

# 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング動向と短時間加熱ホットスタンピングの取組み

横浜国立大学 前野 智美

## 1. はじめに

一般乗用車において軽量化がますます重要となっている。また、EU や米国で内燃自動車の生産規制や政府調達方針の草案などが出ており、EV 化も急務となっている<sup>1,2)</sup>。EV 化では重いバッテリーを積載することから、車両軽量化が電費や運動性能の両面で重要となる<sup>3)</sup>。自動車の材料置換において超高張力鋼板、ホットスタンピング材<sup>4)</sup>、高強度アルミニウム(AI)合金は材料コストやリサイクル性が比較的優位であり、適用の拡大が期待できる。特に、AI 合金は比重が軽く鋼板に比べて厚さを確保できるので、薄肉化による剛性低下有効であり、期待が高い。しかしながら熱処理型アルミニウム合金は延性が低く、プレス成形が難しい問題がある。鋼板のホットスタンピングのように加熱によって成形性を向上する方法が考えられるが、熱処理型アルミニウム合金においては溶体化処理、時効処理によって析出を制御して強度を作りこむため、簡単には加熱を成形に応用できない。

ここでは、まだ一般的には適用が進んでいないが、現在検討の進められている熱処理型 AI 合金のホットスタンピングについて紹介する。

## 2. 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

熱処理型 AI 合金は比強度が高く魅力的である。しかしながら図 1 に示すように、時効硬化した熱処理型 AI 合金の延性は低く、冷間成形は難しい<sup>5)</sup>。航空機などでは焼鈍し (O) 材を冷間プレスし、成形後に溶体化処理・人工時効処理をするが、成形後の熱処理や矯正の追加プレス工程が必要であり、コストや生産性の問題がある。自動車においては、冷間成形が可能な 6000 系合金の自然時効(T4)材が主であり、塗装焼付におけるベークハード (BH) 処理で少し強度を改善するのに留まっている。付加的な熱処理なしに 2000 系や 7000 系合金のプレス成形ができれば、コストの厳しい自動車のパネル部品への応用が期待できる。

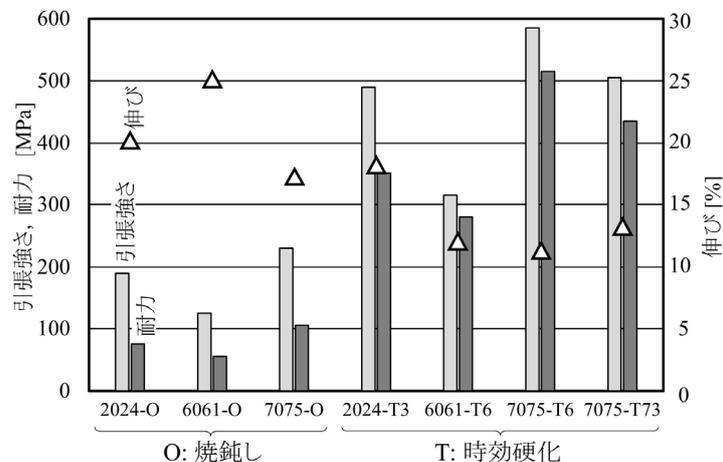


図 1 熱処理型 AI 合金の引張強さ、耐力、伸び<sup>5)</sup>より抜粋

成形後の熱処理などを省略するために、最近開発されている主な熱処理型 Al 合金のホットスタンピングの加熱履歴と強度変化イメージを図 2 に示す。

(a)溶体化処理ホットスタンピング<sup>6)</sup>は Hot Form Quench (HFQ)とも呼ばれる。鋼板のホットスタンピングに似ており、溶体化処理温度(460 °C-550 °C)に加熱した板材をプレス成形し、金型保持で急冷、焼入れをする。(b)W-Temper 冷間成形<sup>7)</sup>は、溶体化処理直後に冷間プレス成形する。析出硬化前の板材は延性があり、冷間成形が可能である。(a),(b)の方法では成形後の溶体化処理が省略される。人工時効などが必要であるが、従来とほぼ同様の熱処理履歴となり、T6 材と同等の強度が得られる。

(c)は温間ホットスタンピング<sup>注1)</sup>である。加熱温度を 150°C-250 °C 程度に制限してプレス成形をすることで、成形性の向上と加熱による強度低下のバランスを取っている<sup>8-10)</sup>。T6 材に対し強度が若干低下するが、成形後の人工時効処理が省略でき、最も低コストである。ホットプレートを利用した短時間加熱によって強度低下を低減する方法も検討されている<sup>11,12)</sup>。(d)も同様に温間成形であるが、成形前の予備時効や成形時の温度保持、BH との組み合わせによって T6 材よりも少し強度を向上させることに成功している<sup>13,14)</sup>。

## 2.1 溶体化処理ホットスタンピング

溶体化処理ホットスタンピングでは、ダイクエンチによって溶体化処理する。しかしながら、図 3 に示すように、冷却速度が強度に影響し、特に、7075 合金の焼入れ感受性は高く、最大強度を得るためには 300 °C/s 程度の冷却速度が必要となる<sup>15)</sup>。Al 合金の熱伝導率が高いが、ダイクエンチにおいて金型と素板に隙間があると著しく冷却速度が低下するため、金型隙間の管理が重要となる<sup>16,17)</sup>。焼付き防止のために、被膜処理を用いる場合は被膜の熱伝導への影響も検討する必要がある<sup>18)</sup>。一方、7000 系合金の焼入れ感受性

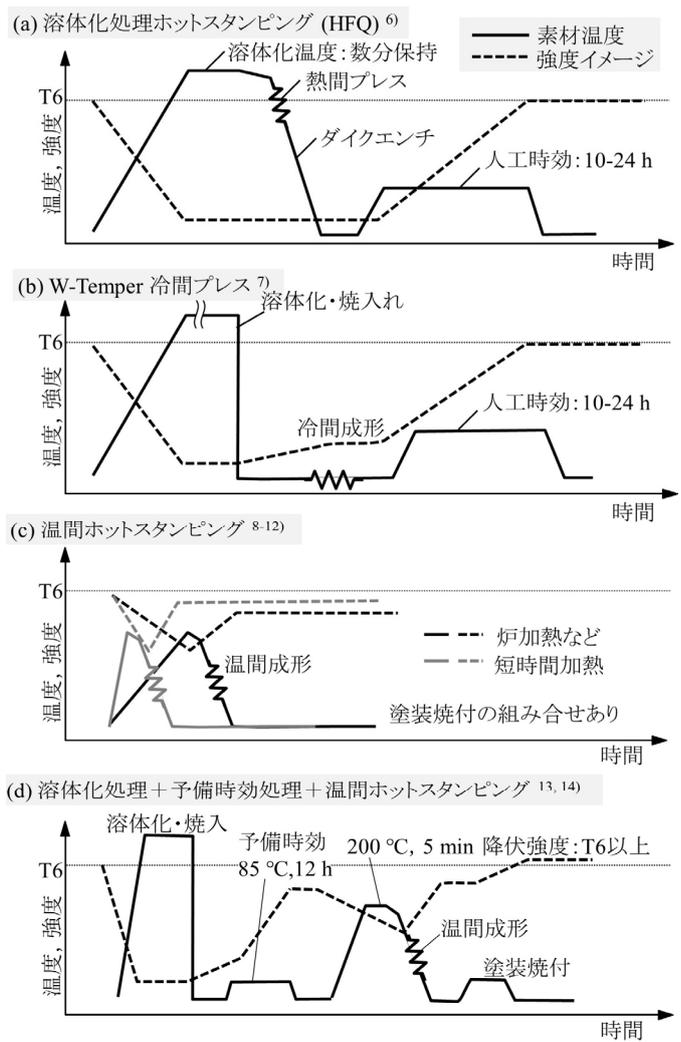


図 2 熱処理型 Al 合金の温・熱間プレス成形における加熱履歴と強度変化イメージ<sup>19-27)</sup>

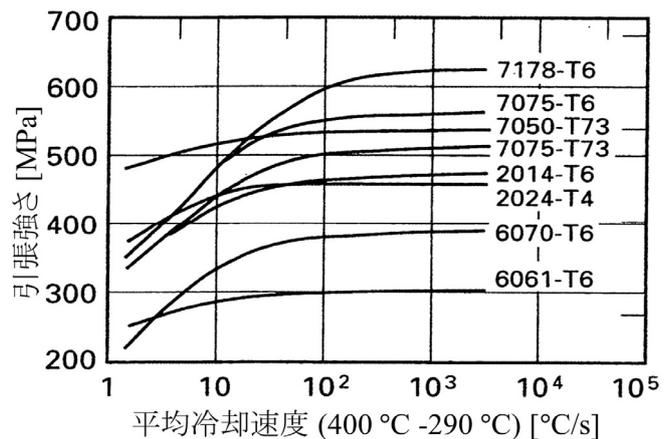


図 3 各種熱処理 Al 合金の引張強さに及ぼす焼入れ時の平均冷却速度の影響<sup>28)</sup>より引用、和訳

注 1) 一般に再結晶温度で温間と熱間を区別するが、ここでは、溶体化処理を目的としない加熱温度を温間と称する。

低減および人工時効時間の短縮のためにジルコニアを添加した合金が検討されている<sup>19)</sup>。

溶体化処理ホットスタンピングでは、成形前の加熱で析出物を再固溶させ、すぐに成形を実施することになる。生産性確保のために、均質化時間は短い。再固溶の際に粒界で溶質原子の濃化が生じた状態で成形すると、粒界が軟化しており、粒界破壊を生じる場合がある<sup>20)</sup>。図4に示すように、450℃以上の温度においては延性が急激に低下しており、溶体化処理温度の495℃での延性は著しく低くなっている。粒界破壊を防ぐ温度に、放冷させてからの成形が考えられるが、焼入れに問題が生じる。そこで、加熱した板材を炉から搬出後に平面の圧盤で挟んで300℃に急冷してから成形する方法が開発されている<sup>21)</sup>。400℃など的高温時より加工硬化が大きくなり、成形性も向上する。また、接触加熱による急速加熱を用いた方法<sup>22)</sup>も検討されており、加熱時の均質化時間確保や生産性向上に役立つ。

溶体化処理ホットスタンピングでは求められる熱処理の管理が厳しい。溶体化処理温度は固相線に近いので、5℃程度の温度幅で管理する必要があり、固相線を超えてしまうと材料に致命的な損傷を与えてしまう<sup>15)</sup>。期待されている7000系合金は焼入れ感受性が高く、焼入れ管理も厳しい。また、加熱温度が高く、摩擦も厳しくなっている。また、利用できる潤滑剤も限定されるため、検討することが多く課題はまだ多い。

## 2.2 温間ホットスタンピング

時効硬化している材料でも、加熱をすると延性が向上し、成形性が向上する。しかしながら、析出硬化している材料を加熱すると析出物の成長や再固溶などが生じ、強度が低下する。図5に200-250℃に加熱した成形金型内でブランクを加熱して、ホットスタンピングした際の硬さを示す<sup>10)</sup>。加熱温度、加熱保持時間の増加に伴い硬さは低下しているが、200℃、5minの加熱であれば、硬さの低下は10%程度に留められる。また、ホットプレートに挟んで、10s-15sで加熱した場合の結果を図6に示す<sup>12)</sup>。200℃において5%以内の強度低下に留まっている。

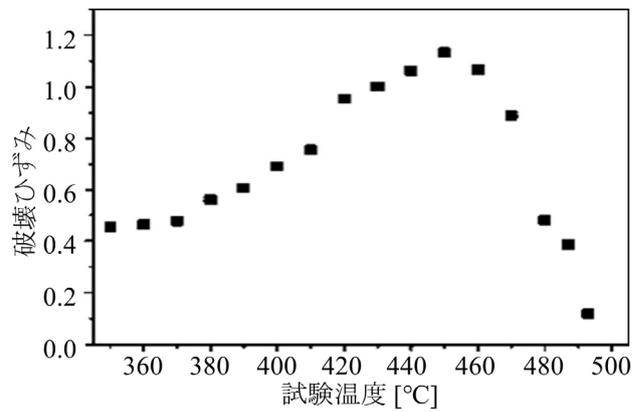


図4 溶体化処理温度に加熱したA2024合金の温・熱間引張試験における試験温度が破壊ひずみに及ぼす影響<sup>20)</sup>より引用し和訳

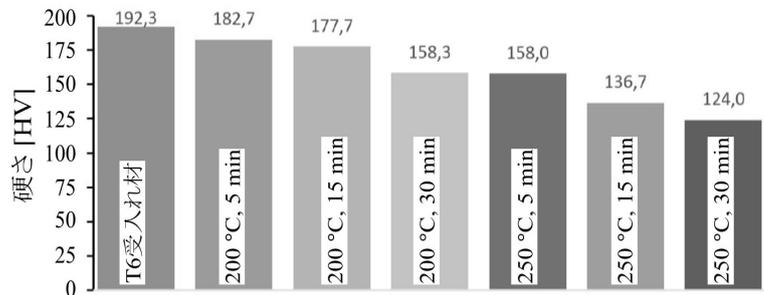


図5 加熱温度と加熱時間が硬さに及ぼす影響<sup>10)</sup>より引用和訳

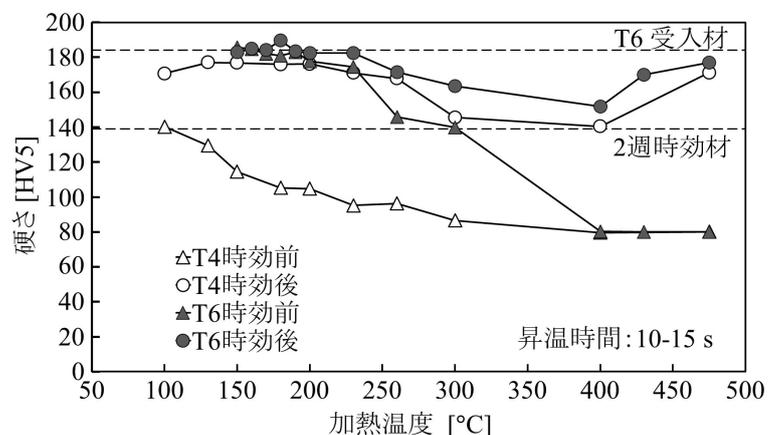


図6 A7075-T6, T4合金における短時間加熱直後および人工時効後の硬さ<sup>12)</sup>より引用

図 7 に A7075-T6 合金の各温度における限界絞り比を示す。60 °C 以下では割れが生じているが、100 °C 以上においては成形ができており、180 °C では絞り比 2.0 が得られている。180 °C の加熱によって、A5182 焼鈍し材の冷間プレスと同等の限界絞り比が得られている。

図 8 に温間および熱間で成形した A7075-T6, T4 材の V 曲げ成形の結果を示す。加熱温度の増加に伴いスプリングバックは低下している。200 °C の加熱においても冷間の半分以下となっている。また、人工時効が必要となるが T4 材を使えばスプリングバックをゼロにできる。

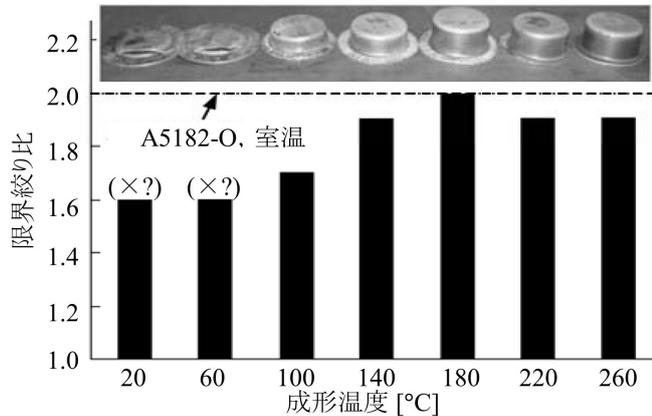


図 7 A7075-T6 合金の温間成形における限界絞り比に及ぼす加熱温度の影響（乾燥型の潤滑剤あり） 8)より引用和訳，一部改変

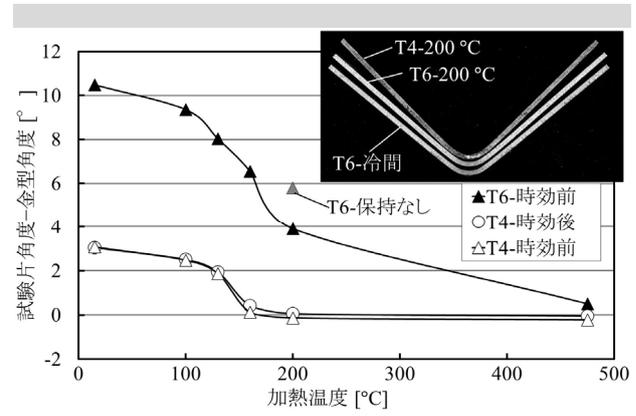


図 8 A7075-T6, T4 材の V 曲げ成形において加熱温度がスプリングバックに及ぼす影響 12)より引用

### 3. Al 合金のホットスタンピングにおける摩擦

Al 合金のプレス成形では冷間においても凝着を起こしやすく、ホットスタンピングではさらに摩擦への配慮が重要となる。板材引抜き<sup>23-25)</sup>、ボール<sup>26, 27)</sup>およびピンオンディスク<sup>28)</sup>など種々の方法で検討されている。いずれの報告においても無潤滑では高い摩擦係数を示しており、顕著な焼付きが報告されており、図 9 で示すように、焼付きを起因として割れが生じる場合もある<sup>29)</sup>。Al 合金のホットスタンピングでは潤滑剤が必須である。

溶体化処理ホットスタンピングでは析出物が固溶しているため、温間ホットスタンピングと比較すると焼付きが生じにくいことが報告されている<sup>24)</sup>。また、析出物と型材質の親和性が焼付きに及ぼす影響が指摘されている<sup>30)</sup>。金型コーティングも種々コーティングが検討されており、DLC<sup>31)</sup>、WC:C<sup>32)</sup>、CrWN<sup>33)</sup>などが検討されている。

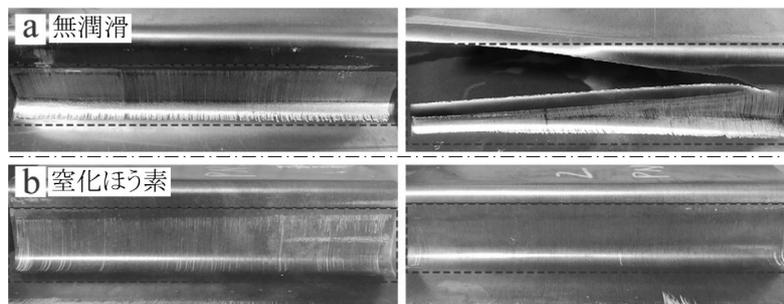


図 9 A7075 の溶体化ホットスタンピングにおける U 曲げ成形において生じた焼付き 29)より一部抜粋

#### 4. おわりに

EV ではバッテリーにより重量増加があり、安全性などの観点で、自動車の構造が変わることが考えられる。熱処理型 Al 合金のホットスタンピングは、特に海外で注目されており、研究報告が増加している。熱処理型 Al 合金の熱処理は複雑であり、その理解が重要となる。また、材料製造から製品までの全体の加熱履歴を踏まえた検討が重要になる。7075 合金は強度が高いものの応力腐食割れ感受性が高いため、その問題の解決が必要となる。管材は加熱効率の高い通電加熱が利用しやすく、Al 合金は加熱温度が低いため、鋼板のホットスタンピングに比べ製造時の炭素排出を低減できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) Jetro : ビジネス短信, (2021), d870a9cd8282f522.
- 2) Jetro : ビジネス短信, (2021), 34e767f15a0d8a26.
- 3) Bachman, K.: *Stamping J.* **31**-5(2019),30-39.
- 4) 森謙一郎 : ふらすとす, **4**-46(2021), 649-653.
- 5) アルミニウム技術便覧編集委員会 : 新版/アルミニウム技術便覧, (1996), 78-80, カロス出版.
- 6) Garret, R. P., Lin, J. and Dean, T.A.: *Adv. Mater. Res.*, **6**-8 (2005), 673-680.
- 7) Sáenz de Argandoña, E., Galdos, L., Ortubay, R., Mendiguren, J. and Agirretxe, X.: *Key Eng. Mater.*, **651**-**653**, (2015), 199-204.
- 8) Wang, H., Luo Y.-B., Friedman, P., Chen. M.-H., Gao L.: *T. Nonferr. Metal. SOC*, **22**-1 (2012), 1-7.
- 9) Maeno, T., Mori, K. and Yachi, R., *CIRP Ann.*, **66**-1 (2017), 269-272.
- 10) Polak, S., Kaczyński, P., Gronostajski, Z., Jaskiewicz, K., Krawczyk, J., Skwarski, M., Zwierzchowski, M. and Chorzępa, W.: *Procedia Eng.*, **207** (2017), 2399-2404.
- 11) 前野智美・齋藤拓己・飛田夏葵・森謙一郎・谷口俊哉 : 平成 30 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2018), 25-26.
- 12) 前野智美・飛田夏葵・齋藤拓己・森謙一郎・谷口俊哉 : 第 69 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2018), 163-164.
- 13) Kumar, M., Ross, N. G.: *J. Mater. Process. Technol.*, **231** (2016), 189-198.
- 14) Hua, L., Zhang, W., Ma, H. and Hu, Z.: *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **169** (2021), 103799
- 15) ASM International Handbook Committee: *ASM Handbook Vol. 4 -Heat Treating-*,10th ed., (1991), 851-855.
- 16) Xiao, W., Wang, B., Zheng, K., Zhou, J. and Lin, J.: *Arch. Civ. Mech. Eng.*, **18**-3 (2018), 723-730.
- 17) Xiao, W., Zheng, K., Wang, B. and Yang, X.: *Archiv. Civ. Mech. Eng.*, **20**-3 (2020), 93.
- 18) Liu, X., Fakir, O.E., Zheng, Y., Gharbi, M.M. and Wang, L.: *Int. J. Heat Mass Transf.*, **137** (2019), 74-83.
- 19) Omer, K., Abolhasani, A., Kim, S., Nikdejad, T., Butcher, C., Wells, M., Esmacili, S. and Worswick, M.: *J. Mater. Process. Technol.*, **257** (2018), 170-179.
- 20) Wang, L., Strangwood, M., Balint, D., Lin, J. and Dean, T.A.: *Mater. Sci. Eng. A*, **528**-6 (2011), 2648-2656.
- 21) Zhu, L., Liu, Z. and Zhang, Z.: *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **103** (2019), 4739-4746.
- 22) Geng, H., Wang, Y., Wang, Z., Zhang, Y.: *Metals.*, **9**-12 (2019), 1341.
- 23) Ghiotti, A., Bruschi, S., Medea, F.: *Wear*, **376**-**377 A** (2017) 484-495,
- 24) Ghiotti, A., Simonetto, E. and Bruschi, S.: *Wear*, **426**-**427 A**(2019), 348-356.
- 25) Liu, Y., Zhu, B., Wang, K., Li, S. and Zhang, Y.: *Tribol. Int.*, **151** (2020), 106504.
- 26) Wang, L., He, Y., Zhou, J., Duszczek, J.: *Tribol. Int.*, **43**- 1-2 (2010), 299-306.
- 27) Liu, Y., Zhu, Z., Wang, Z. Zhu1, B., Wang Y. and Zhang, Y.: *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **96** (2018), 4063-4083.
- 28) Huttunen-Saarivirta, E., Kilpi, L., Hakala, T.J., Metsäjoki, J. and Ronkainen, H.: *Tribol. Int.*, **119** (2018),

567-584.

- 29) Li, X., Yan, X., Zhang, Z., Ren, M., Jia, H.: *Metals*, **11**-7 (2021), 1111.
- 30) Muro, M., Aseguinolaza, I. and Artola, G.: *J. Manuf. Mater. Proc.*, **5**-1 (2021), 15.
- 31) 松本健慈・沢畑直紀・向井智徳・柳田明・小豆島明：第69回塑性加工連合講演会講演論文集，(2018)，167 -168.
- 32) Dong, Y., Zheng, K., Fernandez, J., Li, X., Dong, H. and Lin, J.: *J. Mater. Process. Technol.*, **240** (2017), 190-199.
- 33) Noder, J., George, R., Butcher, C., and Worswick, M.J.: *J. Mater. Process. Technol.*, **293** (2021), 117066.

## A7075 アルミニウム合金の後人工時効レスホットスタンピングにおける加熱条件が硬さと成形性に及ぼす影響

機塑正 前野 智美 (横浜国大) 塑学 ※齋藤 拓己 (横浜国大・院)  
機塑正 飛田 夏葵 (横浜国大・学) 機塑正 森 謙一郎 (豊橋技科大)  
機塑正 谷口 俊哉 (ジータクト)

### 1. はじめに

熱処理型合金である A7075 アルミニウム合金は高比強度であるが、延性が低く切削による加工が主である。焼鈍した板材の成形も考えられるが、成形後の溶体化熱処理は高コストであり自動車への適用は難しい。成形性と溶体化処理の問題を解決する熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングが開発され、検討されている<sup>1)</sup>。この方法では、500°C 程度の溶体化処理温度に加熱した板材を成形するとともに、金型で急冷して溶体化処理を行っている。しかしながら、所定の強度を得るためには成形後の人工時効処理が必要である。また、加工温度が高いため、液体金属脆化の危険もある<sup>2)</sup>。一方、溶体化処理温度での成形も検討されており、加熱時間と強度に及ぼす影響が検討されている<sup>3,4)</sup>。

本研究では接触加熱を採用し、成形後の人工時効を必要としない 7000 系アルミニウム合金のホットスタンピングを開発するために、材料強度に及ぼす加熱履歴の影響およびハット曲げ加工における形状凍結性について調査した。

### 2. 接触加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング

ホットスタンピング後の溶体化処理および人工時効処理を省略するために、接触加熱を用いた短時間加熱によるホットスタンピングを図 1 の (b) に示す。人工時効硬化処理が施されている板材を素材に用いる。素材の析出硬化がなくなるように短時間で加熱を行いプレス成形する。成形中は昇温されているため延性が向上しており、プレス成形が可能となる。成形後に析出硬化が取れていなければ人工時効が省略できる。

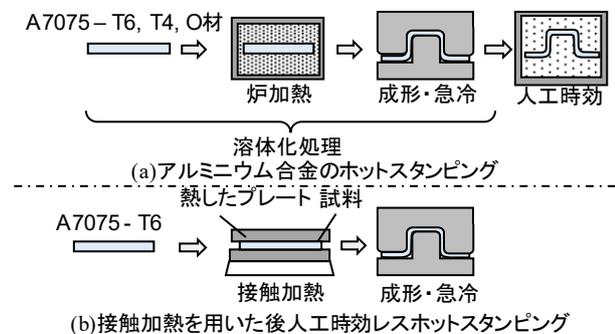


図 1 溶体化処理を行うアルミニウム合金のホットスタンピングと接触加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング

### 3. 接触加熱を用いた温度履歴が材料特性に与える影響

#### 3.1. 接触加熱・水冷実験方法

本研究では厚さ 2mm の A7075-T6 材を検討した。加熱温度と加熱時間がホットスタンピング後の強度に及ぼす影響を調べるために、加熱・冷却のみを行った。20 × 20 × 2mm の試験片をホットプレートで  $T = 200 - 475^\circ\text{C}$  に加熱し、 $t_h = 0 - 900\text{s}$  保持して水冷した。昇温時間がおおよそ 10s になるようにホットプレートの温度を調整した。水冷直後、120°C で 24 時間の人工時効または、焼付け塗装に相当する 170°C で 20 分保持の熱処理後の硬さおよび電気伝導率の測定を行った。

#### 3.2. 接触加熱・水冷実験結果

図 2 に加熱温度 200 - 475°C における加熱が時効前後での硬さと電気伝導率に与える影響を示す。 $T = 200^\circ\text{C}$  では、水冷

直後においても硬さの低下はほとんど見られなかった。200°C 以上においては水冷直後の硬さは温度とともに低下した。時効後においては  $T = 200, 250^\circ\text{C}$  および  $475^\circ\text{C}$  の条件において T6 相当の硬さが得られた。 $T = 475^\circ\text{C}$  は溶体化処理が行われたためである。 $T = 300 - 400^\circ\text{C}$  では人工時効後も T6 相当の硬さにはならなかった。 $T = 200^\circ\text{C}$  においては時効前でも高い硬さが得られており、人工時効処理が省略できる。

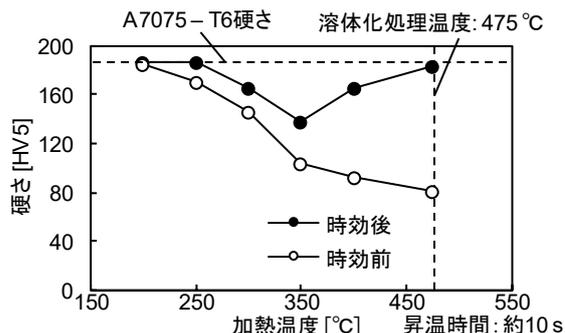


図 2 A7075-T6 合金において加熱温度が硬さに与える影響 ( $t_h = 0\text{s}$ )

$T = 200^\circ\text{C}$  において加熱保持時間が硬さに与える影響を図 3 に示す。加熱時間が増加していくと硬さは徐々に低下している。約 20s の加熱時間においては受入材に対して硬さの低下は 5% 以内となった。加熱時間および温度が保持される加熱から成形までの搬送時間は短い方が望ましい。

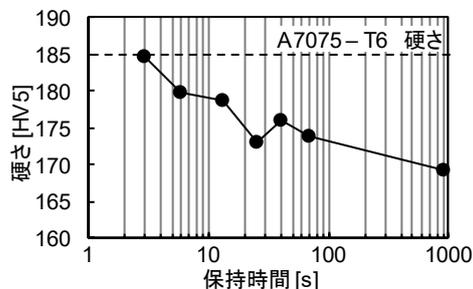


図 3  $T = 200^\circ\text{C}$  において加熱時間が硬さに与える影響

熱処理型アルミニウム合金の焼付け塗装によるベークハードによって、人工時効処理を代えられるかを検証した。図 4 に  $T = 200, 400, 475^\circ\text{C}$  において水冷後の人工時効処理または焼付け塗装が硬さに与える影響を示す。

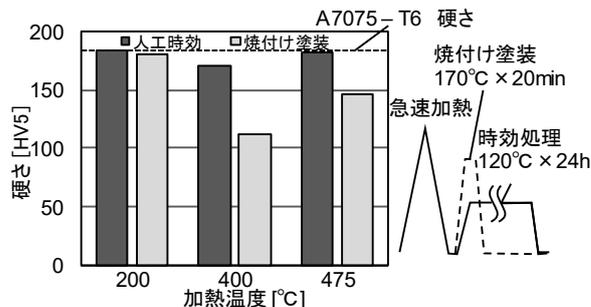


図 4  $T = 200 - 475^\circ\text{C}$  において水冷後の人工時効処理または焼付け塗装が硬さに与える影響

$T = 200^\circ\text{C}$ においては硬さの低下が小さく過時効はほとんど見られなかった。他の温度条件においては、焼付け塗装では硬さの上昇が小さいために人工時効処理が必要となることがわかった。

#### 4. 接触加熱を用いたハット曲げ成形方法

図5に接触加熱を用いたハット曲げ成形に用いた金型詳細と実験条件を示す。試料には  $150 \times 20 \times 2$  mm の A7075-T6 を用いた。ホットプレートで  $T = 200 - 475^\circ\text{C}$  まで加熱し、保持なしで金型へと5s程度で搬送し、成形した。板材を冷やすために5sの下死点保持を行った。ホットプレートの温度は加熱温度に対して  $+20^\circ\text{C}$  とし、熱電対を付けた試験片を加熱温度に達したら取り出した。また、板押え上に2.5mmのスペーサーを配置し、試料のフランジ部はダイスと接触せずに成形される。

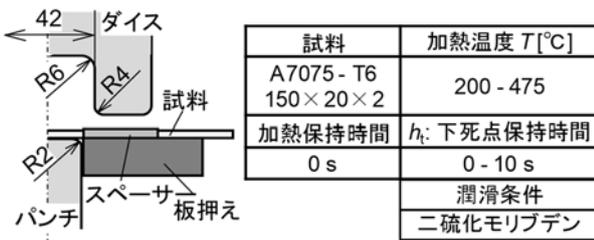


図5 接触加熱を用いたハット曲げ成形の実験条件

#### 5. 接触加熱を用いたハット曲げ成形

図6に  $200^\circ\text{C}$ における炉加熱および接触加熱による温度履歴を示す。炉加熱では917sにおいても  $200^\circ\text{C}$  に達していないのに対し、接触加熱では24sまで短縮されていた。

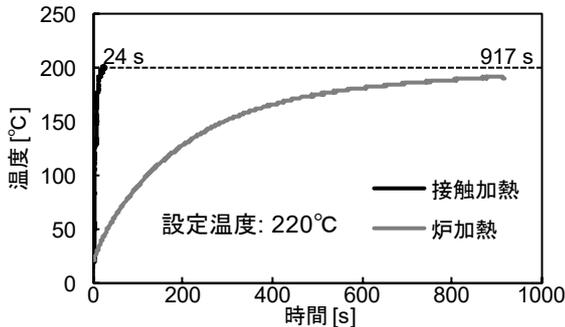


図6  $200^\circ\text{C}$ における炉加熱および接触加熱による温度履歴

図7に冷間、 $T = 200, 400, 475^\circ\text{C}$ におけるハット曲げ成形品を示す。冷間においては成形初期において割れが発生していたが、加熱することによって割れなく成形することができた。 $T = 200^\circ\text{C}$ においてはスプリングバックが見られ、 $T = 400, 475^\circ\text{C}$ においては見られなかった。

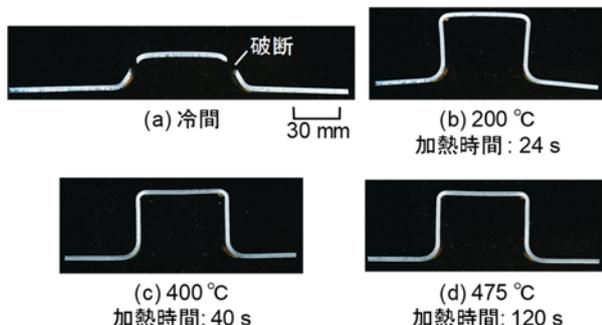


図7 冷間、 $T = 200, 400, 475^\circ\text{C}$ におけるハット曲げ成形品

図8に  $T = 200 - 475^\circ\text{C}$ における成形後の加熱温度が時効前後の硬さに与える影響を示す。加熱、成形後の時効前後で

の底部の板厚中心の硬さを測定した。 $T = 200^\circ\text{C}$ においては水冷した場合と同様に成形直後でも高い硬さが得られており、人工時効処理が省略された。時効後の  $T = 200, 475^\circ\text{C}$ においてはT6材相当の硬さが得られたが、 $250^\circ\text{C}$ においては搬送時間が長かったために水冷した場合と比べて硬さが減少した。

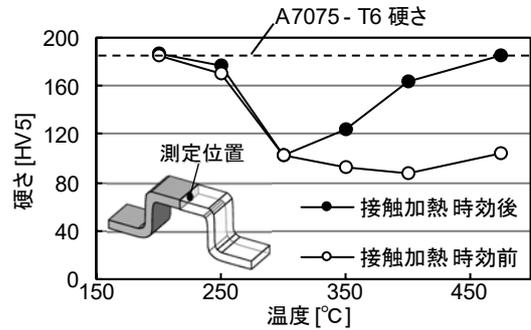


図8  $T = 200 - 475^\circ\text{C}$ における成形後の加熱温度が時効前後の硬さに与える影響

図9に  $T = 200, 475^\circ\text{C}$ における下死点保持時間が時効後硬さに与える影響を示す。 $475^\circ\text{C}$ においては下死点保持なしの場合、T6材と比較して硬さが約20%低下し、4s以上の下死点保持が必要である。一方で、 $200^\circ\text{C}$ では、溶体化処理を行って急冷は必要ないので、下死点保持は不要であり、クランクプレスが適用できる。

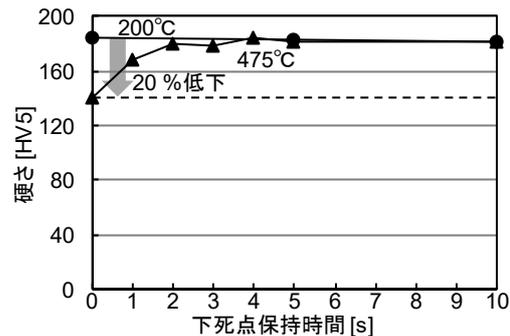


図9  $T = 200, 475^\circ\text{C}$ において下死点保持時間が時効後硬さに与える影響

#### 6. おわりに

本研究ではA7075合金への人工時効処理を省略したホットスタンピングの適用を目的に、接触加熱を用いた短時間加熱によるホットスタンピングを開発した。加熱履歴が製品強度に及ぼす影響を調査し、ハット曲げにおいて成形性を検討した結果以下の知見を得た。

- $200^\circ\text{C}$  20sの加熱後の強度低下は受入れ材の5%以内となった。
- 冷間で割れを生じるハット曲げにおいても、 $200^\circ\text{C}$ において割れを生じることなく成形された。
- ハット曲げにおいて、 $200^\circ\text{C}$ ではスプリングバックが生じた。
- 下死点保持は不要であり、クランクプレスが適用できた。

本研究はJSPS 科研費 JP18K04772の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 1) Lin, J. et al. (2008) Process for Forming Metal Alloy Sheet Components. Patent Application, WO2008059242 A2.
- 2) Wang, L. et al. (2011) Mater. Sci. Eng., A, 528, 2648 - 2656.
- 3) Maeno, T. et al. (2017) CIRP-Ann., 66, 269 - 272.
- 4) Sławomir Polak et al (2017) Procedia Eng., 207, 2399 - 2404.

## 時効硬化された A7075 アルミニウム合金板の短時間加熱を用いた 後人工時効レスホットスタンピングによる V 曲げ成形

機塑正 前野 智美 (横浜国大) 塑学 ※飛田 夏葵 (横浜国大・院) 塑学 齋藤 拓己 (横浜国大・院)  
 機塑正 森 謙一郎 (豊橋技科大) 軽塑正 谷口 俊哉 (ジーデクト)

### 1. はじめに

熱処理型合金である A7075 アルミニウム合金は高比強度であるが、延性が低く切削による加工が主である。熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングが開発されているが、溶体化処理のための冷却管理や、液体金属脆性による成形性低下が指摘されている<sup>1), 2)</sup>。一方、溶体化処理温度まで加熱しない成形も検討されている<sup>3), 4)</sup>。通常、熱処理で硬化された熱処理型アルミニウム合金は、加熱によって強度が低下するため、温間および熱間でプレス成形しない。しかしながら、加熱条件を限定することで強度低下を小さく抑える事が可能となる。著者らは、接触加熱を用いて A7075-T6 合金を 200 °C に短時間で加熱してハット曲げたところ、冷間で生じた割れは抑制され、成形後の強度低下も小さかった<sup>5)</sup>。しかしながら、ハット曲げは変形が複雑であり、形状凍結性の評価が十分に行えていない。また、成形後の材質評価も硬さ評価に留まっている。

本研究では、V 曲げ加工において形状凍結性を調査した。また、成形後の機械的特性を引張試験によって、析出状態の変化を示差走査熱量測定によって調査した。また、人工時効材に加えて自然時効材についても検討を行った。

### 2. 接触加熱を用いた V 曲げホットスタンピング方法

人工および自然時効した熱処理型アルミニウム合金の接触加熱を用いたホットスタンピングを図 1 に示す。人工および自然時効された板材を素材に用い、接触加熱を用いて短時間で加熱を行いプレス成形する。短時間加熱のため、人工時効材では強度低下が抑制され、自然時効材では成形後の溶体化処理なしに人工時効での強度向上が可能となる。成形中は昇温により延性が向上しており、プレス成形が可能となる。人工時効材においては、成形後の人工時効を省略し、自然時効材においては、プレス成形後に人工時効を行う。自然時効材では人工時効が必要となるが、さらなる成形性の向上が期待できる。

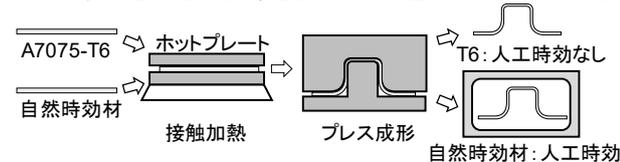


図 1 人工および自然時効した熱処理型アルミニウム合金の接触加熱を用いたホットスタンピング

図 2 に接触加熱を用いた V 曲げに用いた金型詳細と実験条件を示す。試験片には 150 × 20 × 2 mm の A7075-T6 受入材 (以降 T6 材) および 475 °C-1 h 加熱, 0 °C 水冷で溶体化処理後、2 週間自然時効した材料を用いた。通常 A7075 合金では自然時効での硬さが長期間安定しないため T4 処理は規定されていないが、ここでは、2 週間自然時効材を T4 材と呼称する。加熱にはホットプレートを用い、昇温時間を短くするため

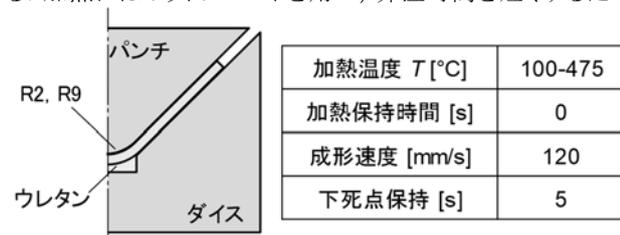


図 2 接触加熱を用いた V 曲げ金型詳細と成形条件

にホットプレートの温度は加熱温度に対して + 20 °C とした。熱電対を付けた温度測定用の試験片が加熱温度 T に達したら、成形用の試験片を 5 s で搬送し、V 曲げを行った。曲げ半径の異なるパンチでダイスを共用するためにダイスの曲げ底部はウレタンゴムとした。

### 3. 接触加熱を用いた温度履歴が材料特性に与える影響

V 曲げを行う前に、変形なしの条件において加熱が時効前後の硬さに与える影響について調査した。20 × 20 × 2 mm の試験片をホットプレートで T = 100 - 475 °C に加熱し、加熱温度 T に到達後すぐに水冷した。ホットプレートの温度は昇温時間がおおよそ 10 - 15 s になるように調整した。水冷直後および 120 °C-24 h の人工時効後の硬さを測定した。

図 3 に A7075-T6, T4 合金において短時間加熱直後および人工時効後の硬さを示す。T6 材において T = 200 °C 以下では、時効前の硬さの低下はほとんど無く、人工時効が省略できる。一方、T4 材においては T = 130 °C 以上では硬さ徐々に減少するが、T = 130 - 200 °C では、人工時効後の硬さが T6 材相当であり、溶体化処理が省略できる。

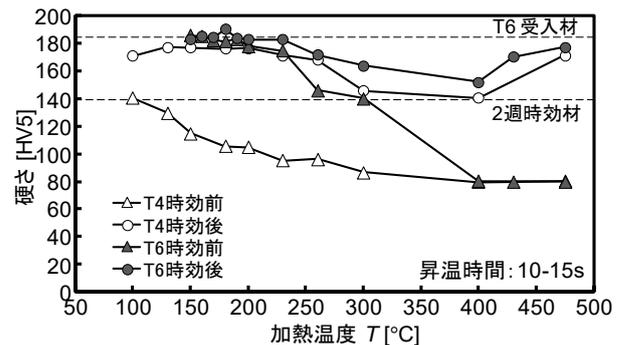


図 3 A7075-T6, T4 合金における短時間加熱直後および人工時効後の硬さ。

### 4. V 曲げ結果

図 4 にパンチ先端半径 2 mm における T6 材の V 曲げ後の曲げ外側を示す。冷間では割れが生じた。T = 200, 475 °C では割れは生じなかった。しかしながら 200 °C においては表面が梨地状になっており、ほぼ限界と見られる。従って、人工時効処理が省略できる T6 材のホットスタンピングにおける板内の最小曲げ半径は、1t (t: 板厚) と程度となる。

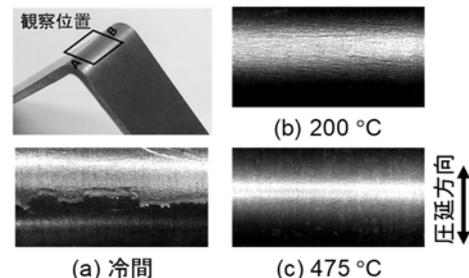


図 4 パンチ先端半径 2 mm における T6 材の V 曲げ後の曲げ部

図 5 に加熱温度がスプリングバックに及ぼす影響を示す。T6 材においては T = 200 °C において冷間に対して 6 割程度スプリングバックが減少した。また、下死点保持なしではスプリング

バックが少し大きくなった。保持時間は短いですが、わずかなクリープ変形によるスプリングバック低減も得られていると考えられる。一方、T4材では  $T = 160^\circ\text{C}$  以上でほとんどスプリングバックを生じなくなった。T4において時効前後での変化はほとんどなく、プレス後の人工時効が形状凍結に及ぼす影響はほとんどない。

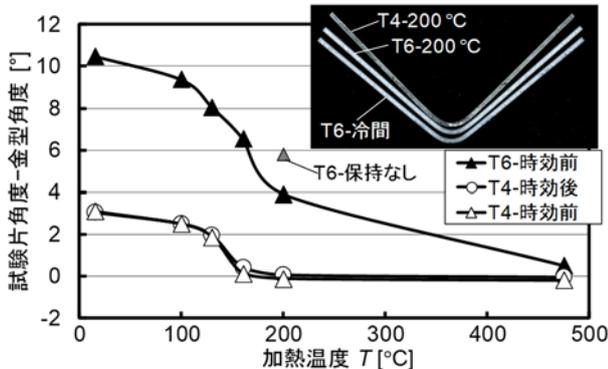


図5 加熱温度がスプリングバックに及ぼす影響 (パンチ先端半径 9mm)

図6に加熱温度が残留応力に及ぼす影響を示す。X線残留応力測定装置(パルステック,  $\mu$ -X360s)を用いて曲げ外側表面の試験片長手方向に沿う残留応力について引張りを正として測定した。加熱温度の上昇とともに残留応力は減少し、 $T = 475^\circ\text{C}$  では測定器ゼロ点範囲となった。 $T = 200^\circ\text{C}$  においてはT6, T4材ともに冷間に対して4割程度減少した。また、T4材では人工時効後に時効前の半分程度となり、残留応力としては小さい値となった。下死点保持なしでは、金型拘束なしに冷却されるため、不均一な熱変形を生じにくく、またその間も自由に變形できるため、残留応力は低下したと考えられる。

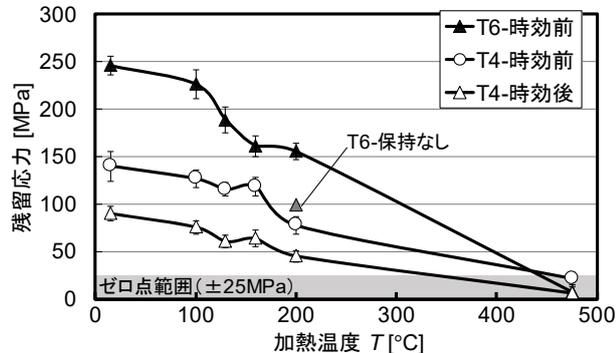


図6 加熱温度がV曲げ後の成形品の残留応力に及ぼす影響 (パンチ先端半径 9mm)

### 5. T6材の短時間加熱ホットスタンピング後の機械的特性および時効硬化状態の変化

図7にT6材の冷間および  $T=200, 250^\circ\text{C}$  成形後の引張試験結果を示す。 $T=200^\circ\text{C}$  においては冷間成形に対して引張強さおよび降伏応力が6%とわずかに低下した。全伸びはほとんど変化しなかった。一方、 $T = 250^\circ\text{C}$  では、強度の低下も確認できるが、伸びの低下が顕著となった。

T6材のホットスタンピングではホットスタンピングでの強度低下を防ぎ、人工時効を省略する。したがって、成形前の加熱でブランク材の時効状態が変化しないことが望ましい。そこで成形前後の析出効果状態の変化について示差走査熱量測定(Differential scanning calorimetry: DSC)によって調査した。成形後の材料を基準物質である純アルミニウムと一緒に加熱して基準物質との温度差から析出物の溶解や析出反応の様子から析出状態を捉えることが出来る。既報<sup>5)</sup>において、短時間加熱では強度低下が生じなかったのに対して炉加熱では強度低下

が生じたため、炉で10分加熱して成形した結果とも比較した。図8にT6受入れ材、接触加熱および10minの炉加熱による  $T = 200^\circ\text{C}$  での成形後の試験片のDSC実験の結果を示す。 $T=200^\circ\text{C}$  の急速加熱材はT6受入れ材とほとんど同じ履歴をたどっており、析出効果の状態にほとんど変化がないことが分かる。一方、炉加熱10minの結果は受入れ材に対して曲線が大きく変化しており、過時効状態の可能性はある。

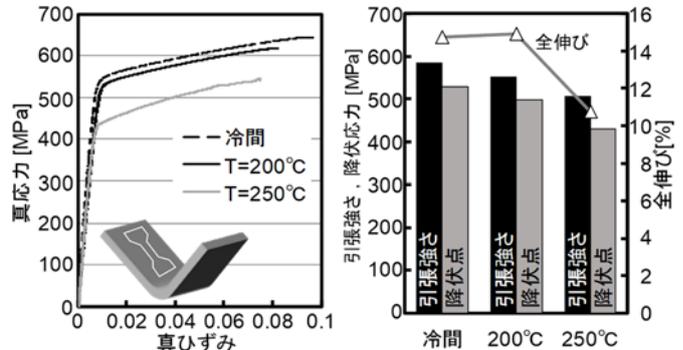


図7 T6材の冷間および  $T=200, 250^\circ\text{C}$  成形後の引張試験結果

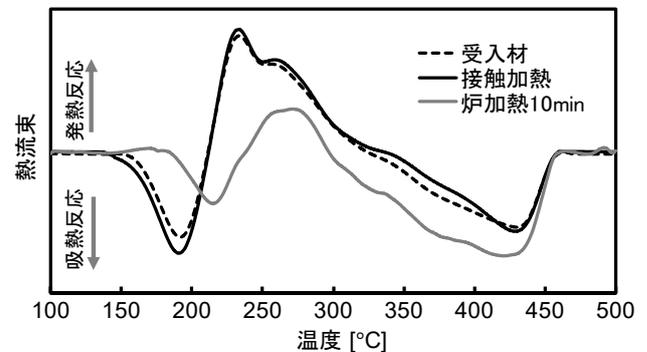


図8 T6受入れ材および  $T=200^\circ\text{C}$  の接触加熱と炉加熱で成形後の材料から得られたDSC曲線

### 6. おわりに

本研究では、A7075合金の短時間加熱を用いたホットスタンピングのV曲げにおいて形状凍結性を調査した。また、成形後の機械的特性および析出効果状態の変化を示差走査熱量測定によって調査した。また、人工時効材に加えて自然時効材についても検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- T6材  $T = 200^\circ\text{C}$  のV曲げにおいて、冷間と比べてスプリングバックが6割程度減少した。この際人工時効は省略が可能である。
- T6材  $T = 200^\circ\text{C}$  の接触加熱では、受け入れ材に対して析出効果状態にほとんど変化は生じず、機械的強度の変化もほとんど生じなかった。
- T4材  $T = 200^\circ\text{C}$  のV曲げにおいて、スプリングバックはほとんど生じなく、残留応力も小さい値となった。また、ホットスタンピング後の溶体化処理は必要なく、人工時効を施せばT6材相当の強度が得られる。

本研究はJSPS 科研費 JP18K04772 の助成を受けたものです。また、残留応力測定機を貸与くださいましたパルステック工業(株)に感謝いたします。

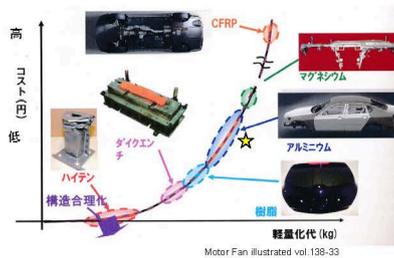
### 参考文献

- 1) Lin, J. et al. (2008) Process for Forming Metal Alloy Sheet Components. Patent Application, WO2008059242 A2.
- 2) Wang, L. et al. (2011) Mater. Sci. Eng., A, 528, 2648 – 2656.
- 3) Maeno, T. et al. (2017) CIRP-Ann., 66, 269 – 272.
- 4) Sławomir Polak et al (2017) Procedia Eng., 207, 2399 – 2404.
- 5) 前野ら：平30 塑加春講論，25 – 26.

## 熱処理型アルミニウム合金 のホットスタンピング

横浜国立大学 前野 智美

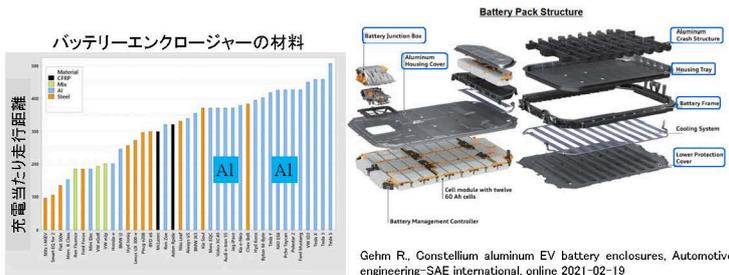
## 自動車軽量化におけるアルミニウム合金の利用



自動車車体の軽量化  
→ 高比強度な材料の使用  
  
コストと軽量化効果のバランス  
→ アルミニウム合金に注目

Motor Fan illustrated vol.138-33

## 現在のEVバッテリーケースにはアルミニウムが多くつかわれている



Gehm R., Constellium aluminum EV battery enclosures, Automotive engineering- SAE international, online 2021-02-19

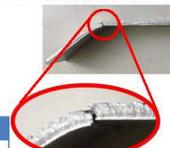
※将来的にバッテリー自身が軽くなるとAl製ケースによる軽量化のメリットが小さくなることも指摘されている

## 熱処理型アルミニウム合金のプレス成形

### 熱処理型高強度アルミニウム合金

高比強度 → 航空機部材として適用

自動車: 6000系 → アウター  
2000系 → 押出材  
7000系 → ドアビーム、バンパー



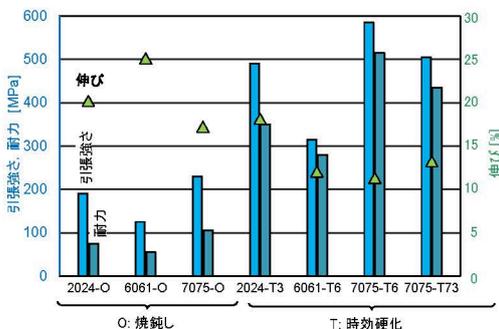
代表的な熱処理型アルミニウム合金の機械的特性

	A7075-T6	A2024-T6	A6063-T4
降伏応力 [MPa]	505	415	90
引張強さ [MPa]	570	485	170
伸び [%]	11	11	22

軽度の曲げで割れた  
A7075-T6アルミニウム合金

## 熱処理型Al合金の引張強さ、耐力、伸び

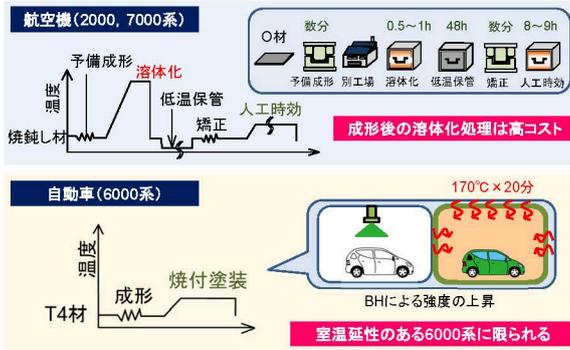
アルミニウム技術便覧編集委員会: 新版/アルミニウム技術便覧, (1996), 78-80, カロス出版.



最大強度: T6  
過時効材: T7  
自然時効材: T4  
焼鈍し材: O  
溶体化処理直後: W

時効硬化材  
 $\epsilon = 11 \sim 14\%$

## アルミニウム部材の成形方法と問題点

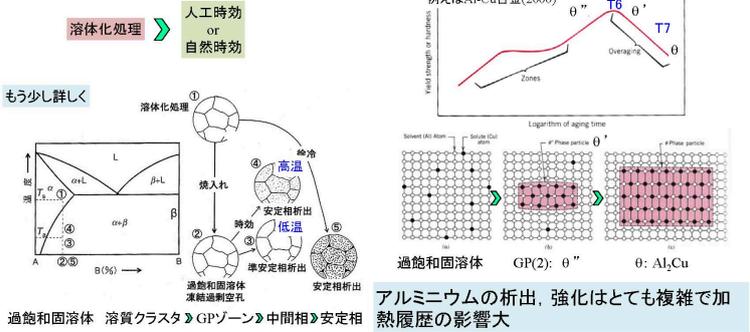


熱処理型アルミニウム合金の強化過程

YNU YOKOHAMA National University

里 達夫, 素形材 62(10)(2021)69-75 および 62(11)(2021)49-60

W.D. Callister, Materials Science and Engineering, 3<sup>rd</sup> ed.(1994) WILEY



熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

- 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングの概要
  - 溶体化処理ホットスタンピング
  - 温間ホットスタンピング
  - アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

人工時効必要

溶体化処理ホットスタンピング  
HFQ (hot form quench)

W-Temper 冷間プレス

積極的に熱処理を実施

人工時効不要

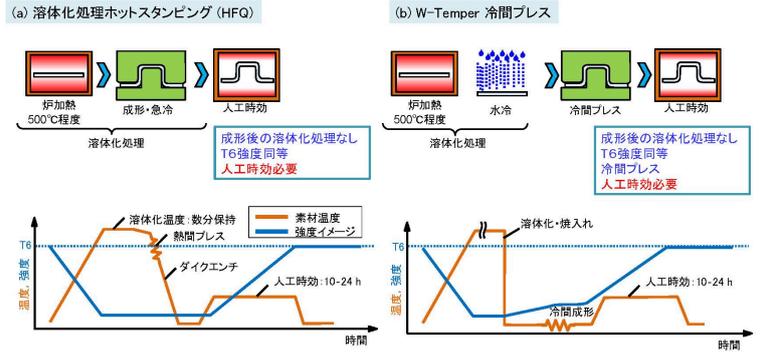
温間ホットスタンピング

溶体化処理 + 予備時効処理  
+ 温間ホットスタンピング

時効硬化材の機能を成形後になるべく低下させない

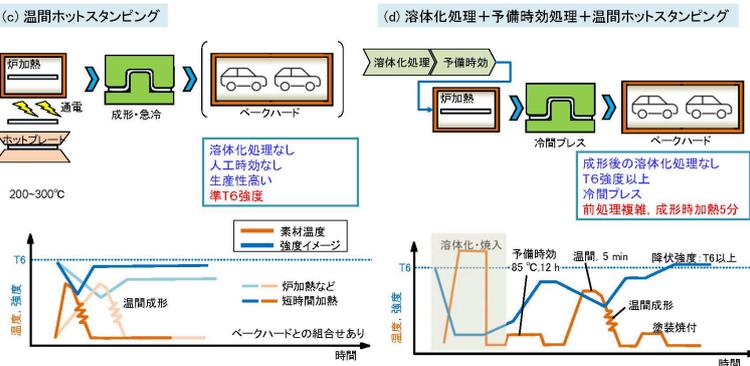
成形後の人工時効が必要な熱処理型アルミニウム合金成形プロセス

YNU YOKOHAMA National University



成形後の人工時効が必要な熱処理型アルミニウム合金成形プロセス

YNU YOKOHAMA National University



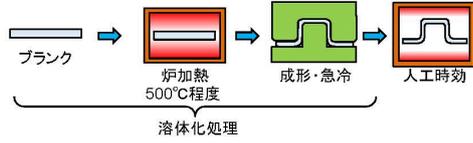
熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

- 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングの概要
  - 溶体化処理ホットスタンピング
  - 温間ホットスタンピング
  - アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

ダイクエンチによって溶体化処理を行うホットスタンピング  
Heat Form Quench (HFQ)

Li - Liang wang et al. TPP(2013), 397 - 406



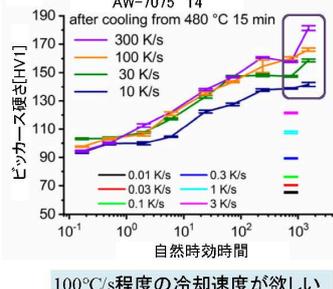
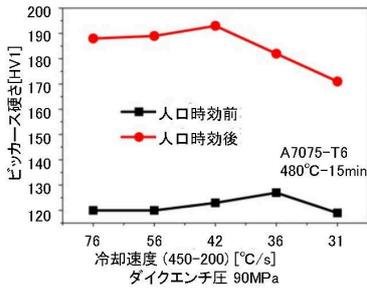
- 低延性素材が成形できる
- 成形と溶体化処理を同時に行える

A7075合金のダイクエンチ時の冷却速度と得られる硬さ

YNU YOKOHAMA National University

M. Y. Zhu et al., Investigation on Quench Rate of 7075 Aluminum Alloy Under Hot Stamping Conditions, 4th (ICHSU2018), Hefei, China, pp.404-409

B. Milkereit et al., Dissolution and Precipitation Behavior for Hot Forming of 7021 and 7075 Aluminum Alloys, Metals 2018, 8, 531



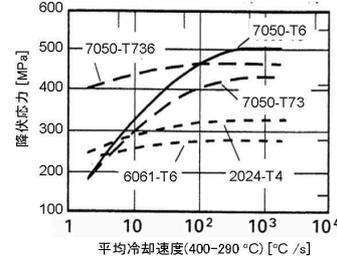
100°C/s程度の冷却速度が欲しい

各種熱処理AI合金の引張強さに及ぼす焼入れ時の平均冷却速度の影響

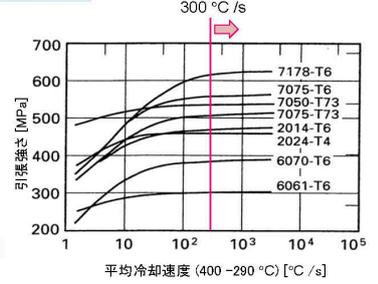
YNU YOKOHAMA National University

ASM International Handbook Committee: ASM Handbook Vol. 4 -Heat Treating-10th ed. (1991), 851-855.

(a) 降伏応力



(b) 引張強さ



7075合金の溶体化処理時の冷却速度の強度依存性は大きく、ダイクエンチによる溶体化処理は簡単ではない

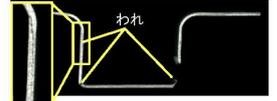
溶体化処理温度管理の難しさと熱間脆性

YNU YOKOHAMA National University

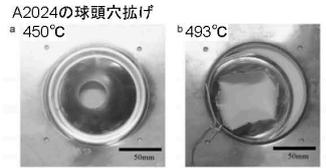
溶体化処理温度は溶融温度にとても近く  
溶融温度範囲に入ると材料は使用不可

合金	溶体化処理温度 (°C)	溶融温度範囲* (°C)
2011	525	535-641
2014	500	507-638
2017	500	513-641
2024	495	502-638
2219	535	543-643
6N01	530	615-652
6061	530	582-652
6063	520	616-654
6262	540	582-652
7003	450	615-650
7N01	450	604-643
7050	475	488-635
7075	480	532-635
7475	515	538-635

\* 均質化熱処理後延伸加工した材料の溶融温度範囲  
Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications, ed. by A. K. Visuadevan and R. D. Doherty, Academic Press, (1989), 91.



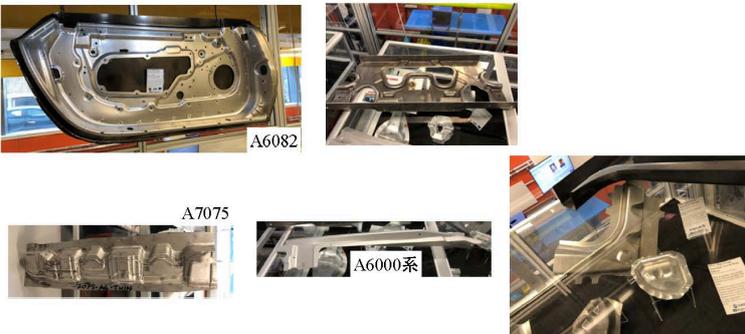
熱間脆性 A2024 500° C  
Maeno, T. et al, CIRP Ann., 66-1 (2017), 269-272.



Wang, L. et al. : Mater. Sci. Eng. A, 528-6 (2011), 2648-2656.

HFQで成形された各種パネル

YNU YOKOHAMA National University



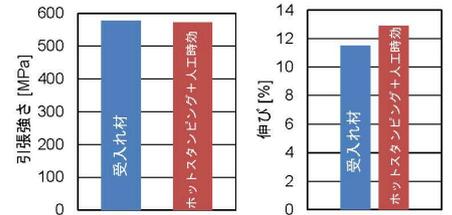
A7075-T6材のHFQされたBピラー

YNU YOKOHAMA National University

Harrison et al., Hot stamping of a B-pillar outer from high strength aluminum sheet. SAE Int. J. Mater. Manf. 7(3), 567-573, 2014



t = 2mm



潤滑剤:Fuch-forge ease 278 アルコールで1/4希釈

UKのImpression Technologies, HFQの状況

YNU YOKOHAMA National University

HFQ® Technology

RACEForm (Rapid Aluminium Cost Effective Forming) - a programme led by Impression Technologies Ltd (ITL). The £9.5 million project received £4.8 million of funding through the APC and included five consortium partners to scale the Hot Form Quench (HFQ) Technology for high volume.

The RACEForm programme has delivered a supply chain enabled for high volume (100K+) lightweight aluminium automotive structural components formed by the HFQ process and create a path to establish HFQ® Technology as a global standard. Upscaling the HFQ component design/manufacturing process meets automotive OEM's requirements for cost effective light weighting of their existing and future vehicle fleets, whilst delivering lower CO2 emissions and fuel savings. A series of LinkedIn articles will communicate the key outputs.

Impression Technologies Ltdが主導するRACEFormプログラムは、HFQテクノロジーを大量生産に拡大するためにAPC(Advanced Propulsion Centre)と5つのコンソーシアムを通じて480万(7.4億円)の資金を受け取りました。

RACEFormプログラムは、HFQプロセスによって形成された大量(100K+)の軽量アルミニウム自動車構造コンポーネントを可能にするサプライチェーンを提供し、HFQテクノロジーをグローバルスタンダードとして確立するための道を切り開きました。HFQコンポーネントの設計/製造プロセスを拡大することで、CO2排出量を削減し、燃料を節約しながら、既存および将来の車両を費用効果の高い軽量化するという自動車OEMの要件を満たします。

Volvo, BMWの電気自動車バッテリーエンクロージャーへの適用を検討

低成形性のリサイクルアルミ材の成形を可能に

国内のアルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

日立ハイテック web

高周波加熱を利用

【アルミホットスタンプ1回プレス】

【鋼板SPCE材】



加工性が非常に良い鋼板 (SPCE材) を上回る成形性を確認

アルミホットスタンプの生産イメージ

熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

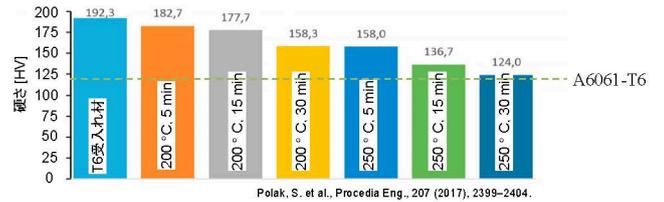
熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングの概要

- 溶体化処理ホットスタンピング
- 温間ホットスタンピング
- アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

温間ホットスタンピング(溶体化処理しない)

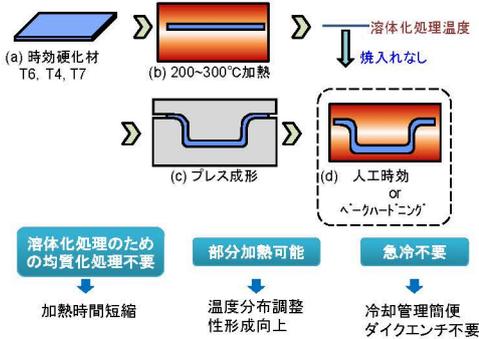
YNU YOKOHAMA National University

加熱温度、加熱時間を管理して、強度低下と成形性のバランスを取る。



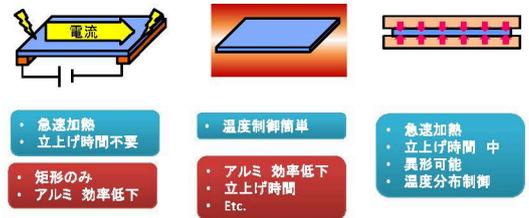
温間ホットスタンピングの有用性

YNU YOKOHAMA National University



温間ホットスタンピングは加熱方法の自由度が高い

YNU YOKOHAMA National University



- 急速加熱
- 立上げ時間不要
- 温度制御簡単
- 矩形のみ
- アルミ 効率低下
- 急冷不要
- 立上げ時間 中
- 異形可能
- 温度分布制御
- Etc.

短時間加熱を用いた温間のホットスタンピングの取組を紹介

YNU YOKOHAMA National University  
熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

- 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング概要の概要
  - 溶体化処理ホットスタンピング
  - 温間ホットスタンピング
  - アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

YNU YOKOHAMA National University  
アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦

焼付き

475°C無潤滑 475°C潤滑あり  
Maeno, T. et al, CIRP Ann., 66-1 (2017), 269-272

U曲げ A7075 Xiangji Li et al., Metals 11(2021) 1111.

無潤滑 窒化ホウ素 グラファイト フッ化モリブデン

検討されている主な潤滑剤

- グラファイト
- 窒化ホウ素
- 二硫化モリブデン
- Fuchs(ドライ型)

Fuch-forge ease 278 アルコールで1/4希釈

YNU YOKOHAMA National University  
温・熱間での摩擦挙動の検討

試験方法	工具/試験片	潤滑	加熱方法	温度	摩擦係数
ボールオンディスク	AISI H11/7475	ドライ	ディスク下のヒーター	300°C 400°C	0.6 - 1.1 0.65 - 1.3
ピンオンディスク	AISI H11/6082	ドライ	電気炉	400°C 500°C	0.5 - 0.65 0.35 - 0.55
引張曲げ	AISI P20/5083	ドライ	ローラー型ヒーター	450°C	1.2 - 1.6
板材引抜	AISI H11/6016	グラファイト	電気ヒータ	300°C 400°C	0.044 - 0.065 0.055 - 0.067

Liu Y. et al., Tribology International 151 (2020) 106504

条件が多岐にわたり、示される結果も広い幅がある  
検討している温度域、材質での検討が必要

YNU YOKOHAMA National University  
熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

- 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング概要の概要
  - 溶体化処理ホットスタンピング
  - 温間ホットスタンピング
  - アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

YNU YOKOHAMA National University  
短時間加熱方法の検討

接触加熱 オイルバス

温度制御簡単  
アルミ 低効率  
立上げ時間  
Etc.

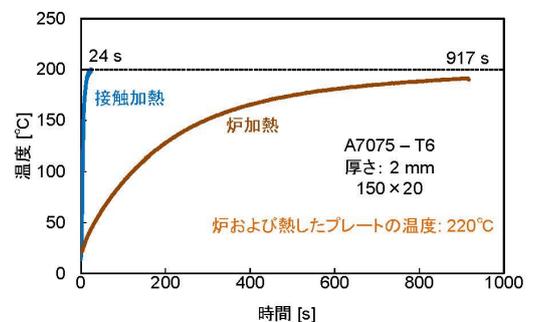
急速加熱  
立上げ不要  
矩形のみ  
アルミ低抵抗

短時間加熱  
立上げ時間 中  
異形可能  
温度分布制御  
熱伝導率高

短時間加熱  
立上げ時間 中  
異形可能  
熱伝導率高

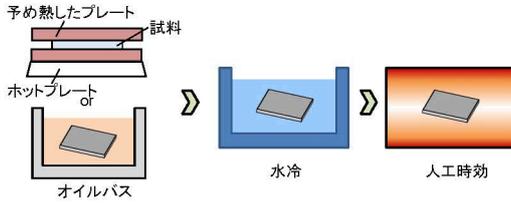
200°C以上は煙油が減る  
ハンドリング

YNU YOKOHAMA National University  
接触加熱を用いた加熱時間の短縮



成形なしにおける温度履歴が時効前後の硬さに与える影響

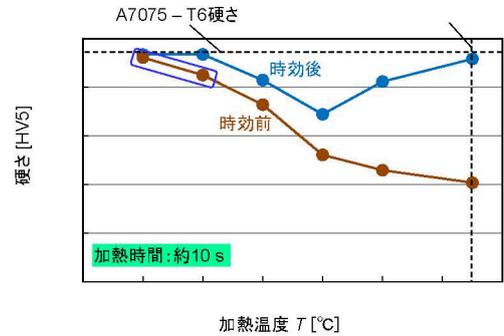
YNU YOKOHAMA National University



試料	加熱温度 $T$ [°C]	保持時間 $t$ [s]	時効処理
A7075 - T6 20×20×2	140 - 475	2 - 900	人工時効: 120 °C×24 h

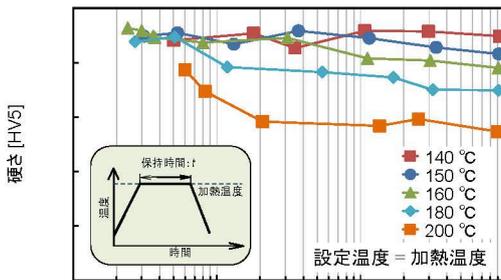
接触加熱において加熱温度が時効前後の硬さに与える影響

YNU YOKOHAMA National University



オイルバス加熱において  
加熱後の保持時間が硬さに与える影響

YNU YOKOHAMA National University



加熱温度到達後の保持時間  $t$  [s]

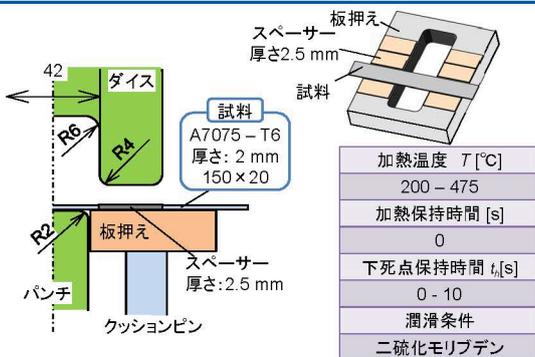
熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

- 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング概要の概要
  - 溶体化処理ホットスタンピング
  - 温間ホットスタンピング
  - アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

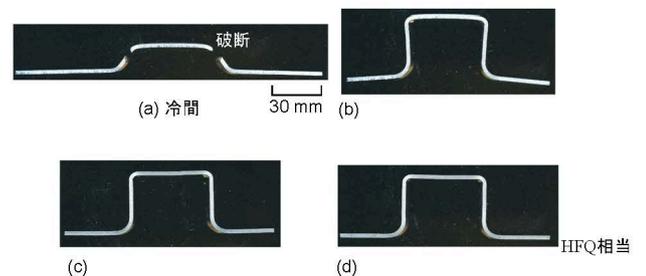
接触加熱を用いたハット曲げ成形

YNU YOKOHAMA National University



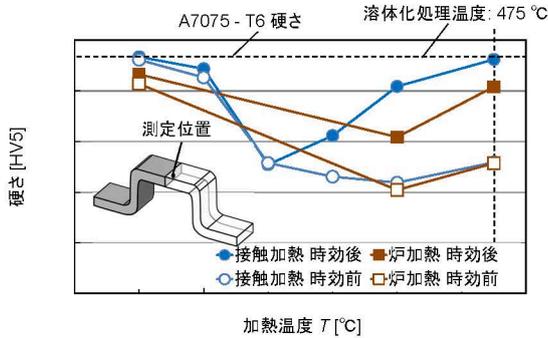
接触加熱を用いたハット曲げによる成形品

YNU YOKOHAMA National University



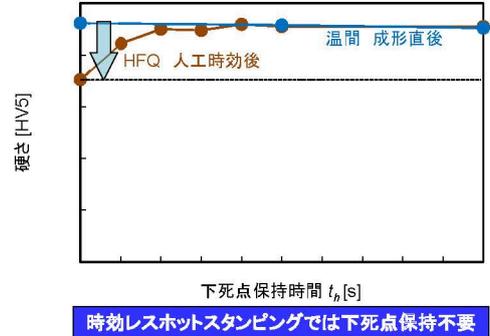
ハット曲げ成形において加熱温度が  
時効前後の硬さに与える影響

YNU YOKOHAMA National University



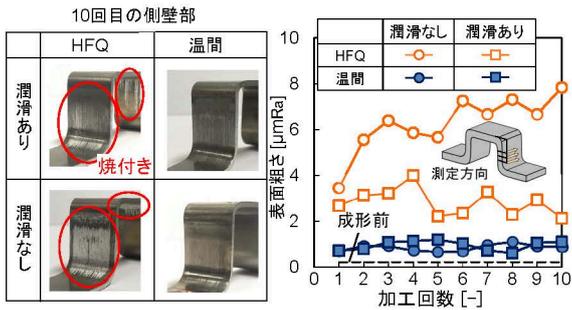
温間, HFQにおいて下死点保持時間が硬さに与える影響

YNU YOKOHAMA National University



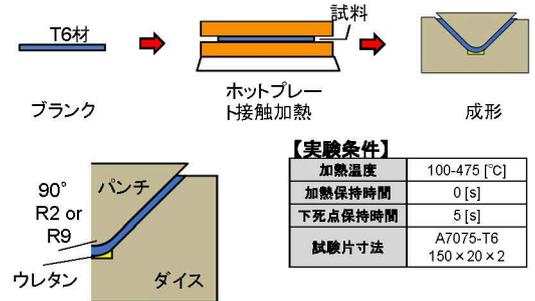
ハット曲げにおける加熱温度と潤滑条件が  
側壁部の表面性状に与える影響

YNU YOKOHAMA National University



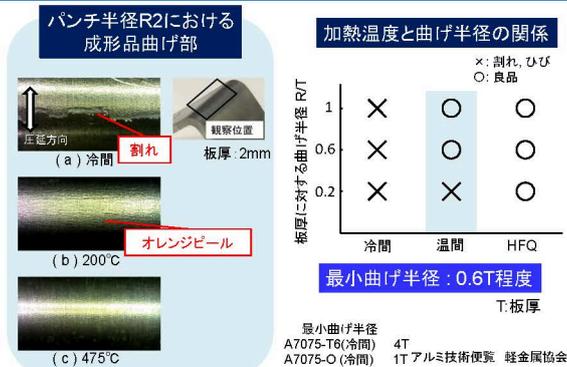
接触加熱を用いたV曲げホットスタンピング方法

YNU YOKOHAMA National University



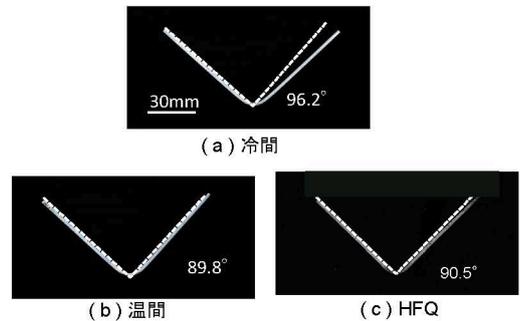
T6ホットスタンピングにおける最小曲げ半径の調査

YNU YOKOHAMA National University



接触加熱を用いたV曲げによる成形品  
(パンチ先端半径 9mm)

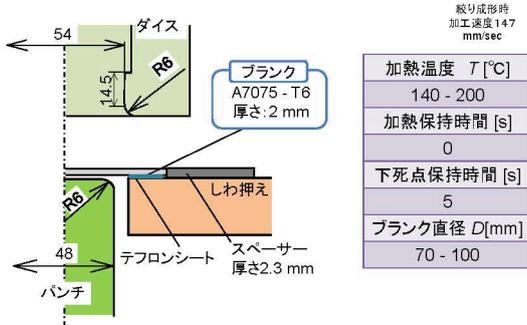
YNU YOKOHAMA National University



200°C以上の加熱でスプリングバック無し

### 接触加熱を用いた深絞り成形

YNU YOKOHAMA National University



加工速度	147 mm/sec
加熱温度 T [°C]	140 - 200
加熱保持時間 [s]	0
下死点保持時間 [s]	5
ブランク直径 D [mm]	70 - 100

### 接触加熱を用いた深絞り成形における加熱温度が成形性に与える影響

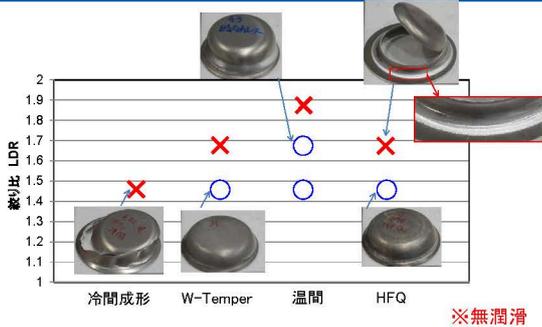
YNU YOKOHAMA National University

ブランク径 [mm] 絞り比 [-]	加熱温度 [°C]			
	冷間	温間1 °C	温間2 °C	温間3 °C
100 mm 2.08				
90 mm 1.88				
80 mm 1.67				3回中1回割れ
70 mm 1.46			10 mm	

※無潤滑

### 最近検討されている他の成形法との絞り限界の比較

YNU YOKOHAMA National University



最も厳しい無潤滑の条件において、時効レス成形が最も成形性が高い結果となり、焼き付きもほとんど見られなかった。潤滑を入れることで更に成形性は向上する。

### 絞り限界に及ぼす潤滑剤の効果

YNU YOKOHAMA National University



潤滑剤を塗布して成形評価を行った結果、冷間成形以外の成形性が向上した。時効レスにおいては、液体潤滑が使える可能性が出た。

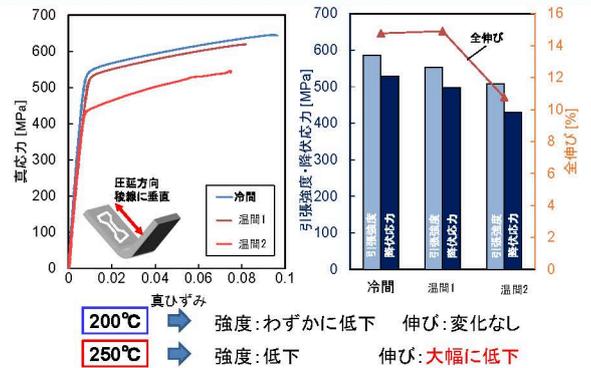
### 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング

YNU YOKOHAMA National University

- 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング概要の概要
  - 溶体化処理ホットスタンピング
  - 温間ホットスタンピング
  - アルミニウム合金のホットスタンピングにおける摩擦
- 短時間加熱を用いた後人工時効レスホットスタンピング
- プレス成形性の検討
- ホットスタンピング後の機械的特性

### T6材の短時間加熱ホットスタンピング後の引張試験結果

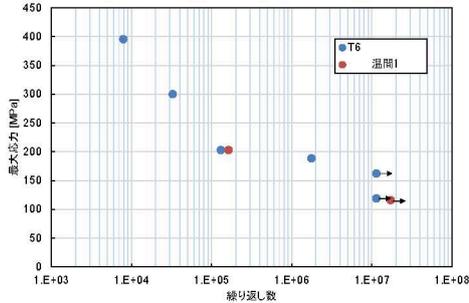
YNU YOKOHAMA National University



200°C → 強度:わずかに低下 伸び:変化なし  
250°C → 強度:低下 伸び:大幅に低下

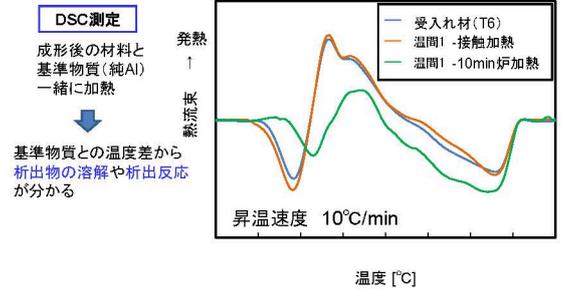
温間成形後の疲労強度特性

YNU YOKOHAMA National University



示差走査熱量測定(DSC測定)による  
200°Cの接触加熱が及ぼす材料組織への影響の調査

YNU YOKOHAMA National University

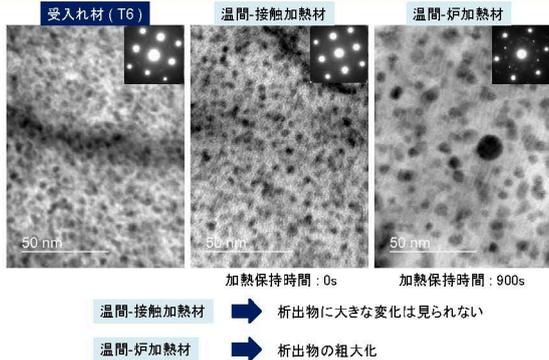


DSC測定  
成形後の材料と  
基準物質(純Al)  
一緒に加熱  
↓  
基準物質との温度差から  
析出物の溶解や析出反応  
が分かる

- ・温間接触加熱材は受け入れ材試料とほぼ同じ履歴をたどっている  
⇒析出状態に変化なし
- ・温間10分加熱⇒過時効状態の可能性

加熱後のTEM組織観察

YNU YOKOHAMA National University



まとめ

YNU YOKOHAMA National University

熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングには溶体化処理ホットスタンピングと温間のホットスタンピングに大きく分けられる。

溶体化処理ホットスタンピングは最大強度の調質を得られるが、熱処理管理は鋼板のホットスタンピングに比べ難しい

温間ホットスタンピングはわずかに強度低下が生じるものの、温度管理の柔軟性が高い。

アルミニウム合金の温・熱間ホットスタンピングにおいて、凝着抑制は重要であり、潤滑剤の選択が重要。また、加熱温度、時間、型表面性状で大きく変わるため、実施予定の加工条件に近い条件での検討が重要。

短時間加熱を用いた温間ホットスタンピングは、成形性、生産性、コストにおいて優位性が高い。A7075-T6材の温間加熱において1.9程度の限界絞り比が得られ、曲げにおける形状凍結性も十分である。