

(解説)

鑄鋼製組立型クランク軸の進歩

森 啓之(工博)*・土山友博(工博)*・於久英一*・久保晴義**・井嶋清幸**・吉本篤人**

*鉄鋼部門・鑄鍛鋼事業部・技術部 **鉄鋼部門・鑄鍛鋼事業部・製造部

Evolution of the Kobe Steel Cast Steel Build-up Type Crankshaft

Dr. Hiroyuki Mori・Dr. Tomohiro Tsuchiyama・Eiichi Oku・Haruyoshi Kubo・Kiyoyuki Ijima・Atsuhito Yoshimoto

Kobe Steel has developed and manufactured build-up type crankshafts made of cast steel since 1955. In order to meet customer demand for increased crankshaft output and compactness, Kobe Steel has continued to develop and improve this type of crankshaft. This paper describes the development history and present activities (casting design, steel-making process, cast steel material and fillet cold rolling) related to these types of crankshaft.

まえがき = 近年の船舶の大型化傾向にともなって、その主機関である低速 2 サイクルディーゼル機関も高出力化してきている。また、カーゴスペースの確保による輸送の効率化のため、エンジンのコンパクト化要求も強くなっている。このため、低速 2 サイクルディーゼル機関の主要部品である組立型クランク軸には高強度化、高品質化が求められてきた。

組立型クランク軸には鑄鋼製と鍛鋼製の 2 種類があるが、現在では当社が世界で唯一の鑄鋼製クランク軸メーカーとなっている。鑄鋼製クランク軸は鍛鋼製クランク軸に対して、ニアネット形状に製造できるため生産性が高いという利点がある。いっぽう、鑄鋼品は鍛鋼品とは異なり熱間における鍛造工程がないため、内部品質には十分配慮する必要がある。このため当社では鑄鋼製クランク軸の製造を開始して以来、たゆまない技術開発を実施しユーザーニーズに応えてきた。

本稿では、世界で唯一の鑄鋼製組立型クランク軸メーカーであり、かつ組立型クランク軸で世界トップシェアを築き上げてきた背景となっている技術開発の歴史と現在の取組みについて紹介する。

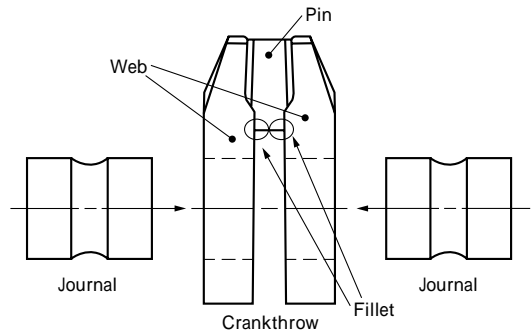
1. 低速ディーゼル機関およびクランク軸の変遷

現在、低速ディーゼル機関のライセンサは MAN B&W 社、ワルチラニューズルツァーディーゼル社、三菱重工業株式会社の 3 社である。第 1 図に一例として MAN B

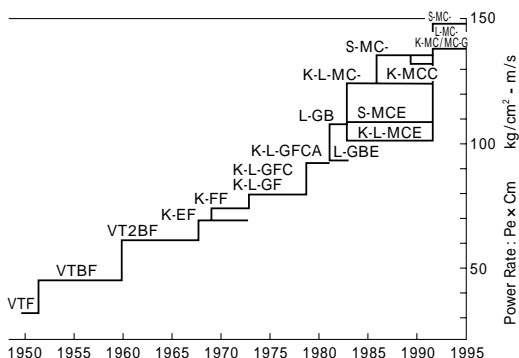
&W 社の創成期から現在までのディーゼル機関の出力の指標である出力率の変遷¹⁾を示す。図中の記号はエンジンの型式を示している。出力はここ 50 年で 3 倍以上になっており、それにともない、クランク軸への負荷も厳しくなっている。

第 2 図に組立型クランク軸各部位の名称を示す。組立型クランク軸はクランクスローにジャーナルを焼きばめして必要気筒数のクランク軸を組立てることより製造され、従来よりシリンダ直径 400mm 程度以上の船用ディーゼル機関に幅広く使用されてきた。

前述したディーゼル機関開発動向の中で、大型クランク軸の形状にも大きな変化が見られる。写真 1、写真 2、および写真 3 に代表的なクランク軸形状の変遷を示す。



第 2 図 組立型クランク軸の各部位の名称
Fig. 2 Illustration of built-up type crankshaft



第 1 図 MAN B&W 機関の出力率の変遷
Fig. 1 Change in power rate of MAN B&W type engines



写真 1 全組立型クランク軸 (B&W タイプ 884VT2BF-180)
Photo 1 Full built-up crankshaft (B&W type 884VT2BF-180)



写真2 半組立型クランク軸 (MAN B&W タイプ 10L80MC)
Photo 2 Semi built-up crankshaft (MAN B&W type 10L80MC)

写真1は全組立型クランク軸と呼ばれるもので、ジャーナル軸だけでなく、ピン部も焼きばめされて製造されるタイプのものである。写真2は半組立型クランク軸と呼ばれるもので、ピン部はアーム部と一体化させることによって、エンジンの出力アップと軽量化が図られるようになった。写真3は近年出現したクランク軸で、従来よりもクランク軸全長が短く(ウェブ厚みが薄く)なり、一層の軽量化・コンパクト化が図られている。このようなクランク軸形状の変遷はディーゼルエンジン開発、すなわちエンジンの高出力化、コンパクト化志向によるものであり、クランク軸に対してクランクスロー材の高強度・高降伏点化およびさらなる品質の安定性が要求されてきた。

組立型クランク軸の中でクランクスローに鋳鋼材をもちいる鋳鋼製組立型クランク軸は以下の特徴を有する。

- 1) ニアネットに製造できるため、歩留まりも良く、かつ機械加工時間が短く生産性が良い。
- 2) 製造設備の制約を受けずに大型スローが製造できる。

上記の特徴を有する鋳鋼製組立型クランク軸によって、当社では第3図に示すように組立型クランク軸全製造本数の70~80%を占め、世界トップシェアを築き上げてきた。以下にはその技術的背景となる主要要素技術の開発の歴史と現在の取組みについて述べる。

2. 鋳鋼製組立型クランク軸の進歩と改良

2.1 製造工程

第1表に鋳鋼製組立型クランク軸の製造工程を示す。この中でクランク軸へ要求される性能から重要な要素技術は、

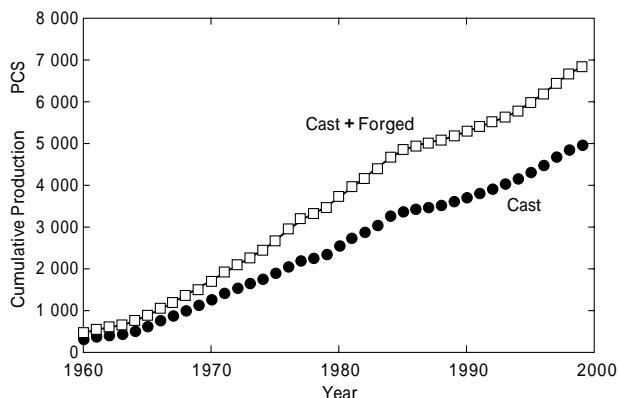
- 1) 鋳造方案
- 2) 製鋼技術・材質
- 3) クランク軸強化法(冷間ロール加工)の三つがあげられる。第2表にその重要要素技術改良の歴史の一覧を示す。

2.2 鋳造方案の進歩と改良

鋳鋼品は鍛鋼品と異なり、熱間鍛錬工程がないことから鋳造方案による内部品質の確保はもっとも重要である。鋳鋼スローの製造を開始して以来、実製品の内部品質の確認^{2)~4)}や、モデル実験⁵⁾⁶⁾などをおして、湯道・押湯などを最適化する鋳造方案を作成・改良してきた。



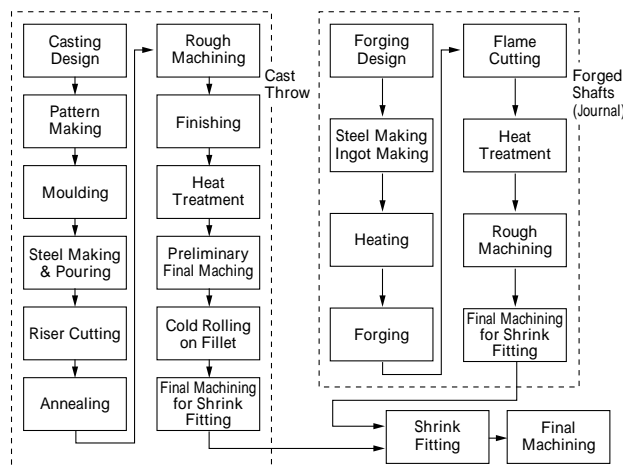
写真3 半組立型クランク軸 (MAN B&W タイプ 5S60MC-C)
Photo 3 Semi built-up crankshaft (MAN B&W type 5S60MC-C)



第3図 組立型クランク軸の製造実績
Fig. 3 Production totals of built-up type crankshaft

第1表 鋳鋼製組立型クランク軸の製造工程

Table 1 Manufacturing sequence of built-up type crankshaft made of cast steel crankthrow

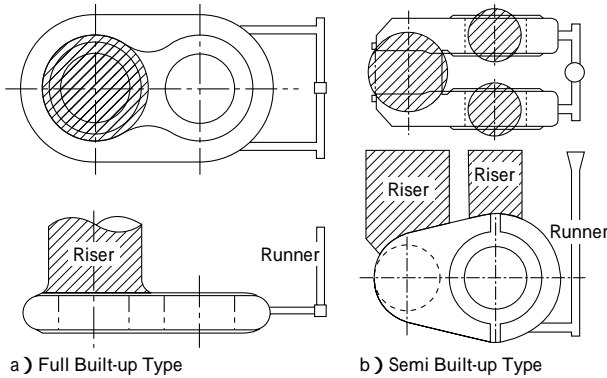


これまでの鋳造方案の変遷を第4図、第5図に示す。第4図a)は全組立型クランク軸用スロー、第4図b)は半組立型クランク軸用スローの鋳造方案の一例を示している。鋳造方案上もっとも留意すべきことは、引け巣の発生や強度を均一に保つための成分偏析の低減であり、そのためには鋳造方案上で指向性凝固を促進させる必要がある。従来、鋳造方案の最適化にあたっては、過去の経験・実績や、実製品の試作などをおして確認されてきた。近年ではそれらに加え、第5図に示すような湯流れ・凝固解析技術をもちいてさらなる最適化を図っている。

第2表 主要要素技術の変遷

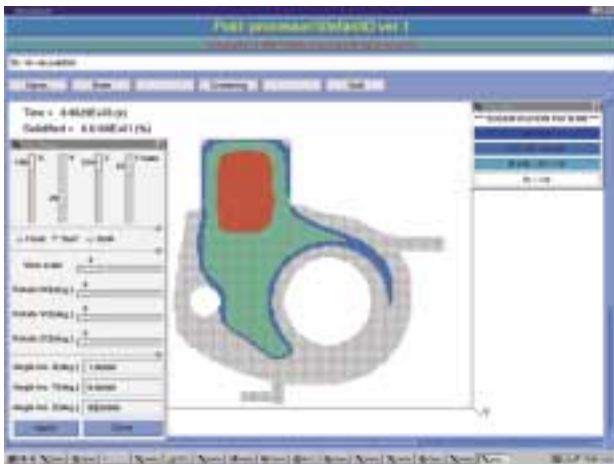
Table 2 Progress of casting design, steel making process, cast steel material and fillet cold rolling

		1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
1	Casting Design	Full Built-up Type Crankthrow		Semi Built-up Type Crankthrow		One Riser		Solidification Analysis		Mold Filling and Solidification Analysis			
		Several Riser											
2	Steel Making Process	Open-hearth Furnace		Electric Furnace		Tap Degassing Process (TD)		Ladle Furnace Process (LF)					
2	Cast Steel Material			Grade 1		Grade 2		Grade S2		Grade 3		Grade 4	
3	Fillet Cold Rolling			Old Type Equipment		New Type Equipment (Small Size)		New Type Equipment (Large Size)					



第4図 組立型鑄鋼スローの鑄造方案

Fig. 4 Casting design for built-up type cast steel crankthrow



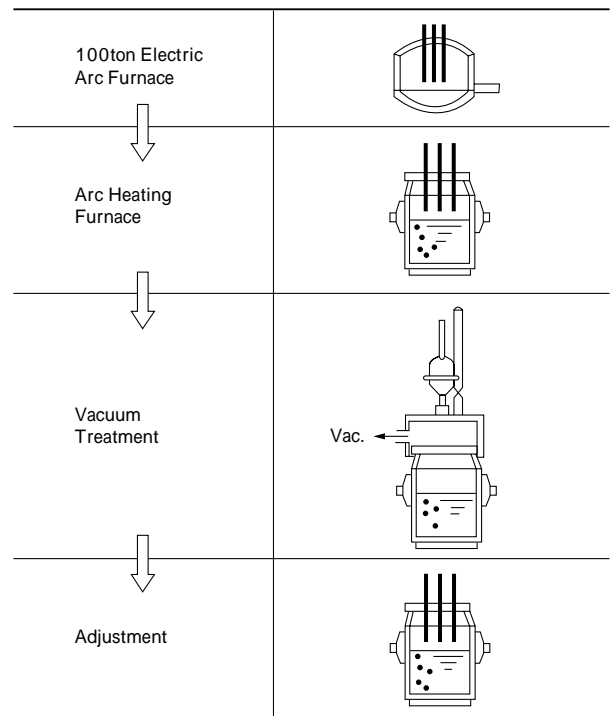
第5図 凝固解析結果 (ウェブ中心の凝固パターン)

Fig. 5 Solidification analysis results (Solidification pattern of web center)

2.3 製鋼技術・鑄鋼スロー材の進歩と改良

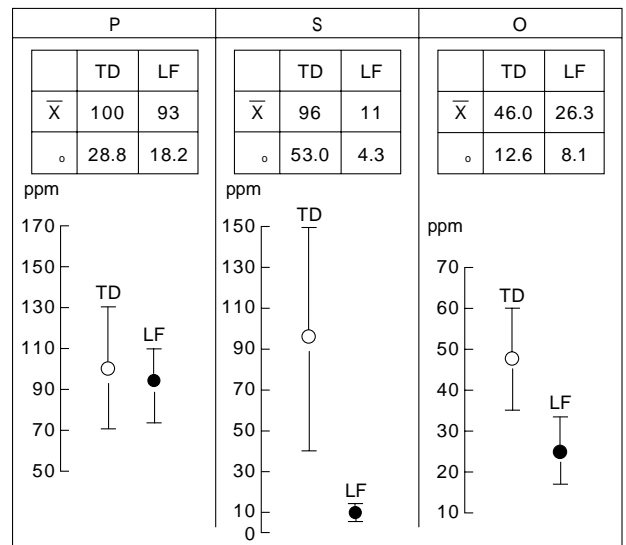
ディーゼル機関の高出力化にともない、鑄鋼材にも高強度化・高降伏点化が望まれてきた。その品質確保のためには製鋼技術と材料化学成分の検討が重要であり第2表中にその開発の変遷を示した。

クランクスロー製造における製鋼技術では、とくに不純物元素の除去や脱ガス処理が重要である。1988年頃までは当社では出鋼脱ガス法(TD)と呼ばれる製鋼プロセスがもちいられていた。その後は電気炉から一度溶鋼を取鍋に受け、取鍋内で精錬をおこなう炉外精錬法(LF)を適用している。炉外精錬法の模式図を第6図に、炉外精錬法の効果を第7図に示す。炉外精錬法の採用に



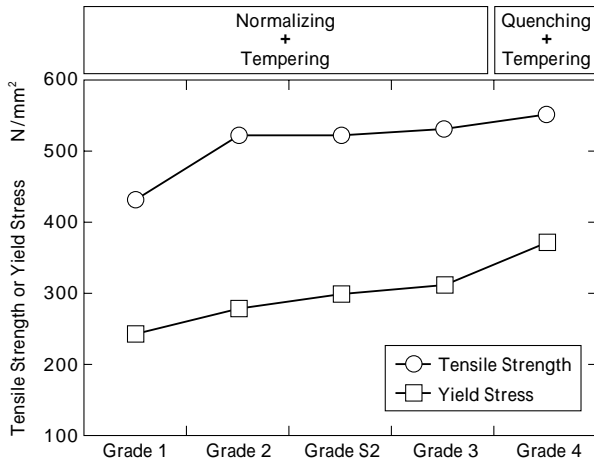
第6図 炉外精錬法

Fig. 6 Ladle furnace process

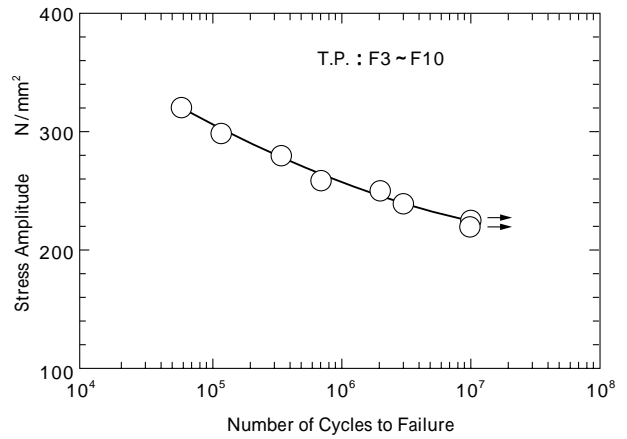


第7図 出鋼脱ガス法と炉外精錬法でのP, S, O量の比較

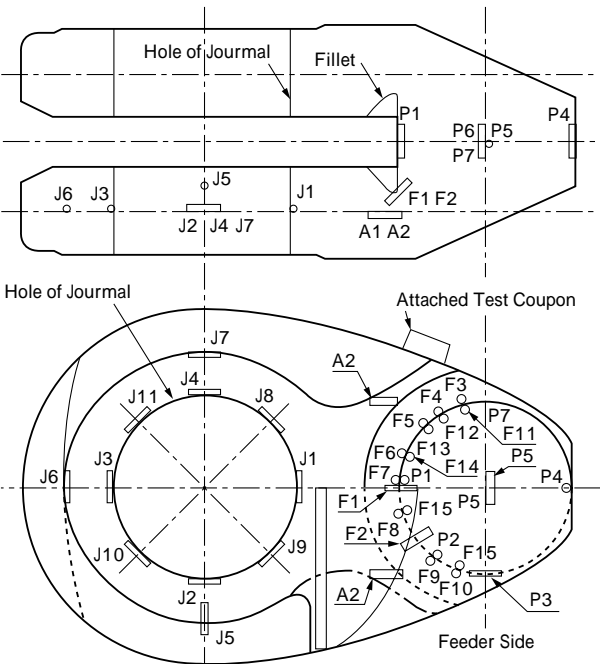
Fig. 7 Comparison of P, S, and O contents between tap degassing process and ladle furnace process



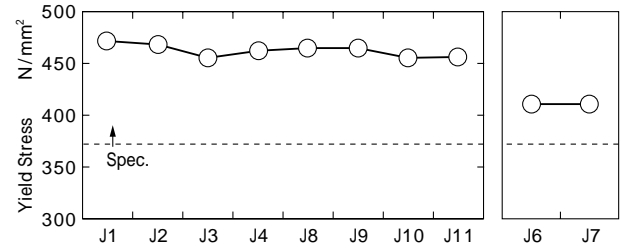
第8図 鋳鋼スロー材の機械的性質と熱処理条件
Fig. 8 Mechanical properties and heat treatment of cast steel materials for crankshaft



第10図 確性試験結果（回転曲げ疲労試験結果）
Fig. 10 Results of rotating bending fatigue test



第9図 確性試験片採取要領
Fig. 9 Positions of test pieces taken from the crankshaft



第11図 確性試験結果（引張試験結果）
Fig. 11 Results of tensile test



写真4 冷間ロール加工装置（井桁フレーム構造：旧タイプ）
Photo 4 Fillet cold rolling equipment (previous type)

より硫黄などの不純物元素や酸素などのガス成分の除去が効果的におこなわれており、非金属介在物の低減に有効な役割を果たしている⁷⁾⁸⁾。

いっぽう、これまでクランクスローに採用されてきた鋳鋼材料の機械的性質（引張強さ、降伏点）およびその熱処理方法を第8図に示す⁹⁾。材質、熱処理条件の改良においては、焼入性のみならず成分偏析などにも留意しておこなうとともに、実体スローを試作・評価して品質を確認し、実用に供してきている。一例として、現在もちいられている中でもっとも高強度であるスロー4種材（Grade 4）の確性試験片採取要領⁹⁾を第9図に、確性試験結果の一例を第10図、第11図に示す⁹⁾。クランクスローでもっとも重要な材料特性はフィレット部の疲労強度およびジャーナルを焼きばめする軸孔周りの降伏点であるが、第10図、第11図に示すように、要求特性を満足することを確認している。

2.4 クランク軸の強化（冷間ロール加工）

クランク軸にもっとも必要な疲労強度をさらに付与するために、当社では最重要部位であるフィレット部を冷間ロール加工法にて強化するという方法を採用してきている。

しかしながら、ピンフィレット部は大きなウェブに挟まれ空間が狭いため、十分な加圧力を与えるように種々の改善をおこなってきた¹⁰⁾。1968年頃には写真4に示す井桁フレーム構造のロール加工装置が設置され、当時の大型鋳鋼スローの加工を可能とした。また1982年にはピンフィレット部の空間の狭い小型鋳鋼スローの加工をおこなうため、装置構造を変更したC型フレーム構造のロール加工装置（写真5）を新設した。さらに大型スローのコンパクト化により、より空間が狭くなったため、1986年には大型鋳鋼スロー用として、C型フレーム構造の装置を新設し現在に至っている。

冷間ロール加工を施すと、材料の加工硬化と圧縮残留応力の発生などによって疲労強度が大幅に上昇す



写真5 冷間ロール加工装置 (C型フレーム構造:新タイプ)
Photo 5 Fillet cold rolling equipment (new type)



写真6 実体疲労試験装置
Photo 6 Fatigue testing machine for an actual-sized crankthrow

第3表 実体疲労試験結果

Table 3 Results of fatigue tests on an actual-sized crankthrow

Type of Crankshaft (Pin Diameter mm)	Material	Fillet Cold Rolling	Tensile Strength σ_b N/mm ²	Fatigue Strength		
				Fatigue Strength σ_w N/mm ²	Degree of Increase	
					Amount N/mm ²	Rate %
Type 80 (730)	Cast Steel (Grade 2)	Non	557.6	176.4	—	—
		Treated	557.6	313.6	137.2	78

る^{5)6),11)~16)}。その効果は写真6に示すように実体スローの大型共振型平面曲げ疲労試験装置をもちいて確認された。その結果を第3表に示す。冷間ロール加工を施すことにより、疲労強度が約78%上昇することを確認し、これらの結果をまとめ主要船級協会からも承認された。さらに、ライセンサー・エンジンメーカからも技術的信頼をえて、現在ではすべての鋳鋼スローに適用されており、現在の鋳鋼製クランク軸製造におけるキーテクノロジーといっても過言ではない。

3. 今後の開発の取組み

以上、鋳鋼スローにかかわる主要要素技術の開発の歴史を述べた。以下に、現在の取組みについて若干触れる。前述したようにディーゼルエンジンの高出力化傾向は今後とも続くものと予想される。したがって、クランク軸にもさらなる高強度化・信頼性向上が望まれている。

現在はそのニーズに応えるべく高強度鋳鋼材料を開発中であるとともに、鋳鋼スローの内外部品質のさらなる向上のために凝固解析技術を駆使した鋳造方案の修正や熱間におけるロール加工などにも取り組んでいる。

加えて、これまでの当社が蓄積してきた技術の展開として、ディーゼル機関の性能向上を図るため、クランク軸材質・形状などを提案し、エンジンメーカと一体化した活動にも取り組んでいきたいと考えている。

むすび=鋳鋼製組立型クランク軸の製造開始から45年が経過した。本稿ではその長い歴史を振り返り主要要素技術に関する開発経緯を中心に述べた。ディーゼル機関は低燃費の観点からも優れた推進機関であり、さらに高性能化が進むものと考えられる。クランク軸はその主要

部品の一つであり、エンジンメーカのクランク軸に対するニーズにこたえるべく、今後ともたゆまない研究開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 福田哲吾: 日本船用機関学会第42回特別基金講演会講演予稿集, (1998) p.12.
- 2) 井上正義ほか: 日本機械学会誌, Vol.68, No.556(1965) p.38.
- 3) 西原 守ほか: 日本船用機関学会誌, Vol.2, No.2(1967) p.49.
- 4) M. Nishihara et al.: 35th International Foundry Congress Kyoto (1968) p.37.
- 5) 西原 守: 日本船用機関学会誌, Vol.8, No.10(1973) p.48.
- 6) M. Nishihara: Bulletin of the M.E.S.J., Vol.2, No.2(1974) p.57.
- 7) 岡村正義ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.33, No.3(1983) p.3.
- 8) A. Suzuki: 10th International Forging Conference Sheffield, (1985).
- 9) J. Yonezawa et al.: 4th International Symposium on Marine Engineering Kobe '90(1990) E-1-3.
- 10) 安 文在ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.19, No.2(1969) p.88.
- 11) 西原 守ほか: 日本船用機関学会誌, Vol.5, No.5(1970) p.22.
- 12) T. Kameoka et al.: Trans. I. Mar. E, Vol.83(1971) p.205.
- 13) M. Nishihara et al.: 9th International Congress on Combustion Engines (1971), A5.
- 14) 西原 守ほか: 日本船用機関学会誌, Vol.7, No.1(1972) p.53.
- 15) S. Araki et al.: 21st International Congress on Combustion Engines (1995), D17.
- 16) 長坂英明ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.48, No.1(1998) p.68.