

アナログとデジタル

東北大学 電気通信研究所 教授 すえまつ のりはる 末松 憲治さん

今から30年近く前、イギリスに留学する機会を得て、北部イングランドのリーズという街で1年ほど暮らしたことがあります。日本で言えば、ちょうど仙台のような規模と首都からの距離の街でした。私の留学先だったリーズ大学といえば、最近では、佳子さまが留学されたことで少し有名になりました。当時はアメリカの大学への留学、あるいはオックスブリッジ（オックスフォード、ケンブリッジのことです）への留学が主流でしたが、日本人が多すぎる、古いイギリスを感じてみたいということから、どちらかという日本人が少ない田舎な街を選んだわけです。また、イギリスは英国病といわれ没落していくイメージである一方、日本は、国民1人当りのGDPでイギリスはおろか米国を超え [1] ピークに達していましたが、これからは次第に落ちていくであろうと考え、今後の日本の状況を考える際の参考になるのではないかと考えていました。

当時のイギリスの製造業では、自動車産業、電機産業はいずれも衰退し、また日本を含めた海外製品が市場を席捲し、日本企業が工場進出を行っている状況でした。一部の少量多品種で高付加価値の産業（ロールスロイスに代表される航空機エンジン産業など）は、かろうじて生き残っていました。一方、大学の理系の研究室には、著名な教授陣がおり、世界をリードし、各国から研究者が集まってくる状況でした。留学を通じて、産業は無くなっても学問と先端技術の研究は残るということを知りました。この学びが、私の場合、現在の大学に移ることを決めた理由の1つだったのかもしれない。

「温故知新」という言葉をよく耳にしますが、このように、過去の似たような事例から、今後を考えてみることは重要だと思います。では、本題である、アナログとデジタルについて考えてみましょう。アナログとデジタルといえば、まずは、音を考えたいと思います。日本においては、1979年に発売されたSonyのWALKMANが大成功例として語られていますが、その時代は、レコードプレーヤー、テープレコーダー、プリアンプ、パワーアンプ、スピーカ

いずれもアナログ信号を扱っていました。しかし、再生・録音、イコライザやノイズ低減などの信号処理については、デジタル化が進み、最終的には、マイクとスピーカ、パワーアンプのみがアナログとして残った状況です。映像で考えても、カメラ（レンズとCCD（Charge Coupled Device）などの受光デバイス）とディスプレイ（発光素子）はアナログあるいは、アナログとデジタルを受け渡す部分として残っています。それなりのレベルの音質や画質であれば、これらのアナログの部分に関してあまり付加価値は発生しませんが、プロ仕様ということになると大きく状況が変わり、そのコストは100倍では利かないレベルになってしまい、デジタル部をはるかに超える価値が出てきます。高ダイナミックレンジ*1化を例にすると、デジタル回路の場合は、データに1bit追加すれば6dB増えますが、アナログ部のダイナミックレンジを6dB増やそうとすると、アナログ回路の出力を4倍にしないといけません。増幅器を4並列動作させると、4倍のコストがかかるわけで、それだけ、アナログ回路は重要だといえます。また、デジタル回路に比べてアナログ回路は、設計においても、製造においても、匠の技が入る余地があります。デジタル信号処理部分は、一度できてしまい成熟するとモジュール化、コモディティ化（汎用化）してしまいますが、アナログ部はつくるたびに手を加えることが可能で、そこが付加価値を生むところです。現在のスマホの、カメラ、画面や、イヤホンなどの画質・音質は、皆さんが非常に気になるところではないでしょうか。

この音や映像の話はスマホなどの無線機に置き換えてみましょう。無線機は、取り扱う周波数が高い（例えば、音声では最高数十kHzに対して、無線では数GHzと1万倍高い）ため、これまでデジタル化ができず、アナログリッチの構成となっていました。しかし、CMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor）*2プロセスの微細化とともに、GHz帯でデジタルICが動作する時代になってきました。パソコンなどのCPUのクロック周波数 [1] を



Profile

1985年早稲田大学理工学部電子通信学科卒，1987年同大学大学院博士前期課程修了。同年三菱電機入社。アナログmovia，デジタルmovia，FOMAの携帯電話，ETC車載器などの各種無線通信端末や衛星通信機器のRF回路の研究開発に携わった。1992～1993年英国リーズ大学客員研究員。2010年より東北大学電気通信研究所教授。大学では，ソフトウェア無線機，デジタルRFなどの無線機ハードウェア技術のほか，耐災害に適した衛星通信技術の研究に従事。2012年信学会エレクトロニクスソサイエティ賞。信学会フェロー。

見ると，CDが本格的に使われはじめた1980年代前半では数十Hzでしたが，DVDの2000年前後では1GHz程度となり，CPUをはじめとするデジタル回路のクロック周波数の高周波化とともに，アナログからデジタルの信号処理系に置き換わってきました。ところが，2005年あたりから，CMOSの微細化は進むものの，パソコンなどのCPUのクロック周波数は数GHz以上にはならず，マルチコア化が進むことになってしまいました。標本化定理*3にあるように，ナイキスト周波数*4である1/2のクロック周波数までしか，アナログからデジタルへの信号処理部の変換が行えない状況となっているわけです。従って，現在でも，スマホなどの端末や，基地局の無線機は，中間周波数*5やベースバンドの信号処理のみデジタルで行い，送信系では，DAC (Digital Analog Converter) でアナログ信号に変換した上で，GHz帯，さらには，sub 6GHzや28GHz帯などのNR (New Radio) の周波数帯に周波数変換する必要があるわけです。また，受信系では，NRの周波数帯の高周波信号を中間周波数やベースバンドに周波数変換し，得られたアナログ信号をADC (Analog Digital Converter) でデジタル信号化しています。本来であれば，アンテナ，高周波フィルタ，低雑音高周波増幅器，送信高周波増幅器以外は，デジタル化してしまいたいところ [3] ですが，なかなかうまくいきません。普通に考えると，現在の周波数変換器を含む構成の高周波アナログ回路で付加価値化を目指そうとするのではないかと思います。あまのじゃくな私 [4] は，ADCやDAC，高周波フィルタ，低雑音高周波増幅器，送信高周波増幅器，アンテナなどの高速化あるいは高周波のアナログ部の高付加価値化は，他の技術者の方にお任せして，低いクロック周波数のままで，アナログの周波数変換器を不要とする高周波アナログ回路のデジタル化を行い，音声や映像と同じようにデジタルリッチなハードウェア構成を目指した研究 (ダイレクトデジタルRF送受信機 [5] と我々は呼んでいます) に取り組んでいます。ナイキスト周波数を超える高周波信号を，直

接DACで生成，ADCでサンプリングと量子化*6する技術が実現されれば，スマホや基地局などの無線機においても，音声や映像機器のように，デジタルリッチなハードウェア構成となり，コモディティ化がさらに進むことが期待されます。

文献

- [1] GLOBAL NOTE : “1人当たり名目GDP (IMF統計).” https://www.globalnote.jp/p-data-g/?dno=8870&post_no=1339
- [2] Stanford VLSI Group : “CPU DB.” http://cpudb.stanford.edu/visualize/clock_frequency
- [3] Intel : “Intel Developer Forum 2012 Keynote, Justin Rattner Presentation,” 2012. https://download.intel.com/newsroom/kits/idf/2012_fall/pdfs/IDF2012_Justin_Rattner.pdf
- [4] 東北大学電気通信研究所 : “【通研人01】末松憲治 無線通信の未来を切り開くあまのじゃくな研究者,” YouTube, Nov. 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=qYNOz1sao9Q>
- [5] 末松 憲治，本良 瑞樹，亀田 卓 : “ダイレクトデジタルRF技術,” 信学論, Vol.J102-C, No.11, pp.297-304, Nov. 2019.

*1 ダイナミックレンジ：入力された信号を歪みなく処理できる信号の範囲。

*2 CMOS：半導体回路の一種であり，携帯端末無線機の高周波アナログICを除く，CPUやADC，DACなどのほとんどのICがこの半導体回路である。

*3 標本化定理：アナログ信号が含んでいる最高周波数の2倍より高い周波数でアナログ信号を標本化すると，標本化により得られたデジタル信号から元のアナログ信号を完全に再生できるという定理である。

*4 ナイキスト周波数：標本化する際の周波数の1/2の周波数のこと。標本化定理より，デジタル信号から再生できるアナログ信号の最高周波数となる。

*5 中間周波数：搬送波 (キャリア) 周波数よりも低い周波数。無線通信システムの多くでは，ベースバンドの送信信号を直接RF周波数に変調 (受信RF信号を直接ベースバンド信号に復調) せず，中間周波数に変換した後に変調する。

*6 量子化：連続したアナログ量を離散的なデジタルの値で近似すること。

本誌に掲載されている社名，製品およびソフトウェア，サービスなどの名称は，各社の商標または登録商標。