

アジア地域の地質から見たアンコール遺跡

盛合 禎夫*

Geological analysis of the ruins of Angkor in Asia

Tomio MORIAI

Abstract

The ruins of Angkor in Cambodia are on the World Heritage List. Angkor is highly evaluated as a cultural heritage; furthermore, in the field of architectural engineering, it is a creative masterpiece. Italy has the most world heritage sites, and in Asia, China and India also have many world heritage sites. Surprisingly, however, Angkor is the most popular tourist destination in the world. We would like to stress the following geological features in Asia which are related to the construction of the Angkor structures. 1. Geological features of Asia, 2. Geological structures, topography, and fault-and-fold systems in Asia, 3. Earthquakes (seismic activities) and landslides and 4. Built-in features to prevent Angkor weathering. In Asia, there are two stable places suitable for building such structures as those of Angkor, namely, Indochina and Siberia. Siberia is very cold with dense forests. However, Cambodia is warmer, very stable and conveniently located. Therefore, Cambodia was the best place for building the ancient city of Angkor.

1. はじめに

一般に遺跡のある処は、冬至、夏至、春分、秋分には、遺跡が正面から日の出が見える位置を選ぶとか、地震、水害のない安定している地盤であることなどの自然の恩恵を享受する環境条件を備えていることが多い。カンボジアのアンコール遺跡はこのような条件に当てはまっており、さらに、文化財としても非常に高い評価を受けている。また、建築工学では創造的才能、景観デザイン、文化的伝統、新建築様式を具備した傑作であると言える。

世界の遺跡の中で、一度はぜひ見ておきたいのはアンコール遺跡が第一位と言われている。世界の遺跡では、規模、数、価値においてイタリアを頂点としており、アジア地域では中国、インドに遺跡が多い。この理由は、その根底には地質学的背景が大きく関与しているからである。今回、アンコール遺跡を地質から見直し、検討してみる。



写真-1 アンコール・ワット

2. アジア地域の地質

2-1 アジア地域の分類

アンコール遺跡は東南アジアのインドシナ半島に入る。また、アンコールとはサンスクリット語からの言葉で都市を意味する。

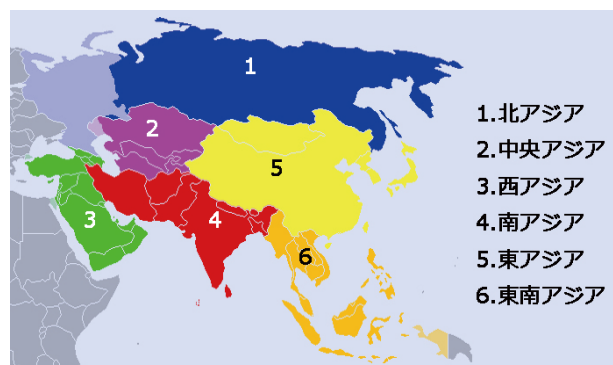


図-1 国際連合によるアジア地域の分類

2016年 10月 18日受理

*東北工業大学 名誉教授

2-2 地質概況

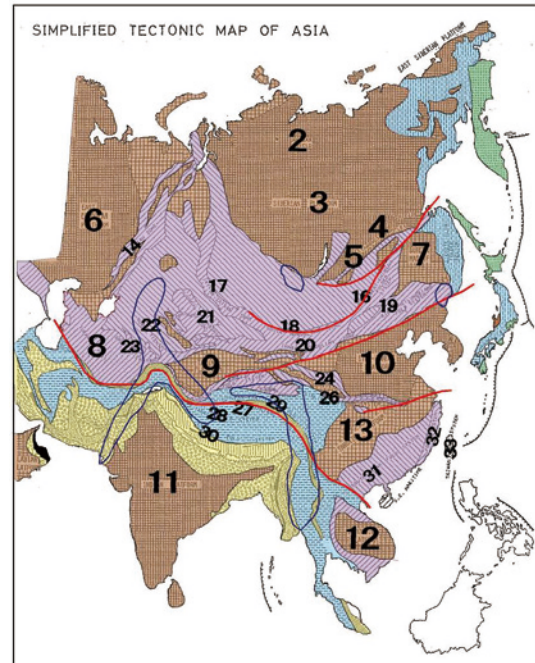
北アジア(シベリア地域)から南へ行くに従って、概ね上盤の若い地層が発達している(図-2)。すなわち、北方が古い地盤で、南方が新しく、若い地層が分布する構造である。

シベリア地域では約 38-25 年億前の地層が分布し、その上位に古生代固化地域の 5 億-2.5 億年前の地層とつながり、その南のチベット高原では中生代固化地域の 2 億年-6 千 5 百万年前の地層が被覆し、さらに大槻(1982)によれば、南部のヒマラヤ地域では、せん断応力集中の高い地域に入る。ここは中生代-新生代に活動した造山帯である。最南端のインドは Gondwana・プレートの一部であり、北のユーラシア大陸に向かって北進し衝突して、ネパール地区を押し上げている。また、以上のシベリア地域から南アジア、東アジア、東南アジアまで、構造運動によっての山脈、高原、断層、褶曲が各地で見られる。またその近くには、沈降によってできた平原、低地、浅い海、湖沼などが見られる。また、火山も東アジア地域には多い。

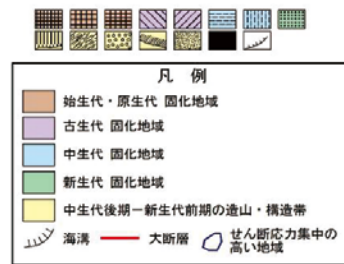
2-3 地質各論

北アジアは先カンブリア界、古・中生代の花崗岩や塩基性、中性貫入岩が分布する。中央アジアは古生代固化地域が多く、また NW 性の大断層があり、トルクメニスタンでは石油や天然ガスを産出し、タジキスタンには先カンブリアの基盤岩と、中生代、新生代の沈降帯が見られる。西アジアにはヒマラヤ造山帯の複雑な褶曲と断層帯が発達している。さらに、南アジアはインドプラットフォームが主であり、これは Gondwana プレートから分離したもので、カール植物化石、Gondwana 植物化石 (Glossopteris) を産する。このインドプラットフォームは北東方向に現在でも年 5 cm の速度で動いている。また、インド地域は先カンブリア楕状地とそれを覆う石炭紀-白亜紀層が発達している。インド西部には広く、中生代-新生代に噴出した玄武岩質溶岩が分布する。また、ヒマラヤ南部の帯状の低地帯は沈降帯とされ、2000m の厚さを持つ。ネパールはエベレスト (8848m) があり、アンモナイト、三葉虫、ウミユリの化石が産出され、4~5 億年前にここは海であったものが隆起して世界一高い山になったものである。

東アジアの中国では先カンブリア界、古生代、中生代固化地域の地層が発達しており、モンゴルは中国と同じ地層であるが、東方に新生代の地層が発達し、褶曲、断層が多い。また、東南アジアのインドシナ半島では、大半の地域が安定している地塊であり、インドプラットフォームの影響も軽微で、多少の押し出しが見られる程度である。硬い先第三系上に薄い第四系が被覆し、その中央にカンボジアのアンコール遺跡が建設されている。



地球 Vol. 4 No. 1, 1982 (大槻原図) 加筆 (大槻, 1982 加筆)
(アジアのプレート内応力場とそれを複製する試み)



- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1: East siberian platform | 18: Sourh Mongolian zone |
| 2: Anabar shield | 19: Kirin-Heilungking fold system |
| 3: Siberian platform | 20: Inner Mongolian zone |
| 4: Aldan shield | 21: Djungal-Balkhasi zone |
| 5: Stanovoy complex | 22: Nouth Tianshan |
| 6: East european platform | 23: South Tianshan |
| 7: Bureya massif | 24: Nanshan fold system |
| 8: Turanian plate | 25: Kunlun fold system |
| 9: Tarim platform | 26: Tsinling fold system |
| 10: Sino-korean platform | 27: Sankiang fold system |
| 11: Indian platform | 28: Tangla fold system |
| 12: Indochina platform | 29: Sungpan-Kantze fold system |
| 13: Yangtze platform | 30: Lhasa fold system |
| 14: Uralian zone | 31: South-Chaina fold system |
| 15: Sikhote-khingian folded system | 32: S.E. Maritime fold system |
| 16: Great-khingian folded system | 33: Taiwan fold system |
| 17: Intysh-zaisan zone | |

図-2 アジア地域の構造図

3. アジア地域の構造区・地形・災害

3-1 序論

アジア大陸は広大なユーラシア大陸の東半分をしめている（図-3）。さらに、このなかに、複雑な地形が認められる（図-4）。これはアジア地域のプレート内の構造応力場に強く支配されているからである。基本的には、プレートが極めて流動的なアセノスフェアの上に浮かんでいるのである。また、新妻(2009)は、プレートの動きに関して、例えば相転換によって橄欖石がペロブスカイトになり、さらに温度と圧力の変化に対応して、地震災害等の発生にも影響することを指摘している¹⁴⁾。このように、ユーラシア大陸の内部は多数の大小の断層によって寸断され、全体として塑性的変形を起こしている。また、このユーラシア大陸は東縁では太平洋とフィリピンプレートに接しており、南縁はインド大陸やアラビアプレートと衝突している。このように、アジア地域は常に異常な地塊の集合帯でもある。



図-3 ユーラシア大陸とゴンドワナ大陸
大浜一之 1983 (科学雑学辞典)

3-2 構造区分

大槻(1982)、Huang(1978)はアジアの地質とプレート内応力場の複製する研究¹¹⁾で、アジアの地質を三大区分している（図-5）。一つめはモンゴル-天山地域の南に凸の構造形態を示す領域(Pal-Asiatic Tectonic Domain)、二つめは太平洋側に沿って北東-北北東に伸びる構造を持つ領域(Marginal Pacific Tectonic Domain)、三つめはユーラシアプレート南縁を縁取る構造領域(Tethys-Himalayan Tectonic Domain)である。さらに、これらの地域がプレート運動の時生じる主応力のせん断応力を算出してみた。その計算にはヤング率、ポアソン比が必要である。そこで、リソスフェアの厚さを一定(80km)にして、ヤング率を1.8, 1.4, 1.2, $1.0 \times 10^{12} \text{dyn/cm}^2$ 、ポアソン比を0.24, 0.25, 0.26, 0.27としたものと、ヤング率を1.5, 1.25, $1.0 \times 10^{12} \text{dyn/cm}^2$ とリソスフェアの厚さを150km, 100km, 70km, 50kmとしたものを統合して解析した。また、せん断応力の計算は次式を使っている。

歪率 $\Delta X/L$ (ずれ $\Delta X=1\text{km}$ 、厚さ $L=80\text{km}$)

E: ヤング率

G: 剛性率 $G = E/2(1 + \sigma)$

σ : ポアソン比

τ : せん断応力 $\tau = G * \Delta X/L$

これによってアジア地域全体にどんな影響を与えられているのか、特にアンコール遺跡地域との関係を究明する必要があった。



図-4 アジア地域の全図

地学カラー図表(1969)に加筆

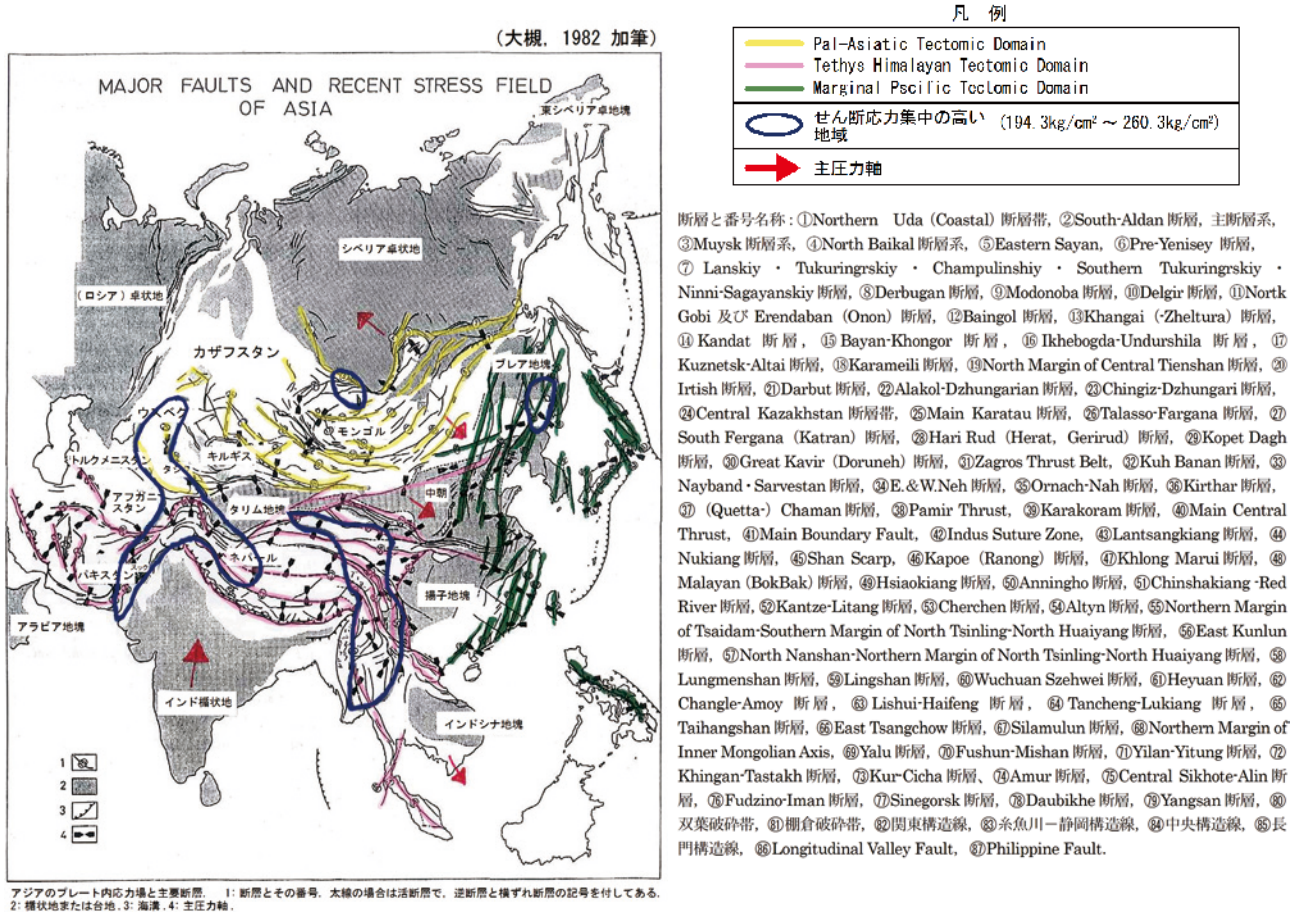


図-5 アジア地域の断層と応力場 (大槻 1982 加筆)

3-3 地形

アジア地域には、図-4、6 に示したように色々な地形が見られる。これらはプレートの移動や地殻変動によって生じたものである。また、これらの中で特徴のある地形を示しているものは遺跡の候補になることが多い。例えば、ヒマラヤ地帯の世界遺産のあるネパールはせん断応力の集中地帯であり、現実に災害が発生している。また、バイカル湖はインドプレートの北進で北東方向の陥没が発生し、それが湖となった。そしてこの湖の沈降は現在も続いているが、既に世界遺産に登録されており、危険地帯と考えた方がよい。このように、特徴のある地形は人間の興味を強く引き、様々な人間が集まるようになり、集落の文明開化、発展に繋がっていく。それ故に、その地形が遺跡に指定される時には、地質学的に良く調査しなければ、将来に禍根を残すことになってしまう。

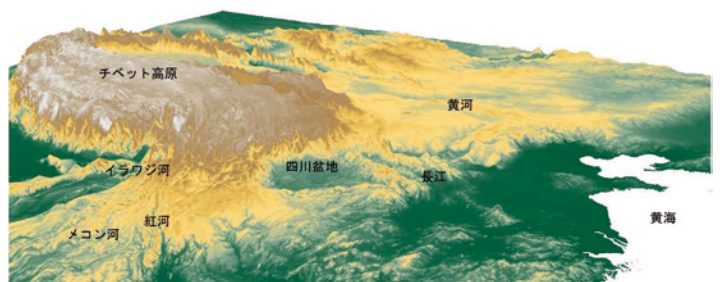


図-6 高原、盆地、河川、海
青海チベット高原地質とその成立 (佐藤信次、猪俣道也 1989)

3-4 主な断層帯と褶曲帯

- ・ヒマラヤ造山帯：④ Main Boundary Fault ④ Indus Structure Zone ⑥ Talasso-Fargana 断層 ② Alakol-Dzhungarian 断層 ⑧ Hari Rud 断層 ⑨ Kopet Dagh 断層 ③ Ornach-Nah 断層 ③ Kirthar 断層 ③ (Quetta-) Chaman 断層 ③ Zagros Thrust Belt ⑤ Chinshahakiang-Red Rivir 断層 ⑤ Lungmenshan 断層 ⑤ Kantze-Litang 断層 ④ Hsiaokiang 断層 ⑤ Anningho 断層 ④ Shan Scarp ④ Altyn 断層
- ・モンゴル西部：⑬ Khangai 断層 ⑬ Ikhe bogda-Undurshila
- ・シベリア台地南東縁：⑦ Lanskiy 断層

3-5 地震帯・地すべり帯

アジア地域の地震は日本を中心として地震や火山活動が多発しているが、このほかにアジア地域はインドプレートがユーラシア大陸と衝突して、頻繁に地震が発生している。一般にプレートが移動するとき、その境界は互いに異なった方向に動くことが多いと言われている。

これまでに述べたように、アジア地域は複雑な構造帯の活動のなかで、断層などの極めて不安定な集合体とも考えられる。

<地震>

南アジアの地震：

- (1) パキスタン 1600-1900年
100人以上の死者
 - (2) インド 1600-1900年
100人～30万人の死者
 - (3) ネパール 1934年1月15日インドで
7253人、ネパールで3400人の死者
- 東南アジアの地震：1600-1987年
100人以上の死者。

また、ミャンマーのバガン遺跡の地震災害(2016.8.24)もヒマラヤ造山帯の中である。さらに、ミャンマー、タイ、マレーシア、フィリピン、インドネシアでも発生した。

中国の地震：山東、河北、山西、四川、雲南、新疆、西藏で巨大地震が発生した。

<地すべり>

中国は70%が山岳地帯で、数十万から百万カ所地すべり危険箇所があるといわれている。甘粛省では十数年間に千カ所あまり地すべりが発生して、2000人以上が死亡している。この中で1983年3月7日のサラサン地すべりが有名である。

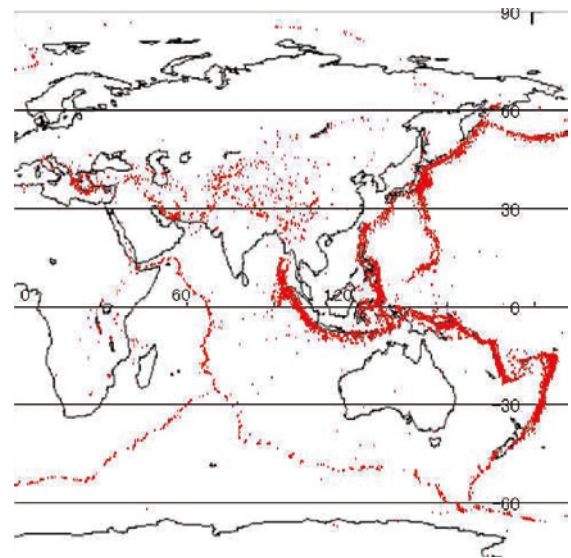


図-7 地震分布
(USGS Earthquake Catalog Search)

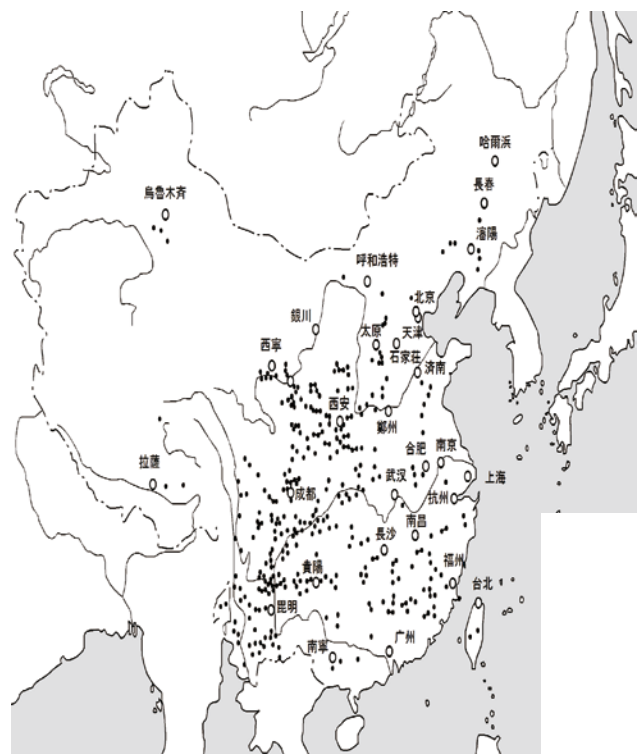


図-8 中国の地すべり分布(中村浩之)
(近代世界の災害、国会資料編集会)

4. アンコール遺跡

4-1 アンコール遺跡地域の地質概況

カンボジアはインドシナ台地の一部で後期三畳紀に生じた造山運動による圧密、隆起した大陸地殻の地塊である。また、トンレサップ湖を中心に第四系のラテライト性赤色土が広く分布している。この下部には先古生層、古生層、中生層が発達している。さらにこのなかに、変成岩、花崗岩、流紋岩、安山岩、玄武岩がへい入、貫入している。遺跡はラテライトや先第四系の砂岩(主として中生層)を使用していることが多い。

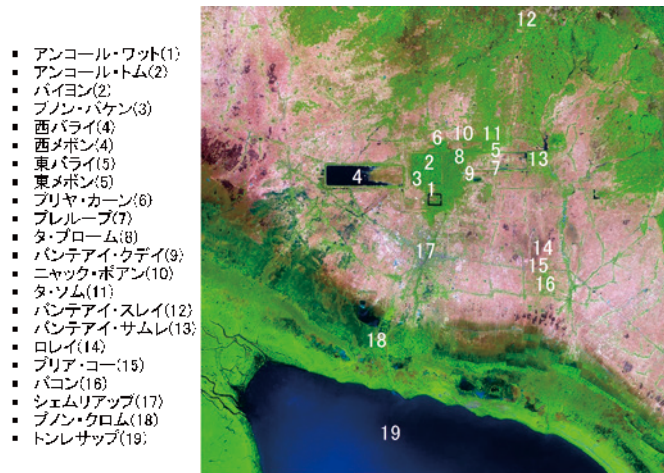


図-9 アンコール遺跡の分布
カンボジア政府・アプサラ機構(1992)

4-2 生い立ちと遺跡

9世紀頃から数々主建設が始まる。特に、スーリヤヴァルマン 2 世(1113-1145)とジャヤーヴァル 7 世(1181)であり、とくにスーリヤヴァルマン 2 世はアンコール・ワットを建設した。遺跡は 2300 ヶ所中、主なものは 60 数ヶ所あり、とくに有名な遺跡は次の通りである。

アンコール・ワット、アンコールトム、バイヨン、プノン・バケン、西バライ、東バライ、東メボン、プリヤ・カーン、プレループ、タ・プローム、バンテアイ・クディ、ニャック・ポアン、タ・ソム、バンテアイ・スレイ、バンテアイ・サムレ、ロレイ、プリア・コー、バコン、トンレサップ(図-9)。

9世紀から14世紀にかけてのクメール王朝の建設した煉瓦や砂岩で作った石造りの宗教建築である。そして、彫像や浮彫の美しい美術傑作を見せてくれる。アンコール・ワットの高い堂塔(65m)は、世界の

中心で神々が住むメール山を象徴し、周壁は雄大なヒマラヤ連峰を、環濠は無限の大洋を意味している。しかしその後、シヤムの侵攻で仏領インドシナ連邦の保護国にまで転落してしまい、アンコール遺跡は密林に深く覆われてしまう。しかし、1860年フランスのアンリームオーによって再発見される。その後は、種々の混乱と困難を経て、今日に至っている。

4-3 カンボジアの地獄時代

フランスの植民地時代(カンボジア、ベトナム、ラオスの三カ国、19世紀)、シアヌークのカンボジア王国、ロンノル政権(クメールルージュとロンノルとの闘い)、ベトナム戦争(1964-1973年)、アメリカの撤退、ポルポトによる民主カンプチアの成立(カンボジアの地獄時代、大量の知識人、技術者の殺戮、約170万人の殺人)、その後1990年統一政権、国連のPKO活動、1997年ポルポトの死去などを経て、現在に至る。この困難の歴史の中で遺跡はかなり損傷したと言われる。

4-4 アンコール遺跡の損傷

一般に遺跡の損壊は基本的には地質構造に支配されているが、どうしても避けられない損傷は現実に発生している。例えば、建築構造や生物や暴風の問題である。また、石材の診断は、遺跡という貴重なものであるので、自由に採取や実験が出来ないので新共振法を開発し使用した¹³⁾。

地下水(常に地表面から1~3mのところに存在している)は雨期と乾季では3~4mの上下差があり、そのため地盤に影響が出る。

一般に水を含むと土の強度は低下する。コンシステンシーの限界(水分の含有量によって固体、塑性、液状に変化)によるものである。また、地表水と地下水は重力の高い位置から低いところに向かって流動するもので、水量が8倍になれば流速は2倍になり、運搬力は流速の6乗に比例する。雨期は5月下旬から10月下旬で、その間にスコールに伴う激しい降雨があり、災害が発生する。また、遺跡の仕口(柱と梁の接合部)は長い間の水分や風化や消耗などで構造全体が緩む。やがて、剛性が低下して崩壊する。アンコール遺跡の中のバンテアイ・クディ(写真-2)の回廊は不同沈下している。柱はほぼ4段の石を重ねているが、これが崩壊している。図-10のように

柱の下段の石と上段の石の雨期と乾季ではその値が全く異なる。長時間続くと崩壊するのである。また、図-11のように約10日でもとに戻っている。

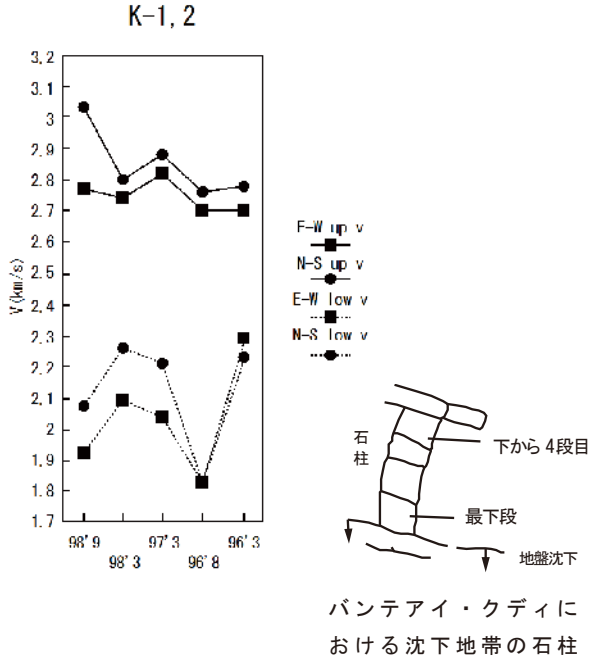


図-10 バンテアイ・クディの石柱の強度変化

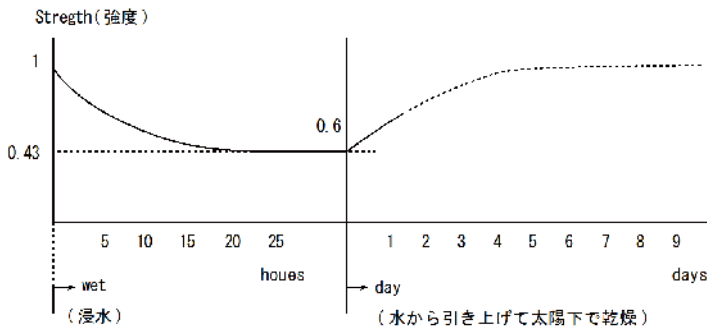


図-11 砂岩の浸水・乾燥による強度変化

石材：砂岩とラテライトである。砂岩は中、古生層で、赤褐色、灰色、淡緑色があり、変質しているものは緑泥石、褐鉄、カオリンなどが発生している。砂岩の中の層理や葉理面が風化し破壊の原因を作っている。ラテライトは鉄やアルミニウムに富んだ土壌であるが、石のように硬くなったものを使用している。ラテライトの中の礫が

抜けたり、泥土化したりして、強度低下につながる。X線回析では針鉄鉱、赤鉄鉱、カオリン、石英が検出された。

気温の変化：大気温度は季節によって、また、一日の中でも較差がある。岩石を構成している多種の鉱物の熱による膨張率の差が岩石の鱗脱、剥離につながる。

生物の作用：植物の肥大成長によって岩石の割れ目に侵入して、割れ目増大するばかりでなく、根の先端から有機酸を分泌して、岩石を化学的に分解する（写真-3）。また、遺跡被害の現象として次のような原因でも発生する。それは、鳥などの排泄物、地衣類、微生物、バクテリア、酸性雨、暴風、豪雨、洪水、荷重、火事、観光によるごみ、落書き、戦争、洗浄、盗難、政争、地すべり、試料採取、加工技術、宗教、遺跡の他への利用（兵営、倉庫などへの転用）等である。



写真-2 バンテアイ・クディの沈下



写真-3 樹木による建物の破壊



写真-4 ラテライトと含有礫



写真-7 レリーフの溶解



写真-5 ラテライト塼の緩み



写真-8 砂岩の剥離

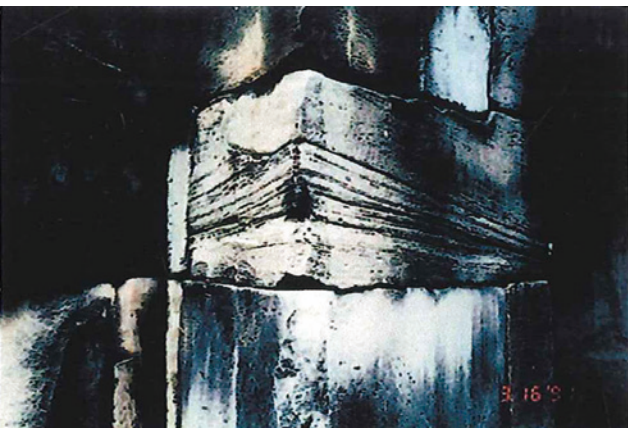


写真-6 砂岩の層理



写真-9 石柱の亀裂とクラック

5. まとめ

アンコール遺跡のあるカンボジアは地震、水害のない安定な楕状地で、交通も便利で、気候も良好である。傍にはアルプス-ヒマラヤ造山帯があるが、その影響は殆どない。一般に地質的変動のある処やその影響のありそうな処には文明開化も起こり難い。しかし、そのような地質構造のことを全く知らないで建立したものや、また、知っているても災害防止できると思ってなのか、そのような処に、たくさんの遺跡があるのも事実である。最近、発生した中国の四川省の災害やネパール、ミャンマーの地震災害は、もともと危険地帯としていた処に起こったもので、残念ながら、予想通りであった。古生代のカレドニア、バリスカン造山運動も巨大であったが、中生代後期から新生代前期のアルプス-ヒマラヤ造山運動はもっと強大であったようで、現在も続いている。この活動によって、アジア地域には、たくさんの山脈、高原が出来、さらに、平原、浅い海、湖水などが誕生している。もし、この中に遺跡があつたら当然損傷を受けるはずである。このような過程のなかでカンボジアのアンコール遺跡は、長い間のたくさんの試練を乗り越って素晴らしい太古の傑作品をみせてくれている。それは、カンボジアはアジアのなかで、常に、最も安定な地盤であったからである。カンボジア以外に安定な処はシベリアがある。しかし、同地は寒いし、8月には降雪もあるし、-73度になることもあると言われる。また、交通も不便である上、タイガと呼ばれる針葉樹が多いので、カンボジアにはとても敵わない。遺跡、遺産には先ず、基本的には地質的環境が優先され、安定した地盤地域が文化財の要因であることが理解できた。アンコール遺跡はこのような好条件を具備した処であった。

参考文献

- 1) 大槻健四郎 (1982) : アジアのプレート内応力場とそれを複製する試み, 地球 No.3, pp.7-14.
- 2) Moriai, T (1991) : Study on the Ground and Stones of the Angkor Monuments, Institute of Asian Cultures, Sophia University, No.4(1991), pp.121-172.
- 3) Moriai, T.(1991) : Ground and Groundwater of Banteay Kdei and Prah

- Khan, Institute of Asian Cultures, Sophia University, No.5(1991), pp.40-60.
- 4) 石沢良昭・河野 靖・盛合禱夫・藤木良明・遠藤宣雄(1991) : カンボジアの文化復興(4), 上智大学アジア文化研究所, pp.1~393, 1991.
 - 5) 石沢良昭・河野 靖・盛合禱夫・藤木良明・遠藤宣雄(1991) : カンボジアの文化復興(5), 上智大学アジア文化研究所, pp.1~633, 1991.
 - 6) 盛合禱夫(2000) : アンコール遺跡の地質学, 連合出版, pp.1-166.
 - 7) 盛合禱夫・松村吉康他(2001) ; 地すべりに関する新共振法による研究, 地すべり, Vol.38, No.1, pp.69-77.
 - 8) Moriai, T.(1992) : Geological Study on the Angkor Monuments, Institute of Asian Cultures, Sophia University, No.7(1992), pp.138-147.
 - 9) 盛合禱夫(1992) : アンコール遺跡の地盤及び石材の劣化, 土と基礎, Vol.40, No.1, Ser.No.408 (1992), pp.41-46.
 - 10) 石澤良昭(2013) : 新古代カンボジア研究, 風響社, pp.1-766.
 - 11) Huang, T.K (1978) : Eclogae Geol.Helv.71, pp.611~635.
 - 12) 盛合禱夫(2016) : アンコール遺跡地域のラテライト, Vol.36, 東北工業大学紀要理工学編 人文社会科学編, pp.13-16.
 - 13) 盛合禱夫 松村吉康(1999) : 土、岩石およびコンクリートの診断法—新共振法による計測—, 東北地質調査業協会40周年記念誌, pp.37-56.
 - 14) 新妻信明(2009) : 日本列島テクトニクスと海洋沈み込み「プレートテクトニクス」その新展開と日本列島, 共立出版.
 - 15) 力武常次(1996) : 近代世界の災害, 国会資料編纂会.