

修士論文

衛星測位情報を利用した気象予測に関する研究

中川 豊

2019 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

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

中川 豊

審査委員：

藤川 和利 教授 (主指導教員)

岡田 実 教授 (副指導教員)

新井 イスマイル 准教授 (副指導教員)

衛星測位情報を利用した気象予測に関する研究※

中川 豊

内容梗概

ゲリラ豪雨は、大雨の原因となる「あたたかく湿った空気」が供給され続けることにより発生する。このためには積乱雲が発生する以前にその兆候を見つけ出す必要がある。大気中の水蒸気の動態の把握が、ゲリラ豪雨の発生の予兆につながるとの観点から、本研究では、国土地理院が全国に展開しているGPS連続観測網（GEONET）から得られる、衛星測位のオープンデータの情報をを用いて、衛星から届く受信電波の遅延から、大気中の水蒸気量を推定する。これまでの研究では、水蒸気と降雨強度の関係を示す研究は十分行われておらず、衛星測位で得られた水蒸気量と、NAIST 構内の気象センサの降水強度との関係を、統計的手法を用いてその特性を明らかにし、ゲリラ豪雨の予測の一助とする。

キーワード

GNSS (GPS)、ZTD (天頂遅延量)、PWV (可降水量)

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文

2019 年 3 月 15 日

Research On Weather Predict Using Satellite Positioning Information*

Yutaka Nakagawa

Abstract

“Guerilla Heavy Rain” is caused by continued supply of “Warm and moist air” that causes heavy rain. for this, it is necessary to find out signs before cumulonimbus occurs. From the viewpoint that grasp of the dynamics of water vapor in the atmosphere leads to the precursor of the “Guerilla Heavy Rain”, this research aims to develop a satellite positioning system which can be obtained from the GPS continuous observation network (GEONET) developed nationwide by the Geographical Survey Institute , I estimate the amount of water vapor in the atmosphere from the delay of received radio waves coming from the satellite. In my previous, research on the relationship between water vapor and rainfall intensity has not been done enough, and the relationship between the amount of water vapor obtained by satellite positioning and the precipitation intensity of a weather sensor in the NAIST premises is calculated using a statistical method It clarifies its characteristics and helps predict “Guerilla Heavy Rain”.

Keywords:

GNSS(GPS), ZTD(Zenith Total Delay), PWV(Precipitable Water Vapor)

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology,
March 15. 2019

目次

図目次

表目次

第1章 序論

1-1 研究の背景	1
1-2 研究の目的	4

第2章 気象観測と予報の現状

2-1 リモートセンシングによる気象観測の現状	5
2-2 気象予報の現状	5

第3章 GNSS (GPS) の原理と仕組み

3-1 GNSS (GPS) の概要	9
3-2 精密測位 (PPP) の原理	11
3-3 精密暦	11
3-4 電離層遅延	12
3-5 対流圏遅延	12

第4章 GNSS (GPS) の衛星測位情報のデータ処理

4-1 GNSS (GPS) データの解析	15
4-2 衛星測位ソフトウェア RTKLIB	15
4-3 天頂総遅延 (ZTD) の推定手法	20

第5章 観測データの統計的処理と結果の検討

5-1 気象センサ (Live E!) の概要	23
5-2 天頂総遅延 (ZTD) と降雨強度の関係	24
5-3 時系列データの分析	25
5-4 天頂総遅延 (ZTD) の成分分析	26

5-5	多変量時系列データの解析	28
5-6	VAR モデル	29
5-7	多変量データにおける相互相関	31
5-8	ZTD と降雨強度の相互相関	32
5-9	ZTD と降雨強度因果性検定とインパルス応答	32
5-10	観測データのより詳細な分析	34
5-11	VAR モデルによる降雨強度の予測	39
5-12	ランダムフォレストによる回帰分析	41
第 6 章 考察および今後の展望		
6-1	結果の検証	44
6-2	考察	55
6-3	今後の展望	56
第 7 章 結論		61
謝辞		
参考文献		

図目次

1-1 衛星測位情報を利用した降雨予測	2
1-2 可降水量の考え方	3
2-1 数値予報モデルで考慮される過程	6
2-2 気象現象のスケールと生存期間	7
2-3 数値予報のイメージ	7
3-1 測位の原理	10
3-2 対流圏遅延遅延とマッピング関数の模式図	13
4-1 RTKLIB の GUI 画面	16
4-2 単独測位の場合の設定	16
4-3 RTKPOST の起動画面	18
4-4 RTKPOST の詳細(オプション設定画面)	19
5-1 Live E!のネットワーク概要	23
5-2 ZTD と降雨強度(2018/06)	24
5-3 ZTD と降雨強(2018/07)	25
5-4 ZTD 成分分析(1)(2018/06)	26
5-5 ZTD 成分分析(2)(2018/06)	27
5-6 ZTD と降雨強度の散布図(2018/07)	28
5-7 ZTD と降雨強度の相互相関(2018/09)	32
5-8 ZTD に対する降雨強度のインパルス応答	33
5-9 気象レーダー (2018/07/18 14:00～16:00)	34

5-10 観測地点の配置状況	35
5-11 ZTD と 降雨強度(2018/07/18 15:00～17:00)	36
5-12 ZTD と 降雨強度(2018/07/19 14:00～16:00)	36
5-13 気象レーダー(2018/07/19 14:00, 14:45)	37
5-14 ZTD と降雨強度(2018/09/04 12:00-18:00)	37
5-15 気象レーダー (2018/09/04 12:00, 14:10)	38
5-16 ZTD と降雨強度の相互相関 (2018/09/04 12:00～18:00)	39
5-17 ZTD と降雨強度(予測 30 分)(2018/09/04 12:00～15:00)	40
5-18 ZTD と降雨強度(予測 50 分)(2018/09/04 12:00～15:00)	42
5-19 ランダムフォレストによる回帰分析(降水の有無の予測)	42
5-20 ランダムフォレストによる回帰分析 (降水強度 10mm/h を条件とした場合の予測)	42
5-21 ランダムフォレストによる回帰分析 (降水強度変化量+10mm/h を条件とした場合の予測)	43
6-1 ZTD と降雨強度の関係 (2018/6)	44
6-2 ZTD と降雨強度の関係 (2018/7)	44
6-3 ZTD と降雨強度の関係 (2018/8)	45
6-4 ZTD と降雨強度の関係 (2018/9)	45
6-5 単一積乱雲の場合の気象モデルと ZTD, 降水強度、および気象レーダーの関係	47
6-6 雨雲が断続的な場合の ZTD と降雨強度(図 6-3 に同じ)、気象レーダーの例	47
6-7 ① 気象レーダー	48
6-7 ② 気象レーダー	48
6-8 ①気象レーダー	48

6-8 ②気象レーダー	48
6-8 ③気象レーダー	48
6-8 ④気象レーダー	48
6-8 ⑤気象レーダー	49
6-9 ①気象レーダー	49
6-10①気象レーダー	49
6-10②気象レーダー	49
6-10③気象レーダー	49
6-10④気象レーダー	49
6-11 ZTD と降雨強度(2018/08/16 11:40)	50
6-12 ZTD と降雨強度(対応が悪い場合)(2018/07/06 09:25)	51
6-13 積乱雲の下で気圧が上昇する模式図	52
6-14 ZTD と気圧、降雨強度(2018/07/09)	53
6-15 気圧と降雨強度の相互相関(2018/07/09)	53
6-16 ZTD、気圧および降水強度の関係(豪雨の予測の可能性がある例)	54
6-17 ZTD、気圧および降水強度の関係(豪雨の予測が困難な例)	54
6-18 鉛直水蒸気量は半径 30km 空間の平均値	55
6-19 電波の降雨減衰と降雨強度の関係(2018/07/05～07/06)	57
6-20 NTG の電波減衰と降雨強度の関係(2017/8/1 00:00～09:00)	58
6-21 同時多点観測システムのイメージ	58
6-22 機械学習を用いたゲリラ豪雨予測手法のイメージ	59

表目次

2-1	2018/06 に運用開始した気象庁のスーパーコンピュータ	8
3-1	IGS 精密暦の種類(2018 年 12 月現在)	12
4-1	生駒電子基準点の諸元	15
4-2	オプションの設定値	19
5-1	時系列データの分析	26
5-2	単位根検定(ZTD)	30
5-3	単位根検定(降雨強度)	31
5-4	単位根検定	32
5-5	回帰分析用データセット	41
5-6	表 5-5 のデータセットのイメージ	44

第1章 序論

はじめに、最近の気象災害の現状と傾向を示し、その対策として本研究に取り組む背景と目的、および研究の結果得られる効果、影響について述べる。

1-1 研究の背景

近年、予報精度自体は向上しているといわれるものの、ゲリラ豪雨のような局地的な集中豪雨、およびそれに伴う災害が増加傾向にある。具体的には時間雨量 50mm を超える雨が頻発するなど、地球温暖化との関連性も議論されているが、雨の降り方が、局地化・集中化・激甚化している現状がある[1]。

気象庁ではスーパーコンピュータを用いて物理法則に基づく計算を行い、数日先までの気象状況を予測している。台風や低気圧に伴う、ある程度範囲の広い大雨などの予測は可能であるが、局地的な大雨がいつどこで発生するかという部分における予測は難しく、現状ゲリラ豪雨の正確な予測は困難である。ゲリラ豪雨の予測精度向上の切り札とされる、スーパーコンピュータ「京」とフェーズドアレイ気象レーダー(MP-PAWR)*1を融合した国家的プロジェクトのシミュレーションにおいては、ゲリラ豪雨の再現に成功しているが[2]、コスト面からまだ研究段階の域を出ない。

気象災害の規模、件数ともにも増加傾向にあるなかで、防災対策に費やす国家予算は限られており十分な対策が取れない。現状では、コストをかけず既存の観測データやインフラを見直し、それらを融合した情報を再構築、利活用することは社会的にも重要なことと考えられる。

スマートフォンやカーナビゲーションには衛星測位のための受信機が内蔵されている。衛星測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System, 以下 GNSS という)とは、衛星からの電波によって位置情報を計算するシステムのことで、米国の GPS(Global Positioning System)がよく知られており、2018 年末から日本の「みちびき」も正式運用となり、cm 級オーダのより高精度で安定した衛星測位サービスがすでに実現している。

¹ フェーズドアレイ気象レーダー:多数のアンテナ素子を配列し、それぞれの素子における送信及び受信電波の位相を制御することで、電子的にビーム方向を変えることができるレーダー。パラボラアンテナを機械的に回転させるレーダーと異なり、瞬間的にビーム方向を自由に变化させることができる。得られた詳細な3次元観測データは、短時間に大雨をもたらす積乱雲のメカニズムの解明につながると期待されている。

この GNSS による測位の誤差の要因のひとつに対流圏の水蒸気がある。対流圏内の水蒸気が、測位衛星から地球に届くまでに電波の遅延を生じるため、精密な測位のためには、この水蒸気の影響の除去が必要であるが、水蒸気は雨雲の発生、発達予測の指標となることから、逆にこれを利用して天気予測を行う GNSS 気象学という分野が確立されて、日々の天気予報にも取り入れられている。本研究ではコストのかからない GNSS のオープンデータと既存の気象センサを組み合わせ、統計的手法により時系列データ処理を行い、ゲリラ豪雨の実態の把握、さらに予測の可能性について検証を行うこととする。

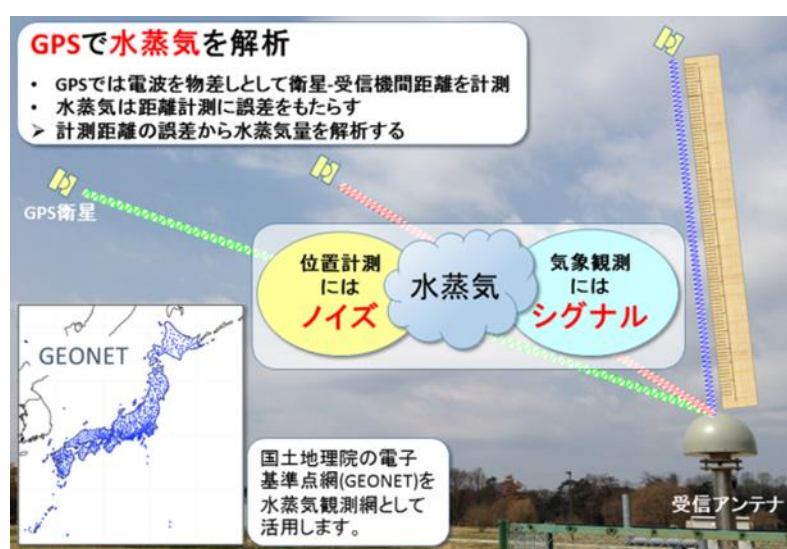


図 1-1 衛星測位情報を利用した降雨予測[3]

図 1-1 は、大気中の水蒸気により衛星から届く電波が受信アンテナに届くまでに遅延が生じるが、測位を対象とした場合は、大気中の水蒸気は単にノイズ(誤差)でしかないが、この遅延量から水蒸気量を推定することができ、それをもとにゲリラ豪雨の予測を行うイメージを示したものである。気象庁では、国土地理院が主に地殻変動の観測のために設置した GEONET (GNSS Earth Observation Network System) の観測網のデータを利用している。このデータは、リアルタイムでの提供の場合は有償であるが、過去のデータについては、一般に公開されており、この情報を元に降雨予測を行うことは、精度の問題はあるものの、技術的には可能である。観測点に 2 周波対応の GNSS (GPS) 受信機と気象センサを用意し、測位情報を元に、測位解析のソフトウェア

で受信したデータを処理すれば、可降水量^{*2}が計算でき、雨量の予測も可能である。可降水量 PWV の計算は以下、式(1)から求まる。可降水量は単位面積あたりの地上から無限大の高さの気柱を考える。(図 1-2)

$$PWV = \int_0^{\infty} \rho_v dz = \int_0^{\infty} \rho q dz = \int_0^{\infty} q dp = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q dp \quad (1)$$

ρ	水蒸気密度	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
ρ_v	空気密度	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
g	重力加速度	m/s^2
p_s	地上気圧	hpa
q	比湿度	kg/kg
p	気圧	hpa

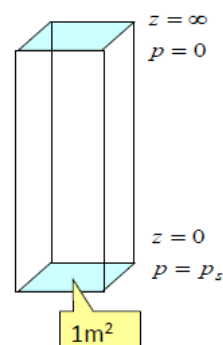


図 1-2 可降水量の考え方

衛星測位のためには GNSS (GPS) を受信機できる受信機およびアンテナが必要である。さらに精密に気象予測へ応用する場合は、電離層による影響を避けるため、高価な 2 周波受信機が必要となる。2018 年 11 月以降のみちびきの正式運用開始を機会として、最近になって、コンシューマ向けの GNSS (GPS) 受信機の性能向上と、低コスト化が加速してきた。

本研究に着手した段階では、まだこのような低コストで 2 周波対応の受信機が入手できる時期にはなかったこともあり、一般に公開されている、測位情報として GEONET のオープンデータと既存の気象センサを利用して、ゲリラ豪雨の実態の把握、さらに予測の可能性について検証し評価を行うこととした。

GEONET は国内に観測点が約 1,300 点あり、常に 4 機以上の GNSS 衛星を観測できるように衛星が配置されている。そのため、大気の水蒸気変動の観測には、観測間隔が

² 可降水量とは、地上から上空までの大気に含まれる水蒸気量の総和 (GPS 可降水量) のことで、水蒸気がすべて降水となった場合に、地上で観測される降水量を表す。衛星測位電波が大気中を通過する際に、水蒸気の効果により伝搬遅延が起こる。これから経路に沿った水蒸気の積分量が推定できる。これを天頂方向に投影すれば、受信機上空における可降水量 (PWV: Precipitable Water Vapor) を求めることができる。

長くかつ不定期的な VLBI (Very Long Baseline Interferometry (超長基線電波干渉法)) や、一日あたりの観測回数が 2 回しかなく観測点も国内に 16 点しかないラジオゾンデ (気球で飛ばされる無線機付き気象観測機器) と比べ、観測頻度、観測点の空間密度の双方で衛星測位が有利である。

1-2 研究の目的

衛星測位による気象予測 (いわゆる GNSS 気象学など) における研究において、GNSS 測位データに含まれる水蒸気量の情報が、豪雨の予報精度向上に有効とされ、実際に日々の天気予報にこの情報が取り込まれている。近年気象の予測精度は向上しているはずであるが、気象災害は近年増加傾向にありかつ甚大化している。この状況では、GNSS の測位情報が豪雨の予測にどの程度有効なのか、疑問と言わざるを得ない。GNSS 測位データは、予報モデルに取り込むことにより予測精度の向上が図られるが、大気中の水蒸気は変動が激しいのに対して、予報モデルのタイムステップが粗く、水蒸気の変動を十分予報モデルで表現できないと考えられる。

GNSS 測位では連続かつ 30 秒毎の水蒸気の把握が可能であり、しかも基本コストがかからない。このため本研究では予報モデルの情報を使用せず、簡便に GNSS 測位情報と既設の気象センサのオープンデータの情報のみにより、統計的手法を用いて水蒸気と降雨強度の関係をデータ解析によって検証し、ゲリラ豪雨予測への指標を導き出し、災害の対策に寄与することを目的とする。とくに東南アジアの熱帯地方のように、気象レーダーなどの観測設備や気象予報が十分整備されていない地域において、豪雨災害に対してその有効性が期待される。

本研究では、GEONET の公開データから、大気の水蒸気の指標となる天頂総遅延 (以下、ZTD という) と気象センサの降雨情報から、ZTD の変化が降雨強度におよぼす、定性的、定量的影響を統計的に分析し、ゲリラ豪雨の予測を目的とした技術基盤の開発の可能性について検討する。

なお、GEONET に設置されている受信機は、3 章で述べるように、2 周波対応のハイエンドな受信機であり、精度の高い ZTD を求めることができる。本研究では測位情報というオープンデータを利用しているが、精度の保証された観測データを使用していること、測位解析処理についてもオープンソースであるが、世界中に広く利用されているソフトウェアを利用していること、そのうえでゲリラ豪雨の予測精度が向上できれば、コストをかけずに、防災、減災にも十分寄与できるものとする。

第2章 気象観測と予報の現状

この章では、ゲリラ豪雨の予測が現状では困難であることの理由と課題について述べる。その対案として、オープンデータの利用でコストがかからないこと、24 時間続観測可能であるという優位性から、GNSS 測位情報を利用した降雨予測の手法を提案する。

2-1 リモートセンシングによる気象観測の現状

豪雨などの気象災害は、発達した積乱雲によってもたらされるが、水蒸気が凝結する際に発生する潜熱が積乱雲を発達させるエネルギーとなるため、水蒸気の監視技術の向上は災害をもたらす気象現象の予測にとって大変重要である。大気下層における水蒸気の増加は、大気的不安定さの増大を意味し、豪雨の予測にとって動態の把握は重要であるが水蒸気は変化が激しい。気象衛星(ひまわり 9 号)に水蒸気センサが搭載されているが、対流圏上・中層を対象としており大雨の状況の把握に必要な対流圏下層の詳細な状況の把握は困難とされている[4]。

気象レーダーは雨雲の構造や検知に必要であるものの、雨雲の今後の移動、盛衰を直接予想することはできない。特に局地的なゲリラ豪雨や竜巻の詳細な 3 次元構造を、わずか 10 秒で観測可能とされる、フェーズドアレイ気象レーダーが大学等の研究機関に整備されはじめているが、まだ研究段階である。その他、国内の 16 地点で定点観測として湿度センサを搭載したラジオゾンデという複合センサを 2 回/日、風船にとりつけて飛揚し直接大気の状態を観測しており精度は高いが、ピンポイントな観測であり、常時変動を繰り返す水蒸気を測定するには、時間、空間分解能としては粗く、リアルタイムでの利用もできない。

2-2 気象予報の現状

数値モデルによる気象予報の精度は近年目覚ましく向上しているが、集中豪雨や局地的大雨など災害につながる顕著現象の予測精度はまだ十分ではない。顕著現象の予測が難しい原因としては、数値モデルの初期値の精度が現象のスケールに対して十分でないことや、わずかな初期値や計算条件の違いで結果が大きく変わること、さらに現在の数値予報の格子間隔では、局地的豪雨や竜巻等の発生源である、積乱雲を直接表現できないことなどが挙げられる。災害をもたらす主な気象現象の直接の原因は積乱雲である。

積乱雲は発達過程で、局地的な大雨とともに、時として、雷、ひょう、竜巻等の突風をもたらす。積乱雲に伴う大雨については、主に気象レーダーで常時監視可能であるが、竜巻はスケールが小さいため現在の気象レーダーの解像度では監視、検出自体が困難である。府県程度の広がりの中で、竜巻等をもたらす積乱雲が発達しやすい状況となることは、数日前から予測可能だが、市町村程度の単位で発生場所、時刻を特定して予測することは現状として困難である。

図 2-1 に数値予報に必要な物理過程の概念を示す。数値予報では現在の各観測値(気温、風、湿度など)から、物理法則に基づいて数値計算を行い、未来の大気の状態を予測する。大気の流れを基本として、積乱雲の発生発達、雲と放射の相互作用、境界層の大気の乱れに伴う運動量・熱・水蒸気の輸送など、数値予報モデルで取り扱う過程は非常に複雑なものとなっている。

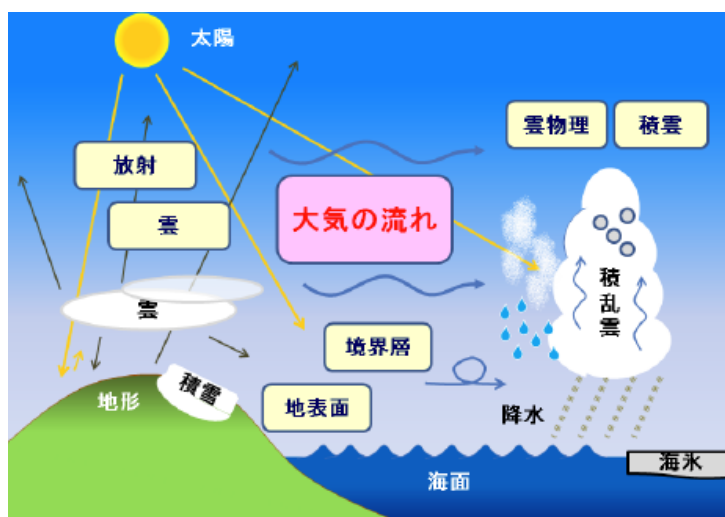


図 2-1 数値予報モデルで考慮される過程[5]

図 2-2 に気象現象のスケール、図 2-3 に数値予報のイメージを示す。数値計算の際、基礎方程式は非線形連立偏微分方程式であるため、解析的に解くことはできない。このため、微小な時間 Δt で離散化して数値積分する[6]。

大気を記述する方程式を
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F$$
 (2)

とすると離散化により
$$\phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$
 (3)

と表現される。 ϕ_t は現在の値、 $\phi_{t+\Delta t}$ は1ステップ先の未来の値である。

積乱雲は、強い上昇気流によって鉛直方向に著しく発達した雲で「大気の状態が不安定」な気象条件で発生しやすくなる。図2-2に示すように、水平方向の広がり数は数 km～10 数 km で、時間スケールは 30 分～1 時間程度である。ゲリラ豪雨のような気象現象の場合、図2-2では概ね「集中豪雨」の範疇に相当するが、実際には様々な現象のスケールのものが複雑に絡み合っ影響しあい、その結果、局地的に同じ地域で大雨が降り続けるといった場合が多い。

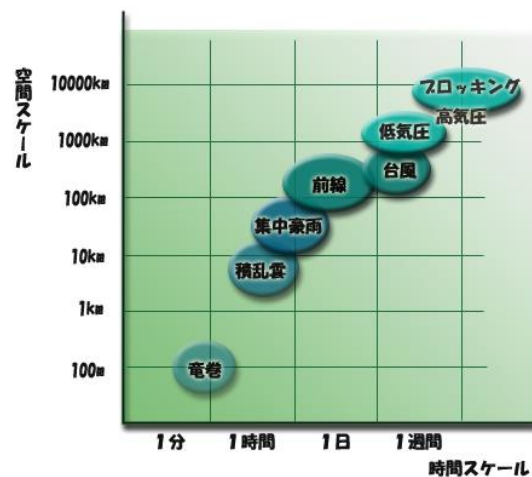


図 2-2 気象現象のスケールと生存期間 [7]

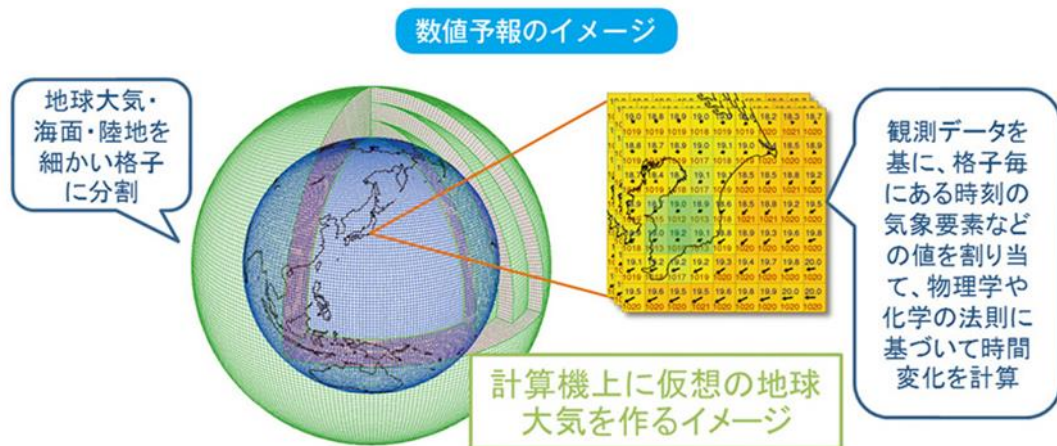


図 2-3 数値予報のイメージ[8]

数値予報モデルには気象現象に応じた時間、空間スケール毎に適したモデルがあるが[7]、ゲリラ豪雨のような局地現象を捉える気象庁のモデルの領域解像度は、2019 年 1 月現在で 2km 格子であり、予測精度を上げるためにはさらに分解能の向上が望まれる。数値予報モデルの分解能の向上というのは、具体的にはスーパーコンピュータの性能の向上のことである。表 2-1 に 2018 年 6 月に気象庁で運用開始したスーパーコンピュータの概要を示す[9]。

新システムは、中核となるスーパーコンピュータに米 Cray 社が開発する「Cray XC50」を採用。計算ノードは主系、副系それぞれ 2816 台で構成され、主系と副系を合計した浮動小数点演算の理論ピーク性能は約 18.166PFLOPS*（従来システム比約 21 倍）に達する。このスーパーコンピュータの足回りとして、約 10.6P バイトの高速ストレージ、共用・大容量・長期保存ストレージ、ルーチン制御・運用監視機器、気象衛星により取得した気象データを入力する衛星関係機器が新システムを支える。主記憶容量は 528T バイトである。（*TFlops：浮動小数点演算を 1 秒間に 1 兆回出来る性能）

スーパーコンピュータ「京」のシミュレーション結果から、個々の積乱雲はサイズが数 km 程度であるため、これまでの気象予測モデルの解像度(格子の間隔)ではきちんと表現できなかったが、格子を細かくとり、その格子サイズに適した気象モデルを開発することで、現実には起こっている現象をより詳細に再現できることを示している。ただし一方で、モデルの格子サイズを細かくすればするほど、シミュレーションに必要な計算量が指数関数的に増加する。計算量の増大に対しても、計算の実行時間を短くする必要がある。このためにさらなるスーパーコンピュータの性能の向上が期待される。

表 2-1 2018/6 に運用開始した気象庁の新スーパーコンピュータ

項目	現	新
機種	Hitachi SR16000/M1 日立製作所	Cray XC50 日立製作所
理論最大性能	847 TFlops	18,166 TFlops
メインメモリ	108TByte	528TB
磁気ディスク容量	348TB	10,608TB

第3章 GNSS(GPS)の原理と仕組み

この章では衛星測位情報から、ゲリラ豪雨の予測を行うために必要な知識、情報として、GNSS(GPS)の概要と測位の原理、測位の方式、および大気中の水蒸気量を見積もるために必要な様々なパラメータなどについて述べる。

3-1 GNSS(GPS)の概要

GNSS(Global Navigation Satellite System)は地球規模の測位衛星の総称であり、GPS(Global Positioning System)は米国の測位衛星を指す。人工衛星から発射されるスペクトル拡散波というマイクロ波を利用して、自分自身の位置を正確に知るためのシステムである。衛星から電波を受けて、地球上どこでも緯度、経度、高さといった3次元座標、そして時間も知ることができる。移動体で利用した場合は、速度、進行方向などもわかる。衛星測位によって得られるのは、自分の位置(x、y、z)と時刻の情報である。衛星測位とは、4つ以上の衛星からの電波を受信して、受信機と人工衛星との距離を測定し、この測距データをもとに位置と時刻を計算する。

まず、それぞれの衛星からの信号を受信して、人工衛星から出た電波がユーザの持つ受信機のアンテナに届くまでの時間を計る。人工衛星から送信した信号には、送信した時刻の情報が入っているので、自分のところに着いた時刻との差が届くまでの時間となる。この時間を「電波伝播時間」という。この電波伝播時間に電波の速度(光の速度=299,792,458m/秒)をかけて、人工衛星と受信機アンテナとの距離を求める。1機の人工衛星との距離を求めただけでは、今自分がいる位置を特定することはできない。

そこで人工衛星が4機必要になる。まず自分と4機の人工衛星との距離をそれぞれ計算し、4つの距離を求める。すると4つの距離が一つに交わる点が出てくる。これが衛星測位によって求められる今自分がいる位置ということになる。図3-1に測位の原理を示す[10]。

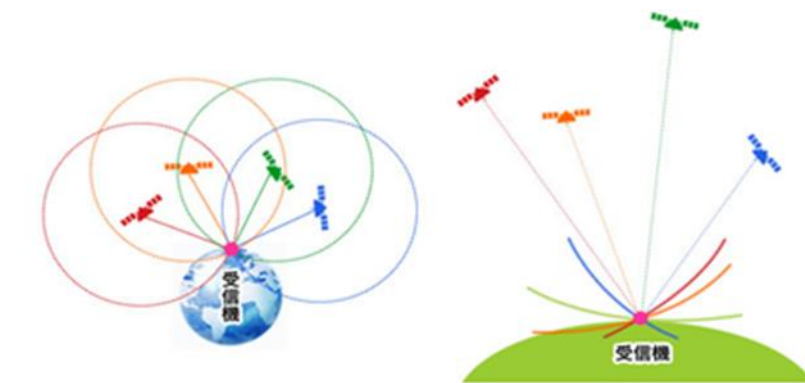


図 3-1 測位の原理[10]

図 3-1において受信機の位置を未知点とすると、3次元空間の場合、3つ衛星から未知点までの距離がわかれば未知点の位置は決まるが、実際には受信機の時計誤差のため4つの衛星が必要になる。つまり4つの未知数の連立方程式を解くこととなる。

以降に具体的な受信機位置の測定の手順を示す[10]。ここで衛星の位置は放送される信号に含まれている。

1. 衛星・受信機間の距離を測定(測距)する。
2. 衛星の位置(座標)を知る。
3. 衛星位置を中心とする複数の級の交点として受信機の座標を求める。

衛星・受信機間の距離は、電波信号の到達時間から求められる。測距には電波信号のコード位相観測値を用いて測距を行うものと、搬送波位相観測値を用いるものがあり、高い精度が要求される精密測位では搬送波位相観測値が使用される。衛星受信機間の測定距離には受信機時計バイアスや電離層遅延、対流圏遅延など様々な観測誤差が含まれる。搬送波位相観測値を用いて精密測位を行う場合はこれらの観測誤差は無視できないため、様々な方法で誤差を軽減している。このような精密測位の手法として、干渉測位と精密単独測位(PPP :Precise Point Positioning) がある。

干渉測位は1地点の位置を既知として他の1地点の相対的な位置関係を導出し、そこから受信機位置を求める。相対的な位置関係は2つの受信機の搬送波位相観測値の差分を計算することで求められる。一方、PPPは1つの受信機で絶対位置を求めることができる。

本研究では、基準観測点を必要とせず、単独観測点のみで測位を行うことができることから精密測位法である PPP を用いて、対流圏遅延成分を観測することにした。次項に PPP の原理の詳細を示す。

3-2 精密精密測位 (PPP) の原理

精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) は精密衛星軌道、衛星時計推定値と搬送波観測データを使って精密測位を行う方法である [10]。PPP は干渉測位と異なり、単独受信機のみで測位を行う。干渉測位で行われる二重差観測も PPP では行われなため、干渉測位において無視される精密モデル項についても考慮する必要がある。受信機 u で受信した衛星 p 測位信号の搬送波位相観測値 $\Phi_u^p(m)$ は以下で表される。

$$\Phi_u^p \equiv \lambda \phi_u^p = r_u^p + c(\delta t_u - \delta t^p) - \delta I_u^p + \delta T_u^p + \lambda N_u^p + \Delta p_u^p + \epsilon_\phi \quad (4)$$

ここで、 ϕ_u^p は搬送波位相観測値 (cycle)、 r_u^p は受信機・衛星間幾何学距離 (m)、 δt_u は受信機時計誤差、衛星時計誤差 (s)、 δI_u^p は電離層遅延 (m)、 δT_u^p は対流圏遅延 (m)、 N_u^p は搬送波位相バイアス (cycle)、 Δp_u^p はアンテナ位相中心変動 (PCV: Phase Center Variation) (m)、 ϵ_ϕ はマルチパスを含んだ搬送波位相観測誤差 (m)、 λ は搬送波波長 (m) である。短基線干渉測位で無視できる時計誤差や電離層遅延、対流圏遅延が誤差要因として現れるため、補正モデルなどを用いてこれらの影響を小さくする必要がある。表 3-1 に IGS 精密暦の例を示す。

3-3 精密暦

短基線干渉測位では衛星位置を求めるために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から構成され、SP3 形式のファイルとして提供される。現在最も広く使用される精密暦は IGS (International GNSS Service) 精密暦である。IGS 精密暦の種類を表 3-1 に示す。

表 3-1 IGS精密暦の種類(2018年12月現在) [11]

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

3-4 電離層遅延

衛星から送信された測位信号は受信機に届くまでに電離層を通過しその影響を受ける。測位信号が受ける電離層遅延 δI_u^p は搬送波周波数の二乗に反比例するため、2周波以上の観測値が得られる場合は、これらの線形より打ち消すことが可能である。この線形結合は電離層フリー結合(ionosphere-free linear combination)と呼ばれる。搬送波位相の電離層フリー結合の観測方程式 $\Phi_{u,LC}^p$ を以下に示す。

$$\Phi_{u,LC}^p \equiv C_1 \Phi_{u,L1}^p + C_2 \Phi_{u,L2}^p \quad (5)$$

ここで $\Phi_{u,L1}^p$ は L_1 帯搬送波位相である。また C_1, C_2 は以下で表される。

$$C_1 = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}$$

$$C_2 = -\frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \quad (6)$$

3-5 対流圏遅延

衛星から送信された測位信号は受信機に届くまでに対流圏を通過しその影響を受ける。このとき測位信号が受ける遅延は、乾燥大気によるものと大気中の水蒸気によるものの2つに分けられる。これらはそれぞれ静水圧遅延(hydrostatic delay)、湿潤遅延(wet

delay) と呼ばれる。対流圏遅延 δT_u^p が測位精度に与える影響を減らす(幾何学距離 r_u^p を正確に求める) 方法は複数存在するが、一般的には未知パラメータとして推定する手法が利用される。推定すべき未知パラメータ数がきわめて多くなるため、各衛星の対流圏遅延すべてを未知パラメータとすることは事実上不可能である。

ここで、図 3-2 のようにある一定の時間内において大気構造が無限長まで水平一様と仮定する。これにより任意の方向の遅延量(つまり、視線方向の遅延量)は、天頂方向の遅延量に仰角依存の係数を乗じた遅延量として表現できる。この仰角依存関数はマッピング関数(mapping function)と呼ばれる。

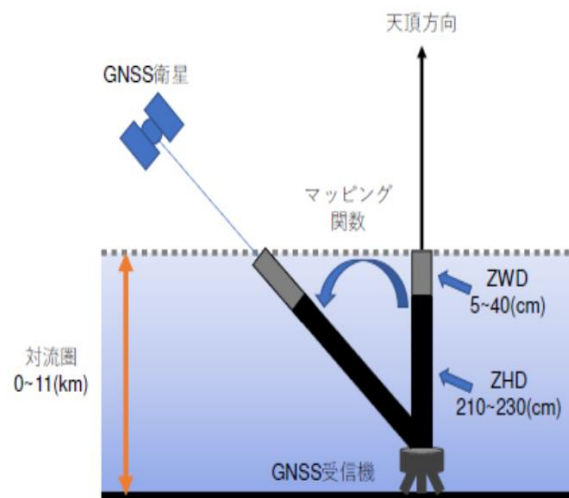


図 3-2 対流圏遅延とマッピング関数の模式図[12]

この考え方に基つくと、ある仰角 El_u^p の対流圏遅延量 δT_u^p は天頂方向の遅延量を用いて以下のように表される。

$$\delta T_u^p = M_h(El_u^p)ZHD + M_\omega(El_u^p)ZWD \quad (7)$$

ここでZHD、ZWDは、それぞれ天頂静水圧遅延、天頂湿潤遅延であり、それらの合計は天頂総遅延(ZTD:Zenith Total Delay) と呼ばれる。つまり

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (8)$$

ここで $M_h(El_u^p)$ 、 $M_\omega(El_u^p)$ がマッピング関数である。最も簡単な近似は仰角の制

限の逆数 $1/\sin(E_l^p)$ で与えられるが、その他多数のマッピング関数が開発されている。

Niell によるNMF(Niell Mapping Function) [13]やGMF(Global Mapping unction) [14]などが挙げられる。このように、実際のGNSS 測位解析では各衛星の対流圏遅延を、ZHD、ZWDの射影と考えることで未知パラメータ数を減らしている。また前線などによって大気構造が水平一様と仮定できない場合(つまり、方位角方向に勾配が生じている場合)は、マッピング関数に方位角方向の勾配成分を加味してZTD推定を行う場合もある。このとき勾配成分はZTDとともに未知パラメータとして推定される。

4 章 GNSS (GPS) の測位情報のデータ処理

この章においては具体的な衛星測位情報の取り出しかた、測位解析のためのソフトウェアの内容と設定の方法、および天頂総遅延の推定方法等について述べる。

4-1 GNSS (GPS) データの解析

GNSS (GPS) 解析データは、国土地理院が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運用しているGNSS連続観測システム (GEONET: GNSS Earth Observation Network System) より入手した [15]。全国1,300ヶ所に設置された電子基準点とGEONET中央局 (茨城県つくば市) からなるが、今回はNAIST周辺の電子基準局 (生駒電子基準局、生駒市立桜ヶ丘小学校) を対象として解析を行い、各時点におけるZTDの時間変化を確認した。表 4-1に、今回対象とした電子基準点の諸元の情報を示す。

表 4-1 生駒電子基準点の諸元 (2019年1月26日現在)

名称	局番号	緯度 (deg)	経度 (deg)	楕円体高 (m)	受信機	アンテナ
生駒	960763	34.69833612	135.70602775	198.7021	TOPCON NET G5	TPSCR G5 GSI

精密単独測位に必要な精密暦は、最も精度の良いIGS精密暦のFinalを使用した。また衛星時計補正情報はCLK形式で提供されるものを使用した。これらの暦情報はNASAにより運用されるCrustal Dynamics Data Information System (CDDIS) のFTPサーバより入手した [16]。また精密暦以外に、PCV補正モデルを国土地理院から入手し、PCV補正を行った [15]。

4-2 測位解析ソフトウェア 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を使用した [17] [18]。RTKLIB は世界中に広く利用されており、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。

RTKLIB: GUI AP (Windows)

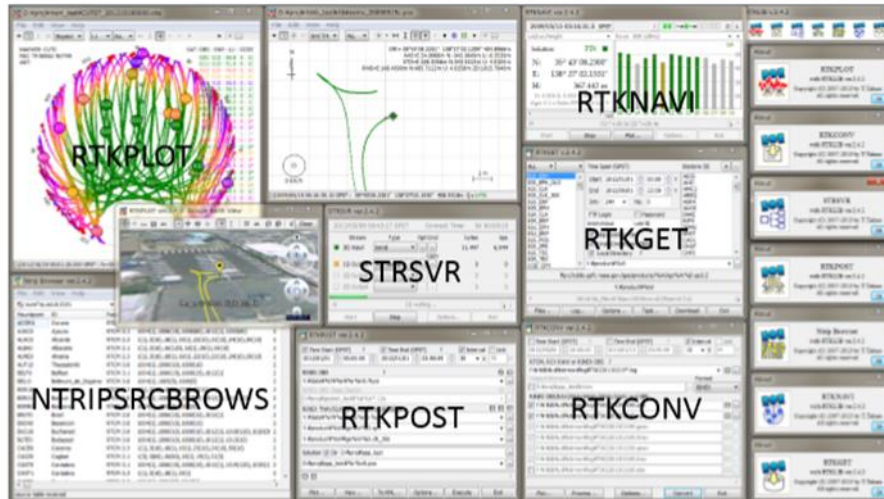


図 4-1 RTKLIB の GUI 画面 [17][18]

図 4-1にRTKLIBのGUIアプリケーションの画面を示す。図 4-2にリアルタイム測位の場合の校正、設定を示す。(RTKLIB ver. 2.4.1 manual)

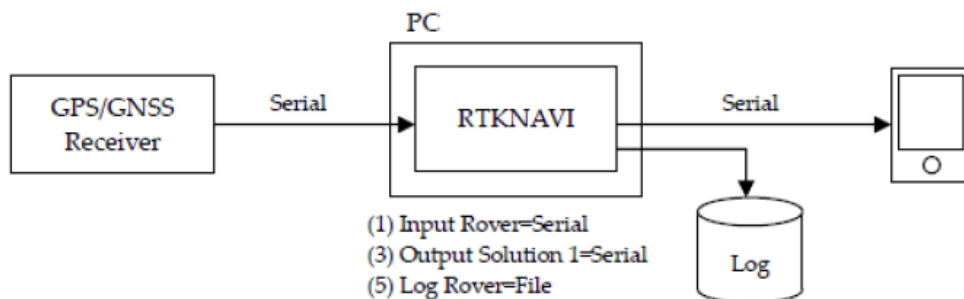


図 4-2 単独測位の場合の設定

RTKLIBの主な機能は以下のとおりである。

- ・「航法処理」を外部計算機上で実装
- ・複数GNSS、複数信号のサポート
- ・各種測位アルゴリズムのサポート
- ・リアルタイム及び後処理
- ・各種入出力メッセージ/ファイルのサポート
- ・PCまたは組込計算機としての可搬性
- ・GNSS受信機の「受信機処理」は含まれていないため、別途GNSS受信機が必要

処理には別途「raw data」を出力する受信機、または出力された「raw data」が必要である。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。

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 4-3に、RTKPOSTの起動画面と各種設定項目を示す。RTKPOSTの各設定項目は以下のとおりである。

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

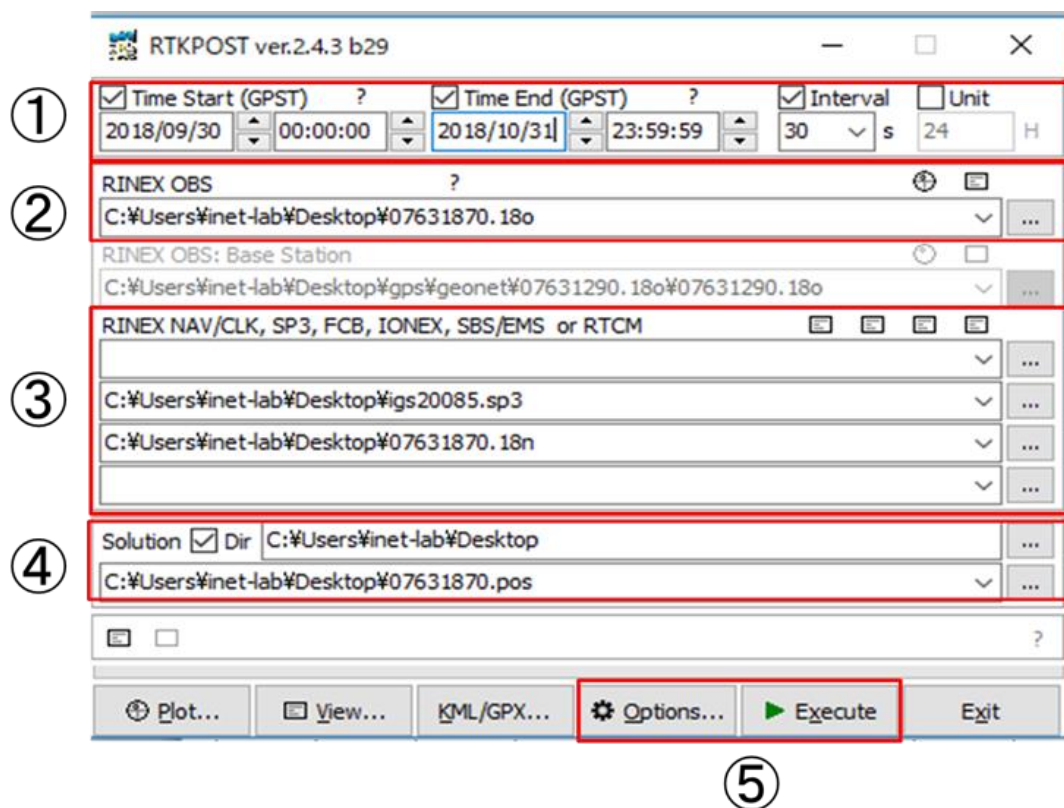


図 4-3 RTKPOST の起動画面

次に詳細オプションの設定を表 4-2、設定画面を図 4-4 に示す。このように、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。本研究では測位手法を PPP-Fixed に設定した。この手法では受信機位置を既知として精密単独測位を行う。その他の設定は以下、表 4-2 に示すとおりである。

表 4-2 オプションの設定値

Positioning Mode	PPP Fixed
Frequencies	L1+L2
Elevation Mask	15 (deg)
SNR Mask	35 (dBHz)
Earth Tide Correction	Solid
Ionosphere Correction	Ionosphere-Free Linear Combination
Troposphere Correction	Estimate ZTD+Grad
Satellite Ephemeris	Clock Precise

Options

Setting1 Setting2 Output Statistics Positions Files Misc

Positioning Mode: PPP Fixed

Frequencies / Filter Type: L1+L2 Forward

Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz): 15 ...

Rec Dynamics / Earth Tides Correction: OFF Solid

Ionosphere Correction: Iono-Free LC

Troposphere Correction: Estimate ZTD+Grad

Satellite Ephemeris/Clock: Precise

☒ Sat PCV ☒ Rec PCV ☒ PhWU ☐ Rej Ed ☒ RAIM FDE ☐ DBCorr

Excluded Satellites (+PRN: Included):

☒ GPS ☒ GLO ☐ Galileo ☒ QZSS ☐ SBAS ☐ BeiDou ☐ IRNSS

Load... Save... OK Cancel

図 4-4 RTKPOST の詳細(オプション設定画面)

4-3 天頂総遅延 ZTD の推定手法

以下にRTKPL0T を利用したZTD 推定の流れを記す[18]。 PPP-Fixed の場合受信機位置はあらかじめ与えられているため、未知パラメータ x は式(9) のようになる。

$$x = (ZTD, G_N, G_E, N_{LC}^T)^T \quad (9)$$

ここで、 G_N 、 G_E はそれぞれ北方向・東方向の対流圏勾配成分、

$N_{LC} = (N_{LC}^1, N_{LC}^2, \dots, N_{LC}^T)^T$ は各衛星の搬送波位相バイアスに電離層フリー結合を適用したものである。観測方程式は搬送波位相観測値と疑似距離観測値を併せて、式(4)、式(5) より式(10)のように与えられる。RTKLIB を利用したZTD 推定において、各衛星の対流圏遅延 δT からZTD への射影にはNiell Mapping Function が利用される。

$$y = h(x) + \epsilon$$

から

$$\begin{pmatrix} \Phi_{LC}^1 \\ \Phi_{LC}^1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Phi_{LC}^1 \\ p_{LC}^1 \\ p_{LC}^2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ p_{LC}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r^1 + c(\delta t_u - \delta t^1) + \delta T^1 + \lambda N_{LC}^1 + \Delta P^1 \\ r^2 + c(\delta t_u - \delta t^2) + \delta T^2 + \lambda N_{LC}^2 + \Delta P^2 \\ \vdots \\ \vdots \\ r^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \delta T^m + \lambda N_{LC}^m + \Delta P^m \\ r^1 + c(\delta t_u - \delta t^1) + \delta T^1 \\ r^1 + c(\delta t_u - \delta t^2) + \delta T^2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ r^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \delta T^m \end{pmatrix} + \epsilon$$

$$= \begin{pmatrix} r^1 + c(\delta t_u - \delta t^1) + M_h(El^1)ZHD + M_\omega(El^1)(ZTD - ZHD) + \lambda N_{LC}^1 + \Delta P^1 \\ r^1 + c(\delta t_u - \delta t^1) + M_h(El^1)ZHD + M_\omega(El^1)(ZTD - ZHD) + \lambda N_{LC}^1 + \Delta P^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + M_h(El^m)ZHD + M_\omega(El^m)(ZTD - ZHD) + \lambda N_{LC}^m + \Delta P^m \\ r^1 + c(\delta t_u - \delta t^1) + M_h(El^1)ZHD + M_\omega(El^1)(ZTD - ZHD) \\ r^2 + c(\delta t_u - \delta t^2) + M_h(El^2)ZHD + M_\omega(El^2)(ZTD - ZHD) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + M_h(El^m)ZHD + M_\omega(El^m)(ZTD - ZHD) \end{pmatrix} + \epsilon$$

(10)

式(10) 中の各成分について、衛星- 受信機間距離 r^p はあらかじめ与えられた受信機位置と精密暦内の衛星軌道情報から導出される。 δt^p 、 Δp^p は、それぞれCLK 形式の衛星時計補正情報と、PCV 補正モデルによって補正される。またRTKLIBで **ZHD** は対流圏遅延の近似モデルである、Saastamoinen Model から受信機位置の楕円体高 h を用いて式(11)で与えられる。

$$ZHD = 0.002277 \times 1013.25(1 - 2.2557 \times 10^{-5}h)^{5.2568}$$

(11)

上記の補正により誤差要因を可能な限り減らしたうえで、観測誤差 ϵ が最小となる

ように未知パラメータ $\mathbf{x}$ を推定する。未知パラメータ推定は拡張カルマンフィルタ^{※3}が使用される。

³ カルマンフィルタは1960年にR. E. Kalman³によって線形フィルタリングと予測問題への新しいアプローチとして発表されて以来、様々な拡張が行われて来た。その代表が非線形システムへの拡張であり、1970年頃から状態の非線形関数の推定値近傍での線形近似に基づく拡張カルマンフィルタが広く用いられている。
出典:6章 カルマンフィルタ - 電子情報通信学会知識ベース
http://www.ieice-hbkb.org/files/01/01gun_05hen_06m.pdf

第5章 観測データの統計的予測の結果と検証

この章では、測位情報から得られた天頂総遅延 ZTD と、降雨強度の関係からゲリラ豪雨の実態を把握し検証を行う。観測データは共に時系列データであり、ZTD の変化に対応して、降雨強度がどのように変化するかを確認し、統計的予測モデルを使用して、測位情報から得られた ZTD と降雨強度の関係を定性的、定量的に評価を行う。さらに、ゲリラ豪雨発生の予兆についても検討を行う。

5-1 気象センサ(Live E!)

実際にゲリラ豪雨を観測するのは地上に設置された雨量計である。NAIST 構内には WIDE プロジェクト⁴がセンサネットワークの研究、教育用に設置した Live E!の気象センサ(デジタル百様箱)が設置されている。雨量、降雨強度のほか、気温、風向風速、気圧、湿度、や CO₂ 濃度などの要素も観測している。降雨強度は音圧センサであ

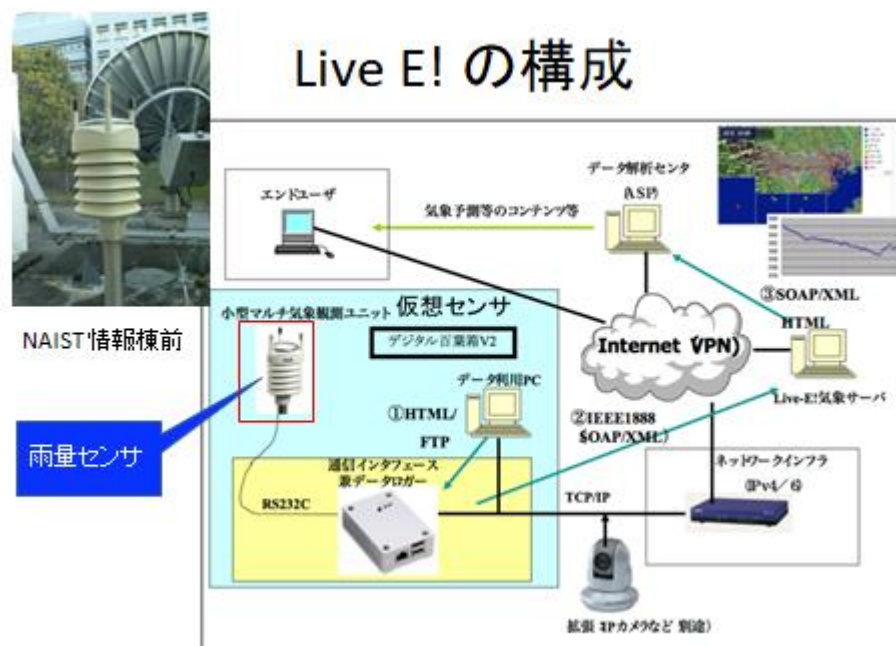


図 5-1 Live E!のネットワーク概要 [22]

る。

⁴ WIDE プロジェクト:1988年に複数の大学間を跨いで結成された、インターネットに関する研究・運用プロジェクト主に、インターネット関係者の交流、様々な技術実験、運用、研究を行っている。インターネットに関する、日本を代表する研究・運用プロジェクトとして認知されている。

図 5-1 に Live E! の構成を示す。NAIST 周辺には「アメダス生駒山」の観測データもあるが、オープンに利用できるのは 10 分値であり、対して Live E! は 1 分値の分解能があり、アメダスにはない気圧、湿度のデータもあるため、これを利用することとした。図 5-1 の左上の写真が雨量計でこれにより降雨強度を観測している。

5-2 天頂総遅延 (ZTD) と降雨強度の関係

図 5-2、図 5-3 はそれぞれ、2018 年 6 月と同年 7 月の 1 月間における、ZTD と降雨強度の 1 分値の変化の様子を示したものである。ZTD は GEONET の生駒電子基準点 (生駒市立桜ヶ丘小学校内) で得られた推定の観測値、降雨強度は NAIST 構内の気象センサで観測されたデータである。なお、ZTD の電子基準点には気象センサがないため、本来は気象センサがある NAIST 構内の Live E! の観測値を補正して使用すべきところであるが、補正が複雑なためそのまま使用することとした。ZTD と降雨強度は異なる観測点となったが (図 5-10)、ZTD と降雨強度の大まかな傾向を把握する点では妥当と考えた。

グラフの上段は ZTD (単位:m)、下段は降雨強度 (単位:mm/h) を示す。横軸の TIME の単位は 1 月間の 1 分の積算値 (30 日間では 43200) である。

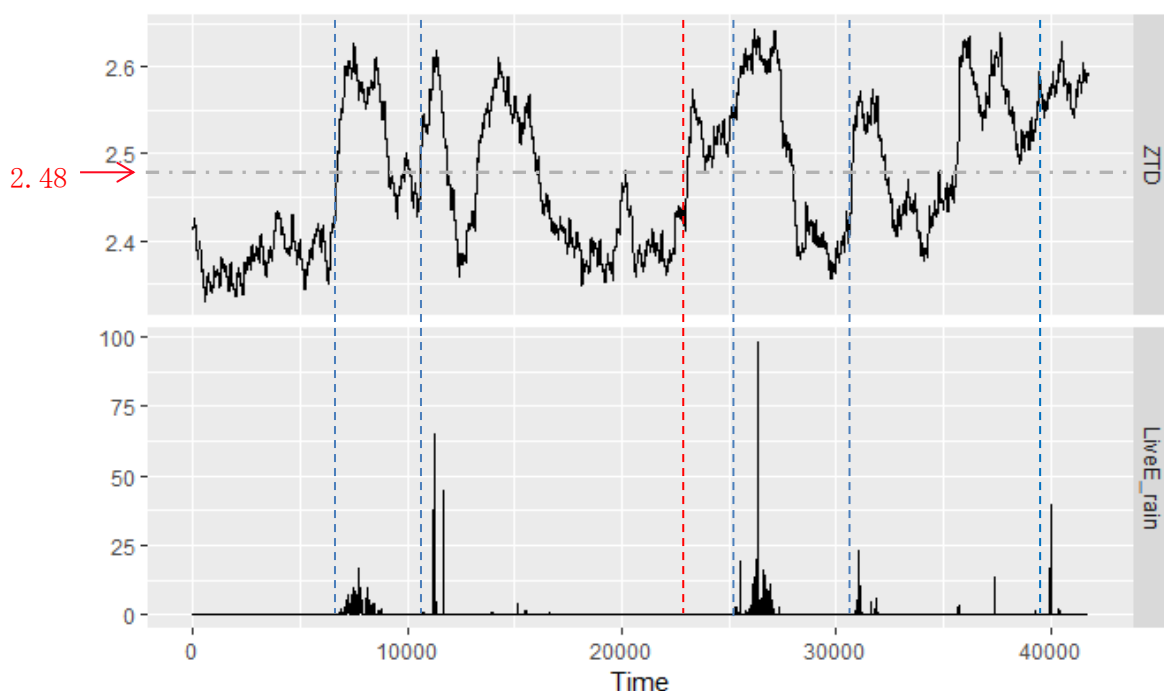


図 5-2 ZTD と降雨強度 (2018/06)

ZTD の変化から降雨強度を推定することが、本研究の主な目的であり、その特徴を見出すことができればゲリラ豪雨の予測につながると考えられる。青色破線の箇所に注目すると、概ね ZTD の急激な増加のあと、若干の時間差があり、降雨強度が増加している傾向が見られる。一方で、赤色破線の部分については、ZTD の急激な増加があったものの、降雨強度の増加につながらない、もしくは降雨自体がなかったことを示している。なお、ZTD と降雨強度の散布図から、2018 年 6 月においては、降水の有無に対する ZTD の閾値は 2.48 であった。同様に同年 7 月においては ZTD の閾値は 2.53 であった。

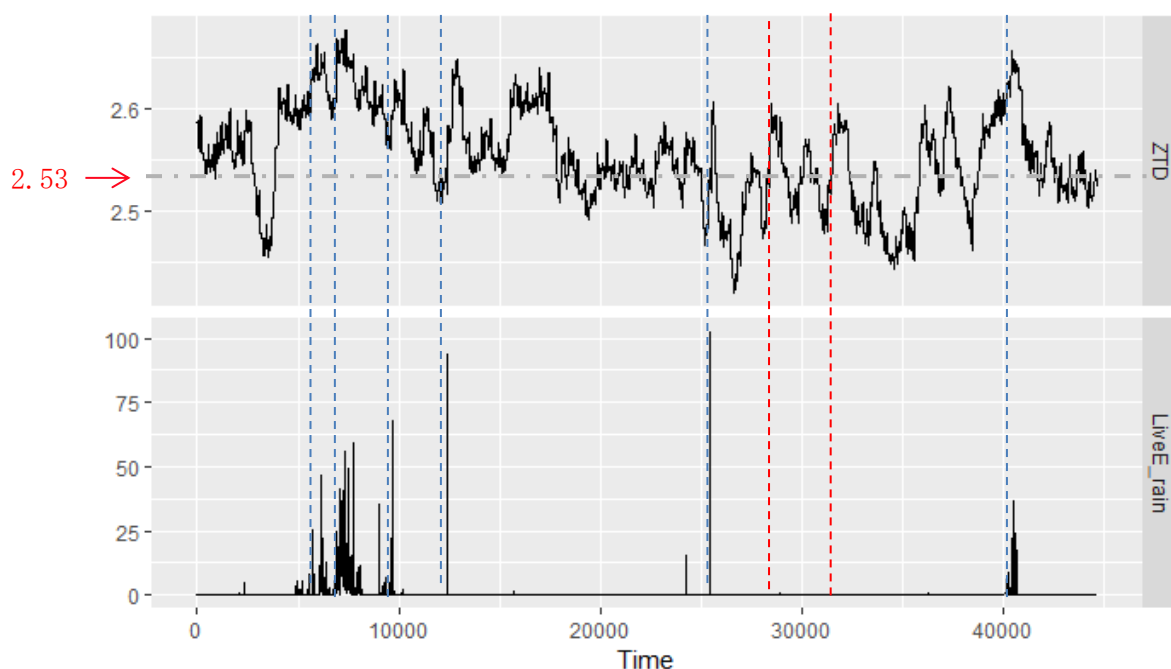


図 5-3 ZTD と降雨強度(2018/07)

5-3 時系列データの成分分析

一定の ZTD の閾値に対して、ZTD が急増した後、時間差を経て降雨がはじまり、その強度が増加するという傾向は限定的ではあるが確認できた。時系列データは原データのままだでは要素の特徴を捉えにくいため、ZTD を 3 つの要素（トレンド、周期変動(季節変動)、不規則変動）に分解し、データの特徴を捉えやすくすることにする。R 言語のライブラリで、時系列データをトレンド、周期変動(季節変動)、不規則変動をそれぞれ trend、seasonal、random として表現、分解することとした。

表 5-1 に分解したデータの状態と特徴を示す。

表 5-1 時系列データの分解

要素名	データの状態	データの特徴
トレンド	データが上昇、または下降している	長期間にわたり増加または減少する変化がある
周期変動	データが上昇と下降を繰り返している	一定の間隔で同じような増減の変化がある
季節変動	データが季節的変動を繰り返している	毎年同じような増減の変化がある
不規則変動	データの動きが時間の経過に依存しない	時間に関係なく増減する変化がある

5-4 天頂総遅延 (ZTD) の成分分析

R 言語の `decompose` 関数を用いて 2018 年 6 月における ZTD の成分を分解し、ZTD の波形を解析した。ZTD は水蒸気量の指標であるが、ノイズも含まれておりかつ常時変化が激しい。ZTD の変化の特徴を見やすくするため、図 5-4 に成分を分類して示した。1 番上が元のデータ (observed) に対して、以下上から順に、トレンド成分、周期変動 (季節変動)、不規則変動を表す。図 5-4 の 1 番下は降雨強度である。

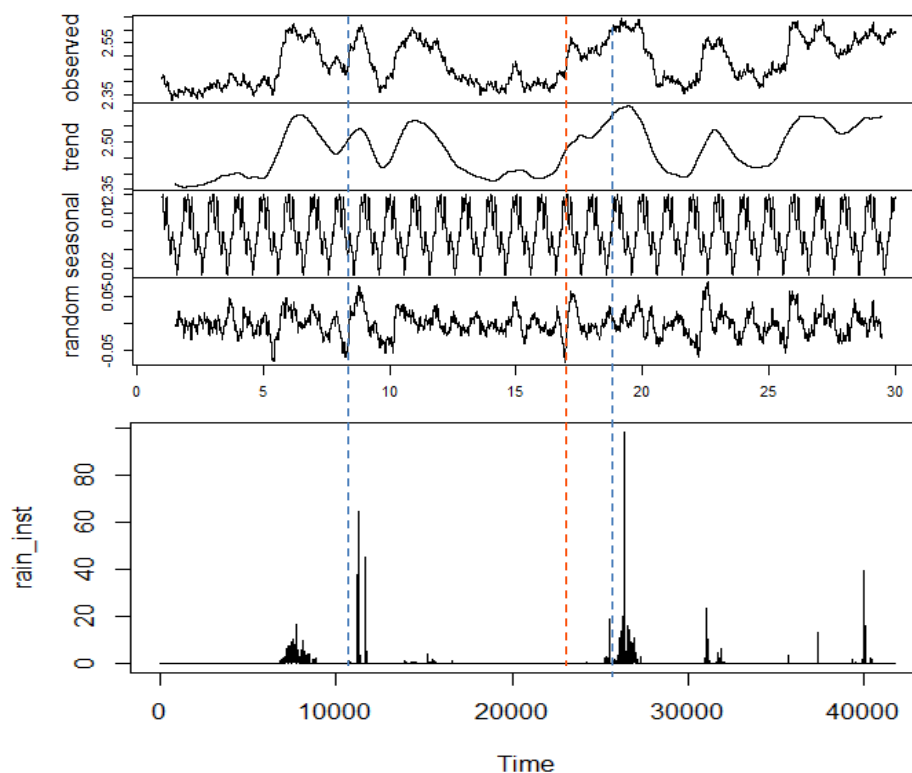


図 5-4 ZTD の成分分析 (1) (2018/06)

不規則変動は自己相関、傾向変動、および循環変動で説明できない短期間でのデータの変化を表しており、文字通り外因性的変動、つまり水蒸気の変動を示していると言える。図 5-4 によると、不規則変動の大きい部分(青色破線)で降雨(豪雨)が発生しているが、赤色破線の部分のように、降雨(豪雨)が発生していないこともあった。なお季節成分については、気温の日周期の変動に対応して ZTD も変化したものと推定される。このことから、ZTD の変化は降雨強度にある程度影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる。不規則変動を見ても、赤色破線の部分のように例外があることが判明した。

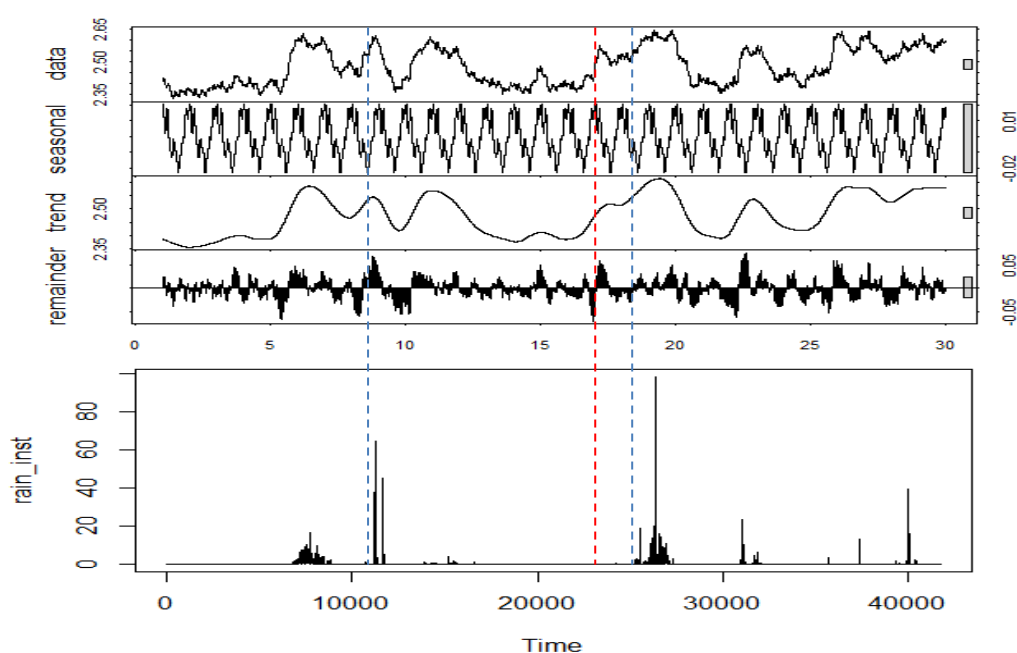


図 5-5 ZTD の成分分析 (2) (2018/06)

次に、ZTD 波形の別の分類として、図 5-5 のように「不規則変動」を「残差」に置き換えてみた。(グラフでは **remainder**)「誤差」は求めようとする真の回帰式から算出される値と実際のデータとの差を表す。残差のプラス方向への増加が大きいところに注目して、降雨強度の変化の有無を確認したが、こちらについても「不規則変動」と同様、「残差」のもつ何らかの傾向(増加している、減少している等)の有無や、飛び抜けた値の有無を確認し、明確な波形の変化の特徴の抽出は困難であった。R 言語の時系列データを、トレンド、周期変動、残差に分解する `stl` 関数を用いてデータ ZTD を分解した

プロットを図 5-5 に示す。降水強度の関係について、降雨の前に ZTD が上昇する傾向はみられるが限定的であった。

ZTD について成分分析を行ってみたが、明確な変化の特徴は見いだせなかった。観測されたデータを定量、定性的に解析する必要があるため、統計的手法を用いて ZTD と降雨強度の関係を導き出す必要がある。ZTD と降雨強度は共に時系列データであり、2 つの変数間において何かしらの影響があると考えられる。まずデータの相関を見るため散布図で確認してみることにした。2018 年 7 月の ZTD と降雨強度の関係を散布図にしたものが図 5-6 である。

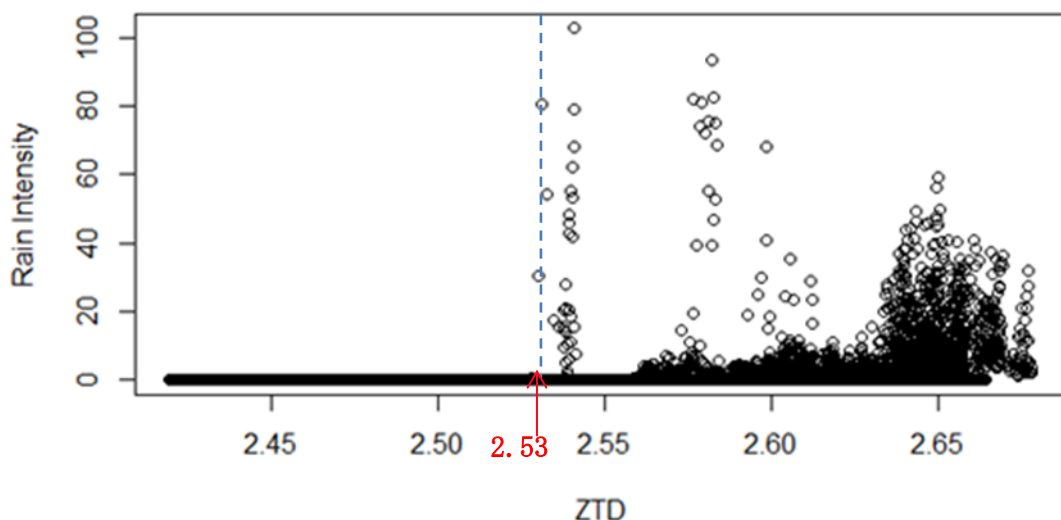


図 5-6 ZTD と降雨強度の散布図(2018/07)

図 5-6 から、降水は ZTD が 2.53 を閾値としてそれ以上の場合に発生していること、ZTD が大きくなるほど降雨強度も大きくなる傾向は見られるが、降雨強度の最大値約 100mm/h では ZTD が 2.54 程度であり、しかも ZTD が 2.54 程度でもっともばらつきが大きい。2 つのデータにおいて明確な相関は見られず、この原因はグラフだけ見ても判明できない。この例以外でも同様の結果であった。

5-5 多変量時系列の解析

自己回帰モデル(AR モデル: Autoregressive model)は、時系列信号の解析によく用いられる回帰分析手法であり、音声認識や制御等の信号処理のための基本的なツールの一つである。画像処理やコンピュータビジョンでも、テキストチャの特徴抽出、動画画像の処

理、輪郭点列の処理などのように、データに何らかの順序関係がある場合の信号処理手法として利用できる。ZTD、降雨強度はともに時系列データである。時系列データを自己回帰するのと同様にベクトル自己回帰モデル（VAR モデル）は自己回帰モデルを、2 つ以上の変数（多変量）に拡張したものである。複数の時系列データを統合してモデル化しているため、変数間の影響を調べるのに役立つと考えた。

VAR モデルでは通常の回帰分析（regression analysis）とは異なり、変数間の時間を通じた関係を捉える際に事前に外生変数（説明変数）と内生変数（被説明変数）を区別しない、つまり具体的な因果関係を仮定しないのが大きな特徴である。このため、特定の理論を前提とせずに、純粹に時系列データから変数間の関係を分析することができる。

本研究については、時系列である、ZTD と降雨強度との相互作用を、VAR モデルを利用して検証することにした。VAR モデルでは事象 A と B がお互いに影響を及ぼしあっていることを想定する。つまり

①事象 A の変化したのち、事象 B が変化する。

②事象 B が変化したのち、事象 A が変化する。

というように A と B が互いに影響しあうことを想定する。具体的に、ZTD と降雨強度がお互いに影響を及ぼしあっていることを以下のように想定する。

①ZTD の増加の後に降雨強度が増加する。

②降雨強度が増加した後に ZTD が増加する。

ただし②については気象学的には考えられないため、本研究では考慮しない。

データの因果関係については「Granger の因果」により検定を行う。さらにインパルス応答関数により「ZTD が急激に増加した場合、降雨強度にはどのような影響があるか」について、以下に定性的、定量的に評価する。

5-6 VAR モデル

VAR モデルを適用し、データの相互比較を検証する。

VAR(p)モデルを $\mathbf{y}_t$ を定数と自身の p 期の過去の値に回帰したモデルとすると、ZTD と降雨強度をモデル化した、1 次の VAR モデルはつぎのように表現される。

$$\begin{aligned}y_{1t} &= c_1 + \varphi_{11}y_{t-1} + \varphi_{12}x_{t-1} + \varepsilon_{1t} \\y_{2t} &= c_2 + \varphi_{21}y_{t-1} + \varphi_{22}x_{t-1} + \varepsilon_{2t}\end{aligned}\tag{12}$$

ただし

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{1t} \\ \epsilon_{2t} \end{pmatrix} \sim W.N.(\Sigma)$$

(13)

なお式(11) は

$\epsilon_{1t}, \epsilon_{2t}$ が分散共分散行列 Σ のベクトルホワイトノイズであることを示す。

データ解析処理については R 言語による関数およびパッケージを用いた。時系列データを分析する際には、まずデータが定常状態であるか否かを調べることが重要である。ある時系列データが簡単なモデル

$$y_t = \alpha y_{t-1} + e_t$$

(14)

で表現でき、かつ $|\alpha| = 1$ (単位根) である場合、ランダムウォークであると言う。時系列データが定常状態であるかどうかを検定することを、単位根検定と呼ぶ。単位根検定は「単位根 $|\alpha| = 1$ が存在する」という仮説検定である。例として 2018 年 6 月における ZTD、降雨強度が定常状態かの判定を行った。ZTD の単位根検定とその結果を表 5-2 に示す。

表 5- 2 単位根検定 (ZTD)

Value of test-statistic	-1. 7728		
Critical values for test statistics	1pct	5pct	10pct
tau2	-3. 43	-2. 86	-2. 57
phi1	6. 43	4. 59	3. 78
alternative hypothes	stationary		
Dickey-Fuller	-2. 0426		
Lag order	1		
p-value	0. 5605		

表 5-2 から、t 値は-1. 7728 で 5pct を下回っている。また単位根係数も p 値は有意水準で仮説が採用される。単位根はあるということはできない。よって定常状態である。

次に降雨強度の単位根検定とその結果を表 5-3 に示す。

降雨自体が非定常状態と考えられるため、降雨強度も非定常状態と考えられるが、一応

の検定を行っておく。

表 5-3 単位根検定 (降雨強度)

Value of test-statistic	-69.984		
Critical values for test statistics	1pct	5pct	10pct
tau2	-3.43	-2.86	-2.57
phi1	6.43	4.59	3.78
In adf. test	p-value smaller than printed p-value		

表 5-3 から t値は-69.984 で5pct を下回っていないことから単位根はある。
また p 値が予想どおり非定常と判定された。

5-7 多変量データにおける相互相関

時系列データの基本的な特性を示す統計量は平均、自己共分散、自己相関などの統計量がある。時系列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ の標本平均は

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t \quad (15)$$

で定義されている。定常時系列の場合、標本データの y_t と y_{t-k} との標本自己共分散関数は

$$\hat{C}_k = \frac{1}{n} \sum_{t=k+1}^n (y_t - \hat{\mu})(y_{t-k} - \hat{\mu}) \quad (16)$$

で定義され、標本自己相関関数は

$$\hat{R}_k = \frac{\hat{C}_k}{\hat{C}_0} \quad (17)$$

で定義される。

1 変数のデータを分析する際は、自己相関を算出してデータの特徴を捉えることができる。同様に多変量データの場合は相互相関を使用する。相互相関はデータのラグをとりつつ、二つの一次元時系列間のクロス相関係数(cross-correlation)とクロス共分散

(cross-covariance)を計算することにより求める。

5-8 ZTD と降雨強度の相互相関

2018 年 9 月の ZTD と降雨強度の相互相関を例として図 5-7 に示す。図 5-7 は 2018 年 9 月の ZTD と降雨強度の同時点における、前後±200 時点の相関を示したものである。横軸の青色破線は 95%の信頼区間である。相関係数自体は高くはないが、-25 時点から -50 時点付近の間において相関のピークがみられた。このことは現時点からさかのぼって約 25 分から 50 分前の ZTD の状況が、現時点での降雨強度に影響していることが言える。

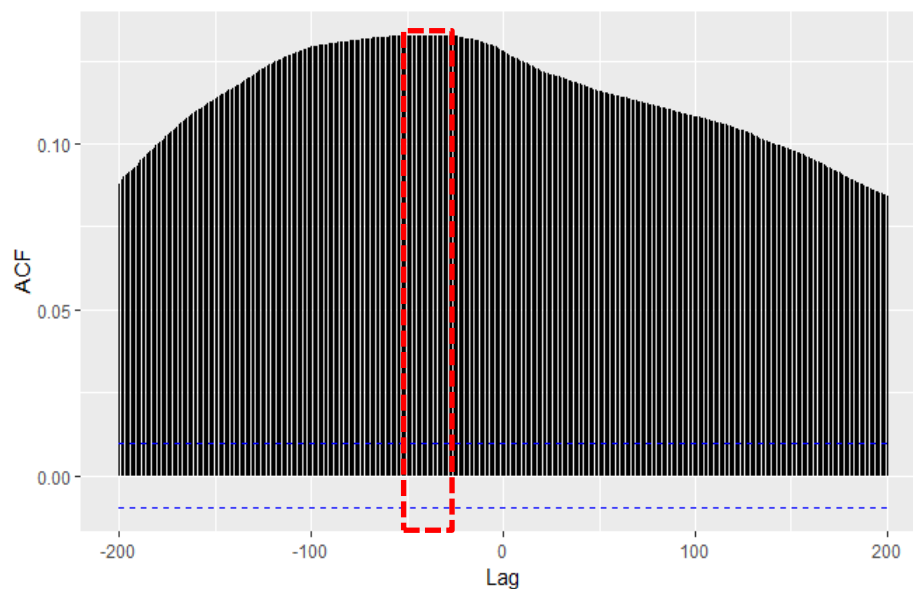


図 5-7 ZTD と降雨強度の相互相関 (2018/09)

5-9 ZTD による降雨強度の因果性検定とインパルス応答

ZTD のデータが、降雨強度に与える影響を因果性とインパルス応答で検証する。R 言語の vars パッケージの causality 関数を使用した。例として、2018 年 6 月について、ZTD のデータが降雨強度に与える影響について、検定の結果を表 5-4 に示す。

表 5-4 単位根検定

	p-value
\$Granger	0.001867
\$Instant	0.0003062

\$Granger は Granger の因果性検定の結果である。p-value が 0.05 より小さいので

Granger の因果があるという結果となった。

\$Instant は Granger の瞬時因果性と呼ばれる因果の検定結果である。こちらは同時刻における ZTD と降雨強度の影響を検定したものである。こちらも p-value が 0.05 より小さいので瞬時因果性があるという結果となった。

ZTD が降雨強度におよぼす影響について、Granger の因果性検定、瞬時因果性ともに有意であることが確認できた。特に \$Instant の結果が示すように ZTD の変化が降雨強度の変化にダイレクトに反映されるということが確認できた。

Granger の因果性検定結果から、瞬時因果性は有意であった。さらに ZTD が急増すると、降雨強度はどのくらいのタイムラグにより増加するか、をインパルス応答関数によって検証する。インパルス応答関数は R 言語の vars パッケージの irf 関数を使用した。

例として 2018 年 7 月の ZTD と降雨強度の関係をインパルス応答によって検証し、結果を図 5-8 に示す。グラフの上が ZTD、下が降水強度である。t=0 をスタートとして、ZTD の増加が始まってから、数時点(数分)から 20 時点(20 分)程度の時間差で豪雨が発生し、特に約 18 時点(青色破線の部分)、つまり約 18 分後に降雨強度のピークがみられた。他の期間においても同様の傾向が見られた。なお、降水強度の変化量のオーダーに対して、ZTD の変化量が小さすぎるため ZTD はほとんど変化してないように見える。

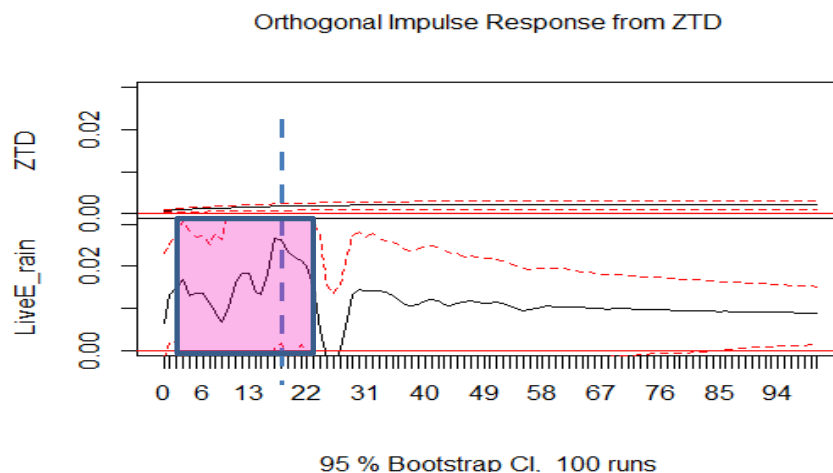


図 5-8 ZTD に対する降雨強度のインパルス応答 (2018/7)

5-10 観測データのより詳細な分析

5-8 項までは、ZTD と降雨強度の関係を 1 月間という単位で検討してきたが、もう少しデータを詳細に確認した例を示す。

図 5-9 は 2018 年 7 月 18 日 16 時 00 分、17 時 00 分の気象レーダー(降水強度)の状況である。雨雲の規模としては小さいながら、同日 15 時付近に雨雲が生駒市北部地域に発生し、その後徐々に北東方向から南西方向に移動し、17 時頃には、ほぼ奈良県内から雨雲が抜け去ったという状況である。

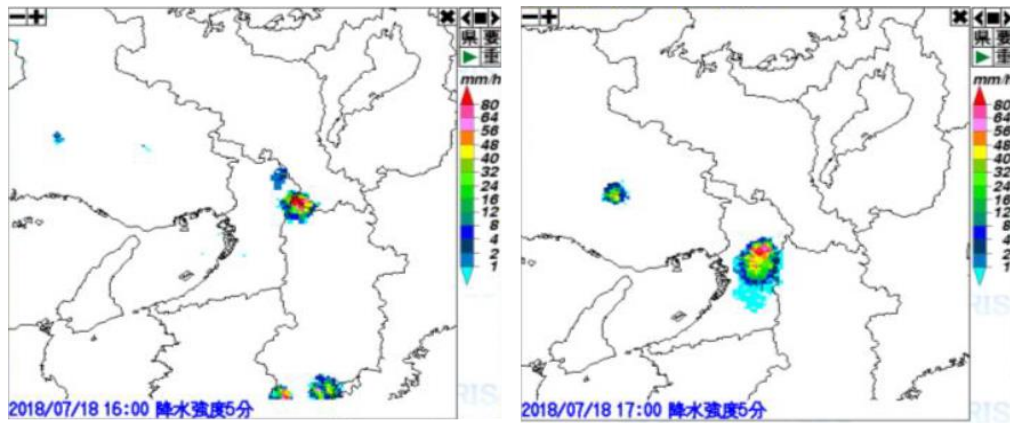


図 5-9 気象レーダー (2018/07/18 16:00~17:00)

図 5-10 は NAIST 構内の気象センサとアメダス生駒山気象観測所、生駒電子基準点の位置関係を示したものである。NAIST～生駒電子基準点間は約 4km、生駒電子基準点～アメダス生駒山気象観測所間は約 3km である。



図 5-10 観測地点の配置状況

図 5-11 は 2018 年 7 月 18 日、15 時 00 分から 17 時 00 分までの ZTD と NAIST 構内の気象センサ、アメダス生駒山のそれぞれの降雨強度のデータを比較したものである。グラフ上段が ZTD、中段は NAIST 構内の気象センサ、下段がアメダス生駒山である。①の青色破線の部分で ZTD が急上昇した後、約 15 分後に②の青色破線の部分で降水が始まり、さらに 15 分後の③の部分で降水強度がピークに達した。ZTD が急上昇した後、約 30 分後に強雨となったことがわかる。また雨雲の移動とともに、2 つの観測点において、時間差で同じような降雨強度の変化(グラフの青色から赤色の部分)が認められた。

ZTD の急上昇の検知が降雨の予測にとって重要なポイントであると考えられる。なお、

④の赤色破線の部分で 2 度目の強雨のピークが発生しているが、③で ZTD がピークとなった後は、減少傾向となったのに、再び強雨が発生しており、ZTD の変化だけで説明できない例の 1 つである。

図 5-12 は、2018 年 7 月 9 日 14 時から 16 時にかけての ZTD および NAIST 構内とアメダス生駒山の降雨強度のデータである。図 5-13 に示す気象レーダーでは解りづらいが、NAIST 構内では強雨が観測されている一方で、アメダス生駒山では雨は記録されていなかった。例えば夏の夕立ちのように局地的な豪雨では気象庁のアメダス観測網(約 17km 格子に配置)ではとらえられない場合もある。また図 5-10 に示すように ZTD は生駒市立桜ヶ丘小学校内に設置されている GEONET のデータであり、ZTD との比較に使用してい

る降雨強度は北東に約 4km 離れた NAIST 構内の観測である。ZTD と降雨強度は同一地点のデータではないことが、誤差や予測の精度に関わる問題の 1 つである。

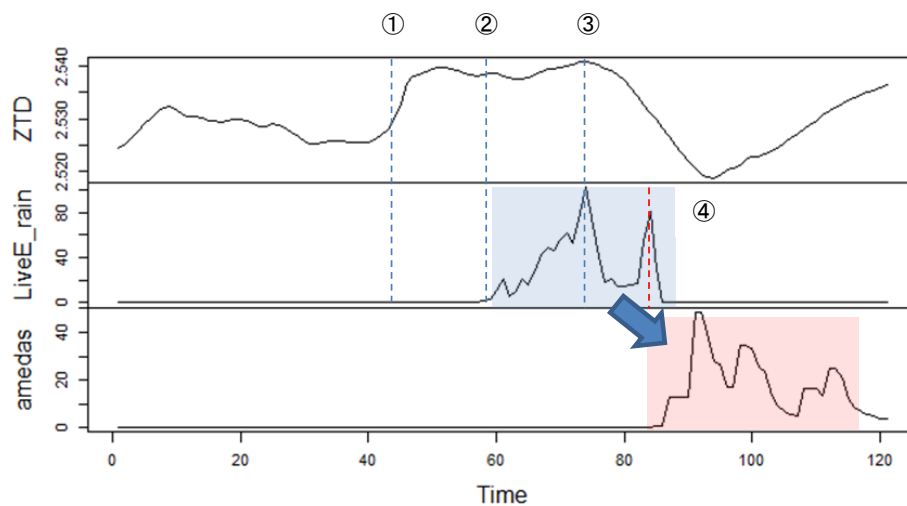


図 5-11 ZTD と降雨強度 (2018/07/18 15:00~17:00)

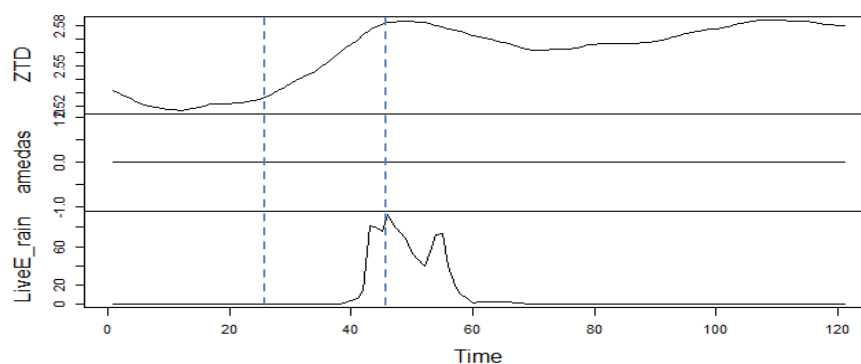


図 5-12 ZTD と降雨強度 (2018/07/09 14:00~16:00)

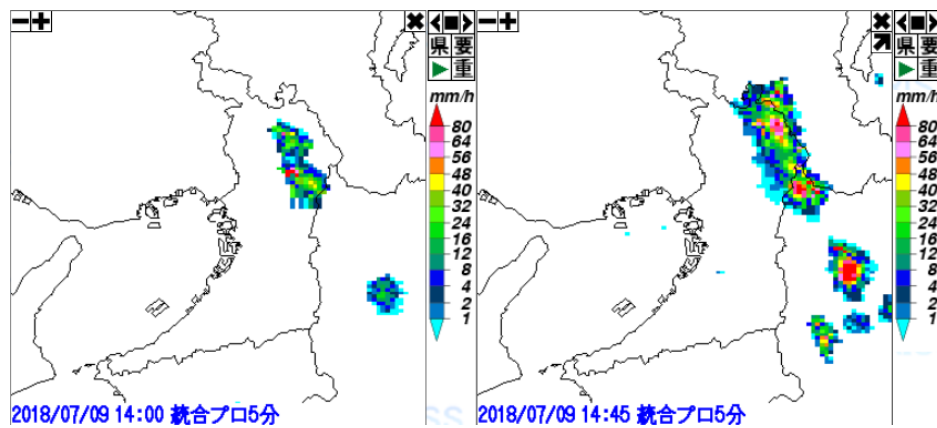


図 5-13 気象レーダー (2018/07/09 14:00(左) 14:45(右))

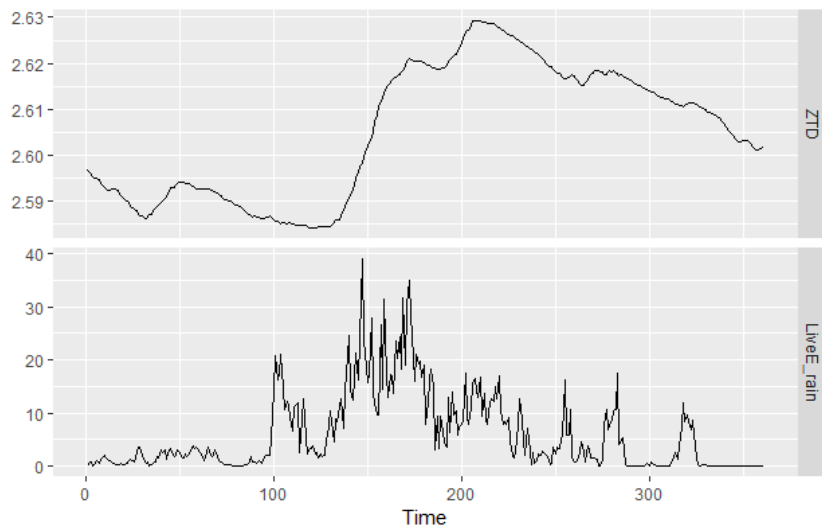


図 5-14 ZTD と降雨強度 (2018/09/04 12:00~18:00)

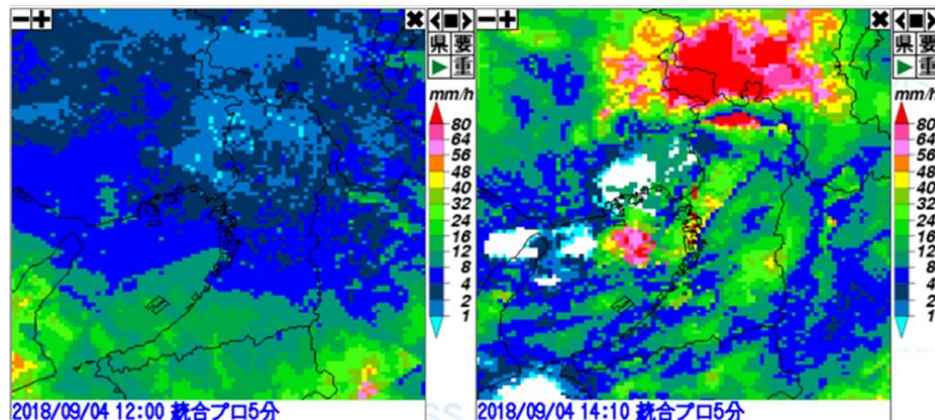


図 5-15 気象レーダー (2018/09/04 12:00(左) 14:10(右))

図 5-14 に、2018 年 9 月 4 日 12 時から 18 時にかけての ZTD と降雨強度の関係を示す。図 5-15 に、2018 年 9 月 4 日の 12 時と 14 時 10 分の気象レーダーを示す。図 5-14、図 5-15 について、2018 年 9 月 4 日は台風第 21 号の影響があった日で、12 時頃徳島県南部に上陸し、14 時頃には兵庫県神戸市付近に上陸し、15 時には日本海海上へ抜けた。近畿では、4 日昼前頃から猛烈な風となり、暴風を伴い大雨となった。関西空港が冠水する等、大きな被害の発生があったもので記憶に新しい。2018 年 9 月 4 日 12 時から 18 時にかけての期間について、ZTD と降雨強度についての相互相関を図 5-16 に示す。現時点より-55 時点前、つまり 55 分前の ZTD の変化が、現時点の降雨強度に最も影響を与えていることが理解できる。またこの結果は図 5-7 で示したように 2018 年 9 月の 1 月間の、相互相関の結果とも一致していた

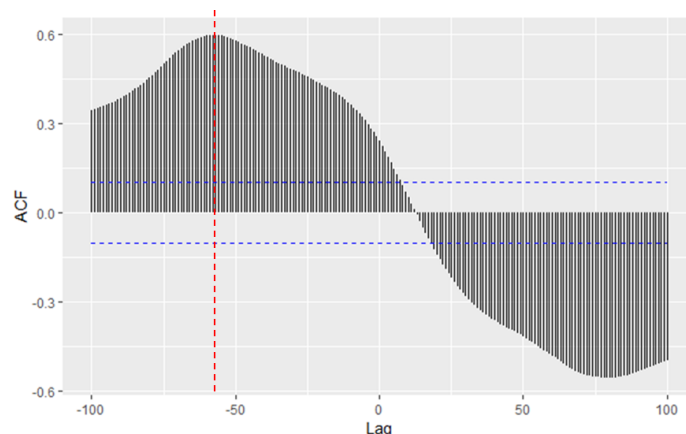


図 5-16 降雨強度の相互相関(2018/09/04 12:00~18:00 ZTD)

5-11 VAR モデルによる時系列データの予測

R 言語の `predict` 関数を使うことで、95%予測区間や信頼性区間の予測を出すことができる。図 5-17 は、図 5-14 から $t=0$ から $t=180$ 時点(12時から15時までの期間)を切り出したもので、150 時点から 30 時点先、つまり 30 分先の予測を示したものである。さらに 150 時点から 50 時点先、つまり 50 分先を予測したものが図 5-18 である。予測期間が長くなるほど予測精度が低下していくことは明らかである。図 5-17 のように比較的精度の高い予測期間は、現時点から 15 時時点先、つまり 15 分程度先までといえる(図の青色破線の部分)。15 分程度先の予測精度が比較的よいことから、5-9 項のインパルス応答の示す結果と組み合わせると、最低でも身の危険を守るための警告(対策)がとれる可能性があると考ええる。なお、予測精度向上のためにはさらにデータを蓄積し、機械学習による予測なども含めての検討も必要と考える。

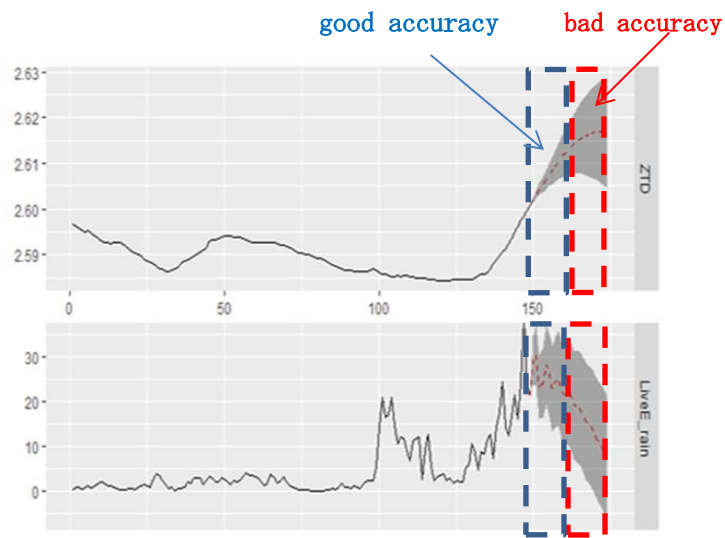


図 5-17 ZTD と降雨強度(予測 30 分) (2018/09/04 12:00~15:00)

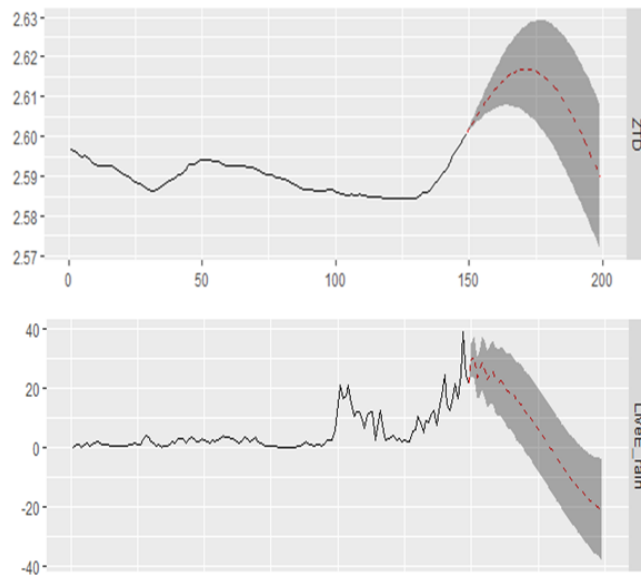


図 5-18 ZTD と降雨強度(予測 50 分) (2018/09/04 12:00~18:00)

5-12 ランダムフォレストによる回帰分析

ZTD の時系列を x_i とし、 y_i を雨が降るまでの時間として回帰分析を行った。データは以下のとおり設定した。N は 60 (60 分間のデータ) とした。

表 -5-5 回帰分析用データセット

id	y	x
1	y_1	$x_{15}, x_{14}, \dots, x_1$
2	y_2	$x_{16}, x_{15}, \dots, x_2$
.	y_3	$x_{17}, x_{16}, \dots, x_3$
.	.	...
N	y_N	$x_{N+14}, x_{N+13}, \dots, x_N$

表 5-5 のデータセットの例を表 5-6 に示す。

表 5-6 表 5-5 のデータセットのイメージ

ID	Date	zdt	rain	y	0	-1	-2	-3		-12	-13	-14
1	#####	2.59844	0	-60	2.59844	2.59808	2.59784	2.59764	.	2.59602	2.59584	2.5958
2	#####	2.5985	0	-59	2.5985	2.59844	2.59808	2.59784	.	2.5962	2.59602	2.59584
3	#####	2.59864	0	-58	2.59864	2.5985	2.59844	2.59808	.	2.59624	2.5962	2.59602
4	#####	2.5987	0	-57	2.5987	2.59864	2.5985	2.59844	.	2.59648	2.59624	2.5962
5	#####	2.59898	0	-56	2.59898	2.5987	2.59864	2.5985	.	2.59668	2.59648	2.59624
6	#####	2.599	0	-55	2.599	2.59898	2.5987	2.59864	.	2.59684	2.59668	2.59648
7	#####	2.59876	0	-54	2.59876	2.599	2.59898	2.5987	.	2.59718	2.59684	2.59668
8	#####	2.5986	0	-53	2.5986	2.59876	2.599	2.59898	.	2.5973	2.59718	2.59684

上記のデータセットに対して、ランダムフォレストを用いて $y = f(x)$ というモデルを構築した。1つの現象としては 45×15 個の 2次元のデータとなる。図 5-19 は、降雨が「なし」の状態から「あり」に変化した時点の ZTD の値を、前 45 分間分を取り出してモデルに入力した結果である。この結果、相関係数 r は $r=0.9824766$ と、雨が降るまでの実測値 y_i と予測値 $\hat{y}_i$ において良好な相関が得られた。次に図 5-20 では、降雨強度が 10mm/h 未満から 10mm/h 以上となった時点の ZTD の値を、前 45 分間分を取り出してモデルに入力した結果である。さらに図 5-21 において、降雨強度が +10mm/h 以上変化したときの時点の ZTD の値を、前 45 分間分を取り出してモデルに入力した結果である。図 5-20 と図 5-21 の比較から、単に降雨強度が大きい状態よりも、降雨強度が急増した場合のほうが、より直前 45 分間の ZTD の振る舞いの影響を受けるとことが示された。このことは 5-8 項に示した相互相関の例のように、現時点から 25 分から 50

分前の ZTD の相関が高いという結果と一致した。ゲリラ豪雨の予測には発生直前約 1 時間の ZTD の把握が重要であることが改めて示された。

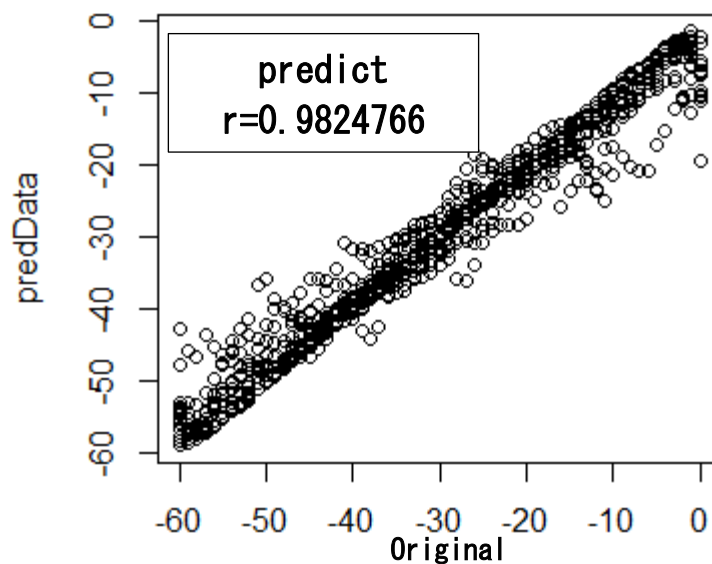


図 5-19 ランダムフォレストによる回帰分析(降水の有無の予測)

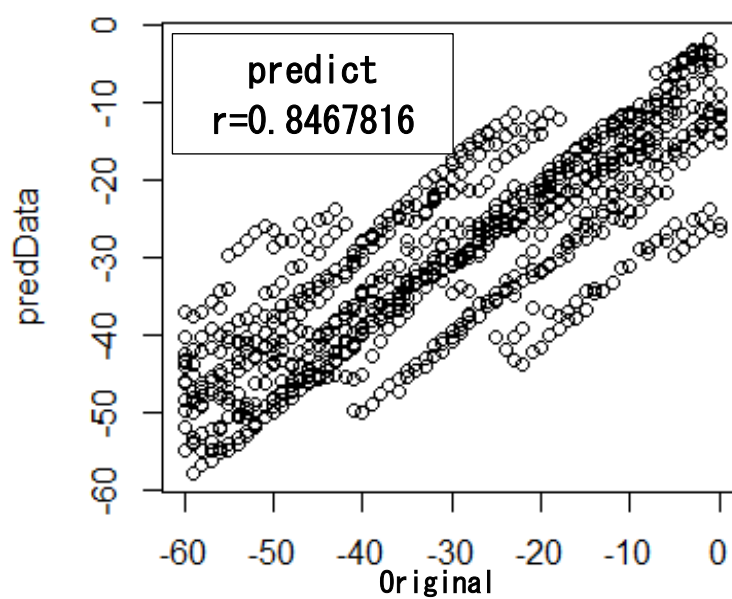
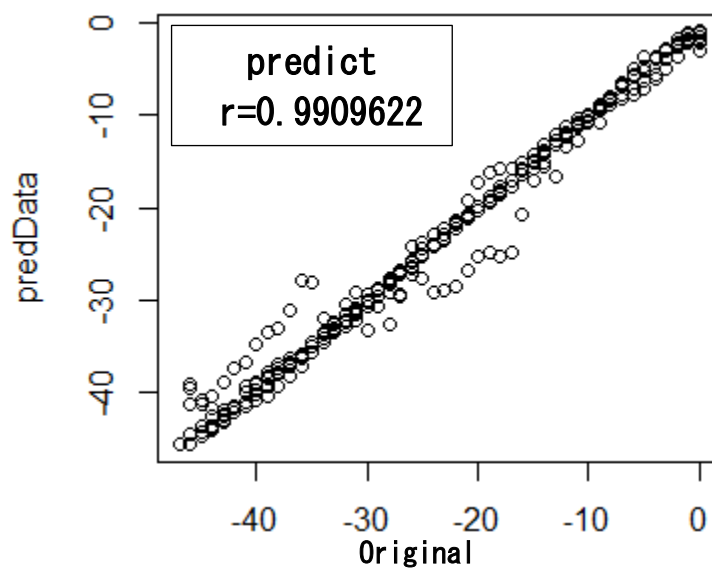


図 5-20 ランダムフォレストによる回帰分析
(降水強度 10mm/h を条件とした場合の予測)

図 5-21 ランダムフォレストによる回帰分析



(降水強度変化量+10mm/h を条件とした場合の予測)

第6章 考察および今後の展望

この章においては、本研究での結果の検証、まとめ、考察、さらに今後の展望について述べる。

6-1 結果の検証

5章で述べた ZTD と降水強度の関係についてその結果を検証する。以下、図 6-1 から図 6-4 に 2018 年 6 月から 9 月の各月の ZTD と降水強度を示す。各図において縦軸の上段は ZTD、下段は降水強度を表す。赤色破線は降雨の有無を示す ZTD の閾値である。赤字で示す日時は降水強度が 50mm/h 以上となった日時を示す。

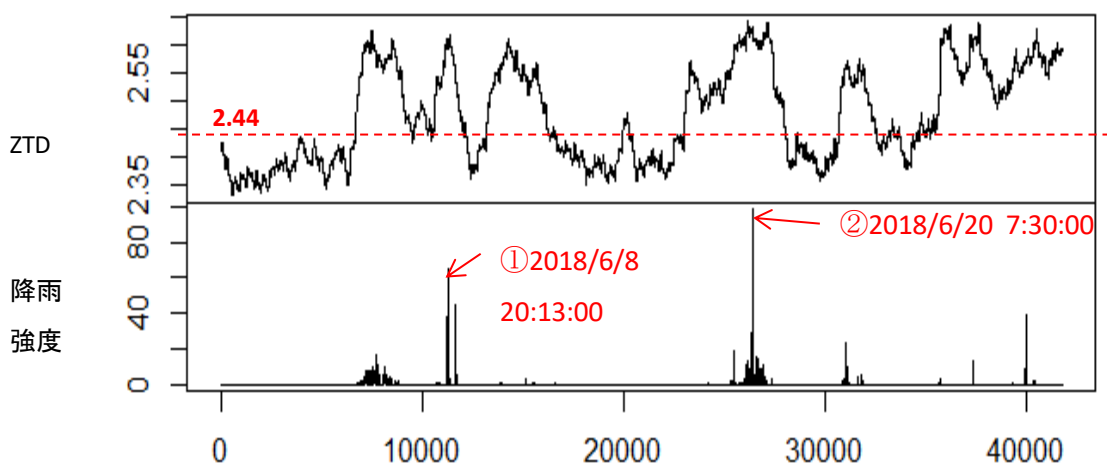


図 6-1 ZTD と降水強度の関係 (2018/6)

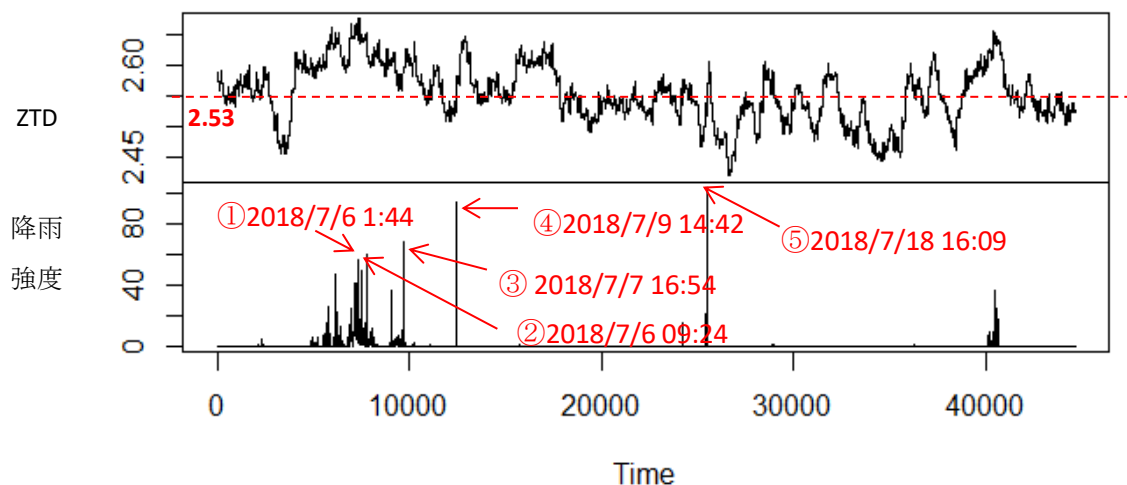


図 6-2 ZTD と降水強度の関係 (2018/7)

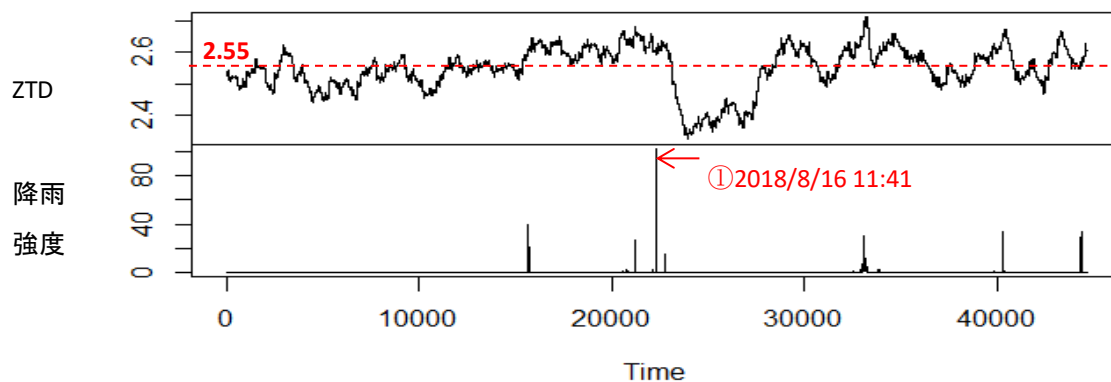


図 6-3 ZTD と降雨強度の関係 (2018/8)

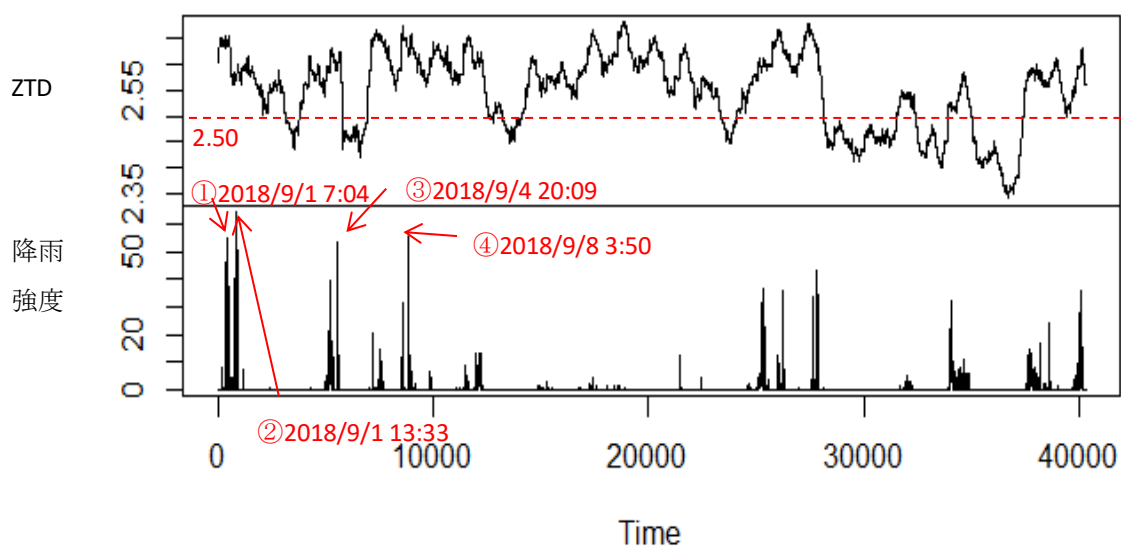


図 6-4 ZTD と降雨強度の関係 (2018/9)

表 6-1 過去 3 年間の月毎の降雨の有無を判定する ZTD の閾値

	6 月	7 月	8 月	9 月
2016 年	欠損	2.53	2.53	2.57
2017 年	2.46	2.55	2.53	2.49
2018 年	2.51	2.53	2.55	2.50
平均	2.49	2.54	2.54	2.52

各月とも、例外を除いて、概ね降雨を観測した閾値以上の ZTD(表 6-1)において、ZTD の急増に対して降雨強度が増加する傾向が認められた。

1 つの GNSS 受信器が受信する ZTD は、受信機の位置から半径 30km の逆円錐型のエリアの上空の測位衛星から届く平均的な水蒸気の量となることから、受信機周囲雨雲の形態によって、ZTD の値が決まる。つまり、雨雲の形態によって ZTD の数値およびその時間変化量が異なることを意味する。受信機の真上に雨雲がある場合とない場合で、ZTD の値も変わることになる。2018 年 6 月から 9 月にかけての豪雨に対して、以下表 6-2 に雨雲の形態を分類して示す。

単発の雨雲の場合、雨雲の動きに対して、ZTD は雨雲の発生前に増加し始め、雨雲の成長とともに、ZTD の増加とともに降水が始まり、次第に強度が大きくなる。ZTD の変化がなくなって降水強度も弱くなり、次第に雨も弱まるといった比較的単純に変化すると考えられる。例として図 6-5 に雨雲の発達モデルと ZTD、降水強度、および気象レーダーの様子を示す。

対して図 6-6 のように、雨雲が継続または断続的に受信機の上を通過した場合は、ZTD は複雑な変化をする。図 6-7①から図 6-10④に気象レーダーの様子を示す。気象レーダーは 4 画面あり左上→右上→左下→右下という順に時間が進む。

表 6-2 雨雲の形態の分類

	日時	雨雲の形態	気象レーダー
図 6-1 ①	2018/6/8 20:13	単発	図 6-7①
図 6-1 ②	2018/6/20 7:30	継続	図 6-7②
図 6-2 ①	2018/7/6 1:44	継続	図 6-8①
図 6-2 ②	2018/7/6 9:24	継続	図 6-8②
図 6-2 ③	2018/7/7 16:54	継続	図 6-8③
図 6-2 ④	2018/7/9 14:42	単発	図 6-8④
図 6-2 ⑤	2018/7/18 16:09	単発	図 6-8⑤
図 6-3 ①	2018/8/16 11:41	断続	図 6-9①
図 6-4 ①	2018/9/1 7:04	継続	図 6-10①
図 6-4 ②	2018/9/1 13:33	継続	図 6-10②
図 6-4 ③	2018/9/4 20:09	断続	図 6-10③
図 6-4 ④	2018/9/8 3:50	単発	図 6-10④

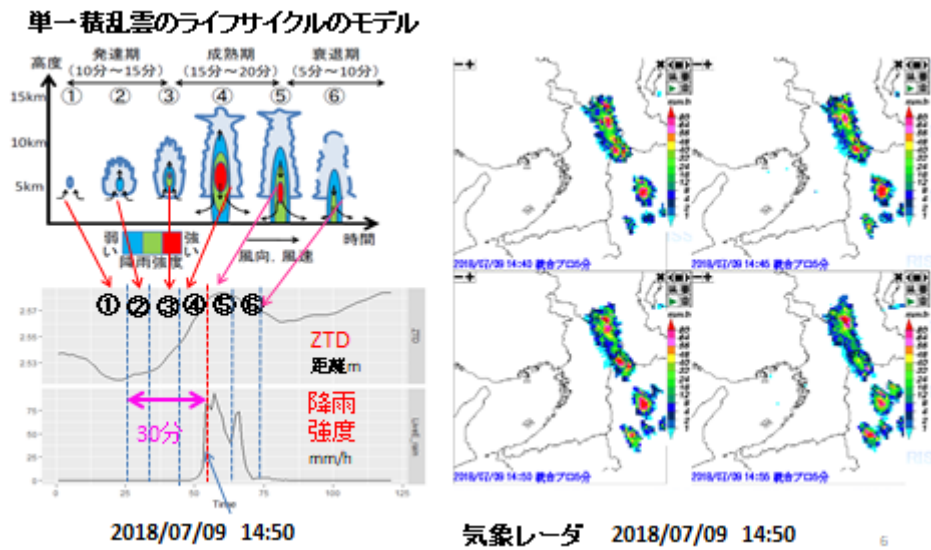


図 6-5 単一積乱雲の場合の気象モデルと ZTD, 降水強度、および気象レーダーの関係

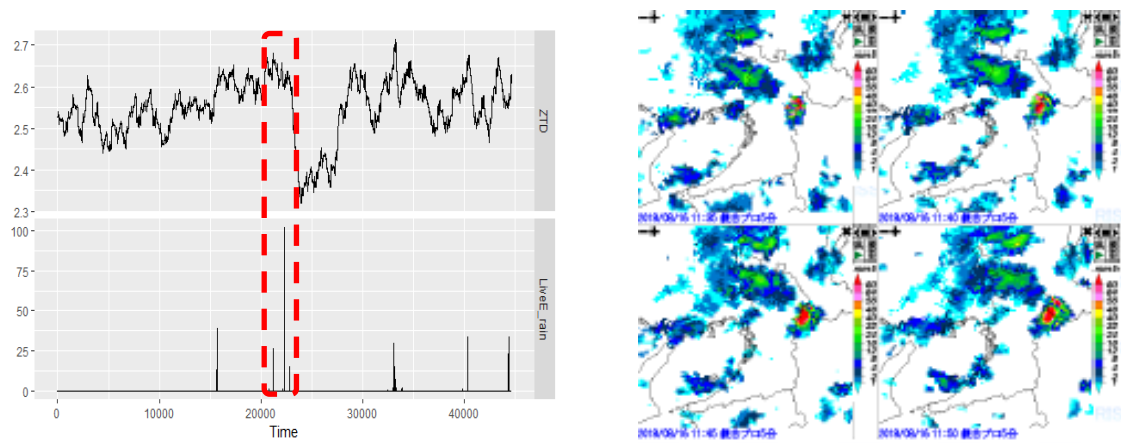


図 6-6 雨雲が断続的な場合の ZTD と降水強度(図 6-3 に同じ)、気象レーダーの例

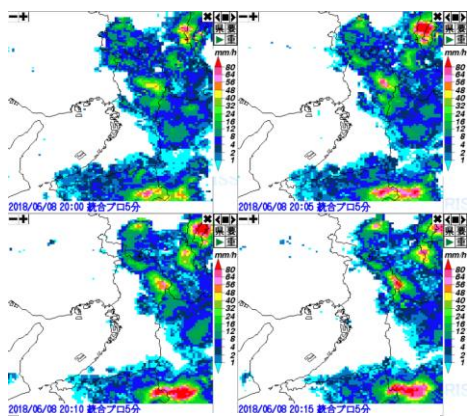


図 6-7 ①

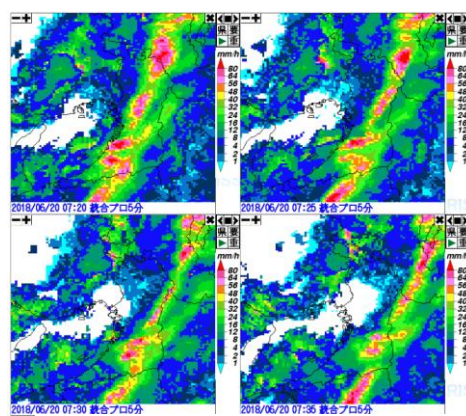


図 6-7 ②

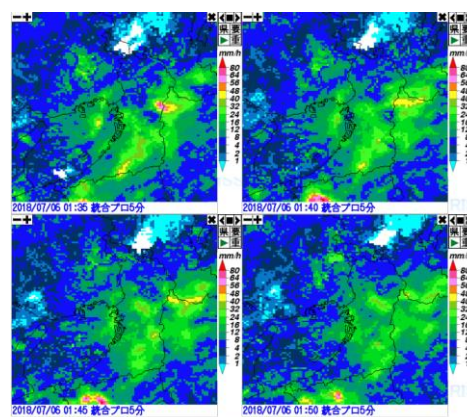


図 6-8 ①

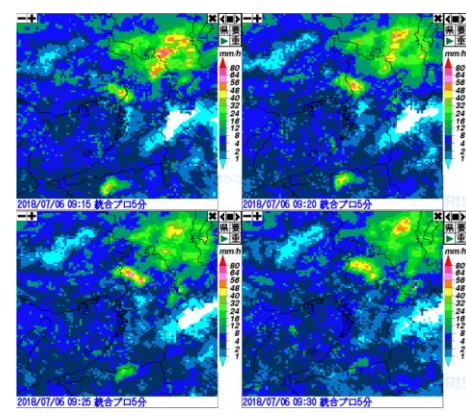


図 6-8 ②

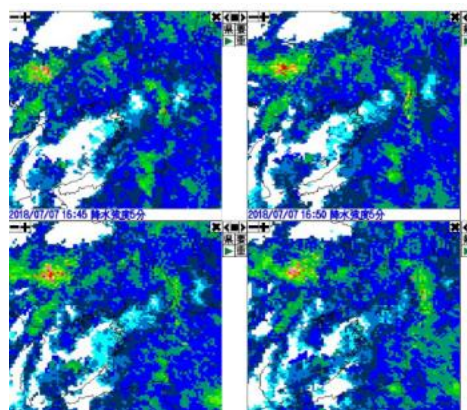


図 6-8 ③

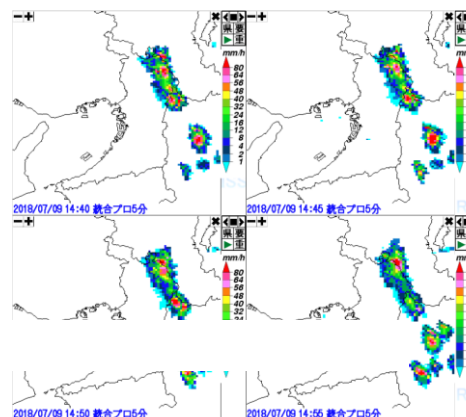


図 6-8 ④

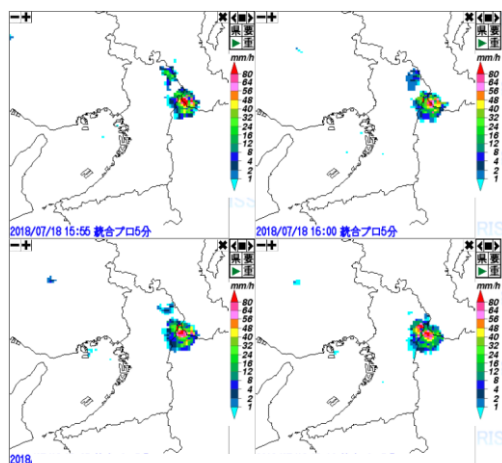


図 6-8 ⑤

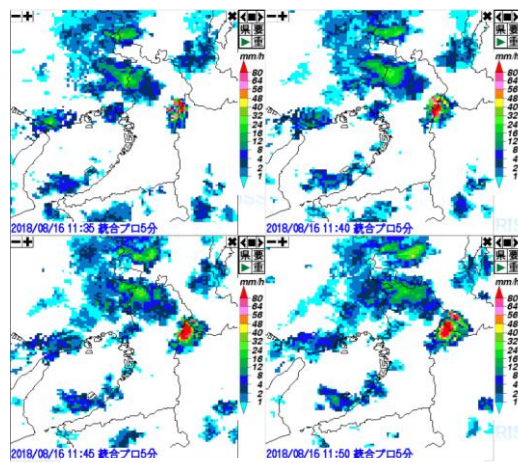


図 6-9 ①

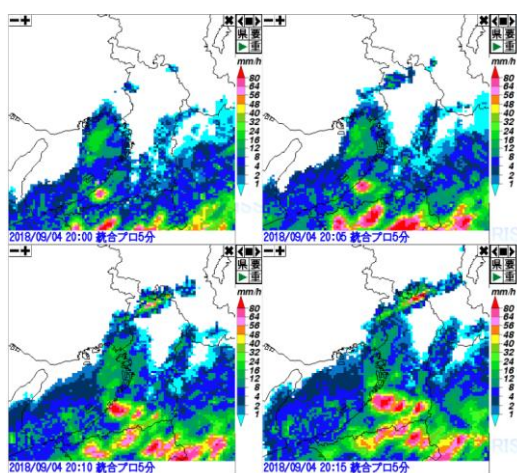


図 6-10 ①

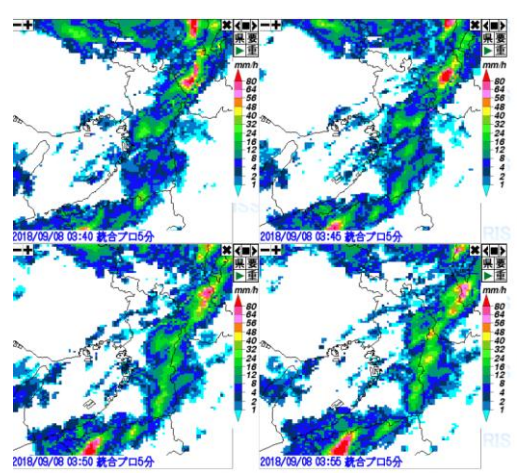


図 6-10 ②

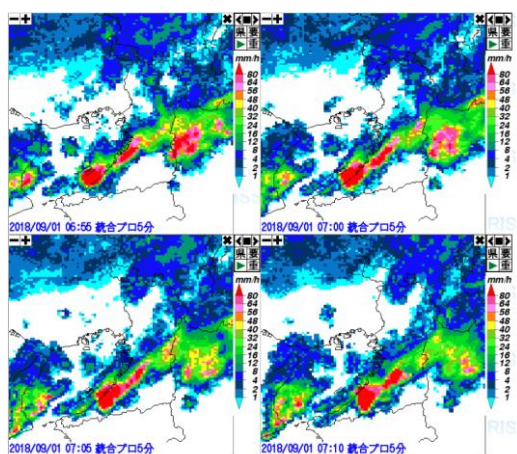


図 6-10 ③

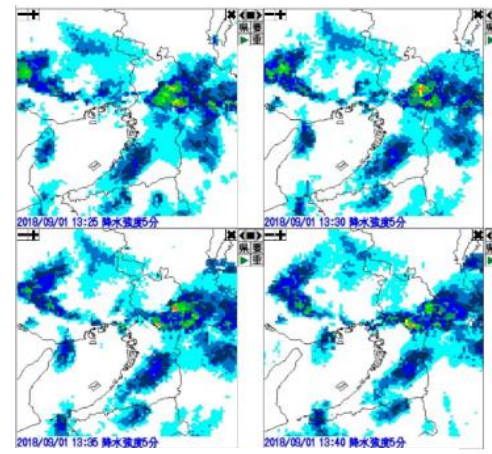


図 6-10 ④

図 6-5 の左上は単一積乱雲の発生から発達、成熟、衰退の一連のライフサイクルの様子を示している[23]。図 6-6 左下の図はライフサイクルに対応して、ZTD と降水強度が変化の様子を、単一積乱雲のライフサイクル①から⑥の過程に合わせて示している。右の図は気象レーダーで、北生駒地方の積乱雲の様子を赤色矢印の順に 5 分毎、計 20 分間の変化を示している。この図からこの積乱雲はゆっくり時間をかけて北西から南東の方向に移動したことがわかる。

図 6-6 は降水が断続する場合の、ZTD と降雨強度、および気象レーダーの関係を示したものであるが、左の ZTD と降雨強度のグラフで赤色破線の部分は、ZTD がほとんど変化(増加)していないのに豪雨が発生している。このような例では単純に ZTD の変化のみでゲリラ豪雨を予測することの困難性を示唆している。表 6-2 は、単独の積乱雲の場合と、連続的または断続的に雨雲が覆っている状況で、予測が困難と考えられる場合があるために雨雲の状態を分類したものである。ZTD は水蒸気量の目安を示しているが、図 6-6 は ZTD が急増の傾向を示さない場合でも豪雨となることを示す例である。ただし ZTD は高水準にあることには違いはない。

図 6-6 は 1 月間のタイムスパンであり、一方、これを 2 時間のタイムスパンとして抽出したのが、図 6-11 である。ミクロ的にみると、青色破線の部分において ZTD の増加に同期して降雨強度の変化がみられた。

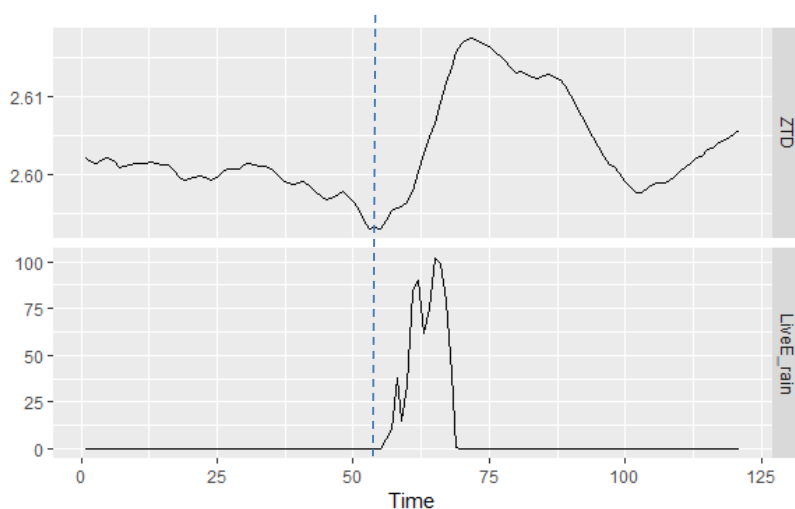


図 6-11 ZTD と降雨強度 (2018/08/16 11:40)

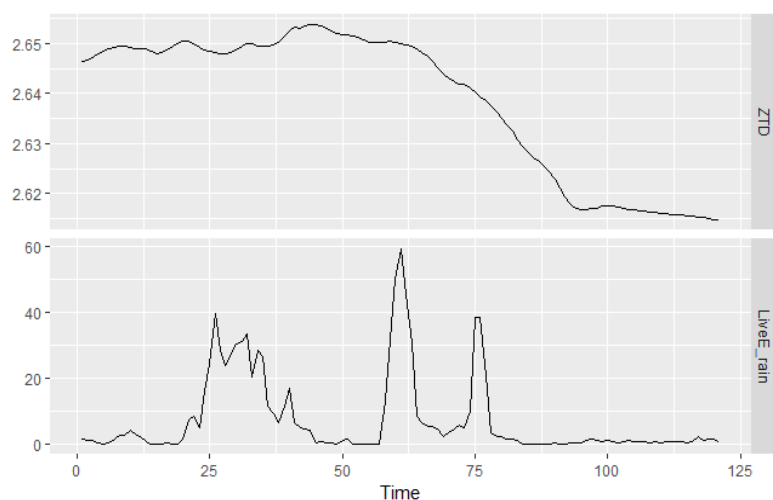


図 6-12 ZTD と降雨強度 (対応が悪い場合) (2018/07/06 09:25)

図 6-12 は、図 6-11 のように、ZTD と降雨強度の関係を 2 時間のスパンで示したものであるが、こちらは ZTD の変動はほとんどないが、降雨強度が大きく変動している。このように、単に時間分解能を細かくすれば ZTD の変化の特徴が見出せる訳ではなく、分解能をいくかにすればよいということも一概に言えない。観測データをミクロ的に捉えるか、マクロ的に捉えるかの判断は、今後の課題とするが、一般的には、単独の積乱雲の場合は図 6-5 のように、ZTD と降雨強度の関係は概ね明瞭と考えられる。対して雨雲が連続、もしくは断続の場合は、ミクロ的に見ても ZTD と降雨強度の関係は不明瞭の場合もあるため、さらにサンプルを増やして検討する必要がある。

本研究では、ZTD と降水強度の関係から、豪雨予測につながる特徴を見出すことが主な目的であるが、ZTD の特徴を捕らえることのみで降水強度を推定することはある程度は可能と考えるが、限界もあると考えられる。このことから、詳細に検討は行わないが今後の課題として、ZTD 以外の要素について、その関連性を確認しておくこととする。気象センサには、降雨強度以外にも様々な観測要素があり、それらのデータも取得できる。具体的には、気圧のデータも含めて降雨強度の推定について検討する。

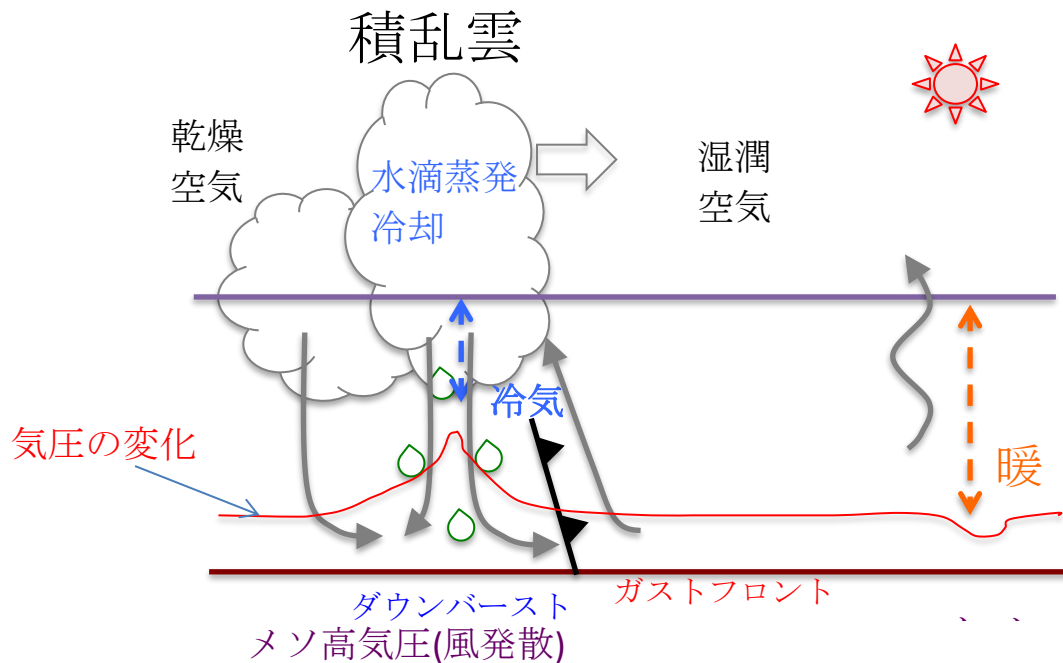


図 6-13 積乱雲の下で気圧が上昇する模式図

図 6-13 は、積乱雲により発生する大雨の時の下降気流を簡易的にイメージしたものである。図の赤色が気圧の変化を示す。雷雲が接近すると気圧は徐々に低下するが、初めの寒冷な気塊が到着すると気圧は急に上昇する。この気圧上昇は短時間で、直ちに再下降して雨が降り始める。この気圧のピークを気象センサで捕らえることができれば、豪雨の予兆につながる可能性がある。図 6-14 に 2018 年 7 月 9 日の 1 日の ZTD、降雨強度、および気圧のデータを示す。一番上が ZTD、中段は降水強度、下段は気圧である。青色破線の部分で豪雨が発生しているが、ZTD と降水強度の関係に加えて、気圧に注目すると、赤色の○で示した部分で微量ながら気圧の急変がみられた。

図 6-15 は気圧と降雨強度の相互相関を示したものである。現時点から遡って 40 分程度にピークがみられた(赤色破線の部分)。気圧と降雨強度の相互相関について VAR モデルの因果性\$Grenger、さらに瞬時的な因果性\$Instant を検定したところ、以下の結果が得られた。

\$Grenger p-value <2.2e-16

\$Instant p-value = 0.007277

ともに、統計的には気圧が降雨強度に影響を与えているという有意な結果となった。この例については、図 6-13 に示すように、豪雨の時の下降気流の効果により、一時的に気圧が急上昇したものと考えられる。このことから ZTD に加えて、気圧の変化を取り込めば、豪雨予測の精度向上につながる可能性がある。図 6-16、図 6-17 に気圧の変化に対応し豪雨の発生したわかりやすい事例と、反対に複雑な事例を示す。また図 6-17 のようにタイムスパンによって現象の見方が異なることもある。これについては今後取り組む課題とする。

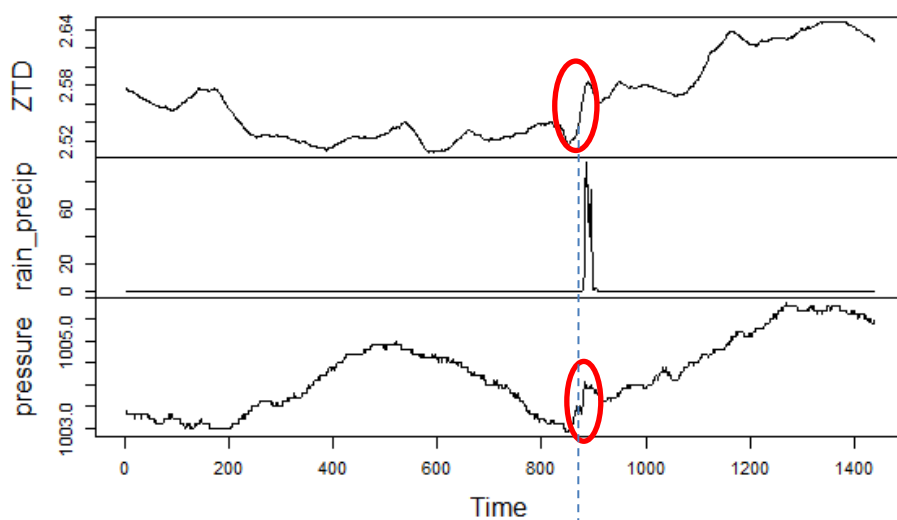


図 6-14 ZTD と気圧、降雨強度 (2018/07/09)

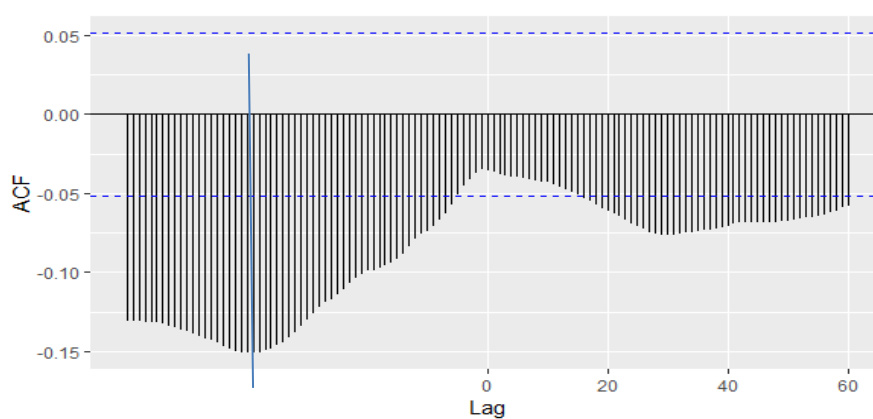


図 6-15 気圧と降雨強度の相互相関 (2018/07/09)

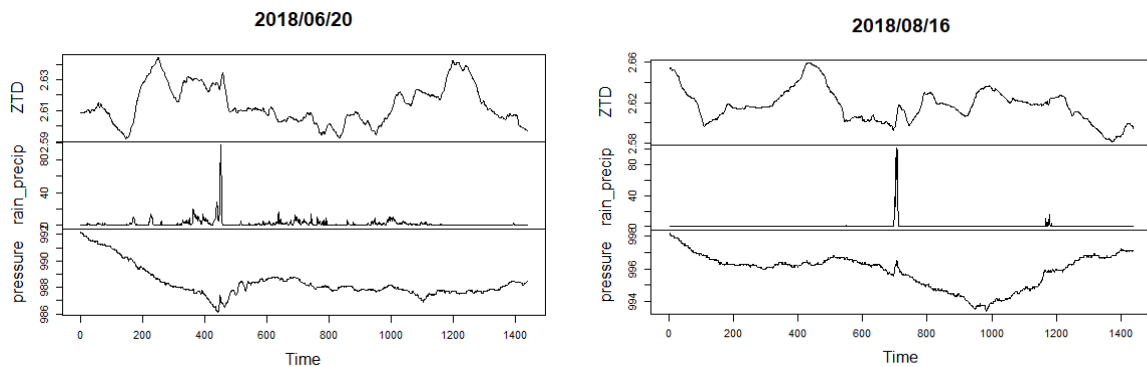


図 6-16 ZTD、気圧および降水強度の関係（豪雨の予測の可能性がある例）

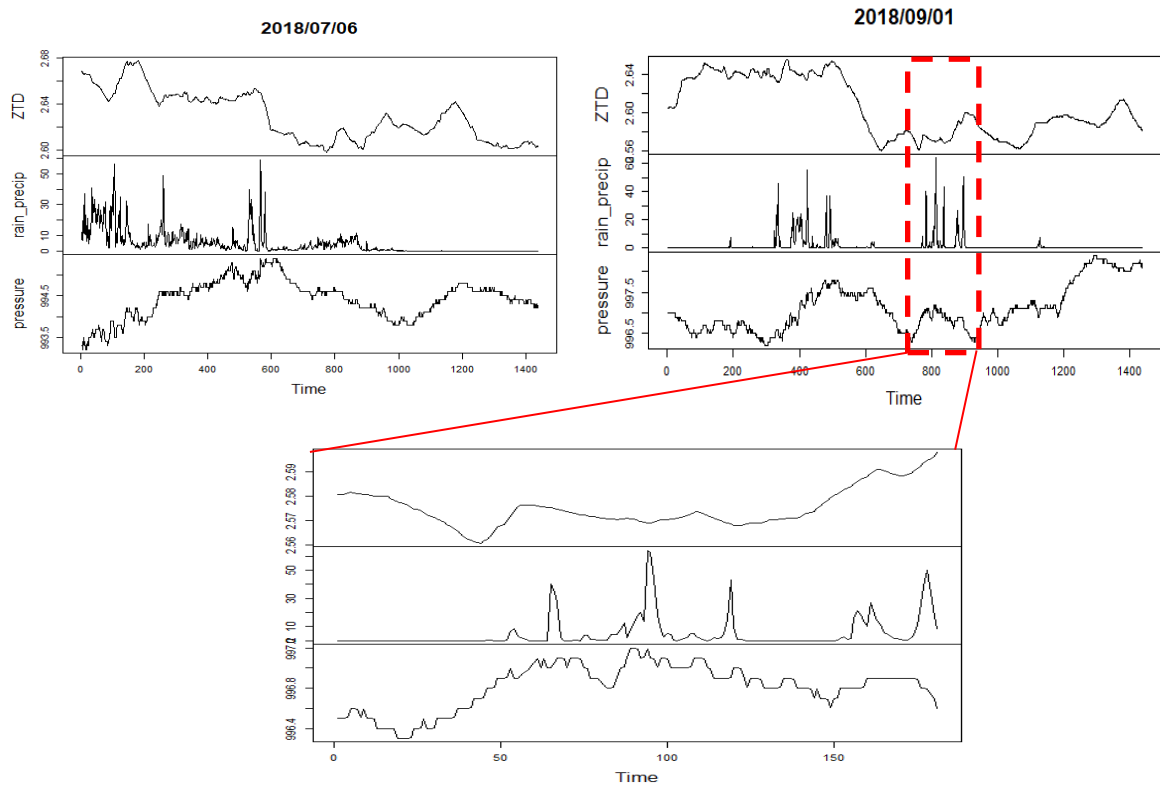
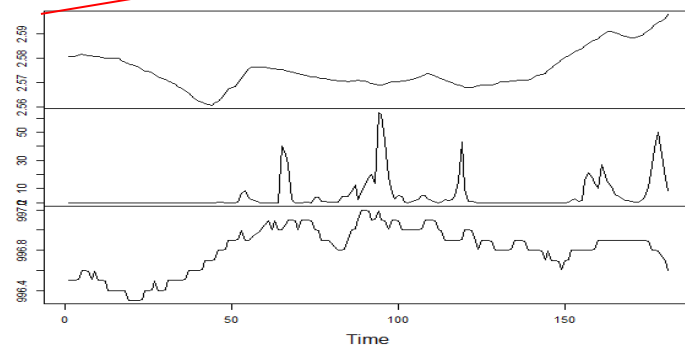


図 6-17 ZTD、気圧および降水強度の関係（豪雨の予測が困難な例）

下の図は右上の図を拡大したもの(12:00-15:00)



6-2 考察

本研究では ZTD の変化のみで降雨強度を予測することを目標としたが、検証したデータは主に昨年夏季のデータが中心となったため、さらに多くのデータを積み重ねて検証する必要がある。以下に主な課題とその対策を示す。

- ① 衛星測位情報では直接大気の水蒸気量を計測できないため、気象モデルを用い ZTD を推定値として算出している。このため変化が激しい気象現象を、モデル自体が正確に表現できない可能性があり、誤差に含まれること。気象モデルの改良が求められる。
- ② GEONET の観測点には気象センサがないため、GEONET の観測点の真上に雨雲があっても、気象センサの観測地点に降雨がない場合もあるため、予測の精度にも影響があると考えられる。NAIST 構内に GNAA 受信機を設置することで改善できると考える。
- ③ 上記②にも関連するが、現状の GEONET の配置状況では、より局所的なゲリラ豪雨の予測は困難であること。
- ④ 図 6-18 に示すように ZTD は、半径 30 数 km の広がりをもった逆円錐空間の天頂方向の平均的な値であること[20]。この図の中右側では降雨もあり、遅延量が相対的に左側より大きい。GNSS 解析で得られる ZTD は、受信機から各衛星方向の平均的な値という性格があるため、豪雨の場合でも、ZTD が過小気味に表現される原因として考えられる。ZTD の水蒸気の勾配のパラメータの調整で改善される可能性がある。

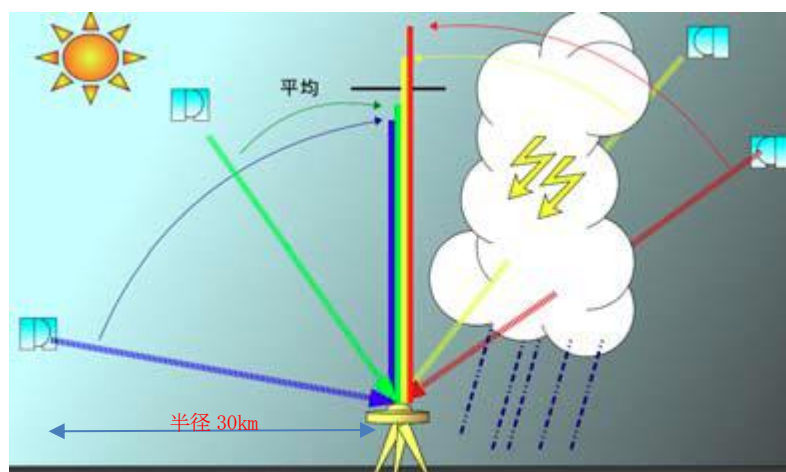


図 6-18 鉛直水蒸気量は半径 30km 空間の平均値[20]

⑤ Live E!の気象センサには風向風速、湿度、気圧等の観測データもあり、ZTD 以外のパラメータも含めてデータ解析、すればさらに予測精度向上が期待できると考えられること、等である。

ZTD のみで降雨強度を予測することは限りがあるが、降雨強度は ZTD の変化に対応しており、ZTD と降雨強度の交互相関係数が示した 55 分という数字からみて、ゲリラ豪雨を対象として約 1 時間まえに安全に避難誘導をおこなう警告が出せる可能性はある。

とくにインパルス応答の結果では ZTD の急増はその 20 分から 30 分程度後のゲリラ豪雨の発生を示唆しており、しかも降雨強度の 1 分間の変化量が+10mm/h となった場合は、精度よく予測できた。また図 5-17 に示したように、VAR モデルの予測では 15 分先の予測の精度が比較的高いと考えられることから、ゲリラ豪雨の発生十数分前の ZTD の急増の検知と予測モデルの組合せにより、身の安全を守るための緊急避難が可能になると考える。

6-3 今後の展望

2018 年末に準天頂衛星「みちびき」が正式運用となった。これまで 200 万円オーバーの受信機が、このタイミングでコンシューマ向けに、ローコストで 2 周波対応の受信機が購入可能となってきた(例 u-blox 社製 F9 など)。この精度により、民生用無人自律走行車 (UAV) アプリケーション地上ロボット・ナビゲーション、ヘッドアップ・ディスプレイ対応の車線レベル・ナビゲーション、インフォテインメント・システム、路車間 (V2X) 通信、農業用および建設用重機の制御、産業用ナビゲーション/追跡等のユースケースに対応できる[21]。これまでローコストで 2 周波対応の受信モジュールがなかったため、今後は一般向けにも cm 級の高性能な測位精度が提供される見込みである。

その他、これまで取り組んだ関連の研究について述べる。図 6-19 は、NAIST 構内で衛星放送の降雨による電波の受信強度の減衰について、降雨強度との関係を示したものである。青色が電波減衰、赤色が降水強度である。電波の減衰と降雨強度の変化がよく一致していることがわかる。ただし、アンテナは JCSAT3 衛星の方向 (NAIST から見て、南東方向) を向いており、NAIST の真上の雨雲を捕えているわけではないため、ゲリラ豪雨の予測には直接結びつかない。雨雲は上空 5km 程度の高さに発達した強雨域があるとすると、仮に NAIST の真上 5km 程度を観測できる位置にアンテナを向けると (NAIST からみて北西 5km 付近)、降雨強度の変化より先に、電波減衰が生じると考えられる。すなわち電波減衰の検知がゲリラ豪雨の予測につながる可能性が考えられる。この関連研究については引き続き今後の課題とする。

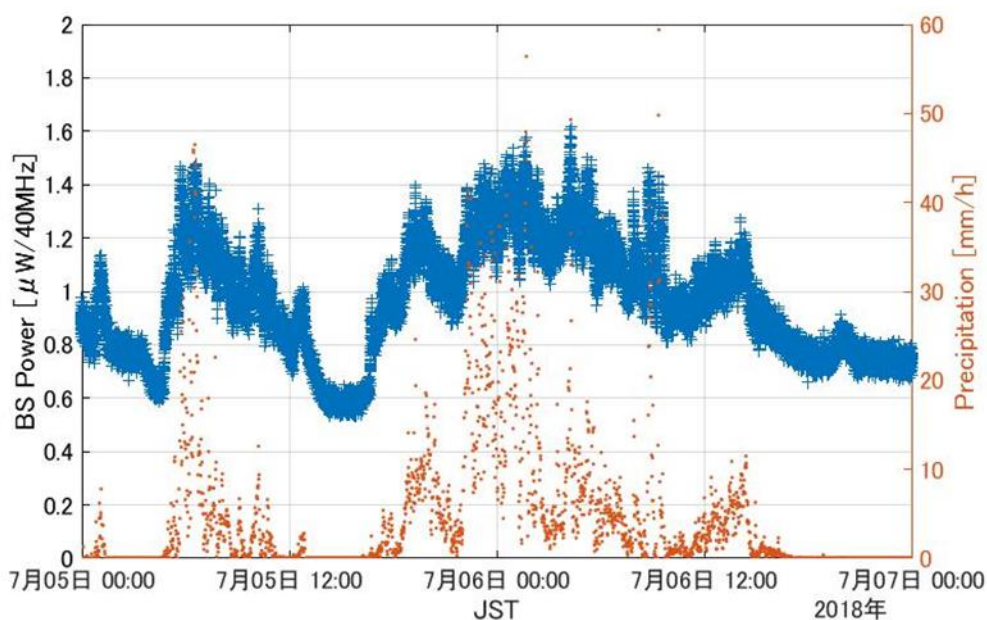


図 6-19 電波の降雨減衰と降雨強度の関係 (2018/07/05~07/06)

また NAIST 構内に設置された、準ミリ波帯のバックアップ回線 (NTG) のログデータから降雨時の電波減衰を確認することが可能で、図 6-20 のように電波減衰と実際の降雨強度がよく一致していることを確認している。このことは雨量センサがなくても降雨強度が精度よく推定されることが可能であり、これについても豪雨予測につながる可能性を秘めていると考える。

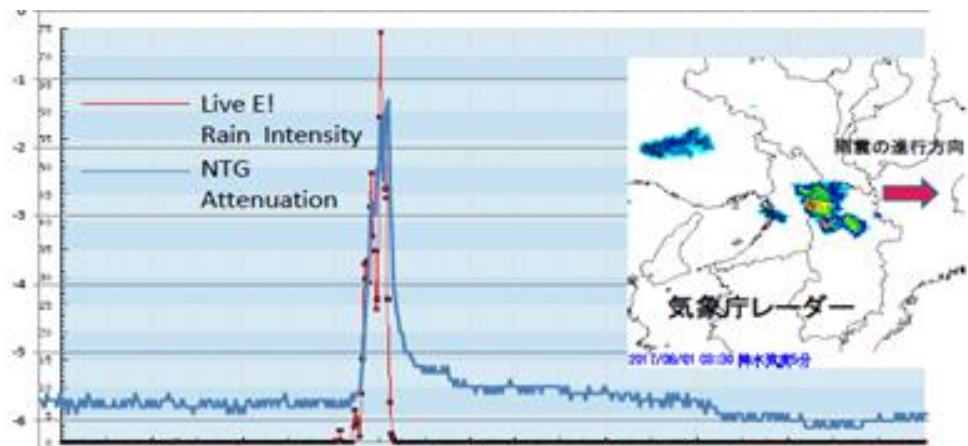


図 6-20 NTG の電波減衰と降雨強度の関係(2017/8/1 00:00~09:00)

本研究では生駒電子基準点のオフラインデータのみを使用した。が、考察に述べたように、図 6-21 に示すイメージのように、受信機と気象センサを 1 つにした観測体制を複数構築し、リアルタイムに同時観測を行うことで、さらに精度の高いゲリラ豪雨の予測につながるものとする。

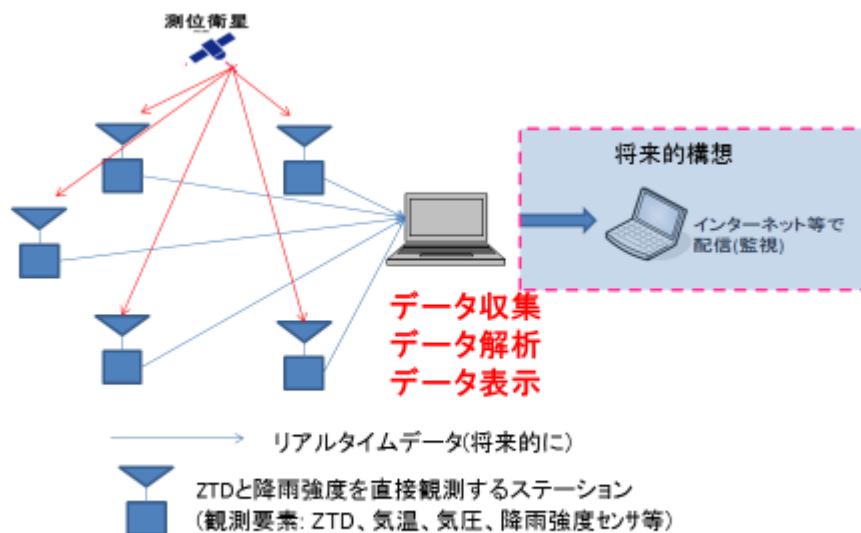


図 6-21 同時多点観測システムのイメージ

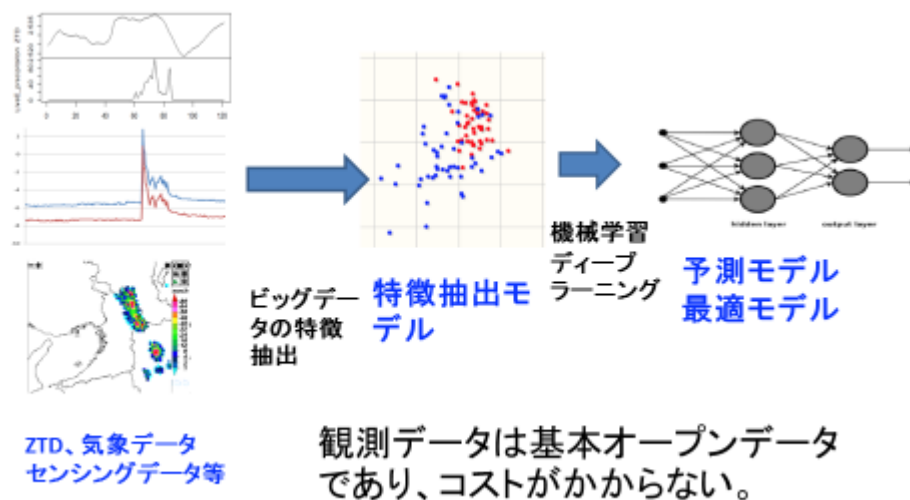


図 6-22 機械学習を用いたゲリラ豪雨予測手法のイメージ

図 6-22 は豪雨予測のための手法を示したものである。様々な観測データから、特徴抽出、分類を行い、機械学習により予測を行う。衛星測位のための受信機、気象センサ、データロガー以外には、既存、既設のインフラ、資源を利用するため、低コストでシステムの構築が可能である。豪雨検知アルゴリズムを図 6-23 に示す。

- ① ZTD と、降雨の有無を判別する ZTD の閾値を比較する。
- ② 閾値以上の ZTD の場合、さらに ZTD の変化量の閾値と比較し、この閾値以上の場合に、豪雨発生ワーニングを出力する。
- ③ さらに気圧の変化量の閾値と比較し、この閾値以上の場合に、豪雨発生アラームを出力する。

それぞれの閾値は過去の気象条件、季節変化を考慮して、パターン認識等により、推定しておく。

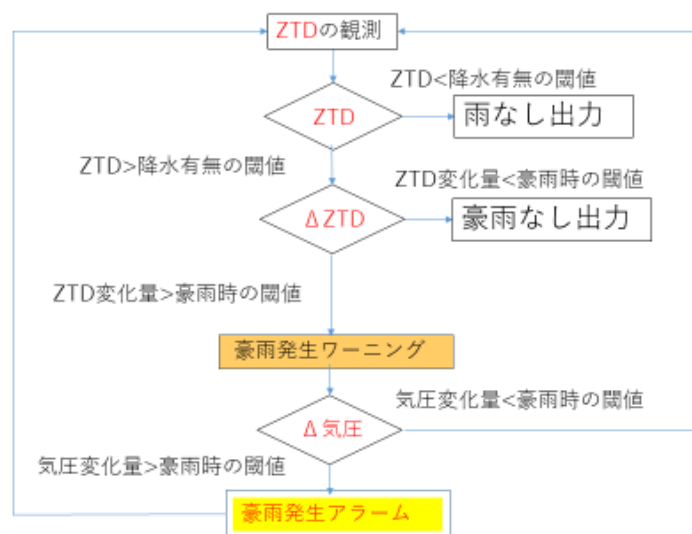


図 6-23 豪雨検知アルゴリズム

第7章 結論

本研究の成果を結論としてまとめる。

(1) ZTD と降雨強度の特性

ある閾値以上で ZTD が急増した場合、概ね若干の時間差の後に降雨強度が増加する傾向が把握できた。一方で ZTD が急増した場合でも、降雨強度が増加しない、または降雨自体がなかった場合もみられた。その原因として、電子基準点と気象センサの設置位置の違いや、雨雲の状態など気象条件によるものと推測される。気象条件の分析の必要性、および単一の電子基準局と気象データのみで解析することの限界が考えられたため、他地点との同時観測による解析が望まれる。

(2) 降水の発生した時の ZTD の値

表 6-1 に降水の発生の有無を判別する ZTD の閾値を示した。まずこの閾値が、豪雨予測判別に必要な条件と考え、この条件下でさらに ZTD の急増量を豪雨発生の目安とした。ZTD の閾値は、特に気温の違いによる季節変動や気象条件の影響もあると考えられる。また、ZTD の閾値はリアルタイムで求められないので、過去のデータを参考にするしかないが、本研究では ZTD の閾値を 1 月単位で求めたが、週単位あるいは日単位で求めたほうが精度が良くなるかもしれない。今回は過去 3 年間のデータとしたが、さらにデータを蓄積する必要がある。

(3) ZTD の成分分析

ZTD の時系列データをトレンド、周期変動(季節変動)、不規則変動、および残差の各成分に分解した。ZTD を成分分析すると、周期成分を取り除いたグラフを用いることでデータの正確な傾向をつかむことが可能な場合があるが、今回、ZTD の成分分析を行ってみたが、降雨強度との関係が明確に判断できなかった。仮にタイムスパンを細かくとるなどして、不規則変動や残差の変化についての特徴を見出すことができれば、豪雨予測の改善につながる可能性はある。

(4) ZTD に対する降水強度のばらつき

図 5-6 から、降水は ZTD が 2.53 を閾値としてそれ以上の場合に発生していること、ZTD が大きくなるほど降雨強度も大きくなる傾向も見られるが、降雨強度の最大値となった、約 100mm/h では ZTD が 2.54 程度である。しかも ZTD が 2.53 程度付近でもっともばらつきが大きいことが示された。単に ZTD の大小のみで降雨強度が決まるものではないことから、ZTD は水蒸気量のポテンシャルを示すものであって、何かの要因がトリガーとなって豪雨が発生することが示唆されている。

(5) 相互相関

多変量の時系列データであることから、相互相関を確認した。この結果、図 5-7 に示すように、1 月間のタイムスパンとしてみた場合、現時点からさかのぼって約 25 分から 50 分前の ZTD の状況が現時点での降雨強度に影響を及ぼしていることが判明した。

(6) ゲリラ豪雨の予測とその妥当性についての評価

ZTD が降雨強度におよぼす影響について、因果性検定、瞬時因果性ともに統計的に有意であることが確認できた。特に ZTD の変化が降雨強度の変化にダイレクトに反映されるということが確認できた。ZTD のデータが、降雨強度に与える影響をインパルス応答で検証したところ、他の期間においても、図 5-8 のように ZTD の増加が始まってから約 20 分から 30 分後に降雨強度のピークが発生する傾向が確認された。

(7) 豪雨検知アルゴリズムの実用化の可能性

観測データを積み重ねる(ビックデータ)ことにより、ZTD および気圧の変化の特徴を、把握することにより、予測精度の向上および、豪雨検知アルゴリズムの実用化も可能と考える。

衛星測位から得られる ZTD は豪雨予測の重要なパラメータであることに疑う余地はなく、予報精度の向上につながっている[23]とのことであるが、予報モデルと水蒸気量を組み合わせてはじめてのその効果が発揮されるものと考えられる。本研究では予報モデルや気象レーダー等のデータや資産は使用せず、ZTD のみで豪雨予測の検討に取り組んだ。ZTD 単独で、ZTD の持つポテンシャルから豪雨の発生するトリガーを見つけることは容易ではなく限界がある。しかし本研究で、豪雨発生前 1 時間程度の ZTD の振る舞いが、豪雨発生の予測にとって重要な要素であること、また閾値以上の ZTD が急増する場合は、数分から 30 分程度後に豪雨となりやすいことが判明した。本研究では着手できなかったが、気圧のデータを取り込むことが有意であれば、豪雨予測の精度向上につながるものとする。今後も気圧のデータの活用やその他の手法によって、ZTD のもつポテンシャルから豪雨予測の検知の可能性を追及して行きたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に御指導、御協力を賜りました。ここに謝意を添えて御名前を記させていただきます。

本学情報基盤システム学研究室、藤川 和利教授には、主指導教員として、常日頃より御指導と御助言を頂きました。また、仕事と研究の両立についても御配慮、御助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

本学ネットワークシステム学研究室、岡田 実教授には、副指導教員として御指導を頂き、先行研究の紹介、研究のアイデアなど適切な御助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

本学情報基盤システム学研究室、新井 イスマイル 准教授には、副指導教員を担当して頂き、研究について丁寧に指導、御指摘、御助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

本学ネットワークシステム学研究室、東野 武史准教授には、関連の研究について御指導を頂き、適切な御助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

本学情報基盤システム学研究室、垣内正年助教には、研究についての適切な御助言、論文作成においても熱心な御指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

本学情報基盤システム学研究室、油谷暁助教には、研究についての適切な御助言、論文作成においても熱心な御指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

様々な面から研究活動を支援いただきました、本学総合情報基盤センター、辻元理恵女史、中野彩子女史には心より感謝いたします。

最後に、本学情報基盤システム学研究室の卒業生のみなさま、同期生諸君に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 気象庁, ”全国(アメダス)の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数”
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
[最終閲覧日: 2019.1.11]
- [2] 理研, ”「京」と最新鋭気象レーダーを生かしたゲリラ豪雨予測”
http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809_1/
[最終閲覧日: 2019.1.11]
- [3] 気象庁, ”地上 GPS 観測網の天気予報 への利用”
<http://www.mri-jma.go.jp/Research/explanation/gps.html>
[最終閲覧日: 2019.1.11]
- [4] 気象研, ”水蒸気画像の特徴”
https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/prod/band_wv.html
- [5] 気象庁, ”数値予報研修資料テキスト”
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/45/1_chapter4.pdf
[最終閲覧日: 2019.1.12]
- [6] 原 旅人, 気象庁予報部数値予報課 予報官, ”数値天気予報の基礎 特に物理過程”
平成 26 年神戸大学特別講義 地球および惑星大気科学特論 I 平成 26 年 6 月 30 日～7 月 1 日
http://wtk.gfd-dennou.org/2014-06-30/01_hara/pub-web/20140630_hara_01.pdf
[最終閲覧日: 2019.1.11]
- [7] 気象庁, ”さまざまな気象現象”
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-1-2.html>
[最終閲覧日 2019.1.11]
- [8] 気象庁, ”数値予報とは”
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2018/index4.html>
[最終閲覧日 2019.1.11]
- [9] 気象庁, ”新しいスーパーコンピュータの運用を開始します 18PFLOPS を達成”
http://www.jma.go.jp/jma/press/1805/16b/20180516_hpc_renewal.html
[最終閲覧日 2019.1.11]
- [10] 杉本末雄・柴崎亮介, ”GPS ハンドブック”、株式会社朝倉出版、2010
- [11] International GNSS Service, ”IGS Products” ,
<http://www.igs.org/products>.

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[12] 国土地理院, “GEONET における高さ情報の高精度化に向けて”

<http://www.gsi.go.jp/common/000054542.pdf>

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[13] Niell, A. E., “Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101, 3227-3246, 1996. DOI: 10.1029/95JB03048

[14] Boehm, J., A. E. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh, “Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data”, *Geophysical Research Letters*, 33-7, 2006. DOI: 10.1029/2005GL025546

[15] 国土地理院, “電子基準点データ提供サービス” ,

<http://terras.gsi.go.jp/>.

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[16] National Aeronautics and Space Administration, “CDDIS: NASA’ s Archive of Space Geodesy Data” ,

<https://cddis.nasa.gov/index.html>.

[最終閲覧日: 2019.11.3]

[17] Tomoji Takasu, “RTKLIB: An open source program package for GNSS positioning” ,

<http://www.rtklib.com/>.

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[18] Tomoji Takasu, “RTKLIB ver.2.4.2 Manual” ,

http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf.

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[19] デジタル百葉箱, ” Live E!のネットワーク概要”

<http://www.live-e.org/instrument/index.html>

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[20] 小司 禎教ほか, “GPS による大気計測とデータ同化”

<https://www.metsoc.jp/kyoikuhukyu/resume/2011/Shoji.pdf>

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[21] u-blox F9 を発表, “堅牢で汎用性が高い, 高精度測位技術”

<https://www.fujiele.co.jp/makernews/2018/21572/>

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[22] 中北英一 (京都大学), "気象レーダーを用いたゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測"

https://www.metsoc.jp/default/wp-content/uploads/2018/10/06_SS2018.pdf

[最終閲覧日: 2019.1.13]

[23]

内閣府みちびき HP, 電子基準点で天気を予測する「GPS 気象学」の可能性

http://qzss.go.jp/news/archive/mri-jma_180517.html

[最終閲覧日: 2019.1.13]

その他

時系列分析と VAR モデル全般については

馬場 真哉 (著), "時系列分析と状態空間モデルの基礎: R と Stan で学ぶ理論と実装"

を参考にした。