

第39回 ばねのへたり

鈴木金属工業(株) 林 博昭

1. 疲労とへたり

ばねにとって疲労とへたりのどちらが大事なのだろうか。図1はGoodmanダイアグラムと呼ばれるばね材料の疲労とへたりの限界を示すばね設計のための図である。この図には二つの重要な線が設けられている。一つは疲れ限度線であり、もう一つはへたり限度線である。設計応力はこの2本の線と対角線で囲まれた範囲内になければいけない。どちらが欠けてもこの図は成り立たない。すなわちばねの設計にはどちらも重要なのである。

2. へたりとは

ところでへたりとは何であろうか。我々が認識している現象は、ばねが使用中にその負荷方向へ塑性変形を生じてしまうことである。しかし、どうしてそのような現象が起きるのかということについては以外と知られていない。

へたりという現象は、弾性限度内の「低い応力下において塑性ひずみが発生する現象」であると言いかえることができる。図2に金属材料の引張試験による応力-ひずみ線図を示す。ばねは本来、この線図における弾性領域で用いられるが、弾性領域でも、ひずみを繰り返し与えられたり、長時間ひずみを与えたままにすると、実際に加えられたひずみより大きいひずみが増えられた時と同じ挙動を示し、除荷しても塑性ひずみという元に戻らないひずみが生じる。へたりというのは元に戻らない「塑性ひずみ」の一種であることを認識して欲しい。

金属において塑性ひずみが生じる過程では、転位と呼ばれる金属結晶内に存在する線状の格子欠陥が大きな役割を果たしている。

3. へたりと転位

転位は英語ではDislocationという。この英語はdis + locationすなわち「配置の乱れ」を意味し、医学用語では関節の脱臼のことである。一方、鉄をはじめとする金属は、図3のような金属結晶というそれぞれの金属特有の格子状の結晶構造を持っている。しかし、この結晶構造は完全無欠ではなく、多数の欠陥が内在しているのが普通である。その欠陥にはいくつかの種類があるが、そのひとつが「結晶格子の配置の乱れ」である転位である。

次にこの転位とへたりの関係について説明しよう。先ほどへたりという現象は、「低い応力下において塑性ひずみが

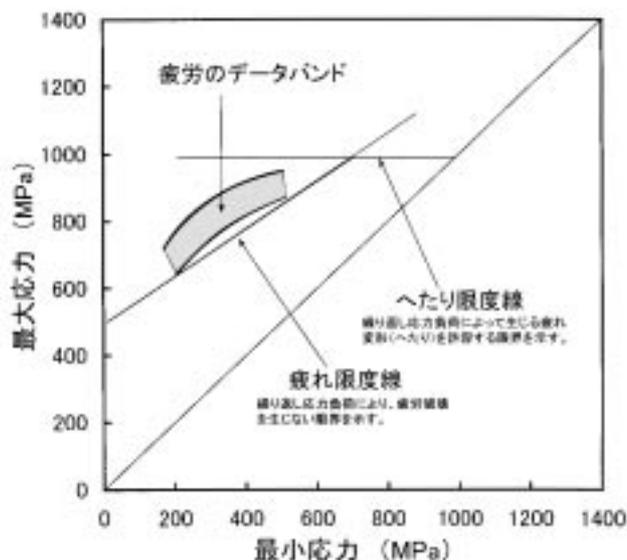


図1 Goodmanダイアグラム

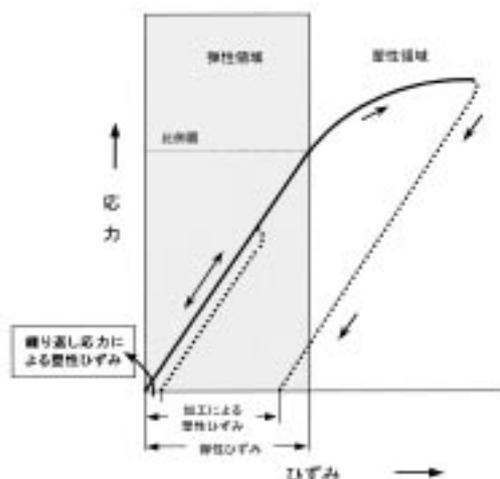


図2 応力-ひずみ線図

発生する現象」だと説明した。では金属材料に力を加えた時、塑性ひずみが生じる機構はどのようになっているのであろうか。

図3に示したように、金属結晶はミクロ的に3次元構造をしている。金属はこの結晶構造が積み重なって図4(a)のよ

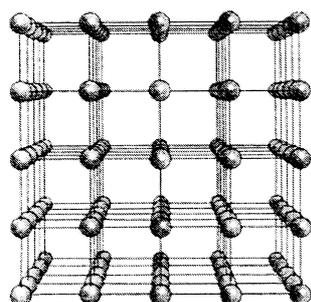


図3 金属の結晶子モデル

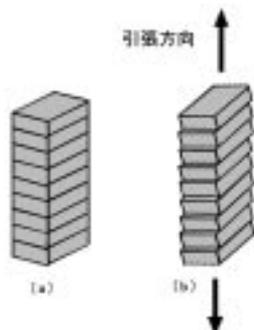


図4 すべり変形のモデル

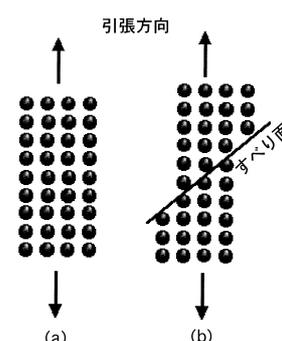


図5 結晶面のすべり

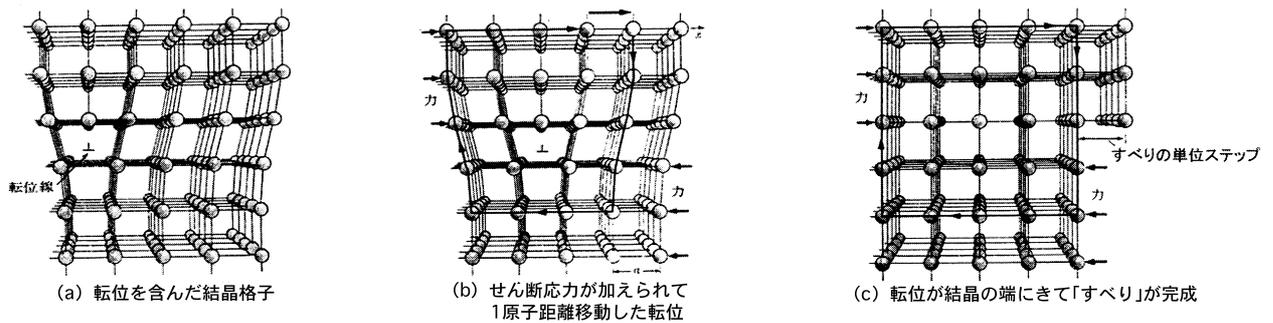


図6 転位の移動によるすべりの発生モデル

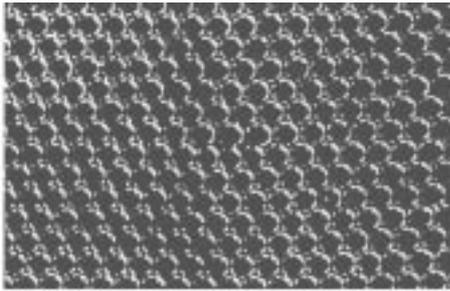


図7 転位の泡モデル

うになっているが、これを引っ張って変形させると、図4(b)のように結晶面がずれて「すべり変形」という変形をする。ちょうどトランプの山を押ししたような感じである。この時の結晶格子は、図5のように原子配列が1原子単位でずれている。(3次元構造で全てを示すのはちょっと大変なので、2次元で説明している)しかし、ここで注意しなければならないのは、原子全体が一斉に1原子ほど動いて図5(b)に至るのではないことである。図6のように原子配置の乱れた部分にせん断応力が加わると、この乱れが左から右に徐々に移動し、最終的に図6(c)のように1原子ほどのすべりが発生する。そう、この原子配列の乱れた部分が転位なのである。図7に転位を含んだ結晶構造を泡でモデル化した例を示す。右下斜めからすかして見ると配列のずれがわかる。この配列のずれは図6(a)に転位線と記してあるように、紙面の厚さ方向に長さを持った線状の欠陥である。この転位の移動こそが塑性変形の源なのだ。

この転位の移動による変形モデルは絨毯の移動モデルにたとえられる。長い絨毯をその長手方向に移動しようとして力まかせに引っ張っても、床との摩擦抵抗が大きくそう簡単には動かない。しかし、図8のように絨毯の片端を少しづつ山(転位)を作り、その山を移動させていけば、小さな力でも距離は短いながら移動できる。

金属、特にばね用材料のような硬い金属の中にはこの転位が無数に存在しており、その転位の多さが高強度の秘密でもある。移動しやすさという見地からは、2種類の転位が存在する。一つは「可動転位」と呼ばれ動くことが比較的容易な転位であり、もう一つは「固着転位」という動きを縛られた転位である。低い応力(弾性ひずみ)を加えて、弾性領域内で繰り返すあるいは長時間使用していると、前者の可動転位が移動を始め、やがて塑性変形と同じ塑性ひずみが生じ、「低い応力下において塑性ひずみが発生する現象」すなわちへたりの発生が完成する。転位の移動は温度にも

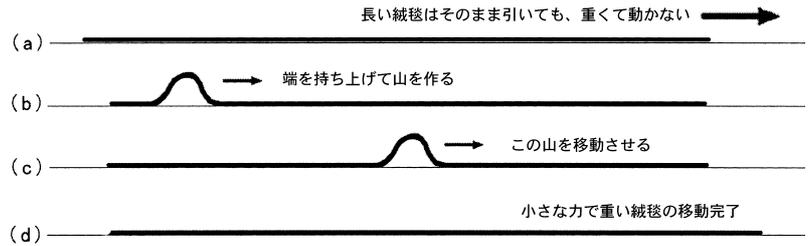


図8 絨毯の移動モデル

左右され、温度の高いほど転位は動きやすい。したがって、ばねも高温環境ほどへたりやすい。

4. へたりを防ぐ

それでは、へたりを抑えるにはどうしたら良いのでしょうか。実際のばねのへたりを抑制する方法としては2種類の方法が用いられている。

一つは上述の説明の中にヒントがある。へたりが可動転位の移動を介して行われるならば、その可動転位を減らせば良い。しかし、強度を維持したまま、転位の絶対量を減らすことは難しいので、可動転位を減らすためには、可動転位を動きにくくなった固着転位に変えるという方法がとられる。

では、どうしたら可動転位の動きを止められるであろうか。答えは第8回の「低温焼なまし」である。ばね成形加工やショットピーニングを施すと加工を受けた領域では可動転位が増殖するとともに残留応力も発生する。可動転位の動きを止め、固着転位に変える熱処理温度は鉄鋼材料の場合は150~250℃で十分であり、ショットピーニングのように有益な残留応力を残しかつへたりを防止する場合には、この温度範囲が適用される。一方、ばね成形加工などによる残留応力は、真の応力=公称応力+残留応力となり、疲労だけでなくへたりに対しても有害なので、強度が低下しない範囲でなるべく高温であることが望ましい。残留応力除去を目的とした低温焼なましは、前述の温度より高温なので可動転位は固着される。しかし、高温になりすぎると材料強度低下の方がへたりに対して問題となる。

へたりを防ぐもう一つの方法は、使用中に応力の加えられる方向に軽い塑性変形を与えて、内在する可動転位を事前に塑性ひずみに変化させてしまう方法である。この方法はセッチングと呼ばれており、前者の熱処理と組み合わせたホットセッチングは、さらに効果の高いものとなる。