

特集：鑑識画像科学・工学の現状と課題 解説

線条痕の画像解析

Image Analysis of Striated Toolmark

内山 常雄*

Tsuneo UCHIYAMA*

要旨 線条痕が同一の工具によって付けられたものか否かの判別は、発射弾丸と発射銃器を結びつけるなど犯罪鑑識において重要な位置を占めている。その作業は、経験を積んだ鑑定者による顕微鏡作業であり、その内容の客観化に画像解析の手法が用いられてきた。しかし、扱う対象の条件の範囲が広く、機械的処理が容易な分野ではない。

Abstract Identification of striated toolmark is important discipline in criminal investigation such as firearm identification. Experienced examiner identifies toolmark using comparison microscope. Image analysis technique has been used for explaining the result objectively. However the automated processing is difficult because the range of condition of each material is very wide.

キーワード：線条痕，発射痕，比較顕微鏡，異同識別の判断基準

Key words: striated toolmark, Marking on fired bullets and expended cartridge cases, comparison microscope, identification criteria

1. はじめに

鑑識画像に関する特集号で線条痕の画像解析の執筆依頼を受けた。この分野は、警察の捜査機関がその実務の大半を担っており、実務の内容が紹介されることが少ない。画像処理になじみやすいテーマではあるが、研究と実務との隔たりは大きい。多くの研究論文は対象を単純化してとらえているが、実務では例外となるものが多く、研究結果を利用することは難しい。最近では、その適用の困難さから、画像処理の手法はこの問題に対して適さず、3次元形状測定の手法でないと処理できないという提案が盛んに行われている。だが手法の問題ではなく、扱う対象特有の困難さがあるからと考えている。工具痕に関して、実務の観点からその原理的な考察を行った文献は国内に少ないことから、その内容を解説する機会として執筆を引き受けた次第である。本論が工具痕の画像解析を理解する上でいささかなりとも参考となれば幸いである。

2. 線条痕—工具痕の一分野

線条痕とは線状の工具痕を意味している。工具痕とは工具によって物体（ワーク）に付けられる痕跡一般である。製造現場では、工具痕は製品欠陥に類するものであり、目立たな

い方が良く、痕跡を残しにくい製造手法が機械加工、塑性加工やトライボロジー（摩擦）分野で研究されている。鑑識分野では、痕跡の特徴から使用された工具を特定、あるいは絞り込む作業が行われてきた。その中で、発射弾丸の円筒部分に付けられる痕跡は線条痕の形態をとり、発砲事件という凶悪事件の最大の物的証拠となることから、線条痕の代表例として取り上げられることが多く、これが筆者の専門分野である。発射痕の解析については、その技術の黎明期に出版された定評のあるテキストがあり、これらのテキストの評価は今後も変わらないものと思われる。現在では入手が難しいものが多いが、参考文献に掲げた¹⁻⁵⁾。

発射弾丸に付けられる痕跡の模式図を Fig. 1 に示す。銃身の内側（銃腔）には螺旋状に回転している凹凸がある。これが腔旋（ライフリング）で、腔旋には右回転のものと同左回転

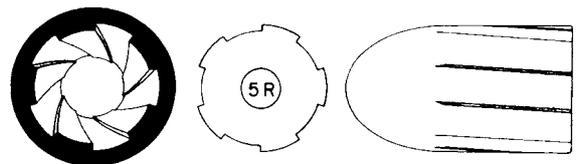


Fig. 1 Rifling of Bore and Rifling Mark on Fired Bullet
Original Drawing : A. A. Biasotti



Fig. 2 Scratched Mark and Impressed Mark

のものがある。凹凸の溝の条数は3～16程度で、4～8のものが多い。弾丸は、発射時に銃腔に刻まれた腔旋とかみあうことによって、弾軸周りの旋回運動を与えられる。この旋回運動により生じるジャイロ効果で細長い弾丸の空中での飛行姿勢が安定し、有効射程と命中精度が飛躍的に向上した。腔旋とかみ合って弾丸に付けられる痕跡が腔旋痕である。Fig. 1に右回転5条の腔旋と、その銃身から発射された弾丸に付けられた右回転5条の腔旋痕を示した。

腔旋の形状のうち、山径、谷径、山の幅（旋丘幅）、谷の幅（旋底幅）、腔旋の回転度合い（腔旋角）は銃身の製造図面に指定されている。これは銃器の製造所や銃のモデルによって決まった値となるもので、これらの値を「型式特徴（Class characteristic）」と呼んでいる。それに対して、加工された腔旋の表面に存在する製造工具痕の形状等は製造図面に指定されたものではなく、製造過程の偶然性によって決定されるものであり、このような形状特徴を「固有特徴（Individual characteristic）」と呼んでいる。一方、製造図面には指定されていなくても、特定の工具に特有の形状特徴が、連続して製造された多くの加工面に残されることがある。これは偶然生じたものとはいえないもので、「準型式特徴（Sub-class characteristic）」と呼んでいる。

工具痕は大きく2種類に分類される。一つは、工具とワークとが滑らずに接触したことにより、ワーク表面に残される工具による塑性変形を受けた痕跡である。これは工具の表面の凹凸と相反した凹凸形状となり、この種の工具痕を圧痕と呼ぶ。もう一つは、工具とワークとが滑りながら接触するもので、この種の工具痕を擦過痕と呼ぶ。線條痕は、線状の痕跡が並んでいるように見える痕跡で、多くの場合で擦過痕であるが、擦過痕が付けられた工具が押しつけられてできた圧痕の場合もある。工具痕の鑑定を行う場合、着目している痕跡が擦過痕なのか圧痕なのかの判別は重要であるが、その形状や痕跡位置等からの総合的判断となる。痕跡表面の光沢で区別できることもあるが、表面の光沢のようなものは、3次元形状測定の手法で処理するのは未だに難しいようである（Fig. 2）。

工具痕は一般的にワーク表面に残される3次元形状である。

例外的に2次元形状のものがあるが、それは、ほとんど変形しない固いワークの上を、柔らかいもので擦過した際に付けられるものである。例えば自動車のフロントガラスの上に残されるゴム製のワイパーの痕跡（汚れ）がそれに当たる。このような特殊な場合を除くと、工具痕は3次元の形状である。このような3次元の形状の工具痕であっても、その解析は2次元の視覚データ（画像）によって行われてきた。当初は、顕微鏡による拡大写真を撮影し、その写真を（切り貼りして）比較することによって識別してきた。1920年代の米国で、2台の顕微鏡の接眼レンズをブリッジで連結し、プリズムで屈折させた像を同一視野内で観察できる比較顕微鏡が開発され、作業効率が飛躍的に向上した。この比較顕微鏡の開発が、現在でも工具痕の異同識別における最大の技術的成果である。初期には2台の顕微鏡を連結していたが、専用設計の比較顕微鏡となり、弾丸や薬きょうの取り回しが便利な載物台が用意され、さらに便利になった。観察用の接眼レンズは当初単眼であったものが、1970年代に双眼の比較顕微鏡が利用できるようになった。これによって比較顕微鏡観察時の疲労が劇的に減少し、長時間観察が可能となった。資料の回転や移動をしながら顕微鏡観察をすることによって、3次元の痕跡形状を把握しながらの比較作業が可能となった。

実際の異同識別作業は比較顕微鏡の観察によって3次元の形状を把握しながら行われるが、その結果を示す写真は2次元のものである。鑑定者は資料の隅々までを比較観察して結論を出す。その結果は1～2枚の比較写真で示されることが多い。その写真で鑑定者が考えたことをすべて伝えられるものでもなく、世界の銃器鑑定件数の大半を占めている米国では、それまで行われていた写真撮影が行われなくなった。その結論の根拠は裁判において口頭で示されるのみで、結論の客観性を他者に伝えにくいという現象が生じた。

工具痕の解析は犯罪捜査に活用されるものであることから、国内での作業は2段階に分かれる。第1段階は比較対照している物件に関して異同の結論を導く作業で、次の段階は、その結論を他者に伝える資料を作成する（証拠化する）作業である。前者の作業は比較顕微鏡による観察作業が基本であり、後者はその結果を示す比較対照写真を貼付した鑑定書を作成することである。現在、その作業量を減少させるためにパソコン利用の画像処理が行われているが、最終的な結論を得る作業と鑑定書に利用する比較写真の撮影には比較顕微鏡が使用されている。

3. 工具痕解析の原理

工具痕解析の目的は、同一工具によって製造された（付けられた）ものを、別の工具によって製造されたものと区別することにある。その識別は、互いに矛盾した2つの原理に基づいて行われている。第一の原理は、「細かく観察しても区別できない二つのものを製造することは不可能である」というものである。これは、区別すべき対象の相違に基づいた原理であり、この原理は常に真である。工業製品の製造において、

各製品は製造図面に指定された寸法公差内で製造されるが、指定された表面粗さの範囲内での微細痕跡等が製品ごとに異なり、どのように高精度に製造された二つの製品でも表面の形状観察によって必ず区別できる。一方、これと相矛盾する第二の原理は、「同一工具によって製造された製品には互いに共通点があり、その共通点から同一工具による製品であると分かる（単純に言えば互いに区別できない）」というものである。第一の原理は常に真であるが、第二の原理は、観察倍率（精度）をある程度下げた時に成り立つ原理である。

現代の工業製品は、単一の工具を用いて数多くの製品が製造される。第一の原理に基づけば、それらの製品は全て区別可能である。よって、例え同一工具によって連続して生産された銃身であっても、2本の銃身には異なる工具痕が付けられており、その区別は可能である。これは常に真実である。よって、これら微細な形状が異なる銃身から発射された弾丸も区別できることになる。一方、同一銃器から連続して発射された弾丸の発射痕の識別でも、工具痕識別の第一の原理に基づけば、これらの痕跡は1発ごとに異なり、互いに識別可能である。これでは全ての物体は区別できるというだけで、何ら意味のある結論を導かない。そこで、工具痕識別の第二の原理を持ち出して、これらに「それと分かる」共通の特徴があることから、「同一銃器による発射痕である」という結論を導くのである。この基準の両刀遣いは、この分野を専門としていない者にとってはおそらく理解不可能な非科学的なものであろう。実際、筆者の過去の研修で、その識別が誰にでも容易に習得できるものではないことを体験している。意味のある正しい結論を導くためには、どの痕跡に着目するのかという取捨選択のセンスが重要となってくる。そのセンスは、多くの工具痕観察経験で養うことは可能であるが、それを専門としていない者には理解が難しいかも知れない。工具痕の異同識別は、誰でも同一の結論を導くことができる客観性の高いものではないが、それを専門としている複数の鑑定者が同一の結論を導いたのであれば、その結論はほぼ妥当なものとなる。また、この作業を専門にこなしてきた鑑定者は、ほとんどの場合で正しい結論を導いてきた。この事実もこの手法の正当性の根拠となっている。

4. 工具痕識別原理の発射痕の異同識別への適用

工具痕識別の第一の原理は、常に正しいが、ほとんど意味のないものである。工具痕識別の第二の原理を発射弾丸に当てはめると、同一銃身から発射された弾丸には共通の特徴があり、他の銃身から発射された弾丸との間で区別可能な何らかの特徴があるということを主張している。これを親子の関係になぞらえると、（親が同一の）兄弟の間には、（祖父母が同一の）従兄弟以上に類似した点があるということである（Fig. 3）。

現在の銃身製造法で同一工具によって仕上げられる銃身は250～1000本程度が標準的であり、質より生産効率を重んじる軍用銃では数千本程度が同一工具で加工されることもある

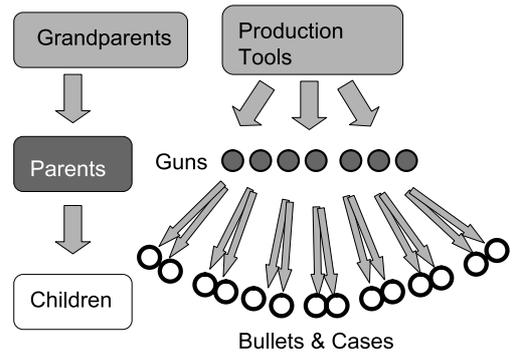


Fig. 3 Principle of Toolmark Identification
We must discriminate cousin from sibling.

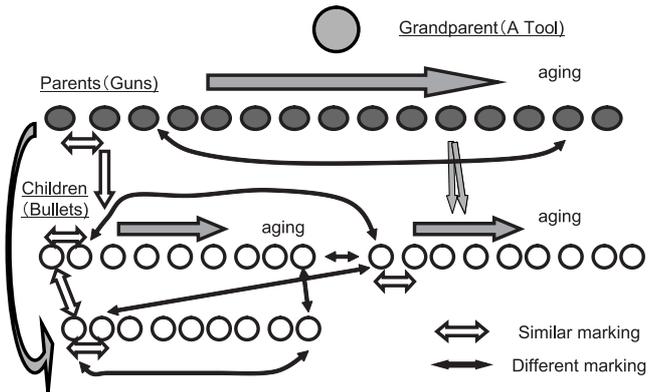


Fig. 4 Aging of Marking
Siblings with different ages are not so similar compare with the young cousins from young parents who are both from the same young grandparents.



Fig. 5 Landmarks Fired from Tokarev Semi-automatics

という。このことから、最大限数千組ぐらゐの叔父や叔母が従兄弟を生むことになる。1丁の銃器から発射される弾丸は、犯罪に使用されるような銃器の場合ではせいぜい数百発である。国内の犯罪に使用されるけん銃では、その数はせいぜい数十発のものが多く（我が国では実包はけん銃同様入手困難であり、けん銃はせいぜい数十発の実包とともに取引され、それを撃ちつくすともはやけん銃の使用価値がなくなる）。このことから、国内の発射弾丸の異同識別においては、銃腔形状の極端な変化を考慮しなくても済む。一方、軍用銃では銃身寿命ぎりぎりの2～3万発が発射されることも多い。これらの発射弾丸が皆兄弟に相当するのだが、兄弟の顔つきは弾丸発射にしたがい次第に変化し、銃身が寿命を迎える頃の発射弾丸に付けられる痕跡は、新品の頃の発射弾丸とは似ても似つかないものとなっている。銃身が新品同士の従兄弟の方がよほど痕跡の形状は類似している（Fig. 4）。一例としてトカレフ自動装てん式けん銃の発射弾丸の例を示す（Fig. 5）。

弾丸発射を繰り返すと銃腔の摩耗損傷が生じ、旋丘痕の形態が左側から右側の写真のように変化していく。当初は旋丘痕の左右の境界（エッジ）がはっきりしているものが、次第に左側（写真では下側）のエッジが不鮮明となり、見かけ上の旋丘痕幅が増大していく。右側のエッジ形状も当然変化する。これらの3枚の写真は、銃腔の摩耗状態が異なる3丁のけん銃の発射弾丸を示しているが、いずれも新銃身の頃の発射弾丸は Fig. 5 の左の写真の形態であったはずである。このように旋丘痕の形態が異なるところまで銃腔の状態が変化してしまえば、たとえ同一のけん銃の発射弾丸でもそれを言い当てることは不可能である。

このように、発射痕の異同識別は、どのような場合にでも可能なものではなく、限られた条件下で成立するものでしかない。最近の研究論文は異同識別が可能であるという前提の基に、その作業を自動化する観点から行われている楽観的なものと、痕跡の異同識別の困難性と非科学性を主張した悲観的なものとに大別されるように筆者は感じている。楽観派は、発射痕から発射銃器を言い当てることのできる立場から、開発した手法の有効性を分かりやすい資料を用いて主張している。その成果は製品となっており、世界標準となっているものに IBIS (Integrated Ballistic Identification System)⁶⁾ があり、それを利用した全米のネットワーク (NIBIN) を米国司法省のアルコール・タバコ・銃器・爆発物局が構築している⁷⁾。楽観派に対する批判はあっても、このシステムにより大量のデータが集められ、現象の理解には貢献している。悲観論では、発射痕の異同識別は鑑定者の技芸 (Art) に依存していて、その非客観性と機械的な処理の困難さを主張している。

5. 腔旋の加工と弾丸に付けられる発射痕

腔旋痕は擦過痕の代表的なものであるが、擦過状工具痕の中では特殊な性質を持っている。通常の擦過状の工具痕は、痕跡を付ける工具が短く（刃先の形態）、長さのあるワークにすじ状の痕跡を付ける。一方、弾丸の腔旋痕ではワークに当たる弾丸の円筒部より工具の方が圧倒的に長い。腔旋痕が付けられる弾丸の円筒部は 10 mm 程度であるが、腔旋の長さはけん銃でも 50 ~ 200 mm, ライフル銃では 500 mm 以上ある。したがって、最終的な発射痕が工具のどの位置の形状を反映しているのかは分かりにくい（銃腔各部の影響の総合的結果）。銃器に適合した弾丸を発射した場合には、弾丸の径は銃腔の山径（旋丘径）より太いため、弾丸と銃腔とは安定した接触をするが、銃腔が摩耗してくると弾丸が銃腔内で踊り、接触位置が不安定となる。発射痕の再現性が低い原因の多くは、このような弾丸発射時の弾丸の挙動のばらつきにあるものと考えられている。

一方、銃腔に腔旋を加工する過程は、再現性がより高いものである。初期にはフックカッターによって、腔旋の谷を1条ずつ切削する手法が用いられていた。1条の谷を切削し終わると、次の谷を加工した。よって、同一銃身の複数の谷に

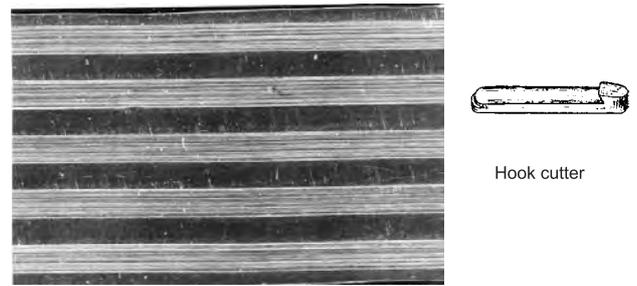


Fig. 6 Replica of Barrel Rifled by Hook Cutter (Photo taken by A. A. Biasotti)
Some similarity is observed on each groove of bore as the same hook cutter was used to cut each rifling. No prominent striation along barrel is observed on land of bore.

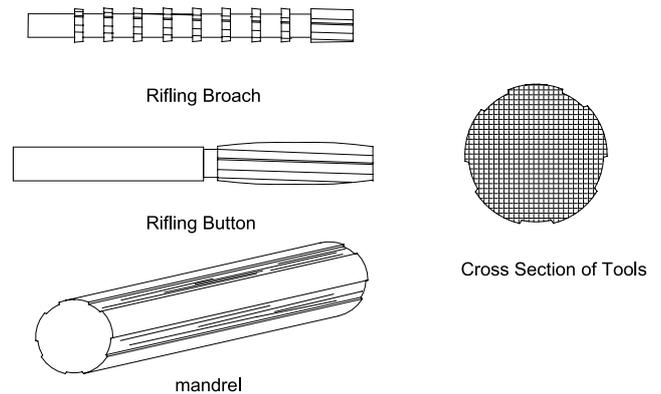


Fig. 7 Rifling Tools

類似した工具痕が付けられる傾向が見られたが、1枚のカッターにかかる負担が大きいため、1本の銃身を加工する途中で刃が研ぎ直され、痕跡は次第に変化していく (Fig. 6)。

フックカッターによる腔旋加工の生産性は低いため、現在行われている腔旋の加工方法は、①ライフリングブローチによる切削加工、②ライフリングボタンによる塑性加工、及び③冷間鍛造による塑性加工の3種類となっている (Fig. 7)。(未だにフックカッターを使用している例もあり、この他に化学的腐食加工法もある)。

ライフリングブローチは、一度に全条の腔旋を切削できる刃が間隔を開けて並んで付けられている工具で、その刃の径が徐々に太くなっている。よって、一回の引き抜きによって切削できる加工量が深く、フックカッター法と比べて生産効率が格段に高い。多くの場合で、1回あるいは2回のブローチ加工によって腔旋が仕上げられている。一方で、何枚もの刃によって加工されることから、1枚の刃による切削量はフックカッターより小さく、加工表面の粗さは小さく、その変動形態も複雑である。ブローチで切削される部分は、銃腔では谷の部分に相当し山の部分は切削しないため、山の部分にはガンドリルによる切削加工痕やリーマによる仕上げ痕が銃腔の円周方向に残されている。その条痕は弾丸の進行方向とは直角の方向であることから、銃腔の山の部分との接触痕跡である弾丸旋丘痕形状にはランダム性がある。ただし、銃腔の山と谷の両者に腔旋に沿った工具痕が残される例もある (Fig. 8)。

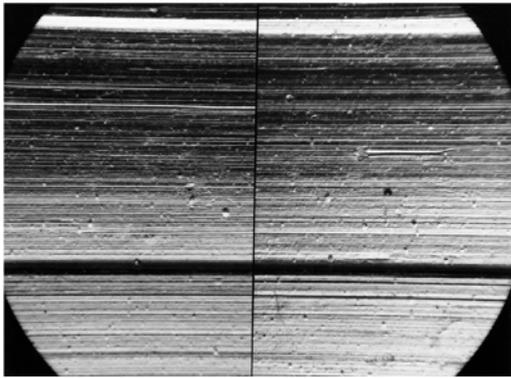


Fig. 8 Replica of Barrel Rifled by Broach (Photo taken by A. A. Biasotti)
In this particular case, many striations run parallel to rifling both on groove and land of bore.

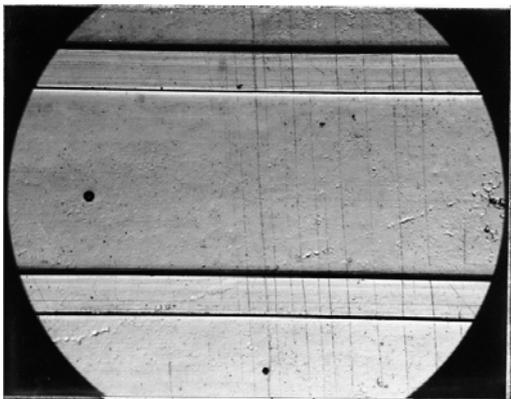


Fig. 9 Replica of Barrel Rifled by Hammer Swage (Photo taken by A. A. Biasotti)
Prominent striations run parallel to rifling on land of bore.

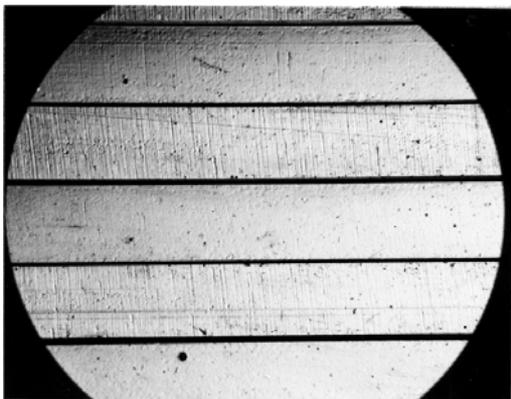


Fig. 10 Replica of Barrel Rifled by Button Swage (Photo taken by A. A. Biasotti)
Note the circumferential reaming marks on the lands which are less prominent on the groove surfaces.

冷間鍛造法では、銃腔の凹凸と逆の形状をした（弾丸の形状に相当する）雄型であるマンドレルを銃身に仕上げるべき鋼管の中に挿入し、鋼管の外側を四方八方からたたき、銃身に仕上げる加工法である（Fig. 7）。この加工法では、マンドレルの凹凸形状がそのまま銃腔に転写される。マンドレルの谷に当たる部分は切削加工されているため、線条の加工痕が付けられており、その痕跡が発射弾丸の谷に相当する部分（旋

丘痕）に付けられる。また、マンドレルの複数の溝が同一工具によって加工されるため（フックカッターによる腔旋の加工と類似している）、発射弾丸のすべての旋丘痕に類似した痕跡が付けられる傾向がある。また、マンドレルに残された加工痕が摩滅するまでの間、複数の銃身の旋丘に類似した痕跡が残される。このように、冷間鍛造によって製造される銃身では、旋丘（山の部分）の痕跡の腔旋に沿った方向の形状にランダム性があるとはいえない（Fig. 9）。

ライフレングボタンによる加工法は、ライフレングブローチと冷間鍛造法の中間の性格がある。冷間鍛造法のマンドレルに相当するライフレングボタンを下穴加工された銃身に通すことによって、腔旋を塑性加工するものである。ライフレングボタンのみで腔旋の加工をする場合と、ブローチ加工した後に仕上げ工程としてライフレングボタンを通す方法とがある。ボタン加工法は廉価な銃身と高品質の銃身の両方で用いられ、その痕跡の粗さもさまざまである。高品質なものでは、銃腔の谷の部分にライフレングに沿った線条痕がほとんど残されない（Fig. 10）。

このように、腔旋の加工方法によって、発射弾丸に付けられる痕跡異同識別上の特徴は異なる⁸⁾。一方で発射弾丸のみの観察からは、その発射銃器の腔旋の加工方法を推定することは困難であり（銃種が分かれば推定できる）、痕跡の解釈は容易ではない。

6. 発射痕異同識別の実際

弾丸は高速（けん銃の場合秒速 200 m ~ 550 m）で発射されるため、水中や人体の柔らかい部分に命中した場合を除いて大きな損傷や変形を被る（Fig. 11）。そのため、発射弾丸に付けられている痕跡を含め、全体形状の測定は多くの場合で困難で、測定できても結果の変形補正が大変である。たとえ変形していなくても、弾丸の種類が異なると、弾丸表面にある溝（チャンネル）の形状が異なることがある（Fig. 12）。また、弾丸の材質が相違すると痕跡の全体的な外観が異なることが多い。鉛を主成分とする弾丸では、弾丸発射時に表面が溶融し、銃腔に由来する痕跡の多くが消滅することがある。弾丸の特定の場所だけを見ていれば発射痕の異同識別ができるという作業ではなく、どこに意味のある痕跡があるかを探し回る作業が必要となる。その場所は個々の事例にしたがって大きく異なる。

一般的に深さのある条痕の再現性（引き続き発射された弾丸に同様の形状で現れること）は良好である。被甲弾丸（鉛の弾芯を銅合金等で覆った弾丸）の弾丸底部付近には再現性の高い痕跡が残されることが多い。この部分に特徴的な痕跡が付けられている場合には、この痕跡を利用した発射痕の異同識別は容易である。画像処理技術や3次元形状測定技術を利用した論文の多くは、この部分の痕跡を利用したものである（Fig. 13）。この部分に良好な痕跡が残されている資料を利用して良好な識別結果が得られても、その解析技術の優秀性を示したものとはいえない。良好な結果を導けるデータを



Fig. 11 Evidence Bullets
Many evidence bullets were deformed badly as they were fired in high speeds.

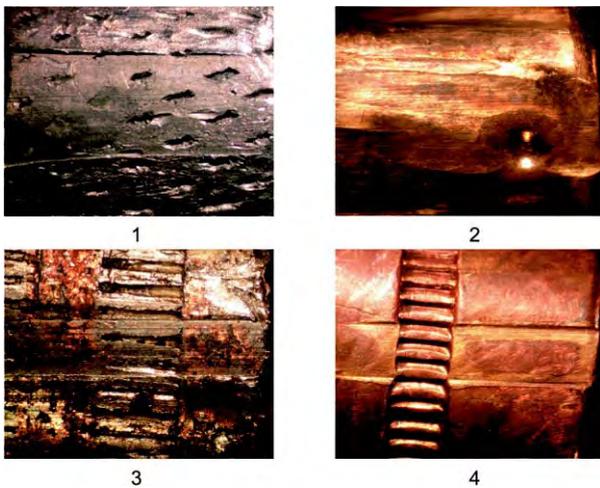


Fig. 12 Marking of Bullet Impressed before Firing
1: Stipple Mark 2: Stab Mark
3: Knurling on Copper Plated Lead Bullet
4: Knurling on Jacketed Bullet

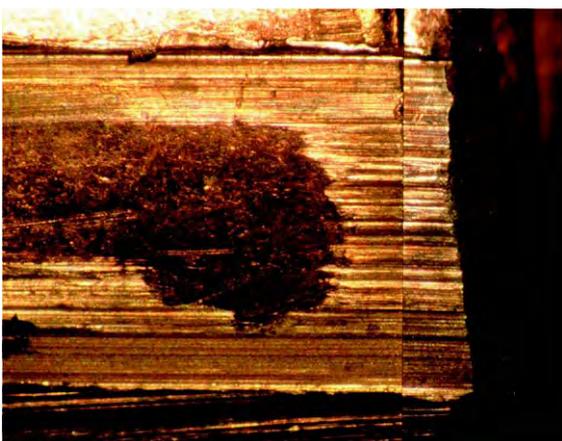


Fig. 13 Prominent Marking on the Base Area of Landmark
Note the other area with no such prominent marking.

扱ったものと見た方が適当である。鉛弾丸の弾丸底部付近では、弾丸発射時に表面が溶融する傾向が強く、被甲弾丸の弾丸底部付近の顕著な特徴痕跡を鉛弾丸の上に発見できないことが多い。

7. 線条痕識別の数量基準

工具痕鑑定を経験的判断基準として「異なる工具によって付けられた痕跡の間に認められる最も良好な類似性 (Best Known Non-Match) を超える類似性が認められる痕跡は、同一の工具に由来するものと結論できる」がある。この基準では、問題となっている痕跡の比較結果と鑑定者の鑑定経験 (記憶) を照合して結論を導くもので、その基準を他者に伝えることのできる客観性が乏しい。鑑定経験の乏しい間は「他人のそら似」を経験しないが、冷間鍛造された連続生産銃身による実験弾丸などを見てしまうと、ほとんど肯定結論を出せなくなってしまうという問題がある。

工具痕鑑定の判断基準を数量化する研究のパイオニアは Alfred A. Biasotti で、筆者は彼と共同作業をするという幸運に恵まれた。彼が 1950 年代に行った研究は、今でも工具痕鑑定の問題点を端的に示した基本文献となっている^{9) 10)}。彼はこの研究で「連続一致条痕本数による判断基準」を提案した。この基準は、連続して対応している条痕 (Consecutively Matching Striations, CMS) に着目し、例えば、ある場所に 4 本以上連続して対応している条痕があればそれらは同一の銃器に由来する痕跡だと結論する基準を提案した。これが連続一致条痕の判断基準 (以下 CMS 基準) で、いわゆる「%マッチ」といわれる「全体で何%の条痕が一致していれば同一銃に由来するものと結論できる」とする基準に対抗するものとして呈示された。「%マッチ」では、同じ銃と異なる銃との間で、その一致条痕の割合の差がわずかであり、結果が既知の例 (試射弾丸) で、その値が逆転している (異なるけん銃による発射弾丸の条痕の % マッチが同一けん銃による発射弾丸の条痕の % マッチを上回る) ことがあり、判断基準となり得ないことが以前から知られていた。% マッチは、痕跡全体の形状に着目している基準であり、痕跡の再現性が全体的に優れたものでなくては成立しない。この基準が損傷変形や材質の異なる資料を相手とする現実の場面では成立しないことは明らかである。全体的な痕跡の対応関係の良否では結論が導きにくい場合でも、CMS 基準を用いると結論が導ける場合が多い。この基準は、その後 J. Murdock と共同して多くの検証がなされ、発射痕の異同識別の世界では最も有名な基準となっている¹¹⁾。ただし、この基準を実務に用いている鑑定者は少ない (結論を導く過程で、CMS 本数を数えていない)。

CMS 基準は、「無実のものを有罪にしてはならない」ということを大前提にしている (国内でも、疑わしきは罰せずの原則として知られる)。そのため、誤って有罪にする可能性 (False Positive) の発生を極力抑え、その代償として誤って無罪にする可能性 (False Negative) を許容している。

それは彼の実験結果が端的に示している。彼の実験結果の代表例を Fig. 14 に示す。これは同一のけん銃及び異なるけん銃によって発射された被甲弾丸に認められる CMS の最大数をまとめたもので、この結果から「被甲弾丸では連続して 4 本以上一致した条痕があれば同一けん銃による発射弾丸と結論する」判定基準が提案された。確率分布の左側の山が異

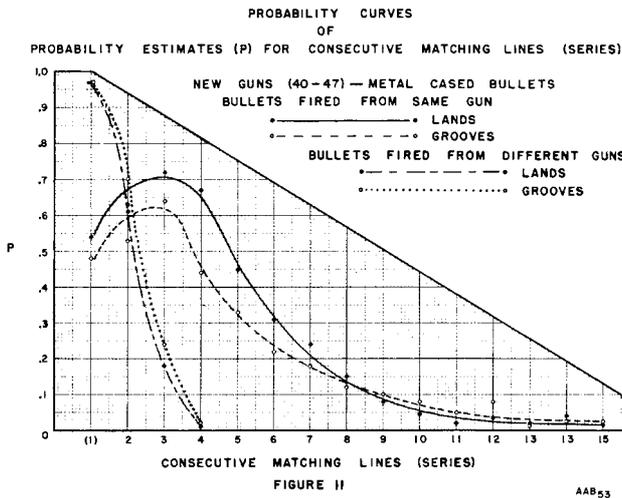


Fig. 14 Experimental Results of CMS Counted by A. A. Biasotti

なるけん銃から発射された弾丸を比較した時に認められるCMSの最大数を旋丘痕と旋底痕について示しており、右側の山は同様のものを同一けん銃から発射された対応する旋丘痕あるいは旋底痕を比較した時に得られたものを示している。異なるけん銃と同一のけん銃の発射弾丸の結果の分布の山の重なりが大きいことが分かる。この確率分布の山の重なり合いは、広範囲にデータを収集すれば避けられないものとなることは日々の鑑定経験から分かる。また、尺度を変えると山を分離できるという性質のものでもない。そもそも、「同一けん銃に由来する弾丸か否か」という分類を発射痕跡から行うという指標自体に無理があることは前述したとおりである。データの採取範囲を広げれば、この分布の重なり合う部分は増加する。提案した識別指標の優秀さを主張する論文ではデータ収集範囲が狭く、線条痕の異同識別の鑑定の非科学性を指摘する論文では、広範囲にデータ収集する傾向にある。Fig. 13の傾向は、筆者には作為を感じさせないものである。

Fig. 13の確率分布があるとき、4本のCMSを同一銃器による発射弾丸であるか否かの判断基準とした場合、False Positiveは0.5%にまで下げられるが、False Negativeはなんと40%にもなってしまう(旋丘痕での結果)。このようにCMS基準はFalse Negativeの犠牲のもとにFalse Positiveを最小限に抑えている基準である。

発射痕を含めた工具痕異同識別の判断基準に関する論文のサーベイがあり、これには過去から現在までの論点がまとめられている^{12) 13)}。CMS基準に関する批判は多いが、その批判はCMSに限ったものではなく、どんな基準にも当てはまるものが多く、結局どこかで線を引いて黑白を付けることが難しい対象なのである。そこで、各種の事象の尤度(ゆうど)を用いて、結果から原因の確率を計算するベイズの定理を用いた解析が増加している^{14) 15)}。ヨーロッパ各国の法科学研究所連合(ENFSI)の工具痕識別のワーキンググループでは、今後ベイズの定理を用いて工具痕の鑑定結果を評価する決定を行っている。

8. 線条痕識別の数量基準の検証

CMSを数える基準は、それまで数値で示された有効な基準が無かった線条痕の異同識別の世界に初めて持ち込まれた数量基準であった。ただし、客観的基準といっても「条痕を客観的に数えられるのか?」、「どこまで対応関係が良好な条痕を一致条痕とするのか?」の問題が残されていた。

筆者はBiasottiの要望にしたがい、当時まだ処理能力が低かったパソコンを用いてこれらの問題点の客観化の研究を行った¹⁶⁾。その後のパソコンの進歩と使用ソフトのバージョン変更に伴い、当時の結果を現在再現できないが、手法は以下の通りである。

- ア. 条痕表面に条痕の流れ方向と直角の方向からの斜光線照明を当てる
- イ. 条痕の方向と1辺が平行になるような長方形のウィンドウを設定し、その範囲の明暗値を条痕の流れ方向に積算する
- ウ. 得られた明度データを平滑化した後、データの連続した斜面の部分等を切り出し、その部分を条痕とする
- エ. 上記の手順でバーコード状のデータが得られ、比較すべき2つのデータの相対位置を移動させながら、データの重なり具合が最良の位置を探す

条痕位置の切り出し法には3種類を選んだ。明度データの下り坂の部分を選ぶ「正」と上り坂の部分を選ぶ「逆」及び明度の極大位置を選ぶ「ピーク」であった。Biasotti本人は写真の明るい部分を条痕と数えていた。すなわち「ピーク」である。斜光線で照明した場合、「正」は条痕の谷の位置にほぼ対応し、「逆」は山の位置に、「ピーク」は照明方向に向いた斜面に対応する(Fig. 15)。

以上の道具立てで、バーコード状に抽出した条痕の幅と位置がどの程度まで同じであれば一致条痕と数えるかの限界値を種々に設定して、多くの比較を行った。その比較結果の一例(相対位置を移動しながら比較した%マッチとCMSカウントのグラフ)をFig. 16に示す。この例では中央位置で顕著なピークが出ている。Fig. 14に示したような、目立った損傷が無く、深さと長さのある条痕が付けられている資料間の比較では、多くの場合でこのような良好な結果が得られた。また、CMSカウントの%マッチに対する優位性も見られず、CMSカウントと%マッチの相関は高かった。

一方、変形や損傷が加わった弾丸では、%マッチのピークは低く、CMSカウントが威力を発揮した。ただし、機械的に条痕を数えると、本来対応しない比較において長いCMSカウントが発生することもあった。鑑定者は、単に条痕の位置と幅を見ているのではなく、画像から条痕形状も読み取って対応条痕を決定している。バーコード状にした条痕の対応関係から判断する場合は、CMSカウント7程度で同一工具由来と決めの方がよいことも分かった。一方で、そのようにしてしまうと本来合うべきものを切り捨ててしまう(False Negativeが高くなる)。結局、同一のけん銃から発射された弾丸と異なるけん銃から発射された弾丸との識別の誤判定率を

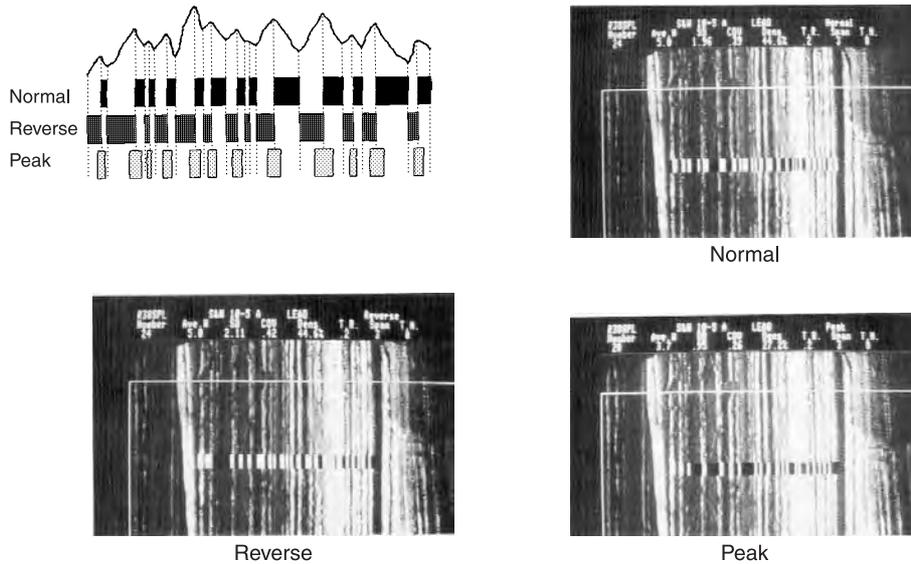


Fig. 15 Three Modes to Extract Bar Code Like Stripes
Normal, Reverse and Peak Method

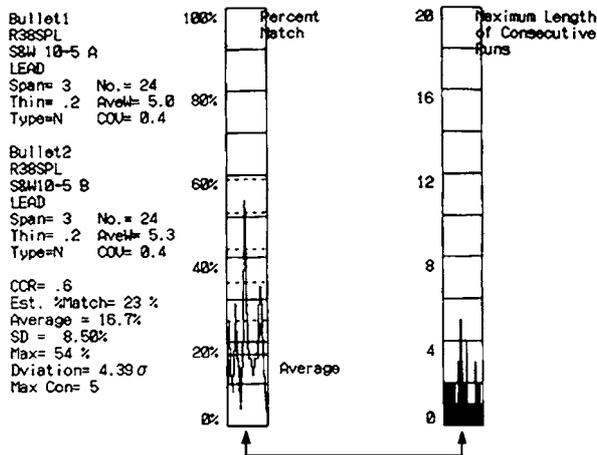


Fig. 16 Example of Comparison Result of ALIS

下げるにはこれだけでは難しかった。

Biasotti は、False Positive を防ぐ判断基準に興味があり、筆者は条痕の判断基準を利用して、自動的に同一けん銃の発射弾丸を選び出すことに興味を持っていた。そのためには CMS カウントだけでの判別は難しく、考える各種の基準を組み合わせ、場合に応じてそれらの基準の重み付けを変化させることによって識別精度が向上するのではないかと考えた。その目的の基に、%マッチや CMS カウントのピークが出た位置と両者の旋丘痕のエッジのそろい具合とか、1 条だけでなくすべての旋丘痕での条痕の対応関係を総合的に評価する方法等に興味の対象が移った。しかし損傷弾丸を扱うと多くの問題が生じ、例えば旋丘痕のエッジがつぶれていれば、ピークが中央に生じないこともある（ピークが中央に出ることを重視しすぎると検出に失敗する）。自己相関の高い痕跡では中央のピークの抜けが低い（中央のピークの抜けが良いものを評価しすぎると、そうでない場合を見落とす）。損傷弾では CMS カウントのピークと%マッチのピークがずれた位置で生じる（両者が同一位置に生じたものに高い評価を与える手

法が失敗する）等の問題があった。また、損傷により表面の伸縮が生じた場合には、相対位置を移動した際に指標のピークが現れにくかった。しかし、その表面伸縮を補正して強引に条痕を合わせることは、どのような分布の条痕でも最終的には合わせられてしまうという批判に答えられないので、それは行うべきではないと考えた。損傷部位で意味の無い痕跡が付いている範囲を手作業で除去すれば結果は大幅に改善されるが、その手間は自動処理の意味を失わせるものであった。

結局、CMS カウントの基準を用いて、自動的に異同識別できる資料は弾丸底部付近に条痕が付けられている被甲弾丸と、損傷が少なく、旋丘痕幅全体で条痕が付けられている部分が残されている鉛弾丸等であった。このような資料であれば、データ数を増加させてもその中からの確なものを見分けた。この結果は Biasotti を喜ばせなかったが、現実の発射弾丸に対応条痕がそれほど見られないという現実に沿った結果と考えられる。そもそも、鑑定者が目で見ても判別できないものを判別できるようにする手法ではない。そこで、当時最も適切かつ慎重な結論を導いていた科警研の鑑定者と筆者のシステム (ALIS) の結論との比較実験を行った。鑑定者は、同一けん銃から発射された弾丸の対応する旋丘痕の比較を行い、その比較結果からそれらが同一のけん銃で発射されたものである主観確率を答えてもらった。ALIS も同じ部分の比較を行い、痕跡の対応状況を 5 段階のランクで評価させた。その結果は驚くほど一致した。

損傷変形のある弾丸を対象とすると、自動識別の判別成績を向上させるためには、手作業が増加し、場合分けでプログラムが複雑化する。筆者の手法は Biasotti の考え方に沿った条痕に着目するもので、局部的に条痕が密集して、その部分が良く合う資料では威力を発揮する。それに対して旋丘痕幅を等分して、各部分の痕跡の類似度を扱う手法の提案もあるが、条痕の間隔がその分割区間幅程度の場合にはうまくいくが、条痕の幅が区間の幅より広いものや、極端に狭いもの

が含まれている痕跡では、その特徴を捉えきれない。ニューラルネットワークを用いた手法の提案もあるが、学習するデータが正しいものばかりであればうまくいかも知れないが、損傷痕が半分以上あるような資料では、それを除く作業が繁雑となることはどのような手法を用いても同様と考えている。

すべての場合で同様の基準で条痕の対応状況を検索するのは効率が悪すぎる。「粗い条痕が多く付いている」、「損傷痕で覆われている」、「表面全体が滑らか」、「中央に特徴的な条痕が1本ある」等といった一目で分かる条件で対象資料を絞り込んでから、細かい痕跡の対応状況を調べた方が効率的である。また、「このような痕跡はなかったかな」といった場合に、該当する画像を引き出せることの必要性を痛感した。その後、ハードディスクの容量単価の急激な低下により大量のデジタル画像データを保管可能になったことから、痕跡画像にコメントを付けて保管し、そのコメントによって検索するシステム BIRI (Ballistic Image Retrieval & Identification) システムを作成し、現在はそれを利用している¹⁷⁾。ネーミングは、主要国が同様のシステムを運用している中で、最後に実用化したことの自戒を込めたものである。なお、繰り返しになるが特定の資料における異同識別の結論を得るには、比較顕微鏡で確認するのが最速で確実性も高い。

9. 痕跡観察のその他の問題

工具痕の鑑定作業は比較顕微鏡を用いて行われるが、痕跡の見え方(画像)は、その照明方法によって大きく変化する。この作業を自動化する上では、対象物の変動要因が少ない方が好ましく、3次元形状そのものを扱った方がよいという主張が古くからあった。また、照明条件による画像の変動が少ない同軸落射照明による画像を解析対象とする事の利点が主張されることもある。IBISは基本的には同軸落射照明画像を扱ってきた。

この中で3次元形状を扱う手法の利点に関する根拠は、「痕跡の重要度と痕跡の深さが比例している」ことにあり、条痕の並びが同様であっても深さが異なるものを区別することによって判別精度が上がるというものである。実際は、工具痕の深さ方向の再現性は痕跡位置(2次元)の再現性より遙かに低い。同一工具による加工であっても3次元形状が容易に変化することは簡単な思考実験から明らかである。例えば、工具を強く押し付ければ深い痕が付くが、その力が弱ければ浅い痕となる。押し付ける力が同等であっても、ワークが柔らかければ深い痕が付くが、ワークが固ければ浅い痕となる。ドライバー等の工具痕の鑑定では、刃先の損耗を防ぐために、対照用の痕跡は鉛板等の柔らかい材料を用いて作成される(条件を変化させて繰り返し採取する必要がある)。この痕を金庫等の鋼板に付けられた痕跡と比較する場合、痕跡の深さ方向の情報はある程度無視することが重要である。

さらに、痕跡の重要度と深さが比例するという根拠も、痕跡そのものの類似性を問題とするのなら成立するが、工具

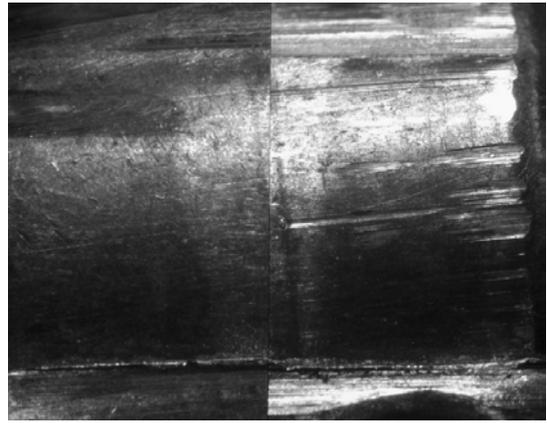


Fig. 17 Deep Striations Appeared on Right Side Bullet Which Originated from Cartridge Case

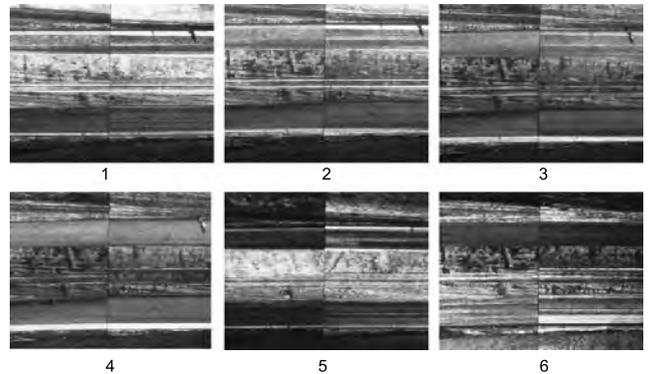


Fig. 18 Comparison Photographs of Landmark under Different Lighting Condition

Lighting condition in left and right side in each comparison photograph was almost the same. Characteristic striations appeared in center of landmark. Those characteristic striations are easily recognized in photo 1 and 2. Those characteristics are obscure in photo 3 and 4. Those are recognizable in photo 5 and 6, however the images are much different from photo 1 and 2.

Examiner can check all these images in short time by rotating bullets under comparison microscope. When a bullet is fixed, one must change lighting condition to check various striations. Where lighting condition is intentionally changed in right from left, it becomes very difficult to identify marking on photograph.

そのものを識別する際には成立しない場合がある。前述した準型式特徴は一般的に深い痕跡であり、それ故再現性が高いのだが、兄弟を従兄弟と区別する際の障害となり得る。また、深い痕が親の影響ではなく、子供に元々あった特徴(発射以前の弾丸に付けられている痕)の場合もある。例えば、弾丸は葉きょうに組み付けられるが、そのときに葉きょうによって擦過痕が付けられることがある(Fig. 17)。3次元形状測定をすると、このような痕跡の影響を受けたデータが採取されるが、それを機械的に除去するのは困難であり、結局人間が目で見ながらデータから除去することになる。

筆者の経験では、深い痕は、多くの痕跡の中から対象を絞り込む際には役立つが、最終的な結論は細かな痕跡の対応関係も考慮するので、3次元形状を測定する利点をそれほど感

じない。実際、判断に迷った際に「この痕跡の3次元形状が分かれば迷わずに結論が得られるのだが」と感じたことはない。比較顕微鏡下で弾丸を回転させながら観察して得られる情報以上のものが3次元形状測定で得られるとは思わない。

一方、画像が照明条件によって大幅に変化することは否定できない。Fig. 18 にその一例を示した。痕跡の異同識別において、多数の資料の中から該当するものを検索する際には、細かい部分の検討をすべきか否かの決断を素早く行う必要がある。そのような場合に Fig. 18 の 1, 2 に見られる旋丘痕の中央部の条痕の対応関係は重要な指標となる。1, 2 では分かりやすい条痕も、他の照明条件ではかなり異なった様相となり、それほど特徴的に見えなくなる。比較顕微鏡の左右で照明条件を変えてしまうと、対応すべき条痕も全く異なって見えることは容易に理解できるであろう。ところで、特徴痕の見やすい 1, 2 の形状が弾丸の3次元形状に対応したものであるかという点、そうでもない。多くの場合で、同軸落射照明である 5 の画像が3次元形状に近い見え方を示す。

比較顕微鏡を用いた鑑定作業では、照明はあまり動かさず弾丸の方を回転させながら、様々な見え方を示す条痕を観察し、特徴的に見える対応条痕を探している。その過程で、浅い条痕でも特徴的に見える場面があることはよく経験する。昔から、痕跡の鑑定は、照明によって微細な痕跡を浮き出させるのが技術(腕)だといわれてきた。これが非科学的だという批判もあるが、一面の真実はある。

10. おわりに

物体表面に残された工具痕に見られる類似性の大小から、それを加工した工具を特定する技術は、その手法自体に矛盾点があり、すべての場合で正しい結論が導ける訳ではない。原理的にはすべての条件のものを識別できなくても、実際にはほとんどの場合で正しい結論が得られている。その理由は、例えば同一工具で加工された使用程度が同程度の銃身のけん銃が、ある発砲事件の容疑者の周辺の別の者が所持している確率が低いからである。このように、各種の事象の確率を総合して判断すると、工具痕の対応関係が特別に良好でなくても、一定の類似性があれば十分な証拠価値がある。

工具痕の鑑定は、容疑者を特定する技術ではなく、使用した工具(銃器)を特定できるにすぎない。銃器は人の手をわたり、最終所持者が必ずしも発砲事件を起こした者とはいえない。その周辺の捜査と証拠固めが必要であり、被疑者の起訴の過程では、すべての証拠や事実関係を、それぞれの確実性とともな総合的な判断が行われている。

謝 辞

本稿では、故 A. A. Biasotti の図表の多くを引用させてもらった。実の息子のようにかわいがられ、「遠くから来た人の貴重な時間を無駄にできない」と食事時間も切りつめて1日中議論したことが懐かしく思い出される。この機会に霊前に改めて深謝します。

参 考 文 献

- 1) J. S. Hatcher, Textbook of Firearms Investigation, Identification and Evidence, Small Arms Technical Publishing Company, 342 (1935).
- 2) J. D. Gunther, C. O. Gunther, The Identification of Firearms, John Wiley and Sons, 342 (1935).
- 3) J. S. Hatcher, et al., Firearms Investigation, Identification and Evidence, Stackpole Books, 536 (1954).
- 4) J. H. Mathews, Firearms Identification, The University of Wisconsin Press, 400 (1962).
- 5) G. Burrard, The Identification of Firearms and Forensic Ballistics, Herbert Jenkins, 217 (1934, 1956).
- 6) <http://www.fti-ibis.com/>
- 7) <http://www.atf.gov/nibin/>
- 8) A. A. Biasotti, Rifling Methods — A Review and Assessment of the Individual Characteristics Produced, AFTE J., **13-3**, 34-61 (1981).
- 9) A. A. Biasotti, Bullet Comparison — A Study of Fired Bullets, Statistically Analyzed, A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of Criminology, University of California Berkeley (1955).
- 10) A. A. Biasotti, A Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets, J. of Forensic Sci., **4-1**, 34-50 (1959).
- 11) A. A. Biasotti, J. Murdock, Criteria for Identification or State of the Art of Firearm and Toolmark Identification, AFTE Journal, **16-4**, 16-24 (1984).
- 12) R. G. Nichols, Firearm and Toolmark Identification Criteria: A Review of the Literature. J. of Forensic Sci., **42-3**, 466-474 (1997).
- 13) Nichols R.G. Firearm and Toolmark Identification Criteria: A Review of the Literature, Part 2. J. of Forensic Sci., **48-2**, 466-474 (2003).
- 14) S. G. Bunch, Consecutive Matching Striation Criteria: A General Critique, J. of Forensic Sci., **45-5**, 955-962 (2000).
- 15) C. Champod, D. Baldwin, F. Taroni, J. S. Buckleton, Firearm and Tool Marks Identification: The Bayesian Approach, AFTE Journal, **35-3**, 307-316 (2003).
- 16) T. Uchiyama, Automated Landmark Identification System, AFTE Journal, **25-3**, 172-196 (1993).
- 17) T. Uchiyama, Ballistic Image Retrieval and Identification (BIRI) System. Forensic Science International, **136** Suppl. 1, 157-158 (2003).