

修士論文

GNSS 天頂全遅延量と仰角マスクとの関連性を用いた 降雨予測の誤警報の低減

今岡 一章

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 岡田 実 教授

ネットワークシステム学 研究室（情報科学領域）

令和2年3月12日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

今岡 一章

審査委員：

岡田 実 教授	(主指導教員，情報科学領域)
笠原 正治 教授	(副指導教員，情報科学領域)
東野 武史 准教授	(副指導教員，情報科学領域)
Duong Quang Thang 助教	(副指導教員，情報科学領域)

GNSS 天頂全遅延量と仰角マスクとの関連性を用いた 降雨予測の誤警報の低減*

今岡 一章

内容梗概

GPS に代表される全地球衛星航法システム (GNSS) の応用として、GNSS 信号が伝搬中に受ける対流圏遅延を利用した気象観測が知られている。近年、この発展として、天頂全遅延 (ZTD) や可降水量 (PWV) といった対流圏遅延推定値を用いた降雨検知・予測の研究が行われているが、いずれも誤警報が多いという問題がある。従来の降雨予測アルゴリズムでは、少ない指標で降雨予測の判断を行っていることが原因と考えられる。本研究では、誤警報を低減するための新たな指標を確立することを目標とする。これを実現するための指標として、測位解析の設定の一つである仰角マスクに着目する。仰角マスクは受信点上空の可視範囲、つまり GNSS 受信機から見た雨雲の存在範囲を決定するため、仰角マスクを複数設定することで降雨接近時の特徴を発見できると考えた。本研究では、観測システムを構築し、本学周辺の複数の GNSS 受信機・気象センタの観測データより、ZTD、単位時間当たりの ZTD 変化量、そして降水強度の関係を検証した。その結果、仰角マスク設定が異なる各 ZTD 時系列データを用いて、仰角マスクが大きいほど降雨前の ZTD 変動が急峻になること、小さいほど ZTD 変動が緩慢になることを明らかにした。またこれらの傾向は晴天時には現れないことを確認した。

キーワード

全地球衛星航法システム (GNSS)、気象観測、降雨予測、対流圏遅延、天頂全遅延 (ZTD)、仰角マスク

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和 2 年 3 月 12 日.

Proposal of novel criteria for improvement of false alarm rate in rainfall forecasting using GNSS zenith total delay*

Kazuaki Imaoka

Abstract

As one of the application of Global Navigation Satellite System (GNSS), meteorological observation technique using propagation delay of GNSS signal caused by atmospheric water vapor is known. Furthermore, related studies on rainfall detection and forecasting using estimated tropospheric delay parameters such as zenith total delay (ZTD) and precipitable water vapor (PWV) has been conducted. However, these methods have the problem with many false alarms. In the conventional rainfall forecast algorithm, these false alarms are caused by small number of criteria. The purpose of this study is to explore new criteria for the improvement of the false alarm rate. To achieve this purpose, we propose to utilize the elevation mask angle, which is one of the positioning analysis setting, as a criteria. This setting plays an important role for rainfall forecasting, because it determines the visible range in the viewpoint of the GNSS receiver for seeking rain clouds.

In this thesis, first, we built an observation system around NAIST. As the next step, the relationship between ZTD, ZTD difference and rainfall intensity with varying elevation cut-off angle has reported using several observation results. As a result, the gradual growth has found before rainfall with low cut-off angle, while

*Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 12, 2020.

the steep growth has found in case of high cut-off angle from the analysis using frequency distribution. On the other hand, these trends could not be confirmed in fair states.

Keywords:

GNSS, Meteorological observation, Rainfall forecasting, Tropospheric delay, Zenith total delay (ZTD), Elevation mask angle

目次

1. 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連研究	3
1.3 研究目的	5
1.4 本論文の構成	6
2. GNSS の原理と仕組み	7
2.1 GNSS	7
2.2 精密単独測位 (PPP)	8
2.2.1 衛星軌道及び衛星時計	9
2.2.2 電離層遅延	9
2.2.3 対流圏遅延	10
2.2.4 拡張カルマンフィルタを用いた精密単独測位	14
3. 解析手法	18
3.1 RTKLIB	18
3.2 使用データ	20
3.2.1 GNSS 測位解析に必要なデータ	20
3.2.2 気象観測データ	20
4. 悪天候時における ZTD 変動傾向の調査	22
4.1 本学周辺における ZTD の振舞いの検証	22
4.2 悪天候時における ZTD と可視衛星数・衛星配置との関係	27
5. 悪天候時の ZTD 変動傾向に仰角マスクが及ぼす影響の検証	34
6. 結論	41
6.1 本論文のまとめ	41
6.2 今後の課題	42

謝辭	43
參考文獻	44
研究業績	49

図 目 次

1	気象庁のレーダー配置図	2
2	[18] で提案された降雨予測アルゴリズムのフローチャート (PWV の変化率のみを用いた手法、[21] より引用)	4
3	[19] で提案された降雨予測アルゴリズムのフローチャート (3つの 指標を導入した手法、[21] より引用)	4
4	マッピング関数の模式図	15
5	RTKPOST の起動画面	19
6	RTKPOST の詳細オプション	19
7	各観測点の位置関係 (地理院地図 [43] を加工して作成)	22
8	2018 年 7 月 18 日 14:00–18:00 の雨雲レーダー画像 (tenki.jp[42] 雨 雲レーダー画像を加工して作成)	23
9	ZTD 及び降水強度の時間変化 (2018 年 7 月 18 日)	25
10	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 7 月 18 日、電子基準点交野)	26
11	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 7 月 18 日、電子基準点生駒)	26
12	2018 年 7 月 9 日 13:00–17:00 の雨雲レーダー画像 (tenki.jp[42] 雨雲 レーダー画像を加工して作成)	28
13	2018 年 7 月 9 日 15:00 に観測された線状降水帯 (tenki.jp[42] 雨雲 レーダー画像を加工して作成)	29
14	可視衛星数の時間変化 (2018 年 7 月 9 日)	30
15	ZTD 及び降水強度の時間変化 (2018 年 7 月 9 日)	30
16	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 7 月 9 日、使用衛星を GPS のみに制限した場合)	31
17	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 7 月 9 日、使用衛星を GPS と GLONASS に制限した場合)	31
18	2018 年 7 月 9 日 14:30 における GPS 衛星配置 (左図) /GLONASS 衛星配置 (右図)	32

19	仰角マスク角度が小さい場合の衛星配置模式図	35
20	仰角マスク角度が大きい場合の衛星配置模式図	35
21	ZTD 及び降水強度の時間変化 (2018 年 4 月)	36
22	ZTD 及び降水強度の時間変化 (2018 年 4 月 6 日)	37
23	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 4 月 6 日、仰角マスク 15°)	38
24	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 4 月 6 日、仰角マスク 25°)	38
25	単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化 (2018 年 4 月 6 日、仰角マスク 35°)	39
26	各仰角マスク下における ZTD 推定値に含まれる緩慢な変動、急峻 な変動の割合	39

表 目 次

1	IGS 精密暦の種類 [26]	9
2	各観測点の緯度経度	23
3	降雨前 3 時間中に含まれる単位時間当たりの変化量 ZTDD の割合	40
4	晴天時 3 時間中に含まれる単位時間当たりの変化量 ZTDD の割合	40

1. 序論

1.1 研究背景

近年、「ゲリラ豪雨」と呼ばれる局地的大雨が問題となっている。気象庁では雨の強さについて、1時間降水量 50[mm/h] 以上 80[mm/h] 未満の雨を「非常に激しい雨」、80[mm/h] 以上の雨を最も強い階級である「猛烈な雨」と定義している [1]。同様に「局地的大雨」について、急に強く降り、数十分の短時間に狭い範囲に数十 [mm] 程度の雨量をもたらす雨と定義している。局所的大雨は全国的に増えつつあり、かつ「ゲリラ豪雨」という言葉がマスメディア等で頻繁に取り上げられるようになったことから社会的な関心も高まっている。2008 年 7 月 28 日には兵庫県神戸市灘区内を流れる都賀川において局地的大雨が発生し、その結果、急激な水位上昇によって 5 名の人命が失われた [2]。また 2014 年 8 月 19 日夜から 20 日明け方には、広島県広島市安佐南区・安佐北区を中心としたごく狭い範囲に局地的大雨が発生した。この事例で 3 時間降水量は 200[mm] に達し、同時多発的に発生した土石流によって 74 名の人命が失われた [3]。このように、局所的大雨が原因となって起こる問題には河川の急激な水位上昇や都市郊外部での大規模土石流などが挙げられ、対策が必要とされる。

気象観測に関する現状技術について述べる。主要な技術として、アメダス (AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System)[4] や気象レーダが存在する。国内に約 1,300 箇所設置されているアメダスの平均設置間隔は約 17[km] であり、降水量、気温、日照時間、風向・風圧などを観測している。概ねメソβスケール (20 – 200[km]) の現象を捉えることができるとされている。

一方、気象レーダは、仰角を変更しながら水平回転し、半球内の降雨分布を三次元的に捜査・測定することが可能である。使用周波数によって、S 帯気象レーダ (使用周波数: 2.8[GHz])、C 帯気象レーダ (同: 5.3[GHz])、X 帯気象レーダ (同: 9.5[GHz]) などに分類される [5]。気象庁ではレーダー観測網が構築され、国土全域をカバーするように全国 20 箇所に C 帯気象レーダーが配置されている。さらに近年開発が進んでいる X 帯気象レーダーでは小型化が進んでおり、その利点を生かして研究用途での運用が多く行われている。しかしながら、山岳地帯や高層



図 1 気象庁のレーダー配置図

建築物が多い地域ではレーダーの電波が届かない不感地が生じる場合があり、降雨事象を正確に把握することが難しくなる。またこれを解消するために空間密度を高めるといったことが考えられるが、設備設置のための投資が膨大な額になる。

これに対して、近年「GNSS 気象学」という研究分野が発展しつつある [6][7]。これはカーナビやスマートフォンの位置認識で使われる全地球衛星航法システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) を気象観測に利用するものである。GNSS 測位解析では、GNSS から放射される電波の位相を観測することによって、電波が受信機に到達するまでの時間、さらに衛星 – 受信機間の距離を推定する。それと送信信号より得た衛星座標を用いて、3次元空間上の受信機座標 (x, y, z) が測位される。このとき推定到達時間は電離層や中性大気に起因する電波の遅れの影響を受けるため、推定受信機座標に誤差が生じる。これを取り除くのではなく、大気中の水蒸気を表す指標として有効活用しようというのが GNSS 気象学の根源である。

1.2 関連研究

1992 年、*Bevis et al.*[8] が測位解析の副産物である GNSS 可降水量 (PWV: Precipitable Water Vapor) を気象学に利用することを提唱してから現在に至るまで、既存の PWV 観測手法であるラジオゾンデやマイクロ波放射計との比較による PWV の精度検証 [9] や、衛星軌道情報の改良による PWV 推定の準リアルタイム化 [10] などに関する研究が行われてきた。また実際の極端現象を用い気象学的な観点から PWV の有用性を検証する研究 [11][12][13][14][15] も気象学者らの手によって行われてきた。

さらに近年、多くの研究者が測位解析によって得られる天頂全遅延 (ZTD: Zenith Total Delay) や PWV を用いた降雨予測について議論してきた [16][17][18][19][20]。この手法の特徴として、地上気象観測データや高層気象観測データ、気象レーダー画像などを入力してスーパーコンピュータを利用して気象を予測する数値予報とは異なり、GNSS 測位解析から得られるデータのみを用いて降雨予測を行うということが挙げられる。より具体的には、大気中の水蒸気に左右されるこれらのパラメータが降雨前に上昇をはじめ、降雨中にピークを迎え、雨が止むと大きく減少するといった傾向を用いて予測が行われる。これにより、より安価で、かつ緻密、高頻度な予測が行えるようになる。先行研究 [16][17] では、PWV と適切な閾値を利用する降雨予測の実現可能性が示され、複数の降雨事象に対して検証が行われた。また [18] では、PWV と 1 時間当たりの変化率を用いた降雨予測手法が提案され、PWV の急激な上昇を基準としてその後 6 時間中に 73[%] の確率で降雨が発生することが報告された (図 2)。同様に [19] では、[18] を改良した降雨予測手法が提案され、単一の指標のみを用いる予測から 3 つの指標を併用する予測に変更することで予測成功率が 7[%] 改善することが報告された (図 3)。ZTD を用いた降雨予測についても提案されており、[20] では ZTD の急激な上昇から 2–6 時間後に降雨が発生することが報告された。

しかしながらこれらの手法では、実際に雨が降らないにもかかわらず ZTD/PWV が上昇することによって、誤警報が多く発生することが問題点として挙げられる。[19] では誤警報率 (FAR: False Alarm Rate) 66[%] を記録している。これらより、ZTD や PWV といった GNSS 測位解析によって得られるデータのみを用いる降雨予測を実現するためには、誤警報を軽減する必要があるといえる。

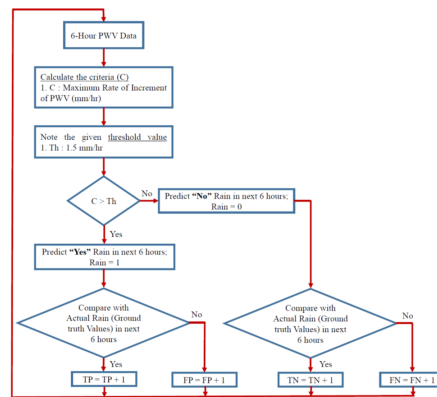


図 2 [18] で提案された降雨予測アルゴリズムのフローチャート (PWV の変化率のみを用いた手法、[21] より引用)

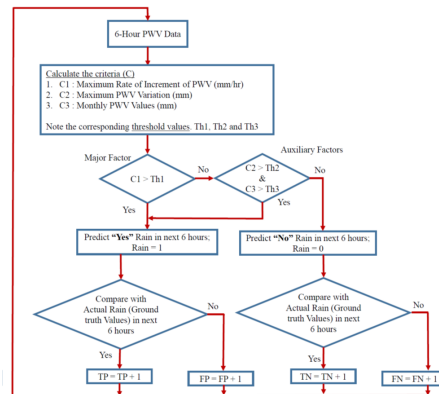


図 3 [19] で提案された降雨予測アルゴリズムのフローチャート (3つの指標を導入した手法、[21] より引用)

1.3 研究目的

先行研究では ZTD 並びに PWV を用いた降雨予測が行われてきた。主要な手法では、ZTD/PWV に適切な閾値を設定することで降雨予測が行われた。また同様に ZTD/PWV の時間当たりの変化率を用いた降雨予測についても実現可能性が検証されてきた。しかしこれらの手法では誤警報率が大きく、これを軽減する必要がある。この原因として、[17] では降雨を除くほかの要因（測位解析中のシステムティックエラーや、観測環境の変化）によるものと推察している。即ち誤警報率を軽減するためには、ZTD/PWV の時系列データから他の要因による変動を取り除く、若しくは降雨による変動を強く特徴づける必要があると考えられる。

本研究では、従来の降雨予測アルゴリズムに降雨を特徴づける指標を新たに導入することを提案する。新たな指標として、測位解析の設定項目の一つである“仰角マスク (Elevation Cut-off Angle)”を用いることを考える。仰角マスクは誤差を大きく含む低仰角衛星の電波の使用を防ぐための機能であり、測位解析では設定した仰角マスクより低い仰角の電波が取り除かれる。故に仰角マスクは受信点上空の可視領域、さらには受信機から見た雨雲の存在範囲を決定する。そのため、異なる仰角マスクで推定を行った ZTD/PWV を比較することで、雨雲の見え方による差異を知ることができると考えられる。本研究では、仰角マスクによって降雨を特徴づけることができるか、またこの指標が降雨予測アルゴリズムの改善に有効であるかを検証する。そのために、本学周辺における GNSS 観測データを用いて ZTD 推定を行い、実際の降雨事象前後の ZTD 変動傾向を調査する。さらに異なる仰角マスクを持つ ZTD 間の比較より、上昇傾向にどのような違いが現れるかを考察する。

1.4 本論文の構成

本論文は以下の通りである。まず第1章では研究背景と関連研究、研究目的について述べた。第2章ではGNSSの測位原理を説明し、ZTD/PWVの物理的性質について述べる。また本研究でZTD推定に使用した、精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) についても簡潔に説明する。第3章では本研究で使用するデータセット並びに本研究で使用した測位解析ライブラリ RTKLIB[22] について解説する。第4章ではZTDを用いた降雨予測が温暖湿潤気候に属する日本においても実現可能であることを検証するため、本学周辺の複数地点のデータを使用して雨雲接近時のZTDの振舞いを調査した。またZTDと可視衛星数並びに衛星配置との関係を実データを用いて検証している。第5章では仰角マスク設定をもとにZTD時系列データから雨雲接近時の特徴を抽出することを試みる。6章では本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. GNSS の原理と仕組み

GNSS 測位解析においてセンチメートル級の精密測位を達成するためには、測位原理はもちろん様々な誤差要因についても知る必要がある。大気中の水蒸気に起因する伝搬遅延（対流圏遅延）を高い精度で推定する場合も同様である。そのため本節では、GNSS の仕組みについて触れた後、精度に影響を及ぼす各誤差要因についても解説を行う。また対流圏遅延について、物理的な性質を述べた上で、GNSS 気象学で多用される 2 つのパラメータ (ZTD/PWV) について解説する。本節の最後には、ZTD の推定に使用した精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) について解説を行う。

2.1 GNSS

GNSS は、GNSS 衛星から発射される信号を用いて GNSS アンテナ（受信機）の絶対位置を得る衛星航法システムである [23][24]。絶対位置に限らず、高精度な速度や姿勢、時刻などを得ることができ、様々なアプリケーションに利用される。衛星は、起動半径を 26,500[km] とする複数の円軌道上に配置されており、決められた軌道を描いて地球を周回するよう地上管制局から制御されている。衛星は衛星固有の疑似雑音符号と航法データを重畳した搬送波を複数の周波数帯で発射しており、ユーザーは対応した周波数帯の GNSS アンテナと受信機で受信する。航法データには、衛星位置を決定する軌道パラメータや衛星時計の補正パラメータなどが含まれる。

GNSS 測位は大まかに以下の流れで行われる。1 から 3 の流れは複数の衛星に対して同時刻で行われ、4 機以上の衛星の伝搬時間から 3 つの未知パラメータ（受信機位置）が推定される。本研究で最も重要な大気中の水蒸気による伝搬遅延についても、未知パラメータとしてモデル化することで逐次推定される。

1. 衛星-受信機間の電波伝搬時間の観測（測距）
2. 航法データ復調・衛星位置の決定
3. 各誤差要因の補正
4. 未知パラメータ（受信機位置）の推定

測距は、GNSS 信号に含まれる疑似雑音符号の性質（時間差 0 以外に自己相関を持たない、相互相関を有しない、受信機内で再生成可能）から導出されるコード疑似距離を用いたものと、搬送波の位相（波数）より導出される搬送波位相観測値を用いたものの 2 つに分けられる。2 つの大きな違いは伝搬時間の観測精度であり、前者が波長 300[m] の疑似距離雑音を利用するのに対して、後者は波長約 20[cm] の搬送波を利用して測距を行う。そのため前者の精度はメートル級であるのに対して、後者ではセンチメートル級からミリメートル級の精度を得ることができる。1 つの受信機で絶対位置を求める場合、前者はコード疑似距離測位もしくは単独測位、後者は精密単独測位 (PPP) と呼ばれる。

しかしながら、精密単独測位で高い精度を得るためには各誤差要因の補正が必要不可欠である。これには、衛星位置に起因するもの、衛星/受信機に内蔵される時計の精度に起因するもの、GNSS 信号が地球の大気中を通過する際に生じるもの（電離層に起因するものは電離層遅延、中性大気に起因するものは対流圏遅延と呼ばれる）などがある。また測位解析において、これらは相互に影響しあう。特に対流圏遅延のみを知りたい場合、ほかの誤差要因の対策を怠ると対流圏遅延が大きく推定される。そのため対流圏遅延を扱う場合でも、上の誤差要因について理解する必要がある。次節では精密単独測位で用いる搬送波位相観測値と観測モデルについて説明した後、これらの誤差要因の補正方法について述べる。

2.2 精密単独測位 (PPP)

搬送波位相は受信機で復調した測位信号の搬送波位相角を連続的に観測したものである。搬送波位相を $\Phi_r^s[\text{m}]$ として、その観測モデルは以下のように表される。

$$\Phi_r^s = \lambda \phi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dT^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda N_r^s + d\Phi_r^s + \epsilon_\Phi \quad (1)$$

ここで、 ϕ_r^s は搬送波位相 [cycle]、 N_r^s [cycle] は搬送波位相バイアス、 $d\Phi_r^s$ [m] は精密補正項である。コード疑似距離とは異なり、搬送波位相 Φ_r^s には搬送波位相バイアス N_r^s と呼ばれる項が含まれている。これは連続的な観測が行われている限りは固定値となる。

2.2.1 衛星軌道及び衛星時計

単独測位では衛星座標を求めるために、放送信号に含まれる航法データ（放送暦）を使用するが、精密単独測位ではより高精度な暦である精密暦 (precise ephemeris) を利用する。精密暦には衛星軌道推定値と衛星時計推定値が含まれ、SP3 形式で提供される。現在 IGS(International GNSS Service) やいくつかの研究機関によって精密暦が作成され、利用者に公開されている [25]。公開までにかかる時間と精度によって表 1 のように分けられる [26]。

表 1 IGS 精密暦の種類 [26]

Type	Latency	Sample Interval	Accuracy	
			Sat. clocks	Orbits
Ultra-Rapid (predicted half)	real-time	daily	~3[ns]	~5[cm]
Ultra-Rapid (observed half)	3–9 hours	15[min]	~150[ps]	~3[cm]
Rapid	17–41 hours	5[min] or 15[min]	~75[ps]	~2.5[cm]
Final	12–18 days	5[min] or 15[min]	~75[ps]	~2.5[cm]
Broadcast	real-time	daily	~5[ns]	~100[cm]

加えて、より高時間分解能の衛星時計推定値が、RINEX CLK EXT 形式のファイルで提供されている（Final 及び Rapid のみ）。

2.2.2 電離層遅延

高度 60–70[km] より上空の超高層大気中 (≤ 1000 [km]) では、その一部が太陽からの放射エネルギーによって電離している。そのうち電離大気密度が高い領域は

電離層 (ionosphere) と呼ばれる。電離層を電磁波が通過するときに、電子と相互作用をし、電磁波の伝搬屈折率 μ が変わること、伝搬経路や速度が変化する。これによる電離層遅延 I_r^s は、GNSS 信号の伝搬経路 s に存在する総電子数の関数であり、以下のように表される。ここで I_r^s は、搬送波位相 Φ_r^s においては位相の進みによってマイナス方向の影響を与えることに注意する必要がある。

$$\begin{aligned} I_r^s &= \frac{40.3}{f^2} \int_s N_e ds \\ &= \frac{40.3 \times 10^{16}}{f^2} \text{TEC} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 f は搬送波の周波数 [Hz] であり、TEC は電離層に存在する電子密度 N_e を電波伝搬経路 s に沿って積分した値で総電子数 (TEC: Total Electron Content) と呼ばれ、TEC Unit (TECU) $= 1 \times 10^{16} [\text{electron}/\text{m}^2]$ を単位として表される。

2 周波以上の搬送波位相が得られる場合、(2) 式の線形結合によって電離層の影響を消去することができる。この線形結合を電離層フリー結合 (ionosphere-free linear combination) と呼ぶ。搬送波位相の電離層フリー結合 $\Phi_{r,LC}^s$ の定義及び観測方程式を以下に示す。

$$\Phi_{r,LC}^s \equiv C_1 \Phi_{r,L1}^s - C_2 \Phi_{r,L2}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dT^s) + T_r^s + N_{r,LC}^s + d\Phi_{r,LC}^s + \epsilon_\Phi \quad (3)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \\ C_2 &= \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{r,LC}^s &= C_1 \lambda_{L1} N_{r,L1}^s - C_2 \lambda_{L2} N_{r,L2}^s \\ d\Phi_{r,LC}^s &= C_1 d\Phi_{r,L1}^s - C_2 d\Phi_{r,L2}^s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。

2.2.3 対流圏遅延

地球の大気鉛直構造において一番下 (高度 0–11[km]) の領域は対流圏 (troposphere) と呼ばれる。雲が立ち雨が降るなど目に見える気象現象をはじめとし

て、熱帯低気圧・前線・台風など、日々の天気の変化をもたらす大気の運動はほとんどすべてこの層で発生している [27]。ゆえにこの層の状態を完全に示すことが可能な指標があれば、すべての気象現象はその指標で説明することが可能であるといえる。

GNSS 測位解析において対流圏中の水蒸気を与える影響について述べる。大気中の水蒸気は地上から高度 5[km] 程度までの対流圏下部に集中して分布しており、この領域を電磁波が通過する際大気屈折による影響を受ける。これは 2 つの物理的性質に起因する。1 つは、電磁波が誘電物質である大気中を通過するために真空中より減速されることで、見かけ上の伝搬経路が伸びる効果である。これはもう 1 つは、電磁波の伝搬経路が曲率を持つため、衛星-受信機間を結ぶ直線より経路が実際に長くなる効果である。これらの効果による対流圏遅延 T_r^s は以下で表される [28]。

$$\begin{aligned} T_r^s &= \int_{\text{atm}} [n(s) - 1] ds + \int_{\text{atm}} ds - \int_{\text{vac}} ds \\ &= \int_{\text{atm}} [n(s) - 1] ds + [S - G] \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $n(s)$ は大気屈折によって曲率が生じた伝搬経路上の点 s における屈折率である。 $S = \int_{\text{atm}} ds$ 並びに $G = \int_{\text{vac}} ds$ はそれぞれ、大気中の伝搬経路長と真空中の伝搬経路長を表す。また右辺第 1 項が減速による遅延、第 2 項 $[S - G]$ が伝搬経路の湾曲による遅延である。天頂方向では S と G が一致し、第 2 項は 0 となる。仰角が低くなるほど、大気中を通過する電磁波の伝搬経路が長くなるので対流圏遅延は大きくなり、減速による遅延と湾曲による遅延はともに増大する。しかし湾曲の効果は仰角 15° 以上では 1[cm] 以下の経路長の伸びに相当するにすぎず、さらに減速による遅延と比べて 3 桁程度小さい [29]。そのため主に減速による遅延の効果のみを考えればよい。

次に、対流圏遅延 T_r^s の物理的性質について、気象に関するパラメータを用いて示す。大気の屈折率 n は、20[GHz] 以下の周波数領域において、気温、乾燥大気分圧、水蒸気分圧の関数で以下のような関係があることが知られている [30]。

$$10^6(n - 1) = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} \quad (7)$$

ここで、 T は気温 [K]、 P_d , P_v はそれぞれ乾燥大気、水蒸気の分圧 [hPa] である。また Z_d , Z_v は乾燥大気、水蒸気の圧縮率であり、理想気体からのずれを表している。この式の右辺第 1 項と第 2 項は、それぞれ乾燥大気成分と水蒸気の誘導双極子の効果である。そして第 3 項は水分子がもともと分極していることに起因する永久双極子の効果である。 k_1 , k_2 , k_3 は実験的に決定される係数で、GPS や超長期基線電波干渉計 (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) の解析においては [31] の値がよく使われる。

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 77.60 \pm 0.08 [\text{K/hPa}] \\ k_2 &= 71.98 \pm 10.82 [\text{K/hPa}] \\ k_3 &= (3.754 \pm 0.036) \times 10^5 [\text{K}^2/\text{hPa}] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

今、特に天頂方向における対流圏遅延を考えると、(6) 式、(7) 式及び気体の状態方程式から以下の式を得る。

$$\begin{aligned} T_r^{\text{Zenith}} = 10^{-6} & \left[k_1 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{R}{m_d} \right) \rho dz \right. \\ & + k'_2 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} dz \\ & \left. + k_3 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} dz \right] \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$k'_2 \equiv \left(k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_d} \right) \quad (10)$$

と定義した。ここで、 ρ は水蒸気も含めた大気の三つで、 m_d , m_v はそれぞれ乾燥大気、水蒸気の分子量 ($m_d = 28.9644 [\text{kg/kmol}]$, $m_v = 18.0152 [\text{kg/kmol}]$)、 R は不変気体定数 ($R = 8314.34 [\text{J/K} \cdot \text{kmol}]$) である。

ここで乾燥大気に起因する遅延量である (2.2.9) 式右辺第 1 項を ZHD とおき、高さを z 、気圧を P とし、静水圧平衡

$$\frac{dP}{dz} = -\rho(z)g(z) \quad (11)$$

を仮定すれば

$$\text{ZHD} = 10^{-6} k_1 \frac{R}{m_d g_m} P_0 \quad (12)$$

となる。ただし、 P_0 は地上気圧、 g_m は次式で与えられる。

$$g_m = \frac{\int \rho(z)g(z)dz}{\int \rho(z)dz} \quad (13)$$

さらに、(13) 式を展開した一次の項は気柱の重心における重力加速度と近似できるから、ZHD は

$$\text{ZHD} = 10^{-3}(2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_0}{f(\phi, H)}, \quad (14)$$

$$f(\phi, H) = (1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028H) \quad (15)$$

と表すことができる [32]。ここで $f(\phi, H)$ は観測点の緯度 ϕ 、楕円体高 $H[\text{km}]$ における重力加速度の違いを効果を表している。以上より、天頂方向における乾燥大気に起因する遅延量は、(14) 式のように地上気圧に比例する関数と考えることができる。これは天頂静水圧遅延 (ZHD: Zenith Hydrostatic Delay) と呼ばれる。

一方 (9) 式右辺第 2 項、第 3 項は、大気中の水蒸気に起因する遅延量であり天頂湿潤遅延 (ZWD: Zenith Wet Delay) と呼ばれる。ZWD は単位面積の大気柱に含まれる水蒸気の総量である可降水量 (PWV: Precipitable Water Vapor) との間に次のような関係があることが示されている [33]。

$$\text{ZWD} = 10^{-6} \left[k'_2 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} dz + k_3 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} dz \right] \quad (16)$$

$$= 10^{-6} R_v \left(k'_2 + k_3 \frac{\int_{\text{Zenith}} \frac{P_v}{T^2} dz}{\int_{\text{Zenith}} \frac{P_v}{T} dz} \right) \cdot \int_{\text{Zenith}} \frac{P_v}{R_v T} Z_v^{-1} dz \quad (17)$$

$$= \Pi^{-1} \text{PWV} \quad (18)$$

ここで、

$$\Pi \equiv \frac{10^5}{R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (19)$$

$$T_m \equiv \frac{\int_{\text{Zenith}} \frac{P_v}{T} dz}{\int_{\text{Zenith}} \frac{P_v}{T^2} dz} \quad (20)$$

と定義した。 R_v は水蒸気の気体定数であり、 T_m は観測点上空の水蒸気分圧で重みづけられた平均気温（加重平均気温）を表している。すなわち、天頂湿潤遅延は、観測点での可降水量と比例定数 Π^{-1} の積で表されることがわかる。

以上より、対流圏遅延は大気中の水蒸気を表す一指標として取り扱えることを示した。次に GNSS 測位解析における対流圏遅延推定方法について説明する。

測位解析において推定しなければならない対流圏遅延は衛星の個数分存在し、かつそれぞれが時々刻々と変化する量である。しかし観測量並びに観測方程式数は衛星の個数しかなく、加えて受信機位置などほかに推定しなければならないパラメータも同時に存在するため、各衛星の対流圏遅延すべてを同時に推定することは困難である。そのため、測位解析においては前述の天頂静水圧遅延 ZHD と天頂湿潤遅延 ZWD の和である天頂全遅延 (ZTD: Zenith Total Delay) が使用される。ZTD, ZHD, ZWD を用いて、衛星 p -受信機間を伝搬する電磁波が受ける対流圏遅延 T_r^p は次式で表される。

$$\begin{aligned} T_r^p &= m_H(El_r^p)ZHD + m_W(El_r^p)ZWD \\ &= m_H(El_r^p)ZHD + m_W(El_r^p)(ZTD - ZHD) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $m_H(El_r^p)$, $m_W(El_r^p)$ はそれぞれ静水圧マッピング関数、湿潤マッピング関数と呼ばれる仰角 El_r^p に依存する関数である [34]。これは大気構造をモデル化した関数であり、衛星 p -受信機間の視線方向の伝搬遅延はマッピング関数によって ZTD, ZHD を用いた形に変換される。ZHD は (14) 式によって高精度に導出することができるので、衛星の個数分だけ存在する対流圏遅延がすべて推定されるのではなく、それらの代表値である ZTD 並びに水蒸気量を表すことができる ZWD が推定される。ZTD の模式図は図 4 のようになる。

2.2.4 拡張カルマンフィルタを用いた精密単独測位

本節では拡張カルマンフィルタをパラメータ推定法として用いた精密単独測位を示す。ここでは、地球に固定された受信機 r の座標 $\mathbf{r} = (x_r, y_r, z_r)$ を求める場合（いわゆる、スタティック測位解を求める場合）を想定する。また L1 と L2 の 2 周波分の観測値が得られるものとし、電離層フリー線形結合を適用する。このとき、推定値パラメータベクトル $\mathbf{x}$ は以下で与えられる。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{r}, cdt_r, ZTD, N_{r,LC}^1, N_{r,LC}^2, \dots, N_{r,LC}^m)^T \quad (22)$$

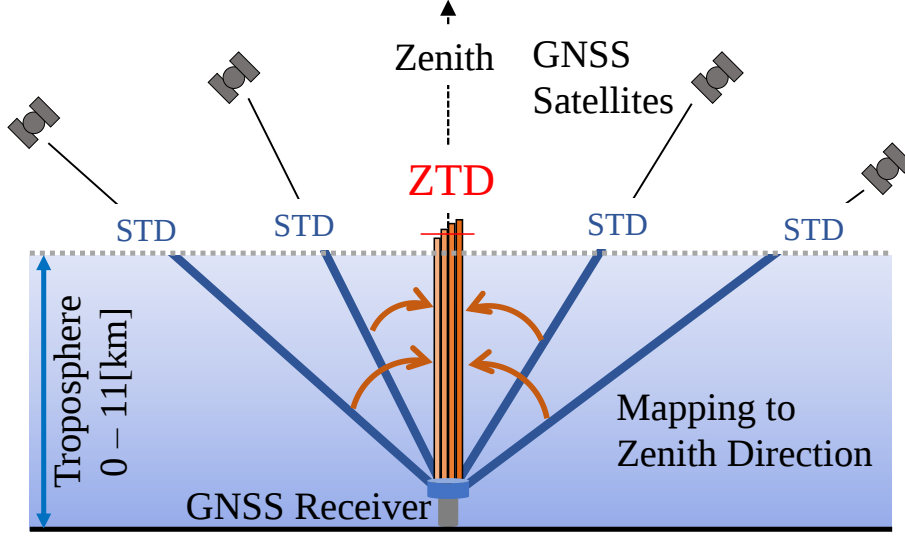


図 4 マッピング関数の模式図

ここで、 $\mathbf{r} = (x_r, y_r, z_r)$ は受信機座標、 cdt_r は受信機時計誤差 $\times$ 光速 [m]、ZTD は受信機位置の天頂全遅延 [m]、 $N_{r,LC}^p$ は衛星 p の搬送波位相バイアス [m] である。

搬送波位相及びコード疑似距離の、時刻 t_k における観測値ベクトル $\mathbf{y}_k$ を以下とおく。

$$\mathbf{y}_k = (\Phi_{r,LC}^1, \Phi_{r,LC}^2, \dots, \Phi_{r,LC}^m, P_{r,LC}^1, P_{r,LC}^2, \dots, P_{r,LC}^m) \quad (23)$$

また搬送波位相とコード疑似距離のモデル式を用いると、観測モデルベクトル $\mathbf{h}_k(\mathbf{x})$ は以下のように書ける。

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \rho_r^1 + c(dt_r - dT^1) + T_r^1 + N_{r,LC}^1 + d\Phi_{r,LC}^1 \\ \rho_r^2 + c(dt_r - dT^2) + T_r^2 + N_{r,LC}^2 + d\Phi_{r,LC}^2 \\ \vdots \\ \rho_r^m + c(dt_r - dT^m) + T_r^m + N_{r,LC}^m + d\Phi_{r,LC}^m \\ \rho_r^1 + c(dt_r - dT^s) + T_r^1 \\ \rho_r^2 + c(dt_r - dT^s) + T_r^2 \\ \vdots \\ \rho_r^m + c(dt_r - dT^s) + T_r^m \end{pmatrix} \quad (24)$$

ここで、衛星 p の対流圏遅延 T_r^p は、天頂全遅延 ZTD、天頂静水圧遅延 ZHD、静水圧マッピング関数 $m_H(El_r^p)$ と湿潤マッピング関数 $m_W(El_r^p)$ を用いて (21) 式のように書きなおされる。またこのとき天頂静水圧遅延については標準大気モデル (14) 式により求める。

マッピング関数には NMF マッピング関数 (Niell Mapping Function)[35] が用いられる。式 (22) 及び (24) より、 $\mathbf{h}_k(\mathbf{x})$ の偏微分係数行列 $\mathbf{H}_k(\mathbf{x})$ は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_k(\mathbf{x}) &= \frac{\partial \mathbf{h}_k(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \\ &= \begin{pmatrix} -\mathbf{e}_r^{1T} & 1 & m_W(El_r^1) & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{e}_r^{2T} & 1 & m_W(El_r^2) & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{e}_r^{mT} & 1 & m_W(El_r^m) & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\mathbf{e}_r^{1T} & 1 & m_W(El_r^1) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{e}_r^{2T} & 1 & m_W(El_r^2) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{e}_r^{mT} & 1 & m_W(El_r^m) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 $\mathbf{e}_r^p$ は衛星 p から受信機間の単位 LOS ベクトルである。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_r^p &= \frac{\mathbf{x}^p - \mathbf{x}_r}{\rho_r^p} \\ &= \frac{\mathbf{x}^p - \mathbf{x}_r}{|\mathbf{x}^p - \mathbf{x}_r|} \end{aligned} \quad (26)$$

以上を使って、時刻 t_k の拡張カルマンフィルタの観測更新は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^+ &= \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_k^-)) \\ \mathbf{P}_k^+ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_k^-)) \mathbf{P}_k^- \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T(\hat{\mathbf{x}}_k^-) (\mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T(\hat{\mathbf{x}}_k^-) + \mathbf{R}_k)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 、 $\mathbf{P}_k^-$ は観測更新前パラメータ推定値、推定値共分散行列、 $\hat{\mathbf{x}}_k^+$ 、 $\mathbf{P}_k^+$ は観測更新後パラメータ推定値、推定値共分散行列、 $\mathbf{K}_k$ はカルマンゲイン、 $\mathbf{R}_k =$

$\text{diag}(\sigma_{\Phi}^2, \sigma_{\Phi}^2, \dots, \sigma_{\Phi}^2, \sigma_P^2, \sigma_P^2, \dots, \sigma_P^2)$ は観測誤差共分散行列である。ただし、観測誤差 $\epsilon_{\Phi, LC}$ 、 $\epsilon_{P, LC}$ は正規分布に従うものとする ($\epsilon_{\Phi, LC} \sim N(0, \sigma_{\Phi}^2), \epsilon_{P, LC} \sim N(0, \sigma_P^2)$)。

受信機時計誤差は白色雑音過程、天頂全遅延は random-walk 過程により変動をモデル化すると、時刻 t_k から時刻 t_{k+1} への時間更新は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- &= \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_k^+ + \bar{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \mathbf{P}_{k+1}^- &= \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k^+ \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

ここで、 $\mathbf{F}_k = \text{diag}(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, \dots, 1)$ は時刻 t_k から時刻 t_{k+1} への状態遷移行列、 $\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = (0, 0, 0, \overline{cdt_r}, 0, 0, 0, \dots, 0)$ は時刻 t_{k+1} における初期パラメータ推定値、 $\mathbf{Q}_k$ はプロセスノイズ共分散行列である。

以上が拡張カルマンフィルタの観測更新の時間更新の流れである。時刻 t_1 の初期推定値及び初期推定値共分散行列を以下とおき、時刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 観測値を使用して、() と () 式を交互に適用することにより推定値 $\hat{\mathbf{x}}_1^+, \hat{\mathbf{x}}_2^+, \dots, \hat{\mathbf{x}}_n^+$ を求める。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_1^- &= \left(\bar{\mathbf{r}}, \overline{cdt_r}, 0, \overline{N}_{r, LC}^1, \overline{N}_{r, LC}^2, \dots, \overline{N}_{r, LC}^m \right)^T \\ \overline{\mathbf{P}}_1^- &= \text{diag} \left(\bar{\sigma}_r^2, \bar{\sigma}_r^2, \bar{\sigma}_r^2, \bar{\sigma}_{cdt_r}^2, \bar{\sigma}_{ZTD}^2, \bar{\sigma}_N^2, \bar{\sigma}_N^2, \dots, \bar{\sigma}_N^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{r}}, \bar{\sigma}_r$ は受信機座標初期推定値と標準偏差 [m]、 $\overline{cdt_r}, \bar{\sigma}_{cdt_r}$ は受信機時計誤差 × 光速の初期推定値と標準偏差であり、2つの初期推定値は単独測位により求める。また搬送波位相バイアス初期推定値は搬送波位相及びコード疑似距離を使って以下により求める。

$$\overline{N}_{r, LC}^p = \Phi_{r, LC}^p - P_{r, LC}^p \quad (30)$$

3. 解析手法

3.1 RTKLIB

GNSS 測位解析には、オープンソースの測位解析ライブラリである RTKLIB[22] を使用した。RTKLIB は単独測位や干渉測位、精密単独測位など多様な測位解析手法に対応した測位解析ライブラリであり、リアルタイム解析及び後処理解析の両方に対応している。また電離層や対流圏などに対する各種補正に関してもユーザーが設定することができる [36]。本研究では後処理解析で ZTD を推定するため、ライブラリ内の後処理用 GNSS 測位解析ソフトウェアである RTKPOST を使用した。図 5 に、RTKPOST の起動画面と各種設定項目を示す。図中の各設定項目は以下のとおりである。

- ① 解析時刻範囲
- ② GNSS 観測データ入力
- ③ GNSS 暦データ入力
(放送暦, 精密暦 (SP3 format), 衛星時計補正情報 (CLK format))
- ④ 測位解析結果出力
- ⑤ 詳細オプション, 測位解析の実行

詳細オプションの設定画面を図 6 に示す。図のように、測位手法や使用周波数、各種補正手法などを設定可能である。本研究では精密単独測位手法の一つである PPP-Static を利用した。この手法では受信機が地球表面上に固定されている静止点と仮定して精密単独測位を行う。

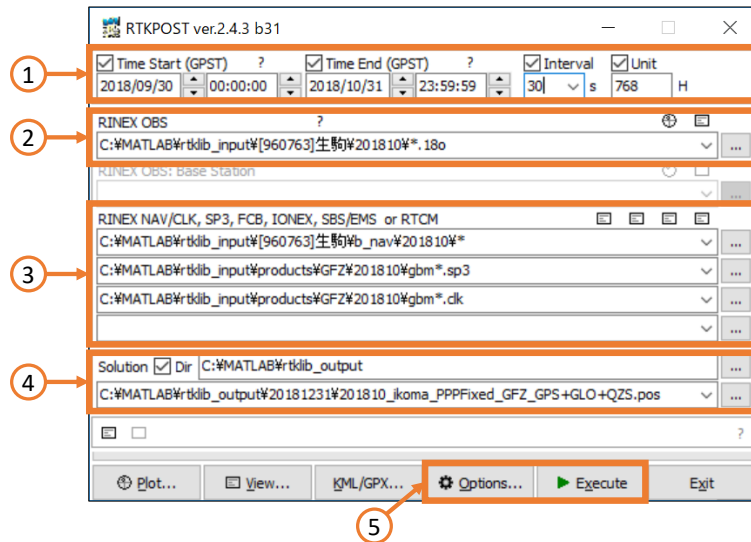


図 5 RTKPOST の起動画面

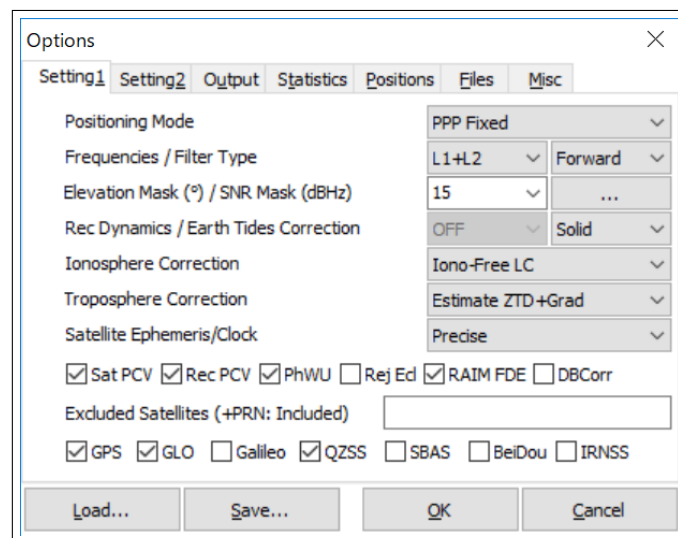


図 6 RTKPOST の詳細オプション

3.2 使用データ

3.2.1 GNSS 測位解析に必要なデータ

GNSS 測位解析に必要な搬送波位相及びコード疑似距離観測値は、国土地理院が運用している GNSS 連続観測システム GEONET(GNSS Earth Observation Network System)[37] より入手した。本システムは全国約 1,300 箇所に設置された電子基準点と呼ばれる GNSS 受信機群で構成されており、高密度かつ高精度な測量網の構築と広域の地殻変動の監視を目的とした観測システムである。このシステムの大きな特徴は、電子基準点座標などの解析後のデータだけではなく搬送波位相及びコード疑似距離観測値といったいわゆる raw data を提供していることである [38]。ゆえに、個々の利用者が望むものに応じて解析項目・設定を変更した測位解析を行うことができる。

精密単独測位に必要な精密暦は、IGS のプロジェクトである Multi-GNSS Experiment and Pilot Project(MGEX)[39] が公開しているものを用いる。MGEX 精密暦では IGS 精密暦でカバーされている GPS, GLONASS 以外にも、Galileo、Beidou、QZSS の暦情報を使用できる。MGEX 精密暦は提供機関ごとに複数存在するが、今回はドイツ地球科学研究センター (GFZ) より提供されている速報暦 (Rapid)[40] を使用した。

3.2.2 気象観測データ

本研究では天頂全遅延を用いた簡便な降雨予測手法の検討を行うために、実環境上における天頂全遅延と気象事象との関係を調査する。それに用いる気象観測データは、気象庁のアメダス [4] より入手した。アメダスからは 1 分間降水強度 [mm/h] を入手した。また同時に、本学情報棟前に設置されている Vaisala 社製気象センサからも気象観測データを入手した。この気象センサでは、累積雨量、1 分間降水強度のほか、気温、風向風速、気圧、相対湿度、CO₂ 濃度なども常時観測している。また本学気象センサは東京大学などが参画している気象センサネットワーク “LiveE!” に接続している [41]。また雨雲の動きを確認するために使用し

た気象レーダー画像は、日本気象協会が運営しているウェブサイト “tenki.jp” より入手した [42]。

4. 悪天候時における ZTD 変動傾向の調査

4.1 本学周辺における ZTD の振舞いの検証

関連研究 [16][20] などでは降雨前に ZTD/PWV が急増することが示されているが、温暖湿潤気候に属する日本において同様の傾向がみられるかは検証が不十分である。本節では日本において上記の傾向がみられるかを確認するため、複数の気象センサ及び電子基準点のデータを用いて雨雲接近時の ZTD の振舞いを検証する。本検証で使用した観測点は図 7 及び表 2 のとおりである。本学周辺の 2 つの電子基準点（生駒・交野、青マーカ）、生駒山のアメダス及び本学設置気象センサ（赤マーカ）から入手した 1 分間降水強度を使用する。

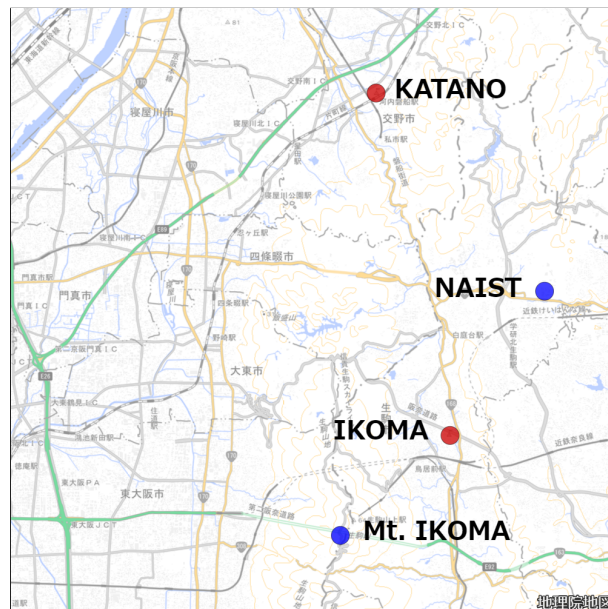


図 7 各観測点の位置関係（地理院地図 [43] を加工して作成）

表 2 各観測点の緯度経度

Type	Station Name	Latitude[°]	Longitude[°]
GNSS Receiver	電子基準点生駒 (IKOMA)	N34.6983	E135.7060
	電子基準点交野 (KATANO)	N34.7778	E135.6855
Weather Sensor	アメダス生駒山 (Mt. IKOMA)	N34.6750	E135.6767
	NAIST	N34.7316	E135.7340

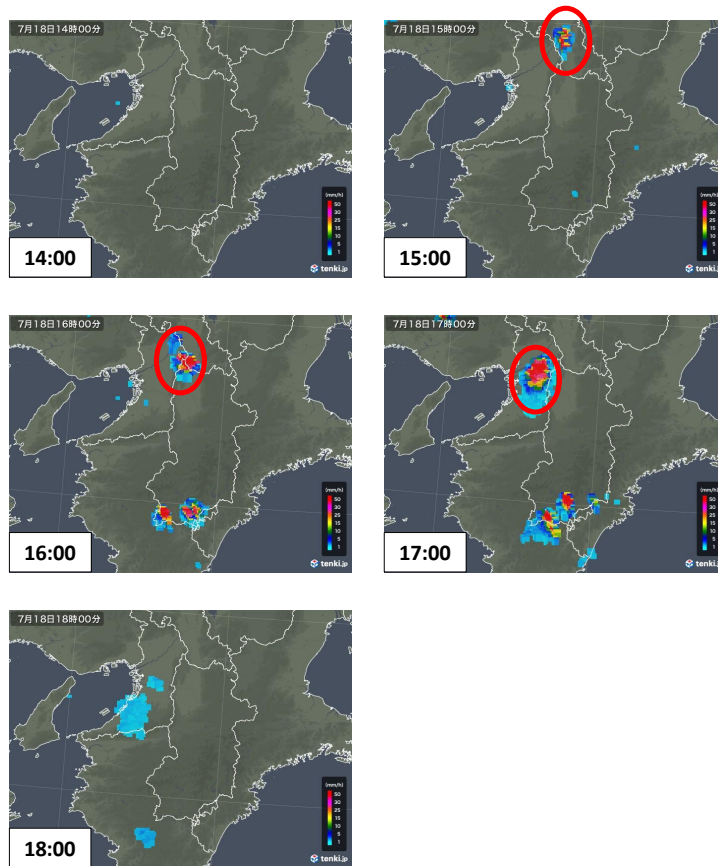


図 8 2018 年 7 月 18 日 14:00–18:00 の雨雲レーダー画像 (tenki.jp[42] 雨雲レーダー画像を加工して作成)

本検証では本学周辺で局地的な大雨が観測された 2018 年 7 月 18 日のデータを使用する。この事象における雨雲レーダー画像を図 8 に示す。本事象で、15 時ごろ京都南部で発生した雨雲は南西方向に移動しつつ急速に発達した。結果的に京都南部から大阪にかけて局所的な大雨を引き起こし、本学に設置した気象センサでも 1 分間降水強度 100[mm/h] を超える雨が観測された。

図 9 に各観測点の ZTD と降水強度の時間変化を示す。また図 10 に各観測点の単位時間（30 秒）当たりの ZTD 変化量 (ZTDD) と降水強度の時間変化を示す。ZTDD は次式で導出される。ここでサンプリング間隔 Δt は 30[sec] である。

$$\text{ZTDD}[t] = \text{ZTD}[t] - \text{ZTD}[t - \Delta t] \quad (31)$$

これらの図より、NAIST で降雨を観測する 1 時間程度前に、電子基準点交野の ZTD が 1.5[mm/30sec] の速さで増加していることがわかる。また同様にアメダス生駒山で降雨を観測する 1 時間程度前に、電子基準点生駒の ZTD が 2[mm/30sec] の速さで増加している。これらから、ZTD は降雨前の水蒸気分布の俊敏な変動を反映していることがわかる。さらに ZTD の上昇並びに急激な上昇をモニタリングすることで、降雨発生を未然に検出することが可能であるといえる。

また ZTD 急増の生起時刻に着目すると、雨雲レーダー画像の雨雲の動きと一致していることがわかる。時系列順に並べると、雨雲に最も近かった電子基準点交野で始めに ZTD が急増し（15：00 頃）、次に電子基準点生駒で ZTD が急増している（15：30 頃）。この 2 つは降雨前の水蒸気分布の変化を如実に示している。その 30 分後に京都側の気象観測点である NAIST 気象センサで降雨が観測され（16：00 頃）、次いで 30 分後に雨雲発生地点から最も遠いアメダス生駒山でも降雨が観測されている。つまり ZTD は降雨の 1 時間程度前には急増をはじめ、かつ雨雲が動くことによる水蒸気分布の変動も反映可能であることがわかる。

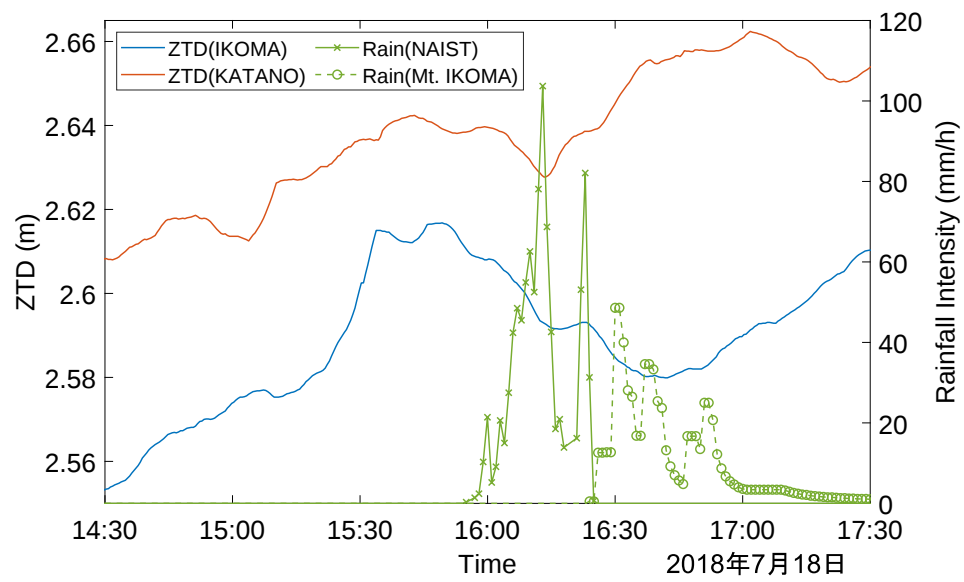


図 9 ZTD 及び降水強度の時間変化（2018 年 7 月 18 日）

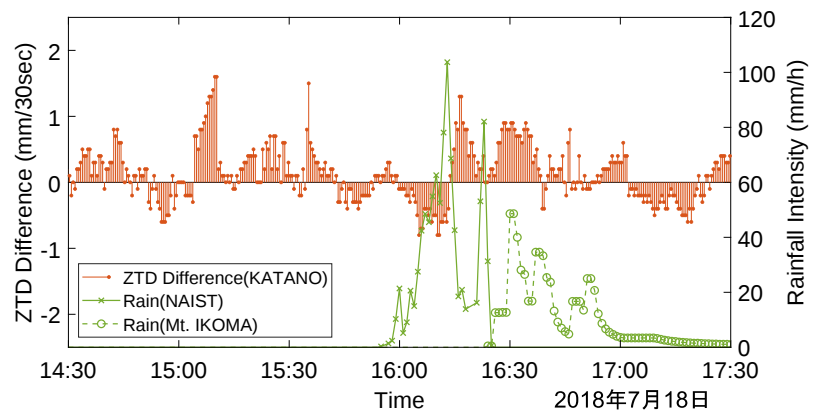


図 10 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 7 月 18 日、電子基準点交野）

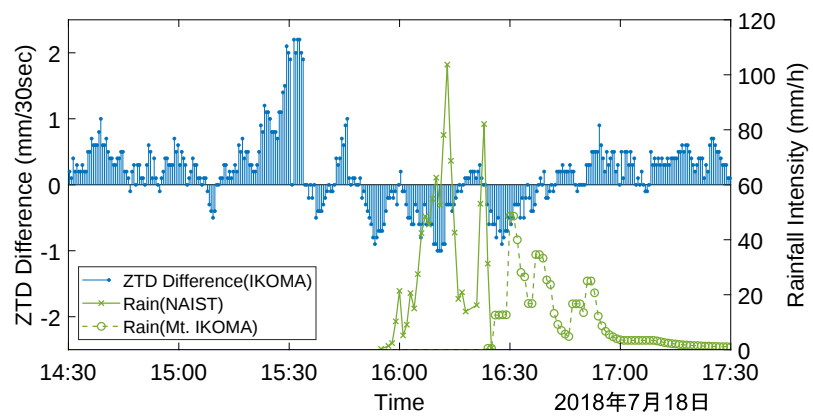


図 11 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 7 月 18 日、電子基準点生駒）

4.2 悪天候時における ZTD と可視衛星数・衛星配置との関係

次に ZTD と GNSS 可視衛星数との関係を検証した。可視衛星数や衛星配置は GNSS 受信機からみた雨雲の存在範囲に直接影響するため、ZTD についても何らかの影響を受けると考えられる。本節では 2018 年 7 月 9 日に発生した局所的な大雨を用いて検証を行う。本事象における雨雲レーダー画像を図 12 に示す。14:00 頃大阪北部で発生した雨雲は急速に発達し、15:00 頃には大阪北部から奈良中部にかけて線状降水帯を形成した。この線状降水帯は幅 20[km]、長さ 80[km] に及んだ。

本検証では電子基準点生駒のデータを選択した。図 13 のように、15:00 時点において線状降水帯の中心に位置していることが確認できる。また可視衛星数の調整は測位使用衛星を制限することによって実現する。今回は使用衛星を GPS のみに制限した場合と、GPS と併せて GLONASS を使用した場合の 2 つについて ZTD をそれぞれ推定する。使用衛星の制限以外は上記と同じ設定を用いる。それぞれの場合の可視衛星数の時間変化は図 14 のとおりである。平均可視衛星数は、GPS のみを使用した場合は 5.73、GPS と GLONASS を使用した場合は 11.65 であり、約 6 機増加している。

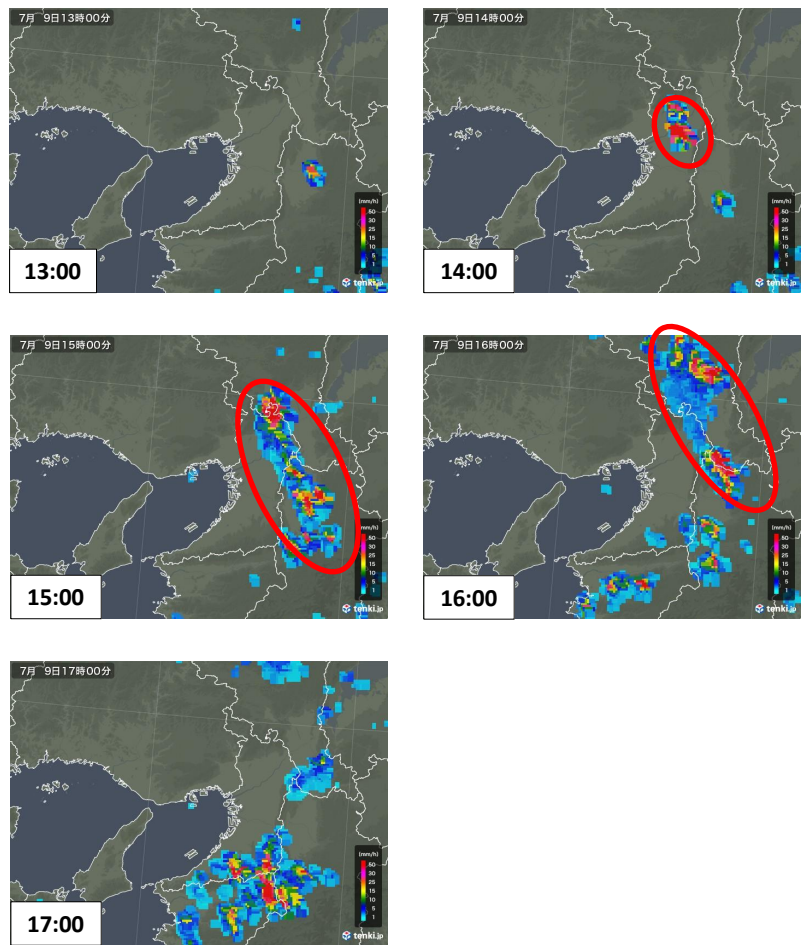


図 12 2018 年 7 月 9 日 13:00–17:00 の雨雲レーダー画像 (tenki.jp[42] 雨雲レーダー画像を加工して作成)

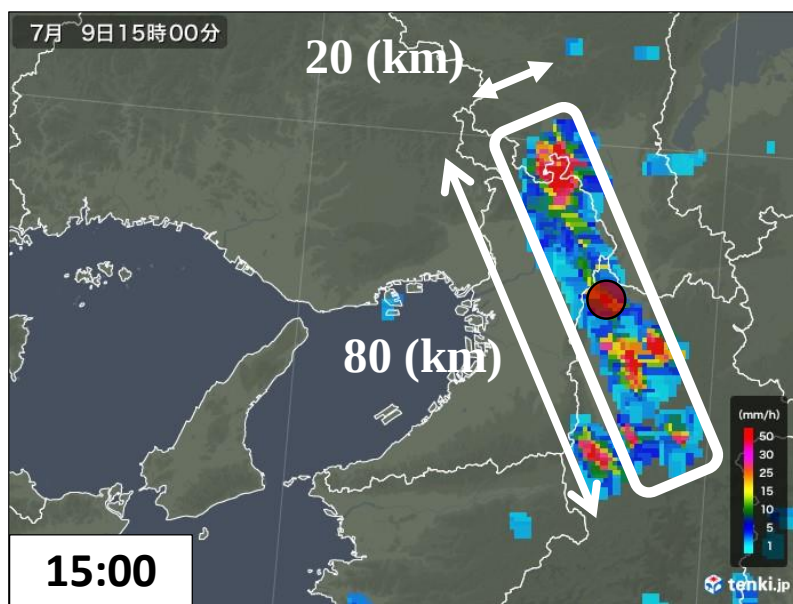


図 13 2018 年 7 月 9 日 15 : 00 に観測された線状降水帯（tenki.jp[42] 雨雲レーダー画像を加工して作成）

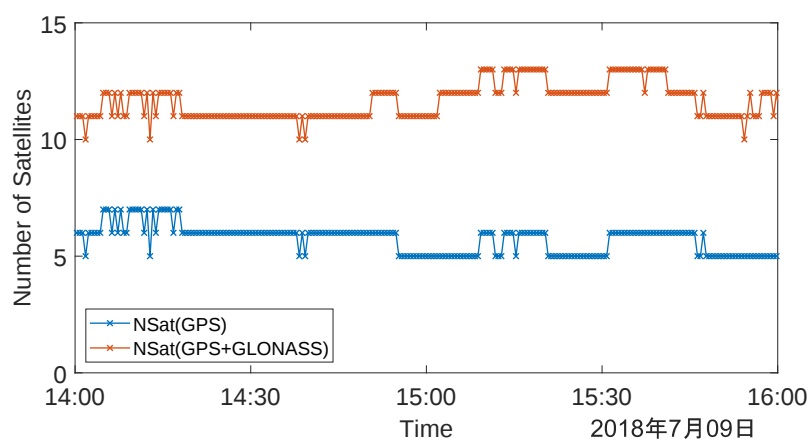


図 14 可視衛星数の時間変化（2018 年 7 月 9 日）

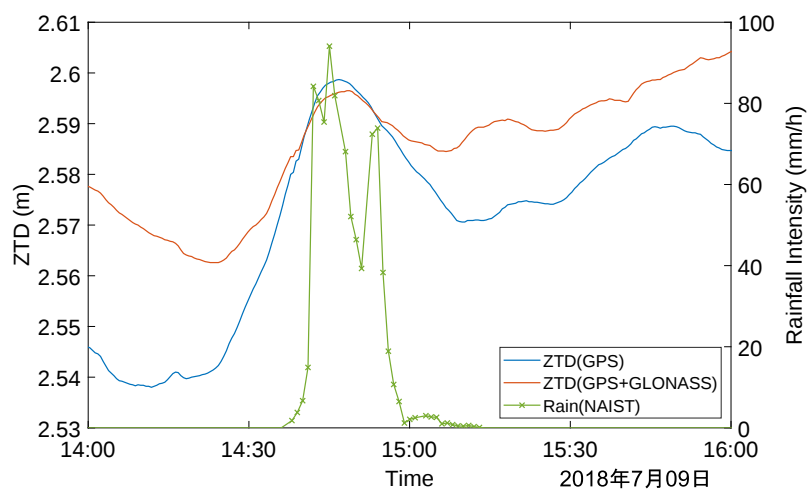


図 15 ZTD 及び降水強度の時間変化（2018 年 7 月 9 日）

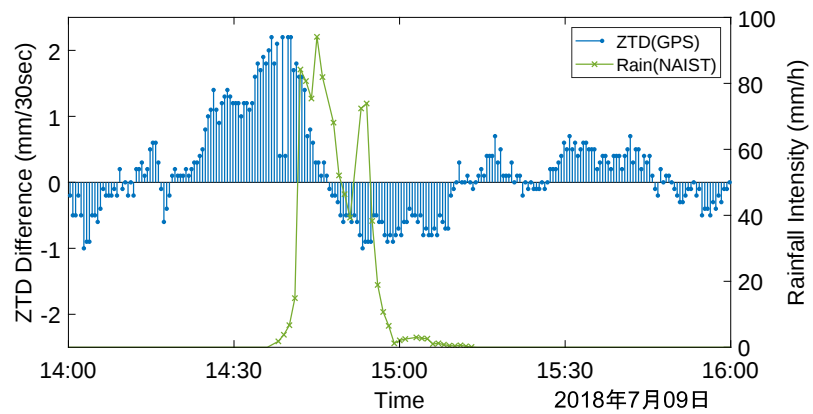


図 16 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 7 月 9 日、使用衛星を GPS のみに制限した場合）

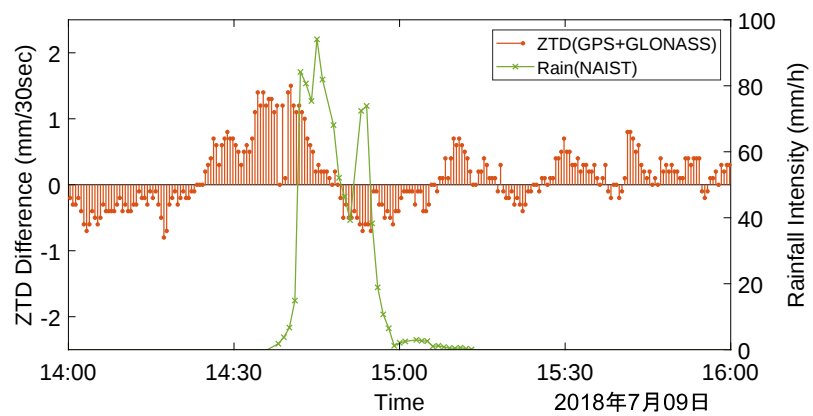


図 17 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 7 月 9 日、使用衛星を GPS と GLONASS に制限した場合）

図 15 に ZTD と降水強度の時間変化を示す。また図 16、図 17 に単位時間当たりの ZTD 変化量 (ZTDD) と降水強度の時間変化を示す。図 15 より、降雨を観測する 15 分程度前には ZTD が急増していることがわかる。GPS のみを使用した場合には、ZTD が $2[\text{mm}/30\text{sec}]$ の速さで継続的に増加していることが確認できる。また GPS と GLONASS を併用した場合においても $1\text{--}1.5[\text{mm}/30\text{sec}]$ の速さで断続的に増加していることがわかるが、GPS のみを使用した場合と比べてその量は少ない。原因として、雨雲の存在範囲と衛星配置が関係していると考えられる。

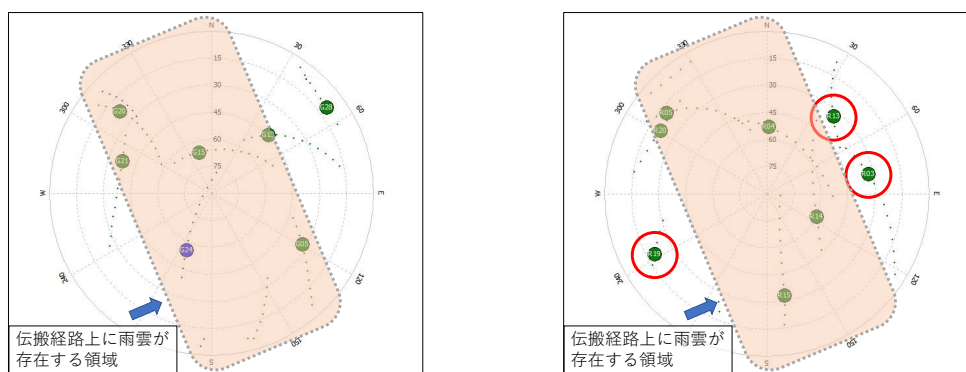


図 18 2018 年 7 月 9 日 14 : 30 における GPS 衛星配置 (左図) /GLONASS 衛星配置 (右図)

図 18 は ZTD が急増し始める時刻 14:30 における GPS/GLONASS の衛星配置である。ZTD の推定には、GPS のみを使用した場合には左図に示す衛星、GPS と GLONASS を併用した場合は右図と左図に示す衛星が使用された。図中の塗り潰された領域は、雨雲レーダー画像で示した線状降水帯が上空を覆っていると考えられる領域である。線状降水帯を引き起こしている雨雲が高度 $10[\text{km}]$ まで存在していると仮定したうえで、図 13 に示した線状降水帯の大きさと照らし合わせて描写している。即ちこの領域内に存在する衛星は線状降水帯の影響を強く受けていると考えられる。

今回のケースでは、図に示すとおりほとんどの GPS 衛星が線状降水帯の影響を受けているのに対して、GLONASS 衛星については計 3 機が領域外に存在している。ZTD は各衛星が持つ対流圏遅延の代表値であるため、GPS と GLONASS を併用した場合は対流圏遅延が小さい領域外の衛星に作用されて ZTD の上昇量

が小さくなったと考えられる。対して GPS のみを使用した場合は、ほとんどの衛星が対流圏遅延成分を多く持っていたために ZTD が急増したと考えられる。

このように、可視衛星数並びに衛星配置と雨雲レーダー画像を比較することによって、各 ZTD 時系列データ上に雨雲の存在範囲による差異が現れることが確認された。これを利用することで、雨雲の接近に対する ZTD 変動を特徴づけることができると思われる。さらに発展して、他の誤差要因（信号受信の中断など）が相互に影響しあうことで発生する ZTD の急増を、降雨予測から除去できることが期待される。これにより降雨予測における誤警報率が軽減可能になる。しかしながら、本検証で比較した 2 ケース（GPS のみを使用した場合/GPS と GLONASS を併用した場合）は GPS 衛星が存在する領域と線状降水帯が存在する領域が一致したために、雨雲の存在範囲による差異が顕著に現われた。全降雨事象についてこのような差異が得られるわけではないため、雨雲の存在範囲と衛星配置、そして ZTD 変動を関連付ける新たな指標を考える必要がある。次章では、GNSS 測位解析の設定の 1 つである「仰角マスク」を用いた雨雲に対する ZTD 変動の特徴づけを提案し、その効果を検証する。

5. 悪天候時の ZTD 変動傾向に仰角マスクが及ぼす影響の検証

本章では、前章 2 節で得た降雨前の ZTD 変動に関する知見を活かすことが可能な指標として、「仰角マスク」を使用することを提案する。仰角マスクとは GNSS 測位解析内の設定項目の 1 つであり、低仰角衛星を測位解析から省くことを目的とする。低仰角衛星は大気中の伝搬時間が長く、マルチパスの影響を受けやすいため誤差を多く含んでいる。それらの影響を最小化するため、仰角が低い衛星は測位解析に使用しないよう制限されている。各時刻における衛星の仰角は衛星軌道情報より容易に参照可能なため、RTKLIB のような測位解析ソフトウェアではよく用いられる。たとえば RTKLIB の初期設定では 15° より低い仰角の衛星はあらかじめ測位解析から省かれる [36]。

前章 2 節より「衛星が存在する領域と雨雲が存在する領域が重なるほど ZTD は急峻に変動する」、「衛星が存在する領域と雨雲が存在する領域の重複が弱いほど ZTD は緩やかに変動する」という降雨前の ZTD 変動に関する知見が得られた。しかし雨雲レーダー画像のように降雨領域をあらかじめ知ることは不可能であるため、前章の方法は現実的でない。対して仰角マスクを用いることで、疑似的に各領域の重複具合を調整することが可能である。仰角マスクが小さいときと大きいときの衛星配置の模式図を図 19、20 に示す。

図 19 は仰角マスクが小さいときの衛星配置を模式化している。塗り潰した逆円錐の領域は仰角マスクによって決定された GNSS 受信機上空の可視領域を表す。領域上部の直径は、対流圏の高度を $11[\text{km}]$ 、仰角マスク 15° とすると $2 \times 11[\text{km}] / \tan 15^\circ \simeq 82[\text{km}]$ となる。衛星が存在可能な領域が大きいとき、雨雲が接近していて領域の一部を覆っている場合や先述の線状降水帯のように数十 $[\text{km}]$ スケールの局所的な大雨の場合において雨雲の影響を受けない衛星が存在しうる。一方図 20 のように仰角マスクが大きいとき、衛星が存在可能な領域は小さくなる。例えば仰角マスク 45° とすると領域上部の直径は $2 \times 11[\text{km}] / \tan 45^\circ = 22[\text{km}]$ となる。このとき領域内に存在する衛星は領域内に密集している分、同じタイミングもしくはそれに近いタイミングで雨雲の影響を受けると考えられる。

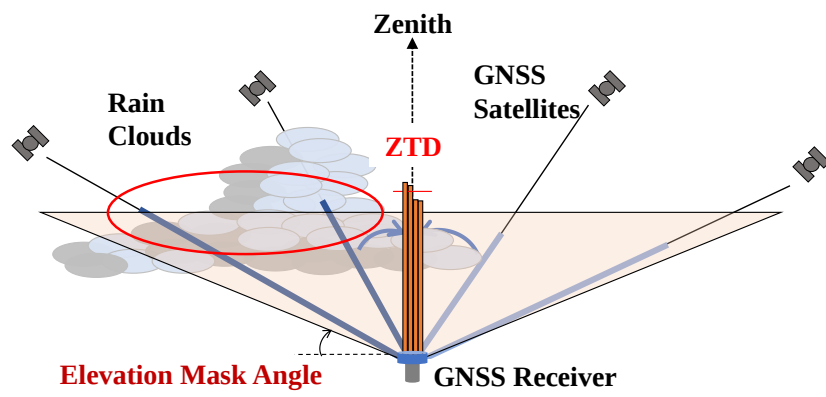


図 19 仰角マスク角度が小さい場合の衛星配置模式図

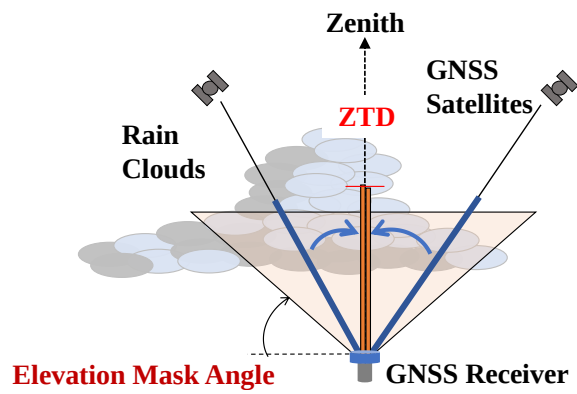


図 20 仰角マスク角度が大きい場合の衛星配置模式図

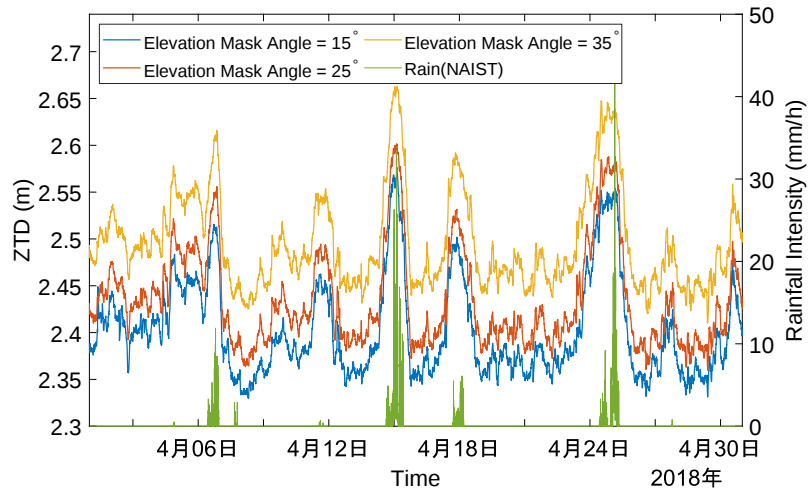


図 21 ZTD 及び降水強度の時間変化（2018 年 4 月）

本章では、ZTD が上昇しかつ降雨が観測された事象を正解事例として、それらに対して上記の仮定が成り立つことを確認する。それにより、仰角マスクが異なることによる ZTD 降変動傾向の違いによって雨雲の特徴づけが可能であることを明らかにする。

本検証では 2018 年 4 月の電子基準点生駒のデータを用いて検証を行った。また ZTD 推定は仰角マスク 15°、25°、35° でそれぞれ実行された。仰角マスク 35° は 4 機以上の衛星が継続して観測できる限界条件である。図 21 に 2018 年 4 月の各 ZTD の時間変化と NAIST における降水強度の時間変化を示す。また図 22 に 2018 年 4 月 6 日の各 ZTD の時間変化と NAIST における降水強度の時間変化を示す。図 22 の事例では 10:00 から降雨が観測された。また降雨の 3 時間程度前から各 ZTD の上昇が確認された。

図 23、図 24、図 25 にはそれぞれ、仰角マスク 15°、25°、35° の単位時間当たりの ZTD 変化量 (ZTDD) の時間変化を表す。ここで降雨前 3 時間の ZTDD を抽出し (360points)、その頻度分布を求めた。それらの結果を図 23、図 24、図 25 の左図に示す。さらに頻度分布を用いて、降雨前 3 時間の間に緩慢な変動・急峻な変動がどの程度含まれているかを求めた。本検討では、緩慢な変動を 30 秒当たり 0.2[mm] を超える変動、急峻な変動を 30 秒当たり 0.6[mm] を超える変動と定義した。またその中間である 0.4[mm] を超える変動についても同様に割合を導

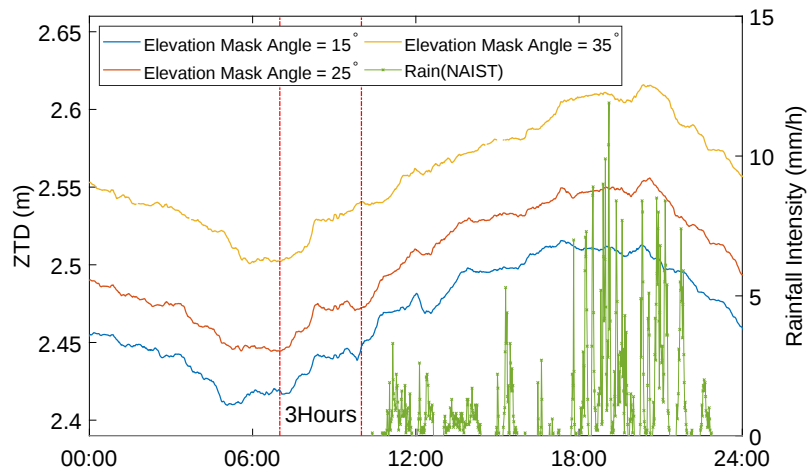


図 22 ZTD 及び降水強度の時間変化（2018 年 4 月 6 日）

出した。表 3 に 2018 年 4 月 6 日の降雨事象における緩慢な変動・急峻な変動の割合と、同様の手法を適用した 2018 年 4 月中の 3 つの降雨事象の結果を示す。

また晴天時の 3 時間中の変動についても同様の手法を用いて検証を行った。雨雲の有無以外の影響を最小にするために、2018 年 4 月で晴天だった日で表 3 と同一タイミングのデータを抽出した。結果を表 4 に示す。これらの結果をまとめたものを図 26 に示す。青の棒グラフが降雨前、赤の棒グラフが晴天時の変動を表している。

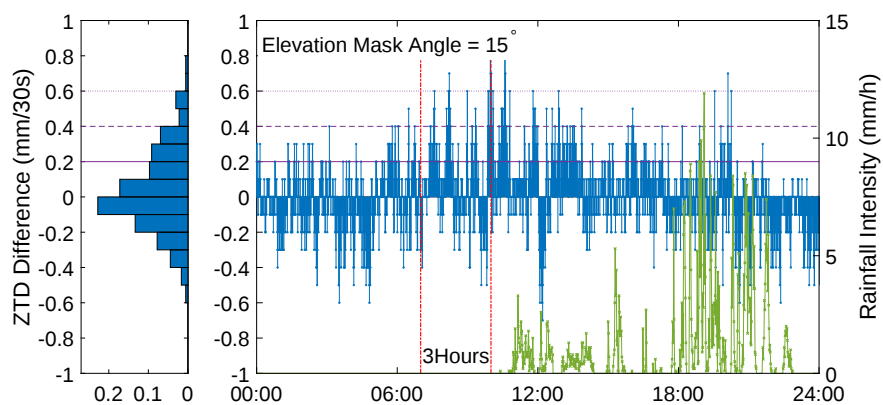


図 23 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 4 月 6 日、仰角マスク 15°）

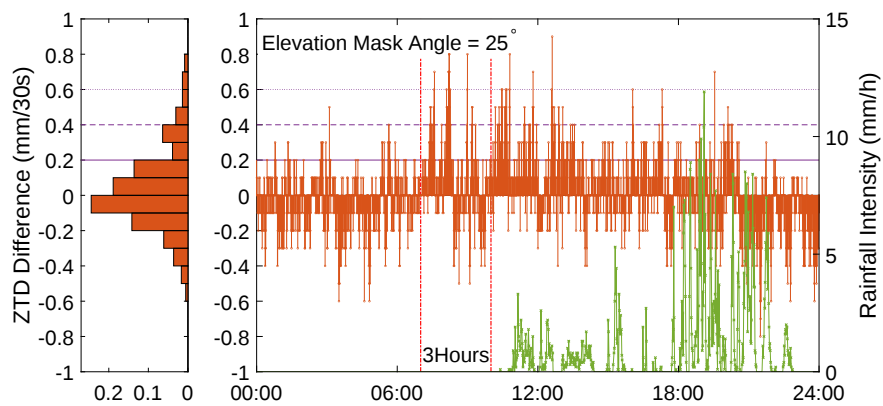


図 24 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 4 月 6 日、仰角マスク 25°）

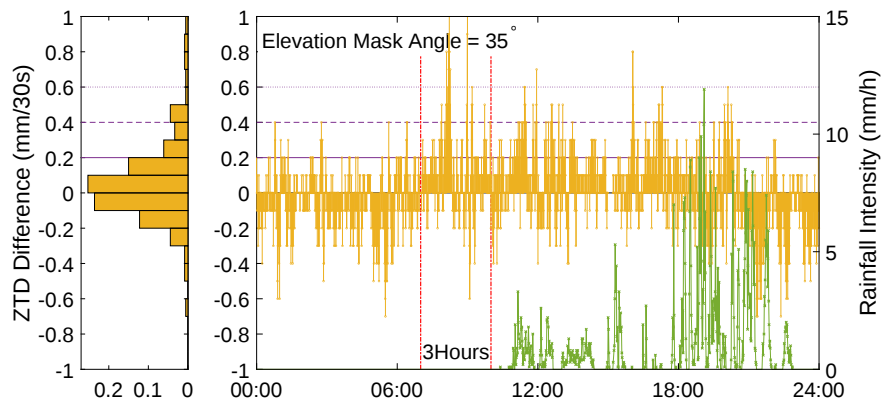


図 25 単位時間当たりの ZTD 変化量及び降水強度の時間変化（2018 年 4 月 6 日、仰角マスク 35°）

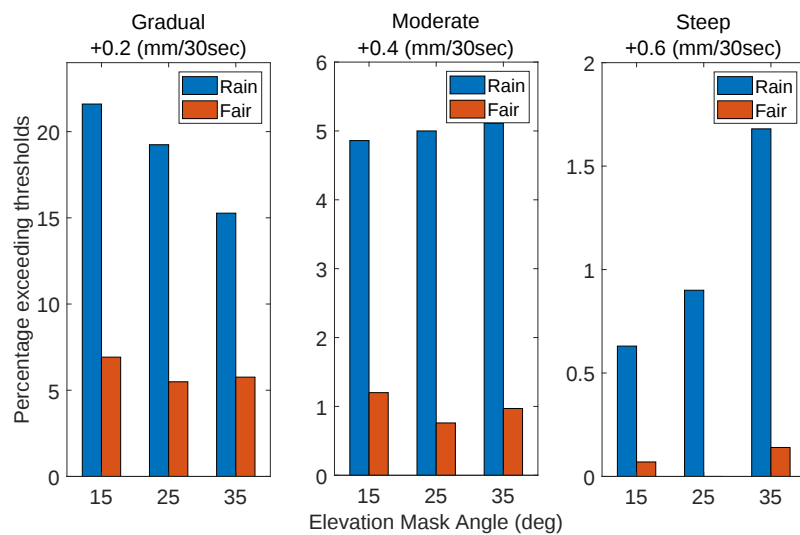


図 26 各仰角マスク下における ZTD 推定値に含まれる緩慢な変動、急峻な変動の割合

表 3 降雨前 3 時間中に含まれる単位時間当たりの変化量 ZTDD の割合

対象とする時間帯	降雨前の 3 時間において、ZTDD が閾値を超える割合 (%)								
	> 0.2 mm/30sec			> 0.4 mm/30sec			> 0.6 mm/30sec		
	15°	25°	35°	15°	25°	35°	15°	25°	35°
April-06-2018, 7:00–10:00	22.50	16.94	16.76	6.39	6.67	7.26	1.11	2.22	2.23
April-14-2018, 12:00–15:00	24.44	20.56	11.01	8.06	7.5	5.66	1.11	0.83	2.83
April-17-2018, 14:00–17:00	8.33	11.67	6.94	0	0.27	1.11	0	0	0
April-24-2018, 7:00–10:00	31.11	27.78	26.38	5.00	5.56	6.39	0.28	0.56	1.67
Average	21.60	19.24	15.27	4.86	5.00	5.11	0.63	0.90	1.68

表 4 晴天時 3 時間中に含まれる単位時間当たりの変化量 ZTDD の割合

対象とする時間帯	晴天時の 3 時間において、ZTDD が閾値を超える割合 (%)								
	> 0.2 mm/30sec			> 0.4 mm/30sec			> 0.6 mm/30sec		
	15°	25°	35°	15°	25°	35°	15°	25°	35°
April-02-2018, 7:00–10:00	6.73	5.28	6.39	1.46	0.56	1.67	0	0	0
April-10-2018, 12:00–15:00	5.56	2.78	3.06	0	0.28	0	0	0	0
April-16-2018, 14:00–17:00	6.94	5.28	3.89	1.11	0.83	0	0	0	0
April-20-2018, 7:00–10:00	8.45	8.61	9.72	2.25	1.39	2.22	0.28	0	0.56
Average	6.92	5.49	5.76	1.20	0.76	0.97	0.07	0	0.14

表 3、図 26 より、降雨前 3 時間中の 0.2[mm/30sec] を超える緩慢な変動は仰角マスクが小さいほど多く含まれることがわかる。4 事象の平均では、仰角マスク 15° と 35° の間で約 6% 異なる。一方 0.6[mm/30sec] を超える急峻な変動については、仰角マスクが大きいほど多く含まれることがわかる。仰角マスク 15° と 35° の差異は約 1% である。これを言い換えると、仰角マスクが大きく衛星が雨雲の影響を受ける範囲が小さい場合に急峻な変動が多く含まれ、逆に仰角マスクが小さく衛星が雨雲の影響を受ける範囲が大きい場合に急峻な変動が少なく緩慢な変動が多く含まれるということになる。また表 4、図 26 より、晴天時の緩慢な変動・急峻な変動について、仰角マスクが異なることによる差異はみられない。これらの傾向は先述した仮定と合致しており、仰角マスクが異なることによる ZTD 変動傾向の違いによって雨雲の特徴づけが可能であるといえる。

6. 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文は、GNSS の対流圏遅延、特に ZTD を用いた降雨予測において誤警報率を軽減することをゴールとして、それに対して有効な新しい指標を提案した。また今回提案した仰角マスクと雨雲探索領域に関する指標に対して、有効性を検証した。

第2章ではGNSSの測位原理と仕組みを解説し、対流圏遅延の物理的性質を解説した。その後精密単独測位（PPP）の原理についても解説を行った。

第3章では本研究で使用したGNSS測位解析ライブラリRTKLIBの解説を行った。その後GNSSの観測諸元と検証に使用した気象観測データについて解説した。

第4章ではZTDを用いた降雨予測が温暖湿潤気候に属する日本においても実現可能であることを検証するため、本学周辺の複数地点のデータを使用して雨雲接近時のZTDの振舞いを調査した。結果より、雨雲接近の30分–1時間程度前から各観測点のZTDが急増することを確認した。また雨雲レーダー画像と照合して各観測点のZTD急増の生起時刻と雨雲の動きが一致していることを確認した。第4章2節では悪天候時のZTDと可視衛星数・衛星配置の関係を検証した。この検証より観測点から見た雨雲の存在範囲と衛星配置が密接に関係していること、それがZTDの時系列データにも表れることを確認した。具体的に、雨雲の存在範囲と測位に使用する衛星の配置が一致するほどZTDが急峻な変動を見せることを確認した。

第5章では仰角マスク設定を用いて、雨雲の存在範囲と衛星配置に関する知見を模擬することを試みた。第4章の結果から定めた、仰角マスクが大きく雨雲の影響を受ける範囲が小さいほどZTDが急峻に変動し、仰角マスクが小さく雨雲の影響を受ける範囲が大きいほどZTDが緩慢な変動をみせるという仮定が正しいことを、複数の降雨事象に対して実証した。さらにZTDに関するこれらの傾向は晴天時には見られないことを明らかにした。これは仰角マスクによって雨雲の存在範囲と衛星配置に関する知見が模擬できていることを示している。

6.2 今後の課題

残された課題として、今回提案した知見を対流圏遅延を利用した従来の降雨予測手法に組み込むことが挙げられる。組み込み方についても、誤警報率を最大限軽減するためにはどうすればよいかを十分に考慮する必要がある。また本研究では、降雨が観測されないにもかかわらず ZTD が急増するという誤警報を軽減する方法を検討してきたが、降雨が観測されたにもかかわらず ZTD が増加しないといった見逃しについても検討を進める必要がある。これにより降雨予測成功率の更なる改善が期待される。

安価でかつ用意に観測可能な他の気象観測データを統合することも、降雨予測成功率を改善する 1 つの方法であると考えられる。今後の展望として、BS 放送電波の降雨による電波減衰を統合することを検討している。

さらに本研究では電子基準点のデータを用いたが、コンシューマ向け GNSS 受信機を用いた ZTD 推定及びそれを用いた降雨予測についても研究が望まれる。本研究では使用することがかなわなかったが、昨年度より安価な GNSS 受信機 [44] を利用した常時観測を実施している。このデータの利用可能性を実証することにより、よりコストパフォーマンスが優れた観測システムの運用が可能になると想定される。

謝辞

本研究に取り組むにあたって多くの方々に御指導と御支援を頂きました。心より深く感謝します。岡田実教授には、本研究に取り組む機会を与えて頂きました。また本研究を遂行するにあたり様々なご指導、ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

笠原正治教授には研究の中間報告に際し、様々なご指導、ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

東野武史准教授には、指導教員として日頃より数多くのご指導、ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

Duong Quang Thang 助教には、指導教員として研究室ミーティングの際などに様々なご指導、ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

本研究室秘書の鬼追美樹氏には、研究生活や事務手続きにおいて様々なサポートをいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

最後に充実した学生生活を共にした、本学先端科学技術研究科、ネットワークシステム学研究室の先輩・同期・後輩の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 気象庁, “気象庁 — 予報用語,” https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [2] 草開浩, 小山芳太, 金森恒雄, 瀬古弘, “2008 年 7 月 28 日近畿地方を南西進した線状降水帯と都賀川での大雨について,” 天気, vol.58, no.5, pp.395–411, 2011.
- [3] 藤谷徳之助, 加藤輝之, 福原正明, 高橋清和, 久保田哲也, 佐々浩司, 牧原康隆, 廣田渚郎, 高薮縁, “「平成 26 年 8 月豪雨に関する研究会」報告,” 天気, vol.62, no.4, pp.315–322, 2011.
- [4] 気象庁, “気象庁 — アメダス,” <https://www.jma.go.jp/jp/amedas/>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [5] 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーセンシング,” 京都大学学術出版会, pp.299–301, 2009.
- [6] 小司禎教, 岩淵哲也, 畑中雄樹, 瀬古弘, 市川隆一, 大谷竜, 萬納寺信崇, “GPS 気象学: GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究,” 測地学会誌, vol.55, no.1, 2009.
- [7] G. Guerova, J. Jones, J. Douša, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, G. Elgered, H. Vedel, and M. Bender, “Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol.9, no.11, pp.5385–5406, 2016.
- [8] M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, “GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol.97, no.D14, pp.15787–15801, 1992.

- [9] C. Rocken, T. V. Hove, J. Johnson, F. Solheim, R. Ware, M. Bevis, S. Chiswell, and S. Businger, “GPS/STORM - GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.12, no.3, pp.468–478, 1995.
- [10] X. Li, G. Dick, C. Lu, M. Ge, T. Nilsson, T. Ning, J. Wickert, and H. Schuh, “Multi-GNSS Meteorology: Real-Time Retrieving of Atmospheric Water Vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS Observations,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.53, no.12, pp.6385–6393, 2015.
- [11] S. Choy, C. Wang, K. Zhang, and Y. Kuleshov, “GPS sensing of precipitable water vapour during the March 2010 Melbourne storm,” *Advances in Space Research*, vol.52, no.9, pp.1688–1699, 2013.
- [12] K. Zhang, T. Manning, S. Wu, W. Rohm, D. Silcock, and S. Choy, “Capturing the Signature of Severe Weather Events in Australia Using GPS Measurements,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol.8, no.4, pp.1839–1847, 2015.
- [13] E. Priego, A. Seco, J. Jones, and M. J. Porres, “Heavy rain analysis based on GNSS water vapour content in the Spanish Mediterranean area,” *Meteorological Applications*, vol.23, no.4, pp.640–649, 2016.
- [14] Y. Seto, H. Yokoyama, T. Nakatani, H. Ando, N. Tsunematsu, Y. Shoji, K. Kusunoki, M. Nakayama, Y. Saitoh, and H. Takahashi, “Relationships among Rainfall Distribution, Surface Wind, and Precipitable Water Vapor during Heavy Rainfall in Central Tokyo in Summer,” *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, vol.96A, no.1, pp.35–49, 2017.
- [15] G. Nykiel, M. Figurski, and Z. Baldysz, “Analysis of GNSS sensed precipitable water vapour and tropospheric gradients during the derecho event in

- Poland of 11th August 2017,” *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, vol.193, no.105082, 2019.
- [16] S. Manandhar, Y. H. Lee, and S. Dev, “GPS derived PWV for rainfall monitoring,” *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, pp.5359–5362.
 - [17] J. Shi, C. Xu, J. Guo, and Y. Gao, “Real-time GPS precise point positioning-based precipitable water vapor estimation for rainfall monitoring and forecasting,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.53, pp.3452–3459, 2015.
 - [18] P. Benevides, J. Catalao, and P. M. A. Miranda, “On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.15, no.12, pp.2605–2616, 2015.
 - [19] Y. Yao, L. Shan, and Q. Zhao, “Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application,” *Scientific Reports*, vol.7, no.12465, 2017.
 - [20] Q. Zhao, Y. Yao, W. Yao, and Z. Li, “Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting,” *Scientific Reports*, vol.8, no.7939, 2018.
 - [21] S. Manandhar, Y. H. Lee, and Y. S. Meng, “GPS-PWV Based Improved Long-Term Rainfall Prediction Algorithm for Tropical Regions,” *Remote Sensing*, vol.11, no.22, 2019.
 - [22] T. Takasu, “RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning,” <http://www.rtklib.com/>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
 - [23] 杉本末雄, 柴崎亮介編, “GPS ハンドブック,” 朝倉書店, 2010.
 - [24] P. J. G. Teunissen, and O. Montenbruck, Eds., “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems,” Springer International Publishing AG, 2017.

- [25] National Aeronautics and Space Administration(NASA), “CDDIS: NASA’s Archive of Space Geodesy Data — GNSS Orbit Products,” https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [26] International GNSS Service(IGS), “IGS Products,” <http://www.igs.org/products/data>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [27] 小倉義光, “一般気象学,” 東京大学出版会, pp.21–25, 1999.
- [28] 大谷竜, 内藤勲夫, “GPS 可降水量の物理と評価,” 気象研究ノート, vol.192, pp.15–34, 1998.
- [29] R. Ichikawa, M. Kasahara, N. Mannoji, and I. Naito, “Estimations of atmospheric excess path delay based on three-dimensional, numerical prediction model data,” *Journal of the Geodetic Society of Japan*, vol.41, no.4, pp.379–408, 1995.
- [30] G. D. Thayer, “An improved equation for the radio refractive index of air,” *Radio Science*, vol.9, no.10, pp.803–807, 1974.
- [31] G. Boudouris, “On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol.67D, no.6, 1963.
- [32] G. Elgered, J. L. Davis, T. A. Herring, and I. I. Shapiro, “Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay,” *Journal of Geophysical Research*, vol.96, no.B4, pp.6541–6555, 1991.
- [33] J. Askne, and H. Nordius, “Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data,” *Radio Science*, vol.22, no.3, pp.379–386, 1987.
- [34] 市川隆一, 田中寅夫, “大気遅延とマッピング関数,” 気象研究ノート, vol.192, pp.35–48, 1998.

- [35] A. E. Niell, “Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths,” *Journal of Geophysical Research*, vol.101, no.B2, pp.3227–3246, 1996.
- [36] T. Takasu, “RTKLIB ver. 2.4.2 Manual,” pp.34–49, http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [37] 国土地理院, “GEONET: GNSS 連続観測システム,” <https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41012.html>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [38] 国土地理院, “電子基準点データ提供サービス,” <https://terras.gsi.go.jp/>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [39] International GNSS Service(IGS), “The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project (MGEX) — Precise Orbit and Clock Products,” http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Products.php. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [40] GFZ German Research Centre for Geosciences, “Analysis Center of the Multi-GNSS Experiment (MGEX) — FTP Server,” <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/GNSS/products/mgex/>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [41] LiveE!評議会, “デジタル百葉箱 — LiveE!プロジェクトの展開状況,” <https://www.live-e.org/instrument/instrument04.html>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [42] 日本気象協会, “tenki.jp — 過去の天気,” <https://tenki.jp/past/>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [43] 国土地理院, “地理院地図,” <https://maps.gsi.go.jp/>. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)
- [44] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局, “みちびき（準天頂衛星システム） — ユーブロックス社、2 周波受信チップのセミナーを開催,” https://qzss.go.jp/news/archive/u-blox_190617.html. (最終アクセス: 2020 年 1 月 26 日)

研究業績

査読付国際会議

1. Kazuaki Imaoka, Takeshi Higashino and Minoru Okada, “Investigation of Rainfall Forecasting Using the Difference of GNSS Zenith Total Delay with Elevation Cut-off Angles,” 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), vol.1, no.1, pp.1239–1241, 10 Dec. 2019.

国内学会大会等

2. 今岡一章, 東野武史, 岡田実, “GNSS 天頂全遅延による降雨予測における観測点位置の離隔が及ぼす影響,” 電子情報通信学会関西支部第 24 回学生会研究発表講演会, vol.1, no.1, p.52, 1 Mar. 2019.
3. 今岡一章, 東野武史, 岡田実, “GNSS 天頂全遅延による降雨予測における可視衛星数との関係,” 2019 年電子情報通信学会総合大会, vol.1, no.1, p.144, 19 Mar. 2019.
4. 今岡一章, 中川豊, 東野武史, 岡田実, “GNSS 天頂全遅延の差分を用いた降雨予測における仰角マスクが及ぼす効果,” 令和元年電気関係学会関西連合大会, vol.1, no.1, pp.168–169, 30 Nov. 2019.

受賞

- 上記業績 2 にて奨励賞受賞
- 上記業績 4 にて連合大会奨励賞受賞（内定）