



金属材料における超塑性

堀 茂 徳**

金属のきわ立った特徴のひとつは、大きな塑性変形能をもつことにある。固体の状態でもかなり自由に形状を変化させることができる。これは金属の可塑性にもとづいているが、別の面からみると、ある程度の永久変形をさせるといふことで、破壊までかなりの仕事をなすわけである。金属材料は大きな延性をもっているうえに、変形するための抵抗が相当大きいものもあるので、強靱であって工業材料として高い信頼を得ている。

金属材料のもっている性質のうちの延性を破壊するまでの引張伸びであらわすと、金属合金の種類によって異なるけれども、その大きさは数%から数十%である。鉄、モリブデン、チタンなどは比較的伸びの値が小さく、金、銀、銅では大きい。焼きなました黄銅では60~70%の伸びをあらわす。しかし伸びが100%(もとの長さの2倍)になることは普通にはないことである。純金属に溶質原子を固溶すると、通常伸びは溶質濃度が増えるとともに次第に下がり、固溶限を越えて合金元素を添加すると第二相が分散するようになるが、そのような状態では一層延性を低下するのが常である。機械、機器、構造物において強度を支える構造材料としては、鋼やデュラルミンの例でわかるように、硬質の第二相を分散させて強化をはかっている。従って、これらの二相合金の伸びはたかだか20~30%までである。引張温度を高くしても、強さは急激におちるが伸びは少し増える程度でさほど変わらないというのが一般であった。ところが、高温で適当な歪速度を選んで引張ると異常に大きな伸びを示す材料があった。数百%はおろか1,000%をかるく越える伸びが得られる。これは超塑性と呼ばれ、異常に大きい伸びの値に注目されて

いる。最近、半田合金で4,850%まで伸びたとの報告がある。これは注意深くなされた実験のもとで得られたもれたものであるが、数百%から1,000%程度までの伸びであれば、それほど厳密な実験条件を選ばなくても、比較的容易に達成することができる。今日では、超塑性をあらわすための金属組織学的条件や変形条件は、かなりわかって来たといつてよい。

それでは1,000%をも越えるような大きな伸びを示すという超塑性のもとはどこにあるのだろうか。金属が結晶構造をくずすことなく塑性変形するのは、転位を介して理解される。塑性変形中に転位がりく続とつくり出される増殖の機構ははたらけばよい。ただ、常に純粋剪断がはたらくとは限らないから、増殖した転位はからみ合って動き難くなり、ついには材料を破壊に導くようになる。このときの伸びは脆いといわれる金属で数%以下、延性金属といわれるものでも前に述べたように、たかだか数十%までである。ところが超塑性合金では1,000%以上の伸びを示すのである。平らに磨いた試料の表面に細い多数の格子線を描いて確認したところによると、超塑性変形はほとんど結晶粒界付近におけるそれでまかなわれている。結晶粒界すべりが生じているのである。超塑性条件に近づくとつれて、結晶粒内におけるすべり変形でなく、粒界すべりの寄与が増加してゆくわけで、結晶粒が細かいと粒界面積が増え、従って超塑性を示し易くなる。ここで整合界面をとる場合は、その界面はすべり難い。傾角の大きい粒界であることが必要である。また純金属では高温になると粒成長をおこし易く、結晶粒が大きくなると超塑性を示さなくなる。それで単相合金よりも第二相粒を含む微細混合組織の合金では、高温で細粒を保持し易いので、超塑性条件を維持し易いということになる。微細組織の高

**堀 茂徳 (Shigenori HORI), 大阪大学, 工学部, 金属材料工学, 教授, 工博, 金属材料学

温安定性が特に大切なのは、超塑性の歪速度が比較的低いことによっている。低い歪速度下で数千%におよぶ伸びをもたらすためには、変形時間が長くなるからである。それでは歪速度($\dot{\epsilon}$)を高くするとどのようなことになるのであろうか。

超塑性にはもうひとつの重要な指標がある。変形応力の歪速度感受性指数 m である。変形応力を σ とすると $m = d \ln \sigma / d \ln \dot{\epsilon}$ で表わされ、超塑性条件では m の値が高い。 $m = 1$ がニュートン流動で金属では 1 とならない。 $m = 1$ というのはゲージ部に出来た局部収縮がそのまま進行し続けられないことを意味しており、 m が大きいと伸びも大きく、両者はおおよそ対応することができる。ただし、よく知られているように、引張伸びはもともと再現性のよいものではないし、また高温におくと結晶粒が成長したり、引張方向にいくから伸びて等軸粒から離れていくなど不安定な面もあるために、 m と伸びとは厳密な対応をもつわけではない。それでは超塑性条件下で m の値が高いのは何に原因しているのだろうか。 m は変形応力の歪速度感受性指数であるから、変形応力が内部応力にかかわるものと有効応力にかかわる項とからなることに注目して、内部応力および有効応力の歪速度感受性を調べることができる。他方、伸びをもたらす変形自体は、結晶粒内の変形と粒界の変形とに分けることができる。そこで超塑性の有効応力と内部応力との何れが、どれほど粒界すべりに関与するかについて調べてみると、有効応力の関与の方がはるかに大きい。内部応力は歪速度に対してほとんど依存しないのである。すなわち $e_{eff} m$ は大きい。そして粒界すべり (S_{gbs}) の有効応力の歪速度感受性指数 $e_{eff} m_{gbs}$ は、平均の m の値がさほど大きくないとき、すなわち伸びが大きくないときでさえ、1 に近い値をとることがわかった。このことは超塑性変形機構を明かす重要な鍵をにぎっているように思われる。超塑性の変形応力は転位のすべり抵抗のそれよりもとても低く、転位のすべり運動の役割でなくて、粒界での格子欠陥の移動が

重要なはたらきをするのであろう。つぎに、このようにして粒界すべりがどんどん進行すると、多結晶金属では当然に粒界の三重点とかで粒界すべりによって空洞が発生することになる。しかしながら、実際には大きな超塑性変形のあとにしか空洞は認められないのである。もしも、空洞が粒界に多数発生するとすれば、やがて、それが互いに連なって超塑性条件をくずして材料を破壊に導くわけであるから、超塑性変形では、空洞が形成されないための何らかの調整機構が同時に存在しているのだらうと考えねばならないわけである。これを明かすことは粒界すべりの研究にもまして重要な課題であらう。

超塑性の変形機構が明らかになると、つぎには、 m が極大をとる歪速度を高歪速度側へ移行させることを目指さねばならない。というのは、合金の超塑性を塑性加工に利用するにあたって、加工速度が問題になるだろうからである。超塑性条件のもとでは、変形抵抗が小さいうえに非常に大きな成形加工能をもっているわけであるが、今日の成形加工速度は非常に速くなっており、高い歪速度を要請されるであらう。ただ、実際の成形加工では、いつも 1,000% 以上の変形を必要とすることは少ないと思われるので、伸びの値を少々犠牲にしてやれば歪速度を相当程度早くすることもできる。また、合金の微細な等軸粒組織の高温における安定性を高めるための工夫をしてやれば、より高温で変形することも可能となり、超塑性変形の歪速度を高くしうる道がある。今日では、圧延、引抜、押出加工あるいは深絞り、張出し加工など、いろいろな加工に金属の超塑性を利用しようとする試みがなされている。これらの加工に超塑性を利用すると、低荷重で加工できるばかりでなく 1 行程で複雑な形状の製品に加工できるから、中間なましや再加工の必要がない。また、超塑性加工で製品をつくったあと熱処理を行って性質をよくすることもできる。超塑性加工した製品は結晶粒が細かい上に機械的性質の異方性も少ない利点があるので、今後積極的に利用されることを期待したい。