

特集 ろう付継手のフィレット形状予測*

Simulation Technology of Fillet Shape for Brazing Joints

手島 聖英
Shoei TESHIMA

小川 洋
Hiroshi OGAWA

It is now more important than ever to assure the quality of brazing joints for Aluminum heat exchangers for automobiles, as the challenges facing product design tend to be higher and the development period tends to be shorter. Furthermore, it is important to develop simulation technology of fillet shapes for brazing joints. Our final target is the prediction of fillet shapes for brazing joints of Aluminum heat exchangers and the assurance of brazing quality during the design process of products.

In this report, we introduce the development plan, the idea of simulation technology, and case examples of fillet shape simulation of brazing joints.

Key words: Simulation, Fillet, Brazing, Joint, Filler metal, Heat exchanger, Free energy, Contact angle

1. はじめに

自動車用アルミ熱交換器には、エンジン冷却用のラジエータやエアコン用のコンデンサ、エバポレータ、ヒータコア等がある。これらの製造方法はいずれもろう付¹⁾と呼ばれる接合方法を用い、フィン、チューブ、タンク等の各種部品からなる多数の継手をろう材が充てんすることにより接合している。このろう材が充てんした部位をフィレットといい、その機能は伝熱促進、気密性確保、強度確保等である。フィレット形状によりこれら機能の特性値が異なってくるため、必要なフィレット形状を得るためにろう材をどの部位にどれだけ設置し、どのようなろう付条件（温度・時間・雰囲気）にすべきかを考え製品設計することが重要である。

代表例としてラジエータの継ぎ手形状を Fig. 1 に示す。ラジエータでは伝熱促進と強度確保が必要なフィ

ンとチューブの継手部（コア部）と、それに加え気密性確保も必要なチューブとプレートの継手部（根付部）がある。このような継ぎ手形状を形成するためのろう材はクラッド材として供給される。クラッド材とは Figs. 2&3 に示すようにあらかじめ芯材表面に圧延によりろう材が設置された材料である。クラッド材の板厚が厚かった従来は、自由度を持ったろう材量を材料表面に設置することができた。しかし近年、自動車用

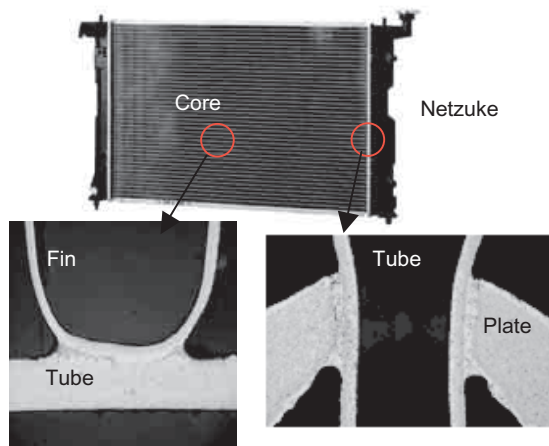


Fig. 1 Brazing joint shape of radiator

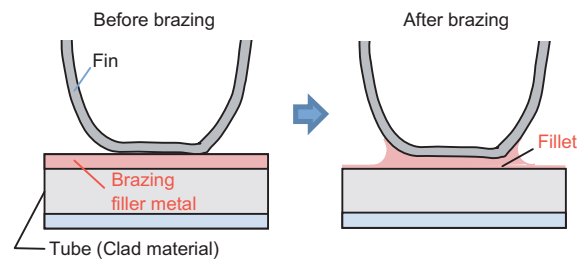


Fig. 2 Structure of material for brazing and fillet

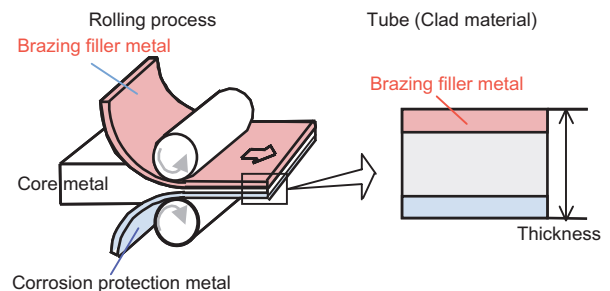


Fig. 3 Method of tube clad material

* 2007年8月20日原稿受理

アルミ熱交換器の高性能・軽量化要求の中、Fig. 4に示すように材料の薄肉化が進行し、従来のように自由度を持ったろう材量を材料表面に設置することが難しくなってきた。また、製品構造も複雑多様化してきており、Fig. 5に示すチューブ構造のようにチューブをろう付にて形成する傾向にあるとともに、そのろう付部が溝となって生ずる現象（タンクからチューブへのろうの流れやチューブとフィンの接合部同士のろうの釣り合い）を考慮しつつ適正なろう材量を適正箇所に配置する必要がある。そのため、従来よりも製品設計の難易度が高まってきた。

一方、製品の開発期間の短縮化が要求される中、従

来のような実験・評価を各段階で繰り返し確認していくのではなく、あらかじめ精度の高いフィレット形状予測をすることにより、設計段階でろう付品質を確保する技術開発が望まれる（Fig. 6参照）。

そこで我々は、このような製品設計の難易度アップと開発期間の短縮要求に応えるため、ろう付継手形状とろう材の設置方法（場所、量）を入力することにより、ろう付後のフィレット形状を予測するフィレット予測技術（シミュレーション技術）の開発に着手した。

本報では、その研究の目指す姿と形状予測の考え方および基礎評価段階の解析事例を紹介する。

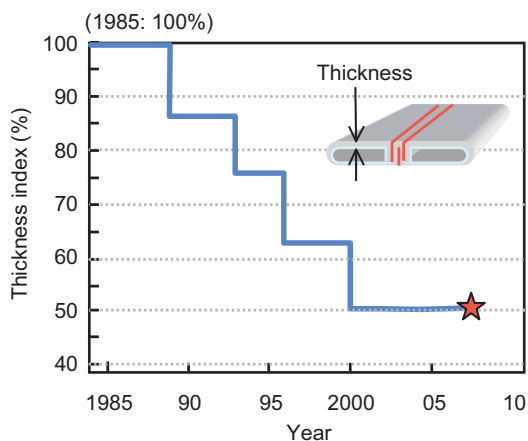


Fig. 4 Transition of tube thickness for radiator

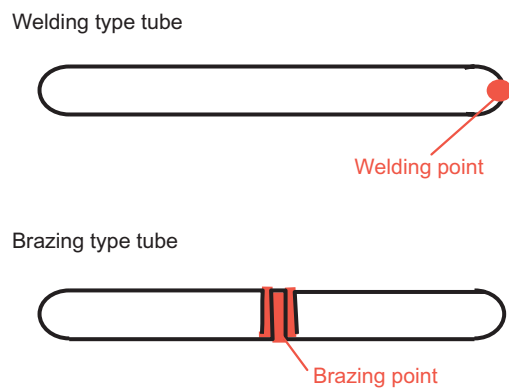


Fig. 5 Type of tube shape

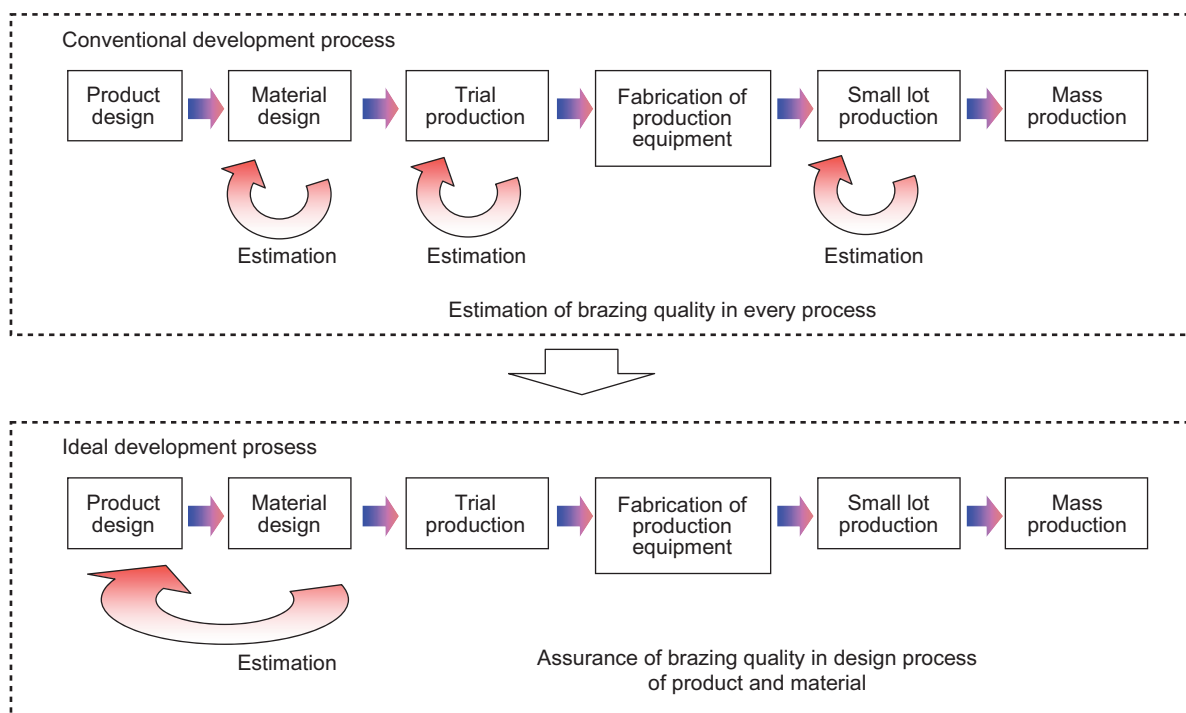


Fig. 6 Process of ideal development from design to mass production

2. 研究の目指す姿

ろう付継手のフィレット形状予測の研究ステップを Fig. 7 に示す。最終的に目指す姿は、アルミ熱交換器の各部位におけるろう付後のフィレット形状を予測する技術開発である。これを実現するためには、各種 1 点継手形状におけるフィレット形状を予測するシミュレーション技術を確立することと、それらの形状を組み合わせた場合に生ずるろうの流動を予測するシミュレーション技術を確立することが必要である。1 点継手の代表的な形状には、フィンとチューブの継手部（コア部）とチューブとプレートの継手部（根付部）がある。

まず、これらを解析するための簡易形状モデルとして前者を逆 T 字形形状モデル、後者を貫入モデルとして取扱い、そのフィレット形状予測技術を開発することを基礎評価段階とし、継手形状の難易度の観点からそれぞれを STEP 1 および STEP 2 とした。そして、STEP 1、STEP 2 で確立した逆 T 字形形状モデルと貫入モデルのフィレット予測技術を組み合わせ 2 点継手間のろう流動予測技術の開発を行うことを次のステップ (STEP 3) とし、STEP 1～3 で確立したシミュレーション技術を実機コア形状に適用し、複雑で多数の継手形状におけるろうの流動とフィレット形状予測を実現することを最終目標 (STEP 4) とした。

今回はこの研究ステップの中の STEP 1 と STEP 2

に関するフィレット形状予測の考え方と解析事例について紹介する。

3. フィレット形状予測の考え方

溶融したろう材がろう付継手に充てんされフィレットを形成する現象を熱力学的に考えると、ろう材が持っている自由エネルギーが平衡状態になろうとして最小の状態になることと考えられる。ここで言う自由エネルギーとは、Fig. 8 に示すような ①界面自由エネルギー ②表面自由エネルギー ③位置エネルギーであり、この現象をモデル図で説明したのが Fig. 9 である。

物性値が同じで形状要因のみに絞ってそれぞれを考えると、①はろう材と母材間の接触面積、②はろう材と気体間の表面積、③はろう材高さに相当する。ここで自由エネルギーが最小となる場合とは、①ろう材と母材の接触面積が大きくなり、②ろう材の表面積が小さくなり、③ろう材の高さが低くなる場合である。その結果、平衡状態では Fig. 9 に示すような半球状態になるということがフィレット形状予測の基本である。この考え方をもとに各種物性値、初期条件等を入力し、自由エネルギーが最小となるような計算をすればフィレット形状を予測できると考えた。

今回、基礎評価段階でのフィレット形状予測を行うに当たり、上記に加え新たに設定した入力条件のポイントは次の 2 点である。

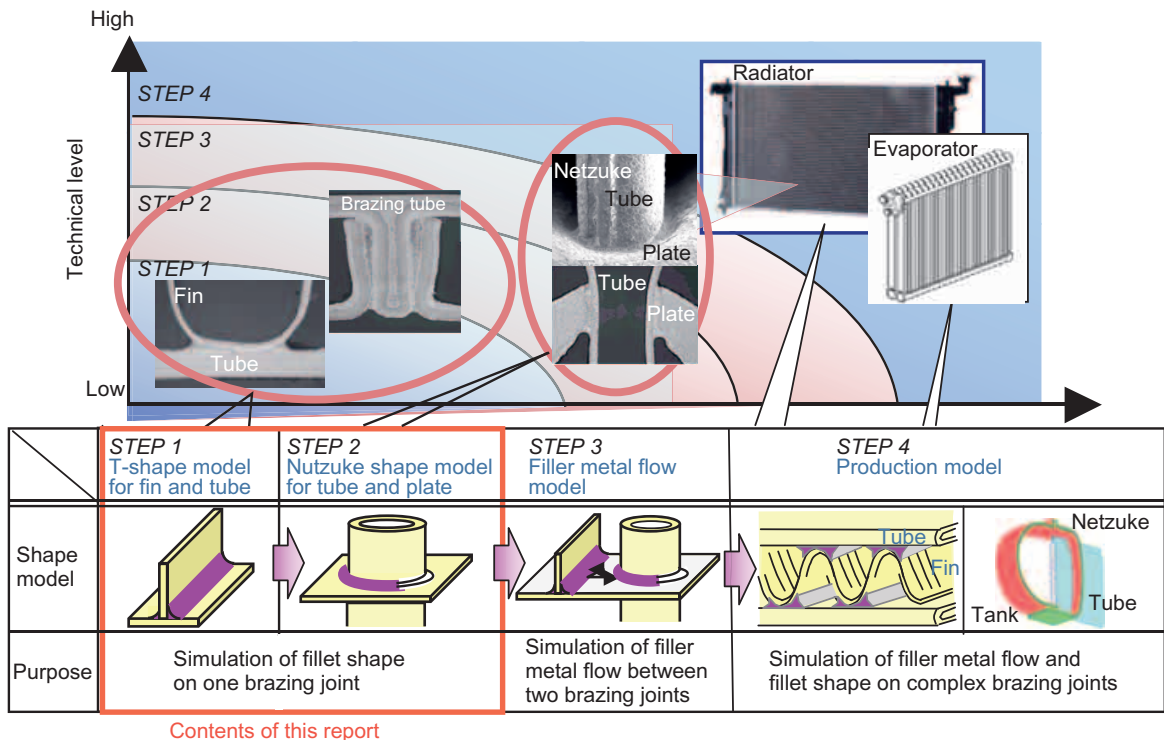


Fig. 7 Process of research and development of fillet shape simulation for brazing joints

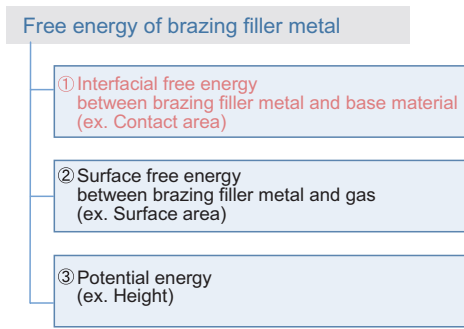


Fig. 8 Classification of free energy

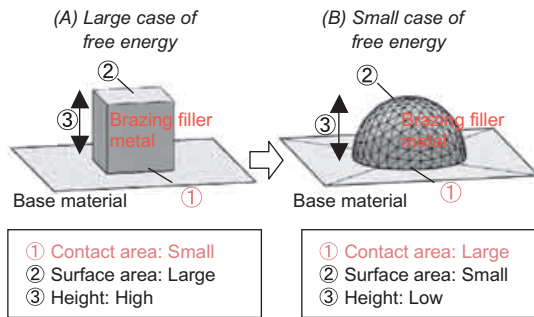


Fig. 9 Idea of fillet shape simulation at brazing

- (1) 表面および界面自由エネルギーの算出に必要な物性値の設定方法・・・接触角，気体とろう材間の表面張力
- (2) 流動有効ろう材量の設定方法・・・流動係数

(1) の表面自由エネルギー算出に必要な物性値は気体とろう材間の表面張力 γ_L である。この表面張力について文献²⁾³⁾を調査した結果、ろう材成分である Al-10% Si の 600 °C における値が $\gamma_L = 0.89 \text{ J/m}^2$ であることが分かりこの値を採用した。また (1) の界面自由エネルギー算出に必要な母材とろう材間の表面張力 γ_{SL} は、Fig. 10 および式 (1) に示す Young の式を基本に、実験結果に基づく接触角測定結果 ($\theta = 0$ 度) と上述の γ_L から算出した。

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta \quad (1)$$

- γ_S : 気体と母材間の表面張力
- γ_{SL} : 母材とろう材間の表面張力
- γ_L : 気体とろう材間の表面張力
- θ : 接触角

一方、(2) の流動有効ろう材量の設定方法は、Figs. 11&12 に示すような実験結果に基づき設定した。ろう付の場合、加熱時にろう材が芯材に拡散し残存するため、初期の材料表面にあるろう材量 (=クラッドろう

材量) と実際にフィレットを形成するろう材量には差が生ずる。そこで Fig. 11 に示すようなろう付後の断面観察結果に基づき、式 (2) および Fig. 12 に示す方法で流動係数 0.6 を選定し入力した。

$$R = S_1/S = S_1/(S_1 + S_2) \quad (2)$$

- R: 流動係数
- S: 初期のろう材体積
- S_1 : フィレット形成に必要なろう材体積
- S_2 : 残存ろう材体積

なお、今回フィレット形状予測に使用した解析ソフトは、Surface Evolver⁴⁾ という有限要素法 (FEM) ソフトである。本ソフトは電子部品のはんだ付部における形状・強度解析等に用いられており、熱交換器のろう付継手部におけるフィレット形状解析にも適用可能と考え使用した。

以下、具体的な二つの解析事例について紹介する。

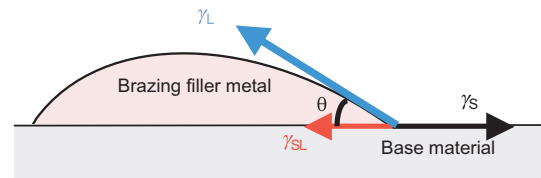


Fig. 10 Balance of interfacial tension and surface tension

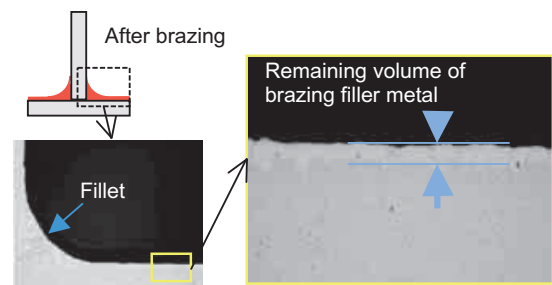


Fig. 11 Remaining volume of brazing filler metal in cross section photograph

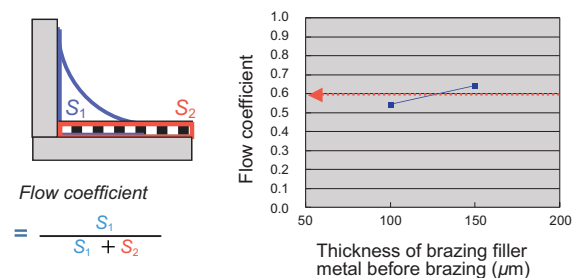


Fig. 12 Experimental data of flow coefficient

4. 解析事例

4.1 逆T字形モデル

本モデルは、アルミ熱交換器のフィンとチューブ間の継手形状（コア部）を想定した線接合のシミュレーション解析事例である。モデル形状を Fig. 13 に示す。モデル形状は板と板を垂直に組合せ逆T字型に設置したものである。解析条件を Table 1 に示す。解析条件の表面張力 γ_L 、流動係数 R は前述の値を用い、密度はろう材の値を用いた。また、ろう材量は厚さ 100 μm のクラッド材と設定しその体積を計算し入力した。解析結果を Figs. 14&15 に示す。解析後の平衡状態における外観は Fig. 14 に示すように板と板の間にろう材が充てんされフィレットを形成していた。このモデルの中央部断面におけるフィレット形状を数値化した結果を Fig. 15 に示す。解析の結果、ろう付継手には表面張力の影響を受けた R 形状のフィレットを形成していた。

一方、ろう付実験結果を Figs. 16&17 に示す。実験に用いたテストピースは解析と同じ形状で同じろう材量のものを用いた。実験の結果、Fig. 16 に示すように外観上解析結果同様のフィレットが板と板の接合部に形成されていることが分かった。また、テストピースの中央部断面を調査した結果、Fig. 17 の断面組織写真に示すように解析結果同様の R 形状のフィレットが形成されていることが分かった。さらに、Fig. 15 で得られた解析結果を断面組織写真に重ね合わせた結果、解析結果と実験結果がよく一致していることが分かった (Fig. 17 中の赤線と青四角を参照)。

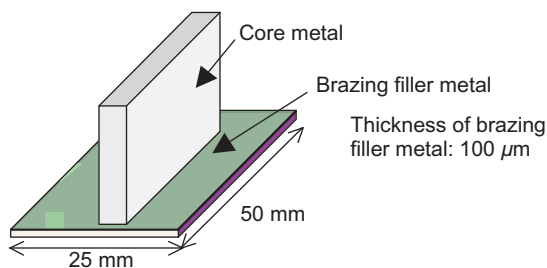


Fig. 13 T-shape model

Table 1 Analysis condition of T-shape model

• Density	p: 2.7 g/cm ³
• Gravity acceleration	g: 9.8 m/s
• Contact angle	θ : 0°
• Surface tension	γ_L : 0.89 J/m ²
• Flow coefficient	R: 0.6
• Volume of brazing filler metal (=Thickness of brazing filler metal: 100 μm)	V: 0.1375 cm ³
<Analysis software: Surface Evolver>	

以上のことより、逆T字形モデルでは解析結果と実験結果はよく一致しており、本シミュレーション解析にて逆T字形モデルのフィレット形状を予測できると判断する。

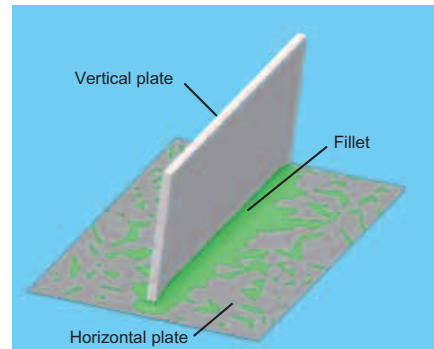


Fig. 14 Result of analysis (Appearance)

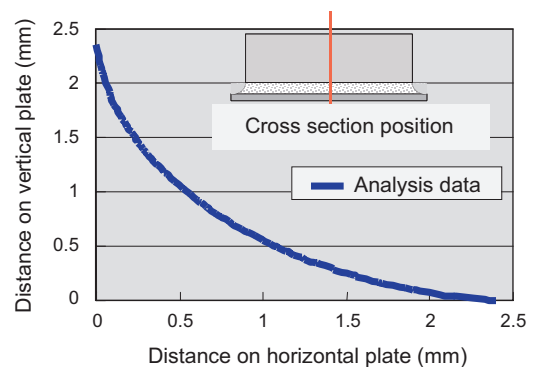
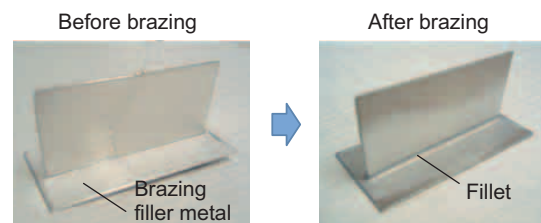


Fig. 15 The result of analysis (Fillet geometry)



Brazing filler metal: A4045 (Al-10Si)
Thickness: 100 μm

Fig. 16 Experimental result of brazing

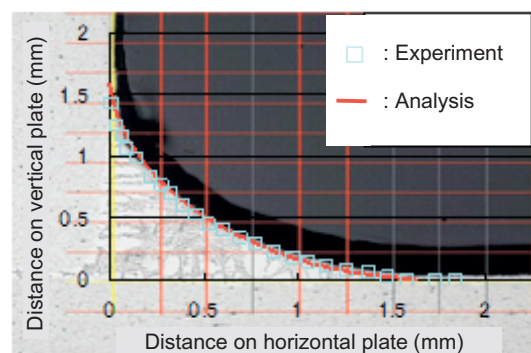


Fig. 17 Comparison between analysis and experiment (Fillet geometry)

4.2 貫入形状モデル

次に、アルミ熱交換器のチューブとプレート間の継手形状（根付部）を想定したシミュレーション解析事例を示す。モデル形状を Fig. 18 に、解析条件を Table 2 に示す。モデル形状はチューブに相当する円筒形のパイプをプレートに相当する円形の穴を空けた板へ垂直に設置したものである。その際、パイプとプレートは円形穴部の一箇所で必ず接触部があるように設置した。また、パイプ外径を 2 種類設定することにより最大となる隙間を変え、良品と不良品の二つのモデルにて解析を実施した。具体的には、パイプ外径とプレート穴内径間の最大隙間を小さく（0.8 mm）し、継手部である円周部がすべてろう材で充てんされるよう設定したのが良品モデルであり、パイプ外径とプレート穴内径間の最大隙間を大きく（3.6 mm）し、継手部である円周部の一部でろう材の未充てん部ができるように設定したのが不良品モデルである。ろう材量は厚さ 150 μm のプレートクラッド材と設定し、その他解析条件の物性値は前述の逆 T 字形モデルと同様の値を用いた（Table 2 参照）。

良品モデルでの解析結果を Fig. 19 の左欄に示す。良品モデルでは外観上継手部の円筒部がすべてろう材で充てんされていた（Fig. 19 の緑色部参照）。また、断面では上下両側に表面張力の影響を受けた R 形状のフィレットを形成していた。

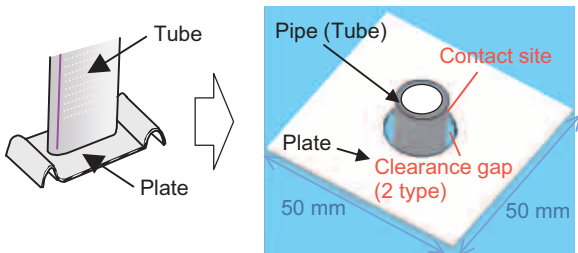


Fig. 18 Netzuke shape model

Table 2 Analysis condition of netzuke shape model

• Density	ρ : 2.7 g/cm ³
• Gravity acceleration	g : 9.8 m/s ²
• Contact angle	θ : 0°
• Surface tension	γ_L : 0.89 J/m ²
• Flow coefficient	R : 0.6
• Thickness of brazing filler metal	: 150 μm
• Plate size: 50 mm × 50 mm × 1 mm	
Center hole diameter:	ϕ 16.2 mm
• Tube size: Outside diameter	
Filling model (Gap: 0.8 mm):	ϕ 15.4 mm
No filling model (Gap: 3.6 mm):	ϕ 12.6 mm
<Analysis software: Surface Evolver>	

一方、良品モデルと同じ形状で同じろう材量のテストピースを用い、ろう付実験をした結果を Fig. 19 の右欄に示す。外観上継手部の円筒部がすべてろう材で充てんされており、かつ、断面写真にて上下両側とも R 形状のフィレットが形成されていることが分かり、解析結果と実験結果がよく一致していることを確認できた。

次に、不良品モデルでの解析結果を Fig. 20 の左欄に示す。不良品モデルでは円筒継手の一部でろう材未充てん部（フィレット未形成部）が発生していた。

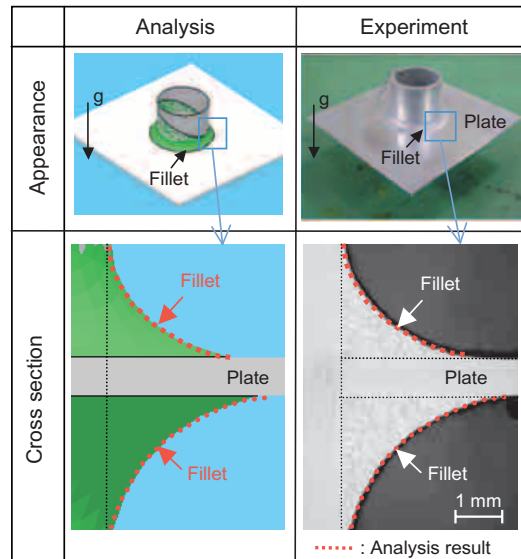


Fig. 19 Comparison between analysis and experiment at filling model (Clearance gap: 0.8 mm)

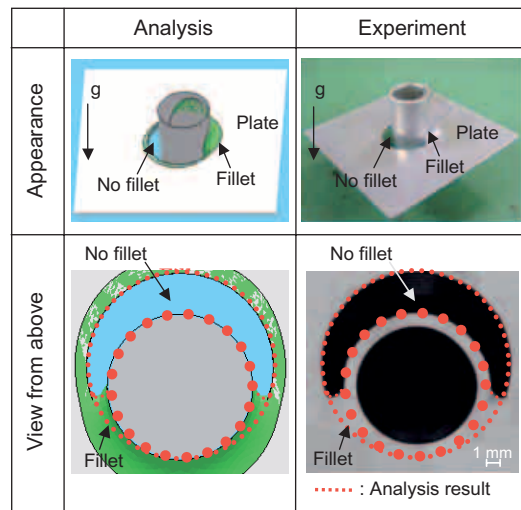


Fig. 20 Comparison between analysis and experiment at no filling model (Clearance gap: 3.6 mm)

この継手部を上から見た図が Fig. 20 左下欄であり、隙間が 1.6 mm 以上の箇所ではフィレットが未形成であった。

一方、不良品モデルと同じ形状で同じろう材量のテストピースを用い、ろう付実験をした結果を Fig. 20 の右欄に示す。左欄の解析結果と同様隙間が 1.6 mm 以上の箇所ではフィレットが未形成であることが分かり、解析結果と実験結果がよく一致していることを確認できた。

以上のことより、貫入形状の良品モデルと不良品モデルを用いフィレットの形成状態を比較調査した結果、解析結果と実験結果はよく一致しており、本シミュレーション解析にて貫入形状モデルのフィレット形状を予測できると判断する。

5. おわりに

アルミ熱交換器の継手形状におけるフィレット予測技術の開発に対し、自由エネルギー最小原理の考え方を導入し検討した結果、逆T字形状モデルと貫入形状モデルという二つの基本形状にてフィレット形状予測が可能なることを確認できた。今後、ろうの流動の考え方とモデルの形状データや物性値入力方法を簡素化する考え方を組み合わせることにより解析技術をさらに進化させ、実機コアのような複雑多数箇所のフィレット形状予測ができる解析技術の確立を目指していきたい。

<参考文献>

- 1) 手島聖英：“自動車用熱交換器のろう付技術”，軽金属学会 第81回シンポジウム テキスト (2007)，p. 14.
- 2) 宮崎 誠 他：“円柱周囲に形成されるメニスカス形状の解析”，溶接学会論文集，Vol.15，No.4 (1997)，p. 674.
- 3) B. J. Keene：“Review of data for the surface - tension of pure metals”，International Materials reviews Vol.38，No.4 (1993)，p. 157.
- 4) K. A. Brakke：“The Surface Evolver”，Experimental Mathematics Vol.1，No.2 (1992)，p. 141.



<著 者>



手島 聖英
(てしま しょうえい)

材料技術部
ろう付技術の開発に従事



小川 洋
(おがわ ひろし)

材料技術部
ろう付シミュレーション技術の開発に従事