

金属間の熱伝達を利用したアルミニウム合金板の部分軟化熱処理

西脇 武志*・金武 直幸**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 54, No. 10 (2004), pp. 425-429

Partial softening heat treatment of aluminum alloy sheets using the heat transfer between metals

Takeshi NISHIWAKI* and Naoyuki KANETAKE**

Partial softening heat treatment of aluminum alloy sheets was investigated using heat transfer between the sheet and a couple of heated metal dies to prepare a peripherally softening blank for deep drawing. It was found, from the heat conduction analysis, that the aluminum blank could be heated to the temperature of the heated dies by contacting with them in less than 1 s and the temperature gradient more than 20 degrees/mm could be obtained near the contacting region. The temperature of the sheet contacted with the heated dies depends on heat transfer from the heated dies and the temperature recovery of their surfaces. Production of the peripherally softening blanks was examined for 5052-H24, 1100-H24 and 6061-T6 aluminum alloy sheets. In the blank of 6061 aluminum alloy sheets, the difference in hardness of the central hard part and the peripheral soft part was about 1.8 times. The softening region was changeable according to inner diameters of the heated dies.

(Received March 29, 2004)

Keywords: deep drawing, aluminum alloy sheet, partial softening, heat conduction

1. 緒 言

自動車の軽量化のために鉄鋼材料の代替としてアルミニウム合金の適用が進んでいる。これらの多くは鋳造部品や押出部品によって置換えが行われており、プレス成形品としての代替は少ない。アルミニウム合金板はプレス成形性、特に深絞り成形性が鋼板と比べて劣っており、加工法を改善して深絞り性を向上させる試みが行われている。

深絞り性を向上させる加工法の一つとして、フランジ部分の強度を相対的に低下させて深絞り性を向上させる周辺軟化深絞り成形法がある。この方法は周辺軟化されたアルミニウム合金板ブランクを用意する必要があるが、生産性の高い汎用のプレス加工機で加工できるという特徴がある。ブランクの周辺を低強度、中央部を高強度と作り分ける冶金学的方法としては、再結晶や時効析出を利用した手法等があり、これまでも周辺焼なまし法¹⁾、周辺過時効処理法²⁾、中央時効析出処理法^{2)~4)}などが検討されている。これらの方法は、いずれも深絞り性向上への効果は認められているものの、工業的な広い利用には至っていない。これは、周辺軟化ブランクを短時間に熱処理する方法が検討されていないためである。炭酸ガスレーザを必要な部位に照射し局部的に軟化する方法⁵⁾は生産性がよいものの、アルミニウム合金板の吸収率を高めるために黒染着色剤を塗布する必要がある。

筆者らは、簡便で生産性のよい周辺軟化熱処理方法の開発を目的とし、高温に加熱された金属型からの熱伝達によるアルミニウム合金板の部分軟化熱処理方法について検討した。

その際、この熱処理方法をプレス成形ラインに組込むことを想定して、部分軟化を付与する熱処理サイクルとして、数秒以内での熱処理プロセスを目標とした。

そこで本研究では、加熱型の設定温度にアルミニウム合金板の温度が達するのを待たずに、定常状態になる前の不均一な温度分布を制御して局部的に軟化させ硬さ分布を付与する可能性を検討した。そのために、そのような部分熱処理中に生じるアルミニウム合金板や加熱型の温度変化、およびアルミニウム合金板の軟化条件を数値解析によって予測し、その結果を基に実験による検証を行った。

2. 熱伝導解析による温度分布の予測

2.1 解析モデルおよび方法

円形ブランクの周辺加熱法を想定し、周辺部のみが高温となり、中心部が低温となるような温度分布の付与条件を、有限要素法を用いた非定常の熱伝導解析によって検討した。

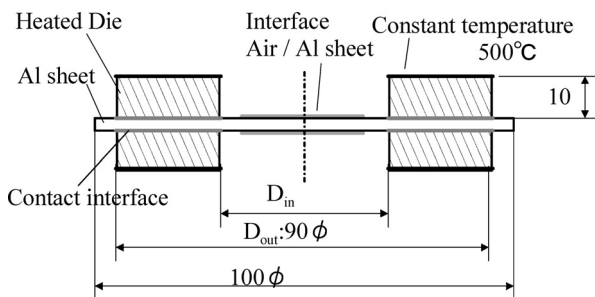
Fig. 1 に解析に用いたモデルを示す。円板状のアルミニウム合金板ブランクを上下一組の金属製加熱型間に挟み込み、加熱するプロセスをモデル化している。ブランクはアルミニウム、加熱型は鉄または銅製を想定し、解析に用いた寸法と物性値を **Table 1** に示す。加熱型の外径は一定とし、内径 (D_{in}) を 33ϕ のパンチを用いた円筒深絞り成形を続く加工として想定して $40\sim 60\phi$ とした。ブランクについては、加熱型との接触部からの熱伝達による入熱を考慮し、接触界面の熱伝達係数 (HTC) を変化させ、その影響を検討した。また、非接触部については空気への放熱を考慮して、空気との界面

* 名古屋市工業研究所 (〒456-0058 愛知県名古屋市熱田区六番 3-4-41)。Nagoya Municipal Industrial Research Institute (3-4-41 Rokuban, Atsuta-ku, Nagoya-shi, Aichi 456-0058). E-mail: nishiwaki@nmiri.city.nagoya.jp

** 名古屋大学 (名古屋市)。Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi).

Table 1 Dimensions and physical parameters used in heat conduction analysis

	Thickness (mm)	Diameter (ϕ)	Specific heat (J/kg K)	Thermal conductivity (W/m K)
Al sheet	t_{Al} : 1, 2, 3	100	963	170
Heated Die (Fe)	10	D_{in} : 40-60 D_{out} : 90	494	50
Heated Die (Cu)	10	D_{in} : 40-60 D_{out} : 90	385	390

**Fig. 1** Analysis model of heat conduction between a circular blank and a couple of heated dies.

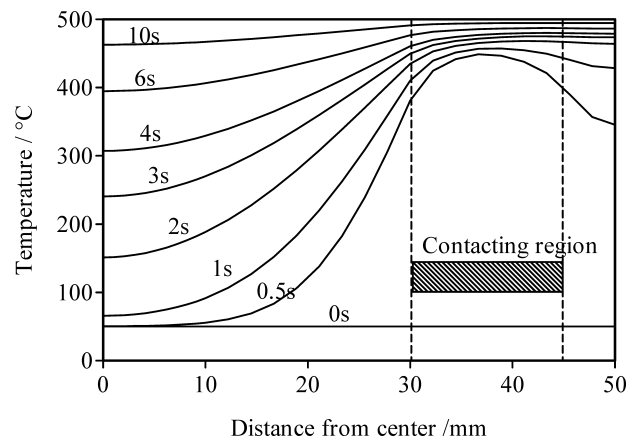
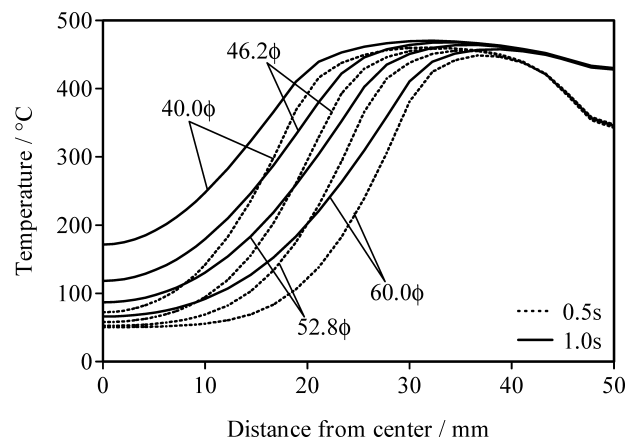
の熱伝達係数を $6 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \text{ K}$ とした。ただし、解析結果への放熱の影響は小さかった。ヒータ等の熱源からの加熱型への入熱を想定し、ブランクに接触していない加熱型の反対側の面に 500°C の熱境界条件を与えることで入熱を考慮した。また、初期温度はブランク 50°C 、加熱型 500°C とし、空気の温度は 25°C 一定とした。これらの境界条件のもと、汎用コードである LS-DYNA を用いて 3 次元熱伝導方程式を陰解法で計算した。有限要素モデルとしては加熱型、円形ブランクともソリッド要素を用い、それぞれ板厚方向に 5 および 3 分割、半径方向に 10 および 28 分割、円周方向に 5 度単位で分割した 1/4 モデルを作成した。

2.2 数値解析結果および考察

2.2.1 加圧保持中の温度分布

Fig. 2 にアルミニウム合金板ブランクの温度分布の時間変化を示す。加熱型との接触部は接触後 0.5s で 450°C に達し、その後緩やかに 500°C に向けて温度が上昇する。また非接触部分でも接触部からの熱伝達により温度が上昇する。1s 後にはブランク中心部の温度が上昇し始め、10s 後にはブランク全体がほぼ均一な温度となっている。しかし、半径 20mm から 30mm の範囲に、0.5s 時に 26°C/mm 、1s 時に 20°C/mm の温度勾配を付与できており、1s 以内の加圧保持で、幅 10mm の間に 200°C の温度差を生じさせることができる。一方、加熱型外部の半径 45mm 以上の非接触部では、ブランク外周部から放熱が少ないため、2s 後に接触部とほぼ同じ温度になった。

Fig. 3 に加熱型の内径寸法を変えたときのブランクの温度分布を示す。加圧保持時間 0.5s での温度勾配は加熱型内径によらず、ほぼ同じであるが、1s ではブランク中心部の温度

**Fig. 2** Calculated temperature distribution in the circular aluminum blank after various contacting times (Fe Die, $D_{in}=60\phi$, $t_{Al}=1\text{ mm}$, $\text{HTC}=0.040\text{ W/mm}^2\text{ K}$).**Fig. 3** Influence of inner diameter of heated die on calculated temperature distribution of circular blank (Fe Die, $t_{Al}=1\text{ mm}$, $\text{HTC}=0.040\text{ W/mm}^2\text{ K}$).

が上昇することにより温度分布は異なってくる。加熱型内径が小さくなり非接触部の面積が狭くなると温度が上昇しやすく、非接触部の温度上昇を避けるためには熱処理時間を短くする必要がある。またブランク中心部の冷却を行うなどして、定常状態の温度勾配を付与する必要がある。

なお、ブランクの板厚が 1~3mm の範囲では、板厚方向には温度勾配はほとんど生じなかった。

2.2.2 接触部温度への加熱型材料の影響

Fig. 4 に鉄製および銅製加熱型を用いたときの加熱型の表面温度とブランクの接触部の温度変化を示す。加熱型表面温度は、接触と同時にブランクへの抜熱で低下するが、0.1s 以内に回復挙動を示しており、その回復は銅製の方が鉄製よりも速い。連続して複数のブランクを熱処理する場合、このような表面温度の低下と回復は、生産性を律速する要因となりうるため、型材質としては熱伝導率の大きな金属の方が優れている。一方、ブランクの温度は加熱型接触後、急速に上昇して 0.1s 程度で加熱型の温度に漸近し、その後加熱型と似た温度変化となる。したがって、ブランクの温度は銅製加熱型の方がより短時間で高温になる。

Fig. 5 に板厚の異なるアルミニウム合金板ブランクが接触したときの加熱型表面の温度低下を示す。板厚の増加に従って加熱型表面の温度は低下することがわかる。ただし、低下

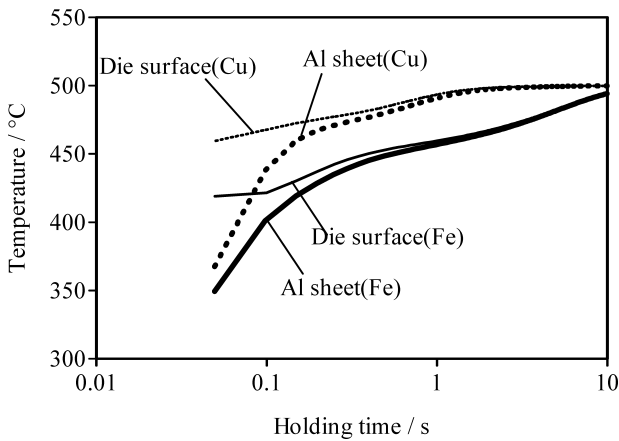


Fig. 4 Change in calculated temperatures in the contact part of aluminum alloy sheet and on the surface of heated die ($D_{in}=60\phi$, $t_{Al}=1$ mm, $HTC=0.040$ W/mm² K).

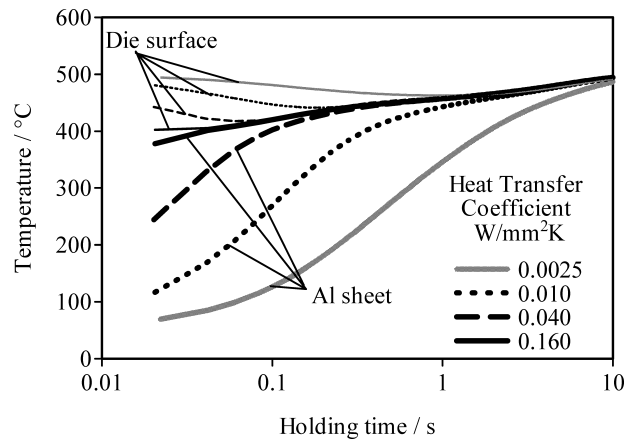


Fig. 6 Influence of heat transfer coefficient on temperature change of the aluminum alloy sheet and heated die surface (Fe Die, $D_{in}=60\phi$, $t_{Al}=1$ mm).

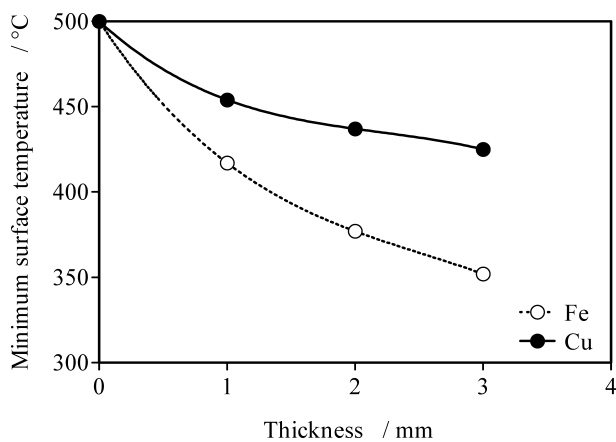


Fig. 5 Change in surface temperature of the heated die by contacting with various thickness of aluminum sheets ($D_{in}=60\phi$, $HTC=0.040$ W/mm² K).

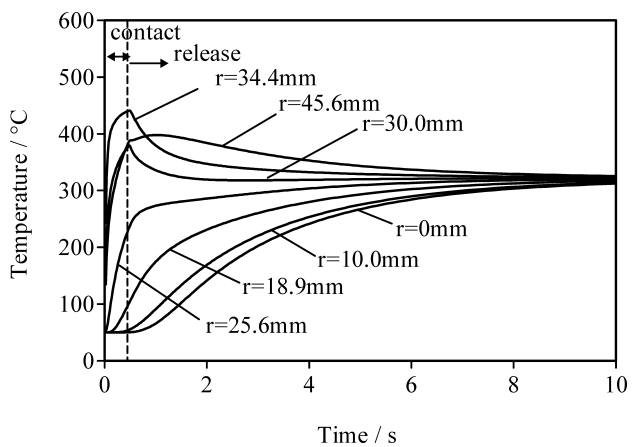


Fig. 7 Temperature change of some points in the circular blank after removing heated dies (Fe Die, $D_{in}=60\phi$, $t_{Al}=1$ mm, $HTC=0.040$ W/mm² K).

量は板厚に比例せず、板厚当たりの低下量は少なくなる。これは加熱型表面の温度低下に伴ってblankとの温度差が減少するため、抜熱速度が減少し、加熱型内部からの熱伝導により加熱型表面温度が回復するからである。熱伝導率の大きい銅製加熱型の場合、比例関係からのずれは顕著であり、鉄製加熱型と比べてさらに緩やかになっている。

2.2.3 接触部温度への熱伝達係数の影響

Fig. 6 にアルミニウム合金板blankと加熱型間の熱伝達係数が異なる場合の加熱型表面とblankの温度変化を示す。熱伝達係数が 0.16 W/mm² K と大きい場合には、blankの温度は瞬時に上昇し、 0.1 s 後で 420°C を超える。その後型温度の回復にあわせて緩やかに温度が上昇していく。一方 0.0025 W/mm² K と小さい場合にはblankの温度は、加熱型表面温度とかい離したまま緩やかに温度が上昇していく。熱伝達係数が大きい場合は加熱型の表面温度回復がblankの温度上昇を律速し、小さいときには加熱型-blankの熱伝達がblankの温度上昇を律速する。中間では、両者の律速過程が混在する。

接触界面の熱伝達係数は、接触面積、粗度、材質などによって値が左右される。アルミニウムの熱間鍛造において提唱されている評価式⁶⁾を用いて熱伝達係数を計算すると、接触間隔 0.125 mm で、接触割合 0.005 , $R_{max}=20$ μm

のとき、熱伝達係数は 0.01 W/mm² K 程度、接触割合 0.07 , $R_{max}=2$ μm のとき、熱伝達係数は 0.16 W/mm² K 程度の値となる。粗度の低い工具およびblankを用いたり、接触時に加圧して接触面積を増やしたりすれば、高い熱伝達係数を得ることができる。

2.2.4 blankの熱履歴

blankの材質変化は加熱から冷却までの一連の熱履歴によって左右される。加熱保持時間が短く、かつアルミニウム合金の熱伝導は速いので、加熱型除去後の温度変化の影響も無視できない。**Fig. 7** に熱処理開始 0.5 s で加熱型を取り除いた場合のblankの温度変化を示す。加熱型除去の後、接触部 ($R=30\sim 45$ mm) の温度は直ちに低下するのに対し、非接触部は除去後も温度が上昇し、 5 s 以上ではblank内の温度差が 100°C 以下となる。すなわち接触部と非接触部の温度差を維持するためには、できるだけ早く冷却を行うことが望ましい。

3. 周辺軟化blankの作製実験

3.1 実験方法

供試材として、5052-H24 ($t=1.5$ mm), 1100-H24 ($t=1$ mm) および 6061-T6 ($t=1$ mm) のアルミニウム合金板blankを用いた。加熱型は高温酸化の少ないSKD11を用い、

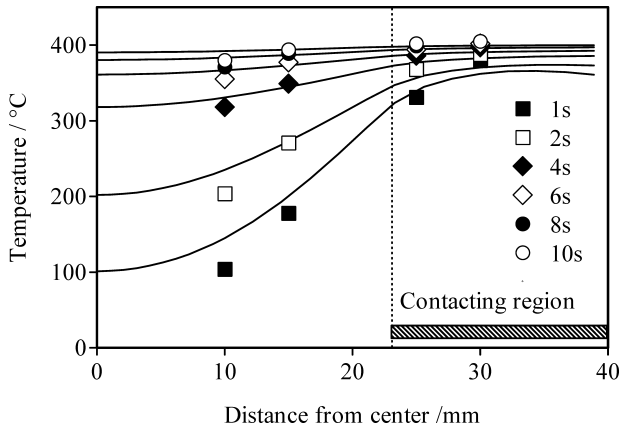


Fig. 8 Measured temperature (plots) in the circular blank after various contacting times in comparison with calculated temperature distribution (solid lines). (Fe Die, $D_{in}=46.2\phi$, $t_{AI}=1.5$ mm, $HTC=0.040$ W/mm² K).

形状はフランジ部のみ加熱されるようリング状で、寸法は内径 39.2, 46.2, 52.8, 59.4φ, 外径 90.0φ で上型, 下型とも同じである。

高温に加熱した上下 1 組の加熱金型にブランクを挟み込み、一定時間加圧保持した後、除圧し直ちに水冷した。加圧力は 30 kN, 除圧後水冷までの時間は平均 1.6 s である。また、ブランクはアセトン脱脂を施し、離型材などは無塗布である。

まず、板厚 1.5 mm, 78φ の 5052 アルミニウム合金板ブランクに溝を掘り、0.5φ のシーす熱電対を挿入して加圧保持中の温度を測定した。このとき加熱型の温度は 400°C とした。その後、ブランクの周辺軟化熱処理を加熱型温度 500°C, 保持時間 0.6 s の条件で行った。また、幅 7 mm の短冊状試験片を用いて保持時間 0.6 s での軟化条件を検討し、300~540°C の範囲で熱処理を行った。ブランクおよび短冊状試験片についてはマイクロビッカース硬さ計にて硬さを測定した。

3.2 実験結果

3.2.1 ブランクの温度変化

ブランクは加熱型上に置いた時点で加熱され、接触部は 55°C/s の昇温速度を示した。その後、加熱型の上型を接触させ加圧を行うと、急激に温度は上昇し、0.6 s までに 380°C/s の昇温速度を示した。

Fig. 8 にブランクに挿入した熱電対で測定したブランク各部の温度変化を示す。中心からの距離 10 mm~25 mm において、加圧開始 1 s 後には 15°C/mm の温度勾配があるが、徐々に緩やかになり、8 s 程度ではほぼ均一な温度分布となっている。図中の実線は、熱伝達係数 0.040 W/mm² K, ブランク径 100φ の熱伝導解析結果であるが、その温度分布は実測結果とほぼ一致している。

3.2.2 ブランクの硬さ分布

作成した周辺軟化ブランクの硬さ分布を **Fig. 9** に示す。いずれの合金においても加熱型との接触部の硬さは低下している。5052, 1100 では非接触部に対して接触部の硬さは 2 割程度の低下であるが、6061 においては 4 割強低下して 1.8 倍程度の硬さ差を示した。また、6061 では接触部に近い非接触部には、熱伝達により熱影響をうけて硬さが連続的に低下した遷移領域が存在し、中心から 13~23 mm の範囲で HV50 程度の硬さ変化が生じている。**Fig. 10** に短冊状試験片を用いて

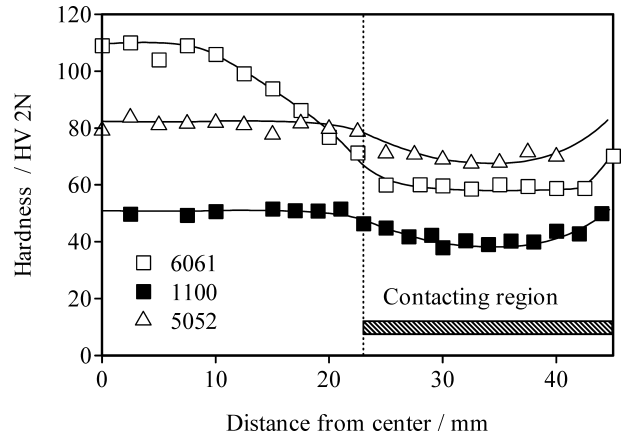


Fig. 9 Hardness distribution of the aluminum alloy blanks after partial heat treatment. ($D_{in}=46.2\phi$, Die Temp.=500°C, Holding time=0.6 s).

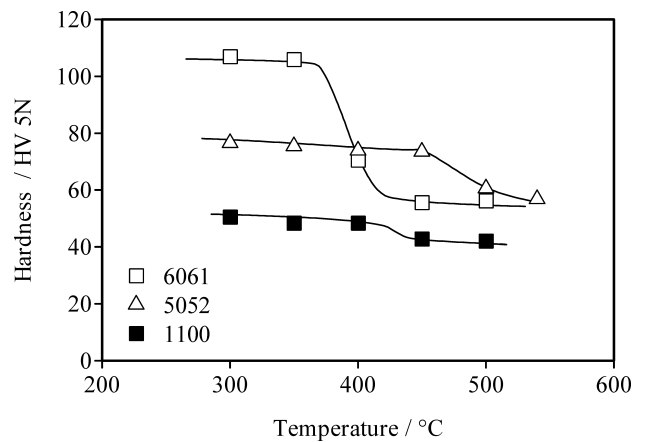


Fig. 10 Influence of heated die temperature on softening of the aluminum alloy sheet.

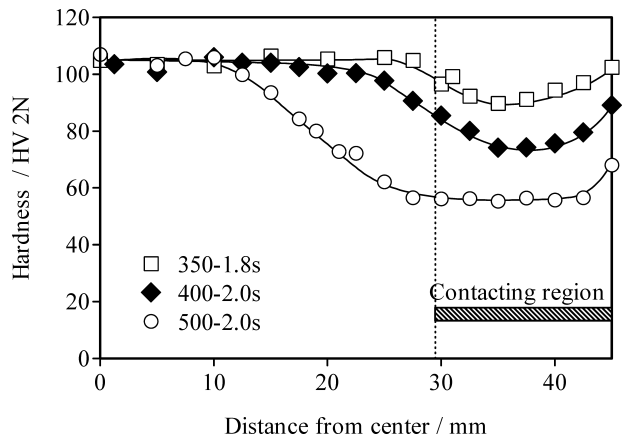


Fig. 11 Hardness distribution of the 6061 aluminum alloy blanks treated with various temperatures. ($D_{in}=60.0\phi$, Holding time=2 s).

異なる温度で熱処理を行った際の軟化曲線を示す。6061 の硬さ低下は 5052, 1100 に比べて大きく、軟化量も 450°C 以上で飽和している。6061 は T6 材であり、5052, 1100 は H24 材であるためにこのような軟化特性の違いを示し、6061 のブランクだけが接触部で大きく軟化している。また **Fig. 3** に示した温度分布 (0.5 s) の計算結果から非接触部の熱影響部の

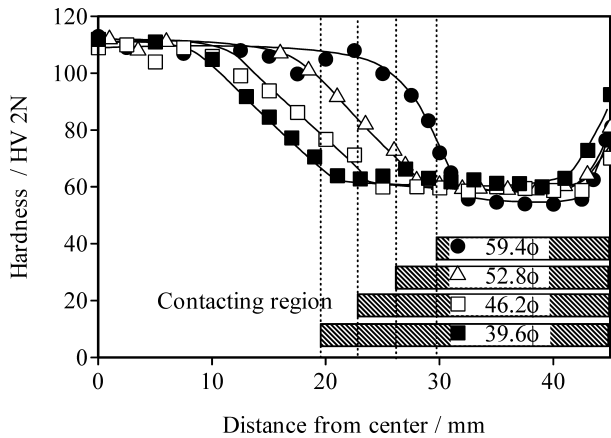


Fig. 12 Hardness distribution of the 6061 aluminum alloy blanks treated with heated dies of different inner diameters. (Die Temp.=500°C, Holding time=0.6 s).

温度上昇は 400°C 以下であるが、Fig. 10 で 6061 のみが 400°C 以下でも硬さ低下している。したがって、6061 の blanks のみが熱影響部で軟化し硬さの遷移領域をもつ。

次に Fig. 11 に 6061 の blanks を 350, 400, 500°C で 2 秒間熱処理したときの硬さ分布を示す。Fig. 10 より 350~400°C では温度に対して硬さの変化が敏感であるため、350, 400°C の熱処理では接触部中の温度分布に対応して硬さが微妙に変化している。一方、500°C では接触部の硬さは一様だが非接触部で硬さが増加した。すなわち硬さ分布曲線の形は、温度に対する硬さの軟化特性が反映されて、熱処理温度によって異なる形となる。最後に、内径の異なる加熱型で 6061 を周辺軟化熱処理したときの硬さ分布を Fig. 12 に示す。加熱型の接触領域に応じた周辺部が軟化しており、異なる硬さ分布

の周辺軟化 blanks を作り分けることができる。

4. 結 言

金属間の熱伝達を利用したアルミニウム合金板の周辺軟化 blanks の作成方法を検討した。熱伝導解析による結果から、1 s 以内の熱処理で blanks を高温にでき、かつ 20°C/mm 以上の温度勾配が付与できて局所的な加熱が可能であることがわかった。加熱部の到達温度は、加熱型からの熱伝達あるいは加熱型表面の温度回復に律速され、前者は熱伝達係数に依存し、後者は加熱型の熱伝導率やアルミニウム合金板の板厚に依存する。また、このように短時間の熱処理では加熱型除去後の熱履歴も無視できないことがわかった。

以上の予測結果に基づき、実際に周辺軟化 blanks の作製を試みた。その結果、6061 合金においては中心部と周辺部の硬さ差が 1.8 倍程度の周辺軟化 blanks を作製できること、加熱型の寸法に応じて軟化領域を変えられることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 戸沢康寿：塑性と加工，**1**-1 (1960)，23.
- 2) 藤岡敏行，菅又 信，金子純一：塑性と加工，**27** (1986)，1363.
- 3) P. S. Bate and H. Schofield, D. J. Barrett: Metall. Mater. Trans. A, **29A** (1998), 1405.
- 4) 森 敏彦，大野 寛，河合 望：塑性加工連合講演会論文集，**38** (1987)，385
- 5) 中村正美，高橋宏由，中村和彦：塑性加工連合講演会論文集，**52** (2001)，385
- 6) 濟木弘行，詹 志宏，丸茂康男，安藤弘行：日本機械学会論文集 C, **61** (1995)，318.