

## 熱間転造加工熱処理による鋳鉄歯車の開発

田中利秋，澤村政敏，五十嵐新太郎，土屋能成，大西昌澄，藤原康之，山本出

## Development of Ductile Cast Iron Flywheel Gear by Hot Form-Rolling and Controlled Cooling

Toshiaki Tanaka, Masatoshi Sawamura, Shintaro Igarashi, Yoshinari Tsuchiya, Masazumi Ohnishi, Yasuyuki Fujiwara, Izuru Yamamoto

## 要 旨

自動車エンジン用鋳鉄フライホイールとリングギヤを一体成形しうる低コストな製造技術として，球状黒鉛鋳鉄歯車の熱間転造と制御冷却による加工熱処理技術を新たに開発した。その技術ポイントを次に示す。

- 1．欠陥のない鋳鉄歯車を成形するための適正な熱間転造条件
- 2．鋳鉄歯車の強度と耐摩耗性を満足するため，転造後制御冷却によって歯面をマルテンサイト組織に歯元をパーライト組織に制御

この開発歯車の精度と耐摩耗性は従来のホブ切り - 熱処理歯車と同等以上であり，この歯車を実際のエンジンに搭載して耐久上問題ないことを確認した。

## キーワード

鋳鉄，フライホイール，球状黒鉛鋳鉄，歯車，熱間転造，加工熱処理，強靱化，強度，耐摩耗性，制御冷却

## Abstract

A new ductile cast iron flywheel integrated with a gear and its manufacturing process were developed to reduce the manufacturing steps and costs compared with a conventional flywheel around which a steel ring gear is fit.

In this process, the ring gear teeth around a spheroidal graphite cast iron flywheel are formed directly in a net shape and free from any defects using the hot form-rolling method, followed by the thermomechanical treatment with controlled cooling in a short time. To obtain the strength and properties required for the flywheel gear, the matrix structure of martensite and pearlite in the gear teeth is made at the tooth face and the tooth bottom, respectively, by controlling the cooling rate after the hot form-rolling operation.

The developed thermomechanical treatment gear is superior to that made by the conventional hobbing and heat treatment with respect to accuracy, strength and anti-wear property. The developed gear showed no problem in the endurance test using a practical engine.

## Keywords

Cast iron, Flywheel, Spheroidal graphite cast iron, Gear, Hot form-rolling, Thermomechanical treatment, Toughness, Strength, Anti-wear property, Controlled cooling

## 1．はじめに

従来の歯車成形法には切削あるいは鍛造，転造技術等がある。Fig. 1(a)に示す従来の自動車エンジン用鋳鉄フライホイール歯車は，切削 - 熱処理された鋼リングギヤを鋳鉄本体に焼ばめで取り付けることから，多工程となっている。そこで，歯形成と必要な材質強化を同時に実現できれば工程短縮と生産の高速化が達成される。このような加工熱処理プロセスを実際の部

品製造に応用した事例は少なく，鋳鉄に適用された事例は全く見当たらない。Fig. 1(b)に示すような直径300mm程度の歯車を鋳鉄本体と一体で成形するには次のような課題があった。

1) 切削加工では，側面にショルダ部が接近しているため高能率な歯切り法が使えず，かつ歯側面の面取りは歯切りと同時加工できない。

2) 鋳鉄に歯切り - 熱処理した場合の強度レベルが低い（スタータピニオン飛込み時の耐摩耗性と靱性が両

立しない)

3) 鋳鉄の塑性加工性が低い

4) 大径歯車の場合、鍛造荷重が非常に大きい

以上のような理由により切削や鍛造による高能率な高品質歯車の一体化成形は困難と判断される。そこで、我々は筆者らが開発してきた熱間歯車転造<sup>1, 2)</sup>と加工熱処理技術<sup>2, 3)</sup>をもとに上記の鋳鉄歯車の成形技術と材質強化技術の確立に取り組んだ。その結果、高性能な鋳鉄歯車を低コストで量産しうる製造プロセスが開発できた<sup>4)</sup>ので報告する。

## 2. 方法

### 2.1 熱間転造

Fig. 2に転造ダイスとブランクおよび転造 - 制御冷却装置を示す。転造ブランクは球状黒鉛鋳鉄FCD450とした。成形性や強度には成分や黒鉛粒径等が影響する<sup>5, 6)</sup>ことから、化学成分はC : 3.7%, Si : 2.5%, Mn : 0.3%, P : 0.02%, S : 0.01%, Mg : 0.045%とし、平均黒鉛粒径は20-30 $\mu$ m、パーライト面積率は5%とした。ブランクの幅と外周部の形状設計には筆者等が開発した方法<sup>1)</sup>を用い、製品寸法より1-2mm程度小さくかつ面取り成形を考慮した外周形状とした。このブランクをFig. 2(b)中に示すような円環状高周波誘導加熱コイルにより外周部を加熱し、その後2つの回転する歯車状ローラーダイスの中央にセットし回転させながらダイスを押し込むことでブランク外周部に歯車を成形した。この転造装置にはブランクの保持をダイス押込

み方向に浮動にして左右の油シリンダによるダイス押込み力をバランスさせる方式(油圧式)<sup>1)</sup>を用いた。さらには、量産性およびダイス駆動と押込み機能を向上させたNC制御装置(NC式)も用いた。Table 1に装置の主要な仕様と熱間歯車転造 - 制御冷却条件を示す。なお、転造精度を従来の鋼(S55C)と比較するために開発歯車成形用のダイスを用いて、歯数36の小径歯車を油圧式で転造した。

### 2.2 加工熱処理

Fig. 3(a)に必要な歯車の部位に応じて求められる特性を示す。組織分布としては歯端部や歯面は耐摩耗性の大きなマルテンサイト組織に、歯元は靱性の高いパーライト組織にすることが有効と考えられる。Fig. 3(b)にCCT曲線<sup>5)</sup>と成形・制御冷却曲線との関係を模式的に示す。転造後空冷処理ではパーライト組織となる。そこで、加工度に応じて転造後の冷却速度を制御(加速冷却)することによって、歯の部位ごとに必要とする組織が得られるようにした。

### 2.3 歯車精度と強度および摩耗特性の評価

歯車精度目標はJIS6級とした。精度の測定方法はJISにのっとりた。なお、歯形精度向上のために転造ダイスには筆者等が開発した設計法<sup>1, 7)</sup>により歯形修正を施した。

Fig. 4(a)~(c)に歯車強度、(d)に摩耗特性の調査方法

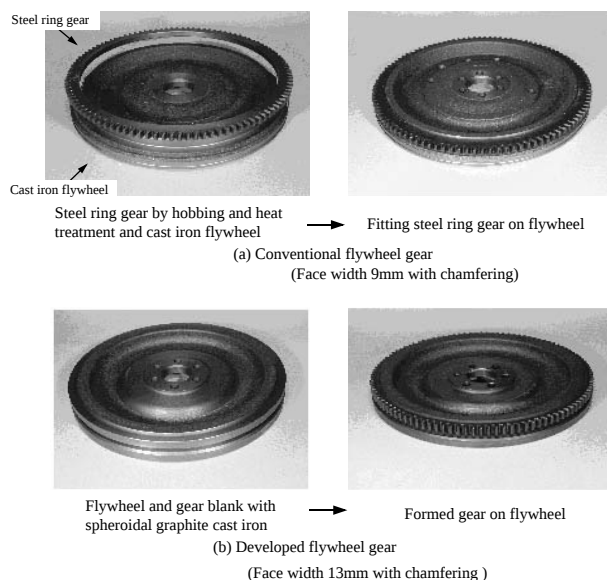


Fig. 1 Conventional and developed flywheel gear for automobile engine. [Spur Gear : Module 2.54, Number of teeth 106, Tip diameter 271.3mm]

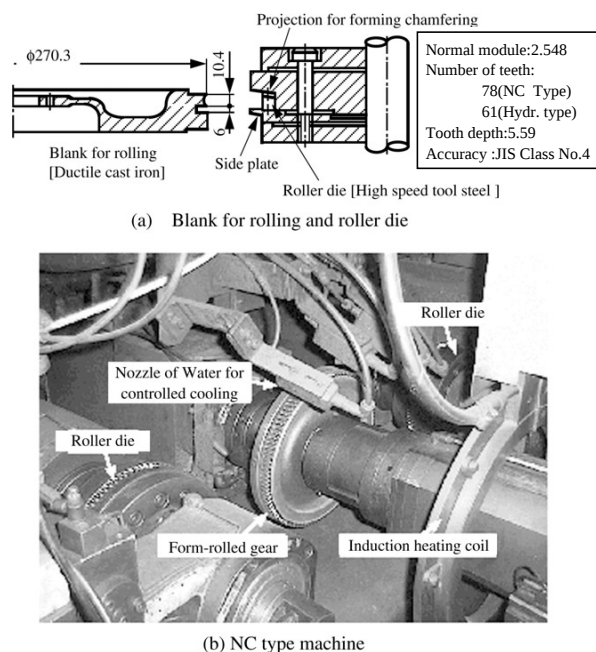
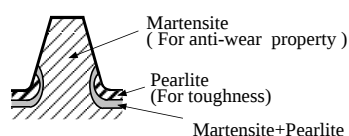


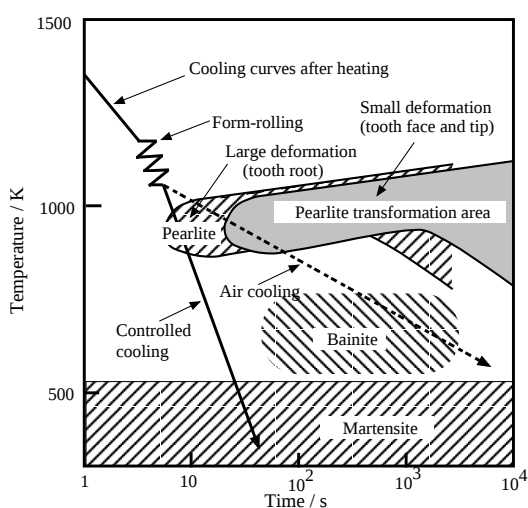
Fig. 2 Roller dies, blank and hot gear rolling and controlled cooling machine.

Table 1 Hot form-rolling and controlled cooling condition.

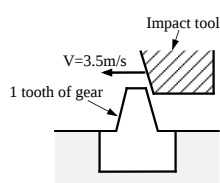
| Item                                  | Hydr. type                                                                                                     | NC type                                                                           |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Roller dies in feed method            | Hydraulic cylinder and positive stopper                                                                        | AC servo motor and ball screw<br>Accuracy of roller dies in feed : $5\mu\text{m}$ |
| Blank support method                  | 1.Floating<br>2.Floating & fixed center at roller dies stroke end<br>(Stiffness: $0.1\text{mm}/9.8\text{kN}$ ) | Rigid<br>(Stiffness: $0.05\text{mm}/9.8\text{kN}$ )                               |
| Rotational speed of roller die        | 180rpm                                                                                                         | 300rpm                                                                            |
| Induction heating condition           | 100kw-10kHz                                                                                                    | 600kw-3kHz                                                                        |
|                                       | 1353K at surface of blank, 1173K at 8mm depth from surface                                                     |                                                                                   |
|                                       | Heating time 80~120s                                                                                           | Heating time 20~50s                                                               |
| Infeed rate of roller die             | $(0.15) \times (\text{Normal module}) / \text{one half of blank rotation}$                                     |                                                                                   |
| Blank rotation in finishing operation | 10 times                                                                                                       | 10 - 45 times                                                                     |
| Lubrication                           | Spray of colloidal graphite in water to roller die teeth during rolling                                        |                                                                                   |
| Rolling temperature and time          | 1273K(start)-723K(finish)<br>7s                                                                                | 1223K(start)-773K(finish)<br>3.5s-17s                                             |
| Cooling method                        | Water spray and dies contact                                                                                   |                                                                                   |
| Cooling ratio                         | 5-60K/s (from 1023K to 773K)                                                                                   |                                                                                   |
| Temper                                | Furnace : 433K-773K, 3600s<br>Induction: 523K-873K, 30s                                                        |                                                                                   |



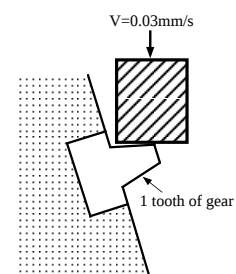
(a) Preferable tooth structure and properties



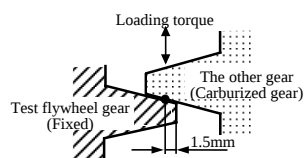
(b) Experimentally determined cooling curves superimposed on CCT diagrams for ductile cast iron



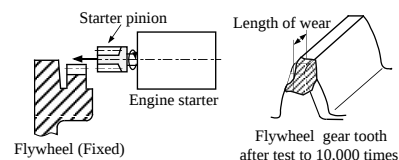
(a) Impact test



(b) Bending test



(c) Fatigue test



(d) Accelerated endurance test for wear and failure of flywheel gears

Fig. 3 Preferable tooth structure and experimentally determined cooling curves.

Fig. 4 Test methods of gears.

を示す。歯車強度は歯車より1歯を切り出して衝撃強度と静的強度により評価した。さらに、対象歯車を小径の歯車と噛み合わせてトルクを繰り返し負荷する方法<sup>7)</sup>で歯元曲げ疲労強度を調べた。摩耗試験は、摩耗の進行を加速するために対象歯車を固定してスタータピニオンを繰り返し飛び込ませることにより行った。摩耗深さは10,000回飛び込ませた後の歯端部をFig. 4(d)中に示すように測定した。

### 3. 結果

#### 3.1 鋳鉄歯車のメタルフローと黒鉛の変形

Fig. 5に転造歯車の歯部外観を示す。転造温度をダイス押込み終了時で1073K以上、加熱深さを全歯丈の1.5倍以上とすることで、面取り成形部を含めて、欠陥のない鋳鉄歯車を成形できた。歯直角断面でのメタルフローと変形した黒鉛をFig. 6(a)に示す。歯元での材料流れが顕著でこの部位の加工度が大きいことが観察される。歯元深さ方向の黒鉛の扁平率分布をFig. 6(b)に示す。表面の扁平率が大きく、従動側（フォロワ側）で90%，被駆動側（ドリブン側）で80%となっている。この扁平率はあらかじめ浸炭したブランクを熱間転造し、その厚み変化から求めた加工率<sup>3)</sup>とほぼ同じである。フォロワ側歯元表面では黒鉛扁平率が大きいことと、材料流れが歯面方向と歯底方向で異なる<sup>2)</sup>ために扁平黒鉛の表面への露出が最も生じやすい部位となる。そのため実歯車の成形にあたっては負荷の作用する歯面がドリブン側となるようにした。なお、スタータピニオン飛び込み時に衝突する歯端面の黒鉛扁平率は平均24%であった。

#### 3.2 鋳鉄歯車の精度向上要因

鋳鉄歯車の転造精度を小径歯車を用いて調べた結果をFig. 7(a)に示す。左右ダイス押込み力をバランスさせて成形する油圧式では鋳鉄歯車の精度は鋼に比べて

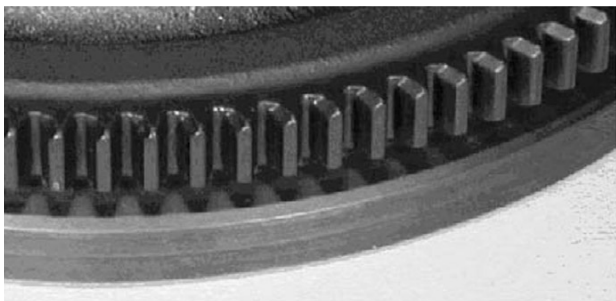
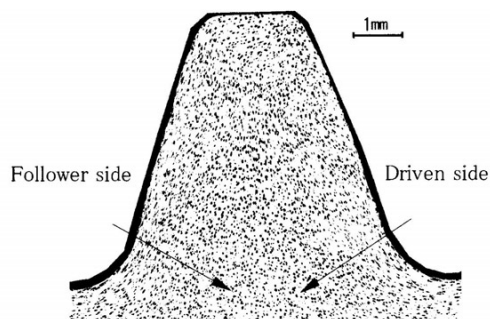


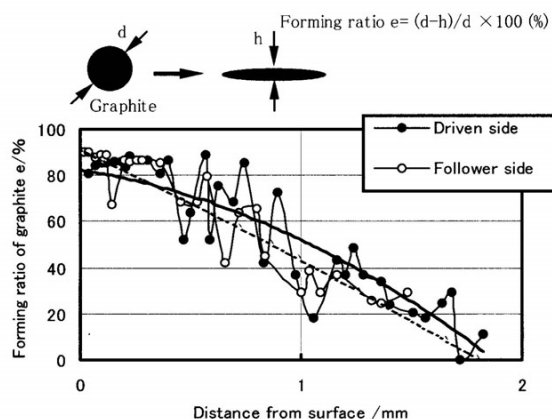
Fig. 5 Form-rolled gear and chamfer with spheroidal graphite cast iron. (Temperature at 90% formation of total tooth depth : 1100K)

悪い。これは、鋳鉄素材中の黒鉛分布が均一ではないことによって、変形抵抗の不均一性が鋼に比べて大きいためと考えられる。そこで、大径の対象歯車では油圧式においてダイス押込み最終端でブランク軸とダイス軸間の変位を規制し、サイジング時のダイス押込み量を均等化して精度向上を図る<sup>1)</sup>ようにした。この結果をFig. 7(b)に示す。さらに、Fig. 7(c)に示すように、加熱時間の短縮とサイジング回数を従来標準の10回(4s)から45回(17s)まで延長することで一層の高精度化が可能となる。なお、歯形精度はこのサイジング時間の範囲ではJIS5級に安定して収まっている。これらの結果よりダイスとの接触時間をサイジング回数20回程度までとすることが精度的にも有効である。このダイスと転造歯車の接触は、冷却速度向上にも効果がある。

熱間転造と制御冷却により約1分サイクルで500個成形した開発歯車のオーバーボール径の変動幅は0.2mm以内、歯車精度は目標のJIS6級に収まった。これは、



(a) Metal flow in form-rolled gear and measurement position of graphite forming ratio



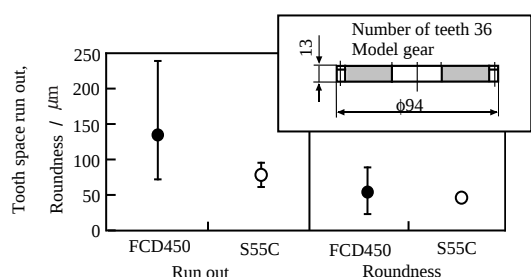
(b) Forming ratio of graphite in formed gear and blank

Fig. 6 Metal flow and forming ratio of graphite in form-rolled gear.

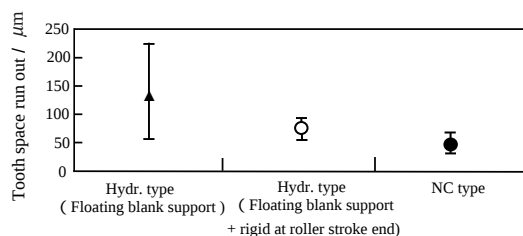
転造後の制御冷却がダイスを含めた装置温度の安定化にも寄与したためと考えられる。以上のように、開発歯車の精度は従来の鋼の焼ばめ歯車の精度JIS6-7級と比べて同等以上にできる。

### 3.3 組織と硬さに及ぼす転造条件の影響

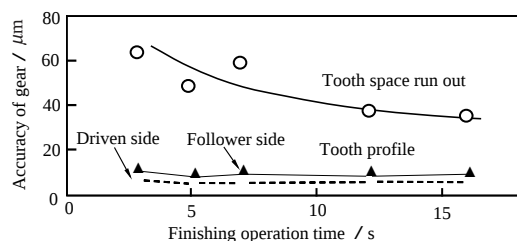
Fig. 8に冷却速度を36K/sとした場合の転造終了温度と冷却後の歯部硬さの関係を示す。転造終了温度の上昇とともに、973K付近で一旦硬さが低下する現象が見られる。歯端部（黒鉛扁平率 $e = 24\%$ ）での硬さの方がドリブン側歯元（ $e = 80\%$ ，表面より0.5mm深さ）よりいずれの転造終了温度でも高い。目的とする歯端部でマルテンサイト、歯元でパーライト組織が得られる転造終了温度は673Kのみであるが、823Kにおいても0.3mm深さまではパーライト組織である。973K付近で硬さが低くなるのは、転造ダイスと転造歯車との噛み合いが外れたときに転造歯車表面に復熱が生じてFig. 3



(a) Ductile cast iron gear's accuracy compare with steel gear's one with hydr. type machine (blank support: floating)



(b) Run out of form-rolled gear  
(Blank rotation in finishing operation: Hydr. type 10, NC type 20)



(c) Relation between finishing operation time and accuracy of gear (NC type)

Fig. 7 Accuracy of ductile cast iron gear.

で示したようにパーライト変態温度域を通過する時間が長くなるためである。

次に、転造終了温度を823K一定として転造後の冷却速度を変化させた結果をFig. 9に示す。冷却速度が速いほど得られる歯部硬さは高くなり、30K/s以上の冷却速度で歯端部はマルテンサイト組織とすることができる。歯元では冷却速度30K/sの条件において、歯元表面から深さ0.5mm深さの範囲までFig. 9(b)中の写真に示すようなパーライト組織である。それより約1mm内部まではマルテンサイトとの混合組織でその内部はマルテンサイト組織である。このパーライト組織の深さ範囲は冷却速度を52K/sにすると0.2mmまで狭くなるが消滅することはなかった。以上の結果より、加工度に応じて転造終了時付近（パーライト変態温度域）の冷却速度を制御すれば、組織や硬さ分布をFig. 3の考え方の通り制御できることが確認された。これらの加工度や冷却速度が組織に及ぼす影響は円柱圧縮試験片を用いた熱加工試験の結果からも確認されている<sup>7)</sup>。さらに加熱時間の短いNC式では歯車内部による自己冷却も利用でき、60K/sまでの冷却速度が得られ、生産上有利である。

### 3.4 歯車の強度と耐摩耗性

前項で述べたようなプロセス条件を制御して歯部硬さを変化させた歯車を製作し、各種の強度や摩耗特性を調査した。これらの特性調査にあたり、開発歯車の特徴を把握するために、次の3つの製造プロセスで製作した歯車の特性と比較した。一つは、転造後通常の

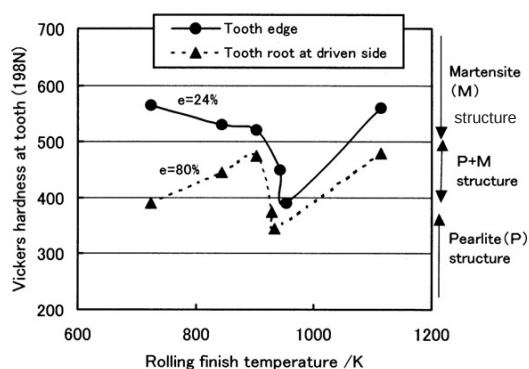
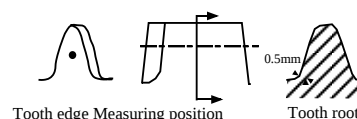


Fig. 8 Relation between rolling finish temperature and hardness at tooth. (Hydr. type, cooling rate 36K/s)

空冷操作で歯部全体を350HV程度にした後、高周波再加熱焼入れ - 焼戻しにより歯部全体の硬さを調整したもの、二つ目は歯切り - 高周波焼入れ焼戻しにより製作した球状黒鉛鋳鉄歯車、三つ目は通常の生産方法である鋼製の歯切り - 高周波焼入れ焼戻し歯車である。ただし、鋼歯車のみ歯幅9mmとしたため、鋳鉄歯車で値である13mmに比例換算した値も示した。

Fig. 10に歯車の強度と摩耗特性を示す。(a)より開発歯車の衝撃強度は転造後冷却してから焼入れした歯車より2倍程度大きくなることわかる。さらに、開発歯車では焼戻しにより歯元中央部のマルテンサイトの硬さを400HVから550HV程度にすれば鋼歯車に近い強度が得られる。(b)より、550HVにした制御冷却歯車は鋼と同程度の曲げ強度を有し、転造後焼入れや歯切り後焼入れした歯車より10から20%程度高い。(c)より、開発歯車の曲げ疲労強度は転造後焼入れした歯車や歯切り後焼入れた鋳鉄歯車より10-20%高いが歯切りした鋼歯車の13mm歯幅に換算した値と比較して15%程度低い。

Fig. 10(d)に歯端部硬さと摩耗量の関係を示す。鋳鉄歯車においては歯端部硬さが高いほど摩耗量は小さく

なる。また硬さを550HV程度にすれば650HVに焼き入れた鋼歯車と同程度の耐摩耗性を示す。この鋳鉄歯車と鋼のマトリックスの硬さは同じであることから、摩耗特性にはマトリックス硬さの影響が大きいと考えられる。歯部硬さを500-550HVにすれば、同一歯幅で比べた場合、開発歯車は鋼歯車に比べて、靱性、静的強度、耐摩耗性は同程度の水準のものが得られ、転造後再加熱焼入れや歯切り - 焼入れした鋳鉄歯車より優れた特性であることがわかる。加工によって扁平化した黒鉛の強度への影響を鍛造によって調べた報告<sup>8)</sup>では、扁平化が大きい程強度が低下することが示されている。この結果や上記の検討結果より、強度向上は組織を制御したことやオースフォーミングの強化効果によるものと考えられる。ただし疲労強度が他の強度ほど向上しないのは、マトリックスより黒鉛粒径の影響が大きい<sup>6)</sup>ためと考えられる。

上述のごとく、高品質の鋳鉄歯車を開発することができた。この歯車を実際の自動車エンジンに搭載して評価した結果、従来品と比べて強度、耐久性は同等で、始動音については音質が向上すること<sup>4)</sup>を確認している。

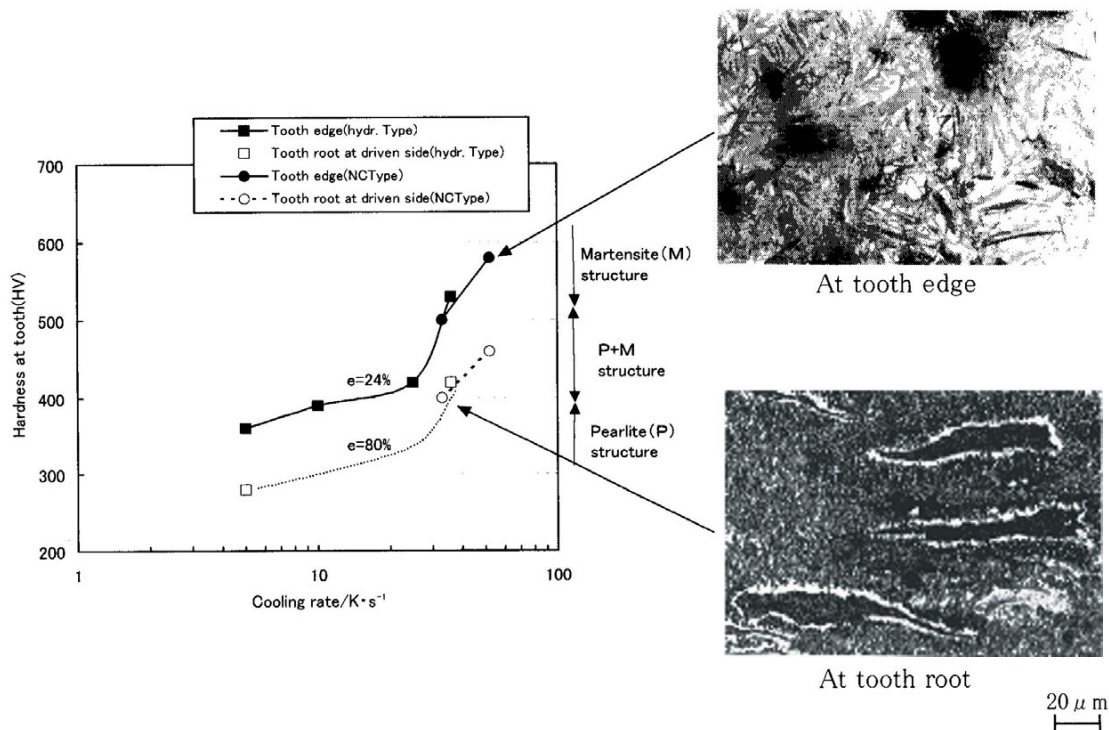


Fig. 9 Relation between cooling rate after hot form-rolling and hardness at tooth.  
[Rolling finish temperature : 823K (hydr. Type), 773K (NC Type)]

#### 4. まとめ

熱間転造加工熱処理技術を応用して、球状黒鉛鋳鉄歯車のネットシェイプ成形技術と歯部を強靱化する組織制御技術を開発した。得られた結果を次に示す。

1) 熱間転造により、歯端部に面取りを有する球状黒鉛鋳鉄製大径平歯車を欠陥なく、JIS6級以上の精度に短時間で成形できた。

2) 熱間転造後の冷却速度を30K/sから60K/sの範囲に制御することで歯車の歯元部をパーライトに、歯端部をマルテンサイト組織にできた。この組織を制御した歯車の靱性と耐摩耗性は従来の焼入れ鋼歯車と同程度であった。

以上の結果、自動車エンジン用の「フライホイール一体型球状黒鉛鋳鉄歯車」に本技術を適用し、実用化

に貢献することができた。

本開発を進めるに際して、支援と協力をいただきましたアイシン高丘の関係各位に厚く謝意を表します。また、当社の関係部署の方々にも多大なるご協力をいただきました。

#### 参考文献

- 1) 団野敦, 田中利秋: 塑性と加工, 28-320(1987), 964 ~ 971
- 2) 田中利秋, ほか3名: 塑性と加工, 30-342(1989), 1038 ~ 1043
- 3) 田中利秋, ほか2名: 塑性と加工, 41-474(2000), 665 ~ 669
- 4) 藤原康之, ほか4名: 素形材, 40-2(1999), 7 ~ 11
- 5) 井川克也, ほか4名: 球状黒鉛鋳鉄の基礎と応用, (1992), 228p, 丸善
- 6) 楊忠亮, ほか3名: 鋳物, 66-11(1994), 846 ~ 851
- 7) Toshiaki Tanaka, et al.: 1998 SAE Trans., 848 ~ 855
- 8) 永井恭一, 岸武勝彦: 鋳物, 62-5(1990), 338 ~ 343

(2000年8月1日原稿受付)

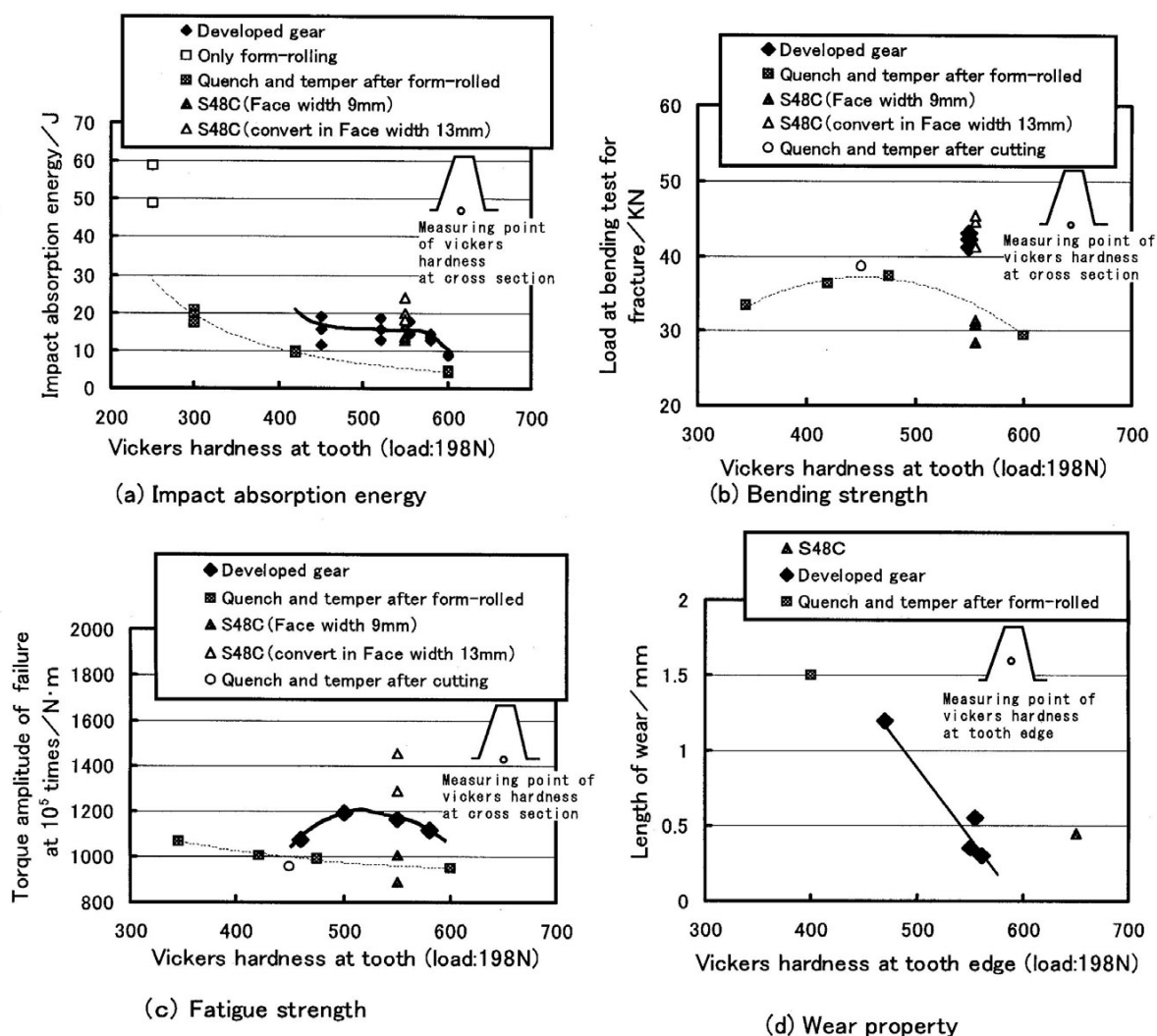


Fig. 10 Influence of vickers hardness at tooth on strength and wear property.

## 著者紹介



田中利秋 Toshiaki Tanaka

生年：1949年。  
所属：加工基盤研究室。  
分野：塑性加工に関する研究・開発。  
学会等：日本塑性加工学会，日本鉄鋼協会，  
日本熱処理技術協会会員。  
1988年日本塑性加工学会論文賞受賞。  
1998年素形材産業技術賞通産大臣賞受賞。



澤村政敏 Masatoshi Sawamura

生年：1962年。  
所属：加工基盤研究室。  
分野：塑性加工に関する研究・開発。  
学会等：日本塑性加工学会会員。



五十嵐新太郎 Shintaro Igarashi

生年：1959年。  
所属：加工基盤研究室。  
分野：塑性加工に関する研究・開発。  
学会等：日本塑性加工学会，精密工学会会員。  
1999年科学技術庁長官賞（創意工夫功  
労賞）受賞



土屋能成 Yoshinari Tsuchiya

生年：1951年。  
所属：加工基盤研究室。  
分野：金型材料，表面処理のトライボロジー  
加工熱処理による材質強化。  
学会等：日本塑性加工学会，日本鉄鋼協会会員。  
工学博士。



大西昌澄 Masazumi Ohnishi

生年：1947年。  
所属：トヨタ自動車株式会社 生技開発部要  
素技術開発。  
分野：金属系プロセス技術開発。  
学会等：日本塑性加工学会，日本熱処理技術  
協会，日本鑄造工学会会員。  
1995年日本塑性加工学会会田技術奨励  
賞受賞。  
R&D100選受賞。  
1998年素形材産業技術賞通産大臣賞受賞。  
日本金属学会技術開発賞受賞。  
1999年日本鑄造工学会技術賞受賞。



藤原康之 Yasuyuki Fujiwara

生年：1961年。  
所属：トヨタ自動車株式会社 第5生技部表面  
改質室。  
分野：金属部品の熱処理。  
学会等：日本塑性加工学会会員。  
1998年素形材産業技術賞通産大臣賞受賞。



山本 出 Izuru Yamamoto

生年：1968年。  
所属：トヨタ自動車株式会社 生技開発部要  
素技術開発鋼材処理グループ。  
分野：鋼部品の材料及び熱処理法の開発。  
学会等：1998年素形材産業技術賞通産大臣賞受賞。