

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 日置綾人

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 28～29 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 28～29 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

大区画圃場の効率的な整備土工技術の開発と体系化では、次のような成果を得た。表土の下の基盤に泥炭土が堆積する 5 筆の大区画圃場において、施工機械による土壌の練り返し等の影響を明らかにするため、施工に伴う土壌物理性の変化について調査した。全ての調査圃場で、施工開始時の表土の含水比は液性限界未満であり、この含水比での表土はぎと表土戻しの作業では、表土の土壌物理性が大きく悪化することはなかった。表土戻し後の粘性土の客土により表土の飽和透水係数が低下した圃場では、施工後 1 年間の営農作業を経ても土壌の排水性は改善しておらず、施工時に土壌物理性の悪化を抑制することが重要であるといえる。また、基盤の泥炭土の均平作業の内、切土から押土を経て敷き均しまでの作業を湿地ブルドーザで行った圃場では、敷き均し後には盛土区域の基盤の泥炭土表層のコーン指数が 0.2MPa 程度か、超湿地ブルドーザでも走行が難しい 0.2MPa 以下にまで低下していた。このことから、泥炭土基盤で、敷き均しまでの作業を湿地ブルドーザにより行う場合、その後の盛土区域の整地作業は、超湿地ブルドーザかさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザにより行うことが望ましいと考えられる。

次年度は、盛土厚さが過年度より大きい施工現場において、大区画化の施工前後の土壌物理性に及ぼす影響を調査する。また、室内試験において異なる土壌水分条件下でブルドーザの模型を走行させ、模型の走行が土壌物理性に及ぼす影響を調査する。

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

地下水位制御システム高度利用技術の開発では、大区画圃場における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ることを目標としており、次のような成果を得た。泥炭を基盤とする転作作物栽培圃場で地下灌漑時の地下水位の変動を調査した結果、農地再編整備前の各区画の土壤物理性の違いの影響を受けて地下水位とその変動にムラが生じた事例と、地下灌漑時に地下水位が変動しなかった事例があった。それらの要因として、現場の透水性が小さく、土壤構造や亀裂の発達が十分ではないことが考えられた。また、水稲移植圃場で登熟期に地下灌漑を実施し、水稲への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保が両立できることを事例的に確認した。さらに地下灌漑の利用に伴う環境負荷の評価のため、大豆畑と水田で温室効果ガス排出を測定したところ、地下灌漑による土壤水分の増加がそれらの排出を促進させている可能性が考えられた。

次年度は、転作畑における給排水ムラの実態の把握と水稲の登熟期における水分供給と地耐力を両立した地下水位制御技術の検証を引き続き行う。また、地下灌漑実施が温室効果ガス排出等の環境負荷へ与える影響を調査する。

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）

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。このような整備が行われた地区で、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。これらの調査圃場では、圃場の地下水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、各圃場の浸透量はいずれも小さかった。そのため、圃場への取水量の差は、主に除草剤散布に伴う強制落水や深水灌漑などの栽培管理の違いにより生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移によっては、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。このように、2カ年の調査では、3種の栽培方式での用水量に大きな違いはなかった。

次年度は、大区画圃場における水稲の移植栽培および直播栽培での水管理実態を分析し、用水量の解明を行う。

(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）

積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究の目的は、①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、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発である。

①では、複合劣化を対象とした劣化機構の解明と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進めた。前者では、造成後50年以上が経過した頭首工において、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、供用後17～36年が経過した鋼矢板排水路を対象とした調査を行い、その構造性能の低下機構を考察した。後者では、開水路において、超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察するとともに、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。

②では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価として、補修後の開水路を対象とした含水率の調査を行い、電気抵抗式水分測定法の有効性を確認した。

次年度は、農業水利施設における複合劣化機構の解明と非破壊・微破壊調査手法の開発、補修・補強工法の耐久性の評価を進める。

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

基幹的な農業水利施設における大規模地震災害時および大雨災害時に備えた災害対応計画の策定技術の開発では、次のような成果を得た。まず、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とリスク解析において、フォールトツリー解析（FTA）が有効なツールであることを明らかにした。このFTAの重要な作業であるFT図作成を進めるとき、原因事象がある程度特定された段階で、作業の目的を対策の検討に切り替えるという方法が、大規模地震に対する具体的な対策の検討に有効であることを確認した。また、現状の土地改良区が有する資源量を用いて、最大限の減災効果を発揮できる災害対応計画として、大規模地震発生後

即座に複数名の施設管理者が予め割り当てられた各ゲート設備に急行して対応にあたるという災害対応体制を提案した。さらに、この対応体制の構築の可否を、取水ゲートを閉鎖するか否かの判断基準とする意思決定方法を提案して、震度6強以上の地震時での有効性を示した。このほか、平成28年8月の台風第10号による大雨災害時において実施された農業用ダムの管理の実態を検証して、ダム管理において防災行動計画が有効であることを示した。

次年度は、長大な農業水利施設における大規模災害時に備えた災害対応計画策定マニュアルを作成する。

(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）

水田圃場の大区画化や地下水水位制御システムの整備の進展に伴って、農区や灌漑区域における流出機構が変化すると予想される。そのため、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、平成28～29年に、圃場整備実施中の地域で水収支および水質の調査を実施した。その結果、広域（約1,100ha）において、用水路と排水路で調査した流入水量と流出水量の差は、流入水量に対して約1割であることから、この区域外への浸透による流出が小さいことが示唆された。整備済み農区および未整備農区の水収支を比較した結果、掛け流しで田越し灌漑を行っている未整備農区に比べて、圃場ごとに独立した水管理を行える整備済み農区では、農区への取水量が少なかった。灌漑期間における幹線排水路の水質濃度（SS、T-N、T-P）は、農地排水が主体となる小排水路の値よりも低く、農業用水の残水等、農地排水以外の水量により希釈されていると示唆された。

次年度は、広域、農区、河跡湖について、それぞれの水収支および水文環境の調査を引き続き行い、開水路整備地区における広域の水循環および水文環境を評価する。

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

家畜ふん尿の好気性発酵を行う肥培灌漑施設での効率的なふん尿調整技術の開発においては、運転状況の現地調査と室内バッチ試験を行った。現地調査では、曝気時間やふん尿スラリーの水理的滞留日数の違いから、調査した5カ所の施設間で運転方法が大きく異なることがわかった。好気性発酵を行う調整槽中のふん尿スラリーのpHは、曝気量の大きい施設でも、腐熟の簡易判定目安であるpH7.8～8.5の下限程度にまでしか上昇していないことから、一般的に曝気量が不足していることが示唆された。また、室内試験では、固形物濃度が4%と7%であるふん尿スラリーを容器に投入し、液温を20℃と30℃に維持して曝気を行った結果、液温を高く維持することで有機物分解量が大きくなることを確認した。

次年度は、連続式の調整方法について室内試験を行い、効率的なふん尿調整条件を明らかにする。また、効率的なふん尿調整条件を現地施設の運転に反映し、検証データの取得を行う。

3) 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

北海道東部の大規模酪農地帯では、国営環境保全型かんがい排水事業が実施され、事業実施状況が流域の水質環境に与える影響を定量化することが求められている。そのため、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) による水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案する。平成28～29年度に、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した。得られた水質データと空間情報を分析した結果、平水時の河川水に含まれる全窒素の主要成分であるNO₃-Nは、流域面積あたりの飼養牛頭数密度との間に正の相関関係が得られた。河川のNO₃-N濃度は、浄化作用を受けている濃度のため、代わりに河畔草地率などから推定した発生源の濃度を用いると、さらに相関性が向上する傾向が得られた。また、近似直線から外れる小流域は事業の実施状況との関係性が示唆された。また、SWATを適用する初期段階として、平成29年度に流出解析を実施した。SWATによる流出解析の結果、低水時に概ね実測値を再現した結果が得られた。しかし、出水時に過大推定する傾向みられたため、土壌の物理性などのモデルパラメータを再検討する必要がある。

次年度は、水質調査を継続することでモデル検証データを蓄積するとともに、水質浄化池の効果を評価する。さらに、SWATの流出解析の精度向上を目指すとともに、水質解析に着手する。

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 years 2016-2017 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 work processes for consolidating small fields into large-block fields in areas where the foundational ground is peat soil, leveling of the foundation is done after the surface soil is removed. The influence of cut and fill works for foundation leveling on the physical properties of soil was investigated. The investigation revealed that the bearing capacity of foundational peat soil moved by a swamp bulldozer decreased to 0.2 MPa or lower. With these bearing capacities, it is difficult to conduct leveling works using a swamp bulldozer. The cause for the decreased bearing capacity of soil was thought to be the remolding that occurred during the peat soil moving works.

In two areas of Hokkaido, planar unevenness in the moisture distribution of the fields was investigated by using two large-block fields where upland crops were cultivated. To clarify the factors that cause unevenness in the moisture distribution of a field, sub irrigation was performed when the field in each of two areas was dry. The major factors for generating unevenness in moisture distribution were estimated to be the soil structure and the degree of crack development. A case study using a large-block rice paddy field revealed that it is possible to maintain the bearing capacity of soil necessary for harvesting works even when sub irrigation was performed during the ripening period.

By using large-block paddy fields with a groundwater level control system, a two-year survey was done on irrigation requirements for three types of rice cultivation: direct seeding culture on a well-drained paddy field, direct seeding in a submerged paddy field, and transplanting culture. It was found that the factor that contributed to the difference among the irrigation requirements of these three types of cultivation was not the difference in the rate of percolation but the difference 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

Concrete specimens from headworks more than 50 year's old were tested and analyzed. It was clarified that the concrete on the surface had frost damage and wear deterioration accompanied by calcium leaching. The relationship between the years in service and degree of corrosion of steel sheet pilings, which are frequently used for drainage channels in the Sorachi Area in Hokkaido, was clarified.

By using an irrigation canal in Hokkaido, which is one of the largest irrigation canals in Japan, it was

demonstrated that the Fault Tree Analysis (FTA) is an effective tool for identifying events that hinder response actions taken by the facility operator at the time of a large-scale disaster. It was also verified that the FTA is useful in considering measures against large-scale disasters.

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

Regarding paddy field zones in Hokkaido, it is expected that the farmland consolidation of paddy fields into large plots and the preparation of groundwater level control systems will change the water environment of the farm blocks and areas larger than the blocks. Aiming at the development of irrigation-and-drainage technologies harmonized with the hydrological environment of surrounding areas, the water environment in districts where farmland consolidation is advancing was investigated. As a result, it was suggested that the differences between the inflow and outflow through the waterway and between the inflow and outflow due to the seepage between areas are small in the areas subject to the investigation of approx. 1,100 ha. Moreover, it was suggested that the drainage from the farmland is diluted with water other than the farmland drainage, such as remaining water for agricultural use, and flows through the main drainage canal in the irrigation period.

The animal waste slurry aeration facilities operated by dairy farms were investigated to clarify the operation conditions and quality of treated liquid. It was found that the blower operation hours differed greatly from farm to farm and that there were many facilities that were thought to have insufficient aeration.

By optimizing the parameters of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), a water quality analysis model, and using the discharge data of the Nishibetsu River in the eastern part of Hokkaido, a water quality analysis model that produces results that fit well with the measured discharge data was constructed. An onsite survey was done to obtain a dataset of water quality (N, P) and discharge, which was to be used in the accuracy assessment of SWAT.

Key words: large-scale fields, 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：横川仁伸、大友秀文、中山博敬、新津由紀、
桑原淳、清水真理子

【要旨】

表土の下の基盤に泥炭土が堆積する5筆の大区画圃場において、施工機械による土壌の練り返し等の影響を明らかにするため、施工に伴う土壌物理性の変化について調査した。全ての調査圃場で、施工開始時の表土の含水比は液性限界未満であり、この含水比での表土はぎと表土戻しの作業では、表土の土壌物理性が大きく悪化することはなかった。表土戻し後の粘性土の客土により表土の飽和透水係数が低下した圃場では、施工後1年間の営農作業を経ても土壌の排水性は改善しておらず、施工時に土壌物理性の悪化を抑制することが重要であるといえる。また、基盤の泥炭土の均平作業の内、切土から押土を経て敷き均しまでの作業を湿地ブルドーザで行った圃場では、敷き均し後には盛土区域の基盤の泥炭土表層のコーン指数が0.2MPa程度か、超湿地ブルドーザでも走行が難しい0.2MPa以下にまで低下していた。このことから、泥炭土基盤で、敷き均しまでの作業を湿地ブルドーザにより行う場合、その後の盛土区域の整地作業は、超湿地ブルドーザかさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザにより行うことが望ましいと考えられる。

キーワード：大区画整備圃場、泥炭土、粘性土、土壌性状、排水性

1. はじめに

北海道の水田地帯では、農家戸数の減少に伴い、一戸当たりの経営面積が拡大している¹⁾。農作業の効率化、省力化のため、大型の農業機械の利点を活かせるような農業基盤の整備が必要となっており、圃場を大区画に整備する事業が進められている。整備前の各圃場の基盤標高は異なっていることが多いため、各圃場を合わせて1区画にするには、図-1のように、表土をはぎ、異なる標高の基盤を切土、盛土により均平にし、表土を戻すという一連の作業を行う必要がある。

ところで、北海道の水田で基盤に泥炭土が占める割合はおおよそ19%程度であり、排水不良の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およそ10%程度である²⁾。こうした土壌を基盤とする施工現場では、基盤面が過湿になり施工工程に制約が生じたり、施工機械による攪拌、練り返しによって土壌の物理性が悪化したりする恐れがある。このため、天候の急変によって表土や基盤が降雨にさらされることのないよう、施工区域を分割して1区画の表土はぎから表土戻しまでの作業をその日のうちに終える対策(図-2)や、接地圧の小さい超湿地ブルドーザを使用して土壌の練り返しを抑制する対策が行われている。

畑作では土壌の良好な排水性が求められており、畑作利用も考慮された水田圃場の大区画化整備において、土壌の排水性を良好に保持しながら施工する技術は、今後さらに重要になってくるものと考えられる。資源保全チームでは、土壌物理性悪化抑制対策の効果を定量的に評価するための研究を行っている。ここでは、こうした対策が行われている圃場での、①施工に伴う表土の土壌物理性の変化、②盛土に用いる泥炭土の搬入方法の違い(湿地ブルドーザでの押土による場合とキャリアダンプでの運搬による場合)による基盤の泥炭土の土壌物理性の変化の違い、について報告する。

2. 方法

2.1 調査地の概要

調査は、表-1に示した5筆の大区画水田圃場で行った。5圃場ともに表土は約30cm厚さの鈹質土である。A～Cの3圃場では表土下には泥炭土が堆積しており、DおよびE圃場では表土下には粘性土が堆積している。施工は、6月～7月の夏期に行われた。A圃場では、基盤の泥炭土を8cm程度切土し、押土した後に、8cm程度盛土した。B圃場は、4cm程度切土し、11cm程度盛土した。D圃場は、6～50cm程度切土し、15～55cm程度盛土した。どの圃場も一連の

作業は、湿地ブルドーザにより行った。一方、C圃場では、盛土に用いる泥炭土の運搬にキャリアダンプを使用した。この泥炭土は、圃場に隣接する排水路を掘削拡幅した時の残土であり、運搬の1ヶ月程前から排水路沿いに仮置きしていたものである。この残土を盛土区域に運搬した後、そ

の日のうちに盛土した。なお、C圃場の切土で発生した泥炭土は、調査地点とは別の区域に盛土した。また、E圃場では、切土で発生した粘性土は別の圃場の盛土材に使用した。このため、E圃場には盛土区域は存在しない。

2.2 調査時期および調査内容

土壌調査は、施工前、施工中（表土はぎ後および切盛土後）、施工後（客土前および客土後）、施工1年後の作物収穫後に行った。ただし、施工1年後に調査を行ったのは、AおよびD圃場である。土壌調査の地点数は、各圃場で切土区域3箇所、盛土区域3箇所の計6箇所である。なお、客土はA～C圃場の3圃場で施工し、施工後（客土後）の調査では、5cm厚さで施工された客土を含めて土壌試料を採取した。土壌試料は、表-2に示す分析項目に供試した。また、施工機械の走行性を確認するため、土壌試料採取と同一地点において、コーンペネトロメーターにより深さ1mまで10cm間隔でコーン指数を測定した。土壌調査を行った4時期の内、施工中を除く3時期に土壌断面調査を行った。地点は、切土区域および盛土区域の各1箇所である。土壌断面調査とあわせて、山中式硬度計により土層ごとに土壌硬度を測定した。

2.3 統計処理

土壌試料では、各分析項目の平均値について、調査時期別の統計処理を行った。統計処理にはTukey法を用い、有意水準を5%とした。

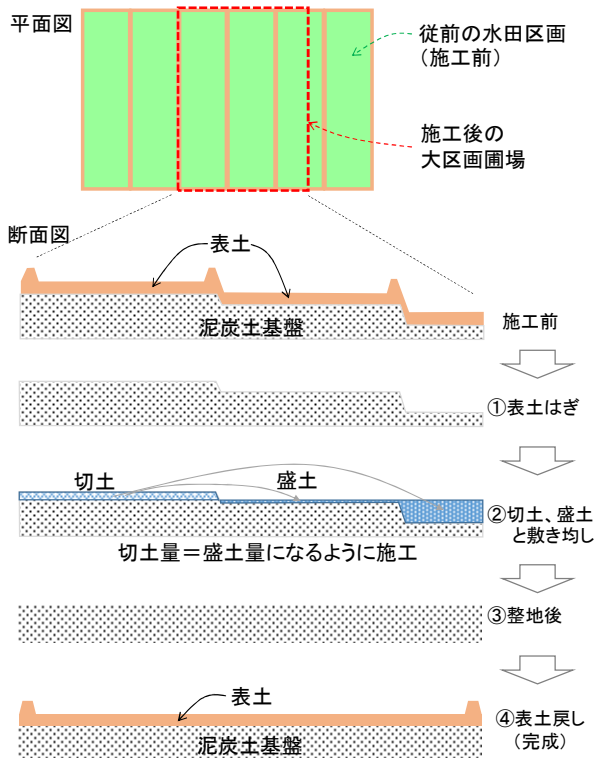


図-1 大区画化の圃場整備のイメージ

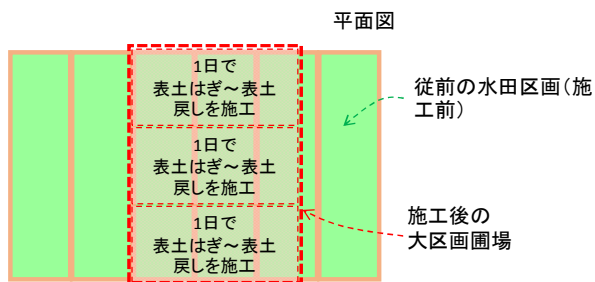


図-2 分割施工のイメージ

表-2 土壌分析項目

分析項目	分析手法
含水比	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	砂柱法および遠心法
液性限界・塑性限界	土の液性限界・塑性限界試験方法

表-1 調査圃場の概要

圃場名	土壌分類		施工年月	1年後調査	盛土厚さ	盛土材の運搬方法
	表土	基盤				
A	シルト質埴土	泥炭土	2016年6月	2017年10月	8cm	湿地ブルドーザによる押土
B	軽埴土	泥炭土	2017年6月	—	11cm	湿地ブルドーザによる押土
C	軽埴土	泥炭土	2017年7月	—	5cm	キャリアダンプによる運搬
D	重埴土	重埴土	2016年7月	2017年10月	15～50cm	湿地ブルドーザによる押土
E	軽埴土	軽埴土	2017年7月	—	—	—

3. 結果と考察

3.1 土壌断面調査

各圃場の施工前後の土壌断面を示す(写真-1~5)。表土の土壌硬度は、A圃場では、施工前14mm、施工後12mm、施工1年後9mmであり、施工によって締め固められてはい

ないと考えられる。一方、B圃場では、施工前18mm、施工後27mmであり、C圃場では、施工前15mm、施工後21mmであった。両圃場ともに、施工後には土壌硬度20mm以上となっており、耕盤層と判断される硬度³⁾まで表土が締め固められていた。

下層土に粘性土が堆積するD圃場では、表土の土壌硬度は施工前21mm、施工後23mm、施工1年後15mmであり、営農作業によって表土は膨軟化していた。E圃場では、施工前17mm、施工後15mmであり、施工による表土の締め固め

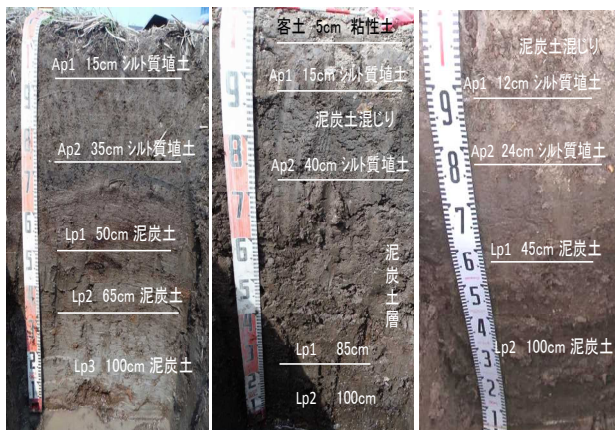


写真-1 A圃場の土壌断面

左: 施工前 中: 施工後(客土後) 右: 施工1年後

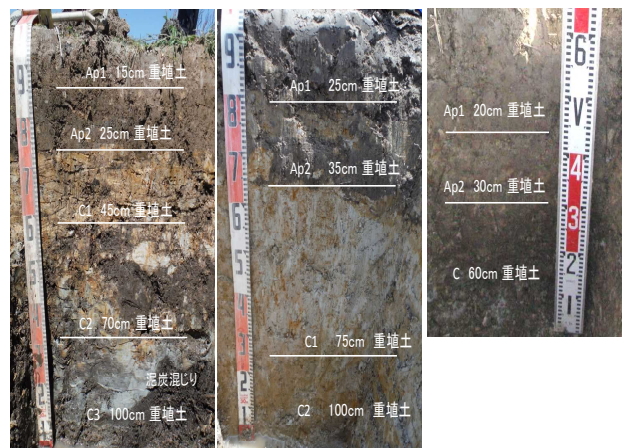


写真-4 D圃場の土壌断面

左: 施工前 中: 施工後 右: 施工1年後

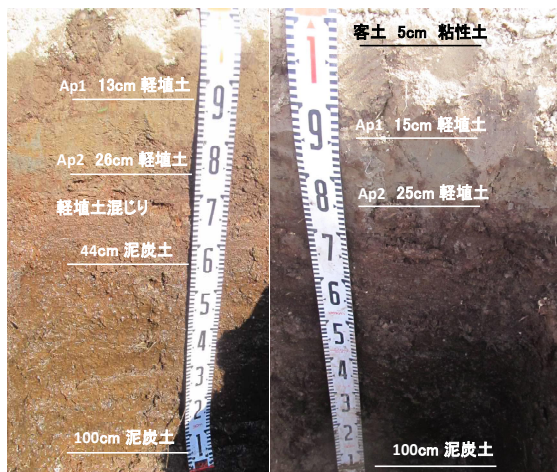


写真-2 B圃場の土壌断面

左: 施工前 右: 施工後(客土後)

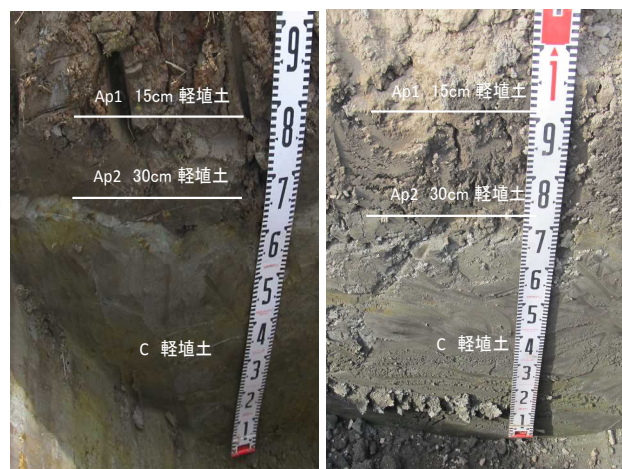


写真-5 E圃場の土壌断面

左: 施工前 右: 施工後

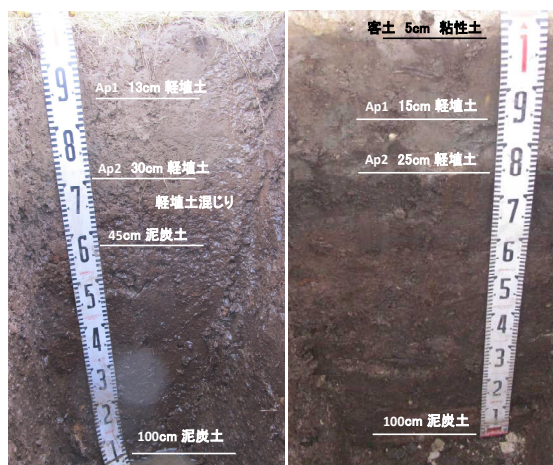


写真-3 C圃場の土壌断面

左: 施工前 右: 施工後(客土後)

表-3 各圃場の施工開始時の土壌含水比

圃場名	土層	含水比	塑性限界	液性限界
A圃場	0-30cm	63%	37%	75%
B圃場	0-30cm	40%	30%	57%
C圃場	0-30cm	36%	28%	47%
D圃場	0-30cm	35%	24%	52%
E圃場	0-30cm	41%	23%	55%

はなかった。

3. 2 施工時の土壌含水比

表-3に各圃場の施工開始時における表土(0-30cm)の含水比を示す。2016年および2017年の両年とも6月から7月にかけて、調査圃場周辺では降雨が続いたが、施工は

降雨の合間の土壌が極力乾燥した状態の時を見計らって行われた。土壌の物理性を悪化させないための目安として、施工開始時の土壌水分を液性限界未満とすることが挙げられている³⁾。調査圃場の施工開始時の表土の含水比は液性限界未満であった。

表-4 各圃場の調査時期別の表土の土壌物理性(0-30cm)※1

圃場名	層位	調査時期	容積重 (g cm ⁻³)	固相率 (%)	粗孔隙量 (%)	飽和透水係数 (m s ⁻¹)
A	表土 (0-15cm)	施工前	0.98 b c	37 b c	16 a	5.8×10 ⁻⁵ a
		施工後(客土前)	0.89 c	33 c	5.4 c	1.8×10 ⁻⁵ a
		施工後(客土後)	1.15 a	44 a	11 b	3.7×10 ⁻⁶ b
		施工1年後	1.08 b	42 b	4.5 c	4.2×10 ⁻⁶ b
	表土 (15-30cm)	施工前	1.01 a	39 a	6.9 a	4.2×10 ⁻⁵ a
		施工後(客土前)	0.87 a b	34 a b	4.9 a b	6.0×10 ⁻⁶ a
		施工後(客土後)	0.90 a b	36 a b	5.5 a b	6.0×10 ⁻⁵ a
		施工1年後	0.81 b	33 b	4.3 b	1.0×10 ⁻⁶ b
B	表土 (0-15cm)	施工前	1.13 a	44 a b	4.8 a	3.1×10 ⁻⁶ a
		施工後(客土前)	0.97 b	40 b	3.8 a b	1.4×10 ⁻⁵ a
		施工後(客土後)	1.16 a	48 a	2.3 b	2.5×10 ⁻⁶ b
	表土 (15-30cm)	施工前	0.63 n. s.	26 n. s.	9.4 a	5.9×10 ⁻⁶ n. s.
		施工後(客土前)	0.78 n. s.	32 n. s.	4.0 b	3.9×10 ⁻⁷ n. s.
		施工後(客土後)	0.85 n. s.	36 n. s.	3.3 b	3.7×10 ⁻⁶ n. s.
C	表土 (0-15cm)	施工前	1.20 a	47 n. s.	7.3 n. s.	1.0×10 ⁻⁴ a
		施工後(客土前)	1.13 a b	47 n. s.	3.0 n. s.	1.2×10 ⁻⁶ b
		施工後(客土後)	1.09 b	44 n. s.	5.3 n. s.	7.2×10 ⁻⁶ b
	表土 (15-30cm)	施工前	1.19 a	45 a	5.4 a b	1.5×10 ⁻⁵ n. s.
		施工後(客土前)	0.75 b	25 b	3.0 b	8.9×10 ⁻⁵ n. s.
		施工後(客土後)	0.71 b	17 b	3.8 a	1.6×10 ⁻⁵ n. s.
D	表土 (0-15cm)	施工前	1.39 n. s.	55 n. s.	6.5 a	6.3×10 ⁻⁵ n. s.
		施工後	1.46 n. s.	56 n. s.	3.3 b	2.0×10 ⁻⁵ n. s.
		施工1年後	1.39 n. s.	52 n. s.	4.4 a b	7.4×10 ⁻⁶ n. s.
	表土 (15-30cm)	施工前	1.46 b	55 n. s.	2.8 n. s.	1.1×10 ⁻⁶ n. s.
		施工後	1.55 a	58 n. s.	3.2 n. s.	2.7×10 ⁻⁵ n. s.
		施工1年後	1.48 b	56 n. s.	2.9 n. s.	6.7×10 ⁻⁸ n. s.
E	表土 (0-15cm)	施工前	1.08 b	41 a	6.1 n. s.	6.8×10 ⁻⁵ n. s.
		施工後	1.43 a	54 b	4.5 n. s.	4.4×10 ⁻⁶ n. s.
	表土 (15-30cm)	施工前	1.54 a	58 a	1.9 b	1.3×10 ⁻⁶ b
		施工後	1.36 b	52 b	3.1 a	6.7×10 ⁻⁵ a
水田圃場の土壌診断基準値(営農上)			—	30~40	—	1.0×10 ⁻⁶ 以上 1.0×10 ⁻⁴ 未満

※1 各圃場の層位ごとに、同項目の値の右に同じアルファベットがある場合は、互いに有意差がないことを示す。

n.s.は有意差なしを示す。

3. 3 施工前後の表土の土壌物理性

表-4 に各圃場の表土の調査時期別の土壌物理性の値を示す。表の値は、切土区域3箇所、盛土区域3箇所の計6箇所で行った分析の平均値である。表の各分析項目では、各圃場の層位ごとに統計処理の結果も併記した。

水田土壌の診断基準値(0~20cm)は、固相率が30~40%、排水性の指標である飽和透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 以上で $1.0 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ 未満とされている⁴⁾。飽和透水係数は、土壌の固相率が増大し粗孔隙量が減少する場合や、施工機械による攪拌、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場合に低下する。施工前調査では、各圃場とも深さ0~15cmおよび15~30cmの表土の飽和透水係数は基準値の範囲に近い値であり、土壌の排水性が良好と考えられる範囲であった。ただし、B圃場およびC圃場の深さ0~15cmの表土は、固相率が40%を超えており、施工前から締め固まった状態にあった。

施工前と比較して施工後に粗孔隙量の減少が見られたのは、A圃場の表土(0~15cm)とB圃場の表土(15~30cm)およびD圃場の表土(0~15cm)であった。E圃場の表土(0~15cm)では、固相率の増大が有意に認められた。しかし、これら圃場の表土の飽和透水係数に有意な変化は認められなかった。C圃場の表土(0~15cm)では、飽和透水係数の低下が有意に認められたが、低下後の値は土壌診断基準値⁴⁾の基準値内に留まっていた。これらのことから、調査圃場では施工により表土の土壌物理性が大きく悪化することはなかったといえる。これは、調査圃場の土壌が極力乾燥した状態を見計らって施工を開始したことと施工中に降雨がなく、表土や基盤が過湿状態になることを回避できたことのためと考えられる。調査圃場では、施工開始時の表土の含水比が液性限界未満であり、この含水比であれば、表土の土壌物理性の悪化はある程度抑制できると推察された。

次に、施工に伴い土壌物理性が悪化した場合に営農作業の中で改善されるかについて考察する。泥炭土が堆積するA~C圃場では、表土戻し後に5cmの厚さで粘性土の客土を行ったが、これにより地表面から深さ15cmまでの表土(0~15cm)の飽和透水係数は、3筆全ての圃場で 10^{-6} m s^{-1} のオーダーとなっていた。施工1年後のA圃場の表土(0~15cm)は、施工後(客土後)と比較して固相率が低下し膨軟化していたが、飽和透水係数の増大までは認められなかった。D圃場では、施工1年後の土壌物理性は、施工後と同程度であった。このように、この間の営農作業で土壌の排水性が改善されてはならず、施工時に土壌物理性の悪化を極力抑えることが重要であるといえる。

3. 4 施工中の基盤(泥炭土)の土壌物理性

表土はぎ後および切盛土後での泥炭土の土壌物理性を調査した結果、切盛土直後の盛土区域における盛土部分において、次のような施工機械による攪拌、練り返しの影響が認められた。図-3にB圃場およびC圃場の施工前と切盛土後の泥炭土のコーン指数を示す。図のコーン指数は、施工前では調査地点6箇所の平均値であり、切盛土後では切土区域、盛土区域の各3箇所の平均値である。ただし、A圃場はデータが欠損しているため図には示しておらず、C圃場の切土区域も1箇所がデータ欠損のため2箇所の平均値とした。

2.1で述べたように、B圃場の盛土区域では11cmの盛土を行い、C圃場の盛土区域では5cmの盛土を行った。B圃場の泥炭土表層11cmのコーン指数は、切土区域で0.31~0.40MPa、盛土区域で0.16~0.23MPaであった。盛土区域のコーン指数は、施工前の未攪乱の泥炭土や切土区域のコーン指数と比較して低かった。一方で、C圃場の泥炭土表層5cmのコーン指数は、切土区域、盛土区域ともに0.24MPaであった。盛土区域のコーン指数は、施工前の泥炭土と比較すると低下しているが、B圃場のように0.20MPa以下までは低下していなかった。

これは、盛土に用いる泥炭土の運搬方法の違いが影響し

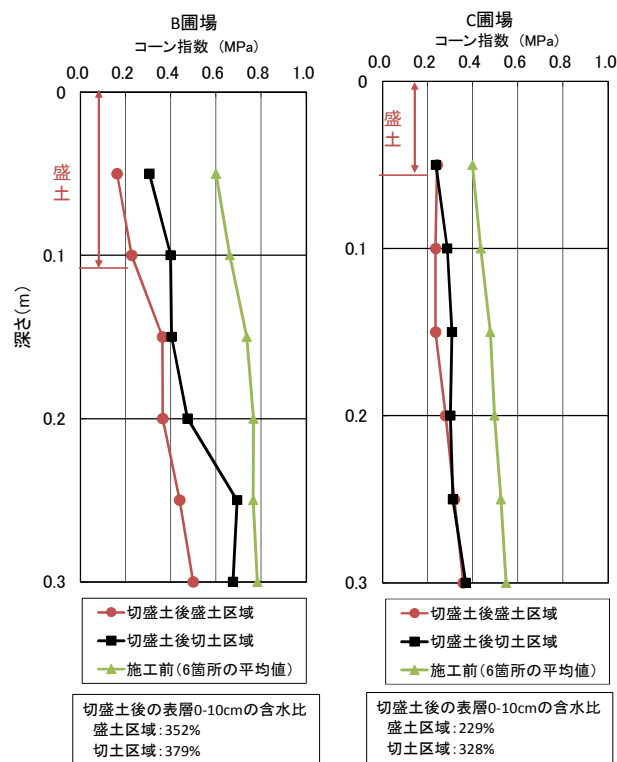


図-3 B圃場およびC圃場の施工前と切盛土直後の泥炭土のコーン指数

ていたと考えられる。B 圃場では、切土で発生した新鮮な泥炭土を湿地ブルドーザによって押し、超湿地ブルドーザで整地した。C 圃場では、1 ヶ月程度仮置きした泥炭土をキャリアダンプで運搬し、超湿地ブルドーザで整地した。1 ヶ月程度仮置きした後であったため、C 圃場の盛土区域における切盛土直後の表層の泥炭土の含水比は 229% であり、B 圃場の 352% と比較すると低かった (図-3)。C 圃場の盛土区域でコーン指数の低下が抑制されたのは、泥炭土の水分量が小さかったことと、湿地ブルドーザによる押しと比較して、キャリアダンプの運搬は土壌の練り返しが少なかったことのためと考えられた。

建設機械の走行に必要なコーン指数は、超湿地ブルドーザで 0.2MPa 以上、湿地ブルドーザで 0.3MPa 以上とされている⁹⁾。B 圃場の切盛土直後の盛土区域のコーン指数は、盛土厚さである 10cm 程度では 0.2MPa 程度かそれ以下であった。このため、切盛土施工時に湿地ブルドーザによる押し作業を行った場合、最終的な切盛土後の整地作業には、超湿地ブルドーザかさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましいと考えられる。

4. まとめ

基盤に泥炭土および粘性土が堆積する 5 筆の大区画水田圃場において、施工段階ごとの土壌物理性を調査した。結果は次のようにまとめられる。

- 1) 5 筆の調査圃場では、施工開始時の表土の含水比が液性限界未満であり、この含水比での施工では、施工前後で表土 (0-30cm) の土壌物理性が大きく悪化することはなかった。
- 2) 客土の施工により、表土の飽和透水係数が低下した圃場では、施工後 1 年間の営農作業を経ても土壌の

排水性は改善しておらず、施工時に土壌物理性の悪化を抑制することが重要であるといえる。

- 3) 湿地ブルドーザにより押し作業が行われた B 圃場の盛土区域では、表層の泥炭土のコーン指数が 0.2MPa 程度か、それ以下にまで低下していた。このため、最終的な切盛土後の整地作業には、超湿地ブルドーザかさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましいと考えられる。
- 4) 1 ヶ月程度仮置きした泥炭土をキャリアダンプで運搬した C 圃場の切盛土直後の盛土区域の盛土部分では、表層の泥炭土のコーン指数は 0.2MPa 以上が確保されていた。これは、泥炭土の水分量が小さかったことと湿地ブルドーザによる押しと比較して、キャリアダンプの運搬は土壌の攪拌、練り返しが少なかったことのためと考えられる。

参考文献

- 1) 北海道農政部：北海道農業・農村の概要、2017.
- 2) 北海道農政部、道総研農業研究本部、ホクレン農業協同組合連合会、社団法人北海道米麦改良協会：北海道の米づくり、pp. 52-61、2011.
- 3) 北川巖、塚本康貴、竹内晴信：基盤整備圃場の適切な生産性を確保する土壌物理性管理指標、農業農村工学会誌、vol. 83 (5)、pp. 363-366、2015.
- 4) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部編：北海道施肥ガイド2015、北海道農政部、pp. 18-36、2015.
- 5) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、p. 391、2009.

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：横川仁伸、山本弘樹、新津由紀、清水真理子

【要旨】

泥炭を基盤とする転作作物栽培圃場で、乾燥時に地下灌漑を実施し、地下水位の変動を調査した。北海道美唄市の美唄地区大豆圃場では、地下灌漑により地下水位は上昇したが、農地再編整備前の各区画の土壌物理性の違いの影響を受けて地下水位とその変動にムラが生じた。瀬棚郡今金町の今金南地区小麦圃場では、地下灌漑時に地下水位が変動しなかった。その要因としては、現場の透水性が小さく、土壌構造や亀裂の発達が十分ではないことが考えられた。以上の成果は、給排水ムラ低減対策としての無材心破、有材心破などの利用の仕方や、土壌条件に応じた地下水位制御の利用の方法を考えるうえで役立つ。また、水稻移植圃場で、登熟期に地下灌漑を実施し調査した結果、登熟期の水稲への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保が両立できることを事例的に確認した。地下灌漑の利用に伴う環境負荷の評価のため、営農期間を通して大豆畑と水田で温室効果ガス排出を測定した。大豆畑の一酸化二窒素と水田のメタンの大きな排出は高い土壌水分で観測され、地下灌漑による土壌水分の増大がそれらの排出を促進させている可能性が考えられた。

キーワード：大区画水田、地下灌漑、地下水位、土壌水分、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¹⁾²⁾。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。

地下水位制御システムの導入は、水稻直播栽培の実現、転作作物の湿害回避や過乾燥軽減、水管理の省力化等に有効である。北海道の転作作物栽培で地下水位制御システムを利用する手法として、土壌の乾燥時に地下灌漑を実施することが提案されている。その際、土壌に乾湿のムラが生じると作物の生育にもムラが生じる。その解消のためには、圃場全体に速やかにムラなく均一に給排水できる、地下水位や土壌水分の制御技術が必要である。本研究の1つ目の達成目標は、転作作物栽培における給排水ムラの実態把握と要因解明とした。

水田では、一般に、登熟期に間断灌漑を実施する。その目的には土壌の過度な乾燥を防いで根の活性を高く維持することが挙げられるが、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、登熟期後半まで地表から根に酸素を供給しつつ、地下から生育に必要な水を供給することが可能となる。同時に、地

表面付近の土壌のみ乾燥させることで、収穫期に備えてコンバイン走行に必要な地耐力も確保することができる。そこで、2つ目の達成目標は、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とした。

地下灌漑に伴う土壌水分・養分の変動は、温室効果ガス排出や窒素流出等の変動にも影響し、環境に負荷を与えることが想定される。そのため、地下灌漑の利用に伴う環境負荷について体系化が必要である。そこで、本研究の3つ目の達成目標は、地下灌漑の利用に伴う環境負荷の評価とした。

2. 転作作物栽培における給排水ムラの実態把握と要因解明

2.1 調査地と方法

2.1.1 調査地

北海道美唄市の美唄地区の転作圃場（B圃場）では、2015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（図-1）。B圃場は長辺約170m、短辺約70mで集中管理孔を備えており、暗渠管（埋設深度0.7～1.0m）の設置間隔は10mを基本としている。整備前には、取水桝から50m地点付近に作業道路が存在した。作業道路の西側は2013年まで6年以上転作畑として利用し、東側は2013年まで水田として利用していた。また、

地表から32~60 cmより下からは泥炭層が存在した。調査開始時における作土層36 cmの土性は、砂23~34%、シルト35~40%、粘土31~37%であった。2017年5月30日に大豆を播種、10月16日に収穫を行った。7月10日から11日まで水位調整型水閘を地下水位-30 cmの設定とし地下灌漑を実施した後、7月13日に水閘を解放した。

瀬棚郡今金町の今金南地区の転作圃場(I圃場)では、2014年度に区画整理工事が実施された(図-2)。I圃場は長辺約250 m、短辺約65 mで地下水位制御システム(FOEAS)を備えており、暗渠管(埋設深度1.0 m)の設置間隔は10 mを基本としている。地表から35~75 cmより下には泥炭層が存在した。調査開始時における圃場中央の作土層28 cmの土性は、砂44~59%、シルト27~37%、粘土19~25%で、その下の基盤高調整の盛土層の土性は、砂70%、シルト18%、粘土12%であった。2016年9月24日に小麦を播種、2017年8月3日に収穫を行った。5月25日から29日までと6月30日から7月5日までの2回、-40 cmの地下水位設定としてFOEASにより地下灌漑取水を制御した。各灌漑期間の最終日には水閘を解放した。

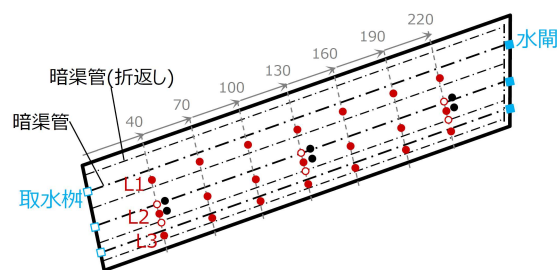


図-2 I圃場の整備前の状況写真と観測地点位置図
(地下水位観測地点および土壌採取地点は赤丸で示す。白抜の赤丸は暗渠脇0.5m離れの地下水位観測地点である。ベーシックインテークプレート測定地点は、黒丸で示す。)

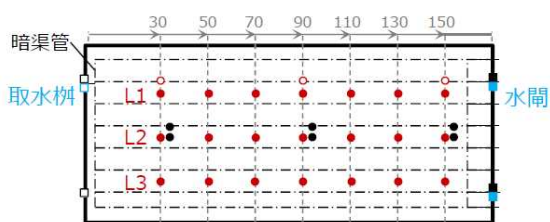
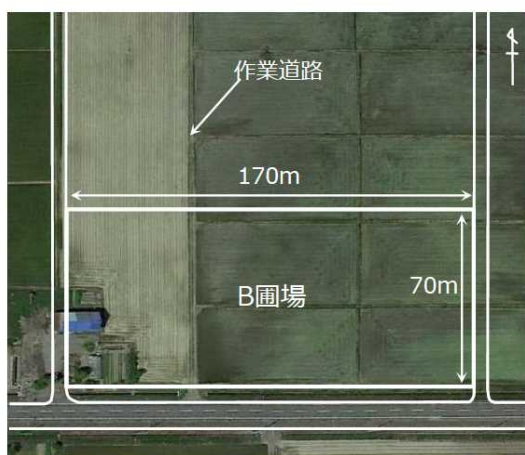


図-1 B圃場の整備前の状況写真と観測地点位置図
(地下水位観測地点および土壌採取地点は赤丸で示す。白抜の赤丸は暗渠脇0.5m離れの地下水位観測地点である。ベーシックインテークプレート測定地点は、黒丸で示す。)

2.1.2 方法

降水量は、B圃場およびI圃場の近傍で転倒マス式雨

量計により計測した。

B圃場の地下灌漑取水量は、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、同一ブロック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。I圃場の地下灌漑取水量は、電磁流量計により1箇所計測し、他2箇所の取水量も同じであると仮定した。両圃場の暗渠排水量は、スリット堰により2~10分間隔で測定した。

両圃場の地下水位は、圃場内暗渠間21地点と暗渠脇3~6地点で測定した。渠間のライン1~3(それぞれL1、L2、L3)において、取水柵から30、50、70、90、110、130、150 mの21地点とした(図-1、2)。地下水位は、絶対圧式水位計を有孔塩ビ管に格納し埋設し、30分間隔で測定した。

それぞれの圃場内の21地点(図-1、2)において、収穫後に泥炭層より上の土壌を採取し、透水係数、乾燥密度、三相分布を測定した。また、10月にシリンダーインテークプレート法によりベーシックインテークプレート測

定した。円筒は、暗渠疎水材直上3地点においてその上の土壌を約3cm残した面（暗渠直上）と、渠間3地点においてAp1層（B圃場約20cm、I圃場約15cm）を約3cm残した面（渠間Ap2）に設置した。

2. 2 転作畑における地下水位の変動

2.2.1 気象と水管理

B圃場における2017年5月から9月の積算降水量は789 mmで、5月～9月までの月降水量は、それぞれ66、147、145、129、247 mmであった（図-3）。B圃場では、6月25日の36 mmの降水後、7月16日まで10 mmを超える降水はなく、7月10日10時から11日16時まで地下灌漑によって取水をした。この30時間での地下灌漑取水量は36 mm、暗渠排水量は12 mmであった。また、B圃場における5月9日までの積算暗渠排水量は674 mmであった。

I圃場の積算降水量は588 mmで、5月～9月までの月降水量は、それぞれ47、129、121、83、209 mmであった（図-4）。5月は降水量が小さく、5月25日から4日間地下灌漑を実施した。この時の地下灌漑取水量は24 mmで、灌漑期間中に合計15 mmの降水があった。FOEASの水位

管理者と水位制御器の設定水位調整に時間を要したことも影響し、暗渠排水量は32 mmと大きかった。また、6月30日から7月5日までの5日間に2回目の地下灌漑を実施した。この時、地下灌漑取水量は18 mmで、灌漑期間中に合計15 mmの降水があったが、暗渠排水量は1 mmに過ぎなかった。I圃場における5月中旬から9月末までの暗渠排水量は431 mmであった。

2.2.2 営農期間における地下水位の変動

B圃場の日平均地下水位は21地点の平均で $-0.84 \sim -0.47$ mの範囲で推移し、降水と地下灌漑の実施に応じて上昇した（図-3）。21地点の地下水位のばらつきは、最大値と最小値の差が $0.25 \sim 0.62$ mの範囲、標準偏差が $0.07 \sim 0.18$ mの範囲で推移した。

I圃場の日平均地下水位は21地点の平均で $-0.58 \sim -0.17$ mの範囲で推移し、B圃場より高かった（図-4）。降水のたびに地下水位は上昇したが、地下灌漑実施時に顕著な地下水位の変化は見られなかった。21地点の地下水位のばらつきは、最大値と最小値の差が $0.35 \sim 0.69$ mの範囲、標準偏差が $0.11 \sim 0.18$ mの範囲で推移し、B圃場と同程度であった。

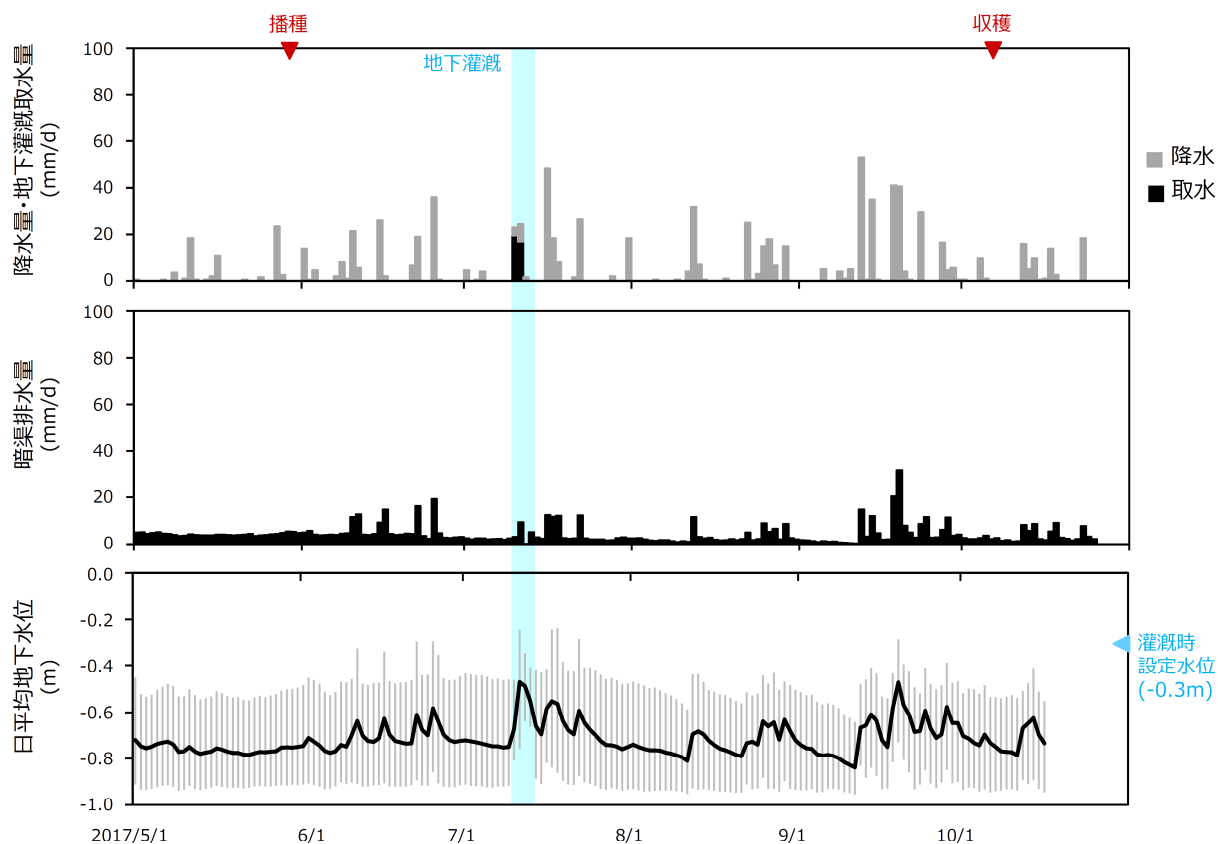


図-3 B圃場における降水量と地下灌漑取水量、暗渠排水量、日平均地下水位の季節変化（地下水位のエラーバーは、最大最小を示す。）

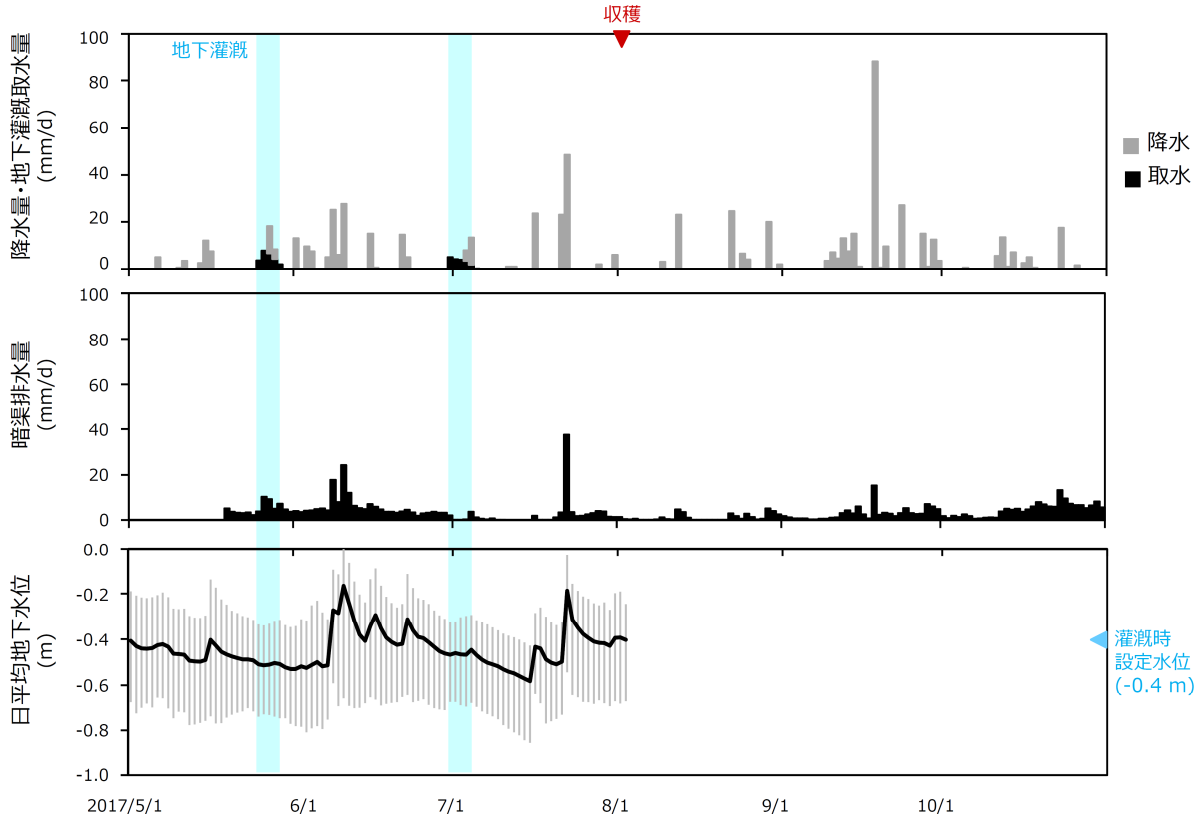


図-4 I 圃場における降水量と地下灌漑取水量、暗渠排水量、日平均地下水位の季節変化 (地下水位のエラーバーは、最大最小を示す。)

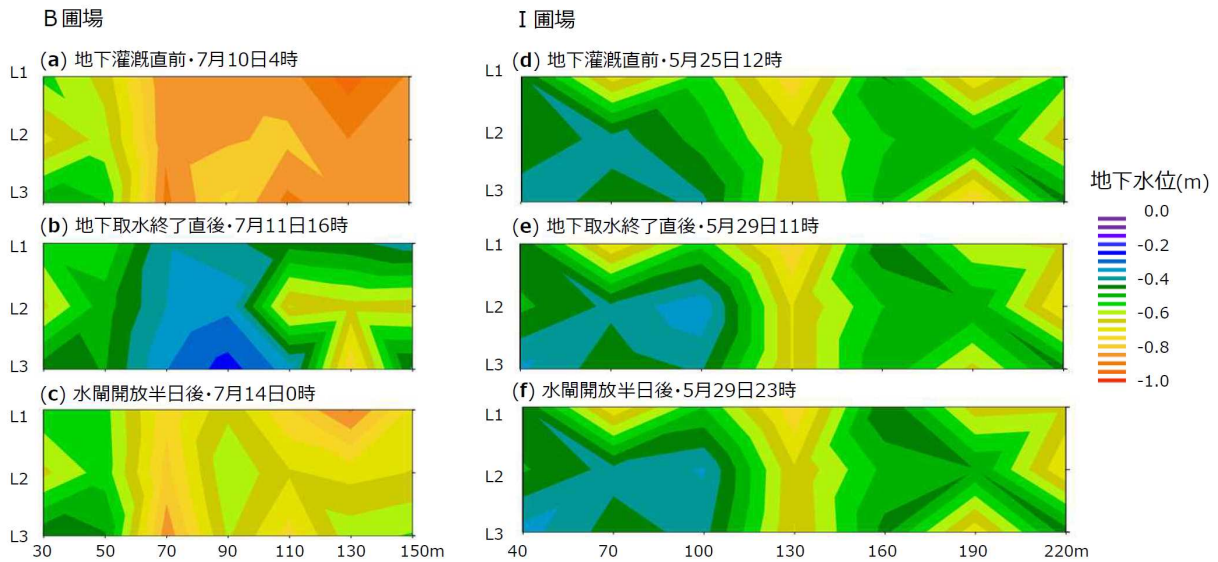


図-5 B 圃場および I 圃場における地下灌漑実施時の地下水位分布 (地下水位は渠間で測定した値を用いた。暗渠周辺の地下水位は含まれない。)

2.2.3 地下灌漑実施時における地下水位変動

圃場内の渠間の地下水位分布を、地下灌漑実施直前、取水終了直後、水閘開放してから半日後について図-5に

示す。

B 圃場では、地下灌漑直前の水位は -0.75 ± 0.14 m で、取水枡から30~50 m地点で高い傾向にあった(図-5a)。

取水終了直後には、 -0.45 ± 0.14 mと30cm程度水位が上昇し、特に70~90 m地点で $-0.23 \sim -0.34$ mと水位が高かった(図-5b)。水閘解放して半日後には -0.63 ± 0.12 mまで低下した(図-5c)。B圃場の地下水位は、30~50 m地点で高く維持され、地下灌漑実施時の変動も小さかった。50 m付近には整備前に作業道路が存在し(図-1)、この作業道路を挟んで両側の圃場の整備前からの土壌物理性の違いが地下水位分布に影響したと考えられた。

I圃場では、地下水位は地下灌漑直前に -0.53 ± 0.12 m、取水終了直後に、 -0.51 ± 0.13 m、水閘解放半日後に -0.52 ± 0.14 mで、地下水位の変動は非常に小さく、また圃場内の分布も変化しなかった(図-5d、e、f)。I圃場の2回目の地下灌漑実施時においても、同様の傾向であった。

地下灌漑実施時における暗渠脇0.5 m離れと渠間の地下水位変動を図-6に示す。B圃場では、取水側の30 m地点を除いて水閘水位の上昇とともに速やかに上昇し、特に暗渠脇で顕著であった。取水停止後、地下水位は緩やかに低下し、水閘開放後は特に暗渠脇で低下した。一方、I圃場では、取水後に明らかに地下水位が上昇した地点は、暗渠脇0.5 m離れの1地点のみであった。

2.3 地下水位変動に影響を与える要因の解析

泥炭が出現する上端はB圃場で 41 ± 7 cm、I圃場で 53 ± 10 cmであった。B圃場では、全地点において泥炭層までを3層に分けて採取し、それぞれの平均深度は0~9、9~22、22~41 cmであった。飽和透水係数の中央値は、北海道施肥ガイドで推奨される基準値($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s)と比較すると、1層目は同程度であったが、2層目と3層目で大きく下回った(図-7)。一方、固相率の中央

値は、1~3層でそれぞれ41.5、41.5、36.7%で、基準値(40%以下)を上回るものがあるものの大きさは逸脱しなかった(図-7)。B圃場では、30~50 m地点で3層目の固相率が大きく、透水係数が小さい傾向にあったが、地下水位との明らかな関係はみられなかった。しかし、整備前の土地利用状態が、地下水位だけでなく、整備後の土壌の物理性にも影響を与えたことが示唆された。

I圃場では、10地点で作土層の下に基盤高調整の盛土層が確認されたため、泥炭層までを3層に分けて採取し、11地点では2層で採取した。それぞれの平均深度は、0~23、23~41、41~53 cmであった。飽和透水係数の中央値は、基準値と同程度で(図-7)、B圃場の3層目とI圃場の2層目を比較すると、後者が有意に大きかった。一方、固相率の中央値は、1~3層でそれぞれ48.1、44.6、38.9%で、3層目を除き基準値を大きく上回った(図-7)。I圃場では、40~100 m地点で泥炭の出現深度が浅く、2層目の固相率が大きい傾向があったが、地下水位と明らかな関係はみられなかった。

ベーシックインテークレートは、B圃場で暗渠直上、渠間Apそれぞれ 188 ± 21 、 7.7 ± 21 mm/h、I圃場で暗渠直上、渠間Apそれぞれ 7.1 ± 1.3 、 0.01 ± 0.01 mm/hであった。I圃場では、飽和透水係数はB圃場より大きいですが、ベーシックインテークレートは小さかった。このことから、I圃場ではB圃場より土壌構造や亀裂の発達が悪く、圃場の透水性が低いことが考えられる。圃場の排水性向上や地下灌漑の利用のためには、水みちの発達が重要であり、今後、土壌構造や亀裂の発達程度とその規定要因を調査する必要がある。

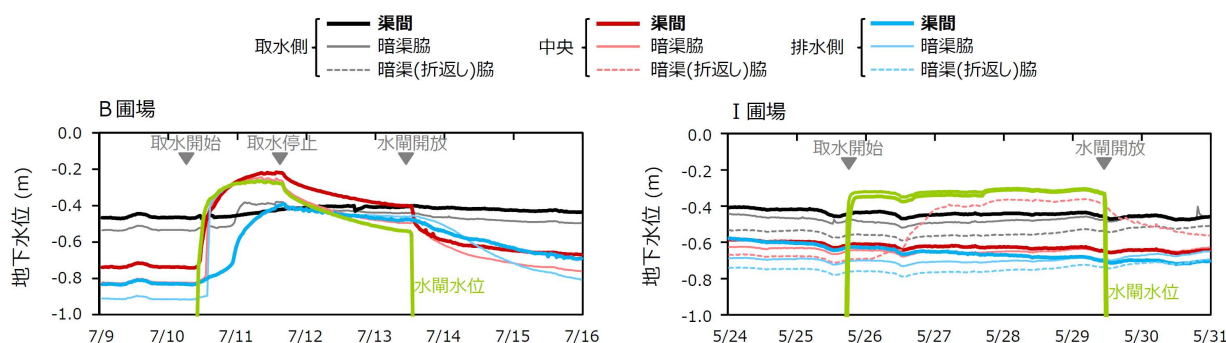


図6 B圃場およびI圃場における地下灌漑実施時の暗渠脇0.5 m離れと渠間の地下水位変動 (取水側、中央、排水側はB圃場でそれぞれ30、90、150 m、I圃場でそれぞれ40、130、220 m地点を示す。暗渠(折返し)は、I圃場のみである。)

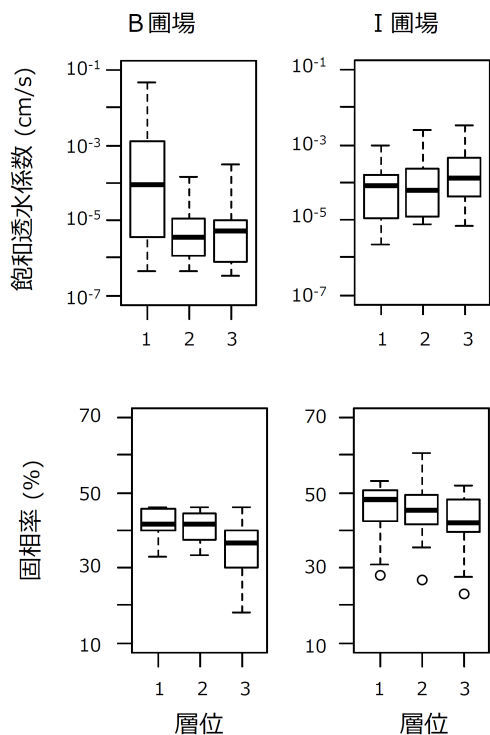


図-7 B圃場とI圃場における飽和透水係数と固相率
(飽和透水係数の統計量算出には対数変換値を用いた。)

3. 水稻登熟期の水分供給と地耐力向上を両立した地下水水位制御技術の検証

3.1 調査地と方法

3.1.1 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美唄地区の隣接する2つの水田圃場で行った(図-8)。圃場は、1区画が長辺約170m、短辺約70mに整備され、地下水水位制御システムが導入されている。暗渠管は、基本10m間隔で、0.70m~1.00mの深さにある。

平成29年は、両圃場とも5月25日に水稻(ななつぼし)の苗を移植、9月26日に収穫を行った。試験圃場では、8月8日から22日までの間、田面から10cm下に地下水水位を設定して地下灌漑を実施し、その後9月20日まで水閘の設定は-10cmで維持した。対照圃場では、8月11日から収穫まで水閘の設定を-40cmに維持し、この期間に地下灌漑による給水は行わなかった。

3.1.2 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。

地下取水量は、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管設置標高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。

地下水水位、土壌水分、水稻出液速度の調査は、各圃場、暗渠から5m離れた3地点(取水柵から長辺方向に30、90、130m離れた地点)で行った。地下水水位は、絶対圧式水位計を有孔塩ビ管に格納し埋設し、30分間隔で測定した。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。

水稻出液速度は、8月31日に各地点2反復で測定した。また、地耐力は、収穫を半月後に控えた9月8日に、各圃場42地点で、デジタル貫入式土壌硬度計により測定した。

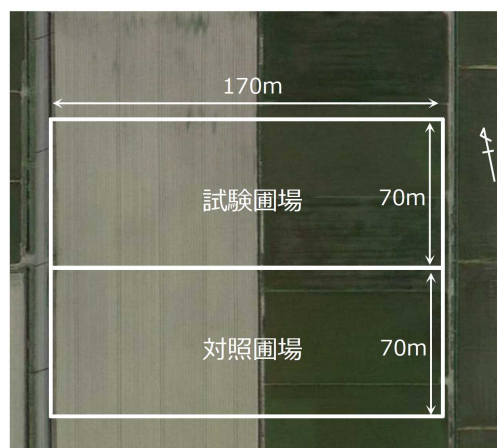


図-8 水田試験圃場と対照圃場整備前の状況写真

3.2 地下水水位と土壌水分の変動

地下水水位の季節変化を図-9に示す。登熟期地下灌漑を開始した8月8日以降、試験圃場では地下水水位は-10cm付近で維持された。一方、対象圃場の地下水水位は緩やかに低下し、8月27日には-30cmを下回った。試験圃場の地下水水位は、給水停止後で降雨もなかった8月29日以降に緩やかに低下し、9月10日には対象圃場と同程度と

なった。試験圃場における登熟期地下灌漑期間の降水量、取水量、暗渠排水量はそれぞれ45、63、63mmであった。

登熟期地下灌漑実施期間の土壌水分は、圃場間で差は認められなかった。しかし、9月10日の土壌水分は、対照圃場で試験圃場よりも減少した。

3.3 水稻登熟期の地下灌漑が作物生育と地耐力に与える影響

水稻出液速度は、圃場間で有意な差は認められなかったが、試験圃場で対象圃場よりも大きい傾向にあった(図-10)。ただし、出液速度測定時の土壌水分は両圃場間に差が認められなかった(図-9)。土壌水分は15cm深のみ

で測定したため、水稻根へ供給される土壌水分の深度とは異なった可能性が考えられる。

0-15cmの地耐力は、圃場間で有意な差はなく、収穫までまだ半月ある時点での測定であったが、多くがコンバイン走行に必要なとされる地耐力(0.25 MPa以上³⁾)を満たしていた(図-10)。以上のことから、登熟期の水稲への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保は両立できると考えられた。しかし一方で、両圃場とも基準を下回る地点も観測され、収穫前に完全に水閘を開放する等、排水を促進するような水管理を検討する必要があると考えられた。

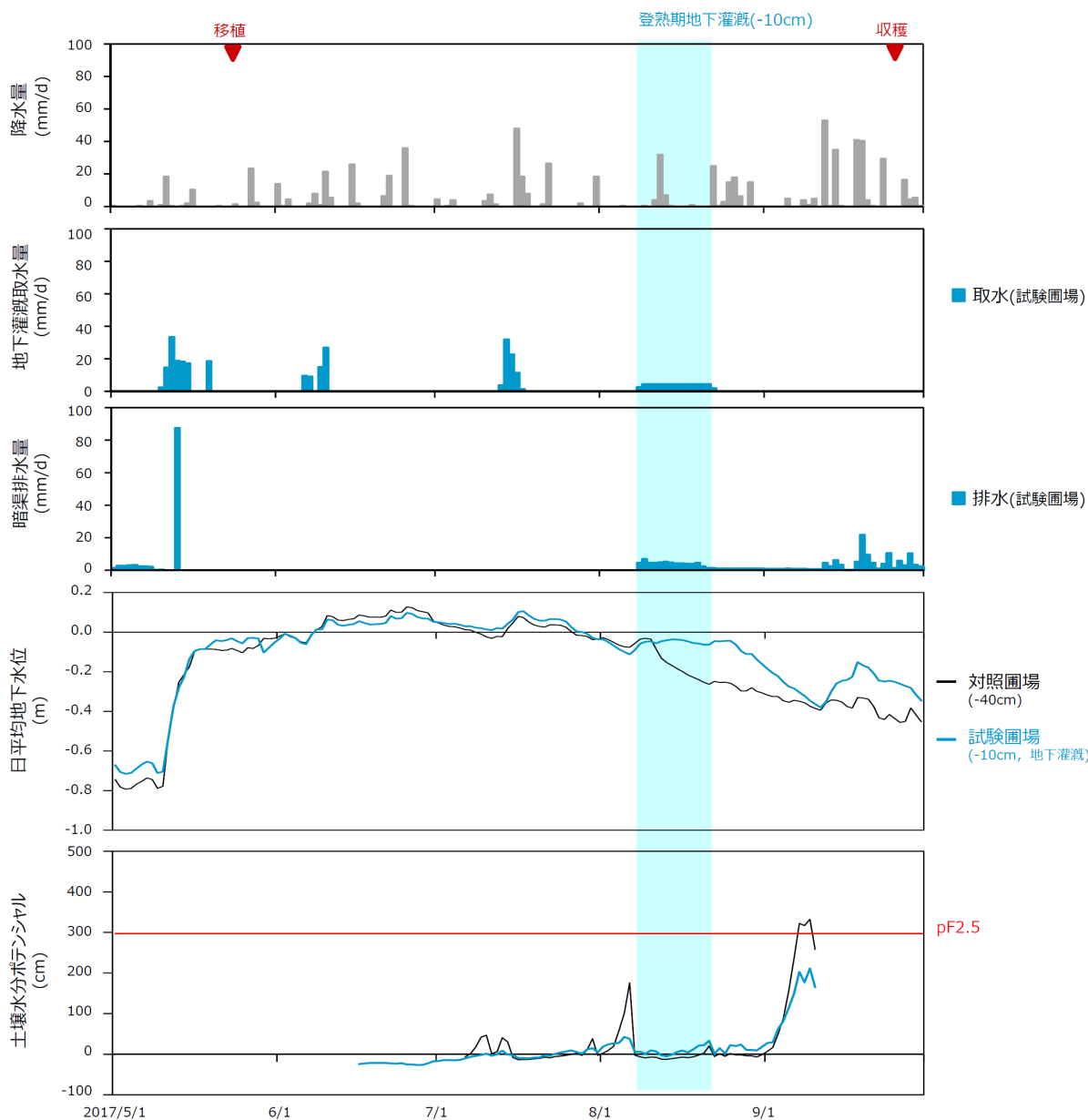


図-9 水田試験圃場と対照圃場における降水量、地下灌漑取水量、暗渠排水量、日平均地下水位、土壌文ポテンシャルの季節変化(地下灌漑取水量と暗渠排水量は試験圃場の結果を示す。)

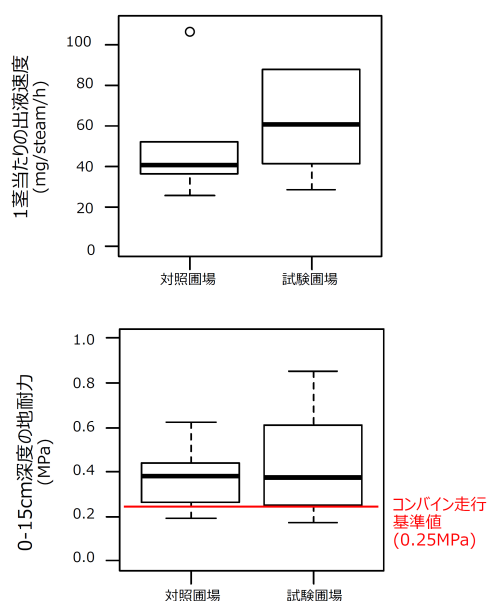


図-10 水田試験圃場および対照圃場における水稻出液速度と地耐力

4. 地下灌漑の利用に伴う環境負荷の評価

4.1 調査地と方法

4.1.1 調査地

調査は、美唄市の美唄地区の大豆畑と水田で行った。

大豆畑は、乾燥時に地下灌漑を実施した試験圃場と実施しない対照圃場で調査した。試験圃場は、2.1.1で述べた圃場とB圃場と同一である。対照圃場は、同一農区内の圃場で、地下灌漑による取水を除いて試験圃場と同様の営農管理を行った。

水田は、登熟期に地下灌漑を実施した試験圃場と実施しない対照圃場で調査した。試験圃場と対象圃場は、3.1.1で述べた圃場と同一である。

4.1.2 方法

土壌表面からの温室効果ガスフラックスをクローズドチャンバー法で測定した。常設した架台にチャンバーを設置した後、0、5、10、15、20分後にチャンバー内のヘッドスペースガスを10mL容の真空バイアル瓶に採取した。測定は暗渠から5.0m地点において、3反復で行った。測定頻度は2週間に1度とした。

ガス試料のメタン濃度はFID付きガスクロマトグラフ、一酸化二窒素濃度はECD付きガスクロマトグラフで測定した。温室効果ガスフラックス測定時に、気温、5cm深地温、5cm深の酸化還元電位(Eh)を測定した。

4.2 転作畑における温室効果ガス排出

大豆畑のメタンフラックスは、試験圃場と対照圃場で有意な差は認められず、 $-0.01 \sim 0.03 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ の範囲で推移した(図-11)。

一酸化二窒素フラックスも、試験圃場と対照圃場で有意な差は認められなかった。一酸化二窒素は、地温、土壌水分、土壌中無機態窒素と有意な相関は認められなかったが、土壌水分が高いときに大きなフラックスが観測される傾向にあった。このことは、地下灌漑による土壌水分の上昇により、一酸化二窒素の排出が促進される可能性を示唆しており、今後地下灌漑実施時における詳細な観測を実施する必要がある。

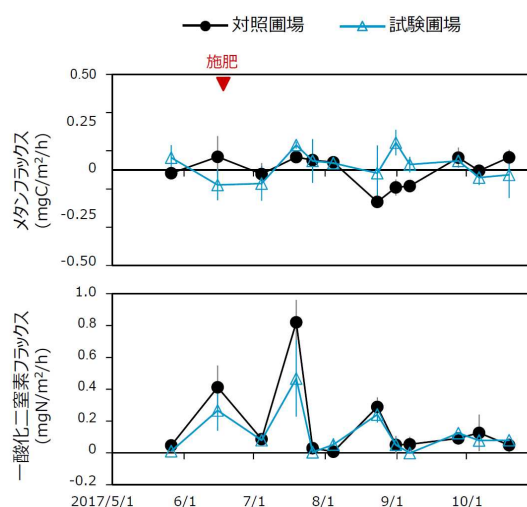


図-11 大豆畑の試験圃場と対照圃場におけるメタンフラックスと一酸化二窒素フラックスの季節変動(エラーバーは標準偏差(n=3)を示す。)

4.3 水田における温室効果ガス排出

水田のメタンフラックスは、対照圃場と比べて試験圃場で大きく推移する傾向があったが、標準偏差が大きく、対照圃場との間に有意な差は認められなかった(図-12)。しかし、9月5日のメタンフラックスについては、試験圃場、対照圃場それぞれ 15.7 ± 0.2 、 $6.0 \pm 0.6 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と試験圃場で有意に大きかった。このことについては、登熟期地下灌漑によって地下水位を高く維持することで、メタン排出が促進された可能性が考えられる。今後、さらなるデータの蓄積が必要である。

一酸化二窒素フラックスは、試験圃場と対照圃場で有意な差は認められなかった。

3) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2015、2015

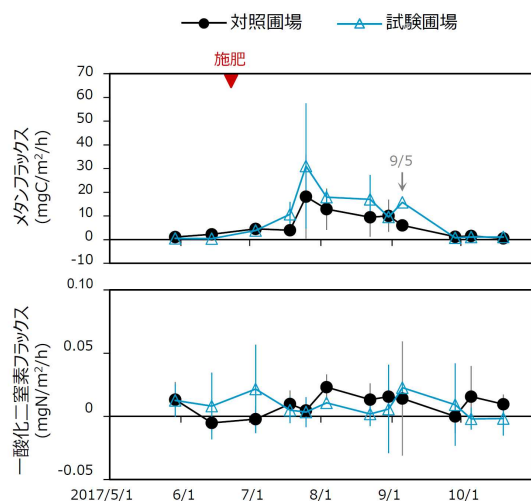


図-12 水田の試験圃場と対照圃場におけるメタンフラックスと一酸化二窒素フラックスの季節変動
(エラーバーは標準偏差 (n=3) を示す。)

5. まとめ

泥炭を基盤とする転作物栽培圃場で乾燥時に地下灌漑を実施し、地下水位の変動を調査した。美唄地区大豆圃場では、地下灌漑により地下水位は上昇したが、整備前の各区画の土壌物理性の違いの影響を受けて地下水位とその変動にムラが生じた。今金南地区小麦圃場では、地下灌漑時に地下水位が変動しなかった。その要因としては、現場の透水性が小さく、土壌構造や亀裂の発達が十分でないことが考えられた。

泥炭を基盤とする水稲移植圃場で、登熟期に地下灌漑を実施し、水稲への水分供給と地耐力への影響を調査した。登熟期後半の水稲出液速度は、試験圃場と対照圃場で有意な差は認められないものの、試験圃場で高い傾向を示した。地耐力は、圃場間で差は認められず、収穫まで半月を残した時点でコンバイン走行に必要なとされる値を多くが満たしており、登熟期の水稲への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保が両立できることを事例的に確認した。

地下灌漑の利用に伴う環境負荷については、大豆畑と水田で温室効果ガス排出を測定した結果、高い土壌水分で大豆畑の一酸化二窒素と水田のメタンの大きな排出が観測され、地下灌漑による土壌水分の増大がそれらの排出を促進させている可能性が考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省：北海道総合開発計画、2016
- 2) 農林水産省：土地改良長期計画、2016

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、越山直子、大津武士

【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実施された地区において、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。平成 29 年度までの成果は、次のとおりである。調査圃場では、圃場の地下水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、各圃場の浸透量はいずれも小さかった。そのため、圃場への取水量の差は、除草剤散布に伴う強制落水や深水灌漑などの栽培管理の違いによって生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移によっては、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3 種の栽培方式を比べれば同じ日に同じ生育ステージであるとは限らないため、3 圃場が同じ気象条件におかれたとしても、必ずしも同じ防除作業が行われるわけではない。また、ある年にある栽培方式に対して行われた栽培管理が、別の年には別の栽培方式で実施されることもある。2 カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生していなかった。

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

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¹⁾。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、圃場の大区画化や水管理の省力化を目的とした地下水位制御システムの整備が行われている。これらの整備が実施されたところには、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²⁾。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%と大きく変わらない例もある³⁾。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目的として、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

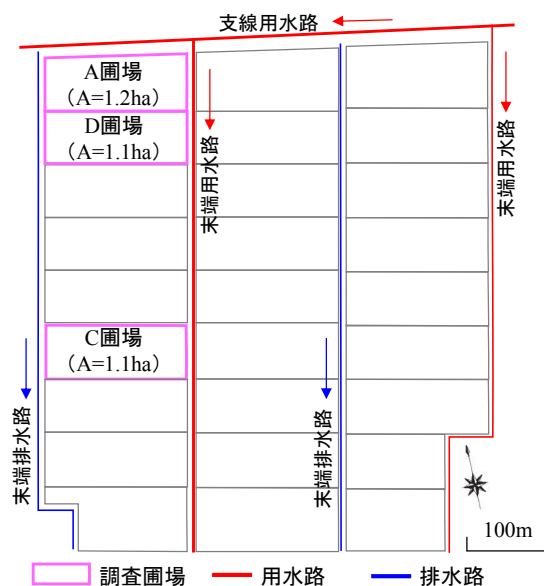


図-1 調査圃場の位置図

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として、水管理および水収支の調査を実施した。

2. 調査概要

2.1 調査地区

美明市に位置する3筆の圃場(図-1)を対象として、平成28年および平成29年に調査を行った。各圃場の水稻栽培方式および栽培品種を表-1に示す。各圃場の栽培方式および品種は、両年とも同じである。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、地表排水と地下排水で行える。地表排水の数は1圃場当たり2ヶ所である。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。暗渠水閘の数は、1圃場当たり2ヶ所である。調査圃場の水管理は、すべて同一の農家により行われた。AおよびD圃場については、平成28年のみ、JAによる水管理の指導が行われた。

2.2 調査方法

D圃場を例として、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。平成29年度は地下取水量を観測する電磁流量計を3圃場に設置した。なお、取水量に欠測が生じた期間については、湛水位および地下水位の変化量を基にした圃場の水収支により、取水量を推定した⁴⁾。

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)-(取水桝からの距離(m))-(暗渠ラインからの距離(m))を表している。湛水位は、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地点において深さ100cmまでの土壌断面調査を行うとともに、採取した試料で土壌物理性試験を行った。各圃場の営農管理については、農家への聞き取り調査を行った。

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

3. 結果

3.1 平成28年度および平成29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観測結果では、灌漑期間中(5~8月)の降水量合計値は、平成28年度では772mm、平成29年度では485.5mmであり、気象

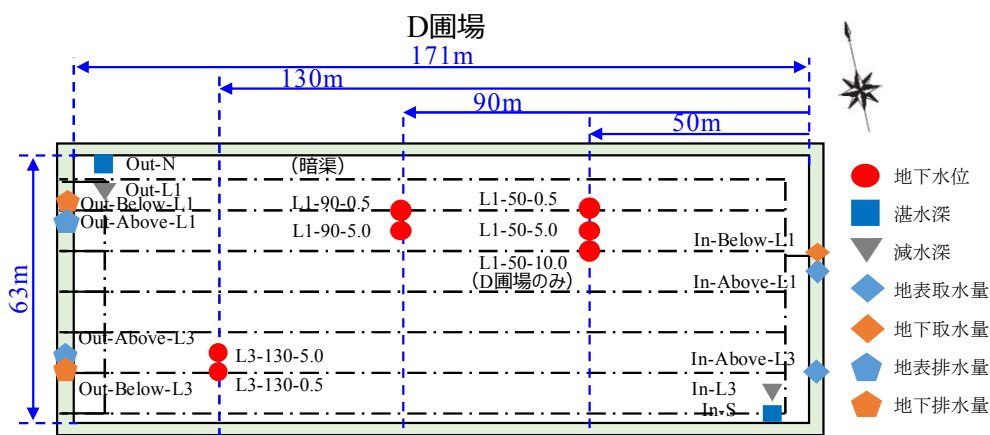


図-2 観測地点の位置 (D圃場の例)

庁データの平年値と比べると、平成28年度は約2倍、平成29年度は同程度であった。降水量について、月ごとの値と平年値を比べると、6月は両年とも平年値の2.5～2.7倍、平成28年8月は台風の影響により平年値の2.3倍であった。両年とも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 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 、泥炭土で $10^{-4} \sim 10^{-5}$ である。

3.3 各圃場の浸透量

両年に行われた減水深調査における減水深の値から、それぞれの蒸発散量を差し引き、浸透量を算定した。この結果、各圃場における日浸透量の2ヶ年の平均値(括弧内は最小値および最大値を示す)は、A圃場:2.8mm(-3.5～15.4mm)、D圃場:1.4mm(-3.1～5.2mm)、C圃場:1.7mm(-3.1～17.4mm)であった。周辺の地下水位が低いような圃場では、代かきが行われない場合、浸透量が増加する例がある⁹⁾が、調査圃場ではいずれも浸透量の値は概ね小さかった。その理由として、泥炭地域であることから圃場の地下水位が高いことにより、代かきの有無による差が小さかったものと考えられる。

3.4 各栽培方式における圃場の水管理

平成28年および平成29年における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、それぞれ図-3および図-4に示す。ここで、図中における各年および各圃場のデータは、平成28年のA圃場は「28A(乾直)」というように、和暦、圃場名(括弧内は栽培方式)の組合せにより表している。また、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。ここで、直播栽培において行われる「浅水管理」とは、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をいう。浅水管理期間の判定は、水稻の生育や取水時期、地下水位変化により行った。

各圃場の水管理は、以下のとおりである。

3.4.1 A圃場(乾直)における水管理

図-3に示すように、28A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。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月中旬に除草材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。

図-4に示すように、29Aでは、播種(5月10日)を行った日の夕方に初期取水が行われた後、3週間程度、浅水管理が地下取水により行われた。8月上旬に地表取水が行われたが、農家への聞き取りによると、取水停止の操作が遅れたことから、意図していたよりも取水期間が長くなり、取水量が過大になった。

3.4.2 D圃場(湛直)における水管理

図-3に示すように、28D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。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。

図-4に示すように、29Dでは、代かき(5月13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が地下灌漑により行われた。6月中旬以降、湛水管理が行われた。農家への聞き取りによると、例年は8月中旬に落水するが、農家による落水操作が遅れ、9月初めに落水が行われた。

3.4.3 C圃場(移植)における水管理

図-3に示すように、28Cでは、5月14日に地表取水と地下取水との併用により初期取水が行われ、代かき(5月17日)を行った後、湛水状態で管理された。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-3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。

図-4に示すように、29Cでは、初期取水が5月10日に行われ、代かきが5月15日に行われた。その13日後に移植が行われ、その後は湛水状態で管理された。

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、平成28年および平成29年における各圃場の水収支を比較した(図-5、

図-6)。ここでは、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た。水収支の算定対象期間は、平成28年8月後半に大雨があったことを考慮し、兩年とも、代かき取水または初期取水から8月中旬までとした。ただし、前述のとおり、29Aについては、意図しない取水量が含まれていたため、8月上旬までの期間を対象とした。

各圃場における流入量および流出量を比較すると、

-170~145mm 程度の差がみられた。各圃場における流入量および流出量の大小関係は、28C および 28D では流入が流出を下回っていたが、28A、29A、29C、29D では流出が流入を上回っていた。前者の理由としては、縦浸透および横浸透による圃場外への流出や圃場内への貯留が生じたこと、後者の理由としては、縦浸透および横浸透による圃場への流入が生じたことが考えられる。

各年における圃場への流入量をみると、平成29年の方

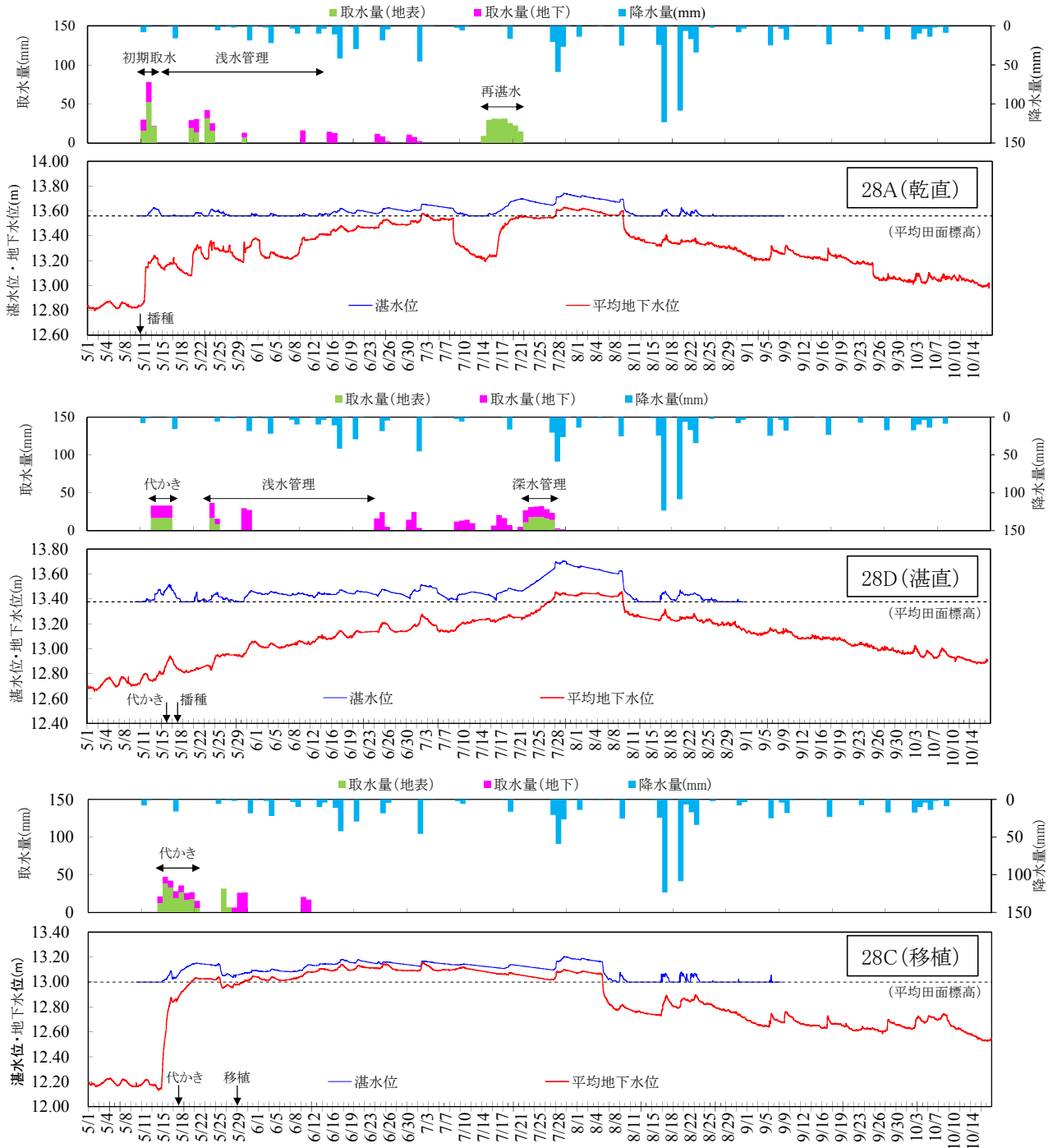


図-3 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化 (平成28年)

が全体的に少なくなっていた。これは、平成28年では、8月に大雨があったことに加えて、A圃場の除草剤散布のために落水した後の再湛水量が197mm（地表灌漑）、D圃場の深水用水量が182mm（地表灌漑および地下灌漑の併用）あったためである。

3.6 各栽培方式における特徴的な水管理

各栽培方式における特徴的な水管理を経時的に把握するために、灌漑期間における各圃場への供給水量（取水量と有効雨量の和）を算定し、累加供給水量を比較した

（図-7）。有効雨量については、地表排水量を栽培管理用水量（圃場へ供給された用水のうち落水口などから表面流去する水量）と無効雨量とを分離する方法⁶⁾により算定した。なお、平成29年のA圃場では、8月上旬以降は、農家による取水停止操作が遅れたため欠測扱いとし、累加供給水量の計算対象とはしなかった。

各栽培方式における8月末時点の累加供給水量をみると、平成28年では、28Aおよび28Dは28Cより25%程度多い値であり、平成29年では、29Cと29Dの値は同程度

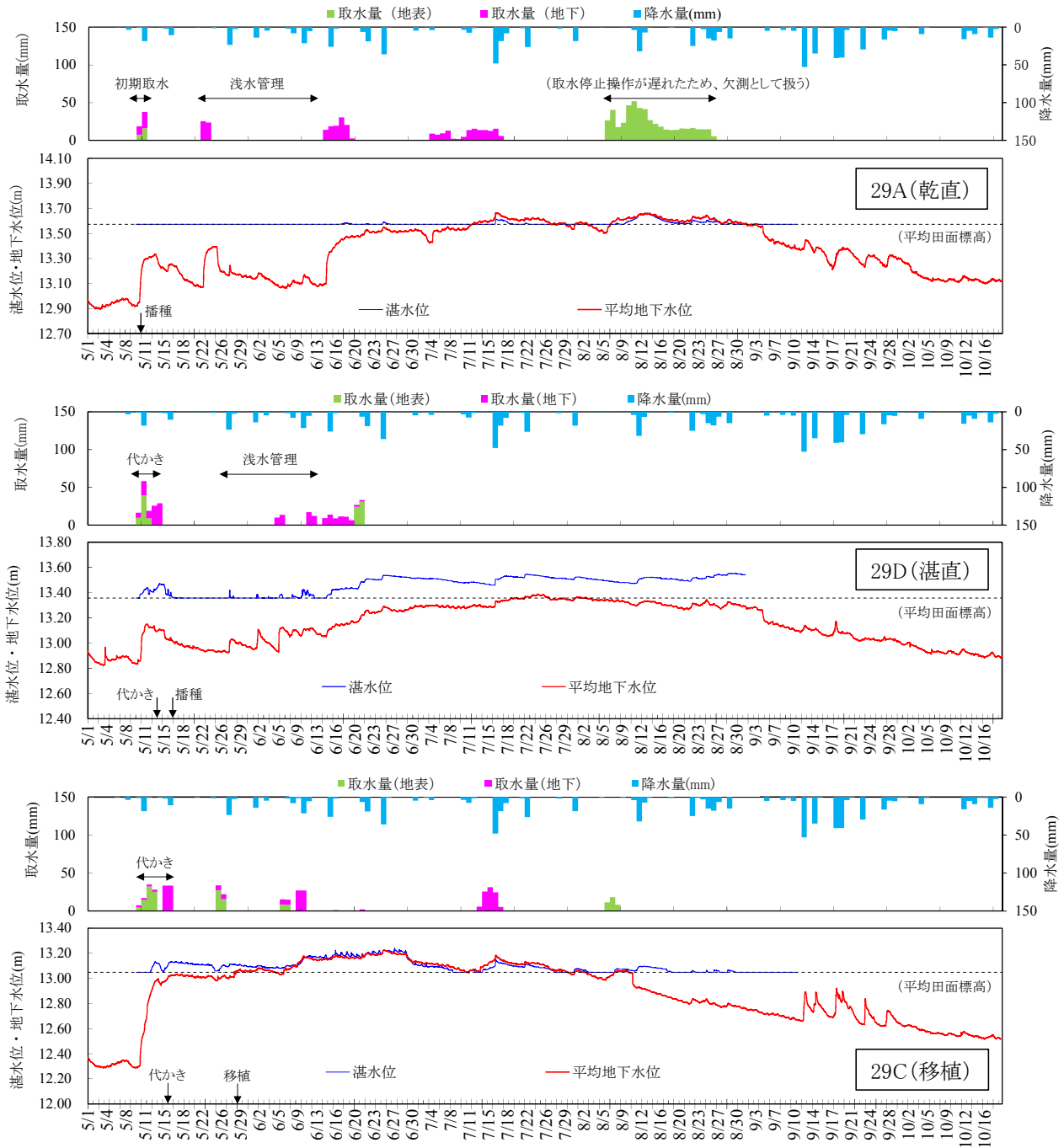


図-4 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化（平成29年）

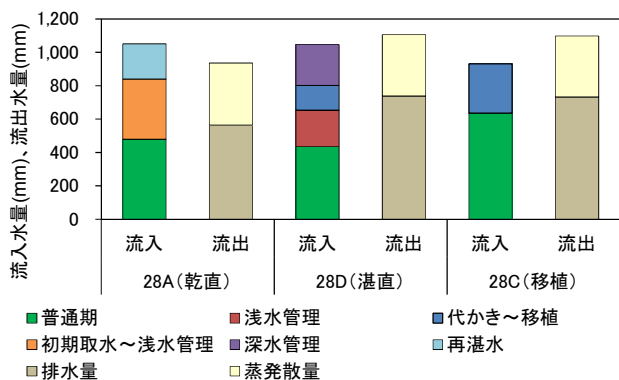


図-5 圃場水収支の比較 (平成28年)

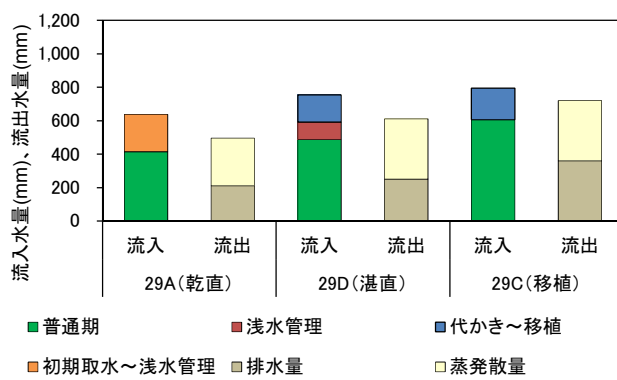


図-6 圃場水収支の比較 (平成29年)

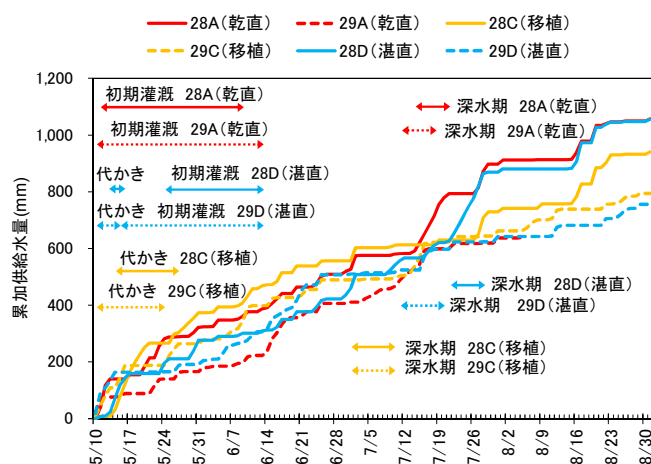


図-7 各圃場における累加供給水量

であった。栽培方式ごとの水管理をみると、28A では7月中旬に除草剤散布のための落水に伴う再湛水が行われ、28D では深水灌漑が行われた。

各調査圃場でみられた、栽培管理に伴う主な水管理(初期取水および代かき・田植え用水を除く)を表-2に示す。これらの水管理は、栽培方式に関わらず、以下に述べる状況下において行われた。農家への聞き取りによれば、28Aの除草剤散布に伴う落水・再湛水は、栽培方式とは関係なく、水稻の生育状況、雑草の種類や繁茂状況に応じて実施された。28Dの深水灌漑については、水稻の生育状況と気象条件に応じて必要とされた。異なる栽培方式では、それぞれ水稻の生育にずれが生じるため、別の時期に低温が到来していれば、他の圃場でも深水灌漑が行われたはずである。

各栽培方式の圃場浸透量は、代かきの有無に関わらずいずれも小さい値であった。それゆえ、各栽培方式の用水量の差は、除草剤散布に伴う落水および再湛水や深水灌漑の有無により生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象

表-2 栽培管理に伴う水管理の例

圃場	水管理	目的および特徴
A	除草剤散布のための強制落水および再湛水の取水	雑草の種類や生育状況に応じて、栽培方式に関わらず行われる。
D	深水灌漑	生育状況とその年の気象条件に応じて、栽培方式に関わらず必要とされる。
C	なし	なし

の推移によっては、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3種の栽培方式を比べれば同じ日に同じ生育ステージであるとは限らないため、3圃場が同じ気象条件におかれたとしても、必ずしも同じ防除作業が行われるわけではない。また、ある年にある栽培方式に対して行われた栽培管理が、別の年には別の栽培方式で実施されることもある。このように2カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生していなかった。

4. まとめ

大区画化および地下水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。平成29年度までの成果は、次のとおりである。調査圃場では、圃場の地下水水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、各圃場の浸透量はいずれも小さかった。そのため、圃場への取水量の差は、除草剤散布に伴う強制落水や深水灌漑などの栽培管理の違いに

よって生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移や各々の圃場の生育および雑草の繁茂の状況によって、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3種の栽培方式を比べれば同じ日に同じ生育ステージであるとは限らないため、3圃場が同じ気象条件におかれたとしても、必ずしも同じ防除作業が行われるわけではない。また、ある年にある栽培方式に対して行われた栽培管理が、別の年には別の栽培方式で実施されることもある。2カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生していなかった。

平成29年度には、各圃場における水管理および供給水量のデータを用いて、今後直播栽培が普及した場合の用水需要パターンを予測する手法を作成した。その内容については、平成30年度のデータも合わせてとりまとめを行い、次年度に報告する。

最後に、本研究を進めるにあたり、現地調査や資料提供にご協力いただいた農業者、美唄市土地改良センター、北海土地改良区美唄事業所、国土交通省北海道開発局札

幌開発建設部の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、2015
- 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
- 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
- 4) 越山直子、大津武士、中村和正：大区画水田における圃場水収支に基づいた取水量の推定、寒地土木技術研究、780、pp.8-12、2018
- 5) 坂田賢、堀野治彦、三野徹：直播水田における圃場単位の水利用に関する事例的研究、農業土木学会論文集、212、pp.17-22、2001
- 6) 渡辺紹裕、丸山利輔、三野徹：水田圃場における栽培管理用水量の発生形態、農業土木学会論文集、124、pp.11-18、1986

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、西田真弓、山田 章

【要旨】

本研究では、①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、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を目的としている。①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築では、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・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 年以上が経過した頭首工において、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、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、腐食量、水質の関係を整理・分析することにより、その構造性能の低下機構を考察した。一方、後者では、開水路において、超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察するとともに、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。さらに、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価を行った。補修後の開水路を対象とした含水率の調査を行い、電気抵抗式水分測定法の有効性を確認した。

キーワード：コンクリート、鋼製部材、凍害、摩耗、腐食、複合劣化、非破壊・微破壊調査手法

1. はじめに

食料・農業・農村基本計画¹⁾、土地改良長期計画²⁾や北海道総合開発計画³⁾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、ゲートや鋼矢板など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数は大であり、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、保全管理にも活用することができる。

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、①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、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を行い、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 年度および平成 29 年度では、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築において、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・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。さらに、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発において、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価を行った。

2. コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明

2.1 頭首工における凍害・摩耗診断⁴⁾

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安全管理が求められている²⁾。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、施設数は基幹の施設だけでも全国で 1,952 箇所³⁾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³⁾に達しており、今後これらの施設の機能を如何に保し管理していくのが喫緊の課題となっている⁵⁾。

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^{6), 7)}、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



図-1 各頭首工の位置および撤去時の状況

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、水による影響を調べた。

(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、JISA 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⁹⁾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 μm) 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〕」⁹⁾および日本道路協会「道路橋示方書・同解説」¹⁰⁾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〕」⁹⁾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

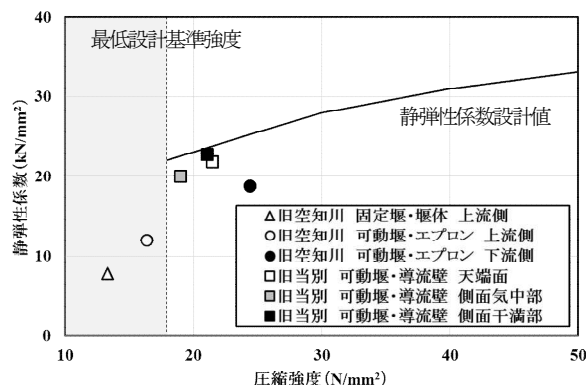


図-2 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

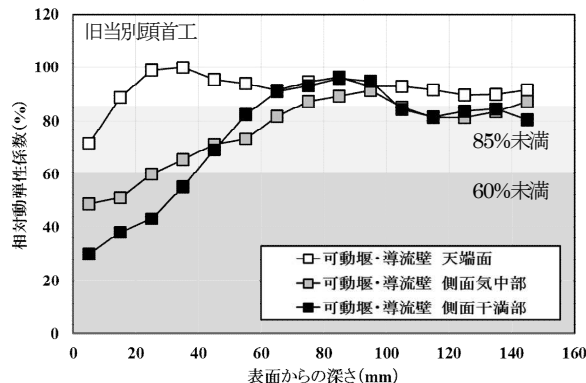
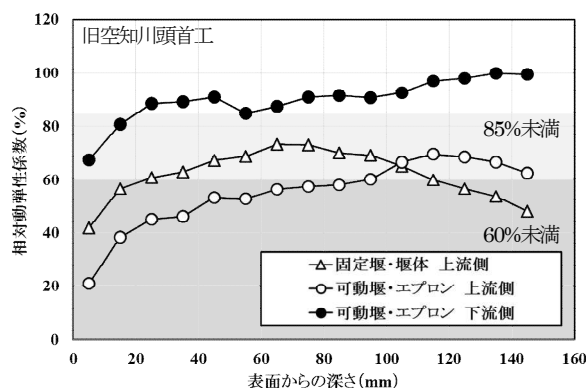


図-3 相対動弾性係数の測定結果

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、水に曝される割合が大きい部位、即ち水による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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 付近の細孔量が多くなっていることが確認された。

既往の研究結果^{11), 12)}では、凍結融解作用により約 0.05~1 μm 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 μm 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^{13), 14)}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^{13), 14)}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

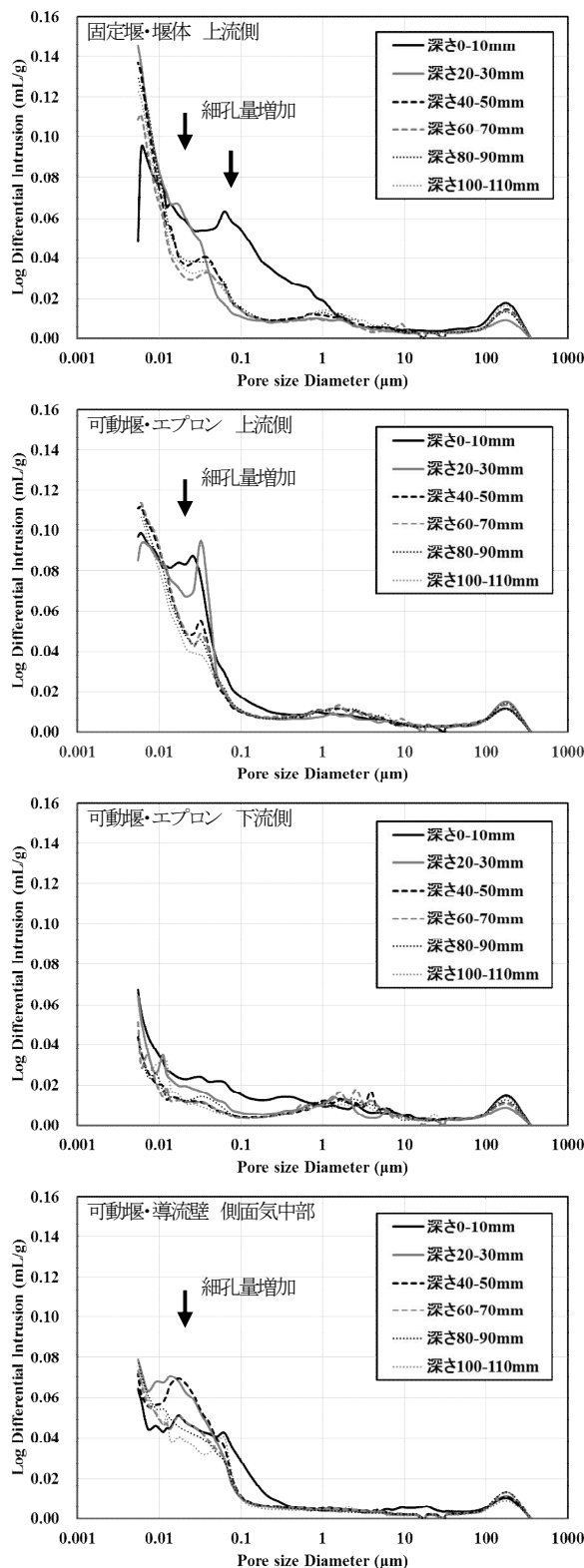


図-4 細孔径分布の測定結果

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

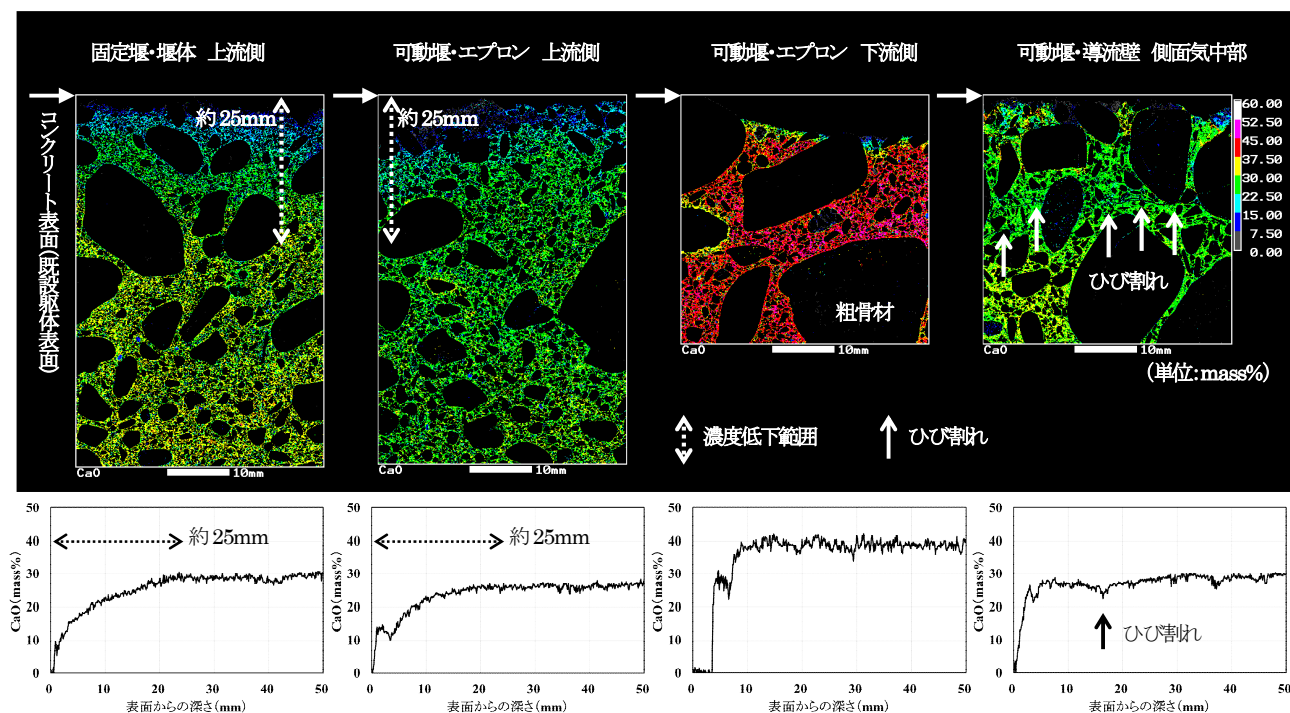


図-5 元素濃度分布（カルシウム (Ca)）の測定結果（骨材の濃度は非表示）

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 鋼矢板排水路における腐食診断^{15), 16), 17)}

2.2.1 目的

積雪寒冷地であり、かつ、泥炭土、火山灰土、重粘土などの特殊土壌が広く分布する北海道では、排水改良は極めて重要な農業生産基盤整備の一つである¹⁸⁾。北海道における排水改良を担う明渠排水路は、連節ブロックや積ブロック、コンクリート柵渠など、様々な部材により構成されている。その中で鋼矢板は、特に軟弱地盤、泥炭地盤に造成される排水路の構成部材として適用されてきている^{19), 20), 21)}。鋼矢板排水路の延長は、北海道内の国営事業により造成された排水路だけでも約 100km に及ぶ。

近年、排水路を構成する鋼矢板の腐食が全国的に問題となっている。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^{22), 23), 24)}。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)。排水改良において重要な役割を担い、かつ、長延長を有する鋼矢板排水路において、鋼矢板の腐食と排水路としての性能低下を如何に診断し評価していくのが喫緊の課題となっている。

本研究では、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対



図-6 北海道内における農業用排水路を構成する鋼矢板の腐食

象とした、鋼矢板の腐食・倒壊の発生要因、ならびに排水路の性能低下要因の究明のための検討を行っている。ここでは、鋼矢板の腐食診断結果の事例を示し、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、性能低下の特徴と機能保全における今後の課題について整理する。

2.2.2 鋼矢板の腐食診断

(1) 腐食の現況と診断方法の選定

診断対象とした鋼矢板排水路は、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。排水路の多くは泥炭性軟弱地盤に造成されており、また、積雪量も比較的多い地域に位置している。排水路を構成する鋼矢板の種別は、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（同8.0mm）、J排水路2測点（同8.0mm）、L排水路2測点（同10.5mm）、N排水路2測点（同8.0mm））を除き、ほぼ全て軽量鋼矢板（同5.0mm）である。いずれの排水路においても、供用後17～36年が経過しており、腐食は総じて著しい状況にある（図-7）。

鋼矢板の腐食の代表的な現況を図-8に示す。鋼矢板の表面側では、腐食は干満帯付近の中でも最多頻度水位近傍において特に著しく、直上の気中部、即ち干満帯上部において開孔し、断面欠損へと進展している場合が多い。一方、直下の水中部、即ち干満帯下部においても、腐食・断面欠損が進展している場合も見受けられる。また背面側では、開孔して排水が流入している場合は表面側と同様に腐食が進展し、断面欠損が拡大する傾向にある。また、倒壊に至った鋼矢板では、そのほぼ全てにおいて断面欠損が確認されている。次に、鋼矢板の切断面の拡大写真を図-9に示す。開孔していない普通鋼矢板では腐食は表面側にのみ発生しているのに対し、開孔した軽量鋼矢板では腐食は表面側に加え背面側にも発生している。

これら腐食の現況から、その発生要因は排水路内を流下する排水にあると考え、腐食状況の定量化を行うとともに、排水について水質に関する各種計測を行った。本

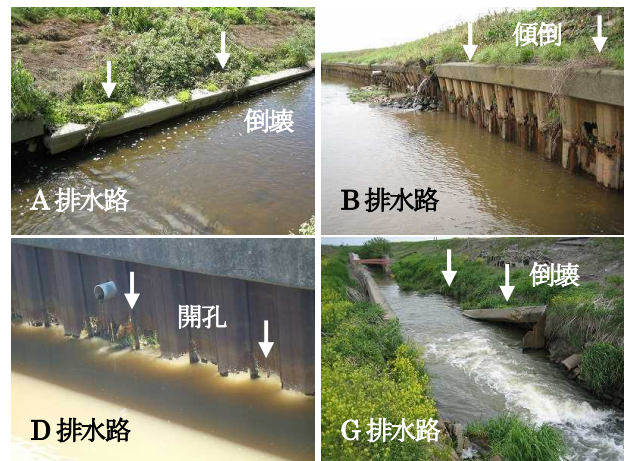
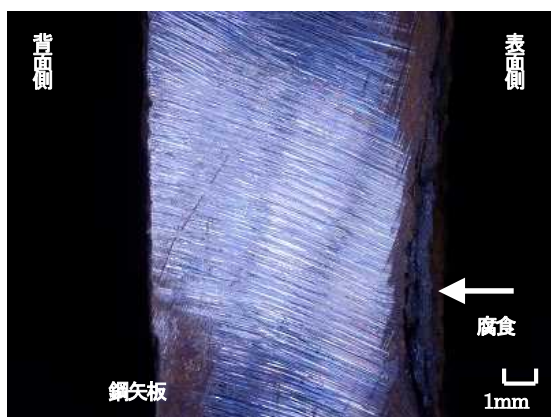


図-7 診断対象とした排水路の鋼矢板の現況



図-8 鋼矢板の腐食の代表的な現況



普通鋼矢板（開孔無し）



軽量鋼矢板（開孔有り）

図-9 鋼矢板の切断面の拡大写真

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、敷設当初の板厚（設計板厚+腐食代）から各計測値を差し引いた値を腐食量（mm）として求めた。板厚の計測は、鋼矢板の表層の錆を除去した後、超音波厚さ計を用いて行った。また、水質に関する計測では、灌漑期間中、腐食位置に水位が最も近付く夏期において、腐食に影響を及ぼすと予想される溶存酸素濃度、pH、導電率、塩化物イオン濃度の計測を行った。

(2) 診断結果および考察

腐食量の測定結果を図-10 に示す。図中では、測点を経過年数順に並べるとともに、測点毎の敷設当初の板厚を淡灰色に着色して示している。なお、各測点において該当する部位が存在しない場合はその結果を記していない。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、増加する傾向にあった。一方で、H排水路の4測点など、局所的に増加している測点もあることが分かった。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敷設当初の板厚に到達（貫通）していた。

経過年数と腐食量との関係を図-11 に示す。部位毎に示される近似式の傾きは、それぞれ部位毎の腐食速度（1年当たりの腐食量：mm/y）を表している。腐食速度は干満帯上部>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った。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ている干満帯下部においても、腐食速度は干満帯上部に準ずる程度に大きいこと、また、普通鋼矢板に比べ、軽量鋼矢板の腐食速度は大きくなる傾向にあることが分かった。

排水の溶存酸素濃度と腐食速度との関係を図-12 に示す。溶存酸素濃度は総じて高く、ほぼ飽和状態にあった。

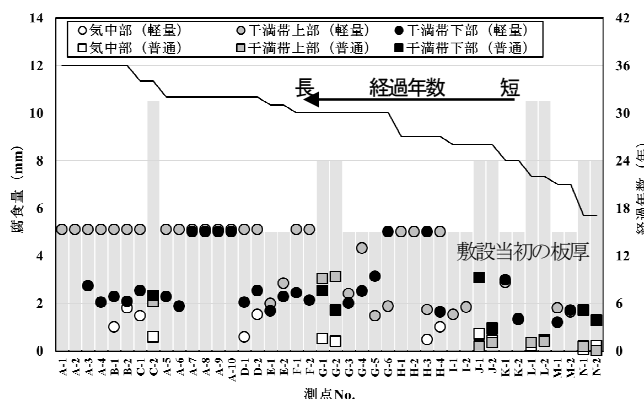


図-10 腐食量の測定結果

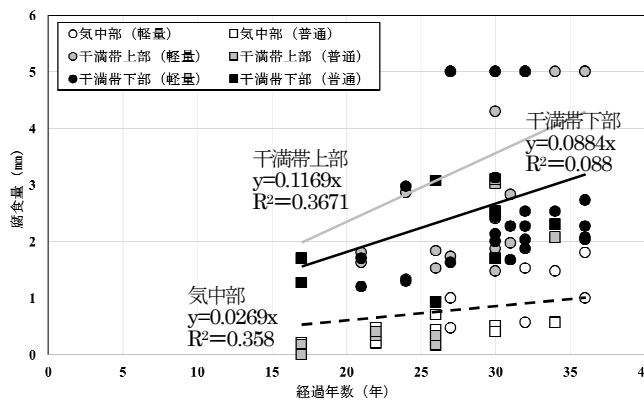


図-11 経過年数と腐食量との関係

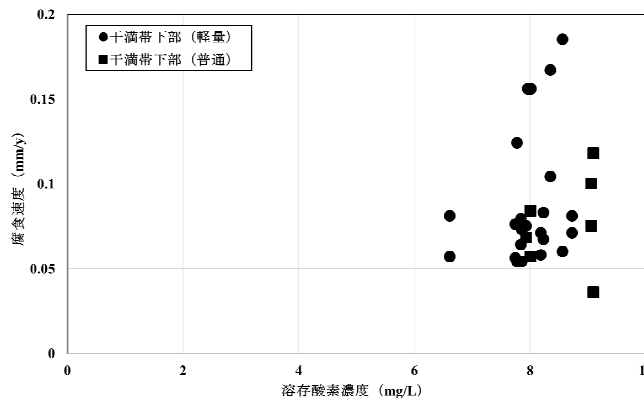


図-12 排水の溶存酸素濃度と腐食速度との関係

また、濃度が高くなるほど、腐食速度も大きくなる傾向が見て取れた。一方、pHは6.95～7.92、導電率は11.18～13.57 (mS/m)、塩化物イオン濃度は5.94～11.01 (mg/L)となり、pHが低いほど、導電率が高いほど、塩化物イオン濃度が高いほど、腐食速度は大きくなる傾向が見られたが、いずれも腐食が進みやすい範囲には推移しなかった。このことから、水質に関しては溶存酸素濃度の影響が最も大きいと考えられる。

2.2.3 鋼矢板排水路の性能低下特性

(1) 鋼矢板排水路の構造性能の低下機構

鋼矢板の腐食の現況および診断結果から、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構は以下の通りであると推察される(図-13)。まず、①鋼矢板の表面側では、気中部や干満帯上部において、水および酸素の供給による湿食が発生する(大気中の腐食)。流下する排水中には多量の溶存酸素が含まれるため、この湿食は干満帯下部や水中部においても発生する(淡水中の腐食)。また同時に、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(局所的な腐食)、②干満帯上部および干満帯下部においてそれぞれ腐食が進み、浮き錆へと進展する。また、③残存する板厚が小さくなった際に荷重が作用した場合は、鋼矢板は破断し、割れや湧水といった変状を生じるようになる。その後、④干満帯上部および干満帯下部ではさらに湿食が進み、開孔・断面欠損へと進展する。開孔・断面欠損を生じた箇所では排水が背面側にも流入するため、背面側からの腐食も発生する。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。⑤開孔・断面欠損が拡大した箇所では、背面土が吸い出され、また、構造的安定性が失われて、荷重が作用した際に⑥傾倒・倒壊に至るものと考えられる²⁵⁾。

積雪寒冷地に特有の泥炭地盤に造成された排水路では、泥炭土の圧密、圧縮、分解などにより、鋼矢板の背面側が露出している事例がよく見受けられる。主に鋼矢板の表面側で発生・進展する腐食・断面欠損は、背面側が露出して水および酸素の供給を受け、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。また、積雪寒冷地に特有の荷重には積雪、雪庇、凍上などが挙げられ、断面欠損が拡大した鋼矢板に対して、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることが考えられる(図-13②、③、④、⑤破線部分、図-14)。

(2) 性能低下の特徴と機能保全における課題

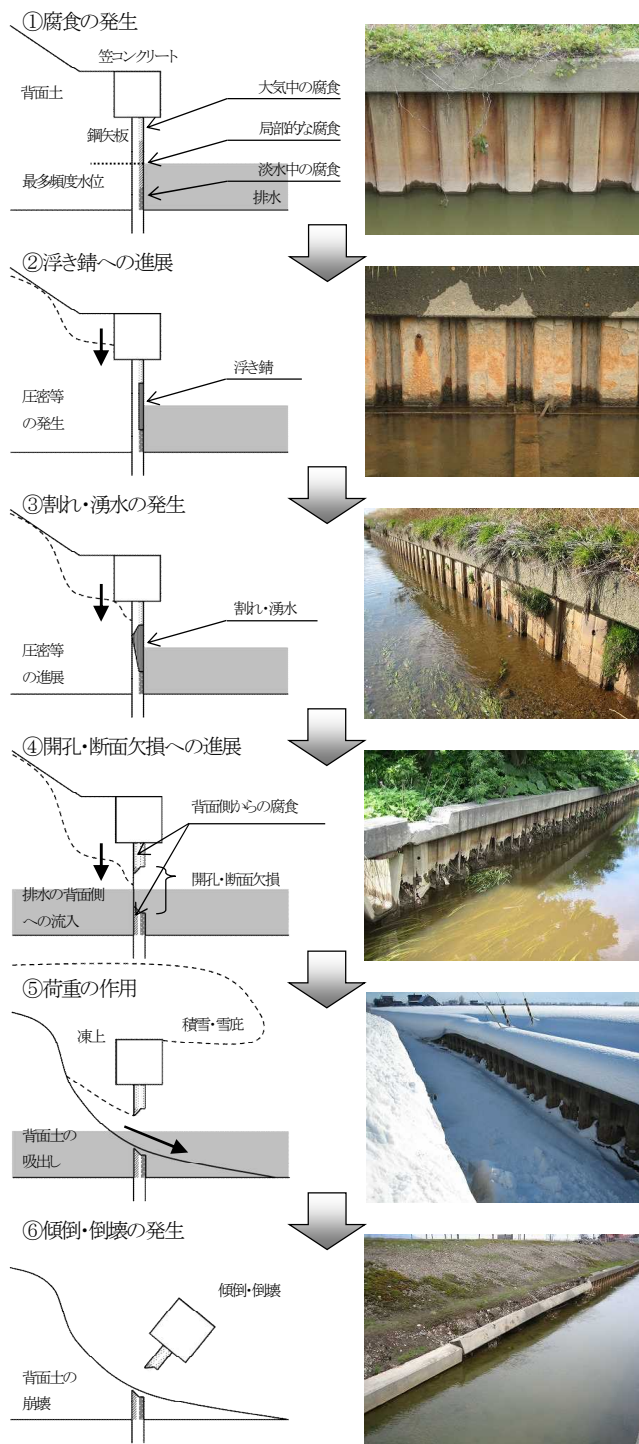


図-13 鋼矢板排水路の構造性能の低下機構

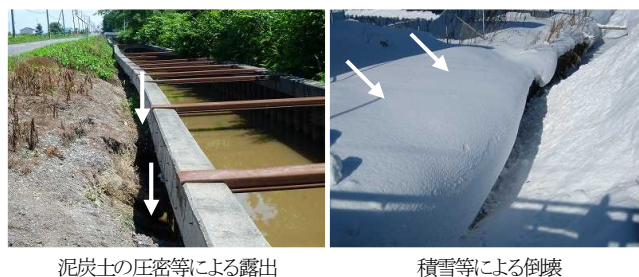


図-14 積雪寒冷地に特有の性能低下要因

積雪寒冷地において鋼矢板の腐食が発生した排水路では、その特有の要因により、構造性能は著しく低下する傾向にある。また、傾倒・倒壊が発生した排水路では、周辺地盤の陥没により歩行者や車両の通行が妨げられるなど、社会的安定性能も低下する場合がある。一方、傾倒・倒壊は積雪などの荷重の作用により最多頻度水位近傍にある腐食位置を基点に発生するため、背面土圧による曲げモーメントが卓越する位置にまで影響を及ぼすことは少なく、排水路の通水断面の阻害に至るまでの背面土の崩壊はほとんど見られない。このため、通水性や排水性といった水理性能は必ずしも低下していない場合が多い。

これら性能低下の特徴を踏まえ、積雪寒冷地に造成された鋼矢板排水路での機能保全における課題を二つ示す。一つは、補修、補強、改築時において構成部材に要求される性能の明確化である。現在、全国各地で排水路を構成する鋼矢板の補修、補強が行われており、今後、補修・補強材料に要求される性能の明確化（品質規格化）が期待される。一方、積雪寒冷地では倒壊に至る場合も少なくはなく、改築を想定した構成部材の性能の向上も必要である。そのためには、供用後の鋼矢板の腐食状況の定量化と、腐食に影響を及ぼす環境要因の精査が必要不可欠となる。もう一つは、構造性能と水理性能の関係性の解明である。用水路では、構造性能が水理性能や水利用性能を下支える性能であり、構造性能の低下は水理性能、水利用性能の低下に直結する場合が多い。一方、排水路では構造性能の低下が直ちに水理性能の低下を招くとは限らない。構造性能の低下がどの構成部材の劣化に起因するもので、どのような機構で水理性能の低下に結び付くのかを見極めていく必要がある。

2.2.4 課題

ここでは、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対象とした鋼矢板の腐食診断結果の事例を示し、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、その性能低下の特徴と機能保全における今後の課題を整理した。鋼矢板の腐食診断結果からは、腐食速度は、干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、経過年数以外の要因に影響を受けることが推察された。さらに、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構の考察では、積雪寒冷地に特有の性能低下要因を示し、それらが鋼矢板の腐食・断面欠損を加速させること、また、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることを示した。今後は、鋼矢板の腐食状況の定量化を進めるとともに、腐食に影響を及ぼす環境要因の精査を行い、また、鋼矢

板排水路の構造性能と水理性能の関係性の解明などについて検討を加える予定である。

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 寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法^{26), 27)}

3.1.1 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安全管理が求められている²⁾。寒冷地に位置する施設においてこのような保安全管理を行うためには、コンクリートの凍害劣化に着目する必要がある。凍害劣化を生じたコンクリート施設では、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^{6), 7)}、それら劣化状態を踏まえた保安全管理技術を構築する必要がある。農業農村整備に関する技術開発計画では、地域特性に応じた技術開発の必要性が示されている²⁸⁾。

農業水利施設の保安全管理では、適時・適切な機能診断を実施することが肝要となる。この機能診断では、「農業水利施設の機能保全の手引き」²⁹⁾に基づく機能診断調査が行われており、以後の劣化予測や対策工法の検討に必要な情報を得るための、施設の性能低下状態やその要因に対する定量的な調査が行われている。その中で鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価では、反発強度法、即ちリバウンドハンマ法による圧縮強度の調査が実施されている。リバウンドハンマ法は、JISにも規定される汎用化された調査手法であるが、コンクリート表面における反発度から強度を推定する手法であるため、この反発度に影響を及ぼす含水率、材齢、劣化状態などに対して補正を行わなければならない³⁰⁾。しかし、この補正には影響要因毎の強度推定式が必要となり、結果、層状ひび割れなどの内部変状が存在する場合の強度を的確に捉えられない可能性がある。そのため、これら寒冷地の劣化特性に対応した、施設状態を定量的に調査し評価することができる機能診断技術の構築が必要となる。

本研究では、これまでに、北海道内の複数のコンクリート開水路において、コア採取を含む詳細調査を行い、寒冷地における劣化特性について整理・分析するとともに、開水路の凍害診断技術、ならびに維持管理技術の開発を進めてきている。ここでは、寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性について述べるとともに、非破

壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察する。

3.1.2 寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性

本研究では、これまでに、北海道内（空知、石狩、後志、日高、檜山、上川、留萌、十勝の各地方）に位置するコンクリート開水路延べ36路線の446測点において、採取したコア試験体における試験を含む劣化状態の詳細調査を行っている。調査対象とした開水路は、最も古い水路は昭和30年代、新しい水路は平成20年代に建設されており、調査時における供用期間は2～56年である。水路型式は、1路線の5測点を除き、ほぼ全て鉄筋コンクリート開水路である。

開水路に発生した凍害劣化による代表的な変状を図-15に示す。凍害劣化は、その初期には微細ひび割れを発生し、スケーリング、骨材の露出・剥落、あるいは内部ひび割れ、層状ひび割れへと進展して、弾性係数の低下を生じさせ、ひいては強度低下に至らせる。最終的には躯体の断面欠損や鉄筋の露出・腐食へと進展し、構造体としての耐荷力や剛性を低下させる。

圧縮強度および静弾性係数の測定結果を図-16に示す。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。測点数は、全446測点の内、両試験を実施した77測点である。なお、図中では、供用期間が20年未満の水路の測定値を白丸、20年以上40年未満の水路の測定値を灰丸、40年以上の水路の測定値を黒丸で示している。また、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〕」⁹⁾および日本道路協会「道路橋示方書・同解説」¹⁰⁾に示される圧縮強度による静弾性係数の設計値である。さらに、淡灰色の着色範囲は、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、静弾性係数ともに建設当初の測定値は不明であるが、供用期間が20年未満の水路では、圧縮強度、静弾性係数ともに測定値は概ね設計値と同程度であるのに対し、20年以上の水路では、圧縮強度は設計基準強度を満たすものの、静弾性係数の測定値は多くの水路で設計値を下回っていることが分かる。このことは、強度低下の段階にまでは至っていないものの、その兆候として弾性係数の低下を生じている水路が数多く存在することを示している。そのため、凍害劣化を生じた開水路に対しては、強度低下だけでなく、弾性係数の低下を捉えられる機能



図-15 開水路に発生した凍害劣化による代表的な変状

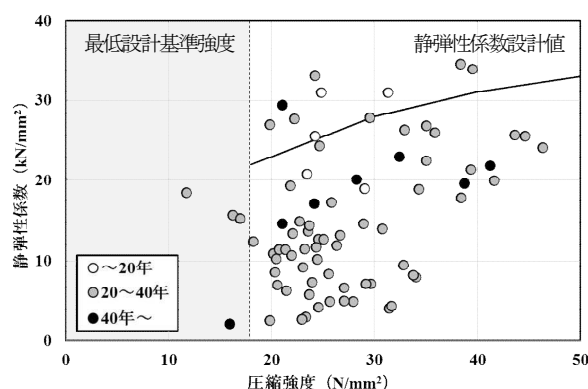


図-16 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

診断手法の適用が必要であると考えられる。

3.1.3 超音波法、機械インピーダンス法の適用性

寒冷地に位置する開水路における凍害劣化の発生形態、ならびに内部変状の発生により生じる弾性係数の低下の実態を踏まえ、これら寒冷地の劣化特性に対応させることが期待できる機能診断手法として、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の適用性を検証した。

(1) 機能診断手法および適用性検証方法の概要

超音波法は、20kHz以上の超音波域の周波数帯を使用し、発振子から接触媒質を介してコンクリート中に発射された弾性波を受振子で測定する手法である。一般に、劣化したコンクリートにおける超音波の伝播速度は健全なコンクリートの伝播速度に比べ小さくなるため、この速度の差異からコンクリートの品質の差異を調べることができる³⁾。コンクリートの超音波伝播速度は、弾性係数、密度、ポアソン比により定まるため³⁰⁾、本法により超音波伝播速度を測定することで、弾性係数を精度よく調査することが期待できる。

機械インピーダンス法は、図-17に示す加速度計が内

蔵されたハンマでコンクリート表面を打撃し、得られた打撃力波形から打撃対象物の機械インピーダンスを測定して、コンクリートの表面近傍の強度を推定する手法である³²⁾。本法で得られる打撃力波形を図-18に示す。機械インピーダンス Z_R は、打撃力の最大値 F_{max} およびハンマが反発を受ける際の速度 V_R から式(1)により算出され、推定強度 STR は、 Z_R から式(2)により算出される³³⁾。一方、 F_{max} は、フックの法則より、コンクリートの弾性係数と変位量の最大値により定まるため、本法により推定強度を測定することで、弾性係数の変化を捉えることが期待できる。

$$Z_R = F_{max} / V_R^{1.2} \dots\dots\dots (1)$$

$$STR = a \times Z_R^3 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a は較正值(12.73)である。

本検証では、上述の圧縮強度および静弾性係数に加え、超音波法により部材厚方向の超音波伝播速度を測定し、さらに、リバウンドハンマ法および機械インピーダンス法によりそれぞれ推定強度を測定して、それらの関係を調べた。

(2) 適用性検証結果および考察

超音波伝播速度と静弾性係数との関係を図-19に示す。超音波伝播速度は、透過法により、部材厚の方向において測定した。測点数は、上述の圧縮強度および静弾性係数を測定した77測点である。なお、超音波伝播速度と弾性係数との関係は二次式により表わすことができるため³⁴⁾、図中では二次多項式による近似曲線を併記している。超音波伝播速度は、元より弾性係数などにより理論的に定まるものであるが、本検証において得られた結果からも、一定の相関性が認められた。このことから、弾性係数の調査における超音波法の有用性が確認された。

リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係を図-20に、機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係を図-21に示す。リバウンドハンマ法による推定強度は、JISA 1155(コンクリートの反発度の測定方法)に準拠して測定した。一方、機械インピーダンス法による推定強度は、1測点当たり30回の打撃を行い測定した。測点数は、超音波伝播速度を測定した測点の内、両法をともに適用した143測点である。リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係からは、正の関係が認められたが、その相関性は低いことが分かった。一方、機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係からは、正の関係が認められることに加え、相応の相関性があることが分かった。リバウンドハンマ法は、コンクリート表面



図-17 機械インピーダンス法による測定状況³³⁾

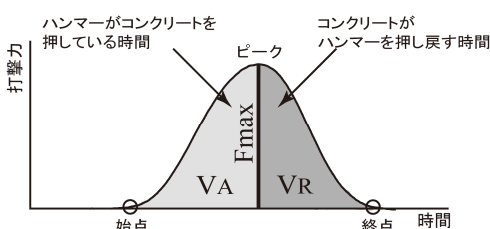


図-18 機械インピーダンス法による打撃力波形³³⁾

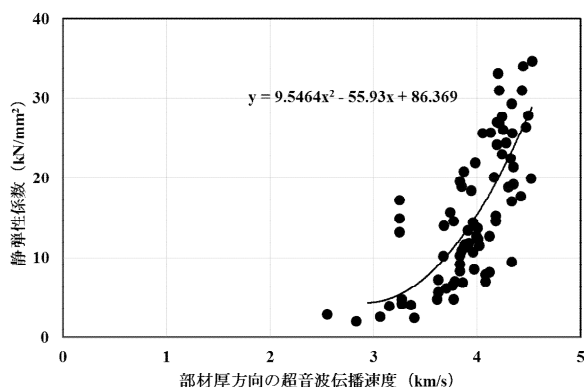


図-19 超音波伝播速度と静弾性係数との関係

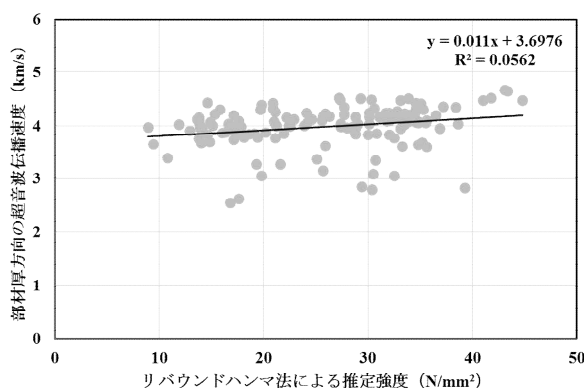


図-20 リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係

における反発度から強度を推定する手法であるため、その推定強度は、表面の劣化状態の影響を多大に受けるものの、内部の劣化状態の影響は受け難いことが予想され

る。一方、機械インピーダンス法は、コンクリートの弾性係数により強度を推定する手法であり、推定強度は、表面の劣化状態だけでなく、内部の劣化状態の影響も反映しているものと考えられる。このことから、寒冷地における機能診断手法としてのリバウンドハンマ法の問題点、ならびに機械インピーダンス法の有用性が示された。

圧縮強度とリバウンドハンマ法および機械インピーダンス法による推定強度との関係を図-22 に示す。測点数は、リバウンドハンマ法では 59 測点、機械インピーダンス法では 58 測点である。なお、図中では、リバウンドハンマ法における測定値を灰丸、機械インピーダンス法における測定値を黒丸で示している。また、±0%、±15%、±30%の誤差範囲を、それぞれ黒色の実線、灰色の破線、黒色の破線にて併記している。リバウンドハンマ法では、±15%の範囲には測点の約 3 割、±30%の範囲には測点の約 5 割の測定値が入るのに対し、機械インピーダンス法では、±15%の範囲には測点の約 5 割、±30%の範囲には測点の約 6 割の測定値が入る。この結果からも、機械インピーダンス法による推定強度は、リバウンドハンマ法による推定強度に比べ、内部の劣化状態の影響をより反映していることが推測される。このことから、機能診断手法としての機械インピーダンス法の有用性が確認され、また、リバウンドハンマ法からの代替の可能性が示された。

3.1.4 課題

ここでは、寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設の機能診断手法の必要性について述べるとともに、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の機能診断手法としての適用性について考察した。寒冷地に位置するコンクリート開水路のように、圧縮強度や弾性係数などの強度特性が健全に保持されない環境下にある施設では、その機能診断において施設状態を如何に定量的に調査し評価していくのが重要となる。今後は、より精度よく調査・評価することができる機能診断技術の開発・適用が期待される。

3.2 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手法^{35),36)}

3.2.1 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ブ試験などがある。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

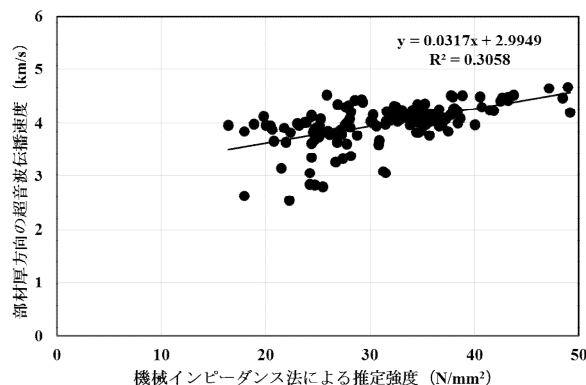


図-21 機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係

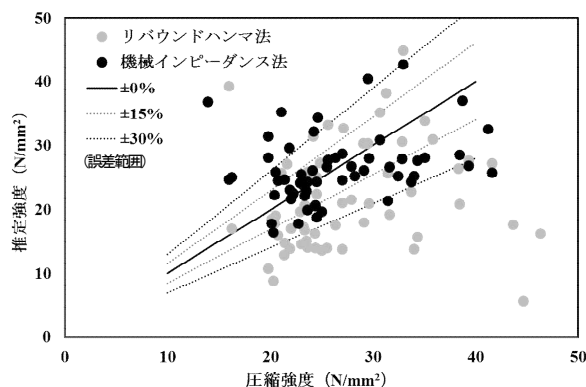


図-22 圧縮強度と推定強度との関係

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³⁷⁾。

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。

3.2.2 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。

3.2.3 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、Ⅲ・Ⅳ水路は同じ幹線であるがバレルが異なる）、Ⅴ水路（北海道岩内郡）、Ⅵ水路（北海道瀬棚郡）である。

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。

3.2.4 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-23 に示し、コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）を図-24 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-25 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、関係性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-26 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

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

拡張アンカーの許容引張荷重は、式 (3) で求められる³⁸⁾。

$$P_{a2} = \phi_2 \times \alpha_c \times c_{\sigma t} \times A_c \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 P_{a2} ：コーン状破壊の許容引張力 (N)、 ϕ_2 ：低減係数（長期荷重用：1/3、短期荷重用：2/3）、 α_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/mm²) ($c_{\sigma t} = 0.31\sqrt{F_c}$)、 F_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 A_c ：コーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm²)、である。 A_c は式 (4) で求められる。

$$A_c = \pi \cdot l_{ce} (l_{ce} + D) \dots\dots\dots (4)$$

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

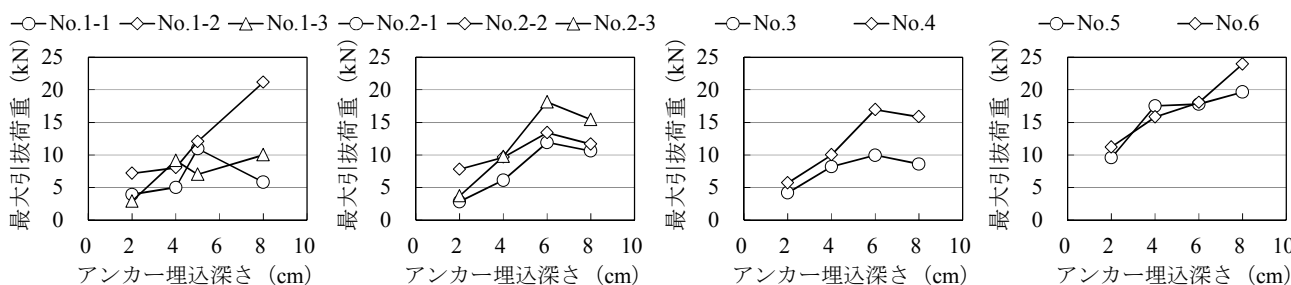


図-23 各埋込深さの最大引抜荷重

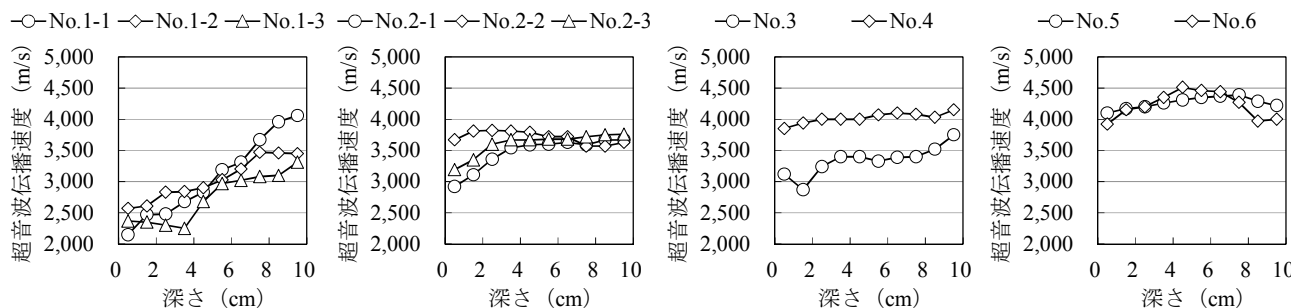


図-24 コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）

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-24 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-27 に示す。また、関係式を式 (5) に示す。

$$P_{\max \cdot x} = 0.065 V_{a \cdot x} + 1.3452 \quad (R^2 = 0.75) \quad (5)$$

ここに、 $P_{\max \cdot x}$: アンカー埋込深さ x m における最大引抜荷重 (kN)、 $V_{a \cdot x}$: 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。

3.2.5 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. 農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価

4.1 積雪寒冷地における表面保護工法の現状

コンクリート開水路に施工された表面保護工法には、凍結融解の作用によるものと推定される様々な変状がみられる。その中で代表的な変状としては、表面被覆工法のはく離、膨れ、断面修復工法のはく離および微細ひび割れが挙げられる。断面修復工法の中には表面含浸工法を併用する工法も存在するが、そうした工法であってもはく離やひび割れを生じる場合がある(図-28参照)。

特に積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路では、灌漑期において水路内の流水に曝されるだけでなく、非灌漑期においても融雪水などに曝されることが考えられ、

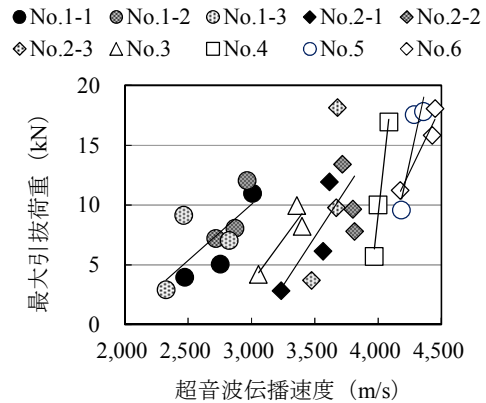


図-25 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係

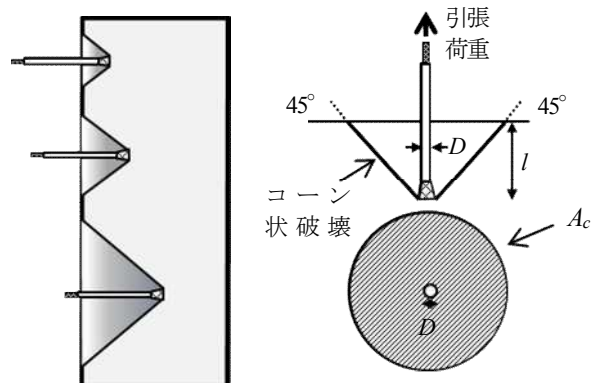


図-26 金属拡張アンカーのコーン状破壊における有効水平投影面積

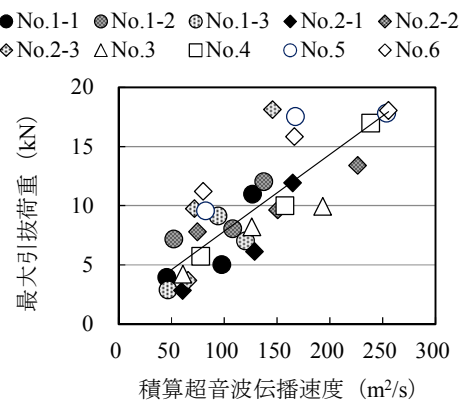


図-27 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の関係

コンクリート躯体は常に高い含水状態に保持されていることが予想される(図-29参照)。そのため、その撥水効果により表面付近の水分を低減させる表面含浸工法や、その大きな塗布厚により凍結深をコンクリート躯体にまで到達させ難くする断面修復工法であっても、凍結融解の作用とそれに伴う変状の発生は避けられないことが考えられる。

4. 2 補修後の開水路を対象とした含水率の調査³⁹⁾

4.2.1 目的

寒冷地に位置するコンクリート開水路では、近年、凍害劣化を対象とした補修が進められている。この補修では、劣化因子である水分の侵入の抑制を期待できる表面保護工法⁴⁰⁾が適用される場合が多い。しかし、その適用後のモニタリング⁴⁰⁾では、摩耗量調査など材料自体の耐久性が調査対象となる場合が多く、水分侵入の抑制効果の有効性やその持続性が調査されることはほとんどない。

本研究では、表面保護工法などにより補修されたコンクリートを対象として、補修効果の有効性やその持続性を検証するためのモニタリング調査手法、ならびにそれら性能を判定指標とした表面保護工法の評価に関する検討を行っている。ここでは、表面保護工法適用後約10年が経過した開水路側壁における、表面保護工法の種別による含水率の調査結果と、含水率の測定に微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定法を試行した結果について報告する。

4.2.2 調査方法の概要

調査対象とした開水路は、北海道上川地方に位置するK水路、C水路で、供用期間は、前者は46年、後者は49年である。構造型式は、いずれもRC現場打ちフリューム水路である。K水路では、無機系被覆工法 K-IO、有機系被覆工法 K-OR、パネル工法 K-PA が適用され、調査時には12年が経過している。C水路では、無機系被覆工法 C-IO-1、C-IO-2、C-IO-3、有機系被覆工法 C-OR、表面含浸工法 C-IM が適用され、9年が経過している。なお、C-IO-2、C-IO-3、C-OR は新設コンクリートに打ち換えた躯体（打換母材）に、その他は既設コンクリート躯体（既設母材）に表面保護工法を適用している。測点は、凍結融解の程度が著しい、南側に面した水路右岸側の気中部および水中部に設けることとし、浮きや剥離などの外観上の変状が軽微な箇所を選定した。

調査方法は、測定精度が期待できる①炉乾法、現地を実施する②電気抵抗式水分測定法とした。調査概要を図-30に示す。①炉乾法では、側壁より採取したコアを表面から20mm間隔で0~140mmの範囲で計7試料に切断し、JIS A 1125（骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面含水率の試験方法）に準拠して炉乾燥前後の質量より含水率を求めた。②電気抵抗式水分測定法では、建築の仕上げ工における品質管理で用いられる電気抵抗式水分計（Kett HI-800型）により、コア採取箇所から30mmの位置にφ6mmの孔を30mm間隔で2つ設け、孔間において測定を行った。測定は上述の試料の採取位

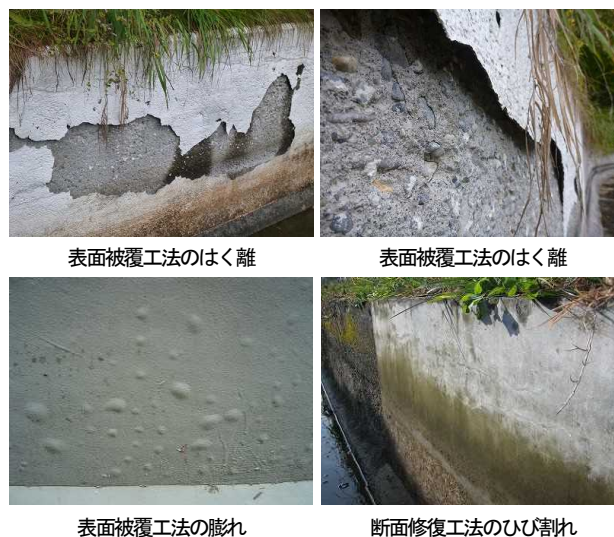


図-28 表面保護工法に作用する凍結融解による変状



図-29 積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路の非灌漑期の状況

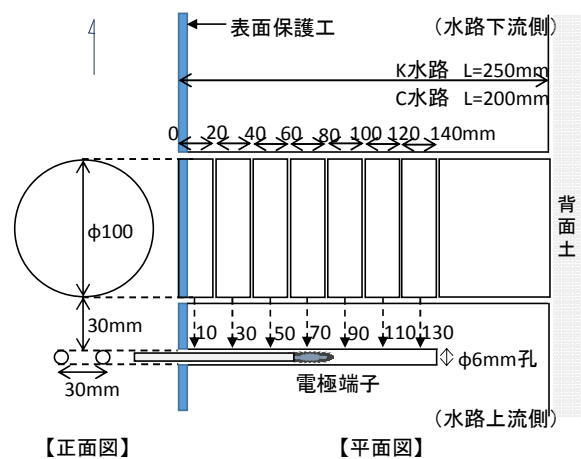


図-30 調査概要

置に対応させるため、深さ10~130mmの計7点で行った。

4.2.3 調査結果および考察

(1) 表面保護工法の種別による含水率

炉乾法により求めた深さ毎の含水率のうち、気中部の結果を図-31に示す。ここで、K-IO、K-OR、C-IO-1、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの表面から10mmの含水率は、補修材（5~15mm）とコンクリートからなる結果となっ

ており、K-PA はコンクリートが含まれていないため測定していない。

既設母材では、同一環境下のコンクリート側壁でも、工法間で含水率に差異が生じていた。一方、打換母材では工法間の含水率の差は小さかった。K水路では、K-NよりもK-IO、K-ORの含水率は高く、K-PAは同程度となった。C水路では、C-NよりもC-IM、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの含水率は低く、C-IO-1は同程度となった。C-Nの含水率は8%程度とほぼ飽水状態にある⁴にも関わらず、C-IM、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの含水率は低く保たれていることから、これらの工法は水分の侵入抑制効果が発揮されていると推測される。また、K-PA、K-IO以外の工法では、含水率は表面に近いほど低くなる傾向が見られ、水分が表面付近に極端に滞留することはない。

(2) 電気抵抗式水分測定法の試行結果

炉乾法と電気抵抗式水分測定法による含水率の測定結果を図-32に示す。C水路(打換母材)では、炉乾法と電気抵抗式水分測定法の測定結果はほぼ同程度で、ばらつきは±30%に収まっていた。一方、母材の供用年数が長いK水路(既設母材)とC水路(既設母材)では、ともに、炉乾法よりも電気抵抗式水分測定法による含水率が低く測定されてしまう。しかし、炉乾法による含水率が高くなるほど電気抵抗式水分測定法の含水率も高くなることから、電気抵抗式水分計による測定は、含水率そのものを求めることは難しいが、コンクリート内部の水分を把握するための尺度として扱うことは有効であると考えられる。

4.2.4 課題

今後は、現地で採取した表面保護工適用後のコアの凍結融解試験を行うことにより、補修効果の有効性や持続性の性能を判定指標とした表面保護工の評価に関する検討を進める。

5. まとめ

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、①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、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を行うことを達成目標としており、これにより、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最終的な研究目的としている。

平成28年度および平成29年度では、①農業水利施設

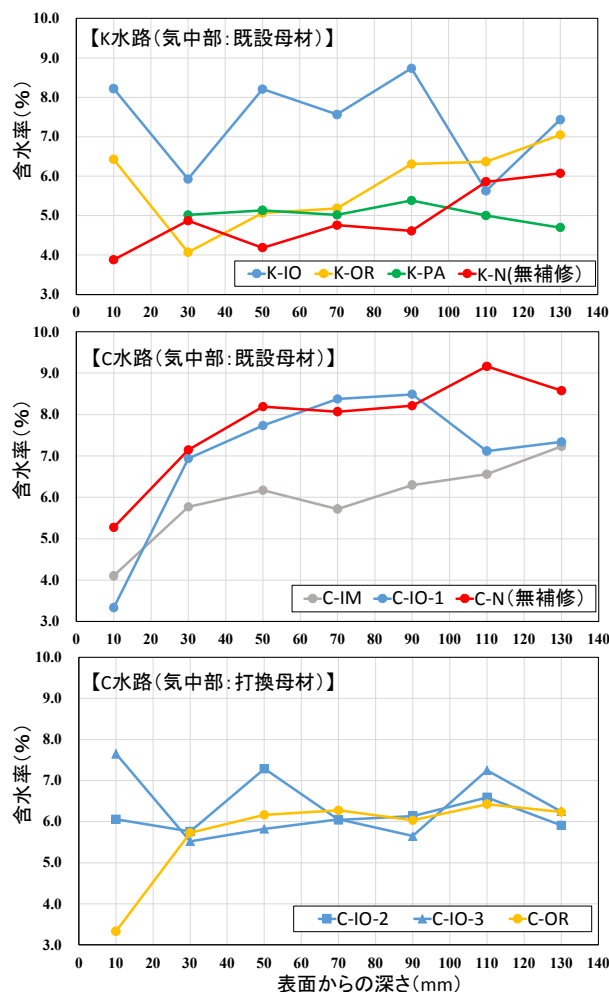


図-31 深さ毎の含水率(炉乾法)

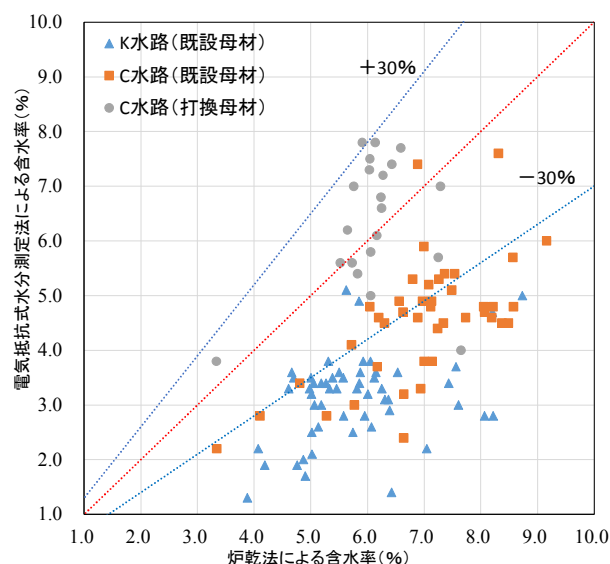


図-32 炉乾法と電気抵抗式水分測定法による含水率

の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築において、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・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。さらに、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発において、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価を行った。

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の詳細調査を行った。その結果、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。
- (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、鋼矢板の腐食診断を行い、経過年数、腐食量、水質の関係を整理・分析することにより、その構造性能の低下機構について考察した。鋼矢板の腐食診断では、腐食速度は、干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、経過年数以外の要因に影響を受けることが推察された。さらに、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構の考察では、積雪寒冷地に特有の性能低下要因を示し、それらが鋼矢板の腐食・断面欠損を加速させること、また、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることを示した。
- (3) 北海道内に位置する開水路延べ 36 路線の 446 測点において、コア採取を含む劣化状態の詳細調査を行った。凍害劣化の発生形態を整理し、内部変状の発生により生じる弾性係数の低下の実態を明らかにして、寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性を示した。また、超音波伝播速度と静弾性係数との関係を整理し、超音波法の有用性を確認した。さらに、リバウンドハンマ法の問題点について考察するとともに、機械インピーダンス法の有用性を示した。
- (4) 北海道内および岩手県内に位置する 6 箇所の RC 現場打ち開水路のコンクリート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、また、この関係を利用して部材内部の凍害劣化診断が可能であることを明らかにした。

- (5) 北海道上川地方に位置する供用後 46 年、49 年を経過し、また、表面保護工法適用後約 10 年を経過した開水路側壁において、表面保護工法の種別によるコンクリート側壁の含水率の調査を行った。その結果、同一環境下のコンクリートでも、工法間で含水率に差異が生じることが分かった。また、含水率の測定に微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定法を試行した結果、含水率そのものを求めることは難しいものの、コンクリート内部の水分を把握するための尺度として扱うことは有効であると考えられる。

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.28-32、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、第 86 巻、3 号、pp.33-37、2018
- 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、pp.560-561、2017
- 16) 石神暁郎・星野香織・工藤吉弘：積雪寒冷地における鋼矢板排水路の性能低下特性、水土の知、第 86 巻、5 号、pp.43-46、2018
- 17) 石神暁郎：北海道における鋼矢板腐食実態と排水路性能低下の特徴、鋼矢板水路の腐食実態と補修・補強対策論文集、pp.11-16、2017
- 18) 北海道開発局農業水産部農業水利課：北海道の明渠排水、pp.3-9、pp.32-46、pp.47-249、1989
- 19) 日置綾人・鈴木一衛・畑中諭・渡辺欣哉：軟弱地盤地帯の明渠排水路施工について、第 25 回（昭和 56 年度）北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.1099-1106、1982
- 20) 杉山幸男・奥井宏・斉藤晴保・鈴木達也：泥炭地排水路工法について、第 32 回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp.107-112、1983
- 21) 新井貞夫・仁平勝行・山内勝彦・河合裕志・横山一男・本間公康：泥炭地における排水路の設計例について、第 33 回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp.5-8、1984
- 22) 峰村雅臣・土田一也・羽田卓也・原斉・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
- 23) 原斉・峰村雅臣・萩原太郎・森井俊広・鈴木哲也：鋼矢板排水路の腐食実態に関する実証的研究、平成 26 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.698-699、2014
- 24) 板垣知也・松木俊郎・江口英弘・長崎文博・鈴木哲也：新潟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
- 25) 石神暁郎：農業用排水路の材料劣化に着目した機能診断手法、平成 26 年度北海道開発局技術開発委員会農業検討部会技術研修分科会（施設保全研修会）講演資料、2014
- 26) 石神暁郎・西田真弓・蒔苗英孝・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法、水土の知、第 86 巻、6 号、pp.27-30、2018
- 27) 石神暁郎・西田真弓・蒔苗英孝・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：コンクリート施設の凍害劣化特性に対応した機能診断手法、平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2018（印刷中）
- 28) 農林水産省農村振興局：農業農村整備に関する技術開発計画、pp.5-8、2017
- 29) 食料・農業・農村政策審議会 農業農村整備部会 技術小委員会：農業水利施設の機能保全の手引き、2015
- 30) 西林新蔵・小柳裕合・渡邊史夫・宮川豊章：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.516-530、2009
- 31) 石神暁郎・金田敏和・蒔苗英孝・会沢義徳・西田真弓・佐藤智：超音波伝播速度の測定によるコンクリート開水路の凍害診断、水土の知、第 80 巻、6 号、pp.13-16、2012
- 32) 久保元樹・井上真澄・佐藤 智・石神暁郎：機械インピーダンス法を用いたコンクリート開水路の凍害診断手法の検討、コンクリート工学年次論文集 36(1)、pp.2110-2115、2014
- 33) 佐藤智・石神暁郎・加藤太吾・安田俊一・大杉周作・蒔苗英孝：機械インピーダンス法によるコンクリート開水路側壁の内部変状の検出、平成 26 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.658-659、2014
- 34) 緒方英彦・服部九二雄・高田龍一・野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1563-1568、2002
- 35) 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
- 36) 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
- 37) 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
- 38) 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
- 39) 西田真弓・石神暁郎・山田章・緒方英彦：寒冷地における表面保護工法適用後のコンクリート開水路側壁の含水率、平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2018（印刷中）
- 40) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針（案）、2005
- 41) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.6-1-6-25、2015
- 42) 湯浅昇・笠井芳夫：非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法、コンクリート工学、Vol.32、No.9、1994

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】

本研究の目的は、基幹的な農業水利施設における大規模地震災害時および大雨災害時に備えた災害対応計画の策定技術を開発することである。そのため、本研究で取り組む主要な課題は、①信頼性工学手法のひとつであるFTAを用いたリスク解析および対策検討方法の有効性を検証して、これらの方法を体系化することと、②現状の土地改良区が有する資源量を用いて、最大限の減災効果を発揮できる災害対応計画の策定方法を考案することの2点である。

課題の①に関して、平成28年度には、FTAを用いて、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を特定し、その原因事象に対する対策を検討した。その結果、FTAによるリスク解析の有効性は確認されたものの、FT図の肥大化に伴いその解析作業が煩雑化するという課題もまた明らかにされた。この課題を解消するため、平成29年度には、FT図作成において一定の具体的な原因事象が特定された段階で対策の検討に切り替えるという方法を案出した。この方法を用いて、灌漑用水路の施設管理者とともに大規模地震対策の検討を行ったところ、具体的な対策を効率よく引き出すことができた。また、課題の②に関して、平成28年度には、大規模地震発生後即座に複数名の施設管理者が予め割り当てられた各ゲート設備に急行して対応にあたるという災害対応体制を提案して、その場合における各ゲート設備への施設管理者の割当人数を最適化する方法を構築した。この結果を受けて、平成29年度には、同災害対応体制の構築の可否を、取水ゲートを閉鎖するか否かの判断基準とする意思決定方法を提案した。この意思決定方法の導入およびFTAにより挙げられた対策の実施によって、現行の災害対応が遂行不能になる確率は、震度6強において約60%低減、震度7において約35%低減されることが分かった。さらに、平成29年度には、平成28年8月の台風第10号による大雨災害時において実施された農業用ダムの管理の実態を検証して、ダム管理において防災行動計画が有効であることを示した。

キーワード：大規模災害、農業水利施設、災害対応、FTA

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¹⁾。平成28年8月には、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発生して、農業水利施設が壊滅的な被害を受けた²⁾。

このような大規模災害に対応するためには、万一施設が被災しても、その後の災害対応により被害拡大を最小限に抑止する減災対策が重要になる。しかし、大規模災害時には、その災害対応に必要な資源である人、情報通信、設備機器、インフラなどもまた被災して、その機能を喪失して

しまうおそれがある。それゆえ、大規模災害時に起こり得る多種多様な被害想定を考慮した災害対応計画を策定しておく必要がある。

大規模災害時における以上のような問題意識から、筆者らは、大久保ら³⁾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FTA (Fault Tree Analysis)を用いて、大規模地震災害時に農業用水路施設での災害対応の遂行を阻害する被害リスクを網羅的に特定するとともに、その被害リスクへの対策の効果を定量的に評価した。このような研究成果を受けて、本研究では、基幹的な農業水利施設における災害対応力を強化するための災害対応計画策定技術の開発を目的として、次のような主要な課題に取り組んでいる。

① FTAを用いたリスク解析および対策検討方法の有効性の検証および体系化

② 現状の土地改良区が有する資源量を用いて、最大限の減災効果が発揮できる災害対応の計画策定手法の考案
平成 28 年度には、①の課題に対して、国内最大級の灌漑用水路施設における災害対応を対象に、FTA を用いたリスク解析および対策検討を実施して、同手法の有効性を検証するとともに、実用面における課題を明らかにした。また、②の課題に対して、実際に災害対応を実施できる施設管理者数の制約において、減災効果を最大化する災害対応計画の最適化手法を構築した。これらの成果を基礎として、平成 29 年度には、次のような研究を実施した。

研究 1：灌漑用水路の施設管理者が大規模災害に備えた対策を自らの手で検討できる実用的な方法の構築を目指して、従来の FTA による対策検討方法を改良した。

研究 2：災害対応にあたる施設管理者の初動体制および意思決定場面に焦点をあてて、既往の災害対応体制における課題を明らかにし、その課題解決にアプローチする新たな災害対応体制を論究した。

また、平成 28 年 8 月北海道大雨災害時の災害対応に関して、平成 29 年 10 月に灌漑用水路施設を管理する施設管理者に対して聞き取り調査を行うことができたことから、次の研究を実施した。

研究 3：大雨災害時におけるダム管理の実態を調査して、そのダム管理の遂行を阻害するリスクの解析から、ダム管理における防災行動計画（タイムライン）の有効性を検討した。

本報告では、以下、2 章において研究 1 について、3 章において研究 2 について、4 章において研究 3 について、平成 28 年度および平成 29 年度の研究成果を報告する。5 章では、各章で得られた主要な結果をとりまとめる。

2. FTA を用いた対策検討方法の改良

2.1 FTA によるリスク特定および対策検討方法

2.1.1 FTA の概要

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対策を明らかにする方法である⁴⁾。FTA は、機械設備の故障からヒューマンエラーまで、特性の異なる事象を統一的に解析することができるので、人や情報通信、インフラなど多種多様な資源が関連する大規模災害時の災害対応過程を解析する手法として適当である。FTA は、①解析対象の把握、②FT 図の作成、③対策の検討の手順で実施する。

2.1.2 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、基幹的な幹線用水路施設を管理する土地改良区職員（以下、「施設管理者」）に聞き取り調査を実施して、大規模地震災害時に幹線用水路施設において起こり得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。

2.1.3 FT 図の作成

FT 図は表-1 に示す記号を用いて作成する。FT 図の例を図-1 に示す。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 と基本事象 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。

本研究では、以上のような規則と手順に従って FT 図を作成することで、大規模地震発生直後における災害対応が遂行不能になる根本的な原因事象、すなわち、基本事象を特定した。なお、発想の公平性や一般性を確保するため、FT 図の作成作業は複数名で行うことが望ましい。本研究では、調査対象の施設管理者、災害に関する知見を有する

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：上位事象の原因となる事象
○	基本事象	根本的な原因となる事象
∪	ORゲート	下位事象のひとつ以上が発生すれば上位事象が発生
∩	ANDゲート	下位事象のすべてが発生する場合に上位事象が発生

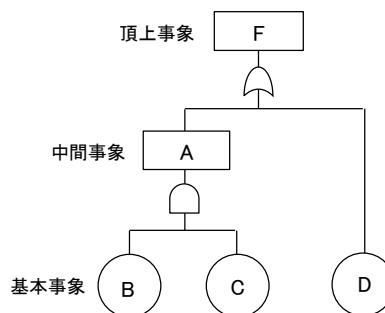


図-1 FT 図の例

技術者および筆者らを含めた6名または7名によってFT図を作成した。

2.1.4 対策の検討

FT図に示される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、ひとつの基本事象に対して複数の対策が考えられる場合がある。その場合には、対策をさらに樹形状の図に整理する「対策検討FT図」を作成することが有効である⁵⁾。対策検討FT図については、2.4節および2.5節において説明する。

2.2 FTAによるリスク特定および対策検討の実例

2.2.1 解析対象とした災害対応

(1) 対象施設

本研究において解析対象とする灌漑用水路施設は、北海道の水田地帯にある頭首工と開水路からなるH幹線用水路である。図-2にその外観を示す。H幹線用水路の施設規模は、延長約80km、最大通水量約42m³/sであり、国内最大級の灌漑用水路である。H幹線用水路を管理する施設管理者の協力を得て、同施設管理者が想定している大規模地震災害時の災害対応を対象に、FTAによる被害リスク



図-2 灌漑期におけるH幹線用水路の外観

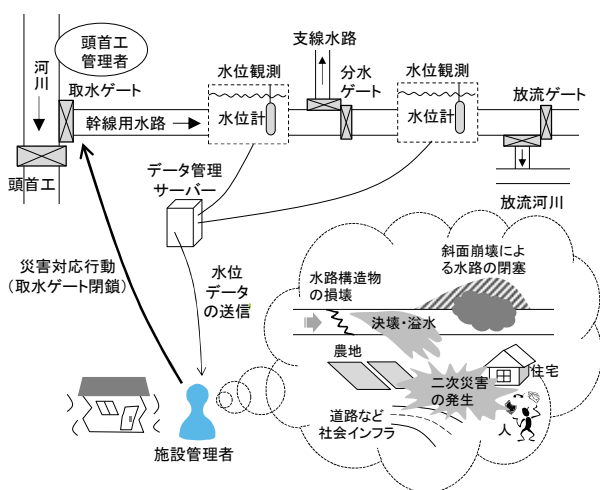


図-3 大規模地震発生直後において想定される災害対応

の特定および対策の検討を実施した。

(2) 大規模地震発生直後における災害対応

大規模地震災害によって長大な幹線用水路が被害を受けて、万一にも決壊あるいは溢水という事態となれば、その被害箇所周辺の地域に甚大な二次災害が生じることが懸念される。そのため、H幹線用水路の施設管理者は、地震発生後、即座に水管理システムのデータを確認して、用水路内の水位に異常があれば直ちに取水ゲートを閉鎖して、溢水や決壊による二次災害の発生を防止することを想定している(図-3)。

(3) 頂上事象の設定

以上のように、大規模地震発生直後に施設管理者が直ちに行う災害対応は、取水ゲートを閉鎖して被害拡大を防止することである。そのため、本研究では、取水ゲートが閉鎖できないという状況、すなわち、「取水ゲートの閉鎖不能」をFT図の頂上事象として設定した。

2.2.2 FT図の作成と対策の検討

H幹線用水路における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象としたFT図の一部を図-4に示す。頂上事象の下位に災害対応の各工程が遂行不能となる事象が列挙される。それらの各事象が発現する原因事象を連鎖的に挙げていき、根本的な発生原因となる基本事象を特定した。図中の△の記号は他のFT図が連結すること、すなわちFT図がさらに継続することを意味する。それゆえ、基本事象「系統電力の停電」以外の事象にはさらにFT図が続くことになる。ここでは、「系統電力の停電」を基本事象としているが、その発生原因は、配電設備、送電設備、発電所と遡っていけば、どこまでも詳細に挙げられるということになる。しかし、配電設備以降の原因事象に対して、施設管理者が対

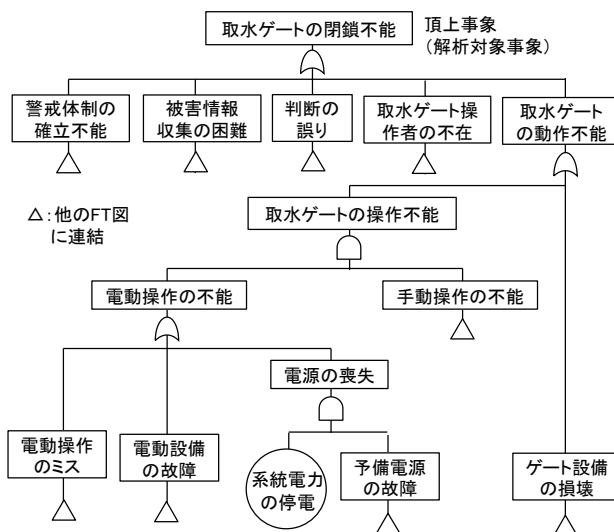


図-4 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象としたFT図の一部

応できるものではない。このように、原因事象の追究をさらに進めることができたとしても、施設管理者による対策実施が不可能であることが確認された時点で原因事象の追究を止め、その事象を基本事象とした。

このようにして挙げられた基本事象に対して、対策を検討した。ただし、頂上事象からの原因経路が異なるものの、同じ内容の基本事象が重複して得られる場合がある。それらの再整理を行って、最終的に50をこえる基本事象と対策が得られた。

2.3 FT図作成における課題

前節では、H幹線用水路を対象に、大規模地震災害時における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図を作成し、その発生原因となる基本事象を特定した。これにより、大規模地震の発生に備えて対策すべき内容を明らかにした。しかし、その一方で、こうしたFTAを用いた一連の対策検討作業を、土地改良区の実務において適切に実施できるだろうかという疑問の声も、実際に筆者らとFT図を作成したH幹線用水路の施設管理者からあがった。

FTAは根本的な原因と考えられる基本事象を明らかにしたうえで、その各基本事象に対する対策を検討していくという手順で行われる。しかし、その基本事象を決定するための客観的な基準は定められていない。それゆえ、無制限に原因事象を挙げていけば、FT図は極端に肥大化してしまう場合がある。このことは、2.2.2項で「系統電力の停電」の原因事象に関して述べたとおりである。FT図が肥大化すれば、言うまでもなくその作成と対策検討に係る時間と労力は増大する。さらに、そこで得られた対策を分類して、対策導入の適否を評価する作業にかかる時間も増大する。また、FT図が肥大化すれば、その全体像が捉えにくいものとなり、FT図が有する「頂上事象が発生する原因経路をひと目で把握でき、机上シミュレーションに役立てられる」という利点も損なわれてしまう。

FTAでは、基本事象を詳細に追究するほど、その対象を具体化することができる。しかし、そのためにFT図が極端に肥大化してしまうことは、逆に対策の検討を困難にしまうおそれがある。このことが、FTAを用いて対策検討を行う際の課題である。

2.4 FT図の改良

以上に述べた課題に対する対応策として、筆者らは、FT図作成において一定の原因事象が特定された段階で、対策の検討に切り替えるという方法（以下、「改良FT図」）を案出した。この方法によって、FT図の肥大化を抑制し、対策を直接的に議論することで、その検討作業の効率化を図ることがねらいである。改良FT図の一例を図-5に示す。

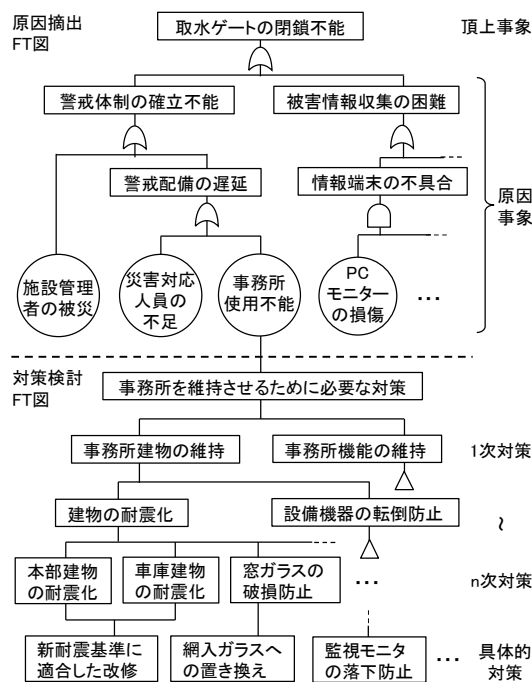


図-5 改良FT図の一例

す。この方法では、FT図による頂上事象の発生原因の追究を、対策を実施する具体的な対象が明確になった時点で休止して、その後は各基本事象に対して対策の検討を進めていく。例えば、基本事象「事務所の使用不能」は、「事務所を維持させるために必要な対策は何か」という観点に切り替えて、対策案を挙げていく。そのとき、多種多様な対策の議論に漏れが生じないように、対策を具体化していく過程を樹形図の図に整理する。

以上に述べた改良FT図による方法を、H幹線用水路の災害対応における大規模地震対策の検討に適用した。その結果、ねらい通りに、従来のFT図により挙げられた対策とほぼ同等かそれ以上の対策を効率よく引き出すことができた。このことから、改良FT図による対策検討方法の実用性は高いことが示唆された。本報告では、以下、改良FT図における頂上事象から基本事象まで部分を「原因抽出FT図」、基本事象から具体的な対策までの部分を「対策検討FT図」と呼ぶ。

2.5 改良FT図の具体例

改良FT図における原因抽出FT図を図-6に示す。現状では、この原因抽出FT図で、どこまで中間事象を挙げた段階で基本事象を得たとするのか、その決定基準を明確に定義することはできていない。本研究では、頂上事象から基本事象までの中間事象の階層をおおむね4段階ないしは5段階程度を目途にして、対策検討の対象が具体化した時点で、その原因事象を基本事象とした。その結果、26の基本事象を特定した。

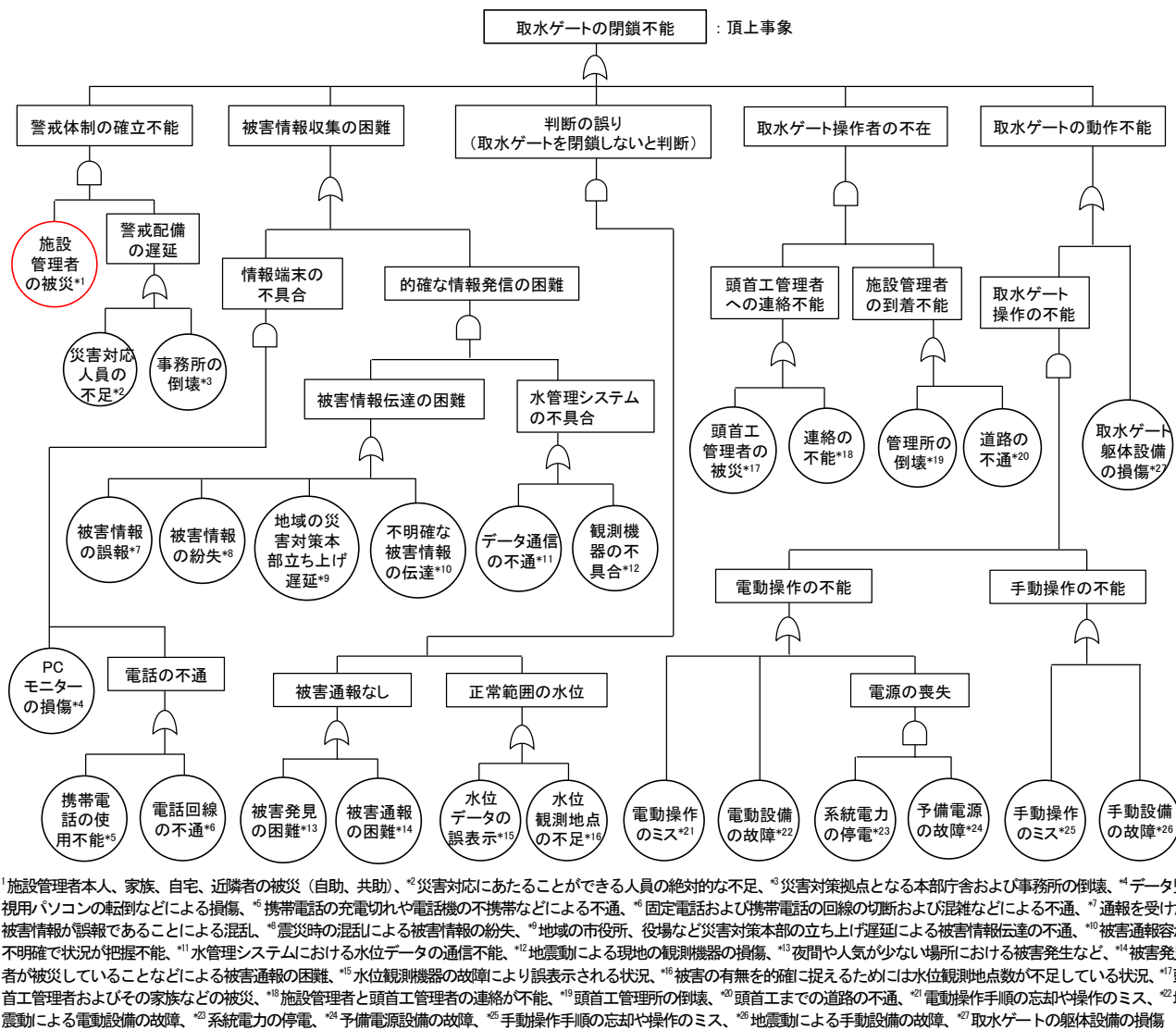


図-6 改良FT図における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする原因抽出FT図

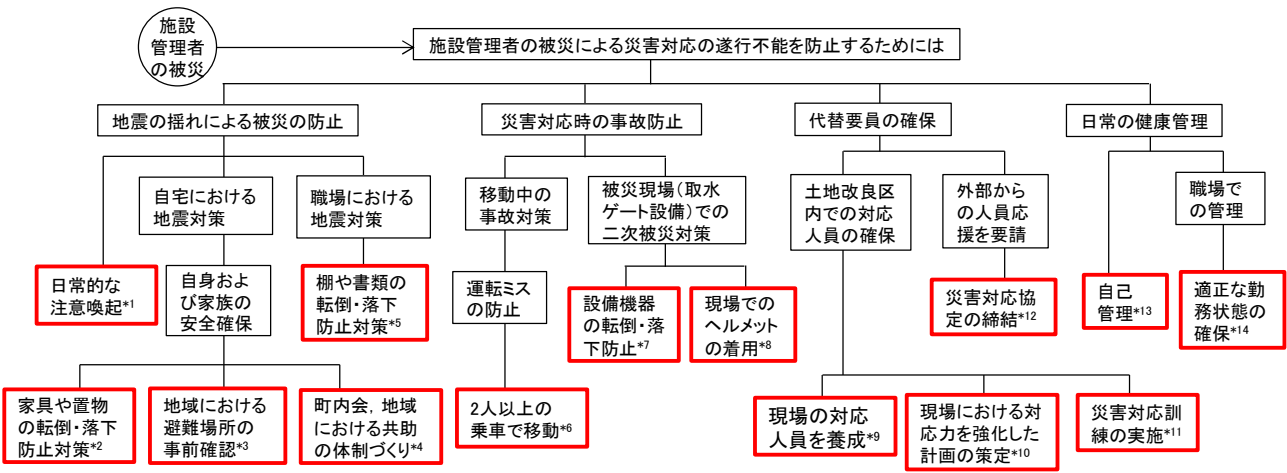


図-7 基本事象「施設管理者の被災」の対策を検討する対策検討FT図

原因抽出 FT 図において特定した基本事象「施設管理者の被災」に対する対策検討 FT 図を図-7 に示す。基本事象「施設管理者の被災」に対する対策を、「施設管理者の被災による災害対応の遂行不能を防止するためには」という観点に切り替えて検討した。まずは一次対策として、「地震の揺れによる被災の防止対策」、「災害対応時の事故防止対策」、「代替要員の確保」、「日常の健康管理」が挙げられた。それらの各対策を自由に議論して、最終的に 14 の具体的な対策が得られた。その内容は、個人の地震対策から現場対応時における対策、人材育成や職場環境に関する対策まで多岐にわたった。この「施設管理者の被災」に対する対策検討では、従来の FT 図により得られた対策よりも、むしろ多数の対策を挙げることができた。

また、他の基本事象についても、改良 FT 図によって得られた対策は、従来の FT 図によって得られた対策とほぼ同数かつほぼ同内容であった。本研究における FTA を用いた対策検討の目標は、これまで認識不足であったリスクや想定していなかったリスクを洗い出して、そのリスクに対する対策を明らかにすることである。この目標達成にアプローチする方法として、改良 FT 図を用いた対策検討方法は、従来の FT 図を用いた方法に比べて遜色のないものであることが、今回の調査結果によって示唆された。

2.6 改良 FT 図による対策検討の妥当性の考察

改良 FT 図による対策検討が妥当であることの根拠を、人間の認識や行動に関する体系的な知見から考察することは、今後の課題である。しかし、改良 FT 図の妥当性は、次のように推察されよう。

我々は日常的にリスクと対策をほぼ同時に考えている。例えば、「明日は重要な試験日である」という場合、その試験をベストな状態で受験できるように、その前日から入念な対策を考えるであろう。すなわち、「寝坊しないように、目覚まし時計をセットする」、「わすれものをしないように、今晚のうちに持ち物の確認をする」、「万一の食あたりを避けるため、今晚は生ものの摂取を控える」などである。すなわち、我々は日常的にリスクと同時に対策を考えている。対策検討 FT 図における対策の検討作業は、この人間の思考過程を活かして、リスクと対策を一気に議論してしまおうとするものである。ただし、こうしたリスクと対策がほぼ同時に考えられるのは、対策を講じる対象が限定されていて、想定される具体的なリスクを次々と挙げるができる場合である。それが漠然として明確でないときには、むしろ、従来の FT 図に従って、リスク事象の探索から始めるほうが得策である。例えば、「現場における事故の防止」を考える場合、まずは現場においてどのよう

な事故が考えられるのか、それを具体化するところから始めることが必要であろう。

以上の考察から、FT 図の肥大化と対策検討の非効率化を招いた原因は、FT 図の作成が対策を検討できる段階であったにも関わらず、どこまでも FTA の定石に従おうとしたためであると考えられる。すなわち、頂上事象の発生原因を原因抽出 FT 図の作成によって探索し、その原因事象がある程度絞り込まれて具体化した時点で、対策検討 FT 図に切り替えるという対策の検討方法は、従来の FT 図による方法よりも、人間の日常的な思考過程を反映した方法であるといえよう。それゆえ、この改良 FT 図による対策検討方法は、現場の実務において、施設管理者が自らの手で災害対応計画を策定する際に、実用的かつ有効に活用されるものと期待できる。

3. 現行の災害対応計画の改善

3.1 現行の災害対応計画の内容と評価

3.1.1 既往研究の概要

筆者らは、大久保ら³⁾において、FTA を用いて、大規模地震発生直後における施設管理者の災害対応行動を阻害する原因の特定および対策の検討を行うとともに、その対策導入の効果を算定した。3.1 節では、その研究結果を概説する。

3.1.2 解析対象とした緊急対応

(1) 対象施設

本研究の解析対象とした施設は、北海道の水田地域に灌漑用水を供給する S 幹線用水路である。S 幹線用水路は、延長約 29km、最大計画通水量 21m³/s を有するコンクリートフルーム水路である。同用水路を管理する S 土地改良区では、十数名の職員が勤務し、そのうちの 7 名が技術系職員（以下、「技師」）である。さらに、その技師のひとり（以下、「A 技師」）が頭首工および幹線用水路各施設の現場（以下、単に「現場」）における実務的な施設管理を担当している。灌漑期における日常的な現場の監視および点検作業は、A 技師の監督のもと数名の委託業者によって行われている。A 技師は各種設備機器の配置や操作に熟知しており、災害時には、現場において緊急的な災害対応を実施する。

(2) 大規模地震災害時に想定される災害対応

S 土地改良区では、災害時における職員間の連絡網や関連機関への連絡先、意思決定者からの指示系統などを示した災害対応体制が決められている。これは災害発生後、職員が土地改良区本部へ速やかに参集して、施設の点検や応急処置を適切に実施することを目的とした計画である。し

かし、突発的に発生する地震災害の場合、万一にも水路構造物が被害を受けて決壊や溢水といった事態となれば、水路から流出する多量の水によって、農地のみならず近傍の住宅地や道路交通などに対しても甚大な二次災害が及ぶおそれがある。そこで、地震災害時には、まず、A 技師が現場において取水ゲートの閉鎖に向けた対応行動を起こすことになっている。すなわち、実際には、図-8 に示すような2段階の災害対応過程が考えられている。第1段階の対応は、A 技師によって地震発生直後から開始される。地震発生後、A 技師は水管理システムにおける水位データを自身が所有する携帯端末によって確認する。そこで水位に異常があれば、直ちに頭首工に向かい取水ゲートを閉鎖して、二次災害の拡大を防止する（以下、「緊急対応」）。その後の第2段階の災害対応では、しだいに土地改良区本部へ参集してきた職員らによって、組織的に施設の点検や被災箇所の応急処置を行う（以下、「点検・応急処置対応」）。

3) 緊急対応の計画策定の必要性

大規模地震災害時の災害対応を強化するための方策として、事業継続計画（BCP : Business Continuity Plan 以下、「BCP」）の策定が考えられる。BCP とは、大規模な災害時においても最重要業務の継続を図るため、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。土地改良施設を対象にした BCP 策定マニュアル⁹⁾も作成されており、その啓発・普及が進められているところである。しかし、BCP が主に対象とするのは、点検・応急処置対応であり、緊急対応に相当する内容はほとんど含まれない。なぜならば、BCP は、やや事後の対応に重点がおかれた計画であり、組織的な対応を強化するための体制整備を主な目的とした内容となっているからである。そのため、BCP の策定とは別途に、緊急対応に関する具体的かつ実践的な行動計画を策定することが必要である。

そこで、大久保ら³⁾では、大規模地震発生直後における「緊急対応」を対象にして解析を行った。

3.1.3 FT 図の作成と対策の検討

緊急対応の目標は、施設被災による二次災害の発生または拡大を防止するため、的確に取水ゲートを閉鎖することである。そこで、大久保ら³⁾では、A 技師による緊急対応において、「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図の作成を行った。その FT 図の一部を図-9 に示す。頂上事象が発現する中間事象を連鎖的に挙げていき、根本的な原因となる基本事象を特定した。この基本事象に対する対策を講じれば、頂上事象の発生を抑制することができる。しかし、対策実施に投入できる費用や労力には制約がある。そのため、施設管理者が実際に実施できる対策は限られた

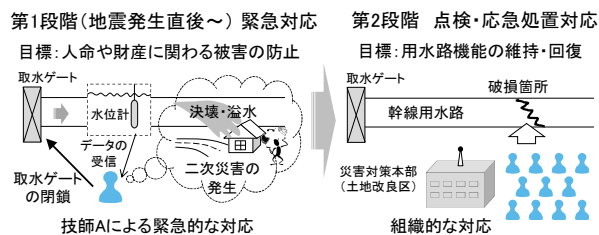


図-8 大規模地震災害時における災害対応過程

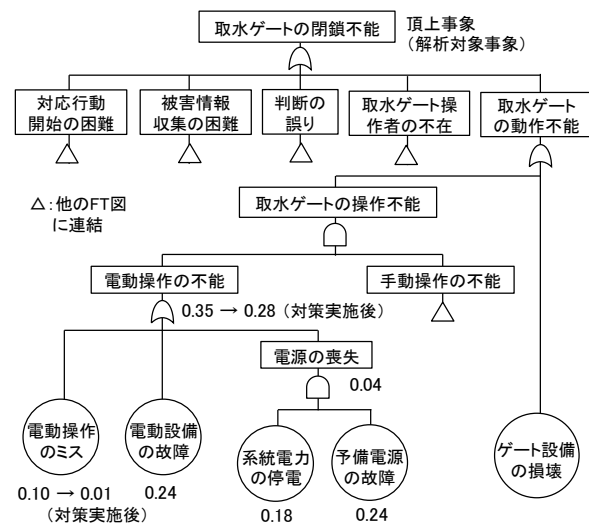


図-9 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図の実例の一部と震度 6 強における発生確率の算出例 (大久保ら³⁾より作成)

表-2 施設管理において実施可能な対策 (大久保ら³⁾より作成)

基本事象	対策	内容
電話機の使用不能 防災無線の使用不能 電動操作のミス 手動操作のミス	ヒューマンエラー対策	携帯電話や防災無線の日常管理における確認 ゲート操作方法の日常管理における確認 ゲート操作方法の簡略化 ゲート操作方法の見える化
監視モニターの損傷 観測機器の不具合	観測機器の破損防止対策	監視用パソコンなどの転倒防止対策 観測機器の転倒防止対策 観測機器の振動による破損に対する対策
水位データの誤表示 水位データの不足	水管理システムの強化	振動や故障による水位データの誤表示を確認 水位観測地点の妥当性の確認 水位計の増設

ものになる。そこで、各基本事象に対する対策の中から、現状の施設管理において実施可能な対策のみを抽出した。その対策を表-2 に示す。設備機器の操作ミスなどに対するヒューマンエラー対策や設備機器の転倒防止対策などが挙げられた。

3.1.4 対策効果の定量評価

FTA では、基本事象に発生確率を与えると、その上位の事象の発生確率を算出することができる。FT 図における

任意の事象の発生確率 P は、その直下位の N 個の事象の発生確率 P_1, P_2, \dots, P_N を用いて、AND ゲートでは(1)式により、OR ゲートでは(2)式により算出される。

$$P = \prod_{n=1}^N P_n \quad (1)$$

$$P = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_n) \quad (2)$$

すなわち、各基本事象の発生確率を設定できれば、(1)式および(2)式を用いて、その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。図-9のFT図中に記した数値は、震度6強における発生確率の算出例である。この場合、「電動操作の不能」の発生確率は0.35と計算できる。このとき、基本事象「電動操作のミス」に対する対策を実施して、その発生確率が対策実施前の1/10に低減できたと仮定した場合、「電動操作の不能」の発生確率は0.28に低減すると評価される。

このようなFTAの定量評価方法を用いて、対策実施前と対策実施後における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を算出した結果を図-10に示す。対策を実施していない現状では、震度6強以上の震災となれば、頂上事象の発生確率はおおむね0.5以上となり、取水ゲートを閉鎖できないおそれがあることが示された。しかし、対策を講じることによって、震度6強における頂上事象の発生確率は0.3となり、一定の対策効果が期待できることが分かった。しかし、震度7の震災となれば、対策実施による効果はほとんど得られないことが示唆された。

以上が大久保ら³⁾において示された主要な結果である。

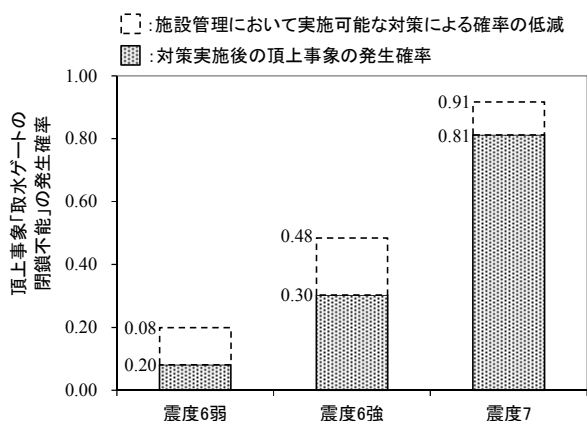


図-10 対策実施前後における各震度階級の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率 (大久保ら³⁾より作成)

3.2 緊急対応時の人員配置の最適化

3.2.1 既往の緊急対応みなおしの着眼点

大久保ら³⁾における結果から、現状の災害対応計画では、震度7の震災となれば、取水ゲートを閉鎖する緊急対応が実施できない確率が高い。そこで、本節では、緊急対応過程を根本からみなおして、緊急対応時に取水ゲートが閉鎖不能になる確率を可能な限り低減することを目指す。そのために筆者らが着目したのは、震災直後に現場において緊急対応を行う技師(以下、「緊急対応技師」)の増員である。

3.2.2 緊急対応技師の増員

現在、S幹線水路の施設管理者が想定している災害対応では、地震発生後、まっ先に現場において緊急対応を行うのは、実質的にA技師のみである。それゆえ、A技師が被災して対応行動を起こすことが不能となれば、緊急対応の遂行は大幅に遅延することになる。そのため、A技師と同様な緊急対応を行うことができる緊急対応技師を養成することが必要である。3.1.2項で述べたように、現行の災害対応計画では、地震発生後、土地改良区職員は土地改良区本部へ参集することになっている。しかし、図-11に示すように、技師の何人かを、土地改良区本部への参集ではなく、直接現場に向かうように割り当てることによって、A技師を含めた複数名の緊急対応技師らによる現場における対応体制(以下、「緊急対応体制」)が構築できるものと考えられる。

また、複数名によって緊急対応体制が構築可能であるとすれば、取水ゲート操作だけでなく、放流ゲート操作による減災効果も期待できる。そこで、各ゲートへの緊急対応技師の割り当て人数をどのようにすれば最も減災効果が高められるのか、という緊急対応体制の最適化の問題が生じる。筆者らは、S幹線水路を対象にして、大規模地震発生時に幹線水路からの放流量を最大化する各ゲートへの技師の割り当て人数を試算した。ただし、ここでの放流量には、取水ゲート閉鎖により止められる取水量も含む。

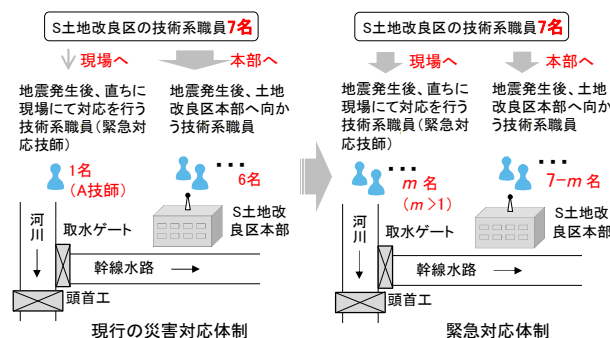


図-11 土地改良区本部へ参集する技師の現場における緊急対応への割り当て

3.2.3 方法

(1) 緊急対応時における人員配置の最適化手法

各ゲート設備への緊急対応技師の配置モデルを図-12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緊急対応技師数である。 $P(n_k)$ はゲート k の操作が実行(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、 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、地震発生後、直接的に幹線用水路のゲート設備に急行できる緊急対応技師の総数 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。

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

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

(2) ゲート k の操作可能確率 $P(n_k)$ の算出

$P(n_k)$ は、図-13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 は緊急対応技師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。「緊急対応技師の到着不能」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緊急対応技師が到着不能となる事象が配列され、それらは上位の「緊急対応技師の到着不能」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、「緊急対応技師の到着不能」が生じる確率が低下することを示す。ただし、本研究では、各緊急対応技師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、「緊急対応技師のゲート 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、緊急対応技師数 n_k には関係しない。以上のことから、 $P(n_k)$ 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。

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

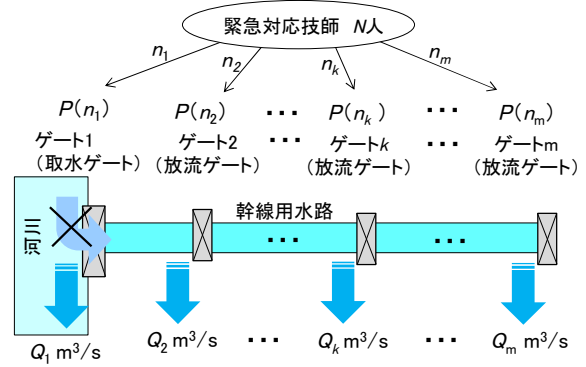


図-12 各ゲート設備への人員の配置モデル

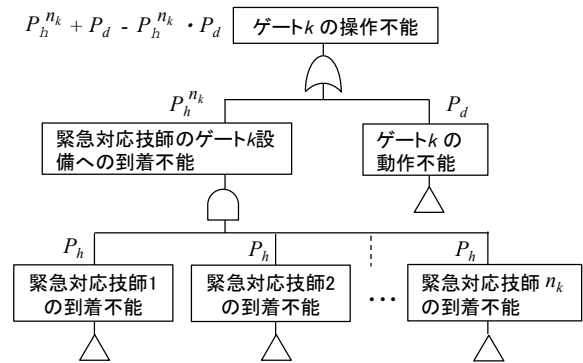


図-13 ゲート k の操作不能を頂上事象とするFT図

(3) ゲート k における放流量 Q_k の算定

Q_1 は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。

(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 ($\sum x_i=M$) を決定するといった配分問題にあたる。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⁹⁾。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。ほとんどの土地改良区では、職員数の制約から現場における緊急対応可能な職員数が10名を上回ることは考えにくい。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。

3.2.4 試算事例および考察

(1) 試算対象とする幹線用水路施設の概要

S幹線用水路には、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。

(2) ゲート操作不能のFT図

図-13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-14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-15に示す。緊急対応技師は、大規模地震発生後、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、「緊急対応技師の到着不能」の原因となる基本事象として、「緊急対応技師の被災」と「移動手段の喪失」の2事象のみを挙げた。

(3) 試算に用いたデータの決定

図-14と図-15に記す基本事象の発生確率を表-3のように設定して、「緊急対応技師の到着不能」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に挙げた値は震度7の震災時の例である。試算に用いた P_h 、 P_d および Q_k を表-4に示す。

(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、7名の技師のうち、本部にて対応する2名を除いた5名までが震災時に緊急対応技師として現場のゲート設備において対応可能である。そこで、緊急対応技師総数を1人~5人までの5通りに仮定した。その各人数において最大となる放流量の期待値を図-16に示す。緊急対応技師総数 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となった。このことは、施設被災時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技師を1人割り当てたほうが減災効果を高められるという結果となった。 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った。また、 N を5人

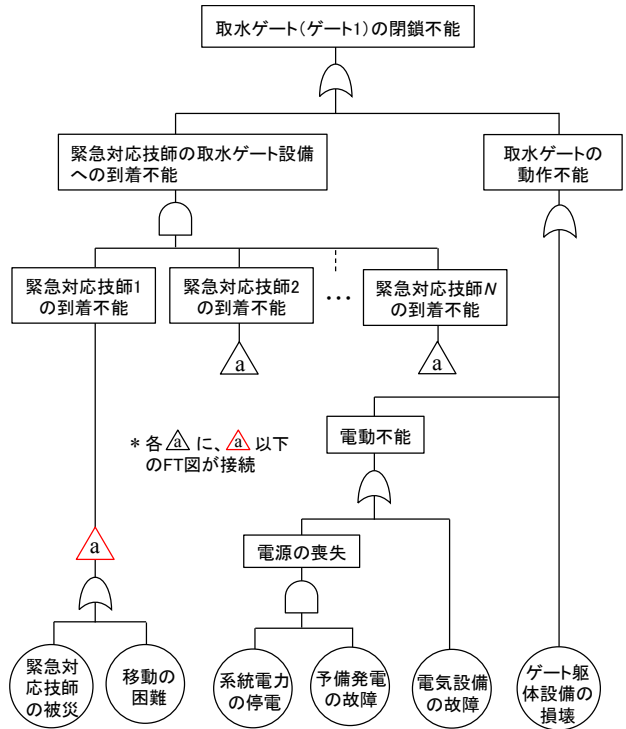


図-14 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図

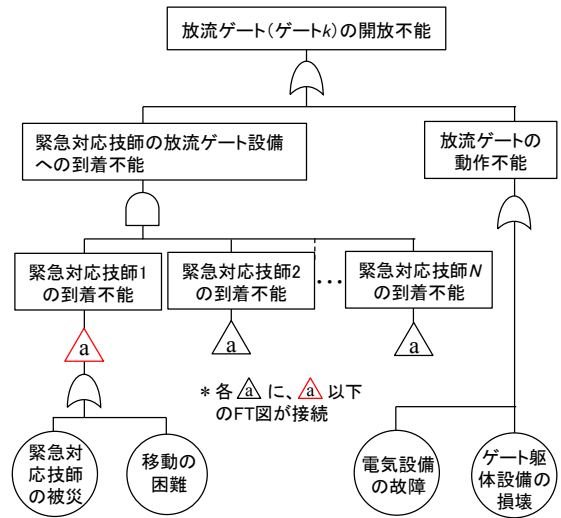


図-15 「放流ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図

表-3 基本事象の発生確率の設定

基本事象	基本事象の発生確率の設定根拠	
	震度7において想定される発生確率	
緊急対応技師の被災	0.350	震災時における木造住宅の全壊率 ⁷⁾ 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 ⁷⁾ 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 ⁷⁾ 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% ⁸⁾ と震度6強における木造住宅の全壊率 ⁷⁾ 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 ⁷⁾ 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 ⁷⁾ と家具等の移動・転倒率 ⁹⁾ 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 ⁷⁾ を適用

表-4 試算に用いたデータ (震度7の場合)

ゲート名	ρ_h	ρ_d	$Q_k \text{ m}^3/\text{s}$
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

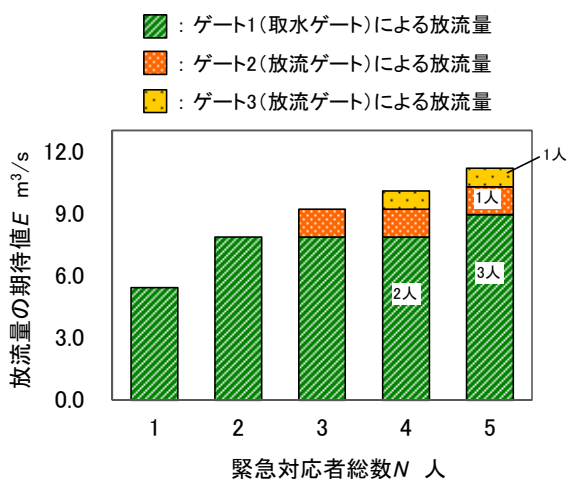


図-16 緊急対応者総数に対する放流量の期待値

にできれば、取水ゲートへ3名、ゲート2とゲート3の放流ゲートへそれぞれ1名ずつ配置する体制が最適解として得られた。この場合 ($N=5$) は、単独の緊急対応技師 (A技師、 $N=1$) によって緊急対応を行う現行の場合よりも約2倍の減災効果が期待できることが示唆された。ただし、緊急対応技師数が増えるほど、1名増員に対する放流量の期待値の増加量が減少する。すなわち、現場へ割り当てる緊急対応技師を増員し続けることが、必ずしも適切であるとは限らない。このことから、現場の緊急対応への割り当て人数は、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する必要がある。

3.3 緊急対応時の意思決定方法の改善

3.3.1 現行の意思決定のみなおし

現行の災害対応では、水管理システムによって得られる被害情報をもとに、施設管理者は意思決定を行う。その意思決定における適切な判断を阻害する事象は、図-9のFT図において、「被害情報収集の困難」および「判断の誤り」に発する一連の中間事象および基本事象である。本節では、この現行の意思決定方法を根本からみなおして改善することで、意思決定におけるリスクの回避を目指す。そのため、まずは大規模地震災害時に想定される現行の意思決定

方法の課題を明確にする。次に、その課題の解決策として新たな意思決定方法を提案し、その有効性を検討する。

3.3.2 現行の緊急対応における意思決定方法の課題

(1) 大規模地震時の不確実な状況下において想定される意思決定場面

長大な幹線用水路は公共性が非常に高いため、その取水ゲートを閉鎖するか否かの意思決定は、災害対応上の最重要課題である。3.1.2項で述べた既往の意思決定方法が有効に機能するためには、水管理システムの水位データから得られた情報によって、幹線用水路における決壊や溢水などの二次災害発生の有無が確実に把握できなければならない。しかし、大規模地震災害は極めて強大で、不確実性の高い現象である。それゆえ、水管理システムにより被害状況を把握するという前提もまた不確実になるものと想定される。そのため、大規模地震災害時には、次のように、A技師の意思決定が困難になる場面が考えられる。

まず、A技師は水管理システムにより用水路内の水位を確認する。しかし、強大な地震動によって、水位観測設備や通信設備が破損して、その機能を喪失してしまうおそれがある。水管理システムが機能不全を起こせば、それに頼るA技師は、幹線用水路に関する被害情報を得られないことになる。また、大規模地震災害時には、たとえ水管理システムにおける水位データが確認できたとしても、意思決定を行う当事者（この場合A技師）の心理的な面において、次のような問題が生じることも考えられる。

気象庁の震度階級¹⁰⁾によれば、震災規模が震度6強以上であれば、A技師の周囲では、全壊する建物が現れ、さらに震度7となれば周囲のいたるところで甚大な被害が生じている事態となる。こうした被害状況を目の当たりにして、A技師は、たとえ水管理システムの水位データに異常がみられないからといって、「幹線用水路に被害はない」と即断できるものであろうか。おそらく、A技師は、その判断に躊躇することであろう。なぜならば、A技師の中で、水位データが正常値を示しているにもかかわらず、それがもはや幹線水路の安全性を保障するものがあるという確信が持てないからである。それゆえ、この場合、A技師は現行の意思決定方法に従って取水ゲートを閉鎖しないか、あるいは万一の被害発生に備えて念のため取水ゲートを閉鎖するか、両者の何れかを選択することに窮することになる。

しかし、いかに被害情報が不確実であったとしても、A技師はそこで確実な情報待ちをして、災害対応の遂行を停滞させてしまうわけにはいかない。それゆえ、A技師は何らかの判断基準をもって自らの対応行動を決定しなければならない。

(2) 基幹的な灌漑水路施設の災害対応に求められる意思決定

以上に述べた課題への解決策として、安全性を重視して、大規模地震発生時には（例えば、震度5強以上の地震発生時には）、とにかく取水ゲートを閉鎖してしまうという考え方もあろう。しかし、幹線用水路が被害を受けて二次災害を引き起こす確率は極めて小さいと考えられる。それゆえ、被害がないにも関わらず取水ゲートを閉鎖してしまう、つまり、「空振り」になる確率が非常に高い。また、基幹的な灌漑水路は公共性が非常に高いことから、その機能が停止した際、すなわち、取水ゲートを閉鎖して、それが「空振り」となった際の損失は決して小さくないものと考えられる。また、震災後における営農の速やかな復帰や被災地域の早期復旧を考慮すれば、結果的に「空振り」となる対応行動は、施設管理者としてもできる限り避けたいところである。それゆえ、大規模地震発生後にとにかく取水ゲートを閉鎖してしまうという対応は、必ずしも得策であるとはいえない。すなわち、この場合、震災時の被害状況に応じて、「取水ゲートを閉鎖しない」という選択もあり得るような意思決定方法が求められよう。

3.3.3 緊急対応体制の構築を判断基準とした意思決定方法の提案

これまでの考察から、大規模地震災害時における現行の意思決定方法（以下、「意思決定方法1」）には、次のような3つの課題がある。①大規模地震災害時には、判断基準となる被害状況の有無を確実に把握することは困難である。そのため、②二次災害が発生しているにも関わらず、「取水ゲートを閉鎖しない」と判断してしまうおそれがある。しかし、その一方で、③被害が発生していないのに取水ゲートを閉鎖してしまう事態、すなわち、「空振り」をしてしまうおそれがある。

こうした大規模地震災害時における意思決定上の課題を解消するための方策として、筆者らは、3.2.2項で述べた緊急対応体制が構築できるか否かを判断基準とした意思決定方法（以下、「意思決定方法2」）を提案する。すなわち、緊急対応体制が構築できれば、取水ゲートを閉鎖しない、緊急対応体制が構築できなければ、取水ゲートを閉鎖する。ここでの緊急対応体制とは、A技師を含む緊急対応技師が取水ゲート設備をはじめとする幹線用水路の各要所へ速やかに移動して、いつ何時、幹線用水路において二次災害が発生しても、即座にそれに対する対応、すなわち、取水ゲートの閉鎖や被害箇所の応急処置を実施できる体制である。緊急対応体制のイメージを図-17に示す。このような緊急対応体制の構築が計画の中に入れば、取水

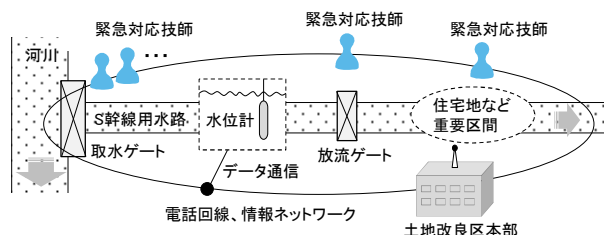


図-17 緊急対応体制のイメージ

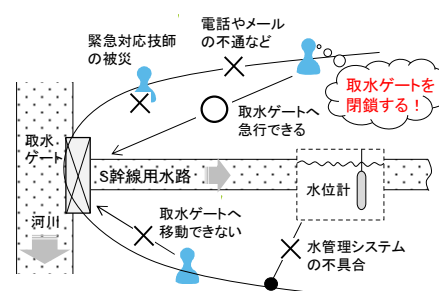


図-18 取水ゲートを閉鎖する意思決定場面の例

ゲートを閉鎖するか否かの意思決定を行う主体は、A技師だけではなく取水ゲートにおける対応を割り当てられた緊急対応技師のおのこのこととなる。大規模地震発生後、緊急対応体制が支障なく構築できれば、緊急対応技師ら自らが現場において用水路の安全を保障することになるので、取水ゲートを閉鎖せずに、（取水ゲートを閉鎖しないと判断して）そのまま幹線用水路の監視を継続する。しかし、図-18に示すように、地震発生後、緊急対応技師どうし連絡がとれない、緊急対応技師の何人かが被災して現場へ向かえない、水管理システムがダウンして水位の状況が把握できないなど、十分な緊急対応体制が構築できなければ、万一の二次災害発生に対応できないことから、そのときは、取水ゲートへ急行できる緊急対応技師が「取水ゲートを閉鎖する」と判断して、その対応行動を開始する。この場合、緊急対応技師は、たとえ単独であっても、自らの判断で取水ゲートを閉鎖できるものとする。

この意思決定方法2に従えば、緊急対応技師の意思決定は図-19のようになる。水管理システムの水位データが確認できない状況は、それ自身が緊急対応体制の重要部分の欠落であるので、直ちに取水ゲートを閉鎖する。水位データが確認できて、その水位に異常があれば即座に取水ゲートを閉鎖する。水位に異常がないときは、緊急対応体制が構築できなければ、取水ゲートを閉鎖し、緊急対応体制が構築できれば、取水ゲートを閉鎖しないとする。

以上のように、意思決定方法2では、安全性を確保した上で、「取水ゲートを閉鎖しない」という対応行動の選択が可能である。この場合、速やかに緊急対応体制が構築で

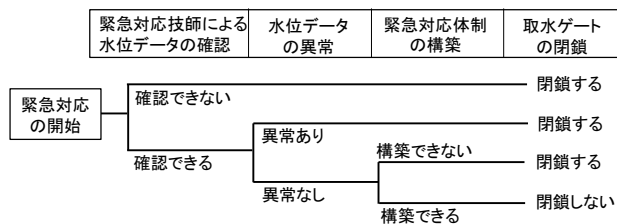


図-19 緊急対応体制の構築を判断基準とした意思決定

きるのであれば、取水ゲートを閉鎖しないので、「空振り」にはならない。しかし、緊急対応体制が構築できない場合は、取水ゲートを閉鎖するので、「空振り」となる場合もあり得る。ただし、「空振り」であったとしても、そもそも施設を管理できない状況では、通水を継続することはできないという考えもある。さらに、大規模地震発生後しばらくは余震の発生が懸念されることから、管理できない状態で通水したまま用水路を放置するわけにはいかないだろう。従って、緊急対応体制が構築できない場合には、取水ゲートを閉鎖することが妥当であるといえる。

また、「緊急対応体制を構築できない」という状況とは、「施設管理者の被災」、「電話連絡の不通」、「水位データの通信遮断」、「停電」などが起きた場合である。こうした被害の有無は、緊急対応技師が直接的に把握可能な事象である。その事象の有無を正確に把握することは、従来のように水管理システムの水位データによって、用水路のどこかで起こり得る被害の有無を把握することよりもはるかに容易である。それゆえ、緊急対応技師は、緊急対応体制の構築の可否をほとんど迷うことなく判断することができるであろう。

以上のことから、意思決定方法2に従えば、意思決定方法1における課題をおおむね解決することができる。

3.4 現行の緊急対応計画の改善策の評価

S土地改良区では、地震発生直後における現地のゲート操作に5名の緊急対応技師を割り当て可能であり、その場合、図-20に示すように、取水ゲートへ3名、放流量が1番目と2番目に大きい放流ゲートへそれぞれ1名ずつ配置する体制が最適解として得られた。この結果に基づいて、地震発生後、直ちに3名の緊急対応技師が取水ゲートへ急行すると仮定して、「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を試算した。取水ゲートの閉鎖は緊急対応技師が1名でも実施可能である。その1名の緊急対応技師が地震時に被災して取水ゲートまで到達できない確率をPとすれば、3名の緊急対応技師が誰も取水ゲートに到達できない確率はP³となる。

また、既往の災害対応では、水管理システムによって被

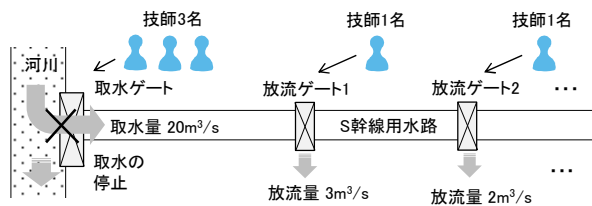


図-20 各ゲートへの人員の配置計画の事例 (S幹線用水路施設の場合)

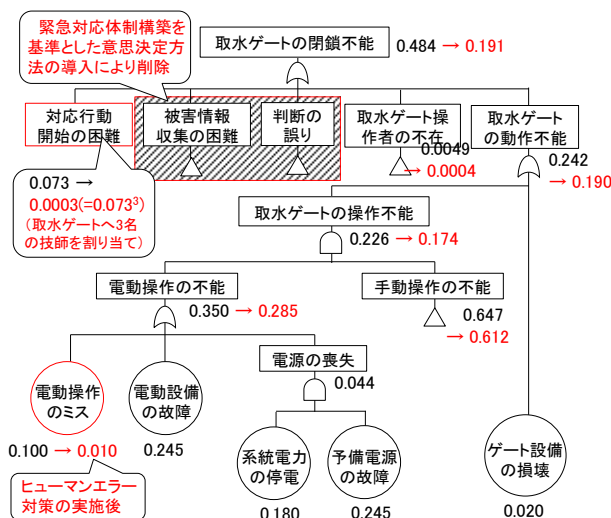


図-21 緊急対応人員の増員、意思決定方法の改善および対策の実施箇所を記したFT図

害情報を得て意思決定を行う。しかし、緊急対応体制の構築を判断基準とすることで、各緊急対応技師は水管理システムが被害を受けることやそのために判断を誤ることに関わらず意思決定を行うことができる。それゆえ、FT図から「被害情報収集の困難」および「判断の誤り」に関する事象を除外した。

図-9に示したFT図に、以上に述べた修正を記載したFT図を図-21に示す。各事象に添えた数字は、震度6強における発生確率であり、黒字は当初の無対策における発生確率、赤字は3.1.3項で述べた対策および本節で述べた改善策実施後の発生確率である。このFT図に基づいて、各震度階級における頂上事象の発生確率を試算した結果を図-22に示す。震度6強における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率は約0.2となり、現行の発生確率から約60%の低減、震度7におけるそれは約0.6となり、現行の発生確率から約35%の低減となった。改善策および対策の実施によって、一定の減災効果が期待できることが分かった。また、この試算は取水ゲートの閉鎖のみを対象としたものであるため、実際には、放流ゲートの開放による効果がこれに加わり、全体の減災効果は、さらに向上することになる。

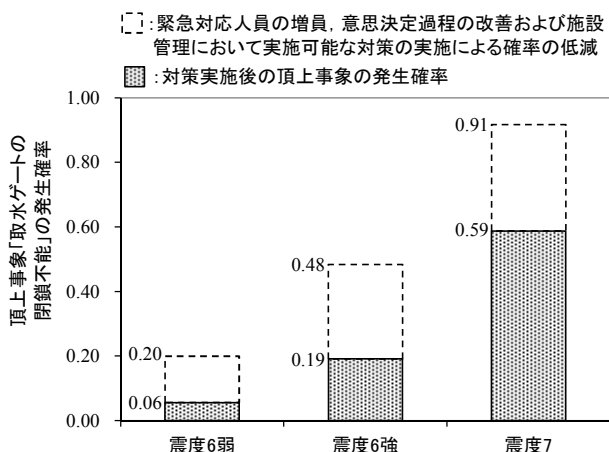


図-22 緊急対応人員の増員、意思決定方法の改善、対策の実施前後における各震度階級の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率

3.5 緊急対応の強化対策の提案

本章では、S幹線用水路施設を対象として、震災時における施設管理者の緊急対応行動の阻害要因に対する対策や現地において緊急対応を行う技師の増員、水管理システムに頼る現行の意思決定方法の改善を検討した。その結果、それら対応策の実施によって、一定の減災効果が期待できることを確認した。このことにより、本研究では、緊急対応の強化対策として、表-2 に示す対策の実施と図-19 に示す意思決定方法の改善、図-20 に例示する緊急対応体制の構築を提案する。

しかし、震度7の震災時には、以上のような緊急対応の強化対策の効果に限界があることも示唆された。震度7の震災では、緊急対応が遂行不能となり、ある程度の被害発生を許容せざるを得ない。そのときにこそ、BCPの策定が必要になる。被害が生じてしまった場合を想定して、何を優先して対処するのか明確に検討して、早期復旧に向けた事後処理の準備をしておく必要がある。

4. 大雨災害時のダム管理における防災行動計画に関する考察

4.1 研究の目的

平成28年8月の台風第10号の北海道接近に伴い発生した大雨災害（以下、「台風第10号大雨災害」）では、農業水利施設や農地が甚大な被害を受けた。寒地土木研究所と公益社団法人農業農村工学会北海道支部は、合同で十勝地域の農業水利施設を主な対象として被害調査を実施した。その被害は、農業用水路の法面がほぼ全沿線にわたり破壊されて、場所によっては隣接する農地の土壌が地表面から深さ1m以上も侵食されて消失するといった状況で

あった¹¹⁾。

こうした大規模な豪雨災害の発生を完全に防止することは困難である。しかし、その被害から人命や個人の財産を第一に守るための災害対応は確実に実施されなければならない。実際に台風第10号大雨災害時において、防災担当者や施設管理者は災害対応に奔走していたものと考えられる。しかし、そうした災害対応がどのような計画によるものであり、どのように実施されたのか、その実態を把握して有効性を評価する試みや課題解決に向けた方策を探究する試みはほとんど行われていない。そこで、本研究では、台風第10号大雨災害において実際に行われたダム管理の実態を検証して、その評価および課題の抽出を行った。さらに、今後の対応策として防災行動計画（タイムライン）の観点からダム管理をみなおし、防災行動計画策定の有効性を示した。

4.2 大雨時におけるダム管理の評価

4.2.1 台風第10号大雨災害時のダム管理の検証

(1) ダム管理者への聞き取り調査

本研究では、北海道の畑作地帯に灌漑用水を供給する農業用ダム（以下、「Aダム」）を管理するB町役場職員のダム主任技術者から、台風第10号大雨災害時におけるダム管理について聞き取りを行った。その結果をもとに、大雨災害に備えて計画されている現行のダム管理の流れ、および北海道大雨災害時において実際に行われたダム管理の経過について、次のとおり整理した。

(2) 大雨災害時のダム管理の流れ

Aダムの管理は、ダム管理主任技術者1名とその補助者4名の計5名（以下、「ダム管理者」）で行われている。通常時、ダム管理者はダム中央管理センターに勤務している。また、ダムサイトにあるダム管理棟には、ダム堤体の管理を委託された2名の業者（以下、「委託管理者」）が8:00から17:00まで勤務し、ダム管理主任技術者の指示のもとにダム管理の実務補助を行っている。通常時、ダム管理者は、ダム中央管理センターにおいて、ダム管理棟から送信されるAダムの流入量や水位、ダム地点の降水量などのデータ（以下、「ダムデータ」）を監視している（図-23）。そこ

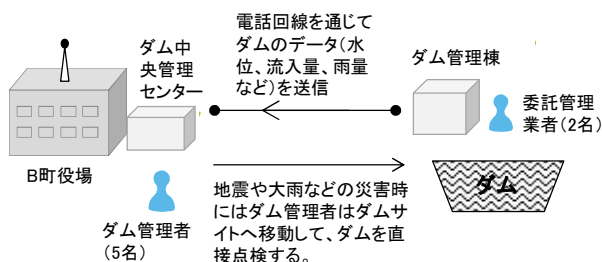


図-23 通常時のダム管理

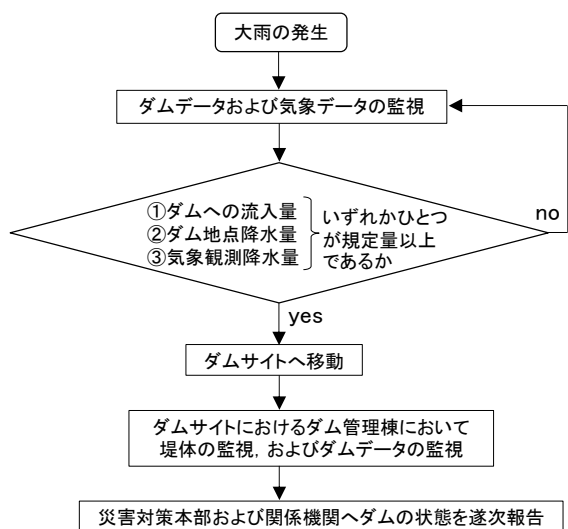


図-24 大雨時におけるダム管理者の対応行動

で、地震や大雨などの異常事態となれば、直ちにダム管理者はダムサイトへ移動して、ダムを直接点検する。

大雨時におけるダム管理者の災害対応フローを図-24に示す。大雨警報が発生された場合、ダム管理主任技術者は警戒体制をとり、ダムデータにおけるダムへの流入量とダム地点の降水量、および気象庁が発表する降水量に注視する。そして、そのいずれかの値がAダムの管理規程に定められた基準を超えれば、ダム管理者のうち2名がダムサイトへ急行して、ダム管理棟においてダム堤体を直接監視する。

(3) 台風第10号大雨災害時におけるダム管理の経過

台風第10号による大雨時およびその前後期間(平成28年8月28日から9月2日まで)におけるAダムへの流入量、ダムサイトにおける時間雨量、およびダム管理者の対応行動を図-25に示す。29日の正午頃から時間雨量が増加して、それに伴いダムへの流入量も徐々に増加した。30日の6時にダム流入量が基準の流入量をこえたことから、ダム管理者2名はダムサイトに向けて移動した。ダム管理者

は30日午前にはダム堤体の点検および確認を行った。そして、その日の午後には、下流河川の氾濫によって農業用水路が被災したため、ダムサイトを一時離れてその対応を行った。30日の夜(21:00~22:00頃)に再度ダムサイトへ向かったものの、ダムサイトへ向かう山中の管理用道路が土砂崩れのため通行不能となり、ダム管理者はダムサイトへ行くことを断念せざるをえなかった。このとき、ダムサイトには2名の委託管理者が在勤しており、ダムサイトにおける直接監視は委託管理者が行い、その結果をダム管理者へ報告することとした。その後、降雨量は急増して、30日23時から31日1時にかけてダムへの流入量は最大となった。この最大の流入量は設計洪水量のほぼ90%に達した。さらにその夜半には、ダムサイトにおけるダム管理棟の停電および電話の不通が起こった。その原因はダムへつながる電線および電話回線が電柱の倒壊により寸断されたためであった。即座に委託管理者は予備発電を起動してダムサイトにおける電力を確保した。この時点から、ダムサイトの委託管理者とダム管理者の連絡は防災無線のみを通じて行われることになった。その後、幸いにも降雨は収まり、ダムへの流入量は急速に減少していった。商用電力の復旧は9月3日、管理用道路の復旧は9月4日、電話回線の復旧は9月9日となった。

4.2.2 大雨災害時におけるダム管理体制の評価

以上のダム管理の経過にみられるように、Aダムのダム管理が台風第10号大雨災害時に順調に実施されたとはいえない。図-26に示すように、ダム管理者はダムサイトへ移動できず、ダムサイトとの連絡は最終的に防災無線のみとなり、電力は予備発電を起動することになった。しかし、Aダムのダム管理が途絶えることなく継続的に実施されたことは、バックアップ機能を備えた現行ダム管理体制が功を奏したためであると評価するべきであろう。すなわち、ダム管理者、電話通信、商用電力の代替として委託管理者、防災無線、予備発電がそれぞれの確に機能したことで、極

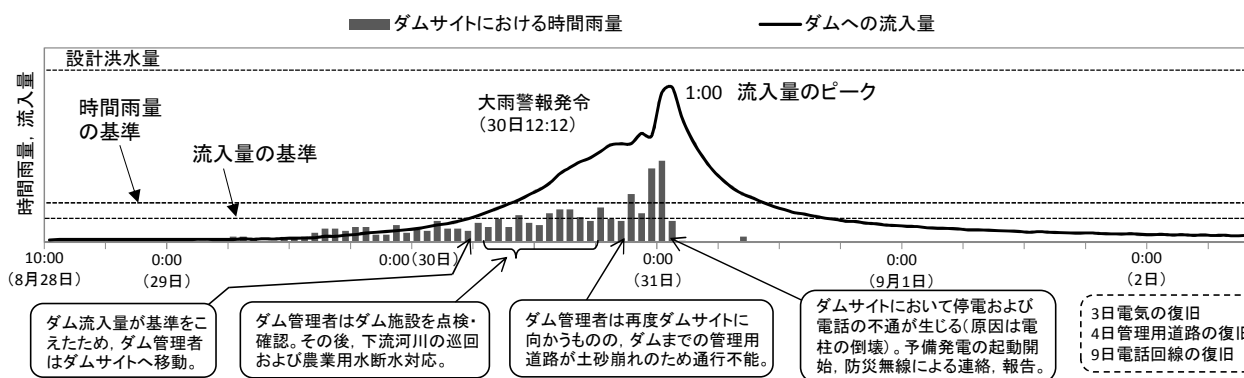


図-25 北海道大雨災害時におけるダム管理の経過

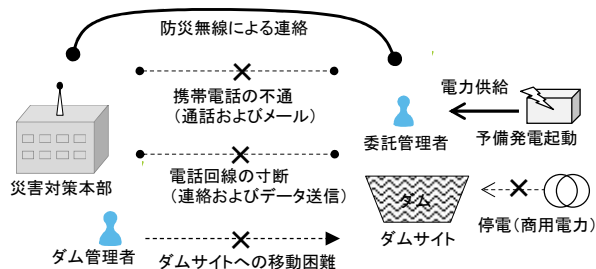


図-26 北海道大雨災害時におけるダム管理の状態

めて甚大な大雨災害時においてもダム管理を継続的に実施することができたものと考えられる。このことは、Aダムにおける現行のダム管理体制が有効であることを示すものである。

しかしながら、ダム管理の状態をできる限り健全に行えるように対策を強化する努力は今後とも必要である。そこで、本研究では、Aダムの管理体制および災害対応をさらに強化する方策を明らかにするため、FTAを用いて、大雨災害時におけるダム管理者の対応行動を阻害する原因事象を特定して、その原因事象の発生を低減あるいは回避する対策を検討した。

4.3 大雨災害時におけるダム管理の強化対策と防災行動計画に関する考察

4.3.1 ダム管理の遂行を阻害する原因特定と対策検討

「ダム管理の遂行不能」を頂上事象として展開したFT図を図-27に示す。ダム管理が大雨災害時の被害によって

遂行不能となる原因事象を挙げていき、23の基本事象を特定した。これらの基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生確率を低減することができる。筆者らは、まず「基本事象の発生を低減する」という観点から考えられる対策(以下、「対策1」)を検討した。次に、大雨災害の発生は、天気予報によって予測できる場合が多いことから、「大雨災害が事前に予測される」という前提条件のもとに、「基本事象の発生を回避する」という観点から考えられる対策(以下、「対策2」)を検討した。

対策1および対策2の検討結果を表-5に示す。まず、対策が同種となる基本事象をまとめて整理した上で、現状においてダム管理者が実施可能な対策と社会インフラなどの対策が中心となるためダム管理者単独による対策の実施は困難である対策(表-5中の網掛け部分)に仕分けた。対策1では、「操作方法の忘却」や「燃料切れ」など単純ミスに対する「ヒューマンエラー対策」や設備機器の「定期的な点検」などが、ダム管理者が実施可能な対策として考えられる。対策2の場合では、台風予報などに基づいて対応の準備が早期に可能である。すなわち、ダム管理者は、道路の不通で車両が走行不能になる事態を回避するため、大雨災害の発生前にダムサイトへの移動を完了する。そして、本格的な大雨の発生前にダム管理に必要な設備機器の点検や動作確認を行う。また、それらの作業に時間的かつ精神的な余裕をもってあたることにより、ヒューマンエラーの発生を回避することもできよう。

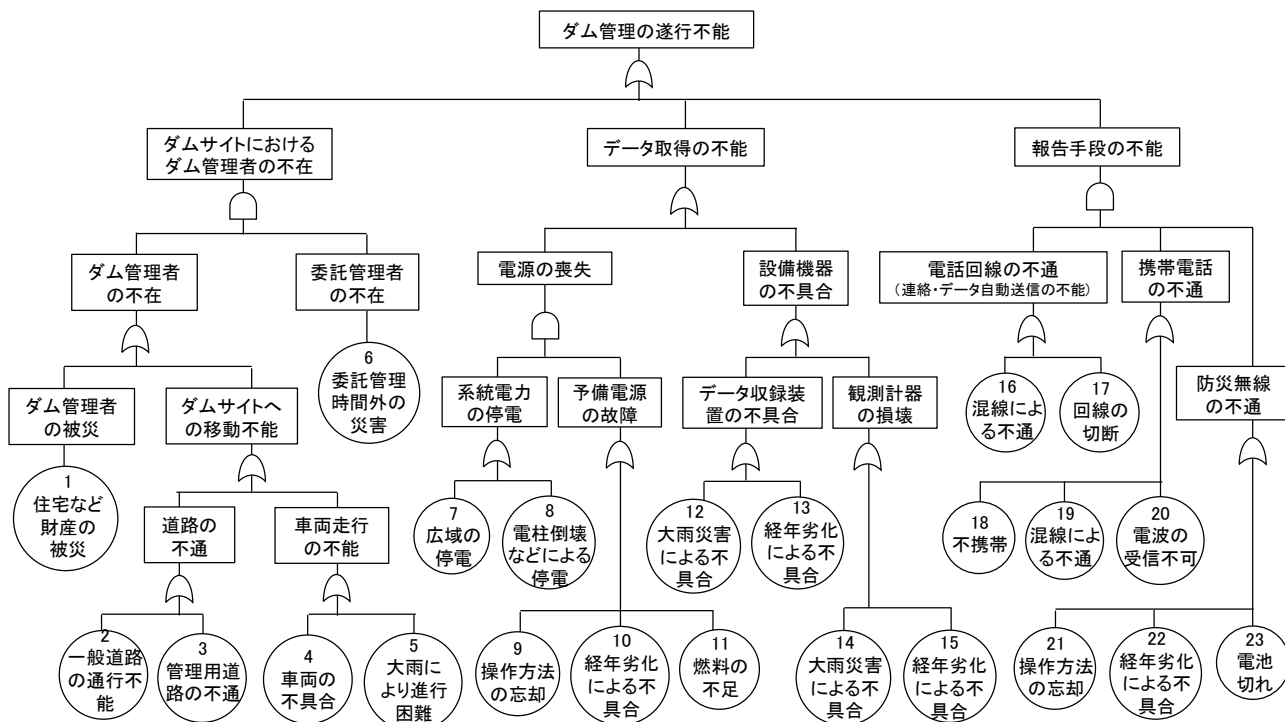


図-27 「ダム管理の遂行不能」を頂上事象とするFT図

表-5 基本事象に対する対策

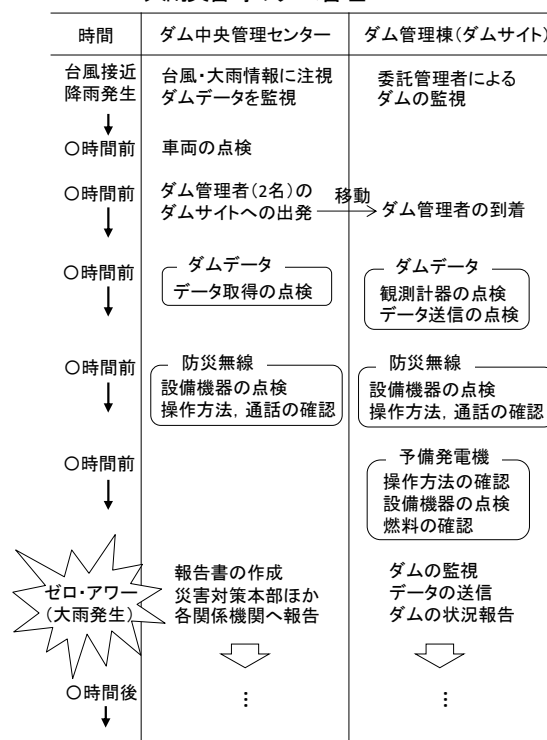
No.	基本事象	対策1	対策2 (防災行動計画)
9, 21	操作方法の忘却		
11	燃料の不足	ヒューマン	
18	不携帯	エラー対策	
23	電池切れ		大雨による災害発生前に確認・点検
4	車両の不具合		
10, 13, 15, 22	経年劣化などによる不具合	定期的な点検	
2	一般道路の通行不能	道路の防災対策の強化	大雨による災害発生前にダムサイトへ移動完了
3	管理用道路の不通		
5	大雨による進行困難	(対策困難)	
6	委託管理時間外の災害発生		
1	住宅など重要財産の被災	住宅や社会インフラの防災対策の強化	住宅や社会インフラの防災対策の強化
7	広域の停電		
8	電柱倒壊などによる停電		
16, 19	混線による不通		
17	回線の切断		
20	電波受信不可		
12, 14	大雨災害による不具合	(対策困難)	(対策困難)

しかし、対策2が対策1をカバーするものではない。なぜならば、対策1と対策2の具体的な対策内容が異なるからである。例えば、対策1では緊急時のパニック状態など厳しい状況を想定した対策を含むが、対策2はそのパニック状態を回避するため早めの対応を行うものである。そのため、ダム管理者は対策1と対策2のいずれの場合も検討して、その双方の具体的な対策を実施することが望まれる。

4.3.2 防災行動計画の観点から想定される大雨災害時におけるダム管理体制

表-5に示す対策2のとおり、大雨による災害のおそれを予測して早期に対応行動を行うことができれば、FT図によって挙げられた23の基本事象のうち14の基本事象の発生を回避することができる。このことから、事前の対応行動に重点をおく防災行動計画がダム管理において非常に有効であるものと示唆される。防災行動計画は、近年注目される新しい水害対策である。現在、国や自治体を中心にその普及が進められている。防災行動計画はタイムラインとも呼ばれ、国土交通省¹²⁾によれば、その定義は「災害の発生を前提に、防災関係機関が連携して災害時に想定される状況を共有した上で、「いつ」、「誰が」、「何をする」

表-6 防災行動計画の観点から想定される大雨災害時のダム管理



を時間軸に沿って整理した計画」とされる。

本研究では、FTAを用いて、Aダムの防災行動計画における「何をする」に該当する対応行動を明らかにした。その結果に基づけば、防災行動計画の観点から、表-6に示すような大雨災害時のダム管理が考えられる。まず、台風の接近に伴い災害対応体制が発動される。ダム管理者は台風や大雨の情報、ダムデータに注視するとともに、ダムサイトへ移動するための車両の点検・整備を行う。そして、ダム管理者は甚大な被害が起こる前の段階でダムサイトへ移動する。ダムサイトに到着したダム管理者は、堤体監視に必要な準備やダムデータを取得するための観測機器の点検およびデータ送信の確認を行う。また、万一の被災時に必要な防災無線や予備発電機の点検や動作確認を行う。このような事前の対応行動をすべて完了して、台風や大雨災害のピークに備える。

こうした早めの対応行動によって、災害時のダム管理における多くのリスクを回避することができよう。しかし、さらに実践的な防災行動計画とするためには、各対応行動を実施する具体的な時間を設定することが重要である。防災行動計画では、一般に主要な災害の発生時点を「ゼロ・アワー」と定めて、そこから時間を遡って個々の対応行動を実施する時刻（-〇hour, 〇時間前, 〇日前など）を設定する。このような対応行動の実施時間を記す防災行動計画は、ダム管理者が的確に災害対応を遂行していくための

基本的な指針となるとともに、その対応行動に漏れがないかを確認するためのチェックリストとして用いられる。

また、防災行動計画では、一般に台風の到来などを「ゼロ・アワー」として定める。しかし、台風第10号による大雨は正確に予測されていたものではなかった。また、4.1.2で述べたとおり、ダム管理者はダムサイトへ向かったにも関わらず、そのときすでにダムサイトに至る管理用道路が土砂崩れのため通行不能になっていた。こうした台風第10号大雨災害の経験と教訓、地域特有の気象と災害過程の分析を踏まえて、防災行動計画における「ゼロ・アワー」の設定やダム管理者の対応行動の判断基準およびタイミング（時刻）を決定することが、今後の課題である。

5. まとめ

平成28年度および平成29年度に実施した研究の主要な結果は、次のとおりである。

- (1) 頂上事象の発生原因を原因抽出FT図の作成によって探索し、その原因事象がある程度具体的に絞り込まれた時点で、対策検討FT図に切り替えるという改良FT図により対策検討を行う方法を案出した。この改良FT図は、土地改良区などにおいて施設管理を行う実務者が大規模災害時に備えた対策を検討するために、実用的かつ有効な方法であることを確認した。
- (2) 大規模地震発生後、直ちに複数名の施設管理者が幹線用水路のゲート設備に向かい対応にあたる緊急対応体制を提案した。この緊急対応体制の構築の可否を判断基準とした意思決定方法を導入することにより、被害情報の不確実性による意思決定の困難を解消できるとともに、一定の減災効果が期待できることが示唆された。
- (3) 大雨災害時のダム管理において、現行の管理体制に組み込まれているバックアップ機能の重要性が評価された。さらにダム管理の災害対応力を強化するために、防災行動計画（タイムライン）の策定が有効であることが示唆された。

平成30年度には、以上の(1)、(2)、(3)の成果を体系化して、その内容を盛り込んだ災害対応計画策定マニュアルを作成する方針である。

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および帯広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。FTAの検証調査および聞き取り調査にご協力いただいた施設管理者には、災害対応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る。

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>
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 小野寺勝重:国際標準化時代の実践 FTA 手法 信頼性、保全性、安全性解析と品質保証、日科技連、pp.115-131、2007
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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、<http://www.busai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>
- 9) 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
- 10) 気象庁:気象庁震度階級関連解説表、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/kaisetsu.html>
- 11) 大久保 天、立石信次、山口 健、桑原 淳、辻 修、宗岡寿美、木村賢人、山崎由里:2016年8~9月の北海道における豪雨災害に関する報告 6 農地・農業用施設の被害について、寒地土木研究所月報、No.771、pp.41-47、2017
- 12) 国土交通省水災害に関する防災・減災対策本部防災行動計画ワーキング・グループ:タイムライン(防災行動計画)策定、活用指針(初版)、pp.4-5、2016

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、越山直子、大津武士

【要旨】

北海道の水田地帯では、農家戸数の減少に伴い担い手への農地集積が急速に進行している。こうした経営の大規模化へ対応するために、圃場の大区画化や地下水水位制御システムの整備が実施されている。このような整備の進展に伴い、圃場の用排水管理が変化し、さらには農区や灌漑区域における流出機構が変化すると予想される。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、圃場整備が現在進められている灌漑区域を対象として、広域レベルおよび農区レベルの水収支および水質の調査を実施した。平成 29 年までの成果は、以下のとおりである。灌漑区域における流入水量と流出水量とを比較した結果、灌漑期での流入量と流出量との差が小さく、対象灌漑区域内における下方浸透量は小さいことが示唆された。整備済み農区および未整備農区の水収支を比較した結果、掛け流しで田越し灌漑を行っている未整備農区に比べて、圃場ごとに独立した水管理を行える整備済み農区では、取水量が少なかった。灌漑期間における幹線排水路の水質濃度(SS、T-N、T-P)は、農地排水が主体となる小排水路の値よりも低く、農業用水の残水等、農地排水以外の水量により希釈されていると示唆された。

キーワード：圃場整備、水田、河跡湖、水収支、水質

1. はじめに

北海道は、全国の耕地面積の4分の1があり、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水位制御システム、用水路のパイプライン化等の整備が実施されている。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すると予想される。整備の前後での地域の水文環境の変化を、考え得る範囲で網羅的に示せば、次のようになる。

- ① 整備後に、直播栽培面積が拡大する可能性がある。地下からの給水が可能になるために、直播栽培での圃場水管理が容易になることが要因のひとつである。
- ② ①が生じると、代かきをしない栽培方式の面積が拡大する可能性がある。代かきをしない水田では、代かきをする水田に比べて作土の浸透性が大きい。この場合、圃場の用水量が増加する可能性がある。
- ③ ②のように作土の浸透性が大きい場合には、代かきをしない圃場での地下水水位は、整備前に比べて高まる可能性がある。
- ④ 移植栽培のように、整備の前後で代かき等の土壌管理に変化がない場合であっても、整備後に地下からの給水を行うようになれば、圃場の地下水水位の挙動は変化する。
- ⑤ 整備前に田越し灌漑を行っている圃場があれば、整備後には田越し灌漑がなくなり、圃場での用水量が変化する可能性がある。
- ⑥ 支線・小用水路がパイプライン化されると、それらから灌漑区域への用水の流入量が減少する。パイプライン化される前は、送水損失水量等を含む用水量が小用水路に供給され、日内変動を有する圃場での取水量を満たしていた。これに対して、パイプライン化後は、支線用水路の灌漑区域に入ってくるのは圃場に実際に取水された水量だけである。
- ⑦ ⑥と同様に、パイプライン化される前には、圃場に取水されなかった用水が小用水路の末端から排水路に流

入していたのに対して、パイプライン化後はこのような流入がなくなる。

- ⑧ ⑦によって排水路の流量が減少すると、地域の河跡湖や沼への供給水量が減少する。このことは、それらの湖沼の水位や水質、湖沼周辺の地下水位に影響を及ぼす可能性がある。
- ⑨ ⑦によって排水路の水位が低下すれば、排水路法面の乾燥が進む可能性がある。これは、さらに排水路法面での亀裂の発生につながる可能性がある。

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¹⁾、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²⁾。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、平成29年度までの調査結果として、灌漑区域における水収支および水文環境と、圃場整備が行われた農区および未整備の農区における水収支および水文環境の概況

について報告する。

2. 調査概要

2.1 広域調査

2.1.1 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、美唄市に位置する、現在圃場整備が進められている灌漑区域を対象として、広域調査を実施した。観測地点の位置を図-1に示す。図-1の広域調査対象地区の面積は約1,100haであり、農地面積は約800haである。平成29年度までの圃場整備率は20%である。地元への聞き取りによると、整備事業地区内における1戸当たりの平均作付面積は約16haである。美唄市内の平成29年の水稲作付面積は3,460ha³⁾であり、乾田直播栽培面積は188ha、湛水直播栽培面積は85ha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。この山形幹線用水路への分水量は、調査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。山形幹線用水路への分水量は、平成29年度に調査を実施した。

農地からの排水は中小の排水路を経由し、三日月第一

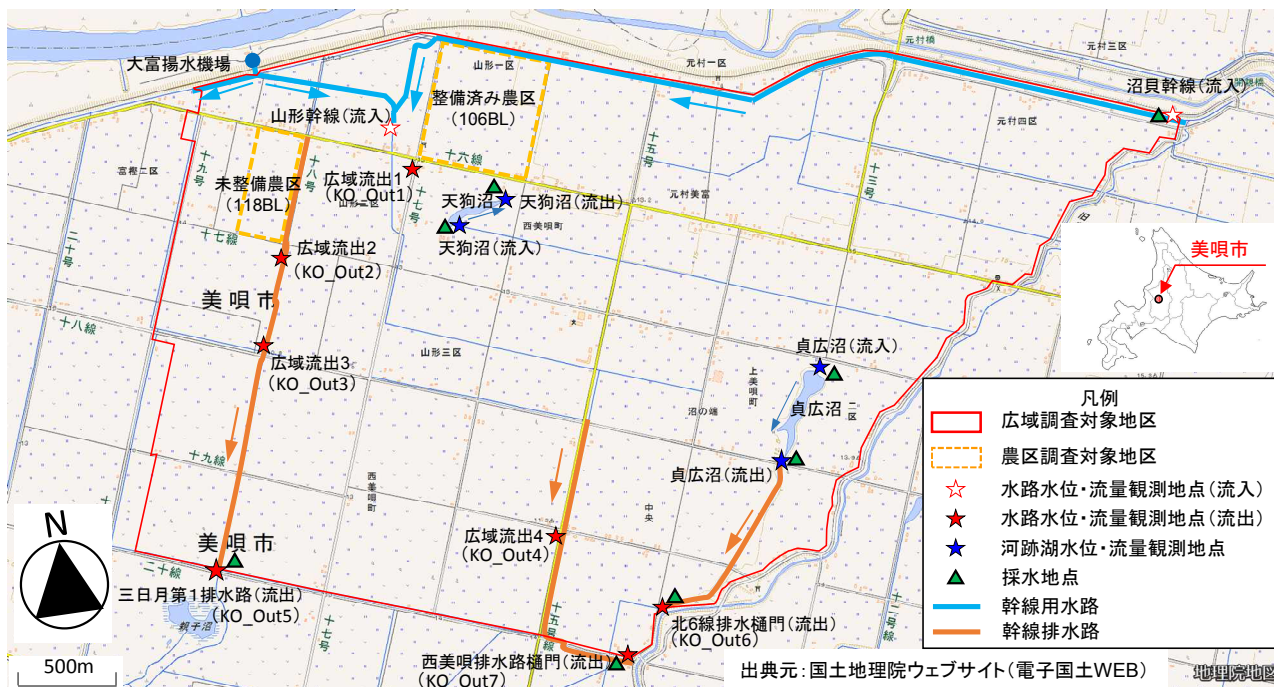


図-1 調査対象とした灌漑区域における観測地点の位置

排水路、北6線排水樋門、西美唄排水樋門等から地区外へ流出する。洪水時には、樋門の操作により流域変更が行われるが、平常時における流出経路はこれらの3地点が主な地点である。

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。どちらも周辺の土地利用は農地が主体である。平成28年および平成29年において、天狗沼の周辺農地では、水稻、大豆が作付けされていた。沼への流入は、小排水路のほか、圃場排水が直接流入する箇所もある。沼からの流出口は、支線排水路に接続している。この接続先の排水路では、灌漑期間に堰上げが行われている。貞広沼では、排水路からの流入箇所は1つであり、下流口は排水路に接続している。

2.1.2 調査方法

対象地区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するとともに、定期観測として、流量観測(月1回程度)を実施した。流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位の観測データから灌漑期間における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など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の付近に水位計を設置し、湖面水位を観測するとともに、流量観測を月1回程度行った。この流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位観測データから灌漑期間における各地点の流量を推定した。天狗沼では、流入口が複数あるうち、比較的流量が大きい小排水路1ヶ所において、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。

2.2 農区調査

2.2.1 地区概要

美唄市に位置する、圃場整備済みの農区および圃場整備が行われていない農区を対象として、調査を実施した(図-2)。

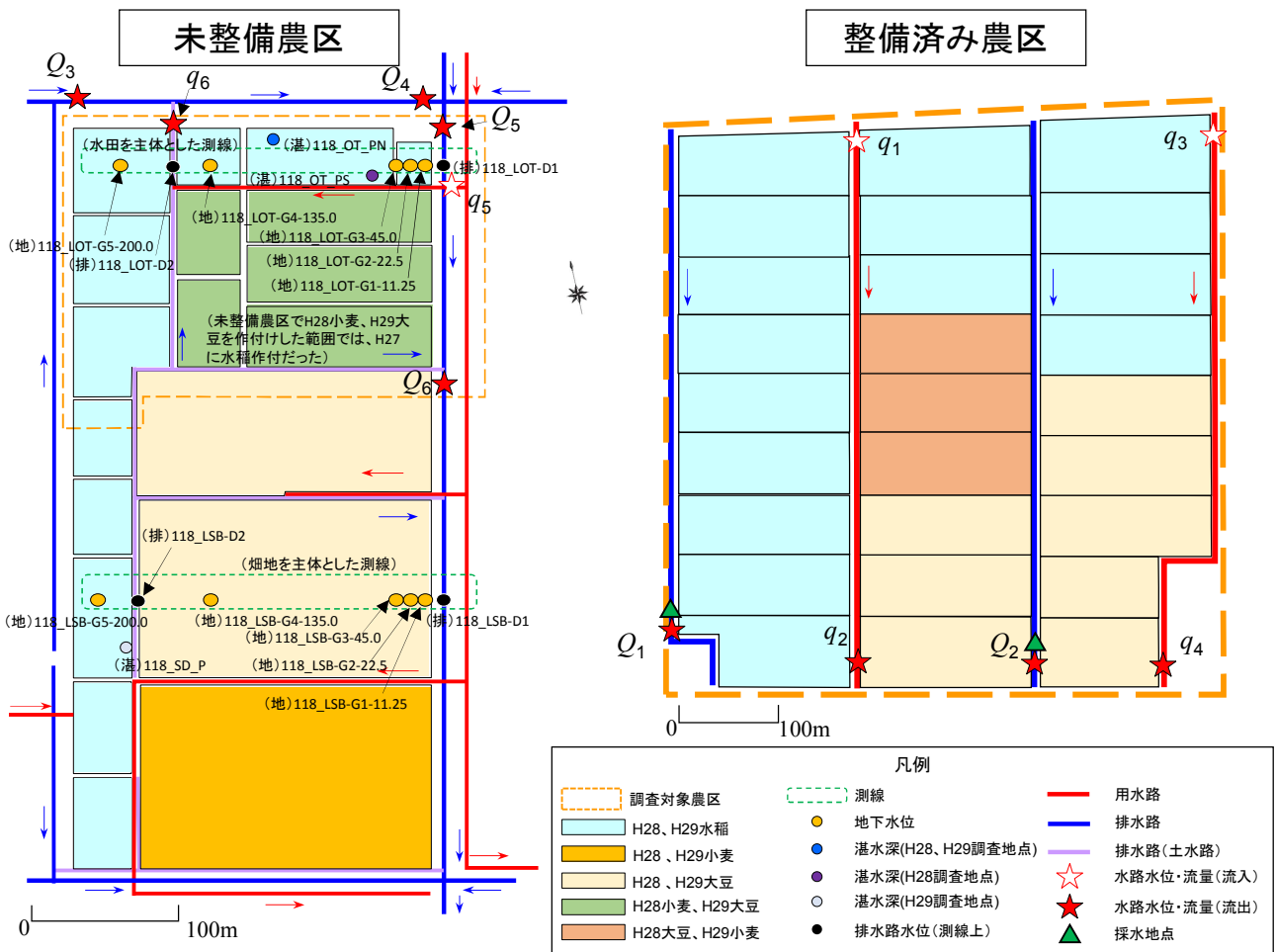


図-2 観測地点の位置(農区調査)

未整備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。水田一筆の面積は0.3ha程度である。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。水収支調査は、農区内の北側の圃場群（面積は約12ha）を対象とした。農区内の一部の水田では、田越し灌漑が行われている。暗渠排水は、水閘の故障により開放されたままとなっており、集水渠から地下排水が0.7L/s程度流出している。農業用水の余水は、土水路を経由して排水路へ流出する。農区内の耕作者数は3人であり、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。

整備済み農区については、全面積約30haのうち、平成28年での水稲作付面積は約18haである。そのうち乾田直播栽培は1圃場（約1ha）、湛水直播栽培は2圃場（約2ha）であった。農業用水は、沼貝幹線用水路から、農区内の西側と東側に位置する用水路へ分水される。用水路は開水路形式であり、圃場へ取水されなかった残水（配水管理用水）は農区外へ流出する。圃場を通過した水は、農区内の西側と東側に位置する排水路を通じて、農区外へ流出する。

2.2.2 調査方法

農区における観測地点の位置を図-2に示す。未整備農区および整備済み農区において、定期観測として、月1回程度、用水路および排水路の流量観測を行った。流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位の観測データから灌漑期間における各地点の流量を推定した。それぞれの農区からの排水量については、図-2に示す記号を用いて、未整備農区からの排水量 Q_g は(1)式により、整備済み農区からの排水量 Q_c は(2)式により推定した。

$$Q_g = (Q_4 + Q_3) + (Q_6 - Q_5) - q_6 \quad (1)$$

$$Q_c = Q_1 + Q_2 \quad (2)$$

未整備農区の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。水位の観測期間は5月から10月までであり、測定頻度は10分間隔である。

また、未整備農区の支線排水路4箇所および整備済み農区の小排水路2箇所において、流量観測と同日に採水を行い、採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P、CODなどの水質分析を行った。このほか、集中観測として、平成28年度の代かき・田植え期間（5月13日～6

月20日）において、整備済み農区の西側の小排水路下流部に自動採水器を設置し、6時間間隔で連続採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-Pの分析を行った。

3. 水田地帯における水収支

3.1 幹線用水路および幹線排水路の流量

広域調査対象地区における月ごとの水収支を図-3に示す。ここでは、沼貝幹線用水路および山形幹線用水路の合計流量を流入量、三日月第一排水路、北6線排水樋門、西美唄排水路樋門の合計値を流出量とした。

広域調査対象地区における流入および流出は、以下に述べるようなことから、用水路および排水路を経由した水量が大部分を占めると考えられる。まず、灌漑期では、流入量に対する流出量の割合は、5月は86%、6月は93%、7月は92%となっていた。流入量と流出量との差は、蒸発散量の推定誤差および地区外への浸透による流出により生じたと考えられる。整備済みの3圃場で調査した結果では、浸透量の平均値は1.4～2.8mm/dであった。これらのことから、広域調査対象地区内における下方および横方向への浸透による流出量は小さいと考えられる。また、非灌漑期では、農業用水が供給されないことから、流出水量の値はきわめて小さくなった。よって、広域対象地区内では、幹線用水路からの農業用水の取水量や、圃場や用水路から排水路へ流出した水量により、水収支を説明できるといえる。

3.2 整備済みおよび未整備の農区における水収支

各農区における水収支を図-4に示す。この農区内の各水量については、流量観測地点の下流において堰上げが行われていない観測日のデータをそれぞれ平均し、算出した。未整備農区では、現地調査で観察した際、田越し灌漑が行われている圃場のうち、最下流に位置する圃場の落口から常に排水が生じていた。これは、水管理を省

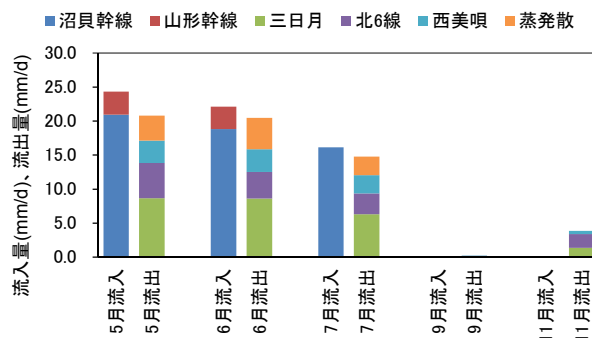


図-3 流入用水路と流出排水路における流量(平成29年)

力化すると同時に、各圃場へ不足なく灌漑するために掛け流しが行われていたと考えられる。これに対して、整備済み農区では各圃場の水管理が独立したものとなることから、落口からの常時の排水はみられなかった。このように、整備済み農区では、圃場ごとでの水管理が容易になり、田越し灌漑に伴う掛け流しが行われなくなることから、未整備農区と比べて取水量が減少したと考えられる。

3.3 農区内における地下水位の経時変化

圃場整備前後における農区レベルの流出の変化をみるために、未整備農区において流出量を観測しているが、数値の精度に懸念が残ることから、ここでは地下水位変化に焦点を当てた。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、平成29年における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-5および図-6に示す。圃場湛水位については、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と118_LOT_G4_135.0で概ね同様となり、118_LOT_G3_45.0が低く、排水路との距離が近くなるにつれて値が低くなった(図-5)。一方、畑地を主体とした測線における畑地の地下水位の値は、水田主体の測線における地下水位と比べて、降雨に対して敏感に反応する傾向がみられた。

図中の地盤高は、それぞれの圃場東側端から200mまでの平均値である。水田主体の測線における5地点の地下水位では、灌漑期と非灌漑期との平均との差は0.00~0.14mの範囲にあった。これに対して、畑地主体の測線における5地点の地下水位では、灌漑期と非灌漑期の差は0.04~0.35mの範囲にあり、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、西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と比較すると、畑地を主体とした測線の方が、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。これらの未整備農区内における地下水位の傾向は、平成28年と平成29年ともに同様であった。未整備農区では、平成31年頃に圃場整備が予定されていることから、今後、整備後の流出量および地下水位を観測し、農区からの流出機構の変化について比較する。

3.4 河跡湖における流入水量および流出水量

圃場整備による水文環境の変化が、河跡湖の水収支に与える影響を検討するために、集水面積が異なる2つの河跡湖を対象として、流入水量および流出水量、湖面水位について調査を行った。

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-7および図-8に示す。また、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-9~図-10に示す。天狗沼における流入は、圃場からの農地排水のみであることから、灌漑期の定期観測時における流入水量は平均0.5L/sであった。天狗沼では、漑期間中、流出口と接続する排水路の下流側付近で、堰板が設置されていたことから、平成29年における天狗沼の流出口地点の灌漑期と非灌漑期と平均水位の差は、0.50mであった。灌漑期間中の湖面水位の差は、農業排水の流入による水位変動だけではなく、堰板の設置による影響を受けていたと考えられる。また、この堰板の設置は、沼の流出口の流量にも影響を及ぼしていた可能性があることから、今後、接

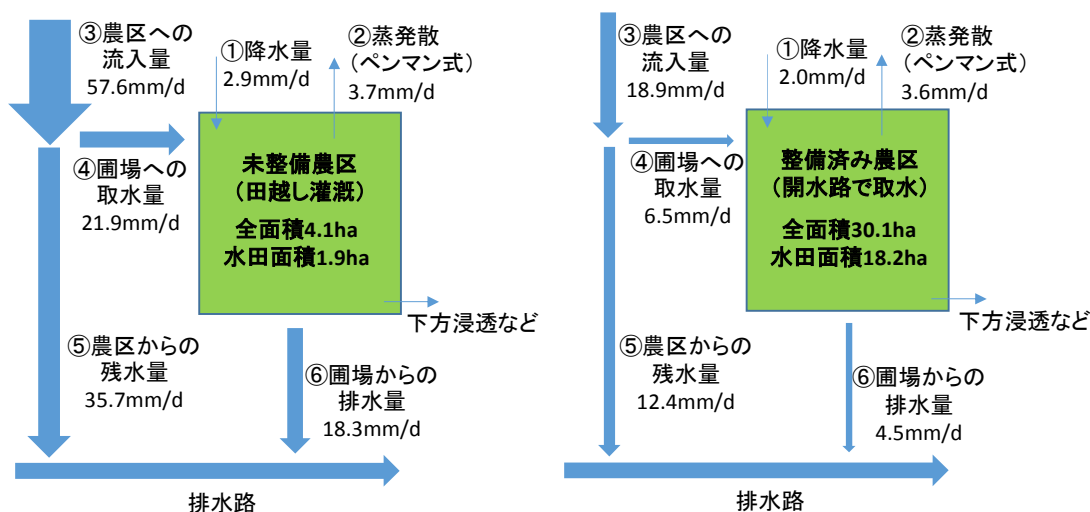


図-4 各農区の流入量と残水量、排水量

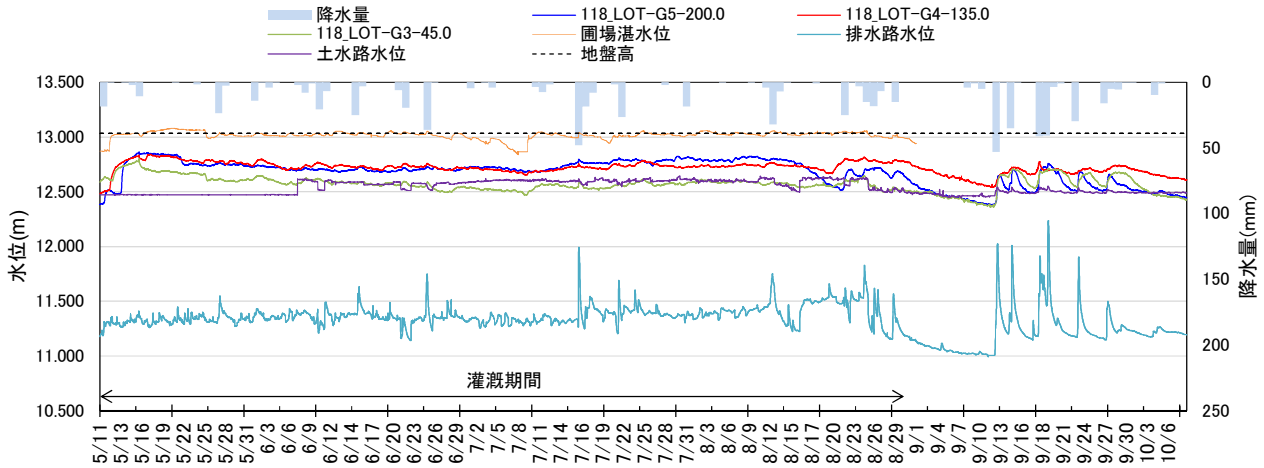


図5 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (平成29年、水田主体)

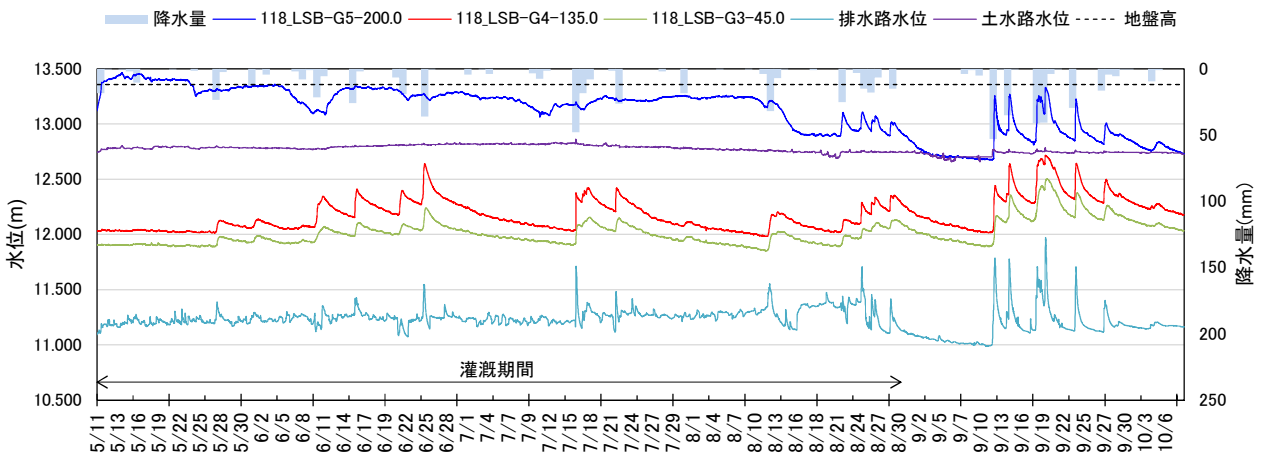


図6 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (平成29年、畑地主体)

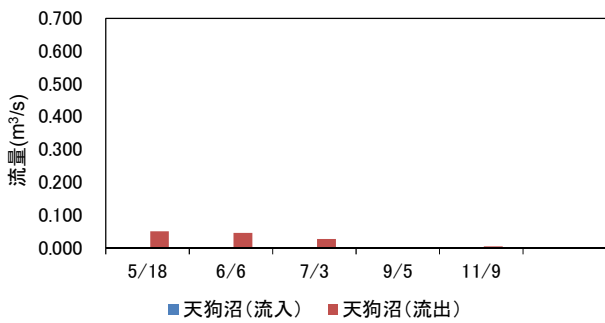


図7 河跡湖における流入水量および流出水量 (平成29年、天狗沼)

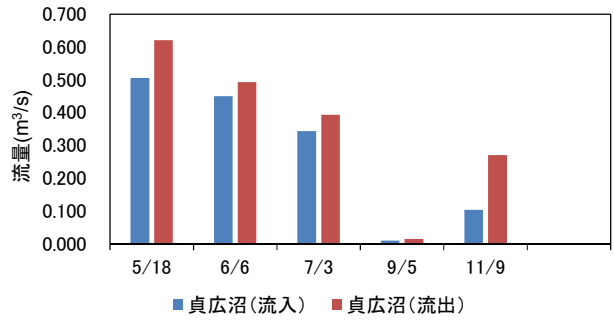


図8 河跡湖における流入水量および流出水量 (平成29年、貞広沼)

続先の排水路の水位変化等について、精査が必要である。

貞広沼では、農地排水および用水路の残水が流入していた。貞広沼の集水域の上流部では、圃場整備が進められていることから、今後、圃場整備に伴って流入水量が変化する可能性がある。今後、2つの沼の平均的な水深、沼の周辺土地利用および農業用水の取水および排水状況

を精査しそれぞれの沼における水収支特性を検討する必要がある。

4. 水田地帯における水質

4.1 幹線用水路および幹線排水路の水質

平成29年における灌漑区域の流入用水路および流出排

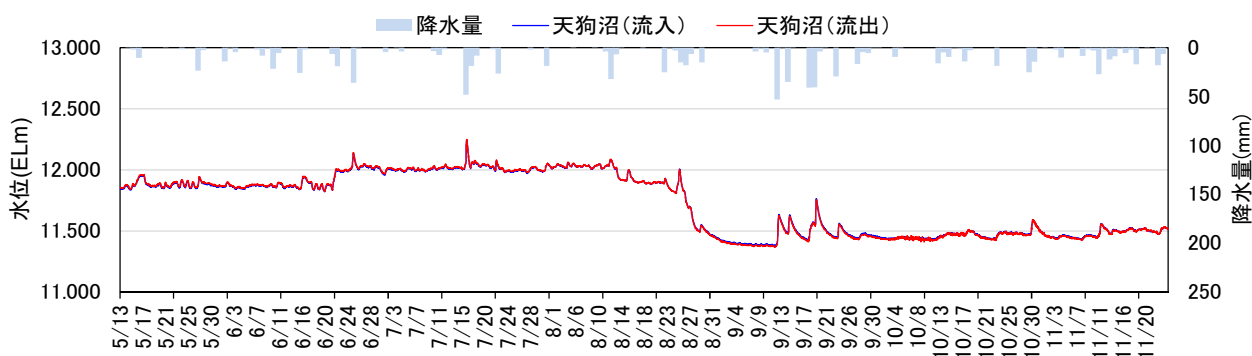


図-9 河跡湖における湖面水位の経時変化 (平成 29 年、天狗沼)

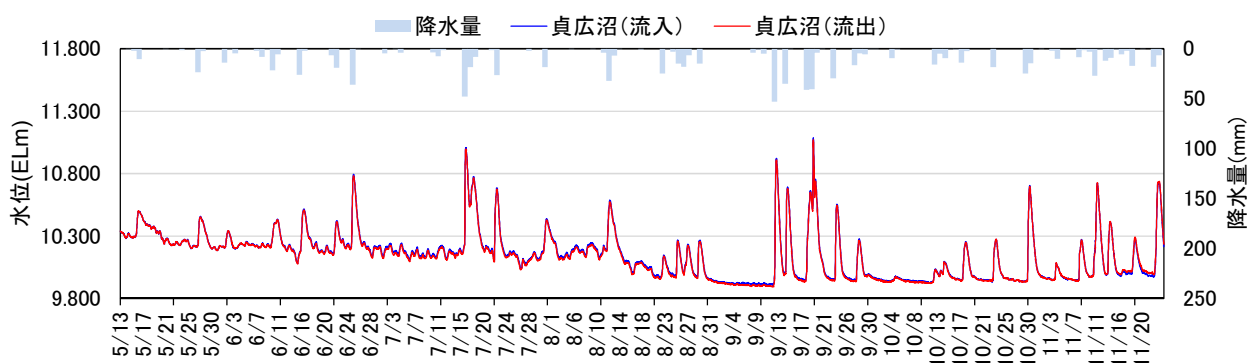


図-10 河跡湖における湖面水位の経時変化 (平成 29 年、貞広沼)

水路の水質濃度 (SS、T-N、T-P) を、それぞれ図-11～図-13に示す。図-11に示すようにSS濃度では、5月と11月で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16mg/Lであったのに対して、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35～132mg/Lまで上昇したと考えられる。

図-12のT-N濃度では、灌漑期の値は0.5～1.9mg/L、非灌漑期では1.9～4.0mg/Lの範囲と、時期により差がみられた。図-13のT-P濃度では、11月以外は図-11のSS濃度と類似した傾向がみられた。

4.2 圃場整備済み農区における農地排水の水質

定期流量観測と同日における調査農区の水質濃度(SS、T-N、T-P)を図-14～図-16に示す。時期ごとに水質濃度をみると、いずれの水質項目についても、普通期の値が小さい傾向がみられた。代かき期(5月)については、106BL排水西ではSS濃度は2255mg/L、T-P濃度は1.6mg/Lであった。代かき後には、SS濃度は8～17mg/L、T-P濃度は0.05～0.06mg/Lにまで低下した。その後の定期観測では、灌漑期間は水質濃度の値が低く、非灌漑期間には降雨後に上昇がみられた。

平成28年度に行った自動採水器を用いた集中観測による、代かき・田植期間の整備済み農区における農地排水(106BL排水西)の平均濃度は、T-N:3.5mg/L、T-P:1.8mg/L、SS:759mg/Lであり、最大値はそれぞれ11mg/L、7.8mg/L、6614mg/Lであった。代かき・田植後の3週間における平均濃度は、それぞれ1.3mg/L、0.08mg/L、31mg/Lまで低下した。

4.3 残水による農地排水の希釈

平成29年5月の定期採水時の流量および水質濃度データを用いて、整備済み農区からの小排水路と残水の負荷量の合計値をそれぞれの流量の合計値で除し、両者を混合したときの水質濃度を推定した。この結果、それぞれの水質濃度の値は1.2mg/L、0.20mg/L、233mg/Lであった。広域でみると、幹線排水路では、小排水路よりも水質濃度の値が低かったことから、用水路の残水が農地排水等の希釈に寄与していたと考えられる。残水の排水路流出は、用水路が開水路系式である地区特有のものである。パイプライン地区では配水管理用水が生じないことから、希釈効果は発現しないものと考えられる。

4.4 河跡湖の水質

集水域内の水文環境の変化は、河跡湖の水質に反映さ

れることから、2つの河跡湖を対象として、水収支および負荷収支を調査している。対象とする河跡湖は、集水面積の規模、周辺土地利用形態等が異なる。それぞれの

河跡湖の水質形成機構を明らかにし、圃場整備に伴う環境変化によって水質や水位等がどのように変化するかを推測することを目的としている。

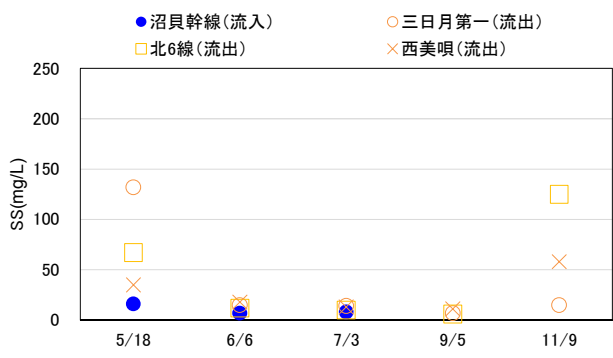


図-11 流入用水路と流出排水路におけるSS濃度(平成29年)

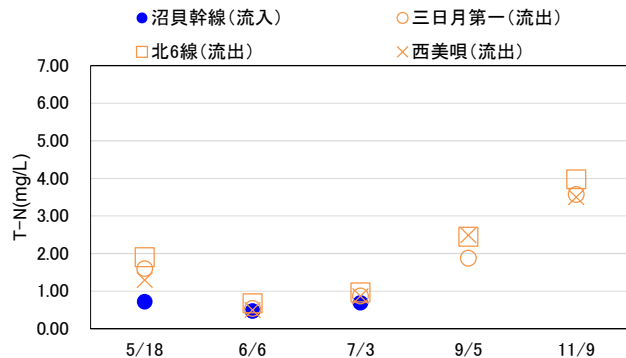


図-12 流入用水路と流出排水路におけるT-N濃度(平成29年)

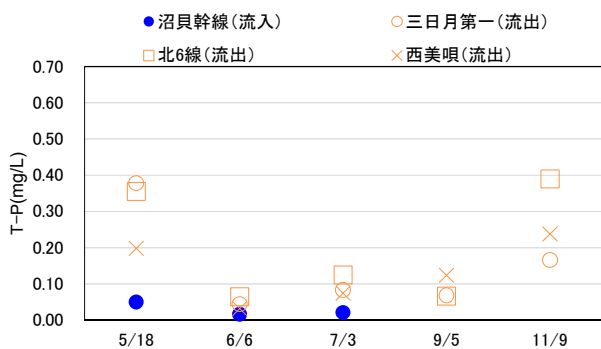


図-13 流入用水路と流出排水路におけるT-P濃度(平成29年)

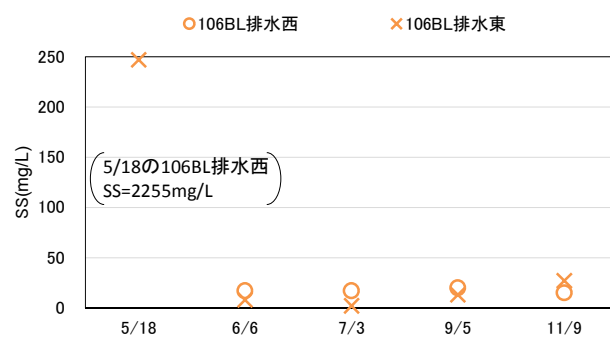


図-14 整備済み農区におけるSS濃度(平成29年)

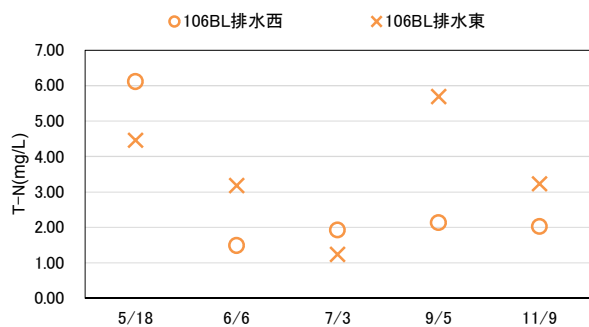


図-15 整備済み農区におけるT-N濃度(平成29年)

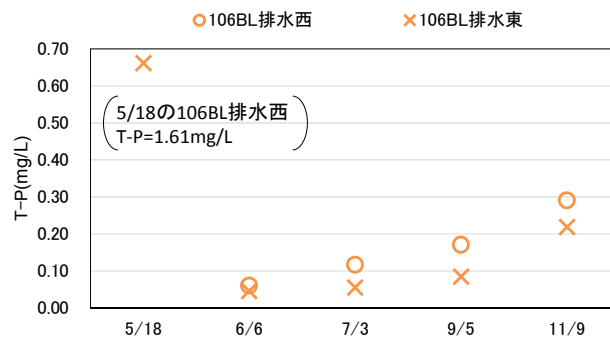


図-16 整備済み農区におけるT-P濃度(平成29年)

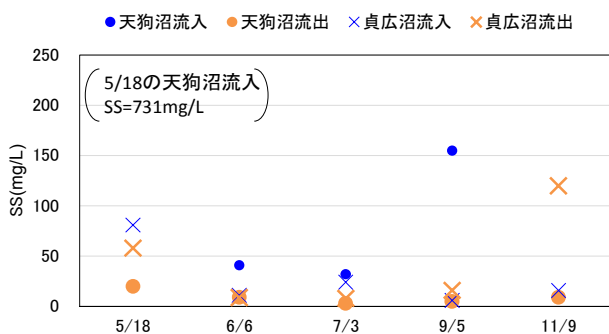


図-17 河跡湖におけるSS濃度(平成29年)

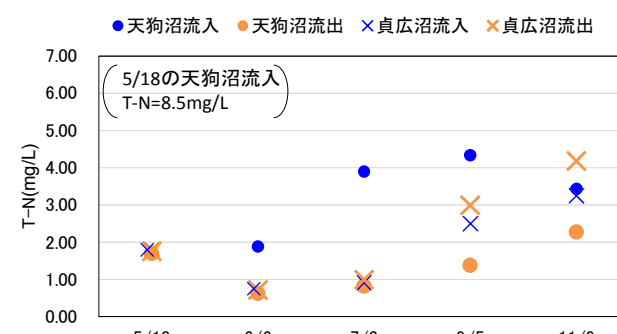


図-18 河跡湖におけるT-N濃度(平成29年)

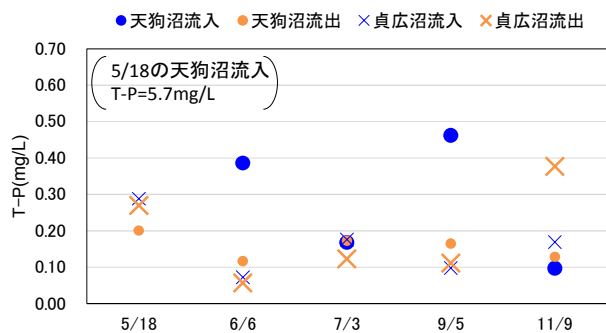


図-19 河跡湖における T-P 濃度(平成 29 年)

河跡湖の流入地点および流出地点における水質濃度(SS、T-N、T-P)を図-17～図-19に示す。天狗沼では、図-17に示すように、流入地点と流出地点の水質濃度は同程度、または前者の値の方が高くなったが、流入水量は流出水量より小さい値であり、その理由は不明であった。

今後、圃場整備に伴う流入量の変化を検討するために、水収支および水質データを蓄積し、河跡湖への流入負荷量とともに湖内における水質変化要因を明らかにする必要がある。

5. まとめ

北海道の水田地帯では、農家戸数の減少に伴い担い手への農地集積が急速に進行している。こうした経営の大規模化へ対応するために、圃場の大区画化や地下水位制御システムの整備が実施されている。このような整備の進展に伴い、圃場の用排水管理が変化し、さらには農区や灌漑区域における流出機構が変化すると予想される。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、圃場整備が現在進められている灌漑区域を対象として、広域レベルおよび農区

レベルの水収支および水質の調査を実施した。平成 29 年までの成果は、以下のとおりである。灌漑区域における流入水量と流出水量とを比較した結果、灌漑期での流入量と流出量との差が小さく、対象灌漑区域内における下方浸透量は小さいことが示唆された。整備済み農区および未整備農区の水収支を比較した結果、掛け流しで田越し灌漑を行っている未整備農区に比べて、圃場ごとに独立した水管理を行える整備済み農区では、取水量が少なかった。灌漑期間における幹線排水路の水質濃度(SS、T-N、T-P)は、農地排水が主体となる小排水路の値よりも低く、農業用水の残水等、農地排水以外の水量により希釈されていると示唆された。

今後、灌漑区域、各農区、河跡湖における水収支および水質のデータを蓄積する。また、それぞれの水収支を精査し、灌漑区域内における負荷流出機構および河跡湖における水質形成機構を明らかにする。これまでは、開水路形式の支線用水路を対象としていたが、平成 30 年度以降は、パイプライン形式の事業地区においても調査を行い、配水管管理用水量の有無が農区の水収支および負荷収支に与える影響を明らかにする。これらをあわせて、河跡湖が点在する大規模水田地帯における水文環境保全対策を提案する。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 29 年版 日本の水資源の現況、p.6
- 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、中曾根英雄、三野徹：水利環境工学、朝倉書店、p.20、1998
- 3) 農林水産省：統計情報わがマチ・わがムラ美唄市基本データ(参照平成 30 年 6 月 18 日)、<http://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/01/215/index.html>

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：横川仁伸、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、施設を利用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った。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運転状況を比較したところ、曝気ポンプ稼働時間の最大値と最小値の比は約4で、ふん尿スラリーの水理的滞留日数の最大値と最小値の比が約2.5であり、施設によって運転方法が大きく異なっていた。調整槽中の固形物単位量当たりの総曝気量が多いほど調整液のpHは高かった。この総曝気量が大きい施設でも調整槽内のスラリーpHは腐熟の簡易判定目安であるpH7.8~8.5の下限值程度にまでしか到達しておらず、曝気量不足が示唆された。室内で実施したバッチ試験の結果では、ふん尿スラリー中固形物濃度が4%で液温を30℃に維持した試験区の有機物分解量は、20℃に維持した試験区のそれより大きく、液温を高く維持することで有機物分解量が大きくなることを確認した。

キーワード：肥培灌漑、好気性発酵、曝気、pH、有機物分解量

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。この事業で整備される施設の一つに肥培灌漑施設がある(図-1)。この施設では家畜ふん尿に水を加え、空気を送り込む(以下、曝気と表記)とともにふん尿スラリーを攪拌する。配水調整槽に貯留された調整液(曝気処理されたふん尿スラリー)は肥料として圃場へ散布される。曝気時間や腐熟の目安は過去に国土交通省北海道開発局が取りまとめた報告書(謝辞参照)に示されているが、実際の運転状況は多様である。その背景には、酪農業では牛乳の冷却、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。

そこで、本研究では、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を提示するため、下記の項目を実施する。

- ①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
- ②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現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証
- ④省エネルギー型ふん尿スラリー調整システムの提案

これまで、①を目的として、実際に稼働している肥培灌漑施設での運転状況調査を、また、②を目的として室内試験装置によるバッチ試験を行った。

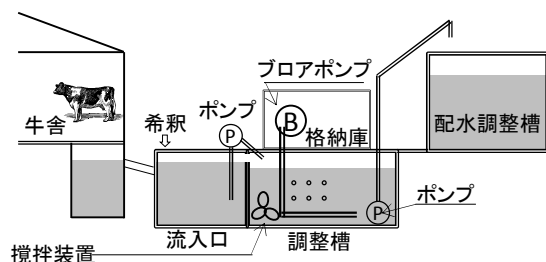


図-1 肥培灌漑施設の概要

2. 肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係

2.1 目的

近年建設されている肥培灌漑施設は、調整槽形状が四角形または八角形である。そこで、本章では、肥培灌漑施設の形状別運転状況を明らかにし、また、各施設の運転状況と調整液性状の関係を検討する。

2.2 方法

2.2.1 調査対象施設の概要

表-1 に調査対象施設の概要を示す。調整槽の形状は八角形が2施設、四角形が3施設である。施設E、Fは調整槽容量が大きいため、曝気ポンプはそれぞれ2台設置されている。調査期間中の調整液貯留量は、調整液移送ポンプの稼働開始設定水位から算出した。

2.2.2 曝気ポンプ流量測定および稼働時間算出

曝気ポンプの流量測定は、曝気ポンプ吸い込み口にエア用超音波流量計 (TRZ100B、愛知時計電機) を取り付けて行った (図-2)。超音波流量計は1台しかないため、5箇所の施設に順次取り付け、短いところでは約10分、長いところでは約3時間、データを取得した。この測定を2018年1~2月に実施した。計測データは、小型データロガーに10秒インターバルで記録した。データから得られた平均の流量は標準状態 (0°C、1気圧) に換算して示した (表-2、表-3)。曝気ポンプの稼働時間は、タイマーで設定されている稼働開始時間および終了時間から算出した。

表-1 調査対象施設の概要

施設記号	調整槽形状	調整液貯留量 (m ³)	曝気ポンプ数 (台)
A	八角形	346	1
B	八角形	251	1
D	四角形	206	1
E	四角形	543	2
F	四角形	670	2



図-2 曝気ポンプの流量測定

2.2.3 ふん尿スラリー投入量および調整液性状測定

調整槽へのふん尿スラリー投入量は、1分ごとに測定した調整槽水位を用いて計算した上昇速度から推定した。計算に用いた水位データは、2017年3月~2018年2月に計測し、各施設の運転状況が安定している複数日を抽出した。抽出数は、最も少ない施設で14日分、最も多い施設で30日分である。調整液は2017年8月~2018年3月に月1回サンプリングを行い、pH (ガラス電極法) および固形物含有量 (105°C、24時間乾燥) を測定した。

2.3 結果および考察

表-2 に曝気ポンプの運転時流量およびふん尿スラリー1m³当たりの曝気運転時流量を示す。調整液貯留量の違いにより曝気ポンプの能力および台数が異なるが、ふん尿スラリー1m³当たりの曝気運転時流量は最大と最小の比が約1.3であり、大差はなかった。

表-3 に曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数を示す。曝気ポンプは間断運転している。ここで示す曝気ポンプ運転時間は、1日の運転時間の合計である。曝気ポンプ稼働時間は最も長い施設Bで8.25h・d⁻¹、最も短い施設Aで2.00h・d⁻¹であり、最大と最小の比が約4であった。ふん尿スラリー投入量と調整液貯留量から求めたふん尿スラリーの水理的滞留日数は、最も長い施設Aで37.2日、最も短い施設Bで14.7日と最大と最小の比が約2.5であった。このように、施設によって運転方法が大きく異なることが明らかとなった。

表-2 曝気ポンプ運転時流量

施設記号	曝気ポンプ運転時流量 (m ³ ・h ⁻¹)	ふん尿スラリー1m ³ 当たり曝気運転時流量 (m ³ ・m ⁻³ ・h ⁻¹)
A	213	0.62
B	149	0.59
D	157	0.76
E	176(No.1) 171(No.2)	0.64
F	261(No.1) 259(No.2)	0.78

表-3 曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数

施設記号	日当たり曝気ポンプ稼働時間 (h・d ⁻¹)	日当たり曝気積算流量 (m ³ ・d ⁻¹)	日当たりふん尿スラリー投入量 (m ³ ・d ⁻¹)	水理的滞留日数 (d)
A	2.00	426	9.3	37.2
B	8.25	1229	17.1	14.7
D	3.25	510	11.6	17.8
E	2.75(No.1) 2.25(No.2)	869	17.0	31.9
F	3.00(No.1) 3.00(No.2)	1560	23.8	28.2

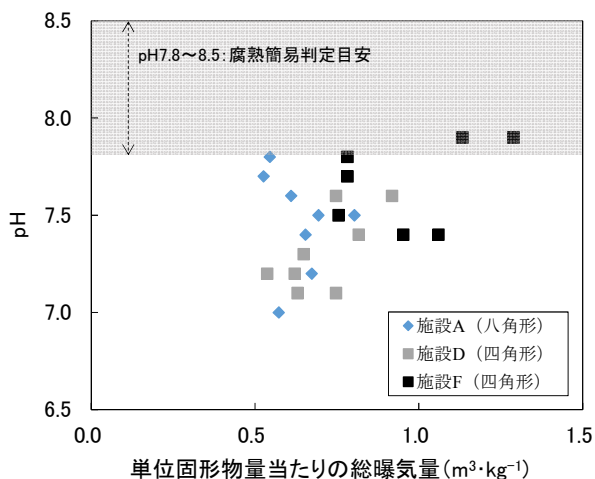


図-3 単位固形物量当たりの総曝気量と pH の関係

次に、曝気量と腐熟の進行の関係を見るために、調整槽中にある固形物の単位量当たりの総曝気量と pH を図-3 に示した。単位固形物量当たりの総曝気量とは、日当たり曝気量($m^3 \cdot d^{-1}$)に水理学的滞留日数(d)を乗じ、調整槽中の固形物量で除した値である。施設 B、E では調整槽の攪拌に不具合が生じていたため、両施設のデータは除外した。単位固形物量当たりの総曝気量が大きいくほど pH が高かったが、最も pH が高い調整液でも、腐熟の簡易判定目安である pH7.8~8.5 の下限値付近にとどまっておき、曝気量不足が示唆された。

なお、曝気量と有機物の分解の関係を見るのであれば、投入スラリーと調整液の固形分含有量の差を曝気量で除すという方法があるが、それぞれの施設での投入スラリーの固形物含有量にばらつきが大きかったため、この方法を採らなかった。

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 目的

肥培灌漑施設でふん尿スラリーを好気性発酵で処理する場合、曝気量、曝気時間、ふん尿スラリー中の固形物濃度などを調整することができる。また、発酵することで発熱し、スラリーの液温が上昇する。そこで本章では、基礎的実験として、ふん尿スラリーバッチ試験装置を用いた室内実験を行い、液温とふん尿スラリー固形物濃度の違いがふん尿スラリー中の有機物分解に及ぼす影響を検討する。

3.2 方法

図-4 に室内実験装置の概要を、図-5 に実験状況を、表-4 に設定条件を示す。使用した未曝気ふん尿スラリーは、現地調査を実施している肥培灌漑施設の流入口より

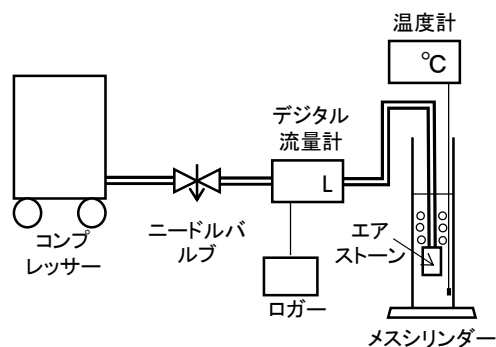


図-4 室内実験装置

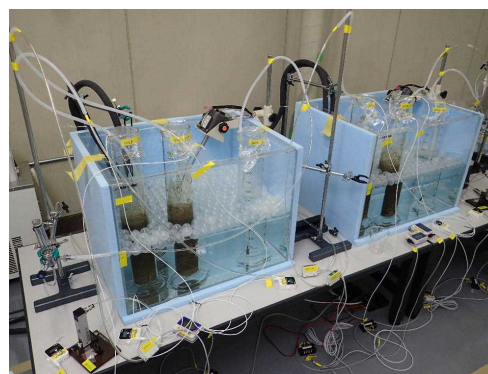


図-5 実験状況

表-4 設定条件

試験区名	液温 (°C)	TS濃度 (%)	曝気流量 (L・min ⁻¹)	曝気時間 (h・d ⁻¹)	ふん尿スラリー量(ml)
20TS4_24h	20	4	0.12	24	1,000
20TS7_24h		7			
30TS4_24h	30	4			
30TS7_24h		7			

2017年9月26日に採取した。全固形物(TS)濃度は7.0%であった。実験では、希釈しない未曝気ふん尿スラリーまたは蒸留水でTS濃度を4%に調整した未曝気ふん尿スラリー1000mlを2000mlメスシリンダーに投入した。ふん尿スラリーの希釈倍率とTS濃度との関係は、既往の文献¹⁾によると2倍希釈でTS濃度が約6%、3倍希釈で約4%と述べられており、これを参考にTS濃度を調整した。ふん尿スラリーを投入したメスシリンダーは水温を20°Cおよび30°Cに制御した水槽内に静置した。メスシリンダーを水槽に静置した理由は、発酵熱による液温上昇を抑えることでふん尿スラリーの温度を一定に保持するためである。曝気は、メスシリンダー内に配置した観賞魚用エアストーンからの送気で常時行った。曝気流量は、メスシリンダーから泡が吹きこぼれない程度の約0.12L・min⁻¹とした。曝気流量はデジタル流量計で測定し、1分毎に小型データロガーで記録して、それを標準状態

(0°C、1気圧)に換算した(表-5)。液温は5分毎にロガー付き温度計で記録した。実験期間は2017年10月5日～21日の17日間である。

曝気開始時および曝気終了時にふん尿スラリー中のTS量と有機物含量を測定した。TS量はスラリーを105°Cで24時間乾燥した後に測定した。また、このTSをさらに550°Cで5時間燃焼して強熱減量(VS)を求め、この値を有機物量とした。実験期間中は1日1回、臭気センサー(畜環研式ニオイセンサ、東京デオドラント(株))で臭気指数を測定した後、一時的に送気を停止し、ガラス棒でメスシリンダー内のふん尿を攪拌し、水素イオン指数(pH)、酸化還元電位(ORP)、電気伝導度(EC)を測定した。

3.3 結果

3.3.1 曝気量および液温

表-5に曝気流量および液温を示す。各試験区とも曝気流量は安定しており、試験期間中の曝気量合計は2600～2700L程度となった。

ふん尿スラリーの液温は概ね設定した温度で推移した。

表-5 曝気流量および液温

試験区名	曝気流量 ^(※) (L・min ⁻¹)	曝気量合計 (L)	液温 ^(※) (°C)
20TS4_24h	0.12±0.02	2699	19.8±0.1
20TS7_24h	0.12±0.03	2717	19.9±0.1
30TS4_24h	0.12±0.02	2650	30.3±0.1
30TS7_24h	0.12±0.02	2641	30.3±0.1

※: 平均値±標準偏差

3.3.2 ORP、pH、EC

図-6にORPの推移を示す。ORPは溶液の酸化力、還元力の強さを表す値で好気の状態では電位が高く、嫌気の状態では電位が低い²⁾。TS4%の両区では曝気開始後3日目までORPが低下し、その後-400mV程度で推移した後9～10日目から上昇し始め、30TS4_24h区では13日目以降に20TS4_24h区よりも大きく上昇した。一方TS7%の両区では試験開始終了時まで、ORPは緩やかに低下し続けた。

図-7にpHの推移を示す。試験開始時のpHはTS4%の両区で6.5、TS7%の両区で6.7であり、曝気開始後にはすべての試験区でpHが上昇し、曝気開始後8～9日目にはTS4%の両区でpHが約8.5に達した後、概ね一定の値で推移した。TS7%の両区ではTS4%の両区より緩やかに上昇し、曝気開始15～16日目に約8.5となった。

図-8にECの推移を示す。ECは溶液中の電解質の総量を表す指標であり²⁾、ECと乾物率から肥料成分含有率を

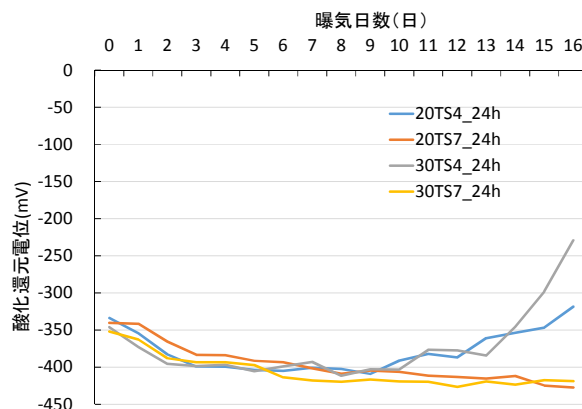


図-6 酸化還元電位 (ORP) の推移

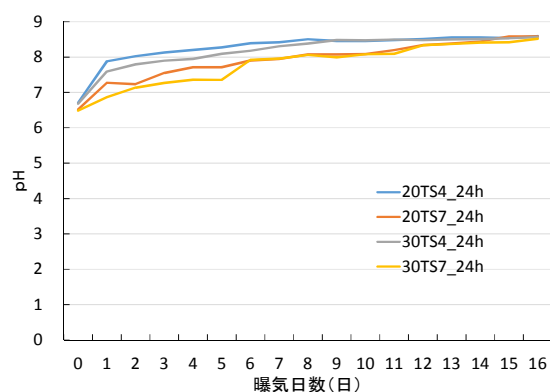


図-7 pHの推移

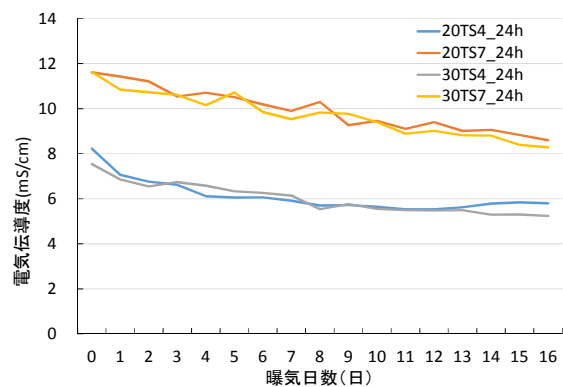


図-8 電気伝導度 (EC) の推移

推定できる³⁾ため、肥料成分の変化の目安として計測した。TS4%の両区では曝気開始後8日目まで徐々に低下した後、概ね一定の値で推移した。一方TS7%の両区では試験終了時まで値は低下し続けた。

3.3.3 TS量および有機物含量

表-6にTS量、有機物含量、有機物減少量を示す。有機物減少量が0.4g・100gFM⁻¹と最も大きかったのは30TS4_24h区であり、逆に0.1g・100gFM⁻¹と最も小さかったのは20TS7_24h区であった。温度の影響を見るため、

20TS4_24h 区と 30TS4_24h 区、20TS7_24h 区と 30TS7_24h 区をそれぞれ比較すると、温度が高い試験区での有機物減少量が大きかった。また、ふん尿スラリーの濃度の影響を見るため、20TS4_24h 区と 20TS7_24h 区、30TS4_24h 区と 30TS7_24h 区をそれぞれ比較すると、TS が小さい試験区での有機物減少量が大きかった。

表-6 TS量および有機物含量

試験区名	TS量(g・100gFM ⁻¹)		有機物含量(g・100gFM ⁻¹)		有機物減少量(g・100gFM ⁻¹)
	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	
20TS4_24h	3.9	3.7	3.3	3.1	0.2
20TS7_24h	6.7	6.6	5.6	5.5	0.1
30TS4_24h	3.9	3.5	3.3	2.9	0.4
30TS7_24h	6.7	6.5	5.6	5.3	0.3

3.3.4 臭気指数

図-9 に臭気指数の推移を示す。なお、測定に用いた臭気センサーの測定上限が臭気指数 40 までとなっており、曝気開始時の一部の試験区では臭気指数が 40 を超えていた。臭気指数規制ガイドライン⁴⁾によると、6段階臭気強度表示法による臭気強度と養牛業における臭気指数の関係は表-7 のとおりである。曝気開始前のふん尿スラリーはすべての試験区において臭気指数が 35 以上となっており、非常に強いにおいであった。曝気開始後 1 日目には臭気指数が大きく低下したものの 30TS7_24h 区では臭気指数が 22 を示し比較的強いにおいであった。次

表-7 臭気強度と臭気指数の関係

臭気強度	内容	臭気指数
0	無臭	—
1	やっと感知できるにおい(検知閾値濃度)	—
2	何のにおいかわかる弱いにおい(認知閾値濃度)	—
(2.5)	(2と3の中間)	11
3	楽に感知できるにおい	16
(3.5)	(3と4の中間)	20
4	強いにおい	—
5	強烈なにおい	—

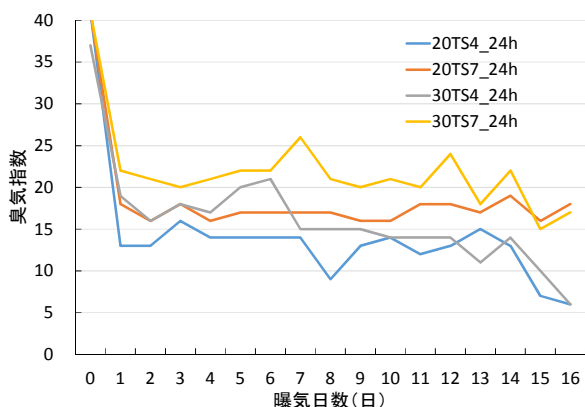


図-9 臭気指数の推移

いで 30TS4_24h 区で 19、20TS7_24h 区で 18 を示し、「楽に感知できるにおい」であった。なお、20TS7_24h 区では臭気指数が 16 以上で推移したものの、30TS4_24h 区では徐々に低下し、試験終了時には臭気指数が 6 となり、においが大きく低下した。また 20TS4_24h 区は曝気開始後 1 日目の臭気指数が 13 を示し、その後も 16 以下で推移し、試験終了時には臭気指数が 6 となった。

3.4 考察

ORP は、TS7%の両区では試験終了まで緩やかに低下し続けたものの、TS4%の両区では曝気開始後 10 日目以降に上昇に転じた。すなわち、TS4%の両区では 9~10 日目までに好氣的分解がある程度まで進み、その後、酸素の供給量が消費量よりも多くなったと考えられる。

pH は TS4%の両区において、曝気開始後 8~9 日目までに徐々に上昇した後、概ね一定の値で推移した。また、EC は TS4%の両区において、曝気開始後 8 日目まで徐々に低下した後、概ね一定の値で推移した。すなわち、上述の ORP が上昇に転じた日数と同じ時期に値が一定となっている。

実験開始時と終了時の測定結果から求めた有機物減少量は、同じ TS 量であれば、温度が高い試験区での有機物減少量が大きいことが明らかとなり、温度を高くすることは有機物の分解、すなわち腐熟に有利であることが確認された。一方、前述の ORP、pH、EC の推移からは、20TS4_24h 区でも好気性発酵が順調に進んでいる可能性があり、今回の曝気条件下では、TS7%と比較して TS4%までふん尿を希釈した方が腐熟しやすい可能性が示唆された。臭気指数は、TS 量が多いふん尿スラリーでは大きい値となり、においの強い状態が継続する。TS 量が少ないふん尿スラリーでは小さい値を示し、曝気日数の経過に伴うにおいの低下が顕著であることが明らかになった。

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と調整液性状の関係解明では、曝気ポンプ稼働時間は最も長い施設と最も短い

施設の比は約4であった。また、ふん尿スラリー投入量と調整液貯留量から求めたふん尿スラリーの水理的滞留日数では、最も長い施設と最も短い施設の比は約2.5であった。このように、施設によって運転方法が大きく異なることが明らかとなった。曝気量と調整液pHの関係では、調整槽中にある固形物の単位量当たりの総曝気量とpHとの関係を整理した。その結果、単位固形物量当たりの総曝気量が多いほどpHが高いことが明らかとなったが、最もpHが高い調整液でも、腐熟の簡易判定目安であるpH7.8~8.5の下限値付近にとどまっており、曝気量不足が示唆された。

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、実験開始時と終了時の測定結果から求めた有機物減少量は、同じTS量であれば、温度が高い試験区での有機物減少量が多いことが明らかとなり、温度を高くすることは有機物の分解、すなわち腐熟に有利であることが確認された。臭気指数は、TS量が多いふん尿スラリーでは大きい値となり、においの強い状態が継続する。TS量が小さいふん尿スラリーでは小さい値を示し、曝気日数の経過に伴うにおいの低下が顕著であることが明らかになった。

謝辞

調整液腐熟の簡易判定目安は、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部「平成9年度十勝地域環境保全型農業高度化検討委員会報告書」を参考とした。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 村上功、西脇康善：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—第九報一、第59回（平成27年度）北海道開発技術研究発表会、2016
- 2) 社団法人農業土木学会：農業土木標準用語辞典、改訂五版、2003
- 3) 北海道農業・畜産試験場編：家畜ふん尿処理・利用の手引き2004、p.58、2004
- 4) 環境省環境管理局：臭気指数規制ガイドライン、p.22、2001

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、田中健二、村上功、吉澤淳、大山武士

【要旨】

北海道東部の大規模酪農地帯では、国営環境保全型かんがい排水事業が実施され、事業実施状況が流域の水質環境に与える影響を定量化することが求められている。そのため、本研究では、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)による水質解析により、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。今年度は、採水調査、空間情報の集計により、河川水質と土地利用状況・営農状況の関係性を調べ、さらにSWATを適用する初期段階として流出解析を実施した。その結果、河川のNO₃-N濃度と流域面積あたりの飼養牛頭数密度に正の相関関係が得られた。河川のNO₃-N濃度は、浄化作用を受けている濃度のため、代わりに河畔草地率などから推定した発生源の濃度（浄化作用を受けていない濃度）を用いると、さらに相関性が向上する傾向が得られた。また、近似直線から外れる小流域は事業の実施状況との関係性が示唆された。SWATによる流出解析の結果、低水時に概ね実測値を再現した結果が得られたが、出水時に過大推定する傾向がみられ、土壌の物理性などのモデルパラメータを再検討する必要がある。

キーワード：水質；酪農；土地利用；SWAT

1. はじめに

北海道は、広大な土地と夏の冷涼な気候風土により酪農に適した地域であり、1950年代の草地拡大や灌漑排水施設などのインフラ整備を契機に酪農産業が発展してきた。現在では、北海道における国内生乳生産量のシェアが50%を超え、安定的な生乳・乳製品の供給地として役割を果たしている。特に北海道東部は、広大な草地を活用した大規模酪農地帯として知られている。一方で、大規模経営による多頭化に伴い、家畜ふん尿由来の水質汚濁物質の河川環境への流出が懸念されている。釧路・根室地域では、家畜ふん尿の効率的な農地還元により自然環境と調和した資源循環型農業を展開することを目的に、国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。事業では、家畜ふん尿を集積し有機質肥料（スラリー）にする肥培かんがい施設の整備や、土砂かん止林や水質浄化池などの浄化型排水施設の整備を行っている。このことから、水質汚濁物質の流出経路の変化やそれに伴う動態変化が予測され、流域規模で水質環境への影響を定量的に評価することが求められている。

流域規模で水質環境を評価する技術としてモデル解析が有効であり、代表的なものとして米国農務省農業研究

局が開発したSWAT (Soil and Water Assessment Tool)がある。SWATのモデルパラメータは米国のものであるため日本での適用事例は少ないが、酪農地域に適用した事例として、施肥方法が水質環境に与える影響を評価したもの¹⁾、浮遊土砂物質、懸濁態窒素、リンの予測値と実測値を適合させたもの²⁾などが挙げられる。しかし、水質環境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存在しない。

本研究では、水質環境評価技術である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。そこで平成29年度は、モデルパラメータの整備および解析精度の検証をするために、昨年度に引き続き河川の採水調査を行い、河川水質の実測値を取得した。さらに、得られた河川水質と土地利用・営農状況を支川小流域ごとに集計し、その関係性を調べた。また、大規模酪農地帯にSWATを適用する初期段階として、流出解析を実行し、実測値の河川流量との検証を行った。

2. 研究対象地

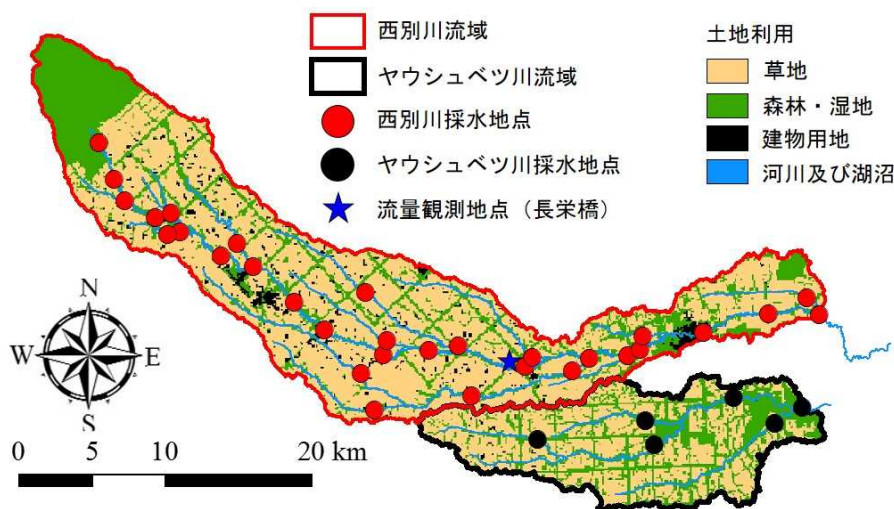


図-1 研究対象流域

2.1 対象流域

本研究の対象流域は、北海道東部の大規模酪農地帯である西別川流域とヤウシュベツ川流域である(図-1)。西別川流域は、別海町、標茶町、中標津町にまたがり、流域面積は41,602 haである。ヤウシュベツ川流域は別海町に位置し、流域面積は15,670 haである。西別川は、約70 kmの本川の間には主要な支川が11本存在し、ヤウシュベツ川は、約30 kmの本川の間には主要な支川が2本存在している。本川と支川の位置関係を表す河川概要図を図-2に示す。両流域とも、国営環境保全型かんがい排水事業地区に含まれ、別海地区と別海南部地区は事業が完了し、別海北部地区と別海西部地区は事業が継続している。

2.2 使用したデータ

本研究で使用したデータは、地形データ、土地利用データ、飼養牛頭数、土壌データ、気象データ、河川流量データである。地形データは、基盤地図情報より数値標高モデルの平成26年版を入手した。土地利用データは、国土数値情報より土地利用細分メッシュの平成26年版を入手した。対象流域の土地利用は、その他の農用地、森林、荒地(湿地)、建物用地、道路、河川地及び湖沼の6種類であり、その他の農用地を草地として取り扱った。飼養牛頭数は、2015年農林業センサスの農業集落カードより入手した。該当する集落は、西別川流域で71集落、ヤウシュベツ川流域で16集落であった。なお、集落内にて農家戸数が2以下の場合、個人情報保護の理由から飼養牛頭数が公開されていないため、流域内の集落で平均した戸数あたりの飼養牛頭数より補完した。土壌データは、昭和53年度版の土壌分類図を国土庁土地局より入手した。気象データは、流域に隣接する気象庁アメダス観測所(別海、虹別、弟子屈、根室)より降水量、気温、相対湿度、風速、

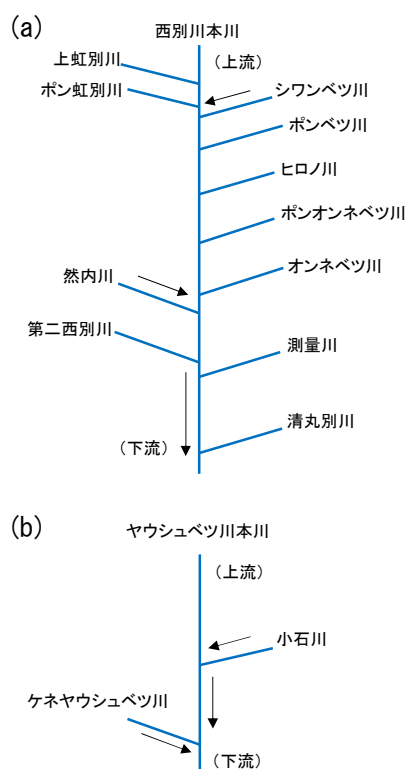


図-2 河川概要図：(a)西別川流域、(b)ヤウシュベツ川流域

日照時間を入手した。なお日射量は、観測値が存在しなかったため日照時間から全天日射量の日平均値を推定する実験式³⁾を用いて換算した。河川流量データは、北海道が観測している西別川本川の長栄橋地点(図-1)の日流量データを2009年から2013年まで入手した。

3. 研究方法

3.1 採水調査手法

研究対象流域の水質状況を把握するために、採水調査

を実施した。西別川の採水地点は、本川16点、支川15点の計31点設定し、ヤウシュベツ川の採水地点は、本川3点、支川3点、計6点設定した。本川の採水地点は、支川が合流した直後や採水地点の距離間隔が等しくなるように設定した。支川の採水地点は、本川との合流点付近に設定し、大きな支川の場合は採水地点を複数点設定した。採水調査は2017年4月から2017年11月までに月2回の頻度で計15回実施した。採水した河川水は100 mLのポリ瓶にて密閉保冷状態で室内に運搬し、水質分析に供した。水質分析項目は全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、全リン(T-P)であり、分析方法はJISに準拠した。

3.2 土地利用状況の集計

対象流域における土地利用・営農状況をGIS(Geographic Information System)ソフトであるArc GISを用いて集計した。土地利用状況を集計する範囲は、採水調査地点の受け持つ小流域であり、西別川は31流域、ヤウシュベツ川は6流域である。流域界は地形データを基に定められるが、実際の流域界と異なる小流域が存在したため、地形データに河道に沿った排水ラインを設定し修正を加えた。それにより、実際の流域界に合った小流域を作成した。なお、下流の小流域は、それより上流の小流域を内包しており、下流の小流域(採水調査地点が受けもつ小流域)ごとに土地利用・営農状況を集計した。

土地利用の諸元として流域草地率と河畔草地率を集計した。流域草地率は小流域ごとに集計し、河畔草地率は河川両岸100 mを河畔として抽出し、小流域ごとに集計し

た。飼養牛頭数は、集落ごとに公開されているため、面積按分により小流域で集計した。面積按分の方法は、集落ごとに草地面積あたりの飼養牛頭数密度を計算し、それに重なる小流域の草地面積を乗じ、小流域ごとに飼養牛頭数を足し合わせた。その際、2歳未満の乳用牛1頭は、ふん尿量を考慮して成牛0.42頭に相当する⁴⁾として換算した。

西別川およびヤウシュベツ川の小流域で集計した流域草地率・河畔草地率・飼養牛頭数の結果を、表-1、表-2に示す。西別川本川とヤウシュベツ川本川の流域草地率は60%以上、河畔草地率は50%以上であり同程度であった。飼養牛頭数は西別川本川の方がヤウシュベツ川本川より多かったが、流域面積あたりの飼養牛頭数は同程度であった。一方で、西別川の支川小流域では、草地率と飼養牛頭数が異なる傾向であったが、ヤウシュベツ川の支川小流域では、同程度の値であった。

3.3 水質解析モデル

SWATは、米国農務省農業研究局によって開発された準分布型流出モデルであり、物理的なプロセスモデルである。SWATは、流域において地形、気象、土壌、土地利用、営農管理といった要素により影響を受ける水・物質動態を同時に扱うことができる。十分な精度の結果が得られることや効率的な解析を可能とするGISインターフェイスやサブソフト群が無償で提供されていることから、世界各地で適用されている。

SWATは、HRU(Hydrological Response Unit)と呼ばれる、地形勾配、土壌の種類、土地利用情報の組み合わせによつ

表-1 西別川の本川および主要支川の諸元

水系	流域面積 (ha)	流域草地率 (%)	河畔草地率 (%)	飼養牛頭数 (head)
本川 西別川	41,602	65	50	36,930
上虹別川	858	61	48	416
ポン虹別川	831	80	65	710
シワンベツ川	2,787	42	42	1,364
ポンベツ川	4,387	59	50	4,230
ヒロノ川	1,179	80	69	1,132
支川 ポンオンネベツ川	4,144	74	62	4,870
オンネベツ川	3,718	75	55	4,765
然内川	7,668	80	61	6,542
第二西別川	823	77	72	501
測量川	832	63	41	728
清丸別川	2,551	70	62	2,712

表-2 ヤウシュベツ川の本川および主要支川の諸元

水系	流域面積 (ha)	流域草地率 (%)	河畔草地率 (%)	飼養牛頭数 (head)
本川 ヤウシュベツ川	15,670	62	52	14,225
支川 ケネヤウシュベツ川	3,402	63	56	2,053
小石川	2,427	69	50	2,485

て細かく分類されたグリッドの集合体によって流域を表現しており、それぞれのグリッドの内の水収支や物質収支解析を行い河川への流出量を計算する。表面流出の計算にはSCS Curve Number法、蒸発散量の計算にはPenman-Monteith法、土壌浸透量の計算にGreen Ampt法、河道追跡の計算にMuskingum River Routing法を採用している。

4. 結果と考察

4.1 河川水質と土地利用・営農状況の関係

西別川流域、ヤウシュベツ川流域における支川小流域ごとのNO₃-N濃度分布を図-3に、流域面積あたりの飼養牛頭数分布を図-4に示す。本稿では、水質項目はNO₃-N濃度を例に表示する。NO₃-N濃度は、西別川流域の中流左岸域で高く、上流域で低い傾向がみられ、ヤウシュベツ川流域は全体的に低濃度であり、小流域ごとの差が小さかった。流域面積あたりの飼養牛頭数密度は、西別川流域の中流左岸域で高く、上流域で低い傾向がみられ、ヤウシュベツ川流域は中程度で小流域ごとの差が小さかった。以上から、NO₃-N濃度と飼養牛頭数密度が高い小流域と低い小流域の位置関係が一致しており、空間的に対応した関係が得られた。

平成28年度の報告書によれば、支川小流域ごとの河川水質と土地利用・営農状況との関係を明らかにするため

に、NO₃-N濃度と飼養牛頭数密度(流域面積あたり)との関係を明らかにしており、NO₃-N濃度が水質環境を評価するのに適した指標であると示唆している。平成29年度

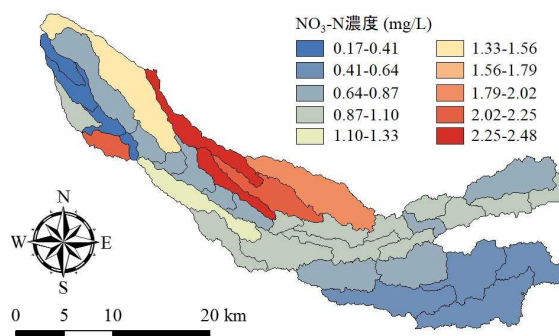


図-3 NO₃-N濃度分布

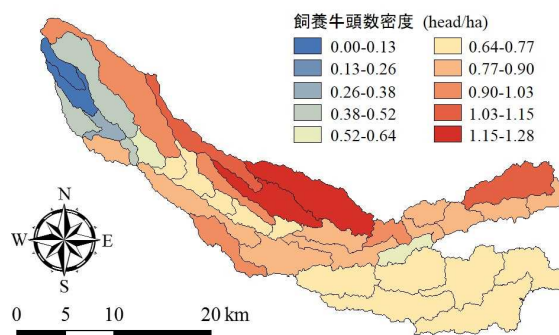


図-4 流域面積あたりの飼養牛頭数密度分布

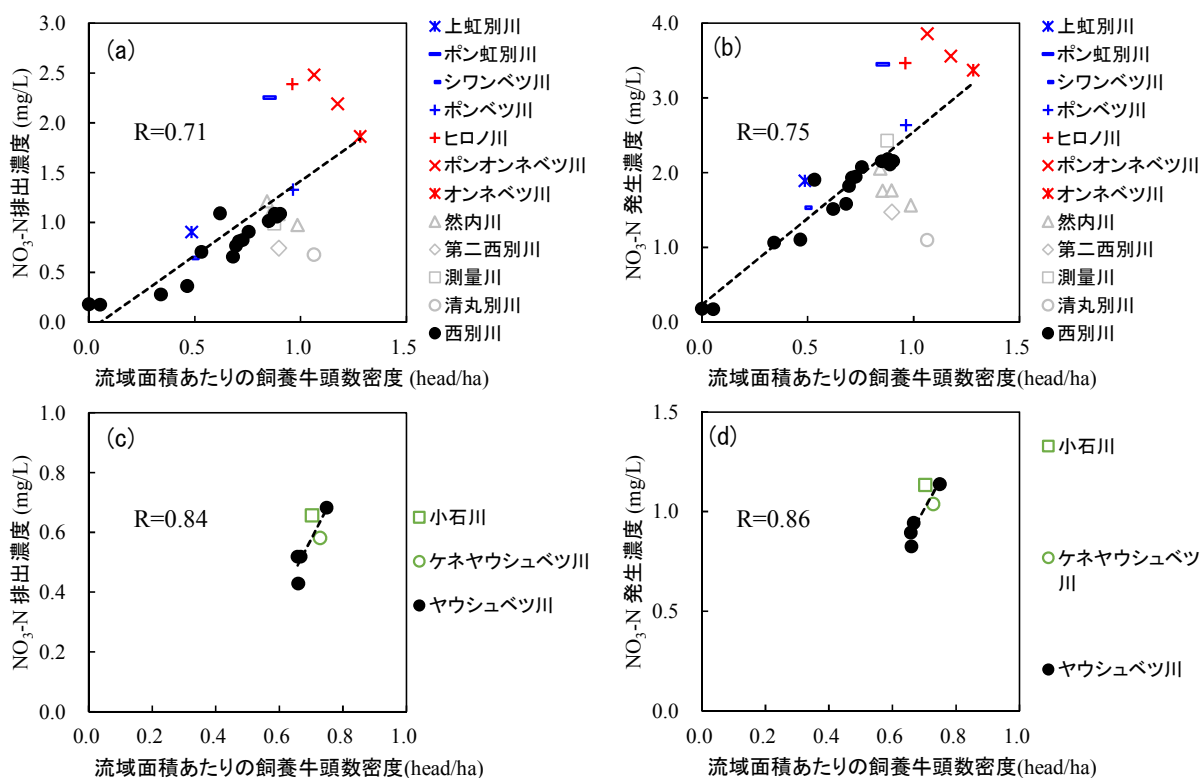


図-5 NO₃-N濃度と流域面積あたりの飼養牛頭数密度の関係：(a) 西別川の排出濃度、(b) 西別川の発生濃度、(c) ヤウシュベツ川の排出濃度、(d) ヤウシュベツ川の発生濃度

の解析結果においても正の相関関係が得られた(図-5(a)、(c))。しかし、同程度の流域面積あたりの飼養牛頭数密度の場合でも $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度にばらつきがみられ、その原因の一つとして負荷を抑制する河畔林や湿地の有無が考慮されていないことが考えられる。採水調査で得られた水質濃度は浄化作用を受けた濃度(排出濃度と定義)であるため、浄化作用を受けていない発生源の濃度(発生濃度と定義)を、以下の式により推定した。

$$C_p = \frac{C_e}{a} \quad (1)$$

$$a = Lu_g \cdot c \quad (2)$$

ここで、 C_p は発生濃度 [mg/L]、 C_e は排出濃度 [mg/L]、 a は排出率 [-]、 Lu_g は河畔草地率 [-]、 c は補正係数 [-] である。本研究では、 a は河畔草地率により定められるとした。つまり、河畔草地率が高いと河畔林や湿地での浄化作用を受けていないことを意味し、発生濃度と排出濃度は同程度になる。逆に、河畔草地率が低いと浄化作用を受けていることを意味し、発生濃度は排出濃度に比べ高い値になる。また、 c は 1.0 とし流域内で変化しないものとしたが、実際の排出率は明らかでない。そのため、草地からの流出水(暗渠からの流出水など)を採水し、草地からの発生濃度に合うように c を決定する必要があり、今後の検討課題である。推定した発生濃度と流域面積あたりの

飼養牛頭数密度との関係を図-5(b)、(d) に示す。その結果、排出濃度との関係と発生濃度との関係を比較すると、西別川流域では相関係数が 0.71 から 0.75 へ、ヤウシュベツ川流域では相関係数が 0.84 から 0.86 へ僅かであるが高くなった。西別川流域の本川および大部分の支川の小流域のプロットは、近似直線付近に分布しているが、清丸別川、第二西別川の小流域は近似直線より下部に、ポンオンネベツ川、ヒロノ川、ポン虹別川の小流域は近似直線より上部に分布し、同程度の飼養牛頭数密度であっても濃度にばらつきがみられた。その原因の一つとして、国営環境保全型かんがい排水事業の実施状況が考えられる。低濃度であった小流域は、事業の完了した別海地区と別海南部地区に含まれ、高濃度であった小流域は、事業が未完了の別海北部地区と別海西部地区に含まれた。このことは、草地から河川へ排出される過程において、事業により設置された水質浄化池や土砂かん止林により、流域規模で負荷を抑制している可能性を示している。発生濃度を推定し、負荷を抑制する河畔林や湿地を定性的に表現することで、河川水質と土地利用状況の関係性が示されたが、水質浄化池・土砂かん止林の位置関係や物質の浄化メカニズムについては考慮できていない。地形連鎖やそれに伴う物質の動態変化を定量的に表現するためには、物理プロセスを踏まえた水質解析モデルの適用が必要である。

4.2 水質解析モデルの適用

本研究では、北海道が長期的に河川流量を観測している西別川の長栄橋地点より上流域に SWAT を適用した

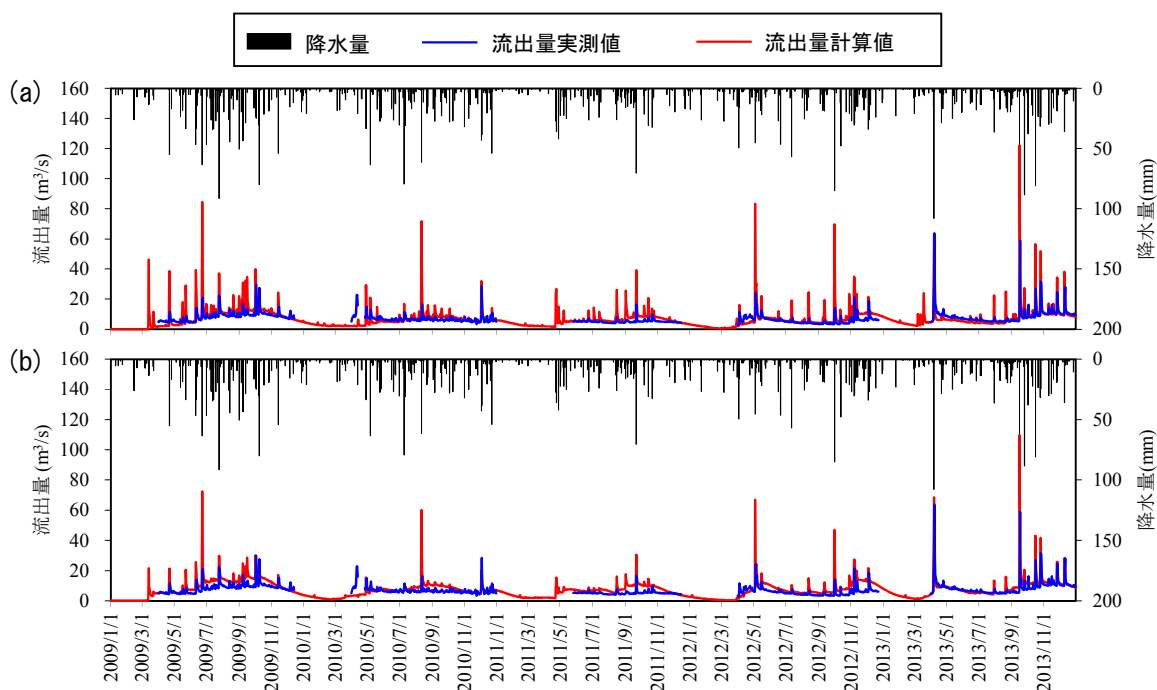


図-6 西別川流域における SWAT の流出解析結果：(a) パラメータ最適化前、(b) パラメータ最適化後

(図-6)。モデルの適用期間は2009年から2013年の5年間であり、適用方法は地形、土地利用分布、土壌分布、各気象値を入力として、モデルパラメータの感度分析および最適化を実行した。パラメータの最適化は、SWATに付与されている自動キャリブレーション機能である SWAT CUPにより、降雨からの直接流出成分である側方流遅れや地下水流出遅れなどのパラメータに対して、河川流量の実測値に合うように実行される。

SWATモデルを西別川流域に適用し、河川流量の実測値と計算値を比較すると、低水時は概ね実測値を再現した結果が得られたが、出水時は過大推定する傾向がみられた。特に、パラメータの最適化前では、ピーク流出量を過大推定する傾向がみられるが、最適化後では、ピーク流出量が抑制され解析結果が改善された。しかし、依然として過大推定の傾向がみられるため、土壌の物理性などのモデルパラメータを再検討する必要がある。本年度の解析結果は、初回の実行結果であるため河川流量に限定しており、上記の課題を解決した後、水質成分(窒素、リン、浮遊土砂物質)の解析を実行していく予定である。また、環境保全型かんがい排水事業の効果を検証するために、事業実施地区内でみられる水質浄化池や河畔の土砂かん止林における物質の動態変化のモデル化を検討している。

5. まとめ

本研究では、北海道東部の大規模酪農地帯である西別川流域とヤウシュベツ川流域を対象として、水質環境評価技術である SWAT を用いた水質解析により、水質環境改善手法を提案することを目的とした。平成29年度は、対象流域において、河川の採水調査と土地利用などの空間情報の集計を実施し、河川水質と土地利用・営農状況の関係を調べた。さらに水質解析モデルである SWAT を西別川流域に適用し、初期段階として流出解析を実施した。主要な成果は以下にまとめられる。

- 1) 窒素成分の主成分である $\text{NO}_3\text{-N}$ 排出濃度と流域面積あたり飼養牛頭数密度との関係性を調べた結果、正の相関関係が得られた。また、河畔林や湿地の浄化作用の効果を検討するため、河畔土地利用の草地率を用いて排出濃度から発生濃度への変換を行い、流域面積あたりの飼養牛頭数密度との関係を調べると、相関係数が向上した。近似直線から外れる小流域が存在し、流域規模において、事業の実施により負荷を抑制している可能性が示された
- 2) SWATによる流出解析の結果、低水時は概ね実測値を再現したが、出水時に過大推定する傾向がみられた。パラメータ最適化後はピーク流出量が抑制され

たが、依然として過大推定する傾向がみられ、モデルパラメータを再検討するなどの課題が残った。

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) 近藤純正 編著：「水環境の気象学」、1994
- 4) 社会法人農林水産技術協会：「環境保全と新しい畜産」、p.20、1997