

熊谷市の地下水涵養量の推定[#]

小川 進* 齋藤 恵介** 高村 弘毅*

キーワード：雨水浸透ます、GIS、リモートセンシング、地下水涵養、湧水

1. はじめに

都市化に伴う不浸透域の増加は、都市型水害、ヒートアイランド、湧水の枯渇の原因となっている。こうした水環境の悪化に対処すべく、雨水浸透ますの設置等の流域対策がとられている。そこで本研究では湧水の枯渇や地下水位低下への対策として、雨水浸透施設の最適配置をGISやリモートセンシングを用いて検討することとした。今回はまず土地被覆分類と土壤試験を含めた水文解析結果より、現況の浸透量の推定を試みた。

2. 対象地域

対象地域である埼玉県熊谷市は新荒川扇状地に位置しており、ここを流下する表層水が伏流水となって浸透する地域である(図1)。現在、約16万の人口を抱え、県北の中心となっている市である。

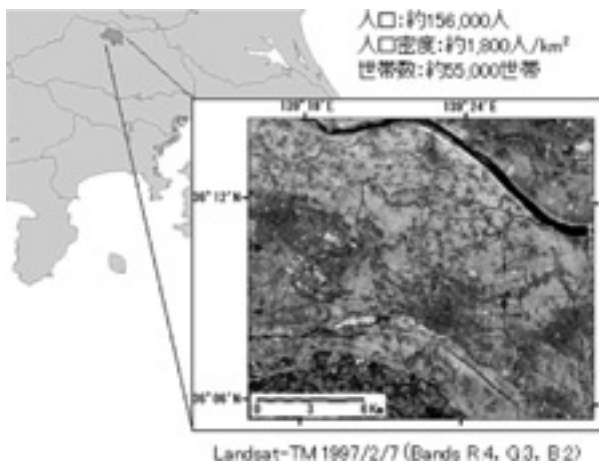


図1 研究対象地

3. 方法

降水量、蒸発散量、浸透量、流出量、上下水道漏水量から地下水涵養量を土地被覆ごとに求め、町丁目単位で集計した。

3-1. 土地被覆分類

Landsat-TM データを用いて土地被覆分類を行った。Landsat-TM データを用いて土地被覆分類を行う場合、1時期のデータから水田等を精度良く抽出することは困難である。そのため表1に示す農繁期と農閑期の2時期のデータを用いて教師つき分類を行い、森林、水田、畑地、草地、市街地、水域、裸地に分類した。各土地被覆の面積率を表2に示す。

3-2. 農業用水量および降雨量

農地(水田、畑地)では5月から10月までの農繁期に大量の水を消費する。熊谷市の水田でも6月半ばから9月にかけて約3,000mmの水が灌漑用水として使用される。このうち、浸透量は15-25mm/day(中澤、1991)であり、農繁期総浸透量は約2,000mmと推定される。よって水田については降雨による浸透量に農業用水の浸透量として2,000mmを加えることにした。同様に畑地では400mmの水が農業用水として使用されるため、こ

表1 使用データ諸元

Landsat - TM: Path = 107, Row = 35
1997 / 2 / 25 (農閑期)
1997 / 8 / 4 (農繁期)

表2 土地被覆率 (%)

水田	畑地	森林	草地	裸地	市街地	水域
31.2	12.8	2.6	4.1	3.9	44.9	0.4

* 立正大学地球環境科学部

** 立正大学大学院地球環境科学研究科学生(現 国際航業株式会社)

2003年度立正大学大学院地球環境科学研究科オープンリサーチセンター業績

の値を考慮して計算を行った。

なお、計算に用いた年間降雨量は熊谷気象台の10年間(1991~2000年)の記録の平均値、1,310mmとした。

3 - 3 . 浸透量および流出量

土地被覆ごとに土壌サンプルを採取し浸透試験を行うことで、土地被覆ごとの浸透能を算定した。

浸透能を表現するには、浸透方程式があるが鉛直一次元浸透では土壌中の浸潤前線 (wettingfront) に Darcy 則を適用した Green と Ampt (1911) による次式がある。

$$i = k_s(H+z+H_f)/z \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i : 浸透能、 k_s : 飽和透水係数、 H : 湛水浸、 z : 湿潤深さ、 H_f : 毛管吸引圧 (> 0) である。ところで、浸透現象を三次元的に蒸発まで含めて記述するには、一般的には Darcy 則を不飽和浸透まで拡張した Richards の式が用いられる。

$$\partial\theta/\partial t = \nabla \cdot (k\nabla\Phi) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Phi = H+z-\phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 θ : 体積含水率、 k : 不飽和透水係数、 Φ : 総ポテンシャル、 z : 深度、 ϕ : マトリックポテンシャルである。Philip (1957) は Richards (1952) の式を一樣な一次元、半無限土壌カラムに適用して、次の近似解を得た。

$$i = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで S : 吸収能、 K : 定数である。しかしながら Richards の式を実際に数値解析で使用するには、一般的には土壌水分特性をあらかじめ実験的に求めていなければならない。たとえば Campbell (1974) の次の実験式を必要とする。

$$\phi = \phi_e(\theta/\theta_s)^{-b} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$k = k_s(\theta/\theta_s)^{2b+3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで ϕ_e : 空気エントリー値、 θ_s : 飽和体積含有率、 b : 定数である。Philip 式(4)は Green-Ampt 式と等価であるので、次のように変換することができる。(小川・和泉、1990)

$$i = \frac{1}{2}St^{-1/2} + k_s/\beta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$S = \sqrt{k_s\Delta\theta(H+H_c)/\beta} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ 、 H_c : 有効毛管駆動圧、 β : 粘性補正因子 (≈ 1.4) である。 ϕ_e 及び b は Campbell 式(5)より導く以下の式で求める。

$$\alpha = -(\phi_e/\theta_s)b \approx H_c/\Delta\theta \quad \dots\dots\dots (9)$$

土地被覆ごとの浸透能より積算浸透量を算出し、以下の式より流出率を算定した。

$$P_c = \frac{\sum(P_i - I)}{P_a} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$I = St^{1/2} + k_s t/\beta \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで P_c : 流出率、 P_i : 一雨降雨量、 I : 一雨積算浸透量、 P_a : 年間降雨量である。

3 - 4 . 蒸発散量

ペンマン法 (1948) により蒸発散量を算定し、土地被覆別地下水涵養量を推定した (Brutsaert, 1982)。

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_a^* - e_a) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Q_n = \frac{R_n}{L_l} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$R_n = R_s(1 - \alpha_s) + \epsilon_s R_{ld} - R_{lu} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$R_{ld} = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\epsilon_a = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{1/7} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$R_{lu} = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 E : 蒸発散量、 $\Delta = (de^*/dT)_T$ 、 $\gamma \equiv c_p P/\epsilon l$ 、 Q_n : 有効エネルギー (mm/day)、 $f(u)$: 風関数 (mm/day)、 u : 平均風速 (m/s)、 e_a^* : 飽和水蒸気圧 (hPa)、 e_a : 水蒸気圧 (hPa)、 R_n : 正味放射量 (W/m²)、 L_l : 蒸発潜熱 (= 2.454 × 10⁶ J/kg)、 R_s : 短波長放射量 (W/m²)、 α_s : アルベド、 R_{ld} : 下向き長波長放射量 (W/m²)、 R_{lu} : 上向き長波長放射量 (W/m²)、 ϵ_s : 表面消散係数 (= 0.97)、 ϵ_a : 大気消散係数、 σ : ステファン・ボルツマン係数 (5.67 × 10⁻⁸ Wm⁻²K⁻⁴)、 T_a : 気温 (K)、 T_s : 地温 (K) である。なお、土地被覆別アルベドは、Kotoda (1986) の値を用いた。

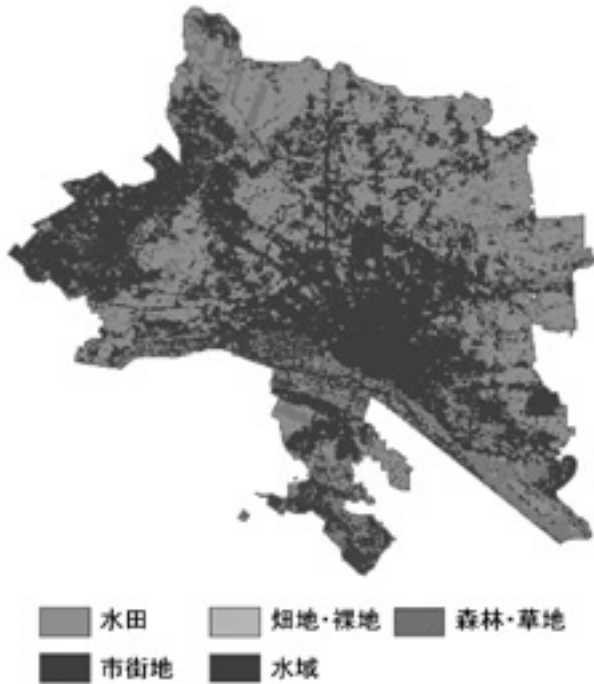


図2 土地被覆分類図

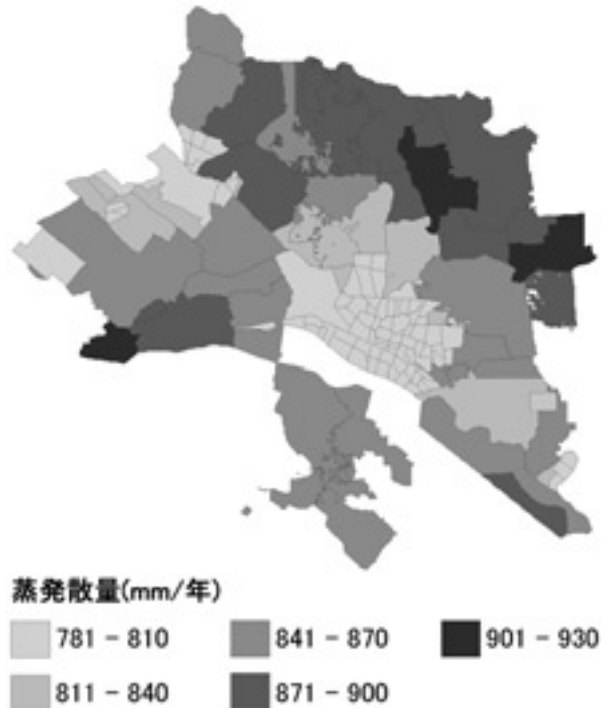


図3 年間蒸発散量分布図

表3 飽和透水係数 (cm / s)

水田	畑地	森林	草地	裸地	市街地	水域
1.8×10^2	1.6×10^2	2.6×10^2	3.5×10^3	1.9×10^2	-	-

表4 吸収能 (cm / s^{1/2})

水田	畑地	森林	草地	裸地	市街地	水域
1.3×10^2	5.0×10^2	3.0×10^2	7.6×10^3	8.3×10^2	-	-

表5 流出率 (%)

水田	畑地	森林	草地	裸地	市街地	水域
0	0	0	0	0	100	0

表6 年間蒸発散量 (mm)

水田	畑地	森林	草地	裸地	市街地	水域
954	835	970	908	783	781	1,023

3 - 5. 上下水道の漏水量

上下水道の漏水量を町丁目ごとに求めた。上水道の使用量は、人口あたり366l/dayである。したがって、町丁目ごとの人口より使用量が求まり、無効水率10%から漏水量が算出される(熊谷市水道部、2002)。下水道はほぼ上水道の使用量に相当し、漏水率も同程度と考えられることから、上水道の漏水量と同じく10%とした。

4. 結果

熊谷市の土地被覆分類結果を図2及び表2に示す。市街地が5割近くを占め、市の半分が不浸透域であることが読み取れる。また、市の北部や荒川南岸の水田地帯に休耕地が見られ、減反による水田面積の減少が認められた。

土壌試験により土地被覆ごとの飽和透水係数、吸収能を求め浸透率を算出した。それぞれの結果を表3、4、

5に示す。市街地以外の土地被覆では飽和透水係数が 10^{-2} cm/sのオーダーと非常に高いため流出率は0と推定された。

年間蒸発散量の推定結果を表6及び図3に示す。土地被覆ごとの差は顕著であるものの、町丁目ごとの集計では800mm台前後と、地域による差は小さい傾向となった。

漏水量分布図を図4に示す。水道管は人口の多い市街地に集まるため、必然的に市街化率の高い中心部の町丁目に漏水量が集中している。蒸散量と比べると収支全体に対する絶対量は小さい値にとどまった。

以上の結果より年間地下水涵養量を求めた。結果を表7及び図5に示す。市の中心から離れた地区は雨水浸透に加え、水田灌漑による浸透が大きく影響していることが読み取れる。一方、市街地が集中している地区では、降雨はほとんど流出してしまい、地下浸透は上下水道の漏水によって成り立っていることが明らかとなった。

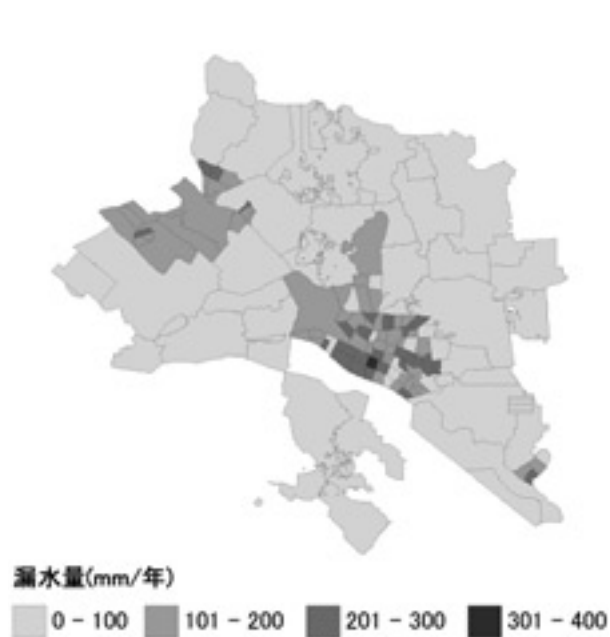


図4 年間漏水量分布図

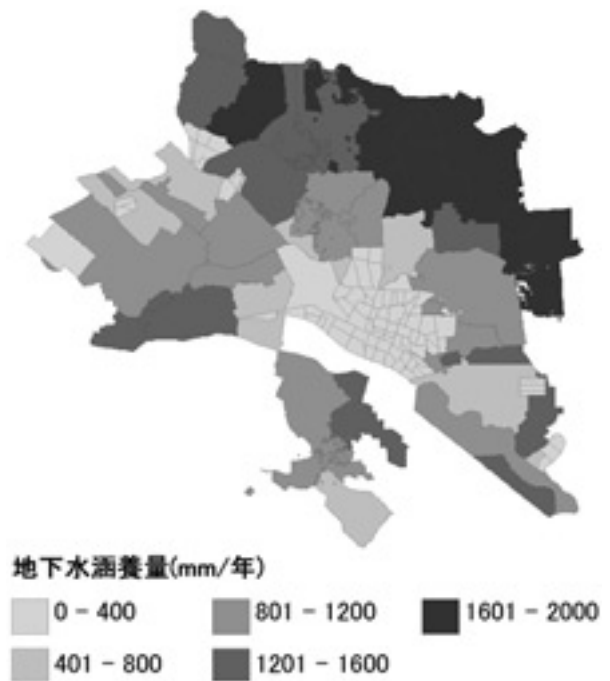


図5 年間地下水涵養量分布図

表7 年間地下水涵養量 (mm)

水田	畑地	森林	草地	裸地	市街地	水域
2,956	875	340	402	527	108	287

5. 考察

本研究の結果から町丁目ごとの水収支の傾向が明らかとなった。特に市の中心部での浸透量の低さが顕著に表れた。こうした市街地の水循環を改善するためには、雨水浸透ます設置が有効である。60m²の屋根面積に対して、50mm/hの降雨を仮定すると、3m³/hの流出であり、浸透ますの標準処理量1.6m³/hから2基で十分対応できる。しかし市街地面積は38.2km²であり、雨水浸透ます2基で100m²の敷地をカバーすれば、765,000基が必要となる。効率よく浸透施設を設置するには、透水性舗装等の設置も検討しなければならない。この計算で明らかのように、熊谷市の湧水量の減少は宅地開発と減反による水田面積の減少が原因である。したがって、浸透施設の設置だけでは、以前の湧水を取り戻すことには限界があることも銘記する必要がある。

6. 結論

熊谷市の水循環の改善に雨水浸透ますの設置が計画されている。この効果を最大限に生かすための基礎的な解析を行った。すなわち、衛星データから土地被覆分類を

行い、これをもとに水文解析から熊谷市の町丁目ごとの雨水浸透量分布図、蒸発散量分布図、地下水涵養量分布図を作成した。これらの分布図は雨水浸透施設設置の計画に利用できるものである。熊谷市の湧水量の減少は宅地開発と減反による水田面積の減少が主な原因である。浸透施設の設置だけでは、限界があることを銘記する必要がある。

参考文献

- 1) Brutsaert, W., Evaporation into the Atmosphere, Kluwer Academic Publishers, 1982.
- 2) Kotoda, K., Estimation of river basin evapotranspiration, Environmental Research Center Papers, University of Tsukuba, 8, 1986.
- 3) Green, W.H. and G.A. Ampt, Studies on soil physics, 1, The flow of air and water through soils, J. Agr. Sci., 4, 1, pp. 1 - 24, 1911.
- 4) Richards, L.A., Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, 1, 318 - 333, 1931.
- 5) Campbell, G.S., A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Sci. 117, pp. 311 - 314, 1974.
- 6) Philip, J.R., The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations, Soil Sci., 84, pp. 257 - 264, 1957.
- 7) Penman, H.L., Natural evaporation from open water, bare soil, and grass, Proc. Roy. Soc. London, A193, 120 - 146, 1948.

- 8) 小川 進・和泉 清, 流域の浸透パラメータとその評価法, 土木学会論文集, 第423号, pp.121 - 129, 1990.
- 9) 熊谷市水道部, 平成13年度水道事業年報, 2002.
- 10) 中澤弉仁, 水資源の科学, 朝倉書店, 1991.

要 旨

都市化に伴う不浸透域の増加は、都市型水害、ヒートアイランド、湧水の枯渇の原因となっている。こうした水環境の悪化に対処すべく、雨水浸透ますの設置等の流域対策がとられている。そこで本研究では湧水の枯渇や地下水位低下への対策として、雨水浸透施設の最適配置を GIS やリモートセンシングを用いて検討することとした。今回は土地被覆分類と土壤試験を含めた水文解析結果より、現況の浸透量の推定を試みた。まず、流域の浸透パラメータの簡便な推定法を導出した。すなわち、フィリップ式の2項を浸透計で実験的に求め、グリーン・アンプト式の項に対応させ、キャンベルの土壤水分特性の実験式から全てのパラメータを同定した。本研究は、熊谷市での浸透実験の実測値や土壤の特性値をもとに、流域浸透事業の方向を検討した基礎的な研究である。

Groundwater Recharge Estimate in Kumagaya City

Susumu OGAWA*, Keisuke SAITO**, and Hiroki TAKAMURA*

*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University, **Graduate School Geo-environmental Science, Rissho University

We derived a simple evaluation method for groundwater recharge estimate with GIS in Kumagaya City. The Philip's two-term equation was available for infiltration parameters. Eight kinds of infiltration tests were carried out for each 1-km by 1-km mesh in the city. From satellite data, a land cover classification map was obtained. For each land cover, rainfall, runoff, and evapotranspiration were calculated. Rainfall was averaged for ten years at Kumagaya Meteorological Station. Runoff was derived from rainfall and Philip's infiltration parameters each land cover. Evapotranspiration was calculated with modified Penman's equation from the meteorological parameters. Finally, groundwater recharge was estimated each town in the city.

Keywords: infiltration pit, GIS, groundwater recharge, remote sensing, seepage