

7. 基準局での信号受信と GBAS への着陸機の影響

航法システム領域 ※齊藤 真二

1 はじめに

国際民間航空機関 (ICAO ; International Civil Aviation Organization) では、航空交通流の増大に対応しつつ、安全性・定時性を向上させるため、全ての運航フェーズにおいて、GPSをはじめとする航法衛星 (GNSS ; Global Navigation Satellite System) による航法システムの構築を進めている。GPS を航空機の航法に利用するためには、十分な安全性を確保するための補強システムが必要となる。地上型衛星航法補強システム (GBAS ; Ground-Based Augmentation System) は、補強システムの一つであり、空港内に設置した基準局で取得した GPS 信号から擬似距離補正値を生成し、着陸進入経路等と併せて補強情報として、VHF 帯の電波で放送する DGPS を基本としたシステムである。

基準局においてより多くの GPS 衛星を捕捉し、かつ低雑音の信号を取得するため、基準局の設置位置の選定には、ターミナルビルや格納庫等の建造物によるマルチパスや遮蔽等の影響を考慮する必要がある。米国の GBAS 地上システムの設置基準では、基準局アンテナ周辺の 155m 以内に固定物件の設置は許容されず、仰角 3 度以上が見渡せることが推奨されている[1]。この条件を満足する設置位置は、滑走路近傍の開けた敷地である。しかし、GPS 信号受信に離着陸する航空機の影響を受け易く、十分に広い敷地がある欧州や米国でも上空通過機の影響が報告されている[2,3]。GBAS 地上システムの設置環境条件を評価するために新千歳空港に設置した評価用 GBAS (以下、新千歳 GBAS) は、実用 GBAS 機材と同じ GPS 受信機と受信アンテナを採用し、離着陸する航空機の影響を評価可能としており、基準局は滑走路末端付近の敷地に設置された[4]。

本稿では、新千歳 GBAS での約 10 カ月の受信データから、GBAS 基準局で受信される GPS 信号の着陸機による影響について示し、GBAS

への影響を分析した結果を報告する。

2 GBAS について

2.1 GBAS の構成

GBAS は、GPS 衛星・地上システム・機上システムからなる。地上システムは、基準局装置・データ処理装置・VHF データ放送 (VDB ; VHF Data Broadcast) 送信装置等で構成される。基準局装置は 4 式の GPS 受信アンテナと GPS 受信機からなり、L1 C/A コード擬似距離・L1 搬送波・航法メッセージをデータ処理装置に出力する。データ処理装置では、モニタによる異常検知と補強情報の生成が行われ、VDB 送信装置より航空機に対して放送される。

補強情報には、DGPS 測位に利用される擬似距離補正値、航空機の誘導のための着陸進入経路に加え、安全性を保証するインテグリティ情報が含まれる。擬似距離補正値は、4 式あるいは 3 式の基準局 GPS 受信機で同時に捕捉している衛星 (共通衛星) について生成され、誤差を低減させるために擬似距離を搬送波位相で平滑化するフィルタ (キャリアスムージングフィルタ) が採用されている。インテグリティ情報には、擬似距離補正値の誤差の標準偏差を表す σ_{pr_gnd} 、基準局受信機毎の擬似距離補正値の誤差の予測値を表す B 値が含まれる。

機上システムは、受信した補強情報に含まれ

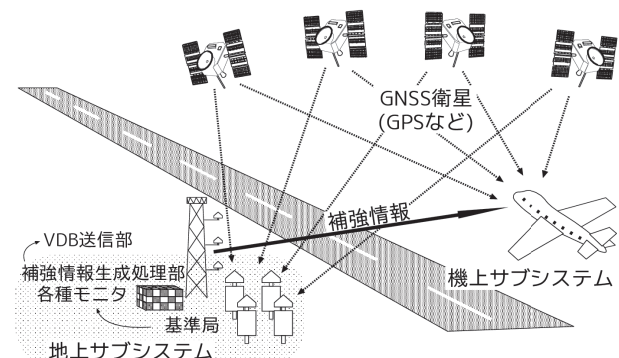


図 1: GBAS の概要

る擬似距離補正值を用いて DGPS 測位を行い、着陸進入経路からの水平・垂直方向の偏位を計算する。さらに、安全性要求を満足させるためインテグリティ情報を用いた警報機能を持つ。機上システムでの警報動作は、保護レベルと警報限界の比較により行われる。保護レベルは、測位誤差推定値の信頼限界を示し、補強情報に含まれるインテグリティ情報、測位に使用した衛星位置から計算される。保護レベルが警報限界を超えた場合には、偏位計算値は無効であり、通常はポイントが消失して警報状態がパイロットに示される。

2.2 基準局の設置条件

基準局の設置条件は、マルチパスの独立性から各基準局を 100m 以上隔離することである[1]。建物などからの鏡面反射については、相関器の特性で 155m の隔離でマルチパスを排除できる。さらに、航空機の影響を避けるため滑走路中心線から一定の隔離が必要とされる[5]。また、PPD（個人用保護デバイス）などの電波干渉源が存在する場合には隔離が必要である[6]。

2.3 新千歳 GBAS の概要

航空機による GPS 信号の受信の影響を評価するため、意図的に新千歳空港の滑走路中心線付近に GBAS 基準局を設置した。これは、GBAS 設置の滑走路中心線からの隔離距離を検討するためである。GBAS 基準局の設置候補地が少ない空港では、滑走路末端付近のローカライザー

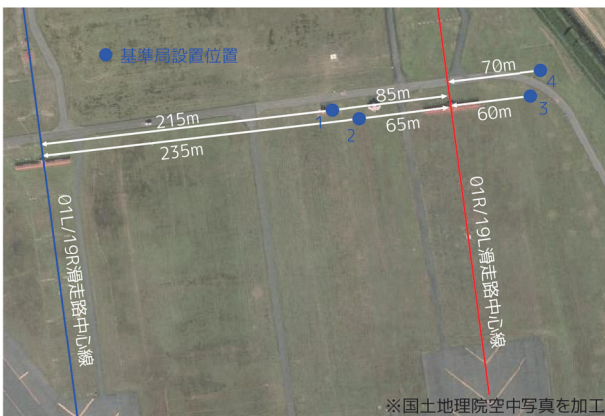


図 2: 新千歳 GBAS の基準局配置

アンテナ付近に敷地がある場合が多い。このため、新千歳空港においても、滑走路 01R 進入用のローカライザーアンテナ周囲に GBAS 基準局を配置した。図 2 は、GBAS 基準局(4 局)と滑走路中心線の位置を示す。ローカライザーアンテナは、滑走路進入末端 (19L) から 200m ほど離れた、空港敷地北側に設置される。GBAS 基準局の滑走路中心線からの距離は、65~85m である。

3 着陸機による影響

3.1 信号強度変動

新千歳 GBAS 基準局位置から目視により、着陸機胴体、垂直尾翼、主翼による GPS 信号の遮蔽、回折の発生が予測できる。ただし、機種によりサイズや形状が異なり、進入パスも一定ではない。そこで、着陸機通過時刻を基準局周辺で撮影された画像情報により特定し、撮影時刻の基準局受信機記録データを抽出した。撮影では GPS 衛星の軌道情報 (アルマナック) から方位角・仰角を概算し画像合成する携帯端末用アプリケーション (GNSS View) を利用した。着陸機の通過時刻は、撮影時刻 (ファイル名に付される UNIX 時刻) とした。

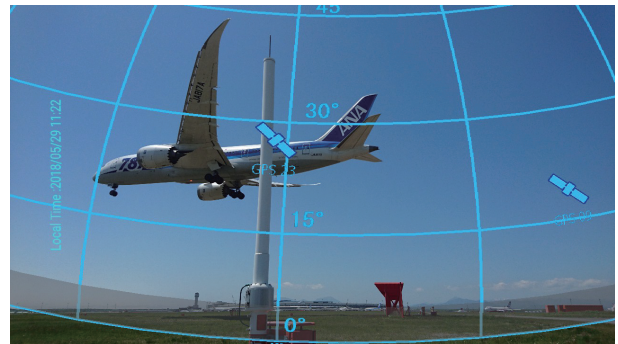


図 3: 3 番基準局から見た着陸機 (B787)

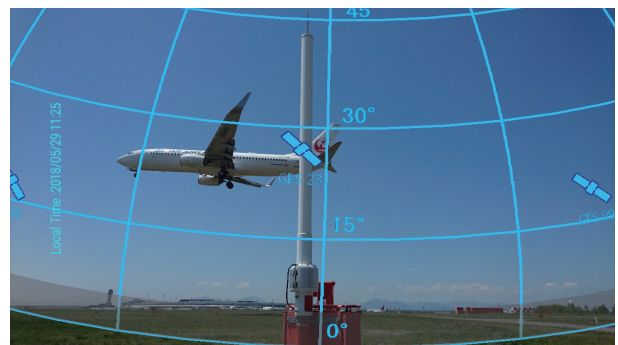


図 4: 3 番基準局から見た着陸機 (B737)

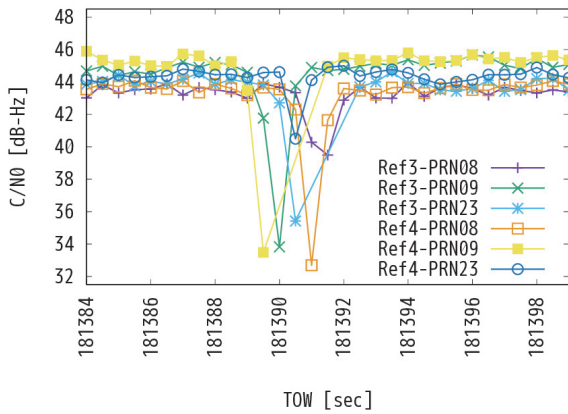


図 5: 受信信号強度の変動

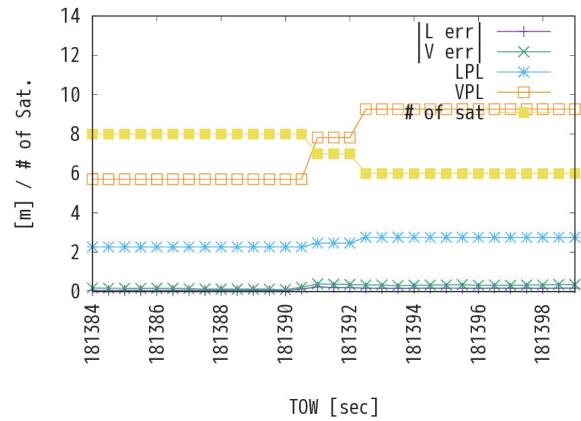


図 7: 測位誤差, プロテクションレベル
および使用衛星数

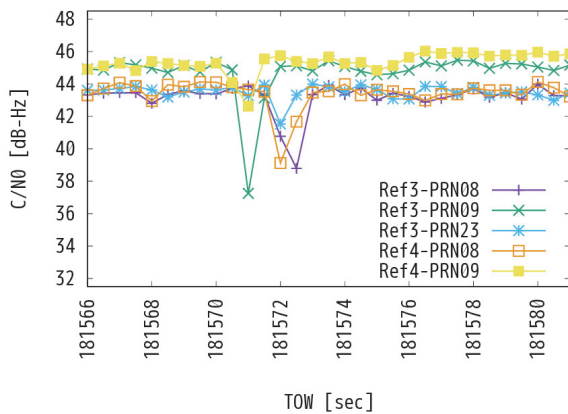


図 6: 受信信号強度の変動

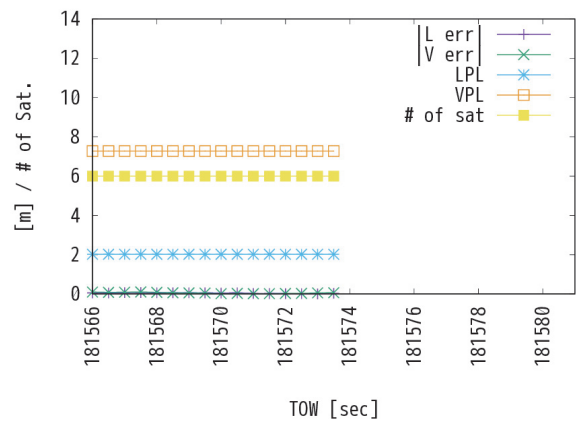


図 8: 測位誤差, プロテクションレベル
および測位誤差

図 3, 4 に基準局 3 から撮影した画像を示す。基準局 3 は滑走路中心線から最も近く (60 m), 着陸機の通過により衛星方向の視界が遮られる。撮影時に遮られた衛星は, PRN09, 23, 08 であった。

図 3, 4 画像撮影時に対応する衛星受信信号強度 (C/N0) を図 5, 6 に示す。着陸機の通過時刻において, GPS 衛星の受信信号強度が 2~10 dB 程低下することが確認された。TOW (Time of Week) は週の開始からの時刻 (GPS 週秒) を意味する。

3.2 測位への影響

GBAS 基準局での受信信号強度の低下は, 航空機側が水平・垂直偏位を計算する過程で行う GBAS 測位の中断や誤差増加につながる。そこで, 空港内に設置したアンテナ位置が既知である固定の擬似ユーザ局で航空機と同様の GBAS

演算を行い, 測位誤差と保護レベル (LPL, VPL) を計算し, 着陸機の影響を検討した。

図 7, 8 は, 図 5, 6 と同一時刻の測位誤差 (水平・垂直), 保護レベル (水平・垂直), 使用衛星数を示す。図 7 から, 着陸機の通過時刻以降には, 使用可能衛星数が減少し, 測位誤差と保護レベルが増加することがわかる。図 8 から, TOW:181574 秒において, 測位の中断が確認された。これは垂直・水平偏位計算の中断 (ポイントの消失) を意味する。この原因は, 着陸機の通過によって, 基準局受信機内で複数の衛星の受信信号強度が低下し, 追尾ループが信号補足を失敗 (ロックロス) して, 搬送波平滑化フィルタをリセットし, 測位使用可能衛星が 4 衛星未満となったためである。

3.3 測位中断の発生回数・月変動

擬似ユーザ局での測位の中断について、約1年間の収集データから発生回数と継続時間の統計量を示す。使用データは、2017年12月～2018年11月である。ただし、2018年4、5月は欠損が確認されたため除外した。

統計処理では、着陸機が基準局に影響し擬似ユーザ局で測位が中断する現象を以下の条件で抽出した。

- (1) 擬似ユーザ局で10秒以上測位が中断する。
- (2) 測位中断の直前に基準局（1，2）または（3，4）でGPS信号強度モニタ，または過剰加速度モニタで，同じPRN番号の衛星排除が生じる。
- (3) 排除された衛星が基準局を中心として滑走路中心線の方位にある。

測位中断が発生した時間帯と発生回数を図9に示す。測位中断は、15時に頻度が高く、航空機の運航が少ない深夜から早朝時間帯は発生していない。10ヶ月間での測位中断は61回、7078秒である。図10に測位中断の継続時間と発生回数の関係を示す。中断継続時間の平均値は116秒，最大値は325秒，最頻値は200秒であった。200秒は搬送波平滑化フィルタをリセット後，開始するまでの待ち時間であり，中断継続時間の最頻値が200秒となるのはこのためである。

図11は、月別の測位中断の発生回数（4，5月は処理から除外）である。中断の発生回数は6～8月に多く、12～3月は少ない。新千歳空港においては、夏期に南東風，冬期に北西風が卓越するため，着陸に利用する滑走路方位の頻度が異なる。このため，基準局の近傍に着陸する航空機の通過数に影響する。

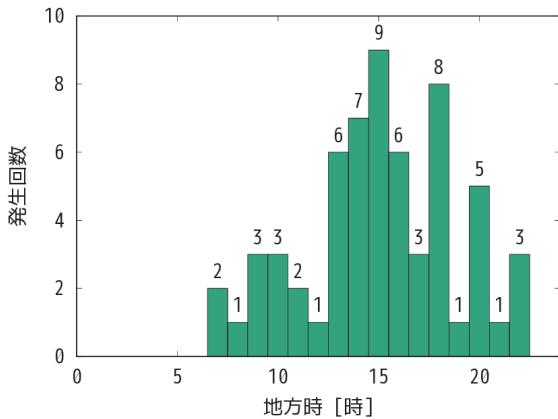


図9: 測位中断の発生時間帯と発生回数

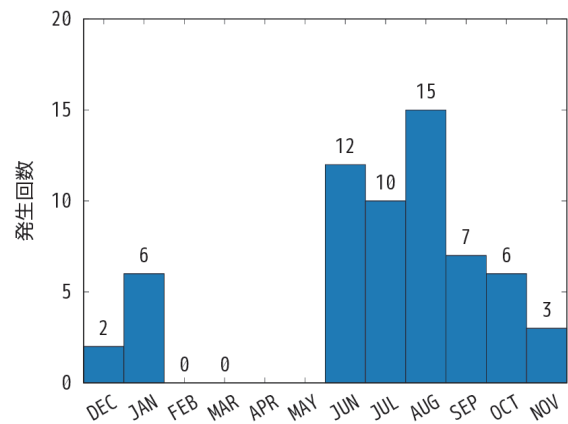


図11: 測位中断の月毎の発生回数

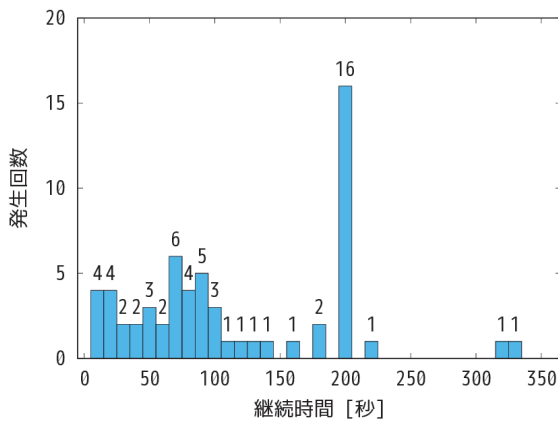


図10: 測位中断の継続時間と発生回数

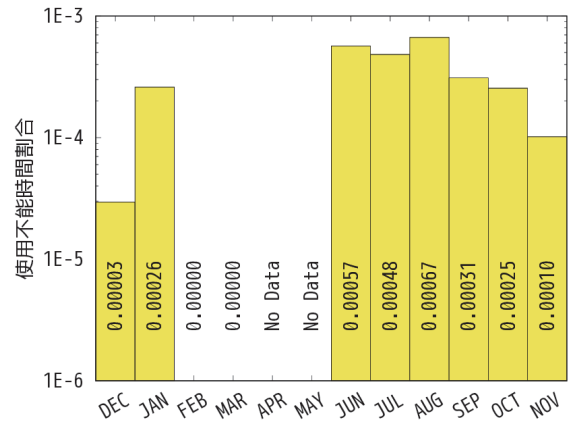


図12: 月毎の測位不能時間割合

3.4 測位中断の時間割合

図12は、擬似ユーザ局において、運用時間中に測位不可となった時間の割合を示す。これは、GBASが常時(24時間)運用されるとして、着陸機の通過により測位が中断する時間の割合とも言える。10ヶ月間では、304日(26,265,600秒)で7,078秒間の中断があり、0.027%(7,078/26,265,600)となった。最も測位不可の割合が高い8月でも、0.067%である。

ただし、ICAO国際標準では、GBASのアベイラビリティ(利用できる時間の割合)を99~99.999%以上としている[7]。平均・8月の測位不能割合は、99.973%・99.933%となり、この範囲に含まれる。しかし、アベイラビリティの低下には他の要因もあることから、これらは無視できる割合ではない。

3.5 受信点の位置と着陸機の影響の関係

滑走路中心線からのGPS基準局の距離とGPS受信信号への影響の関係性を計算機シミュレーションで検討した。着陸機は3度パスで新千歳空港19Lに進入すると仮定し、時刻と機種はCARATSオープンデータから2018年5月29日(図3、4の撮影日)を利用した[8]。GPS衛星の方向は、同日の衛星軌道情報(エフェメリス)から、24時間分を計算する。GPS信号を受信する基準局位置は、滑走路中心線から±600m、滑走路進入端から0~600mの範囲で変化させる。着陸機の影響は、GPS信号の電波伝搬から第1フレネルゾーンが着陸機により遮られた場合に影響すると判定した。搬送波平滑化処理の時定数は100秒とし、開始までの待ち時間(200秒)は衛星を測位に利用しない。

図13は、シミュレーションの結果であり、基準局位置と着陸機がGPS受信信号に影響を与える回数を示す。横軸はGBAS基準局の滑走路進入端からの距離、縦軸は滑走路中心線からの距離である。GBAS基準局を滑走路中心線や滑走路末端に近くに設置するほど発生回数は多く、特に±50mに設置した場合に頻度が高い。また滑走路中心線からの距離に応じて発し頻度は低下する。図14は、同様に基準局位置と測位に利用する衛星数が6機以下となる割合を示す。図

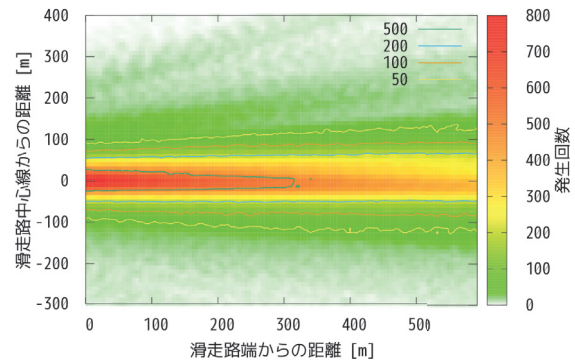


図13: 着陸機によるGPS信号受信への影響の発生回数

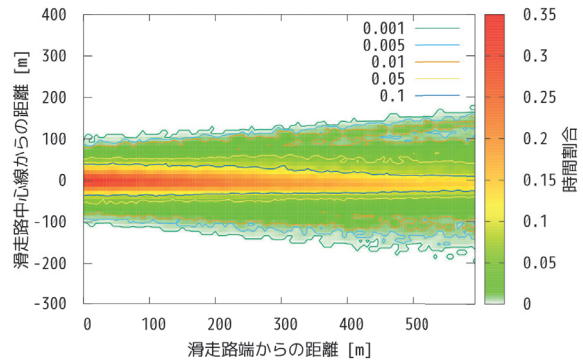


図14: 捕捉衛星数が6機以下となる割合

から99%以上の時間に6機以下とならないためには、GBAS基準局を滑走路中心線から、少なくとも100m離隔する必要があることが分かる。

4 まとめ

GBAS基準局の設置位置と着陸機によるGPS受信信号への影響を検討した。新千歳空港に設置したGBAS基準局での写真撮影と収集したGPS受信データから、着陸機がGPS信号に影響する事例を示した。着陸機通過時のGPS受信データを分析した結果、以下が確認された。

- GPS信号強度の低下
- 測位に利用する衛星数の減少(ロックロス)
- ユーザ側でのGBAS測位誤差, 保護レベルの増加
- 測位の中断

次に10ヶ月間のGPS受信データから、測位中断を計数し、7,078秒間の発生を把握した。この割合は0.027%であり、アベイラビリティでは99.973%に相当する。最後に計算機シミュレーションによりGPS基準局位置と着陸機による影響を検討し、滑走路中心線から±100m以上離隔すれば、測位に利用する衛星数が6機以下となる割合を1%に抑制できることがわかった。

今後は、さらに詳細なデータ分析とシミュレーションを実施し、滑走路中心線付近にGBAS基準局を配置する場合の設置条件を明らかにしたい。

謝 辞

本稿で利用した千歳GBAS基準局でのGPS受信データは、国土交通省航空局技術管理センターから提供を受けた。ご協力頂いた技術管理センターおよび航空局新千歳空港事務所の関係各位に感謝致します。

参考文献

[1] FAA, "Siting Criteria for Ground Based Augmentation System (GBAS)," Order

6884.1, Dec. 2010.

[2] Morten Topland, "Impact of overflights at Frankfurt airport," 16th International GBAS Working Group, Atlantic City, Jun. 2015.

[3] Lukas Marti, Frank van Graas and Joseph Kelly, "Effects of Aircraft Overflights on GPS Measurement," Journal of the Institute of Navigation, Vol. 51, No. 2, pp.123-131, Summer 2004.

[4] 山崎 賢吾, "GBAS設置環境評価について," 航空無線, 第95号(春期), pp.63-69, Mar. 2018.

[5] 齊藤 真二, 福島 莊之介, "地上型衛星航法補強システムの基準局設置条件の検討," 第15回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.107-110, Jun. 2015.

[6] 福島 莊之介, 齊藤 真二, "PPD(個人用保護デバイス)の地上型衛星航法補強システムへの影響," 測位航法学会論文誌, Vol.6, No.1, pp.1-6, 2015.

[7] ICAO, "International Standards and Recommended Practices (SARPs)," Annex 10, Volume I, Seventh Edition, July 2018.

[8] 岡 恵, "CARATSオープンデータの概要," CARATSオープンデータ活用促進フォーラム, Dec. 2021.