

## 非拡散性水素吸蔵条件下の高強度鋼の疲労

中谷 正憲

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻  
博士後期課程3年  
日本学術振興会特別研究員

## 研究背景

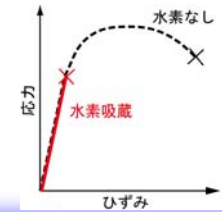
■ 高強度鋼の利用  
➡ 軽量化, 長寿命化

■ 水素社会への移行  
燃料電池や水素エンジン



水素の侵入による強度・延性の低下  
⇒ **水素ぜい化**

↓  
水素ぜい化機構の解明  
耐水素ぜい化材料の開発



## 水素の存在状態

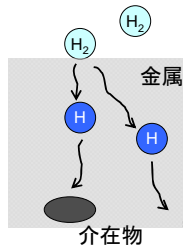
外部環境から水素が侵入

↓  
高圧水素雰囲気  
雨や大気中の水分による腐食  
メッキ, 酸洗い  
溶接

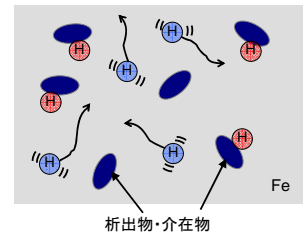
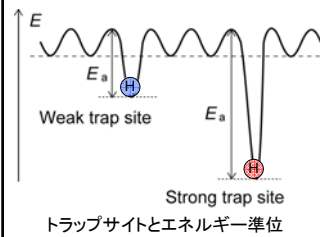
↓  
金属格子内を拡散

↓  
**格子欠陥**に捕捉(トラップ)

原子空孔, 転位, 析出物, 介在物など



## 拡散性水素と非拡散性水素



室温環境下において

再び拡散可能 ➡ **拡散性水素**

拡散不可 ➡ **非拡散性水素**

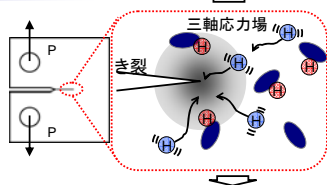
## 水素ぜい化と水素吸蔵状態

三軸応力場に水素が集積  
水素吸蔵量に依存

↓  
**拡散性水素**が主要因子

静的荷重下では  
**非拡散性水素**は拡散しない

↓  
水素ぜい化に寄与しない



### 水素ぜい化対策

➢ 環境側

・腐食表面反応制御

➢ 材料側

・炭化物・粒界偏析の低減

・**非拡散性水素トラップサイト生成**

## 研究目的

### 耐水素ぜい化材料の創製指針

非拡散性水素トラップサイト ➡ 水素の拡散防止

長期間の使用により

非拡散性水素の吸蔵量は**増加・飽和**

実際の機械構造物は**繰返し荷重下**で使用

**疲労損傷**の蓄積による微視組織構造の変化

非拡散性水素が疲労強度特性に及ぼす影響の解明

破壊過程, 材料因子との関連について検討

### 疲労強度特性に及ぼす非拡散性水素の影響

### 疲労強度特性に及ぼす非拡散性水素の影響

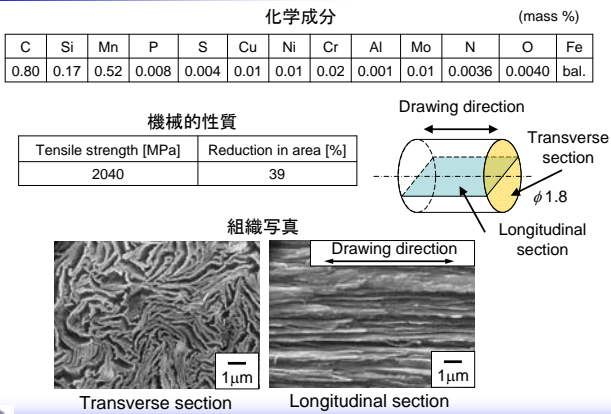
材料内の水素は格子欠陥に存在  
 低合金鋼, ステンレス鋼 → 微視組織が複雑  
 ↳ トラップサイトは多種  
 非拡散性水素の分離・抽出が困難

**伸線強加工高強度鋼**  
 非拡散性水素トラップサイトは1種類

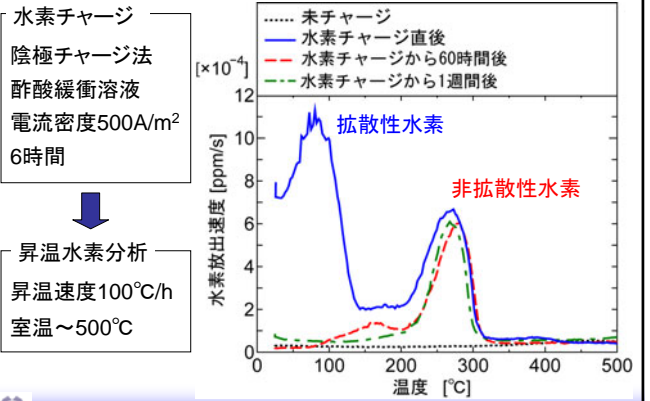
↓

高強度鋼の疲労強度特性に及ぼす  
**水素吸蔵状態**の影響を検討

### 伸線強加工高強度鋼



### 水素吸蔵特性



### 活性化エネルギーとトラップサイト

水素がトラップサイトからの脱離に要するエネルギー

→ 活性化エネルギー  $E_a$

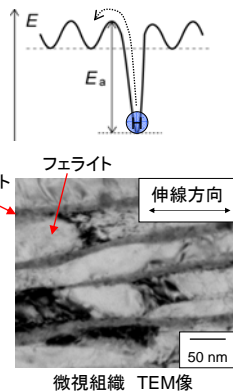
拡散性水素  $E_a=27\text{kJ/mol}$

→ 転位の弾性ひずみ場<sup>\*1</sup>

非拡散性水素  $E_a=73\text{kJ/mol}$

→ フェライト/セメンタイト界面に堆積した転位<sup>\*2</sup>

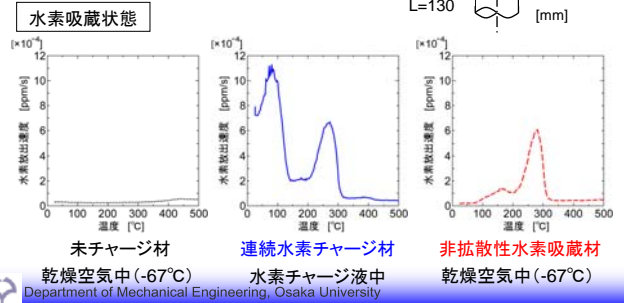
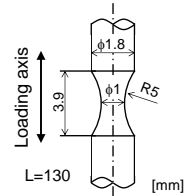
→ 微細化したセメンタイト<sup>\*2</sup>

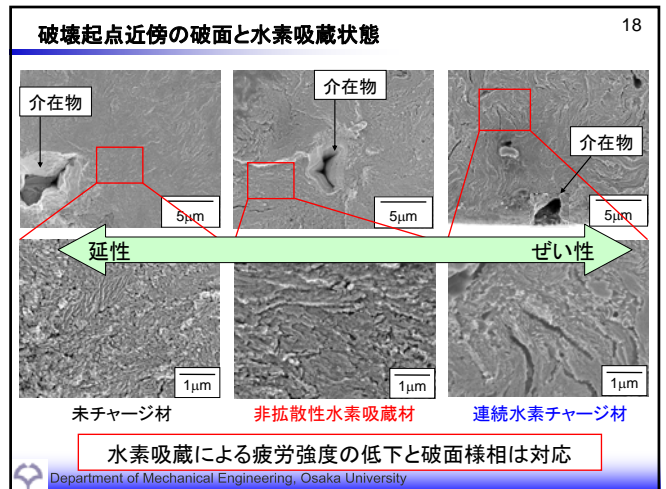
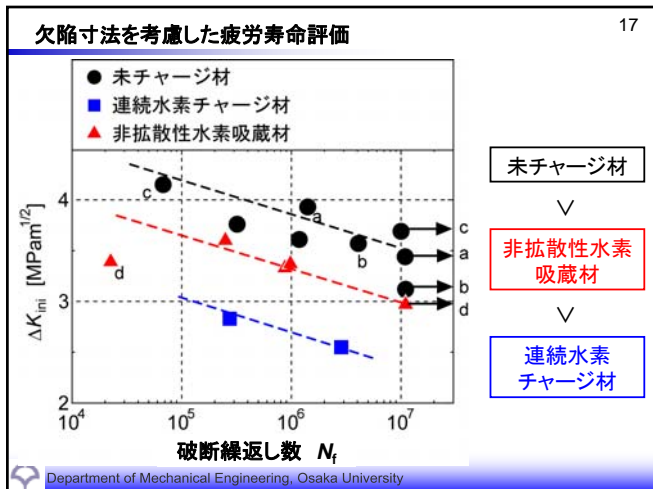
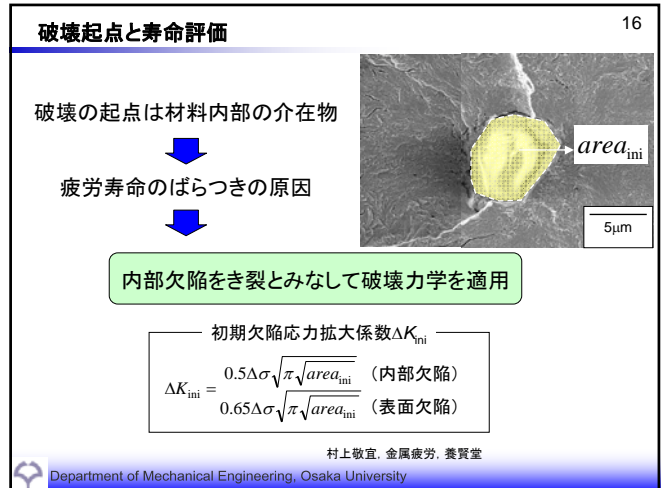
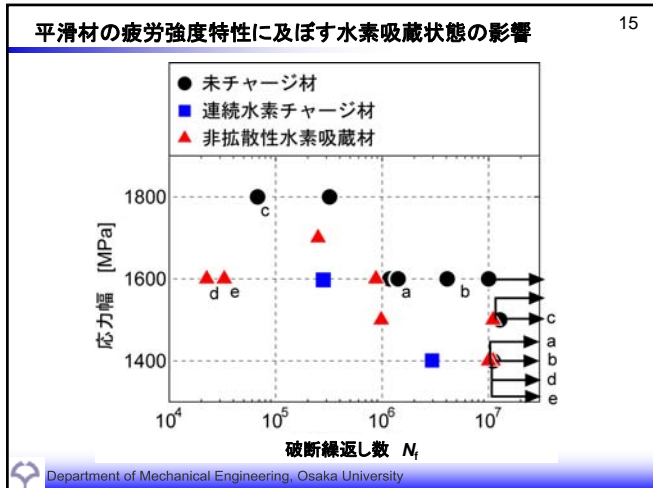
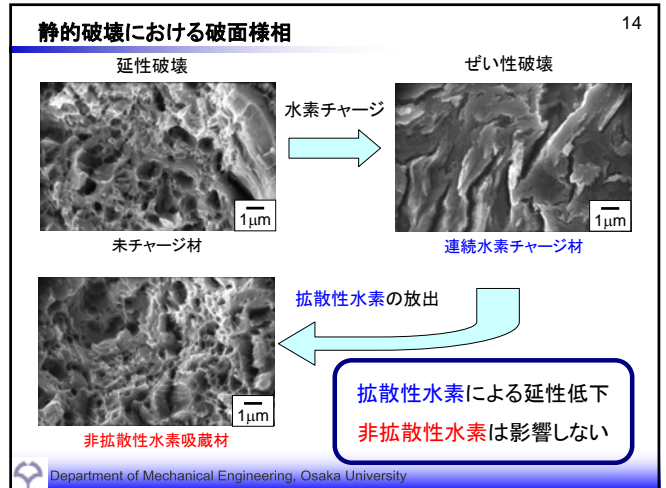
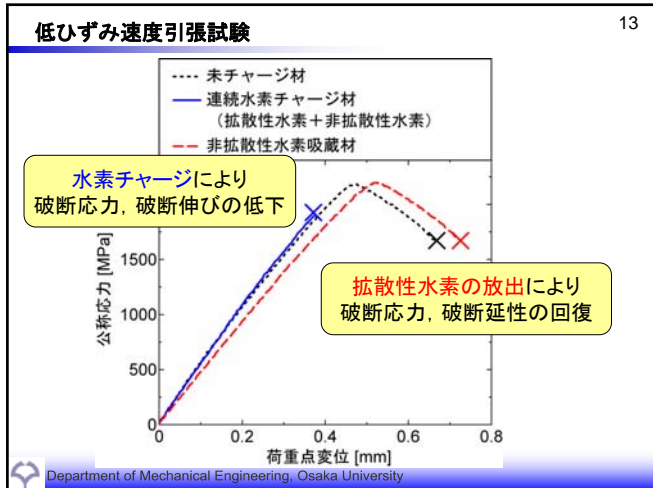


\*1 W. Y. Choo et al, Metall. Trans. A, Vol. 13 (1982)  
\*2 K. Takai et al, ISIJ int., Vol. 43 (2003)

### 実験方法

■ 疲労試験  
 (応力比R=0, 繰返し速度30 Hz)  
 低ひずみ速度引張試験  
 (引張変位速度  $3.3 \times 10^{-5}$  mm/s)





疲労き裂発生寿命に及ぼす非拡散性水素の影響

非拡散性水素と疲労き裂発生・進展

非拡散性水素の吸蔵により**疲労寿命**は低下

**疲労き裂発生 + 疲労き裂進展**

応力支配

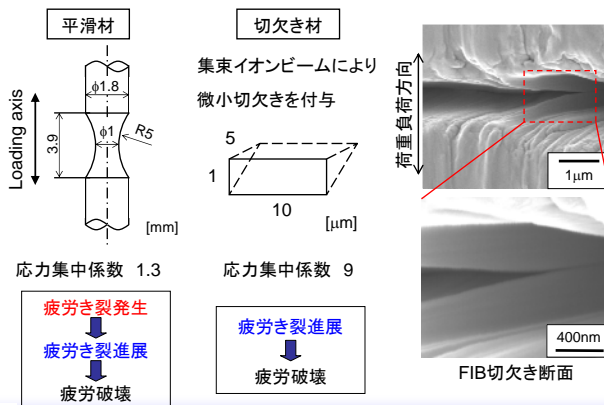
破壊力学支配

疲労破壊過程を分離した上で  
非拡散性水素が疲労強度特性に及ぼす影響を検討

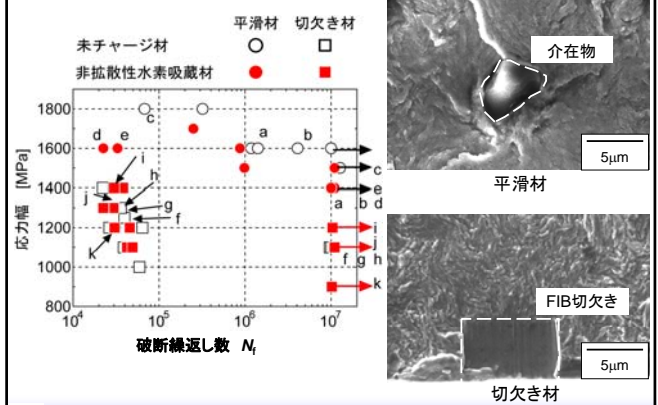
平滑材と切欠き材の疲労強度特性

平滑材の疲労き裂発生寿命を推定・評価

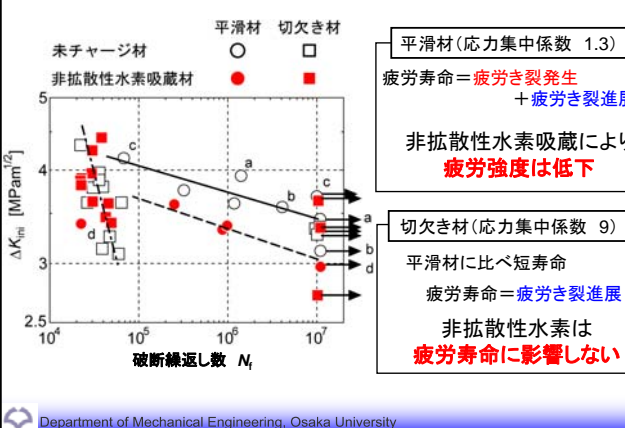
切欠き試験片



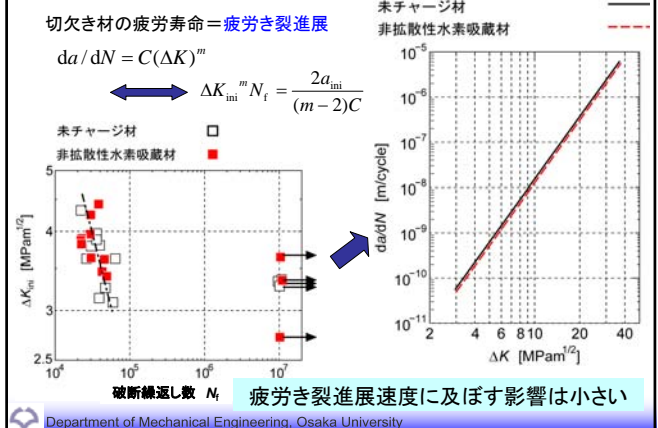
切欠き材の疲労強度特性に及ぼす非拡散性水素の影響



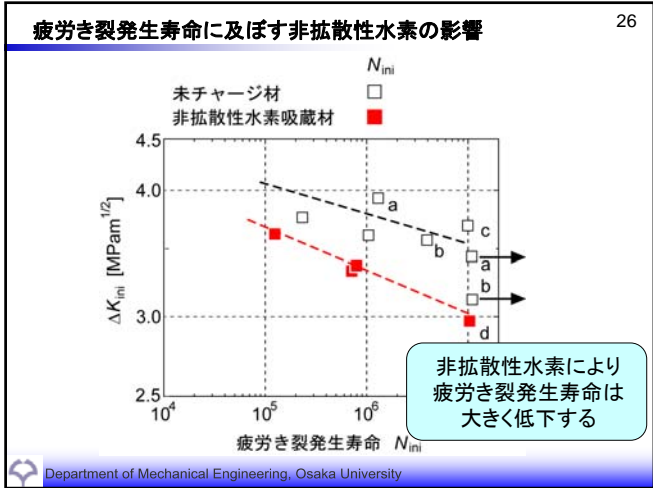
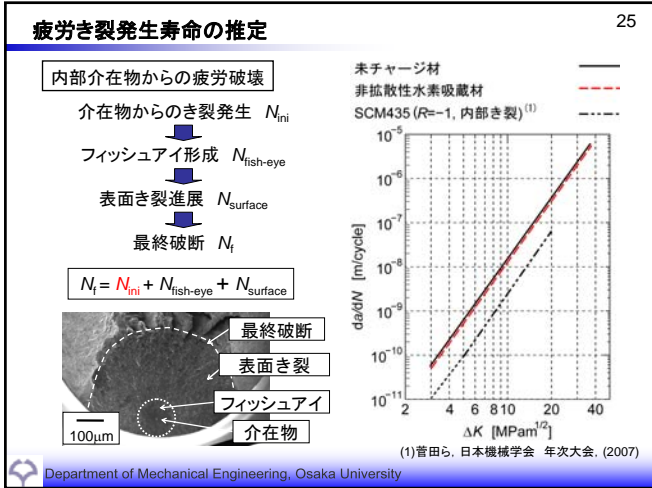
欠陥寸法を考慮した疲労寿命評価



切欠き材のき裂進展速度

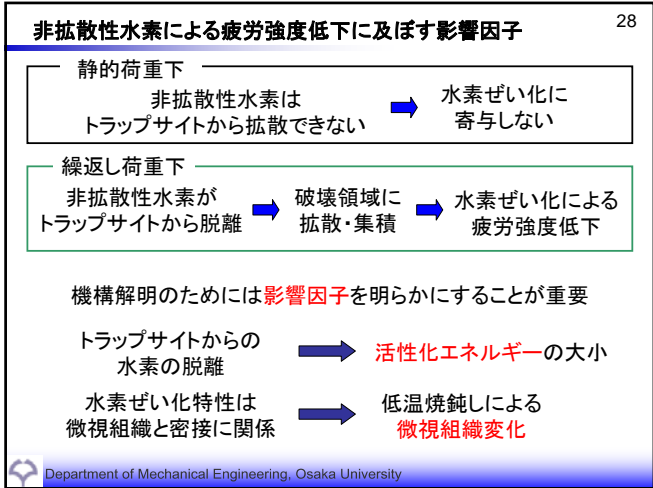






### 非拡散性水素による疲労強度低下に及ぼす影響因子

Department of Mechanical Engineering, Osaka University



### 供試材

#### 伸線強加工高強度鋼

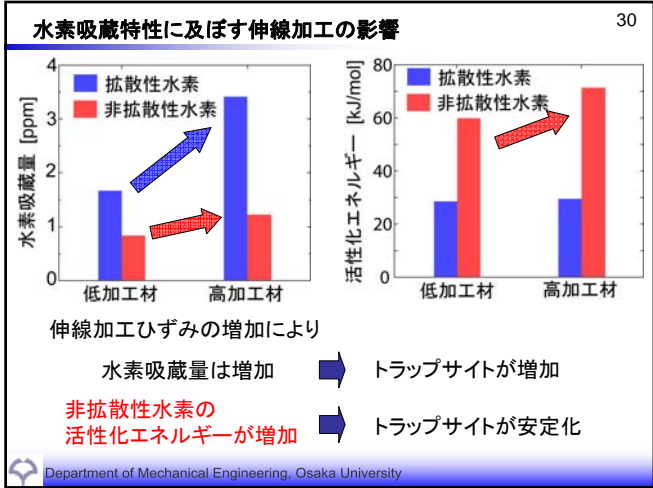
化学成分 (mass %)											
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	N	O	Fe
0.96	0.19	0.69	0.017	0.060	0.21	0.07	0.2	0.011	0.012	0.0013	Bal.

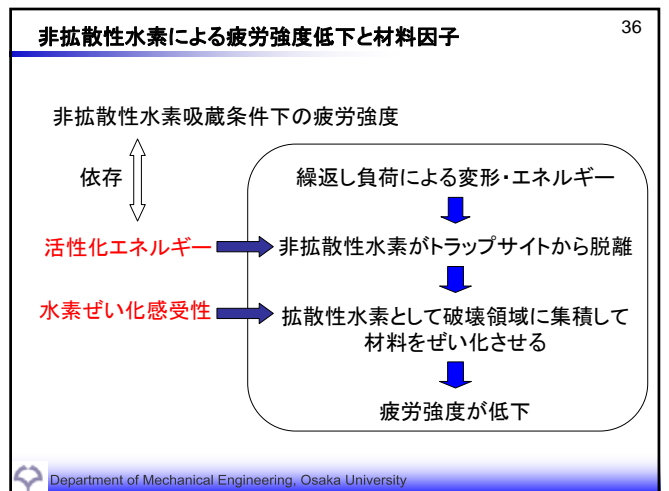
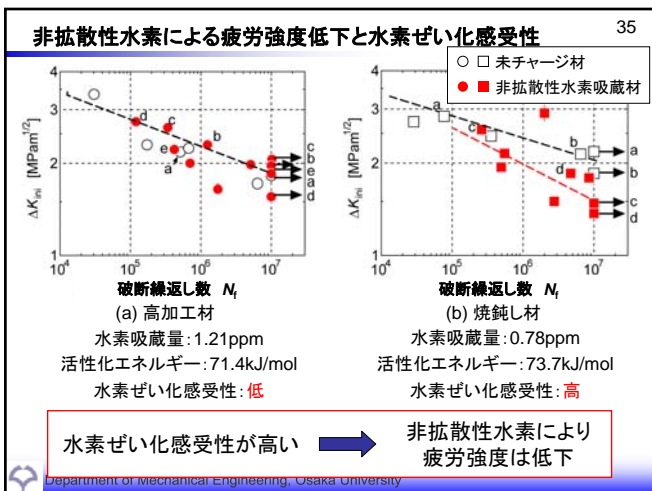
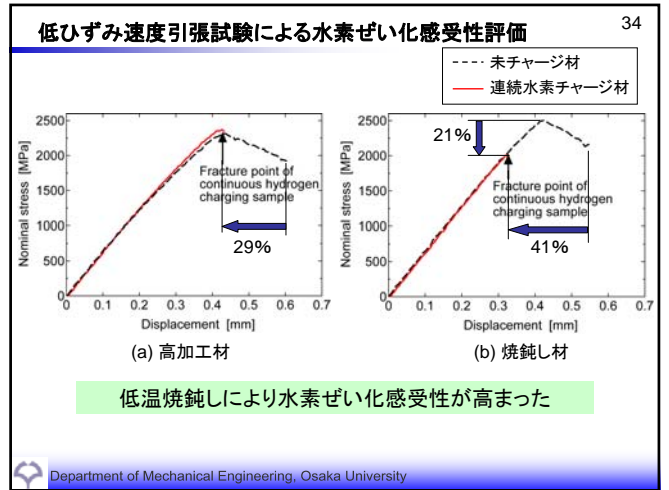
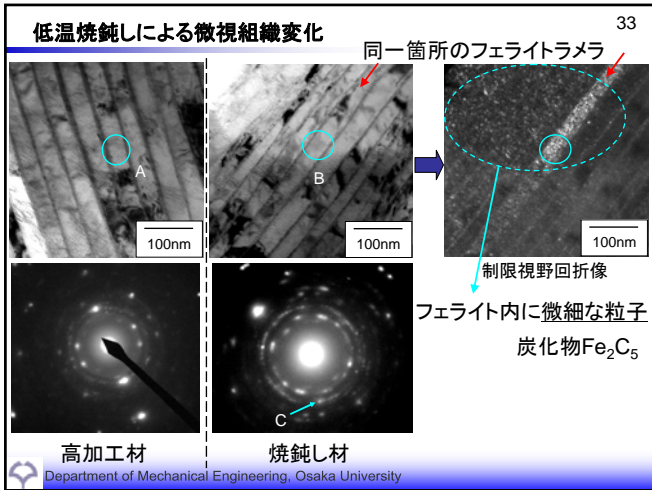
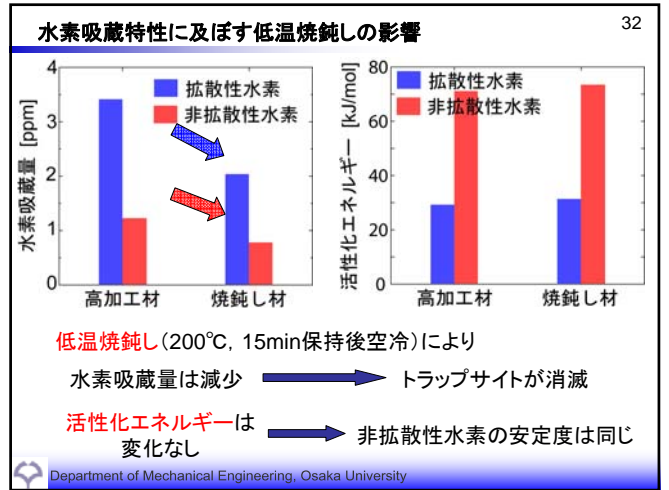
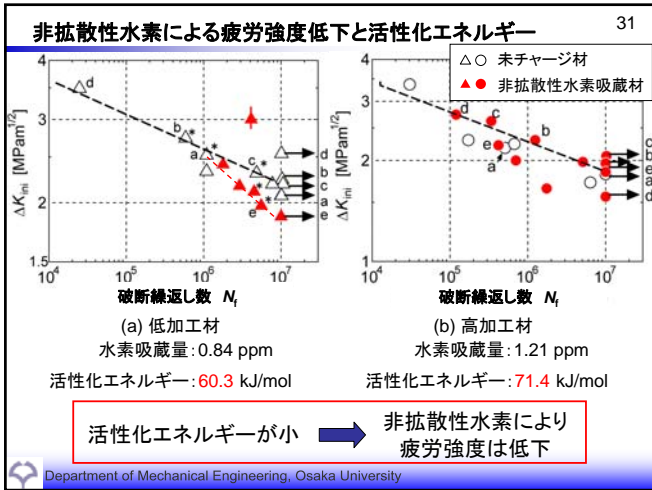
機械的性質			
	Tensile strength [MPa]	Reduction of area [%]	HV
Slightly drawn sample	1894	20	423
Heavily drawn sample	2310	42	546

伸線加工ひずみの異なる同一組成の線材

(a)母材 (φ = 5.5mm) (b)低加工材 (φ = 3.3mm) (c)高加工材 (φ = 1.7mm)

Department of Mechanical Engineering, Osaka University





## 結論 および 耐水素ぜい化材料の創製指針

## 結論

非拡散性水素により疲労強度特性は低下

破壊過程への寄与

疲労き裂発生 > 疲労き裂進展

影響因子

活性化エネルギー

水素ぜい化感受性  
(微視組織)

メカニズム

繰返し負荷による変形・エネルギー → 非拡散性水素がトラップサイトから脱離 → 拡散性水素としてぜい化に寄与

## 耐水素ぜい化材料の創製指針

非拡散性水素のトラップサイトの生成

➡ 拡散性水素のき裂先端への拡散防止

繰返し荷重により非拡散性水素は  
トラップサイトから脱離し、疲労強度が低下

新たな耐水素ぜい化材料の創製指針

1. 活性化エネルギーを大きくする
2. 水素ぜい化感受性を低くする