

流域水循環健全化施策立案のための 簡易水収支マップの作成

MAPPING OF SIMPLIFIED WATER BALANCE FOR PLANNING RESTORATION OF WATER CYCLE IN BASIN SCALE

吉田 拓司¹・山田 晃史¹・緒方 陸¹・富樫 聡²・二瓶 泰雄³
Takushi YOSHIDA, Koushi YAMADA, Riku OGATA, Akira TOMIGASHI and Yasuo NIHEI

¹正会員 修（工） 八千代エンジニアリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋五丁目20-8）

²正会員 博（工） 国立研究開発法人産業技術総合研究所（〒963-0298 福島県郡山市侍池台二丁目2-9）

³正会員 博（工） 東京理科大学理工学部土木工学科 教授（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

Water Cycle Basic Plan calls for concerned parties on integrating water resource management in cooperation. Rainwater infiltration has beneficial effect for the water cycle of inner-city where large part of the surface is impervious and the extreme weather leads the occurrence of the heavy rainfall in short duration. Necessary information, however, is too deficient to expand the implementation of the policy in entire basin. For the reason, this study aimed to develop simple water balance model map as fundamental data to prepare restoration plan of basin water cycle. The water balance map shows the result of mesh analysis by 1km and data on the transition of surface runoff and infiltration from 1976 and 2014. As a result, infiltration in the whole basin area is found to be decreased along with recent urbanization, significantly in terrace area of Lake Inba-numa basin. To achieve restoration of the infiltration in 1976, the study calculated additional 406,682 infiltration inlets are needed to be installed.

Key Words : Water cycle, water balance, Lake Inba-numa, infiltration, basin

1. はじめに

2015年に策定された水循環基本計画では、関係者が連携して一体的かつ総合的にマネジメントを行う事が求められている¹⁾。また、同年に国連総会でSDGs（持続可能な開発目標）が採択され、翌年に我が国においてもSDGs推進のための具体的な施策として健全な水循環の構築に向けた取組の推進を位置づけている²⁾。水循環系が回復する主な例としては、森林や農地等の涵養機能³⁾が考えられる。その一方で、急激な人口増加に伴う不透水面の増加により地下水涵養機能は低下する。市街地には局地的な豪雨に対する脆弱性が内在しており⁴⁾、近年の異常気象に伴う記録的短時間降雨の回数増加による都市型水害（内水氾濫等）の発生も危惧される。

市街地の水循環系の問題を解決していくための施策として、様々な雨水浸透施設が導入されている。例えば屋根雨水を地中に浸透させる「雨水浸透マス」についてはその効果が確認されており⁵⁾、「雨水貯留施設」と合わせて様々な自治体で補助金制度等を設けて普及を促進し

ている。このような雨水管理について、米国では既にグリーンインフラ（以下、GI）の検討・実践が進められている。2015年以降、我が国においてもGIの概念が関係省庁の行政計画に位置付けられており⁶⁾、GIの観点からも雨水浸透施設が普及していく可能性がある。

しかしながら、今後、水循環系の回復を目指していく上では、流域全体を視野に入れ、関係者が効果的な施策を展開していく必要があるものの、現状では事業実施に向けた情報は不足している。また、このような課題を解決するために、近年、国交省が実践している統合型水循環モデルの活用も考えられるが⁸⁾、設定パラメータの複雑さや計算負荷、さらに、流域展開を推進する都道府県の財政状況を勘案すると、全国展開には時間を要すると考えられる。

そこで本研究では、関係市町の流域水循環健全化に資す施策立案の基礎データとするため、流域における簡易水収支マップを作成した。ここでは、印旛沼流域における過去と現在の水収支解析の実施により、地域別の水収支の変遷について把握し、市街地化に伴い減少した地下水浸透量や、過去の水循環系へ回復するために必要な雨水

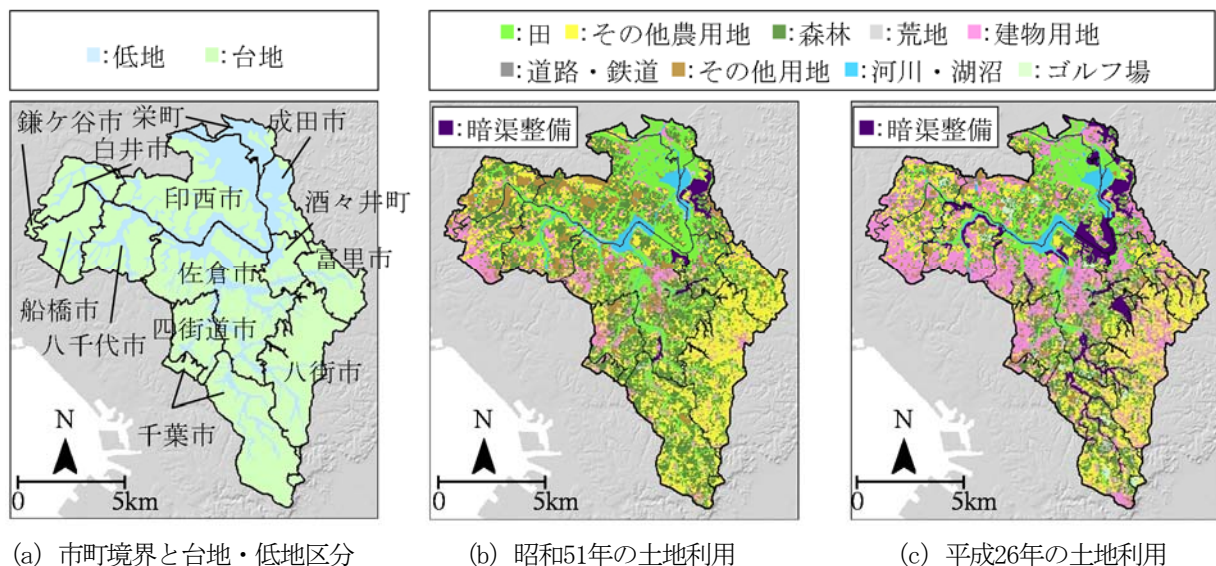


図-1 印旛沼流域の土地利用状況及び、圃場整備事業による暗渠排水範囲

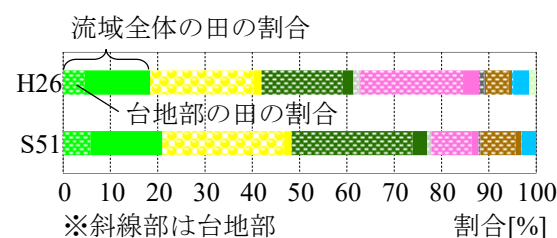


図-2 土地利用の割合（斜線は台地部，凡例は図-1(b) (c)と同様）

浸透マスの設置基数を試算した。

2. 研究方法

(1) 研究対象範囲

研究対象範囲は、千葉県北西部に位置する利根川水系の印旛沼流域とした。印旛沼の流域面積は541km²であり、西印旛沼と北印旛沼に分かれている。西印旛沼には、鹿島川、高崎川、手繰川、神崎川、新川、桑納川、師戸川が流入し、北印旛沼には江川、松虫川が流入している。

図-1 (a) には、印旛沼流域に位置する市町（鎌ケ谷市、船橋市、八千代市、四街道市、千葉市、八街市、富里市、佐倉市、酒々井町、成田市、印西市、栄町、白井市の13市町）と台地・低地部を示している。台地・低地については、日本の地形・地盤デジタルマップをもとに⁹⁾、地質区分を類型化し、「更新統」を台地、「完新統」「その他」を低地とした。図-1 (b) と (c) には昭和51年と平成26年の土地利用状況を示す。また、同図には、暗渠排水の整備範囲についても示している。印旛沼流域の水田では、乾田化のために昭和20年代から区画整理が行われ、暗渠排水整備が昭和40年代から実施されており¹⁰⁾、

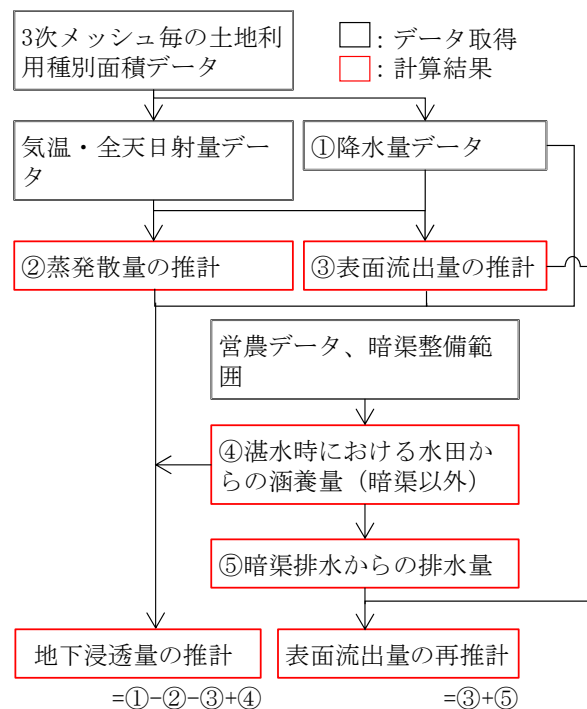


図-3 水収支解析算定フロー

昭和51年から平成26年にかけて暗渠排水の整備範囲が広がっている事が確認できる。

図-2には、印旛沼流域全体の土地利用状況と、台地部が占める割合を示している。流域全体を見ると、昭和51年から平成26年にかけて市街地化が増加し、森林やその他の用地が減少している事が確認できる。また、台地部に着目すると、田以外の土地利用については、台地部の占める面積割合が多い事が確認された。

(2) 水収支解析算定方法

このような印旛沼流域を対象とした水収支解析の算定

表-1 合理式による表面流出量の推計に用いた土地利用種別の流出係数
および土地利用種別の蒸発散量の推計に用いた算定方法

国土数値情報土地利用種別		合理式による表面流出量の推計に用いた土地利用種別の流出係数	土地利用種別の蒸発散量の推計に用いた算定方法
大項目	細目		
田	灌漑期	0.80	蒸発散研究グループ ¹⁷⁾
	非灌漑期	0.30	Suzuki and Fukushima ¹⁶⁾
その他農用地		0.30	Suzuki and Fukushima ¹⁶⁾
建物用地	浸透域	0.30	Suzuki and Fukushima ¹⁶⁾
	非浸透域	0.95	降水量－表面流出量
道路・鉄道		0.95	降水量－表面流出量
その他用地，ゴルフ場		0.30	Suzuki and Fukushima ¹⁶⁾
荒地		0.30	Suzuki and Fukushima ¹⁶⁾
山岳荒地（岩，万年雪）		0.95	降水量－表面流出量
河川及び湖沼		1.00	近藤 ¹⁸⁾ を参考に作成
森林		(降水量－蒸発散量) × (1－地下浸透率)	Priestley and Taylor修正式 ¹⁴⁾

フローを図-3に示す。本研究で用いる水収支解析は、印旛沼流域を1kmメッシュ（標準地域メッシュの第3次メッシュ）に分割して計算を実施し、簡易水収支マップを作成した。

a) 降水量

水収支解析に関係する必要なインプットデータとして、気象データについては、メッシュ平年値2010（気象庁）¹¹⁾を用いたが、降水量データについては、観測所の空間密度が疎となる地域では面的に正確な降水量分布となっていない可能性があることから、メッシュ平年値を解析雨量データ¹²⁾で補正した。具体的には、2011～2015年の月別解析雨量データと、メッシュ平年値2010と同手法により作成された降水量データ¹³⁾（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター作成）を同一メッシュごとに比較して、解析雨量相当に補正するメッシュ別係数を推計し、この係数をメッシュ平年値2010に乗じることで降水量の補正を行った。

なお、本計算では、降雨と降雪の判定についても行っており¹⁴⁾、ディグリーデイ法¹⁵⁾に基づく積雪・融雪プロセスを考慮することで、メッシュ毎の月別融雪出水量を評価している。

b) 蒸発散量，表面流出量

次に、蒸発散や流出の特性については、土地利用に強く依存することから、土地利用種別に評価手法を設定した。蒸発散量については、以下に示すとおりである。

【森林（Priestley and Taylor修正式）¹⁴⁾】

$$E = E_t + E_i = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{\lambda} + \beta P \quad (1)$$

【農地・田（非灌漑期）等（Suzuki and Fukushima¹⁶⁾】

$$E = 0.54 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{S}{\lambda} \quad (2)$$

【湛水している水田（蒸発散研究グループ¹⁷⁾）】

$$E = 0.82S_* \quad (3)$$

【水域（近藤¹⁸⁾）】

$$E = -0.9888l^2 + 41.629l + 561.97 \quad (4)$$

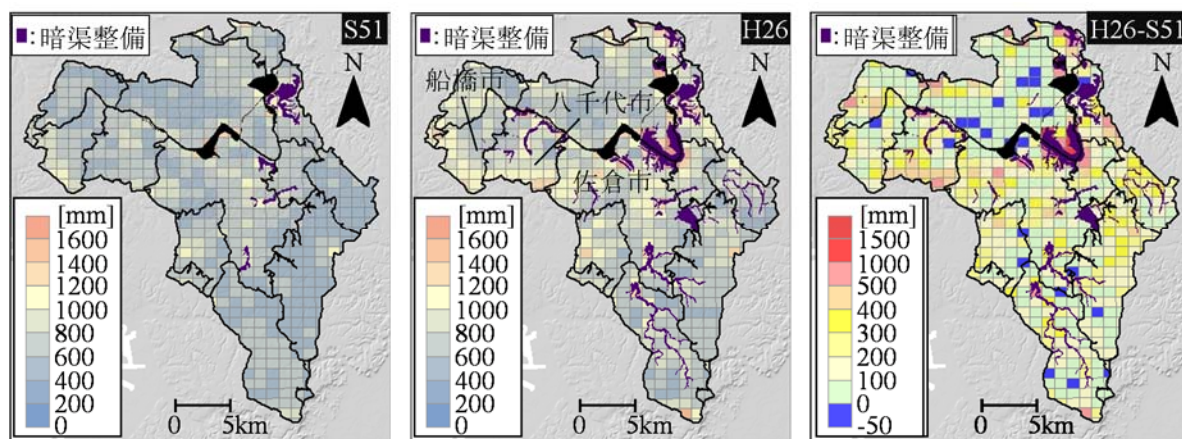
ここで、 E は土地利用ごとの蒸発量(mm/year)であり、 α はPriestley－Taylor定数、 Δ は飽和水蒸気曲線の傾き、 γ は乾湿計定数(hPa/°C)、 R_n は純放射量(=0.8 S ，MJ/m²)、 G は地中熱流量(MJ/m²)、 λ は蒸発潜熱(J/g)、 β は樹冠遮断蒸発率、 P は降水量(mm/month)、 S は全天日射量(MJ/m²)、 $S_* = 10R_n/\lambda$ 、 l はメッシュ重心点の緯度をそれぞれ示す。

表面流出量については、メッシュごとに集中型概念モデルとなる合理式（表面流出量=降水量×流出係数）を採用した。以上の土地利用種別の蒸発散量の算定方法や、表面流出量の流出係数については、表-1に示すとおりである。

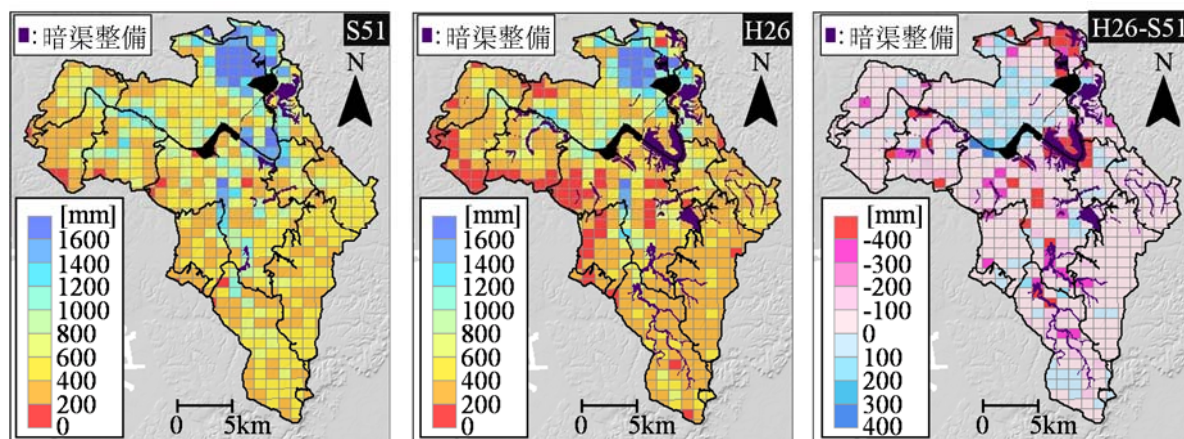
c) 地下浸透量

まず、水田の地下浸透量については、暗渠排水の未整備と整備範囲に分ける。未整備範囲では、5月中旬～9月下旬まで湛水期間中では、適正減水深とされる25mm/dを採用し^{19, 20)}、減水深から蒸発散量を差し引く事により水田からの涵養量を算定した。また、国土数値情報にて分類されている「田」は転作田や休耕田、耕作放棄地も含むことから、作物統計データ²¹⁾から市町村別の水稻作付面積率を把握し、田の面積に乗じる事により水稻作付面積を算定した。なお、水稻作付面積は昭和51年のデータをWEB上から取得が困難であることから、本計算では、平成27年のデータを用いて計算を実施した。また、暗渠排水の整備範囲については、平成20年に千葉県全域で整理された資料²²⁾を参考に、暗渠排水場所を抽出し、該当している「田」に関しては、地中に浸透後、河川や水路等に排水されることから、本計算では表面流出として取り扱った。

他の土地利用に関しては、降水量から蒸発散量と表面



(a) 昭和51年 (b) 平成26年 (c) 平成26年と昭和51年の差
図-4 表面流出量



(a) 昭和51年 (b) 平成26年 (c) 平成26年と昭和51年の差
図-5 地下浸透量

流出量を差し引いて地下浸透量を算定した。

3. 結果と考察

(1) 印旛沼流域における表面流出量、地下浸透量

以上より、1kmメッシュ毎の降水量、蒸発散量、表面流出量、地下浸透量の簡易水収支マップを作成し、ここでは、紙面の関係上、表面流出量と地下浸透量について結果を示す。

図-4に、昭和51年と平成26年の表面流出量及び、平成26年から昭和51年の結果を差し引いた量を示す。表面流出量の結果を見ると、昭和51年から平成26年にかけて全体的に増加している傾向が見られた。特に、この傾向は、西印旛沼から北印旛沼における広範囲の暗渠排水整備や、市街地化が進行した八千代市、船橋市、佐倉市で顕著に見られた。表面流出量の差分については、ほぼ全域で増加している事が確認された。また、図-5は地下浸透量を示しており、(a)～(c)については、図-4と同じ内容である。この図を見ると、地下浸透量の減少している箇所は、表面流出量が増加しており、市街化が影響している事が伺える。

次に、市町別に浸透量を整理した結果を図-6に示す。

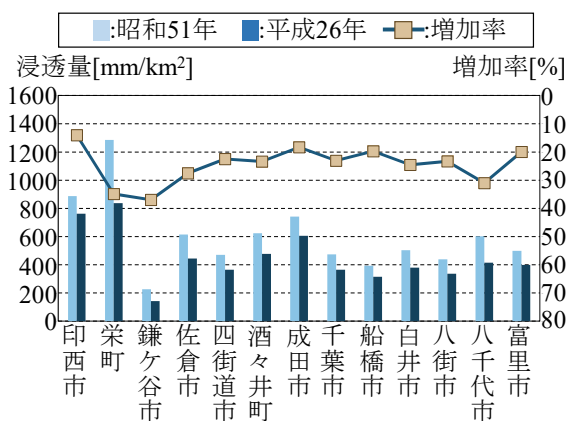


図-6 市町村別の浸透量の増減

ここでは、市町全域の浸透量を各市町の面積で除した値を示している。図-6を見ると、昭和51年から平成26年にかけて全市町で地下浸透量が減少している傾向が見られた。また、浸透量の増加率 $(= H26 - S51) / S51 \times 100$ が低かった市町は栄町、鎌ヶ谷市、八千代市であり、栄町は暗渠排水整備範囲が広がったことも浸透量の減少の原因の一つとして考えられるが、これらの市町は市街地化

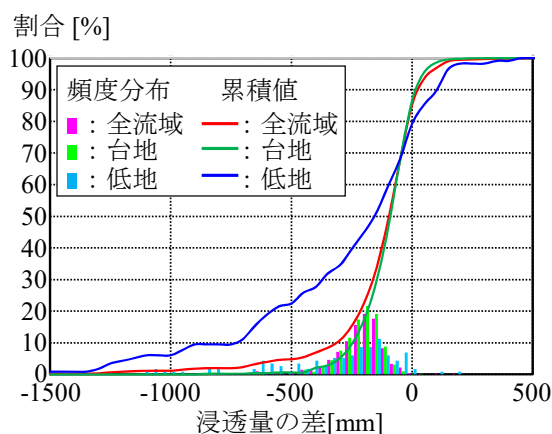


図-7 地下浸透量差（S51年-H26年）の頻度分布

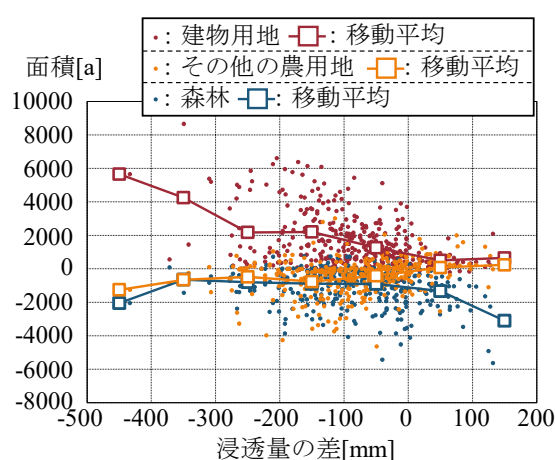


図-8 昭和51年と平成26年の台地を対象とした1kmメッシュ毎の土地利用面積割合の頻度分布

が進んでいた。

(2) 台地・低地別の浸透量

次に、図-1で示した台地と低地の浸透量について検討を行った。図-5(c)で示した地下浸透量差（S51年-H26年）の頻度分布及びその累積分布を図-7に示しており、全流域と台地、低地に分けた結果を示している。なお、1つのメッシュを台地と低地に分ける際には、占める割合が多い方を対象とした。図-7を見ると、全流域と台地の頻度分布の累積値が同じ挙動を示しており、中央値については、全流域、台地でそれぞれ-96mm、-91mmであった。低地については、異なる挙動を示しており、中央値は157mmであり、印旛沼流域の浸透量の減少はほぼ台地の影響である事が示された。

また、図-8には、台地を対象に昭和51年と平成26年の1kmメッシュ毎の浸透量の差と、「建物用地」、「森林」、「その他の農用地」の面積の変化の散布図を示している。ここでは、土地利用の変化との関係性を顕著に把握するために、1kmメッシュ毎に台地と低地を含む面積が80%以上を対象とした。また、図-8には、浸透量の

表-2 雨水浸透マス必要設置基数の試算結果

① 建物用地 の 増加面積 (m ²)	② 雨水浸透 マスの 効果面積 (m ² /基)	③(①÷②) 必要 設置 基数 (基)	(参考) 第2期行動 計画 設置目標 (基)
74,016,097	182	406,682	143,640

差が-500mmから100mm間隔の移動平均も示している。図-8を見ると、建物用地の面積が減少するにつれて、浸透量の差も小さくなる傾向が顕著に見られた。また、その他の農用地については、面積が増加するにつれて浸透量の差が小さくなる傾向が見られたが、建物用地のような面積の増減に対する浸透量の差への応答は小さかった。一方、森林については、面積の差と浸透量の差の関係性は見られなかった。

(3) 必要な雨水浸透マス設置基数の試算

不浸透面が多い市街地における浸透量を増加させるための対策の一つとして、雨水浸透マスが考えられる。ここでは過去から現在にかけて浸透量の減少分を補うために、どの程度浸透マスが必要か試算を行った。具体的には、以下のとおりである。

- ①：台地を対象として、過去から現在の建物用地の増加分の面積を算定する。
- ②：雨水浸透マスの効果面積を把握するために、航空写真を用いて、佐倉市585世帯の平均の屋根面積を算定し、雨水浸透マスの効果面積とする。
- ③：①と②の結果を用いて、浸透マスの必要設置基数を算定する。

これらの結果は表-2に示しており、上記の①～③は表中の①～③と対応している。表に示すように、浸透量の回復に必要な雨水浸透マスの設置基数は406,682基と算定された。これは、印旛沼流域水循環健全化計画 第2期行動計画²³⁾の目標値と比較して、約2.83倍の数値となる。本検討においては、雨水浸透マスの未集水面積と建物用地増加面積を同等として計算したが、土地利用種の「建物用地」は、屋根以外の敷地面積等についても含まれることから過大な数値となっている事に留意が必要であり、現実的には、大型の貯留浸透施設等の普及を推進する事が望ましいと考えられる。

このように、簡易的な水収支マップを作成することにより浸透量が減少している事を地域別に把握する事ができ、具体的な施策展開についても検討する事が可能である。今後、水循環健全化に向けて施策を立案する上では、有効なツールである事が示された。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 印旛沼流域を1kmメッシュに分割し、メッシュ単位での水収支解析を行った。浸透量は、降水量から蒸発散量、表面流出量を差し引き、灌漑期においては暗渠排水整備が行われていない水田を対象に、涵養量を加算し算定を行った。
- 2) 昭和51年と平成26年の土地利用状況を反映させたメッシュ毎の表面流出量と地下浸透量を算定した結果、過去から現在にかけて表面流出量は増加し、地下浸透量は減少している傾向が見られた。これらの特徴が顕著に見られた市町は、概ね市街化が進んでいる事が確認された。
- 3) 流域の中で、低地と台地に着目したところ、流域全体の浸透量の減少は、主に台地が影響している事が示された。また、台地の土地利用状況の変遷を確認すると、建物用地の面積が顕著に浸透量の差に影響している事が確認され、浸透対策を実施する上では、市街地を対象とする事が適切である事が示された。
- 4) 簡易水収支マップより得られた結果を用いて、現在から過去の浸透量まで回復させるために必要な浸透マスの設置基数について試算したところ、約40万基必要である事が示された。しかし、浸透マスは屋根面のみを対象とするため、他の貯留浸透施設対策についても検討していく事が望ましい事が示された。

なお、本報告は千葉県への委託で行っているものであり、データの使用については留意されたい。

謝辞：本研究は千葉県による「印旛沼流域水循環健全化会議」の浸透WGの一部として行われている。本WGのメンバーの方々には有益なご助言を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣官房水循環政策本部：水循環基本計画，2015。
- 2) 一般社団法人SDGs市民社会ネットワーク：基本解説そうだったのかSDGs，pp.1-106，2017。
- 3) 服部重昭，志水俊夫，荒木誠，小杉賢一郎，竹内郁雄：森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方(1)，水利科学，vol.260，pp.1-40，2001。
- 4) 濱武英，軸丸智菜美，小林拓仁，川越保徳，島武男，藤見俊夫：熊本白川中流域水田の地下水涵養と窒素除去の可能性，農業農村工学会論文誌，No.299(83-5)，pp.II 89-II 93，2015。
- 5) 真木雅之：都市型水害，日本気象学会 新用語解説，pp.43-45，2010。
- 6) 二瓶泰雄，市原翔平，吉田拓司，宮子雄太，林薫，上原浩，

東海林太郎，湯浅岳史：印旛沼の水環境再生を目的とした市街地流域対策に関する総合的検討，水工学論文集，vol.53，pp.1093-1098，2009。

- 7) 三菱UGJリサーチ&コンサルティング：季刊政策・経営研究，No.41，vol.1，pp.1-44，2017。
- 8) 菊池英明，長谷川怜思，中元道男，山田文彦：統合型水循環モデルによる白川流域の土地利用変化に伴う河川，地下水挙動の把握，日本地下水学会秋季講演会講演要旨，pp.222-225，2013。
- 9) 若松加寿江，久保純子，松岡昌志：日本の地形・地盤デジタルマップ，東京大学出版会，pp.1-96，2005。
- 10) 白鳥孝治：印旛沼物語，印旛沼流域水循環健全化調査研究報告，vol.2，pp.1-132，2014。
- 11) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/atlas.html>
- 12) 新保明彦：レーダー・アメダス解析雨量（I），天気，Vol.48，No.8，pp.579-583，2001。
- 13) 清野裕：アメダスデータのメッシュ化について，農業気象，Vol.48，No.4，pp.579-583，2001。
- 14) Sawano, S.・Hotta, N.・Tanaka, N.・suboyama, Y. and Suzuki, M. : Development of a simple forest evapotranspiration model using a process-oriented model as a reference to parameterize data from a wide range of environmental conditions, Ecological modeling, Vol. 309-310, pp.93-109, 2015。
- 15) Motoyama, H. : Simulation of Seasonal Snowcover Based on Air Temperature and Precipitation, Journal of Applied Meteorology, Vol. 29, pp.1104-1110, 1990。
- 16) M. Suzuki and Y. Fukusima : Estimates of evapotranspiration from land surface in Shiga Prefecture using digitalized square-grid map database, Lake Biwa Study Monographs, Vol.2, pp.1-55, 1995。
- 17) 蒸発散研究グループ：水田の蒸発散，農業気象，Vol.22，No.4，pp.13-21，1967。
- 18) 近藤純正：湖面や海面の蒸発，天気，Vol.59，No.6，pp.75-78，2012。
- 19) 中村和正，鶴木啓二，多田大嗣：寒冷地水田灌漑および大規模畑地灌漑に適した送配水機能の診断・改善技術の開発，土木研究所平成20年度土木研究所成果報告書，vol.60，pp.1-15，2008。
- 20) 山崎不二夫：水田の減水深，浸透量，土壤物理学会，vol.3，pp.9-14，1960。
- 21) 農林水産省：<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html#r>
- 22) 千葉県印旛農林振興センター：印旛農林振興センター土地改良事業完了地区図，2008。
- 23) 印旛沼流域水循環健全化会議：印旛沼流域水循環健全化計画 第2期行動計画（2016～2020年度），2017。

(2018.4.3受付)