

## 16 食料供給力強化に貢献する積雪寒冷地の農業生産基盤の整備・保全管理に関する研究

研究期間：平成 28 年度～33 年度

プログラムリーダー：寒地農業基盤研究グループ長 竹内英雄

研究担当グループ：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム、水利基盤チーム）

### 1. 研究の必要性

世界人口の増加、食生活の変化、異常気象の頻発等により世界の食料需給関係は今後逼迫する方向にある。日本の食料自給率は現状カロリーベースで 39%と先進国中最低であり、食料・農業・農村基本計画では平成 37 年迄に 45%へ向上させることが目標であるが、食料生産の担い手の減少と高齢化、耕作放棄地の発生など国内の食料供給力の低下が懸念されている。このような状況のもと、イノベーションによる農業の振興(新技術を活用した生産基盤の整備)が急務となっており、国内の重要な食料生産地である北海道においても大規模な営農や積雪寒冷地といった地域条件とその変化に適合する農業生産基盤の整備・保全管理技術の開発が求められている。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、近年北海道内で進められている圃場の大区画化やこれに伴う灌漑排水施設の整備に必要な整備土工技術や灌漑排水技術、積雪寒冷地にある農業水利施設の長寿命化や大規模災害時の防災・減災を目的とした農業水利施設の管理、大規模な酪農地帯や水田地帯における周辺環境との調和に配慮した灌漑排水技術を開発することを研究の範囲として、以下の達成目標を設定した。

- (1) 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発
- (2) 営農の変化と気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発
- (3) 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

このうち、平成 28 年度は(1)、(2)、(3)について実施している。

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 28 年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

#### (1) 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

##### 1) 積雪寒冷地における大区画圃場の整備技術に関する研究

積雪寒冷地の北海道では、基盤に泥炭や重粘土といった湿性の土壌が広く堆積し、秋には長雨が続くことから、整備に伴い圃場が排水不良となるケースが多い。このため、大区画圃場の効率的な整備技術として、湿性土壌の種類や水分条件等に応じた整備土工の技術開発と体系化が求められている。

平成 28 年度は、泥炭及び重粘土のそれぞれの土壌の圃場において湿地ブルドーザにより切盛作業を行ったときの土壌物理性の変化を調査した。水田圃場の大区画化への切盛作業は、土壌の比較的乾いた時期に、基盤面の露出が 1 日以内に収まるように段取りしたうえで、湿地ブルドーザにより丁寧に行われた。このため、平成 28 年度は練返しと見られる土壌物理性の変化は認められなかった。ただし、切盛後に、泥炭土壌では盛土側基盤の多くで、また、重粘土土壌では盛土側表層すべてで、飽和透水係数がやや低下していることが確認された。これは、切土して運搬し盛土する過程で土壌構造が乱されてしまったためと考えられる。

次年度は、泥炭土、重粘土の各土壌の圃場で土壌物理性の変化の調査を継続するとともに、土壌の含水比を変えて室内試験を行い、ブルドーザによる練返しの土壌物理性への影響を調べる。

##### 2) 大区画水田圃場における地下水位制御システムの高度利用に関する研究

水田圃場の大区画化・汎用化に伴い、農業経営において、稲作における水管理作業の省力化、直播導入によるコスト削減、野菜等高収益作物を含む転作作物の収量・品質向上等が求められている。本研究では、作物への給

排水ムラを解消し灌漑による水分供給と排水による地耐力向上を両立させた地下水位制御システム高度利用技術の開発を行う。

平成 28 年度は、泥炭土壌の大区画水田圃場における水稻の移植栽培で、登熟期に地下水位を制御して地下灌漑を実施した。水閘を開放して地下水位を低下させた結果、水閘を閉じて圃場面から 35cm 下で地下水位を一定保持し地下灌漑を行った結果では、いずれも圃場内の各地点の地下水位に大きなバラツキは生じなかったが、取水側で設定水位に達するまでに時間を要する傾向が見られた。また、このように登熟期に地下灌漑を実施したが、収穫期には十分な地耐力が確保できていることが確認された。なお、収穫の際の水稻の稈長は、登熟期の地下水位、土壌水分、収穫期の地耐力のバラツキとは明らかな関係は認められなかった。

次年度は、転作畑においても給排水ムラの実態の把握を行うとともに、水稻の登熟期の地下水位をさらに水分供給に望ましい水位に上げたうえで地下灌漑を実施して、収穫期の地耐力の確認を行う。

### 3) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究（このうち、大区画水田の高精度な水管理技術の開発と用水量の解明）

圃場の大区画化と地下水位制御システムの整備を契機として、直播栽培の導入を進める地域がある。整備後の圃場条件を活かした効率的な水管理の普及を目的として、本研究では高精度な圃場水管理技術の開発とそれに必要な用水量の解明を行う。

平成 28 年度は、地下水位制御システムが整備された大区画水田圃場において、水稻の乾田直播栽培・湛水直播栽培・移植栽培それぞれについて、圃場単位で水管理と水収支の調査を行った。圃場用水量に差が生じる要因は、防除作業や深水管理、中干し後の再湛水など、栽培管理に必要な用水量の差であった。栽培方式によって代かきの有無は異なるが、栽培管理用水量を除く用水量に大きな差はなかった。

次年度は、圃場内の水管理の調査を継続してデータを蓄積する。また、地下灌漑時の圃場内の水の動きを分析して、高精度な水管理技術の開発および普及と用水量の解明を進める。

## (2) 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

### 1) 積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究（このうち、農業水利施設の複合劣化を対象とした農業水利施設の維持管理・更新技術の開発）

積雪寒冷地に位置する農業水利施設には、コンクリートに生じる凍害だけでなく、摩耗や種々の外的荷重が生じており、多くの場合、それら劣化外力は複合的に作用している。国の重要な施策である農業水利施設の長寿命化を達成していくためには、開水路や頭首工を構成するコンクリート、ゲートや鋼矢板等の鋼製部材において、複合劣化を対象とした診断・評価方法、補修・補強方法に関する技術開発が必要である。本研究では、農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の開発と、複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強方法の開発を行い、積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理方法を提案することを目的とする。

平成 28 年度は、コンクリートでの凍害・摩耗および鋼製部材での摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発に取り組んだ。前者では、造成後 50 年以上経過した頭首工のコンクリートの試験・分析を行い、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することを明らかにした。また、17～36 年経過した鋼矢板排水路において経過年数、水質、板厚間の関係を整理・分析することにより、摩耗・腐食の劣化機構を推定した。一方、後者では、開水路側壁で金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験を行い、最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係性を明らかにした。

次年度は、無機系被覆工法適用後の開水路におけるモニタリング手法の検討を進めるとともに、無機系被覆工法を含む各種工法の補修効果の比較検証に関する検討を行う。

### 2) 大規模災害時における長大な農業水利施設の災害対応計画策定技術の開発

大規模災害時に、通水中の基幹的農業用水路の決壊や溢水が生じれば、人命や財産に関わる重大な被害が生じるおそれがある。大規模災害に対するソフト対策の 1 つとして事業継続計画（BCP）があるが、既存の BCP 策定マニュアルには、①被害リスクを網羅的に特定する方法がないこと、②具体的な対策や対応行動を明確にできないこと、③リスクの発生確率や対策の効果を定量的に評価することができないこと等の課題がある。本研究では、これらの課題を克服した災害対応計画策定技術を開発する。

平成 28 年度は、国内最大級の灌漑用水路施設を管理する土地改良区職員からの聞き取り調査を行った。得ら

れた情報をもとにして、大規模災害時における施設管理者の対応行動を阻害する原因事象の特定にフォールトツリー解析（FTA）を適用し、この解析手法が有効であることを検証した。また、大規模災害発生直後に水路内の通水量を緊急的に減じるゲート操作の場面を想定し、取水ゲートまたは各放流ゲートに急行させる最適な人員数の決定手法を示した。

次年度は、災害対応に要する時間の評価手法や対策効果の定量評価手法、コストに制約がある中でリスクを最小化するための最適化手法を検討する。

### (3) 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

#### 1) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究（このうち、周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築）

上川地域や空知地域等の水田地帯の中には、圃場の大区画化とともに地下水位制御施設を含む用排水施設の整備を進めている地域がある。整備によって用水路が管路化される場合には圃場の水管理が変化するため、圃場や広域での水収支も変化して、地域の水文環境が影響を受ける。そのため、水管理の変化が地域環境に与える影響を調査するとともに、地域の水文環境との調和に配慮した灌漑排水技術を検討する必要がある。このような背景から、本研究では、大規模な水田地帯における環境との調和に配慮した灌漑排水技術を開発する。

平成 28 年度は、空知地域の美瑛市において、農区（約 12ha）と広域（約 1,100ha）の調査区域を設定し、これらの水文環境を明らかにするため、水収支や水質の調査を行った。農区内の畑地と水田にそれぞれ設けた測線沿いの地下水位調査では、畑地は水田に比べて灌漑期と非灌漑期の地下水位の差が小さく、また排水路方向に向かって地下水位が低くなる傾向が顕著であった。広域レベルの水文調査の結果、幹線排水路の流量は、灌漑期と比べて非灌漑期に小さい傾向がみられた。また灌漑期の SS 濃度は、代かきおよび大雨による石狩川本川の濁水の影響によって上昇した。2 カ所の河跡湖の湖面水位の時期別平均値は、非灌漑期に比べて灌漑期の方がそれぞれ 0.35m と 0.21m 高かった。これは、農業排水路の水位の時期変動の影響によるものと考えられた。

次年度は、農区および灌漑区域内での水収支・水質の調査を継続し、2 カ年のデータを解析する。

#### 2) 大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

根釧地域のような大規模酪農地帯では、家畜ふん尿に起因する水質汚濁の抑制に配慮した国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。この事業では、家畜ふん尿の曝気・調整を行うための肥培灌漑施設が整備される。家畜ふん尿を適切に処理・活用するためには、良好な発酵状態を保ちながら、消費エネルギーの面からも効率的な肥培灌漑施設の運転方法とシステム改善方法の提示が必要である。本研究では、これらの技術開発を行う。

平成 28 年度は、農家が管理している肥培灌漑施設を対象として、ふん尿スラリーの温度や性状を調査した。いずれの施設においても夏期の調整槽の液温が、ふん尿スラリーの腐熟の目安として示されている 30℃前後まで上昇していた。夏期から冬期にかけての調整槽液温は、一つの施設を除き徐々に低下した。ふん尿スラリー中の有機物含量について二つの施設を比較した結果、単位液量当たりの曝気量が多い施設の方が冬期の有機物減少率が大きいことが明らかとなった。また、室内試験装置を製作して 20 日間の連続運転を行い、安定した稼働が可能であることを確認した。

次年度は、肥培灌漑施設の形状別の運転状況と調整液性状のデータをさらに蓄積しその関係を継続して評価する。また、今年度の成果を基に液温や曝気送気量を変えて室内試験を行い、効率的にふん尿の調整ができる条件を調査する。

#### 3) 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

根釧地域で実施されている国営環境保全型かんがい排水事業では、肥培灌漑施設のほか、水質浄化池や林帯などの水質対策工の整備が行われている。これらの対策を効果的に実施するには、水質改善対策手法の効果の定量化と、それらを地域で実施する場合に種類、位置、規模を決定し、効果を精度良く予測するツールとしての水質環境評価技術（水質解析モデル）が必要である。本研究では、このような水質環境評価技術を開発する。

平成 28 年度は、SWAT（Soil and Water Assessment Tool）の精度検証に用いる実データ取得のために水質調査を実施するとともに、得られた水質データと流域の土地利用や営農状況との関係を検討した。その結果、酪農専業地帯の中でも、飼養牛頭数密度（集落面積当たり）は集落ごとに異なり、平水時の河川水に含まれる全窒素の主要成分である NO<sub>3</sub>-N の濃度はこの密度を反映していることがわかった。流域の土地利用、営農状況と

NO<sub>3</sub>-N 濃度との関係の検討では、飼養牛頭数密度（流域面積当たり）と NO<sub>3</sub>-N 濃度の間に比較的高い相関がみられたが、ばらつきもあり、草地率など複数の要因を加味した評価の必要性が示唆された。

次年度は、広域水質調査による水質環境評価や、環境保全型かんがい排水事業で整備されている水質対策工の効果評価を継続するとともに、SWAT による解析に必要な流域データの収集を進める。

## RESEARCH ON MAINTENANCE AND MANAGEMENT OF AGRICULTURAL INFRASTRUCTURE IN THE SNOWY COLD REGIONS CONTRIBUTING TO IMPROVING FOOD SUPPLY

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Cold-Region Agricultural Development Research Group  
TAKEUCHI Hideo

**Research Group** : Cold-Region Agricultural Development Research Group (Rural Resources Conservation, Irrigation and Drainage Facilities )

**Abstract** : The relationship between global food supply and demand is expected to tighten. In Japan, decreases in the numbers of farming successors and increases in the demographic aging of food producers are causing concerns over a decline in the food supply capacity. In Hokkaido, a major food-producing region of Japan, there is the need for the development of agricultural infrastructure and of conservation and management technologies that suit the local conditions, such as the large scale of farms and the cold, snowy climate. Each objective, and major findings of the surveys conducted in fiscal year 2016 are as follows.

**Objective (1)** : The development of technologies for the efficient consolidation and advanced management of large-scale fields to respond to the expansion of management scale

In a large-scale paddy field of peat soil, the groundwater level control system could keep groundwater in the field at the relatively high level of -35 cm during the rice ripening period. No great differences were found in groundwater level among the points in the field, and the insufficiency of bearing capacity for mechanical operations during harvesting did not occur.

Moreover, irrigation requirements were surveyed at large-scale paddy fields, for direct seeding culture on well-drained paddy fields, direct seeding in submerged paddy fields, and transplanting culture. A factor behind the differences in irrigation requirements was in the lot-management water requirements.

**Objective (2)** : The development of technologies for the maintenance and renewal of agricultural irrigation facilities considering changes in farming and climate

Tests and analyses of concrete from head works constructed fifty or more years ago revealed that frost damage and abrasion deterioration involving the leaching of a calcium component occur near the surface.

The effectiveness of Fault Tree Analysis (FTA) as a tool for identifying events that hinder the facility manager's response in a large-scale disaster was demonstrated by an analysis of one of the nation's largest irrigation channels, which is in Hokkaido.

**Objective (3)** : The development of irrigation and drainage technologies that are in harmony with the environment in a large-scale farming area

Temperatures and properties of slurry were surveyed at dairy cattle manure slurry aeration facilities operated by farmers. In summer, the slurry reached approximately 30 degrees Celsius at all the facilities surveyed; in winter, it reached that temperature at only one facility.

Water quality was surveyed in two river basins in a dairy region in Eastern Hokkaido. A relatively high correlation was found between NO<sub>3</sub>-N concentration, a major component of total nitrogen contained in river waters during the normal water stage, and stocking density of dairy cows (per settlement area).

**Key words** : large-scale field, sub-irrigation, technologies for maintenance and renewal, disaster response plan, harmony with the environment, slurry irrigation

## 16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

### 16.1.1 積雪寒冷地における大区画圃場の整備技術に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム）

研究担当者：大深正徳、大友秀文、中山博敬、新津由紀、  
桑原淳、清水真理子

#### 【要旨】

農地基盤に泥炭土や粘性土が分布する大区画整備圃場において、施工段階（表土剥ぎ、切盛土、表土戻し）ごとの土壌性状の調査を行った。併せて施工当日のブルドーザの走行履歴を解析するために、小型 GPS を用いて追跡が可能かの検証も行った。結果、走行軌跡の記録間隔を当初設定していた 10m から 3m まで短く設定できることが分かった。調査圃場では、分割施工が行われたことから、施工前後において表層土の排水性などに土壌物理性の悪化はなかった。ただし、切盛土後の盛土区域で飽和透水係数がやや悪化した。これは、切土作業で発生した泥炭土や粘性土を運土する際に、練り返しを受けて土壌構造がある程度破壊されたためと考えられた。

キーワード：大区画整備圃場、泥炭土、土壌性状、排水性、ブルドーザ走行履歴

#### 1. はじめに

北海道の農業地帯では、担い手の不足による農家戸数の減少に伴い、一戸当たりの経営規模が拡大している<sup>1)</sup>。このため、農地の大区画化などの基盤整備を契機として、労働時間を低減し、生産コストの削減と収益性の向上を図ることが重要となっている<sup>2)</sup>。このため北海道では、水田地帯を中心に区画整理と農地造成を一体的に施工し、生産性の高い農業基盤の整備が行われている。一方で、北海道のような積雪寒冷地帯では、農地基盤に泥炭土や粘性土といった湿性土壌が分布している場所も多い。北海道の水田土壌で泥炭土が占める割合はおよそ 19%程度であり、排水不良の湿性土壌に分類される灰色台地土とグライ台地土が占める割合は、およそ 10%程度となっている<sup>3)</sup>。

このような排水不良の湿性土壌が農地基盤に分布する施工現場では、降雨などによって施工工程に制約を受けることがある。また、場合によっては大区画整備後に排水性などの土壌性状にバラツキが生じる可能性がある。このため、施工現場では基盤面を長期間露出させたままの状態にすることや、施工機械による練り返しを防ぐ対策が行われている。例えば、表土剥ぎから表土戻しまでの一連の作業を 1 日で終える分割施工を行うことや、湿地ブルドーザなどを使用することである。しかし、大区画圃場の整備段階ごとの土壌性状の変化を報告した事例は少なく、現場での取り組みが十分な効果を発揮しているか定量的に評価できていない。筆者らは農地基盤に泥

炭土と粘性土が分布する大区画整備圃場において、施工段階ごとの土壌性状の検証を行った。これにより、施工に伴う土壌性状への影響を明らかにし、施工直後においても排水性などの悪化の少ない整備技術の確立を目指している。また、この検証を行う時、施工段階ごとの土壌分析値とともに調査地点における施工機械の走行履歴の解析が必要となる。このため、実際の施工現場において湿地ブルドーザに小型の GPS を装着し、走行軌跡の追跡および解析が可能か検証を行った。

#### 2. 方法

##### 2.1 調査地の概要

調査は、美唄市の水田圃場の A 圃場と B 圃場で行った。図-1、2 に A および B 圃場の平面図を示した。A 圃場では基盤層に泥炭土が分布しており、B 圃場では粘性土が分布している。両圃場ともに区画整備後に圃場の均平化を図るために切土区域（図の青色の範囲）と盛土区域（図の黄色の範囲）が存在する。泥炭土が分布する A 圃場では、1 日で表土戻しまでが終わるように圃場を 3 つの区画に分けて施工を行っており、粘性土が分布する B 圃場では 2 日で終わるように圃場を 2 つの区画に分けて施工が行われた。土壌調査はその内の 1 つの区画（図の緑色で囲った範囲）で行った（図-1、2）。土壌試料採取は切土区域（切土①～③）、盛土区域（盛土①～③）で 3 箇所ずつ行った。また、A 圃場では土壌試料採取地点を走行したブルドーザの走行回数を小型 GPS を用いて検証した。

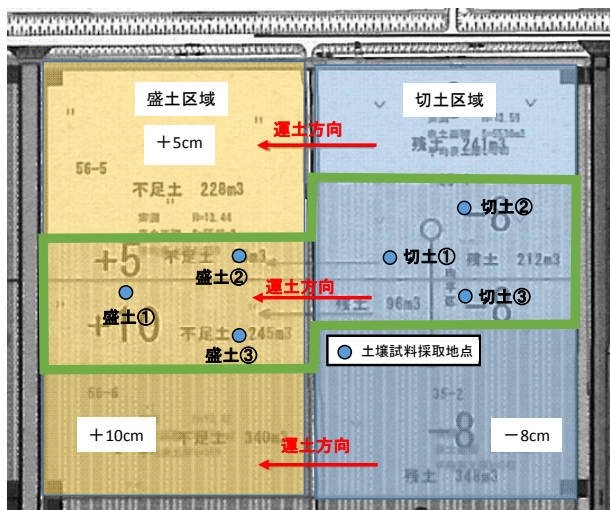


図-1 A 圃場の平面図

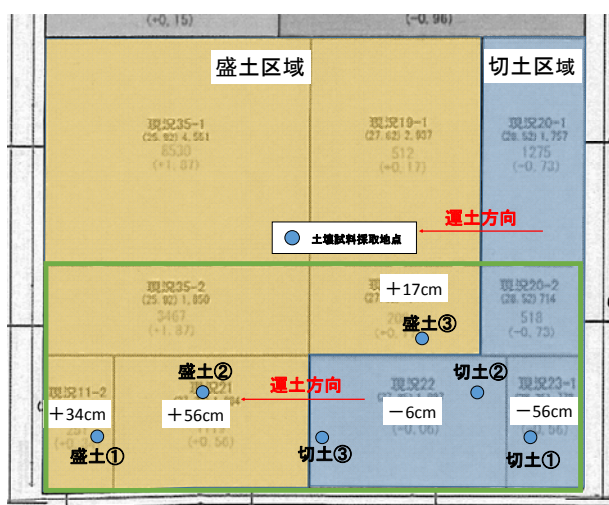


図-2 B 圃場の平面図

## 2.2 調査時期

調査は、施工の各段階が終了するごとに実施し、表-1 に調査時期および図-3 にその間の日降水量を示した。2016年6月は施工地点で降雨の観測される日が続いた。A圃場では、当初6月上旬に施工が行われる予定であったが、降雨の影響により実際は6月下旬となった。A圃場では表土戻し後に客土（厚さ5cm）の施工が行われたため、客土後を施工後調査とした。B圃場では、客土を施工しないため、表土戻し後を施工後調査とした。

表-1 各圃場の調査時期

施工項目	A圃場	B圃場
施工前	5月19日	6月30日
表土剥ぎ後	6月29日	7月7日
切盛土後	6月29日	7月8日
表土戻し後	6月29日	7月8日
客土後	7月21日	—

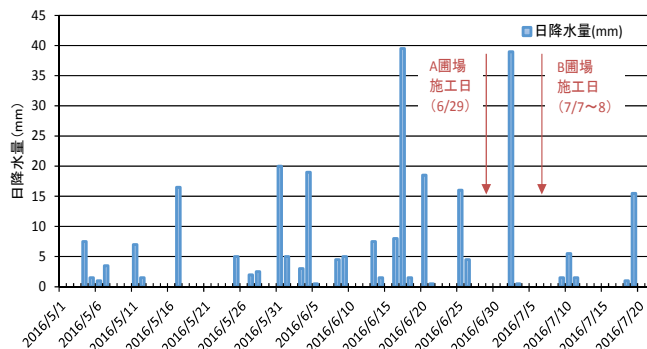


図-3 美唄市の日降水量（気象庁アメダス美唄観測所）

## 2.3 調査内容

### 2.3.1 小型 GPS の概要および設置状況

A圃場で作業を行ったブルドーザの仕様は、表-2の通りである。ブルドーザの走行軌跡の記録に用いた小型GPS（写真-1）の位置精度は、2.5m（DGPS時）である。長時間の測定にはDC5Vの外部電力が必要なため、ブルドーザのシガーソケットを電源とし、電圧をDC5Vへ変換して供給した。なお、No.08のブルドーザはシガーソケットからの電源確保が困難であったため、小型GPSは設置できなかった。このため、小型GPSは計7台のブルドーザに設置した。小型GPSは複数の衛星電波の受信が可能となるように、操縦席の窓内側に固定した。走行軌跡の記録条件は、ブルドーザの走行距離が10mごとに軌跡を記録するように設定した。

表-2 ブルドーザの仕様

No.	機種名	接地圧 (kgf/cm <sup>2</sup> )
01	D61PX	0.34
02	D6NL	0.33
03	D6TLGP	0.35
04	D6NL	0.33
05	D6TLGP	0.35
06	D6RL	0.34
07	D6TLGP	0.35
08	D31PLL	0.16



写真-1 小型 GPS

### 2.3.2 土壌調査

土壌試料採取および地耐力調査は切土区域、盛土区域の3箇所ずつで行った。調査は施工前、施工中（表土剥ぎ後、切盛土後、表土戻し後）および施工後に行った。なお、粘性土が分布するB圃場では、堅密度が大きく地耐力調査は測定不能であった。両圃場ともに切土区域、盛土区域の1箇所ずつで土壌断面調査を行った。土壌断面調査は、施工前と施工後のみ行った。

土壌断面調査では、施工前後の同一近傍箇所深さ1m程度の試坑を掘り、土層構成等を調べた。土層ごとに土壌硬度などを測定後、攪乱試料と未攪乱試料（100cc採土管）を採取した。土壌試料採取では、施工前、中、後に同一近傍箇所深さ60cm程度の試坑を掘り、15cm間隔で土壌試料を採取した。これらの調査で採取した土壌試料は表-3に示した分析項目に供試した。地耐力調査では、施工前、中、後の同一近傍箇所深さ1m程度のコーン指数を貫入式土壌硬度計により測定した。

表-3 土壌分析項目

分析項目	分析手法
含水率	通風乾燥法
容積重	通風乾燥法
三相比	実容積測定装置法
飽和透水係数	変水位法
孔隙分布	砂柱法、遠心法

## 3. 結果と考察

### 3.1 ブルドーザ走行軌跡データの記録状況

図-4にA圃場で作業を行ったブルドーザNo.01の1日の走行軌跡を示す。A圃場では、圃場を3つの区画に分けた分割施工が行われており、土壌調査および走行履歴の調査はその内の中央の区画の施工が行われた時に実施した。施工は、表土剥ぎ、切盛土、表土戻しの順に行われた。表土剥ぎの作業は、調査範囲の上下方向に観音開きの形で行われ、表土は上下方向の隣の区画に一時堆積された。切盛土作業は、圃場の右側の切土部から8cm程度の切土が行われ、圃場の左側の盛土部に5~10cmの盛土が行われた。このことから、図-4の上下方向の動きは表土剥ぎまたは表土戻しの作業を、左右方向の動きは、切土の運土作業または盛土部での締め固め作業を基本的に示していると考えられる。ブルドーザでの運土作業では、排土板で土壌を削りながら前進する走行と、ブルドーザの向きを変えないでそのまま後退する動作を繰り返すことが一般的である。今回の走行軌跡の記録条件は、前述のとおり走行距離が10mごとに軌跡が記録されている。

すなわち、図-4に示した走行軌跡の鋭角部分の先端部分が必ずしもブルドーザの前進と後進が切り替わった地点を示しているとは限らない。そこで、今回得られたデータから、走行軌跡の記録間隔を短くすることで、さらに精度よくブルドーザの走行履歴を解析可能かどうか検証した。

表-4に小型GPSに記録されたブルドーザの最高速度を示す。最高速度が最も速かったブルドーザはNo.07であり、時速9.8kmであった。今回の小型GPSの設定条件では10m走行ごとに軌跡が記録するように設定したため、最高速度で走行した場合、3.7秒間隔で軌跡を記録していくことになる。今回用いた小型GPSは、m単位での距離間隔または秒単位での時間間隔で軌跡の記録頻度を設定することが可能である。最高速度の時速9.8kmは秒速に換算すると2.7mであり、2.7m以下の値で記録するように設定すると1秒より短い時間となり、正確にデータが記録されるか分からないため、走行軌跡の記録間隔の設定は3mとした。なお、記録条件を1秒間隔に設定することも可能ではあるが、ブルドーザが走行していない時間帯でも軌跡が記録されるため、データ量が膨大になるデメリットがある。

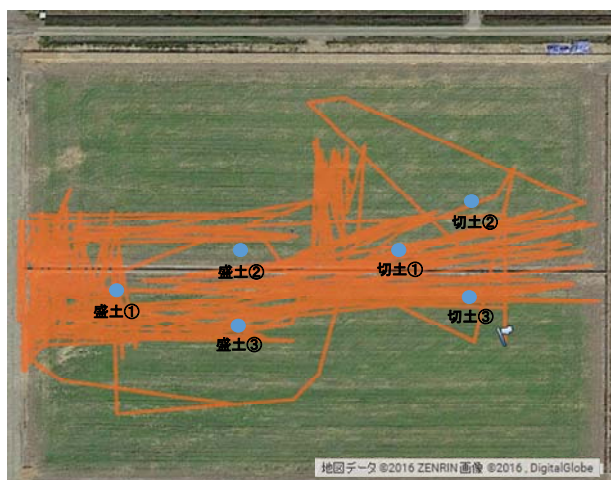


図-4 ブルドーザNo.01の1日の走行軌跡

表-4 ブルドーザの最高速度

No.	最高速度 (km/h)
01	8.7
02	8.1
03	9.6
04	8.9
05	8.6
06	8.5
07	9.8



### 3. 2 土壌調査地点を走行した回数

表-5 に、各ブルドーザの土壌調査地点ごとの走行回数を、走行軌跡を基にカウントした値を示す。最も走行回数が多かった地点は切土①であり、最も少なかった地点は切土③であった。圃場の中央に位置する盛土②、③および切土①の走行回数が圃場の両端に位置する盛土①および切土②、③より多いことが分かる。これは、切土の運土作業で圃場の端から運土する際にも圃場中央を走行する必要があるためと考えられる。また、圃場の両端に位置する盛土①と切土②、③を比較すると盛土①の方がやや走行回数が多かった。盛土区域では、運土した土壌を締め固める作業があるため、それが影響したと推察される。今後、各土壌調査地点でサンプリングした土壌物理性の分析値と走行回数とを併せて検討を進めることになるが、データ解析および次年度の走行軌跡調査では以下の2点に注意が必要と考えている。

ブルドーザが排土板で土壌を削りながら前進した作業回数なのか、排土板を上げて土壌を削ることなく前進または後進した走行回数なのかによって、土壌に対する影響が変わる可能性がある。今回のGPSデータからは、走行速度によって作業状況を推測することは可能であるが、作業状況を正確に把握することは難しい。次年度の調査では、ブルドーザへのインターバルカメラ等の設置により、作業状況を把握できるか検討したい。

ブルドーザの運土作業を大きく分けると、表土剥ぎ、切盛土、表土戻しの作業があり、それぞれ、ブルドーザが走行する地面の土壌性状が異なるため、その把握が必要である。A圃場では、基盤層に泥炭土が分布しており、圃場面を降雨によって過湿状態にしないために、表土剥ぎから表土戻しまでの作業を1日で終える分割施工が行われた。この施工方法に合わせるため土壌試料採取は、

施工段階ごとに行い、それぞれの分析値が得られている。しかし、今回の走行履歴の調査では施工段階ごとの作業開始時間および終了時間を正確に把握していなかったため、施工段階ごとのブルドーザの走行回数をカウントすることが出来なかった。このため、次年度の調査では施工段階ごとに施工が行われた時間を記録することで、作業ごとのブルドーザの走行回数をカウントできるよう改善していく必要がある。これにより各土壌調査地点において、走行履歴と施工段階ごとの土壌物理性の性状変化を組み合わせて検証を行ってみたい。

### 3. 3 土壌断面調査

AおよびB圃場の施工前後の土壌断面を切土区域、盛土区域ごとに示した(写真-2~5)。A圃場では、表土厚は30cmで施工が行われ、施工後には粘性土で5cmの客土が行われた。土壌断面調査を行った地点では、切土区域で8cmの切土が行われ、その土壌(泥炭土)を盛土区域で10cmの盛土として施工されていた。施工前の鈹質土が分布していた表土厚は、切土区域で18cm、盛土区域で35cmと場所によって違いがあった(写真-2、3左側)。表層土(Ap層)の直下には、切土区域、盛土区域ともに低位泥炭が堆積した泥炭土層が分布していた。

A圃場の施工前におけるAp層の土壌硬度は、切土区域で17mm、盛土区域で15~16mmであった。施工後には切土区域で18mm、盛土区域で12mmであった。施工前後で土壌硬度は、同程度か盛土区域で小さくなっており、施工による表層土の締め固めはなかった。表層土下の泥炭土層でも同様の傾向であった。施工後の表層土内には、切土区域、盛土区域ともにやや泥炭が混じった状況となっていた(写真-2、3右側)。これは施工前の状況で、表土の厚さが30cmに満たない場所もあり、表土剥ぎの段階で下層の泥炭層まで一緒に剥ぎ取ったことが1つの要因として考えられる。

B圃場では、表土厚は15cmで施工が行われ、客土は行われていない。土壌断面調査を行った地点では、切土区域で6cmの切土が行われ、盛土区域で50cmの盛土が行われた。表層土には粘性土が分布しており、土壌硬度は切土区域のAp層で20~22mmと比較的堅密した土壌であったが、盛土区域のAp層の土壌硬度は16mmと堅密化しておらず、調査地点で均一ではなかった。ただし、盛土区域でもAp層の直下のC層では、土壌硬度が20mmとやや堅密化した層が見られた。盛土区域のように標高の低い地点では、地表から30cm程度で泥炭土層が堆積している地点があった。切土区域でも、地表から1.0m付近では一

表-5 土壌調査地点別のブルドーザ走行回数

No.	土壌調査地点名					
	盛土			切土		
	①	②	③	①	②	③
01	2	0	7	4	2	6
02	2	0	2	0	0	0
03	4	0	0	10	0	0
04	13	19	16	10	2	1
05	0	6	0	2	4	0
06	2	0	0	8	0	3
07	0	5	2	2	12	5
合計	23	30	27	36	20	15

部泥炭が混じった層があった(写真-4、5左側)。

施工後の表層土は切土区域で25cmであり、25~35cmでは下層土と表土が混じっていた。盛土区域の施工後の表層土は20cmであった。土壌硬度は、切土区域のAp1、Ap2層で23mm、盛土区域のAp層で22mmであり、施工前と同等かそれ以上に締め固まっていた。

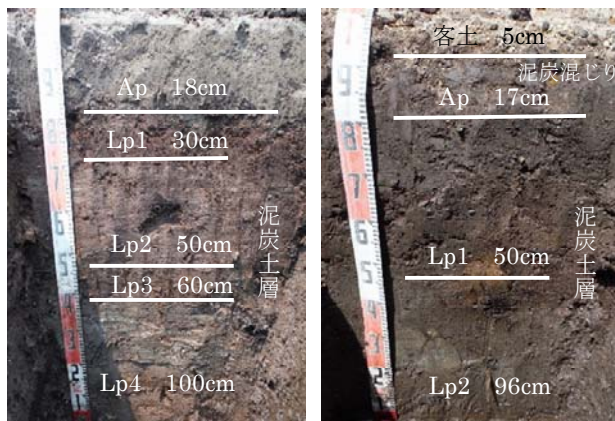


写真-2 A圃場切土区域の土壌断面

左：施工前 右：客土後

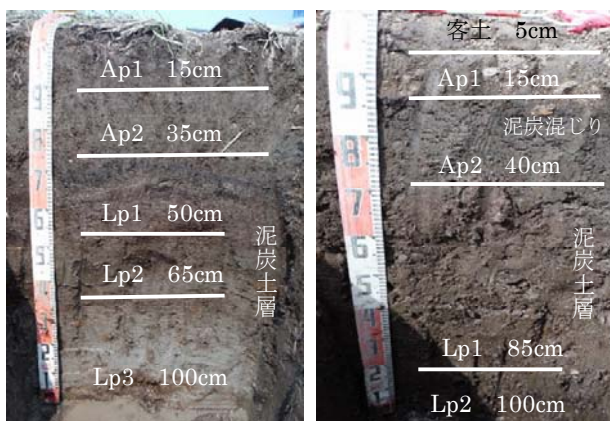


写真-3 A圃場盛土区域の土壌断面

左：施工前 右：客土後

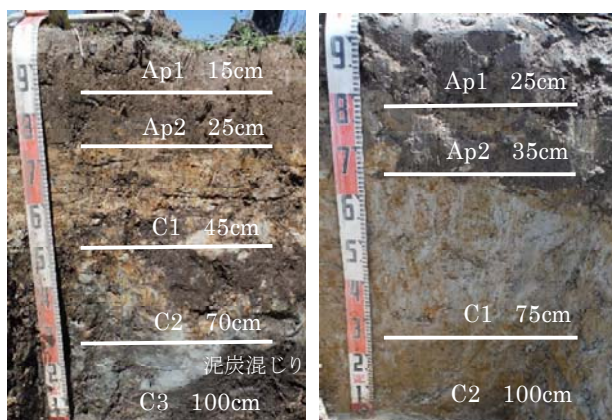


写真-4 B圃場切土区域の土壌断面

左：施工前 右：表土戻し後

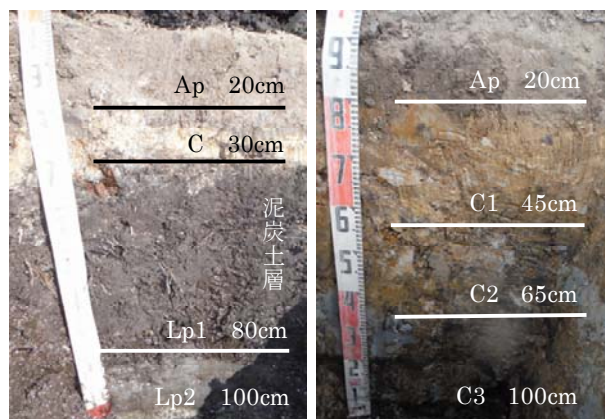


写真-5 B圃場盛土区域の土壌断面

左：施工前 右：表土戻し後

### 3.4 含水率

表-6にAおよびB圃場の土壌採取時期別の土壌水分の値を示した。土壌試料採取は、両圃場ともに切土区域、盛土区域のそれぞれ3箇所まで深度60cmまで行った。

A圃場の施工前調査では、調査の2日前に16mm/日の降雨量があり、地表面から15cm程度(Ap1層)のごく表層の土壌含水率は、切土区域で25~29%、盛土区域で32~38%と盛土区域で高い。盛土区域は、切土区域と比較すると標高が低いために水が集まりやすく、含水率が高くなったと考えられる。15~30cm(Ap2層)の含水率も盛土区域の方がやや高いが、その差はAp1層と比較すると小さい。表層土の下には泥炭土が分布するが、泥炭土の含水率は70%を超える土層が多かった。泥炭土では、表層土のように切土区域、盛土区域による含水率の違いは見られず、同程度であると言える。A圃場の切盛土深は8cm程度であり、切土区域、盛土区域で大きな高低差はない。このため、地表から30cmより深い泥炭土層では切土区域、盛土区域による違いが現れにくかったと考えられる。

B圃場の施工前調査では、調査前の3日間に降雨量は観測されておらず、比較的乾燥した状況での調査であった。このため、A圃場のAp1層と比較してもB圃場の表層土であるAp層の含水率は低くなっている。B圃場の含水率の特徴として、表層土と下層土の差がないことが挙げられる。これはB圃場には、土壌硬度の大きい堅密した粘性土が分布しており、透水性が低いことが影響していると考えられる。ただし、盛土区域の30~60cmの層で一部含水率の高い地点があった。これは、B圃場の特に盛土区域の深い箇所では泥炭土が分布しているのが確認されており、これが一部混じっているためである。

A圃場は表土剥ぎから表土戻しまでを1日で、B圃場は2

日間で終了。A圃場の表土剥ぎが終了した時点での泥炭土の含水率は、切土区域で57~70%、盛土区域で75~78%であり、盛土区域の含水率が高かった。また、切土区域では、下層(45~60cm)の泥炭土の含水率が高い状態であった。この後、8cm程度の切盛土が行われたが、切盛土終了時点では切土区域の表層土の含水率は高くなり、盛土区域では低くなった。これは、切土区域では切土により新鮮な泥炭土が露出したこと、盛土区域では含水率の低かった切土区域表層の泥炭土が移動してきたためと考えられた。表土戻し後の表層土(0~15cm)の含水率は、施工前調査と同様に切土区域より盛土区域で高く、15~30cmの表層土でも同じ傾向が見られた。また、これら表層土の含水率は施工前と比較すると表土戻し後の方が高い。A圃場の施工が行われた日は、前日2日間に降雨はなかったが、それ以前はまとまった降雨量が記録されている。このため、もともと表層土の水分量が施工前調査時と比較して多かったことが影響していると推察された。

B圃場の表土剥ぎが終了した時点での粘性土の含水率は、施工前と同程度であった。B圃場では、切盛土が50cm以上行われた地点が多く、表土剥ぎ後の値と切盛土後の値を単

純に比較することは出来ないが、切盛土が終了した時点での粘性土の含水率は20%前後と大きな変化はなかった。これは、表土戻しが終了した時点でも同じであり、含水率は20%前後であった。比較的乾燥した粘性土は、切盛土などの土量が多い場合でも土壌の含水率の変化は小さいことが分かる。

### 3.5 固相率および飽和透水係数

AおよびB圃場の表層土、基盤層の固相率および飽和透水係数の推移を示した(図-5~12)。固相率は、一定体積当たりの固形物の割合を表しており、施工機械の走行で土壌が締め固められると固相率は増大しやすい。飽和透水係数は、土壌内の粗孔隙量の多少やその連続性に左右され、排水性の指標として用いられる。土壌の固相率が増大し、粗孔隙量が減少する場合や施工機械の練り返しによって土壌構造が破壊され、粗孔隙の連続性が失われると飽和透水係数は低下し、排水性は悪化する。水田土壌の作土層(0~20cm)の土壌診断基準値は、固相率で30~40%、飽和透水係数で $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ m/sであり、鋤床層のような難透水層でも $10^{-7}$ m/s以上が望ましいとされている<sup>4)</sup>。

表-6 A およびB 圃場の採取時期別、採取地点別、土壌深度別の含水率(単位: %)

採取時期	採取箇所	A圃場				B圃場			
		表層土		基盤層(泥炭土)		表層土		基盤層(粘性土)	
		0~15cm	15~30cm	30~45cm	45~60cm	0~15cm	15~30cm	30~45cm	45~60cm
施工前	切土区域①	25	31	55	64	18	21	21	21
	切土区域②	27	32	67	78	12	19	23	19
	切土区域③	29	36	79	76	18	21	22	21
	盛土区域①	38	35	73	69	20	22	22	22
	盛土区域②	32	32	66	74	19	22	35	35
	盛土区域③	38	40	77	77	24	22	22	22
表土剥ぎ後	切土区域①	—	—	62	72	—	19	20	20
	切土区域②	—	—	57	74	—	20	19	20
	切土区域③	—	—	70	77	—	18	18	20
	盛土区域①	—	—	75	77	—	25	20	17
	盛土区域②	—	—	75	75	—	21	31	41
	盛土区域③	—	—	78	80	—	19	17	17
切盛土後	切土区域①	—	—	75	69	—	17	18	19
	切土区域②	—	—	62	74	—	16	17	19
	切土区域③	—	—	72	72	—	16	16	18
	盛土区域①	—	—	66	74	—	20	19	20
	盛土区域②	—	—	52	73	—	25	25	24
	盛土区域③	—	—	72	71	—	19	23	21
表土戻し後	切土区域①	35	38	79	※	21	18	19	※
	切土区域②	36	37	48	※	20	20	20	22
	切土区域③	37	36	50	※	20	18	18	21
	盛土区域①	53	50	54	※	22	19	19	※
	盛土区域②	49	43	55	※	21	24	24	※
	盛土区域③	46	45	55	※	19	20	20	※
客土後	切土区域①	22	36	75	72	—	—	—	—
	切土区域②	23	36	57	68	—	—	—	—
	切土区域③	26	34	69	75	—	—	—	—
	盛土区域①	32	46	79	68	—	—	—	—
	盛土区域②	20	35	58	77	—	—	—	—
	盛土区域③	39	51	77	69	—	—	—	—

※はデータ欠損

A圃場の施工前調査では、表層土で固相率、飽和透水係数ともに基準値近辺であり、土壌の物理性は良好であると言える(図-5、7)。施工前の固相率は切土区域、盛土区域による違いも少なく均一な土壌状態であったが、飽和透水係数は調査地点によってバラツキがあった。表層土下の泥炭土は、植物遺体の堆積した土壌であり、施工前の固相率は10~20%程度、飽和透水係数は $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ m/sと良好な値を示した(図-6、8)。表土戻し後の表層土の固相率はほぼ基準値内であり、飽和透水係数は $10^{-8}$ m/sと基準値を下回る地点も一部確認されたが、その他は基準値内であり、土壌の物理性は良好であると言える。表層土の表土戻し後の切土区域、盛土区域を比較すると盛土区域で固相率がやや低く、飽和透水係数は切土③以外では、切土区域、盛土区域による違いはなかった。ブルドーザの走行履歴調査では、圃場の中央に位置する切土①および盛土②、③の地点でブルドーザの走行回数が多かった。しかし、表土戻し後におけるこれら地点の排水性などの悪化はなく、ブルドーザの走行回数と飽和透水係数の値に関連性は認められなかった。

表土剥ぎ後の基盤層(泥炭土)の固相率は、施工前と比較して盛土区域では変化はなかったが、切土②および③で増大しており、飽和透水係数も切土②で低下していた(図

-6、8)。ただし、その地点の飽和透水係数は $10^{-7}$ m/sのオーダーであり、排水性が急激に悪化している状況ではない。この後、切盛土が行われたが、今度は盛土区域で固相率の増大と飽和透水係数の低下している地点が見られた。これは、切土区域で発生した泥炭土を盛土区域まで運ぶ運土作業で泥炭土の土壌構造がある程度乱されたことや盛土を行った際の締め固め作業が影響しているものと考えられる。ただし、この時の盛土区域の泥炭土の飽和透水係数は、 $10^{-7}$ m/sのオーダーであり、基準値内であった。

A圃場では、基盤に泥炭土が分布するために表土剥ぎから表土戻しまでを1日で終わるよう分割施工が行われ、また過転圧を防ぐために超湿地ブルドーザを使用する工夫が行われている。施工段階ごとの固相率や飽和透水係数を検証したが、基準値を下回った地点の飽和透水係数は $10^{-7}$ ~ $10^{-8}$ m/s程度の低下にとどまっており、そのような地点も圃場の一部に見られる程度であった。このことから、基盤に泥炭土が分布する圃場では、このような分割施工は有効であると考えられた。ただし、A圃場の固相率や飽和透水係数の値が1番大きく変化したのは、客土後の表層土であった(図-5、7)。A圃場の客土は、B圃場近辺の切土で発生した粘性土を表層5cmに施工した。この粘性土が表層土と混じったために固相率が増大し、飽和透水係数も基準

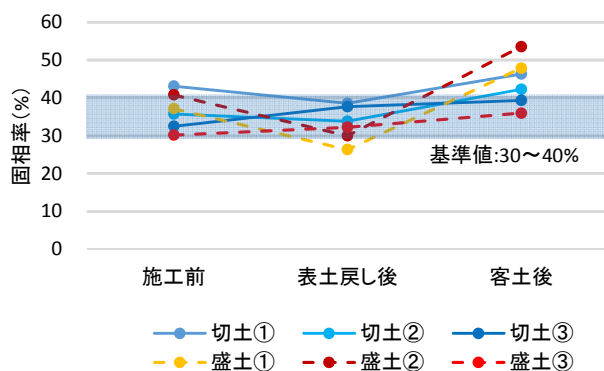


図-5 A圃場表層土(0-15cm)の固相率の推移

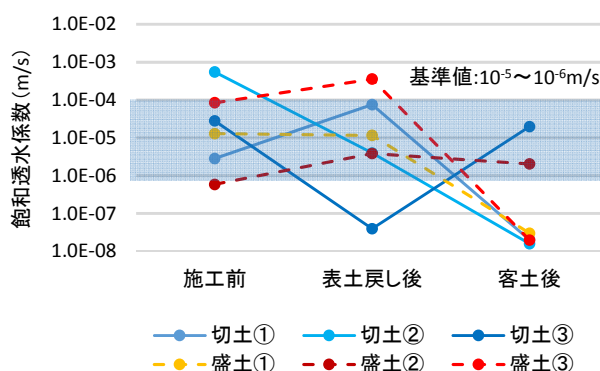


図-7 A圃場表層土(0-15cm)の飽和透水係数の推移

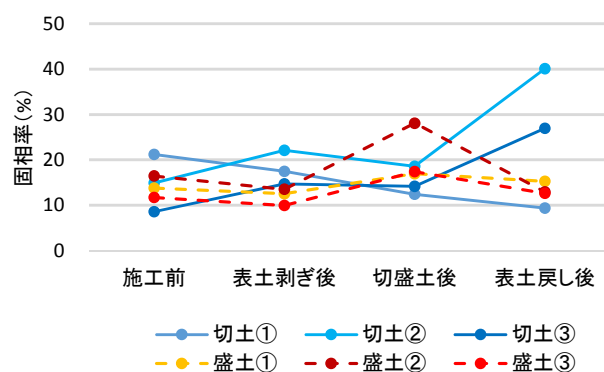


図-6 A圃場基盤層(30-45cm)の固相率の推移

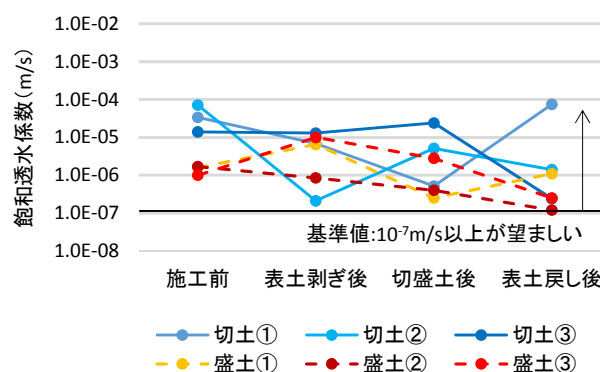


図-8 A圃場基盤層(30-45cm)の飽和透水係数の推移

値を下回る程度まで低下した。今後、営農時の耕起により表層土が攪拌されるため、透水性が改善されることが考えられ、推移を注視したい。

B圃場の施工前調査では、多くの地点で固相率が50%を超えていた(図-9)。飽和透水係数は、表層土では切土②および③で基準値を下回っており(図-11)、下層土には盛土②および③で $10^{-8} \sim 10^{-9}$  m/sオーダーの難透水性の層が確認された(図-12)。このように施工前のB圃場の飽和透水係数は、表層土では切土区域で小さく、下層土では盛土区域で小さかった。表土戻し後の表層土では、全ての地点で固相率が50%を超えており(図-9)、飽和透水係数は、施工前とは逆に盛土区域で基準値を下回った(図-11)。これは、表土戻し作業での湿地ブルドーザの動きに違いが影響した可能性があるが、B圃場ではブルドーザの走行履歴調査は行っていないため、要因は明らかに出来なかった。

表土剥ぎ後では、固相率に大きな変化はなく、飽和透水係数は切土②および③で低下していた(図-10、12)。調査地点の切盛土は6~60cm程度の深さで施工されたため、表土剥ぎ後と切盛土後を比較することは出来ないが、切盛土後で切土区域、盛土区域の固相率を比較すると切土区域でやや大きかった(図-10)。これは、切土区域では下層の堅密な地山が露出するのに対して、盛土区域では運土し

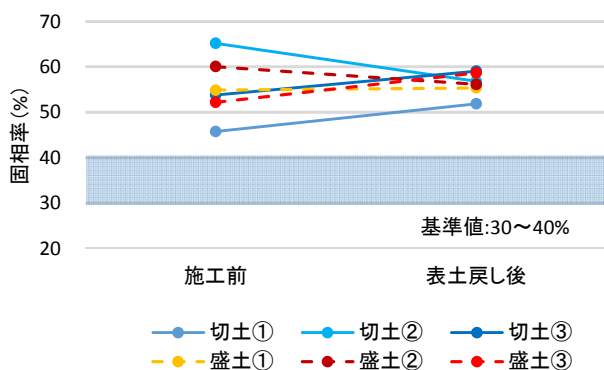


図-9 B圃場表層土(0-15cm)の固相率の推移

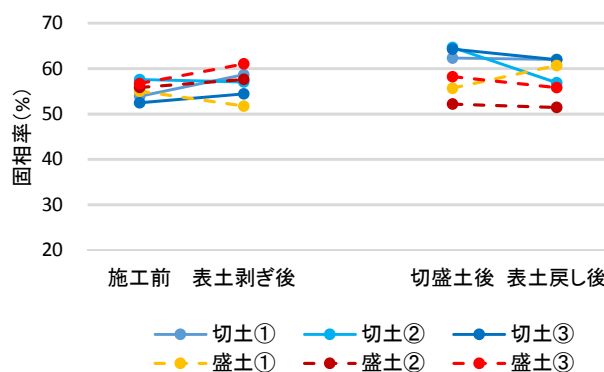


図-10 B圃場基盤層(15-30cm)の固相率の推移

た土壌を湿地ブルドーザで締め固めているためと考えられる。飽和透水係数を見ると固相率の小さかった盛土区域でも $10^{-8} \sim 10^{-9}$  m/sであり、切土区域と同程度であった。固相率が小さいにも関わらず、飽和透水係数が同程度ということは、土壌内の孔隙の連続性が失われている可能性があり、湿地ブルドーザによる運土作業や締め固め作業によって粘性土の土壌構造がある程度乱されたと推察される。表土戻し後の基盤層の飽和透水係数も $10^{-9}$  m/sオーダーの地点が見られ、鋤床層であっても好ましくない値であった(図-12)。湿地ブルドーザなどで極力過転圧を防ぐ工夫をしても施工直後に排水性の基準値を満たすことが難しい状況であった。表土戻し後に施工された暗渠や工事後の営農作業が重要になってくると考えられる。

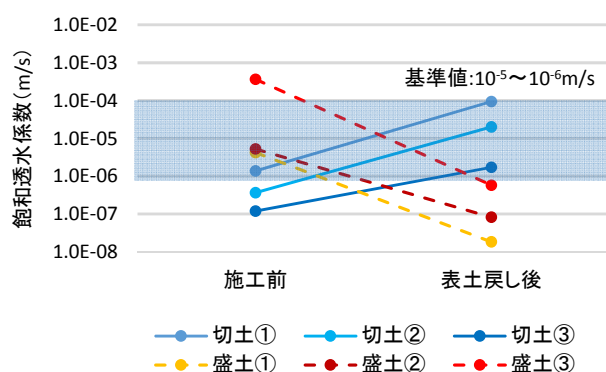


図-11 B圃場表層土(0-15cm)の飽和透水係数の推移

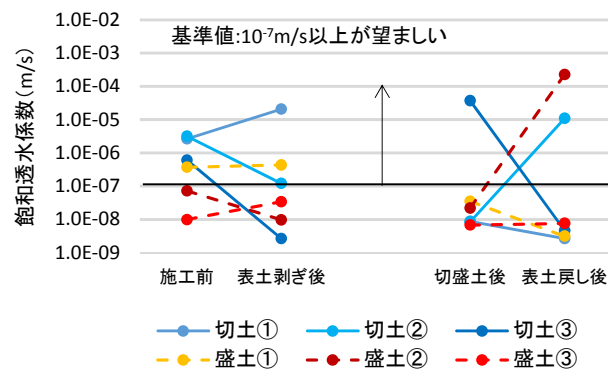


図-12 B圃場基盤層(15-30cm)の飽和透水係数の推移

### 3.6 地耐力調査

A圃場の施工前から施工後にかけて実施した地耐力調査の結果を示した(図-13、14)。6箇所での調査の内、代表的な地点として、切土②のコーン指数を図-13に盛土①のコーン指数を図-14に示した。図の縦軸の深度は、調査時点での地表面からの深度を表している。

盛土①の施工前では、深度20cmでコーン指数が高く

なっていた。A 圃場は、施工前に水田として利用されていたため、鋤床層のような難透水性の耕盤層が形成されていたためと考えられる。切土②のコーン指数は、盛土①ほどのはっきりとした傾向はないが、深度20cm付近でやや高くなっていた。表土剥ぎ後から表土戻し後までの施工中では、施工によってコーン指数に大きな変化は見られず、両地点ともに150~250kN/m<sup>2</sup>の範囲内を推移した。湿地ブルドーザの安定的な走行に必要なコーン指数が300kN/m<sup>2</sup>である<sup>5)</sup>ことを考えると、泥炭土での施工では今回の調査時の水分条件がほぼ限界であったと推察される。客土後では、深度10cmのコーン指数が高い値となった。客土として表層5cmに施工された粘性土の影響と考えられた。

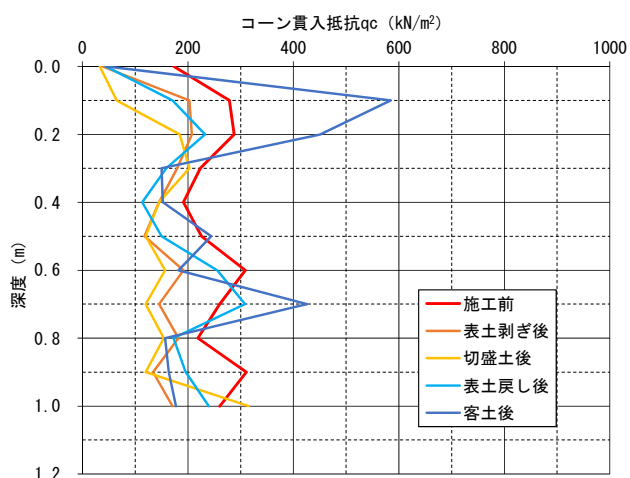


図-13 A 圃場切土②のコーン指数

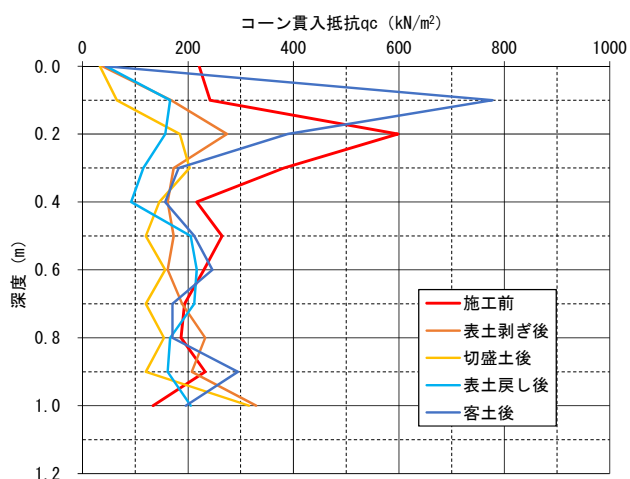


図-14 A 圃場盛土①のコーン指数

#### 4 まとめ

大区画圃場が整備された圃場において施工段階ごとの排水性など土壌性状の検証を平成28年度から開始した。今年度は基盤層に泥炭土や粘性土が分布する2圃場を調査したに過ぎず、1つの事例として結果を報告した。基盤層に泥炭土が分布している圃場では、分割施工が行われたことから、施工前後において表層土の排水性などに土壌物理性の悪化はなかった。田畑輪換を想定した大区画整備圃場では、施工後の良好な排水性の確保は重要になってくると考えられる。それは、畑作利用時には、過湿被害を防ぐだけではなく、水田利用時においても中干し時期には速やかに土壌を乾燥させ、酸素を供給することにつながる。しかし、例えば泥濘化や練り返しと言っても、大区画圃場整備に伴い土壌分析項目がどの程度の値になった状態を言うのか、その時の土壌水分の状態はどの程度なのか、分かっていないことも多い。筆者らは、実圃場の調査だけではなく、室内試験などを加えることで施工直後においても良質な圃場整備が実現できる施工体系の確立を目指して今後も調査を継続していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 北海道農政部：北海道農業・農村の概要、2013年
- 2) 農林水産省：農業生産の基盤の整備に関する資料、2014年
- 3) 北海道米麦改良協会：北海道の米づくり、pp.52-61、2011年
- 4) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2015、2015年
- 5) 社団法人地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—、p.269、2000年

## 16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

### 16.1.2 大区画水田圃場における地下水位制御システムの高度利用に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム）

研究担当者：大深正徳、新津由紀、桑原淳、清水真理子

#### 【要旨】

水稲移植栽培の登熟期に、田面から 35cm 下に地下水位を設定して地下灌漑を実施した。地下水位は田面から平均 37cm 下に保たれ、標準偏差 6 cm と大きなばらつきはなかったが、取水側で設定水位に達するまでに時間を要する傾向にあった。登熟期に地下灌漑を実施しても、収穫期にはコンバイン走行に十分な地耐力が確保された。水稲稈長の圃場内のばらつきは、地下水位や土壤水分、地耐力とは明らかな関係はなかった。今後、より適切な水位と灌漑期間の検討を行うとともに、転作畑で給排水ムラの調査を実施する。

キーワード：大区画水田、地下灌漑、地下水位、土壤水分、給排水ムラ

#### 1. はじめに

北海道の大規模水田地帯では、食料生産の体質強化のため、担い手への農地集積や農地の大区画化・汎用化が推進されている<sup>1)</sup>。また、北海道の大区画水田圃場では、暗渠排水施設を利用した地下水位制御システムの導入が進められている。本システムでは、管内の堆泥除去により暗渠管の維持管理を行うとともに、作物栽培期間に地下から給水することにより、最適な圃場水管理の実現が可能となる。

地下水位制御システムの導入は、水稲直播栽培技術の実現、転作作物への灌水、水管理の省力化等に有効であるが、地下灌漑技術の普及のためには、給排水ムラが生じず、速やかに均一に圃場全体の地下水位や土壤水分を制御する技術が求められる。

水田では、一般に登熟期に間断灌漑を実施する。その目的には根の活性を高く維持することや、収穫期における機械作業に適した地耐力の確保等が挙げられる。しかし、間断灌漑の実施には多くの水や労力を必要とする。そこで、地下水位制御システムを利用し水位を田面下の一定の深さで維持すれば、根に酸素を供給しながら、生育に必要な水を供給することが可能となる。また同時に、上記の状態を収穫まで維持することで、コンバインの走行に必要な地耐力も確保することができる。

平成 28 年度は、水稲栽培登熟期に地下灌漑を実施して田面下で水位を維持し、地下水位や土壤水分等を面的に評価した。また、登熟期地下灌漑が水稲の生育や地耐力に与える影響を調査した。

#### 2. 調査地と方法

##### 2.1 調査地

調査は、平成 27 年度に国営緊急農地再編整備事業にて区画整理工事が実施された北海道美唄市の水田圃場で行った（図-1）。圃場は、1 区画が長辺約 170 m、短辺約 70 m に整備され、地下水位制御システムが導入されている。暗渠管（φ60～125mm、勾配 1/500）は、基本 10m 間隔で、0.70m～1.00m の深さにある。

平成 28 年は、5 月 28 日に水稲の苗を移植、9 月 18 日に収穫を行った。8 月 5 日から水閘を解放して地下水位を低下させ、8 月 8 日から 17 日までの間、田面から 35 cm 下に地下水位を設定して地下灌漑を実施した。



図-1 調査圃場図（2016年9月）

## 2. 2 方法

降水量は、同一農区内で調査圃場から約 450m 離れた地点で計測した。

地下灌漑取水量（以下地下取水量とする）は、10 分間隔で測定した取水柵内水位を HQ 式に代入して求めた。HQ 式は、同一農区内の圃場で測定した取水柵水位と、電磁流量計により測定した地下取水量の関係から作成した。

暗渠排水量は、排水口に取付けたスリット堰により 2 分間隔で測定した。降雨時に排水路水位が暗渠を上回ったときはスリット堰による測定が不可能であったため、同様の水閘管理を行っていた隣接する水田圃場において測定された電磁流量計による排水量と同じであると仮定した。

地下水位、土壌、水稻稈長等の各調査は、暗渠から 5m 離れのライン 1~3（それぞれ L1、L2、L3）上それぞれ、取水柵から長辺方向に 30、50、70、90、110、130m 離れた地点、計 18 地点で行った（図-2）。地下水位および土壌水分ポテンシャルは、6 月 23 日から 9 月 6 日まで測定した。地下水位は 70cm 深もしくは 90cm 深に設置したテンシオメータにより、土壌水分ポテンシャルは 15cm 深に設置したテンシオメータにより 30 分間隔で測定した。昼間は、気温の急激な変動等によりテンシオメータの圧力センサーの出力値が安定しないため、夜間の 21 時から 3 時にかけて測定した値の平均を用いた。

収穫後に、泥炭層より上の土壌を採取した。表層から順に Ap1、Ap2、A3 層の 3 層の土壌を採取し、それぞれの深度と透水係数、土壌中全窒素含有率を測定した。

収穫直前の 9 月 16 日には、水稻の稈長（最長稈の地際から穂首までの長さ）を測定した。また、同地点で、デジタル貫入式土壌硬度計により地耐力を測定した。

## 3. 大区画水田圃場における給排水ムラの実態把握と要因の解明

### 3. 1 気象と水管理

2016 年 5 月~9 月の月降水量は、それぞれ 66、160、180、367、102 mm であった。過去 10 年間の平均月降水量（5 月~9 月でそれぞれ 69、75、123、150、158 mm）と比較すると、6 月~8 月の降水量が多く、特に 8 月には日降水量が 100mm を超える降雨が 2 回（8 月 17 日に 124 mm、8 月 20 日に 109 mm）あった（図-3a）。

登熟期における地下灌漑は、8 月 8 日から 17 日午前まで実施し、この時の地下取水量は 165 mm と推定された（図-3b）。また、この期間の暗渠排水量は 82 mm であった。（図-3c）

### 3. 2 土壌物理化学性の空間変動

18 地点の Ap1 層と Ap2 層の下端の深度はそれぞれ  $7.3 \pm 0.7$ 、 $18.3 \pm 1.6$  cm で、18 地点間に有意な差は認められなかった。一方、表土厚である地表面から A3 層の下端までの深度は  $31.8 \pm 2.5$  cm で、L3（33.7 cm）で L1（30.5 cm）より有意に大きかった（ $p < 0.05$ ）。

飽和透水係数は、地点間で有意な差は認められず、18 地点の平均値は、Ap1 層、Ap2 層、A3 層でそれぞれ  $3.9 \times 10^{-3}$ 、 $2.3 \times 10^{-3}$ 、 $7.6 \times 10^{-3}$   $\text{cm s}^{-1}$  であった。

土壌の全窒素含有量は、Ap1 層、Ap2 層、A3 層でそれぞれ  $1.8 \pm 0.3$ 、 $3.3 \pm 0.5$ 、 $4.0 \pm 0.7$   $\text{g kg}^{-1}$  で、客土の影響を強く受けた Ap1 層で最も小さかった。Ap1 層では、ライン間で有意な差は認められなかったが、取水柵からの長辺方向上の距離と有意な正の相関があり、排水側で大きかった（ $p < 0.01$ ）（図-4）。Ap1 層の全窒素含有率は、A3 層の全窒素含有率と正の相関傾向を示し（ $r = 0.39$ 、 $p = 0.08$ ）（図-5）、整備前の表土の空間変

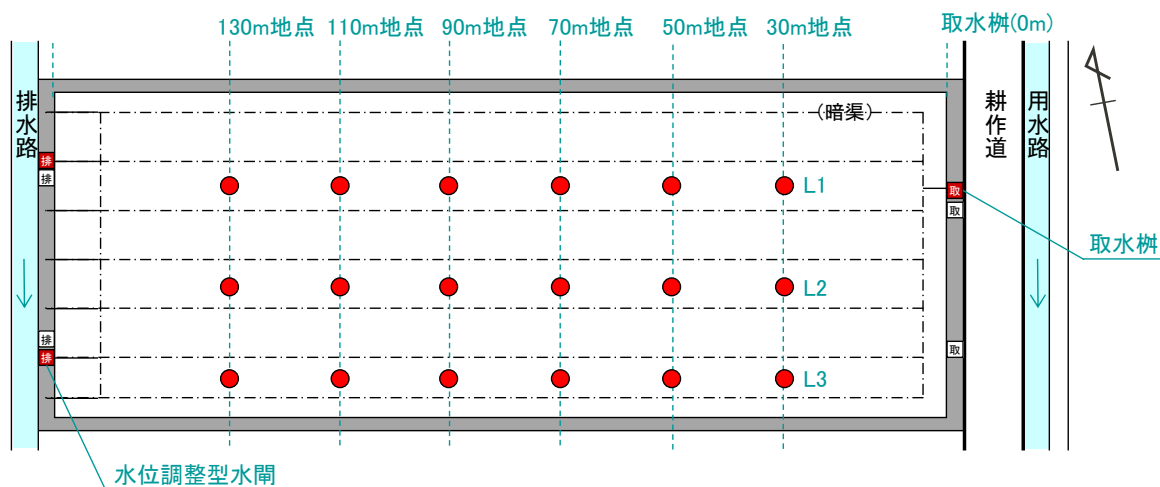


図-2 試験圃場の暗渠配置と調査地点 調査地点は赤丸（●）で示す。



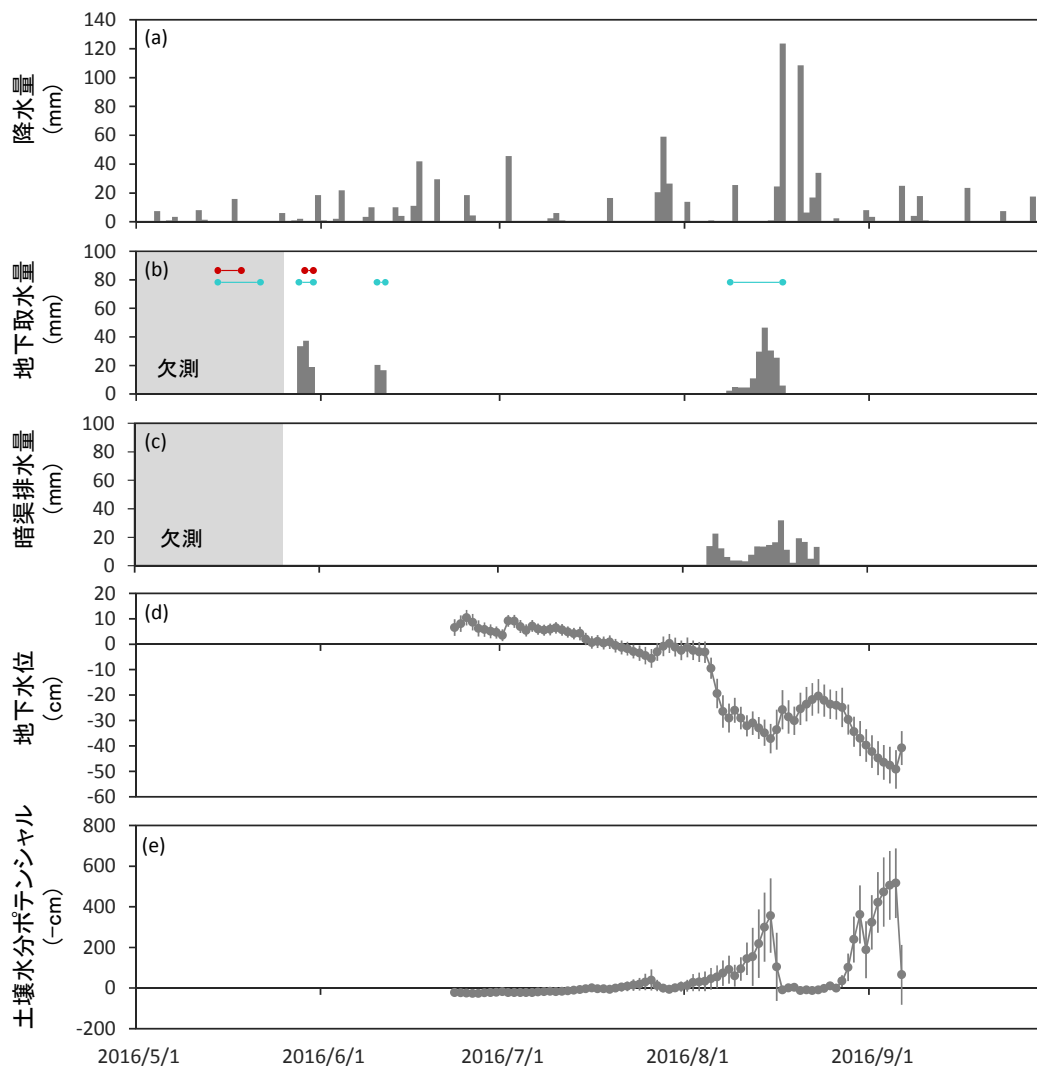


図-3 降水量 (a)、地下取水量 (b)、暗渠排水量 (c)、地下水位 (d)、15cm 深の土壌水分ポテンシヤル (e) の季節変化  
 地下取水量 (b) の赤線 (●) は地表取水、水色線 (●) は地下取水を実施した期間を示す。  
 地下水位 (d) および土壌水分ポテンシヤル (e) のエラーバーは、標準偏差 (n=18) を示す。

動が整備後1年の営農でもAp1層に影響した可能性を示唆する。

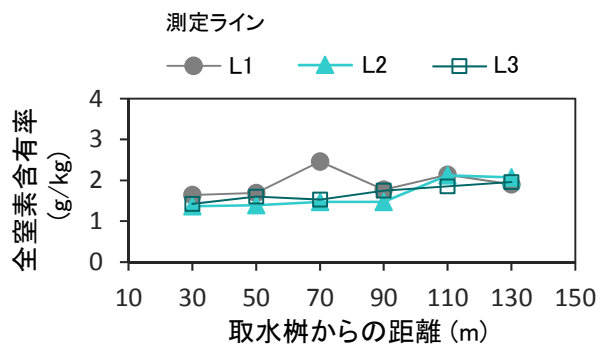


図-4 土壌の全窒素含有率

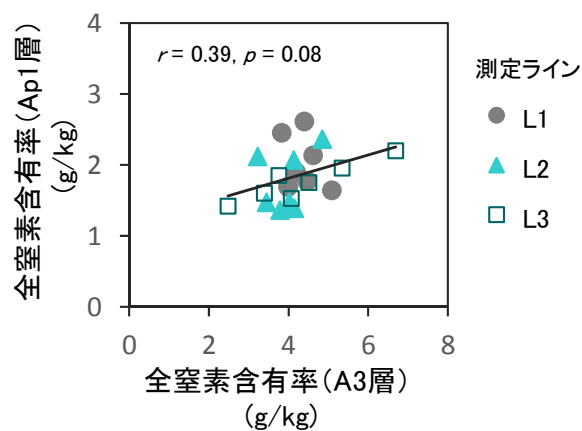


図-5 土壌の全窒素含有率

### 3.3 登熟期地下灌漑実施時における地下水位と土壤水分の空間変動

地下灌漑実施前後における地下水位と土壤水分ポテンシャルの空間変動を図-6に示す。地下水位は、8月5日の水閘開放後に全地点で低下した。8月5日から7日までの地下水位変化速度は、 $-8.5 \pm 2.5 \text{ cm d}^{-1}$ で、地点間に有意な差は認められなかったが、取水柵側で低下速度が小さい傾向にあった(図-7a)。

8月8日から17日まで地下灌漑を実施したが、16日、17日に大きな降雨があったため、8月15日までで地下水位変化速度を求めた。地下灌漑期間の地下水位変化速度は $-1.3 \pm 1.0 \text{ cm d}^{-1}$ で、地点間で有意な差は認められなかったが、取水柵から遠い排水側で地下水位変化が小さく、取水柵から近い地点で地下水位が低下する傾向があった(図-7b)。この時の地下水位変化速度は、8月7日の地下水位と有意な負の相関を示した( $r = 0.84, p < 0.01$ )。以上のことから、水閘開放後には、排水側から地下水位が低下し、その後の地下灌漑による地下水位制御期間では、設定地下水位(-35 cm)より地下水位が高かった取水柵側で水位が低下しており、排水側より取水側で

設定水位に達するまでの時間を要する傾向があると考えられた。8月15日の地下水位は、L1でL2より有意に高かったが( $p < 0.05$ )、取水柵からの距離で有意な差は認められず、18地点の平均値は $-37 \pm 6 \text{ cm}$ 、最大値と最小値はそれぞれ $-27 \text{ cm}$ 、 $-51 \text{ cm}$ であった。

土壤水分ポテンシャルは、地下水位の低下とともに上昇した。8月15日の土壤水分ポテンシャルは、地下水位の低いL2で有意に大きい傾向にあった(図-6f)。しかし、この時の圃場内18地点の地下水位と土壤水分ポテンシャルに明らかな相関は認められなかった。

### 4. 水稻登熟期の水分供給と地耐力向上を両立した地下水位制御技術の検証

#### 4.1 生育期間における地下水位と土壤水分の変動

地下水位の季節変化を図-3dに示す。地下水位は、6月23日の測定開始後、緩やかに低下し、7月2日と7月27日~29日の降雨後に上昇した。8月5日に水閘を開放すると、地下水位の18地点の平均値±標準偏差は、2日間で $-3 \pm 4 \text{ cm}$ から $-26 \pm 6 \text{ cm}$ まで低下した。地下灌漑を実施した8月8日から17日までの平均地下水位は $-32 \sim$

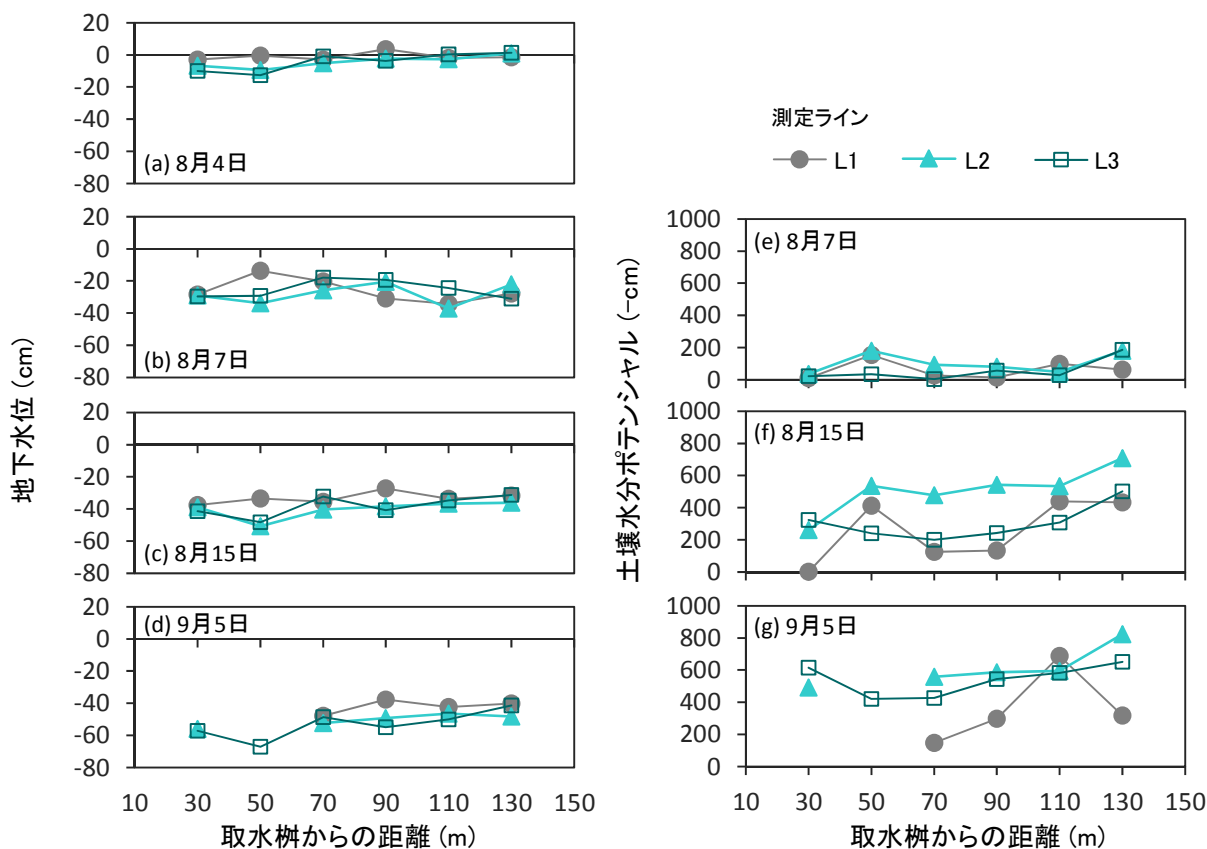


図-6 地下水位と15cm深の土壤水分ポテンシャル

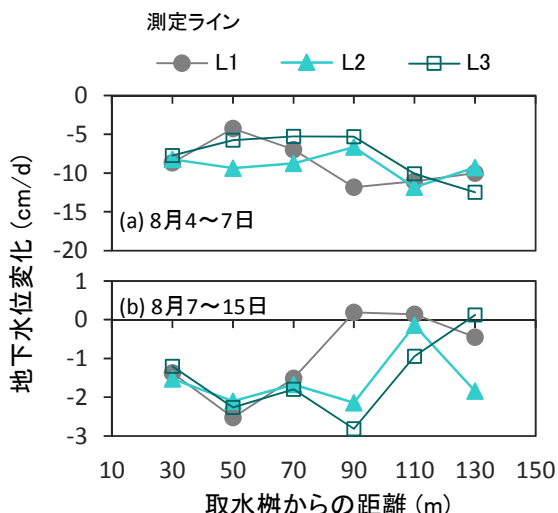


図-7 水閘開放後 (a; 8月4~7日) および地下かんがい実施時 (b; 8月7日~15日) における地下水位変化速度

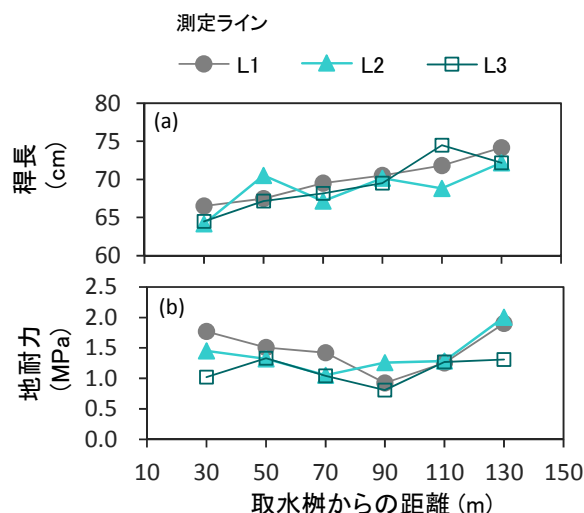


図-8 収穫期の水稻稈長 (a) と0~15cm 深の平均地耐力 (b)

-25 cm で推移した。その後、8月17日と20日の降雨後に、平均地下水位は-20 cm まで上昇した。23日に水閘を全て閉じたが、その後、平均地下水位は緩やかに低下した。

15 cm 深の土壌水分ポテンシャルの季節変化を図-3e に示す。地下水位の低下とともに土壌水分は減少し、土壌水分ポテンシャルは上昇した。8月8日から17日までの地下灌漑実施時においても、平均地下水位は25cm より下で維持されており、15 cm 深度の土壌水分は減少して8月15日には土壌水分ポテンシャルは-360 cm を示した。8月17日の降雨後には、土壌水分ポテンシャルは0付近で推移した。その後の地下水位低下に伴い土壌水分ポテンシャルは上昇し、9月上旬には土壌水分ポテンシャルは-500 cm に達した。

#### 4. 2 収穫期における地耐力と水稻の稈長の空間変動

収穫期における水稻の稈長は  $69.4 \pm 3.0$  cm で、ライン間で有意な差は認められなかったが、取水柵からの距離が遠いと稈長が長くなる傾向があった (図-8a)。稈長は、地下水位や土壌水分ポテンシャル、地耐力とは明らかな関係は認められず、土壌中全窒素含有率の増加とともに有意に増加した ( $r = 0.53, p < 0.05$ ) (図-9)。

地耐力は、18地点全てで0.5 MPa を上回っており (図-8b)、コンバイン走行に十分な地耐力 (0.25 MPa 以上<sup>2)</sup>) が確保されていた。

#### 5. まとめ

水稻登熟期の湛水した水田では、水閘開放後の2日間における地下水位変化速度は  $-8.5 \pm 2.5$  cm/d で、低下

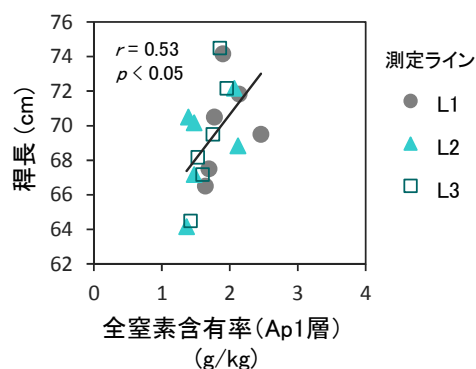


図-9 土壌の全窒素含有率と水稻

速度は取水側でより小さい傾向にあった。その後の地下灌漑による地下水位制御では、設定地下水位 (-35 cm) より地下水位が高かった取水柵側で水位が低下し、8日後の地下水位の平均値と標準偏差は  $-37 \pm 6$  cm であった。この時の圃場内18地点における地下水位と土壌水分ポテンシャルには有意な相関は認められなかった。

登熟期以降に田面下で水位を維持した水田においても、収穫期における地耐力は、全ての地点で0.5 MPa を上回っており、コンバイン走行に十分な地耐力が確保された。水稻の稈長は、土壌中全窒素含有率の増加とともに有意に増加し、地下水位や土壌水分、地耐力とは明らかな関係は認められなかった。

今後、より適切な水位と灌漑期間の検討を行うとともに、転作畑で給排水ムラの調査を実施する。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：北海道総合開発計画、2016年
- 2) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2015、2015年

## 16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

### 16.1.3 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究

#### (このうち、大区画水田の高精度な水管理技術の開発と用水量の解明)

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）

研究担当者：中村和正、酒井美樹、越山直子

#### 【要旨】

北海道の水田地帯では、農作業の効率化をめざして、圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備が進められている。大区画化および地下水位制御システムの整備が行われた地区において、乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培を行った圃場を対象に、圃場単位の水管理および水収支を調査した。この結果、用水量に大きな差はなく、栽培方式ごとに異なる水管理が行われていることから、それぞれの栽培管理用水量の違いにより圃場用水量が異なることが推察された。

キーワード：大区画、地下灌漑、直播栽培、水田、水管理

#### 1. はじめに

食料・農業・農村基本計画では、農地の大区画化や汎用化などの基盤整備が重要な施策として位置付けられている<sup>1)</sup>。北海道は、全国の4分の1を占める耕地面積を有しており、大規模で専門的な農業が展開されている。その一方で、農業者の高齢化等に伴う農家戸数の減少により、農地が急速に担い手へ集積されており、農業経営の大規模化への対応が喫緊の課題となっている。近年では、その対応策として、圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備による水管理の省力化が実施されている。これらの整備が行われたところでは、水稻直播栽培を導入し、育苗作業に関わる労働時間の削減と農作業時期の分散により、さらなる労働生産性の向上を図っている地域がある。

こうした整備に伴い、灌漑方式や水稻栽培方式の多様化が進むと、圃場における水管理や取水量が変化する<sup>2)</sup>。近傍の地下水位が比較的高い地域では、移植栽培と直播栽培における圃場への供給水量の差が10~30%であった例もある<sup>3)</sup>。農区レベルや灌漑区域レベルでは、圃場や農区からの流出機構が変化し、用排水管理に影響することが想定される。将来にわたって、農業用水を安定的、効率的に利用するためには、整備済み地区における圃場水管理や用水量の事例を調査し、圃場や農区における水収支特性を分析する必要がある。

そこで、本研究では、安定的な農業用水の利用および効率的な水管理技術の構築をめざして、圃場が大区画化

されるとともに地下水位制御システムが導入された地区において、水稻の移植栽培および直播栽培を行った圃場を対象に水管理および水収支の調査を実施した。ここでは、初年度の調査結果として、乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培を行った圃場における水管理および水収支の特性について報告する。

#### 2. 調査概要

##### 2.1 調査地区

美唄市に位置する3筆の圃場を対象として、平成28

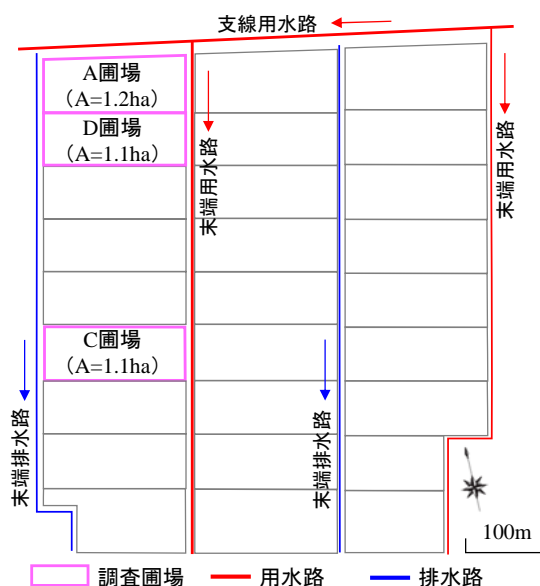


図-1 調査圃場の位置図

年に調査を行った(図-1)。各圃場の水稲栽培方式および栽培品種を表-1に示す。これらの圃場は、平成27年に圃場整備が実施され、地下水位制御システムが整備された。各圃場の面積は1.1~1.2haである。

農業用水は、支線用水路(開水路)から小用水路(開水路)を経由し、各圃場へ取水される。一筆の圃場への用水供給は、地表灌漑2ヶ所、地下灌漑1ヶ所から行える。圃場排水は、地表排水2ヶ所、暗渠排水2ヶ所から行える。圃場内には、暗渠管(φ60~125mm、勾配1/500)が田面から0.70m~1.00mの深さに10m間隔で埋設されている。疎水材は砂利である。調査圃場における水管理は農業協同組合による指導の下、同一の農家により行われた。中干しはいずれの圃場でも行われなかった。

## 2.2 調査方法

各圃場における観測地点の位置を図-2に示す。各圃場の水収支を把握するために、電磁流量計により地表取水量、地下取水量、地下排水量を観測した。ただし、地下取水量を観測する電磁流量計は、平成28年度は所有台数が2台であったため、AおよびD圃場にだけ設置し、C圃場には設置しなかった。このため、C圃場の地下取水量については、集中管理孔(地下灌漑に利用する取水柵)内に水位計を設置し(図-3)、H-Q式(D圃場の実測取水量および取水柵内の水位により作成)を用いて推定した。各圃場の地表排水量については、直角三角堰を排水口近

傍に設置し、観測した。さらに、塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から1.3mの深さに埋設し、各圃場内の地下水位を観測した。地下水位観測地点名は、暗渠ライン名(L1またはL3)-(取水柵からの距離(m))-(暗渠ラインからの距離(m))を表している。湛水深は、水圧式水位計を各圃場の2ヶ所に設置し観測した。各圃場において湛水があり、かつ取水、排水、降雨がないときにN型減水深計を各圃場内の2点に設置し、日減水深を観測した。

気象については、A圃場の近傍に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日射量、相対湿度、大気圧を観測した。観測期間は基本的に5月から8月までであるが、地下水位は9月下旬までである。測定間隔は10分とした。なお、蒸発散量については、ペンマン法により推定した。土壌については、各圃場の1地点において土壌断面調査を行うとともに、採取した試料について土壌物理性試験を行った。

## 3. 結果

### 3.1 平成28年度の気象状況

A圃場近傍に設置した気象観測機器によると、灌漑期間中(5~8月)の降水量合計値は772mmであり、気象庁データの平年値のほぼ2倍であった。月ごとの平年値と比べると、6月は2.7倍であり、8月は台風の影響により

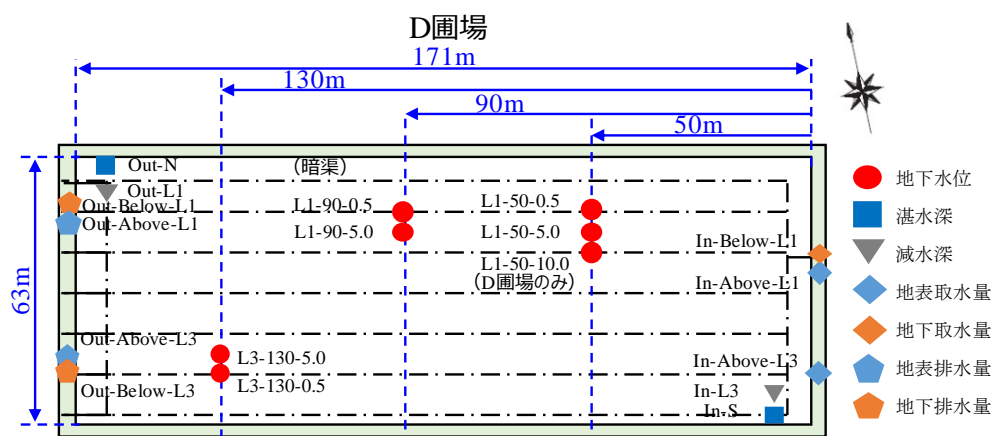


図-2 観測地点の位置 (D圃場の例)

表-1 各調査圃場の栽培方式および栽培品種

圃場名	栽培方式	代かきの有無	栽培品種
A	乾田直播	なし	大地の星
D	湛水直播	あり	おぼろづき
C	移植	あり	ななつぼし



図-3 集中管理孔に設置した水位計  
(円筒型メッシュスクリーンの下に暗渠管がある。)

2.3倍であった。気温は平年並みであった。

### 3. 2 各圃場の土壌

A 圃場の土壌は、地表から-32cm までが作土であり、-32cm 以深に厚さ 13cm の泥炭層がある。泥炭層以外の土性はシルト質埴土である。D 圃場では、地表から-18cm

までが作土である。-37cm から厚さ 30cm の泥炭層がある。泥炭層以外の土性は軽埴土である。C 圃場では、地表から-25cm までが作土である。-35cm 以深は泥炭層であり、それ以外の土性は軽埴土である。いずれも、室内飽和透水試験による透水係数 (cm/s) のオーダーは、作土層で

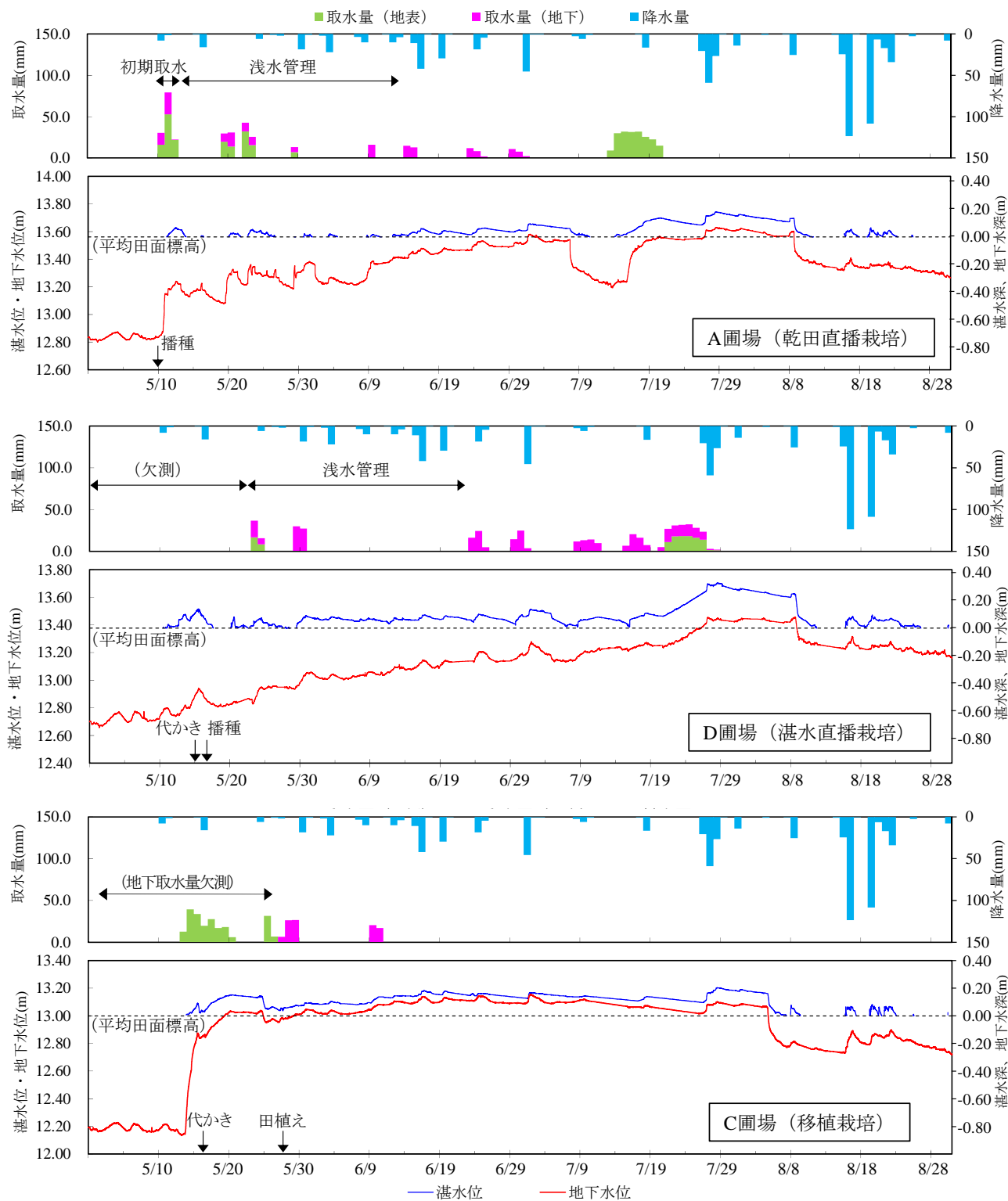


図4 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化

$10^{-6} \sim 10^{-7}$ 、泥炭土で  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  である。

### 3. 3 各圃場の浸透量

日減水深の値をみると、A 圃場は平均 5.6mm/d、C 圃場は平均 4.7mm/d、D 圃場は平均 7.0mm/d であった。今回の観測では、減水深の値は圃場の地下水位の高さに関わらず、圃場ごとに大きな差はみられなかった。

### 3. 4 各栽培方式における圃場の水管理

各圃場の湛水位および地下水位の経時変化と水管理状況を図-4 に示す。図中の湛水位は 2 地点の平均値を、地下水位は 4 地点 (L1-50-0.5、L1-50-5.0、L3-130-5.0、L3-130-0.5) の平均値を標高換算した値を示した。

乾田直播栽培 (A 圃場) では、播種 (5 月 10 日) の翌日に初期取水が行われた後、浅水管理が行われた。湛水直播栽培と同様に、稲の生育や取水時期、地下水位変化により、6 月 14 日までを浅水管理期と判断した。浅水管理期間は主に地表灌漑と地下灌漑の併用により取水され、浅水管理後は主に地下灌漑が行われた。7 月中旬に除草剤散布のため一時的に落水されており、再湛水時にまとまった取水が行われた。

湛水直播栽培 (D 圃場) では、代かき (5 月 15 日) の 2 日後に播種が行われ、播種後から苗立ちが安定するまでの期間に浅水管理 (田面を湿潤状態にさせ、地表面が乾いたら再び湿潤にする水管理) が地下灌漑と地表灌漑の併用または地下灌漑により行われた。なお、6 月は降水量が多く、D 圃場では浅水管理期の終了月日の判定が困難であったことから、水稻の生育や取水時期、地下水位変化により、6 月 23 日までを浅水管理期と判断した。浅水管理期後は、主に地下灌漑が行われ、7 月下旬以降は地下灌漑と地表灌漑の併用により取水された。7 月下旬から 8 月上旬までの期間、深水灌漑が行われた。

C 圃場 (移植栽培) では、5 月 14 日に初期取水が行われ、代かき (5 月 17 日) を行った後、湛水状態で管理された。地下取水量は欠測であったが、聞き取りによれば、代かきの前後は地表取水と地下取水も併用されていた。移植後は地下灌漑が行われた。降雨量が多かったことから、6 月中旬以降は取水が行われなかった。図-4 に示すように、湛水位および地下水位の経時変化をみると、移植栽培では、地表灌漑と地下灌漑の併用による代かき取水に伴い、地下水深が -0.80m から -0.10m 程度まで急速に上昇した。湛水期間中における圃場の地下水位は、8 月初めまでほぼ湛水位と一体的に変動していた。C 圃場における水管理の特徴としては、代かき用水があったこと、中干しが行われなかったために再湛水時の栽培管理用水量がなかったことが挙げられる。

### 3. 5 各栽培方式における圃場の水収支の特性

灌漑期における水収支特性をみるために、取水量および降水量を流入、排水量および蒸発散量を流出として、各圃場の水収支を比較した (図-5)。水収支の算定対象期間は、代かき取水または初期取水から 9 月上旬までである。ここで、C 圃場の代かき取水量の一部と、D 圃場の代かき取水量および同時期の排水量は欠測であった。

各圃場の流出量をみると、いずれも流入量の値を下回っていた (図-5)。日減水深の値は小さかったが、縦浸透および横浸透の影響によると考えられる。また、8 月下旬における圃場の地下水位が 4 月下旬と同程度まで低下していなかったことから、圃場内の貯留分による影響が考えられる。

各圃場における栽培管理用水量をみると、A 圃場の除草剤散布のために落水した後の再湛水量は 197mm (地表灌漑)、D 圃場の深水用水量は 182mm (地表灌漑および地下灌漑の併用) であった。一方、図-5 に示すように普通期における流入水量には、圃場ごとに大きな差はみられなかった。また、A 圃場と C 圃場では、灌漑期間における流出量の合計値はそれぞれほぼ同じであった。それゆえ、両圃場の流入水量には、数倍となるような差は生じないと考えられる。これらのことから、圃場用水量の差は、土壌の浸透量の違いよりも、主として栽培方式等に応じた水管理の違いにより生じたと推察できる。

調査圃場において生じた栽培管理用水を表-2 に整理

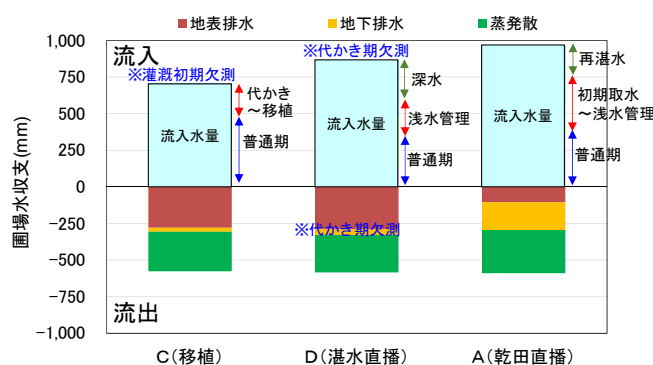


図-5 圃場水収支の比較

表-2 平成28年に調査圃場において生じた栽培管理用水

圃場名	栽培方式	栽培管理用水
A	乾田直播	除草剤散布のための強制落水後の再取水
D	湛水直播	深水灌漑用水
C	移植	—

した。これは、深水灌漑が湛水直播栽培だけに特有であることを表しているものではない。平成 28 年の水稻の生育状況と気象の推移によって、例えば湛水直播栽培だけで深水灌漑が必要とされたものと考えられる。

#### 4. まとめ

地下灌漑が可能な大区画水田圃場（3 筆）を対象として、乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培における圃場水管理、圃場水収支を比較した。この結果、各栽培方式では異なる水管理が行われており、それぞれで発生した栽培管理用水により圃場用水量が変化するものと推察

された。今後、圃場整備済み農区および未整備農区の水収支について、それぞれの特性を明らかにする。

#### 参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、2015 年
- 2) 古檜山雅之、中村和正、鶴木啓二、石田哲也：地下灌漑が可能な大区画水田における圃場水管理、農業農村工学会論文集、290、pp.23-32、2014 年
- 3) 越山直子、酒井美樹、伊藤暢男、中村和正：大区画水田における移植栽培と直播栽培の用水量の比較、農業農村工学会論文集、304(85-1)、pp. I\_7- I\_14、2017 年



## 16.2 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

### 16.2.1 積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）、技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：中村和正、大久保天、石神暁郎、田場一矢、山田 章

#### 【要旨】

本研究では、コンクリートでの凍害・摩耗および鋼製部材での摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。前者では、造成後 50 年以上経過した頭首工のコンクリートの試験・分析を行い、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することを明らかにした。また、17～36 年経過した鋼矢板排水路において経過年数、水質、板厚間の関係を整理・分析することにより、摩耗・腐食の劣化機構を推定した。一方、後者では、開水路側壁で金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験を行い、最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係性を明らかにした。

キーワード：コンクリート、鋼製部材、凍害、摩耗、腐食

#### 1. はじめに

食料・農業・農村基本計画<sup>1)</sup>、土地改良長期計画<sup>2)</sup>や北海道総合開発計画<sup>3)</sup>では、農業水利施設の適切な保全管理、戦略的な維持管理が重要な施策として位置づけられている。その中で、積雪寒冷地に位置する農業水利施設には、温暖な地域とは異なる様々な変状が確認されている。施設には、コンクリートに生じる凍害だけでなく、摩耗や種々の外的荷重が生じており、多くの場合、それら劣化外力は複合的に作用している。結果、施設の使用性だけでなく、構造的安定性、第三者（歩行者等への）影響度に関する性能の低下もみられている。

農業水利施設の要求性能を満足させ、その長寿命化を達成していくためには、開水路や頭首工を構成するコンクリート、ゲートや鋼矢板等の鋼製部材において、複合劣化を対象とした診断・評価方法に関する技術開発が必要不可欠となる。一方で、寒冷地に位置する農業水利施設の規模は大きく、例えば、国内の用水路の中で寒冷地に位置するものは約 4 割にも及ぶ。寒冷条件の厳しい北海道内での研究成果は、北海道内だけでなく他の寒冷地に位置する農業水利施設の長寿命化、保全管理にも活用できる。

本研究では、積雪寒冷地に位置する社会基盤を構成する施設群の一つである農業水利施設の長寿命化を図るため、農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方

法の構築を行い、積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理方法を提案することを目的とする。

本研究の初年度に当たる平成 28 年度では、コンクリートでの凍害・摩耗および鋼製部材での摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発に着手した。前者では、頭首工コンクリートの凍害・摩耗診断を行い、また、排水路鋼矢板の腐食診断を行った。一方、後者では、アンカー引抜試験によるコンクリート開水路側壁の凍害劣化診断を行った。

#### 2. コンクリートでの凍害・摩耗および鋼製部材での摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明

##### 2.1 頭首工コンクリートの凍害・摩耗診断<sup>4)</sup>

###### 2.1.1 目的

土地改良長期計画では、老朽化が進行する農業水利施設の機能を将来にわたって安定的に発揮させるため、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理が求められている<sup>2)</sup>。数ある農業水利施設の中で、頭首工は、農業水利システムの中核を成す拠点施設であり、施設数は基幹的施設だけでも全国で 1,952 箇所<sup>5)</sup>に及ぶ。一方、そのうち耐用年数を超過した施設は実に 576 箇所<sup>6)</sup>に達しており、今後これらの施設の機能を如何に保全し管理していくのが喫緊の課題となってい

る<sup>5)</sup>。

頭首工は、堰体、堰柱、エプロンなど、多くのコンクリート施設により構成される。コンクリートは、時間の経過とともに劣化が進行し、特に積雪寒冷地では凍害劣化が懸念される。凍害劣化が発生したコンクリートでは、躯体内部に発生する層状ひび割れなどによりその健全性が著しく損なわれることが明らかになっており<sup>6,7)</sup>、また、水利施設に特有の摩耗劣化との併発により、施設の性能低下が加速される可能性も考えられる。

本研究では、北海道内に位置する2つの頭首工の撤去工事に際し、施設の供用中には実施することが難しい、堰体などの主に水中に曝されている部位を対象としたコア採取を行い、劣化状況の詳細調査を行った。ここでは、その結果の概要を示すとともに、凍害劣化と摩耗劣化との関係、ならびに長寿命化を図るための対策工法の適用に際する留意点について考察する。

## 2.1.2 凍害・摩耗診断の概要

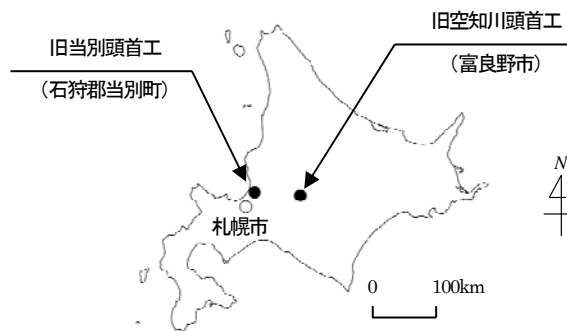
### (1) 診断対象の概要

診断対象とした頭首工は、北海道上川地方に位置する旧空知川頭首工、ならびに石狩地方に位置する旧当別頭首工である。各頭首工の位置および撤去時の状況を図-1に示す。旧空知川頭首工は、昭和30～32年に造成され、平成27年の撤去時における供用期間は概ね60年である。形式は、左岸側に固定堰、右岸側に可動堰を配置する複合堰である。一方、旧当別頭首工は、昭和35～37年に造成され、平成25年の撤去時までの供用期間は概ね50年である。形式は、全面可動堰となっている。いずれの頭首工においても、主に気中に曝されている堰柱は寒暖差の大きい凍結融解環境下に置かれており、外観上からも著しい凍害劣化が確認される。また、主に水中に曝されている堰体やエプロンでは、断面欠損に至る著しい摩耗劣化が確認されている。

診断は、各施設より採取したコア試験体を試験・分析することにより行った。旧空知川頭首工では、摩耗劣化が比較的軽微な固定堰の堰体の上流側および可動堰のエプロンの上流側と、摩耗劣化が甚大な可動堰のエプロンの下流側の計3箇所からコアを採取した。一方、旧当別頭首工では、摩耗劣化は比較的軽微であるものの凍害劣化は甚大であると予想される可動堰の導流壁の下流側において、導流壁の天端面、側面気中部（最多頻度水位の上側）、側面干満部（最多頻度水位の近傍）の計3箇所からコアを採取し、水分の影響を調べた。

### (2) 診断方法の概要

採取したコア試験体について、圧縮強度および静弾性



旧空知川頭首工



旧当別頭首工

図-1 各頭首工の位置および撤去時の状況

係数、コンクリート表面からの深さ毎の相対動弾性係数、細孔径分布、元素濃度を測定した。

圧縮強度および静弾性係数は、JIS A 1107（コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法）および JIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠して測定した。コア試験体の寸法は直径 100×高さ 200mm である。

相対動弾性係数の測定では、まず、超音波法（透過法）により深さ毎のコアの直径方向の超音波伝播速度を測定し、次に、得られた伝播速度より、緒方ら<sup>8)</sup>の研究結果から導き出されている算出式により深さ毎の相対動弾性係数を算出した。なお、算出に必要な健全部の伝播速度

は、各頭首工で得られた最速値とした。測定周波数は54kHzである。

細孔径分布の測定では、深さ毎に採取した試料を用いて、水銀圧入法により細孔径毎の細孔容積を測定した。測定圧力範囲は0～228MPa（細孔径で約500～0.0055 $\mu\text{m}$ ）である。

元素濃度は、JSCE-G 574（EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法（案））に準拠して測定し、コンクリート表面からの元素濃度分布を得た。測定対象元素は、カルシウム（Ca）、けい素（Si）、硫黄（S）、アルミニウム（Al）の4元素である。

### 2.1.3 凍害・摩耗診断の結果および考察

#### (1) 診断結果および考察

##### 1) 圧縮強度および静弾性係数

測定結果を図-2に示す。図中の黒色の実線は、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」<sup>9</sup>および日本道路協会「道路橋示方書・同解説」<sup>10</sup>に示されている圧縮強度による静弾性係数の設計値である。また、灰色の着色範囲は、後者の文献に示されているコンクリートの最低設計基準強度を下回る範囲を明示したものである。圧縮強度、静弾性係数ともに造成当初の測定値は不明であるが、固定堰の堰体の上流側、可動堰のエプロンの上流側の測定値は、土木学会、日本道路協会の設計値、基準値に比べ小さかった。一方、可動堰のエプロンの下流側の測定値は、圧縮強度は他の部位に比べ大きかったが、静弾性係数は圧縮強度から推定される値よりも小さかった。可動堰のエプロンの下流側では、すりへり作用による断面欠損が確認されており、圧縮強度が低下したコンクリートが既に消失していた可能性が考えられる。

##### 2) 相対動弾性係数

測定結果を図-3に示す。図中では、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」<sup>9</sup>に規定される数値を参考に、相対動弾性係数85%未満60%以上の範囲を灰色に、60%未満の範囲を濃灰色に着色して示している。相対動弾性係数は、総じて低く、また、コンクリート表面に近いほど低くなる傾向がみられた。さらに、水分に曝される割合が大きい部位、即ち水分の影響を受け易い部位ほど、低くなる傾向が確認された。これらの結果は、施設が著しい劣化環境下に置かれていることを裏付けるものであり、また、水分に起因する劣化外力が表面から発生・進展したことを示している。

##### 3) 細孔径分布

測定結果を図-4に示す。総細孔量は、コンクリート表面に近いほど多くなる傾向がみられた。固定堰の堰体の

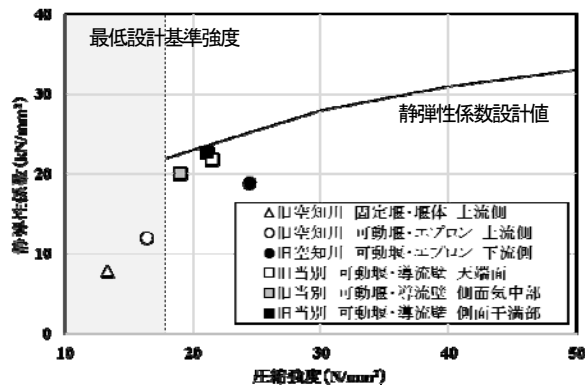


図-2 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

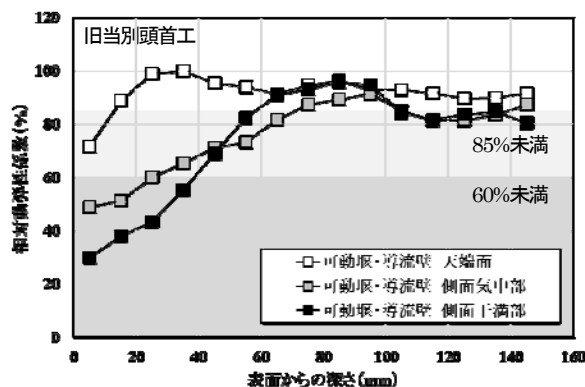
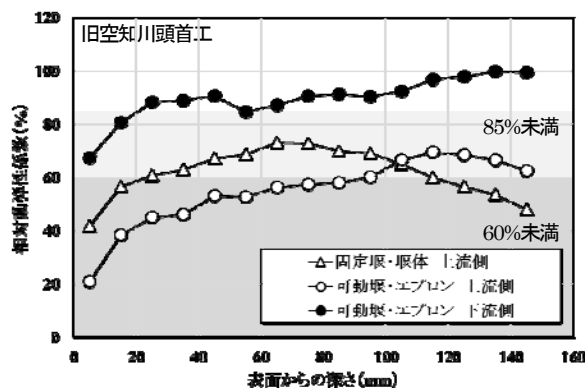


図-3 相対動弾性係数の測定結果

上流側では、概ね造成当初のコンクリートとみなせる表面からの深さ100～110mmより採取した試料に比べ、表面からの深さ0～10mmより採取した試料では細孔径約0.01～1 $\mu\text{m}$ 付近の細孔量が、深さ20～30mmより採取した試料では約0.01～0.05 $\mu\text{m}$ 付近の細孔量が多くなっており、表面に近いほど粗な構造となっていることが確認された。また、可動堰のエプロンの上流側では、表面に近いほど、約0.01～0.05 $\mu\text{m}$ 付近の細孔量が多くなる傾向がみられた。さらに、可動堰の導流壁の側面気中部では、深さ20～30mmおよび40～50mmより採取した試料において約0.01～0.05 $\mu\text{m}$ 付近の細孔量が多くなっていることが確認された。

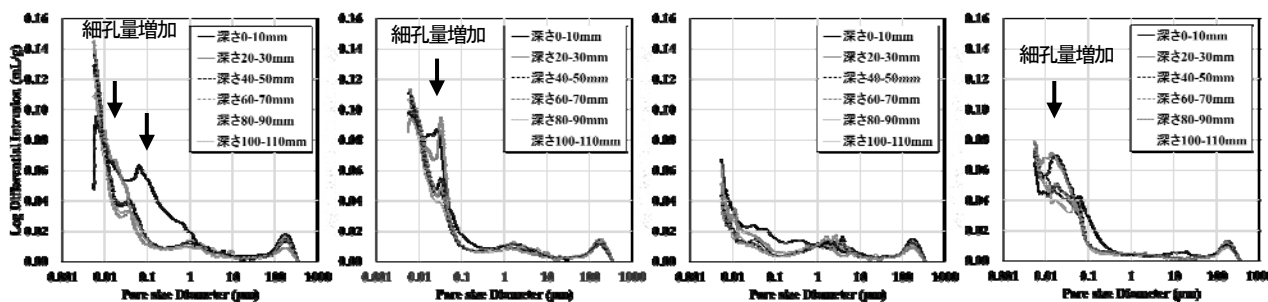


図-4 細孔径分布の測定結果

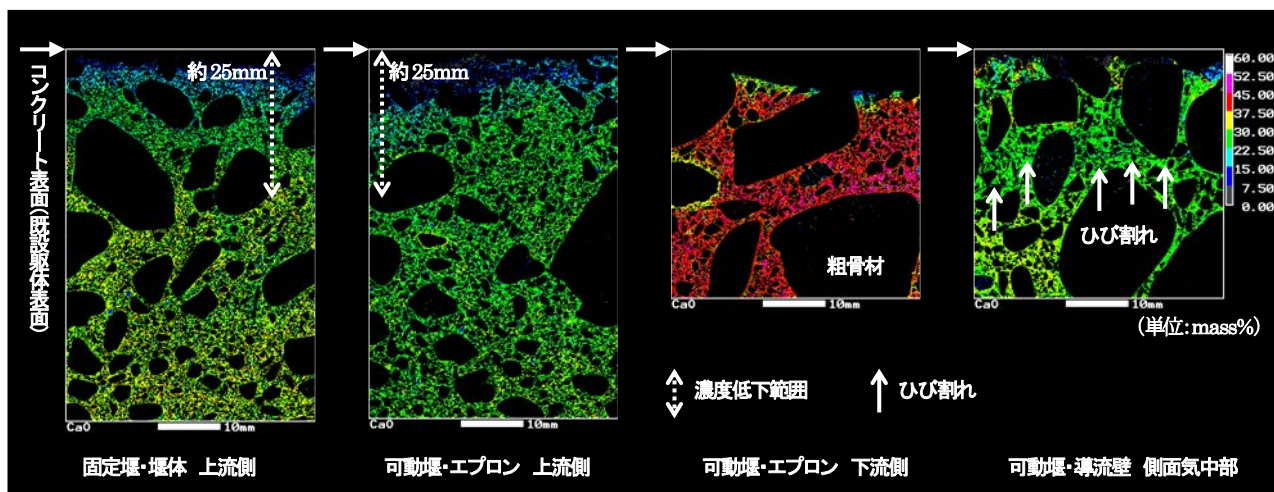


図-5 元素濃度（カルシウム (Ca)）の測定結果（骨材の濃度は非表示）

既往の研究結果<sup>11), 12)</sup>では、凍結融解作用により約0.05～1 $\mu$ m 付近の細孔量が増加することが示されている。従って、特に固定堰の堰体の上流側の表面近傍では凍害劣化が発生している可能性が高い。一方、凍害劣化が発生し難いと考えられる可動堰のエプロンの上流側にも約0.01～0.05 $\mu$ m 付近の細孔量の増加が確認された。これは、後述するように、長期間水と接触したことによってカルシウム成分が溶脱<sup>13), 14)</sup>し、セメント硬化体の組織が脆弱化したものと推察される。なお、可動堰の導流壁の側面気中部では、表面からの深さ約10～50mmの範囲でひび割れの発生が確認されており、細孔量の増加はこのひび割れに影響を受けていることが考えられる。

4) 元素濃度

測定結果のうち、カルシウム (Ca) の濃度の測定結果を図-5に示す。固定堰の堰体の上流側、可動堰のエプロンの上流側では、カルシウム濃度はコンクリート表面に近いほど低くなる傾向がみられ、特に表面からの深さ約0～25mmの範囲で低下は顕著であった。また、可動堰の導流壁の側面気中部では、ひび割れ近傍でのカルシウム濃度低下も確認された。一方、可動堰のエプロンの下流側では、カルシウム濃度はごく表層においてのみ低下

しており、他の部位に比べ総じて高かった。このことから、カルシウム濃度が低下したコンクリートの大部分が既に消失していたことが確認された。

既往の研究結果<sup>13), 14)</sup>では、淡水中に長期間曝され摩耗劣化が発生したコンクリート開水路では通水表面近傍においてカルシウム成分の溶脱現象が生じることが示されており、本診断で対象とした頭首工を構成するコンクリート施設においても同様の現象が生じていたことが明らかになった。

(2) 凍害劣化と摩耗劣化との関係

本診断で得られた相対動弾性係数の低下範囲、細孔量の増加範囲、カルシウム濃度の低下範囲は各々よく符合しており、凍害劣化と摩耗劣化は相互に影響を与え合う関係であることが予想される。凍害劣化が摩耗劣化に与える影響としては、ひび割れの発生や細孔量の増加、それに伴う圧縮強度や相対動弾性係数の低下による、すりへり抵抗性の低下などが考えられる。一方、摩耗劣化が凍害劣化に与える影響としては、カルシウム成分の溶脱現象に伴う細孔構造の変化による、凍結融解抵抗性の低下などが考えられる。

(3) 対策工法適用に際する留意点

凍害および摩耗劣化が発生した頭首工を構成するコンクリート施設の補修・補強においては、以下の点に留意する必要がある。一つは、劣化範囲の特定と除去である。本診断で得られた結果からも明らかなように、凍害および摩耗劣化が発生したコンクリートでは、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性が表面からある一定の深さまで低下している。この劣化範囲が適切に特定され除去されなければ、対策工法による補修・補強効果を持続的に得ることは難しい。もう一つは、対策工法に対する耐凍害性および耐摩耗性の要求である。積雪寒冷地に位置する施設の多くは著しい劣化環境下に置かれている。そのため、新たに適用される対策工法に対しても、この劣化環境下に耐え得るより高度な性能を要求していくことが必要となる。

#### 2.1.4 課題

本診断の結果から、積雪寒冷地に位置する頭首工を構成するコンクリート施設は、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性の低下を伴う著しい劣化環境下に置かれており、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することが示された。今後は、実構造物における診断結果の蓄積とその分析を継続実施するとともに、凍害劣化と摩耗劣化が併発した場合の劣化機構の解明、ならびに対策工法の要求性能の解明などについて、検討を加える予定である。

### 2.2 排水路鋼矢板の腐食診断<sup>15)</sup>

#### 2.2.1 目的

近年、農業用排水路を構成する鋼矢板の腐食が問題となっている。例えば、新潟県内の低平排水不良地域に敷設された排水路鋼矢板では、水位変動域である干満帯付近における局所的な腐食の進行が確認されている<sup>16),17)</sup>。

一方、積雪寒冷地である北海道内に敷設された鋼矢板では、腐食が進行して倒壊に至る場合もあり、周辺地盤の陥没など、社会的安全性に影響を及ぼす事例も散見されている(図-6 参照)。

本研究では、北海道空知地方に敷設された排水路鋼矢板の腐食・倒壊の発生要因究明のための検討を行っている。ここでは、腐食の診断結果の事例を示すとともに、腐食・倒壊の発生・進展のメカニズムについて考察する。

#### 2.2.2 腐食診断の概要

診断対象とした排水路は、北海道空知地方に位置するA～N排水路(14路線、42測点)である。鋼矢板の種類は、一部の普通鋼矢板(C排水路1測点(板厚10.5mm)、G排水路2測点(板厚8.0mm)、J排水路2測点(板厚8.0mm)、L排水路2測点(板厚10.5mm)、N排水路2



A 排水路



B 排水路



D 排水路



G 排水路

図-6 排水路鋼矢板の腐食

測点(板厚8.0mm)を除き、全て軽量鋼矢板(板厚5.0mm)である。供用後17～36年が経過しており、外観上の発錆・腐食は総じて著しい状況にある。

本診断では、測点毎に、気中部、干満帯上部、干満帯下部の3部位において残存する板厚の計測を行い、設計板厚から各計測値を差し引いた値を腐食量 (mm) とし求めた。また、排水路内を流下する排水について、溶存酸素濃度などの水質に関する各種計測を行った。

### 2.2.3 腐食診断の結果および考察

腐食量の測定結果を図-7に示す。図中では、測点を経過年数順に並べて示している。いずれの部位においても、腐食量は、経過年数が長くなるほど、増加する傾向にある。一方で、局所的に増加している測点もあることが分かる。また、腐食量は概ね干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、干満帯上部の多くでは板厚に到達(貫通)している。

経過年数と腐食量との関係を図-8に示す。部位毎に示される近似式の傾きは、各々腐食度(1年当たりの腐食量)を表している。腐食度は干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、ばらつきも大きいことが分かる。このことから、経過年数以外の要因に影響を受けていることが推察される。さらに、通常は排水に曝され続けている干満帯下部においても、腐食度は干満帯上部に準ずる程度に大きいことが分かった。

排水の溶存酸素濃度と腐食度との関係を図-9に示す。溶存酸素濃度は総じて高く、ほぼ飽和状態にある。また、相関性は低いが、濃度が高くなるほど、腐食度も大きくなる傾向が見て取れる。

本診断の結果から、腐食・倒壊の発生・進展のメカニズムは以下の通りであると推察する。鋼矢板の表面側では、気中部や干満帯上部において、水と酸素の供給による湿食が発生・進展する。干満帯下部や水中部は、溶存酸素が多量に含まれる排水に曝されている。その状況下で、干満帯上部をカソード部(+)極、干満帯下部をアノード部(-)極とするマクロセル腐食電池が形成され、干満帯上部および干満帯下部では腐食が進み、断面欠損へと進展する。その後、干満帯上部では湿食が進展し、断面欠損が拡大する。実際には、これらの過程に、気中部における乾湿繰返し、水中部におけるエロージョン(摩耗)、表面の付着物に起因する通気差腐食などが複合的に作用しているものと推測される。また、これら表面側でみられる腐食・断面欠損は、背面側が露出して酸素の供給を受け、背面側からの腐食が発生・進展することにより加速される。積雪寒冷地に特有の泥炭地盤に造成された排水路では、泥炭の圧密沈下により鋼矢板の背面側が露出し、腐食・倒壊を助長させているケースが見受けられる。断面欠損が発生・拡大した鋼矢板は、構造的安定

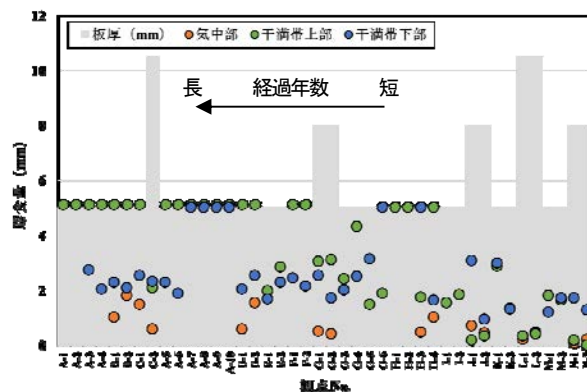


図-7 腐食量の測定結果

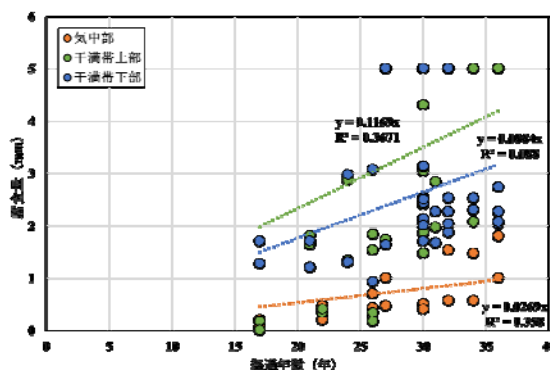


図-8 経過年数と腐食量との関係

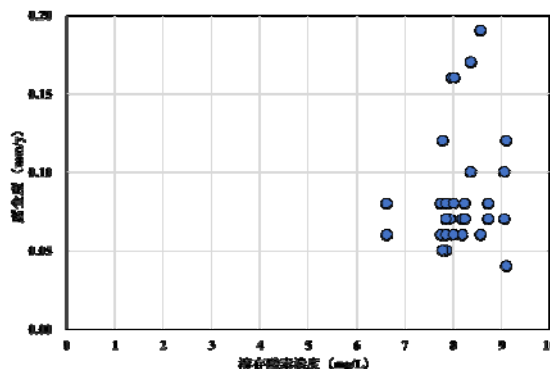


図-9 溶存酸素濃度と腐食度との関係

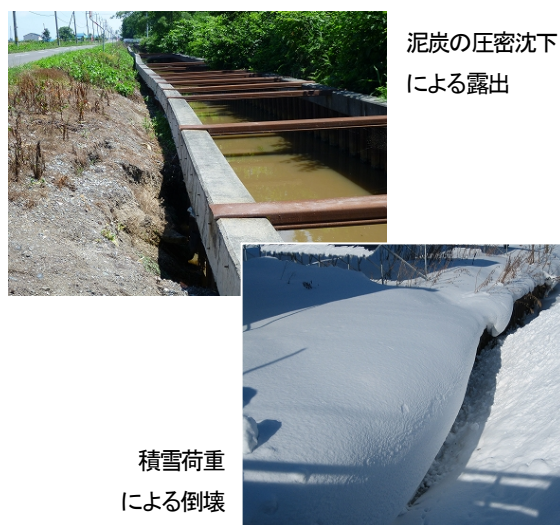


図-10 積雪寒冷地に特有の劣化要因

性が失われ、背面土圧や積雪荷重などの外力が作用した際に倒壊するものと考えられる（図-10 参照）。

### 2.2.4 課題

ここでは、積雪寒冷地における排水路鋼矢板の腐食の診断結果の事例を示すとともに、腐食・倒壊の発生・進展のメカニズムについて考察した。今後は、水質や流速などに関する各種計測を継続実施し、経過年数以外の影響要因について解明していく予定である。

## 3. 非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発

### 3.1 アンカー引抜試験によるコンクリート開水路側壁の凍害劣化診断<sup>18), 19)</sup>

#### 3.1.1 目的

凍害劣化が生じているコンクリート構造物の診断手法としては、非破壊試験として超音波法や共鳴振動法などがあり、局部破壊試験として改良プルオフ試験などがある。ただし、これらの手法では、表層近傍のコンクリートの劣化状況は評価できるものの、コンクリート内部の深さ方向の劣化程度を評価することは難しい。そこで本研究では、任意の深さ位置の劣化程度を評価するための手法として、芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験によるコンクリート構造物の凍害劣化診断に関する研究に取り組んでいる<sup>20)</sup>。

ここでは、異なる 6 箇所の RC 現場打ちフリュームの側壁でアンカー引抜試験を実施し、最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加える。

#### 3.1.2 アンカー引抜試験の概要

アンカー引抜試験には、接着・付着力引張試験器（サンコーテクノ社製テクノテスター RT-3000LDII 型）を用いた。この試験器では、最大荷重 30kN、最大変位量 10mm（分解能 0.01mm）までの測定を行うことができる。また、試験に用いるアンカーは、全長 100mm、アンカー本体直径 8mm の芯棒打込み式金属拡張アンカー（サンコーテクノ社製 SY-810K 型）である。アンカーの埋込深さの調整は、1cm 刻みの専用の長さ調整具を用いて行い、この長さ調整具を用いることで任意の深さ位置での試験が可能である。

#### 3.1.3 現地試験の概要

現地試験を実施した既設の RC 現場打ちフリュームの側壁は 6 箇所であり、I 水路（北海道美唄市）、II 水路（岩手県奥州市）、III 水路・IV 水路（北海道美唄市、I 水路とは異なる）、V 水路（北海道岩内郡）、VI 水路（北海道瀬棚郡）である。

表-1 アンカー引抜試験の概要

水路名称	I 水路	II 水路	III 水路	IV 水路	V 水路	VI 水路
測定深さ (cm)	2, 4, 5, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8
測定箇所数	3	3	1	1	1	1
番号	No. 1-1 ~1-3	No. 2-1 ~2-3	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6

アンカー引抜試験におけるアンカー埋込深さ（測定深さ）、測定箇所数および番号は表-1 に示す通りである。また、各測定箇所の近傍から φ10cm のコアをそれぞれ 1 本採取し、採取したコアに対しては、表面から深さ方向のコア横断面における超音波伝播速度を側壁における水平方向と上下方向の 2 方向で測定した。

#### 3.1.4 最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係

アンカー引抜試験における各埋込深さの最大引抜荷重を図-11 に示し、コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）を図-12 に示す。また、測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と上下方向の超音波伝播速度の関係を図-13 に示す。ただし、8cm 深さは、アンカーの拡張部にすべりが生じている可能性があることから除外している。図からは、アンカー埋込深さ 6cm までの範囲において、超音波伝播速度と最大引抜荷重の間には正の線形関係があることが示唆されるが、関係式は水路によりそれぞれ異なることがわかる。これは、各水路における凍害劣化の状態（コンクリート組織の緩みやひび割れの発生状態）および程度が異なることが影響していると考えられる。

アンカー引抜試験における破壊形態が図-14 に示すようなコンクリート躯体のコーン状破壊である場合、金属拡張アンカーの許容引張荷重は、式 (1) で求められる<sup>21)</sup>。

$$P_{a2} = \phi_2 \times \alpha_c \times c_{\sigma t} \times A_c \quad (1)$$

ここに、 $P_{a2}$ ：コーン状破壊の許容引張力 (N)、 $\phi_2$ ：低減係数（長期荷重用：1/3、短期荷重用：2/3）、 $\alpha_c$ ：施工のばらつきを考慮した低減係数 (0.75)、 $c_{\sigma t}$ ：コーン状破壊に対するコンクリートの割裂強度 (N/mm<sup>2</sup>) ( $c_{\sigma t} = 0.31 \sqrt{F_c}$ )、 $F_c$ ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $A_c$ ：コーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm<sup>2</sup>)、である。 $A_c$ は式 (2) で求められる。

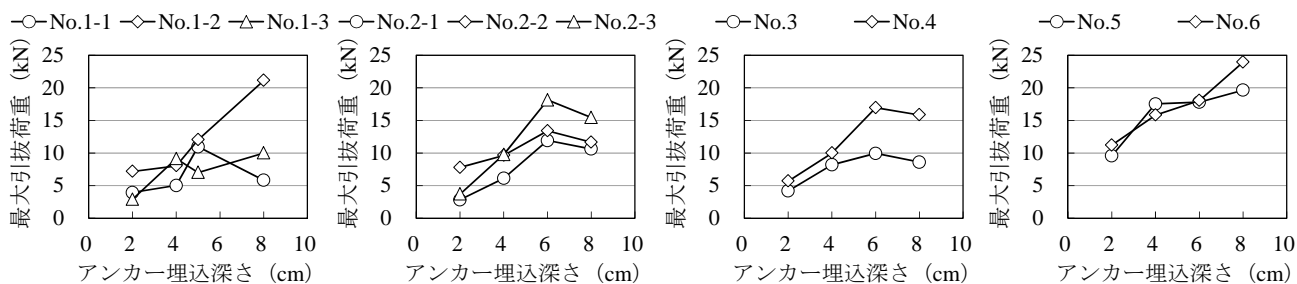


図-11 各埋込深さの最大引抜荷重

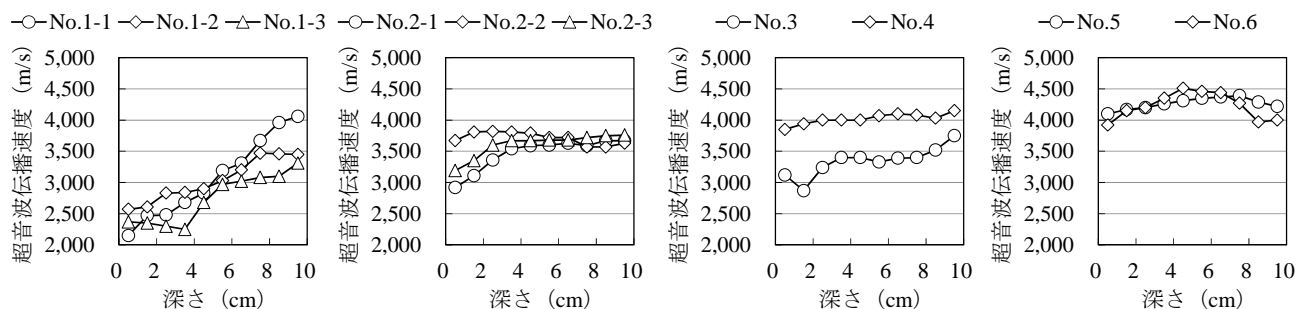


図-12 コアの深さ方向の超音波伝播速度 (上下方向)

$$A_c = \pi \cdot l_{ce} (l_{ce} + D) \quad (2)$$

( $l < 4D$ の場合は  $l_{ce} = l$ ,  $l \geq 4D$ の場合は  $l_{ce} = 4l$ )

ここに、 $l_{ce}$ : アンカーボルトの強度算定用埋込み深さ (mm)、 $l$ : アンカーボルトの埋込み長さ (mm)、 $D$ : アンカーボルト軸部の直径 (mm)、である。

この式からコンクリートの割裂強度は、引張力 (ここでは最大引抜荷重) をコーン状破壊面の有効水平投影面積で除することで求められ、アンカー引抜試験の各測定深さにおける有効水平投影面積が最大引抜荷重の測定値に影響を及ぼしていることがわかる。つまり、最大引抜荷重に影響を及ぼすのは、アンカー拡張部の局所的なコンクリートの状態だけでなく、表面からアンカー拡張部までの範囲のコンクリートの状態の2要素であり、前者がアンカー埋込位置における超音波伝播速度であるならば、後者は表面からアンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値ということになる。

そこで、図-12 に示した超音波伝播速度を二次多項式で近似し、表面からの各アンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値を求め、この積算超音波伝播速度と最大引抜荷重の関係を考察することにした。両者の関係を図-15 に示す。また、関係式を式 (3) に示す。

$$P_{\max \cdot x} = 0.065 V_{a \cdot x} + 1.3452 \quad (R^2 = 0.75) \quad (3)$$

ここに、 $P_{\max \cdot x}$ : アンカー埋込深さ  $x$  m における最大引

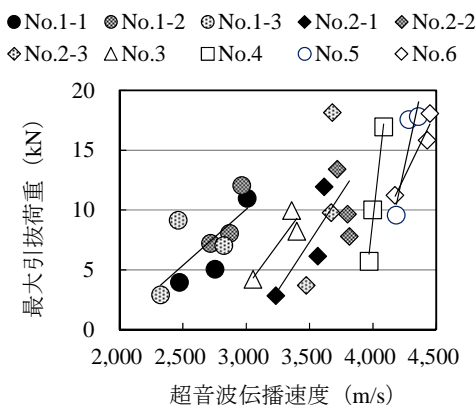


図-13 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係

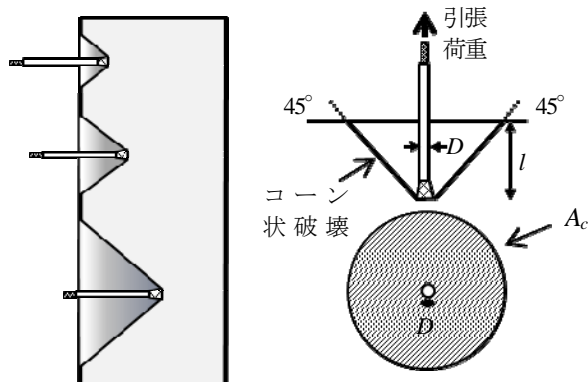


図-14 金属拡張アンカーのコーン状破壊における有効水平投影面積



抜荷重 (kN)、 $V_{a,x}$ : 表面から  $x$ m までの積算超音波伝播速度 ( $m^2/s$ )、である。

各水路における凍害劣化の状態は異なるにも関わらず、最大引抜荷重は表面からのアンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値と線形の関係にあることがわかる。

### 3.1.5 課題

ここでは、異なる 6 箇所の RC 現場打ちフリームの側壁でアンカー引抜試験を実施し、各アンカー埋込位置における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加え、最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の間に線形関係があることを明らかにした。今後は、アンカー埋込深さが小さい範囲 (2cm 以下) での検証を、また、補修後の側壁における検証を行う予定である。

## 4. まとめ

本研究では、コンクリートでの凍害・摩耗および鋼製部材での摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行い、農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法を構築することを最終的な達成目標としている。

平成 28 年度において、コンクリートでの凍害・摩耗および鋼製部材での摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明では、頭首工を構成するコンクリートにおける凍害および摩耗を対象とした調査・診断、排水路を構成する鋼矢板における腐食を対象とした調査・診断を行い、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発では、アンカー引抜試験によるコンクリート開水路の側壁を対象とした凍害劣化診断を行った。

以下に、実施した主な検討内容と得られた結果の概要を整理する。

- (1) 北海道上川地方および空知地方に位置する造成後 50 年以上が経過した頭首工において、固定堰などの主に水中に曝されている部位を対象とした劣化状況調査を行った。その結果、頭首工を構成するコンクリートは、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性の低下を伴う著しい劣化環境下に置かれており、表面近傍における凍害劣化と、カルシウム成分の溶脱現象を伴う摩耗劣化が発生することが示された。
- (2) 北海道空知地方に位置する供用後 17~36 年が経過した鋼矢板排水路において、経過年数、水質、板厚間の関係を整理・分析した。その結果、鋼矢板の腐

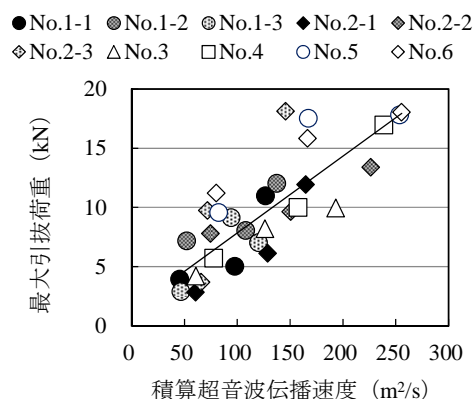


図-15 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の関係

食量は経過年数が長くなるほど増加する傾向にあり、また、経過年数以外の要因にも影響を受けること、腐食度は溶存酸素濃度が高くなるほど大きくなることが示された。さらに、これらの結果から、鋼矢板の摩耗・腐食の劣化機構を推定した。

- (3) 北海道内および岩手県内に位置するコンクリート開水路の側壁において、芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験を実施した。その結果、最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の間には線形関係があることが示された。

## 参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、pp.44-45、2015
- 2) 農林水産省：土地改良長期計画、pp.29-30、2016
- 3) 国土交通省：北海道総合開発計画、pp.48-49、2016
- 4) 石神暁郎・蒔苗英孝・池下貴之・春田恵太・森 充広：頭首工を構成するコンクリート施設の凍害・摩耗診断、水土の知 (投稿中)
- 5) 農林水産省農村振興局：農業基盤情報基礎調査 (平成 26 年 3 月 31 日時点)、2016
- 6) 緒方英彦・高田龍一・鈴木哲也・山崎大輔・佐藤周之：RC 開水路の側壁内部における凍害ひび割れの発生形態、水土の知、第 78 巻、5 号、pp.29-33、2010
- 7) 石神暁郎・佐藤 智・周藤将司・緒方英彦：コンクリート開水路の凍害劣化の発生形態とその診断手法、水土の知、第 83 巻、10 号、pp.27-30、2015
- 8) 緒方英彦・野中資博・藤原貴央・高田龍一・服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集、pp.63-70、2006
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]、pp.34-45、

- pp.157-160、2013
- 10) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説、I 共通編、pp.73-89、2012
- 11) 岡本修一・魚本健人:細孔構造からみた凍結融解による劣化機構に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.901-906、1997
- 12) 岡本修一・魚本健人:凍結融解による劣化への初期ひび割れの影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.913-918、1998
- 13) 石神暁郎・森充広・渡嘉敷勝・増川晋:農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.805-810、2005
- 14) 森充広・渡嘉敷勝・山崎大輔・加藤智丈:長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.919-924、2009
- 15) 石神暁郎・星野香織・工藤吉弘:積雪寒冷地における排水路鋼矢板の腐食診断、平成 29 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (投稿中)
- 16) 峰村雅臣・土田一也・羽田卓也・原齊・森井俊廣・鈴木哲也:新潟県における鋼矢板リサイクルの取り組み、平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.872-873、2012
- 17) 板垣知也・松本俊郎・江口英弘・長崎文博・鈴木哲也:新潟県地域における産官学連携による腐食鋼矢板水路の補修工法の開発、平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016
- 18) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢:凍害劣化したコンクリートのアンカー引抜試験における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係、平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016
- 19) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢:アンカー引抜試験における最大引抜荷重を利用したコンクリート側壁の凍害劣化診断、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、2016
- 20) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢:芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜き試験によるコンクリート構造物の凍害劣化診断、日本非破壊検査協会コンクリート構造物の非破壊検査論文集、Vol.5、pp.77-84、2015
- 21) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説 (第 2 版)、pp.321-322、2013

## 16.2 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

### 16.2.2 大規模災害時における長大な農業水利施設の災害対応計画策定技術の開発

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）

研究担当者：中村和正、大久保天、立石信次

#### 【要旨】

近年、大規模災害における甚大な被害発生に備えた対策や体制を記す事業継続計画（BCP）の策定が推進されている。しかし、既往のBCP策定マニュアルが扱っているのは基本的な規範や様式であり、そこには被害リスクの特定や対策効果の評価を行う具体的な方法の記載はない。この課題解決にアプローチする方法として、本研究ではフォールトツリー解析（FTA）に着目した。平成28年度には、国内最大級の灌漑用水路の施設管理を対象にFTAを用いたリスク解析を実施して、大規模災害時における施設管理者の災害対応行動を阻害する原因事象の特定に、FTAが有効であることを確認した。また、発災直後に水路内の通水量を速やかに減じる対応を実施するため、各ゲート設備への最適な人員配置数を決定する手法を考案した。

キーワード：大規模災害、灌漑用水路施設、災害対応、FTA、最適化

#### 1. はじめに

基幹的な農業水利施設が大規模な地震や突発的な豪雨により被害を受ければ、広範囲にわたる営農への影響が懸念されるばかりでなく、その被災箇所から流出する多量の水が新たな被害リスクとなって、地域住民の人命や財産に関わる甚大な二次災害を引き起こすことが考えられる。東日本大震災をはじめ過去の大規模な地震災害では、多くの農業水利施設が被災したり。また、平成28年8月に、北海道および東北地方に上陸した台風によって集中豪雨が生じた一部の地域では、農業水利施設が壊滅的な被害を受けた<sup>2)</sup>。こうした万一の大規模地震災害および豪雨災害に備えて、基幹的な農業水利施設における災害対応力を強化することが喫緊の課題である。

近年、こうした大規模災害に備えた取り組みのひとつとして、事業継続計画（Business Continuity Plan、以下、「BCP」）が注目されている。BCPとは、大規模な災害時においても最重要業務の継続あるいは早期再開を図るため、それに必要な対策、方針、体制、手順を示した計画のことである<sup>3)</sup>。BCPは2003年頃から民間大企業を中心に策定されてきたが、最近では、国や自治体でもBCP策定マニュアル<sup>4)</sup>を整備している。また、平成28年度から農林水産省では、同省が作成したBCP策定マニュアル<sup>5)</sup>を活用して、全国の農業水利施設を対象にBCP策定の普及・啓蒙に取り組んでいる。

しかし、こうした既往のBCP策定マニュアルは汎用的かつ簡易的な内容であり、施設管理者が実際の災害対応

時において直面する具体的な課題に、十分対応できる内容となっていない。既存のBCP策定マニュアルの課題として、①被害リスクを網羅的に特定する方法がないこと、②具体的な対策や対応行動を明確にできないこと、③リスクの発生確率や対策の効果を定量的に評価することができないことなどが挙げられる。本研究の目的は、以上の課題に対応した災害対応計画策定技術を開発することである。

筆者らは、既往研究<sup>6)</sup>において、信頼性工学におけるリスク解析手法のひとつであるフォールトツリー解析（Fault Tree Analysis、以下、「FTA」）を用いて、農業用水路施設の災害対応計画を対象として、大規模地震災害時における被害リスクを網羅的に特定するとともに、その対策効果を定量的に示した。本研究では、農業水利施設におけるFTAを用いた被害リスク解析手法の充実化、体系化を図るとともに、対策に投入できる経費やマンパワーなどの対応力に制約がある中で、最大限の減災効果が期待できる災害対応計画の策定方法を開発する。そのため、本研究では、次の内容を実施する。

- (1) FTAによるリスク解析手法を国内有数の大規模施設に適用して、同手法の有効性と課題を明らかにする。
- (2) 災害対応に要する時間の評価など、FTAが適用困難な事象に対する評価手法を開発する。
- (3) 施設管理者や技術者の経験や感覚による評価を数量化して、対策効果を定量評価する方法を構築する。
- (4) コストや労力に制約がある中でリスクを最小化する

ための最適化手法を構築する。

(5) 本研究成果をとりまとめて災害対応計画策定マニュアルを作成する。

平成 28 年度は、このうち(1)および(4)の内容に関する研究を実施した。以下、2 章では、国内最大規模の灌漑用水路施設を対象に、大規模災害時における被害想定および災害対応の流れを整理するとともに、FTA を用いて、大規模地震災害時における施設管理者の対応行動を阻害する原因事象を特定する。3 章では、震災後の緊急的な災害対応における人員配置を決定する最適化手法を示し、同モデルを実際の幹線用水路施設に適用して、各ゲート設備への人員配置数が具体的に算出できることを示す。

## 2. 災害対応における FTA 手法を用いたリスク解析

### 2.1 研究の必要性

前章において述べたとおり、本研究の目的は、既存の BCP 策定マニュアルにおける課題を解決して、基幹的な灌漑用水路施設における災害対応計画の策定技術の開発を行うことである。そのための有力な方法として、本研究では、FTA に着目した。FTA とは、解析対象とする望ましくない事象（頂上事象）を出発点にして、その発生原因となる事象（中間事象）を FT 図と呼ばれる樹形状の図に整理していくことで、根本的な原因となる事象（基本事象）を網羅的に特定し、頂上事象の発生を低減する有効な対策を明らかにする方法である<sup>7)</sup>。さらに、FTA では、FT 図上の基本事象に適当な発生確率を与えることにより、頂上事象の発生確率が算出でき、これを用いて対策の効果を定量的に評価することができる。すなわち、災害対応における被害リスクの解析に FTA を適用することで、既存の BCP 策定マニュアルに示されていない具体的な対策の検討とその効果の定量評価ができるものと考えられる。

以上の観点から、本研究では、大規模地震災害発生直後における緊急的な災害対応（以下、「緊急対応」）にお

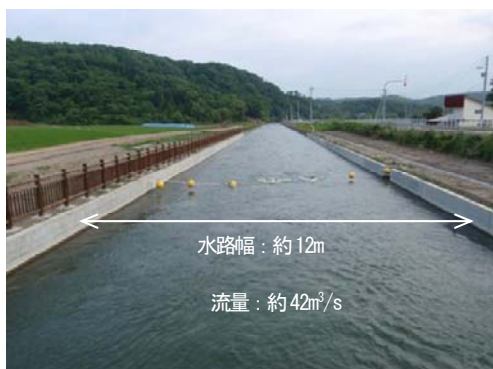


図-1 灌漑期における H 幹線用水路の外観

ける FTA を実施した。調査対象としたのは、北海道の水田地帯における頭首工と開水路からなる H 幹線用水路（図-1）の施設管理である。H 幹線用水路の施設規模は、水路延長約 80km、最大通水量約 42m<sup>3</sup>/s であり、国内最大級である。H 幹線用水路を管理する土地改良区の協力を得て、大規模地震時を想定した FTA によるリスク解析を実施した。

## 2.2 方法

### 2.2.1 FTA の手順

本研究では、FTA を①解析対象の把握、②FT 図の作成、③対策の検討、④定量解析の手順で実施する。以下、その各手順を解説する。

### 2.2.2 解析対象の把握

FTA の第一段階は、解析対象とする災害対応の流れを把握することである。本研究では、H 幹線用水路の施設管理者（同施設を管理する土地改良区職員）に、聞き取り調査を実施して、大規模地震時および豪雨時に用水路施設において想定される被害状況を整理するとともに、その被害状況に対応する施設管理者の災害対応行動の流れを把握した。

### 2.2.3 FT 図の作成

FT 図の例を図-2 に示す。FT 図は表-1 に示す記号を用いて表現する。最初に解析対象とする事象 F を頂上事象として設定する。次に、頂上事象 F が起こる直接的な原

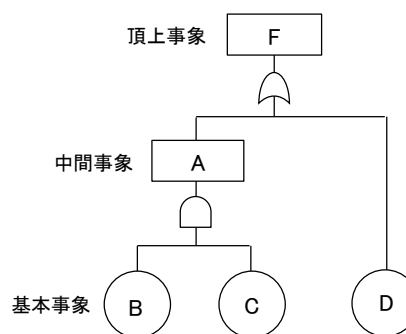


図-2 FT 図の例

表-1 FT 図に使用される記号

記号	名称	内容
□	頂上事象	頂上事象: 解析対象とする事象
□	中間事象	中間事象: 頂上事象と基本事象の間の事象
○	基本事象	これ以上展開不能な最小レベルの事象
∪	ORゲート	入力事象のうち1つが発生する場合に出力事象が発生
∩	ANDゲート	入力事象のすべてが発生する場合に出力事象が発生
△	移行記号	他のFT図が接続することを示す記号

因となる事象を挙げて、それを頂上事象Fの下位に並べて書き出す。この場合は中間事象Aおよび基本事象Dである。このとき、頂上事象Fの直下のORゲートは、中間事象Aおよび基本事象Dのいずれかひとつが生じた場合に、頂上事象Fが発生することを意味する。中間事象Aが生じる原因は、基本事象BおよびCである。この場合は、ANDゲートで結合されているので、基本事象BとCがともに生じた場合に中間事象Aが発生することを意味する。

以上のような規則と手順に従いFT図を作成することで、本研究では、解析対象とする頂上事象が生じる根本的な原因となる基本事象を網羅的に特定した。なお、FT図の作成作業には、発想の公平性や一般性を確保するため、複数名のチームにより作業にあたる事が望ましい。本研究では、調査対象の施設管理者を含む6名または7名の技術者によりFT図を作成した。

### 2.2.4 対策の検討

FT図により明らかとなった基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生を抑制することができる。ただし、施設管理の現場では、対策に投入できる予算の制約から実際に実施可能な対策は限られたものになると考えられる。そこで、本研究では、各基本事象に対する対策を挙げるとともに、それらを比較的簡易に実施できる対策と、コストや労力の制約から当面のところ実施困難な対策に分類した。

### 2.2.5 定量解析

FT図における基本事象に発生確率を与えれば、頂上事象の発生確率を計算することができる。FT図における任意の事象の発生確率Pは、その直下のN個の事象(中間事象または基本事象)の発生確率 $P_1, P_2, \dots, P_N$ を用いて、ANDゲートの場合では(1)式により、ORゲートの場合では(2)式により算出できる<sup>9)</sup>。

$$P = \prod_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i) \quad (2)$$

すなわち、FT図上の各基本事象の発生確率が設定できれば、(1)式および(2)式を用いて、下位事象から上位事象の発生確率を順次計算していくことにより、最終的に頂上事象の発生確率を算出することができる。FT図における頂上事象の発生確率の算出事例を図-3に示す。各基本事

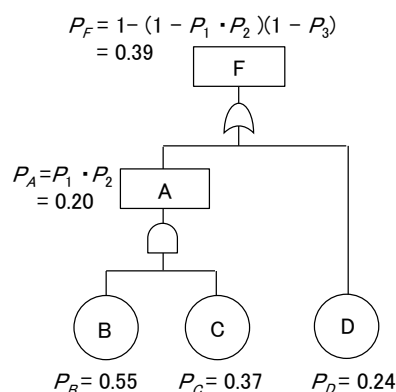


図-3 頂上事象の発生確率の算出事例

象B、C、Dの発生確率 $P_B, P_C, P_D$ をそれぞれ0.55、0.37、0.24とすると、この場合、中間事象Aの発生確率 $P_A$ は、(1)式を用いて $P_B$ および $P_C$ から0.20と算出され、さらに頂上事象の発生確率 $P_F$ は、(2)式を用いて $P_A$ および $P_D$ から0.39であると算出できる。

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 解析対象の把握

#### (1) 大規模災害時に想定される災害過程

灌漑用水路の沿線には農地ばかりでなく、住宅地や道路などの生活圏もある。図-4に住宅地を通過するH幹線用水路の概観を示す。このような基幹的な灌漑用水路施設が被災して、水路から多量の水が流出する事態となれば、その被災箇所付近の住宅地や道路などの社会インフラに深刻な二次被害を与えるおそれがある。H幹線用水路の施設管理者によれば、台風や発達した前線に伴う豪雨によって、毎年数回程度、幹線用水路からの溢水が懸念される状況が起きているということである。

また、気象庁の震度データ<sup>9)</sup>によれば、H幹線用水路沿線の地域では、過去25年間(1990年~2016年)に、震度4の地震2回と震度5弱の地震1回が起きているが、いずれの地震時においても、被害はほとんど発生してい



図-4 住宅地を通過するH幹線用水路の外観

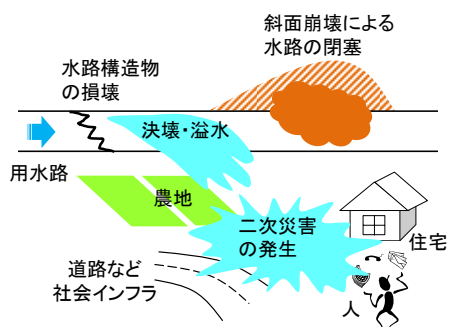


図-5 水路から流出により想定される二次災害

ない。しかし、震度5強以上の大規模な震災となれば、法面崩壊により流路が妨げられて溢水することや水路構造物が損壊して決壊することも考えられよう。さらに、震度6強以上の震災では、地表面に断層が現れることも考えられる。用水路を横切って断層が通過するような事態となれば、水路が寸断・破壊されて、水路から多量の水が流出して大規模な二次災害が起り得る(図-5)。

さらに、以上のような被害が発生して、緊急的に災害対応を実施しようとしても、その対応行動に必要な資源である人、情報通信、設備機器、インフラ、エネルギーもまた被災して、その機能が喪失あるいは著しく低下してしまう状況が考えられる。現在、施設管理者により想定されている震災時の災害対応は、それに必要な資源のすべてが健全に機能することを前提に計画されている。それゆえ、現状の災害対応計画のままでは、万一の大規模地震時において、効果的な災害対応を実施できないおそれがある。

(2) 災害時における施設管理者の災害対応

H 幹線用水路施設の施設管理者への聞き取りにより、災害時における施設管理者の対応行動を把握した。図-6 に災害時におけるH幹線用水路の施設管理の模式を示す。H幹線用水路を管理する土地改良区では、4つの事業所、頭首工管理所、および土地改良区本部が連携して災害対応を実施する。水路には水位観測設備が17箇所、監視カメラが7箇所設置されており、これらのデータはパソコンや携帯端末において職員全員が閲覧可能である。豪雨時において、水路に異常が確認されれば、土地改良区本部の意思決定者(技術部長)から頭首工管理所へ取水ゲートの閉鎖が、また各事業所へ放流ゲートの開放が指示される。H 幹線用水路の全長は約80kmであるため、取水ゲートを閉鎖したのみでは、下流側で水位が低下するまでに半日以上を有する。それゆえ、被害箇所の通水量の低減を効果的に行うために、放流ゲート操作による水位調整が重要になる。

H 幹線用水路施設では、大規模地震時と豪雨時ともに、

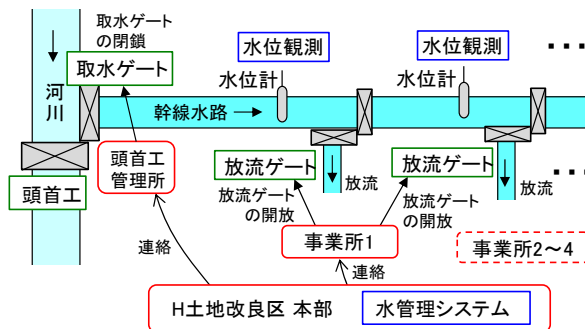


図-6 災害時におけるH幹線用水路の施設管理の模式

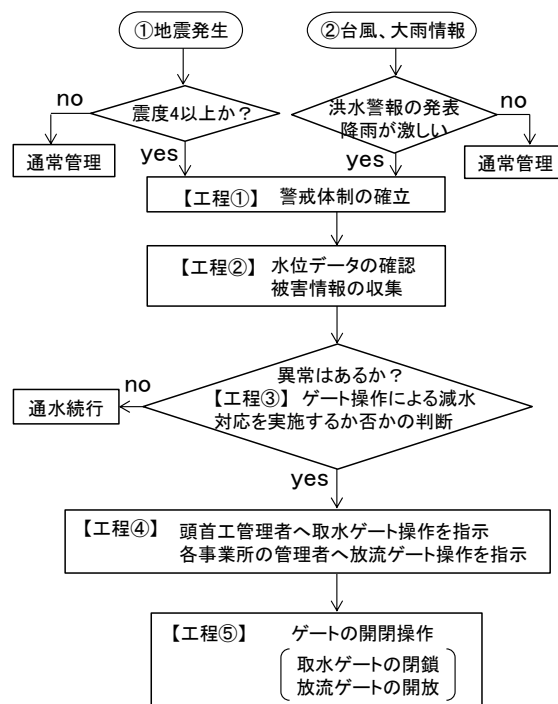


図-7 大規模災害発生直後における災害対応の流れ

水管理システムによって水路の異常を確認し、必要に応じてゲート操作により水路内の通水量を低減する措置を講じることになる。豪雨時あるいは大規模地震時における災害対応の流れを図-7に示す。主要な災害対応の工程は次の5工程に整理できる。被害発生が考えられる規模の豪雨あるいは震災(震度4以上)が生じれば、施設管理者は、警戒体制を確立する(工程①)。次に、用水路施設における被害の有無を把握するため、施設管理者は水管理システムにおける水位データを確認する(工程②)。この水位データは、土地改良区事務所内のパソコンのほか、施設管理者が所持する携帯端末においても確認することができる。施設管理者は、水位の急激な変化などの異常があった場合、あるいは外部から被害通報があった場合には、通水を停止すると判断(工程③)して、取水ゲート閉鎖および放流ゲートの開放に向けた対応行動を

開始する。施設管理者は、頭首工管理者へ取水ゲート閉鎖を指示するとともに、各事業所に放流ゲート開放を指示する（工程④）。頭首工管理者および各事業所の施設管理者は、取水ゲートの閉鎖または放流ゲートの開放を行う（工程⑤）。

### 2.3.2 FT 図の作成

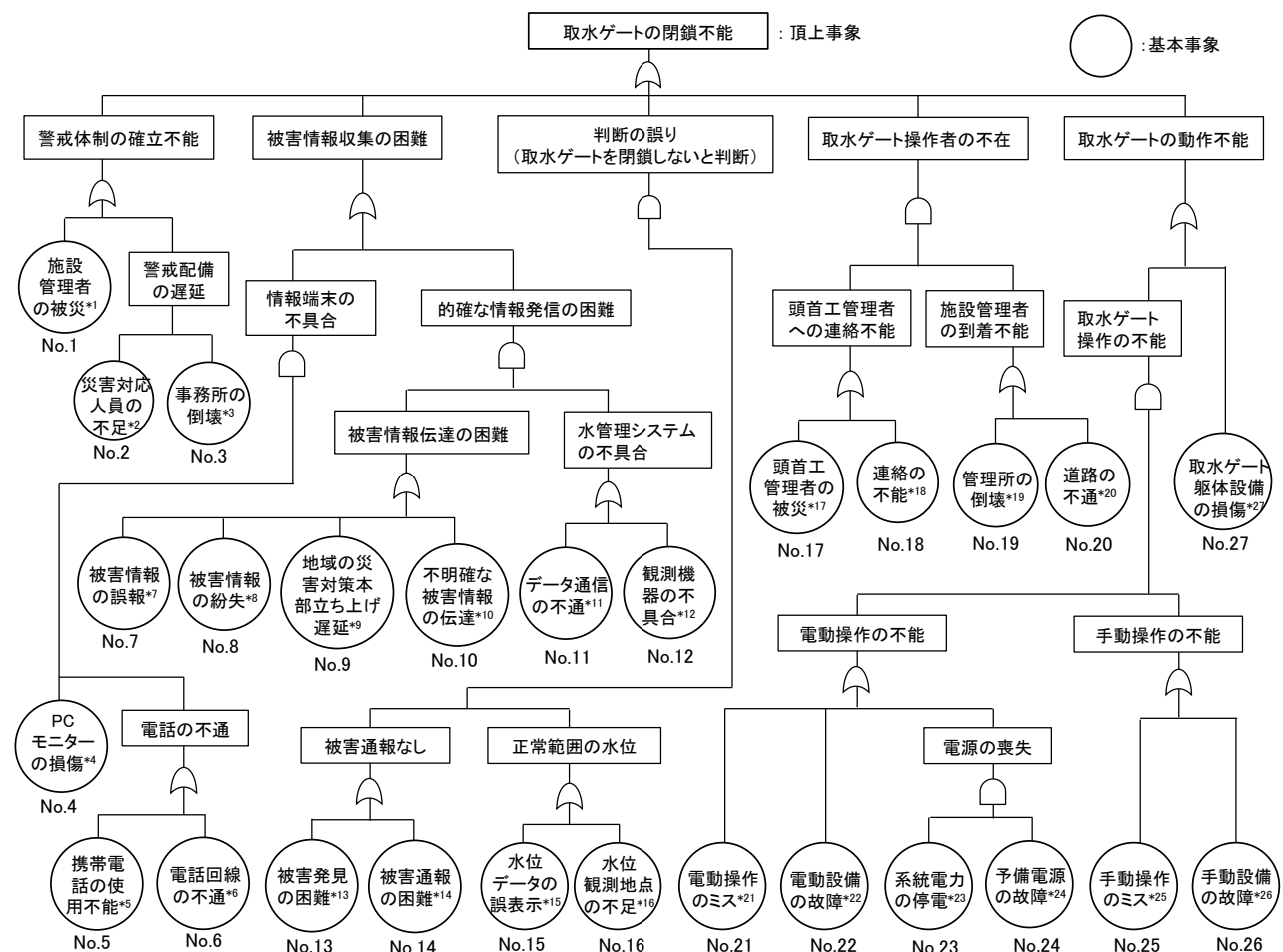
#### (1) 頂上事象の設定

H 幹線水路の施設管理者は、施設の被災確認後、直ちに取水ゲートを閉鎖する対応行動と放流ゲートを開放する対応行動を開始する。しかし、取水ゲート閉鎖による減災効果と放流ゲート開放による減災効果が異なることから、これらをひとつの FT 図（例えば、「災害対応の

遂行不能」を頂上事象とする FT 図）として整理することは困難である。そのため、この場合、「取水ゲートの閉鎖」と「放流ゲートの開放」の各過程に関して、それぞれ FT 図を作成する必要がある。本研究では、このうち主要な対応過程である取水ゲートの閉鎖を対象として、「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とした FT 図を作成した。

#### (2) FT 図による基本事象の特定

図-8 に頂上事象を「取水ゲートの閉鎖不能」とする FT 図を示す。取水ゲートが閉鎖されるためには、図-7 に示した災害対応工程①～⑤の各工程が確実に実施されなければならない。それゆえ、頂上事象「取水ゲートの



<sup>\*1</sup> 施設管理者本人とその家族、近親者あるいは自宅などの重要財産の被災、<sup>\*2</sup> 災害対応にあたることのできる人員の不足、<sup>\*3</sup> 災害対策本部および災害対応の要となる事務所の倒壊、<sup>\*4</sup> 災害対策本部および事務所の水位データ監視用パソコンの転倒などによる損傷、<sup>\*5</sup> 携帯電話の充電切れや電話機の不携帯など施設管理者のヒューマンエラー、<sup>\*6</sup> 固定電話および携帯電話の不通、通話制限、<sup>\*7</sup> 通報を受けた被害情報の誤り、<sup>\*8</sup> 震災時の混乱による情報伝達過程における被害情報の紛失、<sup>\*9</sup> 被害通報は地域の災害対策本部を経由して施設管理者に届くと想定し災害対策本部の立ち上げ遅延による被害情報伝達の遮断、<sup>\*10</sup> 施設管理者が被害通報を受けても内容が不明確である状況、<sup>\*11</sup> 各水位観測機器からの水位データの通信不能、<sup>\*12</sup> 観測機器の不具合による水位確認不能、<sup>\*13</sup> 夜間や人気が少ない場所における被害発生、<sup>\*14</sup> 被害発見者が被災している状況で通報が困難、<sup>\*15</sup> 水位観測機器が誤表示をしているにも関わらず施設管理者はそれを正しい値と認識している状況、<sup>\*16</sup> 被災による急激な水位変化を捉えるためには水位観測地点数が不足している状況、<sup>\*17</sup> 頭首工管理者およびその家族や近親者あるいは自宅など重要財産の被災、<sup>\*18</sup> 施設管理者と頭首工管理者の連絡不能、<sup>\*19</sup> 頭首工管理所の倒壊、<sup>\*20</sup> 頭首工管理者に取水ゲート操作を依頼できず施設管理者が頭首工へ急行する場合の道路の不通、<sup>\*21</sup> 電動操作手順の忘却や操作のミス、<sup>\*22</sup> 地震動による電動設備の故障、<sup>\*23</sup> 通常時の電源である系統電力の停電、<sup>\*24</sup> 系統の停電に備えた予備電源の故障、<sup>\*25</sup> 電動操作手順の忘却や操作のミス、<sup>\*26</sup> 地震動による手動設備の故障、<sup>\*27</sup> 取水ゲートの駆体設備の損傷

図-8 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図

閉鎖不能」が発生する第一の原因は、工程①～⑤のいずれかの工程が実施不能になることである。すなわち、「対応行動開始の困難」、「被害情報収集の困難」、「判断の誤り（取水ゲートを閉鎖しないと判断）」、「取水ゲート操作者の不在」および「取水ゲートの動作不能」が最初の中間事象となる。これらの中間事象はORゲートを用いて頂上事象と結合される。その各中間事象についてFT図を展開して、その発生原因となるNo.1～No.27の基本事象を特定した。ただし、本研究では、施設管理の範囲を超える事象が得られた時点、あるいは一定の対策方針が明らかとなった時点で、その事象を基本事象とした。例えば、前者の事例として、「施設管理者の被災」に対する対策は、個人の備えによるところであるから、これを基本事象とした。また、後者の事例として、「PCモニターの損傷」に対して、事務所内のPCや書棚の転倒防止などの対策が考えられたことから、これを基本事象とした。

### 2.3.3 対策の検討

#### (1) 対策の分類

基本事象に対する対策を表-2に示す。対策実施の実現性が高い順に、①施設管理者により実施可能な対策、②管理体制を強化する対策、③施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策、④構造物や社会インフラの耐震補強が必要な対策に分類・整理した。

#### (2) 施設管理者により実施可能な対策

携帯電話の不携帯やゲート設備の操作方法の忘却などによる操作ミスは、震災時のパニック状況における施設管理者のヒューマンエラーである。ヒューマンエラーに対する対策は、わずかな工夫で効果が得られることが期待できる。対象となる基本事象をさらに詳細に分析して、ミスが生じにくいシステムを構築することが必要である。PCモニターの損傷や水位観測機器などの故障リスクに対しては、観測機器の転倒防止や振動破壊に対する対策を施すことのほか、強振を受けた場合や異常水位となった場合に現地の観測機器が正しい値を表示するのかわ確認しておくことが重要である。また、現状の水位観測地点におけるデータだけでは、発災時における水路内の水位変化を確実に捉えることができないことも考えられる。豪雨時の管理実績やシミュレーションにより適切な水位観測地点を推定して、観測設備の移設や増設を検討する必要がある。

以上のような対策の実施には、施設管理者の労力を必要とするものの、そのための費用負担は比較的少ない。それゆえ、現状の施設管理において実施可能な対策であ

表-2 基本事象に対する対策

No.	基本事象	対策	対策の枠組み
5	携帯電話の使用不能		
21	電動操作のミス	ヒューマンエラー対策	
25	手動操作のミス		
3	事務所の倒壊		①施設管理者により実施可能な対策
4	PCモニターの損傷	転倒防止などの対策	
19	管理所の倒壊		
12	観測機器の不具合	振動による故障などに対する対策	
15	水位データの誤表示		
16	水位観測地点の不足	水位観測設備の増設	
1	施設管理者の被災	管理実務者の養成	②管理体制を強化する対策
2	災害対応人員の不足	緊急時の体制強化	
17	頭首工管理者の被災	緊急時の体制強化	
8	被害情報の紛失	地域行政の危機管理対策の強化	③施設管理者、地域住民および行政機関の協力・連携が必要な対策
9	地域の災害対策本部立ち上げ遅延		
10	不明確な被害情報の伝達	地域住民との災害対応計画の策定	
7	被害情報の誤報	監視カメラの増設	
13	被害発見の困難		
14	被害通報の困難	住宅における地震対策	
6	電話回線の不通	情報通信機能の強化	
11	データ通信の不通		
20	道路の不通	道路施設の耐震補強	④施設構造物や社会インフラの耐震補強に関わる対策
22	電動設備の故障		
24	予備電源の故障	設備機器の耐震補強	
26	手動設備の故障		
23	系統電力の停電	電力系統の耐震補強	
27	取水ゲート施設の損傷	施設構造物の耐震化	

ると考えられる。

#### (3) 管理体制を強化する対策

大規模地震時には、設備機器の操作に熟知している施設管理者が被災することも考えられる。その場合、この施設管理者に代わって災害対応にあたる人員が必要となる。そのため、災害対応に必要な設備機器の操作ができる災害対応人員を養成するとともに、支線管理者や受益者から速やかに災害対応の支援が得られる体制づくりも必要である。

こうした災害時における管理体制を構築するためには、通常の施設管理の範囲をこえて、施設に関わる関係者全体の枠組みの中で議論をしていく必要がある。これらは時間と労力を要するものの、現場の費用負担は比較的少ないことから、現状の施設管理において実施可能な対策であると考えられる。

#### (4) 施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策

長大な用水路施設における被害の第一発見者の多くは



地域住民である。その被害情報は、まず、市町村などに設置される地域の災害対策本部に通報され、そこから施設管理者に到達するものと考えられる。それゆえ、施設管理者への被害情報の到達を確実なものにするためには、地域住民の協力体制の確立と市町村の災害対策本部との連絡体制の強化が必要である。今後、地域防災計画が見直される中で、施設管理者と行政、地域住民の連携体制が明確に計画されることが望まれる。

#### (5) 構造物や社会インフラの耐震強化に関わる対策

情報通信や道路の不通など社会インフラの被害あるいは住宅や施設構造物の損壊を低減する対策には、基本的に施設やインフラの耐震強化が必要である。これには社会全体の強靱化が必要であり、それを施設管理の中で直接実施できるものではない。

#### 2.3.4 2章のまとめと課題

本章では、国内最大規模の灌漑水路施設であるH幹線水路施設を対象に、大規模災害時における被害想定および施設管理者の災害対応行動の流れを整理するとともに、FTAを適用して、大規模地震時の緊急対応において、取水ゲートが閉鎖不能になる原因事象を特定した。これにより得られた主要な成果を次に示す。

(1) H幹線水路を対象におけるFT図は、既往研究<sup>9)</sup>において作成した他の幹線水路を対象にしたFT図とほぼ同様な構成・内容であった。このことから、FT図の主要部分は、用水路施設の規模によらず標準的な形として提案できるものと考えられる。

(2) 豪雨時の災害対応行動と地震時の災害対応行動は、ほぼ同じ工程であった。極めて発生頻度が低い地震災害に対応するためには、日常的な施設管理の中にいかに地震災害時の対応を定着させるかということが重要である。この観点から、豪雨時における災害対応の実績が、経験に乏しい大規模地震時における災害対応の実践に役立てられる可能性が示唆される。

(3) 取水ゲート閉鎖による減水の効果と放流ゲート開放による減水の効果が異なるため、これらをひとつのFT図により整理すること（例えば、頂上事象を「災害対応の遂行不能」としてFT図を作成すること）が困難である。この場合は、各ゲートの操作不能についてFT図を作成し、3章に述べる方法などによって全体の災害対応を評価することが考えられる。

(4) 本研究で作成したFT図をもとに、定量解析の精度向上に必要な課題「設管理者や技術者の経験や感覚による評価を数量化して、対策効果を定量評価する方法を構築する」について、今後検討していく方針である。

### 3. 緊急対応時における人員配置の最適化

#### 3.1 研究の必要性

大規模地震が発生し、万一基幹的な灌漑用水路が決壊あるいは溢水という事態となれば、その多量の流出水によって甚大な二次災害が引き起こされるおそれがある。そのため、2章において述べたとおり、施設管理者は大規模地震発生後の緊急対応として、取水ゲートを閉鎖することを想定している。しかし、現状の土地改良区において、震災時の緊急対応を速やかに遂行できる施設管理者は非常に少ない。本章で試算対象とするのは、後述するS幹線水路である。この用水路を管理する土地改良区では7人の技術系職員が在職している。このうち日常管理の実務を担当する施設管理者は1名であり、現計画では、震災時においても緊急対応を真っ先に行うのは、施設の設定機器の操作に熟知したこの施設管理者のみである。既往論文<sup>9)</sup>によれば、このような単独の施設管理者により取水ゲートを閉鎖する緊急対応は、震度6強～震度7の最大級規模の震災時であればほとんど遂行不能になる。そこで、大規模地震に備えて、複数名の施設管理者により緊急対応を行う管理体制を事前に計画しておく必要がある。施設の日常管理を行う施設管理者以外の技術系職員も、緊急対応時に必要な設備機器の操作を習得することによって、現状の土地改良区においても複数名の施設管理者による緊急対応体制が構築できるものと考えられる。さらに、複数名による緊急対応が実施可能であれば、取水ゲート操作だけでなく、放流ゲート操作による減災対応も行うことができる。すなわち、複数の施設管理者が取水ゲートおよび放流ゲート操作を分担することによって、現状よりも災害対応力の向上が期待できる。

そこで、本章では、複数の施設管理者を想定し、もともと減災効果が大きい各ゲート設備への人員配置数を決定する方法を示す。さらに、同方法を実際の幹線水路施設に適用して、具体的な最適解の算出を確認する。

#### 3.2 方法

##### 3.2.1 緊急対応時における人員配置の最適化手法

各ゲート設備への人員の配置モデルを図-9に示す。ゲート1を取水ゲートとし、ゲート2からゲート $m$ までを放流ゲートとする。 $n_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) は、 $k$ 番目のゲートにおける緊急対応を割り当てられる施設管理者数である。 $P(n_k)$ はゲート $k$ の操作によって緊急対応が実行（取水ゲートの閉鎖あるいは放流ゲートの開放）される確率である。 $Q_1$ は取水ゲート閉鎖による通水停止流量であり、

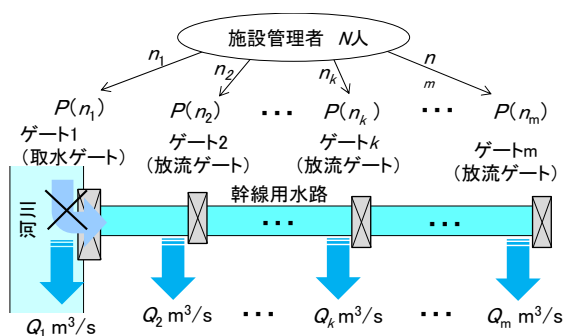


図-9 各ゲート設備への人員の配置モデル

$Q_k$  ( $k = 2 \sim m$ ) はゲート  $k$  からの放流量である。震災時における幹線用水路からの全放流量は、確率  $P(n_k)$  を用いて(3)式のように、放流量の期待値  $E$  で表される。本研究では、土地改良区内で緊急対応を担当する施設管理者の総数  $N$  を制約条件 ((4)式) として、放流量の期待値  $E$  を最大とする各ゲートへの施設管理者の配置数  $n_1, n_2, \dots, n_m$  を求める。

$$E = \sum_{k=1}^m P(n_k) \cdot Q_k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m n_k = N \quad (4)$$

### 3.2.2 ゲート $k$ の操作可能確率 $P(n_k)$ の算出

$P(n_k)$  は、図-10 に示すような FT 図をもとにして求められる。図中における  $P_h$  は施設管理者がゲート設備に到着できない確率、 $P_d$  はゲート設備が動作不能になる確率である。「施設管理者の到着不能」の下位には、地震発生後のゲート操作を割り当てられた各施設管理者が到着不能となる事象が並列され、それらは上位の「施設管理者の到着不能」と AND ゲートで結合される。このことは、ゲート  $k$  への割り当て人数  $n_k$  が多いほど、ゲート  $k$  にだれも到着しないという確率、すなわち、「施設管理者の到

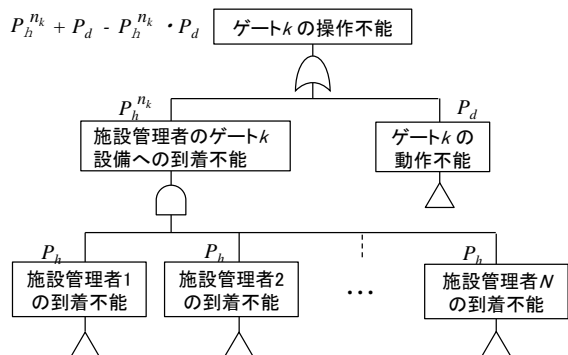


図-10 ゲート  $k$  の操作不能を頂上事象とする FT 図

着不能」が生じる確率が低下することを示す。ただし、本研究では、各施設管理者 1~ $N$  の到着不能となる確率はすべて等しく  $P_h$  であるとした。すなわち、「施設管理者のゲート  $k$  設備への到着不能」の発生確率は、 $P_h$  の  $n_k$  乗と表される。一方、「ゲート  $k$  の動作不能」とは、地震動によるゲート設備の破損や不具合などである。そのため、「ゲート  $k$  の動作不能」の発生確率  $P_d$  は、施設管理者数  $n_k$  には関係しない。

$P(n_k)$  は「ゲート  $k$  の操作不能」が生じる確率の余事象となり、次の(5)式により求められる。

$$P(n_k) = 1 - \left[ P_h^{n_k} + P_d - P_h^{n_k} \cdot P_d \right] \quad (5)$$

### 3.2.3 ゲート $k$ における放流量 $Q_k$ の算定

$Q_1$  は取水ゲートにおける最大計画通水量とした。 $Q_k$  ( $k = 2 \sim m$ ) は各放流工の施工図面に基づいて算定した。

### 3.2.4 最適解の算出

減災効果を最大化する各ゲート設備への人員配置数を決定する問題は、以上の(3)式、(4)式、(5)式により数理計画問題として定式化される。この問題形式は、例えば、ある資源を  $N$  個の工場に配分することを考えて、 $i$  番目の工場に  $x_i$  の資源を配分して  $f(x_i)$  の利得が得られるとき、総利得  $f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_N)$  を最大化する資源の配分  $x_1, x_2, \dots, x_N$  ( $\sum x_i = M$ ) を決定するという配分問題にあたる。この種の問題には、一般に動的計画法による解法が知られている<sup>10)</sup>。しかし、以上の例において総資源量  $M$  が離散的でごく小さければ、単純に資源配分のすべての組み合わせに対する総利得をしらみつぶしに調べるという方法が最も簡便である ( $M$  が大きくなると組み合わせ数が増大して計算量が膨大になる)。ほとんどの土地改良区では、現場における緊急対応可能な職員数が 10 名を上回る計画は考えにくい。それゆえ、(4)式を満たすすべての組み合わせに対する(3)式の解を比較することで最適解を求める方法が、この場合、実用的で分かり易いものと考えられる。

## 3.3 試算事例および考察

### 3.3.1 試算対象とする幹線水路施設の概要

試算対象とした S 幹線水路施設は、北海道の水田地帯における頭首工と開水路からなる典型的な灌漑水路である。S 幹線水路の施設規模は、水路延長約 29km、最大計画通水量  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  である。

S 幹線水路には、取水ゲートのほか 6 箇所の放流ゲートがある。取水ゲートの操作には電動と手動があるが、本研究では、その取水ゲート操作を電動のみで行うもの

とした。なぜならば、手動による操作には膨大な時間と労力を要することから、緊急的な対応にはなり得ないからである。取水ゲート設備は停電時に作動する予備電源を備えている。また、放流ゲートの開閉はすべて手動による機側操作のみである。

### 3.3.2 ゲート操作不能のFT図

図-10のFT図に従って作成した、S幹線用水路における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図を図-11に、また、「放流ゲートの開放不能」を頂上事象とするFT図を図-12に示す。施設管理者は、大規模地震発生

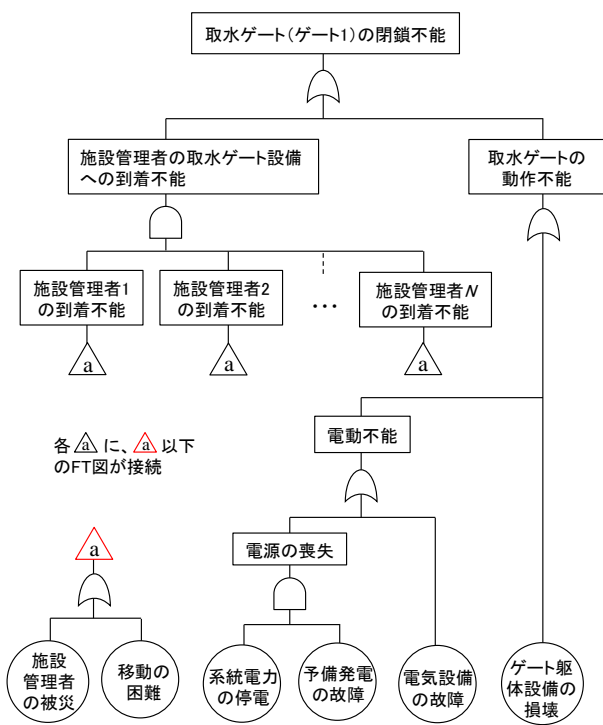


図-11 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図

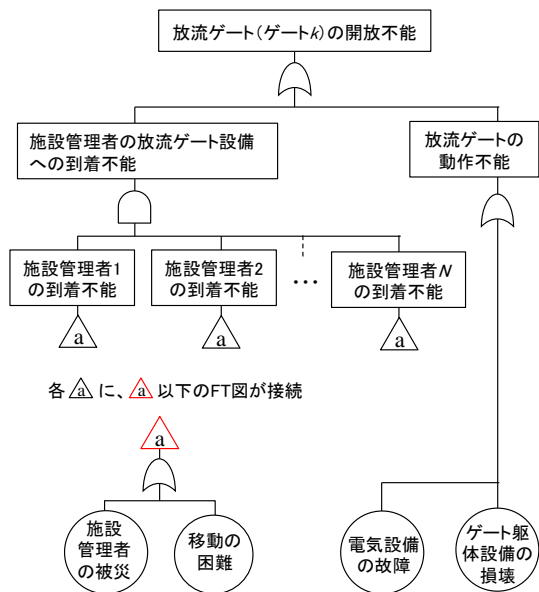


図-12 「放流ゲートの開放不能」を頂上事象とするFT図

後、水管理システムなどによる現地の正確な被害情報を待たず、直ちに担当するゲート設備へ向かうものとした。なぜならば、現地の正確な被害情報待ちをしている間に適切な対応の実施時機を逸してしまうこともあり得るからである。そこで、本研究では、「施設管理者の到着不能」の原因となる基本事象として、「施設管理者の被災」と「移動手段の喪失」の2事象のみを挙げた。

### 3.3.3 試算に用いたデータの決定

図-11と図-12の基本事象の発生確率を表-3のように設定して、「施設管理者の到着不能」の発生確率  $P_h$  と「取水ゲートの動作不能」の発生確率  $P_d$  を求めた。ただし、表-3は震度7の地震時を想定したものである。試算に用いた  $P_h$ 、 $P_d$  および  $Q_k$  を表-4に示す。

### 3.3.4 最適化の試算結果

表-4に示したデータを(3)式、(4)式、(5)式に代入して、最適解を求めた。S幹線用水路を管理する土地改良区では、技術系職員が7名であることから、本部にて対応する職員2名を除いた5名までを災害時に現場のゲート設備において対応可能な人数であるとした。対応可能な施設管理者総数を1人~5人までの5通りに仮定して、その人数において最大となる放流量の期待値を図-13に示す。緊急対応を行う施設管理者総数  $N$  が1人または2人のときは、取水ゲートのみに対応行動を集中させることが最も効果的であるといえる。このことは、施設被災時

表-3 基本事象の発生確率の設定

基本事象	震度7において想定される発生確率	基本事象の発生確率の設定根拠
施設管理者の被災	0.350	震災時における木造住宅の全壊率 <sup>11)</sup> を適用
移動の困難	0.150	震災時における道路のリンク閉塞率 <sup>11)</sup> より推定
動力設備の故障	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 <sup>11)</sup> を適用
系統電力の停電	0.900	系統電力の停電率は電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における停電率18% <sup>12)</sup> と震度6強における木造住宅の全壊率 <sup>11)</sup> から、各震度階級の停電率を設定
予備電源の故障	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 <sup>11)</sup> を適用
電気設備の故障	0.400	建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒率より小さいとして、鉄筋コンクリート建物の倒壊率 <sup>11)</sup> と家具等の移動・転倒率 <sup>12)</sup> の平均値を適用
ゲート躯体設備の損壊	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 <sup>11)</sup> を適用

表-4 試算に用いたデータ

ゲート名	$P_h$	$P_d$	$Q_k$ m <sup>3</sup> /s
ゲート1(取水)	0.448	0.509	20
ゲート2(放流)	0.448	0.190	3
ゲート3(放流)	0.448	0.190	2
ゲート4(放流)	0.448	0.190	1.5
ゲート5(放流)	0.448	0.190	1
ゲート6(放流)	0.448	0.190	1
ゲート7(放流)	0.448	0.190	0.5

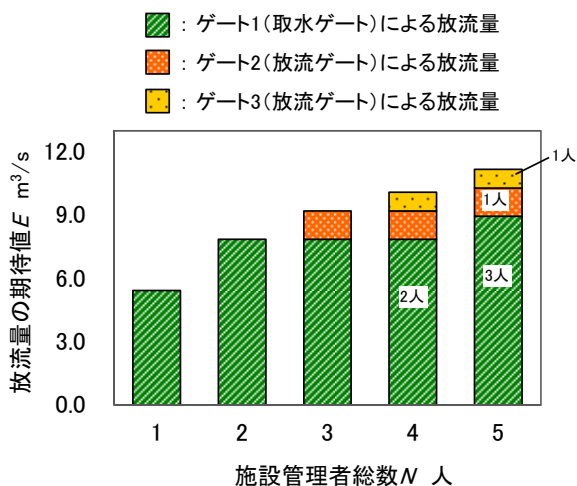


図-13 施設管理者総数に対する放流量の期待値

には直ちに取水ゲートを閉鎖する従来の対応行動の妥当性を示すものである。 $N$ が3人であれば、取水ゲートだけでなく、ゲート2の放流ゲートへも緊急対応を行う施設管理者を1人割り当てたほうが減災効果を高められる。 $N$ が4人であれば、さらにゲート3へ人員を配置することで最も放流量が大きくなる。また、 $N$ を5人にできれば、単独の施設管理者 ( $N=1$ ) によって緊急対応を行う現状の場合よりも約2倍の減災効果が期待できることが示唆される。ただし、施設管理者数が増えるほど、1名増員に対する放流量の期待値の増加量が減少する。このことから、現場の緊急対応への割り当て人数に関しては、全体の土地改良区職員数と他の災害対応業務のバランスを考慮して決定されるべきであろう。

以上のように、本最適化モデルによって得られる結果は、大規模災害に備えた災害対応計画を策定する際の検討作業を支援する具体的なデータを提供する。

### 3.3.5 3章のまとめと課題

本章では、大規模地震時の緊急対応において、複数の施設管理者によって取水ゲートおよび放流ゲート操作を分担することを想定して、最も減災効果が大きい人員配置を決定する最適化手法を示した。その主要な成果および今後の課題を次に示す。

- (1) 本最適化手法を用いて、各ゲート設備への具体的な人員配置数を決定することができた。得られた結果は、大規模災害時における災害対応計画を策定する際の検討材料として活用することが期待できる。
- (2) 本最適化手法の精度向上が必要である。基本事象の発生確率の再検討や個々の施設管理者の情報を含めた具体的なモデルの構築(例えば、施設管理者の自宅からゲート設備までの距離を考慮して「施設管理者の移動困難

の発生確率に重み付けを行うなど)が今後の課題として考えられる。

(3) 国内最大級のH幹線用水路では、大規模災害時に、緊急対応にあたる施設管理者数が20名をこえる。また、幹線用水路のほか、関係するダムやため池の対応も行わなければならない。こうしたS幹線用水路よりも規模が大きく複雑な災害対応にも適合する最適化モデルを、今後、詳細に検討していく必要がある。

## 4. 今後の方針

本研究の成果を踏まえて、平成29年度の研究方針について次に述べる。

本研究では、国内最大級の灌漑用水路施設を対象に、FTAを用いた大規模災害時のリスク解析を実施することで、同手法の有効性を確認した。しかし、取水ゲート閉鎖の対応行動と放流ゲート開放の対応行動に関するリスクをひとつのFT図において表現できなかったため、FT図を用いた災害対応全体の定量評価には課題があることが分かった。この解決方法は、今後の検討課題としたい。さらに、平成29年度には、本研究で得られたFT図を用いて、施設管理者の災害対応行動が阻害されるリスクや対策の効果を定量的に評価する。その際に基本事象に与える発生確率の精度を向上させるため、施設管理者や技術者の経験や感覚による評価を数量化する方法に関して検討を進めたい(1章に述べた(4)の研究内容に相当)。

また、本研究では、震災直後の緊急的な災害対応体制を決定するための基本的な最適化手法を考案した。平成29年度には、コストの制約における対策導入の最適化手法の検討と初動から応急復旧までの災害対応のスケジューリングの最適化および評価手法の検討を行いたい(後者の課題は、1章に述べた(2)の研究内容に相当)。

**謝辞:** 本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部農業整備課には、調査地の調整や資料の提供などにおいて多大な支援をいただいた。聞き取り調査にご協力いただいた土地改良区には、用水路管理の現状や震災時に想定される被害リスクなどについてご教示をいただいた。ここに記して関係者各位に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 例えば、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所：研究者からみた東日本大震災と復旧・復興、pp.6-50、2016。

- 2) 農業農村工学会北海道支部：平成 28 年 8 月北海道豪雨による農業用排水路および農地の被害、<http://www.agr.hokudai.ac.jp/nougyoudoboku/hokkaidoshibu/TOP.html>、1995.
- 3) 内閣府防災担当：事業継続ガイドライン—あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応—、pp.3-4、2013.
- 4) 例えば、国土交通省水管理・国土保全局下水道部：下水道BCP 策定マニュアル～第 2 版～（地震・津波編）、2012.
- 5) 農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室：土地改良施設管理者のための業務継続計画 (BCP) 策定マニュアル、2016.
- 6) 大久保 天、本村由紀央、中村和正：基幹的な灌漑用水路における大規模地震災害に備えた災害対応力強化対策の評価、農業農村工学会論文集、No.302(84-2)、pp.I\_121-I\_130、2016.
- 7) 塩見 弘、島岡 淳、石山敬幸：FMEA, FTA の活用（日科技連信頼性工学シリーズ第 7 巻）、日科技連、pp.12-16、2005.
- 8) 益田昭彦、青木茂弘、幸田武久、高橋正弘、中村雅文、和田浩：新 FTA 技法、日科技連、pp.58-65、2013.
- 9) 国土交通省気象庁：震度データベース、(オンライン)、<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>、参照 2017.1.20.
- 10) 小和田 正、沢木勝茂、加藤 豊：OR 入門 意思決定の基礎、pp.45-58、2013.
- 11) 横田 崇、川上徹人、尾崎友亮、下山利浩、近藤さや、岡部 来、吉田知央、坂本誠一、能勢 努、辻村晃一、下坪善浩：震度に関する検討について、験震時報、75、pp.61-105、2011.
- 12) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定、第 3 部被害想定手法、(オンライン)、入手先<<http://www.busai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>>参照 2016.3.17、2012.

## 16.3 大規模農業地域における環境との調和した灌漑排水技術の開発

### 16.3.1 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究

#### (このうち、周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築)

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）

研究担当者：中村和正、酒井美樹、越山直子

#### 【要旨】

農区内の地下水位調査の結果、畑地を主体とした測線では、灌漑期と非灌漑期の地下水位の差はほとんどなく、水田を主体とした測線と比べて、排水路方向に向かって田面からの地下水位深さが低下する傾向がみられた。広域レベルの水文調査の結果、幹線排水路の流量は、灌漑期と比べて非灌漑期において減少する傾向がみられた。水質濃度については、灌漑期では、代かきおよび大雨による石狩川本川の濁水の影響により、SS濃度が上昇した。河跡湖の水文調査の結果、二つの河跡湖とも、農業排水路水位の時期変動の影響により、灌漑期の湖面水位が非灌漑期よりも高くなっていた。灌漑期と非灌漑期の水位差は、天狗沼では0.35m、貞広沼は0.21mであった。

キーワード：大区画、地下灌漑、直播栽培、水田、水管理

#### 1. はじめに

北海道は、全国の4分の1を占める耕地面積を有しており、大規模で専門的な農業が展開されている。その一方で、農業者の高齢化等に伴う農家戸数の減少により、担い手への農地集積が急速に進行しており、経営の大規模化への対応が喫緊の課題となっている。近年では、その対応策として、圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備による水管理の省力化が実施されている。こうした整備に伴い、圃場の用排水管理が変化すると、農区や灌漑区域における流出機構が変化し、水環境に影響することが想定される。農業用水は、国内の水資源利用量の3分の2を占めており<sup>1)</sup>、農業地域の水循環の大部分を占めるとともに、営農目的だけではなく、景観や水質等の水環境の保全や地下水の涵養等、多面的かつ公益的な機能を果たしている<sup>2)</sup>。将来にわたって、地域の水環境を保全しながら、農業用水を安定的、効率的に利用するためには、圃場整備前後における農区および広域の水文環境を調査し、圃場や農区における水収支および負荷収支の特性を分析する必要がある。

そこで、本研究では、水田地帯における周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、農区レベルおよび広域レベルの水文環境の調査を実施する。ここでは、初年度の調査結果として、灌漑区域と圃場整備がまだ行われていない農区の水文環境の概況について報告する。水収支や水質負荷収支の解析については、次年度に

報告する。

#### 2. 調査概要

##### 2.1 農区調査

##### 2.1.1 地区概要

美唄市に位置する、圃場整備が実施前である農区を対象として、調査を実施した（図-1）。農区面積は約12haであり、水田一筆の面積は0.3ha程度である。農区内の北側および西側は水田であり、その他は畑地（小麦、大豆）となっている。農業用水は大富幹線用水路（開水路）から末端用水路（開水路）を経由し、農区内の水田圃場へ取水される。農区内の一部の水田では、田越灌漑が行われている。暗渠排水は、水閘の故障によりほとんど操作できず、集水渠から地下排水が流出している。農業用水の余水は、土水路を経由して排水路へ流出する。農区内の耕作者は3人おり、そのうち2人が水田圃場の耕作を行っている。圃場の水管理操作は、耕作者それぞれの判断により行われた。中干しはいずれの圃場でも行われなかった。

##### 2.1.2 調査方法

農区における観測地点の位置を図-1に示す。地下水位の経時変化を把握するために、水田および畑地を主体とするそれぞれの測線において、圃場の地下水位、土水路の水位、排水路水位を観測した。観測期間は5月から10月までであり、測定頻度は10分間隔である。

## 2. 2 広域調査

### 2.2.1 地区概要

広域レベルの水収支および水文環境を把握するために、前項の農区を含む灌漑区域を対象として、調査を実施した。観測地点の位置を図-2に示す。この灌漑区域の面積は約1,100haであり、農地面積は約700haである。平成28年度までの圃場整備率は12%である。地元への聞き取りによると、地区内における1戸当たりの経営面積は11haである。JA美唄管内の水稲作付面積は2,180ha（主食用米1,180ha、飼料用米、加工用米等300ha）であり、主食用米のうち移植栽培は93%、乾田直播は5%、湛水直播2%である。

地区内の農業用水は、主に沼貝幹線用水路および大富揚水機場から供給される。大富揚水機場の取水量は、大富幹線用水路と山形幹線用水路に分水され、このうち、山形幹線用水路への分水量が対象灌漑区域へ流入する。しかし、山形幹線用水路への分水量データがないので、平成29年度以降に実態調査を行うこととした。このため、今年度の結果とりまとめでは、灌漑区域への流入量に沼貝幹線用水路のデータだけを用いた。なお、山形幹線への分水量は、対象区域内の一部で使用されるものであり、沼貝幹線用水路の流量と比べて小さい。

農地からの排水等は排水路を経由し、三日月第一排水路、北6線排水樋門、西美唄排水樋門から地区外へ流出する。地区内には、天狗沼（水面積：約8ha）と貞広沼（水面積：約20ha）の二つの河跡湖がある。どちらも周

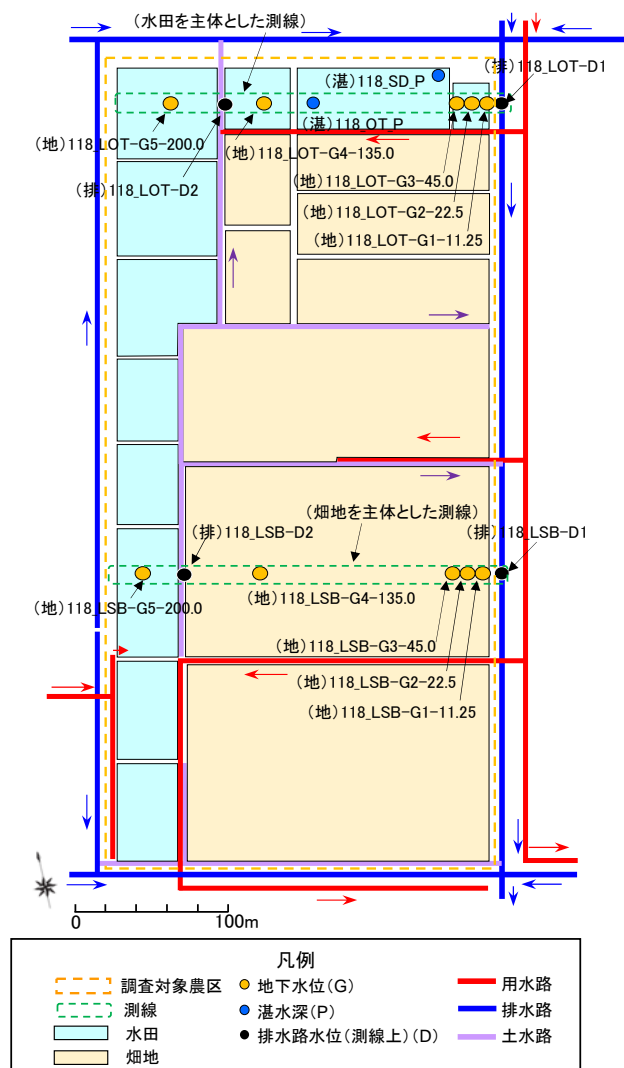


図-1 観測地点の位置（農区調査）

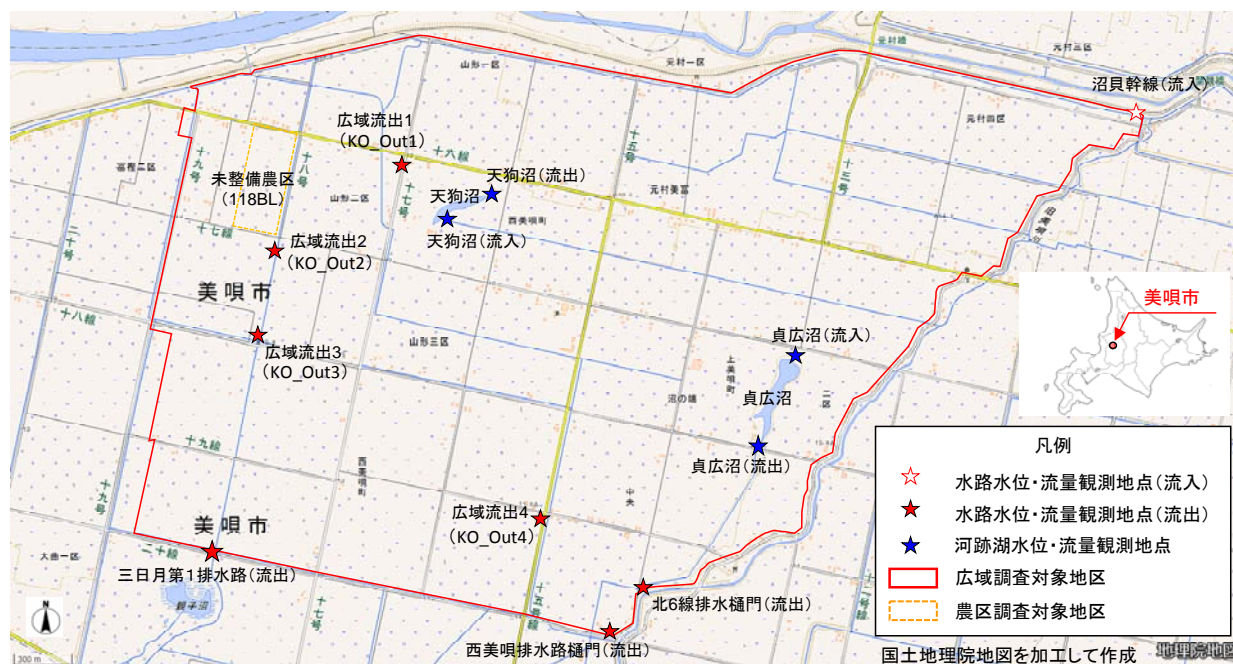


図-2 観測地点の位置（広域調査）

辺の土地利用は農地が主体である。天狗沼では、小排水路からの流入箇所が複数あり、流出口は排水路に接続している。貞広沼では、排水路からの流入箇所が1つあり、下流口は排水路に接続している。

### 2.2.2 調査方法

対象区域内における水収支を把握するために、用水路、排水路の観測地点に水位計を設置して自記観測を行うとともに、月1回程度、流量を観測した。これらの水位および流量の観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位の観測データから各地点の流量を推定した。対象区域内の水質状況を把握するため、広域流入地点1箇所、広域流出地点3箇所において、流量観測時に採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P、CODの水質分析を行った。

河跡湖の水文環境を把握するため、二つの河跡湖の流入口および流出口に水位計を設置し、湖面水位をそれぞれ観測した。さらに、河跡湖への流入水量および流出水量を把握するために、流入口付近および流出口付近に水位計を設置し、月1回程度、流量を観測した。これらの

水位および流量の観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位の観測データから各地点の流量を推定した。天狗沼では、複数ある流入口の小排水路の一つにおいて、月1回程度、流量および水位の観測を行った。

気象については、灌漑区域内に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日射量、相対湿度、大気圧を観測した。観測期間は5月から11月までである。測定間隔は20分とした。

## 3. 圃場整備前の農区における水文環境

### 3.1 農区内における地下水位の経時変化

農区内における水田または畑地を主体とした測線について、測線上の地下水位および水路水位の経時変化をそれぞれ図-3および図-4に示す。ここで、圃場湛水位は、2地点の平均値を用いた。水田を主体とした測線についてみると、地下水位は、農区の西側に位置する118\_LOT\_G5\_200.0の値が最も高く、118\_LOT\_G4\_135.0、118\_LOT\_G3\_45.0と、排水路との距離が近くなるにつれて値が低くなった(図-3)。一方、畑地を主体とした測線

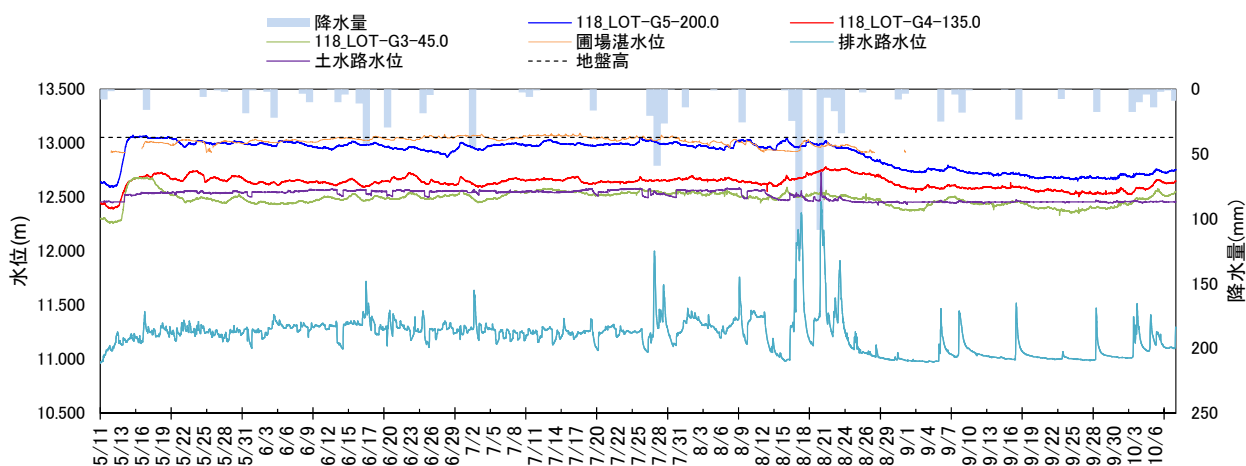


図-3 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (水田主体)

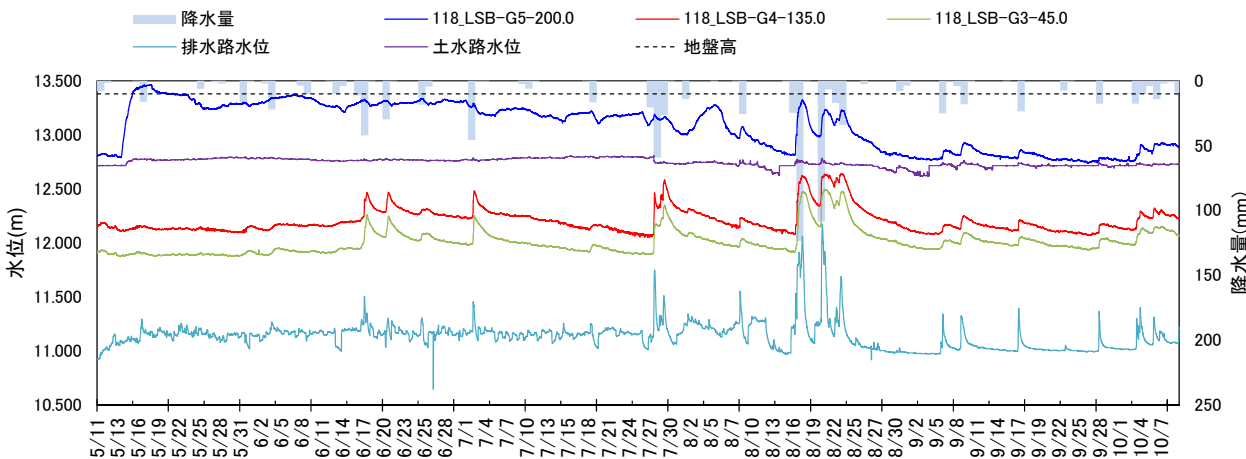


図-4 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (畑地主体)



の畑地の地下水位の値は、**図-3**と比べて、降雨に対して敏感に反応する傾向がみられた。同様に、農区内の西側と東側の地下水位の差も**図-3**よりも大きくなる傾向がみられた。

### 3. 2 灌漑期と非灌漑期における農区内地下水位の比較

灌漑期間および非灌漑期の農区内における地下水位の特性をみるために、灌漑期間および非灌漑期の平均値を**図-5**および**図-6**にプロットした。図中の田面高は、それぞれの圃場東側端から200mまでの値である。**図-5**に示すように、水田主体の測線では、灌漑期と非灌漑期の平均地下水位の差は0.08~0.28mであった。これに対して、

**図-6**の畑地主体の測線では、地下水位の灌漑期と非灌漑期の差は0.01~0.43mであり、水田部分の地下水位の差が最も大きく、畑地部分における時期ごとの差はほとんどなかった。両測線の田面の標高値は、東側から排水路方向に低くなっており、その低下幅は畑地を主体とした測線の方が大きかった。田面からの地下水位の深さは、水田を主体とした測線よりも畑地を主体とした測線において、灌漑期、非灌漑期とも排水路方向に低下する傾向がみられた。畑地では、土壌の亀裂が発達していると考えられる。このことが影響した結果、水田と比べて地下水位を保持しにくくなったと考えられる。

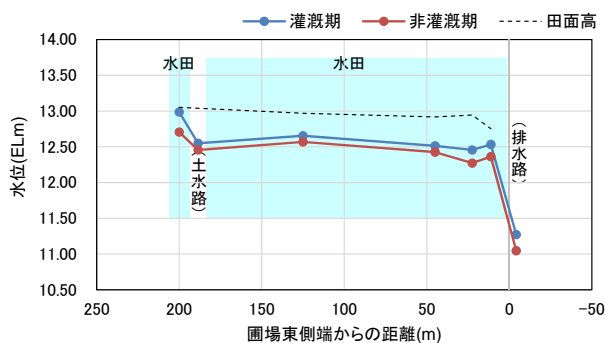


図-5 水田を主体とした測線における地下水位

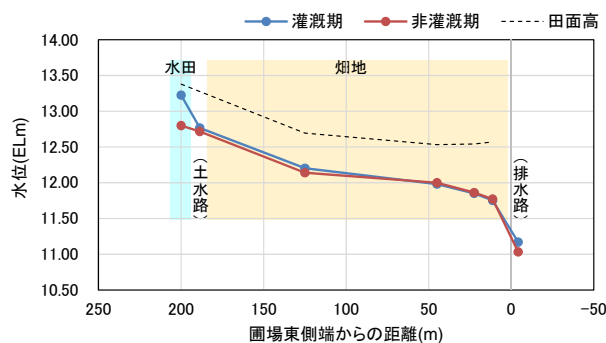


図-6 畑地を主体とした測線における地下水位

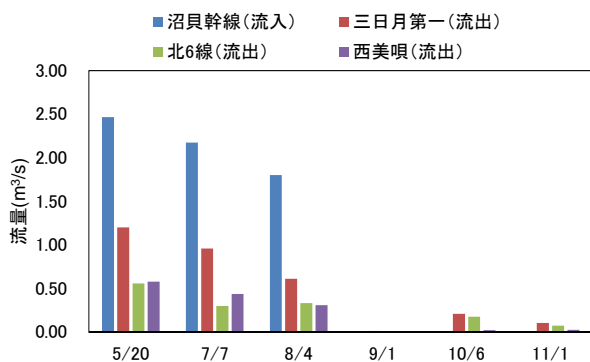


図-7 流入用水路および流出排水路における流量

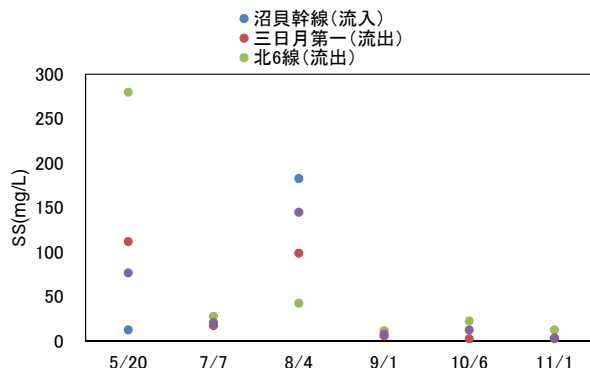


図-8 流入用水路および流出排水路におけるSS濃度

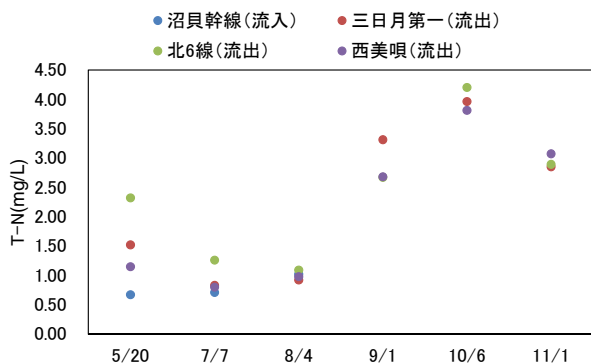


図-9 流入用水路および流出排水路におけるT-N濃度

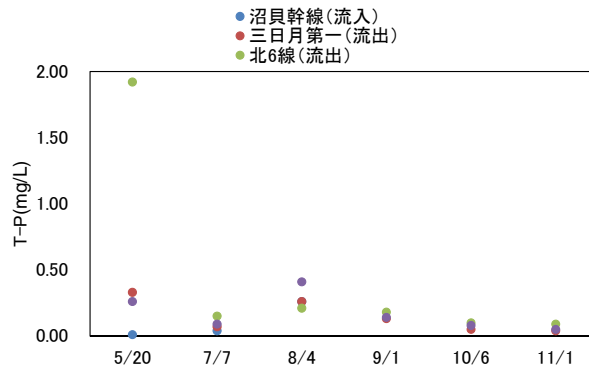


図-10 流入用水路および流出排水路におけるT-P濃度

#### 4. 広域レベルにおける水文環境

##### 4.1 幹線用水路および幹線排水路の流量

灌漑区域の流入用水路および流出排水路の定期観測時の流量を図-7に示す。灌漑期についてみると、沼貝幹線の流入水量の値は、流出水量（三日月第一、北6線、西美唄）の合計値と同程度であった。非灌漑期では、排水路流量の値は灌漑期よりも小さくなっていった。ここで、灌漑区域内の排水路（K0\_Out1～K0\_Out7）における灌漑期と非灌漑期の水位を比較した結果、いずれも灌漑期の方が高く、時期による差は0.04～0.55mであった。これは、非灌漑期では農業用水の供給が止まり、農地からの流出水量や用水路の残水等が排水路へ流入しなくなることにより、灌漑区域内の排水路の水位が低下したと考えられる。

##### 4.2 幹線用水路および幹線排水路の水質

灌漑区域の流入用水路および流出排水路の水質濃度（SS、T-N、T-P）を図-8～図-10に示す。図-8をみると、SS濃度では、5月と8月で値が著しく上昇する傾向がみられた。5月では、流入地点の用水路である沼貝幹線の

値は13mg/Lであったが、地区内の水田で代かきが多く行われていたことにより、排水路（三日月第一、北6線、西美唄）におけるSS濃度が77～280mg/Lまで上昇したと考えられる。また、8月では、沼貝幹線の値が183mg/Lと最も高くなっていった。これは、7月下旬に空知および石狩地方で大雨があったことから、石狩川本川に濁りが生じていたためである。この高濃度の農業用水が、灌漑区域内へ流入した結果、地区内の排水路の値も上昇したと考えられる。これらの月を除くと、SS濃度の値はいずれも33～28mg/Lの範囲であった。図-9のT-N濃度についてみると、灌漑期の値は0.67～2.3mg/L、非灌漑期では2.7～4.2mg/Lの範囲と、時期により差がみられた。図-10のT-P濃度では、図-8のSS濃度と類似した傾向がみられた。ただし、流出排水路のうち、北6線の値が最も高くなった理由は不明である。

##### 4.3 河跡湖の水位の経時変化

天狗沼および貞広沼における水位の経時変化をそれぞれ図-11、図-12に示す。灌漑期と非灌漑期の平均水位は、どちらの沼でも非灌漑期の方が低く、時期による差は天狗沼（流出口）では0.35m、貞広沼（流出口）では0.21m

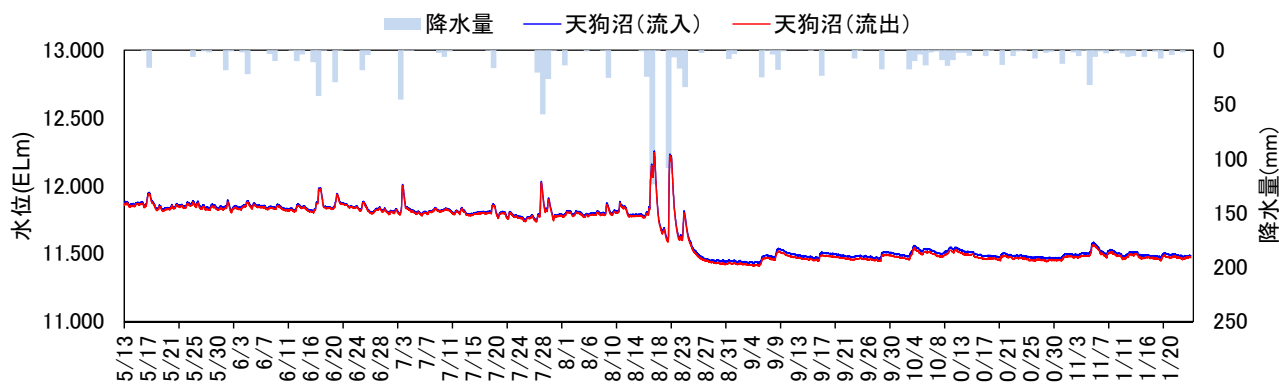


図-11 河跡湖における湖面水位および周辺地下水位の経時変化（天狗沼）

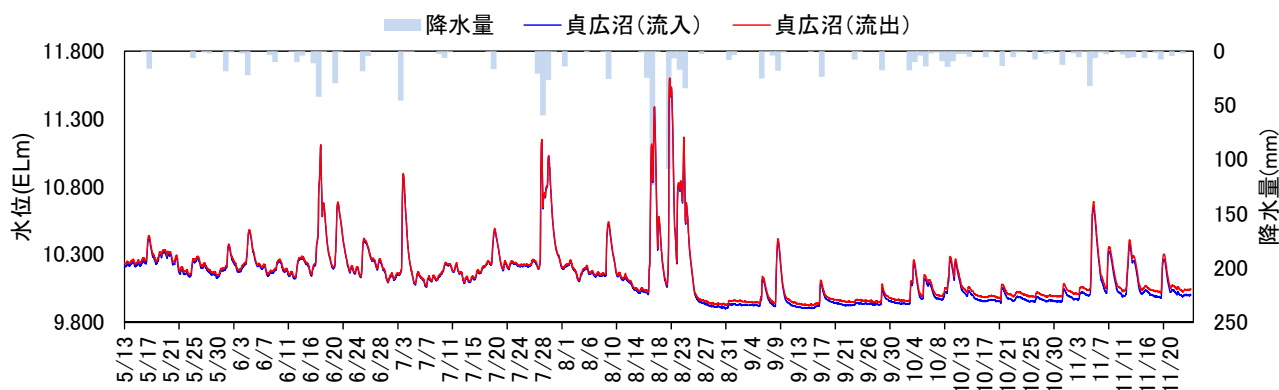


図-12 河跡湖における湖面水位および周辺地下水位の経時変化（貞広沼）

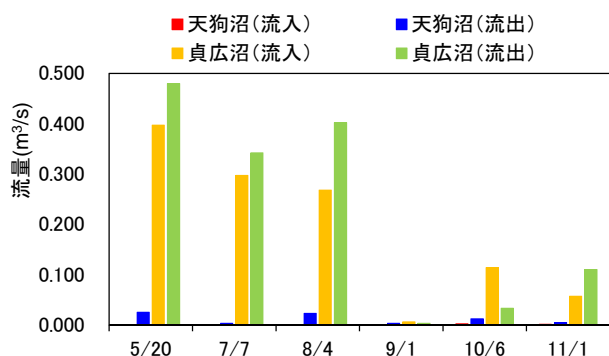


図-13 河跡湖における流入水量および流出水量  
(天狗沼、貞広沼)

であった。どちらの沼も、農業排水路の水位の時期変動の影響を受けていると考えられる。

天狗沼および貞広沼における流入水量および流出水量を図-13に示す。貞広沼の流入水量および流出水量は、非灌漑期と比べて灌漑期の値が大きくなっていた。天狗沼の流出水量は $0.003 \sim 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。降雨時の水位上昇幅は、天狗沼よりも貞広沼の方が大きくなる傾向がみられた(図-11、図-12)。今後、周辺土地利用等を精査し、それぞれの河跡湖の水収支を明らかにする。

## 5. まとめ

農区内の地下水位を調査した結果、畑地を主体とした測線では、水田を主体とした測線と比べて、灌漑期と非

灌漑期の地下水位の差はほとんどなく、排水路方向に向かって地下水位が低くなる傾向がみられた。広域レベルの水文調査の結果、幹線排水路の流量は、灌漑期と比べて非灌漑期において減少する傾向がみられた。水質濃度については、灌漑期では、代かきおよび大雨による石狩川本川の濁水の影響により、SS濃度が上昇した。こうした代かきや降雨後の濁水の影響が生じたときを除くと、T-N濃度は、灌漑期よりも非灌漑期において値が上昇していた。河跡湖の水文調査の結果、二つの沼とも、農業排水路の時期変動の影響により、灌漑期の湖面水位が非灌漑期よりも高くなっていた。灌漑期と非灌漑期の水位差は、天狗沼では0.35m、貞広沼は0.21mであった。

今後、未整備農区における水収支の特性を明らかにするとともに、圃場整備後の農区との比較を行う。また、灌漑区域内の河跡湖の周辺土地利用状況を精査し、河跡湖の水収支および負荷収支を明らかにする。さらに、圃場整備前後における農区水収支特性の変化が広域レベルの水文環境に与える影響を明らかにする。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：日本の水資源の現況、p.9、2016年
- 2) 丸山利輔、中村良太、水谷正一、渡辺紹裕、黒田正治、豊田勝、荻野芳彦、中曽根英雄、三野徹：水利環境工学、朝倉書店、p.20、1998年

## 16.3 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

### 16.3.2 大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ

(資源保全チーム)

研究担当者：竹内英雄、横濱充宏、大友秀文、

中山博敬、桑原淳

#### 【要旨】

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設では、実際に運転する農家ごとに曝気時間などの運転方法が異なる。本研究では、効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、肥培灌漑施設の運転状況の現地調査および室内実験を行う。曝気を行う調整槽の形状と容量が異なる5カ所の肥培灌漑施設での液温を調査した結果、いずれの施設においても夏期の調整槽の液温が、ふん尿スラリーの腐熟の目安として示されている30℃前後まで上昇していた。夏期から冬期にかけての調整槽液温は、一つの施設を除き徐々に低下した。また、ふん尿スラリー中の有機物含量について二つの施設を比較した結果、単位液量当たりの曝気量が多い施設の方が冬期の有機物減少率が大きいことが明らかとなった。室内試験装置を製作して20日間の連続運転を行った結果では、通気量に大きな変化は生じず、安定した稼働を確認した。

キーワード：肥培灌漑、好気性発酵、曝気、液温、有機物含量

#### 1. はじめに

北海道東部の大規模酪農地帯では、家畜ふん尿の有効活用と地域環境保全を目的とした国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。事業で整備される施設の一つに、家畜ふん尿に水を加え、空気を送り込む（以下、曝気と表記）とともに攪拌によって混合し、圃場へ散布する肥培灌漑施設がある。肥培灌漑施設では、家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる。曝気時間や腐熟の目安などの運転管理方法は、過去の研究成果に基づき示されているが、実際の運転状況は多様である。その背景には、酪農業は牛乳の冷却、畜舎換気、ふん尿処理など、多くのエネルギーを消費しており、近年の電力価格上昇などにより経営収支が悪化する中、酪農家が経費削減のために好気性発酵に費やすエネルギーを節約していることがある。不適切な曝気処理を行うと、調整液（曝気処理されたふん尿スラリー）の腐熟が進まず臭気や粘性が低下しないため、周辺環境や作物生育への影響が懸念される。そのため、良好な腐熟を維持しながら効率的にふん尿を処理する運転方法の提示およびシステム改善方法の提示が必要である。

本研究では、実際に稼働している肥培灌漑施設での運転状況の調査および室内試験装置による実験を行い、効率的な運転方法を明らかにする。

#### 2. 肥培灌漑施設の形状別運転状況および調整液性状の関係説明

##### 2.1 方法

##### 2.1.1 調査対象施設の概要

図-1に調整槽が単槽の場合を例として、肥培灌漑施設の概要を示す。牛舎で発生したふん尿は流入口へ流れ込み、灌漑用水により希釈される。希釈されたふん尿は調整槽へ流下し、調整槽ではブローポンプで空気を送り込んで曝気を行う。曝気時間は、曝気時の発泡状況などを考慮して調整されるため、施設によって異なる。曝気により腐熟したふん尿スラリーは配水調整槽へ送られ、最も肥効が期待でき周辺への流出が抑えられる早春および牧草刈取後に圃場へ散布される。なお、ブローポンプの起動開始時刻は施設によって異なる。

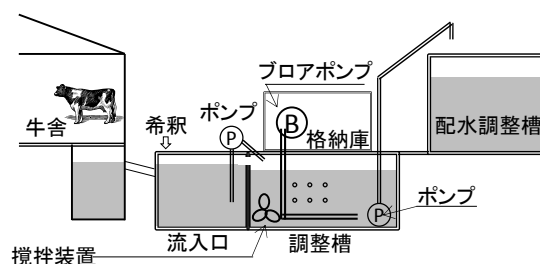


図-1 肥培灌漑施設の概要

表-1 調査対象施設の概要

施設記号	調整槽形状	調整槽容量(m <sup>3</sup> )
A	単槽 八角形	346
B		243
C		422
D	単槽 四角形	221
E		542
F		756
G	多槽	1次 88, 2次 85, 3次 82, 4次 79, ポンプピット 72 (合計 406)

表-1 に調査対象施設の概要を示す。稼働中の肥培灌漑施設は、酪農家の飼養頭数や飼養方式により仕様が異なる。そこで本調査では、調整槽の形状と容量がふん尿スラリーの腐熟に影響を及ぼすことも考えられることから、調整槽の形状と容量を考慮した7施設を選定した。A～Cの3施設は調整槽の形状が、近年施工実績の多い八角形で単槽の施設である。D～Fの3施設は、調整槽の形状が四角形で単槽の施設、Gは調整槽が複数に区切られている多槽の施設である。なお、施設C、Fでは計測機器の不具合等による欠測が生じたため、以下では5施設について報告する。

### 2.1.2 曝気パターン

効率的な曝気方法を提示するためには、曝気時間とふん尿スラリー腐熟との関係を明らかにすることは重要である。そこで、調整槽の曝気時間を制御盤内のタイマー設定値から読み取った。いずれの施設も、ブローポンプの稼働と停止を繰り返す間断運転を行っていた。表-2に各施設の調整槽曝気時間の日合計およびブローポンプの稼働、停止間隔を示す。施設によって設定値が異なり、この違いは施設運転中の発泡状況などにより調整された結果である。

表-2 調査対象施設の概要

施設記号	調整槽曝気時間 日合計(h)	曝気および停止時間
A	2.00	曝気0.25h、停止0.25hを8回繰り返す
B	4.00	曝気1.00h、停止0.75hを4回繰り返す
D	3.25	曝気0.25～0.5h、停止0.25～0.5hを不規則に実施
F	3.00	曝気0.25h、停止0.25hを12回繰り返す
G	3.50	曝気0.5h、停止0.5～4.5hを不規則に実施

### 2.1.3 液温および気温

調査対象地区では、酪農家がスラリー腐熟を判定する指標として調整槽の温度が連続して 30℃に達すること

を目安としている<sup>1)</sup>ことから、各施設の液温等を測定した。図-2に液温および気温の測定位置を示す。流入口および調整槽それぞれにおいて、底面から上方へ1mと2mの位置に温度センサーを設置した。多槽である施設Gでは、流入口、1次～4次調整槽およびポンプピットそれぞれに温度センサーを設置した。図-3に温度センサーの設置状況を示す。ふん尿施設ではセンサーやケーブルの劣化が著しいため、今回は園芸用支柱を結束バンドで継ぎ合わせ、その表面にテフロン被覆された水中センサーを取り付け、定期的にセンサーを交換する方法を採用した。液温の測定と同時に、曝気時に稼働するブローポンプが設置されている格納庫室温と、外気温を測定した。温度測定間隔は5分である。液温の測定開始日は、表-3に示したとおりである。冬期の運転状況を把握するため、施設Aのみ先行して測定を開始した。その他の施設では、2016年8月から9月にかけて測定を開始した。

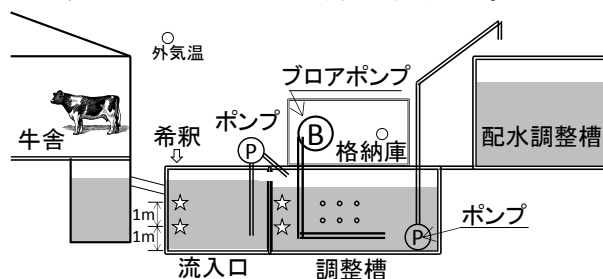


図-2 液温および気温測定位置 (○: 気温、☆: 液温)



図-3 液温センサー設置状況

表-3 調査対象施設の概要

施設記号	液温測定開始日
A	2015/12/16
B	2016/8/3
D	2016/9/8
F	2016/8/3
G	2016/9/7

### 2.1.4 ふん尿スラリー中の有機物含量の分析

施設AおよびFにおいて、秋から冬の流入口および調整槽内ふん尿スラリーを採取し、ふん尿スラリーの腐熟を把握するための一指標として有機物含量を分析した。採取したふん尿スラリーは105℃で24時間乾燥し、乾物重量を測定した。その後、550℃で5時間燃焼し、灰分を測定した。有機物含量は、乾物重量から灰分を引いた値とした。

## 2. 2 結果および考察

### 2.2.1 各施設の液温および気温の推移

図-4~8に、各施設で測定した液温および気温の推移を示す。流入口および調整槽の液温は、下層部または上層部で測定した温度変化に大差がない場合には、上層部の温度を示した。ただし、一部の施設では上層部の温度変化が下層部と比較して大きく異なる場合があり、その場合は下層部の温度を示した。上層部の温度変化が下層部と比較して大きく異なる要因としては、一時的に液面が大きく低下したことが考えられる。

図-4は施設Aにおける温度推移である。流入口および調整槽の液温は冬期に低下し、調整槽は2016年3月下旬から4月上旬にかけて最低の約14℃を記録した。外気温は2月に最低の-20℃近くまで低下しており、液温の低下は1~2ヶ月遅れて生じることが明らかとなった。6月の測定では調整槽温度が欠測しているが、流入口の温度推移と同様に徐々に上昇していると推察される。調整槽温度は9月中旬に最高の28℃程度を示したが30℃には達していなかった。その要因の一つとして、曝気時間が日当たり2時間であり、他の施設より短いことが考えられる。施設Aの当初の曝気時間は4時間であったが、2015年秋に調整槽からの発泡が顕著となったため、曝気時間を4時間から2時間に変更している。現在は調整槽から泡があふれ出すことはないが、内部を観察すると調整槽上端まで発泡している場合もある(図-9)。施設を管理していく上で、著しい発泡が起こらないような運転方法を明らかにすることも重要である。施設Aでの今後の調査では、発泡時の運転状況およびふん尿性状を調査し、突発的な発泡の要因および曝気時間を長くしても発泡を抑制することができる運転方法を明らかにしていきたい。

図-5は施設Bにおける温度推移である。施設Bでは9月中旬から発泡が顕著となったが、曝気時間は変更しなかった。9月9日に調整槽の温度が約3℃低下しており、その後、調整槽の液温が低下傾向を示した。今回の調査結果からは9月9日の事象を明らかにすることができな

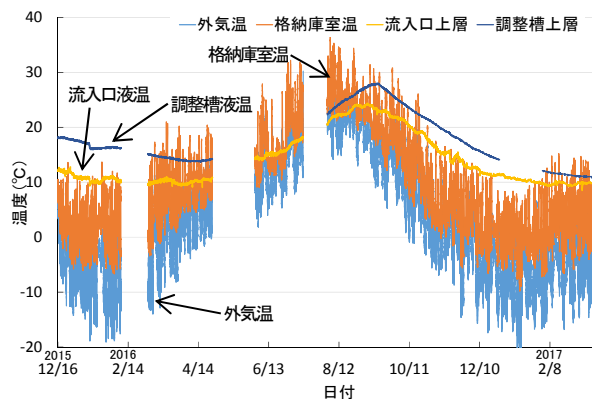


図-4 施設Aにおける温度推移

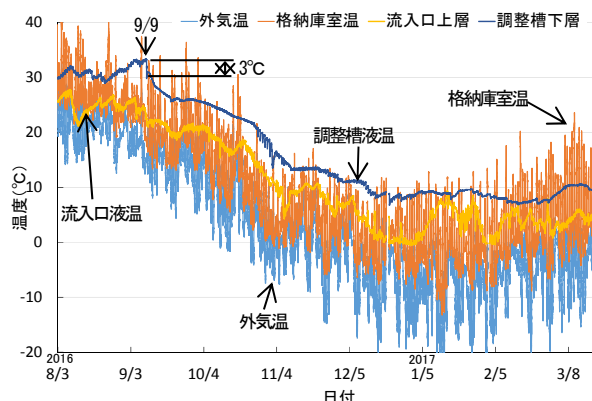


図-5 施設Bにおける温度推移

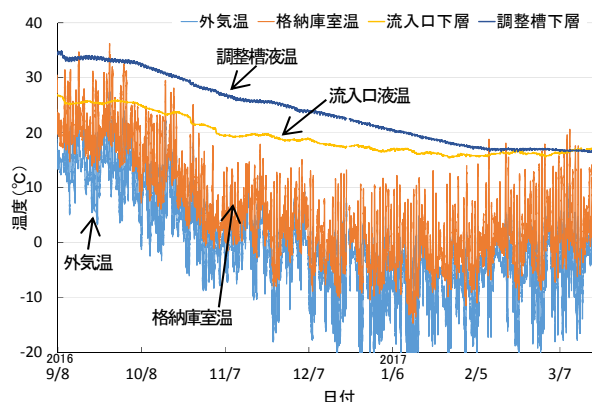


図-6 施設Dにおける温度推移

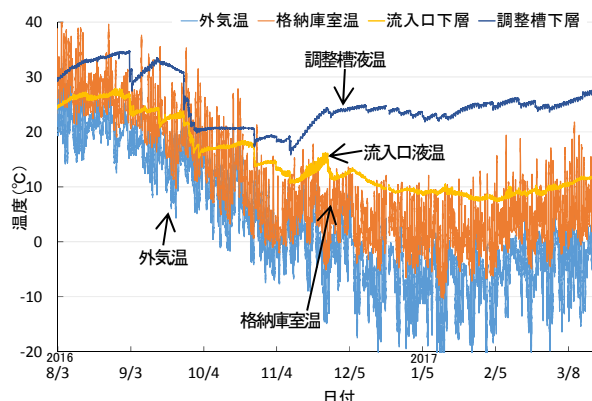


図-7 施設Fにおける温度推移

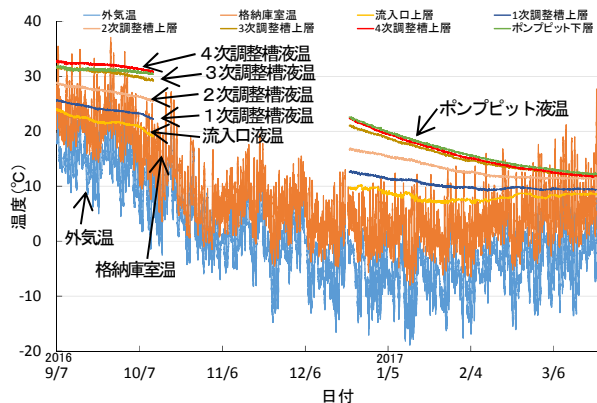


図-8 施設Gにおける温度推移



図-9 施設A調整槽内の発泡状況(2016/11/1撮影)

かったが、調査を開始した8月上旬から9月8日までは、調整槽の液温が概ね30℃を超えており、8月下旬から9月上旬にかけては上昇傾向を示している。施設Bの曝気時間は4時間であり施設Aの2倍である。このことから、曝気時間を長くすることで調整槽の液温を上昇させることが可能であることがわかる。なお、施設Bでも一時的に発泡が顕著となっていることから、施設Aと同様に、発泡を抑制しながら調整槽の液温を30℃以上で維持する運転方法を明らかにする必要がある。

図-6は施設Dにおける温度推移である。10月下旬までは調整槽の液温が30℃以上で推移している。しかしながら、それ以降の液温は低下傾向を示し、3月には16℃程度まで低下している。施設Dは曝気時間が3.25時間であり、施設AとBのほぼ中間の曝気時間であった。

図-7は施設Fにおける温度推移である。この施設では、冬期間においても調整槽の液温が低下せず、11月中旬以降は徐々に上昇している。このように施設によっては冬期でも調整槽の液温が上昇しており、今後、送気量の現地測定などを行い、その要因を解明していきたい。

図-8は施設Gにおける温度推移である。施設Gは調整

槽が複数に分かれており、畜舎から流入口に移送されたふん尿スラリーは、1次～4次の調整槽を経由した後、ポンプピットに貯留され、スラリーポンプで配水調整槽へ移送される。液温は、流入口<1次<2次<3次<4次調整槽の順を維持しながら推移しており、曝気時間が長くなるにつれて、液温が高くなっていることがわかる。ただし、冬期にはその差は小さくなった。今後、単槽の施設の温度推移と比較しながら、多槽施設でのふん尿スラリー腐熟の特徴を整理していきたい。

### 2.2.2 ふん尿スラリー中の有機物含量

表-4に曝気前後のふん尿スラリー中の有機物含量を示す。なお、各施設の単位時間当たりの曝気量は設計値を用い、曝気時間は前述のとおり、制御盤内のタイマーの設定値から読み取った。施設Fでは、冬期の有機物減少率が約53～57%を示した。施設Aでは9月下旬に採取した試料の有機物減少率は約45%であったが、冬期の有機物減少率は約25～35%と低い値を示した。施設Aでは単位液量当たりの曝気量が施設Fより少なく、このことが施設Aでの有機物減少率が小さくなった要因の一つと考えられる。次年度は他施設の分析を行い、液温と有機物減少量の関係を整理していきたい。

表-4 曝気前後のふん尿スラリー中の有機物含量

施設記号	調整槽 単位液量当たり の日曝気量 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ・日)	ふん尿スラリー 採取日	ふん尿スラリー中の 有機物含量(%FM) (カッコ内数値は液温℃)		有機物 減少率 (%)
			流入口	調整槽	
A	1.0 (15分×8回の間欠 曝気)	2016/9/27	6.6(21.9)	3.6(25.7)	45.2
		2016/11/1	5.9(16.9)	4.3(20.6)	27.9
		2016/12/21	7.6(11.2)	5.0(14.5)	34.8
		2017/3/22	7.7(10.0)	5.9(10.9)	24.5
F	1.8 (15分×12回の間欠 曝気)	2016/12/21	7.0(10.3)	3.0(23.9)	56.6
		2017/2/2	5.7(8.0)	2.7(25.3)	52.8
		2017/3/22	7.4(12.3)	3.5(27.7)	53.1

## 3. 室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明

### 3.1 方法

室内でふん尿スラリーの曝気を行うための試験装置を製作し、連続運転時の動作確認を主目的とした試験運転を実施した。図-10に試験装置の概要を示す。コンテナ底部に固定したエアストーンからふん尿スラリー中に空気を供給する仕組みとした。送気量は流量計にデータロガーを接続して記録した。ふん尿スラリーは、施設Fの調整槽から2016年12月下旬に採取したものをを用いた(図-11)。

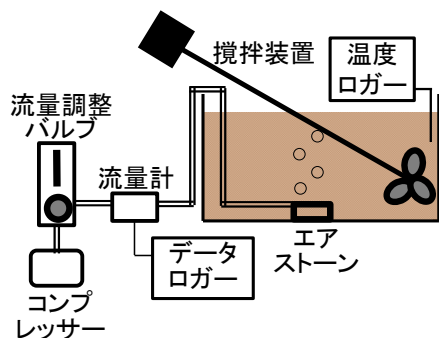


図-10 室内試験装置の概要

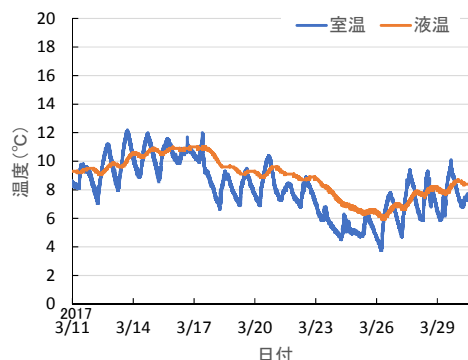


図-13 温度の推移



図-11 室内試験装置での曝気状況

### 3. 2 結果および考察

図-12 に試験期間中の日平均通気量を、図-13 に室温および液温の推移を示す。20 日間の連続運転期間を通して、通気量に大きな変化は生じなかった。エアストーンが目詰まりが懸念されたが、20 日間の運転では問題ないことが確認された。液温については、室温とほぼ同様に推移していた。今回用いたふん尿スラリーは調整槽から採取したものであり、また、連続運転中にはふん尿スラリーの投入を行っていないため、好気性発酵による発熱は小さかったと考えられる。今後、ふん尿スラリーの投入を行いながら、液温変化のデータを蓄積していきたい。

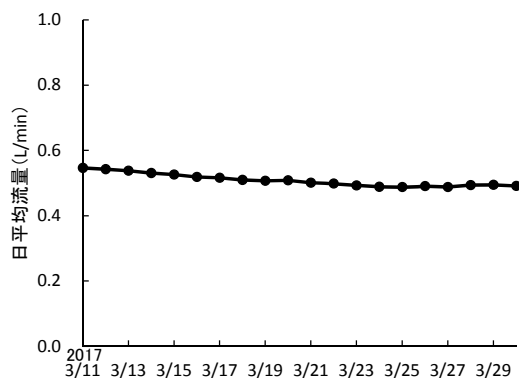


図-12 通気量の推移

### 4. まとめ

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設では、実際に運転する酪農家ごとに曝気時間などの運転方法が異なる。その背景には、酪農家が経費削減のために好気性発酵に費やすエネルギーを節約していることがある。本研究では、効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、肥培灌漑施設の運転状況の現地調査および室内実験を行った。

肥培灌漑施設の形状別運転状況および調整液性状の関係解明では、曝気を行う調整槽の形状と容量が異なる 5 カ所の肥培灌漑施設での液温を調査した。その結果、いずれの施設においても夏期の調整槽の液温が、ふん尿スラリーの腐熟の目安として示されている 30℃前後まで上昇していた。夏期から冬期にかけての調整槽液温は、施設 F を除き徐々に低下した。施設 F では冬期も調整槽温度が上昇している時期があり、今後、送気量の現地測定などを行い、その要因を解明していきたい。

また、ふん尿スラリー中の有機物含量について施設 A と F を比較した結果、施設 F では施設 A より冬期の有機物減少率が大きいことがわかった。施設 F では単位液量当たりの曝気量が施設 A より多く、このことが施設 F での有機物減少率が大きくなった要因の一つと考えられる。

室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明では、室内でふん尿スラリーの曝気を行うための試験装置を製作し、連続運転時の動作確認を主目的とした試験運転を実施した。その結果、20 日間の連続運転期間を通して、通気量に大きな変化は生じず、概ね安定した稼働を確認した。

### 参考文献

- 1) 村上功, 西協康善: 環境保全型かんがい排水事業における肥培施設整備前後の効果検証—第九報—, 第 59 回 (平成 27 年度) 北海道開発技術研究発表会、2016



## 16.3 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

### 16.3.3 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤グループ（水利基盤チーム）

技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：中村和正、鶴木啓二、村上功、吉澤淳、  
太田日出春

#### 【要旨】

本研究では、水質解析モデルである SWAT（Soil and Water Assessment Tool）が大規模酪農地帯の水質環境評価技術として利用されるようにパラメータの整備を行うとともに、精度の検証を行う。最終的には、SWAT を用いた水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的としている。本年度は、SWAT の精度検証に用いる実データ取得のために水質調査を実施するとともに、得られた水質データと流域の土地利用や営農状況との関係を検討した。その結果、酪農専業地帯の中でも、飼養牛頭数密度（集落面積当たり）は集落ごとに異なり、平水時の河川水に含まれる全窒素の主要成分である  $\text{NO}_3\text{-N}$  の濃度はこの密度を反映していることがわかった。流域の土地利用、営農状況と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度との関係の検討では、飼養牛頭数密度（流域面積当たり）と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の間に比較的高い相関がみられたが、ばらつきもあり、草地率など複数の要因を加味した評価の必要性が示唆された。

キーワード：水質、酪農、土地利用、SWAT

#### 1. はじめに

環境保全型かんがい排水事業で整備されている肥培灌漑施設の効果や水質対策工（河畔緩衝林帯、水質浄化池）の効果の一部は明らかにされているが、それらが地域の水質環境（窒素、リン、SS）に与える影響は定量評価されていない。水質環境評価技術として有力なモデルに米国農務省で開発された SWAT（Soil and Water Assessment Tool）があるが、モデルに用意されているパラメータは米国のものであり、日本での適用事例は少ない。SWAT の酪農地帯での適用事例として、施肥方法が水質環境に与える影響を評価した北海道立総合研究機構の研究<sup>1)</sup>、SS・懸濁態窒素・リンの予測値と実測値を適合させた北海道大学の研究<sup>2)</sup>はあるが、水質改善手法の評価ツールとして利用された事例は国内には無い。SWAT で酪農地帯における水質対策手法を評価できるようにするには、日本国内用のパラメータを整備し、精度を検証する必要がある。

本研究では、大規模酪農地帯の水質環境評価技術として利用されるようにパラメータの整備を行うとともに、精度の検証を行い、最終的には、SWAT を用いた水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的としている。本年度は、SWAT の精度検証に用いる実データ取得のために水質調査を実施するとと

もに、得られた水質データと流域の土地利用や営農状況との関係を検討した。

#### 2. 調査方法

##### 2.1 対象流域概要

調査対象は、北海道東部に位置する西別川流域（流域面積424km<sup>2</sup>）およびヤウシュベツ川流域（流域面積153km<sup>2</sup>）である（図-1）。各流域の主な土地利用は草地で、このうちの大部分は採草地であり、一部は放牧地として利用されている。また、西別川上流部には山林があり、各流域の河畔には林地および湿地が残されている。両流域とも、流域内草地の大部分が国営環境保全型かんがい排水事業地区（一部は完了地区）に含まれている。

##### 2.2 水質調査方法

調査流域全体の水質状況が把握できるように、西別川流域では本川と主要支川11河川から計75地点の採水点を、ヤウシュベツ川流域では本川と主要支川2河川から計24地点の採水点を設定して採水調査を行った（図-2、図-3）。採水は、2016年6月、7月、10月、11月の平水時に実施した。採取した河川水は、100mLのポリ瓶にて密封保冷状態で室内に搬入し、水質分析に供した。分析した水質項目は、全窒素（T-N）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、全リン（T-

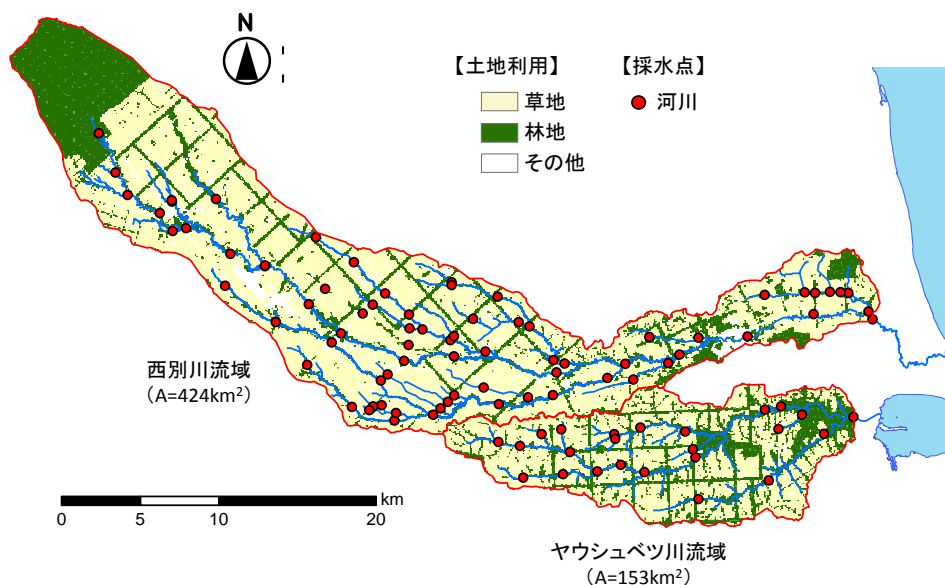


図-1 調査流域の土地利用と採水地点

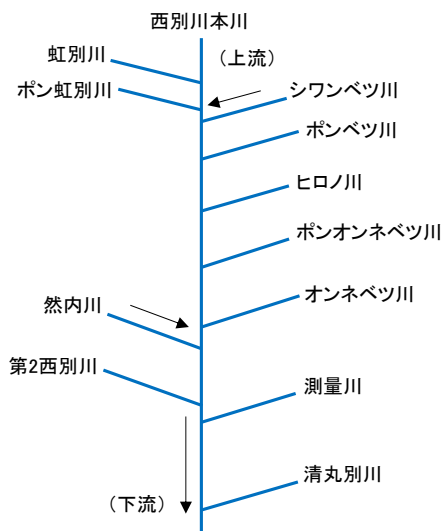


図-2 調査対象河川概要図 (西別川)

表-1 本川および主要支川の諸元 (西別川)

	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流域面積率 (%)	草地率 (%)	飼養牛頭数 (頭)
西別川本川	424	100	65	31,331
西別川(最上流)	7	2	0	0
虹別川	13	3	42	332
ポン虹別川	8	2	81	567
シワンベツ川	22	5	35	357
ポンベツ川	45	11	56	3,117
ヒロノ川	14	3	82	1,255
ポンオンベツ川	46	11	45	4,841
オンベツ川	36	8	73	4,148
然内川	78	18	78	5,624
第2西別川	9	2	74	449
測量川	10	2	63	582
清丸別川	28	7	71	2,117

\*データは本川および支川の最下流観測点の値である  
 \*\*流域面積率 (%) = 支川の流域面積 / 本川の流域面積 × 100

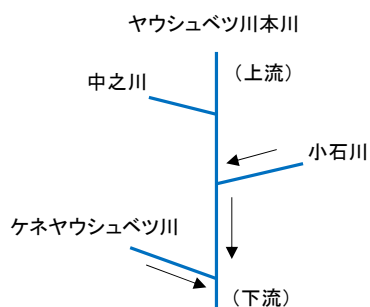


図-3 調査対象河川概要図 (ヤウシュベツ川)

表-2 本川および主要支川の諸元 (ヤウシュベツ川)

	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流域面積率 (%)	草地率 (%)	飼養牛頭数 (頭)
ヤウシュベツ川本川	153	100	62	14,225
ヤウシュベツ川(最上流)	7	5	77	1,182
中之川	10	7	69	1,072
小石川	24	16	69	2,485
ケネヤウシュベツ川	34	22	63	2,053

報 (数値標高モデル、10m メッシュ) を、土地利用データは国土数値情報 (土地利用細分メッシュ、平成 21 年度版) を利用した。調査流域の土地利用データは、土地利用細分メッシュで設定されている 11 種の土地利用区分のうち、「その他の農用地」を「草地」、「森林」を「林地」、その他の 9 種類の土地利用を「その他」と置き換えて作成した。飼養牛頭数は、2010 年農林業センサスの農業集

P) である。分析方法は JIS に準拠した。

### 2. 3 土地利用情報の収集

調査流域の土地利用解析には、GIS ソフトウェア (ArcGIS Ver10.4) を使用した。地形データは基盤地図情

落カードのデータを利用した。集落単位の飼養牛頭数の流域単位への変換は、面積按分により行った。2歳未満の乳用牛1頭は、糞尿量を考慮し、成牛0.42頭に相当するとして成牛頭数に換算した<sup>3)</sup>(表-1、表-2)。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 河川水質と土地利用、営農状況との関係の概要

西別川本川および主要支川の最下流観測点のT-N濃度(計4回の水質データの平均値)と西別川本川最上流観測点から各観測点までの距離の関係を示す(図-4)。最上流観測点は、流域の土地利用は山林が多いため、最も濃度が低く、下流になるにつれて、草地の割合が大きくなるため、濃度も高くなっていった。特に、本川中流部までは、本川よりも高濃度の支川が流入することで、本川の濃度も上昇していた。

次に各支川流域の負荷発生量と水質状況との関係を把握するため、飼養牛頭数密度(集落面積当たり)と、西別川本川最上流観測点と本川に流入する主要支川の最下流観測点のNO<sub>3</sub>-N濃度を示す(図-5、図-6)。なお、NO<sub>3</sub>-Nは、平水時の河川水に含まれる窒素の主要成分である。酪農専業地帯の中でも、飼養牛頭数密度(集落面積当たり)にはばらつきがあり(最小値0.09頭/ha、最大値2.45頭/ha)、西別川中流域の北側を中心に飼養牛頭数密度(集落面積当たり)の高い集落が存在していた。また、上記で示した飼養牛頭数密度(集落面積当たり)が高い集落を流れる支川で濃度が高くなる傾向があった。一方、ヤウシュベツ川流域では、西別川流域ほど飼養牛頭数密度(集落面積当たり)に大きな差が無く(最小値0.45頭/ha、最大値0.89頭/ha)、NO<sub>3</sub>-N濃度にも明確な差は無かった。よって、以後の結果については、西別川流域の河川水質と土地利用の関係を示す。

#### 3.2 西別川流域の河川水質と土地利用、営農状況との関係

西別川流域の土地利用は主に草地であるため、各採水地点流域の草地率とNO<sub>3</sub>-N濃度の関係を見た。草地率が低い流域ではNO<sub>3</sub>-N濃度が低く、草地率が高い流域ではNO<sub>3</sub>-N濃度が高くなる傾向がみられたが、相関性は低かった(図-7(a))。相関性の低い理由として、面積が小さい流域は、畜舎等の点源や肥料散布量の多い草地など、特定の負荷源の影響が河川水質に反映されやすいことが推測できる。そのため、小面積と大面積の流域は対等な評価ができないと考えられる。このことから、このような評価を行う場合、小流域のデータは、流域面積に閾値を設定して除外する必要があるとあり、本研究では、閾値を5km<sup>2</sup>とした。5km<sup>2</sup>より小さい流域を除いた場合、閾値を設定しない場

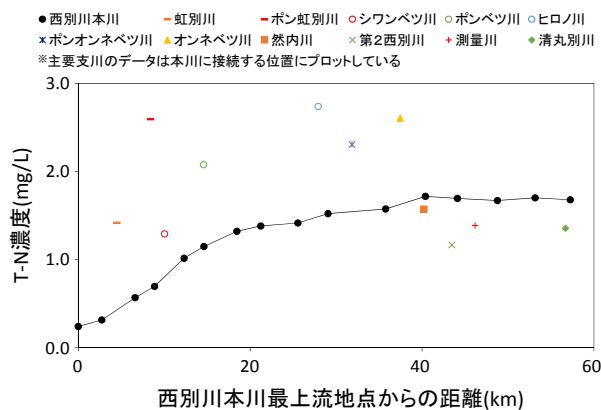


図-4 西別川本川および主要支川最下流観測点のT-N濃度

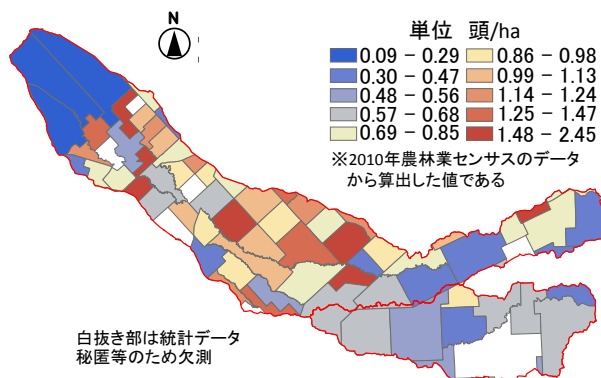


図-5 飼養牛頭数密度(集落面積当たり)

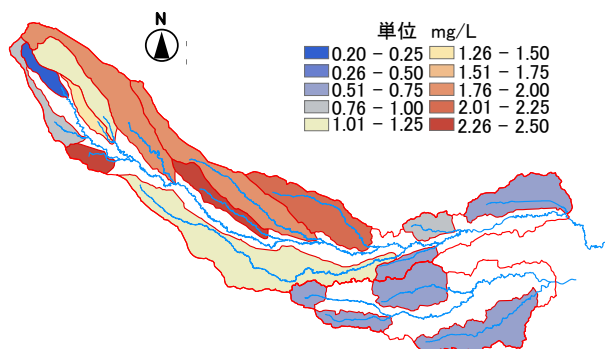


図-6 本川最上流および主要支川のNO<sub>3</sub>-N濃度

合に比べてばらつきの程度が小さく、相関性が高くなった(図-7(b))。しかし、閾値を設定した場合でも、同程度の草地率に対するばらつきが大きかった。これは、飼養牛頭数の情報が含まれていないこと、すなわち、同程度の草地率でも流域によって、飼養牛頭数密度が大きく異なることが主要因であると考えられる。

そこで、飼養牛頭数密度(草地面積当たり)とNO<sub>3</sub>-N濃度の関係を見ると、草地率よりも相関性が高いものの、同程度の飼養牛頭数密度(草地面積当たり)でもばらつきがみられた(図-7(c))。次に、飼養牛頭数密度(流域面積当たり)とNO<sub>3</sub>-N濃度の関係を見ると、飼養牛頭数密度(草地面積当たり)よりも高い相関が得られた(図-7(d))。

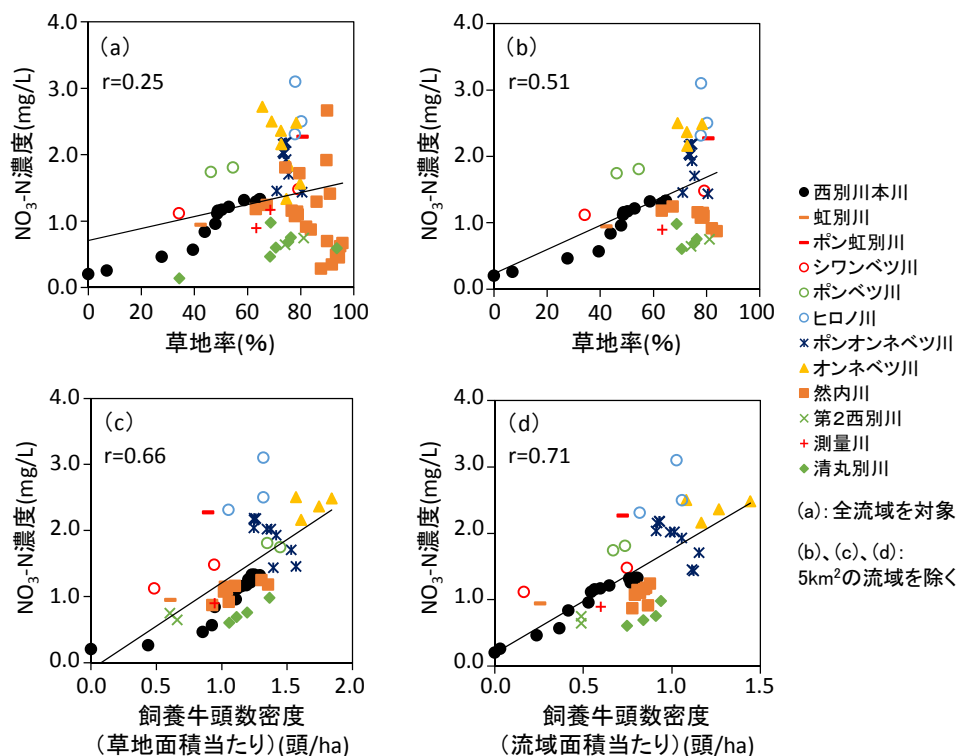


図-7 NO<sub>3</sub>-N 濃度と流域の土地利用 (西別川流域)

このことは、本研究のような草地率にばらつきのあるデータの場合、草地面積当たりよりも流域面積当たりの飼養牛頭数密度の方が、水質環境を評価するのに適した指標であることを示唆するものである。しかし、いずれの場合でも同程度の飼養牛頭数密度 (流域面積当たり) に対する NO<sub>3</sub>-N 濃度にばらつきがみられた。ばらつきの要因として、草地率の情報が含まれていないことが考えられる。また、土地利用と NO<sub>3</sub>-N 濃度の関係において、草地から河川へ流出する負荷を抑制する河畔林や湿地の有無、負荷源となる酪農施設の位置や肥料投入量の違いなどもばらつきがみられた要因と考えられる。そのため、水質環境の評価には、草地率や飼養牛頭数密度も含め、複数の要因を考慮した検討が必要と考えられる。

その他の水質項目として、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、T-P は大部分の流域で平水時には低濃度であり、土地利用との関係は判然としなかった。SWAT では、洪水時の水質も予測可能であることから、今後は洪水時のデータ収集し、これらの項目についても評価を行う予定である。

#### 4. まとめ

本論文では大規模酪農地帯に位置する西別川流域およびヤウシュベツ川流域を調査対象とする平水時河川の水

質解析の結果を述べた。

酪農専業地帯の中でも、飼養牛頭数密度 (集落面積当たり) は集落ごとに異なり、平水時河川において特に NO<sub>3</sub>-N の濃度にそれが反映される結果が得られた。この結果を踏まえ、流域の土地利用や営農状況との関係を見たところ、飼養牛頭数密度 (流域面積当たり) と比較的高い相関が得られた。しかし、ばらつきも大きく、草地率など複数の要因を加味した評価の必要性が示唆された。

今後は、洪水時も含めた水質観測を継続するとともに、河畔林や湿地の有無、酪農施設の位置や肥料投入量の違いなどの情報を収集して、SWAT にて水質解析を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 酒井治、三枝俊哉：「草地酪農地帯の養分収支に基づく河川水質の予測：2.SWAT による河川水質予測値の適合性改善」、日本土壤肥料学会講演要旨集、54、p.254、2007
- 2) Chunying WANG：「SWAT モデルによる北海道東部の標津川流域における水、土砂、養分流出予測」、北海道大学博士論文、2014
- 3) 社団法人農林水産技術情報協会：「環境保全と新しい畜産」、p.20、1997