

水素による固溶強化と双晶変形促進効果を利用した高性能ステンレス鋼の開発

九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 助教 小川 祐平

1. 研究の背景

強度・延性・靱性を兼備した鉄鋼材料は、我々の生活や産業の中核を担う不可欠な存在である。しかしながら、鉄鋼材料に水素原子が固溶すると、強度や延性が著しく損なわれることが知られている（水素脆化）。近年では水素エネルギー利用への世界的取り組みが活発化する中で、100 MPa に達する高圧水素ガス貯蔵・輸送用の容器・配管等に鉄鋼材料が多用されている。水素ガスへの直接的接触と厳しい力学的負荷が重畳する高圧水素ガスインフラ用構造部材の安全保証において、水素脆化に対する懸念の払拭は今なお技術的課題として残されたままである。

金属材料に溶質元素が固溶すると、原子間結合性、相安定性、格子欠陥（転位や粒界、原子空孔など）の安定性が多様に変化する。これらの物性変化は合金組成や微視組織に依存して材料の強度・延性を向上と劣化のいずれへも導き、炭素による青熱脆性のように、負荷環境によっては水素以外の元素が特性劣化を誘起する場合もある。水素を固溶元素の一種と捉えるならば、水素脆化は水素によるネガティブな側面だけが優先して現れた事象と考えるもよい。仮に水素が鉄鋼材料の機械的特性に与えるポジティブな側面が存在するのであれば、それを最大限に引出しつつネガティブな側面を抑制できる材料を創生することで、水素脆化問題を打開するための糸口が見出せると考える。

本研究では、現行の水素インフラにおいて主要構成材料となっているオーステナイト系ステンレス鋼に着目した。水素固溶能の高い面心立方（FCC）構造のオーステナイト鋼では、塑性変形に伴う体心立方構造へのマルテンサイト変態を主要因として水素脆化が発現する^[1]。一方、相安定性の高い組成の高 Mn 鋼^[2]、ハイエントロピー合金^[3]などの FCC 系材料では、固溶水素が顕著な強度上昇を引き起こすことや、材料の均一変形能を向上させることが近年報告されている。これらは水素による機械的特性への有益な側面が現れ得ることを示した一例ではあるものの、双方の効果を兼備した材料は、未だに実例がない。研究者らは最近、Fe-24Cr-19Ni (mass %) 組成のオーステナイト鋼に水素を添加して引張試験を行うと、強度と延性の双方が固溶水素濃度に比例して大きく向上することを発見した（図 1）^[4]。この現象は、水素によって固溶強化が生じたことと、変形双晶の促進に伴って加工硬化性能が広いひずみ範囲に渡り維持された結果であり、具体的には約 130 mass ppm の固溶水素によって、『引張強度×均一伸び』の指標で 30%の向上が確認されている。本研究では、このような水素による固溶強化と変形双晶促進による加工硬化性能向上の機構を解明すること、さらにはそれらの効果が最も効率よく発現する合金成分バランスを探索することで、水素を有効添加元素として活用した新たな耐水素オーステナイト鋼開発への方向性を示すことを目的とした。

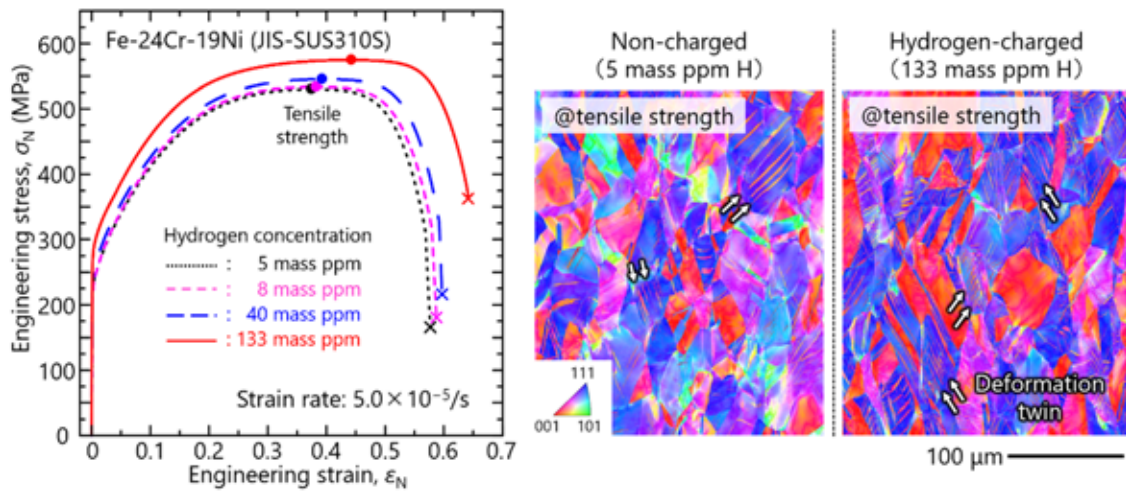


図1 Fe-24Cr-19Ni (mass%) オーステナイト鋼において固溶水素による強度と延性の同時向上が発現した一例⁴⁾ (右2枚の写真はEBSD分析により観察した均一変形部(引張強度到達時)の組織, 図中矢印は変形双晶を指し水素によってその密度が増加)

2. 研究成果

2.1 水素による固溶強化メカニズムの検討

一般的な侵入型溶質原子による固溶強化は、溶質原子周辺に生まれた短範囲(数原子間距離)の格子ひずみと、材料の塑性変形を担う格子欠陥: 転位の周辺に生じるひずみ場との干渉に由来する。この溶質原子による抵抗を転位が乗り越えるプロセスは温度と変形速度に依存した熱活性化(原子の熱振動が抵抗の乗り越えを補助する)過程であり、故に変形応力の温度とひずみ速度への依存性を調べることで、固溶強化の原子スケールでの機構を知るための手がかりを得ることができる。

本研究ではこれまでと同様にFe-24Cr-19Ni鋼(JIS-SUS310S)を用い、温度173~423 K、ひずみ速度 5×10^{-5} および 5×10^{-3} /sの下で引張試験を行い、各条件での降伏応力(0.2%耐力)と降伏後の流動応力を測定した。試験片には圧力100 MPa、温度543 Kの水素ガス中で200時間保持することによる水素曝露を行い、138 mass ppm (7570 at ppm)の水素を一様に添加した。試験片の直径は6 mm、ゲージ長は30 mmである。

図2に、ひずみ速度 5×10^{-5} /sにおける水素添加材および未添加材の真応力-真ひずみ線図と、水素による降伏応力上昇量(降伏時の固溶強化量)の温度依存性を示す。水素添加材と未添加材のいずれにおいても、降伏応力と流動応力は温度低下に従って単調に上昇したが、一方で水素による固溶強化量は298 Kで最大となり、それより低温側では減少し、高温側では徐々に消失した。また、図3に示すのは、水素添加材と未添加材における流動応力の差分(降伏後の固溶強化量)を、真ひずみに対して整理したグラフである。173, 223, 373, 423 Kでは概ね横這いのプロットが得られ、水素による固溶強化はひずみには大きく依存しない。対して298 Kではひずみ増加とともに固溶強化量が減少し、真ひずみ0.05以降では固溶強化量が173 Kにおける値を下回る形となった。

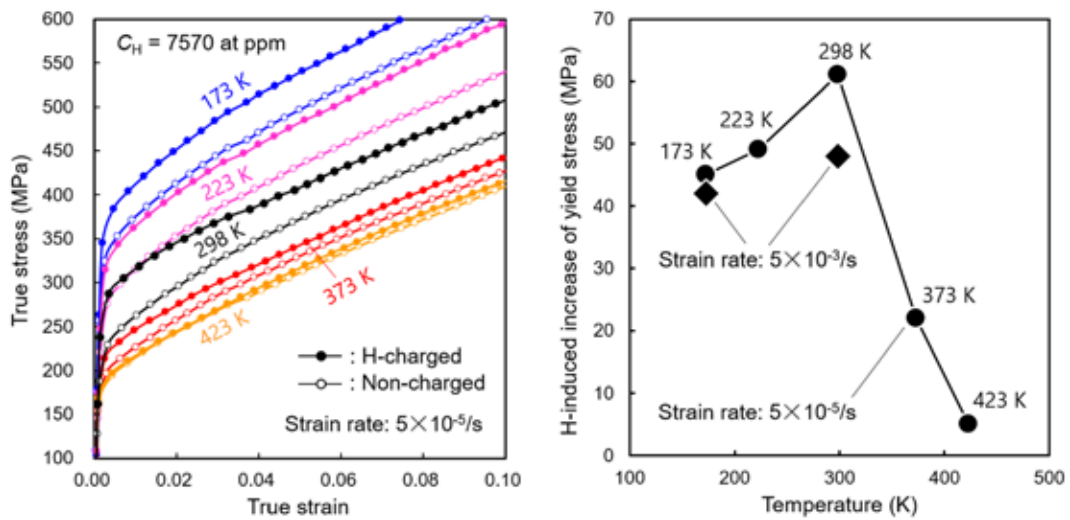


図2 Fe-24Cr-19Ni (SUS310S) 鋼における真応力-真ひずみ特性（水素添加材および未添加材）と水素による降伏応力上昇量（降伏時の固溶強化量）の変形温度依存性

図2右側のグラフ中には、ひずみ速度を $5 \times 10^{-3}/s$ へと上昇させた際の降伏応力上昇量を併せてプロットしている。173 Kにおいて、固溶強化量にひずみ速度依存性は殆ど現れなかったが、298 Kではひずみ速度の上昇によって降伏時の固溶強化量が減少する傾向が認められた。以上のような、温度低下やひずみ量の増加、ひずみ速度上昇によって固溶強化量が減少する一連の結果は、上述したような転位の熱活性化過程に依拠した一般的な固溶強化モデルでは説明のつかないものである。

図2のように、固溶強化量（降伏応力）が特定の温度領域で最大値を示すのは、

転位が結晶格子中に静止した溶質原子ではなく、材料中を拡散・移動する溶質原子と動的な相互作用を起こす際に認められる特徴である。SUS310S 鋼における水素拡散係数^[5]を基に水素原子の格子間ジャンプ頻度を概算した場合、本研究で実験環境として用いている298 Kでは $10^4 \sim 10^5/s$ の値が得られ、水素は短時間の間にも頻繁に材料中を移動することになる。一方、低温域の173 Kではジャンプ頻度が $10^{-3} \sim 10^{-2}/s$ となり、固溶水素は引張試験の時間スケール内では格子間サイトに固定されているものとして近似することができる。Epperly と Sills は数値解析によって拡散する溶質原子と運動転位との相互作用を詳細に検討し、以下のような臨界ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ の記述式を提案している^[6]。

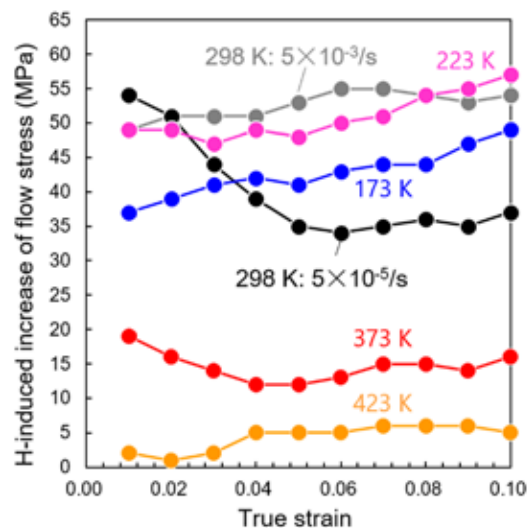


図3 水素添加材と未添加材における流動応力差（固溶強化）のひずみ依存性

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{4QDkT}{M\beta} \rho_m b \quad (1)$$

ここで D は溶質原子の拡散係数、 k はボルツマン定数、 T は温度、 M はテイラー因子、 β は剛性率と溶質原子 1 個あたりが生む格子膨張に依存した係数、 ρ_m は可動転位密度、 b は転位のバーガースベクトルである。また、 Q は D, k, T, β を用いて無次元化された転位の運動速度 (v) であり $Q = vb / (4DkT)$ で表される。 $Q > 100$ の場合、転位の運動速度は溶質原子の移動速度よりも十分に速い (Break away 限界) ため動的相互作用は起きないが、 $Q < 100$ の場合には溶質原子が運動する転位周辺に雰囲気を形成して一部追従するようになり、それによる引きずり抵抗 (Drag force) が発生する。この Drag force は、 $Q = 1$ (v_c) 付近で最大値を示す。一方、 $Q < 0.01$ の場合は溶質原子雰囲気が平衡分布のまま転位と共に運動する (Equilibrium 限界) ため、Drag force は消失する。図 4 は、式(1)と文献[5]を基に、本研究で用いた温度範囲における $\dot{\epsilon}_c$ を $Q = 0.01, 1, 100$ の 3 条件下で計算してプロットしたものである。なお、焼き鈍されたオーステナイト系ステンレス鋼における可動転位密度は降伏とともに $10^{10} \rightarrow 10^{12} \text{ m/m}^3$ のオーダーで急増することが報告されている[7]ため、計算には近似値としてそれらの値を用いた。

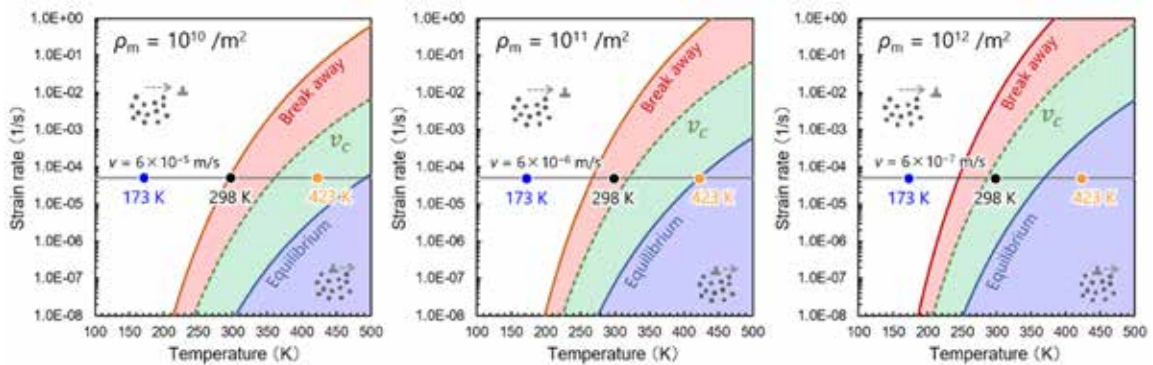


図 4 材料中を拡散する水素の雰囲気形成によって運動転位への Drag force が発現するための臨界ひずみ速度とその温度・可動転位密度への依存性 (式(1)により算出)

本研究での基準ひずみ速度 $5 \times 10^{-5} \text{ s}$ (図 4 中の灰色水平線) の場合、転位と水素との相互作用は降伏による可動転位密度の増加とともに Break away 限界から Drag force の最大点 v_c を通過し、Equilibrium 限界へと向かうことが分かる。この結果は、降伏後のひずみ増加とともに固溶強化量が減少する 298 K での特性 (図 3) を合理的に説明できるものであり、298 K での固溶強化に対して水素雰囲気による Drag force が重要な役割を演じていることを示唆する。173~223 K は Break away 限界以上、373~423 K は Equilibrium 限界以下のひずみ速度領域にあることから、ともに Drag force による降伏点前後での変形応力への影響は小さい。このことは、298 K において水素による降伏応力上昇量が最大値を示す実験事実とも整合する。また、同じ 298 K でも、より大きいひずみ速度 $5 \times 10^{-3} \text{ s}$

の下では降伏点前後での Drag force の影響は小さくなり、降伏後の固溶強化量の低下がひずみ速度上昇によって認められなくなった (図 3) のは、このためであると考えられる。

降伏後の真ひずみ 0.05 以上の領域について見ると (図 3), 223~423 K の間では温度低下に従って固溶強化量が単調に増加し、かつ 298 K ではひずみ速度上昇によっても増加する熱活性化型の挙動が認められる。このことは、水素雰囲気による Drag force の寄与に加え、結晶格子中に分散した固溶水素と転位との短範囲相互作用に伴う熱活性化成分が、これら温度域での固溶強化に上乘せされていることを示唆する。分散した水素がどのように転位に対する抵抗として働くかは今後議論の余地があるが、研究者らは最近第一原理計算による原子シミュレーションを別途行い、置換型元素である Cr の近傍の格子間サイトへ水素が優先的に固溶することを実証した⁹⁾。そのような M-H ペアによる短範囲の格子ひずみ¹⁰⁾が、固溶強化の熱活性化成分を担った可能性がある。また、173 K と 223 K では流動応力の温度依存性が他の温度域と逆転している (図 3) が、水素が引張試験中に拡散を許される 223 K 以上の温度域では、Drag force 以外に拡散性水素による別の強化機構が働いたと推定される。一例としては、障害物に一時的に止められている転位が、拡散してきた水素原子によって固着されることによる動的ひずみ時効が考えられ、研究者らが別途実施した応力緩和試験では、水素による動的ひずみ時効の存在を実際に示唆する結果が得られている¹⁰⁾。一方、これらの議論とは異なり、水素拡散の影響が無視できる 173 K では、固溶強化量にひずみ速度への依存性は現れず、非熱活性化型の挙動を示した。Cr と水素が高い親和性を持つことから、Cr 周辺への短範囲規則格子形成による強化機構が考えられるが、さらに厳密な解明が待たれるところである。

2.2 電子顕微鏡内その場引張試験による変形双晶発達挙動の観察

水素による変形双晶促進の詳細な過程と、その加工硬化への影響を明確にするため、SEM 内小型引張ステージ (TSL 社製) を用いて、同一結晶粒内における変形組織発達の断続的な観察を EBSD 分析により行った。図 5 に、実験に使用した試験片の形状、小型引張ステージの写真および観察対象とした領域の EBSD 結晶方位マップを示す。供試材は SUS310S 鋼であり、試験片には 2.1 節と同様の条件により事前の水素添加を施した。なお、観察中の試験片表面からの水素脱離は、無視できるほど小さいことを、材料表面における水素原子から分子への再結合速度も加味した有限要素法解析によって確認済みである。約 5×10^{-4} s のひずみ速度で変形させた後に真ひずみ 0.12 においてクロスヘッドを停止させ、目的視野を撮像した。その後、同一のひずみ速度において再負荷した後、同様の行程を真ひずみ 0.03~0.04 毎に合計 10 ステップ行った。

オーステナイト鋼を含む FCC 合金では、 $\langle 111 \rangle$ 方位と平行な引張軸を持つ結晶粒内で最も早期に変形双晶が発現し、成長することが一般に知られている。このような理由から、本研究でも初期引張軸が $\langle 111 \rangle$ 方位に近く、かつ互いに同程度のサイズを持つ結晶粒 (図

5 中の(i)~(iv)) を観察対象に選択し、水素添加材と未添加材の比較を行った。

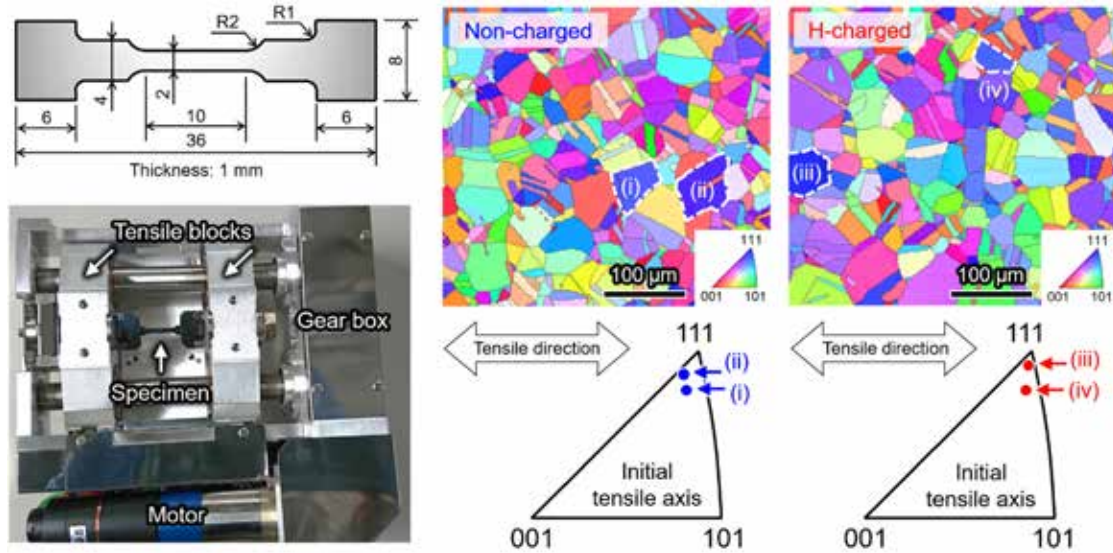


図 5 SEM 内引張試験用ステージの写真と専用試験片の形状，および観察対象領域の EBSD 像 (EBSD 像中の(i)~(iv)は観察対象とした選択された結晶粒であり，それらの初期引張軸方位をステレオ三角形中に示す)

図 6 に、SEM 内引張試験中における水素添加材と未添加材の真応力-真ひずみ線図および加工硬化率曲線を示す。2.1 節における 298 K での引張試験と同様，水素添加材では有意な流動応力上昇が確認され，変形後期には双晶促進によるものと思われる加工硬化率の上昇が認められた。なお，真応力-真ひずみ線図中に見られる定期的な応力低下点(1)~(10)はクロスヘッドの停止に伴う応力緩和によるものであり，EBSD 撮像時のひずみに対応している。

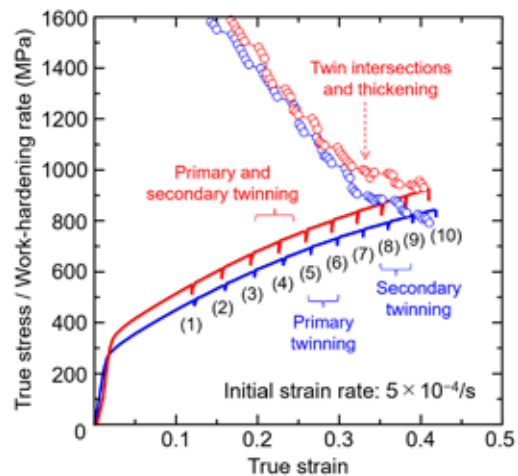


図 6 SEM 内引張試験中の応力-ひずみ特性 (赤：水素添加材，青：未添加材)

図 7 に、上記(1)~(10)の撮像点のうち代表的な個所における変形組織の EBSD 像を，結晶粒(i)と(iii)についてそれぞれの極点図と共に示す。水素添加材と未添加材のいずれにおいても真ひずみ 0.25 付近で変形双晶が発生し始め，双晶発生開始の臨界ひずみに対して固溶水素の有意な影響は認められなかった。一方，一度変形双晶が発生し始めた後には，水素添加材の方が，ひずみに対してより速い速度で変形双晶の密度が増加した。未添加材における変形双晶は，結晶粒中で転位によるすべり変形が最も活発な特定の{111}面(主す

べり面) を選択して発達する傾向にあった。これに対して水素添加材では、発生開始時から複数の $\{111\}$ 面上で同時多発的に変形双晶が形成され、加えて未添加材の場合よりも変形双晶が分厚く成長する等の変化が現れた。

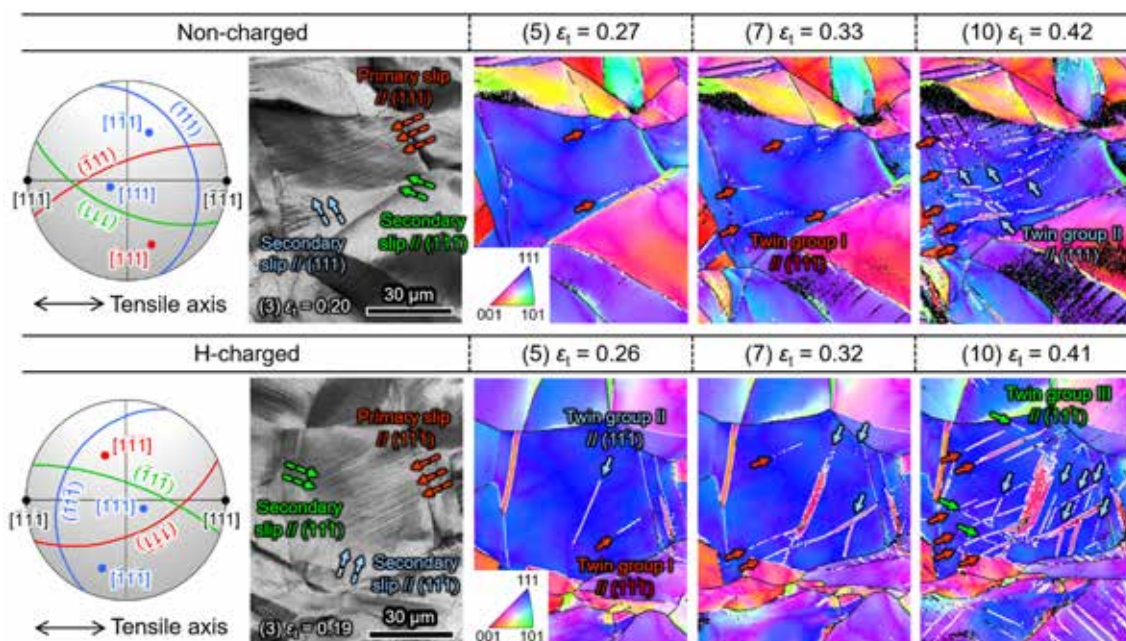


図7 SEM内引張試験における結晶粒(i)・(iii) (図5を参照)内の変形組織発達過程(観察点(5)(7)(10)に対応する応力-ひずみ特性や加工硬化特性については図6を参照)

FCC金属における変形双晶は、2本のショックレー部分転位に挟まれた積層欠陥が $\{111\}$ 面上に毎層重なり合うことで核生成する。すなわち、双晶の発生には双晶核の胚となりうる高転位密度領域が必要であり、故に双晶発生開始のための臨界ひずみ(臨界転位密度)の必要性が指摘されている^[11]。本研究では双晶開始ひずみに対して水素の影響はほとんど認められなかったが、一方で双晶発生後の密度増加と複数 $\{111\}$ 面上での同時発達が水素によって促進された。このことから、水素の本質的な役割は、臨界転位密度が達成された後に、双晶胚が核へと成長するのを補助することであると推察される。また、水素によって双晶密度の増加が促進され始めるひずみ(図7中(5))が、巨視的な応力-ひずみ線図において水素誘起の加工硬化率上昇が現れ始める点(図6)に対応していないことは注目値する。むしろ、加工硬化率の上昇は、複数 $\{111\}$ 面上で発生した双晶同士の交差や、双晶の厚さ方向への成長(図7中(7)および(10))と対応している。以上の事実から、水素による加工硬化率の上昇とそれに伴う均一伸びの向上は、単に変形双晶の密度が増加したことによるものだけではなく、水素によって変形双晶の発生・成長形態が変化したことに由来するものであると結論できる。

2.3 水素による高強度・高延性化を最適化するための合金成分の探索

以上のような水素誘起の固溶強化と双晶変形促進効果を有用に使いこなすためには、それらの効果が発現するための合金成分条件の明確化が不可欠である。そこで、今回は市販の Fe-Cr-Ni 合金である SUS310S, SUS309S, SUS316L, Incoloy330, Invar36 の 5 種に対して種々の濃度の水素を高温・高圧水素ガス曝露により添加し、Cr・Ni 含有量増減に伴う水素固溶能や 298 K での引張試験における機械的性質の変化を調査した。表 1 に、各材料の詳細な化学成分と Cr/Ni の質量含有比、および変形双晶の発生難易度を示すパラメータである積層欠陥エネルギー-SFE (mJ/m^2) の計算値 (関連する研究成果(1)を参照) を示す。実験に用いた試験片は直径 6 mm, ゲージ長 30 mm の丸棒であり、ひずみ速度は 2.1 節での検討と合わせる形で $5 \times 10^{-3} \text{s}$ とした。

表 1 各合金の成分 (mass%) と Cr/Ni 含有比および積層欠陥エネルギー (mJ/m^2)

Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Fe	Cr/Ni	SFE
SUS310S	0.02	0.3	1.06	19.07	24.21	-	-	-	Bal.	1.3	47.4
SUS309S	0.08	0.4	1.6	13.34	22.57	-	-	-	Bal.	1.8	37.5
SUS316L	0.013	0.22	1.81	12.08	16.81	2.01	-	-	Bal.	1.4	40.6
Incoloy330	0.06	1.34	1.34	35.12	18.42	0.23	0.08	0.09	Bal.	0.5	82.6
Invar36	0.01	0.10	0.55	36.28	-	-	-	-	Bal.	0.0	92.5

図 8 に、各合金を 11 MPa および 100 MPa の水素ガス中に 543 K で曝露した際の水素固溶量と Cr・Ni 含有量, Cr/Ni 含有比との関係, ならびに固溶水素量と 298 K における降伏応力上昇量との関係を示す。水素固溶量は Cr 含有量が 20%を超える SUS310S と SUS309S において極めて大きく, Cr 含有量が 20%以下または 0%のその他 3 種の合金では Cr/Ni 含有比が大きくなるほど上昇する傾向にあった。また, Cr および Ni の含有量に関わらず, 水素による降伏応力上昇量 (固溶強化量) は水素濃度のみの関数として線形比例する形で増加していることが分かる。2.1 節での検討において, 298 K での固溶強化には転位の水素雰囲気引きずりによる Drag force が大きく寄与していることが示唆されているが, 上記のような線形比例の関係は, 溶質原子による Drag force が溶質元素濃度の 1 乗に比例することを示す理論式^[12]に関連するものと思われる。

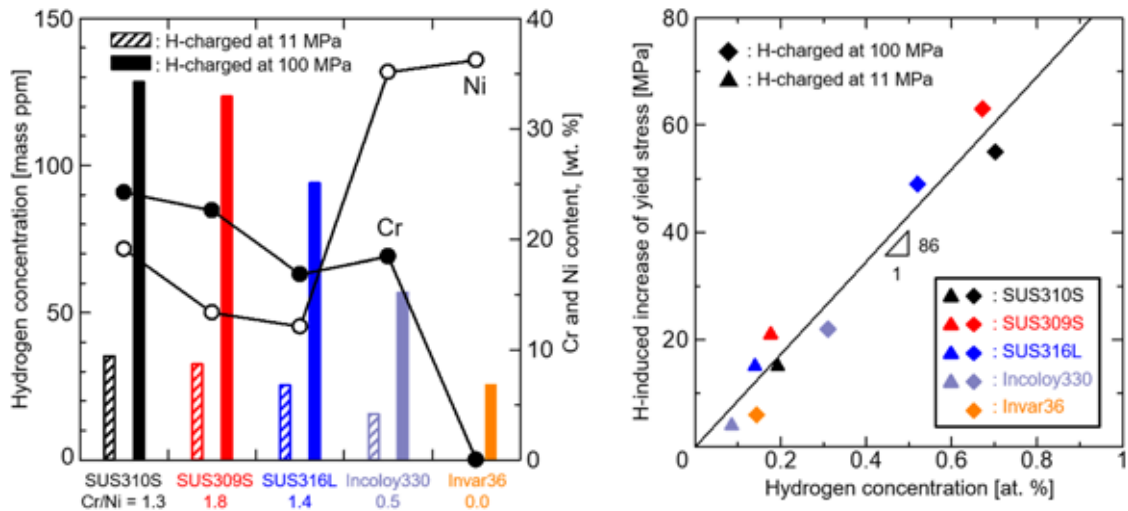


図 8 水素固溶量および 298 K での水素による固溶強化量の Cr・Ni 濃度依存性

図 9 に示すのは、SUS316L を除く 4 合金における『引張強度×均一伸び』を、水素添加材（100 MPa において曝露したもの）と未添加材とで比較したものであり、水素による強度・延性向上効果の発現は、①Cr 含有量と②Cr/Ni 含有比の 2 パラメータと非常に良い相関を持つことが伺えるグラフである。このことはまず、①と②の双方が大きいかほど材料の水素固溶能力が上昇し（図 8）、より大きな固溶強化が発現するようになることと関係している。また、オーステナイト鋼における Cr・Ni はそれぞれ SFE 値を低下・上昇させる作用を持つため、パラメータ①②が小さくかつ Ni 含有量が過度に大きい場合には、水素の有無に関わらず変形双晶の発生が抑制され、延性の向上に至らなかったものと考えられる。実際、図 9 において水素による大幅な特性向上が認められる SUS310S と SUS309S においては破断後の試験片において変形双晶が認められたものの、そうではない Incoloy330 と Invar36 では変形双晶の存在は確認できなかった。ここで、SUS316L においても水素による双晶促進は認められたものの、それが変形の比較的早期に発生して双晶密度が飽和してしまったことから、結果として延性の向上には至らなかった。したがって、同材料は例外として図 9 からは除外した。以上の結果をまとめると、

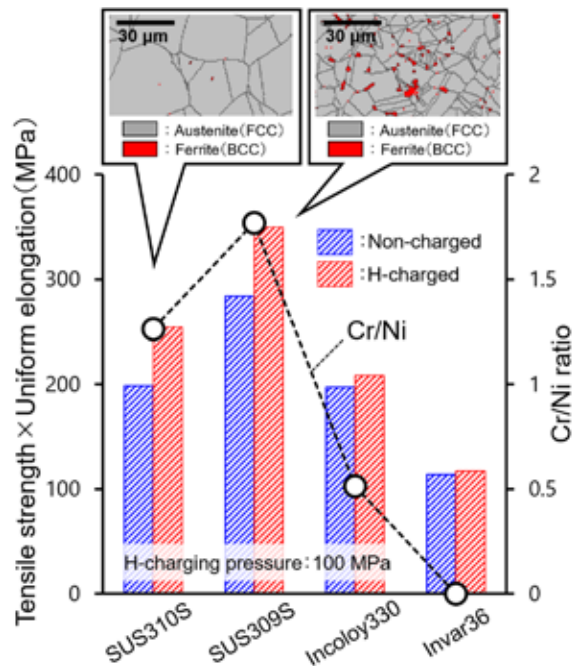


図 9 Fe-Cr-Ni 合金 4 種における『引張強度×均一伸び』に与える水素の影響

水素による高強度・高延性化を効率よく発現させるためには高い Cr 含有量と Cr/Ni 含有比が不可欠であり、その意図は固溶強化に必要な水素固溶能力と、双晶発現に必要な低 SFE 値を得ることにあると言える。ただし注意すべきは、双晶発生の有無だけではなく、SUS316L のような双晶の早期飽和に至らないために、双晶が適度なひずみレベルで発生して変形後期まで継続するような適切な SFE 値を選択する必要があることである。なお、Fe-Cr-Ni 系合金においては未だに信頼できる SFE 計算式が得られておらず、実際に表 1 では SUS309S の方が SUS316L よりも低い SFE を示しており、後者の方が早期に双晶発生に至る実験の傾向とは一致しない。SFE の正確な測定・算出方法の検討も含めて、今後検討すべき重要課題である。

上記に加え、水素の有無に関係なく SUS309S では他材料より優れた強度・延性バランスが得られている。これは、フェライト生成元素である Cr に富んだ同材料が微量なフェライト相を含む故に結晶粒組織が微細な（図 9 上部を参照）ためであり、この効果を利用した組織制御により、さらに性能の優れた材料を作り込める可能性がある。

3. 総括 ～水素による高強度・高延性化の機構とその活用法～

以上、本研究では Fe-Cr-Ni 合金において見出された水素による固溶強化と変形双晶促進による加工硬化率上昇と延性向上効果を材料性能の改善に活用すべく、同現象の潜在機構と、それらが効率的に現れる合金成分の探求を行った。

水素による固溶強化は室温付近かつ低ひずみ速度の下で顕著となる現象であり、そこには格子中に分散した水素による熱活性化応力成分に加え、転位の水素雰囲気引きずりによる Drag force が寄与していることを示す結果が得られた。また、水素は複数{111}面上での同時多発的な双晶発生を誘起し、双晶同士の交差や双晶の厚さ方向への成長を通して材料の加工硬化性能を向上させることが分かった。

これらの効果を最大限引き出すためには、水素固溶能力の大小と変形双晶の発現有無を決定付ける①Cr 含有量と②Cr/Ni 含有比の制御に着目した材料作りが不可欠である。具体的には 20 mass%を超える Cr の添加と、変形双晶を適度なひずみレベルで発生させるよう意図した SFE 値を得るための Cr/Ni 比の最適化が、今後の展開への鍵である。

謝辞

本研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」 2020 年度技術研究助成の支援を受けて実施されたものです。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1]. L. Zhang, M. Wen, M. Imade, S. Fukuyama, K. Yokogawa, *Acta Materialia* 56 (2008) 3414-3421.
- [2]. K. Yamada, M. Koyama, T. Kaneko, K. Tsuzaki, *Scripta Materialia* 105 (2015) 54-

57.

- [3]. H. Luo, Z. Li, D. Raabe, *Scientific Reports* 7 (2017) 9892.
- [4]. Y. Ogawa, H. Hosoi, K. Tsuzaki, T. Redarce, O. Takakuwa, H. Matsunaga, *Acta Materialia* 199 (2020) 181-192.
- [5]. T.P. Perng, C.J. Altstetter, *Acta Metallurgica* 34 (1986) 1771-1781.
- [6]. E.N. Epperly, R.B. Sills, *Acta Materialia* 193 (2020) 182-190.
- [7]. T.H. Alden, *Metallurgical Transactions A* 18 (1987) 51-62.
- [8]. 森山潤一郎, 高桑脩, 山口正剛, 小川祐平, 津崎兼彰, 材料とプロセス (日本鉄鋼協会 講演論文集) 35 (2022) 261.
- [9]. V.G. Gavriljuk, H. Hänninen, S.Y. Smouk, A.V. Tarasenko, K. Ullakko, *Metallurgical and Materials Transactions A* 27 (1996) 1815-1821.
- [10]. 藤田洸, 小川祐平, 材料とプロセス (2023) ※日本鉄鋼協会 第 185 回春季講演大会にて講演論文発表予定 (原稿投稿済み).
- [11]. L. Remy, *Acta Metallurgica* 16 (1978) 443-451.
- [12]. P.M. Anderson, J.P. Hirth, J. Lothe, *Theory of Dislocations* 3rd edition, Cambridge Univ. Press.

主要な研究成果

《査読付き学術論文》

- (1) H. Nishida, Y. Ogawa, K. Tsuzaki, Chemical composition dependence of the strength and ductility enhancement by solute hydrogen in Fe–Cr–Ni-based austenitic alloys, *Materials Science and Engineering A* 836 (2022) 142681.
- (2) Y. Ogawa, H. Nishida, O. Takakuwa, K. Tsuzaki, Hydrogen-enhanced deformation twinning in Fe–Cr–Ni-based austenitic steel characterized by in-situ EBSD observation, submitted to *Materials Today Communications* 34 (2023) 105433.

《解説・総説》

- (3) 小川祐平, 水素を利用した高強度・高延性構造用合金の創製およびこれに関わる新発見, 日本金属学会会報『まてりあ』 61 (2022) 325-333.

《学術会議口頭発表》

- (4) 西田会希, 小川祐平, 松永久生, 高桑脩, 津崎兼彰, 水素固溶に伴うオーステナイト鋼の強度・延性向上効果に対する Cr・Ni 量の影響, 日本鉄鋼協会 第 181 回春季講演大会, 2021 年 3 月 18 日 (オンライン開催).

- (5) 小川祐平, 高桑脩, 津崎兼彰, オーステナイト鋼の機械的特性に対する固溶水素の役割 ～脆化元素および高強度・高延性化元素としての2つの側面～, 日本溶射学会 第2回 合同支部講演会, 2022年9月2日 (オンライン開催).

- (6) 小川祐平, 高桑脩, 津崎兼彰, オーステナイト鋼における水素による固溶強化の元素濃度・試験温度依存性, 日本鉄鋼協会 第184回秋季講演大会, 2022年9月21日 (福岡工業大学).