

インターネットとオープンな無線技術の今後

力武 健次^{1,2,a)}

概要：電波は限りある公共の資源であり電波を使う無線通信や放送は歴史的に厳しい監理の下に運用されてきた。無線機器も目的を限定した独自仕様の専用機として開発されるのが主であった。しかし 2010 年代に入り多目的に使えるソフトウェア無線機 (SDR) の入手が容易となり関連ソフトウェアやハードウェアの仕様や詳細実装情報の公開 (オープン化) がインターネットを通じて行われるようになった。また無線通信に関する情報も世界各地で収集されインターネットでオープンなデータとして開示されている。これらのインターネットによるオープン化と SDR 化を前提とした無線の利用形態の変化に従来の監理および管理体制は追従できておらず、オープン化による新たな利用法の実現やその実現に伴い発生する問題の解決に対応できていない。本稿では 2010 年代以降の筆者のオープンソース SDR 実装作成やアマチュア無線を通じたオープンサイエンス活動への参加など無線のオープン化に関連する活動で得た知見について紹介し、今後の電波による無線通信の監理および管理体制、セキュリティ確保、新たな利用法の実現に必要な技術開発促進など今後のあるべき姿について議論と提言を行う。

Future of Internet and Open Radio Engineering

KENJI RIKITAKE^{1,2,a)}

Abstract: Radio waves are limited public resources. Communication and broadcasting using radio waves are historically operated under strict regulations, and the radio equipment was primarily developed as a proprietary device for dedicated purposes. Since the 2010s, however, multi-purpose software-defined radio (SDR) has become widely available, and the specification and detailed information of the SDR implementations are publicly opened through the internet. Also, traffic-related data and information on radio communication are collected worldwide and openly disclosed as datasets. Traditional regulatory and administrative bodies do not effectively catch up the radio wave usage changes from the popularization of SDRs and open information exchange via the internet. Those bodies do not promptly respond to the needs of innovative new radio usage, and to the problems arise from the modern usage either. In this paper, we introduce the lessons we have learned from our activities of making radio engineering open by building our own open-source SDR implementations and participating in open-science amateur radio activities. We then discuss and propose our perspectives on the regulatory and administrative bodies, the security assessment, and the facilitation of the technology development for the new usage of radio communications.

1. はじめに

19 世紀末期にヘルツの電磁波の発見 [1] とマルコーニの電波 ^{*1}による無線通信の実用化 [2] が行われて以来、電波

は無線通信や放送の基幹的役割を担ってきた ^{*2}。2020 年の現在、携帯電話から発展した LTE とイーサネットから発展した無線 LAN の 2 つはスマートフォンやタブレットによるインターネットの基幹通信媒体として日常生活に欠かせないものになっている。

一方、無線通信方式の実験や開発にもインターネットは不可欠なものとなった。ソフトウェア無線機 (Software-Defined Radio, SDR) はパソコンのモジュールとして安価

¹ 力武健次技術士事務所
Kenji Rikitake Professional Engineer's Office, Setagaya City, Tokyo
156-0045 Japan

² GMO ペパボ株式会社 ペパボ研究所
Pepabo R&D Institute, GMO Pepabo, Inc., Tenjin, Chuo ku, Fukuoka
810-0001 Japan

^{a)} kenji.rikitake@acm.org

^{*1} 周波数 3THz 以下の電磁波の総称 (電波法第 2 条の 1)。

^{*2} 以後本稿では特に記さない限り「無線通信」や「放送」は電波によるものを指す。

に入手できるようになり、受信のみならず送信も行えるようになったため、通信方式の改良はハードウェアの改造なく行えるようになった。また無線通信でやりとりされる各種情報について、今までの2拠点間(P2P)の情報交換だけでなくインターネットを併用して各通信拠点からの情報を吸い上げることで、集約したデータによる全体像の可視化などより大局的な利用が可能になった。一言でいえば、無線技術にもオープン化^{*3}とソフトウェア・ファースト[3]の波が押しよせてきている。

しかしこのような無線通信や放送をめぐる状況の変化に、現状の電波監理^{*4}体制は追従できているとは言い難い。根本的な課題としては以下の2点があると筆者は考える。

- a) 現在の免許に基づく事前許可の仕組みでは、新規通信方式の実験要請に対して迅速に追従することができない。具体的には、無線通信の根幹原則である混信妨害を与えない範囲であることが技術的に確実な場合においても、事前許可なしには実験環境を得ることができない制度となっている。
- b) SDR化による通信方式の模倣が容易である現在、免許を受けていない無線機器は電波を出していないだろうという技術的な仮定は成立しなくなっている。言い換えれば、あらゆる無線機器はセキュリティ攻撃の可能性を考えなければならなくなっている。

本稿ではこれらの考えに基づき、2010年代以降の筆者のオープンソースSDRの実装作成と運用、またアマチュア無線を通じたオープンサイエンス活動への参加など、無線通信のオープン化に関連する活動で得た知見について紹介しながら、今後の無線通信の監理および管理体制、セキュリティ確保、そして技術開発促進について今後のあるべき姿について議論と提言を行う。

以下に本稿の構成を示す。2章では世界と日本の電波監理体制について概説する。3章ではSDRの歴史とインターネットとのかかわりについて述べる。4章ではアマチュア無線の歴史的役割と21世紀以降のオープンサイエンス化について論じる。5章では無線での暗号利用の課題と現状について述べる。そして6章では前章までの議論をふまえた今後の電波による無線通信の監理および管理体制、セキュリティ確保、新たな利用法の実現に必要な技術開発促進など今後のあるべき姿について議論と提言を行う。

2. 電波の監理体制

2.1 電波の国際監理体制

電波は混信を避けるために目的別に周波数や通信方式を

設定して運用することが必要であり、国際電気通信連合(ITU)の国際法に基づいて各国や各地域の主管庁^{*5}が監理する体制が歴史的に取られてきた[5]。

ITUは無線通信や放送に関する管理を司る下部組織としてITU Radiocommunication Sector (ITU-R) [6]を持つ。ITU-Rでは世界各国や各地域間での無線通信の有害な混信妨害を避けるために、周波数割り当ての管理、衛星軌道等衛星の利用に関する情報の管理等を行うとともに、国際的ルールの根幹となる無線通信規則(Radio Regulations, RR) [4]の改正を行う業務を担っている。

無線通信では電力の大きな無線機と効率の良いアンテナで実効輻射電力(ERP)を大きくした無線局が優位に立てる。この優位性を利用した周波数の独占や競争相手の排除などの不公平な行為は無線通信の利用が始まった当初から繰り返し発生している[7]。このような問題を解決するために、国際的な無線通信や放送に関する会議が定期的に行われるようになった[8]。1903年の万国無線通信会議(International Radiotelegraph Conference)の予備会議に始まったこの会議の歴史は、1993年以降世界無線通信会議(World Radiocommunication Conference, WRC) [9]として定期的に行われるに至っている。

2.2 日本の電波監理体制

日本では1900年の電信法から分かれた1915年の無線電信法[10]を経て、第2次大戦終結後1950年に電波法[11]と放送法[12]が制定され電波監理体制が確立した。無線電信法第1条では「無線電信及無線電話ハ政府之ヲ管掌ス」と定められ、電波は国家がもっぱら管掌することが記されていたが、戦後の民主化に伴い電波法第1条では「この法律は、電波の公平且つ能率的な利用を確保することによつて、公共の福祉を増進することを目的とする。」としてITU-RのRRに準拠する形に改められた。

電波法は1950年の制定以来、基本的原則を70年の間変えずに現代に至っている。以下、本稿で論じる内容に係る電波法に定められた電波監理の原則の概要を示す[13]。

- a) 電波法の下での監理体制では、電波を利用したい者はあらかじめ総務大臣からの免許による許可を受けその免許の範囲内で運用を行うことが前提となっている^{*6}。
- b) 無線局の開設を行おうとする者は、事前に総務大臣に免許を申請しなければならない(電波法第6条)。この際、無線設備の工事設計など、無線機やアンテナ等の技術の詳細仕様が確定していなければならない(同条の7)。

^{*3} 本稿では「オープン化」は「詳細使用を公開していない独自技術ではない、通信規格やデータプロトコルなど実装に関する仕様の情報と実装が公開されること」の意味で使用する。

^{*4} 監理という用語には法的な権限をもって取り締まること(regulation)を含む。本稿では各国や各地域の政府当局による管理と監督を指す。

^{*5} 各国各地域政府の無線通信に関する責任を負う部局のこと。日本では総務省が該当する。後述のITU-R RR [4] Article 1, Section 1.2のAdministrationに相当。

^{*6} 電波法第4条「無線局を開設しようとする者は、総務大臣の免許を受けなければならない。」(ただし同条各号に記されている微弱電波、27MHz帯の市民ラジオ、登録局など一部の例外を除く)。

- c) 免許申請の書類審査で電波法第7条の技術基準に適合し周波数の割り当てが可能であると判断された場合は、総務大臣は同法第8条に基づき予備免許を与える。この予備免許に基づき無線局の工事を行い完了した後、同法第10条に定められた落成検査を受け、無線設備と運用に従事する無線従事者の資格などの事項について検査を受けて問題がなければ、総務大臣は免許を同法第12条に基づき与える。
- d) 工事設計を変更しようとする場合はあらかじめ総務大臣の許可を受けなければならない（電波法第9条）。
- e) 免許を与えたことの証明として、総務大臣は電波法第14条に基づく免許状を交付する。

2.3 日本の現行の電波監理体制の問題点

2.2節では日本における電波法の下での電波監理体制の概要を紹介した。この体制は徹底した事前許可原則に貫かれており本稿執筆時の2020年現在に至るまで根本的には変わっていない。この事前許可原則に合わない無線設備については、あくまで例外として認められているに過ぎない。

たとえば現在広く使われている無線LANは、電波法第4条の3^{*7}に示す例外である。また広く普及している携帯電話やスマートフォン等については、基地局なしではこれらの携帯端末が通信できないことをふまえ、電気通信事業者がこれらの端末の免許人となることで各々の端末利用者は免許申請をしなくて済むようになっている[14]。これらの端末は総務省令で定める特定無線設備として技術基準適合証明（技適証明）を受けているため、個別の落成検査を省略できる。同様に、機種変更をした場合も技適証明を受けている端末であれば、個別の許可を省略できる。

しかし、新しい技術の普及のために例外的改正と政令による変更を必要とする現在の電波法では、法律全体の見通しが悪くなっているため、すでに認可され確立した利用法については問題が起らないもの、新規技術を適法に運用するには電波法との適合性に関する調整が必要で時間がかかるという問題が起こっている。その結果、SDRなど無線通信の周波数帯や通信方式を動的かつ自由に変更できる技術を迅速にかつ適法に利用することが困難になっている。

3. SDR とインターネット

3.1 SDR の歴史の概要

SDRの歴史はE-Systemsが1984年に同社のニュースレターにsoftware radioという言葉を使ったことに始まる[15]。

その実際は受信機のベースバンド信号に適応フィルタと復調器をデジタル処理で実現するというものであった。

その後1991年にDARPAのSPEAKEasy計画が発表された。SPEAKEasyの目標は「2MHzから2GHzの間に10個の異なる軍事用無線プロトコルをサポートするもの」で、1995年のPhase-1ではSPARC-10ワークステーションにラックマウントされた大きな機材だったのが、1997年のPhase-2では車載用機材になるまでの小型化に成功している。この開発の過程ではソフトウェアとハードウェアを問わず標準化されたオープンシステムとオープンアーキテクチャによる柔軟性を持たせることが必要と関係者の一人であるBonserは発表している[16]。

SDRの基礎概念は1992年にMitolaによる論文[17]で示された。この論文ではコンピュータによるデジタル処理を中心とし時系列のアナログ電気信号として表現される電波との間にA/D-D/A変換を行うことで、もっぱらコンピュータが信号生成、変調、復調、誤り制御、および各種マルチメディアサービスを行うモデルが示されている。

2001年にはGNUプロジェクトの1つとしてGNU Radio[18]が立ち上がり、C++とPythonによるSDRのプロトタイピングができるようになった。そしてその後のデジタル信号処理(DSP)やFPGAなどの普及と高性能化により、2020年の現在はテレビの地上デジタル放送[19]などDSPやSDRの技術を前提に作られる無線通信や放送システムが普及して使われるようになった。

3.2 RTL-SDR の登場と普及

SDRには目的別にさまざまな実装が存在するが、その中で最も広く知られている受信機モジュールの1つはRTL-SDRである。RealTekが2008年に発表した欧州の地上デジタルテレビ放送DVB-T用の受信チップRTL2832Uが実は音声のFM放送や欧州のデジタルラジオ放送DABの再生にも使えることをFryが2010年に発見した[20]。その後Linux等で動くソフトウェアツール群rtl-sdr[21]とGNU Radioへの信号源となるgr-osmosdrなどが普及し、LinuxなどでSDRが現実のものとして体験できるようになり広く普及した。現在入手できるRTL-SDRモジュールの1つRTL-SDR V3[22]（図1）は単体でUSD24.95^{*8}と手頃な価格で使うことができる。

RTL-SDR V3の内部振幅分解能は8ビット（48dB相当）、最大サンプリング周波数は2.4MHz、IQ信号^{*9}による受信周波数範囲は24MHz～1766MHzである[24]。この周波数範

^{*7} 2.4GHzや5GHzの無線LANは同項の「空中線電力が一ワット以下である無線局のうち総務省令で定めるものであつて、第四条の三の規定により指定された呼出符号又は呼出名称を自動的に送信し、又は受信する機能その他総務省令で定める機能を有することにより他の無線局にその運用を阻害するような混信その他の妨害を与えないように運用することができるもので、かつ、適合表示無線設備のみを使用するもの」に該当する。

^{*8} 2020年8月5日確認。

^{*9} 解析信号、複素信号とも呼ばれる。1つの実信号からヒルベルト変換や直交検波などで特定の周波数に対し90度位相をずらして生成した2つの時系列信号の組を複素数として扱ったもの。瞬時振幅や位相が定義できるためデジタル信号処理で広く用いられる（[23]、2章 信号とシステムの複素領域での扱い）。



図 1 RTL-SDR V3 の写真
Fig. 1 Photo of RTL-SDR V3.



図 2 Airspy HF+ Dual Port の写真
Fig. 2 Photo of Airspy HF+ Dual Port.

囲には FM 放送や航空無線，アマチュア無線，ADS-B^{*10}など広い地域で受信可能な無線通信や放送が存在するため，SDR の実験だけでなく運用に広く用いられている．一例として ADS-B 情報を集約して地図上に表示するインターネットサービスを提供している FlightRadar24 は廉価な ADS-B 受信機として Raspberry Pi と RTL-SDR V3 相当の受信モジュールの利用を推奨している [26]．

3.3 Airspy HF+と airspy-fmradion

現在筆者の多用している SDR 受信機モジュールの 1 つは Airspy HF+ Dual Port [27] (図 2) である^{*11}．このモジュールは内部振幅分解能が 18 ビット (108dB 相当)，最大サンプリング周波数は 768kHz，IQ 信号による受信周波数範囲は 9kHz ~ 31MHz と 60MHz ~ 260MHz となっており，長波や中波，短波，FM 放送などの高感度受信に特化している．RTL-SDR ではダイナミックレンジが狭いため実用的に使うには受信機初段の高周波利得を細かく手動で調整しなければならなかったが，Airspy HF+ Dual Port では広範囲に対応する自動利得調整 (AGC) が組み込まれており，放送受信の際に頻発する大信号による受信機初段の飽和と歪

^{*10} Automatic Dependent Surveillance - Broadcast の略．航空監視システムにおいて航空機側が位置や速度情報などを管制側に通知するシステム [25]．

^{*11} 2020 年 8 月 6 日現在，受信アンテナ端子を 1 つにして軽量化した Airspy HF+ Discovery が日本向けには itead.cc で USD169 (送料別) で入手できる．

の問題をモジュールを利用する際に考える必要がないという利点がある．

2018 年から 2020 年にかけて，筆者は Linux や macOS の機器を高品質な FM ステレオ放送受信機として活用することを目的としたソフトウェア airspy-fmradion [28] を製作した．airspy-fmradion は RTL-SDR 用の FM ステレオ放送受信機であった SoftFM [29] とその改良した fork である NG-SoftFM [30] を基にさらに改良を加えたソフトウェアであり，RTL-SDR, AirSpy R2/mini, AirSpy HF+ Dual Port/Discovery の各モジュールに対応している．SoftFM や NGSoftFM は GPLv3 ライセンスで公開されているため airspy-fmradion も GPLv3 ライセンスで配布している．

airspy-fmradion には独自に実装した受信時の歪を抑えるマルチパスフィルタの機能がある．このフィルタは振幅一定であるべき FM 信号の振幅がマルチパス信号と干渉したときに発生する振幅の変化を利用し，複素 LMS アルゴリズム [31] による適応フィルタで遅延信号の影響を取り除いて振幅を一定に近づける Constant Modulus Algorithm (CMA) [32] を使っている．具体的な実装に際しては望月と羽鳥による方式 [33] を採用し，適応フィルタの入力振幅を一定にするための AGC や信号処理計算ライブラリ VOLK [34] による高速化を図った．フィルタを適用した結果，NHK 大阪 FM 放送の 880Hz の時報音の雑音歪率 (THD+N) を 0.918% から 0.242% に低減した効果を得られている [35]^{*12}

3.4 インターネットと SDR の発展の関係と今後

1990 年代の SPEAKeasy の開発成果の時点で，SDR はオープン化されたシステムとして開発するのがより良いという価値観が確立された．そして GNU Radio などのソフトウェアや RTL-SDR などのハードウェアモジュールがよりオープンな形で利用できるようになることで，SDR の関連技術開発は加速している．

airspy-fmradion の開発にあたって，基礎技術の論文など文献収集はもっぱら Web を通じて行い，関連ライブラリは libsoxr [37] など公開されているオープンソースソフトウェア (OSS) を使った．結果として SDR 固有のバッファリングによる再生遅延の問題はあるものの，それ以外は汎用コンピュータで高音質な FM 放送を再生できる OSS の開発という当初目的を達成できている．OSS が OSS を生み出すことが SDR の分野でも起こっている．

筆者の SDR 関連の活動は電波法の制限を回避するため受信のみに絞っているが，現実にはすでに送信できる SDR も存在する．HackRF One [38] は，1MHz ~ 6GHz の間の半二重の送受信が可能で，最大サンプリング周波数は 20MHz

^{*12} 筆者が調べた限りで市販のオーディオ製品でこのようなマルチパスフィルタを実装したものはアキュフェーズのチューナー T-1200 [36] のみである (ただし民生用でない業務機を除く)．

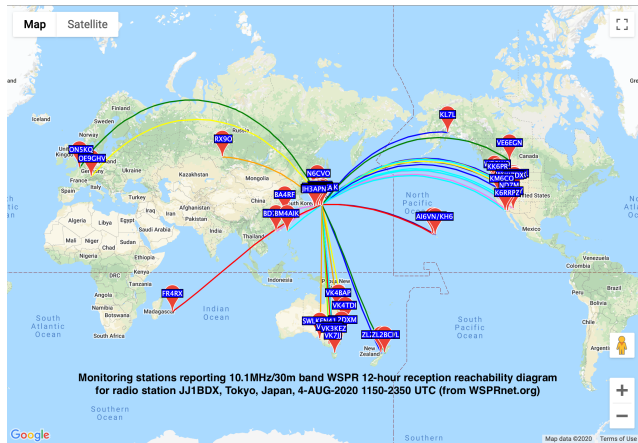


図3 WSPRでのJJ1BDXの到達状況(WSPRnet)

Fig. 3 Diagram of reachability by WSPR of JJ1BDX (WSPRnet).

である^{*13}。このHackRF Oneなどを使ったGPS信号の生成ソフトウェアも公開されている[39]。今後はSDRを使った送信機の実装もさらに一般化すると予想できる。

また、SDRの普及は情報を俯瞰的に観測することを可能にした。一例として松本と菊地[40]はRTL-SDRを使い65MHz～2.1GHzの広域にわたる電界強度測定による災害時の被災推定の有用性を示している。今後はこうした従来の無線通信や放送の枠を超えた利用が出てくるであろう。

4. アマチュア無線とオープンサイエンス

アマチュア無線は電波で営利目的でない雑談を楽しむ場としてソーシャルネットワーク的な役割を歴史的に担ってきた。しかしインターネットでのソーシャルネットワークの台頭により、その存在意義は本来の技術を中心としたものに回帰しつつある。本節ではインターネットが変えたアマチュア無線の各種活動について紹介する。

4.1 WSJTによる微弱信号対応デジタル通信の普及

2001年に流星反射通信など微弱信号を捉える無線通信方式としてTaylorが提唱したWSJT[41]とWSJTから各種発展したプロトコルを実装したプログラムはWSJT-X[42]として公開されている。本稿ではWSJT-Xで現在広く使われている通信方式のうちWSPRとFT8の2つを紹介する。

WSPR[43]は交信を目的とせずピーコン用に特化しており、2分間ごとに110.6秒送信する代わりに帯域幅が6Hzと極めて狭いため、2.5kHz幅のS/N比を基準とした場合-31dBという微弱信号で受信することができる[44]。参考までに筆者の運用するアマチュア無線局JJ1BDX^{*14}でのWSPRの到達状況(図3)を示す。

一方FT8[45]は交信を目的にして設計されており、2.5kHz

^{*13} 日本では秋月電子通商で33000円で販売している(2020年8月6日現在)。

^{*14} 東京都世田谷区の自宅に設置、本稿運用時のアンテナは地上高8mの長さ1.4mに短縮した10.1MHz帯用ホイップアンテナにカウンターポイズを付けて空中線電力10Wで行った。

幅のS/N比で通信限界が-21dBとWSPRよりも10dB大きな限界電力が必要であるが、15秒ごとに12.6秒送信する方式として迅速な通信を可能にし、現在筆者のように十分な大きさのアンテナを架設できないアマチュア無線家などの間で遠距離交信を楽しむために広く用いられている。WSJT-XはWSPRnet[46]やPSK Reporter[47]など情報集積を行うWebサービスに受信レポートを送る機能を備えており、これらを利用して全世界の伝搬情報がわかる。

4.2 HamSciとオープンサイエンス

インターネットを通じたデータ収集の広がりや、オープンサイエンスの一形態である一般市民が科学研究に参加するcitizen scienceとしてアマチュア無線のコミュニティを活用する方向へも広がっている。米国の研究者を中心としたコミュニティHamSCI[48]では、アマチュア無線家による電波伝搬の共同観測など地球単位の観測活動を企画主導している。2020年6月21日の部分日食の際は、中国の標準電波局BPMの伝搬異常の有無を観測するイベントが開かれ筆者も観測に参加した[49]。

4.3 交信情報のデータベース化

従来アマチュア無線家の間は交信証明を紙のQSLカードで行うのが一般的だったが、米国の無線連盟ARRLが2003年に導入したLogbook of The World (LoTW)[50]では、公開鍵暗号で交信記録に署名するOSSであるTrusted QSL[51]を使い、紙によることなく多くの局の交信記録の真正性を保ちながらデータベースで一元管理することに成功した。これにより交信証明に基づいた表彰を行うアワードプログラムが電子化され、ARRLはアワードプログラムと交信記録を一体化したビジネスモデルを確立した。同様のモデルはeQSL.cc[52]やClub Log[53]、QRZ.com Logbook[54]でも使われており、特にClub Logでは集まってくる交信情報を統計解析することで2017年9月からのFT8モードの台頭[55]などのトレンド分析に成功している。

4.4 インターネットによる変化と日本の課題

アマチュア無線でもインターネットで各無線局の情報を一箇所に集約するクラウドサービスの導入が行われた結果、実時間での伝搬状況の把握や交信直後の交信状況の確認など、従来できなかった迅速かつ網羅的な活動が可能になり、オープンサイエンスの基盤として使用し得るグローバルな通信実験環境に変わった。

インターネットは通信方式の開発形態も変えた。WSJT-Xの開発は現在インターネット上でオープンに行われており、forkであるJTDx[56]など互換ソフトウェアもOSSとして開発されている。また関連通信方式の開発は、内容の秘匿化を行わないなどの一定の制約を満たしていれば法律違反とはならず事前許可を必要としない米国のアマチュア

無線の環境下で行われた。

一方日本のアマチュア無線の現状はこれらの新規開発の利用者の立場に留まっており、日本語化以外の根本的なシステムデザインでは貢献できていない。電波法の事前許可原則では新しい電波形式や通信方式の自由な実験は容易ではなく、自由に挑戦するマインドセットが日本に育たなかったこともその理由の1つであろう。

5. 無線での暗号利用の課題

無線での暗号利用は下位層での伝送の信頼性が担保されていれば問題なく行うことができる。しかし、有線のように通信の相手方を限定することは電波の特性上容易ではなく、以下の3点を考える必要がある。

- a) 電波は広範囲に到達するため予想できない相手に傍受され、また通信あるいは妨害の試みが行われる可能性を考えなければならない。そのため共通鍵暗号だけでは十分な攻撃の抑止にならず、公開鍵暗号を使い秘密鍵を電波上に送信せずに暗号を利用できる環境を作る必要がある [57]。
- b) 無線通信は事前許可原則に基づいて行われているため、攻撃の可能性は免許制度によってある程度抑止できるという仮定がなされている。しかし GPS や ADS-B などの基幹的通信方式では暗号技術による認証すらされていないため、誰でも情報を偽造できてしまう可能性があり、この仮定はもはや成立しない。
- c) 一方、何もかも暗号化して内容を秘匿することは通信内容の公共利用を阻害する可能性があり慎重に行われなければならない。一例としてテレビ放送のスクランブル化は日本放送協会 (NHK) は行わない方針を示している [58]。真正性を示す認証と、内容の秘匿化は、厳に峻別して考えるべきである。

これらの暗号利用に関する技術開発を円滑に行うには、オープン化された暗号標準や実装を迅速に採用し危殆化しないようにするための法的な基盤整備が必要になる。すでに日本でも GPS などへの攻撃手法に関する書籍 [59] が刊行されており、攻撃に関する情報は市中に出回っている。これらの攻撃手法の進化に対抗するには、防衛手段としての技術基準や制度の策定および技術開発の実証実験を円滑かつ迅速に行うことが必要である。

6. まとめ: 今後変えていくべきこと

本稿では現在の電波監理体制と無線での暗号利用の課題、そして筆者の行った SDR 開発とアマチュア無線でのオープンサイエンスの活動を述べた。すでに 21 世紀から無線機は SDR 化に伴い単機能から複合機能化そしてコンピュータによる仮想化へと向かっており、従来の無線技術応用製品も SDR として作られることが一般的になっている。受信機だけでなく送信機の SDR 化も進み、電波をハッ

クする行為が技術的にも経済的にも誰でも可能な状況になりつつある。

この SDR 普及の状況下においては、使う可能性のあるすべての方式を事前に網羅して許可を受けた上で無線局を運用するという *de jure* 原則のみに依拠した日本の 1950 年以降の電波法による電波監理体制は維持が困難になっていると言わざるを得ない。有害な混信防止の抑止という大原則を守りつつ、より自由な電波の利用について、現在のようない例外として認める方式ではなく法律の根幹原則から見直して変えていかなければ、技術の発展に日本だけ付いていけなくなっているという状況が今後も続くであろう。具体的な方法の例としては以下の5点が挙げられる。

- 特定の周波数範囲と出力について一切の免許や事前許可を要しない自由な利用を認め、対象帯域を拡充する。現状でも同様の周波数帯は存在するが、それらを拡大する。たとえば国際規格になる前の段階の新しい通信方式やプロトコルについても、事前許可を必要としない利用法を認めるべきであろう。
- 既存の基幹的通信方式については、事前許可制度を過信することなく、内容の真正性を示す送信元の認証を公開鍵暗号で行えるような技術開発を推進し、そのための公開鍵暗号基盤 (PKI) を整備する必要がある。そして同時に、電波の利用が適正であるかを確認するためのモニタリング体制を強化すべきである。
- 免許の必要な利用形態については、機器の変更ごとに必要な手続を簡略化あるいは廃止する。一例として、米国ではアマチュア無線局の送信機に対する事前登録を要しないが、日本は一台ごとに登録する必要がある。そのために多大な事務作業が利用者にも政府にも発生している。無線設備の監理ではなく、無線がどのように利用されているかを監理すべきであろう。
- 日本国外で普及していて日本でも利用に問題がないと予想できる無線機器は、他国他地域の同様の制度との相互認証等を行い、実験だけでなく運用に供せるようにする。可能性として、現行の実験等の特例制度 [60] を拡充し、有資格者が確認することで運用への利用も可能にすることが考えられる。
- 免許情報をデータベースで一元監理し、書面を必要としない仕組みに改正する。一例として、電波法第 14 条に定めた無線局免許状を交付するために、アマチュア無線局の各種申請の場合は返信用封筒を送るか追加の送付料を支払うという事務上の多大な非効率の作業が発生している [61]。一方米国では無線局免許等は連邦通信委員会 FCC のデータベースで管理され紙の免許を所持する義務はない [62]。日本政府でも内閣府、法務省、経済産業省の連名で「特段の定めがある場合を除き、契約に当たり、押印をしなくても、契約の効力に影響は生じない」旨の文書 [63] を公表しており、テ

レワークを推進する立場である総務省もこれに従い新規技術開発を阻害する手続きの削減と廃止に向けて改革を推進すべきであろう。

本稿が今後のインターネットの発展に向けた電波利用を考える際の一助になれば幸いである。

謝辞 本稿執筆の際の議論また査読にご協力いただいたペパボ研究所の皆様に感謝する。

参考文献

- [1] The Editors of Encyclopaedia Britannica: Heinrich Hertz, Encyclopædia Britannica, inc. (online), available from <https://www.britannica.com/biography/Heinrich-Hertz> (accessed 2020-08-04).
- [2] Nobel Media AB: Guglielmo Marconi Biographical, Nobel Media AB (online), available from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/biographical/> (accessed 2020-08-04).
- [3] 及川卓也: ソフトウェア・ファースト, 日経 BP (2019). ISBN 978-4-8222-8991-1.
- [4] ITU-R: Radio Regulations (Edition of 2016), ITU-R (online), available from <http://handle.itu.int/11.1002/pub/80da2b36-en> (accessed 2020-08-04).
- [5] 鳥越祐之, 横山隆裕, 坂中靖志: 知識の森 13 群 (標準・知財・法規) -3 編 (情報通信関連法規) -2 章 (国際法規) -2-1 国際法規総論, 電子情報通信学会 (オンライン), 入手先 http://www.ieice-hbkb.org/files/13/13gun_03hen_02.pdf (参照 2020-08-04).
- [6] ITU-R: ITU Radiocommunication Sector, ITU (online), available from <https://www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx> (accessed 2020-08-04).
- [7] 電波適正利用推進員協議会: 電波博物館:電波学習館 第 3 章:電波利用の国際的仕組み:国際的電波利用制度の確立, 電波適正利用推進員協議会 (オンライン), 入手先 https://www.cleandenpa.net/museum/gaku/cont/vol3/vol3_1.htm (参照 2020-08-04).
- [8] ITU-R: Complete List of Radio Conferences, ITU-R (online), available from <https://www.itu.int/en/history/Pages/CompleatelistOfRadioConferences.aspx> (accessed 2020-08-04).
- [9] 総務省電波利用ホームページ: 世界無線通信会議とは, 総務省 (オンライン), 入手先 <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/inter/wrc/wrcsum/index.htm> (参照 2020-08-04).
- [10] 大蔵省印刷局: 無線電信法 (大正 4 年 4 月 21 日法律第 26 号、官報第 865 号 1915 年 06 月 21 日 481 頁~483 頁), 国立国会図書館デジタルコレクション (オンライン), 入手先 <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/2952971> (コマ番号 5/25 および 6/25) (参照 2020-08-04).
- [11] e-Gov: 電波法 (昭和二十五年法律第百三十一号), 総務省行政管理局 (オンライン), 入手先 https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=325AC000000000131 (参照 2020-08-04).
- [12] e-Gov: 放送法 (昭和二十五年法律第百三十二号), 総務省行政管理局 (オンライン), 入手先 https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=325AC000000000132 (参照 2020-08-04).
- [13] 酒匂一成: 無線法規の概要 (その 5) — 基地局の電波免許 —, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol. 3, No. 1, pp. 44-47 (1995). (オンライン https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol3_1/vol3_1_044jp.pdf, 参照 2020-08-04).
- [14] 酒匂一成: 無線法規の概要 (その 6) 携帯電話と電波免許, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol. 3, No. 2, pp. 32-35 (1995). (オンライン https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol3_2/vol3_2_032jp.pdf, 参照 2020-08-04).
- [15] Nutaq Inc.: A short history of software-defined radio (SDR) technology, Nutaq Inc. (online), available from <https://www.nutaq.com/blog/short-history-software-defined-radio-sdr-technology> (accessed 2020-08-05).
- [16] Bonser, W.: SPEAKeasy Military Software Defined Radio, Air Force Research Laboratory (online), available from https://www.its.bldrdoc.gov/media/30649/bons_s.pdf (accessed 2020-08-05). Published in 1998 International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART) Speaker Slides, URL: <https://www.its.bldrdoc.gov/isart/past-programs/1998-isart-speaker-slides.aspx>.
- [17] Mitola, J.: Software radios-survey, critical evaluation and future directions, [Proceedings] NTC-92: National Telesystems Conference, pp. 13/15-13/23 (online), DOI: 10.1109/NTC.1992.267870 (1992).
- [18] GNU Radio Project: GNU Radio, GNU Radio project (online), available from <https://www.gnuradio.org/> (accessed 2020-08-05).
- [19] 川口英, 辰巳博章: 地デジ受信機のしくみ, CQ 出版 (2010). ISBN 978-4-7898-4543-4.
- [20] coherent-receiver.com: Related Works: RTL-SDR Introduction, SWI Kommunikations- und Computer GmbH (online), available from <https://coherent-receiver.com/publications> (accessed 2020-08-05).
- [21] osmocom.org: rtl-sdr, osmocom.org (online), available from <https://osmocom.org/projects/rtl-sdr/wiki/Rtl-sdr> (accessed 2020-08-05).
- [22] RTL-SDR.COM: Buy RTL-SDR Dongles (RTL2832U), RTL-SDR.COM (online), available from <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/> (accessed 2020-08-05).
- [23] 原島 博: 信号解析教科書—信号とシステム—, コロナ社 (2018). ISBN 978-4-339-00907-1.
- [24] RTL-SDR.COM: RTL-SDR Blog V3 Datasheet, RTL-SDR.COM (online), available from <https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf> (accessed 2020-08-05).
- [25] 総務省情報通信審議会: 情報通信審議会情報通信技術分科会航空無線通信委員会報告「ADS-B に係る無線設備の技術的条件」(案) (資料 10-9-2) (平成 19 年 7 月 18 日版), 総務省 (オンライン), 入手先 https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/koukuu_musen/pdf/070718_1_s2.pdf (参照 2020-08-05).
- [26] FlightRadar24 AB: Build your own ADS-B receiver, FlightRadar24 AB (online), available from <https://www.flightradar24.com/build-your-own> (accessed 2020-08-05).
- [27] airspy.com: Airspy HF+ Dual Port, airspy.com (online), available from <https://airspy.com/airspy-hf-plus/> (accessed 2020-08-05).
- [28] Rikitaake, K.: airspy-fmradion, KRPEO (online), available from <https://github.com/jj1bdx/airspy-fmradion> (accessed 2020-08-05).
- [29] van Rantwijk, J.: SoftFM, (online), available from <https://www.rantwijk.nl/softfm/> (accessed 2020-08-05).

- //github.com/jorisvr/SoftFM) (accessed 2020-08-05).
- [30] Griffiths, E.: NGSoftFM, (online), available from <https://github.com/f4exb/ngsoftfm> (accessed 2020-08-05).
- [31] Widrow, B., McCool, J. and Ball, M.: The complex LMS algorithm, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 63, No. 4, pp. 719–720 (online), DOI: 10.1109/PROC.1975.9807 (1975).
- [32] Treichler, J. and Agee, B.: A new approach to multipath correction of constant modulus signals, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 31, No. 2, pp. 459–472 (online), DOI: 10.1109/TASSP.1983.1164062 (1983).
- [33] 望月孝志, 羽鳥光俊: 適応デジタルフィルタによる FM マルチパスひずみ自動除去の方式, *テレビジョン学会誌*, Vol. 39, No. 3, pp. 228–234 (オンライン), DOI: 10.3169/itej1978.39.228 (1985).
- [34] GNU Radio Project: Vector-Optimized Library of Kernels (VOLK), GNU Radio Project (online), available from <https://www.libvolk.org/> (accessed 2020-08-05).
- [35] 力武健次: 無線とラジオの人生 (9): FM 放送とエアチェック (4): マルチパスキャンセラ, Note (オンライン), 入手先 <https://note.com/jj1bdx/n/nf5775b0b7d50> (参照 2020-08-05).
- [36] アクフェーズ株式会社: DDS FM STEREO TUNER T-1200 詳細カタログ, アクフェーズ株式会社 (オンライン), 入手先 <https://www.accuphase.co.jp/cat/t-1200.pdf> (参照 2020-08-06).
- [37] Sykes, R.: The SoX Resampler Library, Rob Sykes (online), available from <https://sourceforge.net/projects/soxr/> (accessed 2020-08-06).
- [38] Great Scott Gadgets: HackRF One, Great Scott Gadgets (online), available from <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/> (accessed 2020-08-06).
- [39] Ebinuma, T.: GPS-SDR-SIM, OSQZSS (online), available from <https://github.com/osqzss/gps-sdr-sim> (accessed 2020-08-06).
- [40] 松本直人, 菊地俊介: 災害時における無線モニタリングによる社会インフラの見える化, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2020-IOT-49, No. 10, pp. 1–6 (2020).
- [41] Taylor, J.: WSJT: New Software for HF Meteor-Scatter Communication, ARRL (online), available from <http://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/WSJT_QST_Dec2001.pdf> (accessed 2020-08-06). QST, December 2001, pp. 37–41.
- [42] Taylor, J.: WSJT-X, (online), available from <https://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/wsjsx.html> (accessed 2020-08-06).
- [43] Taylor, J. and Walker, B.: WSPRing Around the World (2010). Available online at http://www.n4cly.net/PDF_Files/Amateur_GeneralUse/WSPRing%20Around%20the%20World.pdf, accessed 2020-08-06, QST, ARRL, November 2010, pp. 30–32.
- [44] Joseph H. Taylor, Jr.: WSJT-X 2.2 Users Guide, (online), available from <https://www.physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/wsjsx-doc/wsjsx-main-2.2.2.html> (accessed 2020-08-06).
- [45] Franke, S., Somerville, B. and Taylor, J.: The FT4 and FT8 Communication Protocols, ARRL (online), available from <https://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/FT4_FT8_QEX.pdf> (accessed 2020-08-06). QEX, July/August 2020, pp. 7–17.
- [46] WSPRnet Admin Team: WSPRnet, WSPRnet Admin Team (online), available from <https://wspnet.org/drupal/> (accessed 2020-08-06).
- [47] Philip Gladstone: Digimode Automatic Propagation Reporter, (online), available from <https://pskreporter.info/> (accessed 2020-08-06).
- [48] HamSCI: Ham Radio Science Citizen Investigation, HamSCI (online), available from <https://hamsci.org/> (accessed 2020-08-06).
- [49] 力武健次: 2020 年 6 月 21 日部分日食に伴う電離層観測プロジェクトの紹介と測定結果の考察, *PROPAGATION Edition 8* (長谷川真也, 編), 戸塚 DXers サークル, pp. 99–104 (2020). (オンライン版 URL: <http://my-bc1-life.sakura.ne.jp/PROPAGATION.htm>, 参照 2020-08-06).
- [50] ARRL: Logbook of The World (LoTW), ARRL (online), available from <https://lotw.arrl.org/> (accessed 2020-08-06).
- [51] Trusted QSL Group: Trusted QSL, Trusted QSL Group (online), available from <http://www.rickmurphy.net/trustedqsl.org/> (accessed 2020-08-06).
- [52] Electronic QSL Card Centre: eQSL.cc, Air Wave Productions, LLC (online), available from <https://eqsl.cc/> (accessed 2020-08-06).
- [53] Michael Wells: Club Log, Club Log (online), available from <https://clublog.org/> (accessed 2020-08-06).
- [54] QRZ.COM: QRZ.com Logbook, QRZ LLC (online), available from <https://logbook.qrz.com/> (accessed 2020-08-06).
- [55] Michael Wells: Proportion of modes used on the air – 2018 update, G7VJR's Blog (online), available from <https://g7vjr.org/2019/03/proportion-of-modes-used-on-the-air-2018-update/> (accessed 2020-08-06).
- [56] Chernikov, I. and Järve, A.: JTDX, JTDX Developer Team (online), available from <https://jtdx.tech/en/> (accessed 2020-08-09).
- [57] 渡辺優平, 入山敬大, 森井昌克: L-014 WEP の安全な運用方法とその実装について (L 分野:ネットワーク・セキュリティ, 一般論文), *情報科学技術フォーラム講演論文集*, Vol. 14, No. 4, pp. 195–200 (2015). (オンライン <http://id.nii.ac.jp/1001/00153993/>, 参照 2020-08-07).
- [58] 日本放送協会: よくある質問集: なぜ、スクランブルを導入しないのか, 日本放送協会 (オンライン), 入手先 <https://www.nhk.or.jp/faq-corner/2jushinryou/01/02-01-08.html> (参照 2020-08-07).
- [59] 上松亮介: ハッカーの教科書 IoT ソフトウェア無線の教科書, データハウス (2020). ISBN 978-4-7817-0243-8.
- [60] 総務省: 技適未取得機器を用いた実験等の特例制度, 総務省 (オンライン), 入手先 <https://exp-sp.denpa.soumu.go.jp/public/> (参照 2020-08-09).
- [61] 総務省: 免許状返信用封筒の送付について, 総務省電波利用電子申請・届出システム Lite (オンライン), 入手先 <https://www.denpa.soumu.go.jp/public2/help/manual/cat_license_receipt/man_about_sending_response_letter.html> (参照 2020-08-07).
- [62] e-CFR: CFR Title 47 Part 97: Amateur Radio Service, US Government Publishing Office (online), available from <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=efab34aa9bddd538dcf73435b71cc139&mc=true&node=pt47.5.97&rgn=div5#se47.5.97_15> (accessed 2020-08-07).
- [63] 内閣府, 法務省, 経済産業省: 押印についての Q&A, 内閣府, 法務省, 経済産業省 (オンライン), 入手先 <http://www.moj.go.jp/content/001322410.pdf> (参照 2020-08-07).