

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 高強度ばね鋼の水素脆化機構に関する研究                                                                                                                                                                       |
| Title(English)    | Study on hydrogen embrittlement mechanism of high strength spring steel                                                                                                                   |
| 著者(和文)            | 砂子真魅                                                                                                                                                                                      |
| Author(English)   | Manami Sunako                                                                                                                                                                             |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京科学大学,<br>報告番号:甲第296号,<br>授与年月日:2025年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:多田 英司,藤居 俊之,林 幸,村石 信二,小林 覚                                                                        |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Institute of Science Tokyo,<br>Report number:甲第296号,<br>Conferred date:2025/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                      |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                           |
| 種別(和文)            | 論文要旨                                                                                                                                                                                      |
| Type(English)     | Summary                                                                                                                                                                                   |

# 論文要旨

## THESIS SUMMARY

|                                            |          |          |                                          |                 |      |
|--------------------------------------------|----------|----------|------------------------------------------|-----------------|------|
| 系・コース：<br>Department of, Graduate major in | 材料<br>材料 | 系<br>コース | 申請学位（専攻分野）：<br>Academic Degree Requested | 博士<br>Doctor of | （工学） |
| 学生氏名：<br>Student's Name                    | 砂子 真魅    |          | 審査員主査：<br>Chief Examiner                 | 多田 英司           |      |

### 要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「高強度ばね鋼の水素脆化機構に関する研究」と題し、以下の 6 章から構成される。

第 1 章「緒論」では、自動車用懸架ばねの概要および懸架ばねに関連する既往の耐水素脆化技術とその課題について述べた。焼戻しマルテンサイト鋼の耐水素脆性向上策としては、VC や TiC による水素トラップおよび転位運動抑制が報告されているが、500°C以下の低温焼戻しを行う高強度ばね鋼ではこれら添加元素の効果を十分に活かすことが困難であり、持続可能性の観点からも低合金鋼の活用が望ましいことを述べた。以上の経緯から、本研究では 2000MPa 級低合金ばね鋼の耐水素脆性向上には準安定鉄炭化物( $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ )による水素トラップと転位運動抑制が有効であると推定し、 $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ の微細分散法として高 Si 鋼と急速焼戻しの組み合わせに着目した。一方、高 Si 急速焼戻し鋼では、 $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ とともに残留オーステナイト( $\gamma$ )が増加することが想定されたが、残留 $\gamma$ は水素をトラップし、水素脆化特性を低下させる場合と向上させる場合がある。そこで、本研究では、低合金高強度ばね鋼において炭化物と残留 $\gamma$ が耐水素脆性に及ぼす影響の明確化と水素脆化機構の解明を目的とした。さらに、ばねの製造工程が組織や水素脆化特性に及ぼす影響を把握し、懸架ばねの耐水素脆性を向上させるための組織と製造条件の指針を提案することとした。最後に、本研究の目的と構成を整理した。

第 2 章「高 Si 急速焼戻し鋼の水素脆化特性および炭化物と残留オーステナイトの影響」では、Si 量と焼戻し速度を誘導加熱(IH: Induction heating)と炉加熱(FH: Furnace heating)を用いて変えたばね鋼を作製し、透過型電子顕微鏡による組織観察や放射光による X 線小角散乱分析から、炭化物および残留 $\gamma$ の分布状態を定量評価するとともに、それらの鋼とサブゼロ処理によって残留 $\gamma$ を減少させた鋼について複合腐食サイクル試験下における 4 点曲げ試験により耐水素脆化特性を評価している。その結果、Si 量が 2.0mass%と最も多く、かつ焼戻し速度を IH により大きくした 2.0Si-IH 鋼では、微細な  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ がラス内に多く分散し、耐水素脆化特性が低 Si 鋼や低速焼戻し鋼よりも優れることが明らかとなった。また、2.0Si-IH 鋼は残留 $\gamma$ も最も多く含有していたが、サブゼロ処理を行うと水素脆化による破断寿命が長くなることから、残留 $\gamma$ は水素脆化特性を低下させることが明らかとなった。

第 3 章「高 Si 急速焼戻し鋼の水素トラップ特性および炭化物と残留オーステナイトの影響」では、昇温脱離分析法(TDA)を用いて、高 Si 急速焼戻し鋼の水素トラップ挙動および  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ や残留 $\gamma$ の影響を解明することを目的とした。 $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ や残留 $\gamma$ の水素放出温度を推定するために、2.0Si 鋼を種々の焼戻し温度で処理したばね鋼の TDA 分析を行い、その結果、2.0Si 鋼では、焼戻し温度 400°Cのときに  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ 量および水素トラップ量が最大となることから、水素トラップに対して  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ の影響が大きいことが示唆された。また、2.0Si-IH 鋼では、低 Si 鋼や低速焼戻し鋼よりも水素を多く含有しているにもかかわらず破断しにくく、水素脆化感受性が低いことが明らかとなった。これは 2.0Si-IH 鋼に多く含まれる  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ や残留 $\gamma$ が水素をトラップし、転位や粒界などへの水素トラップ量を低減あるいは、それら欠陥への水素の集積を遅延させるためであると考えられた。ただし、残留 $\gamma$ にトラップされた水素量は、水素脆化評価試験の時間経過によって大きく減少しており、残留 $\gamma$ が加工誘起あるいは水素誘起変態によってマルテンサイトに変態した可能性が示唆された。

第 4 章「高 Si 急速焼戻し鋼の水素脆化によるき裂の発生と進展機構」では、Si 量と焼戻し速度の異なるばね鋼に対して、陰極チャージ 4 点曲げ試験後の破断面を観察することで、高 Si 急速焼戻し鋼の水素脆化機構を調

査した。その結果、残留 $\gamma$ を含む IH 焼戻し鋼の破壊起点にはファセットが生じる傾向があり、ファセットは体心立方格子(bcc)のすべり面である{112}面に沿った割れであることが明らかとなった。そのことより、残留 $\gamma$ が加工誘起あるいは水素誘起変態によってマルテンサイトとなり、過飽和になった水素が{112}面での転位すべりを促進したと推察された。また、2.0Si-IH 鋼の破壊進展域の破面形態は擬へき開破面であり、一方、低 Si 鋼や低速焼戻し鋼では粒界破面を含む傾向であった。よって、2.0Si-IH 鋼ではラス内に分散した微細な  $\text{Fe}_2\text{3C}(\epsilon)$  に転位や水素が集積することで  $\text{Fe}_2\text{3C}(\epsilon)$  がき裂の進展経路となり、相対的に粒界などの応力集中部への転位や水素の集中が抑制されることでき裂の発生や進展を遅延させると考察した。2.0Si-IH 鋼は、残留 $\gamma$ の増加によるき裂の発生よりも、 $\text{Fe}_2\text{3C}(\epsilon)$  の粒内微細分散によるき裂発生・進展の抑制効果の方が水素脆化による破断寿命に大きく影響することが明らかとなった。

第 5 章「ばねの製造工程が組織および水素脆化特性に及ぼす影響」では、懸架ばねの製造工程であるひずみ取り焼鈍とショットピーニングが、高 Si 急速焼戻しばね鋼の組織および水素脆化特性に及ぼす影響を調査した。その結果を踏まえて、懸架ばねの耐水素脆化特性を向上させるための製造条件の指針を得ることを目的とした。ひずみ取り焼鈍は、300°C 付近の温度で残留 $\gamma$ を分解し、かつ炭化物の粗大化を抑制する条件が適していることを明らかにした。また、ショットピーニングによって耐水素脆化特性を向上させるためには、圧縮残留応力場の深化による負荷応力の低減と水素侵入の抑制が重要であることを考察した。

第 6 章「総括」では、本研究で得られた知見を総括し、高強度懸架ばね鋼の水素脆化特性を向上させるための組織設計や製造条件の指針について提案した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

## 論文要旨

### THESIS SUMMARY

|                                            |          |          |                                          |                 |      |
|--------------------------------------------|----------|----------|------------------------------------------|-----------------|------|
| 系・コース：<br>Department of, Graduate major in | 材料<br>材料 | 系<br>コース | 申請学位（専攻分野）：<br>Academic Degree Requested | 博士<br>Doctor of | (工学) |
| 学生氏名：<br>Student's Name                    | 砂子 真魅    |          | 審査員主査：<br>Chief Examiner                 | 多田 英司           |      |

### 要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words )

In this study, we assumed that hydrogen trapping and dislocation motion suppression by iron carbide ( $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ ) are effective in improving the hydrogen embrittlement (HE) resistance of low-alloy spring steel, and focused on the combination of high-Si steel and rapid tempering. In rapid tempered high-Si steel, it was assumed that  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$  and retained austenite ( $\gamma$ ) would increase, but the retained  $\gamma$  could trap hydrogen and either reduce or improve the HE properties. Therefore, the purpose of this study is to clarify the effect of carbides and retained  $\gamma$  on HE resistance in low-alloy high-strength spring steel and to reveal the HE mechanism. Furthermore, we aimed to understand the effect of the spring manufacturing process on the microstructure and HE properties, and to propose guidelines for the microstructure and manufacturing conditions to improve the HE resistance of suspension springs.

As a result, we confirmed that the higher the Si content and the faster the tempering rate, the greater the amount of  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$  precipitated in the laths, and the higher the HE resistance. It was estimated that  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$  in the laths pins dislocations and traps hydrogen, suppressing the concentration of dislocations and hydrogen at grain boundaries, thereby delaying the initiation and propagation of cracks. On the other hand, it was suggested that retained  $\gamma$  transforms into martensite due to the accumulation of dislocations and hydrogen during the HE process, promoting the initiation of cracks. It was revealed that in rapid tempered high-Si steel, the effect of suppressing crack initiation and propagation due to the fine dispersion of  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$  in the laths contributes more to the fracture life than the initiation of cracks due to retained  $\gamma$ . In addition, it was found that the appropriate conditions for stress relief annealing in the manufacturing process of springs are a low temperature of around 300°C, which decomposes retained  $\gamma$  and does not coarsen carbides. It was suggested that in order to improve HE resistance by shot peening, it is important to reduce the load stress by deepening the compressive residual stress field and to suppress hydrogen entry.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).