

GAST-Dによる低視程時の滑走路運用の改善効果

航法システム領域 吉原 貴之, ※齊藤 真二, 藤井 直樹
航空交通管理領域 青山 久枝

1 はじめに

GBAS (Ground-based Augmentation System) は, GNSS (Global Navigation Satellite System) 衛星の L1 信号を用いた狭域ディファレンシャル方式により, 航空機の精密進入をサポートする航法システムである。従来の ILS (Instrument Landing System) は, 進入滑走路に対して, 決められた場所に設置する必要があるローカライザー (LOC; Localizer) 及びグライドスロープ (GS; Glide Slope) アンテナから送信される電波で経路を生成して航空機を誘導する。そのため, 各アンテナから送信される電波を保護する領域 (CSA; Critical and Sensitive Area; 以下, 制限区域という) が設定される。この領域が滑走路面や誘導路面と重なることから, 航空機の滑走路運用に影響を与える場合がある。

GBAS 進入では, これとは大きく異なり, 2.1 節で述べるように, 地上装置は空港内等に設置された 4 式の基準局が GNSS 衛星信号を受信することにより, 測位補正や衛星故障に関する補強情報を生成し, 進入経路情報を付加して補強信号として VDB (VHF Data Broadcast) アンテナから放送する。機上装置は地上装置からの信号と機上で受信した GNSS 信号により, 航空機の測位計算を行い進入経路からの偏差を出力する。そのため, GBAS では VDB 電波の進入経路に対応した覆域要件を満たせば, 一式で複数の滑走路に複数の進入経路を提供できるとともに, ILS ほど強い設置要件の制約や, 制限区域を設定する必要もない。

GBAS の国際標準は, 国際民間航空機関 (ICAO; International Civil Aviation Organization) が標準及び勧告方式 (SARPs : Standards and Recommended Practices) に定めている[1]。精密進入方式では, 決心高や滑走路視距離の最小値から大きく 3 つのカテゴリー (CAT-I, II, III) に分けられている。CAT-I 運航では, これらの最小値がそれぞれ 60m, 550m である[2]。CAT-I

GBAS SARPs は 2001 年 11 月に発効したが, その後, 明らかになった補強情報の信頼性に対する電離圏リスクの対策や電波干渉 (RFI; Radio Frequency Interference) の検証に時間を要すこととなり, SARPs 発効から 10 年以上経過した 2012 年 2 月にドイツのブレーメン空港に初めて導入された。また, CAT-I より, 視程条件が厳しくても低い高度まで誘導可能な高カテゴリー運航と呼ばれる CAT-II, III 運航をサポートする L1 信号を用いる GBAS 地上装置の SARPs については 2018 年 11 月に発効している。

このように, 国際的には CAT-I GBAS が運用を開始してから 10 年以上経過しているが, これまで ILS 運航と同等な運用がなされてきた。CAT-III GBAS に関しては, 対応する機上装置の供給がなされていない現状がある。GBAS の普及には, GBAS の利点を活かして, 従来の ILS 運航では困難であった運航の実現することが望まれている。

本発表では, GBAS は ILS のような制限区域を滑走路面や誘導路面に設定する必要がない利点に着目して, ILS と GBAS について低視程時の高カテゴリー運航について比較し, GBAS の導入効果について報告する。

2 GBAS について

2.1 GBAS の概要

GBAS は地上型補強システムと呼ばれ, 図 1 に示される 4 つの基準局と, 衛星毎に測距信号に含まれる誤差を計算し残留誤差の見積りや GNSS 衛星故障等の信号異常の有無といった情報を付加して, 補強情報を生成する信号処理装置から構成され, この補強情報は進入経路情報等とともに VDB アンテナから放送される。

GBAS では, 地上装置, 機上装置, それについての進入誘導サービス能力を GAST (GBAS Approach Service Type) というサービスタイプで定義している。具体的には, CAT-I は GAST-C, CAT-II, III は GAST-D となる。

GAST-D 運航では、GAST-C 運航の安全性要件を包含する。したがって、GAST-D 地上装置は GAST-C 及び D に対応した GBAS メッセージを放送する。また、地上装置、機上装置で対応可能なサービスタイプが異なる時は、利用可能なサービスタイプは低い方が適用される。例えば、地上装置が GAST-D 対応でも、機上装置が GAST-C 対応であれば利用可能なサービスタイプは GAST-C となる。なお、航法システムとしての GAST-D は CAT-III 精密進入までサポートできるが、実際に運用される進入カテゴリーは空港設備等の諸条件を含めて決定される。

2.2 GBAS 運航の利点

現在、CAT-I GBAS が運用されている比較的大きな空港としては、米国ではニューアーク空港、サンフランシスコ空港、オーストラリアではシドニー空港、メルボルン空港、ドイツではフランクフルト空港等が挙げられる。また、日本でも、東京国際空港で 2020 年 7 月からトライアルが実施されている。国際的にもこれまで、ILS 運航をトレースする運航が行われてきたが、今後は GBAS の利点を活かして、従来の ILS 運航では困難であった運航を実現することが望まれている。そのため、電子航法研究所では令和 4 年度から GBAS を活用して空域・空港の制約、航空機の飛行特性や環境への配慮を踏まえて安全かつ効率的な進入着陸を実現することを目的とした以下の項目を含む研究課題を開始した [3]。

- GBAS で一つの進入方向に対して複数進入経路を設定した運用と経路設計における安

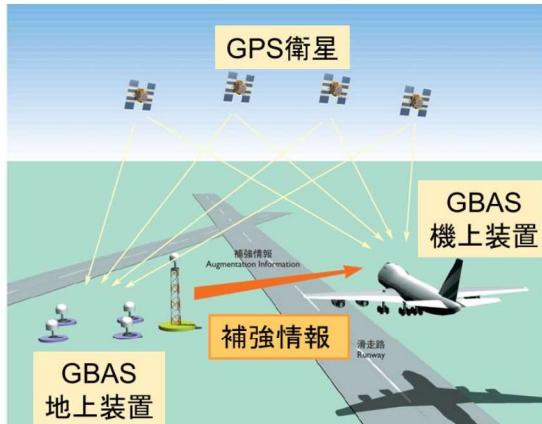


図 1 GBAS 概念図

全性評価手法

- 進入着陸でのパイロット支援ツール開発

- 低視程時の滑走路処理機数の改善評価

本研究では、3 つ目の項目について低視程時の ILS、GBAS のそれぞれについて高カテゴリー運航時の滑走路処理機数の違いを比較することで GBAS 運航の導入効果の評価を行った。

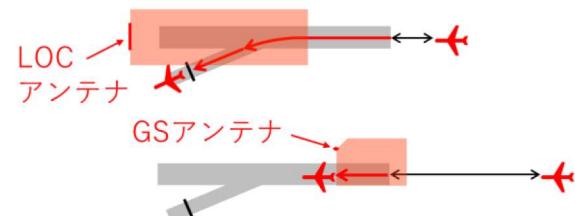
内容としては、高カテゴリー ILS 運航時、滑走路面、誘導路面に ILS 電波を保護する制限区域が必要となることから、一般に、到着機の先行機との間隔が通常よりも大きくなるために単位時間あたりの滑走路処理機数が低下するが、GBAS では、このような制限区域の設定が不要であることから、滑走路処理機数の低下を抑制する改善効果についての評価を行った。

3 低視程時の滑走路運用

3.1 低視程時の高カテゴリー ILS 運航

図 2 に、低視程時の ILS 制限区域と滑走路運用についての概念図を示す。LOC アンテナ、GS アンテナの前面に、それぞれ薄赤色の制限区域が存在し、滑走路面、誘導路面にも及んでいる。同図は後続機が到着機の場合について示したもので、上段 (a) は先行機が到着機の場合、下段 (b) は先行機が出発機の場合を示している。管制方式基準[4]では、前述の CAT-I 運航における雲高、滑走路視距離のどちらかが最小値（すなわち、それぞれ 60m、550m）以下

(a) 到着機連続



(b) 出発機／到着機

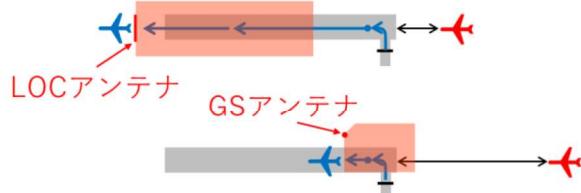


図 2 低視程時の ILS 制限区域と滑走路運用

となった場合には、以下のように CAT-II/III ILS 制限区域に対して航空機等の侵入から保護することを規定している。

- LOC 制限区域：到着機がミドルマーカーまたはこれに相当する DME フィックスを通過した後
- GS 制限区域：到着機が滑走路進入端から 4NM の地点を通過した後

そのため、図2のように ILS を使用する到着機（以下、ILS 到着機という）の先行機が到着機、出発機のそれぞれの場合について、先行機との間隔は LOC, GS 制限区域を保護するために必要な間隔のうち長い方を確保する必要がある。結果として、CAT-II/III ILS 運航では通常よりも単位時間あたりの滑走路処理機数が減少する。

3.2 GAST-D による滑走路運用の効率化

欧州では低視程時における滑走路運用についてそれぞれ ILS のような制限区域を必要としない、あるいは大幅に縮小できる CAT-II, III GBAS や MLS (Microwave Landing System) 運航による到着機に対する新たな滑走路の運用概念、および、それによりもたらされる効果について検討し、ICAO EUR Doc 13 としてまとめている[5]。その検討例では、到着機が連続する場合において、先行する到着機の滑走路離脱に関わる滑走路停止位置は、ILS 制限区域の他に OFZ (Obstacle Free Zone) と呼ばれる保護要件が関連し、後続機が ILS 制限区域を必要としない GLS 到着機の場合にはこの OFZ の保護要件で滑走路停止位置が決まる。このとき、滑走路使用が想定される翼幅が最大となる航空機に合わせて一律に滑走路中心線からの距離で停止位置を設定するのではなく、先行機の型式が属する翼幅のグループ（コード文字 A～F）に応じて、後続する GLS 到着機に着陸許可を与えるための LCL (Landing Clearance Line) を設定することで、両者の間隔が短縮可能となる場合が生じる。このような滑走路運用には、先進型地上走行誘導管制システム (A-SMGCS; Advanced Surface Movement Guidance and Control System) を高度化して、先行機に応じた LCL を航空管制官に示すとともに、先行する到着機が確実に LCL の外側に到達したことを確認するための航空機の位置表示が必要である。

また、この低視程時の滑走路運用概念では ILS 到着機に対する着陸許可を現在の滑走路進入端から 2NM 手前であるところを 0.6NM まで短縮した運用が想定されること等が述べられている。

この滑走路運用概念を参照して、フランスのシャルルドゴール空港を対象とした低視程時の CAT-III GBAS 導入効果の事例検討がなされている[6]。この検討では、GBAS 非搭載機 (ILS 到着機) との混在を考慮した場合、GBAS 搭載機の割合が 90%にならないと空港容量の改善は難しいと結論づけている。一方、ドイツのフランクフルト空港でも CAT-II GBAS 導入効果の計算機シミュレーションによる定性的評価がなされている。このシミュレーション解析は同空港の着陸専用滑走路 (RWY25R) を対象に実施された。この滑走路の交通流の特徴としては、1 日のうちに 4 つの到着機数のピーク時間があるが、GBAS 搭載率が 60%以上でこの変化に対応できると結論付けている[7]。なお、前者の検討では ILS 機、GLS 機の混在への対応として英国ヒースロー空港で導入されている時間ベースの後方乱気流管制間隔 (TBS; Time-based Separation) で使用されているような航空機毎に管制間隔の目印を航空管制官に与える管制支援システムの必要性を指摘している。TBS に関しては、国際的にも混雑空港への導入検討が進められており、中長期的な視点からもこのような新しい管制支援システムを使用した滑走路運用の方向性も考えられる。

4 航空機間隔短縮効果の試算

4.1 滑走路停止位置

本研究では、前述の ICAO EUR Doc 13 の滑走路運用概念を参照して、成田国際空港を対象とした低視程時の GAST-D 導入効果を検討する。成田国際空港は、低視程時には A 滑走路 (RWY16R) を用いた出発機、到着機が混在した滑走路運用になり、走行できる誘導路も限られる。現在の低視程時の取付誘導路、高速離脱誘導路の停止位置標識はそれぞれ、滑走路中心線から 120m, 128m 離れた位置にある。ICAO EUR Doc 13 の滑走路運用概念では、到着機に進入許可を与える LCL について、A380 の運航を想定するか否かで異なり、滑走路進入端から

進入方向に 900m までの LCL については衝突リスクの関係から LCL までの距離をそれぞれ滑走路中心線から 107.5m, 90m としている。これらは取付誘導路上の出発機の停止位置に関する。また、進入方向に 900m を超えた地点では LCL はそれぞれ 77.5m, 60m と設定されているが、これらは高速離脱誘導路等に適用されると考えられる。

本研究では、以下の理由から航空機間隔短縮効果の試算については取付誘導路を考慮せず、高速離脱誘導路のみについて停止位置の違いを考慮した解析を行うこととした。

- 滑走路進入端付近の取付誘導路は出発機が使用するものであるが、出発機については先行機が出発機、到着機のいずれの場合も滑走路での待機時間が存在すると考えられることから、ILS 制限区域が不要となることで生じる滑走路寄りとなった停止位置から滑走路の出発待機場所までの走行時間の短縮効果は考慮しない
- 到着機は全て高速離脱誘導路から離脱するものとして到着機の進入と反対側の滑走路末端付近の取付誘導路の停止位置の違いも考慮しない

また、前述のフランクフルト空港を対象とした検討例[8]では保守的に滑走路進入端での LCL を滑走路と平行に全ての誘導路に適用しているが、本研究でも同様に取り扱うこととした。すなわち、現行の高速離脱誘導路の停止位置標識のある 128m について、A380 については 107.5m、それ以外の航空機については 90m に短縮することとし、今回は後者の A380 以外の航空機の場合について試算を行うこととした。

4.2 到着機、出発機に関わるセグメント毎の時間見積と航空機間隔の計算

航空機間隔短縮効果の試算にあたっては、先行研究[8,9]に記載された空港の発着容量の算出方法を参考した。これら先行研究では、到着機、出発機について以下のようにそれぞれ L1～L3、T1～T3 のセグメントに分けてそれらに要する時間を算出して 1 機あたりの処理時間を算出している。

- 到着機の L1～L3 の定義[8]

- L1：着陸許可を受けた後、滑走路進入端の 1NM 手前の地点から滑走路進入端までにかかる時間
- L2：滑走路進入端通過時点から、滑走路の縁を通過するまでにかかる時間
- L3：滑走路の縁を通過してから、停止線（誘導路上の地点）を通過するまでの時間

● 出発機の T1～T3 の定義[8]

- T1：滑走路上で待機している航空機に離陸許可が下りてから、それを受けた航空機が動き始めるまでの時間（レスポンスタイム）
- T2：航空機が動き始めてから離陸するまで、あるいは、滑走路 1NM 地点を通過するまでの時間
- T3：離陸あるいは 1NM 地点通過から上空で 2NM 進んだ地点までの時間

本研究では、後続機が ILS 到着機、GLS 到着機のそれぞれの場合について対応するセグメントの時間を加算して航空機間隔を算出した。

図 3 は後続機が ILS 到着機となる場合について示しているが、LOC 制限区域、GS 制限区域によって必要となる航空機間隔をそれぞれ計算して大きい方を採用することとした。ここで、 $L_{3\text{LOC}}$ 、 $T_{3\text{LOC}}$ はそれぞれ、到着機の L3、出発機の T3 に対応するセグメントのうち、LOC 制

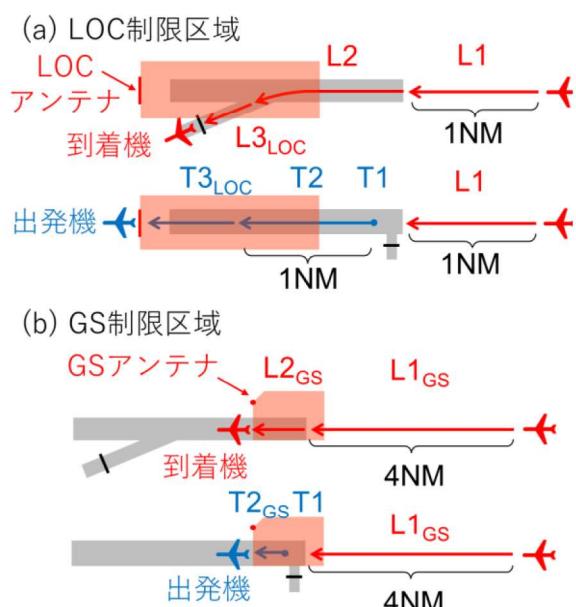


図 3 後続機が ILS 到着機の時間間隔

限区域外に出るために必要な時間を示す。同様に、 L_{2GS} 、 T_{2GS} は GS 制限区域を出るのに要する時間である。図 4 には、後続機が GLS 到着機となる場合を示す。これらの場合についてそれぞれ、先行機と後続機の航空機間隔を算出するためには、セグメント毎の時間を数値化する必要がある。そこで、本研究ではセグメント毎の時間を表 1 のように算出し、航空機間隔の試算に用いた。表中の低視程時の実測値として記載しているのは、2020年1月8日に低視程条件の時間帯での到着機 24 便の航跡から平均値を算出したものである。

4.3 航空機間隔の試算と短縮効果

表 1 の各セグメントの時間から図 3、図 4 に対応する航空機間隔を算出できるが、例えば、後続機が GLS 到着機で先行機が出発機の組合せでは、 $T_1 + T_2 + T_{3GS} + L_1$ で航空機間隔 108 秒と計算される。ここで、 T_{3GS} を考慮するのは、低視程条件下であることから音声による離陸確認に時間を要すると考えたためである。今後、後段の処理で成田国際空港に就航する航空機型式の割合を反映して後方乱気流管制間隔と合わせた実効的な航空機間隔を導出して計算機シミュレーションを行い、時間当たりの滑走路処理機数等の滑走路運用指標を用いた評価を行う予定である。そのため、図 3、図 4 に記載されていない後続機が出発機である場合の時間間隔も算出することとした。これについて、後続機が出発機で先行機も出発機の場合には先行研究[8]と同様に $T_1 + T_2 + T_3$ で算出した。一方、先行機が到着機の場合は低視程条件下で LCL を確実に通過している必要があることから $L_1 + L_2 + L_{3GS}$ で算出した。これらを含めた試算結果を表 2 に示す。この結果から、後続機が GLS 到着機の場合、ILS 到着機と比べて先行機

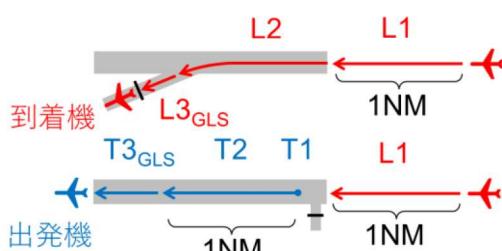


図 4 後続機が GLS 到着機の時間間隔

表 1 低視程時の航空機間隔試算に用いた数値

	時間	数値
到着機	L_1	30秒(固定値) [8]
	L_{1GS}	99秒(対地速度75m/sとして4NMの飛行時間)
	L_2	78秒(低視程時の実測値:2020年1月8日、高速離脱誘導路A7)
	L_{2GS}	5秒(対地速度75m/sとしてGS制限区域外に出るために要する飛行時間)
	L_{3LOC}	30秒(低視程時の実測値:2020年1月8日、高速離脱誘導路A7)
	L_{3GS}	21秒(L_{3LOC} をLCLまでの距離で比例計算)
出発機	T_1	15秒(固定値) [8]
	T_2	37秒(低視程時の1NM地点通過の実測値:2020年1月8日)
	T_{2GS}	7秒(T_2 をGS制限区域外までの距離で比例計算)
	T_3	45秒(固定値) [8]、後続が出発機で適用
	T_{3LOC}	33秒(T_3 からLOCまでの距離で比例計算)
	T_{3GS}	26秒(T_3 から滑走路末端までの距離で比例計算)

表 2 低視程時の航空機間隔の試算結果

	先行機	後続機	間隔(秒)
低視程	出発機	ILS到着	121
		GLS到着	108
	到着機	ILS到着	138
		GLS到着	129
到着機	出発	129	
	出発	97	

が出発機、到着機についてそれぞれ 13 秒程度、9 秒程度の時間間隔が短縮される可能性が示された。

5まとめと今後の課題

本研究では、GBAS の利点として低視程時の滑走路の ILS 制限区域の保護が不要である利点に着目し、GAST-D による滑走路運用の効率化について定量評価を行うことを目的として、ILS 到着機と GLS 到着機について航空機間隔の試算を行った。成田国際空港を対象として効果を試算するため、到着機、出発機の各組み合わ

せについてセグメント毎の時間から航空機間隔の短縮時間を試算した。その結果、後続機がGLS 到着機の場合、ILS 到着機と比べて先行機が出発機、到着機についてそれぞれ 13 秒程度、9 秒程度の時間間隔が短縮される可能性が示された。今後の課題としては、航空機の型式毎の航空機速度、滑走路上の加減速効果を考慮してセグメント移動時間を詳細化するとともに、後方乱気流管制間隔を考慮した航空機間隔とした上で、成田国際空港に就航する航空機型式の割合を考慮して出発機及び到着機順序を与えるシナリオ作成と、それに基づく計算機シミュレーションによる時間当たりの滑走路処理機数等の滑走路運用指標を用いた評価を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、航跡データのご提供等、ご協力を賜りました国土交通省航空局交通管制部の関係各位に感謝申し上げます。また、成田国際空港の検討にあたり、ご協力を賜りました成田国際空港株式会社の関係各位に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] ICAO SARPs, Annex 10 Aeronautical Telecommunications, Volume I: Radio Navigation Aids, 8th Edition, July 2023.
- [2] ICAO Doc 9365, Manual of All-Weather Operations, Fourth Edition, 2017.
- [3] 吉原貴之、齊藤真二、森亮太、藤井直樹、青山久枝, “GBAS を活用した柔軟な進入経路の設定と滑走路運用の高度化,” 第 60 回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2022-5138, 2022 年 10 月.
- [4] 航空保安業務処理規程 第 5 管制業務処理規程, 国土交通省航空局, 2020 年 11 月.
- [5] ICAO EUR Doc 013, “European Guidance Material on All Weather Operations at Aerodromes, Fifth Edition, September 2016.
- [6] P. Ladoux, “GBAS@Paris CDG study,” 18th International GBAS Working Group (IGWG/18), April 27, 2017.
- [7] O. Weber, GLS CAT II with ISGS at Frankfurt (DFS), IGWG/21, Brussels, September 2022.
- [8] 北河涉、泊尚志、荒谷太郎, “首都圏空港機能強化検討調査～成田国際空港について～（第 35 回運輸政策研究所研究報告会）”, 「運輸政策研究」, Vol. 17, No. 2, pp. 75-80, 2014 年 7 月.
- [9] 北河涉、泊尚志, “「首都圏空港機能強化検討調査～成田国際空港について～」（第 35 回研究報告会報告）の補遺”, Vol.18 No.2, pp.80-85, 2015 年 7 月.