集合組織の制御と応用

長 嶋 晋 一*

集 合 組 織 と は

よく知られているように金属材料は微小結晶の集合体であるから、材料の特性を正しく理解するためには、材料全体を等方性連続体として取り扱える平均的性質を知るとともに、それを構成する結晶についての結晶構造や格子欠陥などに基づく特性、および結晶の集合体としての結晶粒界や結晶の方位配列などに支配される特性についての知識を整理しておくことが大切である。ここでは材料を構成する結晶の方位配列に注目して、どのような方位配列が考えられるのか、それに基づく機械的、物理的異方性はどうか、結晶方位の制御による材料の特性の改善の可能性およびその利用例などについて述べてみよう。

金属材料を形成する微小結晶の方位配列の極限状態のひとつとしては、すべての結晶が統計的に全く不規則な方向にむいている“ランダムな状態”が考えられる。この場合には機械的、物理的諸性質はすべて等方的であると見なすことができるが、それらの微小結晶がある特定の方位配列をとるにしたがって次第に異方性を示すようになる。変圧器用珪素鋼板の磁気異方性や深絞り用薄鋼板における塑性異方性などはその典型的な例である。

このように結晶粒が特定の方向に配列したものを優先方位 (preferred orientation) があるといい、優先方位のある状態を集合組織 (texture) と呼ぶ。この preferred orientation という語が示す通

り、材料内の結晶は好んで (prefer) 特定の方向に並ぼうとする傾向がある。そして集合組織の“集”の字も当用漢字が制定されるまでは“自発的に集まる”という意味の“聚”という漢字が使われていた。

また texture という単語には本来織物の地模様という意味があるが、材料の集合組織という意味で使われる場合にはランダム方位に対して特定の方位を向いている結晶粒がどの程度あるかを考えているだけで、結晶の方位配列に関する周期的な規則性までは考慮していない。

集 合 組 織 の 種 類

上に述べたように微結晶の方位配列の一方の極にランダムな方位の状態があるが、これに対して結晶が特定の方向に整然と配列するときどのようなタイプがあるかを考えてみよう。

第1は結晶のある特定の方向が材料の特定の方向に平行になっている場合である。たとえば線引きしたアルミニウム細線では、針金の軸つまり引き抜き方向に立方体対角線 $\langle 111 \rangle$ 方向が平行に並んでいて、しかも針金の軸のまわりには対称になっているものである。このような集合組織は繊維組織 (fiber texture) と呼ばれ、この方位配列の各結晶に共通な方向は繊維軸 (fiber axis) と名付けられている。

このような繊維組織は線引きの他にスエージング、押し出し、引張りなどの1軸変形をうける場合にも形成されることが知られている。

第2のタイプは結晶のある特定の面が材料の特定の面に平行な集合組織である。たとえば適当な温度に保った下地の上に金属の蒸気を導いて晶出

* 横浜国立大学教授；工学部機械工学科
Texture Control of Metals for Industrial Use; Shin'ichi Nagashima (Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama)
1978年3月2日受理

させると、このタイプの集合組織が得られる。銅やニッケルでは(111)面が蒸着膜に平行な単一の方位が、アルミニウムや銀では(111), (100), (110)が、それぞれ膜面に平行な三つの方位が共存する集合組織となる。このとき蒸着膜の面内における軸の方向は全くランダムである。

なお上の説明では、外形に注目して蒸着膜と結晶面との方位関係を述べたが、それを[111], [100], [110]軸が蒸着膜に垂直であると書きかえても結晶学的には全く同じことであって、このタイプの集合組織は膜面に垂直な繊維軸を持つ繊維組織と呼ぶべきものであることがわかる。

この種の繊維組織は溶融金属からの凝固、電気めっきや蒸着などの結晶成長、圧縮のような1軸変形の場合に認められるものである。

第3のタイプは、結晶の特定の面が材料のある特定の面に平行であり、さらにその結晶面内の特定の方向が材料の特定の方向に平行になっている方位配列である。このような方位は圧延板や圧延後焼なました金属板に生ずるものである。たとえば薄手の細長い箱に角砂糖を整然と詰めこんだものを考えるとこの種の集合組織が理解し易い；この模型は立方晶金属の立方体面が圧延面に平行で、かつ立方体の稜が板の長手方向に並んだ立方体方位(cube texture)と呼ばれる集合組織に対応している。圧延集合組織にはこのような単純な方位ばかりでなく様々な方位があるが、圧延面に平行な結晶面および圧延方向に平行な結晶方向の二つによって規定されるのがこのタイプの特徴である。

このタイプの集合組織の方位が完全にそろった理想的な状態は単結晶であるが、実際には中心の

方位から $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ の範囲にばらついている。

以上をまとめると

(i) 金属結晶が成長する場合には成長方向を繊維軸とし、タイプ1または2の繊維組織が形成される。

(ii) 1軸方向に塑性変形をうけ、あるいはそれが焼きなまされたときもタイプ1または2の繊維組織が得られる。

(iii) 板圧延され、あるいはそれが焼きなまされたときはタイプ3の集合組織が得られる。

(iv) 実用材料においては、単一の集合組織がシャープに生ずることは少なく、どの方位も中心方位からの偏りがあり、いくつかの方位およびランダムな分布をしたものが重畳している場合が多い。

したがって集合組織の研究においては、その複雑な方位をいかに定量的に評価し、さらにその3次元的分布をいかに正確にわかり易く表示するかが重要な課題となってくるが、紙数の都合でこの問題についての説明は省略する。

金属材料の異方性と集合組織

金属材料の異方性の制御と利用に関する話をすすめるに当たって、先ず材料を二つに大別して構造材料と機能材料とし、前者について機械的性質の異方性について述べ、後者に関しては物理的性質の非等方性について考えることにする。

機械的性質の異方性

われわれが市場で入手する金属材料は一般に機械的性質が等方的なものは少なく、特に圧延材においては圧延方向とこれに直角方向とでは後者の

表1 金属単結晶および多結晶体の弾性定数。

	$E_{\max}^{(a)}$ (GPa)	方 向	$E_{\min}^{(a)}$ (GPa)	方 向	$E_{\text{bulk}}^{(b)}$ (GPa)	$G_{\max}^{(a)}$ (GPa)	方 向	$G_{\min}^{(a)}$ (GPa)	方 向	$G_{\text{bulk}}^{(b)}$ (GPa)
Al	75	[111]	63	[100]	75	28	[100]	25	[111]	26
Cu	190	[111]	67	[100]	136	76	[100]	30	[111]	—
Ag	115	[111]	43	[100]	100	44	[100]	19	[111]	31
Au	112	[111]	41	[100]	88	40	[100]	18	[111]	30
α -Fe	284	[111]	132	[100]	190	116	[100]	60	[111]	80
W	392	[111]	392		360	151	[100]	151	[100]	157
Mg	50	0° *	43	53.3° *	—	18.0	44.5° *	16.8	90° *	16.6

* [0001]軸との角度

(a) C.S.Barrett: *Structure of Metals*, 2nd Edition, McGraw-Hill, London, (1952), 469.

(b) 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善, (1974), 35.

性質が劣るものが多い。この原因としては成分の偏析、非金属介在物の分布、材料の塑性流れ、残留応力などマクロ的要因が及ぼす影響が大きい、集合組織の形成に基づく結晶学的異方性を無視することはできない。

機械的性質に及ぼす結晶方位の影響は弾性定数の異方性およびすべり系の非等方性として現われる。参考までに各種金属単結晶の弾性定数を表 1 に示した。これによるとアルミニウムほか二、三の金属を除くと弾性定数の結晶方位による差異は最大値が最小値の 2 倍以上になっていることがわかる。

物理的性質の異方性その他

磁気的性質：金属の物理的性質の中で異方性が最も著しいのは磁気的性質である。図 1 は純鉄単結晶の磁化曲線を示したもので、この図から明らかなように $[100]$ 方向は極めて弱い磁界で容易に磁化し飽和値に達するが、 $[110]$ 、 $[111]$ など他の方向は磁化曲線の勾配が途中でゆるやかになり飽和しにくい⁽¹⁾。

図 1 純鉄の主な方向の磁化曲線⁽¹⁾
($1 \text{ kA/m} = 12.57 \text{ Oe}$, $1 \text{ T} = 10 \text{ kG}$)

その他の物理的性質の異方性：電気抵抗は、立方晶金属では方向によっての差はほとんどないが、六方晶や斜方晶金属など対称性の低いものでは主軸に平行な方向と、これに垂直な方向とでは

かなりの差があるものが多い⁽²⁾。

同様な方位依存性は熱膨張係数や熱電能にも認められているし、熱伝導率、熱膨張係数および電気抵抗の温度依存性、磁化率、透磁率、拡散係数、さらには酸化や腐食などの化学反応速度や光学的性質などの表面特性の異方性も報告されている⁽³⁾。

集合組織を利用した例

上に述べたように金属材料の異方性は金属の結晶構造およびその種類により、また特性によって著しい相違のあるものやほとんど差のないものなど多種多様であった。しかし材料の特性を工業的に利用する立場からは次の二つの考えに分けられる。

- (i) 極大値または極小値を積極的に利用する。
- (ii) 平均値との差をできるだけ減少させ等方的性質を持たせようとする。

(i) は機能材料として金属を使う場合に考えられるものであり、(ii) は構造材料として使用する場合に考慮せざるを得ない。ここでは前者の例として磁気異方性を利用した珪素鋼板、後者の例として深絞り性と集合組織との関連を考慮した金属薄板をあげて説明を加える。

珪素鋼板における集合組織制御⁽⁴⁾

変圧器や電動機に使われる電気鉄板には磁束密度が高く鉄損が少ないものが望ましいが、1900 年頃珪素の添加によって透磁率が高まり鉄損が減少することが知られて珪素鋼板が使われるようになった。珪素含有量は当初 0.5% だったが、次第に高められて 3~4% の熱延鋼板が生産されるようになった。ところが珪素含量が増すと飽和磁気密度が減少するので、鉄の磁気異方性を利用してこの問題を解決することが考えられた。すでに述べたように $[100]$ 軸は磁化の容易な方向、 $[111]$ 軸は磁化の困難な方向である。米国の Goss は 1934 年に容易磁化軸が圧延方向に平行な“方向性珪素鋼板”を 2 段冷延法によって製造する技術を発表した⁽⁵⁾。

方向性珪素鋼板：この 2 段冷延法では Goss の方位と呼ばれる目的の方位 $\{(110)[001]\}$ を優先

的に成長させ他の方位の成長を抑制するインヒビタとして MnS を利用している。大よその工程は次のようなものである。

先ず製鋼段階で Mn と S を添加する。鋼塊に鋳込み、分塊圧延によってスラブを作る。熱延に先立ってスラブを高温度に加熱して MnS を完全に固溶しておき、熱延後の冷却過程で微小な MnS の析出を均一に分布させる。つづいて冷間圧延、中間焼なまし、再び冷間圧延を施し、脱炭焼なましを済ませてからボックス炉で仕上げ焼なましを行なうのであるが、この段階で MnS は 1 次再結晶による一様な結晶成長を抑制し、Goss の方位を持つ結晶粒の 2 次再結晶を促進する働きをする。

最近わが国で開発された方向性珪素鋼板の製造技術にはインヒビタに MnSe を使った 2 段冷延法や、AlN を使った 1 段冷延法がある⁽⁴⁾。従来の方向性珪素鋼板の容易磁化軸 [100] の圧延方向への集積度は約 7° であったが、最近では平均 3° 程度にまで高められ磁気特性も向上している。

2 方向性珪素鋼板：上述の Goss の方位は板面に平行な容易磁化軸は圧延方向だけにしかないが、立方体面 (100) を圧延面に平行にすれば板面内に容易磁化軸を 2 個持つ 2 方向性鋼板が得られる。Assmus ら⁽⁶⁾は結晶の表面エネルギーの差を利用して、高温焼なましによる 2 次再結晶によって 2 方向性珪素鋼板の製造に成功したが、現在は工業生産はされていない。その理由は製造コストが高くつくことと、変圧器に使用したとき磁歪にもとづく騒音が大きいという本質的欠陥があるためである。

深絞り用金属薄板における集合組織制御

薄金属板の深絞り、カップ成形においては、板に顕著な集合組織のあるものは、割れや耳の発生など好ましくない現象がおきるので、集合組織を軽減することが必要になる。特に銅板においてはこれについての研究が多い。ところが薄鋼板の場合にはプレス成形性を高める方位と害する方位との両方が存在することが明らかになり、深絞り性を向上させるためには有害な方位を減少させるだけではなく、有益な方位を積極的に増加させる方策がとられている。

銅板：上に述べたように、電気鉄板では立方体方位が望ましいが通常の圧延と再結晶の組み合わせではできにくく、安価な製造法が確立されていない。その一方銅をはじめとする面心立方金属では極めて簡単に立方体方位ができるのであるが皮肉なことにこの方位が発達した薄板は、深絞り成形を行なうと割れたり著しい耳が発生したりして好ましくない。そのため立方体方位を減少させる製造要因の検討が行なわれ次のような対策をとればよいことが明らかにされている⁽⁷⁾。

- (i) 冷延集合組織が発達するとよくないので中間焼なましを行なう。
- (ii) 1 回の圧下率は小さくする。
- (iii) 最終焼なまし前の結晶粒径を大きくする。
- (iv) 最終焼なまし温度を低くする。
- (v) 下記の元素の少量添加が有効：Zn, Sn, Al, Be, Cd など。

プレス成形用薄鋼板：プレス成形用薄鋼板の深絞り性に及ぼす集合組織の影響を注意深く観察すると、成形性を低下させる方位もあるが、向上させる方位もあることがわかった⁽⁸⁾。これが引き金になって集合組織と深絞り性に関する研究が華々しく展開された。その結果を要約すると次のとおりである。

(i) それまでは深絞り性を高めるためにはランダム方位に近づければよいと考えられていたが、さらに深絞り性を良くする方位がある。

(ii) (111) および (112) 面が圧延面に平行な方位は深絞り性を向上させ、(100) および (110) 面が圧延面に平行な方位はそれを低下させる。

(iii) 深絞り性を向上させる方位を増し、低下させる方位を減少させるためには現行生産工程を変更せずに工程要因を制御するだけで十分である。

(iv) 深絞り性以外のプレス成形性、張出し性や形状性など、を向上させるための製造条件を満足させながら、その範囲内で希望する集合組織を助長する要因を選ぶことができる。

(v) 集合組織の制御には次の要因を総合的にコントロールすることが大切である⁽⁸⁾。

○鋼種、成分、インヒビタ (MnS, AlN など)

- 熱延条件：均熱温度，圧延率，仕上り温度，巻取温度
- 冷延条件：圧延率
- 焼なまし条件：雰囲気，昇温速度，加熱温度，加熱時間，冷却速度

集合組織の新しい利用

以上に述べたのは集合組織の制御についての研究結果が工業的成果としてわが国で実を結んだ代表的な例であるが，これ以外に新しい応用の分野はないものであろうか．そのような考えで単結晶および多結晶金属の異方性に関する数少ない資料を参考にして，今後どのような面に利用の可能性があるかを思いつくまま書き並べてみる．

高張力鋼の強度靱性向上

ラインパイプに使われる非調質高張力鋼はコントールドローリングによって製造されるが，その鋼にはかなり強い集合組織が存在する．この集合組織が強度および靱性に影響を与えることは当然考えられることである．稲垣ら⁽⁹⁾は強度，靱性におよぼす方位の影響を簡単な仮定に基づいて検討し，(332)[11 $\bar{3}$]方位が好ましく，(311)[01 $\bar{1}$]方位は悪影響のあることを示した．

タービンブレードのクリープ強度向上

高温クリープ強度を高めるためには結晶粒界の少ない粗粒材が使われるが，コストを無視して単結晶で部品を作ること試みられている．このような材料に繊維組織や単結晶の集合組織の集積度を強化することが有効のように思われる．

高弾性率金属線

表1に示したように金属のヤング率は一部の例外を除いて異方性が大きく，[111]方向では[100]方向の2倍から3倍にもなっている．この異方性を利用できないかという指摘は古くからされているが，応用された例はまだない．銅線について考えると，ヤング率の異方性が顕著だが電気伝導度の異方性はないので利用法がありそうである．

また銅線，特にミュージックワイヤに適用して，ヤング率が高くリラクゼーションが少ないものができれば，音色の狂いの少ないピアノの製造が可能になるであろう．

周期的構造を持った集合組織

この文のはじめに texture という言葉には布地の織目模様という意味があるということを述べた．それに示されるような2次元的または3次元的に規則性のある周期構造を持った集合組織を作るという考えはどうであろうか．表面層と中心層の方位が異なるサンドイッチ構造は今でも作れる．さらに発展させてランダム方位と特定方位が縞状に並んだもの，AとBのふたつの方位が縞状に並んだ“すぎあや模様”や格子状にならんだ“市松模様”も作れそうに思える．

このような集合組織が思うように作れるようになると，粒界構造のコントロールも夢ではなくなってくる．

あ と が き

本文の中でも述べたように，わが国における集合組織の研究は高性能珪素鋼板と高品質プレス成形用鋼板の製造条件の確立という世界に誇るべき成果を挙げた．その反動であろうか集合組織に関する研究は一段落して，工業的に重要なテーマはもう残っていないという印象が強いようであるが，決してそうではなくここで取り上げた異方性の利用のほかにも，集合組織形成に及ぼす成分や第2相の影響，2相合金や制御圧延における変態と集合組織との関連など未解決の問題はまだ数多く残されていることを強調して結びの言葉とする．

文 献

- (1) K.Honda and S.Kaya : Sci.Rep. Tohoku Imp. Univ., **15**(1926), 721.
- (2) C.S.Barrett : *Structure of Metals*, 2nd Edition, McGraw-Hill, London, (1952), 469.
- (3) W. Boas and J. T. Mackenzie : *Progress in Metal Physics*, Vol. II, Interscience Publishers, New York, (1950), 90.
- (4) 田口 悟：鉄と鋼，**62**(1976)，905.
- (5) N.P.Goss : U.S.P. 1965 559, (1934).
- (6) F.Assmus, K.Detert and G.Ibe : Z.Metallk., **48**(1957), 344.
- (7) C.S.Barrett and T.B.Massalski : *Structure of Metals*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, (1966), 572.
- (8) 久保寺治朗：薄鋼板の成形性，日本鉄鋼協会第9回西山記念技術講座，(1970)，3；武智 弘：塑性と加工，**12**, No. 121(1971-2)，85.
- (9) 稲垣裕輔，栗原 極，小指軍夫：鉄と鋼，**61**(1975)，991.