

プレス技術と金型の進化に関する研究

－自動車産業と冷間工具鋼の発展について－

村瀬 眞澄

Evolution of the Press Technology and the Special Tooling

－ Regarding Development of the Automobile Industry and the Alloy Tool Steel for Cold Dies －

MURASE Masumi

目 次

- I. はじめに
- II. 冷間工具鋼の基礎
- III. 自動車産業と冷間工具鋼
- IV. おわりに

Abstract

This research focuses on the development of the automobile industry and the alloy tool steel for cold dies. The needs of the times led to the development of the alloy tool steel for cold dies. As a result, evolution of the press technology in the automobile industry made great strides. The evolution of the alloy tool steel for cold dies is the result of the research on element and the metallic structure.

キーワード：プレス技術、プレス金型、冷間工具鋼、自動車産業

Keywords：Press technology, Press dies, Alloy tool steel for cold dies, Automobile industry

I. はじめに

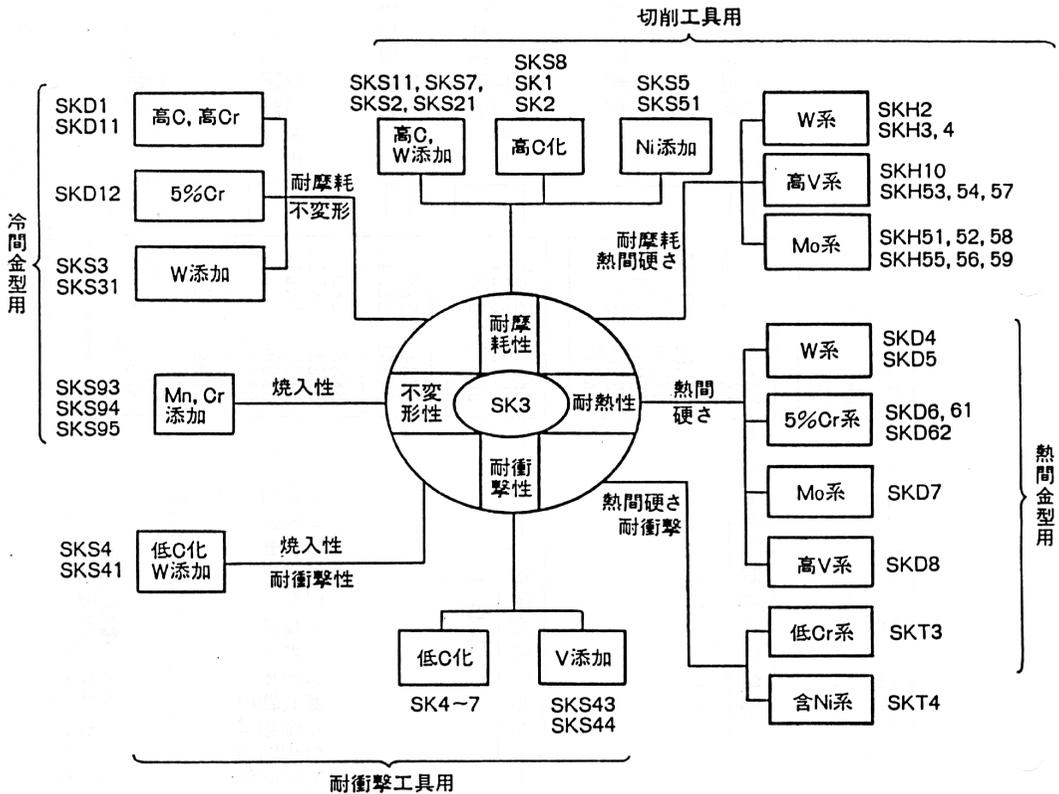
(1) 工具鋼とは

工具鋼とは、金属材料などを加工または成形するための工具として用いられる特殊鋼である。工具鋼は一般には特殊鋼に属するものであり、特殊鋼は基本的に構造用鋼・工具鋼・特殊用途鋼に分類される。工具鋼の基本的な分類として、炭素工具鋼・合金工具鋼・高速度工具鋼・中空鋼・その他と分けることができる。工具鋼の主な用途・特性と鋼種は、図

I-1のように冷間金型用¹⁾・熱間金型用²⁾・切削工具用³⁾・耐衝撃工具用⁴⁾に分類することができる。

本研究の焦点である冷間工具鋼⁵⁾は、プレス金型に使用され合金工具鋼がもっとも多く選択されている。とくにプレス金型に使用される工具鋼にはSKD11⁶⁾という鋼種がJIS規格にあり、この鋼種が一般的によく知られておりプレス金型の材料の選択における基本の鋼種となっている⁷⁾。

図 I-1 工具鋼の主な用途・特性と鋼種⁸⁾



出所：日本高周波鋼業。

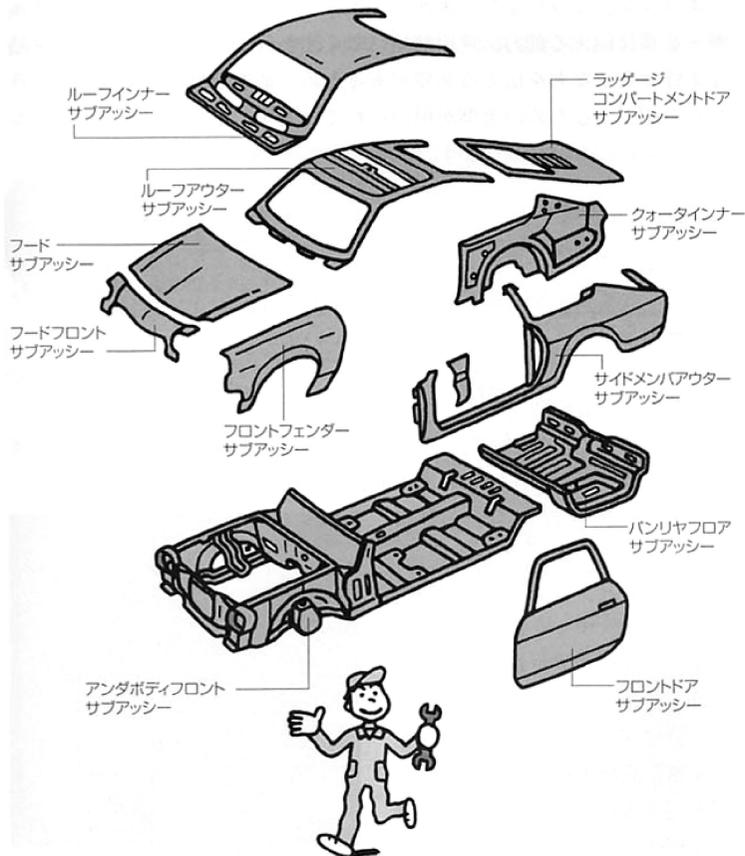
1) 一般に、常温付近で金属などの成形に用いられる工具鋼のことである。プレス金型に用いられる。
 2) 一般に、溶融金属を鋳造するためなどに用いられる工具鋼のことである。
 3) 一般に、刃物やドリルなどに用いられている工具鋼のことである。
 4) 一般に、靱性が大きい工具鋼のことである。
 5) 工具鋼の冷間と熱間とは使用される温度域を示しており、冷間は常温という意味で適応されている。鍛造やダイカストなどのように高温で使用される工具鋼は、熱間工具鋼といわれる。
 6) SKD11は、プレス金型メーカーや工具鋼商社の関係者の間では一般にダイス鋼といわれている。
 7) JISとはJapanese Industrial Standardsの略であり、日本工業規格のことである。
 8) この図は、工具鋼に関わるメーカーや商社の関係者の間ではよく知られているものである。本論では、出所を入手先で表記した。

（2）プレス部品とプレス金型

自動車産業では、プレス金型を用いて図 I - 2 のようにボンネット（hood panel）・フェンダー（fender panel）・ルーフ（roof panel）などの見える部分の部品として外板（outer panel）と、外見からは見えない部分の部品として内板（inner panel）、プラットフォーム⁹⁾、メンバー（member）¹⁰⁾などが量産されている。

自動車産業は、2度にわたる石油危機や衝突安全対策に対応するため車体の軽量化をおこなった。そのためプレス技術の他部品への適用や自動車用薄鋼板の高張力化をおこない、自動車産業のプレス成形技術の難易度もどんどん上がっていった。このような自動車産業の背景から、それらのニーズに対応するように冷間工具鋼も進化をしていった。

図 I - 2 自動車部品の例



出所：吉田（2004）， p.35.

⁹⁾ プラットフォームとは、従来はトラックなどの荷台を指していた。現在では、自動車メーカーのグローバル化にともない車体骨格を示すようになった。

¹⁰⁾ 自動車の車体骨格を構成する強度部材のことである。

(3) 本研究のポイント

一般に経営学の視点では、自動車産業における冷間工具鋼の発展を研究した場合、冷間工具鋼は自動車産業の生産技術のなかのプレス技術という1分野の領域におけるプロセスイノベーションと考えられる。しかし、工具鋼メーカーを基点とした場合、冷間工具鋼は製品でありプロダクトイノベーションである。つまり、自動車産業の発展において生産技術を研究するには、自動車産業のプロセスイノベーションと関連産業のプロダクトイノベーションの相関関係を十分認識して理解していく必要があると考えられる。

したがって、本研究は経営学の視点より自動車産業とともに発展した冷間工具鋼の進化について研究をしていくこととした¹¹⁾。

II. 冷間工具鋼の基礎

(1) 冷間工具鋼の前身

工具鋼は人類史上において鉄の歴史そのものであり、図 I - 1 では炭素工具鋼である SK 3 がこれにあたる。その後、18世紀から19世紀にかけて Cr(クロム), W(タングステン), Nb(ニオブ), V(バナジウム), Mn(マンガン)などの合金元素の発見や有効性が確認されることにより合金工具鋼の歴史がはじまることとなった。

先に述べた冷間工具鋼の基本となる SKD11は、高C(炭素)高Cr鋼にあたりはじまりは1892年である¹²⁾。第一次世界大戦のころ高C高Cr鋼は高速度工具鋼¹³⁾の代用として、耐摩耗性や熱処理の優れた性質により今日にいたる代表的な冷間工具鋼として認識されている。

わが国では戦前までヨーロッパ型である2% C-13% Cr系であったが、戦後しばらくしてアメリカ型の1.5C-13%Cr系がプレス金型の標準型材となった¹⁴⁾。その後、SKD11がJIS規格鋼種として、業界では広く認知され多く用いられてきた。

¹¹⁾ 本研究における冷間工具鋼の研究対象は、一般に総焼材といわれる熱処理メーカーにて焼入れがおこなわれるものである。したがって、火炎焼入れ(フレームハード)による冷間工具鋼は研究対象としていない。

¹²⁾ 清永(2000), p.71.

¹³⁾ 金型や特殊鋼の関係者の間では、通称ハイスといわれている。高速度工具鋼は1900年に発明され、W系やMo(モリブデン)系に分けることができる。

¹⁴⁾ 前掲書, pp.151-152. ただし、アメリカ型の1.5C-13%Cr系は他の資料では1.5C-12%Cr系と表記している場合もある。

（2）合金元素について

冷間工具鋼の基本成分は約0.3%～1.5%程度のCであり、Cは焼入れ性や硬さおよび耐摩耗性に効果がある¹⁵⁾。冷間工具鋼の硬さや強度、耐摩耗性を向上させるためには、先に述べたCr, W, Nb, V, Mnなど合金元素を添加する必要がある。表Ⅱ－1は、冷間工具鋼における主要な合金元素の効果について示したものである。

表Ⅱ－1 合金元素の効果

合金元素名	効果
Cr (クロム)	焼入れ性、耐酸化性が増し、靱性を改善する。
W (タングステン)	耐摩耗性を増大させる。
Nb (ニオブ)	結晶を微細化させる。
V (バナジウム)	耐摩耗性を増大させる。
Mn (マンガン)	焼入れ性と耐摩耗性を増大させる。
Mo (モリブデン)	焼入れ性を増大させ、2次硬化を高める。
Ni (ニッケル)	靱性を増大させる。
S (硫黄)	被削性を高めるが、靱性を低下させる。

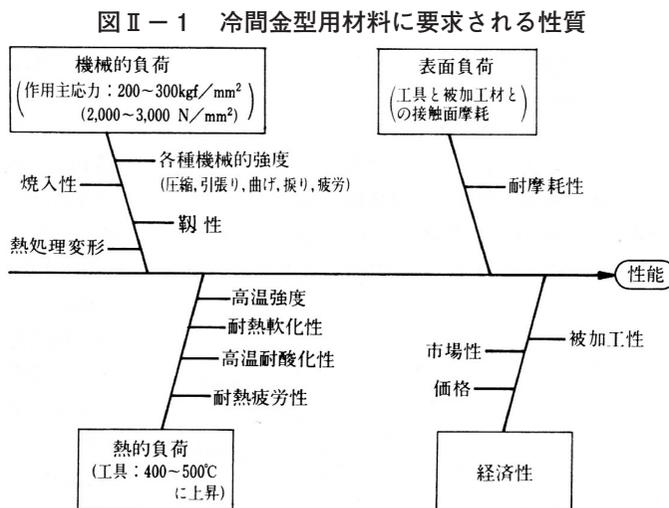
出所：筆者作成。

工具鋼メーカーでは冷間工具鋼に求められる特性を達成するため、合金設計の精度を高めるため、合金元素の組成や金属組織、製鋼工程などの研究を常におこなっている。

これらの合金元素の添加量や、合金元素の相乗効果により冷間工具鋼はそれぞれの適用的な特性を得ることができる。

（3）冷間工具鋼に要求される性質

一般に冷間工具鋼に要求される性質は、図Ⅱ－1のように示される。プレス成形をおこ



出所：特殊鋼倶楽部特殊鋼ガイド初級編集委員会編（1990），p.135.

¹⁵⁾ C0.6%以上では、耐摩耗性を増大させる効果のほうが大きい。

なうプレス機の力は数トンになるため、機械的負荷として硬さや靱性が求められる。プレス成形では冷間工具鋼と被加工材の間に摩擦が発生するため、表面負荷として耐摩耗性が求められる。プレス成形時には摩擦熱などが発生するため、熱的負荷として高温強度や耐熱疲労性などが求められる。

工具鋼メーカーでは、このような冷間工具鋼に求められるニーズに対応した鋼種の開発をおこなっている。

Ⅲ. 自動車産業と冷間工具鋼

1. 環境の変化によるニーズの誕生

(1) 時代背景

1950年代後半から我が国の経済は急速に成長をはじめ、モータリゼーションの到来となり自動車の普及が進んだ。その後、2度にわたる石油危機や排ガス騒音規制、リコール制度、衝突安全対策、北米北欧向け輸出車の腐食対策などにより、自動車産業を取り巻く環境は大きく変化していった。

自動車産業では排ガス規制や衝突安全への対策や低燃費車開発のため、高張力鋼板や防錆用表面処理鋼板などを採用して車体構造を改良し、自動車の軽量化を図ることとなった。

(2) ニーズへの対応

長らく SKD11が標準型材として用いられていたが、1970年代後半に開発された高張力鋼板のプレス成形難易度が非常に高く、当時の自動車産業では大きな課題となった¹⁶⁾。さらに1980年ごろから放電加工法が金型の製作工程に用いられるようになり、これまで冷間工具鋼に要求されていた性質に加えて新たな課題が要求されることとなった。つまり、高張力鋼板のプレス成形難易度は図Ⅱ-1のような従来のニーズの延長線上であった。一方、放電加工法は金型の設計製作に属するニーズであったため、冷間工具鋼にとって全く新しいニーズの誕生であった。

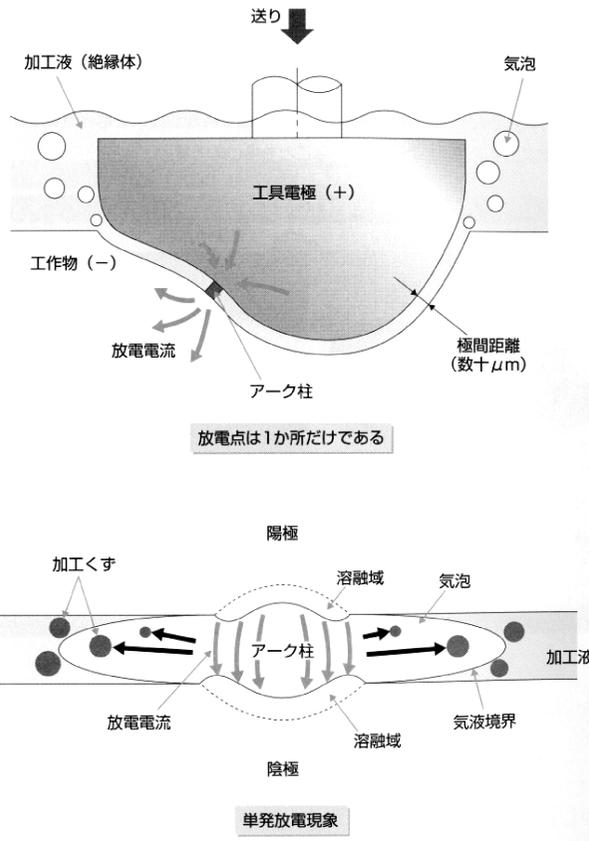
放電加工法とは図Ⅲ-1のように被加工物と電極に電圧を与えて放電を発生させ、その放電で生じる高熱と高圧によって被加工物を溶かして加工する方法である。放電加工法は熱処理後の硬化した冷間工具鋼の加工を可能する反面、被加工物の表面層に放電加工による異常層を成形してしまい、そこから割れを発生させることが問題であった。これに加え、当時の金型の製作工程では冷間工具鋼は低温焼戻しがおこなわれており高温焼戻しに

¹⁶⁾ この当時の様子は、薄鋼板成形技術研究会の文献などに詳しく掲載されている。

比べ、金属組織には安定的なマルテンサイト組織以外に不安定な残留オーステナイト組織が多く存在するためこの問題をいっそう大きくさせた¹⁷⁾。この放電加工による割れ対策として、8Cr系冷間工具鋼が開発された¹⁸⁾。

新たに開発された8Cr系冷間工具鋼は、図・写真Ⅲ-1（金属組織、硬度と靱性）のようにCとCrの適量化により熱処理で形成される晶出炭化物を微細化することによる靱性改善とV、W、Mo添加による二次硬化による冷間工具鋼の疲労強度、被切削性の向上

図Ⅲ-1 放電加工法



出所：森重（2007），p.143.

¹⁷⁾ 放電加工がまた普及していない当時、プレス金型業界では工具鋼の低温焼戻しは一般的なものであった。現在では高温焼戻しが主流のようにになっているが、コストや納期的问题があり低温焼戻しがおこなわれている。一般に高温焼戻しを指定すると低温焼戻しに比べ、コスト増と納期2日程度が余分に必要となるからである。低温焼戻しは150℃～200℃でおこなわれ、高温焼戻しは500℃前後でおこなわれる。

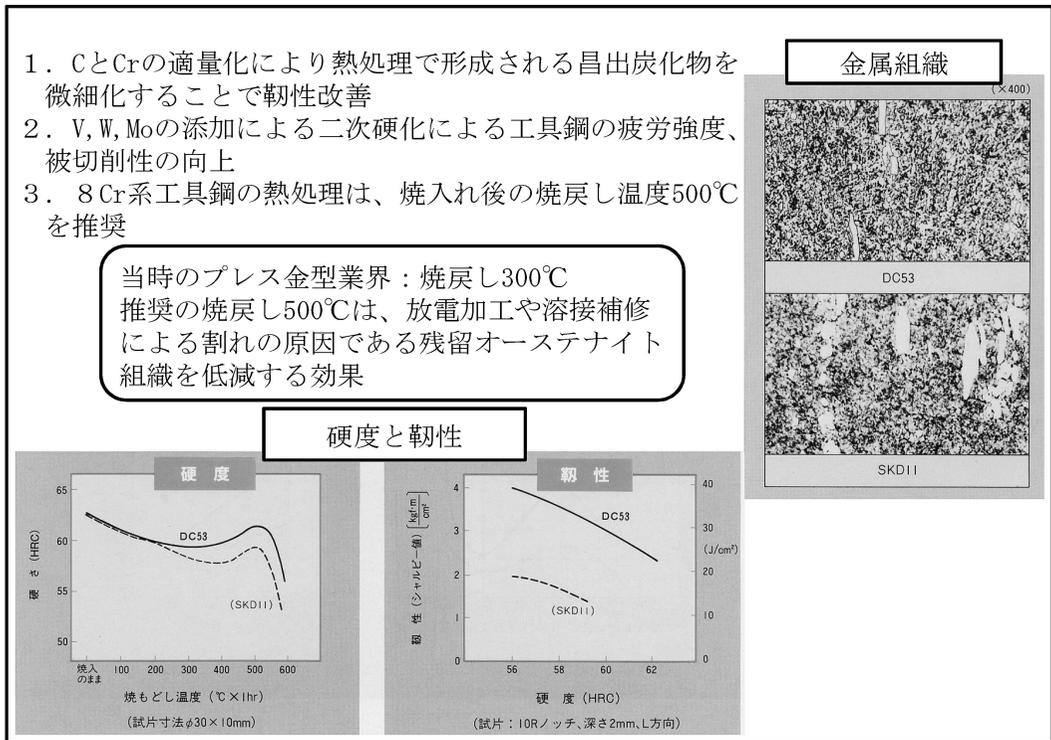
¹⁸⁾ 一般に8Cr系の工具鋼の合金元素の基本は、1%C, 1%Si, 0.4%Mn, 85Cr, 2%Mo, 0.3%Vの合金元素である。8Cr系の工具鋼として代表的な鋼種は、大同特殊鋼ではDC53, 日立金属ではSLD8などがある。

などの効果を生み出すことになった¹⁹⁾。8Cr系冷間工具鋼はSKD11の熱処理後の硬度を上回りながら、SKD11以上の靱性をもった冷間工具鋼であった。

その結果、8Cr系冷間工具鋼の特性である靱性と疲労強度は自動車用薄鋼板の高張力化が進行していたプレス成形技術に効果を発揮し、被切削性の向上は金型製作工程の進展に大きく貢献することとなった²⁰⁾。

8Cr系冷間工具鋼が開発された当時、一般では冷間工具鋼の熱処理における焼入れ後の焼戻し温度は200℃程度の低温であったが、8Cr系冷間工具鋼の焼戻し温度は500℃程度の高温を推奨したことも画期的なことであった。これらの試みは、残留オーステナイト組織を低減させる効果をもたらした。そのほか、高温焼戻しの一般化は金型の溶接補修に

図・写真Ⅲ－1 8Cr系冷間工具鋼の特徴



おける割れ防止にも効果を発揮した²¹⁾。

2. 自動車産業の戦略の変化

(1) 時代背景

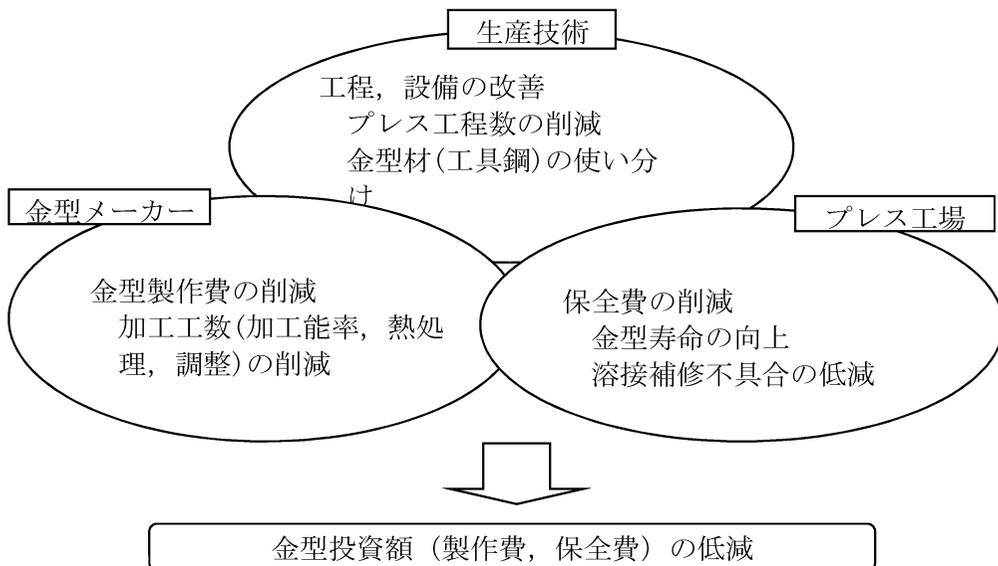
バブル崩壊後、不況は我が国の基幹産業の1つである自動車産業にも影響を与えた。その結果、国内生産台数は減少に転じ、海外生産へ向かっていった。自動車産業ではこのような不況のなか、生産プロセスの効率化およびコスト削減が大きな課題となった。

(2) ニーズへの適応と急速な進化

1990年代後半になると、自動車産業では自動車用薄鋼板の高張力化に対応したプレス成形技術や金型の設計製作などの技術的知識の獲得だけでなく、プレス成形工程や金型製作費などコスト削減が盛んに提唱されるようになった。

自動車産業の代表であるトヨタでは1997年ごろに型費低減活動、2000年には総原価低減活動CCC21、2005年にはVI活動がおこなわれた²²⁾。また、各自動車メーカーでは自動車

図Ⅲ-2 自動車産業のプレス金型へのニーズ



出所：筆者作成。

²¹⁾ 関係者によると、高温焼戻しが一般的になっていないころは、溶接補修で工具鋼を割ってしまうことが多かったという。

²²⁾ 当時、30%の型費低減を目標としていた。CCC21とは、Construction of Cost Competitiveness 21の略である。VI活動のVIとは、Value Innovationの略である。

部品の共通化がおこなわれ、プレス部品の高精度化や形状の複雑化により工具鋼には高強度とともに長寿命が要求されることにもなった²³⁾。

図Ⅲ-2のように自動車メーカーでは生産技術部門とプレス工場、協力企業である金型メーカーが各々のニーズを明確にしたうえで、これらを総合的に精査した金型投資額をコスト削減の目標とした。このような自動車産業のコスト削減活動について、工具鋼メーカーでは開発部門が市場の情報分析を積極的におこない、新型冷間工具鋼の開発は後押しされることとなった²⁴⁾。

自動車産業のプレス金型へのニーズは、8Cr系冷間工具鋼の開発のきっかけとなった金型の設計製作に属するニーズへの対応がさらに必要となったことである。8Cr系冷間工具鋼の開発では放電加工法に対応した面が大きく評価されたが、時代のニーズであるコスト削減では金型製作費の削減がもっとも効果的であったため、金型の主な製作方法であった切削加工に対応しなくてはならなくなった。

このような自動車産業の要望が高まるなか、SKD11に比べ被切削性や金型寿命を向上させ、熱処理条件を同等とした10Cr系快削冷間工具鋼や従来の8Cr系冷間工具鋼の改良鋼が相次いで開発された。10Cr系快削冷間工具鋼と8Cr系改良冷間工具鋼の開発により、自動車メーカーのコスト削減活動の多くの要求は満たされることとなった。両冷間工具鋼をSKD11と比較した場合、10Cr系快削冷間工具鋼はSKD11に準じた耐摩耗性を重視した特性をもち、これに対して8Cr系改良冷間工具鋼は靱性を重視した特性をもっていた。そのため、自動車産業ではこれらの特性を活用して各プレス成形に適した冷間工具鋼の使い分けおこない、プレス金型寿命の適正化と向上に対応することができた。

これら冷間工具鋼の特性である被切削性の向上は、図・写真Ⅲ-2（SKD11と10Cr系快削冷間工具鋼の写真）のように切削抵抗が少ない金属組織により、切削加工の高速化が可能となり金型製作費の削減に一応の効果を発揮することとなった²⁵⁾。

10Cr系快削冷間工具鋼の特徴はSKD11の耐摩耗性や熱処理条件を備えながら、被切削性を飛躍的に向上させていることである。関係者によると10Cr系快削冷間工具鋼を開発するに当たって、「炭化物の粒度、面積率と耐摩耗性・疲労特性・被削性の関係」について研究をおこなったことが重要な起点であるとしている。つまり、一般に冷間工具鋼に要

²³⁾ プレス部品の共通化は、プレス加工の高速化とプレス回数の増大を招くこととなり工具鋼への負担は相当なものとなった。

²⁴⁾ このころから、工具鋼メーカーの一部の開発担当者などでは本業以外である切削加工などの知識を持ち合わせるようになった。

²⁵⁾ 切削抵抗が少なくなり、切削加工が高速化できるということは、逆に低速状態であれば切削工具の寿命を延ばすことができるということである。

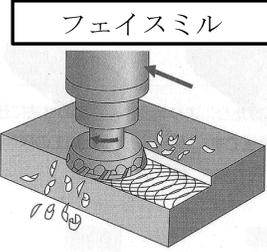
求される性質は図Ⅱ－１のように示されるとしたが、10Cr系快削冷間工具鋼の開発では工具鋼メーカーの視点から自動車産業のニーズに対応するだけではなく、自ら切削工具や切削加工、プレス金型の使用状況なども調査することにより、冷間工具鋼の本質を追究することに開発のベクトルを定めたことである。その結果、図・写真Ⅲ－２のフェイスミルによる切削試験では、大幅に切削条件の向上を達成している。また、10Cr系快削冷間工具鋼にはSが適量添加され、従来の冷間工具鋼の常識を覆す画期的な試みがなされていた²⁶⁾。

しかし、10Cr系快削冷間工具鋼と8Cr系改良冷間工具鋼が開発されたにもかかわらず、金型の設計製作では課題を残したままとなった。それは金型の製作工程における熱処理による冷間工具鋼の変寸や変形は、その後のプレス金型の完成までの調整に多大な加工工数を有するままであった。熱処理による冷間工具鋼の変寸の原因は、冷間工具鋼の金属組織が熱処理によってオーステナイト組織からマルテンサイト組織に硬化する変態にあっ

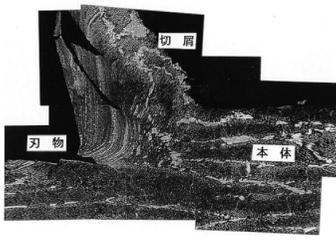
図・写真Ⅲ－２ 10Cr系快削冷間工具鋼の特徴

1. JIS規格SKD11に比べ被切削性や金型寿命を向上させ、熱処理条件を同等
 2. Sの適量添加により、被切削性の飛躍的な向上（金型製作に効果）

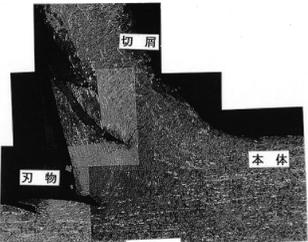
フェイスミル



SKD11



10Cr系快削冷間工具鋼



工具	切削条件			
	直径250mmフェイスミル			
回転数	125rpm	160rpm	200rpm	260rpm
送り速度	140mm/min	200mm/min	280mm/min	280mm/min
切り込み	2mm			
SKD11	○	△	×	×
8Cr系冷間工具鋼	○	○	△	×
10Cr系快削工具鋼	○	○	○	○

注：○は切削性良好、△は切削性可、×は切削性不可

出所：筆者作成。写真は日本高周波鋼業、フェイスミル図は森重（2007），p.136.

²⁶⁾ 一般にSと添加した鋼には、硫黄快削鋼がある。しかし、Sは被削性の改善効果が大きいですが、冷間工具鋼では脆さの原因として不純物であるとの認識が一般的であった。

た。この金属組織の変態は異方性をともなった変寸であったため、熱処理後における金型の製作工程は高精度を維持するため仕上げの工程では厳しい調整が強いられたままとなった²⁷⁾。

事例Ⅲ-1にて、冷間工具鋼の開発過程においてブラックボックスであり、企業機密といえる合金元素の添加量について明らかにすることにより、冷間工具鋼の開発の熾烈さを示していくこととしたい。

〈事例Ⅲ-1〉

先に述べたようにプレス金型業界では、JIS規格のSKD11は金型材選考における基準の鋼種となっている。そのため、SKD11は合金元素が開示されており、機械的性質である耐摩耗性や靱性も同様に明確化されている。

8Cr系冷間工具鋼が開発された後のSKD11の改良鋼が、さまざまな工具鋼メーカーより開発され販売されている。主たるSKD11の改良の目的は、プレス成形において被加工材である薄鋼板の高張力化に対応した冷間工具鋼の硬度や靱性の改善や、プレス金型の製作費削減のため冷間工具鋼の被切削性の改善などであった。そのため、工具鋼メーカーでは改良鋼の性能を明確にするため、JIS規格鋼種のSKD11と機械的性質について比較を必ずおこなう。しかし、改良鋼の合金元素や製鋼技術については特許申請をおこなうか、全く明らかにしないことがほとんどである²⁸⁾。SKD11と改良鋼の合金元素について比較をおこなうと、表Ⅲ-1のようになる。

表Ⅲ-1ではSKD11と改良鋼の合金元素の比較をおこなったが、これらの改良鋼は開発過程において表のように合金元素の添加量を数回にわたって変更している。表Ⅲ-2の改良鋼の合金元素は前期型と後期型を比較すると、CrとMo、Vの添加量の変更をおこなっている。この理由は、耐摩耗性と焼入性、変形の抑制などについて合金元素の最適化をおこなったと考えられる²⁹⁾。

²⁷⁾ 異方性とは、鉄鋼材料など金属組織において長手方向や幅方向、および板厚方向によって塑性的や電磁気的特質が異なることである。一般に鍛鋼品の場合、圧延をしたファイバー方向である長手方向が熱処理では変寸率がもっとも大きいとされる。

²⁸⁾ 筆者の実務経験でも、改良鋼の合金元素や製造技術について明らかにすることはなかった。改良鋼の特性をJIS規格鋼種のSKD11と比較をおこなって優位性をしめしたうえで、自動車メーカーとプレス金型メーカーの要望などに対して企画提案をおこなってきた。

²⁹⁾ 一般に冷間工具鋼の合金元素の変更は、メーカーより明らかにされることはほとんどない。ただし、合金元素の変更は晶出炭化物に影響をおよぼすため、冷間工具鋼の耐摩耗性や靱性など特性にあらわれる。

表Ⅲ－１ SKD11と改良鋼の合金元素比較

JIS 規格／合金元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
SKD11	1.40 ～1.60	0.40以下	0.30～ 0.50	0.03以下	0.03以下	11.00～ 13.00	0.80～ 1.20	0.20～ 0.50
A 社 SKD11改良鋼	1.2	0.3	0.4		0.08	10	1.3	0.3
B 社 SKD11改良鋼	1	1	0.4			8.3	2	0.3
B 社 SKD11改良鋼Ⅱ	0.7	0.4	0.5		0.07	7.1	1	0.2
C 社 SKD11改良鋼	1	1	0.4			8.3	2	0.3
C 社 SKD11改良鋼Ⅱ	0.7	0.3	0.4		0.07	7.4	0.9	0.2

注：単位%

合金元素のCは炭素，Siはシリコン，Mnはマンガン，Pはリン，Sは硫黄，Crはクロム，Moはモリブデン，Vはバナジウムである。

SKD11とは日本工業規格（JIS）の鋼種記号である。

この合金元素調査では、PのほかW（タングステン）、Ni（ニッケル）などの調査はしていない。

筆者独自調査のため、メーカーの合金元素比率と完全に一致しているとは限らない。

出所：筆者作成。

表Ⅲ－２ 改良鋼開発における合金元素の変化

鋼種／合金元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	W	Co	Cu
SKD11改良鋼前期型	0.6	0.3	0.5	0.01	0.07	6	2.1	0.3	0.1	0.04	0.04	0.05
SKD11改良鋼後期型	0.7	0.3	0.5	0.01	0.06	7.3	1	0.25	0.09	0.01	0.15	0.03

注：単位%

筆者作成のため、メーカーの合金元素比率と完全に一致しているとは限らない。

出所：筆者作成。

3. 冷間工具鋼の挑戦

(1) 時代背景

2000年代に入ると、自動車産業では金型の設計製作においてコスト削減活動で従来のように何%削減という目標の設定ではなく、金型製作費を納期と仕上げまでのトータルコストとして考えることによるコスト削減の方針を打ち出した。つまり、これまでの冷間工具鋼では熱処理による変寸や変形が発生することなど、業界で一般的に認識されていたトレードオフを限りなくなくす方向に向かっていったのである。

(2) ニーズへの挑戦

自動車産業の金型製作費を納期と仕上げまでのトータルコストとして考え方が、工具鋼メーカーに熱処理による変寸や変形の問題に対応したプリハードン冷間工具鋼を開発させ

るにいたった。

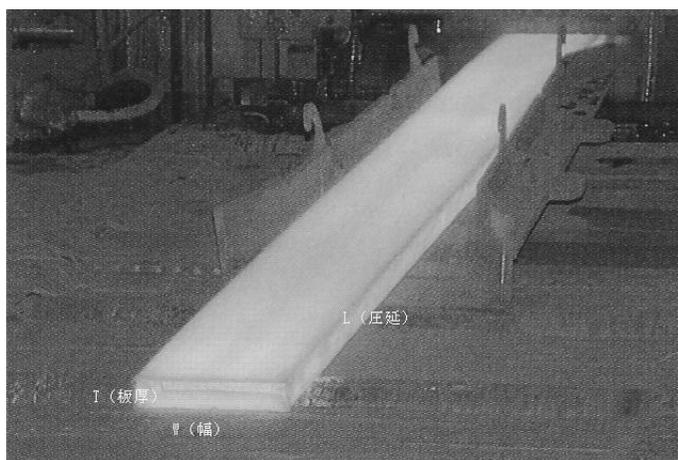
冷間工具鋼のL（圧延）、T（板厚）、W（幅）は、工具鋼の圧延工程である写真Ⅲ－1のように示すことができる。一般に熱処理による変寸とは、図Ⅲ－3のようにL、T、Wの各方向の変寸率により、焼入れ後の焼戻しにおいて変寸が発生することである。熱処理による変寸は一般に膨張する傾向が多く、プレス金型の製作工程における仕上げに多くの工数を必要とされ、自動車産業のトータルコストをして考えたコスト削減として大きな課題となった。プレス金型の仕上げの多くは工作機械などによるものではなく、職人といわれるベテランの担当者に頼る面が大きかったからである³⁰⁾。

プリハードン冷間工具鋼とは熱処理の焼入れ焼戻しを済ませた冷間工具鋼であり、金型メーカーの製作工程で熱処理工程が不要になる。また金型用冷間工具鋼として金型に必要な特性を損なわず、金型製作における被切削材としての特性を改善するという開発目標が設定されていたため直接切削加工で仕上げまでおこなうことを可能としていた。

このように開発されたプリハードン冷間工具鋼は、自動車メーカーの高精度化や金型製作費削減を部分的に達成することができた。しかし、熱処理済みのため金型メーカーでは高硬度の切削加工が強いられることとなり、切削加工工数や切削工具費の増加が大きな課題となることとなった。

8Cr系冷間工具鋼やプリハードン冷間工具鋼が開発されるなか、金型製作費削減のた

写真Ⅲ－1 工具鋼の圧延工程



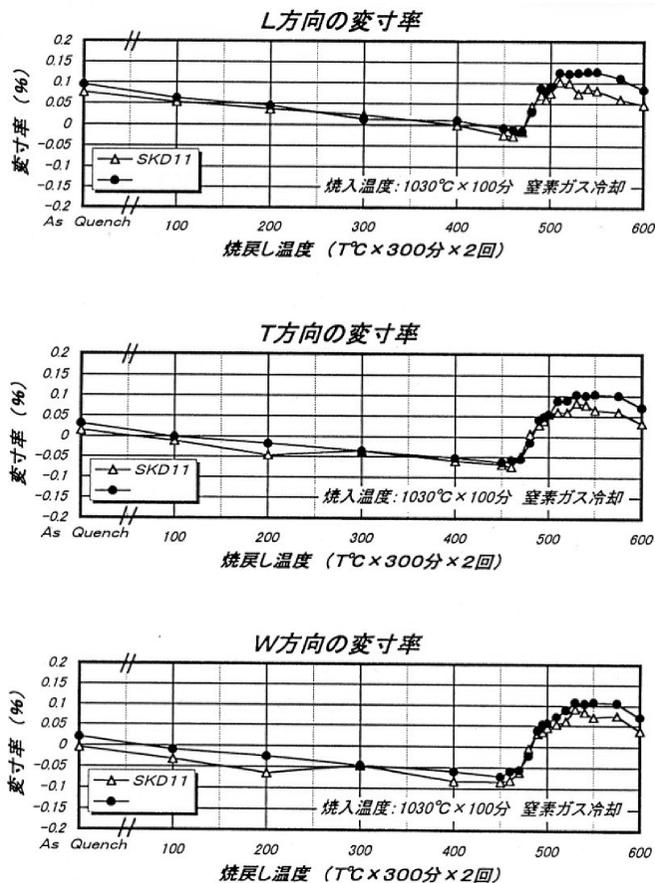
出所：日本高周波鋼業提供資料に、加工し筆者作成。

³⁰⁾ どのようなプレス金型でも設計図どおりに切削加工をしても、熱処理による変寸が発生した場合、仕上げ工程で修正をおこなわなくてはならない。

め冷間工具鋼を鋳物化したダイス鋼系鋳鋼の開発が新たにおこなわれた時期がある³¹⁾。ダイス鋼系鋳鋼は、鋳物なので事前に必要とする形状に鋳込むことができるため、高精度を維持しながら切削加工工数や切削工具費の削減ができると考えられた。ダイス鋼系鋳鋼への自動車メーカーの要求する品質は、表Ⅲ-3のようであった。これらの要求品質を満たすため、ダイス鋼系鋳鋼は後熱処理タイプと熱処理済みのプリハードンタイプの2種類の開発が試みられた。

しかし、ダイス鋼系鋳鋼の開発は要求されたシャルピー衝撃靱性値に届かず、さまざまな改善対策を検討、実施したがうまくいかなかった³²⁾。これらの試みは工具鋼メーカーに

図Ⅲ-3 工具鋼の各方向変寸率



出所：日本高周波鋼業。

³¹⁾ プレス金型には、板厚の薄いものにも鋳鋼が使用される場合がある。この場合の鋳鋼はフレームヘッドが多いため、ここでは総焼の工具鋼と区別するためにダイス鋼系鋳鋼とした。

³²⁾ シャルピー衝撃靱性値とは、材料の靱性を評価するためにおこなわれる衝撃曲げ試験のことである。一般に、工具鋼などで靱性といわれているのがシャルピー衝撃靱性値のことである。

とって失敗ではなく、自動車産業の生産技術の実態を知ることができ、冷間工具鋼の開発というプロダクトイノベーションとして重要な挑戦であった。

表Ⅲ－3 ダイス鋼系鋳鋼の品質

1. プレス金型に必要な靱性の確保
2. 耐摩耗性と表面熱処理性の確保
3. 被切削性と鋳造性の確保
4. 偏析の軽減
5. プレス金型の仕上げ代の最小化

注：鋳造性とは、湯流れ性のことである。

出所：筆者作成。

4. 環境の変化への適応

(1) 時代背景

急速にグローバル化が進むなか、自動車産業では生産プロセスの効率化およびコスト削減は継続されてきた。そのようななか、社会的要請として環境問題や衝突安全性の取り組みの向上や、希少金属の需要の高まりが、さらに自動車産業に大きな影響となり課題となった。

(2) 冷間工具鋼の環境への適応

自動車産業のニーズに対応するかのよう冷間工具鋼の開発は、活発におこなわれ2004年当時には表Ⅲ－4に示すようにさまざまな特性を備えた冷間工具鋼が販売された。表Ⅲ－4の工具鋼のブランド表は、各工具鋼メーカーの製品と日米工業規格の互換性を示したものである。

自動車メーカーは部品の共通化による少品種大ロット化になった反面、製品の差別化や多様化により多品種小ロット化が意識されるようになった。そのため金型製作費のコスト削減と金型寿命の適正化を求め、プレス金型の要求に適した性能や価格の冷間工具鋼が求められるようになった。また、世界的な希少金属の需要の高まりが工具鋼製造コストへの大きな影響となり、希少金属の少ない冷間工具鋼も考えられるようになった³³⁾。

こうしたなか、図・写真Ⅲ－3のようにSKD11に比べ高硬度、高靱性、高被切削性を確保しつつ、熱処理変寸の異方性が極めて小さいマトリックス系冷間工具鋼が開発された。

³³⁾ 増田、清水、井ノ口 (2009), pp.44-45.

マトリックス系冷間工具鋼は図・写真Ⅲ－3（金属組織）のようにSKD11や8Cr系冷間工具鋼に比べ、金属組織における熱処理変寸の異方性に影響を及ぼす晶出炭化物面積率を極めて低減した冷間工具鋼である³⁴⁾。このマトリックス系冷間工具鋼は8Cr系冷間工具鋼に比べ熱処理変寸の異方性がほとんどないため、熱処理条件を調整することにより変寸率をほぼなくすることができる。

マトリックス系冷間工具鋼の進化として希少金属の省資源化をコンセプトに開発された冷間工具鋼が、マトリックス系省資源冷間工具鋼である。マトリックス系省資源冷間工具鋼は、合金元素のうち希少金属のMo, W, VをSKD11対比で約30%の省資源化を達成した。一般に合金工具鋼である冷間工具鋼の特性を構成する希少金属の合金元素を少なくすることによって、その合金工具鋼は限りなく炭素工具鋼に近い存在となる。その結果、金型製作において熱処理の制約が大きくなりコスト削減が難しくなる可能性があるが、マトリックス系省資源冷間工具鋼は希少金属の添加量を最適化することにより金型製作において従来以上にコスト削減を目指すことができる冷間工具鋼となった。

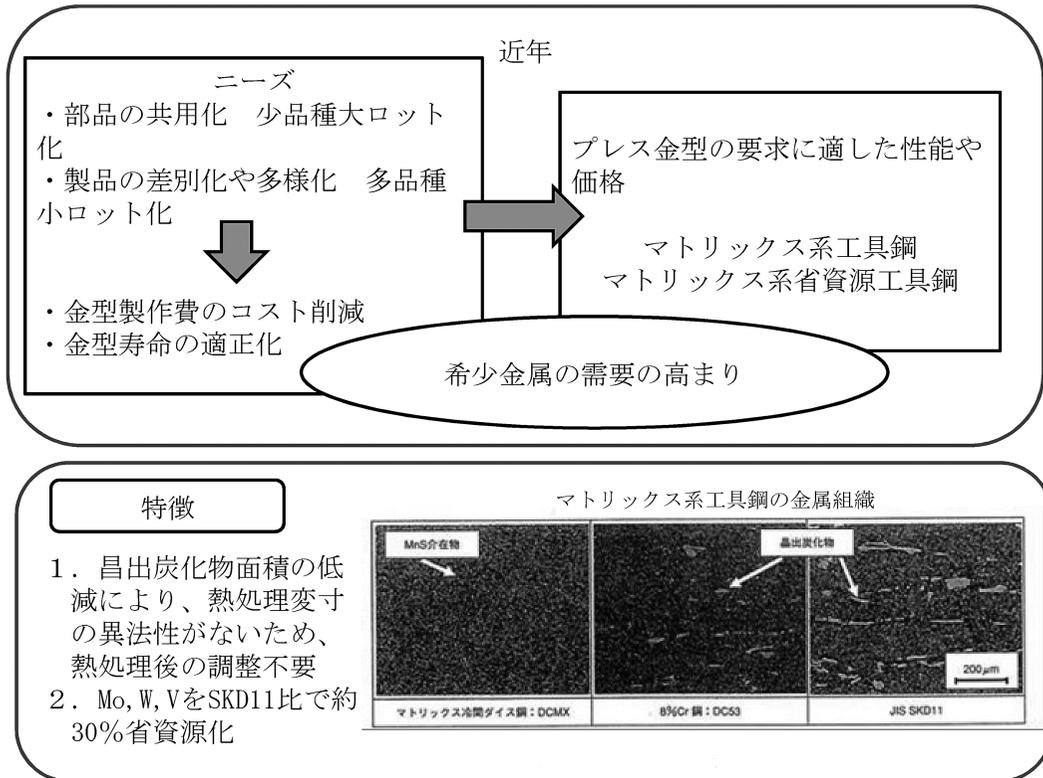
表Ⅲ－4 工具鋼のブランド対照表（冷間金型用鋼）

分類	JIS相当	AISI相当	会社名								
			愛知製鋼	神戸製鋼所	山陽特殊製鋼	大同特殊鋼	日本高周波鋼業	日立金属	不二越	理研製鋼	
炭素工具鋼	SK105	W1-10	SK3		QK3	YK3	K3				
合金工具鋼	SKS93		SK301		QK3M	YK30	K3M	YCS3			
	SKS3		SKS3		QKS3	GOA	KS3	SGT			
	SKD1	D3	SKD1		QC1	DC1	KD1	CRD			
	SKD11	D2	SKD11		QC11	DC11	KD11	SLD	CDS11	RD11	
	SKD11(改)		AUD15		QCM8	DC53	KD11S, KD21	SLD8	MDS9		
	中CrSKD		SXACE		QCM7	DCX		ARK1			
	SKD12	A2	SKD12			DC12	KD12	SCD			
	プリハードン40HRC					GO40F	KAP65	HPM2T			
	プリハードン50HRC以上					CX1	RC55	PRE2			
	火炎焼入鋼		SX105V, SX4		QF3	GO5	FH5, KRXC	HMD5, HMD1			
	低温空冷鋼		AKS3			GO4	KSM	ACD37			
耐衝撃鋼		AKS4		QF1	GS5	KTV5	YSM				
その他		AUD11 SX5, SX44		QCM10			YCK2 ACD8 SLD10	ICS22 MCR1			
高速工具鋼	SKH51	M2			QH51	MH51	H51	YXM1	SKH8	RHM1	
	SKH55系					MH55	HM35	YXM4	HM35 HS53M		
	SKH57系					MH8	MV10	XVC5	HS93R HS88M FM38V		
	マトリックス系				QHZ	DRM2 DRM3	KMX1 KMX2 KMX3	YXR33 YXR3 YXR7	MDS1, MDS3 MDS7 MATRIX2 ATM3		
粉末高速工具鋼	SKH40			KHA30		DEX40		HAP40	FAX38		
	マトリックス系			KHA3VN		DEX-M1 DEX-M3		HAP5R			
	その他			KHA32 KHA60 KHA33N KHA30N	SPM23 SPM30 SPM60	DEX20 DEX60 DEX80		HAP10 HAP50 HAP72	FAX31 FAX35 FAXG1 FAXG2		

出所：全日本特殊鋼流通協会。

³⁴⁾ 清水、井上、関谷（2008），pp.68-69.

図・写真Ⅲ-3 近年のニーズとマトリックス系冷間工具鋼



出所：筆者作成。写真は清水、井上、関谷（2008），p.68.

Ⅳ. おわりに

このように冷間工具鋼の進化は、1980年ごろまでは日本の自動車産業が飛躍的に生産台数を伸ばしている状況に対して、その開発の進捗は緩やかな状況であった。しかし、1980年ごろを境に自動車の軽量化のため高張力鋼板の使用が増え、金型製作に放電加工法が開発されたことにより、当時としては画期的な8Cr系冷間工具鋼が開発された。その後、冷間工具鋼に求められるニーズは、自動車メーカーの生産技術部門やプレス工場、プレス金型メーカーのニーズが複雑に絡み合ったものとなり、10Cr系快削冷間工具鋼や8Cr系改良冷間工具鋼が開発され、冷間工具鋼の特性である耐摩耗性と靱性について差別化が図られプレス技術全体の向上に寄与した。最近ではこれらのニーズに加え、希少金属の省資源化という環境問題をも冷間工具鋼はクリアしなくてはならない状況となってきた。また、炭素繊維複合材料を筆頭に新素材への対応する課題も大きなものとなってきている。

これから冷間工具鋼に求められるニーズは市場のグローバル化や市場問題、環境問題な

どここれまでにない急速な環境の変化をともしない、より複雑となるニーズに対応した冷間工具鋼の開発が重要となっていくであろう。

また、経営学の視点として自動車産業を基点とした冷間工具鋼の発展を研究した場合、冷間工具鋼は自動車産業の生産技術のなかのプレス技術という1分野の領域におけるプロセスイノベーションとなってしまう。しかし、工具鋼メーカーを基点とした場合、冷間工具鋼は製品でありプロダクトイノベーションとなるのである。したがって、自動車産業の発展において生産技術を研究するには、自動車産業のプロセスイノベーションと関連産業のプロダクトイノベーションの相関関係を十分認識し理解していく必要がある。

これまでの経営学の視点では、工学の領域まで踏み込んだ研究はなされてこなかった。冷間工具鋼の進化は、工具鋼メーカーの経営戦略の回答であることは間違いない、それを経営学の視点で明らかにしていくことは非常に難しいことである。しかし、工具鋼メーカーを取り巻く環境や時代の変化は、自動車産業はもちろんのこと、現在では希少金属など環境問題など複雑なニーズに対応していく必要があることが明らかであり、このような深層の部分明らかにしていくことが経営学にとって新たな領域の研究が可能になると考えられる。

最後に、本研究に際して多くの貴重な資料をご提供くださった関係者の方々にお礼を申し上げます。

[参考文献]

- 阿部源隆、中村秀樹、調秀夫（1986）「高硬度・高靱性冷間工具鋼「QCM8」の開発」『日本金属学会会報』第25巻第5号 日本金属学会, pp.438-440.
- 阿部行雄、久保田邦親、田村庸（2001）「新冷間金型材 ARK1の開発」『日立金属技報』第17巻 日立金属, pp.87-92.
- 阿部行雄（2006）「TECHNICAL REPORT ハイテン成形用冷間工具鋼「SLD-MAGIC」の開発と特性」『型技術』第21巻第2号 日刊工業新聞社, pp.78-81.
- 阿部行雄、久保田邦親、山岡美樹、小松原周吾（2007）「新冷間ダイス鋼 SLD-MAGIC の特徴と使用事例」『型技術』第22巻第8号 日刊工業新聞社, pp.100-101.
- 井川正治（2006）「グローバル化に向けたトヨタの生産技術革新」『先端技術フォーラム2006名古屋』講演聞き取り資料（2006.11.17）
- 薄鋼板成形技術研究会（2007）『プレス成形難易ハンドブック 第3版』日刊工業新聞社。
- 型技術研究会（1991）『図解 型技術用語辞典』日刊工業新聞社。
- 加藤享、中出英治、鷹島弘、小川淳（2000）「プレス金型の一体構造を可能とする焼入れ鋳鉄の開発」『TOYOTA Technical Review』Vol.50No.2 オーム社, p92.
- 久保田邦親、小松原周吾、扇原孝志（2005）「新冷間ダイス鋼 SLD-MAGIC の開発」『日立金属技報』

第21巻 日立金属, pp.45-52.

清永欣吾 (2000) 『工具鋼』 日本鉄鋼協会。

金属材料研究会 (1988) 『図解 金属材料技術用語辞典』 日刊工業新聞社。

山陽特殊製鋼研究・開発センター (2001) 「製品紹介 被削性と型寿命に優れた冷間工具鋼 QCM7」 『山陽特殊製鋼技報』 第8巻1号, pp.106-108.

山陽特殊製鋼研究・開発センター (2004) 「製品紹介 冷間ダイス鋼「QCM」シリーズ QCM8, QCM7, QCM10」 『山陽特殊製鋼技報』 第11巻1号, pp.85-87.

清水敬介、横井大円、辻井信博、鈴木賢司、福岡敬司 (2002) 「快削高靱性ダイス鋼「QCM7」の適用事例」 『型技術』 第17巻第8号 日刊工業新聞社, pp.64-65.

清水崇行、井上幸一郎、関谷篤 (2008) 「マトリックス冷間ダイス鋼「DCMX」」 『型技術』 第23巻第14号 日刊工業新聞社, pp.68-69.

清水崇行、井上幸一郎、関谷篤 (2010) 「熱処理寸法の制御が容易なマトリックス冷間ダイス鋼 DCMX」 『電気製鋼』 第81巻第1号 大同特殊鋼研究開発部, pp.53-60.

清水崇行、井上幸一郎、関谷篤 (2010) 「熱処理変寸制御性に優れたマトリックス冷間ダイス鋼 DCMX の開発」 『あたりあ』 第49巻第3号 日本金属学会, pp.113-115.

清水崇行、増田哲也、井ノ口貴之 (2010) 「金型用プレートに適した省資源冷間ダイス鋼 DCLT」 『電気製鋼』 第81巻第1号 大同特殊鋼研究開発部, pp.61-68.

特殊鋼倶楽部特殊鋼ガイド編集委員会 (1977) 『特殊鋼ガイド 第4編』 (社)特殊鋼倶楽部。

特殊鋼倶楽部特殊鋼ガイド初級編集委員会編 (1990) 『特殊鋼ガイド 初級』 (社)特殊鋼倶楽部。

野口正光、山口勝利 (1988) 「プレス金型用火炎焼入鋳鉄の開発」 『トヨタ技術』 第38巻第1号, pp.20-27.

林田敬一 (1995) 「高被削性冷間工具鋼 - KD11S - 」 『特殊鋼』 第44巻第11号 特殊鋼通信社, pp.9-11.

増田哲也、清水崇行、井ノ口貴之 (2009) 「省資源冷間ダイス鋼」 『型技術』 第24巻第8号 日刊工業新聞社, pp.44-45.

松田幸紀 (2001) 「冷間工具鋼の最近の動向」 『塑性と加工』 第42巻第480号 日本塑性加工学会, pp.3-7.

松田幸紀 (2002) 「高性能冷間ダイス鋼 DC53」 『特殊鋼 有名ブランド生産システム 誕生秘話』 特殊鋼通信社, pp.155-166.

森重功一 (2007) 『図解入門 よくわかる 最新金型の基本と仕組み』 秀和システム。

吉田潤二、林田敬一、小高根正昭 (1996) 「被削性に優れた新冷間工具鋼「KD11S」」 『型技術』 第11巻第7号日刊工業新聞社, pp.42-45.

吉田潤二、勝亦正昭、山崎善夫 (1998) 「冷間金型用鋼の疲労寿命に及ぼす一次炭化物の影響」 『鉄と鋼』 第84巻第1号日本鉄鋼協会, pp.79-84.

吉田潤二、勝亦正昭、山崎善夫 (1998) 「冷間金型用鋼の疲労寿命に及ぼす二次炭化物の影響」 『鉄と鋼』 第84巻第9号日本鉄鋼協会, pp.672-677.

吉田弘美 (2004) 『よくわかる金型のできるまで』 日刊工業新聞社。