基本コース - すべての大人のために

ADS-Bとは何か、どのような仕組みか

全12章。航空や無線の予備知識は必要ありません。計算例は中学・高校程度の数学で理解でき、読み飛ばしても話の筋は失われません。読了時間は約50分です。

学ぶ - https://radar.dataero.eu/ja/learning/course　2026-11-21

目次

第1章 問題: 誰にも見えない航空機で埋め尽くされた空
第2章 ADS-B以前: レーダーで航空機を探す
第3章 発想: 航空機自身に語らせる
第4章 航空機はどのように自分の位置を知るのか
第5章 メッセージの構造
第6章 - 物理 波: 目に見えない光としての電波
第7章 - 物理 到達距離: 地球の丸みと信号の減衰
第8章 - 物理 アンテナ: 27センチメートルの波をとらえる
第9章 受信とデコード
第10章 1台の受信機から大陸の地図へ
第11章 何に使われ、どこに弱点があるのか
第12章 簡単な歴史
用語集
次へ 理論から実践へ: 受信機を作ろう

第1章

問題: 誰にも見えない航空機で埋め尽くされた空

ごく普通の平日、ヨーロッパの空域を横切るフライトは約30,000便にのぼります。巡航中の旅客機は秒速およそ250メートル、時速にして900 kmで移動しており、向かい合って飛ぶ2機は毎秒0.5キロメートルずつ近づきます。窓の外を見ているパイロットには、その様子はほとんど見えません。高度10,000メートルでは他の航空機は点にしか見えず、しかもその多くは雲に隠れています。空は、道路が描かれていない3次元の道路網であり、そこを行き交う交通は高速で、しかも目に見えないのです。

航空管制は、この交通を互いに離しておくために存在します。原則となるルールは単純です。管制空域では、航空機どうしは垂直方向に少なくとも1,000フィート(約300メートル)、あるいは決められた水平距離を空けて飛びます。水平距離はレーダーの覆域内では通常5海里(9.3 km)で、洋上ではそれよりはるかに大きくなります。このルールを適用するには、管制官はセクター内のすべての航空機の位置を、継続的かつ確実に知っている必要があります。1分前にどこにいたかではなく、いまどこにいて、どの高度で、どちらに向かっているのかです。このコース全体のテーマは、その情報をどのように得るかということです。これを表す専門用語が**監視**(サーベイランス)です。

覚えておきたい数字
時速900 kmで飛ぶ航空機は、1分間に15 km、1秒間に250 m進みます。更新が遅い監視方法や誤差の大きい監視方法では、まさに重要となるその距離について、管制官は推測に頼るしかなくなります。

第2章

ADS-B以前: レーダーで航空機を探す

最初の答えは、1930年代末に開発され第二次世界大戦中に成熟した**一次レーダー**でした。回転する大きなアンテナが、短くきわめて強力な電波のパルスを送り出します。パルスが航空機に当たると、そのごく一部が反射して戻ってきます。レーダーはパルスが出てから反射波が戻るまでの時間を測ります。電波は光の速さ、秒速300,000 kmで進むので、その時間から距離がわかります。アンテナが向いていた方向から方位がわかります。一次レーダーは見事なまでに独立しています。航空機側には何の機器も必要なく、そのため今も軍で使われています。しかし、実際の弱点もあります。遠くの航空機からの反射波はきわめて弱いため、送信機は巨大でなければなりません。反射波は、その航空機が誰なのか、どの高度にいるのかについて何も教えてくれません。そしてアンテナが1回転するのに数秒かかるため、各航空機が見えるのは4〜12秒に1回だけで、その間に航空機は最大3 km移動します。

2つ目の答えである**二次監視レーダー**(SSR)は、航空機を参加者に変えました。地上局が1030 MHzで質問、すなわち*質問信号*(インテロゲーション)を送信します。機上の小さな無線機である**トランスポンダー**がその質問を受け取り、自らの強い信号で1090 MHzにより応答します。応答は反射ではなく送信されたものなので、レーダーの反射波より何百万倍も強く、またコンピューターが生成するので情報を載せることができます。最も古い形式(Mode A)では、応答には管制官が割り当てた4桁の識別コードが含まれ、Mode Cではさらに航空機の高度も含まれます。1980年代には**Mode S**("S"は選択式を意味するselectiveの頭文字)が登場しました。Mode Sでは、すべてのトランスポンダーが固有の24ビットアドレスを持ち、個別に質問を受けることができ、56ビットまたは112ビットのデータメッセージで応答できます。この数字、1090 MHzと、この言葉、Mode Sを覚えておいてください。ADS-Bはこの両方の上に直接築かれています。

二次レーダーは大きな進歩でしたが、先代と共通する2つの制約が残っていました。航空機は問われたときにしか話さないため、地上には依然として範囲内に質問を送る局が必要で、海洋、砂漠、山脈では使えません。また、応答がどの方向から来たかを知るために地上局には依然として回転するアンテナが必要で、各航空機は1回転に1回しか見えません。管制官の画面には、なめらかに動く航空機ではなく、数秒ごとに跳ぶ点が表示されたままです。これを改善するには、根本的に異なるものが必要でした。問われなくても航空機が自分の位置を報告し、地上は何も測定しなくてよい方法です。

第3章

発想: 航空機自身に語らせる

1990年代までに、別のアプローチを可能にする2つの技術が成熟していました。衛星航法により、適切な装備を持つすべての航空機が自分の位置を正確に知ることができるようになりました。その精度は、地上からレーダーで測れるどんな精度よりもはるかに優れています。そしてMode Sトランスポンダーは、すでに1090 MHzでデータメッセージを送れる無線機を提供していました。この2つを組み合わせれば、論理は抗いがたいものになります。航空機がどこにいるかを地上が苦労して測るのではなく、すでに知っている航空機に、定期的に、すべての相手へ、ただそれを伝えさせればよいのです。それがADS-Bであり、その名前を構成する4つの単語はそれを正確に表しています。

それは**自動**(Automatic)です。送信のきっかけとなるものは何もありません。トランスポンダーは自分のスケジュールで、約1秒に2回送信します。範囲内に地上局があるかどうかにも、パイロットが何か操作するかどうかにも関係ありません。実際、飛行中のパイロットがこれを止めるには、トランスポンダーの電源を切るしかありませんが、それは禁止されています。それは**従属**(Dependent)です。メッセージのすべ

ての項目は航空機自身の機器から来ており、位置は衛星受信機から、高度は気圧高度計から得られます。地上は何も測定せず、伝えられたことを信頼します。それは**監視**(Surveillance)です。その目的は、航空管制や近くの航空機に対して、その航空機がどこにいるかを知らせることです。航空機自身が自分の位置を知る航法とも、パイロットと話す通信とも区別されます。そしてそれは**放送**(Broadcast)です。メッセージには宛先も、受信確認も、暗号化もなく、範囲内で受信機を持つ人なら誰でも、管制センターであれ、他の旅客機であれ、学校であれ、まったく同じものを聞き取ります。

「従属」は、技術者を不安にさせる言葉であり、説明する価値が最も大きい言葉でもあります。レーダーは独立した測定を行います。航空機の計器が間違っていても、レーダーには関係ありません。ADS-Bは航空機自身の航法システムの誤差をすべて引き継ぎ、そのシステムがだまされたり故障したりすれば、発信される位置は同じ確信をもって間違ったものになります。だからこそ、すべてのADS-Bメッセージには位置と並んで、航空機が自分の位置をどの程度信頼しているかを示す情報(第5章で扱う完全性と精度のカテゴリー)が含まれており、だからこそレーダーは停止されていないのです。

「放送」は、このコースを可能にしている言葉です。メッセージは暗号化されずに全員に向けて送られるため、航空管制だけでなく、1090 MHzに合わせたあらゆる受信機で聞き取ることができます。学校の屋上に設置するかもしれない受信機も例外ではありません。同じ性質が、第11章で取り上げるこのシステムの主な限界の源にもなっています。誰でも読めるメッセージは、誰でも偽造できるメッセージでもあるのです。

第4章

航空機はどのように自分の位置を知るのか

ADS-Bのすべては航空機が自分の位置を知っていることに基づいているので、この章では衛星航法を扱います。総称は**GNSS**(Global Navigation Satellite System、全球測位衛星システム)です。最もよく知られているのはアメリカのGPSで、ヨーロッパのGalileo、ロシアのGLONASS、中国のBeiDouも同じ原理で動いています。それぞれのシステムは、航空機よりはるか上空、高度約20,000 kmを周回する24〜30機ほどの衛星群からなり、各衛星は数十億分の1秒の精度を持つ原子時計を搭載しています。各衛星は、要するに「こちらは衛星N番、私の位置はこれこれで、この信号を送った時刻はちょうどTです」と告げる電波を絶えず送信しています。

航空機の受信機がその信号を受け取るのは少し後になります。電波が伝わるには時間がかかるからです。秒速300,000 kmでは、衛星からの20,000 kmを進むのに約1000分の67秒かかります。受信機は、メッセージに記された時刻と到着した時刻を比べます。その差に光の速さを掛けたものが、その衛星までの距離です。1つの距離は、受信機をその衛星を中心とする球面上のどこかに位置づけます。2つの球面は円で交わり、3つの球面は2点で交わります。そのうち1点は通常ありえない場所(地中深くや宇宙のはるか彼方)なので捨てられます。つまり、受信機が完璧な時計を持っていれば、衛星は3機で足りることになります。

しかし、受信機は完璧な時計を持っていません。原子時計は数万ユーロもし、とても収まりません。受信機にあるのは安価な水晶時計で、その誤差は必要な時刻精度をはるかに上回ることがあります。ここからがうまくできているところです。受信機は自分の時計の誤差を、3つの位置座標に加えた4つ目の未知数として扱い、4機目の衛星の信号を聞きます。方程式が4つ、未知数が4つ。受信機は自分の位置を求め、その副産物として、自分の時計を数十ナノ秒以内に補正します。これが、衛星受信機には少なくとも4機の衛星が見えている必要がある理由であり、すべてのGNSS受信機がついでながら建物の中で最も正確な時計の1つでもある理由です。

桁の大きさにこだわってみる価値があります。衛星航法が実は時刻を計る作業であり、幾何学はおまけにすぎない理由がそこからわかるからです。光は1ナノ秒で30センチメートル、1マイクロ秒で300メートル進みます。ですから100万分の1秒の時刻誤差は300メートルの位置誤差になり、現代の受信機の数メートルという精度は、約10ナノ秒の水準の時刻精度に相当します。具体例で考えましょう。衛星が信号に12:00:00.000 000 000という時刻を記し、航空機の受信機がそれを12:00:00.070 000 000に受け取ったとします。伝搬時間は0.070 sなので、距離は0.070 x 300,000 km/s = 21,000 kmです。もし受信機自身の時計がわずか1マイクロ秒進んでいたら、計算結果は21,000.3 km、つまり300メートル遠すぎることになり、同じ誤差は他のすべての衛星までの距離にも入り込んでしまいます。この共通の誤差こそ、4機目の衛星があぶり出して取り除くものです。

高度は1つではなく2つ

衛星から得られるのは、地球の数学的な表面からの高さ、つまり*幾何*高度です。ところが、航空機が航空交通のために発信する高度はそれではありません。それは**気圧高度**で、胴体にある静圧孔(スタティックポート)と呼ばれる小さな穴で測った機外の気圧から求められます。気圧は高さとともに決まった形で下がり(地上付近ではおよそ8メートルごとに1 hPa、高くなるにつれてゆるやかに)、世界中のすべての高度計は、海面で1013.25 hPaを基準とする同じ標準大気を使って気圧を高さに換算しています。気圧が普段と大きく違う日には、すべての航空機の気圧高度が同じだけずれますが、それこそが要点なのです。間隔設定で重要なのは海面からの真の高さではなく、どちらも「フライトレベル350」を示す2機が、「フライトレベル340」を示す1機から本当に300メートル離れていることです。ADS-Bは位置メッセージで気圧高度を25フィート(7.6 m)刻みで発信し、それとは別に衛星による高さとの差も発信するので、受信機は両方を求めることができます。

第5章

メッセージの構造

世界中の旅客機が使うADS-Bメッセージは、**拡張スキッタ**(extended squitter)と呼ばれるMode Sの送信です。「スキッタ」は、応答としてではなく自発的に送られる送信を指す古いレーダー用語で、「拡張」というのは112ビットという長さが元のMode S応答の2倍だからです。技術者は「1090 MHz extended squitter」を「1090ES」と書きます。1回の送信は全体で120マイクロ秒続きます。まず8マイクロ秒の*プリアンブル*、つまり受信機がメッセージの始まりを認識し時計を同期させるための4つのパルスからなる固定パターンがあり、続いて1マイクロ秒に1ビットの割合で112のデータビットが送られます。

ビットの送り方: パルス位置変調

1マイクロ秒の各ビットの枠は、前半と後半の2つに分けられます。前半に電波のパルスがあり後半が無音なら1、無音の後にパルスなら0を意味します。したがって、データが何であっても1ビットにつき必ず1つのパルスがあり、受信機は各枠のどちらの半分が強かったかを判断するだけでよいのです。このパルス位置変調という方式は、トランスポンダーから遠くのアンテナに届くまでに信号が受ける雑音やフェージングに強く、しかも安価にデコードできます。

パルス位置変調による4ビット: 1, 0, 1, 1



各枠は1マイクロ秒。前半にパルス: 1。後半にパルス: 0。

112ビット

DF 5 ビット ダウンリンク フォーマット	CA 3 ビット 能力	ICAOアドレス 24 ビット 航空機固有の識別子	ME - ペイロード 56 ビット 先頭5ビットのタイプコードに応じて、位置、高度、速度、コールサイン、または状態	PI 24 ビット 誤り検出(CRC)

最初の5ビット、ダウンリンクフォーマットは、それがどの種類のMode Sメッセージなのかを示します。値17は「Mode SトランスポンダーからのADS-B」を意味します。24ビットの**ICAOアドレス**は航空機の恒久的な識別子で、登録時に割り当てられます。可能なアドレスは2の24乗、つまり16,777,216通りあり、国連の民間航空機関であるICAOによってブロック単位で各国に割り当てられています。たとえばベルギーの航空機は、16進数で448000から44FFFFまでのアドレスを持ちます。古いMode Aの4桁のコードとは違い、このアドレスは決して変わらず、共有されることもないので、受信機は最初のメッセージからどの航空機の声を聞いているのかを確実に知ることができます。

56ビットの**ME**フィールドが実際の内容で、その先頭5ビットである*タイプコード*が残りの意味を示します。タイプコード1〜4は、BEL1234やRYR7KLのような航空機のコールサインを、6ビットの文字8つで運びます。コード9〜18は気圧高度つきの空中位置を、20〜22は同じものを衛星高度つきで運びます。コード19は速度を運びます。東西方向と南北方向の成分に分解した対地速度、昇降率、そして気圧高度と衛星高度の差です。コード28、29、31は状態を運びます。緊急コード、選択高度、そして発信された位置をどの程度信頼できるかを示す完全性と精度のカテゴリーです(たとえば「NIC」が8なら、真の位置が報告された位置から185 m以内にあることを高い確率で保証します)。

最後の24ビットは**巡回冗長検査**(CRC)で、それより前の88ビットから決まった多項式による割り算で計算される数値です。受信機はデコードしたビットに対して同じ計算を繰り返し、結果が一致しなければ、途中で少なくとも1ビットが壊れたと判断してメッセージを捨てます。1マイクロ秒のパルスは雑音や他の航空機からの重なったメッセージによって簡単に失われるので、この検査こそが、壊れた位置を管制官の画面に出さないための仕組みです。受信機が記録する実際のメッセージは、次のようになります。

> `8D` **`4840D6`** `202CC371C32CE0` `576098`
>
> 8D: ダウンリンクフォーマット17、能力5。4840D6: ICAOアドレス、オランダの航空機。20...: タイプコード4、識別メッセージで、デコードするとコールサインKLM1023になる。576098: 誤り検出。

地球を34ビットに収める

位置メッセージには、緯度に17ビット、経度に17ビットしかありません。これでは地球1周を131,072段階に分けることになり、赤道上では1段階が約300 mになります。とても十分とはいえません。ADS-Bはこれを**コンパクト位置報告**(CPR)で解決します。地球はゾーンに分割され、17ビットはゾーン内の非常に精密な位置(約5 mまで)を示しますが、どのゾーンかは示しません。航空機は、わずかに異なる2つのゾーン格子、「偶数」と「奇数」のメッセージを交互に送り、両方を1つずつ受け取った受信機は、ゾーンを一意に割り出すことができます。いったん割り出せば、その後は1つのメッセージだけで航空機を追跡できます。0.5秒の間に別のゾーンへ跳ぶことはまずありえないからです。ビットを1つも増やさずに有効な精度を倍にする、巧みな工夫です。

送信の頻度

飛行中のトランスポンダーは、位置メッセージを1秒に2回、速度メッセージを1秒に2回、コールサインを5秒ごとに送り、さらに状態メッセージをより長い間隔で送ります。全体で1秒あたり4〜5回の拡張スキッタになります。1回は120マイクロ秒なので、トランスポンダーが実際にADS-Bを送信している時間は全体の1000分の1をはるかに下回ります。残りの時間は、1030 MHzのレーダーの質問信号や他の航空機の衝突回避のための問い合わせを聞き、それに応答しています。

第6章 - 物理

波: 目に見えない光としての電波

メッセージは**電波**として航空機を離れます。このコースで最も役に立つ考え方は、電波と光線が同じものだということです。どちらも電磁波です。電場と磁場がともに振動するパターンが、光の速さcで空間を進んでいきます。cは秒速299,792,458メートル、ほぼ秒速300,000 kmです。電波を、緑色の光や病院のX線や台所の電子レンジのマイクロ波と区別するのは、場がどれだけ速く振動するか、つまり**周波数**fだけです。周波数はヘルツ(1秒あたりの振動数)で表します。

波は決まった速さで進むので、周波数が決まれば、ある山から次の山までの距離、つまり**波長**lambdaが決まります。1秒間に波はcメートル進み、f回振動するので、1回の振動はc / fメートルを占めます。

$$c = f \times \lambda$$

ADS-Bの場合: lambda = 300 000 000 / 1 090 000 000 = 0.275 m。航空機とあなたのアンテナの間の波は、山と山の間隔が27.5 cmで、学校で使う定規とほぼ同じ長さです。

波	周波数	波長	備考
FMラジオ放送	100 MHz	3 m	車のアンテナはこの何分の1かの長さ
ADS-B / Mode S	1,090 MHz	27.5 cm	レーダーに対するトランスポンダーの応答にも使用
携帯電話(4Gの周波数帯)	1,800 MHz	17 cm	スペクトル上の近い隣人
Wi-Fi、電子レンジ	2,450 MHz	12 cm	周波数は同じでも電力はまったく違う
目に見える緑色の光	560,000,000 MHz	0.000 54 mm	周波数は50万倍高い

この後のすべてにかかわる2つの結論があります。第一に、電波は光なので、何かに曲げられたりさえぎられたりしない限りまっすぐ進み、地球を通り抜けることはありません。これがシステムの到達距離を決めます。それが第7章のテーマです。第二に、波長が27.5 cmなので、電波と最も強く相互作用する金属

の構造物、つまりアンテナは、その程度の大きさになります。それが第8章のテーマです。

電波が音ではない理由

子どもだけでなく大人にも最もよく見られる混同は、電波と音の混同です。おそらく「ラジオ」が音を出す箱だからでしょう。両者はまったく関係のない現象です。音は空気中の圧力の波で、分子が隣の分子を押していく連鎖です。伝わるには物質が必要で、秒速340 mで進み、真空を越えることはできません。電波には何も必要ありません。衛星と航空機の間の真空を越え、音より100万倍近く速く進みます。航空機のエンジン音とADS-Bのメッセージは同じ瞬間に航空機を離れますが、20 km離れた受信機にメッセージは67マイクロ秒で届き、音はまる1分後に届きます。

なぜ1090 MHzなのか

この周波数は受け継がれたものです。1950年代の国際協定で960〜1215 MHzの帯域が航空無線航行用に確保され、1090 MHzが二次レーダーのトランスポンダーの応答周波数になりました。ADS-Bが設計されたとき、新しい無線機を取り付けるよりも、すべての旅客機にすでに搭載されているトランスポンダーを再利用するほうがはるかに安上がりでした。こうしてADS-Bは、Mode Sトランスポンダーが1090 MHzで話すことの1つになったのです。アメリカでは、高度約5,500 m以下を飛ぶ小型機は、代わりに978 MHzのUATという別のシステムを使うことがあり、そのため現地の受信機は両方を聞いていることがよくあります。

第7章 - 物理

到達距離: 地球の丸みと信号の減衰

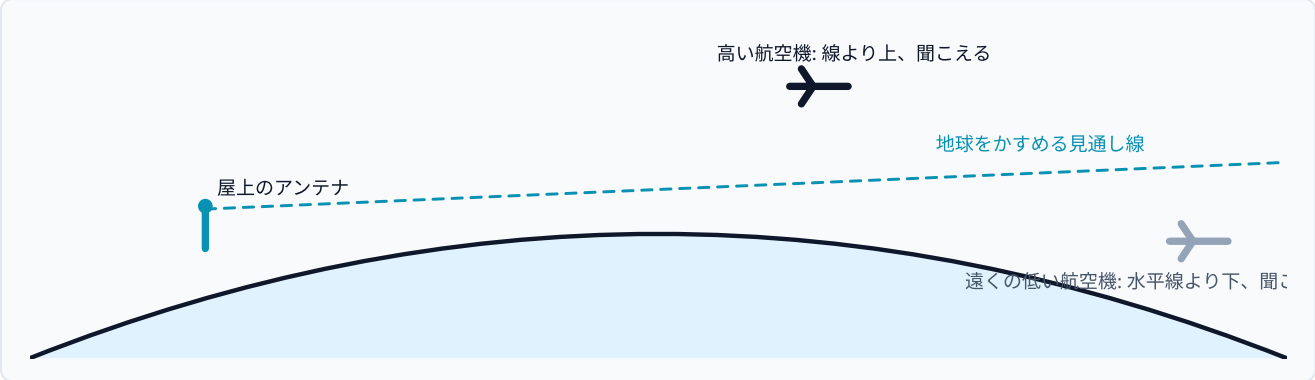
トランスポンダーはピーク電力数百ワットで送信します。そのような信号はどれくらい遠くまで聞こえるのでしょうか。それを制限するものは2つあり、性質がまったく異なるので、分けて考えることが大切です。はっきりした境界を決める幾何と、ゆるやかな境界を決める電力です。

電波水平線

1090 MHzでは、電波は光のようにふるまいます。まっすぐ進み、地球に沿って曲がることはありません。したがって、地上のアンテナが航空機の電波を聞けるのは、両者を結ぶ直線が地面を通らない間だけです。地表にいる観測者にとって、水平線とはその直線がちょうど地球をかすめる地点です。航空機が高いほど、そのかすめる地点は遠くなり、アンテナが高ければさらに遠くなります。球への接線の幾何から、簡単な結果が得られます。水平線までの距離(km)は、高さ(m)の平方根のおよそ3.57倍です。大気が電波をわずかに下向きに曲げるため水平線は約15パーセント延び、技術者は代わりに4.12を使います。

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h aircraft) + sqrt(h antenna) )   heights in metres
```

高度11,000 mの航空機、高さ20 mの屋上のアンテナ: 4.12 x (104.9 + 4.5) = 451 km。高度1,000 mの航空機、同じ屋上: 4.12 x (31.6 + 4.5) = 149 km。15 km離れた地上の航空機: 間の土地が平らで障害物がない場合を除き、まったく聞こえない。



これで、受信機のカバレッジに特有の形が説明できます。高空を飛ぶ交通に対しては400 km以上の円になり、進入中の航空機に対しては数十キロメートルまで縮み、地上の航空機に対しては、すぐ隣の空港を除けばほとんどゼロになります。また、受信機の性能よりも受信機の高さのほうがはるかに重要である理由や、丘、高い建物、さらには航空機がこちらから遠ざかる方向に旋回したときのその航空機自身の翼が、信号を一瞬で断ち切ってしまう理由も説明できます。

逆二乗の法則

水平線の内側では、信号は距離とともに弱くなります。トランスポンダーのアンテナは水平方向のあらゆる向きに電波を放射するので、その電力はどんどん大きくなる球面に広がっていきます。球の面積は半径の2乗に比例して大きくなるので、一定の大きさのアンテナが受け取る電力は距離の2乗に比例して小さくなります。2倍離れれば4分の1、10倍離れれば100分の1です。技術者はこれをデシベルで表した*伝搬損失*として表現します。1090 MHzで400 kmの場合は約145 dBとなり、受信電力が送信電力の約10の14.5乗分の1になることを意味します。250ワットのパルスは、およそ1ミリワットの100億分の1として届きます。優れた受信機ならそれをぎりぎり検出できます。幾何による水平線と電力による限界がたまたま数百キロメートルで一致するのはそのためで、システムはそのように設計されているのです。

この2つの限界は、理解しておく価値のある形で相互に作用します。水平線の内側では、近くの航空機からの強い信号も遠くの航空機からの弱い信号も、どちらも完全にデコードできます。第5章のパルス位置方式が問うのは、各ビットの枠のどちらの半分が強かったかだけで、どれだけ強かったかではないからです。航空機が遠ざかるにつれて信号が徐々に使えなくなっていくのではありません。水平線の近くのどこかで、幾何が信号を断ち切るか、受信機内の雑音がついに信号をかき消すまではデコード可能なままで、そこで航跡が途切れるのです。カバレッジマップの縁がくっきりしているのも、受信機が聞き取る最も遠い航空機がほとんど常に最も高い航空機であるのもそのためです。

第8章 - 物理

アンテナ: 27センチメートルの波をとらえる

アンテナとは、通り過ぎる電磁波がその中の電子をそろって動かし、受信機が増幅できるごく小さな交流電流を生み出すように形作られた導体です。送信機では逆のことが起こります。航空機のアンテナに流れる交流電流が波を送り出すのです。このやりとりの効率は、波長に対する導体の大きさで決まります。まっすぐな導線は、長さが半波長のとき最も強く反応します。つまり*共振*します。そのとき導線を行ったり来たりする電流が波の振動にぴったり合うのです。ちょうど子どものブランコを、その固有のリズムで押すようなものです。1090 MHzの場合、半波長は13.75 cmです。

最も一般的な実用形は**1/4波長モノポール**です。長さが4分の1波長、つまり6.9 cmの垂直な棒が、導電性の面である*グランドプレーン*の上に立っています。グランドプレーンは鏡の役割を果たすので、棒とその鏡像が合わさって半波長アンテナのようにふるまいます。航空機のADS-Bアンテナが胴体の上にある高さ数センチメートルのずんぐりしたブレードであるのはこのためで、この場合は胴体がグランドプレーンになっています。愛好家のアンテナがブリキのふたの上に立てた短い導線であるのも同じ理由です。長さの合わない導線でも動作はしますが、性能はずっと劣ります。「金属の耳」は同調しているのです。

さらに3つのアンテナの性質が物理から導かれ、それぞれに目に見える結果があります。1つ目は**偏波**です。電磁波の電場は、進行方向に直角な決まった方向に振動し、アンテナは電場のうち自分の長さの方向の成分にしか反応しません。航空機のアンテナは垂直に取り付けられているので、ADS-Bの波は垂直偏波で届き、受信アンテナも垂直でなければなりません。横に寝かせるとほとんど何も聞こえません。上下に振ったロープの波が、横向きのすき間で止められてしまうのと同じです。2つ目は**放射パターン**です。垂直アンテナは水平線の方向に最も感度が高く、自分の軸の方向にはまったく感度がありません。そのため3次元での感度は、アンテナが穴を貫いたドーナツの形になります。だから受信機は300 km先の航空機を難なく聞き取る一方で、真上を通過する航空機を数秒間見失うことがよくあります。どのライブマップでも注目してみる価値があります。共振する素子をいくつか縦に積み重ねるとドーナツが平たくつぶれ、真上の感度を犠牲にして、遠くの航空機がいる水平線の方向に感度が集中します。これがアンテナの**利得**(ゲイン)の意味で、それは常に感度の再配分であって、感度を新たに生み出すものでは決してありません。

3つ目は、アンテナと受信機の間にあるものに関することです。アンテナは1090 MHzだけでなく周辺のあらゆる信号を拾います。その中には数百メガヘルツ離れた携帯電話の、はるかに強い送信も含まれます。そのため、航空用の帯域だけを通すフィルターを最初に置きます。次に信号はケーブルを通って進む必要がありますが、1090 MHzでは同軸ケーブルは10メートルごとに信号のおよそ半分を失います。対策は、受信機側ではなく、ケーブルの手前のアンテナ側に低雑音増幅器を置き、信号が道のりを耐え抜けるだけの強さを持たせることです。受信機側で増幅すると、残った信号と一緒にケーブルの雑音まで増幅してしまうからです。これらは細かな点ですが、学校の屋上の受信機が水平線の航空機まで聞き取れるか、近くの航空機しか聞き取れないかを決めるのは、まさにこうした細かな点なのです。

第9章

受信とデコード

アンテナから地図上の点までには、5つの段階の連鎖があります。アンテナが、通り過ぎる波を数マイクロボルトの交流電流に変えます。フィルターと低雑音増幅器が1090 MHzの帯域を残して他のすべてを取り除き、信号を1000倍に強めます。ソフトウェア無線がその周波数に同調し、信号を1秒間に200万回サンプリングして数値の流れに変えます。デコーダーがその流れの中からプリアンブルのパターンを探し、112ビットを読み取り、パリティを検査してフィールドをデコードします。そしてトラッカーが各航空機からのメッセージを、位置、航跡、ラベルからなる1つの継続的に更新される記録にまとめます。

注目すべきは3つ目の段階です。2010年ごろまでは、1090 MHzのデコードには数千ユーロもする専用のハードウェアが必要でした。その後、愛好家たちが、20ユーロのUSBテレビチューナーに、任意の周波数に同調させて生の信号をコンピューターに渡せるチップが入っていることを発見しました。この**ソフトウェア無線**(SDR)は、無線の問題をプログラミングの問題に変えます。ノートパソコンやRaspberry Piが信号の強さを表す毎秒200万個の数値の流れを受け取り、無料のソフトウェアがプリアンブルのパターン

を探し、1マイクロ秒の各枠のどちらの半分が強いかを測り、112ビットを組み立て、CRCを計算し、フィールドを表示します。中学校・高校向けキットの受信機製作プロジェクトはまさにこの連鎖であり、学校なら100ユーロ未満で作ることができます。

トラッカーの段階で、メッセージの流れは知識に変わります。思い出してください。1つの位置メッセージだけでは、偶数と奇数のメッセージが組になるまではあいまいです。速度は位置とは別に届き、コールサインもまた別に届きます。トラッカーはそれらをICAOアドレスによってつなぎ合わせ、誤り検出に失敗したものを捨て、各航空機の最後に知られた状態を保持します。1分間メッセージが届かなければ、多くの場合その航空機が水平線の下に入ったためで、航跡は期限切れになります。

第10章

1台の受信機から大陸の地図へ

1台の受信機が聞き取るのは、直径数百キロメートルの円形の空です。ヨーロッパの地図には何百台もの受信機が必要で、役に立つのは都市にあるものではなく、散らばって設置されたものです。海岸に、谷に、島に、他の受信機の円が届かないあらゆる場所にです。各受信機は、デコードしたメッセージにそれぞれ到着時刻を記して、インターネット経由で中央のサービスに送ります。そのサービスは*集約*を行います。高空の航空機からの同じメッセージは、通常10〜20台の受信機から同時に届くので、重複を見分けて統合しなければなりません。また検査も行います。同じ航空機について、近くのどの受信機の見え方とも食い違う位置は、おそらくデコードの誤りか故障したトランスポンダーによるもので、フラグを付けられるか破棄されます。

マルチラテレーション: 位置を伝えない航空機を見つける

すべての航空機が位置を発信しているわけではありません。古いトランスポンダーは識別と高度でレーダーに応答しますが、衛星からの入力を持っていません。意図的に何も送らない航空機もあります。それでもその1090 MHzの送信は地上に届いており、ネットワークは衛星航法を裏返すことでそれらの位置を突き止めることができます。時計が精密に同期した4台の受信機が、同じ送信が届いた瞬間をそれぞれ記録すれば、その瞬間の差から距離の差がわかります。受信機Aに受信機Bより1マイクロ秒早く届いたメッセージは、BよりAに300 m近い地点から送られたものです。その性質を持つすべての点は、AとBの間にある双曲面という曲面の上にあります。4台の受信機から得られる3つのそのような曲面は、航空機の位置で交わります。これが**マルチラテレーション**(MLAT)で、何百キロメートルも離れた受信機どうしで約10分の1マイクロ秒、つまり30 mの時刻精度が必要になります。受信機はその時刻を、航空機が使うのと同じ衛星から得ています。

同じ発想を2度
衛星航法: 1台の受信機と、位置がわかっている4つの送信機から、受信機の位置を求める。マルチラテレーション: 1つの送信機と、位置がわかっている4台の受信機から、送信機の位置を求める。どちらの場合も実際に測っているのは時間であり、1マイクロ秒は300メートルです。

第11章

何に使われ、どこに弱点があるのか

最初の利用者は航空管制です。ヨーロッパ全域で、管制官はいま、1秒に2回の更新と衛星並みの精度を持つADS-Bを、レーダーやマルチラテレーションと組み合わせた統合画像を見ています。北大西洋、北極圏、サハラ砂漠、そしてほとんどの海洋など、レーダーが届かなかった場所では、低軌道の通信衛星に搭

載された受信機がADS-Bメッセージを受け取っています。これにより、大西洋を横断する航空機の間隔を以前よりはるかに詰めることができるようになりました。2番目の利用者は航空機です。「ADS-B In」を備えた旅客機は、近くの交通を乗員に表示し、衝突防止装置に取り込みます。空港は霧の中で地上の航空機や車両を追跡するのに使います。研究者はオープンデータを使って、騒音、燃料消費、飛行機雲、遅延を研究しています。そして学校の屋上の受信機も、ささやかながら、このすべてに参加しているのです。

このシステムの弱点はその設計から直接生じており、どれも単に並べるのではなく理解しておく価値があります。メッセージは暗号化も署名もされずに放送されるため、メッセージそのものには、それが航空機から来たことを証明するものが何もありません。地上の送信機が、違法ではあっても、存在しない航空機を表す完璧な形式のメッセージを発信することは可能で、受信機は何の疑いもなくそれをデコードしてしまいます。システムを守っているのはメッセージではなく、それを取り巻く文脈です。幻の航空機はレーダーに映らず、マルチラテレーションでも見つからず、実際の交通のようにはふるまいません。そして管制センターは絶えず照合を行っています。暗号署名を備えたプロトコルの改訂版は長年議論されてきましたが、障害は技術的というより実務的なものです。世界中のすべてのトランスポンダーを交換しなければならないからです。

位置は航空機の衛星受信機に依存しているため、衛星航法を乱すものは何であれADS-Bを乱します。紛争地域の近くでは衛星信号の妨害(ジャミング)やなりすまし(スプーフィング)が日常的になっており、そうした地域を飛ぶ航空機は位置を計算できなくなったり、間違った位置を計算したりすることがあります。そのとき航空機のメッセージには低下した完全性カテゴリーが含まれ、管制官のシステムはそれにフラグを付け、ADS-Bが完全に置き換えることを意図されていなかった独立した測定であるレーダーが引き継ぎます。したがって両者の関係は、後継と先代ではなく、弱点を補い合うパートナーの関係なのです。

義務化の対象は旅客機とほとんどの大型機であって、空を飛ぶすべてのものではないため、地図はそもそも不完全です。管制空域外の軽飛行機、グライダー、気球、多くの軍用機はADS-Bをまったく搭載していないことがあり、一部の軽飛行機は1090 MHzの受信機では聞き取れない別のシステムを使っています。また、発信は航空機を識別するので、その所有者を特定することもできます。特定のプライベートジェットを追うことは、事実上、特定の人物を追うことになります。そのため、所有者が求める航空機の登録記号を隠す制度が生まれ、航空機が世界に向けて発信する情報がプライベートなものでもありうるのかについて、議論が続いています。この議論は年長の生徒に投げかけるのに適したテーマです。物理はそれに答えを与えないからです。

第12章

簡単な歴史

> **1935〜1945年**
> イギリス、ドイツ、アメリカで一次レーダーが開発される。終戦までに、「敵味方識別」(IFF)のトランスポンダーがレーダーのパルスに符号化された応答を返すようになり、これが二次レーダーの祖先となる。
>
> **1950年代〜1960年代**
> 民間の二次レーダーが標準化される: 1030 MHzの質問信号、1090 MHzの応答、Mode Aの識別コードとMode Cの高度。
>
> **1980年代**
> 固有の24ビットアドレスとデータメッセージを持つMode Sが、MITリンカーン研究所で開発されICAOに採用される。GPSが民間利用者向けに運用を開始する。

1990年代〜2000年代

ADS-Bが定義され試験される。特にアラスカでは、レーダーによるカバーが不可能で事故が多発していた。1090 MHz拡張スキッタが国際的に標準化される。

2010年代

安価なソフトウェア無線により受信が趣味になり、数千台の受信機からなるボランティアのネットワークが登場する。洋上をカバーするため受信機が衛星に搭載されて打ち上げられる。

2020年

アメリカ(1月)と欧州連合(6月、年末までの移行期間つき)で、管制空域を飛ぶほとんどの航空機にADS-Bが義務化される。空はあらゆる場所で、いつでも語り始める。

用語集

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast(放送型自動従属監視)。航空機が自分の位置を発信すること。

気圧高度
標準大気を用いて気圧から求めた高さ。航空機が報告する高度。

CPR
コンパクト位置報告。精密な位置を34ビットに収める偶数・奇数方式。

CRC
巡回冗長検査。すべてのメッセージの末尾にある24ビットの誤り検出。

拡張スキッタ
ADS-Bを運ぶ、112ビットの自発的なMode S送信。

GNSS
全球測位衛星システム: GPS、Galileo、GLONASS、BeiDou。

ICAOアドレス
航空機のトランスポンダーが持つ恒久的な24ビットの識別子。

Mode S
ADS-Bの基盤となっている選択式二次レーダーの規格。

マルチラテレーション
複数の受信機での信号到着時刻の差から送信機の位置を求めること。

伝搬損失
逆二乗の法則に従い、距離とともに信号が弱くなること。

電波水平線
アンテナと航空機を結ぶ直線が地球にさえぎられない最大の距離。

SDR
ソフトウェア無線: 生の信号サンプルをデコードのためにコンピューターに渡すチューナー。

SSR
二次監視レーダー: 地上が質問し、トランスポンダーが応答する。

トランスポンダー
レーダーに応答し、1090 MHzでADS-Bを送信する航空機の無線機。

波長
波の隣り合う山と山の間の距離: c / f。1090 MHzでは27.5 cm。

次へ

理論から実践へ: 受信機を作ろう

12の章で説明してきたシステムを、いまや手に取ることができます。実践ワークショップでは、それを午後のひとときの作業に変えます。100〜150ユーロで何を買えばよいか、アンテナの作り方と設置の仕方、Raspberry Piの準備とDataeroフィーダーのインストール方法、そして聞き取った航空機があなたの

受信局の名前とともにライブマップに現れるのを見る方法です。上のすべての章に、そこで行う測定が用意されています。実際の航空機を使った電波水平線の確認、信号強度の列に現れる逆二乗の法則、そして空の1日のリズムです。

実践ワークショップを開く https://radar.dataero.eu/ja/learning/workshop