

アルミニウムろう付における 流動ろうによる侵食現象の挙動観察と定量評価法の開発

In-Situ Behavioral Observation of Erosion Phenomena by Flowing Liquid Filler during Aluminum Brazing and Development of a Quantitative Evaluation Method

村瀬 崇
Takashi Murase

柳川 裕
Yutaka Yanagawa

概要 ラジエータやコンデンサなどの自動車用熱交換器の製造では、ろう付工程中にチューブが局所的に激しく侵食されることがある。この侵食は、チューブのろう接合部をヘッドからのろうが流動したために発生したものと推定されている。しかし、ろう付中の実際のろう流れ挙動を観察したり、侵食量とろう付条件との関係を定量的に把握するためには、従来の熱交換器ろう付後の調査や既存のろう付試験では困難であった。そこで、規定された量のろうを供給する上板、ろうの流路となる溝を持つ下板、およびろうを流動させ続けるろう吸引部からなる試験片を用いた評価方法を開発した。本評価法により、流動ろう侵食現象の要因パラメータについてその影響度を明確にできた。

Abstract: In the manufacturing process of automotive heat exchangers involving radiators and condensers, severe erosion is occasionally seen to occur locally on the tube during brazing. It is generally presumed that this erosion is caused by the molten filler from the header that flows into the brazing portion on the tube. However, for both the conventional method of studying brazed heat exchangers and the existing brazing test, it is difficult to observe actual behaviors of molten filler during brazing, as well as to quantitatively understand the relationship between the extent of erosion and the brazing conditions. Accordingly, we have developed a new evaluation method using a test piece that consists of a filler plate to supply a specified volume of filler, a base plate with gutters that serves as a fluid channel for the filler and capillary sheets which makes the filler keep flowing. It has been found that this evaluation method can clarify the effects of physical parameters in the erosion phenomenon due to molten filler.

1. はじめに

ラジエータ、コンデンサなどの自動車用熱交換器は、表層にAl-Siろう材層を有するアルミニウムクラッド材（ブレイジングシート）を成形加工した部品（チューブ、フィン、ヘッド、タンクなど）をろう付により接合し製造される。

代表的なろう付法である、非腐食性フラックスろう付では、**図1**に示すように、成形加工した部品を熱交換器の形状に組み、フッ化物系フラックスを塗布した後、窒素置換炉で600℃程度に加熱する。ブレイジングシートは、心材の融点が630～645℃程度なのに対し、ろう材は577℃～600℃程度で溶融するため、ろう付中はろう材のみが液相となる。フラックスの作用により材料表面の酸

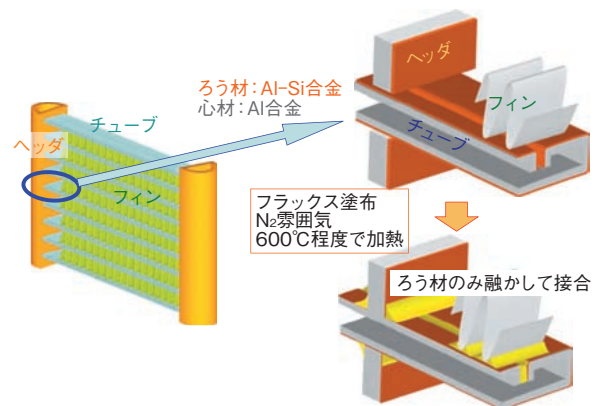


図1 自動車用熱交換器の模式図とろう付の模式図
Fig.1 Schematic of brazing of automotive heat exchanger.

化皮膜が破壊されているので、液相となったろうは、部材の間の隙間を充填し、部材を接合する。

ろう付過程で、溶融したろうと接触する心材に、**図2**に示すような軽微の侵食(溶解)が発生する¹⁾。

しかし、実際の熱交換器のろう付では、部材が局所的に激しくろう侵食される現象が見られることがある。これは、部材間を流動するろうによる侵食であると考えられている。

本報では、流動ろうによる侵食のメカニズムを解明するために、流動ろうによる侵食を再現し、ろうが流動する様子の直接観察、および侵食量と流動したろうの量の関係の定量を行う評価方法を開発したので、方法や定量例を報告する。

2. 従来の評価方法

ろうによる侵食を模式的に評価する方法として、従来は、**図2**に示すようにブレイジングシートを一枚の板で加熱して断面観察によってろうに侵食された深さを評価する方法や、**図3**に示す逆T字型継手試験片としたものを加熱してろうによる侵食深さを測定する方法があった²⁾。

1枚の板の加熱による評価では、チューブ、フィンなどの部材にクラッドされているろうが近傍の心材を侵食

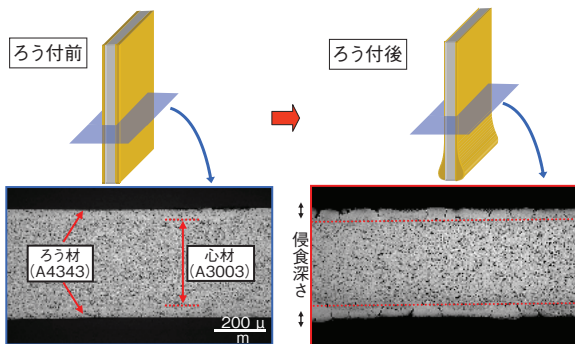


図2 ブレイジングシート心材のろうによる侵食
Fig.2 Erosion in brazing sheet :Core alloy penetrated by molten filler alloy.

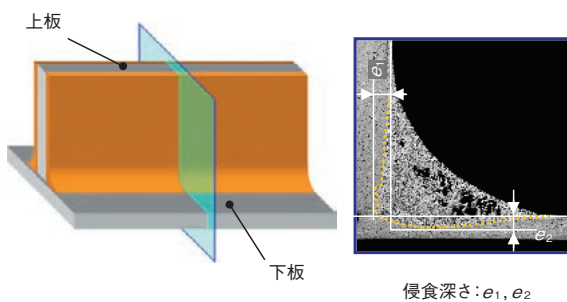


図3 逆T字型継手試験
Fig.3 T-shape model.

する量を評価するものである。また、逆T字型継手試験ではチューブとタンクの接合部などにフィレットとして溜まったろうによる母材の侵食を評価するものである。これらの評価で、ろうは溶融直後、重力や継手間の毛細管力で所定の位置に流動した後は、評価中大きく動くことはない。

図4は、チューブの折り曲げ部で発生したろう浸食を示している。ブレイジングシートを折り曲げ成形し、ろう付によって造管するチューブを用いた熱交換器では、このようにヘッダとの接合部近傍においてチューブの折り曲げ部の合わせ目が局所的にえぐられたように浸食されることがある。

このような現象は、前述の静止したろうによる従来評価方法では再現されなかった。そこで、筆者らは、**図5**に示す熱交換器を模擬したテストピースを用いて再現実験を行った。このテストピースはヘッダ、折り曲げ部を持つチューブおよびフィンを模擬した部分からなり、ヘッダ部分にのみろう材をクラッドしている。このテストピースのヘッダとチューブにフッ化物系フラックスを10 g/m²塗布した後、窒素ガス雰囲気中で600℃×3 minのろう付加熱を行った。ろう付加熱後サンプルの観察を行った結果、ヘッダのろうがチューブ折り曲げ部の端とチューブとフィン間に充填されていた。そして、ヘッダ近傍のチューブ折り曲げ部で長手方向に直交する断面を観察したところ、前述の侵食が再現されていた。

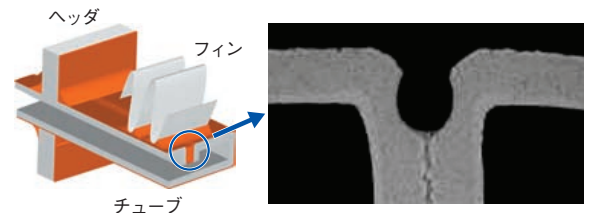


図4 自動車用熱交換器のチューブ折り曲げ付近での侵食の発生
Fig.4 Erosion at brazing line on automotive heat exchanger tube.

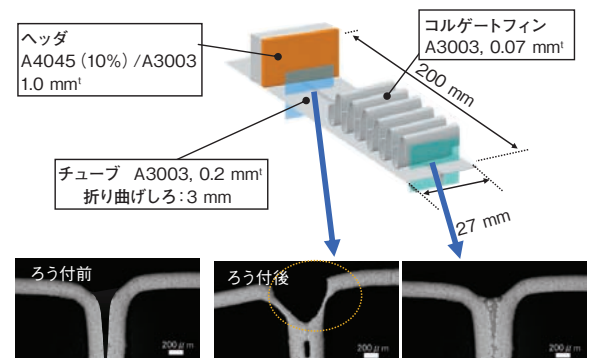


図5 侵食の再現実験方法と結果
Fig.5 Method and result of erosion model test.

この侵食は、毛管力によるヘッダ溶融ろうのチューブ折り曲げ部への流動に原因があると考えられていた。

これらの結果より、この侵食は、チューブ折り曲げ部の隙間を流動するヘッダのろう材に起因すると推定した。

しかし、上記の方法は、ろう侵食現象を再現できるが、次の問題点があり、ろう侵食の定量評価や機構解明ができなかった。

- ①流動したろう材の定量が不可能。
- ②隙間やフィンとチューブの接合部の形状が加熱中に変化する。
- ③隙間を流れる溶融ろうの挙動が見えない。

- ①溝を流動したろう材の量は、実験前後の上板の質量変化で定量が可能である。
- ②ろうが流れる部分を切削加工溝にしたため、チューブ折り曲げ部の隙間とは異なり、形状を定量できる。また、溝を加工する下板の厚さを2 mmにしたため、実験中の異常変形がなく、ろうが流動する部分の条件を一定にすることが可能である。
- ③ろう吸引部にアルミニウム繊維焼結体を使うためろう吸引力が大きく、ろうの吸引力の変動を抑制できる。
- ④可視炉を用いてろうが流動する様子を観察および記録することが可能である。

3. 開発した評価方法

3.1 本開発の特徴

開発したろう侵食の定量評価に用いた試験片形状を、**図6**に示す。この試験片は、上板、下板およびろう吸引部から構成されている。ろうは、上板の片面のみにクラッドされている。下板には、機械加工による溝があり、この溝の片端には上板が点接触で固定され、逆側の端にはろう吸引部が配置される。

この試験片を加熱した場合、溶解した上板表面のろう材は、溝と溶融ろうの間に発生する毛管力により流動する。このろうがろう吸引部（アルミニウム繊維焼結体）に達すると、ろう吸引部に発生する毛管力により、溝内部のろうはろう吸引部内に向かって流動し続ける。

この評価方法の特長を**図5**の試験片と比較して次に示す。

3.2 試験片の構成

上板はA3003合金にAl-12%Si合金が片面10%クラッドされた40×40×3.6 mmのブレージングシート、下板は60×40×2 mmのA1100板、ろう吸引部は20×20×0.3 mmのアルミニウム繊維焼結体³⁾5枚で構成されている。**表1**に、上板のろう材と心材、および下板の組成を示した。下板の溝は、幅0.5 mm、深さ0.5 mm、長さ40 mmで、エンドミルで加工した。

上板のろう材は、温度によるろうの液相のSi濃度変化を防ぐため、共晶に近いAl-12%Siを用いた。下板は、硬質材(H26)に溝加工を施した後、380℃×2時間の焼鈍を行い、O材として試験片に供した。下板の溝の形状は、エンドミルで容易に加工可能な四角断面とした。幅は、ろうの流動の様子が見やすく、かつ毛管力が十分働くサイズである0.5 mmとした。ろう吸引部には、上板から供給されるろうを、最後まで十分吸引可能な量のアルミニウム繊維焼結体を配した。

流したろうの量による侵食量の影響を観察するために、上板のサイズを20×20、28×28、56×56 mmとした試験片も用意した。

比較としてろう吸引部を設置しない試験片も実験に供した。

3.3 評価手順

評価は、直径40 mmの円形の覗き窓が付いた窒素雰囲気ろう付炉で行った(装置については、本号「ろう付性評価における可視化技術」を参照)。**図7**に示すように、上板とろう吸引部の間の溝と、上板の溝との接触部

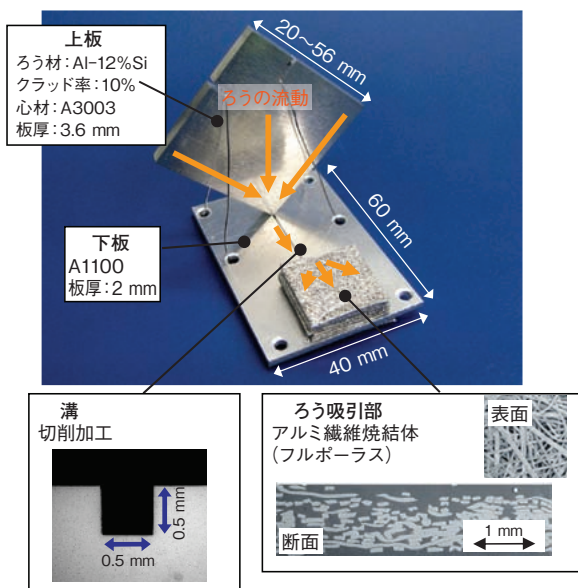


図6 開発した試験片
Fig.6 Developed test piece.

表1 構成材料の組成
Table 1 Composition of constituent materials.
(mass%)

		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn
上板	ろう材	11.75	0.60	0.15	0.1	0.01	—	0.1
	心材	0.25	0.60	0.15	1.15	0.01	0.05	0.0
下板	心材	0.05	0.56	0.12	0.01	0.02	0.01	0.0

付近が視野に入るよう試験片をこの炉内にセットし、ろうの流動状況を観察した。下板の溝とろう吸引部にのみフッ化物系フラックスを10 g/m²以上塗布した試験片を加熱・昇温し、500℃から590℃まで20℃/minで昇温後、590℃で5 min保持し、保持後100℃/minで急冷した。なお、温度制御は下板の実測温度で行った。

実験後、図8に示すように、上板と下板の溝の接点を折って上板を分離し、上板のろう付前後の質量変化を測定した。

ろう侵食状況を観察するため、下板の溝の長手方向の断面と長手方向に直交する断面の観察を行った。観察は、上板と下板の接点から0 mm、5 mm、12 mm、20 mm、28 mmの位置で行った。

図9に示すように、ろう付後の溝の長手方向に直交する断面より下板母材の侵食された部分の断面積を侵食面積として定義した。実際の測定では、図9で示した部分の面積を画像解析により測定した後、溝のろう付前の断面積(0.25 mm²)を引いて侵食面積を求めた。

4. 評価結果と考察

4.1 溝を流動するろうの観察

まず、ろう吸引部がある試験片の加熱の様子を観察した。

加熱を開始して、570℃付近で最初に下板の溝部分に塗布したフラックスが溶融して、下板の表面を拡がる様子が観察された。この時点で、フラックスが上板表面に拡がる様子は見られなかった。

図10にろうが溶融した直後の観察結果を示す。図10の①に示すように、本実験では下板が590℃に到達した後に、上板の溝との接点付近のろうが溶融し始めた。次に、②融けたろうが上板と溝の間を埋めた直後に、③溝

の底面をろうが流れだし、④ろうがろう吸引部の下に到達した後も、⑤-⑥溝から溢れることなくろうが流動し続けた。このことより、ろう吸引部がろうに接した後、速やかにろうを吸収し始めたと言える。

ろうが流動を開始してすぐに、上板と下板との接点付近の表面に凹みが生じた。この凹みは、上板の上方に向かって扇状に広がっていった。この凹みが発生した原因は、ろうが酸化皮膜の下を通って下板の溝に向かって吸われたためであると考えられる。また、この凹みを追うようにして、フラックスが上板の表面にゆっくりと拡がる様子が観察された。

ろうが流動している間、上板と下板の接点にろうがフィレットとして溜まることはなかった。また、ろうの流動中、溝からろうが溢れ出ることはなく、途中で流動が途切れるようなこともなかった。

そして、ろうが流動するにつれて図11に示すように、⑦-⑩溝の間口の幅が1.5倍程度まで広がっていき様子が観察された。これより、ろうの流動により母材が段々と侵食されていくことが分かった。

比較として用意したろう吸引部がない試験片のろう付中の観察結果を、図12に示す。フラックスが溶融した後に①ろうが溶融し、②流動を開始するまではろう吸引部がある試験片と同じ挙動を示した。しかし、③ろうが溝を満たした後は、ろうは溝に向かっては流れず、④-⑥に示すように上板と下板の接点に大きなフィレット

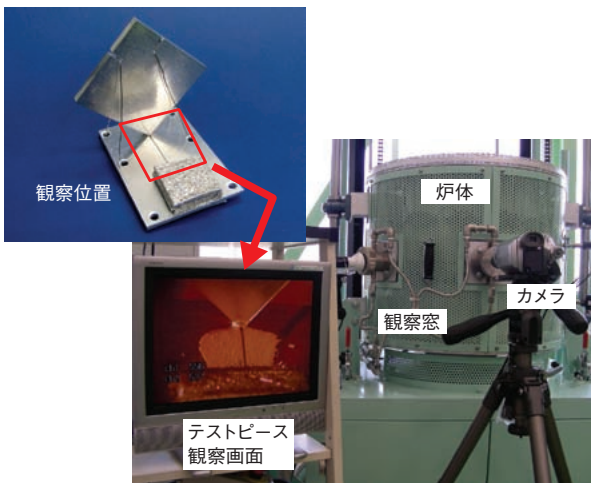


図7 ろう付中の試験片の観察
Fig.7 In-situ observation of test piece in furnace during brazing.

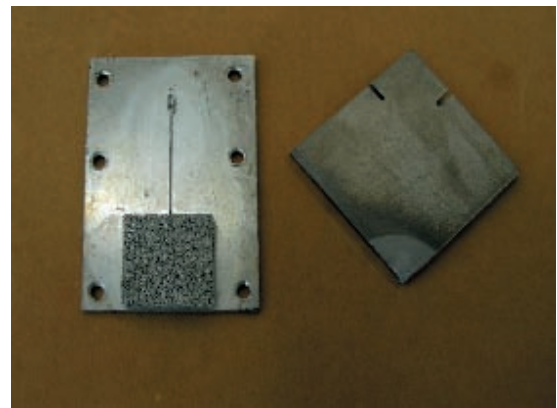


図8 ろう付後の上板の分離
Fig.8 Separation of filler-clad plate from base plate.

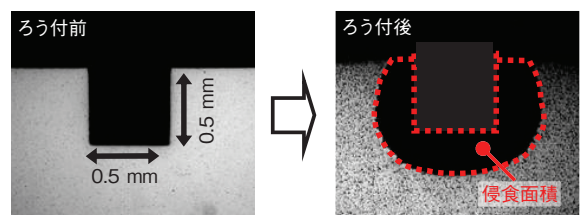


図9 侵食量の定量
Fig.9 Definition of erosion area.

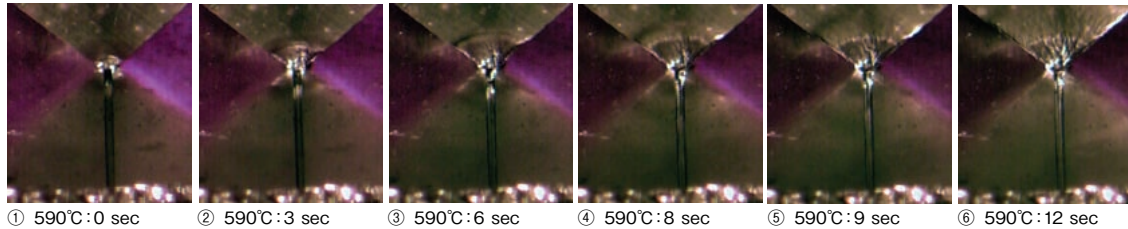


図10 試験片のろう付中の観察結果(ろう熔融直後)

Fig.10 Continuous in-situ observations of molten filler flowing from the filler plate to gutter on the base plate during brazing (just after filler melting).

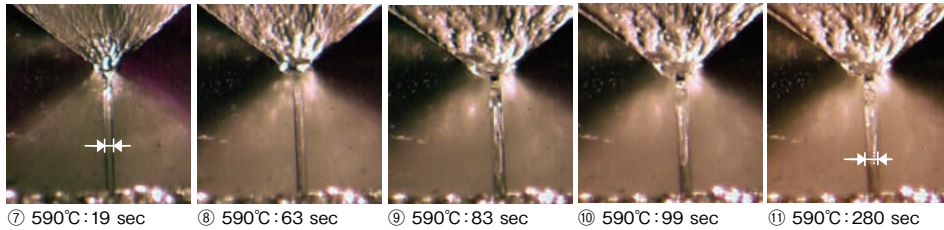


図11 試験片のろう付中の観察結果(ろう流動の進行)

Fig.11 Continuous in-situ observations of molten filler flowing from the filler plate to gutter on the base plate during brazing.

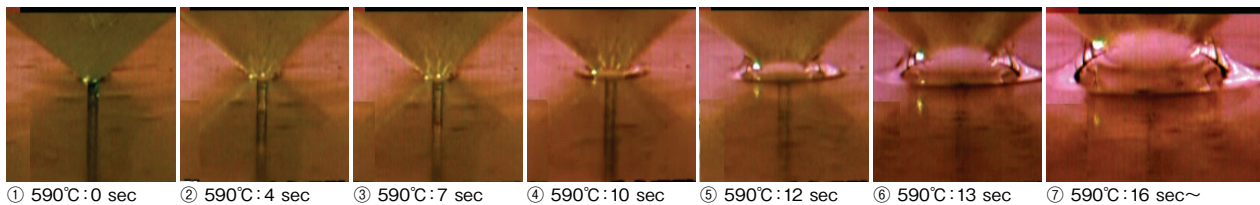


図12 ろう吸引部がない試験片のろう付中の観察結果

Fig.12 Continuous in-situ observations of molten filler moving on the test piece without capillary sheets during brazing.

を形成した後、⑦流動が止まった。流動が停止した後も590°Cで4 min程度保持していたが、この間、溝がろう吸引部がある試験片のように広がっていくような様子は観察されなかった。

図13にろう付終了後、炉から取り出したサンプルを示す。ろう吸引部がある試験片a)では上板と下板の間に大きなフィレットは形成しておらず、接点付近の溝が幅広にえぐられていた。接点から3 mm程度までの間に溝幅が狭まっていき、そこからろう吸引部のおよそ1 mm手前までの22 mm程度の間では、溝の幅が一定となっていた。そして、ろう吸引部の手前で再び溝の幅が広がっている様子が観察された。この間の溝の中では、ろうが溝を完全に埋めているようなことはなく、ほとんど残っていない場所も多かった。また、上板の重量変化から求めた流動したろうの量は1 gであった。

それに対し、ろう吸引部がない試験片b)では、上板と下板の間に大きなフィレットが形成されていた。また、溝は全長にわたってろうが満たされていた。フィレットで覆われていない部分の溝の幅は、ろう付前からの変

化が外観上認められなかった。なお、この試験片での流動したろうの量の測定は、上板と下板の間に大きなフィレットが形成されたため、不可能であった。

4.2 ろう付後の断面観察とろう侵食の定量

1 gのろうを流動させた試験片(上板の大きさ40×40 mm)の溝の所定の位置の長手断面を図14に示す。ろう吸引部のある試験片a)では、上板との接点がある0 mm付近と、ろう吸引部の下の28 mm付近で、急激に

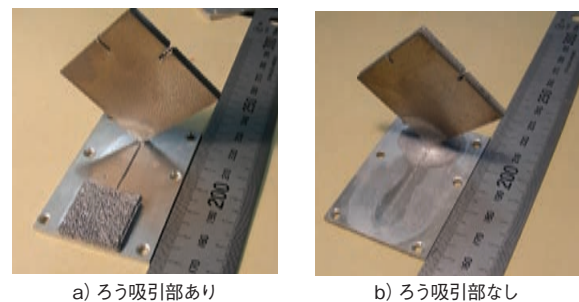


図13 ろう付後の試験片の外観

Fig.13 Appearance of test pieces after brazing.

深くなっており、侵食が安定していなかった。それに対し、両者の間の5 mmから20 mmにかけては、溝の侵食深さがほぼ一定であった。

同様な位置の長手方向に直交する断面を図15a)に示す。いずれの位置でもろう付前と比較して大きく侵食していた。位置によって侵食形態に特徴が見られた。5～20 mmでは、侵食の形・大きさが一定であった。この位置での侵食の形態は円状であり、表面の間口以上に奥に侵食が広がっていた。一方、0 mmでは、大きく間口が開いたような半円の侵食形態であった。また、28 mmでは、複雑な形態をしており、侵食の深さや母材の侵食量が5～20 mmと比べてさらに顕著に大きくなっていた。

これに対し、ろうが流動しなかったろう吸引部のない試験片b)の長手方向に直交する断面では、図15b)に示すように、上板から0～28 mmのいずれの位置においても、ろうが溝を完全に埋めているものの、ろう侵食がほとんど観察されなかった。

図15の各断面より侵食面積を測定した。その結果を図16に示す。ろう吸引部がある試験片a)では、上板から5～20 mmでの侵食面積が0.4 mm²ではほぼ一定していた。また、0 mm, 28 mmでは1 mm²を超えていた。それに対し、ろう吸引部がない試験片b)では、0 mm～28 mmにおいて0.1 mm²以下であり、ろう吸引部がある試験片a)と比較して侵食量が極めて軽微であった。

4.3 流動ろう材量と侵食面積の関係

上板のサイズを変え、流動ろうの量を変化させた実験結果を図17に示す。侵食面積は、侵食量が安定している12 mmの位置で測定した。その結果、浸食される母材の断面積は、ろうの流動量に比例して増加することが

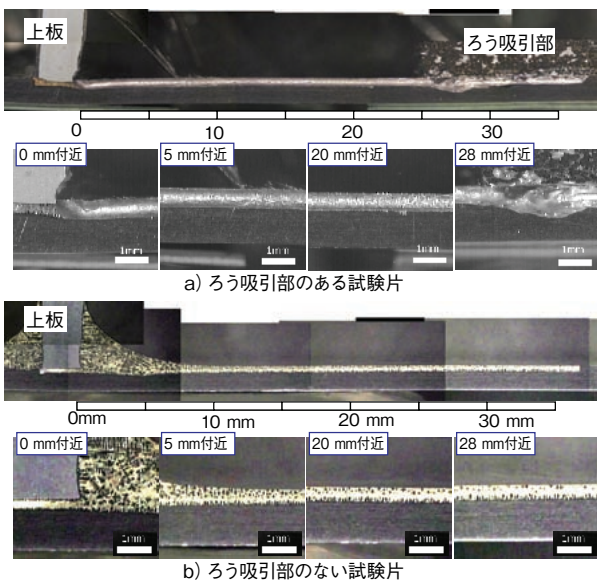
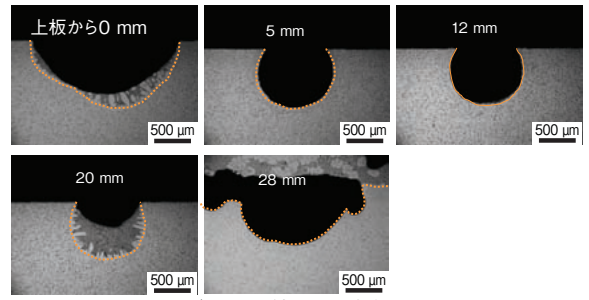
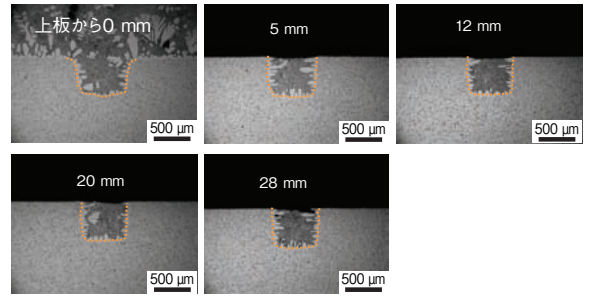


図14 ろう付後の試験片の溝の長手方向断面観察結果
Fig.14 Optical microstructures of sections along the gutter after brazing.



a) ろう吸引部のある試験片



b) ろう吸引部のない試験片

図15 ろう付後の試験片の溝の横断面観察結果
Fig.15 Optical microstructures of sections across the gutter after brazing.

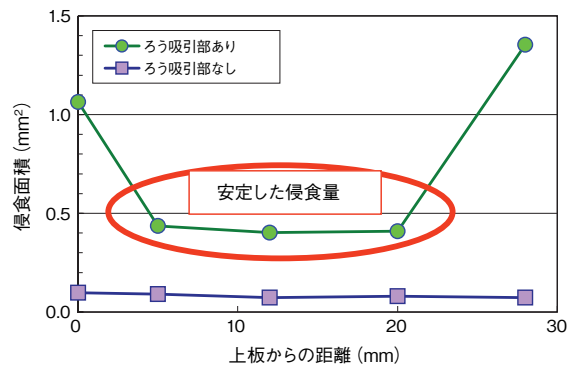


図16 上板からの距離と溝の侵食面積の関係
Fig.16 Relationship between erosion area and gutter distance from filler plate.

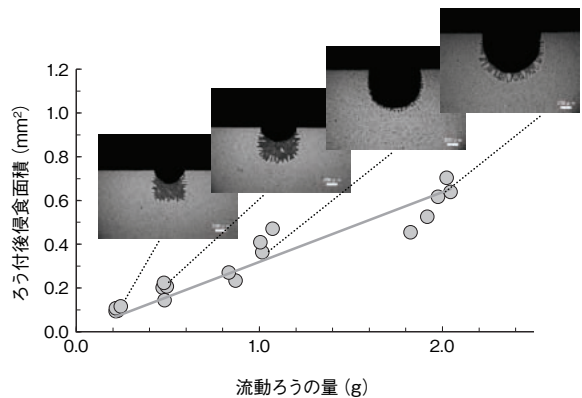


図17 流動したろうの量と侵食面積の関係 (上板から12 mm)
Fig.17 Relationship between the volume of molten filler and the erosion area (gutter distance: 12 mm).

分かった。また、断面観察より、流動したろうが増加するにつれて、もとの溝の形状の正方形から円形状に侵食の形態が変化しながら侵食量が増加していくことが分かった。

4.4 実際の熱交換器での侵食現象との対応

図18に、開発した試験片形状と実際の熱交換器でそれぞれ発生するろう流動と母材の侵食の進行状況を比較推定した。まず、開発した試験片形状で、侵食の形態が一定であった上板接点から5~20 mmの位置での溝の中のろうの流動状況を考察する。

ろう付中、溝からろうが溢れたり、逆流する様子は観察されなかった。よって、この間では、ろうが上板接点からろう吸引部接点に向かって一方向に流れていると推定する。また、流動中の溝内のろうは、濡れ性が十分あることや、図15a)と図17の断面観察で見られる溝に残ったろうの状態から、図18a)に示すように液面の中央が凹んで溝の内壁上部まで接している状態であると推定する。これらのことから、この試験片では、流動ろうと下板の溝の内壁との界面に沿って下板が侵食された結果、円弧状の侵食断面になったと考える。

次に、実際の自動車用熱交換器のチューブで起きたろう侵食でのろうの流動状況と侵食形態を考える。

この場合のチューブ折り曲げ部を流れるろうは、濡れ性が十分あることを考慮すると、図18b)に示すように液面の中央が凹んでチューブの折り曲げ部上部まで接している状態であると推定する。この形状と、図4と図5を

照らし合わせると、この実機のチューブの場合も流動ろう材とチューブ心材の界面に沿って円弧状に侵食が進んだと考える。

以上より、本研究の試験片の上板接点から5~20 mmの位置での溝の内部と、実際の熱交換器チューブの折り曲げ部で起きている侵食は、侵食の量に違いはあるものの、同じようにろうが流動して発生したものであると言える。

したがって、開発した試験片を用いて、実際の熱交換器での流動ろうによる侵食を評価することができると思われる。

5. おわりに

自動車用熱交換器のヘッドプレート近傍のチューブ折り曲げ部で発生する流動ろうによる侵食の定量評価法を開発し、流動ろうの量と侵食量の関係を明らかにした。

また評価の過程で、ろうが流路を流れて母材を侵食する様子を直接観察し、侵食に至るまでのろうの流動現象を確認した。

侵食の形態から、この評価法が実際の熱交換器の製造で発生する侵食現象をよく再現していることが確認された。

今後、この評価法を使って、流動ろうによる侵食メカニズムの解明、特に下板アルミニウム中の成分、金属組織の影響、実験温度、ろうの成分の影響などについて実験する予定である。

参考文献

- 1) 福元敦志, 土公武宜: Furukawa-Sky Review, 1 (2005), 21.
- 2) アルミニウムブレイジングハンドブック編集委員会 編: アルミニウムブレイジングハンドブック (改訂版), (社) 軽金属溶接構造協会 (2003), 127.
- 3) アルミニウム繊維燃結不織布「フルポーラス」の紹介: 古河スカイ <http://www.furukawa-sky.co.jp/products/fullporous.htm>

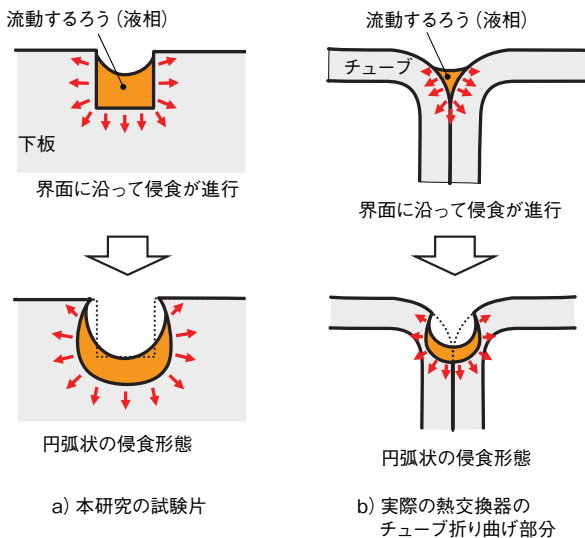


図18 断面から見た流動中のろうの形態と侵食の進行の推定図

Fig.18 Presumed models of erosion process in the gutter of developed test piece, occurring on the brazing line on an automotive heat exchanger tube.



村瀬 崇 (Takashi Murase)
技術研究所



柳川 裕 (Yutaka Yanagawa)
技術研究所