

考古学発掘作業の現場でのデータ収集用としての 非接触式三次元撮像装置の可能性の検討

アンコール遺跡群のバンテアイ・クデイ寺院でのトレンチ調査に絡んで

京都府立大学助教授 菱田哲朗

上智大学アジア人材開発センター共同研究員 前田剛男

はじめに

彫像などが穴に埋められている場合、それに携わる人の意識をどのように復元すればよいのだろうか。これを考える直接的な手掛かりは、遺物の出土状況にある。像は整然と置かれたのか、でたらめに投げ入れられたのか、あるいは像はすでに破壊されていたのか、穴の中で壊れたのか。また穴はどのように埋められたのか、地表面はどのようになっていたのか。さらには像以外に埋められたモノはないのか。埋める最中に、あるいは埋めた後に何らかの儀式は行っていないのかなど観察し検討すべき課題は実に多い。

発掘に従事する研究者は、同時代の、あるいは後生の研究者が提起する質問に答えられるように、入念に記録を取りながら発掘作業を進めていかなければならない。

現在、私たちは、このような基本に従って、アンコール遺跡群の一つバンテアイ・クデイ遺跡 (Banteay Kdei) における廃仏の発掘作業を進めて来ている。本稿では、その過程で、今回、初めて実施した発掘現場での発掘された遺物、遺構の非接触式三次元撮像装置 (Non-Contact 3D Digital scanner) による撮像結果を紹介し、その利用可能性に考察することにする。

1. バンテアイ・クデイでの発掘作業

上智大学アンコール遺跡国際調査団は、カンボジア人自身によるアンコール遺跡群の修復・保存を目的に、カンボジア人の実地研修も行ってきている。その一環として、図1に示すように、小建物 D11 から順次トレンチを掘り、発掘作業を進めていたところ、大量の廃仏を発見した。長年にわたる地道な活動と幸運の賜であった。その埋蔵

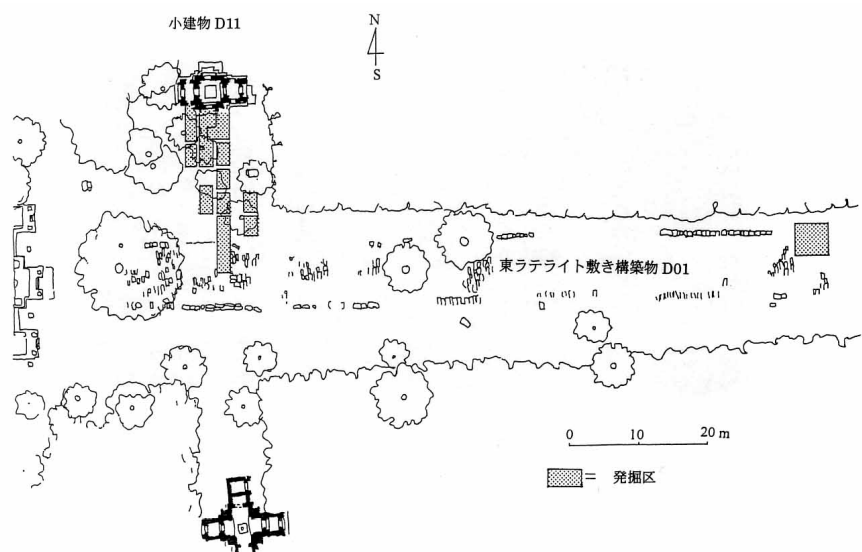


図1 バンテアイ・クデイ遺跡 大量廃仏発掘地域

状態は図2に示すような状況だった。¹ さらに、バンテアイ・クデイ遺跡周辺の遺物、遺構を含む総合的なGIS（地図情報システム）を構築するため、トレンチ調査で発掘された遺構や遺物などの埋設状況が分かるように基準点から一定の深さごとに図面を作成し、それらと関連する写真データとともに整理し、リンクする作業も進められている。²

2. これまでの非接触式 3次元撮像装置の適用実績と成果

一方、上智大学アンコール遺跡国際調査団では、産業用としては利用されている非接触式 3次元撮像装置（Non-Contact 3D Digital Scanner）の技術の可能性に着目し、発掘された遺物を中心に、撮影を行ってきており、その結果、考古学の研究ツールとして非常に有効で、今後、さらに多くの適用分野が開拓できるということを実証してきた。同時に非接触式三次元撮像装置の原理や、撮影したものから、具体的に、その三次元画像をコンピュータ上で作成するプロセスなどについても紹介した。³

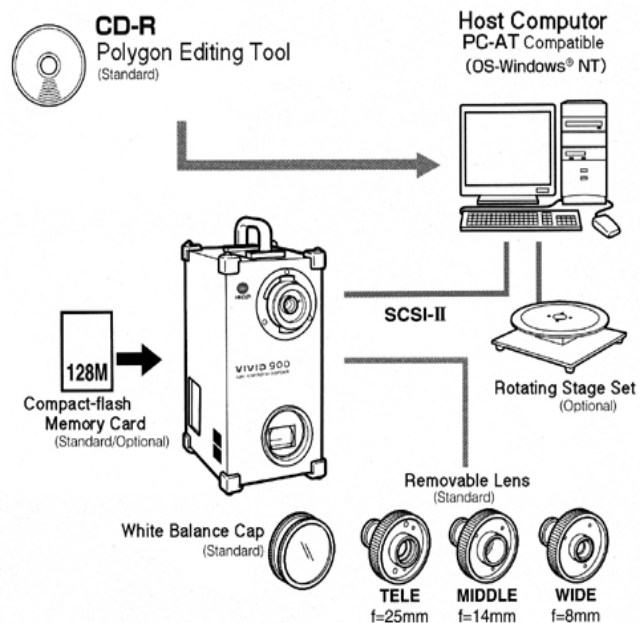
これまで開発してきた非接触式三次元撮像装置の適用分野は以下の通りである。

- | | |
|--------------------|--|
| 1. 三次元寸法測定・形状分析 | 仏像（バンテアイ・クデイ発掘） |
| 2. 破断・分断されたものの形状合成 | 仏像（バンテアイ・クデイ発掘） |
| 3. 残存部分からの全体形状の推定 | 壺（バンテアイ・クデイ発掘） |
| 4. 碑文や浮き彫りの明確化 | 苔むした浮き彫り（バンテアイ・クデイ遺跡）
判別が難しい碑文（APSARA 保存事務所保管） |
| 5. 文化遺産への一般の関心の喚起 | 乳海攪拌（アンコールワット遺跡の浮き彫り）
東洋のモナリザ（バンテアイ・スレイ遺跡の浮き彫り） |

なお、ここで使用した機材とシステム構成などは以下の通りである。

使用機材とシステム

- ・非接触型三次元計測器:
KONICA MINOLTA
VIVID 910
- ・三次元データ処理ソフト:
Rapid Form INUS
- ・コンピュータ
Compaq EVO N600c
Compaq EVO W6000



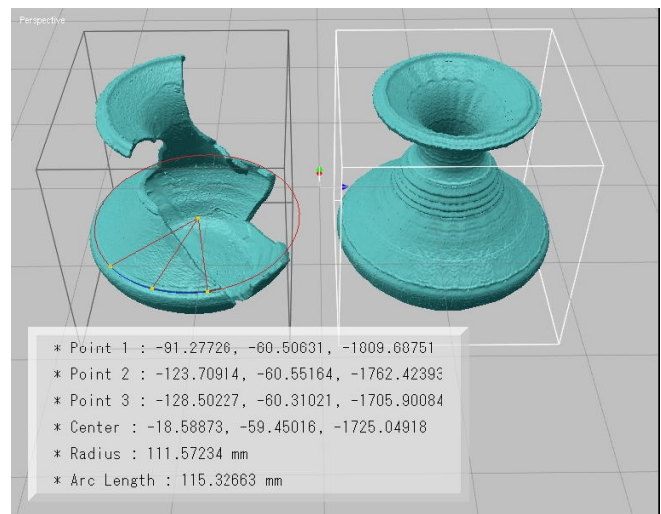
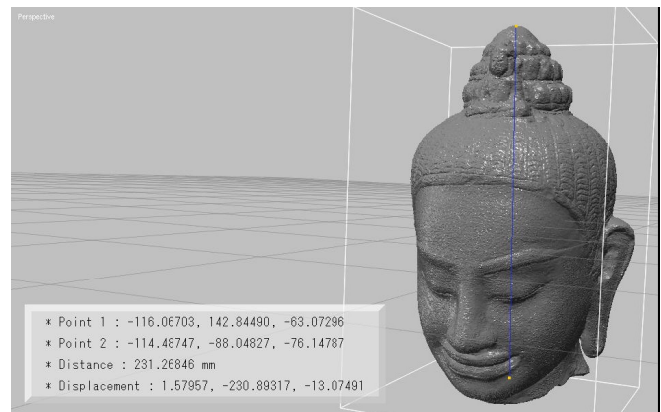
3. 非接触三次元撮像装置とは——過去に行った撮影結果の一例

非接触三次元撮像装置という、特殊なものと思う人がいると思うが、簡単に言えば、対象とする物体の空間的位置——その高さ、幅、奥行きを含む寸法のデータを計測する技術で、実を言えば、人間も生まれながらして、ある程度、同じような能力を備えている。だから、離れた複数の物体について、あちらの方が大きいとか、こちらの方が手前にあるなどと言うことができるのである。

しかし、残念ながら、人間の目は物体の寸歩や位置を「相対的」にしか把握できない。物体に触れず非接触で、これらの「絶対値」の情報を計測できるのが、最近、脚光を浴びている非接触三次元撮像装置と呼ばれるものである。

いろいろな方式のものが登場してきているが、その中でも、従来から使っているコニカ・ミノルタのVIVIDという装置は、その動作原理が人間に近い。人間は2つの目から入る左右差のある情報を、原理的には「三角法」に基づいて処理し、物体との距離感、物体の大きさや位置を認識している。それを同じことをレーザー光線、2つのレンズ・システム、マイクロプロセッサを組み込んだ処理システムを使ってコンパクトにまとめているのがVIVIDである。

「三角法」の原理に従えば、「目の間隔」を大きくすれば、精度は高まるが、装置は大きくなるため使いにくいという問題がでる。その妥協の産物なのだが、2メートルぐらいまでの物体の形状データを1mm以下の高精度で得られるという性能は、当面の目的を考えても十分だと思う。いろいろな対象物の撮影に挑戦したが、とりあえず満足できる成果を得られている。



4. 発掘現場と遺構への拡大

もっとも、先に説明した非接触式三次元撮像装置にあっても、ハードもソフトもすべて発展途上であり、現実には、2mぐらい大きさの対象物を1mm程度の高精度で測定しようと思うと、撮影後のデータ処理まで含めると、相当の熟練と根気が求められる。

精度を問わなければ、100mぐらいの大きさの対象物を比較的簡単に測定できる非接触三次元撮像装置が存在するので、それを利用することもできる。しかし、精度はまだ2cmぐらいであり、それを使って苦勞して三次元画像を作っても、専門家の評価に耐えることはできないだろう。ともかく、現状では、直ちに専門家の求める、専門家が行う「実測」を上回るような成果が得られないものの活用は難しいと思う。

考古学の「実測」で精度に、非接触式 3 次元問題になるのは、大きく分けて二分野がある。壺だとか仏像などの「遺物」と、「遺構」の二つの分野だろう。我々は、これまで蓄積した「遺物」での非接触式三次元撮像装置の利用経験を踏まえて、バンテアイ・クデイ遺跡の発掘現場と発掘された遺構の非接触式三次元撮像装置による撮影を試みた。

考古学で行なう発掘現場での実測の目的は、「発掘し、遺物や遺構が埋設されている状況を明らかにし、それらの調査を行い、そして最後に、それらの元の状態を復元できるような図面（平面図、断面図）などを含む資料を作成すること」である。

現在は、物差しや巻き尺などを使って長さや距離を測定し、それで平面図や断面図などを描いている。大変な注意力と根気と努力が要求される（写真1）。しかも、どう頑張っても、それを実際に行う人の技量とか主観に左右されるところが大きく、大事な情報が見落とされる危険からは免れない。いので厄介である。

写真などを併用しても、それらの図面から正確な発掘現場や遺構の復元を行おうとすれば、間違いなく大きな障害にぶつかると思った。そこで基礎となる現場の詳細な状況把握について非接触式三次元撮像装置の適用を試みた。



写真1

5. 発掘現場の遺構の非接触式三次元画像撮影

遺物の非接触式三次元画像撮影はいろいろやってきたが、発掘現場で、まだ埋まった状態の遺物と、その埋まっている周囲の状況とを併せて、そっくり非接触式三次元撮影で取り込むとなると、勝手に違う。足場、電源、照明など厄介な準備作業が多くなる。

しかし、これまでの物差しや巻き尺を使う方途と比べて、はるかに高精度で、しかも短時間で、遺構と、そこに埋まっている遺物——掘り出すと形が崩れてしまうようなものを含め、その情報を一括して取り込むことが出来れば、考古学での遺構計測が飛躍的に進歩するだろうということで、非接触式三次元画像撮影装置（VIVID）によって、バンテアイ・クデイ遺跡の中に掘られた 2m×6m の遺構（写真2）の形状計測を試みた。



写真2

別方式の非接触式三次元画像撮影装置によって遺構計測を行った例がいくつか報告されているが、遺構の形状計測だけにとどまり、遺構の中に存在する遺物については、別に人間が手で「実測」し、そのデータを貼り付けるといったことが行われている。⁴

しかし、VIVID であれば、一回の範囲は狭いが、解像度とのバランスが良く、遺構と同時に、その中での遺物の位置特定も可能だろうと考えた。撮影条件、撮影結果、課題などは以下の通りである。

1) 撮影条件

レンズとしては、遺物が埋まっている部分などを除いて、すべて VIVID の交換レンズ群として用意されているもののうち、もっとも 1 回の撮影範囲が大きい WIDE レンズを使用した。VIVID と対象との距離は 150cm~300cm の距離で撮影を行った。この距離は 1 回の撮影範囲と精度とのトレードオフの関係にあるが、屋外撮影などではそれだけでは決められない。

撮影現場の環境では、300cm を越えると、日差しの関係からレーザー光の強度を最大にしても計測が上手く出来なかった。反射レーザー光の増幅レベル、利得 (Gain) を大きくすれば、反射レーザー光を捉えることは出来るのだが、ノイズが大きくなりすぎて、実際に耐えうるデータは得られなかった。

ともかくカンボジアの屋外の日中の日差しは強い (写真 3)。この日差しの遮蔽方法を改善したり、夕暮れか夜間に撮影したりすれば、現在の機材でもさらに良い撮影結果が得られるだろう。



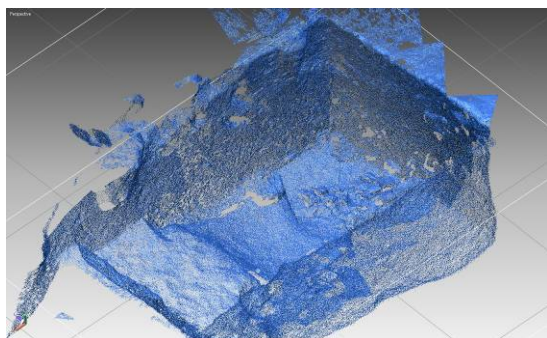
写真 3

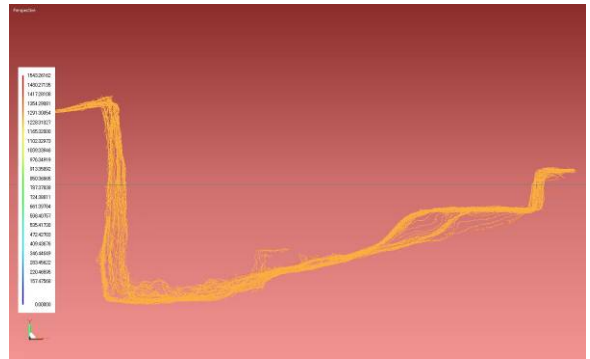
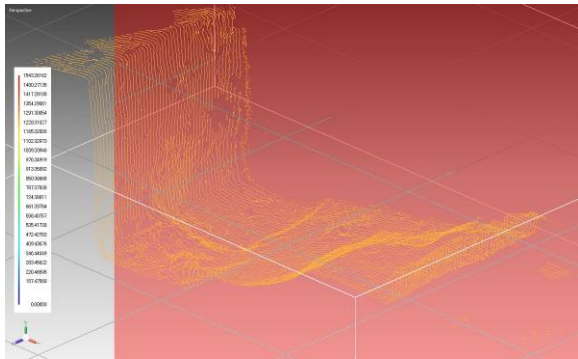
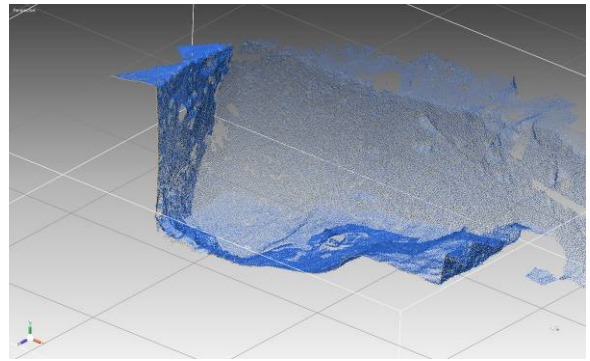
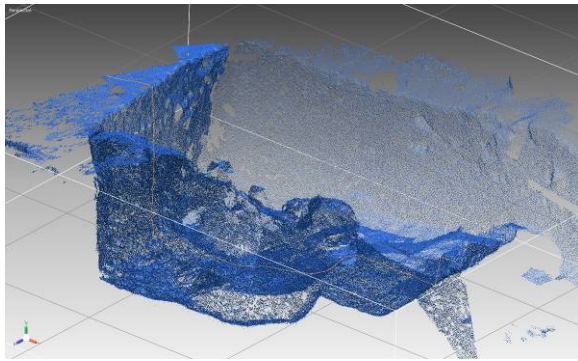
なお、対象との距離を 350cm 以上にすると、ノイズ以外の問題も発生する。照明状態の良いところで撮影を行ったが、これだけの距離をとると、現状の交換レンズ群では、画像の歪みが目立ってくる。1 枚だけであれば良いが、それを重ねたり、つなぎ合わせたりする画像処理には実用的ではない。交換レンズ群の一層の充実が望まれる。これらの経験を踏まえて装置メーカーの技術者と協議しながら最適な撮影方法を開発する必要がある。

2) 撮影結果

撮影条件のテストための時間を含め、遺構の非接触式三次元画像撮影に要した時間は約 3 時間だった。そして、これまでの物差しや巻き尺を使う方途と比べて、はるかに高精度かつ短時間で、遺構と、そこに埋まった状態の遺物の情報を一括して取り込み、高精細な形状分析を行うことができた。我々が使用した非接触式三次元撮像装置 (VIVID 以外にも、様々なタイプの非接触式三次元撮像装置はあるが、屋外のしかも限られたスペースでの大小様々な石質の遺物の撮影には、とくに VIVID の機動性が非常に有効だったことになるだろう。

完成した遺構の三次元画像は以下の通りである。





遺構および遺構に埋まっている遺物を含め、十分に現在の「実測」に代替ないし、それを補完する画像が得られた。この三次元画像から、任意の2地点間の距離を計測するとか、任意の部分の断面形状を描かせるとか、等高線図を描かせるとか、ある部分をクローズアップして観察するとか、様々なことが、簡単にできる。もちろん、それらをハードコピーとして印刷することもできる。

3) 課題

最大の課題は、撮影した何10枚の個々の画像をつなぎ合わせたり、重ね合わせたり、ソフトウェアを使ってコンピュータ上で処理するには、現在のところ、かなりの時間を必要とすることである。数時間、コンピュータが計算し続けることなど日常茶飯事である。やっけていて、これが最も辛い時間だが、この技術は日進月歩しており、数年のうちには、数時間で出来るようになり、大幅に作業が楽になることを期待している。

また日差しのカンボジアの屋外での遺構の撮影に関わる照明方法とか交換レンズ群に関する問題についても、すでに前述したので、ここでは遺構の計測において、とくに問題となる3) - 1. 土層と3) - 2. 遺物の出土状況について述べる。

3) - 1. 土層 (写真4)

土層は色調や粒度、含有量などで判断されるが、現状の技術では、そこまで高精度に調査区壁面の三次元画像を得ることは出来なかった。1回の撮影範囲が最も小さい TELE レンズを使用して距離 90cm で計測すると、粒子の違いを確認できる画像が得られたが、これと同じ作業を遺構の内面全体について行うことは、その後のコンピュータ処理を考えると、非現実的で不可能と言わざるを得ない。

ただし、土層の境界がわかるように溝をいれた状態であれば、現状でも十分に VIVID を使って、土層情報を含む遺構全体の三次元画像を撮影することができる。



写真4

3) - 2. 遺物の出土状況

遺物の出土状況については、どの程度の精度で出土状況の遺物を計測するかによるが、遺物それ自体は掘り出した後、再度の高精度に計測できるし、ポイントが遺構の形状と出土状況の大まかな把握にあることを考えると、1回の撮影範囲が大きい WIDE レンズでも十分すぎる画像が得られた。この経験に照らすと、さらに WIDE レンズより1回の撮影範囲が大きく、かつ歪みの少ない交換レンズ群が提供され、レーザー光の強度とノイズ処理の問題が改良されれば、VIVID によって遺構の計測時間は、一気に短縮されるものと期待される。

なお、これまで VIVID での撮影経験がない遺物が存在したために、これ以外にも、いくつかの問題にぶつかった。その内容は以下の通り。

ガラス質、例えば黒曜石などの遺物の撮影

いろいろな撮影条件で撮影を行ったが、現在の実測に代替できるデータを得ることはできなかった。原因は、ガラス質の遺物からの反射光である。VIVID では弱いレーザー光線で撮影対象物を走査（スキャニング）し、その反射光をレンズで取り込み、画像処理を行っている。しかし、ガラス質の遺物の場合には、その反射光が強くなりすぎて、問題を起こすのだと思われる。照明方法を含め、今後、装置メーカーの技術者などと協議しながら最適な撮影方法を開発する必要がある。

小さい黒曜石の遺物の撮影

同じガラス質であっても、黒曜石の場合は、他の遺物に比べて極端に小さいものが多く、VIVID の交換レンズ群として、現在の TELE レンズより狭い撮影範囲のレンズが提供されれば、問題は回避できるようにと思われる。照明方法を含め、この点についても、今後、装置メーカーの技術者などと協議しながら最適な撮影方法を開発する必要がある。

砂岩質の遺物の撮影

鑿^{のみ}の跡がわずかしこ残っていらいものが多く、その微妙な鑿の跡までも撮影しようとして、精度を上げて撮影したところ、砂岩粒子が邪魔をして計測できなくなるという問題にぶつかった。そのため、ある程度、撮影精度の点で妥協せざるを得なかった。VIVID には、綺麗な撮影画像を得るため、自動的に反射光のノイズを除去する機能がある。これは便利なのだが、この機能を利用すると、砂岩粒子をノイズとして扱い、そのため対象遺物の表面の本来の凹凸までも消される。砂岩粒子の大きさや付着物の特性などに応じて、撮影条件を工夫し、整理する必要がある。照明方法を含め、ノイズ除去レベルの調節などについて、今後、装置メーカーの技術者と協議しながら最適な撮影方法を開発する必要がある。

おわりに

考古学の調査技術は日進月歩であり、常に古い技術と、新しい技術が混在しているのが現状である。ただ、その目的は、客観的な情報をいかに多くの人々の間で共有できるようにするかという一点に絞られると考える。調査現場をいつでもどこでも——といってもモニターの中ではあるが——再現できるようにすることは、調査記録の究極の目的といえる。今回試みた非接触式三次元撮像装置がそのための有力なツールになっていくことは間違いないだろう。

¹ 「仏像出土の発掘調査とその意義 D11 建物発掘調査 (30 次, 32 次, 33 次) および追加調査 (36 次, 37 次)」

丸井雅子・上智大学 COE プロジェクト研究助手 「カンボジアの文化復興 19」(2002 年 12 月) P.49 - 64

² 「バンテアイ・クデイ寺院を中心とした GIS による空間情報の統合」 菱田哲郎・京都府立大学助教授 「21 世紀 COE 国際シンポジウム：文化遺産とアイデンティティと IT (情報技術)」(2004 年 3 月、12、13、14 日)

³ 「仏の三次元デジタル画像 廃仏等の三次元デジタル画像—その試みと示唆されたこと」 前田剛男・上智大学共同研究員 「カンボジアの文化復興 19」(2002 年 12 月) P.143 - 161」

⁴ 「274 体の廃仏の 3 次元デジタル測量」前田剛男・上智大学アジア文化研究所共同研究員 「21 世紀 COE 国際シンポジウム：文化遺産とアイデンティティと IT (情報技術)」(2004 年 3 月、12、13、14 日)

「274 体の廃仏の 3 次元デジタル画像撮影技術の可能性を探る」 前田剛男・上智大学共同研究員 「カンボジア研究会」および「第 5 回 IT 技術と文化遺産研究会」2004 年 6 月 14 日