

4. GBAS 海外展開のための電離圏環境評価

航法システム領域 ※齋藤 享, 吉原 貴之
ベトナム科学技術アカデミー地球物理研究所 Le Huy Minh
タイ・モンクット王工科大学ラカバン Pornchai Supnithi

1 はじめに

地上型衛星航法補強装置 (Ground-Based Augmentation System: GBAS)は GNSS を用いて航空機の精密着陸進入を実現する、次世代の航法システムの一つである。GBAS は、ディファレンシャル GNSS 技術に基づいた GNSS 補強システムであり、空港周辺に設置した基準局による補強情報を航空機に対して送信し、航空機はその補強情報に基づいて誤差を補正し、正確な位置を得て安全に着陸を行う。

GBAS の導入は欧米と豪州、ロシアを中心に進められており、カテゴリ I GBAS は既に、米国、ドイツ、スペイン、スイス、豪州及びロシアにおいて運用が行われている。さらに、カテゴリ III GBAS についても、2018 年に国際標準 [1]が発効している。しかし、後述する電離圏の影響のため、運用中の GBAS は磁気中緯度地域に限られている。(ここで「磁気中緯度」と述べた理由については後述する。)

日本を含む磁気低緯度地域においては、その特有の電離圏活動の影響により、安全性と可用性を両立させることが容易ではなく、インド、マレーシア等で運用に向けた GBAS が設置されているものの、運用開始には至っていない。しかしながら、ICAO アジア太平洋地域では、ICAO APAC GBAS/SBAS Implementation Task Force が設立されるなど、GBAS, SBAS 導入に向けた機運が高まっている。

この中で、日本では羽田空港に実用 GBAS が設置され、2021 年の磁気低緯度地域初の GBAS 運用開始に向けた運用評価が行われている。電子航法研究所は、羽田空港 GBAS における安全性評価を支援し、とりわけ日本付近の電離圏の環境評価に専門家として深く関わった [2]。

このように、日本は磁気低緯度地域における GBAS 実用化において世界に先駆けており、日本発の技術をもって、磁気低緯度地域における

GBAS 普及とそれによる安全かつ効率的な航空交通の実現に貢献できる立場にある。

本研究では、磁気低緯度地域において GBAS を導入する際に最も重要となる電離圏環境評価において必要な事項を解説するとともに、GBAS 導入のための実際の電離圏環境調査について、電子航法研究所がこれまでに海外研究機関と協力して行ってきた電離圏観測を例として紹介する。本研究では、現在実用化が進められているカテゴリ I GBAS を主に対象とする。

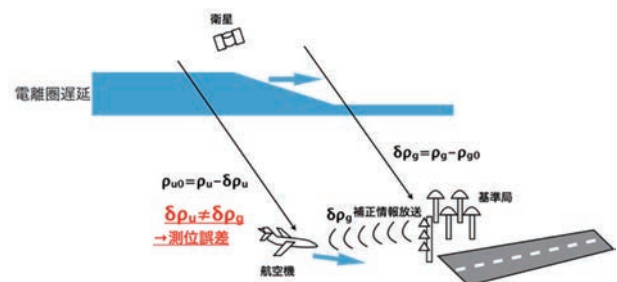


図1 GBAS の電離圏空間勾配による誤差

2 GBAS と電離圏

電離圏とは、高度約 60 km 付近から 1000 km 以上にかけて存在する、地球大気の一部電離した領域である。地球には磁場（地磁気）があり、荷電粒子の運動は磁場によって強く制限されるため、電離圏の密度分布その他の性質は地磁気の影響を強く受ける。そのため、電離圏の性質を議論する際には地理緯度ではなく地球磁場と関連づけられた磁気緯度が用いられる。地磁気の向きが水平となる場所を磁気赤道という。

電離大気中を GNSS 電波が通過する際には、屈折率が真空中とは異なることから電波伝播に遅れが生じ（電離圏遅延と呼ぶ）、測距誤差を生じる。GBAS は電離圏遅延を含む誤差を、位置が既知の基準局の観測データを用いて補正するが、電離圏遅延量が空間的に変動する場合（電離圏勾配と呼ぶ）、補正誤差となる（図1）。

図2に示すように、電離圏遅延量分布は地理赤道ではなく磁気赤道に関連づけられた分布を取り、その他の性質も同様に磁気緯度に関連づけられるため、GBASに対する電離圏の影響の地域的な違いを考える場合には、磁気緯度が最も重要な指標となる。日本付近では、磁気緯度は地理緯度に対して約6度低い。

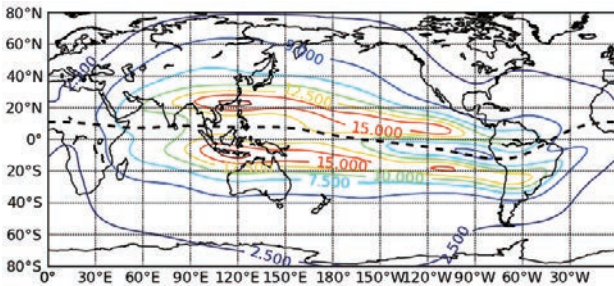


図2 日本時間12時の電離圏遅延量分布の例。破線は磁気赤道を表す。

2.1 GBASにおける電離圏の影響とその回避方法

電離圏勾配による誤差は通常、基準局と航空機の距離1kmあたり数mm程度(GPS L1周波数(1.57542GHz)における値)であり、航空機の位置誤差の保守的な見積り量である保護レベルに取り込むことによって保護される。

しかしながら、電離圏は必ずしも常に静穏な状態にあるわけではなく、様々な電離圏擾乱に伴い電離圏遅延量が通常状態の10~100倍程度変動する可能性がある。これらを保護レベルで保護しようとする場合、保護レベルが極端に大きくなり、ほぼ全ての時間帯でGBASが使用不可となってしまう。そのため、電離圏擾乱に伴う電離圏勾配については保護レベルで対応せず、異常状態として検出し、航空機が危険となる状態を排除することにより、安全性を確保する。これを実現するためには、電離圏擾乱に伴う電離圏勾配の特徴を知る必要があり、電離圏勾配の特徴を記述するパラメータの範囲を定義したものを電離圏脅威モデルと呼ぶ。

2.2 静穏時電離圏パラメータ

電離圏が擾乱状態になく、GBASにおける潜在誤差を保護レベルで対応する場合を考える。保護レベルは、複数の要素からなる測距誤差の

保守的な見積り量と、GNSS衛星の配置によって決まる係数の衛星ごとの積の和から求められる。衛星ごとの測距誤差の保守的な見積り量(σ)は、以下の式で与えられる[1]。

$$\sigma^2 = \sigma_{pr_gnd}^2 + \sigma_{tropo}^2 + \sigma_{pr_air}^2 + \sigma_{iono}^2 \quad (1)$$

ここで、 σ_{pr_gnd} は地上基準局のマルチパス誤差、 σ_{tropo} は対流圏遅延による誤差、 σ_{pr_air} は機上受信機のマルチパス誤差、そして σ_{iono} が電離圏勾配による誤差である。 σ_{iono} は、

$$\sigma_{iono} = F \cdot \sigma_{vig}(x_{air} + 2\tau v_{air}) \quad (2)$$

と表される。ここで、 F は電離圏を高度35kmに存在する薄い層と仮定した場合の垂直遅延量から斜め遅延量への換算係数、 x_{air} は航空機と地上基準局との距離、 v_{air} は航空機の速度、 τ はコード擬似距離を、位相擬似距離を用いて平滑化する時定数、そして σ_{vig} が静穏時の電離圏勾配誤差を特徴付けるパラメータである。

2.3 電離圏脅威モデル（電離圏擾乱時）

電離圏擾乱時の電離圏勾配は一般的に、図3に示すような楔状の電離圏遅延量空間変化としてモデル化される[1]。電離圏擾乱時の電離圏勾配による誤差(δ)は、式(2)と同様に

$$\delta = F \cdot g(x_{air} + 2\tau v_{air}) \quad (3)$$

として与えられる。すなわち勾配(g)が直接誤差の大きさに関連する重要なパラメータである。しかし、電離圏擾乱時には、航空機が危険な状態になりうる電離圏勾配を検出し排除するという監視機能（電離圏モニタ）が動作する必要がある。そのために、幅(w)、電離圏勾配の移動速度(v)も重要となる。また、深さ(d)は、最大の電離圏起因誤差の上限を定める。

従って、電離圏脅威モデルを定めるということは、これらのパラメータの値の範囲を調べることである。

電離圏の性質は磁気緯度によって大きく異なり、緯度領域ごとに特徴的な現象が存在するため、電離圏脅威モデルのパラメータの値も地域

によって異なる。そのため、電離圏脅威モデルは地域ごとに定める必要がある。表1は、カテゴリIII GBASの国際標準の策定過程において、国際標準案の検証のために用いられたものである[1]。これらは、中緯度のデータに基づいて構築された米国本土向けのモデル[3]を元に、磁気低緯度地域の電離圏勾配が中緯度地域よりも大きいであろうことを考慮して保守性を増したものである。しかし、その後の研究[4, 5]で、磁気低緯度の電離圏勾配はさらに大きく、磁気低緯度地域の電離圏脅威モデルは別個に評価が必要であることがわかっている。

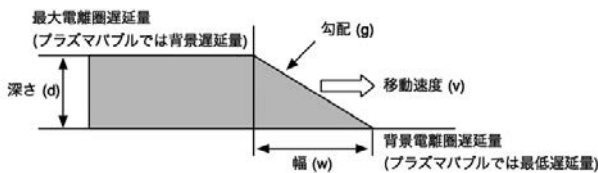


図3 電離圏勾配の形状モデル[1]。

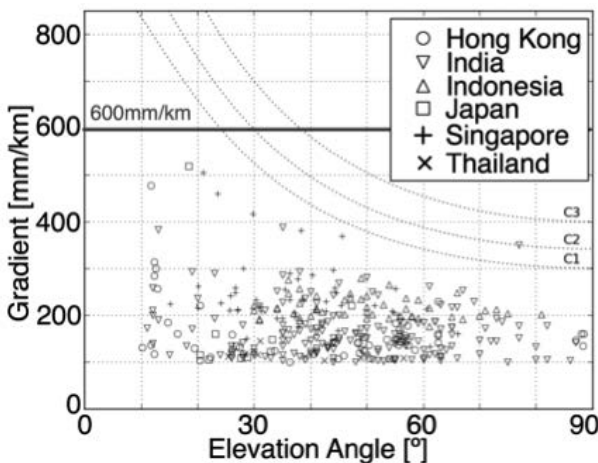


図4 アジア太平洋地域共通 GBAS 電離圏脅威モデル [6, 7]。

図4は、2012年から2016年にかけて、ICAOアジア太平洋地域電離圏問題検討タスクフォース(Ionospheric Studies Task Force: ISTF)が電離圏データ収集・共有を行った結果として策定された、アジア太平洋地域共通GBAS電離圏脅威モデルの勾配(g)を示す[6, 7]。アジア太平洋地域では、勾配(g)の上限は600 mm/kmであり、カテゴリIII GBAS国際標準の検証に用いられた上限値を超過していることがわかる。石垣島における観測においては、空間スケールの最小値についても範囲を逸脱し、10 km程度の

ものが存在することが分かっている[5]。

表1 カテゴリIII GBAS国際標準の検証に用いられた電離圏脅威モデル

パラメータ	値の範囲
幅 (w)	25–200 km
深さ (d)	0–80 m
移動速度 (v)	0–1500 m/s
勾配 (g)	移動速度に依存

移動速度 (v)	勾配最大値 (g)
$v < 750$ m/s	500 mm/km
$750 \leq v < 1500$ m/s	100 mm/km

3 GBAS導入と電離圏評価

GBASを導入し運用する際の電離圏環境の評価については、ICAOアジア太平洋地域ISTFによってまとめられている[8]。電離圏評価には大きく分けて、GBAS導入前の静穏時電離圏パラメータと電離圏脅威モデル（以下併せて電離圏環境パラメータという）の決定と、GBAS導入後のこれらのパラメータの継続的なチェックと更新がある。

電離圏環境パラメータは航空航法の安全性に関わるパラメータであるので、これらを定めることはGBASを導入する各国の責任である。これは、たとえアジア太平洋地域に属する場所にGBASを導入する場合であっても、ICAOアジア太平洋地域共通GBAS電離圏脅威モデルを採用するかどうかは各国の責任において決定されなければならないということである。さらに導入後の電離圏環境パラメータの維持・更新作業も同様に各国の責任である。

従って、GBASを導入する各国においては、電離圏環境パラメータの妥当性を判断する知見が最低限必要であり、これらを独自に評価し、維持・更新する技術を有することが望ましい。

4 電離圏環境評価手法

先に述べたように、電離圏脅威モデルにおいて、空間スケールの最小値は10 km程度であることが分かっている。また、標準的なGBASは、空港周辺23 NM（約43 km）をサービス範囲と

するので、この範囲内の空間スケールで変動する電離圏変動がGBASにとって考慮すべきものである。従って、電離圏環境評価の手法は、空間スケール10 km程度の電離圏勾配を検出できるものでなければならない。

4.1 観測手法

電離圏遅延量の空間勾配は、方向を持つ2次元の量である。2次元平面内の空間スケール10 km程度の電離圏変動を捉えるためには、少なくとも3つのGNSS受信機を、10 km程度の間隔で、3受信機の位置が直線上に並ばないように配置する必要がある。

GNSS受信機は、個々の受信機でそれぞれ電離圏遅延量変動を導出するため、L1信号に加えて第2の周波数を受信できる必要がある。

GNSS受信機のサンプリングレートは、電離圏の空間変動に対し十分速い必要がある。必要なサンプリングレートの決定には、電離圏勾配の移動速度と受信機間隔の関係、電離圏勾配の大きさと速度の関係を考慮して決める。

最大600 mm/kmの電離圏勾配が100 m/sで移動しており、受信機間隔が10 kmである場合は、サンプリングレートは1 Hz以上が望ましい。

4.2 解析手法

解析に用いる手法は、静穏時、擾乱時いずれにも共通して使用できることが望ましい。静穏時電離圏パラメータは数 mm/kmの値であるので、電離圏勾配の解析精度としては少なくとも1 mm/km程度が必要である。受信機間距離10 kmの場合、解析手法として受信機間の電離圏遅延量差において10 mm程度の精度を持つ必要である。加えて、幅、深さ、移動速度等のパラメータを導出できる必要がある。

電離圏勾配の解析手法としては、主に以下の2つが用いられている。一つは、米国FAAが開発した、2周波電離圏遅延量測定値に基づくLong-Term Ionosphere Anomaly Monitoring (LTIAM) [9]である。もう一つは、電子航法研究所が開発したSingle-Frequency Carrier-Based and Code-Aided (SF-CBCA)法 [10, 11]である。両者にはそれぞれ利点、欠点があるが、以下では電子航法研究所で一通りの解析手法としてまと

めた、SF-CBCA法とその結果を用いた電離圏パラメータの導出方法について解説する。

5 電離圏勾配特性解析の流れ

5.1 電離圏勾配(g)の導出

まず、SF-CBCA法を用いて、3つの受信機間の電離圏遅延量差を導出する。そのためには、事前に受信機（アンテナ位相中心）の位置を精密に求めておく。この手法では、受信機間の相対的な位置が重要であるので、一度決定した位置座標は、受信機間の相対位置が大きく変わらない限り再計算する必要はない。

図5に示すように、受信機1,2、受信機2,3、受信機3,1の組み合わせについてSF-CBCA法を用いて電離圏遅延量差を導出する。その結果を $\delta I_{SD,1,2}$ 、 $\delta I_{SD,2,3}$ 、 $\delta I_{SD,3,1}$ とする。SF-CBCA法は位相測定値の整数値不定性の推定を含むため、これらの結果に整数値不定性の誤推定が含まれていないことを確認する必要がある。これらが正しく推定できている場合、3つの電離圏遅延量差の推定値の総和は誤差の範囲で0となるはずであるので、

$$|\delta I_{SD,1,2} + \delta I_{SD,2,3} + \delta I_{SD,3,1}| < \delta I_{th} \quad (4)$$

を満たすものについてのみ、正しく推定されたものとして、以降の解析に使用する。この条件を満たす場合、3つの電離圏遅延量差のうち2つを用いて、2次元平面内のベクトル量として電離圏勾配を求め、その大きさとして g を得る。

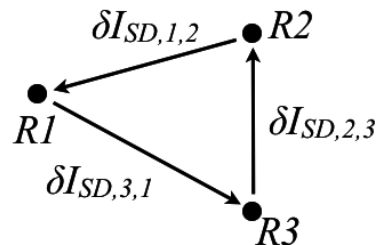


図5 3受信機と電離圏遅延量差の概念図。

5.2 静穏時電離圏パラメータ(σ_{vig})の導出

5.1で求めた電離圏勾配のうち、電離圏擾乱時ではないと判断される時間帯のデータを用いて静穏時電離圏パラメータ(σ_{vig})を求める。求めた g を電離圏傾斜係数で垂直換算したものを

集計し、その標準偏差と、発生確率の累積確率密度分布関数(CDF)を求める。確率密度は完全な正規分布にはならないので、正規分布のCDFが観測されたCDFを 10^{-7} レベルでバウンドするように、保守的に標準偏差に係数を乗じたものを σ_{vig} とする(図6)。

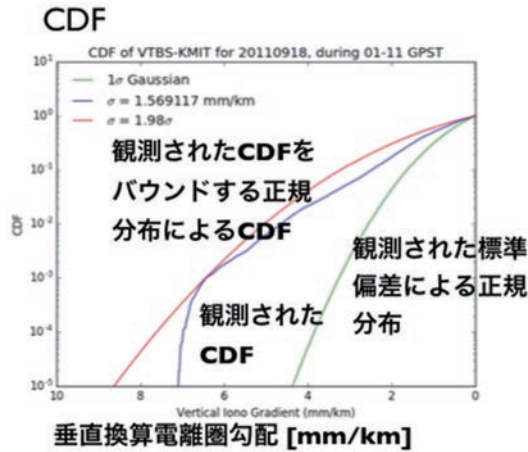


図6 垂直換算電離圏勾配のCDFと σ_{vig} 。

5.3 電離圏脅威モデルパラメータの導出

一定以上の g について、電離圏擾乱に伴う電離圏勾配として、電離圏脅威モデルパラメータ(図3)を導出する。

まず、 g について、その電離圏勾配が観測された衛星仰角との関係を図4と同様の方法で調べる。アジア太平洋地域では、600 mm/kmを超えるものがなければ、アジア太平洋地域共通GBAS電離圏脅威モデルが適用できる。超えるものがあれば、それに応じて上限を修正する。

続いて、2周波観測を用いて電離圏遅延量を3受信機ごとに導出し、その時間変動に共通して見られる特徴点を抽出し、 d , v , w を求める[5]。図7は、石垣島で観測されたデータを用いて v を導出した例である。これらをやはり既存のモデルと比較し、範囲内であるかどうか判定し、必要に応じて値の範囲を修正する。

ここで値の範囲を狭める場合は、保守性を削減する方向であるので、十分なデータ量に基づいているか、慎重に判断しなければならない

5.4 解析ソフトウェアパッケージ

5.1~5.3の手順は、C言語及びPythonとフリーソフトウェアライブラリによるソフトウェ

ア群として整備されており、様々なプラットフォームにおいて容易に移植、動作可能である。

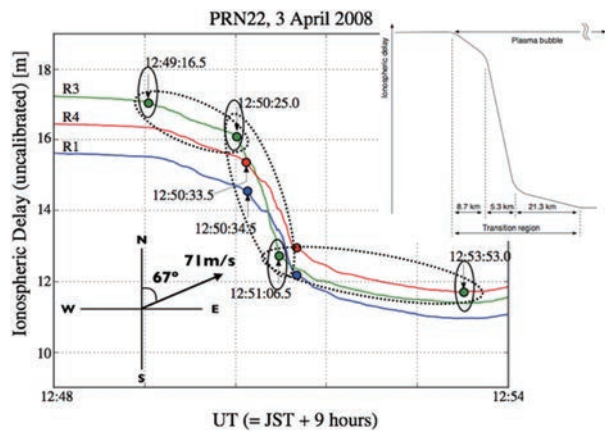


図7 電離圏勾配移動速度、幅の推定。

6 海外電離圏データ収集・解析

電子航法研究所ではこれまでに、世界各国の研究機関等と協力し、GBASのための電離圏環境評価を行い、一部の国においては研究協力を通して独自データの取得と解析を行っている。

タイ・バンコクにおいては、2011年から図8に示す観測網を構築し、モンクトット王工科大学ラカバン(KMITL)とともに電離圏勾配観測と解析を行っている[12, 13]。

2019年からは、ベトナム・ハノイにおいて、ベトナム科学技術アカデミー地球物理研究所と共同で電離圏勾配観測を開始し、現地研究者への技術指導を行っている。

これらの活動を通し、GBAS導入のための電離圏観測・解析についての現地の理解が深まり、今後のGBAS導入に寄与すると期待される。



図8 タイ・バンコクにおける電離圏勾配観測。

6. まとめ

本研究では、GBAS導入において安全性を担

保する上で最も重要な課題の一つである電離圏環境評価について、背景からデータ収集、解析手法までをまとめ、海外におけるGBASのための観測・解析・技術支援の実施例を紹介した。

電離圏は自然現象であるので、GBASを導入し運用を行っていくためには、GBASを導入する各国の責任で電離圏環境が当初の想定を超えていないか継続的に検証していかなければならない。GBASを展開するにあたっては、ハードウェアを展開するだけでなく、これらのソフトウェア技術を合わせて展開する必要がある。

本研究でまとめたような、電子航法研究所がこれまでに積み重ねてきた技術が、日本のGBAS技術の海外展開に活用されることを期待するとともに、日本のGBASの継続的な改良にも活用されることを期待したい。

参考文献

- [1] International Civil Aviation Organization (2018), "Annex 10 to the Convention on the International Civil Aviation," Amendment 91.
- [2] M. Nakamura, S. Saito, and T. Yoshihara (2019), "Characteristics of Ionospheric Gradients in the Transition Region from Magnetic Low to Mid-latitudes for GBAS Implementation," Proc. ION Pacific PNT 2019, pp.827-834.
- [3] S. Pullen, Y. S. Park, P. Enge (2009), "Impact and mitigation of ionospheric anomalies on ground-based augmentation of GNSS," Radio Science, vol.44, pp.RS0A21, doi:10.1029/2008RS004084
- [4] J. Lee, M. Yoon, S. Pullen, J. Gillespie, M. Mather, R. Cole, J. Rodrigues de Souza, P. Doherty, R. Pradipta (2015), "Preliminary results from ionospheric threat model development to support GBAS operations in the Brazilian Region," Proc. ION GNSS+ 2015, pp.1500-1506.
- [5] S. Saito and T. Yoshihara (2018), "Evaluation of extreme ionospheric total electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System," Radio Science, vol.52, pp.951-962, doi:10.1002/2017RS006291.
- [6] S. Saito, S. Sunda, J. Lee, S. Pullen, S. Supriadi, T. Yoshihara, M. Terkildsen, F. Lecat, and ICAO APANPIRG Ionospheric Studies Task Force (2017), "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region," GPS Solutions, vol.21, pp.1937-1947, doi:10.1007/s10291-017-0662-1.
- [7] International Civil Aviation Organization Asia and Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (2016), "GBAS Ionospheric Threat Model for APAC Region."
- [8] International Civil Aviation Organization Asia and Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (2016), "GBAS Safety Assessment Guidance Related to Anomalous Ionospheric Conditions."
- [9] S. Jung, J. Lee (2012), "Long-term ionospheric anomaly monitoring for ground based augmentation systems," Radio Science, vol.47, pp.RS4006.
- [10] S. Fujita, T. Yoshihara, and S. Saito (2010), "Determination of ionospheric gradients in short baselines by using single frequency measurements," J. Aeronaut. Astronaut. Aviat., vol.A42, pp.269-275.
- [11] S. Saito, and T. Yoshihara (2012), "Absolute gradient monitoring for GAST-D with a single-frequency carrier-phase based and code-aided technique," Proc. ION GNSS 2012, pp.3055-3065.
- [12] S. Rungraengwajjake, P. Supnithi, S. Saito, N. Siansawasdi, and A. Saekow (2015), "Ionospheric delay gradient monitoring for GBAS by GPS stations near Suvarnabhumi airport, Thailand," Radio Science, vol.50, pp.1076-1085, doi:10.1002/2015RS005738.
- [13] J. Budtho, P. Supnithi, and S. Saito, (2018), "Analysis of quiet time vertical ionospheric delay gradients around Suvarnabhumi airport, Thailand," Radio Science, vol.53 doi:10.1029/2018RS006606.