

まえがき

電波はテレビやラジオは勿論、衛星通信、携帯用電話、カーナビゲーションなどで広く使われ、今日の我々の生活に不可欠な存在となっている。その上、昨年 10 月には、家庭へ引き込まれている電力線（電気配線）をインターネット配線としても利用しようという高速電力線通信（PLC）が解禁され、電波は電力線に乗って家庭内に深く入り込むようになって来た。しかし、“電波とは一体何なのか”と問われると、その性質、振舞いについて正しく答えられる人は少ない。それは、電波が海の波や音波、超音波のような媒体の振動の波ではなく、目に見えない電気（正確には電界と磁界）の振動の波であること、又、真空中でも伝わり、光の速度で極めて遠方にも達するという特異な性質をもっていることから、その存在を実感し難いからである。しかし、宇宙誕生の昔から宇宙空間は電磁波で満たされ、光と同様に電磁波の一種である電波もその例外ではない。すなわち、雷放電などに伴って発生する、自然界には元々存在している波動である。

本書は、このように身近かな存在である電波について、その正体に迫り、電波の本質を理解する手助けとなる入門書として記述されたもので、主として電波の物理的性質に焦点が当てられている。光の性質やベクトルの概念について、ある程度の知識を持っている者であれ

ば、読み流すだけで理解できるように、数式類は説明に欠かせないもののみを本文中に記載し、極力注として各節の最後に収めている。また、直感的に説明内容が把握できるように、図面類を数多く取り入れてある。本書が電波の正体、本質を理解し、電波に一層の親しみを感じられるようになるための手助けになれば幸いである。

なお本書を執筆するに当たり、内外の数多くの書籍や論文、資料を参考にさせて貰った。これらの著者や執筆者にお礼を申し上げる。

最後に本書の執筆を勧めて下さった元シュプリンガー・フェアラーク・東京（株）社長の平野皓正氏を始め、出版に当たり、お世話になった（株）一灯舎の関係者の方々にお礼を申し上げる。

2007年5月 中司 浩生

目次

まえがき	iii
第 1 章 電波とは	1
1.1 電波の正体	2
1.2 電磁波と電波	3
1.3 平面波	3
1.4 電波はエネルギーを運ぶ	7
1.5 定在波とは	9
1.6 電波は情報を運ぶ	12
第 2 章 電波はどのように伝わるか	17
2.1 大気中を伝わる時	17
2.2 非導電性媒質平面へ入射するとき	27
2.3 導体に沿って伝搬するとき	33
第 3 章 電波の放射と受信	45
3.1 アンテナの利得とビーム幅	46
3.2 偏波の違い	55
3.3 円偏波の性質と雨滴反射波の除去	58
第 4 章 電波は物体に当たるとどのように散乱するか	61
4.1 散乱断面積	62
4.2 代表的物体の後方散乱断面積	63
4.3 円偏波による円柱径の推定	66

4.4	前方散乱波のふしぎ	68
第 5 章	電波は金属や水中では強く減衰する	73
5.1	電波の浸透の深さ	73
5.2	水中へ電波が放射される時	76
第 6 章	エネルギーを担う電波の利用	81
6.1	電子レンジの話	82
6.2	マイクロ波ビームによる電力の伝送	84
6.3	衛星太陽エネルギー発電所 (SSPS) の概要	87
	主な参考文献	91
	著者略歴	93
	索引	95

図表目次

図 1.1	電磁波の名称	4
表 1.1	電磁波の周波数帯の区分	5
図 1.2	平面波の伝搬	6
図 1.3	平面波の運ぶ電力と交流回路を流れる電力	8
図 1.4	定在波	11
図 1.5	振幅変調	14
図 1.6	周波数変調	15
図 2.1	大気による電波の屈折	18
図 2.2	見通し距離の拡大と等価地球半径	19
図 2.3	回折による電界強度の変化	21
図 2.4	平面反射体と電波の伝搬経路	22
図 2.5	海面上の無指向性アンテナの干渉パターン	23
図 2.6	電離層による f_c 電波の透過と反射	25
図 2.7	平面波の反射と透過	27
図 2.8	ブルースター角と全反射の臨界角	28
図 2.9	入射角 θ_1 の変化に伴う海水の反射係数の変化	30
図 2.10	層状媒質による平面波の反射と透過	31
図 2.11	同軸線路	35
図 2.12	同軸線路内を流れる電力	36
図 2.13	平行 2 線式線路を取り巻く電気力線と磁力線	37
図 2.14	平行 2 線式線路のオーム損	38
図 2.15	投波器から放射される表面波	39
図 2.16	導波管断面内の電気力線と磁力線	41
図 2.17	導管波の高次モードの例	42
図 2.18	ストリップ線路と電気力線	43
図 3.1	半波長アンテナ	47

図 3.2	半波長アンテナによる放射電界の概念図	48
図 3.3	パラボラアンテナによる放射電界の概念図	48
図 3.4	パラボラアンテナへの平面波の入射	50
図 3.5	半波長アンテナの実効開口面積	51
図 3.6	アンテナ (電力) パターン	52
図 3.7	水平偏波の送, 受信	56
図 3.8	楕円偏波/円偏波の発生	57
図 3.9	円偏波利用による球状反射体からの反射波の除去	58
図 4.1	平面波の入射と散乱	62
図 4.2	円偏波による円柱径の推定	67
図 4.3	物体と前方散乱パターン	69
図 4.4	前方散乱波を利用したレーダの一提案	71
図 5.1	導体内部での電波の減衰と浸透の深さ δ	74
図 5.2	表皮効果による電流密度の減少	75
図 5.3	海面へ電波を入射させたときの様子 (曲線は電界を表わす)	78
図 6.1	電子レンジの概要を示す図	83
図 6.2	マイクロ波ビームによる電力の伝送	86
図 6.3	衛星太陽エネルギー発電所 (SSPS) の基本構想	87
図 6.4	マイクロ波送, 受電の構想	88

第 1 章

電波とは

電波は、その存在を理論的に予言したのがマックスウェルで、1864年のことであった。次いで1888年にヘルツが火花放電によって電波の発生に成功し、更に1896年にはマルコニーがこれを用いた通信（無線通信）の方法を発明している。以来、1世紀以上の間に今日のような目覚ましい電波の利用技術の進展が見られ、電波は我々が生活してゆく上で不可欠なものとなっている。

電波は“人工的導波体の無い空間を伝搬する3,000GHzより低い周波数の電磁波”の呼称とされている。しかし、導体に沿って伝搬する電磁界の波も、本質的には電波と変わりはない。単に、伝搬形態が異なるだけである。このような理由から、以下の章では広い意味で“電波”という言葉を用いている。ここでは先ず“電波とは”と題してその本質に迫ってみたい。

1.1 電波の正体

下敷きを毛皮で擦れば電気が発生する。これは下敷きが毛皮を構成している分子から電子を剥ぎ取り、毛皮がプラスの電荷を、下敷きがマイナスの電荷を得た結果である。

さて、このような電荷が、ある空間に存在すると、その周囲には電界が発生するが、これはその電荷に他の電荷を近づけると、それに力（電気力）が働くことから、その存在が認められる。そして、このことは、そこに他の電荷を動かそうとする能力、つまり、静電エネルギーが存在していることを示している。また、この電荷が移動すると、電荷の移動（流れ）はすなわち電流であるから、移動する電荷の周囲に磁界が生じ、磁気エネルギーが発生する。

さて、池に石を落とすと、落とした箇所で水面が上下振動を起こして水の波が周囲に広がってゆく。これと同じように、電荷が短い距離を往復運動（振動）すると、振動電荷が存在する位置を中心として同心球面状の波面を画いて電界と磁界の波がエネルギーを担って広がってゆく。これが電波である^{注1}。そして、電磁エネルギーが伝搬する速度、すなわち電波の速度は光速に等しく、自由空間中で約 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ となる^{注2}。

注 1

電界 \mathbf{E} 、磁界 \mathbf{H} が時間的に変化すると、次のマックスウェルの方程式の右辺が零ではなくなる。

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

ここで、 $\nabla \times$ はベクトル演算子の記号、 ε, μ はそれぞれ自由空間の誘電率、透磁率である。

つまり、振動磁界 \mathbf{H} は振動電界 \mathbf{E} を発生させ、発生した振動電界 \mathbf{E} は新たに振動磁界 \mathbf{H} を発生させるという関係が継続することになる。そして、波源（ここでは振動電荷、又は振動方向に沿う微小区間を流れる振動電流）の近くでは、距離の 3 乗および 2 乗に逆比例する電磁界成分が優勢であるが、十分遠方では距離の 1 乗に逆比例する電磁界成分が進行波となって観測される。これが放射電磁界（電波）である。又、放射電磁界の強度は、振動周波数に比例し、電荷の振動軸に対し垂直方向で最大、軸方向で零となる。

雷放電は短時間に数多くの振動電流を発生し、周辺にいわゆる電磁パルスを放射する。

注 2

マックスウェルの方程式から導かれる波動方程式の解に伴って、電磁波の伝搬速度 v は、 $v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$ と求められる。自由空間（真空）中であれば $\varepsilon = \varepsilon_0 \simeq 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 、 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ と置き、 $v = c \simeq 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ となる。

1.2 電磁波と電波

電波は図 1.1 に示すように電磁波の中で最も低い周波数の分類に属するもので、波長が 0.1mm 以上のものを言っている（ただし、赤外線の種類では波長 1mm までが赤外線に含まれる）。表 1.1 は電波の周波数帯の区分を示している。

なお、電波は電界と磁界の波であることから、これを強調する意味で電磁波と呼ぶことも多いが、本来はその一部を指すものである。

表 1.1 電波の周波数帯の区分

周波数範囲	略称	名称	波長	
3~3,000Hz	ELF	超長波	$10^5 \sim 10^2$ km	
3~30kHz	VLF		100 ~ 10 km	
30~300kHz	LF	長波	10 ~ 1 km	
300~3,000kHz	MF	中波	1 ~ 0.1 km	
3~30MHz	HF	短波	100 ~ 10 m	
30~300MHz	VHF	超短波	10 ~ 1 m	
300~3,000MHz	UHF	極超短波	} マイクロ波 1 ~ 0.1 m	
3~30GHz	SHF	センチ波		10 ~ 1cm
30~300GHz	EHF	ミリ波		10 ~ 1 mm
300~3,000GHz		サブミリ波	1 ~ 0.1 mm	

1.3 平面波

1.1 節で述べたように、電波は波源を中心として同心球面状の波面を画いて伝播してゆくが、このような球面状の波面も波源から遠く離れてその 1 部分を眺めれば平面状の波面として見える。このような平面状の波面を持つ電波を特に平面波（又は平面電磁波）と呼び、電波の性質を考える上での基本としている。

さて、電界や磁界の中で電荷や磁荷の受ける力の方向を表わす曲線を、それぞれ電気力線、磁力線と呼ぶが、平面波はこれら電気力線と磁力線を、布で言えば縦糸と横糸のように発生させながら、布の面（波面）全体がそれに垂直な方向に進んで行く波というイメージで捉えることができる。このとき、波面は電界、磁界が 1 回振動する間に 1 波長だけ波源から遠去かって行く。したがって、1 秒間には波長の

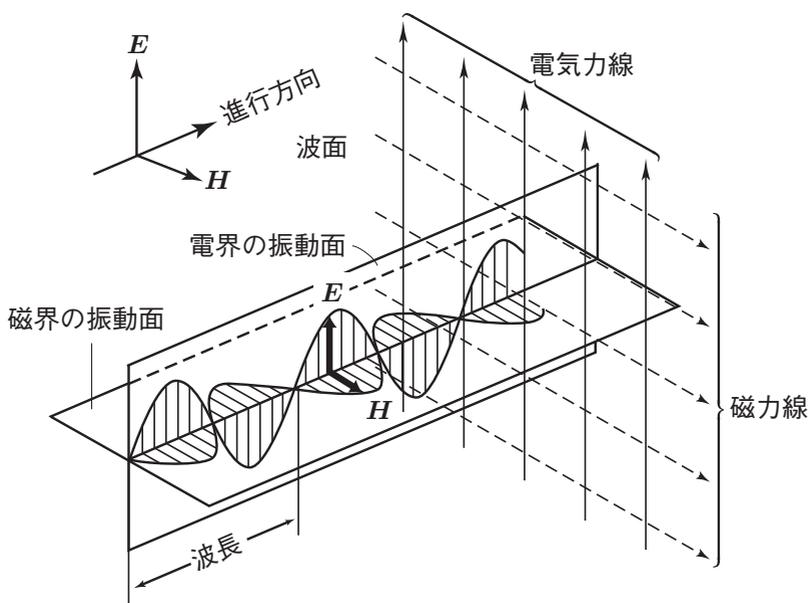


図 1.2 平面波の伝搬

振動数（周波数）倍だけ進むことになり，自由空間中ではこの距離が約 $3 \times 10^8 \text{m}$ になる．図 1.2 は進行方向に対して垂直な面内で電磁界が振動しながら伝播してゆく様子を示している．音波が媒質の振動方向と同じ方向に伝播する縦波であるのに対して，電波は横波であることが分かる．

1.4 電波はエネルギーを運ぶ

電波はエネルギーを担って伝搬し、そのエネルギーの大きさは単位時間当たりの値である電力によって計られる。電波は図 1.2 に示すように電界と磁界が正弦波振動を行いながら自由空間を伝搬するので、電界、磁界の強さを、その振幅の $1/\sqrt{2}$ の値、すなわち実効値 $E[\text{V/m}]$ 、 $H[\text{A/m}]$ で表わせば、平面波が運ぶ電力は、波面の単位面積当たり $EH[\text{W/m}^2]$ となる。これは、交流回路で給電線に実効値 $V[\text{V}]$ の電圧が掛り、 V と同相で実効値 $I[\text{A}]$ の交流電流が流れれば、負荷に供給される電力は $VI[\text{W}]$ で表されるのと全く同じ関係になる（図 1.3 参照）。又、交流回路では、 V/I は特性抵抗 R_C に等しく^{注3}、給電線の幾何学的寸法に依存するが、平面波では E/H は特性電波インピーダンス Z_i に等しく、媒質の誘電率 ε と透磁率 μ に依存する。真空中では $Z_i = 376.7\Omega$ となる^{注4}。

さて、地球表面に届く太陽からの放射エネルギーは、放射に垂直な面の 1cm^2 当たり、毎分約 2.2 カロリーとされている。これと同じエネルギーを、もし電波で送るものとしたとき、電界、磁界はどのような大きさになるであろうか。

これは、前述のように、平面波は単位面積当たり $EH[\text{W/m}^2]$ の電力を運び、又、 $E/H = 376.7\Omega$ であることから、容易に電界 $E = 7.6 \times 10^2 \text{V/m}$ 、磁界 $H = 2.0 \text{A/m}$ と求められる^{注5}。

なお、電界ベクトルと磁界ベクトルの方向が分かっている場合、電波の進行方向（電力の伝わる方向）は図 1.2 から分かるように、 \mathbf{E} ベクトルを \mathbf{H} ベクトルの方向へ回転させたとき、右ねじの進む方向になる。

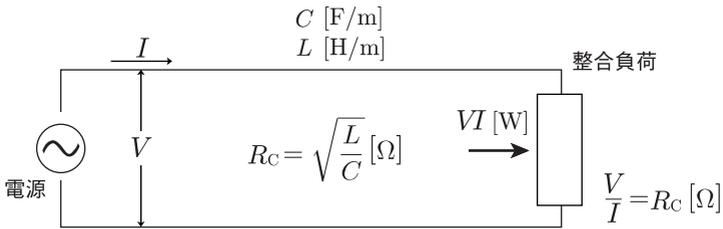
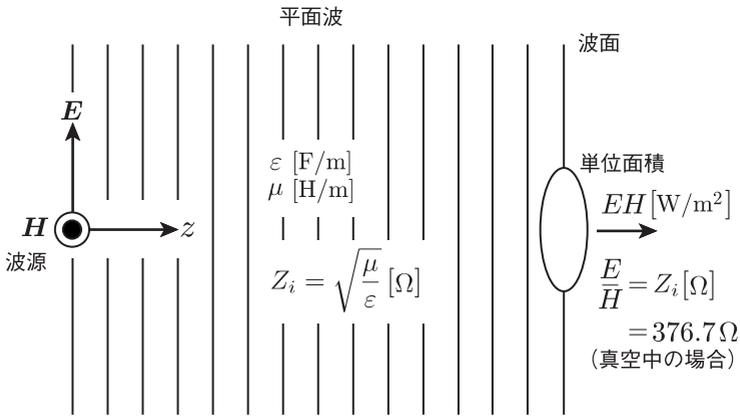


図 1.3 平面波の運ぶ電力と交流回路を流れる電力

注 3

負荷に R_c に等しい抵抗（整合負荷）が接続されているとしている。

$$R_c = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega]$$

ここで、 C, L はそれぞれ給電線の単位長当たりの並列キャパシタンス、直列インダクタンスである。

注 4

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} [\Omega]$$

真空中では $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$ より, $Z_i = 376.7\Omega$ となる.

注 5

単位面積を通過する電力は $EH = E^2/Z_i = E^2/376.7[\text{W}/\text{m}^2]$ で表されるから, これを 1m^2 当たり毎秒降り注ぐ太陽エネルギー, すなわち $2.2 \times 4.2 \times 1/60 \times 10^4 \text{W}/\text{m}^2$ に等しいと置けば求められる.

1.5 定在波とは

海の波が岸壁に当たって戻って来るとき, 岸壁に向かう波と戻って来る波が干渉して, 岸壁の近くでは上下振動する波として観測される. このような波を定在波 (又は定常波) と呼んでいる. そして, 定在波は波動に共通して発生し得る現象である. そこで, ここでは定在波について一望しておこう.

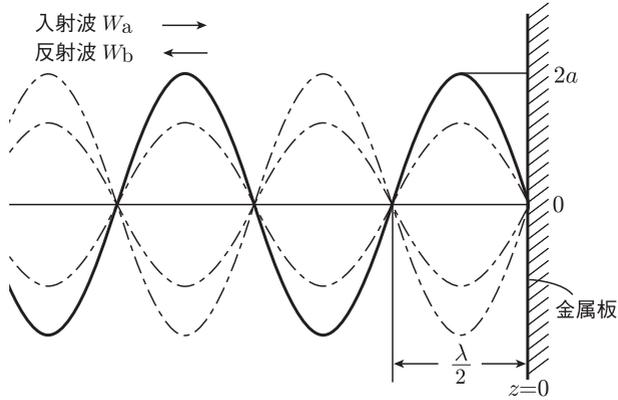
今, 角周波数 $\omega (= 2\pi f, f$ は周波数) で正弦波振動する 2 つの電磁界 W_a, W_b が z 軸に沿って互いに逆方向に伝搬する場合を考える. このとき W_a, W_b の振幅をそれぞれ a, b (ただし $a > b$ とする) とし, $t = 0, z = 0$ において W_b の位相が W_a の位相より θ だけ遅れているものとすれば, W_a, W_b はそれぞれ,

$$W_a = a \cos(\omega t - \beta z), \quad W_b = b \cos(\omega t + \beta z - \theta)$$

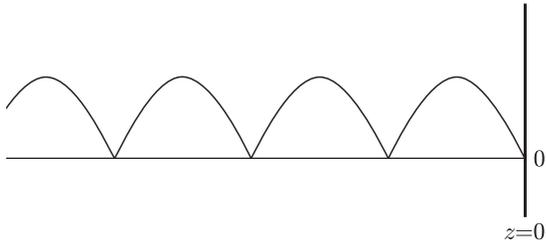
と表すことができる^{注6}. ここで, $\beta = 2\pi/\lambda$, λ は波長である.

これらの合成電磁界 $W_a + W_b$ は、同様に角周波数 ω の振動電磁界となるが、その振幅は $\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(2\beta z - \theta)}$ で表され、 z 軸上の位置によって決まった値を示す。すなわち、 z 軸上の各点において、電磁界が上述の振幅で角周波数 ω で振動し、振幅の最大値、最小値はそれぞれ $a + b, a - b$ となることが分かる。これら最大値、最小値は、いずれも z 軸上で $\lambda/4$ 毎に繰返されることも明らかである。

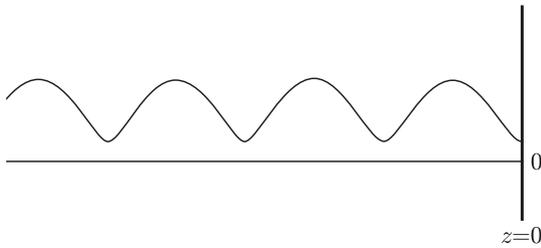
特別な場合として、平面波が金属板に当たって完全反射される場合の合成電界についてみると、金属板への入射電界と反射電界をそれぞれ W_a, W_b と置けば、完全反射であるから、 $a = b$ 、又、金属板表面で合成電界は零にならねばならないから^{注7}、 $\theta = 180^\circ = \lambda/2$ と置くことができる。したがって、入射波と反射波の合成電界の振幅は前式にこれらの値を代入して、 $\sqrt{2a\sqrt{1 + \cos(4\pi/\lambda \cdot z - \lambda/2)}}$ で表され、図 1.4(a) のように、最大値が $2a$ 、最小値が 0 となる。このような振幅を持つ振動電界を包絡線検波すると^{注8}、同図 (b) のような波形が得られる。なお、詳細説明は省略するが、反射板で完全反射されない場合 ($a > b$ の場合) について包絡線検波波形を示すと同図 (c) のようになる。



(a) W_a と W_b の振幅が等しい ($a = b$) 場合の合成波形



(b) (a) の包絡線検波波形



(c) $a > b$ の場合の包絡線検波波形

図 1.4 定在波

注 6

$a \cos(\omega t - \beta z)$ は $t = 0$ における波形 $a \cos \beta z$ を z 軸の正方向に $\omega/\beta t$ だけ平行移動した式に相当するから、 $t = 0$ における波形が t 秒後に $\omega/\beta t$ だけ z 軸の正方向に進んだことを意味する。つまり、本式は $\omega/\beta = \lambda f = v$ なる速度で z 軸の正方向に進む波を表している。同様に $b \cos(\omega t + \beta z)$ は同じ v なる速度で z 軸の負方向に進む波を表している。

注 7

完全導体表面においては、電界の接線成分が零、磁束密度（したがって、磁界）の法線成分が零になる。これを境界条件と呼んでいる。

注 8

ダイオードのような整流素子で高周波電圧（電流）を検波して、直流を含む低周波の電圧（電流）に直し、振動波形の包絡線を取り出すことを包絡線検波という。

1.6 電波は情報を運ぶ

電波が今日のように放送や情報通信の分野で広く使われるようになったのは、電波がいろいろな情報を瞬時に目的地へ伝達してくれるからに他ならない。ところで、この情報は電波を搬送波としてこれを変調することによって電波に乗せられ、受信側でこの電波を復調することによって再び取り出され利用される。このように、電波による情報伝達の問題は、主として変・復調技術の問題となるので、詳細については無線工学の専門書に委ねることとして、ここでは最も基本的な

変調方式である振幅変調について、その原理を概観するに止める。

振幅変調は、文字通り情報伝達を搬送波の振幅変化によって行うものである。今、搬送波が z 軸の正方向に進む電波で、その振幅を A 、角周波数を $\omega (= 2\pi f, f$ は搬送周波数)、位相を ϕ とすれば、搬送波は

$$A \cos(\omega t - \beta z + \phi) \quad (1)$$

で表される。ここで、 $\beta = 2\pi/\lambda$ 、 λ は波長である。

したがって、これを振幅 B 、角周波数 $\omega_m (= 2\pi f_m, f_m$ は変調周波数) の変調信号

$$B \cos \omega_m t \quad (2)$$

で振幅変調すると、振幅変調波は

$$W = A(1 + m \cos \omega_m t) \cos(\omega t - \beta z + \phi) \quad (3)$$

の形になる。ここで、 W は振幅変調波の瞬時値、 $m = B/A$ は変調度である。

図 1.5 は変調信号と振幅変調を受けない搬送波および受けた搬送波(振幅変調波)を示している。図で振幅変調波の包絡線は変調信号に相当し、情報はこのような形で搬送波に乗り伝達される。

なお、一般には変調信号は正弦波信号とは限らず複雑な波形を持つ信号となるので、一般的な時間関数 $g(t)$ で表されねばならない。したがって、式 (2) の代わりに $Bg(t)$ と置き、振幅変調波は式 (3) の代わりに

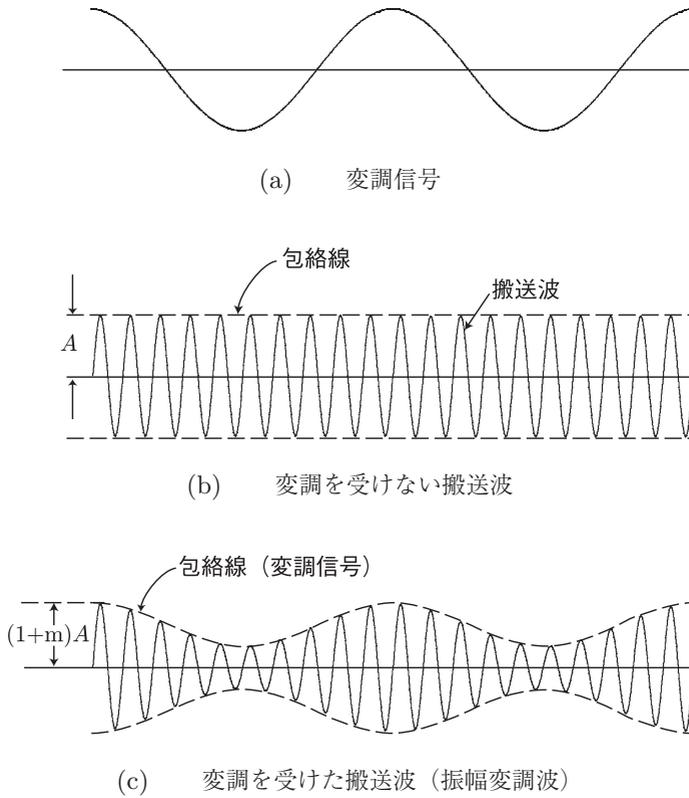
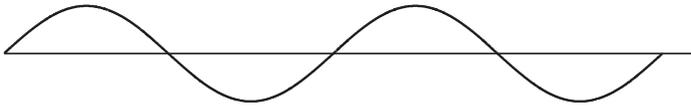


図 1.5 振幅変調

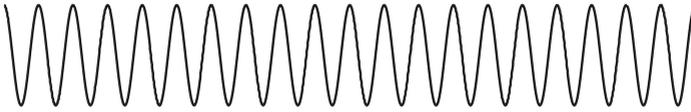
$$W = A(1 + mg(t)) \cos(\omega t - \beta z + \phi) \quad (4)$$

の形で表される。

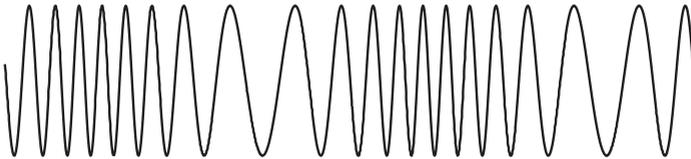
なお、詳細は省略するが、振幅変調方式の他にも代表的な変調方式の1つに周波数変調方式がある。振幅変調との違いが一目して分かるように、周波数変調の様子を図 1.6 に示している。



(a) 変調信号



(b) 変調を受けない搬送波



(c) 変調を受けた搬送波 (周波数変調波)

図 1.6 周波数変調