

## タイ・アユタヤの文化遺産防災に向けた現地調査と洪水解析

In-situ investigation and flood analysis for disaster mitigation of cultural heritage in Ayutthaya

檀上徹<sup>1</sup>・赤澤史顕<sup>1</sup>・田中七裕<sup>2</sup>・藤本将光<sup>3</sup>

豊田祐輔<sup>4</sup>・谷口仁士<sup>5</sup>・深川良一<sup>6</sup>・里深好文<sup>6</sup>

Toru Danjo, Fumiaki Akazawa, Nanahiro Tanaka, Masamitsu Fujimoto  
Yusuke Toyoda, Hitoshi Taniguchi, Ryoichi Fukagawa and Yoshifumi Satofuka

<sup>1</sup>立命館大学大学院 理工学研究科 総合理工学専攻 博士課程後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Doctoral Course of Science and Engineering

<sup>2</sup>京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 修士課程 (〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)

Graduate School of Engineering, Kyoto University Civil and Earth Resources Engineering

<sup>3</sup>立命館大学助教 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>4</sup>立命館大学准教授 政策科学部 政策科学科 (〒603-8577 京都市北区等持院北町56-1)

Associate Professor, Ritsumeikan University, College of Policy Science

<sup>5</sup>立命館大学教授 歴史都市防災研究所 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Institute of Disaster Mitigation for Urban Cultural Heritage, Ritsumeikan University

<sup>6</sup>立命館大学教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Ayutthaya has been registered as a world heritage by UNESCO in 1991. Ayutthaya is located in a low elevation area, surrounded by three rivers. Therefore, the flood occurred frequently. The flood in October, 2011 had continued more than a month. Bricks of many remains had been deteriorated and the ground under the remains is unequally settled due to floods. If this situation continues, there is a possibility that the value of cultural heritage decreases. So flood analysis for the sandbank surrounded by three rivers is conducted. In addition, four cases with different conditions were analysed. Based on the results of analysis, this paper proposes the future disaster mitigation of the culture heritage in Ayutthaya.

**Keywords :** *Ayutthaya, Flood analysis, World helitage, Disaster mitigation*

### 1. はじめに

アユタヤ遺跡は、タイの首都バンコクから北へ76km離れた場所に位置し、チャオプラヤ川、ロップリー川、パーサク川に囲まれた中洲内および周辺地域である(図1)。チャオプラヤ川とその支流に囲まれた地形のため水運に恵まれ、17世紀はじめに国際貿易都市として繁栄した。当時のアユタヤの交通は水路がメインであったことから、中洲内には多くの水路が張り巡らされていた。長きに亘る王朝時代の寺院や仏像の文化遺産が、現在でも数多く残っており、1991年にユネスコによって世界遺産に登録された。

チャオプラヤ川には2つの代表的な狭窄部が存在する。1つ目はアユタヤ市街上流付近、2つ目はバンコク市上流付近に位置する。この2つの狭窄部に挟まれていることから、河川の特長として元来氾濫しやすい地域と考えられる。さらに、タイの地形は日本と比較して極端に勾配が緩く、大部分が平原であるため、流下能力が非常に乏しい。そのため、タイでは規模の大小を問わず、洪水氾濫が毎年のように発生している。ア

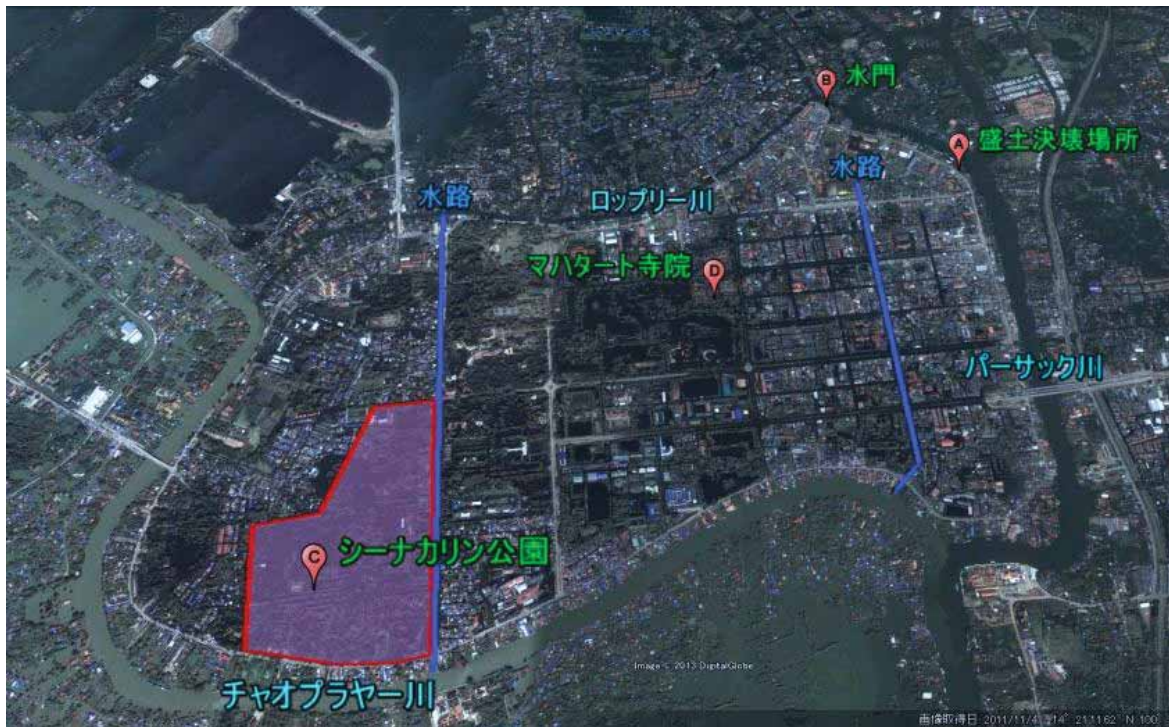


図1 アユタヤ中洲内の地図（出典：Google Earth 修正、加筆）

ユタヤにおいても、1995年、2006年、2011年に遺跡が浸水する大規模な洪水が発生した。特に2011年に発生した洪水では、台風第8号がベトナム北部へ上陸したことから始まり、10月には、1か月以上にも亘る浸水が続いたことで、中洲内に点在する文化遺産群が長期間水没した。これまでに著者らは、2012年3月、11月、2013年2月の計3回の洪水被害の調査を行った。2012年3月に行った調査結果については、檀上ら<sup>1)</sup>が報告している。本報告では、それ以後の計2回で得られた調査の知見についてまず述べる。また、中洲内のエリアを対象とした氾濫解析を行い、中洲内でどのように洪水が発生し進行していくかを把握する。さらに、洪水氾濫時における防災対策が可能かについて4つの提案を加味した氾濫解析を行う。

## 2. アユタヤ遺跡エリアの被害の実態

### (1) 2011年のアユタヤ遺跡エリアにおける洪水の概要<sup>1)</sup>

北東の河川と中洲内を結ぶ生活用の排水管により河川から中洲内へと浸水が続く中、10月7日の22時頃に北東（パーサクク川とロップリー川の合流地点付近）の盛土（図1のA）あるいは水門（図1のB）が、中洲内から侵食され破壊し、一気に河川水が中洲内へ流入したことが、地元住民からのヒアリングから分かっている。

中洲内へ流入した河川水は0.5～2.0mに達し、1ヵ月以上に亘り浸水が続いた。さらに、南西に位置するシーナカリン公園（図1のC）は、中洲内でも標高が低い地域であることから、最後まで浸水した状況が続いた。中洲内を含めたアユタヤ一帯は、勾配の緩やかな地形であるため、長期間に亘り中洲内の水位が下がらなかったことから、最終的にポンプ用いて強制排水を行った。

### (2) 文化財建造物の被害

アユタヤの遺跡には、煉瓦で造られた建築物が多数点在し、野焼き煉瓦と言われる低い温度で焼成されているものが用いられている。特に著しい風化が生じている箇所では、指先で削れるほどの状態が見られ、日干し煉瓦並みと言わざるを得ないほど極めて低い強度であることが推定される<sup>2)</sup>。また、至るところで遺跡の煉瓦が白く変色しており、度重なる降雨や浸水によって塗料や色素が抜けたためと考えられる。さらに、降雨量が比較的多い高温多湿というタイの気候条件から考えると、アユタヤの遺跡群は耐久性上、極めて困難な状況下に置かれていることが分かる。



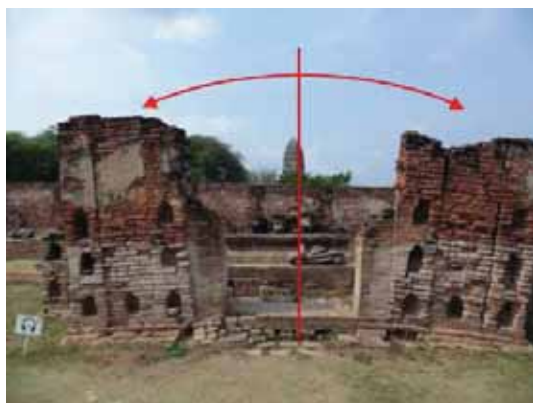


写真1 傾いた遺跡



写真2 修復工事の状況



写真3 遺跡の傾き



写真4 地盤の窪み



写真5 構造物の傾きにより基礎部分がせん断破壊した状況

マハタート寺院（図1のD）の境内には、煉瓦で造られた仏塔や礼拝堂があり、煉瓦の劣化に加え構造物が傾いた状態で現在まで残っている（写真1）。幾つかの構造物については、現在補強工事が行われている。作業者の話によると、構造物の中心に鉄筋を挿入し新たに支えを作ること、構造物が傾く現象を食い止める工事が行われているとのことである（写真2）。しかしながら、大多数の構造物は手つかずな状態であり、ある構造物の下段部分は5~7度ほどの傾きが生じている（写真3）。この構造物は、北もしくは北東側へ建物が傾いており、倒れる方向の反対側（南西側）の地表面には大きな窪みが発生している（写真4）。この理由の一つとして、構造物が傾くことで地盤が引っ張られ、隙間が生じたことで集中的な沈下が発生したこ



写真6 構造物に亀裂が発生

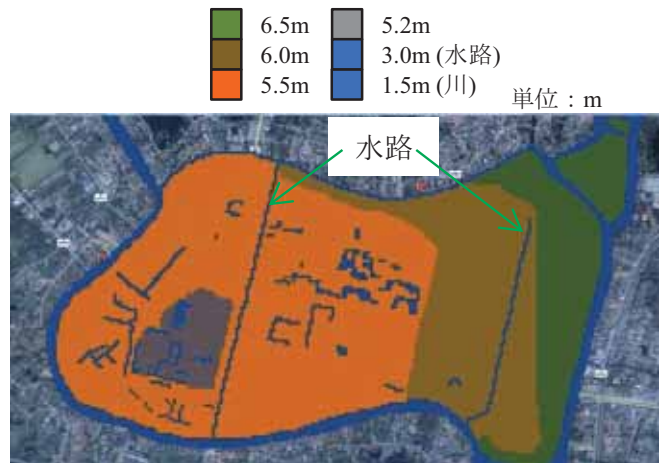


図2 標高データの作成 (Excel)

とが挙げられる。また別の場所では、建物にせん断破壊が生じ、斜め方向の亀裂が発生しているものもあった(写真5)。構造物が傾いたことで、荷重が片側面に掛かり、縦方向へせん断されたと考えられる。さらに、構造物への亀裂の発生や、本来直線に配置された構造物のたわみ、ズレが生じものが目立っている(写真6)。

以上のように、地盤の変状や煉瓦の劣化、腐食が進行すると構造物の傾きが進行する可能性が高いと言わざるを得ない。したがって、地盤沈下の原因の追究および対策を講じる必要がある。現在のところ、その誘因は降雨または長期間の浸水による水の作用だと考えられる。降雨比べ洪水氾濫による長期間の浸水が発生する頻度は低い、一度発生するとその破壊力は計り知れないと考えられる。そこで、アユタヤ遺跡エリアにおける洪水氾濫が、どのように発生し進行していくか把握する必要がある。次章では、今後洪水が発生した場合のアユタヤ遺跡エリアの浸水状況を数値シミュレーションによって表現する。

### 3. 洪水氾濫シミュレーション

#### (1) 解析の概要

アユタヤ中心部の標高データは、現地調査の際に持参したMagellan社のGPS (Explorist Pro 10) とGoogle Earthの標高値を参考に20mメッシュで作成した。標高データの作成にはExcelを用い、標高によって色を変化させている(図2)。主に河川と水路(図2の青色)の標高を1.5mと3m、その他(図2の緑、茶、橙)は5.0~6.5mとなるよう設定した。上記の設定から通常(構造物等の障害物を考慮しない)状態のアユタヤ中心部の河川氾濫を河床変動解析ソフト「iRIC (Nays2D Flood)」を用いて解析した。

#### (2) 基礎方程式と計算条件

##### a) 流れの基礎方程式

iRIC<sup>3)</sup>では、河川の複雑な境界や河床地形を直接考慮できるように座標系は一般曲線座標を採用している。直交座標における式を一般座標 $\xi, \eta$ を用いた一般座標系に変換した基礎式を以下に示す。

流れの連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

x、y方向の流水の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta \\ & = -g \left[ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] - C_f \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_3 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta \\ & = -g \left[ (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] - C_f \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left( \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (4)$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left( \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (5)$$

$$D^\xi = \left( \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_t \left( \xi_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_t \left( \xi_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] \quad (6)$$

$$D^\eta = \left( \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_t \left( \xi_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_t \left( \xi_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] \quad (7)$$

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (8)$$

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v, \quad u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \quad (9)$$

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad (10)$$

ここに、 $h$ は水深、 $t$ は時間、 $u$ は $x$ 方向の流速、 $v$ は $y$ 方向の流速、 $g$ は重力加速度、 $H$ は水位、 $\tau_x$ は $x$ 方向の河床せん断力、 $\tau_y$ は $y$ 方向の河床せん断力、 $F_x$ は $x$ 方向の植生による抵抗力、 $F_y$ は $y$ 方向の植生による抵抗力、 $C_f$ は河床せん断係数、 $v_t$ は渦動粘性係数、 $C_D$ は植生の抗力係数、 $a_s$ は単位体積に占める植生の遮断面積を示す。iRICでは植生の影響も考慮できるが、本研究では植生については考慮していない。

渦動粘性係数 $v_t$ についてはゼロ方程式モデルを用いて、

$$v_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (18)$$

とする。ここに、 $\kappa$ はカルマン係数であり $\kappa=0.4$ である。

底面摩擦に関してはマンシングの粗度係数を用いて設定する。平均流速公式にマンシング則を適用した場合、河床せん断係数は次式により表現できる。

$$C_f = \frac{g n_m^2}{h^{1/3}} \quad (19)$$

以上の方程式をCIP法により、差分し計算している。

## b) 計算条件

計算条件および流量の時間変化を表1と表2に示す。マンシングの粗度係数は河川で用いられる一般的なものを用い、流入河川勾配についてはアユタヤにおける実際の河川勾配を用いた。水の流入位置は、左上の1箇所から流入1、右上の2箇所から流入2を与え、洪水氾濫時の流量や流速の計測はされていないことから、それぞれの流入量は河川幅に応じて決定した。本解析は中洲内に水が流入した後の挙動について把握することを目的としているため、開始2時間までは河川に水を流すための流量を与え、3時間後からは洪水氾濫する流量を与えた。また、下流および解析範囲の端部分からは水が等流で流出するものとして計算を行った。

## (3) 解析結果と考察

図3にアユタヤ中洲内における解析結果の経時変化を示す。北西から南東にかけて順に洪水氾濫していることが分かる。また、東部はほとんど浸水していないという結果が得られた。各狭窄部（北東および北西の



河川の合流部分) においては常に赤色が示されており、水位が上昇していることが見受けられた。これはアユタヤでの洪水の原因の一つとなっている地理的要因の狭窄部の存在が確認できたこととなる。また、南北にまたがる2本の水路の排水能力が低く、西側からの氾濫水が水路に到達する前に、水路の水が氾濫した。解析上は20mメッシュで表現しているため、水路幅は20mとなるが、実際の水路は5mほどしかないため、さらに氾濫しやすくなると考えられる。

以上のことから、洪水対策が万全でなければ、東側を除くほぼ全域で浸水の被害が見られ、長期的な洪水では被害の規模は大きくなると考える。そこで、中洲内における洪水氾濫の軽減に向けた防災対策の提案について、次章に示す。

表1 計算条件

| パラメータ          | 設定値     |
|----------------|---------|
| x方向の計算点間隔 $dx$ | 20.0m   |
| y方向の計算点間隔 $dy$ | 20.0m   |
| 計算タイムステップ $dt$ | 0.1s    |
| マンニングの粗度係数     | 0.03    |
| 流入河川の勾配        | 0.00002 |

#### 4. アユタヤ遺跡の防災計画に向けた提案

##### (1) 提案内容および条件

洪水被害を抑える対策として種々あるが、ここでは4つの提案についてiRICを用いた解析による検討を行う。4提案は以下に示す通りである。

CaseA) 南北をかける2つの水路を掘り下げた場合

CaseB) 一部の遺跡をかさ上げた場合

CaseC) 南西のシーナカリン公園および農地を遊水池とした場合

CaseD) アユタヤ中心部全体を輪中堤で囲んだ場合

CaseA)では、南北に伸びる2つの水路を1.5m掘り下げた。CaseB)は、中洲内の中心からやや北に位置する遺跡を対象(シミュレーションを見やすいようにするため)とし、その遺跡を部分的に地盤高を3m上げた場

表2 流量の時間変化

| 時間(h) | 流量( $m^3/s$ ) |     |
|-------|---------------|-----|
|       | 流量1           | 流量2 |
| 0     | 300           | 200 |
| 1     | 300           | 200 |
| 2     | 300           | 200 |
| 3     | 400           | 267 |
| 4     | 400           | 267 |
| 5     | 500           | 333 |
| 6     | 500           | 333 |
| 7     | 600           | 400 |
| 8     | 600           | 400 |
| 9     | 600           | 400 |

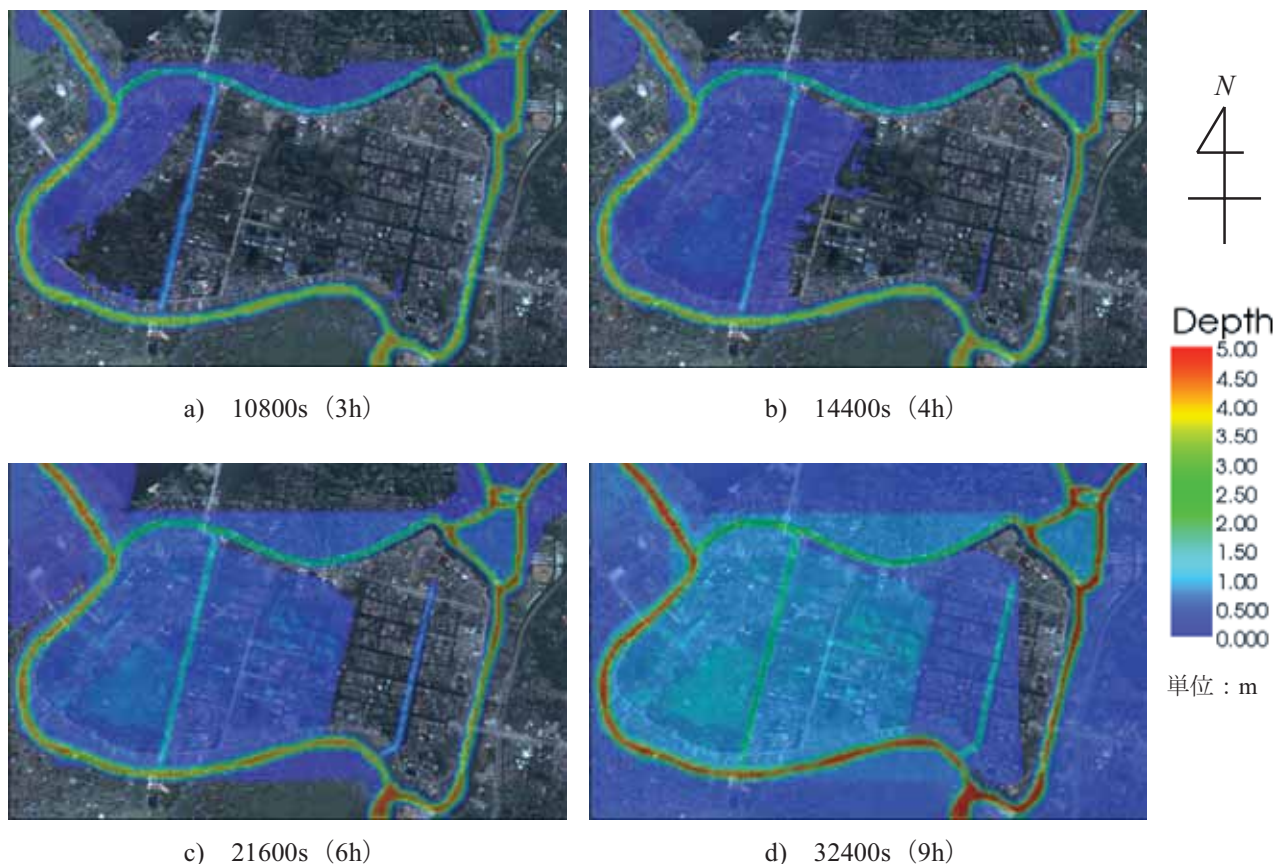


図3 アユタヤ中洲内における洪水解析結果

合を想定した条件で行った。CaseC)は、南西に位置するシーナカリン公園および農地の約400,000m<sup>2</sup>を標高2.2m分下げ、遊水地とした場合を想定している。CaseD)は、アユタヤ中心部全体を3mの輪中堤で囲った場合である。

## (2) 結果と考察

図4に、9時間後のすべてのケースの解析結果について示す。また、結果を比較しやすいように、浸水深さ1.5m以上を赤色、0.5m以下は表示しないように設定した。

南北をかける2つの水路を掘り下げた場合（CaseA）では、西側の南北にかかる水路に水が溜まることで、対策なしと比較して中央および東側の浸水が低く、おおよそ0.4mほど浸水が軽減された（図4の(b)）。水路の全長は約2.2kmなので、水路幅を拡大すればするほど貯水能力は上がるが、下流への流下能力が低いままでは効果が発揮できない恐れがある。しかしながら、アユタヤ王朝時代（約500年前）のように水路を張り巡らし有効活用することは、防災の意味だけでなく観光面でもメリットがある可能性もある。

一部の遺跡をかさ上げした場合（CaseB）では、かさ上げを行った場所以外では浸水していることが分かる（図4の(c)）。そのため、部分的に3mかさ上げを施すことは効果的であることが分かるが、文化遺産地域における地盤内の状態（地質や強度等）を把握しなければならない。しかし、浸水に伴う遺跡の劣化と腐食を早急に軽減し保護する手法としては、



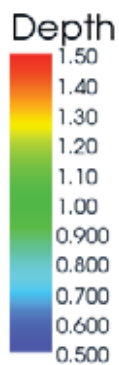
(a) 対策なしの洪水解析



(b) 南北をかける2つの水路を掘り下げた場合 (CaseA)



(c) 一部の遺跡をかさ上げた場合 (CaseB)



単位：m



(d) 南西の一部を遊水地とした場合 (CaseC)



(e) アユタヤ中心部全体を輪中堤で囲んだ場合 (CaseD)

図4 対策時のアユタヤ中洲内における洪水解析結果 (9h)

現実的で即効性のある対策である。

南西の一部を遊水池とした場合（CaseC）における結果では、対策なしと比較して0.2mほど遊水池とした場所が、周囲への浸水被害を軽減する働きを示している（図4の(d)）。また、河川の南および南東のコンターを見て、比較的青色を示していることから、河川の南側への流出量が僅かではあるが、押さえられていることが分かる。つまり、一時的に遊水池に氾濫水を集めることで、本解析における流入量であれば河川および他の地域への流出をも軽減する効果を発揮した。しかし、本解析以上の流量を与えると東側の地域も浸水状態になることは容易に想像できる。

アユタヤ中心部全体を輪中堤で囲んだ場合（CaseD）では、アユタヤ全体を3.5mの輪中堤で囲むことで、中洲内に水が入り込まないことが確認できた（図4の(e)）。しかし、全長12kmの輪中堤を必要とするため、非現実的な要素も多いのが現状である。

以上のことから、世界遺産地における本提案の中では、南西の遊水池の活用が最も良いものとする。一度洪水が発生すると、アユタヤ周辺の河川の流下能力は著しく低下し、河川の水位が上昇することから、水位が低下するまでの一時的な期間、どこかに貯水する必要がある。また、シーナカリン公園は遺跡群とは離れた位置にあり、さらに標高も低いことから、アユタヤ遺跡群の浸水被害を低減させることは可能だと考える。水路に関しては、常時は南北に水を流し、水位上昇時は北側の水門を閉鎖し、南側のみ開放する。そうすることで、中洲内に河川水が流入した場合、水路が河川に排水する機能として有することが可能ではないかと考える。しかしながら、南側を開放することで河川水位が上昇した場合に、流入口としての役割を果たしてしまう可能性が懸念されることから、今後、詳細な解析が必要である。

#### 4. おわりに

本論文では、まず2012年11月と2013年2月の計2回行った調査で得られた知見を示した。また3つの川に囲まれた中洲内のエリアを対象とし、洪水解析を行った。さらに、今後の対策に向けた提案として4条件における解析を行い、結果について検討した。以下に、今回得られた知見について述べる。

- 1) 現地調査結果より、煉瓦の劣化や腐食が進行すると構造物の傾きが進行する可能性が高いと言わざるを得ない。また、地盤沈下の原因の追究および対策を講じる必要がある。
- 2) iRICを用いた洪水解析結果より、アユタヤ中洲内においては北西から南東にかけて順に洪水氾濫することが分かった。また、東部はほとんど浸水しない結果が得られた。さらに、各狭窄部（北東および北西の河川の合流部分）においては常に水位が高い状態であることも分かった。
- 3) 氾濫洪水対策の提案として、アユタヤ全土を輪中堤で囲むことや、一部かさ上げについて効果が見られた。水路を掘り下げることで、中洲内の中央部の浸水の深さが軽減されることも分かった。また、南西の一部を遊水池にした場合、水路の結果同様に浸水の深さが軽減されることが分かった。

本解析では簡易的に入手した標高データを用いたことから、洪水氾濫時の傾向については検証できた。しかし、今後より詳細な提案を行う上では、より詳細な標高データを用いた解析が必要である。さらに、浸水被害により地盤内の地下水位および強度等の把握を行い、不同沈下の現象の把握および地盤と構造物の変状との関係について検討していく必要がある。

**謝辞：**本研究は、グローバルCOEプログラム「歴史都市を守る『文化遺産防災学』推進拠点」の支援を受けた。また、立命館大学大学院理工学研究科の速水智氏には、解析におけるアドバイスを頂いた。ここに、記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 檀上徹，上野祐生，谷口仁士，深川良一，里深好文：世界遺産アユタヤの洪水調査ならびに文化遺産防災へ向けた提案，歴史都市防災論文集，Vol.6，pp.329-334，2012.
- 2) 長谷川哲也・畑中重光・PRINYA Chindapasirt・THANUDKIJ Chareerat：タイ国アユタヤ遺跡の劣化調査と修復方法の提案，日本建築士学会大会学術講演会研究発表論文集，pp.191-194，2006.
- 3) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について，土木学会水工学論文集，Vol.47，pp.643-648，2003.