



H. Ike

環境負荷を低減する塑性加工の トライボロジー技術の共同研究

(社)日本塑性加工学会 プロセス・トライボロジー分科会

執筆代表者 池 浩*

1. はじめに

地球環境とか廃棄物とかという言葉を見聞きしない日がないほどに環境問題は全人類にとっても深刻な課題となってきた。それは人間の生産・消費・廃棄などの社会活動が地球環境に脅威を与えるほどに大きくなってきたことの証でもある。「大きいことは良いこと」という単純素朴な考え方はいまや通用しない。少なくとも地球環境に与える影響は「小さいことは良いこと」の時代である。

このような問題の指摘はすでに数十年前から行われており、国際的な合意や協定などもすでに1972年(ストックホルム人間環境宣言)から始まっていると言えるが、1990年代になってオゾン層の破壊や温暖化の問題がマスコミを賑わすようになってから現実の問題として広く浸透してきた。そして地球温暖化ガスの削減に関する京都議定書(1997年)等、具体的な社会的行動を要請する法体制も整備されつつある。

日本塑性加工学会プロセス・トライボロジー分科会ではこのような社会的趨勢をとらえて表題のような共同研究を企画し、天田財団より助成を得て各種の調査研究活動を推進した¹⁾。さらに同分科会が中心的に執筆して日本塑性加工学会会誌「塑性と加工」では2005年1月号で「地球環境とこれからの塑性加工トライボロジー技術」²⁾と題した特集号を発行した。ここではこの経緯をふまえて本特集テーマ「表面改質と界面の制御」という観点から問題の再整理と展望を行う。なお地球環境の形成過程については上記特集号の解説³⁾、地球環境とトライボロジーの関わりの社会的側面については筆者の解説⁴⁾を参照していただきたい。

トライボロジーは潤滑を中心に接触・摩擦・摩耗・表面損傷などを包括した研究分野であるが、それが社会的に注目されたきっかけとして摩擦摩耗等による社会的損失が経済的にも巨額になることが指摘され、研究開発を促進したという経過がある。別の言葉でいうとふさわしい潤滑を行うことにより、トライボロジー技術はエネルギー及び材料の消費を削減することができ、その意味で地球環境の負荷の低減に貢献してきた。

ところが1990年代にクローズアップされたのは化学物質の廃棄に関連する地球環境の悪化という側面が強

く、トライボロジーも潤滑剤の成分として各種の化学物質を使用していること、あるいは加工の前後の洗浄において地球温暖化ガスを発生する溶剤を使用していたなどの点から技術革新を要求される立場となった。

以下ではこの中で地球環境に優しいトライボロジーならびに加工技術という立場から追究されている技術開発を方法別に概観する。

2. 潤滑剤の開発

潤滑剤はトライボロジーの中核をなす物質であり、これまでの開発の方向性は後処理(除去)しやすく作業環境で有害でない範囲で成形限界が必要なレベルをクリアする物という考え方でなされてきた。しかし現在は環境問題から使用禁止もしくは将来使用禁止される可能性のある化学物質を排除した潤滑剤の開発が社会的に要請されている。

ヨーロッパでは2001年に提案された新しい化学物質の規制枠組み(Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals - REACH⁵⁾)の具体化について種々の議論が行われている。これは基本的には非常に厳しい化学物質の規制につながるものであり、最終的にどのような形で実施されるかについては不明な点があるにせよ、全体として化学物質への規制が強化されていく方向にあることは間違いない。

日本では環境負荷低減の立場からの潤滑剤の開発としてはダイオキシンを発生する可能性のある塩素(塩化パラフィンなど)の排除が最優先されている⁶⁾⁹⁾。塩基性カルシウムスルフォネートと硫黄系極圧剤を主成分とした潤滑剤が提案され代替が進んでいる。ステンレス鋼板のプレス成形やせん断などの厳しい条件ではさらに亜鉛系添加剤を加えた潤滑剤が注目されている⁸⁾⁹⁾。

冷間鍛造では化成被膜処理(ボンデ処理)に替わる乾燥被膜の開発が進められている。ボンデ処理は大量の水を消費し、またプロセスが長いことが生産技術の一つのネックにもなっているが、それに全面的に替わる潤滑性の高い被膜処理あるいは潤滑剤というものには得られていない。しかし一例として金属錯体の化学の応用というべき潤滑皮膜が提案され¹⁰⁾鍛造部品の中で難易度の低いものから順次

置き換えが進められているという実情にある。

熱間鍛造では主として職場環境労働環境の改善、廃棄物低減という趣旨で黒鉛フリー化、いわゆる白色潤滑剤による代替が進められている。潤滑性に優れる特殊な構造をもつアニオン性高分子と冷却性に優れるノニオン性高分子を組み合わせた水溶性潤滑剤により代替が可能と報告されている¹¹⁾。

板材成形などより軽度な潤滑条件に対しては低粘度油ベースで加工後の洗浄処理を必要としない揮発性潤滑油（無洗浄油）の開発がなされ適用も進んでいる¹²⁾。また生分解性を重視する欧州では松の木から採取した油の潤滑性に注目して開発が進められている^{13) 14)}。日本では小麦粉の潤滑性に注目した研究が行われ、ステンレス鋼板・チタン等のプレス加工にも適用可能性が高いと報告されている^{15) 16)}。また余剰あるいは流通経路に載れない農畜産物の利用という観点もだされ、豆乳あるいは牛乳のフィルムによる固体潤滑がところみられた。チタンの深絞りにおいてテフロンシートと同程度のLDRを示したという¹⁷⁾。

3. 工具および工具の表面処理

ドライ加工あるいはセミドライ加工を実現するうえで工具材質あるいは工具の表面処理の効果に期待するところは大きい。従来のTi, V系の表面皮膜は硬度が高く、工具摩耗の軽減には有効であるが、無潤滑での摩擦は比較的大きくドライ加工には適していない。近年着目されているのは工具として必要な硬さがありながらドライで摩擦係数の小さな工具材質あるいは皮膜処理である。炭化珪素やアルミナなどセラミック工具による冷延軟鋼板、亜鉛めっき鋼板、純銅板などの板成形でのドライ加工が可能とされた¹⁸⁾。また最近の工具表面処理のハイライトはDLC皮膜にあり、アルミニウム¹⁹⁾およびステンレス鋼板²⁰⁾の連続ドライ絞り加工の報告が出されている。塑性加工工具の表面処理において問題となる基盤と皮膜の密着性はショットブラスト処理によって表面粗さを制御し機械的結合力を増すことによって確保されている。

4. 被加工材への皮膜処理

過去においてポリマー膜を被覆した潤滑板^{21) 24)}という表面処理が提案されたが、潤滑性は優れていても後行程で除去が必要になるなどの問題により十分普及しているとは言えない。しかしアルミ板材においては材料の傷つきやすさをカバーする面もありプレコート材が一般化しつつある²⁵⁾。また飲料缶においてはストレッチ・ドロー法

との組合せによりポリエステル製の皮膜が活用され脚光を浴びた²⁶⁾。さらに環境対応がより大きな課題になるにつれ、プレコート鋼板^{27) 28)}の適用も増加しつつある。揮発性潤滑剤（無洗浄油）¹²⁾を使用する場合、潤滑性の不足をプレコート材で補っているという場合も多い。

5. 加工技術の革新

環境負荷低減と名をうって発表されているものには超音波や振動の付加²⁹⁾、対向液圧・水潤滑^{30) 31)}、などがある。深絞りにおける高圧空気潤滑³²⁾も提案されている。ストレッチドロー法²⁶⁾もダイ丸み部での板厚減少によりしごき加工を軽減している意味では一つの環境負荷低減加工法である。ただこれらの新しい加工法の多くは実用まで到達するには生産効率の評価や設備投資等の壁があるのでなかなか難しいところがある。成形限界の向上、仕上げの向上など他の利点も組み合わせていく必要があるだろう。潜在的には深絞りを浅絞りや張出しに変更するなどすべり量の軽減、成形加工から曲げ加工への転換、ティラード・ブランク等素材形状の変更による加工の軽減など、いわゆる加工の厳しさ・トライボロジー的条件（すべり距離、接触面圧、発熱、表面積拡大率等）の厳しさの軽減を加工面ではかることと潤滑技術を組み合わせることで環境負荷の低減をはかることができよう。

6. 環境負荷低減をめぐる技術開発の今後

以上のような状況をふまえながらプロセス・トライボロジー分科会では塑性加工のトライボロジー関連におけるこれまでの環境対応の技術開発を展望し、資料集を発行した³³⁾。それをもとに今後の展開を討議したとき、環境負荷低減方法の効果の定量評価法が存在していないことが大きなネックであるという共通認識を得た。効果と費用の比がわからないというだけでなく、加工素材、工具または工具の表面処理、加工法、潤滑剤、加工温度等の変更が組合わさって生じる場合に総合的にどの程度環境負荷低減が実現できているのか、現状では評価しにくいことがある。ある場合には設備の更新そのものも環境負荷として考える必要があるだろう。

この種の問題に関しては通常LCA (Life Cycle Assessment) という手法がとられている。しかしISO14040から14048にわたるLCAの国際標準³⁴⁾でも前提となる特定の目的に限定した分析をする傾向にあり、さらに影響評価の重み付けも価値判断等のはいつてくる余地があるので必ずしも総合的・客観的な評価になっていない。

「製造プロセスからのエミッション(製品以外の物すべて)を低減する技術開発」を目標にエミッションフリーマニュファクチャリング(EFM)³⁵⁾が模索されたが、その調査研究報告書でもアンケート結果として「生産機械分野では環境負荷評価法が未だ普及していない。普及していない理由は従来の評価法が煩雑であること、また加工時および廃棄時の環境負荷に関するデータが不足していること、また現在の評価法には時間的な概念が導入されておらず、変化の激しい工場の設備を対象とした場合に評価が困難となる。環境負荷値だけでなく、生産活動全般に係わる評価法開発に対する要望が強い」³⁵⁾とされている。また「これまでの工場や生産プロセスの設計では、高効率、高エネルギーの観点から、生産性を優先して、生産形態の決定や製造工程の選定が行われていた。これからは、環境性を考慮して行程や加工法を選定する方向へ価値観が移行することは明らかである。しかしながら、従来のLCA技法では、異種の行程や加工法の比較評価については十分な議論がなされておらず、有効な手段とはいえない。エミッション排出はエネルギー効率などの環境評価項目から、除去加工と塑性加工、あるいはレーザー加工と電気的加工、などについて、比較評価することができない。異種間での比較の必要性はますます増加するものと予測でき、新しい異種間比較評価方法の提案が望まれる。」³⁶⁾と指摘されている。当分科会での検討会における議論でもこれと同じような意見が多く、上に指摘されている「環境負荷値だけでなく、生産活動全般に係わる評価法」「異種間比較評価方法」の提案をいかに実現するのか、本格的検討に取り組む時期に来ているように考えられる。その意味で具体的なプロセスについてのケーススタディから始まって、問題の抽出、手法の検討等を推進する場の設置が期待される。

7. おわりに

環境負荷の低減をめぐるのは欧州において REACH (Registration, Evaluation, Authorization of Chemicals) が本格的に稼働する状況にある。また地球温暖化ガスの排出低減については京都議定書の発効という積極面がみえる反面、排出権ビジネスの肥大化が危惧される。最近の動きについては「2005年11月28日から12月11日にかけて、議定書に基づく温室効果ガス削減を推進するための第1回京都議定書締約国会合(COP/MOP1)がカナダのモントリオールで開催された。会合では、地球温暖化防止の京都議定書の運用ルール『マラケシュ合意』を正式採択し、森林吸収源に関する算定ルールや、各国の二酸化炭素削減状況をチェックする遵守委員会の設置などが決まった。な

お、クリーン開発メカニズム(CDM)については、省エネルギー事業の認定基準が緩和されるほか、これまで対象外だった二酸化炭素の回収・貯留事業(隔離事業)が議題に取り上げられており、今後、対象事業としての承認に関して議論することとなっている」³⁷⁾と報じられている。

2013年以後の枠組みづくりについては、米国の戦略(二酸化炭素の隔離[地球温暖化の主要な原因である二酸化炭素を、地下の地質が持つ二酸化炭素貯留能力や海洋が持つ二酸化炭素の吸収(溶解)能力を活用し隔離すること]をはじめとする技術開発へ投資を集中すること)が明確化される中で世界政治での活発な駆け引き材料にもなっている。自然環境と科学技術を土台としながら社会的・政治的要素も影響を及ぼす問題と言える。技術面から社会的条件を変更するのはなかなか難しいが研究開発に対する助成のみならず、実用化に対しても奨励金にあたるようなものを社会的支援策として導入すべきではないだろうか。

技術的には2から5で述べたように近年のトライボロジー研究のかなりの部分で地球環境の負荷低減にからむ試みが展開されている。究極的にはドライ加工的な方向に進むことは考えられるが、当面のことを考えると万能と言える対策はないので、筆者は加工方法や被加工材に合わせて一番良い対策を総合的に選択し開発していくことが塑性加工のトライボロジストの役割のように感じている。そのためには加工界面の条件や状況を的確に把握することが必要であり、新たな計測システムであるとか、数値シミュレーションと連携したマイクロ解析等が必要になっていないだろうか。また加工条件の変更、潤滑剤の変更等の状況の整理するためにはトライボロジー・データベースの構築が必要という考え方もあるが、実際には多因子のからむ現象のため、十分に状況を特定できるだけの情報のないデータが多い。トライボロジー的に必要十分な情報整理も大きな課題である。

最後にこの場を借りて当分科会の標記研究開発活動に財団法人天田金属加工機械技術振興財団より研究開発助成をいただいたことを御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 池 浩・片岡征二：研究概要報告書(17)，(2005)，61-66，財団法人天田金属加工機械技術振興財団。
- 2) 日本塑性加工学会編：地球環境とこれからの塑性加工トライボロジー技術 特集号，塑性と加工，46-528(2005-1)，4-70。
- 3) 片岡征二：同上，4-10。

- 4) 池 浩：同上，64-70.
- 5) REACHについては下記を参照されたい。
<http://europa.eu.int/comm/environment/chemicals/reach.htm>
- 6) 産業構造審議会 廃棄物・リサイクル小委員会：品目別廃棄物処理・リサイクルガイドライン，(2001)，27.
- 7) (社)潤滑油協会：塩素フリーできれいな環境，(2003).
- 8) 木村茂樹：196 回塑性加工シンポジウム，(2000)，53-61.
- 9) 横田秀雄：文献2)，11-14.
- 10) 樫村徳俊・竹内雅彦・小田 太・河原文雄・尾嶋平次郎・伴野 満：塑性と加工，41-469 (2000)，109-114.
- 11) 原田辰巳：塑性と加工，44-515 (2003)，1172-1176.
- 12) 木村茂樹：塑性と加工，文献2)，15-18.
- 13) Ahlroos, T., Parikka, R., Kupiainen, V. and Varjus, S.: Proc. 2nd Int. Conf. Tribol. Manuf. Proc. (ICTMP), (2004), 501-507.
- 14) Klocke, F., Maßmann, T., Lugscheider, E., Bobzin, K. and Bagcivan, N.: *ibid.*, 629-640.
- 15) 吉村博文・林 豊和・片山純一・不破英次：塑性と加工，40-457 (1999)，134-138.
- 16) 吉村 博文ほか：54 回塑加連講論，(2003)，251-252.
- 17) 平田康一：文献2)，28-32.
- 18) 片岡征二・基 昭夫・玉置賢次：塑性と加工，文献2) 52-57.
- 19) 村川正夫：文献2)，48-51.
- 20) 野口裕之・村川正夫・片岡征二：56 回塑加連講論，(2005)，305-306.
- 21) 伊藤秀男・竹島義雄：住友軽金属技報，35-3/4 (1994)，50-61.
- 22) 勝見俊之・宮内優二郎・斉藤勝士・菊池郁夫・円山勝俊，まてりあ，34-6 (1995)，789-791.
- 23) 須藤忠三，プレス技術，33-8 (1995)，29-33.
- 24) 金井 洋・平 武敏，プレス技術，33-8 (1995)，34-37.
- 25) 大澤泰明：196 回塑加シンポジウム，(2000) 29-36.
- 26) 今津勝宏・小林 亮・山田幸司・毎田知正・中村琢司：塑性と加工，45-527 (2004)，979-984.
- 27) 柏村敬二：塑性と加工，44-507 (2003)，432-435.
- 28) 金井 洋・植田 浩平，プレス技術，42-13 (2004)，52-56.
- 29) Kataoka, S. and Murata, M.: Proc. 6th ICTP, (1999), 633-636.
- 30) 中村和彦：塑性と加工，41-471 (2000)，390-394.
- 31) Murata, M. and Miyamoto, H.: Proc. 7th ICTP, (2002), 1645-1650.
- 32) 井口典明・内田幸彦・星野倫彦：56 回塑加連講論，(2005)，311-312.
- 33) 日本塑性加工学会プロセス・トライボロジー分科会：塑性加工関連のトライボロジーにおける環境問題一分科会文献データベースを活用した現状と課題の分析，(2004).
- 34) JIS では ISO と同一番号で Q14040 (原則および枠組み)，Q14041 (目的および調査範囲の設定ならびにインヴェントリ分析)，Q14042 (ライフサイクル影響評価)，Q14043 (ライフサイクル解釈) が発行されている。
- 35) 機械システム振興協会：エミッションフリーマニュファクチャリングシステムの調査研究報告書，(2000)，54.
- 36) 同上：58.
- 37) エコロジーエクスプレス：
<http://www.ecologyexpress.com/trend/2006/20060111trend.htm>