

氏 名	並 木 邦 夫
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 3 年 11 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 46 年 3 月 東北大学工学部金属材料工学科卒業
学 位 論 文 題 目	歯車用浸炭鋼の組織制御と高強度化に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 西澤 泰二 東北大学教授 及川 洪 東北大学教授 谷野 満 東北大学助教授 石田 清仁

## 論 文 内 容 要 旨

自動車の動力伝達歯車は自動車用機械構造部品の中で最も高い強度を要求される部品であるが、疲れ強さと耐摩耗性向上のため、肌焼鋼に浸炭が施されて用いられている。近年、自動車産業においては、高性能・高出力化のみならず、燃費の削減を目的とした軽量化の動きがますます急になっており、特に地球規模環境問題に端を発する排気ガス、燃費の規制化はこれに拍車をかけている。その結果、浸炭歯車についても高強度・軽量化が強く望まれるようになった。

本論文は疲れ強さと衝撃強さとが共に優れる歯車用浸炭鋼の開発を目的として行った研究の成果をまとめたもので全編 8 章から成立っている。

### 第 1 章 緒 言

本章では自動車歯車用浸炭鋼に求められる特性、高強度化の動向について述べ、従来技術を概括したうえで本研究の目標と方針を設定している。

浸炭歯車は従来より SCr 420 や SCM420 が中心に用いられ、必要に応じて SNCM420 が採用されてきた。しかしながら、こうした JIS 鋼種の使い分けでは強度上、必ずしも十分ではない例が顕在化するようになり、歯車用鋼の高強度化が必須となってきた。特に、浸炭材の強度として疲れ強さのみが注目されてきたが、衝撃破壊の生ずる例も確認されるようになったのが特徴である。一般的には強度と靱性とは相反する性質であるが、本研究では疲れ強さ（強度）と衝撃強さ（靱性）とが共に優れる歯車用鋼の開発を意図した。具体的には疲れ強さを 10～20%、衝撃強さを 50% 以上向上させることを目標とした。

研究に当たっては、まず、従来ほとんど研究例のなかった浸炭層の靱性に注目し、これに及ぼす主要合金元素および不純物元素の影響を明らかにした。その上で、実際の浸炭材の疲れ強さ、衝撃強さを検討し、高強度化の指針を得た。さらに、これらの結果を基に新歯車用鋼を合金設計し、実用性能を評価することとした。

## 第2章 実験方法

本章ではマイクロ組織観察、硬さ測定等、本研究での共通の実験項目についてまとめている。なお機械的性質評価のための個々の実験方法については各章で詳細に示すこととした。

## 第3章 実用歯車の破壊機構の検討

本章では実用歯車および試験歯車の損傷形態や破壊機構について調べ、高強度化のための手法に関する検討結果について述べている。歯車の損傷形態は歯面と歯元に関するものに分類されるが、自動車用歯車の場合、歯面でのピッチング損傷が生ずることは極めて希れであるため、本研究では歯元の疲れ強さおよび衝撃強さに絞ることとした。実用歯車の調査からは下記の点が明らかとなった。すなわち浸炭歯車の表面には、ガス浸炭時に粒界酸化層が形成されること、酸化物中にはSi, Mn, Cr等が濃化すること、その結果、粒界酸化層近傍ではこれらの焼入性向上元素が減少するため不完全焼入組織が生ずること、き裂は低応力・高サイクルの疲れ破壊であれ、衝撃破壊であれ、この浸炭異常層を起点として発生することなどである。さらに表面近傍では旧オーステナイト粒界に沿った粒界破壊であることも明らかとなった。その結果、歯車用浸炭鋼の高強度化に当たっての課題は粒界酸化層、浸炭異常層の軽減と浸炭層の強靱性向上に要約された。また、粒界酸化層の軽減のためには、合金元素の再検討が必要であること、浸炭層の強靱性向上には特にオーステナイト結晶粒の微細化と粒界の強化が必要であることを指摘した。

## 第4章 浸炭硬化層の靱性に及ぼす不純物元素と主要合金元素の影響

本章は本論文の最も中心となる内容を含む部分であって、浸炭層の靱性に注目しこれに及ぼす不純物元素P,Sおよび主要合金元素, Mn, Ni, Cr, Moの影響について述べている。

まず浸炭層を想定した0.8% C鋼を溶製し、シャルピー襲撃値に及ぼすP, S量の影響を調べた。その結果、P量の増加にともない旧オーステナイト粒界への偏析量が増加し、これを脆化させることによりL, T両方向とも衝撃値が低下することを明らかにした。靱性の低下を防止するには0.015%以下に低減することが必要である。またSはMnSを形成し、熱間加工方向に伸長するため、これと直角方向の衝撃値を低下させる。これを完全に抑制するためには0.001%まで低下させることが必要となる。次に、肌焼鋼(0.2% C)を溶製し、実際の浸炭材および心部の特性について検討を加え、Pは心部には影響を与えず、浸炭層の靱性を劣化させることによって浸炭材全体の靱性を劣化させることを明らかにした。なおMoはPの粒界偏析そのものを防止することはできないものの、粒界脆化を抑制し靱性向上に寄与する。Sは心部、浸炭層ともに影響を与え熱間加工方向と直角方向の靱性を低下させる。

主要合金元素についてはNi, Cr, Moは浸炭層の衝撃値や破壊靱性値を高めいっぽうMnはこれを低下させる。各元素は硬さ、残留オーステナイト量、オーステナイト結晶粒度などの組織因子を通して靱性に影響を与えるが、結晶粒度の影響が最も大きい。またシャルピー衝撃値と粒界破面率とは逆相関があり、結晶粒が微細なほど粒界破面率が減少し衝撃値が向上する。Mnは結晶粒度を変化させず、残留オーステナイト量を増加、硬さを低下させるにも拘らず、靱性を低下させる。これはMnが粒界脆化を助長するためと考えられた。

## 第5章 浸炭肌焼鋼の疲れ強さと組織の関連

本章も第4章と同様、本論文の中心をなすものであり、実際の浸炭材の疲れ強さとマイクロ組織および合金組成との関連を述べている。まずガス浸炭時に形成される粒界酸化層はSi, Mn, Cr量の増大にともない深くなり、その深さは $10Si + Mn + Cr$  (wt.%)で整理できること、粒界酸化層の深いほど回転曲げ疲れ強さが低下することを明らかにした。これらの合金元素の影響は、酸化物形成のための自由エネルギーにより説明される。特にSiについては影響度が大きいことから、従来のJIS規格：0.15~0.25の下限以下とすべきであることを提案している。また焼入性が同等の場合、疲れ強さは合金元素パラメータ： $(Ni + Mo) / (10Si + Mn + Cr)$ で定量化できることも提案した。これは粒界酸化層は潜在き裂として働き、疲れき裂発生起点となること、Ni, Moは粒界酸化層を形成せず焼入性向上に寄与するとともに、疲れき裂の発生および進展を抑制することにより疲れ強さの上昇に効果があることを意味している。なお疲れ試験片の破面観察の結果、通常鋼では粒界酸化層を起点として疲れき裂が発生し、主に粒界破壊が優先するが、低P-Mo鋼および低P-Ni-Mo鋼では粒界破面はほとんど認められず、第4章で明らかにしたごとく、これらの系では粒界が強化され衝撃強さのみならず疲れ強さの向上にも寄与していることを確認した。

歯車実体を用いた疲れ試験においても、回転曲げ疲れ試験におけるのと同様の合金元素の影響が確認された。しかしながら歯車実体においては回転曲げ疲れ試験片に比べ合金元素の影響度が小さい。これは歯車の加工において歯底に残存する加工痕が起点となり疲れき裂が発生するため、合金元素の影響度が減少するものと考えられた。

## 第6章 浸炭肌焼鋼の衝撃強さと組織の関連

本章では歯車の衝撃強さを評価するに当たり、歯車衝撃試験機を試作し、これを用いて合金組成やマイクロ組織との関連について検討した結果を述べている。

当試験機は一對の平歯車を噛合わせインパクトアームを介して計装化ハンマーにより衝撃荷重を負荷するものであり、これを用いて実体歯車の衝撃の強さの評価を可能としたものである。歯車が破壊する時のインパクトアームが受ける反力を衝撃破壊荷重と定義すると、この値は疲れ強さと同様、前述の合金元素パラメータの増大にともなって増加すること、さらに不純物元素PおよびSを考慮したパラメータ： $(Ni + Mo) / (10Si + Mn + Cr + 200P + 100S)$ でより良く整理できることを明らかにした。なお浸炭材心部を想定したVノッチシャルピー試験の焼入・焼もどし材では浸炭材に比べて合金元素の影響が小さいことから、主にき裂発生に対して合金元素の影響が大きいこ

とも明らかにした。

衝撃破壊時のき裂は粒界酸化層を起点として発生，粒界あるいは粒内を伝播し，粒内を最終破壊経路とする。従って発生を抑制するにはまず粒界酸化層の形成を抑えること，また粒界破壊を抑制するため粒界脆化元素Pの低減など，疲れ強さ向上のための手法がそのまま活用できることが確認された。

## 第7章 新歯車用浸炭鋼の性質と実用化

本章では前章までに得られた知見に基づいて新歯車用浸炭鋼を合金設計し，その性質を調べ，さらに実際の自動車歯車として実用化された例を述べている。

新浸炭鋼はいずれもSi, Mn, Crを低減するとともに，Ni, Moを富化したもので，特にSiは従来のJIS鋼下限以下（ $\leq 0.15\%$ ）としたのが特徴である。さらに粒界強化を意図しPの低減も図った（ $\leq 0.015\%$ ）。また疲れ強さ，および衝撃強さと合金元素パラメータとの関連を明確にし，用途に応じた新材料の適用基準も明確にした。

新浸炭鋼は疲れ強さ，衝撃強さがSCM420に比べて各々10～20%，50%以上向上との初期の目標を十分満足しており，1Cr-0.4Mo鋼はディファレンシャルギアおよびトランスミッションギア，1Cr-0.5Ni-0.3Mo鋼はトランスミッションギア，1Ni-0.3Mo鋼は等速ジョイント部品に実用化された。さらに2Ni系の高合金鋼はレース車など特殊車用に活用されている。

## 第8章 総括

本章は研究により得られた知見を総括するとともに，本研究により見出された疲れ強さと衝撃強さが共に優れる新歯車用浸炭鋼は自動車用動力伝達歯車として十分な性能を有しており，高出力，小型・軽量化に寄与し得ると結論している。

## 審査結果の要旨

自動車の動力伝達歯車は、自動車の車体の中で最も強い強度を要求される部品であり、疲れ強さ、衝撃強さ、ならびに耐摩耗性の優れた浸炭鋼が用いられてきた。自動車産業においては、排気ガス規制に対応するための軽量化が近年急がれており、浸炭歯車についての要望はますます厳しくなりつつある。

本論文は、疲れ強さと衝撃強さとが、共に優れた歯車用浸炭鋼の開発を目的として行った研究の成果をまとめたものであり、全編8章から成る。

第1章は緒言であり、本研究の目的と背景について述べている。

第2章では、実験試料の組成、組織観察などの実験方法について述べている。

第3章では、歯車の損傷や破壊の実態について検討し、高強度化のためには粒界酸化と異常浸炭を軽減して、浸炭層の靱性向上を計るべきことを指摘している。

第4章では、浸炭層の靱性に及ぼす不純物元素（P, S）と合金元素（Mn, Ni, Cr, Mo）の影響について詳細に調査し、その結果、不純物元素は旧オーステナイト粒界に偏析して熱間圧延方向と直角の方向の靱性を低下させ、また、Ni, Cr, Moは浸炭層の衝撃強さと破壊靱性を高めることを示している。

第5章では、浸炭材の疲れ強さとマイクロ組織ならびに合金組成との関連について検討し、浸炭の際に生じる粒界酸化層が疲れ亀裂発生の起点となることを明らかにしている。特にSiは粒界酸化層の形成を促す度合いが大きいので、従来のJIS規格の下限濃度以下とすべきことを提案している。

第6章では、浸炭材の衝撃強さとマイクロ組織との関連について、独自に試作した試験機によって検討し、衝撃破壊も粒界酸化層を起点として発生し、粒界に沿って伝播することを確認している。また、粒界酸化層の形成を抑制し、粒界脆化元素を低減することによって疲れ強さと衝撃強さの双方を向上させ得ることを実証している。

第7章では、前章までに得られた知見に基づいて歯車用浸炭鋼の適正組成を立案し、実際の自動車用歯車として優れた性能を実現し得たことを述べている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、実用歯車の破壊機構の詳しい解析に立脚して、高強度化のための組織制御に関する研究を行い、特に、従来看過されてきた浸炭層の強靱性に注目し、浸炭時の粒界酸化層の形成防止や、不純物の偏析に基づく粒界脆化の抑制、さらにNi, Moの活用などを骨子とする、成分設計基準を提案し、疲れ強さと衝撃強さが共に優れた新歯車用浸炭鋼を開発したもので、材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。