

電話の信号を伝える方法（1）

音声を電波に載せるまで

先生：「今日は電話の音声はどうやって相手側に伝わるかを説明しよう。

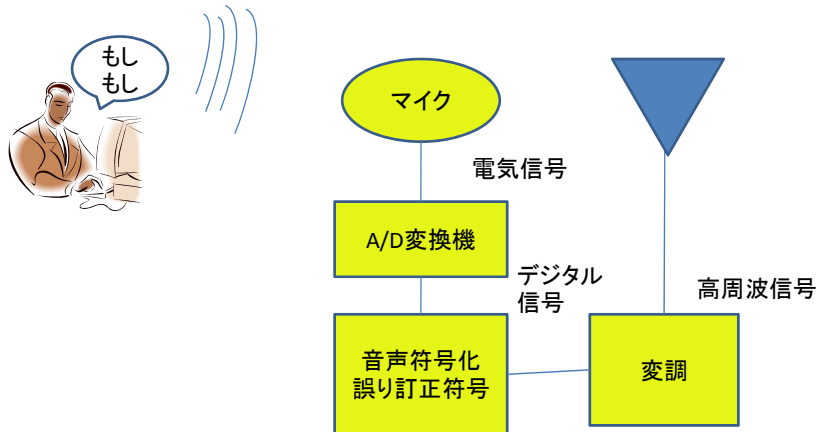
今日の説明はネットワークの仕組みではなくて音声信号が具体的にどのように電波に乗って相手側まで伝えられるかということだ。」

生徒：「先生、別に音声が電波に変わる仕組みを知らなくてもケータイを使えますよ。」

先生：「そうだね。しかし、こういう仕組みの基本的なところだけでも知っておくと、なにかと役に立つので簡単に説明しておこう。それぞれの方法は深い技術が盛り込まれているので、その技術に興味のある人にはいずれ「携帯電話の技術」コーナーで説明することにしよう。

下の図は人間の発した声がケータイの中でどのように処理されているかを示す図だ。

音声が伝播に載せられるまで



(1) A/D 変換

まず空気中を伝わってきた音声はケータイについているマイクで電気信号に変えられる。マイクは音波の強弱に比例するような電流が流れるようにできており、空気中を伝わってきた音を電気信号に変換する。この電気信号はアナログの信号だがこれを A/D 変換器でデジタル信号に変換する。A/D 変換というのはアナログ・デジタル変換のことだ。人間の声は 20 ヘルツから十数キロヘルツまでの成分を持ってい

と言われているが、実は電話では4キロヘルツ以上の成分は落としてから変換される。電話の声が少しこもったような感じで臨場感が少ないのはこの高い周波数成分を落としているからだ。

生徒：「先生、どうして高い周波数成分を落としたのですか？」

先生：「これはずっと昔に固定の電話を作った時に決められた。NTTのような電話会社では全国の電話を取り扱うためにたくさんの電話信号を運べるようなネットワークを作る必要がある。一人当たりの電話信号の占める周波数成分が多いと、その分余計なコストがかかってしまう。そこでできるだけ少ない周波数成分で違和感なく音声を伝えるにはどのくらいの周波数成分が必要かをいろいろ実験した結果、4キロヘルツ以下で良いと決めたのだと思う。後で説明するがケータイのように電波で音声を飛ばすときにはさらにこの周波数を節約しないといけない、という条件が厳しく、そのためにいろいろな技術が使われている。」

(2) PCM方式

話を元に戻そう。4キロヘルツ以下の信号をデジタル信号にして送り受信側で元に戻すためには、最高周波数の2倍、つまり8キロヘルツの割合でA/D変換すればよいことが理論的に知られている。そこで、1秒間に8000回の割合でA/D変換を行い、それぞれの値を8ビットで表現する、つまり電圧の強さをゼロから255までの値で表現するわけだ。この8ビットというのもいろいろ実験して決められたようだね。こうすると、人間の音声は1秒間に64000ビット（これを64kbpsと書く）で表現されることになる。固定電話の場合にはこの信号がそのままネットワークに送り出される。つまり固定電話では音声信号一人分を送るのに64kbpsを使用しているわけだ。この方式をPCM（Pulse Code Modulation）方式という。携帯電話が広がり始めた頃は固定電話ではこのPCM方式が世界の標準として広がっていった。

(3) 電波割り当ての制約

ところが、電波で音声を飛ばすケータイではこれでは困る。その理由は無線周波数が不足しているからだ。どこの国でも電波は国の大切な財産として国が管理している。そして、国が国民のためになると判断した用途に国が許可を出すようにしている。電波が産業として使えることがわかったのは20世紀の初めだが、それ以来いろいろな人が電波を使いたいと言って申請した。放送が一番有名な用途だがその他に、アマチュア無線、飛行機の操縦制御、レーダー、企業向けの通信などだ。電波を使って一人一台の電話をサービスしようという話が出てきたのは1970年代の後半で、その頃には既に電波はいろいろな用途に割り当てられていて、携帯電話に割り当てられる周波数は限られていた。

そこで、限られた周波数でできるだけ多くの人の声を送ろうとして、ものすごく色々

な研究がされた。それがこれから述べる音声符号化と誤り訂正符号だ。

(4) 音声符号化

PCM 方式は周波数が 4 キロヘルツ以下ならどんな信号でも一定以下の誤差で送ることができる方式だ、しかし、音声は人間の発生する声であるので様々な特徴がある。この特徴を捕まえて圧縮しようという研究が世界各国で行われた。考え方は人間が声を発生するメカニズムを研究し、それに合わせた形で音声を作るような技術が検討された。更に電話では話している時と聞いている時では状態が違う。また、母音と子音でも情報量が違う。それぞれの地域で開発競争と音質のコンペが行われた。複雑な計算をすれば圧縮はできるが消費が増えてしまう。これらの色々な要素を組み合わせで行った結果、今最も広く使われているのはフィンランドのノキア社の提案した AMR という方式だ。AMR とは Adaptive Multi Rate の略で、話をしている時、黙って聞いていて背景雑音だけが入っている時など 8 種類の状態別に符号化し、少ない時は 4.75kbps、多い時でも 12.2kbps で符号化される。これを状態によって切り替える。現在のドコモの FOMA などではこの方式が使用されている。この方式で符号化すると平均的には 7kbps くらいで伝送できる。PCM の 64kbps と比べると 1/10 位になっている。逆に言うと同じ周波数帯域で 10 倍近い人数の音声を伝達できることになるんだ。」

生徒：「ふーん。すごいですね。普通の固定の電話も AMR にしないのですか？」

先生：「良い質問だね。実は AMR を実現するには複雑な計算が必要なんだ。それも複素数の行列計算が必要になる。複素数なんて数学では出てくるけど実社会では使わないと思っているかもしれないが、携帯電話では欠かせない概念なんだ。普通のコンピュータでは複素数の計算はあまり想定されていないので計算量が増えてしまう。そこで、デジタル信号処理プロセッサ (DSP : Digital Signal Processor) という特殊なコンピュータを開発して、携帯電話にはこの DSP が使われている。

一方、AMR ができたときにはもう PCM がかなり広まっていた。家庭の電話機を DSP 入り的高级なものに取り換えるかどうかだが、固定通信では光通信技術というのが発展して、伝送容量が飛躍的に増大し、無理に電話の信号を圧縮しなくても良くなったので固定の電話機は PCM のままになっているんだ。」

生徒：「それじゃあ、携帯電話から固定電話に電話するときにはどうするのですか？」

先生：「そうだね。NTT のネットワークでは電話は PCM で扱われている。一方 NTT ドコモのネットワークでは電話は AMR で扱われている。そこでドコモが変換器を用意して、NTT に音声信号を出すときには PCM に変換しているんだ。

(5) 誤り訂正符号

携帯電話では音声符号化とペアで誤り訂正符号というのが使われている。音声符号化では 64kbps の音声を何とか圧縮しようとするのに対して、誤り訂正符号は圧縮された音声データに対して冗長ビットというのを付け加えて情報量を増やしている。

生徒：「なんでそんなことをするのですか？」

先生：「それはね、無線では誤りがどうしても出るからだ。

携帯電話はいろいろなところで使われるので電波が弱い時もある。電波が弱くなると送った信号が正しく受信されずに誤って受信される場合が出てくる。その時に、音が途切れたり変な音が出たりしないように間違いを自動的に訂正する誤り訂正符号というのを使うんだ。間違いを自動的に訂正するというと不思議に思うかもしれないが、簡単な例を挙げて説明しよう。例えばある 1 ビット[1]を送るとする。これが[1]と受信されれば正しくて、[0]と受信されれば誤りだ。この時に[1]を送るのに[1 1 1]と 3 回送れば 1 回は[0]と判定されても[1]のほうが多いので誤りを訂正することができる。この例では 3 回送っているので伝送効率は 1/3 になってしまうがね。

実際の無線では誤りは 100 ビットに 1 ビット位になるように基地局の配置や送信電力を設計する。誤りが少なければそれを訂正するにはもっと効率のよい符号を使うことができる。音声符号化とペアで使うと言ったのは、音声符号化で圧縮した信号を全て誤り訂正符号で保護するのではなく、間違った時に再生される音声に影響の大きいビットは強く保護して、影響の少ないビットはあまり保護しない、というようなやり方をして、冗長ビットが増えないような工夫をしているからだ。冗長ビットの量は状態によって異なるが平均で 1.5 倍くらいに送るビット数が増えるくらいだと思う。これを加えても固定の PCM よりは 5 倍以上の改善になっている。

誤り訂正の技術には音声符号化とはまた別の数学が使われている。一時はフランスの天才数学者ガロアが考えた理論が使われていたが、今はアメリカのビタビさんの考えた方式が主流になっている。」

生徒：「ふーん。携帯電話には結構数学がでてくるんですね。」

先生：「そうだよ。

一見、実生活とは関係なさそうな数学が実際に人の生活を便利にしていると考えると面白いだろう。先生はこの他に、この音声符号化と誤り訂正の考え方は、世の中のいたるところで重要な概念だと思っている。今、企業は競争が激しいのでいたるところで業務の効率化と言って無駄を省く努力をしている。これが音声符号化に相当する。しかし、効率化だけを追求すると、疲れてミスをしてしまったりして結果として損害を与えたりする。そこで、良く練られた「ゆとり」を仕事に持たせることによりミスを少なくする。これが誤り訂正符号だ。このように「効率化」と「ゆとり」をうまく組み合わせることで、トータルで効率が上がり、ミスも少ないという結果が得られる。上司は効率化を主張し、部下はゆとりを主張するだけでなく、どうやったらトータルで効率が上がるかを話し合っただけで決めるべきだと思うんだ。

(6) 変調

最後に変調の話をしてしよう。変調の役割は二つある。一つは圧縮され誤り訂正を施さ

れた情報を送信が許可されている周波数帯の信号に変換することだ。日本では現在 2GHz 帯、800~900MHz 帯、1.5GHz 帯などが携帯電話用に割り当てられている。もう一つは効率よく情報を電波に載せる方式だ。もともと、アナログの携帯電話方式の場合には一人当たりの信号の占める周波数幅をできるだけ狭くすることが求められていたが、デジタル方式になってからは、システム全体として多くの人が使える方法ということでいろいろな方法が使われている。

長くなるので詳細は説明しないが、第 1 世代のアナログ方式の時は FDMA、第 2 世代の PDC 方式（ドコモのブランドで言うと MOVA）の時は TDMA、第 3 世代の WCDMA 方式（ドコモのブランドで言うと FOMA）の時は CDMA、そして将来の方式が OFDMA という方式が使われている。恐らくこれで打ち止めになり、第 5 の方式は出てこないと思う。具体的にどんな方式なのかに興味のある人はそのうち「無線技術」コーナーに解説文を載せるので見てほしい。」