



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

耐熱鋼の常識と非常識

Common Knowledge and Preposterous Idea in Heat-resistant Steels

光原昌寿

Masatoshi Mitsuhara

九州大学
大学院総合理工学研究院
准教授

この度、「躍動」にて研究内容を紹介させていただく機会を頂戴した。著者は、大学4年生で研究室配属になってから現在までの16年の間、耐熱鋼・耐熱合金の高温物性に関する研究に携わらせていただいた。主に興味の対象としたのが強度と微細組織の関係であり、具体的には以下のような内容に取り組んできた。

- ・フェライト系耐熱鋼の多次元組織解析とそれに基づく強度評価^{1,3)}
- ・フェライト系耐熱鋼のクリープ変形解析^{4,6)}
- ・フェライト系耐熱鋼の強化機構解明^{7,8)}
- ・窒素を有効利用した新規フェライト系耐熱鋼の創製^{9,10)}
- ・オーステナイト系耐熱鋼の組織安定性、局所変形評価、粒界破壊挙動¹¹⁻¹³⁾
- ・Ni基耐熱合金の多次元組織解析と強化機構解明¹⁴⁻¹⁶⁾
- ・結晶粒界近傍の組織をデザインした新たなNi基耐熱合金の強度評価¹⁷⁻¹⁹⁾

最近の若手大学研究者を取り巻く状況をみる限り、自分がこのような一貫した環境とテーマで研究に向き合っていることは大変僥倖なことである。

どの研究分野でも同様であろうが、駆け出しの若造であった頃、耐熱材料の分野に存在した多くの「常識の壁」にぶつかった。もちろんその多くが合理的な理論や実験事実に基づくものであったが、中には明文化されることのない通説や思い込みのようなものもあったように思う。今回の良い機会にこの16年を振り返り、特にフェライト系耐熱鋼のクリープ変形と強度に関する常識と非常識について考えてみよう。そのためにまずは高温変形の一般論について簡単に触れる。

高温での材料強度には様々な学問要素が関わる。私が所属する研究室を40年前に立ち上げられた吉永日出男先生は、学生からの「何故、金属学を専攻されたのか」との問いに「金属学は数学と物理と化学、理学と工学が交わる学問であるか

ら面白い」と答えておられた。全くそのとおりである。我々はいつもの一筋縄ではいかない問題に直面し、持てる学識を総動員してなお足らず、新たな知識と経験を蓄積していくのである。特に高温での金属物性などといった場合には動的現象のオンパレードであり、複雑なことこの上ない。そのため、金属の高温変形を学問として追求する上では、まずは純金属もしくは固溶体合金を用いて理論構築することが正しく、それでもまだ人類は高温変形のごく一部しか理解できてはいない。現在までの高温変形の理解、残された課題については及川洪先生のまとめられた解説^{20, 21)}に詳細に述べられているのでぜひ一読いただきたい。

図1に、クリープ変形における最も有名でかつ重要な図の一つである「変形機構領域図」を模式的に示す。純金属におけるクリープ変形の熱活性化過程は拡散である。しかし、その変形の担い手は一つには定まらず、転位運動による場合と拡散での原子移動による場合とがある。前者を転位クリープ、後者を拡散クリープと呼び、それぞれが変形を支配する条件(温度、応力)を書き記したものが上述の「変形機構領域図」である。高温変形と室温変形の明確な違いは、変形を速度の観点から記述するかどうかであろう。室温変形では、

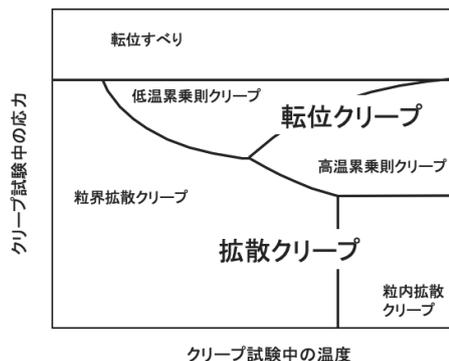


図1 変形機構領域図

負荷力が最も重要な変数であり、そのときの変形速度はあまり重要ではない。一方で高温変形では、ある一定の力を加えたときの変形速度こそが強度の指標である。たとえば転位クリープでは、転位の運動速度が変形を律速し、それが小さいほど高強度である。したがって、転位の動きを遅らせるような組織因子を組み込めば材料は強化される。拡散クリープの場合には、原子の拡散パスとその速度が変形を律速する。つまり、強度を決定する。転位クリープ、拡散クリープ、それぞれの中にも、変形の担手の運動様式に応じた細かな区分が存在する²²⁾がここでは割愛する。

図2は、クリープ試験で得られる典型的な時間-ひずみ曲線と時間-ひずみ速度曲線の模式図である。一般に、材料がクリープ変形を起こして破断するまでの間には、図2中に示すような3つの段階(領域)が存在する。遷移クリープ(1次クリープとも呼ばれる)、定常クリープ(2次クリープとも呼ばれる)、加速クリープ(3次クリープとも呼ばれる)である。遷移クリープでは変形速度が徐々に減少する。すなわち材料が変形とともに徐々に強化される。逆に加速クリープでは変形速度が時間とともに増加し材料が弱くなっていく。これらの現象は、変形とともに生じる様々な格子欠陥の発生・蓄積、ミクロな損傷(キャビティ、ポイド、マイクロクラック)の発生・凝集・伝播、さらにはマクロな試験片外形変化(断面積の減少など)に起因するもので、材料組織の熱的变化を無視したとしても生じる。もしもこれに加えて材料組織が時間、応力、ひずみに応じて変化する場合には、その変化度合いは各段階に加算的、相乗的もしくは減算的に寄与する。したがって、金属のクリープ変形と一口にいても、

$$\text{材料強度} = (\text{変形機構}) \times (\text{変形段階}) \times (\text{格子欠陥と損傷の蓄積}) \times (\text{材料組織変化})$$

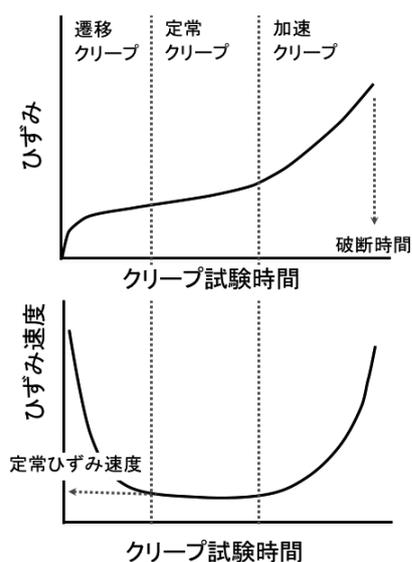


図2 金属材料における典型的なクリープ曲線

というように、様々な事柄の影響を総合的に考慮する必要がある。ここで研究者を大いに惑わす要因となるのが、例えばそれぞれの変形機構ないしは変形条件において純然と強化に寄与する材料組織因子が、別の条件では全く効かない、時には弱体化にさえ作用してしまうという事実である。すなわち、上記概念式の“×”の部分に当てはまる演算式をも、我々は慎重に考慮しなくてはならない。

さて、以上のような高温変形の一般的な解釈を背景に、本記事の目的である「フェライト系耐熱鋼における常識と非常識」に論点を戻そう。研究を始めた当初、私に襲いかかったフェライト系耐熱鋼最大の常識の壁は「耐熱鋼のクリープ変形は純金属のそれと全く違う」というものであった。つまり、純金属における変形の常識はフェライト系耐熱鋼では非常識なものであり、純金属ベースの変形理論は耐熱鋼のそれと直接的には結びつかない(もしくは結びつきにくい)というのである。このように考えられるに至ったフェライト系耐熱鋼の特異な性質について、以下にまとめてみる。

- ・クリープ変形挙動について
(純金属) 遷移・定常・加速クリープがある。
(耐熱鋼) 定常クリープが存在せず、遷移と加速のみで構成される。加速クリープの占める割合が大きい。
- ・クリープ変形の活性化エネルギーについて
(純金属) クリープ変形の熱活性化過程は拡散である。各変形機構の律速過程に対応し、格子拡散や粒界拡散の活性化エネルギーを示す。
(耐熱鋼) 多くの場合、格子拡散よりもはるかに大きな値を示す。変形条件により活性化エネルギーは多様に変化するが、それが変形機構の遷移と対応するかどうかは不明である。
- ・クリープ変形速度の応力依存性(応力指数またはn値と呼ばれる)について
(純金属) クリープ変形機構に対応した応力依存性指数を示す。
(耐熱鋼) 純金属の応力依存性指数よりもはるかに大きな値を示すことが多い。
- ・結晶粒径の効果について
(純金属) 一般に、結晶粒を細かくすると弱くなる。
(耐熱鋼) マルテンサイト組織(微細粒組織)にすると強化される。
- ・強度と微細組織の関係について
(純金属) 転位下部組織の発達を除き、微細組織の変化はほぼ考慮しない。
(耐熱鋼) 微細組織は変形とともに変化する。強度を理解する上で組織の動的変化を定量的に捉えることは必須である。

以上のような特徴から、フェライト系耐熱鋼では、クリープ変形専門家の常套手段である「活性化エネルギー」と「応力指数」

からの変形機構判別が容易でない。変形の素過程が転位の運動によるのか、拡散によるのか、はたまた粒界すべりの寄与によるのか、力学試験の結果のみから判断できないのである。これは研究者にとって大きなハンディキャップとなる。さらに問題を加速的に難しくするのが微細組織の動的変化である。

フェライト系耐熱鋼は高温用構造部材として広く実用化されており、強度向上のための材料開発が常に求められている。そのため、理解に時間のかかる“実用条件での変形機構”は一旦棚上げにして、ひとまずは転位クリープを仮定しつつ、転位運動の抑制に効果的な組織因子の導入による材料設計がなされてきた。いくつかの固溶元素、多種多様な粒内析出物と粒界上析出物、高密度の転位下部組織などがそれぞれあり、それら強化因子の絶妙なバランス²³⁾を保つための緻密な合金成分設計が1960年代から今日に至るまで精力的に続けられてきた²⁴⁾。結果として、種々の高強度フェライト系耐熱鋼 (Creep Strength Enhanced Ferritic steelsの略でCSEF鋼と呼ばれる) が開発され、例えば石炭焚き火力発電プラントの主流技術である超々臨界圧発電方式を実現させた。現在でも、先進超々臨界圧発電方式の実用化のための大きな原動力となっている。

CSEF鋼は工業的に大きな成功を納め、人類の文化の発展に十分な貢献を果たしている材料である。しかし、CSEF鋼に詰め込まれた強化因子はそのほとんどが熱的に非平衡な組織を用いており、それにもかかわらず材料を高温で長時間 (例えば数十年の間) 用いるのである。それはまるで積み木を積み上げたような危うさを秘めており、一旦それが崩れると途端に脆さを露呈してしまう。これが結局のところ、ここ数十年の間そして将来にわたりフェライト系耐熱鋼の研究者を悩ませ続ける2大問題、すなわち「溶接継ぎ手の強度低下問題」と「長時間使用条件下での強度の腰折れ問題」につながる。

溶接プロセスにより複雑な入熱履歴を経たCSEF鋼は、それに緻密に設計された最適微細組織を容易に失い、結果として溶接継ぎ手の材料強度は母材に比べて半分ほどに減少する²⁵⁾。どんなに強い母材を準備しても、フェライト系耐熱鋼が実用されるような大型部材では溶接プロセスは必須であり、その設計強度は結局のところ溶接部の強度で決まることになる。事実、火力発電プラントの蒸気配管などでは溶接継ぎ手での破損が多く報告されている。また、そのような発電プラントにおいてCSEF鋼は数十年の耐用年数を想定して用いられる。すなわち、材料の数十年にわたる強度を推定できなくては使い物にならないということである。そこで、実験室レベルで測定可能な短時間 (とはいっても中には数年におよぶ試験も実施される) の強度を長時間側へ“外挿”して評価する。図3は、代表的なCSEF鋼であるASME Gr.91鋼をクリープ試験したときの負荷応力と破断時間の関係²⁶⁾である。短時間側からの強度評価の外挿は長時間側の強度を大きく過大評

価する危険性を含んでいることを明確に示している。これが「長時間使用条件下での強度の腰折れ問題」である。

ここに述べた2つの大きな課題の解決には、先ほど棚上げたCSEF鋼の変形理論をやはりしっかりと構築していかなくてはならない。それには、「耐熱鋼のクリープ変形は純金属のそれと全く違う」という常識の壁と対峙しなくてはならない。著者はCSEF鋼の非平衡な微細組織の動的変化をひとつずつ詳らかにしていった先に、純金属と変わらない耐熱鋼の真のクリープ変形が眠っていると信じているからである。

最後に、ASME Gr.91鋼において、マルテンサイト組織中のラス境界が強度に与える影響について考察した研究内容⁷⁾を簡単に紹介しよう。ラスはCSEF鋼において動的変化の最も激しい組織因子である。破断時間が数千時間以下になるような高～中応力でのクリープ変形条件では、ラスの粗大化が変形速度の増加と密接なつながりを持つ²⁷⁾。すなわち、ラス境界が変形中の転位運動を阻害する重要な役割を担っており、ラスの熱的安定性が強度向上に効果的である。しかし、ラスが転位運動の障害となる具体的なメカニズムは全く不明であった。図4は、TEM内その場合高温クリープ試験により、変形中の転位とラス境界の相互作用を直接的に観察した結果である。転位端はラス境界に組み込まれるように観察され、転位はラス内を弓形になりながらすべり運動する。その強化は、粒子強化の内部応力を求める場合と同様の式で表現することができ、具体的な抵抗力は初期に70 MPa程度、クリープ変形が進行しラス幅が増大すると40 MPa以下に減少することを実験的に求めた。このように、CSEF鋼に導入された強化因子をひとつずつ丁寧に温度・応力・時間の関数として定量化すれば、それらの大きな動的変化に隠されたCSEF鋼の真のクリープ挙動を抽出できるようになるはずである。

以上のように本記事では、著者がこれまで活動してきた耐熱鋼の研究分野の「常識」にまつわる事柄を述べた。中には著者の浅慮な知識と拙い経験による私見、偏見が含まれているかもしれない。もしも記事を目にいただいた諸先輩方

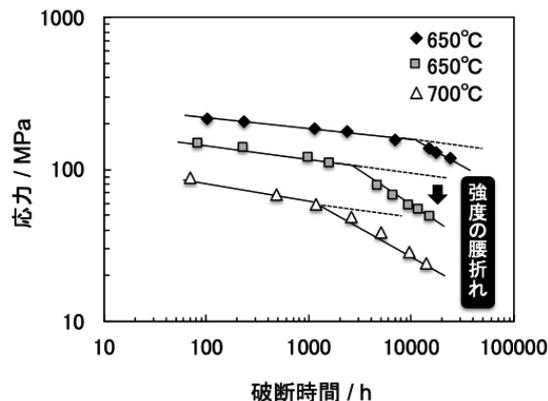


図3 ASME Gr.91鋼の応力-破断時間線図

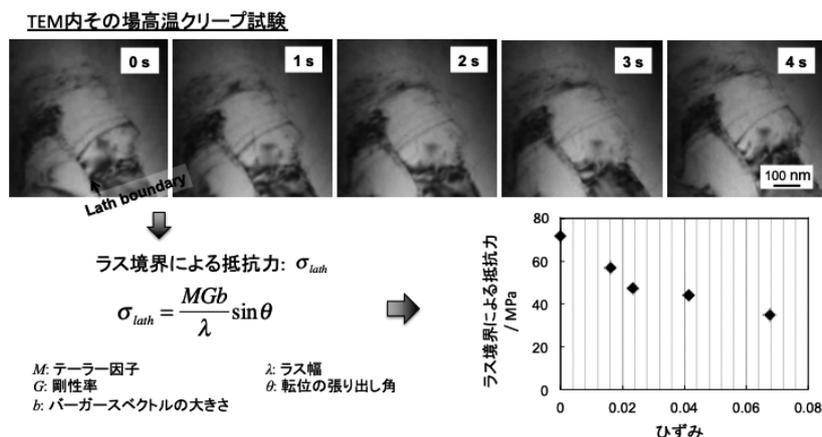


図4 ラス境界-転位間相互作用の直接観察と強化能の評価

から、これをきっかけに様々な助言をいただけるのであれば大変幸せなことである。また、この記事を読んで耐熱材料の研究に興味を持っていただいた若手研究者の方がいるかもしれない。その方々に是非とも知っていただきたい。耐熱材料の高温変形にはまだまだ広大で深遠な人類の未踏領域がただただ広がっているのである。

参考文献

- 岡野倫明, 伊藤孝矩, 光原昌寿, 西田稔: 日本学術振興会耐熱金属材料123委員会研究報告, 56 (2015), 165.
- 光原昌寿, 原田絵梨香, 山崎重人, 池田賢一, 波多聰, 中島英治, 大塚智史, 皆籐威二: 可視化情報学会誌, 31 (2011), 98.
- 光原昌寿, 森岡真也, 波多聰, 池田賢一, 中島英治: 日本学術振興会耐熱金属材料123委員会研究報告, 49 (2008), 353.
- S.Yamasaki, M.Mitsuhara, K.Ikeda, S.Hata and H.Nakashima: Mater. Trans., 55 (2014), 842.
- 山崎重人, 光原昌寿, 池田賢一, 波多聰, 中島英治: 鉄と鋼, 100 (2014), 688.
- 光原昌寿, 寺田大将, 池田賢一, 中島英治: 鉄と鋼, 94 (2008), 27.
- M.Mitsuhara, S.Yamasaki, M.Miake, H.Nakashima, M.Nishida, J.Kusumoto and A.Kanaya: Philos. Mag. Lett., 96 (2016), 76.
- 光原昌寿, 三明正樹, 山崎重人, 中島英治, 西田稔: 日本学術振興会耐熱金属材料123委員会研究報告, 54 (2013), 1.
- S.Yamasaki, M.Mitsuhara and H.Nakashima: ISIJ Int., 58 (2018), 1146.
- 山崎重人, 光原昌寿, 中島英治: 鉄と鋼, 103 (2017), 64.
- S.Yamasaki, M.Mitsuhara, H.Nakashima and M.Yonemura: ISIJ Int., 57 (2017), 851.
- 平田茂, 伊藤孝矩, 光原昌寿, 西田稔: 鉄と鋼, 101 (2015), 51.
- 光原昌寿, 池田賢一, 中島英治, 早川弘之, 楠元淳一, 金谷章宏: 鉄と鋼, 94 (2008), 299.
- S.Yamasaki, M.Mitsuhara and H.Nakashima: Mater. Trans., 58 (2017), 442.
- D.Tyutyunnikov, M.Mitsuhara and C.T.Koch: Ultramicroscopy, 159 (2015) 26.
- S.Yamasaki, M.Mitsuhara, K.Ikeda, S.Hata and H.Nakashima: Scr. Mater., 101 (2015), 80.
- M. Yonemura and M. Mitsuhara: Philos. Mag., 98 (2018), 3247.
- 伊藤孝矩, 山崎重人, 光原昌寿, 中島英治, 西田稔, 米村光治: 鉄と鋼, 103 (2017), 434.
- T.Ito, S.Yamasaki, M.Mitsuhara and M.Nishida, M.Yonemura: Mater. Trans., 58 (2017), 52.
- 及川洪: まてりあ, 49 (2010), 49.
- 及川洪: まてりあ, 49 (2010), 95.
- 丸山公一, 中島英治: 改訂版 高温強度の材料科学, 内田老鶴圃, (2002).
- 角屋好邦, 志水悦郎: 鉄と鋼, 86 (2000), 189.
- 太田定雄: フェライト系耐熱鋼 ~世界一へのためまざる研究と開発~, 地人書館, (1998)
- M.Yaguchi, K.Nakamura and S.Nakahashi: Proceeding of the ASME PVP2016 (2016), PVP2016-63316.
- NIMS Creep Data Sheet No. 51A, NIMS, (2013)
- K.Sawada, M.Takeda, K.Maruyama, R.Ishii, M.Yamada, Y.Nagae and R.Komine: Mater. Sci. Eng., A 267 (1999), 19.

(2019年1月21日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京工業大学 物質理工学院材料系 教授

竹山 雅夫

光原先生は、間違いなく今後20年間は耐熱鋼・耐熱合金の分野を牽引する若手のホープです。この度、先生の「躍動」記事「耐熱鋼の常識と非常識」を読ませて頂き、多いに共感を抱くとともに、同記事にコメントをする任を得たことを光栄に思います。

小職が光原先生に初めて会ったのは、まだ彼が大学院の学生の頃、どこかの学会で発表した時だったと記憶しています。随分鼻息の荒い、しかも、底抜けに明るい前向きな学生だな、というのがその時の印象。以来、先生はその個性を失うことなく、首尾一貫して耐熱材料の高温変形に関する研究を続けられ、既にベテランの域に入っていると思います。

耐熱合金の高温クリープにおける「常識と非常識」でいえば、小職も教科書に書かれてあることに随分と疑問を抱いたものです。例えば、拡散クリープ、粒界すべり、亜粒界の役割、加速クリープ開始の原因など、未だに教科書に書かれてあることが盲目的に受け入れられている。これらについての自身の考えは別の機会に述べるとして、教科書にあるクリープ変形の理論は、電子顕微鏡による転位の観察が可能となって以降、1960年代から70年代にかけて精力的に行われ、しかも大半がAlやAl-Mg合金で得られた知見に基づいており、これらを耐熱鋼などの実用材にそのまま適用することには無理がある、と

いう点は全く同感です。また、寿命予測に関しても、耐熱合金の組織は高温保持中に時々刻々と変化し、しかもそれが変形によって加速される。したがって、長時間クリープ破断強度を応力加速あるいは温度加速試験による短時間側のデータから外挿あるいはLarson-Millerプロットにより見積めることは、組織変化という因子を考慮しない限り、過大評価するのは当然だと思います。特に、光原先生が精力的に取り組んでおられる高Crフェライト系耐熱鋼の組織は複雑怪奇であり、小職はこの材料だけには手を出したくないと思っていますが、先生は緻密にしかも新たな解析手法を導入しながら一つ一つ絡まった糸を解すように課題解決に取り組み、学理と応用両面から優れた成果を出しておられます。

耐熱材料は、今我々が直面しているエネルギーや環境問題などと密接に関係し、持続可能な安全安心な社会を構築する上でも、今後ますます重要になる分野であり、まだまだ解決すべき課題が多々あります。一つの分野をずっと継続して研究することが難しくなっている時代ですが、耐熱材料は息の長い材料であり、難しいけど面白い。ある意味金属学の王道といえる分野です。継続は力なり。光原先生には今後もこの分野において大いに暴れ回り、若者に耐熱合金の面白さを伝え、世界をリードすることを期待しています。応援しますよ。

日本製鉄(株) 技術開発本部 フェロー

吉永 直樹

光原先生のためなら、とつい思ってしまう先生であります。そういうわけで、私よりもずっとふさわしい方がおられると恐縮しつつも、ついコメント役を引き受けてしまいました。

光原先生のことは以前から存じ上げてはおりましたが、頻繁に会話するようになったのは比較的最近のことです。日本鉄鋼協会「高温材料の高強度化」研究会を中島英治先生とともに立ち上げる際にお声掛け頂いたことがきっかけです。私自身は入社以来一貫して自動車用鋼板の研究開発に従事してきたこともあり、高温材料にはあまり馴染みがありませんでした。学生時代に加藤雅治先生の講義「高温変形と破壊」に触れ、高温変形の面白さを未熟者なりに感じてはおりましたが、一方で、高温変形には有名な理論があって、洗練され、議論の余地が小さい分野なのかなあ、とも感じておりました。上記研究会での光原先生の講義はそれとは全く異なるものでした。本稿でも述べられている通り、「人類は高温変形のごく一部しか理解できていない」との認識のもとに、「常識の壁と対峙」しようとの決意を熱く語られています。大先生やベテラン研究者の前でこのように明言することはなかなか難しいことだと思います。しかし、それをやるのが光原先生であり、また、やっても反感を買わない

どころか、むしろ褒められてしまうのが光原先生だと思います。決断力と尋常ならざる情熱で力強く前進しつつも、周囲への気配りと敬意を決して忘れないお人柄の賜物だと思います。

上記研究会では光原先生の方針に基づき、新しいデータを積み上げるよりも、先人の業績をしっかり勉強した上で、何が明らかになっていないのかを明らかにすることが目的となっています。この「一筋縄ではいかない問題」の本性を解明すべく、「因子をひとつずつ丁寧に定量化する」とのお考えに大いに共感します。それと同時に複数の因子を同時に成立させる“×(掛け算)”についてもお考えをめぐらせて頂ければなお有難いです。

火力発電の高効率化に必須である超耐熱材料の開発は、日本はもとより人類の未来にも深く関わる課題です。これ以外にも様々な分野で超高強度化がブレークスルーの鍵となっていますが、実用化のためには、原理原則に立ち返った基礎基盤研究を徹底的に行うことが今こそ必要だと痛感しています。光原先生！高温変形の「広大で深遠な人類未踏領域」を粘り強くひたすらに走り続けて新しい学理を築いて下さい。後継者の育成や我々へのご指導も忘れずに。心から期待し応援しています！