

物質の世界目次

物質を構成する要素	1
微視的世界を支配する法則	2
量子力学をつくった科学者達.....	4
物質世界における原子，分子の集団的振舞.....	6
物質のかたち	9
分子性物質の特殊な存在のかたち：液晶	12
物質中での電気伝導 ...絶縁体，導体，半導体	15
低温の世界.....どのようにして到達でき，そこでは何が起こるか	17
低温の世界での物質の不思議なふるまい...超伝導と超流動.....	19
絶対0度よりも低いマイナス温度の世界はあるか。...レーザー光.....	21
セラミックスと高温超伝導物質.....新素材と我々の未来.....	24
物質の磁氣的性質...常磁性，反磁性，強磁性，反強磁性，フェリ磁性.....	29
物質の磁性と現代社会...マルチメディアと磁気媒体	34
物質中での光の伝導...光ファイバーと我々の世界.....	39

物質を構成する要素

電子 electron, 原子 atom, 分子 molecule

原子

原子：原子核 + 電子

原子の構造, 原子番号, 原子スペクトル

原子の種類

周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																
	(IA)	(IIA)	(IIIA)	(IVA)	(VA)	(VIA)	(VIIA)	(VIII)	(IX)	(X)	(XI)	(XII)	(IIB)	(IIIB)	(IVB)	(VB)	(VIB)	(VII)	(VIII)															
1	¹ H																		² He															
2	³ Li	⁴ Be											⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne																
3	¹¹ Na	¹² Mg											¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar																
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr																
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe																
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn		
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr																	

* ランタノイド ⁵⁸Ce - ⁷¹Lu
** アクチノイド ⁸⁸Ra - ¹⁰³Lr

図1 新しい周期表
IUPAC 新編化学命名法改訂版(1988)による番号は1~18、カッコ内は従来の番号方式による表、日本化学会は1992年より両者を併記する移行措置をとる。

原子の大きさ ~0.1nm 国際単位系 (SI 単位系) について
SI 単位には Cal はない。

SI 基本単位	
長さ	メートル m
質量	キログラム kg
時間	秒 s
電流	アンペア A
熱力学温度	ケルビン K
光量	カンデラ cd
物質	モル mol

SI 接頭語			
10 ²⁴	エクサ	exa-	E
10 ²¹	ペタ	peta-	P
10 ¹⁸	テラ	tera-	T
10 ¹⁵	ギガ	giga-	G
10 ¹²	メガ	mega-	M
10 ⁹	キロ	kilo-	k
10 ⁶	ヘクト	hecto-	h
10 ³	デカ	deka-	da
10 ⁰	デシ	deci-	d
10 ⁻¹	センチ	centi-	c
10 ⁻²	ミリ	milli-	m
10 ⁻³	マイクロ	micro-	μ
10 ⁻⁶	ナノ	nano-	n
10 ⁻⁹	ピコ	pico-	p
10 ⁻¹²	フェムト	femto-	f
10 ⁻¹⁵	アト	atto-	a

分子

分子の形：球形 希ガス分子
ラグビーボール形 H₂, O₂, N₂
直線形 CO₂
折線形 H₂O
.....

固有の名称をもつ SI 派生単位			
量	名称・記号	他の単位との関係	
距離	ヘルツ Hz	s ⁻¹	
力	ニュートン N	m·kg·s ⁻²	
圧力、応力	パスカル Pa	N/m ² m ⁻² ·kg·s ⁻²	
エネルギー、仕事、熱量	ジュール J	N·m m ² ·kg·s ⁻²	
仕事率、放射能	ワット W	J/s m ² ·kg·s ⁻³	
電気量、電荷	クーロン C	A·s	
電気容量	ファラド F	C ² /J m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻² ·A ⁻²	
電気導度	シーメンス S	C/V m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻² ·A ⁻¹	

微視的世界を支配する法則

我々の常識とは何だろうか。

微視的世界

我々が直接目で見ることのできない原子や分子の世界

10^{-10} m を長さの単位として測定される世界

巨視的世界

我々が直接目で見ることのできる世界

(地球上の自然現象, 宇宙の出来事は巨視的世界で起こる現象である)

1 m の長さを単位として測定される。

巨視的世界で成り立つ法則は微視的世界でも成り立つだろうか。

巨視的世界で成立する法則の特色

物体の運動

因果律 causality が成立する。原因と結果, 結果の予言が可能

物体の運動に対して, 任意の時刻における位置と速度の同時測定が可能である。

(物体の運動の軌跡)

電磁波, 電波, 光

波動現象

巨視的世界では, 物体(粒子の集まり)と波動は全く別物であり, 前者はニュートンの運動方程式, 後者は Maxwell の電磁気学に従う。

微視的世界の住民の不思議な振る舞い

光子ないしは光量子 photon

光は波動だろうかそれとも粒子だろうか。

Planck : 黒体輻射, Einstein : 光電効果

電子 electron は粒子か

粒子性と波動性

ドブロイ波 de Broglie wave(1924) $p = \frac{h}{\lambda}$

微視的世界の特徴

粒子性と波動性の 2 重性 duality

粒子性: 数えることが可能, その運動は軌跡(軌道)をもつ(因果律の成立)

波動性: 場所的な広がりを持ち, 干渉, 回折を示す。

我々は微視的世界を理解しきれぬか。

我々の常識，知識は巨視的世界の現象を当然のものと認めることから，出発し，そこで出来上がったものである。我々の意識も，巨視的世界の反映にすぎないといえる。数学を含む自然科学の記述の手段もその範疇にある。

微視的世界に対する 2 つの解釈

(1) 観念論的解釈：ヨーロッパ

我々は，微視的世界を直接見ることはできないのだから，その本質を論じること自体無意味である。本質は数式の中に発散している。

(2) 唯物弁証法的解釈：日本，ロシア

波動性と粒子性の両立する世界とはどのようなものかを出来る限り，物質サイドから論理的に解釈する。

思想的立場，イデオロギーの問題。

観念論：物質的世界の客観的存在を否定し，世界は個人の主観の観念にすぎないとする立場

唯物弁証法：世界は固定的な事物の複合ではなく，新たなものの生成，量から質への転化，古いものの消滅という諸過程の複合として存在し，一切の事物は，他の事物との相互関係にありながら，自己の諸過程内部における対立物との闘争により自己運動を起こし発展するとする考え方。（色即是空，空即是色）

アメリカにおける天地創造論と進化論 creationism と evolutionism

量子力学をつくった科学者達

シュレーディンガー Schrödinger を中心とする物理学者

プランク (M. Planck, 1858 ~ 1947)

ドイツの物理学者。ミュンヘン大学を卒業，1889年，キルヒホッフの後任としてベルリン大学に招かれ，3年後に教授となる。はじめは主として熱力学の研究をしていたが，ベルリンに移ってから熱放射の研究にはいり，量子仮説を提唱し，それが量子論の発端となったが，本人はむしろ保守的な立場をとりつづけた。



ボーア (N. Bohr, 1885 ~ 1962)

デンマークの物理学者。コペンハーゲン大学を出て，イギリスでJ. J. トムソンとラザフォードの指導を受け，帰国後ラザフォード模型に量子論を適用し，対応原理にもとついて水素原子のスペクトル系列の説明に成功した。1916年，コペンハーゲン大学教授となり，1921年に開設された附属研究所に世界の俊英を集め，量子力学の形成に指導的役割を果し，波動関数に対するコペンハーゲン解釈を確立した。また，原子核研究では複合核モデル，核分裂の理論を提唱。第2次世界大戦中にイギリス，さらにアメリカに渡り，原爆の開発に協力した。



ド・ブロイ (L. de Broglie, 1892 ~ 1987)

フランスの名門貴族の出身。ソルボンヌで，はじめ歴史学を学んだが，兄の影響で物理学に転向。1932年，パリ大学教授。1923年，電子の波動性を提唱し，ボーアの量子条件の本質の解明に成功。アインシュタインによりその重要性が認められ，シュレーディンガーの波動力学の形成の大きなきっかけをつくった。しかし，波動関数の確率解釈に関しては，ときに動揺を示しながらも，反対意見をもちつづけた。



シュレーディンガー (Schrödinger, 1887 ~ 1961)

オーストリアの物理学者。ウィーン大学に学び，チューリッヒ大学，ベルリン大学などの教授を経て，ナチスを嫌ってアイルランドに渡り，ダブリン高級研究所長となる。第2次大戦後帰国し，ウィーン大学教授となる。はじめ色彩論の研究をしていたが，1926年，ド・ブロイのアイデアを発展させて，波動力学を創始した。また，これとは独立に発見された行列力学と波動力学の等価性を示した。しかし波動関数の確率解釈に反対し，“シュレーディンガーの猫”として知られる思考実験を考えた。その後は，一般相対論，統



計力学，生物物理の研究に転じた。

ボルン (M. Born, 1882 ~ 1970)

ドイツのユダヤ系物理学者。ゲッチンゲン大学に学び，ベルリン大学を経て，1921年，ゲッチンゲン大学教授。1925年，ハイゼンベルグ，ヨルダンと協力して行列力学をつくり，また波動関数に確率解釈を与えた。なお，ハイゼンベルグのアイデアが行列で表現できることに気付いたのはボルンであった。1933年，ナチスの圧力を受けてイギリスに渡り，エジンバラ大学教授となり，戦後ドイツに帰った。また，結晶格子の研究，自己エネルギーの発散の困難を克服するための非線形電磁力学の研究などが有名である。多くの著書があり，とくに『光学』は現在でもよく読まれている。

ハイゼンベルグ (W. Heisenberg, 1901 ~ 1976)

ドイツの物理学者。ゾンマーフェルト，ボルンおよびボーアに学び，乱流の研究で学位をえた後，1925年，行列力学を創始した。1927年，不確定性原理を発見し，量子力学の物理的基礎を与えた。1927年よりライプツィヒ大学教授，1941年よりベルリン大学教授。1955年，マックス・プランク研究所長。この間，強磁性の理論，パウリと共同して場の量子論を確立し，1932年には原子核が陽子と中性子から構成されるとして原子核物理学の飛躍的發展をもたらした。またアイソ・スピンの概念を導入した。さらにS行列の理論など現代物理学の中心課題の発展に対して，つねに指導的役割を果たした。



ディラック (P. A. M. Dirac, 1902 ~ 1984)

イギリスの物理学者。ブリストル大学で電気工学を学び，1925年，ケンブリッジ大学で統計力学を研究。そのころハイゼンベルグの仕事に啓発されて量子力学の研究に転じ，量子力学の一般的定式化に成功した。名著『量子力学』の内容のほとんどが，ディラックのオリジナルの研究にもとづくものである。その後ボーアの指導を受け，はじめて光の量子論を創り，また1928年には，電子の相対論的波動方程式を発見した。その他，多時間理論，単磁極の理論，重力場の量子化など多くの重要な業績がある。1932年，ケンブリッジ大学教授。1969年からフロリダ州立大学教授。

以上は砂川重信著「量子力学の考え方」岩波書店の中から，スキャナーで取り込んだものである。

量子力学の解として得られる例

原子軌道関数 Atomic Orbitals 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d,.....

物質世界における原子，分子の集団的振舞

.....統計力学とは何だろうか

物質世界を構成する 2 種類の粒子

ボース粒子，ボソン boson

光子，スピン量子数が整数の（電子，陽子および中間子の総和が偶数である）原子

個性に乏しい，協動的，陽気な（？）性格の粒子

低温ではすべての粒子が同一状態を占めることが出来る

空間の対称性：粒子を入れ替えても不変

ボース-アインシュタイン統計に従う

フェルミ粒子，フェルミオン fermion

スピンが半整数の粒子，電子，陽子，中性子，スピン量子数が半整数の原子

個性的，排他的，陰気な（？）性格の粒子

すべての粒子は異なる状態にある

反対称性空間：粒子の入れ替えに対して空間は反転する

フェルミ統計に従う

温度とは何か(Dictionary of Physics 3rd Ed., Longman)

temperature Symbol: T . The property of an object that determines the direction of heat flow when the object is brought into thermal contact with other objects : heat flows from regions of higher to those of lower temperatures. (See thermodynamics (second law).)

This definition merely allows one to place in order of temperature a number of objects. To assign numerical values, it is necessary to establish a scale of temperature. The only temperature scale now in use for scientific purposes is the *International Practical Temperature Scale, temperature being expressed in *degrees Celsius or *kelvins. Temperature is a measure of the kinetic energy of the molecules, atoms, or ions of which a body or substance is composed. The *thermodynamic temperature of a body is now treated as a physical quantity and is measured in kelvins .

The measurement of low and moderate temperatures (roughly up to 500) is usually classed as thermometry while pyrometry covers the high-temperature ranges.

温度計：thermometer, 高温計：pyrometer

温度目盛 temperature scale

セ氏目盛 (Celsius scale)

華氏目盛 (Fahrenheit scale)

ケルビン温度目盛 (Kelvin scale)

セ氏目盛 (centigrade or Celsius scale) は 1742 年に、スウェーデンの天文学の教授セルシウス (Anders Celsius, 1701-1744) によって導入されたものである。この目盛では、空気で飽和した水の凝固点の温度は 0 であり、沸騰する水の温度は 1 気圧のもとでは 100 である。

英語を話す国で日常生活に用いられている華氏目盛 (Fahrenheit scale) では、水の凝固点は 32 °F で、水の沸点は 212 °F である。この目盛では、凝固点と沸点とは、セ氏目盛におけるような 100 度ではなく、180 度もちがっている。温度を一つの目盛から別の目盛に換算するには華氏目盛がセ氏目盛の $\frac{100}{180}$ または $\frac{5}{9}$ であり、0 が 32 °F と同一温度であることを記憶しておきさえすればよい。

華氏温度はダンチヒに生れ、オランダに定住した自然哲学者ファーレンハイト (Gabriel Daniel Fahrenheit, 1686-1736) によって案出された。彼は 1714 年に水銀温度計を発明した。それ以前には、アルコールが温度計の液体として用いられていた。目盛の零点として、彼は自分で得た最も低い温度、すなわち、等量の雪と塩化アンモニウムとをまぜることによってえられる温度をとった。水の沸点として彼が 212 °F をとったのは自分の体温が 100 °F になるようにするためであった。人体のふつうの温度は 98.6 °F である。たぶんファーレンハイトは温度計の目盛検定をやっていたときに、少し熱があったのであろう。

約 200 年前、科学者たちは、気体を冷却すると体積は、規則正しく減少することに気づいた。そしてもし体積が、ずっと同じ調子で減るとすると、約 - 273 で零になるということを知った。この温度 - 273 (より正確には - 273.15) が最低な温度である、すなわち、絶対零度であるという考えが発展した。そして、新しい温度目盛が、イギリスの偉大な物理学者、ケルビン卿 (Lord Kelvin, 1824-1907) によって案出された。ケルビン目盛 (Kelvin scale) は、熱力学の法則が簡単な形であらわせるように定義されている。

SI 温度目盛は、度の新しい定義を用いたケルビン目盛である。すなわち絶対零度 0 K とし、水の三重点が 273.16 K としている (温度 273.16 K, 圧力 0.006 気圧では、水は、純粋な、液体の水、氷、そして水蒸気の三者が共存する。これを水の三重点 triple point という)。度に対するこの定義を用いると、1 気圧のもとでの水の沸点は 373.15 K であり、空気で飽和した水の 1 気圧 (atm) 下での凝固点は 273.15 K である。だから、SI ケルビン温度は 273.15 K だけセ氏温度よりも大きい。

(ポーリング著一般化学、岩波書店 6-7p)

気体分子の速度分布

マックスウェル-ボルツマン分布

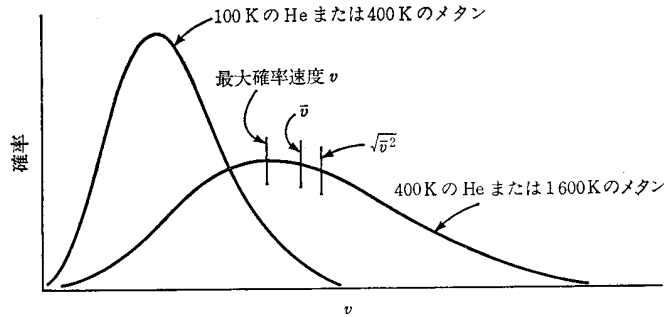


図9-7 100 K および 400 K のヘリウム原子の速度分布関数. これらの二つの曲線は 400 K および 1600 K のメタンについてもあてはまる.

気体分子の平均速度

$$145.5 \sqrt{\frac{T}{M}} \text{ m/sec}$$

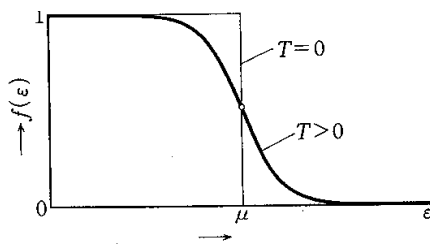
室温 (25 , 298.15 K)	酸素 (M = 32)	444 m/s
	窒素 (M = 28)	475 m/s
	水素 (M = 2)	1780 m/s

微視的世界の粒子

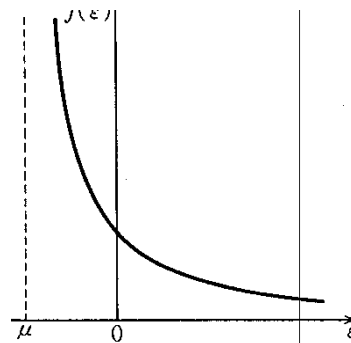
ボース粒子とフェルミ粒子の分布則

低温において重要になる

高温ではボースとフェルミの区別は重要ではない



フェルミ分布



ボース分布

エントロピー Entropy

原子や分子の集団の乱雑さの程度を表す量

自然界の自発的な変化の方向： エネルギーとエントロピー

物質のかたち

.....共有結合性物質，金属，イオン結晶

化学結合の種類

共有結合 covalent bond

電子の共有による原子間の結合：化学結合は量子現象である

イオン結合 ionic bond

陽イオンと陰イオン間の静電気力による結合

金属結合 metallic bond

電子（自由電子）媒介とする金属陽イオン間の結合

水素結合 hydrogen bond

電気陰性度の大きな F, O, N に水素 H が共有結合で結合している分子間では，それ以外の分子に比べて，強い引力が働いている。これを水素結合という。水分子間や我々の体を構成している生体分子間には水素結合がある。

化学結合の理論

原子価結合法 valence bond method

化学結合に参加する各原子は基本的に結合前の個性を保持している。化学結合によって原子価電子（価電子）valence electron は変化するが，それ以外の原子中の電子は不変である。

分子軌道法 molecular orbital method

原子中の電子は原子軌道関数 atomic orbital で表されるように，分子中の電子は分子軌道関数 molecular orbital で表される。

分子軌道法を使わなければ理解できない現象もある。

例：酸素の常磁性

固体物質の種類

温度を低くすればたいの物質は固体になる。

固体の最も安定な存在形態は結晶である

共有結合結晶：固体を構成する原子がすべて共有結合で結ばれたられば巨大分子

分子性結晶：分子が互いに分子間力で結びついて固体結晶をつくる

水素結合性結晶：水素結合で分子が結合してできる結晶

イオン結晶：イオン結合により作られる結晶

金属結晶：不純物を含まない金属

BONDS BETWEEN ATOMS

Atoms do not stick together in arbitrary numbers and spatial arrangements. Instead, the atoms of a particular element will combine in only, certain ways with the atoms of other elements (including, perhaps, its own atoms). The reason for the restriction is to be found in the properties of electrons and their arrangement around each atomic nucleus.

For our purposes it is necessary to know only that a link or *bond* between two atoms in a molecule is due to their sharing of a pair of electrons. (This idea, which was first proposed by the American chemist G. N. Lewis in the opening decades of this century, has survived the rigors of quantum mechanical scrutiny with only minor changes of detail.) The two electrons hover between the atoms and act as a kind of electrostatic glue between the nuclei. That is, *each bond in a molecule is a shared electron pair*. The number of bonds that an atom can form with other atoms is then a reflection of the number of electrons it can share with its neighbors. The rules governing this activity (which can be explained by going further into atomic structure) are as follows:

- a hydrogen atom usually forms only one bond
- a carbon atom usually forms four bonds
- a nitrogen atom usually forms three bonds
- an oxygen atom usually forms two bonds
- a chlorine atom usually forms one bond

Bond sharing is shown in the illustration on the opposite page. Hydrogen can also take part in a special type of bonding between molecules, in which it links two atoms; this is explained later.

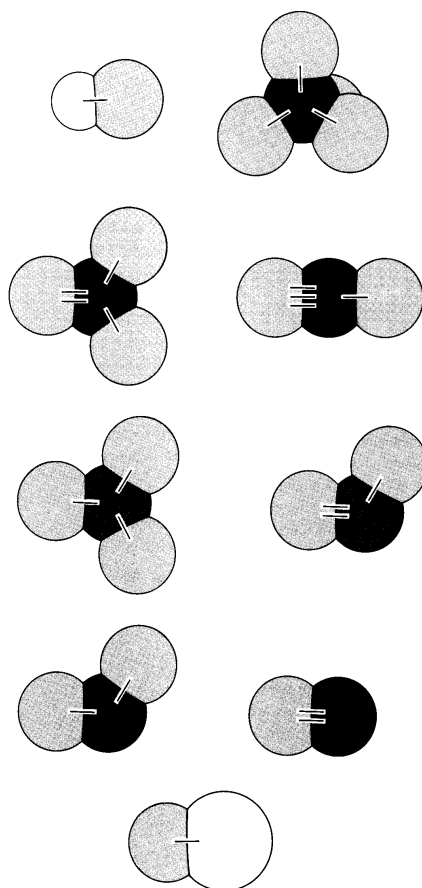
In writing the structure of a molecule (as distinct from showing a model of it), it is common to represent a bond with a short single line (–) between the *chemical symbols* of the atoms it joins. The symbols we need include:

H	hydrogen
C	carbon
N	nitrogen
O	oxygen
F	fluorine
P	phosphorus
S	sulfur

Cl chlorine

The bond between a hydrogen atom and a chlorine atom in hydrogen chloride is therefore represented as H-Cl.

Some atoms can form more than one bond to another atom. If a carbon atom shares two pairs of electrons with a neighboring oxygen atom, for example, then there is a double bond between them. This double bond is denoted C=O, and it can be seen in many of the structures shown later, including acetic acid (33) and testosterone (159). Similarly, a pair of atoms can share three pairs of electrons. Then the two atoms are joined by a triple bond, as in the hydrogen cyanide molecule H-C≡N (104), and the fabric Orlon (69). Atoms cannot share four pairs of electrons; hence, three bonds between two atoms is the maximum possible.



The atoms of the elements form characteristic numbers of bonds. The gray atoms represent atoms of elements that can form one, two, or three bonds.

分子性物質の特殊な存在のかたち：液晶

...発見の経緯と設計

物質の三態 three states of matter

純物質の取り得る 3 種類の集合状態

相図 phase diagram

(T : 温度 , Temperature, P : 圧力 , Pressure)

g: gas 気体

l: liquid 液体

s: solid 固体

t: triple point 3 重点

c: critical point 臨界点

水の臨界点 (374.15 , 218.3 気圧)

気体

この集合状態においては, 分子が互いに完全に不規則な運動状態にある。

固体 (結晶 : crystal)

分子の重心が格子点上にあるという規則的な分子の集合状態をいう。

液体

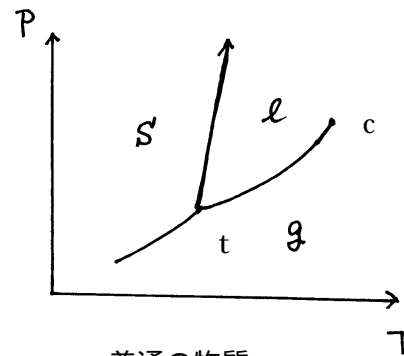
分子の重心は, 集合全体では無秩序 (長距離秩序 long range order が無い) であるが, 気体ほどは完全に無秩序ではなく各液体分子のまわりで, ある程度の規則 (短距離秩序 short range order) がある。

非晶質 amorphous

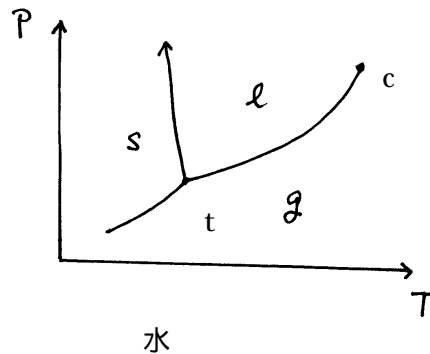
Devoid of crystalline form. True amorphous solids lack regular arrangement of their atoms. They are often supercooled liquids like glass and they may crystallize slowly in suitable conditions. Polycrystalline materials (e.g. metals) should not be confused with amorphous substances.

秩序結晶と無秩序結晶 ordered crystal and disordered crystal

分子は一般に形を持っている。例えば, 窒素分子はラグビーボールのような形をしている。分子の重心が格子点上に規則正しく配列したものが結晶であるが, この結晶には, 分子の姿勢 (これを分子の配向 orientation という) が規則正しく並んだものと不規則に並んだものの 2 種類がある。前者を秩序結晶, 後者を無秩序結晶という。一般に液体状態にある物質の温度を下げていくと, まず, 無秩序結晶ができ, さらに温度を下げると, 秩序結晶に変わる。



普通物質



水

配向をもつ分子の集合体の温度変化

	高温			低温
	気体	液体	無秩序結晶	秩序結晶
重心の配列	不規則	不規則	規則的	規則的
配向の配列	不規則	不規則	不規則	規則的



もし分子が細長かったらどんな現象が起るだろうか

以下は“岩波，理化学辞典第4版”よりの引用：

液晶 liquid crystal

有機結晶のなかには，加熱すると一定の温度で融解して濁った液体となり，さらに高い一定温度で透明な液体に変わるものがある．この現象は安息香酸コレステリルについて，ライニツァー（F. Reiner）が発見した（1888）．レーマン（O. Lehmann）は，この濁った液体が結晶に似て光学的異方性，すなわち複屈折を示すことから，液晶（流動性結晶）の名を提案した（1889）．このように，液晶は結晶と液体の間において，ある温度範囲内で存在する状態であることから，中間相ともよばれる．また，液体，固体と並ぶ第3の凝集状態とか，気体，液体，固体と並ぶ物質の第4の状態という名称も用いられる．液晶を形成する物質の分子は，その形が棒状のものが多い．この形の分子間にはたらく力は異方性に富むため，結晶が融けて分子の重心の位置に関する規則性が失われても，分子の配向は残るなど，ある程度の秩序をもった状態が生じる．これが液晶である．分子配列の仕方によって，ネマチック液晶，コレステリック液晶，スメクチック液晶に分類される．円板状分子が形成する液晶はとくにディスコチック液晶とよばれる．これらの温度変化によって出現する液晶はサーモトロピック液晶と総称される．この他に，両親媒性物質，たとえばせっけんと水または他の溶媒からなる系に出現するリオトロピック液晶がある．

液晶表示 liquid crystal display

ある方向に配列したネマチック液晶分子に電場を印加し，液晶の誘電特性や電気伝導率の異方性を利用して再配列させると，複屈折のため光学的性質に変化が生じる．各種計器に広く用いられている液晶表示は，一般にこの電気光学的効果を応用したものである．2枚の電極基盤（導電性ガラス板が多く用いられる）の間に，分子の長軸が基板に平行に配列（ホモジニアス分子配列）した液晶を挟んだのち，基板の枚を90°ねじる．このように

して得たセルの前後に、互いに直交した偏光子を置くと、セルが光ベクトルを 90° 回転させるため、光は表示装置を通過する。これに電場を印加して、分子の長軸を基板に垂直方向に配列（ホモトロピック分子配列）させると、光は通過できなくなる。もし、2枚の偏光子が平行に配置されていれば、逆の変化を与える。これをねじれネマチック効果（twisted nematic effect）という。ホモジニアス分子配列をさせた液晶に2色性染料を溶解し、電場によって液晶分子とともに染料分子の配向を行ない、色の変化をもたらすホストゲスト効果や、同じホモジニアス分子配列にある液晶に電解質を溶かし、交流電流によって乱流を作り出す動的散乱効果など、種々の工夫がなされている。また強誘電性液晶の電気光学効果を利用した表示方法も提案されている。液晶表示は低電圧で動作し、消費電力も小さいことを特徴とする。

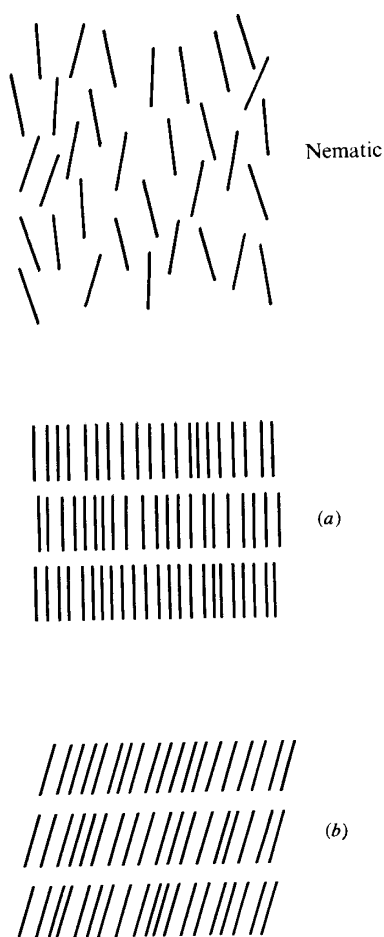


Fig. 1.1.3. Normal and tilted smectic structures.

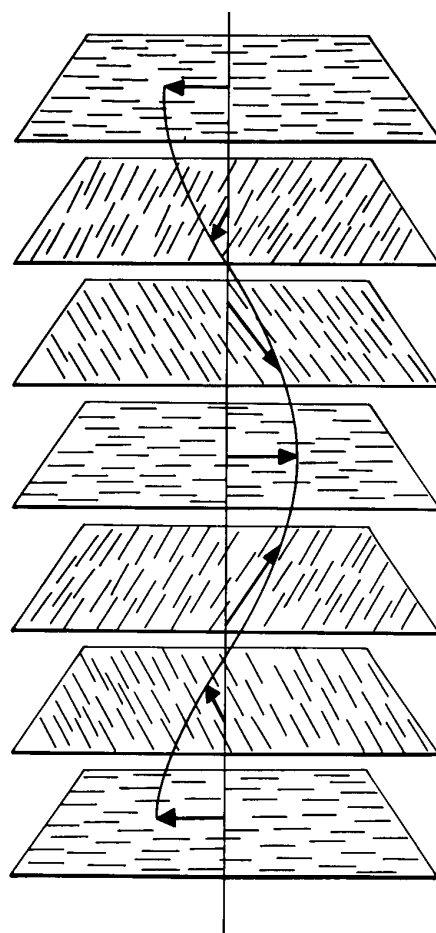


Fig. 1.1.2. The cholesteric liquid crystal: schema

物質中での電気伝導 ...絶縁体，導体，半導体

質問への回答

アナログ信号 analogue signal

連続的な量の大きさを表現された信号．ふつうは表現される物理量そのもの，あるいはそれと一定の関係にある連続的な物理量，たとえば電圧，電流，周波数，空気圧，油圧などを用いる．

デジタル信号 digital signal

情報を離散的な量または状態の組合せによって構成された数値や符号で表現した信号をいう．信号の大きさや波形に多少の狂いがあっても同じ意味内容をもつので，内容の伝達が正確に行なわれる利点をもつ．2種類の量や状態の組み合わせで数値や符号を構成することが多く，2進数，2進符号などという．表現上は0と1で表わすのがふつうである．

フラクタル

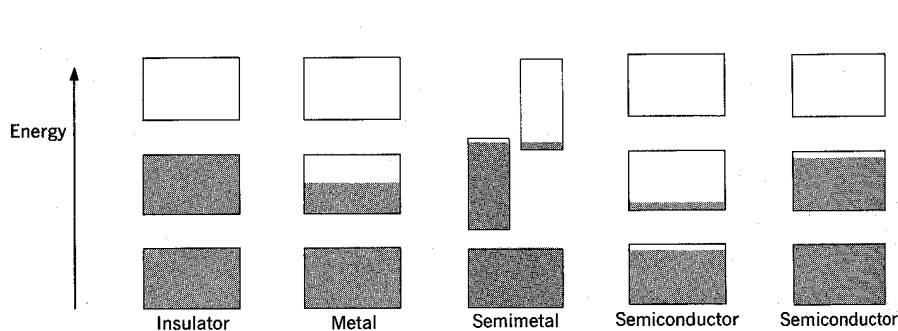
1987年の市民公開講座のコピー参照

固体の帯理論 band theory of solid

孤立した原子中での電子の取りうるエネルギー： 離散的な線 line 状態

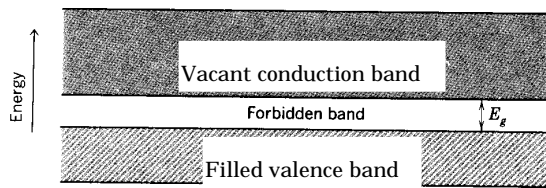
原子が固体を構成しているときの固体中での電子のエネルギー： 帯 band 状態

C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 5th Ed. (John Wiley)



Schematic electron occupancy of allowed energy bands for an insulator, metal, semimetal, and semiconductor. The vertical extent of the boxes indicates the allowed energy regions; the shaded areas indicate the regions filled with electrons. In a semimetal (such as bismuth) one band is almost filled and another band is nearly empty at absolute zero, but a pure semiconductor (such as silicon) becomes an insulator at absolute zero. The left of the two semiconductors shown is at a finite temperature, with carriers excited thermally. The other semiconductor is electron-deficient because of impurities.

真性半導体 intrinsic semiconductor

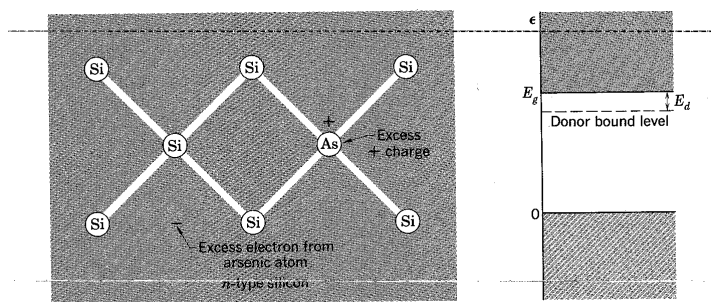


Band scheme for intrinsic conductivity in a semiconductor. At 0K the conductivity is zero because all states in the valence band are filled and all states in

the conduction band are vacant. As the temperature is increased electrons are thermally excited from the valence band to the conduction band, where they become mobile.

不純物半導体 impurity semiconductor

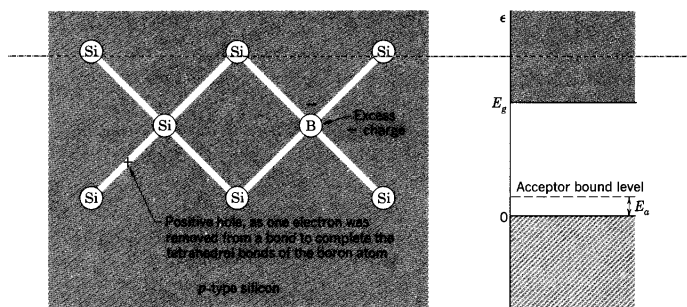
n 型半導体 n-type semiconductor



Charges associated with an arsenic impurity atom in silicon. Arsenic has five valence electrons, but silicon has only four valence electrons. Thus four electrons on the

arsenic form tetrahedral covalent bonds similar to silicon, and the fifth electron is available for conduction. The arsenic atom is called a donor because when ionized it donates an electron to the conduction band.

p 型半導体 p-type semiconductor



Boron has only three valence electrons; it can complete its tetrahedral bonds only by taking an electron from a Si-Si bond, leaving behind a hole in the silicon valence band. The positive hole is then available for conduction.

The boron atom is called an acceptor because when ionized it accepts an electron from the valence band. At 0 K the hole is bound: remember that holes float.

p - n 接合 p-n junction

p 型半導体と n 型半導体を接合すると，電流は p から n にしか流れない整流作用や光起電力効果がある

低温の世界.....どのようにして到達でき，そこでは何が起こるか

Low Temperature World

自然の寒さ*

測定された最低気温： - 64.6 （シベリア東部ベルホヤンスク，1900）

低温を実現するための手段

19世紀まで天然氷の使用

塩化ナトリウム 22.4% + 氷 77.6% - 21.2

塩化カルシウム 58.8% + 氷 41.2% - 55

冷蔵庫，冷凍庫

ジュール - トムソン効果：気体を急激に膨張させると気体の温度は降下する

液体窒素 liquid nitrogen

ジュール - トムソン効果を利用して，空気からつくることができる

- 196 ， 77K

液体水素 liquid hydrogen

水素の製法：水の電気分解，天然ガスないしは石油 + 水蒸気 - 酸化炭素と水素

液体窒素で冷却の後，ジュール - トムソン効果で液化する

- 253 ， 20K

ロケット燃料，将来の自動車の燃料？

液体ヘリウム liquid helium

アメリカ，カナダの天然ガス中には数%のヘリウムが含まれる場合がある

この天然ガスを圧縮，膨張で冷却することにより，ヘリウム以外の成分は液化して，

取り除き，純粋なヘリウムを得ることができる

ヘリウムを液体窒素で冷却し，ジュール - トムソン効果で液化する

- 269 ， 4K

さらに低温を得るには：磁気冷却法，断熱消磁法

液体ヘリウム の低圧での蒸発で得られる最低の温度は 1K よりやや低い程度

常磁性物質に磁場をかけ，磁気モーメントのそろった状態をつくったのち

磁場をきると，磁気モーメントはまわりから熱を奪って，いろいろな向きを取る

この原理によりいっそう低温を得ることができる：0.01K 以下

核磁気冷却法：0.0002K 程度

低温では何が起こるか

物質は低温では硬くかつもろくなる。

非常に低温のもとでは，量子効果が出現するようになる：超流動，超伝導

低温のもとでの生物

液体窒素の利用

食品の保存

食品材料の冷蔵，完成した料理の冷凍貯蔵

土木工事

凍結工法：軟弱な地盤の工事

自動車や自動洗濯機等のスクラップの処理

液体窒素で冷したスクラップはもろくなっている，粉碎して非金属を除けば，良質の鋼鉄を得ることができる

医学方面での利用

血液の保存，精子や卵子の保存，細胞組織の保存

低温外科：悪性細胞の液体窒素による破壊

自然科学

低温での化学反応の研究

低温での物性の研究

高温超伝導 High Temperature Superconductivity

液体ヘリウムの利用

液体ヘリウムの温度では，物質は超伝導などの量子効果を示すことが多い

超伝導エレクトロニクス

* 自然の寒さ

アメリカ陸軍の調査による最低気温

アメリカ合衆国 - 61

イタリア - 16

ソ連（現在のロシア） - 52

インド - 28

イラク - 7.2

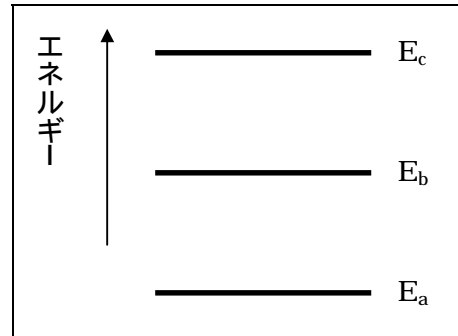
日本の南極昭和基地の月別平均気温

1月	-0.7°C	7月	-18.2°C
2	-3.4	8	-19.5
3	-6.5	9	-18.3
4	-10.0	10	-13.3
5	-13.5	11	- 6.4
6	-15.9	12	- 1.5

理科年表，1989

低温の世界での物質の不思議なふるまい...超伝導と超流動

すでに述べたように、物質を構成する粒子には、ボース粒子とフェルミ粒子の 2 種類がある。これらの粒子は右図のような飛び飛びのエネルギー状態を取る。ボース粒子では同一のエネルギー状態を多数の粒子が占めることができる。定性的には、エネルギーの低い状態を多数の粒子が占め、エネルギーの高い状態になるにつれ、粒子の存在数は小さくなる。どのエネルギー準位にどれだけの粒子がいるかは温度により異なる。温度が低くなるにつれ、粒子は低いエネルギー状態をとろうとする。逆に温度が高くなると、粒子は高いエネルギー状態を取ることができるようになる。このような関係を表す定量的な式も与えておこう。温度が T の場合、任意のエネルギー準位に対する粒子の存在数は



$$f(E_\gamma) = \frac{1}{\exp[(E_\gamma - E_a)/kT] - 1}, \quad \gamma = a, b, c, \dots$$

に比例する。

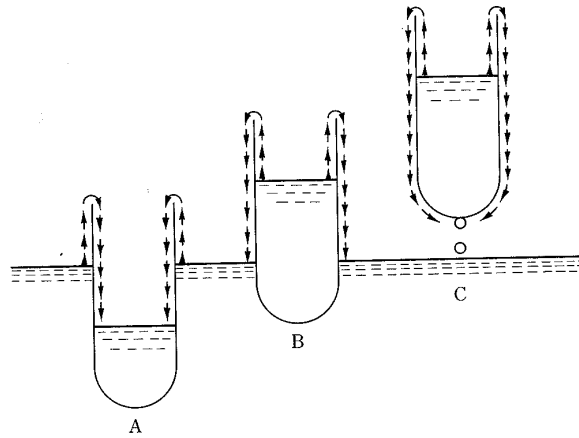
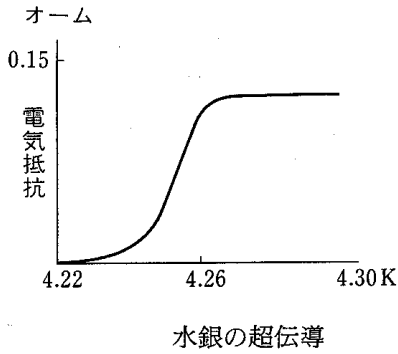
ボース粒子からなる物質の温度を下げていくと、ある低温の温度 T_c 以下では、実質上ほとんどの粒子が最低のエネルギー E_a を占めるようになる。このように、物質を構成するほとんどすべての粒子が同一の粒子状態を占めることを、ボース - アインシュタイン凝縮という。ボース - アインシュタイン凝縮の例として、超流動と超伝導がある。

超流動 superconductivity

ボース粒子に属するヘリウム He は 4.2K 以下の温度では、液体になる。ヘリウムの温度をさらに下げても、絶対温度 0K まで液体のままである。しかし、正確には、2.2K (T_c) 以上の温度の液体とそれ以下の温度の液体ではその性質が全く異なる。低温側の液体は He II といわれ、この液体では、ボース - アインシュタイン凝縮が起こっており、すべてのヘリウムは同じ量子状態にあると考えられる。He II は普通の液体と異なり、粘り気すなわち粘性が全くない。このため、液体ヘリウムは、毛細管の中をよく流れる。しかも毛細管の内径が小さいほど流速が大きくなる。普通の液体では毛細管の内径が小さくなると流速も小さくなる。また、普通の液体に見られる、分子運動の不規則さも全くない(かつて述べたエントロピーがない)。He II ではさらに奇妙なことが起こる。次図のような実験をすると、A では器を傾けなくても、液体ヘリウムは器内へ入り、B では器外へ流出する。C の場合は滴となって滴り落ちる。

超伝導 superconductivity

1911年オネスは水銀の電気抵抗は液体ヘリウム温度以下では、突然0に近くなることを見出した。これが超伝導



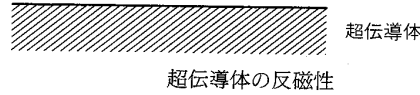
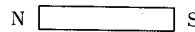
現象の最初の発見である。超伝導状態にある水銀の電気抵抗は、常伝導状態の100億分の1程度であり、ほとんど、抵抗なく電流が流れる。

超伝導の特色

電気抵抗が0である

超伝導体は磁力線を貫通させない(マイスナー効果)：完全反磁性

(超伝導体は磁石を浮かすことができる)



超伝導になりうる物質

超伝導になる可能性のある物質は金属が多い

元素に注目すると価電子の数は2 - 8である

強磁性、反強磁性を示す物質は超伝導にならない

超伝導の理論：BCS理論

Bardeen, Cooper, Schrieffer のつくった理論 (1957)

物質中の電気の担い手は電子である。電子はフェルミ粒子でありボース粒子ではない。それなのに、ボース - アインシュタイン凝縮が起こるのはなぜか。

結晶中の電子は、結晶を構成する原子の熱振動状態と共存している。量子力学では、熱振動状態は、フォノン phonon と呼ばれる粒子と見なすことができる。このフォノンはボース粒子である。超伝導状態では2個の電子とフォノンがペアをつくっている。これをクーパー・ペアといい、粒子と見なすことができる。この擬粒子はボース粒子であり、ボース - アインシュタイン凝縮を起こすことができる。

高温超伝導 (Müller, Bednorz, 1986) La, Ba, Cu, O

高温超伝導体はセラミック ceramic 酸化物である

絶対0度よりも低いマイナス温度の世界はあるか。...レーザー光

LASER : *light amplification by stimulated emission of radiation*

誘導放出により増幅された、位相のそろった単色光

単色光 : 1つの振動数ないしは波長からなる光

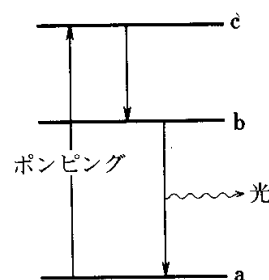
位相 phase : 波動等の周期的現象において、1周期内の進行段階を示す量、例えば、 $y = A \sin(\omega t + \alpha)$ で表

される波の位相は $\omega t + \alpha$ である。

光の干渉性 coherence : 波が出会うとき、波の山と山、谷と谷が一致する場合には強め合い、山と谷、谷と山が一致する場合には打ち消しあう。

普通の光 : いろんな波長とまちまちの位相よりなる

普通の単色光 : ある特定の波長だが、位相はまちまちの光



原子中の電子は飛び飛びのエネルギーを取り、電子が高いエネルギー状態から低いエネルギー状態に移るときに光を放出し、逆に低いエネルギー状態から高いエネルギー状態に移るときに光を吸収する。この場合に光の波長はエネルギー準位間の差を反映するある決まった値を取る。光を放出するとき、外から同じ波長の光が入射しているかどうかで大きな違いがある。外からの光の入射がない場合には、光の放出は各原子で独立に起こり、位相もまちまちである。これを自然放出 spontaneous emission という。これに対して、外から放出光と同じ波長の光が入射しているときには、誘発されて放出される光の位相は、外からの光の位相と完全にあうようになる。これを誘導放出というが、これを起こしているのがレーザーである。これが起きるためには、上のエネルギー準位に下のエネルギー準位よりも多くの電子が存在しなくてはならない。下の準位にいる電子は光を吸収してしまうからである。

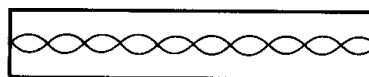
したがって、有効な誘導放出を起こすためには、上のエネルギー準位に下のエネルギー準位よりも多くの電子を分布させてやる必要がある。これは自然には起きない。このためには、図のような準位をもった原子を利用する。まず別な強い光をあてるなどして、一番下の準位 a から上の準位 c へ電子をあげる。これは電子をポンプでくみ上げるのに似ていることからポンピングと呼ばれる。準位 c の電子は周囲にエネルギーを与えてすぐに準位 b に落ちる。このようにすれば、準位 a よりも、準位 b の方に電子を多く分布させることができる。

このような特別なことをしなければ、絶対温度 T では、エネルギー ε に存在する電子の数は $e^{-\varepsilon/kT}$ に比例する。これは、普通の温度では、上の準位よりも下の準位の方に多くの電子が存在することを意味する。上の準位 b に下の準位 a よりも多くの電子が存在することは

負の温度になっていると解釈することもできる。すなわち、レーザーではポンピングによって負の温度が、2つの準位 a, b 間に、人為的につくられている見なすことができるのである。負の温度は温度の概念の拡張であり、単なる定義上の問題である。実際に、負の温度が完全な意味で実現しているのではない。

このように負の温度の状態になった原子を容器に入れ、その両端に互いに平行な鏡をとりつける。そして容器の長さを放出される光の波長の半整数倍に調整しておく。すると b a で放出された光は両端の鏡で反射されて定常波をつくる。ポンピングを続行していると、光を放出した後も、電子はすぐ上の準位に上がり、負の温度の状態を持続することができるので、この定常波によって常に誘導放出が起こり、極めて強く、位相がそろった光をつくることができる。これがレーザーである。

レーザー装置の見学



自然科学研究教育センター桑江教授のレーザ

ー Raman 分光器のレーザーの実物を見学する。

Ar レーザー：488 nm の波長のレーザー光（青色）を実際に見ます。

桑江教授の都合がつけば、他の波長のレーザー光も見せて頂けるかもしれない。

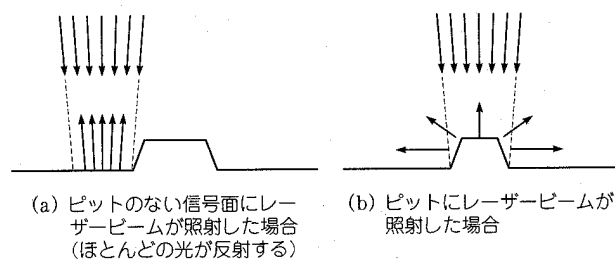
注意：レーザー Raman 分光器の実験装置は、非常に高価でかつ微妙に調整されているから、勝手に実験室の装置にふれたり、その上に物を置いたりしないようにしてください。

破損したり、計器がくるったりしてはいけませんので。

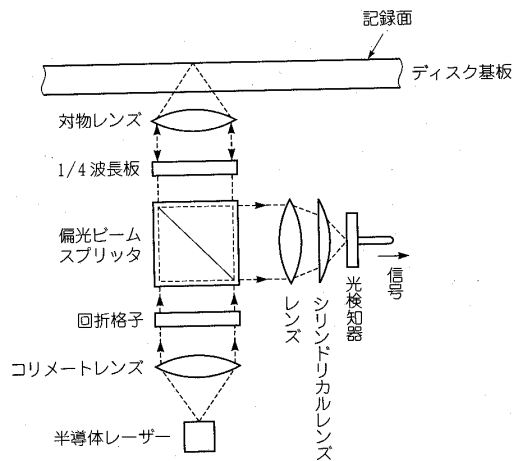
家庭やオフィスで活躍しているレーザー

コンパクトディスク CD，レーザーディスク LD

半導体レーザー（ガリウムヒ素半導体の p 型と n 型の接合部から出る波長 780nm のレーザー光）をレンズで絞って CD，LD のトラックに当て、反射光を光ダイオードで受ける。これにより、トラック上にピットがあるかないかが検出できる。このあるかないか、すなわち、オンオフの信号は最終的には電気信号に直され、音や映像に再生される。その原理は以下の図で示される。



光ピックアップで信号をとり出す



CDおよびLDの光ヘッド

CD や LD の表面は透明なプラスチックで覆われており ,プラスチックを通してレーザー光がディスクの表面にあたる。このため ,コンパクトディスクの再生は半永久的に可能と考えられる。ここでは ,レーザー光の ,直進性 ,スペクトル幅の狭さ ,集光性といった特質が利用されている。このような特性はレーザー光がコヒーレントな光であるという性質による。

精密工業におけるレーザーの利用

レーザー加工 切る ,つなぐ ,変える (金属表面の性質 ,成分) ,量子加工

バイオ・医学への応用

レーザーメス ,細胞融合 (網膜剥離の治療)

参考書 : 藤岡知夫著 ,オプティカルパワー 魔法の光レーザー ,1994 ,裳華房

セラミックスと高温超伝導物質.....新素材と我々の未来

セラミックス ceramics

成形，焼成等の工程をを経て得られる非金属無機材料をさす。

セラミックスの種類

汎用セラミックス

従来の窯業製品の陶磁器，セメント，ガラス

これらは，物質的には，土や石の成分であるケイ酸塩（一般式 $xM_mO_n \cdot ySiO_2$ ）

M: Al, Fe^{II}, Ca, Mg, Na, K

ニューセラミックス，ファインセラミックス

従来の陶磁器に対して用いられてきた手法（成形，焼成）をケイ酸塩以外にも適用する

電磁工学的機能を持つセラミックス：通信に利用される

熱的・機械的機能を持つセラミックス：省エネルギー技術精密機械技術に使われる

耐食性と生体親和性をもつセラミックス（バイオセラミックス）：医療用

等のように，大まかに分類できる（岩波，理化学辞典）が，丸善“新素材ハンドブック”（1988）では，セラミックスを

電子的機能を有するエレクトロセラミックス

光学的機能を有するオプトセラミックス

機械的機能を有するエンジニアリングセラミックス

という3種類に分類している。

新素材ハンドブックのエレクトロセラミックスの機能・用途・物質に関する285ページの樹木図をを引用しておく（次ページの図）。

陶磁器

（参考書：長坂克巳編，やきものアラカルト I, II, 1994, 裳華房）

人類は経験上，土や石を粉々に粉碎して，水を混ぜてこね，それを容器に成形し，火で焼けば（焼成），硬い陶磁器になることを知った。科学的に見れば，土や粉々に粉碎された石は，ケイ酸塩の微結晶の集まりにすぎません。これらの微結晶の間に化学結合が生じてできるのが，陶磁器です。この意味では，陶磁器は，ケイ酸塩の結晶（全体が一つの結晶である単結晶）ではなく，多結晶 polycrystal です。

一般に，自然界にある結晶は，単結晶ではなく，多結晶です。これは，特殊な条件の下でしか，単結晶はできないことと関係があります。興味のある方は次のような実験をしてみてください。室温より熱いめの水に，溶けるだけの食塩を溶かした食塩水をしばらく放置すると，小さな結晶がいくつか沈殿してきます（これは食塩の単結晶です）。結晶の1つを細い糸で結び，（できれば，他の結晶は取り去って下さい）食塩水中につるしておくで，うまくやれば，1cm くらいの透明できれいな結晶面を持つ食塩の単結

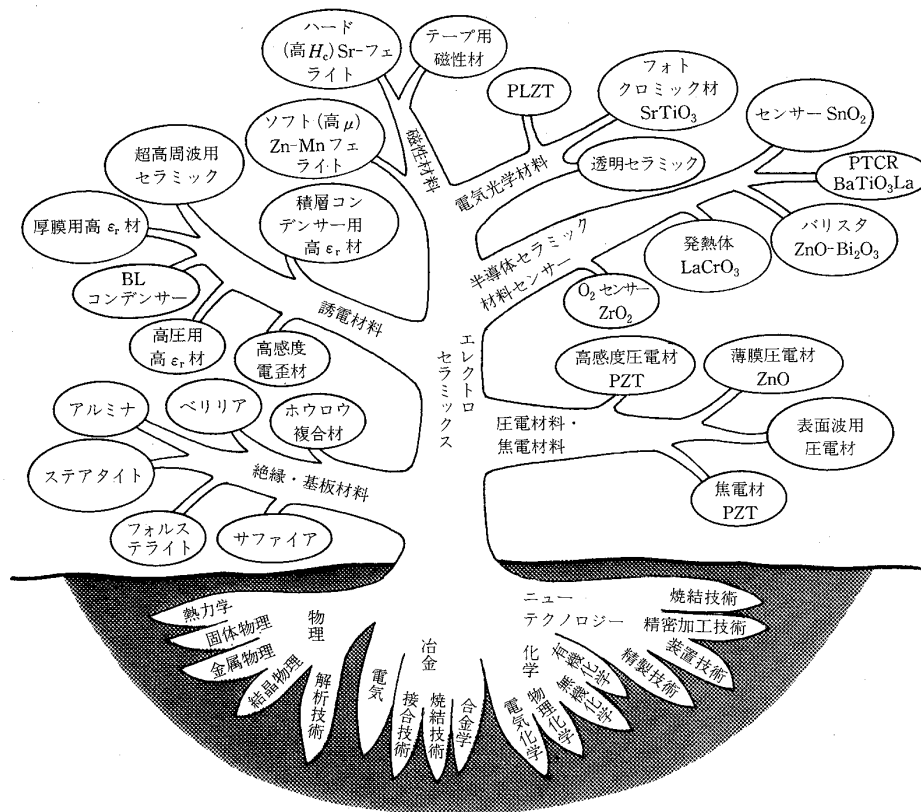


図 21・1 エレクトロセラミックスの樹木図

晶を成長させることができます。しかし、これはなかなかうまく行きません。たいていは、汚いでこぼした結晶しかできません。この結晶が多結晶と言われるものです。

陶磁器の制作では、焼成ないしは焼結 sintering が一番大切なことで、数十年前までは、薪を用い、職人の勘に頼ってなされました。これは大変な作業であり、また重労働であったようです。最近では、ガスや電気を使って、十分な温度制御のもとでこの焼結はなされている。

piezoelectric ceramics (圧電性セラミックス)

(参考書： 藤島 啓著， piezoelectric ceramics ハイテク時代の影の立役者 ，1993， 裳華房)

ファインセラミックスのすべてを述べるのは不可能なので、我々の日常生活で私達が大変お世話になっている piezoelectric ceramics について述べることにする。

まず piezoelectric products が日常生活で何に使われているかを列挙しよう。

時計の時刻の刻み (クォーツクリスタル (水晶) の振動の利用) ，

目覚しなどのスピーカー，テレビなどのリモコンの信号の発信，

テレビの中には、音や映像をきれいにし出すための電子部品として少なくとも 5 個，

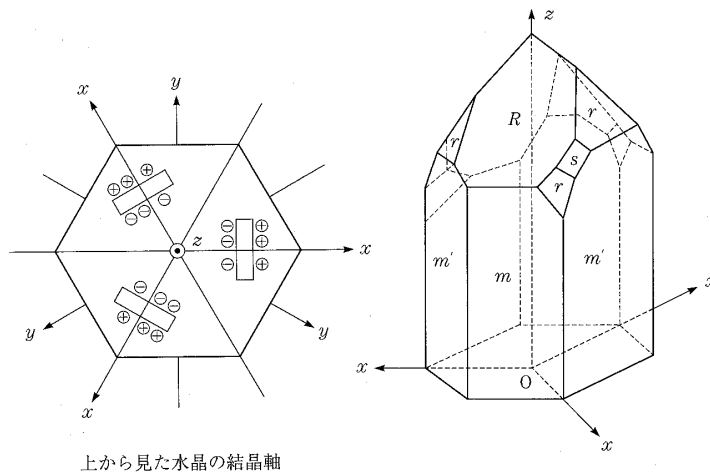
ガスコンロの点火部分，電話機の呼び出し音，...

ピエゾとは何か

piezoelectricity 圧電気の略語

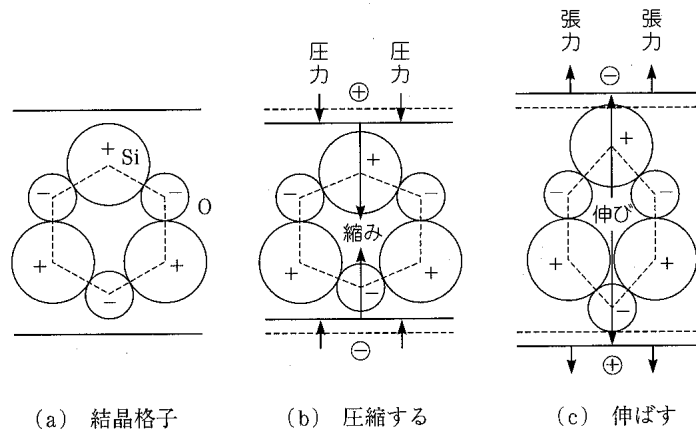
熱すると電気を発生する電気石がある。この加熱により生じる電気を焦電気というが、(例のノーベル賞物理学者として有名な)ピエール・キュリーが弟のジャック・キュリーと焦電気の研究をしていて、水晶には焦電気があると同時に、圧縮すると電気を発生する、圧電気があることを発見した。

水晶はシリコン Si の酸化物 SiO_2 が配列して図のような単結晶になったものである。結晶中では、シリコンはプラス、酸素はマイナスの電気を持っている。結晶中では、ケイ素や酸素は下図(a)のようになっている。これは中心に関して対称で、電気的にはプラスとマイナスが中和して中性です。



上から見た水晶の結晶軸

(マイナスからプラスを結んでできるベクトルを電気双極子モーメントというが、これらのベクトルの合成が0となっていることを意味する。)これに、上下方向に圧力を加え、圧縮すると、原子の中心を結ぶ6角形は(b)のように歪む。こ



(a) 結晶格子

(b) 圧縮する

(c) 伸ばす

のためプラスの中心とマイナスの中心はずれる。この場合、プラスの中心は上に、マイナスの中心は下にずれる。結晶はこの6角形の配列よりできているので、結晶中全てに、このようなプラスとマイナスのずれが生じていることになる。すなわち、圧縮することにより結晶には電気(電圧)が生じたことになる。引伸ばしたときは(c)のようになるので、(a)とは逆の電気が生じたことになる。これが圧電現象の原理で、これは電気エネルギーと機械エネルギーの変換に利用できる。

圧力によって電圧を発生する現象を正圧電効果という。逆に、このような結晶に電圧を加えてやると、結晶は変形します。このような現象を逆圧電効果という。

ところで、水晶は一定の振動数で振動する。この振動に伴い、結晶には(b)と(c)の電氣的

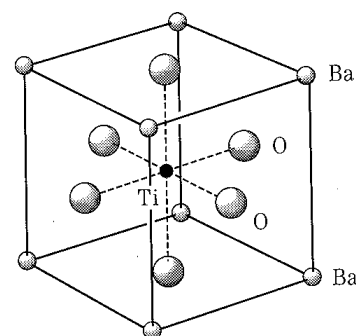
振動があらわれる。この振動を増幅するのが、水晶発振回路で、時計をはじめ、コンピュータや通信など、エレクトロニクスの重要な技術として、世界中で使われている。水晶は世界中で産出し、日本でも山梨県を代表に全国各地でたくさん採れ、エレクトロニクスの各方面で利用されている。

ピエゾセラミックス

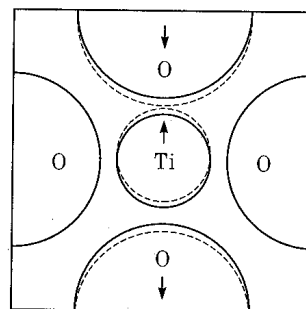
水晶は天然のもので、自然の造岩作用でできた。水晶のもつ圧電効果を、より効果的に(数値的に言えば、100 倍程度の大きさで)、人工的に、成形、焼成でつくられたものをピエゾセラミックスという。次に、最初につくられ、今も利用されているピエゾセラミックスの例を挙げよう。

チタン酸バリウム BaTiO₃

チタン酸バリウムのセラミックスは無数の単結晶からなる多結晶である。各単結晶中のチタン酸バリウムの結晶構図は右図のようになっている。中心にチタン Ti があり、6 面体の 8 つの角にバリウム Ba があり、6 つの面の中心に酸素 O がある。このような結晶構造はペロブスカイト形と呼ばれる。電気的にはバリウムとチタンがプラス、酸素がマイナスの電気を帯びている。ところで、この構造からは、これがどうして圧電効果を示すのか説明できません。

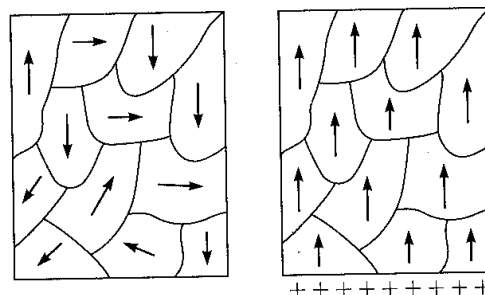


以上では、結晶中ではチタンは中心にあるといったが、厳密に言えば、常温では、図のように中心から少しずれている。また酸素もこれに引っ張られて、点線のように少しずれている。このようなずれは、酸素原子の大きさに比べて、チタン原子が小さいため、チタンが隙間を自由に動けることのためだといわれる。



このような移動が生じると、結晶中で、互いに接近し

あった酸素とチタンのペアがあることになるが、既に述べたように、酸素はマイナス、チタンはプラスの電気をもつので、これ等の酸素とチタンのペアは電気双極子モーメントと見なすことができる。セラミックス中の 1 個の単結晶はこの双極子モーメントの集団であるので、電気的な分極が生



分極前

分極後

じていることになる。

このセラミックスは多結晶であり、それを構成する各単結晶中で、それぞれ違った向きの分極が起きている。このためセラミックス全体としては分極していないことになる。しかし、これに高い直流電圧をかけてやると、チタンが自由に動けるために、各単結晶は同じ向きに分極し、セラミックス全体も大きく分極することになります。この際には、原子の移動も伴うので、結晶は変形することになる。まさに、圧電効果があらわれたことになるのです。この効果は、天然の水晶に比べて、100 倍も大きい。

PZT

チタン酸鉛 PbTiO_3 に少量のジルコン酸鉛 PbZrO_3 を混ぜてつくったセラミックスで、PZT は鉛 Pb、ジルコニウム Zr、チタン Ti の略である。この PZT は人類が発見した最高の特性を持つ piezoceramics セラミックスである。結晶形はチタン酸バリウムと同じペロブスカイト形であるが、チタン酸バリウムは、120 以上の温度で、piezo の特性を失うのに、PZT は 300 までその特性を失わず、しかも、圧電特性はより大きい。

高温超伝導物質

1986 Karl Alexander Müller & Johannes Georg Bednorz

ランタン、バリウム、銅、酸素からなるセラミックスの超伝導性を発見

結晶構造は、ペロブスカイト形である。

常温では、絶縁体であるセラミックスが低温ではどうして、全く抵抗なく電気を通す超伝導体になるのだろうか。

物質の磁氣的性質...常磁性，反磁性，強磁性，反強磁性，フェリ磁性

磁石にくっ付いたり，くっつかなかったり，また場合によるとそれ自体が磁石であったりというように，物質によりその磁氣的な性質は異なる。このような物質の磁氣的性質は物質を構成する原子や分子が磁氣的性質を持っていることに起因する。原子や分子が磁氣的性質をもつのは，それらに属する電子が小さな磁石と見なせる性質を持つためである。電子は，いわば自転に相当するスピンなる量を伴い，（スピンは量子現象であり厳密に言えば，自転という考え方は，完全な意味では正しくないが，）このスピンはまさに磁石そのものである。（電子を負の電気量をもつ球と考えれば，その回転は，コイル上に，回転とは逆向きの電流が流れている電磁石と見なせる。）原子や分子上のスピンは対になっていることが多いので，原子や分子が磁石であることは少ない。しかし，奇数個の電子をもつ原子や分子，電子対を構成しない状態にある原子や分子（例えば酸素分子上には，2つの孤立電子があり，そのスピンは同じ向きをとっている。）はそれら単独で小さな磁石である。このような電子は不対電子と呼ばれる。

磁化 magnetization

原子や分子に外部から磁場をかけると，それらが小さな磁石である場合には，磁場の方向をむこうとする。（原子や分子は激しく運動しているので，小さな磁石が完全に磁場の方向にそろわけてはならない。どれだけか，磁場の方向を向いているかは，温度により異なり，統計的に計算される。）また磁氣的性質の解釈に関しては，原子や分子は定常電流が流れているコイルと見なすことができる。ところで，コイルに磁場をかけると，コイル上には，その磁場を打ち消す磁場を生じるような付加的な電流が流れる（発電機の原理）ことが知られている。この場合，原子や分子上に誘導される磁気は外部からかけられた磁場とは反対向きである。

物質は原子や分子の集合体である。物質に磁場をかけた場合，その構成要素が上に述べたような磁氣的な影響を受けるために，物質全体も磁化されることになる。今，外からかけた磁場の大きさを H ，物質の磁化の大きさを M とすれば，

$$M = \chi H$$

と表される。この比例係数は磁化率（ないしは磁気感受率）magnetic susceptibility といわれる。

磁性体の種類

物質はその磁氣的な性質に関して，次に挙げる磁性体のどれかに分類することができる。反磁性体以外は磁化率が正である（ $\chi > 0$ ）。

反磁性体 diamagnetic substance

不対電子を持たない分子は、永久磁気モーメントがない。従って、このような分子からなる物質の磁化率 χ は負である。すなわち、磁場と反対方向に磁化（この磁化はきわめて小さい）される。大抵の分子は不対電子をもたないので、分子からなる物質は、一般に反磁性体と考えてよい。

常磁性体 paramagnetic substance

不対電子をもつ分子、例えば、 O_2 , NO, NO_2 , ClO_2 , は永久磁気モーメントをもつ。このような永久磁気モーメントをもつ分子からなる物質は、磁場をかけると、磁場方向を向く磁気モーメントのため磁場方向に磁化される。

強磁性体 ferromagnetic substance

隣り合う磁性イオンに属する電子がその位置を交換すると、2つのスピンの間には、量子力学的効果として、相互作用が働く。これを交換相互作用というが、これは位置交換の機構により正になったり、負になったりする。交換沿相互作用が正であれば、スピンは平行になろうとするが、負であれば、逆平行になろうとする。電子間に正の交換相互作用があれば、電子スピンの平行になるため、各磁性イオンの電子スピンによる磁気は平行に配列し、磁場をかけなくても、自発磁化 spontaneous magnetization を生じることになる。このような磁性体を強磁性体という。Fe, Co, Ni 等の金属がこれに相当する。

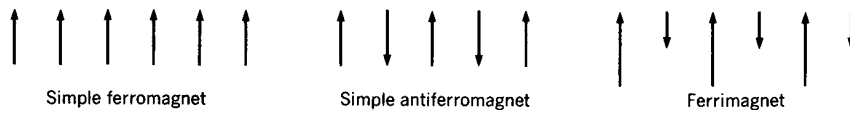
反強磁性体 antiferromagnetic substance

電子間の交換相互作用が負であれば、スピンは逆平行に並ぶため、物質の構成粒子の磁気は逆平行に整列する。磁気が逆平行に配列し、互いに磁気を打ち消すため自発磁化はゼロになっている磁性体を反強磁性体という。自発磁化がないので、反磁性体と同じだと思うかも知れないが、反磁性体では、構成粒子が磁気をもたないが、反強磁性体では、個々の構成粒子が磁気を持つという両者間には根本的な違いがある。反強磁性体では、温度が高くなるにつれて、磁気の配列が乱れ、磁場の方向を向く磁気の割合が増える。反強磁性体には MnO , Cr_2O_3 等がある。

フェリ磁性体 ferrimagnetic substance

2種類の磁気が交互に反平行に整列している磁性体、強磁性体ほどは強くないが、自発磁化を生じる。種々のフェライト、鉄ガーネット、クロマイトなどがある。フェライト ferrite とは $M^{II}O \cdot Fe_2O_3$ 型の2価金属の塩をさす。 M^{II} は Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, Cd などである。

強磁性、反強磁性、フェリ磁性を概念的に示せば下図のようになる。



反強磁性体 MnO におけるスピンの配列は図のようになっている。(C. Kittel, Introduction to Solid State Physics 5th Ed., John Wiley, p.480)

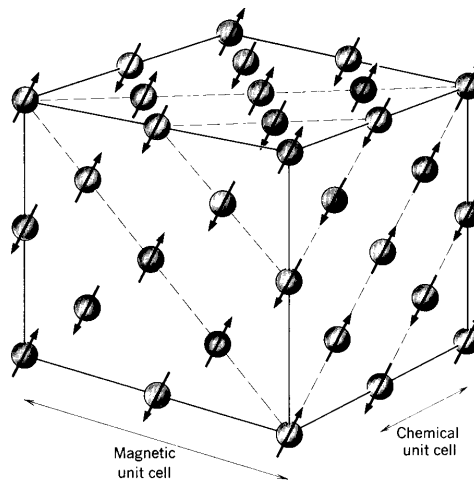


Figure 21 Ordered arrangements of spins of the Mn²⁺ ions in manganese oxide, MnO, as determined by neutron diffraction. The O²⁻ ions are not shown.

磁区

ferimagnetic domains

Fe, Co, Ni などは強磁性体で、自発磁化をもっているの
で、それらは永久磁石の
はずである。しかし、我々は経験

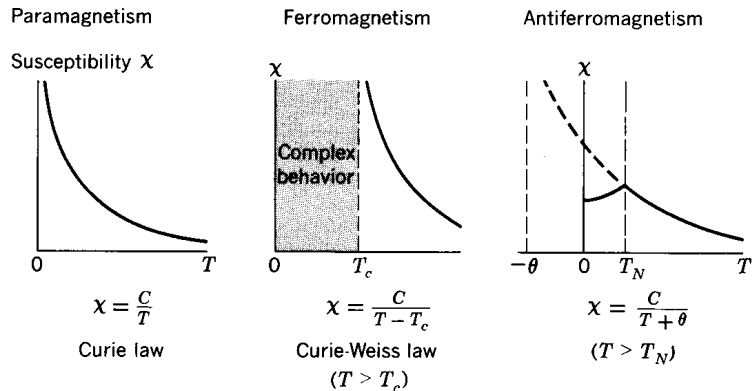
上、Fe が永久磁石であることはまれで、ほとんどの鉄は磁石でないことを知っている。どうしてだろうか。これに対する回答が磁区 magnetic domains なのである。鉄などの強磁性体は磁気が平行にそろって、自発磁化を生じている小領域の無数の集まりによってできている。この小領域を磁区という。磁区と呼ばれる各小領域はそれぞれ強力な永久磁石であるが、その大きさや磁石の向きはまちまちである。これは観察により確認できる事実である。このような事情から、巨視的なサイズの強磁性体では、磁化が0になっているのである。

磁化率の温度変化

これまでの議論より明らかに、反磁性以外の磁化率は温度とともに変化する。常磁性体、強磁性体および反強磁性体の磁化率の温度変化は次ページの図ようになる(Kittel, Introduction to..., p.481)。この図より、強磁性体も常磁性体も(図にはないが、フェリ磁性体も)、ある温度で、常磁性体になる。これを磁気相転移という。その転移温度は物質により異なる。

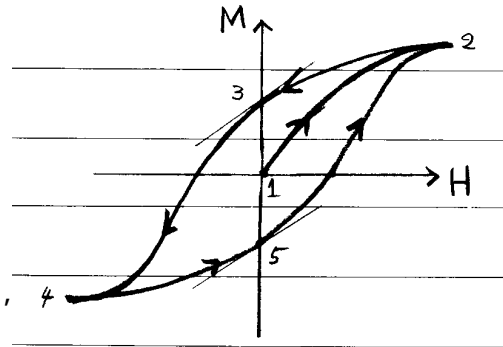
強磁性体の転移温度をキュリー温度 T_C というが、この温度で強磁性体には、スピンの秩序を持って配列した磁気的秩序相 ordered phase からスピンの無秩序になっている磁気的に無秩序な相 disordered phase への相転移 phase transition が起る。このため、キュリー温度 T_C より高温では、強磁性体は、常磁性体になる。キュリー温度 T_C は Fe: 1043K,

Co : 1400K , Ni : 631K である。



強磁性体では、図の T_C 温度（キュリー温度という）以下では、磁気モーメントは平行に整列している。

この物質にかかる磁場 H を増加させると、その磁化 M は曲線 1 → 2 に沿って変化し、飽和状態に達する。大きな磁場がかかり、飽和状態にある物質の磁場を減少させると、磁化 M は曲線 2 → 1 ではなく、曲線 2 → 3 に沿って変化し、磁場 H を 0 にしても、磁化は 0 にならない。さらに逆（-）方向の磁場をかけていくと、磁化は曲線 3 → 4 に沿って変化する。この逆方向の磁場を減少させれば磁化は曲線 4 → 5 の変化

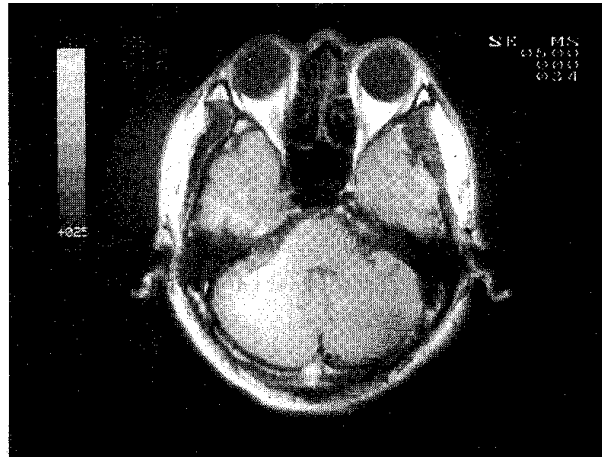


をする。この場合も、 $H = 0$ で逆方向の磁化は残る。この状態で、正の磁場を増加させていくと、磁化は曲線 5 → 2 の変化をする。これはヒステリシス hysteresis と呼ばれ、磁氣的内部構造が履歴によって異なることに起因する。すでに述べた磁区を用いて説明すれば、外からかけた磁場方向をもつ磁化の磁区が成長したことによる。

反強磁性体も、ネール Néel 温度 T_N と呼ばれる温度以上では、スピン配列の秩序がなくなるので、常磁性体へ変わる。ネール温度の例を挙げれば、 $MnO : 122K$, $NiO : 523K$, $CoO : 291K$ である。

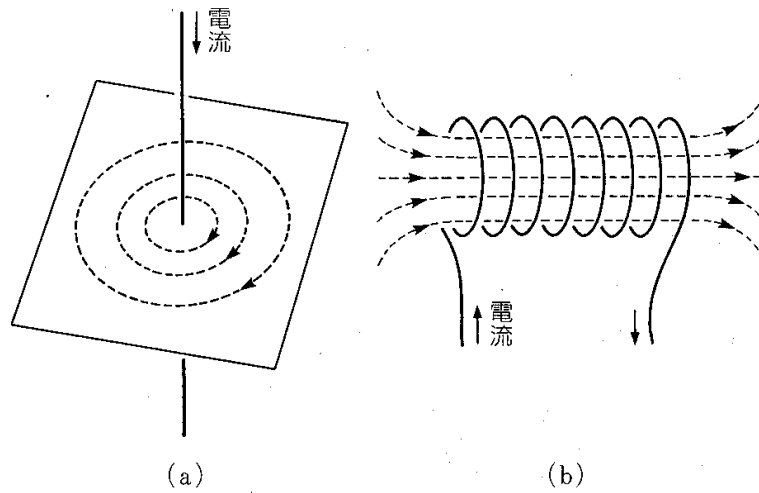
原子核の磁気

原子核も核スピンと呼ばれるスピン量子量をもつため、磁気をもつことができる。しかしその大きさは、電子の持つ磁気量に比べれば、2000 分の 1 程度の大きさである。このため、原子核からの、物質の磁気への寄与は問題にならない。しかし核磁気共鳴法と言われる手段を使えば、原子核のもつ、磁気を直接測定することができる。最近医学の分野で使われている MI(magnetic image) と呼ばれるものは、人体に磁場をかけ、人体を構成する原子(水素原子)の原子核の磁気を測定し、その際得られた情報をコンピュータを使って、断層像にしたものである。



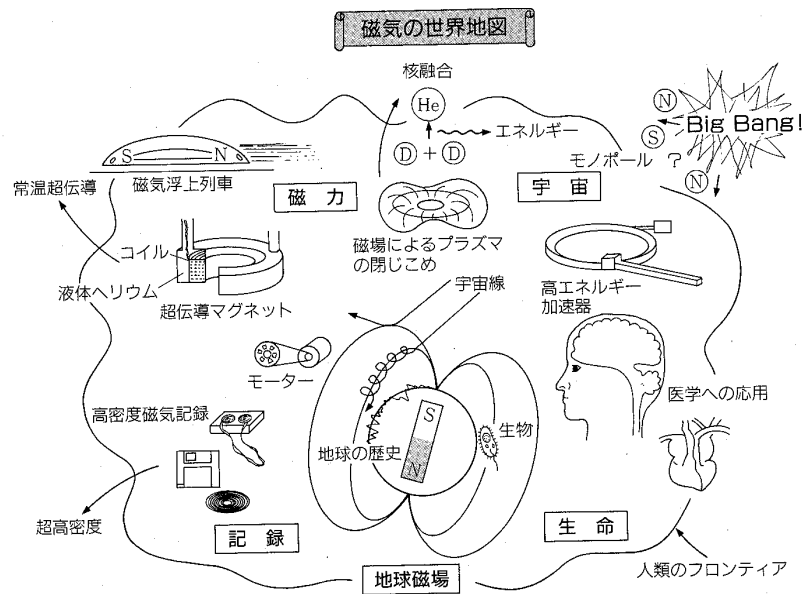
頭を目の位置で輪切りにした磁気共鳴影像法による写真

磁場と電流



物質の磁性と現代社会...マルチメディアと磁気媒体

我々が日常生活で、音楽などの音声やテレビの映像を記録するのに用いるカセットテープやビデオテープ等の磁気テープ、パソコンでソフトや種々の情報の記録や保存に用いるフロッピーディスク、ハードディスクやMOディスク等の磁気ディスクは磁気を利用して、情報を記録している。また、我々がよく使うテレホンカードやキャッシュカードも磁気記録の応用である。



参考書

- 高尾正敏, ビデオレコーディングの話 高密度磁気記録と材料技術, 1989, 裳華房
 田崎 明, 磁気がひらく未来, 1990, 裳華房
 日本化学会編, 新しい磁石, 1993, 大日本図書

記録と記憶 record & memory

記録とは、人間が意志を持って何らかの出来事を、文字や画などの手段を通じて自分自身の外部の媒体に書き留めることらしい。また、記憶とは、元来生物の体内に過去の影響が残ることのようで、閉じた世界でのいわば覚え書きに過ぎなく、個人差があり、完全には他人と共有できないものである。人の記憶は死ねば完全に消えてなくなってしまう。このような記憶は内部記憶（内部メモリー）といえる。個人の記憶は、他人と共有できるように、きちんと整理し、外部の媒体に不揮発な形に記録し残すことができる。これが外部記憶である。したがって、記録とは、社会では情報の共有が必用であるが、個々に記憶されたのでは忘れてしまったり、整理が悪いと散逸の危険があるので、みんなで共有できる不揮発な形（外部記憶）に情報を加工することといえる。共有すべき情報を加工し、蓄積し、流

布させるのが、記録装置である。

地球の磁気記録

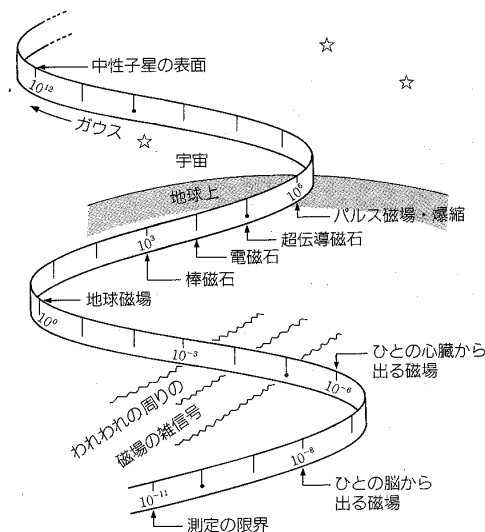
岩石に記録された地球の歴史

岩石の中には、鉄分を含んだものがある。この中には、磁化されたものがある。鉄は高温（キュリー温度以上）では強磁性体ではないが、温度が下がれば強磁性体になる。このため、岩石中の磁性の向きは、その岩石が（溶岩が固まって）できたときの地球の磁場の方向を記録していることになる。

その記録によれば、地球の磁場（の大きさや向き）は絶えず変動してきたことがわかる。磁場がなければ、太陽からの荷電粒子が直接地球に降り注ぎ、我々生物は生命存続の危険にさらされるし、この荷電粒子が核になって水蒸気を集め、雲を作り出すので、太陽光線が遮られて、氷河期になるかもしれない。いずれにせよ、磁場の変動は地球全体の気候を大きく変動させそうである。

日本列島はかつては真っ直ぐだったものが、数千年前に弓形に曲ったことも、岩石中の磁場を調べることより証明できる。

このような、磁気の記録は、湖底や海底の沈殿物中にもある。これは、これらの沈殿物は地球の過去のちりであり、このちりには磁気を帯びた鉄分が含まれる。この鉄分の磁気はそのちりが沈んだときの地球の磁場の方向を向いている。



我々のまわりの磁場の大きさ

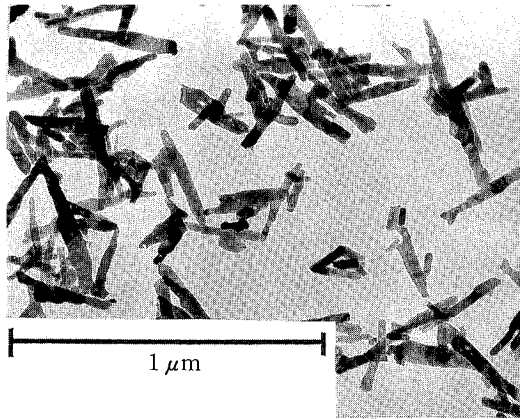
磁気記録の原理

強磁性体やフェリ磁性体は磁場をかけたとき、強磁性体のところで述べた、ヒステリシス特性を示す。この特性を利用して、磁性体を正か負どちらかに磁化することで、0と1の2値情報を記録できる。テープやディスク上の磁性体の微小部分を順次連続的に正あるいは負に磁化させて、狭い範囲に多数の情報を書き込んだものが磁気テープや磁気ディスク記録装置である。これらは磁気メディア（媒体）と呼ばれる。たくさんの情報を書き込むためにはテープやディスク上の磁性体の高密度化が必用である。

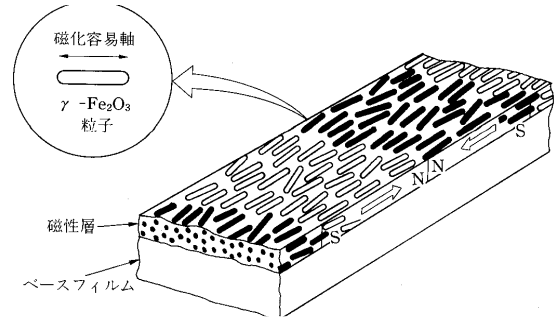
磁気テープとフロッピーディスク

フェリ磁性体である針状の Fe_2O_3 粉末をプラスチック基板の上に塗布したもので、比較的安価にできるので、カセットテープ、TVのビデオテープ、パソコンのフロッピーディスク

など、我々の日常生活で最もよく使われているものである。針状の Fe_2O_3 粉末やそれを塗布したテープは次図のようになる。磁気テープのプラスチックは、機械的強度があり、

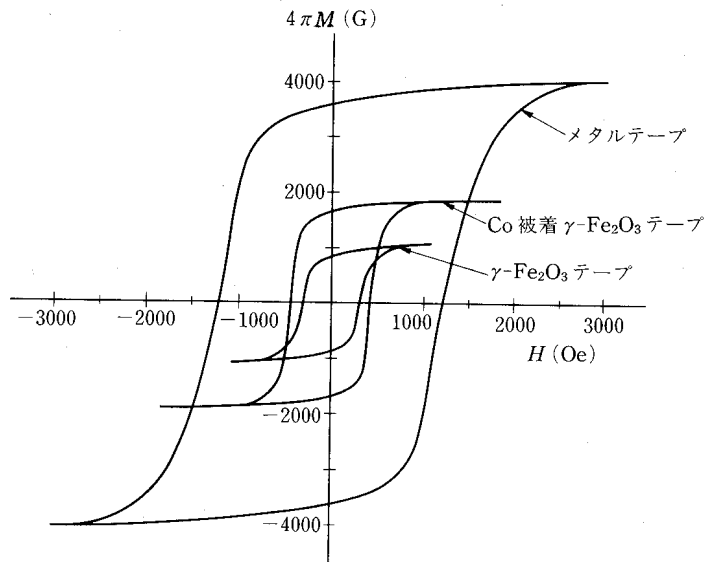


磁気記録用酸化鉄粉末



かつ、安価なポリエチレンテレフタレートである。磁気テープの色は磁性体の色である。

Fe_2O_3 磁性体粉末をコバルト (Co) 膜で覆って保磁力を高めたものをベースフィルムに薄く塗布することにより記録特性を一段と高めることができる (Co 被着 Fe_2O_3 テープ)。さらに、 Fe_2O_3 磁性体粉末よりも粒径が小さく磁気特性も改善された鉄系メタル粉を塗布して得られる高性能の磁気テープ (メタルテープ) や磁気ディスクも開発されている。



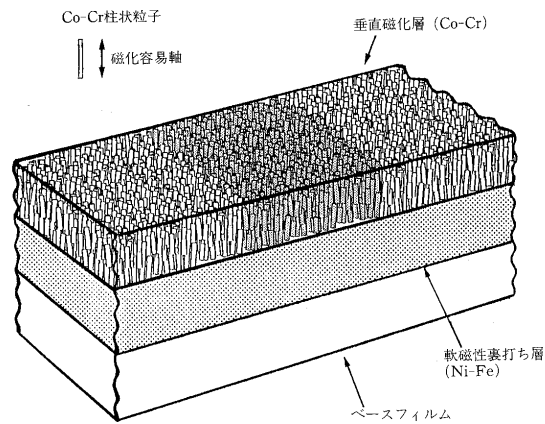
各種磁気メディアのヒステリシスループ

以上はプラスチックフィルムに磁性体を塗料として塗り付けることによりできる磁気記録媒体で、塗布型磁気媒体といえる。

なお、テレホンカード、キャッシュカード、各種クレジットカードもこの方法で作られた磁気カードである。塗布型磁気媒体においては、図から明らかなように、磁性体はフィルム面と平行になっている。もっと高密度の磁気記録媒体を得るには、磁気媒体をフィルム面に垂直にしてやる必要がある。

垂直磁化方式による磁気記録媒体

アルゴンガスを放電させてプラズマ状態にし、アルゴンのイオンを金属合金に衝突させてやると、合金からその成分原子が高速で飛び出してくる。そこに、プラスチックフィルムを置いておけば、その面上に、薄い金属の膜を積層させることができる。このような方法（スパッタ法）を、特別な条件下で、うまく利用すれば次の図のようなフィルム面と垂直な方向に磁化される特性をもつ磁気記録媒体をつくることができる。

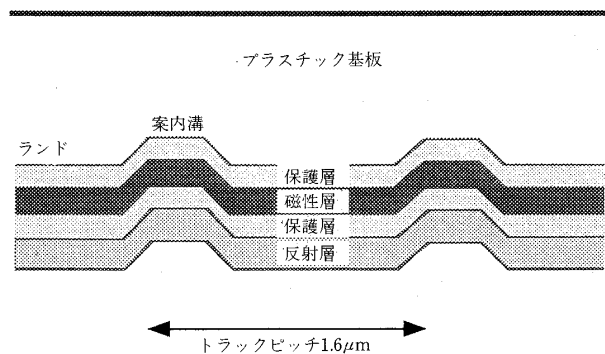


光磁気ディスク (MO ディスク)

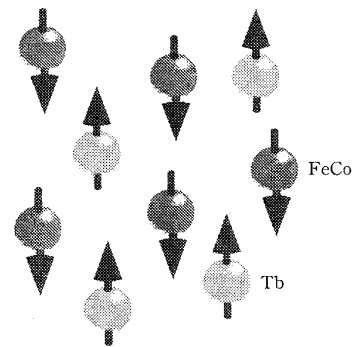
magneto-optical disk

(ある決まった平面でのみ振動する光である) 直線偏光が磁性体で反射されるとき反射光の偏光面は回転する。磁化の向きが逆になれば、反射光の偏光面の回転も逆になる。

この原理を利用して、磁気記録記録の読み取りを行うのが光磁気記録装置である。光磁気ディスクの断面形状は



のようになっている。磁性材料としてははテルビウム Tb, 鉄 Fe, コバルト Co の合金がよく使われる。図の磁性層は、スパッタ法で作られたこの合金のアモルファス状態の膜である。この膜は面に垂直方向に磁化される性質を持っている。微視的には、左図のように磁化される。すなわちフェリ磁性体である。ディスクは記録情報を持たないときには、全て一定方向に磁化されている。このディスクへの記録は、半導体レーザー光のパルス記録したい領域に照射して、照射部分を加熱し、反対向きの磁場をかければ、磁化を容易に反転させることができるという現象の利用により行う。



これを光熱磁気記録という。

将来，未来????

超高面密度記録の可能性

従来来の技術の延長上

有機磁性体分子の設計

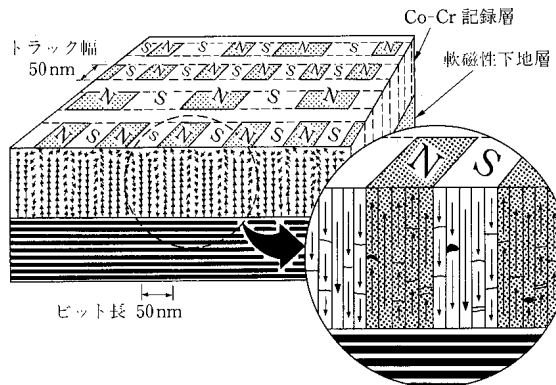


図 28 垂直磁化方式における超高面密度記録の可能性

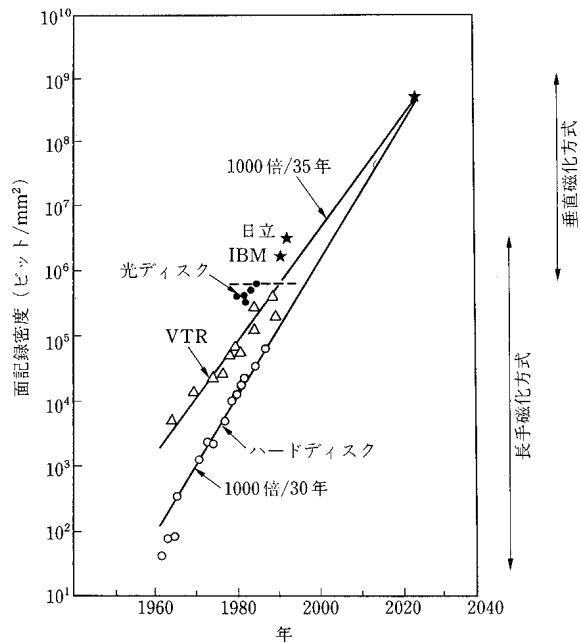


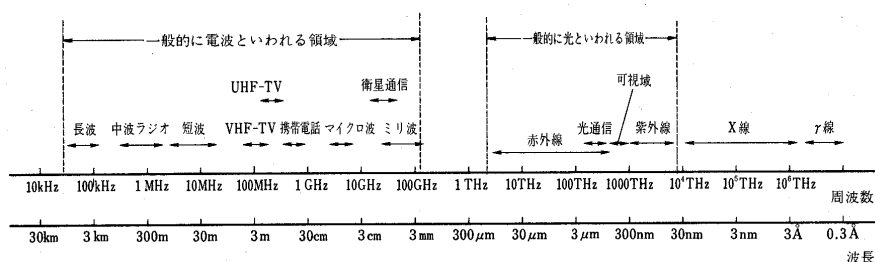
図 29 磁気記録技術における面記録密度進展のトレンドと将来の可能性

物質中での光の伝導...光ファイバーと我々の世界

諸君は光ファイバーという言葉を目にしたことがあるであろう。我々が日常使っている電話、Fax、パソコン通信等の信号は、最近では、パルス状の光として光ファイバーの中を伝わっていることが多いのである。

参考書：

稲田浩一，マルチメディアで夢を送る光ファイバの話，1995，裳華房



真空中の電磁波

電磁波は真空中を秒速 30 万 km で、真っ直ぐに進む。我々が日ごろ電波と呼んでいるものも、光と呼んでいるものも、また放射線と呼んでいるものも全て電磁波であり、同一の性質を持つ。違いは波長（ないしは振動数）のみである。

地上の電波と光（電磁波）

電波も光も波長こそ違え、同じ電磁波であるが、真空中とは異なり、地上では違ったふるまいをする。これは、地球上の大気圏には、空気、ちり、ほこり、雲の成分である雨粒や氷の粒が存在するためである。これらの粒子は、電気の影響下で分極する誘電体と考えることができる。電磁波は電気量の振動であるので、大気圏に存在する（その電磁波の波長の 10 分の 1 以下の大きさの）粒子と出会うとそれを分極し、互いに電気的な相互作用をするので、直進できず散乱されることになる。これをレイリー散乱というが、この散乱の強さは電磁波の波長の 4 乗に逆比例することが知られている。したがって、大気圏では、電磁波は波長の小さなものほど強く散乱されることになる。別の言い方をすれば、波長の大きな電磁波ほど、散乱されず、直進する可能性が大きいといえる。空の色が青いのはこのためである。また夕焼けもこのレイリー散乱で説明できる。電磁波のうち、我々が光と呼んでいるものは、曇っているときには、雲の水滴によって散乱されてしまい、直進できないが、電波は水粒子によって散乱されず、直進することができる。このため、ごく最近まで、信号の伝達には主に電波が用いられてきた。

日常我々が使っている電波

UHF Ultra High Frequency wave

波長 0.1~1 m デシメートル波, 極超短波

VHF Very High Frequency wave

波長 1~10 m メートル波, 超短波

HF High Frequency wave

波長 10~100 m デカメートル波, 短波

MF Medium Frequency wave

波長 100~1000 m ヘクトメートル波, 中波

波長 と振動数 の関係 = 3×10^8 m/sec

(m)	0.3	3	30	300
(1/sec or Hz)	10^9	10^8	10^7	10^6

Radio

AM (Amplitude Modulation 振幅変調)

530 ~ 1600 kHz (MF 波)

FM (Frequency Modulation 周波数変調)

76 ~ 90 MHz (VHF 波)

電磁波と通信

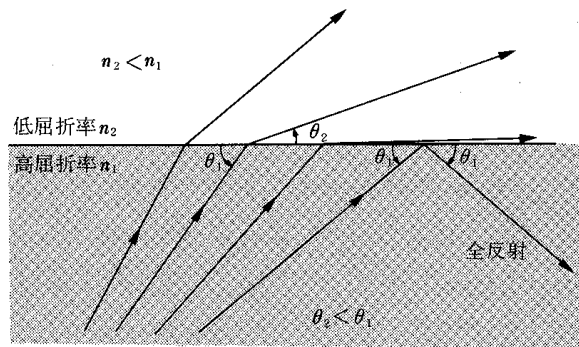
通信においては, 情報はパルス状の電磁波として発信される。したがって, 波長が小さいほど, 一度にたくさんの情報を送ることができる。実際, 前ページの図から分かるように, 衛星通信では, 1cm 前後の波長の電磁波が使われている。この意味では, もっと波長の小さな電磁波を通信に用いた方が, より望ましいことになる。しかし, 既に述べたように, 波長の小さな電磁波ほど, 大気中の粒子による散乱(レイリー散乱)を受けるため, このような電磁波を通信に使うと, 雨, 霧, 雪などの天候の影響が強くなってしまふ。

散乱による損失を少なくして,

波長の小さな電磁波を通信に使うにはどうすればよいか

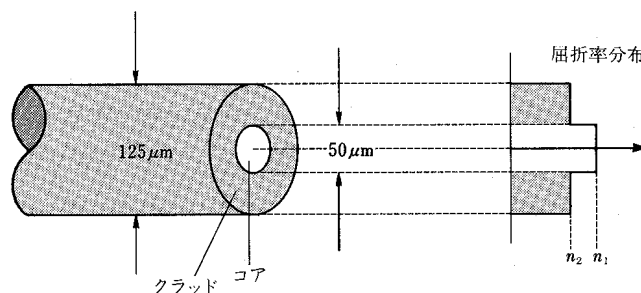
真空中では, 散乱による損失がないことから, 最初は, 電磁波を中空の管の中で送信するような研究がなされたがうまく行かなかった。その後発想の転換がなされ, できる限り不純物を除いた石英ガラスのような透明な純物質中では, レイリー散乱が非常に小さく, 電磁波の損失が少ないこと, および, 光は屈折率の大きな物質から小さな物質へは, 全反射のために, ほとんど出てこないことに着目し, 波長の小さい電磁波を, 物質中で伝搬させることにより, 通信を行なうことが可能になった。これが現在諸君が耳にする光ファイバーによる通信であり, 大規模に利用されだしてから, まだ 10 年に満たない。

屈折率の大きな物質から屈折率の小さな物質への光と光ファイバー



図のような場合、高屈折率の物質中を伝わる光は低屈折率の物質との境界面への入射角が大きいと、一部は反射し、残りは角度を変えて透過していく。しかし、境界面への入射角がそれほど大きくないときには、光は全て反射（全反射）し、低屈折率の物質中へ透過することはできない。これは高屈折率の物質を低屈折率の物質で包んでやれば、光は外に漏れることなく高屈折率の物質中を伝わることを意味する。これが光ファイバーの原理である。実際光ファイバーは右図

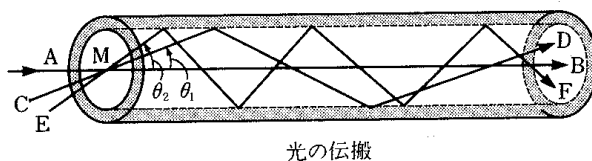
のような構造を持っている。ここでコアが高屈折率の物質で、石英に Ge を添加した物質であり、クラッドは石英である。ところで、このような光ファイバーの石英ガラスは、



(天然の水晶には不純物が含まれすぎ、利用できないので、) 化学的合成したものを、物理的に処理し、できる限り、 SiO_2 、 GeO_2 以外の物を含まないようにつくられる。

光ファイバーの構造と種類

光ファイバーは右上図のように、コアとクラッドからなる。一本の光ファイバーの直径は 125 μm (0.125mm) である。たいていの光ファイバーのクラッドは純粋な石英でできているが、コアの部分の構造は用途にしたがって異なっている。右上図のようにもしコアの部分全体が同一の物質からなり、その直径が 50 μm である場合には、コア中を伝わる光は AB、

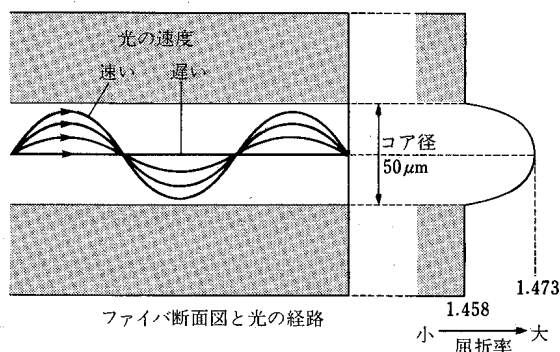


CD、EF といった伝わり方（モードといわれる）が可能である。光の速度は一定であるが、図の B、D、F では経路が異なるため、M を同一時刻に出た光の信号が、

これらの点に到達する時刻は異なる。このために、コア中での光の進行速度はモードで異

なることになり、信号は歪んでしまう。これをさける方法は2つあり、光ファイバーも2種類あることになる。

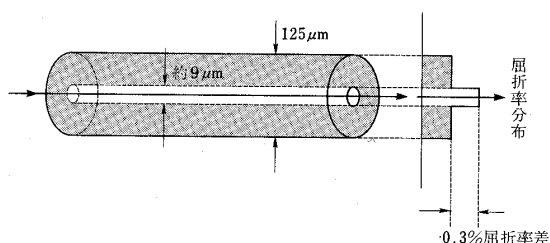
(1) グレーデッドインデックス多モードファイバー



SiO₂にGeO₂を混ぜると屈折率が増大する。この混合比を適当に調整することにより、どの経路を通る(どのモードの)光も同じ速度で進むように、コアの屈折率を中心から遠ざかるにつれて小さくなるようにすることができる。しかし、現実にはすべてのモードが同一の伝搬速度をもつような光ファイバー

をつくることは大変難しいため、次に述べる光ファイバーほどには、大規模に使われていない。しかしこのファイバーはコア径が大きく、光の入射が容易なため、LAN等の特別な用途には使われている。

(2) シングルモードファイバー



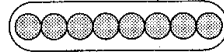
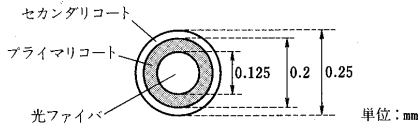
コア径を細くし、左図のような構造にしてやると、一つのモードの光しか伝わらない。この光ファイバーが現在、長距離の幹線路や加入者線路などの公衆回線に使われる光ファイバーである。このファイバーで使

われる光の波長は1.31μmで、この場合のレイリー散乱等による光の損失は1kmあたりおよそ8%である。このファイバーで1.31μmの波長の光が使われる理由は、この波長を使うと、1秒間に送れる信号が最大になるからである。情報を信号として送るには、それを0か1に直し、それに対応する光のパルスに変換される。このようなパルス信号をできるだけたくさん送るには、パルスの幅ができる限り小さいことが望ましい。この構造の光ファイバーでは1.31μmの波長の光が最も小さなパルス幅で伝わる。これ以外の波長の光では、パルスが広がって、パルス同士が重なってしまうので、パルス幅を狭くできない。コアの屈折率を変えてやれば、そこで最も効率よく(最低のパルス幅で)伝わる光の波長(これを光ファイバーの伝送帯域が最大になる波長という)は異なる。

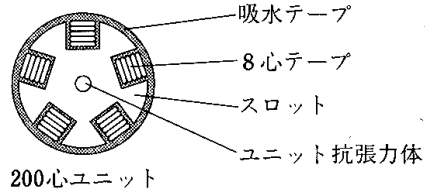
ところで、石英ガラスファイバーの光の伝送損失が最低になる波長は1.55μmである。この場合には、1kmあたりの光の損失は4%である。長距離通信においては、光の損失を少なくするために、この1.55μmの波長を使うのが望ましいが、それでは、伝送地帯が最大

にはならない。コアの屈折率をうまく調整しこの波長で、最大の伝送帯域になるような光ファイバーも最近作られている。これを分散シフトファイバーという。

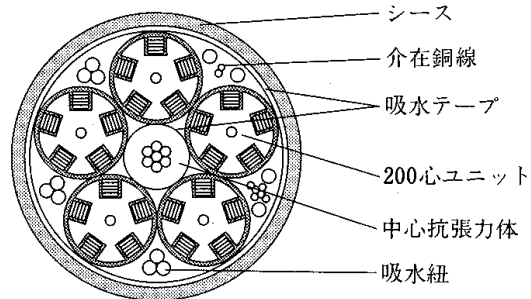
光ケーブルの構造



8心テープ厚さ：0.4mm、幅：2.2mm



200心ユニット

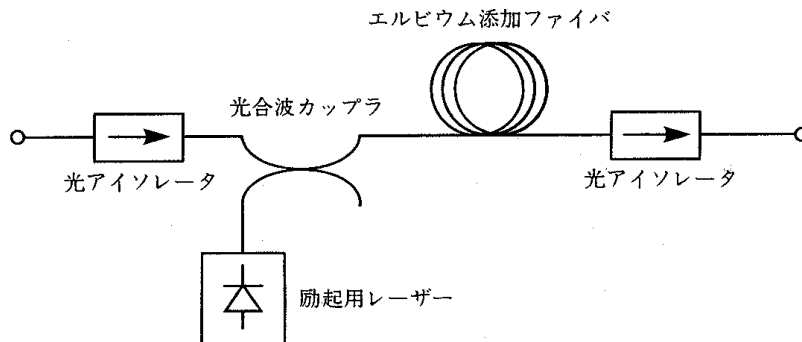


外径：40mm
1000SM-WBM

光ファイバー増幅器

すでに述べたように、光ファイバー中の光は1km進むと少なくとも96%に減衰する。これは100kmでは、 $0.96^{100} = 0.017$ 、光は1.7%以下の強度になってしまうことを意味する。したがって、長距離通信では、100kmくらいごとに、中継器で信号を増幅してやらなくてはならない。中継器では、光を受光素子で受け、電気信号に直して、この電気信号を増幅した後、再びレーザー光に直して送り出している。

最近実用化された増幅器はシングルモードファイバーのコアの中に、希土類元素であるエルビウム Er を添加しただけのきわめて単純なものである。この光ファイバーは1.55



μm の光を吸収してしまう性質がある。このファイバーに $1.48\mu\text{m}$ のレーザー光を送り込んで、エネルギー準位の逆転分布をつくってやれば、 $1.55\mu\text{m}$ の光の誘導放出が起きる。これはまさに $1.55\mu\text{m}$ の光の増幅に利用できる。

光ファイバー通信網

NTT による大容量の幹線路

