レーザで歴史的建造物を甦らせる

J. ペニーデ、F. クインテロ、 A. リベイロ, A. サンチェス・カスティーロ,R. コメサーナ, J. デルバル, F. ルスクイノス, J. パウ

下地に損傷を与えず落書きを消す方法

真新しい壁にスプレーで落書きされて喜ぶ人はいない。そしてこの問題は誰もが身近に感じている。落書きを見て落胆したケースは、2万年も前から起こっていた。アルタミラ洞窟（スペイン）で暮らしていた種族の長は、狩りから戻ると彼の同族の一人によって洞窟の天井に下手な落書きをされていた。鉱物、動物、植物の顔料で書かれた落書きを見た時、おそらく彼は「天井に何したんだ!」と大声で叫んだだろう。アルタミラの洞窟画、3万2千年前に描かれたショーヴェの洞窟画（フランス）、2千年前に描かれたカルフォルニア州サンタバーバラ群の画。実際には、これらの洞窟画が当時どれほど評価されていたのかはわからない（**図1**）。

現在では、これらの"洞窟画"は古代人の技術的や精神的な能力、また文化的儀式や日常生活を示すものとしてしばしば評価されている。それにも関わらずいくつかの批判的な意見では、これらの洞窟画は芸術的な表現ではあるが、余暇や癒しのための行為にすぎず、公共物破壊であり落書きに似たものだとみなしている。いずれにせよ、もし古代人がこの洞窟画を消そうとしたなら、描くときよりもさらに大きな労力が必要だったことは間違いない。

歴史的建造物

現代では歴史的建造物に描かれた落書きを消すことが重要な課題となっている。落書きは公的な建造物や記念碑を好んで描かれるようになっており、政治、失業、宗教などに対する不満の表現といった側面を持つが、やってはいけない行為である。そして、従来の方法で落書きを消すことは下地の劣化を引き起こし致命的なリスクとなる。歴史的建造物において落書きを消去した後の下地が、処理されていない部分と調和を保つことは重要である。落書きは文化的遺産の価値を顕著に悪化させ、建造物の美観やモニュメントの歴史的価値も損ねる。

メキシコ、モレリア歴史地区の住人は、スペイン植民地時代から歴史的建造物が多くある地区に住んでおり、この問題を非常によく理解している。この地区は1991年にユネスコ世界遺産に登録されたが（**図2**）、景観の素晴らしさの一方で落書きの量は増え続け、ついには重要地区に指定されている旧市街地「モレリアのピンク石街-cantera rosa de Morelia」のピンク石壁へまでも落書きされてしまった。

モレリア市は2008年から落書き撲滅キャンペーンを開始し、現在、落書き除去方法発明のために年間数十万ペソを投資している。歴史的建造物の景観を保たなくてはいけないので、この作業には非常に繊細な方法が要求される。採用された方法は研磨剤入りウォータージェットクリーニングと薬品によるクリーニングであったが、前者は効果的だが石の外観に深刻な損傷を与える可能性があり、後者は消去時に使用される薬品により健康被害を引き起こす問題を抱えていた。

図1 "複数色で描かれたバイソンは歴史上初の落書きと知られている。アルタミラ洞窟壁画（スペイン）、紀元前20,000年ごろ（左）
チュマシュ族の洞窟画、サンタバーバラ群（アメリカ、カルフォルニア州）、紀元前2000年ごろ（右）

図2　教会（モレリア大学）（左）、モレリア水道橋（右）、落書き（右上）（モレリア歴史アーカイブ委員会）

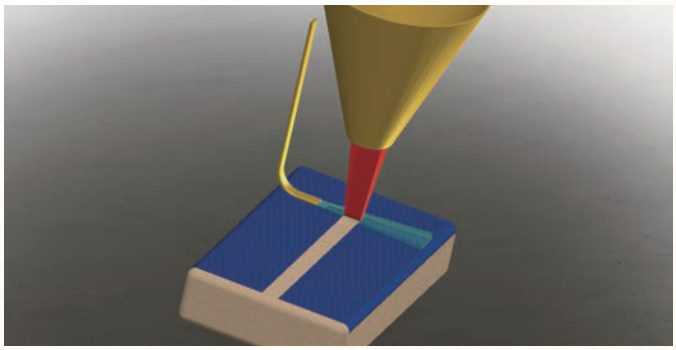

図3　加工ヘッド及び消去プロセス

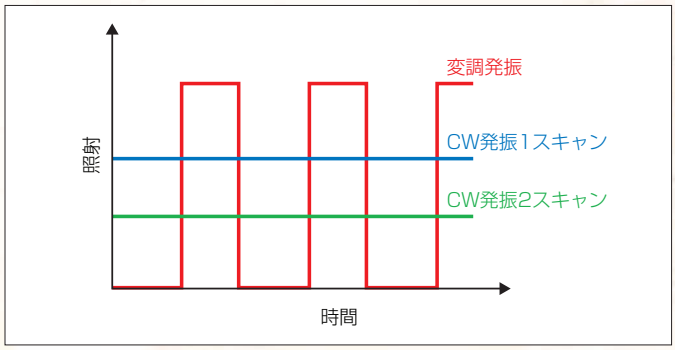

図4　今回の研究ではレーザ設定に異なる３種類の出力モードを適用した。

レーザによる落書き除去

スペインのビゴ大学、応用物理学部とメキシコのミチョアカナ大学、機械エンジニアリング学部が共同でレーザを使った解決策を発案した。研究者たちはビゴ大学のレーザ材料加工研究所にて共に開発をすすめ、モレリアのピンク石に描かれた落書きをレーザで消去する方法を実証した。レーザ光は石表面に正確に焦点をあわせ、照射（パワー密度）も正確に調整でき、その高い精度により石に損傷を与えることなく落書きを消去することができるといった非常に重要な利点を持つ。中でも非常に優れた性能を発揮した高出力半導体レーザ（HPDL）が採用された。

HPDLはまず、小型で丈夫であり、携帯性、に非常に優れており、レーザを持ち出して街中や建造物の落書きを消去することが可能になる。さらにこのレーザは電気－光変換効率が40％以上と高効率で、産業レーザ光源においても非常に高い実績がある。全ての実験はディラス社（Dilas）のダイレクト半導体レーザ（波長940nm、最大出力1500W（公称値））と焦点距離85mmのレンズが使用され、石表面に5.1mm×2.2mmの四角形レーザスポットを照射し行われた。

この方法では石表面に焦点をあわせたレーザ光により石に損傷を与えずに落書きを消去できる（**図3**）。周知の様にレーザ光を使うと他の消去方法には達することができない正確さで小さなエリアを加熱でき、更に適切な波長を持ったレーザを選択することにより、下地の石が損傷せず落書きだけにその波長を吸収させることができる。

HPDLの好ましい属性にも関わらず、レーザを誤って設定したならば、落書きが消去できないか、もしくは下地の石を損傷させてしまい失敗する可能性がある。落書きの消去はレーザ照射による消散と燃焼により行われるので、落書きを消去し石を元の外見に戻すために適切なパラメーターと条件を見つけ出すため広範囲な試験を行った。**図4**で見られる様に、3種類の出力モード、変調発振、CW発振1スキャン、CW発振2スキャンのテストを行った。

アシストガスをいくつかの設定でテストした結果、低圧（5bar）エアーを噴射する2ノズル加工ヘッドが選ばれた。第1のノズルはレーザの同軸上に配置され、第2のノズルはそれと垂直に設置し、レーザは第2のノズルと垂直方向に移動する。

テストした3種類の方法の中で、CW発振2スキャンが最もよい結果となった。初めの2種類のレーザの方法が失

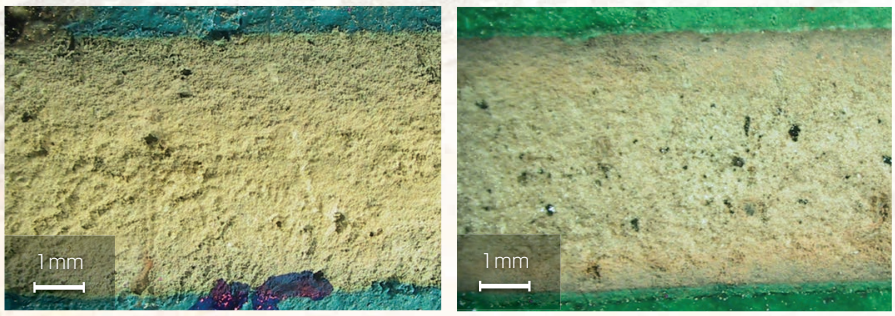

図5　HPDLを用いてCW発振2スキャンで青、緑、赤の落書きを消去した結果。

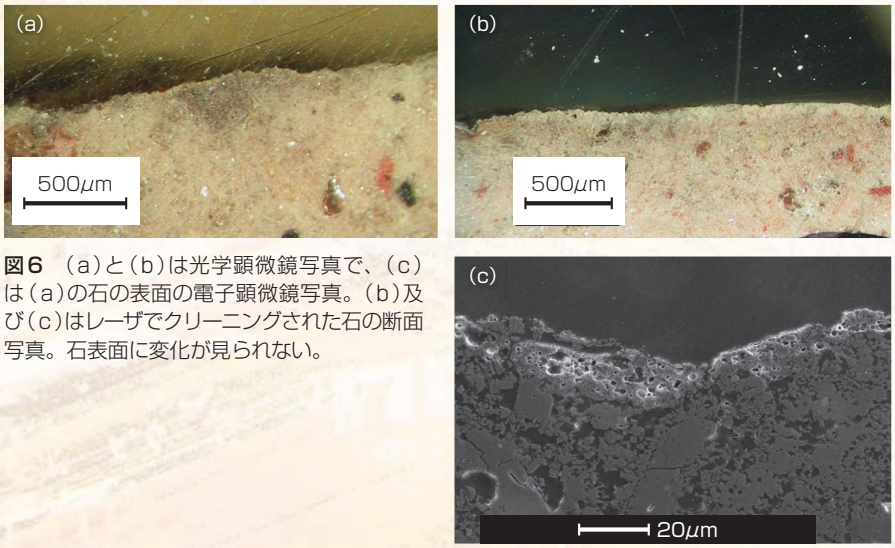

図6　(a)と(b)は光学顕微鏡写真で、(c)は(a)の石の表面の電子顕微鏡写真。(b)及び(c)はレーザでクリーニングされた石の断面写真。石表面に変化が見られない。

敗した時、別な解決方法が必要とされた。それまでの実験で、低出力の照射では塗料を炭化させるには十分であったものの黒い残留物を残してしまい、落書きを完全に消去できずにいた。塗料はHPDLから照射された赤外線を多く吸収し、レーザ光は石から色を効果的に除去した。それがヒントになり、落書きされた石にレーザを2度照射させることで解決できることがわかった。まず初めに、前よりも低い出力で塗料を炭化させ、2度目の照射で黒い残余物を除去し、損傷無しに石をきれいにする方法だ(**図5**)。レーザの適切な加工パラメーターは、出力800W/mm^{2}とスキャンスピード10mm/sである。

さらに出力を低くしているので石の表面に損傷を与えない。結果、レーザCW発振2スキャンでは石の特徴的なピンク色を維持し、さらに損傷しきい値に達しないので表面の粗さをも維持できた。

レーザでクリーニングしたサンプルの断面写真が**図6**で示されている。レーザCW発振2スキャンではほとんど熱の悪影響が認められない。また、熱の損傷で割れてもいない。これは照射時間が出力ほど重要では無いという興味深い結果を示す。実際に、(マルチスキャンクリーニングにて)出力を低く設定し、照射時間を長くすると石に対する副作用が減少した。落書きを消去するためには変調を使った処理ではCW発振1スキャンより高い出力が必要でCW発振2スキャンよりも高い出力を使った。結果として、変調発振はCW発振1スキャンよりも良くなかった。同じ理由でCW発振2スキャンはCW発振1スキャンよりも良い結果であった。ゆえに、1番目の低出力照射で塗料を燃焼及び炭化させ、2番目の照射でそれを取り除くといった2段階処理により、CW発振2スキャンがさらに効果的であることが明らかにされた。

要約

まとめであるが、損傷させずにモレリアのピンク石から落書きを消去するにはレーザを使用したクリーニング方法が効果的であることが実証された。ただし現段階では、熱による副作用無く石から落書きを消去することは非常に難しいため、このクリーニング方法は興味深いものと考えられている。さらには、コンパクトなサイズ、長寿命、高効率といったHPDLの利点を使えば、街中に持ち込み落書き消去も行うことができるようになるだろう。私達は文化芸術への損傷が無いモレリアを見たいと願っており、この方法がそれを実現するよい方法ではないかと考える。しかし、当時の落書きかもしれないアルタミラの洞窟画にはレーザクリーニングを使用しないで欲しい。それは落書きが何千年もの時を経て当時の生活を知る大事な絵となり、私達に意味をもたらしている可能性があるものだからである。

著者紹介

J. ペニーデ(J. PENIDE)、F. クインテロ(F. QUINTERO)、A. リベイロ(A. RIVEIRO)、R. コメサーナ(R. COMESANA)、J. デルバル(J. DEL VAL)、F. ルスクイノス(F. LUSQIONOS)、J. パウ(J. PAU)は全員スペインのビゴ大学所属。(E-mail:pou@uvigo.es)A.サンチェス・カスティーロ(A. SANCHEZ-CASTILLO)はメキシコ、モレリアのミチョアカナ大学所属。

ILSJ