■5 群（通信・放送）－ 2 編（光アクセス線路・伝送技術）

7 章 メタリック線路と加入者伝送方式

（執筆者：木村　康郎）［2017 年 6 月　受領］

■概要■

電気通信の歴史は，1850 年にドーバー海峡間の海底ケーブルによる電信が成功してから，本格的な発展の時代を迎えた．特に，1869 年に設立された大北電信会社（The Great Northern Telegraph Company）による海底メタリックケーブルによる電信事業によって，政治経済における情報通信の重要性を全世界に知らしめることになった．世界中に張り巡らされた電信ケーブル網は，やがて電話回線網に変わり，光ファイバケーブル網へと通信技術の進化とともに変わっていった．その変遷は，様々な通信方式の開発による情報通信の高速化の歴史でもあった [1]．

メタリックケーブルによる通信システムは，電信，電話のサービスから，それまでのアナログの電話回線からデジタル化された ISDN 方式を経て，さらにインターネットの発展とともに，より高速な xDSL システムへと進んでいった．一方，構内配線システムでは，Ethernet の進展から，10BASE-T，100Base-T，1GBase-T，10GBASE-T と高速化していった．現在，ほとんどの PC には平衡メタリックケーブルを用いる有線通信デバイスが標準で装備されている．近年はさらに短距離ではあるが，より高速な伝送もメタリックケーブルで行うことが検討されている．同軸ケーブルはより広帯域な伝送媒体として，多重中継回線や CATV の伝送に用いられている．

【本章の構成】

本章では，メタリックケーブルの概要（7-1 節）と，そのメタリックケーブルを利用した xDSL 通信システム（7-2 節）及び同軸ケーブルによる CATV 通信方式（7-3 節）について解説する．

7-1 節では，公衆電話回線で使用されてきた代表的なケーブルについて解説し，メタリックケーブルにおける電気信号の伝搬の原理とその取扱い方を回路理論で説明する．また，通信ビルとお客様との間を結ぶアクセスネットワーク構成を簡単に説明する．また，LAN（Local Area Network）に使われるメタリックケーブルについて，その特徴を簡単に述べる．

7-2 節では，主に電話サービス用に設計されたメタリックケーブルを用いて高速な通信を実現する xDSL サービスについて解説する．インターネットの爆発的な進展に伴い，既存のメタリックケーブルで簡単に従来の ISDN よりもはるかに高速な通信を実現する仕組みとその特徴について述べる．

7-3 節では，同軸ケーブルを用いた CATV 方式についてその特徴と通信方式およびネットワーク構成を説明する．世界的には，同軸ケーブルによる CATV 方式は世界の主流であり，多くの CATV 加入者が利用しているが，日本では HFC 方式及び FTTH 方式が主流となっている．地上デジタル放送及び BS デジタル放送を CATV で伝送するパススルー方式について説明する．

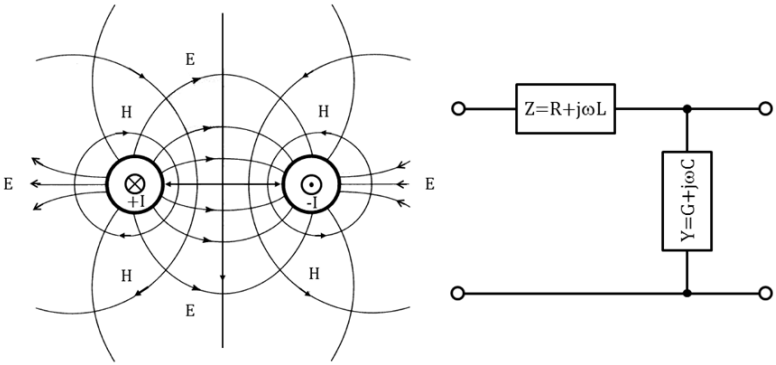
■5 群 － 2 編 － 7 章

7-1 メタリックケーブル技術

（執筆者：木村康郎）［2017 年 6 月 受領］

7-1-1 メタリックケーブルの信号伝搬の原理

メタリックケーブルを伝搬する電気信号は，2 本の導体間に誘起される電磁波によって運ばれている[2, 3]．この 2 本の導体間に交流を印可して閉回路にすると，その電磁場の分布は模式的に図 (a)のようになる．メタリックケーブルの伝送特性の厳密な取扱いは，2 本の導体によって，その周囲の空間に誘起する電磁場を求めなければならないが，金属導体を分布定数回路として扱うことにより，電磁界分布を考えることなくその伝送特性を金属導体の抵抗 R，インダクタンス L，容量 C 及び漏洩コンダクタンス G で表すことができる[4, 5]．これらの四つの量を線路の 1 次定数と呼び，その等価回路は**図 7･1**(b)のように表すことができる．これらの四つの量は，金属導体の導電率や導体間の絶縁物の誘電特性によって決まる．



(a) 円形金属導体間の断面上の電磁場の分布の様子　(b) 微小区間の等価回路モデル

図 7･1　メタリックケーブル上の電磁場の分布とその等価回路モデル

分布定数回路として最初に $L=0$ の場合を検討したのは，W.Thomson[6]であり，後に O.Heaviside[7] は次に示す式を導出した．これは電信方程式と呼ばれており，この微分方程式を解くために，現在は演算子法と呼ばれている解析方法を創出している．

$$-\frac{dV}{dx}=(R+j\omega L)I=ZI,\quad -\frac{dI}{dx}=(G+j\omega C)V=YV \tag{7･1}$$

ただし，$\gamma=\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}=\alpha+j\beta$ である．

また，$Z=\sqrt{(R+j\omega L)/(G+j\omega C)}$ とすると，γ は伝搬定数，α は減衰定数，β は移送定数，Z は特性インピーダンスであり，伝搬定数と特性インピーダンスは線路の 2 次定数と呼ばれている．線路の 2 次定数がわかると，2 端子対回路網の任意の点での電圧と電流の関係を次の式によって，求めることができる[4, 5]．

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \gamma x & Z \sinh \gamma x \\ \dfrac{1}{Z} \sinh \gamma x & \cosh \gamma x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \qquad (7\cdot 2)$$

ただし，送信側の位置の電圧と電流を(V_1, I_1)として，距離 x 離れた位置の電圧と電流は(V_2, I_2)である．

金属導体間に誘起される電界は金属導体中にも侵入するが，その侵入できる深さは，周波数及び金属導体の導電率で決まり，周波数が高くなるほど侵入できる深さは小さくなる．この現象を表皮効果と呼んでおり，この効果により周波数が高くなるほど，実効的な金属断面積が減少することになり，その結果として近似的に周波数の 1/2 乗に比例して抵抗が増加する$\sqrt{f}$特性が現れる．したがって，周波数が高くなるほど，導体に侵入できる電界成分は小さくなり，導体周辺の空間に電磁界成分がはじき出されることになる．光の周波領域になると，もはや平衡形メタリックケーブルで伝送することは不可能となり，光ファイバのような誘電体導波路が必要となってくる．周波数の低いところは平衡形メタリックケーブルが使えるが，周波数が高くなると同軸ケーブル，導波管そして光ファイバへと最適な伝送媒体も替わっていくことになる．

平衡型メタリックケーブルの電磁界は，図 7･1(a) に示すようにその電磁界成分は大きく広がり，閉じ込めが弱いため，容易に外部導体の影響を受けることになる．なお，この影響を小さくするために, 中心導体とその外側を導体で囲む構造にしたのが, 同軸ケーブルである．同軸ケーブルはその構造から不平衡形ケーブルである．この外部導体との影響は漏話と呼ばれており，伝送品質の劣化となることから，防止する手段が必要となる．その一つは，2 本の金属導体を均一の周期（ピッチ）で撚ることにより，外部での電磁界を打ち消して，漏話を防ぐ方法であり, 伝送する電磁界の周波数が高くなるほど小さなピッチで撚ることになる．このとき，ほかの回線との漏話を小さくするため，ピッチを変えることも行われている．電話回線用のメタリックケーブルと比較すると LAN ケーブルはかなり細かなピッチで拠っている．漏話を分布定数回路として考えると，2 本の回線間に電磁的な静電結合あるいは電磁結合がある回路モデルで解析することができる [4, 5].

漏話モデルでは，妨害回線が被妨害回線の送信側（近端）あるいは受信側（遠端）へ与える影響によって，近端漏話特性または遠端漏話特性と呼んで区別し，それぞれ周波数特性の依存性が異なる特性をもっている．この違いは，損失の周波数依存性が周波数のほぼ 1/2 乗に比例することに起因している [4, 5]．なお，市販されている LAN ケーブルは伝送損失，近端漏話特性及び遠端漏話特性等の特性によって規定されており，これらの規格を満足するようにケーブルが作られている．

7-1-2 電信電話時代のメタリックケーブルの変遷

メタリックケーブルは，歴史的には帰還回線を大地とする不平衡のメタリックケーブルを用いた電信方式から始まった．電信用に開発された海底ケーブルには，絶縁体として天然ゴムのガタパーチャが使われていた. 日本では1869年に鉄線を2本用いて電信が始まった. 1890 年には，片線がアースの単線式架空裸線方式が始まり，1897 年には 2 線を使って往復電流を流す複線式架空裸線方式が始まった．複線式架空裸線方式は，2 本の裸電線を一定の間隔で配置して使用するもので，絶縁物は空気であり，電信及び電話に使われた．平衡裸線は天候

の影響を受け，特に着雪により信号の減衰量が大きくなった．天候の影響を避けるため，また回線の増加に対応するために，導体の周囲を絶縁体で覆って，回線を束ねたケーブルの開発が必要となった．

初期のケーブルとして，導体の周りに紙を巻いて絶縁した紙鉛被ケーブルが開発された．紙は吸湿性があるため，ケーブルの中に水が浸入すると絶縁特性の劣化や，伝送損失の増加などが発生し，最悪の場合には短絡することになった．そのため，防水特性を確保するため，ケーブルの外被を鉛で覆った構造を取った．1958 年にはケーブル芯をアルミテープで縦添えし，さらにその外側を鉄テープで縦添えして，これを溶接して密封し，外被にポリエチレンを使ったスタルペス（Steel Aluminum Polyethylene）構造を取ったケーブルが使用されるようになった．1960 年代に入ると，絶縁体としてより特性の優れたプラスチックを用いたケーブルが開発されて導入されることになった．プラスチックの使用により伝送損失の低減や漏話特性の改善などが図られ，高周波の領域も使用できるようになり，ISDN によるディジタル電話網の実現に貢献した．この後，さらに高速な通信網として，光ファイバによる FTTH 実現に向けた研究開発が進むことになる．FTTH の実現するまでの間，既存のメタリックケーブルを使用した高速な xDSL 伝送方式が検討された．xDSL の導入により高速なインターネットサービスが提供され，xDSL の利用者が急増した．やがて xDSL 方式は FTTH に移行することになる．現在の通信ビルとお客様の間を結ぶいわゆるアクセスネットワークは，メタリックケーブルと光ファイバケーブルが共存する状態となっている．

公衆電気通信網で使われてきた代表的なメタリックケーブルの特徴を**表 7･1** にまとめて示す[8]．

表 7・1　主なメタリックケーブルの特徴

ケーブル種別	主な特徴
平衡裸線 1869 年　鉄線 1890 年　硬銅線	・空気を絶縁とした裸線（鉄線・硬銅線）を用いる平衡 2 線式 ・市外電話線，長距離電信線に使用 ・導体径は 2.9 mm/3.5 mm /4.0 mm など
紙絶縁ケーブル 1897 年紙鉛被導入 1958 年スタルペスを導入 1981 年に廃止	・絶縁には紙テープ/紙パルプを使用したケーブル ・吸湿で特性が劣化するため，スタルペス構造で防水 ・400～2400 対で地下多対ケーブル，中継ケーブルに使用 ・ケーブル構造は，図 7･3 (a)を参照 ・導体径は 0.4 mm，0.5 mm，0.65 mm，0.9 mm
市内 PEF-P ケーブル 1961 年から導入	・絶縁には，発泡塗装法による発泡ポリチレンを使用 ・漏話特性が紙絶縁ケーブルと比較して改善 ・3600 対で，地下配線用ケーブルに使用 ・ケーブル構造は，図 7･3 (a)を参照 ・導体径は，0.32 mm
市内 CCP ケーブル 1962 年から導入	・絶縁は，充実着色ポリエチレンを使用 ・絶縁被覆を着色したので，作業性が向上

CCP-F ケーブル：1989 年から発泡ポリエチレンを使用	・0～400 対（0.9mm は 100 対まで）架空用ケーブルに使用 ・ケーブル構造は，図 7･3 (b)を参照 ・導体径は，0.4 mm，0.5 mm，0.65 mm，0.9 mm
市内 PEC ケーブル 1982 年から本格導入	・絶縁には，カラーコード発泡ポリエチレンを使用 ・ケーブルの伝送特性が向上 ・200～3000 対で地下配線用ケーブルに使用 ・ケーブル構造は，図 7･3 (a)を参照 ・ラミネートシースを採用 ・導体径は，0.4 mm，0.5 mm，0.65 mm，0.9 mm

7-1-3　メタリックケーブルを使った電話網の構成

メタリックケーブルを使用した公衆通信網の例として，NTT の通信ビルとユーザ間を結ぶメタリックアクセス区間の代表的なネットワーク構成を**図 7･2** に示す．ネットワークは，地下の配線区間と電柱上の架空配線区間から構成されており，それぞれの使用領域に最適な構造のケーブルが使用されている．**図 7･3**（a）は 2400 対紙絶縁地下ケーブル，図 7･3（b）は 100 対プラスチック絶縁架空ケーブルのそれぞれの断面図である [9]．日本では，4 線を撚って 2 回線として使っている．この 4 線は断面が常に直交する方向の 2 線を回線として使用し，この 2 回線を同一カッドと呼んでいる．この 4 線の拠り方は星形カッドと呼ばれている．この 2 回線は常に一緒なので，最も強くお互いの回線の影響を受けることになる．この回線と隣のカッドは隣接カッド，さらにその隣は一つ飛びカッド，さらにその隣は二つ飛びカッドと呼んでおり，漏話特性を計算するときには，この幾何学的な位置関係を考慮して漏話雑音を確率論的に推定して，伝送品質を計算している [4]．漏話特性の原因は，回路論的な見方では，ほかの回線との静電結合，または磁界結合によって生じるが，その本質的な原因は，断面のカッド構造の幾何学的な乱れによる回線間の結合や，ほかの回線との同じピッチでの長距離にわたる近接などによるところが大きく，その特性は個々のケーブルによって大きく異なってくる．このため，例えば同一カッドにおいても漏話特性が良かったりする場合もあるため，メタリックケーブルを用いた伝送方式では，他回線の漏話雑音の推定には，確率論的な扱いが必須であった [4]．

特に，ISDN や ADSL などの高速デジタル回線を提供する場合には，電話回線を含めたそれぞれの回線がほかの回線に与える影響を極力小さくなるようにケーブル内の使用する回線を選択するなどの工夫をしている．このメタリックケーブルのネットワークとほぼ同じ配線ルートで光ファイバネットワークが構築されているため，メタリックケーブルと光ファイバケーブルは同じスペースを共有する状態となっている．

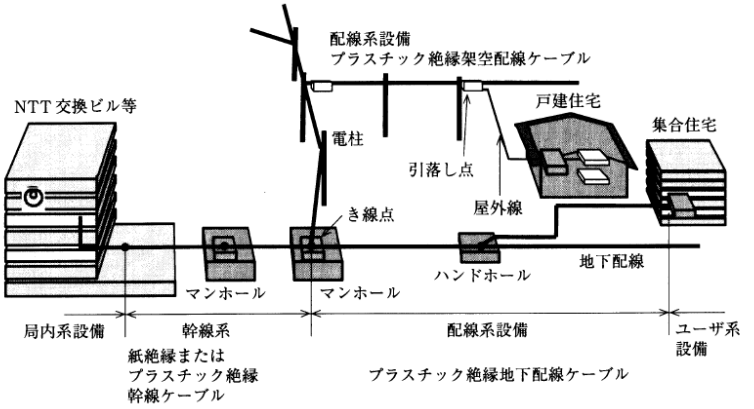
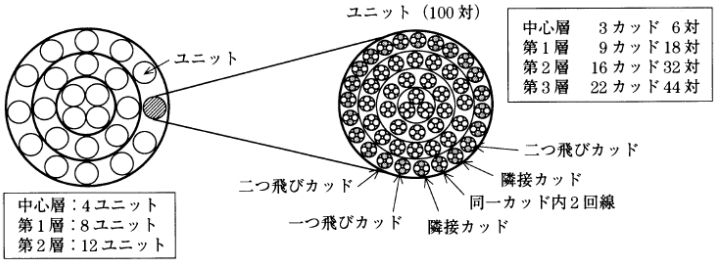
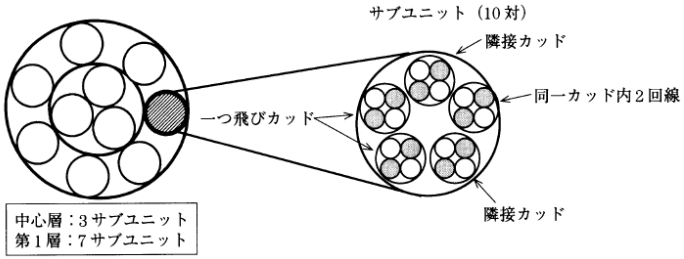


図 7・2　メタリックアクセス網の構成



(a) 2400 対紙絶縁地下ケーブルの断面図



(b) 100 対プラスチック絶縁架空ケーブルの断面図

図 7・3　地下ケーブルと架空ケーブルの断面図

7-1-4 VDSL マンション配線の現状

マンションなどの既存の集合住宅などで，光ファイバケーブルの配線ができない状況においては，既存の電話回線を用いて VDSL 方式で高速伝送サービスが提供されていた．しかし，この方式は既存の電話回線のケーブルを使用していたため，外部からの雑音に弱く，場合に

よっては安定した高速な伝送速度を確保できなかった．このため，次第に光ファイバケーブルによる配線に替わりつつある．VDSL システムについては，本章 7-2-3 の VDSL の項で詳述している．

7-1-5 構内系 LAN システム

構内系のネットワークでは，イーサネットワークの高速化に伴い，平衡型メタリックケーブルを用いた高速な通信が実現している．**表 7・2** に構内系メタリックケーブルの特徴を示す．構内系 LAN システムで使われる平衡型ケーブルには，100BASE-T 用の CAT5，1000BASE-T に使われる CAT5e と CAT6，そして 10GBASE-T に使われる CAT6A と CAT7 がある．現在はさらに 40Gbit/s の高速な通信用ケーブルも検討されている．しかしながら，メタリックケーブルの伝送損失は周波数の 1/2 乗に比例して大きくなる $\sqrt{f}$ 特性ため，高速になるほど損失が増加して距離は短くなる．10GBASE-T で通信ができる距離としては最大で 100 m となっている．ほとんどの PC には，1000BASE-T のインタフェースが装備されていて，メタリックケーブルを用いて 1Gbit/s の高速な LAN が実現している．

電話回線用のメタリックケーブルと比較すると，高周波領域で使用することから，漏話特性に起因する雑音特性の改善が必要となり，伝送特性を改善するために撚りピッチを短くして，近端漏話及び遠端漏話特性を改善している．構内情報配線システムに関しては JIS X5150：2004[10] が日本工業規格として制定されており，家庭から工場，オフィス，キャンパス及びデータセンターでの情報配線システムについてそのネットワーク構成から伝送損失および雑音に対する特性を規定している．

表 7・2　構内系メタリックケーブルの特徴

ケーブル	主な特徴
LAN ケーブル CAT5，CAT5e，CAT6/6a，CAT7	・非シールド型（UTP）とシールド型（STP）の 2 種類 ・平衡対撚線が 4 回線（8 線），コネクタは RJ45 を使用 ・高速になるにつれて距離は短くなり，1G/10GBASE-T では 100 m 以内

■5 群 － 2 編 － 7 章

7-2 xDSL 伝送方式

（執筆者：木村康隆）［2017 年 6 月 受領］

xDSL とは，「x Digital Subscriber Line」の略で，ADSL，VDSL などの総称であり，2 線メタリックケーブルに各種の符号化・変調技術を適用して，ディジタルデータを伝送する方式を意味しており，伝送方式等の規格は，国際電気通信連合電気通信標準化部門（ITU-T：International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector）などで議論されている．

7-2-1 xDSL のシステム構成

xDSL として，代表的な ADSL と VDSL のシステム構成を図 7・4 に示す．ADSL は，インターネットサービスの急速な普及に伴い，メタリック加入者線路を用いて，下り伝送速度を ISDN（Integrated Service Digital Network）などの従来方式と比較して数十倍以上にできることから，国内においては 1999 年から本格的にサービスとして使われ始めた．VDSL は，ADSL と比較して，伝送距離は制限されるが，より高速な伝送速度を実現することが可能できあることから，アクセス区間に光ファイバが導入されるとともに，光ファイバの導入が困難な集合住宅に対して，光アクセスサービスの足まわりとして使われ始め，収容局から集合住宅入口までを光ファイバを用い，集合住宅内の短いメタリック線路区間に対して VDSL を用いて高速伝送する構成で使われている．また，ADSL や VDSL においては，メタリック線路区間にスプリッタを挿入することにより ADSL・VDSL 信号を電話回線に重畳して使用することができる．

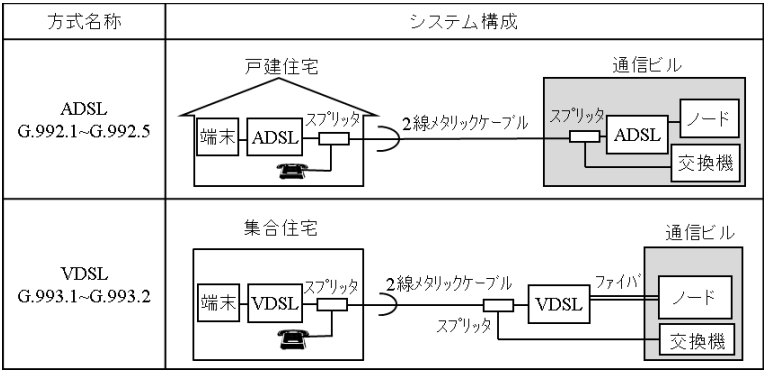


図 7・4 xDSL 伝送のシステム構成例

7-2-2 ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

ADSL は，基本 2 線メタリックケーブルを利用して，下り最大 47 Mbps，上り最大 5 Mbps の非対称の伝送速度をもつシステムであり，変調方式としては，DMT（Discrete Multi-Tone）方式を採用している．DMT は，OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）とも呼

ばれ，多数のサブキャリアを用い変復調する方式であり，変調には離散フーリエ逆変換，復調には離散フーリエ変換を利用する．

xDSL の媒体として利用する 2 線メタリックケーブルは，本章 7-1 節にて述べたように，隣接回線からの漏話雑音が混入するため，既存システムとの相互干渉を抑制することなどから，ADSL[11, 12]においては，北米での使用を考慮した仕様の Annex A，欧州の使用を考慮した仕様の Annex B，そして，日本に広く普及している TCM-ISDN（G.996.1 Appendix III）環境下での使用を考慮した Annex C がそれぞれ ITU-T にて勧告化されている．また，高速化や長延化に対応するため，使用周波数帯域の拡大，フレーム構造の変更，パイロット信号の変更なども行われ，**図 7･5** に示すように多くの種類の ADSL が存在し，最大 2.208 MHz までの周波数を用いて，下り最大伝送速度 24 Mbps を有する ADSL まで標準化されている．また，非標準ではあるが，下り周波数を 3.75 MHz まで拡張するとともに，エコーキャンセラー技術を用い，上り使用周波数を下り使用周波数とオーバーラップさせ 483 kHz 拡張することにより，下り最大 47Mbps，上り最大 5 Mbps を実現する ADSL も実用化されている．

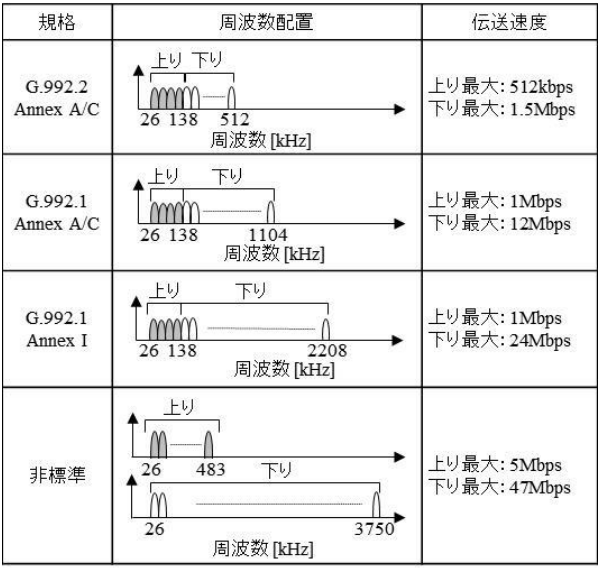


図 7・5　各種 ADSL 方式の使用周波数と最大伝送速度

図 7･6 に ADSL の上り下りの伝送速度を 0.4 mm 紙絶縁ケーブルの距離をパラメータとしたシミュレーション結果を示す．ADSL においては，レートアダプテーション機能により，リンク確立時に伝送路の状態（線路損失と雑音電力量）に応じて最適な伝送速度で接続する機能をもつため，加入者ごとに伝送速度は異なる．ADSL では，線路長の増加とともにメタリック線路の線路損失が高周波帯ほど大きく増加し，高周波側のサブキャリアが使えなるため，帯域拡張して最大伝送速度を向上させた方式を用いても，収容局近くの加入者に対しては高速サービスが提供可能となるが，収容局から遠い加入者には高速化メリットを提供する

ことができない．また，図 7･6 は漏話雑音をパラメータとして含まれていないが，隣接回線からの漏話雑音も，伝送速度低下の要因となる．

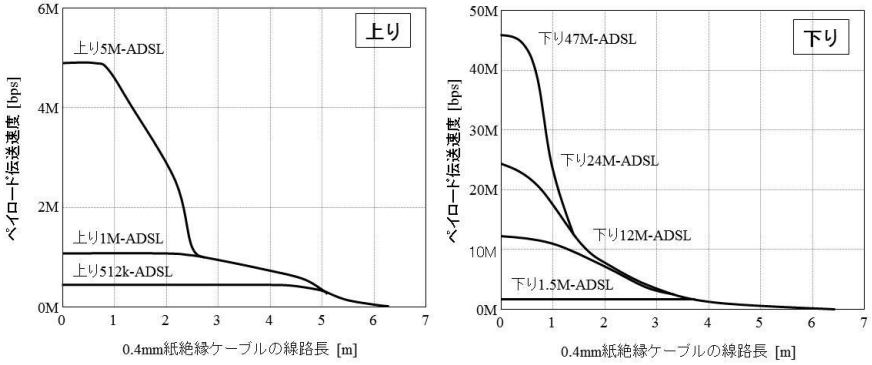


図 7・6　ADSL の伝送速度の距離依存特性

7-2-3 VDSL (Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line)

VDSL は，基本 2 線メタリックケーブルを利用して，上り下り最大 100 Mbps の伝送速度を持つシステムである．VDSL[13, 14] においては，**図 7･7** に示すように，12 MHz までの周波数を利用する通称 VDSL1 が G.993.1，30MHz までの周波数を利用する通称 VDSL2 が G.993.2 として ITU-T にて標準化されている．VDSL1 においては，ADSL と同じ DMT 方式と，シングルキャリア変調である QAM（Quadrature Amplitude Modulation）方式の両方が勧告化されたが，VDSL2 においては，DMT（Discrete Multi-Tone）方式のみ勧告化されている．また，VDSL は，使用周波数としては，TCM-ISDN の重畳や，ADSL との相互干渉を考慮して，1.1 MHz 以下の周波数を使用せずに運用されることが多く，ADSL よりも高周波数帯域を使用するため，伝送距離 1 km 程度までが適用範囲となる．

規格	変調方式	周波数配置（D: 下り, U: 上り）	伝送速度
G.993.1 （VDSL1）	DMT / QAM		上り最大: 30Mbps 下り最大: 50Mbps
G.993.2 Annex C （VDSL2）	DMT		上り最大: 100Mbps 下り最大: 100Mbps

図 7・7　各種 VDSL 方式の使用周波数と伝送速度

VDSL2 は，VDSL1 に対して，周波数帯域の拡張による最大伝送速度向上のほかに，回線安定化機能（OLR：On Line Reconfiguration）として，Bit swapping，SRA（Seamless Rate Adaptation），及び SOS（Save our Showtime）が追加されている．DMT 方式では，リンク確立時に伝送路状態に応じて，一定の SNR（Signal-Noise Ratio）マージンを確保できるよう各サブキャリアに最適なビット数を割り当てるが，回線安定化機能を動作させると，リンク確立後においても，漏話雑音が変化に追従して，リンク断なし（サービス中断なし）で，各サブキャリアに割り当てるビット数を最適化して最適な伝送速度に保つことが可能となる．

まず，Bit swapping 機能の動作イメージを**図 7･8** (a)に示す．Bit swapping 機能は，伝送路における雑音電力周波数特性が変化したとき，SNR マージンが所定の値よりも余裕があるサブキャリアの搭載ビットを SNR マージンが所定の値を下回ったサブキャリアへ移動させることにより，伝送速度を一定に保ちつつ，雑音耐力を向上させる機能である．次に，SRA，SOS 機能度動作イメージを図 7･8 (b)に示す．隣接回線の VDSL 回線のリンクアップなどにより雑音が急激に増加した場合，SRA では対応できない大きな雑音の増加を検知すると，SOS により，サブキャリアに割り当てるビット数を瞬時に大きく減少させ伝送速度を低下させることにより，増加した雑音に対して SNR マージンを確保し通信を維持する．その後，SRA により各サブキャリアの割り当てるビット数を最適化して伝送速度を回復させる．

また，伝送路にインパルス性雑音が誘導されたときのビットエラーを物理レイヤでの再送信処理を行うことにより，通信を安定に保つ G.998.4 で標準化された INP（Impulse noise protection）機能や，更なる高速化として，回線間の漏話雑音をキャンセルして伝送速度向上を図る G.993.5 で標準化された Vectoring 技術，及び周波数帯域を 30MHz 以上に拡大して，上り下り伝送速度合計最大 1Gbps を目指す標準化（G.9700，G.9701）も ITU-T にて進んでいる．

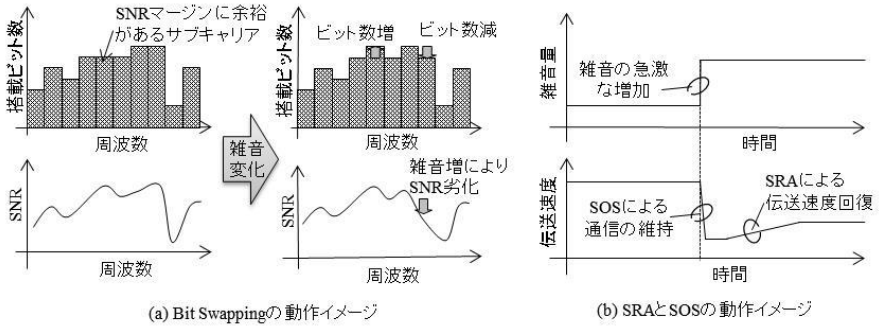


図 7・8　回線安定化機能の動作イメージ

■5 群 － 2 編 － 7 章

7-3 CATV 伝送方式

(執筆者：結城直彦)[2017 年 6 月 受領]

7-3-1 CATV 設備における伝送方式の状況

日本における有線放送は，1955 年の群馬県伊香保温泉での共同受信設備に始まり，現在では接続端子が 50 端子以下の小規模設備も含め 6 500 以上の設備が有線放送設備として総務省に届け出され，登録されている．衛星放送の開始，地上波放送のデジタル化などのテレビジョン放送の進展，インターネット接続サービスの提供等，有線放送事業者の提供するサービスの変化に伴い，有線放送の伝送方式も従来の同軸ケーブルを主とする伝送方式から幹線系に光ファイバを用い，その先の分配系に同軸ケーブルを用いる HFC（Hybrid Fiber Coaxial）方式やすべての伝送路を光ファイバで構成する FTTH（Fiber To The Home）方式が主流となりつつあり，自主放送を行う接続端子数が 501 端子以上の有線放送設備の多くが HFC もしくは FTTH 方式となっているが，小規模な設備などでは現在も全同軸ケーブル型が主流である．

7-3-2 全同軸ケーブル型による CATV 網構成

すべての伝送線路を同軸ケーブルで構成する全同軸ケーブル型の CATV 網の構成は，信号の送出設備であるヘッドエンド（Head-End）からの信号を増幅器による増幅と，分岐装置による分岐を繰り返すツリー型（Tree Network）となる．増幅器は同軸ケーブルによる信号の減衰を増幅するもので数百メートルごとに配置される．増幅器の縦続接続により増幅器で発生する雑音が積算されるため，縦続接続段数は十数段に制限される．

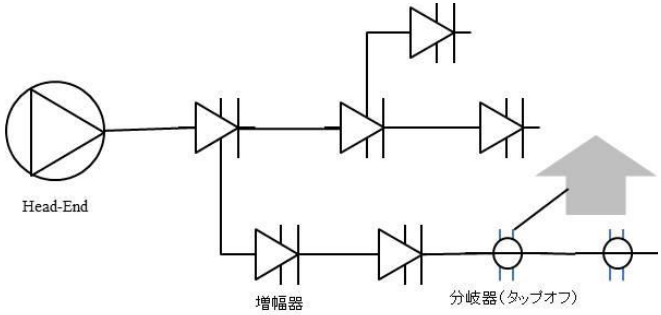


図 7・9 CATV 網トポロジー

7-3-3 同軸ケーブの構造

同軸ケーブルは内部導体を絶縁物（誘電体）で囲い，さらにそれを外部導体で覆った構造となっており，伝送損失が少なく，外部への電磁波の漏れが少ない，さらには柔軟性があり取扱いが容易であるといった特徴がある．同軸ケーブルの特性インピーダンス Z_0〔Ω〕は，内部導体の外径 D〔m〕，外部導体の内径 d〔m〕，誘電体の比誘電率 ε〔F/m〕とすると，

$$Z_0 = \frac{183}{\sqrt{\varepsilon}} log_{10}\left(\frac{D}{d}\right) \qquad (7・3)$$

で求められ，内部導体，外部導体の比に依存する．一般的な同軸ケーブルの特性インピーダンスは 50〔Ω〕と 75〔Ω〕があり，放送用には 75〔Ω〕の同軸ケーブルが利用される．同軸ケーブルの損失特性は内部導体の径が大きいほど低損失であるが，誘電体に交流電圧を加えたときに誘電体の電気分極が電場の変化に追従できなくなり，エネルギーの一部が熱になって損失する誘電損失により，周波数に比例して減衰量が多くなる．同軸ケーブルの周波数特性を補正するため，増幅器において低周波側の信号に対して高周波側の信号の増幅率を高くするチルト調整が行われる．

7-3-4 パススルー伝送方式

パススルー伝送方式とはヘッドエンドで受信した放送電波の変調方式を変えずに伝送する方式でアンテナによる直接受信と同じ放送信号が伝送される．地上アナログ放送の有線放送設備による同時再放送ではパススルー伝送方式が行われてきた．地上デジタル放送の同時再放送の場合であってもパススルー方式が利用できる．しかしながら，地上アナログ放送が VHS 帯での放送であったため，それに合わせて VHS 帯しか伝送できない有線放送設備においては地上デジタル放送の利用電波帯である UHF 帯を伝送できない. このような有線放送設備において用いられる伝送方式に周波数変換パススルー方式がある．周波数変換パススルー方式は, 受信した放送電波の搬送周波数を VHS 帯にダウンコンバートし伝送する方式である. 市販の地上デジタル放送受像機のほとんどが地上デジタル放送の周波数変換パススルー方式に対応している.

BS デジタル放送は 12 GHz 帯の電波で放送されており，アンテナで受信後の BS-IF 信号は 1.0～1.5 GHz にダウンコンバートされ受像機に入力される．この BS-IF 信号は，一部の広帯域な有線放送設備ではパススルー伝送が可能だが，多くの設備では伝送できないため周波数変換パススルー方式を用いる必要がある．しかしながら，BS デジタル放送の周波数パススルー変換方式に対応した BS デジタル放送受像器が市販されていないため，受信端で元の周波数帯にアップコンバートする必要があり，さらには BS デジタル放送の信号周波数帯域が 500MHz の広帯域であることから未使用のチャネル数が多い設備でしか使用することができないため，実施している設備は少数であり，BS 放送での変調方式（TC8PSK,QPSK,BPSK から選択組合せにて実施されている）よりも単位周波数当たりの伝送容量が大きい 64QMA（64 Quadrature Amplitude Modulation）に変調方式を変えて伝送し，専用の受信器（STB：Set Top Box）にて復調し視聴するトランスモジュレーション方式が主流である.

7-3-5 有線放送における各種伝送特性の規定

日本のテレビジョン放送の業務に用いる電気通信設備は放送法で定める技術基準に適合，維持することが定められており, 有線テレビジョン放送の業務に用いられる電気通信設備は，有線一般放送の品質に関する技術基準を定める省令に定める技術基準が適用される.

■参考文献

1) 城水元次郎：“電気通信物語”，オーム社，(2004)
2) 太田浩一：“電磁気学 II”，丸善株式会社（2000）
3) 太田浩一：“マクスウェルの渦アインシュタインの時計”，東京大学出版（2005）
4) 小林夏雄：“通信線路伝送理論”，電気通信学会（1959）
5) 丸林元：“通信伝送工学”，電子情報通信学会（1981）
6) W. Thomson，”On the Theory of the Electric Telegraph.”，Proc. Roy. Soc.，7，pp.382- 399 (1856)
7) O. Heaviside，” On the Extra Current.”，Phil. Mag.， 2， pp.135- 145 (1876)
8) 福富秀雄：“電気線路通信技術”，電気通信協会（1979）
9) 電気学会・ホームネットワークと EMC 調査専門委員会編，“ホームネットワークと EMC：第 5 章 メタルアクセス回線と EMC”，オーム社（2006）
10) JIS X 5150：2004，“構内情報配線システム”，日本規格協会
11) “Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers”, ITU-T Recommendation G.992.1, (1999)
12) “Splitterless asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers”, ITU-T Recommendation G.992.2, (1999)
13) “Very high speed digital subscriber line transceivers”, ITU-T Recommendation G.993.1, (2004)
14) “Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)”, ITU-T Recommendation G.993.2, (2011)