

曲げ・せん断の先鋭化特集号によせて

神馬 敬*

1 まえがき

天田金属加工機械技術振興財団は1987年度に設立され、爾来17年間に650件を超える研究課題に助成を行い、累計金額は9億5千万円を超えた。この間に助成研究成果発表会の開催並びに機関誌として“FORM TECH REVIEW”の発行を1991年度以来、継続して行い、特に2003年度からは助成成果の一層の普及を図るため、財団の発表会と塑性加工春季講演会との併設開催を実施して好評を得ている。2004年度は第2回の併設開催発表会として、1999—2001年度の助成研究の中から「曲げ・せん断の先鋭化」に関連する論文15編を選んで特集号に掲載し、内5編は優秀論文として助成研究成果発表会においても講演頂き、更に特別講演を玉川大学町田輝史教授に御願ひしてプログラムを組んだ。幸い、関係各位のご協力が得られ、充実した発表会が開催される運びとなったことを喜んでいる。本特集号の予稿を読んで感じたのは、以前には考えられなかった複雑な加工工程の数値解析が可能になったこと、塑性加工同士の組み合わせ、あるいはレーザー照射、火花放電加工、超高压流体の利用など加工法の複合化が進んでいることである。天田財団の企画委員会の同僚から、巻頭言を曲げやせん断の研究の歴史も含めて書けとお勧めを受けたので、昔の話も含めて本特集号に掲載された論文を紹介してみたい。

2 益田森治先生と前田禎三先生¹⁾

益田先生は1901年のお生まれで、東京高等工芸学校(現千葉大学工学部)教授、東京工業大学教授、同工業教員養成所長を歴任され、多数の塑性加工技術者と研究者を養成された。室田忠雄先生と共著の工業塑性力学(養賢堂)は教科書として広く採用された。益田先生はご自身が古稀を迎えられるにあたり、自叙伝「プレスとともに五十年」¹⁾を自費出版され、その中で板金加工では抜き・曲げ・絞りとダイセット、プレス機械の動特性が重要課題であることを改めて強調された。筆者は東京工業大学の卒業研究学生として曲げ加工の研究をお手伝いし、大学院の学生としては薄板の打抜きに関する塑性力学的研究をテーマとして与えられたので、思い出が多い。益田先生は深絞り加工をご自身の学位論文のテーマとして、1939年より大阪帝国大学教授の中原益治郎先生のご指導を受けた。中原先生は色々といき違いをされ、深絞り加工の研究の先達であつ

た福井伸二先生を訪問されて、「益田君が深絞りの問題を取り扱っている。どうもあなたの領分を侵すようであるがご了承をお願いします」と挨拶されたという。

1958年、益田先生監修「薄板の曲げ加工」²⁾の序文には「プレス分野での重要な打抜きについて最近東大の前田禎三助教授によって立派な業績がまとめられたことは誠に喜びに堪えない。私の研究室でもこれを塑性力学的の立場から検討に取りかかっている。よろしくご指導をお願いする次第である」と書かれた。当時博士課程1年だった筆者はこれを読んで発奮したのを覚えている。近年は塑性加工の論文数が増えて文献参照が容易ではないが、先人の業績を尊重する心が薄れてはいないか危惧するものである。

前田禎三先生のご業績は多方面にわたり、優秀なお弟子を多数育てられたが、惜しくも本年1月に逝去された。筆者にとっては、直接教養を受けた機会は少なかったが、ご著作を通じて大きい影響を受けた。お人柄を表す数々の逸話をお弟子の村川正夫教授からうかがっているが、ここでは、益田先生の自叙伝に前田先生が寄せられた感想文を引用したい。「機械学会のプレス作業工業標準部会でダイセット及びプレス作業工業標準のJIS企画原案を審議していた時代、益田主査と海輪幹事の呼吸がびたりと合い、百数十頁の膨大な原案が2年の短時日で見事にまとめられた。当時私は委員として参画するかたわら、せん断加工特性を何とか理論的に解釈をつけるべく苦慮していた。益田先生は私の初期からの研究を暖かく見守り、1957年発表の私のせん断模型の提案に対し、直々に激励して頂いた。このお言葉で当時沈滞気味であった研究が再び息を吹き返し、学位論文にまとまって行った。益田先生はとかく煙たい偉い先生であるという噂を耳にしたが、直弟子でもない者を励まして下さる優しい先生だった」。

前田先生のせん断模型は複刃によるせん断の過程を単純せん断期と薄層せん断期に分けてせん断特性を説明し、塑性曲線からせん断抵抗を算出された。パンチとダイスの刃先を結ぶ薄い層に沿ってすべりを生じるとした薄層せん断期はせん断加工の本質をついたものである。

その後、筆者は素材の体積不変の法則と工具による拘束条件を満たすせん断模型を提案し、延性の高い材料のせん断では切刃側面と接する材料がパンチ進行方向の引張りを受けて陥没する現象が起きることを示し

た。これは前田先生のせん断模型と工藤英明先生の上界法の論文に啓発されてのことと思いつている。

3 曲げ加工^{2), 3), 4)}

3軸応力問題としての曲げ解析は、1950年代初期にG.Sachs, 斎藤浩一先生らが行って、曲げによる板厚変化を求め、曲げ見込代(bend allowance)を与える線図を得た。これらの解析はいわゆる全ひずみ理論に基づいており、曲げられた板の伸びのない層(中立面)が曲げの進行とともに圧縮側に移動し、現在中立面となっている層が以前には圧縮を受けていたことを無視している。板の曲げの問題は、正確には、中立面の定義を変え、曲げられた状態からわずかに曲げが進むときに長さを変化しない層を中立面として定義し、ひずみ増分理論を適用して応力とひずみを求めなければならない。ただし、ひずみ増分理論による解は電子計算機を必要としたので、曲げの解析結果は1970年代まで待たなければならなかった。

一方、プレス金型による薄板のV形曲げ加工を1軸応力の単純理論を用いて詳細に解析した益田先生と室田先生らの研究は、複雑なスプリングバックの変化を明らかにし、加工技術者の指針になった。単純理論により曲げの大変形を解く方法は、戸澤康壽先生らの平板からUO方式により円管を成形する研究に発展して、曲げ変形に曲げ返しの変形を複合、円周方向の圧縮変形を付加する解析と、これに関連するモデル実験が進められ、わが国のUO製管法は諸外国に類を見ない高水準の技術を確認した。

一方、戸澤先生はスプリングバックの抑制策として引張力を加えながら型に巻きつける方法を一般化して、引張力のみならず板の長手方向、幅方向、厚さ方向の圧縮力も含めて、垂直力を伴う曲げを解析し、更に最小曲げ半径がせん断変形の関与する曲げくびれの発生で決定される理論を示した。

「いずれにせよ、加工現場で経験する現象は材料の異方性も影響して複雑である。技術者も研究者も複雑な変形過程の本流をつきとめ、単純な理論によって現に行われているプレス加工を解析し、それを基にして技術上の問題を解決し、さらに新しい事項を推理して技術の進歩向上に役立つべきである」と齋藤浩一先生は塑性と加工2巻10号(1961年)で述べている。

本特集号掲載の曲げ関連論文は、ばね用ステンレス

鋼板の曲線断面形状への引き曲げ、油圧プレスブレーキの位置決めバルブの高精度化、押し通し曲げ加工へのオフセットロールの導入、板金のハンドリングロボットの動作行程の自動生成、レーザー光と火花放電による熱応力利用曲げ、高張力鋼板を自由曲げの多い金型構造にして低荷重化するとともに曲げ戻しを避ける工夫、Mg合金の微視組織と曲げ特性への影響がある。非対称断面を持つ軽量材の実用回転引曲げ加工法の開発では複合弾性心材、側面拘束ガイド、長手方向の引張り力負荷が効果的であり、ほぼ、ゆがみのない加工が可能となることを示した。板金CADデータ変換の標準化に関する研究は、板金加工業界での実態調査を国内外の現地調査と国内アンケートにより実施し、10種類の代表的板金加工法の調査結果の7割以上は2, 3の表記法に集約でき、各種加工法の統一した表記、標準化が可能であると判断している。

プラスチック成形金型の設計製造工程では「驚異のプロセス・テクノロジーのすべて(山田真次郎、ダイヤモンド社、2003年)」に記述されているように、従来45日間を要していた工程をプロセステクノロジーの手法を用いて45時間、1/24に短縮された例がある。CADデータ変換の標準化、板金曲げ加工工程の最適設計等が曲げ工程の大幅短縮に役立つことを期待する。

4 せん断加工関係^{3), 4)}

本論文集には高速せん断、精密せん断、プレコート材のせん断切り口被覆、超高压流体をパンチに代用した穴あけ機と高压水を潤滑剤として用いた深絞り加工機が掲載されているので、従来の関連する研究と比較して述べる。

高速せん断は、だれ小、かえりなしのせん断を意図したものである。せん断加工ではクリアランス部のひずみ速度は大雑把に言ってパンチ速度/クリアランスで表されるから、特に零クリアランスに近い打抜きでは数m/sのせん断速度でせん断しても、高ひずみ領域でかなりの熱が発生する。この熱は高速加工では変形部から周辺に伝達する時間的余裕がなく、局所的に加熱された状態となり、それが材料の軟化を招いてますますその部分のみ変形が進行し、ついには薄い層状領域でのみせん断変形が進行する。この層は変形のもっとも激しい切刃間を結ぶ線上にでき、鋼材の高速せん断では急冷組織であるマルテンサイト組織が観察される

場合もある。中川威雄教授がZenerの記述を確認したこの実験は、高速せん断加工の開発にもっと重視されるべきである。かえりの高さはパンチとダイスのクリアランスにあまり影響されないことから、工具の摩耗の影響を受け難いことが予想される。高速せん断プレスの発生騒音の音圧レベルは通常のクランクプレスとほぼ同等であった。打抜きプレスの騒音は100dBを超えることが多く、打抜き時の素材の破断によるブレークスルーがトリガーとなって、金型及びそれに連結されたプレスフレームなどが振動、衝突して発生する。逆圧作動ダンパーの使用により10数dBの騒音低減効果が得られている。

「精密せん断」に関連して、日本工業大学は試し打ちによる修正不要の金型製作法の研究を目的としてファインブランキングセンターを設けた。同センター長の村川教授らの本論文集に掲載された「有限要素法解析」の進展から見て、目的達成の可能性が高いと思っている。そこでは板厚1mmのせん断に対して0.01mmのパンチストローク毎に有限要素分割を更新してアダプティブリメッシングを行い、破断条件を仮定してクラック発生位置を求めた。上下抜き加工条件を変化させて、かえり無し打抜きが成功する場合、非成功の場合の打抜き品形状を計算し、実際に打抜き実験を行って解析結果と比較して、だれ形状やかえり発生の判定が有限要素法解析で十分できることを確かめている。

有限要素法による塑性加工解析の高精度化は文部省総合研究A62302053と天田財団研究助成AF91002を受けて筆者を主査として共同研究が行われ、参加者はその後も引き続いて研究を進展させている。この共同研究が若手研究者を研究活動に組み入れることによって、次世代研究者の育成が行われた側面も見逃せない。研究助成にあらためて感謝申し上げたい。

「追い抜きシェービングせん断」は、凸輪郭製品の打抜きについてトリミングを繰り返し行って、鋭い凸角部のだれを減少させ、板厚以下の微少幅のさんを残すせん断についても好結果を得た。追い抜き・シェー

ピングせん断・曲げ・絞りを複合させた成形システムも試作している。抜き落とし代を小さくして切屑排出を切削機構に近づける追い抜きシェーピングは、近藤一義教授の発明した対向ダイスせん断法を思い出させる。そこでは負のクリアランスを積極的に利用して切屑排出に利している。筆者は対向ダイスせん断法が理論的には前田先生の薄層せん断期と同様の変形機構、単一せん断面によるすべり変形によって説明できるとした。⁵⁾

高速、精密せん断の論文の説明が続いたので、筆者らの薄板電子部品(ICリードフレーム)の高速打抜き加工についても述べさせて頂く。これは櫛刃状の板厚程度の幅のさんを1000spmの高速で打抜くもので、天田財団の研究助成を受けた。パンチ厚さは板厚程度で、クリアランスも片側10 μ m以下だから、加工中の金型のたわみに起因するさんの両側の打抜きクリアランスと板押さえの不平等も製品精度上の問題になる。プレスとダイセットの剛性の相性も研究課題に入れなければならない。8年前、韓国の企業の研究者から打抜きリードフレームの寸法精度が打抜き条件でどう変化するか、有限要素法によって計算した結果を見せられて、筆者らの実験結果と異なった結論だったので討論したことがあった。8年経過した今、韓国の研究者の話をもう一度聞きたいものである。多くの先達によって築かれた曲げとせん断の加工技術がますます発展することを祈念して結びとする。

文献

- 1) 益田森治、プレスとともに五十年、自費出版、1971.
- 2) 益田森治監修、薄板の曲げ加工、誠文堂新光社、pp.258, 1958.
- 3) (社)日本塑性加工学会、日本の塑性加工 I 歴史と進歩、pp.606, 1986.
- 4) (社)日本塑性加工学会、日本の塑性加工 II 技術発展の動向、pp.1058, 1986.
- 5) プレス加工便覧、丸善、1975年、p.98.