

未来を拓く
先端材料

島村 昭治 編著

71.22
512

未来を拓く 先端材料

島村 昭治 編著

JK551 / 18

工業調査会

ま え が き

1960年から現在までの約20年間、さまざまな研究開発が行なわれてきたが、それらは大きく三つに分けることができる。第1は、1960年代のほぼ終り頃までの時期で、その前半はまだ高度成長時代にあり、わが国の研究開発は正に追い付け追い越せであった。すなわち、“加速のため”の開発が活発に進められていた。しかしながら、1964年の新幹線開通、1970年の大阪万国博開催の花々しさの中で、今までややもすれば見のがされていた限りある地球資源の問題が、高度成長の前に影を落すようになり、人々が不安を感じ始めた頃、1973年の第1次石油ショックは、それまでの加速形技術開発に警告を与えた。頼りにしていたエネルギーがぐらついてきたのである。

第2の時期はこれから始まり、研究開発は、通産省工業技術院のサンシャイン計画に代表されるように、(エネルギー小国が)“生き残るため”の開発となった。

さて、60年代の“加速”、70年代の“生き残り”の研究開発を進めながら、わが国の科学技術水準は急ピッチで上昇し、一部の軍事的色彩の強い部分を除いては、大方の工業製品の水準では世界のトップに立つことができた。正に追い付いて肩を並べ、追い抜きかけたのである。

しかし、さてこれから先頭に立ってさらに差を付けようとした時、当事者はひやりとさせられた。その原因の一つは、追い上げに力を使いすぎて、スタミナに不安を生じたことであり、もう一つは、ペースメーカーの背中を見て走る立場から、先頭を走る孤独のランナーとなった今、ペースを自分で作る訓練がしてなかったことに気付いたことである。

研究開発には、ニーズ指向形と、シーズ展開形とがあるが、わが国はおもに前者を得意とした。しかし、自分のペースで先頭を切って走るには、常にシーズを生み、かつ育てていかなければならない。特に先進技術といわれるものは、針の先ではだめで、ピラミッドの頂上でなければ物にならない。地道な研究の積み上げ、すなわちスタミナが必要なのである。

第3の時期は、この危機感が生れた1980年代に始まるもので、“育てる”研究開発といえよう。ともに昨年スタートした通産省工業技術院の「次世代」および科学技術庁の「創造科学」は、この考えにもとづき、国家プロジェクトとしては、

始めてのあからさまなニーズ指向をとらない未来投資形の研究開発である。

以上、この20年間の研究開発を“加速”、“生き残る”、“育てる”の三つに分けてみたが、これらは前者のアンチテーゼとして後者があるのではなく、三つが互いに補完し合うものであり、これで、わが国の研究開発体制も欧米並みの姿に整ったといえよう。

さて、多くの研究開発はハードウェアの完成を目標としており、当然のことながら材料が一つの課題となる。そこで、この20年間のさまざまな研究開発において材料にぶつけられた声を整理してみると、二つに分けられる。

第1は、『このプロジェクトがつまづいているのは材料が駄目だからだ』という批判で、つい最近まではこの声をもっと大きく、材料技術者はただ黙々と批判に耐える材料の開発に努力してきた。しかし、最近になると、少しこの発言のトーンが変わった。それは、『もうこの先は材料に頑張ってもらわなければ駄目だ。よろしく頼む』ということで、裏返せば同じ意味なのだが、以前は山にのぼるのに、材料に後から押せといったのに対して、今は、材料が上から引張れというのであり、材料関係者はその重責をひしひしと感ぜざるをえない。

本書“未来を拓く先端材料”はこのような背景に立って、これからの材料への期待に応えるべくまとめた。未来はみずから拓くもので、待つものではないというのが、ともに執筆したわれわれの考えであり、したがって、本書では、ごく一部（例えば9章）を除いては、いわゆる夢の材料はとりあげていない。今すでに使われて技術革新に大きく寄与しているか、実用化に向って成長しつつある材料技術が本書の中心である。未来を夢見することは未来に近づくことの第1歩であるが、それよりも未来へのかけはしとなる技術についてまずまとめることを心がけた本書が、この時期に多少でもお役に立てば幸いである。

終りに、性格の異なる材料技術の内容を成書とするために努力を惜しまれなかった工業調査会出版部の古内正行、編集部の矢口正和の両氏に御礼申し上げる。

昭和57年11月3日

執筆者を代表して 島 村 昭 治

未来を拓く 先端材料 執筆者

- 編者 島村 昭治 (機械技術研究所材料工学部)
(執筆順)
- 松野 建一 (機械技術研究所材料工学部)
- 鈴木 朝夫 (東京工業大学精密工学研究所)
- 山崎 道夫 (科学技術庁金属材料技術研究所)
- 市川 冽 (機械技術研究所機工部)
- 鈴木 雄一 (古河電気工業㈱中央研究所)
- 鳥阪 泰憲 (機械技術研究所材料工学部)
- 大石不二夫 (鉄道技術研究所有機化学研究室)
- 森田 幹郎 (東京芝浦電気㈱総合研究所金属セラミック材料研究所)
- 柳田 博明 (東京大学工学部)
- 桑原 誠 (九州工業大学工学部)
- 阿部 弘 (旭硝子㈱研究開発部)
- 戸田 堯三 (㈱日立製作所生産技術研究所)
- 小林 和夫 (工業技術院九州工業技術試験所)
- 立石 哲夫 (機械技術研究所材料工学部)

目 次

1 章 文明史の中の材料	島村	1
1.1 文化と文明		1
1.2 物質と材料		1
1.3 衣, 食, 住と材料技術		2
1.4 材料技術の3要素		3
1.5 やきもの		4
1.6 青 銅		5
1.7 鉄		6
1.8 アルミニウム		9
1.9 プラスチック		10
2 章 技術開発のキーテクノロジーとしての材料技術	松野	13
——R&Dの壁を破るために必要とされる材料技術——		
2.1 はじめに		13
2.2 宇宙・航空関連分野		13
2.2.1 スペースシャトル		13
2.2.2 航空機		16
2.3 エネルギー関連分野		17
2.3.1 核融合		17
2.3.2 新エネルギー技術		18
2.3.3 省エネルギー技術		21
2.4 その他の分野		23
3 章 材料を設計する	島村	29
3.1 設計とは		29
3.2 今までの設計と材料の係わり——受動的な立場——		30
3.3 材料のより能動的なアプローチ		31
3.4 材料設計		32

4 章 先端合金	35
4.1 先端合金の開発動向	鈴木朝夫 35
4.1.1 材料開発の方法	36
4.1.2 製造技術からみた先端合金	38
4.2 超耐熱合金	山崎 39
4.2.1 超耐熱合金とは	39
4.2.2 超耐熱合金に要求される性質	40
4.2.3 ニッケル基超耐熱合金の開発	43
4.2.4 一方凝固法	44
4.3 超塑性合金	市川 46
4.3.1 超塑性合金——革新的な加工技術への期待	46
4.3.2 超塑性現象	46
(1) 微細結晶粒塑性	50
(2) 変態超塑性	51
(3) 変態誘起塑性	51
4.3.3 超塑性合金の加工技術	52
4.3.4 実用超塑性合金	52
(1) 最初の超塑性合金——亜鉛合金	53
(2) 構造材料——超塑性アルミニウム合金	58
(3) 超塑性ニッケル合金——難加工材成形法	54
(4) 超塑性鋼——多岐にわたるその用途	54
(5) 最新航空機材料——超塑性チタン合金	54
4.3.5 将来の展望	54
4.4 形状記憶合金と超弾性合金	鈴木雄一 55
4.4.1 形状記憶効果と超弾性	55
4.4.2 形状記憶合金と超弾性合金の応用	58
(1) 形状記憶合金の応用	58
(2) 超弾性合金の応用	60
4.5 防振合金	鳥阪 61
4.5.1 叩いてゴムのように音のしない金属	61
4.5.2 なぜ金属が音を吸収するのか	62
(1) 複合形	63

(2) 強磁性形	63
(3) 転位形	63
(4) 双晶形	63
4.5.3 防振合金にはどんなものがあるか	64
4.5.4 防振合金はどんなところに使われるか	66
4.5.5 今後、どのような防振合金が生まれるか	66
4.6 加工熱処理	鳥阪 67
4.6.1 材料の潜在能力を 100 %フルに発揮させる	67
4.6.2 加工熱処理にはどのようなものがあるか	68
(1) 鍛造焼入れ	68
(2) サブゼロ加工	68
(3) アイソフォーミング	69
(4) 温間加工	69
(5) ストレイン・テンパリング	69
(6) オースフォーミング	72
(7) TRIP	73
4.6.3 現在における加工熱処理の現状は	74
(1) 制御圧延	74
(2) スパイラルフィン付特殊ダイスによる伸線 S T 法	75
(3) 温間引抜き	76
(4) 鍛 造	76
(5) サブゼロ加工	76
4.6.4 今後の加工熱処理はどう進むか	76
5 章 エンジニアリングプラスチック	大石 81
5.1 エンジニアリングプラスチックの魅力	81
5.1.1 エンプラの特徴	83
5.2 エンジニアリングプラスチックの性能	86
5.2.1 エンプラの種類と特徴	86
(1) ナイロン (またはポリアミド, 略号 P A)	86
(2) アセタール樹脂 (POM)	90
(3) ポリカーボネート樹脂 (PC)	90
(4) PBT 樹脂 (PBT)	90

(5) 熱硬化性樹脂	91
5.2.2 エンプラの引張強度特性	91
5.3 エンジニアリングプラスチックの現状	98
5.4 エンジニアリングプラスチックの開発動向	99
5.4.1 材種別開発動向	99
(1) ポリエチレン系	99
(2) ポリプロピレン系	101
(3) ABS系	101
(4) ナイロン系	102
(5) ポリアセタール系	103
(6) ポリカーボネート	103
(7) PBT樹脂系	104
(8) フェノール樹脂	104
5.4.2 高耐熱樹脂の開発状況	106
(1) 芳香族ポリエステル	106
(2) ポリエーテルサルホン	106
(3) ポリイミド	106
6 章 複合材料	森田 115
6.1 複合材料の分類と開発動向	115
6.1.1 複合材料の種類	115
6.1.2 複合材料の歴史	116
6.2 軽量高強度材料	118
6.2.1 補強材料	118
6.2.2 複合材の特性	120
6.2.3 軽量高強度材料の用途	122
6.3 耐熱材料	123
6.3.1 繊維強化複合材料—W/FeCrAlY	124
6.3.2 一方向凝固共晶合金—Co-TaC	126
6.3.3 分散強化合金— γ/γ' -Y ₂ O ₃	126
6.3.4 耐熱複合構造—NiCrAlY/ZrO ₂ ·Y ₂ O ₃	127
6.4 耐食材料	129
6.4.1 電気絶縁用 SF ₆ ガスと粒子分散複合材料	129

6.4.2 ガラス短繊維強化複合材料——SMC の耐食性	130
6.4.3 グラファイト繊維強化材料	132
6.5 機能材料	133
6.5.1 レドーム (Radome)	133
6.5.2 X線診断用ベッド	134
6.5.3 超電導材料	135
6.5.4 粉末鉄心 (高周波磁心)	136
6.5.5 磁気テープ	137
6.5.6 永久磁石	137
6.5.7 バイメタル	138
6.5.8 ボロン繊維などの音響機器への応用	140
6.5.9 その他	140
7 章 ファインセラミックス	143
7.1 ファインセラミックスの開発動向	柳田 143
7.1.1 セラミックスからファインセラミックスへ	143
7.1.2 ファインセラミックスの機能と用途	145
7.1.3 将来展望	150
7.2 セラミックスの電磁氣的機能とその応用	桑原 150
7.2.1 セラミックスにおける電磁氣的機能のいろいろ	150
7.2.2 セラミックスにおける導電的機能と応用	152
(1) パリスタ	152
(2) 絶縁体および半導体特性	153
(3) 雰囲気センサ	154
7.2.3 セラミックスにおける誘電的機能と応用	155
7.2.4 セラミックスにおける磁氣的機能と応用	156
7.2.5 セラミックスにおける圧電的機能と応用	157
7.3 セラミックスの機械的機能とその応用	阿部 158
7.3.1 セラミックスの機械的性質	158
(1) ヤング率 (縦弾性率)	158
(2) 破壊靱性	159
(3) 強度と疲労	160
(4) 硬 度	161

7.3.2 機械的機能材料としてのセラミックスの応用	161
(1) 硬度, 耐摩耗性を利用する用途	161
(2) 高強度を利用する用途	161
7.4 光学的機能と応用	戸田 164
7.4.1 光学的機能をもつための微構造	164
7.4.2 耐熱・光学的機能と応用	165
7.4.3 耐蝕・光学的機能と応用	166
7.4.4 セラミックレーザへの応用	167
7.4.5 電気光学的機能と応用	167
(1) 画像メモリ, 表示装置	169
(2) マトリックスディスプレイ装置	170
(3) 光シャッタ	170
(4) アナログ空間変調器	171
(5) 数字表示素子	171
7.4.6 その他の機能	171
(1) フォトクロミズム	171
(2) 音響光学効果	172
7.5 セラミックスの熱的機能と応用	小林 172
7.5.1 熱的強度機能セラミックス開発の意義	172
7.5.2 材料の開発状況	173
(1) 炭化珪素 (SiC)	173
(2) 窒化珪素 (Si ₃ N ₄)	174
(3) サイアロン (Sialon)	175
7.5.3 熱的機能改善へのアプローチと実用化への問題	176
(1) 材料特性向上への課題	176
(2) 材料の信頼性, 大形化・複雑形状化への問題	177
(3) 評価法の確立その他	178
7.5.4 材料の応用と展望	178
8 章 生体用材料	立石 181
8.1 はじめに	181
8.2 生体用材料研究の最近の傾向	182
8.3 生体用材料の必要条件	182

8.4	金属材料	185
8.5	バイオセラミックス	187
8.6	高分子材料	188
8.7	生体用材料の将来	191
8.8	生体用材料の応用例	192
8.8.1	人工関節と骨セメント	192
8.8.2	人工関節のデザイン	195
8.8.3	固定法 (骨セメントを含む)	199
8.8.4	人工血管	202
9	章 知能材料	島村 207
9.1	機械の知能化, 材料の知能化	207
9.2	工業材料の本当の革命	207
9.3	たこのできる材料	209
9.4	硬軟に変化する材料	210
9.5	マテトロニクス	212
9.5.1	状態を外部に教える材料	212
9.6	さらに生体に近づく——新陳代謝	213

1 章 文明史の中の材料

1.1 文化と文明

文化と文明の区別は必ずしも明確でない。例えば 広辞苑を引くと、文化と文明の第1義は、それぞれ次のようであって、その区別はよく分らない。

文化 ①世の中が進歩し文明になること。文明開化。

文明 ①文教が進んで人知の明なこと。

さて、周知のように文化は culture、文明は civilization という英語にそれぞれ対応している。そこで、この二つの英語を P.O.D. で当たってみると、次のようになる (いずれも第1義のみを掲げる)。

culture (n.) trained & refined state of the understanding & manners & tastes.

civilization (n.) (esp.) advanced stage of social development.

そして 広辞苑においてはそれぞれ culture および civilization に対応する文化および文明の語義として、次を与えている。

文化 ③ (culture) 自然を自然のままゆだねておくことなく、技術を通じて人間の一定生活の目的達成に役立たせること (文化活動)。

文明 ② (civilization) ④人知が進んで開けた世の中。物質的にも発達し、特に機械の利用が行なわれて、人格尊重と機会均等などの原則が認められているような社会、すなわち近代社会⇔蒙昧、野蛮。

なお、同書では文化と文明を狭義に理解して、文化を宗教、道徳、学芸などの純精神文化と解し、これに対し、技術または物質文化をさして文明というとしている。

一方、有名な福沢諭吉の文明論の概略には、その緒論の始めに、『文明論とは人の精神発達の議論なり』とあり、またまた分からなくなるが、本書の立場からいうと、文明とは技術または物質文化をさすという狭義の解釈が理解し易い。

1.2 物質と材料

文明というものを前節の終りで述べたようであるとして、その歴史的展開の中で材料がどのように寄与してきたかを展望するのが本章の役割である。それでは材料とは何だろうか。それについて少し考えてみよう。

再び 広辞苑と P.O.D. にもどって、材料とその英語である material について語義を求める。

材料 ①ものを作るもと。原料、しろ。

material (n.) That from which something is or made.

さて、材料の定義でいうもと、material の定義にある That を構成するものは何だろうか。それは物質である。そこで物質という使いなれた言葉を理化学辞典に当たってみると、長い説明があるが、その始めの部分は次のように述べている。

物質 (Substance, material, matter) 古くは漠然と単にわれわれの感覚によって、その存在の一切を知られるもの、単なる空間とは異なった何か実質的なものの意味にとらえた……。

以下はその後の物理学的・化学的認識にかかわるもので略した。こうすると、目に触れ、手に触れるものはすべて物質ということになる。

そこで、材料というものにもう一つはっきりした概念を与えたい。それは、物質と材料とはどう区別するのかということである。上記の理化学辞典の対応英語の第1義の substance がまず物質に対応するとすれば、substance と material の区別となる。こんなことを論じている英書を知らないが、筆者の感覚でいうと、次のように区別したい。

「人間が目的意識をもってみた時、物質は始めて材料となる」。

これはすぐ分かるように、物質を材料の上位概念としてとらえ、物質＝材料でないとしており、その差を人間の目的意識の有無においている。

実は、こう考えると材料というものがよく分かるのである。考古学的人間がみた自然と、今のわれわれがみている自然とは、山、川、海あるいは動植物など、(動植物については多少の変化があったかも知れないが) まずほとんど同じであろう。そしてヒトがそれらの自然を構成している、いわゆる物質をただ漠然と眺めていただけでなく、何かの目的に使いだした時から、材料史が始まったといえるからである。

山の大きな岩も、それが砕けた石ころもそれだけでは物質である。しかし、石ころを加工し刃物を作ったり、もう少し時代が下り、それは現代にまで及んでいるが、岩山から四角なブロックを切りだして住居を築けば、始めて石が材料となったのである。その石の斧で動物を殺し、石のナイフで切り、空腹を満たした後に残った骨でナイフを作れば、骨もまた材料である。骨がスープの材料となったのはもっと後のことであろう。

1.3 衣、食、住と材料技術

前節に述べたように、文明を狭義にとらえ、人間の物質的・技術的な生活水準の高さというようにきめると、自から衣、食、住という言葉が浮かんでくる。さて、人間がヒトとしてその他の動物とは異なった道を歩みだした頃、始めに努力したのは、この三つの生活の基礎手段のどれであったろうか。

それが食であることはすぐ分る。というのは、衣や住がなくても、温暖な気候の下では死ぬことはないが、食がなければ生命を保つことはできないからである。食が満たされた時に人間は衣と住に関心をもつだろうが、その中でも、より技術に近い、すなわち文明史的に先に関心を示したのは衣である。というのは、住は天然のほら穴や木蔭がそのまま使えるけれ

ども、衣はたとえ腰みののようなものでも、多少の加工が必要だからである。そして、『衣食足りて礼節を知る』という言葉は、この二つが満たされて始めて人間が（動物と縁を切って）精神的側面を有するに至ることを示していると理解したい。

衣、食の次はもちろん住で、ここで岩穴や木の茂みに変えて始めて人工の住いを作るようになる。

ヒトは始め、自然の植物の実を拾ったり、動物を殺したりして、空腹を満たしていたのであろう。そのうちに畠を作って植物を栽培し、家畜として動物を飼うようになった（この方はいわゆる農耕より少し遅いらしいが。このように食物を収集することから生産することに進んだのは新石器時代人（9,000~3,000 B.C.）といわれている）。そして、そのためには木や石の利用だけでなく、金属も必要とされ、金属を利用する技術を身に付けたのも新石器時代人であるから、材料史も新石器時代から始まるというよいと思う。

さて、このような食糧の生産のためにはまず農耕用の道具が必要であり、それらは木で作られていた。また、収穫した小麦を粉にするには臼が必要だが、それは石から刻まれた。これらは、いずれも天然の木を切り倒して切ったり、削ったりして農耕のすきを作り、天然の石を削って石臼としたのである。

住も同様であって、山のほら穴から出ても、やはり石を積み上げたり、木の枝を組んでそれを葉で覆ったりして空間を囲んで住いとしたのであろうし、王宮と名付けられる家も石のかたまりが四角な石のブロックに変っただけで材料としての本質には変化はない。

衣も同様で、植物の葉や木の皮あるいは動物の皮を処理したものを身にまとっていたのであろう。これも天然の素材そのものを使っていたということからみれば、食、住のそれと変わらない。

ここで気付くのは、ここまでの材料史では人間はエネルギーとして、火のほかには自分の筋力だけを使っていたらしいということである（水車はヨーロッパではローマ時代に始まる）。そして、火を食物の調理以外に使いこなしたところに、材料史の次の進歩があったのである。

1.4 材料技術の3大要素

われわれの文明を支えている材料について、目の前にあるいろいろの製品を構成する材料を、それを構成するに用いられた原料にさかのぼって考えると、およそ次に示すような三つに大分類されることがわかる。

第1は、天然材料を単に形態的に変化させて物の用にたつようにしたものである。前節で触れたように人類が始めて農耕に使った“すき”は樫の木で作られていたが、これは森の樫の木を切って、削って組み立てたものである。また、原始人の刃物は、天然の石を加工して作ったものである。これらは、いずれも天然の木や岩の形態を変えたに過ぎない。

ピラミッドもその巨大さと建設技術にはおどろくが（2,500 B.C. 前後に主に作られている）、材料としては天然の岩石そのものにすぎない。

第2は、天然材料を原料とするのであるが、その形だけでなく質的にも変換して製品としたものである。その一つの例は、エジプト人が住居用のれんがをナイル川の泥を干し固めて作ったことである。

第2の例は金属の製造であって、周知のように銅器や鉄器は文明史のかなり始めの時期に登場している。しかし、現在のようにそれらを含む鉱石から銅や鉄の金属を抽出する技術の実用化は、ずっと後のことで、始めは天然の銅や鉄のみの鉱石（例えば鉄では隕鉄など）から銅や鉄の部品を作った。

第3世代は、いわゆる合成であって、天然にない材料を作り出すことである。その始めは、合成樹脂であって、ベークランド (L.H.Bakeland) の実用化したフェノール樹脂（商品名ベークライト）から*、わずか70年余りのうちに今のプラスチックエージが出現した。絹をしのぐナイロン繊維、鉄をしのぐ強さを有するアラミド繊維などはその輝かしい成果の一つであり、複合材料もプラスチック系が目下のところリードしている。しかし（天然に存在しない）合成材料は有機系だけでなく、無機系でも原子力時代をもたらしたプルトニウムなどの超ウラン元素や、タングステンカーバイドをしのぐ CBN（立方晶窒化ボロン）などがあり、20世紀は合成材料元年といってよいほどである。

さて、上に述べた材料技術の三つのカテゴリーのうち、第1の天然材の形態変化については本書で語る必要はあるまい。そして第2、第3のカテゴリーのうちから、人間の生活に大きな影響を与えた材料技術として、次の五つをとり上げてみたい。

- (1) やきもの
- (2) 青銅
- (3) 鉄
- (4) アルミニウム
- (5) プラスチック

1.5 やきもの

やきものはむずかしくいえば陶磁器といわれるように陶器と磁器に分かれる。陶器も磁器もともにその素地は長石、珪石、礬土（アルミナ）から成っているが、陶器の素地は磁器に比べると礬土、すなわち土分が多い、いわゆる粘土質であり、磁器の素地は土分の少ない珪石質である。それでは、土器、すなわち縄文土器や弥生土器といわれるものは陶器かというところ、広義にはそうであるともいえる。しかし、ここではそのような区別は不要である。というのは話は土器だけで十分だからである。

土器とは名のごとく粘土を固めて焼いたものである。何時の日か人間はこうにして手近に得られる粘土の固りから、穀物はもちろん、水を入れても漏らず、かつ火にかけて煮炊きのできる丈夫な容器を作る技術をおぼえた。すなわち粘土が材料となったのであり、材料

* 1909年に発売された

技術の名にふさわしい最初のものは粘土の焼成技術である。縄文土器はよく知られている特異な形態で印象付けられているが、そのもっとも古い砲弾形の底の尖ったものは今から約9,000年前にさかのぼることができるといわれているから、材料技術は9,000年の歴史を有しているのである¹⁾。しかもそれは日本人の創始になるのだから、低い鼻も少しは高くなる。したがって、材料元年は約9,000年以前といつてよさそうである。

そして、驚くべきことは、縄文土器の中期以後には明らかに粘土の中に雲母やシャモット(砂)を意図的に混合して、成形性を向上させる一方、焼成による収縮割れを防いでいる²⁾。これは、6章の複合材料に述べられている粒子分散強化の思想の萌芽に外ならない。

縄文土器の焼成温度は800～950°Cであつたろうということが、最近の実験的研究で確かめられている³⁾。さて、土器の成形で材料技術的に次に特筆すべきは、ロクロ(轆轤, potter's wheel)が発明されたことで、それまではひも状あるいは板状にのばした粘土を積みかねて成形したのであるが、ロクロにより碗や壺など回転対称品はきわめて能率的に成形されるようになった。すなわち、道具の発明である。ロクロが何時から使われるようになったかは分明でないが、中国の黒陶と呼ばれるものはロクロ成形されており、それは2,500～3,000 B.C. までさかのぼることができ⁴⁾、エジプトの1,900 B.C. の遺跡の中からロクロと焼成用かまどの中にいた陶工のモデルが見いだされているそうだから、今から5,000年近く以前頃からロクロは使われ始めたのであろう。

1.6 青銅

やきものに始まる材料技術史の次に続くものは銅、特に青銅である。もちろん金属利用の歴史からいえば、金やあるいは次節に述べる鉄の方が古い。それは金は純金に近い形で天然に存在しているし、鉄は純鉄として宇宙から贈られてくるからである。銅も天然に存在しているが、その量はわずかで、鉱石から取りだして人間の道具を作るには、まず鉱石を製錬して有用な金属のみを抽出し、ついでそれを必要な形に加工することが必要である。なぜ銅が製錬技術の始めに位置するかというと、恐らくそれは銅がもっとも製錬し易かったからであろう。

今日、銅はいろいろの鉱石から製錬されるが、古代人が用いたのはくじゃく石(malachite)である。それは $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ の化学組成を有する緑色の結晶で、炉内で加熱することにより、容易に銅がえられる。実はくじゃく石は名の通り美しい緑色をしているので、銅の原鉱として使われるようになった時代(約2,000 B.C.)よりはるか以前(少なくとも5,000 B.C.)から、化粧用の顔料、特にアイシャドー用として使われていたので、当時の人にはなじまれていた鉱石だったのである。いずれにせよ金属材料元年は約2,000 B.C. である。

鉱石を製錬し、かつ得られた銅を溶かして鑄造する技術も同時に獲得されたが、そのための加熱の技術は、先行したやきものの焼成によって確立されていた(銅の融点は1,083°Cであるから、土器の焼成温度を約200°C高めればよかった)。しかし、このようにして得られた銅は、いわゆる純銅であり、加工し易い反面、道具や武器として用いるには硬さが不足し