

17. ターミナル空域評価手法におけるふたつのアプローチ

航空交通管理領域 ※木村 章、福田 豊、蔭山 康太

1. はじめに

羽田空港再拡張等に伴い、航空交通量の増大とそれに伴う空港周辺空域の高密度・複雑化が想定される。また、航空交通システムは容量増大とともに運航効率向上など社会及び航空関係者の多様な期待に対応することが求められている。空域・経路・管制方式等の検討及び設定は、運用の極めて専門的な知識や経験則等に基づいて進められるが、その過程においてデータに基づく客観的評価や関係者による具体的な（あるいは数値的な）改善目標の共有を図ることが有効である。特に大都市圏周辺の空域は空港整備に伴う交通の集中・輻輳が予想され、その最適化に向けた評価手法の充実が望まれる。

以上を背景に、ターミナル空域評価手法に関する研究では、上昇降下が輻輳する空域の運用改善に資する客観的評価手法を研究している。

将来の航空交通管理システムは、TRAJECTORY(4D) based operations と呼ばれるトラジェクトリの水平・垂直・時間軸の計画・予測・制御向上により改善が図られようとしている。ここでは時間要素及び垂直要素に着目した評価に関連する手法を紹介する。

2. 時間要素へのアプローチ

2.1 羽田到着機の滞留時間計測

一般的に、航空機運航において遅延が発生しやすく時間予測が不確実な局面のひとつが混雑空港への到着フェーズである。巡航高度からの降下から進入許可が発出されるまでの間には順序・間隔付けのための飛行延伸が発生する。本研究では到着フェーズでの飛行延伸による遅延を滞留時間と定義し 2008 年の羽田空港到着機データを対象に滞留時間を計測した。

この局面の評価は近年欧州でも実施され、ユーロコントロールが発行する ATM に関するパフォーマンス報告書 PRR2008 (Performance Review Report 2008) に、欧州主要空港における到着フェーズの飛行延伸に関する評価が掲載

されている[1] (図 1)。なお PRR2008 の評価手法と次に記述する当研究の評価手法は定義範囲及び測定手法の統一が図られたものではない。

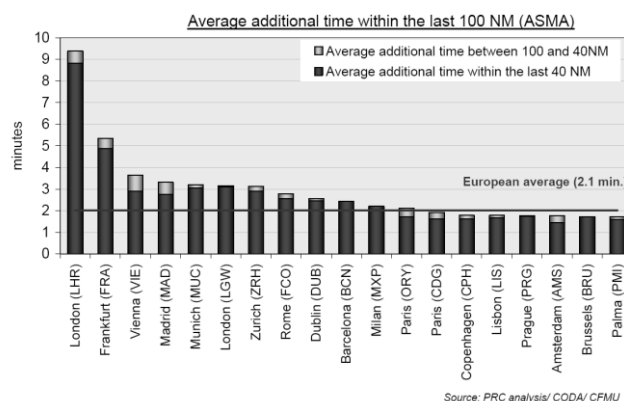


図 1: 欧州での飛行延伸評価（最終 100nm の平均追加通過時間:PRR2008 抜粋）

2.2 到着フェーズ飛行距離・時間の測定

計測範囲とする到着フェーズは、巡航高度からの降下地点及びその付近から発生するエンルートにおけるレーダー誘導を包含できるよう、150nm の範囲と定義した。具体的には、各航空機が空港標点から半径 150nm の円内に入域した地点から滑走路進入端直近の着陸判定点までの飛行距離及び飛行時間を測定した。また、管制移管点を境としてその飛行をエンルート、ターミナル（空域）に分類した。

計測には、2008 年 2/4/6/8/10/12 月の 39 日分羽田到着機（早朝深夜帯到着機、近隣空港から、及び洋上を經由した到着機等を除く）、15,400 機の RDP (Radar Data Processing) システムデータ及び FDPS (Flight Data Processing System) データを使用した。

計測範囲概念図 (図 2) 及びデータ解析から得た飛行距離・時間の統計結果を示す (表 1)。なお今回の計測にあたっては、通常の順序・間隔付けによる飛行延伸のみならず、悪天や滑走路閉鎖等による空中待機、着陸復行後の飛行等、通常時の混雑以外に起因する事例も結果として含まれている。

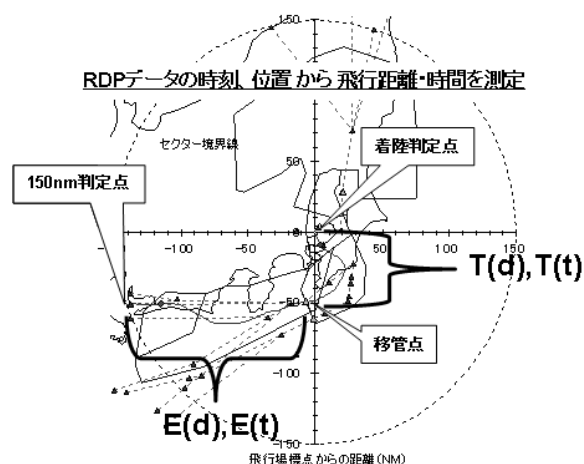


図 2: 計測範囲概念図

表 1: レーダーデータによる飛行距離・時間

全データ	エンルート 距離nm E(d)	エンルート 時間h:m E(t)	ターミナル 距離nm T(d)	ターミナル 時間h:m T(t)
平均値	130	0:16	73	0:17
最大値	287	0:47	233	0:50
最小値	72	0:09	38	0:08
標準偏差	15	0:02	19	0:04
機数	15400	15400	15400	15400

移管点別			着陸滑走路							
			RWY34		RWY16		RWY22			
SPENS	E(d)	E(t)	T(d)	T(t)	T(d)	T(t)	T(d)	T(t)		
平均値	136	0:16	68	0:16	90	0:20	101	0:23		
最大値	245	0:35	191	0:40	196	0:47	187	0:49		
最小値	72	0:09	42	0:10	44	0:08	67	0:15		
標準偏差	13	0:02	17	0:03	19	0:04	18	0:04		
機数	10320	10320	7845	7845	1762	1762	713	713		
PERRY	E(d)	E(t)	T(d)	T(t)	T(d)	T(t)	T(d)	T(t)		
平均値	112	0:13	82	0:18	98	0:22	113	0:25		
最大値	287	0:47	152	0:32	165	0:36	233	0:50		
最小値	82	0:10	62	0:12	74	0:16	84	0:18		
標準偏差	16	0:02	15	0:03	15	0:03	20	0:04		
機数	1125	1125	791	791	233	233	101	101		
TLE	E(d)	E(t)	T(d)	T(t)	T(d)	T(t)	T(d)	T(t)		
平均値	119	0:17	66	0:16	64	0:16	65	0:18		
最大値	230	0:39	168	0:42	156	0:34	171	0:39		
最小値	114	0:13	40	0:10	39	0:09	38	0:10		
標準偏差	8	0:01	11	0:02	16	0:04	23	0:05		
機数	3955	3955	2856	2856	789	789	310	310		

2.3 計画（想定）経路と標準距離・時間の定義

滞留を算出するために、到着機がレーダー誘導を受けず公示経路上を飛行した場合の到着フェーズの計画（想定）経路とその距離・所要時間を設定する必要がある。

エンルートの計画（想定）経路は、AIC（Aeronautical Information Circular）で公示された推奨飛行計画経路とし 150nm 地点から管制移管点までの距離を算出し標準距離とした。そして各到着機について FDPS データの計画経路を参照し合致する AIC 推奨経路を判定した。航空機が AIC 経路をファイルしていない場合は最も経路に近い AIC 推奨経路を割り当てた。

ターミナルの計画（想定）経路は、各管制移管点と各着陸滑走路の組み合わせ毎に一律の想

定経路を設定し、その距離を標準距離とした。その理由は、経路を構成する標準到着経路、計器進入方式及び着陸滑走路がもともと飛行計画に明示されないこと、また到着機は管制移管点通過後進入開始に向けてレーダー誘導により一列に配列されるためである。各想定経路は装備要件に関わらず RNAV 標準到着経路と代表的な計器進入方式の組み合わせとした。そして RDP データを参照し、通過した管制移管点と着陸滑走路を判定し想定経路を割り当てた。

一方、計画（想定）経路の所要時間は、航空機型式、巡航高度、さらに年間を通じては季節風の影響を受けるため同一経路であっても到着機毎に異なる（エンルートでは影響が大きく、通過高度が低高度でかつある程度一定化されたターミナルでは時間差は生じにくい）。ここでは、エンルート、ターミナルの経路パターン毎に、算出した標準距離と同一の飛行距離が測定された飛行データを抽出し、その平均所要時間をもって当該計画（想定）経路の標準時間とした。経路パターン毎の標準距離・時間を示す(表 2)。

表 2: 計画(想定)経路の標準距離・時間

エンルート標準値の設定					
移管点	経路パターン	AIC推奨の飛行計画経路	150nm-移管点 経路距離 (nm)	一致データ 平均 所要時間	
TLE	N1	V22 TLE Y10 TLE	117	0:17:13	
	N2	V32 GOC V22/Y10 TLE	120	0:17:39	
	N3	GTC R21 GOC V22/Y10 TLE	141	0:20:38	
	N4	HISUI Y31 LAPIS R211 GOC Y10 TLE	172	0:21:58	
SPENS	W1	RJNK /// KCCV59 LHE V17 WESTN	175	0:23:29	
	W2	G597 XAC V17/Y211 WESTN	133	0:15:53	
		V71 XAC V17/Y211 WESTN			
		V17 XAC V17 WESTN			
	W3	Y291 SHTLE Y29 LHE V17 WESTN	138	0:17:46	
	W4	Y29 LHIE V17 WESTN	135	0:16:28	
PERRY	W5	Y23 WOLA V21 XAC V211 WESTN	117	0:14:23	
	W6	Y21 XAC Y211 WESTN	113	0:13:52	
		A1 SAKIT W28 SPENS V17 WESTN			
	S1	Y52 SAKAK Y521 XAC Y211 WESTN	113	0:13:45	
	S2	W28 SAKIT V18 OTAKI	107	0:12:45	
	S2	Y573 NJC Y523 PERRY Y231 ORGAN V18 OTAKI	107	0:12:45	
ターミナル標準値の設定					
移管点	RWY	想定経路（航空路、標準到着経路、計器進入方式）	移管点-RWY 経路距離 (nm)	一致データ 平均 所要時間	
TLE	RWY34	KOITO N . RNAV ARRIVAL+ILS34L	67	0:17:07	
	RWY16	JONAN N . RNAV ARRIVAL+VOR16L	54	0:14:25	
	RWY22	KASAI N . RNAV ARRIVAL+ILS22	54	0:16:06	
SPENS	RWY34	Y211+KOITO S. NR1 RNAV ARRIVAL+ILS34L	59	0:14:11	
	RWY16	Y211+JONAN S. NR1 RNAV ARRIVAL+VOR16L	71	0:16:37	
	RWY22	Y211+KASAI S. NR1 RNAV ARRIVAL+ILS22	83	0:18:54	
PERRY	RWY34	V18+KOITO S. NR2 RNAV ARRIVAL+ILS34L	89	0:18:59	
	RWY16	V18+JONAN S. NR2 RNAV ARRIVAL+VOR16L	95	0:21:40	
	RWY22	V18+KASAI S. NR2 RNAV ARRIVAL+ILS22	106	0:23:21	

2.4 滞留時間のまとめと考察

RDP データ解析による飛行時間と計画（想定）経路の標準時間とを比較し、エンルートとターミナルを合算した滞留時間について示す(表 3)。

表 3： 滞留時間の分類と割合

滞留時間のまとめ 五分法						三分法			RWY	
<= 0:00	<= 0:10	<= 0:15	<= 0:20	> 0:20	COUNT	<= 0:00	<= 0:10	> 0:10		
200802d1	119	232	45	2	0	398	30%	58%	12%	34
200802d2	176	249	5	1	0	431	41%	58%	1%	34
200802d3	136	259	38	2	0	435	31%	60%	9%	34
200802d4	180	233	19	1	0	433	42%	54%	5%	34
200802d5	188	242	3	1	1	435	43%	56%	1%	34
200804d1	118	287	26	3	0	434	27%	66%	7%	34
200804d2	125	165	19	0	0	309	40%	53%	6%	34/16
200804d3	114	270	38	11	0	433	26%	62%	11%	34/16
200804d4	92	232	26	5	0	355	26%	65%	9%	22/34
200804d5	186	231	13	1	0	431	43%	54%	3%	34/16/22/34
200804d6	194	243	0	0	0	437	44%	56%	0%	34/16/34
200804d7	178	257	1	0	0	436	41%	59%	0%	34/16/34
200806d1	157	249	22	2	0	430	37%	58%	6%	34
200806d2	31	125	9	1	0	166	19%	75%	6%	???/16/22
200806d3	214	210	8	0	0	432	50%	49%	2%	34
200806d4	227	190	10	1	0	428	53%	44%	3%	34
200806d5	210	219	5	0	0	434	48%	50%	1%	34/16/34
200806d6	136	274	16	1	0	427	32%	64%	4%	34/16/22
200806d7	51	110	21	18	16	216	24%	51%	25%	22/34/22/34
200808d1	103	65	0	0	0	168	61%	39%	0%	34/16/???
200808d2	169	207	3	0	0	379	45%	55%	1%	34/16/34
200808d3	135	192	3	0	0	330	41%	58%	1%	34/16/34
200808d4	56	85	17	1	0	159	35%	53%	11%	34/16/34
200808d5	258	172	8	0	0	438	59%	39%	2%	34
200808d6	229	204	5	0	0	438	52%	47%	1%	34
200810d1	123	281	28	2	0	434	28%	65%	7%	34
200810d2	77	199	60	39	10	385	20%	52%	28%	34/16/34/22
200810d3	207	223	4	0	1	435	48%	51%	1%	34
200810d4	237	181	9	3	2	432	55%	42%	3%	34/16/22/34
200810d5	113	240	55	20	6	434	26%	55%	19%	22/16/22/34
200810d6	214	225	0	0	0	439	49%	51%	0%	34
200810d7	111	283	32	6	0	432	26%	66%	9%	34/16/22/34/22/34
200812d1	103	291	21	7	3	425	24%	68%	7%	22/34
200812d2	187	226	13	6	2	434	43%	52%	5%	34/16/34
200812d3	257	172	7	0	1	437	59%	39%	2%	34
200812d4	91	281	40	11	4	427	21%	66%	13%	34/16/22/34
200812d5	142	209	18	12	17	398	36%	53%	12%	34
200812d6	203	220	11	0	1	435	47%	51%	3%	34/16/34
200812d7	145	283	13	0	0	441	33%	64%	3%	34

<= 0:00	<= 0:10	<= 0:15	<= 0:20	> 0:20	COUNT	<= 0:00	<= 0:10	> 0:10	
200802	799	1215	110	7	1	2132	37%	57%	6%
200804	1007	1685	123	20	0	2835	36%	59%	5%
200806	1026	1377	91	23	16	2533	41%	54%	5%
200808	950	925	36	1	0	1912	50%	48%	2%
200810	1082	1632	188	70	19	2991	36%	55%	9%
200812	1128	1682	123	36	28	2997	38%	56%	6%
2008	5992	8516	671	157	64	15400	38.9%	55.3%	5.8%

各行は日毎（上段）、月毎、年間（下段）の滞留時間の結果を示す。各列は、「計画経路より短縮されたか滞留がなかった（<=0:00）」「10分以内の滞留（<=0:10）」「10分を超え15分以内の滞留（<=0:15）」など五分法での機数と割合（上段は機数のみ）、総機数、そして滞留時間三分法の場合の割合、当日の着陸滑走路（上段のみ）を示す。その結果、年間を通じた滞留の平均時間は約2分、標準偏差は約5分であった。滞留時間五分法の場合の分布割合を示す（図3）。

到着機の滞留時間をパフォーマンス指標として考察する。パフォーマンス評価についてICAOのATM運用概念[2]は、ユーザーの期待に対しシステムがどれほど提供可能か認識することが重要と述べている。到着機の滞留は、滑走路の容量、空域の対応能力及びこれらを勘案した交通流制御方式の結果として現れる事象である。測定手法の改善がさらに必要だとしても、期待に対するパフォーマンスの回答例のひとつとして滞留時間の測定値は指標候補と言える。

例えば運航者からは飛行効率が期待される。この場合、年間の飛行延伸がどうであったか、パフォーマンスの回答として距離や時間の総数あるいは平均値を使用できるだろう。PRR2008がその例である。一方、最終ユーザーたる利用者は遅延の可能性やその幅の予測性を期待する。これに対しては、その偏差や許容滞留時間閾値を設けて遅延割合を示す方法が適するだろう。

また、我が国の航空交通流管理（ATFM）システムはターミナル空域が対応可能な滞留時間をパラメータ（システムではスペーシングタイムと呼ぶ）設定して到着機の交通流制御を実施している。このパラメータと実際の滞留時間を比較検証することで、システムの妥当性確認や運用の目標値設定など、運用評価の一環として用いることもできるだろう。

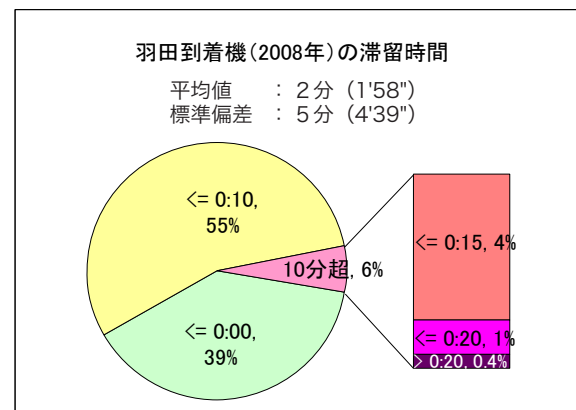


図 3： 滞留時間計測のまとめ

3. 垂直要素へのアプローチ

3.1 空域立体構造の視覚化

TRAJECTORY(4D) based operationsにおいて垂直面もまた、現状認識、予測及び管理の向上が必要な要素である。垂直面の運用改善に向けては、第一に空域とトラジェクトリの立体構造を、容易に利用可能なツールにより視覚化し、関係者が認識を共有できる環境が必要だろう。例えば、チャート類、レーダー表示等は一般的に平面地図上に高度を数字で示し垂直面を表わすが、関係者の空域認識の共有を図るうえでは立体構造の理解が容易な別の表現手法の利用が効果的である。

よって、幅広い関係者の空域認識を支援することを目的とし、Google社が提供するバーチャ

ル地球儀ソフト Google Earth をはじめ一般に利用可能なツールを利用した空域構造の視覚化について調査試行した。対象が一般利用可能なソフトウェアであることから、ここでは描画に至る使用方法、作成過程の解説を省略し、描画例を中心に紹介する。

3.2 空域とトラジェクトリの描画

進入管制区やセクター等空域の立体構造を 3D オブジェクトとして作成し Google Earth 上に描画する。空域描画に必要な地点、高度の情報は公示されており、地点の緯度経度を XY 座標値に変換しモデルを作成する（図 4）。

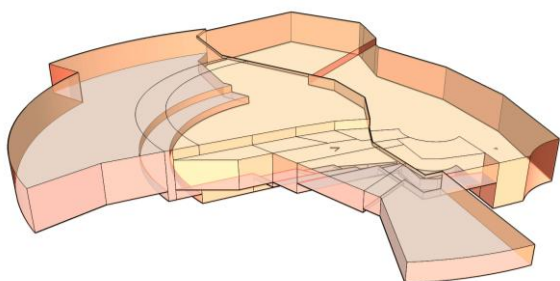


図 4：東京進入管制区モデル

また、トラジェクトリ表現として 3D 航跡を Google Earth 上に描画する。3D 航跡の作成は、RDP 等のレーダーデータや各種シミュレーションから出力されたデータを利用する。シミュレーションデータは例えば、当研究所のファストタイムシミュレーション、ATC リアルタイムシミュレーションから入手することもできるが、ここでは市販のフライトシミュレーションを用いた航跡の描画例を示す（図 5、6）。市販フラ

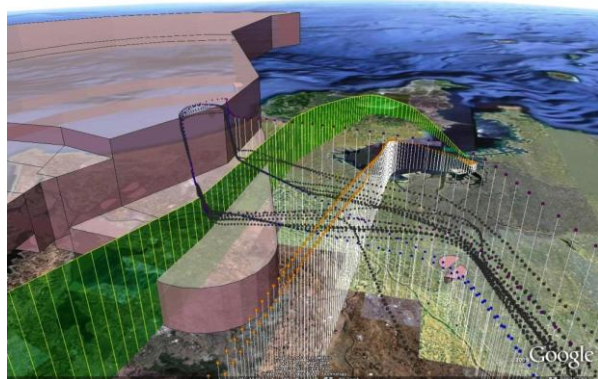


図 5：オブジェクト化した旧成田進入管制区、出発方式の高度制限と、レーダー、シミュレーション航跡を Google Earth 上に描画

イトシミュレーションは、各種のアドオン、連携するソフトウェアを利用することにより、実際の経路や仮想経路の創作が容易である。航空機性能モデルに高度な精度を要しない利用目的（例えば空域構成、運用方法の可視化や教育用、広報用デジタルコンテンツ）においてはこれらシミュレーションデータの活用が便利である。

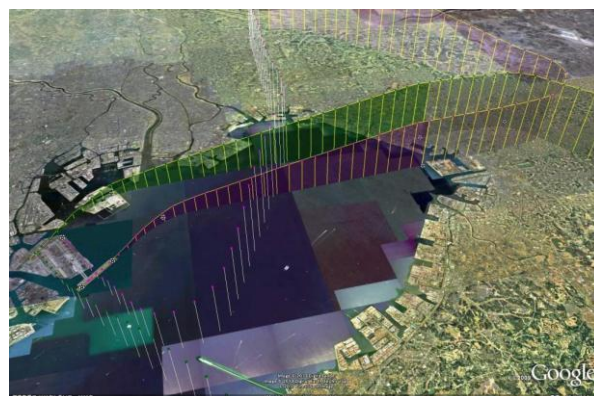


図 6：フライトシミュレーションで作成した仮想の進入方式の航跡（公開された情報に基づき創作した方式であって、航空局による設計ではないことに留意）

4. まとめ

上昇降下が輻輳する空域の運用改善に資する評価手法研究の一環として時間要素と垂直要素の観点から手法例を示した。

時間要素として 2008 年データから羽田到着機の滞留時間を測定し、パフォーマンス指標としての可能性を考察した。

垂直要素として、一般に利用可能なツールを利用した立体空域構造の視覚化を試行した。デジタルコンテンツを比較的容易に作成できることから、様々な用途での視覚的資料としての可能性がある。

参考

- [1] EUROCONTROL □Performance Review Report 2008□ Chapter6: Operational Performance at main airports, Figure 72: Average additional time within the last 100 NM
- [2] ICAO Doc 9854 □Global Air Traffic Management Operational Concept□