

## アルミニウム溶接構造体の強度予測モデル構築\*

荒木 俊雄\*\*, 岩村 信吾\*\*\*, 蓬田 翔平\*\*\*\*  
井上 純哉\*\*\*\*\*, 源 聡\*\*\*\*\*, 渡邊 誠\*\*\*\*\*

### Development of Strength Prediction Model for Welded Aluminum Structures\*

Toshio Araki\*\*, Shingo Iwamura\*\*\*, Shohei Yomogida\*\*\*\*  
Junya Inoue\*\*\*\*\*, Satoshi Minamoto\*\*\*\*\* and Makoto Watanabe\*\*\*\*\*

#### 1. 背景と目的

溶接部の特性を最適化するためには、合金成分と材料組織（析出物、結晶粒など）の適切な制御が必要である。一方、溶接には、母材の種類や板厚、形状、溶加材の種類、溶接条件など、多くの製造因子が影響するため、実験的な方法のみで最適条件を見出すには、大きなリソース（工数、費用）を要する。対して、近年、様々な分野で応用が進んでいるデータ科学は、多数のパラメータが関与する複雑系現象の表現・理解に向いている。実験データ群を元に製造因子と特性の関係をモデル化すれば、様々な製造条件で仮想的に特性を推測することができ、トライアルアンドエラーの試行回数低減が期待できる。ただし、データ科学によるモデルが適用できるのは、学習データの範囲内に限定される。既存の実験データの範囲外までを推測するには、物理法則に基づく予測モデルが適しているが、物理モデルは開発コストと計算コストが大きいという課題もある（脚注）。以上のように、実験、データ科学、物理法則というアプローチがあるが、いずれも長所と短所を併せ持っている。

本研究では、より低コストで広い条件範囲での溶接条件最適化を目的に、アルミニウムの溶接構造体を例

に、実験、データ科学、物理法則の3つのアプローチを併用した強度予測モデルの開発を試みた。

#### 2. 検討対象と実験データベース整備

アルミニウムの溶接構造体としてメジャーな5000系アルミニウム合金のMIG溶接を予測の対象とした。5000系アルミニウム合金の主要な強化機構は固溶強化であるので、析出強化型の合金に比べてメカニズムはシンプルである。母材を5083と5052の2種類、溶加材を5183とAl-5.8% Mg-0.8% Mn-0.1% Zrの2種類とし、板厚を始めとした形状因子を変更して、計24条件で溶接構造体を作製した。さらに、溶接構造体および各部位（母材、熱影響部、溶接部）の組織および特性を定量的に評価し、データベースとした。以上の実験条件の要約をFig. 1に示す。

#### 脚注

物理モデル開発は、現象のメカニズムを表現する理論式や回帰式の選択・プログラミング・実験データとの比較による計算精度の検証で実施される。計算精度向上には、選択する数式の追加や見直し・再プログラミング・パラメータ調整（数式の係数やフィッティングパラメータ導入）が必要であり、要求される精度に応じて開発コストが大きくなる。また計算精度には計算タイムステップが影響し、ステップ幅を微細にする程精度が向上するが計算コストが大きくなる。

\* 本稿の主要部分は、軽金属溶接, 57 (2019), 437-440に掲載。

Main part of this paper has been published in the Journal of Light Metal Welding, 57 (2019), 437-440.

\*\* (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部 博士(工学)

Research Department II, Research & Development Division, UACJ Corporation, Ph. D. (Eng.)

\*\*\* (株)UACJ 経営戦略部 博士(工学)

Corporate Strategy Department, UACJ Corporation, Ph. D. (Eng.)

\*\*\*\* (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部

Research Department II, Research & Development Division, UACJ Corporation

\*\*\*\*\* 東京大学 生産技術研究所 博士(工学)

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph. D.

\*\*\*\*\* 国立開発研究法人 物質・材料研究機構 博士(理学)

National Institute for Materials Science, Dr. Sc.

\*\*\*\*\* 国立開発研究法人 物質・材料研究機構 博士(工学)

National Institute for Materials Science, Ph. D.

### 3. モデルの構造設計

素材と製造条件から特性を予測するという目的に対し、Fig. 2のモデル構造を設定した。全体としては、素材と製造条件のインプット情報を元に、溶接構造体の強度を予測する流れである。ここに、中間情報として、各部位(母材、溶接部、熱影響部)のマイクロ組織およびマイクロ強度特性を設定し、これらを下記の3つのサブモデルでつなぐ構造とした。

- ①各部位のマイクロ組織予測サブモデル
- ②各部位のマイクロ強度特性予測サブモデル
- ③溶接構造体のマクロ強度特性予測サブモデル

個々の予測計算の方法としては、回帰式、経験式、理論式、物理シミュレーションなど、様々な方法があるが、手法の使い分けが重要である。高度なモデルは様々な物理現象を考察できる反面、多くの開発時間と計算時間が必要になるというデメリットもある。特に、複数の予測計算を連結させる場合には、単純なモデルの組合せの方が全体最適を図りやすく、好適である。本研究においては、マイクロ組織計算に回帰式を、マイクロ強度特性計算に経験式を、マクロ強度特性計算にFEMを用いた。

このフレームワークに基づき、製造因子から溶接構造体の強度に到るまでの製造因子、材料組織因子の詳細な繋がりを整理した(Fig. 3)。本研究では、上記因子群より、結果に特に影響を及ぼすMg量と結晶粒径に着目してモデルを構築した。

### 4. モデル構築

#### 4.1 各部位のマイクロ組織予測サブモデル

マイクロ組織予測計算においては、説明変数として母材と溶加材の合金成分、形状因子(板厚、開先設計)、溶接条件(電圧、電流、溶接速度)を用いた。さらに、材料が受ける熱履歴の情報として、Rosenthalの移動熱源の式により、最高到達温度を計算し、説明変数に加えた。予測する目的変数としては、結晶塑性への影響が大きいMg量と結晶粒径を設定した。

溶接は製造パラメータが多く、材料組織変化を理論的かつ正確に予測することが難しいため、ここではニューラルネットワークによる回帰式を用い、説明変数と目的変数の関係をモデル化した。Fig. 4に示すように、このサブモデルにより、高精度にMg量と結晶粒径を予測できる。ただし、非線形モデルであるニューラルネットワークを採用したことで、データベースの外挿領域に対する予測精度は低下していると考えられ、扱う際には計算条件に注意が必要である。

#### 4.2 各部位のマイクロ強度特性予測サブモデル

各部位における結晶塑性は、経験的に知られている真応力-真歪の指数則を基本に、Mg量と結晶粒径の影響を加味した式(1)にて算出した。

$$\sigma = \left( k_1 C_{Mg} + \frac{k_2}{\sqrt{D}} \right) \epsilon^{(k_3 + k_4 C_{Mg})} \quad (1)$$

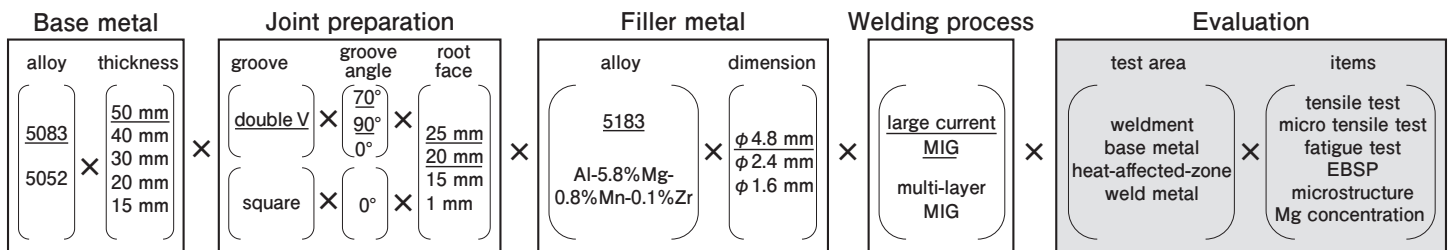


Fig. 1 Experimental conditions. Each item underlined was the control condition.

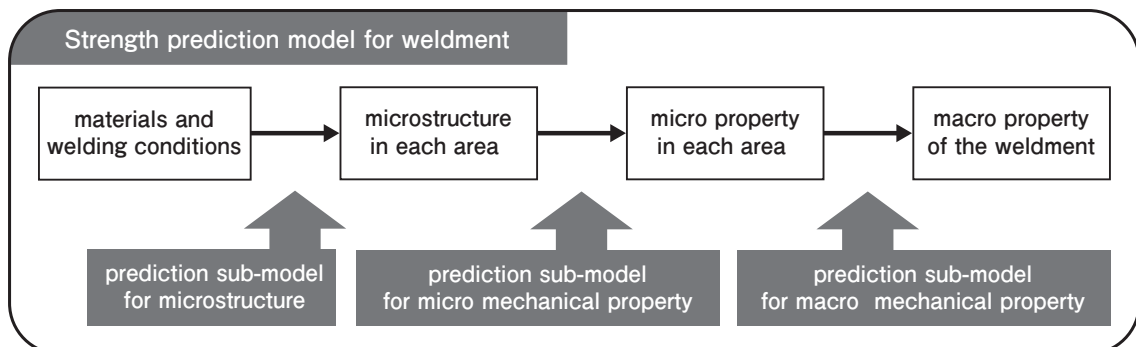


Fig. 2 Framework of property prediction model for aluminum weldment.

ここで、 $\sigma$ は流動応力、 $\varepsilon$ は真歪、 $D$ は結晶粒径、 $C_{Mg}$ はMg量である。定数 $k_i$ については、各部位から切り出した微小試験片の応力歪曲線にデータ同化して決定し、 $k_1=9.4 \times 10^3$ ,  $k_2=0.47$ ,  $k_3=0.08$ ,  $k_4=2.8$ を得た。実験と計算による耐力と引張強さの比較をFig. 5に示す。強度レベルが異なる2つの合金(5083, 5052)について高精度に予測可能である。また、式(1)は金属材料の加工硬化を表現する経験式であることから、実験データ範囲外でもある程度の妥当性が期待できる。

### 4.3 溶接構造体のマクロ特性予測サブモデル

マクロ強度特性予測においては、実験で実施した引張試験をFEMで模擬することで、溶接構造体全体としての応力-歪曲線を求めた。試験片の形状と、FEMメッシュをFig. 6に示す。メッシュは引張試験片のサイズに合わせて作成し、試験片の断面マクロ観察の結果に基づき、メッシュに母材、熱影響部、溶接部の境界線を設定した。さらに、各部位のそれぞれに、ミクロ強度特性予測サブモデルで計算した結晶塑性の情報(応力歪曲線、式(1))を付与し、FEM計算に供した。

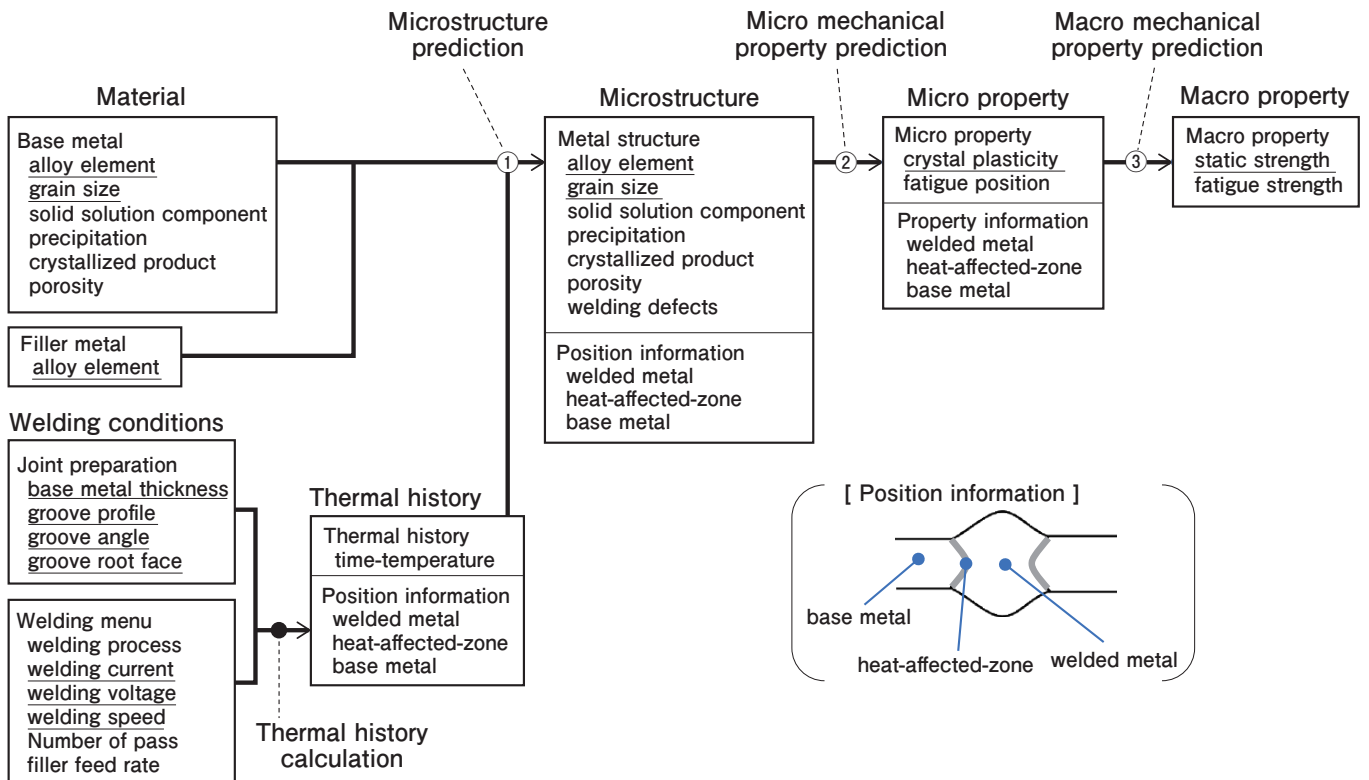


Fig. 3 The relevance of welding procedure and material properties factors in influencing weldment properties. The factors underlined were applied in this model.

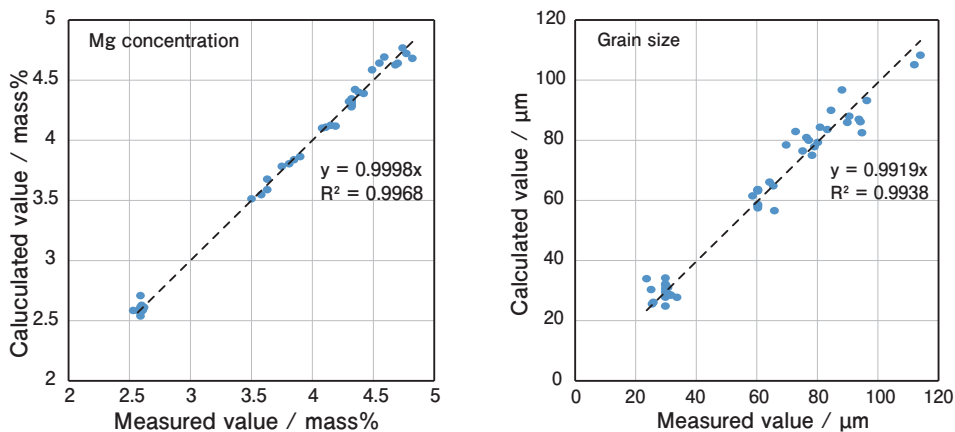


Fig. 4 Accuracy of prediction sub-model for microstructure.

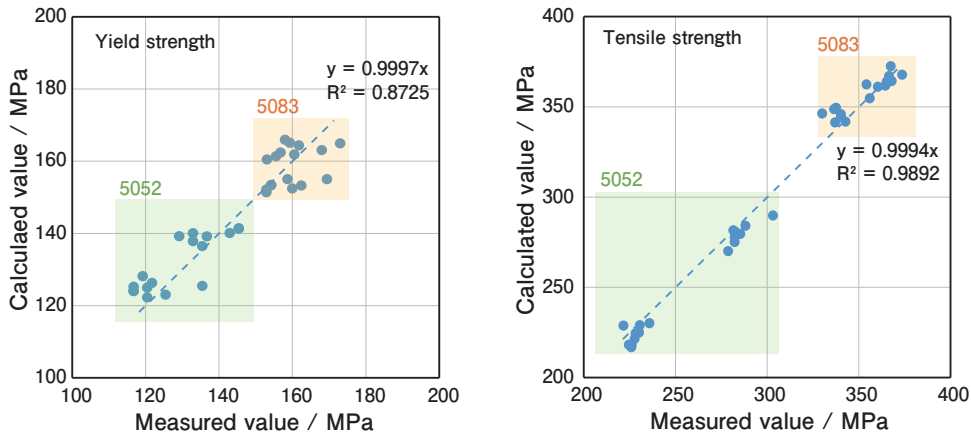


Fig. 5 Accuracy of prediction sub-model for micro mechanical property.

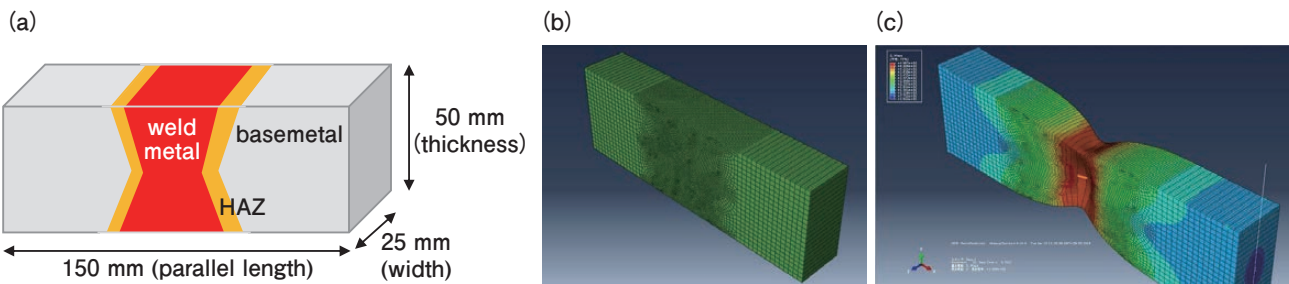


Fig. 6 Simulation of tensile test by FEM. (a)schematic figure of tensile test specimen (b)initial FEM mesh (c)the simulation result after tensile test.

### 5. モデルの精度検証

モデルの精度検証のため、3つのサブモデルを組み合わせた溶接部強度予測モデル全体による計算結果を、実材料の結果と比較検証した。検証した条件としては、製造条件は基準条件 (Fig. 1 下線の条件) とし、母材 (5052, 5083) と、溶加材 (5183, Al-6% Mg-0.8% Mn-0.2% Zr) を組み合わせた4条件とした。

まず、破断位置について計算と実験を比較した結果を Fig. 7 に示す。実材料の引張試験では、母材が高強度の5083の場合は溶接部で、低強度の5052の場合は母材で破断した。フレームワークによる予測結果でも、同様の位置でくびれが生じており、定性的に傾向が一致した。ただし、母材で破断した5052の計算では溶接部に対して左右対称なFEMメッシュを与えているため、左右均等にくびれが生じた。破断形態を議論する場合は問題になるが、引張強さを予測する場合には影響は小さいと考える。Fig. 8 に応力歪曲線を計算した結果を示す。計算による応力歪曲線での最高強度は、実験における引張強さとよく一致している。検証した4条件において、引張強さの予測誤差は±5 MPa以内であり、実用レベルの予測精度を達成した。

### 6. まとめと今後の展望

本研究では、アルミニウム溶接構造体の製造条件最適化という目的に対し、実験、データ科学、物理法則の3つのアプローチを組み合わせ、強度予測モデルを構築した。この強度予測モデルは、検証した範囲内で高い予測性能を示し、実検討におけるトライアルアンドエラー回数の低減に資すると期待される。

本検討により、材料特性予測に関する今後の課題と可能性が明確となった。データアプローチは高い予測精度が期待できる反面、モデルの汎化性能が下がり、適用範囲が狭くなる。物理モデルはこの問題を解決するが、複雑な現象を物理モデルで表現する場合、開発コストが大きくなり、実験によるトライアルアンドエラーの方が速いということになりかねない。本検討で提示した方法は、簡単な物理法則 (あるいは経験則) とデータアプローチを併用しており、実用レベルの特性予測モデルを構築する際の、一つの解決策として期待できる。

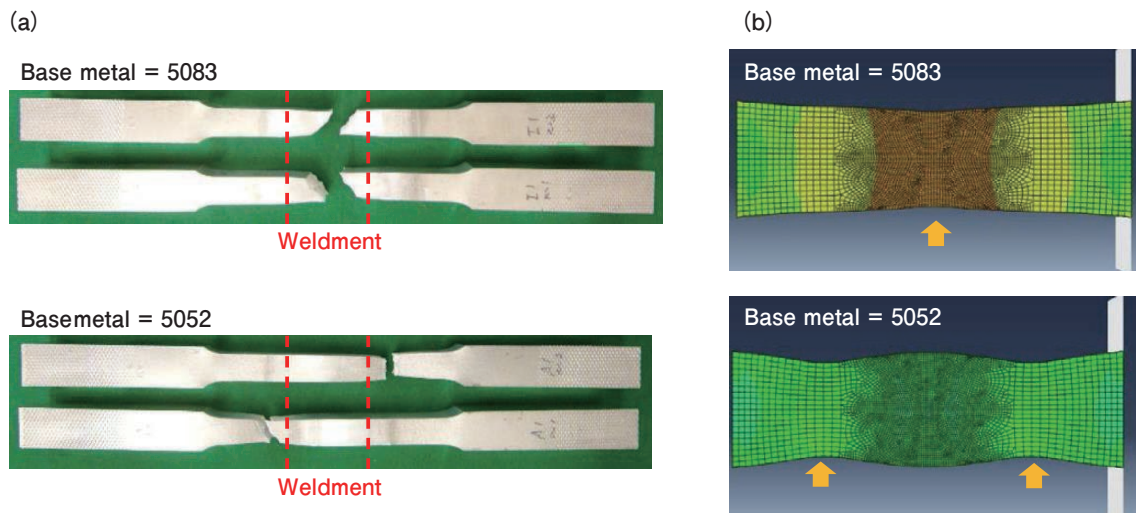


Fig. 7 Simulation result of weldment strength by prediction model for mechanical property, comparison of fracture points. (a) experimental result (b) simulation result

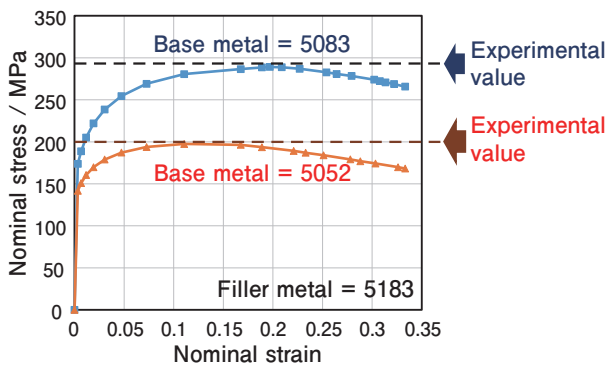


Fig. 8 Simulation result of weldment strength by prediction model for mechanical property, comparison of strength.

謝 辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「革新的構造材料」(管理法人: JST) によって実施された。ここに特記して謝意を表す。



荒木 俊雄 (Toshio Araki)  
 (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部  
 博士(工学)



岩村 信吾 (Shingo Iwamura)  
 (株)UACJ 経営戦略部  
 博士(工学)



蓬田 翔平 (Shohei Yomogida)  
 (株)UACJ R&Dセンター 第二研究部



井上 純哉 (Junya Inoue)  
 東京大学 生産技術研究所  
 博士(工学)



源 聡 (Satoshi Minamoto)  
 国立開発研究法人 物質・材料研究機構  
 博士(理学)



渡邊 誠 (Makoto Watanabe)  
 国立開発研究法人 物質・材料研究機構  
 博士(工学)