

地下水位変動タンクモデルを用いた緩衝帯の機能検証 ～国営総合農地防災事業サロベツ地区の取り組み～

株式会社アルファ技研

高 橋 洋
植 屋 賢 祐

1. はじめに

利尻礼文サロベツ国立公園の上サロベツ湿原に隣接する農用地（牧草地）では、泥炭地盤の沈下起因した排水機能等の低下が顕在化していた。これらの機能回復を目的とする国営総合農地防災事業が計画され、農業・農用地と多様な生物や生態系を有する湿原環境との共生が図られることとなった。対応する取組みの一つとして、農用地と湿原が隣接する箇所に、農用地では適度の地下水位を保持し、湿原地下水位は現状よりも低下させないことを目的する「緩衝帯」の設置が計画された¹⁾。

緩衝帯は、農用地と湿原との境界にある既設の排水路を部分的に堰き止めてその機能を廃止し、これに替えて農用地側に一定の幅（ $L=25\text{m}$ ）をとって排水路を新設し、この25m幅を緩衝部として存置するものである（図－1）。なお、当該用地の確保は、関係農家からの無償提供により実現している²⁾。

事業期間中に、農用地、緩衝帯および湿原の地下水位のモニタリング調査を行い、排水整備による農用地への効果や湿原地下水位への影響、すなわち緩衝帯の機能（有効性）を検証した。

地下水位の変動には、年変動のある雨量や蒸発散量、周辺排水路の水位の影響が考えられる。これらの影響を考慮した定量的な評価を行うため、泥炭地の地下水位変動に関する既往の研究成果である地下水位変動タンクモデル³⁾を適用し、地下水位変動機構の定量化による緩衝帯の機能検証を試みた。

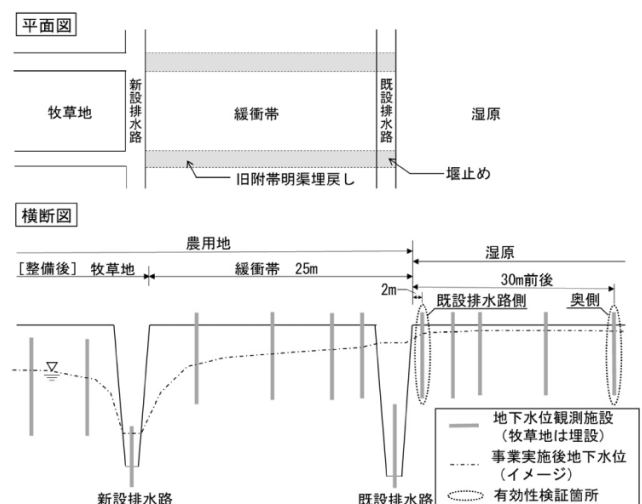
2. 地下水位調査の概要

緩衝帯は、農用地と湿原が隣接する6箇所、 $\Sigma L=9.9\text{km}$ の区間に設置された。

緩衝帯の機能検証を目的として、緩衝帯設置（排水

整備）前後で地下水位のモニタリング調査を行った。地下水位は、各緩衝帯で牧草地から湿原を横断する延長50m～70mの観測ラインを設け、そこに数m～十数m間隔で複数の観測点を設けて計測した。

地下水位の計測には、自記式水位計を用いて、1時間間隔で通年の計測を行った（図－1）。地下水位観測の範囲は、いずれの緩衝帯も農用地及び湿原が排水路の法肩から30m程度、緩衝帯が既設排水路を含め25mであり、地下水位の観測期間は12～15年間に及ぶ。



図－1 緩衝帯概要図

3. 緩衝帯の有効性評価

緩衝帯は、農業と湿原の共生を理念とする環境保全の取組みである。湿原に隣接する牧草地の一定幅を地下水環境の緩衝部として存置する具体的な取組みは、本事業地区が初の試みであった。このため、実際に地下水位を計測し、当該データに基づいてその機能（有効性）の検証を進めた。

緩衝帯の有効性は、緩衝帯設置前後における地下水位変動機構の変化の有無を確認することで評価できる。これには、地下水位変動機構の定量化が必要であるこ

と、また、地下水位変動は年により変動のある降雨量や蒸発散量の影響を受けることを踏まえ、評価手法として、気象条件を考慮した地下水位変動機構の定量化が可能な地下水位変動タンクモデルを適用した。

以下に、低位泥炭の分布する区域に施工されたA緩衝帯に隣接した湿原を事例として、地下水位変動タンクモデルを用いた緩衝帯の有効性評価の概要を述べる。

3-1 地下水位変動タンクモデルの概要

地下水位変動タンクモデルは、タンク内の水位を地下水位に見立て、降雨や流出孔係数などをパラメータとしてタンク内水位（地下水位）の変動を解として求める手法である（式－1）。

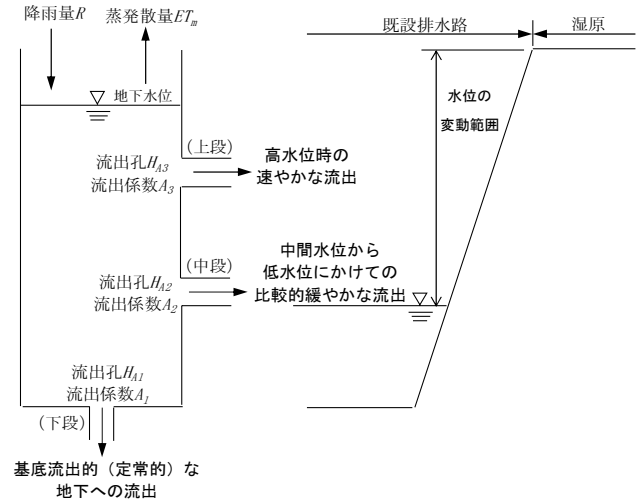
A緩衝帯に隣接する湿原の地下水位変動タンクモデル（以下、「地下水位モデル」という）は、以下の条件を踏まえ、図－2に示す3孔の単段タンクとした。

- ① 対象とする箇所は低位泥炭が分布する区域である。この場合、タンク内水位の上昇に係る入力（流入水）として、降雨及び周辺（高位泥炭地等）からの流入が考えられる。ただし、本箇所は牧草地や道路に隣接して排水路網が整備されており、周辺から湿原への流入はなく、入力降雨に限定できると考え、単段タンクとした。
- ② 地下水位の実測値より、その上昇ピークからの通減は、降雨直後の比較的速やかな低下と、それ以降の比較的緩やかな低下を示す特徴が見られた。これより、地下水位モデルでは、比較的速やかな地下水位の低下に対応する上段流出孔（ H_{A3} ）と、主として比較的緩やかな地下水位の低下に対応する中段流出孔（ H_{A2} ）を設定した。なお、これらに加えて、基底流出的な深部（地下）への浸透を下段流出孔（ H_{A1} ）として設定した（図－2）。
- ③ また、地下水位の低下に係る要素として、上記に加えて蒸発散量がある。

$$\begin{aligned}
 HW_{(n+1)} = & HW_n - A_1 \times (HW_n - H_{A1}) \\
 & - A_2 \times (HW_n - H_{A2}) - A_3 \times (HW_n - H_{A3}) \\
 & + C \times R - E_{tm} \quad \dots \dots \dots \text{式－1}
 \end{aligned}$$

ここに、 $HW_{(n+1)}$: 1時間後のタンク内の水位
 HW_n : n時におけるタンク内の水位
 H_{A1} 、 H_{A2} 、 H_{A3} : 流出孔の標高

A_1 、 A_2 、 A_3 : 流出孔の流出係数
 C : 水位上昇係数
 R : 降雨量
 E_{tm} : 蒸発散量



図－2 地下水位変動タンクモデル概念図

3-2 緩衝帯の有効性の検証地点

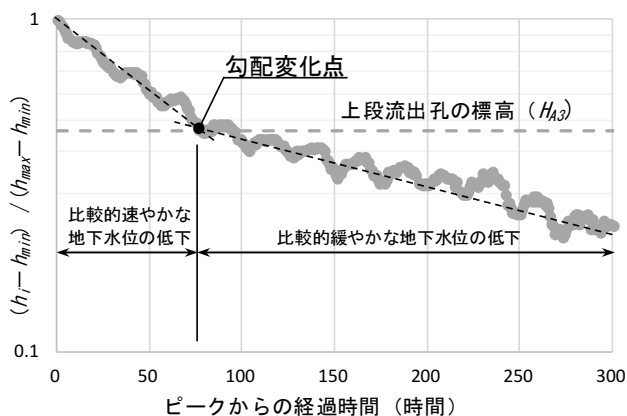
地下水位モデルによる検証地点は、湿原のうち、最も既設排水路に近い地点と、最も奥の、2箇所とした（図－1：横断図）。既設排水路側は排水路の法肩から湿原へ約2m、奥側は湿原へ約26mに位置する。既設排水路側は、緩衝帯の設置（既設排水路の堰止め）による影響で地下水位変動機構が変化する可能性の大きい箇所である。一方、奥側は、緩衝帯の設置の影響が比較的小さいと考えられる箇所である。

3-3 緩衝帯設置前の地下水位モデル

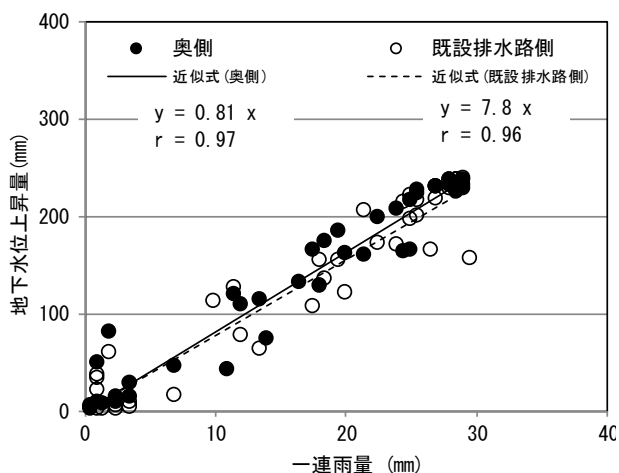
緩衝帯設置前の地下水位モデルは、調査2カ年の地下水位の実測値に適合するよう作成した。

（1）流出孔の標高（ H_{A1} 、 H_{A2} 、 H_{A3} ）

- ① 上段流出孔の標高（ H_{A3} ）は、降雨後の地下水位の通減が明瞭な期間の地下水位実測値を複数例抽出し、図－3に示す整理・分析にもとづき設定した。本図は横軸に経過時間を、縦軸（対数目盛）に地下水位の上昇量（ $h_{max} - h_{min}$ ）に対するピーク後の地下水位（ $h_i - h_{min}$ ）の比をとった関係図である。降雨毎に本図を作成し、それぞれの勾配変化点の地下水位を調べ、それらの平均値を上段流出孔の標高（ H_{A3} ）とした。
- ② 中段流出孔は、図－3の勾配変化点より低位の



図－３ 上段流出孔の標高 H_{A2} 算定の例



図－４ 一連雨量と地下水位上昇量の関係

比較的緩やかな地下水位の低下（流出）に係る孔である。排水路に比較的近い湿原の既設排水路側は、その標高（ H_{A2} ）を既設排水路の実測の水位変動の下限值とした（図－２）。一方、既設排水路からより離れていて、その水位変動の影響が小さいと考えられる湿原の奥側の H_{A2} は、当該箇所の実測の地下水位変動の下限值とした。

- ③ 下段流出孔は、より深い地下への浸透である基底流出に係る孔であり、その標高（ H_{A1} ）は既設排水路の河床高とした。

（２）水位上昇係数（ C ）

湿原の既設排水路側と奥側のそれぞれについて、降雨後に地下水位が上昇した事例を複数抽出し、一連雨量と対応する地下水位上昇量の相関分析を行った。水位上昇係数は、両値の相関が高い（相関係数 $r \geq 0.96$ ）ことを確認のうえで、相関式の傾きとした（図－４）。

（３）降雨量（ R ）

降雨量は、Ａ緩衝帯に最寄りのアメダス豊富地点の

観測値を用いた。

（４）蒸発散量（ E_m ）

蒸発散量は、ペンマン式により算定した蒸発量に作物係数を乗じた値とした。作物係数（ K_c ）は、牧草の生育期である６月～９月は $K_c=1.2$ とし、それ以外の５月及び１０月～１１月は $K_c=1.0$ とした。^{４)}

（５）最適モデルの作成

以上の（１）～（４）をモデルの定数とし、流出孔の流出係数（ A_1 、 A_2 、 A_3 ）を変数として、式－１に基づき最適モデルの同定を行った。流出係数（ A_n ）の最適値は、地下水位モデルによる地下水位の再現値と実測値の相対誤差^{５)}（式－２）により評価した。この際、モデルの精度の指標となる許容誤差は、相対誤差２０％以下とした^{６)}。相対誤差が許容誤差の範囲内かつ最小となる場合の流出係数（ A_n ）の組合せを試行錯誤法により求め、最適モデルとした。なお、相対誤差を算定する際の基準となる標高（基準値 H ）は、モニタリング調査期間の各検証箇所における地下水位変動の下限值とした。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|H_{oi} - H_{ci}|}{(H_{oi} - H)} \times 100(\%) \quad \cdots \cdots \text{式－２}$$

ここに、 j ：相対誤差（％）

N ：データ数

i ：データ番号

H_{oi} ：実測値ＥＬ．（ｍ）

H_{ci} ：計算値ＥＬ．（ｍ）

H ：基準値ＥＬ．（ｍ）

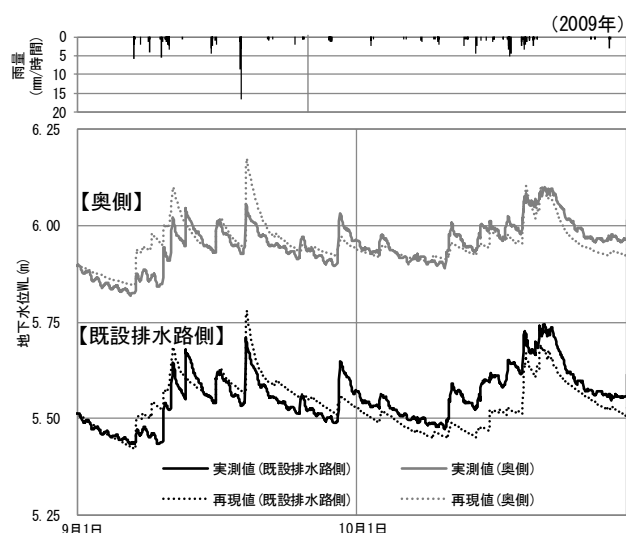
（６）緩衝帯設置前の最適モデル

以上により作成した最適モデル（以下、「設置前モデル」という）による地下水位の再現値と実測値の経時変化を図－５に示す。相対誤差は湿原の既設排水路側が１９．６％～１９．７％、湿原の奥側が８．６％～１３．３％でいずれも許容誤差（２０％）の範囲内であり、本モデルは実用的な精度を有すると判断した。

最適モデルの係数を表－１に示した。流出孔の流出係数について、上段流出孔の流出係数が最も大きくなっている。また、流出係数は、いずれの孔も湿原の奥側に比して既設排水路側が大きくなっている。これらは、①泥炭の上層ほど透水係数が大きいこと、②降雨後の

表－１ 緩衝帯設置前の最適モデル係数

項目		単位	湿原	
			既設排水路側	奥側
流出孔標高	上段 H_{A3}	EL. (m)	5.597	5.941
	中段 H_{A2}	EL. (m)	5.200	5.750
	下段 H_{A1}	EL. (m)	4.523	4.523
流出係数	上段 A_3	—	0.040	0.023
	中段 A_2	—	0.0017	0.0016
	下段 A_1	—	0.000025	0.000009
水位上昇係数	C	—	7.90	8.10
基準水位		EL. (m)	5.339	5.614
相対誤差	J	%	19.6～19.7	8.6～13.3



図－５ 再現値と実測値の経時変化

地下水位低下は奥側に比して既設排水路側で早いことを示す。

3-4 緩衝帯の有効性の検証

緩衝帯設置後の地下水位変動機構の変化の有無を確認するため、設置前モデルに緩衝帯設置後の気象条件（降雨量および蒸発散量）を入力して、地下水位を再現した。すなわち、この地下水位は排水整備を行っていない（地下水位変動機構に変化がない）場合の地下水位の予想値を表す。当該再現値と緩衝帯設置後の地下水位の実測値を比較して、その相対誤差が許容誤差20%以内であれば、緩衝帯設置前後で地下水位変動機構に変化はないと評価される。

（１）地下水位変動機構の変化の評価

検証の対象とした年次は、緩衝帯設置後の5月～10月の総雨量が最も少ない2017年とし、降雪や融雪の影響を受けない5月～10月の地下水位を比較した。

湿原の奥側と既設排水路側における地下水位の再現値と実測値の経時変化を図－6に示す。奥側の地下水位の再現値（上段）は、ほとんどの期間で実測値に対

して所定の誤差（20%）の範囲内であった。よって、奥側の地下水位変動機構は緩衝帯設置前から変化はなく、排水整備の影響はないと評価した。一方、既設排水路側の地下水位の再現値は、ほとんどの期間で実測値に対する所定の誤差（20%）の範囲を外れた。既設排水路側の地下水位変動機構は、緩衝帯設置によって変化し、湿原環境としては好転したこととなった。すなわち、地下水位の実測値は再現値よりも高く推移しており、緩衝帯設置（既設排水路の堰止め）によって、地下水位を上昇させる方向に地下水位変動機構が変化した。

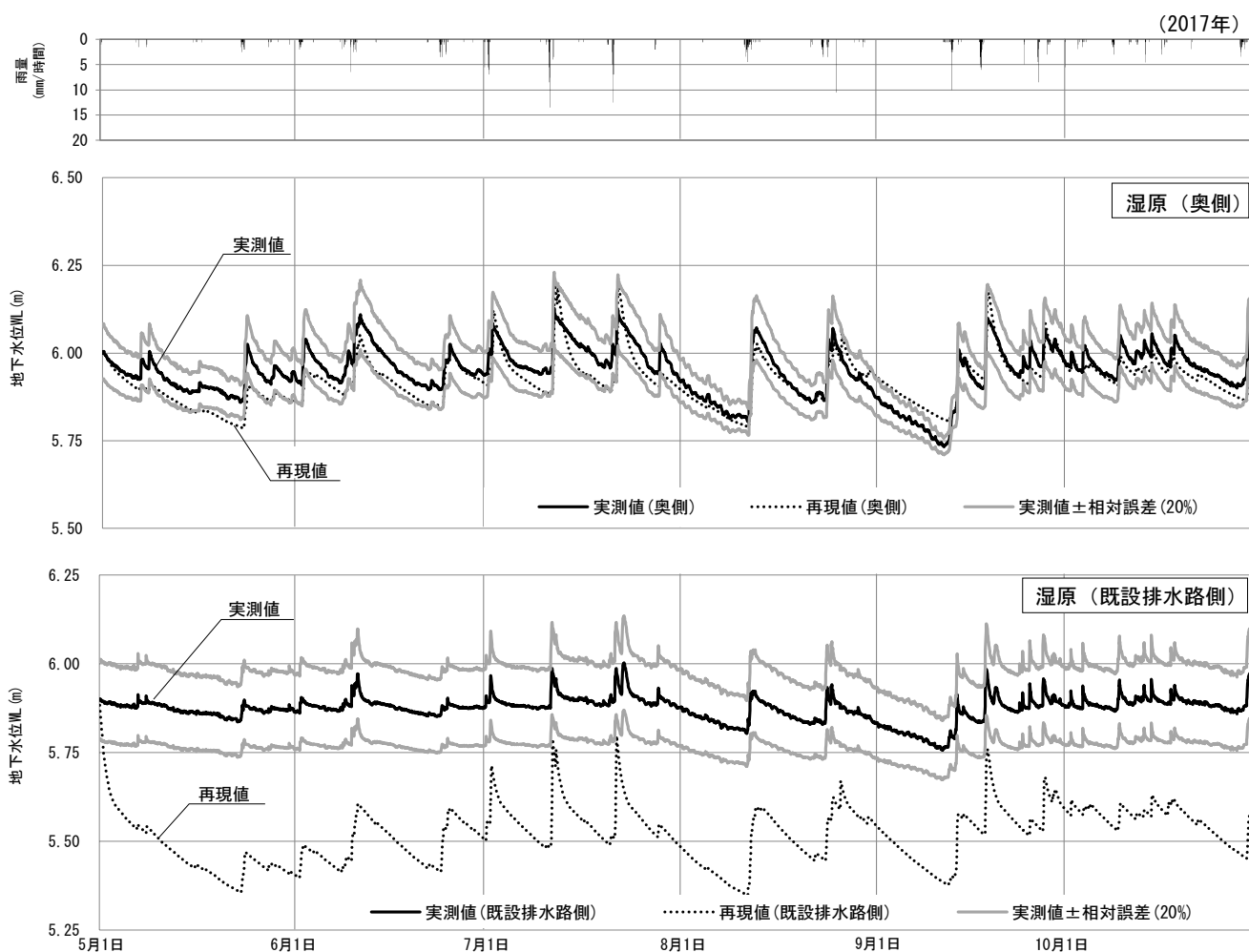
以上のとおり、地下水位モデルによって緩衝帯は新たな排水整備の影響を湿原に及ぼさず、むしろ既設排水路に近い湿原部の地下水位変動機構を好転させていたことが定量的に確認できた。なお、農用地（牧草地）では、図－7に示す緩衝帯設置前後の平均地下水位（実測値）の比較から、新たな排水整備により地下水位が適度に低下し、過湿障害が解消されていることも確認された。

（２）地下水位変動機構の変化の定量化

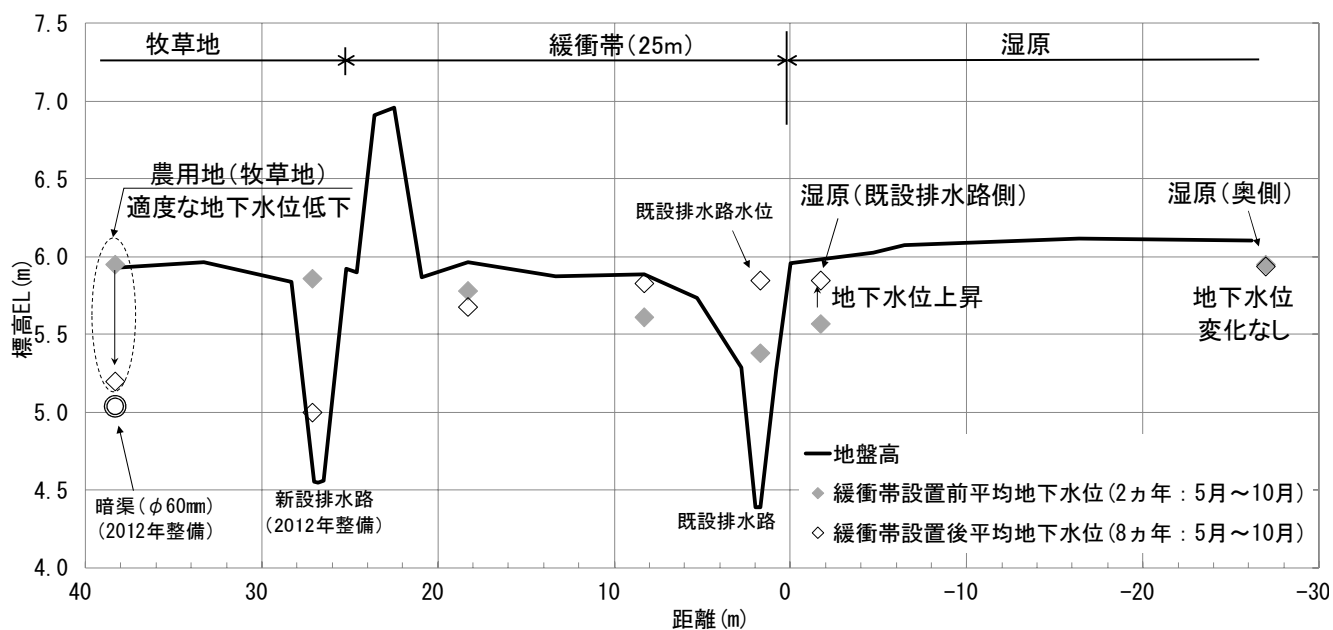
緩衝帯設置後に地下水位変動機構が変化したと考えられる湿原の既設排水路側について、緩衝帯設置後の地下水位等の実測値に基づき、地下水位モデル（以下、「設置後モデル」という）を作成した。

その際、設置後モデルの中段流出孔の標高（ H_{A2} ）、下段流出孔の標高（ H_{A1} ）及び下段流出孔の流出係数（ A_1 ）は設置前モデルから変化はないものとし、同じ値とした。一方、上段流出孔の標高（ H_{A3} ）と流出係数（ A_3 ）、中段流出孔の流出係数（ A_2 ）及び水位上昇係数（ C ）は、既設排水路部の水位の上昇により、設置前モデルから変化したものと考えた。上段流出孔の標高（ H_{A3} ）及び水位上昇係数（ C ）は、排水整備前と同様の方法により新たに算定した。

最適モデルは、上段流出孔の流出係数（ A_3 ）及び中段流出孔の係数（ A_2 ）を変化させて計算を行い、相対誤差が最小となるモデルとした。整備後モデルの地下水位の再現値と実測値の相対誤差は4.2%であり、モデルの再現性は良好であった（図－8）。設置後モデルでは、上段流出孔の標高（ H_{A3} ）は設置前モデルに比



図－6 設置前モデルによる地下水位の再現値と実測値の経時変化



図－7 観測ラインにおける平均地下水位（横断図）

表－２ 緩衝帯設置後の最適モデル係数

項目		単位	湿原（既設排水路側）	
			緩衝帯設置前	緩衝帯設置後
流出孔標高	上段 H_{A3}	EL. (m)	5.597	5.852
	中段 H_{A2}	EL. (m)	5.200	
	下段 H_{A1}	EL. (m)	4.523	
流出係数	上段 A_3	—	0.040	0.012
	中段 A_2	—	0.0017	0.000001
	下段 A_1	—	0.000025	
水位上昇係数	C	—	0.79	0.42
基準水位		EL. (m)	5.339	
相対誤差	J	%	58.0～66.6	4.2

して0.25m程度高くなった。また、流出係数を見ると、上段流出孔（ A_3 ）は、設置前の $A_3=0.040$ に対して設置後は $A_3=0.012$ へと小さくなり、中段流出孔（ A_2 ）は、設置前の $A_2=0.0017$ に対して設置後は $A_2=0.000001$ へと極めて小さくなった。

緩衝帯設置前後における H_{A3} 、 A_3 及び A_2 の変化は、既設排水路の水位が上昇して、湿原（既設排水路側）の地下水位も堰上げられた影響を地下水位変動の機構面から定量的に表していると言える。地下水位モデルは地下水位変動機構の変化についても、緩衝帯設置前後の最適モデル係数を比較することで、その定量評価を可能とする（表－２）。

（３）実測値による地下水位変動機構の変化の検証

湿原の既設排水路側と奥側のそれぞれについて、緩衝帯設置前後における日平均地下水位の深度別の出現頻度を実測値に基づき整理して図－９に示した。日平均地下水位は１時間間隔の実測値から集計し、深度0.01mごとの出現頻度（％）を求めた。

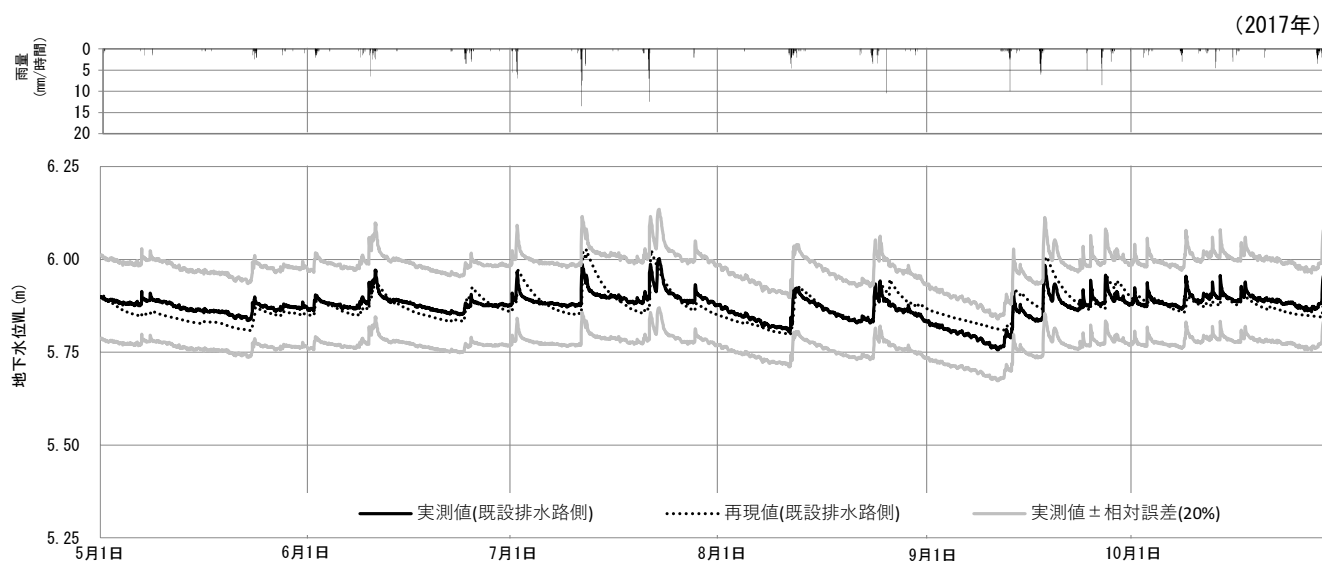
湿原の奥側の地下水位は、緩衝帯設置前後ともに主として地表面から深度0.3mの間に位置しており、深度別の出現頻度から見た地下水位変動の特徴に変化はない。一方、既設排水路側の地下水位は、緩衝帯設置前は深度0.2mから0.6mの間に位置したが、緩衝帯設置後は地表面から深度0.2m付近となり、さらに緩衝帯設置前に比してその変動幅が小さくなった。すなわち、湿原の奥側は緩衝帯設置前後で地下水位変動の特徴に変化は認められず、一方で既設排水路側は緩衝帯設置後に地下水位変動の特徴が変化したことが明瞭である。

以上の結果は、地下水位モデルによる地下水位変動機構の変化の評価と合致する。

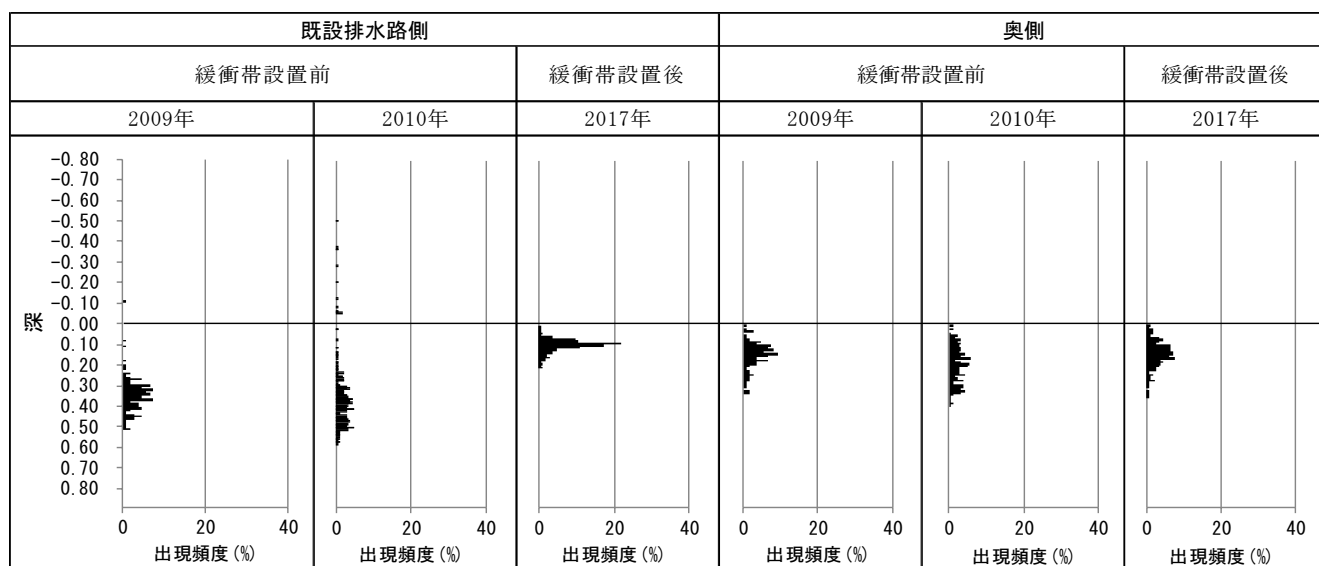
3-5 維持管理段階の地下水位モデルの活用について

モニタリング調査に基づく以上の検証等から、農用地の機能回復と湿原地下水位への影響抑制を両立する緩衝帯の機能（効果）が確認された。すなわち、緩衝帯は農業と湿原の共生の要となる施設であり、事業完了後もその機能を維持していくことが重要である。

事業完了後は、地元自治体と農家の協働による維持管理が計画され、緩衝帯や周辺湿原の状況をモニタリング調査するとともに、その機能評価を行っていくこととなる。その際、事業完了時点で適合する地下水位モデルを作成しておき、必要により評価時点の気象条件に基づき地下水位を再現し、実測の値と比較することで、緩衝帯の機能評価が可能となる。また、同様に、



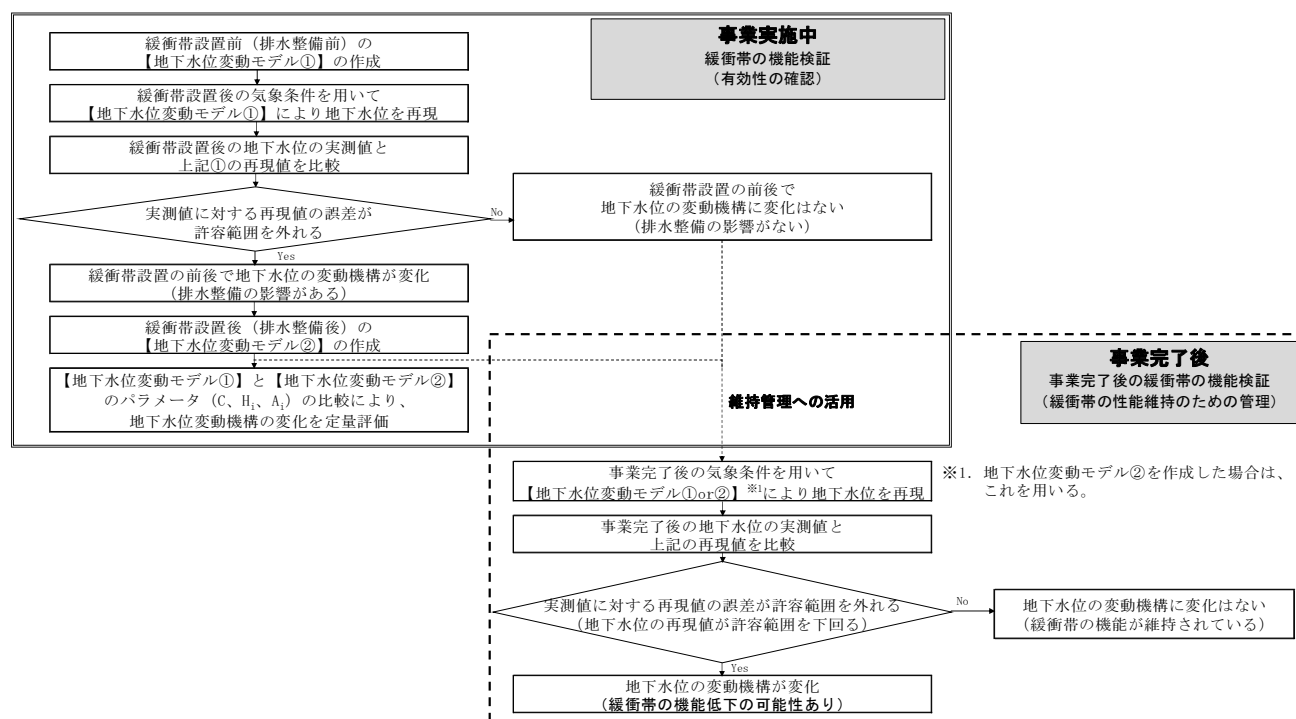
図－８ 緩衝帯設置後の最適モデルにおける再現値と実測値の経時変化



※1 2009年は7月～10月の実測値、2010年及び2017年は5月～10月の実測値を基に作成

※2 地下水位の深度0.00mは地表面を表す。

図－9 緩衝帯設置前後における日平均地下水位の深度別出現頻度



※1. 地下水位変動モデル②を作成した場合は、これを用いる。

図－10 地下水位変動タンクモデルを用いた緩衝帯の機能検証の手順

農用地側も事業完了時点の地下水位モデルを作成することで、事業完了後の排水機能の変化（劣化）の有無を定量評価することが可能となるなど、本モデルは農用地の機能診断ツールとしても有用と考える。

4. まとめ

地下水位モデルにより、排水整備による農用地の機能回復と、隣接する湿原地下水位への影響（低下）抑制を両立する緩衝帯の機能を定量的に評価できた。

地下水位モデルを活用した緩衝帯機能の検証方法をまとめると、以下のとおりである（図－10）。

- （1）緩衝帯設置前（排水整備前）の地下水位や雨量等の観測データにもとづき、地下水位モデルを作成して、流出孔係数（ A_0 ）などのパラメータにより地下水位変動機構を定量化する（設置前モデル）。
- （2）緩衝帯設置後（排水整備後）の雨量等の気象データを用いて、設置前モデルにより地下水位を再現する。地下水位の再現値が実測値に対して所定の誤差

の範囲にある場合は、排水整備が地下水位変動に影響していないと判断する。

- (3) (2)で所定の誤差の範囲を超える場合は、排水整備が地下水位変動に影響を及ぼした（地下水位変動機構が変化した）と判断する。
- (4) 緩衝帯設置後（排水整備後）の地下水位や雨量等の観測データにもとづき、設置後モデルを作成して、設置前モデルとパラメータを比較することにより、その変化を定量評価する。
- (5) (1)あるいは(4)で作成したモデルは、事業完了後の維持管理における初期モデルとし、(2)と(3)の要領で緩衝帯機能の持続を確認するのに使用できる。

5. おわりに

北海道の河川下流域には泥炭地が広く分布し、その農業利用にあたっては排水整備が不可欠である。一方、泥炭は、植物の残遺体を主としていて、その排水（地下水位の低下）は、圧密・圧縮的挙動や乾燥収縮・分解を促進するなどして地盤の沈下を増大させる。加えて、泥炭の性状の不均一性とも相まって、圃場や用排水施設等の農業基盤に不等沈下を発現する場合もある。

泥炭地の農業利用にあたっては、営農面や環境面からみた地下水位管理に加えて、農業基盤の機能維持の側面からの地下水位管理の視点が重要となる。このとき、地下水位変動機構の定量化を可能とする地下水位変動タンクモデルは、管理手法の検討などの有用なツールになると考える。

謝 辞

本報は、稚内開発建設部よりご発注頂いた業務の成果に基づき取りまとめたものです。業務中は稚内開発建設部をはじめ、豊富町、サロベツ農事連絡会議の各位に多くのご指導、ご協力を頂きました。また、泥炭地における地下水位変動の調査・分析にあたっては、北海道大学名誉教授梅田安治氏より多くのご助言とご教授を賜りました。

ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 中瀬 洋志ら（2006）：サロベツ泥炭地の農地と湿原の再生、農業土木学会誌第74巻8号、pp. 699～702
- 2) 松田 俊之ら（2016）：サロベツ泥炭地における「緩衝帯」の合意形成、農業農村工学会誌第84巻5号、pp. 395～398
- 3) 井上 京、梅田 安治（1993）：泥炭地の地下水位変動の長期評価、第42回農業土木学会北海道支部研究発表会、pp. 92～97
- 4) 農林水産省農村振興局監修（平成27年5月）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水（畑）」、pp. 178～188
- 5) 角屋 睦、永井 明博（1980）：流出解析手法（その11）—SDEP法による貯留関数の最適同定—、農業土木学会誌第48巻11号、pp. 851～856
- 6) 農林水産省農村振興局整備部水資源課（2011）：農業農村整備事業のための河川協議の実務、pp. 5～89

略 歴

たかはし ひろし
高橋 洋



1988年 埼玉県に生まれる
2013年 東北大学大学院工学研究科卒業
(株)アルファ技研に入社
現在に至る

うえ や けんすけ
植屋 賢祐



1969年 北海道に生まれる
1992年 弘前大学農学部卒業
(株)アルファ技研に入社
現在に至る