



## 入門講座

素材を形に～素材の加工方法－5

# せん断・打抜き加工

Shearing and Blanking

廣田健治

Kenji Hirota

福岡工業大学

工学部 知能機械工学科

教授

## 1 はじめに

圧延、押出し、引抜き等の一次加工を経た金属素材は、出荷に際して一定の長さに切断される。また、素材から部品を作る際にも、部品の輪郭形状に沿った切断が必要となる。切断技術には切削加工、レーザー加工、放電加工など様々な種類があるが、その中でもせん断加工は切断が1回の加圧動作で瞬時に達成できることが特徴であり、金属製品の大量生産を支える主要な加工技術として知られている。

せん断加工は僅かな隙間（クリアランス）を隔てて対向する一対の工具間で被加工材を加圧して行われる。その変形過程と切断面を図1に模式的に示す。加工初期には (a) のように工具が材料表面付近に押し込まれ、刃先の側面側にだれ込

みが、正面側につぶれがそれぞれ形成される。また、クリアランスの存在により偶力が発生し、被加工材は図示の向きに回転しようとする。加圧が進むと (b) のように変形が板厚方向に貫通し、クリアランス部分の材料がせん断変形を受ける。この段階で被加工材は工具側面になじむように変形し、平滑な切断面が形成されていく。工具の切込みが進むと (c) のように上下の工具角部付近からき裂が発生し、両き裂が会合すると (d) のように被加工材がAとBに分離される。切断面は (a) で生じた「だれ」、「つぶれ」、(b) で生じた平滑な「せん断面」、(c) で生じた「破断面」で構成される。Bの切断面も同様の構成となる。また、(c) においてき裂は厳密には工具角部からやや側面寄りの位置から生じ、切断面にはひれ状の突出部分「かえり」（バリ）が残留する。切断面は直角で平坦な形状が理想であり、(d) の平滑面以外の部位は形状不良となる。また、(a) の偶力は切断面の傾きや被加工材の反り、ねじれの原因となり平坦度を悪化させる。

このような寸法精度、形状精度に関する不良は生産性とのトレードオフとしてある程度まで容認されており、その不良の程度や許容範囲は、素材形状や用途によって異なる。本稿では板材のせん断加工を中心に、上記の切断面に関する不良現象や対策について解説する。

## 2 板材のせん断加工

圧延加工で得られる長尺材を一定の長さにせん断する際には、シヤーと呼ばれる専用機が用いられる。比較的、長い寸法をせん断するため加工荷重を下げる目的でパンチには図2 (a) のように傾斜角（シヤー角）が与えられている。なお、図は説明のために誇張して描いており、実際のシヤー角はわずかである。シヤー角を与えない場合、せん断荷重の最大値  $P_{max}$  は次式で計算できる<sup>1)</sup>。

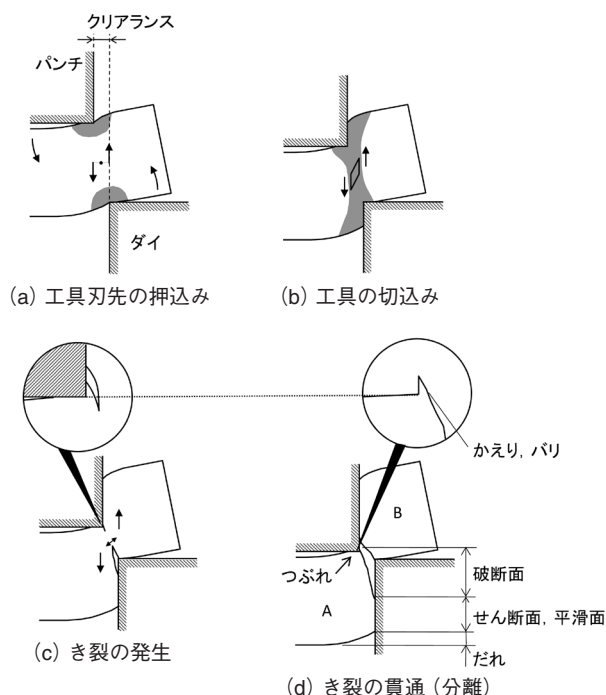


図1 せん断加工での変形過程

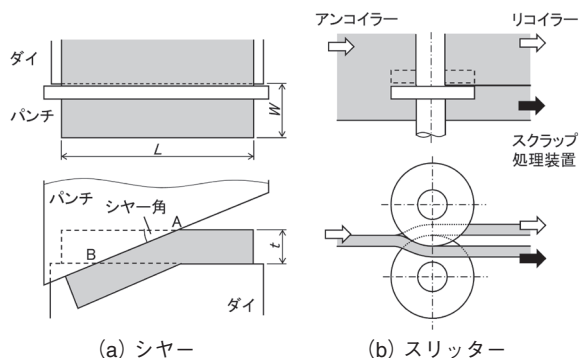


図2 直線輪郭のせん断加工

$$P_{\max} = t \times L \times ks$$

ここで、 $L$ は切断長さ、 $t$ は板厚、 $ks$ はせん断抵抗である。せん断抵抗は最大せん断荷重を輪郭断面積で除して得られる見かけのせん断応力であり、引張強さの0.8倍で概算できる。シヤー角を与えると、せん断変形は刃のAB部分で押されている部分にのみ生じ、総断面積 $L \times t$ に比べて小さくなることで荷重が低減される。ただし、シヤー角を大きくすると反りやねじれが生じやすくなり、特に切断幅 $W$ が小さくなると顕著に表れる。

コイル材を一定の幅に切断する際には、図2 (b) に示すスリッターと呼ばれる専用機が用いられる。回転刃の間で連続的にせん断が行われ、シヤー角と同様の効果で長尺材に対してもせん断荷重を小さく抑えられる。

所定の長さで幅に切り分けられた板材は、プレス機械と金型を用いて部品形状に加工される。金型を用いたせん断加工ではパンチを雄型、ダイを雌型として行われる。ここで、図1 (d) においてパンチの下に残るAが製品となる場合は「打抜き加工」、ダイの上に残るBが製品となる場合は「孔抜き加工」もしくは「孔あけ加工」と呼ばれている。被加工材の反りを防ぐために、必要に応じてA部に対しては逆押さえ、B部に対しては板押さえが図6のようにパンチおよびダイに対向する側に追加される。板材から作られる製品は、せん断、曲げ、成形など複数のプレス加工を経ることが多く、金型を並列に配置して搬送加工される。その過程では半製品が板材につながった状態でダイの上に残るようにせん断が行われ、最後の工程で製品が板材から切り離される。このような金型を順送型という。これに対し、1つの金型に複数のパンチおよびダイを配置し、1回の加圧動作で複数箇所のせん断を同時に行って部品の輪郭形状を得る金型を総抜き型と呼ぶ。

### 3 板材の精密せん断加工

打抜きや孔抜きによる切断面は部品の輪郭断面となり、図1 (d) に示した各種不良が品質として問題となる場合には対

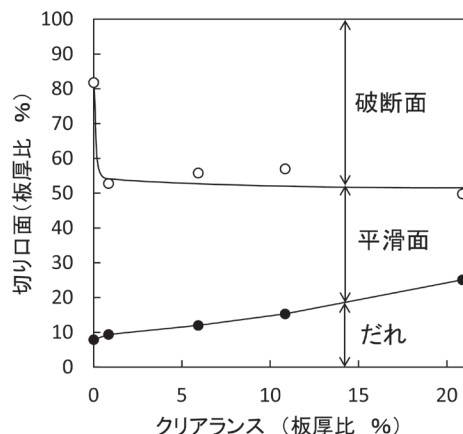


図3 クリアランスによる分離面構成の変化  
〔純アルミニウム焼きなまし材、板厚10mm、平行複刃〕  
による直線せん断での輪郭中央部での測定値

策が必要となる。具体的には次の2つの方策が挙げられる。

#### 3.1 せん断条件による改善

せん断条件の中で最も重要な因子はクリアランスであり、クリアランスを小さくするほどだれ、かえりは減少し、せん断面は増加し、延性の大きい材料では理想的な切断面に近づけることができる。具体例を図3に示す<sup>2)</sup>。ただし、クリアランスが小さくなると図4 (a) のように工具角部から生じたき裂が内部で停留し、再び平滑面形成が行われることがある。この現象は二次せん断と呼ばれる。一見すると破断面が少なく良好な切断面に見えるが、二次せん断面の裏側には停留き裂があり、この部位（タンゲ）が脱落する恐れがある。このため、破断面が問題とならない部品では図4 (b) のようにき裂が円滑に会合する条件を適正条件として推奨している。適正クリアランスは多くの材料で板厚の5~10%である<sup>1)</sup>。図3は室温、低速で直線輪郭のせん断を行った結果であるが、温度、加工速度、輪郭形状によっても分離面構成は変化する。例えばギヤのような形状では歯先の凸輪郭部でだれが顕著となり、有効板厚の減少が問題となる。また、高速でせん断を行うと、破断面は増加するが切断面の直角度が向上することが示されている<sup>3)</sup>。被加工材を加熱してせん断を行うと軟化によりせん断荷重が低減し、だれやせん断面が増える傾向にある<sup>4)</sup>。

製品の平坦度については、板押さえや逆押さえにより拘束した状態でせん断を行えば改善できる。ただし、板厚に対して細い幅をせん断する際には、断面全体にゆがみが生じるため側面の拘束も必要となる。しかし、寸法が小さくなると側面に正確に工具を当てるのが難しくなり、別途工法の工夫が必要となる<sup>5)</sup>。

被加工材の機械的性質と分離面の関係について、だれは一樣伸びが大きい材料ほど大きくなり、破断面は局部伸びや断面絞りが大きいほど小さくなる<sup>1)</sup>。また、金属箔のせん断で

は結晶粒径が板厚に近くなるほどせん断荷重のばらつきが増えることが示されている<sup>6)</sup>。一方、鋳鉄やマグネシウム合金のような脆い材料では、加工の早期にき裂が生じ、且つ、切断面の内部へ進展して凹凸の激しい破断面が生じる。

### 3.2 工法の工夫による改善（精密せん断法）

せん断条件の調整だけで不良が改善できない場合には、工法を見直す必要がある。ただし、それでもすべての不良を抑制することは難しく、抑制対象を絞った対策が取られている。これらを総称して精密せん断法と呼ぶ。以下に代表的なものを述べる。

#### 3.2.1 仕上げ抜き

クリアランスを極力小さく設定し、工具の角部に丸みを与えることで工具角部からのき裂発生を遅延させて破断面を抑制する方法である。丸みは製品として利用する切断面に接する工具（図1でAを製品とするならダイ）にだけに与えればよい。この方法は通常のせん断設備で実施できるメリットはあるが、比較的延性の大きい金属でないと効果が得られない。また、丸

みを付けることでだれや反りが生じやすくなるため、丸みの大きさは破断が抑制できる範囲で最小限に選ぶべきである。

#### 3.2.2 シェービング加工

板材の縁を薄く除去するようにせん断すると、図5 (a) のAB面でせん断変形が生じる。点線は加工前の形状であるが、パンチで加圧された材料が外側に排除されながら切込みが進む。切込みが進むと変形面がAC面に移り通常のせん断となる。AB面での変形は切削における切り屑生成と同等であり、この変形を長く持続させることが破断面抑制のための要件となる。材質にもよるが、クリアランスを極力小さく設定しても、取り代 $W$ は板厚の10%以下まで小さくしなければならない。また、取り代を輪郭に沿って一様に設定するために位置合わせにも注意を払う必要がある。この問題を回避するために、図5 (b) のようにパンチに段をつけて、DとFの刃先で通常のせん断を行い、続いてEとFの刃先でシェービングを行う方法があり削り抜き<sup>7)</sup>と呼ばれている。ただし、シェービングされた屑が段部に残るため、連続で加工する場合にはその除去が必要となる。

#### 3.2.3 ファインブランキング

静水圧下で引張試験を行うと局部伸びが増えることが知られており、せん断加工においても破断き裂の遅延に効果がある。この効果を3.2.1の仕上げ抜きに加味したものがファインブランキングである。具体的には図6のように板押さえと逆押さえで材料を拘束し、且つ、スクラップとなる側の工具

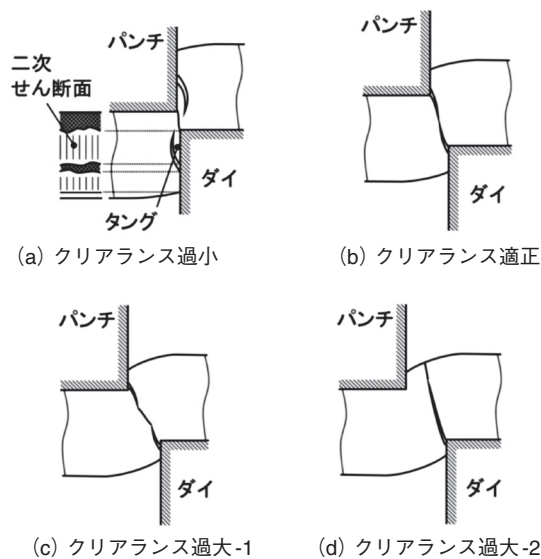


図4 クリアランスによるき裂進展の違い

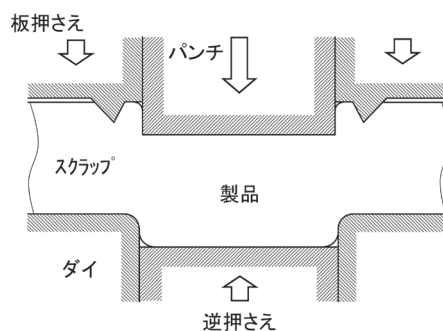


図6 ファインブランキング

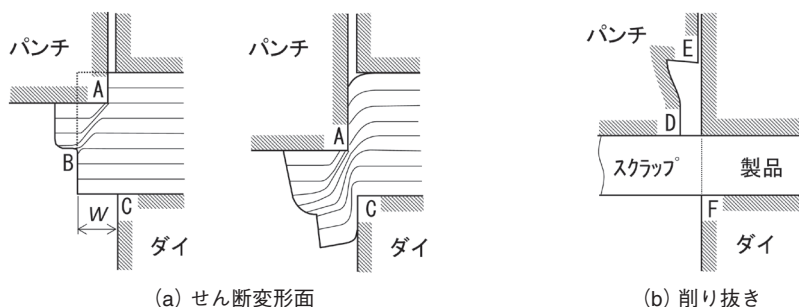


図5 シェービング加工（孔抜きの場合）

に突起を設けて押し込むことでせん断変形域に静水圧を与えた状態でせん断を行う。板押さえと逆押さえに大きな拘束力を与える必要があり、複動式の専用油圧プレスが用いられる。精密な金型と専用のプレス設備が必要となるが、3.2.1や3.2.2に比べ適用条件が広く直角度がよく破断面のない切断面が得られる<sup>8)</sup>。

### 3.2.4 かえりを抑制するせん断法

かえりは積層して使用する際に板厚方向の寸法誤差となるほか、鋭利な形状のため人が触れて怪我をしたり、相手部品に傷をつけたりする恐れがある。かえりは図1 (d) のようにき裂の起点部分に生じるため脆く、プレス成形時の金型や組立て後の製品の中で脱落してトラブルにつながることもある。また、3.2.1～3.2.3の工法でき裂を抑制できた場合にも切削のバリのようなかえりが生じる。この種のかえりは「変形バリ」、「延性バリ」と呼ばれ、脱落の恐れは少ない反面、強固で除去しにくい。かえりに対する要求は部品によって異なり、①許容レベル以下に抑えればよい場合と、②完全な抑制が求められる場合がある。

①に関して、工具角部が丸くなれば図1 (c) のき裂の起点が側面寄りの位置へ移動しかえり高さが増加する。すなわち、かえりは工具角部の形状を反映するため、せん断工具の寿命判定の簡易的な指標としても用いられる。また、クリアランスを大きく取ると、図4 (d) のように片側からのき裂が板表面に抜ける場合があり、き裂が生じた工具側 (図4 (d) ではダイ側) のかえりは小さくなる。この現象をうまく用いれば、安定してかえり高さを小さく抑えることができる。この手法は簡易バリ低減法と呼ばれ、実生産での適用実績が報告されている<sup>9)</sup>。

②に対しては、ベルト研磨、タンブル加工、化学研磨など部品の寸法形状やかえりの発生状況に応じた追加加工がせん断後に実施されることが多い。一方、せん断過程でかえりを抑制するには、かえりが生じる側にもだれを形成して板厚中央部で分離を行えばよい。具体的には図7 (a) のように途中でせん断を止めて逆押さえをパンチ、板押さえをダイとして逆方向にせん断する。この方法は上下抜き<sup>10)</sup>と呼ばれるが、複

動動作が行えるプレス設備が必要となる。閉じた輪郭形状であれば (b) のように半せん断状態で取り出して、平板間で押し戻すことで同様の加工が行える。その際、図示のように被加工材の一部が仮想的なパンチとダイの役割を果たす。この方法は平押し法<sup>11)</sup>と呼ばれ通常のプレス設備で実施できる。ただし、クリアランスや半せん断量を適切に選ばないとかえりが発生したり分離を達成できない場合があり、材質や形状に応じてせん断条件の最適化が必要となる。同様の加工は図2 (b) に示したスリッターにも適用されている。

## 4 板材以外のせん断加工

板材以外では棒材や管材を所定の長さに分断する際にせん断加工が用いられている。板材のせん断加工との相違点は、断面のアスペクト比が大きく断面形状のゆがみが生じやすい点にある。また、円形断面では切断線に沿って厚さが異なるため変形は複雑になる。

丸棒のせん断は鍛造加工用の素材取りとして用いられることが多い。断面形状のゆがみを防止するために円形もしくは半円形の孔を有する工具が用いられる<sup>12)</sup>。最初に工具が接する部分がつぶれやすく、図1 (d) のだれやつぶれが大きくなる。また、その影響で断面の真円度も悪化する。せん断時に素材の曲がりが生じると、切断面の傾きが大きくなるほか、き裂の会合が不連続となり、切断面に図4 (a) に示したタンゲが生じる。このような不良は後続の鍛造加工において不良や品質のばらつきにつながり問題となる。以下のようにせん断工法の工夫で対処できない場合、切削加工や予備すえ込みなど鍛造前に追加加工が必要となる。

切断部の形状不良は、パンチおよびダイとして棒材の外周全体を拘束できる円形孔工具を用い、クリアランスを適切に選べばある程度改善できる。切断面の品質については破断面を容認するかどうかで対応が異なる。高速でせん断を行えばき裂の発生と伝播が早期に起こり、ほぼ全面が破断面となるが直角でゆがみの少ない切断面が得られる<sup>4)</sup>。この手法は鉄鋼材料で多く用いられており、カムを用いて工具を高速で往復運動させるなど専用の装置がある。

管材は中空体のためせん断時に棒材よりも断面のつぶれが生じやすい。厚肉管や細径管のように剛性がある管では丸棒と同様の方法でせん断できるが、断面がつぶれてしまう場合には図8のように心金を用いて管内部を拘束してせん断を行う<sup>13)</sup>。心金の数と配置によりいくつかの方法があり、管の内部に挿入して適切な位置に保持する工夫がなされている。このため、金型構造が複雑になるほか、切断長さにも制約がある。心金を用いない方法として、図9に示す突切り型によるせん断がある<sup>13)</sup>。薄いV字型の切れ刃を用いることでせん断

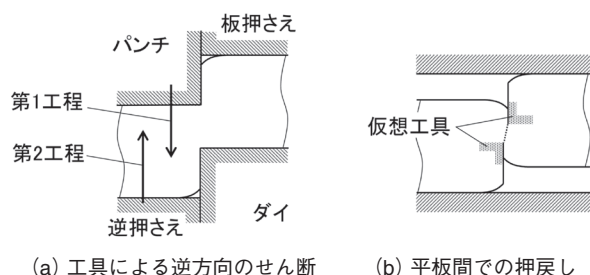


図7 半せん断後にせん断方向を反転させてかえりを抑制する方法

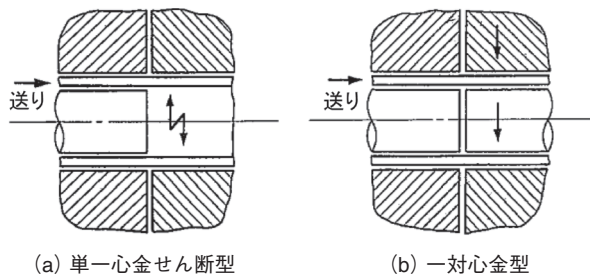


図8 心金を用いた管材のせん断加工

力を低減するもので、肉厚が薄い管では心金を用いなくてもつぶれを防止できる場合がある。この方法では最初に刃を管壁に貫通させる荷重が高くなるため、溝入れ用カッターを併用した二段階の加工とする方法もある。心金を用いる方法に比べ型構造は単純化されるが、内径側の拘束がない分だけ断面形状の精度は低下する。また、V字刃の幅だけ材料歩留りが低下する。

鍛造加工後に型の合わせ目に生じるバリを除去する際にもせん断加工が用いられる。バリの部分は薄く均一な厚みであり板材の打抜き加工に近いが、鍛造された部位を介して加圧を行うため図7 (b) と同様に被加工材の一部がせん断工具を兼ねる。このため、通常の板材の打抜き加工に比べると切断面の精度は悪くなる。

## 5 おわりに

せん断加工は金属材料が素材から製品になるまでの工程で必ずと言ってよいほど用いられる切断技術である。加工は瞬時に達せられるが、変形に関してはクリアランス部分に大きな塑性変形が集中して破断に至る複雑な加工であり、有限要素法においてもき裂の発生や進展など予測が難しい解析対象の一つである。また、被加工材の形状や用途によって、工法や加工条件を適切に選定する必要がある。例えば、鍛造用素材として棒材をせん断する場合には、切断面の傾きや断面形状のゆがみの低減を重視して破断面が容認される場合がある。一方、切断面に切削品と同等の品質が求められる部品では破断面を抑制できる精密せん断法が用いられる。特に図6に示したファインブランキングは、自動車用の厚板部品を中心に切削加工の代替工法として多く用いられている。近年では部品軽量化のニーズから、材料拘束力を利用して精密せん断と成形を同時に行う複合化が進められている<sup>14)</sup>。また、軽量化の観点でマグネシウム合金、高張力鋼板、CFRPのような比強度の高い材料に対してもせん断加工が求められている。これらの材料は通常の方法ではせん断精度が悪く様々な

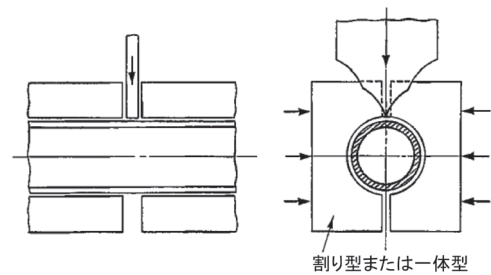


図9 突切り型による管材のせん断加工

方法が試みられており、シェーピング加工による改善例などが報告されている<sup>15-17)</sup>。また、高張力鋼板では通電加熱により昇温してせん断を行うことが試みられ、せん断荷重の低減と切断面の改善例が示されている<sup>18)</sup>。

## 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：新塑性加工技術シリーズ4 せん断加工，コロナ社，(2016)
- 2) 神馬敬：塑性と加工，6 (1965) 52, 243.
- 3) 野田治男：鍛造技報，17 (1992) 49, 1.
- 4) 村川正夫，西垣徳是，古閑伸裕，大川陽康：塑性と加工，31 (1990) 354, 924.
- 5) 廣田健治，野嶋佑輝，栗屋啓輔，森祐司：塑性と加工，58 (2017) 675, 317.
- 6) Jie.Xu, Bin.Guo, Chunju.Wang and Debin.Shan：International Journal of Machine Tools & Manufacture, 60 (2012), 27.
- 7) 中川威雄，吉田清太：塑性と加工，10 (1969) 104, 665.
- 8) ファインブランキング技術研究会：ファインブランキングハンドブック，プレスフォーミングジャーナル社，(2010)
- 9) 石川茂，堀江俊索，江嶋瑞男，橋本浩二：型技術，6 (1991) 8, 132.
- 10) 前田禎三：機械の研究，10 (1958) 1, 140.
- 11) 牧野育雄：プレス技術，13 (1975) 5, 93.
- 12) 柳原直人：塑性と加工，35 (1994) 396, 43.
- 13) 中川威雄：塑性と加工，23 (1982) 255, 307.
- 14) 瀧脇健二：プレス技術，51 (2013) 3, 33.
- 15) 古閑伸裕：軽金属，50 (2000) 1, 18.
- 16) 村川正夫，中村健太，土屋敏郎，松本朗，古閑伸裕：塑性と加工，54 (2013) 628, 431.
- 17) 古閑伸裕，霍舒揚：塑性と加工，57 (2016) 666, 655.
- 18) 森謙一郎，藤阪靖二，内田光隆，上蘭俊，前野智美：塑性と加工，51 (2010) 588, 55.

(2017年9月1日受付)