

当社の自動車用型鍛造品への取り組み

Current State of SMI's Die Forged Products for Automobiles

濱崎 敦/Atsushi Hamazaki・関西製造所 専門部長

小林勇策/Yusaku Kobayashi・関西製造所 自動車建機品製造部 型鍛造品技術室 室長

要 約

鍛造クランク軸は、形状、材質、製造プロセスすべてにわたり、時代とともに進歩してきた。

ここでは、関西製造所で製造している代表的な自動車用型鍛造品であるクランク軸について、その製造プロセスをプレス鍛造とハンマー鍛造の差も含めて説明し、併せて最新鋭プレス鍛造ラインの特徴と鍛造クランク軸設計の考え方を示した。

また、クランク軸材料の現状について概説し、設計評価、製品性能評価それぞれの機能評価技術についても言及した。

Synopsis

Forged crankshafts have developed over gaining new shapes, materials and manufacturing processes.

This paper describes the manufacturing process for hummer and press forged crankshafts, typical die forged products for automobiles at Osaka Steel Works, together with the characteristics of the newest forging press line.

Design concepts and today's materials for forged crankshafts are explained. Finally, the evaluation of design and product qualities are described.

1. 緒 言

自動車用エンジンは経済性、安全・快適性、低公害性等のニーズから、小型、軽量、低燃費、低騒音・振動、高出力化の方向をたどり、それに伴ってクランク軸に要求される特性も年々高度化してきている。

関西製造所においては、長年にわたりクランク軸をはじめとする自動車用型鍛造品を製造してきた。この間新しい設備の導入、使用金型精度の向上やバランス解析、FEM 解析等の活用による鍛造技術の向上、実体疲労試験やエンジン試験等による機能評価技術の充実等種々開発、改善を実施し、これらの要求を満足すべく、努力してきた。

以下にクランク軸を対象として、当社自動車用型鍛造品への取り組み状況をとりまとめた。

2. 型鍛造クランク軸の製造プロセス

2-1 製造プロセスと設備

クランク軸の一般的な鍛造プロセスを第1図に示す。荒地取り工程は材料配分の適正化による材料歩留まり向上がその主目的であり、製品形状、生産量規模により簡略化もしくは省略される場合がある。

なお、V型クランク軸等ツイスト（振り）工程が必要な

工 程	加工目的	加工形状
予備成形	荒地取り	軸方向体積配分
	曲 げ	幅方向体積配分
型鍛造	荒型打	断面成形
	仕上型打	断面成形
整形	バリ抜き	バリ除去
	成形型打	寸法矯正

第1図 クランク軸の鍛造工程
Fig.1 Crankshaft forging process

場合はバリ抜き工程と整形工程の間で実施される。

又、これらの工程に使用される鍛造用設備の代表例を第1表に示す。

成形工程の型鍛造にはプレス鍛造とハンマー鍛造があり、通常、大ロットの小物鍛造品生産にはプレス鍛造が、小ロット品、大物品の生産にはハンマー鍛造が用いられる。プレス鍛造にはクランクプレスの他、スクリュウプレス、ウェ

技術解説

ッジプレス等が、又ハンマ鍛造には上部加圧式のドロップハンマ、カウンターブローハンマが主として使用されている。当社ではこの中クランクプレスとカウンターブローハンマを使用している。

第1表 鍛造用設備
Table 1 Forging equipment

プロセス	設 備
ピレット切断	鋸 シャー設備
加熱	ガスまたは重油炉 誘導加熱装置
予備成形	レデュースロール 鍛造プレス
型鍛造	鍛造プレス ハンマ
ばり切断	油圧または機械プレス
ツイスト（振り）	ツイスタプレス
コイニング	油圧または機械プレス

2-2 プレス鍛造とハンマ鍛造の比較

近年の鍛造ラインは生産性、自動化の観点よりプレス鍛造が主となっている。第2表にプレス鍛造とハンマ鍛造の比較を示すが、ここに示すように、生産性、自動化、製品精度面でのプレス鍛造の優位性がその理由であると考えられる。

この傾向は、現状、クランク軸に見られる製品の軽量化、加工代ミニマム化の顧客ニーズに対応するための小抜き勾配化、鍛造公差の狭幅管理化およびV添加鋼による非調質化等の製品技術動向より今後ますます進んで行くものと考えられる。

第2表 プレス鍛造とハンマ鍛造の比較
Table 2 Press forging vs. Hammer forging

特 徴	プレス	ハンマ
生 産 性	○	
自 動 化	○	
製 品 品 質	○	
型 寿 命	○	
自 由 度 (サイズ, ロット)		○
作 業 環 境	○	
設 備 費 用		○
保 守 費 用		○

注：○は有利なことを示す

一例として当社16 000Tプレスによるハンマ品のプレス化による製品精度向上例を第3表に示す。

同時に、プレス鍛造における段取り替え短縮によるFMS化、TPM等によるメンテナンスコスト削減等の設備、操業技術開発が今後更に重要となってくる。

2-3 最新鋭プレス鍛造ライン

当社において開発した6 500Tプレスを主機とした最新鋭クランク軸鍛造ラインの概要を第2図²⁾に示す。

本プレスラインの開発により下記を実現し、大幅コストダウンを実現した。

- (1)高速鍛造クランク軸生産：生産タクト 8秒/個

(従来ラインの1/2)
- (2)高生産性

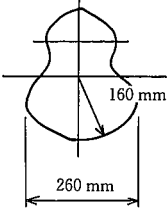
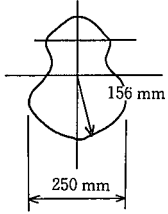
：労働生産性

＝従来ラインの4倍
- (3)FA化促進

：FA化率 50%以上

(定義：21世紀の鍛造工場

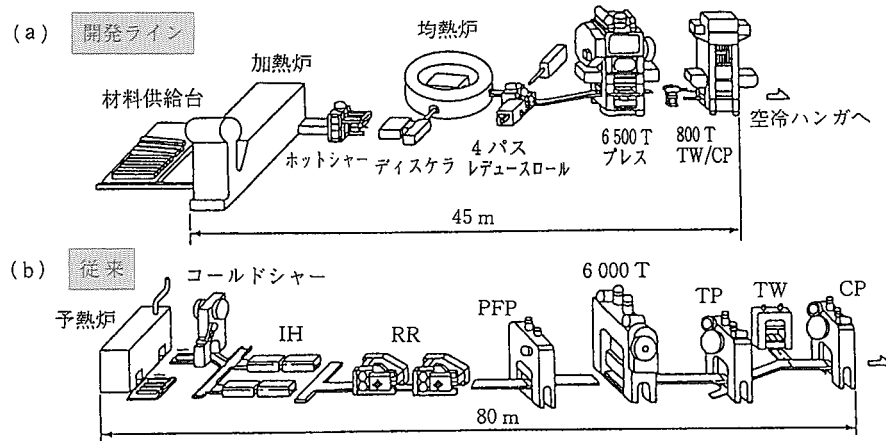
第3表 ハンマ→プレスライン移行による軽量化事例
Table 3 Advantages of press forging against hammer forging

項 目		35T-Mハンマ品	16 000T品	重量軽減
加工代	抜 勾 配	5°	3°	-4 kg
	ピン (片側)	5 mm	4 mm	
	ジャーナル (片側)	4.5 mm	4 mm	
	長手 (フロント, フランジ)	5 mm	4 mm	
フィレット R		15 mm	6 mm	
カウンター ウェイト 形 状 【CAD バランス計算 にて評価】				-15 kg
鍛造重量		314 kg	295 kg	-19 kg

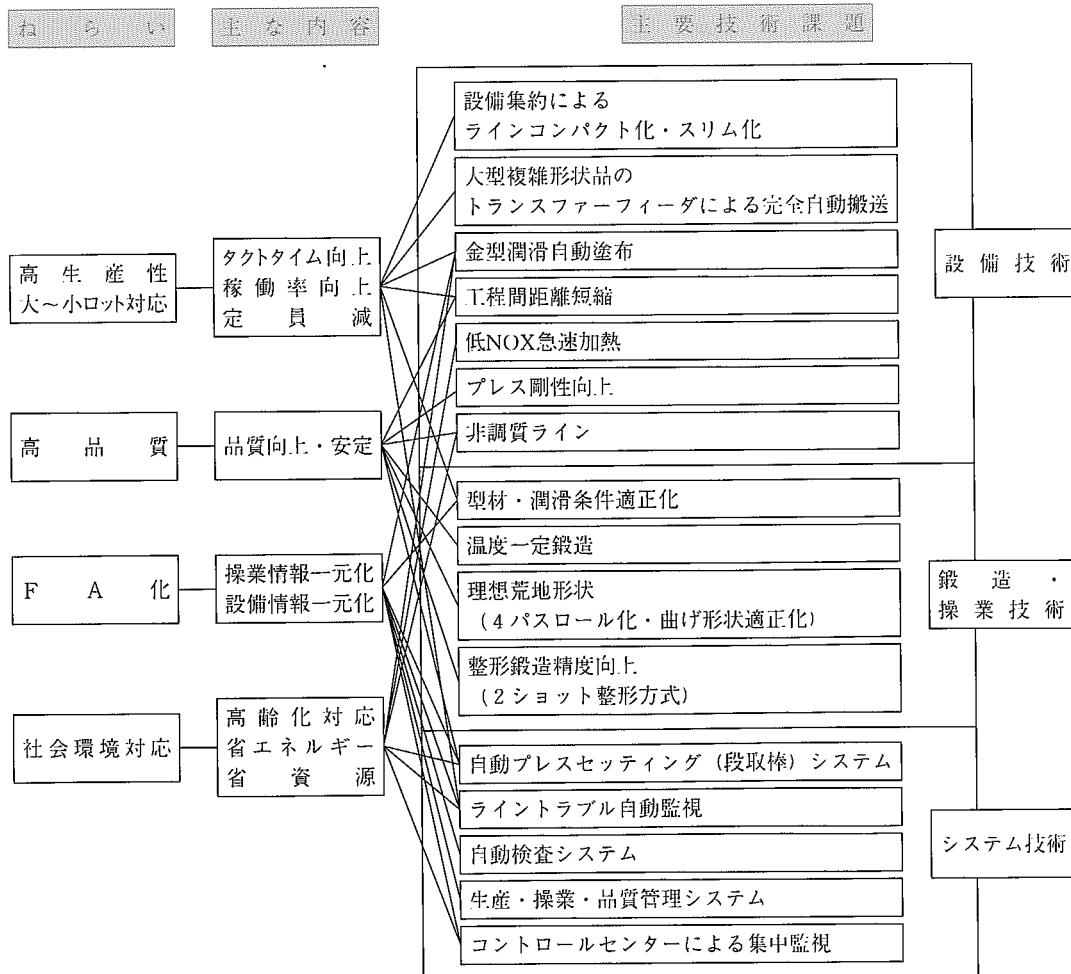
調査研究報告書／
'93素形材センター編

(4)品質合格率 : 平均 98.5%
このプロジェクト実現のため開発あるいは導入した技術

内容を第3図²⁾にとりまとめている。第3図に示すように、鍛造設備としてではなく、鍛造クランク軸生産システムとして開発されたところが6500Tプレスラインの特徴であり、今後の鍛造ライン開発の方向付けをするものといえる。



第2図 6500T 鍛造ライン
Fig.2 New 6500T press line



第3図 6500T プレスライン開発技術
Fig.3 Technologies applied to 6500T press line

技術解説

3. 型鍛造クランク軸の設計

3-1 クランク軸製品設計

エンジンの主要部品であるクランク軸へのニーズはエンジンに対するニーズとともに高度化してきている。この現状を第4図に示す。

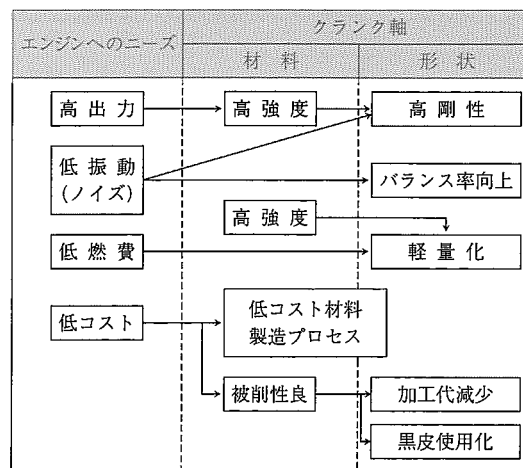
この対応のため当社では前述の生産技術開発に加え、第5図³⁾に示す多種のクランク軸機能解析技術を開発実用化してきている。

鉄鋼メーカーとしての材料試験、開発能力とCADを活用した設計評価技術の体系化によりクランク軸の最適化を目指している。

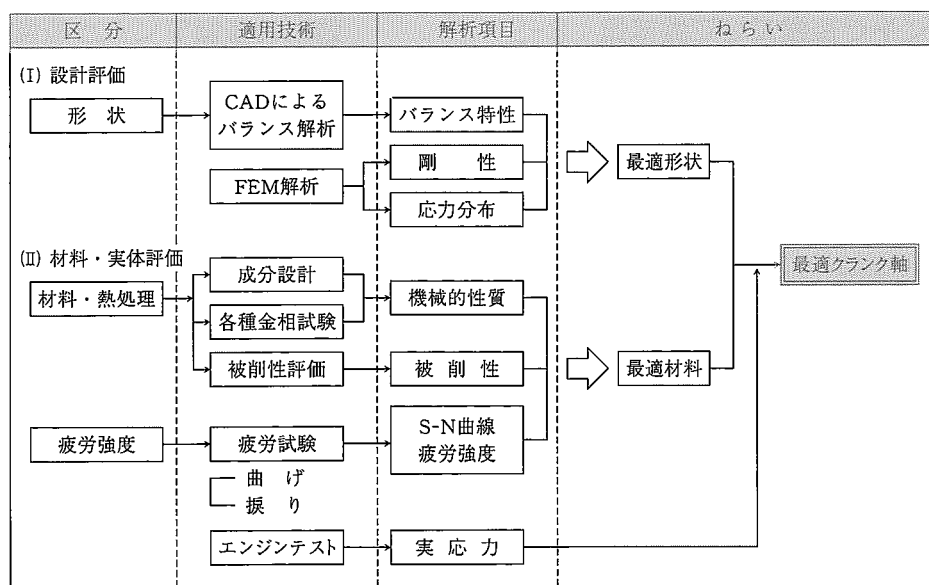
3-2 製造プロセス、金型設計

クランク軸のプレス鍛造には通常6～7種の金型が使用される。したがって金型設計および製造プロセスの効率化は製品開発の工期短縮のKey Technologyであり、CAD化等の技術開発が各社で進められている。

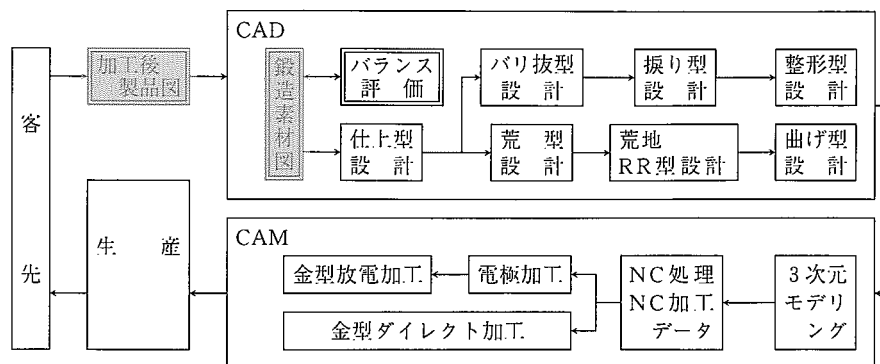
当社においても、'81以降金型設計、製造にCAD/CAMを導入し、第6図に示すCAD/CAMによる金型設計、製造の一貫システムを構築し、新たに開発した第7図に示す



第4図 クランク軸へのニーズ
Fig.4 Needs for crankshafts



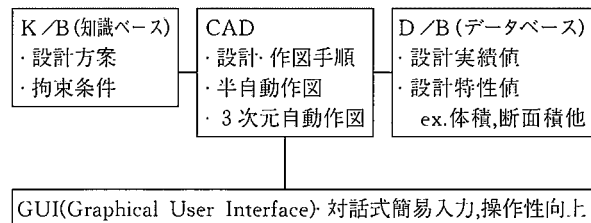
第5図 クランク軸開発技術
Fig.5 Developed technologies for crankshafts



第6図 CAD/CAM 製造システム
Fig.6 CAD/CAM manufacturing process

エキスパート CAD システムとの併用で設計工期を約25%短縮するとともに製品体積、鍛造荷重の高精度計算を可能にした。

又、鍛造プロセスの解析についても三次元 FEM を用い複雑形状の塑性シミュレーションシステムの開発を進めており、製品開発～量産の開発工期の更なる短縮を目指している。



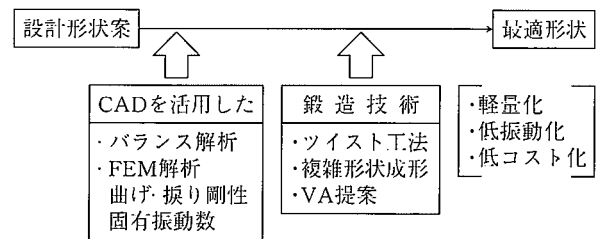
第7図 エキスパート CAD システム
Fig.7 Expert CAD system

3-3 デザインイン

エンジンそのものの開発工期短縮、開発コスト低減が求められる現在、クランク軸においても製造、使用のコンカレントエンジニアリング化が注目されてきている。

製品設計の早期段階での設計、製造両面での最適化は製品のコスト削減および開発コスト削減に極めて効果的であり、設計情報の共有化を含めたデザインインへのニーズは大きなものがある。当社ではこれまで開発してきた CAD 設計評価技術（前述）と蓄積してきたクランク軸型鍛造技術を活用しデザインイン活動を推進している。

当社デザインイン活動の概要を第8図に示す。



第8図 デザインイン活動
Fig.8 Design-in for crankshafts

4. クランク軸材料

4-1 クランク軸に要求される特性と使用材料

クランク軸に要求される材料特性は、疲労強度、切削性、耐焼付性の3つに集約できる。これらの特性はすべて満足されねばならないが、クランク軸によって、その必要レベルには差異がある。また、疲労強度や耐焼付性と切削性は、お互いに相反する性質であり、いずれも満足するためには後述するように硬さを上げないで耐久比（疲労強度/引張強さ）を上げることにより疲労強度を向上させる、表面処理を有効活用する等の工夫が必要である。

第4表はクランク軸に使用される材料の代表例である。従来は0.43-0.55%Cの炭素鋼や Mn 鋼、Cr-Mo 鋼等の調質材が強度に応じて用いられてきたが、最近はこの材質

第4表 クランク軸に使用される材料例
Table 4 Examples of materials used for crankshafts

材 質		化 学 成 分 (%)								
		C	Si	Mn	S	Cr	Mo	V	Pb	Ca
炭素鋼 (S43C～S55C)	S48C	0.45～ 0.51	0.15～ 0.35	0.60～ 0.90	≤ 0.035	≤ 0.20	—	—	—	—
マンガ鋼 (Mn鋼)	S48C+Mn	0.45～ 0.51	〃	1.10～ 1.40	≤ 0.025	〃	—	—	—	—
	SAE1548	0.44～ 0.52	〃	〃	≤ 0.050	〃	—	—	—	—
クロムモリブデン鋼 (CrMo鋼)	SCM435	0.33～ 0.38	〃	0.60～ 0.85	≤ 0.030	0.90～ 1.20	0.15～ 0.30	—	—	—
	SCM440	0.38～ 0.43	〃	〃	〃	〃	〃	—	—	—
普通非調質鋼	S48CS1V	0.45～ 0.52	0.20～ 0.70	0.60～ 1.10	0.040～ 0.070	≤ 0.25	—	0.05～ 0.15	—	—
	S45CVL1	0.42～ 0.48	〃	〃	≤ 0.035	〃	—	〃	0.04～ 0.09	—
	S48CVS1L1	0.45～ 0.52	〃	〃	0.040～ 0.070	〃	—	〃	〃	—
	S48CVS1L2Ca	0.45～ 0.52	〃	〃	〃	〃	—	〃	0.10～ 0.25	添加
高強度 非調質鋼	S38MS1V	0.35～ 0.42	〃	1.20～ 1.50	〃	〃	—	〃	—	—
	開発鋼				未 公 開					

材質のトレンド
(非調質化の流れ)

炭素鋼→
普通非調質鋼

Mn, CrMo鋼→
高強度非調質鋼

技術解説

も非調質化が進み、各調質鋼と同等の疲労強度を有する非調質鋼が開発、実用化されている。

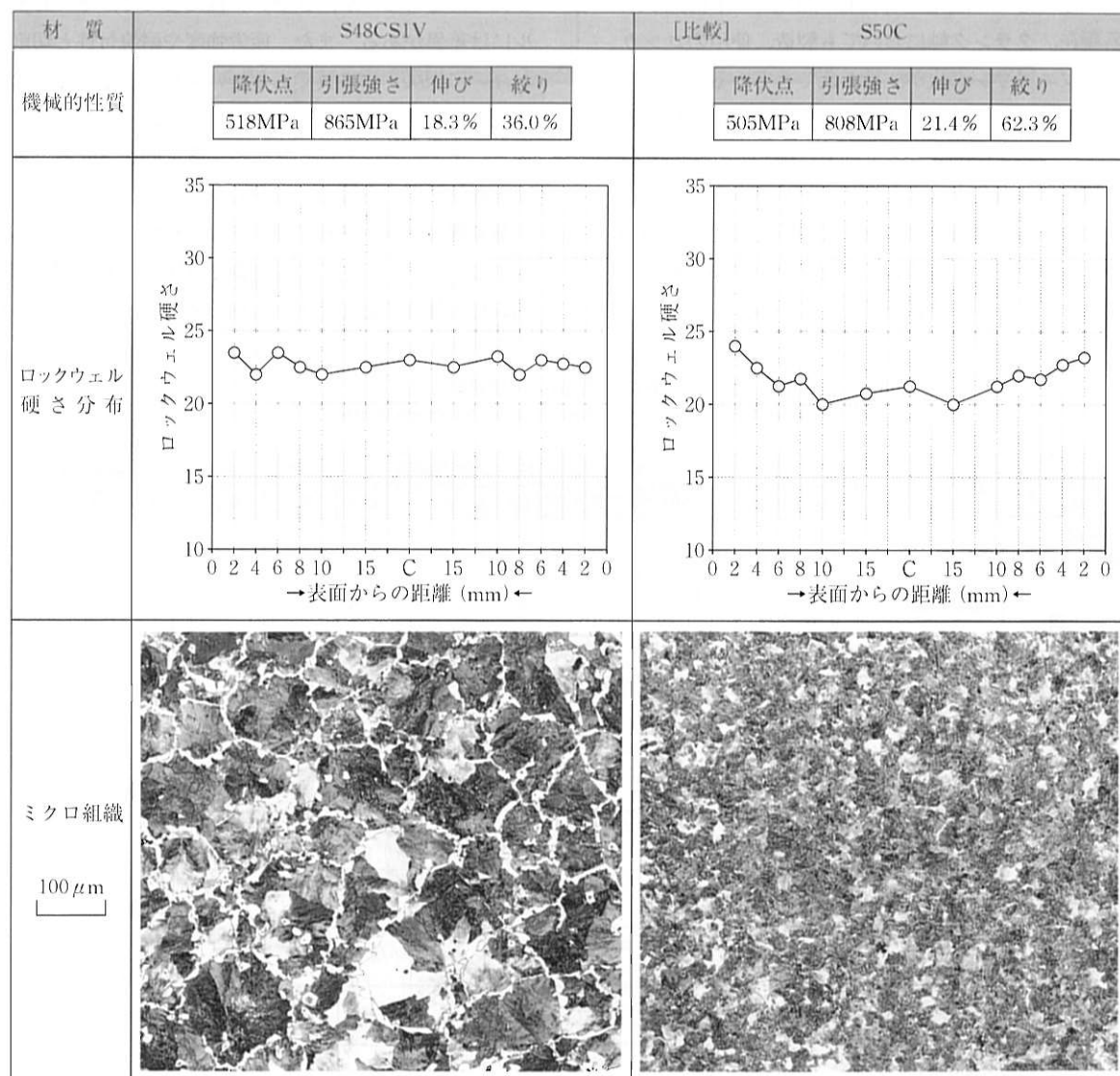
4-2 非調質快削鋼

非調質鋼は Microalloyed Steel と呼ばれるように、鋼に少量の V、Nb、Ti 等の合金元素を添加し、それらの炭窒化物の析出を利用して鍛造後空冷の状態で調質鋼と同等の強度を得るものであるが、一般的には調質鋼に比べ、結晶粒が粗めのフェライト・パーライト組織が多い。そのため靱性がやや劣り、クランク軸等靱性の余り要求されない部品に使用されることが多かった。しかし、靱性を向上させるため、①鍛造温度を低下させる ②C量を減少させ、Mn量を増加させる、Ti、Si、S等の添加量を調整する等化学成分をコントロールする。③介在物制御により、マイクロ組織を微細化する。④ベイナイトまたはマルテンサイト組織を用いて強靱化をはかる、等⁴⁾により靱性の必要な自動車用足廻り部品にも使用されるようになってきている。

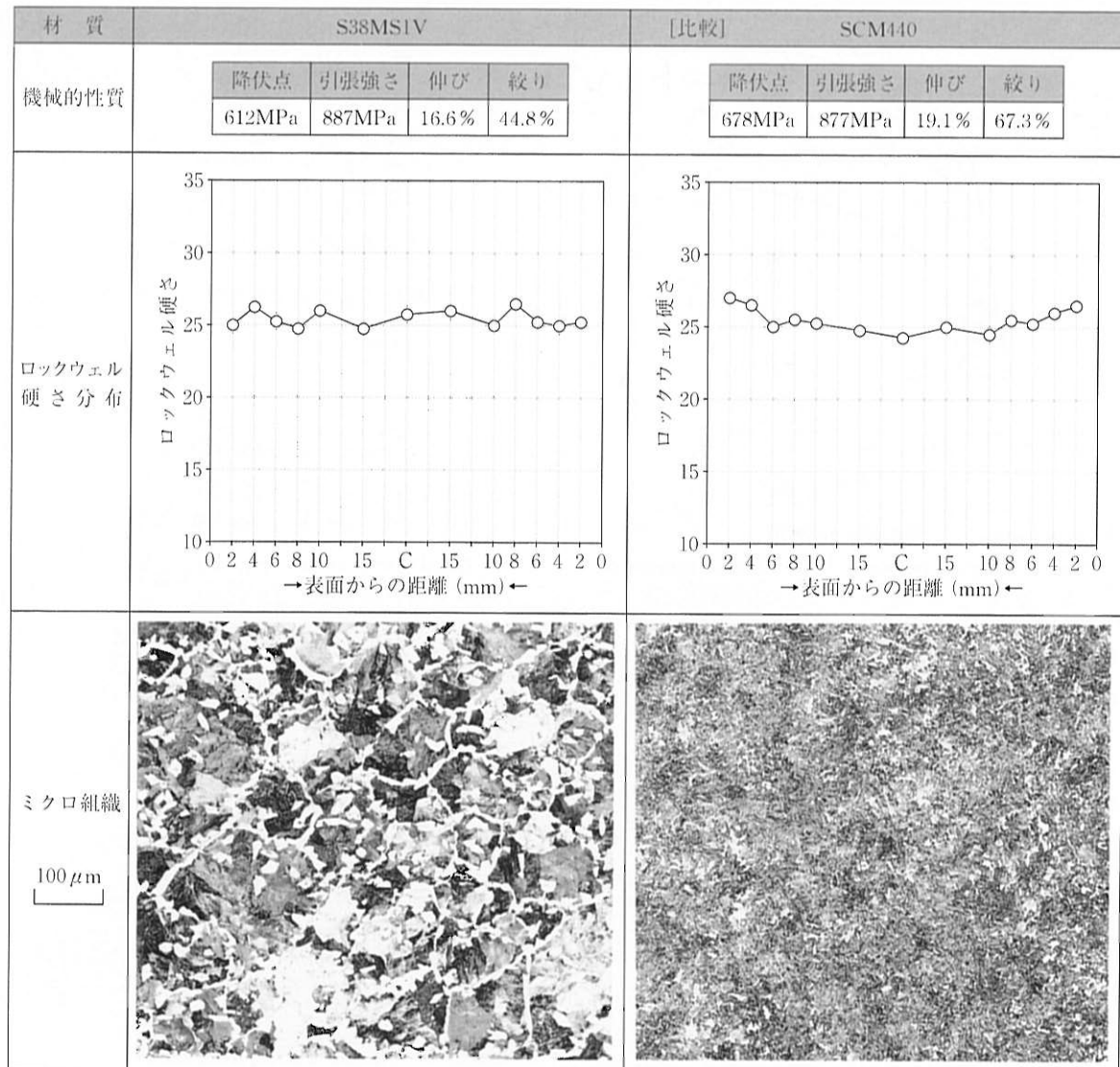
クランク軸の場合には靱性よりも曲げ疲労強度に重点がおかれている。通常 S50C 程度の調質鋼に相当する疲労強度 350~400MPa クラスの非調質鋼 (48CS1V 系) が広く用いられているが、更に強度が必要な場合には、SCM440 調質鋼に相当する疲労強度 400~450MPa クラスの高強度非調質鋼 (S38MS1V) が使用される。S38MS1V は硬さを上げないで疲労強度を向上させるため、C を下げて耐久比の高いフェライト組織⁵⁾を増加させ、Si、Mn 等によりフェライトを強化することで、疲労強度を高めている。S48CS1V と S38MS1V の特性をそれぞれ調質鋼と比較して第 9 図、第 10 図に示す。

高疲労強度を得るために表面処理が利用されることも多い。第 5 表⁶⁾にクランク軸の代表的な表面処理の比較を示す。また、表面処理による疲労強度の変化を第 11 図に示す。

第 12 図は以上述べた材料の動向を一つの図にまとめたものである。



第 9 図 S48CS1V の材料特性
Fig.9 Material characteristics of S48CS1V



第10図 S38MS1V の材料特性

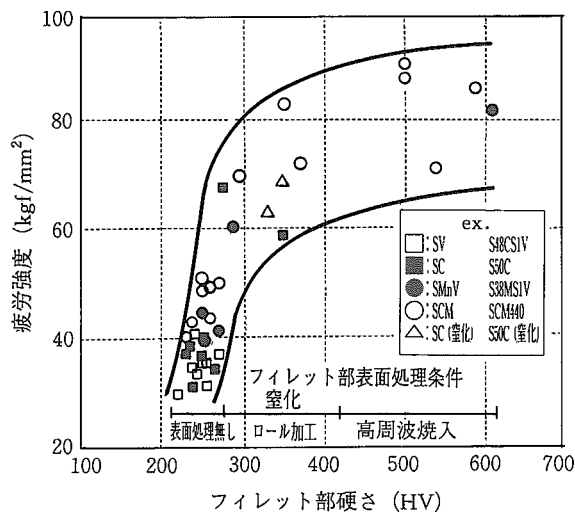
Fig.10 Material characteristics of S38MS1V

第5表 クランク軸の代表的強化法（加工後表面処理法）の比較

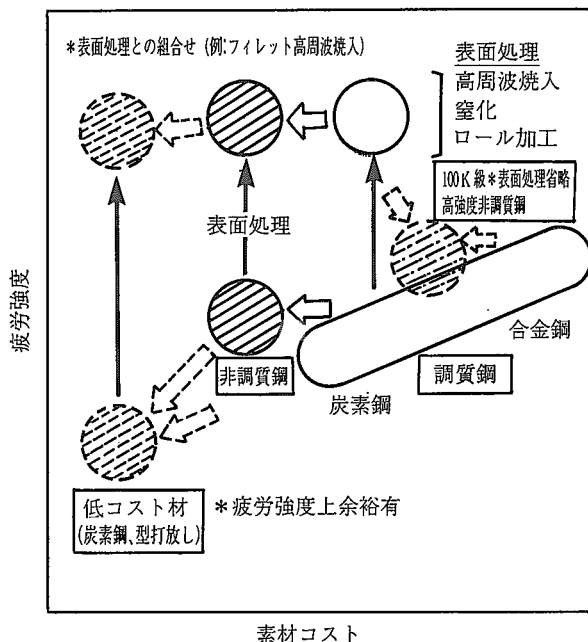
Table 5 Comparison of typical surface strengthening methods used for crankshafts

強化法	フィレットロール加工	軟窒化処理	高周波焼入
強化機構	塑性加工による加工硬化と圧縮残留応力の発生	炭素、窒素元素のFeへの固溶強化と圧縮残留応力の発生	マルテンサイト変態による硬化、圧縮残留応力の発生
コスト	低	高	低
インライン化	可	困難	可
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> ・冷間加工で熱を使わない ・省エネルギー ・短時間で処理可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・メタル摺動部も強化 ・処理時間が長い ・熱変形をやや伴う 	<ul style="list-style-type: none"> ・局部焼入れが可能（メタル摺動部も強化可能） ・処理時間が短い

技術解説

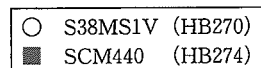


第11図 各種表面処理による疲労強度の変化
Fig.11 Fatigue strength before and after surface treatment

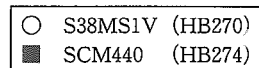
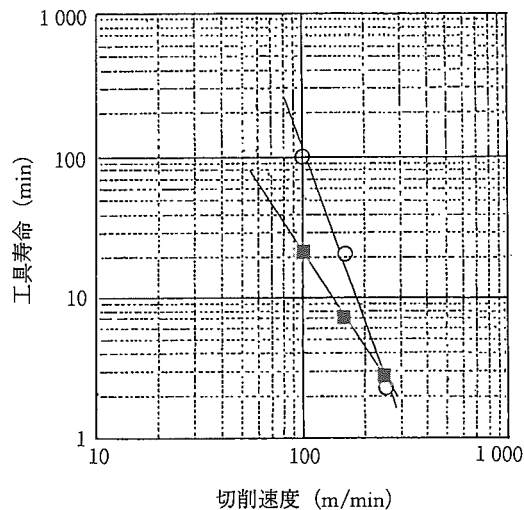


第12図 クランク軸の材料開発動向
Fig.12 Development of crankshaft materials

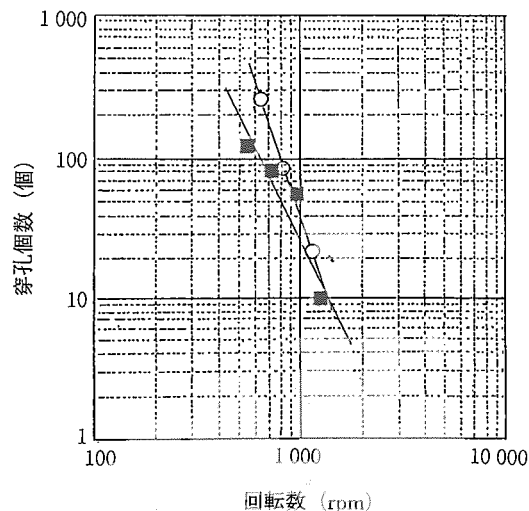
非調質鋼には一般に快削元素が含まれている。調質鋼の場合は、焼入性に応じ表面部と内部で硬度差の生じることが多い。これに対し非調質鋼の場合には鍛造後の冷却コントロールのみで強度が得られるため、表面と内部の硬度差はほとんどないことが多い。クランク軸材料については、油穴加工時の切削性が問題になるが、調質鋼で内部硬さが低くなる材料はこの点ではむしろ好ましい。非調質鋼の場合には一般にS、Pb、Ca等の快削元素を添加することによって、切削性を向上させている。第13図に第10図の硬さ分布を持つSCM440とS38MS1Vの被削性試験結果を示す。非調質鋼は内部硬さが高くても、被削性はむしろ優れている。



試験条件
工 具：P20(超硬)
送 り：0.25 mm/rev.
切込み：2 mm
乾 式
寿命判定基準；フランク摩耗：0.2 mm



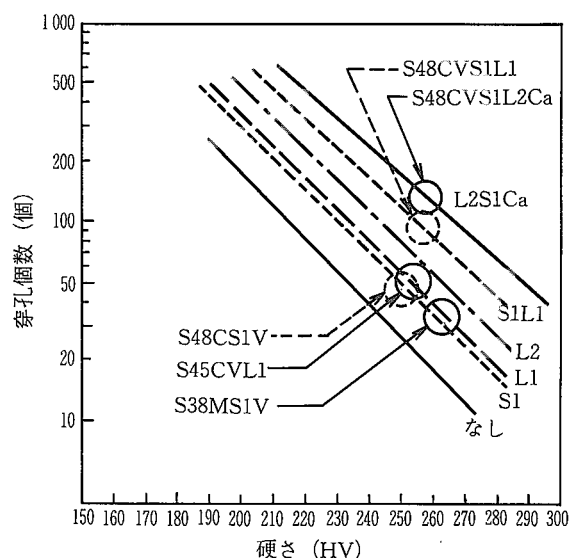
試験条件
工 具：SKH 51 10φドリル
送 り：0.2 mm/rev.
穴深さ：40 mm
湿 式
寿命判定基準；刃先摩損まで



第13図 S38MS1VとSCM440の被削性試験結果
Fig.13 Machining test results of S38MS1V and SCM440

快削元素は①S, Te, Se, Zr ②Pb, Bi ③Ca, Tiの3つのグループに分けられ、それぞれに切削性に及ぼす効果が異なる。最もよく用いられるのはSとPbであるが、これらを複合添加したものやS, Pb, Caの3元素を添加して被削性を高め、加工能率を大幅に向上したもの⁷⁾も使用されている。

各種非調質快削鋼の硬さとドリル被削性との関係を第14図に示す。目的に応じて快削元素は使い分けられているが、米国では鉛規制が日本より厳しく、将来鉛快削鋼の使用量は減少していくものと思われる。



第14図 各種非調質鋼の硬さとドリル被削性の関係
Fig.14 Drill machinability of various microalloyed steels

4-3 最近のクランク軸材料動向

鍛鋼製クランク軸は常に鑄鉄製クランク軸と競合関係にある。一般に鍛鋼の利点は強度と剛性の高さにある。

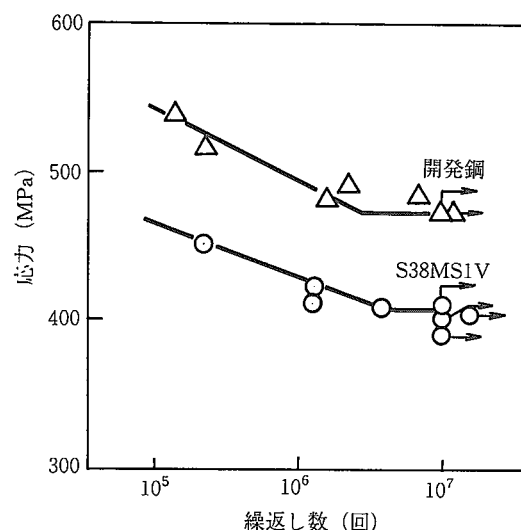
最近のニーズの一つとして、疲労強度は多少低くなっても、高い剛性を維持しながらコストを極限まで下げた鍛鋼材料が求められており、クランク軸によっては合金元素や快削元素の添加を押さえた安価な非調質鋼が使用されることもある。MnやNを有効に活用することも安価な材料を得るための一つの方法である⁸⁾。

一方エンジンの高出力化に対応して、疲労強度のできるだけ高い材料も求められている。最近開発した高強度非調質鋼は、S38MS1Vと同じ開発コンセプトに基づいて設計した材料で、合金元素の添加量に工夫をこらし、第6表、第15図に示す特性を得ている。ミクロ組織は被削性を考慮し、フェライト+パーライト組織としている。

第6表 高強度非調質鋼の材料特性

Table 6 Mechanical properties of the high strength microalloyed steel

降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	疲労強度 (N/mm ²)	$\frac{\sigma W}{T.S.}$
721	1 040	14.9	26.3	471	0.45



第15図 高強度非調質鋼の疲労特性
Fig.15 Fatigue strength of the high strength microalloyed steel

更に各種表面処理に適した材料の開発も望まれているが、最終的には素材費、鍛造費、熱処理費、機械加工費等トータルとしての製造コストと得られる材料特性とを比較し、いかにコストパフォーマンスの高い製品を作るかが、求められるところである。

5. 機能評価技術

クランク軸製造の上で欠かせないのは、鍛造クランク軸の機能評価技術である。この機能評価技術は、設計段階における設計評価技術と製品完成後の製品性能評価技術の二つに分けることができる。

5-1 設計評価技術

設計評価技術は既に述べたデザインイン活動には必須の技術である。その事例としてバランス解析とFEM解析の一例を示す。

(1) バランス解析

a. 解析環境

使用CAD: CADD5 (Computer vision 製)

使用ソフト: 自社開発

b. 解析情報

必要な情報: 加工寸法 (加工後製品図), ボウウェイト重量・位置, ライトニングホール重量・位置

バランス解析: 動バランス計算, バランス改善検討

技術解説

アウトプットできる情報：トータルバランス表、スローごとのバランス率、VA提案形状

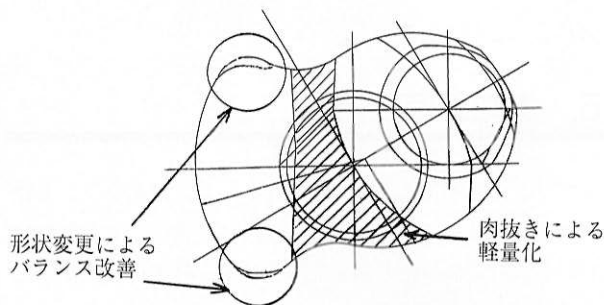
c. 解析フローチャート

第16図に解析フローチャートを示す。この図にある各種技術を活用することによって、顧客に対する設計面でのVA提案が可能となる。その一例を第17図に示す。



第16図 解析フローチャート

Fig.16 Analysis flow chart



第17図 VA提案形状例

Fig.17 An example of VA proposal

(2) FEM 解析

a. 解析環境

初期モデル作成：CADD5

解析ツール：I-deas

b. 解析情報

必要な情報：解析項目・位置，荷重負荷方法・位置，支持方法・位置

フライホイールのサイズ・位置（振動解析の場合に必要）

FEM 解析：曲げ，振り，固有振動数

アウトプットできる情報：

曲げおよび振り剛性，各部位応力，各モード固有振動数

c. 要素作成方法

- ・ 6 面体・5 面体要素（応力，歪解析）

CAD で3D 粗メッシュ作成→

I-deas で細メッシュ作成

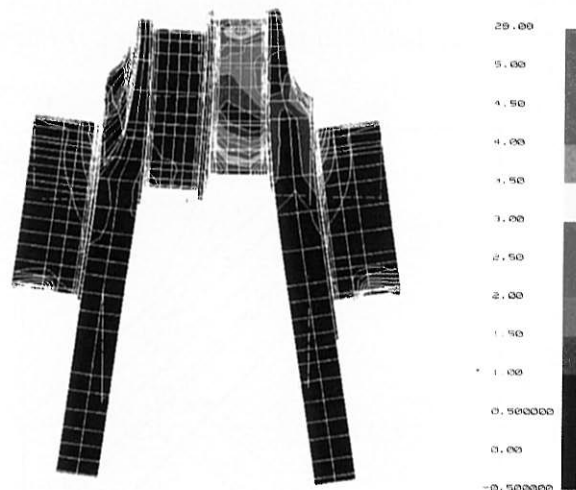
（ワイヤーのみ）

- ・ 4 面体要素（振動解析）

CAD でモデル作成→ I-deas による自動メッシュ

（ソリッドから面データ作成）

一例として，FEM による曲げ応力，歪解析のサンプルを第18図に示す。



第18図 曲げ解析変形図および応力分布図例

Fig.18 An example of deformed figure and stress distribution after bending analysis

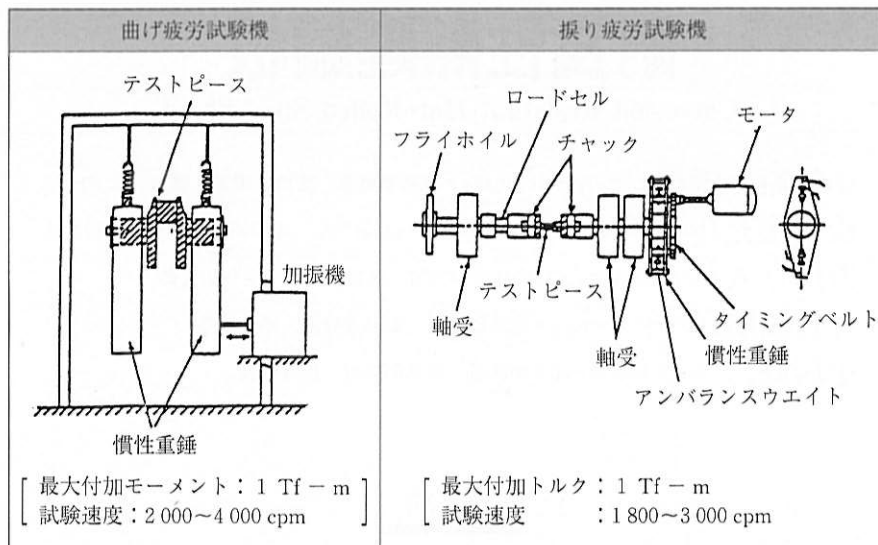
5-2 製品性能評価技術

クランク軸の製品としての性能評価は材料面での評価が主体となるが，評価技術を一覧にすると第7表のようになる。この中で当社で実施している実体疲労試験の方法を第19図に示す。最終的にはエンジンベンチを用いて製品としての総合評価を行うことにより，FEM 解析結果等を検証することも可能である。

第7表 クランク軸材料面での機能評価技術一覧

Table 7 A list of evaluation technology with crankshaft materials

項目	適用技術	備考
材料・熱処理	材料設計	材料面での総合評価が可能
	各種金相・材料試験	
	被削性試験	
疲労強度	小野式回転曲げ疲労試験	FEM解析のサポート
	クランク軸疲労試験	
エンジンテスト	ファイアリングベンチ	実体機能評価が可能
	モーターリングベンチ	



第19図 クランク軸の実体疲労試験方法

Fig.19 Fatigue test machines of actual crankshafts

6. 結 言

自動車用型鍛造品としてクランク軸をとりあげ、当社における設計、材料、製造、評価試験等の取り組みにつき、その現状をとりまとめた。

国際競争の激しい今日においては、設計から機能評価にいたる総合製品技術と溶解から鍛造にいたる一貫した製造技術を併せ保有していることは、当社の大きな強みである。今後も個々の技術力向上に努めると同時に、顧客と一体となった新しい開発にも注力し、国際競争力を強化していく所存である。



濱崎 敦 / Atsushi Hamazaki

関西製造所 専門部長

(問合せ先 : 06(466)6150)

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：最新塑性加工要覧 p.194
- 2) 秋田昌毅他：住友金属 Vol.47 No.1 (1995) p.87, 86
- 3) 久保 亮他：素形材 Vol.36 No.12 (1995) p.13
- 4) 野村一衛：まてりあ Vol.34 No.6 (1995) p.706-708
- 5) 西岡邦夫他：住友金属 Vol.32 No.2 (1980) p.157

- 6) 島本敏郎他：自動車技術 Vol.44 No.6 (1990) p.95
- 7) 森元秀：特殊鋼 Vol.42 No.6 (1993) p.51
- 8) 例えば M. Cristinacce et al : Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steel (1996) p.42