

GIS 利用による諏訪湖流域における 非特定汚染源負荷のモデリング

藤居良夫* 金谷篤志**

*信州大学工学部 **信州大学大学院工学系研究科

GIS Nonpoint Source Pollution Model for Lake Suwa Basin

Yoshio Fujii* Atsushi Kanaya**

*Faculty of Engineering, Shinshu University **Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

Key words : 地理情報システム Geographic Information Systems, 非特定汚染源 Nonpoint Source Pollution, 諏訪湖 Lake Suwa

1. はじめに

近年、特に閉鎖系水域において、湖沼環境の改善・水質改善のため、水質規制や下水道の整備が行われているにも関わらず、現状では顕著な水質改善はみられていない。その原因の一つとして、非特定汚染源からの汚濁物質の排出（非特定汚染源負荷）が挙げられる。これは市街地や農地、山林等からの雨水排水のような面状に存在する汚染源のことで、表流水系に流入し、排水規制で制限することができず、特定することが困難である。また、湖沼に流入する前に処理することが非常に難しいため、湖沼の水質改善を妨げる本質的な原因となっている。そこで本研究では、GIS（地理情報システム）を利用することにより、非特定汚染源負荷に関わる様々なデータを整備・管理し、これらを用いて非特定汚染源負荷の分布状況を把握するための手法を確立し、諏訪湖流域に対して適用して、手法の利点及び問題点と課題について考察を行った。なお、本研究では、水の富栄養化の程度を表す代表的な指標であることから、全リン（T-P）及び全窒素（T-N）を研究対象としている。

2. 研究の流れと対象流域

本研究の流れを図-1 に示す。本研究で用いる手法と、原単位法により流域内の発生負荷量を推定して、これに流達率を乗じて流達負荷量を求めるという従来の方法（これを従来方式とする）は、発生負荷量と流達率を乗じて流達負荷量を求める点で基本

的には同じである。しかし、本研究手法と従来方式との主な相違点は、流達率の扱い方にある。従来方式では、流域全体として流達率が設定されている。本研究では、この流達率に対して、GIS を利用して流域を細かく分割し1ピクセルごとに値を設定する。この値に発生負荷量を乗じてピクセルごとの流達負荷量を求めることにより、汚染負荷の分布状況を把握することが可能となる。図-1 に示したピクセル単位排出率・流線網・ピクセル単位流達率・ピクセル単位年間流達負荷量などを求めるため、対象流域における標高データ、土壌データ、土地利用データなどを整備した。

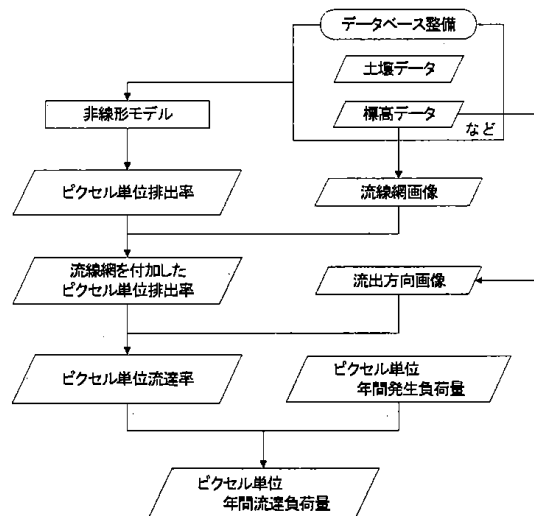


図-1 研究の流れ

ここでは、研究対象として諏訪湖流域を設定した。諏訪湖は、流出河川が天竜川 1 河川のみである典型的な閉鎖性水域である。昭和 30 年代後半からの高度経済成長による産業の発展、都市化の進展に伴い、湖の水質は汚濁が進行し富栄養化が進んでいる。諏訪湖流域としては流域面積が約 525km²であり、岡谷市、諏訪市、茅野市、下諏訪町、富士見町、原村の 6 市町村が流域市町村である (図-2)。

3. GIS データの整備

3.1 標高データ

標高データ (図-3) は、国土地理院より刊行されている「数値地図 50mメッシュ (標高)」を用いた。諏訪湖流域内での最大標高は八ヶ岳山頂付近で

2822m、最小標高は諏訪湖で 759m である。この標高データより、集水域・傾斜度・流出方向・流線網などを求めた。

3.2 土壌データ

土壌データについては、「土地分類基本調査 (長野県, 5 万分の 1)」における土壌図を利用して、デジタル化処理を行ってデジタル化し、GIS で使用できる土壌データを作成した (図-4)。

3.3 土地利用データ

土地利用データについては、より詳細なデータを得るため、人工衛星データを用いて土地被覆分類を行い (図-5)、これを土地利用データとして用いた。

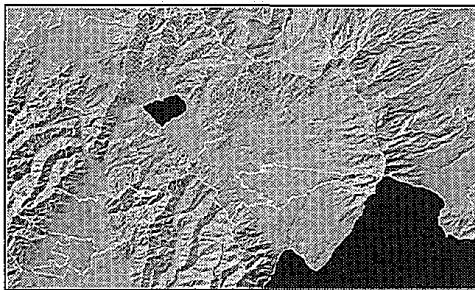


図-2 諏訪湖流域

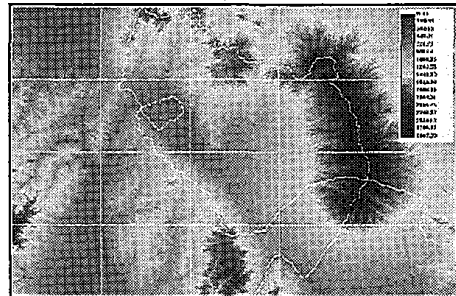


図-3 標高データ

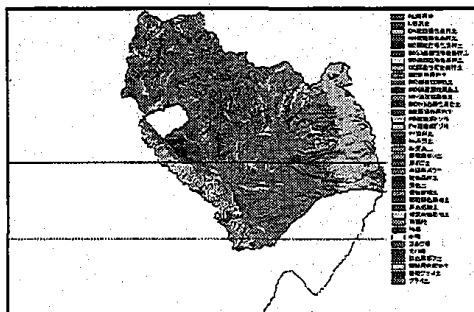


図-4 土壌データ

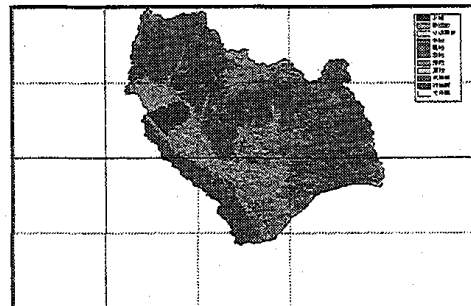


図-5 土地利用データ

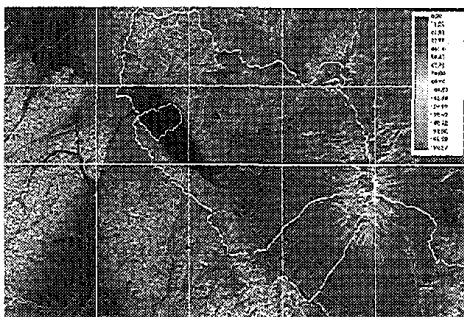


図-6 傾斜度

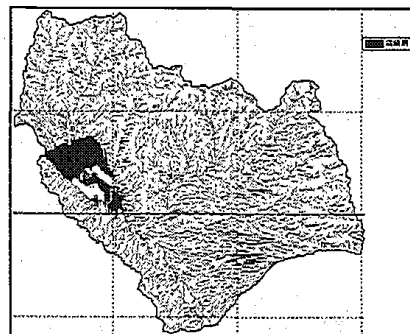


図-7 諏訪湖流域流線網

使用した人工衛星データは、地球観測衛星 Terra に搭載されているセンサー ASTER のデータ (2001 年 5 月 31 日撮影) を用いた。このデータの解像度は約 15m であり、土地被覆分類の方法としては教師付分類である最尤法を採用した。

4. ピクセル単位流達率の算出

本研究では、流達率 (汚染物質が湖沼に達する割合) をピクセル単位で設定することにより (これをピクセル単位流達率とする)、諏訪湖流域における非特定汚染源の分布状況の把握を行った。

4.1 ピクセル単位非排出率

全リン・全窒素に対するピクセル単位の非排出率 (表流水によって運ばれた汚染物質が、ろ過、浸透等によって除去される割合) を求めるため、米国で開発された非線形モデル式²⁾を用いて、感度解析により諏訪湖流域に適用可能な形に誘導・修正した (1)式, (2)式)。

それぞれの変数に対して、透水係数³⁾ (表-1)、平均粒径³⁾ (表-2)、土地利用別粗度係数⁴⁾ (表-3) については一般的な値を用いた。流水距離 (表-4) については、各ピクセルの流出方向 (各ピクセルの周囲 8 方向のピクセル標高のうち、最も標高の低い方向) により、そのピクセルに対して垂直・水平に流出する場合はピクセルの辺の長さ、対角線方向に流出する場合はピクセルの対角線の長さである。傾斜度 (図-6) は、各ピクセルの周囲 8 方向の標高との傾斜角度のうち最も傾斜の急な値である。

これらの変数を用いて得られた非排出率を、任意のピクセルの負荷量全体 (100%) から引くことにより、ピクセル単位排出率 (任意のピクセルから隣

$$\frac{\text{全リン (T-P) 非排出率 (\%)}}{=} \left\{ \frac{1}{1 + e^{(1.47 \cdot 0.416d + 0.012\text{sqr}d + 419.53p - 5.74n)}} \right\} \times 100 \quad \dots (1) \text{式}$$

d: 流水距離 (m), sqrd: 平方流水距離 (m²),
p: 透水係数 (cm/s), n: 土地利用別粗度係数

$$\frac{\text{全窒素 (T-N) 非排出率 (\%)}}{=} \left\{ \frac{1}{1 + e^{(0.3699 + 0.016d + 26.83\theta \cdot 4.58\ln(n) + 2.87\ln(\text{mpd}) + 1.47dn - 1.63d\theta)}} \right\} \times 100 \quad \dots (2) \text{式}$$

d: 流水距離 (m), θ : 傾斜度 (%),
n: 土地利用別粗度係数, mpd: 平均粒径 (mm)

接するピクセルに排出される割合) が求められる。

4.2 流線網

本研究では、表面流出について考慮しているため流線網を設定し、この流線網に属するピクセルに関してはピクセル単位排出率を 100% (すべて排出される) としている。この流線網については、標高データから求めた (図-7)。

4.3 ピクセル単位流達率

ピクセル単位流達率は、汚染物質が湖沼に達する割合であるため、ピクセル単位排出率に対して流出方向を考慮して掛け合わせるにより、算出することができる。算出方法の模式図を図-8に示す。

ピクセル単位排出率の左上のピクセル値「0.5」の部分には、流出方向の黒枠で囲んだ部分を経て流下する。このため、黒枠の部分のピクセル単位排出率を掛け合わせた結果、ピクセル単位流達率は「0.210」

表-1 土壌別透水係数³⁾

農地土壌	透水係数 (cm/s)
厚層黒ボク土	0.020550
黒ボク土	0.020550
多温黒ボクド	0.004400
褐色低地土	0.011933
灰色低地土	0.041000
硬質灰色低地土	0.041000
淡色黒ボク土	0.020550
粗粒灰色低地土	0.024600
細粒グライ土	0.033000
グライ土	0.033000
牧場	0.002550
水域	0.000000
ゴルフ場	0.002550

※林地土壌については岩石地に関しては一般的に低いとされているため、0.000001cm/s、その他は農地土壌のデータから考慮し一律0.0212cm/sと設定した。

表-2 土壌別平均粒径³⁾

農地土壌	平均粒径 (mm)
厚層黒ボク土	0.02624
黒ボク土	0.02624
多温黒ボクド	0.01660
褐色低地土	0.03643
灰色低地土	0.02593
硬質灰色低地土	0.02593
淡色黒ボク土	0.02624
粗粒灰色低地土	0.04545
細粒グライ土	0.01877
グライ土	0.01877
牧場	0.02114
水域	0.00000
ゴルフ場	0.02114

※林地土壌については岩石地に関しては一般的に粒径が大きいため2mm、その他は農地土壌のデータから考慮し一律0.02mmと設定した。

表-3 土地利用別粗度係数⁴⁾

土地利用項目	粗度係数 n 値
水域	0.000
市街地	0.040
交通用地	0.047
水田	0.060
畑地	0.060
草地	0.050
荒地	0.050
湿地	0.050
広葉樹	0.060
針葉樹	0.060
その他	0.050

※土木研究所資料の値を参考とした。

表-4 流水距離

流出方向	流水距離 (m)
垂直・水平方向	15
対角線方向	15 $\sqrt{2}$

※垂直・水平方向: 90°, 180°, 270°, 360°
対角線方向: 45°, 135°, 225°, 315°

※本研究では
1ピクセル: 約15m×15mである。

となる。このような計算をすべてのピクセルに対して行うツール(ピクセル単位流達率算出プログラム)を、Visual Basicを用いて開発した。これにより求めたピクセル単位流達率の結果を、全リンについては図-9に、全窒素については図-10に示す。

5. ピクセル単位年間流達負荷量の算出

5.1 ピクセル単位年間発生負荷量

任意のピクセルから発生する汚染物質質量(ピクセル単位年間発生負荷量)は、負荷量原単位を単位換算することにより導出できる。本研究で用いた諏訪湖流域における負荷量原単位⁵⁾と、負荷量原単位を

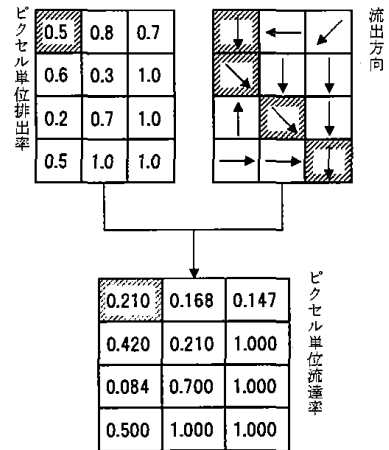


図-8 模式図

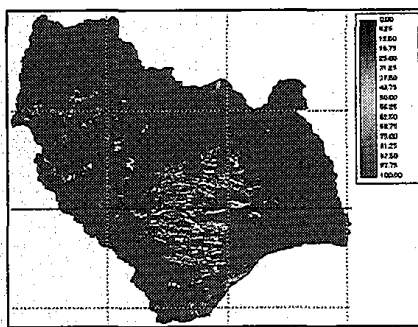


図-9 全リン
ピクセル単位流達率

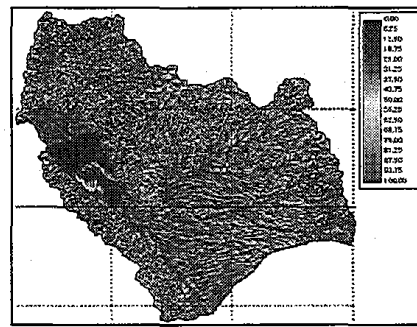


図-10 全窒素
ピクセル単位流達率

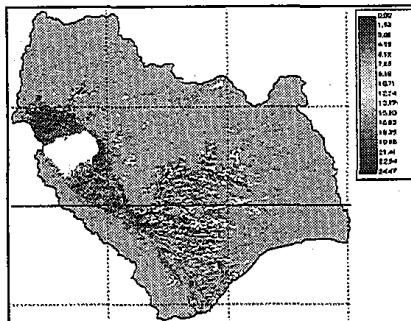


図-11 全リン
ピクセル単位年間流達負荷量

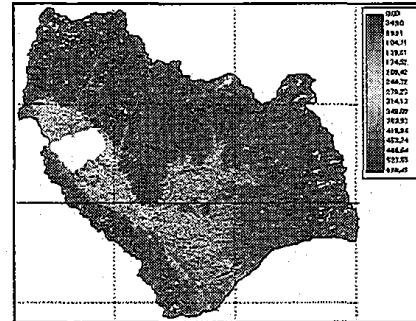


図-12 全窒素
ピクセル単位年間流達負荷量

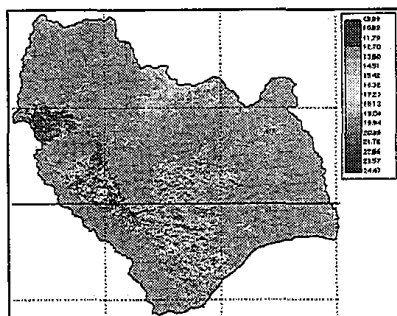


図-13 全リン
10g/cell/年以上の地域

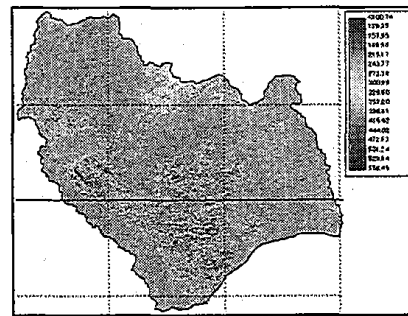


図-14 全窒素
100g/cell/年以上の地域

単位換算した結果を表-5に示す。

5.2 ピクセル単位年間流達負荷量

ピクセル単位年間流達負荷量（任意のピクセルから発生した汚染物質が湖沼に達する量）は、ピクセル単位年間発生負荷量とピクセル単位流達率を掛け合わせることで求められ、この負荷量が汚染物質の分布状況を表すことになる。求めた諏訪湖流域におけるピクセル単位年間流達負荷量の結果は、全リンについては図-11に、全窒素については図-12に示す。

5.3 検証

本研究手法の適合性を検証するため、従来から一般的に用いられている負荷量の推定方法（従来方式）との比較を行った。従来から一般的に用いられている方法は、流達率を流域単位で設定し、流域単位ごとに流達負荷量の推定を行うというものである。諏訪湖流域において従来方式を用いて流達負荷量を推定する際、通年の流達率を一般的な報告値⁹⁾に準じて、全リンについて0.9、全窒素について0.8と設定した。従来方式による推定結果を表-6に示す。本研究手法では、流域内のピクセル単位年間流達負荷量について、各ピクセル値の合算を行わなければならない。これにより、従来方式との比較が可能となる。土地利用ごとに各ピクセル値の合算を行った結果を表-7に示す。この2つの表を比較すると、本研究手法で得られた流達負荷量は、全リンについては従来方式の約97%、全窒素については従来方式の約99%であることがわかる。また、表-7から得ることができる本研究手法の流域全体での流達率は、全リンでは0.88、全窒素では0.799であった。これらのことから、全リン・全窒素に対する本研究手法

による流達負荷量は、合理的な値が得られたと考えられる。

6. 考察

表-8は、土地利用形態別に年間発生負荷量・年間流達負荷量を集計したものである。これより、諏訪湖流域における年間流達負荷量は、未開発地域で顕著に高くなっていることがわかる。このような特に自然的要因に左右されやすい未開発地域では、非特定汚染源負荷の人工的な削減効果を期待するのは困難であり、非特定汚染源負荷のより効果的な削減のためには、開発地域・農地に焦点を当てなければならない。図-13、図-14はそれぞれ、全リン・全窒素の非特定汚染源負荷量の高い地域の分布状態を示している。これにより、開発地域・農地での負荷量の分布状態が明確に抽出でき、開発地域が密集する諏訪湖周辺で負荷量の高い値が分布していることがわかる。これは、発生負荷量は農地より開発地域の方が多いためである。一方、諏訪湖流域の中央部に位置する茅野市及び原村周辺では諏訪湖周辺に比べ、負荷量の低い値が分布していることがわかる。これは、この地域では特に農地が多数存在しているためである。これらから、茅野市・原村周辺における今後の土地利用のあり方により、諏訪湖に流達する非特定汚染源からの負荷量の増減が左右されると考えられる。

このように、非特定汚染源負荷量を地図画像上に表示することにより、比較的容易に年間流達負荷量を把握することができ、また、非特定汚染源負荷量の高い地域が特定できるなど、負荷量の分布状態を容易に理解することが可能となる。以上より、非特定汚染源負荷量の把握においてGISを利用することは非常に有効であり、利用価値の高いことが確認

表-5 負荷量原単位・年間発生負荷量

土地利用	全リン (T-P)		全窒素 (T-N)	
	負荷量原単位 kg/km ² /日	ピクセル単位 年間発生負荷量 g/cell/年	負荷量原単位 kg/km ² /日	ピクセル単位 年間発生負荷量 g/cell/年
水域	0.000	0.000	0.00	0.000
市街地	0.298	24.473	3.04	249.660
交通用地	0.298	24.473	3.04	249.660
水田	0.189	15.522	2.54	208.5975
畑地	0.097	7.966	6.80	558.450
草地	0.088	7.227	1.16	95.265
荒地	0.088	7.227	1.16	95.265
湿地	0.088	7.227	1.16	95.265
広葉樹	0.088	7.227	1.16	95.265
針葉樹	0.088	7.227	1.16	95.265
その他	0.088	7.227	1.16	95.265

表-6 年間流達負荷量

(従来方式)

土地利用	全リン (kg/年)	全窒素 (kg/年)
水域	0.00	0.00
市街地	2792.34	25320.51
交通用地	2138.69	19393.33
水田	1727.72	20639.24
畑地	305.40	19030.95
草地	1823.56	21367.02
荒地	1798.59	21074.33
湿地	26.81	314.18
広葉樹	1917.71	22470.16
針葉樹	6616.86	77530.94
その他	54.98	644.21
総計	19202.67	227784.88

表-7 年間流達負荷量

(本研究手法)

土地利用	全リン (kg/年)	全窒素 (kg/年)
水域	0.00	0.00
市街地	2573.45	29067.85
交通用地	1800.68	21546.81
水田	1355.59	22559.42
畑地	271.40	21047.38
草地	1785.48	22180.60
荒地	1791.88	21436.43
湿地	28.96	324.76
広葉樹	2024.66	21042.37
針葉樹	7065.28	67909.13
その他	57.57	637.73
総計	18754.94	227752.47

された。このような特性と利点をもつGIS利用は、環境問題について関心の高い現代において、今後さらに重要視されると考えられる。

7. まとめ

本研究では、諏訪湖流域において、GISを利用することにより、地理的要因に重点を置き、標高データや土壌物理特性などを踏まえ、非特定汚染源負荷量のピクセル単位での分布状況の把握を行った。その結果、得られた全リン・全窒素のピクセル単位年間流達負荷量を示す画像データを用いて、さらに、この画像データとデータベース整備で構築した土地利用データとを重ね合わせることで、汚染状況の分布を把握することが可能となり、非特定汚染源負荷量の把握においてGISを利用することが非常に有効であることが確認された。

今後の課題として以下の点が考えられる。本研究では、全リン・全窒素を研究対象汚染物質としたが、これらは生物や死骸の一部として粒子状で浮遊しているもの、鉱物粒子や有機・無機コロイドに吸着されているもの、水中に溶解しているものなど、その存在形態は多様である。水域では分子の種類や汚染物質の存在形態によって、藻類や微生物による利用のされやすさ、すなわち生物活性や沈降性などが異なり、浸透、沈殿、吸着、分解および揮発作用が汚染物質の存在形態によって異なる。このため、全リン・全窒素といったマクロ的な捉え方ではなく、より詳細に汚染物質の存在形態を把握し、その存在形態別に適合した非排出率を求める必要性もある。

また、本研究手法では表面流出を考慮することによりピクセル単位での非特定汚染源負荷の把握を試みたが、諏訪湖に流出する汚染物質の総負荷量の推定に対してより適合性のあるモデルを求めるためには、本研究手法に地下浸透等による非特定汚染源負荷を加える必要もある。そのため、浸透作用に伴う経時変化等を考慮した、より複雑なプロセスを追跡できるピクセル単位での負荷算出法の確立が必要である。

今後の展望としては、非特定汚染源負荷量の分布状況の精度を高めることが挙げられる。本研究では、土壌に関する平均粒径や透水係数は一般値を用いており、精度を高めるために現地調査により実測データを整備して、より諏訪湖に適したデータを利用する必要がある。この総合的な現地調査の実施が今後の課題である。

表-8 土地利用形態別集計

	土地利用形態			総計
	開発地域	農地	未開発地域	
ピクセル単位年間発生負荷量 (g/cell/年)				
全リン (平均値)	24.473	11.744	7.227	
全窒素 (平均値)	249.660	383.524	95.265	
年間流達負荷量 (kg/年)				
全リン	4374.13	1626.99	12753.81	18754.94
全窒素	50307.28	43730.38	134720.10	228757.76
面積 (km ²)	50.37	37.41	423.36	511.14
面積比重 (%)	9.85	7.32	82.83	100.00

※ 開発地域：市街地、交通用地

農地：水田、畑地

未開発用地：上記以外（水域を除く）

謝辞

本研究を行うにあたり、諏訪湖における様々な文献を提供して頂いた長野県諏訪建設事務所下水道課の方々、また、長野県における土壌に関する貴重なお話や土壌図などを提供して頂いた長野県農業総合試験場及び長野県林業総合センターの専門技術員の方々には大変お世話になりました、謹んで感謝の意を表します。

引用文献

- Novotny V. and G. Chesters : Delivery of sediment and pollutants from nonpoint sources: A water quality perspective, Journal of Soil and Water Conservation 44(6), 568-576 (1989)
- Levine D. A., C.T. Hunsaker, S.P. Timmins, and J.J. Beauchamp : A Geographic Information System Approach to Modeling Nutrient and Sediment Transport, Oak Ridge National Laboratory, Environmental Science Division, Publication No.3993 (1993)
- 土壌物理学会：新編土壌物理用語辞典，養賢堂（2002）
- 土木研究所資料：氾濫シミュレーション・マニュアル，11-14（1996）
- 長野県：諏訪湖汚濁負荷削減現況調査報告書（1993）
- 服部明彦：湖沼汚染の診断と対策，日刊工業新聞社（1988）
- 国松孝男・村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版（1989）
- 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版（1990）
- 大住典嗣・関口辰夫：閉鎖性水域（湖沼域）におけるGISによる環境影響評価手法に関する研究，日本測量調査技術協会APA No.75-7，56-66（2000）