

〈一般研究課題〉 機械学習の援用による鉄鋼材料における  
低合金化と高強度・高延性化の実現

助成研究者 愛知工業大学 小川 登志男



## 機械学習の援用による鉄鋼材料における 低合金化と高強度・高延性化の実現

小川 登志男  
(愛知工業大学)

## Development of low alloy steel with high strength and ductility using machine learning

Toshio Ogawa  
(Aichi Institute of Technology)

### Abstract :

We attempted to develop low alloy steel with high strength and ductility using machine learning. The martensite steels were tempered at two stages, and fine and coarse cementite particles were mixed. The strength-ductility balance was improved by using water cooling between the first and second tempering stages. Moreover, the strength-ductility balance was also improved by tempering at a low temperature in the first stage and at a high temperature in the second stage. Based on these experimental results, multi-objective Bayesian optimization was used to further improve both tensile strength and total elongation. As a result, we revealed that it is crucial to spheroidize cementite particles and maintain the size ratio of coarse cementite particles to fine cementite particles within a certain range in order to improve the strength-ductility balance.

### 1. はじめに

近年、自動車車体の軽量化による燃費向上と衝突安全性確保を両立させるため、自動車車体への高強度鋼板の適用が進んでいる [1,2]。一方、高強度化に伴う加工性の低下が懸念されており、自動車用鋼板の高強度・高延性化が求められている。鉄鋼材料における強度と延性のバランスを改善するためには、合金元素を添加することでミクロ組織を適切に制御する必要がある。これにより発生する問題点として、鉄鋼材料の価格高騰や金属資源のリサイクル率低下などが挙げられる。した

がって、鉄鋼材料の高強度・高延性を図る上で、合金元素に頼らない材料設計が求められている。

著者らはこれまでに、炭素 (C) 以外の合金元素を含まないFe-0.80mass%C鋼におけるセメンタイト (θ) のサイズ分布を制御することで、焼き戻しマルテンサイト鋼における強度-延性バランスの向上を図ってきた [3,4]。その結果、高温および低温でそれぞれ焼き戻し (以下「二段階焼き戻し」と称する)、粗大および微細なセメンタイトを混在させることで強度-延性バランスが向上した [3]。また、深層学習も援用することで、焼き戻しマルテンサイト鋼における強度および延性の支配因子を推定することにも成功した [4]。

一方で、これまでに行った二段階焼き戻しの条件は限られており、焼き戻し温度や保持時間の最適化によりさらなる強度-延性バランスの向上が見込める。しかしながら、実験的アプローチのみで焼き戻し条件を最適化するには、膨大な実験量が必要となる。そこで本研究では、実験的アプローチに加えて、機械学習の援用による焼き戻し条件の最適化を目指す。具体的には、多目的ベイズ最適化を用いることで焼き戻しマルテンサイト鋼の強度-延性バランス向上に対し最適な焼き戻し条件を探索するとともに、得られた最適組織の形態から引張特性の支配因子を解明することを目指す。

## 2. 試料および実験方法

供試材には、Fe-0.80mass%C鋼の板材を用いた。1000℃で5 minのオーステナイト化処理後に油冷したものを初期試料とした。この初期試料に対し、種々の温度および保持時間で二段階焼き戻しを行った。また、一段階目と二段階目の焼き戻しの間の冷却条件について、先行研究 [3,4] では炉冷としていたが、本研究では水冷に変更した実験も行った。さらに、先行研究 [3,4] では一段階目で高温、二段階目で低温焼き戻しを行っていたが、本研究では一段階目で低温、二段階目で高温焼き戻しを行った条件も加えた。

種々の条件で焼き戻しを行った試料に対して引張試験を行い、焼き戻し条件と特性値との関係をデータセットとして構築した。次に、多目的ベイズ最適化を実行し、複数の最適解 (パレート解) となり得る焼き戻し条件をサンプリングした。本研究では、5つの焼き戻しパラメータ (一段階目の焼き戻し温度および保持時間、一段階目と二段階目の焼き戻しの間の冷却条件、二段階目の焼き戻し温度および保持時間) を考慮してパレート解を算出した。その後、サンプリングされた焼き戻し条件に基づいて再度試料を作製し、引張試験を行うことでデータセットを更新した。このプロセスを繰り返すことで焼き戻し条件の最適化を進め、引張特性の最大化を試みた。なお、本研究ではこのベイズサイクルを11サイクル繰り返した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 二段階焼き戻しを施した試料のミクロ組織および引張特性

二段階焼き戻しを施した試料の引張強度と全伸びの関係をFig. 1に示す。図中の数値は、引張強度と全伸びの積を表している。各試料の引張特性は、低強度-高延性から高強度-低延性まで幅広い範囲でトレードオフの関係を示した。また、低強度材の引張特性は、高強度材に比べてより良好な強度-延性バランスを示し、先行研究 [3,4] と同様の傾向であった。

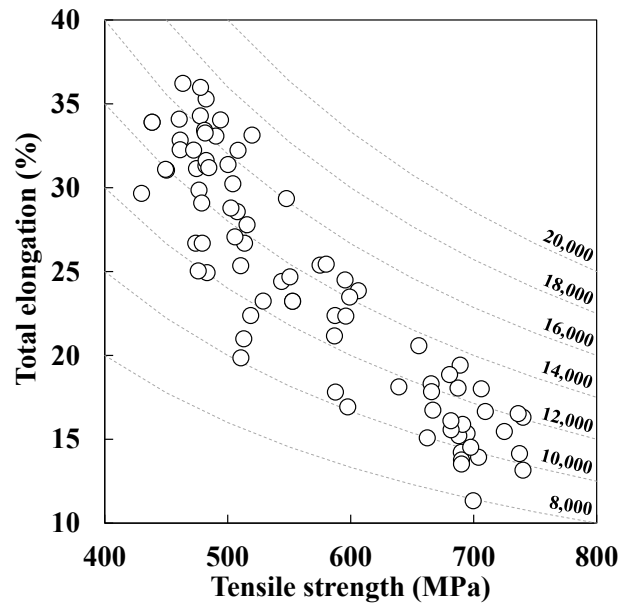


Fig. 1 Relationship between tensile strength and total elongation of tempered specimens.

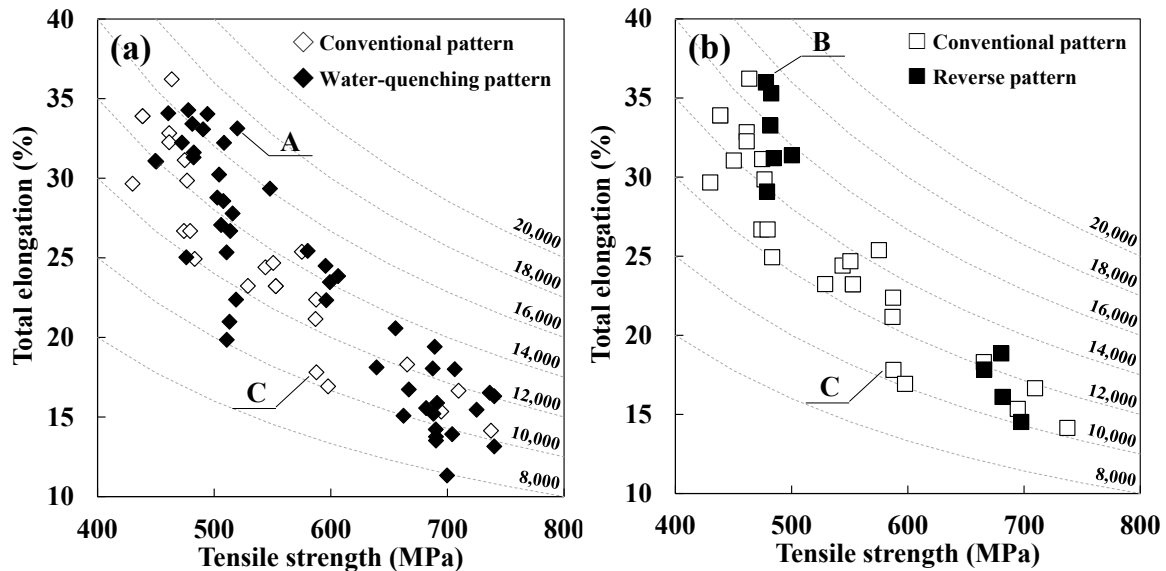


Fig. 2 Effects of (a) cooling conditions between first and second tempering stages and (b) tempering temperatures at first and second stages on tensile properties.

二段階焼き戻し条件と引張特性の関係をFig. 2に示す。炉冷の場合と比べて、水冷した試料の強度-延性バランスは全体的に向上する傾向が認められた。特に、低強度材の強度-延性バランスが向上した (Fig. 2(a))。また、一段階目で低温、二段階目で高温焼き戻しを行った場合も、先行研究 [3,4] と比べて特に低強度材の強度-延性バランスが向上した (Fig. 2(b))。

一段階目と二段階目焼き戻しの間の冷却条件を水冷とし、強度-延性バランスが良好であった低強度材のマイクロ組織をFig. 3(a) に示す。また、一段階目で低温、二段階目で高温焼き戻しを行い、強度-延性バランスが良好であった低強度材のマイクロ組織をFig. 3(b) に示す。さらに、従来と同様の二段階焼き戻しを行い、強度-延性バランスが不良であった低強度材のマイクロ組織をFig. 3(c) に示す。強度-延性バランスが不良であった低強度材におけるセメントライトは、球状のものだけでなく、フィルム状に連なり一方向に伸長しているものも観察された (Fig. 3(c))。それに対し、強度-延性バランスが良好であった低強度材のセメントライトは球状化しており、いずれの試料においても

粗大および微細セメンタイトだけではなく、それらの中間的なサイズのセメンタイトも多数観察された (Fig. 3(a) および (b))。一段階目と二段階目の焼き戻しの間の冷却条件を水冷にした場合、一段階目の焼き戻し時に析出したセメンタイトの粗大化を抑制できたと考えられる。また、一段階目で低温、二段階目で高温焼き戻しを行った場合、一段階目の焼き戻し時に析出した微細セメンタイトが二段階目の焼き戻し時にやや成長する程度で、極端なセメンタイトの粗大化を抑制できたと推察される。したがって、一段階目と二段階目の焼き戻しの間の冷却条件を水冷にした場合と、一段階目で低温、二段階目で高温焼き戻しを行った場合は、粗大および微細セメンタイトだけではなく、それらの中間的なサイズのセメンタイトも多数形成されたと考えられる。

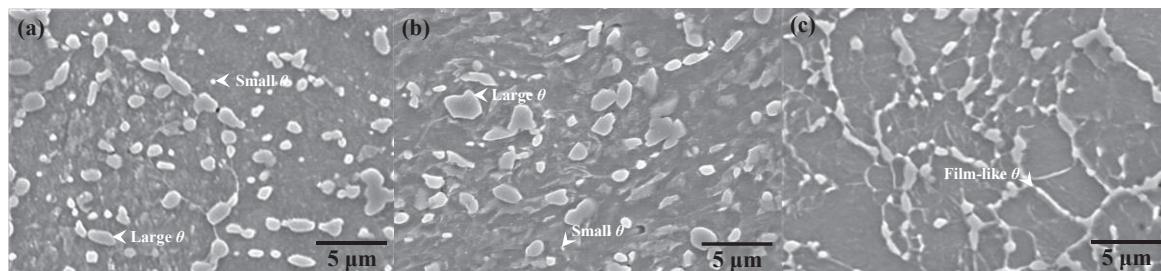


Fig. 3 Microstructures of tempered specimens (a) A, (b) B, and (c) C indicated in Fig. 2.

### 3.2 多目的ベイズ最適化によりサンプリングされた焼き戻し条件で作製した試料のミクロ組織および引張特性

Fig. 1のデータに、多目的ベイズ最適化によって更新されたデータを加えたものをFig. 4に示す。サンプリングされた試料は、低強度から高強度まで幅広い強度-延性バランスを示した。特に、3回目の最適化において、従来よりも優れた強度-延性バランスを達成した。さらに、8回目の最適化においては、高強度材の中で最も優れた延性を持つ試料のサンプリングに成功した。最終的に、わずか11回の最適化で2つのパレート解を獲得することに成功した。

ここで、低強度材における劣解 (Fig. 5(a)) とパレート解 (Fig. 5(b)) のミクロ組織を比較した。両者の引張特性 (Table 1) を比較すると、全伸びの向上により強度-延性バランスが大幅に向上している。また、パレート解では析出したセメンタイトが球状化していた。さらに、極めて高い延性を示したにもかかわらず、粗大セメンタイトのサイズは比較的小さく、粗大セメンタイトと微細セメンタイトのサイズ比が小さかった。

次に、高強度材における劣解 (Fig. 6(a)) とパレート解 (Fig. 6(b)) のミクロ組織を比較した。両者の引張特性 (Table 2) を比較すると、低強度材と同様に全伸びの向上により強度-延性バランスが大幅に向上している。また、低強度材の場合と同様に、パレート解では多くのセメンタイトは球

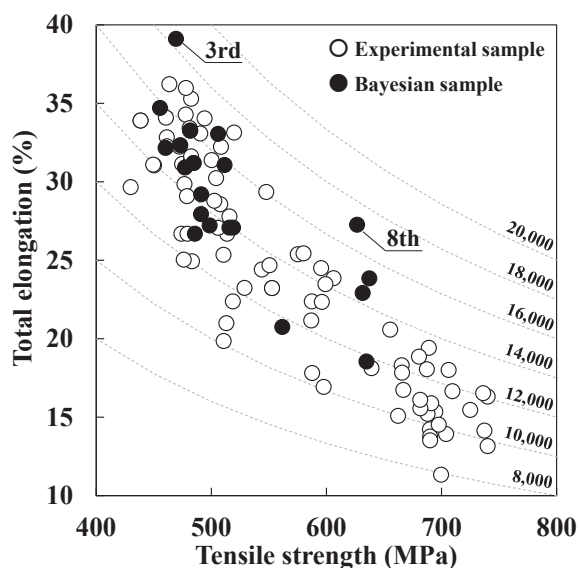


Fig. 4 Tensile properties added in Fig. 1 with data updated by multi-objective Bayesian optimization.

状化していた。さらに、粗大セメンタイトのサイズは比較的小さく、微細セメンタイトの個数が非常に多かった。

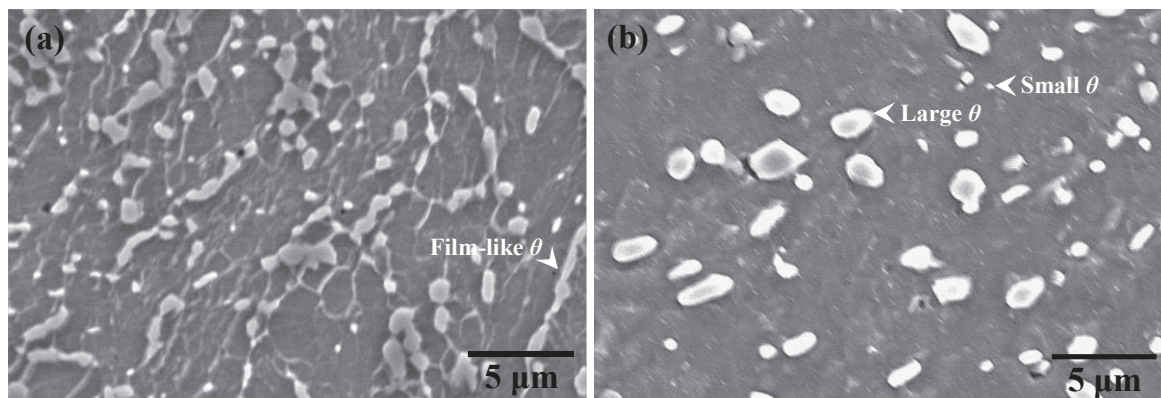


Fig. 5 Microstructures of (a) inferior and (b) Pareto solutions for tempered specimens with low strength.

Table 1 Tensile properties in tempered low strength samples with inferior and Pareto solutions.

	Tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Tensile strength $\times$ Total elongation (MPa $\cdot$ %)
Inferior solution	479	26.7	12789
Pareto solution	469	38.9	18244

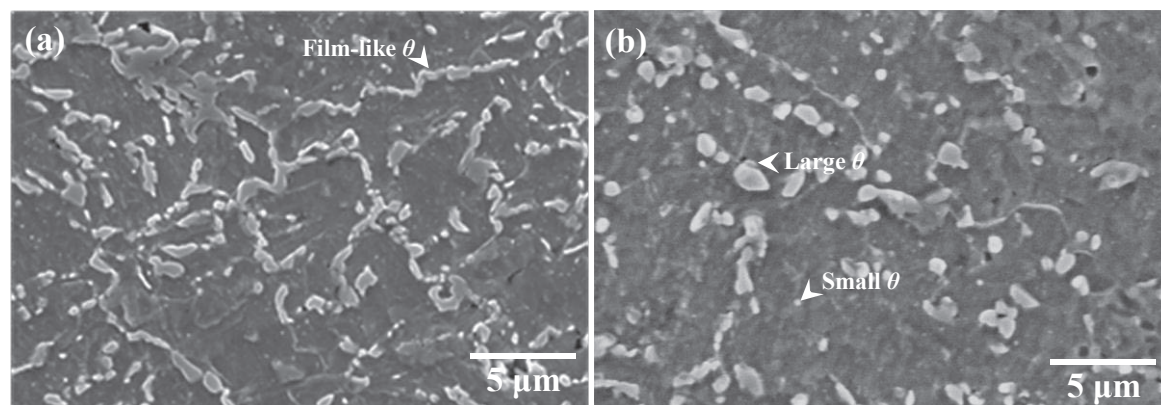


Fig. 6 Microstructures of (a) inferior and (b) Pareto solutions for tempered specimens with high strength.

Table 2 Tensile properties in tempered high strength samples with inferior and Pareto solutions.

	Tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Tensile strength $\times$ Total elongation (MPa $\cdot$ %)
Inferior solution	639	18.1	11566
Pareto solution	627	27.3	17117

以上の結果から、パレート解を得るために必要な焼き戻し条件として、高温焼き戻しでは長時間保持により粗大セメンタイトの球状化を促進し、低温焼き戻しでは高温-短時間もしくは低温-長時間の焼き戻しにより微細セメンタイトを多く析出させつつ、セメンタイトの成長および合体による

粗大化を抑制することが有効であると考えられる。従来、複相組織鋼における硬質第二相の微細均一分散が、強度-延性バランスの向上に有効であることが報告されている [5]。つまり、焼き戻しマルテンサイト鋼においては、従来報告されている硬質第二相の微細均一分散という指針に加え、粗大および微細セメンタイトのサイズ比を適切に制御することが強度-延性バランスのさらなる向上に繋がると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、機械学習の援用により鉄鋼材料の低合金化と高強度・高延性化を実現することを大局的な目的とし、焼き戻しマルテンサイト鋼における強度-延性バランスの向上を試みた結果、以下の知見を得た。

- (1) 焼き戻し条件の改良と多目的ベイズ最適化の活用により、強度と延性がともに優れる2つのパレート解の獲得に成功した。
- (2) 強度-延性バランスを向上させる組織形態は、セメンタイトの等軸化、さらには粗大セメンタイトと微細セメンタイトのサイズ比を小さくすることが有効であることを明らかにした。また、それらを達成するための焼き戻し条件は、一段階目の高温焼き戻しでは長時間保持、二段階目の低温焼き戻しでは温度に応じて保持時間を調整する必要がある。

#### 参考文献

- [1] M. Takahashi, Sheet steel technology for the last 100 years: Progress in sheet steels in hand with the automotive industry, *Tetsu-to-Hagané*, 100 (2013), 82-93.
- [2] S. Hiwatashi, Autobody lightweighting and decarbonization with advanced high-strength steels, *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, 73 (2022), 390-394.
- [3] K. Hayakawa, T. Ogawa, L. He, F. Sun, Y. Adachi, Improvement in the strength-ductility balance of tempered martensite steel by controlling cementite particle size distribution, *J. Mater. Eng. Perform.*, 33 (2024), 6675-6685.
- [4] K. Sawai, K. Sugiura, T. Ogawa, T. T. Chen, F. Sun, Y. Adachi, Analysis of tensile properties in tempered martensite steels with different cementite particle size distributions, *AIMS Mater. Sci.*, 11 (2024), 1056-1064.
- [5] T. Nonaka, N. Fujita, H. Taniguchi, T. Tomokiyo, K. Goto, Development of ultrahigh-strength steel sheets with excellent formabilities, *Mater. Jpn.*, 46 (2007), 108-110.