

熱交換器製品でのろう材エロージョン解析

Filler material erosion analysis in heat exchanger products

長島 政彦* 上林 一崇* 古池 紀之*
 Masahiko Nagashima Kazutaka Uebayashi Noriyuki Koike

要 旨

熱交製品をろう付けする場合、ろう浸食によるエロージョンが発生する事がある。ろう材の液相温度を超えた場合に発生するエロージョンは、状態図によって説明が出来る。熱交製品では、固液混合状態の温度でろう付けされることが多く、この状態での解析を行った結果を報告する。

Abstract

In the brazing process of heat exchanger products, erosion may occur caused by filler material. The erosion phenomenon in the temperature range above liquid phase temperature of filler material may well be described by a phase diagram. On the other hand heat exchanger products are often brazed in the liquid-solid mixed phase condition. This report addresses the analysis of the latter case of the erosion phenomenon.

Key Word: Heat Exchange, Erosion, Liquid-Solid mixed phase

1. はじめに

アルミニウム合金製熱交換器は、3000系アルミニウム合金に、Al-Si合金をクラッドしたブレイジングシートが用いられ、ろう付けにより生産されている。自動車の燃費向上目的での軽量化要求が強く、使用されるブレイジングシートの薄肉化が進められており、今後も継続すると考えられる。このような製品でろう付けを行うと、熱交換器流路を形成するチューブ材、放熱を行うフィン材等箔材でのろう浸食による穴あき不具合（エロージョン）が発生する場合があります。製造上の問題となる事がある。軽量化目的の箔材化などは今後も続くと考えられ、ろう浸食の抑制は、熱交換器生産時の重要な課題となっている。

ろう材浸食エロージョンには、過度の加熱によるろう材Siの拡散による浸食、流動ろう材による浸食があり、それぞれテストピースを用いた解析の報告がなされている。

⁽¹⁾ ⁽²⁾ テストピースでの試験は報告例が多いが、製品でのエロージョンを十分に説明できていない。

本研究では、熱交換器を構成する部品を使用して、ミニチュアサイズの熱交換器による実生産に近い条件で、ろう浸食の支配要因解析を試みた。

2. ろう材によるエロージョンとは

エロージョンとは、溶融したろう材により被接合材のアルミニウム合金材が浸食される現象であり、エロージョンの駆動力は、状態図上A点から液相線との交点B点へとSi濃度を下げようとする働きである。(Fig. 1)

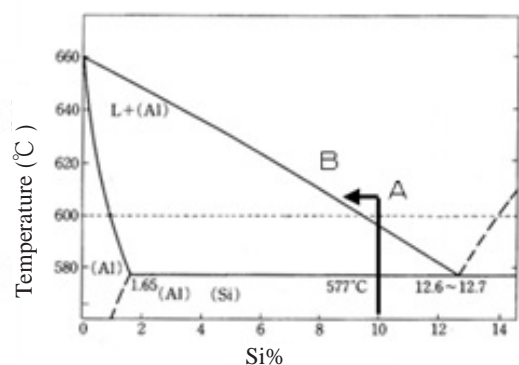


Fig. 1 Al-Si phase diagram

3. 要因解析

3.1. エロージョンを促進させる因子

エロージョンを促進させる因子として、ろう材中のSi濃度、ろう材量、ろう付け到達温度、ろう材固相線温度以上の保持時間を選び、実験計画法に基づきそれぞれの因子の影響度について調査を行った。

3.2. 試験サンプル

ろう付け試験には、チューブ本数 21 本のミニチュアサイズのラジエターを使用した。(Fig.2 Brazing Sample)

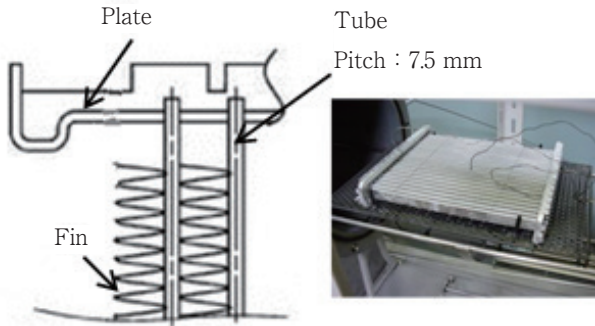


Fig. 2 Brazing sample

3.3. 試験材

チューブ材、フィン材は当社の現行生産ラジエターで、最も板厚の薄い部品を使用した。

プレート材は、Table 1 に示す材料構成とした。

チューブ材、プレート材は、皮材 / 芯材 / 皮材の三層から構成されており、皮材をろう材としている。全板厚に占める各層の厚さを百分率で示したものをクラッド率と呼ぶ。

ろう材の量はクラッド率にてコントロールした。

Si 濃度の狙い値は、A3434 下限値から A4045 上限値とし、クラッド率は、一般的な公差 10 ± 2% とした。

ろう材 Si (wt%) : 6.5, 7.5, 8.5, 10

ろう材クラッド率 (%) : 8, 10, 12

芯材 : 3000 系合金

犠牲材 : 7000 系合金 (クラッド率 10%)

板厚 : 1.3 t

Table1 にそれぞれのサンプルと、ろう材の流動性測定結果を示すが、試作した材料は、狙い通りの特性であることを確認し、実験に使用した。

Table 1. Specification of tested samples

Sample No.	Filler material Si%	Filler material Clad ratio	Coefficient of filler flow		
			590℃	600℃	610℃
1	7.5%	8%	0.22	0.30	0.42
2	↑	10%	0.20	0.32	0.44
3	↑	12%	0.20	0.29	0.40
4	6.5%	8%	0.13	0.19	0.29
5	8.5%	↑	0.38	0.47	0.62
6	10%	↑	0.61	0.69	0.84

3.4. エロージョン判定基準

ろう付け後のプレート-チューブ接合部の断面からチューブ材の残存板厚を測定し、エロージョンによる浸食深さを測定した。

$$(\text{チューブ残存板厚}) / (\text{チューブ元板厚}) \times 100$$

3.5. 実験条件

クラッド率 (=ろう材量) を固定した条件 (Table2) と、ろう材 Si 濃度を固定した条件 (Table3) の 2 種類の直交表を作成し評価を行った。

Table 2. Test condition (Clad ratio 8% Fixed)

Test No.	Si%	Brazing temp	Keep time >577℃
1C	6.5%	590℃	2min
2C	6.5%	595℃	4min
3C	6.5%	605℃	8min
4C	8.5%	590℃	4min
5C	8.5%	595℃	8min
6C	8.5%	605℃	2min
7C	10%	590℃	8min
8C	10%	595℃	2min
9C	10%	605℃	4min

Table 3. Test condition (Si% Fixed)

Test No.	Si%	Brazing temp	Keep time >577℃
1S	8%	590℃	2min
2S	8%	595℃	4min
3S	8%	605℃	8min
4S	10%	590℃	4min
5S	10%	595℃	8min
6S	10%	605℃	2min
7S	12%	590℃	8min
8S	12%	595℃	2min
9S	12%	605℃	4min

3.6. ミニチュアサイズ熱交換器での実験結果

実験結果を Fig.3.4 に示す。

この結果より、エロージョンの支配的な因子はろう材 Si 濃度とろう付け時到達温度であることが分かる。クラッド率で現されるろう材総量、保持時間は、本実験の水準内では影響が少なかった。

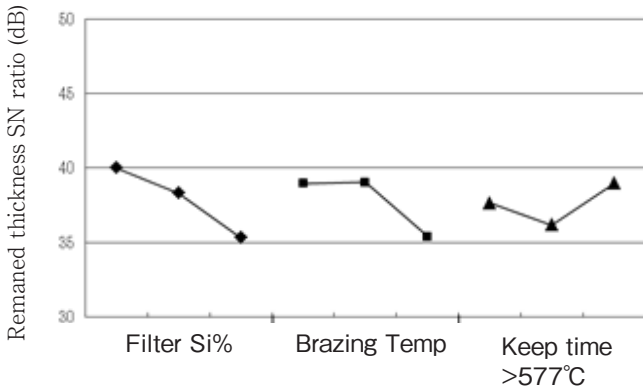


Fig. 3 Cause and effect of incidence to erosion (Clad ratio 8% Fixed)

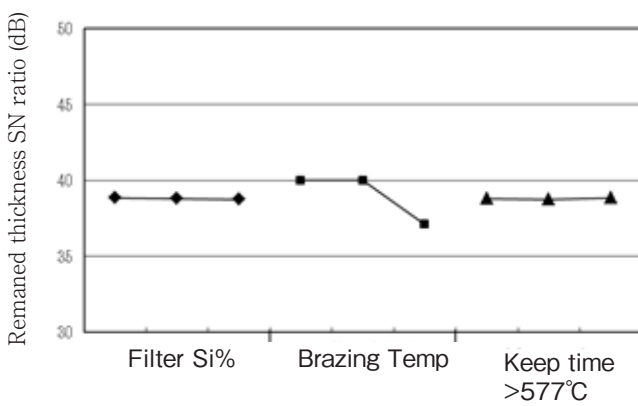


Fig. 4 Cause and effect of incidence to erosion (Si% Fixed)

影響の強い因子 (到達温度とろう材 Si 濃度) で, エロージョン発生有無を整理した結果を Fig.5 に示す.

チューブ材板厚方向に発生したエロージョン深さが元板厚に対し, 20%を閾値とした.

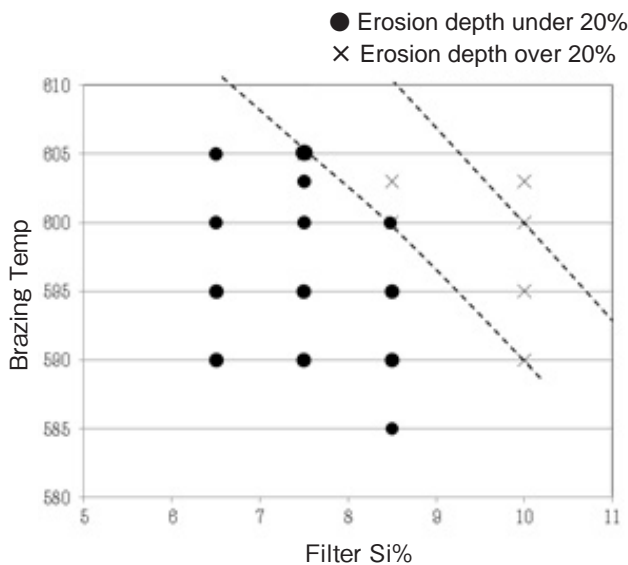


Fig. 5 The observed Si erosion

ろう材 Si 濃度が高く, ろう付け温度が高い, すなわち液相比率が高い状態でエロージョンが発生しやすくなっている.

3.7. 液相量とエロージョンについての確認試験

ろう材によるエロージョンは, 液相比率だけで発生するかどうかを, 液相量を変えた試験で確認した.

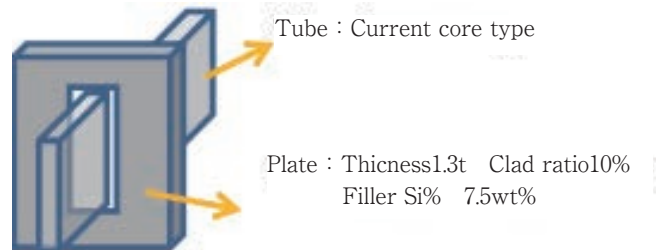


Fig. 6 Shape of tested sample

プレート材のサイズを変更することで, ろう付け部へ供給されるろう材の量を変化させた.

ろう材の量は, 16,45,65mm³の三水準.

ろう付け到達温度は, 590, 600, 610°Cの三水準とし, それぞれの設定温度に到達してから三分間保持を行った.

ろう付け時に, 形成される液相ろう材の量は, プレートが持っているろう材に応じて変化するが, エロージョンに寄与するのはフィレット部に流れてきたろう材のみである為, 液相ろう材量=フィレット面積と置き換え整理した.

ろう付け後の接合部断面から, チューブ材残存板厚が80%以下の場合エロージョン発生とみなした.

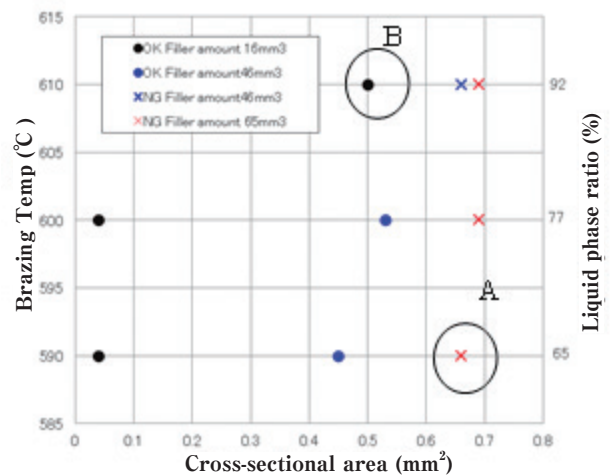


Fig. 7 Relationship between erosion and amount of liquid phases

ろう付け後のフィレット面積の大きさは, フィレット部に流れてきた液相量と考えられる.

ろう材中の液相比率が低くてもろう材液相量が多い

部分 (Fig. 7中の A) ではエロージョンが発生している。又、液相比率が高くて、ろう材液相量が少ない (Fig. 7中の B) とエロージョンは発生していない。

4. 考 察

4.1. 固液混合状態でのエロージョン

ろう材は、固相温度を超えると液相が生じるが、この時の Si 濃度は元の Si 濃度より高く共晶に近い濃度になる。(C1)

製品でのろう付けでは、液相ろうは接合部へ流れる為、接合部付近では共晶濃度に近いろう材の浸食を受けることになる。

さらにろう付け温度を上昇させていくと液相中の Si 濃度は、C2 まで下がるが依然として元の Si 濃度よりは高濃度のろう材が供給されてくる。

ろう材中の Si 濃度が多いほど液相比率が高くなり、より多くの液相ろう材が供給される。

これ等の事からろう材中の Si 量、ろう付け温度以外にも、ろう材の液相量もエロージョンの進行に影響していると考えられる。

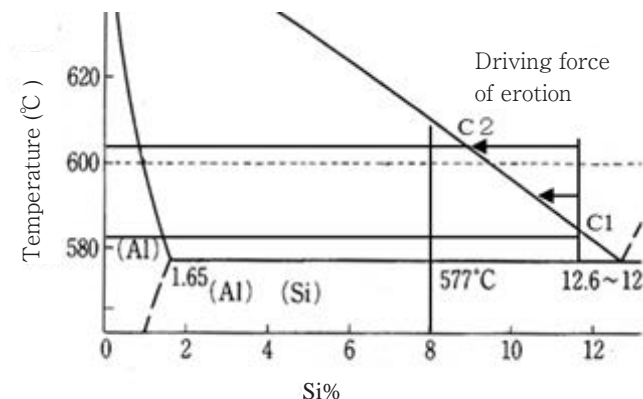


Fig. 8 Fase diagram of Al-Si alloy

5. ま と め

- 熱交製品のようにろう付け部にろう材が流れてきてフィレットを形成するようろう付けでは、流動ろうは元のろう材 Si 量よりも濃い濃度であり、エロージョンの駆動力となっている
- このため、過度のろう材があると、エロージョンが発生する。

6. お わ り に

ろう材とアルミニウム合金材界面で起こっている Si と Al の反応がどのように進んでいるかの検証までは至らなかった。今後評価方法を含めて検討していきたい。

参 考 文 献

- (1) 川瀬, 柳川: Furukawa-Sky Review,4 (2008) 43-49
- (2) 松門, 鶴野: 軽金属学会第 122 回春季大会講演概要 (2012) 88, p165-167



長島 政彦



上林 一崇



古池 紀之