

## 圧送管中における硫化水素生成予測手法としての WATS モデルの特性、及び適用可能性の検討

日本水工設計(株) 武 憲司  
河内 隆秀  
小高 悠

### 1. 背景と目的

圧送管中における汚水の嫌気化による硫化水素の発生、及びそれに付随するコンクリート構造物の硫酸腐食の問題が、下水道施設の老朽化により顕在化してきている。その結果、既設及び新設を問わず、硫化水素対策の必要性が高まってきており、硫化水素生成予測に関する知見の蓄積、および対策導入検討を適切に行うことが可能な手法の確立が望まれている。

そこで当社では、硫化水素生成予測の手法として「WATS (Wastewater Aerobic/anaerobic Transformation in Sewers) モデル」に着目した。WATS モデルは、これまでに用いられてきた硫化水素生成予測手法よりも、より精度の高い硫化水素生成予測が可能であると考えられているモデルである。

本稿では、①WATS モデル自体の特性把握 (3 節)、②WATS モデルによる実データの解析 (4 節)、を行った。①の目的は、WATS モデルの特性に対して理解を深め、WATS モデルを活用する際の一助とすることであり、②の目的は、実際に硫化水素生成予測手法として WATS モデルを活用し、その適用性を確認することである。

### 2. WATS モデルの概要

WATS モデルは、1990 年代に国際水協会 (IWA) によって提唱されたものである。WATS モデルは、硫化物生成速度の予測精度の向上を目指した、管渠内における好気・嫌気状態での有機物と硫黄化合物の変質に関するプロセスモデルであり、物質収支と反応速度論を用いて構成される IWA 活性汚泥モデル (ASM) の考え方を適用し、特に今回の解析対象となる硫黄成分に着目した ASM の改良版である。

WATS モデルに組み込まれている、管渠内において生じる微生物反応のプロセスを図 1 に示す。また、WATS モデルのマトリックスを表 1 に示す。

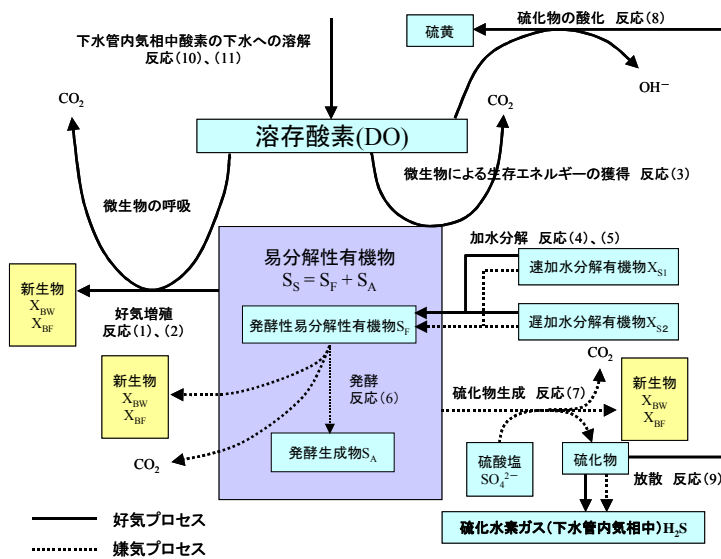


図 1 WATS モデルにおける反応プロセス<sup>(1)</sup>

表 1 WATS モデルのマトリックス

組成→ プロセス↓	1	2	3	4-1	4-2	5	6	プロセスの 速度
	S <sub>F</sub>	S <sub>A</sub>	X <sub>BW</sub>	X <sub>S1</sub>	X <sub>S2</sub>	-S <sub>O</sub>	S <sub>H2S</sub>	
下水中の好気増殖		$-\frac{1}{Y_{Hw}}$	1			$\frac{1-Y_{Hw}}{Y_{Hw}}$		式 (1)
バイオフィーム中の好気増殖		$-\frac{1}{Y_{Hf}}$	1			$\frac{1-Y_{Hf}}{Y_{Hf}}$		式 (2)
生存エネルギーの獲得	-1					1		式 (3)
好気加水分解 (X <sub>S1</sub> )	1			-1				式 (4) # = 1
好気加水分解 (X <sub>S2</sub> )	1				-1			式 (4) # = 2
嫌気加水分解 (X <sub>S1</sub> )	1			-1				式 (5) # = 1
嫌気加水分解 (X <sub>S2</sub> )	1				-1			式 (5) # = 2
発酵	-1	1						式 (6)
硫化物生成		-2					1	式 (7)
硫化物の酸化						0.5	-1	式 (8)
硫化物の気相への放散							-1	式 (9)
再ばっ気						-1		式 (10) 、 (11)
<p>&lt;各式&gt;</p> <p>式 (1) ; <math>\mu_H(S_F+S_A)/(K_{S_w}+(S_F+S_A)) \cdot S_O/(K_O+S_O) \cdot X_{Bw} \alpha_W^{(T-20)}</math>            式 (2) ; <math>k_{1/2}S_O^{0.5} \cdot Y_{Hf}/(1-Y_{Hf})A_{W-P}/V \cdot (S_F+S_A)/(K_{Sf}+(S_F+S_A)) \alpha_f^{(T-20)}</math>            式 (3) ; <math>q_m \cdot S_O/(K_O+S_O) \cdot X_{Bw} \alpha_W^{(T-20)}</math>            式 (4) ; <math>k_{H\#} \cdot (X_{S\#}/X_{Bw})/(K_{X\#}+X_{S\#}/X_{Bw})S_O/(K_O+S_O) \cdot (X_{Bw}+ \epsilon_A X_{Bf}A_{W-P}/V) \cdot \alpha_W^{(T-20)}</math>            式 (5) ; <math>\eta_{fe}k_{H\#} \cdot (X_{S\#}/X_{Bw})/(K_{X\#}+X_{S\#}/X_{Bw})K_O/(K_O+S_O) \cdot (X_{Bw}+ \epsilon_{An}X_{Bf}A_{W-P}/V) \cdot \alpha_W^{(T-20)}</math>            式 (6) ; <math>q_{fe}S_F/(K_{fe}+S_F) \cdot K_O/(K_O+S_O) \cdot (X_{Bw}+ \epsilon_{An}X_{Bf}A_{W-P}/V) \cdot \alpha_W^{(T-20)}</math>            式 (7) ; <math>k_{nS}K_{O(S)}/(K_{O(S)}+S_O) \cdot S_S^n \cdot A_{W-P}/V \cdot \alpha_f^{(T-20)}</math>            式 (8) ; <math>p_S S_{H2S}/(K_{H2S}+S_{H2S}) \cdot S_O/(K_O+S_O) \cdot \alpha_W^{(T-20)}</math>            式 (9) ; <math>0.69 \cdot (1+0.17F^2) \cdot (su)^{3/8} \cdot j_{S_{H2S}}dm^{-1} \alpha_T^{(T-20)}</math>            式 (10) ; <math>K_{La}(S_{OS}-S_O)</math>            式 (11) ; <math>K_{La}=0.86 \cdot (1+0.2F^2) \cdot (su)^{3/8}dm^{-1} \alpha_T^{(T-20)}</math></p>								
<p>&lt;各記号&gt;</p> <p>A<sub>W-P</sub>; 下水と管内表面接触面積(m<sup>2</sup>)、d<sub>m</sub>; 水理学的水深 (m)、F; フルード数=<math>u/(gd_m)^{0.5}</math>、g; 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)、j; 硫化水素として存在している硫化物の割合、k<sub>H#</sub>; 加水分解速度定数、種類#(d<sup>-1</sup>)、k<sub>nS</sub>; 硫化物生成に関する n 次速度定数 (g<sup>n</sup>m<sup>-n</sup>h<sup>-1</sup>)、K<sub>fe</sub>; 発酵に関する飽和定数(gCOD/m<sup>3</sup>)、K<sub>H2S</sub>; 硫化物の酸化に関する飽和定数(gS/m<sup>3</sup>)、K<sub>La</sub>; 総括酸素移動容量係数 (h<sup>-1</sup>)、K<sub>O</sub>; 溶存酸素の飽和定数(gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)、K<sub>O(S)</sub>; 硫化物生成の抑制に関する飽和定数(gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)、K<sub>Sf</sub>; 易分解基質の飽和定数(gCOD/m<sup>3</sup>)、K<sub>Sw</sub>; 易分解基質の飽和定数(gCOD/m<sup>3</sup>)、K<sub>X#</sub>; 加水分解飽和定数、種類#(gCOD/gCOD)、k<sub>1/2</sub>; バイオフィーム内 1/2 次速度定数 (gO<sub>2</sub><sup>0.5</sup>m<sup>-0.5</sup>d<sup>-1</sup>)、n; 反応の次数(-)、p<sub>s</sub>; 硫化物酸化の速度定数(gS/m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>)、q<sub>fe</sub>; 最大発酵速度 (d<sup>-1</sup>)、q<sub>m</sub>; 生存エネルギー摂取速度定数 (d<sup>-1</sup>)、s; 自然流下管路の勾配 (m/m)、S<sub>A</sub>; 発酵生成物(gCOD/m<sup>3</sup>)、S<sub>F</sub>; 発酵性易分解基質(gCOD/m<sup>3</sup>)、S<sub>H2S</sub>; 硫化物濃度(gS/m<sup>3</sup>)、S<sub>O</sub>; 溶存酸素(gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)、S<sub>OS</sub>; 飽和溶存酸素濃度(gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)、S<sub>S</sub>; 易分解基質(gCOD/m<sup>3</sup>)、T; 下水温度(°C)、u; 平均流速 (m/s)、V; 下水容量 (m<sup>3</sup>)、X<sub>Bf</sub>; バイオフィーム中バイオマス(gCOD/m<sup>2</sup>)、X<sub>Bw</sub>; 下水中バイオマス(gCOD/m<sup>3</sup>)、X<sub>S#</sub>; 加水分解基質、種類#(gCOD/m<sup>3</sup>)、Y<sub>Hf</sub>; バイオフィーム中バイオマスの増殖収率(gCOD/gCOD)、Y<sub>Hw</sub>; 下水中バイオマスの増殖収率(gCOD/gCOD)、α<sub>f</sub>; 温度補正係数=1.03(-)、α<sub>T</sub>; 再ばっ気に関する温度補正係数=1.024(-)、α<sub>w</sub>; 温度補正係数=1.07(-)、ε<sub>A</sub>; 好気条件下のバイオフィーム効率係数(-)、ε<sub>An</sub>; 嫌気条件下のバイオフィーム効率係数(-)、η<sub>fe</sub>; 嫌気加水分解の速度低減係数(-)、μ<sub>H</sub>; 最大比増殖速度 (d<sup>-1</sup>)、#; #=1:速加水分解; #=2:遅加水分解、W: 下水中のプロセス、f: バイオフィーム内のプロセス</p>								

### 3. WATS モデルの特性把握

本節では、WATS モデルによる硫化水素生成予測において、重要となる因子（水温、有機物濃度、DO、硫酸イオン濃度、及び管径等）について、硫化物生成に対する影響度合について検討した。

本節の目的は、各因子の影響度合を検討することで、WATS モデルの特性を把握し、実データの解析や将来予測等に役立てることである。

検証に先立って、まずは各検証において用いた有機物の分画について言及しておく。本稿においては、次節の表 3 に示す有機物分画文献値の平均を標準的な有機物分画と考え、各成分間の比として固定した。すなわち、想定した  $COD_{Cr}$  に対する有機物分画を決定する際は、各成分比を案分して求めた。以下にその成分比を示す。

表 2  $COD_{Cr}$  の値に対する有機物分画

	$COD_{Cr}$	Ss	$X_{S1}$	$X_{S2}$	$X_{BW}$	$X_{Bf}$
有機成分の成分比	1.00	0.06	0.13	0.72	0.09	固定*

※  $COD_{Cr}$  とは独立した数値と考えられるため、15 で固定とした。

#### 3.1 水温影響の検証

圧送管流入  $DO = 0 \text{ mgO/L}$ 、圧送管径  $\Phi 300$ 、初期  $COD_{Cr} = 250 \text{ mg/L}$ 、及び  $500 \text{ mg/L}$  の条件における WATS モデルシミュレーション結果を図 2、図 3 に示す。

図には、汚水の標準的な  $COD_{Cr}$  である  $500 \text{ mg/L}$  の時、及びその半分の  $250 \text{ mg/L}$  の時共に、 $15 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$  の間で水温が  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  上昇するごとに、溶存硫化物の生成速度が約 1.2 倍上昇することが示されている。このことは、水温上昇に伴う溶存硫化物の生成速度の上昇割合が、濃度によらずほぼ一定であることを示している。

これは、WATS モデルマトリックス（表 1）において、溶存硫化物の生成速度を示す式（7）に水温に関する項目が含まれていることに起因する。すなわち、温度補正係数  $\alpha_f$  に関して、

$$\alpha_f^5 = 1.03^5 = 1.159 \approx 1.2$$

であることによる。

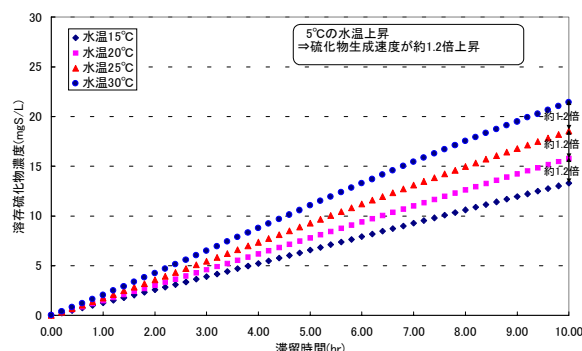


図 2 水温の影響 ( $COD_{Cr} = 250 \text{ mg/L}$ )

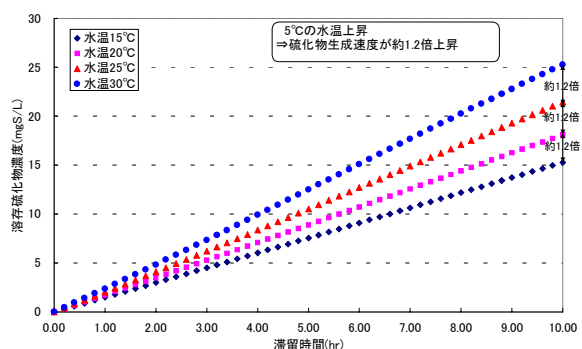


図 3 水温の影響 ( $COD_{Cr} = 500 \text{ mg/L}$ )

### 3.2 有機物濃度影響の検証

圧送管流入 DO = 0 mgO/L、圧送管径 Φ300、水温 15 °C、及び 25 °C の条件における WATS モデルシミュレーション結果を図 4、図 5 に示す。

図には、水温にかかわらず、COD<sub>Cr</sub> が 2 倍になれば溶存硫化物の生成速度が 1.2 倍上昇することが示されている。

このことは、WATS モデルマトリックス (表 1) において、溶存硫化物の生成速度を示す式 (7) に、有機物分画の成分である S<sub>s</sub> に関する項目が含まれていることに起因する。すなわち、S<sub>s</sub> に関して、

$$S_s^n = 2^{0.23} = 1.172 \approx 1.2$$

であることによる。本件においては、有機物分画の成分比を COD<sub>Cr</sub> にかかわらず固定しているため、上記結果が導き出されたと捉えることができる。

### 3.3 DO 影響の検証

圧送管径 Φ300、水温 25°C における WATS モデルシミュレーション結果を図 6、図 7、及び図 8 に示す。ただし初期 COD<sub>Cr</sub> は、250mg/L、及び 500mg/L とした。また、圧送管流入 DO は 0 mgO/L、2 mgO/L、8 mgO/L、40 mgO/L とした。なお、8 mgO/L は大気圧における飽和溶存酸素濃度を示しており、硫化水素対策として汚水への空気注入を行った際の最大の初期 DO 値である。また、40mgO/L は純酸素 1 気圧下における飽和溶存酸素濃度を示しており、硫化水素対策として汚水への酸素注入を行った際の最大の初期 DO 値と考えることができる。

図 6 より、COD = 250 mg/L の時には、8mgO/L の DO が滞留時間 1 時間程度で、40mgO/L の DO が滞留時間 7 時間程度で消費され、その後、硫酸塩還元細菌による硫化物の生成反応が進行する。一方、図 7 においては、COD = 500mg/L の時には、8mgO/L の DO が滞留時間 0.5 時間程度で、40mgO/L の DO が滞留時間 3 時間程度で消費されてしまう。

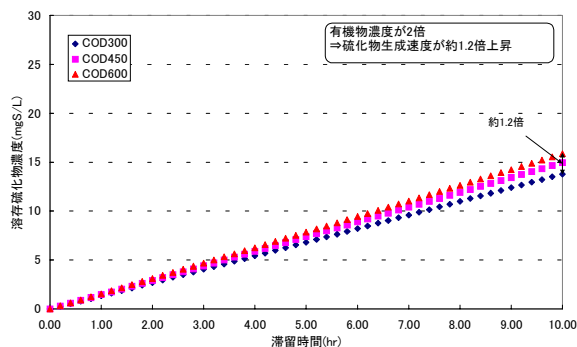


図 4 有機物濃度の影響 (水温 15°C)

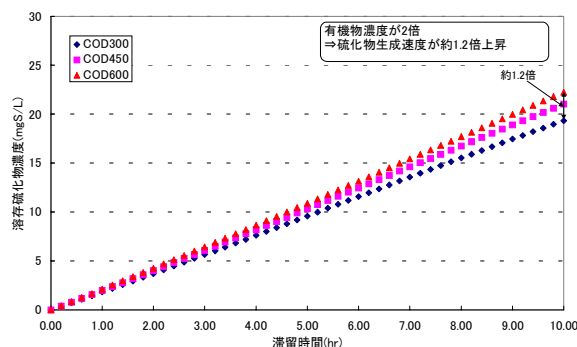


図 5 有機物濃度の影響 (水温 25°C)

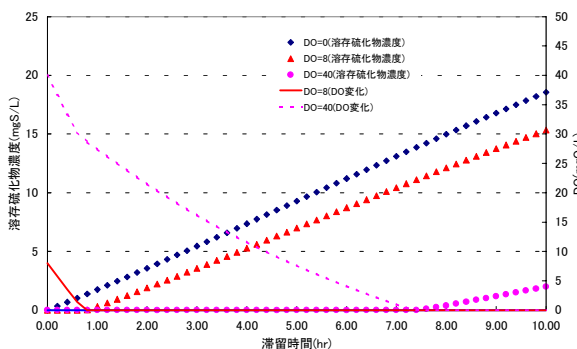


図 6 DO の影響

(水温 25°C、COD<sub>Cr</sub> = 250mg/L)

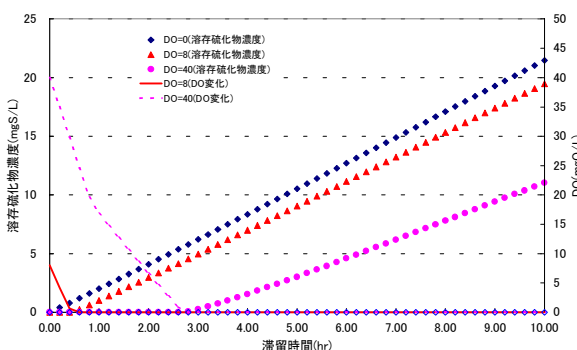


図 7 DO の影響

(水温 25°C、COD<sub>Cr</sub> = 500mg/L)

図 6 及び図 7 の対比から、有機物濃度が大きい方が、DO の消費速度も速いことが分かる。

また、図 8 は DO と、硫化物生成反応の関係をより小さなオーダーで示したものである。「下水道管路施設腐食対策の手引き(案)<sup>2)</sup>」(以下「手引き」)においては、硫酸イオンの還元が生じる場合の限界の溶存酸素濃度を 0.1~1.0mgO/L としている。一方、WATS モデル上においても、図 8 より、DO がほぼ完全に消費されないと、硫酸塩還元細菌による硫化物生成反応は進行しないという結果になった。

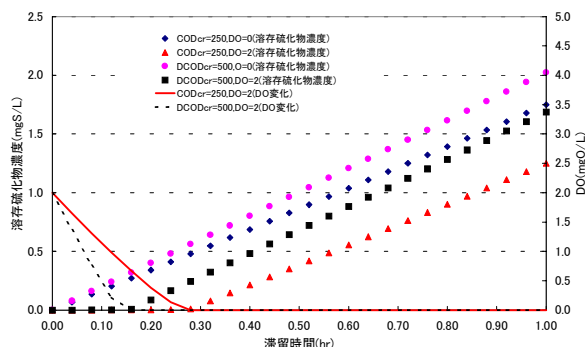


図 8 DO の影響

(水温 25°C、COD<sub>Cr</sub> = 250mg/L, 500mg/L)

### 3.4 硫酸イオン濃度影響の検証

「手引き」においては、下水中の硫酸イオン濃度は 30~80mg/L 程度と示されており、硫黄換算すると 10~27mgS/L となる。すなわち、生成する溶存硫化物の濃度の上限も 10~27mgS/L であるといえる。

図 9 は、圧送管流入 DO = 0 mgO/L、圧送管径 Φ300、初期 COD<sub>Cr</sub> = 500mg/L の条件において WATS モデルシミュレーションを行った際の、硫酸イオン濃度の影響を示している。WATS モデルマトリックス(表 1)において、硫酸イオン濃度は因子として含まれていないが、その硫黄換算値を溶存硫化物生成の上限としてモデルに容易に組み込むことができた。

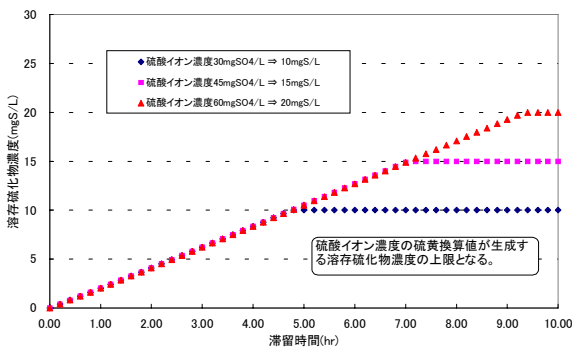


図 9 硫酸イオン濃度の影響

(水温 25°C、COD<sub>Cr</sub> = 500mg/L)

### 3.5 管径影響の検証

圧送管流入 DO = 0 mgO/L、水温 25°C、初期 COD<sub>Cr</sub> = 500mg/L、の条件における WATS モデルシミュレーション結果を図 10 に示す。

図 10 より、硫化物生成速度は管径に反比例することがわかる。これは、WATS モデルマトリックス(表 1)式(7)において、管径を D とした際、

$$\frac{A_{W-P}}{V} = \frac{\pi \times D \times L}{\pi \times D^2 / 4 \times L} = \frac{4}{D}$$

となり、硫化物生成速度が管径 D に反比例するためであると考えることができる。

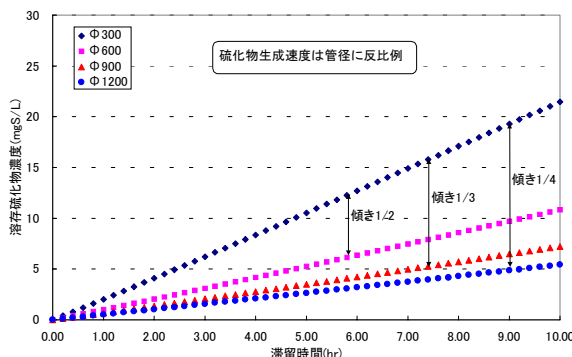


図 10 管径の影響

(水温 25°C、COD<sub>Cr</sub> = 500mg/L)

4. 実データの解析による WATS モデルの適用性の検証

前節を踏まえ、本節では WATS モデルによる実データの解析を行い、硫化水素生成予測に対する WATS モデルの適用性について検討した。解析の対象は A 県 A ポンプ場系統圧送管 (Φ300、延長 5,142m)、及び B 県 B ポンプ場系統圧送管 (Φ300、延長 4,020m) である。それぞれ平成 16 年 12 月、平成 17 年 3 月に、水質調査、硫化水素ガス濃度測定などの実態調査を行っている。表 3 に、WATS モデル解析の際に用いた水質条件やパラメータを示す。水質条件やパラメータは、OUR 試験や水質調査結果により求めるものを除いて、文献値に従った。

図 11 及び図 12 は、圧送開放点における硫化水素ガス濃度を示している。図より、A ポンプ場系圧送管、B ポンプ場系圧送管共に、WATS モデルによる解析結果が実際の圧送開放点における硫化水素ガス濃度測定結果をうまく表現できていることが分かる。これは、前節で述べたように、WATS モデルが硫化水素生成に影響を与える多くの因子をそのモデル内に取り込んでいるためである。このことより、圧送管中における硫化水素生成予測に対する、WATS モデルの適用性の高さが示されたといえる。

なお、A 県 A ポンプ場及び B 県 B ポンプ場では、硫化水素抑制対策として、酸素注入を採用している。当社では、酸素注入時においても硫化水素ガス濃度測定や水質調査等の実態調査を行い、WATS モデル解析についても同様に行った。その結果として、酸素注入対策時における WATS モデルの信頼性の高さについても確認をしている。ただし、その結果は実態調査結果、WATS モデル解析結果、共に硫化水素がほとんど出ないというもの

表 3 実態調査結果の WATS モデル解析における水質条件及びパラメータ

	Aポンプ場	Bポンプ場	文献値 <sup>1)</sup>	備考
解析日時	H16.12.15	H17.3.10	—	
圧送開始地点水温	20.4℃	14.4℃	—	
圧送開放地点水温	18.0℃	12.2℃	—	
圧送管径	Φ300×1条	Φ300×1条	—	
圧送距離	5,142m	4,020m	—	
平均滞留時間	3.5hr	11.1hr	—	
COD <sub>Cr</sub>	160	315	350~650(500)	水質測定による
S <sub>S</sub>	3.5	25	10~50(30)	OUR試験による
X <sub>SI</sub>	0	52	30~100(65)	OUR試験による
X <sub>SS</sub>	127	217	280~440(360)	OUR試験による
X <sub>NH</sub>	29.5	21	30~60(45)	OUR試験による
K <sub>HR</sub>	10	10	10~20(15)	モデルフィッティングによる
Y <sub>H</sub>	0.63	6.4	6	OUR試験による
Y <sub>NH</sub> , Y <sub>HR</sub>	0.74	0.74	0.55	OUR試験による
K <sub>N</sub>	0.2	0.2	0.2	
K <sub>SW</sub> , K <sub>SR</sub>	0.2	1	1	OUR試験による
q <sub>max</sub>	0.43	0.83	1	OUR試験による
K <sub>12</sub>	2.4	2.4	2.4	
K <sub>N1</sub>	0.5	0.35	0.6	OUR試験による
K <sub>N2</sub>	0.2	0.15	0.2	OUR試験による
K <sub>H1</sub>	5	6	5	OUR試験による
K <sub>H2</sub>	0.3	0.75	0.8	OUR試験による
E <sub>A</sub>	0.1	0.1	0.1	
E <sub>AN</sub>	0.45	0.45	0.45	
f <sub>lc</sub>	0.25	0.25	0.25	
q <sub>0</sub>	2	2	2	
K <sub>fr</sub>	20	20	20	
K <sub>NS</sub>	0.065	0.065	0.065	
K <sub>NS1</sub>	0.02	0.02	0.02	
P <sub>S</sub>	8.5	8.5	8.5	
K <sub>HNS</sub>	0.5	0.5	0.5	
n	0.23	0.23	0.23	
A <sub>w</sub>	1.07	1.07	1.07	
A <sub>r</sub>	1.03	1.03	1.03	
A <sub>r</sub>	1.024	1.024	1.024	
I	0.76	0.76	0.76	
J	0.443	0.443	0.443	
γ	0.91	0.91	0.91	
K <sub>H</sub>	0.41	0.41	0.41	

※ 文献値にある()内の数値は、その平均値である。

※ 太字下線は、文献値と等しい部分である。

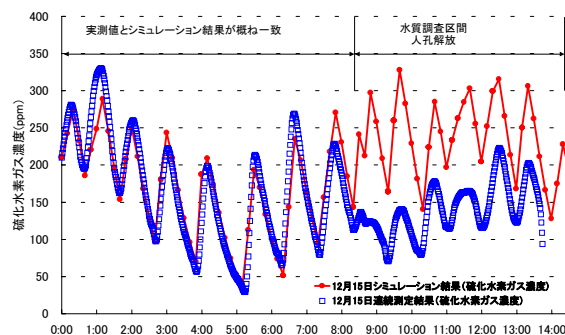


図 11 H16.12.15 A ポンプ場系圧送管解析結果

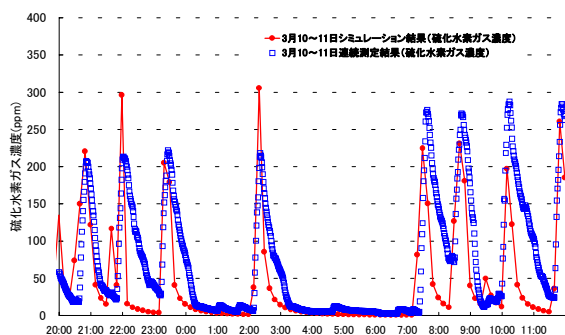


図 12 H17.3.10 B ポンプ場系圧送管解析結果

であり、図 11 及び図 12 と比較してオーダーが極端に低く、本稿では割愛させていただいた。

## 5. まとめ

3 節においては、WATS モデルの特性把握を行った。その結果、以下の特性が示された。

- ① 有機物濃度が 2 倍になると硫化物生成反応の速度が 1.2 倍になる。(3.1)
- ② 水温が 5℃上昇すると、硫化物生成反応の速度が 1.2 倍になる。(3.2)
- ③ COD = 250 mg/L の時には、8 mgO/L の DO が滞留時間 1 時間程度で、40 mgO/L の DO が滞留時間 7 時間程度で消費され、COD = 500 mg/L の時には、8 mgO/L の DO が滞留時間 0.5 時間程度で、40 mgO/L の DO が滞留時間 3 時間程度で消費される。すなわち、下水の有機物濃度が大きいほど、空気注入対策及び酸素注入対策における必要注入量が大きくなる。(3.3)
- ④ 「手引き」においては、硫酸イオンの還元が生じる限界の DO を 0.1~1.0mgO/L としているが、WATS モデル上でも同様の結果である。(3.3)
- ⑤ IWA が提唱する WATS モデルマトリックスの原型には、硫酸イオン濃度の項目が組み込まれていないが、硫酸イオン濃度の硫黄換算値を溶存硫化物濃度生成の上限とすることで、WATS モデルに組込むことが可能である。(3.4)
- ⑥ 硫化水素生成速度は管径に反比例する。(3.5)

4 節においては、A 県 A ポンプ場系圧送管及び B 県 B ポンプ場系圧送管について、水質測定結果、OUR 試験結果、及び文献パラメーターを用いて、WATS モデルによる実態調査結果の解析を行った。その結果、無対策時、及び酸素注入対策時における硫化水素生成予測手法としての、WATS モデルの信頼性及びその適用性の高さを確認した。

以上を踏まえて当社では、硫化水素により老朽した下水道施設の再構築において、WATS モデルを最大限に活用していきたいと考えている。今後、様々なデータを蓄積し、WATS モデルを生かした業務展開を図っていきたい。

## <参考文献>

- 1) 田中直也, 越智孝敏, 二宮一, “下水道管路における好気・嫌気プロセスとその相互作用”, 月刊下水道 Vol.22, No.11 (1999)
- 2) 日本下水道協会, “下水道管路腐食対策の手引き (案)”, (2002)