

2024（令和6）年度 修士学位論文

オンボード航空機監視システム構築に向けた
放送型自動従属監視信号の活用

Utilization of Automatic Dependent Surveillance Broadcast
signals for on-board aircraft surveillance systems

2025 年 3 月 3 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1275031 松倉 大輔
指導教員 原田 明德
岡 宏一

目次

第 1 章	序論.....	3
1.1	研究背景.....	3
1.2	研究目的.....	3
第 2 章	航空システム.....	4
2.1	空中衝突防止装置（TCAS: Traffic Alert Collision Avoidance System）.....	4
2.2	放送型自動従属監視信号（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）..	5
第 3 章	ADS-B のメッセージの変換.....	6
3.1	ADS-B メッセージタイプ.....	7
3.1.1	コールサインの変換例.....	7
3.2	飛行中における機体の位置情報.....	8
3.2.1	奇数/偶数メッセージの識別.....	8
3.2.2	CPR パラメータと機能.....	9
3.2.3	バイナリ文字列を 10 進数値に変換.....	9
3.2.4	緯度指数 j	10
3.2.5	緯度の導出.....	10
3.2.6	緯度の導出結果の確認.....	11
3.2.7	経度.....	11
3.3	速度メッセージ.....	13
3.3.1	メッセージ Subtype1 または Subtype2 の場合.....	13
3.3.2	水平速度の変換.....	14
3.3.3	垂直速度(Vertical Rate).....	15
3.3.4	メッセージ Subtype3 または Subtype4 の場合.....	15
3.3.5	機首方位.....	16
3.3.6	対気速度の種類.....	16
第 4 章	ADS-B 信号の取得方法.....	18
4.1	Radarcape を用いた ADS-B 信号の取得.....	18
4.2	機上で取得した ADS-B 信号.....	20
第 5 章	生データの高度履歴.....	24
第 6 章	機体間距離.....	27
6.1	保護領域 ⁽¹²⁾	27
6.2	間隔指標 ⁽¹²⁾	28
6.3	二点間距離の計算方法.....	29

第 7 章	解析結果.....	32
7.1	2022 年 11 月 16 日の便の解析データ	32
7.2	2024 年 11 月 20 日に取得した ADS-B データの解析	35
7.3	自機と他機の水平距離が 0 になるまでの予想時間	39
7.3.1	解析手順.....	39
7.4	水平距離と機首方位の関係.....	41
第 8 章	結論.....	42
8.1	まとめ.....	42
8.2	今後の課題.....	43

第1章 序論

1.1 研究背景

現在の航空業界では、コロナ禍の収束により航空交通量が増加することが見込まれる。これに伴い、飛行中の機体同士の接近や到着の遅延が起こる可能性が見込まれる。また、到着便の着陸指示やフライトプランは航空管制と操縦士のやり取りに一任されているのが現状で、主要空港での着陸順序を指示する際において上空で、無駄な飛行経路が遅延時間を生み出している。さらにもう一つの問題として、交通需要が高くなっていく上で、上空での機体同士の渋滞に対しては、機体同士の接近の可能性が必然的に高まる。この対策として空中衝突防止装置(TCAS: Traffic Alert Collision Avoidance System)⁽¹⁾と放送型従属監視信号(ADS-B: Automatic Dependent Surveillance Broadcast)⁽²⁾というシステムがある。将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(CARATS: Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)⁽³⁾でも安全性を向上させるという観点から放送型自動従属監視信号の活用が検討されている。

また、2001年1月31日に発生した日本航空機駿河湾上空ニアミス事故⁽⁴⁾は、駿河湾上空で接近した日本航空907便と日本航空958便双方に対してTCAS（空中衝突防止装置）の回避指示が作動したのにも関わらず、管制官の誤った指示により、最接近距離で高度差約40mのニアミス（異常接近）を引き起こした。こうしたヒューマンエラーの対応策としても広範囲で受信できるADS-Bが有効だと考えられる。

2024年1月2日に発生した羽田空港滑走路衝突事故⁽⁵⁾では、海上保安庁の航空機が誤って、JAL516便の着陸予定の滑走路に進入し、管制の指示通り着陸したJAL516便と衝突してしまった。これについては、なぜ誤って進入した機体に管制官が気づかなかったのか、また、双方の機体がADS-B INを搭載し、互いに認識しあうことで衝突事故を未然に防げたのではないかと考えられる。

1.2 研究目的

混雑空港での機体の離着陸は、有限である滑走路と時間の関係から即座に着陸できる機体と空港近くの上空で飛行しながら着陸時間を待機せざるを得ない機体が発生してしまう。また、管制官は、空港周辺を飛行する多くの機体の操縦士に対して着陸の指示を与えなければならず、その負担は甚大である。本研究では、放送型自動従属監視信号を使用することで、管制官の負担を軽減し、最終目的として、機上で得た生データを基に解析し、管制の指示に依存しない機体間相互通信の実現を目指す。

第2章 航空システム

2.1 空中衝突防止装置 (TCAS: Traffic Alert Collision Avoidance System)

空中衝突防止装置(TCAS: Traffic Alert Collision Avoidance System)とは、近接するほかの航空機がもつトランスポンダに質問信号を送信し、その応答信号を受信して、空中衝突の恐れのある航空機との衝突回避に必要な鉛直方向の回避指示を航空機乗組員に提示し、空中衝突を未然に防止するための機上装置⁽¹⁾である。検出範囲は 15NM (海里) となっており、周辺機を検出するためにトランスポンダからモード C もしくは S の質問パルスを送信し、1 秒に 1 回送信する。これにより、TCAS アンテナで応答パルスを受信する。また、航空機衝突防止装置(ACAS: Airborne Collision Avoidance System)⁽⁶⁾というシステムもあるが、本質的に TCAS と同じシステムを指し、ACAS は、国際民間航空機関(ICAO: International Civil Aviation Organization)⁽⁷⁾で採択され、主に欧州で使用される名称である。

TCAS のアドバイザリには、約 25[s]から 48[s]以内に衝突のおそれがある他機の情報を表示する TA(Traffic Advisory)と約 15[s]から 35[s]以内に衝突するおそれのある他機に対する回避操作を指示する RA(Resolution Advisory)の 2 種類⁽¹⁾がある。

また、TCAS は、客席数 19 または最大離陸重量が 5700kg を超えた、タービン発動機を装備した飛行機に搭載が義務付けられている。空港内の他の機体を対象に作動する誤報 (Nuisance RA) を含めると、TCAS-RA の通報件数と Nuisance RA の発生件数の割合は、以下の表 1 のようになる。

表 1 TCAS の Nuisance RA 発生割合⁽¹⁾

	2019 年度	2020 年度	2021 年度
TCAS-RA の通報件数	201	86	87
Nuisance RA の件数	96	42	49
Nuisance RA 発生率	47.8%	48.8%	56.3%

表 1 より、Nuisance RA の発生率が多いのは事実であるが、例えば、高度 30000[ft]を水平飛行中に針路前方に低高度から上昇中の航空機を認知し、そのまま飛行が続くと仮定すれば、TCAS が最接近点を予測し、RA を発する可能性がある。しかし、他機が 29000[ft]で水平飛行になれば、RA は不要となってしまう。このように TCAS が発動すれば、必ず他機と衝突するわけではなく、操縦士と管制が TCAS だけに頼ることも必ずしも良いとは言えない。

2.2 放送型自動従属監視信号（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）

放送型自動従属監視信号は、主に航空機の飛行情報が組み込まれており、SSR モード S(Secondary Surveillance Radar Mode-S)装置⁽⁸⁾を用いて送信される。この SSR モード S 装置は、地上からの質問に対応して航空機のモード S トランスポンダから応答される情報をもとに機体のモード S アドレスを得るものである。送信範囲としては 200[NM]とされており、従来のレーダーシステムよりも広範囲で受信できるうえに精度が高くなっている。情報内容としては、送信元の機体の緯度や経度などの位置情報、高度、対地速度、機首方位などその他諸々の情報があり、1090[MHz]で毎秒 2 回程度⁽⁹⁾、放送されている。

また、オンラインサービスである Flightradar24⁽¹⁰⁾は、世界中の協力者が地上で取得した ADS-B データをアップロードしたものである。過去の飛行情報を調べることやプレイバック機能を活用することで特定日時の飛行状況を可視化することができる。

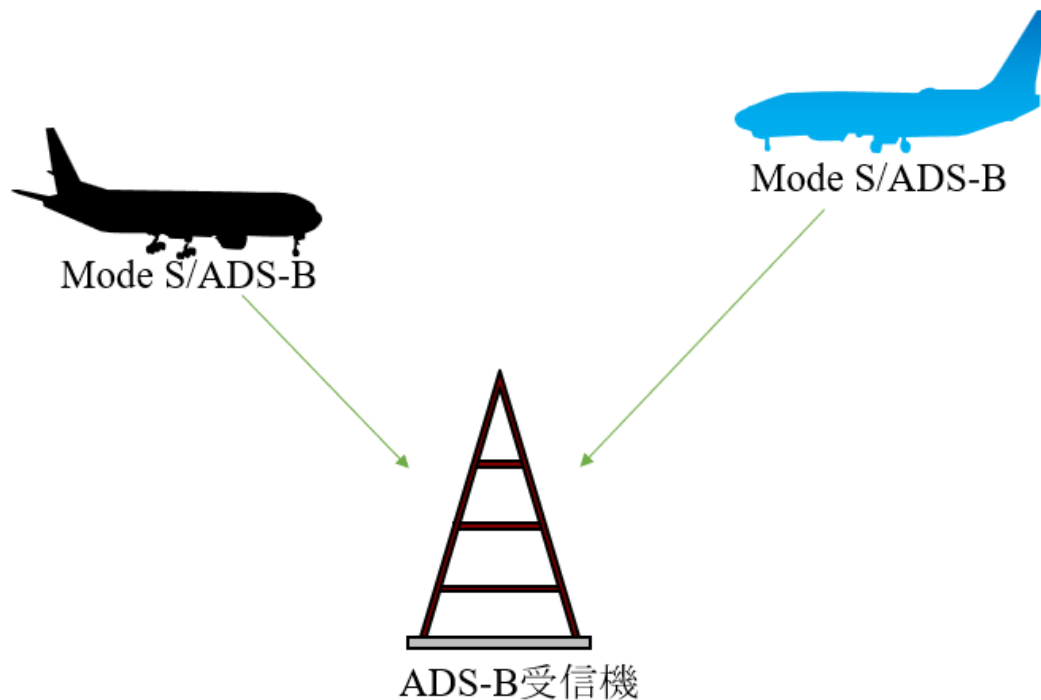


図1 ADS-B データの受信経路

第3章 ADS-B のメッセージの変換

ADS-B の情報として機体の緯度や経度、高度などの位置情報や、16 進数で表している ICAO コードがあり、この ICAO コードによって機体ごとの区別ができるようになっている。ICAO とは、国際民間航空機関で 1944 年に採択された国際民間航空条約に基づき設置された国連専門機関である。また、これらの情報は 56 ビットまたは 112 ビットの 16 進数で表されたメッセージが元になっており、ADS-B メッセージとして読み取ることができる。具体的な例で示すと 1～5 ビットはダウンリンクフォーマット、6～8 ビットは Capability(追加識別子)、9～32 ビットは ICAO 機体番号を示している。

表 2 ビットとメッセージの内容

nBits	Bits	Abbr	名称
5	1-5	DF	ダウンリンクフォーマット(17)
3	6-8	CA	機能, 追加識別子(additional identifier)
24	9-32	ICAO	ICAO 機体番号(ICAO aircraft address)
56	33-88	DATA	データ
	[33-37]	[TC]	タイプコード(Type code)
24	89-112	PI	Parity/Interrogator ID

表 3 ADS-B メッセージとビットの分割例

HEX	8D	4840D6	202CC371C32CE0	576098←
BIN	10001 101	010010000100 000011010110	[00100]0000010110011000011011 10001110000110010110011100000	010101110110 000010011000
DEC	15 5 DF CA	ICAO	[4]..... [TC]-----DATA-----	PI

3.1 ADS-B メッセージタイプ

ADS-B にはどんな情報が含まれているかを識別するにはタイプコードを確認する必要があり，ADS-B メッセージの 33 ビットから 37 ビットで示されている．各タイプコードとデータ区分に含まれる情報を表 4 に示す．

表 4 各タイプコードとデータの情報

TC	内容(Content)
1-4	航空機識別(Aircraft)
5-8	表面位置(Surface position)
9-18	飛行中の位置(Airborne position)
19	飛行速度(Airborne velocities)
20-22	飛行中の位置(Airborne position(GNSS Height))
23-31	その他の用途(Reserved for other uses)

ADS-B は巡回冗長検査を用いてメッセージの正当性を検証し，最後の 24 ビットはパリティビットで，疑似コードは CRC プロセスを示している．

3.1.1 コールサインの変換例

コールサインの変換例を以下の表に示す．

表 5 コールサインの変換例

	DF---- CA-	ICAO--	DATA-----	PI-----
HEX:	8 D	4840D6	2 0 2CC371C32CE0	576098
BIN:	10001 101	*****	00100 000 *****	*****
DEC:	17 4		4 0 TC *	

3.2 飛行中における機体の位置情報

この節では、ADS-B メッセージから得られたビットから緯度と経度を導出する方法を示す。機体の位置情報は、Downlink Format:17 および Type Code: 9~18 で変換できる。メッセージは以下の表 6 のように構成されている。

表 6 ビット数と対応する内容

MSG bits	# bits	Abbr	内容
1-5	5	DF	ダウンリンクフォーマット
33-37	5	TC	タイプコード
38-39	2	SS	監視状況
40	1	NICsb	NIC サプリメント B
41-52	12	ALT	高度
53	1	T	時間
54	1	F	CPR 奇数/偶数フレームフラグ
55-71	17	LAT-CPR	CPR 形式の緯度
72-88	17	LON-CPR	CPR 形式の経度

3.2.1 奇数/偶数メッセージの識別

緯度、経度の位置情報の変換前に、上表 6 の 54 ビット目のフレームフラグから奇数メッセージであるか、偶数メッセージであるかを判別する必要がある。

- ・ 0 であれば、偶数フレーム。
- ・ 1 であれば、奇数フレーム。

3.2.2 CPR パラメータと機能

デコード処理で使用するいくつかのパラメータと共通関数を表 7 に示す。

表 7 パラメータと共通関数の概要

パラメータ又は共通関数	概要
NZ	赤道と極の間の地理的緯度ゾーンの数
floor(x)	$k \leq x$ となる最大整数値 k を定義
mod(x,y)	$x - y \cdot \text{floor}\left(\frac{x}{y}\right)$
NL(lat)	緯度 lat が与えられた時の経度ゾーンの数 返される整数値は[1,59]の範囲内 $NL(lat) = \text{floor}\left(\frac{2\pi}{\arccos\left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot NZ}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180} \cdot lat\right)}\right)}\right) \quad (1)$

まず、両方のメッセージの CPR 緯度と経度のビットを分離する。

```

F      CPR 緯度      CPR 経度
[--][-----][-----]
[0][10110101101001000][01100100010101100]
[1][10010000110101110][01100010000010010]
```

3.2.3 バイナリ文字列を 10 進数値に変換

緯度と経度の CPR をそれぞれ 10 進数値に変換すると

```

LAT_CPR_EVEN: 93000/131072
LON_CPR_EVEN: 51372/131072
LAT_CPR_ODD: 74158/131072
LON_CPR_ODD: 50194/131072
```

となり、ここでの緯度と経度は 17 ビットで定義されているため、最大値が 131072(2^{17})になる。計算結果として得られるのはその最大値の割合を表している。

3.2.4 緯度指数 j

次に緯度指数 j の導出を以下の式(2)に示す．Floor 関数は $k \leq x$ となる最大の整数値 k を定義している．

$$j = \text{floor}\left(59 \cdot \text{Lat}_{cprE} - 60 \cdot \text{Lat}_{cpro} + \frac{1}{2}\right) \quad (2)$$

3.2.5 緯度の導出

まず，2つの定数を赤道と極の間の地理的緯度ゾーンの数値である NZ を用いて導出すると，以下の式○のようになる．

$$D\text{Lat}_E = \frac{360}{4 \times NZ} = \frac{360}{60} \quad (3)$$

$$D\text{Lat}_O = \frac{360}{4 \times NZ - 1} = \frac{360}{59} \quad (4)$$

さらに $\text{mod}(x, y)$ を使用して相対緯度を計算する．係数関数 $\text{mod}(x, y)$ は次の式のようにになる．

$$\text{mod}(x, y) = x - y \cdot \text{floor}\left(\frac{x}{y}\right) \quad (5)$$

相対緯度は以下の式○のようになる．

$$\text{Lat}_E = D\text{Lat}_E * (\text{mod}(j, 60) + \text{Lat}_{cprE}) \quad (6)$$

$$\text{Lat}_O = D\text{Lat}_O * (\text{mod}(j, 59) + \text{Lat}_{cpro}) \quad (7)$$

南半球の場合，数値は270[deg]から360[deg]となり，緯度が範囲内であることを確認する必要がある．

$$\text{Lat}_E = \text{Lat}_E - 360 \text{ if } (\text{Lat}_E \geq 270) \quad (8)$$

$$\text{Lat}_O = \text{Lat}_O - 360 \text{ if } (\text{Lat}_O \geq 270) \quad (9)$$

最終的な緯度はタイムスタンプに応じて選択され，最新のものが使用される．

$$\text{Lat} = \begin{cases} \text{Lat}_E & \text{if } (T_E \geq T_O) \\ \text{Lat}_O & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

3.2.6 緯度の導出結果の確認

NL(Lat_E)とNL(Lat_O)を計算する．同等でない場合，2つの位置は異なる緯度ゾーンにある．2つの値が同じ場合は，経度の計算に進む．

3.2.7 経度

偶数フレームが最後にある場合

T_EVEN>T_ODD:

$$ni = \max\{NL(Lat_E), 1\} \quad (11)$$

$$DLon = \frac{360}{ni} \quad (12)$$

$$m = \text{floor}\left(Lon_{cprE} \cdot [NL(Lat_E) - 1] - Lon_{cpro} \cdot NL(Lat_E) + \frac{1}{2}\right) \quad (13)$$

$$Lon = DLon \cdot (\text{mod}(m, ni) + Lon_{cprE}) \quad (14)$$

奇数フレームが最後にある場合

T_EVEN<T_ODD:

$$ni = \max\{NL(Lat_O) - 1, 1\} \quad (15)$$

$$DLon = \frac{360}{ni} \quad (16)$$

$$m = \text{floor}\left(Lon_{cprE} \cdot [NL(Lat_O) - 1] - Lon_{cpro} \cdot NL(Lat_O) + \frac{1}{2}\right) \quad (17)$$

$$Lon = DLon \cdot (\text{mod}(m, ni) + Lon_{cpro}) \quad (18)$$

算出された値が 180[deg]よりも大きい場合：

$$Lon = Lon - 360 \text{ if } (Lon \geq 180) \quad (19)$$

3.1 16 進数から高度への変換

8D 872FA0 580983AA554890 48BA81

↓

101 1000 0 1001 1000 11 1010 1010 101 101 100 1000 1001 0

↓

0101 1000 0000 1001 10000 0011 1010 1010 0101 0101 0100 1000 1001 0000

↓

01011 00 0 0000100110000 0 0 11101010100101010 10100100010010000

0000100110000

- ① 8 ビット目は Q ビットと呼ばれ，高度データから Q ビットを除いた 2 進数を 10 進数に変換
- ② Q ビットが 0 であれば，100ft 単位
Q ビットが 1 であれば，25ft 単位を 10 進数に掛ける．

3.3 速度メッセージ

速度に関するメッセージには2つのタイプがあり、メッセージ内の3ビットのサブタイプによって決定できる。Subtype1と2の場合は、対地速度（Grand speed）として読み取れ、Subtype3と4の場合は、対気速度（Air speed）として読み取れる。後者の方は、前者よりも極めて取得されるケースが少なく、ほとんどが対地速度として取得される。

3.3.1 メッセージ Subtype1 または Subtype2 の場合

Subtype1 は、亜音速を表し、Subtype2 は超音速を表している。以下の表に Subtype1,2 の時の詳細ビットを表8に示す。

表8 Subtype1,2 の場合の詳細ビット

MSG Bits	N bits	Abbr	内容
33-37	5	TC	タイプ
38-40	3	ST	サブタイプ
41	1	IC	Intent change flag
42	1	RESV-A	Reserved -A
43-45	3	NAC	Velocity uncertainty (NAC)
46	1	S-EW	東西速度標識
47-56	10	V-EW	東西速度
57	1	S-NE	南北速度標識
58-67	10	V-NS	南北速度
68	1	VrSrc	垂直レートソース
69	1	S-Vr	垂直速度標識
70-78	9	Vr	垂直速度 (Vertical rate)
79-80	2	RESV_B	Reserved-B
81	1	S-Dif	Diff from baro alt, sign
82-88	7	Dif	Diff from baro alt

3.3.2 水平速度の変換

水平速度と方位を計算するには東西速度 $V(ew)$ と東西速度標識 $S(ew)$ ，南北速度 $V(ns)$ ，南北速度標識 $S(ns)$ の 4 つの値が必要である．また，この $S-NS$ と $S-EW$ から機体がどの方向に飛行しているのか識別できるようになる．具体的な関係を下の表 9 に示す．

表 9 速度標識と飛行方向の関係

速度標識	2 進数	飛行方向
S-NS	1	北から南へ飛行
	0	南から北へ飛行
S-EW	1	東から西へ飛行
	0	西から東へ飛行

速度と方向は次のように計算できる．

$$V(we) = \begin{cases} -1 * [V(ew) - 1] & \text{if}(s(ew) = 1) \\ V(ew) - 1 & \text{if}(s(ew) = 0) \end{cases} \quad (20)$$

$$V(sn) = \begin{cases} -1 * [V(ns) - 1] & \text{if}(s(ns) = 1) \\ V(ns) - 1 & \text{if}(s(ns) = 0) \end{cases} \quad (21)$$

$$v = \sqrt{V_{we}^2 + V_{sn}^2} \quad (22)$$

$$h = \arctan\left(\frac{V_{we}}{V_{sn}}\right) * \frac{360}{2\pi} [\text{deg}] \quad (23)$$

出された値が負であれば， $360[\text{deg}]$ を加えることで方位として決定する．また， $V(we)$ と $V(ew)$ は別の値として区別し，同様に $V(sn)$ と $V(ns)$ も区別することに注意する．

$$h = h + 360 \quad \text{if} (h < 0) \quad (24)$$

具体的に数値を代入した例を示す．

V-EW : 00000010001 $\rightarrow$ 9

S-EW : 1

V-NS : 0010100000 $\rightarrow$ 160

S-NS : 1

$$V(we) = -(9 - 1) = -8 \quad (25)$$

$$V(sn) = -(160 - 1) = -159 \quad (26)$$

$$v = 159.20[\text{kn}]$$

$$h = 182.88[\text{deg}]$$

3.3.3 垂直速度(Vertical Rate)

航空機の垂直方向の判定（上か下か）は、上表で示されるビット 69 の S-Vr から読み取ることができる。

- 0 であれば，下降．
- 1 であれば，上昇．

続いて，垂直速度 Vr は，ビット 70 からビット 78 から 1 を引いた値に 64 を掛けた値 (ft/min)とする．以下に，ビットからの変換例を示す．

Vr ビット : 000001110 → 14

Vr : $(14 - 1) \times 64 = 832$ [fpm]

S-Vr : 0 → 下降．

つまり，毎分 832[ft]の降下率で降下している機体であるということがわかる．

垂直速度ソース(VrSrc)は，気圧高度，幾何学的高度のいずれかであるか識別できる．

- 0 であれば，気圧高度変化率
- 1 であれば，幾何学的高度変化率

3.3.4 メッセージ Subtype3 または Subtype4 の場合

Subtype3（亜音速）と Subtype4（超音速）は，対地速度の情報が利用できないときに対気速度として放送される.前述のようにこの対気速度の情報が放送されることは非常にまれである．以下の表に Subtype3 のみに適応される詳細ビットを表 10 に示す．

表 10 Subtype3,4 の場合の詳細ビット

MSG Bits	N bits	Abbr	内容
33-37	5	TC	タイプ
38-40	3	ST	サブタイプ
41	1	IC	Intent change flag
42	1	RESV-A	
43-45	3	NAC	Velocity uncertainty(NAC)
46	1	H-s	方位(Heading status)
47-56	10	Hdg	Heading (proportion) 方位の割合
57	1	AS-t	対気速度タイプ(Airspeed Type)
58-67	10	AS	対気速度(Airspeed)
68	1	VrSrc	Vertical rate source
69	1	S-Vr	垂直速度標識(Vertical rate sign)
70-78	9	Vr	垂直速度(Vertical rate)
79-80	2	RESV_B	Reserved-B

81	1	S-Dif	Difference from baro alt,sign
82-88	7	Dif	Difference from baro alt

3.3.5 機首方位

機首方位（Heading）は航空機の横軸の方位で一般に磁方位による機軸の方位

H-s は機首方位の示しており，0 または 1 によって利用可能であるか判断できる．

0--->数値を利用できない

1--->数値を利用できる

10 ビットで表される Hdg は真円，つまり 360[deg]の割合で導出できる．

$$heading[deg] = \frac{Decimal(Hdg)}{1024} \times 360[deg] \quad (27)$$

例えば，47 ビット目から 56 ビット目の Hdg が以下の(1)であれば，

1010110110 ----->694

$$heading[deg] = \frac{694}{1024} \times 360[deg] = 243.98[deg] \quad (28)$$

3.3.6 対気速度の種類

表の AS-t から対気速度の種類（TAS または IAS）を識別できる．

- AS-t が 0 であれば，指示対気速度（IAS）
- AS-t が 1 であれば，真対気速度（TAS）

また，表の AS ビットを 2 進数から 10 進数に変換することでいずれかの対気速度を導出できる．例を下に示す．

- 0101111000 → 376 [knot]

3.5 NIC/NAC 値の決定

NIC, NAC, NUC, SIL はそれぞれナビゲーション整合性カテゴリ, ナビゲーション精度カテゴリ, ナビゲーション正確性カテゴリ, 監視と放送源の整合性レベルを表している.

3.5.1 NIC と Rc の決定

Rc とは, NIC_p 番号から補間された水平半径であり, 40 ビットではなく, NIC サプリメント B と TC 番号の組み合わせで NIC 値を決定できる.

以下の表に TC, NIC, Rc の関係を表 11 に示す.

表 11 TC, NIC, Rc の関係

TC	SBnic	NIC	Rc
9	0	11	7.5m
10	0	10	25m
11	1	9	74m
	0	8	0.1NM
12	0	7	0.2NM
13	1	6	0.3NM
	0		0.5NM
	1		0.6NM
14	0	5	1.0NM
15	0	4	2NM

また, NAC は速度メッセージで報告される.

第4章 ADS-B 信号の取得方法

4.1 Radarcape を用いた ADS-B 信号の取得

この節では、ドイツ製の Jetvision 社の Radarcape を使用して ADS-B 信号を取得した結果を示す。Radarcape は、モード A/C、モード S、ADS-B データを高い精度で取得でき、GPS 同期クロックを統合することで 50 ナノ秒の範囲でタイムスタンプが可能になる。これにより、MATLAB のツールを使用した長時間による ADS-B 取得における、ADS-B データの時間ラグを解決することができる。Radarcape の感度は、-93[dbm]の入力レベルまで保証されており、最大 450[km]の範囲で信号を受信できる。

また、機上での Radarcape の使用については、常にコンセントとの接続が必要であり、日本航空の国内線の便にはコンセント電源の設置がなされていないため実行できていない。図 2 に Radarcape の正面図、図 3 から図 6 には接続した PC で表示できる ADS-B 情報を示す。



図 2 Radarcape ADS-B 受信機の正面図

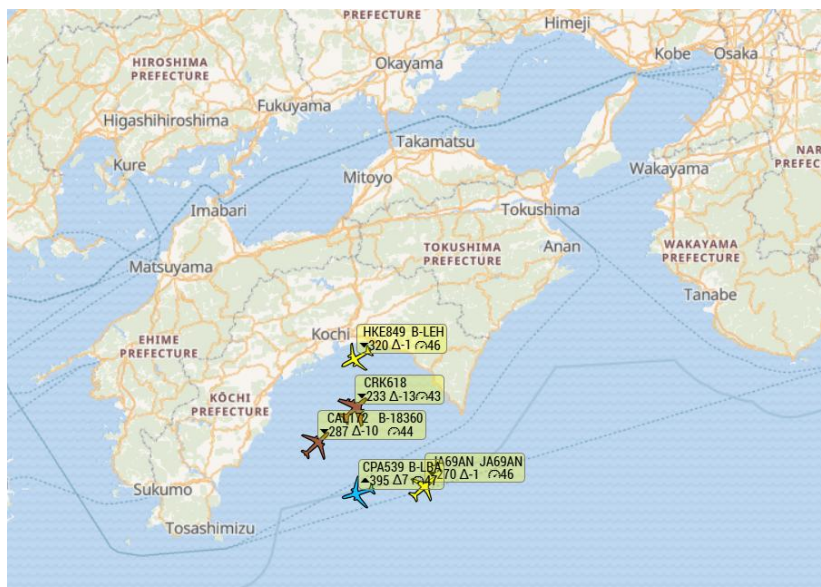


図 3 2D で表示される航空機の位置(Radarcape)

Registration ▲▼	Mode-S ▲▼	Flight ▲▼	Origin Name ▲▼	Origin ▲▼	Destination Name ▲▼	Destination ▲▼	Track ▲▼	Magn. Heading ▲▼	True Heading ▲▼	Altitude ▲▼	GNSS Altitude ▲▼	Speed ▲▼	IAS ▲▼	TAS ▲▼	Vertical Rate ▲▼	GND/ AIR ▲▼	Type ▲▼	Category ▲▼	Operator ▲▼	Country ▲▼	Source ▲▼
	781EC8	CQH6217					82			35000	37750	475			0	Air		A3		Chin	ADS-B
JA205P	84B451	APJ198					48			26700	28800	406			-2304	Air	A20N	A3	APJ	Japa	ADS-B
JA22JJ	84BCD4						223			27475	29350	452			1472	Air	A320		JJP	Japa	
JA653J	862DOC	JAL6719					255			36000	38725	453			0	Air	B763	A5	JAL	Japa	ADS-B
JA75AN	8687BC	ANA547	Osaka International	RJOO	Kagoshima	RJFK	235			26000	27925	489			0	Air	B738	A0	ANA	Japa	ADS-B
JA902P	872863	APJ64	Hong Kong International, Islands	VHHH	Kansai International, Osaka	RJBB	47			29000	31300	461			-64	Air	A21N	A3	APJ	Japa	ADS-B
B-18360	8991A8	CAL172	Taiwan Taoyuan International, Taoyuan (Dayuan)	RCTP	Kansai International, Osaka	RJBB	48			19250		403			-1856	Air	A333	A5	CAL	Taiw	ADS-B
	8991DE	SJX803					241			40000	43000	474			0	Air		A5		Taiw	ADS-B
N134FE	A08A8F	FDX6008					223			35625	38375	466			1536	Air	B763	A5	FDX	USA	ADS-B

図4 ブラウザで表示される機体の ADS-B データ(Radarcape)

Incoming Mode-S & ADS-B Frames

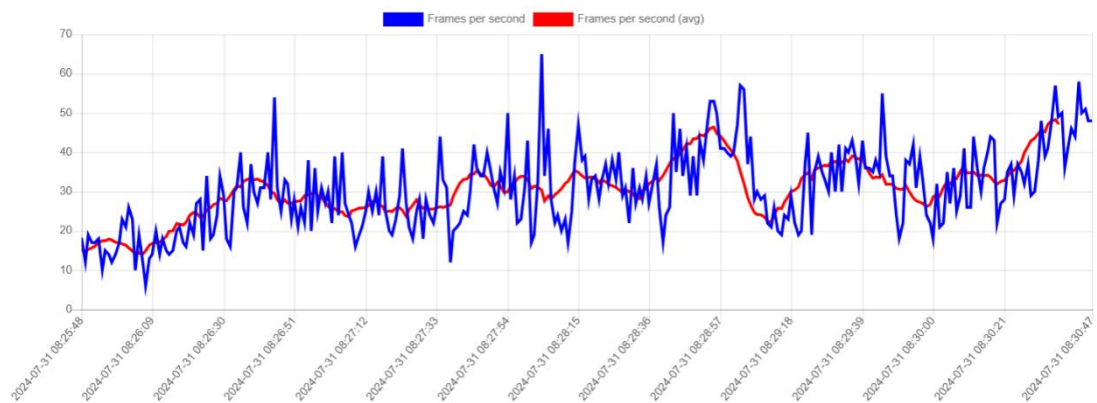


図5 受信された ADS-B 信号の時刻ごとの感度(Radarcape)

Monitored Aircraft

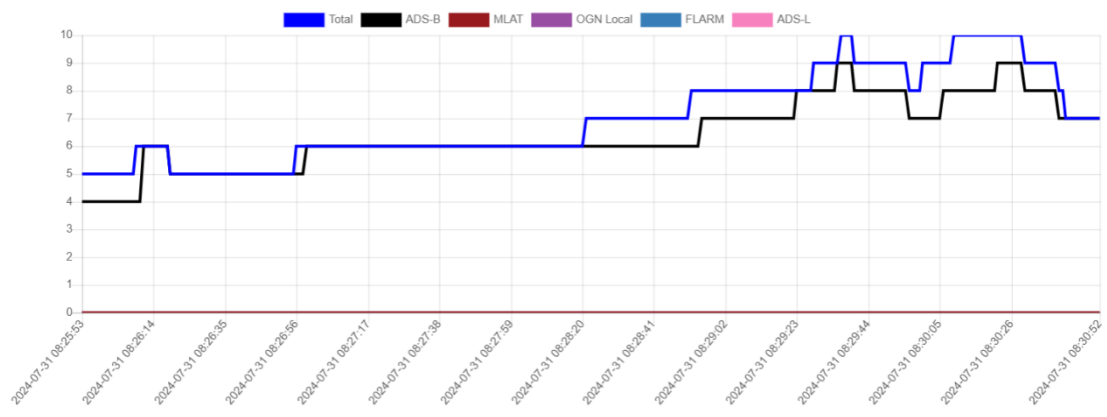


図6 Radarcape で受信した各信号の種類と取得数

4.2 機上で取得した ADS-B 信号

実際に、機上から ADS-B 信号の取得を行った。

使用したツールは MATLAB の Communications Toolbox と Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio であり、これらのソフトウェアをアドオンした PC に 1090MHz の信号を受け取る専用のアンテナをつなげる。ツールの初期設定である受信期間を長時間に設定した場合、生データに時間の遅れが発生するため、20 秒ごとに設定し、ADS-B 信号の受信を行った。使用したツールは以下のとおりである。

- Communications Toolbox
- Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio

以下の図 7 にアンテナを示し、機内取得での様子を図 8 に示す。

取得時間に関しては、搭乗した機体の離陸から着陸までの時間であり、リアルタイムに取得できた ADS-B データの位置をプロットしたものを図 9 に示す。



図 7 ADS-B 受信アンテナ

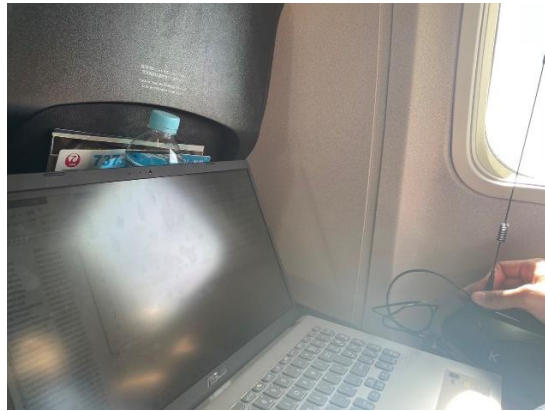


図 8 機上取得の様子

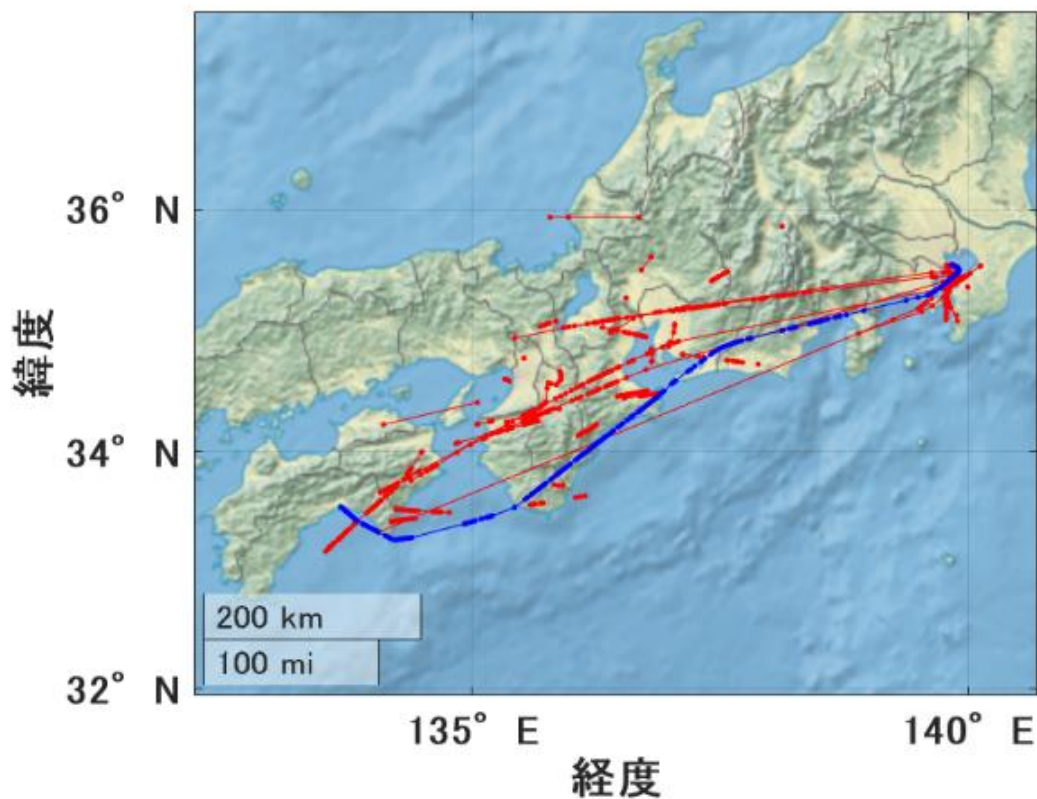


図 9 機上で取得した自機と他機の位置(2022/11/16)

図 9 は、2022 年 11 月 16 日の羽田空港発高知空港着の便で機上取得した ADS-B データの位置情報を地図上にプロットしたものである。

青線は自機の位置、赤線は他機の位置を示しており、各機体の緯度、経度の点と点を線でつないでいる。また、線が太くなっているところは、短い時間間隔で多くの ADS-B 信号が取得できているということがわかる。

座席は、自機の飛行方向に向かって右側の席で ADS-B 信号を取得しており、機体の左側よりも右側の他機の ADS-B 信号が多く取れていることが読み取れる。

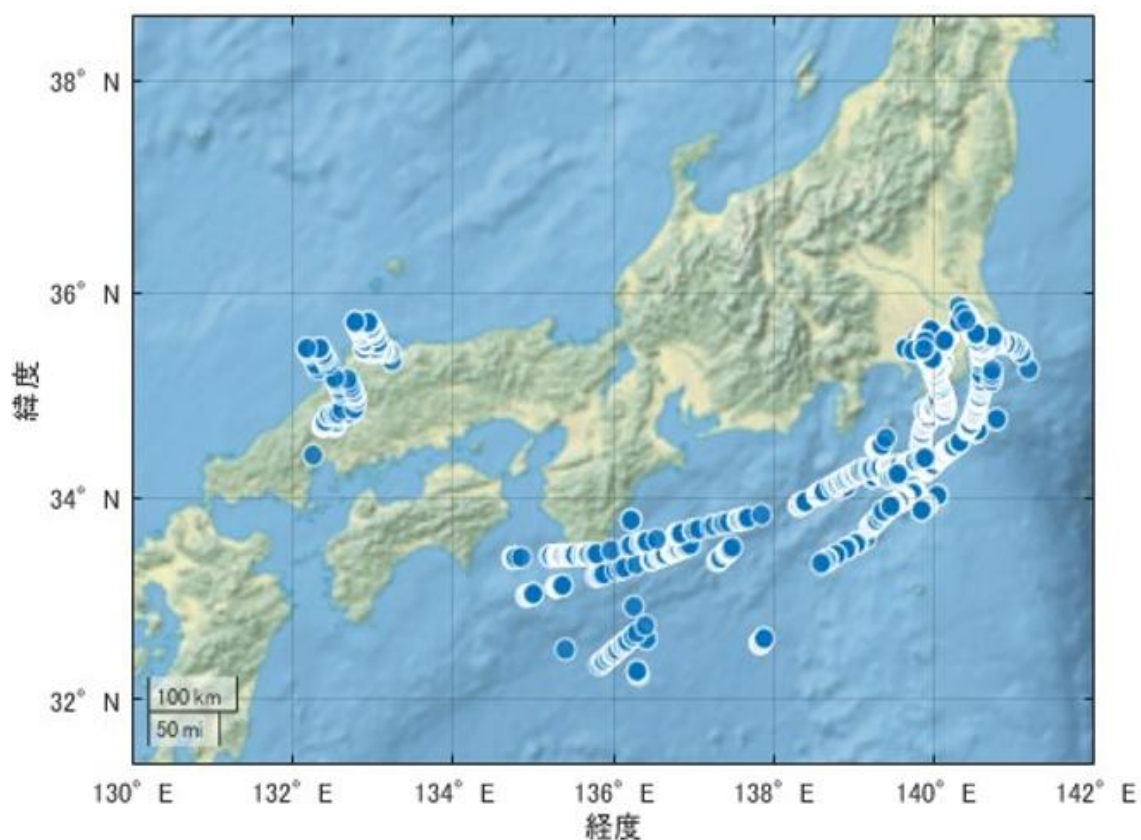


図 10 高知発羽田着の便，機上で取得した ADS-B データ(2024/10/1)

図 10 は 2024 年 10 月 1 日の JAL494 便に搭乗し，飛行中において ADS-B 信号の取得を行い，ADS-B 情報の中の緯度と経度から地図上にプロットしたものである．経路としては高知空港発羽田空港着で，青いプロットが自機と他機の位置情報である．また，自機(JAL494 便)の離陸から着陸までの時間で得られた全ての ADS-B データを図 10 に反映させている．

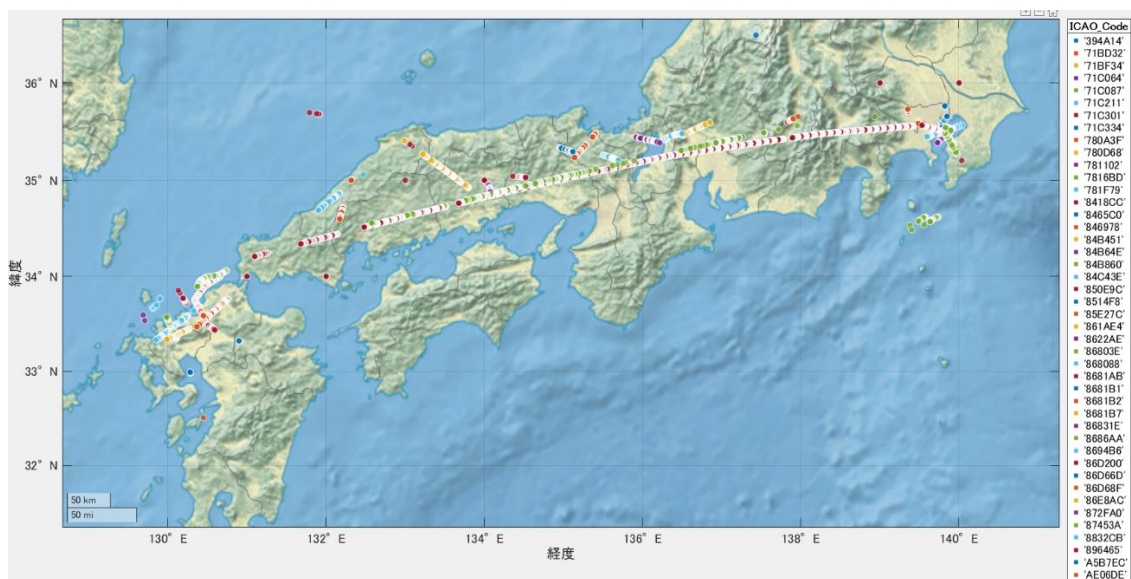


図 11. 羽田空港発福岡空港着の ADS-B データ (2024/11/20)

図 11 は、2024 年 11 月 20 日に羽田空港発福岡空港着の JAL327 便に搭乗し、ADS-B 信号の機上取得を行い、位置をプロットしたものである。

自機、他機の機体ごとに色分けをしてプロットしており、図 11 の凡例は ICAO コードに対応した機体の色を示している。

座席は右側の席であり、自機の飛行方向の右側の ADS-B 信号が多く取得できていることがわかる。

第5章 生データの高度履歴

機上で取得した ADS-B データの高度履歴を図 12 に示す。

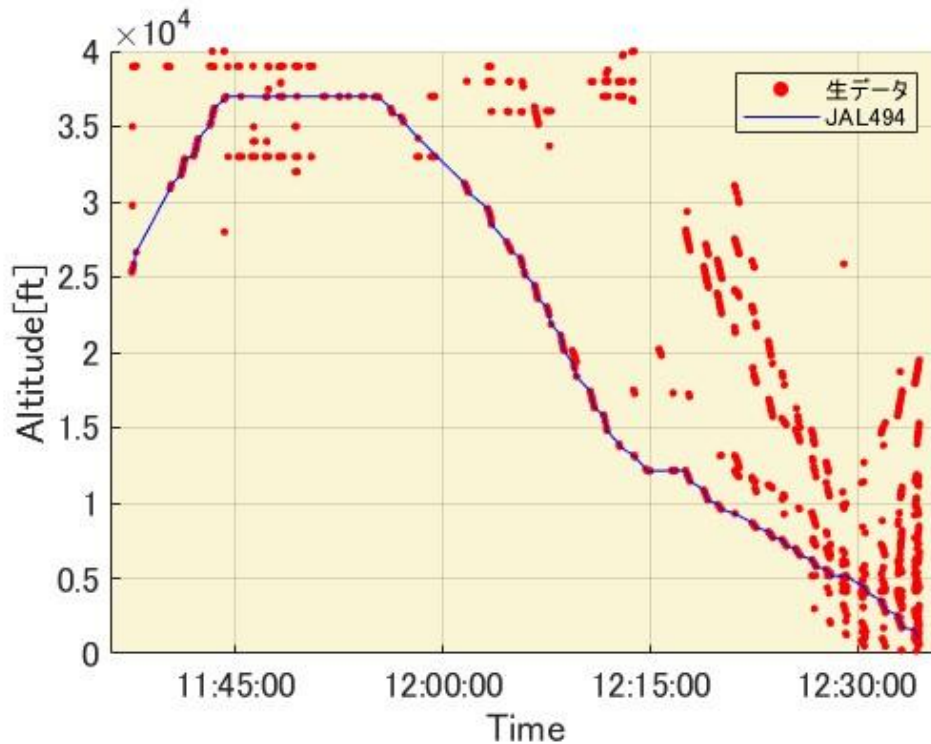


図 12 自機(JAL494)と周辺機の生データによる高度履歴(2024/10/1)

図 12 は、10 月 1 日の自機である JAL494 と周辺機である他機の ADS-B 生データの高度履歴を示したものである。赤点は、該当時刻に取得できた高度であり、青線は、自機のデータを線でつないだものになっている。

また、11 月 18 日に取得したデータを下図の図 13 に示す。

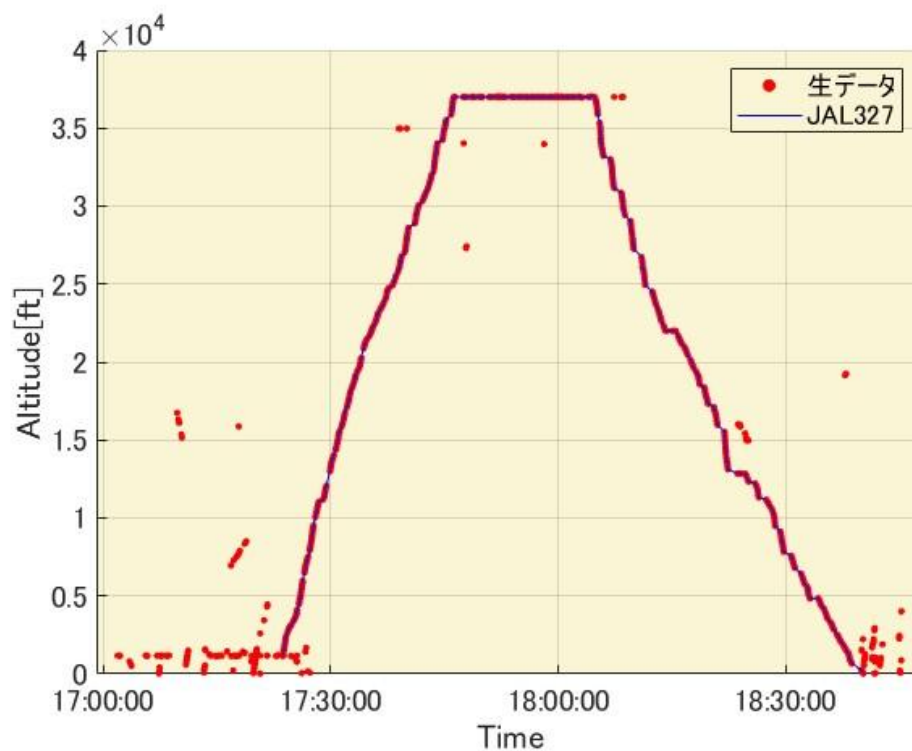


図 13 自機(JAL327)と周辺機の生データによる高度履歴(2024/11/18)

自機の便名は、JAL327 便であり、経路は福岡空港発、羽田空港着である。離陸から着陸までの飛行時間において取得できた ADS-B データをプロットしており、自機の空港周辺や着陸空港の周辺で他機の ADS-B データが取得できている時間帯は見られるものの、上昇飛行中、巡航中、降下中においては、ほとんど周辺機の ADS-B データが取得できていないことがわかる。

次に、下図に 11 月 20 日に取得した ADS-B データの高度履歴を図 14 に示す。

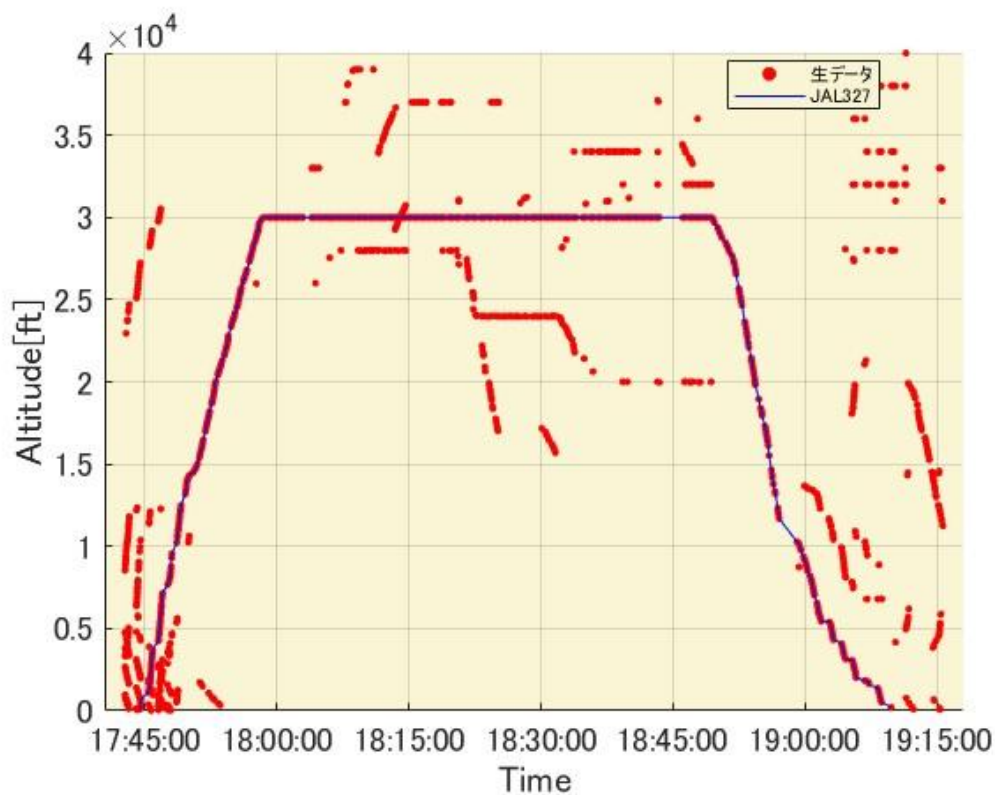


図 14 JAL327（自機）と周辺機の生データによる高度履歴(2024/11/20)

自機の便名は JAL327 便であり、飛行経路は、羽田空港発、福岡空港着の便である。また、JAL327 便の高度履歴に関しては、赤点を青線で結んでおり、飛行時間は 17 時 45 分から 19 時 13 分までである。

図 13 と図 14 を比較すると、図 14 の方が離陸から着陸までの間で多くの自機及び他機の ADS-B 信号を取得できたことがわかる。

さらに図 14 から分かることとしては、上昇中と降下中は自機の高度より低い高度を飛行している機体の ADS-B データはあまり取得できていないのに対して巡航飛行している時間帯に関しては、自機より低い高度の機体の ADS-B データも取得できていることがわかる。

第6章 機体間距離

6.1 保護領域⁽¹²⁾

飛行中の機体と周囲の機体との機体間距離を定量的に示すために、ディスク型の領域を保護領域として、解析対象である自機の周りに設定する．この保護領域に対して、他機が侵入してきた場合に、異常接近としての評価を行う．

TCAS(空中衝突防止装置)についても保護領域の考えが導入されており、自機の高度によって保護領域の範囲が変動する⁽¹²⁾が、本稿の保護領域に関しては、自機の高度に依存しないものとする．

保護領域の半径および高さは、自機の周りの水平方向に $d_0 = 5[\text{NM}]$ 、鉛直方向には $h_0 = 1000[\text{ft}]$ として設定する．

$d_0 = 5[\text{NM}]$ は安全のために管制官が確保すべき最小の間隔であり、10 秒間に 1 回の頻度で各航空機の位置を認知する管制官にとって、必要最低限の水平距離⁽¹⁴⁾に設定されている．

$h_0 = 1000[\text{ft}]$ は、平成 17 年 9 月 30 日に導入された短縮垂直間隔(RVSM: Reduced Vertical Separation Minimum)⁽¹⁵⁾が基になっており、航空機同士の垂直間隔は、2000[ft]から 1000[ft]に短縮された．また、航空法施行規則 174 条⁽¹⁶⁾に「人又は家屋の密集している地域の上空にあつては、当該航空機を中心として水平距離 600m の範囲内の最も高い障害物の上端から 300m の高度」と記載されており、航空機は地上の障害物に対しても 1000[ft]の間隔を取っていることがわかる．以下の図 15 に保護領域のイメージ図を示す．

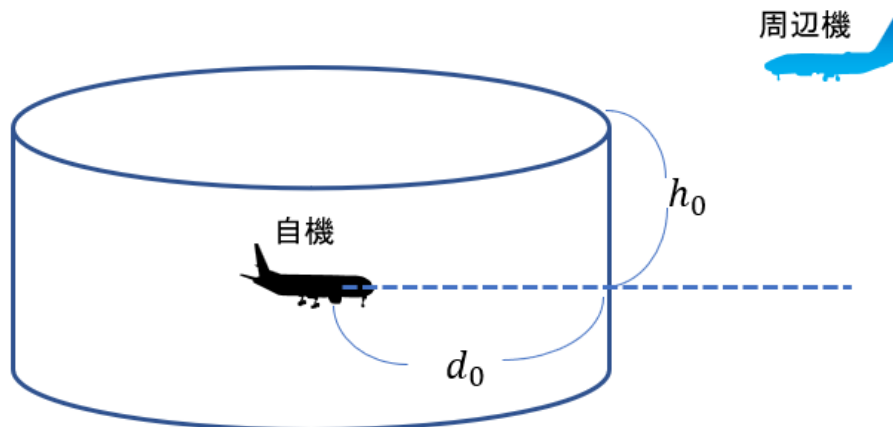


図 15 保護領域のイメージ図

6.2 間隔指標⁽¹²⁾

自機と周辺機である他機の相対距離を、接近度合いとして表現するために、まず、他機との水平距離と高度差をそれぞれ d_0 と h_0 を用いて除すことで無次元化する。次に、無次元化した2つの数値(d/d_0 , $\Delta h/h_0$)のいずれかの最大値を抽出し、以下の式(29)を間隔指標とする。

$$I = \max\left(\frac{|\Delta h|}{h_0}, \frac{d}{d_0}\right) - 1 \quad (29)$$

また、他機との水平距離の計算方法は地球を真球と仮定した場合の2点間距離から導出している。

表 12 間隔指標と機体間距離の具体的な関係

間隔指標	自機と他機の位置関係
① $I>0$	自機の保護領域外に他機が存在
② $I=0$	自機の保護領域表面上に他機が存在
③ $I<0$	自機の保護領域内に他機が存在

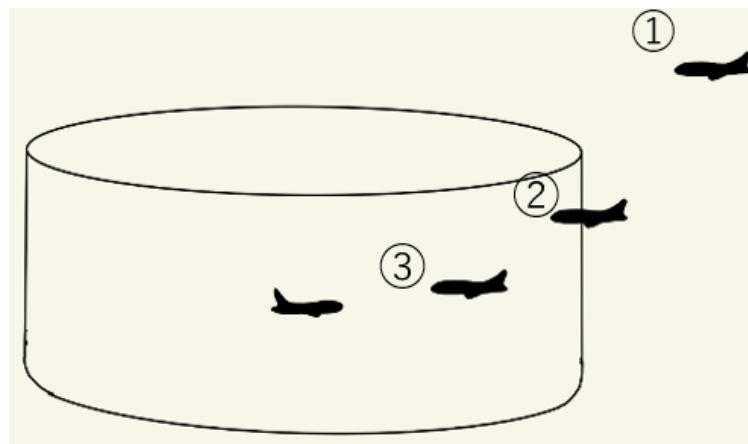


図 16 間隔指標のイメージ図

表 12 より、間隔指標 I が 0 より大きな値である場合は、自機に対して他機は保護領域から外れて飛行しており、十分に安全な距離(水平距離、高度差)を確保して飛行しているということがわかる。

間隔指標 I が 0 であれば、自機に対して他機は保護領域の表面上を飛行しており、双方の飛行方向や上昇角度または降下角度によっては、直後に保護領域に侵入してしまう可能性があると考えられる。

間隔指標 I が 0 を下回れば、自機に対して他機は保護領域に完全に侵入しており、異常接近しているとみなす。

6.3 二点間距離の計算方法

この節では、自機と飛行している周辺機の機体間距離の具体的な計算方法を示す。地球は平面ではなく、楕円球体であるため単純なピタゴラスの定理では導出できない。そのため、ADS-B データに組み込まれた緯度と経度の位置情報から回転楕円体である地球を真球と仮定し、自機と他機の水平距離を導出する。

自機の緯度と経度をそれぞれ $Lat1$, $Lon1$ とし、他機の緯度と経度をそれぞれ $Lat2$, $Lon2$ とする。また、機体の緯度と経度は度数法で表記されているため、ラジアンに変換し、弧度法を用いて計算を行う。

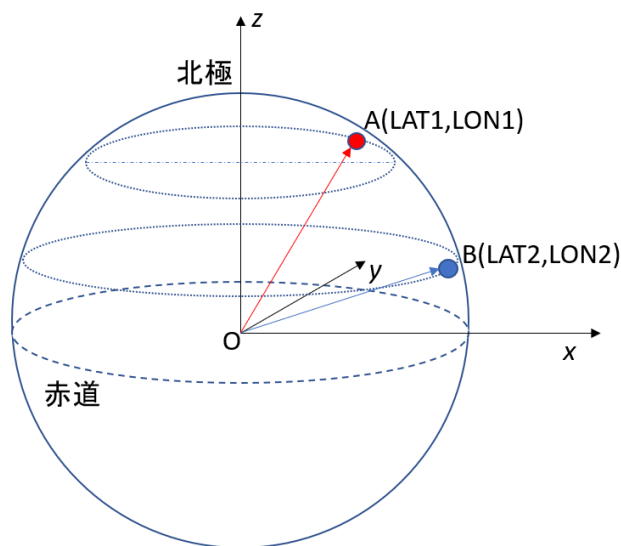


図 17 地球を真球と仮定した場合の機体の位置関係

変換後の緯度と経度をそれぞれ $LAT1$, $LON1$ と $LAT2$, $LON2$ として以下の式(30)～(33)とする。

$$\varphi_1 = (Lat1) * \frac{2\pi}{360} \quad (30)$$

$$\phi_1 = (Lon1) * \frac{2\pi}{360} \quad (31)$$

$$\varphi_2 = (Lat2) * \frac{2\pi}{360} \quad (32)$$

$$\phi_2 = (Lon2) * \frac{2\pi}{360} \quad (33)$$

機体の位置情報は緯度，経度で表されており，下の図 18 と図 19 のように三次元座標に変換すると，以下の式(34)~(36)になる．

$$x1 = \cos(\varphi_1) * \cos(\phi_1) \quad (34)$$

$$y1 = \cos(\varphi_1) * \sin(\phi_1) \quad (35)$$

$$z1 = \sin(\varphi_1) \quad (36)$$

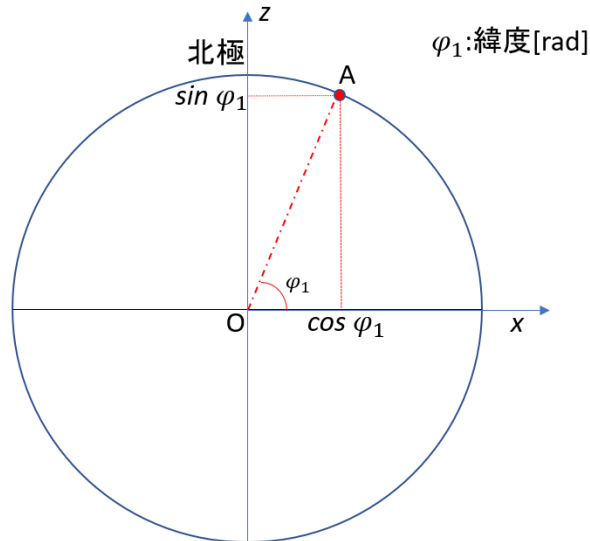


図 18 地球の赤道面を水平に見たとき

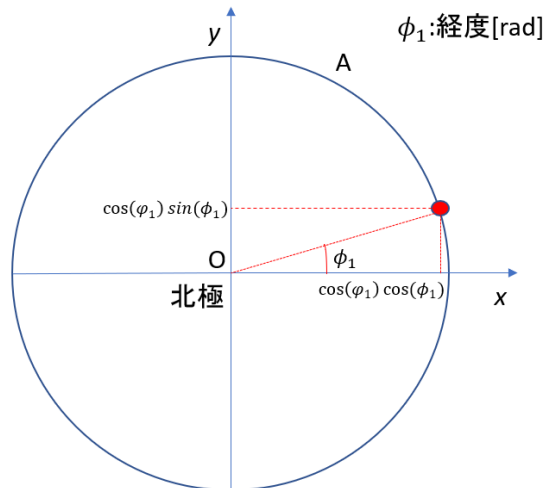


図 19 北極を 2 次元座標の中心に置いた場合の x - y 座標

他機の位置情報についても同様である．以下の式(36)~(38)が他機の三次元座標変換後の式である．

$$x_2 = \cos(\varphi_2) * \cos(\phi_2) \quad (37)$$

$$y_2 = \cos(\varphi_2) * \sin(\phi_2) \quad (38)$$

$$z_2 = \sin(\phi_2) \quad (39)$$

また， $\cos(\phi)$ が求まれば，逆関数を用いることで ϕ は算出できる．地球中心から見た地点 A 地点，B 地点の座標をベクトル $\vec{a}$ ， $\vec{b}$ とすると，その内積 $\vec{a} \cdot \vec{b}$ は

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos(\phi) \quad (40)$$

となり，両地点の座標ベクトルを最初から長さ 1 に正規化しておけば，内積は $\cos(\phi)$ と等しくなる．

これらの位置ベクトル $\overrightarrow{OA}$ と $\overrightarrow{OB}$ が成す角の余弦値 $\cos\psi$ は内積として，

$$\cos\psi = (x_1 * x_2 + y_1 * y_2 + z_1 * z_2) \quad (41)$$

$$\psi = \arccos(x_1 * x_2 + y_1 * y_2 + z_1 * z_2) \quad (42)$$

地球の半径を 6371[km]とすると，二点間距離 D (Distance)[km]は，以下の式(42)のようになる．

$$D = 6371 * \arccos(x_1 * x_2 + y_1 * y_2 + z_1 * z_2) \quad (43)$$

第7章 解析結果

ADS-B 信号を用いて解析した結果をこの章で示す。扱ったデータは、機上で取得した ADS-B データと Flightradar24 から抽出した ADS-B データである。

7.1 2022 年 11 月 16 日の便の解析データ

以下の図 20 は、Flightradar24 から抽出した ADS-B データを用いて間隔指標を解析した結果である。また、機上で取得した ADS-B データについては、ADS-B 信号取得時の時間間隔を自機(JAL499 便)の離陸から着陸時間まで設定したことで、実際のフライトと時間のラグを確認したため、省略する。

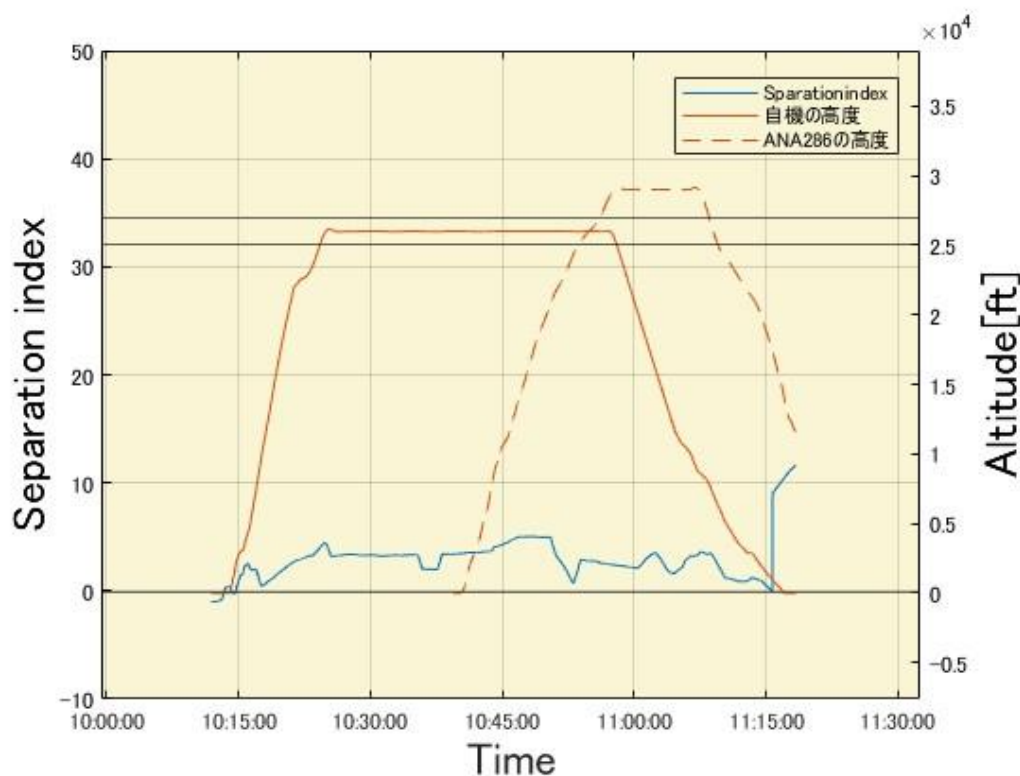


図 20 自機(JAL499 便)の高度と他機との間隔指標の最小値(2022/11/16)

図 20 より、左縦軸は間隔指標、右縦軸は高度、横軸に協定世界時 UTC としており、赤線はそれぞれ、自機(JAL499 便)と他機(ANA286 便)の高度を表している。青線は、間隔指標を示しており、自機の離陸または着陸時間前後の時間帯を除いて、0 を下回る時間はなく、他機は自機の保護領域の外側を飛行しているということがわかる。また、一見自機と他機の高度が重なる時間帯に間隔指標が小さい値をとるかのように見えるが、当該時刻においてはすでに適当な水平距離が保たれていた、つまり、間隔指標に用いた因数は、 d/d_0 であった。

表 13 具体的な高度差と水平距離の推移

時刻	$ \Delta h /h_0$	d/d_0
10:50:28	5.2632	5.9966
10:50:29	5.2345	5.9520
⋮	⋮	⋮
10:51:05	4.3317	4.3441
10:51:06	4.3114	4.2999
⋮	⋮	⋮
10:53:04	1.6953	1.6562
10:53:05	1.6715	1.6954
10:53:06	1.6478	1.7325
⋮	⋮	⋮
10:53:54	0.7110	3.8685

表 13 の時刻と 2 機の高度差と水平距離を比較すると、10:50:28 から 10:51:05 までの時間帯における水平距離は、高度差を上回っていることから、間隔指標は水平距離の方で計算されていることがわかる。10:53:04 では、 $|\Delta h|/h$ が 1.6953、 d/d_0 が 1.6562 をとり、取得した時間帯の全体で、 $|\Delta h|/h$ の方で最小値を取ったことがわかる。この時刻から 10:53:54 までの間は、水平距離は増加し、高度差は減少しているということがわかる。

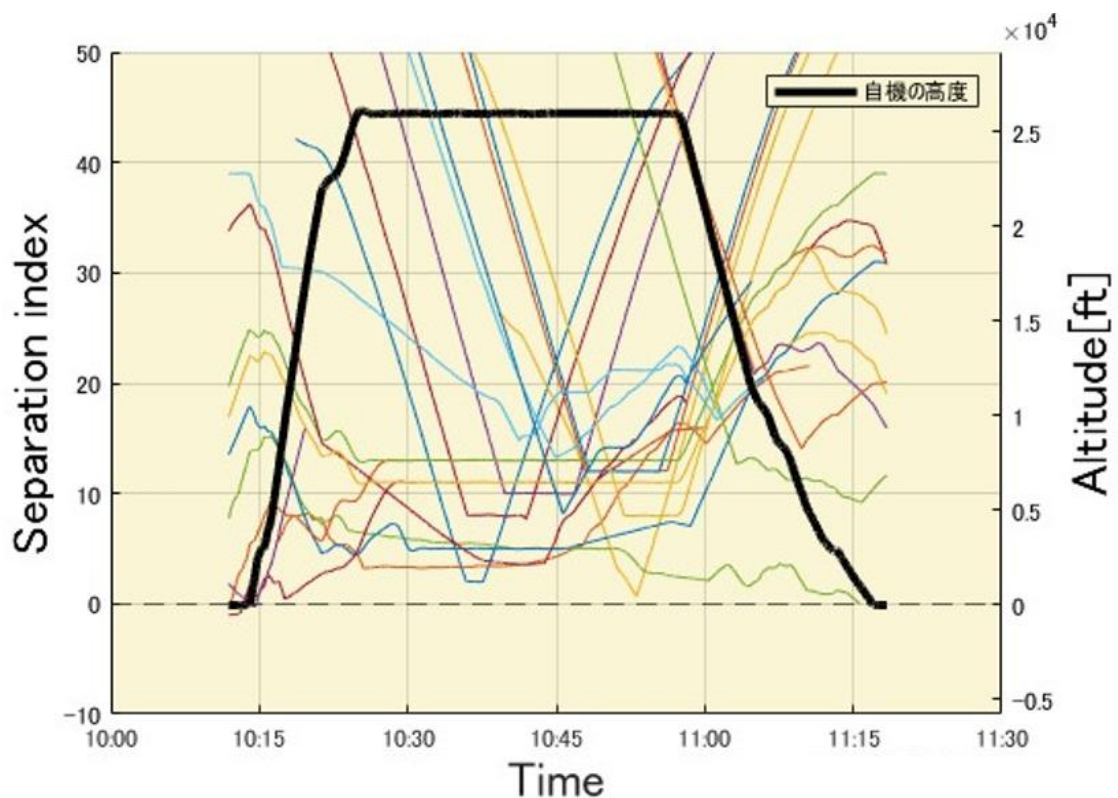


図 21 自機と各周辺機との間隔指標(2022/11/16)

図 21 は、2022 年 11 月 16 日の Flightradar24 の ADS-B データを用いて、自機(JAL499 便)と全ての他機との間隔指標を解析した結果である。この間隔指標に関して、自機に対して急激に減少している機体や自機の離陸から着陸までの間あまり大きな変動を取らない機体も見られる。

特徴として間隔指標が逆三角形になっている機体は、自機と空中ですれ違っているということがわかり、尚且つ間隔指標が一定になる時間帯は、高度差の方で間隔指標を計算しているということがわかる。対して、間隔指標が終始大きな値にならない機体は自機の後方または前方を追従、または飛行方向が類似しているということわかる。

7.2 2024 年 11 月 20 日に取得した ADS-B データの解析

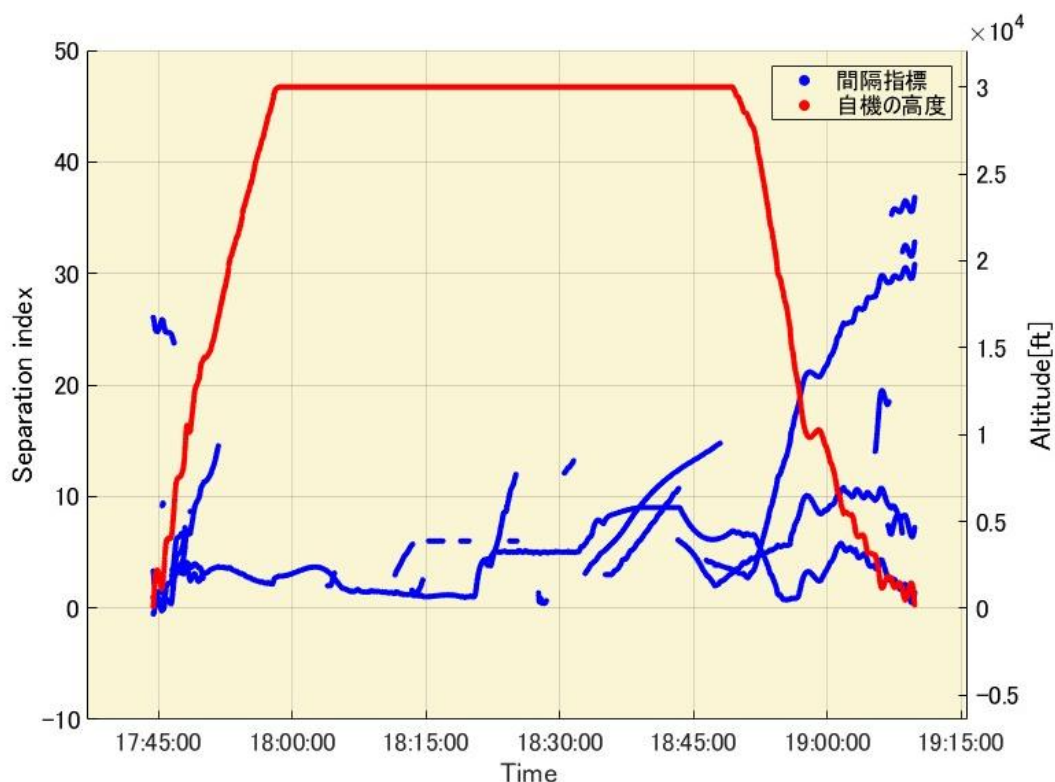


図 22 自機(JAL327)の高度と周辺機との間隔指標

図 24 は、11 月 20 日に機上で取得した ADS-B データをもとに間隔指標を解析した結果である。また、自機の便名は、JAL327 便であり、ICAO コードは 8618CC である。

赤線は自機の高度履歴を示しており、青線は自機と周辺機である他機とのそれぞれの間隔指標を示している。青線に関して、途中で途切れているデータがあるのは機上で得られた ADS-B データが自機の離陸から着陸までの時間で、他機の ADS-B データの一部だけが取得できたからである。

間隔指標に関しては、自機の飛行中に 0 を下回り、自機と異常接近している時間帯は見られず、他機が自機の保護領域外を飛行していることがわかる。自機の出発空港が羽田空港であったため、離陸時間前後に関しては、間隔指標が 0 に近い値をとっていることや ADS-B 信号が他の時間帯に比べ多く取得できていることがわかる。

また、この自機と他機の距離の確保は、管制官によって実現されており、図 22 のような数値をコックピット上で表示することができれば、仮に他機が自機の保護領域内に進入した場合でも操縦士の独自の判断により、安全な距離を確保することができると考えられる。

図 23 に 11 月 20 日の自機(JAL327 便)と他機(JAL264 便)の位置関係を示す。また、図 23 は Flightradar24⁽⁴⁾から抜粋したものであり、間隔指標が最小値の時刻と一致したものである。



図 23 間隔指標が最小値の時の自機と他機の位置関係⁽⁴⁾

図 23 から、自機とその周辺機は兵庫県の上空を飛行しており、間隔指標最小値の対象便は JAL264 便であった。詳細を以下の表 14 に示す。

表 14 JAL264 便の詳細情報

便名	JAL264
ICAO コード	850E9C
飛行時間	18:13~19:15
路線	広島空港発 羽田空港着
間隔指標が最小値の時刻	18:28:18
$ \Delta h /h_0$	1.41
d/d_0	1.1989
間隔指標 I	0.41

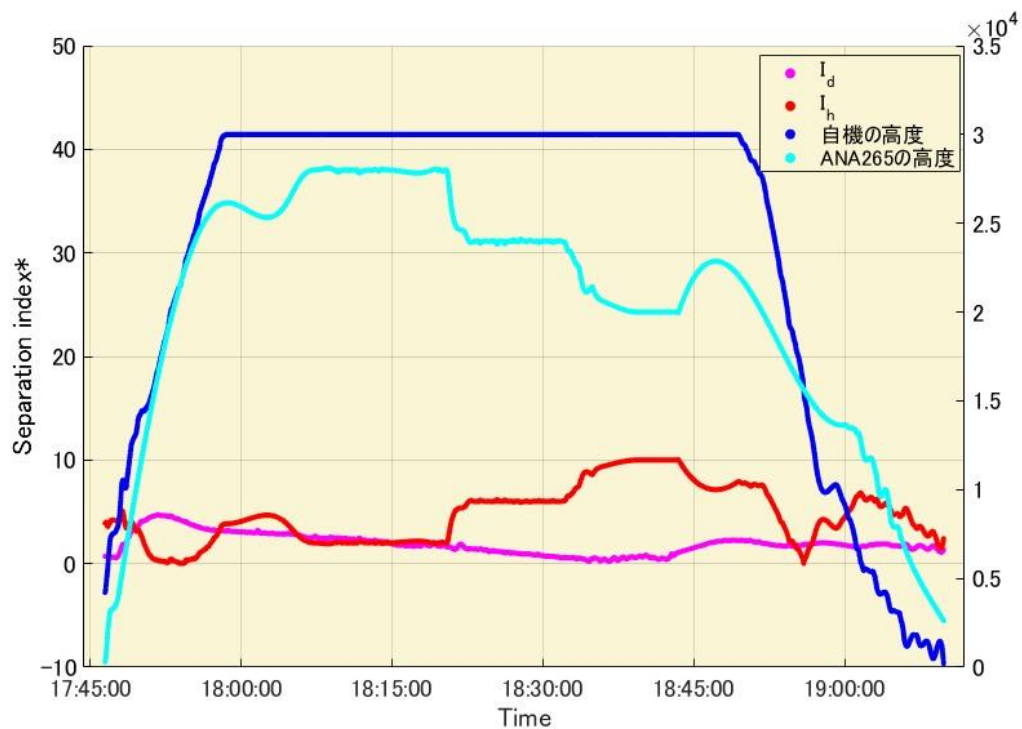


図 24 機上取得した ADS-B データから解析した自機(JAL327 便)と ANA265 便の間隔指標

図 24 から、自機(JAL327 便)と他機(ANA265 便)の水平距離は、大きな値の変化は見受けられず、一定の水平距離を保ちながら飛行していることがわかる。

また、18:07 から 18:20 にかけては水平距離と高度差は共に小さな値であり、ほかの時間帯に比べ、短い距離かつ短い高度差の値で飛行していることがわかる。また、この図の間隔指標の最小値時の時刻と飛行状況を下の表 16 に示す。

表 16 ANA265 便の詳細情報

間隔指標が最小値の時刻	18:55:27
便名(解析対象便)	ANA265
ICAO コード	87453A
路線	羽田空港発 福岡空港着

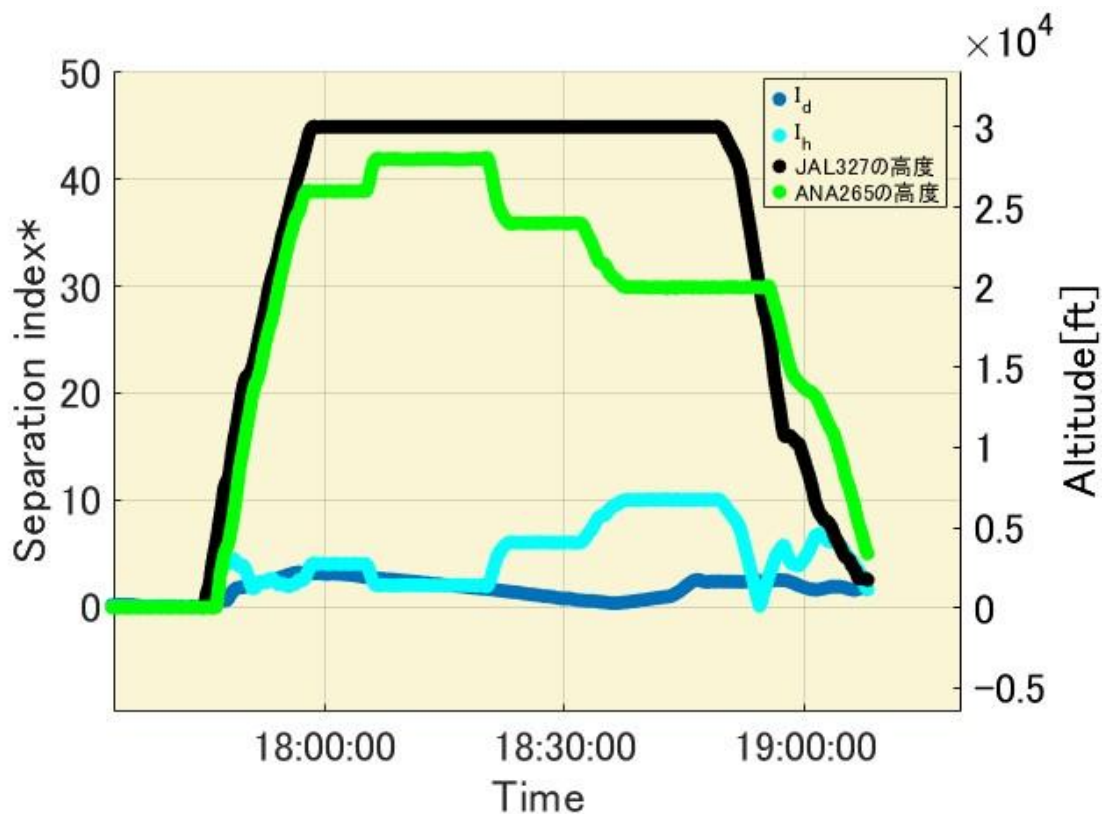


図 25 Flightradar24 のデータを用いて解析した間隔指標

図 25 は、Flightradar24 から抽出した ADS-B データを使用して間隔指標を解析した結果である。この図も図 24 と同様に、自機(JAL327 便)の後方を飛行していた他機(ANA265 便)との間隔指標で用いる高度差、水平距離を示しており、自機(JAL327 便)の離陸から着陸までの間で間隔指標が 0 を下回る時間帯はなく、他機(ANA265 便)は保護領域の外を飛行しているということがわかる。

7.3 自機と他機の水平距離が 0 になるまでの予想時間

混雑した空域でパイロットが飛行中の航空機について機体間距離が近づいているという認識ができれば事前に再度安全な距離を確保することができる．そのために間隔指標の計算で使った水平距離である d/d_0 を用いて，自機と他機の水平距離が 0 になるまでの予想時間を解析する．

7.3.1 解析手順

解析手順として以下の 1～3 までの手順で行う．

1. d/d_0 の毎秒ごとにおける接線方程式を導出する．
2. 1 で導出した接線方程式から x 切片を抽出する．
3. x 切片と接線方程式を導出した時刻との差を予想時間とする．

以下の図 22 に Flightradar24 のデータを用いて解析したものを示す．

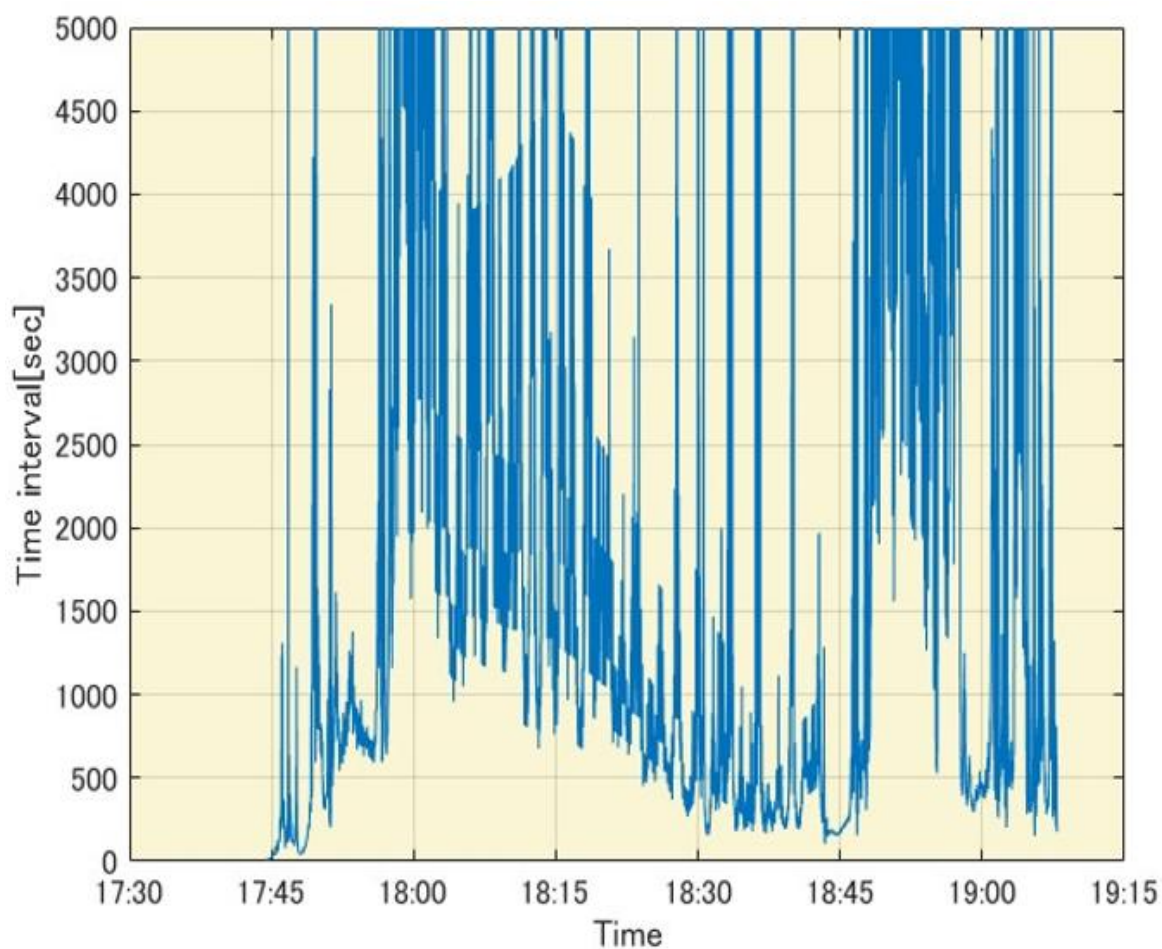


図 26 水平距離が 0 になるまでの予想時間

図 26 は、11 月 20 日の ADS-B データを解析したグラフであり、自機(JAL327)と他機(ANA265)の水平距離が 0 になるまでの時間を解析したものである。また、他機は自機の後方を追従して飛行していたことから、予想時間に大きな変動を示す時間帯がないことが読み取れる。

また、自機と他機の飛行方向は平行に近づくと、この予想時間は極めて大きな値をとる。

7.4 水平距離と機首方位の関係



図 27 自機と他機の機首方位の変化履歴(2024/11/20)

図 27 は、自機(JAL327 便)と他機(ANA265 便)の機首方位(Heading)の時間履歴を示したものである。自機の機首方位は、巡航中においてほとんど変化しないことがわかる。

また、他機の機首方位は 18:38:00 周辺で 30[deg]程度の変化を示しており、18:46:00 ごろには、機首方位を巡航の機首方位の変化前に戻していることがわかる。この機首方位を操作した時間帯における間隔指標の図 24 の d/d_0 (magenta)に着目すると、 d/d_0 は、増加傾向にあることがわかる。 d/d_0 は 18:38:00 辺りまで減少傾向にあったことからわかるように、他機は、機首方位を操作し、自機とある程度の水平距離を確保したのではないかと考えられる。

第8章 結論

8.1 まとめ

本研究では、ADS-B 信号を機上で取得し、ADS-B データを基に自機と他機の接近度合いを保護領域と間隔指標を用いて事後解析を行った。また、Flightradar24 の ADS-B データでも解析を行うことで、機上取得との誤差比較を行った。間隔指標が逆三角形のような概形であれば、他機と上空ですれ違っている飛行状況で、間隔指標の値が数十分に掛けてあまり変化していなければ、他機と並行している機体であることがわかる。このように間隔指標の概形から他機との飛行状況を把握することができた。

自機と水平距離が少しずつ減少している機体が存在すれば、いずれかの機体が機首方位 (Heading) を変化させ、十分な水平距離を確保しなおしているということが解析から読み取ることができた。Flightradar24 では、機首方位を示すデータを取得することはできないが、MATLAB のようなツールを用いれば、機首方位のほかに上昇・降下率 (Vertical rate) などの様々な情報を得ることができる。

現在では、自機と他機の距離および高度差の確保・維持は、管制官のみによってなされているが、間隔指標を用いて他機との接近度合いをコックピット上で表示することができれば、仮に他機が自機の保護領域内に進入した場合でも操縦士の判断により、安全な距離を確保するための操作が可能となり、安全性の向上につながると考えられる。

また、日本航空機駿河湾上空ニアミス事故⁽⁴⁾のようなヒューマンエラーが発生した場合の対応策になり得ると考えられる。

8.2 今後の課題

Radarcapex の使用について、MATLAB による ADS-B の長時間取得はデータとして表示される時刻が信号取得時の時刻ではなく、ツールで読み込んだメッセージの変換後の時刻であったため、実際に取得されたであろう時刻との差が明白に確認された。この課題は、GPS 同期クロックを統合した Radarcapex を使用すれば解決すると思われるが、機上での使用も幾度か試行する必要がある。

また、機上監視システムの実現に向けて、ADS-B 信号の受信精度が、座席の受信位置による影響を著しく受けることを確認したので、1090[MHz]の周波数を安定して受信し続けるシステムと環境をオンボードで整えることが重要であると考ええる。

参考文献

- (1) 国土交通省, 国土交通省航空局: 空中衝突防止装置(TCAS)について
<https://www.mlit.go.jp/common/001516096.pdf>
- (2) 井上岳, 黒田優佳, 森井達也: 放送型自動位置情報伝達・監視データによる滑走路安全区域の評価手法とその試行, 国土交通省, 国土技術政策総合研究所, No.1129.2020.10
- (3) 国土交通省, 将来の航空交通システムに関する研究会: 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(2010)
- (4) 国土交通省, 航空・鉄道事故調査委員会, 航空事故調査報告書(2002.7.12), 2002-5-JA8904
- (5) 国土交通省, 運輸安全委員会(航空部会), 令和6年1月2日発生 海上保安庁所属ボンバルディア式 DHC-8-315 型 JA722 及び 日本航空株式会社所属エアバス式 A350-941 型 JA13XJ の航空事故 (2024,12,25)
<https://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/detail2.php?id=2376>
- (6) 白川昌之, “航空機衝突防止装置(ACAS)の技術動向とモード S 拡張型スキッタについて, 電子航法研究所”, 1995
- (7) 外務省, 国際民間航空機関(ICAO),
https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page22_000755.html
- (8) 国土交通省, 航空局, “SSR モード S システムの概要及び運用状況”
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/koukuu_musen/pdf/070614_1_s2.pdf
- (9) 国土交通省, 参考資料, 監視: ADS-B out, DAPs.
<https://www.mlit.go.jp/common/000048410.pdf>
- (10) Flightradar24. <https://www.flightradar24.com/>
- (11) Junzi Sun. ADS-B Decoding Guide, Release 0.3. (2017/1/30)
- (12) 福田豊, 白川昌之, 小瀬木滋, “航空機衝突防止装置の衝突回避アルゴリズムの改訂の影響について”, 電子航法研究所報告, No.78,1993.9
- (13) 小塚智之, 宮沢与和, ナヴィンダ キトマル ビクラマシンハ, マーク ブラウン, 福田豊, “監視データを用いた航空機の干渉回避指示推定”, 航空宇宙技術, Vol.14, pp.77-83, 2015.
- (14) 森亮太, “洋上における航空機の管制間隔とその安全性評価”, REAJ 誌, 2017, Vol.39, No.4 (通巻 236 号)
- (15) 国土交通省, 航空局, “7 次空整における整備システム”, 12.RVSM, (2002/5/17)
https://www.mlit.go.jp/singikai/koutusin/koku/hoan/2/images/sankou1_3.pdf

- (16) 日本国法令(1952.7.31), 航空法施行規則第 174 条. 官報, 運輸省令第 56 号, pp401-402.

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心且つご丁寧に指導していただいた指導教員の原田明徳准教授，岡宏一教授，様々な知識を教えていただいた研究室の先輩方，同期に心から感謝いたします。最後に，大学生活を支援し続けてくれた家族に心より感謝いたします。