

成果報告2

「耐熱金属材料のクリープ寿命評価法」

緒方 隆志

平成28年 2月24日



背景

- ・火力高温機器では、毎日起動-定格-停止運転など頻繁な負荷変動を生じる運転条件下ではクリープ疲労損傷が進行する。
- ・火力高温機器の信頼性の高い運用を維持するには、クリープ疲労条件下でのき裂発生寿命を的確に予測することが重要である。
- ・これまでの研究では、長時間のひずみ保持条件に対する寿命評価法の適用性については、十分に明らかにされていない。

目的

- ・種々の耐熱金属材料のクリープ疲労寿命試験データを収集し、これらの試験結果に対する寿命評価法の適用性を明らかにする。

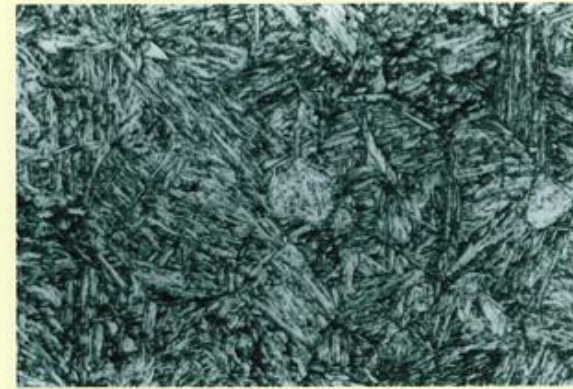


試験に用いた耐熱金属材料

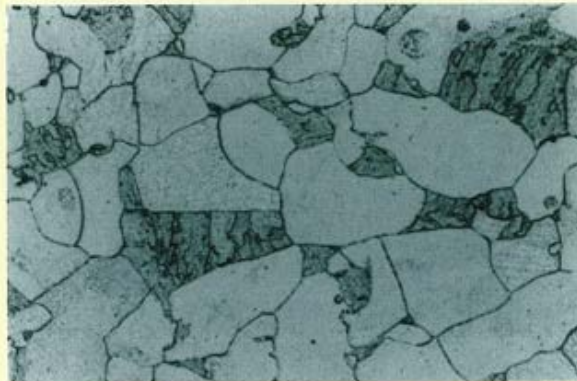
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
CMV	0.3	0.22	0.77	0.012	0.005	0.33	1.03	1.14	0.22
STPA	0.09	0.3	0.36	0.009	0.006	-	2.12	0.91	-
9Cr	0.09	0.24	0.44	0.003	0.001	0.04	8.78	0.94	0.21
12Cr	0.14	0.04	0.47	0.012	0.005	0.58	9.34	1.69	0.17
304SS	0.05	0.47	0.83	0.03	0.009	9.11	18.63	-	0.06
316FR	0.009	0.57	0.86	0.025	0.005	11.25	16.85	-	-



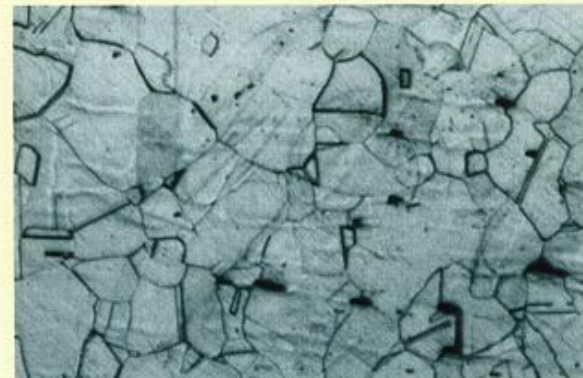
Cr-Mo-V forging steel (CMV)



Mod.12Cr-1Mo steel (12CR)



2.25Cr-1Mo steel (STPA)



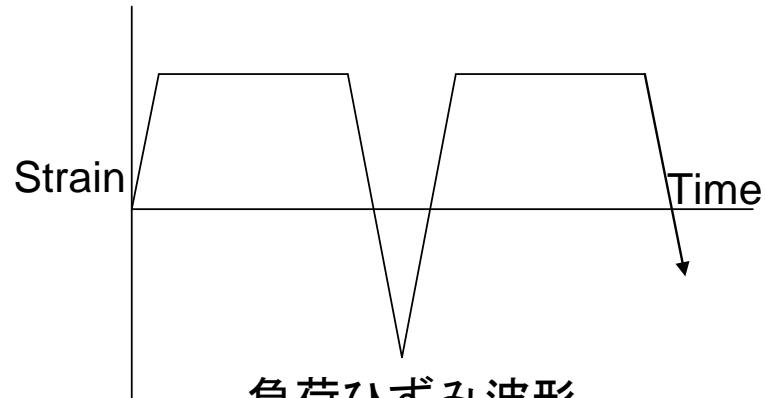
Type 304 stainless steel(304SS)



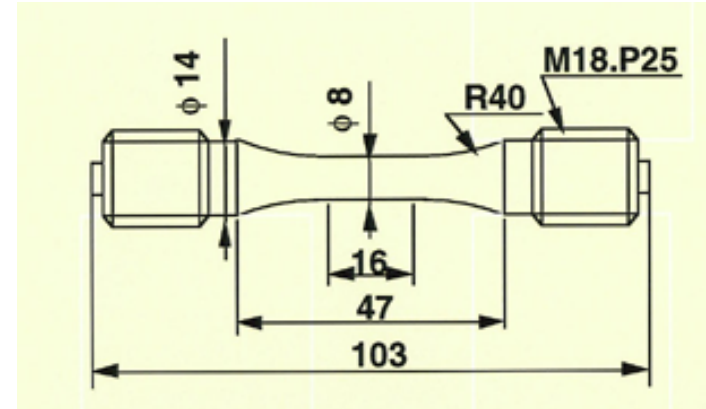
クリープ疲労試験方法

試験温度: 500, 550, 600°C

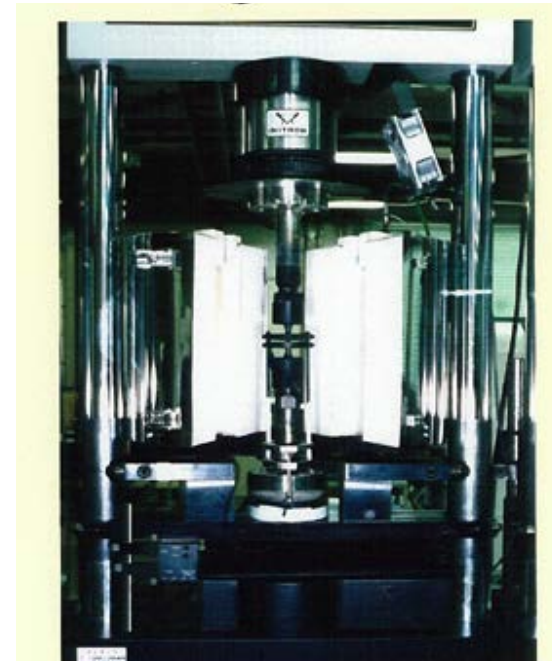
ひずみ保持時間: 0.167 – 100 hours



負荷ひずみ波形



試験片形状

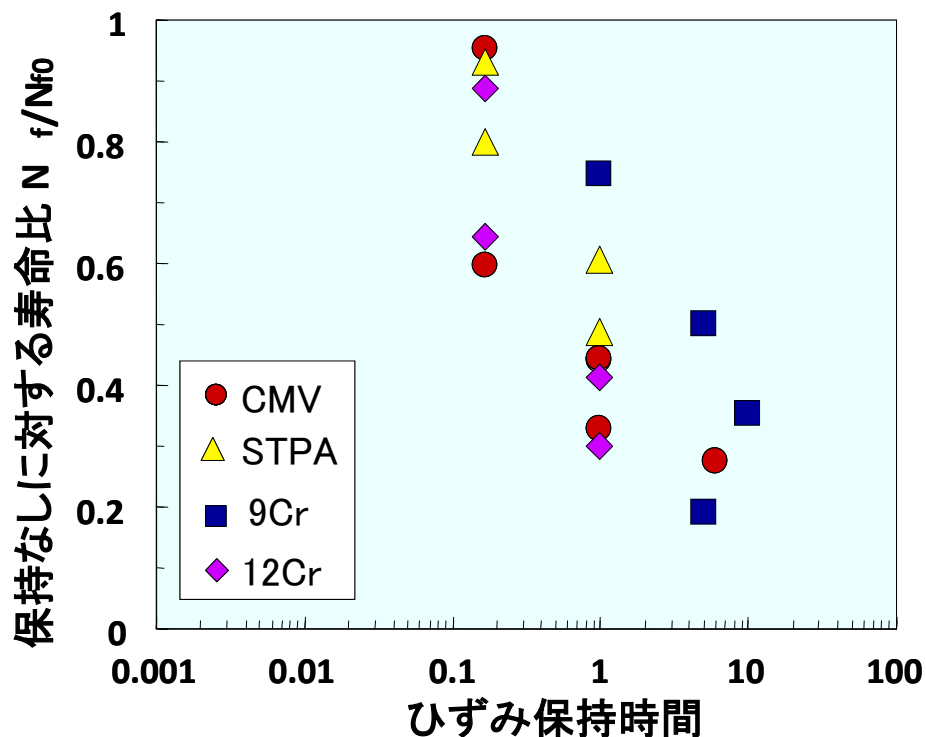


クリープ疲労試験装置

クリープ疲労におけるひずみ保持時間の影響

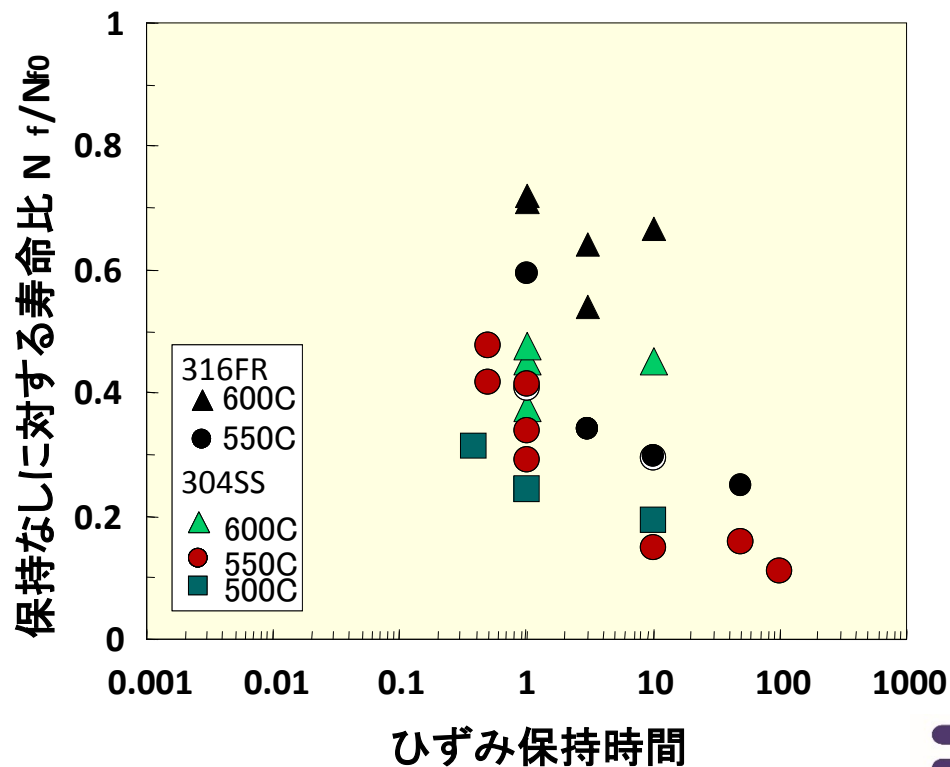
フェライト系合金鋼

- 1Cr1Mo0.25V steel ---- CMV
- 2.25Cr1Mo steel ---- STPA
- 9Cr1Mo0.2V steel ---- 9Cr
- 12Cr1Mo0.2V steel ---- 12Cr

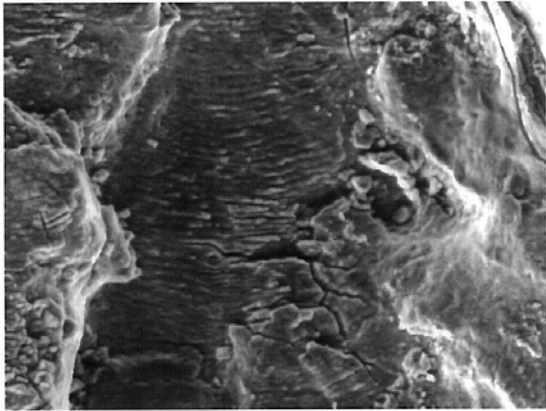


オーステナイト系ステンレス鋼

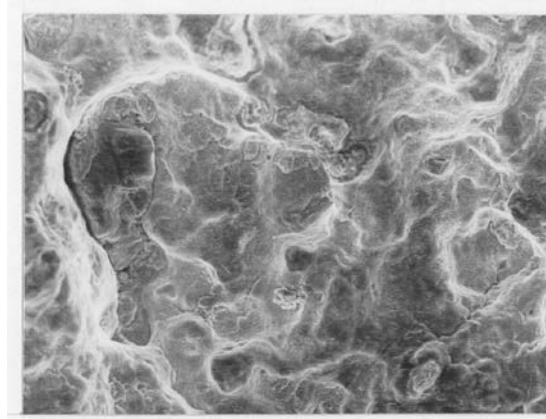
- 304 stainless steel ---- 304SS
- Mod.316 stainless steel ---- 316FR



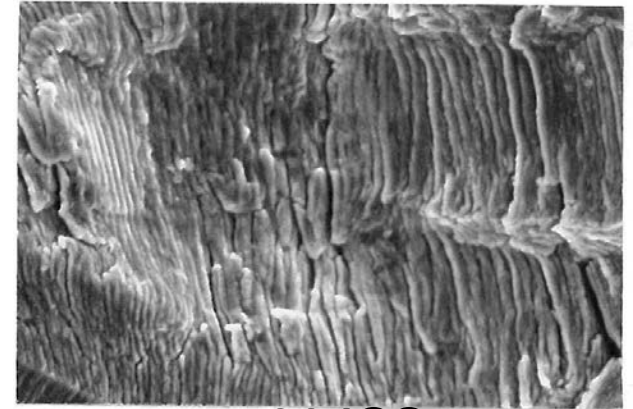
クリープ疲労試験での形成された破面



CMV



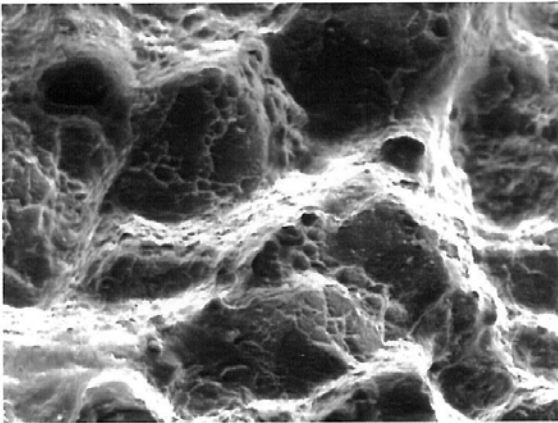
12Cr



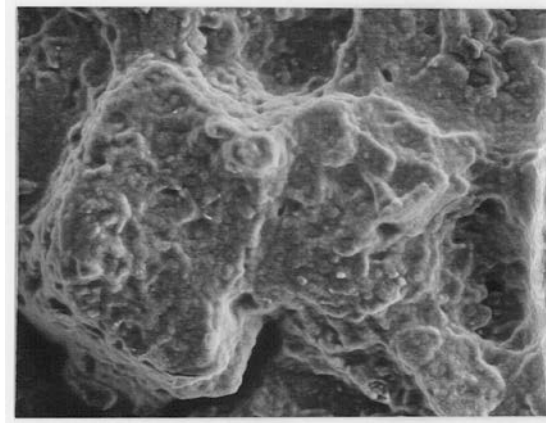
304SS

10分以下のひずみ保持条件の破面

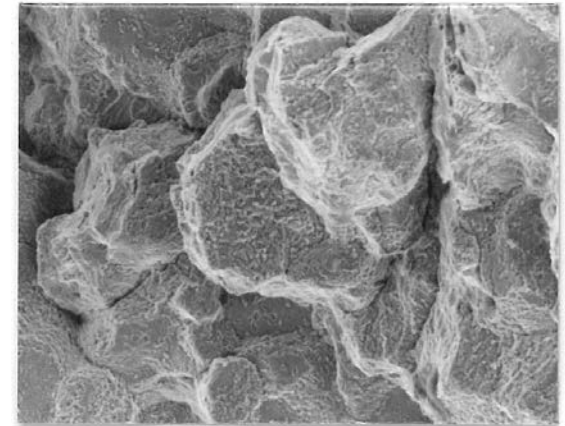
50 μ m



CMV



12Cr



304SS

1時間以上のひずみ保持条件の破面

破損した試験片の縦断面組織(1時間保持)

CMV



STPA

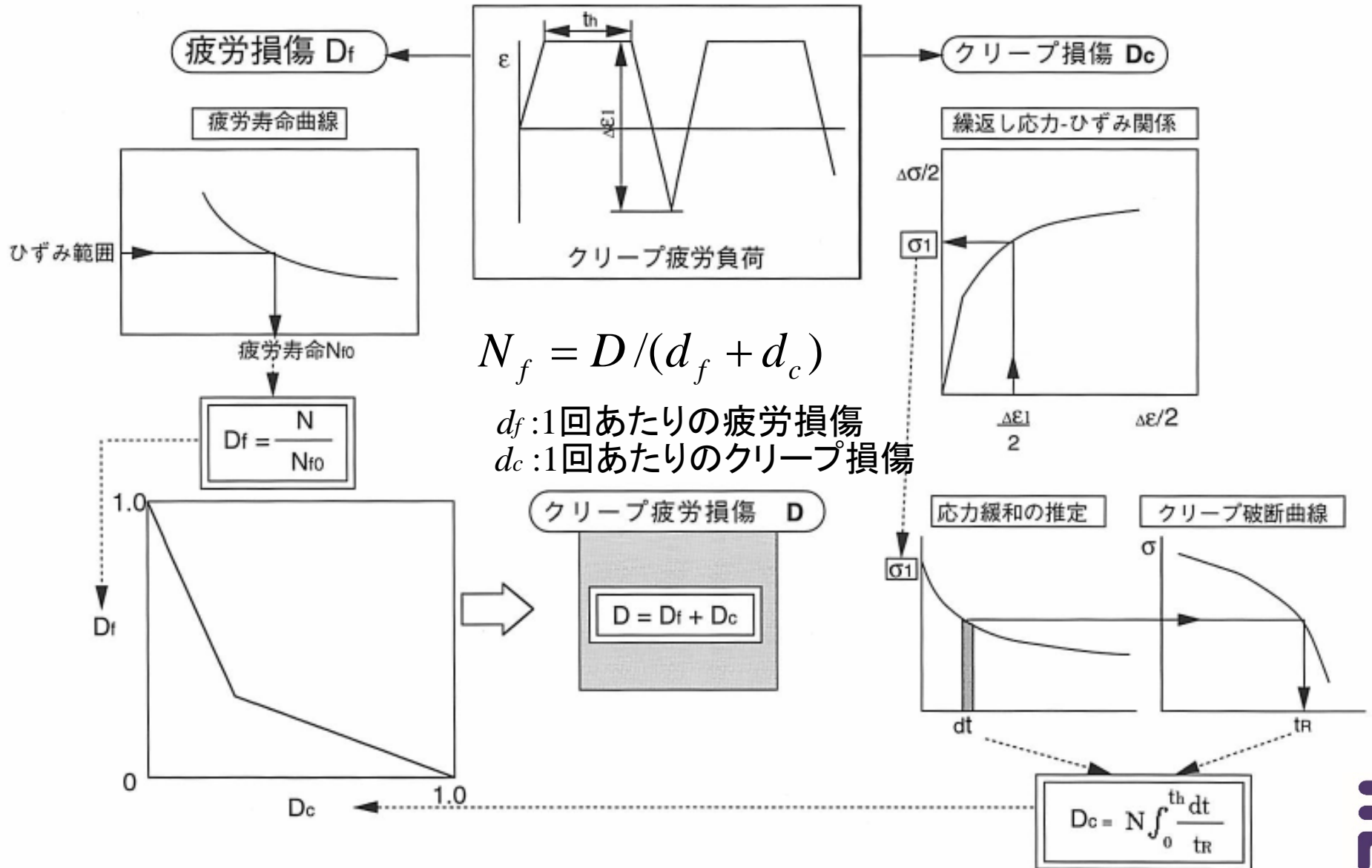


12CR



20μm

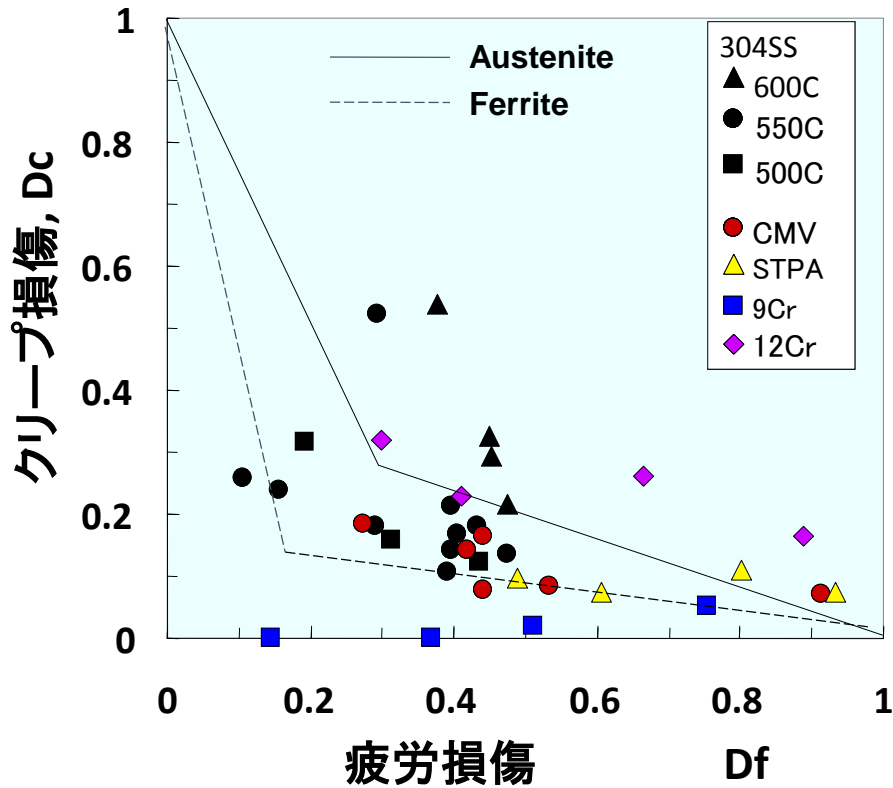
線形損傷則(時間消費則)による寿命評価法



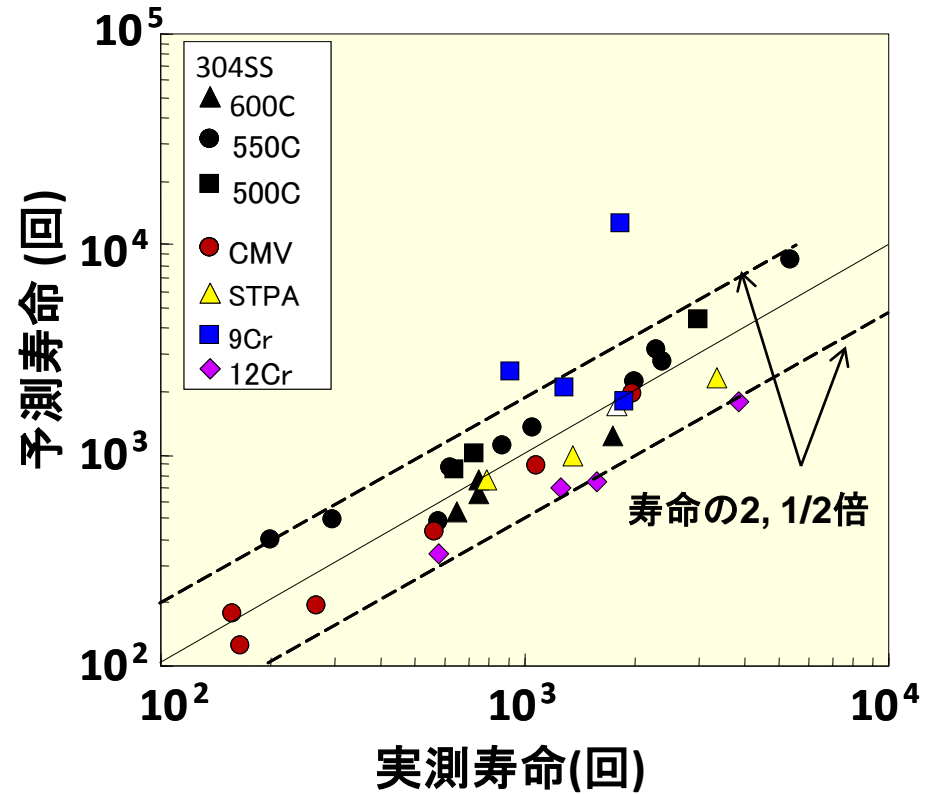
時間消費則(応力基準)に基づく寿命評価

時間消費則

$$D = D_f + D_c \quad D_f = N / N_{f0} \quad D_c = N \left(\int dt / t_r \right)$$



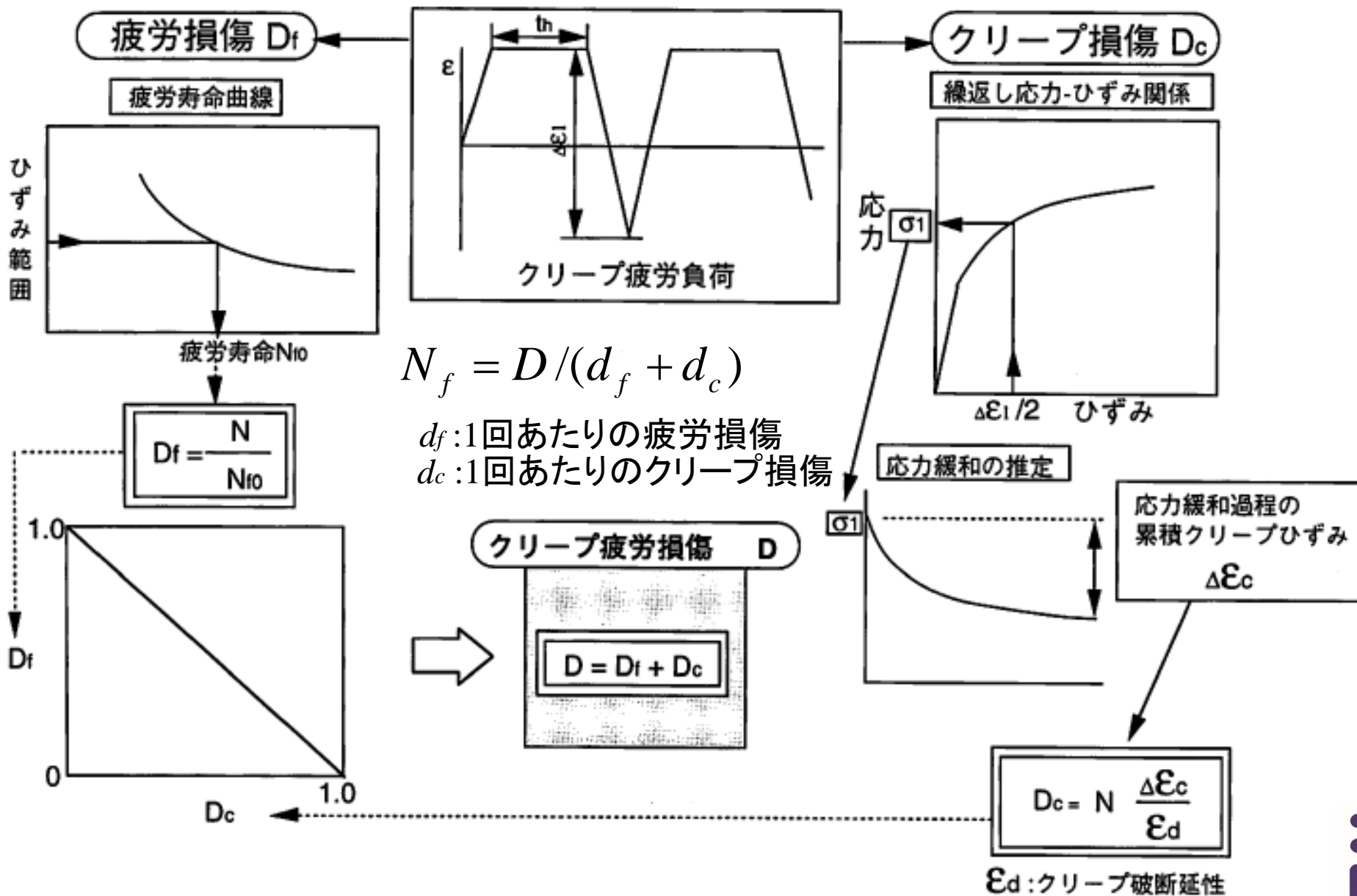
Df - Dc 線図



予測寿命と実測寿命の比較



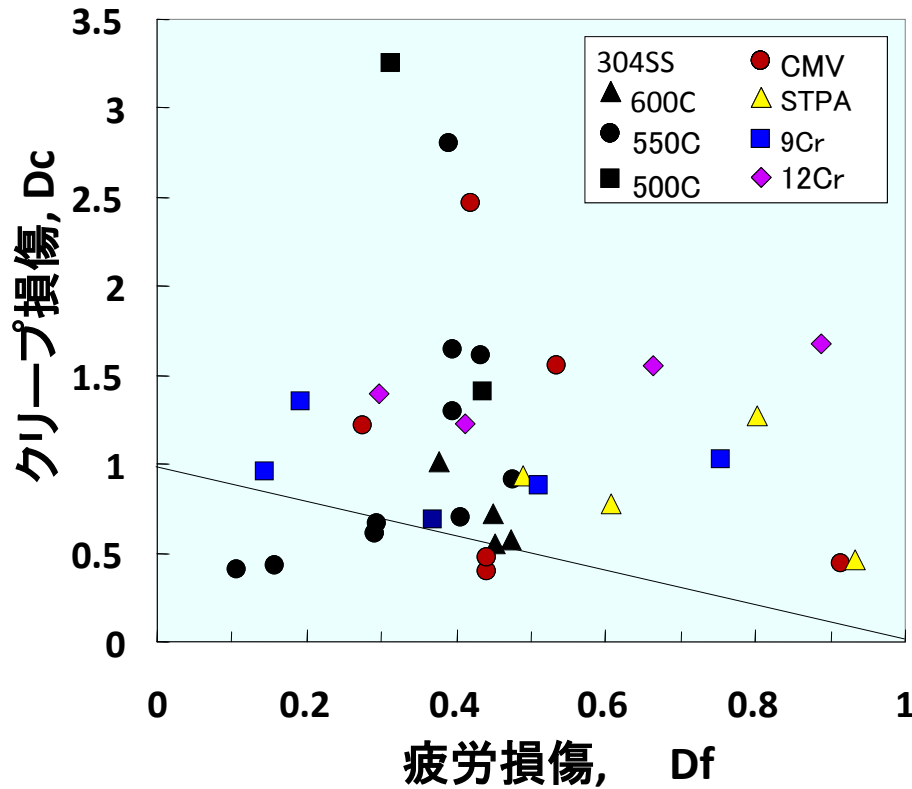
線形損傷則(延性消耗則)による寿命評価法



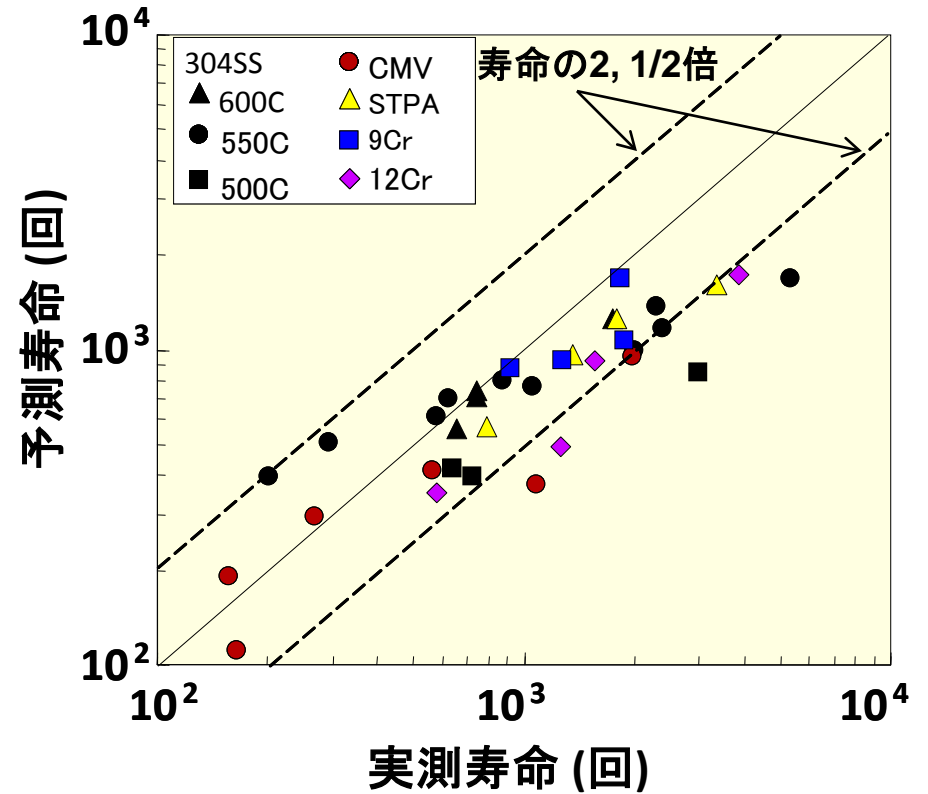
延性消耗則(ひずみ基準)に基づく寿命評価

延性消耗則

$$D = D_f + D_c \quad D_f = N / N_{f0} \quad D_c = \Delta \varepsilon_c / \varepsilon_\phi$$



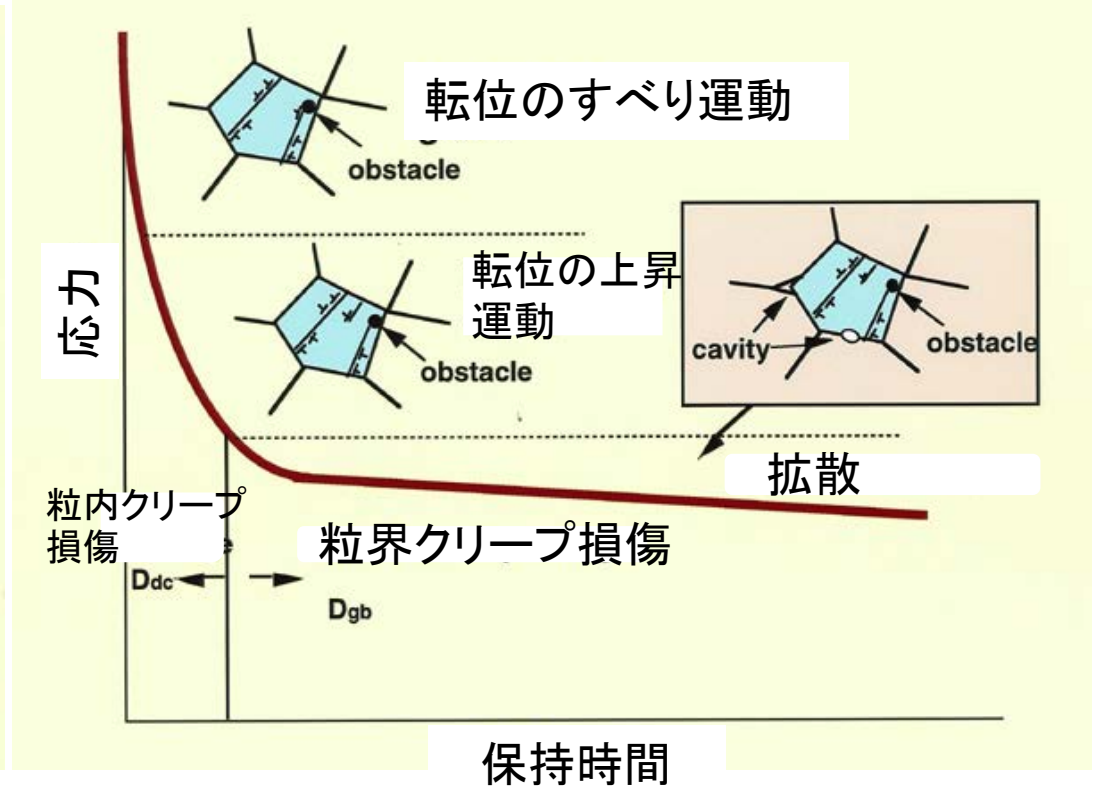
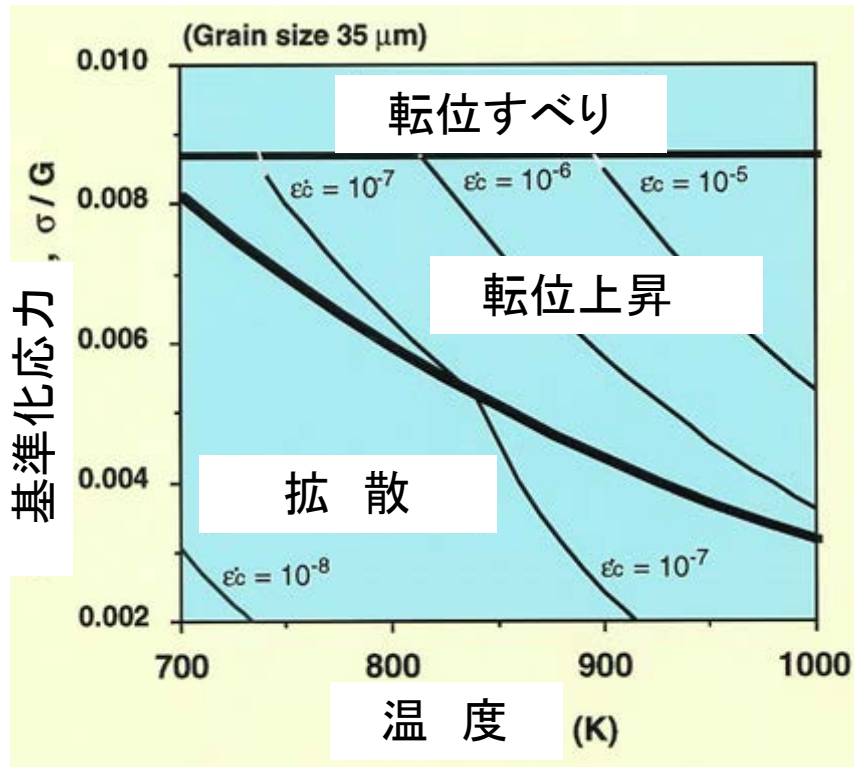
Df - Dc 線図



予測寿命と実測寿命の比較



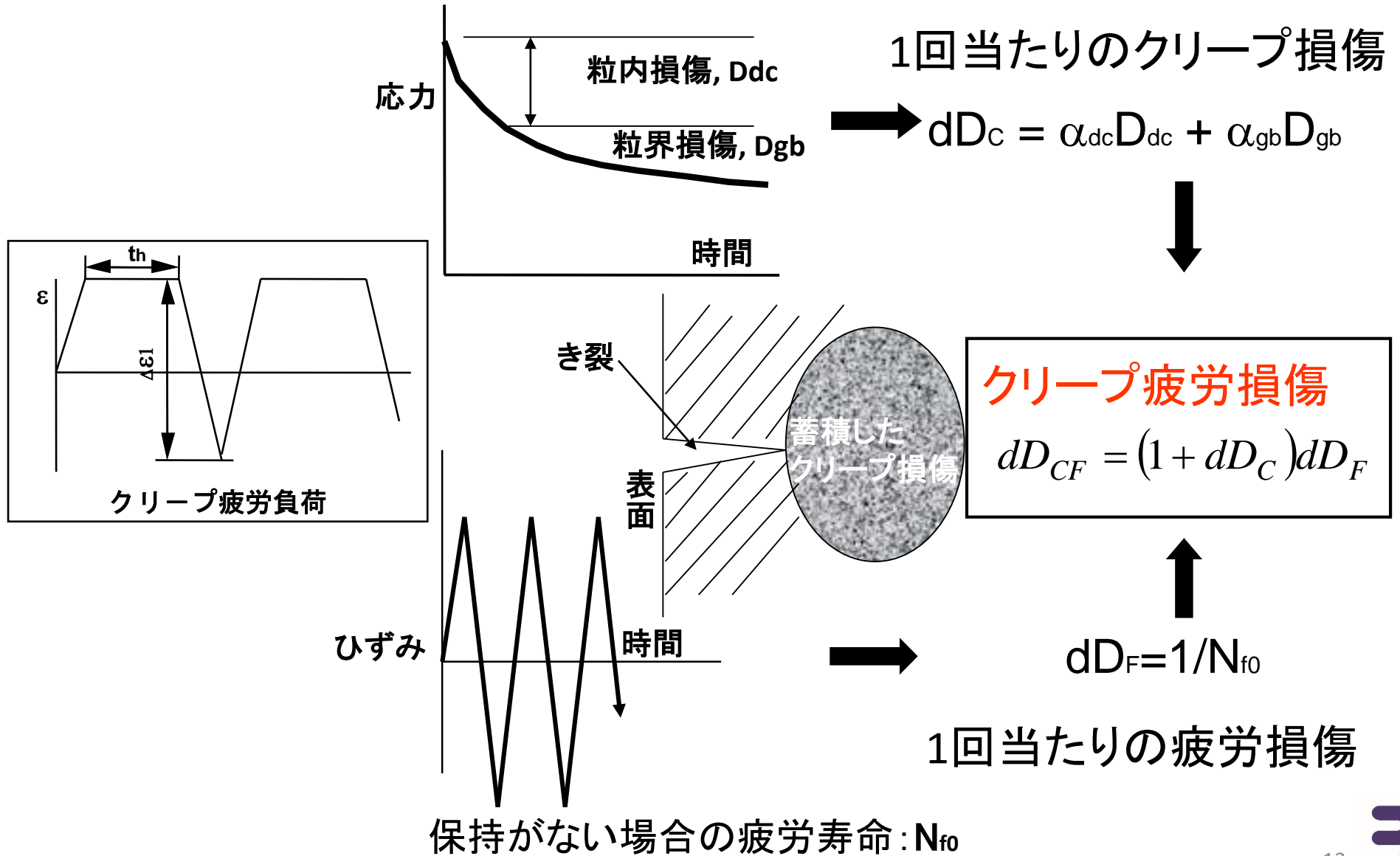
応力緩和過程でのクリープ変形・損傷機構の概念



CrMoV鋼のクリープ変形機構線図

応力緩和過程でのクリープ変形と損傷機構の関係

非線形累積損傷則による寿命評価法



非線形累積損傷則による材料定数の決定

寿命予測式

$$N_f = [-1 \left\{ 1 + 2D_c A \Delta \varepsilon_{in}^m \right\}^{1/2}] / D_c$$

N_f : 疲労寿命 A, m : 材料定数

$\Delta \varepsilon_{in}$: 非弾性ひずみ範囲

$$D_c = (\alpha_{dc} D_{dc} + \alpha_{gb} D_{gb})$$

$$D_{dc} = \frac{\Delta \varepsilon_{dc}}{\varepsilon_f}, \quad D_{gb} = \frac{\Delta \varepsilon_{gb}}{\varepsilon_r}$$

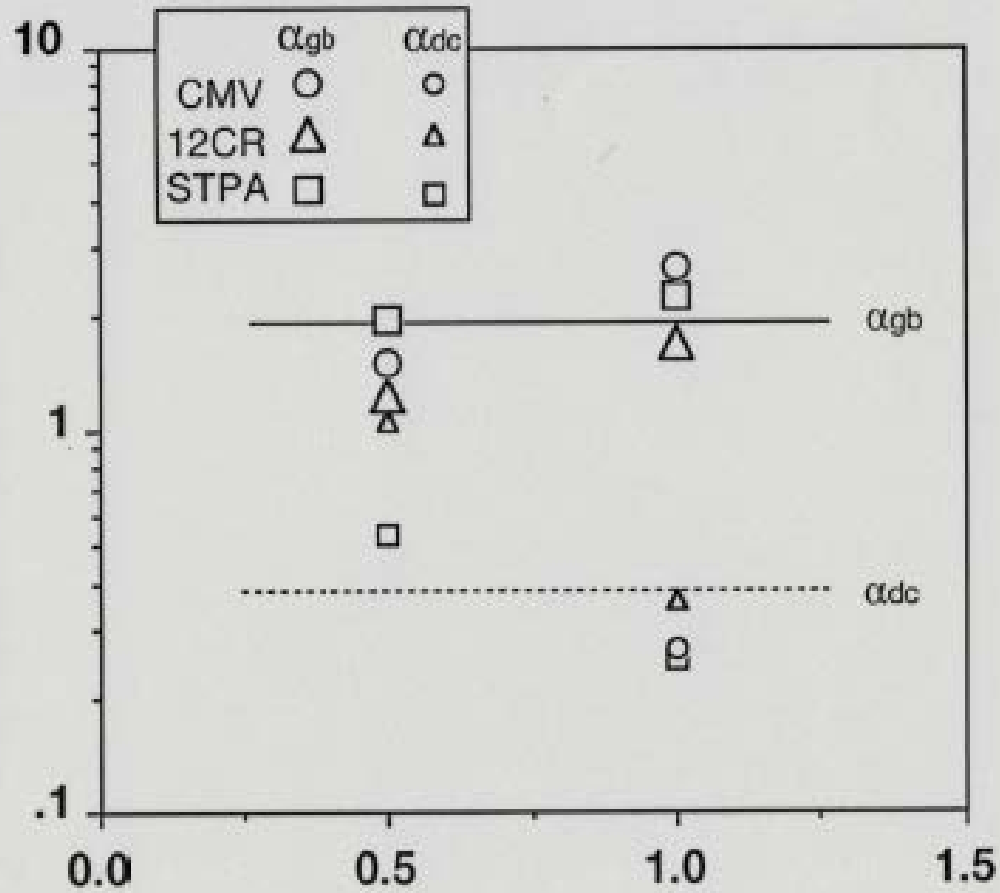
$\Delta \varepsilon_{dc}$: 粒内クリープひずみ

$\Delta \varepsilon_{gb}$: 粒界クリープひずみ

ε_f : 短時間クリープ破断
伸び

ε_r : 真クリープ破断ひずみ
($\ln(A/A_0)$)

粒内および粒界クリープ損傷係数, α_{dc}, α_{gb}



全ひずみ範囲

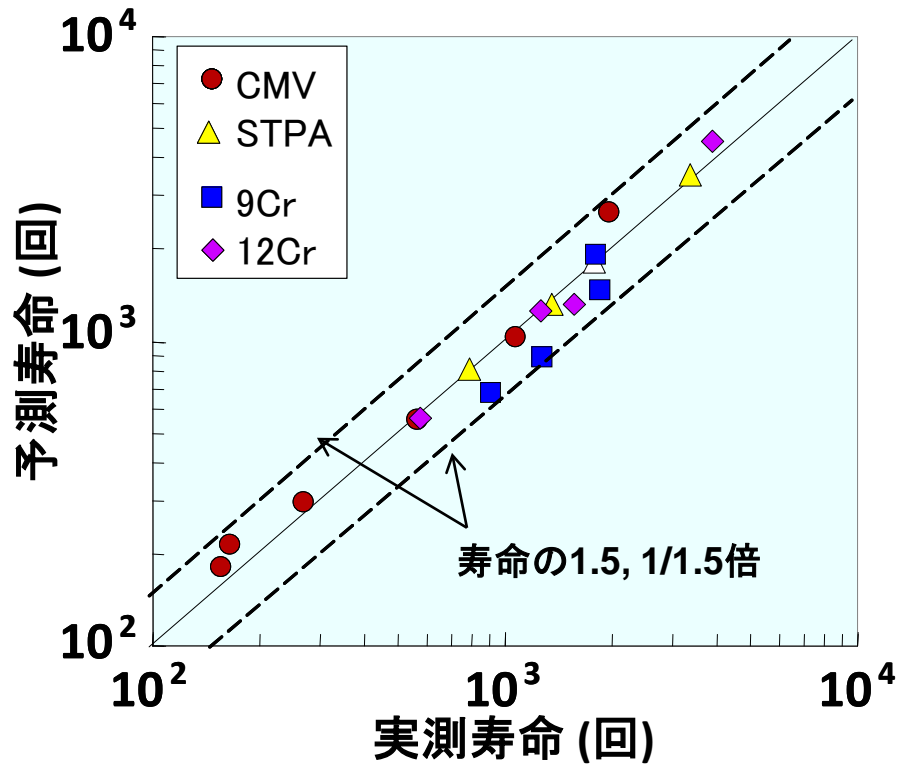


非線形累積損傷則に基づく寿命評価

フェライト系合金鋼

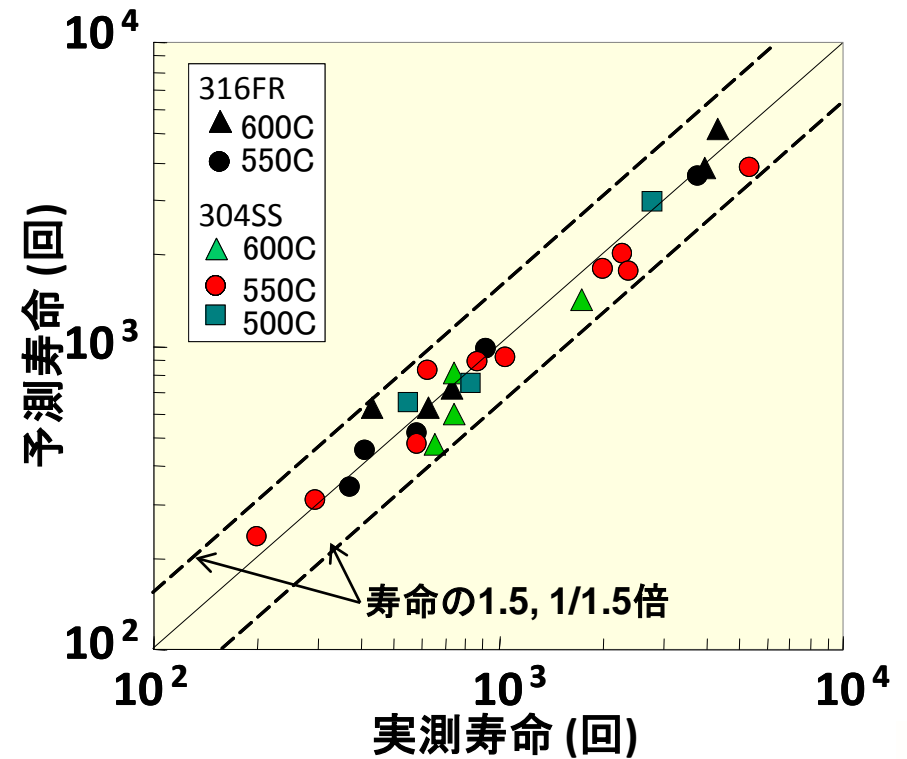
温度: 600°C

	A	m	α_{dc}	α_{gb}	ϵ_f	ϵ_r
CMV	2.14	-1.15			1.20	0.03
STPA	4.55	-1.20	0.38	2.0	1.60	0.10
9Cr	1.32	-1.56			1.20	0.10
12Cr	3.85	-1.20			1.60	0.03



オーステナイト系ステンレス鋼

	温度	A	m	α_{dc}	α_{gb}	ϵ_f	ϵ_r
304SS	500	0.608	-1.15		6.0	0.22	0.06
	550	0.204	-1.20	0.38	4.0	0.5	0.10
	600	0.127	-1.56		2.0	0.92	0.10
316FR	550	0.106	-1.20	0.38	4.0	0.25	0.10
	600	0.045	-2.00		2.0	0.50	0.20

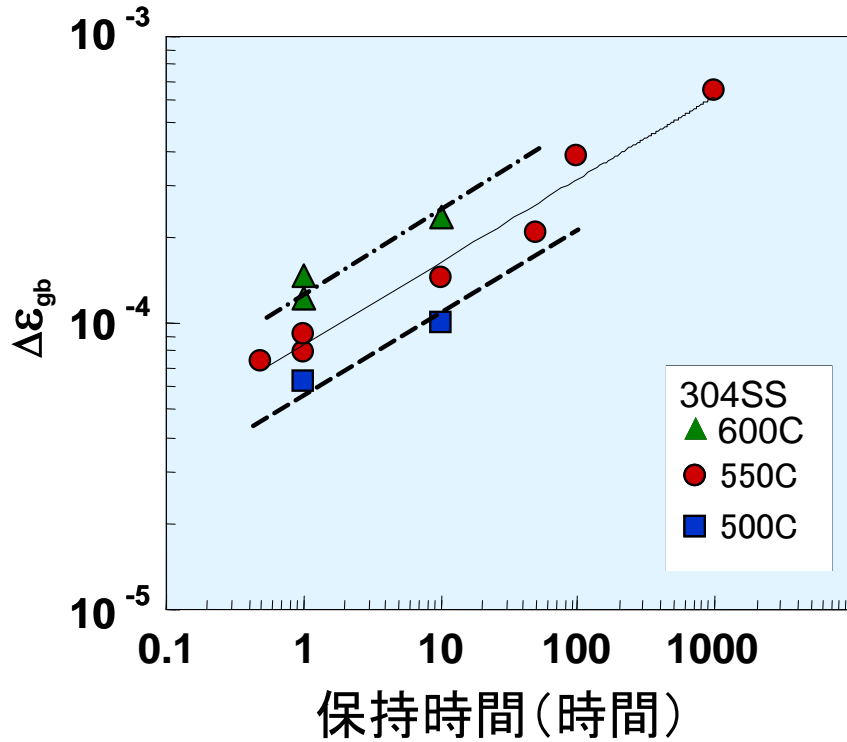


非線形累積損傷則による寿命評価の簡便法

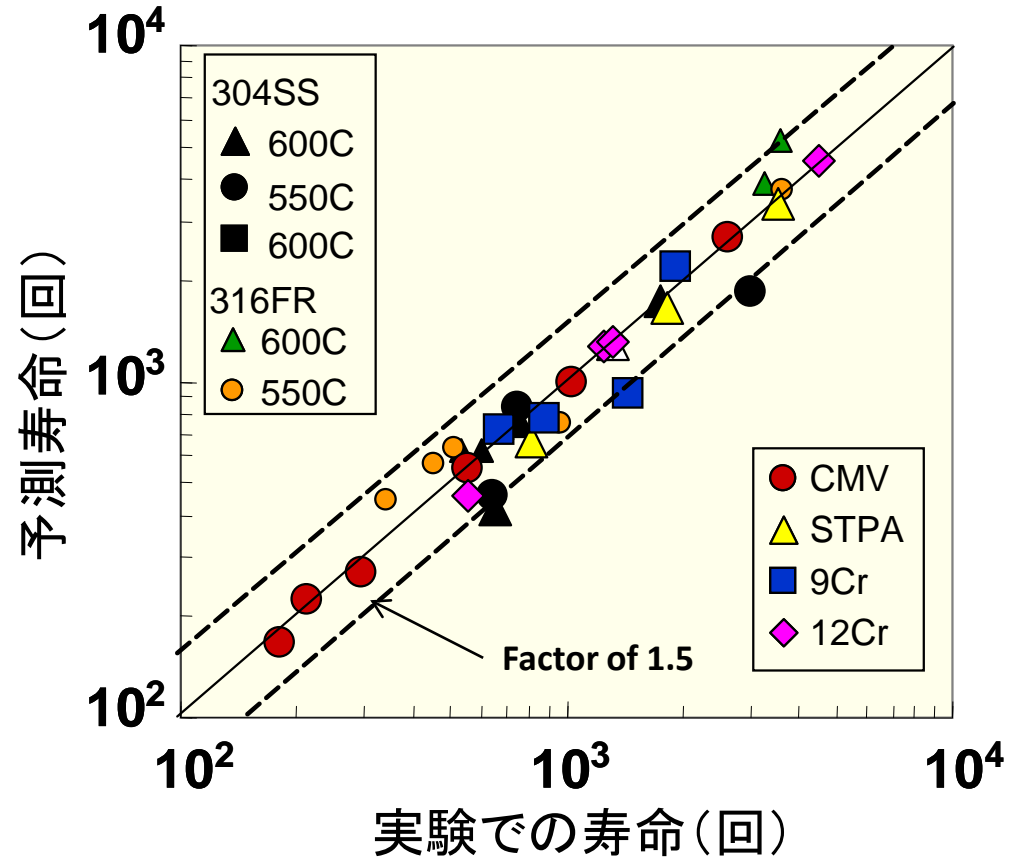
温度およびひずみ保持時間からの $\Delta\varepsilon_{dc}$ and $\Delta\varepsilon_{gb}$ の算出式

$$\Delta\varepsilon_{dc} = (0.75\Delta\varepsilon + 0.25)(1.15 \times 10^{-6} T - 0.0004)t_h^{0.0667}$$

$$\Delta\varepsilon_{gb} = 1.6 \times 10^{-16} \Delta\varepsilon t_h^{0.29} T^{4.29}$$



$\Delta\varepsilon_{gb}$ と保持時間の関係



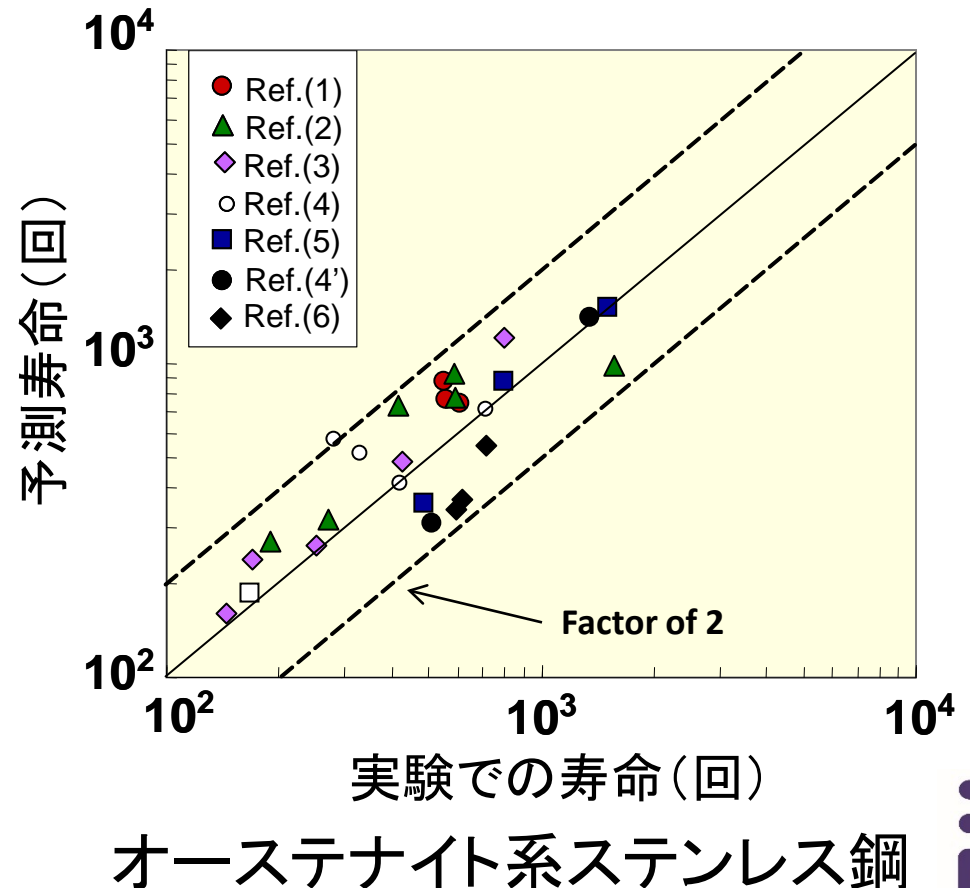
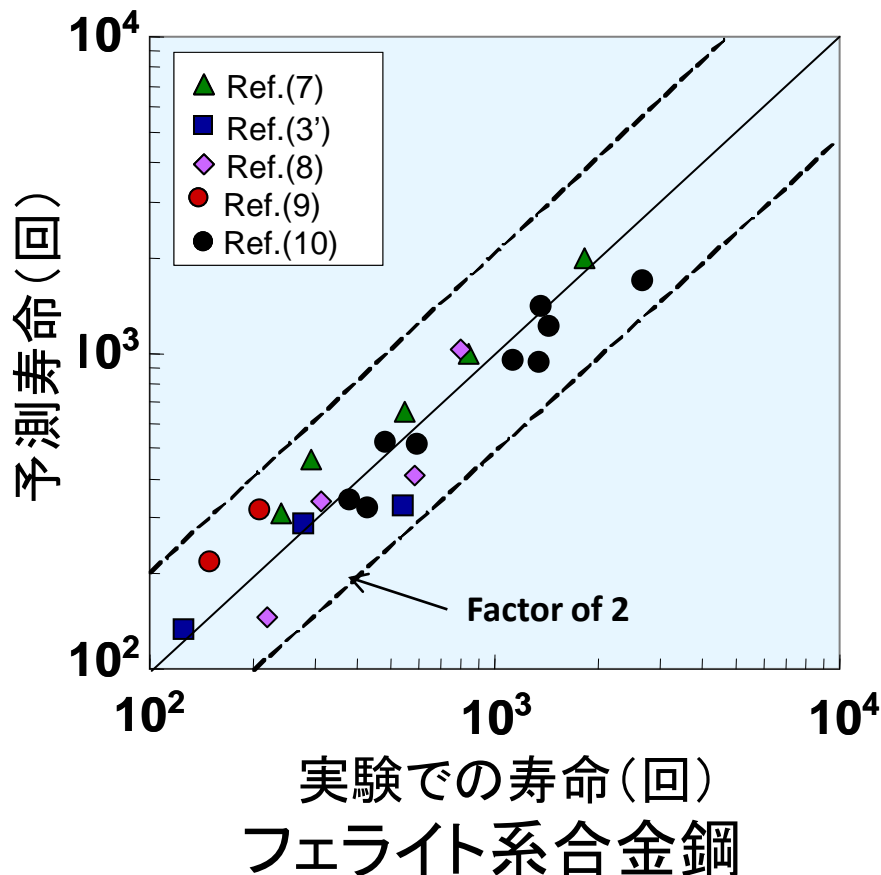
簡便法による寿命予測結果



簡便評価法による外部機関データの寿命予測

Author	Material	Hold time
Ref(7) NIMS	CrMoV	1.0
Ref(3)' Endo et. al.	CrMoV	1.0-24.0
Ref(8) Kadoya	CrMoV	1.0-24.0
Ref(9) Priest et. al.	CrMoV	3.0-16.0
Ref(10) NIMS	9Cr1Mo	1.0

Author	Material	Hold time
Ref(1) Mayer et. al.	304SS	1.0
Ref(2) Brinkman et. al	304SS	0.5-1.0
Ref(3) Endo et. al.	304SS	1.0-6.0
Ref(4) Koto et. al.	304SS	1.0-6.0
Ref(5) NIMS	304SS	1.0
Ref(4)' Koto et. al.	316SS	1.0-6.0
Ref(6) Wood et. al.	316SS	24.0



まとめ

1. 耐熱金属材料のクリープ疲労寿命は、保持時間が長くなるにつれて低下するが、その度合いは材料、温度、ひずみ範囲によって異なり、保持時間だけから寿命を予測することは困難であった。
2. 長時間ひずみ保持クリープ疲労試験に対する時間消費則および延性消耗則による予測結果のばらつきは、実験結果倍半分を超え、精度の高い予測結果が得られなかった。一方、応力緩和過程でのクリープ損傷機構と疲労とクリープの相互作用を考慮した非線形累積損傷則によって、クリープ疲労寿命が精度よく予測された。
3. 試験温度、ひずみ範囲、保持時間から寿命を予測する簡便非線形累積損傷則を適用して、公表されている耐熱金属材料のクリープ疲労寿命を倍半分の精度で予測することができた。

