

## &lt;論文&gt;

## ASM を用いた水質シミュレーションの計算刻み幅に関する検討

## A Study on the Step Size for the Computer Simulation of Activated Sludge Process Using the ASM

○大石 亮<sup>1</sup>, 後藤 浩之<sup>1</sup>, 豊岡 和宏<sup>1</sup>, 出口 達也<sup>2</sup>, 木幡 信和<sup>2</sup>, 糸川 浩紀<sup>3</sup>, 村上 孝雄<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> (株) 明電舎, <sup>2</sup> (株) 荏原製作所, <sup>3</sup> 日本下水道事業団

○Akira OOISHI<sup>1</sup>, Hiroyuki GOTOH<sup>1</sup>, Kazuhiro TOYOOKA<sup>1</sup>, Tatsuya DEGUCHI<sup>2</sup>,  
 Hiroki ITOKAWA<sup>3</sup>, Takao MURAKAMI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Meidensha Corporation, <sup>2</sup> Ebara Corporation, <sup>3</sup> Japan Sewage Works Agency

## Abstract

On the computer simulation of water quality using model like activated sludge models (ASM), smaller calculation step size makes the numerical solution more accurate, but requires more computations. Too large step size (for practical calculation time) causes another inaccuracy from property of ASM. With inappropriate large step size, the decrease of the component concentration may exceed its existence, and the negative concentration appears in the calculation. This phenomenon is important for maintaining the validity of numerical calculation. To decide appropriate step size, the condition should be known that the phenomenon occurs. In this paper, some case studies for this phenomenon were done on the relation between step sizes and disturbance conditions (ex. the inflow fluctuation). The characteristics of this phenomenon were observed, and examinations to decide the appropriate step size are reported.

**Key Words** : ASM, simulation, step size

## 1 はじめに

排水処理分野におけるシミュレーションでは、活性汚泥による排水の生物処理工程の挙動を表現するための動力学モデルが実用化の段階にある。特に近年では、国際水協会(IWA)のタスクグループが提唱している活性汚泥モデル(Activated Sludge Model, ASM)<sup>1)</sup>の活用が増えている。ASMは、活性汚泥中の微生物増殖である生物反応プロセスとそれに伴う有機物、窒素、りんなどの水質変化を表現する数学的モデルである。

ASMでは、生物反応に伴う成分濃度の時間変化量、すなわち反応速度を微分方程式で表している。ASMを利用したシミュレーションでは、この微分方程式を離散化して、計算刻み幅 $\Delta t$ の周期で順次計算する。したがって $\Delta t$ を細かくすれば計算機による数値解としての精度は向上するが、計算量が増大する。 $\Delta t$ を可変刻みにより決定するアルゴリズムを使った場合も含め、 $\Delta t$ の決定はシミュレーションの利用者に委ねられている。

計算刻み幅 $\Delta t$ を、「十分な余裕を持って」小さくすることは計算コスト上のロスが大きい。そこで実用上最大の $\Delta t$ を探索する必要性が生じるが、ここで数値計算の性質による離散化誤差と、ASMの反応速度式の特徴から来る制約の2通りの問題がある。可変刻みのアルゴリズムは前者の離散化誤差が任意の範囲に収まるよう適宜 $\Delta t$ を自動変更する手法であるが、必ずしも後者には対処していない。後

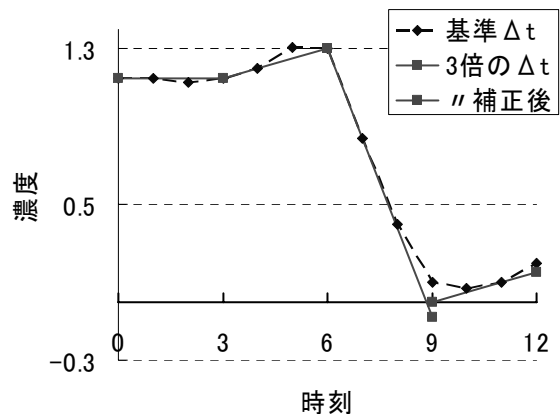


Fig. 1 負の濃度の発生の模式図

者の問題とは、 $\Delta t$  が大きすぎると、成分濃度が  $\Delta t$  の間に減る量が存在量を上回り、計算上で濃度が負の値となりうることである。

これは文献 1) の p62-63 で指摘されている。

Fig. 1 のグラフにこの現象を想定した一例を示した。点線は適切な  $\Delta t$  での成分濃度変化のシミュレーション例で、時刻 6 で速まった濃度減少速度は、時刻 7, 8 では濃度の減少に伴って低下するので、プロットの傾きはなだらかに変化している。一方、実線は  $\Delta t$  を先の例の 3 倍とした場合で、時刻 6 での濃度減少により時刻 9 では 0 を若干踏み越えて負の値となっている。補正後のプロットは、その時点で濃度を 0 に補正して計算を継続したものである。反応速度式には負の濃度を適用できないためにこのような対処が考えられるのだが、物質収支から見ると、これでは他の物質形態からの転換なしに予めわずかに物質が生成していたことになる。すると、 $\Delta t$  を短くして再計算しなくては原理的にシミュレーションの精度は低下することになる。したがって成分濃度が負となる現象は数値計算の妥当性に対し重要な意味を持ち、またこの現象の発生条件を解析することは適正な  $\Delta t$  の決定に役立つといえる。

本報では、対処の必要性の検討まで含めて、この現象の特性を調査した。現象の起こる計算刻み幅  $\Delta t$  と、下水処理施設の条件との関係、計算結果に及ぼす影響、流入変動などの諸条件との関係についてそれぞれケーススタディを実施した。また、実用上で適切な  $\Delta t$  を決定するための手法についての検討も報告する。

## 2 検討方法

負の成分濃度が算出される現象をここでは「オーバーステップ」と呼ぶ。シミュレーションソフトウェアにおいて、オーバーステップが発生した反応槽や頻度を閲覧できるツールを作成した。オーバーステップが一時的に（数ステップ程度）しか発生しない状況も観察できるよう、負の濃度の発生時点では警告を出力し、濃度を 0 に修正して計算を継続するようにした。

流入水や運転条件などの急変動による外乱がない定常な条件では、 $\Delta t$  が成分濃度の変化量に対し充分小さければオーバーステップが起こる要因は生まれない。そこで、仮想の下水処理プロセスの条件を設定し、以下の検討を行った。まず、定常条件下で  $\Delta t$  をどこまで粗くできるかを探索した。次に、外乱となる条件を何通りか組み合わせで与え、それによるオーバーステップ発生の有無を  $\Delta t$  ごとに比較した。この方法でケーススタディを実施し、条件ごとの適切な  $\Delta t$  を探索するとともにオーバーステップが成分濃度に及ぼす影響も検討した。

## 3 シミュレーション条件

本検討では、標準活性汚泥法（標準法）と嫌気-無酸素-好気法 (A2O 法) の仮想下水処理場のモデルを対象に、ASM2d を適用してシミュレーションを実施した。それぞれの処理場の条件を Table 1 に示した。その模式図である Fig. 2 に示した通り、A2O は標準法に対して嫌気・無酸素

Table 1 仮想処理場の条件

	標準法	A2O 法
槽数	4	9
各槽容積 (m <sup>3</sup> )	667.5 × 4	500 (嫌気) × 1 500 (無酸素) × 4 667.5 (好気) × 4
HRT (h)	8	1.5 + 6 + 8
硝化液循環比 (-)	—	1.5
汚泥返送比 (-)	0.5	0.5
ASRT (d)	9	9
汚泥濃度指標 X <sub>TSS</sub> (mg/L)	反応槽内の平均約 3000mg/L	
流入水質 COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	235.6mg/L (内訳: 発酵性易分解性有機物 S <sub>F</sub> = 2.4mg/L, 発酵生成物 S <sub>A</sub> = 9.6mg/L, 遅分解性有機物 X <sub>S</sub> = 135mg/L 他)	

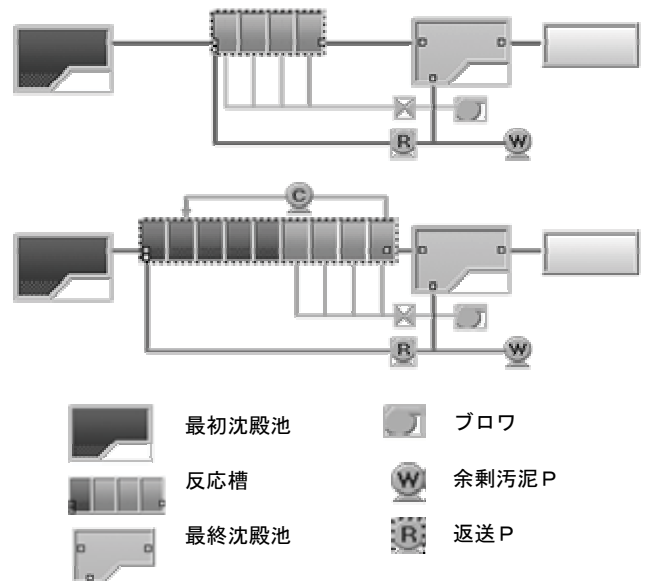


Fig. 2 仮想処理場の模式図 上: 標準法、下: A2O 法

槽と循環ポンプを追加した点だけが違えてある。これらの施設に対し、流入や曝気による外乱の影響を調査するため、次の運転条件を設定した。

- ・ DO 一定制御の場合と、DO を強制固定した場合との比較：

DO 一定制御の制御周期は応答を極力速くするため  $\Delta t$  と同じとした。全好気槽への送風量を等分配し、好気槽末端が 1.5mg/L となるよう制御した。一方、DO 強制固定では、送風量を無視して各好気槽の DO を 0.3、0.5、0.7、1.5mg/L に固定した。さらに、A20 法では嫌気・無酸素槽の DO を 0.01mg/L に固定した「全 DO 固定」の条件も検討対象とした。

- ・ 一定流入量の場合と、流入水量が急変動する場合の比較：

変動条件として、(A) 24 時間中の 1 時間のみ他の時間帯より流入水量を 2 倍にした場合と、(B) 1 時間かけて線形に倍の水量に上昇し 1 時間かけて戻す場合とを設定した。

計算に使用したモデルパラメータは文献 1) のいわゆるデフォルトの値を利用し、一定流入量にて  $\Delta t$  を 10 秒刻みとして 90 日以上計算し安定に至った状態を初期条件とした。

#### 4 結果と考察

計算刻み幅  $\Delta t$  を 10 秒～3分30秒の範囲で 1 秒刻みで探索した結果、成分濃度  $S_{O_2}$ ,  $S_F$ ,  $S_A$  についてオーバーステップが発生した。各記号は ASM2d で定義されている溶解性成分の濃度で、それぞれ溶存酸素(DO)、発酵性易分解性有機物、発酵生成物(酢酸など)を表している。 $S_F$ ,  $S_A$  は主に従属栄養生物によって消費される溶解性 COD である。なお S で始まる記号が溶解性成分、X で始まる記号は浮遊成分と定義されている。各条件においてオーバーステップがみられた最小の  $\Delta t$  を、その発生した槽番号と併せて Table 2 に示した。槽番号は標準法については 1～4、A20 法については 1～9 と、前段から順に番号を振って表記した。

**Table 2** オーバーステップが発生した最小の  $\Delta t$  (破線の右は発生した槽番号)

		$S_{O_2}$	$S_F$	$S_A$	
<b>定流量</b>					
標準法	DO 制御	1 分 24 秒 #1, 2, 3	1 分 40 秒 #3	—	
	DO 固定	—	1 分 37 秒 #3	—	
A20 法	DO 制御	40 秒 #5	3 分 24 秒 #8	3 分 24 秒 #9	
	好気 DO 固定	36 秒 #5	3 分 19 秒 #9	3 分 19 秒 #8	
	全 DO 固定	—	2 分 28 秒 #7, 9	2 分 28 秒 #8	
<b>流入変動</b>					
標準法	DO 制御	(A)	58 秒 #1	1 分 10 秒 #4	1 分 06 秒 #1
		(B)	1 分 03 秒 #1	1 分 04 秒 #4	1 分 04 秒 #1
	DO 固定	(A)	—	1 分 03 秒 #2	1 分 03 秒 #1
		(B)	—	1 分 04 秒 #2	1 分 04 秒 #1
A20 法	DO 制御	(A)	26 秒 #5	2 分 14 秒 #8	2 分 17 秒 #9
		(B)	↑	↑	↑
	好気 DO 固定	(A)	25 秒 #5	2 分 18 秒 #9	2 分 25 秒 #8
		(B)	↑	↑	↑
全 DO 固定	(A)	—	1 分 41 秒 #9	—	
	(B)	—	↑	—	

##### 4. 1 オーバーステップが発生した最小の $\Delta t$

定流量の場合： $S_{O_2}$  のオーバ

一ステップ発生箇所は、D0一定制御の場合は制御対象外の1~3番目の好気槽で、D0固定の場合はA20法における無酸素槽の末端の槽だった。これらは曝気による酸素移動および移流してきた微量のD0が即座に消費され尽くしたことによるものとみられる。前者については、制御パラメータにより曝気量の応答性を緩和させると、1~3番目の好気槽で急激な曝気風量上昇が押さえられるために、S成分の消費速度の急上昇が抑えられ、オーバーステップが発生しなくなる場合もあった。S<sub>A</sub>とS<sub>F</sub>については、標準法（第3槽S<sub>F</sub>）では1分37秒以上で、A20法（7,9槽S<sub>F</sub>、8槽S<sub>A</sub>）では2分28秒以上で発生した。

流入水量変動のある場合： 全項目に共通して、定流量の場合よりも $\Delta t$ は小さい。ほとんどの場合、オーバーステップは流入水量変動に連動して周期的に発生した。標準法では1分前後でS<sub>O<sub>2</sub></sub>、S<sub>A</sub>とS<sub>F</sub>ともにオーバーステップが発生したが、それぞれは別時刻に観察された。S<sub>O<sub>2</sub></sub>については流量負荷の増大に伴って発生するが、S<sub>A</sub>とS<sub>F</sub>についてはその数時間後に消費される速度が変化して発生していた。これはS<sub>O<sub>2</sub></sub>のオーバーステップはS<sub>A</sub>やS<sub>F</sub>などの基質が充分存在する場合に起こりやすいことと関係していると思われる。

標準法とA20法とでの $\Delta t$ の比較では、全体を通じ共通した傾向がみられた。S<sub>O<sub>2</sub></sub>のオーバーステップについてはA20法でより短い $\Delta t$ で発生しやすく、S<sub>A</sub>とS<sub>F</sub>については逆に標準法でより短い $\Delta t$ で発生しやすかった。これはA20法では硝化細菌の存在が多いことなど溶存酸素S<sub>O<sub>2</sub></sub>の消費速度が上がりやすいことと、逆に標準法ではS<sub>O<sub>2</sub></sub>の多い環境でS<sub>A</sub>とS<sub>F</sub>の消費が主体となっていることが要因となっていると思われる。

なお4.3節でも述べるが、変動パターン(A)(B)の2通りについては、相互の差は軽微だった。

#### 4.2 計算結果に及ぼす影響

オーバーステップが計算結果に与える影響を $\Delta t$ ごとに評価するため、標準法に対し定流量かつD0制御を与えた条件 (Table2の先頭の条件) で、成分濃度の計算結果のうち変化が顕著だった第4槽のS<sub>F</sub>、S<sub>A</sub>、S<sub>NH<sub>4</sub></sub> (アンモニア態窒素)、S<sub>NO<sub>3</sub></sub> (硝酸態窒素) を、 $\Delta t$ を横軸にとりFig.3のグラフに示した。定常な条件下で計算が収束しているの、 $\Delta t$ が10秒の場合の計算結果を適正值とすると、成分濃度が適正值を保つ区間 ( $\Delta t$ が1分24秒未満と1分35秒~1分39秒) がみられた。これは影で描いた48時間あたりのオーバーステップ発生件数 (「カウント」と表記) が無い区間と一致した。1分24秒~1分34秒ではS<sub>O<sub>2</sub></sub>について、1分40秒~1分52秒ではS<sub>F</sub>について、それ以上は両方ともにオーバーステップが発生したとともに、各成分濃度も変化している。なお、S<sub>O<sub>2</sub></sub>のオーバーステップ時はD0がゼロと正值の間で振動を繰り返し、他の水質もこれに伴い変動していたのでグラフにはそれぞれの平均値を記した。

逆にS<sub>F</sub>のみのオーバーステップが起きた場合は、各成分濃度は適正值からのずれを生じつつも安定に収束していた。その影響としては、 $\Delta t$ が1分45秒以上のとき、S<sub>F</sub>のオーバーステップの影響として、①S<sub>F</sub>の値が約25%適正值からずれ、②残存していたS<sub>A</sub>がゼロになり、③S<sub>NH<sub>4</sub></sub>も約3%ずれるなどの波及がみられる。だが、このように適正值からのずれが起きたことをシミュレーションの操作者が知るには、あらかじめ適正值を知っておくか、オーバーステップの発生を検知できる仕掛けをしておく必要がある。

一般化すると、ある $\Delta t$ での計算結果が、微小な $\Delta t$ での計算結果と同じであれば、そ

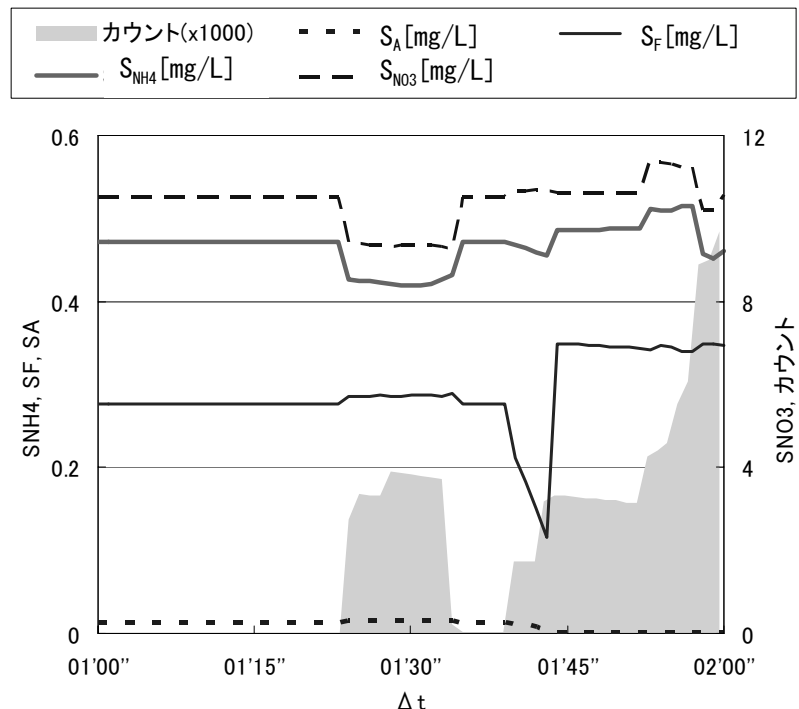


Fig. 3 計算刻み幅ごとの水質とオーバーステップの発生カウント数

の $\Delta t$ は実用上充分小さいと考えられる。このことを示唆できる指標があれば有効である。Fig. 3の $\Delta t$ の範囲では、オーバーステップとその補正以外に計算結果に影響を及ぼす数値計算上の問題はない。そこで、指標としてオーバーステップの発生を検知し、それを充分下回るような $\Delta t$ を採用したり、他の外乱要因を取り除くなどの手法を使えば、計算結果の精度を保つ上で有効と考えられる。その際、初期条件の理由から計算開始時に起こるオーバーステップは無視できたほうが実用的と思われる。

なお、ある計算刻み幅の自動調整アルゴリズムは、離散化誤差に応じて $\Delta t$ を変化させるが、オーバーステップは検知対象外である。

### 4.3 オーバーステップ前後の成分濃度の挙動

オーバーステップが発生する機構を調べるために、発生の前後の水質の挙動を観察した。Table2の中から、 $S_F$ ,  $S_A$ のオーバーステップが常時ではなく一時的に起こる条件として、標準法に対しDO固定の条件に流入水量変動を与えたものに着目した。より長い $\Delta t$ にすると、常時 $S_F$ ,  $S_A$ のオーバーステップが発生してしまうので、その影響を排するために $\Delta t$ を1分04秒にして間欠的にオーバーステップが起こるように計算した。なお、DO制御の場合にはこれと同程度の $\Delta t$ で $S_{O_2}$ のオーバーステップが起きていたので、その影響も避けるためDOは固定とした。流入水量の変動条件については(A), (B)ともに検討した。

Table2の通り、オーバーステップが発生したのは、第1槽の $S_A$ と第2槽の $S_F$ だった。流入水量変動条件(A)についてそれらの発生を観察したところ、発生時刻は流入水量が変動している時刻ではなく、流入変動が収まった後のそれぞれ3時間後と5時間後だった。Fig. 4のグラフにその様子をプロットし、オー

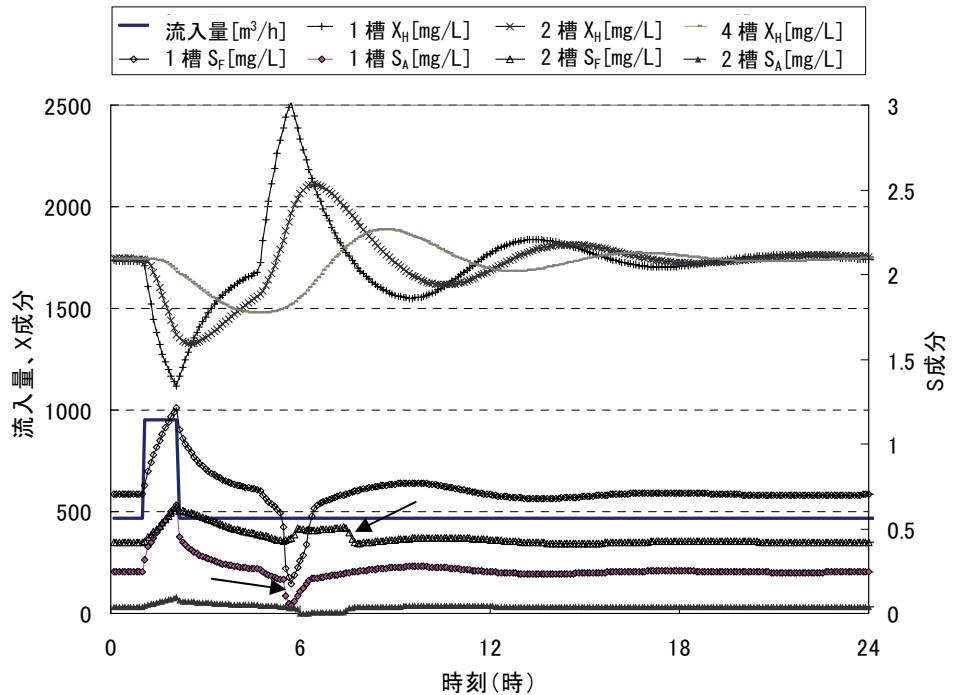


Fig. 4 流入水量変動 (A) に起因するオーバーステップ発生 (矢印) の様子

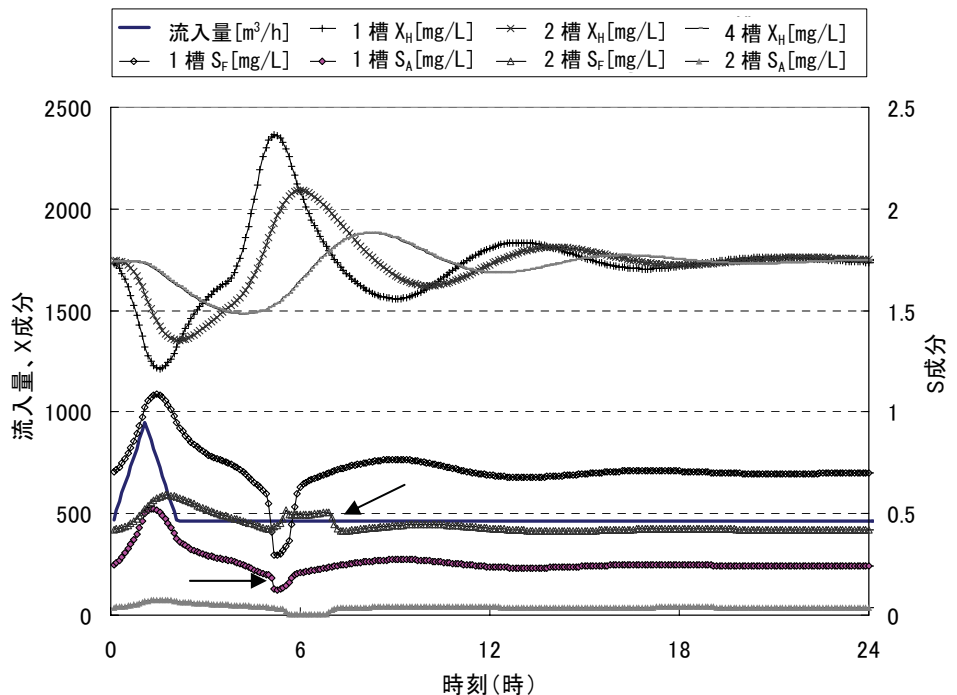


Fig. 5 流入水量変動 (B) に起因するオーバーステップ発生 (矢印) の様子

バーステップが発生している箇所を矢印で示した。第1槽の $S_F$ 、第2槽の $S_A$ も観察したところ、第1槽の $S_F$ 、 $S_A$ が急減少している現象が発端となっている様子が窺えた。ここで $S_A$ の減少量のみがその第1槽内の残存量を超えてしまいオーバーステップに至っているのだが、 $S_F$ 、 $S_A$ の示していた挙動は同様だった。そこで、この急激な挙動の原因は、 $S_F$ が $S_A$ に変化する発酵プロセスではなく、それらとともに消費する反応すなわち従属栄養生物 $X_{II}$ の増殖プロセスであると考え、 $X_{II}$ の変化にも着目した。

グラフの上方に $X_{II}$  (第1, 2, 4槽) をプロットした。はじめ等濃度である各 $X_{II}$ は流入水量の上昇をきっかけに希釈効果を受けて順次低下する。この期間、水理的滞留時間が短くなっている。その後、流入水量が元に戻ると $X_{II}$ は上昇に向かい、振動を伴いつつ元の濃度に復元しようとしている。ただし、各槽の変動の周期は滞留時間の影響を受けて各々異なっている。これにより、復元しかけていた1槽 $X_{II}$ が、4槽 $X_{II}$ が上昇に転じるタイミングで急上昇に転じ、その振幅を大きくしている。これは返送経路により4槽 $X_{II}$ の影響を受けたものと思われる。シミュレーションでは最終沈殿池の固液分離性能が流入変動によらないモデルとなっているために、 $X_{II}$ を含めた汚泥濃度の上昇は実際より急激である可能性がある。1槽 $X_{II}$ の濃度が最大に到達した付近で $X_{II}$ の増殖速度も急上昇しており、これにより第1槽で $S_F$ 、 $S_A$ が急激に消費される効果を生んだものとみられる。これが第1槽 $S_A$ のオーバーステップを招き、その後第2槽 $S_F$ にも波及している様子が窺える。

Fig. 5には流入水量変動条件(B)のときのグラフを示した。流量が瞬時に変化してはいないため、各成分の変動には鋭い峰のような変曲点は見られないものの、 $S_A$ 、 $S_F$ のオーバーステップの発生と、それに先立つ $X_{II}$ の振動の様子はほとんど同じである。少なくともこの条件において、変動条件(A)と(B)ではオーバーステップ発生の最小の $\Delta t$ にほとんど差がなかったことは、この点が関わっていると思われる。すなわち、外乱である流入水量の変動により励起された $X_{II}$ 濃度の振動が、返送汚泥経路などにより重ね合わされて増幅されたときに、励起振動の振幅を上回る $X_{II}$ の急上昇が起きていた。このときに、 $S_A$ 、 $S_F$ の消費速度が急速に増加し、オーバーステップが発生しやすくなったものと思われる。

オーバーステップは外乱から遅れて発生しており、また、 $S_A=0$ のとき、オーバーステップが発生していたのは $S_A$ 自体ではなく $S_F$ であるように、濃度が0になることとオーバーステップは同義ではない。したがって、他の水質成分などの変化からオーバーステップが発生しているかどうかを判別することは困難だと思われる。よってオーバーステップの発生を検知するには、やはりそれ自体を計算行程上で確認するのが適当と思われる。

4.2での検討と併せると、シミュレーションの過程でオーバーステップの発生を検知できるようにしておき、それを回避するように $\Delta t$ を短く調節するか、または意図しない外乱を招いている計算条件を取り除く手法を使えば、効率よく実用的な $\Delta t$ を決定できると考えられる。

## 5 まとめ

ASMを利用したシミュレーションの計算工程で計算刻み幅 $\Delta t$ が大きいときに負の成分濃度が算出される現象(オーバーステップ)についてケーススタディを通じて調査した。

この現象が起きたときに負の成分濃度を0に補正して計算を続行すると、計算結果には影響が出る。オーバーステップは、成分濃度 $S_{O_2}$ 、 $S_F$ 、 $S_A$ のような反応槽内での平均残存時間の短いものについて発生しやすい。特に成分濃度 $S_{O_2}$ については計算刻み幅 $\Delta t$ が1分未満でも発生することがあった。

オーバーステップは流入水量変動のような外乱によって発生しやすくなるが、外乱の直後に発生するとは限らない。 $S_{O_2}$ については、曝気風量制御のような変化の速い入力が外乱となって発生するだけでなく、曝気されていない槽など常にわずかな $S_{O_2}$ しか存在しない場所でも起こりやすい。 $S_{O_2}$ のオーバーステップについてはA20法の好気槽先頭で発生しやすく、 $S_A$ と $S_F$ については標準法で発生しやすかったという傾向があった。

シミュレーションの過程でオーバーステップの発生を検知できるようにしておき、それを回避する条件を探す手法を使えば、効率よく実用的な $\Delta t$ を決定できると考えられる。

## 【参考文献】

- 1) 味埜俊(訳)，“活性汚泥モデル”，環境新聞社(2005)

(受付 2005. 4.28)

(受理 2005. 8.18)