

(2022 年 2 月 3 日提出)

Keywords: Martensitic transformation, TRIP, cryogenic temperature, steel, stress field

1. 序論

次世代のエネルギーキャリアとして注目されている水素だが、輸送する際の方法の一つとして単純低温液化がある。この技術はコストを度外視すればすでに確立されているが、商業的に導入するには貯槽の大型化が必要になる。1993~2002 年にかけて実施された国家プロジェクトである WE-NET では液化水素貯槽に使用する低温材料に関する検討が盛んに行われた。しかし、ひとまずの候補材とした SUS304L、SUS316L と言った既存のステンレス鋼について基本的な母材のシャルピー衝撃試験特性や SSRT 試験特性などの評価を実施したに過ぎず、構造物が地震を受けて破壊した場合の影響の大きさを考慮すれば、直ぐに適用できる状況ではない。

そこで本研究の目的は大型液化水素貯槽の最有力候補材である SUS316L を中心にマルテンサイト変態のしやすさが異なる幾つかの SUS 材を準備し、WE-NET で考慮されなかった極低温下・応力多軸度の高い条件のマルテンサイト変態と破壊靱性試験の様相を調査することとした。

2. 実験

Table 1 に示す 4 種のステンレス鋼を用い極低温下 (今回は液体窒素) にて実験を行った。

まず平滑丸棒試験を破断させ、一様伸び部分のマルテンサイト変態量を調査した(Fig. 1)。変態量は Md30 と良好な相関が認められ、 γ 安定な SUS310S では塑性歪 60% 下でも変態率は 20% に留まる一方、SUS304 では 25% 程度の塑性歪でほぼ完全にマルテンサイト変態が完了している。

テーパ付き丸棒引張試験を実施することで複数の塑性歪条件を得ることができる。極低温下での変形特性や変形に伴うマルテンサイト変態量を調査することが目的である。Fig. 2 に結果を示す。10% 程度の比較的少ない塑性歪量でも変態量が多いことがわかる。なお、肩部 (図中青色) でも平行部 (赤色) でも今回測定した範囲でほとんど差が検知されなかった。両者の応力多軸度は 0.45、0.33 と差異があるが、この範囲では塑性歪量とマルテンサイト変態量の関係に及ぼす応力多軸度の影響は限定的であることが判った。

Table 1 Major indexes of used steels regarding to martensite transformation (deg. C)

Mark	M_s	M_d^{30}
SUS304	-19	44
SUS304L	-22	28
SUS316L	-190	-83
SUS310S	-418	-365

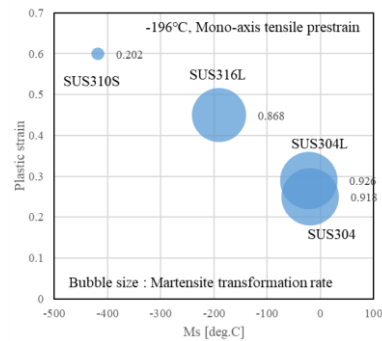


Fig.1 Effect of plastic strain and transformation indexes on martensite formation rate

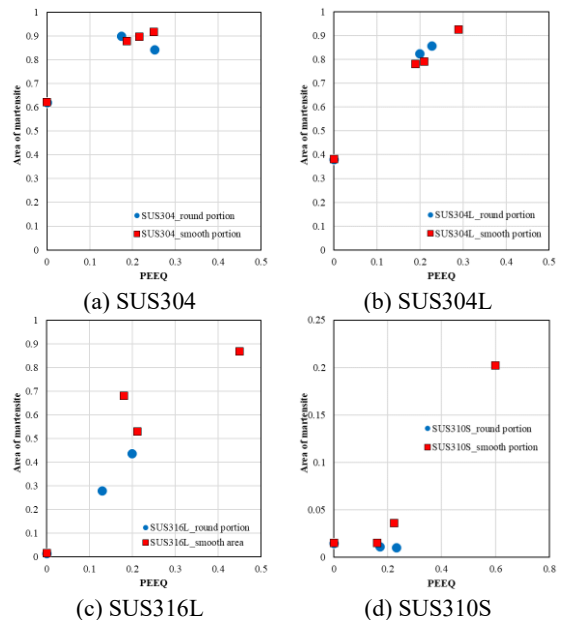


Fig. 2 Evolution of martensite amount as equivalent plastic strain advances

CT 試験は機械ノッチ・疲労亀裂と 2 種類の条件で実施したが SUS304、304L の機械ノッチ条件

では不安定延性破壊が生じた（図表は割愛）。

この原因に対する調査実験として、SUS304 と SUS316L の CT 試験片の機械ノッチ材に対して EBSD 解析を行った(Fig. 3)。一行目の SUS304 ではその時の切欠き部の組織はマルテンサイトが 95.3%とほとんど完全にマルテンサイト組織になっていることが分かった。またアレスト位置ではマルテンサイト変態量が 61.1%にまで低下していた。これは SUS304 の予歪 0 でのマルテンサイト変態量である 62.1%と同等である。二行目の SUS316 の切欠き部の状態は欠損が激しいが、SUS304 と同様に 98.6%と圧倒的にマルテンサイト変態が完了していることは同様であった。

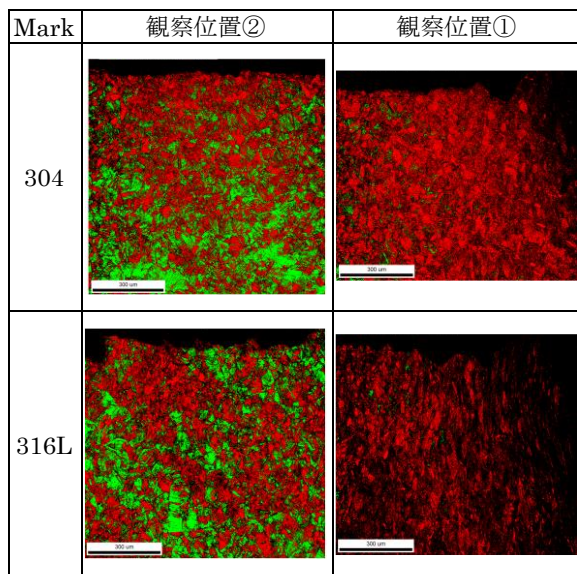


Fig. 3 Fracture appearance and ductile crack extension size of each specimen (Red: α , Green: γ)

3. 有限要素法解析（マルテンサイト変態に及ぼす応力場の影響調査）

前章での両試験において多くの領域がマルテンサイト変態しており、破壊靱性試験で一部見られた不安定破壊現象はマルテンサイト変態によりもたらされたと考えられる。構造物内でのこのような不安定破壊が発生してしまうことは構造物崩壊に直結する可能性があり避けなければならない。本章ではマルテンサイト変態量を決定づける負荷の影響を明らかにするための新しいアプローチを行う。つまり、常に変位比が厳密に一定になるような理想的な载荷状態を再現する。

簡単のため二次元モデルとし、材料には弾完全塑性を与えた。マルテンサイト量の大小を議論する際に使われることの多い相当塑性歪が一定になる条件を共通条件とし変位比（応力場）を変化させた複数の条件を考え、境界条件としてそれらを反映させた端部強制変位を与えた。その後、マルテンサイト変態に係る膨張を膨張量の等価な

熱膨張に置き換えて強制的に膨張を再現し、その際に変態相自身と周囲マトリクスの弾性歪エネルギーの変化量を FEM 上で観測する。つまり、変態により弾性歪エネルギーが増えれば変態は起こりにくく、減れば変態が進行しやすい。

検討の結果先行研究(Fig. 4)[1]によると塑性歪 3%における変態量は $EQ \approx UN > TC$ であったが、今回の計算結果(Fig. 5)において EQ が最も高いという点は合致しているがその他二者の順序は逆転していた。そもそも EQ, TC などの二軸試験は変位比を一定にしながら引張が困難であり、実験的な誤差も大きい可能性がある。しかし応力多軸度が大きいと変態しやすいという基本的な性質は一致していると見て良いだろう。

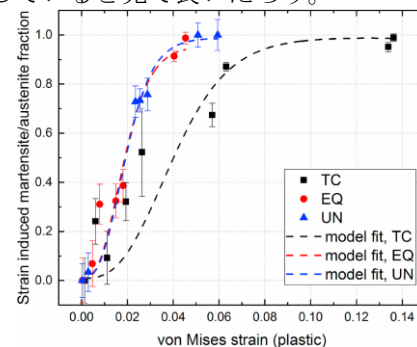


Fig. 4 Correlation of equivalent plastic strain and martensite transformation amount [1].

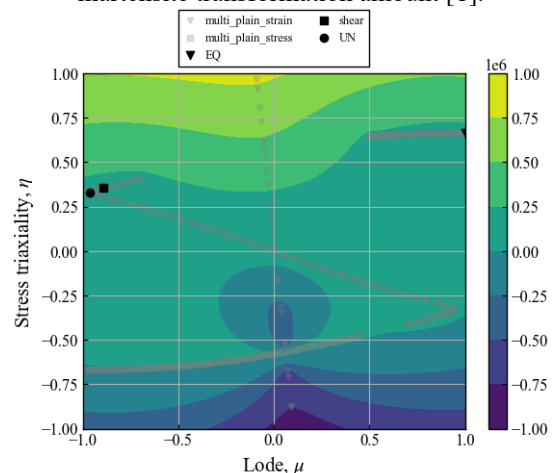


Fig. 5 Contour plot of potential energy release density on stress triaxiality and lode parameter plane

4. まとめ

今後の水素社会を支えるためには、貯輸送に相応しい材料を決定する必要がある。過不足のない提案が不可欠であり、脆性破壊や水素脆化の観点で望ましくないマルテンサイト変態を制御する観点が重要になってくると考えられる。本研究をさらに深化させ高多軸度状態での材料評価を提案したい。

参考文献

[1] E. Polatidis et al, Materials Science and Engineering: A, Volume 800, 2021, 140321,