

フォトニクスで捜査される犯罪は まったく割に合わない

ゲイル・オーバトン

かつての研究室内の破壊的で化学的な捜査に限られていた犯罪現場の証拠調査は、その痕跡が小さく顕微鏡サイズであっても、フォトニクス技術による非破壊捜査が可能になっている。

「犯罪は割に合わない (crime doesn't pay)」という表現はかつてないほど現実味を帯びつつある。その多くがフォトニクスや光学技術に帰属する科学的手法は、実に洗練された水準に到達し、犯罪捜査に協力する科学者は容疑者と犯罪現場を確実に結び付けている。殺人現場に残された体液、毛髪、衣服の切れ端、土、植物の一部などのきわめて小さい痕跡は「殺人者と一緒に逃げる」ことができない。

われわれは誰でも化学的DNA分析が現在から何十年も前のさまざまな凶悪事件の解決手段になることを知っている。しかし、あなたは顕微鏡レベルの繊維製品の試料を同定し、また、1本の毛髪試料のレーザーアブレーションがケラチンに存在する酸素、窒素、硫黄などの化学種の比を同定し (<http://opfocus.org/index.php?topic=story&v=8&s=6>を参照)、個人がそこで何を食べていたかを時間の関数として検出できることを知っているだろうか？

テレビで放送される『CSI: 科学捜査班』、『BONES-骨は語る-』そして『Forensic Files』などの番組は法医学捜査の科学を世間に広めた。かつての研究室内の古典的、破壊的、化学的捜査に限られていた犯罪現場の証拠調査は、ごくわずかな微視的痕跡証拠しか残されていなくても、現在は光やレーザーを

用いることで可能になっている。例えば、中赤外分光法に比べると約10倍も高感度のラマン分光法は、試料の破壊や危険化学物質を使用しなくても、希薄な体液を高精度で分析できる。

犯罪現場

すべての犯罪捜査は最初の段階で犯罪現場を分析して、手がかりとなる液体や固体を探し出す。通常の「ブラックライト」、つまり紫外 (UV) 光 (フィルタやゴーグルと組み合わせて可視度を改善する) は、自然蛍光を放射する精液、膿液、尿、汗および唾液を検出できるが、血液のシミは別の問題になる。血液はすべてのUV波長を吸収し、明るいバックグラウンドのなかでは暗いシミとして観察される。残念なことに、犯人は洗浄などをして血液のすべての痕跡を隠蔽しようとするため、UV分析法は役立たない。しかし、ハイテクのフォトニクスからはIR分光法という解決策が得られる。

洗浄により100倍に薄められた血液のシミはIR分光法が効果的な検出手段になる。米サウスカロライナ大学 (University of South Carolina) のステイブン・L・モーガン教授 (Stephen L. Morgan) とマイケル・L・マイリック教授 (Michael L. Myrick) は、「光学的分光法を用いた犯罪現場の生体液の高速可視化」の技術を開発し、2011年6月に国

立司法研究所 (NIJ) から助成金を受けた (<http://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/235286.pdf>を参照)。彼らは非常に少量の血液に対して、ルミノールあるいはその他のアミドブラック、フルオレセイン、ロイコ結晶バイオレットなどの蛍光増強化学物質がしばしば偽陽性反応を示すことを発見した。その理由はこれらの物質の蛍光が血液ヘモグロビン中の鉄ばかりでなく、犯罪現場に自然発生していたすべての鉄とその他の関連物質からも触媒作用を受けることにある。

対照的に、フーリエ変換赤外 (FTIR) 分光法は非破壊測定法であり、一般的な表面や織物の非吸収性バックグラウンドであっても、波数が1650と1540 cm^{-1} のヘモグロビンの強い吸収を非破壊で検出できる。

モーガン教授とマイリック教授の測定装置はIR光源 (赤熱バーまたは空間ヒータ) と通常の熱赤外線カメラを組み合わせて使用する。光源を高速にチョップし、画像の各画素をロックイン増幅器でデジタル処理すると、血液のシミのある部分とシミのない部分のコントラストが可視化され、識別が可能になる。検出器の応答は組み合わせ理論にもとづいて最適化され、シミュレーションによる設計プロセスにもとづいて、血液のシミのある部分とシミのない部分との識別を最大にする薬液用フィルタが選択される。さらに、この熱赤外線撮像技術による血液の検出を容易にするために、このチームは赤外線に透明な基板上の高分子膜からなる1つ以

上の薬液用フィルタを用いて試料を観察し、血液と他の妨害物質との識別を可能にした(図1)。

赤外線撮像および分光法ばかりでなく、ラマン分光法も血液のシミと精液の検出感度を改善できるが、ラマン分光法は犯罪現場に残された少量の未知物質の同定にも重要な役割を果たす。

米ニューヨーク市立大学(City College of New York)のジョン・R・ロンバルディ教授(John R. Lombardi)は、「ラマン分光法は赤外分光法にない利点をもつが、その重要性の多くは水のラマン散乱が低いため水性溶媒の検出に使えることだ」と語っている。われわれが携帯式分光計から学習していることだが、ロンバルディ教授は「水は赤外線を強く吸収して赤外信号を妨害するため、ラマン散乱は生化学に最適の検出手段になる」と付け加えた。

しかし、ロンバルディ氏によると、ラマン分光法には、蛍光のラマン信号が弱く、干渉するという2つの欠点がある。幸いなことに、これらの2つの欠点は分子を金属(一般に銀や金)ナノ粒子の表面に吸着させる表面増強ラマン分光法(SERS)を用いることで克服できる。ロンバルディ氏は「SERSを使用すると、ラマン信号は何桁も増強され、同時に蛍光消光(クエンチ)が起こる。信号は単一分子の検出を可能にする最大 10^{14} の増倍率が報告されている⁽²⁾。これは化学物質の痕跡量の同定に理想的な像倍率であり、SERSの法医学捜査への利用を拡大する基盤になる」と語っている。

ロンバルディ氏によると、ニューヨーク市立大学はメトロポリタン美術館(Metropolitan Museum of Art)、ニューヨーク市警察(NYPD)



図1 この画像はポリエステル織物上に希釈度の異なる血液で書いた文字「I(希釈なし)」、「X(10倍に希釈)」、「V(25倍)」、「L(50倍)」および「C(100倍)」を示している。画像はAC(交流)変調反射の同相検出を用いて再生された。右下には位相検出の参照物体がある。(許可を得てAnalyt. Chem., 82, 8427-8431; Copyright 2010 American Chemical Societyから転載した)

の犯罪研究所およびジョン・ジェイ刑事司法大学(John Jay College of Criminal Justice)の犯罪科学プログラムと提携し、SERSを犯罪捜査に応用して、規制物質(薬物)、刺青用染料、美術品や織物用のインクと染料などの関心物質の痕跡量を検出する技術を開発している^{(3)~(6)}。例えば、このチームはメタアクリレートヒドロゲルと1:1ジメチルホルムアミド(DMF)およびニナトリウムエチレンジアミン四酢酸(EDTA)の1重

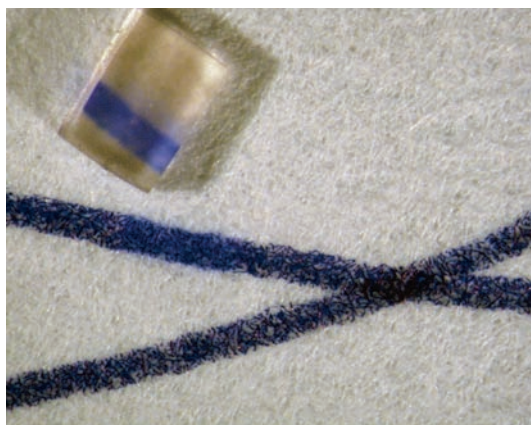


図2 織物に埋め込まれた染料をラマン分光法で同定するために、特殊な化学物質を使用して、染料のわずかな割合の染料をヒドロゲル立方体に移した。この染料を金属ナノ粒子の溶液に溶かしてラマン検出を行った。(資料提供: ニューヨーク市立大学)

量%水溶液を使用して、基板から標的染料の痕跡量を抽出する固相微量抽出(SPME)と同様の技術を開発した(図2)。ヒドロゲルを用いて抽出された染料の痕跡量はSERS検出用の金属ナノ粒子のフォトリソ液中に溶解する。

検視解剖の一部としての規制物質の分析、あるいは代替法としての犯罪現場に残る擬似薬物の分析において、ラマン分光法とその派生分光法も重要な役割を果たす。STFCの英ラザフォード・アップルトン研究所(Rutherford Appleton Laboratory)中央レーザ施設の主任

科学者を務めるパベル・マトウシェク氏(Pavel Matousek)と共同研究者は、薬瓶や生体組織などの不透明試料であっても、レーザビームの入射点から10 mmまでの距離から戻るラマン信号を分析できる空間オフセットラマン分光法(SORS)を開発した。この計測器は従来のCWレーザ励起と分散性ラマンCCD検出器を使用する。この方法は混濁物質の深い場所から生じるラマン信号が浅い場所からの信号に比べて、試料の表面では大きく広がる事実を利用して、試料内部の光子の動きを直接検出する⁽⁷⁾。

2005年に開発されたSORSはSTFCの関連企業として独立した英コバルトライトシステムズ(Cobalt Light Systems)の手で商品化された。最近の開発には航空セキュリティ用のプラスチックやガラス瓶に封入された液体爆発物を非侵襲スクリーニングするSORS装置が含まれる。この装置は代替技術に比べると、誤り警報の発生率が極めて低く、現在は欧州の主要な空港において試験されている(www.coballight.com/products/insight100を

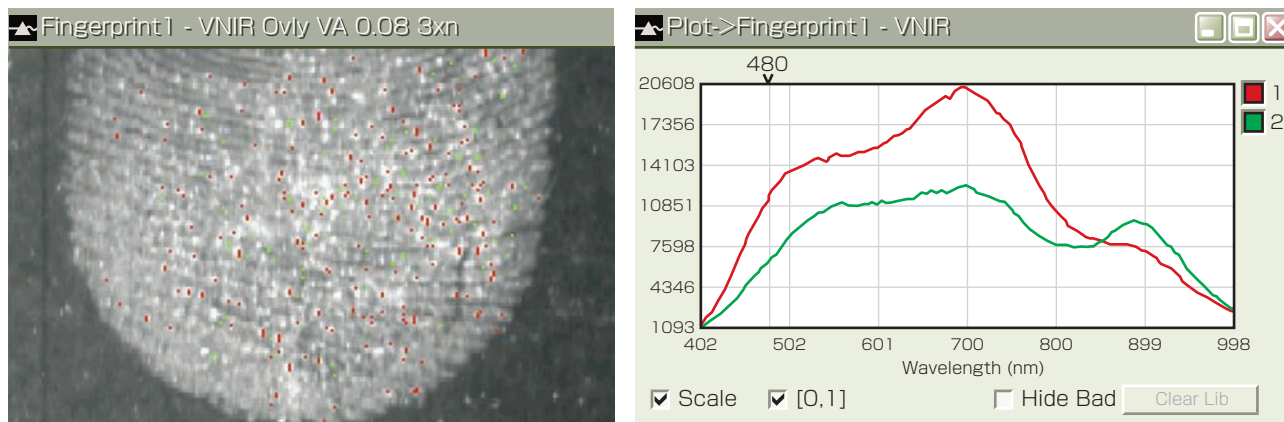


図3 指紋の山の部分に残された化合物の痕跡(左)の犯罪捜査はハイパースペクトル分析が行われ(右)、データベースの化合物や化学物質と照合される。(資料提供:ヘッドウォールフォトニクス社)

参照)。開発中のもう1つの製品は薬品メーカーに入荷する原材料を非侵襲同定するためのSORSスキャナだ。このスキャナは包装を開けなくても、化学物質の同定を数秒以内に完了できる。SORS技術は骨疾患の非侵襲スクリーニングや胸部癌の診断を目的として、世界中の多数の学術研究機関において開発されている⁽⁸⁾。

DNAと指紋の一部

犯罪現場の血液のシミは薄く、その他の物質も痕跡量しか残らないことが通例だが、検出するDNA物質や指紋も完全なもの少ない。しかしながら、フォトニック技術の継続的な進歩と検出感度の向上により、DNAや指紋の一部からの個人の完全な識別が可能になった。

1912年に遭難したタイタニック号から発見されカナダのノバスコシア州ハリファックスに埋葬されていた少年は、歯の鑑定とDNAの予備分析による最初の識別に失敗したが、2008年になると、シドニー・レスリー・グッドウィンという名前の少年であることが解明された。米軍DNA鑑定研究室(Armed Forces DNA Identification Laboratory)に勤務し、遺体を科学分析する業務の一部に従事したアイデンティファインダーズ・

インターナショナル(Identifinders International)の法医学捜査系図学者を務めるコリーン・フィッツパトリック女史(Colleen Fitzpatrick)は、「この少年の識別は単一ヌクレオチド多形(SNP)と呼ばれる蛍光標識DNA検出にもとづく毛細管電気泳動法のいくつかの相互作用を用いることで成功した」と語っている⁽⁹⁾。

このDNA精密分析は蛍光分析を基本にするフォトニック技術を使用する。米アプライドバイオシステムズ社(Applied Biosystems)のPCR増幅キットやSNaPshotなどの商業化された装置は1台以上のレーザー光源を使用して、DNA鎖に付着した特定の蛍光染料や蛍光標識を励起する。これらの方法は蛍光信号の増幅と測定およびフォトニックセンサ技術にもとづいて、使用するDNAフラグメントがごく少量であっても、DNAマッチングを確実に行うことができる。

米ヘッドウォールフォトニクス社(Headwall Photonics)のCEOを務めるデイ

ビッド・バンノン氏(David Bannon)は、「ハイパースペクトルセンサは試料の固有な化学組成にもとづいて、指紋の山の部分にある物質や化合物を同定できる」と語っている。

ヘッドウォールのスペクトル範囲が380~1000nmのHyperspec極近赤外(VNIR)イメージセンサと900~2500nmのHypersec短波長赤外(SWIR)センサは「プッシュブルーム」移動技術によるライン走査を行って指紋のハイパースペクトルデータを取得する。ヘッドウォールのStarter Kitはセンサ用の架台、非常に安定な照明光源およびセンサ下の試料の移動ステージが実装されている。指紋は数秒で走査され、空間位置の3Dデータがx-y座標で表示され、それぞれの位置のスペクトル成分が得られる。これらのデータは既知の化学物質、爆発物および関心物質のスペクトルデータベースと比較される(図3)。

参考文献

- (1) V. Sikirzhitski et al., *BioOptics World*, 5, 1, 33-36 (January/February 2012).
- (2) M.V. Cañamares et al., *J. Phys. Chem. C*, 112, 20295-20300 (2008).
- (3) M. Leona et al., *Analyt. Chem.*, 83, 3990-3993 (2011).
- (4) I. Geiman et al., *J. Forensic Sci.*, 54, 947-952 (2009).
- (5) M. Leona et al., *Acc. Chem. Research*, 43, 782 (2010).
- (6) V. Rana et al., *J. Forensic Sci.*, 56, 200-207 (2011).
- (7) R. Ehrenberg, *ScienceNews*, 179, 13, 22 (June 18, 2011).
- (8) K. Buckley and P. Matousek, *Analyst*, 15, 136, 3039-3050 (2011).
- (9) R.S. Just et al., *Forensic Sci. Int.: Genetics*, 5, 3, 231-235 (June 2011).