

◆ 報 文 ◆

米国アイダホ州ポートヌーフ川下流における水質モデルの構築

佐藤元志*

1. はじめに

ポートヌーフ (Portneuf) 川は、米国アイダホ (Idaho) 州南東部を流れるスネイク (Snake) 川上流部の支流である。またスネイク川は、米国三大河川の一つであるコロンビア川にワシントン州南東部で合流し最終的には太平洋に流入する。ポートヌーフ川はスネイク川を上って来るマス類が産卵可能な水質を要求されている。

ポートヌーフ川下流部、特にポカテロ市の下水処理場近くでは、栄養塩を含む無数の湧水・地下水が流入している (図-1)。下水処理場放流口の上流および放流水中の栄養塩のレベルはポカテロ市に

よってモニタリングされてきたが、湧水・地下水の水文学的動態と栄養塩の経路 (特にリン酸態リン、アンモニア態窒素) についてはほとんどわかっていない。本稿は、アイダホ州 (DEQ) の依頼により、モデリングを実施し、現在のポートヌーフ川下流部の水質の把握、ポカテロ市下水処理場からの流入の影響の理解、及び、栄養塩の影響が懸念される区域の確認を行ったのでこれについて述べる。

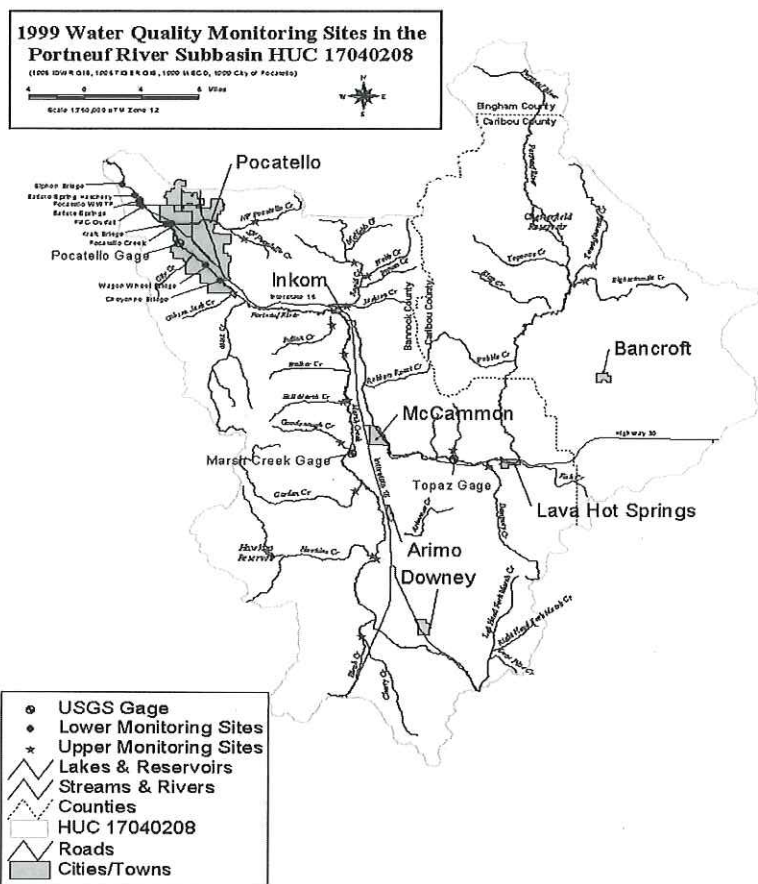


図-1 ポートヌーフ川流域内にある自治体とモニタリング地点

2. ポートヌーフ川流域の概要

ポートヌーフ川は、山間部の原生林を流れる溪流群を源とし、峡谷を南に流下してラーバホットスプリング (Lava Hot Springs) に到る。次いでポートヌーフ山脈内の小峡谷を西に流れてマッカモン (McCammon) に達し、北に進路を変えてマーシュ (Marsh) 峡谷を流れて、インカム (Inkom) で西に向きをかえポートヌーフ峡谷を通過してポカテロに到る。ポカテロ市内では北西方向の流れを維持し、スネイク川の沖積平野地域

Water Quality Modeling of the Lower Portneuf River in Idaho, U.S.A.

に達した後、スネイク川上流部にあるアメリカンフォールズ (American Falls) 貯水池に流入する¹⁾ (図-1)。ポートヌーフ川はアメリカンフォールズ貯水池の主要な流入河川である。

ポートヌーフの水源は標高2,830m付近に位置し、河川長は156kmである。川は標高1,326m付近で貯水池に流入しており、河川全体の勾配はおおよそ9.6m/kmとなる。ポカテロの米国地質調査所 (USGS) 観測点での流量は、 $1.4\text{m}^3/\text{sec}$ から $81.2\text{m}^3/\text{sec}$ の範囲で季節変動する¹⁾。

ポカテロ北西部は、スネイク川の沖積平野の端に位置する低地である。この地域の堆積物は透水性であるため、大量の水が浸透できる。これまでに2つの透水帯が確認されている²⁾。1つは砂礫層にある地下水位の浅い帯水層であり、もう1つは透水しやすい被圧帯水層である。ポートヌーフ川下流の地下水は、降水、灌漑からの還元、ポートヌーフ川とその支流からの伏流水、丘陵地域から流れる伏流水などから涵養される。透水性の礫層と地表面が交差する場所で、大量の湧水が川下流部で流れ込む。この湧水が下流の流量の大部分を占める (90%近く) と推定されている^{3) 4)}。

3. QUAL2E とは ?

本研究では、ポートヌーフ川下流の日最大許容負荷量 (TMDL: Total Maximum Daily Load) プログラムを支援するために水質モデルを構築した。この目的のために、U. S. EPA (米国環境保護庁) の河川水質モデルプログラム QUAL2E^{5) 6)} を選択した。U. S. EPA や USGS で維持管理されている水質モデルは多数あるが、その中でも QUAL2E、WASP6、SWMM、HSPF などはよく使われ、実績のあるモデルである^{7) 8)}。QUAL2E モデルは、定常状態での水質 (例えば、DO、BOD、栄養塩、富栄養化) をシミュレーションするモデルである。図-2 に QUAL2E で使われている溶存酸素収支概念を示す⁶⁾。重要な相互作用因子としては、栄養塩サイクル、植物性プランクトン増殖、底泥による酸素消費、有機物による酸素消費、大気中からの酸素供給である。矢印は、中程度に汚染されている水域における反応の方向を示しているが、

環境条件によっては反対方向に向きが変わる場合もある。基本的なプログラムは、モデル境界での物質交換とともに移流、拡散、点源負荷・非点源負荷の流入などのプロセスを扱うことができ、水質管理方策の設定を支援するために使用される。

QUAL2E は、河川、溪流、貯水池、湖沼、池、などの多様な水環境におけるさまざまな水質問題を解析するために使用されてきた。QUAL2E は、物質収支を基礎にさまざまな仮定に基づく概念モデルの組合せで構成されている。例えばこのモデルは、輸送メカニズム (移流および拡散) は流れの主要方向に沿ってのみ生じると仮定している一次元モデルであり、また流量、排出負荷量などの外部入力変数が時間変動しないと仮定している定常モデル (steady state model) でもある。QUAL2E は、複数の排水の放流、取水、支流の流入など、流下につれて増減する河川流量を扱うことができる。しかしこのモデルでは、水源要素は最大で10、合流要素は9、点源および取水要素は50に制限されている。QUAL2E - UNCAS では、QUAL2E とともに3つの不確実性の解析手法 (感度解析、一次誤差解析、モンテカルロシミュレーション) が利用できる⁶⁾。

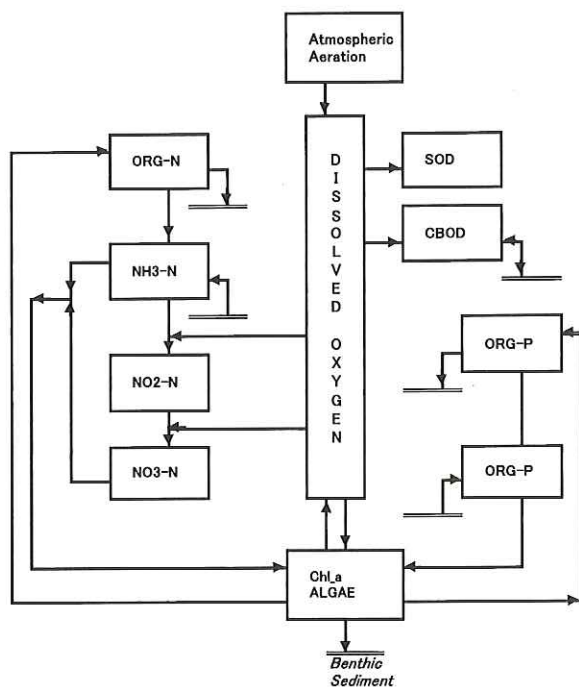


図-2 QUAL2E で使われている溶存酸素収支の概念⁶⁾

4. モデルの構築

QUAL2Eを使用し、アメリカンフォールズ貯水池での河口を0kmとするポートヌーフ川下流区間(55.2kmから13.5km)で定常状態の1次元水質モデルを構築した。このポートヌーフ川モデルでは、河川は40区間(reach)、8つの支流、それに6つの点源を含む482の計算要素(0.1km/計算要素)から構成されている。モデルのキャリブレーションには、最悪なケースのシナリオを評価するために高水温で低流量の条件を呈する9月のデータを使用した。州・市政府の研究者、大学研究者、市民グループ等によって収集されたデータをもとにデータベースを作成し、その中から品質管理(QAQC: Quality Assurance, Quality Control)プログラムの明確なデータを選択した。最悪ケースのシナリオをシミュレーションするということは、不確実性のマージン(MOS: Margin of Safety)―排出負荷量と結果として生じる河川水質との関係の不確実性―を最小限に抑えることになる。

モデルキャリブレーションのために、最初は水質(物理、化学、生物的)反応の動力学的なパラメータを報告⁶⁾されている値の範囲の平均値に設定し、次に湧水地下水量とその水質の値がモデルの出力値と最近の河川データと近似するまでパラメータ値を調整した。

5. モデリングの結果

5.1 シミュレーションの結果

ポートヌーフ川モデルでは、水温、BOD₅、DO、藻類、有機態窒素、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、有機態リン、溶存態リン、全リン、ナトリウムと塩素イオンを含む13の水質変数をシミュレートした。その結果、上流側の境界からI-86〔バティースト(Batiste)橋の上流に位置する州間高速道86号線〕あたりまで、水質は変化しないことが示された。水質と水量は、I-86からサイホン(Siphon)橋まで(およそ3.7km)で急激に変化するが、この変化は、流量収支の結果から、主に湧水(実質的にはほとんど調査されていない)とポカテロ下水処理場の影響であることが示された。地下水(帯水層からの)の寄与の可能性に加えて湧水(泉)と下水処理場からの流入

量は、I-86からサイホン橋までの区間で流量が4倍以上に増える(図-3)。

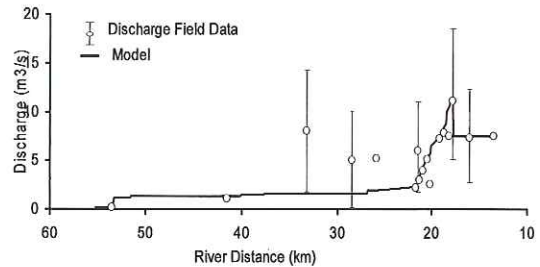


図-3 ポートヌーフ川下流の流量
(バティースト橋: 21.5km、ポカテロ下水処理場放流口: 20.6km、バティースト湧水: 20.0km、サイホン橋: 17.8km)

硝酸態窒素とリン酸態リンのモデルシミュレーションの結果をそれぞれ図-4と図-5に示した。このモデルシミュレーションの結果から、次のことが示された。(1) 現在のBOD₅レベルは、ポートヌーフ川のDOレベルに影響を与えるほどは高くない。(2) バティースト橋とサイホン橋の間において流入している多数の湧水と地下水は、ポートヌーフ川の最も大きな硝酸態窒素と全リンの負荷源となっている。ポカテロ下水処理場からの排水は、アンモニア態窒素の最も大きな負荷源とな

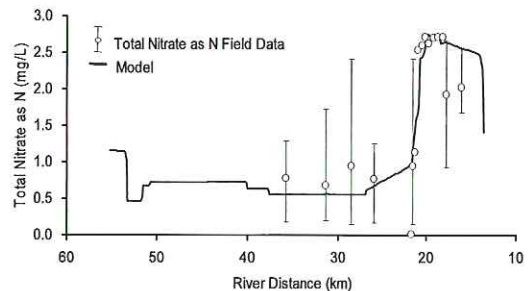


図-4 硝酸態窒素のモデルシミュレーションの結果

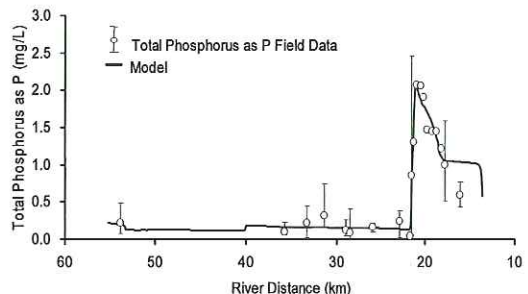


図-5 リン酸態リンのモデルシミュレーションの結果

ているが、バティースト湧水、未確認の湧水・地下水の流入などが栄養塩の主要な負荷源であり、ポートヌーフ川下流部の富栄養化の要因となっている。

上記のモデルシミュレーションの結果から計算した硝酸態窒素とリン酸態リンの負荷量をそれぞれ図-6と図-7に示した。栄養塩の物質収支に基づいて次のことが明らかになった。(1) ポカテロ下水処理場からのアンモニア態窒素の負荷は95kgN/日と見積られたがこれは硝酸態窒素の負荷380kgN/日よりもかなり少ない。(2) バティースト湧水からのアンモニア態窒素の負荷は66kgN/日と見積られた。(3) 未確認の湧水と地下水の流入による硝酸態窒素とリン酸態リンの負荷は、それぞれ1,725kg N/日と852kg P/日と見積られた。

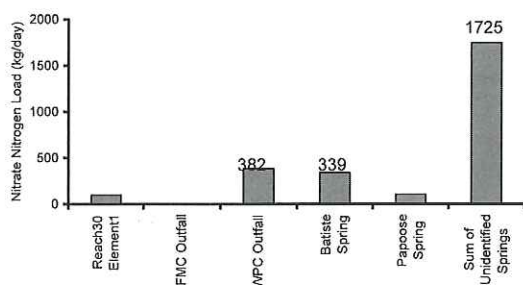


図-6 硝酸態窒素の負荷量

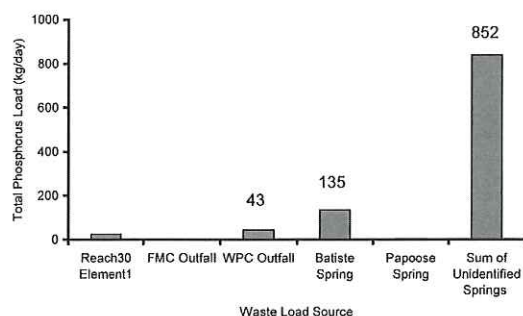


図-7 リン酸態リンの負荷量

5.2 不確実性の解析の結果

本研究では、QUAL2E-UNCASの不確実性の解析手法のうちモンテカルロシミュレーションを選択した。ここでは5000回のシミュレーションを実行した。QUAL2Eのマニュアルで、標準偏差5%の推定値(95%信頼区間)を得るためには、少なくとも2000回のシミュレーションをすること

が推奨されている²⁾。QUAL2E-UNCASは指定した位置(計算要素)においての水質変数の統計値(例えば、濃度の平均値、標準偏差、など)、頻度分布、累積頻度分布などを算出する²⁾。ここでは、シミュレーションの結果をそれぞれの水質変数に対する累積頻度で示した。その1例として、ポカテロ下水処理場の放流口付近での川の硝酸態窒素の累積頻度を図-8に示す。

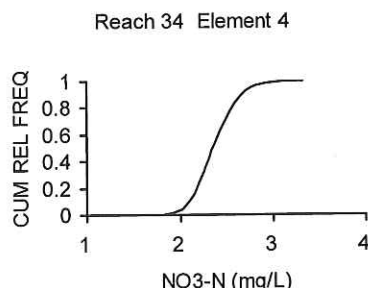


図-8 ポートヌーフ川のポカテロ下水処理場放流口付近 (Reach 34, Element 4) での硝酸態窒素の累積頻度

モンテカルロシミュレーションの結果に基づく、の現状値は以下ようになった。1) TMDLの無機態窒素の目標値0.3mg/Lを現状の値が超過する確率は100%、2) TMDLの全リンの目標値0.075mg/Lを現状の値が超過する確率は100%、3) TMDLの昼間DOの目標値6.0mg/Lを現状の値が超過する確率は100%である。従ってポートヌーフ川下流部では、DOレベルがTMDLの目標値の6.0mg/Lより低くなることは無いが、窒素とリンに関しては目標値を達するのは現状では不可能である、ということがわかった。

5.3 ポカテロ市の下水処理場を改善したと仮定した場合のシミュレーションの結果

ポカテロ市の下水処理場を改善した場合のシミュレーションを次の4つのシナリオで実施した。つまり完全(除去率100%)の硝化プロセスを導入した場合、完全硝化・脱窒プロセスを導入した場合、完全リン除去プロセスを導入した場合、それに完全硝化・脱窒とリン除去プロセスを同時に導入した場合、である。これらのシナリオでのシミュレーションの結果、次のことが予測された。硝化プロセスを導入した場合、アンモニア態窒素濃度は処理場の放流口とポートヌーフ川の合流点において41%減少する(図-9)。さらに硝化・脱窒プロセスの導入により、硝酸態窒素濃度も23%

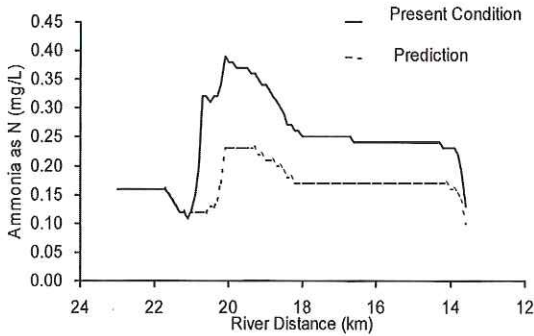


図-9 ポカテロ下水処理場に完全硝化プロセスを導入した場合のアンモニア態窒素の予測濃度

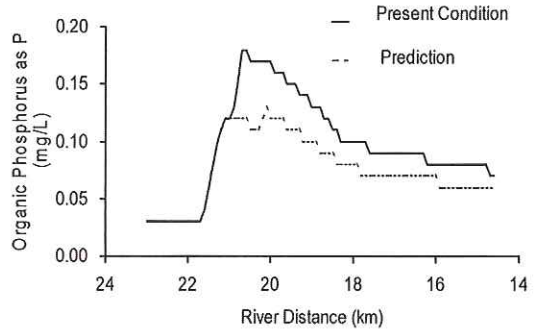


図-11 ポカテロ下水処理場に除去率100%のリン除去プロセスを導入した場合の有機態リンの予測濃度

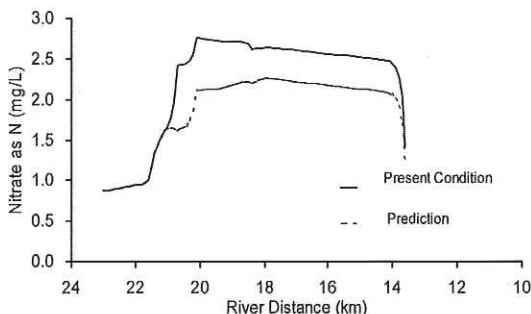


図-10 ポカテロ下水処理場に完全硝化・脱窒プロセスを導入した場合の硝酸態窒素の予測濃度

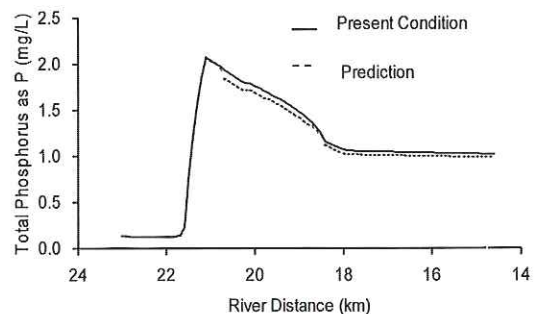


図-12 ポカテロ下水処理場に除去率100%のリン除去プロセスを導入した場合の全リンの予測濃度

減少する(図-10)。硝化プロセスと硝化・脱窒プロセスのどちらの改善策も、現在の富栄養化のレベル(藻類の増殖など)に影響を与えることはない。リン除去プロセス単独、あるいは硝化・脱窒とリン除去を組み合わせたプロセスを導入することによって、有機態リン(図-11)を33%程度減少させることができるが、溶存態リン、全リン(図-12)、藻類の増殖(図-13)にはほとんど影響を与えない。現在、ポカテロ市では約700万ドルを投資し、硝化プロセスを建設する計画があるが、このモデリングの結果はポカテロ市下水処理場の改善だけではポートヌーフ川下流TMDLの目標値は達成されないことを示唆している。

6. おわりに

モデル計算から以下が示唆された。(1) ポートヌーフ川下流のポカテロ下水処理場の排水口付近には、まだ未確認の湧水・地下水が存在し、それらからの栄養塩負荷が極めて大きい。(2) 市の財源を使って下水処理場を改良しても、川の富栄養化の改善は期待できない。

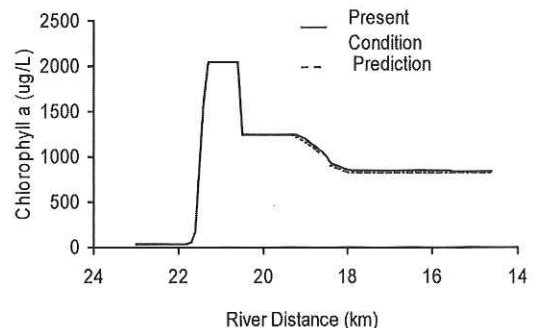


図-13 ポカテロ市下水処理場に除去率100%の硝化・脱窒・リン除去プロセスを導入した場合の藻類(クロロフィルa)増殖の予測値

これらの結果に基づいて、市と州は共同で未確認の湧水・地下水の把握、調査にあたるということで合意した。モデルの結果からは、湧水からの負荷量を把握しなければTMDLの策定が進められないことが示唆されている。ポカテロ下水処理場には、二年以内に硝化プロセスが完成する予定である。下水処理場の改善シナリオ(硝化プロセスの導入)の結果はプロセス完成後のモニタリン

グのデータで評価されるであろう。

米国ではTMDLに関する訴訟が多く起こっている。このような状況でモデリングを実施するに当たって、筆者は次の三点に留意するよう注意を促している。(1) モデルはそのモデル構築の際に使用された仮定以上の機能を持たない、(2) モデルはそのモデル構築の際に使用されたデータの質以上の質は持たない、(3) 「ゴミのようなデータを入力すれば、ゴミのような結果が出力として出てくる (Garbage in, Garbage out)」ということである。モデルはモデル構築者が望む結果を出す傾向があるので注意が必要である。これらの留意点を監視するために、筆者は「文書化が万事 (Documentation is everything)」という忠言に従っている。すなわちモデル構築・使用上の仮定、長所・短所、概念的モデル環境の設定、参考資料などを流域の利害関係者 (stakeholders) が容易にレビュー、そして理解できるような形で文書化している。TMDLプロセスをガラス張りにし、透明度をもたせることによって、問題点が早期に明らかになり、不必要な訴訟が避けられるであろう。さらに行政機関によって認可されているQAQCプログラムに従って得られたデータを使用すること (QAQCの記録のないデータは「ゴミのようなデータ」としてデータベースから削除すること) がモデリングの結果を弁護するために重要である。モニタリングプログラムには、データ収集方法・QAQC方法の記述など、また利害関係者との協力的なモニタリングプランも含まれる。モデリングを評価するためのデータは適切に計画されたモニタリングプログラムによってもたらされるであろう。

参考文献

- 1) Perry, J.: Water Quality Status Report Lower Portneuf River, Idaho Department of Health and Welfare, Division of Environment, Statehouse, Boise, Idaho, 1977.9
- 2) Goldstein, F. J.: Hydrogeology and Water Quality of Michaud Flats, Southeastern Idaho, Master's Thesis, Idaho State University, 1981. 3) Houck, O. A.: The Clean Water Act TMDL Program: Law, Policy, and Implementation, Environmental Law Institute, 1999.12
- 3) Brock, J. T.: Assessment of Possible Effects of Pocatello's Treated Wastewater on the Biology and Chemistry of the Portneuf River, The city of Pocatello, Idaho, 1989.11
- 4) Perry, J. A. and Clark, W. H.: Groundwater Classification Through Spring Chemistry-The Lower Portneuf River, Southeastern Idaho, Journal of the Idaho Academy of Science, Vol. 26, No. 1/2, pp. 55-71, 1990.6/12
- 5) U.S. EPA: QUAL2E Windows Interface User's Guide (EPA/823/B/95/003), Office of Water, Office of Science and Technology, Standards and Applied Science Division, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 1995.8
- 6) Brown, C. L. and Barnwell Jr., T. O.: The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual", EPA/600/3-87/007, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1987.
- 7) <http://www.epa.gov/ceampupl/swater/index.htm>, Exposure Assessment Models, Surface Water Models.
- 8) <http://www.epa.gov/ost.wqm>, Water, Water Science, Quality Models
- 9) <http://www.epa.gov/owow/tmdl>, Total Maximum Daily Loads.

佐藤元志*



独立行政法人土木研究所水循環研究グループ水質チーム招聘研究員、工博
Dr. Chikashi SATO