

ウガンダ国東部における灌漑計画策定に向けた
衛星全球降水マップ（GSMaP）の利用に関する研究

東京農業大学大学院

農学研究科 農業工学専攻

博士 (農業工学) 学位論文

小林 維 円

ウガンダ国東部における灌漑計画策定に向けた 衛星全球降水マップ (GSMaP) の利用に関する研究

目次

第 1 章 緒言	1-1
第 1 節 研究背景	1-1
1.1.1 アフリカの農業と灌漑	1-1
1.1.2 サブサハラ・アフリカ地域の稲作	1-4
1.1.3 途上国における降雨観測の現状と課題	1-6
1.1.4 人工衛星からの降雨観測の歴史と衛星全球降水マップ (GSMaP) とは	1-7
第 2 節 本研究の目的	1-8
第 3 節 本研究の構成	1-9
第 4 節 既往の研究のレビュー	1-10
1.4.1 GPM/DPR・GSMaP の精度検証結果 (JAXA)	1-10
1.4.2 GSMap の精度検証結果 (その他の研究論文)	1-11
第 5 節 対象地域の概要	1-12
第 6 節 まとめ	1-14
第 2 章 日本国内での GSMap の地上降雨データとの比較に基 づく精度検証	2-1
第 1 節 本章の目的	2-1
第 2 節 解析方法	2-1
2.2.1 解析に用いた地上雨量データ	2-1
2.2.2 解析に用いた GSMap データ	2-2
2.2.3 解析方法	2-2
2.2.4 評価指標	2-4
第 3 節 結果及び考察	2-6
2.3.1 各時間分解能における GSMap の降雨の検出精度及び地 上降雨推定量に関する評価	2-6
2.3.2 降雨観測所の標高が GSMap の精度に与える影響評価	2-14
第 4 節 まとめ	2-20
第 3 章 ウガンダ国東部の地上降雨の特性について	3-1
第 1 節 本章の目的	3-1
第 2 節 研究対象地及び解析方法	3-1
3.2.1 研究対象地	3-1
3.2.2 地上雨量データの解析方法	3-4
第 3 節 結果及び考察	3-5
3.3.1 各時刻での発生回数割合	3-5
3.3.2 近傍観測地点の降雨発生時間と量の比較	3-10
第 4 節 まとめ	3-12
第 4 章 ウガンダ東部での GSMap の地上降雨データとの比較 に基づく精度検証	4-1
第 1 節 本章の目的	4-1

第 2 節 解析方法	4-2
4.2.1 地上雨量データ	4-2
4.2.2 GSMaP データと解析方法	4-2
第 3 節 結果及び考察	4-4
4.3.1 GSMaP を用いた地上降雨の特徴検証	4-4
4.3.2 降雨の検出精度	4-9
4.3.3 降雨量の推定精度	4-14
第 4 節 まとめ	4-23
第 5 章 GSMaP を用いた灌漑計画への利用可能性の検討	5-1
第 1 節 本章の目的	5-1
第 2 節 検討方法	5-1
5.2.1 F/S 時の水収支計算方法	5-2
5.2.2 本研究の水収支計算方法	5-3
5.2.3 GSMaP を用いた灌漑可能面積の検討方法	5-3
第 3 節 結果	5-5
5.3.1 地上降雨（観測所）及び GSMaP（観測所）を用いた灌漑 可能面積の比較	5-5
5.3.2 GSMaP（観測所）及び GSMaP（灌漑地区）を用いた灌漑 可能面積の比較	5-6
第 4 節 考察	5-7
5.4.1 地上降雨（観測所）及び GSMaP（観測所）を用いた灌漑 可能面積の比較	5-7
5.4.2 GSMaP（観測所）及び GSMaP（灌漑地区）を用いた灌漑 可能面積の比較	5-8
5.4.3 GSMaP の降雨データを灌漑計画に用いる上での留意点	5-9
第 5 節 まとめ	5-10
第 6 章 総括	6-1
第 1 節 研究成果の概要	6-1
第 2 節 今後の課題	6-4

要旨

Summary

謝辞

引用文献

図目次

図 1-1	世界人口の変化（1990～2020年）	1-1
図 1-2	主要穀物価格の推移（1990～2020）	1-2
図 1-3	サブサハラ・アフリカ地域のコメの生産量、輸入量、 輸出量、消費量の推移（1990年～2019年）	1-2
図 1-4	サブサハラ・アフリカ及び他地域の灌漑整備率の水位 （1990年～2019年）	1-3
図 1-5	CARD フェーズ 1 対象 23 カ国のコメの生産量、作付面 積及び反収の推移（2007年～2018年）	1-4
図 1-6	CARD フェーズ 2 の支援対象候補国（32カ国）とその 分類	1-5
図 1-7	ウガンダ国における気象観測所の稼働状況（1900年～ 2000年）	1-7
図 1-8	本研究の全体の構成	1-9
図 1-9	アフリカ大陸におけるウガンダの位置付	1-12
図 1-10	ウガンダ全土と調査対象地域の位置図	1-13
図 1-11	月平均気温及び月別降雨量の変化（Entebbe）	1-13
図 1-12	ウガンダ東部の位置図	1-14
図 2-1	AMeDAS 世田谷観測所位置図	2-3
図 2-2	199 地点の AMeDAS 観測所位置図	2-4
図 2-3	捕捉率・空振り率の時間別分布	2-6
図 2-4	降雨強度と捕捉率の関係	2-7
図 2-5	月毎の合計雨量	2-8
図 2-6	時間分解能別の AMeDAS 地上雨量と GSMaP の関係(① ～⑩)	2-12
図 2-7	各 GSMaP プロダクトの時間分解能別の相関係数(R)の 変化	2-13
図 2-8	各 GSMaP プロダクトの時間分解能別の傾き(S)の変化	2-13
図 2-9	年間での標高と捕捉率の関係(MVK)	2-14
図 2-10	年間での標高と捕捉率の関係(Gauge)	2-14
図 2-11	夏季での標高と捕捉率の関係(MVK)	2-15
図 2-12	夏季での標高と捕捉率の関係(Gauge)	2-15
図 2-13	冬季での標高と捕捉率の関係(MVK)	2-15
図 2-14	冬季での標高と捕捉率の関係(Gauge)	2-15
図 2-15	年間での標高と降雨推定誤差の関係(MVK)	2-16
図 2-16	年間での標高と降雨推定誤差の関係(Gauge)	2-16
図 2-17	夏季での標高と降雨推定誤差の関係(MVK)	2-17
図 2-18	夏季での標高と降雨推定誤差の関係(Gauge)	2-17
図 2-19	冬季での標高と降雨推定誤差の関係(MVK)	2-17
図 2-20	冬季での標高と降雨推定誤差の関係(Gauge)	2-17
図 2-21	標高と期間中 AMeDAS 総降水量の関係	2-18
図 2-22	標高と期間中 GSMaP (MVK) 総降水量の関係	2-18
図 2-23	標高と期間中 GSMaP (Gauge) 総降水量の関係	2-18

図 2-24	気象因子と雲底高度の関係	2-19
図 3-1	地上降雨観測地所 11ヶ所の位置図	3-2
図 3-2	設定した 4つのペアの位置関係	3-5
図 3-3	クラスター分類 樹形図	3-7
図 3-4	クラスター分析の結果	3-8
図 3-5	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター1).....	3-9
図 3-6	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター2).....	3-9
図 3-7	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター3).....	3-9
図 3-8	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター4).....	3-10
図 4-1	GSMaP のグリッドと地上雨量観測地点の関係	4-3
図 4-2	クラスター分類 樹形図	4-5
図 4-3	クラスター分析の結果	4-6
図 4-4	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスターA).....	4-6
図 4-5	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスターB).....	4-7
図 4-6	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスターC).....	4-7
図 4-7	各時刻での地上降雨発生割合 (クラスターD).....	4-8
図 4-8	クラスター1とクラスターAの比較結果	4-8
図 4-9	クラスター2とクラスターBの比較結果	4-9
図 4-10	クラスター3とクラスターCの比較結果	4-9
図 4-11	クラスター4とクラスターDの比較結果	4-9
図 4-12	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(1-1地点)	4-10
図 4-13	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(1-2地点)	4-10
図 4-14	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(1-3地点)	4-10
図 4-15	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(1-4地点)	4-10
図 4-16	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(1-5地点)	4-11
図 4-17	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率(FAR) の時間分解能別分布(1-6地点).....	4-11
図 4-18	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(2-1地点)	4-11
図 4-19	図 GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(2-2地点)	4-11
図 4-20	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(2-3地点)	4-12
図 4-21	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(2-4地点)	4-12
図 4-22	GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率 (FAR)の時間分解能別分布(2-5地点)	4-12
図 4-23	各時間分解能における捕捉率 (POD) の変化	4-13
図 4-24	各時間分解能における空振り率 (FAR) の変化	4-13

図 4-25	解析期間中の月別雨量 (1-1 地点)	4-14
図 4-26	解析期間中の月別雨量 (1-2 地点)	4-14
図 4-27	解析期間中の月別雨量 (1-3 地点)	4-14
図 4-28	解析期間中の月別雨量 (1-4 地点)	4-14
図 4-29	解析期間中の月別雨量 (1-5 地点)	4-15
図 4-30	解析期間中の月別雨量 (1-6 地点)	4-15
図 4-31	解析期間中の月別雨量 (2-1 地点)	4-15
図 4-32	解析期間中の月別雨量 (2-2 地点)	4-15
図 4-33	解析期間中の月別雨量 (2-3 地点)	4-15
図 4-34	解析期間中の月別雨量 (2-4 地点)	4-15
図 4-35	解析期間中の月別雨量 (2-5 地点)	4-16
図 4-36	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(1-1 地点)	4-16
図 4-37	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(1-2 地点)	4-16
図 4-38	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(1-3 地点)	4-17
図 4-39	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(1-4 地点)	4-17
図 4-40	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(1-5 地点)	4-17
図 4-41	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(1-6 地点)	4-17
図 4-42	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(2-1 地点)	4-18
図 4-43	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(2-2 地点)	4-18
図 4-44	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(2-3 地点)	4-18
図 4-45	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(2-4 地点)	4-18
図 4-46	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)と傾き(S)(2-5 地点)	4-19
図 4-47	各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)	4-20
図 4-48	各時間分解能における GSMaP プロダクトの傾き(S)	4-20
図 4-49	各観測点における時間分解能の RMSE の変化	4-22
図 4-50	GSMaP の雨量計補正に用いられる地上降雨観測網	4-22
図 5-1	F/S 対象地区の位置図	5-2
図 5-2	F/S 対象地区と地上降雨観測所の位置関係	5-4
図 5-3	地上降雨(観測所)及び GSMaP(観測所)を用いた Atari 地区、Sironko 地区、Namatala 地区の灌漑可能面積	5-5
図 5-4	GSMaP(観測所)及び GSMaP(灌漑地区)を用いた Atari 地区、Sironko 地区、Namatala 地区の灌漑可能面積	5-6

図 5-5	Tororo 観測所地上降雨及び同地点の GSMaP の旬雨量 と有効雨量の比較	5-7
図 5-6	2004 年 8 月上旬(8/1～8/10)の Tororo 観測所 日雨量と GSMaP の日雨量との比較	5-8

表目次

表 1-1	GSMaP のプロダクト諸元	1-8
表 1-2	GPM/DPR・GSMaP の精度検証結果	1-10
表 2-1	2×2 分割表	2-4
表 2-2	各 GSMaP プロダクトの時間分解能別の RMSE	2-13
表 2-3	GSMaP のプロダクト毎の捕捉率の比較結果	2-15
表 3-1	地上降雨観測地点及びその諸元	3-3
表 3-2	各ペアの組み合わせと 2 点間の距離	3-4
表 3-3	各時刻における降雨の発生回数割合	3-6
表 3-4	クラスター分析の結果	3-6
表 3-5	観測期間中の各地点における各降雨強度の降雨発生回数	3-11
表 3-6	20 mm/hour 以上の雨がペア内 2 地点で同時・別々に発生した回数	3-12
表 4-1	各地上雨量計と GSMaP のグリッドの対応	4-3
表 4-2	各時刻における降雨の発生回数割合	4-4
表 4-3	クラスター分析の結果	4-5
表 4-4	各時間分解能における RMSE	4-21
表 5-1	F/S 時の灌漑可能面積及び計画対象作物	5-1
表 5-2	水収支計算のため設計諸元	5-3

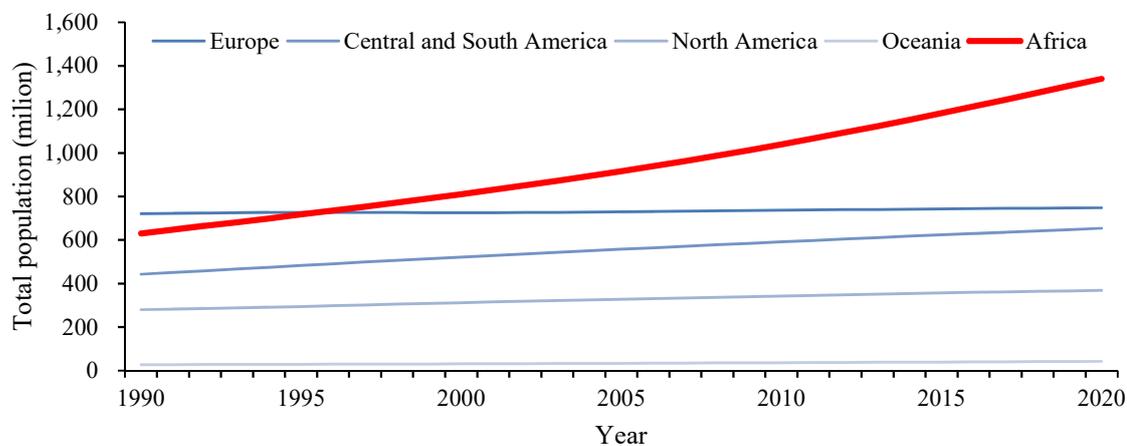
第1章 緒言

第1節 研究背景

1.1.1 アフリカの農業と灌漑

(1) 概況

アフリカ大陸は面積 28,404,000 km²、人口 13.4 億人であり、世界人口の 17.2%が生活している。図 1-1 に示すようにアフリカ大陸には人口の増加率が高い国が多く、2050 年には世界人口の 25.6%をアフリカ大陸の国々が占める可能性がある。またサハラ砂漠以南のアフリカの国々（サブサハラ・アフリカ地域）では、飢餓に苦しんでいる人口（貧困ライン以下）41%を占めると言われており、今後の人口増加と相まって、この問題は深刻さを増す可能性が高い。

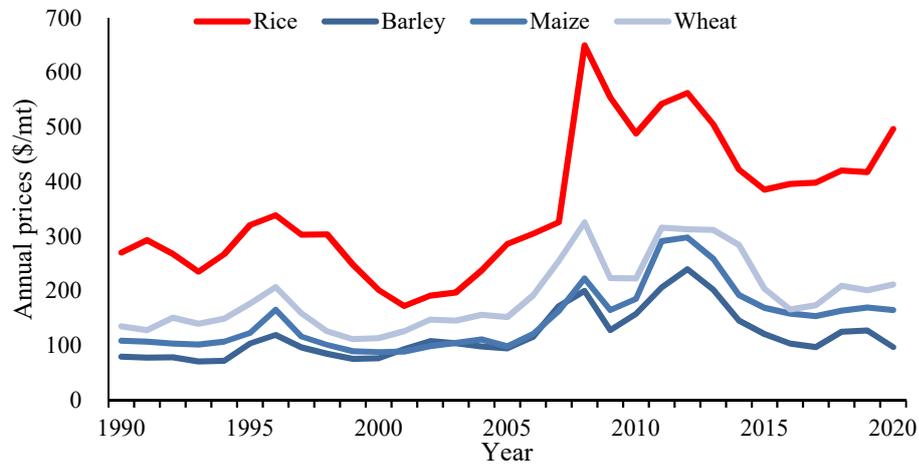


（出典：国連 World Population Prospects 2019 を基に筆者作成）

図 1-1 世界人口の変化（1990～2020年）

また、図 1-2 に示すように 2008 年以降、干ばつ等の影響による不作によって昨今の世界的な穀物価格の上昇の影響を受け、コメをはじめとする主要穀物の価格は高止まりしており、貧困層を中心に食糧不安が広

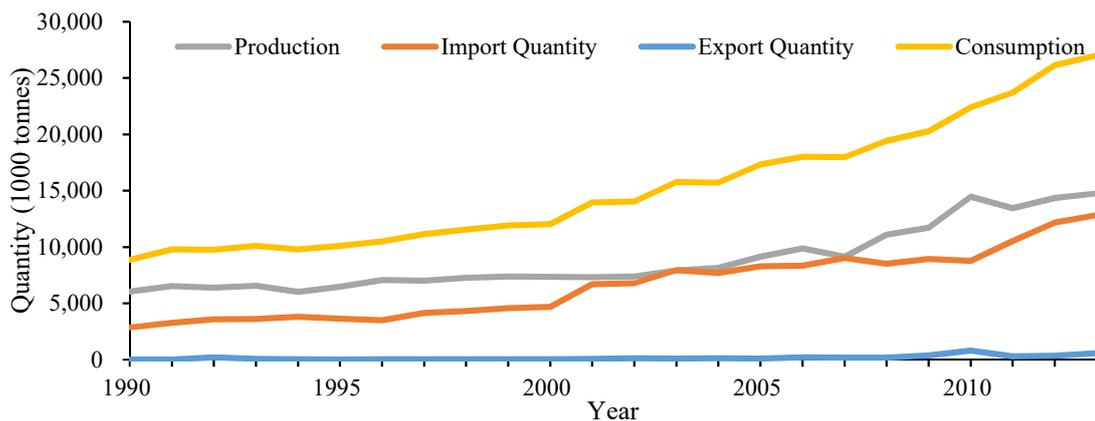
がるなど、サブサハラ・アフリカ地域の農業を取り巻く状況は厳しさを増している。



(出典：World Bank Commodity Price Data を基に筆者作成)

図 1-2 主要穀物価格の推移(1990～2020)

前述したように、アフリカ大陸の人口の増加や価格上昇、これらの国々の経済の発展と共にサブサハラ・アフリカ地域でのコメ需要が近年急激に増大し、生産量、輸入量が増加している。



注：Consumption=Production + Import-Export

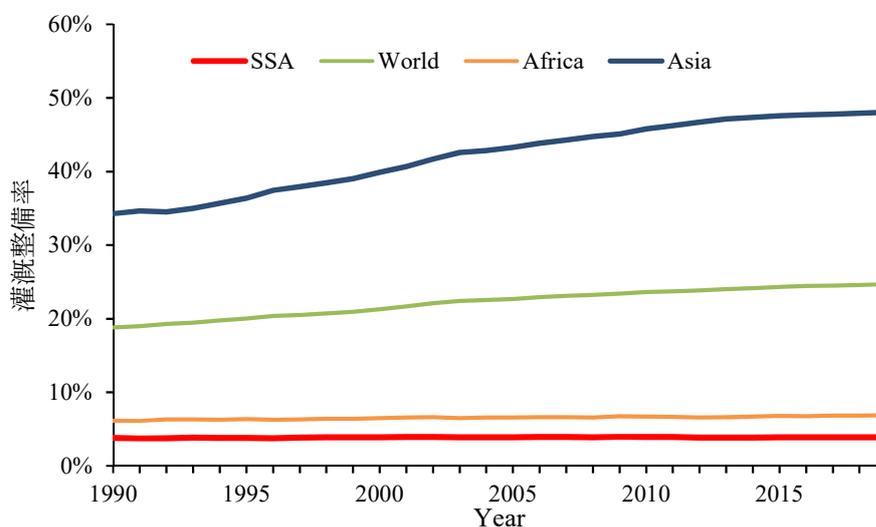
(出典：FAOSTAT を基に筆者作成)

図 1-3 サブサハラ・アフリカ地域のコメの生産量、輸入量、輸出品、消費量の推移(1990年～2019年)

(2) 灌漑農業の状況

サブサハラ・アフリカ地域の多くの国々では、農業が GDP の多くを占め、国民の多くが農業に従事する主要な産業である。他方で、これらの多くの国では今でも粗放な農業が行われており、生産性は非常に低い。この大きな要因として農業インフラが未整備・栽培技術の未熟さなどとともに気候変動による水資源への影響などが起因している。図 1-4 にサブサハラ・アフリカの農地面積（Agricultural land）における灌漑面積（Land area equipped for irrigation）の割合（灌漑整備率）を示した。

アジアをはじめとする国々の灌漑整備率が緩やかに上昇しているのに対し、サブサハラ・アフリカ地域の灌漑整備率は過去 30 年間ほぼ横ばいであり、2019 年時点でもわずか 3.9 % と非常に限られている。そのため、殆どの農家は天水に依存した農業のため、降雨の多寡によってその時々生産量が変化し、安定した農業が難しい現状にある。



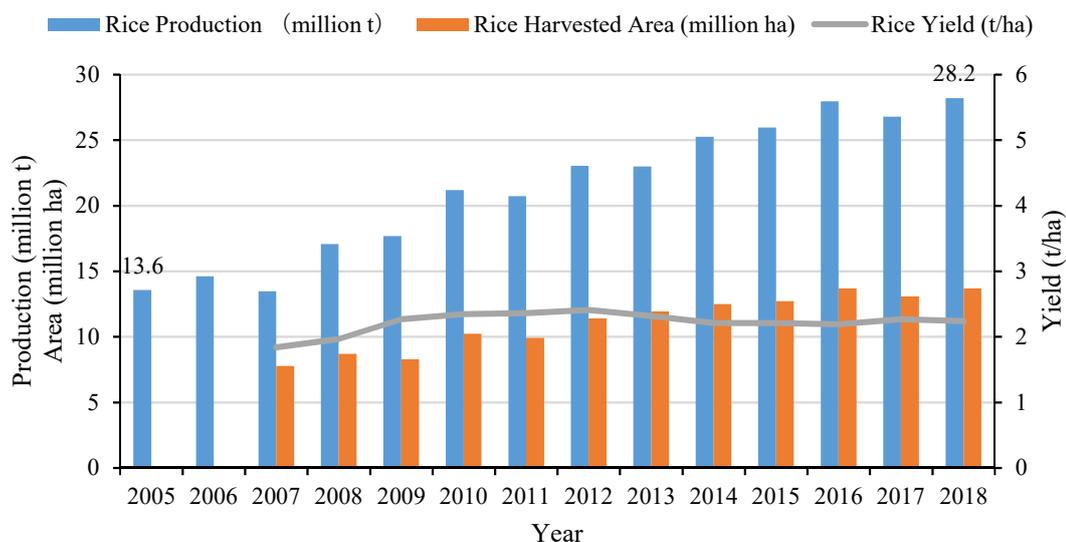
(出典：FAOSTAT を基に筆者作成)

図 1-4 サブサハラ・アフリカ及び他地域の灌漑整備率の水位（1990 年～2019 年）

1.1.2 サブサハラ・アフリカ地域の稲作

2008年5月 TICAD IVで「アフリカ稲作振興のための共同体（CARD）」が発表された。これはサブサハラ・アフリカ地域のコメ生産量を1400万トン（2005年）から2018年までの10年間で2800万トンへ倍増することを目標とした国際的な取り組みである。

図1-5に示すように、CARDフェーズ1の対象期間において、この初期目標が達成された。この成果を受け、CARDフェーズ2では、2019年から2030年までの10年間でコメ生産量の更なる倍増（5,600万トン）を目指すことが目標とされた。CARDフェーズ2では、フェーズ1の23カ国からさらに10カ国対象を増やし、支援対象候補32カ国を対象とされた。



（出典：JICA、FAOSTAT を基に筆者作成）

図 1-5 CARD フェーズ 1 対象 23 カ国のコメの生産量、作付面積及び反収の推移（2007 年～2018 年）

CARD フェーズ 2 の対象国は地域拠点国、重点国（15 カ国）、その他支援国（12 カ国）の 3 つのカテゴリに分類される（図 1-6）。地域拠点

国（5カ国）は、独立行政法人 国際協力機構（JICA）が長期にわたり技術協力を通じて支援してきた国である。協力を通じて整備してきた稲作協力拠点（機関、施設、知見）を活用し、周辺国に対して第三国研修の実施を通じて、CARD 展開の基盤となる国である。

本研究の対象国であるウガンダ共和国（以下、ウガンダ国）もカメルーン、セネガル、タンザニア、マダガスカルと共に地域拠点国 5カ国に該当し、日本政府が実施する政府開発援助（ODA）において稲作セクターの支援を実施する上で重要な国と考えられている。

ウガンダの農業セクターは、GDP の約 27% を占め、労働人口の約 72% が従事するという主要な産業であり、主たる農業形態は高い水資源ポテンシャルを背景とした、小規模かつ生産性の低い天水農業が多く営まれている（坪井・2017）。

CARD フェーズ 2 の目標達成のためにも、ウガンダのような水資源に、恵まれた地域での灌漑開発ニーズが近年高まっている。

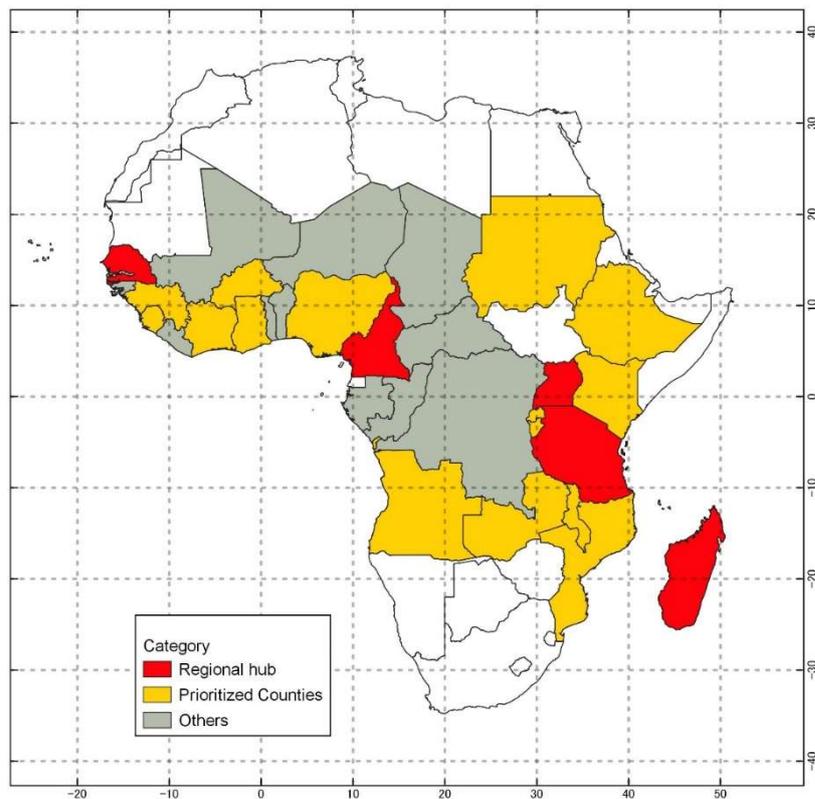
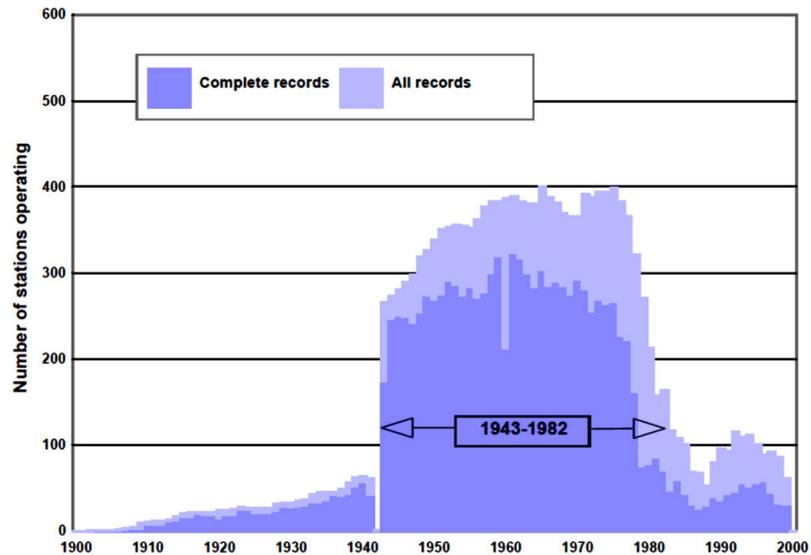


図 1-6 CARD フェーズ 2 の支援対象候補国（32カ国）とその分類

1.1.3 途上国における降雨観測の現状と課題

気象情報はその地域の環境条件を把握する上で重要である。中でも降雨量データは、水資源開発や洪水対策等の広い用途に利用いられ、特に灌漑計画を立案する上では、対象面積、施設規模の事業内容や規模を検討する上で必要不可欠な情報である。日本国内においては、気象庁により地域気象観測システム（AMeDAS）をはじめとした無人観測施設が全国各地に整備され、質・量ともに高い降雨情報が蓄積されている。しかし、開発途上国の多くは、観測機材の維持管理不足や手動観測のため、気象データを継続的に観測することが困難であり、データの欠損や観測自体が中断される場合もある。また、観測が人力で行われるため、データの信頼性や時間分解能に限界がある。そのため、多くの途上国では、灌漑開発計画の策定に求められる十分な品質と量の降雨などの気象データが利用できないのが現状である。

図 1-7 は本研究の対象国であるウガンダ共和国における 1900 年から 2000 年にかけての気象観測所の稼働状況を示している。1962 年のイギリスからの独立までの期間に多くの観測所が整備されてきたものの、1981 年から 1986 年までの内戦時に多くの観測所が機能を失い、現在に至るまでにその多くが回復していない事を示している。



(出典：DWRM Ministry of Water and Environment,2010)

図 1-7 ウガンダ国における気象観測所の稼働状況（1900年～2000年）

1.1.4 人工衛星からの降雨観測の歴史と衛星全球降水マップ（GSMaP）とは

日本国内では明治時代初期に最初の気象観測所が開設され、その歴史が始まった。1974年に地域気象観測システム（AMeDAS）の運用が開始、1953年には初の静止軌道衛星GSM(ひまわり)が打ち上げられ、宇宙からの雨雲の観測と発展してきた。静止気象衛星による雨雲の観測のために、各国で人工衛星が打ち上げられ、搭載されたセンサーにより可視光域及び赤外域の波長を観測し、気象業務などに利用されてきている。

JAXAとNASAは、1997年の熱帯降雨観測衛星（TRMM）の打上げから人工衛星による熱帯域の降雨観測を開始した。その後、観測範囲の拡大、高精度・高頻度化を目指しGPM主衛星を開発し、2014年に打上げ、より詳細な雨雲の状態を観測することが可能になった(Hou et al., 2014)。GPM主衛星のみでは地球全体の雨雲の同時観測は困難であるが、国内外の副衛星群に搭載されたマイクロ波放射計により得られた雨雲の情報を

統合し、JAXA 独自のアルゴリズムで解析することで、南緯 60° ～北緯 60° の地球全体を対象とした降雨量を、時間解像度 1 時間、空間解像度 0.1 度(約 10km)で評価できる「全球降雨マップ (GSMaP)」が無償で提供されている(T. Kubota et al., 2008)。

GSMaP には表 1-1 に示した複数のプロダクトがあり、0 時間遅れで提供されるリアルタイム版 (https://www.eorc.jaxa.jp/theme/NEXRA/index_j.htm) と 4 時間遅れで提供される準リアルタイム版、3 日遅れで提供される標準版 (https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm) がある。また、それぞれのプロダクトについて CPC の地上雨量観測網データで補正された雨量計補正版が存在する。なお、本研究では、灌漑計画への利用を想定しているため、リアルタイム版や準リアルタイム版ではなく標準版を評価対象とした。

表 1-1 GSMaP のプロダクト諸元

データ名	プロダクト	名称	提供期間	更新 待ち時間
世界の雨分布 リアルタイム	GSMaP_NOW	リアルタイム版	2017/03/29～現在	0 時間遅れ
	GSMaP_Gauge_NOW	リアルタイム雨量計補正版	2019/06/27～現在	0 時間遅れ
世界の雨分布速報	GSMaP_NRT	準リアルタイム版	2000/3/1～現在	4 時間遅れ
	GSMaP_Gauge_NRT	準リアルタイム雨量計補正版	2000/4/1～現在	4 時間遅れ
	GSMaP_MVK	標準版	2000/3/1～現在	3 日遅れ
	GSMaP_Gauge	標準雨量計補正版	2000/3/2～現在	3 日遅れ

第2節 本研究の目的

本研究において、途上国である東アフリカのウガンダ国東部において観測した地上降雨データとの比較を通して、GSMaP の精度検証を行い、そのデータの特徴を明らかにした上で、途上国で入手困難な地上降雨データの代替として実際の利用方法の検討や利用上注意点を明らかにし、灌漑計画の活用可能性について検討する。

第3節 本研究の構成

本研究の全体の構成について、概要を下図に示す。

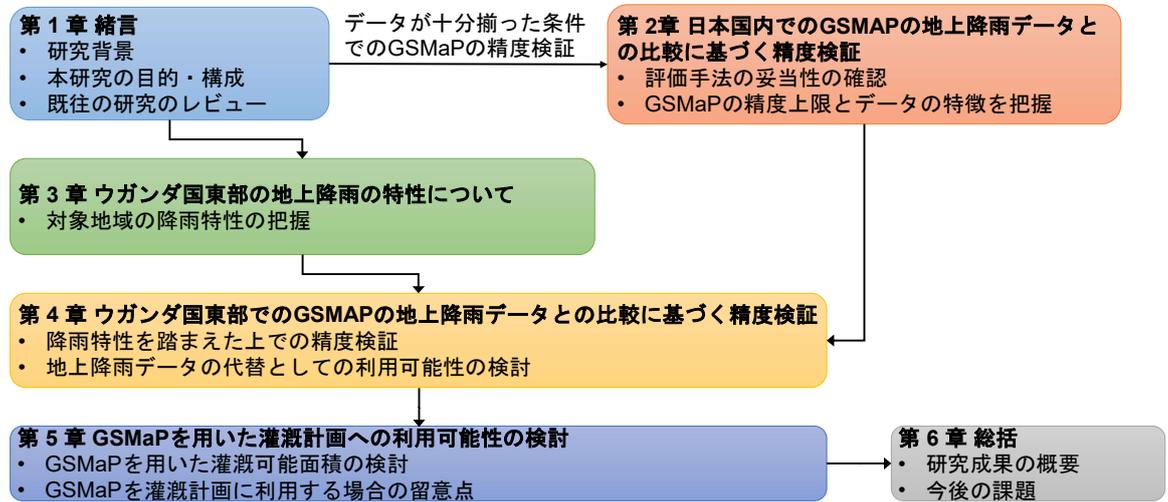


図 1-8 本研究の全体の構成

第2章では、まず既往の観測データが充実した日本国内を対象に、AMeDASを基準としてGSMaPのデータを比較し、その精度を確認する。この際に精度評価に関する手法の妥当性の確認も行う。

第3章では研究対象地域であるウガンダ東部で観測した地上降雨データを用い、同地域の地上降雨の特徴を明らかにする。

第4章においては、同様にウガンダ東部で観測した地上降雨データを基準としてGSMaPのデータを比較し、GSMaPを用いることで熱帯地域での特徴の再現や精度について明らかにする。また、第3章で明らかになった対象地域の降雨特性がGSMaPのデータにおいても確認できるかを検証する。

第5章では、第4章までの結果を踏まえ、実際の灌漑開発計画を基にGSMaPを用いて計画策定を行った場合にどの程度、結果に影響を及ぼすかを検証する。

第4節 既往の研究のレビュー

1.4.1 GPM/DPR・GSMaPの精度検証結果（JAXA）

本項では、GPM 主衛星に搭載された GPM/DPR センサー及び GSMaP に関する JAXA による評価結果についての概要を記載する（出典：科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会宇宙開発利用部会（第41回）配付資料）。

主要な成果として、二周波降雨レーダの開発し、TRMM の降雨レーダー（PR）よりも弱い降水の観測が可能となった。気象庁の数値予報システムへのデータの活用、極端現象の監視と予測が可能となった。TRMM/PR で観測できなかった緯度 35～65 度の中緯度の観測が可能になり、降水の鉛直構造の違い、中緯度では地表に向かって降水量が増加するが、熱帯では地表面に向かって減少することが明らかになった。

具体的な評価指標とその達成状況は下表のとおりである。

表 1-2 GPM/DPR・GSMaP の精度検証結果

ミッション要求条件	達成状況
月平均全球降雨量の緯度分布の推定精度±10%以内を達成	2014年6月から2016年5月までの2年間で、降雪時のデータは除く。気候区分により、6つのエリアを設定。すべてのエリアで±10%未満。 【ミニマムサクセス達成】 アメリカ合衆国内の雨量計補正済み地上レーダを利用。2014年6月から2016年3月までの期間で、冬季を除く16ヶ月間について、平均で-7.0%となり「±10%以内」を満たす。【フルサクセス達成】
軌道傾斜角約65度の太陽非同期軌道からの感度0.2mm/hrでの降水の常時観測を実施	センサの健全性を校正実験及び海面エコー強度の長期間変動から確認。KaPR(HS)で0.19mm/hとなり、フルサクセスの達成を確認。データ取得要求はNASA-JAXA Joint Requirementsで98%以上と規定されており、KuPR:99.22%、KaPR:99.17%での常時観測を達成している。【フルサクセス達成】 現在、ミッション期間を超えて、上記を維持しており、エクストラサクセスを達成している。

ミッション要求条件	達成状況
月平均全球降雨量の緯度分布の推定精度±10%以内を達成	解析期間：2014年6～2015年5月について、平均で8.6%、10%以内となる格子は、DPR 74.2%であり、達成指標を満たす。【達成指標達成】
広域河川流域日雨量推定精度±40%以内を達成	検証期間は雨量の多い夏季（2015年6-8月の3カ月）、約2万平方キロ領域として、緯度経度1.5度格子で評価。日本、米国の地上雨量計で補正した地上レーダデータとの相対誤差の平均が±40%未満で、達成指標を満たす。【達成指標達成】

(出典：科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会宇宙開発利用部会
(第41回) 配付資料)

多くの指標で目標が達成されているものの、降雨量に対する評価は全世界規模では月雨量について、日本とアメリカの事例では流域スケールでの日雨量の評価となっている。一方、本研究対象地であるサブサハラ・アフリカ地域において、日雨量やさらに時間分解能が小さい単位での検証は行われていない。

1.4.2 GSMaPの精度検証結果（その他の研究論文）

GSMaPの観測精度については、日本を始め各国で行われており、GSMaPと他の衛星観測降雨データを日本国内のレーダ AMeDAS を用いて評価 (T.Kubota et al. 2009)、利根川流域を対象に GSMaP (標準及び標準雨量計補正プロダクト) をレーダ AMeDAS を用いて評価する (K. Takido et al. 2016) と言った既往の研究が挙げられる。これらの先行研究では、捕捉率 (POD) や見逃し率 (FAR) と言った検出精度の指標と相関係数や近似直線の傾きを降雨量の推定精度の評価指標として提案され、これらの指標が地形や標高、降雪の影響を受けることを示した。その他、インドネシアの5ヶ所で観測された地上降雨データを GSMaP (標準版) と比較・評価 (N. Sugiarta et al. 2017) が行われている。この研究では、3時間降雨及び日雨量降雨を対象に評価が行われ、GSMaPは降雨の発生検出に適しており、時間間隔がより大きい日雨量で一致度が高い事を明らか

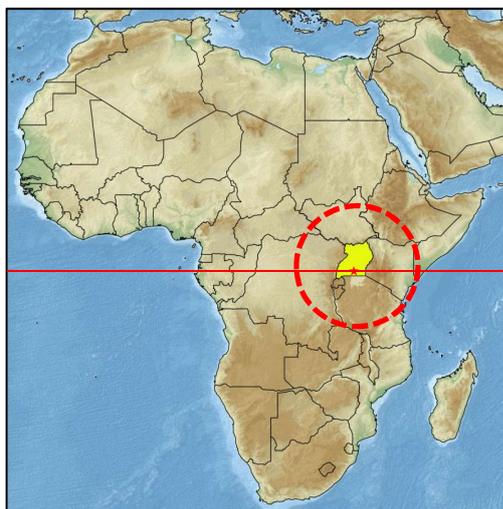
にすると共に地形や海岸付近の海風・陸風循環などの局所的な影響も、結果のばらつきに影響している可能性を示した。

実際に GSMaP を入力データとして解析に用いた事例では、パキスタンにおける洪水解析に GSMaP 準リアルタイム (NRT) プロダクトを用いて解析 (T. Sayama et al. 2012) やエジプトのフラッシュフラッドのシミュレーションに降雨データとして GSMaP を利用した事例 (M. Saber et al. 2010) が報告されている。

しかし、サブサハラ・アフリカでの精度検証は未だ多く行われておらず、データの特徴や利用に際しての注意点などの検討の余地がある。

第5節 対象地域の概要

本研究対象のウガンダ国は、アフリカ大陸東側に位置し、赤道上に位置する熱帯気候の国である。人口は 3.8 千万人、国土面積：241,000 km² (内 18%は水面) の内陸国である。



(出典：NOAA National Geophysical Data Center, ETOPO1 及び <https://www.gadm.org/> の行政界データを基に筆者作成)

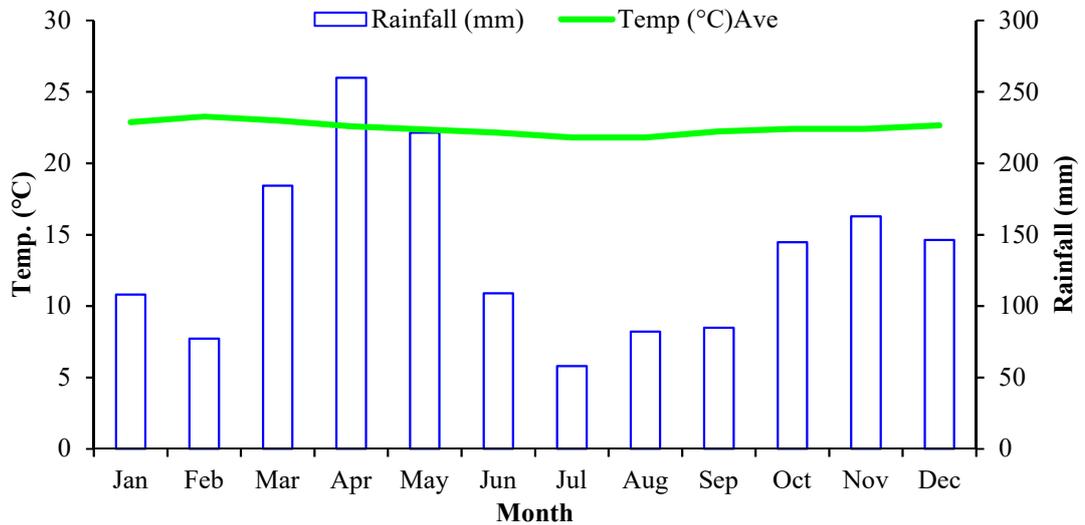
図 1-9 アフリカ大陸におけるウガンダの位置付



(出典：<https://www.gadm.org/>の行政界データを基に筆者作成)

図 1-10 ウガンダ全土と調査対象地域の位置図

年平均気温は 22～25 °C と一年を通して温暖な気候で、年降水量は 1,200～1,750 mm と多く、それらの降雨は年に 3 月から 5 月、10 月から 11 月の 2 度の雨季に集中して発生する。



(出典：UNMA)

図 1-11 月平均気温及び月別降雨量の変化 (Entebbe)

本研究の対象地であるウガンダ東部には隣接するケニヤとの国境に標高 4,321 m の Elgon 山がそびえ立ち、Elgon 山で発生した降雨が裾野に多数の河川として存在し、同地域で広く行われており水田稲作の水源となっている。

水資源が豊富に存在するものの、同地域には気象観測所が限られ、灌漑計画を立案するために必要な長期間の気象データの収集は行われていない。

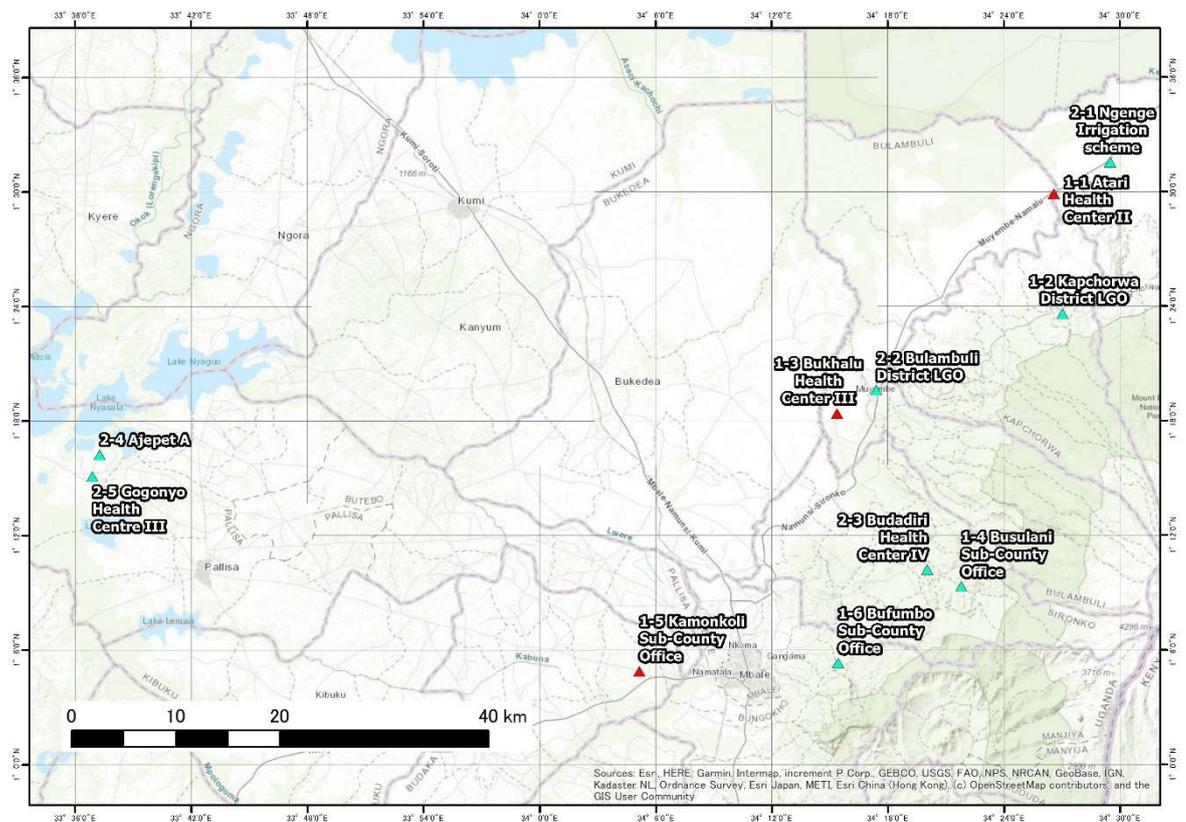


図 1-12 ウガンダ東部の位置図

第6節 まとめ

本研究の背景として、研究対象国が位置するサブサハラ・アフリカ地域の現状の課題とし、人口増加や天水農業に依存した営農体型を説明し、食糧生産のニーズの高まりや、そのための灌漑開発が必要な点を述べた。

他方でそのために必要な気象観測の必要性とこれらの情報が当該地域の国々で不足する現状について述べた。

近年開始された人工衛星に搭載された降雨レーダーによる観測とマイクロ波放射計の観測データを統合することで全球の雨雲の状態を捉えることが可能になり、さらにその情報を解析することで、全球降水マップ(GSMaP)として、全球の降雨データとして無償で公開されている。これらは日本国内を始め海外においても利用されつつあるものの、サブサハラ・アフリカ地域を対象として、地点雨量と比較による精度検証が十分に行われていない事を明らかにした。

そこで本研究の目的は、研究対象地域であるウガンダ共和国東部を対象に、地上降雨の実測データに基づきその地域の降雨特性を明らかにし、GSMaPの精度検証を行い、灌漑計画策定への利用可能性を検討することとした。

第2章 日本国内での GSMaP の地上降雨データとの比較に基づく精度検証

第1節 本章の目的

本研究における主たる対象はウガンダ国東部であるが、当地は広範囲に利用可能な検証用の気象観測データの量と質に制限がある。そこで、まずは日本において観測された気象データを基に、GSMaP の精度やその特徴について明らかにすることを本章の目的とする。

第2節 解析方法

2.2.1 解析に用いた地上雨量データ

(1) AMeDAS

GSMaP の検証に用いる比較用の地上降雨データとして、気象庁が観測を行い一般公開されている AMeDAS のデータを用いる。

なお、本研究に用いた AMeDAS は日本全国にある自動気象観測システムであり、地域気象観測システム（Automated Meteorological Data Acquisition System）の略称である。1974年11月1日から運用が開始し、降水量の観測をおこなう観測所は日本全国で現在約1,300箇所存在し自動観測が行われている。これだけの規模での観測により、日本国内で平均約17km²に1箇所の密度を実現している、

AMeDAS の観測データは気象庁ホームページ（<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>）に掲載されている、「過去の気象データ・ダウンロード」のページ（<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>）から「観測地点」、「項目」、「観測期間」を指定し、CSV形式のファイルをダウンロードした。この際、「項目」については、データの種類を「時間別」、「項目」を

「降水量（前 1 時間）¹」を指定した。なお、降雨量データは 0.5mm 刻みで提供されている。

2.2.2 解析に用いた GSMaP データ

AMeDAS との比較に用いたデータは、JAXA が運営する FTP サーバ（hokusai.eorc.jaxa.jp）からテキスト形式の時間雨量の GSMaP 標準版（mvk_Version7.10020）を用いた（JAXA, 2018）。気象庁ホームページに掲載されている AMeDAS の観測地点の座標を基に、当該観測地点の位置するメッシュの値を抽出した。

このテキスト形式ファイルには同時刻の GSMaP 標準版及び雨量系補正版（Gauge）の 2 種類のデータが格納されている。なお、GSMaP のデータについては、後 1 時間のデータとして集計されるため、時差の補正と併せて調整する。（GSMaP データ=GMT+9 時間+1 時間）

このテキスト形式ファイル(CSV 形式)をマイクロソフト Excel を用いて GSMaP の任意の座標の時間雨量データを抽出し、Excel 上で任意の時間分解能に集計し、解析した。

2.2.3 解析方法

ここで、GSMaP の特徴を明らかにするため、下記の条件について比較・検討を行った。

(1) 各時間分解能における GSMaP の降雨の検出精度及び降雨の推定量に関する評価

解析期間：2018 年 1 月 1 日 1 時から同年 12 月 31 日 25 時まで。

解析地点：AMeDAS 世田谷観測所の観測降水量

¹ 例:「12 時の降水量」として表示されている数値は、11 時 00 分から 12 時 00 分までの降水量です。
(出典:<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq1.html#2>)

解析時間分解能：1 時間、3 時間、6 時間、12 時間、日別、5 日、10 日、月別

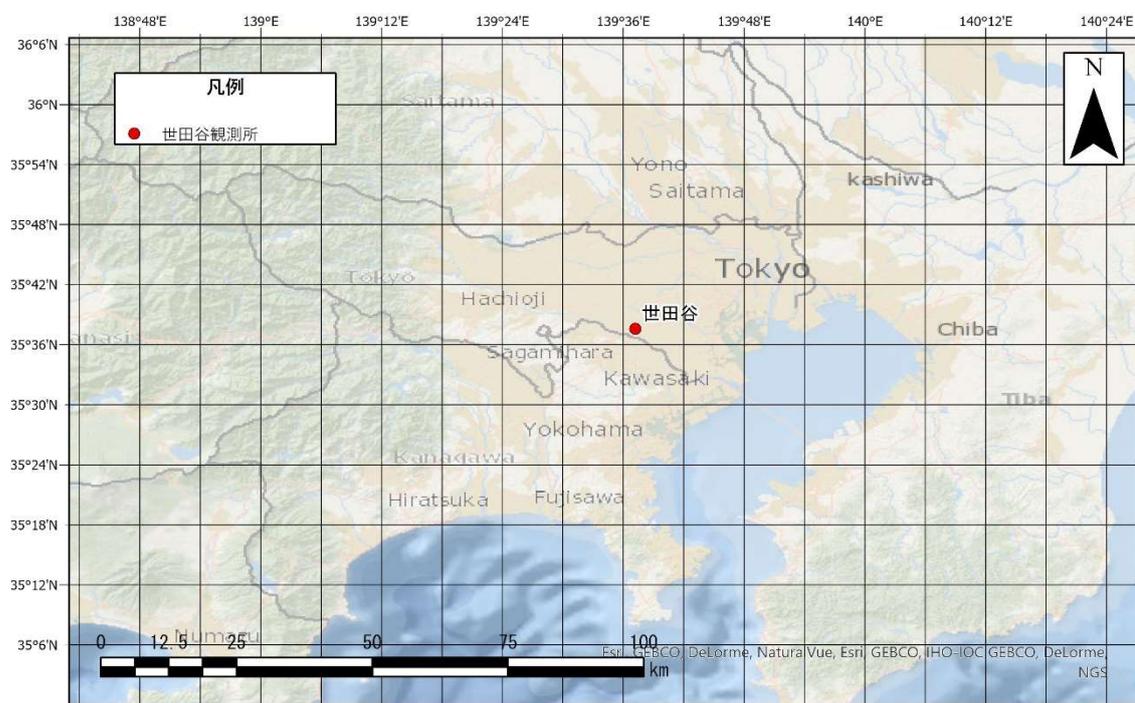


図 2-1 AMeDAS 世田谷観測所位置図

(2) 観測所の標高が精度に与える影響評価

解析期間：2018 年 1 月 1 日 1 時から同年 12 月 31 日 25 時まで。

解析地点：199 地点 の AMeDAS 観測所（図 2-2）

解析時間分解能：1 時間、期間全体

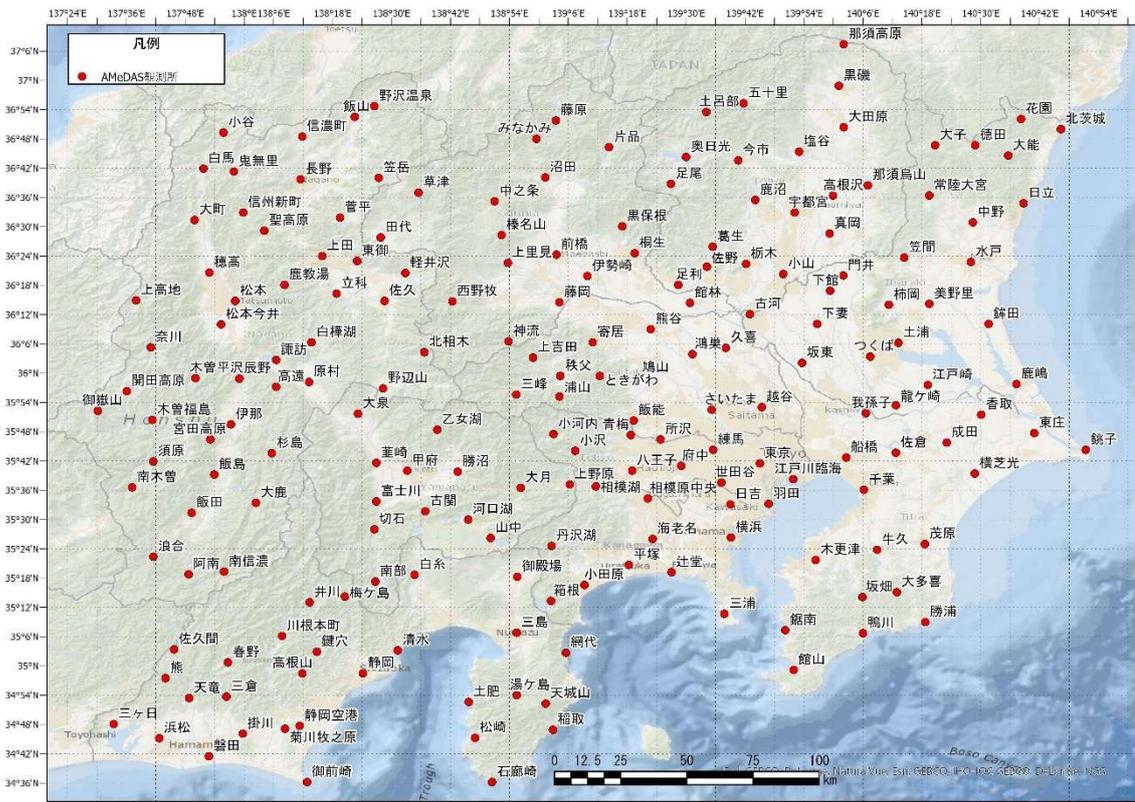


図 2-2 199 地点の AMeDAS 観測所位置図

2.2.4 評価指標

地上降雨の精度を検証するにあたり、本研究では以下の指標を用いた。

(1) 検出精度評価

GSMaP の地上降雨検出精度評価については、 2×2 分割表 (表 1) を用い、同時刻の地上降雨検出の成否を 4 カテゴリに分類し、各カテゴリに分類された頻度数を求め、捕捉率 (POD: Probability of Detection) (式 1) 及び空振り率 (FAR: False Alarm Ratio) (式 2) を用いて評価した (Wilks 2006)。

表 2-1 2×2 分割表

GSMaP \ 地上降雨	降雨あり	降雨なし
	降雨あり	a (検出)
降雨なし	c (見逃し)	d (非検出)

$$\text{捕捉率 : POD} = \frac{a}{a+c} \quad (\text{式 1})$$

$$\text{空振り率 : FAR} = \frac{b}{a+b} \quad (\text{式 2})$$

前述のとおり、異なる時間分解能での評価を行うため、AMeDAS 及び GSMaP の 1, 3, 6, 12, 24 時間毎の積算雨量を算出して比較した。なお、既往の研究(K. Takido et al. 2016) と同様、GSMaP の雨量データについては、0.5 mm/h 未満の雨量を 0.0 mm/h とした。

(2) 推定精度評価

GSMaP の地上降雨推定精度評価については、同時刻の AMeDAS 地上降雨と GSMaP の推定雨量から線形回帰分析を行い、切片を有する近似直線の傾き(S)とその相関係数(R) 及び RMSE を指標に評価を行った。また期間中の月雨量を比較した。異なる時間分解能での評価を行うため、AMeDAS 及び GSMaP の 1, 3, 6, 12, 24 時間毎、5 日、10 日、月別の積算雨量を算出して比較した。なお、0.5 mm/h 以下の雨量は 0.0 mm/h とした。

第3節 結果及び考察

2.3.1 各時間分解能における GSMaP の降雨の検出精度及び地上降雨推定量に関する評価

(1) 降雨検出の精度

図 2-3 に時間分解能別の捕捉率と空振り率の結果を示す。時間分解能が大きくなるにつれて捕捉率(POD)は上昇し、空振り率(FAR)は減少した。これは、空間的な雨の発生のばらつきや時間的なずれにより短時間では捉えなかった雨を、時間間隔を広げることで捉えられるようになったと考えられる。プロダクト間の比較では、POD について違いが現れなかったものの、Gauge プロダクトの方が良い結果を示した。これは FAR については地上降雨観測網のデータの補正により b (誤警報) が減少したことにより、指標が改善したものとする。

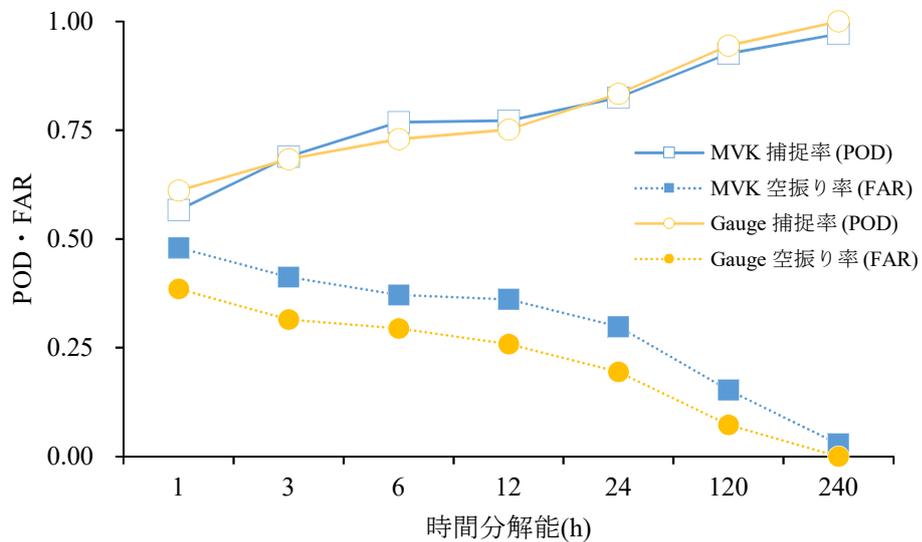


図 2-3 捕捉率・空振り率の時間別分布

図 2-4 に雨量に対する Gauge と MVK の捕捉率の関係を示す。Gauge は、降雨強度が増加することに伴い捕捉率が上昇し、2 mm/h の降雨強度

については捕捉率 8 割以上で捉えていた。MVK は、3 mm/h 以上の降雨が発生すると捕捉率が減少したが、降雨強度に伴う捕捉率の上昇傾向が見られた。

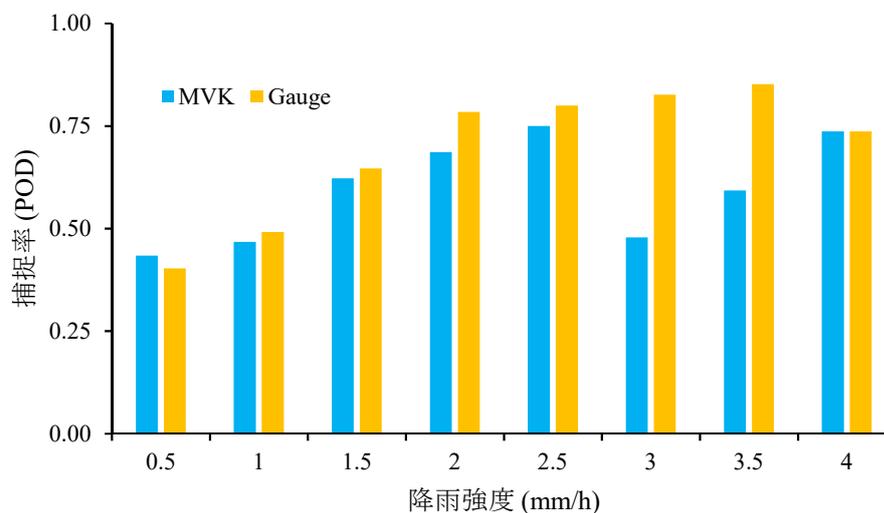


図 2-4 降雨強度と捕捉率の関係

(2) 降雨推定量の精度

図 2-5 に月毎の積算雨量を示す。これより、Gaugeの方が AMeDASとの整合性がとれている。他方で MVK は月によって AMeDAS 観測雨量の倍以上の数値を示した。このことから、Gauge が地上観測降雨網による補正が効果的に行われた事を示した。

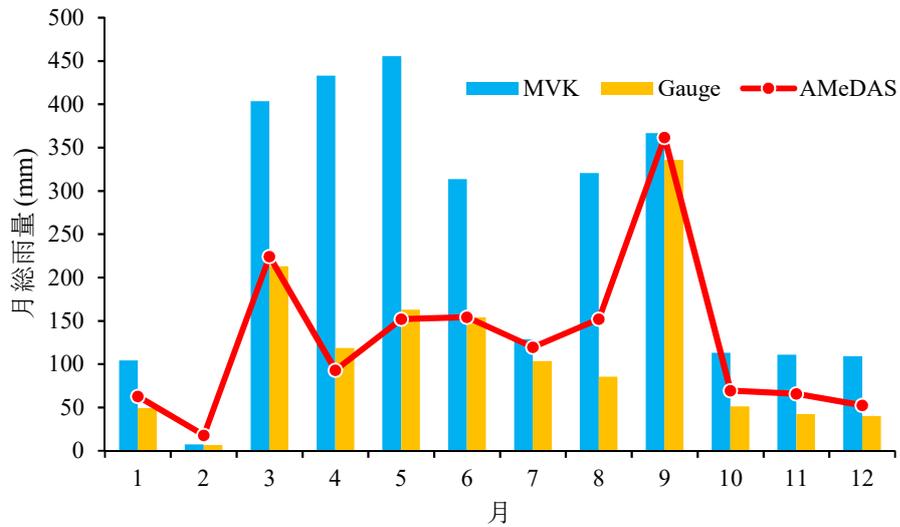
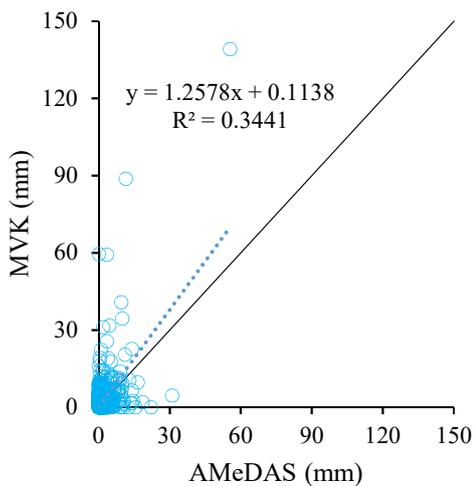
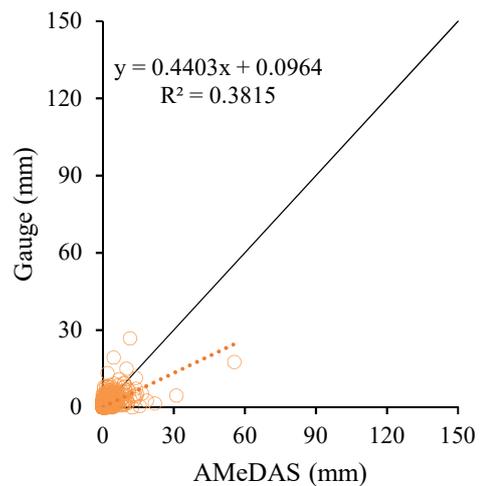


図 2-5 月毎の合計雨量

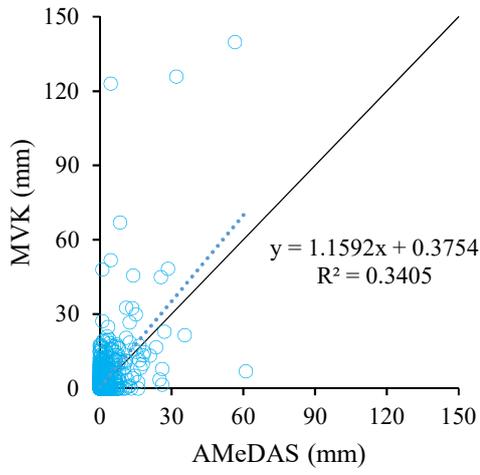
図 2-6 に、時間分解能別の AMeDAS と GSMaP の散布図を示す。標準版 (MVK) では、相関があまり向上しなかったが、標準雨量系補正版 (Gauge) は時間間隔を広げることに伴い正の相関が強くなった。この理由は、無観測領域を雲の移動ベクトルで補完した場合に生じる、降雨イベントの時間的ずれが相殺されるためと考えられる。また MVK と Gauge の相関を有意差検定したところ、5% 水準で有意な差が認められた。よって、地上雨量計補正の効果が十分に発揮されていることが分かった。



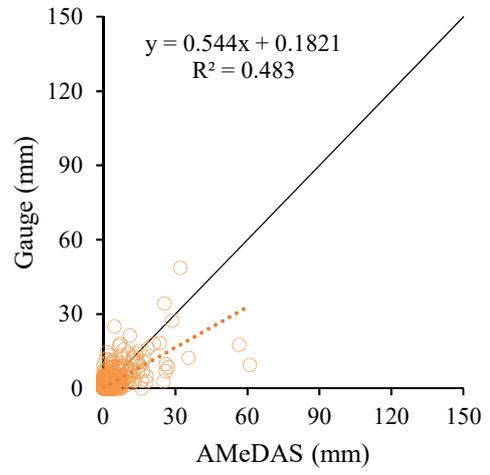
① 1 時間別雨量 (MVK)



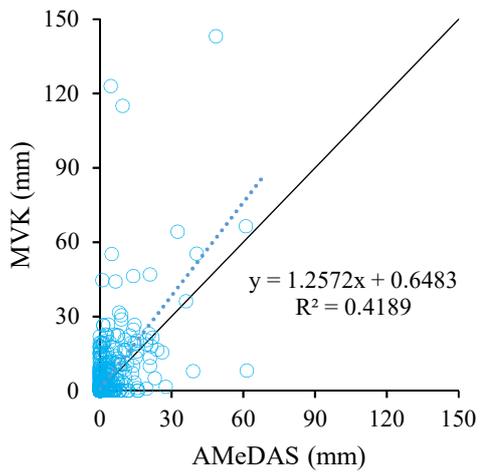
② 1 時間別雨量 (Gauge)



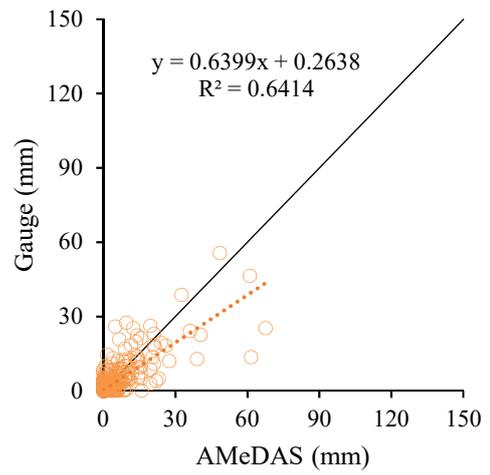
③ 3 時間別雨量 (MVK)



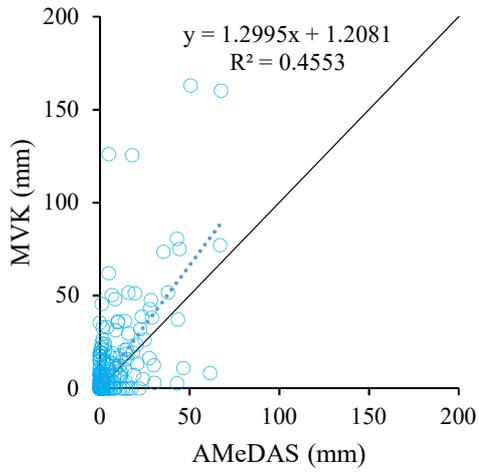
④ 3 時間別雨量 (Gauge)



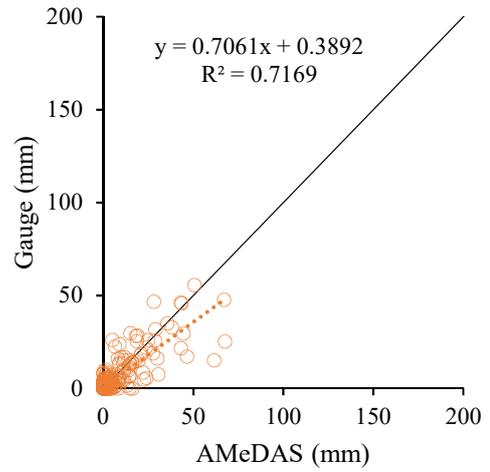
⑤ 6 時間別雨量 (MVK)



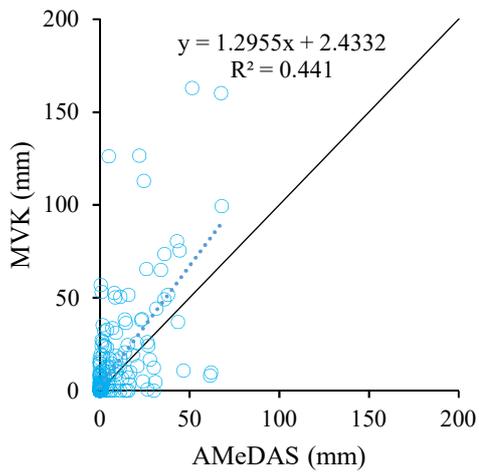
⑥ 6 時間別雨量 (Gauge)



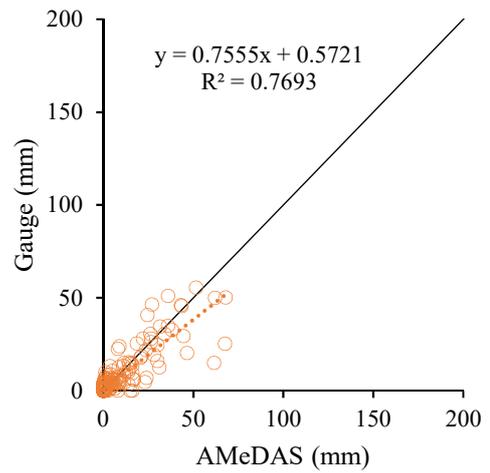
⑦ 12 時間別雨量 (MVK)



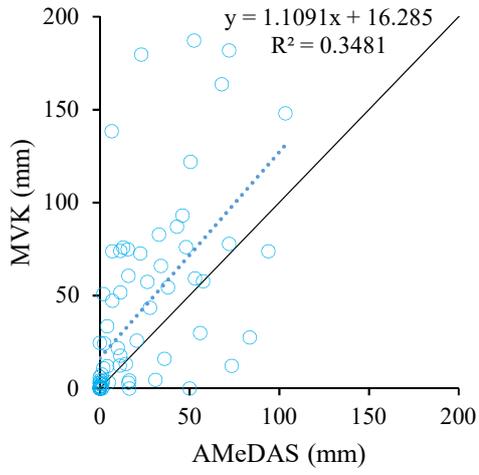
⑧ 12 時間別雨量 (Gauge)



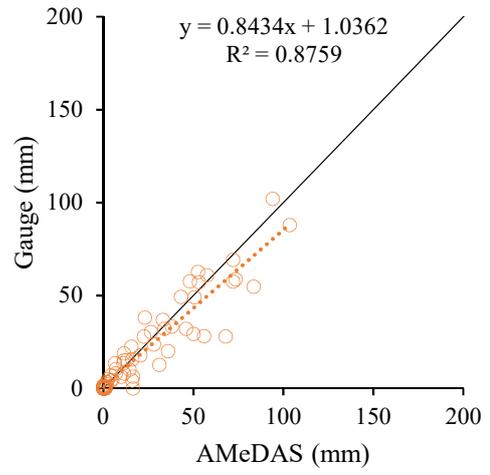
⑨ 24 時間別雨量 (MVK)



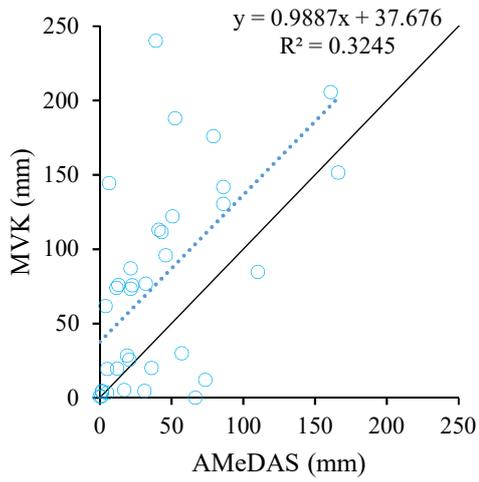
⑩ 24 時間別雨量 (Gauge)



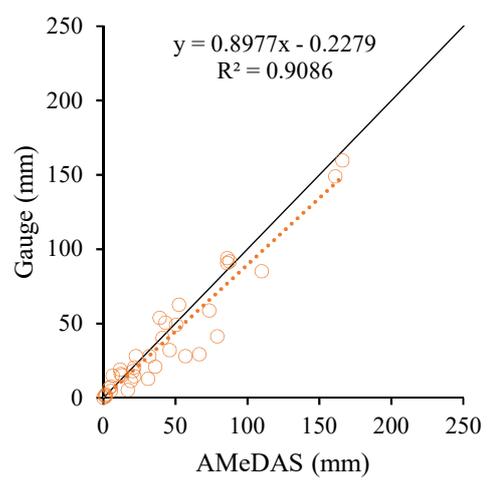
⑪ 5 日別雨量 (MVK)



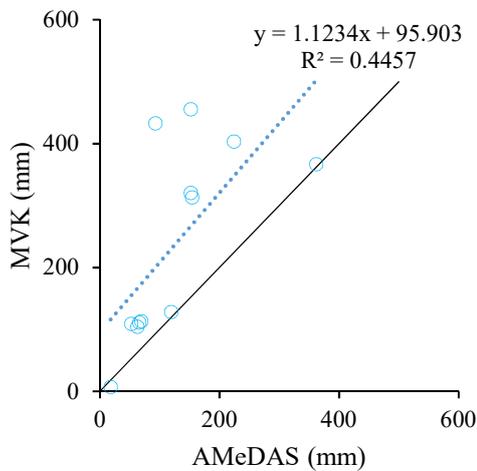
⑫ 5 日別雨量 (Gauge)



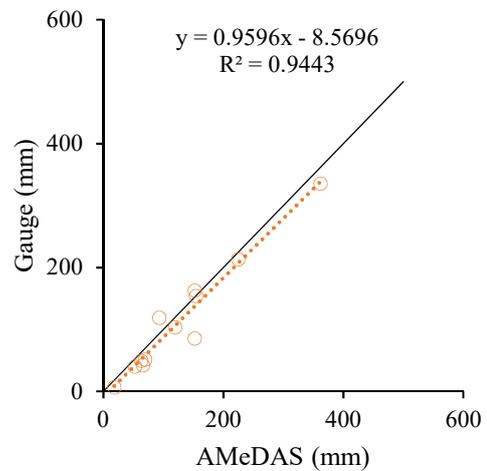
⑬ 10 日別雨量 (MVK)



⑭ 10 日別雨量 (Gauge)



⑮ 月別雨量(MVK)



⑯ 月別雨量(Gauge)

図 2-6 時間分解能別の AMeDAS 地上雨量と GSMaP の関係(①～⑯)

各 GSMaP プロダクトの相関係数 (R) と傾き (S) について各時間解像度の変化を図 2-7 と図 2-8 に示した。

標準版 (MVK) の傾き (S) は、全ての時間分解能において 1.0 を上回り、AMeDAS の地上降雨量を過大評価傾向にあるが、時間間隔を広げていくにつれ、1.0 に近づく傾向が確認されたが、相関係数 (R) は時間間隔を広げていっても 1.0 に近づく傾向は確認できなかった。

標準雨量系補正版 (Gauge) の傾き (S) は、全ての時間分解能において 1.0 を下回り、AMeDAS の地上降雨量を過小評価傾向にあるが、時間間隔を広げていくにつれ、1.0 に近づく傾向が確認された。また相関係数 (R) については、標準雨量系補正版 (Gauge) が全ての時間分解能において標準版 (MVK) よりも 1.0 に近く、時間間隔を長くするにつれ 1.0 に近づく傾向を確認した。

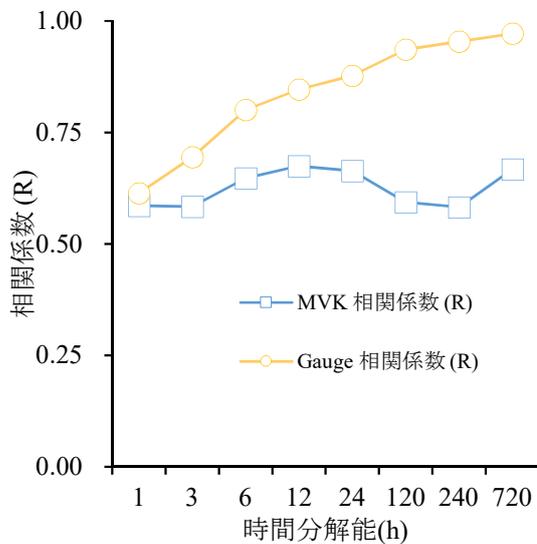


図 2-7 各 GSMaP プロダクトの時間分解能別の相関係数(R)の変化

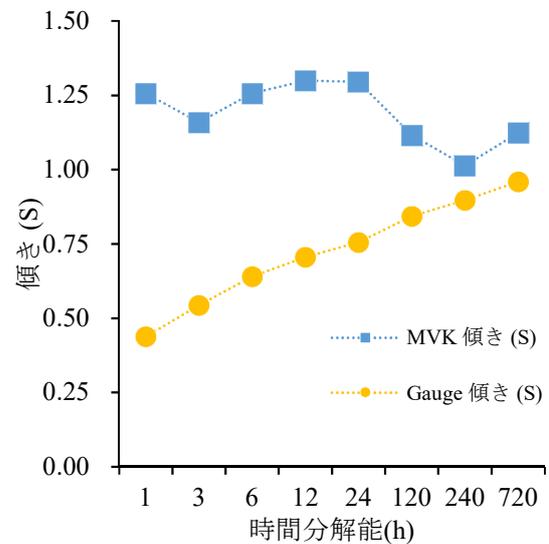


図 2-8 各 GSMaP プロダクトの時間分解能別の傾き(S)の変化

各 GSMaP プロダクトの精度比較を行うため RMSE を求めた(表 2-2)。

各時間分解能において、標準雨量系補正版 (Gauge) の RMSE が小さく、その違いは標準雨量系補正版 (Gauge) の 2 倍から 6 倍までであることが明らかになった。

表 2-2 各 GSMaP プロダクトの時間分解能別の RMSE

(単位 : mm)

GSMaP プロダクト	時間分解能 (h)							
	1	3	6	12	24	120(5日)	240(10日)	720(月)
MVK	2.0	4.5	7.1	10.9	16.4	43.6	68.7	158.7
Gauge	0.9	2.0	2.8	4.0	5.2	9.5	13.1	25.3

以上の結果より、標準雨量系補正版 (Gauge) は CPC の地上雨量網の補正データを効果的に得られるため、標準版 (MVK) よりもより正確に地上降雨を再現することが可能であることが確認された。

2.3.2 降雨観測所の標高が GSMaP の精度に与える影響評価

(1) 降水検出精度

標高と GSMaP 時間雨量データを基に求めた捕捉率 (POD) の関係を年間(図 2-9、図 2-10)、夏季(図 2-11、図 2-12)、冬季(図 2-13、図 2-14)に分けて示した。その結果、GSMaP の両プロダクトにおいて標高が高くなるにつれて捕捉率が減少することが確認された。また、対象期間を夏季(6月から8月)、冬季(1月から2月、12月)に分けて検証したところ、Takido et al., (2016)の結果と同様、冬季において捕捉率の低下傾向がより大きくなることが示された。

表 2-3 に GSMaP のプロダクト毎の捕捉率の比較結果を示した。この結果からプロダクトの比較について、期間全体、夏季、冬季の全てにおいて、Gauge がより良い結果を示した。

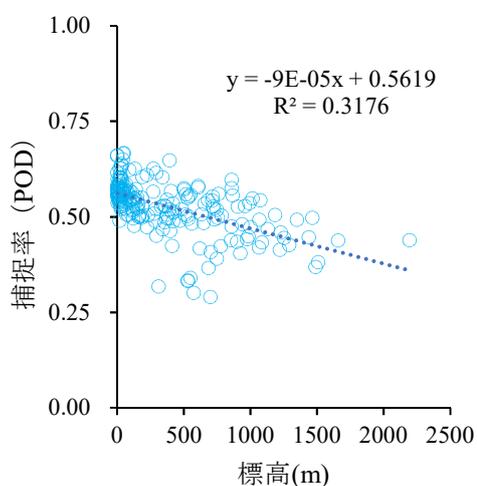


図 2-9 年間での標高と捕捉率の関係 (MVK)

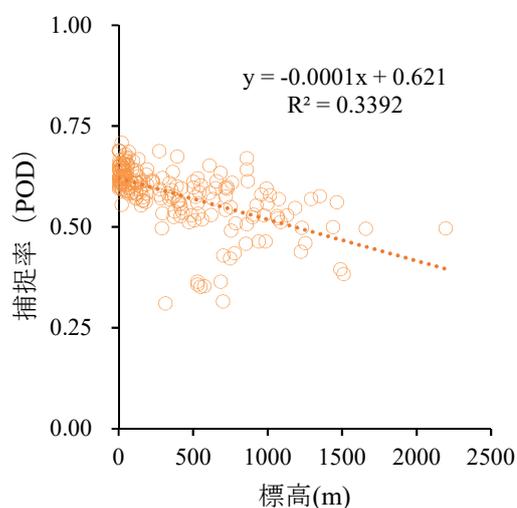


図 2-10 年間での標高と捕捉率の関係 (Gauge)

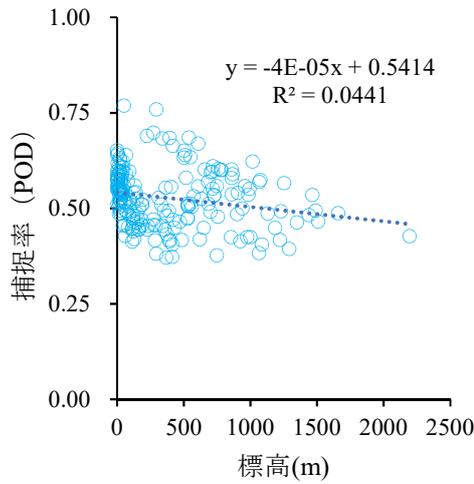


図 2-11 夏季での標高と捕捉率の
関係(MVK)

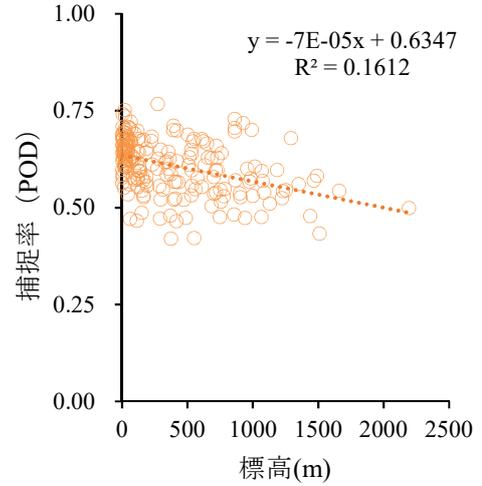


図 2-12 夏季での標高と捕捉率の
関係(Gauge)

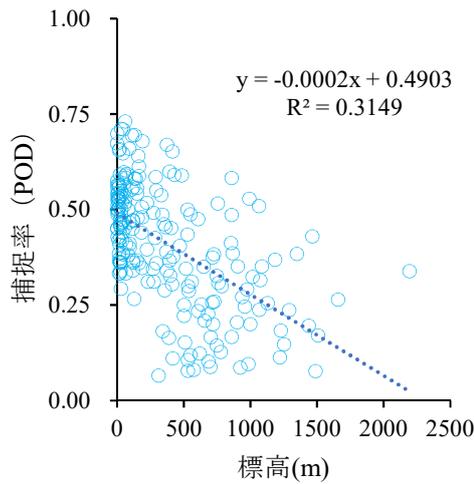


図 2-13 冬季での標高と捕捉率の
関係(MVK)

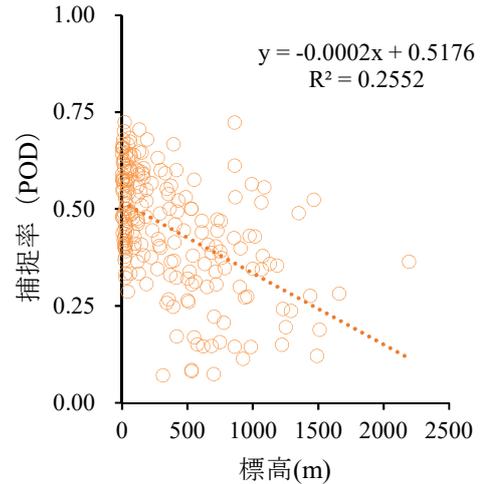


図 2-14 冬季での標高と捕捉率の
関係(Gauge)

表 2-3 GSMaP のプロダクト毎の捕捉率の比較結果

		MVK	Gauge
捕捉率 (POD)	期間全体	0.527	0.583
	夏季 (6月から8月)	0.527	0.609
	冬季 (1月から2月、12月)	0.411	0.449

(2) 降雨推定量の精度

次に、標高と降雨推定誤差（期間中 AMeDAS 総雨量-GSMaP 総雨量）の関係を期間中全体(図 2-15、図 2-16)、6月から8月までの夏季(図 2-17、図 2-18)、1月から2月と12月の冬季(図 2-19、図 2-20)に分けて示す。

その結果、両プロダクトにおいて AMeDAS 観測地点の標高が高くなるにつれて降雨推定誤差が大きくなること（GSMaP が過小評価傾向になる）が確認された。特に Gauge においては、標高 0m 付近では降雨推定誤差が 0 mm 前後に多く分布しているものの、標高が高くなるにつれて、降雨推定誤差が大きくなる傾向にあった。

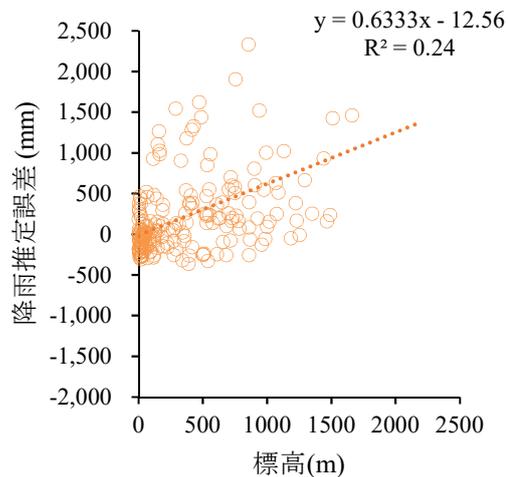
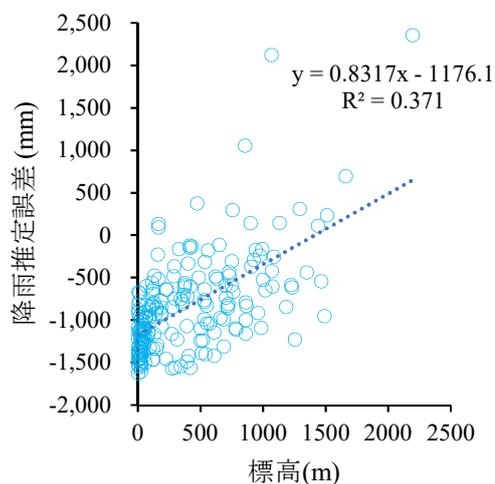


図 2-15 年間での標高と降雨推定誤差の関係(MVK) 図 2-16 年間での標高と降雨推定誤差の関係(Gauge)

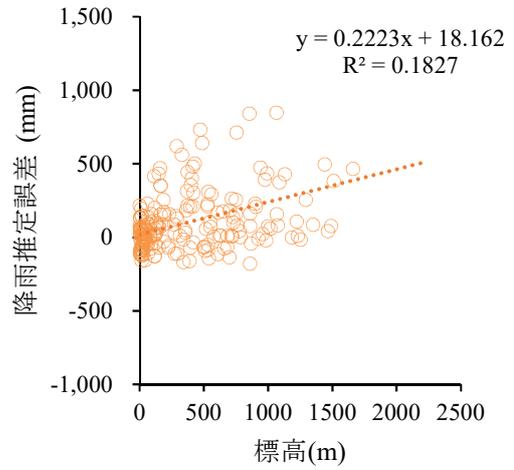
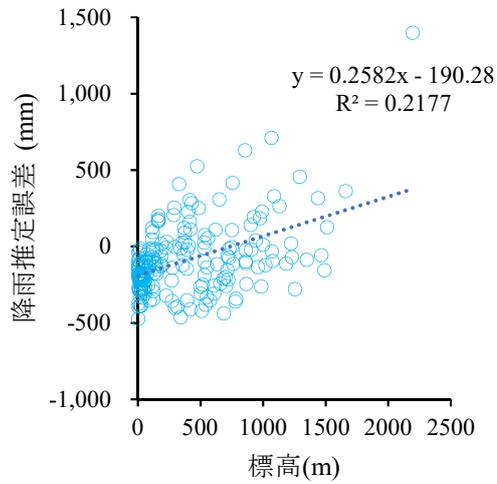


図 2-17 夏季での標高と降雨推定
誤差の関係(MVK)

図 2-18 夏季での標高と降雨推定
誤差の関係(Gauge)

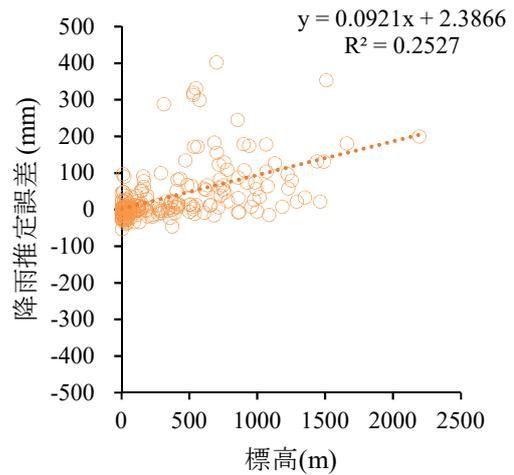
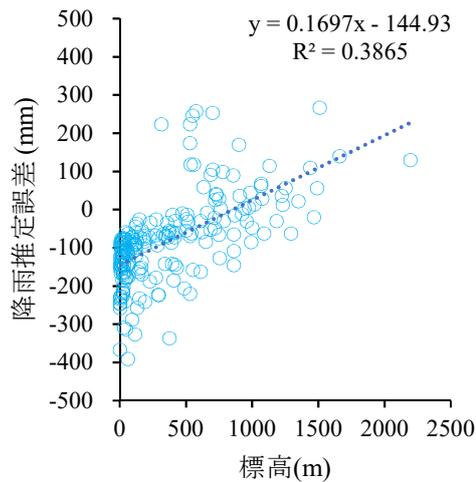


図 2-19 冬季での標高と降雨推定
誤差の関係(MVK)

図 2-20 冬季での標高と降雨推定
誤差の関係(Gauge)

(3) 精度に対する考察

以上の結果になった要因を考察する。まず、標高と AMeDAS 解析期間総雨量の関係(図 2-21)、標高と GSMaP 解析期間総雨量の関係(図 2-22、図 2-23)を示した。AMeDAS の総雨量と標高には正の相関が見られた。一方で、GSMaP の両プロダクトの総雨量と標高には正の相関が見られな

かった。これより、標高が高くなるにつれて AMeDAS 雨量が増加する事象を、GSMP が十分に観測できていない可能性があることが示唆された。

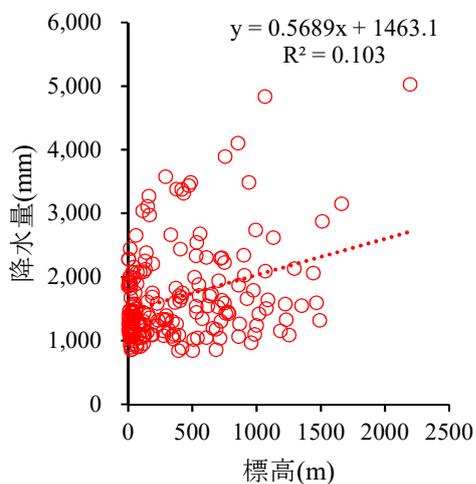


図 2-21 標高と期間中 AMeDAS 総降水量の関係

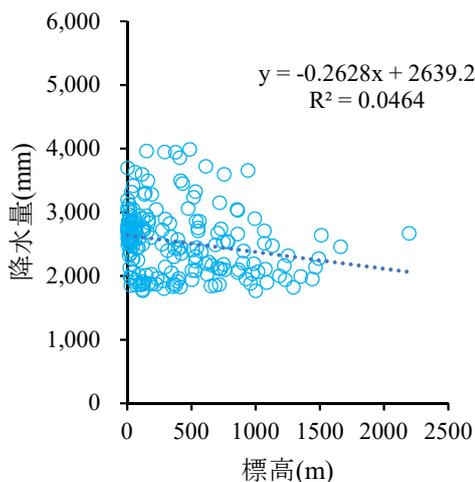


図 2-22 標高と期間中 GSMP (MVK) 総降水量の関係

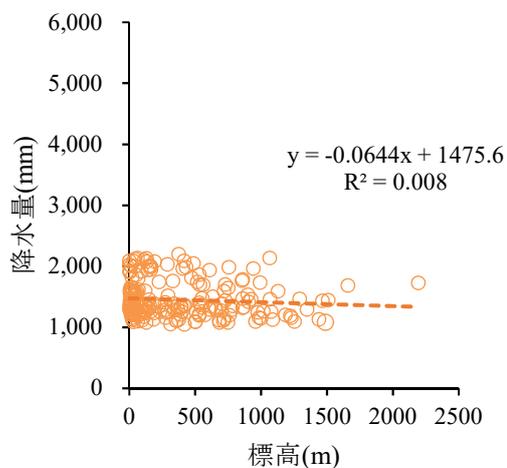


図 2-23 標高と期間中 GSMP (Gauge) 総降水量の関係

この理由として、GSMP Gauge プロダクトについては、雨量系補正に用いられる観測網が比較的標高の低い地点に分布している可能性が考えられる。それ以外の可能性について、仮説を立てて GSMP の精度について

て考察した。

同じ水分量を含む空気が存在する場合、温度が低いほど相対湿度は高くなる。また、気温は標高が高い所ほど低下する。これより、標高が上がるほど相対湿度が上昇するということになる。また翁(2009)によると、相対湿度の上昇に伴い雲底高度が低下すると報告されている。これらの事実より、標高が高くなるにつれて雲と地面との距離が短くなることが証明される。雲と地面の距離が近いということは、観測点の雨量計との距離が近いことと同じである。雨粒は半径が 2.5 mm を超えると分裂が生じるようになり、降雨中に雨粒の蒸発も生じるため、地面に到達する雨量は、雲と地面の距離が短く蒸発による損失の少ない高地の方が、AMeDAS で観測される地上雨量が多くなることが推察される。

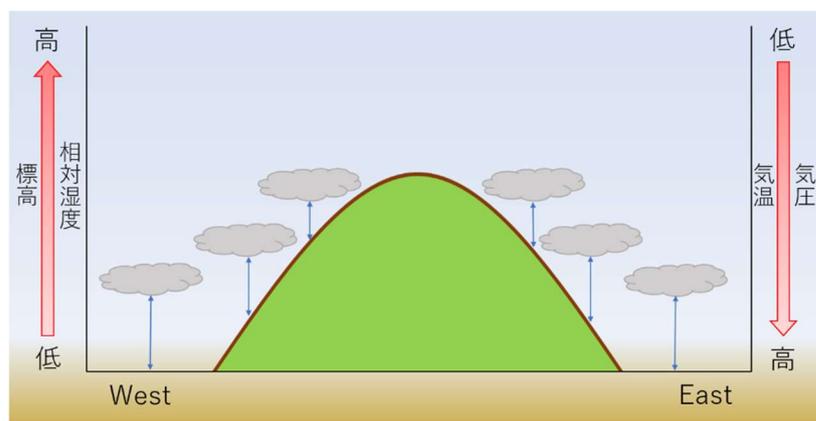


図 2-24 気象因子と雲底高度の関係

一方 GSMaP に用いられる GPM 主衛星の降雨センサ (DPR) は、地表面から地上 19km までを観測範囲としており、今まで再現できなかった雲内部の降水強度を確認することを可能としている。しかし、この降水強度のデータは、DPR が観測した雨粒の大きさの分布をもとに構成されたものであるため、実際に地上まで雨粒が到達したかどうかは考慮していない。

実際の地上降雨は、標高が高くなることで雲底が持ち上げられ、強い雨を降らせる雨雲が形成されやすくなる。さらに雲底と地表面の距離が短くなり、地表面に到達するまでの降雨中の雨粒の蒸発が少なくなる。これより標高の高い地点の方が、雨量が大きくなる。しかし、蒸発した雨粒は小さな粒子(霧粒、雲粒)となって空気中に存在するため、衛星は地面に到達しなかったこの粒子まで観測することとなり、標高による雨量の差が生じない。このため、標高が高くなるにつれて推定雨量の差が大きくなったと考えられる。

よって、標高が高くなることで推定雨量精度が低下するのは、AMeDAS と GSMaP で雨の捉え方が異なることが原因であると考察した。

第4節 まとめ

GSMaP の基本的な観測特性について検証するため、AMeDAS と GSMaP(MVK, Gauge)を比較した。その結果、時間分解能を広げることで捕捉率が向上し、これらの相関もより強くなることが分かった。また MVK と Gauge を比較したところ、地上降雨観測網の結果を反映させた補正の効果により Gauge の方が雨量を適切に評価し FAR についても改善した。

また、標高の違いによる GSMaP プロダクトの精度を検討した。その結果、観測地点の標高が高くなることで GSMaP の精度が低下する傾向が確認された。これは、AMeDAS は地面に到達した雨粒を観測し、GSMaP はセンサの観測領域に存在する雨粒が観測対象であるという、この2つの違いが精度の要因になっていると考察した。

第3章 ウガンダ国東部の地上降雨の特性について

第1節 本章の目的

本研究の対象地域であるウガンダ国東部において、現場調査時に確認された短時間に発生する強烈な降雨や GSMaP の分解能 (0.1 度=約 10 km グリッド) よりも狭い範囲で発生する雨が推定精度に影響を与えている可能性が示唆された (Kobayashi et al, 2018)。

そこで本章では、対象地域で実際に雨量計から得られた地上降雨データを用い、地上観測降雨の特性・空間的な分布の特徴を明らかにする事を目的とした。

第2節 研究対象地及び解析方法

3.2.1 研究対象地

本研究では、ウガンダ国東部地域に位置する 11 カ所 (後述) での実測したデータを用いた。観測地点の多くは Mt. Elgon (標高 4,321 m) の裾野に位置し、観測地点の標高は 1,100 m~2,000 m に分布していた。対象地域であるウガンダ東部は、年間を通して温暖な気候であり、年に 2 度の雨季が存在し、年間降水量は年によってばらつきがあるものの、1,000~1,500 mm 前後であった。

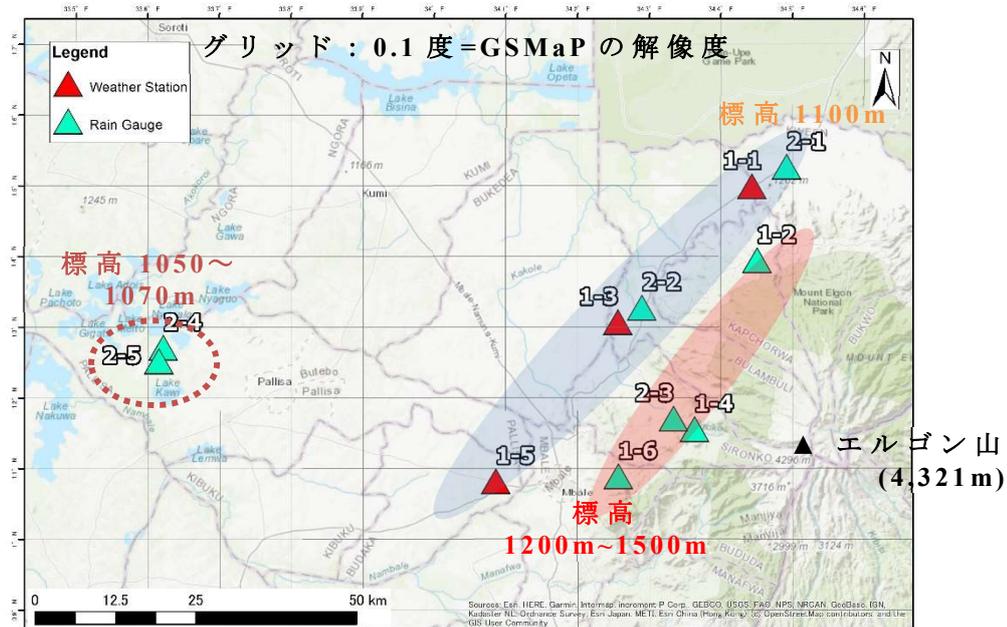


図 3-1 地上降雨観測地所 11ヶ所の位置図

(1) 観測方法

観測地点は表 3-1 に示したように機材が設置された経緯から大きく 2 つに分けた。1 つは国際協力機構(JICA)が実施した「ウガンダ国ウガンダ中央部・東部地域灌漑地区開発計画」(JICA2017)の調査期間中に設置された気象観測装置 3カ所、自記式雨量計 3カ所により自動観測された計 6地点であった。観測装置は人獣などの干渉により観測が中断しないように一辺がそれぞれ 10 m (気象観測装置) 及び 5 m (自記式雨量計) 高さ 2m の金属製フェンスに囲われていた。観測は 1地点のみ先行して 2014年 8月 から、それ以外の 5地点については 2015年 3月 から開始し、一部機材の故障等による欠損もあるものの現在まで継続されていた。これらの観測機材は灌漑計画を立案するための情報収集を主眼に設置されていたため、計画対象地区の主要水源である河川流域の上流及び開発対象地区近傍に設置されていた。

2つ目は、東京農業大学総合研究所 大学院博士後期課程研究支援制度

の助成を受けて 2018～2019 年に設置した自記式雨量計であった。これらの雨量計は狭い範囲に発生する強烈な降雨の実態を確認することを目的に、既存雨量計の約 5 km 圏内に設置した。

表 3-1 地上降雨観測地点及びその諸元

Code	Name	Easting (Degree)	Northing (Degree)	Elevation	Equipment	Year of Installation
1-1	Atari Health Center II	34.443513	1.498107	1,086 m	Weather station	2015
1-2	Kapchorwa District LGO	34.450783	1.393603	1,961 m	Automatic Rain gauge	2015
1-3	Bukhalu Health Center III	34.256389	1.306473	1,091 m	Weather station	2015
1-4	Busulani Sub-County Office	34.363493	1.155253	1,286 m	Automatic Rain gauge	2015
1-5	Kamonkoli Sub-County Office	34.086178	1.081556	1,109 m	Weather station	2015
1-6	Bufumbo Sub-County Office	34.257194	1.088640	1,536 m	Automatic Rain gauge	2014
2-1	Ngenge Irrigation scheme	34.491913	1.525730	1,099 m	Automatic Rain gauge	2019
2-2	Bulambuli District LGO	34.290210	1.326864	1,084 m	Automatic Rain gauge	2019
2-3	Budadiri Health Center IV	34.334022	1.170121	1,237 m	Automatic Rain gauge	2019
2-4	Ajepet A	33.621178	1.270708	1,052 m	Automatic Rain gauge	2019
2-5	Gogonyo Health Centre III	33.614836	1.251594	1,079 m	Automatic Rain gauge	2018

観測には気象観測装置(米国 Onset Computer Corporation 製 HOBO Micro station H21-002 データロガー、同 S-RGB-M002 転倒桁形降雨センサー)及び自記式雨量計(米国 Onset Computer Corporation 製 RG3-M イベントロガー内蔵型転倒桁形雨量センサー)を用いた自動観測により降雨観測を行った。いずれの降雨センサーも分解能 0.2 mm であった。気象観測装置については 10 分ごとの積算雨量を記録していたが、自記式雨量計は転倒しますが転倒した時刻を記録していたため、転倒時刻から任意の時間分解能で集計した。なお、観測された降雨は 10 分毎の降雨量、1 時間毎の積算雨量として集計した。

3.2.2 地上雨量データの解析方法

(1) 各時刻での発生回数割合

ウガンダ国東部の降雨の特徴を評価するためにウガンダ国東部の 11 地点の気象観測装置及び自記式雨量計により自動観測された 2019 年 9 月 1 日から 2020 年 8 月末までの 12 カ月間のデータを用いた。解析期間全体で各時刻の降雨発生回数を集計し、各時刻での発生回数割合を求めた。またこの結果をクラスター分析し、同地域の降雨発生特性を明らかにした。

(2) 近傍観測地点の比較

短時間のうちに発生する強烈な雨を定量的に評価するためにウガンダ国東部の 8 地点の気象観測装置により自動観測された 2019 年 9 月 1 日から 2020 年 8 月末までの 12 カ月間のデータを用いた。表 3-2 及び図 3-2 に示すように、各グループの観測点は約 5km 圏内に雨量計が 2 カ所配置され、これを 1 つのペアとして計 4 ペア設け、ペア内の 2 地点の雨量をそれぞれ比較した。解析期間中の 10 分及び 1 時間降雨強度を求め解析した。なお各ペア内の 2 地点の距離は、平均で 4.0km であった。

表 3-2 各ペアの組み合わせと 2 点間の距離

ペア	ペアの組み合わせ		2 地点間の距離 (km)
ペア 1	1-1 Atari Health Center 2	2-1 Ngenge Irrigation Scheme	5.65
ペア 2	2-3 Budadiri HC4	1-4 Busulani Sub-County Office	3.66
ペア 3	2-2 Bulambuli DHQ	1-3 Bukhalu Health Center 3	4.36
ペア 4	2-4 Ajepet	2-5 Gogonyo Health Center3	2.25

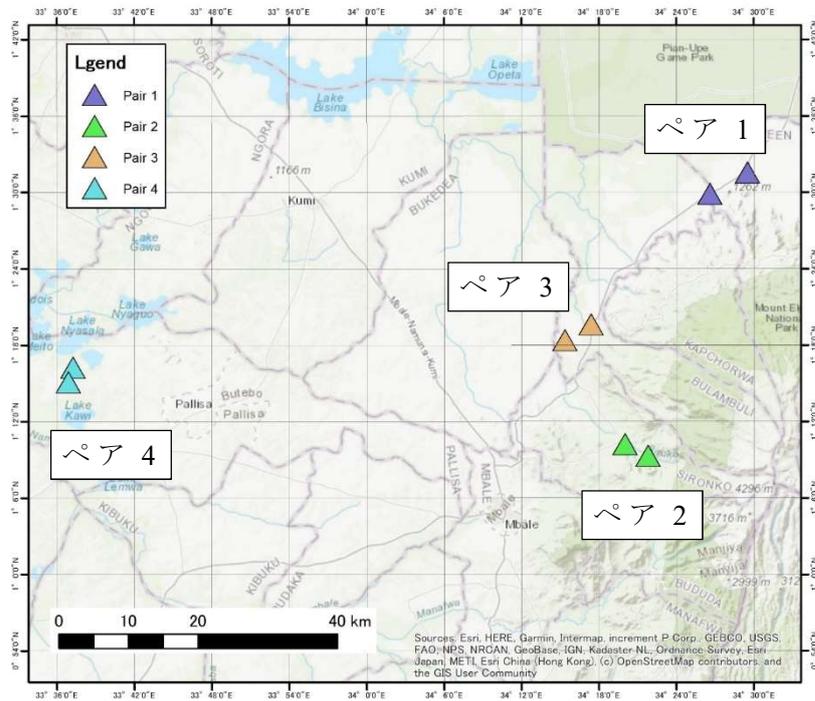


図 3-2 設定した4つのペアの位置関係

第3節 結果及び考察

3.3.1 各時刻での発生回数割合

表 3-1は解析期間中の各時刻における降雨の発生回数を集計した結果をまとめた。

表 3-3 各時刻における降雨の発生回数割合

(単位：%)

観測地点	時刻																								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1-1	5.0	7.1	5.3	4.6	3.9	3.9	3.6	1.4	1.4	0.7	0.0	0.0	0.4	1.1	3.6	3.2	5.0	7.5	7.5	5.0	6.4	9.6	6.8	7.1	
1-2	5.6	3.8	4.6	3.8	2.7	2.1	1.2	1.1	1.6	1.3	1.1	1.3	1.9	3.5	6.4	5.4	4.0	7.2	7.8	6.2	6.4	5.6	6.2	5.9	3.5
1-3	3.6	4.5	5.8	4.5	2.5	4.7	2.5	1.1	0.6	0.3	0.6	1.4	3.6	7.5	9.5	5.0	2.8	4.7	5.6	4.2	5.6	7.0	6.7	5.8	
1-4	2.1	2.9	2.1	2.5	2.3	1.7	0.8	0.8	0.4	0.6	0.6	1.5	6.7	15.6	16.2	11.6	6.5	4.6	4.8	2.7	2.7	3.4	4.2	2.3	
1-5	5.9	3.4	5.1	5.9	5.1	2.5	3.4	2.5	1.7	0.0	0.0	1.7	1.7	9.3	13.6	3.4	3.4	3.4	4.2	4.2	6.8	4.2	3.4	5.1	
1-6	1.5	2.1	3.1	2.3	2.1	2.3	1.9	1.1	1.0	0.8	0.6	1.7	10.5	16.8	12.2	8.0	5.3	4.6	5.2	4.2	2.9	3.2	3.6	3.1	
2-1	5.9	6.3	4.8	5.4	4.8	3.0	2.2	1.8	1.5	0.0	0.0	0.4	0.0	1.1	1.5	4.1	6.6	10.0	10.3	4.4	6.3	7.7	6.3	5.5	
2-2	5.1	4.5	3.5	4.2	3.8	3.5	1.0	0.3	0.6	0.3	0.6	2.2	6.4	10.6	6.1	5.1	5.1	6.1	6.4	2.6	5.4	5.8	6.1	4.5	
2-3	2.0	3.2	2.5	2.7	2.5	2.0	0.7	0.2	0.0	0.7	0.5	1.1	6.5	16.0	15.6	10.6	6.5	4.5	5.2	3.6	3.6	4.3	3.2	2.3	
2-4	9.0	4.9	4.9	5.9	4.9	3.4	4.3	3.1	2.2	0.9	1.5	0.6	1.5	2.5	2.5	4.3	4.0	3.1	3.4	6.5	5.9	6.5	6.8	7.4	
2-5	7.6	5.1	4.2	5.9	5.1	4.8	4.5	2.2	2.0	1.4	2.8	0.6	1.4	2.0	2.0	4.8	4.5	3.1	2.5	7.3	6.2	5.9	6.5	7.9	

さらに、この結果をクラスター分析し、表 3-4 に示すように 4 つのクラスに分類された。なお、クラスター分析にはエクセル統計（バージョン 3.22）を用いた。

表 3-4 クラスター分析の結果

クラスター	観測地点
クラスター 1	1-1 Atari Health Center 2、2-1 Ngenge Irrigation Scheme RG、
クラスター 2	1-2 Kapchorwa District HQ、1-3 Bukhalu Health Center 3、 2-2 Bulambuli DHQ RG、1-5 Kamonkoli Sub-County Office
クラスター 3	1-4 Busulani Sub-County Office、2-3 Budadiri HC4 RG、1-6 Bufumbo Sub-County Office
クラスター 4	2-4 Ajepet RG、2-5 Gogonyo Health Center3

図 3-3 に示したクラスター分析の樹形図より、Elgon 山北側麓と平地部（クラスター 1 と 4）、エルゴン山北西側から西側（クラスター 2 と 3）がより類似する傾向が確認された。

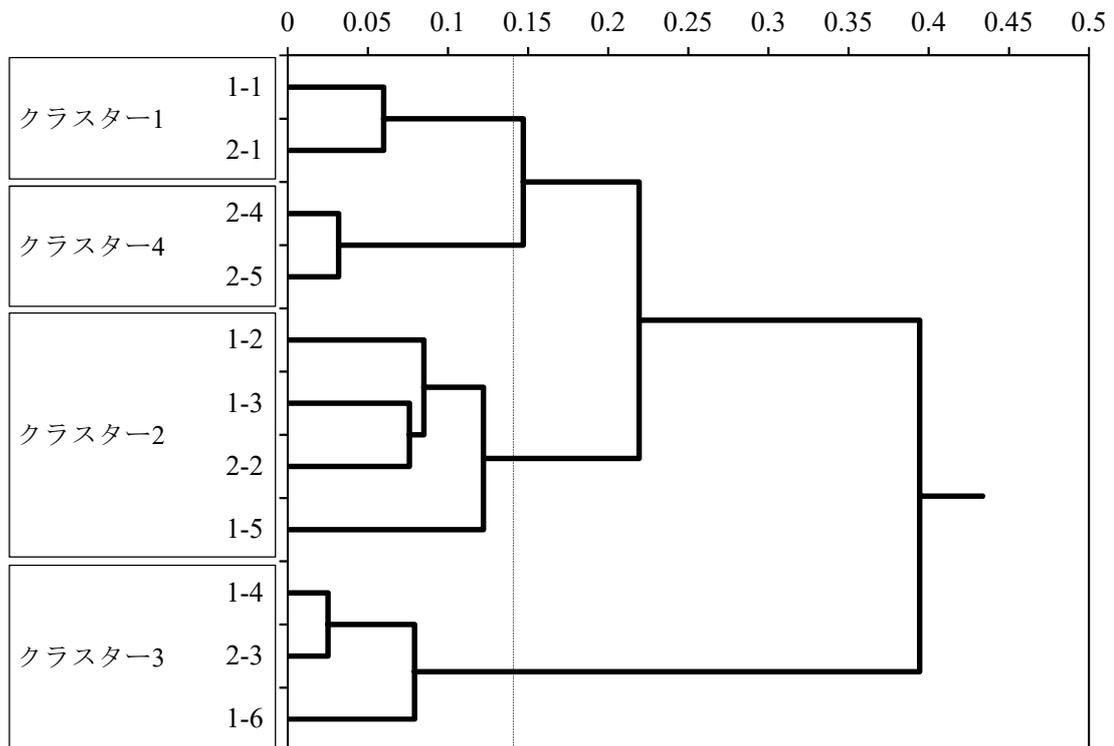


図 3-3 クラスタ分類 樹形図

(1)降雨発生時刻からみた地上降雨の特徴

観測対象の全地区の観測期間中の 10 分間降雨について、各時刻の発生回数を集計した結果、観測地点の緯度経度及び標高とその特徴から 4 つのクラスターに分類することができた。Elgon 山の北側標高 1100m 地帯に位置するクラスター1 (1-1, 2-1 の 2 地点)、Elgon 山北西側の標高 1200 ~ 1100m 地帯の比較的高い地点に位置するクラスター2 (1-2, 1-3, 1-5, 2-2 の 4 地点)、Elgon 山西側標高 1200m 地帯にかけての麓に位置するクラスター3(1-4, 1-6, 2-3 の 3 地点)、及び西側平地部標高 1050m 地帯に位置するクラスター4 (2-4, 2-5 の 2 地点) に分類された。

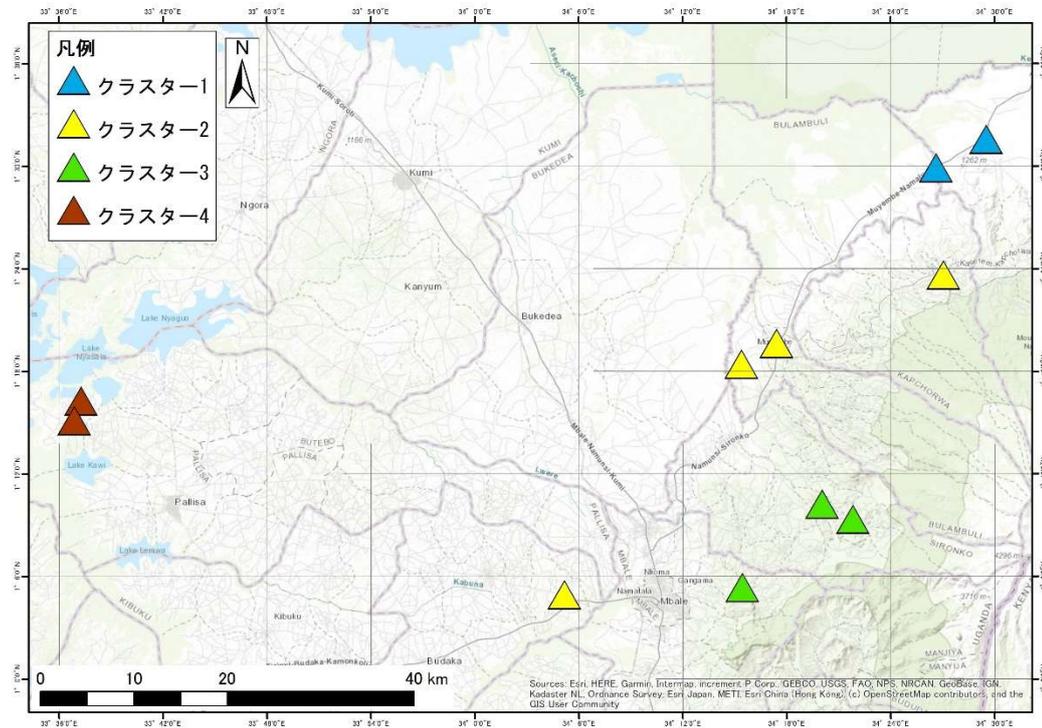


図 3-4 クラスタ分析の結果

図 3-5 から図 3-8 にクラスタ毎に各時刻の降雨発生割合を示した。

各地点において、共通して 8 時から 11 時までの降雨発生割合は一日を通して最も降雨の発生回数が低かった。しかし、降雨発生割合のピークについては、クラスタごとに特徴があり、クラスタ 1 では、日没前後に最も高くなり、その後深夜まで高い割合が続き、日の出にかけて低下する傾向にあった（図 3-5）。クラスタ 2 は、正午過ぎから 15 時台までの時間帯に降雨が多く発生していることが分かった（図 3-6）。クラスタ 3 も同様に正午から 15 時台にかけて多く降雨が発生していたが、クラスタ 2 と比較して、日没から日の出までの時間帯にも降雨が発生する傾向が認められた（図 3-7）。クラスタ 4 は、10 時前後から正午にかけてもっとも低く、その後徐々に増加し、深夜 0 時にピークを迎えると徐々に低下するという傾向を示した（図 3-8）。

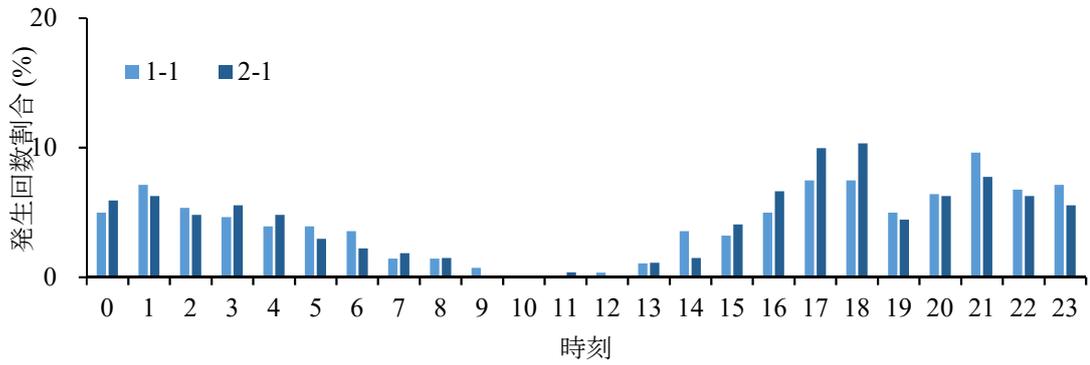


図 3-5 各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター1)

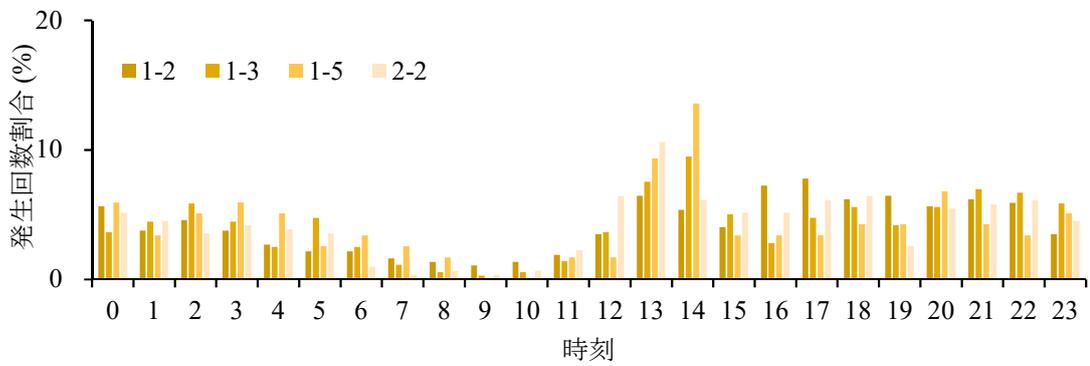


図 3-6 各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター2)

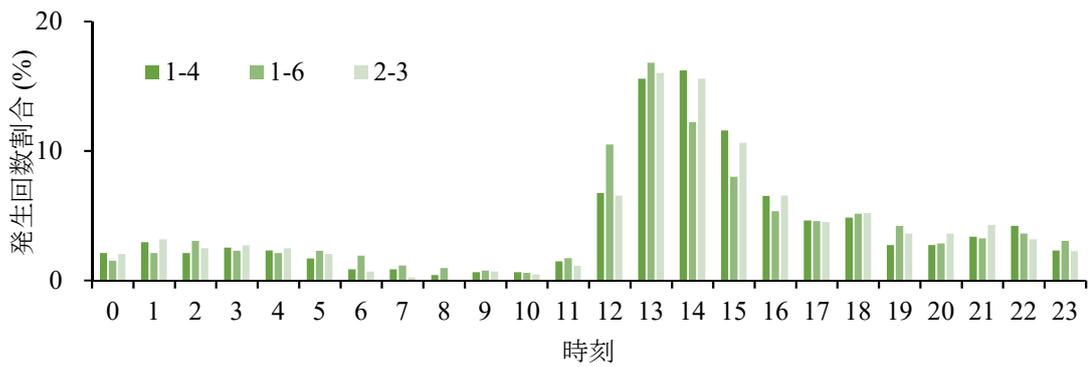


図 3-7 各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター3)

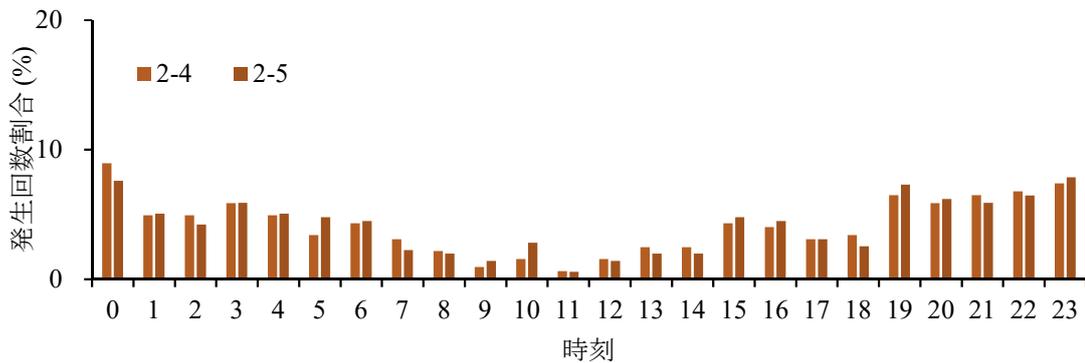


図 3-8 各時刻での地上降雨発生割合 (クラスター4)

3.3.2 近傍観測地点の降雨発生時間と量の比較

我が国の気象庁の資料を参考にして降雨強度の区間を設定し、4 ペアの期間中降雨の日最大降雨強度の発生回数を集計した(気象庁, 2017)。また、1 時間の降雨強度の区間を 10 分間の降雨強度に換算し、同様に 10 分降雨の最大強度の発生回数を集計した。

各地点における降雨強度毎の発生回数を表 3-5 に示した。区間の設定にも、前述同様の気象庁の資料を参考にした。1 時間降雨量(=降雨強度)では、30 mm 以上から 50 mm 以下の「激しい雨」に分類される降雨強度は観測期間中に数回発生し、4 回以上発生することはなかった。また、50 mm 以上から 80 mm 以下の「非常に激しい雨」に分類される降雨は全ペアにおいて期間中に 1 度しか発生していなかったことが分かった。

しかし、観測された最小の時間分解能である 10 分間の降雨量を用いて、1 時間降雨量と同等の強度に換算してその区間の発生回数を求めた。その結果、8.3 mm/10min 以上から 13.3 mm/10min 以下(降雨強度 50 mm/h 以上から 80 mm/h 以下相当)に分類される降雨強度の発生回数が各地点の平均で 14 回程度あり、さらにそれ以上の強度の降雨が発生していることが明らかになった。このことから、調査地域において 1 時間よりも短い降雨時間に非常に激しい雨が発生していることが明らかになった。

表 3-5 観測期間中の各地点における各降雨強度の降雨発生回数

区間	Pair 1		Pair 2		Pair 3		Pair 4	
	1-1	2-1	1-4	2-3	2-2	1-3	2-5	2-4
0 mm	8246	8302	7906	7837	8211	8053	8218	8238
0.5～10 mm 以下	509	451	839	911	551	707	515	502
10～20 mm 以下	24	24	31	29	18	17	32	31
20～30 mm 以下	3	3	6	5	2	6	15	11
30～50 mm 以下	2	4	2	2	2	1	3	2
50～80 mm 以下	0	0	0	0	0	0	1	0
80～100 mm 以下	0	0	0	0	0	0	0	0
100～120 mm 以下	0	0	0	0	0	0	0	0
0 mm	51441	51483	50633	50460	51380	51036	51104	51213
0.1～1.7 mm 以下	1086	1052	1815	1997	1191	1469	1326	1281
1.7～3.3 mm 以下	87	79	144	141	81	98	114	89
3.3～5.0 mm 以下	34	34	58	60	20	54	73	48
5.0～8.3 mm 以下	40	42	42	31	22	39	56	45
8.3～13.3 mm 以下	12	11	12	14	7	8	20	25
13.3～16.7 mm 以下	4	2	0	1	1	0	10	1
16.7～20 mm 以下	0	1	0	0	2	0	1	2

観測期間中のデータを用い、10 分間雨量と 1 時間雨量について 3.3 mm/10 min (=20mm/hour) 以上の「強い雨」に分類される強度の降雨が、ペア内の 2 地点で同時、または別々に発生した回数を求めた。

その結果、10 分間降雨、1 時間降雨の両条件において、同時に発生している回数よりも別々に発生している回数が多いことが明らかになった。すなわち、表 3-6 に示したように、10 分間降雨での降雨強度では、短時間に激しい雨が発生していることが明らかになった。このことから、観測期間中において対象地域では 20 mm/hour 相当の強い降雨が短時間に発生する際に、その降雨の範囲は約 4 km 圏よりも小さい可能性が示唆

された。

表 3-6 20 mm/hour 以上の雨がペア内 2 地点で同時・別々に発生した回数

カテゴリ		ペア 1	ペア 2	ペア 3	ペア 4
3.3mm/10min 以上の降雨 が	別々に発生 している回 数 (割合)	164 (95%)	170 (88%)	137 (94%)	141 (67%)
	同時に発生 している回 数 (割合)	8 (5%)	24 (12%)	8 (6%)	70 (33%)
20mm/hour 以上の降雨 が	別々に発生 している回 数 (割合)	10 (91%)	12 (86%)	10 (91%)	18 (72%)
	同時に発生 している回 数 (割合)	1 (9%)	2 (14%)	1 (9%)	7 (28%)

第4節 まとめ

本章では、地上降雨の特性として、実測の降雨量データの分析から次の点が明らかになった。

降雨の発生時刻は、クラスター分析によってエルゴン山との位置関係でクラスターに分けることができた。また、降雨の発生時刻については一日のなかで降雨が発生する時間帯に特徴があることが明らかになった。

近接する雨量計を用いてペア毎に比較した結果、1 時間継続し強烈な雨が降り続けるパターンよりも、より短い降雨時間に集中して発生することが明らかになった。また、クラスター分析では降雨発生時刻に傾向が確認され、その特徴は、4 km 圏内の同一ペア内では同日同時刻に降雨が発生する頻度は少なく、近接した場所でもズレて降雨が発生する傾向があることが確認された。

以上より、ウガンダ国東部では、短時間に強烈な降雨が発生し、その際の雨域は GSMaP の分解能である 10 km グリッドよりも小さい場合が多いことが推察される。

第4章 ウガンダ東部での GSMaP の地上降雨データとの比較に基づく精度検証

第1節 本章の目的

気象情報は、その地域の環境条件を把握する上で重要である。中でも降雨データは、水資源開発や洪水対策等に用いられ、特に灌漑計画を立案する上では、対象面積、施設規模等の事業内容や規模を検討する上で必要不可欠な情報である。日本国内においては、アメダスをはじめとした無人観測施設が気象庁により全国各地に整備され、質・量ともに高い降雨情報が蓄積されている。しかし、開発途上国の多くは、観測機材の維持管理不足や手動観測のため、気象データを継続的に観測することが困難であり、データの欠損や観測自体が中断される場合もある。そのため、多くの途上国では、灌漑開発計画などの策定に求められる十分な品質と量の降雨などの気象データが利用できないのが現状である。

一方、地球全体を対象とした降雨量を時間分解能 1 時間、空間解像度 0.1 度(10km)の「全球降雨マップ (GSMaP)」として無償で提供されているものの、GSMaP の精度検証に関する既往の研究では、日本国内においてアメダスを用いた GSMaP の精度検証が行われており、アジア、中東、北アフリカでは洪水解析の降雨データとして多く用いられた実績がある。一方、サブサハラアフリカ地域での地上降雨量と GSMaP の比較による時間雨量や通年での日雨量の精度検証は行われていない。

そこで、本章では、第 3 章で明らかになった地上降雨の特性が GSMaP の推定降雨からも評価できるか、また地上降雨と GSMaP の比較を行い、GSMaP の降雨量の精度とその特徴を明らかにすることを目的とした。

第2節 解析方法

4.2.1 地上雨量データ

解析に用いた地上観測降雨量は、国際協力機構(JICA)が実施した「ウガンダ国ウガンダ中央部・東部地域灌漑地区開発計画」(JICA 2017)の調査期間中である 2014 年及び 2015 年に設置された気象観測装置と大学院博士後期課程研究支援制度で 2018,19 年に設置され観測された雨量計データをを用いた。なお、地上観測された降雨データは 10 分毎の降雨量に整理した後、各比較に用いる時間分解能で再集計した。解析期間は 2019 年 9 月 1 日から 2020 年 8 月 31 日までの 1 年間とした。

4.2.2 GSMaP データと解析方法

(1) GSMaP を用いた地上降雨の特徴検証

第 3 章で確認されたウガンダ国東部の降雨の特徴を、GSMaP を用いた再現の可能性を評価するために、2019 年 9 月 1 日から 2020 年 8 月末までの 12 カ月間の観測降雨データとウガンダ東部の 11 地点の雨量計の設置位置のグリッドにおける GSMaP の時間降雨量を用いた。降雨発生時刻の特徴についての分析では、解析期間全体で各時刻の降雨発生回数を集計し、各時刻での発生回数割合を求めた。またこの結果をクラスター分析し、地上の降雨特性の再現可能性を確認した。

各雨量計と GSMaP のグリッドの対応を表 4-1 に各雨量計と GSMaP の対象グリッドの位置関係を図 4-1 に示した。

し、各カテゴリに分類された頻度数を求め、捕捉率（POD）及び空振り率（FAR）を用いて評価した(Wilks 2006)。

2) 地上降雨推定量の評価方法

GSMaP の降雨量推定精度の評価については、同時刻の地上降雨と GSMaP の推定雨量から切片を有する線形回帰分析を行い、近似直線の傾き(S)とその相関係数(R)及び各時間分解能の RMSE を求め評価を行った。また期間中の月雨量を比較した。異なる時間分解能での評価を行うため、地上雨量及び GSMaP の 1, 3, 6, 12, 24 時間毎、5 日毎（120 時間）、10 日毎（240 時間）、15 日毎（360 時間）の積算雨量を算出して比較した。なお、0.5 mm/h 未満の雨量は 0.0 mm/h とした。

第3節 結果及び考察

4.3.1 GSMaP を用いた地上降雨の特徴検証

下表は解析期間中の各時刻における降雨の発生回数を集計した結果である。

表 4-2 各時刻における降雨の発生回数割合

(単位：%)

観測 地点	時刻																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
G1-1	3.5	3.3	2.8	2.2	2.2	2.4	1.7	0.4	0.0	0.4	0.2	0.2	0.2	2.2	4.4	5.7	8.7	11.8	11.1	11.5	7.8	6.5	5.4	5.2
G1-2	3.8	3.6	2.8	1.8	2.2	2.6	2.0	0.0	0.2	0.4	0.6	0.0	1.0	2.8	4.6	5.2	9.9	11.9	11.7	9.7	7.4	6.6	4.8	4.2
G1-3	3.5	2.7	3.5	1.8	1.8	2.7	2.0	0.6	0.0	0.4	0.0	0.2	0.6	5.3	9.4	4.7	8.0	9.8	9.8	9.0	7.6	6.5	5.7	4.3
G1-4	3.1	2.7	2.0	2.0	2.0	2.7	2.3	0.4	0.5	0.4	0.2	0.0	0.9	5.2	7.7	5.8	9.9	9.9	10.6	8.5	8.1	6.1	5.0	4.0
G1-5	4.4	3.4	3.2	2.0	2.3	2.5	2.0	0.8	0.3	0.2	0.0	0.0	1.0	5.7	8.9	7.0	7.0	5.9	8.0	9.9	7.5	7.5	5.5	4.9
G1-6	3.4	2.5	2.0	1.5	2.2	1.9	1.9	0.7	0.2	0.0	0.2	0.2	2.2	6.8	9.0	7.8	9.6	8.8	8.8	8.8	7.3	5.9	4.4	4.1
G2-1	4.2	3.2	2.8	2.1	1.9	2.3	1.9	0.5	0.0	0.5	0.5	0.2	0.2	1.2	1.9	5.6	9.5	12.5	12.0	12.5	9.3	6.0	4.9	4.6
G2-5	6.3	4.9	4.2	4.0	3.5	3.5	3.1	1.2	0.2	0.5	0.7	0.3	0.0	0.5	2.6	4.4	7.3	6.6	7.0	8.7	7.9	7.3	7.0	8.0

この結果をクラスター分類し、4つのクラスに分類した（表 4-1）。

表 4-3 クラスター分析の結果

クラスター	観測地点
クラスターA	G1-1、G1-2、G2-1
クラスターB	G1-3、G1-4、G1-6
クラスターC	G1-5
クラスターD	G2-5

図 4-2 に示すクラスター分析の樹形図より、エルゴン山北側と平地部（クラスターA と D）、エルゴン山北西側から西側（クラスターB と C）がより類似する傾向にあった。

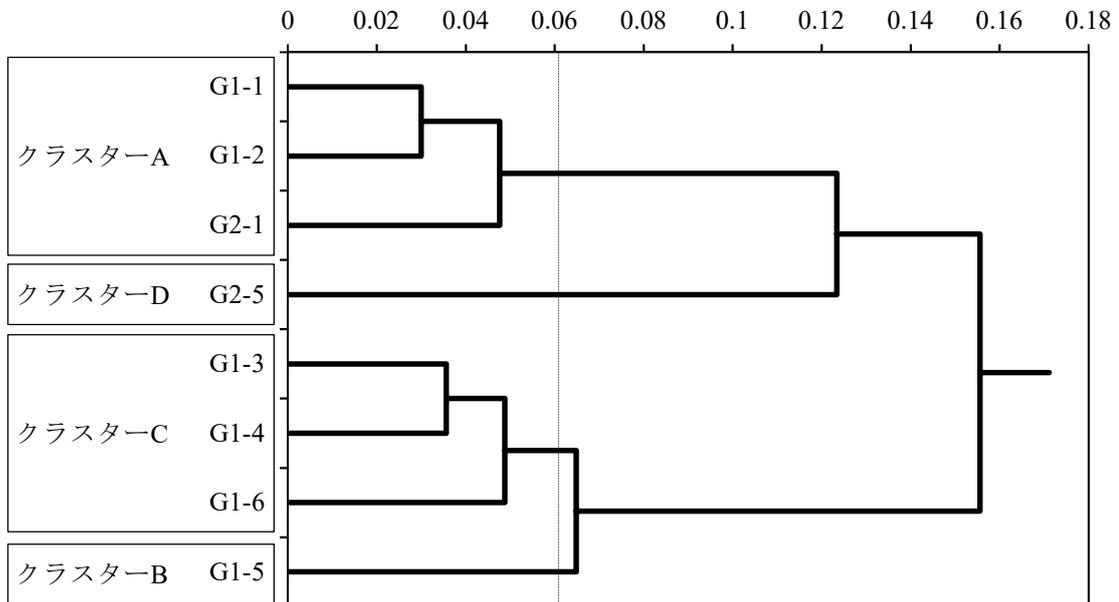


図 4-2 クラスター分類 樹形図

GSMaP の時間雨量データから各時刻の降雨発生回数を集計した結果、観測地点と Elgon 山との位置関係と標高からその特徴から 4 つのクラスターに分類することができた。Elgon 山の北側標高 1,100 m~1,200 m 地帯に位置するクラスターA (G1-1, G1-2, G2-1 の 3 地点)、Elgon 山北西側の麓に位置する標高 1,100 m のクラスターB (G1-5 の 1 地点)、Elgon 山北西から西側標高 1,100 m~1,200 m 地帯にかけて位置するクラスターC (G1-3, G1-4, G1-6 の 3 地点)、西側平地部標高 1,050 m 地帯に位置するクラスターD (G2-5 の 1 地点) であった。

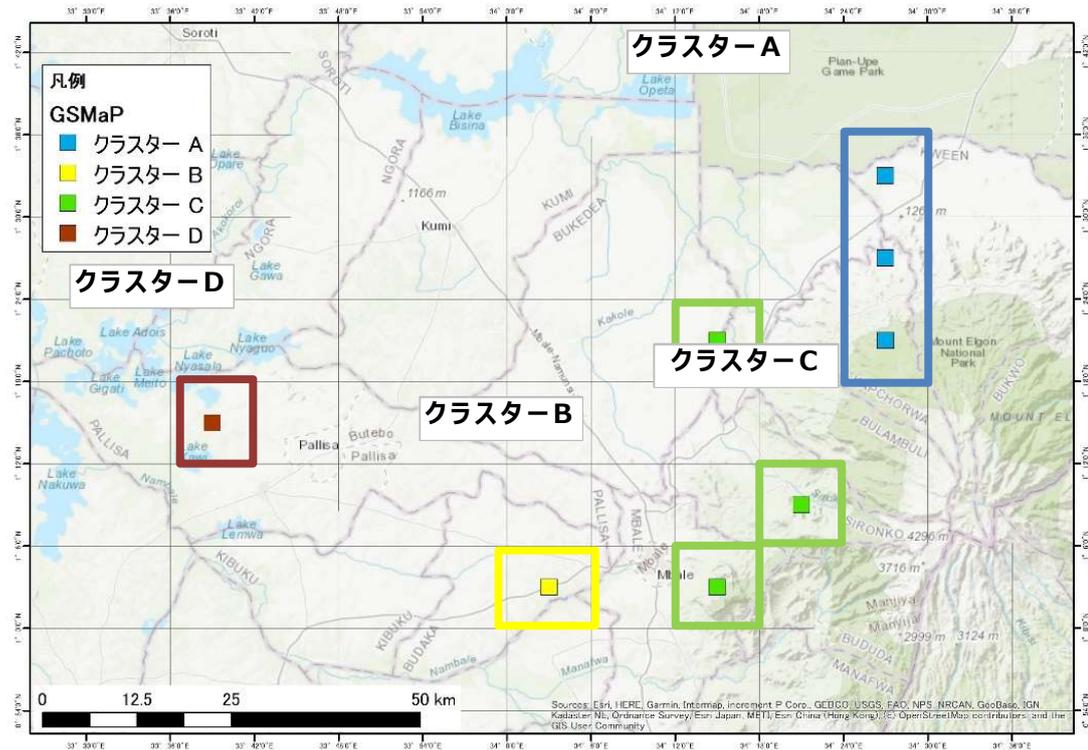


図 4-3 クラスタ分析の結果

クラスターAについては、日の出から正午まではほぼ降雨は発生しておらず、正午から発生回数が増加する傾向にあった（図 4-4）。またピークが17時から19時にかけて現れ、日の出までにかけて降雨が発生していた。

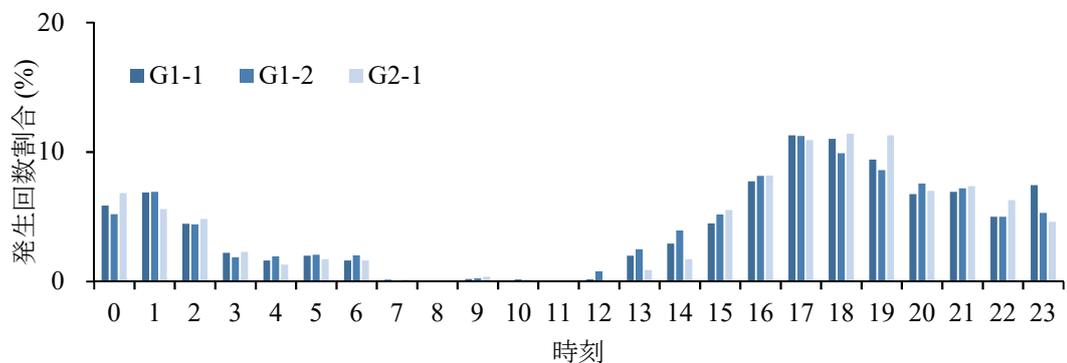


図 4-4 各時刻での地上降雨発生割合（クラスターA）

クラスターBについては、Aと同様、日の出から正午まではほぼ降雨

は発生せず、正午から翌日の日の出にかけて発生していた。14時台に1度目のピークが現れ、19時に再度ピークが現れていた（図 4-5）。

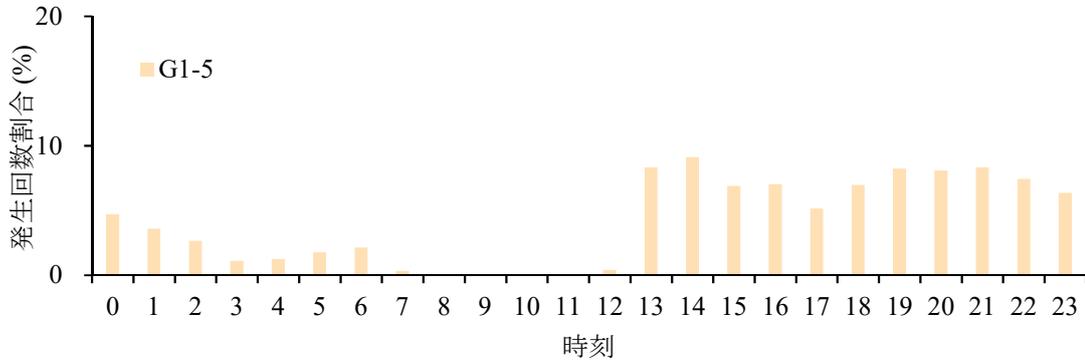


図 4-5 各時刻での地上降雨発生割合（クラスターB）

クラスターCについては、Bと類似した傾向にあり、日の出から正午まで降雨はほぼ発生することがなく、正午以降から降雨が発生した。また、14時台と16～20時台の2度のピークが出現した（図 4-6）。クラスターB及びCにおいて14時台にかけて発生する降雨については、日中太陽光で地表面が暖められたことで形成された積乱雲の影響があったと考察した。

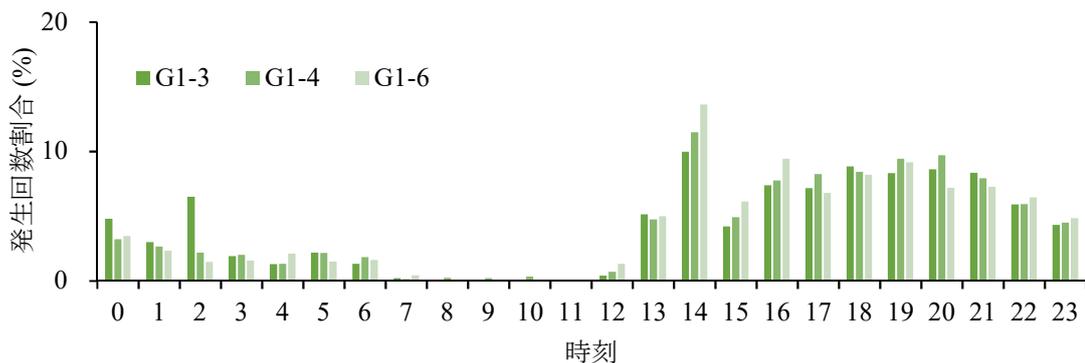


図 4-6 各時刻での地上降雨発生割合（クラスターC）

クラスターDも日の出から13時まで降雨が発生することは稀であり、その後16時台と19時台にピークが現れるものの、他のクラスターと比

較して、深夜から翌日の日の出（6時台）にかけても比較的降雨の発生割合が多いという特徴が確認された（図 4-7）。

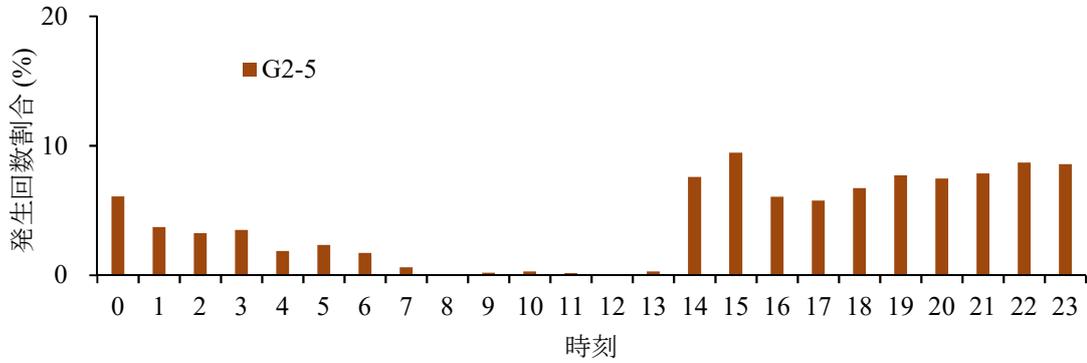


図 4-7 各時刻での地上降雨発生割合（クラスターD）

第 3 章で示した地上降雨の発生回数割合のクラスター分析結果（クラスター1～4）と GSMaP の降雨データを用いて分析した発生回数割合のクラスター分析結果（クラスターA～D）については、それぞれのクラスターの平均値を求め比較を行った（図 4-8 から図 4-11）。

地上降雨のクラスター分析の結果と比較して、GSMaP においても各クラスターの降雨発生時刻が類似しており、GSMaP から地上降雨の発生時刻の傾向を再現できることが確認された。

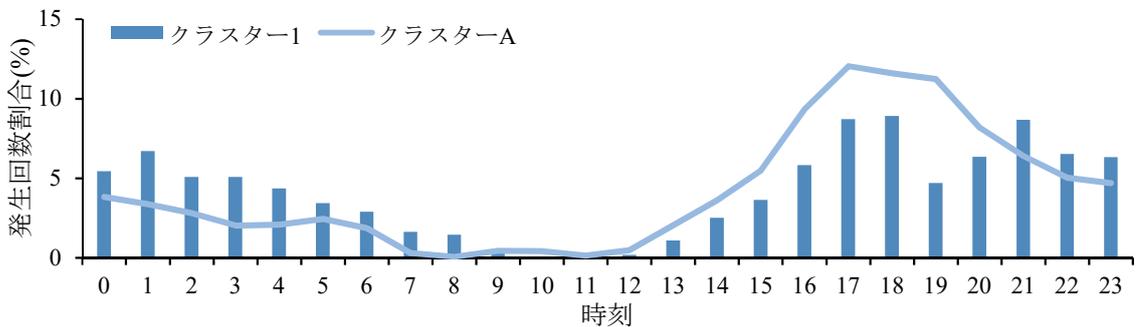


図 4-8 クラスター1とクラスターAの比較結果

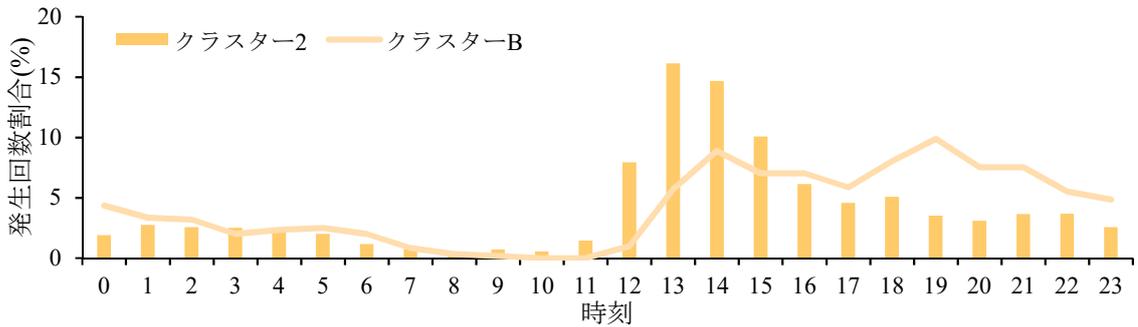


図 4-9 クラスタ-2 とクラスタ-B の比較結果

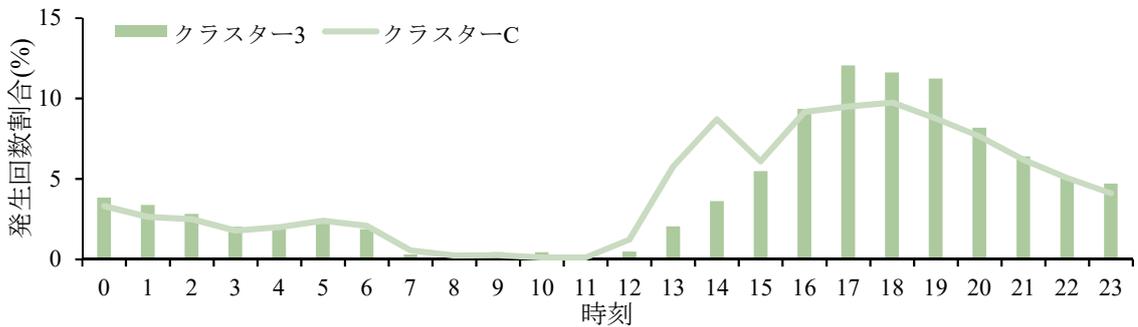


図 4-10 クラスタ-3 とクラスタ-C の比較結果

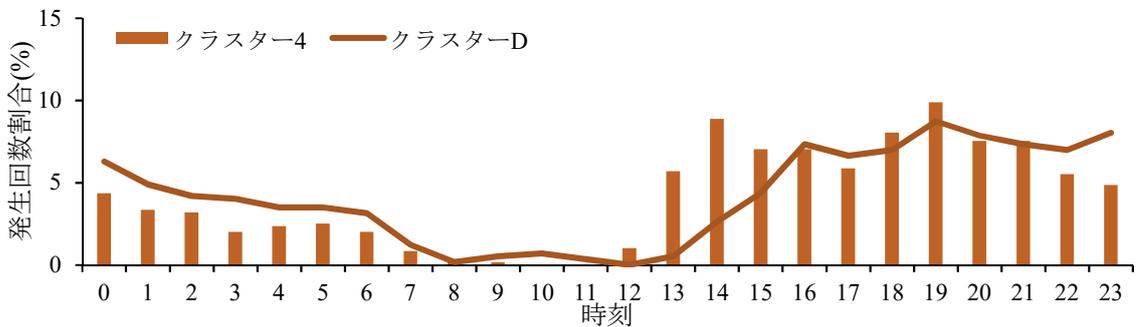


図 4-11 クラスタ-4 とクラスタ-D の比較結果

4.3.2 降雨の検出精度

ここでは、標準版 (MVK) 及び標準版雨量計補正版 (Gauge) の 2 つの製品を対象に、地上降雨データとの比較に基づく検出精度の評価を行った。

1-1 地点から 2-5 地点までの 11 地点の各地上降雨観測地点での GSMaP 両製品 (MVK 及び Gauge) の捕捉率 (POD)・空振り率 (FAR) の

時間分解能別分布を以下の図 4-12 から図 4-22 に示した。

11 地点全てにおいて、時間間隔を長くすることで、捕捉率、見逃し率の指標が改善する傾向を示しており、POD については、時間間隔が 1 時間から 24 時間にかけて MVK が Gauge よりも良い傾向を示した。

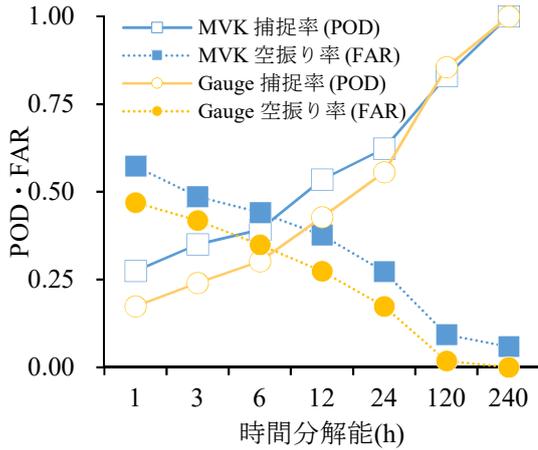


図 4-12 GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(1-1 地点)

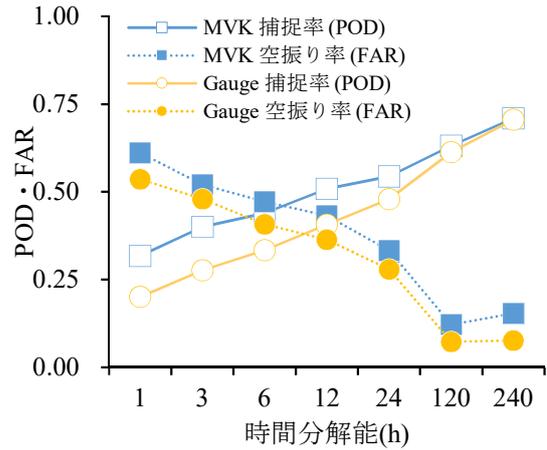


図 4-13 GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(1-2 地点)

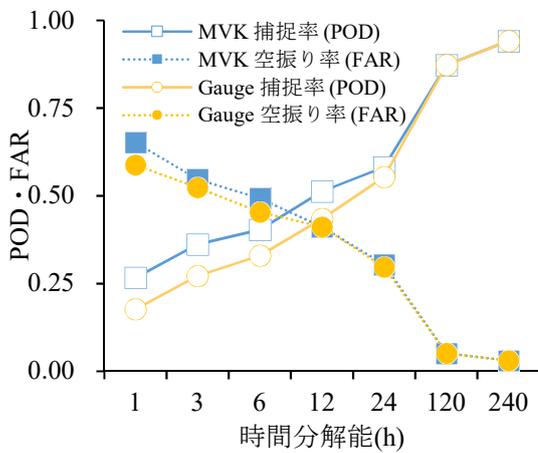


図 4-14 GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(1-3 地点)

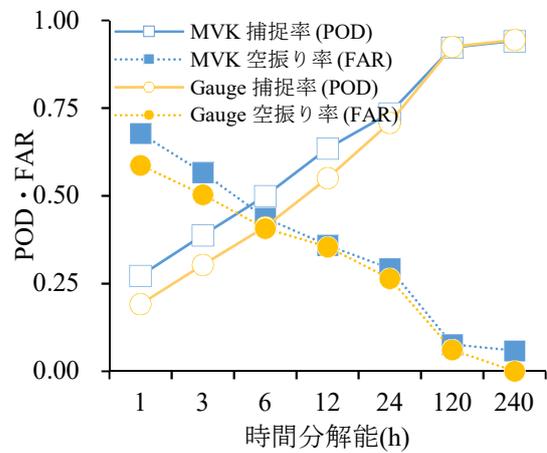


図 4-15 GSMaP 両プロダクトの捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(1-4 地点)

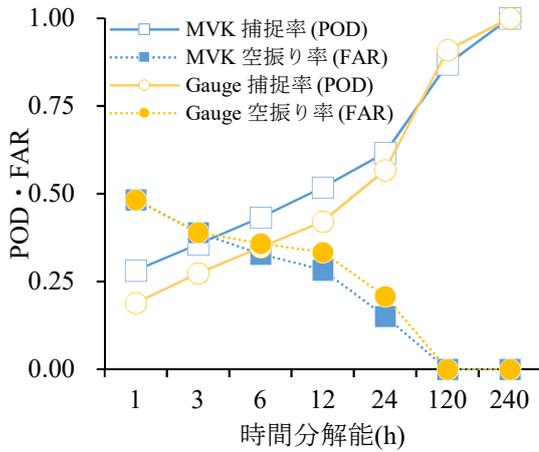


図 4-16 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(1-5 地点)

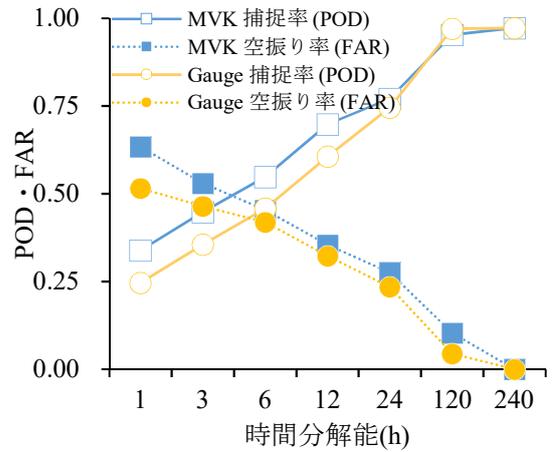


図 4-17 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(1-6 地点)

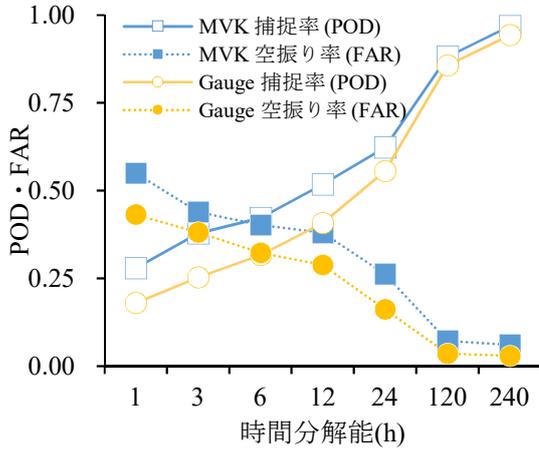


図 4-18 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(2-1 地点)

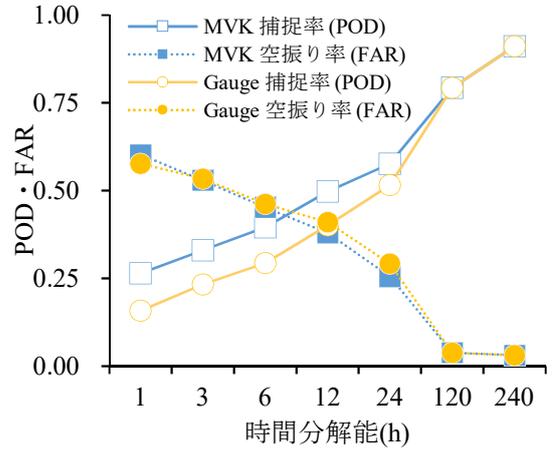


図 4-19 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(2-2 地点)

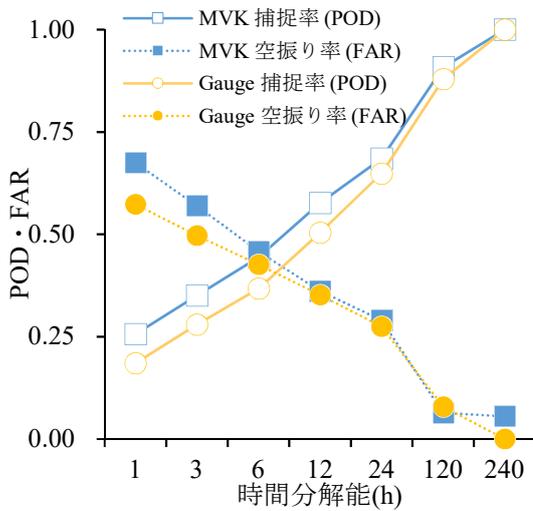


図 4-20 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(2-3 地点)

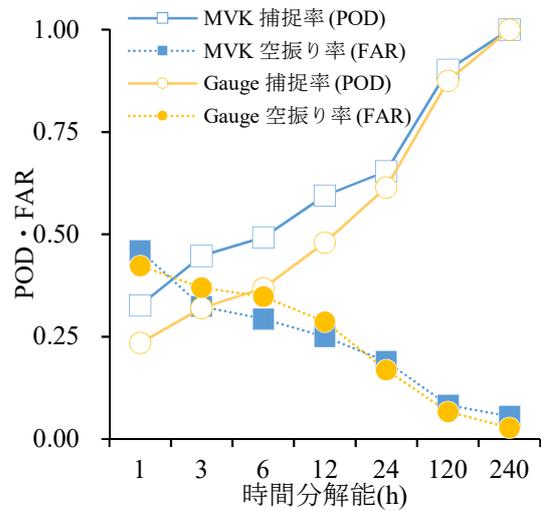


図 4-21 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(2-4 地点)

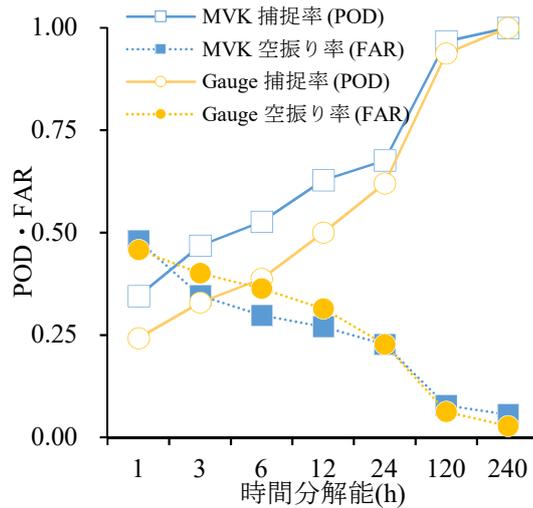


図 4-22 GSMaP 両製品の捕捉率(POD)及び空振り率(FAR)の時間分解能別分布(2-5 地点)

図 4-23 は、各時間分解能における 11 地点の捕捉率 (POD) の平均値を示した。MVK では、時間分解能 1 時間で $POD=0.29$ から 240 時間 (=10 日) で $POD=0.95$ 、Gauge でも時間分解能 1 時間で $POD=0.20$ から 240 時間で $POD=0.95$ まで向上し、両製品についても時間間隔を長くするにつれ捕捉率が改善する傾向を示した。両製品において、120 時間 (=5 日) で $POD=0.85$ 以上となるが、時間分解能が 1 時間から 24 時

間では標準版（MVK）が標準版雨量計補正版（Gauge）より平均で 0.09 良い傾向を示した。

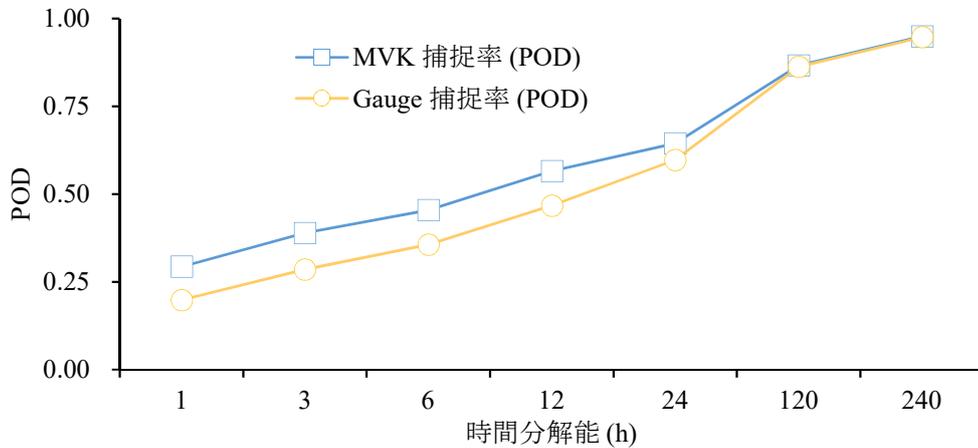


図 4-23 各時間分解能における捕捉率（POD）の変化

図 4-24 は、各時間分解能における空振り率（FAR）の平均値を示した。時間分解能 1 時間では標準版（MVK）の FAR=0.58、標準版雨量計補正版（Gauge）では 0.51 であったが、120 時間（=5 日）以上では FAR=0.05 以下となる。いずれのプロダクトについても時間分解能を大きくするにつれ、空振り率が改善される傾向を示した。またプロダクト間の比較については、全ての時間分解能で標準版雨量計補正版（Gauge）がわずかに良好（FAR の差が 0.03）な傾向が認められた。

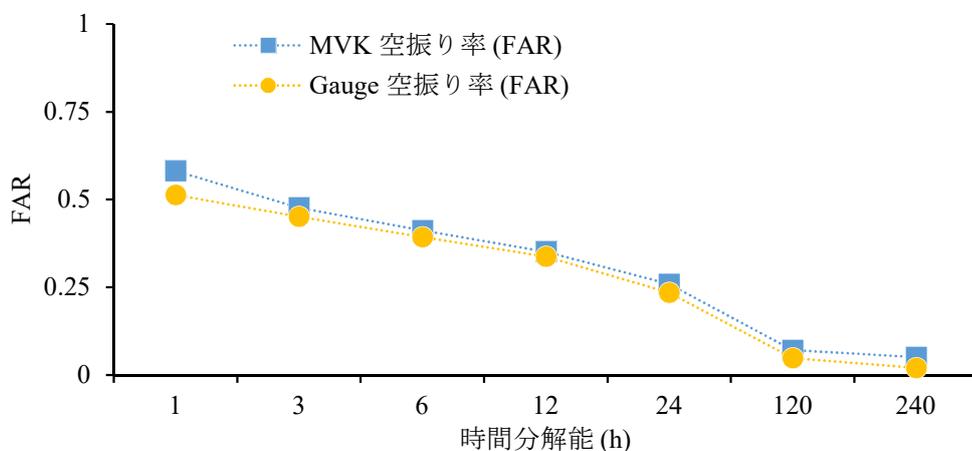


図 4-24 各時間分解能における空振り率（FAR）の変化

4.3.3 降雨量の推定精度

図 4-25 から図 4-35 に 11 地点それぞれの解析期間中の地上降雨及び GSMaP (MVK 及び Gauge) の月別積算雨量を示す。これより、いずれの地点でも 10 月から 12 月の雨季、1 月から 2 月の乾季、そして 3 月から 4 月にかけて現れる雨季を GSMaP のいずれのプロダクトにおいても再現していることわかった。しかし、この結果からは各地点において GSMaP のプロダクトの違いは地点毎に異なり、全体で類似した傾向は確認できなかった。

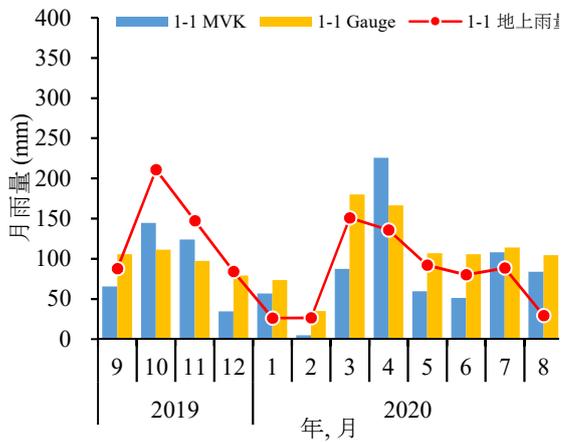


図 4-25 解析期間中の月別雨量 (1-1 地点)

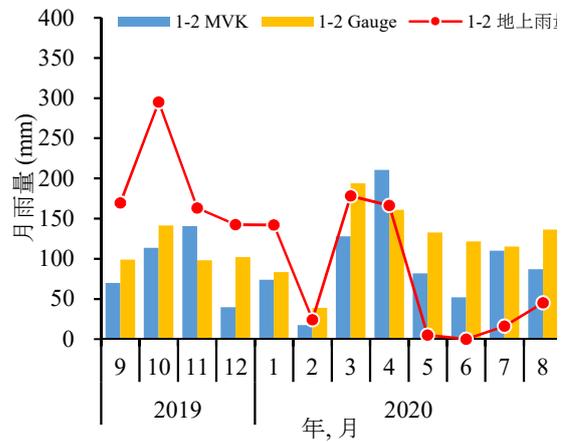


図 4-26 解析期間中の月別雨量 (1-2 地点)

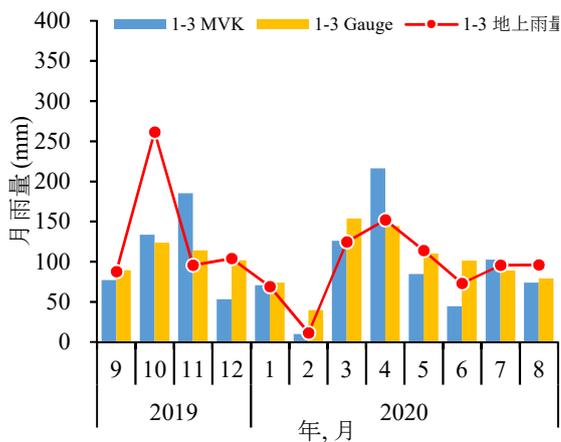


図 4-27 解析期間中の月別雨量 (1-3 地点)

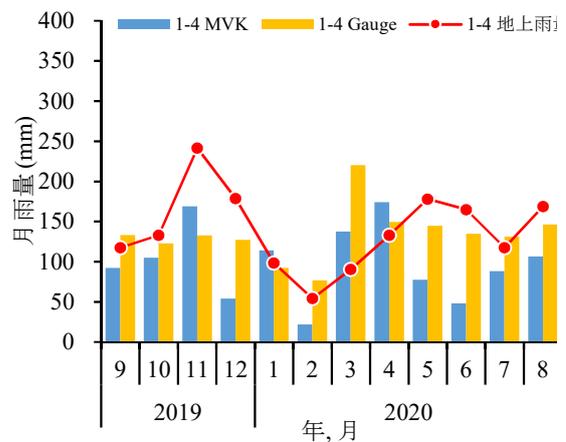
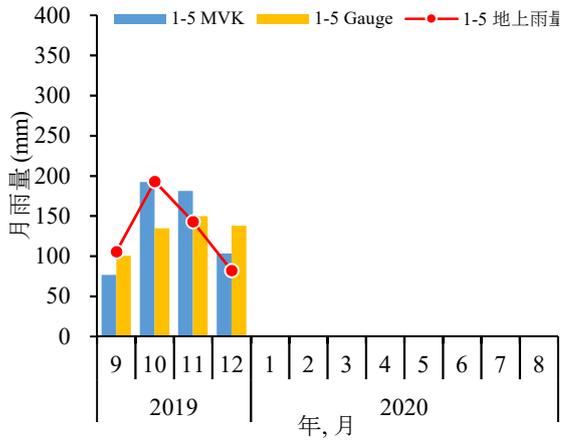


図 4-28 解析期間中の月別雨量 (1-4 地点)



*2020年1月からは欠損のため解析に用いない。

図 4-29 解析期間中の月別雨量 (1-5 地点)

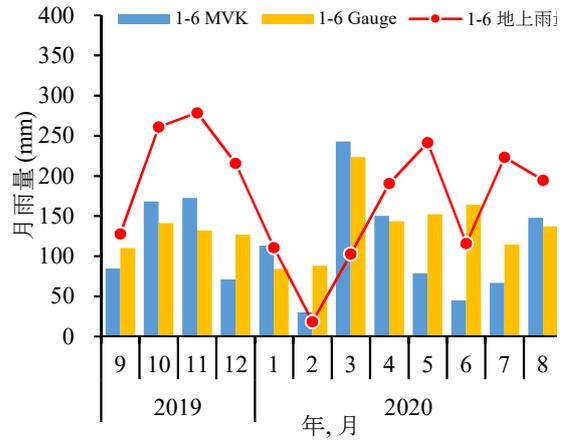


図 4-30 解析期間中の月別雨量 (1-6 地点)

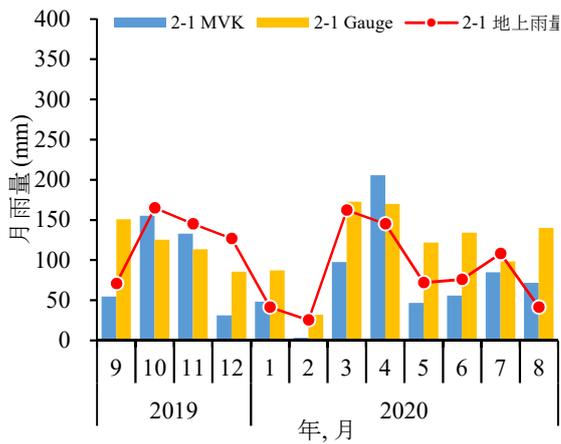


図 4-31 解析期間中の月別雨量 (2-1 地点)

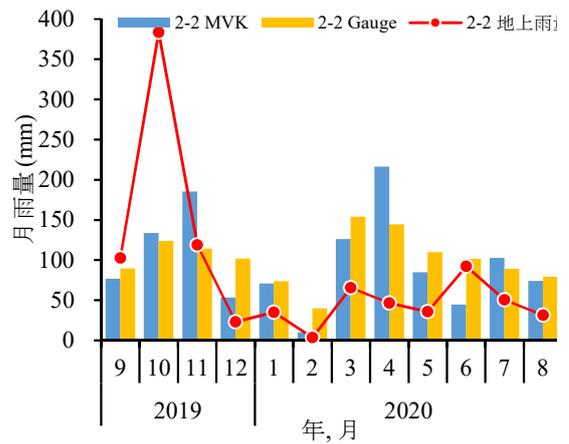


図 4-32 解析期間中の月別雨量 (2-2 地点)

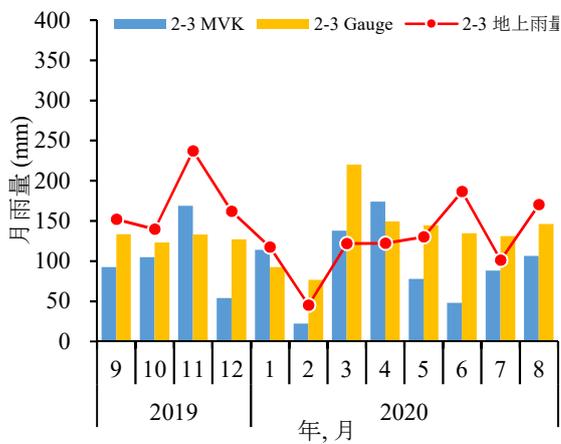


図 4-33 解析期間中の月別雨量 (2-3 地点)

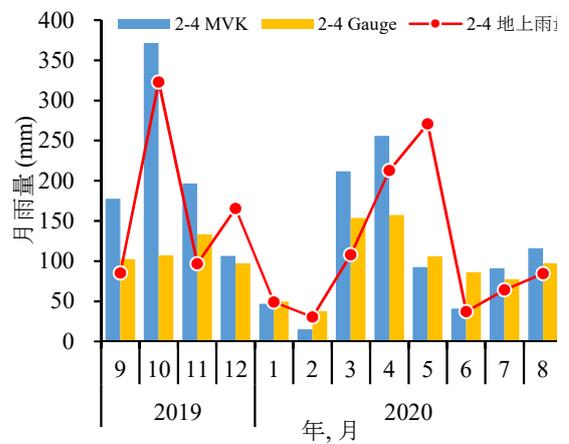


図 4-34 解析期間中の月別雨量 (2-4 地点)

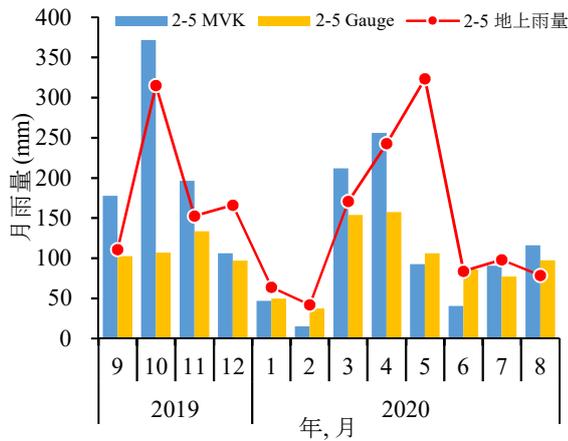


図 4-35 解析期間中の月別雨量（2-5 地点）

図 4-36 から図 4-46 に 11 地点の GSMaP プロダクトの相関係数（R）と傾き（S）について、各時間分解能の変化を示す。各時間分解能の前後で若干の増減があるものの、全体的に時間分解能を長くするにつれ、指標が向上する傾向が確認された。

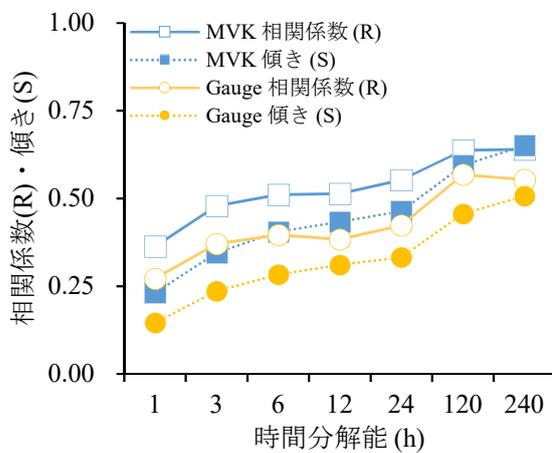


図 4-36 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(1-1 地点)

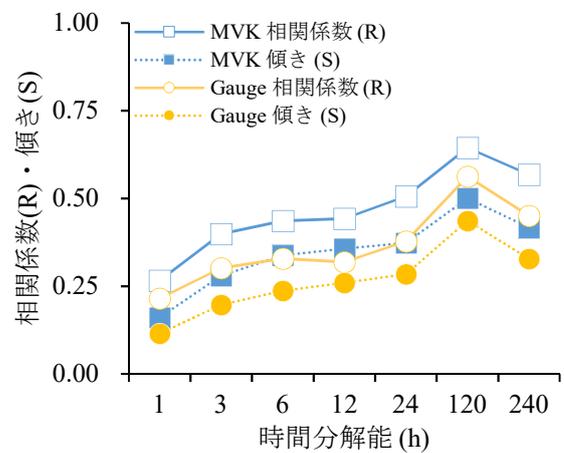


図 4-37 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(1-2 地点)

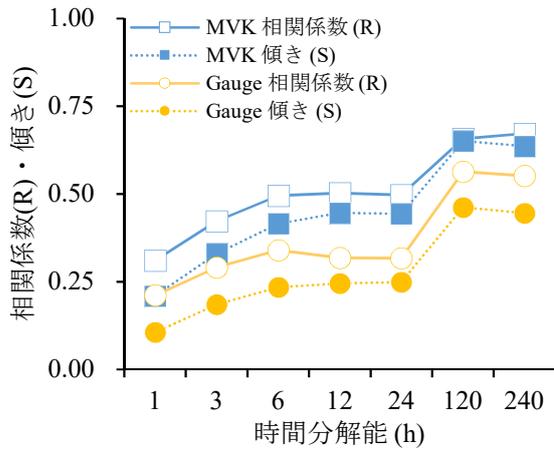


図 4-38 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(1-3 地点)

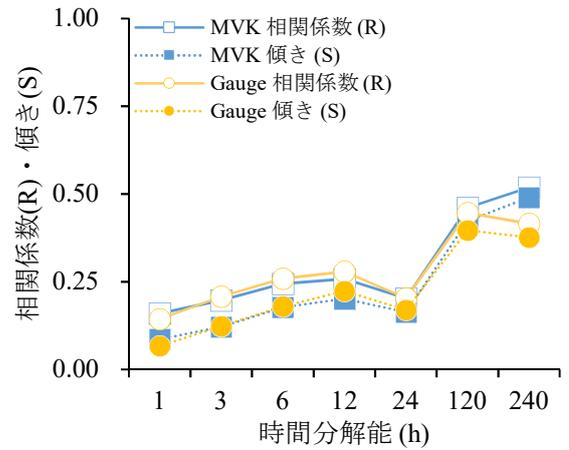


図 4-39 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(1-4 地点)

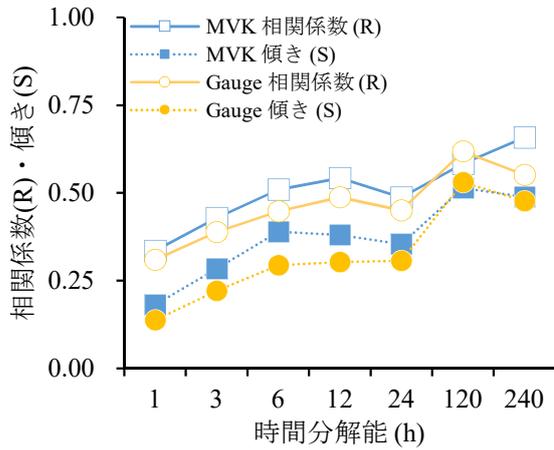


図 4-40 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(1-5 地点)

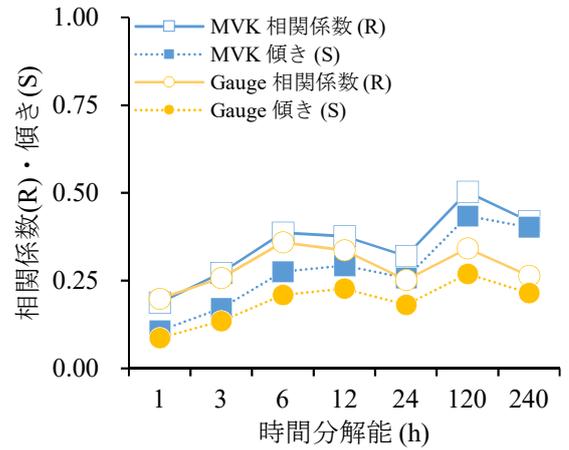


図 4-41 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(1-6 地点)

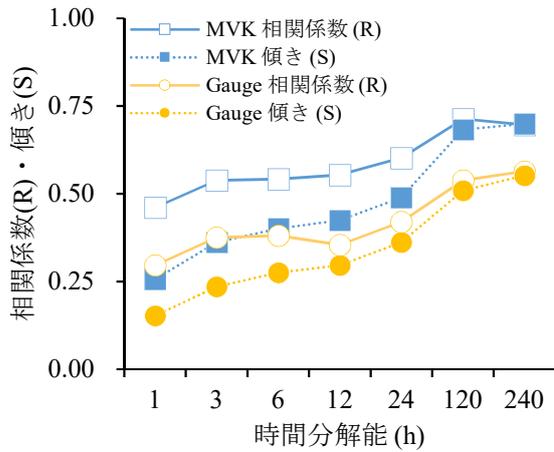


図 4-42 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(2-1 地点)

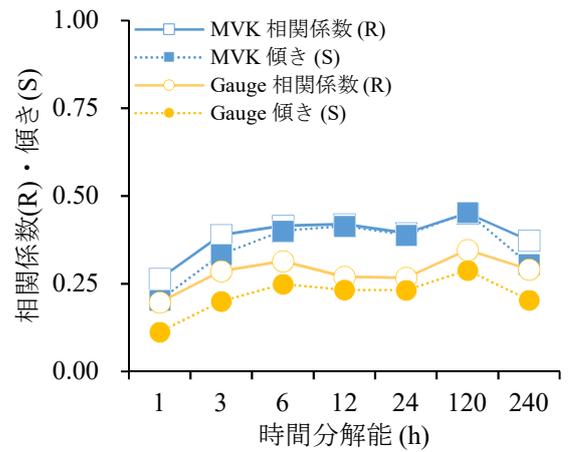


図 4-43 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(2-2 地点)

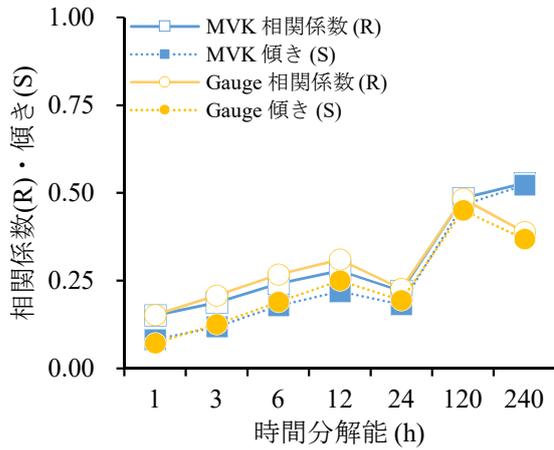


図 4-44 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(2-3 地点)

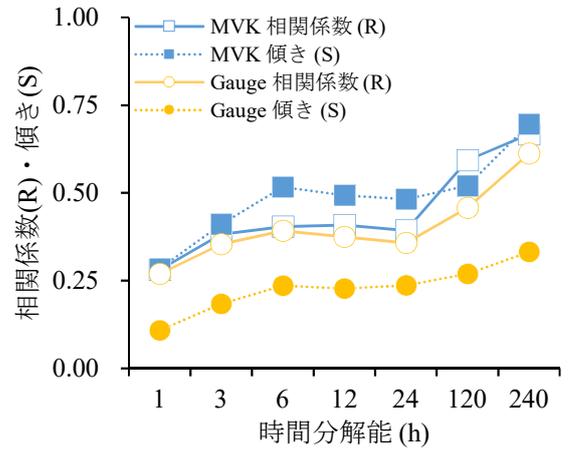


図 4-45 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(2-4 地点)

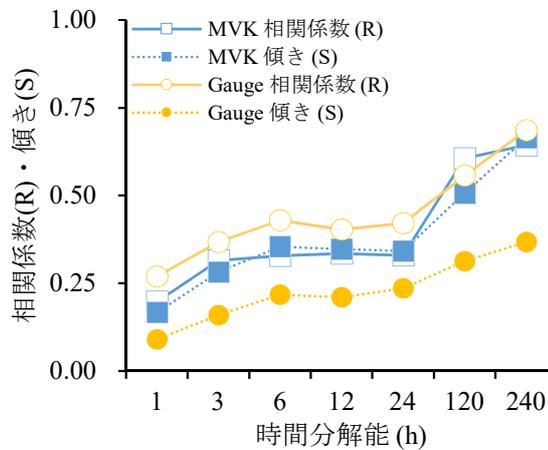


図 4-46 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数(R)と傾き(S)(2-5地点)

11地点で得られた相関係数(R)と傾き(S)について GSMaP プロダクト毎に各時間分解能の平均値を求めた(図 4-47、図 4-48)。

標準版(MVK)及び標準雨量計補正版(Gauge)の両プロダクトについて、傾き(S)はいずれも1.0を下回り、地上降雨を過小評価傾向であることが明らかになった。この傾向は乾季と雨季が存在し熱帯モンスーン気候に分類され、比較的同緯度帯のベトナム中部での検証事例(上米良, 2014)でも報告されている。

標準版(MVK)の傾き(S)は時間分解能1時間で最も悪く(S=0.18)、10日で最も良くなる(S=0.54)。標準雨量計補正版(Gauge)も同様に、時間分解能1時間で最も悪く(S=0.11)、5日で最も良くなり(S=0.40)、両プロダクトで時間間隔を長くするにつれ、傾き(S)は徐々に1に近づく傾向を示した。また全ての時間分解能において、標準雨量計補正版(Gauge)よりも標準版(MVK)がより良い傾向を示した。

相関係数(R)についても同様な傾向であり、標準版(MVK)は時間分解能1時間で最も悪く(R=0.27)、5日及び10日で最も良くなる(R=0.58)。標準雨量計補正版(Gauge)も同様に、時間分解能1時間で最も悪く

($R=0.23$)、5 日で最も良くなった ($R=0.50$)。標準版 (MVK) 及び標準雨量計補正版 (Gauge) の両プロダクトで時間間隔を長くするにつれ相関係数 (R) が 1.0 に近づく傾向を確認した。

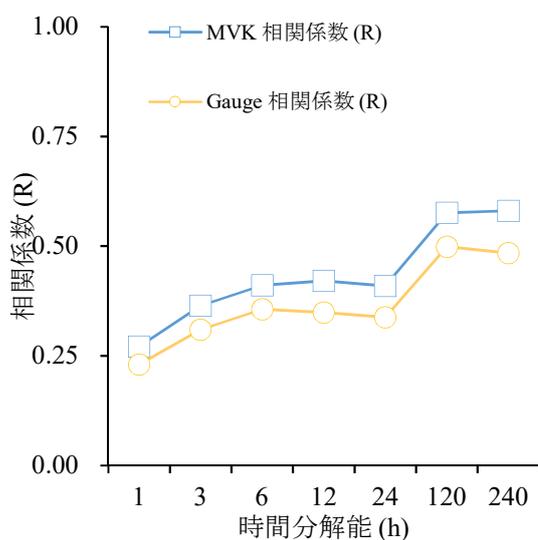


図 4-47 各時間分解能における GSMaP プロダクトの相関係数 (R)

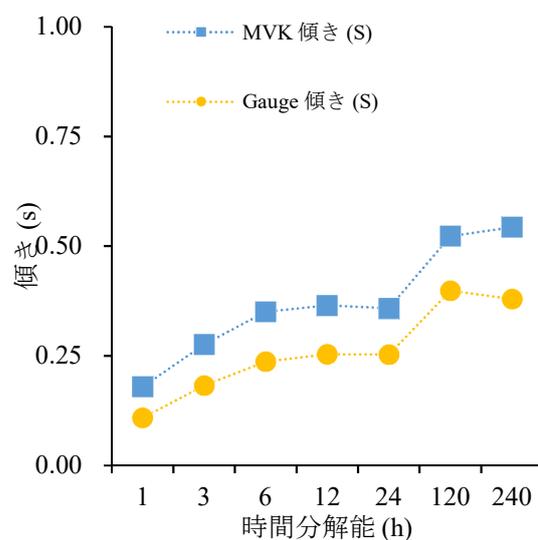


図 4-48 各時間分解能における GSMaP プロダクトの傾き (S)

各 GSMaP プロダクトの精度比較を行うため RMSE を求め、さらに 11 地点の各時間分解能での MVK と Gauge の差と平均を求めた (表 4-4)。

時間分解能 1 時間から 24 時間まではわずかに Gauge の RMSE が小さいが、120 時間 (=5 日) 以上では MVK の RMSE が小さい結果を示した。

表 4-4 各時間分解能における RMSE

単位 : mm

観測地点	プロダクト	時間分解能 (h)						
		1	3	6	12	24	120	240
1-1	MVK	1.12	2.18	3.18	4.60	6.65	18.64	25.78
	Gauge	1.15	2.31	3.42	5.09	7.37	19.34	27.36
1-2	MVK	1.21	2.34	3.53	5.21	7.71	20.68	34.85
	Gauge	1.21	2.46	3.75	5.75	8.59	22.53	38.26
1-3	MVK	1.20	2.28	3.40	4.93	7.10	16.77	24.36
	Gauge	1.20	2.38	3.65	5.48	7.86	17.56	26.78
1-4	MVK	1.45	2.95	4.50	6.42	9.40	22.88	31.85
	Gauge	1.43	2.90	4.39	6.35	9.41	21.86	31.20
1-5	MVK	1.63	3.09	4.57	6.71	9.76	17.79	22.86
	Gauge	1.62	3.11	4.68	6.93	9.94	16.91	26.72
1-6	MVK	1.67	3.32	4.71	6.85	9.99	25.14	40.88
	Gauge	1.60	3.24	4.61	6.75	9.99	26.42	39.81
2-1	MVK	1.15	2.26	3.33	4.75	6.44	15.67	23.42
	Gauge	1.26	2.54	3.80	5.81	7.88	19.77	27.87
2-2	MVK	1.13	2.20	3.36	5.02	7.37	21.20	36.70
	Gauge	1.09	2.22	3.36	5.30	7.66	21.40	37.20
2-3	MVK	1.44	2.91	4.45	6.31	9.17	21.92	31.10
	Gauge	1.41	2.85	4.31	6.19	9.15	20.56	31.12
2-4	MVK	1.76	3.33	5.52	8.05	11.38	23.55	36.82
	Gauge	1.42	2.74	4.12	6.35	9.04	25.13	35.80
2-5	MVK	2.05	3.84	6.24	9.07	12.78	24.23	38.04
	Gauge	1.69	3.23	4.71	7.18	10.07	25.60	37.33
MVK - Gauge の 11 地点の平均値		0.07	0.07	0.18	0.07	0.07	-0.78	-1.16

得られた RMSE を各時間分解能で比較するために、RMSE を各時間分解能で除し、時間あたりの RMSE を求めた。各時間分解能における RMSE の変化を図 4-49 に示した。

時間間隔が長くなるに連れ、RMSE の値も徐々に低下し、時間分解能 240 時間 (=10 日) で収束していることが確認された。

この結果より、本研究対象地では GSMaP の利用の際に 10 日間での積算雨量としての活用が望ましいと考察した。

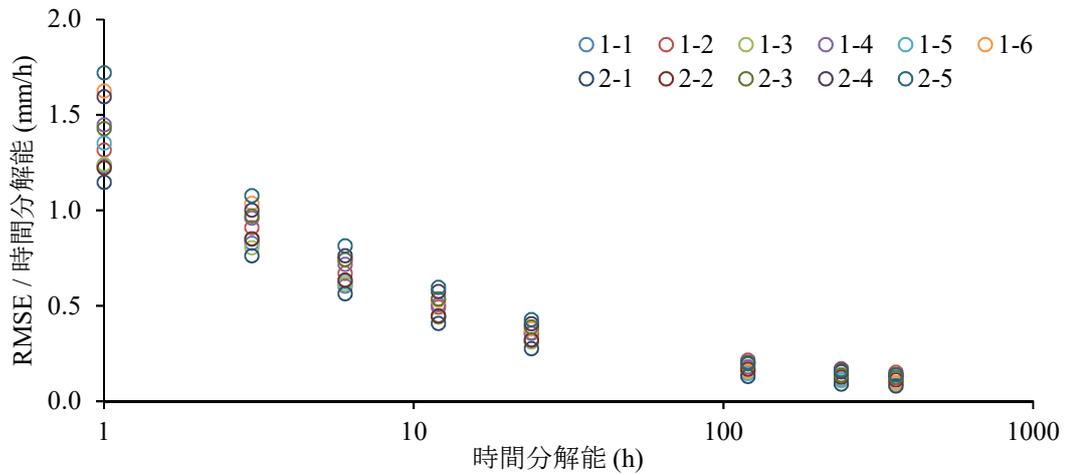
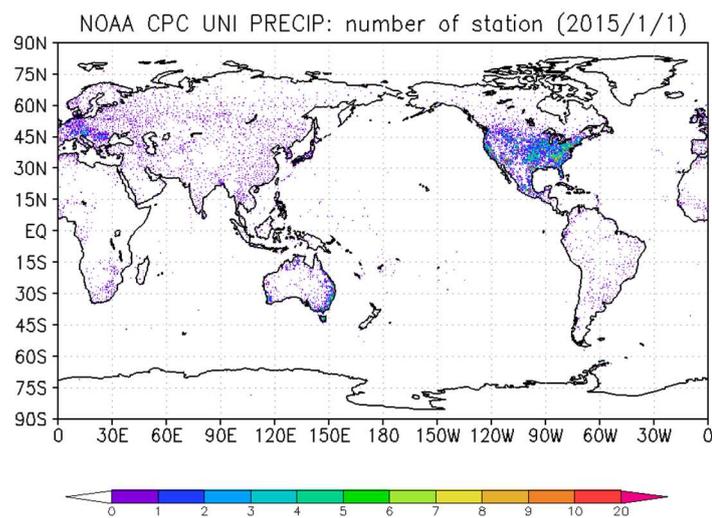


図 4-49 各観測点における時間分解能の RMSE の変化

第 2 章の日本国内の検証において、プロダクトの比較において Gauge が MVK よりも精度が高いという結論であったが、これは図 4-50 に示すとおり、Gauge プロダクトの補正に用いられる地上降雨観測網の密度が日本国内では充実している反面、ウガンダ国東部については、その密度が非常に低く、効果的な補正ができないためと考えられる。



(出典：NOAA)

図 4-50 GSMaP の雨量計補正に用いられる地上降雨観測網

第4節 まとめ

本章では、第3章の結果との比較において、GSMaPは地上降雨で確認された降雨発生時刻の特徴を捉えることが可能であることがわかった。

GSMaPの精度検証の結果、GSMaPは地上降雨量を過小評価する傾向にあるが、時間間隔を長くしていくことで、評価指標が改善される傾向を示し、RMSEについて時間分解能10日で収束することが明らかとなった。またプロダクトの比較において、雨量計補正版の補正に用いられる地上観測網の密度が低いことが起因し、対象地域では標準版(MVK)がより良い結果を示した。

以上の結果より、GSMaPの利用時には洪水解析等の時間分解能の細かい利用用途よりも、灌漑計画等の時間分解能の大きい用途(240h=10日間)での利用が実用的であると結論づけた。

第5章 GSMaP を用いた灌漑計画への利用可能性の検討

第1節 本章の目的

灌漑計画を立案するためには、対象地域の降雨量や水源となる河川などの流量が必要となる。しかし、途上国の多くではこれらの利用可能な情報は限られており、精度の高い検討を困難にしたり事業化に支障をきたすなどの負の影響を与えている(小林 2015)。

研究対象地域においても 2014 年から 2017 年にかけて JICA が「ウガンダ国ウガンダ中央部・東部地域灌漑地区開発計画」(以下、F/S) が実施され(JICA 2017)、この調査では中央部及び東部に位置する 10 ヶ所の灌漑地区の調査が行われ、その中から事業効果などを指標として優先開発地区として 3 地区が選定された。

そこで本章では、この 3 地区を対象に F/S 時と同様の方法で事業規模(灌漑可能面積)を GSMaP の降雨データを用いて検討し、灌漑開発計画策定の GSMaP 利用の可能性を明らかにすることも目的とした。

第2節 検討方法

F/S 時に優先開発地区としてウガンダ国東部の Atari 地区、Sironko 地区、Namatala 地区の計 3 地区が選定された。その際の灌漑可能面積及び計画対象作物を表 5-1 に示す。

表 5-1 F/S 時の灌漑可能面積及び計画対象作物

灌漑地区名	灌漑可能面積 (ha)	計画対象作物
Atari	570	水稲・畑作 (メイズ)
Sironko	1,000	水稲・畑作 (メイズ)
Namatala	1,570	水稲

また、3 地区の位置関係については図 5-1 に示す。

の灌漑以外の水需要分（河川維持流量、生活用水、家畜用水）を加え、半月毎の総需要量を求めた。この半月毎の総需要量が当該期間の平均流量を超えない面積を算出し、灌漑可能面積とした。なお、水収支計算のための諸元を表 5-2 にまとめた。

表 5-2 水収支計算のため設計諸元

項目	採用値	出典
1.作物係数	水稻 1.05, 1.10, 0.95	FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56
2.日作物蒸発散量	Tororo 気象観測所 (1969-1978年の平均値)	The development study on water resources development and management for Lake Kyoga basin in the Republic of Uganda final report
3.浸透量	1.0 mm/日	
4.代かき用水量	代かき期間：15日 代かき減水深：150 mm	
5.有効雨量	5 mm 未満：0 mm 5 mm 以上 80 mm 未満： 降雨量の 80 % 80 mm 以上：64 mm	土地改良事業計画設計基準 計画「農業用水（水田）」（平成 22 年 7 月制定）付録 技術書
6.灌漑効率	60 %	National Water Resources Assessment, 2013

5.2.2 本研究の水収支計算方法

第 4 章の結論として時間分解能 10 日において GSMaP データが灌漑計画に利用可能と結論付けたため、本章では 10 日（旬）毎の水収支計算を行った。また、F/S 時においては水稻と畑作物（メイズ）の 2 種類の作物を対象とした検討を行ったが、本研究では検討を簡素化するために水稻作のみを対象とした。なお、それ以外の検討諸元については、F/S 時と同様とし、2004 年の灌漑可能面積を GSMaP データから算出した。

5.2.3 GSMaP を用いた灌漑可能面積の検討方法

F/S 時の灌漑可能面積は、Atari 地区については同地区から 90 km 西に位置する Soroti 気象観測所で観測された日雨量データを用い、Sironko 地区及び Namatala 地区については両地区から南に 40 km から 70 km 離れ

た Tororo 気象観測所で観測された日雨量データを用いて計算を行った。
 なお、各対象灌漑地区と利用したデータの気象観測所の位置関係を図
 5-2 に示す。

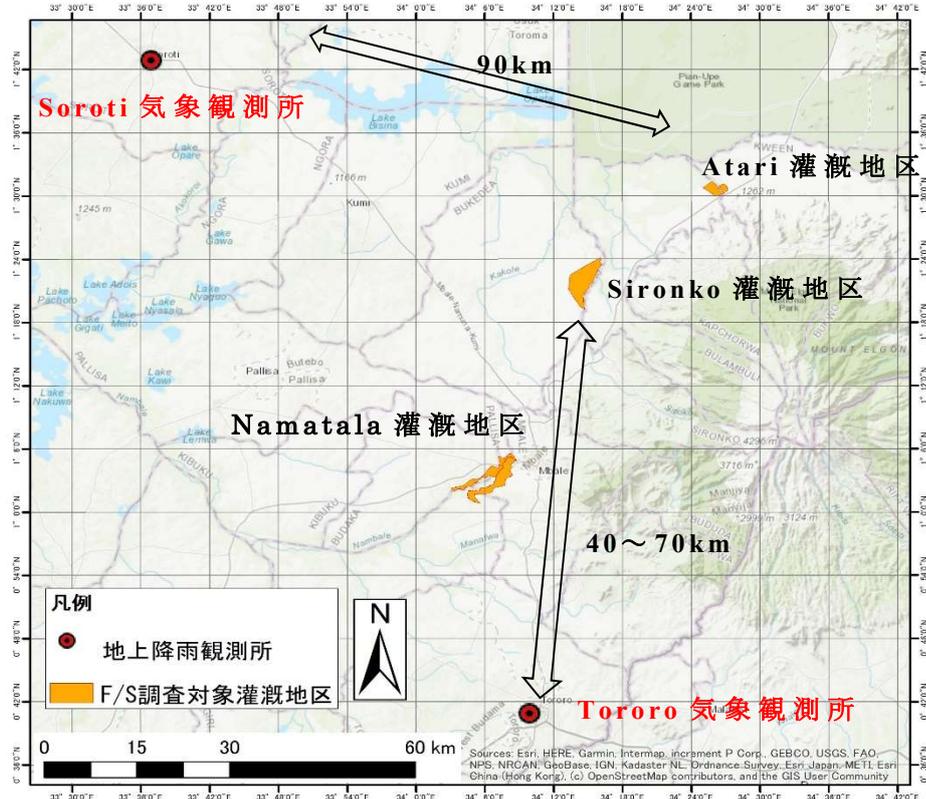


図 5-2 F/S 対象地区と地上降雨観測所の位置関係

GSMaP の利用可能性を検討するために以下に示す 3 種類の降雨量を用
 いて灌漑可能面積を算出し検討した。

①地上降雨（観測所）は、Soroti と Tororo 気象観測所でそれぞれ観測
 された地上降雨データを利用した場合（F/S 時と同条件）、また、②GSMaP
 （観測所）は、Soroti と Tororo 気象観測所が位置するグリッドの GSMaP
 データを利用する場合、そして③GSMaP（灌漑地区）として、Atari、Sironko、
 Namatala 地区が位置するグリッドの GSMaP データを用いる場合である。

この地上降雨の観測所、GSMaP 観測所、さらに GSMaP 灌漑地区の 3 つの条件で算定した灌漑可能面積の比較を行い、GSMaP を用いた灌漑可能面積の利用の可能性の検討を行った。

第3節 結果

5.3.1 地上降雨（観測所）及び GSMaP（観測所）を用いた灌漑可能面積の比較

F/S 時と同条件である地上降雨（観測所）を用いた灌漑可能面積及び GSMaP（観測所）を用いた灌漑可能面積の結果を図 5-3 に示した。

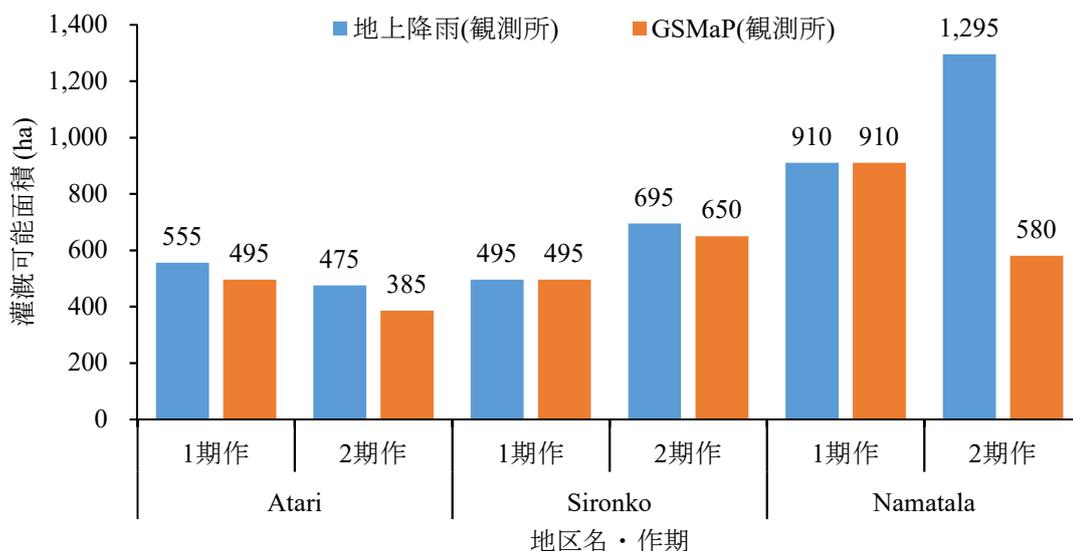


図 5-3 地上降雨（観測所）及び GSMaP（観測所）を用いた Atari 地区、Sironko 地区、Namatala 地区の灌漑可能面積

3 地区について地上降雨（観測所）を用いた灌漑可能面積を基準として比較すると、Atari 地区については両作期で灌漑可能面積が平均 15% 減少(75 ha)であった。Sironko 地区については、1 期作目の灌漑可能面積は同規模であったが 2 期作目は 6%の減少(45 ha) となり同程度の面積となった。Namatala 地区については、1 期作目は同規模であるものの 2 期

作目については 55%の減少(715 ha) となった。3 地区の比較では、Atari 地区及び Sironko 地区については灌漑可能面積の差が 10%程度であったものの、Namatala 地区について、2 期作目の灌漑可能面積に半分近い大きな差が出る結果となった。

5.3.2 GSMaP（観測所）及び GSMaP（灌漑地区）を用いた灌漑可能面積の比較

GSMaP（観測所）を用いた灌漑可能面積の結果と GSMaP（灌漑地区）を用いた灌漑可能面積の結果を図 5-4 に示した。

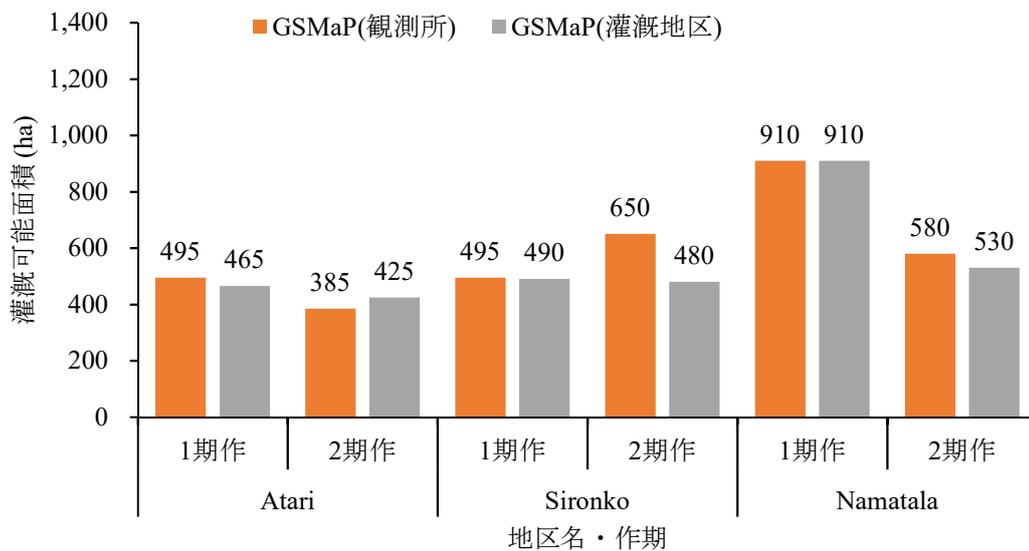


図 5-4 GSMaP（観測所）及び GSMaP（灌漑地区）を用いた Atari 地区、Sironko 地区、Namatala 地区の灌漑可能面積

GSMaP（観測所）を用いた灌漑可能面積を基準とした場合、Atari 地区については、1 期作目に 30 ha 減少するが、2 期作目は 40 ha 増加した。Sironko 地区については、1 期作目は 5 ha と僅かに差が出る程度であったが、2 期作目は 170 ha 減少した。Namatala 地区については、Sironko 地区と同様 1 期作目は同じ結果となったが、2 期作目については 50 ha と

僅かに減少した。

第4節 考察

5.4.1 地上降雨（観測所）及び GSMaP（観測所）を用いた灌漑可能面積の比較

地上降雨（観測所）と GSMaP（観測所）を用いた灌漑可能面積の比較において差が大きくなった Namatala 地区 2 期作目について、原因を分析するため Tororo 観測所地上降雨及び同地点の GSMaP の旬毎の雨量と有効雨量の比較を行った（図 5-5）。

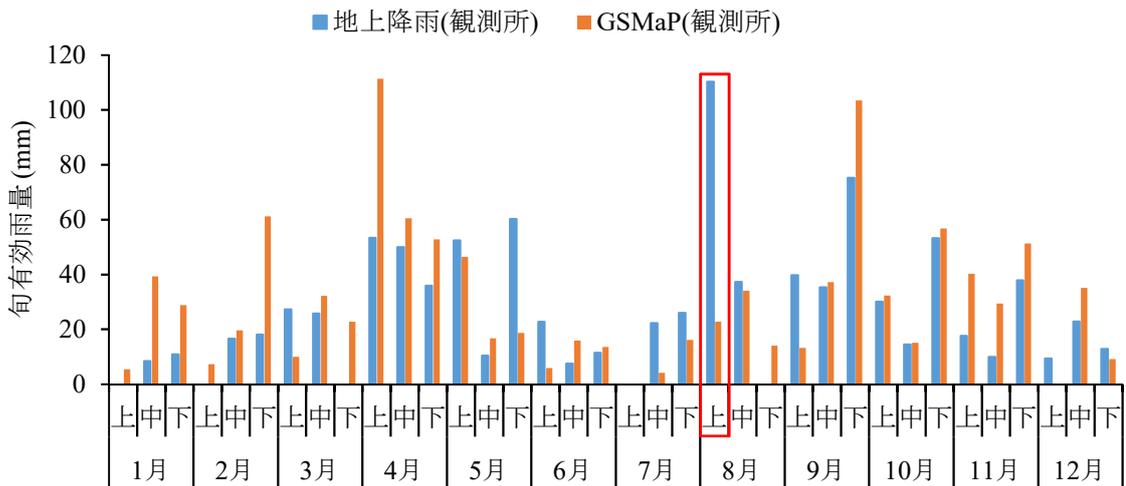


図 5-5 Tororo 観測所地上降雨及び同地点の GSMaP の旬雨量と有効雨量の比較

2 期作目の灌漑可能面積は 8 月上旬が最も小さくなり、この時期の降雨量が制約要因になっていた。この期間に Tororo 観測所で観測された大雨が灌漑可能面積に大きな差が生じた要因と示唆された。

そこで、この事を更に詳細に検討するために、この期間で観測された Tororo 気象観測所の日雨量、同地点の GSMaP の日降雨量及び GSMaP の灌漑地区の日雨量を図 5-6 に示す。

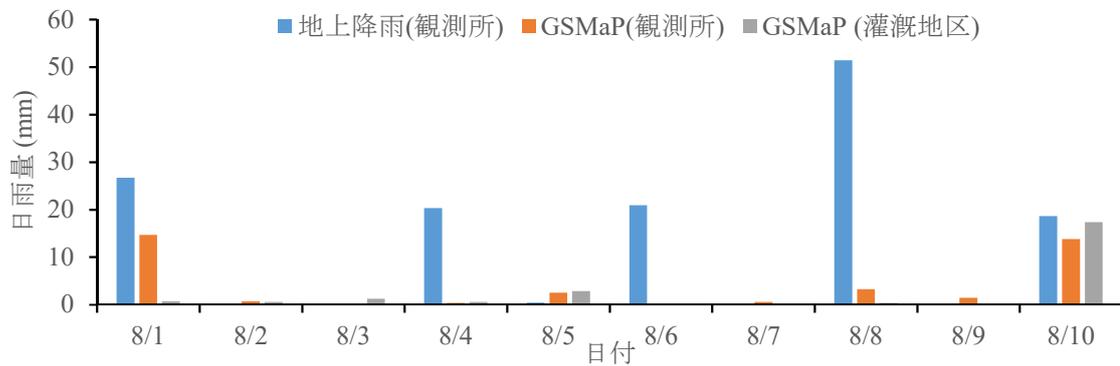


図 5-6 2004 年 8 月上旬(8/1～8/10)の Tororo 観測所 日雨量と GSMaP の日雨量との比較

Tororo 気象観測所では 10 日間の中に 20 mm 以上の降雨が 4 日間発生しており、8 月 8 日には 51.4 mm の降雨を観測していた。この期間に発生した地上降雨量と GSMaP の降雨量の差が Namatala 地区の灌漑可能面積の算出結果に影響を与えていることが明らかになった。

これは GSMaP では検出しない短時間に降る局所的な降雨が地上観測所付近で発生した可能性が高いと考えられる。この降雨は灌漑計画上、地区全体に発生することが期待できない降雨であるため、過大設計側の評価のリスクになったと考えた。他方で、GSMaP の降雨量を利用することによって対象範囲全体で発生する降雨に基づく灌漑可能面積の検討が可能になり、より実態に合った灌漑可能面積の評価が可能になると言える。

5.4.2 GSMaP（観測所）及び GSMaP（灌漑地区）を用いた灌漑可能面積の比較

今回検討をおこなった 3 地区について、既存の気象観測所地点と対象灌漑地区は直線距離で約 40 km から 90 km 離れていた。一般に 2 地点が 10 km 以上離れている場合に降雨量に違いが現れると言われているため、

今回灌漑可能面積に違いが現れているのは2地点で発生する降雨の差であったと考えられる。

すなわち、GSMaPを用いることで実際に対象とする地点で発生する降雨により近い条件で灌漑可能面積を評価することが可能である。

5.4.3 GSMaPの降雨データを灌漑計画に用いる上での留意点

気象観測所で観測された地上降雨を用いた場合と気象観測所の座標が位置するグリッドのGSMaPの降雨量を用いて算出した灌漑可能面積を比較した際に、Namatala地区の2期作目において灌漑面積が約50%小さくなった。これは灌漑面積を規定する期間にGSMaPでは検出できない短時間に降る局所的な降雨が発生したことが原因と考えられる。その結果、地上降雨量とGSMaPの降雨量の差が大きくなったことで灌漑可能面積が減少したことがわかった。

灌漑計画の視点では、地上観測所で観測された局所的な降雨は対象灌漑地区全体で利用できない降雨である可能性が高いことがわかった。他方でGSMaPの降雨量についてはより面的に発生している降雨を捉えているため、GSMaPを用いて評価した灌漑可能面積については灌漑施設の規模としてはより安全側の設計であることも示唆された。

気象観測所地点でのGSMaP及び灌漑地区が位置する地点のGSMaPの降雨量を用いて灌漑可能面積の比較を行った結果から、灌漑可能面積に差が現れることがわかった。この差は対象3地区の気象観測所と対象灌漑地区は直線距離で約40 kmから90 km離れていることが起因し、両地点で発生する降雨量の違いによると考えられる。

開発途上国の多くで長期間観測された気象観測所は数が限られ、対象灌漑地区周辺に存在しないことが往々にして起こり得るが、当然、観測所から離れば離れるほど、その地点の地上降雨量との差が大きくなる

可能性があり、この情報に依拠して計画を行うことは妥当性の面で疑問が生じる。

しかし、GSMaP を用いることで、対象地域近傍で発生する降雨量データを利用することが可能となり、より妥当性の高い灌漑面積の検討が可能になると考える。また GSMaP の降雨データは、灌漑可能面積の算出以外にも、既存気象観測地点と灌漑地区の降雨量やそのパターンを比較することが可能であり、離れた地点の実測降雨量データを利用する上で妥当性の検討材料の一つとして利用可能であると示唆される。

第5節 まとめ

本章では水収支計算に GSMaP の降雨量データを用いて灌漑可能面積の検討可能性についての検討を行った。

そのために、まず F/S 時と同じ条件である気象観測所で観測された地上降雨を用いた場合と気象観測所の座標が位置するグリッドの GSMaP の降雨量を用いて算出した灌漑可能面積を比較したところ 3 地区において灌漑可能面積は同等規模となったが、GSMaP では検出できない短時間に降る局所的な降雨が発生したと考えられる Namatala 地区の 2 期作目において灌漑面積が約 50% 小さくなった。

また、気象観測所地点での GSMaP 及び灌漑地区が位置する地点の GSMaP の降雨量を用いて灌漑可能面積の比較を行った結果、両地点の距離が 10 km 以上離れているために発生する降雨量が異なるため灌漑可能面積に差が現れることがわかった。

これらの結果を踏まえ、GSMaP の降雨データを灌漑計画の策定に利用する際の注意点をまとめるとともに、本研究対象地のウガンダ国東部の検討結果から、旬（10 日）毎の有効雨量の評価であれば F/S レベルでの灌漑可能面積の検討においては十分利用が可能であると結論づけた。

第6章 総括

第1節 研究成果の概要

本研究の目的は、研究対象地域であるウガンダ共和国東部を対象に、地上降雨の実測データに基づきその地域の降雨特性を明らかにし、GSMaPの精度検証を行い、灌漑計画策定への利用可能性を検討することとした。

第1章では、本研究の背景として、研究対象国が位置するサブサハラ・アフリカ地域の課題とし、人口増加や経済発展を背景とした食糧増産のニーズの高まりや、多くの農家が天水農業に依存した営農体型を継続している現状と、これらの課題解決のための灌漑開発の必要性を述べた。他方でそのために必要な情報である気象データが当該地域の国々で不足する現状について述べた。近年開始された人工衛星に搭載された降雨レーダーによる観測とマイクロ波放射計の観測データを統合することで全球の雨雲の状態を捉えることが可能になり、さらにその情報を解析・統合されたプロダクトが全球降水マップ(GSMaP)として、無償で公開されている。これらは日本国内を始め海外においても利用されつつあるものの、サブサハラ・アフリカ地域を対象として、地点雨量との比較による精度検証が十分に行われていない事を示し、本研究の意義とオリジナリティを述べた。

第2章では、GSMaPの基本的な観測特性・利用可能性について検証するため、AMeDASをグラントゥルースとしてGSMaP(MVK, Gauge)との比較を行った。その結果、時間分解能を広げることで捕捉率が向上し、これらの関係の相関もより強くなることを明らかにした。またMVKとGaugeを比較したところ、地上降雨観測網の結果を反映させた補正の効果によりGaugeの方が雨量を適切に評価しFARについても改善した。さらにGaugeプロダクトは、標高が高くなるにつれてGSMaPの精度が悪

化する傾向も確認した。この原因について、AMeDASは地表面に到達した雨粒を観測していること、GSMaPはセンサの観測領域に存在する雨粒が観測対象であるという、この2つの違いが精度低下の要因になっていると考察した。

第3章では、地上降雨の特性として、実測の降雨量データの分析から降雨の発生時刻について特徴があり、クラスター分析によってその観測点の降雨特性をエルゴン山との位置関係から4分類にできることを明らかにした。また、降雨の発生回数と時刻については、一日のなかの降雨発生回数分布に特徴があることも明らかにした。また、近接する雨量計のペアを比較した結果、強烈な降雨は1時間継続イベントよりも、より短い降雨時間に集中して発生する特徴が明らかになった。一方、4km圏内の同一ペア内では同日同時刻に降雨が発生する頻度は少なく、観測場所が近接していた場合でも降雨に時間的ずれが生じる傾向があることも確認した。これらのことより、ウガンダ国東部では、短時間に強烈な降雨が発生し、その際の雨域はGSMaPの分解能である10kmグリッドよりも小さい場合が多い可能性が示唆された。

第4章では、前章の結果との比較において、GSMaPは地上降雨で確認された降雨発生時刻の特徴を捉えていることが明らかになった。また、精度検証の結果、時間間隔を大きくしていくことで、RMSEは改善され、時間間隔10日で収束することを明らかにした。そのためGSMaPの利用は洪水解析等の時間間隔の細かい利用用途よりも、灌漑計画等の時間間隔の大きい用途（10日間）での利用が実用的であると結論づけた。

第5章では、F/S調査時と同条件である気象観測所で観測された地上降雨を用いた場合と気象観測所の座標が位置するグリッドのGSMaPの降雨量を用いて算出した灌漑可能面積を比較した。その結果、3地区において灌漑可能面積は同等規模となったが、GSMaPでは検出できない短時間に降る局所的な降雨が発生したと考えられるNamatala地区の2期作目において灌漑面積が約50%小さくなった。また、気象観測所地点での

GSMaP 及び灌漑地区が位置するグリッドの GSMaP の降雨量を用いて灌漑可能面積の比較を行った結果、両地点の距離が 10km 以上離れていることが要因となり降雨量が異なるため、灌漑可能面積に差が現れることがわかった。これらの結果を踏まえ、GSMaP の降雨データを灌漑計画の策定に利用する際の注意点をまとめるとともに、本研究対象地のウガンダ国東部での検討結果から、旬（10 日）毎の有効雨量の評価であれば F/S 調査レベルでの灌漑可能面積の検討においては十分利用が可能であると考察した。

以上により、ウガンダ東部での地上降雨と GSMaP の検討結果から、旬（10 日）毎の検討において F/S 調査レベルでの灌漑可能面積の検討において GSMaP は地上降雨データの代替として十分利用が可能であると結論付けた。

第2節 今後の課題

本研究は、地上降雨データとの比較による GSMaP の精度検証を行ったが、一定期間の地上降雨量の観測結果を用いることで、より GSMaP の降雨推定精度を高めるための補正方法を開発できた場合、今後 GSMaP の利用用途が更に広がることが期待される。

また、今回の結果はウガンダ国東部においての結果に基づくものであり、サブサハラ・アフリカ地域には様々な気象特性を持った地域があるため、周辺他地域や更に降雨の少ない地域などでの検証を積み重ねることで、適応可能地域のさらなる拡大の可能性があると考える。

GSMaP の時間分解能毎の精度評価においてより時間間隔の長い日雨量や旬雨量といった用途での利用を推奨しており、洪水解析と言った治水分野での解析については局所的に発生する激しい降雨が解析結果に重大な影響を及ぼすため、利用上注意が必要と結論づけている。

しかし、開発途上国の多くには流量観測が行われていない河川が無数に存在しており、今後調査対象地域における適切な降雨流出モデルの開発が行われた場合、GSMaP を入力データとして灌漑開発計画策定時に必要となる水源としての河川流量の評価などへの応用も期待される。

要旨

サブサハラ・アフリカ地域は、近年の人口増加や経済発展等の影響を受け、食糧生産のニーズが高まっている。しかし、依然として天水農業に依存した営農体型から脱却できておらず、灌漑開発を計画する上で必要となる気象データが当該地域の国々で不足していることも要因となり、開発が進んでいない。他方で、近年複数の人工衛星による雨雲の観測データを統合し、全球降水マップ(GSMaP)として全球の降水データが無償で公開されている。そこで本研究では、ウガンダ共和国東部を対象に、地上降雨の実測データに基づきその地域の降雨特性を明らかにし、当地でまだ十分に検証が行われていない GSMaP の精度検証を行い、灌漑計画策定への利用可能性について検討した。

まず、GSMaP の基本的な観測特性・利用可能性について検証するため、AMeDAS をランドトゥルースとして GSMaP(MVK, Gauge)との比較を行ったところ、時間分解能を長くすることで捕捉率が向上し、これらの関係の相関もより強くなることを明らかにした。また MVK と Gauge との比較から、日本においては Gauge の方が雨量の推定精度は高かったが、捕捉率には違いが認められない事を示した。さらに GSMaP は、標高が高くなるにつれて精度が悪化する傾向も確認した。この原因について、AMeDAS は地表面に到達した雨粒を観測していること、GSMaP はセンサの観測領域に存在する雨粒が観測対象であるという、この2つの違いが精度低下の要因になっていると考察した。

次に、ウガンダ国東部での実測の降雨量データの分析から、降雨の発生時刻については特徴があること、またクラスター分析によってその観測点の降雨特性をエルゴン山との位置関係から4分類にできることを明らかにした。降雨の発生回数と時刻については、一日のなかの降雨発生回数分布に特徴があることも明らかにした。また、近接する雨量計のペアを比較した結果、強烈な降雨は1時間継続イベントよりも、より短い

降雨時間に集中して発生する特徴を明らかにした。一方、4km 圏内の同一ペア内では同日同時刻に降雨が発生する頻度は少なく、観測場所が近接していた場合でも降雨に時間的ずれが生じる傾向があることも確認した。これらのことより、ウガンダ国東部では、短時間に強烈な降雨が発生し、その際の雨域は GSMaP の分解能である 10km グリッドよりも小さい場合が多い可能性が示唆された。

さらに、GSMaP を用いることで、地上降雨で確認された降雨発生時刻の特徴を捉えていることが明らかになった。また、実測の地上降雨をグラントゥルースとして比較を行った結果、GSMaP は地上降雨を過小評価傾向にあること、時間分解能を長くしていくことで RMSE は改善され、時間間隔 10 日で収束することを明らかにした。そのため GSMaP の利用は洪水解析等の時間間隔の細かい利用用途よりも、灌漑計画等の時間間隔の大きい用途（10 日間）での利用が実用的であると結論づけた。

最後に、過去に行われた F/S の検討内容を GSMaP の降雨データを用いて再検証したところ、F/S 時には GSMaP では検出できない短時間に発生した局所的な降雨を基に有効雨量を算出しているため、1 つの灌漑地区で灌漑可能面積に約 50%の違いが出ることを明らかにした。また、地上観測地点と灌漑地区の距離が 10km 以上離れていることで GSMaP の降雨量も異なるため、灌漑可能面積に差が現れることがわかった。これらの結果を踏まえ、GSMaP の降雨データを灌漑計画の策定に利用する際の注意点をまとめるとともに、本研究対象地のウガンダ国東部での検討結果から、旬毎（10 日毎）の有効雨量の評価であれば F/S 調査レベルでの灌漑可能面積の検討においては十分利用が可能であると考察した。

以上により、ウガンダ東部での地上降雨と GSMaP の検討結果から、旬（10 日）毎の検討において F/S 調査レベルでの灌漑可能面積の検討において GSMaP は地上降雨データの代替として十分利用が可能であると結論付けた。

**Utilization of Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)
for the formulation of irrigation plan in Eastern Uganda.**

Yukimitsu KOBAYASHI

SUMMARY

Countries in Sub-Saharan Africa region are facing increasing needs for food production due to population growth and economic development in recent years. However, countries in the region have not been able to shift from rainfed agriculture, and the lack of meteorological data necessary for planning irrigation development in the region is also a factor, which has hindered development. On the other hand, global precipitation data has recently been freely available as the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP), which integrates cloud observation data from multiple satellites. In this study, the rainfall characteristics in the eastern part of the Republic of Uganda were identified based on measured ground rainfall data, and the accuracy of the GSMaP, which has not yet been fully validated in the target area, was verified and its potential for use in irrigation scheme development was examined.

To verify the basic observational characteristics and availability of GSMaP, AMeDAS was compared with GSMaP products (MVK and Gauge). The results showed that longer time resolution improves the Probability of Detection (POD) and stronger correlations. A comparison between MVK and Gauge products showed that Gauge was more accurate in estimating rainfall in Japan, but there was no difference in the POD. Furthermore, the GSMaP showed a trend of worsening accuracy with increasing elevation. The reason for this was considered that AMeDAS observes rainfall that has reached the ground surface, while GSMaP observes rainfall that exists in the vertical observation area of the sensor, and these differences were considered to be the reason for the decline of accuracy.

The results of the analysis of measured ground rainfall data in eastern Uganda

showed that the time of occurrence of rainfall has a characteristic pattern, which can be classified into four categories according to its location to Mt. Elgon by cluster analysis. The time of occurrence of rainfall showed typical distribution patterns of rainfall occurrence within a day. Comparison of pairs of rain gauges nearby showed that intense rainfall was characteristically concentrated in shorter periods of rainfall, rather than in one-hour-long events. On the other hand, rainfall occurs less frequently at the same time on the same day within the same pair which are located within 4 km distance. Even if the rain gauges in the same pair were located close to each other, the results showed that there was a trend that rainfall events occur with a time lag. These findings suggest that there is a possibility that intensive rainfall occurs in short periods of time and that the area of rainfall is likely to be smaller than the 10 km grid which is equal to the resolution of GSMaP in many cases of rainfall in eastern Uganda.

It was found that the GSMaP enables to capture of characteristics of the time of rainfall occurrence which were identified in the ground-based rainfall. The comparison of measured ground rainfall as ground truth showed that GSMaP tends to underestimate ground rainfall and that the RMSE improves with lengthening time resolution, to converge at a time resolution of 10 days. It was therefore concluded that the use of GSMaP is more practical for applications with longer time intervals (such as 10 days), such as irrigation planning, rather than applications such as flood analysis with finer time intervals.

A review of previous Feasibility Study (F/S) using GSMaP rainfall data showed a difference of about 50% in the irrigable area for one irrigation scheme due to the calculation of effective rainfall based on specific and local rainfall occurring over a short period of time in the conditions of the F/S, which cannot be detected by GSMaP. It was also found that differences in the irrigable area occurred due to differences in rainfall at distances of more than 10 km between ground observation points and irrigated areas. Based on these results, the remarks to be considered when using GSMaP rainfall data for irrigation planning are summarised.

From the results of the study in eastern Uganda, it is concluded that the GSMaP can

be used as an alternative to ground rainfall data and it's concluded that the assessment of effective rainfall for 10 days interval is sufficient to be used in the planning of irrigable area at the F/S level.

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、東京農業大学大学院 農学研究科 農業工学専攻 渡邊文雄教授からは、後期課程への進学前から本論文の構成、内容まで懇切なご指導とご助言ならびにご校閲を賜りましたことを心より感謝申し上げます。2006年4月の地水工学研究室（当時）入室時から研究室活動に始まり、卒業論文、修士論文の作成指導、そして開発コンサルタントという進路を示して頂きました。筆者の現在のキャリアがあるのも、ひとえに渡邊先生のご指導があつてこそと感謝しております。本論文の執筆に際し、研究が進まない中でも時には優しく、時には厳しく指導頂いたおかげで、なんとか完成にたどり着きました。

また、同大学院 鈴木伸治教授からも多大なご指導、ご助言を賜りましたことを深く感謝申し上げます。2007年4月に鈴木先生が農大に赴任されてから、研究室での活動に留まらず国内・海外のフィールドでいつも丁寧にご指導頂きました。この経験は、本研究で気象観測装置の設置・観測を行う上で大いに役立ちました。

本論文審査の主査を引き受けて頂きました東京農業大学 島田沢彦教授、副査をご担当頂いた岡澤宏教授には、論文のとりまとめの際に丁寧にご指導いただいた。特に筆者がいつも結果をネガティブに捉えがちになるところを、結果をよりポジティブに捉えるようアドバイスいただき、第5章の灌漑計画に用いる上でのポイントを整理する上で多くの示唆を頂きました。

高橋悟先生、西牧隆壯先生からは、折々で励ましのお言葉を頂くとともに、その背中から海外の技術協力の現場において現地の状況や環境をつぶさに観察し、真に必要な物が何かを考える姿勢を学ばせていただいた。

本研究は国際協力機構（JICA）がウガンダ共和国を対象として実施している「ウガンダ国ウガンダ中央部・東部地域灌漑地区開発計画」に筆

者が従事した期間に収集したデータを一部用いて取りまとめたものである。また、本研究の一部は、東京農業大学総合研究所平成 29 年度及び平成 30 年度 大学院 博士後期課程研究支援制度の助成を受けたものである。

NTC インターナショナル株式会社の小林稔昌氏（当時）、根岸将也氏には本研究の着想を得る機会となったウガンダ国での F/S 業務時に多くのアドバイスを頂いた。大学院後期課程進学のきっかけとなった農業農村工学会誌への投稿の機会を頂いた際には、石坂邦美氏（当時）と菊池翔太郎氏（当時）に共著者となっていただき、報文作成にご協力いただいた。本論文取りまとめ時に並行して従事していた「ルワンダ国灌漑水管理能力向上プロジェクト」の業務主任者、副業務主任者である國安法夫氏、滝川永一氏には論文執筆と業務の掛け持ちに理解を示して頂き、多大なる便宜を図っていただいた。また同プロジェクトに従事する専門家の皆様にもご迷惑おかけする事もあったが、暖かく見守っていただいたことに御礼を申し上げたい。中村謙仁氏には、地水工学研究室（当時）入室時から現在に至るまで、先輩として折々で適切なアドバイスや励ましのお言葉を頂き、業務の忙しさに挫けて研究を続ける心が折れそうになる度に支えて頂いた。

本研究の現場調査を実施する際に、F/S 調査時からの現地スタッフである Mr. Okiria Emmanuel（現 岐阜大学大学院）、Mr. Shimiyu David、カウンターパートである、ウガンダ水環境省 Directorate of Water Resources Management 所属 Mr. Tom Kanyike、ウガンダ農業畜産水産省 Agriculture Infrastructure, Mechanization and Water for Agricultural Production 所属 Mr. Ronald Kato Kayizzi 氏、Mr. Benon Lwanga 氏、Mbale District Local Government Office 所属 Mr. Rajab Namakhola には多大な支援を頂いた。特に Mr. Shimiyu David にはコロナ渦で筆者がウガンダに渡航できない期間も気象観測装置の維持管理やデータ回収などの作業に従事いただいた。

地水環境工学研究室の室員をはじめ、大島拓海氏、柚木真晴氏、佐藤宏大氏には解析の一部を彼らの卒業論文のテーマとして取り組んでいただき、本論文完成に貢献いただいた。

最後に、陰ながら支えていただいた両親、姉弟をはじめ、妻 小百合には業務と掛け持ちで大学院に進学する事に理解を示していただき、短い日本帰国時も研究や論文執筆に時間を割いても文句も言わずに子供達と共に支えていただいたことに感謝申し上げます。

引用文献

1. United Nations Population Division Department of Economic and Social Affairs, World Population Prospects 2019,
(<https://population.un.org/wpp/>)
2. World Bank, Commodity Price Data,
(<https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>)
3. FAO, FAOSTAT, <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
4. JICA, CARD フェーズ 1 の成果, 統計データ (FAOSTAT) ,
https://www.jica.go.jp/activities/issues/agricul/approach/ku57pq00002m21du-att/card_profile.pdf
5. 坪井達史 (2017):ウガンダの稲作農家と米生産, 熱帯農業研究
Vol.10, No.2 p.65-67
6. Directorate of Water Resources Management, Ministry of Water and Environment, Republic of Uganda (2013): National Water Resources Assessment: report 2013.
7. Y. Hou, R. K. Kakar, S. Neeck, A. A. Azarbarzin, C. D. Kummerow, M. Kojima, R. Oki, K. Nakamura and T. Iguchi (2014): The Global Precipitation Measurement Mission. Bulletin of the American Meteorological Society, 95, 701–722.
8. T. Kubota, S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y.N. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa, K. Iwanami, M. Kachi, K. Okamoto (2008): Global Precipitation Map using Satelliteborne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, pp. 2259-2275, Jul. 2007.

9. 文部科学省（2018）：科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会宇宙開発利用部会（第41回）配付資料，
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/059/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2018/04/19/1403594_1.pdf
10. Takuji KUBOTA, Tomoo USHIO, Shoichi SHIGE, Satoshi KIDA, Misako KACHI, Ken'ichi OKAMOTO (2009): Verification of High-Resolution Satellite-Based Rainfall Estimates around Japan Using a Gauge-Calibrated Ground-Radar Dataset, Volume 87A Pages 203-222.
11. Kentaro TAKIDO, Oliver C. SAAVEDRA VALERIANO, Masahiro RYO, Kazuki TANUMA, Tomoo USHIO, Takuji KUBOTA (2016): Spatiotemporal Evaluation of the Gauge-Adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation at the Basin Scale, Volume 94 Issue 2 Pages 185-195
12. Nyoman Sugiarta, Kakuji Ogawara, Tasuku Tanaka, Made Sudiana Mahendra (2017): Application of GSMaP Product and Rain Gauge Data for Monitoring Rainfall Condition of Flood Events in Indonesia. International Journal of Environment and Geosciences 1(1): 36-47.
13. Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K., (2012): Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. Hydrological Sciences Journal, 57 (2), 298-312.
14. SABER Mohamed, KANTOUSH Sameh, ABDEL-FATTAH Mohamed, SUMI Tetsuya (2017): Assessing Flash Floods Prone Regions at Wadi basins in Aswan, Egypt. 京都大学防災研究所年報, 60号, 853-863.

15. 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
16. JAXA(2018)：GPM データ利用ハンドブック 3.1 版，
https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_J.pdf
17. Wilks, D. S. (2006): Statistical Methods in the Atmospheric Sciences Second Edition, International Geophysical Series vol. 91. Academic Press
18. K. Takido, O. C. Saavedra Valeriano, M. Ryo, K. Tanuma, T. Ushio, T. Kubota (2016): Spatiotemporal Evaluation of the Gauge-Adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation at the Basin Scale, A Journal of the Meteorological Society of Japan, 94-2, 185-195
19. 翁一城(2009): シーロメーターとラジオゾンデを用いた海洋上低層雲の研究，東京海洋大学(修士論文)
20. Yukimitsu KOBAYASHI, Fumio WATANABE, Shinji SUZUKI, Okiria EMMANUEL, Tom KANYIKE (2018): Verification of availability of GSMaP rainfall data based on the comparison of observed rainfall data in Africa, Journal of Arid Land Studies, Volume 28 Issue S Pages 85-88
21. 気象庁 (2017)：雨と風 (雨と風の階級表)
22. NOAA: CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation ,
<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>
23. 小林 維円，菊池 翔太郎，石坂 邦美 (2018)：灌漑計画策定における衛星データの活用事例，農業農村工学会誌，83 巻 7 号 p.549-552.

24. JICA (2017): The Project on Irrigation Scheme Development in Central and Eastern Uganda Final Report. JICA.
25. 上米良 秀行, Thanh Ngo-Duc, Le Viet Xe, 松本 淳, 牛尾 知雄, 岩見 洋一 (2014): ベトナム中部地域における衛星雨量プロダクト GSMaP の性能調査, 水文・水資源学会 2014 年度研究発表会
26. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., (1998): FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Crop Evapotranspiration: (guidelines for computing crop water requirements)
27. JICA (2011): The development study on water resources development and management for Lake Kyoga basin in the Republic of Uganda final report. JICA
28. 農林水産省農村振興局 (2010): 土地改良事業計画設計基準 計画「農業用水(水田)」(平成 22 年 7 月制定) 付録 技術書
29. Directorate of Water Resources Management (DWRM), MWE Government of Uganda (2010): Hydro-Climatic Study Report on the Water Resources of Uganda, 140p.