	ppm	>20	>20	34	31	>20	>20	42	49
Sb	ppm	0.4	0.4	0.7	0.4	0.3	0.4	0.6	0.6
Sc	ppm	2.4	1.7	3.2	1.5	0.5	0.6	2.9	3.1
Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	2.4	3.5	4.5	3.0	1.1	1.1	3.3	2.6
Sr	ppm	17	15	14	9	8	2	12	10
Ta	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	1
Tb	ppm	0.7	0.9	>0.5	1.3	>0.5	>0.5	0.6	0.6
Th	ppm	5.0	3.9	6.2	5.2	2.0	2.0	6.9	8.0
U	ppm	1.2	1.5	3.2	1.9	>0.5	1.1	2.5	1.7
V	ppm	26	14	32	10	9	>5	14	16
Y	ppm	10	8	13	12	3	6	9	11
Yb	ppm	1	1	2	1	1	1	2	1
Zn	ppm	15	32	19	20	19	5	50	11
Zr	ppm	238	53	86	78	31	37	126	101

表4-5 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

No.		TH-216	TH-218	Sao	TH-119	TH-120	TH-121	TH-122	TH-123
Sampling point		Phra Wihan	Phra Wihan	Khua Formation	Sao Khua	Sao Khua	Sao Khua	Sao Khua	Sao Khua
SiO ₂	%	87.05	89.72		88.34	92.95	91.02	82.02	82.41
TiO ₂	%	0.118	0.237		0.397	0.161	0.415	0.150	0.264
Al ₂ O ₃	%	5.42	4.83		4.64	3.93	3.62	5.94	3.25
Fe ₂ O ₃	%	3.73	1.29		2.54	0.70	1.17	1.06	0.53
MnO	%	>0.001	0.006		0.025	0.018	0.108	0.055	0.071
MgO	%	0.11	0.24		0.65	0.16	0.16	0.26	0.19
CaO	%	0.02	0.03		0.19	0.07	0.18	4.33	6.56
Na ₂ O	%	0.02	>0.01		0.10	>0.01	0.40	0.39	0.23
K ₂ O	%	0.84	0.78		0.49	0.29	0.28	0.39	0.28
P ₂ O ₅	%	0.02	0.05		0.07	0.05	0.07	0.07	0.06
LOI	%	2.03	1.90		2.49	1.76	2.80	5.33	6.21
TOTAL	%	99.37	99.07		99.93	100.01	100.21	99.99	100.07
S	%	0.007	0.003		0.002	0.003	0.002	0.002	0.027
Ag	ppm	>0.3	>0.3		>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
As	ppm	8	3		7	6	16	13	11
Au	ppm	>5	8		>5	>5	>5	>5	>5
Ba	ppm	72	96		254	137	186	180	1046
Be	ppm	1	1		1	>1	1	>1	>1
Bi	ppm	>2	>2		>2	>2	2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1		>1	>1	>1	>1	>1
Cd	ppm	>0.3	>0.3		>0.3	0.3	>0.3	>0.3	>0.3
Ce	ppm	23	48		37	36	40	30	36
Cr	ppm	9	22		29	12	25	12	13
Cs	ppm	2.05	1.3		1.9	0.9	0.7	1.3	0.7
Cu	ppm	6	5		22	39	32	19	16
Eu	ppm	0.3	0.7		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Hf	ppm	>0.5	6.3		3	>0.5	4.8	>0.5	3.7
Ir	ppm	>5	>5		>5	>5	>5	>5	>5
La	ppm	15.8	29.6		18.7	20.3	20.9	18.3	19.9
Lu	ppm	0.14	0.22		0.25	0.11	0.25	0.21	0.23
Mo	ppm	7	>5		7	7	7	>5	5
Nd	ppm	11	20		17	19	15	16	18
Ni	ppm	6	7		20	6	14	9	7
Pb	ppm	8	8		4	69	7	7	3
Rb	ppm	52	47		32	>20	>20	>20	>20
Sb	ppm	0.8	0.6		0.6	0.3	0.4	0.5	0.4
Sc	ppm	2.4	3.2		4.0	2.1	2.7	2.4	2.3
Se	ppm	>3	>3		>3	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	1.4	3.6		3.3	2.8	3.8	3.0	3.0
Sr	ppm	7	13		18	14	17	26	55
Ta	ppm	>1	>1		>1	>1	>1	>1	>1
Tb	ppm	>0.5	0.6		0.7	0.7	0.8	1.0	>0.5
Th	ppm	6.2	7.3		5.6	3.4	5.0	4.9	5.3
U	ppm	2.1	1.0		1.7	1.4	1.1	1.3	1.8
V	ppm	19	19		33	21	20	24	30
Y	ppm	7	10		13	5	15	13	12
Yb	ppm	1	1.4		2	1	2	1	2
Zn	ppm	5	8		56	11	25	19	13
Zr	ppm	60	148		194	67	151	68	122

表4-6 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

No.		TH-124	TH-219	Phu	TH-108	TH-115	TH-125	TH-132	TH-133
	Sampling point	Sao Khua	Sao Khua	Phan Formation	Phu Phan	Phu Phan	Phu Phan	Phu Phan	Phu Phan
	SiO ₂	75.27	93.13		92.49	96.03	92.98	97.29	94.11
	TiO ₂	0.160	0.142		0.064	0.028	0.102	0.038	0.080
	Al ₂ O ₃	4.89	3.50		3.57	2.40	3.90	1.23	3.51
	Fe ₂ O ₃	0.78	1.03		0.43	0.21	0.35	0.31	0.23
	MnO	0.145	0.032		0.039	>0.001	0.005	0.002	0.002
	MgO	0.82	0.39		0.23	0.03	0.14	0.02	0.07
	CaO	8.72	0.02		0.05	0.01	0.04	0.02	0.03
	Na ₂ O	0.50	>0.01		0.06	>0.01	0.01	0.05	0.02
	K ₂ O	0.57	0.59		1.14	0.11	1.36	0.09	0.37
	P ₂ O ₅	0.04	0.03		0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	LOI	8.33	1.28		1.79	1.07	1.17	0.62	1.49
	TOTAL	100.22	100.14		99.89	99.91	100.08	99.68	99.94
	S	0.003	0.003		0.003	0.003	0.003	0.002	0.003
	Ag	>0.3	>0.3		>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
	As	14	4		>2	7	21	>2	4
	Au	>5	>5		6	>5	>5	>5	>5
	Ba	124	107		215	19	213	18	45
	Be	1	>1		1	>1	>1	>1	>1
	Bi	>2	>2		>2	>2	>2	>2	>2
	Br	>1	>1		>1	>1	>1	>1	>1
	Cd	>0.3	>0.3		>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
	Ce	35	40		27	22	29	16	22
	Cr	9	12.5		4	>1	6	5	3
	Cs	1.6	1.3		1.5	1	1.1	>0.5	1
	Cu	19	7		23	20	20	24	22
	Eu	0.7	0.4		0.9	0.2	0.7	0.5	0.5
	Hf	>0.5	>0.5		>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5
	Ir	>5	>5		>5	>5	>5	>5	>5
	La	19.8	22.0		16.7	13.5	15.2	8.5	13.1
	Lu	0.24	0.12		0.15	0.12	0.15	0.21	0.21
	Mo	7	8		12	15	21	30	24
	Nd	18	13		20	12	19	8	10
	Ni	4	14		6	2	3	2	3
	Pb	6	12		8	>3	7	>3	5
	Rb	23	30		46	>20	64	>20	>20
	Sb	0.5	0.5		0.3	>0.2	0.6	0.6	0.5
	Sc	2.3	2.3		1.0	0.5	1.2	0.7	0.9
	Se	>3	>3		>3	>3	>3	>3	>3
	Sm	3.1	1.8		3.3	2.1	2.6	1.0	1.6
	Sr	41	8		16	7	25	4	9
	Ta	>1	>1		>1	>1	>1	1	>1
	Tb	0.8	>0.5		>0.5	1.1	>0.5	>0.5	>0.5
	Th	4.1	4.9		3.2	2.6	4.2	2.4	3.9
	U	1.4	>0.5		>0.5	>0.5	1.5	>0.5	>0.5
	V	13	13		12	>5	9	>5	>5
	Y	17	6		10	5	7	4	5
	Yb	2	1		1	1	1	1	1
	Zn	9	16		15	12	9	3	6
	Zr	77	64		49	32	72	31	65

表4-7 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

No.		TH-212	TH-213	TH-217	Khok	TH-116	TH-117	TH-126	TH-127
Sampling point		Phu Phan	Phu Phan	Phu Phan	Kruat Formation	Khok Kruat	Khok Kruat	Khok Kruat	Khok Kruat
SiO ₂	%	91.69	94.53	99.26		76.54	30.29	68.00	67.18
TiO ₂	%	0.116	0.045	0.092		0.522	0.278	0.296	0.319
Al ₂ O ₃	%	4.75	2.69	0.28		9.21	4.69	5.01	5.74
Fe ₂ O ₃	%	0.59	0.46	0.02		2.82	1.96	1.00	1.73
MnO	%	0.002	0.003	>0.001		0.042	0.297	0.106	0.097
MgO	%	0.33	0.47	>0.01		1.21	0.82	0.49	0.74
CaO	%	0.01	0.06	>0.01		1.95	33.12	11.79	11.77
Na ₂ O	%	>0.01	>0.01	>0.01		2.18	0.78	0.74	0.69
K ₂ O	%	1.03	0.50	0.02		0.79	0.63	0.78	1.00
P ₂ O ₅	%	0.02	0.03	0.02		0.11	0.10	0.07	0.07
LOI	%	1.54	1.14	0.23		4.37	27.03	10.39	10.72
TOTAL	%	100.09	99.93	99.90		99.74	99.99	98.67	100.05
S	%	>0.001	0.002	>0.001		0.002	0.059	0.111	0.003
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3		0.4	0.4	>0.3	>0.3
As	ppm	>2	>2	>2		18	33	21	18
Au	ppm	7	6	7		>5	>5	5	>5
Ba	ppm	28	93	22		164	443	3834	219
Be	ppm	>1	>1	>1		1	>1	>1	1
Bi	ppm	>2	>2	>2		>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1		>1	1	>1	>1
Cd	ppm	>0.3	>0.3	>0.3		>0.3	1.1	0.5	>0.3
Ce	ppm	22	33	13.5		49	36	32	40
Cr	ppm	4.5	1.5	10		37	23	23	26
Cs	ppm	0.65	>0.5	>0.5		3	1.7	0.9	1.1
Cu	ppm	4	3	2		21	8	17	209
Eu	ppm	0.2	0.6	>0.1		1	0.8	0.8	1.6
Hf	ppm	4.7	>0.5	9.4		7.2	4.2	>0.5	1.7
Ir	ppm	>5	>5	>5		>5	>5	>5	>5
La	ppm	13.8	19.8	8.9		25.6	24.2	16.8	41.4
Lu	ppm	0.12	0.10	0.12		0.32	0.28	0.21	0.49
Mo	ppm	9	7	6		6	>5	6	>5
Nd	ppm	8	17	6		22	15	17	33
Ni	ppm	4	8	3		18	11	11	15
Pb	ppm	4	>3	>3		11	10	>3	>3
Rb	ppm	38	46	>20		47	>20	32	29
Sb	ppm	0.5	0.3	0.3		0.7	0.9	0.5	0.6
Sc	ppm	1.0	0.9	0.7		7.1	4.3	4.0	4.3
Se	ppm	>3	>3	>3		>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	1.6	2.6	1.0		4.2	3.3	3.3	6.3
Sr	ppm	4	10	2		76	211	103	78
Ta	ppm	>1	>1	>1		1	>1	>1	>1
Tb	ppm	>0.5	>0.5	>0.5		>0.5	>0.5	0.8	1.0
Th	ppm	6.2	3.0	2.7		6.7	4.8	3.3	3.9
U	ppm	>0.5	>0.55	1.4		1.7	1.8	1.1	1.3
V	ppm	5	>5	>5		58	36	29	31
Y	ppm	6	7	6		19	19	16	35
Yb	ppm	1	1	1		2	2	1	3
Zn	ppm	4	10	5		47	4	11	18
Zr	ppm	145	35	181		282	168	103	110

表4-8 コラート層群を構成する砂岩の全岩化学組成分析結果

No.		TH-128	TH-129	TH-130	TH-131
	Sampling point	Khok Kruat	Khok Kruat	Khok Kruat	Khok Kruat
SiO ₂	%	75.46	81.34	82.12	78.97
TiO ₂	%	0.255	0.485	0.366	0.242
Al ₂ O ₃	%	12.65	9.55	9.23	10.39
Fe ₂ O ₃	%	1.97	2.17	1.74	1.67
MnO	%	0.014	0.044	0.028	0.016
MgO	%	0.19	0.33	0.28	0.83
CaO	%	0.29	0.69	0.42	0.37
Na ₂ O	%	5.46	3.47	3.46	3.08
K ₂ O	%	1.11	0.65	0.63	1.03
P ₂ O ₅	%	0.02	0.10	0.05	0.07
LOI	%	1.26	1.50	1.29	2.26
TOTAL	%	98.66	100.34	99.61	98.92
S	%	0.002	0.002	0.003	0.012
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
As	ppm	20	19	7	>2
Au	ppm	5	>5	>5	9
Ba	ppm	195	172	143	191
Be	ppm	2	2	2	2
Bi	ppm	>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1	>1
Cd	ppm	0.4	>0.3	>0.3	0.6
Ce	ppm	44	85	83	55
Cr	ppm	13	20	24	9
Cs	ppm	3.8	3	3.4	2.6
Cu	ppm	17	23	17	17
Eu	ppm	0.6	1.9	1.8	1
Hf	ppm	>0.5	9.6	10	5
Ir	ppm	>5	>5	>5	>5
La	ppm	21.6	51.2	60.3	27.7
Lu	ppm	0.30	0.53	0.45	0.26
Mo	ppm	6	>5	13	>5
Nd	ppm	15	42	39	23
Ni	ppm	4	8	6	9
Pb	ppm	15	10	15	10
Rb	ppm	>20	>20	>20	>20
Sb	ppm	0.9	0.5	0.6	0.7
Sc	ppm	5.1	5.2	4.5	3.9
Se	ppm	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	3.0	8.0	8.7	4.8
Sr	ppm	167	109	99	88
Ta	ppm	>1	2	1	1
Tb	ppm	>0.5	1.1	2.3	>0.5
Th	ppm	9.3	10.4	11.2	8.2
U	ppm	>0.5	2.1	1.7	2.0
V	ppm	16	36	32	26
Y	ppm	17	45	33	19
Yb	ppm	2	4	3	2
Zn	ppm	20	27	23	33
Zr	ppm	100	367	351	112

表5-1 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の全岩化学組成分析結果

Group1	No.		TH-1	TH-2	TH-3	TH-15	TH-16	TH-17	TH-18
	Sampling point		Kamphaeng Noi	Kamphaeng Yai	Prasat Yai Ngao	Phimai	Phimai	Phnom Wan	Phnom Wan
	SiO ₂	%	77.84	77.63	74.63	78.63	85.74	79.20	80.75
	TiO ₂	%	0.377	0.316	0.532	0.502	0.312	0.638	0.132
	Al ₂ O ₃	%	10.82	10.61	11.30	8.86	6.38	7.98	7.82
	Fe ₂ O ₃	%	2.03	1.88	2.58	2.45	1.53	2.78	1.24
	MnO	%	0.028	0.020	0.030	0.040	0.009	0.016	0.016
	MgO	%	0.44	0.45	0.37	1.43	0.95	0.63	0.72
	CaO	%	1.28	1.09	1.69	0.39	0.20	0.36	0.35
	Na ₂ O	%	2.88	3.20	3.15	1.79	0.21	2.17	1.87
	K ₂ O	%	1.16	1.07	1.24	0.89	1.77	1.13	1.75
	P ₂ O ₅	%	0.08	0.07	0.09	0.11	0.10	0.72	0.08
	LOI	%	3.39	3.65	4.66	4.88	2.33	4.31	3.63
	TOTAL	%	100.33	99.98	100.28	99.97	99.51	99.93	98.35
	S	%	0.004	0.002	0.005	0.010	0.019	0.003	0.043
	Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	0.4	>0.3	1.5	>0.3
	As	ppm	3	>2	>2	10	8	9	2
	Au	ppm	6	>5	>5	>5	>5	18	>5
	Ba	ppm	206	168	200	412	764	233	1991
	Be	ppm	2	2	2	1	1	1	2
	Bi	ppm	2	>2	2	2	>2	>2	>2
	Br	ppm	>1	3	4	>1	>1	>1	>1
	Cd	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
	Ce	ppm	272	95	87	37	48	41	49
	Cr	ppm	12	13	13	43	19	37	7
	Cs	ppm	2	2.8	4.5	3.1	3.7	1.8	1.8
	Cu	ppm	5	5	5	9	7	18	3
	Eu	ppm	8.7	3	2.8	0.8	0.8	0.9	0.9
	Hf	ppm	4.2	4.8	8.9	8.5	9.8	9.1	2.8
	Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	La	ppm	297.0	161.0	130.0	27.8	31.2	23.5	31.7
	Lu	ppm	1.63	0.67	0.70	0.31	0.28	0.26	0.20
	Mo	ppm	>5	>5	5	>5	>5	>5	>5
	Nd	ppm	198	73	86	18	21	22	24
	Ni	ppm	3	2	7	10	9	>1	2
	Pb	ppm	8	7	10	11	4	13	6
	Rb	ppm	48	53	56	45	51	>20	90
	Sb	ppm	0.6	0.5	0.6	0.8	0.7	0.8	0.6
	Sc	ppm	5.0	4.7	6.6	6.5	3.3	6.9	2.3
	Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
	Sm	ppm	36.8	12.9	13.8	3.7	4.2	4.1	4.3
	Sr	ppm	154	156	168	51	30	83	101
	Ta	ppm	>1	>1	2	>1	>1	>1	1
	Tb	ppm	4.4	2.4	2.0	>0.5	2.0	>0.5	>0.5
	Th	ppm	10.6	13.1	17.1	9.2	12.7	9.4	8.0
	U	ppm	2.3	2.3	2.3	2.2	2.8	2.2	2.3
	V	ppm	37	34	54	53	22	119	16
	Y	ppm	162	70	60	20	20	12	13
	Yb	ppm	13	5	5	2	2	2	2
	Zn	ppm	30	30	28	32	22	30	37
	Zr	ppm	225	166	378	323	368	364	71

表5-2 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の全岩化学組成分析結果

No.		TH-19	TH-20	TH-21	TH-22	TH-401	TH-402	TH-403	TH-404
Sampling point		Non ku	Non ku	Muang Khaek	Muang Khaek	Phimai	Phimai	Phimai	Phimai
SiO ₂	%	73.97	84.79	72.56	78.80	79.76	85.16	83.64	87.25
TiO ₂	%	0.258	0.069	0.396	0.115	0.536	0.452	0.291	0.227
Al ₂ O ₃	%	13.16	7.39	12.82	7.55	9.10	6.75	7.85	6.20
Fe ₂ O ₃	%	1.93	1.08	2.75	1.24	2.77	1.83	1.71	1.27
MnO	%	0.020	0.011	0.044	0.071	0.030	0.027	0.013	0.016
MgO	%	1.16	0.67	0.84	0.85	1.48	1.15	1.16	0.82
CaO	%	0.49	0.26	0.68	1.13	0.40	0.26	0.22	0.26
Na ₂ O	%	3.19	1.63	3.64	1.72	1.66	0.02	>0.01	>0.01
K ₂ O	%	2.17	1.74	1.92	1.72	0.98	1.74	1.98	1.76
P ₂ O ₅	%	0.07	0.05	0.13	0.26	0.11	0.14	0.10	0.12
LOI	%	3.16	2.37	4.08	6.03	3.15	2.46	2.70	2.19
TOTAL	%	99.58	100.06	99.86	99.47	99.97	99.99	99.67	100.14
S	%	0.012	0.037	0.004	0.047	0.006	0.019	0.005	0.030
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
As	ppm	2	2	5	2	5	6	9	5
Au	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	35	>5
Ba	ppm	672	1589	317	1978	188	790	264	1334
Be	ppm	2	2	2	2	1	1	2	2
Bi	ppm	3	2	>2	>2	>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
Cd	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	0.5	0.4	0.5	0.3
Ce	ppm	61	35	70	42	35	46	47	56
Cr	ppm	15	>1	20	>1	43	21	21	11
Cs	ppm	3.5	2.6	6.3	2	4	4	5	3
Cu	ppm	2	2	5	3	11	11	35	8
Eu	ppm	1.1	0.9	1.2	0.7	0.8	0.8	0.8	1.5
Hf	ppm	4.4	>0.5	6.4	2.9	9.3	>0.5	>0.5	6.2
Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
La	ppm	44.4	34.4	45.4	26.5	22.3	29.6	32.2	33.9
Lu	ppm	0.31	0.19	0.42	0.22	0.30	0.29	0.30	0.26
Mo	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	9	8	6
Nd	ppm	24	18	30	20	17	20	18	31
Ni	ppm	1	3	8	2	24	19	23	22
Pb	ppm	7	8	12	6	>3	149	7	>3
Rb	ppm	67	75	81	61	>20	68	80	60
Sb	ppm	0.5	0.4	0.7	0.4	0.6	0.8	0.8	0.7
Sc	ppm	4.8	1.6	7.2	1.8	5.2	3.2	3.9	2.2
Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	5.3	3.7	5.9	3.7	2.6	3.0	3.0	5.7
Sr	ppm	143	90	124	122	48	31	27	35
Ta	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	1	>1
Tb	ppm	1.1	0.8	0.7	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	1.4
Th	ppm	12.5	5.8	15.2	8.2	8.8	10.3	10.1	8.5
U	ppm	2.7	1.5	2.0	2.1	2.6	3.9	2.4	1.7
V	ppm	27	12	40	16	48	25	28	16
Y	ppm	20	14	26	12	15	13	14	21
Yb	ppm	3	1	3	2	2.1	1.9	2.0	2.2
Zn	ppm	44	29	42	33	42	35	33	21
Zr	ppm	106	59	207	83	315	137	151	140

表5-3 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の全岩化学組成分析結果

No.		TH-405	TH-406	Group2	TH-5	TH-6	TH-7	TH-8	TH-11
Sampling point		Phimai	Phnom War		Phum Phon	Ta Muen Thom	Ta Muen Thom	Bai Baek	Ban kruat
SiO ₂	%	87.88	84.46		94.34	92.99	93.32	96.61	95.67
TiO ₂	%	0.263	0.135		0.453	0.120	0.176	0.023	0.047
Al ₂ O ₃	%	5.98	7.49		2.09	2.70	2.81	1.16	1.80
Fe ₂ O ₃	%	0.92	1.20		0.32	1.20	0.49	0.10	0.26
MnO	%	0.013	0.013		0.002	0.002	0.005	>0.001	0.011
MgO	%	0.69	0.67		0.06	0.11	0.11	0.02	0.02
CaO	%	0.04	0.29		0.04	0.06	0.08	0.03	0.02
Na ₂ O	%	0.01	1.68		0.17	>0.01	0.18	0.21	0.16
K ₂ O	%	1.52	1.70		0.17	0.28	0.18	0.06	0.06
P ₂ O ₅	%	0.05	0.06		0.03	0.04	0.03	0.03	0.02
LOI	%	1.90	1.85		1.25	1.65	2.40	1.91	1.99
TOTAL	%	99.27	99.55		98.94	99.01	99.77	100.15	100.05
S	%	0.004	0.025		0.002	0.004	0.003	0.003	0.003
Ag	ppm	>0.3	>0.3		>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
As	ppm	3	>2		>2	2	>2	>2	>2
Au	ppm	>5	>5		>5	>5	11	>5	>5
Ba	ppm	144	1359		30	54	44	17	21
Be	ppm	1	1		>1	>1	>1	>1	>1
Bi	ppm	>2	>2		>2	>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1		1	1	>1	>1	>1
Cd	ppm	0.4	0.5		>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
Ce	ppm	37	42		30	14	12	9	9
Cr	ppm	14	5		37	16	15	2	8
Cs	ppm	3	2		>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	1.3
Cu	ppm	4	2		3	3	4	3	3
Eu	ppm	0.7	0.9		0.4	>0.1	>0.1	0.2	>0.1
Hf	ppm	9.1	>0.5		8.9	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5
Ir	ppm	>5	>5		>5	>5	>5	>5	>5
La	ppm	25.4	27.9		16.7	11.3	9.7	7.2	7.2
Lu	ppm	0.29	0.20		0.18	0.09	0.08	0.07	>0.05
Mo	ppm	9	6		>5	>5	>5	>5	>5
Nd	ppm	14	16		14	>5	>5	>5	>5
Ni	ppm	12	6		2	3	>1	>1	2
Pb	ppm	>3	5		>3	>3	3	4	>3
Rb	ppm	51	80		>20	>20	>20	>20	>20
Sb	ppm	0.4	0.6		0.3	0.4	>0.2	0.3	>0.2
Sc	ppm	1.8	1.6		1.3	1.2	1.3	0.3	0.6
Se	ppm	>3	>3		>3	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	2.2	3.0		1.7	1.0	0.8	0.5	0.6
Sr	ppm	16	86		6	10	7	4	5
Ta	ppm	>1	2		1	>1	>1	>1	>1
Tb	ppm	1.3	>0.5		>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5
Th	ppm	11.3	6.8		6.0	2.8	2.6	1.9	2.2
U	ppm	2.0	1.9		1.4	>0.5	>0.5	>0.5	1.3
V	ppm	10	11		12	22	15	>5	>5
Y	ppm	12	10		5	5	4	4	2
Yb	ppm	1.7	1.4		1	1	1	1	1
Zn	ppm	20	38		4	3	2	>1	1
Zr	ppm	254	74		256	69	58	37	31

表5-4 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の全岩化学組成分析結果

No.	TH-12	TH-13	TH-14	TH-24	TH-140	TH-141	TH-201	TH-202
Sampling point	Ban kruat	Phnom Rung	Phnom Rung	Si Khiu	Wat Mahathat	Prang Sam Yod	Khao Phra Wihan	Khao Phra Wihan
SiO ₂	95.71	95.50	96.36	90.61	88.25	89.92	86.57	94.80
TiO ₂	0.047	0.054	0.080	0.047	0.130	0.134	0.255	0.085
Al ₂ O ₃	1.95	2.29	2.10	2.33	6.25	4.61	6.61	2.98
Fe ₂ O ₃	0.28	0.29	0.34	0.25	0.96	1.33	2.18	0.55
MnO	0.005	0.002	0.002	0.015	0.005	0.023	0.006	0.002
MgO	0.03	0.02	0.04	0.20	0.33	0.49	0.47	0.08
CaO	0.03	0.02	0.02	0.05	0.15	0.16	0.03	0.02
Na ₂ O	0.20	0.17	0.16	0.17	0.52	0.33	0.03	>0.01
K ₂ O	0.09	0.04	0.08	0.51	1.28	1.11	1.14	0.25
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03	0.10	0.04
LOI	0.99	1.85	1.17	4.97	2.18	1.80	2.71	1.19
TOTAL	99.36	100.28	100.36	99.20	100.09	99.93	100.09	100.01
S	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.006	0.003
Ag	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	1.6	>0.3
As	>2	2	>2	>2	>2	>2	5	3
Au	18	>5	>5	>5	10	>5	9	9
Ba	29	20	20	383	160	157	150	39
Be	>1	>1	>1	1	1	1	2	1
Bi	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2
Br	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
Cd	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	0.3	>0.3	>0.3
Ce	16	18	28	27	48	48	48	25
Cr	4	>1	4	3	12	8	24.5	5.5
Cs	1	>0.5	>0.5	1.8	1.4	1.3	4.1	1.15
Cu	2	1	4	4	19	19	21	20
Eu	0.2	0.4	0.8	0.7	0.8	1	0.7	0.4
Hf	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	6.7	>0.5
Ir	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
La	11.8	11.3	13.8	16.5	29.7	24.5	30.4	15.6
Lu	>0.05	0.06	0.14	0.11	0.21	0.20	0.26	0.12
Mo	>5	6	>5	>5	18	10	>5	>5
Nd	>5	9	18	18	25	23	20	8
Ni	>1	>1	2	5	6	11	20	4
Pb	>3	>3	>3	>3	11	3	24	4
Rb	>20	>20	>20	38	60	47	65	27
Sb	>0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.3
Sc	0.6	0.6	0.5	1.4	2.1	1.4	4.4	1.3
Se	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
Sm	1.0	1.8	3.9	3.1	4.3	4.4	3.3	1.7
Sr	10	5	5	13	37	25	16	7
Ta	>1	>1	>1	>1	>1	>1	2	>1
Tb	>0.5	>0.5	>0.5	1.1	>0.5	0.9	>0.5	0.6
Th	3.3	3.8	5.6	5.2	5.1	4.5	8.8	3.6
U	>0.5	>0.5	>0.5	0.8	1.3	1.3	2.0	0.8
V	9	>5	>5	8	17	10	22	>5
Y	4	5	12	7	12	12	15	9
Yb	1	1	1	1	1	1	2	1
Zn	1	1	3	4	35	59	42	7
Zr	39	57	107	45	89	92	182	48

表5-5 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の全岩化学組成分析結果

No.		TH-203	TH-204	TH-205	TH-206	TH-207	Group3	TH-304	TH-305
		Khao Phra	Khao Phra	Khao Phra	Khao Phra	Khao Phra		Wat Phu	Wat Phu
Sampling point		Wihan	Wihan	Wihan	Wihan	Wihan			
SiO ₂	%	83.90	86.34	92.26	92.10	87.30		76.41	79.79
TiO ₂	%	0.464	0.262	0.127	0.135	0.211		0.289	0.196
Al ₂ O ₃	%	7.73	7.07	4.12	4.17	6.51		11.75	10.91
Fe ₂ O ₃	%	3.02	1.98	1.04	1.19	1.83		2.85	2.09
MnO	%	0.005	0.003	0.002	0.003	0.008		0.112	0.014
MgO	%	0.38	0.37	0.15	0.13	0.72		1.18	0.50
CaO	%	0.03	0.03	0.02	0.02	0.06		0.16	0.13
Na ₂ O	%	0.03	>0.01	0.01	>0.01	0.02		3.33	4.23
K ₂ O	%	1.09	0.95	0.58	0.44	0.93		1.10	0.64
P ₂ O ₅	%	0.11	0.08	0.03	0.04	0.05		0.06	0.06
LOI	%	3.10	2.89	1.68	1.69	2.48		2.37	1.42
TOTAL	%	99.87	99.99	100.02	99.92	100.11		99.60	99.99
S	%	0.007	0.007	0.003	0.004	0.018		0.002	0.002
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3		0.4	3.4
As	ppm	6	5	5	5	7		7	>2
Au	ppm	9	7	>5	>5	>5		25	10
Ba	ppm	133	112	67	60	121		188	89
Be	ppm	2	1	1	1	2		2	2
Bi	ppm	>2	>2	>2	>2	>2		>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1	>1	>1		>1	>1
Cd	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3		>0.3	>0.3
Ce	ppm	66.5	35.5	24	39.5	54.5		52	48
Cr	ppm	32.5	25.5	15.5	9.5	19.5		17.6	9.7
Cs	ppm	3.5	2.95	1.8	1.6	2.75		2.4	>0.5
Cu	ppm	16	10	8	21	4		43	55
Eu	ppm	0.9	0.5	0.2	0.6	0.8		0.9	0.9
Hf	ppm	14.4	5.1	>0.5	>0.5	4.5		>0.5	>0.5
Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5		>5	>5
La	ppm	42.0	22.4	15.1	22.0	33.3		30.6	27.4
Lu	ppm	0.52	0.20	0.16	0.23	0.28		0.20	0.19
Mo	ppm	6	>5	>5	>5	>5		14	16
Nd	ppm	26	14	9	14	21		26	20
Ni	ppm	16	16	9	8	15		25	10
Pb	ppm	>3	>3	>3	16	5		85	6
Rb	ppm	71	44	30	24	46		62	40
Sb	ppm	0.8	0.7	0.6	0.6	0.8		0.5	>0.2
Sc	ppm	6.0	4.3	2.5	2.5	4.1		5.0	3.0
Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3		>3	>3
Sm	ppm	4.6	2.4	1.4	2.5	4.1		3.7	3.0
Sr	ppm	16	14	9	11	18		73	75
Ta	ppm	2	1	>1	>1	>1		>1	>1
Tb	ppm	>0.5	>0.5	0.8	>0.5	>0.5		>0.5	1.4
Th	ppm	16.4	8.9	4.7	6.4	8.8		5.3	5.0
U	ppm	3.4	1.8	>0.55	1.8	1.9		1.4	1.0
V	ppm	37	20	12	10	24		36	21
Y	ppm	22	12	8	12	15		12	11
Yb	ppm	3	2	1	1	2		1	2
Zn	ppm	38	22	14	9	25		84	43
Zr	ppm	435	127	58	72	129		115	90

表4-6 タイおよびラオスのクメール遺跡を構成する砂岩材の全岩化学組成分析結果

No.		TH-306	TH-307	TH-308	TH-311	TH-312	TH-313	TH-314
Sampling point		Wat Phu	Wat Phu	Wat Phu	Sida	Sida	Wat Phu	Wat Phu
SiO ₂	%	78.95	77.19	75.73	74.13	73.99	84.07	79.89
TiO ₂	%	0.250	0.271	0.433	0.435	0.518	0.141	0.258
Al ₂ O ₃	%	11.38	12.04	12.05	12.07	12.00	8.88	10.70
Fe ₂ O ₃	%	2.02	2.43	3.14	3.15	3.80	1.31	1.71
MnO	%	0.017	0.010	0.072	0.057	0.026	0.007	0.007
MgO	%	0.51	0.65	0.87	1.88	1.56	0.33	0.48
CaO	%	0.14	0.18	0.18	1.04	0.26	0.13	0.17
Na ₂ O	%	4.40	4.34	4.51	3.01	3.43	3.49	3.83
K ₂ O	%	0.55	0.78	0.91	1.71	0.88	0.49	0.63
P ₂ O ₅	%	0.07	0.08	0.09	0.36	0.27	0.05	0.47
LOI	%	1.56	1.68	1.75	2.32	2.49	1.18	1.96
TOTAL	%	99.87	99.64	99.73	100.16	99.22	100.08	100.09
S	%	0.002	0.001	0.001	>0.001	0.010	0.022	0.002
Ag	ppm	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3
As	ppm	>2	>2	>2	>2	3	3	3
Au	ppm	>5	8	>5	>5	>5	>5	6
Ba	ppm	108	115	187	372	248	1112	399
Be	ppm	2	2	2	2	2	1	2
Bi	ppm	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2
Br	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
Cd	ppm	>0.3	0.5	0.4	0.7	0.5	>0.3	>0.3
Ce	ppm	37	44	35	57	59	41	54
Cr	ppm	16.7	15.0	29.0	34.3	41.7	>0.85	17.0
Cs	ppm	>0.5	2.9	>0.5	>0.5	>0.5	1.7	>0.5
Cu	ppm	8	8	12	5	52	8	13
Eu	ppm	0.9	0.7	0.8	1.0	1.0	0.7	1.2
Hf	ppm	>0.5	>0.5	>0.5	>0.5	5.1	>0.5	>0.5
Ir	ppm	>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
La	ppm	21.2	28.9	26.0	33.3	30.6	22.7	29.7
Lu	ppm	0.23	0.17	0.22	0.25	0.34	>0.05	0.20
Mo	ppm	11	7	6	>5	7	14	12
Nd	ppm	19	19	19	26	25	21	27
Ni	ppm	10	12	16	19	19	6	6
Pb	ppm	4	5	8	9	>3	>3	>3
Rb	ppm	>20	35	>20	60	68	40	>20
Sb	ppm	>0.2	0.7	>0.2	>0.2	>0.2	>0.2	0.5
Sc	ppm	3.7	3.9	5.7	6.0	7.2	2.3	3.8
Se	ppm	>3	>3	>3	>3	>3	>3	>3
Sm	ppm	2.7	3.2	2.8	4.1	4.6	2.5	4.5
Sr	ppm	79	85	91	205	83	72	83
Ta	ppm	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
Tb	ppm	1.4	>0.5	0.9	1.1	1.4	1.5	0.9
Th	ppm	4.9	4.7	6.4	6.2	7.0	3.6	4.6
U	ppm	1.3	1.0	2.5	6.0	2.4	1.1	>0.5
V	ppm	24	22	48	49	52	18	21
Y	ppm	14	14	13	16	20	8	27
Yb	ppm	1	2	2	2	2	1	2
Zn	ppm	35	42	50	46	63	23	34
Zr	ppm	93	97	182	221	225	74	90