HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	遠心燃焼合成法によるNi-Al合金の精密鋳造と異種金属材料への同時接合
Author(s)	大参, 達也; 桐原, 和彦; 工藤, 昌行
Citation	日本金属学会誌, 64(9), 735-738 https://doi.org/10.2320/jinstmet1952.64.9_735
Issue Date	2000-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74670
Type	journal article
File Information	1-7.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

日本金属学会誌 第64巻 第9号(2000)735-738

遠心燃焼合成法によるNi-Al合金の精密鋳造と異種金属材料への同時接合*1

大参達也　桐原和彦*2　工藤昌行

北海道大学大学院工学研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 64, No. 9 (2000), pp. 735-738
© 2000 The Japan Institute of Metals

Precision Casting of Ni-Al Alloy and Simultaneous Joining to Dissimilar Metals by Centrifugal Combustion Synthesis*1

Tatsuya Ohmi, Kazuhiko Kirihara*2 and Masayuki Kudoh

Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

A modified centrifugal combustion synthesis process has been developed that enables precisely casting synthesized materials and simultaneously joining them to a dissimilar metal. The material to be synthesized was a Ni-25 mol%Al alloy and that to be bonded was a stainless steel, an ultra-low carbon steel, pure nickel or a Ni-25 mol%Al alloy. The base material to be bonded; a graphite mold; and a green compact of reactants consisting of Al, Ni and NiO were set in a centrifugal caster. When the combustion synthesis reaction was induced in the centrifugal force field, synthesized molten Ni-Al alloy flew into the mold and collided with the base material. This process was successfully applied in joining the synthesized Ni-Al alloy and various base materials. Centrifugal force was also confirmed to assist the molten Ni-Al alloy fill the mold cavity and adhere to the surface of the base materials.

(Received April 25, 2000; Accepted July 17, 2000)

Keywords: *combustion synthesis, thermite reaction, centrifugal casting, centrifugal force, precision casting, joining, nickel-aluminum alloy, intermetallic compound, solidification*

1. 緒　　言

遷移金属アルミナイドや遷移金属シリサイドなどの金属間化合物は，高温構造材料として優れた特性を持つ反面，機械的加工性や溶接性が一般の金属材料より劣るため，通常の金属材料加工法の適用が困難な場合が多い[1]．このため，これらの金属間化合物に目的とする形状を付与し，また必要に応じて異種材と接合して最終的な成形部品を製造するまでに，多くの工程と時間とが必要となる．

最近，著者らは，燃焼合成法[2-6]と遠心鋳造法を組み合わせることにより，金属間化合物の合成と鋳造，および異種材との接合を一工程で行う方法について検討した[7]．本手法は，燃焼合成反応によって溶融状態の金属間化合物を合成し，同時に遠心力を利用して溶融金属間化合物を鋳型に充填するとともに，異種金属基材と接触させることにより接合するものである．著者らは，このような概念のプロセスを「遠心燃焼合成法」と呼んでいる．

前報[7]において，著者らは，原料粉末の圧粉体の底部にステンレス鋼基材を埋め込んだ試料を用い，遠心力下で燃焼合成反応を励起する手法を試みた．その結果，Ni-Al系金属間化合物とステンレス鋼基材との接合が可能であることを確認するとともに，健全な接合部を得るためには，遠心力の付与と，圧粉体と基材との密着が必要であることを明らかにした．しかし，この手法は，複雑形状の部材への適用が困難であることなど，まだ多くの制約がある．そこで，本研究では，このような問題点を克服した新しい遠心燃焼合成法を考案し，その適用性について基礎的な検討を行った．本プロセスでは，圧粉体と基材とを離隔し，それらの間に鋳型を配置する．そして，燃焼合成により生成した金属間化合物溶湯を，遠心力を利用して鋳型キャビティに流入させるとともに，その溶湯の流れを基材表面に衝突させて密着させる．そして，鋳型キャビティに充填された金属間化合物が凝固することにより，最終的に金属間化合物の精密鋳造部材と異種金属との接合体が得られる．本研究では，接合の相手材として4種類の金属基材を用いて，Ni-25 mol%Al合金(Ni_3Al)との接合体を作製し，接合界面の健全性について調査した．

2. 実 験 方 法

2.1 テルミット型燃焼合成法

本研究では，前報[7]と同様に，燃焼合成反応の段階で流体状態の生成物を得るためにテルミット型燃焼合成法[8,9]を採用した．テルミット型燃焼合成反応は，式(1)に示す通常の燃焼合成反応と式(2)に示すテルミット型合成反応[9]とを所定の割合で組み合わせた反応であり，式(3)のように表

*1 2000年3月31日日本金属学会春期大会において発表
*2 北海道大学大学院生(Graduate Student, Hokkaido University)

される．

$$3Ni+Al \longrightarrow Ni_3Al \quad (1)$$

$$3NiO+3Al \longrightarrow Ni_3Al+Al_2O_3 \quad (2)$$

$$3aNiO+3(1-a)Ni+(1+2a)Al \longrightarrow Ni_3Al+aAl_2O_3 \quad (3)$$

ここで，aはテルミット型合成反応の割合である．テルミット型燃焼合成反応では，適当なa値を選ぶことによって溶融状態のNi_3Alを得ることができる．また，テルミット型燃焼合成反応では金属間化合物と同時に酸化物(式(3)ではAl_2O_3)が生成するが，遠心燃焼合成法における遠心力は，金属間化合物と酸化物との密度差に基づく二層分離を促進する役割を果たすものと考えられる．

燃焼合成に供した試料は，Al, Ni, NiOの各粉末から調整した円柱状の圧粉体(直径20 mm，質量30 g)である．使用した原料粉末は，前報[7]と同じ市販の噴霧アルミニウム粉(平均粒径100 μm)，カーボニルニッケル粉(平均粒径5 μm)，および酸化ニッケル粉(平均粒径5 μm)である．これらの粉末に少量のエタノールを加えて混合し，大気中雰囲気下で金型成形した．粉末の配合は，式(3)に基づいてNi-25 mol%Al合金(Ni_3Alの化学量論組成)が生成するように調整した．また，テルミット型合成反応の割合aの値は予備実験に基づいて0.25とした．なお，圧粉体成形時の温度は室温，また成形圧力は約470 MPaとした．

2.2 遠心燃焼合成法

本研究で用いた縦型遠心鋳造装置の回転部の模式図をFig. 1(a)に示す．遠心燃焼合成実験では，装置を回転させながら，電熱線に通電することにより圧粉体を加熱し，燃焼合成反応を励起した．なお，装置の回転速度は19 s^{-1}とした．このとき，接合界面における遠心力の加速度は約70～85 Gとなる．また，実験は大気中雰囲気下で行った．

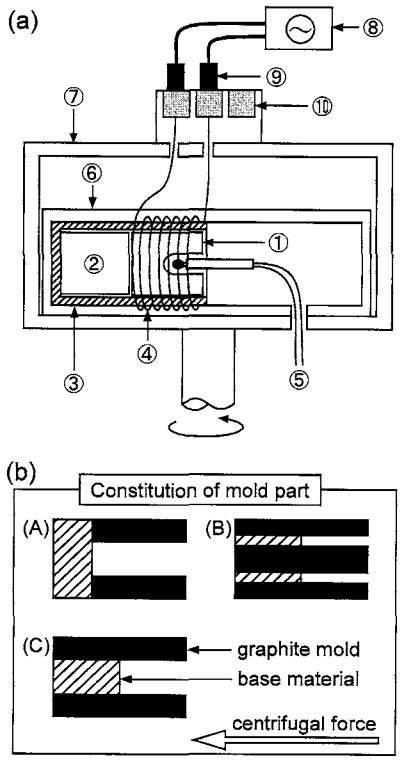

Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus. ① green compact, ② mold part, ③ alumina container, ④ heating coil, ⑤ thermocouple, ⑥ inner steel container, ⑦ outer steel container, ⑧ electric source, ⑨ graphite brush, ⑩ slip ring.

Fig. 1(b)に，本研究で用いた3種類の鋳型部形状を示す．これらは，いずれも黒鉛製鋳型と基材とから構成されており，それぞれ以下の場合に使用した．

(A) 直径20 mm・長さ10 mmの円柱状基材の端面に，直径10 mmまたは5 mmのNi-Al合金円柱を垂直に接合する場合．

(B) 外径14 mm・内径10 mm・長さ15 mmの管状基材の端部に同じ断面形状のNi-Al合金管を接合する場合．

(C) 直径10 mm・長さ15 mmの円柱状基材の端部に同じ径のNi-Al合金円柱を接合する場合．

基材の材質としては，ステンレス鋼(JIS規格SUS304L)，極低炭素鋼(0.08 mass%C含有)，純ニッケル，およびNi-25 mol%Al合金を検討した．基材用のNi-25 mol%Al合金は，テルミット型燃焼合成法と遠心鋳造法とを用いて作製したものである．

また，遠心燃焼合成法における遠心力の役割を確認するための比較実験として，通常重力(1 G)の下で燃焼合成・接合実験を行った．この実験では，鋳型部の上に圧粉体試料が位置するように装置の方向を変更した．なお，この比較実験では，a=0.25の他に，より断熱燃焼温度の高いa=0.4の場合も併せて検討した．

実験により得られた試料は，長手方向に切断して組織を観察し，主に基材とNi-Al合金との接合界面に着目してその健全性を調査した．なお，組織の顕出にはマーブル試薬を使用した．

3. 実験結果および考察

3.1 接合界面の健全性に及ぼす遠心力の影響

遠心燃焼合成法により作製した試料の一例をFig. 2に示す．本試料は，円柱状ステンレス鋼基材(直径20 mm)の端面に直径10 mmのNi-Al合金円柱を接合したものである．Fig. 2(a)は縦断面のマクロ組織，また(b)は接合界面近傍のミクロ組織である．Fig. 2(a)によると，高温のNi-Al合金溶湯との接触により，基材の表面がわずかに溶融している．また，Fig. 2(b)に見られるように，ステンレス鋼とNi-Al合金とは完全に密着している．

なお，本研究で作製した試料では，前報[7]と同様に，Ni_3Alマトリックス中に初晶NiAlが残存していた．この初晶NiAlは，マクロ組織においては白いデンドライトとして観察された．また，テルミット型燃焼合成反応で副生したアルミナに関しては，そのほとんどが圧粉体の設置場所に残留しており，Ni-Al合金鋳物中には，ごくまれに最大10 μm程度の微細な球状のアルミナ粒子(Fig. 3参照)が観察される程度であった．なお，本研究では，鋳型キャビティ内へのアルミナの流入を阻止する手段は特に用いなかったが，必要に応じてアルミナを捕捉するフィルタなどを使用することにより，製品へのアルミナの混入を防ぐことができるものと考

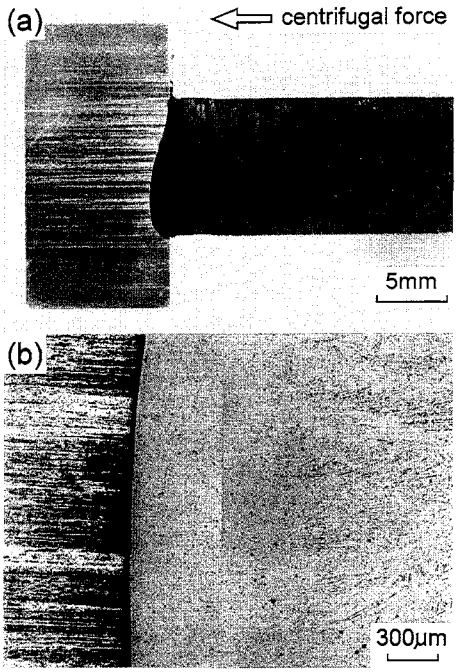

Fig. 2 Structure of a Ni-Al alloy-stainless steel joint produced by centrifugal combustion synthesis.
(a) Macrostructure. (b) Microstructure near the joint interface.

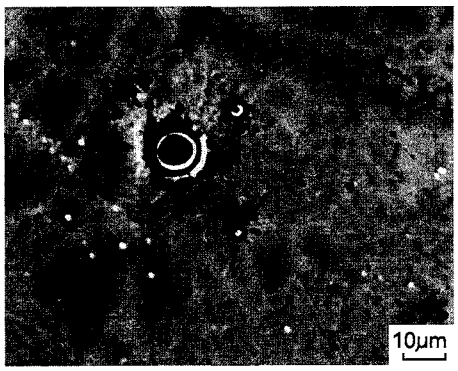

Fig. 3 Fine alumina particles observed in the specimen shown in Fig. 2.

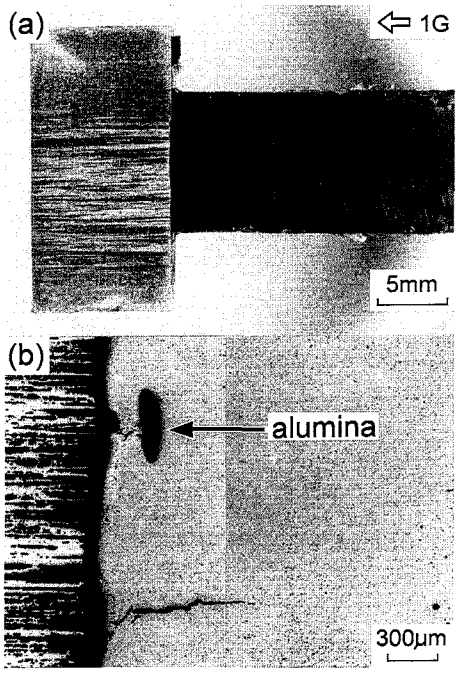

Fig. 4 Structure of a specimen produced under 1 G gravitational acceleration. The base material is a stainless steel. (a) Macrostructure. (b) Microstructure near the joint interface.

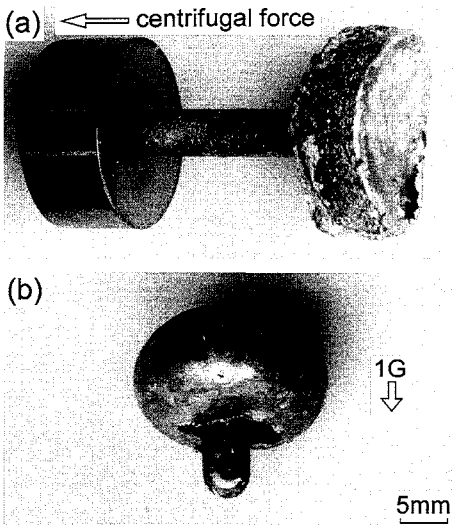

Fig. 5 Specimens produced by using a mold with a slender cavity (5 mm diameter). (a) Specimen produced by centrifugal combustion synthesis. (b) Specimen produced under 1 G (Ni-Al alloy that did not flow into the mold cavity).

えられる．また，それとは逆に，アルミナ粒子を意図的に混入させ，そのサイズや分布を制御する事が可能になれば，鋳物部分を粒子分散型の複合材にすることができる．これらの方法の詳細については今後の検討課題である．

次に，Fig. 2 の場合と同じ鋳型を使用し，通常重力下で燃焼合成・接合を行った比較実験の結果を Fig. 4 に示す．なお，本試料ではテルミット型合成反応の割合 a を0.4とした．Fig. 4(a)は試料の縦断面のマクロ組織，また(b)は接合界面近傍のミクロ組織をそれぞれ示している．ここで，Fig. 4(a)を Fig. 2(a)と比較すると，前者では a 値を大きくして断熱燃焼温度を高くしたにも関わらず，基材表面の溶け込みがほとんど見られない．また，Fig. 4(b)に見られるように，接合界面近傍にはクラックや粗大な塊状のアルミナ介在物など多くの欠陥が存在している．

次に，Fig. 2 および Fig. 4 の場合と同様の鋳型部を用い，鋳型キャビティの直径のみを 5 mm に変更した実験の結果を Fig. 5 に示す．Fig. 5(a)および(b)は，それぞれ(a)遠心燃焼合成実験および(b)通常重力下で実施した比較実験(a =0.4)により得られた試料の外観写真である．遠心燃焼合成実験では，Fig. 5(a)のように良好な接合体が得られた．これに対し，通常重力下での実験では，Fig. 5(b)に示すように溶湯が鋳型の入り口で止まってしまい，鋳型内に流入しなかった．

以上の結果から，本プロセスにおける遠心力は，溶湯を鋳型内に流入させ，且つ，基材に密着させる上で重要な役割を

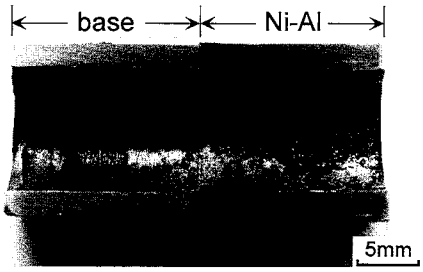

Fig. 6 Longitudinal cross section of a tubular specimen produced by centrifugal combustion synthesis. The base material is a stainless steel.

果たすことが確認された.

次に，管状のステンレス鋼基材に同じ断面形状の Ni-Al 合金管を接合した遠心燃焼合成実験の結果を示す．Fig. 6 は試料の縦断面の外観写真である．基材と鋳物部分とは良好に接合しており，本プロセスにより金属間化合物のニアネットシェイプ成型と異種材への同時接合が可能であることを明瞭に示している.

3.2 各種の基材材質を用いた遠心燃焼合成材

次に，基材の材質を変えた遠心燃焼合成実験の結果を示す．Fig. 7 は，それぞれ(a)ステンレス鋼，(b)極低炭素鋼，(c)純 Ni，および(d) Ni-25 mol%Al 合金の円柱状基材(直径 10 mm)に同じ直径の Ni-25 mol%Al 合金円柱を接合した試料の縦断面マクロ組織を示している．(a)～(b)の試料では接合界面近傍が白く腐食されているが，この領域は異種金属基材と鋳物部分との間の遷移領域である．Fig. 7 の試料のいずれにおいても，基材と鋳物部分は密着しており，接合不良部は見られなかった．これにより本プロセスが種々の基材材質に適用できることが確認された.

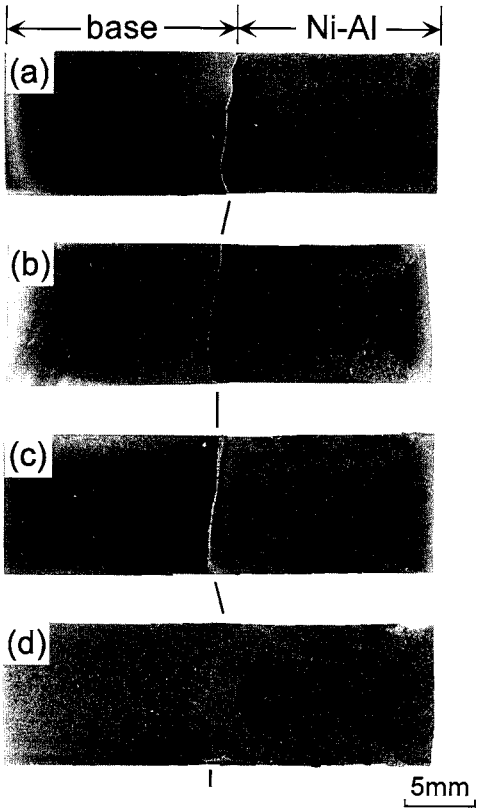

Fig. 7 Macrostructures of specimens produced by centrifugal combustion synthesis with various base materials. (a) Stainless steel. (b) Ultra-low carbon steel. (c) Ni. (d) Ni-25 mol%Al alloy.

4. 結　　言

燃焼合成法と遠心鋳造法とを組み合わせた遠心燃焼合成法により，Ni-25 mol%Al 合金の合成と精密鋳造，および各種の金属基材への同時接合を試みた．得られた結果を以下に要約する.

(1) 本プロセスを用いることにより，Ni-25 mol%Al 合金のニアネットシェイプ成型と金属基材への同時接合が可能である.

(2) 本プロセスにおける遠心力は，鋳型内への溶湯の流入，および溶湯と基材との密着を促進する役割を果たす.

文　　献

1) M. Nobuki: *Intermetallic Compounds for Materials*, ed. by Materials Science Society of Japan, Shokabo, Tokyo, (1995), pp. 41–87.
2) A. Bose, B. H. Rabin and R. M. German: Powder Met. Int., **20**(3)(1988), 25–30.
3) A. Hibino: J. Japan Inst. Metals, **56**(1992), 1435–1443.
4) S. Miura, T. Ohashi and Y. Mishima: Intermetallics, **5**(1997), 45–59.
5) C. Nishimura and C. T. Liu: Acta metall. mater., **41**(1993), 113–120.
6) S. Miura and C. T. Liu: Intermetallics, **2**(1994), 297–313.
7) T. Ohmi, K. Kirihara and M. Kudoh: J. Japan Inst. Metals, **64**(2000), 347–350.
8) O. Yamada and Y. Miyamoto: J. Japan Inst. Metals, **56**(1992), 938–942.
9) O. Yamada and H. Matsumoto: J. F. S., **67**(1995), 708–715.