

フェライト鋼の基底クリープ強度特性に及ぼす 微量合金元素の影響

木村 一弘*・九島 秀昭*・八木 晃一*・田中 千秋*²

Effects of Minor Alloying Elements on Inherent Creep Strength Properties of Ferritic Steels

Kazuhiro KIMURA, Hideaki KUSHIMA, Koichi YAGI and Chiaki TANAKA

Synopsis : Creep rupture strength properties of carbon steel have been analyzed from a viewpoint of inherent creep strength, and the effects of minor alloying elements on inherent creep strength have been investigated. Inherent creep strength, which is a new concept proposed by the authors, is an essential strength property independent of both microstructural morphology and time, and the governing factor of long-term creep strength property. Large heat-to-heat variation of inherent creep strength observed for the carbon steel has been cleared to be caused by a remarkable improving effect of Mo on that. However, strengthening effect of Mo has been speculated to saturate at a slight amounts of about 0.03mass%. It has been concluded that an inherent creep strength of ferritic steel is governed by solid solution strengthening effect due to such as C and Mo, and the maximum inherent creep strength is obtained by the addition of C and about 0.03mass% of Mo. Moreover, it has been suggested that the inherent creep strength of many ferritic heat resistant steels are maximum level for ferritic steels, consequently, creep rupture strength of those converges to an almost same level at the long-term region.

Key words : carbon steel ; ferritic heat resistant steel ; inherent creep strength ; long-term creep strength ; Mo ; carbon ; solid solution strengthening ; Larson-Miller parameter.

1. 緒言

長時間クリープ強度は発電プラント等で長期間使用される高温構造部材にとって、最も基礎的で重要な材料特性である。火力発電所や化学プラント等の高温構造部材の設計には一般に10万時間クリープ破断強度が参照されるが、一部の国では20万時間クリープ破断強度に基づいた設計も行われている¹⁾²⁾。したがって、プラントの高い安全性を維持するためには、材料の長時間クリープ強度特性を精度良く、的確に把握することが重要である。

以上の観点から、金属材料技術研究所では40種類を超える実用耐熱金属材料について最長10万時間までのクリープ破断データを取得することを目的としたクリープデータシートプロジェクトを実施している³⁾。すでに歴大な長時間クリープデータが得られているが、それらのデータに基づいてフェライト系耐熱鋼の長時間クリープ強度特性を系統的に解析した結果、大変興味深い知見を見だし、それを基底クリープ強度概念として報告している⁴⁾⁵⁾。基底クリープ強度は微細組織形態や時間の経過に依存しない強度特性である。第二相の析出・分散や合金元素の固溶による強化、

あるいは加工硬化等の種々の因子によりクリープ強度は向上する。しかし、クリープ変形が問題となるような高温では拡散が活発に生ずるため材料の微細組織形態は不安定であり、析出相の凝集粗大化等の回復が生ずる。そのため、微細組織形態に依存した強化因子の効果は時間の経過に伴い徐々に減少し、クリープ強度は低下する。微細組織が完全に焼戻されるだけの十分な時間が経過した高温・長時間側では微細組織形態に依存した強化因子の効果は消滅し、クリープ強度は時間の経過に依存しない固有の強度特性となる。以上の考えが基底クリープ強度概念であり、微細組織形態に依存しない安定な強度特性が基底クリープ強度である。

長時間のクリープ強度特性を実験で求めるためには多大な労力と時間が必要であり、短時間データからの外挿により高い精度で推定することは困難である。しかし、基底クリープ強度概念により長時間クリープ強度特性を的確かつ容易に評価することが可能になると考えられる。そのためには基底クリープ強度の支配因子を解明することが重要である。基底クリープ強度に影響を及ぼす因子としては、1) マトリックスの強度、2) 結晶粒径、3) 酸化物分散強化

平成6年12月19日受付 平成7年3月3日受理 (Received on Dec. 19, 1994; Accepted on Mar. 3, 1995)

* 金属材料技術研究所環境性能研究部 (Environmental Performance Division, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305)

* 2 金属材料技術研究所環境性能研究部 (現: 材料設計研究部) (Environmental Performance Division, now Materials Design Division, National Research Institute for Metals)

等が考えられる。酸化物分散強化はごく一部の材料に関する問題であることから、実用材料の基底クリープ強度特性の支配因子を解明するためには、マトリックスの強度に着目して基底クリープ強度を検討することが重要である。

そこで本研究では、フェライト系耐熱鋼と同じフェライトマトリックスを有し、実用耐熱鋼に比べて合金元素添加量の少ない炭素鋼を供試材とし、基底クリープ強度に及ぼす微量合金元素の影響を調べるとともに、実用耐熱鋼のクリープ強度特性との比較検討を行い、基底クリープ強度の支配因子に関して検討を行った。

2. 供試材及び実験方法

供試材は未使用のボイラ・熱交換器用鋼管から採取した9ヒートの炭素鋼(JIS STB410)⁹⁾であり、化学組成をTable 1に示す。供試鋼はオーステナイト領域から空冷されており、フェライトとパーライトの混合組織を有する。供試鋼の673, 723及び773Kで最長約10万時間までのクリープ破断データを基底クリープ強度の観点から解析し、基底クリープ強度特性の支配因子に関して検討を行った。

クリープ破断強度の比較には0.012mass%Cの低炭素鋼⁷⁾、

0.3mass%Cの炭素鋼(JIS SB480)⁸⁾に加え、前報^{4),5)}で検討を行った10鋼種の耐熱鋼^{9)~18)}を用いた。低炭素鋼を除くすべてのクリープ破断データは金材技研クリープデータシートに掲載されているものであり、耐熱鋼に関しては複数ヒートの中から平均的なクリープ破断強度特性を有する単一のヒートを抽出して解析に供した。比較検討に用いた金鋼種の化学組成もTable 1に併せて示す。クリープ破断強度の評価にはLarson-Millerパラメータを用い、パラメータ定数はすべての鋼種について20とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 クリープ破断強度特性

供試鋼の673, 723及び773Kでのクリープ破断データをFig. 1に示す。いずれの温度、応力条件においてもクリープ破断時間は1桁程度の広い範囲でばらついている。

Fig. 1に示した炭素鋼のクリープ破断データを低合金鋼の0.5Mo鋼(JIS STBA12)から高合金鋼の12Cr 1 Mo 1 W0.3V鋼(JIS SUH616B)まで10鋼種の耐熱鋼のデータ^{9)~18)}と併せてLarson-Millerパラメータで整理してFig. 2に示す。なお、酸化によるクリープ破断寿命の著しい低下が認められ

Table 1. Chemical compositions(mass%)of steels studied.
Heat: Reference code used in NRIM Creep Data Sheets.

Steels	Heat	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	W	V	Al	N
Low carbon steel		0.012	tr.	0.03	—	—	0.07	—	—	—	—
JIS STB 410	CAA	0.20	0.31	0.59	0.046	0.011	0.05	—	—	0.006	0.0056
	CAB	0.20	0.28	0.60	0.045	0.010	0.05	—	—	0.005	0.0066
	CAC	0.20	0.29	0.55	0.054	0.012	0.05	—	—	0.004	0.0058
	CAG	0.21	0.21	0.62	0.046	0.019	0.05	—	—	0.008	0.003
	CAH	0.24	0.24	0.64	0.074	0.019	0.05	—	—	0.011	0.006
	CAJ	0.20	0.20	0.47	0.056	0.010	0.07	—	—	0.005	0.011
	CAL	0.21	0.32	0.48	0.017	0.006	0.08	—	—	0.004	0.0044
	CAM	0.20	0.31	0.50	0.017	0.006	0.09	—	—	0.004	0.0037
	CAN	0.23	0.32	0.53	0.022	0.005	0.07	—	—	0.005	0.0051
JIS SB 480	CaC	0.28	0.30	0.70	0.07	0.02	0.22	—	—	0.004	0.0097
	CaD	0.20	0.22	0.68	0.11	0.03	0.23	—	—	0.010	0.0077
	CaE	0.34	0.22	0.70	0.10	0.03	0.20	—	—	0.002	0.0107
	CaF	0.28	0.19	0.80	0.06	0.22	0.04	—	—	0.016	0.0073
	CaG	0.29	0.20	0.93	0.03	0.36	0.06	—	—	0.018	0.0045
	CaH	0.29	0.22	1.00	0.07	0.34	0.05	—	—	0.011	0.0035
	CaM	0.22	0.22	0.82	0.06	0.18	0.08	—	—	0.005	0.0082
	CaN	0.26	0.23	0.74	0.04	0.15	0.07	—	—	0.007	0.0108
JIS STBA 12	LAA	0.11	0.30	0.48	—	0.51	—	—	—	0.005	0.0078
JIS STBA 20	MFE	0.12	0.25	0.44	0.71	0.52	0.06	—	—	0.004	0.0058
JIS STBA 22	MBM	0.10	0.31	0.51	1.03	0.53	0.04	—	—	0.009	0.0076
JIS STBA 23	MCH	0.10	0.70	0.47	1.24	0.56	0.07	—	—	0.009	0.011
ASTM A542	MnA	0.15	0.39	0.44	2.27	1.00	0.04	—	—	0.017	0.006
ASTM A470-8	VaA	0.28	0.20	0.72	1.02	1.12	0.20	—	0.27	0.002	0.0075
JIS STBA 25	MDE	0.11	0.37	0.45	4.68	0.50	0.05	—	—	0.008	0.0159
JIS STBA 26	MEC	0.09	0.45	0.45	9.15	0.93	0.06	—	—	0.009	0.017
JIS SUS 403-B	RBC	0.14	0.31	0.46	12.00	0.04	0.05	—	—	0.008	0.0167
JIS SUH 616-B	RAH	0.25	0.35	0.70	11.9	0.99	0.03	0.95	0.28	0.027	0.021

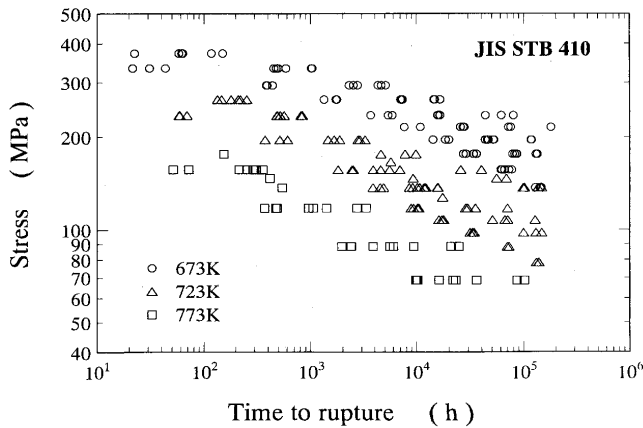


Fig. 1. Creep rupture strength properties of JIS STB 410 at 673, 723 and 773K.

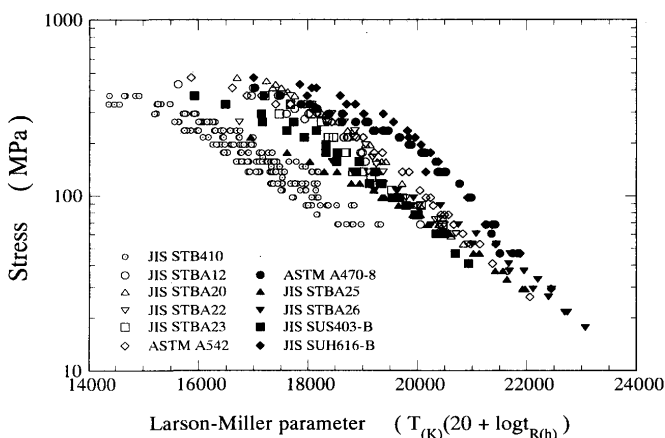


Fig. 2. Creep rupture strength properties of carbon steel (JIS STB 410) and 10 different types of ferritic heat resistant steels.

た一部のデータ[†]は除外してある。耐熱鋼のクリープ破断強度は100MPa以上の高応力域では鋼種により大きく異なり、破断寿命に換算して4桁あるいはそれ以上の広い範囲でばらついている。しかし、応力の低下に伴い破断強度のばらつきの程度は減少し、低応力の高温・長時間側ではすべての鋼類の破断強度が破断寿命に換算して1桁程度の狭い範囲に収斂する傾向が認められる。この結果から前報⁴⁾⁵⁾では、フェライト系耐熱鋼の基底クリープ強度は鋼種の違いを問わず同程度であると推察した。一方、炭素鋼のクリープ破断強度特性は耐熱鋼とは大きく異なり、以下の特徴が認められる。

- 1) 炭素鋼のクリープ破断強度は耐熱鋼の破断強度に比べ小さく、破断寿命は1～2桁程度短い。
- 2) 炭素鋼のクリープ破断強度の応力依存性（データプロットの勾配）は約200MPa以下の広い応力範囲でほぼ一定

であり、耐熱鋼が低応力・長時間側で示す共通の破断強度の応力依存性と同程度である。

3) 炭素鋼のクリープ破断強度は破断寿命に換算して1桁程度の範囲でばらついている。化学組成の大きく異なる10鋼種の耐熱鋼のクリープ破断強度が低応力側では同程度の範囲内に収斂することと比較すると、炭素鋼のクリープ破断強度のばらつきの程度はかなり大きい。

3・2 炭素鋼の基底クリープ強度特性

供試鋼のクリープ破断データをヒート別にしてFig. 3に示す。クリープ破断強度は破断寿命に換算して1桁程度の広い範囲でばらついており、ばらつき範囲は低応力・長時間側でも減少する傾向は認められない。しかし、個々のヒートに関してはクリープ破断強度に大きなばらつきは認められない。したがって、本供試鋼のクリープ破断強度が大きくばらつくのは、クリープ破断強度のヒート間差が大きいことに起因するものである。

本供試鋼の平均的なクリープ破断強度を示すCACヒートの応力-破断時間曲線をFig. 4に示す。最も低温の673Kでは応力の低下に伴い曲線の勾配は単調に増大する。しかし、723Kでは応力が約150MPa以下に低下すると曲線の勾配は逆に減少し、逆S字型の形態を示す。応力-破断時間曲線の逆S字型の形態から、応力が約150MPa以下の、723Kでは約5,000hを、また773Kでは数百時間を超えた長時間側ではクリープ強度が本供試鋼の基底クリープ強度にまで低下しているものと推察される。

Fig. 4のデータをLarson-Millerパラメータで整理してFig. 5に示す。なお、基底クリープ強度に相当すると推察される応力150MPa以下でのクリープ破断データに関する回帰直線を同図に併せて示す。本供試鋼のクリープ破断データはLarson-Millerパラメータで整理することができ、とくにクリープ

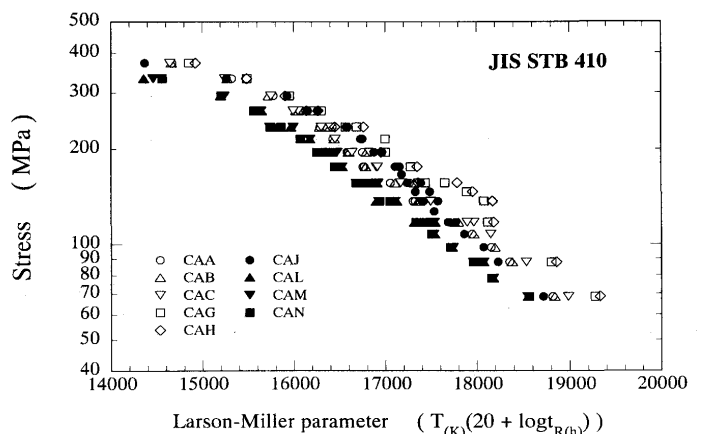


Fig. 3. Creep rupture strength properties of carbon steel (JIS STB 410).

[†] JIS STBA22とSTBA23に関しては873Kでは約10,000h以上、923Kでは約1,000h以上の長時間側で酸化によるクリープ破断寿命の著しい低下が認められた。他の低Cr鋼であるJIS STBA12とSTBA20に関しては酸化の影響が顕著となる高温・長時間側のデータがなく、ASTM A542とA470-8は平行部径が10mmの大きなサイズの試験片を用いているため、本試験範囲内では顕著な酸化の影響は認められなかった。

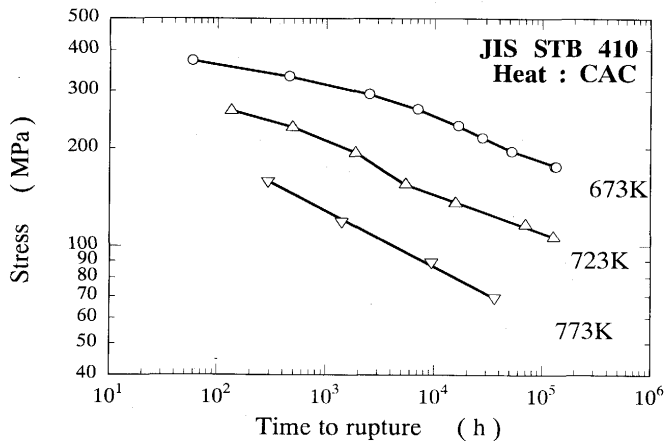


Fig. 4. Stress-time to rupture curves of the CAC heat of carbon steel (JIS STB 410) at 673, 723 and 773K.

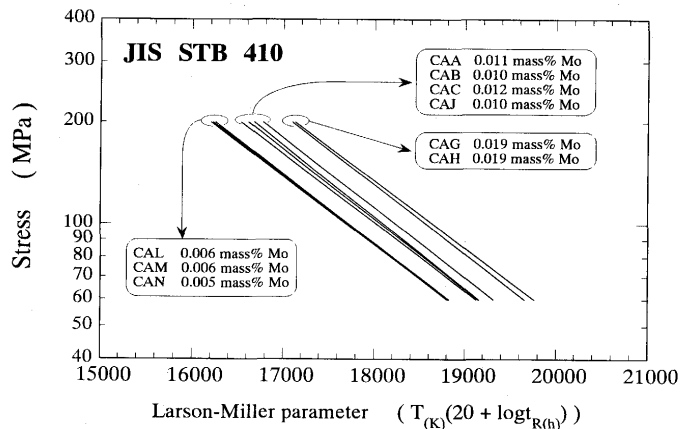


Fig. 6. Inherent creep strength properties of the carbon steel (JIS STB 410).

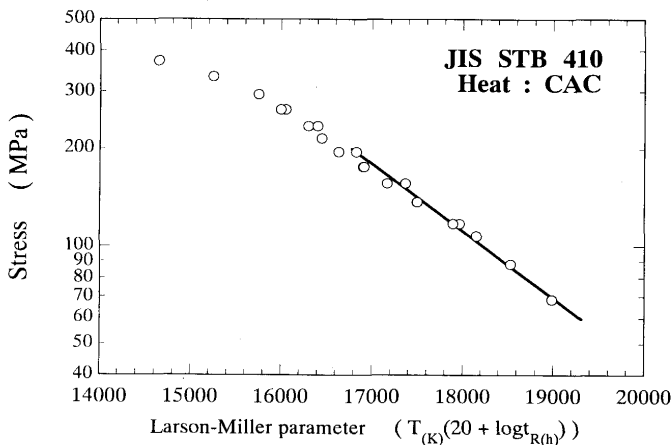


Fig. 5. Creep rupture strength properties of the CAC heat of carbon steel (JIS STB 410).

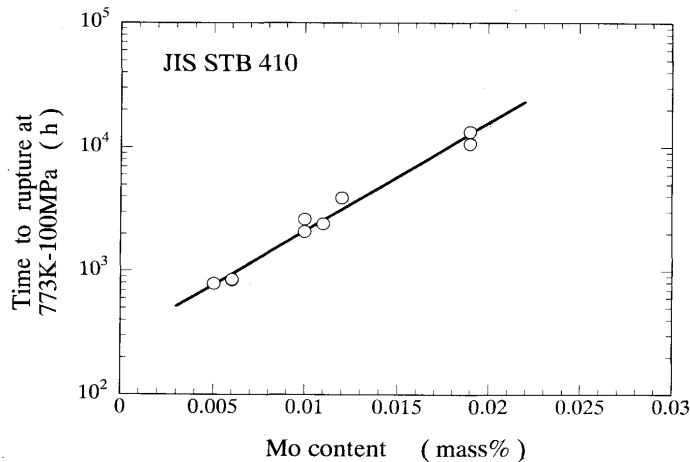


Fig. 7. Effect of Mo content on the inherent creep strength of the carbon steel (JIS STB 410).

プ強度が基底クリープ強度にまで低下していると推察される低応力域では、応力の対数とLarson-Millerパラメータとの間に良い直線関係が認められる。

3.3 炭素鋼の基底クリープ強度のヒート依存性

前節ではCACヒートのクリープ破断強度特性を調べ、高温・長時間側のクリープ破断データが基底クリープ強度に相当することを明らかにした。そこで、他のヒートについても基底クリープ強度に相当する高温・長時間側のクリープ破断データに関して回帰分析を行い、得られた回帰直線をまとめてFig. 6に示す。基底クリープ強度を表す直線はいずれも同程度の勾配を有しており、ほぼ平行である。しかし、基底クリープ強度の大きさはヒートにより大きく異なり、破断寿命に換算して1桁以上の大きな違いが認められる。したがって、本供試鋼の基底クリープ強度はヒートにより大きく異なり、それがクリープ破断強度に大きなヒート間差を生じさせた原因である。

ところで、Fig. 6に示した回帰直線は基底クリープ強度の大きさが異なる3つのグループに分類できる。これらのグループは微量のMo量と良く対応しており、Mo量の高いヒ

ートほど基底クリープ強度は高い。そこで、Fig. 6の結果から773K-100MPaでのクリープ破断寿命を計算により求め、Mo量に対して整理してFig. 7に示す。なお、773K-100MPaの試験条件はいずれのヒートに関してもクリープ強度が基底クリープ強度にまで低下していると考えられる試験条件である。各ヒートの基底クリープ強度の大きさを評価したクリープ破断時間は微量のMo量と良く対応しており、破断時間の対数とMo量との間には非常に良い直線関係が認められる。なお、Table 1に示すMo以外の全成分元素についても、添加量と基底クリープ強度との相関について同様の検討を行った。その結果、Cr及びMnにもMoと同様、基底クリープ強度との間に正の相関が認められたが、両元素とも基底クリープ強度との相関の程度はMoの場合ほど強くはなかった。

Fig. 7に示した各ヒートのクリープ破断時間をクリープ試験前の結晶粒度に対して整理してFig. 8に示す。結晶粒度はクリープ強度に影響を及ぼす重要な組織因子であるが、クリープ試験前の結晶粒度と基底クリープ強度との間に相関は認められない。基底クリープ強度に到達したと推定され

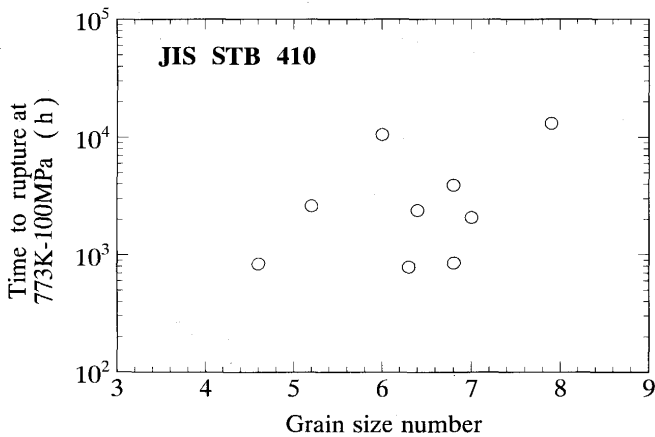


Fig. 8. Relation between inherent creep strength and the grain size prior to creep test of the carbon steel (JIS STB 410).

る高温・長時間側でクリープ破断した試料について組織を観察した結果、結晶粒内に多量のサブバウンダリーの形成が認められた。方位差が 2° を超えるサブバウンダリーは、クリープ強度に対して結晶粒界と同様の影響を及ぼし、発達したサブバウンダリーの形式は実質的な結晶粒径の減少と等価であることが報告されている¹⁹⁾²⁰⁾。したがって、クリープ強度が基底クリープ強度にまで低下する高温・長時間側では、発達したサブバウンダリーの形成により、クリープ強度に影響を及ぼす結晶粒度のヒート間差が消滅するため、クリープ試験前の結晶粒度の違いは基底クリープ強度に影響を及ぼさないものと推察される。

以上のように本供試鋼のクリープ破断強度が微量のMo量と密接に関連し、とくに高温・長時間側で両者の間に良い相関が認められ、Mo量の増加に伴いクリープ破断強度が増大することは横井らも報告している²¹⁾。東山らも同一規格材に関して検討²²⁾を行い、クリープ破断強度はMo添加により上昇するが、その加果が0.025%程度で飽和することを報告している。また、いずれの報告でもクリープ破断強度を向上させるMo添加の効果は析出強化ではなく、CやN等の侵入型固溶元素との相互作用の効果をも含めた固溶強化であると推察している。本研究ではMo量の増加に伴い基底クリープ強度が増大することを明らかにした。したがって、鋼種により化学組成や短時間クリープ強度が大きく異なるにもかかわらず、基底クリープ強度が同程度である耐熱鋼とは異なり、炭素鋼の基底クリープ強度はヒートに強く依存し、それが微量Mo量の違いによる固溶強化量の大小に依存するものと推察される。なお、本解析では、0.01mass%程度の微量Moの添加により、クリープ破断寿命が10倍程度も増大するという固溶強化の効果が認められたが、これは、従来一般的に考えられている固溶強化の効果に比べて著しく大きいものである。その原因としては、Mo原子単独による効果ではなく、Moと炭素との原子対による効果が考えられるがその詳細については別報²³⁾を参照されたい。

3・4 耐熱鋼の基底クリープ強度の支配因子

前節では炭素鋼の基底クリープ強度がヒートにより大きく異なり、それが微量のMoによる固溶強化量の大小に依存することを見いだした。そこで本節では、フェライト系耐熱鋼の基底クリープ強度と微量のMoによる固溶強化との関係について検討を行う。

基底クリープ強度に対応したクリープ破断寿命の対数とMo量との間には良い直線関係が認められる。そこで、Fig. 7の両者の関係を内外挿することによりMo無添加の炭素鋼とMoを0.01, 0.02及び0.03mass%含む炭素鋼の基底クリープ強度を評価して、10鋼種の耐熱鋼のクリープ破断データの範囲と併せてFig. 9に示す。なお、0.012mass%Cの低炭素鋼のクリープ破断データ⁷⁾と0.02~0.36mass%のMoを含む炭素鋼 (JIS SB480) のクリープ破断データ⁸⁾の範囲も併せて示す。Mo無添加鋼の基底クリープ強度は低炭素鋼のクリープ破断強度よりも破断寿命に換算して1桁程度大きい。一方、Moを0.02から最高で0.36mass%含む炭素鋼のクリープ破断データは高応力側では広い範囲でばらついているが、低応力側では0.02から0.03mass%のMoを含む炭素鋼の基底クリープ強度の範囲に収斂している。また、10鋼種の耐熱鋼のクリープ破断強度が高温・長時間側で収斂する強度レベルは0.03mass%のMoを含む炭素鋼の基底クリープ強度と同程度であり、低炭素鋼のクリープ破断強度に比べて破断寿命に換算して4桁程度大きい。

この結果から、基底クリープ強度を高めるMo添加の効果は約0.03mass%で飽和し、フェライト鋼の最大の基底クリープ強度が得られるものと推察される。したがって、耐熱鋼のクリープ破断強度が高温・長時間側で同程度に収斂するのは、いずれの鋼種も最大限の基底クリープ強度を有するためであると推論される。また、Mo無添加の炭素鋼が低炭素鋼のクリープ破断強度よりも高い基底クリープ強度を有することから、炭素の単独添加、あるいはCrやMn等のMo

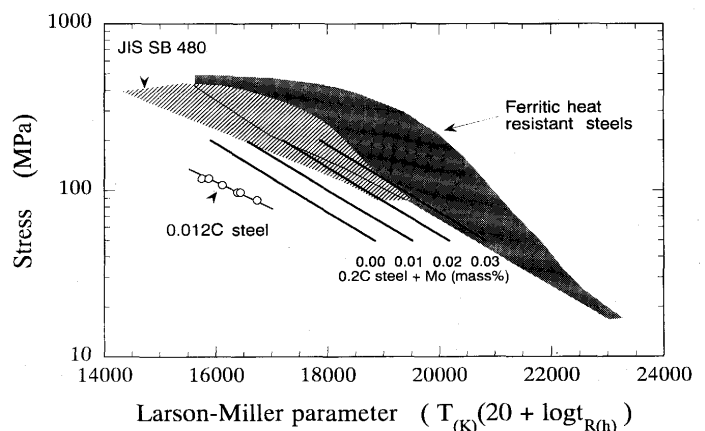


Fig. 9. Inherent creep strength properties of the carbon steels which contain several amounts of Mo and creep rupture strength properties of 0.012C steel, JIS SB 480 and 10 different types of ferritic heat resistant steels.

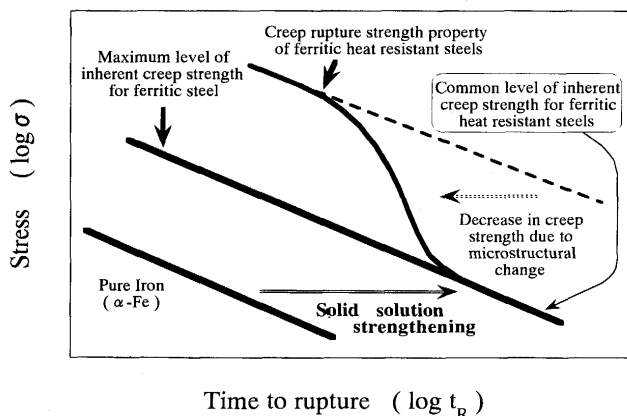


Fig. 10. Schematic representation on the governing factor of inherent creep strength and long-term creep strength properties of ferritic steels.

以外の合金元素と炭素の複合添加によっても基底クリープ強度は向上するものと考えられる。

以上の結果をまとめた模式図をFig.10に示す。フェライト鋼の基底クリープ強度の大きさは炭素とMo等の合金元素による固溶強化に支配されており、合金元素の微量添加により著しく向上する。しかし、基底クリープ強度を高めるMo添加の効果は0.03mass%程度の極微量で飽和するため最大の基底クリープ強度が存在し、その大きさは純鉄のクリープ破断強度に比べて破断寿命に換算して4桁程度大きい。一方、フェライト系耐熱鋼はいずれの鋼種も最大限に高められた基底クリープ強度を有しており、そのため高温・長時間側ではすべての鋼種のクリープ破断強度が同程度の強度、すなわち耐熱鋼に共通の基底クリープ強度レベルに収斂するものと推論した。

4. 結論

本研究ではフェライト鋼の基底クリープ強度の支配因子を解明することを目的として、炭素鋼のクリープ破断強度特性を解析し、基底クリープ強度に及ぼす微量合金元素の影響を調べるとともに、耐熱鋼のクリープ破断強度特性との比較検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 炭素鋼のクリープ破断強度は耐熱鋼に比べ低く、破断寿命に換算して1桁程度の大きなばらつきを示す。

(2) 約150MPa以下の低応力域に相当する高温・長時間側では、炭素鋼のクリープ強度は基底クリープ強度にまで低下しているものと推察され、応力の対数とLarson-Millerパラメータとの間には良い直線関係が認められた。

(3) 炭素鋼の基底クリープ強度の大きさはヒートにより

大きく異なり、基底クリープ強度を評価した破断寿命の対数と微量のMo量との間には良い直線関係が認められた。

(4) 基底クリープ強度の大きさとクリープ試験前の結晶粒度との間には相関は認められなかった。

(5) 炭素鋼の基底クリープ強度を高めるMo添加の効果は0.03mass%程度の微量で飽和するものと推察され、最大限に高められた基底クリープ強度の大きさは耐熱鋼が高温・長時間側で示す共通のクリープ強度と同程度であった。

(6) 炭素の単独添加、あるいはCrやMn等のMo以外の合金元素と炭素との複合添加によっても基底クリープ強度は向上するものと推察された。

(7) 以上の結果から、フェライト鋼の基底クリープ強度は炭素とMo等の合金元素の添加による固溶強化に支配されており、炭素鋼にMoを0.03mass%程度微量添加することにより基底クリープ強度を最大限に高めることができるものと推察した。また、耐熱鋼はいずれの鋼種も最大限に高められた基底クリープ強度を有しており、そのため高温・長時間側ではすべての鋼種が同程度のクリープ破断強度に収斂するものと結論した。

文 献

- 1) U.Malström: Int. Design Criteria of Boilers and Pressure Vessels, (1984), p.29 [ASME, New York]
- 2) A.Schneider: 同上 (1984), p.37
- 3) 田中千秋, 八木晃一: 鉄と鋼, **80** (1994), p.255
- 4) 木村一弘, 九島秀昭, 八木晃一, 田中千秋: 鉄と鋼, **77** (1991), p.667
- 5) K.Kimura, H.Kushima, K.Yagi and C.Tanaka: Proc. 5th Int. Conf. on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, ed. by B.Wilshire and R.W.Evans, (1993), p.555 [The Institute of Materials, London]
- 6) 金属材料技術研究所クリープデータシート, 7B (1992)
- 7) 金属材料高温強度データ集 第3編 炭素鋼及び鋳鉄編, (1977), p.305 (日本鉄鋼協会)
- 8) 金属材料技術研究所クリープデータシート, 17A (1981)
- 9) 同上, 8B (1991)
- 10) 同上, 20B (1994)
- 11) 同上, 1A (1976)
- 12) 同上, 2A (1976)
- 13) 同上, 36A (1991)
- 14) 同上, 9B (1990)
- 15) 同上, 12B (1992)
- 16) 同上, 19A (1981)
- 17) 同上, 13B (1994)
- 18) 同上, 10A (1979)
- 19) 平井龍至, 寺田芳弘, 松尾 孝, 菊池 實: 学振123委研究報告, **29** (1988), p.275
- 20) 寺田芳弘, 松尾 孝, 菊池 實: 学振123委研究報告, **31** (1990), p.93
- 21) 横井 信, 新谷紀雄, 郡 宗幸, 田中秀雄: 学振123委研究報告, **16** (1975), p.107
- 22) 東山博吉, 松尾輝夫, 仕幸三郎, 塩塚和秀, 西 正: 火力原子力発電, **24** (1973), p.790
- 23) 小野寺秀博, 阿部太一, 大沼正人, 木村一弘, 藤田充苗, 田中千秋: 鉄と鋼, **81** (1995) 8掲載予定