



随 筆

物づくりとダイヤモンド

井 川 直 哉*

Diamond in Advanced Manufacturing Technology

Key Words : Diamond, Ultraprecision Machining, Nanotechnology

1. はじめに

美と富の象徴として、そして時には飽くなき欲望の対象としてのダイヤモンドにまつわる話題には事欠かない。そして最も硬くて摩滅しにくい物質であることもよく知られている。しかしこの物質が我々の日常生活を支える技術や、その基盤としての工学・技術において果たす、あまり表に出ない性質、それによってもたらされる価値や決定的役割が人々の話題になることは甚だまれである。しかも大げさに言えば、この役割こそが現代科学・技術を支えている局面も少なくないのである。

ここでは主として技術分野の方々に、ダイヤモンドの知られざる素顔の一面—工学・工業的側面—をご紹介します、あわせて、ある種の極限物質ともいえるその能力を利用した、筆者と協力者による物づくり研究の流れと、それに基づく体験的研究随想を述べさせていただきます。

2. 工業物質としてのダイヤモンド— 苦しいときのダイヤモンド頼み

類まれな物質としてのダイヤモンドの基礎物性については古くから多くの資料がある。また人工合成の成功(1955)や、その後の研磨(研削)材料としての多用、薄膜状ダイヤモンドの気相合成(1970~)など工業的展開に多くの話題がある。その詳細は他の資料にゆずるとして、有用な工業的性質の一部を挙げ

てみると、軽量(比重:3.52)、並外れの高い硬さ(例:ヌーブ硬さ 約6,000~10,000 kg/mm², 焼き入れ鋼の約10倍)と強度(例:引っ張り強さ3~20×10 GPa), 大きなヤング率(10.5×10² GPa以上, 鋼の約5倍), 銅に比べて数倍の高い熱伝導度(2,000~W/m・K, タイプII), 特異な光学物性(例:屈折率2.5), 低い線膨張係数(例:0.8×10⁻⁶/K), 高い化学的安定性(酸化開始温度900~1,000 K)などがある。

これらの性質を利用して、一般の工業材料では対応できない条件下で用いられる道具、機器部品、電子部品、光学部品、医用器具部品などが、数量的には多くはないがかけがえのないキー・パーツとして重用されている。いわば“苦しいときのダイヤモンド頼み”である。具体的には、極度の耐摩耗性が求められる機器部品(ガラス切り、ビット、スクライバ、切削・研削工具)、数GPa以上の高圧力に耐える超高圧部材(アンビル、硬さ測定用圧子、高圧セル用窓材)、特殊な条件下で用いられる特殊電子部品(高機能ヒートシンク、耐熱センサ)、高屈折率や透光性が求められる特殊光学素子(レンズ、窓)、nmレベルの規模での鋭利性が必要な超精密・微細器具(ミクロトームナイフ、超精密切削工具、粗さ計用触針)などを例として挙げることができる。ただ、原理的には可能であっても、例えば大きさが数mm程度を超えるものは、合成技術が発達した現在でも当然コストと効用のバランスから実用性が制限されることはいうまでもない。もう一つの問題は、ダイヤモンドは熱力学的にもともと地上では準安定物質であるから、ある条件(例えば1,000 Kの高温、反応物質の共存など)の元では損傷を受けやすくなることである。この意味ではダイヤモンドといえども万能とはいえないのである。

以上の言わば予備知識を説明した上で、筆者が経験したほぼ50年の“物づくり学”の中でのダイヤモ



* Naoya IKAWA
1933年1月生
昭和30年大阪大学工学部精密工学科卒業
現在、大阪大学 並びに 大阪通信大学名誉教授、工学博士、専門は精密加工学、精密機器学
TEL 072-799-0997
FAX 同上
E-Mail ikawan@jttk.zaq.ne.jp

ソドとの付き合いを述べさせていただく事にする。

3. ダイヤモンドとの出会いと遍歴

研究生生活の大部分は、物づくり技術の中でも刃物（切削工具）で金属を削って精密な形を作り出す古典的手法の一つ“切削加工”に係わるものである。時代の流れに振り回されて確たる展望もなく過ごしたこともあった。しかしあえて言えば少なからぬ期間、ダイヤモンド（切削）工具とその応用の研究に明け暮れる結果となった。特に1980年代になってからはダイヤモンドバイト（単結晶を磨いて作った刃物）による超精密切削の極限加工精度は？という問題に意を注いだ。その対象とする加工精度のレベルは今ではnm（ナノメートル、1メートルの10億分の1）にも達している。

ダイヤモンドとの出会いはダイヤモンド砥石で始まった。ダイヤモンドの粉末（砥粒）と結合材としての樹脂、金属粉、磁器質粉体（単体または複合）とを混合焼結したダイヤモンド砥石（車）を高速回転させて、一般的な刃物材料としては最も硬さの大きい超硬工具（炭化物、酸化物などの焼結体）の研磨（研削）を行う技術の体系化がテーマであった。1950年代の後半、それはまだ産業界では貴重でかつ珍しい時代であった。一応の成果（学位論文、1965）は得たものの、大きさ μm 以下の規模で起こる、多くのパラメータが関係する加工現象の複雑さに閉口し、この技術を支配する本質はなにか？不変の研究対象はなにか？という疑問がついて離れなかった。それは多分、物質としてのダイヤモンドであろうということになり、まずダイヤモンド砥粒単体の性質解明に手を付けた。1回の作用時間（1msec以下）の間に砥粒が与える力学的、熱的、化学的負荷の性質を調べ、何万回かの負荷の結果として現れるダイヤモンドの摩耗の特徴の一つを解明した。ここでは各種の鋼材をダイヤモンド単粒で模擬研削（多数回の高速引っ掻き—一種の抽象実験）し、被削材硬さの最も低い純鉄の場合に最も大きな工具摩耗が観察された結果から、ダイヤモンドの熱化学的摩耗機構が推論された（1971）。また1,270 Kの高温下で接触させたダイヤモンド砥粒が、相手である純鉄の表面層に炭素として拡散した顕微鏡組織写真（写真1）を撮ったのもこの頃である。最硬の物質とされるダイヤモンドでも摩擦する相手と温度条件によってはこのように比較的容易に

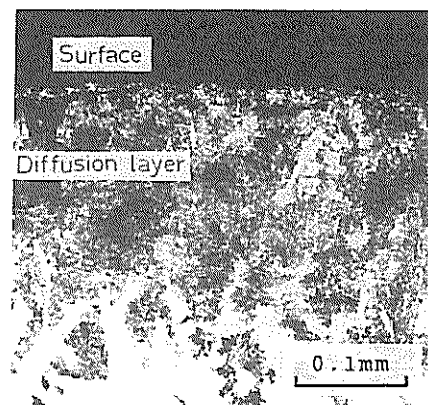


写真1 真空加熱炉中でダイヤモンドに加圧接触させた純鉄の表面層に拡散した炭素の光学顕微鏡写真（1,270 K, 4×10^{-2} Pa, 30min）
—ダイヤモンドの熱損耗のモデル実験—

摩滅されるので、先にも触れたように万能とは言えないのである。

成り行きとして当然、試料として砥粒よりは単結晶を採り上げ、より一般性のある各種工学物性を研究対象とすることになった。まず、微細ダイヤモンド圧子（インデンタ）によって発生するダイヤモンド試料表面の μm 規模クラックを、アコースティック・エミッション（AE）信号で検出する脆性材の強度測定法を開発した（1982）。これを利用して、赤外吸収など各種の科学的手法で欠陥が同定されたダイヤモンド試料について強度測定を行い、工具材料としての非経験的選別への展望を得た（1985）。

ダイヤモンドの優れた物性が明らかになるに連れて、その極限能力、さらには切削加工の極限加工精度への興味が深くなった。当然、関連技術としての工作機械要素の挙動に関する知識が重要である。そこで行った、工作機械の位置決め精度の基礎解析（1975）、nmレベルの分解能を持つ光電変位センサーの開発（1987）、それを利用した空気ベアリングのnmレベルでの挙動解析（1986）、レーザ光線の直進基準としての可能性解析（1988）などの研究が思いだされる。これらはいずれもnmレベルでの機器挙動を対象にしており、現今のいわゆるナノテクテクノロジーの一部を担うものであろう。因みに、物づくりの分野ではすでに1974年にこの名称が（故）谷口紀男博士によって提唱されていた。

4. ある転機—超精密切削

私達のダイヤモンド工具研究において一つの転機となったのは、1980年代半ばに発足した米国ローレンス・リバモア国立研究所との共同研究であった。当時、同研究所では慣性核融合(レーザ核融合)炉、並びにいわゆるSDI(戦略防衛構想、別名スターウォー構想)の重要な構成要素である強力レーザ光源の反射集光ミラーの製作を担当する精密工学プログラム(強力レーザ光を集光して敵ミサイルの頭脳部を不能にする構想の一部)が発足していた。それは高純度の無酸素銅を素材として、ダイヤモンドバイトによってnmレベルの加工面粗さと複雑な形状を持つ金属反射鏡の超精密切削仕上げ(SPDT, Single Point Diamond Turning)を目的としていた。そのリーダーが日本の関連研究調査のため約半年間の滞日中に私達の研究室を訪れ、当時進めていた単結晶ダイヤモンド内の強度欠陥同定に興味を持ち、その後の情報交換を経て日米科学共同事業(日本：日本学術振興会、米国：米国科学財団 NSF)の援助により、公式には1986年、7年の2年間の共同研究を行った。この間、日本側は精密ダイヤモンド工具の供給、米国側は同研究所の当時世界最高と言われた切削実験装置による切削実験を担当した。

実験計画は双方の長時間の討論によって練ったものだが、米国側の支援設備、組織が充実しているので信頼できる結果が素早く得られた。当時の私達の、いわば殆どが自作の実験装置や計測器、それに大学院生を頼りにすることの多かった実働体制と比べて彼の地の体制を羨ましく思ったものである。しかしお蔭で、電着銅の切削実験において公称切取り厚さ約1nmの切削が可能なることを証明できたし(写真2)、nmレベルの刃先形状精度を持つダイヤモンド切れ刃(写真3)が実現し得ることもわかった(1993)。これをりんごの皮むきに例えれば、ダイヤモンド製の精密なナイフとnmレベルの運動精度(特に運動再現性)をもつ機械を用いれば、nmレベルの極めて薄い皮を安定して剥ぎ取る作業が出来るとも言えようか。

これらの結果は、nmレベルの精度を目指す超精密ダイヤモンド切削の可能性に確かな根拠を示すと共に、一方では、より正確な現象解析のためには従来の連続体モデルが不十分であることを示唆する事

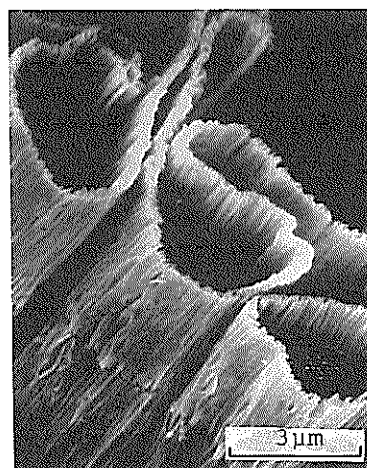


写真2 高純度電着銅のダイヤモンド切削で採取された切りくずのSEM写真
(切り取り厚さ1nmに設定された切りくずの厚さは排出時には数nmとなり、縮細状に折り重なる)
— 制御可能な寸法精度レベルの検証 —

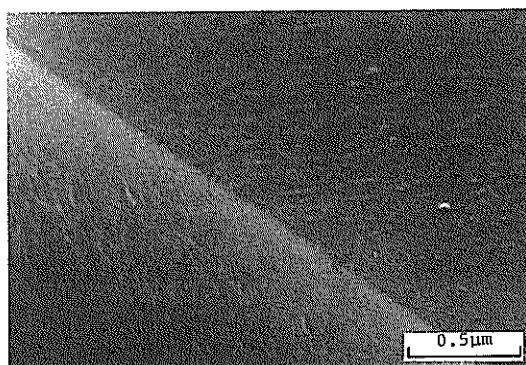


写真3 超精密ダイヤモンド切削工具切れ刃稜のSEM写真
— 刃先の鋭利さの検証 —

にもなった。それは、原子数にして僅か数個分の規模で起こる現象を数理的に取り扱うには、原子・分子からなる粒子構造の挙動を対象にするのがむしろ自然だからである。こうして取り組み始めた切削現象の分子動力学シミュレーションは幾つかの成果(1993)を挙げてはいるが、今後必ず実用的問題となるダイヤモンド工具の摩耗機構の体系的理解(2000)と、その摩耗制御への応用の面で共に今後の進展が期待される。

5. “物づくり学” 随想

これまで述べてきた研究体験を通して、大学での物づくりに関する“基礎研究”について筆者は次の

ように考えている。物づくりの研究(しばしば工学の全ては)は世間的な意味では典型的な“応用研究”である。これまで基礎力不足を痛感することがしばしばあったので、例えば加工研究の中でも“基礎的研究”をと言う思い入れがあり、それを結果的にはダイヤモンドの工学物性とその応用としての超精密切削研究の中に見つけたか?と言う気がする。

工学における基礎研究は、その結果が出来るだけ広く活用されるという有用性・展開性、それ自身の主体性・独創性・能動性などが求められる。少し我田引水を述べさせていただくならば、超精密切削加工は確かに物づくりの一手段であると言う受動性は否定できないが、製作されたキー・パーツの寸法・形状精度が、完成されたシステム全体の機能限界(例えばレーザ光の集光性能)を決めると言う意味で能動的である。それはまた学問的にも、高温、高圧、極微、界面などの、いわばある種の極限条件下の物質挙動を対象とする意味で、先導的、主体的であろう。そこでもたらされる情報の応用は広い展開性が期待できる。

さて、上のような意味での基礎研究を潜在的に意識しつつ私達が行ってきたのは、一口で言えば可能性の探求(Feasibility Study)である。ある個別技術がどのレベルまで原理的に到達可能か?という問題への解答を探ることである。この過程で心がけていることがいくつかある。素朴な疑問、素直な思考、“雑音”を極力排した実験・計測などである。それらに基づき解析と実現が可能なモデルを作る。勿論、深い洞察力、鋭い直感が必要だが、これは神様が各人の努力に応じて与えて下さるものであろう。

一方、現実の物づくりでは当然きわめて多くのパラメータが加工結果に関係する。だが適切なモデルが正確に構築され、かつ昨今の情報検出・処理技術をもってすれば現象の予測、制御を行うのに本質的な障害は少ないと言えよう。残されるのは研究・解析コストと効用・効果とのトレードオフの問題である。しかしこれは、関連技術の進歩によって近い将

来飛躍的に改善されることすら予想される。

Feasibility Study形の研究で、私達は計測器をのぞけば既成の商業機器を用いることは殆どない。必要なモデル化が一般に困難だからである。正確なモデル化の出来ないシステムを用いて得た研究結果は、応用の一般性と言う観点からはしばしばある種の危険性をはらんでいる。基礎研究に携わるものとして心がけておきたい。

6. おわりに—Diamonds are forever

研究生活を振り返ると、ダイヤモンドは実に多くのものを与えてくれたようである。ダイヤモンドは“刃物”としてある種の極限物質であるがゆえに、期せずして物づくりの手法の一つである切削加工によって可能な極限の加工精度は?という課題を研究することが出来た。ご協力いただいた多くの関係者に心から感謝したい。その過程で行った関連研究を含めて、物づくりの基礎研究並びに教育に必要な、私なりの工学観を幾分かは育むことできたように思う。

堅い話ばかりではなく、幾つかの楽しい事も想いだされる。ダイヤモンドに係わる研究交流で得た人脈のお陰で、ある時はロンドン市内のダイヤモンド・ビジネスの幹部の好意で、ダイヤモンド原石の“山”を目の当たりにできたし、また別の機会には、人工ダイヤモンドの超高温・超高压合成に成功したGE社の、Diamond Mine(ダイヤモンド鉱山)と書かれた研究室を訪れ、合成炉の原型に触れ、セミナーを開催して交流できた印象深い思い出も残っている。更に、かの有名なスパイ映画007シリーズの一つ、“Diamonds are forever”という作品にまつわる話がある。そのアムステルダムでのロケ現場となった地域でダイヤモンド・ビジネスに携わる旧知の研究者を訪ねたとき、彼の指差す窓のすぐ下に、あの有名な追跡シーン? 運河に架かる巨大な開閉式の橋が見えた。いささかこじ付けだが、私にとっても“ダイヤモンドは永遠に(上記の邦訳題名)”である。

