

アメンヘテプ3世王墓埋葬室壁画のデジタル化における撮影方法の検討

犬井正男^{*1}、佐藤真知子^{*1}、菊地敬夫^{*2}、東吉彦^{*3}、齋藤大輔^{*4}、吉村作治^{*5}

Photographing for Digitizing the Mural in the Royal Tomb of Amenophis III

Masao Inui^{*1}, Machiko Sato^{*1}, Takao Kikuchi^{*2},
Yoshihiko Azuma^{*3}, Daisuke Saito^{*4}, Sakuji Yoshimura^{*5}

We are attempting to digitize the mural in the royal tomb of Amenophis III, one of the pharaohs of ancient Egypt. In this paper, we describe methods and conditions to shoot the mural. We discussed two methods, the slide method and the swing method, and adopted the later. We also discussed many photographic conditions, camera, lens, taking distance, taking width and height, etc., and determined these conditions. And we photographed the mural under these conditions.

1. はじめに

エジプト・ルクソールの王家の谷に古代エジプト王アメンヘテプ3世の王墓があり、幅 8.2m、奥行き 15.4m、高さ 3.1m（一部 4.7m）の埋葬室の壁に「アムドゥアト書」が描かれている。この王墓埋葬室の平面図と立面図を図1に示す。多くの研究者が活用できるような環境で公開することを念頭に

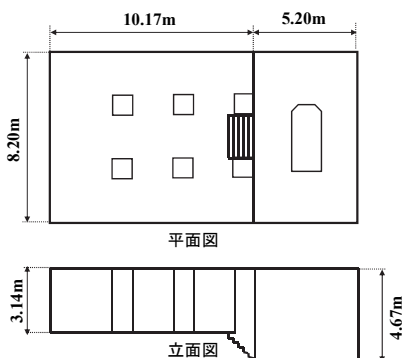


図1 アメンヘテプ3世王墓埋葬室の平面図と立面図

置き、ディスプレイ上に実寸大で表示できるように、この壁画のデジタル画像化を行っている。

この研究全体の流れを図2に示す。デジタルカメラで壁画のある範囲を分割して撮影し、これらの撮影画像すなわち小画像から接合によって中画像を作成する。さらに、これらを接合し東西南北の各壁面ごとに大画像を作成し、これらの大画像をズーム画像化し、拡大縮小と移動が自由にできるようにし、インターネット上で公開していく予定である。本報告では、最初の撮影に関する検討とそれらの結果を述べる¹⁻⁵⁾。

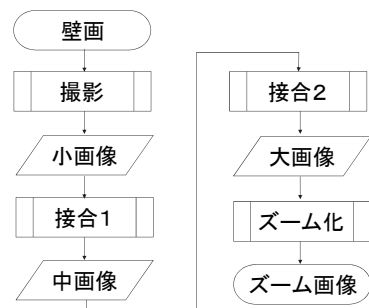


図2 研究全体の流れ

*1 東京工芸大学工学部メディア画像学科教授

*2 サイバー大学世界遺産学部客員准教授、早稲田大学エジプト学研究所招聘研究員

*3 東京工芸大学工学部メディア画像学科講師

*4 芝浦工業大学工学部電気電子学群電気工学科助教、東京工芸大学工学部メディア画像学科客員研究員

*5 早稲田大学名誉教授

壁画の撮影は3回行った。1回目は、まとまった撮影時間が確保できかつ気温もそれほど高くない2009年2~3月に行った。2回目は、照明と測量方法を変え、翌2010年2~3月に行い、壁画のほぼ半分を撮影した。3回目は2011年2~3月に行く予定であったが、エジプトでのムバラク政権の崩壊で政情が不安定になり延期した。2012年2~3月はユネスコの修復が行われていたため、残りの半分を撮影する3回目は2012年8~9月に行った。1回目と2・3回目では、照明と測量方法が異なる。照明は、1回目はタングステン電球であったが、均一に照明することができなかつたため、2・3回目はストロボにアンブレラを着けて照射した。測量は、1回目はチェッカーボードを使用したが高精度が出なかつたため、2・3回目は19×19点のレーザーを照射した。この報告では、主として2・3回目の撮影条件について述べる。

2. 撮影方式

壁画に対して垂直にむけたままカメラを横方向に移動して撮影する方法をスライド式 (slide method) と呼ぶことにする。これに対して、カメラの位置を三脚で固定して上下左右にカメラの方向を変えて撮影する方法を首振り式 (swing method) と呼ぶことにする。これら両方式の検討を行った。

1) 予備調査と模擬壁面の作成

2008年3月に行った予備調査では、図3に示すように、机と台を用いて高さを調節し、その上に光学レールを載せ、光学レールにカメラを縦位置でセ



図3 予備調査での机と椅子を用いたスライド式

ットするレールキャリアを載せ、横方向に一定間隔でカメラを移動させ、壁画を撮影した。その後、高さを変えて同じように撮影した。この方法、つまりスライド式で撮影した画像はパノラマ写真作成ソフト PTGui[®] でうまく接合することができた。

予備調査で撮影した画像からの接合画像に縦横に等間隔の緑色の線を描いたプリントを作成した。プリントの大きさは縦206cm、横162cmで、緑色の線は幅2mmで22.8cm間隔である。このプリントを模擬壁面と呼ぶことにする。模擬壁面を撮影することによって、撮影方式の検討を行った。

予備調査で光学ベンチを用いたが、直径約10mmの高さ調整ねじ部に砂が入り動かなくなつてしまった。砂対策を講じる必要性を感じた。



図4 スタンドにカメラを複数取り付けたスライド式

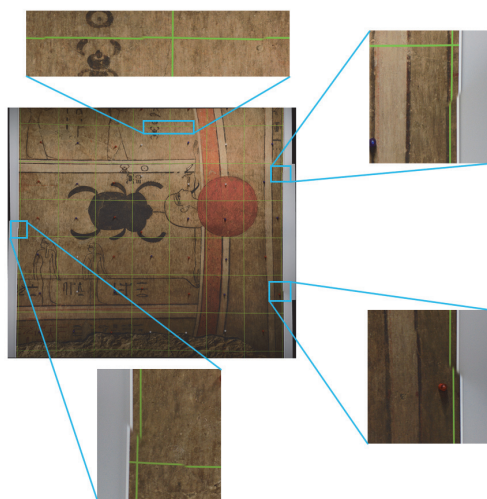


図5 図4のスライド式で撮影した画像からの接合画像及びその一部の拡大図

2) スライド式

予備調査の結果から、スライド式は画像をうまく接合できるが、操作性は非常に悪かった。そのため、図4に示すように、1本のポールに複数のカメラを取り付け、ポールを横方向に移動しながら撮影できるようにした。ポールの2本の脚のキャスターをレールに載せて移動すれば、壁画との距離を一定に保つことができる。

この方法で模擬壁画を撮影し、撮影画像からのPTGuiによる接合画像を図5に示す。一見うまく接合されたかのように見えるが、図5の拡大図で分かるように、緑の線が不連続になっており、接合がうまくいっていない。レンズやカメラの個体差が原因かと考え、1台のカメラとレンズを用いて高さを変えて何回かスライドさせて撮影したり、カメラが壁画に垂直になるように厳密な調整を行って撮影したが、これらの画像からもうまく接合できなかった。また、現場は床が平面ではなく、水平に移動させることが困難であるため、現場での作業性も重視し、スライド式は断念した。

3) 首振り式

通常のパノラマ写真はこの方法で撮影されている。精度良く自動的に首振りを行うために、図6に示すようにそれぞれ縦方向と横方向に回転するステージを2台組み合わせたパノラマ写真自動撮影装置を製作した。装置は上下方向に±16度、左右方向に±360度、それぞれ0.002度と0.004度の分解



図6 製作したパノラマ写真自動撮影装置
カメラと三脚の間にあるのが2台の回転ステージで、テーブルの上にあるのがコントローラー

能で回転させることができる。この装置をプログラムによってコントロールし、縦横の方向を自在に変えて自動的にシャッターを切り撮影する。この装置を用いて撮影したところ、図7に示すように、うまく接合できた。

後日、市販されているギガパンの存在を知った⁷⁾。これを用いると簡単にパノラマ画像を撮影し、ズーム画像にすることができる。しかし、一体型であるためリモートコントロールができず、高い位置にセットしたときに撮影範囲の設定ができない。また、精度と再現性は不明である。

4) 首振り式で撮影した画像の接合精度

首振り式で模擬壁画を撮影した画像から接合した中画像の精度を調べた。

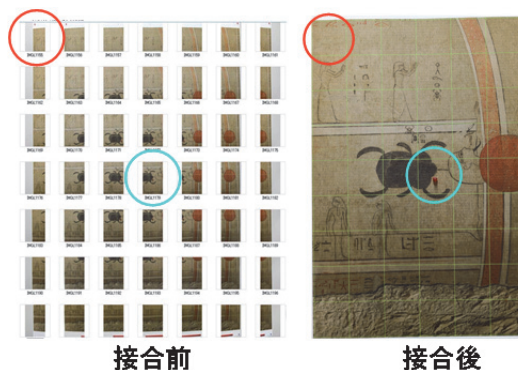
図7左に示す首振り式で撮影した画像では、赤丸で示した左上の画像は、歪んでおり、中央部と比べると小さくなっている。左上部と中央部の接合前後の画像を図8に示す。接合後の画像では大きさと歪みがどうなっているかを定量的に調べた。

このとき、2つの尺度を定義した。ひとつは、次式で定義した倍率である。

$$\text{倍率} = \frac{\text{周辺部の四辺形の平均長さ}}{\text{中央部の四辺形の平均長さ}} \times 100(\%)$$

もう一つは、次式で定義した正方率である。

接合前後のそれぞれの値を表1,2に示す。接合後、中央部の正方率はやや悪化しているが、それ以外の値は良くなり、誤差は1%未満であった。これらの



接合前

接合後

図7 首振り式で撮影した画像の接合

値は、エジプト学研究者が利用するには十分な精度であることが分かった。

3. 撮影条件

以下に示す撮影条件を検討し、それらの条件で模擬壁画を撮影することを繰り返し、最適と思われる条件を決めた。

・カメラ

35mm 版デジタル一眼レフカメラで、研究開始当時に最大画素数(2100 万画素)であった Canon EOS 1Ds MarkIII を用いることとした。同じイメージセンサーを使っている Canon EOS 5D MarkII を予備機とした。

・レンズ

焦点距離の長いレンズを使い、撮影距離を長くし、被写界深度を深くし、歪みを少なくしたいが、撮影距離が長いと柱で遮られ隣接する中画像とのオーバーラップが少なくなり、大画像への接合が困難となる。

焦点距離 100mm から 200mm までの単焦点レンズ数本でテストしたところ、最も歪曲収差が小さかった Canon EF 180mm F3.5 Macro USM を採用した。

・撮影距離

種々の画像処理を行うため、最終画像の 1 画素が撮影画像の 2×2~3×3 画素から構成されるようにしたい。

・被写界深度と絞り

採用レンズの最大 F 値は 32 である。絞るほど被写界深度は深くなるが、解像力が劣化する。撮影距離と撮影幅とも関連し、総合的に決める。

表 1 接合前後の倍率の変化

	接合前	接合後
左上部	90.8(%)	100.6(%)

表 2 接合前後の正方率の変化

	接合前	接合後
中央部	100.0(%)	100.5(%)
左上部	93.1(%)	99.9(%)

・撮影幅

撮影距離と絞りとも関係する。また、中画像のオーバーラップ率も考慮する必要がある。

・撮影画像の横方向オーバーラップ率

初期(撮影 1・2 回目)には 1 枚失敗しても 1/3 以上オーバーラップするように 2/3 以上にしたが、失敗することがなかったため撮影 3 回目は 1/3 以上とした。

・横方向の撮影枚数

撮影幅と横方向オーバーラップ率から決まるが、中央でカラーチャートを撮影するため、横方向の撮影枚数を奇数とする。

なお、前述したように横方向オーバーラップ率を 2/3 以上にすると 1 枚失敗しても 1/3 以上オーバーラップするようになるが、左右の両端ではこれではカバーされない。どこでも 1 枚失敗してもいいようにするには両端で 2 枚撮影しなくてはならない。こうすると、撮影枚数はオーバーラップ率 1/3 のときの倍近くになってしまう。これは現実的でなく、ほとんど撮影に失敗がないため、もし失敗があっても最初から取り直した方がトータルの時間は短くてすむ。

・撮影高さ

パノラマ写真自動撮影装置の上下方向の回転角は±16 度(仕様では±15 度)と小さいため、これが大きな制約となっている。

・撮影画像の縦方向オーバーラップ率

1/2 前後とした。

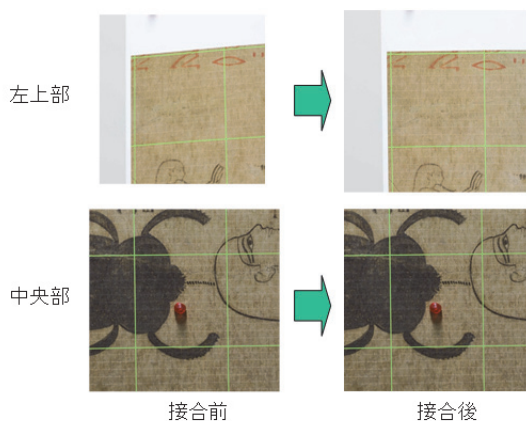


図 8 首振り式で撮影した画像の接合

- ・縦方向の撮影枚数

撮影高さと同方向オーバーラップ率から決まるが、中央でカラーチャートを撮影するため、縦方向の撮影枚数を奇数とする。

- ・中画像の横方向オーバーラップ率

接合した中画像間のオーバーラップ率は、撮影画像と同様に1/3は確保したい。図9に示されているように、埋葬室高床部には6本の柱があり、これが撮影条件を難しくしている。

- ・ストロボ

アンブレラを取り付けたストロボ2灯を左右から壁画に照射する。遠方から照射するには柱が邪魔で、200Wとあまり強くないため、柱の前すなわち壁画から2m弱の位置に設置しなくてはならない。そのため、不均一な照明にならざるを得ないが、それは撮影後に画像処理で補正する⁸⁾。

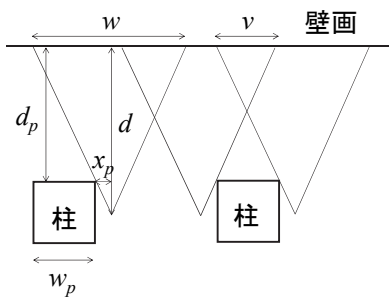


図9 カメラ位置及び撮影範囲の上面図

壁から d 離れた位置から撮影するときの撮影幅 w とオーバーラップ v 。 d_p は柱の壁からの距離、 x_p はカメラの柱からの距離。

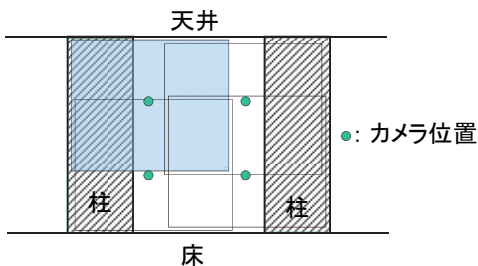


図10 カメラ位置及び撮影範囲の正面図

左上のカメラ位置から撮影する範囲を薄い青色で示している。

これらの条件を検討し、経緯と数値は省略するが、最終的にカメラ位置及び撮影範囲の上面図及び正面図はそれぞれ図9と図10に示すように決めた。これらの図で示すように1地点の上下でそれぞれ幅約3m、高さ約2mの範囲を撮影し、三脚を横に移動していき壁画全体を撮影する。柱を挟む中画像でもオーバーラップ率(図9に示す記号では v/w)は約1/3を確保している。撮影画像の縦方向は、オーバーラップ率を50%弱にし撮影枚数を9枚とした。横方向の枚数は、初期には横方向オーバーラップ率を2/3としたため11枚であったが、その後、横方向のオーバーラップ率を1/3とし7枚にした。このように、1ヶ所では初期には横11×縦9=99枚、その後は横7×縦9=63枚の撮影を行った。

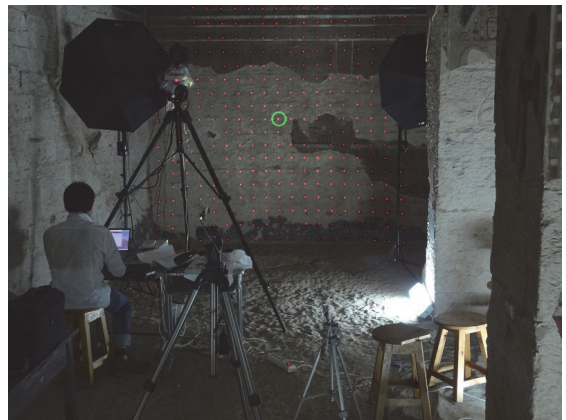


図11 キャリブレーション用の19×19点の赤色レーザーパターンを照射しての撮影



図12 エアパーズ用に作製した空気注入装置

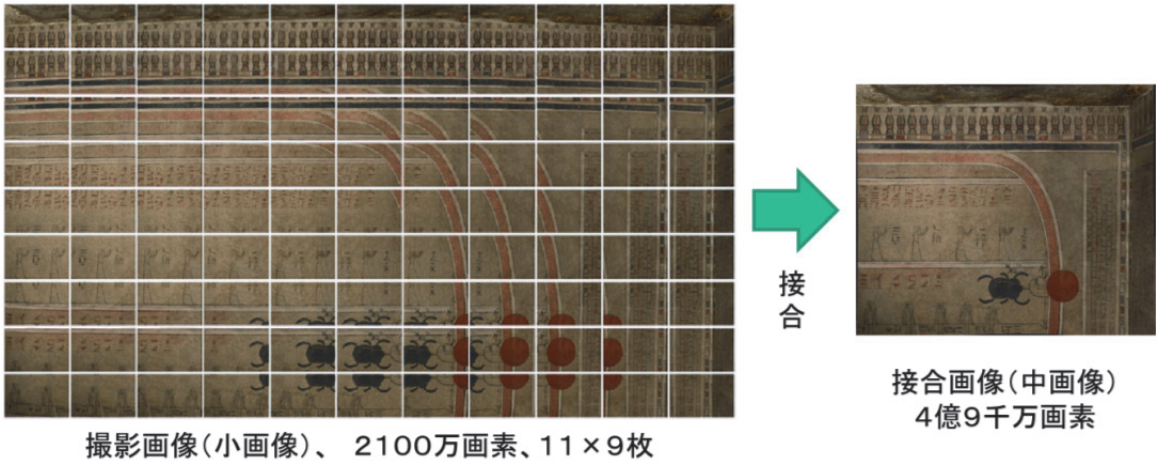


図 13 撮影画像（小画像）から接合した中画像の例

通常の撮影のほかに、壁とカメラの位置関係を把握するために、各撮影位置で、図 11 に示すように、キャリブレーション用に 19×19 点の赤色レーザーパターンを照射した画像を別途撮影し、さらにキャリブレーションパターン上の数点の座標を測量計により測定した⁹⁾。また、壁面上の数点の座標を測量計により測定した。なお、図 11 の緑色の円は、測量時と大画像の接合時にわかりやすいように、19×19 点の赤色レーザーパターンの中央を示すように、緑色のレーザーを照射している。

直接の撮影条件ではないが、以下の 2 点も付記しておく。

・三脚

最大高さ 2.4m の Manfrotto 161MK2B を用いたが、3 本の脚を個別に自由な角度で開くことができ、足場の上で設置場所が限定されたときにその効果を発揮した。

・エアージェ

予備実験でねじに砂が咬んで動かなくなったため、パノラマ写真自動撮影装置の回転ステージのねじ部に砂が入らないようにした。そのためには、回転ステージ全体をビニール袋で包み、この中に空気を常時注入して加圧状態にし、砂を含んだ空気が入らないようにする、いわゆるエアージェを行う。これを行うために、図 12 に示すように、フィルターをついた金魚等の水槽用のポンプをカブトムシ飼育用のフィルターをついた飼育槽にいれ、ここから空気を送るようにした。もちろん飼育槽は密閉する

ように、蓋の内側に厚さ 1mm のスポンジを貼ってある。

4. 撮影

前述の条件で壁画を撮影し、99 枚（2 回目の撮影でのオーバーラップ率 2/3 のとき）または 63 枚（3 回目の撮影でのオーバーラップ率 1/3 のとき）の撮影画像（小画像）を得た。このとき、色補正用のカラーチャートも撮影した。通常の撮影のほかに、中画像から大画像への接合のときに幾何補正を行うために、19×19 点のレーザーパターンを照射しての撮影も行った。これらのドットは測量計で位置座標の測量を行った。図 13 に示すように、小画像を接合し、約 5 億画素の中画像を作成した。中画像の照明補正⁸⁾と色補正¹⁰⁾を行い、補正した中画像を壁面



図 14 棺の蓋をまたいで設置した三脚

ごとの大画像に接合した⁹⁾。このときに、19×19ドットのレーザーパターンを照射した画像を利用した。

前述したように使用した三脚の脚の角度が個別に連続的に変更することができたため、図14に示すように棺の両側においた足場に脚を設置し棺の蓋をまたぐようにカメラを設置でき、威力を発揮した。

1回目の撮影結果から中画像を作成し、それらからズーム画像を作成し、ホームページにした状態を図15に示す。識別名 X_m・n の X は東西南北の略、m は地点番号、n は 1 または 2 でそれぞれ上または下を示す。W34-2 は、西壁の 3,4 番目の地点での下の部分は壁画の剥落部だけなので、遠方から 1 度に撮影した。

中画像を接合して大画像を作成中であり、今後これらの大画像からズーム画像を作成していく。また、3 回目は撮影したばかりで、種々の画像処理を行いつつある。

5. まとめ

アメンヘテプⅢ世王墓埋葬室の撮影方式と撮影条件を検討し、決めた。これらの方式及び条件で撮影し、良好な中画像を作成することができた。

今後、中画像に照明補正⁸⁾と色補正¹⁰⁾を行い、それらを接合して大画像を作成し⁹⁾、ズーム画像にしていく。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金(課題番号20401026)の助成を受けて行われた。また、本研究の一部は文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業による助成を得て行われた。実験に協力してくださった白倉達哉氏、吉原鉄也氏、木村善衛氏に感謝致します。また、模擬壁画をプリントしてくださったセイコーエプソン株式会社に感謝致します。

参考文献

1) 犬井正男、佐藤真知子、稲垣敏彦、菊地敬夫、吉村作治、アメンヘテプ3世王墓壁画のデジタル画像化、日本写真学会誌、第72巻別冊、

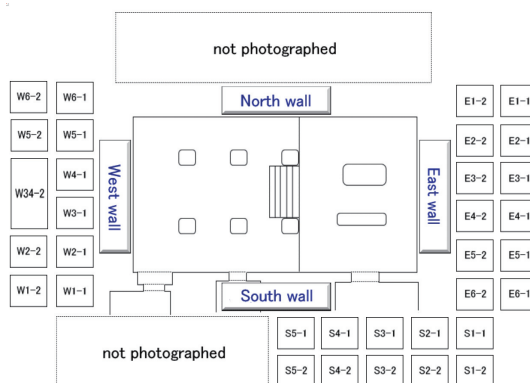


図15 ズーム画像のホームページ

pp.45-46 (2009)

- 2) Masao Inui, Machiko Sato, Toshihiko Inagaki, Takao Kikuchi, Sakuji Yoshimura, Digital imaging of the mural paintings in the royal tomb of Amenophis III, IIEEJ Image Electronics and Visual Computing Workshop 2010 (IEVC2010), 1p-7, Manuscript in CD (2010)
- 3) Masao Inui, Machiko Sato, Masaru Kato, Takao Kikuchi, Sakuji Yoshimura, Zoom-imaging of the mural painting in the royal tomb of Amenophis III, The 31st International Congress on Imaging Science (ICIS 2010), pp.801-804 (2010)
- 4) 犬井正男、佐藤真知子、アメンヘテプ3世王墓の埋葬室におけるアムドゥアト書のデジタル撮影、早稲田大学エジプト研究会、アメンヘテプ3世王墓に描かれたアムドゥアト書の史料化に関する研究会(2010)
- 5) 菊地敬夫、犬井正男、佐藤真知子、吉村作治、アメンヘテプ3世王墓の埋葬室に描かれた壁画の史料化に向けたデジタル画像化、オリエント、53(2)、pp. 218-219 (2010)
- 6) <http://www.ptgui.com>
- 7) <http://www.gigapan.com>
- 8) 犬井正男、加藤勝、佐藤真知子、東吉彦、齋藤大輔、水野統太、菊地敬夫、吉村作治、アメンヘテプ3世王墓壁画撮影時の不均一照明の補正(I) 照明モデルの構築とその検証、日本写真学会誌、74(6)、320-325 (2011)
- 9) 佐藤真知子、犬井正男、菊地敬夫、吉村作治、アメンヘテプⅢ世王墓内壁画のデジタル化にお

ける画像の接合、画像電子学会誌、41(2), 177-183
(2012)

- 10) 犬井正男、加藤勝、佐藤真知子、東吉彦、齋藤大輔、菊地敬夫、吉村作治、アメンヘテプ3世王墓埋葬室壁画のデジタル画像化における色補正、東京工芸大学工学部紀要、34(1), 65-70
(2012)