



|                     |                                                                                                         |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 自動車での実使用を考慮した高強度鋼板の水素脆化評価に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]                                                           |
| Author(s)           | 衣笠, 潤一郎                                                                                                 |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                   |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                                  |
| Dissertation Number | 甲第15839号                                                                                                |
| Issue Date          | 2024-03-25                                                                                              |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/91805">https://hdl.handle.net/2115/91805</a>                       |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> |
| Type                | doctoral thesis                                                                                         |
| File Information    | Kinugasa_Junichiro_abstract.pdf, 論文内容の要旨                                                                |



## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称    博士（工学）    氏名   衣笠   潤一郎

## 学 位 論 文 題 名

自動車での実使用を考慮した高強度鋼板の水素脆化評価に関する研究  
(Study of Evaluation Method for Hydrogen Embrittlement of High-Strength Steel Sheets for Actual Use in Automotive)

近年問題とされている地球温暖化の主要因として、CO<sub>2</sub>をはじめとした温室効果ガスが挙げられ、世界各国で自動車における CO<sub>2</sub> 排出量の削減目標が掲げられている。ここで CO<sub>2</sub> 削減には自動車の車体軽量化による燃費の改善が有効である。そのための手法として、投資コストが比較的安く容易に適用でき、乗員の安全確保のための衝突安全規制とを両立出来る高強度鋼板の適用が挙げられる。しかし、高強度鋼板を適用する際の課題として、加工性や溶接性、水素脆化などの問題がある。ここで水素脆化は鋼材強度が高いほど起こりやすいことが知られており、ますます進展していく鋼板の高強度化を阻害する因子のひとつである。

高強度鋼板を安全に使用するためには、適切な水素脆化評価法の確立が求められている。この確立のため、1) 種々の環境における工業的・実用レベルでの 1470 MPa 級鋼板を用いた遅れ破壊有無の評価や鋼中水素量の評価、2) 鋼中における水素存在位置の可視化技術、3) 薄鋼板に特有のプレス成形を加味した新たな水素脆化評価法について研究を行った。本論文は 6 章から構成されている。第 1 章は高強度鋼板の適用が燃費改善による CO<sub>2</sub> 削減と衝突安全性を低コストで両立出来る手法として有益なことを述べた。また、高強度鋼の適用における課題として加工性や溶接性、水素脆化が挙げられることを述べた。高強度鋼板に用いられる従来の評価技術として U 曲げ試験片を用いた例にして、複雑なひずみ状態となるプレス成形の影響を考慮出来る手法では無いこと、水素脆化が生じる局所水素の評価手法にも課題があることを示した。

第 2 章は日本国内で腐食環境の異なる試験地に 1180～1470 MPa 級鋼板を用いた U 曲げ試験片を長期間暴露し、水素量の経時変化および水素脆化の発生有無を調査した。大気腐食環境下で鋼中に吸蔵される水素量は 0.1～0.2 ppm 程度である。Cu や Ni の添加で鋼材の耐食性の向上と表面に生成するさびの形態を制御することにより、鋼中に吸蔵される水素量を低減できた。大気腐食環境下で鋼板に吸蔵される水素量は鋼板の加工状態(曲げ半径、曲げ部の負荷応力)によらずほぼ一定であった。また、1470 MPa 級の鋼板において、微細な残留オーステナイトを含むベイニティックフェライト組織は同強度のフェライト + マルテンサイト組織よりも耐遅れ破壊性に優れていることを明らかにした。

第 3 章は第 2 章での検討に加え、北海道札幌市にて 1500 MPa 級鋼板およびその U 曲げ試験片を冬期(2021 年 12 月～2022 年 4 月)に暴露し、寒冷地における自動車の使用環境として想定される積雪(埋雪)環境下での鋼板の腐食および鋼中に吸蔵される水素量を調査した。地面からの高さを 100 mm または 800 mm とした実験から、100 mm 高さでは鋼材表面に形成した水膜により水溶液腐食に近い状態となり、さびによる防食効果が発現しないため腐食量は多くなった。その腐食速度は宮古島海岸以上の非常に高いものであることを明らかにした。一方、鋼中に吸蔵される水素量は、腐食速度と相関は認められずほぼ一定値を示した。この理由として、埋雪環境下で鋼中に吸蔵

される水素量は、鋼材周囲の環境により変化していることが考えられた。埋雪環境下では鋼材表面に極薄い水膜が形成しており、空気中に存在する酸素が薄い水膜を通して鋼材表面に供給されるため、主なカソード反応は溶存酸素の還元反応であり、水素発生はわずかである。一方、鋼材表面が雪に覆われていない場合、鋼材表面に存在するさび下での溶液 pH が低下する反応が生じ、鋼中への水素侵入の要因となる  $H^+$  の発生量が増加する。これらの結果から、埋雪環境下では鋼材の腐食は進行するが、鋼中への水素侵入はそれほど多くならないことを解明した。

第 4 章は二次イオン質量分析と同位体標識法の組合せを用いて、鋼中での水素集積箇所として想定される応力勾配およびひずみ集中部における水素の可視化、応力およびひずみと水素分布の関係の解明を試みた。応力勾配を有する U 曲げ試験片の曲げ加工部での水素フラックスを評価した結果、曲げ外側で引張応力、板厚中心で 0 になり、曲げ内側で圧縮応力となる応力勾配に応じ、板厚のほぼ中央を境界として曲げ外側では内側より水素フラックスが高くなることを実験的に明らかにした。また、従来の静水圧応力と Fick 第一法則に基づいた式から計算される水素分布は塑性変形に伴うひずみの影響を考慮しても応力集中部における水素濃化を適切に評価出来ていない可能性を指摘した。ひずみ集中を有するシャー切断端面での水素フラックスを評価した結果、切断部に存在する応力が増加するにつれて水素フラックスが高くなるが、ひずみが増加しても水素フラックスはほぼ一定の値を取ることを明らかにした。これらから鋼中での実質的な水素の分配は応力の影響が大きいことを明らかにした。本章で構築した高感度水素可視化手法を用い、応力勾配およびひずみ集中部における水素分配挙動の半定量的な可視化に成功した。

第 5 章はプレス成形を考慮した新たな鋼板の水素脆化評価法の開発である。成形限界線図に基づき作製した試験片に水素および応力を付与し、ひずみモードと応力、水素量が水素脆化に与える影響を評価することで、水素脆化評価法としての適用可能性について研究を行った。さらに複雑なひずみ状態を考慮した鋼中の水素挙動に関する報告は少ないため、成形モード (単軸、平面ひずみ、等二軸) によって異なるひずみ状態が鋼中での水素存在状態および耐水素脆化特性に与える影響を検討した。強度レベルを 1500 MPa 級に調整した薄鋼板における成形限界線図を作成し、成形モード毎に応力と水素を付与し、割れの発生有無の評価を行った結果、複雑部品へ加工する際の水素脆化発生の有無とひずみモードによる耐水素脆化特性の差を評価することができた。また、EBSD による組織解析および第 4 章で構築した高感度水素可視化手法による水素分布解析結果から、単軸において組織中の局所にひずみ (変型) 量の多い箇所が存在する部分に局所的に水素が濃化することを明らかにした。一方、等二軸では組織中にひずみ (変形量) が多い箇所が平均的に存在するため、局所への水素濃化は生じにくいことを明らかにした。これらの結果から、同一の鋼板でもひずみモードによって耐水素脆化特性が異なる理由として、組織中の局所のひずみ (変形量) が影響している可能性が示唆された。

第 6 章において、本論文を総括した。