

## V. 全流域モデルにおける窒素収支の再調整

### 1. 背景と課題

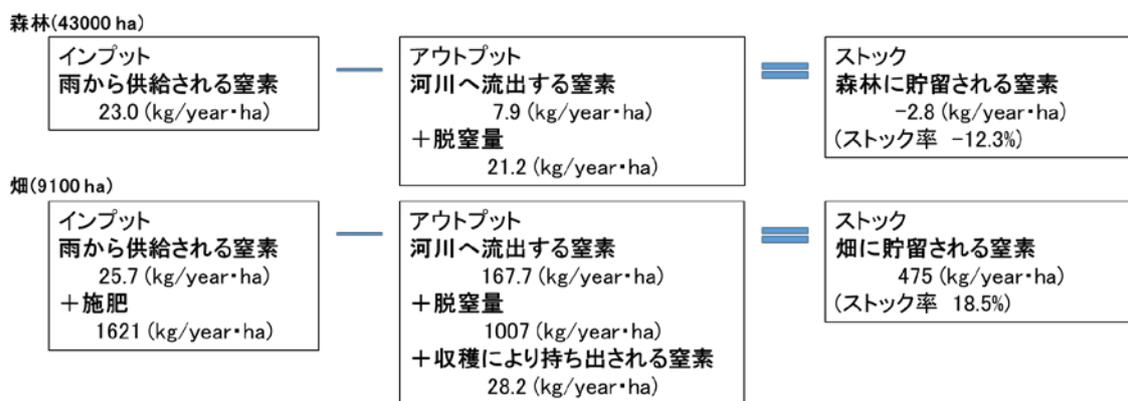
前年度に実施した、森林が海域に果たすポジティブな役割の総合評価において、森林の役割の一つとして森林のストック機能の評価を試みた。森林のストック機能は、森林にインプットされる様々な物質が一時貯留され、急速な流出を制御し時間をかけて下流に流れることにより海域に安定的に栄養塩や有機物を供給するとされる機能である。

森林への主な栄養塩のインプットとしては、雨に含まれる窒素や大気汚染・黄砂による乾性沈着、母岩からの供給などが考えられるが、SWAT モデル上で再現できる現象は限られている。ここでは、SWAT で推定が可能な栄養塩のうち、インプットの設定が容易で収支の計算が可能である窒素に着目してストック機能の評価することとした。

前年度時点における窒素収支の集計結果を図V-1 に示す。窒素のインプット量からアウトプット量を引いた値をストック量とすると、森林では窒素はストックされておらず、 $-2.8(\text{kg}/\text{year} \cdot \text{ha})$  が森林から流出している、という結果となった。一方、畑では  $475(\text{kg}/\text{year} \cdot \text{ha})$  がストックされておりストック率は 18.5%となった。

既往の知見<sup>2</sup>では、森林では窒素流入負荷量よりも窒素流出負荷量のほうが小さく、森林は窒素のストック源となることが知られている。前年度における窒素収支はそれに反する結果となっており、この原因として脱窒量が現実に即していない可能性が考えられた。前年度時点の窒素収支では、雨からの窒素供給量のほとんどが脱窒により空气中に放出されており、畑においても同様に施肥量のほとんどが脱窒されている。これは現実的には考えづらい結果であり、窒素収支に関してモデルの再調整が必要な状況であった。

そこで、今年度は全流域モデルの窒素収支が現実的な値となるよう、モデルの各種設定を見直し、窒素収支の再計算を行った。



図V-1 2018年度の全流域モデルによって推定した森林及び畑における窒素のインプット、アウトプット、およびストック量

<sup>2</sup> 独立行政法人森林総合研究所 “森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集 24. 森林流域の水質モニタリングとフラックスの広域評価 (改訂版)” (2010)

## 2. 調整方法

### 【集計対象】

SWAT モデルにおける窒素の循環プロセスは図 V-2 に示される流れが想定されている。窒素のインプットとしては、①：雨などによる大気中からの供給および施肥による供給、および②：細菌による窒素固定がある。アウトプットとしては、③：河川への流出、④：窒素を吸収した植物の収穫による持ち出し、⑤：空气中への脱窒、⑥：空气中への揮散といった要素がある。このうち、SWAT の出力結果を確認したところ細菌による窒素固定およびアンモニアの揮散については発生していなかったことから集計の対象外とし、①・③・④・⑤を集計対象とした。

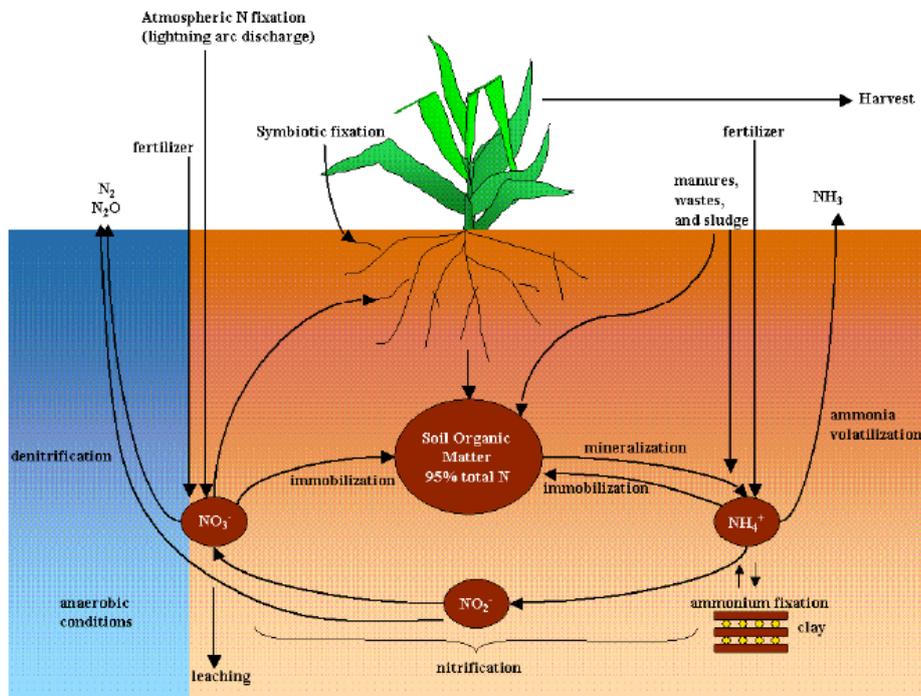


Figure 3:1-1: The nitrogen cycle

図 V-2 SWAT モデルにおける窒素循環の模式図 (Neitsch et al. 2011<sup>3</sup>より)

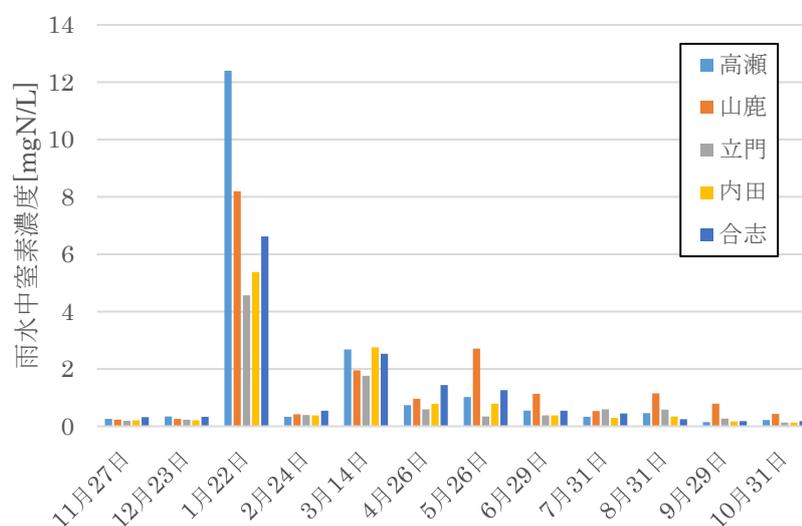
### 【雨の窒素濃度の調整】

検討委員会において、検討委員より雨から供給される窒素量が通常よりも多すぎるのでは、との指摘があった。実際に、菊池川流域内に設置された森林総合研究所の鹿北試験地における窒素流入量は 7.7~11.8[kg/ha/year]と観測されており<sup>2</sup>、前年度時点の SWAT による推定値の半分程度となっている。

<sup>3</sup> Neitsch, Susan L., et al. Soil and water assessment tool *theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute, 2011.

全流域モデルで設定している、雨に含まれる窒素濃度（RCN）の値は、本事業で2016年～2017年にかけて菊池川流域内の観測所において雨水を実際に採取して分析した値の平均値（1.25 mg/L）を用いていた。しかし、実測データを再確認したところ、サンプルの採取日によって値のばらつきが非常に大きいことがわかった（図V-3）。

SWATの設定上、雨に含まれる窒素濃度全流域に1つの値しか設定できず、地域別・期間別に設定することはできない。そのため、上記の平均値を単純にRCNとして設定すると、特定の濃度が高い日の値に引っ張られてしまい、全体としては過剰な窒素量をインプットすることになる。そこで、実測データの中央値である0.39mg/Lを採用することとし、RCNを0.39として設定を変更した。



図V-3 菊池川流域内の観測所において2016年～2017年に実施した雨水中窒素濃度の測定結果

#### 【施肥量の調整】

各作物の施肥量については作物暦や有識者からの情報等を元に、裏作が行われる場合を想定して設定を行ってきた。しかし、モデル上で設定された施肥量が全国平均の年間施肥量（三島・神山 2010<sup>4</sup>）を大きく上回る量となっていたことから、以下の点を見直し調整した。

- 実際にはすべての田畑が裏作を実施しているわけではなく、また表作での施肥を考慮して裏作の施肥量を調整すると想定されることから、施肥量を半量程度とした。
- SWAT では堆肥は乾燥重量を設定することとなっている。一般的な作物暦では湿潤

<sup>4</sup> 三島慎一郎, and 神山和則. "近年の日本・都道府県における窒素・リン酸フローと余剰窒素・リン酸の傾向に関する算出方法とデータベースおよび運用例." *農業環境技術総合研究所報告書* 27 (2010): 117-139.

堆肥重量を計上していることが考えられるため、約 0.15 を乗じて乾燥重量に直して設定した。

表3 各年の窒素収支

	化学肥料					堆肥					作物収奪					自然の出入り				
	1985	1990	1995	2000	2005	1985	1990	1995	2000	2005	1985	1990	1995	2000	2005	1985	1990	1995	2000	2005
平均	125.8	116.4	106.0	98.2	91.9	31.5	31.9	31.2	24.3	23.2	69.1	68.5	67.9	70.1	68.2	1.8	2.0	1.4	2.5	2.5
標準偏差	30.3	38.2	43.5	36.4	30.9	16.7	16.9	18.4	15	14.1	20.3	18.6	18.9	18.6	2.0	4.38	4.54	3.88	4.31	4.47
尖り度	0.21	5.97	14.12	8.67	2.89	1.73	4.11	5.16	2.59	3.81	7.73	4.85	5.00	3.40	3.50	2.67	0.65	3.05	0.06	-0.25
歪度	0.70	2.02	3.14	2.34	1.39	1.23	1.54	1.81	1.38	1.67	2.56	2.05	2.01	1.69	1.73	1.04	0.34	1.07	0.38	0.26
メディアン	134.2	122.5	107.8	106.2	98.8	31.7	30.5	29.5	21.5	20.2	57.8	55.0	54.2	56.1	54.4	-2.3	-1.2	-2.4	-0.7	-0.8
最大	229.1	282.0	334.8	271.0	204.6	89.4	99.3	106.4	77.2	74.6	148.7	132.3	131.3	124.8	121.6	13.3	11.5	11.5	10.6	10.4
最小	90.1	82.8	66.4	58.0	55.3	0.0	10.5	8.2	8.4	5.7	0.0	41.6	40.8	32.9	32.1	25.5	0.0	-10.1	-9.9	-9.3

図V-4 平均的な窒素収支（三島・神山 2010 より引用）

#### 【脱窒関連パラメータの調整】

前年度までの窒素収支では、窒素のインプット量のほとんどが脱窒として生態系外に流出していたことから、脱窒関連パラメータが不適切となっていた可能性が考えられる。また、森林から河川に流出する窒素量も平均より多いと検討委員に指摘を受けたため、脱窒関連パラメータだけでなく窒素収支関連のパラメータ全般を再調整することとした。

調整の対象パラメータおよびキャリブレーション結果については、巻末資料を参照のこと。

#### 【集計方法】

本項では森林のストック機能に着目しているため、土地利用ごとに窒素収支を集計する必要がある。SWAT の出力結果を土地利用ごとに集計するには、HRU (Hydrological Response Unit) を単位として集計する必要がある (HRU について詳細は巻末資料参照)。各 HRU における降水量や流出量は、[mm / 単位面積] という単位で出力されているため、土地利用ごとに集計するためには、単純に各 HRU からの流出を合計するのではなく、各 HRU の面積に応じて補正した値にして集計する必要がある。

そこで、各 HRU の面積に対してその土地利用全体の面積で割った値を重み (ウェイト) とし、それぞれの降水量や流出量にウェイトを乗じてから土地利用ごとに合計することで、面積に応じた加重平均値を得た。

例) 森林の HRU の、ある日の降水量・流出量を算出する場合 (森林の合計面積は 1ha で、HRU1~3 で構成されるとする)、土地利用別の集計結果は図V-5 となる。計算式は以下の通り。

$$\text{森林の降水量} = \sum \text{各 HRU の降水量} \times$$

(各 HRU の面積) / (土地利用が森林の HRU の面積の合計)

	HRU1	HRU2	HRU3		HRU1	HRU2	HRU3	森林合計
面積(ha)	0.5	0.2	0.3	→ 重み付け	降水量(mm)	0.5	0.2	0.6
面積割合	0.5	0.2	0.3		流出量(mm)	0.5	0	0.9
降水量(mm)	1	1	2					
流出量(mm)	1	0	3					

図 V-5 土地利用別集計値の計算例

なお、比較対象の土地利用は森林および畑とし、それぞれの窒素のインプット量とアウトプット量を上記の方法により集計し、最終的にどれだけの量が土地にストックされるかを推定した。

### 3. 調整結果

上記の再調整を実施した結果、窒素収支は図 V-6 のとおりとなった。森林では、雨による窒素供給は 7.4kg/year/ha であり、前述した鹿北試験地における観測結果(7.7~11.8)に近い値となっている。また、脱窒量もパラメータ調整後は大幅に減少し、1.3kg/year/ha となった。インプット量とアウトプット量を差し引きしたストック量は+1.2kg/year/ha となり、森林の窒素収支はほぼ平衡状態だがややストックしている結果となった。

また、畑では施肥量の調整の結果、大幅に減少し、既往文献(三島・神山 2010)の平均窒素流入量と近い値となった。脱窒量は投入量の 1 割程度となり、過剰な脱窒の発生を解消できたと考えられる。ストック量は-14.2kg/year/ha となり、畑土壌からは窒素が収奪されていると推定された。

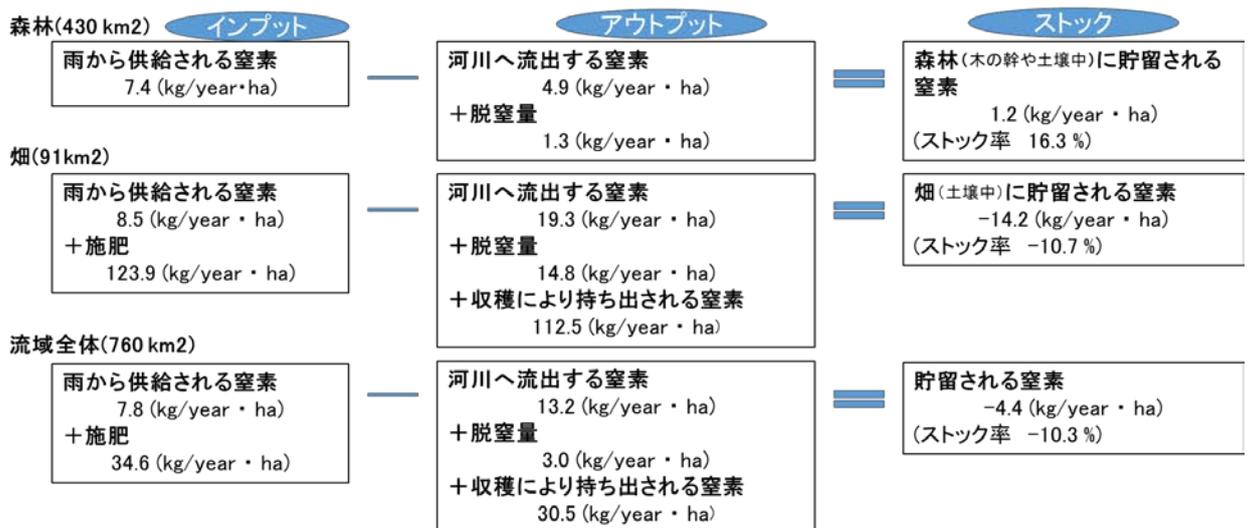


図 V-6 本年度の全流域モデルによって推定した森林及び畑における窒素のインプット、アウトプット、およびストック量

図V-7には、森林総合研究所が茨城県中部の森林流域における窒素収支を推定した結果を参考情報として示した。森林への雨による窒素流入量（8~9kg/ha）および窒素流出量（3~4kg/ha）は、SWATによって推定した量にいずれも近い値となっており、今回再調整を行った窒素収支が妥当な範囲となっていることが確認できた。

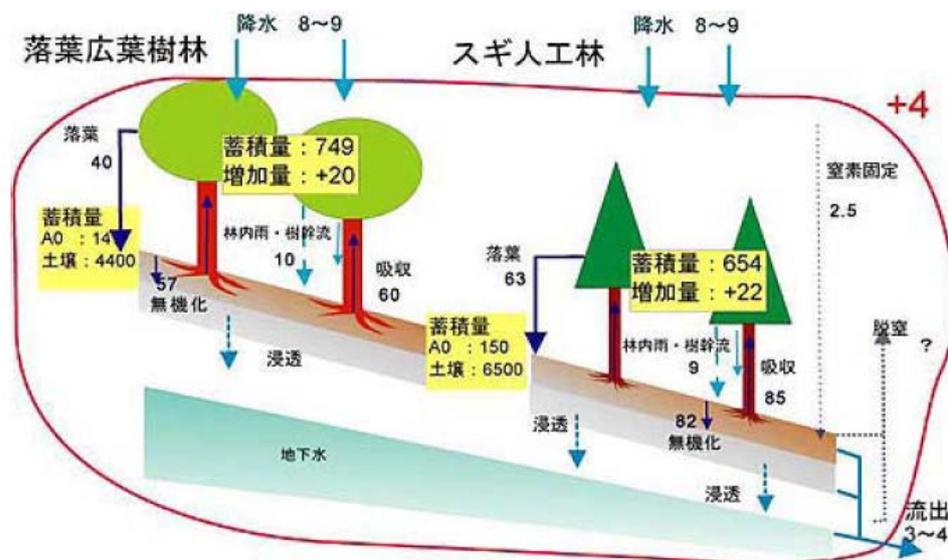


図2 茨城県中部の森林流域における窒素の蓄積量と移動量

図V-7 茨城県中部の森林流域における窒素の蓄積量と移動量（森林総合研究所 研究の森から第133号より引用）。図中の数値の単位はすべて kg/ha

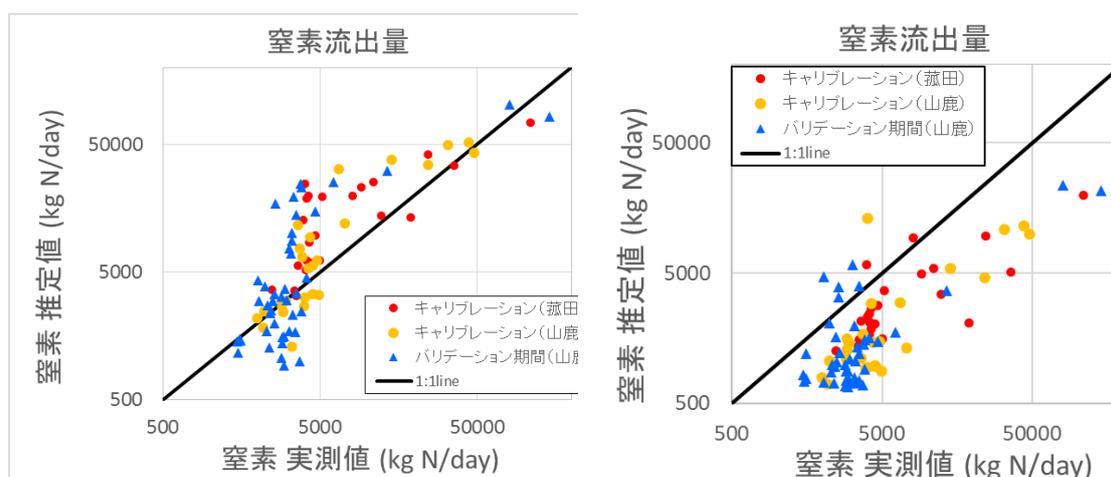
また、上記の図では脱窒量が不明とされていたが、農地と森林における脱窒量についてレビューを行った Barton et al. (1999)<sup>5</sup>によると、脱窒量は 0 -239kg N/year/ha までの範囲で大きくばらついてはいたが、灌漑され施肥が行われた畑地土壌からの発生量が大きくなっている。森林では平均 1.9kgN/ha/year とかなり少ないのに対し、畑地では平均 13kgN/ha/year と 1 ケタ多い値と報告されている。このレビュー結果と、SWAT による推定値はかなり近い値となっており、脱窒量についても適正な範囲で推定できたと考えられる。

今回再調整を行った全流域モデルの窒素流出量の再現精度について図V-8 および表V-1に示す。2018年度時点のモデルでは、ピークの流出量はうまく再現できていたものの、過大評価の部分と過小評価の部分が混在し、推定流出量にばらつきがあった。今回の再調

<sup>5</sup> Barton, L., et al. "Annual denitrification rates in agricultural and forest soils: a review." *Soil Research* 37.6 (1999): 1073-1094.

整では、全体的に窒素流出量は過小評価となったが、推定のばらつきは軽減され、出水時・平水時ともに一定の割合で過小となっている傾向があるように見受けられる。

再現精度の指標ではほとんどが **unsatisfactory** の評価となっており、再現精度は低い結果となっている。ただし、森林の窒素収支については妥当な値であることが確認できていることを考慮すると、過小評価の原因は農地または都市部にあることが推定される。本事業は主に森林の機能に着目したものであるため、この目的に対しては今回再調整したモデルで十分な推定ができていけると言える。ただし、全体の流出量としては一定程度過小評価となっていることに留意が必要である。



図V-8 再調整済みの全流域モデルにおける窒素流出量の推定値と実測値の比較。左図は2018年度時点の結果、右図は今年度の結果

表V-1 再調整済みの全流域モデルにおける窒素流出量の再現精度の指標

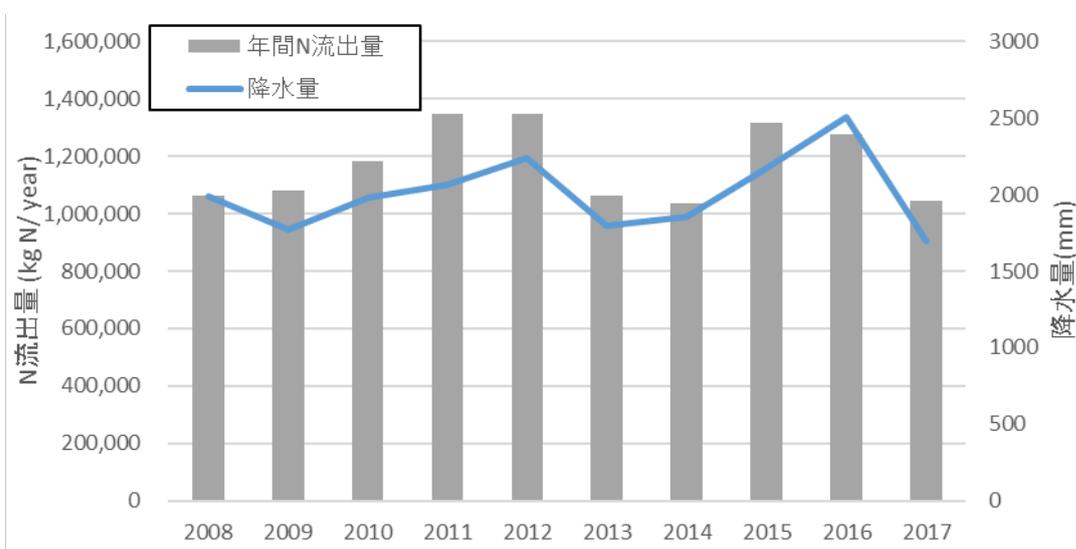
期間	観測地点	RSR	NSE	PBIAS
キャリブレーション	菰田	0.86 (us)	0.26 (us)	69.90 (s)
	山鹿	0.94 (us)	0.11 (us)	66.73 (s)
バリデーション	山鹿	0.87 (us)	0.24 (us)	72.69 (us)

図V-9 流出モデルの評価指標と精度評価基準 (Moriyasi et al. (2007)より引用)

Table 4. General performance ratings for recommended statistics for a monthly time step.

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

今回再調整した全流域モデルから年間窒素流出量を推定すると、年間 100 万～140 万 [kg/year]の範囲で増減していた（図V-10）。前年度時点のモデルによる推定結果は年間約 250 万～500 万[kg/year]であった（昨年度報告書参照）ことと比較すると、今年度推定結果は 1/2～1/5 に減少している。これの大きな要因は、施肥量を見直したことで河川に農地から流入する窒素量が大幅に減少したためと考えられる。今回のモデルは前述したとおり全体的に過小評価であるため、実際の流出量は、前年度時点のモデルによる推定結果と今回の推定結果の間に位置すると考えられる。

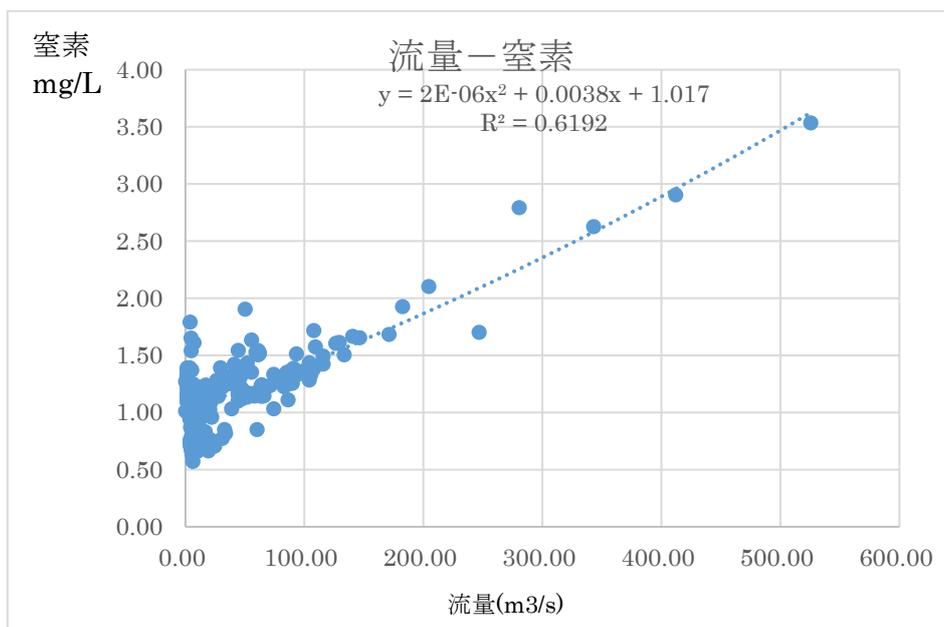


図V-10 再調整済みの全流域モデルから推定した年間窒素流出量の経年変化

今年度は平水時・出水時ともに豊富な現地調査データを取得できたことから、試行的に L（負荷量）-Q（流量）曲線および H（水位）-Q（流量）曲線を作成し、実測値ベースの年間窒素負荷量を推定した（図V-11）。

その結果、推定された実測値ベースの城観測所地点における年間窒素負荷量は、251,069kg となった。一方、SWAT の全流域モデルから推定された年間窒素負荷量は 134,284kg であり、上記の負荷量の約半分程度であった。

上述の通り現在のモデルでは窒素を過小評価傾向であり、実測値ベースの年間負荷量と比べてもモデル推定値が少なかった。しかし、オーダーが変わるような極端な過小評価ではないことから、過小評価であることを認識しながら以降の解析に用いることは可能と考える。また、実測値ベースの年間負荷量もあくまで相関関係から導いた推定値であり、誤差があり得ることに注意が必要である。



図V-11 流量と窒素の相関関係

今回の窒素収支に関する再調整によって、全体的な窒素収支（特に森林における窒素収支）の妥当な範囲で推定が可能となった。また、森林は窒素を全体としてやや貯蓄しており、森林のストック機能を示すことができた。

今後の課題として、窒素流出量の全体的な過小評価が挙げられる。ただし、少なくとも森林からの流出については妥当な範囲で推定できていると考えられることから、森林に着目した解析を行う限りでは問題はないと考えられる。

この課題を今後解決させることを目指す場合、今回の再調整では扱わなかった点源負荷（ポイントソース）について再検討することが考えられる。特に都市部や畜産由来の排水については、大量の窒素の流出源と予想されるものの実測データに乏しいことからほぼ検証ができていない。こうした排水について、実測データあるいは文献情報から信頼性の高い設定が可能になれば、窒素の過小評価が解決する可能性があると考えられる。