3章 FPUの周波数移行

3-1 放送素材伝送用FPUの歴史と変遷

キーワード：伝送技術、電波、中継制作

1. まえがき

テレビ局では、さまざまな番組を制作している。バラエティ番組やドラマ等は、事前撮影したVTRなどを交えながら主にスタジオ中心に制作される。一方、情報番組、報道ニュース番組等は、スタジオでの制作に加えて、外部からの中継等を交えて放送する。特に事件や事故などについては、現場からの状況を生で放送することにより、視聴者により深く内容を伝えることが可能となる。その他、スポーツ番組は、基本的にスタジオを使わないで外部で制作することが多い。ゴルフ、サッカー、野球等は、ゴルフ場やスタジアム等で制作され、そこから固定的に本社まで伝送される。しかし、マラソンや駅伝のように選手が道路を移動するロードレースは、中継車を移動させながら選手を撮影して制作するなど、手法はさまざまである(図1)。

これら番組制作において演奏所以外の場所から映像・音声を送るためには、光ファイバを用いた伝送や静止衛星経由の伝送(SNG)も用いられるが、場所が不確定な場合も多いため、フィールドピックアップユニット(以下FPU)という伝送装置を用いることが多い。

このFPUは、主にB、C、Dバンド(6GHz~7GHz帯前後)とE、Fバンド(10GHz帯)が使用される。

このB~Fバンドは、マイクロ波の領域で直進性が高いため、主に固定伝送用とされている。

アンテナはパラボラアンテナが用いられる。送信側は、電波のクリアランス確保のため、ビルの上などの高い場所にアンテナを設置するが、車から12m程度伸ばしたポールの上にアンテナを取り付け伝送する場合や、工事足場のようなイントレを複数段組み上げた上に設置する場合など状況によって設置方法は異なる。高さは、受信基地までの安定した回線を構築するために必要不可欠である。

* 本稿の著作権は著者に帰属致します。

† 日本テレビ放送網株式会社 技術統括局 技術戦略部

"Frequency Migration of Television Program Contribution Devices: History and Development of FPU" by Tetsuo Makino (Technology Strategic Planning, Engineering & Technology Division, Nippon Television Network Corporation, Tokyo)

正会員 牧野鉄雄†

図1 一般的な番組制作形態

一方、移動体伝送用途としては、別途700MHz帯の周波数を総務省から割当てられた。

B~Fバンドにおいても、近距離であれば、広い指向性のアンテナ(電磁ホーン等)を用いて移動体からの伝送を行うことも可能であるが、ほとんどの場合は、伝送距離、伝送の安定性から700MHz帯のFPUが用いられる(図2)。

2. FPUの発振方式とFPUの構造

古くFPUは、発振にクライストロン管が用いられ、真空管で構成されていた。筐体も大きく簡単に持ち運びできる代物ではなかった。また、受信基地も現在のモーターでアンテナ方向を調整するのではなく、鉄塔上にレールが施され、人力で方向を調整するものであった。使用する周波数がマイクロ波ということもあり、パラボラアンテナと高周波発信回路は導波管で接続されるか、同一筐体かは仕様により決められていたが、それなりに重量があるため簡単に移動できる代物ではなかった(これが後の2ピース型FPUの原点とも聞いている)。

発信素子はその後、セミトランジスタやインパットダイオードなどさまざまな素子が開発され用いられるようになったが、1980年代後半は安定した水晶発振素子が主流となりアナログFPUが全盛期を迎えた(図3)。

筐体はコントロール部とヘッド部に分かれ、コントロール部に入力したベースバンド信号をFM変調してから中間周波数に持ち上げIF信号(130MHz)とする。これに電圧を重ねてヘッドに伝送、ヘッド部では、電源とIFを分離した後130MHzから指定周波数にアップコンバートしてヘッド

図2 700 MHz帯FPUの役割

図3 FPU伝送機器

図4 2ピース型FPU例

に取り付けられたパラボラアンテナから送信する（図4）。
一方、受信側は、受信した信号をヘッド部に130 MHzの

IF信号に変換してコントロール部に送り、コントロール部で差動復調し、ベースバンドに戻して出力する。

チャンネル名称はB, C, DバンドとE, Fバンドと英語表記では連続しているものの、周波数はおおよそ7 GHz帯と10 GHz帯と分かれるため、この間には大きな周波数の溝がある。現場の運用では、1台で両方の周波数を用いたいことからマルチに送信できるFPU開発が望まれ、各FPUメーカーでは、マルチ送信型のFPUを開発した。アンテナ放射器は、7 GHz帯と10 GHz帯それぞれの素子が放射器反射板の手前に設置される構造である。この放射器は、60 cm直径のパラボラと90 cm直径のパラボラのどちらにも対応できるため、取材時の機材軽量化には役立っている反面、微妙にパラボラ焦点からずれた位置に素子が設置されることになるため、電界強度低下を防ぐ工夫がされている。

また、小型、軽量化された製品も販売され始めたのがこの時期である。1990年代になるとPLLシンセサイザが設計されるようになり、FPUもシンセサイザ方式が主流となった。これにより、安定した発信が小さな回路で構成できるようになった。水晶にかわり、セラミックに電磁界をかける発信方法やMSWといった発振素子などPLLシンセサイザにはさまざまな原振素子が用いられていた。

2001年に「21世紀の初めの日の出を富士山山頂から」と番組の企画が持ち上がり、日本テレビでは、真冬の富士山にチャレンジすることになった。この中継では、人力で山頂に向かうため機材量を極限まで減らさなければならず、軽量化した一体化FPUを開発して使用した。これは、マイクレベルの音声が入力できるように改造したほ

か、 -30°C の恒温槽でテストを繰り返し安定的に電波が出るように調整した。マイクとカメラを直接FPUに入力して伝送するといった限りなくシンプルな中継ではあったが、無事21世紀の初日の出を富士山頂からお茶の間に届けることができた。

3. なぜFPUは1ch 18 MHz帯域なのか？

一部の固定回線では振幅変調も使用されていたが、FPUの変調方式は、FM変調方式が主流であった。入力される信号がアナログ信号であることから、 S/N を稼ぐために、変調度は4.5 MHzに規定された。また、送信帯域は25 MHz幅必要とのことで、1ch 25 MHzと決められた。ここからは想像であるが、当時、100 MHzを単純に4分割して25 MHz幅と、きりの良い数字に収めてフィルタ等を設計したのではないか、鶏か卵かはわからないが、とりえず気持ちのよいチャンネル幅で規格化が行われた。このころはフィルタはアナログ的に構成することから、性能を確保することが難しく、隣接波の干渉などを危惧する場合は、変調度を4.5 MHzから3.2 MHzに落として伝送するなど、変調度選択型の製品も販売された。

1990年代半ばになると、フィルタ回路もしっかりしたことから、変調度は3.2 MHzで充分との結果から、25 MHzチャンネル幅の中で3.2 MHz変調度といった運用となった。

この時期、周波数有効利用の観点から、チャンネルを詰めて再配置する案が求められた。ベッセル関数で計算すると、変調度を3.2 MHzとしたときの信号99%は、18 MHz帯域に収まるということから、FPUチャンネルは18 MHz幅（ガードバンドなし）に変更されることになった。

PLLシンセサイザ方式のFPUでは、チャンネルROMを入れ替えるだけで周波数が変更できるため、チャンネル変更はそれほど手間にはならなかった。しかし、隣接の影響は大きなものとなることが危惧されたため、山梨県河口湖に在京放送局が集まり、隣接チャンネルで送信した場合に、どの程度の影響があるか伝送テストを行うことになった。1泊2日のこのテストには、在京放送局すべてが参加して、各局の中継車を河口湖の対岸に集結させたのちに、湖畔に面したホテルの一室に受信ポイントを設置、各局の波を少しずつ送信しながら隣接波の影響を確認していった。この結果、入力電界が高い場合は、IMも発生してかなりの影響があることが確認されたため、東京タワーなど放送局が同時に伝送し、強電界が予想されるFPU受信基地では、入力電界を -40 dBm 以下とするなど自主規制が行われた。

FM復調回路の場合、ディスクリャンプで差動復調する場合は、急峻な映像の輝度変化が生じた場合に、DC成分が躍る現象が生じ、あたかもオートアイリスが動作したような現象が発生した。そこで、2000年頃にはFM復調にもPLL回路が用いられた製品が販売されるようになった。

こちらは、離れた周波数を引き込む力が強いことから、

隣接チャンネルの影響を受けやすくなり、運用に応じてこれらを使い分けるなど工夫された。

帯域を18 MHzに変更したことは、既存の運用局には、いくつかの問題を投げかけたものの、チャンネル数増加に大きく貢献した。これによりFPUを新たに申請できるようになり、さまざまな番組制作に寄与した。

4. デジタル変調方式の検討

1990年代後半に、ARIBでは、マイクロ帯送信器のデジタル変調方式が検討された。放送もアナログNTSCからHD方式が検討されていたこの時期、HD伝送用途には過渡的に、アナログFM方式のFPUが使用できる多値FM方式が提案され規格化された。平成9年（1997年）に規格化されたARIB STD-B8がこれである。

多値FM変調方式は、デジタル信号をアナログFPUで伝送できる「夢の方式」とされたが、実際の運用では、変復調時のアンプによる歪み等が微妙に影響することから、送受一体で調整が必要であり、それほど普及はしなかった。

次に、ARIBでは、固定回線（TSL）のデジタル化の検討が行われた。デジタル化は、周波数有効利用に寄与する技術であるが、入力する信号のターゲットをSD放送にするかHD放送にするかが問題となった。アナログFPUと同様にSD方式を採用するのであれば、18 MHzの帯域をより分割できるが、将来のHD放送をターゲットとするのであれば、その伝送容量をいかに18 MHzの帯域に収めるかが議論の中心となった。また、圧縮技術の発達により、HD放送の画質をどこまで確保するべきかなど新しい課題も生じた。素材伝送は、現場から演奏所までの伝送であり、その後、スタジオなどで加工されてから再び、放送送信用に圧縮される。途中VTRに収録をすることを考えると、最低3回の圧縮伸長に耐えられる画質が求められることになり、「3タンデム接続」のための画質要件が決められ、FPUでは、最大65 Mbpsの信号を伝送することとなった。

圧縮方式もさまざまで、アナログと異なる遅延時間という問題が生じた。当時主流の方式としては、JPEG2000、MPEG-2などがあったが、FPUはMPEG-2が選定された。

変調方式はシングルキャリアに64QAM変調をする方式が採用されたが、状況に応じて多値度をさげることも規格の中に盛り込まれた。この規格は、平成9年（1992年）にARIB STD-B11として規格化された。

これと同時期に移動体中継用途にOFDM変調方式の研究が行われ、ARIBでは700 MHz FPUのデジタル化が検討を行った。実験は、NHK放送技術研究所で開発中のOFDM 700 MHz FPUを用いて、麴町にある日本テレビの鉄塔（地上約100 m）で行った（図5、図6）。

当時の東京マラソン（国立競技場スタート～品川折り返し）のコースにおいて、四ツ谷見附から市ヶ谷、飯田橋の外堀沿いを中継車が走行するテストコースで、このFPUは

受信状況風景

移動開始したテスト移動中継車

受信誤り率測定風景

図6 日本テレビ鉄塔でのテスト風景

図5 実験に用いられたJPEG2000 コーデック

誤り率がほとんど低下することなく伝送できるといった驚くべき性能を発揮した。まだこの実験では、映像コーデックの開発が追いついていなかったため、データ伝送におけるビット誤りの測定でしかなかったが、デジタルFPUのメリットとして誤り訂正による伝送改善は、運用に大きな期待を与えることとなった。数年後、ARIBで規格化されARIB STD-B13ができた。

この規格に準拠したFPUは、複数メーカーで開発され現場に導入された。アナログFPUでは、伝送が途切れてしまい、ホワイトノイズ（通称砂嵐）となる画面が多々見受けられていたが、デジタルFPUの導入により砂嵐はなくなり、時と場合によっては画面がフリーズする新しい現象となったが、映像がきれいにつながるようになった。

当時、日本テレビでは横浜国際女子駅伝を中継していたが、八景島折り返しポイント最後のトンネル内をデジタルFPUを用いて伝送させたところ、まったくフリーズもせずに伝送することができた。また、それまでは、中継車屋上にアンテナ要員がついて、アンテナを受信方向に指向させ

ていたが、デジタルFPUの登場で、移動車側アンテナは、それまでのクロス八木から、無指向型アンテナへと変わり、屋上は無人となった。

5. テレビ放送のHD化と箱根駅伝HD化

2003年12月から東京、名古屋、大阪を中心に地上デジタル放送が開始された。これに伴い急速にHD番組制作が求められることになった。日本テレビでは、2003年の本社移転に伴い、スタジオのHD化はいち早く対応したが、中継先のHD化は、FPUなどの回線をHD化する必要があることから時間を要した。しかし、日本テレビとしては、お正月の箱根駅伝を完全HD化することが悲願であり、綿密な計画のもと、2005年は一部のセンターのみがHD化対応であったものを、2006年には移動車のHD化などに取組み、2008年には完全HD化を成し遂げた（図7）。これを支えたのが、FPUのHD化であった。移動体からの伝送は、700 MHz帯のOFDM変調であるが、HD化に伴う伝送容量増量についてあまり期待はできなかった。しかし、コーデックの工夫により何とかHD画質を確保した。B～FバンドはOFDM、シングルキャリアの両方に対応しており、最大65 Mbpsの容量が確保できるため、受信点からの伝送は、それなりの太さのパイプとして使用できた。

デジタル化のもう一つの特徴は、各受信点においてTS信号のままMUXして7GHz帯～10GHz帯FPUで伝送すると、本社または、それぞれのセンター（番組制作センター）で、瞬間的な劣化を自動的に検知して切替えるダイバー受信が可能となったことである。これにより、ある受信点で一瞬信号が途切れても、別の受信点で信号が受信できていれば、機械が自動的に切替え、映像をつなぐことができるようになった。

箱根駅伝の場合、移動車がどのポイントにいるかといったコースガイドを連絡線に重畳しているため、これを聞くことである程度方向を見ることができた。各アンテナ要員は、足元にコースガイドに沿ったメモを記載して、移動車の方向にアンテナを向けられる工夫をした。

湘南エリアの700 MHzアンテナ指向運用

駒ヶ岳山頂のアンテナ指向運用

各移動中継車およびバイク

図7 箱根駅伝中継

アナログFPUの時代にはなかった新しいアンテナ指向技術ができたのである。

6. 700 MHz FPU周波数移行

700 MHz FPUは、他の周波数帯に代えがたい地位を確立していたが、携帯電話の需要増から1.2 GHz、2.3 GHz帯に移行することが決められた。この周波数帯は、UHF帯電波の特性よりもマイクロ波に近い特性となり、直進性が強く、あまり反射波などの伝送には不向きである。そこで、箱根駅伝などのコースで伝送テストを繰り返し、700 MHz帯FPUと同等の伝送ができるための所要改善量が求められた。この分は、送信出力などに振り分けながら、現状と同等の運用を確保していかなければならない。そこで、今後、周波数移行するにあたり、何度も同じコースでテストを繰り返し、番組をそのように制作するか、新しい技術にチャレンジしていく予定である。

7. むすび

放送局の使命としては、お茶の間に臨場感を伝える必要がある。そこでFPUという「飛び道具」は必須のアイテムである。各放送局では、この特性を熟知しながら、どのような場面で「どの道具」を使うべきか考えながら運用している。また、今後4Kなどより高画質な番組制作も検討されており、高度化も必要不可欠となっている。

今後、これらの周波数を有効に使いながら、FPU等の伝送装置は、目的に応じてよりいっそう効率的に運用するように考えていく必要がある。

日本テレビでは、今後も、FPUにおける周波数を有効かつ効果的に使う技術研究、現場での運用の工夫などを考え、視聴者の要望に応えられる番組制作を行っていく所存である。

(2015年1月30日受付)

まきの てつお 牧野 鉄雄 慶応義塾大学理工学部電気工学科卒業。1988年、日本テレビ放送網(株)入社。技術局送出部、同社新社屋建設本部、技術統括局技術戦略センター技術開発部などを歴任、現在、技術統括局技術戦略部専門部長(兼)社長室麹町再開発事務局。正会員。