

田んぼの貯留機能強化による
洪水への抑制効果に関する基礎研究

～産学官共同研究報告書～

令和5年12月

公益財団法人 福井県建設技術公社

発刊にあたって

(公財)福井県建設技術公社は、県および市町の建設技術の向上と良質な社会資本の整備に寄与することを目的として各種の事業を実施しています。

その中の一つであります産学官共同研究支援事業は、産学官が取り組む技術研究開発を推進するため、研究経費を補助するとともに、その研究成果を報告書として作成し、関係機関に配布することをもって技術の普及を図ることを目的としています。

このたび「田んぼの貯留機能強化による洪水への抑制効果に関する基礎研究」が(産)株式会社キミコン、(学)福井工業高等専門学校 環境都市工学科田安研究室、(官)福井県(土木部河川課、奥越土木事務所、福井県工業技術センター 建設技術研究部)の共同により行われました。

近年、地球温暖化に伴う気候変動の影響などにより、洪水などによる水災害が頻発・激甚化しております。県内では、平成25年台風18号災害(主に嶺南地域が被災)、平成30年7月豪雨災害(越前町)、令和4年8月大雨災害(奥越地域や南越前町)において甚大な被害が発生しております。

本報告書は、洪水などによる水災害の防止・軽減を目的に、福井県の水田面積(県土面積の約10%)に着目し、この水田に大雨の際の雨水を一時的に貯留し、時間をかけてゆっくり下流に流すための基礎的研究としてとりまとめられたものです。

最後に、この共同研究にご協力いただきました関係各位に、心から御礼申し上げます。この研究成果が、県内の水災害の被災軽減につながれば幸いです。

令和5年12月

公益財団法人 福井県建設技術公社

理事長 西出 俊亮

まえがき

近年、気候の温暖化の影響による降雨量の増大が甚大な被害を生じさせている。計画規模を越える洪水の発生が頻発する現状において、令和元年の「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」の提言では、気温が2℃上昇した場合の降雨量の変化倍率を1.1倍～1.15倍とし、洪水流量は1.2倍、100年に1回の洪水は約2回発生するとしている。これを受けて、令和2年に「あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換」が取りまとめられ、令和3年には「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律案」いわゆる（流域治水関連法）が施行された。これによって、水災害対策は流域のあらゆる関係者が主体的に参画し、氾濫をできるだけ防ぐ・減らす対策を実施していかなければならないものとなっている。

なかでも「田んぼダム」は、田んぼの排水口を意図的に小さくして田んぼからの排水量を制限することで、短時間に集中して高強度の雨が降る局地的大雨等に対して、排水経路となる支川や本川への雨水の集中を緩和し、内水氾濫を抑制するとともに本川のピーク流量を低減させる効果が期待されている。つまり、「田んぼダム」は流域治水対策の中でも既存ストックを有効活用し、集水域での降雨の貯留を行うことで即効性のある対策とされている。しかし、現状では「田んぼダム」を実施した場合の効果について、数値モデルによる計算結果や湖沼に流出する地域での計測データなどが示されている程度であり、局地的大雨時の貯留量や本川ピーク流量の低減量など河川計画に寄与する実測データは得られておらず、「田んぼダム」として運用することによる収量への影響なども明らかとなっていない。そのため、営農者の協力を得るためには「田んぼダム」の効果と収量への影響を実データにより示すことが必要となっている。

そこで本研究では、田んぼダムの貯留効果を検証するため、現地調査を実施するとともに営農期間中の水田に水位計を設置して検証に必要なデータを取得し、調査解析による効果検証を行うことを目的とする。また、期別の稲の育成状況や貯留の有無による育成状況の差をドローンにより撮影した空中写真を用いて調査し、田んぼダムとしての一時貯留が稲の育成に及ぼす影響について検証を行う。

本報告書は、令和5年度に取得できたデータについて検討を行ったものである。現段階では、現地計測データの解析方法にさらなる工夫が必要ではあるものの、今後も現地計測を継続して実施し、「田んぼダム」の効果と影響を検証するためのデータを収集していくこととなる。

令和5年12月

独立行政法人国立高等専門学校機構 福井工業高等専門学校
環境都市工学科 教授 田 安 正 茂

研究の分担

研 究 テ ー マ	分 担
1. 現地測量、ドローン等による写真撮影と稲の育成状況観察（期別）、計測装置設置補助、計測データ回収・整理・解析補助、稲の育成状況と排水特性の相関関係を整理し、ドローンでの期別調査により排水特性を分類するシステムを構築し提案	産 (株式会社 キミコン)
2. 現地調査、計測装置検定、計測データ回収補助、データ解析指導・結果の評価、ドローンでの写真撮影による稲の育成状況評価	学 (福井高専)
3. 関係機関の調整、発注業務全般、計測装置検定補助、計測装置設置および現地作業補助、計測データ回収、計測データ解析、研究成果とりまとめ（報告書作成）	官 (福井県)

参加研究員（所属・職名は令和5年12月時点のものである）

区分	氏名	所属・職名	担当する研究テーマ
産	藤田 貴準	株式会社キミコン 常務取締役	現地測量、ドローン等による写真撮影と 稲の育成状況観察（期別） 計測装置設置補助、計測データ回収・整 理・解析補助 稲の育成状況と排水特性の相関関係を 整理し、ドローンでの期別調査により排 水特性を分類するシステムを構築・提案
	山本 将大	株式会社キミコン 技術第二部	
学	田安 正茂	福井工業高等専門学校 環境都市工学科 教授	総括、助言・指導、現地調査、計測装置 検定、解析結果の評価
	辻野 和彦	福井工業高等専門学校 環境都市工学科 教授	ドローンでの写真撮影による稲の育成 状況評価
	坂井 響太	福井工業高等専門学校 環境都市工学科	資料とりまとめ、データ解析
	辻 青伶	福井工業高等専門学校 環境都市工学科	
官	丸中 孝通	福井県土木部河川課 河川計画G 主任	関係機関の調整、発注業務全般 計測装置検定補助、計測装置設置、現地 作業補助 計測データ回収・整理・解析 研究成果とりまとめ（報告書作成）
	藤田 崇史	福井県土木部河川課 河川計画G 主査	
	南北 淳	福井県奥越土木事務所 河川砂防課大野河川G主任	
	藤井 誠	福井県奥越土木事務所 河川砂防課大野河川G 企画主査	
	大谷 寛幸	福井県奥越農林総合事務所 農村整備部計画管理課主任	
	西端 宏明	福井県工業技術センター 建設技術研究部 研究員	
	林 泰正	福井県工業技術センター 建設技術研究部 主任研究員	

以下、立ち上げ時研究員（ ）内は令和4年6月10日時点の所属・職名である

官	山岸 理恵	福井県土木部都市計画課 都市環境・公園G 主任 (福井県土木部河川課 河川計画G 主任)
	笈田 雅章	福井県港湾空港課 福井港湾事務所 工務課 主任 (福井県奥越土木事務所 河川砂防課大野河川G 主任)
	長谷川 信二	福井県嶺南振興局 林業水産部 水産漁港課 課長 (福井県工業技術センター建設技術研究部 主任研究)
	山本 哲也	福井県丹南土木事務所 広野・榎谷ダム統管理事務所 主任 (福井県奥越農林総合事務所 農村整備部計画管理課主任)

目次

第1章 序論	
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 田んぼダムに関する既往の研究	1
1.3 研究対象地域について	2
第2章 研究対象地点と計測機器	
2.1 計測対象の田んぼについて	3
2.2 排水柵	5
2.3 水位計	6
2.4 排水経路	8
2.5 水位計の設置位置	9
第3章 水位計測データとその解析	
3.1 湛水試験の水位計測	10
3.1.1 4月11日～4月15日(排水制御板φ150mm)の水位変動	10
3.1.2 4月15日～4月20日(排水制御板φ50mm)の水位変動	18
3.1.3 排水制御板φ150mmとφ50mmの違いによる排水量の比較	25
3.2 営農期間の水位計測	26
3.2.1 6月1日～6月26日の水位変動	26
3.2.2 6月26日～7月28日の水位変動	30
3.2.3 7月28日～8月28日の水位変動	34
第4章 UAVを用いた水稲成長量の推定	
4.1 UAVを用いた空撮	36
4.2 DSMによる草丈の推定	38
4.3 NDVIによる水稲の活性度の把握	41
第5章 結論	42
参考文献	43

第1章 序論

1.1 研究背景と目的

近年、全国各地で豪雨災害が頻発しており、国は令和2年度から流域治水（流域のあらゆる関係者との協働、流域全体で総合的かつ多層的な対策）に取り組み始めている。その施策のひとつとされる田んぼダムは、既存ストックを有効活用する施策に挙げられているが、現状では地元の理解度が低いため普及は進んでいない。この取り組みを推進するため、田んぼダムによる貯留効果の定量化・可視化が求められている。また、田んぼダムはその規模や位置等に加え、降雨の規模等により、効果の程度や影響範囲は変化するとされているが、全国的に見ても現地で観測された洪水等の事象に対する再現検証（シミュレーション）しか行われていない状況であり、上記の降雨規模の変化に対しての研究成果は発表されていない。

本研究では、田んぼダムの貯留効果を検証するため、現地事象による検証に必要なデータを取得する現地調査を実施し、調査解析による効果検証を行うことを目的とする。また、期別の稲の育成状況や貯留の有無による育成状況の差をドローンにより撮影した空中写真を用いて調査し、田んぼダムとしての一時貯留が稲の育成に及ぼす影響について検証を行う。

なお、本研究で得られたデータは今後実施予定の模型実験において、現地観測ではなかなか確認できない降雨事象（洪水時降雨や計画降雨）や稲の育成状況を模型で再現する際の検証データとして活用し、模型実験による様々な降雨条件での流量係数（パラメータ）の確認およびシミュレーション結果との対比検証を実施する予定である。

1.2 田んぼダムに関する既往の研究

田んぼダムに関しての研究や先進事例として、吉川ら¹⁾は新潟県村上市神林地区で水田に「落水量調整板」を設置し、大雨時に水田に意図的に雨水を貯留する「田んぼダム」の取り組みを行っており、それらの「田んぼダム」の洪水緩和機能を流域スケールで検証している。検証された流出解析では流出量を経時的に計算し、調整板を全水田に設置すると仮定した計算において、排水河川および幹線排水路のピーク時流量が25%～29%減少し、0.17～0.23mの水位低下をもたらすという結果を得ている。また、宮津ら²⁾は、現地観測に基づいて構築した数値モデルを用いて浸水シミュレーションを実施し、田んぼダムの浸水被害緩和機能発揮における限界降雨を検討している。その結果として、本流域では120年確率降雨程度まで田んぼダムの効果が最大限発揮されるものの、降雨規模が大きくなると畦畔を越えて溢水する水田が増加し、田んぼダムの効果は低減することを確認している。

これらのことから、「田んぼダム」の取り組みは、対象地域の洪水緩和に有効であるものの、畦畔を越えて溢水するような豪雨では効果が低減することが推察される。

1.3 研究対象地域について

本研究の研究対象地域は福井県大野市で、場所は赤根川付近の田んぼである。図 1.1～図 1.3 に田んぼの位置を示す。研究対象地域とした大野市は、福井県の中でも東の内陸地に位置し、奥越地区と呼ばれている。大野市は地形や季節風の影響により北陸山地形の気候で、冬季の気温は低く降雪が多い。春先から夏にかけて福井市と比べて大野市の方が降水量は多い。



図 1.1 福井県における研究対象地点位置図

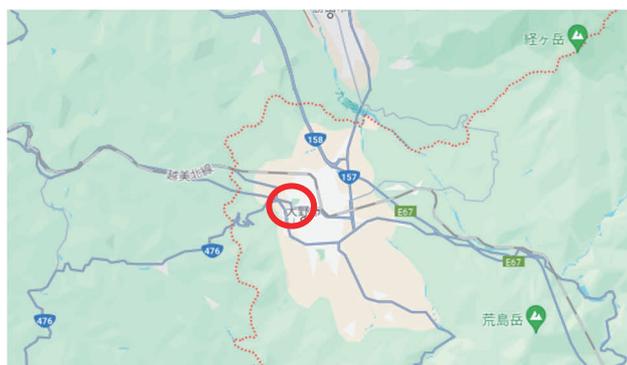


図 1.2 大野市における研究対象地点の位置図



図 1.3 大野市中野町における研究対象の田んぼの位置

第2章 研究対象地点と計測機器

2.1 計測対象の田んぼについて

本研究では、二つの田んぼに計測装置を設置してデータ採集を行った。二つの田んぼは、田んぼ1と田んぼ2として研究を行った。写真2.1に田んぼ1,2の位置関係と面積を示す。(田んぼ1,2の面積は座標法面積計算書にて計算したものをを用いる。)



写真 2.1 田んぼ 1, 2 位置関係

田んぼ 1, 2 は、一つの排水経路上にあり、赤根川水位観測所や九頭竜川ダム統合管理事務所に設置された雨量観測装置にも近く、それぞれのデータを福井県および国土交通省より提供いただいた。また面積は、田んぼ 1 は $2,300\text{m}^2$ であり、田んぼ 2 は $4,000\text{m}^2$ となっており、田んぼ 2 の方が大きい。

田んぼ 1, 2 についての測量は、共同研究企業の株式会社キミコンによって実施し、詳細な計測結果を得た。田んぼ 1, 2 における標高観測位置を図 2.1 に示し、測量結果を表 2.1 に示す。

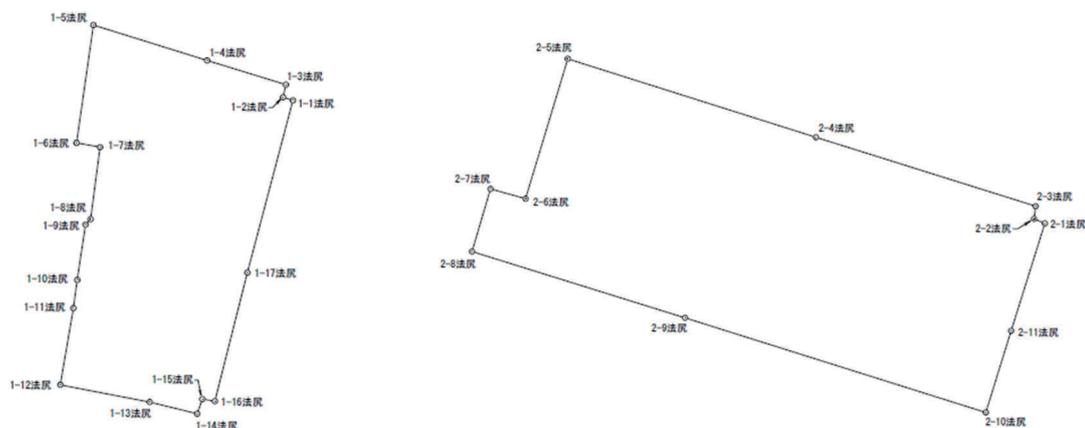


図 2.1 田面座標計測位置

表 2.1 田面（畦法尻）標高

田んぼ1	標高[m]	田んぼ2	標高[m]
1-1法尻	167.443	2-1法尻	167.347
1-2法尻	167.230	2-2法尻	167.294
1-3法尻	167.299	2-3法尻	167.362
1-4法尻	167.242	2-4法尻	167.178
1-5法尻	167.244	2-5法尻	167.434
1-6法尻	167.276	2-6法尻	167.204
1-7法尻	167.223	2-7法尻	167.312
1-8法尻	167.110	2-8法尻	167.350
1-9法尻	167.208	2-9法尻	167.267
1-10法尻	167.149	2-10法尻	167.402
1-11法尻	167.097	2-11法尻	167.194
1-12法尻	167.315		
1-13法尻	167.308		
1-14法尻	167.342		
1-15法尻	167.326		
1-16法尻	167.307		
1-17法尻	167.257		

それぞれの田んぼの標高を見ると、田んぼ1は標高の1番高いところが1-1法尻で167.443 m、標高の1番低いところは1-11法尻の167.097 m、田んぼ1の田面における標高差は0.346 mで田面標高の平均値は167.2574 mとなった。田んぼ2は、標高の1番高いところが2-5法尻で167.434 m、標高の1番低いところが2-4法尻で167.178 m、田んぼ2の田面における標高差は0.256 mで田面標高の平均値は167.3040 mとなった。

2.2 排水桝

研究対象とした田んぼは、令和4年度末に圃場整備事業が完了しており、圃場整備事業工事にあわせて排水流出量計測用桝(写真2.2, 図2.2)を設置した。排水桝には、排水流量を計測するための越流堰と排水量を制限する円形の穴あき板(φ150 mm 又はφ50 mm)が取り付けられている。



写真2.2 排水流出量計測用桝

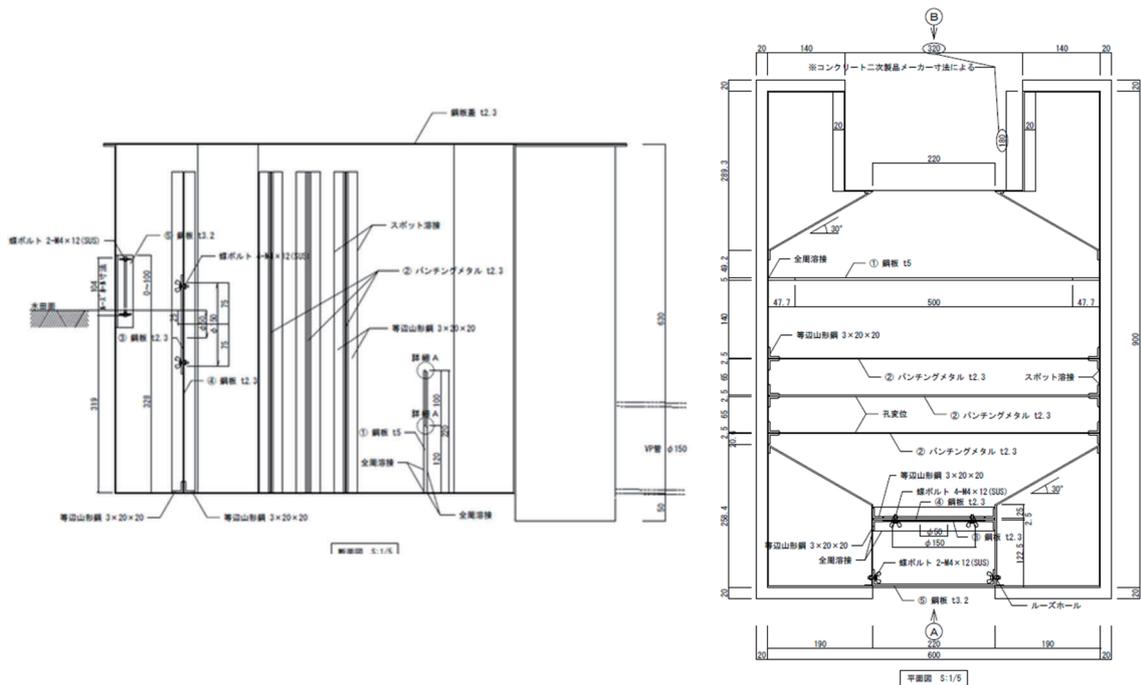


図2.2 排水流出量計測用桝図面

2.3 水位計

本研究では、田んぼの水位を計測するために、水位計「S&DL mini Model-4900」を設置した。この水位計は、水中での圧力を測定して水位データを取得する計測器であり、大気圧の変動値を同時に計測することで、正しい水位データを得ることができる。使用した水位計を図 2.3、写真 2.3 に示す。

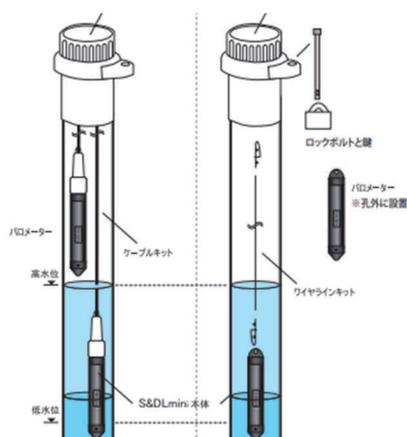


図 2.3 水位計



写真 2.3 水位計

写真は、排水柵内に設置した水位計と田んぼ内に設置した水位計を撮影したものである。本研究では、水位データ(表 2.2)、大気圧データ(表 2.3)を計測器で測定するとともに、現地で実測にて水面標高を計測した現地計測データ(表 2.4)の3つのデータを取得した。次頁に計測記録の一例を示す。

表 2.2 水位データ

Date	Time	ms	LEVEL	TEMPERATURE
2023/6/1	14:49:37	0	-0.009	26.0
2023/6/1	14:59:37	0	0.072	24.5
2023/6/1	15:09:37	0	0.070	24.8
2023/6/1	15:19:37	0	0.168	23.8
2023/6/1	15:29:37	0	0.169	23.8
2023/6/1	15:39:37	0	0.181	25.6
2023/6/1	15:49:37	0	0.169	25.2
2023/6/1	15:59:37	0	0.172	24.8
2023/6/1	16:09:37	0	0.171	24.5
2023/6/1	16:19:37	0	0.172	24.4
2023/6/1	16:29:37	0	0.169	24.3

表 2.3 大気圧データ

Date	Time	ms	LEVEL	TEMPERATURE
2023/6/1	14:56:47	0	0.596	29.0
2023/6/1	15:06:47	0	0.591	27.4
2023/6/1	15:16:47	0	0.589	27.0
2023/6/1	15:26:47	0	0.591	28.4
2023/6/1	15:36:47	0	0.586	32.4
2023/6/1	15:46:47	0	0.586	31.5
2023/6/1	15:56:47	0	0.584	29.8
2023/6/1	16:06:47	0	0.584	29.0
2023/6/1	16:16:47	0	0.584	28.4
2023/6/1	16:26:47	0	0.586	28.1
2023/6/1	16:36:47	0	0.585	27.5

表 2.4 現地計測データ

		水位計No	測定時刻	X座標 (塩ビ管 天)	Y座標 (塩ビ管 天)	Z座標 (塩ビ管 天) (標 高)	Z座標 地盤高 (田面) (標高)	塩ビ管天 端と塩ビ 管底高	塩ビ管天 端から 田面高 ・ 排水路高	塩ビ管天 端から 水面高(1) テープ実 測
摘要日			6月1日							
番号								1	2	3
計算式										
田んぼ 1	放流量計測装置①	No.2	15:47	-967.530	42788.464	167.970		0.987	0.987	0.866
	田んぼ①	No.5	15:42	-968.617	42788.924	168.185	167.288	1.031	0.873	0.839
	田んぼ②	No.3	15:41	-967.762	42792.175	168.138	167.221	1.030	0.872	0.788
	田んぼ③	No.4	15:38	-1010.594	42819.179	168.210	167.293	1.051	0.881	0.861
	田んぼ④	No.10	15:37	-1038.610	42797.148	168.216	167.338	1.015	0.880	0.871
田んぼ 2	放流量計測装置②	No.1	15:59	-919.637	42995.394	167.901		1.000	1.000	0.880
	田んぼ⑤	No.15	16:01	-918.669	42996.334	168.121	167.237	1.026	0.849	0.807
	田んぼ⑥	No.11	16:03	-919.705	42999.601	168.069	167.202	1.023	0.820	0.751
	田んぼ⑦	No.12	16:18	-968.690	43084.018	168.111	167.273	1.027	0.826	0.796
	田んぼ⑧	No.13	16:15	-972.231	43028.077	168.096	167.299	1.020	0.799	0.782
排水路	排水路①	No.9	15:49	-977.319	42784.687	167.344		1.027	0.985	0.950
	排水路②	No.8	15:52	-957.301	42786.760	167.324		1.022	0.958	0.925
	排水路③	No.14	16:11	-936.436	42987.216	167.081		1.025	1.060	0.816
	排水路④	No.6	16:07	-917.033	42993.014	167.050		1.006	1.006	0.795
	排水路⑤	No.7	16:23	-947.608	43313.523	166.609		1.035	1.046	0.860

表 2.2, 表 2.3 の水位と大気圧の時刻歴データは, 計測器で記録した計測時間間隔 10 分毎の日時と計測値 (LEVEL), 気温である. 本研究では, データ取得期間を約 1 ヶ月間として, 営農期間を 6 月, 7 月, 8 月の 3 期に分けて取得した.

表 2.4 の現地計測データは, 計測した日付と時間毎にそれぞれの水位計での X, Y, Z 座標と塩ビ管天端からのそれぞれの距離を計測したものである. 本研究では, これらのデータを基に大気圧変動を考慮した水面標高を算出した.

水面標高の時刻歴は, 現地計測データの計測日時と同時刻の水位データと大気圧データを照合して, 実測の水面標高から水位計測器による水位データを校正し, 水位データの変動と大気圧データの変動分を水面標高の変動に換算することによって導いた.

2.4 排水経路

本研究で計測を行った田んぼ 1, 田んぼ 2 の排水経路は、写真 2.4.1 に水色で示した経路によって繋がっており、赤根川に直接流出する経路となっている。写真 2.4.1 に排水経路、写真 2.4.2 に排水路を示す。



写真 2.4.1 排水経路



写真 2.4.2 排水路

2.5 水位計の設置位置

令和4年度末に圃場整備工事が完了した際の湛水試験時に、田んぼ内と排水路内に水位計(合計15ヶ所)を設置し、水位変動の時系列データを取得した。写真2.5に田んぼに設置した水位計の位置を示す。また、それぞれの水位計の番号を表2.5に示す。

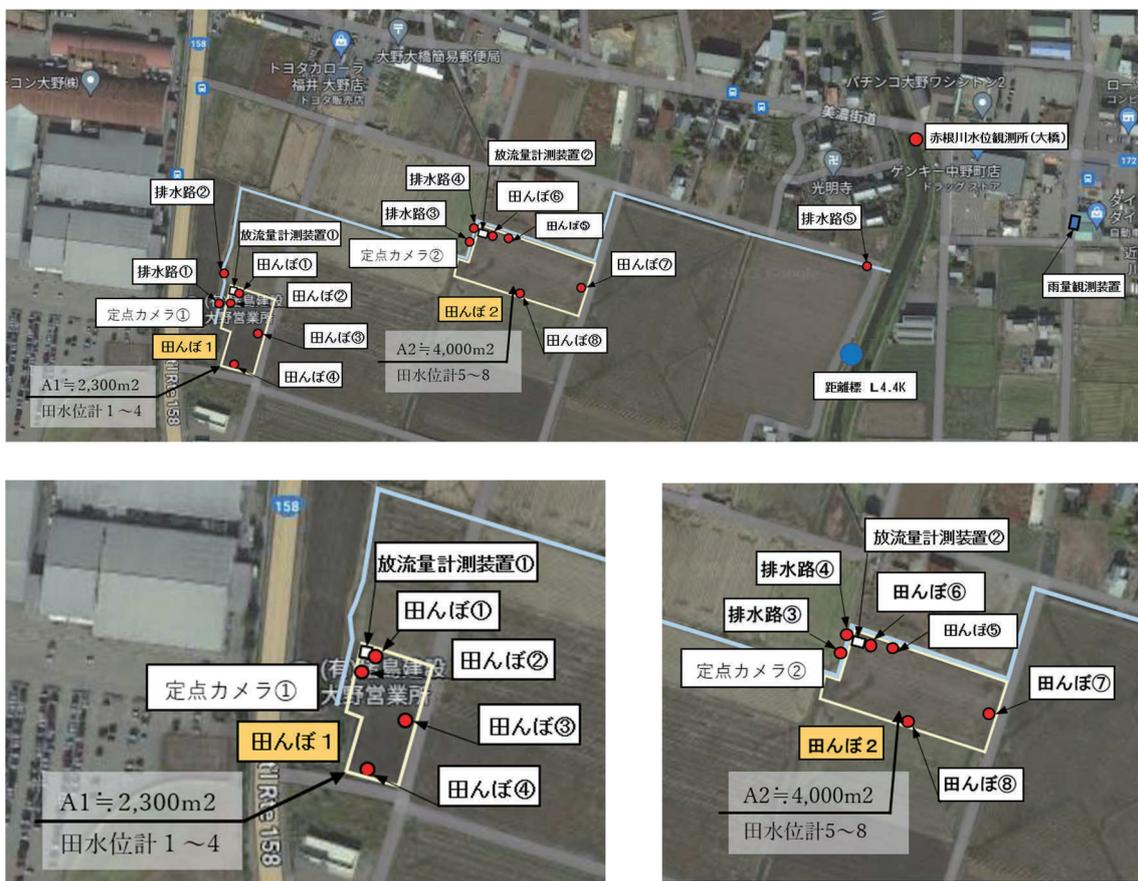


写真 2.5 水位計の設置位置

表 2.5 設置位置と水位計の番号

		水位計No
田んぼ1	放流量計測装置①	No.2
	田んぼ①	No.5
	田んぼ②	No.3
	田んぼ③	No.4
	田んぼ④	No.10
田んぼ2	放流量計測装置②	No.1
	田んぼ⑤	No.15
	田んぼ⑥	No.11
	田んぼ⑦	No.12
	田んぼ⑧	No.13
排水路	排水路①	No.9
	排水路②	No.8
	排水路③	No.14
	排水路④	No.6
	排水路⑤	No.7

第3章 水位計測データとその解析

3.1 湛水試験の水位計測

本研究では、田んぼ1,2において4月11日～4月15日(排水制御板φ150mm)と4月15日～4月20日(排水制御板φ50mm)の2回に分けて湛水試験を行った。湛水試験は、日中に配水管の給水バルブを開けて田んぼ内に給水し(夜間は給水停止)、満水位の状態から排水を行い、その間の水位変動を記録した。

3.1.1 4月11日～4月15日(排水制御板φ150mm)の水位変動

4月11日～4月15日の湛水試験は、排水柵の排水制御板φ150mmを用いて行った。田んぼ1,2の水位計で計測した水面標高と同時刻の10分間降雨量データを図3.1.1と図3.1.2に示す。両図は、左縦軸に水面標高[m]を表し、右縦軸に10分間降雨量[mm]を表す。横軸は、4月11日14時30分を0とおき、4月15日9時30分までの10分間隔のデータ数を表している。

図3.1.1と図3.1.2において、水面標高の変化しているところを区切ると6つの区間に分割することができる。

ここで、区間①,③は、排水柵内に設置した水位計(田んぼ1のNo.2と田んぼ2のNo.1)の水面標高に大きな変化はないが、水田内各所に設置した水位計の水面標高が徐々に低下しており、給水停止時間中の漏水による水位低下を捉えている。区間⑤でも、排水柵内水位計の水面標高が一旦は上昇するもののその後の変化はないが、水田内水位計の水面標高は徐々に低下しており、漏水による水位低下を捉えている。

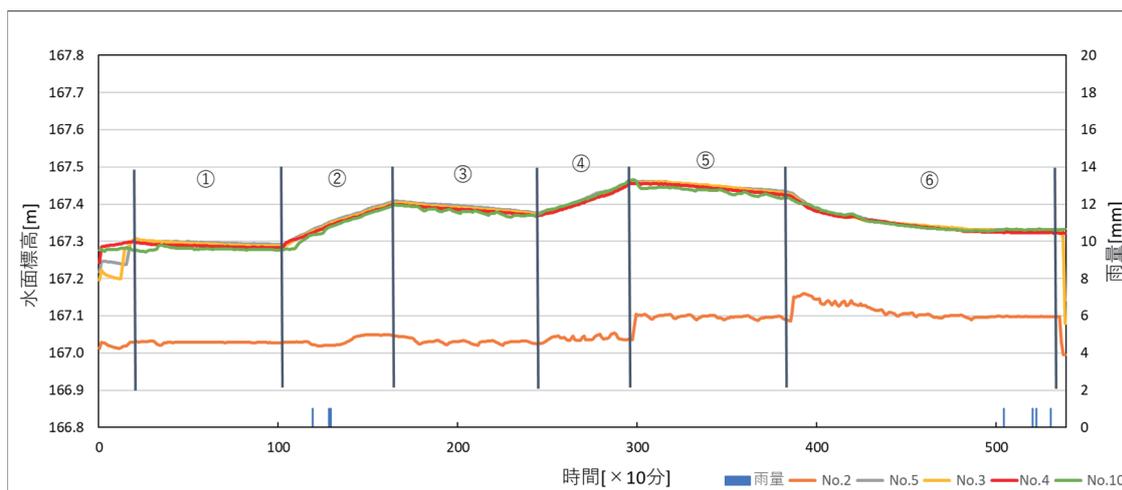


図 3.1.1 田んぼ1 排水制御板φ150mmの水位変動

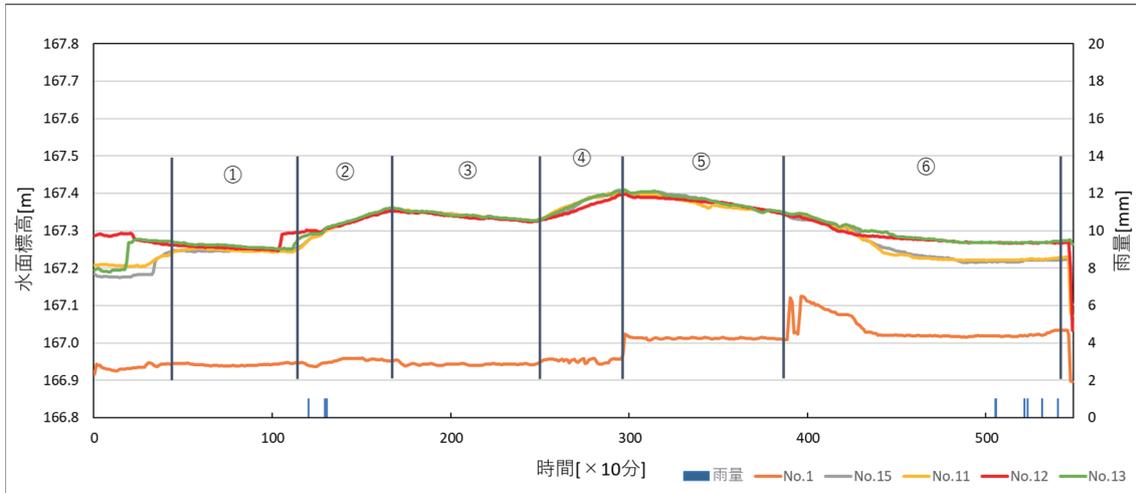


図 3.1.2 田んぼ 2 排水制御板 φ 150 mm の水位変動

また、区間②, ④は、排水柵内水位計の水面標高に大きな変化はないが、水田内水位計の水面標高が上昇していることから、田んぼ内に水を貯めている(給水している)時間の水位上昇を捉えている。

そして、区間⑥は、排水柵内水位計の水面標高が大きく上昇した後、急激に低下する変化を見せており、水田内水位計も水面標高が低下しているため、排水制御板 φ 150 mm を通過して排水されている時間の水位低下を捉えていることが分かる。

つまり、区間①, ③, ⑤は給水停止時間中の漏水による水位低下であり、区間②, ④は給水時間中の水位上昇、区間⑥は排水制御板を通過して排水されている時間の水位低下を表している。

(1) 漏水による水位低下の解析

ここでは、図 3.1.1, 図 3.1.2 の区間①, ③, ⑤で生じている漏水による水位低下に着目し、漏水による水面標高の変化速度と漏水流量の算出を試みた。区間③の 3 時間分の水面標高データを図 3.2.1 と図 3.2.2 に示す。両図は、縦軸に水面標高 [m] を表し、横軸には 10 分間隔のタイムステップ数を表している。水田内の 4 カ所に設置した水位計の 3 時間での水面標高変化からそれぞれの低下値と平均値を表 3.1 に示す。また、表 3.1 に示した水面低下値を時間で割って漏水による水面低下速度を算出し、算出した水面低下速度にそれぞれ田んぼ 1 の面積 2,300 m² と田んぼ 2 の面積 4,000 m² を掛けて漏水流量を算出した。表 3.1 に漏水による水面低下速度と漏水流量を示す。

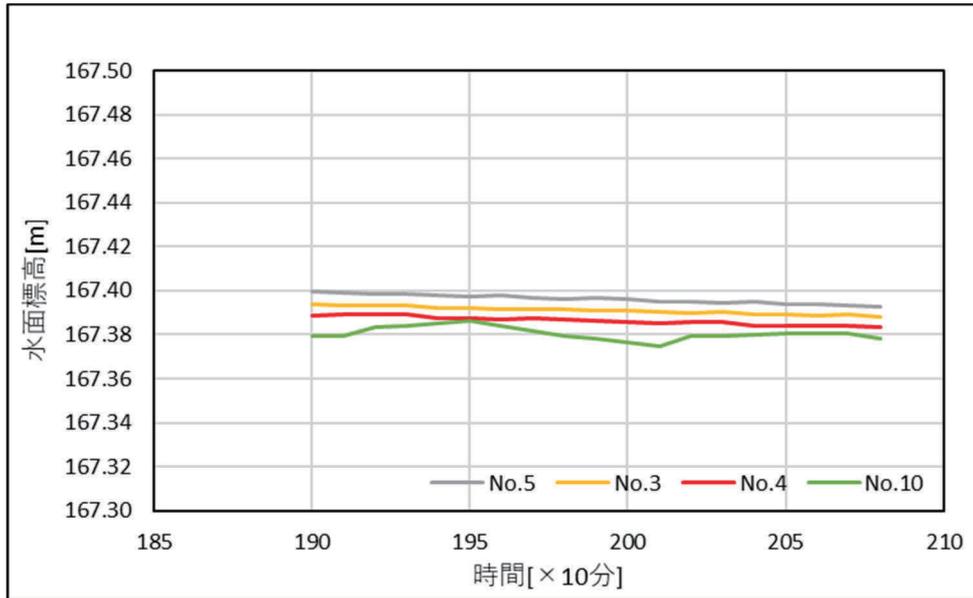


図 3.2.1 漏水による 3 時間での水面低下 (田んぼ 1)

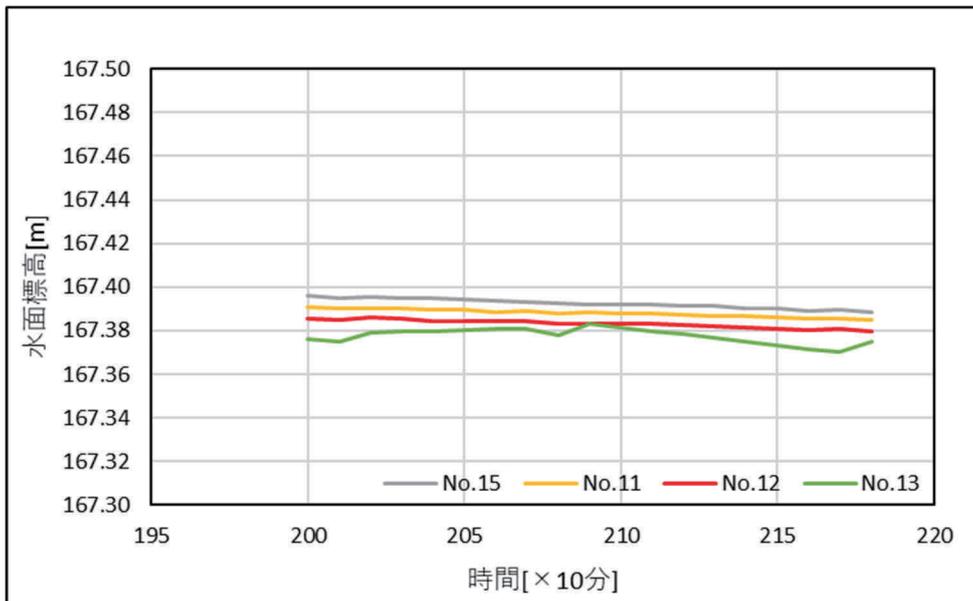


図 3.2.2 漏水による 3 時間での水面低下 (田んぼ 2)

表 3.1 漏水による 3 時間での水面低下値とその平均値

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10	平均値
低下値[m]	0.0068	0.0055	0.0055	0.0013	0.00477
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13	平均値
低下値[m]	0.0078	0.0061	0.0060	0.0016	0.00538

表 3.2 漏水による水面低下速度と漏水流量

φ 150	水面低下速度[m/s]	漏水流量[m ³ /s]
田んぼ1	4.42130×10^{-7}	1.01690×10^{-3}
田んぼ2	4.97685×10^{-7}	1.99074×10^{-3}

表 3.2 の漏水による水面低下速度と漏水流量の算出結果から、漏水による水面低下速度は田んぼ 2 の方がやや速く、漏水流量は田んぼ 2 が田んぼ 1 の約 2 倍となった。ここでの水面低下速度は、単位面積当りの漏水流量と等しいので、面積の違いが漏水流量の差となって現れていると言える。

(2) 給水による水位上昇の解析

ここでは、図 3.1.1、図 3.1.2 の区間②、④で生じている給水による水位上昇に着目し、給水による水面標高の変化速度と給水流量の算出を試みた。区間④の 3 時間分の水面標高データを図 3.3.1 と図 3.3.2 に示す。両図は、縦軸に水面標高[m]を表し、横軸には 10 分間隔のタイムステップ数を表している。水田内の 4 カ所に設置した水位計の 3 時間での水面標高変化からそれぞれの上昇値と平均値を表 3.3 に示す。また、表 3.3 に示した水面上昇値を時間で割って給水による水面上昇速度を算出し、算出した水面上昇速度にそれぞれ田んぼ 1 の面積と田んぼ 2 の面積を掛けて給水流量を算出した。表 3.4 に給水による水面上昇速度と給水流量を示す。

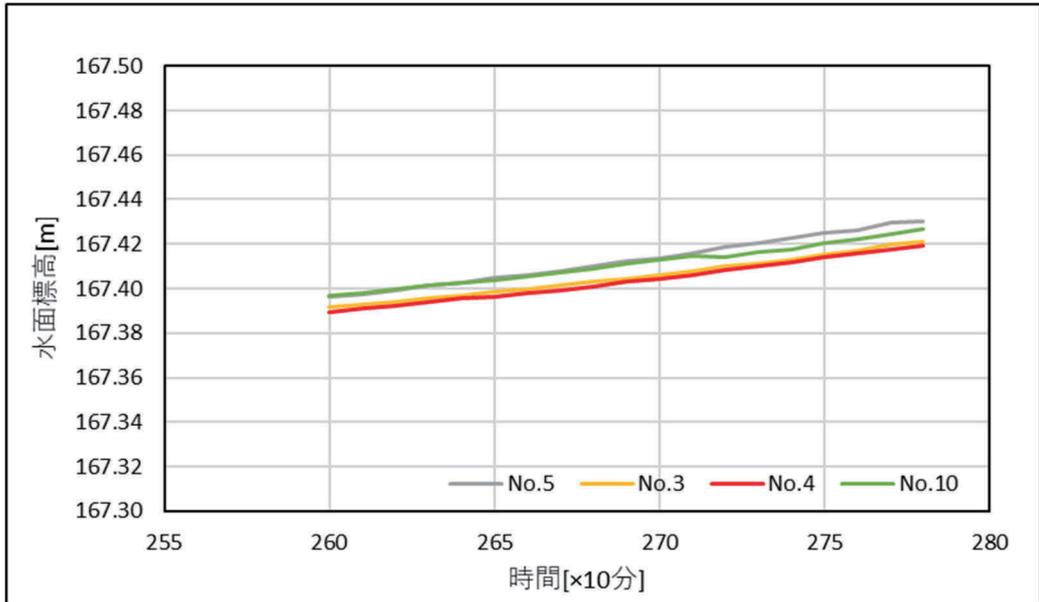


図 3.3.1 給水による 3 時間での水面上昇 (田んぼ 1)

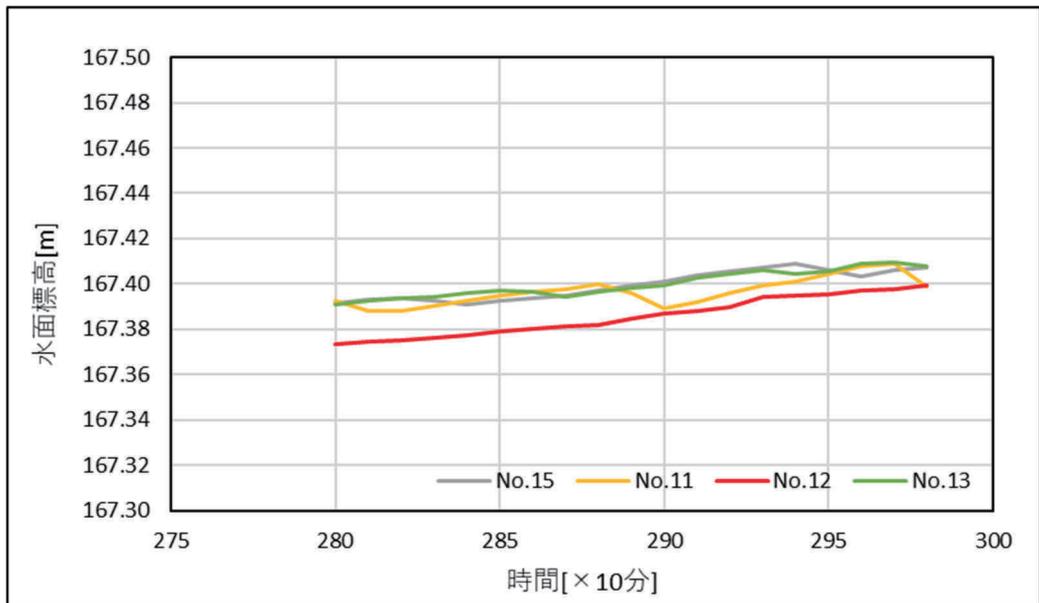


図 3.3.2 給水による 3 時間での水面上昇 (田んぼ 2)

表 3.3 給水による 3 時間での水面上昇値とその平均値

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10	平均値
上昇値[m]	0.0341	0.0290	0.0301	0.0301	0.0308
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13	平均値
上昇値[m]	0.0160	0.00640	0.0264	0.0169	0.0164

表 3.4 給水による水面上昇速度と給水流量

φ 150	水面上昇速度[m/s]	給水流量[m ³ /s]
田んぼ1	2.85417×10^{-6}	6.56458×10^{-3}
田んぼ2	1.52083×10^{-6}	6.08333×10^{-3}

表 3.4 の給水による水面上昇速度と給水流量の算出結果から、給水による水面上昇速度は田んぼ 1 の方が速く、給水流量は田んぼ 1 の方がやや多くなった。給水流量はバルブの開度や配水管の圧力による違いがあると推察できるので、ここでの給水流量の差もそれらの原因によるものと考えられる。水面上昇速度の違いは、田んぼ 1, 2 で同程度の給水流量であれば、面積が大きいほど水面上昇速度が遅くなることが理解できる。

(3) 排水制御板φ150 mm を用いた排水による水位低下の解析

ここでは、図 3.1.1, 図 3.1.2 の区間⑥において、排水制御板φ150 mm を通過して排水されている時間の水位低下に着目し、排水制御板φ150 mm を用いた排水による水面標高の変化速度と排水流量の算出を試みた。区間⑥の 3 時間分の水面標高データを図 3.4.1 と図 3.4.2 に示す。両図は、縦軸に水面標高[m]を表し、横軸には 10 分間隔のタイムステップ数を表している。水田内の 4 カ所に設置した水位計の 3 時間での水面標高変化からそれぞれの低下値と平均値を表 3.5 に示す。また、表 3.5 に示した水面低下値を時間で割って排水による水面低下速度を算出し、算出した水面低下速度にそれぞれ田んぼ 1 の面積と田んぼ 2 の面積を掛けて排水制御板φ150 mm を用いた時の排水流量を算出した。表 3.6 に排水制御板φ150 mm を用いた時の水面低下速度と排水流量を示す。

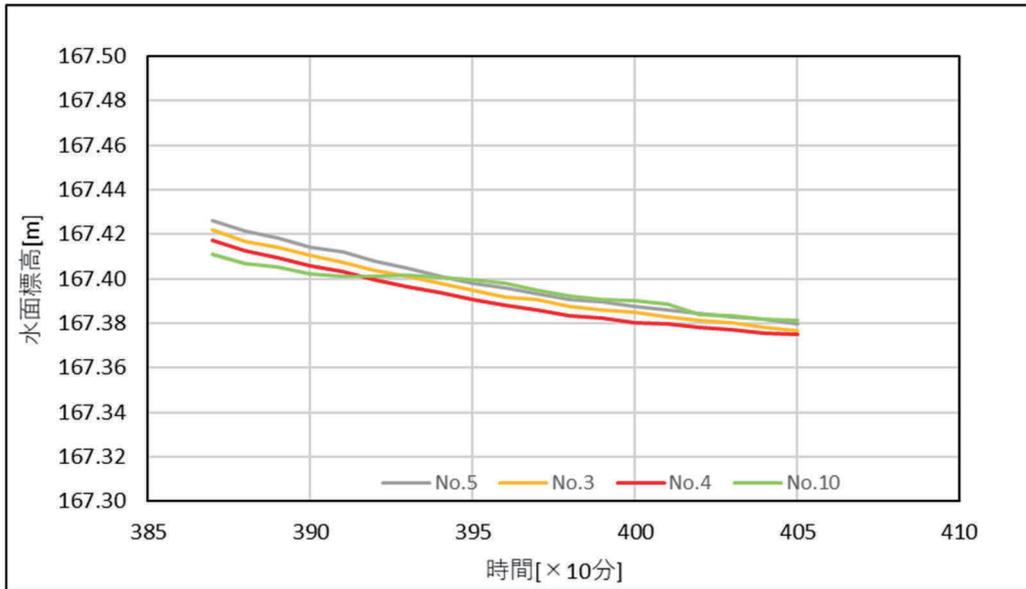


図 3.4.1 排水制御板 φ 150 mm を用いた排水による水面低下 (田んぼ 1)

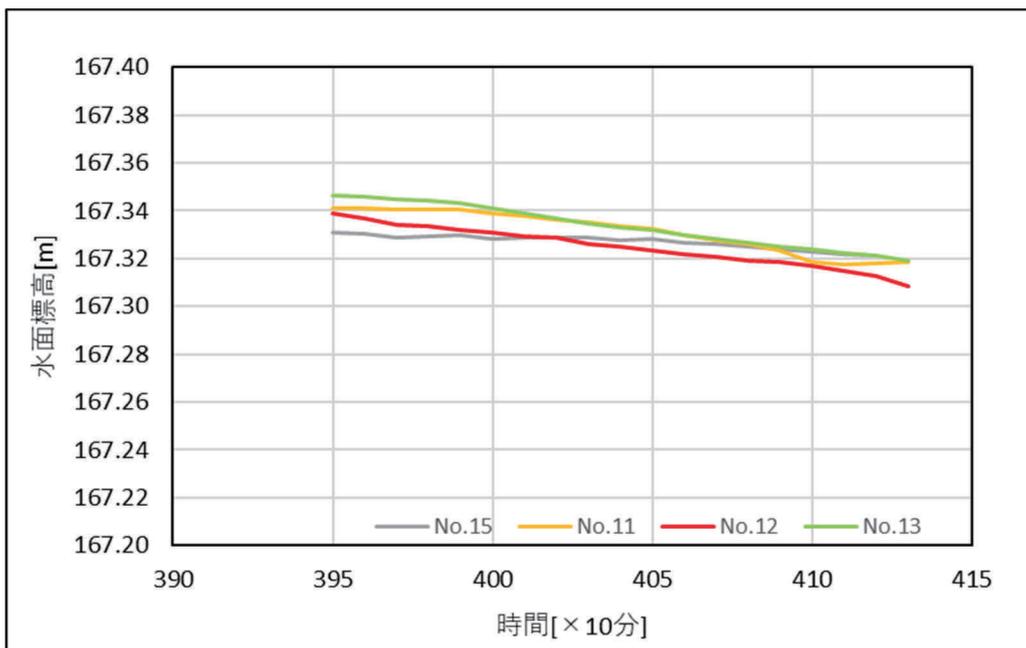


図 3.4.2 排水制御板 φ 150 mm を用いた排水による水面低下 (田んぼ 2)

表 3.5 排水時(φ 150 mm)3 時間での水面低下値とその平均値

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10	平均値
低下値[m]	0.0462	0.0454	0.0422	0.0294	0.0408
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13	平均値
低下値[m]	0.0099	0.0228	0.0301	0.0272	0.0225

表 3.6 排水時(φ 150 mm)の水面低下速度と排水流量

φ 150	水面低下速度[m/s]	排水流量[m ³ /s]
田んぼ1	3.77778×10^{-6}	8.68889×10^{-3}
田んぼ2	2.08333×10^{-6}	8.33333×10^{-3}

表 3.6 の排水制御板 φ 150 mm を用いた排水による水面低下速度と排水流量の算出結果から、排水時の水面低下速度は田んぼ 1 の方が速く、排水流量は田んぼ 1 がやや多くなった。排水流量は排水柵の越流堰を超える水深によって決定するので、田んぼの貯留水深が深いほど排水流量も多くなったと考えられる。

3.1.2 4月15日～4月20日(排水制御板φ50 mm)の水位変動

4月15日～4月20日の湛水試験は、排水柵の排水制御板φ50 mmを用いて行った。田んぼ1,2の水位計で計測した水面標高と同時刻の10分間降雨量データを図3.5.1と図3.5.2に示す。両図は、左縦軸に水面標高[m]を表し、右縦軸に10分間降雨量[mm]を表す。横軸は、4月15日9時40分を0とおき、4月20日8時30分までの10分間隔のデータ数を表している。

図3.5.1と図3.5.2において、水面標高の変化しているところを区切ると5つの区間に分割することができる。

ここで、区間①,③は、排水柵内水位計(田んぼ1のNo.2と田んぼ2のNo.1)の水面標高に大きな変化はないが、水田内水位計の水面標高が上昇していることから、田んぼ内に給水している時間の水位上昇を捉えている。

また、区間②は、排水柵内に設置した水位計の水面標高に大きな変化はないが、水田内各所に設置した水位計の水面標高が僅かに低下しており、給水停止時間中の漏水による水位低下を捉えている。

そして、区間④は、排水柵内水位計の水面標高が一旦上昇した後に低下する変化を見せており、水田内水位計も水面標高が低下しているため、排水制御板φ50 mmを通過して排水されている時間の水位低下を捉えていることが分かる。なお、区間⑤も排水による水面低下を捉えているものと推察されるが、水面低下速度が緩やかになっていることから、区間⑤では水田内の水をほぼ排出した状態であると考えられる。

つまり、区間①,③は給水時間中の水位上昇であり、区間②は給水停止時間中の漏水による水位低下、区間④は排水制御板を通過して排水されている時間の水位低下を表している。

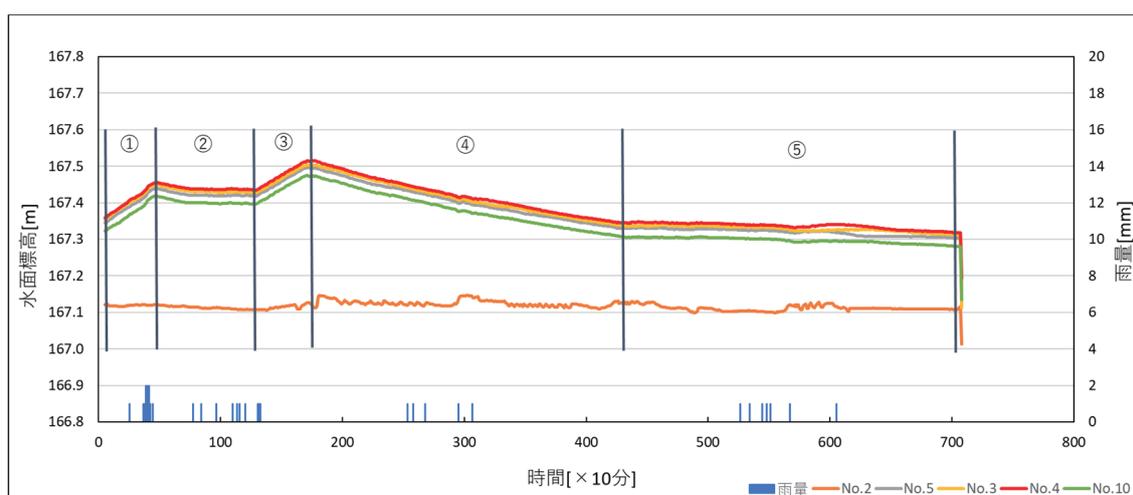


図 3.5.1 田んぼ 1 排水制御板 φ 50 mm の水位変動

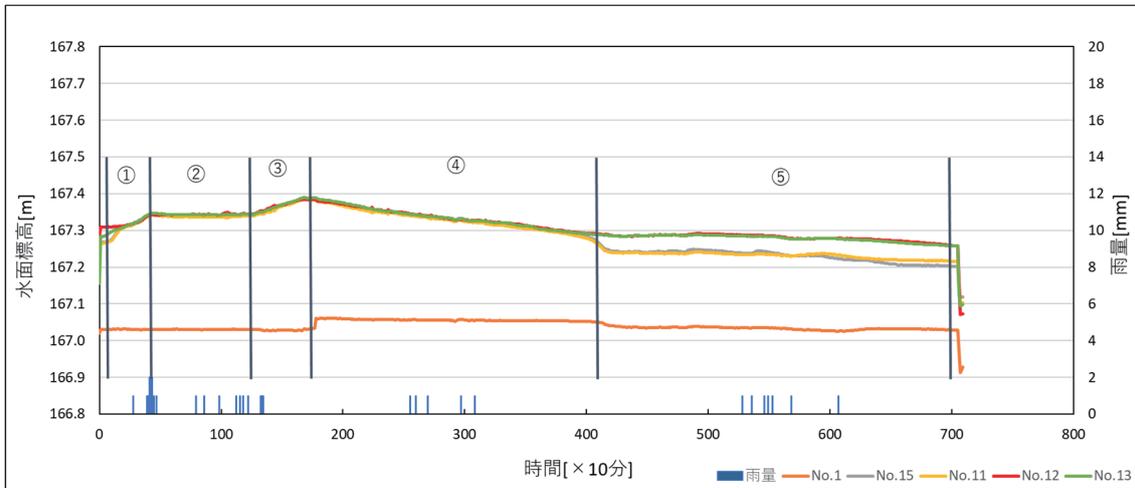


図 3.5.2 田んぼ 2 排水制御板 φ50 mm の水位変動

(1) 給水による水位上昇の解析

ここでは、図 3.5.1、図 3.5.2 の区間①、③で生じている給水による水位上昇に着目し、給水による水面標高の変化速度と給水流量の算出を試みた。区間③の 3 時間分の水面標高データを図 3.6.1 と図 3.6.2 に示す。両図は、縦軸に水面標高[m]を表し、横軸には 10 分間隔のタイムステップ数を表している。水田内の 4 カ所に設置した水位計の 3 時間での水面標高変化からそれぞれの上昇値と平均値を表 3.7 に示す。また、表 3.7 に示した水面上昇値を時間で割って給水による水面上昇速度を算出し、算出した水面上昇速度にそれぞれ田んぼ 1 の面積と田んぼ 2 の面積を掛けて給水流量を算出した。表 3.8 に給水による水面上昇速度と給水流量を示す。

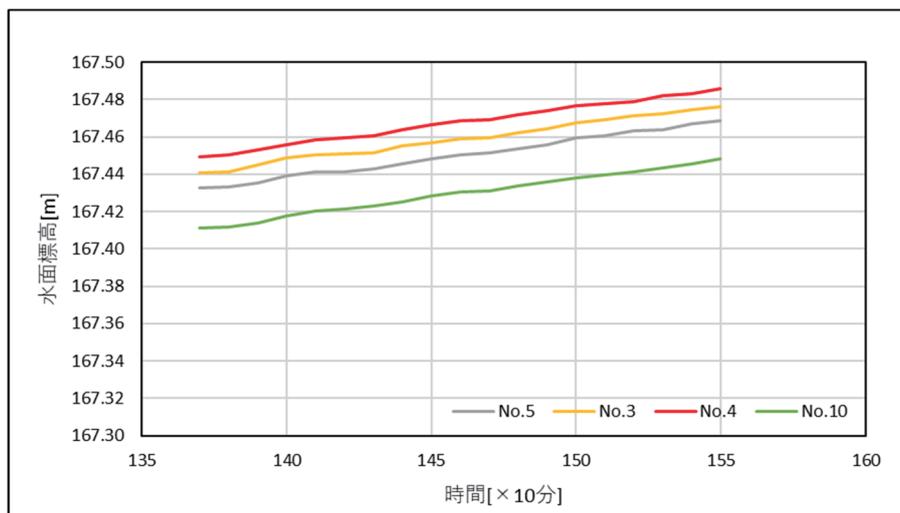


図 3.6.1 給水による 3 時間での水面上昇（田んぼ 1）

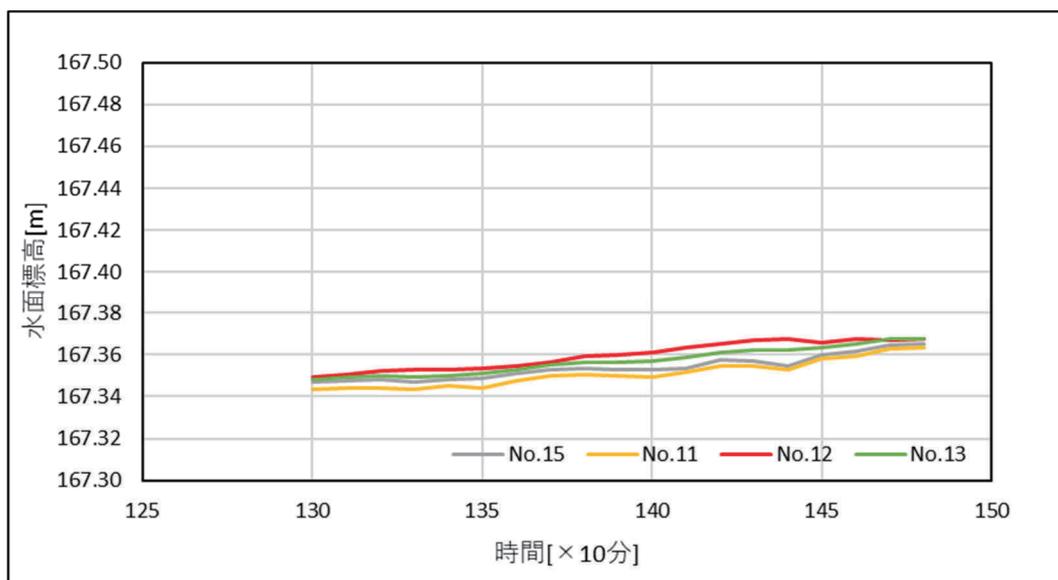


図 3.6.2 給水による 3 時間での水面上昇 (田んぼ 2)

表 3.7 給水による 3 時間での水面上昇値とその平均値

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10	平均値
上昇値[m]	0.0359	0.0352	0.0363	0.0369	0.0361
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13	平均値
上昇値[m]	0.0183	0.02030	0.0184	0.0193	0.0191

表 3.8 給水による水面上昇速度と給水流量

φ50	水面上昇速度[m/s]	給水流量[m ³ /s]
田んぼ1	3.34028×10^{-6}	7.68264×10^{-3}
田んぼ2	1.76620×10^{-6}	7.06481×10^{-3}

表 3.8 の給水による水面上昇速度と給水流量の算出結果から、給水による水面上昇速度は田んぼ 1 の方が速く、給水流量は田んぼ 1 の方がやや多くなった。湛水試験時の給水において、水面上昇速度、給水流量ともに算出結果は 1 回目 (表 3.4) よりも 2 回目の方が大きくなった。

(2) 漏水による水位低下の解析

ここでは、図 3.5.1、図 3.5.2 の区間②で生じている漏水による水位低下に着目し、漏水による水面標高の変化速度と漏水流量の算出を試みた。区間②の3時間分の水面標高データを図 3.7.1 と図 3.7.2 に示す。両図は、縦軸に水面標高[m]を表し、横軸には10分間隔のタイムステップ数を表している。水田内の4カ所に設置した水位計の3時間での水面標高変化からそれぞれの低下値と平均値を表 3.9 に示す。また、表 3.9 に示した水面低下値を時間で割って漏水による水面低下速度を算出し、算出した水面低下速度にそれぞれ田んぼ1と田んぼ2の面積を掛けて漏水流量を算出した。表 3.10 に漏水による水面低下速度と漏水流量を示す。

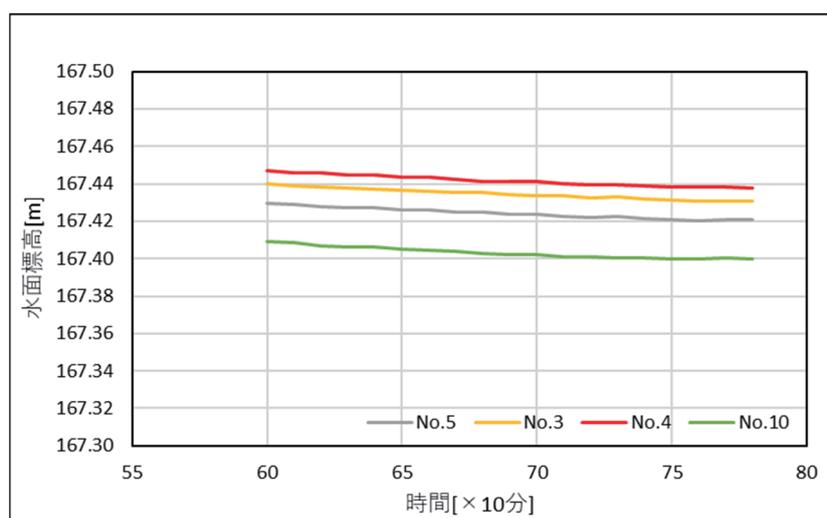


図 3.7.1 漏水による3時間での水面低下（田んぼ1）

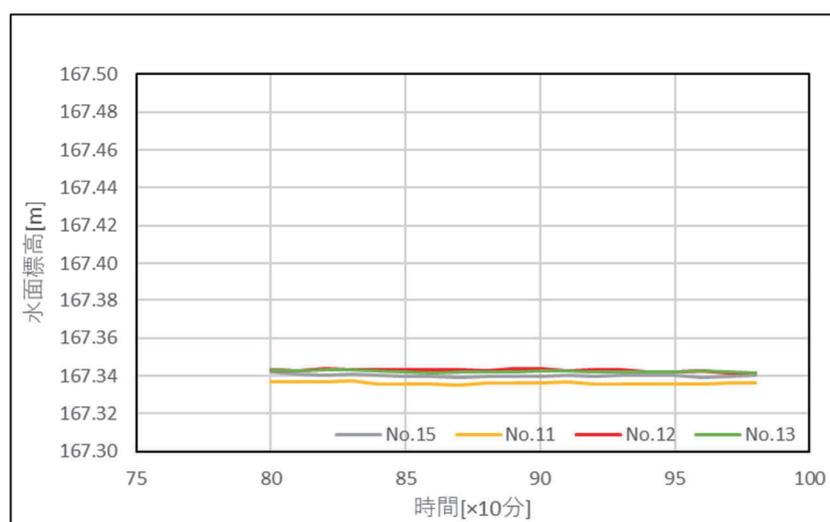


図 3.7.2 漏水による3時間での水面低下（田んぼ2）

表 3.9 漏水による 3 時間での水面低下値とその平均値

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10	平均値
低下値[m]	0.0087	0.0092	0.0089	0.0092	0.00900
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13	平均値
低下値[m]	0.0017	0.0005	0.0017	0.0015	0.00135

表 3.10 漏水による水面低下速度と漏水流量

φ 50	水面低下速度[m/s]	漏水流量[m ³ /s]
田んぼ1	8.33333×10^{-7}	1.91667×10^{-3}
田んぼ2	1.25000×10^{-7}	0.50000×10^{-3}

表 3.10 の漏水による水面低下速度と漏水流量の算出結果から、田んぼ 1 の値が田んぼ 2 に比べてとても大きいことが分かる。1 回目の湛水試験の結果（表 3.2）と比較すると、漏水による水面低下速度、漏水流量は田んぼ 2 で大幅に減少したが、田んぼ 1 では約 2 倍に増加する結果となった。田んぼからの漏水は、泥分が漏水箇所を塞ぐことで湛水 2 回目の方で漏水量が低下するものと思われたが、田んぼ 1 では逆に漏水量が増加した。その原因については把握できていない。

(3) 排水制御板 φ 50 mm を用いた排水による水位低下の解析

ここでは、図 3.5.1、図 3.5.2 の区間④において、排水制御板 φ 50 mm を通過して排水されている時間の水位低下に着目し、排水制御板 φ 50 mm を用いた排水による水面標高の変化速度と排水流量の算出を試みた。区間④の 3 時間分の水面標高データを図 3.8.1 と図 3.8.2 に示す。両図は、縦軸に水面標高[m]を表し、横軸には 10 分間隔のタイムステップ数を表している。水田内の 4 カ所に設置した水位計の 3 時間での水面標高変化からそれぞれの低下値と平均値を表 3.11 に示す。また、表 3.11 に示した水面低下値を時間で割って排水による水面低下速度を算出し、算出した水面低下速度にそれぞれ田んぼ 1 の面積と田んぼ 2 の面積を掛けて排水制御板 φ 50 mm を用いた時の排水流量を算出した。表 3.12 に排水制御板 φ 50 mm を用いた時の水面低下速度と排水流量を示す。

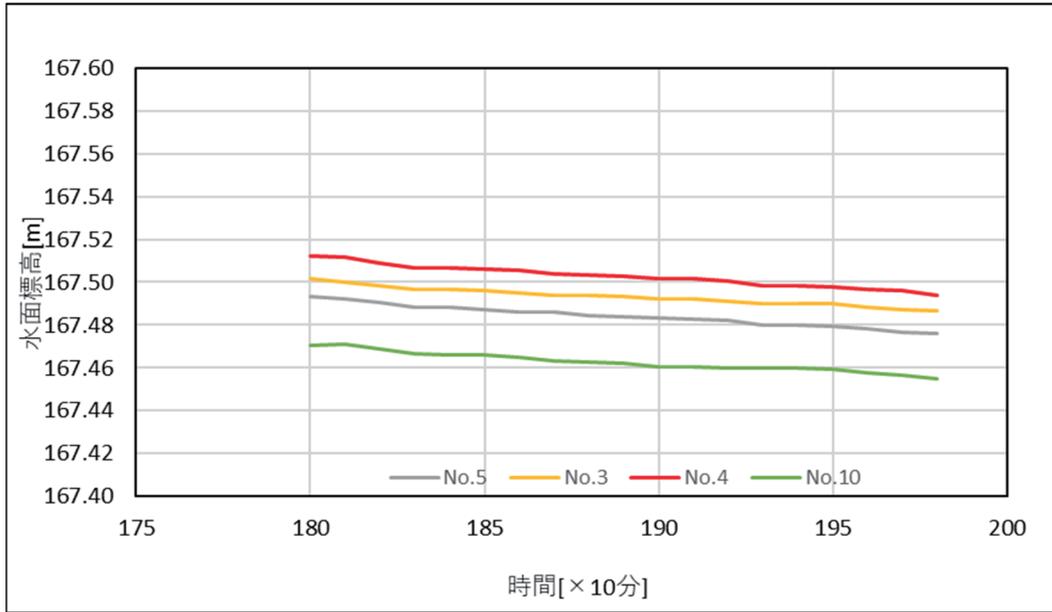


図 3. 8. 1 排水制御板 φ 50 mm を用いた排水による水面低下 (田んぼ 1)

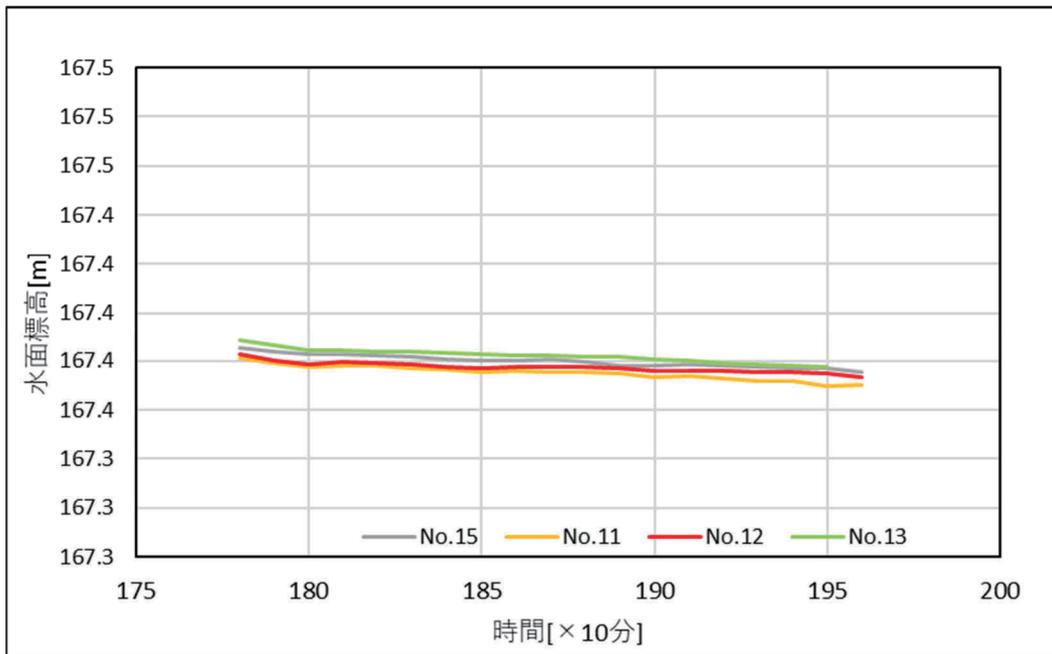


図 3. 8. 2 排水制御板 φ 50 mm を用いた排水による水面低下 (田んぼ 2)

表 3.11 排水時(φ 50 mm)3 時間での水面低下値とその平均値

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10	平均値
低下値[m]	0.0173	0.0152	0.0181	0.0158	0.0166
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13	平均値
低下値[m]	0.0100	0.0111	0.0096	0.0114	0.0105

表 3.12 排水時(φ 50 mm)の水面低下速度と排水流量

φ 50	水面低下速度[m/s]	排水流量[m ³ /s]
田んぼ1	1.53704×10^{-6}	3.53519×10^{-3}
田んぼ2	0.97454×10^{-6}	3.89815×10^{-3}

表 3.12 の排水制御板 φ 50 mm を用いた排水による水面低下速度と排水流量の算出結果から、排水時の水面低下速度は田んぼ 1 の方が速く、排水流量は田んぼ 2 がやや多くなった。

3.1.3 排水制御板φ150 mm とφ50 mm の違いによる排水量の比較

田んぼ1,2における1回目の湛水試験（排水制御板φ150 mm）と2回目の湛水試験（排水制御板φ50 mm）の水面低下速度と排水流量の算出結果の比較を表3.13に示す。田んぼ1,2のどちらも排水制御板をφ150 mm からφ50 mm に変更することにより、大幅に排水流量を制限できていることが分かる。満水位の状態から排水を完了するまでの時間を比較すると、排水制御板φ150 mm では田んぼ1で約13時間、田んぼ2で約25時間であり、面積比と同程度の所要時間差となった。それに対し、排水制御板φ50 mm では排水完了までに田んぼ1,2のどちらも約70時間程度が必要であった。また、排水制御板φ150 mm では排水時に排水樹内の越流堰を超える水深が約10 cmであったのに対し、排水制御板φ50 mm では約3 cmであった。

これらの現地計測で得られた結果は、田んぼの排水口に排水制御板を設置した際に、その排水遅延効果を算出するための検証データとして有効であると考えられる。ただし、ここで示した結果は、湛水試験時の水位変動データから算出したものであり、営農期間の水田での降雨の貯留とその排水においては異なる結果になることが予想される。

また、漏水流量は給水流量や排水流量へも影響を与える数値であるため、正確に把握することが必要であると考えられる。

表3.13 排水制御板φ150 mm とφ50 mm の違いによる排水量の比較

田んぼ1	水面低下速度[m/s]	排水流量[m ³ /s]
φ150	3.77778×10^{-6}	8.68889×10^{-3}
φ50	1.53704×10^{-6}	3.53519×10^{-3}
田んぼ2	水面低下速度[m/s]	排水流量[m ³ /s]
φ150	2.08333×10^{-6}	8.33333×10^{-3}
φ50	0.97454×10^{-6}	3.89815×10^{-3}

3.2 営農期間の水位計測(6, 7, 8月)

本研究では、令和5年度の営農期間の水位変動について、田んぼ1,2ともに排水制御板φ50mmを用いて計測を実施した。計測期間は、田植え終了後から稲刈り前までの6月,7月,8月であり、3カ月間の結果を得ることができた。計測期間中のデータは、約1ヶ月毎に計測器から計測記録データを取り出し、再度計測器を設置して次の計測記録を開始する方法で実施した。

3.2.1 6月1日～6月26日の水位変動

田んぼ1,2における6月の水面標高と10分間毎の降雨量データを図3.9.1, 図3.9.2に示す。両図は、左縦軸に水面標高[m]を表し、右縦軸に10分間雨量[mm]を表している。横軸は、6月1日15時00分を0とおき、6月26日11時00分までの10分間隔のデータ数を表している。

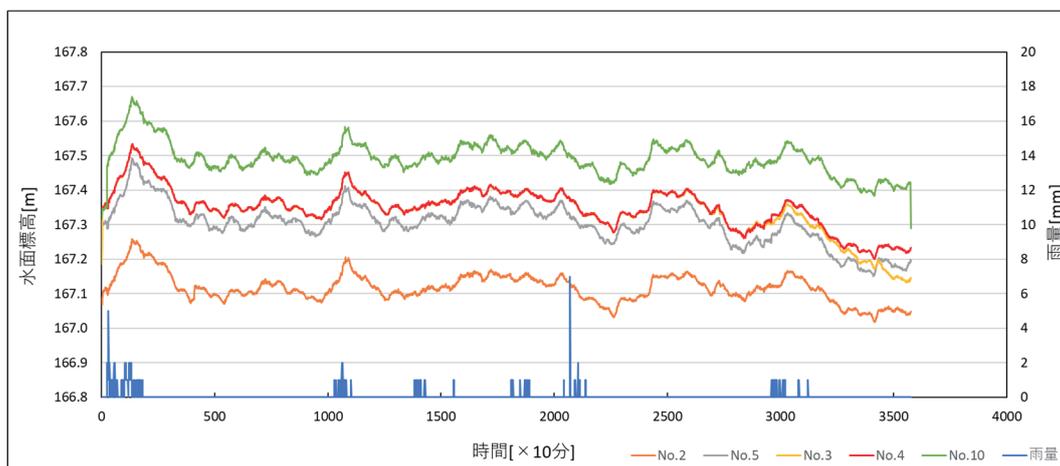


図 3.9.1 田んぼ1 6月の水面標高の変動と降雨量

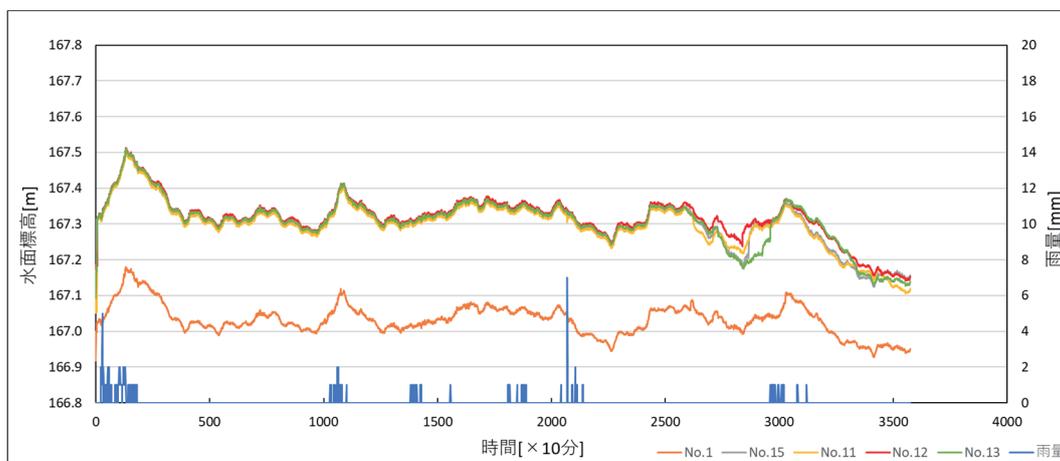


図 3.9.2 田んぼ2 6月の水面標高の変動と降雨量

ここで、**図 3.9.1** と **図 3.9.2** を比較すると、**図 3.9.2** の田んぼ 2 では水田内に設置した 4 カ所の水位計 (No. 15, No. 11, No. 12, No. 13) の値はほぼ同一であるのに対して、**図 3.9.1** の田んぼ 1 の水田内に設置した 4 カ所の水位計 (No. 5, No. 3, No. 4, No. 10) では、水位計 No. 3 と No. 4 の値はほぼ同一であるが、水位計 No. 5 と No. 10 の値は同一となっていない。確認のため、田んぼ 1 の水面標高データについて計測器毎に計測期間中の平均値を算出し、その平均値と各時刻の値の差である変動量を算出した。田んぼ 1 の各水位計の変動量を **図 3.9.3** に示す。**図 3.9.3** から各水位計の水面標高の変化量はほぼ同一であることから、田んぼ 1 の水面標高データにばらつきが生じた原因については、水位計センサーの初期誤差が生じたことにより、水面標高データを算出する段階で現地計測データによる更正が正しく行えていないことが考えられる。

図 3.9.2 の田んぼ 2 の水面標高の変動と **図 3.9.3** の田んぼ 1 の水面標高の変動量に着目すると、両図ともに横軸の 2500 ステップ (6 月 17 日) 以降のデータにおいて、各水位計の値に差が生じてグラフにばらつきが生じていることが分かる。これは、田植え後の苗が生長したことによって、水田内の水面標高の変動が均一でなくなったと推察できる。

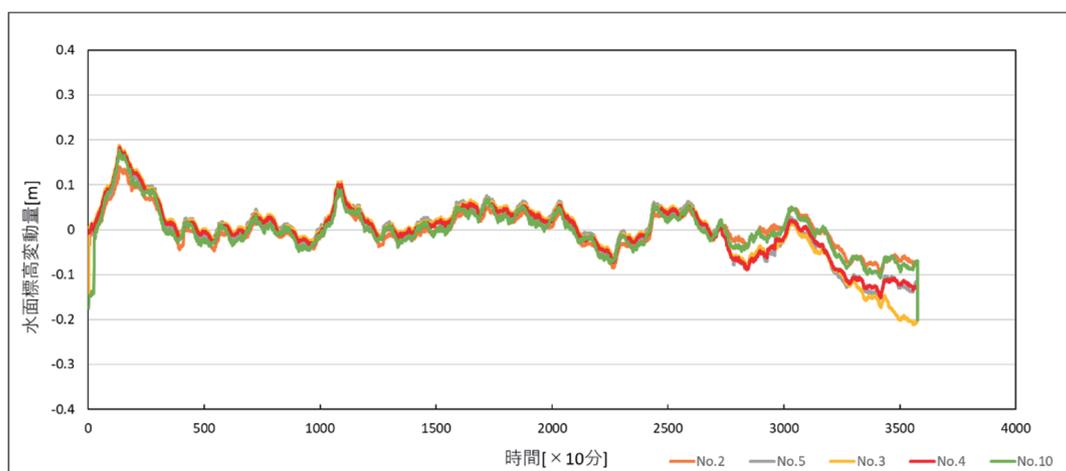


図 3.9.3 田んぼ 1 の各水位計における水面標高の変動量 (6 月)

田植え直後の降雨による水面標高の上昇と下降について、**図 3.9.1**、**図 3.9.2** の横軸タイムステップで 260 ステップまでの降雨量と水面標高の変化に着目する。

図 3.10.1、**図 3.10.2** に田んぼ 1, 2 の 10 分間隔タイムステップで 260 までの水面標高の変化を示す。両図において、雨の降り始めから水面標高がピークとなるまでの積算値は 94 mm であった。この間の田んぼ 1, 2 における各水位計の水面標高の上昇量を **表 3.14** に示す。また、水面標高が下降する際の低下量を **表 3.15** に示す。さらに、水面標高の低下量から算出した降雨後の排水流量と湛水試験時の排水制御板 $\phi 50$ mm の排水流量との比較を **表 3.16** に示す。

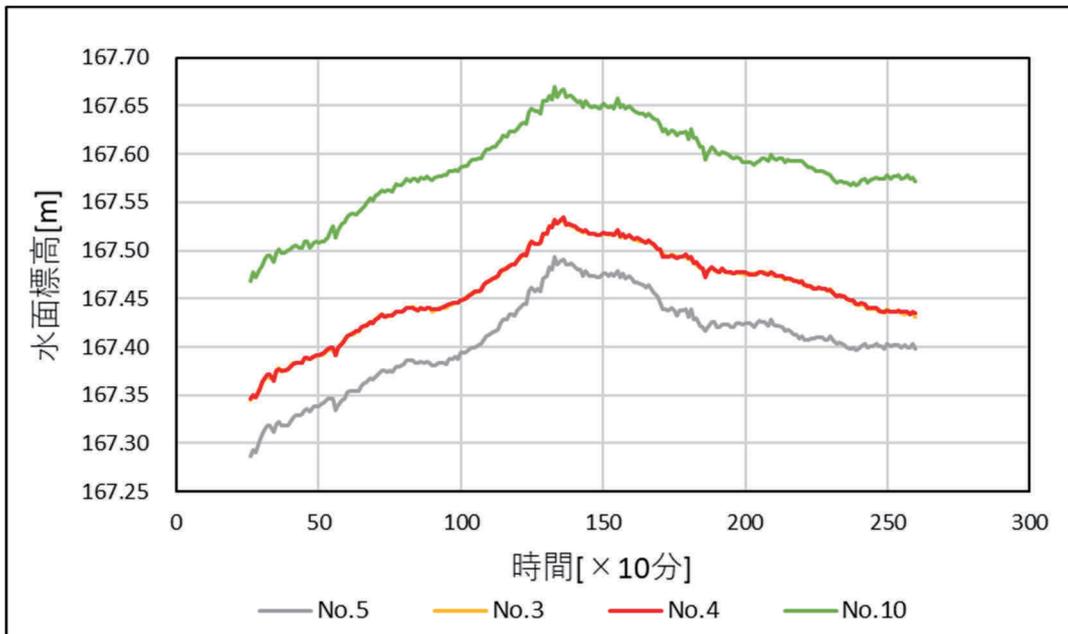


図 3.10.1 6月の田植え直後の降雨による水面標高の変化 (田んぼ 1)

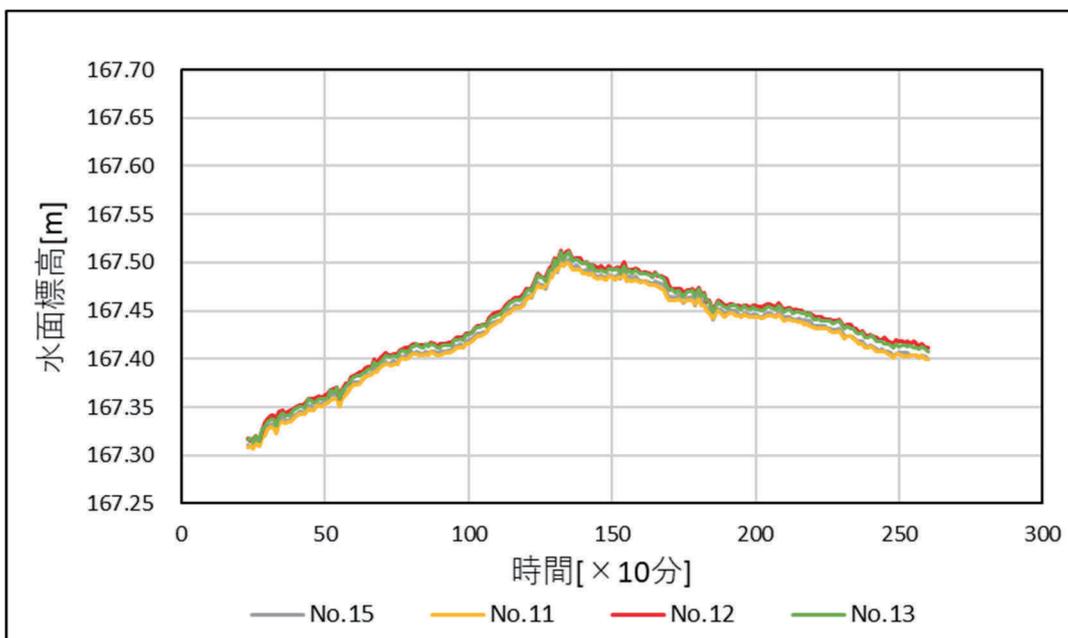


図 3.10.2 6月の田植え直後の降雨による水面標高の変化 (田んぼ 2)

表 3.14 降雨による田んぼ 1, 2 の各水位計の水面標高の上昇量

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10
上昇値[m]	0.206	0.187	0.185	0.201
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13
上昇値[m]	0.195	0.191	0.194	0.195

表 3.15 降雨後の田んぼ 1, 2 の各水位計の水面標高の低下量

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10
低下値[m]	0.095	0.101	0.097	0.098
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13
低下値[m]	0.106	0.100	0.100	0.103

表 3.16 降雨後の排水流量と湛水試験時の排水流量との比較

	排水流量 [m ³ /s]	
	湛水試験(φ 50 mm)	6月
田んぼ1	3.53519×10^{-3}	2.95046×10^{-3}
田んぼ2	3.89815×10^{-3}	5.32552×10^{-3}

降雨量の観測記録では降り始めからの積算値が 94 mm であったにもかかわらず、表 3.14 の降雨による水面標高の上昇量は約 190 mm となっている。田んぼ内に水張りされている場合には、降雨時間中も排水柵前面の堰板を越えた水が排水されていると考えられるため、降雨量よりも水面上少量が少なくなると予想されるが、降雨量に対して水面標高の上昇量が約 2 倍となっている。降雨量と田んぼ内水位上昇量の関係については、今後さらにデータを比較して検証していく必要がある。

湛水試験時の排水流量と降雨の排水流量を比較した表 3.16 から、田んぼ 1 においては湛水試験時の排水流量を降雨の排水流量が下回っているが、田んぼ 2 においては逆に降雨の排水流量が大きな値となっている。これは、田んぼ 2 の水面低下速度が湛水試験時よりも速かったことによるものであり、その原因についてはさらなる検討が必要である。

3.2.2 6月26日～7月28日の水位変動

田んぼ1,2における7月の水面標高と10分間毎の降雨量データを図3.11.1, 図3.11.2に示す. 両図は, 左縦軸に水面標高[m]を表し, 右縦軸に10分間雨量[mm]を表している. 横軸は, 6月26日12時10分を0とおき, 7月28日10時00分までの10分間隔のデータ数を表している. 両図においては, 各水位計の値に差がみられるため, 田んぼ1,2ともに各水位計の水面標高の変動量を算出し, 図3.11.3, 図3.11.4に示す.

また, 図3.11.1, 図3.11.2の水面標高と降雨量のグラフにおいて, 横軸の2500ステップ前に7月13日未明の降雨(降り始めからの積算降雨量134mm)による特徴的な水面標高の変化が捉えられている. 横軸の2350ステップから2500ステップまでの水面標高の変化を図3.12.1, 図3.12.2に示す.

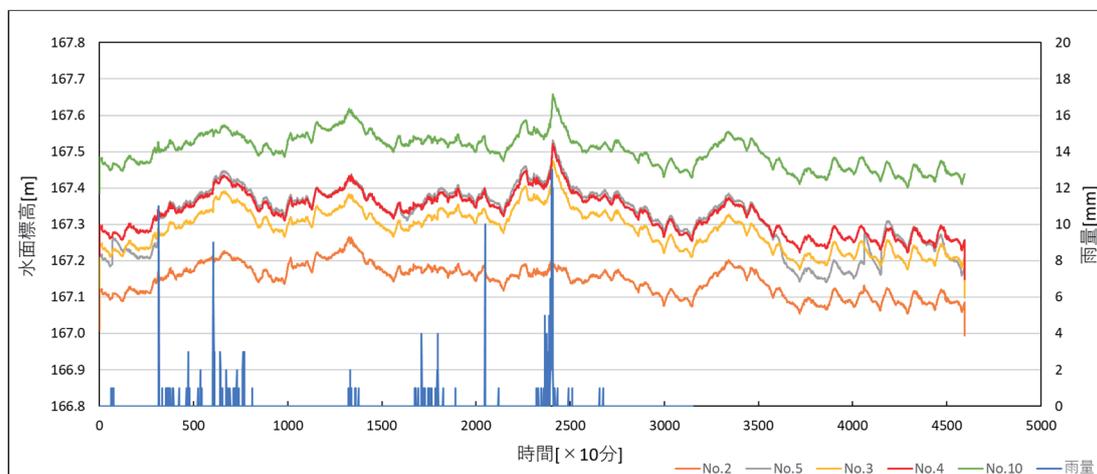


図 3.11.1 田んぼ1 7月の水面標高の変動と降雨量

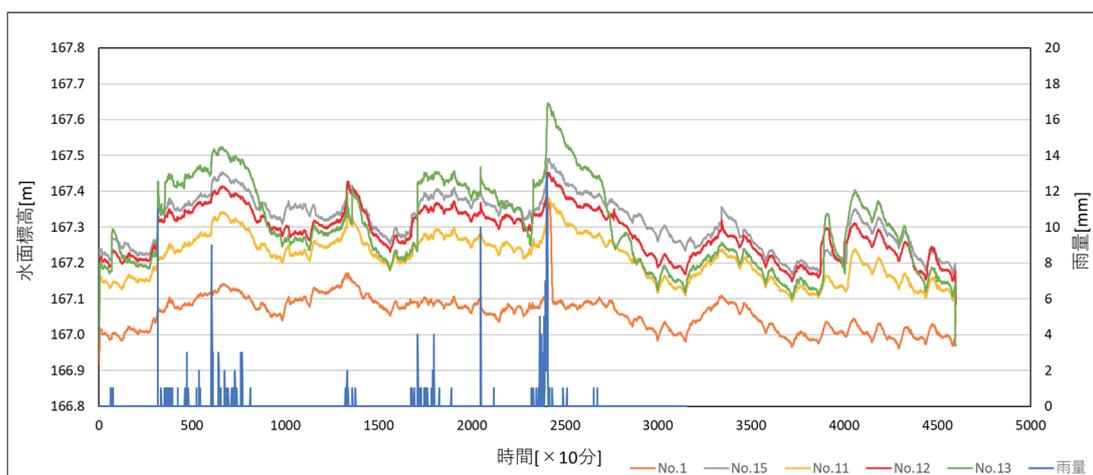


図 3.11.2 田んぼ2 7月の水面標高の変動と降雨量

図 3.11.3 の田んぼ 1 と図 3.11.4 の田んぼ 2 の水面標高変動量を見ると、田んぼ 2 の変動は水位計 No. 13 の変動幅が他の水位計に比べて大きくなっている。後述する 8 月のデータには見られない特徴であり、現段階でその原因については把握できていない。また、横軸の 4000 ステップ以降に現れる周期的な変動は 24 時間周期であり、営農者の日々の水管理による水面変動が捉えられている。

7 月 13 日の降雨による水面標高の変動を示した図 3.12.1, 図 3.12.2 において、雨の降り始めから水面標高がピークとなるまでの積算値は 134 mm であった。この間の田んぼ 1, 2 における各水位計の水面標高の上昇量を表 3.17 に示す。また、水面標高が下降する際の低下量を表 3.18 に示す。さらに、水面標高の低下量から算出した降雨後の排水流量と湛水試験時の排水制御板 φ50 mm の排水流量との比較を表 3.19 に示す。

7 月 13 日の降雨後に田んぼ 2 の排水柵からの排水状況を撮影した写真を写真 3.1 に示す。

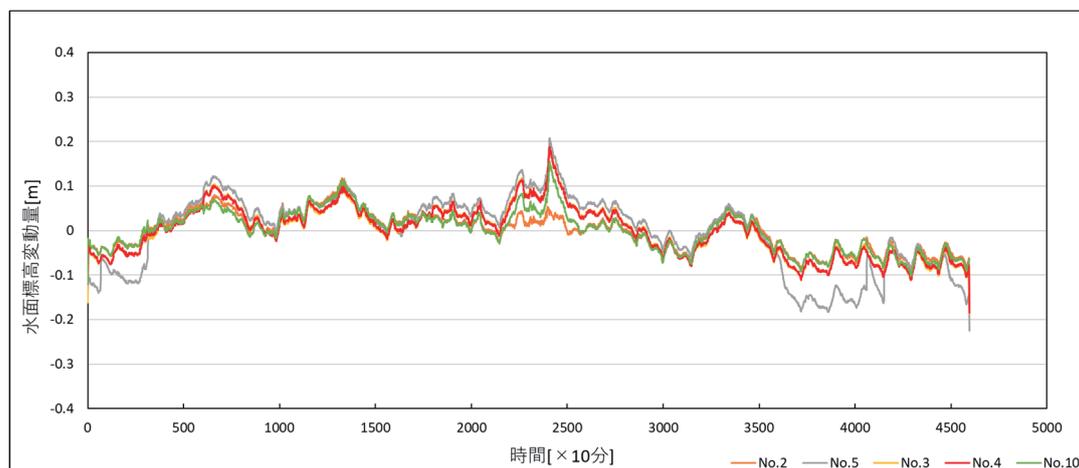


図 3.11.3 田んぼ 1 の各水位計における水面標高の変動量 (7 月)

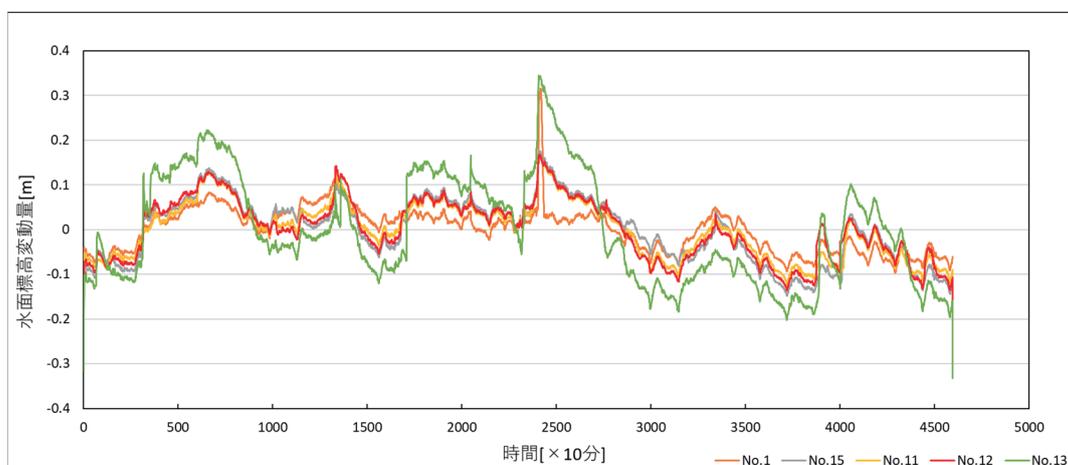


図 3.11.4 田んぼ 2 の各水位計における水面標高の変動量 (7 月)

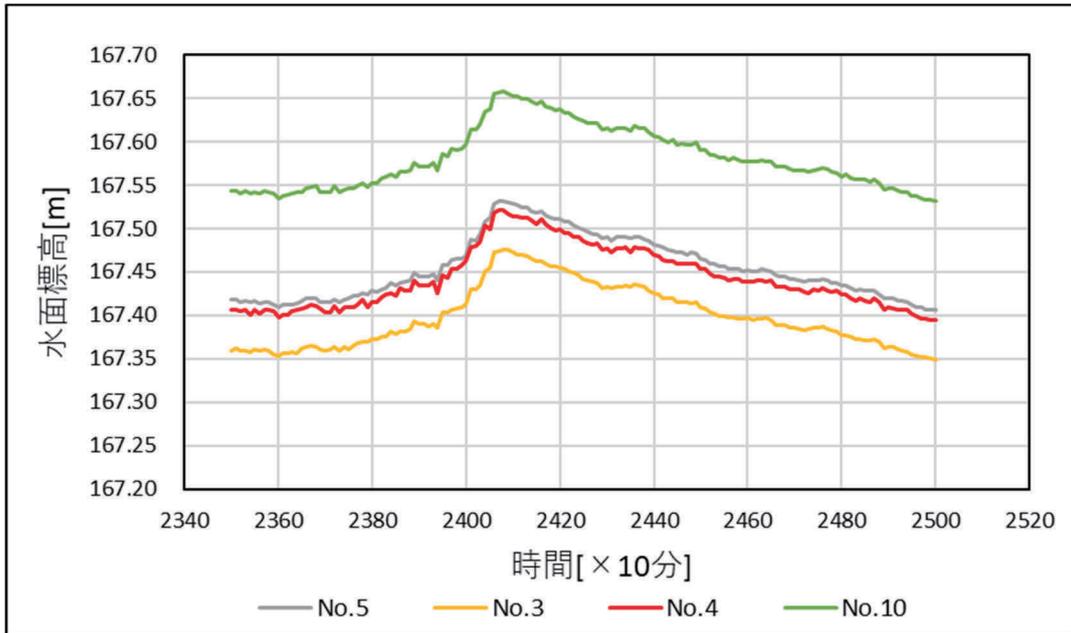


図 3.12.1 6月の田植え直後の降雨による水面標高の変化 (田んぼ 1)

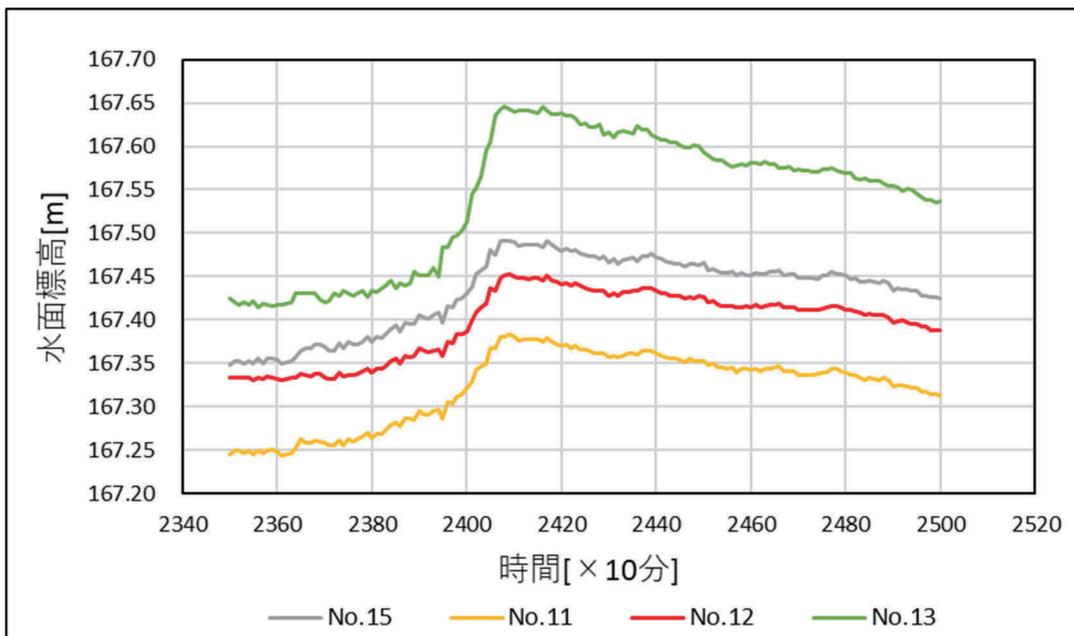


図 3.12.2 6月の田植え直後の降雨による水面標高の変化 (田んぼ 2)

表 3.17 に示した 7 月 13 日の降雨による水面標高上昇量の平均値は、田んぼ 1 で 112.5 mm, 田んぼ 2 で 152.5 mm であった。降雨量の観測記録 134 mm との差については、今後さらにデータの検討を進めていく。また、湛水試験時の排水流量と降雨後の排水流量を比較した表 3.19 においては、田んぼ 1, 2 のどちらも降雨後の排水流量の方が大きな値となっている。このとき田んぼ 2 では、写真 3.1 にあるように排水路の水位が上昇して排水口が水没している状況であった。田んぼ 1 の排水口は水没していないが、排水流量は田んぼ 2 の方が大きい値となった。

表 3.17 降雨による田んぼ 1, 2 の各水位計の水面標高の上昇量

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10
上昇値[m]	0.112	0.115	0.110	0.113
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13
上昇値[m]	0.143	0.134	0.117	0.216

表 3.18 降雨後の田んぼ 1, 2 の各水位計の水面標高の低下量

田んぼ1	No.5	No.3	No.4	No.10
低下値[m]	0.124	0.126	0.122	0.124
田んぼ2	No.15	No.11	No.12	No.13
低下値[m]	0.066	0.066	0.063	0.105

表 3.19 降雨後の排水流量と湛水試験時の排水流量との比較

	排水流量[m ³ /s]	
	湛水試験(φ 50 mm)	7月
田んぼ1	3.53519×10^{-3}	5.22344×10^{-3}
田んぼ2	3.89815×10^{-3}	6.02410×10^{-3}



写真 3.1 7 月 13 日の降雨後の田んぼ 2 排水口水没状況

3.2.3 7月28日～8月28日の水位変動

田んぼ1,2における8月の水面標高と10分間毎の降雨量データを図3.13.1, 図3.13.2に示す. 両図は, 左縦軸に水面標高[m]を表し, 右縦軸に10分間雨量[mm]を表している. 横軸は, 7月28日10時30分を0とおき, 8月28日12時00分までの10分間隔のデータ数を表している. 両図においては, 各水位計の値に差がみられるため, 田んぼ1,2ともに各水位計の水面標高の変動量を算出し, 図3.13.3, 図3.13.4に示す.

水面標高と降雨量のグラフで, 横軸の3400ステップと4000ステップで記録された15mm程度の降雨において, 田んぼ1の各水位計は降雨による水面上昇が表れていないが, 田んぼ2の各水位計は降雨による水面上昇が表れている. 降雨による水面標高の反応の違いについては, 水稻の育成状態や繁茂密度の違いなどが原因と考えられる.

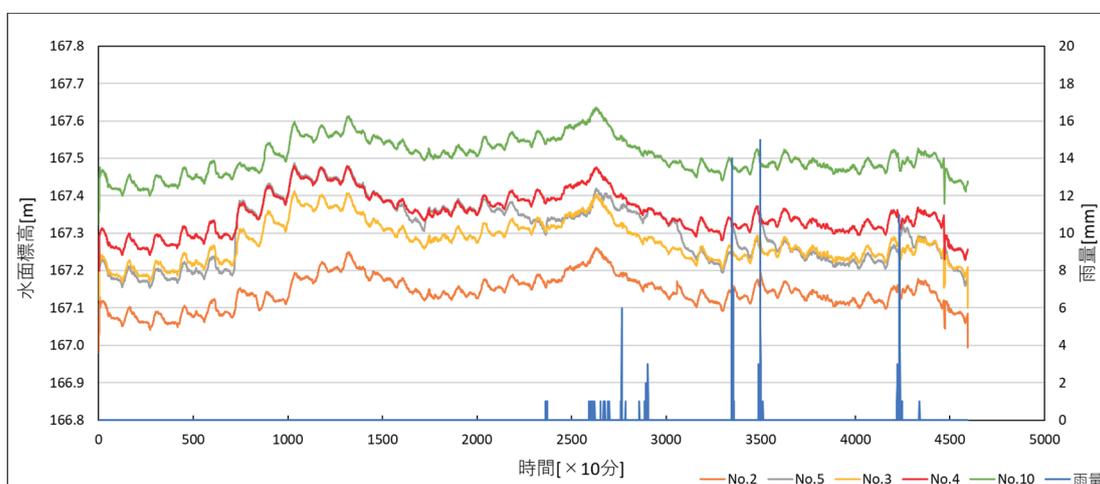


図 3.13.1 田んぼ1 8月の水面標高の変動と降雨量

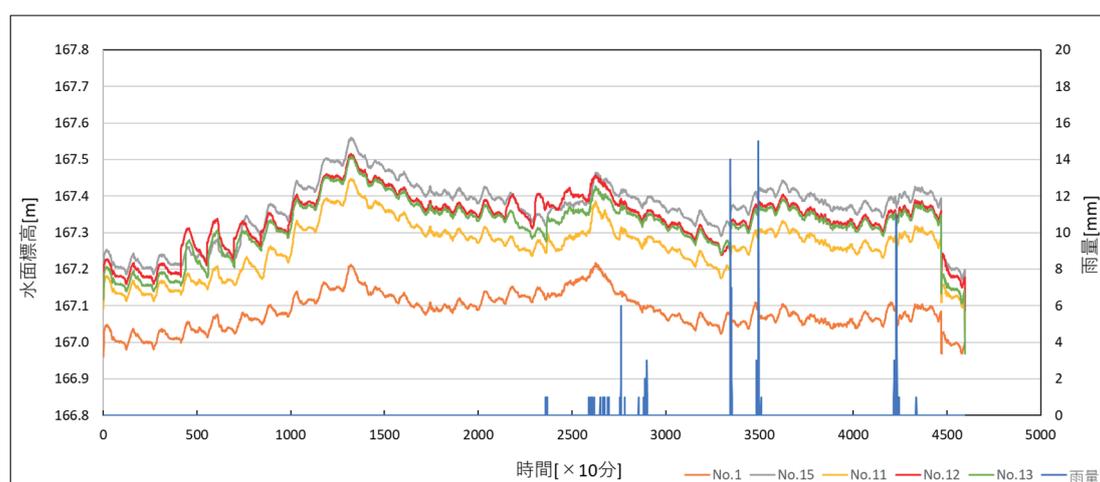


図 3.13.2 田んぼ2 8月の水面標高の変動と降雨量

水面標高の変動量を示した図 3.13.3, 図 3.13.4 において, 横軸の 4500 ステップまでは, 日々の水管理による 24 時間周期の水面変動が捉えられており, 4500 ステップ以降は稲刈りに向けて落水した水位低下が捉えられている。また, 8 月の水面標高の変動量は, 各水位計により僅かな差が生じており, 水稻が十分に生育した状態では水田内の水面標高の変動が均一でないことが現れている。

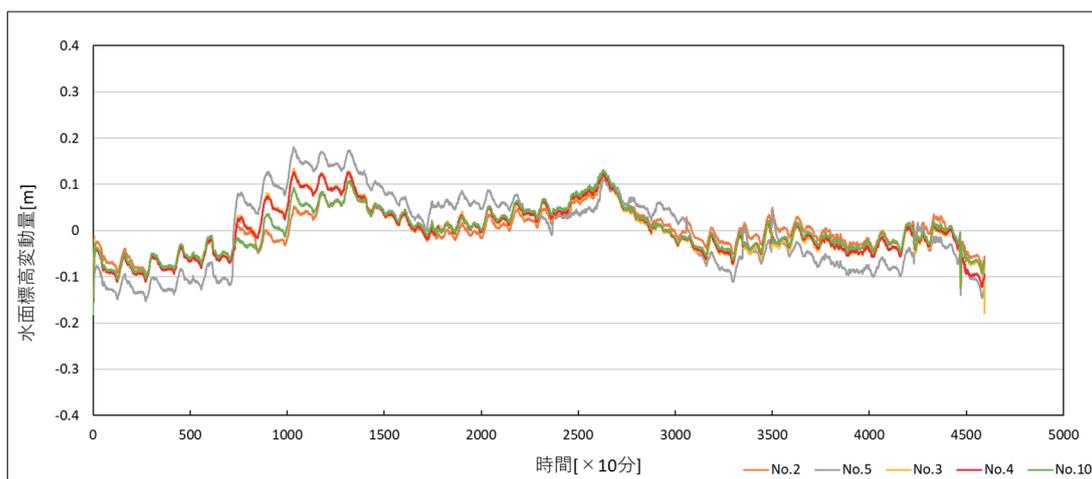


図 3.13.3 田んぼ 1 の各水位計における水面標高の変動量 (8 月)

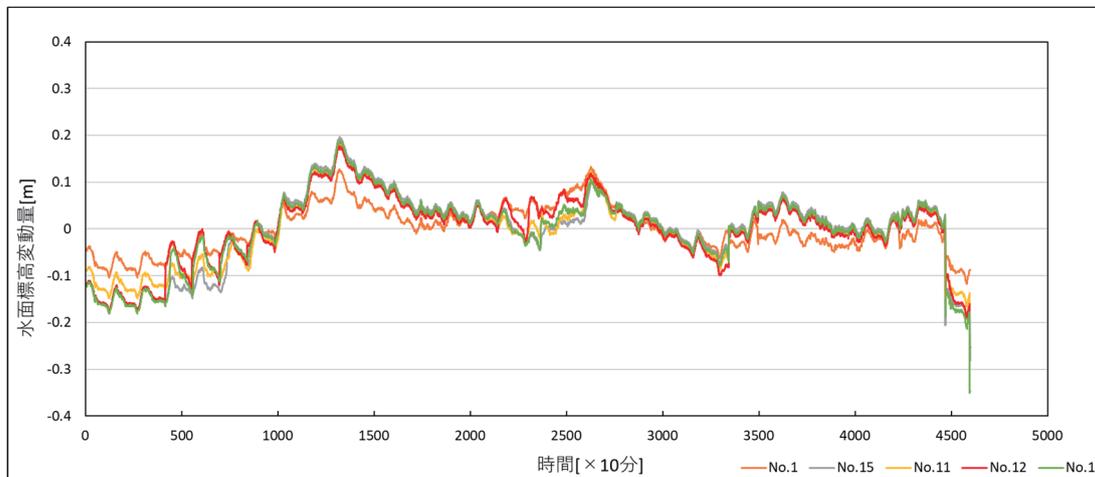


図 3.13.4 田んぼ 2 の各水位計における水面標高の変動量 (8 月)

第4章 UAVを用いた水稻成長量の推定

本研究では、水田を田んぼダムとして運用する場合の水稻の育成に与える影響について、UAVを用いた空撮画像から水稻の育成状況の把握を試みた。

本報告では、空撮日に実測した草丈と空撮画像から推定される草丈を比較し、水稻の成長量について検討を行った。また、マルチスペクトルカメラを用いた撮影により、水稻の活性度の把握を試みた。

4.1 UAVを用いた空撮

本研究においてはUAVを用いた空撮を7月4日、8月22日に実施した。空撮では、**図4.1**に示すDJI社製のPhantom 4 Professional（以下、Phantom 4）を用いた。また、この機種の様を**表4.1**に示す。空撮は、飛行ルートを設定しオートパイロットを用いて行った。なお、7月4日の空撮は株式会社キミコンが実施し、8月22日は福井工業高等専門学校環境都市工学科の辻野教授が実施した。7月4日の空撮の際には、対空標識を設置した後に地上基準点（GCP）としてGNSSのRTK測位結果を与えた。



図4.1 DJI社製 Phantom 4 Professional

表4.1 DJI社製 Phantom 4 Professionalの様

名称	Phantom4 professional
ホバーリング精度	垂直±0.5m
最高速度	72km/h(S), 58km/h(A), 50km/h(P)
質量	1388g
対角寸法	350mm
運用限界高度	6000m
GPSモード	GPS/GLONASS
有効画素数	20M-Pixels
画像サイズ	5472×3648

7月4日の空撮時には田んぼ1の水稻の育成状況を把握するため、マルチスペクトルカメラ（MAPIR社製 Survey 3）による撮影を行った。

UAVによる空撮により得られた画像は、SfM（Structure from Motion）ソフトウェアとして、Agisoft社製のMetashape Professionalを用いて画像処理を実施した。なお、画像処理に用いたMetashape Professionalは、有人機やUAVなどによる空撮デジタル画像から地表面の高さを示すDSM（Digital Surface Model：数値表層モデル）や、空中写真を正射投影したオルソモザイク画像、鳥瞰図、3Dモデルが生成できるソフトウェアである。空撮画像からソフトウェアを用いて生成した対象域全体のオルソモザイク画像を図4.2に示す。図中において田んぼ1は赤色、田んぼ2は黄色の枠で囲まれた範囲である。

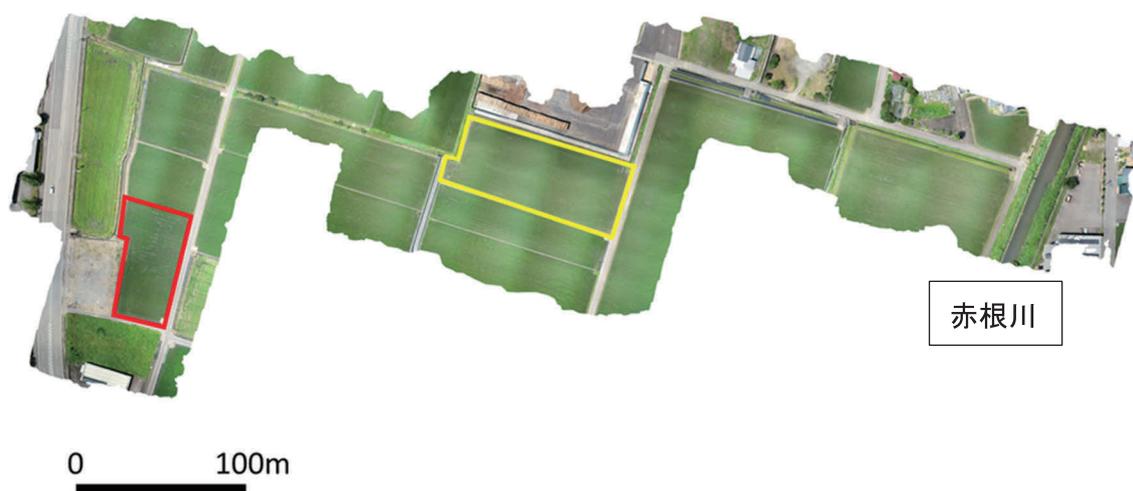


図4.2 研究対象域全体のオルソモザイク画像（7月4日）

4.2 DSMによる草丈の推定

7月4日、8月22日に実施したUAVでの空撮によって得られた画像から、地表面の高さを示すDSM (Digital Surface Model: 数値表層モデル) を生成した。DSMの生成手順を以下に示す。

- ① UAVによって空撮した写真をMetashape Professionalにインポートする。
- ② インポートした画像から、同じ位置と考えられるポイントの集合体のポイントクラウドを生成する。
- ③ 座標が既知である地上基準点 (GCP) を与え、その地点における、平面直角座標系第6系のX, Y, Zの値を入力する。
- ④ 各画像のGPSの位置の確認及び修正を行う。
- ⑤ 高密度ポイントクラウドを生成する。
- ⑥ メッシュ (3Dモデル) を構築する。
- ⑦ DSM画像を生成する。

7月4日の空撮画像から生成した対象域全体のDSMを図4.3に示す。

なお、水稻のように草丈の長い植物が生育する地点の空撮画像を用いてDSMを生成する際には、風で植物が揺れるためその高さを正確に捉えることが困難である。そこで、上記手順の「⑤ 高密度ポイントクラウドを生成する。」において、「中」と「最高」の2通りの解像度で高密度ポイントクラウドを生成した。図4.2に示したオルソモザイク画像は8 mm/pixelで生成されているが、高密度ポイントクラウドを「中」で生成した場合には生成されるDSMは約39.2 mm/pixel、「最高」で生成した場合には8 mm/pixelとなる。つまり、高密度ポイントクラウドを「最高」でDSMを生成した場合にはオルソモザイク画像と同じ解像度で高さを生成できるが、「中」でDSMを生成した場合には解像度は約1/5となる。

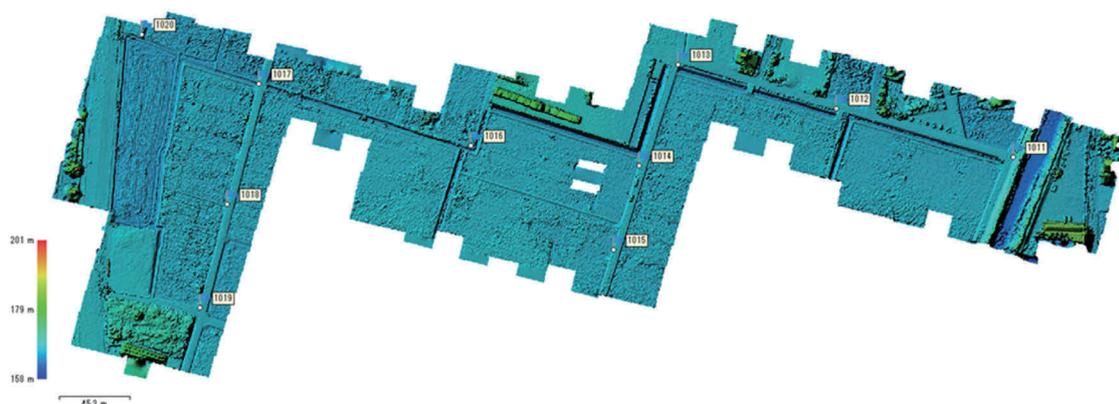


図4.3 研究対象域全体のDSM (7月4日)

生成した DSM は、リモートセンシング用ソフトウェアである ERDAS IMAGINE 2018 を用いて DSM のプロファイル（断面図）を描くことができる。7 月 4 日の空撮画像から 2 通りの解像度で生成した DSM について、田んぼ 1 の任意の断面の標高を図 4.4 に示す。

図 4.4 は縦軸に標高[m]，横軸に任意断面の距離[m]を表している。

この図から、高密度ポイントクラウドを「最高」の解像度で生成した場合には標高データのばらつきが大きく、草丈がどの程度であるかの推定が困難であると言える。一方で、「中」の解像度で生成したデータは「最高」と比較してデータが平均化されていることが分かる。

なお、図 4.4 に示す「最高」の標高データの平均値は 167.2012 m, 「中」の平均値は 167.2805 m であり、両者の差は約 8 cm となった。

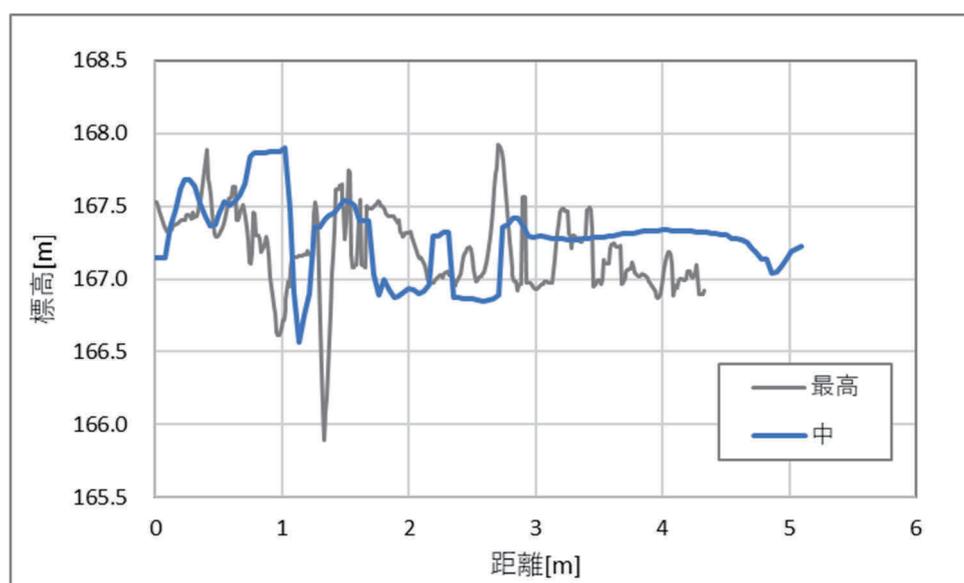


図 4.4 高密度ポイントクラウド生成時の解像度と標高

次に、7月4日から8月22日にかけての稲の育成状況を空撮画像から推定するため、8月22日に実施した空撮画像を用いて高密度ポイントクラウド「中」の解像度で生成したデータについて、田んぼ1の任意の断面において標高を求めた。図4.5に7月4日と8月22日の標高データの比較を示す。図4.5は縦軸に標高[m]、横軸に任意断面の距離[m]を表している。

この図から、8月22日の標高データは概ね高さが揃っていることが分かる。このことから、刈り入れ前の十分に育成した稲が田面に密に存在する場合には、空撮画像から稲の高さを推定することが可能であると言える。8月22日の標高データの平均値は168.1897mであり、7月4日の標高データの平均値167.2805mと比較すると、0.9092mの差となった。空撮時に現地で稲の草丈を実測した値は、7月4日は約30cm、8月22日は約80cmであったので、実測では約50cmの成長量であった。このように、実測の成長量との差異が生じた原因は、7月4日の稲の育成状況が正確に推定できていないことにある。これは、田植え後のまだ稲が十分に生長できていない段階において、水田内に稲が密な状態にはなっておらず、風に対しても大きく揺れてしまうため、高さを正確に推定することが困難な状況にあるためだと考えられる。

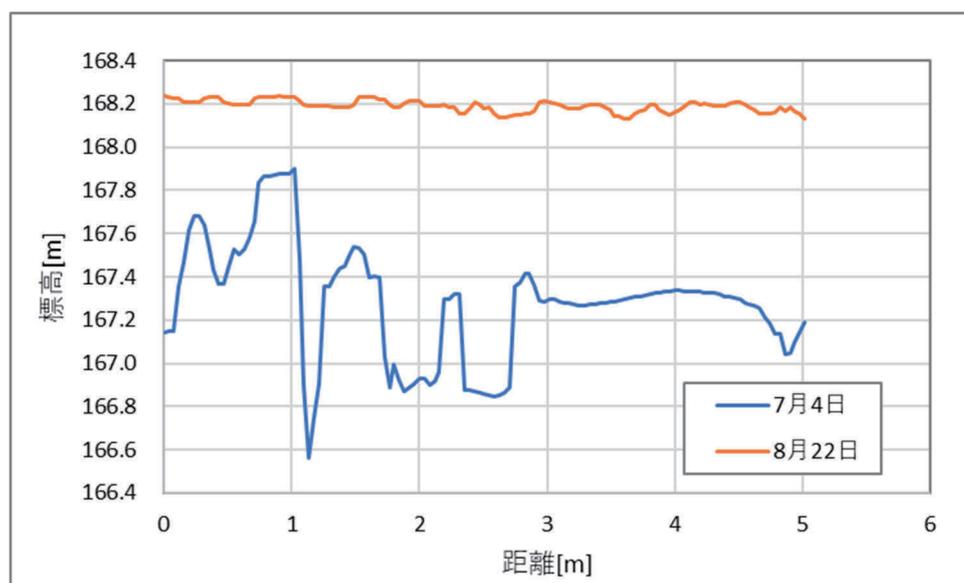


図4.5 7月4日と8月22日の標高の比較

4.3 NDVI による水稲の活性度の把握

7月4日の空撮時には田んぼ1の水稲の育成状況を把握するため、マルチスペクトルカメラ（MAPIR 社製 Survey 3）を用いてドローンにより撮影し、植生指標の NDVI（Normalized Difference Vegetation Index：正規化植生指標）の値を算出した。NDVI の算出式を式1に示す。

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad \text{式 1}$$

ここで、IR：近赤外域の反射率（波長 850 nm）

R：可視域赤の反射率（波長 660 nm）

植生が多く活力が高い部分では、近赤外域の反射率の値が大きくなり、可視域赤の反射率の値が小さくなるので、NDVI の値は 1.0 に近い値となる。なお、撮影する時刻が異なると反射の大きさも変化すると予想されるため、マルチスペクトルカメラによる空撮では、田んぼ1の全体が映り込むように飛行高度を上げて撮影した。図4.6に7月4日の田んぼ1における NDVI のカラーコンター図を示す。7月4日の田植え後2カ月弱の段階では、水稲の NDVI 値は高いところで0.2程度であった。

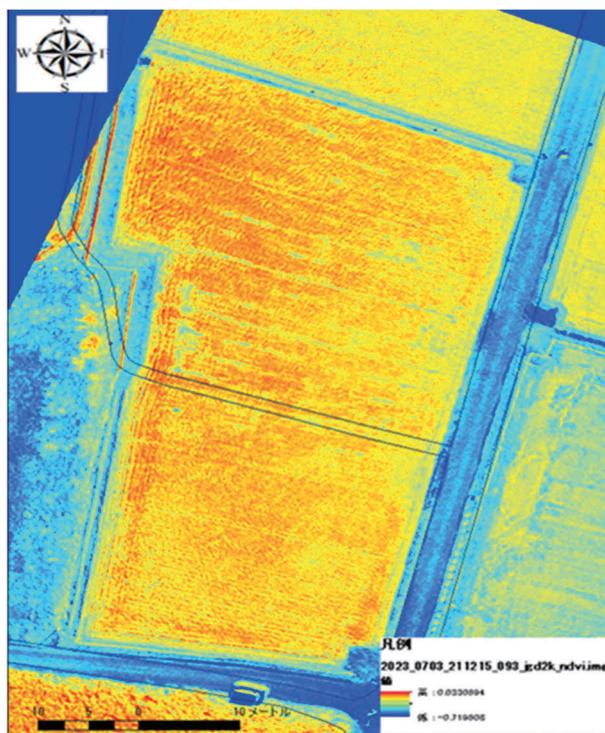


図 4.6 7月4日の田んぼ1における NDVI のカラーコンター図

第5章 結論

本研究では、田んぼダムの貯留効果を検証するため、大野市の赤根川付近の田んぼにおいて、田んぼの排水口に排水流出量計測用柵を設置して排水量制御を行いつつ、水田内の水面変動を水位計により計測した。

4月に実施した湛水試験では、排水制御板φ150 mmとφ50 mmを用いた試験を行い、排水流量を算出した。田んぼ1,2のどちらも排水制御板をφ150 mmからφ50 mmに変更することにより、大幅に排水流量を制限できており、満水位の状態から排水を完了するまでの時間を比較すると、田んぼ1で約13時間が約70時間、田んぼ2で約25時間が約70時間となった。

また、田植え終了後から稲刈り前までの6月,7月,8月の営農期間の水位変動について、田んぼ1,2ともに排水制御板φ50 mmを用いて計測を実施した。

6月の計測結果では、中旬以降に各水位計の水面標高の変動にばらつきが生じており、稲の生長によって水田内の水面標高の変動が均一でなくなったと考えられる。

7月の計測結果では、7月13日の強い降雨（積算雨量134 mm）による水面変動が捉えられており、降雨時の田んぼからの排水流量が湛水試験時の排水流量を大きく上回る結果となった。

8月の計測結果では、営農者の日々の水管理による24時間周期の水面変動が捉えられており、今後蒸発散量との検討が必要と考えられる。また、各水位計の水面標高の変動に僅かな差が生じており、水稻が十分に生育した状態では水田内の水面標高の変動が均一ではないことが確認できた。

また、UAVを用いた空撮画像からの検討では、DSMによる草丈の推定を行い、刈り入れ前の十分に育成した稲が田面に密に存在する場合には、空撮画像から稲の高さを推定することが可能であることが分かった。その一方で、田植え後のまだ稲が十分に生長できていない状態では、高さを正確に推定することが困難であることが分かった。なお、今回の解析では空撮回数が2回であったため、田んぼダムの運用による水稻の育成への影響の把握には至っていない。

本研究で得られた現地事象の計測データにおいては、本報告では解析し切れていない情報も多く含まれており、今後もこのデータを様々な面から解析し続けていく必要がある。さらには、UAVを用いた空撮をより高頻度で実施するとともに、今後発生しうる現地事象を捉え、未解明である事象についてより多くのデータを集めることが必要であり、今後も研究対象とした田んぼにおいて、継続的なデータ取得を行っていきたい。

参考文献

- 1) 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢眞一: 田んぼダム実施流域における洪水緩和機能の評価, 農業農村工学会論文集, No. 261, PP. 41~48 (2009. 6).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsidre/77/3/77_3_273/_article/-char/ja/
- 2) 宮津進, 松下時生, 岩村祐暉, 吉川夏樹: 田んぼダムの適用限界に関する一考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 76, No. 2, I_805-I_810, 2020.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/76/2/76_I_805/_article/-char/ja
- 3) 小型絶対圧水位計 S&DL mini Model-4900:
https://www.oyo.co.jp/pdf/download/OYO_SandDL_mini_Model-4900.pdf
- 4) 濱侃, 早崎有香, 望月篤, 鶴岡康夫, 田中圭, 近藤昭彦:
小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング,
水文水資源学会誌, Vol. 29, No. 1, pp. 44-54, 2016.