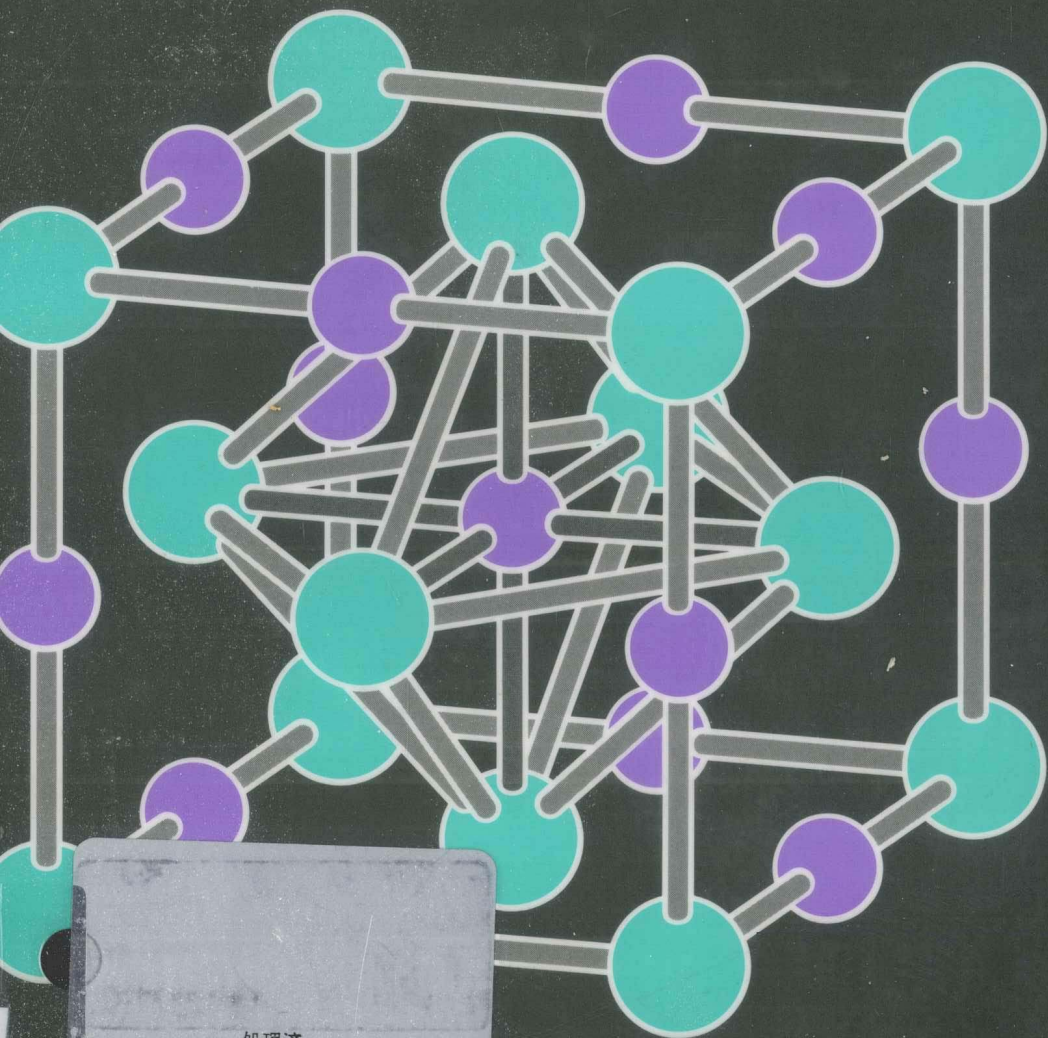


未来材料入門

材料基礎から未来コンピュータの素子まで

小山田了三 著



処理済

東京電機大学出版局



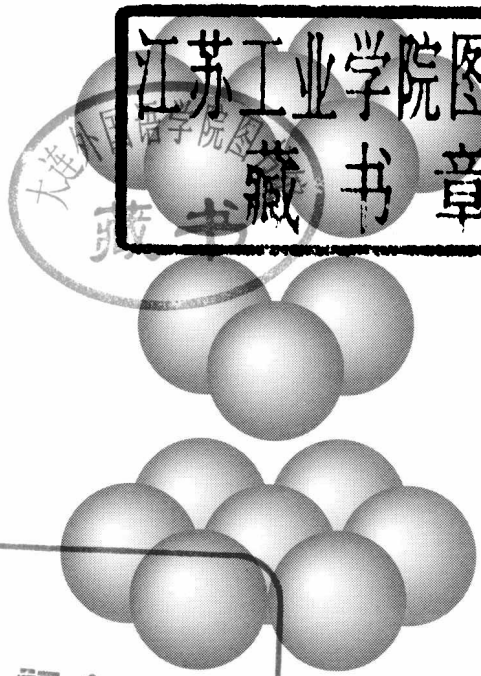
日文 701521774

未来材料入門

材料基礎から
未来コンピュータの素子まで

小山田了三 著

江苏工业学院图书馆
藏书章



日本財団支援

笹川良一記念文庫

財団法



東京電機大学出版局

〈著者紹介〉

おやま だりょうぞう
小山田了三

- 学歴 岩手大学(教)卒業(1955年), 後東京理科大学(理),
東京教育大学(理)に学ぶ
東京工業大学大学院修士課程修了(1964年)
工学博士(1973年)
- 職歴 中学校・高等学校教員(1955~1964年)
科学技術庁金属材料技術研究所主任研究官(1971年)
長崎大学教授(1978年)
ニューマテリアル開発研究所・シンクタンク代表
東京電機大学講師(1984年)
山梨学院大学教授(1986年)
一般教育部長(1992年)

未来材料入門—材料基礎から未来コンピュータの素子まで—

1995年10月30日 第1版1刷発行

著者 小山田了三

発行者 学校法人 東京電機大学
代表者 廣川利男
発行所 東京電機大学出版局
〒101
東京都千代田区神田錦町2-2
振替口座 00160-5- 71715
電話 (03)5280-3433 (営業)
(03)5280-3422 (編集)

印刷 三立工芸㈱
製本 懶徳住製本所
装丁 高橋壯一

© Oyamada Ryozo 1995

Printed in Japan

*無断で転載することを禁じます。
*落丁・乱丁本はお取替えいたします。

ISBN4-501-61420-X C3043

Ⓔ <日本複写権センター委託出版物>

はじめに

今日の技術の進歩はめざましい。中でも特に先端技術といわれる分野では、寸速秒歩と評されるほどの勢いの進歩を見せている。そして、これを利用して生まれてきた最新の機器は、私たちがかつての体験から見るとほとんど信じられないような便利、かつ快適な性格を持つものになっている。けれども、この種の機器にやや詳しい人であれば、そうした最先端の性質は、機器に使用している材料の特質から直接生み出されていることを知っている。つまり、最先端の分野の機器は材料が決め手なのである。しかし、こうしたきわめて高度な性格の材料の分野を見ると、一般の人々はこの分野に大変難しいという印象を抱きながらも、同時に、人々は現代の高度技術社会では、こうした知識は生活に欠かすことのできないものであり、ある程度は知っておきたい思いにとらわれていることも確かである。

一方、今日、理工系学部に入ってくる学生を見ると、基礎的知識の不足している学生も少なくない。しかし、そうした学生にもというより、そうした学生であればなおのこと、理工学の一般的あるいは体系だった理論をしっかり学ばせる必要があり、それはこの領域の一部である材料の分野においても同じである。

このような現状にも関わらず、今日まで数多く出版されてきた材料に関する本は、そのほとんどがある程度の専門的な知識を有する者のためのもので、真に初歩から学びたい人々が手にできる本はきわめて少なかった。そこで、こうした人々を対象に、高校時代の初歩程度の知識で、材料と呼ばれるものの全体とその概念を大ざっぱにとらえることができるような本を出したいという企画を東京電機大学出版局が出されたことは、まことに時を得たものと言える。そしてこれについて筆者が依頼を受けたのであるが、それは材料の分野にたずさわって久しい筆者にとって望外の光栄であった。

しかしその内容が幅広い材料全般に関わることであり、逡巡するところも少なくなかったが、筆者を含む余り専門家とは言えない一般の人々を対象にした本が出ることは、きわめて大切なことであるとかねがね考えていたので、これをお引き受けすることとした。

こうした考えから出たものであるから、本書の内容は、今まであまり人々が手をふれなかった「材料史」や、まだ確定した範囲を持たない「材料学」の領域を見渡す材料全般の基礎的な知識にできるだけふれる内容のものにした。また初心者にできるだけわかりやすいように解説し、文中には多くの事例を挙げ、難解な用語についても、できるだけ日常のわかりやすい言葉で説明するように努めた。そして材料の数学的表現は、ほとんどさけることにした。

以上のような点を考慮してまとめてみたが、筆者の力不足のために意を尽くせないところも多々ある。それらの点については先輩諸賢の御叱正、御指導をいただければ幸いである。

なお、本書の性質上いちいち挙げて記さなかったが、筆者が学んだ多くの諸氏の御著書からさまざまな御教示を頂いている。感謝申し上げたい。

最後に、本書の完成には、全般にわたって金属材料技術研究所 基礎物性研究部 主任研究官・八木沢孝平氏（工博）のご協力を、また第3, 5, 6章は鳥取大学工学部機械工学科助手・小山田隆信君（工博）の協力を得た。そして出版に当たっては、今まで筆者の著書を幾度となく手がけて下さった編集課長朝武清實氏に御尽力をいただいた。付記して深く感謝申し上げたい。

この本が、これから「材料学」を目指す人々の何らかの手助けとなれば筆者の大きな喜びである。

1995年3月

筆者記す

目 次

序 章 人類と材料

第1章 材料の歴史から何を学んだか

1.1 石から土へ	4
1.2 金属の発見と使用	6
1.3 プラスチックの誕生	8
1.4 セラミックスの再生—ニューセラミックス—	10
1.5 半導体と超格子材料の時代	11

第2章 材 料 基 礎

2.1 材料の構造	15
2.2 材料の構造と原子の詰まり方 (packing)	19
2.3 原子の構造	25
2.3.1 原子の中の電子軌道	25
2.3.2 電子の振舞いと波動関数	29
2.4 原子の結合—結合力と結合の仕方—	30
2.4.1 イオン結合と電子軌道	31
2.4.2 共有結合	35
2.4.3 結合の割合と電気陰性度	39
2.5 原子とイオンの半径	41
2.5.1 電子軌道の形と電子の入り方	41
2.5.2 遷移元素の軌道への電子の入り方	43
2.5.3 原子半径とイオン半径	43
2.5.4 共有結合半径	47

2.6 結合の起動力—イオン化ポテンシャルと親和力—	47
2.6.1 イオン化ポテンシャル	47
2.6.2 電子親和力	49
2.6.3 2量を用いた化合物の生成の検討	50
2.7 結晶の構造	50
2.7.1 結晶の基本構造	51
2.7.2 結晶構造の分類	54
2.7.3 アモルファス物質の構造	56
2.7.4 有機材料の構造	59
2.8 結晶のバンド構造	63
2.8.1 バンドの発生とバンドの状態	64
2.8.2 成分原子と結晶のバンド	70
2.8.3 化学結合によるバンドの説明	72

第3章 金属材料

3.1 水素吸蔵合金	75
3.1.1 水素の吸蔵・放出の仕組み	75
3.1.2 金属格子の中の水素の席	76
3.1.3 水素化物の結合状態	78
3.1.4 水素吸蔵合金における水素の反応	81
3.1.5 合金の水素化反応熱の利用	84
3.1.6 水素吸蔵合金の利用	86
3.2 アモルファス合金	88
3.2.1 アモルファス合金の条件	89
3.2.2 アモルファス合金の特性	95
3.3 アモルファス合金の磁性材料	102
3.3.1 フェロ磁性体とフェリ磁性体	102

3.3.2	アモルファス合金の省エネルギー性	106
3.4	磁性体のひずみの利用	109
第4章 ニューセラミックス		
4.1	高温材料としてのニューセラミックス	111
4.1.1	ニューセラミックスの自動車材料への応用	113
4.1.2	窒化ケイ素セラミックスの結晶構造	115
4.1.3	窒化ケイ素の応用	118
4.2	超伝導とその利用	119
4.2.1	超伝導を示す現象－完全伝導性と完全反磁性－	120
4.2.2	超伝導小史	122
4.2.3	酸化物系超伝導体とその構造	126
4.3	ニューガラス	132
4.3.1	ニューガラスの特性	133
4.3.2	ニューガラスの非線形的性質	135
4.3.3	非線形現象の原因	139
4.3.4	微結晶による非線形現象	141
第5章 半導体		
5.1	ダイオードとトランジスタ	144
5.1.1	ダイオード	145
5.1.2	トランジスタ	146
5.1.3	レーザダイオード	147
5.2	光集積回路	150
5.2.1	集積回路 (IC) と光集積回路 (光 IC)	150
5.2.2	光 IC の種類	153
5.2.3	光電子コンピュータ	154

5.3 半導体超格子素子	155
5.3.1 超格子のバンド構造	159
5.3.2 超格子構造の作成	162
5.3.3 超格子構造が生む特性	163
5.3.4 超格子の応用	166

第6章 複合材料

6.1 材料の複合と複合の理論	172
6.1.1 複合と複合材の分類	172
6.1.2 複合の理論	175
6.2 繊維強化プラスチック	177
6.2.1 繊維強化プラスチック (FRP)	177
6.2.2 炭素繊維強化熱硬化性プラスチック	178
6.2.3 高性能炭素繊維強化プラスチック	178
6.3 金属系複合材料	180
6.3.1 分散強化型合金	181
6.3.2 繊維強化型合金	183
6.3.3 クラッド材	186
6.4 セラミックス系複合材料 (FRC)	188
6.4.1 セラミックス系複合材料の強靱化機構	188
6.4.2 ミクロおよびナノ複合材料	191
6.4.3 用 途	194
6.5 高性能 C/C コンポジット	195
6.5.1 材料特性	196
6.5.2 C/C コンポジットの用途	201

第7章 有機材料

7.1 有機材料の機能	204
7.1.1 熱可塑性高分子材料	205
7.1.2 先端機能	208
7.2 光化学ホールバーニング効果	208
7.3 分子設計と機能設計	215
7.4 有機非線形材料	220
7.5 有機分子電子デバイス	225
索引	228

序章 人類と材料

46億年といわれる想像を超えた長い地球の歴史の中で、生物の誕生は約40億年前であり、人類の誕生はわずかに500万年前であったという。

この長い地球の年齢を今の1年に例えてみれば、元旦に誕生した地球上に、春4月1日に生物が発生し、除夜の鐘が鳴り始める12月31日の午後4時近くに人類の姿が見られるようになったということになる。それは、人類がたどってきた長い歴史も地球の年齢に比べると、1日の数分の1ほどの時間にしかすぎず、人類はこの短い時間に自らの文明を築き上げてきたことを示している。

人類はまず生まれてすぐ(ヒトの頃)、周囲にある手頃な石や細い木の枝を道具として使い始めた。まもなくヒトの生活が樹上から地上へ移って、2本足で歩き出すようになると、手が解放された。人は本格的に道具を作り、これを使用し始めた。

やがて火の使用(50万年前頃)が始まり、これによるさまざまな体験を重ねて、人類は自ら使う材料を積極的に作り出すまでになった。その後の人類は、自ら開発したさまざまな材料の助けを借りて生活を維持・発展させながら現代の文明を築き上げてきたが、今日に残された先人たちの数多くの作品は、そのことを明確に物語っている。

これらの軌跡を材料の歴史に直してみると、それは大まかに石器・木材・土器・青銅器・鉄器・ガラス・鉄鋼、プラスチック、および半導体を含めたファインセラミックスという順に歩んできたと言うことができよう。

これらの材料の発展の跡を、歴史を学ぶ手法に従って、もう一步踏み込んで見ていけば、ある時代に新材料がなぜ生まれ、どのようにして開発され、なぜそれが選ばれたのか、その理由を読みとることができるはずである。そしてそれは、人類の過去の文明の進歩を支えてきた新材料の発見・開発の歴史であるとともに、

人類の未来材料の開発の手がかりを与えてくれるものになるはずである。
そこで、次章では、まずこの点について見てみよう。

第1章 材料の歴史から何を学んだか

500 万年前に出現したと言われている人類が、誕生してまもない頃から他の動物と異なっていた最大の特徴は、立って歩く（二足歩行）ことであった。この動作は人の手を開放し、集中して他の目的に使用することを可能にして、幼稚ながら自分の考えたものを作り出させ、人の手と大脳の発達を急速に促すこととなった。人間はその発達した知能を働かせて、より複雑な道具を作り出すようになり、石器等の簡単な道具に始まった技術は、今日のハイテク機器の開発という信じ難いほどの高度なレベルに到達させるまでになった。

ところで、石器からハイテクに至る長い道筋の中で、人間が作り出してきた無数ともいえる道具や機器の製作を支え続けてきたのは、単純な道具あるいは複雑な機器を問わず、人間が発見し、開発し続けてきたさまざまな材料であった。それは天然の石や木に始まり、現在では自然には存在しない物質を人工的に作り出し得るまでに発展してきているが、これらの材料がなければ、今日までのいかなる道具も機器も、その製作は不可能であったことはあえて説明するまでもないことである。

その意味で人類の歴史は、一面から見れば、材料開発の歴史だったと行うことができ、さらにその歴史は、これからの未来においても人間が材料開発という頁を加え続けて行くことを強く示唆しているものでもある。そこでここでは、今日までの材料の歴史をつぶさに振り返り、その変遷をたどりながら、それから私たちが何を学んだのかを分析し、その示唆する将来の材料開発の方針、手法についても考えてみることにしよう。

1.1 石から土へ

人類の最初の材料である石は、人類誕生の当初から固くて（性質）入手しやすく、かつ安い材料（価格）として、ヒトに使用されていた。この長い石器時代（40万年以上）が始まると、人間はすぐ石にはさまざまな種類があり、固さにもそれぞれ違いがあることに気付いた。やがてその中からナイフや鎌として利用できるもの（黒曜石、水晶）を発見し、同時にこれらの加工法（石器製作の技術）も開発し出した。

こうした加工法がすでに50万年以上前に生み出されていたことを、今日私たちは、上高森遺跡（宮城県築館町）等から発掘した石器や、北京原人（40万年前）が残した石器に見ることができる。この石の使用から、人類は①それぞれ石（材料）が持つ違った性質や、②加工法、さらには③入手の難易による価値の違い等について学んでいった。そしてそれらとともに BC 1 万年以上前までには、人間は、実用の面で石は大変有益な材料ではあるが、加工性・成形性に難があり、製品の精密性にも欠け、大型の容器には成形できないという欠点に打ち当たることとなった。

表 1・1 石器・土器の特徴

	石 器	土 器
時 代	BC 40 万～1 年	BC 13000 ～ AD 300 年
製 作 法	砕く、割る、削る、磨く 作業により作る。	粘土性の土を成形し、焼成し て(初800℃、後1100℃)作る。
使 用 法	狩猟・農耕・調理	容器（食器用、保存用）

まもなく人間は、こうした欠点を補える材料を探し始め、長い時間をかけて土器の材料となる粘土を発見した。今日の日本列島に住んだ人々は、すでに BC 1 万年以上も前に土器を作り始めたことがわかっている。一方、ヨーロッパ大陸では、粘土を日干しれんがやモルタル等として、BC 1000 年前頃に使用し始めたが、その 100 年ほど後に、粘土を成形・焼成して土器を作り始めたことが知られている。いわゆる、今日で言うセラミックス材料の発生である。

こうして生まれた土器は、水や木の実を保存したり、食材料の容器あるいは運搬のための入れ物として広く利用され、今日見られるさまざまな容器のスタートとなった。

この加工・成形しにくい石材料から、それが可能な粘土材料へという新材料の開発は、より望ましい材料を求め続けるという、人類によって現在も続けられている材料開発の歴史の第一歩を飾るものとなった。

【土器製作法の進歩】

新しい材料である粘土を用いて作られる、土器の加工（製作）技術も徐々に進歩していった。

わが国の土器の製作は、縄文時代より少し前に始まったとされているが、その土器作りも、初めは大きな^た焚き火の中で焼く手法で行われていた。その長い経験の後に、人間はやがて地面に穴を掘って囲うことにより、強い火力を得ることができると知り、まもなく^{かま}窯が使用されるようになった。この窯の使用によって土器の焼成温度も先土器時代の数 100℃から 1000℃程度へと高められて、作られる土器の強度も格段に上がっていった。さらに年代が下がって AD 10 世紀頃には、原料にある種の粘土長石成分を混入すると、陶器が緻密になることが発見されて、良質の陶磁器の開発につながっていったのである。このことは、新しいよりよいものの製作には、周辺の製作条件の発達と開発も必要であることを示している。

この長石成分（^{うわぐすり}釉）の発見によって、土器は水漏れを防ぎながら美しさを併せ持つものとなり、その後、美しい実用品としての本格的な陶器の製作が始まった。

ここで発見された釉は、はるか後の近代に至って材料の成分が化学的に明らかにされるようになると、陶磁器を焼成する際に、その一成分である長石が粘土の粒子をつなぐ働きをしていること等が発見された。

一方、セラミックスの一種であるガラスの歴史は非常に古く、エジプト、メソポタミア等の古代オリエン文明時 (BC 3000 年頃) までさかのぼり、この頃すでにガラスが作られていたという記録が見られる。この時代のガラスはまだ不透明

なもので、装飾・祭禱用の玉等として用いられていた。その後、ガラスは食器・容器として長い歴史を経て、中世にはステンドグラスとして社会の表舞台でその美しさを人々に見せるようになった。しかしこれが広く、かつあらゆる場面で人々に本格的に使用されるようになったのは、ガラスの生産が工業化された20世紀初頭に入ってからであった。

ところで、BC 1万年以上前からの粘土利用が始まってまもなく、人間は粘土は石に比べて成形性の良い優れた性質を持つ材料ではあるが、それで作成された土器は強度の点で大いに難点のあることに気づいた。そして人間は、石のように堅く、かつ土器のように成形加工しやすい新しい材料を求めるようになった。

1.2 金属の発見と使用

石と粘土（セラミックス）の後に、人類が発見し、使用し始めたのは金属であった。金属はたまたま火の周りに置かれていた自然石（鉱石）や、祭等で火の中に投げられた石（鉱石）が溶け出し、発見されたと考えられている。また、あるもの（鉄）は隕石によって知られたとも考えられる。これらの新しい材料の中で、人間が初めて使ったのは、溶けやすい銅（融点1083℃、BC 5000年頃）であった。

しかし、銅を溶かして固めたものを使用しているうちに、人間はやがて銅とスズが溶け合ったものを発見し、銅より硬い青銅（BC 3000年頃、銅とスズとの合金）を使用し始めた。この合金（青銅）について言えば、支那大陸ではすでに周の時代（BC 1000年頃）に、使用する器物に応じて固さをコントロールするための、銅とスズとの混合比（金の六斉と呼ばれた）が確立していたことが知られている。

この経験から、人間は鉱石を焼いて金属（ここでは銅）を取り出せること、それは溶かして使えること、単体では柔らかくて使用が限られるもの（金属）でも、他の成分（ここではスズ）を加えること（合金化）により強くすることができ、利用範囲を広げることができることを学んだ。すなわち新しい材料（合金）の開発と、その改良法を会得したのである。この鉱石を焼いて含有成分を抽出すると

いう金属の製法を利用して、人間はまもなく鉄を発見し、使用するようになった。

鉄の本格的な利用は、ヒッタイト人によって始められた(BC 1500年頃)とされている。この新しい材料(鉄)は強度の面で、石、土、青銅等の材料よりはるかに優れており、加工・成形は難しい(赤熱してたたく)ものの、希望の形のものを作ることができるものであった。この新材料の鉄は、展性、延性といった金属の新しい性質(表1-3)を教えてくれた。やがてこれらの技術が伝わって、わが国の鉄器使用はBC 3世紀頃に始まっている。

後代(8世紀以降)のわが国の鉄製造において、特に注目すべきは、鉄に微量の炭素を固溶させることで、その性質(ここでは鉄の固さ)を著しく変えることができるという効用を、木炭で加熱(同時に加炭することになる)した鉄を打つ(炭素の拡散を促進)というマクロな感覚を通して鍛冶たちが知っていたことである。このように、人間は金属を使用しながら、目には見えないミクロな他種成分の混合によってマクロな金属の性質をコントロールできるということも学んでいった。

表1-2 鉄(鉄器)の長所・短所

項目	評価	現 代
強 靱 性	◎	種々の合金にする。
加 工 性	○	機械化による加工
展 延 性	○	機械化による加工
経 済 性	◎	大量産出
耐 食 性	×	メッキを施す、塗装する。
導 電 性	○	現在はあまり使用しない。

◎大変よい。○普通 ×悪い。

その後の長い年月の間に、人類はさまざまな金属(重金属・軽金属等)を発見し、これらを使用しながら、金属の長所、短所(表1-2)を一つひとつ学び、さらにこれを改良する方法を開発して、後の本格的な合金の時代へとつなげていったのである。そして15世紀になると、鉄を大生産する方法(高炉法)が発明され、鉄の一般化とともに機械への使用が始まり(17世紀)、人類は本格的な金属製機械