

自動車用薄鋼板の技術革新－戦後日本における鉄鋼製造技術の技術革新の事例－

Innovations in Production of High Performance Steel Sheets for Autobody - an example of technological innovations in post-war Japan iron and steel industry -

黒田 光太郎*・松尾 宗次**
KURODA Kotaro・MATSUO Munetsugu

自動車用薄鋼板、プレス成形、深絞り加工性、結晶集合組織、集合組織形成機構、基礎研究
Steel sheet for automotive carbody, Deep drawing quality steel sheet, Crystallographic texture, Formation mechanism of preferred orientation favorable for deep drawing, Fundamental metallurgical research

要旨

乗用車の大量生産を可能にする重要な技術は自動車車体の高速プレス成形加工である。プレス加工に供せられる薄鋼板は深絞り性を付与する結晶集合組織を具備せねばならない。戦後日本において乗用車国産化否定論も強い中で、自動車、鉄鋼会社の研究・技術者たちが、理化学研究者吉田清太を中心とする研究会に集いプレス成形の塑性工学研究、また日本鉄鋼協会において自動車用鋼板を対象とする低炭素鋼研究会が金属組織学的研究を進め、今日の自動車技術と鉄鋼技術の重要な基盤が築かれた。

日本自動車産業の戦後復興

米国の著名なピュリツァ賞作家David Halberstamは「Reckoning」¹⁾を著し、驕りの中に変革を忘れた報い(reckoning)を受けた米国に対し、技術革新そして品質の向上と管理に真剣に取り組んだ日本とを対比した自動車産業興亡の歴史を描いた。その邦訳書『覇者の驕り』²⁾の自序において「天然資源に乏しく、第二次世界大戦によって破壊された日本が、燃費がよいというだけでなく、一般のアメリカ人がその品質の良さを認めるような優秀な車を生産しているのだ。そんなことが、いったいどのようにして、そしてなぜ起こったのか」とHalberstamは問題提起した。

さらにこの自著についてHalberstamは「第二次大戦で、産業、経済のみならず精神的にも壊滅状態に陥った日本は、二世代にわたって生活向上という共同の目的を定め、海外からなんでも学び、何ひとつ無駄にすることなく取り入れた。製造し、働く喜びを身につけていった日本人こそ、自動車の量産技術を確立したヘンリー・フォード一世の子供たちということができる」と語っている³⁾。

本発表では、Halberstamの提起した上記の疑問「日本の自動車の技術革新が、どのようにして、そしてなぜ起こったのか」について、自動車の主要素材である薄鋼板を製造する鉄鋼技術の技術革新の面から眺めていくこととしたい。

自動車産業を支えるプレス加工用薄鋼板

Halberstam が述べているように自動車の大量生産を可能にした最大の革新はフォード・システムである。この方法に並んで1912年Edward Buddが開発した全鋼板製車体の自動車生産システムの重要性が指摘されている^{4,5)}。初期には馬車メーカーが木製の車体を製作していた。しかし木骨布張り製では自動車エンジンからの発熱や振動による問題が発生したために、要所要所に鉄板を貼り付けるなどの強化処置が施された。鉄板で覆う範囲は次第に広がっていった。

Buddは1912年全鋼板製車体オークランド社向けに製造した。Buddはスポット溶接法の一つであるBudd溶接法を発明した米国人技術起業家であった。全鋼板製車体を効率的に製造するためには広幅の鋼板が必要である。そのために全鋼板製車体の普及は1930年代まで遅れた。さらに全鋼板製車体の効率的工業生産のためには、プレス加工技術とプレス成形可能な鋼板の供給が必須である。戦後日本で1952年の参議院運輸委員会⁶⁾において乗用車国産の是非が議論された際にも、プレス成形ができる鋼板の国産が問題にされた。「向こう(米国)ではプレスというようなぼこんと打ち上げたようなボディを作っている際に、こちらではハンマーでぴっぱいてでこぼこのボディを作って、横から見ると情けない始末であります」と日米の技術レベルを比較した

*名古屋大学大学院工学研究科 教授

**独立行政法人 物質・材料研究機構 外来研究員

* Nagoya University, Professor, Dr.Eng.

** National Institute for Materials Science, Dr. Eng.

参考人意見が述べられ、自動車メーカーから招かれた参考人は「(乗用車の) 価格の引下げのポイントといたしましてはボディをプレス化する・・・すでにプレス化を実現すべく最善の努力をいたしております」と応じ、「(そのために) 最近鋼材会社が非常な協力を頂くことにお約束をいただいております」と鉄鋼業との協力の必要を訴えた。当時鉄鋼会社も戦争で壊滅状態にあり、復興の道を歩んでいた。

プレス加工用薄鋼板開発の共同研究

前報⁷⁾において筆者らは第二次大戦後の鉄鋼技術復興に向けた日本鉄鋼協会を中心とした精細な調査にもとづき、日本の基幹産業としての使命を達成するための技術指針が提示されたことを示した。この中で鉄鋼一貫生産方式の採用、国際競争力を高性能・高品質の高級鋼材製造を志向する指針が提言されていた。この指針をもとに鉄鋼一貫生産方式の一翼を担う薄鋼板量産可能な冷間圧延ミルの設置が進んだ。しかし当時の国産薄鋼板の材質レベルは図1に示すように米国産に比べて著しく劣っていた。また図2には戦後日本における鉄鋼生産と乗用車生産高の対比と主要な技術革新を示した。

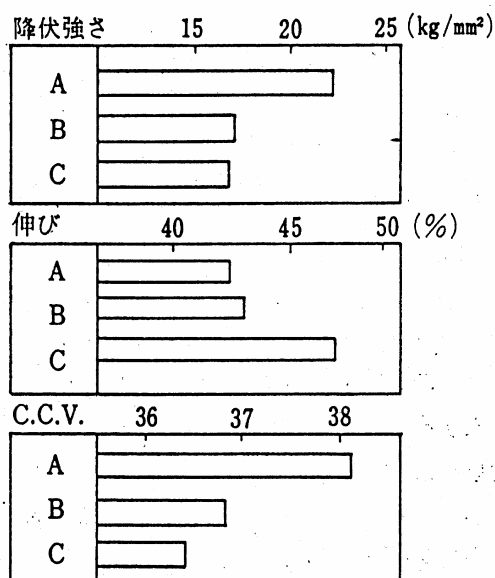


図1 国産薄鋼板の材質レベル⁸⁾

- A: 1960年頃の国産鋼板の材質特性
- B: 1960年頃の米国産鋼板の材質特性
- C: 1980年頃の国産鋼板の材質特性

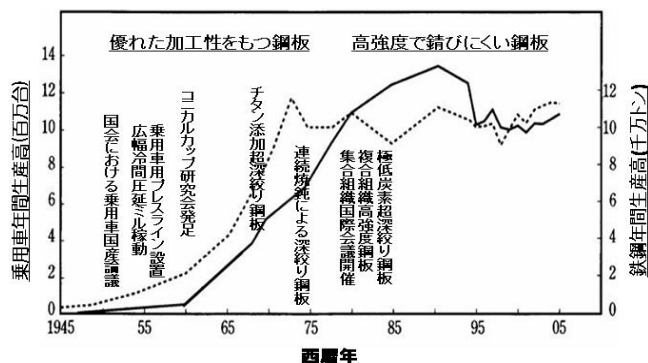


図2 戦後日本の鉄鋼生産と乗用車生産の推移

このような状況下で、自動車と鉄鋼の二産業の研究者・技術者とを結びつける活動が進んでいく。図2にあるCCV (conical cup value) 法は東京大学の福井伸二が考案した簡易に深絞り性を評価できる試験法⁹⁾から得られる値である。福井はコニカルカップテスト研究会という同人会的集まりを作った。この研究会には自動車メーカーと鉄鋼会社の技術者が集まり、福井の弟子である理化学研究所吉田清太が中心となってCCV試験法のJIS標準化を目指した。ここで参加者の間に会話障害の存在が問題となった⁷⁾。とくにプレス試験において当時かなりの程度で発生した「しわ」と「割れ」は鋼板あるいはプレス技術に責任なのか議論が交わされた。この議論の中でしわと割れの現象についての理解に齟齬があったのである。吉田はこの障害を克服するために、プレス成形における形状や寸法ならびに変形の様相などの解析を進め、論文「薄鋼板のプレス成形の塑性学的成形区分とその体系化」にまとめた¹⁰⁾。

この論文では、図3に示すように、複雑なプレス成形も材料の流れ入り、流れ出し、伸びの方向の挙動から解析すると、深絞り、張出し、伸びフランジ、曲げの四つの基本変形要素からなることが示された。この解析は二産業間の会話障害を取り除き、プレス技術、材料特性の緊密な共同研究の発展のために大きな意義があった。さらにCCV試験法の提案と合わせて、この当時発足した国際深絞り研究グループ (IDDRG: International Deep Drawing Research Group) の会合において高い評価が得られた。コニカルカップテスト研究会は自動車会社と薄鋼板製造会社を網羅した「薄鋼板のプレス成形と試験法研究会」さらに「薄鋼板成形技術研究会」へと発展していき、理化学研究所の吉田研究室は自動車用薄鋼板の実用開発の中核的な役割を果たしていく。

深絞り加工性と集合組織

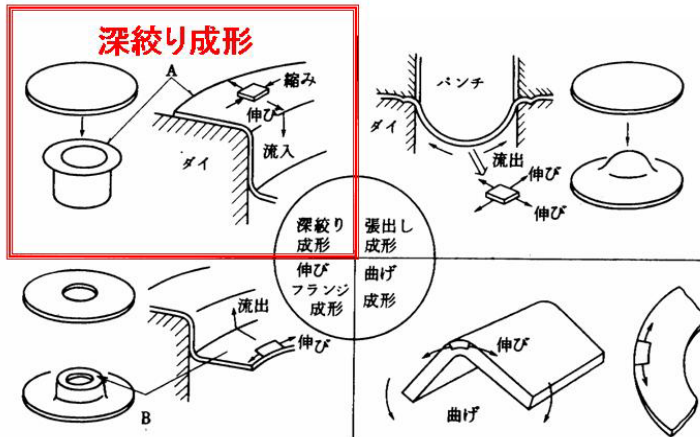


図3 プレス成形における変形要素区分

乗用車の個性を主張するオリジナルな造形デザインを実現し、鋼板を美しく乗用車車体に成形する上で、深絞り加工は重要である。図3に示されるように、円板からカップを成形する深絞り成形では、円板は円周方向に縮小、半径方向に伸長する。したがって深絞り加工に好ましい鋼板は、板幅方向に縮みやすい性質をもつことが求められる。さらに成形過程で板厚が薄くなる傾向が大きいと破断に至りやすい。このような理由で、一軸引張り試験における板厚歪と板幅歪との比(r 値)が深絞り加工性の良い指標となる。 r 値は結晶が特定のすべり方向(面)によって塑性変形が進むことにもとづく塑性異方性を表わす尺度である。 r 値は米国の技術者によって経験をもとに提案されたものであるが、東京大学の五弓勇雄は深絞り加工において発生する耳の研究から、塑性変形の結晶異方性に注目して r 値と同等な塑性歪比を有効な材料特性尺度として提案していた。五弓は福井と吉田と協力して薄鋼板成形技術に大きく貢献、とくに鉄鋼技術者たちに結晶塑性学と金属組織学を結びつけた結晶集合組織を活用した材料開発を指導した。

1950~60年代において深絞り加工性の優れた鋼板はA1キルド鋼板であった。第二次大戦中に米国ではこの鋼板の開発がなされ、製鋼・熱間圧延・冷間圧延・箱焼鈍の巧妙な組み合わせによるバッチ処理で高い r 値の得られることを経験的に知っていた。戦後日本鉄鋼業の技術者たちは、米国の技術から多くを学び、改良を加えながら、深絞り級鋼板の製造を可能にしていた。しかしA1キルド鋼板の優れた特性

の成因や結晶塑性学的理解は不十分であった。日本では鉄鋼協会や金属学会の場を通して熱心に進められた。ここで得られた知見は、その後の超深絞り鋼板の開発や連続焼鈍により深絞り鋼板製造法の開発につながっていく。

深絞り性の尺度 r 値は鋼板の結晶集合組織に強く依存している。鉄の結晶は体心立方構造をもつ。図4は1958年ベルギーで開催された万国博覧会のモニュメントを描いた2ユーロ硬貨である。アトムムと呼ばれる高さ100mのモニュメントは、鉄の体心立方結晶の巨大な模型であり、結晶は立方体の体対角線を垂直にして立っている

(cube on edge(COE)方位と表現)。この結晶の向きは、深絞り加工性に好ましい結晶粒の方位に対応



図4 深絞り成形に有利な方位を向いた鉄結晶を模した2ユーロ硬貨

している。この方位の板状結晶を板面内のいろいろな方向に引張り変形すると、いずれの方向でも高い r 値を示す。したがって多結晶体の鋼板内で、COEの向きに結晶粒が多数集合しているならば深絞り加工が容易

日本鉄鋼協会における基礎共同研究会

1970年日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会の中に大学、国立研究所、鉄鋼会社の研究者が参加、「薄鋼板製造技術の基礎としての再結晶現象および集合組織」に焦点を合わせた再結晶部会が設立された。この年鉄鋼協会主催で“International Conference on the Science and Technology of Iron and Steel (ICSTIS)”が開催され、戦後日本鉄鋼の科学技術の自立が世界的に認められた。ICSTISは前記IDDRGの共催でもあり、とくに“Sheet Metal Forming and Formability”のセッションが設けられていた。

再結晶部会の研究成果は 1975 年「鉄鋼薄板の再結晶及び集合組織」¹²⁾として公開された。この報告書では、下記目次のように、基礎的事項から実際に工場生産される薄鋼板にわたり、戦後鉄鋼薄板の製造技術を米国の ARMCO 社、US Steel 社から日本の技術者たちは多くを教えられ、その上に独自の知識を蓄積し、超深絞り鋼板開発や連続焼鈍法実現など世界に先駆けた新たな技術につながる流れが体系的に記述されている。

1. 鉄鋼の再結晶と粒界移動
2. 結晶粒界の構造と粒界移動の機構
3. 低炭素リムド鋼板の再結晶および再結晶集合組織
4. 低炭素アルミニウムキルド鋼板の再結晶および再結晶集合組織
5. 低炭素鋼板の再結晶集合組織に及ぼす炭化物形成元素添加の影響
6. 低炭素鋼板の再結晶集合組織に及ぼす銅添加の影響
7. 薄鋼板の成形と組織の関係
8. 正極点図による集合組織測定法

これらの研究で得られた低炭素鋼板の再結晶集合組織形成に関する知見は、その後の深絞り用薄鋼板開発の指針として役立っていく。とくに当時最高の特性をもった AI キルド鋼板における集合組織形成の理解は、大きな意義をもつ。箱焼鈍というコイルに巻いた冷間圧延板を徐加熱・徐冷却で約一週間の工程を費やして製造された。この徐加熱中に AlN の析出と鋼の再結晶とが同期して起こる条件において COE 方位が最も顕著に発達することが判明し、析出物が集合組織を制御する事実が明らかになる。こうして鋼中炭窒化物析出物の効果を追及する流れの中で Ti 添加鋼が見出された¹³⁾。この超深絞り級鋼板は r 値が 2 を超える高い特性をもち、世界的に大いに注目される製品であった。

Ti 添加は有効な付随効果をもち、さらに新しい薄鋼板の方向を切り拓いた。Ti は鉄中の炭素や窒素と結合して、自動車用薄鋼板の課題であったひずみ時効を防止する。さらに Ti 添加鋼では急速加熱においても、COE 方位が発達する特異性が認められ、連続焼鈍法による自動車用鋼板製造を可能にする契機となった。上記のように Ti 添加は純鉄では鋼中の炭素や窒素と結合して実質的に侵入型元素が不在の IF (interstitial free steel) 鋼となる。このような IF 鋼は真空脱ガス技術の進歩や微量 Ti 添加方法の改良

による低コスト化とあいまって多量に使用されるようになっていく。連続焼鈍と亜鉛めっきラインとの複合化により、車体防錆強化された薄鋼板の製造もおこなわれている。

現在進んでいる国際的鉄鋼業界の再編成の中で日本は自動車用高級鋼板の製造技術において優位性を確保している。この優位性は、本報告で示したように、戦後日本はプレス加工技術と薄鋼板製造に関する知識も乏しい状態から、産学官の技術者・研究者が基礎研究を重視し、併せて製鋼・圧延プロセス一貫した工場実験を通して達成した成果である。

また、このような高級鋼の技術革新の背景には、1974 年の第 1 次オイルショック以来、連続鑄造に代表される工程の連続化や副生ガス利用などの省エネルギー策が積極的に進められことを見落としてはならない。量的拡大に頼らない生産性の向上によって、30 年間以上に渡って国内粗鋼生産量は 1 億トン前後する水準で推移し、2006 年度に史上最高の粗鋼生産量に達した。今後、この過程で大きな役割を果たした様々な技術革新についても分析を行いたい。

参考文献

- 1) David Halberstam: "The Reckoning", William Morrow & Co., New York, 1986.
- 2) D. ハルバースタム著 高橋伯夫訳:『覇者の驕り 自動車・男たちの産業史』, 日本放送協会, 1986.
- 3) 朝日新聞: 1987 年 1 月 12 日朝刊 12 版 9 面。
- 4) S. Grayson: Automobile Quarterly, 16(1978), 352.
- 5) P. Nieuwenhuis and P. Wells: Industrial and Corporate Changes, 16(2007), 183.
- 6) 第 13 回国会参議院運輸委員会会議録 第 36 号: 1952 年 7 月 26 日。
- 7) 黒田光太郎、松尾宗次: 特定領域研究「日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化」第 2 回国際シンポジウム研究論文発表会 論文集, A-5, 2006.
- 8) 武智弘、松尾宗次: 鉄鋼界, 29(1979), No. 4. 18.
- 9) 福井伸二: 東京大学理工研報告, 6-6(1952), 27.
- 10) 吉田清太: 日本機械学会誌, 84(1981), 261.
- 11) 五弓勇雄: マシナリー, 1951 年 1 月号, p. 18, 1952 年 2 月号, p. 109.
- 12) 鉄鋼基礎共同研究会・再結晶部会報告書:「鉄鋼薄板の再結晶及び集合組織」2 分冊, 日本鉄鋼協会, 1975.
- 13) 清水峯男、河原田実、柴田政明: 特許公報、特公昭 42-12348, 1967.