

X線回折法によるガスタービン用Ni基超耐熱合金のクリープ劣化診断

川崎重工業(株) 井頭 賢一郎
igashira_kenichiroh@khi.co.jp

ジェットエンジンやガスタービンエンジンの製造および運用において、高温、高応力に晒されるタービン翼の劣化診断や余寿命を推定する技術は、不測の破損を未然に防ぐためのみならず、ライフサイクルコストに影響を与える部品交換期間を適正に設定するために高度化が要求されており、タービンメーカーのみならず電力会社、ガス会社等の有力ユーザーが様々な手法を開発、提案している。

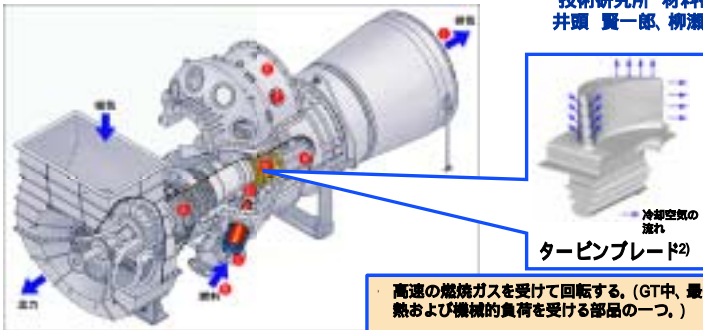
最新のタービン翼に適用されているNi基超耐熱合金は、Ni固溶体である 相中に、Ni₃Alを主とする立方体形状の '相が整然と析出した特徴的な組織を有する。このような / '型 Ni 基超耐熱合金は、引張荷重によるクリープの場合、劣化の進行に伴い隣接する '相同土が引張方向に直交する平面上に合体、粗大化する、いわゆるラフト化現象を呈する。そして多くの劣化診断法は、このラフト化組織の状態を指標としたものである。ただし、このラフト化はクリープ劣化の初期の段階では変化が大きい、材料によっては中盤以降での変化がわずかになる場合もみられ、また組織形態による評価であるため任意性も無視できない。

このような理由から、我々はラフト化組織形態に頼らず、かつ定量性のある評価法として、X線回折による評価の可能性を検討した。これは、クリープ中盤以降でラフト化組織の変化がほとんど見られないといった場合でも、結晶レベルでの変化は継続しているものと考えたためである。X線回折手法を用いた各種評価の結果、'相の規則格子反射の ロッキングカーブ半価幅が、クリープ寿命消費率の増加と共に単調に増加するといった傾向を見出した。 ロッキングカーブ半価幅の増大は、EBSP の結果等から '相の方位ミスオリエンテーションの増大であることが示され、TEM による組織観察から、この原因がクリープボイドの発生原因となる / '界面への転位の集積であると推測するに至った。

Kawasaki

X線回折法によるガスタービン用Ni基超耐熱合金のクリープ劣化診断

川崎重工業株式会社
技術研究所 材料研究部
井頭 賢一郎、柳瀬 悦也



Kawasaki L20Aガスタービン¹⁾

タービンブレード²⁾
冷却空気の流れ

高速の燃焼ガスを受けて回転する。(GT中、最も過酷な熱および機械的負荷を受ける部品の一つ、)
1枚でも破損するとエンジンに決定的なダメージを与える場合がある。
材質や運用方法に非常に高い信頼性が要求されます。

引用:
1)http://www.khi.co.jp/tb/03_gas/03_gas.html
2)http://www.khi.co.jp/gasturbine/technologies/tec1_main.html

本研究の目的

対象器機: ガスタービン、ジェットエンジン

対象部材: 高温タービン翼 (Ni基超耐熱合金の精密鑄造部品)

開発技術:

実機使用翼を抜き取り検査し、次のオーバーホールまで使えるか、交換すべきかを、より精度良く判断するための評価手法を開発する。



精密鑄造による中空動翼の断面¹⁾

目的 / 背景:

- 当社が設定する交換サイクルに対して、顧客の納得を頂く。
- 近年、保守を含む契約案件が増えつつある。(過剰頻度のO/Hは、利益を圧迫)
- タービン翼の価格は上昇の一途。(適切な安全裕度を確保しつつも、なるべく長く使いたい。) 高性能化のため、プロセスの複雑化(冷却通路の複雑化、多結晶、一方向凝固、単結晶)や、希少金属、貴金属の添加量増加、また金属全般の価格が高騰。



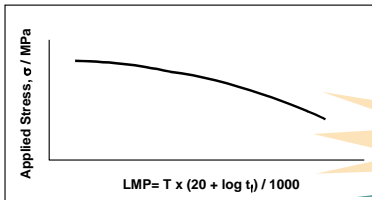
再使用可能

交換

引用
1) http://www.khi.co.jp/gasturbine/technologies/tect_main.html

タービン翼のクリープ寿命予測

クリープ破断試験結果(応力-LMP線図)をバックデータとし、実機翼に負荷される応力、応力負荷された時間、材料温度がわかれば、余寿命が算出されるのだが...



$$\sigma = f(LMP)$$

$$LMP = \frac{T(K) \times \{20 + \log t_f (h)\}}{1000}$$

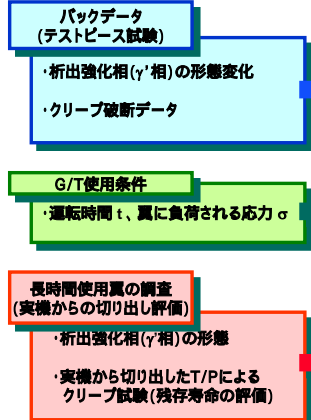
温度の僅かな見積もり違いで、余寿命推定を大きく狂わせてしまう。

応力 : 解析から比較的高い精度で応力分布が算出される。

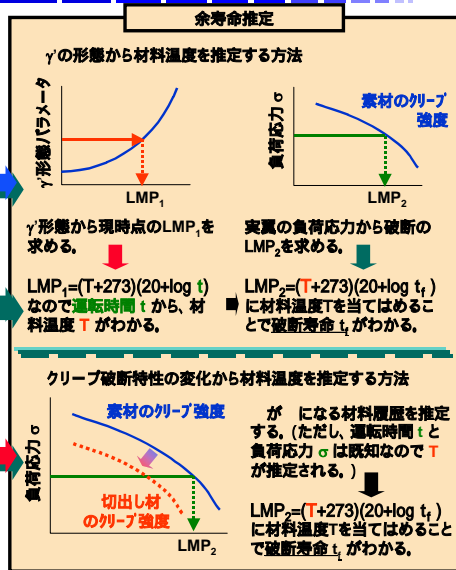
時間 : 運転記録から読みとれる。

温度 : 伝熱解析が難しい。(高温ガス-金属間の熱伝達: 表面粗度などで変化) 燃料、運転条件による変動有り、回転体であるため、直接的な測温が困難。

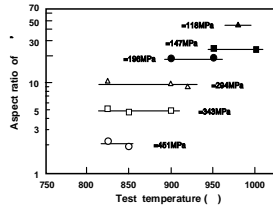
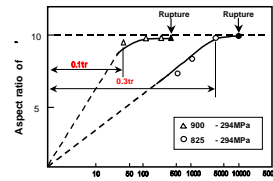
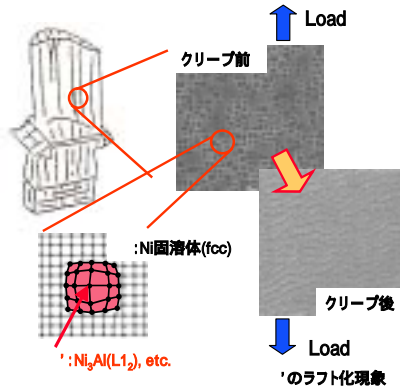
タービン翼のクリープ寿命予測手法(従来法)



ただし、...



Ni基超合金のクリープ現象に伴う組織変化(ラフト化)



のAspect比は、クリープの早い段階で飽和。
飽和したAspect比は、温度に依存しない。(応力には依存する)

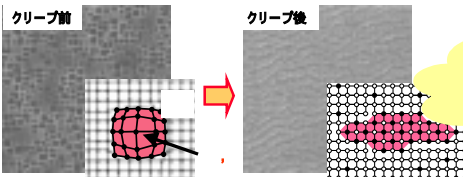
引用:
山本浩康, 吉岡洋明 (著者) : ニッケル基一方向凝固合金のクリープ変形中の組織変化, 学術123委員会 研究報告, Vol.39, No.1, (平成10年3月), P.17.

の形態観察から温度を推定することには限界がある?

ガスタービン動翼の熱的環境

引用
1) 川崎重工技報 161号 (2006)
2) http://www.khi.co.jp/gasturbine/technologies/tec1_main.html

Ni基超合金の放射光によるX線回折実験の意義



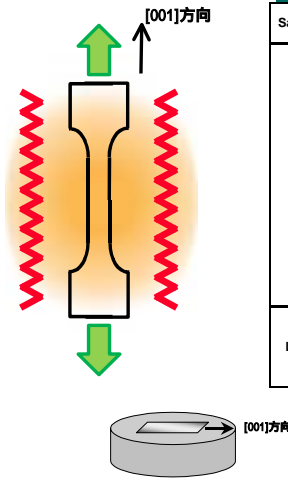
クリープに伴うの凝集、成長が飽和した後も、結晶格子レベルではダメージ蓄積による変化が引き続き生じていると考えられる

例えば、

- 整合界面減少
- 整合ひずみの低下
- 平均的な格子定数の変化
- 格子定数のばらつき
- 結晶方位のばらつき
- 結晶中転位の増加
- 結晶性の低下、結晶の湾曲、ボロニゼーション等
- 組成の変化
- 格子定数の変化、格子定数のばらつき

これらの変化は、X線回折法で捕らえられる！！

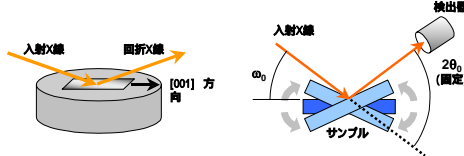
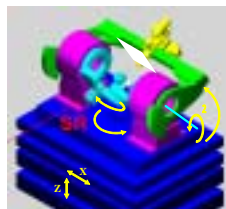
評価したサンプルのクリープ試験条件と実機翼の履歴



Sample	Temp.	100 MPa		225 MPa		350 MPa		
		time / h	t/t _i	time / h	t/t _i	time / h	t/t _i	
T/P	RT	0	0.000	0	0.000	0	0.000	
	1123 K					1000	0.529	
						1205	0.638	
						1800	0.952	
	1173 K		999	0.005	1000	0.465	90	0.467
			-	-	1600	0.744	140	0.732
			-	-	2000	0.930	200	1.041
	1223 K				120	0.502		
					180	0.753		
				Rupt.	1.000			
1273 K		1002.1	0.504	16	0.506			
		1500	0.754	Rupt.	1.000			
		1800	0.905	Rupt.	1.000			
L20A	1173 K	1000	0.005					
		10000	0.052					
	1223 K	1000	0.056					
		10000	0.561					

t : クリープ試験時間(実機運転時間)
t_i : MarM247DS材のLMP線図から算出。

測定方法('規則格子反射の ロッキングカーブ測定)

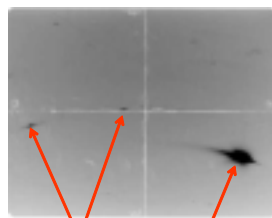


サンプル配置とロッキングカーブ測定方向

		Ni (γ)			Ni ₃ Al (γ')			
		Lattice Constant a (nm)	0.3590		Lattice Constant a (nm)	0.3566		
h	k	l	20 (10 ³ Å ³)	Structural Factor	F _c ²	20 (10 ³ Å ³)	Structural Factor	F _c ²
-1	0	0	19.8891	0	0	20.02515	f _{Al} - f _{Ni}	153
-1	0	0	28.27355	0	0	28.46783	f _{Al} - f _{Ni}	128
-1	1	1	34.81054	4f _{Ni}	5856	35.05239	f _{Al} + 3f _{Ni}	4321
2	0	0	40.41291	4f _{Ni}	5196	40.69689	f _{Al} + 2f _{Ni}	3827
2	1	0	45.43323	0	0	45.57625	f _{Al} + f _{Ni}	31
2	1	1	50.05247	0	0	50.41260	f _{Al} - f _{Ni}	84
2	2	0	58.48078	4f _{Ni}	3634	58.91297	f _{Al} + 3f _{Ni}	2654
2	2	1	62.41056	0	0	62.87831	f _{Al} - f _{Ni}	68
1	0	0	62.41056	0	0	62.87831	f _{Al} - f _{Ni}	68
2	1	1	64.20403	0	0	64.70759	f _{Al} - f _{Ni}	64
2	1	1	69.88868	4f _{Ni}	2864	70.42639	f _{Al} + 3f _{Ni}	4154
2	2	2	73.49035	4f _{Ni}	2793	74.06724	f _{Al} + 3f _{Ni}	2025
3	2	0	77.02505	0	0	77.64011	f _{Al} - f _{Ni}	55

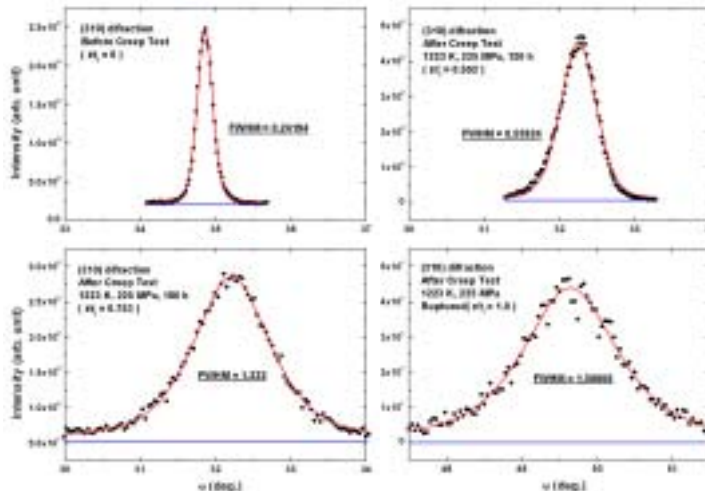
F: Atomic Scattering Factor

偶奇混合指数面回折線は 'のみからの情報!!
ただし、基本格子反射強度の数%

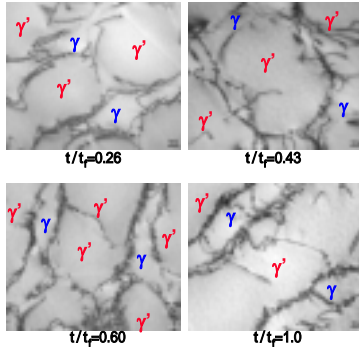


粗大結晶粒であるため、回折光は離散的!!
規則格子反射はやはり弱い。

クリープ劣化度に対する '規則格子反射の ロッキングカーブの変化

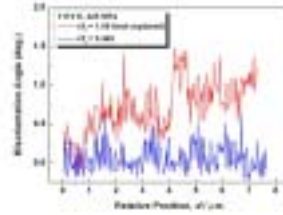


ロッキングカーブ半価幅の増大とは



クリープ劣化に伴い / '界面転位が増加している！！

'のミスオリエンテーション増大



クリープ劣化に伴い方位ミスオリエンテーションが増加。(EBSPで確認)

寿命消費率の増大

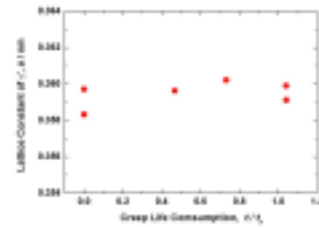
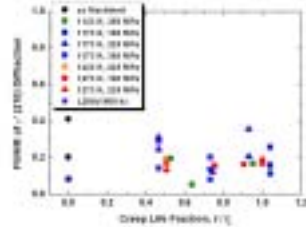
/ '界面転位の増加

'相の方位ミスオリエンテーションの増大

'の ロッキングカーブ半価幅増大

ロッキングカーブ半価幅の増大とは

- 'の方位ミスオリエンテーション以外に理由はないのか？ -



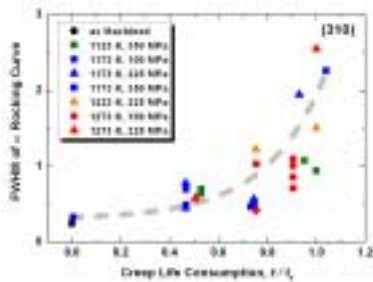
-2 で測定した 'の回折ピークの半価幅は、クリープ劣化度に依存しない。

'の格子定数は、クリープ劣化度に依存しない。

結晶性の低下ではなさそう。



クリープ寿命消費率に対する '規則格子反射のロッキングカーブ半価幅変化



重相関係数 0.917790782

偏回帰係数表

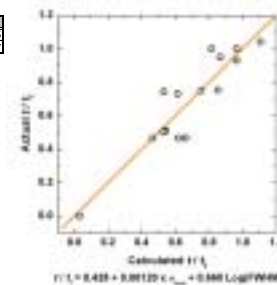
変数名	係数	標準誤差	t値	F値	検定	帰無仮説の有罪確率
定数項	0.427387072	0.102368	4.175002	17.43064	1%有罪	0.001287918
寿命	0.001198379	0.000383	3.080332	9.304527	5%有罪	0.010078489
Log(FVHM)	0.659875189	0.108303	6.092639	37.12263	1%有罪	5.39454E-05

標準偏回帰係数表

変数名	係数	標準誤差
寿命	0.367758824	0.120563
Log(FVHM)	0.734570134	0.120563

従属変数との偏相関

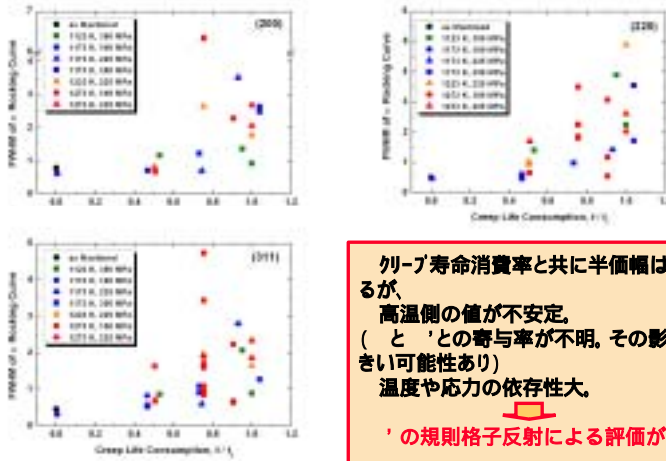
変数名	偏相関係数
寿命	0.56582653
Log(FVHM)	0.869317937



温度や負荷応力条件の異なる試験でも良く整理できている。

温度依存性が比較的小さい。 温度によらないダメージ評価の可能性あり。

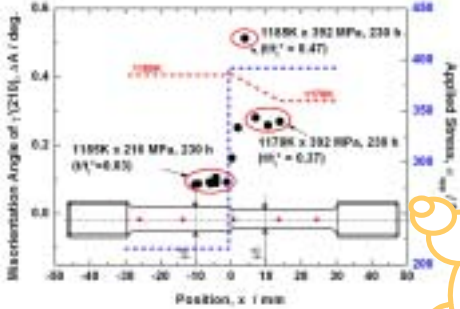
クリープ寿命消費率に対する基本格子反射の ロッキングカーブ半価幅変化



クリープ寿命消費率と共に半価幅は増大するが、
高温側の値が不安定。
(と'との寿命率が不明、その影響が大きい可能性あり)
温度や応力の依存性大。

'の規則格子反射による評価が妥当!

ロッキングカーブ半価幅マッピング -劣化度マッピングの可能性-



温度および負荷応力に分布を付けた試験体について、ロッキングカーブ半価幅をマッピング

'の方位ミスオリエンテーションは、材料の部位によるクリープ寿命消費率の違いを反映している。

クリープ劣化度を
実機翼上で
マッピングできる可能性
を示唆。

まとめ

- ・ クリープ劣化度と、'の ロッキングカーブ半価幅が相関。
- ・ 本手法では、環境温度の推定をする必要なしに寿命消費率を推定可能。
- ・ 'の ロッキングカーブ半価幅の増大は、'の方位ミスオリエンテーションの増大。
EBSPの結果
/ '界面転位の増加
- ・ 実機翼面上での寿命消費率マッピングの可能性が示唆された。