

## インドネシア・中央カリマンタン熱帯泥炭湿地林における地下水流動解析

### Groundwater flow Analysis of a Tropical Peat Swamp Forest in Central Kalimantan, Indonesia

城戸由能・神田亜希子<sup>(1)</sup>・峠嘉哉<sup>(2)</sup>・北側有輝<sup>(2)</sup>・中北英一

Yoshinobu KIDO, Akiko KANDA<sup>(1)</sup>, Yoshiya TOUGE<sup>(2)</sup>, Yuki KITAGAWA<sup>(2)</sup> and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学工学部地球工学科

(2) 京都大学大学院工学研究科

(1) Faculty of Engineering Undergraduate School of Global Engineering, Kyoto University

(2) Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

In 1980s, 'Mega Rice Project' for the expanded agricultural production was planned in Indonesia, and so many drainage canals have been constructed for irrigation and drainage of tropical swamp peatland in Kalimantan Island. But it brought the groundwater level drawdown in the drained swamp peatland, so that it caused a huge amount of carbon dioxide emission by forest fires and soil degradations. In order to conserve the groundwater level by the canal water level management, the canal backfilling and/or gate construction should be discussed in the civil engineering viewpoint. In this study, two-dimensional groundwater flow model related with the river flow condition and the land surface process was integrated for quantitative evaluation of the effect of canal repair management. Simulation results of groundwater level drawdown by the canal construction suggest the conservation of the hydrological environment and the CO<sub>2</sub> emission reduction by canal management in the tropical swamp peatland.

**キーワード:** 熱帯泥炭湿地林, 地下水流動解析, 陸面過程モデル, インドネシア・中央カリマンタン, メガライスプロジェクト

**Keywords:** tropical peat swamp forest, groundwater flow analysis, land surface model, Central Kalimantan in Indonesia, Mega-Rice Project

#### 1. 研究の背景と目的

赤道直下に位置するカリマンタン島では, 1980年代からインドネシア政府により大規模な土地開発を目的としたメガライスプロジェクトが実行された. 開拓民をカリマンタン島へ移住させ, 天然の熱帯雨林を焼き払い, 稲作やパーム油・アブラヤシのプランテーションなどが行われた. この際, 灌漑や熱帯

泥炭湿地の排水のために人工排水路が造成された. 排水された泥炭湿地では土壌の分解が促進され, 地表表層下に蓄積されていた酸性土壌が出現し, 結果として農耕不適となった土地は荒廃した (高田, 2006). このような農地土壌改良の失敗や, 開拓民移住, 生活基盤資本整備の失敗によりメガライスプロジェクトは中断され, その後, 放置されて正しい管理が行われなくなった土地では排水による泥炭湿

地表面の乾燥化が進行した。また、伝統的に行われていた焼畑農業は、乾燥化により土壌の再生サイクルが乱れ持続可能な焼畑農業のサイクルが継続しにくくなり、より短期間での焼畑が実施され、周辺森林への延焼も増加した。さらに自然発火による森林火災が多発しており、土壌の乾燥化の影響により火災が長期化しやすいといった影響が出ている。

二酸化炭素の排出量削減のために、持続可能で商品価値の高い樹種を用いた植林活動、効果的な消火活動の検討などが行われている。またメガライズプロジェクトで造成した人工排水路の水位管理も重要な手段の一つである。地下水位低下と二酸化炭素排出量には相関関係があると報告されており（井上, 2012）、ホットスポットと呼ばれる発火点は、人工排水路付近で地下水位が低下し乾燥化が進んだと考えられる地区で多発していることも報告されている。

中部カリマンタン州には各地に様々な規模の排水路網が張り巡らされている。大規模なものは幅約30mほどであり、泥炭層地盤を約3m掘削し、掘削した土は堤体盛土に使用されている。泥炭湿地の地下水位を回復させるため、水位低下の原因となる排水路水位の管理方法が検討されている。開発された土地を元の自然な状態に戻す方策として、排水路を完全に埋め戻し建設前の状態に近づけるという提案があったものの、排水路を水運として活用している地域住民に受け入れられていない。そのため地域住民の舟運用小型船が通過可能な範囲での水路幅の縮小および水門の併用が新たに提案されている。開削時の盛土や周辺地域の土砂石資源などを活用することでコストを抑え、現地住民の理解と協力を得ながら恒久的な排水路水位管理を目標としている。地下水位を回復させるための効率の良い対策を立てるには、地下水位の変化を定量的に評価することが必要不可欠である。

本研究では、対象領域付近の降水量や河川水位等の観測データを基に、人工排水路建設に伴う地下水流動への影響を定量的に評価するための基礎的な検討を行うことを目的とする。具体的には、メガライズプロジェクトで造成された排水路網が現在でも残る中部カリマンタン州・パランカラヤ付近の排水路網を対象領域とし、連続式とDarcy則を基礎式とした飽和平面二次元地下水流動モデルと、大気側からの気象強制力を条件に地表面の放射収支・水収支・熱収支を解く陸面過程モデルSiBUC（Tanaka, 2004）を用いて、地下水位の現状再現計算を行った。

## 2. 対象領域の概要と関連研究

### 2.1 対象領域の選定

本研究では排水路造成による地下水位への影響評価を行う対象を、インドネシア・カリマンタン島中部カリマンタン州の中心都市であるパランカラヤ市南部とした。地球規模課題対応国際科学技術協力（2004）の「インドネシアの泥炭・森林における火災と炭素管理」プロジェクト対象地域であり、インドネシア政府が実施する地球温暖化抑止のための泥炭地管理モデル地区として選定されている。カリマンタン島の中央から南部のジャワ湾まで伸びるカハヤン川とセバングウ川、両河川を結ぶカランプンガン水路および両河川に平行して南下するタルナ水路の二つの主要な排水路を含んでいる[Fig. 1]。排水路が大規模なもので地下水への影響が明瞭に出やすいと推測されること、また既往調査研究の蓄積があり泥炭層の構造や水文観測データが利用可能であることから、排水路の地下水位環境への影響評価をする対象領域として中部カリマンタン州が適切であると判断した。

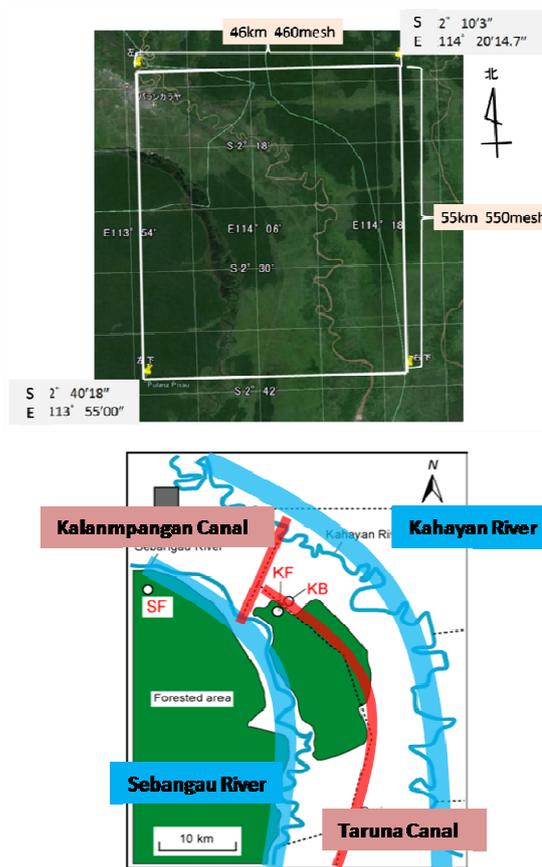


Fig. 1 Target area of this study (Blue: River, Red: Canal)

### 2.2 観測データ

気象データに関しては、セバングウ川中流のTjilik Riwut空港で降水量の連続的な観測が行われている。2001～2010年の日観測データの利用を試みたところ

全年においてデータの欠損がみられ、特に2001～2006年はデータ欠損が年間で150日以上と非常に多く、適切な補間を行うのが困難であり、強い不確実性を含む恐れがあった。そこで欠損が20日以下である2007～2010年のデータに補間を行うことで利用した。

河川水位はカハヤン川3地点とセバンガウ川1地点の2009～2011年の日観測データを利用した。しかしそれぞれの観測地点のGPS位置情報と衛星観測による地形・標高・土地利用等のデータとの整合性が低いいため、観測地点の標高を特定しにくいという問題点があった。本研究で河川水位に関しては季節ごとの相対変化に重点を置くこととし補正を行った。補正方法の詳細については3.3で述べる。

またこれらの気象観測値と河川水位観測値が共通して存在する期間は2009年と2010年のみであるが、他の年降水量データと比較したところ、2009年は少雨年、2010年は多雨年であり、地下水への影響を評価する上で適切であると判断した。しかし、今後長期間の解析を行う場合は観測値以外の全球データ等を参考にする必要はある。

### 3. 基礎データ

本研究では、カハヤン川・セバンガウ川を含む南北55km、東西46kmを解析対象範囲としている。その範囲は「南緯2度10分6.3秒、東経113度55分00秒」の地点を北西端、「2度40分18秒、東経114度20分14.7秒」の地点を南東端として、空間解像度を100mとした550×460のメッシュごとに計算している。対象領域をFig. 1に示す。また後述の透水係数等を考慮したうえで時間解像度を1時間とし、解析を行った。

モデル解析に必要な基礎データの概要を以下に示す。

#### 3.1 標高

地表標高については1km解像度のSRTM衛星地形全球データから対象領域を切り出した[Fig. 2]。100mメッシュの地表標高データを作成するため、複数の手法での内挿を試みた。

まず線形内挿したところ[Fig. 3] [Fig. 4]、所々に5～10m程度の不自然な起伏がみられたため適切ではないと判断した。次に逆距離加重内挿方法(Inverse Distance Weighted:以下IDW)で補間を行った。IDW内挿法は周辺の値に対し距離の累乗に反比例した重みをつけその影響力を求める方法である。影響を与える範囲を変更し、確認のため対象領域より広く切り取って比較した結果をFig. 5に示す。ある地点の直近2, 3, 4, 5メッシュまでの影響を考慮し内挿した場

合の標高をそれぞれ(a), (b), (c), (d)に示す。なお今回は距離累乗値を1とし、距離に反比例した重み付けを行っている。これより直近2メッシュ(a)では線形内挿と同様に不自然な起伏が残るが、直近3メッシュを考慮した場合、全体的に平滑化されることが確認される。直近4メッシュ以上では過剰になめらかであり地形の特徴が反映されないと判断し、(b)を解析で用いることとした。Fig. 3で示す断面で線形内挿とIDW内挿を比較したものがFig. 4であり、線形内挿においてみられた数カ所の急激な陥没が解消され、自然な地形が表現できている。よって直近3メッシュの影響を受け距離に反比例する重みをつけて内挿する方法を利用した。河川や水路部の標高補正に関しては3.3と3.4で後述する。

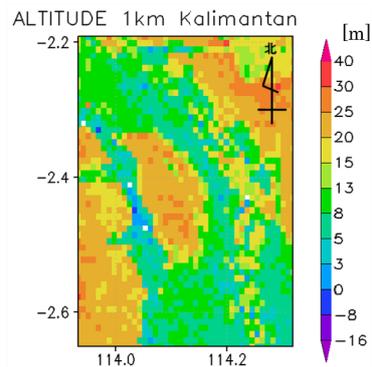


Fig. 2 Surface altitude (SRTM 1km resolution)

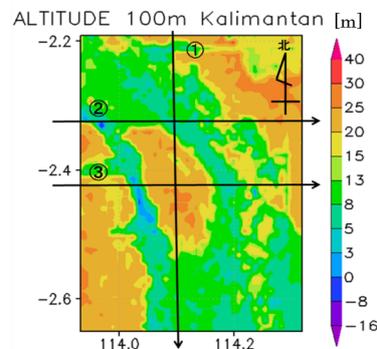


Fig. 3 Surface altitude (liner interpolation)

さらに帯水層の基盤標高を設定した。基盤標高とは地下水帯の下部境界を形成する不透水層最上部の標高を意味し、地下水がそれ以上深い地層にほとんど浸透しにくいとされるものである。既往研究では対象領域の泥炭ドームは下層の砂や粘土層がほぼ水平に堆積した土壌層の上に盛り上がるように泥炭層が堆積していると報告されている(井上,2012)。さらに、熱帯泥炭湿地林の特性として対象領域における地下水位は、一年を通して地表から非常に近いことが知られており、基盤標高を十分深くすることで、

を考慮せずに、地下水位変動を確認できると考えられるので、全メッシュにおいて一律に-15.0[m]と設定した。

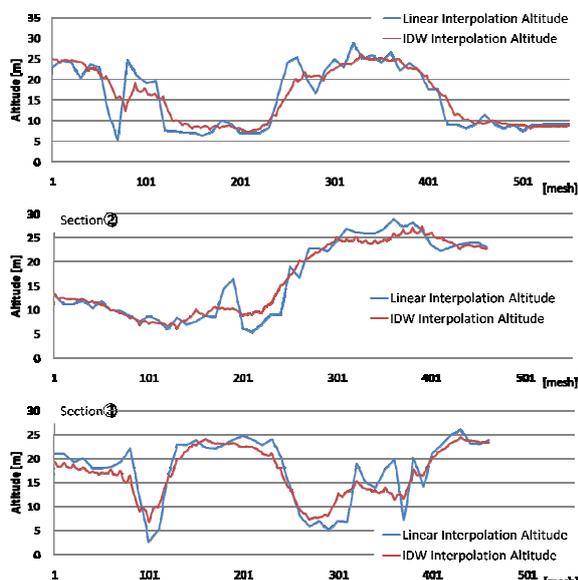


Fig. 4 Surface altitude (Blue: liner interpolation, Red: IDW interpolation)

### 3.2 降水

前述の通り、2001～2006年の日降水量についてはデータの欠損が非常に多く年間100日を超えるため、本研究では2007～2010年の日降水量データを利用した。しかしこの4年間にもデータの欠損が年間13～20日間みられたため、データが存在する日数に限定した月ごとの日平均降水量を算出し、欠損している日に与えるという補間を行った。補正前と補正後の年積算降水量をTable 1に示す。対象期間内では2009年は少雨年、2010年は多雨年であったことが確認された。日降水量を24時間で分割し時間降水量とした。

Table 1 Lack of data and Annual precipitation before/after revision

	2007	2008	2009	2010
<b>Lack of data [days]</b>	<b>20</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>17</b>
<b>Annual precipitation (before revision)[mm]</b>	<b>3613</b>	<b>2795</b>	<b>2592</b>	<b>4361</b>
<b>Annual precipitation (after revision)[mm]</b>	<b>3880</b>	<b>2869</b>	<b>2741</b>	<b>4598</b>

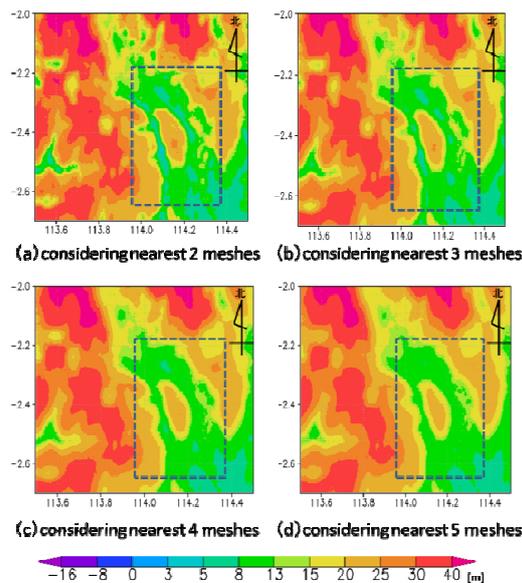


Fig. 5 Surface altitude (IDW interpolation)

### 3.3 河道条件の設定

#### (1) 河道位置と標高の設定

カリマンタン島における詳細な土地利用データを入力することができなかったため、衛星画像データを参考にしつつ、SRTMの標高データを基に、河道流下経路の大きな形状を再現することとした[Fig. 6]。対象領域の衛星画像ではカハヤン・セバングアの両河川とも細かく蛇行を繰り返す複雑な流下形状を示している。しかし、SRTM標高データは1km解像度であるため蛇行部分は再現されておらず、標高の低い部分で極力なめらかな勾配になるように設定した。

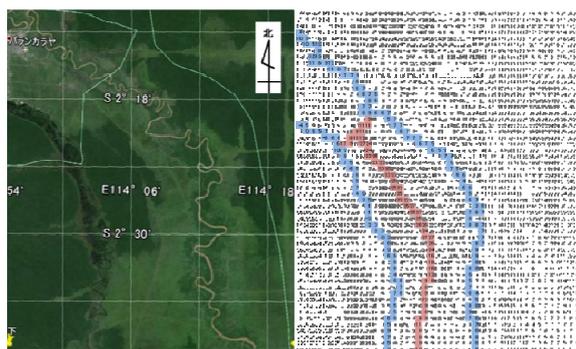


Fig. 6 Location of the rivers and canals (Left: aerial photograph, Right: SRTM 1km surface altitude data)

#### (2) 河川水位

河川水位の設定には、2009～2011年にカハヤン川周辺の3地点とセバングア川周辺の1地点でそれぞれ

観測された日水位を利用している。2009～2011年の日水位観測値をFig. 7に示す。観測地点のGPS情報と衛星による標高および土地利用データが整合しなかったため、本研究では季節的な相対変化のみを考慮することとした。河床のための標高の掘り下げを一律に10mとし、氾濫が起こらないとして、両河川の最高水深が10m以下となるように補正を行った。カハヤン川の水位を観測値より一律に9m低く、セバンガウ川の水位を観測値より一律に10m低く設定している。また時間内挿は行っておらず、24時間一定の日水位を与えている。

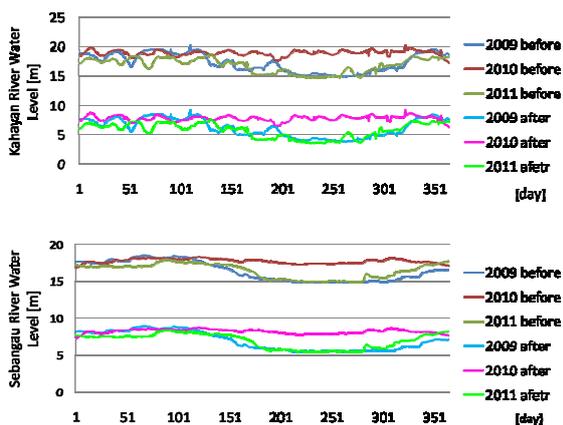


Fig. 7 River water level before/after revision (Upper: R. Kahayan, Lower: R. Sebangau)

### 3.4 水路条件の設定

#### (1) 水路位置と標高の設定

河川位置と同様に衛星画像を参考に設定した。Fig. 6に衛星画像と、本研究で設定した河川・水路メッシュの位置との比較を示す。中央に存在する泥炭ドームの北部をカランパンガン水路が通り、両河川に平行にカランパンガン水路の中央付近から南へ通るのがタルナ水路である。

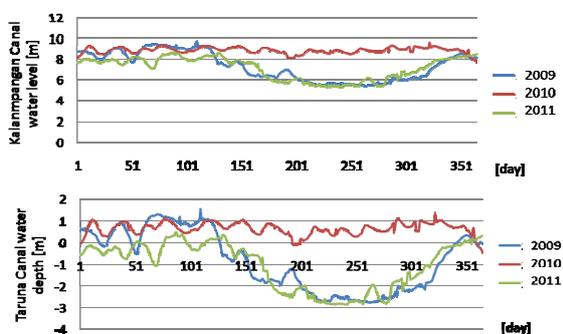


Fig. 8 Upper: Kalanmpangan Canal water level, Lower: Taruna Canal water depth

### (2) 水路水位

両水路の水位観測データが得られなかったため、カランパンガン水路水位は両側の河川との分岐点における水位の平均とし、タルナ水路水深はカランパンガン水路との分岐点における水深と同期し、かつ等しいと仮定した。Fig. 8にカランパンガン水路水位、タルナ水路水深を示す。

### 3.5 地下水流動に関するパラメータ

本研究で設定した各種パラメータをTable 2に示す。河床・水路床の透水係数と難透水層厚に関しては北側ら（2014）が京都盆地における地下水流動解析で使用した日本国内の文献値を与えたが、カリマンタン島の河床や堤防の締め固めは日本ほど頑丈にされておらず、特に人工水路については周辺土壌との間の通水性が高いと考えられる。今後、現地の河道や水路に関する情報を収集し、パラメータを変更するとともに、河床と水路で異なるパラメータ設定の検討も必要である。浸透能に関しては、踏査記録にある現地写真を参照したところほぼ森林か農地であったため、上記と同様に日本国内における森林の浸透能パラメータを使用した。

地下水帯水層の透水係数と有効間隙率に関しては、清水建設ら（2011）のインドネシアにおける地下水水面変動解析や、三宅ら（2005）によるカリマンタン熱帯泥炭の有効間隙率調査を参考に数値範囲を設定したうえで感度解析を実施した。5.2(1)で後述する。

帯水層内の透水係数および有効間隙率については、対象領域において土質データの空間分布が得られないので、本研究では河川部以外の全メッシュにおいて等しい値を与えている。

Table 2 Parameters using for groundwater analysis

Item	Parameter
Coefficient of permeability [m/s]	$5.0 \times 10^{-4}$ (by sensitivity analysis)
Effective porosity	0.5 (by sensitivity analysis)
Infiltration capacity (river) [mm/h]	(initial) 0.1, (final) 0.1
Infiltration capacity (forest) [mm/h]	(initial) 100, (final) 60

## 4. 仕様モデルの概要

### 4.1 解析の流れ

本研究では、地下水流動モデルをメインとしているが、本研究では雨季乾季の違いによる地下水涵養量の季節変化を正確に再現するため、陸面過程モデルSiBUCを利用して、蒸発散や地表到達降水量を算定する。対象領域は森林部が多く存在するため、蒸散と遮断作用が強く働き、観測された降水量よりも地下水に涵養される水量は少ないと考えられる。そ

ここでSiBUCによる水収支解析に基づき地表到達降水量を計算し、最終的には対象領域の降水量を1km解像度の分布で与える。また、同時に出力される流出量や蒸発散量を元に対象領域での水収支解析を行う。4.ではそれらのモデルの構造を説明するとともに、5.以降で地下水の現状再現計算を行った内容を紹介する。

本来はSiBUC-河川(水路)流動-地下水モデルの入出力は相互に関連しているため、接続した解析が必要であるが、本研究では、まず地下水影響評価に着目したため、地下水モデルの境界条件・入力値として陸面過程を設定しており、モデル間では一方にデータをやりとりしている。将来的にはモデル間の関連する要素を相互にやりとりする総合的水循環モデルに発展させることを目標とする。

## 4.2 地下水流動の基礎式およびその概要

### (1) 飽和平面二次元地下水流動モデル

本研究の地下水流動モデルには、飽和帯だけを対象とした飽和平面二次元の地下水流動モデルを用い、その基礎式として連続式とDarcy則を用いた。

基礎式は、以下の式で表される。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(h-s) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(h-s) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + \varepsilon \quad (1)$$

$\lambda$ : 有効間隙率,  $h$ : 水位[m],  $k$ : 透水係数[m/s],  $s$ : 基盤高[m],  $\varepsilon$ : 涵養量と揚水量と蒸発散量,  $x, y$ : 空間座標,  $t$ : 時間とする。  $\varepsilon$  で示される涵養量には地表面からの浸透および河川河床部を通しての交流現象が含まれている。

数値計算の境界条件としては、基盤標高の高低差に従って流出入を算定する分水嶺境界条件と流量境界条件の二種類の条件を用いている。現況再現計算では、初期条件は基盤標高に一定の水位を足した状態で数年間のスピニング計算を行い、その後、本計算を実施した。空間差分間隔は100[m], 時間差分間隔はCFL条件の考え方に基づき 3,600[s]を与えた。また、くり返し前後の水位差の収束判定条件を  $1.0 \times 10^{-3}$  [m]以下とした。

### (2) 地表からの地下水涵養量算定方法

栗津ら(2012)の研究成果に基づき、Hortonの浸透能式に基づいて地表からの降水涵養量を算定する。Hortonの提唱(1939)によると、地面は土質や地被条件に応じて決まった浸透能の挙動性質を持っており、地面に達した雨水はここで浸透分と地表流下分に分けられる。降雨によって浸透能は低下し、降雨強度が浸透能を越すようになると、浸透しない部分

は地表流下となり、浸透能以上の降雨の地下水への涵養は起こらない。

今回用いた浸透能式は、状況によって3つの式で表されるものとする。

#### I. 降雨強度が浸透能より小さいとき

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-\frac{f_c}{S_m} t} \quad (2)$$

#### II. 強度が浸透能より大きいとき

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-\frac{f_0}{S_m} t} \quad (3)$$

#### III. 降雨がないとき (浸透能の回復)

$$f(t) = f_0 + (f_c - f_0) e^{-\frac{f_0}{10S_m} t} \quad (4)$$

ここで、 $f$ : 浸透能,  $f_0$ : 初期浸透能,  $f_c$ : 最終浸透能,  $S_m$ : 最大表層水分保留量,  $t$ : 降雨時間である。

雨水浸透能の評価のために、先行研究では、初期浸透能、最終浸透能、最大表層水分保留量について、斉藤ら(2005)、向井ら(2009)の文献を参考にして土地利用毎に一定の値を定めている。本研究では森林に相当するパラメータ値を参考にして感度解析を実施した。

地表からの地下水の涵養量を算定するときは、降雨量と浸透能とを比較し、降雨量<浸透能のときは降雨量が涵養量、降雨量>浸透能のときは浸透能の値が涵養量とする。

また、Hortonの浸透モデルでは地表面が乾燥している状態では、初期降雨は地下に浸透せず表層土壌に保留される初期損失が考慮されている。対象領域は年間を通して降水量が多い熱帯泥炭湿地であること、降水量データが日雨量にもとづいて与えることを考慮して、無降雨日の後の降雨についてのみ浸透域の初期損失に相当する3[mm]を与えた。

### (3) 河川・水路と地下水間の交流現象の表現

河川・水路メッシュ上では、河川や水路から地下に涵養するとともに、水位低下時には周辺地下水から河川・水路へ流出する交流現象が存在する。特に本研究の対象領域では人工排水路の建設に伴い地下水・土壌水が排水され、周辺土壌の乾燥化が促進されたことが問題となっている。本研究では、成戸ら(2000)が用いたモデルを参考にして涵養量を計算

する。このモデルは、河床に薄い難透水層が存在することを仮定して、その透水係数から河川の鉛直浸透量を評価する。

河川水面と地下水面の水位差を  $\Delta h$  [m]、難透水層の厚さ  $a$  [m]、難透水層の透水係数  $k$  [m/s] をパラメータとして、(4.2.19)式を用いて鉛直浸透量  $q$  を求める。地下水位が河川水位よりも高くなり、 $\Delta h$  が負の値になるときは、逆に地下水から河川に流出しているとして、双方向の水のやり取りを表現した。

$$q = k \frac{\Delta h}{a} \quad (5)$$

河川水位については、上述の通りカハヤン川・セバンガウ川それぞれ1地点の日観測水位を時間的な内挿を行わずに1時間ごとに設定した。また、パラメータについては文献値である  $a = 0.3$  [m]、 $k = 0.036$  [m] を採用したが、自然河川および人工水路の河床や堤防のり面状態を考慮して、数値設定を検討する必要がある。

### 4.3 地表到達降水量の算定方法

#### (1) 陸面過程モデルSiBUCの概要

陸面過程モデルは、メッシュ毎の鉛直一次元方向における地表面付近の水・熱収支を解析するモデルであり、蒸発散や樹冠遮断が考慮されている。今回用いた陸面過程モデルSiBUCは、メリーランド大学ゴッダード宇宙飛行研究所(GSFC)で植生モデルSiB (Sellers et al., 1986) をベースとして開発された水文モデルで、農地における灌漑・排水の効果や、都市・水体における物理的プロセスを陽に取り扱える数少ない陸面過程モデルの一つである。一年を通して温暖で森林部が多いカリマンタン島では樹冠遮断や蒸発散作用が強いと考えられ、SiBUCを本研究で使用することでそれらを高精度に推定できるという利点がある。

#### (2) 使用した入力データ

気象強制力に関しては、カリマンタン島は観測データが限られた地域であるので、観測値に加え全球で用意されている気象データプロダクトを利用した。JRA55は気象庁が公開している再解析データであり、全球1.25度解像度で全球の再解析データについて1958年以降55年間分を用意している。また土地利用や植生の状態を示す地表面条件は、陸上での様々な水文プロセスに大きく影響を与える重要なパラメータである。土地被覆データにはUSGSが公開している全球1km解像度データであるGLCCversion2を用いた。土地被覆以外の植生・土質といった地表面条件には、ECOCLIMAPversion1を用いた。

ECOCLIMAPはMeteo Franceによって公開されているデータで、土地被覆データセットと気候図を基にして植生や土壌物性に関するデータセットを解像度1kmで用意しており、一般的な陸面過程モデルでの解析に必要なデータは全て揃えている。

以上のデータを用いて、5.1でSiBUCによる水熱収支解析を行った。

## 5. 地下水流動モデルによる再現計算

本章では、4.で説明したモデルを用いたシミュレーションを行い、排水路造成による地下水への影響を検討する。まずSiBUCによる水・熱収支解析の検証を行った。次にその結果を用いて平年の地表到達降水量と河川水位を元に、泥炭湿地の地下水流動に関するパラメータを設定するための感度解析をしながら水路造成前の再現計算を行った。また、SiBUCで出力した地表到達降水量を分布で与えるを試みた。そして決定したパラメータに基づき水路造成による地下水位の影響評価と考察を行う。

### 5.1 SiBUCによる水熱収支解析

SiBUCを用いて2007~2010年の解析を行った。SiBUCの出力結果のうち、水収支解析を行うにあたり必要な降水量、地表到達降水量、蒸発散量、流出量、基底流出量の5項目と、それらから推定される表面流出量、地下浸透量の2項目の結果、また降水量を1としたときの各項目の割合をTable 3に示す。SiBUCを用いた水・熱収支解析では、降水量の約84%が地表到達降水量、35%が樹冠遮断を含む蒸発散量、54%が表面流出量、5%が地下水から河川・池沼への基底流出量であるという結果となった。ここで地表到達降水量とは、樹冠遮断量を考慮した降水量のことである。

Table 3 Water balance analysis by SiBUC (Lower: rate)

	2007	2008	2009	2010	Average
①Precipitation[mm/y]	3882	2869	2742	4599	3523
②Precipitation reaching the surface[mm/y]	3263	2367	2262	3899	2948
③Evapotranspiration[mm/y]	1251	1203	1279	1202	1234
④Total runoff[mm/y]	2456	1449	1269	3200	2094
⑤Base runoff[mm/y]	193	194	188	194	192
⑥Surface runoff(④-⑤)[mm/y]	2263	1254	1080	3006	1901

	2007	2008	2009	2010	Average
①Precipitation[mm/y]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
②Precipitation reaching the surface[mm/y]	0.84	0.83	0.83	0.85	0.84
③Evapotranspiration[mm/y]	0.32	0.42	0.47	0.26	0.35
④Total runoff[mm/y]	0.63	0.50	0.46	0.70	0.59
⑤Base runoff[mm/y]	0.05	0.07	0.07	0.04	0.05
⑥Surface runoff(④-⑤)[mm/y]	0.58	0.44	0.39	0.65	0.54

次にカハヤン川における流出高を利用して検証を行った。辻ら（2012）はカハヤン川流域の観測所流域において水収支法によって推定された蒸発散量とHamon法、Thornthwaite法によって算出された可能蒸発散量との比較を行い、妥当性を検証した上で降水量、流出高、蒸発散量といった水収支の定量化を行っている。辻らの実測に基づいた水収支解析とSiBUCによる水収支解析結果、また降水量を1とした場合の各項目の割合をTable 4に示す。なお辻らは降水量として、本対象領域付近の観測値、カハヤン川上流の観測値、GPCPデータの3種類を用い比較したところ、カハヤン川上流の観測値のみを用いて算出した蒸発散量が妥当であるとしていたため、Table 4にはその結果を示している。両解析結果共に、泥炭湿地の降水は地下にほぼ浸透することなく約60%が流出し、蒸発散は約35%であるということが確認された。このことからSiBUCによる水収支解析は実測に基づく水収支解析と整合性があると判断し、5.2以降で行う平面二次元地下水流動モデルを用いた地下水流動計算の降水量として、SiBUCから出力される地表到達降水量を利用することとする。

Table 4 The comparison of water balance analysis by SiBUC and observation (Lower: rate)

	Analysis by SiBUC	Analysis by observation
Precipitation [mm/y]	1.00	1.00
Total runoff [mm/y]	0.59	0.63
Evapotranspiration [mm/y]	0.35	0.37

	Analysis by SiBUC	Analysis by observation
Precipitation [mm/y]	3523	3878
Total runoff [mm/y]	2094	2438
Evapotranspiration [mm/y]	1234	1440

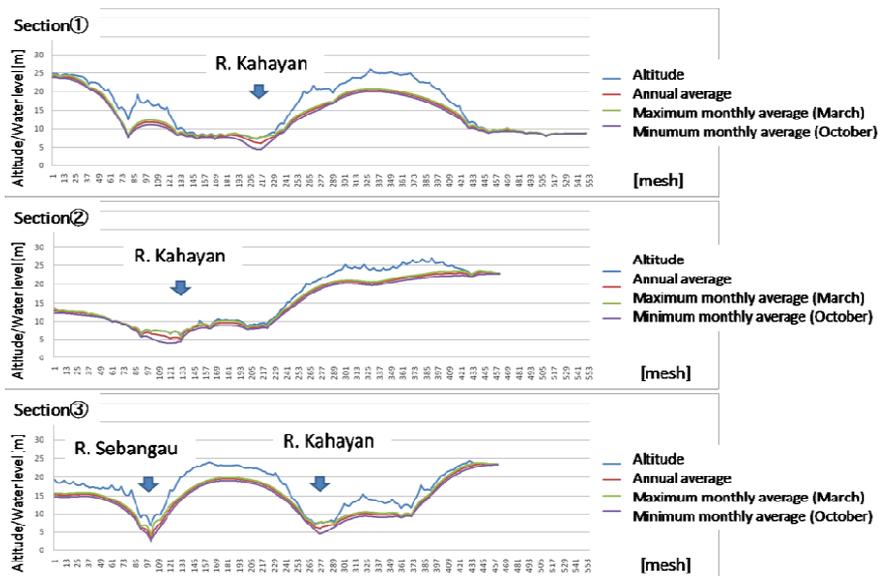
## 5.2 水路造成前の再現計算

### (1) 感度解析

熱帯泥炭湿地における透水係数、有効間隙率等の各種パラメータ数値を決定するため、文献を基に数値範囲を絞ったうえで感度解析を行った。水路がない場合、地下水位は雨季では地表から溢れ、乾季では地表付近に存在する状態を再現した各種パラメータ数値をTable 2にまとめ、本節以降ではこれらの数値を使用している。

### (2) 現状再現計算

5.1(1)で設定したパラメータを用いて、水路造成前の再現計算を行った。熱帯泥炭湿地林においては、特に雨季は地表面に水があふれた状態となり、低水深の池・沼のような状態になっていることが報告されている。そこで、地下水位が地表から溢れて湿地を形成する状態を表現するために、地下水モデルにおける地下水位の制約条件として地表標高+0.25[m]と設定した。降水量と河川水位の観測値が共通して存在する2009年と2010年の計算結果をFig. 9に示す。それぞれ水位が最高であった月の平均水位、最低であった月の平均水位、年平均水位をプロットした。2009年は少雨であったため、泥炭ドームの年平均水位は地表から約4m下にあるという結果となった。一方、多雨年の2010年には年平均水位が地表から約2m下、最高月平均水位がほぼ地表付近であり、河川周辺の泥炭ドーム側面において地表以上となっている部分も見られ、再現目標を満たす解析結果が得られた。今後より詳細な現地情報を得て検証を進めていく。



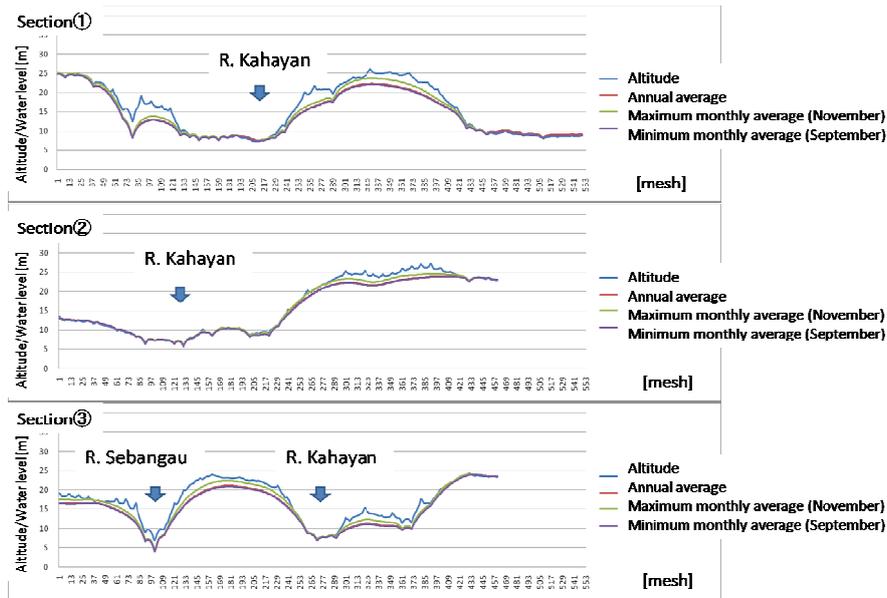


Fig. 9 Ground water level before canal construction (Upper: 2009, Lower: 2010) (Blue: Surface altitude, Red: annual average groundwater level, Green: monthly average ground water level of maximum rainfall month, Purple: monthly average groundwater level of minimum rainfall month)

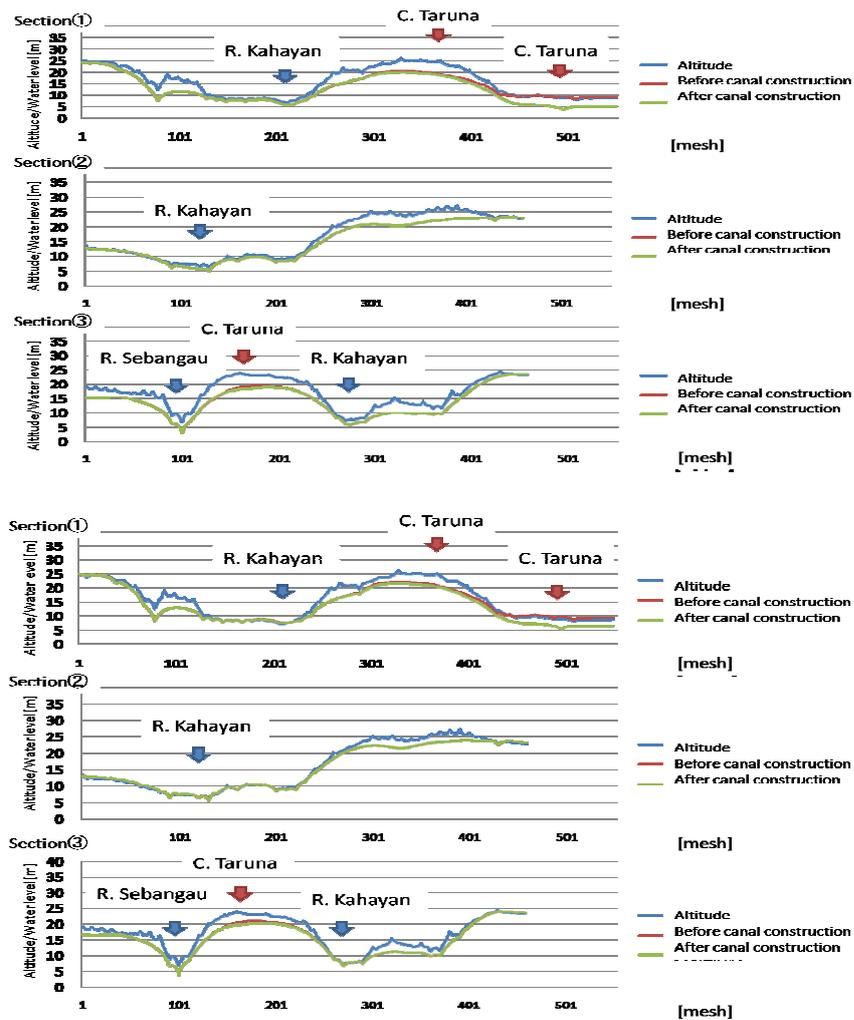


Fig. 10 Ground water level before/after canal construction (Upper: 2009, Lower: 2010)

## 5.2 水路造成後の再現計算

感度解析により設定したパラメータを用いて、水路造成後の再現計算を行った。水路位置と標高、水路水位の設定については5.1(2)のように行った。計算期間は5.2.2と同様に降水量と河川水位の観測値が共通して存在する2009年と2010年であり、比較のため、水路造成後と水路造成前の年平均地下水位を[Fig. 10]にプロットした。グラフの赤矢印は水路位置を示している。断面③では泥炭ドーム中央のタルナ水路水位に引っ張られ、周囲の地下水位が水路造成前よりも低くなっていることが確認できる。水位低下の影響範囲を把握するため、Fig. 11には水路造成前と水路造成後の泥炭ドームにおける地下水位差を示す。これより、50cm以上の地下水位低下がみられた範囲は、2009年平均水位では約3.3km、2010年平均水位では約4kmに渡っているという結果となった。地下水位低下はタルナ水路兩岸の約250~500mの範囲で起こっているという情報を踏まえると、この影響範囲は過大であると考えられるが、森林火災がカハヤン川とセバンガウ川に挟まれた領域全体で起こっているという情報もあり、今後検証データを入手し妥当性を調べる必要がある。

## 6. 結論

本研究の目的は、インドネシア・カリマンタン島熱帯泥炭湿地林において、メガライズプロジェクトの際に造成された人工排水路が原因で周辺地下水位が低下しているという現状に対し、その影響を定量的に評価することである。本研究では平面二次元地下水流動モデルを用いて対象領域における地下水流動計算を行った。

この地域では地形、地盤に関する詳細な調査が行われていなかったため、現在入手可能な全球データの利用、観測値が存在する範囲での補間・補正を行うなど、できるだけ再現性を高めるための工夫を施しながら基礎データを作成した。降水量に関しては蒸散や遮断量を考慮するために陸面過程モデルSiBUCを用いて地表到達降水量を計算した。また同時に出力される蒸発量、表面流出量、基底流出量などから対象領域における水収支解析を行った。検証に使用できるデータが不十分ではあったが、実測に基づく水収支解析結果とある程度の整合性を見いだすことができた。さらに地下水流動を決定する要因である透水係数、有効間隙率の感度解析を、熱帯泥炭湿地に関する文献を参考に範囲を絞った上で行っ

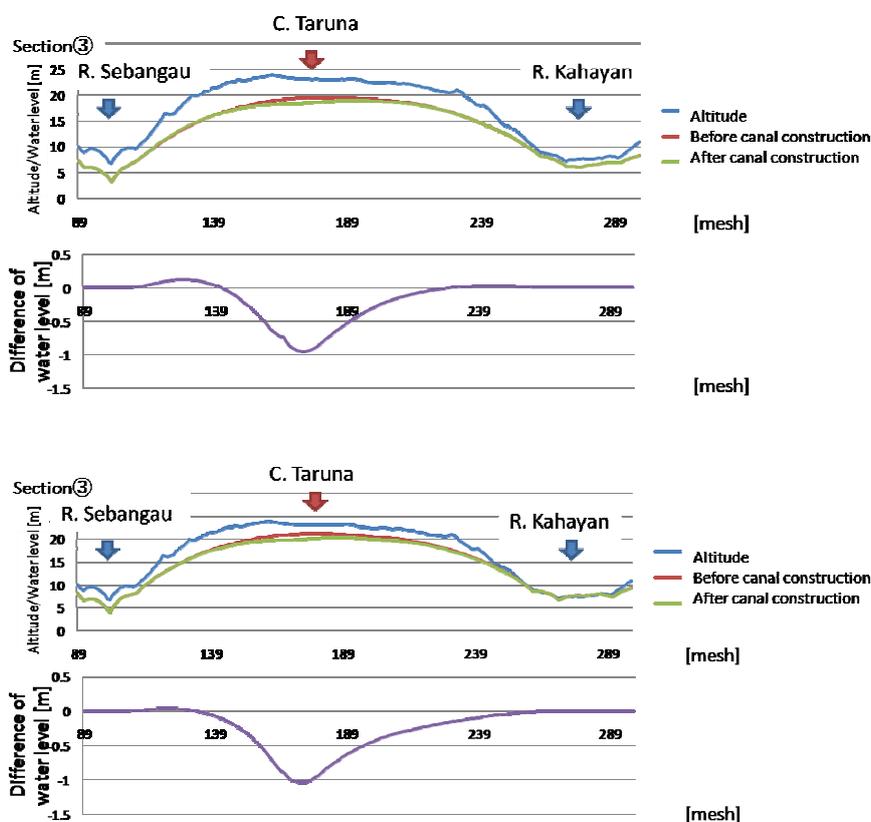


Fig. 11 Difference of ground water level ([groundwater level before canal construction]-[groundwater level after construction])

た。平年の地下水位は、雨季では地表から溢れ、乾季では地表付近に存在する、という状態を満たすパラメータの組み合わせを求めた。そしてこれらのパラメータを用いて現状再現計算を行った。

現状再現計算では衛星画像を参考に水路の位置を設定し、カランパンガン水路水位はカハヤン川・セバンガウ川との接点における水位の平均、タルナ水路水深は全ての地点において、カランパンガン水路との接点における水深と等しいという条件の下、水路造成後の地下水位計算を行った。すると水路がないと仮定した場合よりも、地下水位が造成水路周辺4kmの範囲に渡り低下するという結果となった。このことはつまり、人工排水路を全て埋め戻し、造成前の状態を回復した場合、その水路周辺域での地下水位低下をある程度回復できる可能性を示している。

本研究では対象領域としてカハヤン川・セバンガウ川中流に限定した計算を行ったが、上流部で浸透した地下水が数ヶ月ほどの時間をかけて下流部へ移流することを考慮すると本対象領域のみでの解析では不十分と言える。再現性を高めるためには河川上流の分水嶺で区切り流域全体で降水や地下水の流れを考察する必要がある。河川水位や水路水位に関しても、連続した観測値を入手し、それを元に4つの河川・水位を連結させた水路網での水位計算とその検証をすることが重要である。また将来の気候変動との関係性も視野に入れており、乾燥化による森林火災や土壌分解による二酸化炭素放出量評価、気候変動で降水量が増加・雨季が延長した場合の地下水への影響評価を今後の課題とする。

## 謝 辞

北海道大学農学研究院・大崎満教授、高橋英紀教授から水文観測データの提供を受けたことを記して謝意を表します。また本研究は研究大学強化促進事業SPIRITS「カリマンタン島熱帯泥炭湿地林の回復と炭酸ガスの排出削減に関する研究」の支援を受けた。

## 参考文献

栗津 進吾 (2012) : 京都盆地水系における流動・水質モデルにもとづく地下水利用可能性に関する研究, 京都大学修士論文。  
井上 元 (2012) : 「メガライスプロジェクト⇒泥炭森林の乾燥化⇒火災と土壌分解」シナリオは本当か? 第5回KURA理工会資料, pp.15-22。  
株式会社清水建設 (2014) : 平成 23 年度 新メカニズム実現可能性調査「インドネシア・ジャンビ州

における泥炭乾燥による好気性分解の抑制と稲作拡大に基づく靱殻発電に関する新メカニズム実現可能性」報告書 (参照2014-12) 。

北側 有輝・城戸 由能・中北 英一 (2014) : GCM空間解像度を考慮した地下水環境への気候変動影響の統計確率的評価手法に関する研究, 水工学論文集, Vol.58, pp.1135-1140。

斉藤 卓弥・米田 稔・森澤 真輔 (2005) : 桂川右岸地下水の水質分布変化に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.42, pp.81-90。

高田 容子 (2006) : インドネシア中央カリマンタンでの植林事業, 森林施業研究会ニュース・レター, No.32, (参照2014-12) 。

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) (2004) : 研究課題別終了時評価報告書「インドネシアの泥炭・森林における火災と炭素管理」, (参照2014-12)

辻 弘平 (2012) : インドネシアKahayan川流域を対象とした水収支と流出量の推定, 土木学会北海道支部論文報告集, 68号, B-29。

成戸 章典 (2000) ・岡 太郎・石井 将幸 : 高知県春野町における地下水塩水化の平面二次元解析, 海岸帯水層中の塩水の有効利用に関する研究報告書, pp.57-69。

三宅 龍平 (2006) : カリマンタン熱帯泥炭の有効間隙率と水分動態, 農業土木学会全国大会講演要旨, pp.720-721。

三宅 龍平・井上 京・Adi Jaya・Untung Darung (2005) : カリマンタン熱帯泥炭の有効間隙率と水分動態, 平成17年度農業土木学会 講演会 講演要旨集, pp.698-699。

向井 浩 (2009) ・治田 隆宏・田中 里志 : 井水の化学成分に基づく京都盆地北部市街域の地下水系の解析, 地球化学, Vol.43, pp.45-57。

Robert E. Horton (1939) : Analysis of runoff-plot experiments with various infiltration-capacity. Trans. Amer. Geophys. Union, pp. 693-711。

Sellers, P. J., Mintz Y., Sud Y.C. and Dalcher, A. (1986) : A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J. Atmos. Sci., vol.43, pp.505-531。

Tanaka, K. (2004) : Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model Doctoral dissertation, Kyoto University。

(論文受理日 : 2015 年 6 月 7 日)