

報告書概要

技術研究開発課題名	地域課題分野（河川）
技術研究開発テーマ名	濃尾平野における水資源総合管理のための地下水涵養機能評価モデルに関する研究
研究代表者	
氏名	所属・役職
神谷 浩二	岐阜大学工学部社会基盤工学科・准教授
共同研究者	
氏名	所属・役職
児島 利治	岐阜大学流域圏科学研究センター・准教授
大橋 慶介	岐阜大学工学部社会基盤工学科・助教
【1】背景・課題	
<p>日本の沿岸都市部では、揚水規制に伴う地下水位の回復と地盤沈下の沈静化によって、地下水を保全しながら上手く利用する考え方に移行し始め、地下水の新たな活用ニーズが高い状況にある。今後の地下水利用にあたっては、地盤沈下や地震時の液状化危険度増大などの地下水位変動に伴う障害を最小化するための適正水位を設定して、その水位を維持するための地下水流動系における涵養量と揚水量の水収支バランスを管理することが必要である。特に、平成6年のような異常渇水時の地盤沈下の一時的進行にも対処するため、涵養量減少に対して地下水利用量を制御する方策も重要である。しかしながら、地下水流動の解析技術が高度化しているにもかかわらず、河川や森林などによる涵養機構の定量的評価が未だ不十分であるため、涵養量に見合う地下水利用可能量を明示できないでいる。</p>	
【2】技術研究開発の目的	
<p>本研究は、濃尾平野における今後の地下水管理に貢献するため、主要な涵養源である河川と森林における地下水涵養機構を解明するとともに、河川水位等の観測値によって涵養量等を評価・表現する方法を究明したものである。なお、後述するように森林に比べると河川による地下水涵養量が多大であることが考えられたため、河川による地下水涵養について主眼を置いた。</p>	
【3】技術研究開発の内容・成果	
1. 河川による地下水涵養量の評価・表現法	
<p>河川による地下水涵養量の評価・表現法を究明するため、濃尾平野の北部に位置する長良川扇状地の地域を事例に、地下水涵養や地下水流動機構について調査・分析を行った。特に、地下水涵養量の評価では、河川の流下に伴う流量変化を把握することによって河川からの地下への漏水量を求め、それを涵養量とみなす従来手法を適用し、その手法の妥当性等についても言及した。</p>	
1-1 対象地域	
<p>対象地域は、図1に示すように、長良川扇状地とその周辺である。</p> <p>長良川扇状地では、収集したボーリング柱状図の例を示した図2のように、TP-20mあたりなどで薄厚の粘性土が介在するが、殆どの層が厚い礫質土によって構成され、これが主要帯水層になっている。また、長良川の河川堤防の基盤の多くは、扇頂から扇端に至る範囲では礫質土によって構成されていて、河川水が地下水に涵養される条件にある。</p>	
1-2 ADCPによる河川流量の測定	
<p>河川流量の測定は、上記の図1に併記したように、長良川扇状地の扇頂の上流側に位置する地点A（河口からの距離57.4kmで千鳥橋付近）、扇中央あたりの地点B（50.2kmで忠節橋付近）、扇端付近の地点C（47.6kmで鏡島大橋付近）の3地点で実施した。長良川に接続する排水樋管等は計8地点であった。長</p>	

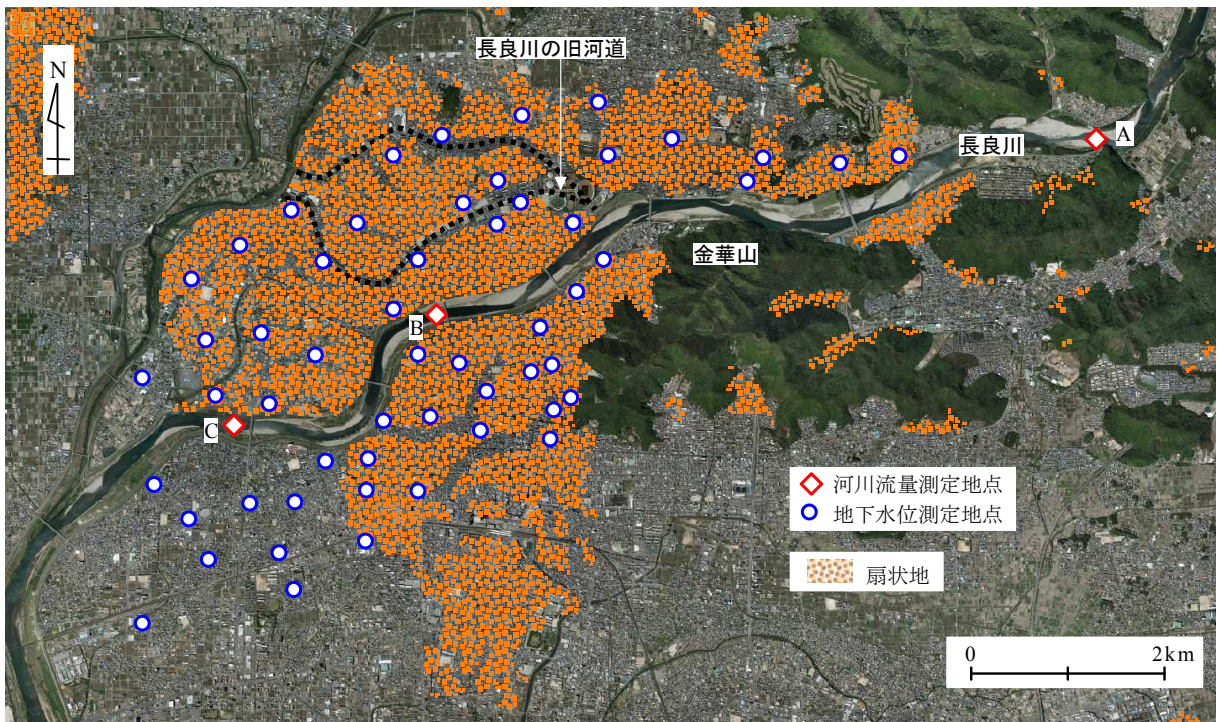


図1 対象地域の長良川扇状地

良川では、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) を搭載した観測用ボートを河川断面方向に曳航することによって流量を測定した。一方、長良川の接続水路では、落差工が存在する場合は越流水深から流量公式によって流量を求め、落差工が存在しない場合は浮子法によって流量を測定した。なお、長良川の接続水路等での流量は河川流量に対して1/10000~1/1000程度と僅かであった。

流量測定は、2013年の10月8日(第1回)、10月28日(第2回)、12月17日(第3回)、2014年の7月22日(第4回)、9月19日(第5回)にそれぞれ実施した。

各観測断面は、ADCPでの曳航観測のために橋梁下流に設定されているが、橋脚の影響でその後流は大きく乱れている。こうした状況で代表的な流量値を得るためには、同一断面において複数回往復計測させることが重要である。ADCP付属の解析ソフトであるWinRiverによりASCIIデータとして3次元流速データを出力し、往復計測された同一断面の流速分布を時間平均化し、そのうえで内外挿補完して代表流量を求めた。また、同一断面の計測であっても、航路の蛇行によって横断距離が異なるが、特に橋上曳航の際にその傾向は顕著である。しかし、図3に示すように、航跡の直線化補正をすることで計測毎の位置合わせを容易にし、多数の横断計測データをほぼ同一の直線航跡として扱うことができる。一方、ADCPでは水流の乱れによる欠測が発生するが、広範囲での欠測が生じることもしばしばあり、欠測点周辺値を使った内挿補完でさえも容易ではないことがある。このような場合、図4のように欠測を含んだまま時間平均化された流速分布を求めることで欠測箇所を大幅に減らすことができ、周辺値を使った欠測点の内挿補完が容易になる。欠測点は上下左右の周辺値を

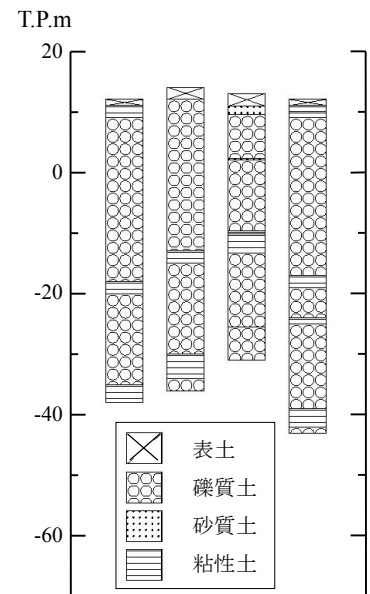


図2 ボーリング柱状図

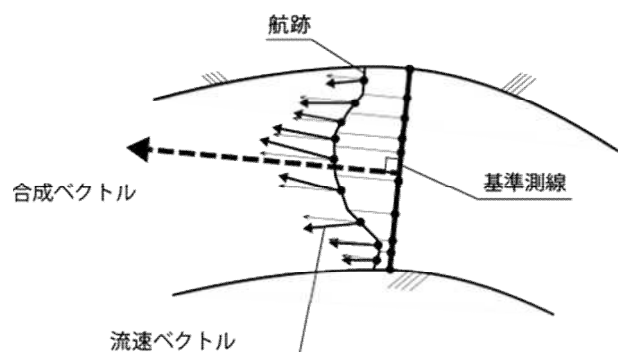


図3 航跡の直線化補正

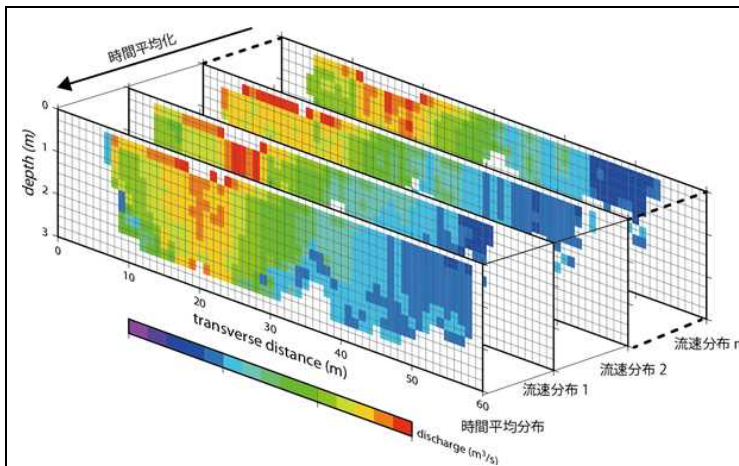


図4 流量を求める際の時間平均化の概念

平均することで内挿補完したが、周辺値にも欠測が含まれる場合もあるため、欠測点の内挿値が収束するまで反復計算して断面の流速分布を求め、そのときの流量の値を用いた。図5は、ADCPによって測定した流速分布の例を示したものである。

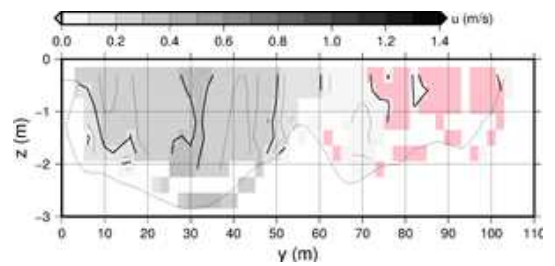


図5 測定された流速分布の例

表1 河川流量の測定値

地点	河川流量 (m³/s)				
	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
A	34.4	135.9	42.6	87.4	30.6
B	27.5	107.6	28.8	71.8	30.2
C	26.3	108.1	欠測	72.2	33.6

表1は、測定した河川流量の値を示したものである。但し、第3回調査における地点Cでの測定値はADCPの不具合等により欠測である。なお、第2回測定は豊水流量のときのものであり、第4回は平水、第3回は低水、第1回と第5回は渇水のときのものである。

1-3 水収支による地下水涵養量の評価

a) 地下水涵養量の算定方針

河川の流下に伴う流量の変化と河川に接続する排水樋管等の水路の流入・流出量の値を用いて、河川の水収支（蒸発量を無視）を把握することによって、河川からの地下水への漏水量（涵養量）を求める。

流量の測定実施時における長良川の水位（上記の図1の流量測定地点Bに対応する水位観測所）を調べると、測定開始時刻から完了時刻までの間での水位変化量は、第1回測定では0cm、第2回では9cm、第3回では1cm、第4回では7cm、第5回では1cmであった。例えば、測定地点Bでの次の水位流量曲線（HQ）式(1)によれば、第1回、第3回、第5回では流量の変化量は1m³/s以下であり、第2回では12m³/s、第4回では6m³/s程度である。即ち、第1回、第3回、第5回では河川流量はほぼ定常状態とみなせるが、第2回と第4回では非定常状態であるので、地下水涵養量の算定については両者を区別して検討する必要がある。

$$Q = \begin{cases} 49.78(H + 4.28)^2 & ; \text{if } -3.67 < H \leq -2.31 \\ 72.63(H + 3.94)^2 & ; \text{if } -2.31 < H \leq 1.44 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 Q (m³/s)は河川流量、 H (m)は河川の基準水位である。なお、上記のとおり長良川の接続水路等での流量は微少であったため、それによる水収支を無視して涵養量を算出することにした。

b) 低水時（定常状態）における地下水涵養量の算定

第1回、第3回、第5回の測定について、河川流量がほぼ定常状態とみなせる場合では、その流量の収支に基づき河川からの漏水量を地下水涵養量 Q^* (m³/s)とした。

c) 高水時（非定常状態）における地下水涵養量の算定法の提案

第2回と第4回の測定では、洪水波の通過に伴い地点あるいは時刻によって河川流量が変化するため、ADCPによる測定流量の差から涵養量を推定することは困難であり、非定常な流量変化を計算から把握することが不可欠となる。そのため、次元不定流計算を用いて非定常流れを解き、漏水がゼロと仮定した場合の流量 Q' (m³/s)の時系列変化を求めることとした。第2回測定を例に、涵養量を算定する提案法の概要は次のとおりである。

断面形は、200m 間隔の河川横断測量に基づく一般断面形を用いて、上流端流量は測定地点Bに対応する水位観測所の水位とHQ式(1)から推定し、第2回測定の10月28日を含む一連の出水イベントとして10月25日から10月31日までを計算している。但し、HQ式は洪水波形ごとに異なるため式(1)が必ずしも正しいとは言えない。そこで、式(1)の波形を上流端流量として入力し、計算で得た地点BのHQ

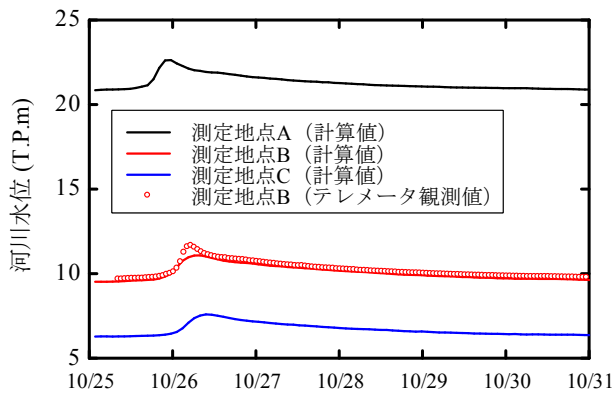


図 6(a) 出水期間の河川水位

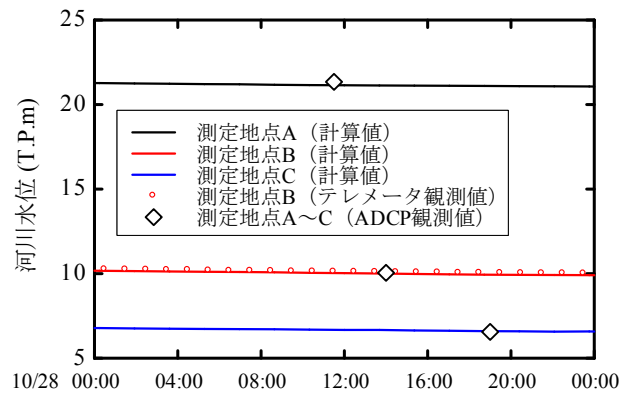


図 6(b) 流量測定日 (10月28日) の河川水位

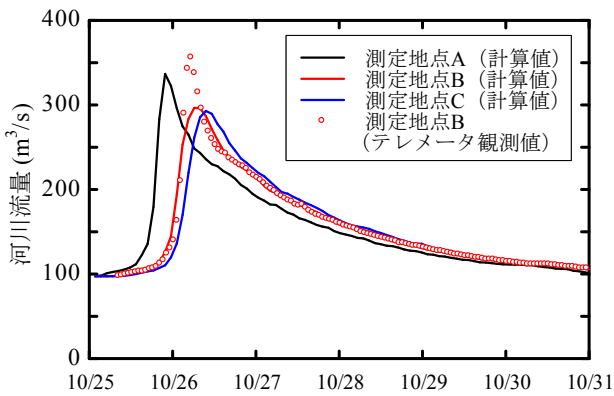


図 7(a) 出水期間の河川流量

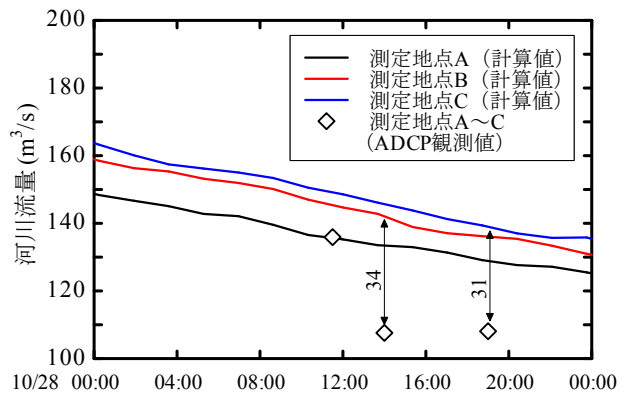


図 7(b) 流量測定日 (10月28日) の河川流量

関係を新たな HQ 式として繰り返し与え、パラメータが収束したときの HQ 関係を次の修正 HQ 式(2)として計算に利用した。

$$Q = 23.0(H + 5.1)^2 \quad (2)$$

一次元不定流計算の支配方程式は、次の連続式(3)および一次元浅水流方程式(4)である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 u^2}{h^3} = 0 \quad (4)$$

ここで、 A (m^2)は断面積、 Q (m^3/s)は流量、 u (m/s)は断面平均流速、 g (m/s^2)は重力加速度、 n ($m^{1/3}/s$)はマンニングの粗度係数、 \bar{h} (m)は平均水深である。 \bar{h} は断面積 A を水面幅で除したものであり、水面幅は連続式から求まる A と測量断面形から決定している。粗度係数 n は、計算水位と観測水位が一致する値を試行的に決定している。

次に、測定地点 A における計算流量と ADCP 測定流量と一致するように上流端流量に乗じる流量係数を調整した。最終的に式(2)の流量を 0.89 倍した波形が測定地点 A の観測流量と最も良く一致したため、この条件で解析を進めることとした。そのときの河川水位変化を図 6 に示した。出水期間での水位変化を示した図 6(a)において、測定地点 B での水位をみると、増水期である 10 月 26 日の計算水位は、観測水位に対してピークが過小評価になっているが、減水期に入ると観測水位に漸近し、河川流量の 10 月 28 日の水位変化を示した図 6(b)では、計算水位は測定地点 B のテレメータ水位だけでなくそれぞれの ADCP 測定時の水位とも良く一致した。このことから、この計算条件で求めた流量を 10 月 28 日の漏水をゼロと仮定した流量 Q' と定義し、測定流量との比較に用いることとする。

図 7 に出水期間全体および 10 月 28 日のハイドログラフを示す。出水期間での河川流量変化を示した図 7(a)では、水位と同様に測定地点 B のピーク流量は観測値に対して計算値が過小評価となっているが、

10月28日について示した図7(b)の流量変化においては、計算値と観測値は良い一致を示している。この測定地点Bでの計算値の過小評価については、地点Bのハイドログラフに基づく流量を上流端の地点Aの流量として与えているため、数値拡散や実際の断面形変化の影響でハイドログラフの波形が平滑化されているものと考えられる。そして、図7(b)の◇印の点は、測定地点A、BおよびCでの測定流量 Q_A 、 Q_B および Q_C を示しており、計算流量は、各測定に対応する漏水をゼロと仮定した流量 Q' である。即ち、漏水が無ければその地点を流れていたはずの流量 Q'_A 、 Q'_B 、 Q'_C がそれぞれ $136\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $142\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $139\text{ m}^3/\text{s}$ である。それに対して、実際に漏水によって減少した流量をADCPによって測定した値 Q_A 、 Q_B および Q_C はそれぞれ $136\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $108\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $108\text{ m}^3/\text{s}$ であるので、その差 $0\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $34\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $31\text{ m}^3/\text{s}$ が測定地点Aから各測定地点までに失った流量、即ち、漏水量であると考えられる。なお、測定地点Aでの計算流量と測定流量を校正根拠に用いたため、 Q'_A と Q_A は等しくなっている。

このように、洪水波の伝搬時間を考慮して、漏水がないと仮定したときの流量と漏水によって減少した測定流量との差によって、地下水涵養量を見積もることが可能であると考えられる。

d) 算定された地下水涵養量

表2は、上記の方法によって求めた地点Aと地点Bの区間、地点AとCの区間のそれぞれの地下水涵養量の値を示したものである。

表2 河川による地下水涵養量

区間	地下水涵養量 (m^3/s)				
	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
A-B	6.9	35.2	13.8	18.2	0.4
A-C	8.1	31.3	欠測	15.4	-3.0

渇水～豊水流量で得られた河川による地下水涵養量は、A-B区間では $0\sim 35(\text{m}^3/\text{s})$ 程度の範囲、A-C区間では $0\sim 30(\text{m}^3/\text{s})$ 程度にある。また、第2回、第4回、第5回測定では、A-C区間の地下水涵養量はA-B区間のそれよりも小さくなっているため、河川水へ地下水が復帰していることも想像される。A-B区間における涵養量は、A-C区間における涵養量の $0.85\sim 1.2$ 倍の範囲(第5回ではA-C区間で負の値であるため除く)にあり、地下水涵養がA-B区間区間で卓越している。

このように、洪水波の伝搬時間を考慮して、漏水がないと仮定したときの流量と漏水によって減少した測定流量との差によって、地下水涵養量を見積もることが可能であると考えられる。

1-4 河川による地下水流動への影響

a) 地下水位の調査

既設井戸(消防水利井戸)を利用して、地下水位を1日間で一斉に測定する調査を実施した。上記の図1には、測定に利用した井戸の位置を併記した。水位測定では、ロープ式水位計を井戸内に投入し、地上から地下水面までの距離を測定し、地表面の標高値を用いて地下水位の標高値を求めた。

地下水位測定は、河川流量測定と同日の2013年の10月8日(第1回)、10月28日(第2回)、12月17日(第3回)、2014年の7月22日(第4回)、9月19日(第5回)の計5回を実施した。なお、第1回～第3回の測定では50地点、第4回と第5回では5地点追加し55地点を測定対象地点とした。

b) 地下水の流動状況

図8は、第4回と第5回測定での地下水位の値を用いて描いた地下水位等高線を示したものであり、また、その等高線に直交する流線を示したものである。長良川扇状地の範囲において、地下水位等高線が河川を中心として湾曲する地下水嶺が認められ、河川水が地下へ流入する傾向にある。特に、旧河道との分岐点付近でその湾曲が顕著

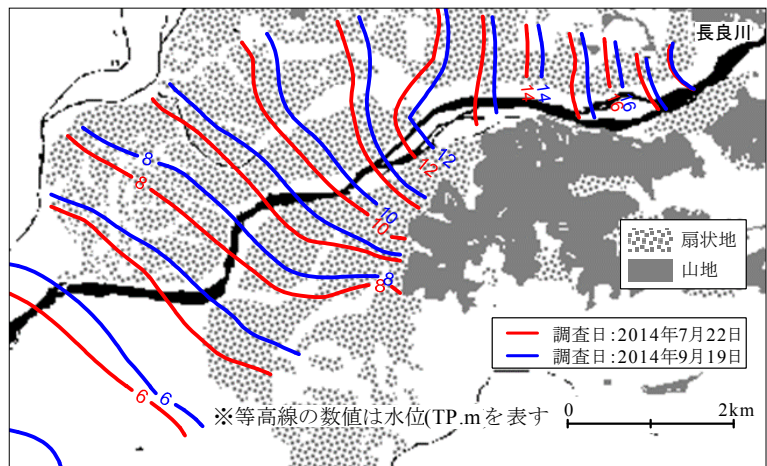


図8(a) 地下水位等高線

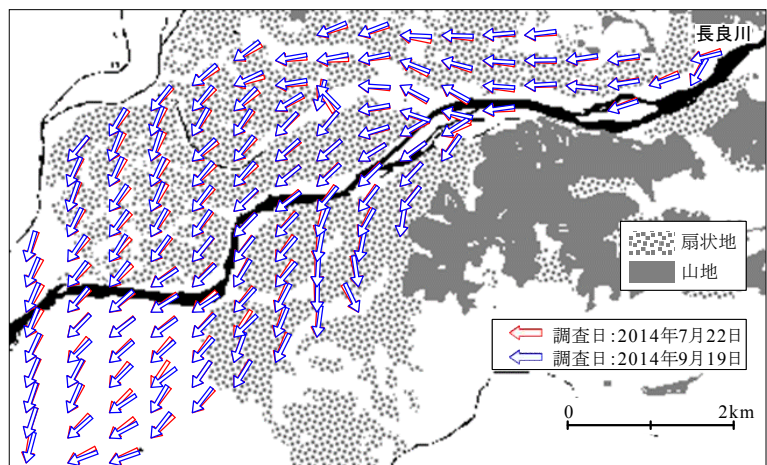


図8(b) 地下水の流線

である。また、長良川右岸側では、扇頂から扇央あたりに至る範囲で河川から流入した地下水は、扇状地内に向かった後に南西方向に流下する傾向にあり、旧河道に沿う流れが卓越している。そして、扇端付近で南西方向の地下水流が長良川で横断するように流下し、地下水が長良川へ復帰しているとみることできる。長良川左岸側では、長良川から流入した地下水は、扇状地が広がり始めるあたりから南西方向に流下し、扇端付近で右岸側からの地下水流と合流する傾向にある。一方、いずれの測定日においても地下水流の流向に殆ど差が無く、流向は河川水位の変動による影響を受け難いことが考えられる。なお、地下水流の動水勾配は、1/1000～3/1000 程度にあった。

c) 河川水位と地下水位

図 9 は、地下水位測定時における長良川の平均水位（上記の図 1 の河川流量測定地点 B に対応する水位観測所）と地下水位の関係の例を示したものである。両者は、図 9 に破線で示したように、河川水位の値を用いて一次式によって良好な関係で表される傾向にある。その一次式の傾きは、河川水位の変動による地下水位の変動割合に相当すると考えられ、図 8 と対比すると、涵養源である河川からの地下水の流動距離が大きくなるほど変動割合の値は小さくなる傾向にある。

即ち、河川水位（あるいは河川流量）の変化によって、周辺の地下水位は比例して変化するが、地下水の流動経路や動水勾配は殆ど変化しない影響関係にある。

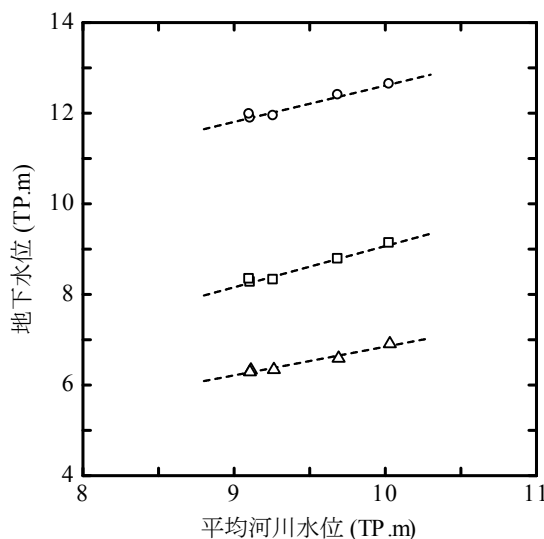


図 9 河川水位と地下水位

1-5 地下水涵養量の一表現法

a) 河道特性を考慮した地下水流動の解析

河川による地下水涵養量は、主に、河川水位とその周辺の地下水位、河川水の流入する地層の透水性によって影響されると考えられる。また、河川水位の変化に伴う河道の潤辺（漏水面）の変化によって地下水涵養量も増加することも想定される。そのため、飽和・不飽和浸透流解析に基づき、河道特性による地下水涵養量への影響について検討した。但し、三次元の地下水挙動に対して、二次元断面を用いた簡易モデルを用いて概略的な数値解析を実施した。

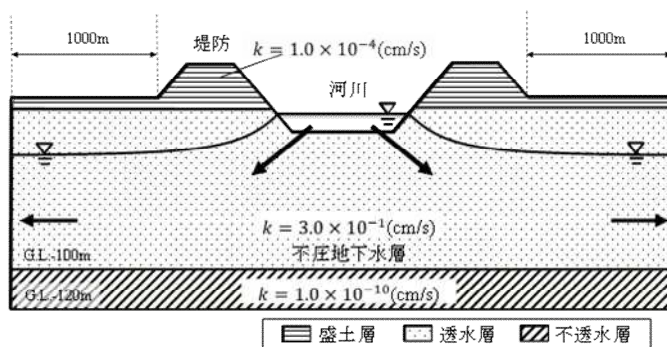


図 10 解析モデルの概要

図 10 は、解析モデルの概要を示したものである。図 1 の河川流量測定地点 B (河口からの距離 50.2km) を例に、河川横断測量の一般断面を用いて、また、ボーリング柱状図を参照して地層モデルを構築した (不透水性の基盤を GL-100m に仮定)。なお、図中に示した帯水層の透水係数は、既存資料の揚水試験データを参照して設定した。そして、平水時であった第 4 回測定の地下水位等高線と河川水位を与え初期状態を設定して、測定地点 B に対応する河川水位観測所での 2013 年 4 月～2014 年 3 月の期間の日平均水位 H^* (TP.m) を水理境界として与え、また、堤防裏のりから 1000m 離れた地点の境界の地下水位は河川水位との差が 1/1000 の動水勾配になるように求めた水位を固定して、非定常解析を行った。ところで、図 8 を参照して河川水が地下へ流入等しているとみられる河川区間全体について、上記と同様に河川横断測量の一般断面を用いたときの定常解析を事前に実施して、地下水涵養量や地下水位の測定値と比較してモデルや解析精度等について検討した。

図 11 は、非定常解析で得られた河川水位と地下水涵養量の関係を示したものである。河川水位が低めるときは、地下水涵養量は水位上昇に伴い緩やかに増加し、高めるときは水位上昇に伴って勾配を増しながら増加する傾向にある。この関係は、河川の水位流量曲線 (HQ) 式に類似しているともみられたため、二次式: $Q^* = a(H^* + b)^2$ を図 11 の関係にフィッティングさせたときの関係を破線で併記した。この二次式によって河川水位と涵養量は良好な関係で表現できることが認められる。これは、河川水位が低めるときは涵養量には砂州などの河道の状態とともに河川水位と地下水位の差が影響し、高めのと

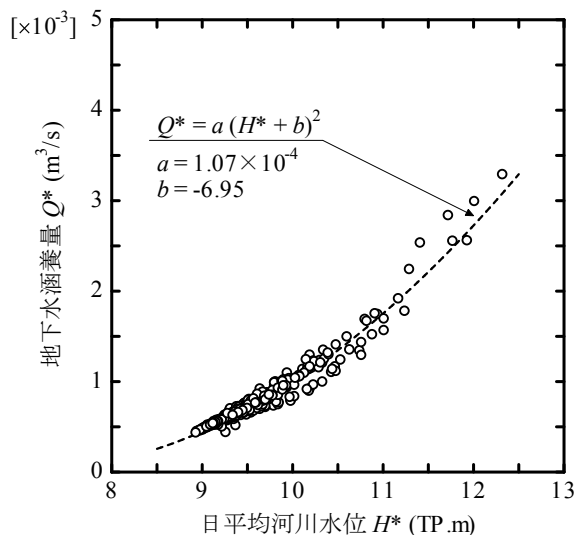


図 11 河川水位と地下水涵養量 (解析値)

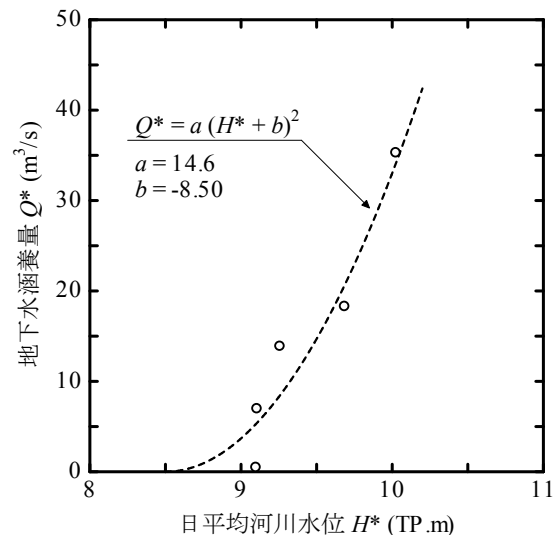


図 12 河川水位と地下水涵養量 (測定値)

きは河川水位と地下水位の差がより大きくなって支配的に影響していることによると想像され、その関係の物理的意味の解釈は今後の課題である。

b) 河川による地下水涵養量の管理

上記のように、河川水位と地下水涵養量の関係は、河川流量の HQ 式に類似していることが得られた。そのため、図 12 は、測定流量に基づいた A-B 区間での地下水涵養量 Q^* の値を河川流量測定地点 B に対応する水位観測所での日平均河川水位 H^* に対して示したものであり、二次式： $Q^* = a(H^* + b)^2$ をフィッティングさせたときの関係を破線で重ね合わせて示したものである。図 12 によれば、河川水位と地下水涵養量は、次式(5)によって比較的良好な関係で表される。

$$Q^* = 14.6(H^* - 8.50)^2 \left[= 14.6(H + 4.06)^2 \right] \quad (5)$$

ところで、式(5)の標高水位 H^* を基準水位 H に置き換えたときの関係と測定地点 B に対応する水位観測所での HQ 式(1)を比較して、河川の基準水位を -3 ~ -1m の範囲で、A-B 区間での地下水涵養量と地点 B での河川流量を試算すると、地点 A から地点 B に至るまでに河川流量の約 20% が地下水涵養されていることが得られる。また、2014 年の平均河川水位の値 $H = \text{TP. } 9.64 \text{ m}$ を式(5)に代入すると $Q^* = 19 \text{ m}^3/\text{s}$ が得られ、日量にして約 160 万 m^3 の地下水涵養量が見積もられる。

このように、今後のデータ蓄積も必要であるが、観測河川水位によって河川流量とともに長良川扇状地内の河川による地下水涵養量を把握して管理できる可能性が示唆される。

2. 森林における降雨の地下水涵養

森林における降雨の地下水涵養量の分析するため、濃尾平野の北部の流域を事例に、降雨量等の調査を実施した。

2-1 対象地域の概況

対象地域は、岐阜市の安食地区に位置する伊自良川支川の安食谷川流域 (0.31 km^2) である。

図 13 は、対象地域の空中写真を示したものである。本流域は山地災害危険地区に指定されており、山地斜面からの洪水流の速やかな排水のため、水路床幅 1.5m の排水路が設置されており、常時 0.5~1cm 程度の基底流が維持されている。なお、環境省生物多様性センターの自然環境情報 GIS システムによれば、流域の主な樹種はコナラ群落 23%、モチツツジ-アカマツ群集 77%とされており、針葉樹、広葉樹の混交した天然林とされている。

2-2 水文調査

対象地域において、降雨量、排水路の流量、土壌水分量、地下水位をそれぞれ測定した。

先ず、林床 (林内) および樹冠の開けた箇所 (林外) にクリマテック製 CTKF-1 雨量計を設置した。林内には 5 台、林外には 1 台の雨量計を設置した。観測された降雨を降雨イベント毎に集計し、樹冠遮断損失量の評価を行った。図 14 は、観測された林内雨 (樹冠通過雨) R_t (mm) と林外雨 R_g (mm) の関係を示したものであり、次の関係式(6)が得られた。

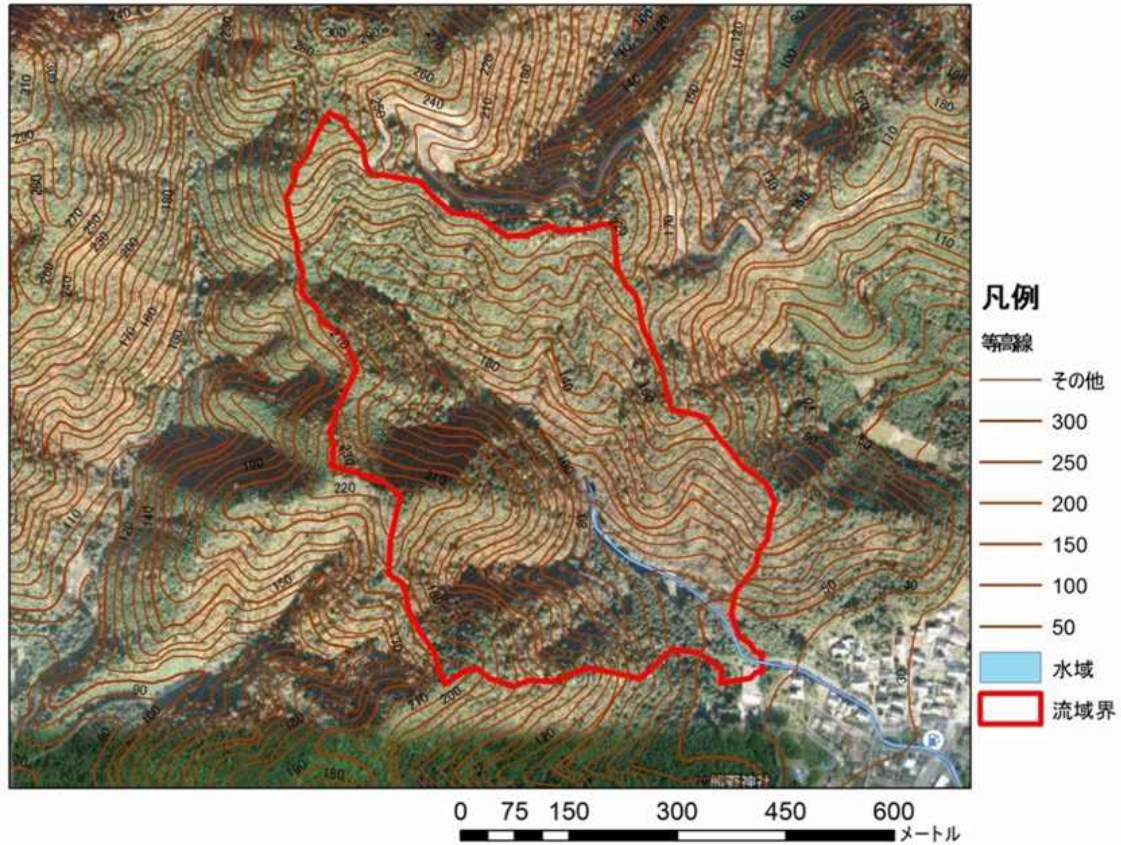


図 13 森林の対象地域

$$R_t = 0.914R_g - 1.04 \quad (6)$$

本森林では、総降雨量の約 10%が遮断蒸発していると考えられる。

次に、流域の集水排水路（図 13 の水域）において、超音波式水位計による連続水位 h (m) の観測と浮子法による流量 Q (m³/s) の測定によって、連続流量観測を実施した。超音波水位計は、Field Pro 製レベルセンサー 260-700 を排水路上方に固定して設置した。また、2014 年 7 月～10 月の期間において、浮子法による流量観測を 3 回実施した結果、次の水位流量曲線式(7)による関係が得られた。

$$Q = 53.29h^2 \quad (7)$$

土壌水分量の測定は、Delta-T 社の Profile Probe (PR2) を用いて行った。森林内に土壌水分計を設置して、深さ $z = 10, 30, 40, 60, 100$ cm のそれぞれにおける体積含水率 θ を観測した。また、集水域（図 13 の流域界）の地下水流の下流側に位置する既設の井戸に地下水位計を設置して、地下水位 (GL-m) を観測した。いずれも観測期間は、2013 年 10 月 16 日から 2015 年 1 月 8 日までである。図 15 は、ある降雨イベント（2014 年 8 月 15 日～19 日）を例に、体積含水率、地下水位の経時変化を示したものであり、10 分間林内雨量の変化を併記した。表層付近では降雨によって体積含水率は速やかに応答して増加する傾向にあるが、地下水位は降雨開始から数時間から十数時間が経過した後を上昇し始める傾向にある。

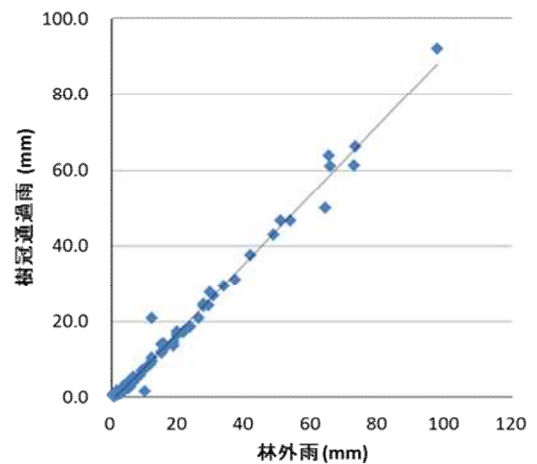


図 14 林外雨と樹冠通過雨の関係

2-3 水収支解析

降雨、流量観測結果より、良好な洪水ハイドログラフが得られた二つの降雨イベント（2014 年 7 月 10 日、2014 年 8 月 15 日）を選択し、対象流域の水収支の評価を行った。

林内、林外雨量計の観測結果より、遮断率は約 10%と評価されている。図 16 に示す二つの降雨イベ

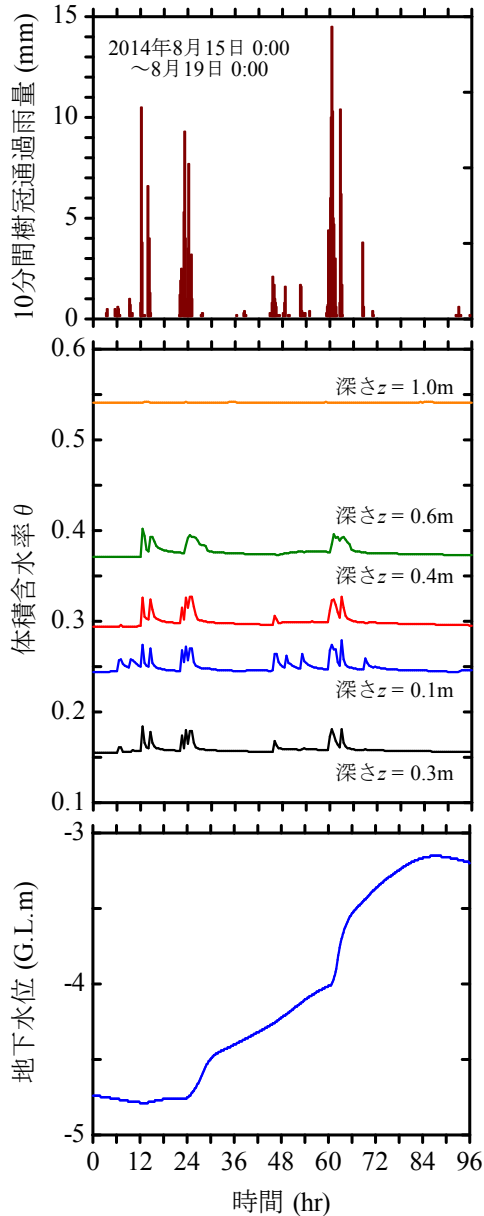


図15 降雨量と水分量・地下水位

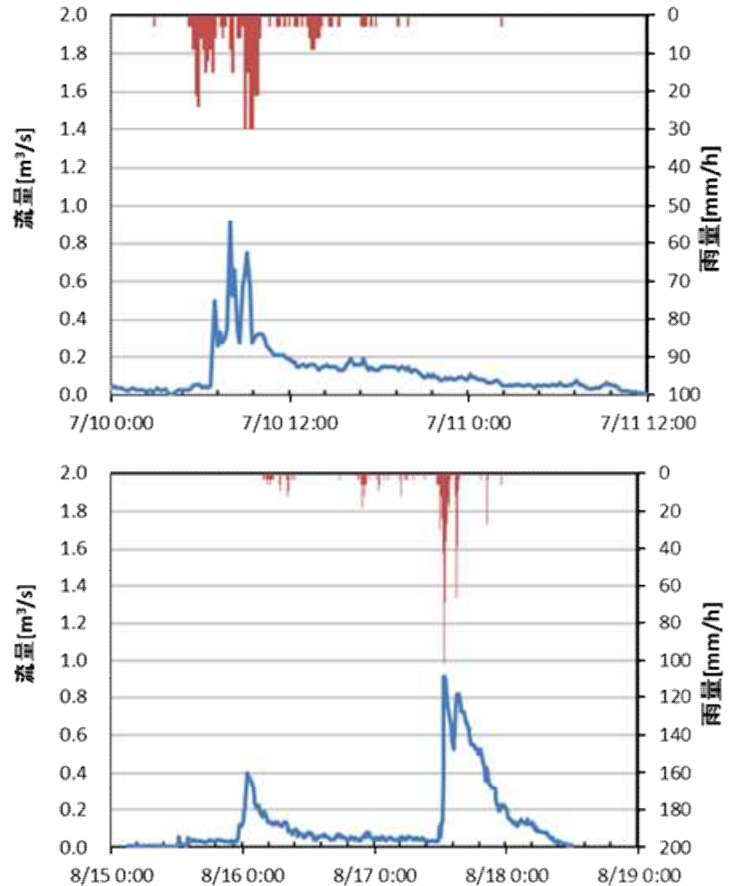


図16 降雨イベントのハイドログラフ・ハイエトグラフ

表3 降雨イベントの水収支

	2017/7/10~7/11		2014/8/15~8/19	
	総量 (mm)	割合 (%)	総量 (mm)	割合 (%)
降雨量	73.0	100	143.5	100
直接流出高	44.8	61	109.7	76
遮断量	7.3	10	14.4	10
一次貯留量	20.9	29	19.4	14

ントのハイドログラフを直接流出成分と基底流出成分に分離し、そのイベント中の直接流出量を評価した。また、ハイエトグラフより降雨イベント中の総降水量を算出した。表3は、洪水イベントにおける水収支の評価結果を示したものである。本流域では、60~75%程度が降雨イベント時に直接流出として即座に表面流として流出し、14~30%程度が流域内の土壌に一時的に貯留され、降雨終了後に、蒸発、基底流出、もしくは地下水涵養として流域外に流出すると考えられる。

2-4 森林における地下水涵養量の評価

a) 対象地域での年間水収支

岐阜の地方気象台の気象観測データを用いて、安食谷川流域の年間水収支の評価を試みる。

年降水量 R は、岐阜市の AMeDAS データより、2014 年では 1719mm/year と評価された。直接流出高 Q_d について、安食谷川流域の二つのイベントの水収支解析結果より直接流出率 f は 60%~75% と評価される。地下水涵養量が多くなるように $f = 0.6$ とした場合、年間に少なくとも $Q_d = fR = 1031 \text{ mm/year}$ が直接流出として流出していると評価できる。基底流出高 Q_b について、安食谷川の水位計測は欠測期間が多く1年間を通して計測はできていないが、計測期間における水位を平均すると基底流の水位は平均 6mm 程度であった。6mm の水位が1年間継続したと仮定して、年間の基底流出高 Q_b を算出すると、 Q_b

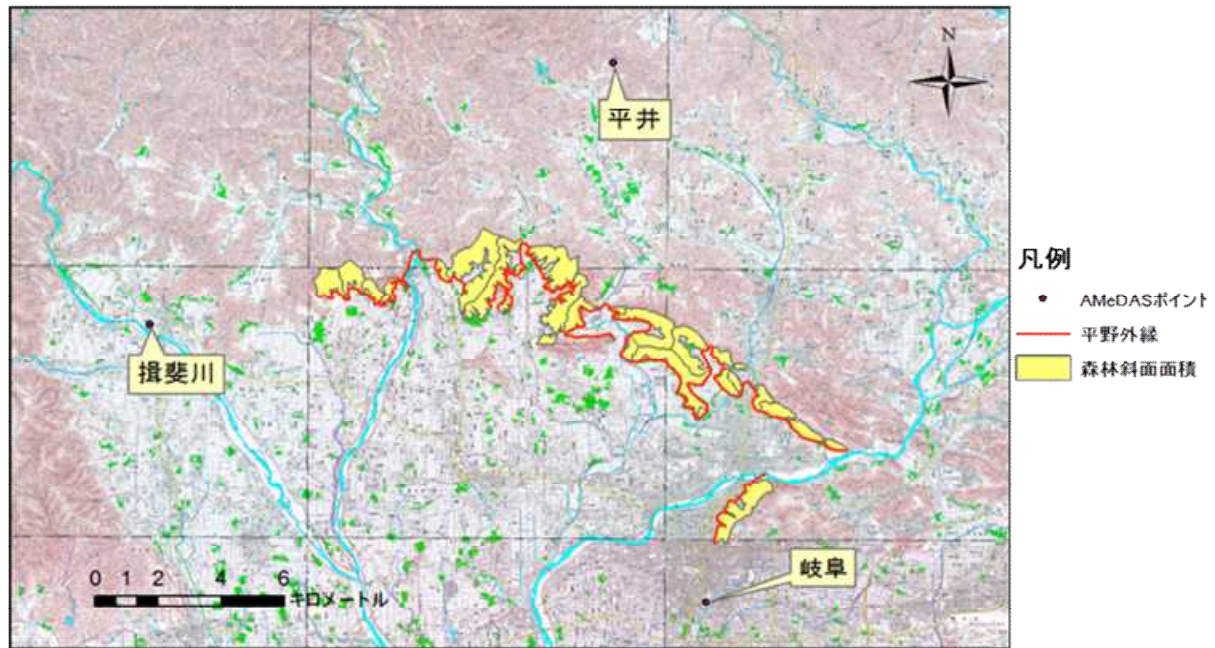


図 17 濃尾平野に隣接する森林斜面のポリゴン

= 203mm/year と評価された。蒸発散量 E について、降雨時の遮断蒸発は約 10% と推定されているが、森林からは無降雨時も蒸発散により土壤中の水分損失が発生している。岐阜気象台の気象データ及び次のバルク式(8)を用いて、簡易的に年間蒸発散量を求めた。

$$\lambda E = \lambda \rho \beta C_H U [q_{\text{sat}}(T) - q] \quad (8)$$

ここで、 E (kg/m²/s) は蒸発量、 λ は水の気化潜熱、 ρ (kg/m³) は空気密度、 β は地表面の蒸発効率、 C_H は顕熱のバルク輸送係数、 U (m/s) は風速、 q_{sat} は気温 T における飽和比湿、 q は比湿である。式(8)より求めた年蒸発散量 E は、580mm/year と評価された。各パラメータは植生域の標準として提案されている値を用いているが、若干の過大評価、過小評価は含まれる。

以上の解析結果を用いて、安食谷川流域の年間水収支を次の式(9)で評価する。

$$R = Q_d + Q_b + E + \varepsilon \quad (9)$$

ここで ε は水収支式の残差、すなわち地下水涵養量である。上記で評価した R 、 Q_d 、 Q_b 、 E の各値を代入すると、 $\varepsilon = -95$ mm/year と評価され、地下水涵養量はマイナスとなる。蒸発量は過少、過大評価の可能性を含み、直接流出量は過少評価の可能性を含むことを考慮すると、安食谷川流域において、森林斜面から直接地下水へ涵養されている量はほとんど無いと推測される。

b) 濃尾平野における森林からの地下水涵養量

濃尾平野の北部の長良川右岸から根尾川に至るまでの濃尾平野に隣接する森林斜面より濃尾平野に涵養する地下水量の評価を検討した。

GIS を用いて長良川右岸～根尾川間において濃尾平野と隣接する森林斜面を図 17 のようにエディットし、その面積を計測したところ、総面積は 16.7 km² であった。安食谷川流域では、土壤に浸透した雨水は、安食谷川という水みちを通し、基底流として降雨後に流出する。一方、近傍に水みちが存在しない斜面では、基底流として流出する雨水は、斜面下端より濃尾平野の地下水へ涵養していると考えられる。上記の森林斜面の総面積 16.7 km² のうち、水みちを介さず地下水帯へ涵養している領域の割合の評価は困難であるが、全領域で基底流出高に相当する雨水が地下水帯へ涵養していると仮定すると、全森林斜面での年間地下水涵養量は、3,390,000 m³/year と評価される。毎秒辺りに換算すると約 0.11 m³/s と評価できるが、上記の河川による地下水涵養量に比べると微少である。

3. まとめ

本研究は、岐阜県濃尾平野における今後の地下水管理のあり方に資するべく、主要な涵養源である河川や森林による地下水涵養の機構を究明したものである。

先ず、長良川扇状地を対象に、河川流量や地下水位の調査に基づき、河川による地下水涵養機構と河川周辺の地下水流動への影響を考察し、涵養量の評価法を検討した。その結果、

- 1) 河川区間の上下流における流量差に基づく水収支と洪水波の伝搬時間を考慮した一次元不定流計算による算定方法から地下水涵養量を算出した。扇頂から扇央に至る範囲での地下水涵養量は、河川水位の増減に伴って変化し、 $10\sim 30\text{m}^3/\text{s}$ 程度の範囲であった。特に、扇頂から扇央に至る範囲で、地下水涵養が卓越する傾向であった。
- 2) 地下水位等高線に基づいて、扇頂から扇端に至る範囲において河川水は地下へ流入する傾向にあり、特に、長良川の旧河道が「水みち」になっていることが判明した。また、長良川の旧河道の分岐点付近での動水勾配が高めにあり、河川による地下水涵養に支配的な役割を果たしていると考えられた。
- 3) 地下水涵養によって地下水位等高線に河川を中心とした地下水嶺が認められ、地下水は河川を起点として広がるように流動した後に南西に向かう傾向であった。また、長良川右岸側の地下水は、扇端付近で長良川を横断するような流動がみられ、地下水から河川が得水を受けている傾向にあった。これらの流向は、河川水位によって変動しない傾向であった。
- 4) 上記調査データに対して二次元飽和・不飽和浸透流解析を行うことによって、河川からの涵養機構の概略を究明して、河川の湧水位、低水位、平水位のときの涵養量には、河川水位のみならず河道の形状などの特性も影響することが推察された。
- 5) 地下水涵養量は、河川管理で用いられる水位流量曲線（HQ）と同型式によって、河川水位と二次式の関係で表現できることが判明した。この関係式によれば、対象地域では、河川流量の約 20% が涵養されていることが考えられた。

次に、濃尾平野に隣接する森林斜面より、河川を介さず直接涵養する地下水量の評価を水文解析および GIS を用いて評価した。その結果、

- 6) 調査対象の安食谷川流域における水収支の評価では、蒸発散量を過大評価している可能性はあるが、収支はマイナスとなり、ほとんど地下への浸透は無いと評価された。
- 7) 基底流出に相当する水分が地下水涵養のソースとなると仮定し、地下水涵養量の評価を行ったところ、長良川右岸～根尾川までの範囲の森林斜面からの地下水涵養量は約 $0.11\text{m}^3/\text{s}$ と評価された。これは、長良川における河川による涵養量に比べると極めて少量であった。

【4】今後の課題・展望

本研究は、特に河川による地下水涵養量の評価・表現法に主眼を置いて究明したものである。涵養量の評価は、扇状地における河川流量の水収支を把握することに基づいたが、河川流量には砂州等の河道特性が影響することなどが予想され、水収支による地下水涵養量の評価法の精度等について検討を加える必要があると考えられる。また、地下水涵養量は、水位流量曲線と同型で、河川水位と良好な関係にあることが得られ、涵養量の管理において有用であるとみられた。測定値の蓄積によって、上記の河道特性による影響も含めて、涵養量の管理方法等を検証することも重要である。一方で、地下水の涵養・流動に関する解析モデルの構築を図るなどして、濃尾平野の地下水のメカニズムを明らかにすることも課題として残される。

濃尾平野の地下水について長良川が重要な役割を果たしていることが判明し、今後、揖斐川・木曾川および中小河川の扇状地における涵養機構などを解明することによって、濃尾平野の地下水管理のあり方等に繋ぐことが重要である。