

平成 22 年度 修士論文

湿地における水収支と地下水位変動の推定

三重大学大学院 生物資源学研究科

共生環境学専攻 博士前期課程

松下 峰

## 目次

### 第1章 緒論

#### 1-1 研究背景

#### 1-2 調査地概要

##### 1-2-1 沼沢内に自生する湿地性植物

##### 1-2-2 沼沢内の様子

##### 1-2-3 湧水減少の原因

##### 1-2-4 対策

#### 1-3 研究目的

### 第2章 理論

#### 2-1 地下水位変動モデル

#### 2-2 水収支式

### 第3章 方法

#### 3-1 測定期間

#### 3-2 測定場所

#### 3-3 測定方法

##### 3-3-1 四角堰における排水量測定

##### 3-3-2 三角堰における湧水量測定

##### 3-3-3 地下水位観測井における地下水位測定

##### 3-3-4 百葉箱における大気圧補正

##### 3-3-5 沼沢内井戸概要

##### 3-3-6 蒸発散量

## 第4章 結果

- 4-1 四角堰での越流水深の変化
- 4-2 三角堰での越流水深の変化
- 4-3 地下水位の変化
- 4-4 降雨量の変化
- 4-5 気温の変化
- 4-6 蒸発散量の変化
- 4-7 四角堰での流量変化
- 4-8 三角堰での流量変化
- 4-9 地下水位シミュレーションの結果
- 4-10 水収支の結果

## 第5章 考察

- 5-1 水位変動に関する考察
- 5-2 モデルに関する考察
- 5-3 水収支に関する考察

## 第6章 結論

結論

謝辞

参考文献、引用文献

謝辞

引用・参考文献一覧

# 第 1 章

## 緒 論



## 1-1 研究背景

金生水沼沢植物群落は周辺の環境変化により湧水が減りそれに伴い地下水位が低下することで乾性化が進んでいったが、湿地の復元増殖事業が行なわれ、湿地性植物が回復しつつある。湿地の復元を進めていくにあたり、植物の植生の変化等を調べていく生物学的見地も大切であるが、湿地の状態を保つためには生育基盤としての土木的見地も大切である。そこで、水環境の現状を把握し、今後の金生水沼沢植物群落の保全に役立てるために、現地で測定データが取得できる地下水位や湧水・排水量の変動傾向を調べるとともに、水収支の推定の研究を行った。

## 1-2 調査地概要

金生水沼沢植物群落は、鈴鹿市中央部の地子町字金生水563番・西条町字猿楽田675番等に位置する。

北は標高約20mの平野(鈴鹿川谷底平野)が開けて水田として利用され、南は平野より数m高い台地(旧鈴鹿川砂礫層)が東西に発達し、かつては畑作地であったが、近年は住宅・工業地帯として開発が進んでいる。沼沢は図1-2-1のような丘陵部と平野部が交接するところに位置し、面積約7000㎡の低湿地帯を形成している。

金生水の名の由来から、旱魃時でも枯渇することのない豊富な泉水が古くから地子町・西条町・飯野寺家町共通の貴重な灌漑用水源として利用されてきたものと思われる。

この泉水一帯には沼沢植物群落が存在し、その種類は豊富で昭和5年当時の調査資料によれば約400種類の植物が群生していた。その特色として暖地性植物と寒地性植物が混生しているため植物の種類が多く、特に食虫植物を含む湿地性植物が豊富にみられることが当指定地の特色である。そこで、それらの保護のため、金生水沼沢植物群落として昭和11年6月22日に指定申請を行い、昭和12年4月17日に国の天然記念物に指定された。(金生水沼沢植物群落平成18年度調査記録より引用)



図 1-2-1 沼沢地全体図 (2006年撮影)

参考 URL : [http://www.city.suzuka.lg.jp/mass/datas/210\\_002.pdf](http://www.city.suzuka.lg.jp/mass/datas/210_002.pdf)



図 1-2-2 金生水沼沢植物群落の位置

参照 URL : <http://www.mapion.co.jp/map/admi24.html>



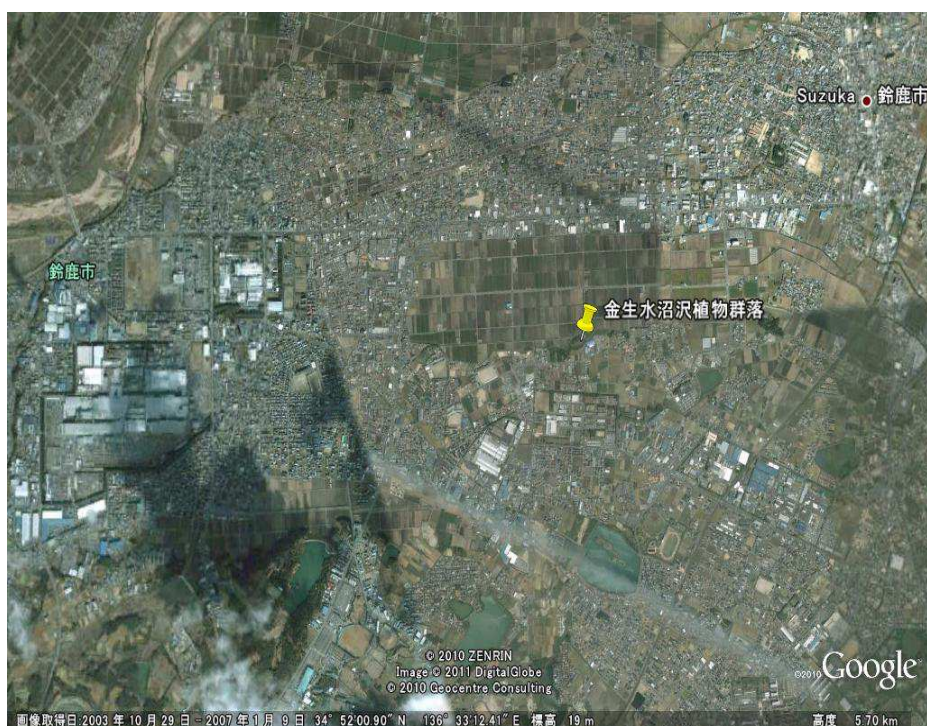


図 1-2-3 金生水沼沢植物群落の位置 (Google Earth 2003)

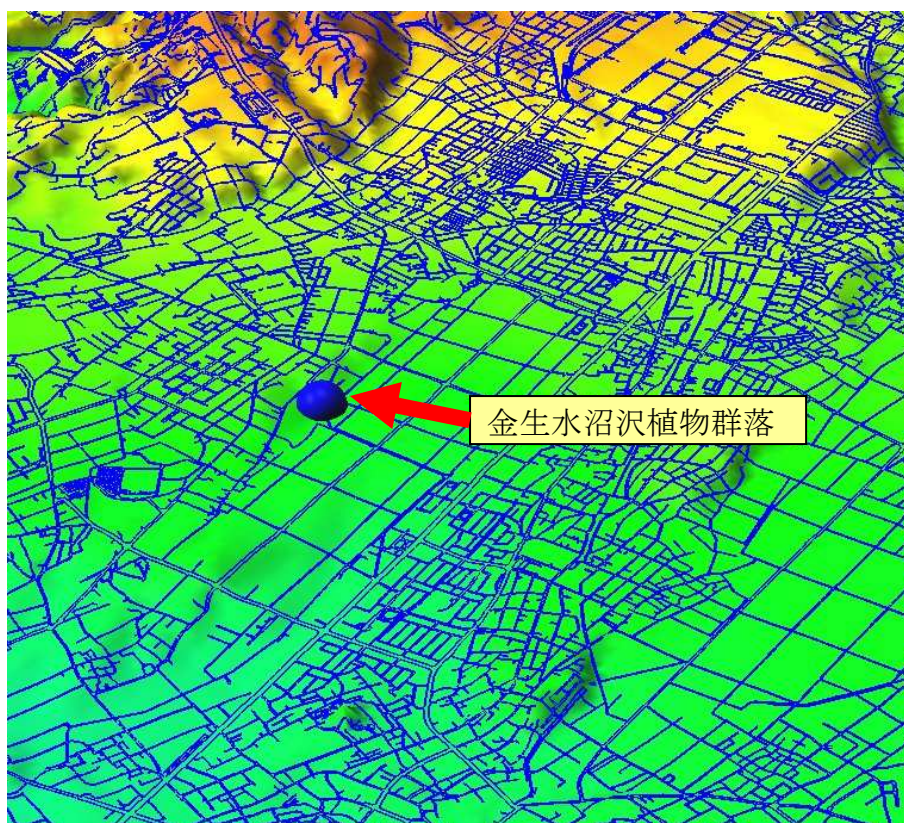


図 1-2-4 流域周辺のコンター図



### 1-2-1 沼沢池内に自生する湿地性植物

沼沢池内に自生する湿地性植物を筆者が撮影した。



図 1-2-5 トウカイコモウセンゴケ (2010年11月2日 筆者撮影)



図 1-2-6 サギソウ (2009年8月6日 筆者撮影)





図 1-2-7 ノカンゾウ (2009年8月6日 筆者撮影)



図 1-2-8 ナガボノアカワレモコウ (2010年11月2日 筆者撮影)



### 1-2-2 沼沢地内の様子

沼沢内の様子を筆者が撮影した。



図 1-2-9 沼沢地東側 1 (2009 年 6 月 24 日 筆者撮影)



図 1-2-10 沼沢地東側 2 (2010 年 7 月 1 日 筆者撮影)





図 1-2-11 旧水源 (2009年6月24日 筆者撮影)



図 1-2-12 沼沢地西側 (2010年7月1日 筆者撮影)





図 1-2-13 懸崖からの湧水 1 (2009 年 6 月 24 日 筆者撮影)



図 1-2-14 懸崖からの湧水 2 (2009 年 6 月 24 日 筆者撮影)





図 1-2-15 沼沢地東側の集水域 (2009年10月11日 筆者撮影)



図 1-2-16 沼沢地南東の排水堰 (2010年12月29日 筆者撮影)

### 1-2-3 湧水減少の原因

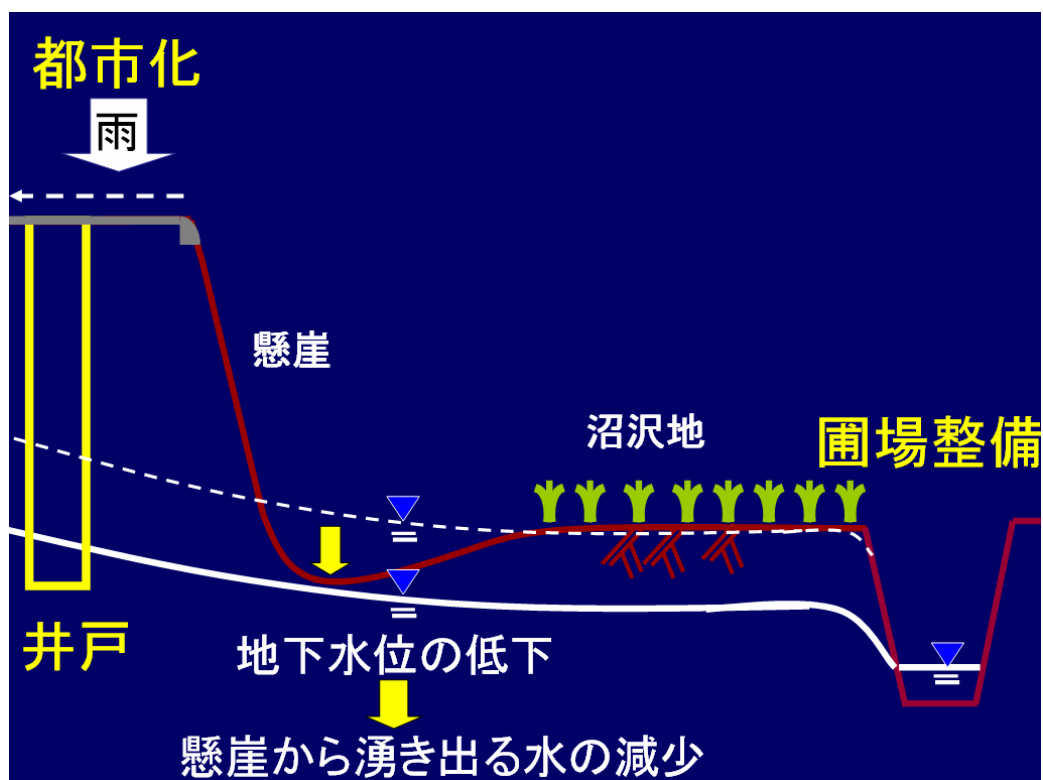


図 1-2-17 金生水の湧水減少の要因（菊池ら、2004 を改変）

金生水の地下水位が減少した要因は次の3つが考えられる。

- ・ 雨水浸透面積の減少
- ・ 地下水取水の影響
- ・ 圃場整備による排水促進の影響

地下水位が低下した結果、湧水が減少し、沼沢内が乾性化し、湿地性植物種の著しい減少が問題視されてきた。



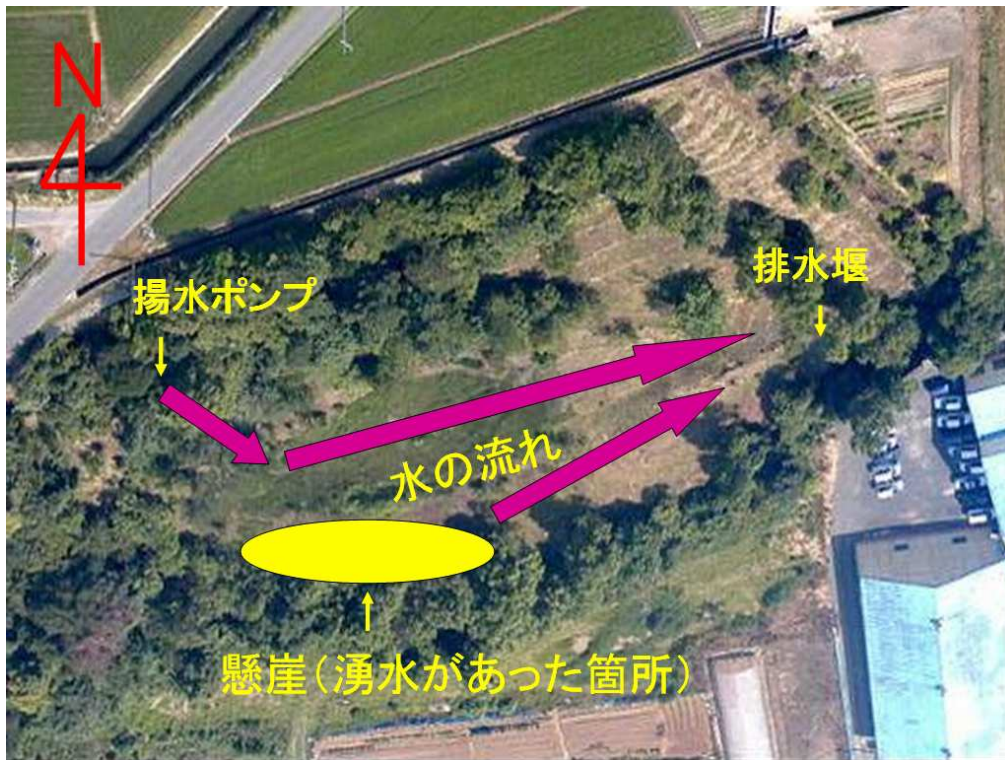


図 1-2-18 流域内の水の流れ



図 1-2-19 懸崖 (湧水があった箇所) (2009年4月17日筆者撮影)  
以前は金生水沼沢の南側の懸崖から豊富な湧水があり、沼沢地を涵養していた。

# KANASYOUZU(Ori=a1)V03a

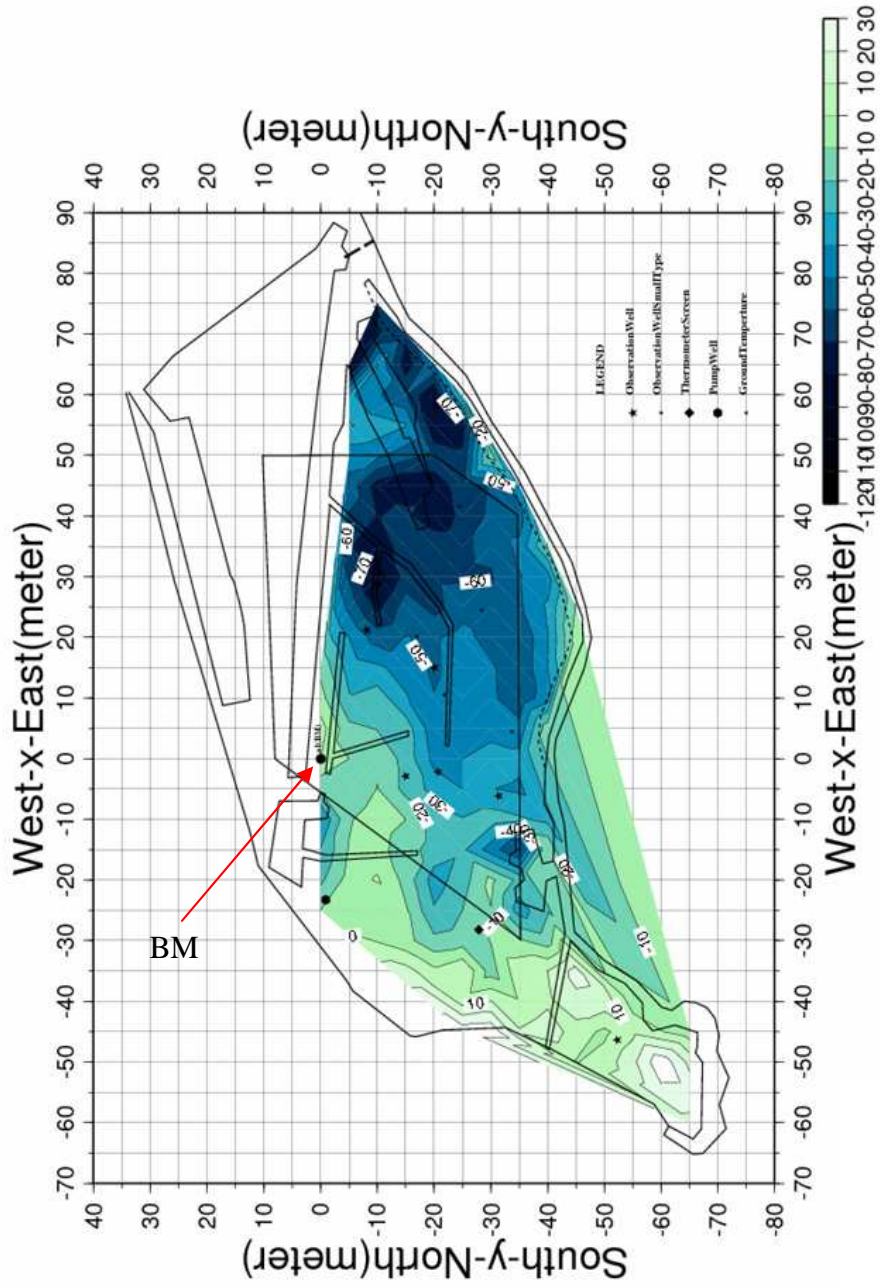


图 1-2-30 金生水平面图



# KANASYOUZU(A1-Ground-height-contour)

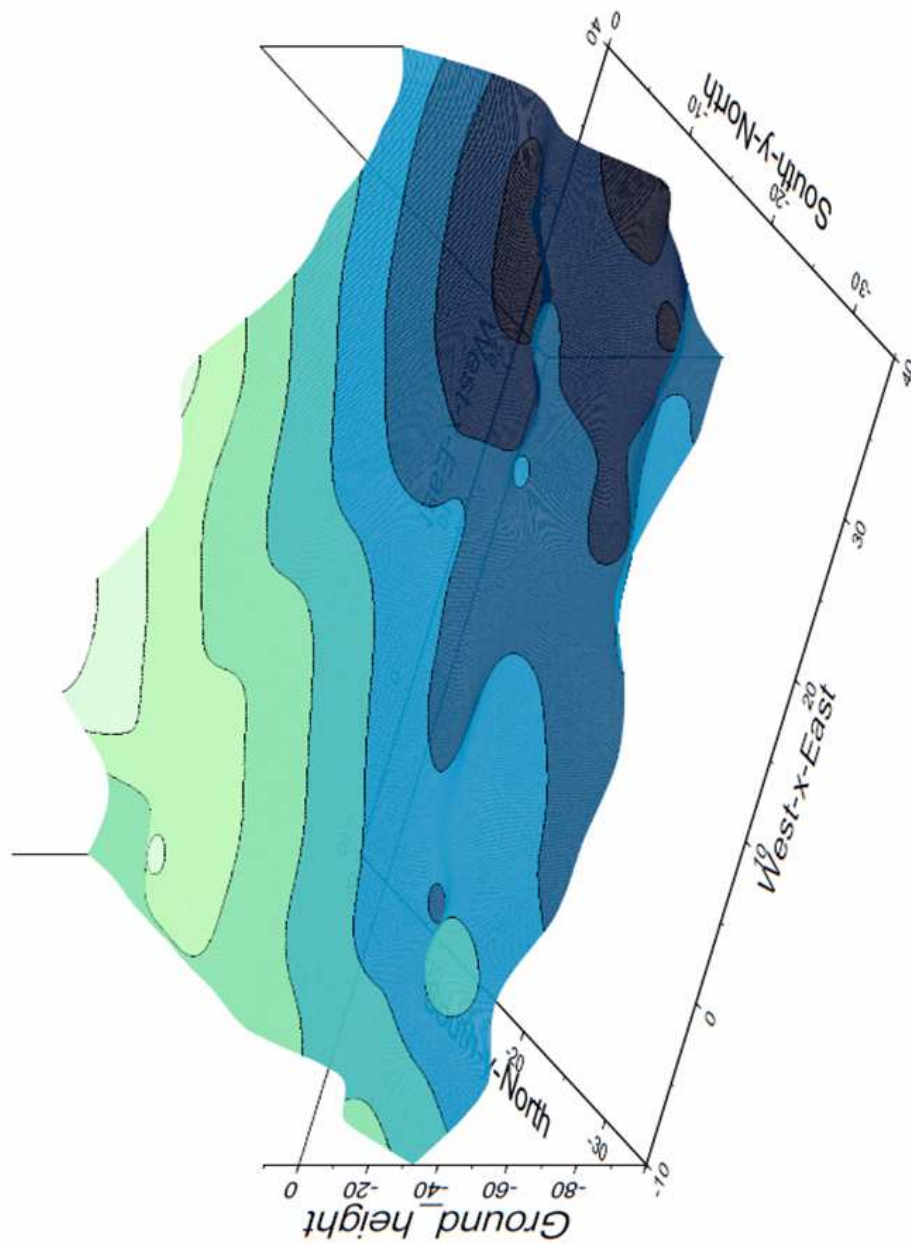


図 1-2-31 金生水三次元コンター図 1

KANASYOUZU(A1-Ground-height-contour)

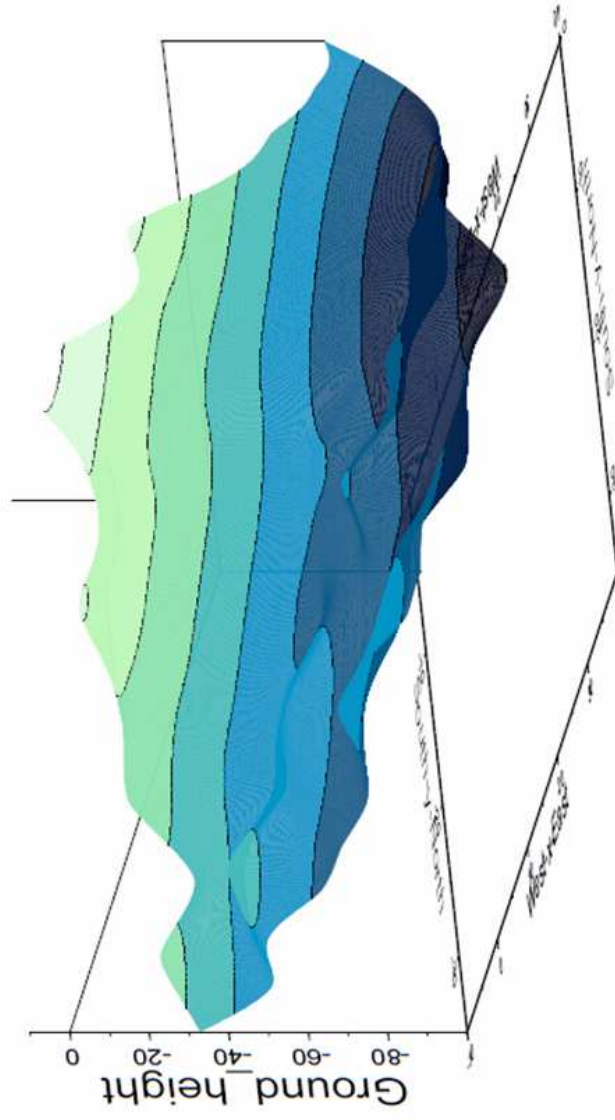


図 1-2-32 金生水三次元コンター図 2

## 都市化による影響

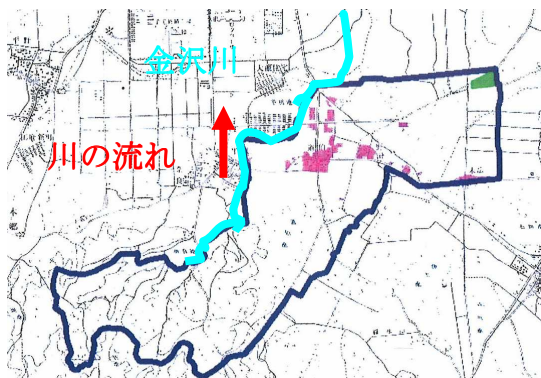


図 1-2-33 都市化前（昭和 40 年）

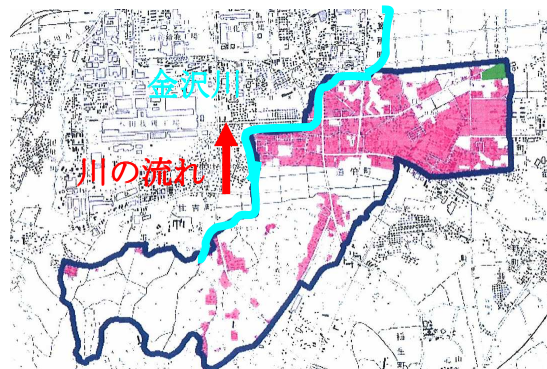


図 1-2-34 都市化後（平成 10 年）

都市化による影響を調べるため、昭和 40 年と平成 10 年の金生水周辺図を比較した。金生水沼沢の南側、金沢川流域を紺色の線で示してある。流域内の土地利用の移り変わりを示した。ピンク色の部分は雨水が浸透しにくい土地利用となっている都市化域を表している。両者を比較すると、平成 10 年は昭和 40 年と比べて田畑や林が住宅地や工場へ変わり、道路も増えていることがわかる。これにより、雨水浸透を避けて排水路から河川へ直接排出させる構造物が増加した。これらにより、都市化による雨水浸透面積の減少は地下水位低下に大きな影響を与えたのではないかと考えられている。

参考文献：鈴鹿市文化振興部文化課（2004）『金生水沼沢植物群落平成 16 年度調査記録』  
pp.34-36



## 地下水取水の影響

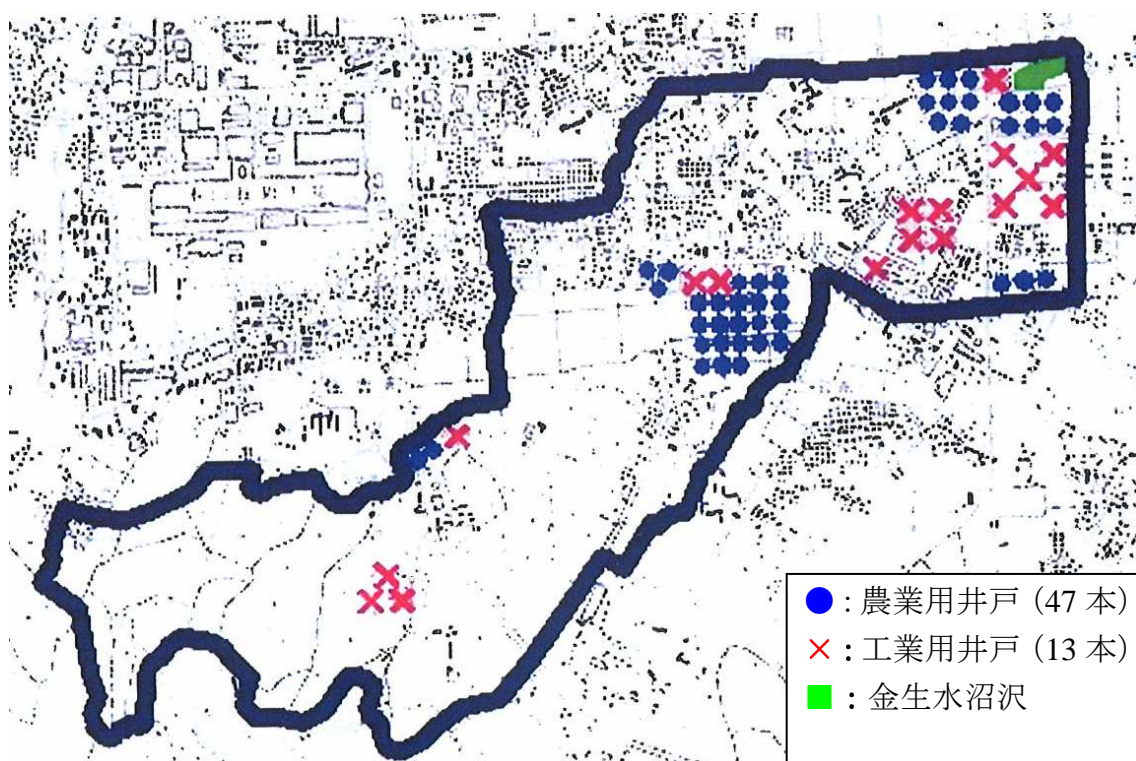


図 1-2-35 沼沢地周辺の井戸設置状況

金生水沼沢植物群落の流域には多くの工場や公共施設が存在しており、地下水を取水して利用している。紺色の線の内側の金生水の後背流域には、工業用井戸が 13 本、農業用井戸が 47 本、計 60 本の井戸が設置されている。地下水の過剰な汲み上げにより地下水位低下に大きな影響を与えたのではないかと考えられている。

参考文献：鈴鹿市文化振興部文化課（2004）『金生水沼沢植物群落平成 16 年度調査記録』  
pp.37-38

## 圃場整備による影響



図 1-2-36 圃場整備地区（整備前）



図 1-2-37 圃場整備地区（整備後）

昭和 51 年度から、金生水沼沢植物群落の下流域で安塚地区圃場整備事業が進められていった。事業の目的に、「本地区は既設の県営鈴鹿用水により用水補給をされる地域である。受益地は未整備であるので、圃場を整備し、円滑な水管理による生産性の向上と大型農業機械の導入により農業経営の安定を図らんとするものである」とあり、水はけを良くして地耐力を向上させるために排水促進を行ったことが伺える。

金生水沼沢植物群落下流域での圃場整備事業は地下水位低下に大きな影響を与えたと考えられる。

参考文献：鈴鹿市文化振興部文化課（2004）『金生水沼沢植物群落平成 16 年度調査記録』pp.39-40

三重県営安塚地区ほ場整備事業概要書 三重県北勢県民局四日市農林事務所

#### 1-2-4 地下水位及び湧水減少の対策

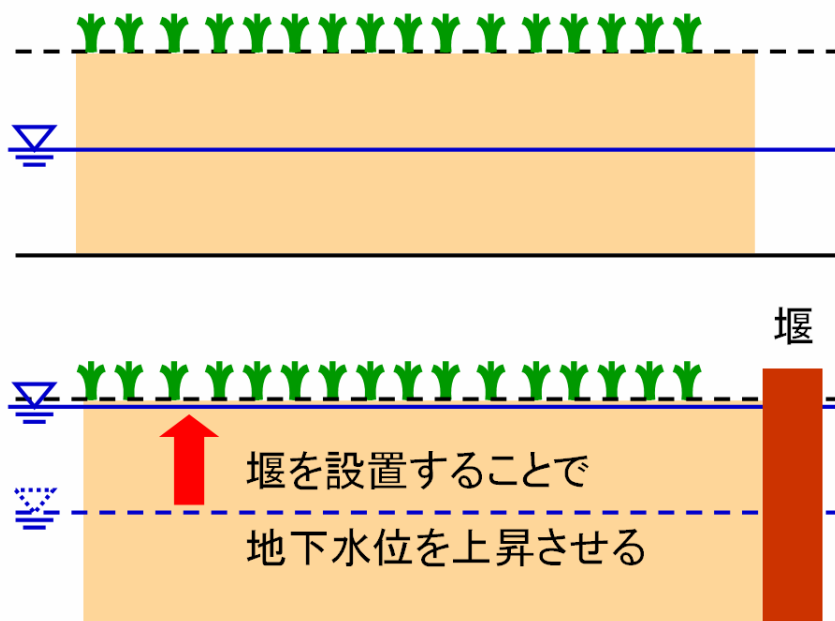


図 1-2-38 対策 1 (堰板の設置)

沼沢地は北西に比べて南東のほうが低くなっており、水もその方向に流れる。沼沢地南東端の水が流出するところに堰を設置し、堰板の高さを高くすることで、沼沢地の表面水の水位や地下水位を高く維持することが出来る。

参考文献：鈴鹿市文化振興部文化課（2004）『金生水沼沢植物群落平成 16 年度調査記録』  
pp.41

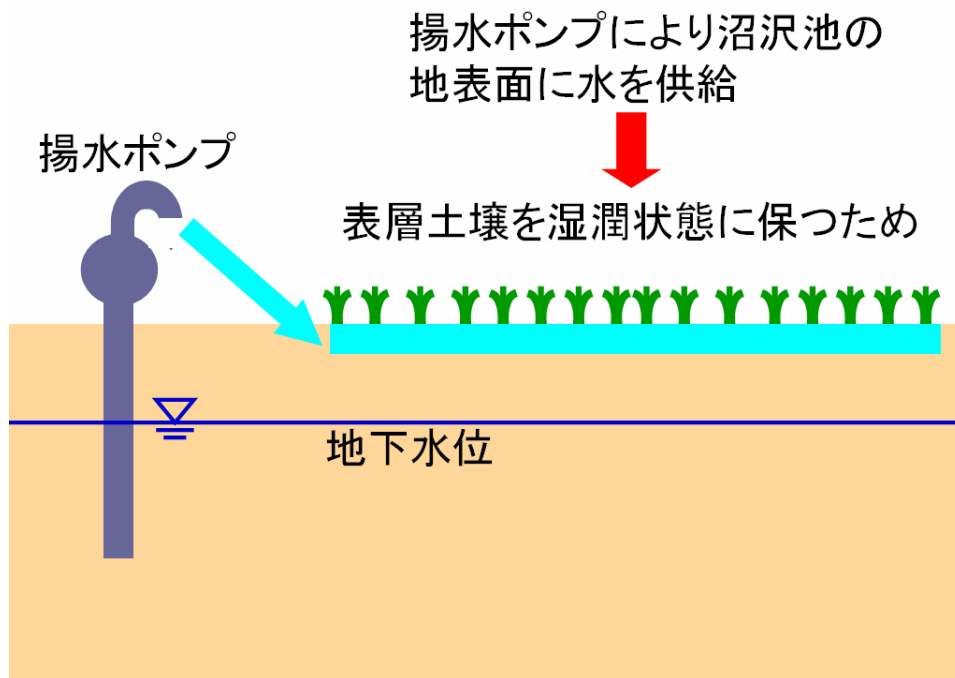


図 1-2-39 対策 2 (ポンプの設置)

平成 17 年 9 月に沼沢内にポンプが設置された。加えて水路が浚渫され、群落の表層土壌に水が行き渡りやすくなるようになった。





図 1-2-40 対策 3 (防護フェンス) (2011 年 1 月 6 日 筆者撮影)

平成 22 年 2 月に既存のフェンスに加え、防護フェンスが増設された。進入防止や希少植物の持ち出しを防ぐ効果が期待できる。

### 1-3 研究目的

本論では、金生水沼沢植物群落の地下水位変動の特徴をとらえ、シミュレーションによってその変動を再現することと、水収支を推定することで、流域内の水の動き、量がどのようになっているかを理解することを目的としている。そこで、本論では金生水沼沢植物群落内において

- ①地下水位の変動について、モデルを組み立て、モデルの検証を検討する。
- ②流域内の水収支を推定し、流入、流出の各項目について成分を分離し、外部涵養量について推定、考察する。

## 第 2 章 理 論

## 2-1 地下水位変動モデル

2009 年度北川の卒業研究に引き続き、本論では「地下水位上昇期の観測値を用いた雨水涵養モデル検討（堤ら、2001）」を参考に 1 段タンクモデルを組み立て、地下水位の変動を再現した。

- ・ 横穴を設けたこと。（横浸透を考慮）
- ・ 地下水量流入量に加え、地下水流出量を加えたこと。
- ・ 地下水位の減少成分からポンプ揚水量を外したこと。



## タンクモデル

本論では、地表面+表層土壌部分の浸透域モデルの考え方を記した。地下水位の上昇期および下降期のデータと時間雨量、ポンプによる揚水量を用いて地下への涵養量を推定する1段タンクモデルを使用した。図2-1に涵養モデルの概要図を示す。

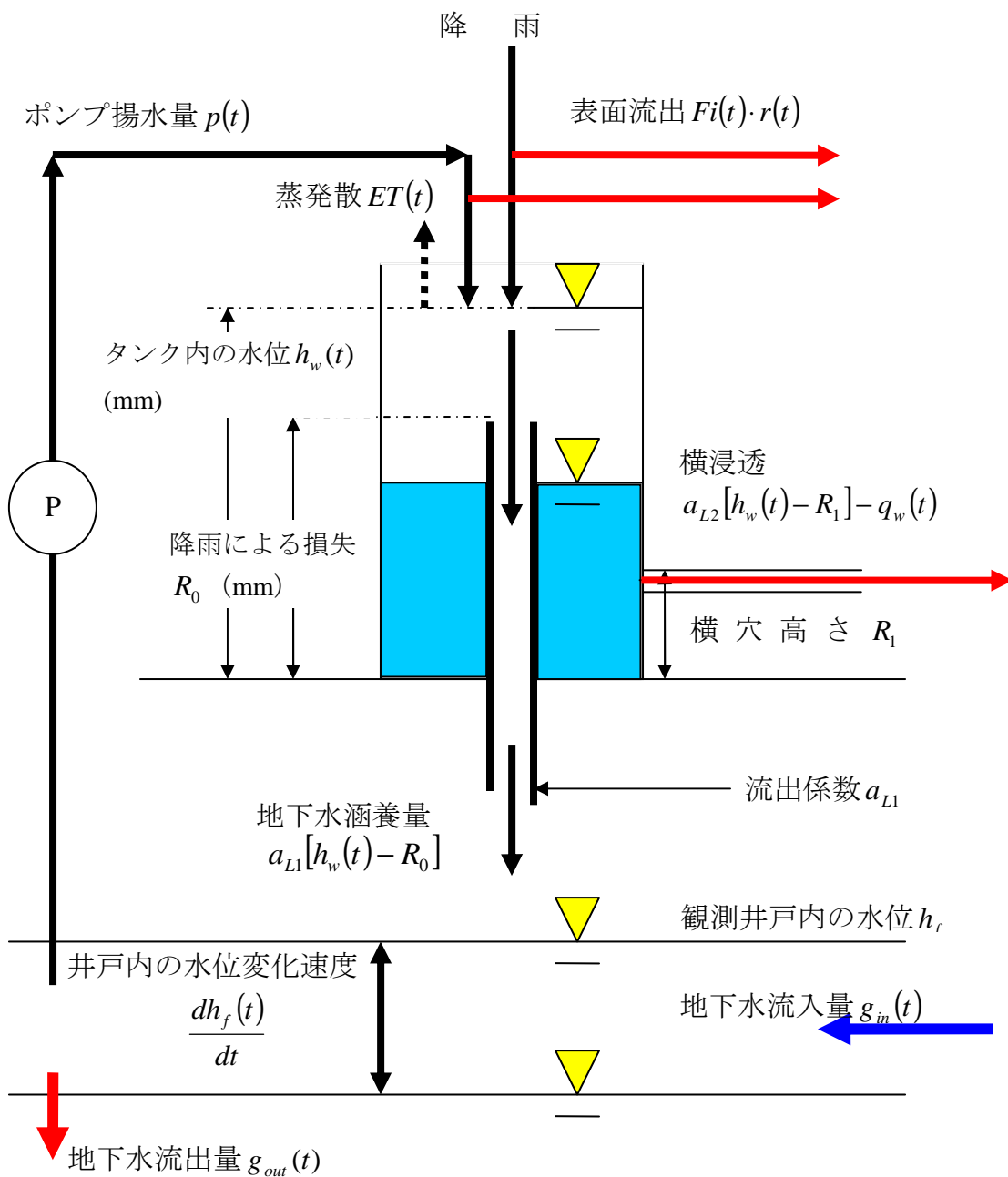


図 2-1 涵養モデル概要

## 計算手法

地表面からタンクへの涵養量を表す式として

① 沼沢内

$$\frac{dh_w}{dt} = \{1 - F_1(t)\} \cdot r(t) + \{1 - F_2(t)\} \cdot p(t) - q_w(t) - ET(t) \quad (\text{式 2-1-1})$$

② 地下水への涵養量を表す式として

$$s_w = a_{L2} \{h_w(t) - R_1\} - q_w(t) \quad (\text{横流出量})$$

$$q_w = h_w - s_w \quad (\text{地下水涵養量})$$

$$q_w = a_{L1} \{h_w(t) - R_0\} - q_w(t-1) \quad (\text{地下水涵養量}) \quad (\text{式 2-1-2})$$

③ 観測井内の水位を  $h_f$  とすると、地下水位の変動を表す式は次式の様になる。

$$\frac{dh_f(t)}{dt} = \frac{q_w(t)}{\eta_e} - \frac{g_{out}}{\eta_e} + \frac{g_{in}}{\eta_e} \quad (\text{式 2-1-3})$$

この場合、 $F(t)$ 、 $a_L$ 、 $R_0$ 、 $\eta_e$ 、 $g_{out}$ 、 $g_{in}$  の 6 個の未知数が存在する。このうちの  $R_0$  と  $\eta_e$  については観測期間内の各降雨イベントでの降雨量とそれによる地下水位上昇高さを基に後述する方法で推定する。従って、上式による計算値が観測される地下水位の上昇に対して最も合う  $a_L$ 、 $F(t)$ 、 $g_{out}$ 、 $g_{in}$  との組み合わせを求めることにより、降雨  $r(t)$  に対する応答モデルを作ることができる。

そこで、 $a_L$ 、 $F(t)$ 、 $g_{out}$ 、 $g_{in}$  の値を変化させ、次式で示される評価関数  $J$  の値が小さく、かつ計算値が実測値と近くなる組み合わせを求める。

$$J = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N \{h_{fobs}(t) - h_{fcal}(t)\}^2}{N}} \quad (\text{式 2-1-4})$$

ここに、 $h_{fobs}(t)$  : 観測地点における地下水位の実測値 (mm)

$h_{fcal}(t)$  : 式 2-1-4 による地下水位の計算値 (mm)

$N$  : 観測時間数

表面流出率は降雨強度あるいは累積降雨量に依存せず、地覆状態に固有の値として解析した。 $F(t)$ の値は(式 2-1-5)で表される。

$$F_x(t) = F_{x\infty} \quad (= \text{一定}) \quad (\text{式 2-1-5})$$

ここで、

$F_1(t)$  : 降雨に対する表面流出率

$F_2(t)$  : ポンプ揚水量に対する表面流出率

$h_w$  : タンク内水位 (mm)

$s_w$  : 横流出量 (mm)

$q_w$  : 地下水涵養量 (mm)

$h_f$  :

$g_{out}$  : 地下水流出量(mm)

$g_{in}$  : 地下水流入量 (mm)

$R_0$  : 初期損失 (縦穴)

$R_1$  : 初期損失 (横穴)

$\eta_e$  : 有効空隙率

$r(t)$  : 降雨量 (mm)

$p(t)$  : ポンプ揚水量 (mm)

$ET(t)$  : 実蒸発散量 (mm)

表 2-1-1 地表面の種類別基礎流出係数

(社団法人 日本道路協会 道路土工—排水工指針 20,21 ページ より引用)

地表面の種類		流出係数
路面	舗装	0.70 ~ 0.95
	砂利道	0.30 ~ 0.70
路肩, のり面など	細粒土	0.40 ~ 0.65
	粗粒土	0.10 ~ 0.30
	硬岩	0.70 ~ 0.85
	軟岩	0.50 ~ 0.75
砂質土の芝生	勾配 0~2%	0.05 ~ 0.10
	〃 2~7%	0.10 ~ 0.15
	〃 7%以上	0.15 ~ 0.20
粘性土の芝生	勾配 0~2%	0.13 ~ 0.17
	〃 2~7%	0.18 ~ 0.22
	〃 7%以上	0.25 ~ 0.35
屋根	0.75 ~ 0.95	
間地	0.20 ~ 0.40	
芝, 樹林の多い公園	0.10 ~ 0.25	
勾配の緩い山地	0.20 ~ 0.40	
勾配の急な山地	0.40 ~ 0.60	
田, 水面	0.70 ~ 0.80	
畑	0.10 ~ 0.30	

## 2-2 水収支式

水収支式で用いた項目を以下に示す。

### 流入成分

- ・ 降雨量  $r(t)$  (式 2-2-1)
- ・ ポンプによる揚水量  $p(t)$  (式 2-2-2)
- ・ 懸崖からの流入量 (三角堰での流量)  $w(t)$  (式 2-2-3)

### 流出成分

- ・ 沼沢地末端からの排水量 (四角堰での流量)  $Q(t)$  (式 2-2-4)
- ・ 蒸発散量  $ET(t)$  (式 2-2-5)
  
- ・ 貯留量の変化  $\Delta s(t)$  (式 2-2-6)

水収支式は以下のように表される。

$$r(t) + p(t) + w(t) = Q(t) + ET(t) + \Delta s(t) \quad (\text{式 } 2-3-7)$$

図 2-2 に水収支の概要図を示した。

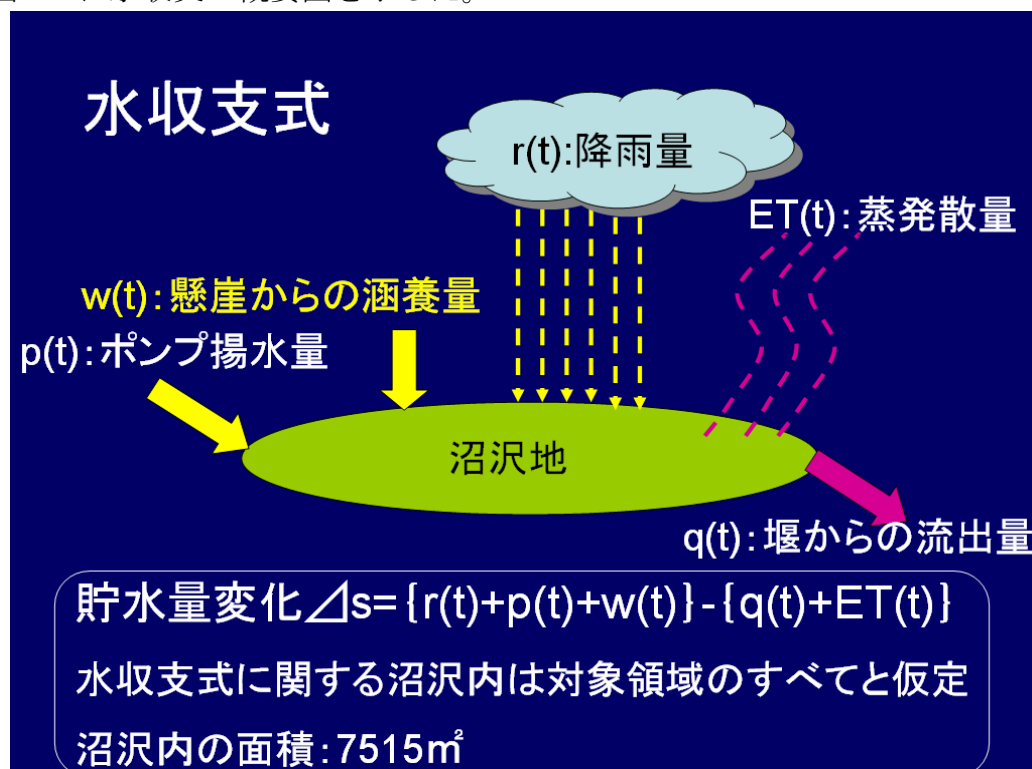


図 2-2 水収支概要

# 第 3 章 方 法

### 3-1 測定期間

地下水位（地下水位観測井）	2010年1月1日～2010年12月7日
懸崖からの湧水量（三角堰）	2010年2月3日～2010年12月7日
沼沢地末端からの排水量（四角堰）	2010年8月6日～2010年10月29日
気温（津気象台）	2009年1月1日～2010年12月7日

それぞれのデータを測定期間内に1時間毎に記録した。



### 3-2 測定場所

沼沢地内のデータロガー設置場所を図3-2-1に示した。(星印が測定場所)

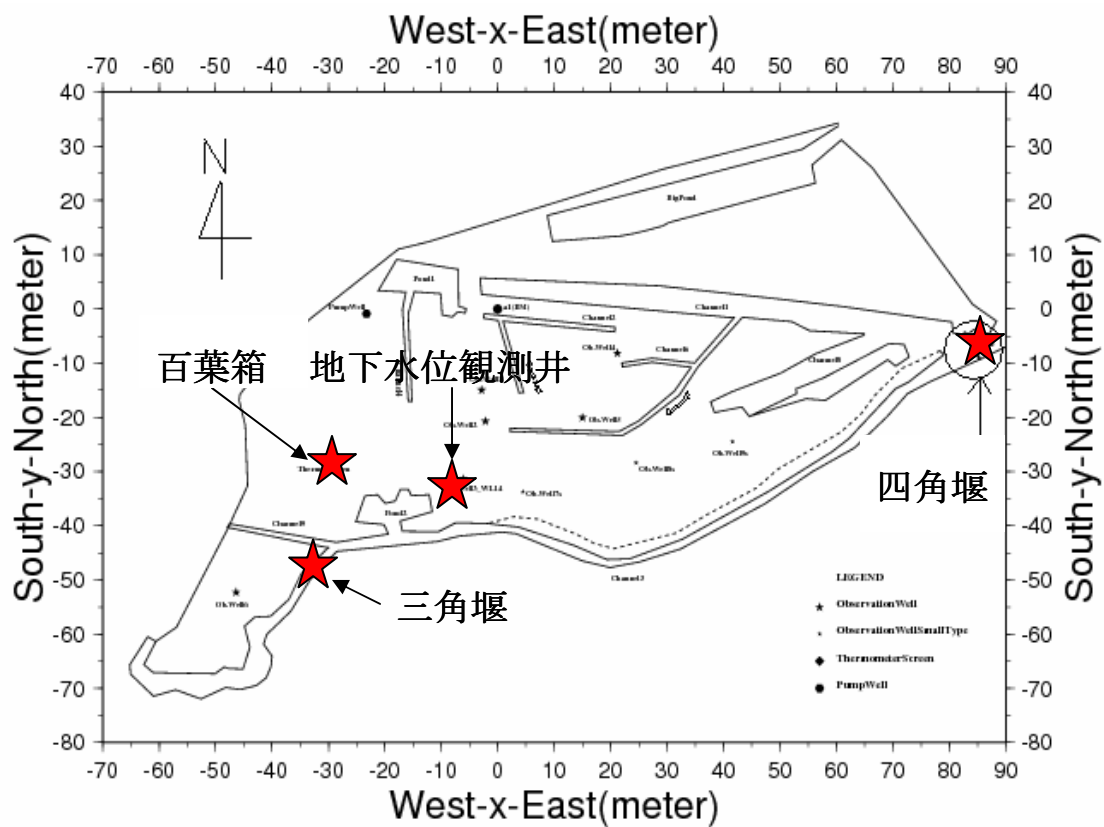


図 3-2 データロガー設置場所

### 3-3 測定方法

沼沢地内で測定した項目

- ・排水量
- ・湧水量
- ・地下水位
- ・気温

の4つについて説明する。

### 3-3-1 四角堰における排水量測定

2008年度坪井の研究では四角堰の越流水深を測定する際、水位ロガー（Onset社：U20）に紐を通し、そのため、越流水深が大きくなることがたびたびあった。そこで、測定データの信頼度を上げるため、紐を通したロガーを排水堰西側の地面に直接打った木杭に引っ掛け、さらに内部に大きなゴミが入らないようにするため、塩ビ製円筒に穴を開けたものをカバーとして差し込んだ。また、円筒には蓋をした。



図 3-3-1 沼沢内南西部、四角堰付近測定箇所（水位計データロガー）  
（2009年8月6日 筆者撮影）

## 四角堰詳細

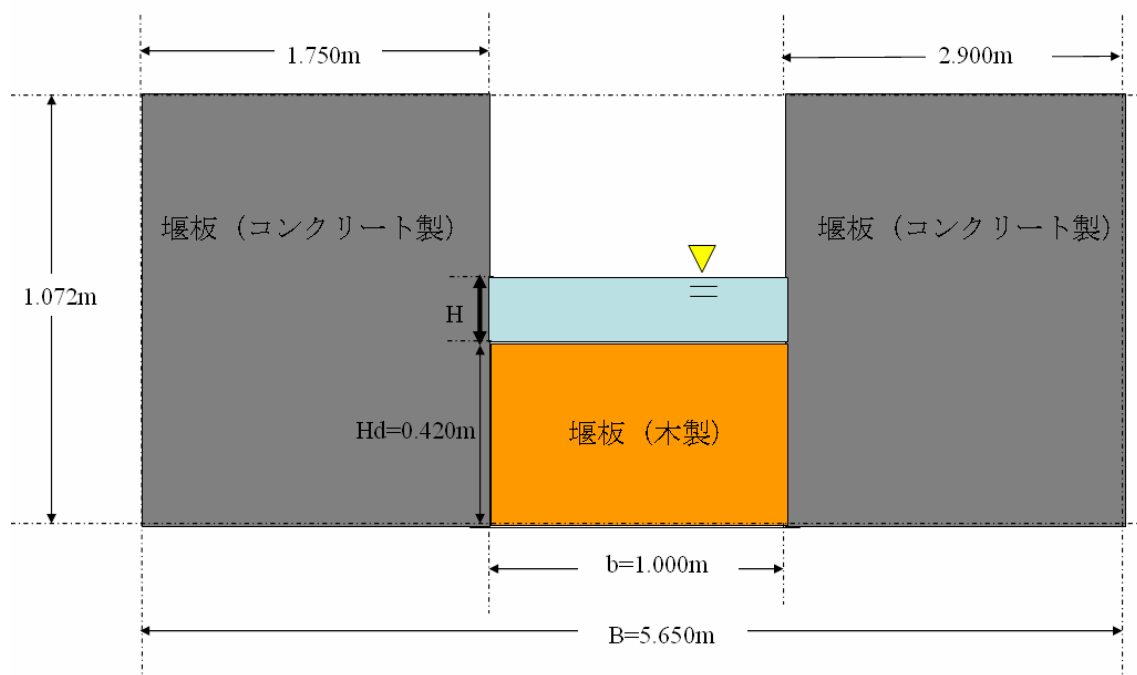


図 3-3-2 四角堰詳細

四角堰の各項目の記号の意味を示す。

$B$  : 全幅 (単位 : m)

$b$  : 越流部分の幅 (単位 : m)

$H_d$  : 越流部分の堰高 (単位 : m)

$H$  : 越流水深 (単位 : m)

四角堰の流量公式を用いて沼沢地の総排水量を求めた。

四角堰の流量公式

$$Q = KbH^{\frac{3}{2}} \quad (\text{式 } 3-3-1)$$

ここで、

- $Q$  : 流量 (単位 : m<sup>3</sup>/s)  
 $K$  : 流量係数 (単位 : 無次元)  
 $b$  : 越流部分の幅 (単位 : m)  
 $H$  : 越流水深 (単位 : m)

また流量係数  $K$  は、

$$K = 1.785 + \frac{0.00295}{H} + 0.237 \frac{H}{H_d} - 0.428 \sqrt{\frac{(B-b)H}{H_d B}} + 0.034 \sqrt{\frac{B}{H_d}} \quad (\text{式 } 3-3-2)$$

(単位 : 長さ[m]、時間[s])

適用範囲は、

- $0.5 \leq B \leq 6.3$
- $0.15 \leq b \leq 5$
- $0.15 \leq H_d \leq 3.5$

$B=5.65\text{m}$ 、 $b=1.00\text{m}$ 、 $H_d=0.42\text{m}$  より、

すべて適用範囲を満たしている。

参考文献 : 日下部重幸、檀和秀、油城豊勝 (2002) 『水理学』 pp70-72

### 3-3-2 三角堰における湧水量測定

湧水量を把握するため、2009年1月26日、沼沢地南側の懸崖部に接する池の小水路の末端に三角堰の設置を行った。そして、四角堰の時と同様に水位観測塔を設置し、内部に水位ロガー（Onset社：U20）をセットした。

堰の設置の際は、鈴鹿市文化振興部文化課の協力を頂いた。



図 3-3-3 沼沢内南西部、三角堰付近測定箇所（水位計データロガー）  
（2010年12月7日 筆者撮影）

### 三角堰詳細

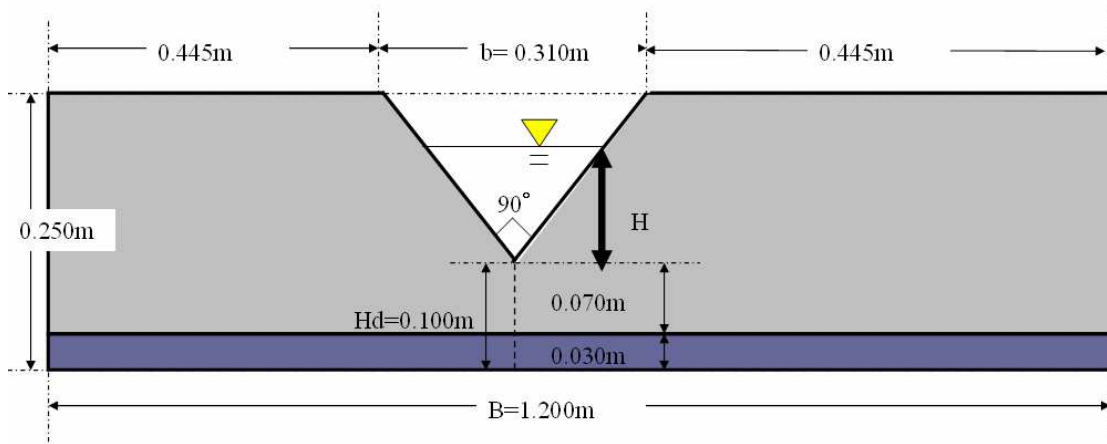


図 3-3-4 三角堰詳細

三角堰の流量公式を用いて沼沢地の湧水量を求めた。

三角堰の流量公式

$$Q = KH^{\frac{5}{2}} \quad (\text{式 3-3-3})$$

ここで、

$Q$  : 流量 (単位 : m<sup>3</sup>/s)

$K$  : 流量係数 (単位 : 無次元)

$H$  : 越流水深 (単位 : m)

また流量係数  $K$  は、

$$K = 1.354 + \frac{0.004}{H} + \left( 0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{Hd}} \right) \left( \frac{H}{B} - 0.09 \right)^2 \quad (\text{式 3-3-4})$$

(単位 : 長さ[m]、時間[s])

適用範囲は、

•  $0.5 \leq B \leq 1.2$

•  $0.1 \leq H_d \leq 0.75$

•  $0.07 \leq H \leq 0.26$

•  $H \leq \frac{B}{3}$

$B=1.20\text{m}$ 、 $H_d=0.42\text{m}$  に関しては条件を満たしている。

測定期間中、越流水深  $H$  は下限の  $0.07\text{m}$  を下回ることがあったが、上限の  $0.26\text{m}$  を上回ることはなかった。

参考文献 : 日下部重幸、檀和秀、油城豊勝 (2002) 『水理学』 pp72-73



三角堰は、上記のように流量公式に当てはめる際の条件を満たしていない項目があった。よって、公式とで求めた流量と実測流量との関係を調べるために検定を行った。

2011年1月5日13時53分

越流水深：5.0cm

流量公式での流量：0.96L/s

検定結果から求めた平均流量：0.88L/s

多少の誤差はあるが、流量公式で求めた流量は妥当であると判断した。

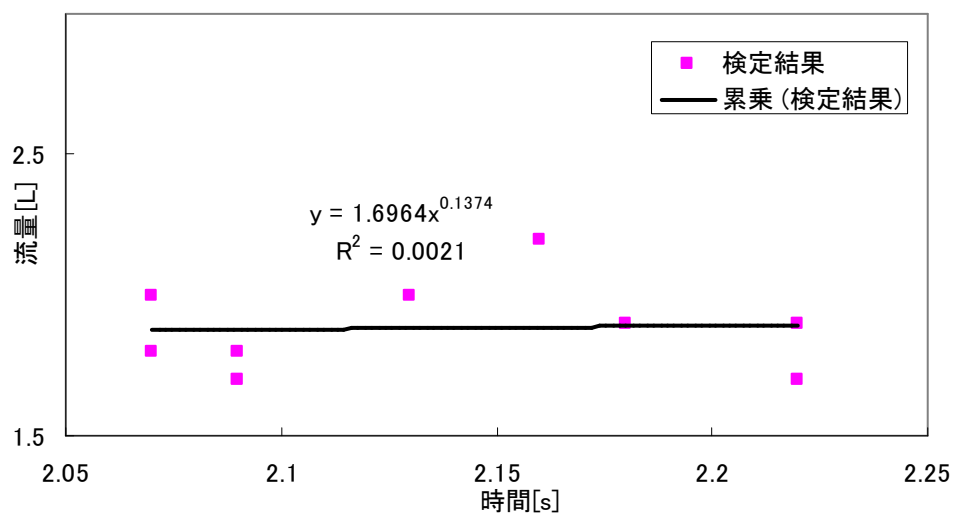


図 3-3-5 検定結果

### 3-3-3 地下水観測井における地下水位測定

平成 19 年度に沼沢地内の地下水位を把握するために、地下水観測井が設けられた。本論においても観測井内に設置された水位ロガーのデータを使用した。内部を図 3-3-7 に示す。



図 3-3-6 沼沢内中央部、地下水位観測井（2009 年 4 月 17 日 筆者撮影）

地下水観測井詳細

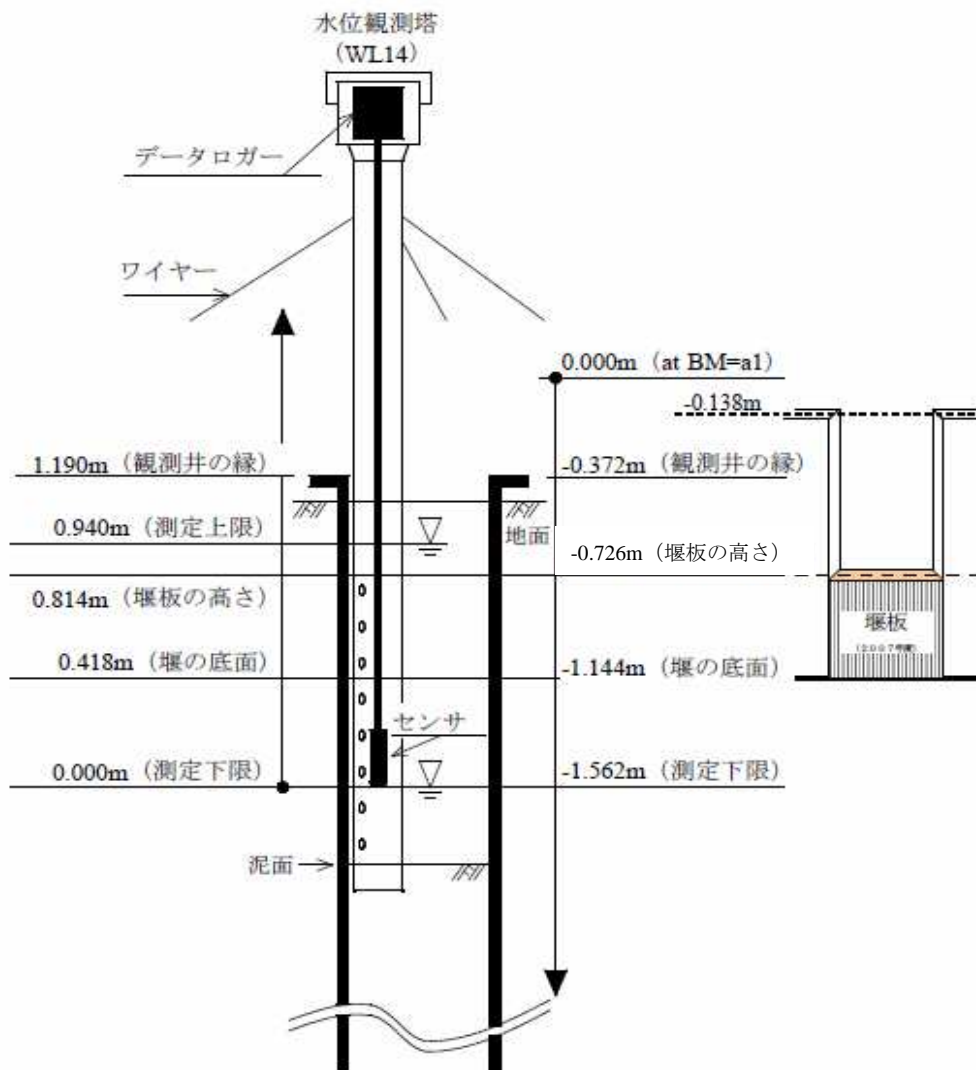


図 3-3-7 地下水観測井の内部

### 3-3-4 百葉箱における大気圧測定

四角堰と三角堰に設置した水位ロガー(Onset 社 : U20)は大気圧補正が必要であるため、沼沢内の百葉箱内部に同様の (U20) ロガーを1台設置した。



図 3-3-8 沼沢内中央部、百葉箱内部測定箇所（大気圧補正用データロガー）  
(2011年1月6日 筆者撮影)



ロガーはセンサー部分がゴミによって測定に不備が出ないようにするため、ネットでもわりを保護し、袋の端に画鋲を打って設置点を固定した。



図 3-3-9 百葉箱内部 (大気圧補正用データロガー)  
(2011年1月6日 筆者撮影)

### 3-3-5 沼沢内揚水井戸概要

深度 40m

管径  $\phi 250 \sim 267$ mm

掘削径 400mm

管種 SGP 管

ストレーナー種類 巻線型

ストレーナー長 9.00m

自然水位 GL-2.46m

揚水量 200ℓ/min

工期 2005年08月04日～2005年10月17日

緯度・経度 北緯  $34^{\circ} 51' 53.11''$  東経  $136^{\circ} 33' 51.63''$

## ポンプ流量

ポンプの揚水量を求めるために以下の測定を行った。

測定期間：2009年8月5日

場所：金生水沼沢内ポンプ付近

測定器具 ・バケツ  
・はかり  
・ストップウォッチ

## 測定結果

表 3-3-1 測定結果

	水+バ ケツ(kg)	バケツ (kg)	水 (kg)	時間 (s)	流量 kg/s	流量 kg/min	流量 m3/s	流量 m3/h	流量 m3/12h
1回目	38.03	1.6	36.43	9.47	3.85	230.81	0.00385	13.85	166.19
2回目	22.93	1.6	21.33	5.71	3.74	224.13	0.00374	13.45	161.38
3回目	26.93	1.6	25.33	6.91	3.67	219.94	0.00367	13.20	158.36
4回目	27	1.6	25.4	6.66	3.81	228.83	0.00381	13.73	164.76
平均	28.72	1.6	27.12	7.19	3.77	225.93	0.00377	13.56	162.67

ポンプの運転期間は以下のようになっている。

2009年：3月15日～11月30日

2010年：2月14日～10月29日

運転時間は0:00～12:00の12時間である。

### 3-3-6 蒸発散量

蒸発散量はソーンズウェイト法を使用し、算出した。

$$E_p = 0.533D_0 \left( \frac{10t_i}{J} \right)^a \quad (\text{式 3-3-5})$$

$$a = 0.000000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.49236 \quad (\text{式 3-3-6})$$

$$J = \sum_{j=1}^{12} (t_j / 5)^{1.514} \quad (\text{式 3-3-7})$$

$E_p$ : 月平均蒸発散量 (mm/day)

$D_0$ : 可照時間 (h)

$t_i$ :  $i$ 月の平均気温 (°C)

可能蒸発散量の7割の値を実蒸発散量とした。



## 第 4 章 結 果

#### 4-1 四角堰での越流水深の変化

四角堰での越流推進の変化を図 4-1 に示す。  
測定期間は 2010 年 08 月 06 日～2010 年 12 月 07 日、測定間隔は 1 時間である。  
2010 年 10 月 29 日 14 時に 42cm の堰板を外したため、越流水深が急に減少し、負の値をとった。

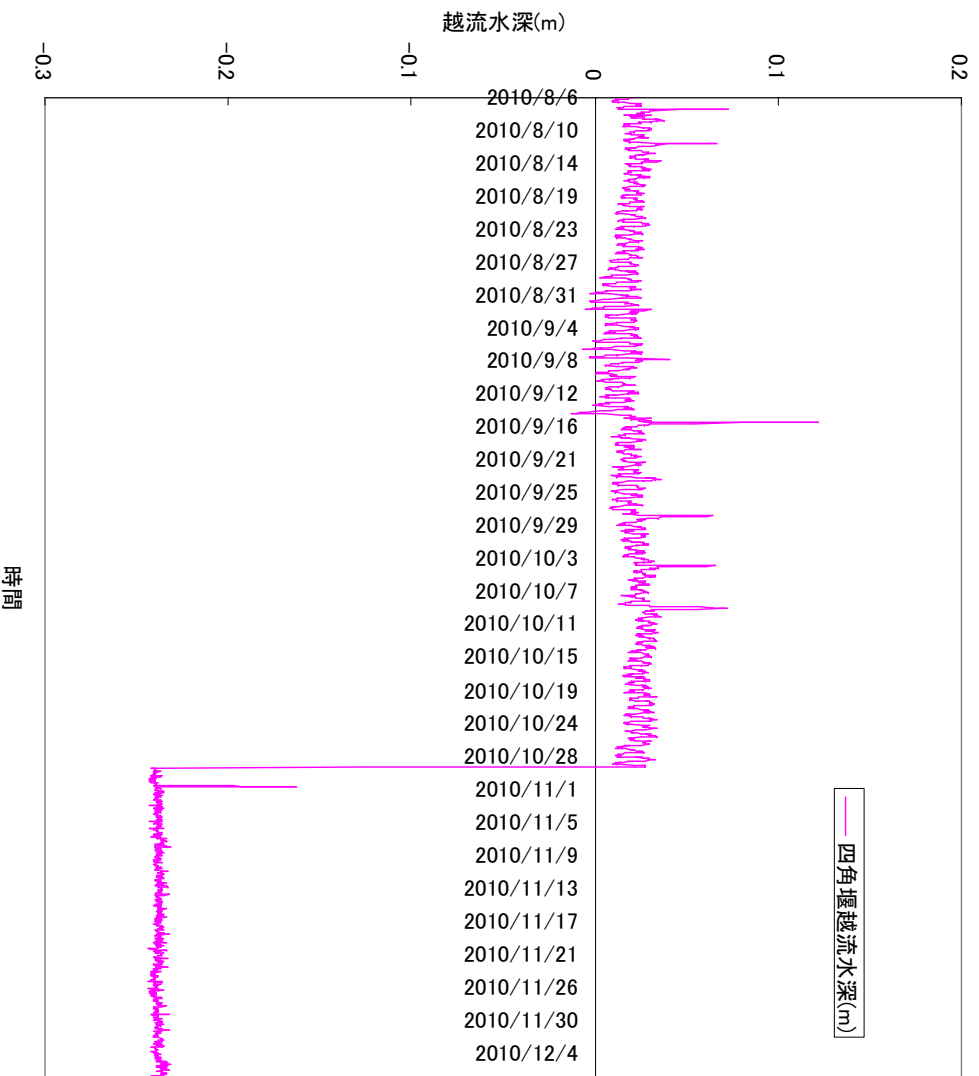


図 4-1 四角堰越流水深

#### 4-2 三角堰での越流水深の変化

三角堰での越流水深の変化を図 4-2 に示す。

測定期間は 2010 年 01 月 26 日～2010 年 12 月 07 日、測定間隔は 1 時間である。

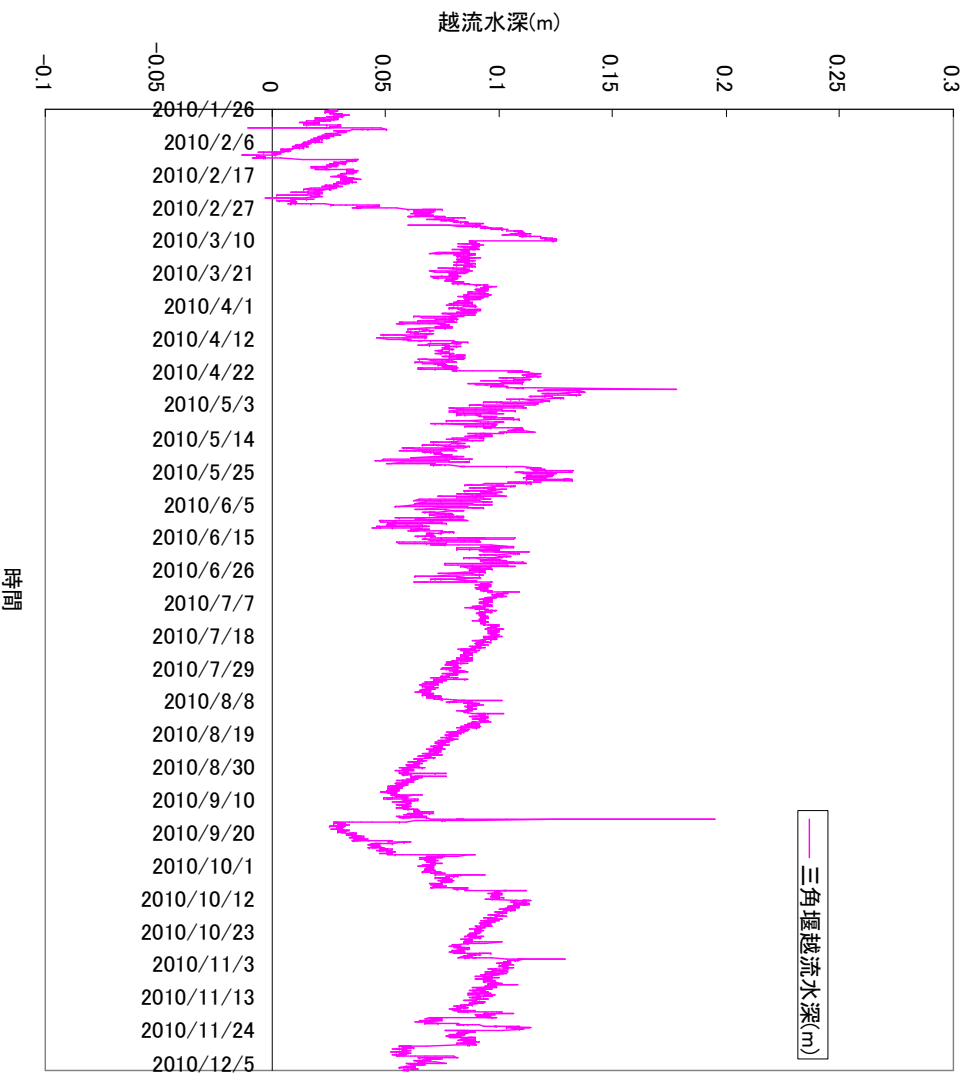


図 4-2 三角堰越流水深

### 4-3 地下水位の変化

地下水位観測井における地下水位変化の実測値を図 4-3-1 から図 4-3-4 に示す。尚、図 4-3-1 と図 4-3-2 は毎日 0 時測定 of 24 時間間隔、図 4-3-3 と図 4-3-4 は 1 時間間隔の測定で行なった。測定期間は 2009 年 1 月 1 日から 2009 年 12 月 31 日と 2010 年 1 月 1 日から 2010 年 12 月 31 日である。

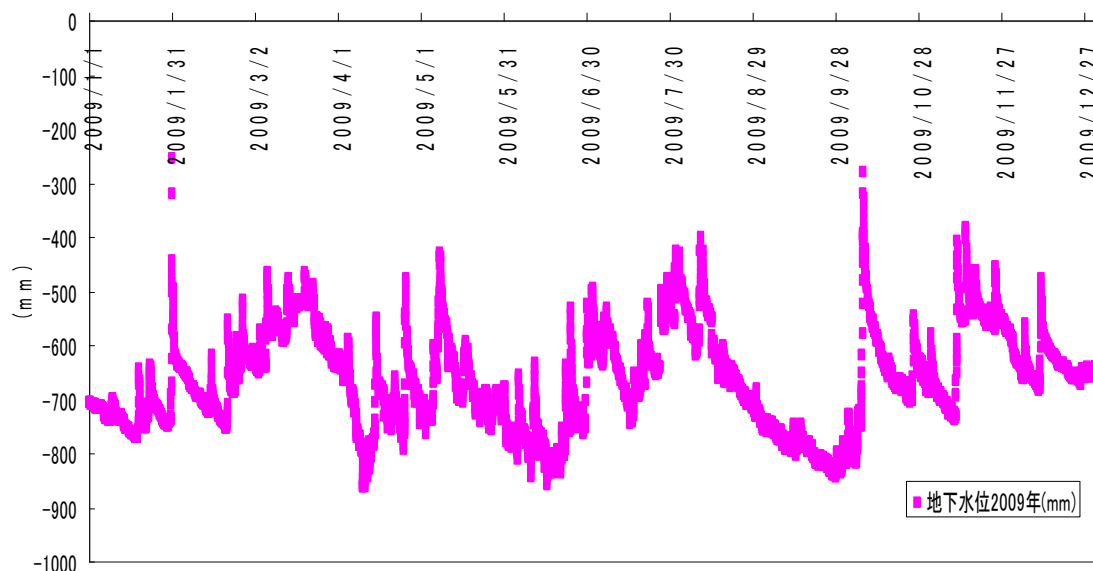


図 4-3-1 2009 年実測地下水位 (1 時間隔)

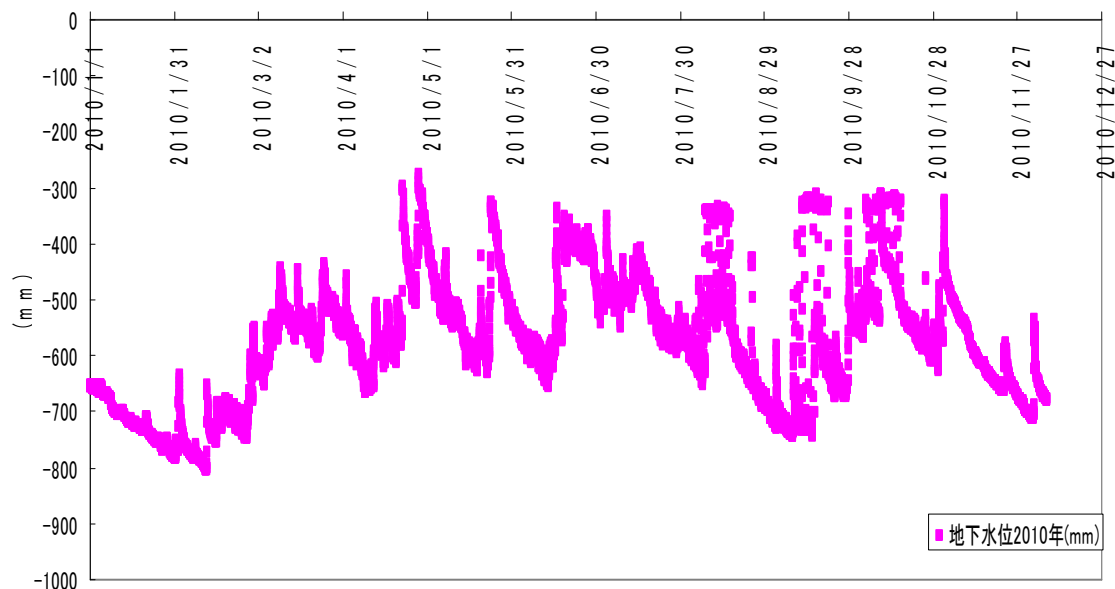


図 4-3-2 2010 年実測地下水位 (1 時間間隔)

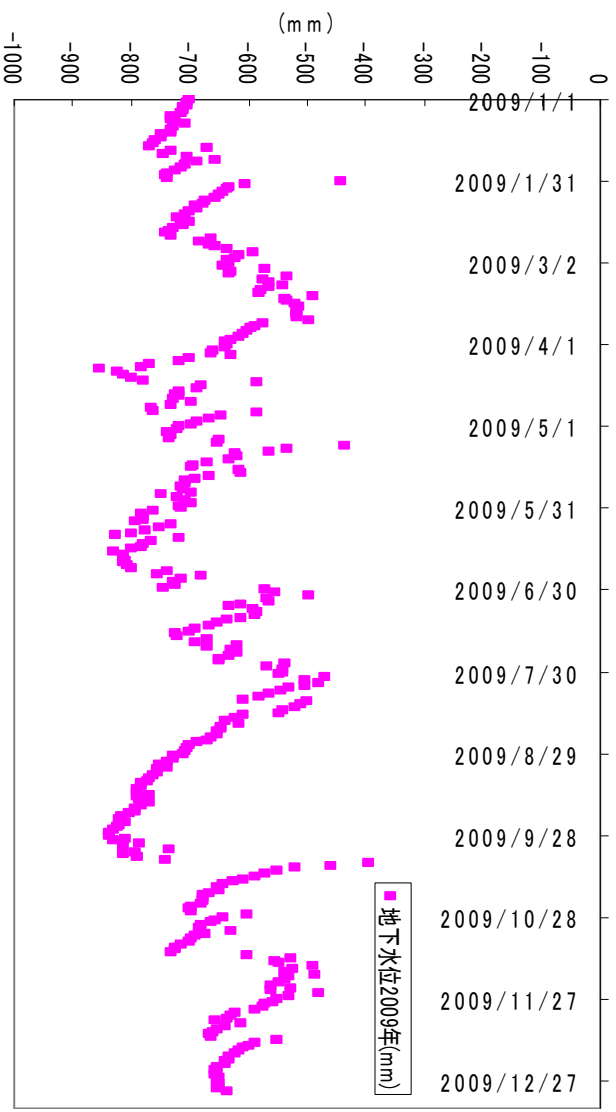


图 4-3-3 2009 年实测地下水水位 (24 時間間隔)

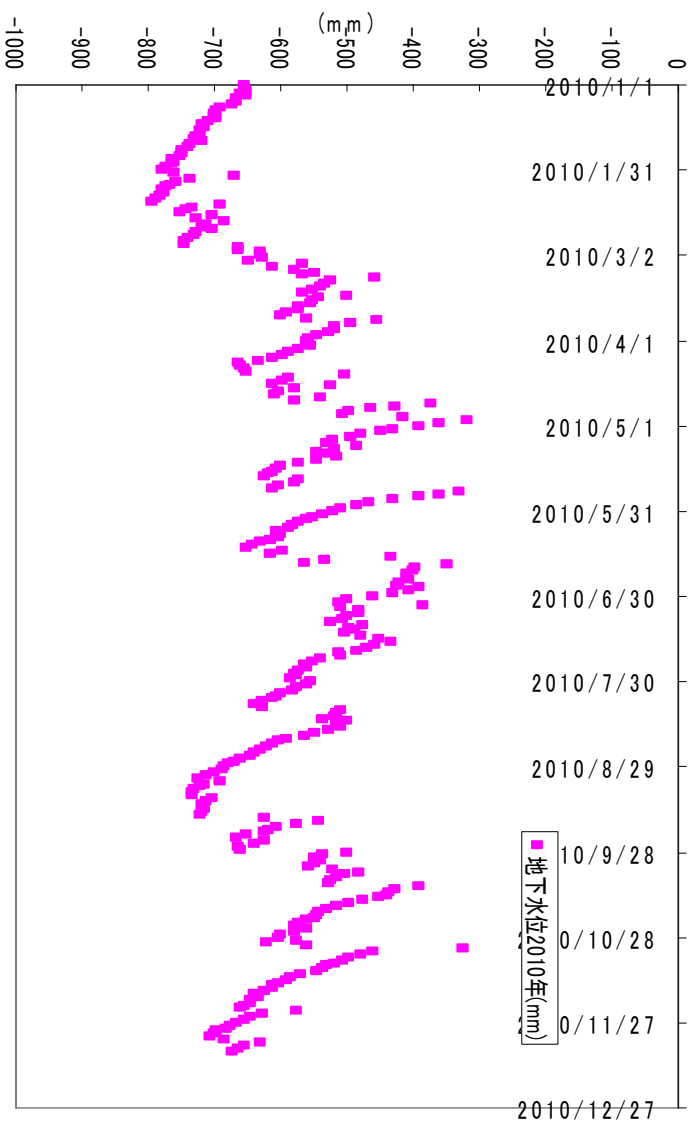


图 4-3-4 2010 年实测地下水水位 (24 時間間隔)



#### 4-4 降雨量の変化

降雨量の変化を図4-4-1から図4-4-4に示す。尚、図4-4-1と図4-4-2は日降雨量であり、図4-4-3と図4-4-4は1時間あたりの降雨量である。

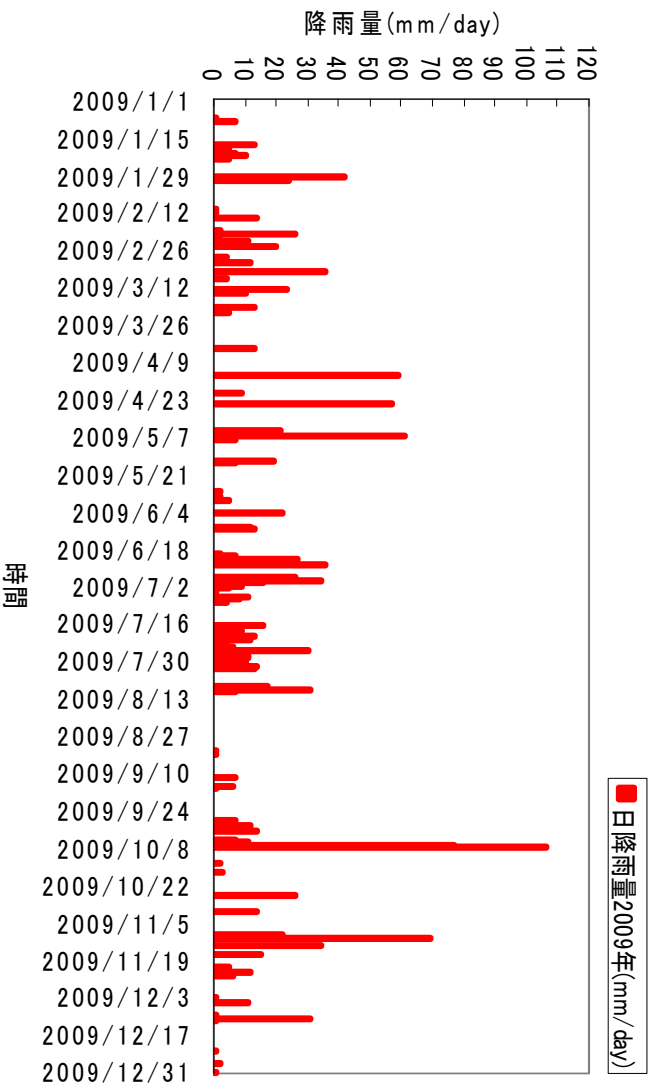


図4-4-1 2009年の日積算降雨量

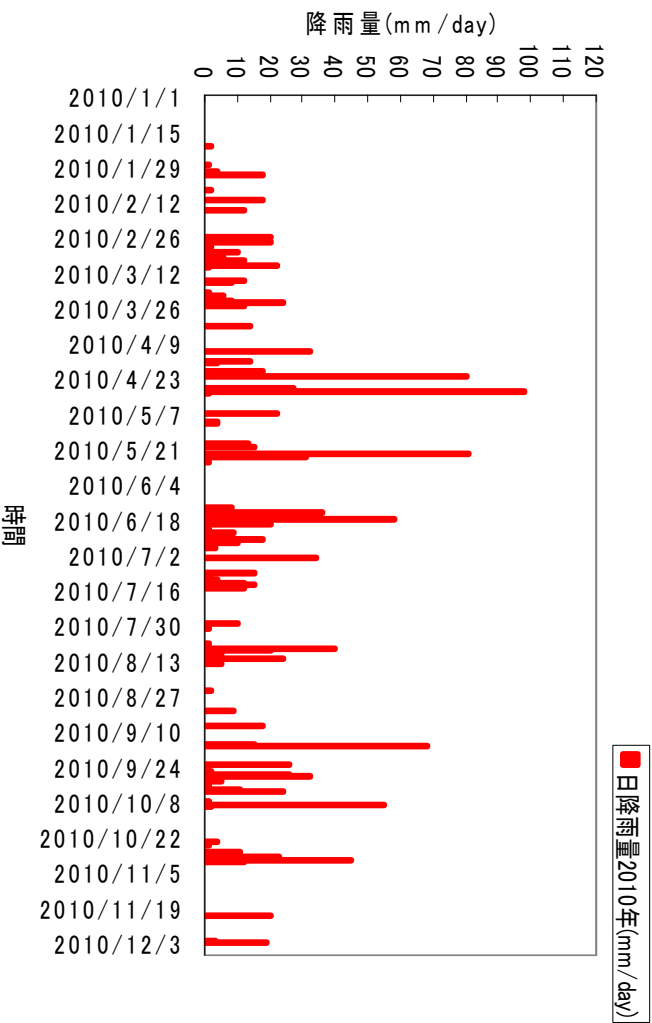


図4-4-2 2010年の日積算降雨量

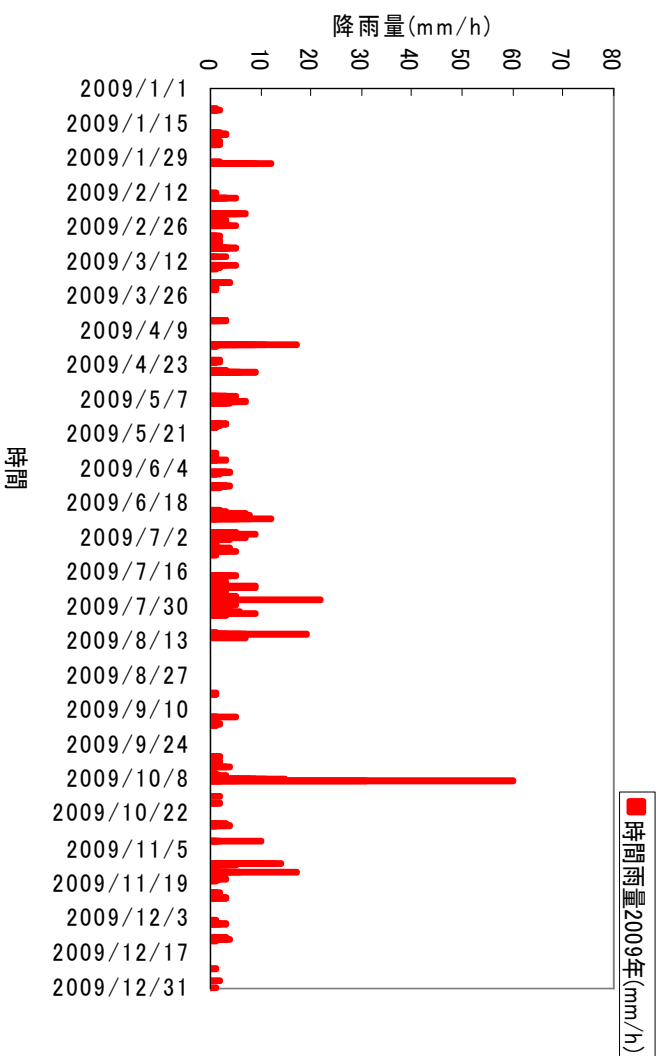


図 4-4-3 2009年の時間降雨量

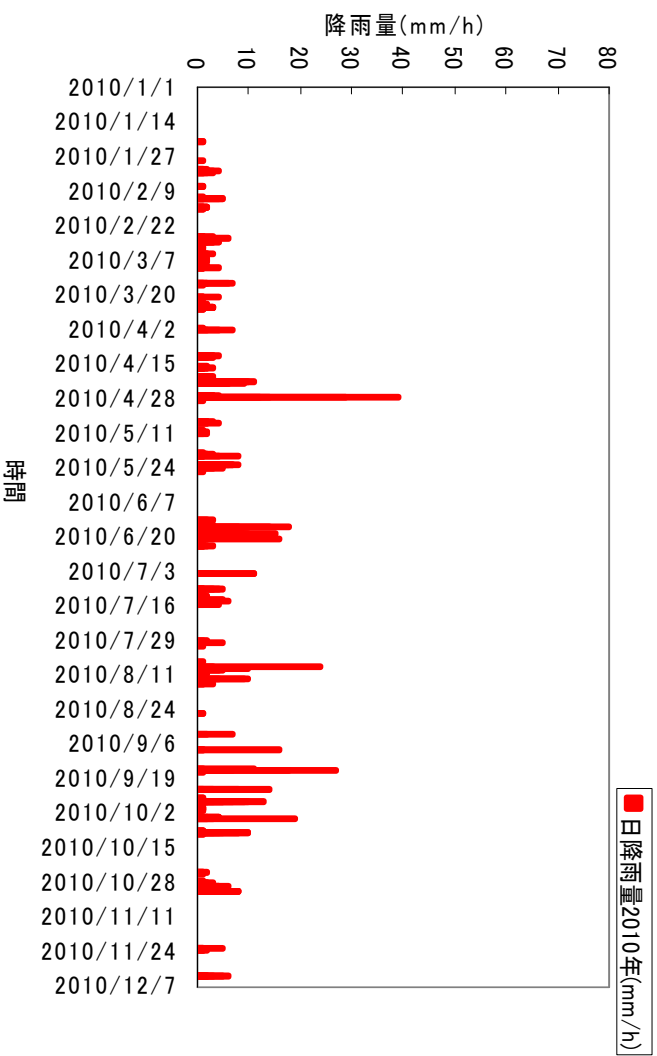


図 4-4-4 2010年の時間降雨量

## 4-5 気温の変化

気温の変化を図 4-5-1 と図 4-5-2 に示す。使用した気温データは気象庁津気象台における月平均気温である。

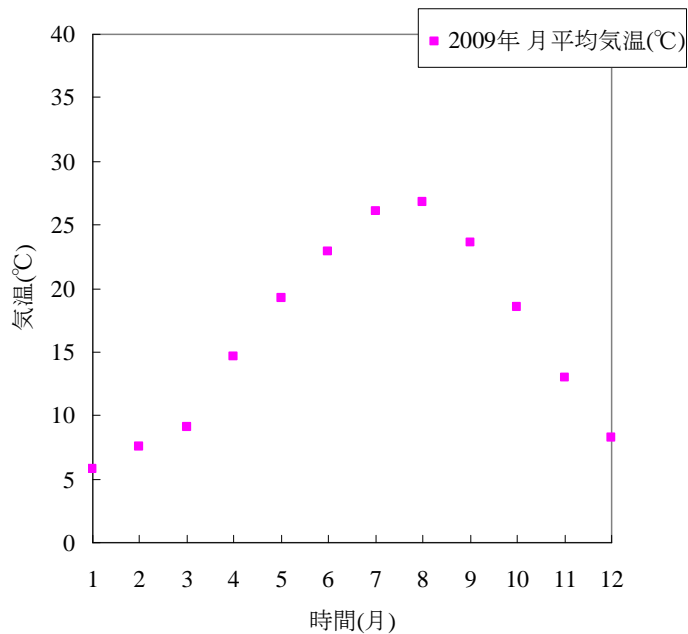


図 4-5-1 月平均気温 (2009 年)

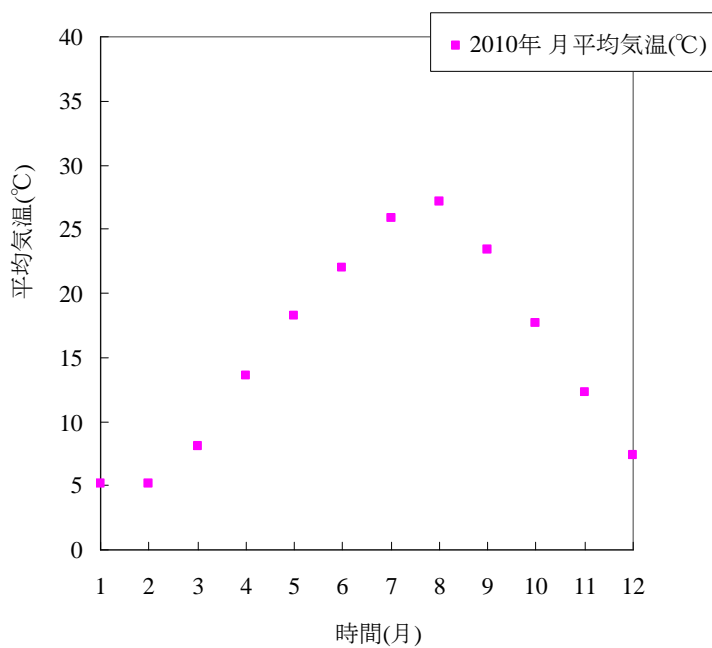


図 4-5-2 月平均気温 (2010 年)

#### 4-6 蒸発散量の変化

蒸発散量の変化を図 4-6-1 と図 4-6-2 に示す。月平均気温をもとにソーンスウェイト式で可能蒸発散量を求め、その 7 割を実蒸発散量とした。

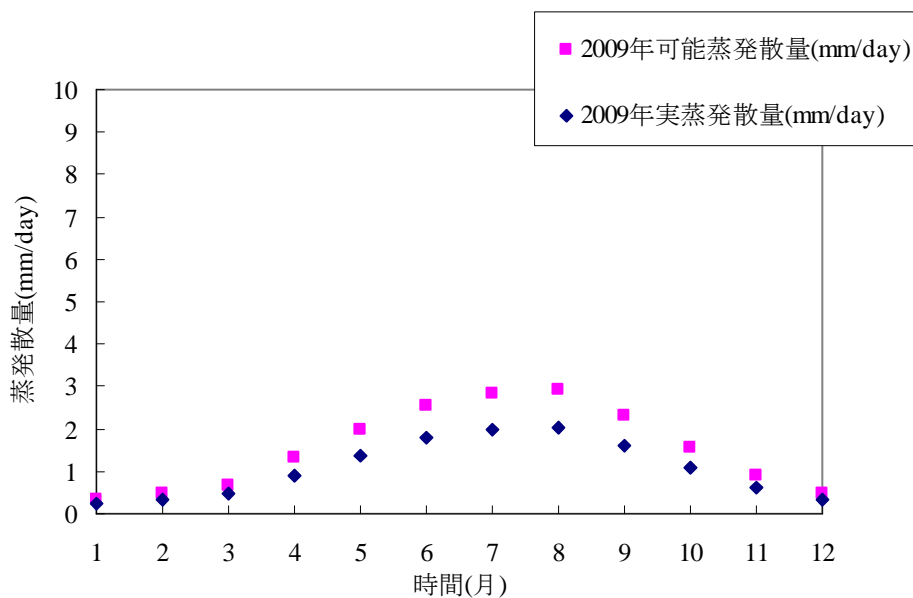


図 4-6-1 蒸発散量 (2009 年)

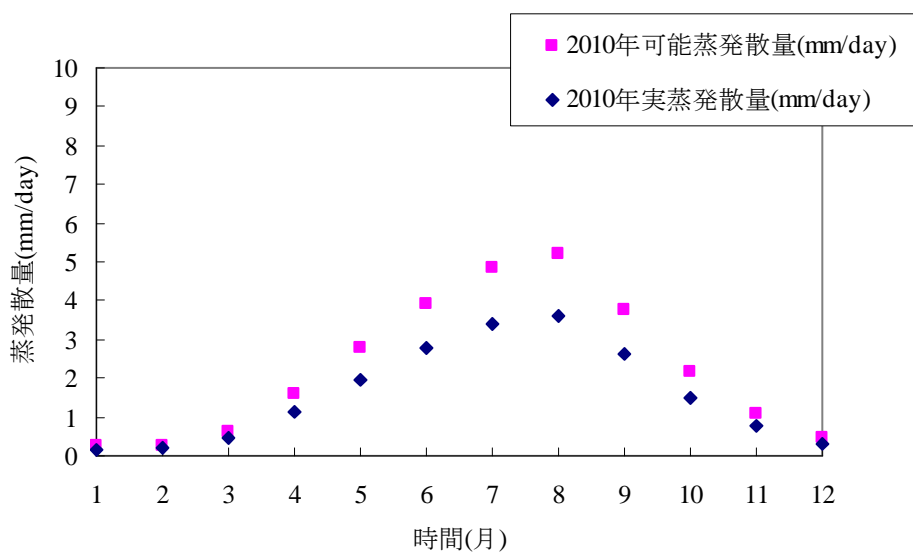


図 4-6-2 蒸発散量 (2010 年)

#### 4-7 四角堰での流量変化

四角堰での流量変化を図4-7に示す。尚、測定間隔は1時間で、測定終了時刻は堰板が外された10月29日の14時とした。

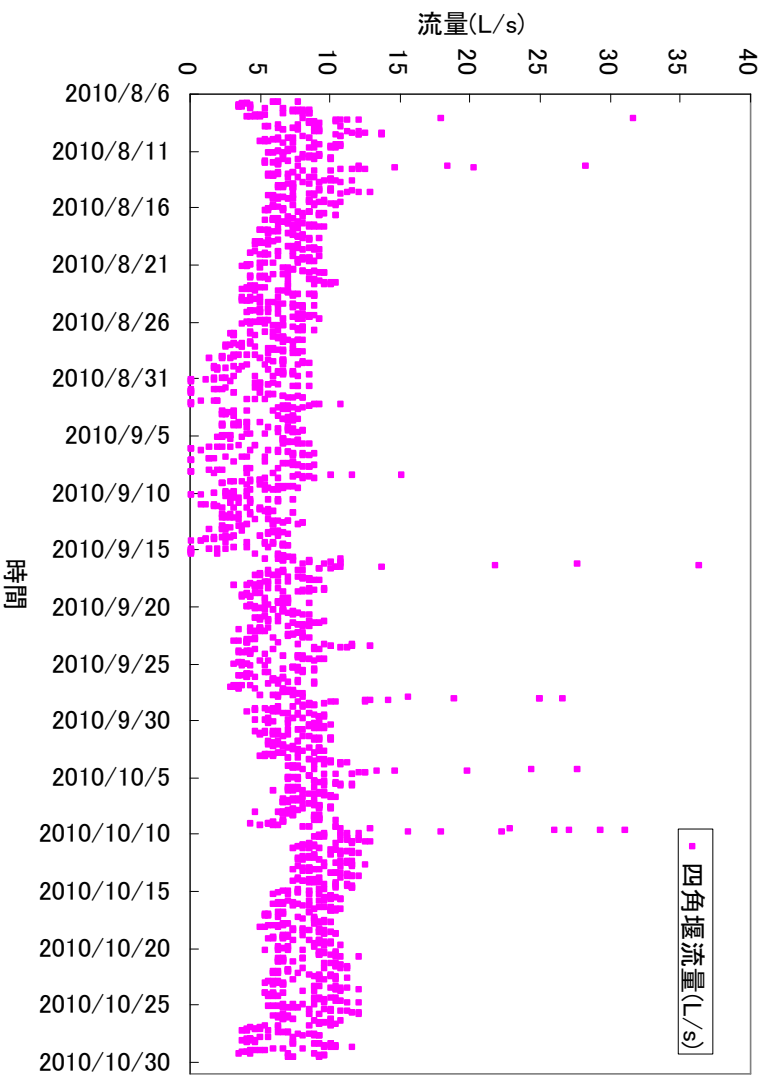


図 4-7 四角堰での流量変化



#### 4-8 三角堰での流量変化

三角堰での流量変化を図 4-7 に示す。尚、測定期間は 2010 年 1 月 26 日から 2010 年 12 月 7 日、測定間隔は 1 時間である。

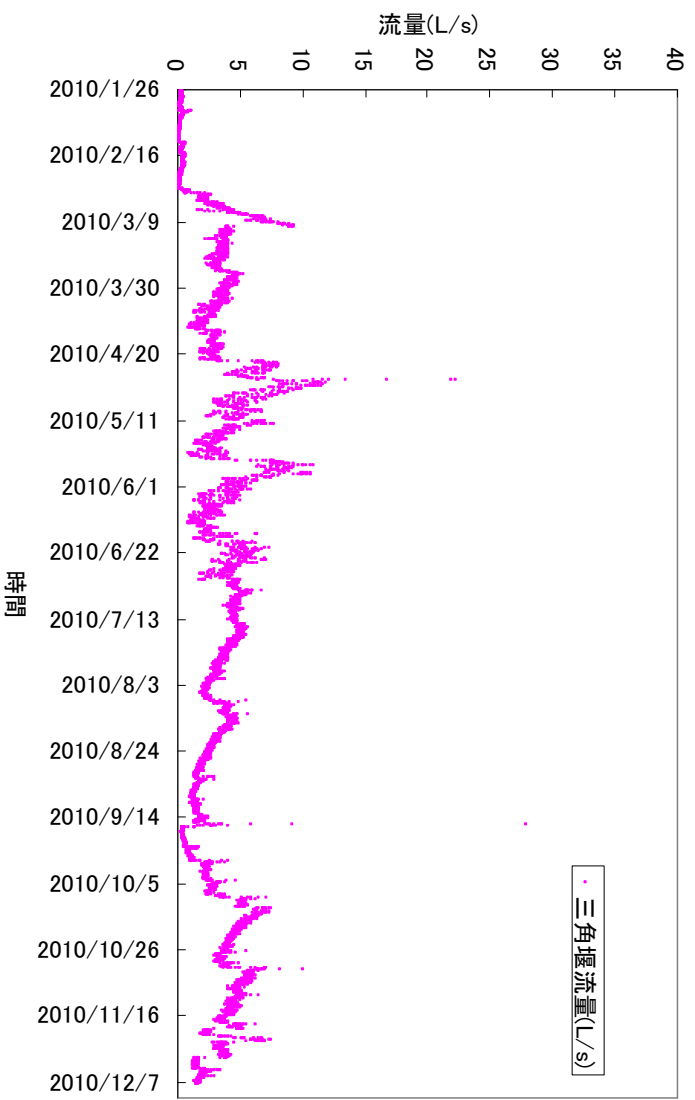


図 4-8 三角堰での流量変化

#### 4-9 地下水位のシミュレーション結果

表 4-9-1 シミュレーションに用いた係数（測定間隔：24 時間）

	2009 年	2010 年
流出係数	0.95	0.95
初期損失	0	1
タンク初期水深 (mm)	0	5
地下初期水位 (mm)	-705.35	-656.41
有効空隙率	0.423	0.532
揚水量 (mm/day=12h)	21.65	21.65
地下水流入 (mm/day)	18.06	17.70
地下水流出 (mm/day)	21.49	21.41
横穴流出係数	0.475	0.475
横穴高さ	0	0
表面流出率 f1	0.15	0.15
表面流出率 f2	0.95	0.95
評価関数	124.91	148.45

表 4-9-2 シミュレーションに用いた係数（測定間隔：1 時間）

	2009 年	2010 年
流出係数	0.95	0.95
初期損失	0.86	1
タンク初期水深(mm)	13	5
地下初期水位(mm)	-705.35	-656.41
有効空隙率	0.205	0.234
揚水/1h(mm)	1.80	1.80
地下水流入(mm/h)	-0.023	-0.033
地下水流出(mm/h)	0.120	0.115
横穴流出係数	0.88	0.9
横穴高さ	0	0
表面流出率 f1	0.15	0.15
表面流出率 f2	0.95	0.95
評価関数	199.71	285.64

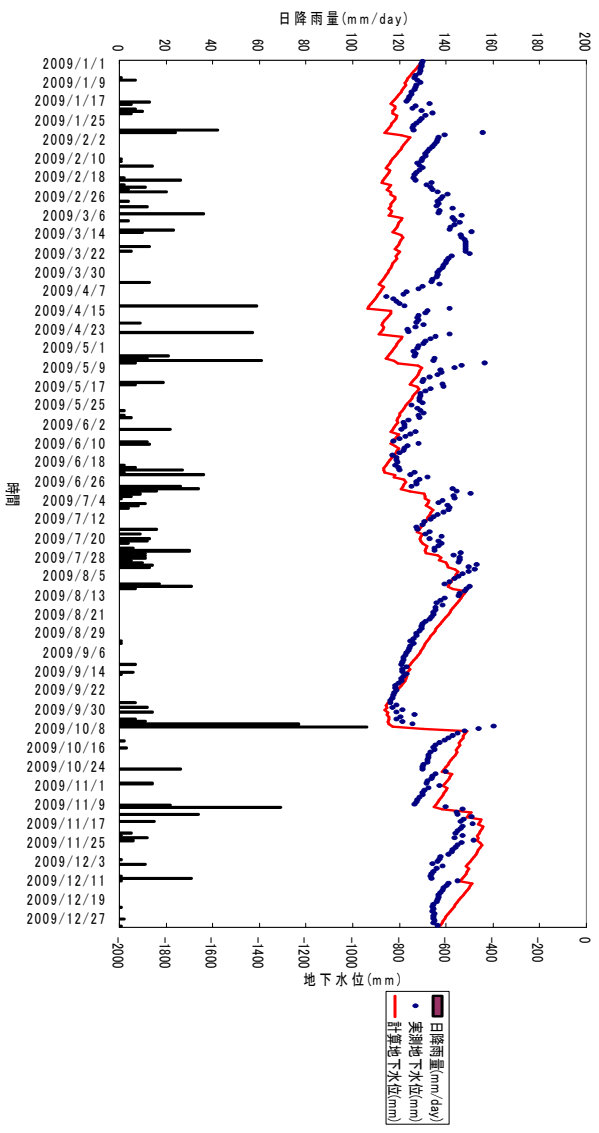


図 4-9-1 2009 年のシミュレーション結果 (24 時間間隔)

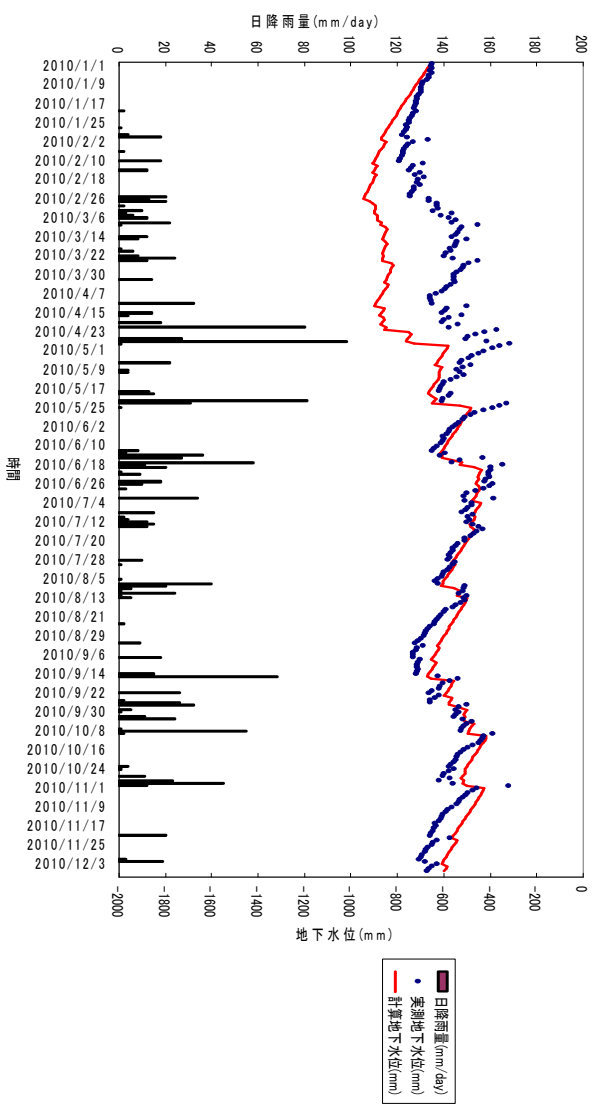


図 4-9-2 2010 年のシミュレーション結果 (24 時間間隔)

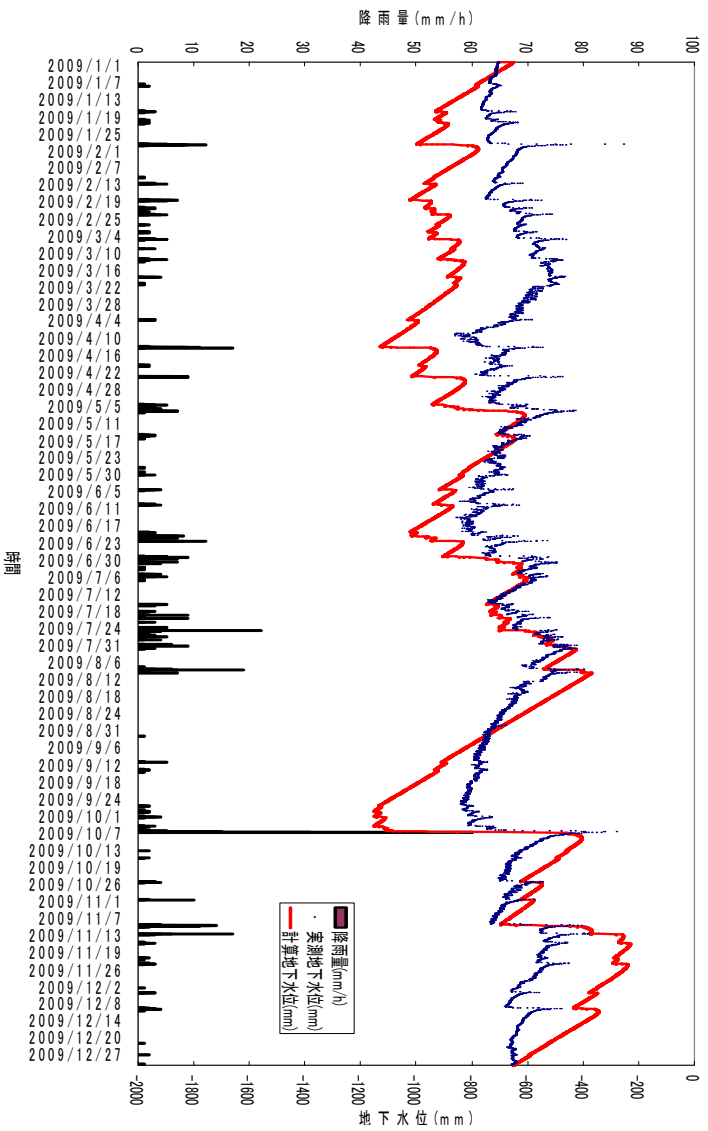


図 4-9-3 2009 年のシミュレーション結果 (1 時間間隔)

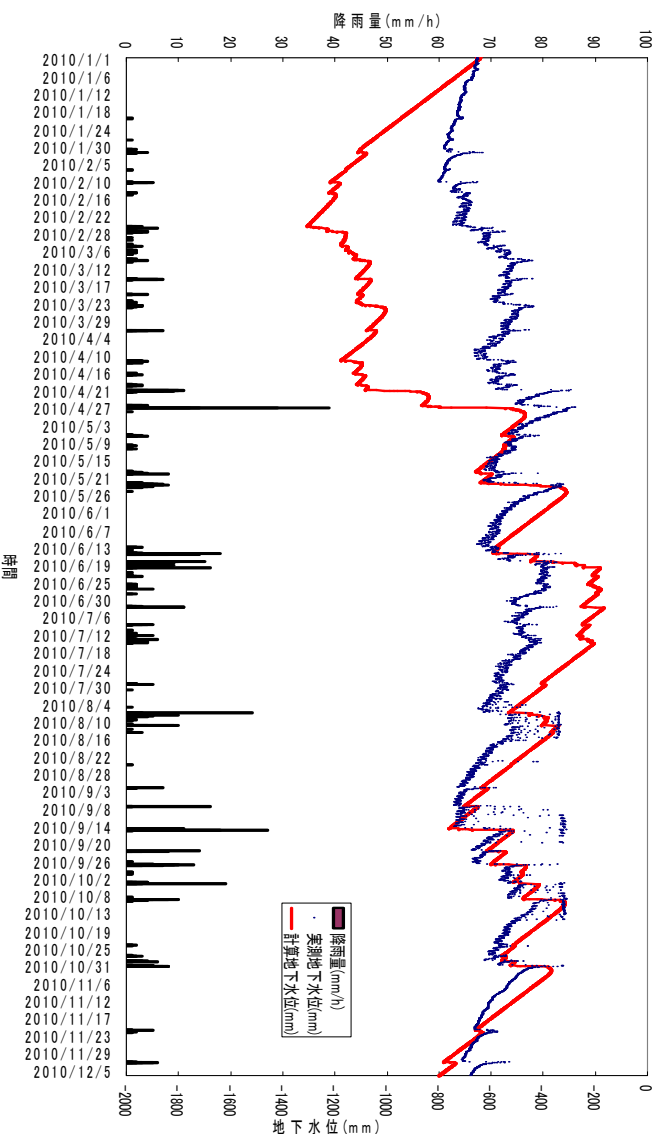


図 4-9-4 2010 年のシミュレーション結果 (1 時間間隔)

#### 4-10 水収支の結果

測定期間内における水収支の結果を表 4-10 に示す。

表 4-10 水収支の結果

		L	m3	mm
流入量	総降雨量	3073635	3074	407
	総揚水量	13664246	13664	1818
	総湧水量	19940391	19940	2563
流出量	総排水量	51514320	51514	6855
	総蒸発散量	1403459	1403	187
	差	16239507	16240	2161

(※ 測定期間 2010 年 8 月 6 日～2010 年 10 月 29 日)



# 第 5 章 考 察

## 5-1 水位変動に関する考察

連続無降雨7日間における水位変動の様子を図5-1-1と図5-1-2に示す。

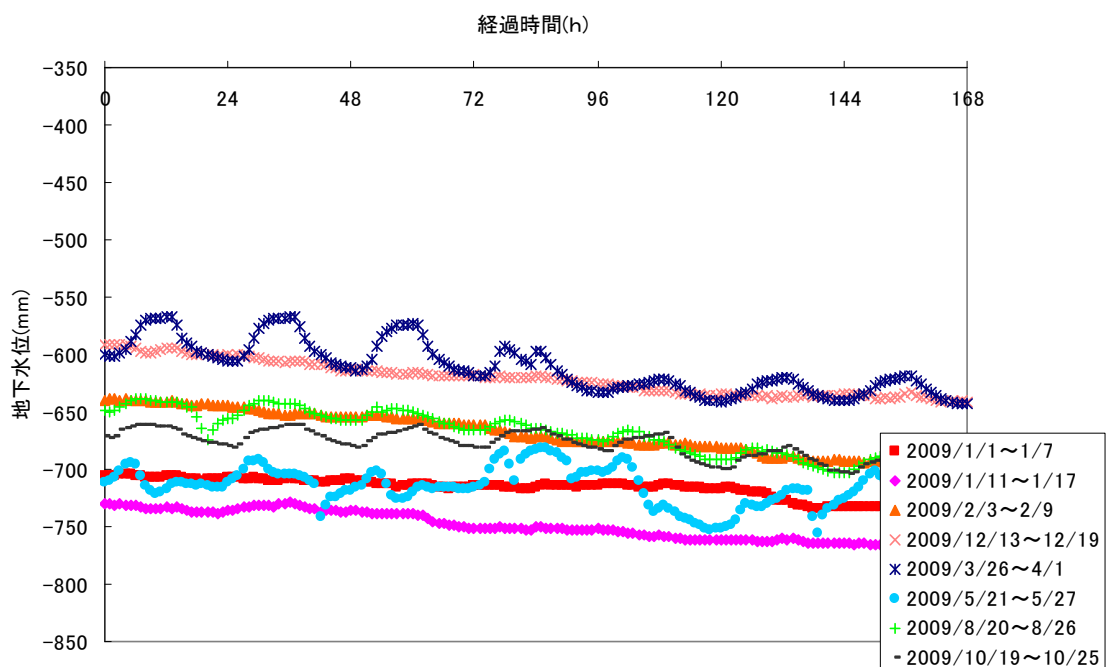


図 5-1-1 2009年連続無降雨期間(7日間:168時間)における地下水位変動

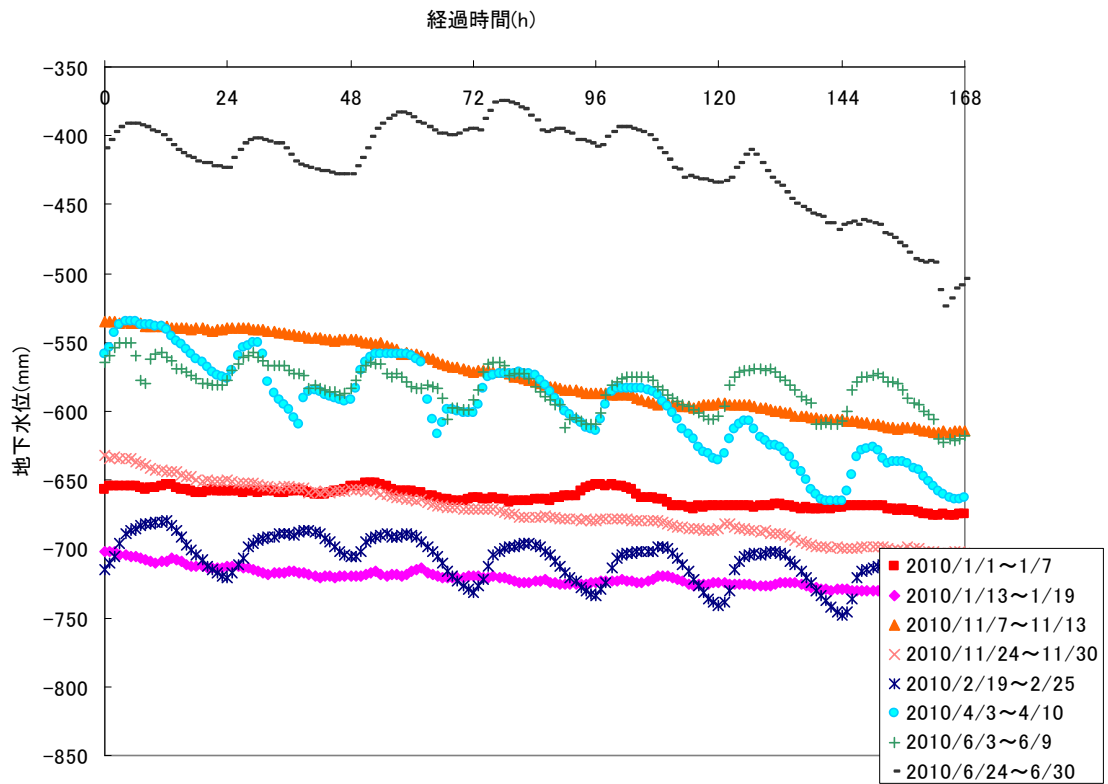


図 5-1-2 2010 年連続無降雨期間(7 日間 : 168 時間)における地下水位変動

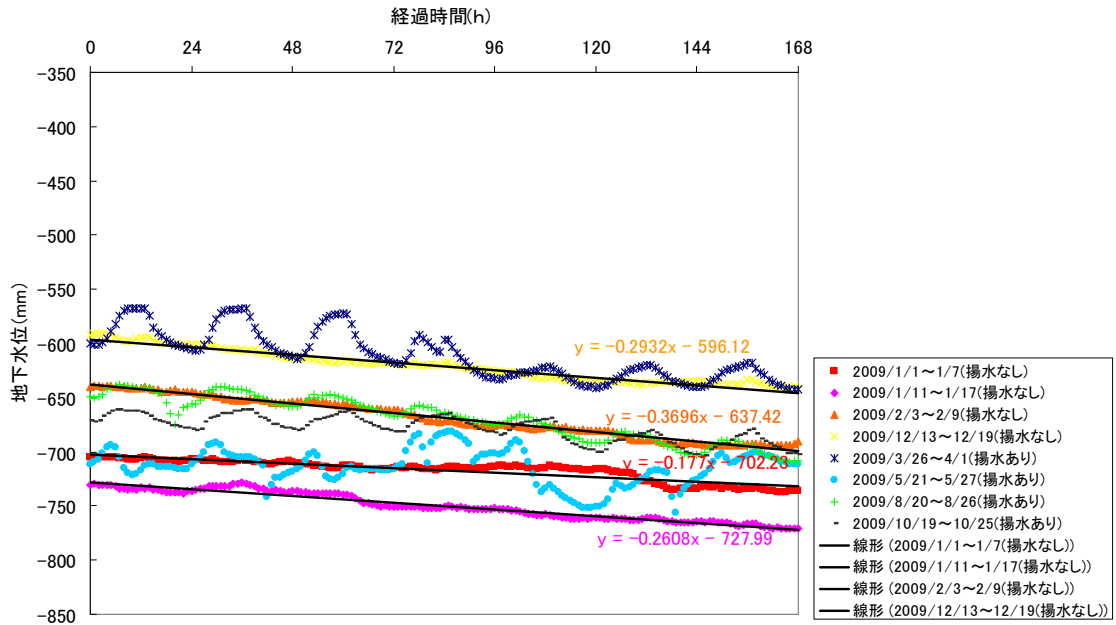


図 5-1-3 線形近似を用いた 2009 年揚水ポンプ休止期間中の地下水位減少の式

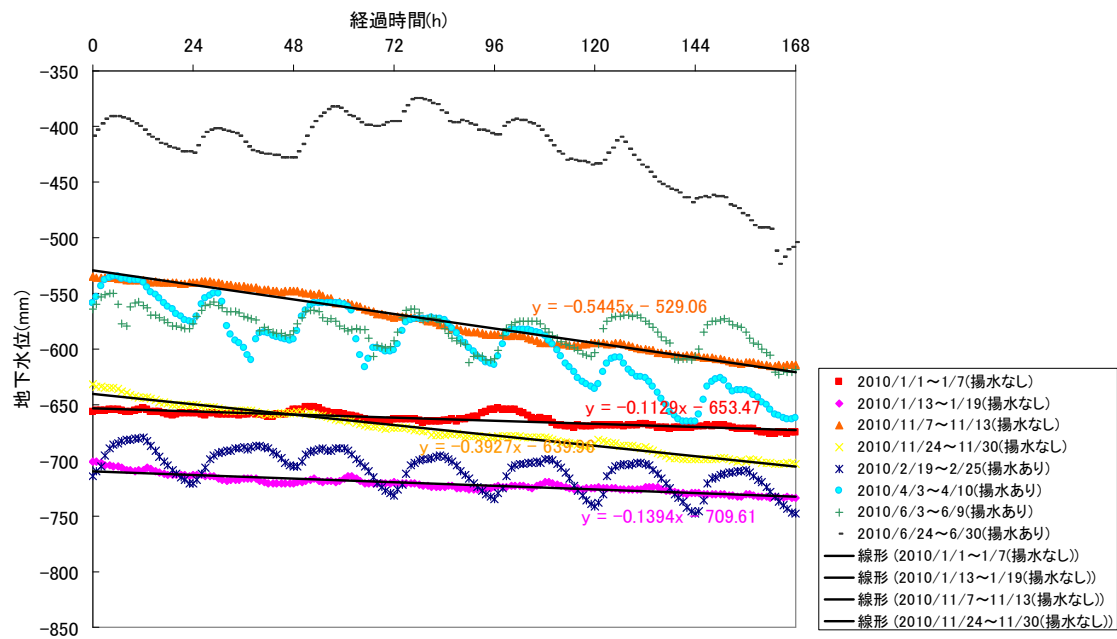


図 5-1-4 線形近似を用いた 2010 年揚水ポンプ休止期間中の地下水位減少の式

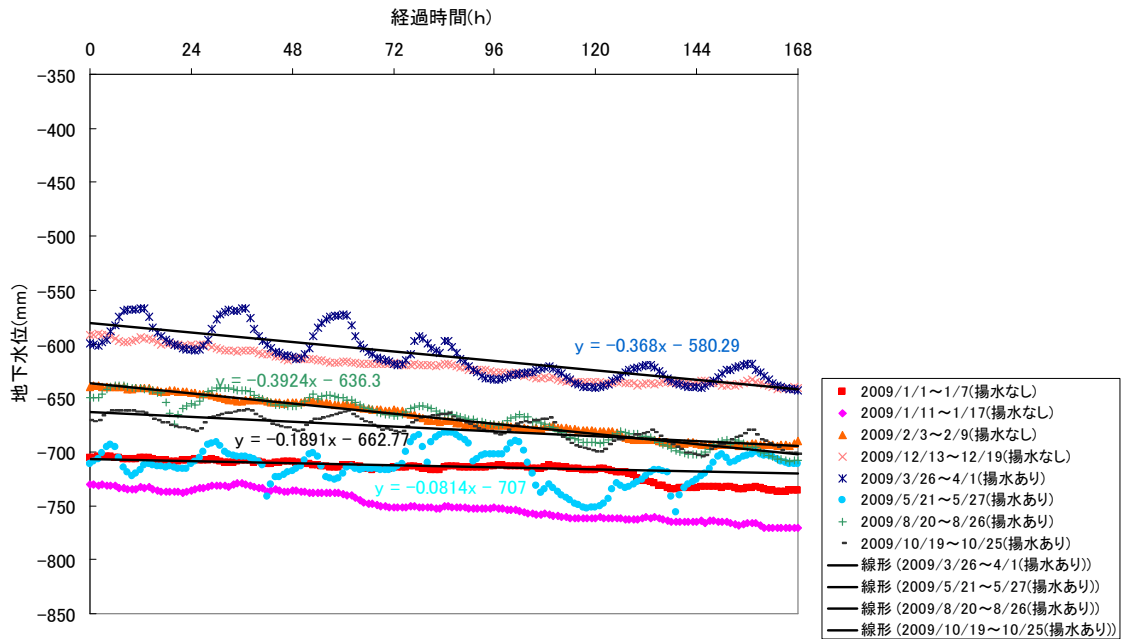


図 5-1-5 線形近似を用いた 2009 年揚水ポンプ運転期間中の地下水位減少の式

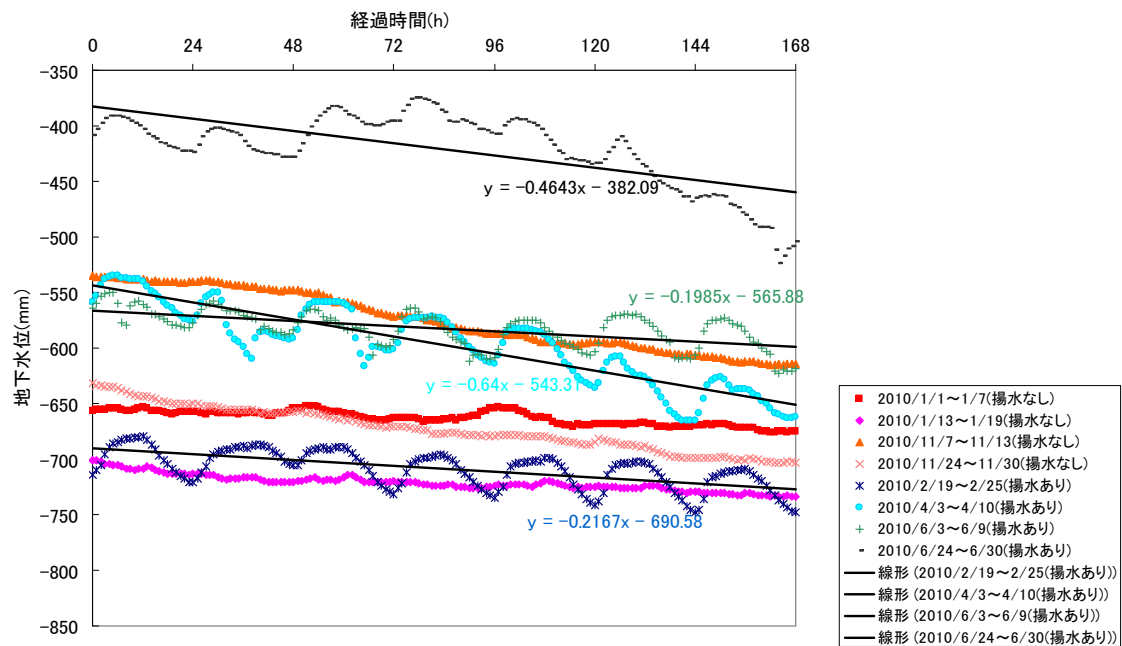


図 5-1-6 線形近似を用いた 2010 年揚水ポンプ運転期間中の地下水位減少の式



図 5-1-1、図 5-1-2 より、揚水ポンプ休止期間中の地下水位変動と運転期間中の連続無降雨時における地下水位変動の違いを見つけることが出来た。休止期間では地下水位が緩やかかつ直線的に下がっているのに対し、運転期間中は小刻みに上下しながら下がっている。ポンプの運転時間は1日のうち12時間で午前0時～正午までであり、その間に表層に水が供給されその水が地下水帯に届くため地下水位が上昇し、休止後は横浸透、下層の土壌に水が浸透するために地下水位が減少しているものと考えられる。

揚水ポンプ休止期間中の地下水位減少速度は各期間のグラフから線形近似式を用いて式の傾きから求めた。結果は以下のようになった。休止期間と運転期間中の地下水位平均減少速度に明確な違いを見つけることは出来なかった。地下水位平均減少速度の平均は休止期間に約 0.286mm/h、運転期間は 0.318mm/h となった。単位を mm/day(=mm/24h)として1日あたりの地下水位減少速度を調べると、休止期間に  $0.286 \times 24 = 6.86 \text{mm/day}$ 、運転期間に  $0.318 \times 24 = 7.65 \text{mm/day}$  となった。

表 5-1

揚水ポンプ休止期間中と運転期間中の無降雨時における地下水位減少速度

		水位減少速度 (mm/h)	平均減少速度 (mm/h)	
休止 期間	2009/1/1～1/7	0.293	2009年	休止期間平均
	2009/1/11～1/17	0.370	0.275	0.286
	2009/2/3～2/9	0.177		
	2009/12/13～12/19	0.261		
	2010/1/1～1/7	0.545	2010年	
	2010/1/13～1/19	0.113	0.297	
	2010/11/7～11/13	0.393		
	2010/11/24～11/30	0.139		
運転 期間	2009/3/26～4/1	0.368	2009年	運転期間平均
	2009/5/21～5/27	0.081	0.258	0.319
	2009/8/20～8/26	0.392		
	2009/10/19～10/25	0.189		
	2010/2/19～2/25	0.217	2010年	
	2010/4/3～4/10	0.64	0.380	
	2010/6/3～6/9	0.199		
2010/24～6/30	0.4643			

沼沢内水位と地下水水位の変動を比較した図 5-1-7 より、この 2 つは降雨やポンプ運転によって同じような変動傾向を示すことがわかった。二つは降雨時に上昇し、ポンプ稼動に合わせて上昇と下降を繰り返す動きをする。

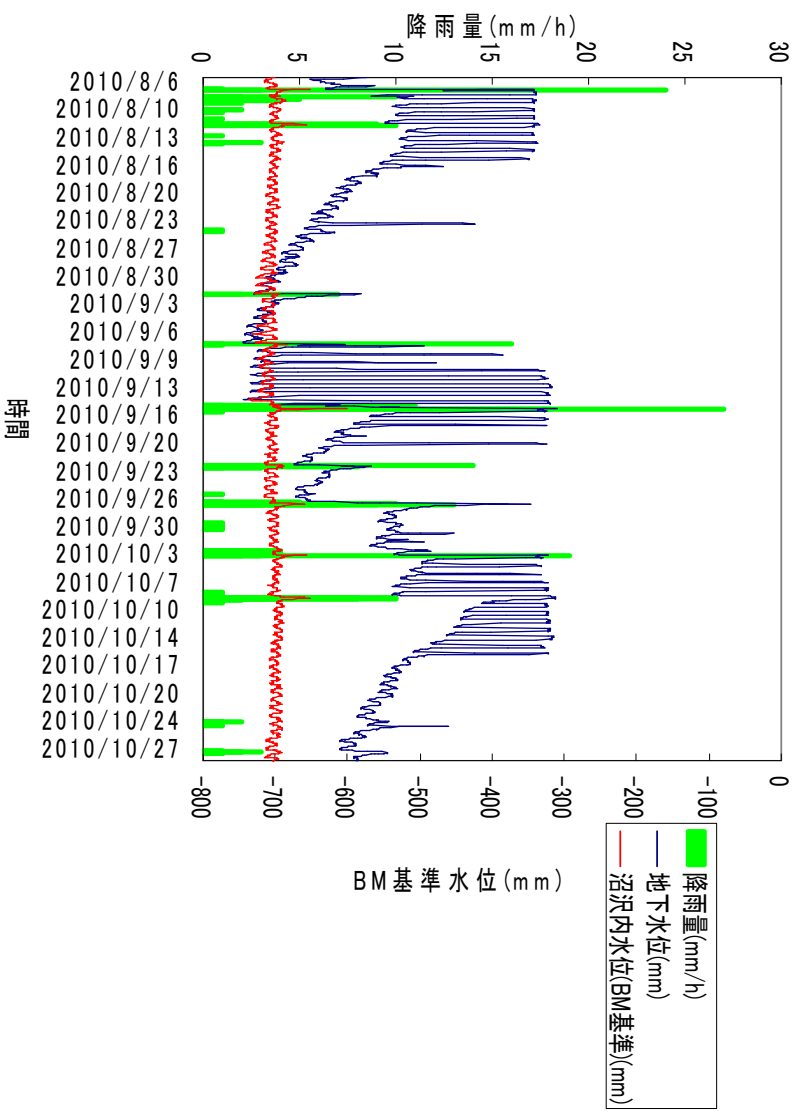


図 5-1-7 降雨量と地下水水位、沼沢内水位との関係

沼沢内水位（排水堰水位）、地下水位、懸崖からの湧水量（三角堰の越流水深）変動グラフから、相関を調べた。図 5-1-8 より、湧水量（三角堰流量）は降雨によって上昇したが、地下水位や沼沢内水位のようなポンプの稼動による影響は、水位の上下動が見られるため、受けているように見えた。

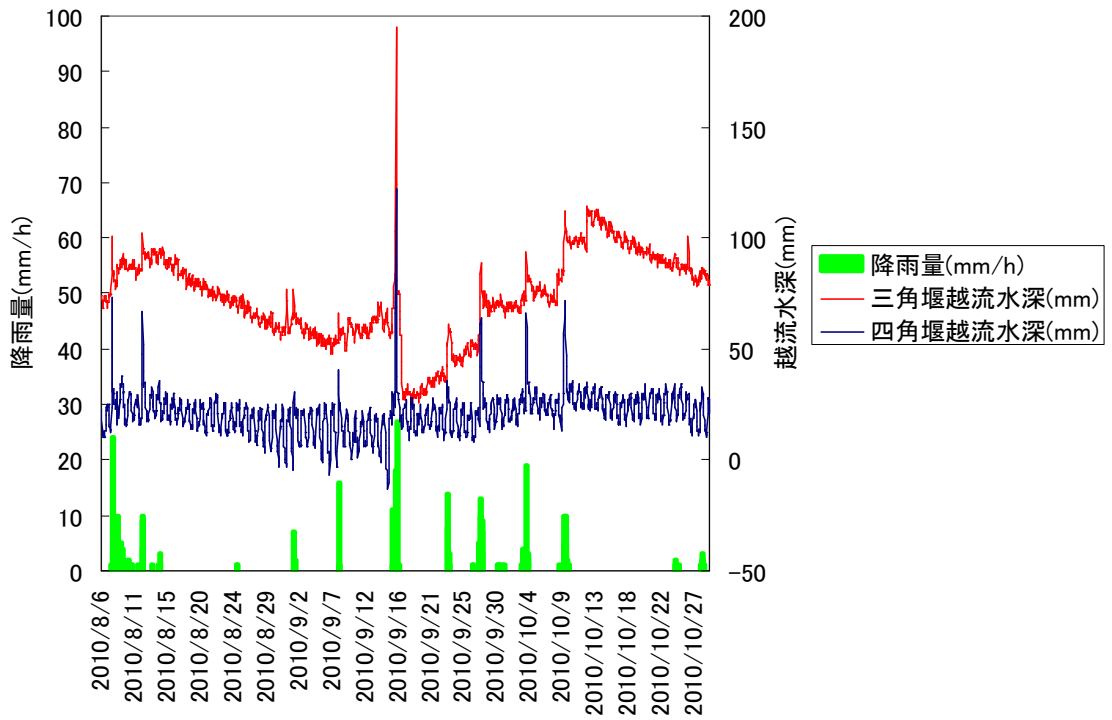


図 5-1-8 降雨量と三角堰越流水深、四角堰越流水深との関係

## 5-2 モデルに関する考察

地下水位変動モデルを作成する際、まず降雨に対してどれだけ地下水位が上昇するか傾向を見つけることが大切である。一雨の降雨量とその時の地下水位上昇量について関係性を調べた。

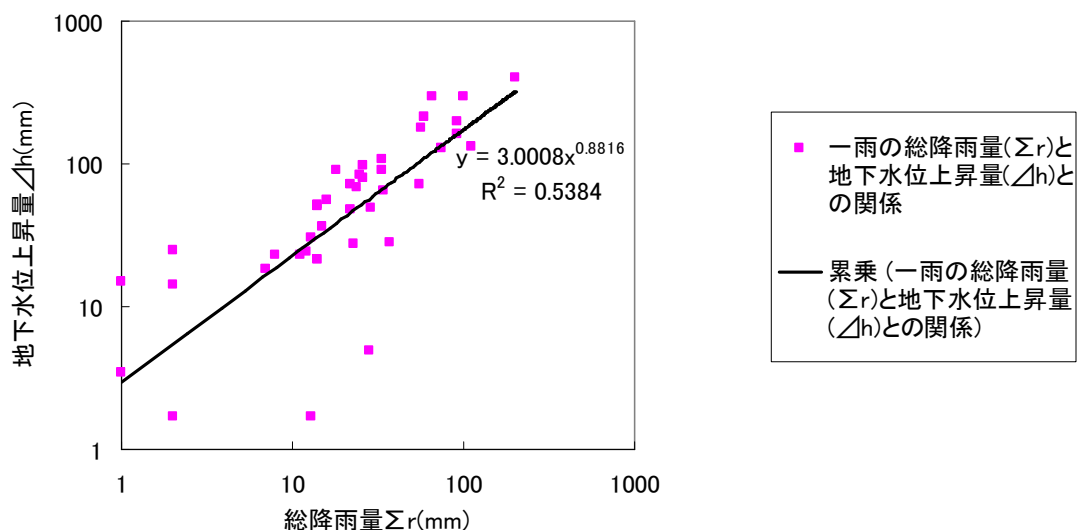


図 5-2-1

一雨の総降雨量 ( $\Sigma r$ ) 地下水位上昇量 ( $\Delta h$ ) との関係 (2009年 24時間間隔)

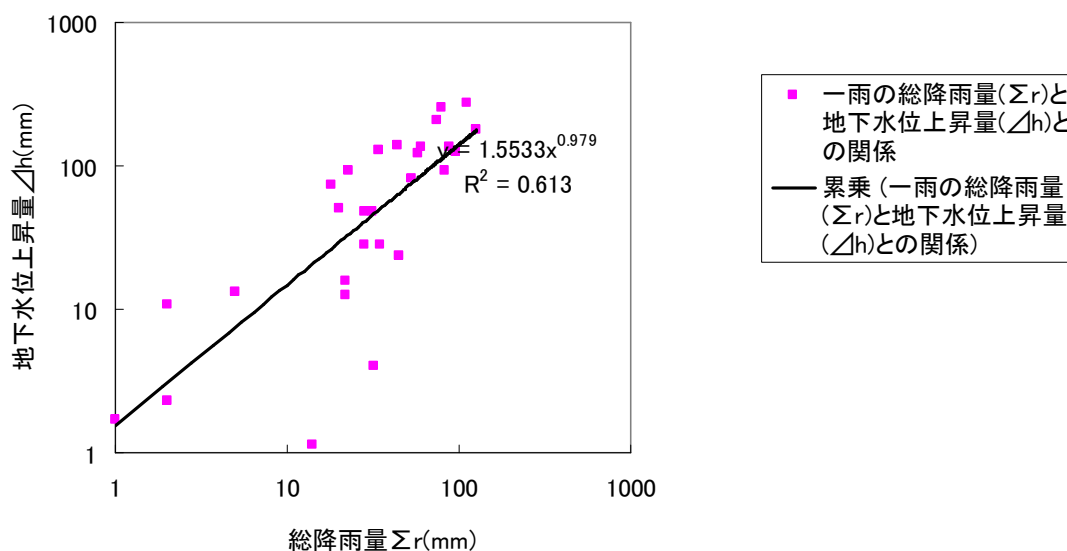


図 5-2-2

一雨の総降雨量 ( $\Sigma r$ ) 地下水位上昇量 ( $\Delta h$ ) との関係 (2010年 24時間間隔)

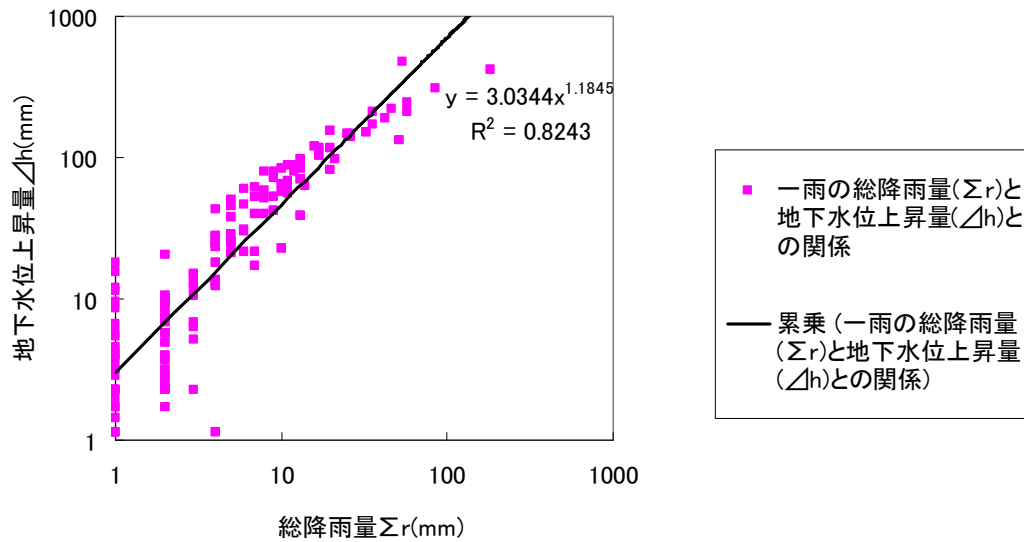


図 5-2-3

一雨の総降雨量 ( $\Sigma r$ ) 地下水位上昇量 ( $\Delta h$ ) との関係 (2009 年 1 時間間隔)

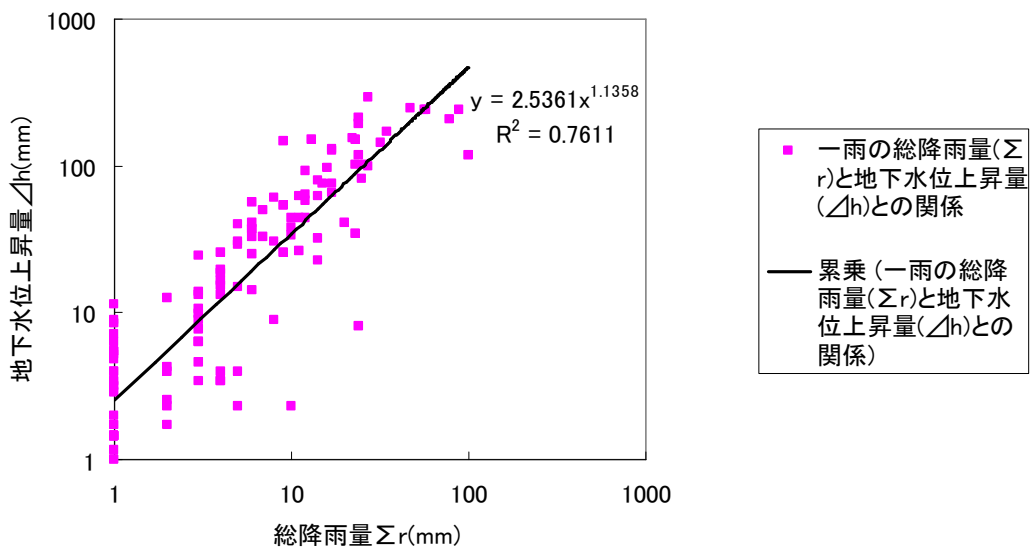


図 5-2-4

一雨の総降雨量 ( $\Sigma r$ ) 地下水位上昇量 ( $\Delta h$ ) との関係 (2010 年 1 時間間隔)



## シミュレーションで用いる係数に関する考察

測定間隔が 24 時間と 1 時間のものを比較すると、前者の方が 1 回の降雨に対する地下水上昇量が小さく出た。本湿地は流域が狭く下層土壌が礫質で水が浸透しやすい性質のため、降雨直後に地下水位が上昇してもすぐに降下してしまう。日積算降雨量が多い場合でも 24 時間間隔の測定では水位変動が出にくい。これは、図 1~4 の降雨に対する地下水上昇の相関において相関係数が測定間隔 1 時間の方が 24 時間よりも大きいことから証明できる。よって、ひとつの継続する降雨イベントの総降雨量に初期損失雨量を差し引いたものから地下水水位上昇量を割って求める有効空隙率は測定間隔 24 時間で大きい値 (2009 年 : 0.423、2010 年 : 0.532)、測定間隔 1 時間で小さい値 (2009 年 : 2010 年 : ) をとった。また、本湿地では降雨に対する応答が速いため、初期損失  $R_0$  は 0 とした。

地下水流入、地下水流出に関しては、実測値は用いていない。地下水流入量は 2009 年度北川卒業論文で用いた、約 18mm から試行錯誤的に求めた数値 (24 時間間隔で 2009 年 : 18.06mm/day、2010 年 : 17.70mm/day) を用いた。

1 時間間隔でのシミュレーションにおいて、地下水流入量は -0.022707mm/h(2009 年)、-0.033459mm/h(2010 年)となり、地下水流出量は 0.1199554mm/h (2009 年)、0.1147334mm/h(2010 年)となった。流入量が負の値をとり、両者の合計はとなった。つまり、地下水涵養量は地表面からの涵養量から 1 時間毎に 0.1426624(2009 年)、0.1481924(2010 年)ずつ減らしていくことになる。降雨時以外は地下水位が徐々に減っていく傾向があるため、地下水流出量の方が大きいという考え方は妥当であると考えられる。

また、計算地下水位の係数を変化させたものを図 5-2-5 と図 5-2-6 に載せた。変更点は以下のとおりである。

- 2009 年の計算地下水位において 2010 年で用いた係数を使用した。
- 2009 年の計算地下水位において横穴からの流出量を 0 とした。  
(横穴からの流出係数 0)
- 2010 年の計算地下水位において 2009 年で用いた係数を使用した。
- 2010 年の計算地下水位において横穴からの流出量を 0 とした。  
(横穴からの流出係数 0)

グラフから、計算地下水位の波形に大きな違いは出なかった。しかし、タンク内の水位が高くなった再現期間の後半になると、波形のばらつきが大きくなった。

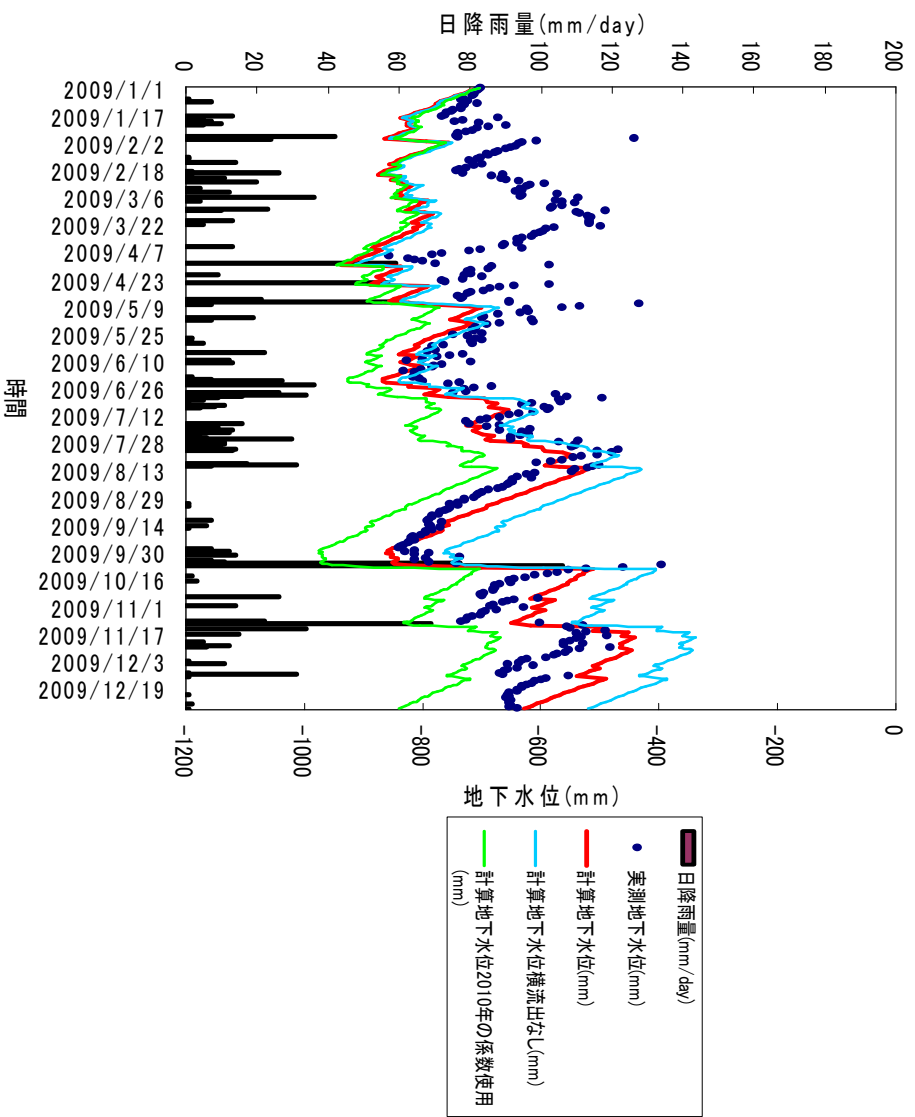


図 5-2-5 係数の違いによる計算地下水位の違い (2009年)

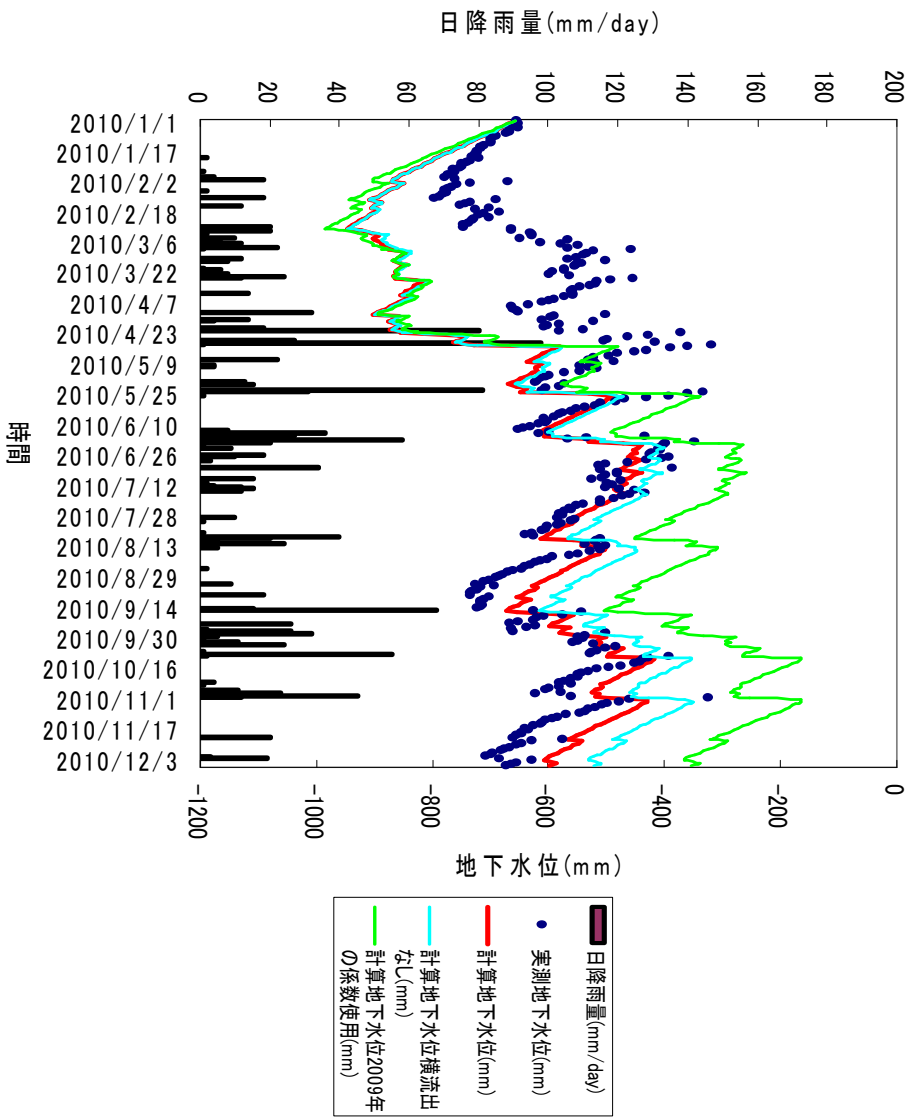


図 5-2-6 係数の違いによる計算地下水水位の違い (2010年)

### 5-3 水収支に関する考察

測定期間内(2010/08/06~2010/10/29)における水収支の結果を以下に示す。

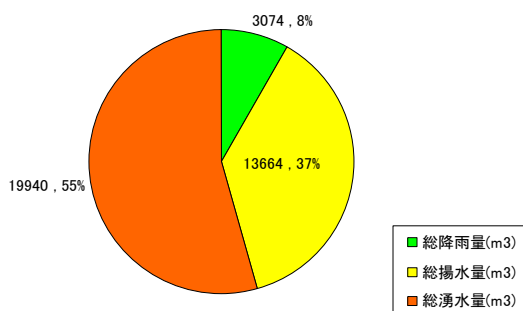


図 5-3-1 流入成分

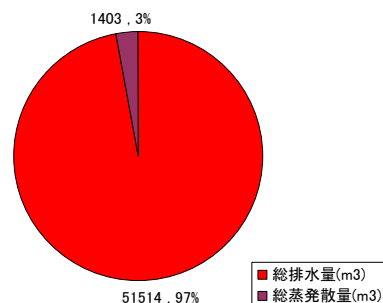


図 5-3-2 流出成分

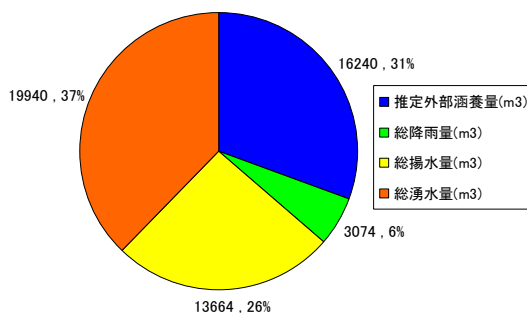


図 5-3-3 流入成分 (外部涵養を考慮)

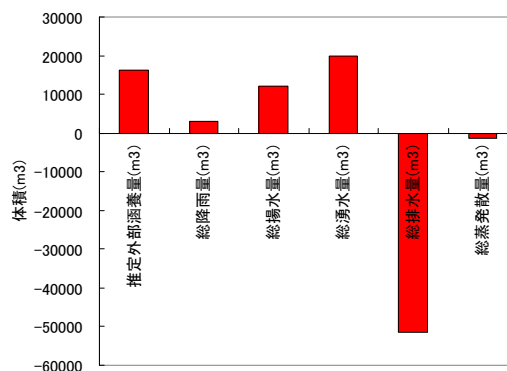


図 5-3-4 測定期間内における金生水沼沢植物群落の水収支

#### 水収支における外部涵養の可能性について

水移動のメカニズムとその量的把握のために水収支は有効ではない。しかし、その代わりに水収支は考え方の誤りを減らし、相違の原因を特定するのに効果がある。水収支において、流入と流出は均衡するはずであるが、調査期間中の測定できた総流出量は総流入量を上回った。ここで、不足した流入量全てを外部から流入してきた推定外部涵養量とすると、その量は 16240 m<sup>3</sup>となり、総流入量の約 30.7%を占める。一方、懸崖からの総湧水量は 3074 m<sup>3</sup>で 37.7%となり、これら二つを足したものは総降雨量と総ポンプ揚水量を足したものより量が多いことが分かる。実際の量は不明であるが、総流入量に対する外部涵養量は多いように推測される。懸崖からの湧水は沼沢地南側の淵を通り流出堰から出て行く。この湧水を沼沢地の植物植生区域に向けて小水路を設置して水を行き渡らせることで、水の有効活用に繋がるのではないかと考えた。

## 地下水位と沼沢内水位の関係について

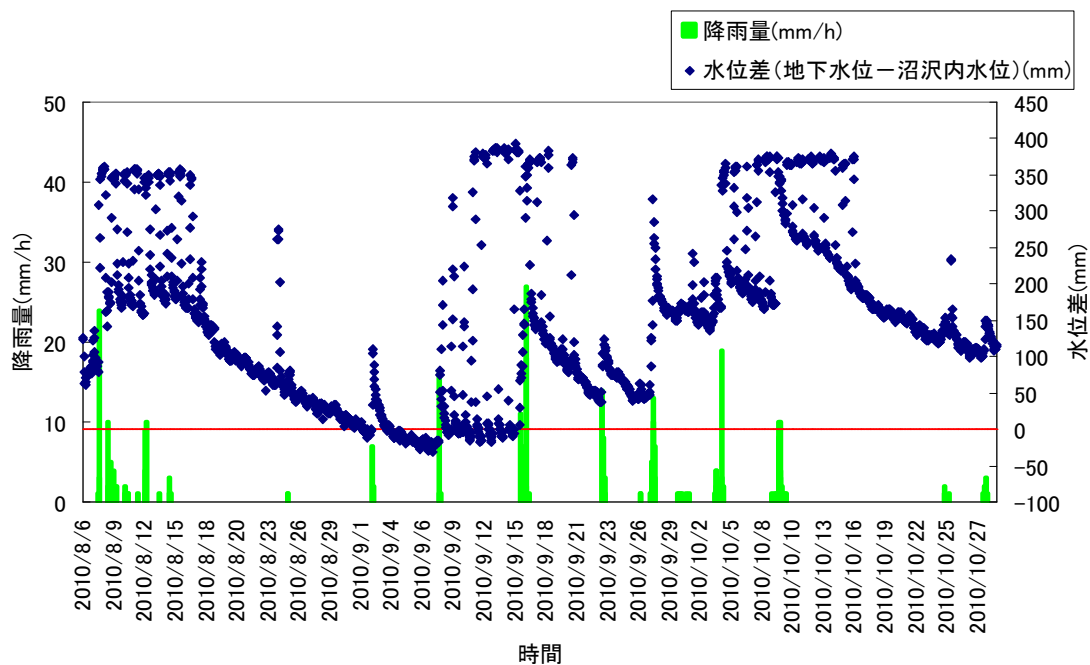


図 5-3-5 降雨量と水位差の関係

図5-3-5では地下水位と四角堰での観測水位である沼沢内水位の水位差に着目し、変動を示した。図より、沼沢内の水位よりも地下水位の方が高くなっている時間が多いことが分かる。そして、まとまった降雨後、地下水位は徐々に下がっている。この時、水は地下へ浸透していることに加え、沼沢地から四角堰方向に流出していることが考えられる。



# 第 6 章

## 結 論

地下水位シミュレーションの計算と水収支の算定をして、次のような結論に至った。

- 地下水位はモデルを用いておおむね再現することができた。シミュレーションに用いる係数は測定間隔の違いで水位変化のグラフの波形に違いが見られた。
- 本論では先に有効空隙率を求め、その後で他の係数を変化させることで地下水位変化の実測値と理論値とのずれを少なくすることができた。
- 地下水位、湧水量、排水量は降雨があるとすぐに上昇することが確認できた。
- 地下水位、排水堰の水位は沼沢内の揚水ポンプ運転の影響を受けていることが確認できた。
- 水収支は総流出量が総流入量を上回った。流入と流出が釣り合っていると考えた場合、外部涵養によって沼沢地が潤った状態になっているということである。金生水沼沢では流出口に堰板を設置した状態であるため、沼沢地には常に水が溜まった状態で地下水位も高くなっている。
- 沼沢内の水位は流出口の堰板によってほぼ一定の高さを保っているのに対し、地下水位はポンプ運転期間、休止期間問わず無降雨期間が長い場合は少しずつ低下している。
- 懸崖からの湧水を測ることで、流入成分のうち、外部涵養量の一部の量を知ることが出来た。

## 謝辞

最後に、この修士論文の作成にあたり、加治佐隆光教授ならびに近藤雅秋助教には甚大な御指導と御協力をしていただいたことに深く感謝いたします。また、鈴鹿市文化課の皆様にはポンプ運転時間や堰板高さの変更等のお知らせや、水位計設置作業に協力していただいたことに感謝します。同研究室の方々には現地調査に協力していただいたことに感謝します。

## 参考文献、資料

坪井秀幸（2009）「金生水沼沢植物群落における水収支」三重大学卒業論文

北川智也（2010）「金生水沼沢植物群落におけるタンクモデルを用いた地下水解析」三重大学卒業論文

堤敦（2000）「地下水位上昇期の観測値を用いた雨水涵養モデルの検討」

日下部重幸、檀和幸、湯城豊勝（2002）『水理学』コロナ社

金丸昭治、高棹琢馬（1975）『水文学』朝倉書店

鈴鹿市（2009）『大発見！鈴鹿市の自然 ―鈴鹿市の自然ガイドブック―』

鈴鹿市文化振興部文化課（2006）『金生水沼沢植物群落 平成 18 年度調査記録』

鈴鹿市文化振興部文化課（2005）『金生水沼沢植物群落 平成 17 年度調査記録』

鈴鹿市文化振興部文化課（2004）『金生水沼沢植物群落 平成 16 年度調査記録』

鈴鹿市文化振興部文化課（2003）『金生水沼沢植物群落 平成 15 年度調査記録』

三重県営安塚地区ほ場整備事業概要書 三重県北勢県民局四日市農林事務所

環境省（2008）湿地の生態学的特徴を維持するための地下水管理に関するガイドライン