HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	非水洗式し尿処理におけるし尿の性状変化
Author(s)	斉藤, 貢; 眞柄, 泰基
Description	第8回衛生工学シンポジウム（平成12年11月16日（木）-17日（金） 北海道大学学術交流会館） . 7 水処理 3 . 7-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 8, 257-262
Issue Date	2000-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7246
Type	departmental bulletin paper
File Information	8-7-1_p257-262.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

7－1

非水洗式し尿処理におけるし尿の性状変化

○斉藤　貢（北海道大学）、 眞柄泰基（北海道大学）

1．背景

今日のし尿処理は、高性能の技術が開発され普及している一方で、そういった技術の進歩の恩恵に浴さない人も依然として多く、技術の 2 極分化が一層拡大している。 研究の多くは新技術の開発、高度化に向けられ、古くから用いられて来た簡易な技術は長く顧みられなかった。 とりわけ、20 世紀のし尿処理は水洗化により多くの問題を解決してきたが、他方、水資源の枯渇や水環境の汚染といった問題も引き起こした。 更に、世界的には水資源に恵まれない地域も多く、そういった地域でも適用可能な非水洗式のし尿処理も求められている。

日本には汲み取り式のし尿処理の歴史があり、江戸時代にはそれがエコロジカルに機能していたといわれており、非水洗式は決して水洗式に劣る、間に合わせの方式ではない。 しかしながら、世界各国で利用されている数多くの非水洗式トイレについて、それらの方式が果たして有効に機能しているかの検証は必ずしも十分になされていない。 そこで、非水洗式トイレを適切に評価する事が必要と考えられる。

2．目的

非水洗式トイレは、多くの場合、便器の直下或いは近傍にし尿をある期間貯留するためのピットが設置されている。 その形態自体は方式により様々であるが、何れの場合も意図的・非意図的に貯留し尿の性状変化が起こる。 各処理方式で実際にどの様な変化が生じるかについては、定性的な予想はある程度できるものの、定量化されたデータは余り無いのが現状である。 それぞれの方式毎に定量化されたデータを得る事は、それが現地調査であれモデル実験であれかなりのサンプル数を必要とし、時間と費用がかかる。 そのため、非水洗化トイレにおけるし尿の性状変化を数値的に解析し、コンピューターシミュレーションを行なう事は、時間、コストの両面で大きなメリットがあると考えられる。

3．シミュレーションモデル

シミュレーションモデルは、Fig.1 に示すような最も基本的なピットトイレを想定し、垂直方向の 1 次元で計算を行なう。 ここに貯留されたし尿には、微生物により分解されると同時に、沈殿や拡散といった物理化学的な変化も生じる。それらを総合的に評価し、実際の現象にできるだけ合致し、しかも単純化されたモデルを考えた。

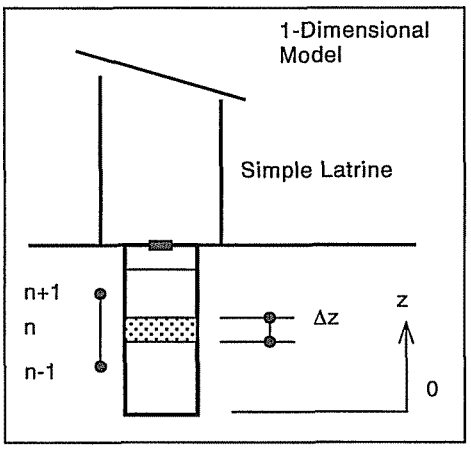

Fig.1　Simulation Model

有機物は、加水分解･酸化･還元反応により、好気的には二酸化炭素、嫌気的にはメタンガスにまで分解される。 有機窒素は加水分解･脱アミノ反応を経てアンモニアになり、好気的に酸化されて硝酸が生成され、硝酸は無酸素時の硝酸呼吸により脱窒されて窒素ガスが生成されるとした。 リン収支については、Activated Sludge Model 2d (ASM2d) と同様の反応を考えた。 微生物によるし尿の分解の過程を Fig.2 に示

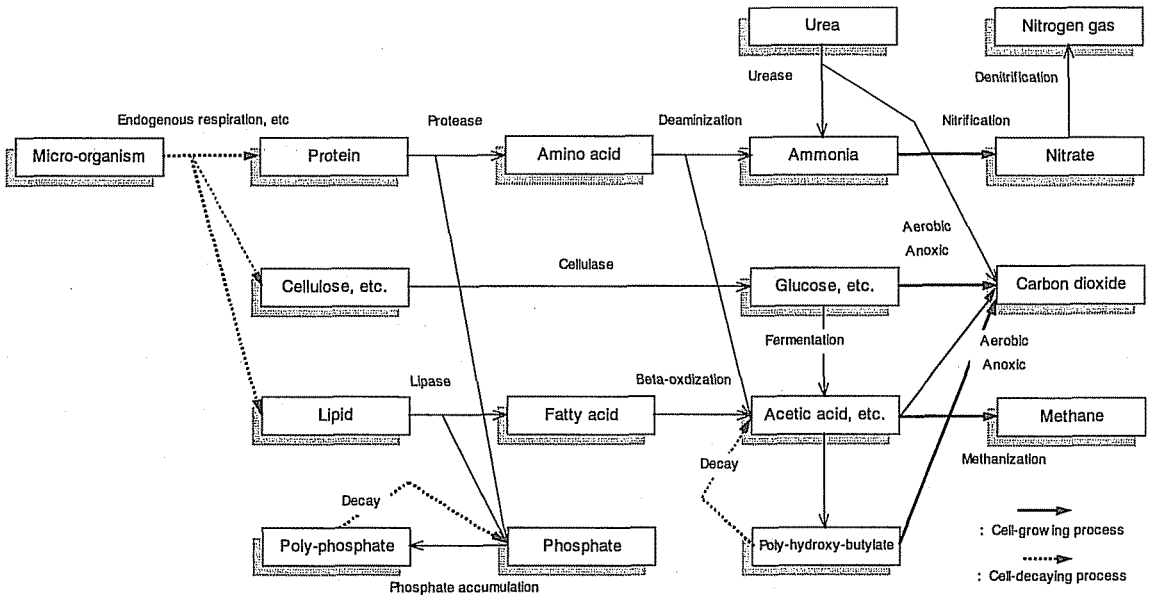

Fig.2　Biochemical Processes

す。 また、し尿中の微生物菌体は、自己消化によりそれ自身再び有機物となる。 以上を 26 の単位プロセスに分けたものを Table.1 に示す。

Table.1　Unit Processes

	Biochemical Model	State	Materials	=>	Products
1	Hydrolysis of protein by protease		Protein	=>	Amino acid, phosphate
2	Hydrolysis of lipid by lipase		Lipid	=>	Fatty acid, phosphate
3	Hydrolysis of cellulose by cellulase		Cellulose	=>	Glucose
4	Hydrolysis of urea by urease		Urea	=>	Ammonia, CO2
5	Beta-oxidization of fatty acid	Aerobic	Fatty acid, O2	=>	Acetic acid, CO2
6	Beta-oxidization of fatty acid	Anoxic	Fatty acid, NO3	=>	Acetic acid, N2
7	Deaminization of amino acid	Aerobic	Amino acid, O2	=>	Ammonia, glucose, CO2
8	Deaminization of amino acid	Anoxic	Amino acid, NO3	=>	Ammonia, glucose, N2
9	Fermentation	Anaerobic	Glucose	=>	Acetic acid
10	Methanization	Anaerobic	Acetic acid, CO2	=>	Cell, Methane, CO2, H2
11	Decomposition of glucose	Aerobic	Glucose, O2	=>	Cell, CO2
12	Decomposition of glucose	Anoxic	Glucose, NO3	=>	Cell, CO2, N2
13	Decomposition of acetic acid	Aerobic	Acetic acid, O2	=>	Cell, CO2
14	Decomposition of acetic acid	Anoxic	Acetic acid, NO3	=>	Cell, CO2, N2
15	Nitrification	Aerobic	Ammonia, O2, CO2	=>	Cell, Nitrate
16	Storage of poly-hydroxy-butylate		Acetic acid, polyphosphate	=>	PHA, phosphate
17	Storage of poly-phosphate	Aerobic	Phosphate, PHA, O2	=>	Poly-phosphate, CO2
18	Storage of poly-phosphate	Anoxic	Phosphate, PHA, NO3	=>	Poly-phosphate, CO2, N2
19	Growth of phosphate accumulating organisms	Aerobic	PHA, O2	=>	Cell, CO2
20	Growth of phosphate accumulating organisms	Anoxic	PHA, NO3	=>	Cell, CO2, N2
21	Lysis of heterotrophic organisms		Cell	=>	Protein, Lipid
22	Lysis of nitrifying organisms		Cell	=>	Protein, Lipid
23	Lysis of methanizing organisms		Cell	=>	Protein, Lipid
24	Lysis of phosphate accumulating organisms		Cell	=>	Protein, Lipid
25	Lysis of poly-hydroxy-butylate		PHA	=>	Acetic acid
26	Lysis of poly-phosphate		Poly-phosphate	=>	Phosphate

4．プログラムフロー

シミュレーションモデルのプログラムフローを Fig.3 に示す。 プログラムは、与えられた時間間隔毎に、し尿ピット内の微小範囲における各単位プロセスを計算し、それに pH、SS の変化を加えた後、物質移動を計算する。 以下に各々のステップについて説明する。

4.0 境界条件

プログラムスタート時の初期値を設定する。 初期値には、環境条件(気温、外気の組

成等)、新鮮し尿の性状(濃度、pH、粘度等)、ピット形態(水深、固液境界高等)、外乱要因(し尿の投入、浸出等)、後段の計算に用いられる係数等が入力される。

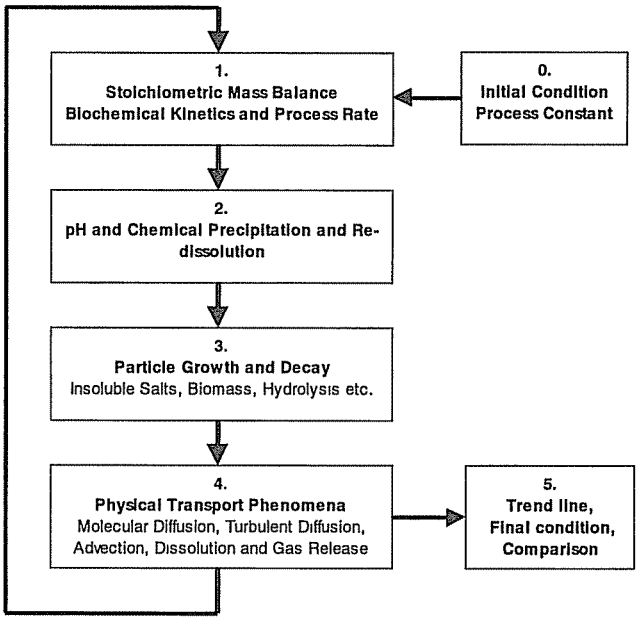

Fig.3 Program Flow

4.1 化学量論的平衡を基にした生物反応

生物反応プロセスにおける化学量論的平衡を Table.3 に、各単位プロセスの反応速度式を Table.4 に示す。総合速度係数は、各単位プロセスの行の係数を全て掛け合わせるとで得られる。ここで、反応速度と濃度との関係を示すために Michaelis-Menten 型の係数を用いた。表中の未知数は実験により求める。

4.2 pH の変化とそれによる化学的沈澱溶解反応

生物反応による生成物により、ピット内のし尿の pH が変動する。pH は全体の反応(主に酵素反応)の活性度を変化させるとともに、リン酸塩・炭酸塩の沈澱・溶解を規定し、モデル全体のリン収支にも影響を与える。Table.2 にし尿の pH に影響を与える物質及びイオンの関係を示した。イオンの価数は、酸解離定数(pKa)により一義的に定まり、また、難溶解性塩の濃度も溶解度積により与えられる。このマトリックスを数値的に収束させることにより、pH を始めとした各物質の存在形態の割合が定まる。

Table.2 pH and Ion Balance

	Mass Balance												Dissociation		Solubil-ity Product
	K	Na	Ca	Mg	NH_3	Cl	NO_3	SO_4	A*	CO_3	PO_4	G*	pKa	pKw	
H^+														14	
OH^-															
K^+	x												13.86		
KOH	x														
Na^+		x											13.64		
NaOH		x													
Ca^{2+}			x										*11.36*		
$CaOH^+$			x										12.36		
$Ca(OH)_2$			x												5.26
$CaCO_3$			x							x					8.06
$Ca_3(PO_4)_2$			xxx								xx				23.46
$CaHPO_4$			x								x				11.49
Mg^{2+}				x									*10.42*		
$MgOH^+$				x									11.42		
$Mg(OH)_2$				x											9.22
$MgCO_3$				x						x					4.59
$Mg_3(PO_4)_2$				xxx							xx				18.57
$MgHPO_4$				x							x				11.05
NH_4^+					x								9.24		
NH_4OH					x										
HCl						x							-0.03		
Cl^-						x									
HNO_3							x						0.01		
NO_3^-							x								
H_2SO_4								x					*0*		
HSO_4^-								x					1.96		
SO_4^{2-}								x							
CH_3COOH									x				4.56		
CH_3COO^-									x						
H_2CO_3										x			6.35		
HCO_3^-										x			10.33		
CO_3^{2-}										x					
H_3PO_4											x		2.15		
$H_2PO_4^-$											x		7.2		
HPO_4^{2-}											x		12.35		
PO_4^{3-}											x				
$C_5H_{10}O_4N^+$												x	2.18		
$C_5H_9O_4N$												x	4.2		
$C_5H_8O_4N^-$												x	9.59		
$C_5H_7O_4N^{2-}$												x			

A*: Acetic Acid G*. Glutamic Acid

4.3 浮遊物質の成長と分解

モデルでは、浮遊物質が全て球形粒子で、その粒度分布は粒径 d の関数 f(d)で与えられると考える。更に、浮遊物粒子は、粒径に応じその内部及び表面に水を吸着しており、粒子

毎に見かけの密度は異なる。 この密度についてもdの関数で与える。 単位時間当たりの粒径dの粒子における菌体の増殖による体積増分は、菌体量の比で配分される。 一方、化学的な無機塩類の析出・溶解、及び有機物の加水分解は専ら粒子表面で起こると考えるので、これによる増分は粒子の面積比で配分する。 上記3つの体積増加により粒径dの粒子がg(d)になるとすると、新しい粒度分布は$f(g^{-1}(d))$という関数で表わされる。

4.4 物質移動

以上より生化学的な諸条件が変化したピット内において、物質の平衡状態を取り戻す形での移動現象が生じる。溶解性物質は分子拡散及び乱流拡散により濃度差を解消しようとする。 揮発性物質は、水面において吸収・放出される。 粒子状物質は、重力による沈降・浮上に加え、粒径に応じた拡散が生じる。 そして、全てはピット内の水流によっても移流される。 ただし、今回のモデルでは、ピット内でし尿は滞留していると考えられるので、移流及び乱流拡散は生じないとする。

重力による粒子の自由沈降速度vはStokesの式により表わされるが、ピット底部では粒子の堆積により沈降が妨げられ、濃度cがρ_sになると、即ち全ての空間が粒子によって占められると沈降は停止する。 従って、自由沈降速度に濃度による低減率を掛け合わせて、

$$v = \frac{g(\rho_s - \rho)}{18\mu_l} d^2 \frac{\rho_s - c}{K_M + \rho_s - c}$$

となる。 ここでK_Mは飽和定数である。 運動方程式は、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (cv)}{\partial z} = -D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

で表わされる。 溶解性物質に関しては分子拡散のみによって物質移動がなされるので、左辺第2項は必要としない。溶液中の粒子の拡散係数D_s、および分子拡散係数D_dは、Birdらにより、

$$D_s = \frac{KT}{3\pi\mu_L d} \qquad D_d = 7.4\times10^{-8}\frac{(\Psi_B M_B)^{\frac{1}{2}}T}{\mu_L \tilde{V}_A^{0.6}} \quad \text{(cgs単位系において)}$$

が示されている。 ここで、Kはボルツマン定数、Tは絶対温度、V_Aは溶質の沸点で液体としてのモル体積、M_Bは溶媒の分子量、Ψ_Bは溶媒によるパラメーターで、水の場合2.6が与えられている。 これらの条件で運動方程式を数値的に解くことにより、し尿中での物質移動が求められる。 気相との物質交換は、二重境膜説に基づき計算する。

4.5 結果の出力

計算した結果は、各物質の濃度やその計時変化として表わすほか、一般的な汚水の指標(COD、SS、TOC、アルカリ度等)に変換し、評価を行ない易くする必要がある。

5．今後の目標

今後は、このモデルが必要とする係数類を実験により求め、それを使って実際にプログラミングを行ない、それが現状をどの程度表現できるかを見極めたい。 そして、改良できる部分を見つけ出し、このシミュレーションモデルを実用レベルまで精度を高めたい。

さらに、新しい条件やパラメーターを加えていく事によって、より複雑な形態のトイレにも応用できるようにして行きたい。

参考文献

M. Henze et al. (1999): *Activated Sludge Model No.2d ASM2D*, Wat. Sci. Tech. Vol.39, No.1

R. B. Bird et al. (1960): Transport Phenomena, John Willey & Sons

Table.3 Stoiciometry

Conserv.	Gaseuse				Soluble						
as C		1.000		1.000				1.000	1.000	3.429	0.429
as N			1.000		1.000	1.000				1.000	1.000
as O	1.000	2.667				3.429	2.065	1.333	1.333	2.476	0.571
as P							1.000				
as Mass	1.000	3.667	1.000	1.500	1.214	4.429	3.065	2.500	2.500	7.476	2.143
as mole	0.031	0.083	0.036	0.083	0.071	0.071	0.032	0.042	0.014	0.060	0.036
as	O2 O_2 [gO]	CO2 CO_2 [gC]	N2 N_2 [gN]	CH4 CH_4 [gC]	NH3 NH_3 [gN]	NO3 NO_3 [gN]	PO4 PO_4 [gP]	Acetate $C_2H_4O_2$ [gC]	Glucose $C_6H_{12}O_6$ [gC]	Amino a. *1 [gN]	Urea CH_4ON_2 [gN]
1							v1,po			1	
2							v2,po				
3									1		
4		1			1						-1
5	-v5,o2	v5,co						v5,ac			
6		v6,co	v6,n2			-v6,no		v6,ac			
7	-v7,o2	v7,co			1			v7,ac		-1	
8		v8,co	v8,n2		1	-v8,no		v8,ac		-1	
9		v9,co						1	-1		
10		v10,co		v10,me			-ipbm*Yc	-1			
11	-v11,o2	v11,co					-ipbm*Yh1		-1		
12		v12,co	v12,n2			-v12,no	-ipbm*Yh1		-1		
13	-v13,o2	v13,co					-ipbm*Yh2	-1			
14		v14,co	v14,n2			-v14,no	-ipbm*Yh2	-1			
15	-v15,o2	-v15,co			-1	1	-ipbm*Ya				
16							Ypo	-1			
17	-v17,o2	v17,co					-1				
18		v18,co	v18,n2			-v18,no	-1				
19	-v19,o2	v19,co					-ipbm*Yp				
20		v20,co	v20,n2			-v20,no	-ipbm*Yp				
21							ipbm		iglbm	iaabm	
22					v22,nh		ipbm		iglbm	iaabm	
23							ipbm		iglbm	iaabm	
24							ipbm		iglbm	iaabm	
25								1			
26							1				

Conserv.			Particulate						Biomass			
as C			1.000		1.000	3.429	1.000	1.000	0.473	0.473	0.473	0.473
as N						1.000			0.113	0.113	0.113	0.113
as O			0.148	1.548	0.667	1.524	0.140	1.111	0.270	0.270	0.270	0.270
as P				1.000		0.000	0.000		0.016	0.016	0.016	0.016
as Mass	39.000	35.400	1.296	3.806	1.791	6.405	1.284	2.250	1.000	1.000	1.000	1.000
as mole	1.000	1.000										
as	Cation K [mole]	Anion Cl [mole]	Fatty a. $C_{16}H_{32}O_2$ [gC]	P. phos. KPO_3 [gP]	PHA $C_4H_6O_2$ [gC]	Protein *2 [gN]	Lipid $C_{57}H_{98}O_6$ [gC]	Cellulose $C_6H_{10}O_5$ [gC]	Bhet $C_5H_7O_2N$ [gMass]	Baut $C_5H_7O_2N$ [gMass]	Bpao $C_5H_7O_2N$ [gMass]	Bmet $C_5H_7O_2N$ [gMass]
1						-1						
2			1				-1					
3								-1				
4												
5			-1									
6			-1									
7												
8												
9									Yh0			
10												Ym
11									Yh1			
12									Yh1			
13									Yh2			
14									Yh2			
15										Ya		
16	Ypo			-Ypo	1							
17	-1			1	-Yph							
18	-1			1	-Yph							
19					-1						Yp	
20					-1						Yp	
21						iprbm	ilpbm	icebm	-1			
22						iprbm	ilpbm	icebm		-1		
23						iprbm	ilpbm	icebm				-1
24						iprbm	ilpbm	icebm			-1	
25					-1							
26	1			-1								

*1: $C_{4.8}H_{9.6}O_{2.6}N_{1.2}$ *2: $(C_{4.8}H_{7.6}O_{1.6}N_{1.2})_n$

v_,_: Stoichiometric constant i_bm: Constituent in biomass Y_: Yield

Table.4 Process Rate

	Rate Constant	Reduction Factor	pH	O2	NH3	CO2 NO3
1	kpr		Ch+*K1,a/(K1,a+Ch+)(K1,b+Ch+)			
2	klp		Ch+*K2,a/(K2,a+Ch+)(K2,b+Ch+)			
3	kce		Ch+*K3,a/(K3,a+Ch+)(K3,b+Ch+)			
4	kur		Ch+*K4,a/(K4,a+Ch+)(K4,b+Ch+)			
5	kfa		Ch+*K5,a/(K5,a+Ch+)(K5,b+Ch+)	Co2/(K5,o2+Co2)		
6	kfa	η6,no	Ch+*K6,a/(K6,a+Ch+)(K6,b+Ch+)	K6,o2/(K6,o2+Co2)		Cno/(K6,no+Cno)
7	kaa		Ch+*K7,a/(K7,a+Ch+)(K7,b+Ch+)	Co2/(K7,o2+Co2)		
8	kaa	η8,no	Ch+*K8,a/(K8,a+Ch+)(K8,b+Ch+)	K8,o2/(K8,o2+Co2)		Cno/(K8,no+Cno)
9	μh0		Ch+*K9,a/(K9,a+Ch+)(K9,b+Ch+)	K9,o2/(K9,o2+Co2)		K9,no/(K9,no+Cno)
10	μm		Ch+*K10,a/(K10,a+Ch+)(K10,b+Ch+)	K10,o2/(K10,o2+Co2)	Cnh/(K10,nh+Cnh)	K10,no/(K10,no+Cno)
11	μh1		Ch+*K11,a/(K11,a+Ch+)(K11,b+Ch+)	Co2/(K11,o2+Co2)	Cnh/(K11,nh+Cnh)	
12	μh1	η12,no	Ch+*K12,a/(K12,a+Ch+)(K12,b+Ch+)	K12,o2/(K12,o2+Co2)	Cnh/(K12,nh+Cnh)	Cno/(K12,no+Cno)
13	μh2		Ch+*K13,a/(K13,a+Ch+)(K13,b+Ch+)	Co2/(K13,o2+Co2)	Cnh/(K13,nh+Cnh)	
14	μh2	η14,no	Ch+*K14,a/(K14,a+Ch+)(K14,b+Ch+)	K14,o2/(K14,o2+Co2)	Cnh/(K14,nh+Cnh)	Cno/(K14,no+Cno)
15	μa		Ch+*K15,a/(K15,a+Ch+)(K15,b+Ch+)	Co2/(K15,o2+Co2)	Cnh/(K15,nh+Cnh)	Cco/(K15,co+Cco)
16	kph		Ch+*K16,a/(K16,a+Ch+)(K16,b+Ch+)			
17	kpp		Ch+*K17,a/(K17,a+Ch+)(K17,b+Ch+)	Co2/(K17,o2+Co2)		
18	kpp	η18,no	Ch+*K18,a/(K18,a+Ch+)(K18,b+Ch+)	K18,o2/(K18,o2+Co2)		Cno/(K18,no+Cno)
19	μp		Ch+*K19,a/(K19,a+Ch+)(K19,b+Ch+)	Co2/(K19,o2+Co2)	Cnh/(K19,nh+Cnh)	
20	μp	η20,no	Ch+*K20,a/(K20,a+Ch+)(K20,b+Ch+)	K20,o2/(K20,o2+Co2)	Cnh/(K20,nh+Cnh)	Cno/(K20,no+Cno)
21	bh					
22	ba					
23	bm					
24	bp					
25	bph					
26	bpp					

	Acetate Glucose PHA	Amino Acid Urea Fatty Acid Poly-phosphate	PO4 Protein Lipid Cellulose	Bhet Baut Bpao Bmet
1			(Cpr/Ch)/(K1,pr+Cpr/Ch)	Ch
2			(Clp/Ch)/(K2,lp+Clp/Ch)	Ch
3			(Cce/Ch)/(K3,ce+Cce/Ch)	Ch
4		Cur/(K4,ur+Cur)		Ch
5		(Cfa/Ch)/(K5,fa+Cfa/Ch)		Ch
6		(Cfa/Ch)/(K6,fa+Cfa/Ch)		Ch
7		Caa/(K7,aa+Caa)		Ch
8		Caa/(K8,aa+Caa)		Ch
9	Cgl/(K9,gl+Cgl)		Cpo/(K9,po+Cpo)	Ch
10	Cac/(K10,ac+Cac)		Cpo/(K10,po+Cpo)	Cm
11	Cgl/(K11,gl+Cgl)		Cpo/(K11,po+Cpo)	Ch
12	Cgl/(K12,gl+Cgl)		Cpo/(K12,po+Cpo)	Ch
13	Cac/(K13,ac+Cac)		Cpo/(K13,po+Cpo)	Ch
14	Cac/(K14,ac+Cac)		Cpo/(K14,po+Cpo)	Ch
15			Cpo/(K15,po+Cpo)	Ca
16	Cac/(K16,ac+Cac)	(Cpp/Cp)/(K16,pp+Cpp/Cp)		Cp
17	(Cph/Cp)/(K17,ph+Cph/Cp)	(K17,max-Cpp/Cp)/(K17,pp+K17,max-Cpp/Cp)	Cpo/(K17,po+Cpo)	Cp
18	(Cph/Cp)/(K18,ph+Cph/Cp)	(K18,max-Cpp/Cp)/(K18,pp+K18,max-Cpp/Cp)	Cpo/(K18,po+Cpo)	Cp
19	(Cph/Cp)/(K19,ph+Cph/Cp)		Cpo/(K19,po+Cpo)	Cp
20	(Cph/Cp)/(K20,ph+Cph/Cp)		Cpo/(K20,po+Cpo)	Cp
21				Ch
22				Ca
23				Cm
24				Cp
25	Cph			
26		Cpp		

k_:	Rate Constant	ac:	Acetic Acid	n2:	Nitrogen Gas
μ_:	Maximum Growth Rate	ce:	Cellulose	nh:	Ammonia
b_:	Decay Rate	co:	Carbonate, Carbon Dioxide	no:	Nitrate
η_:	Reduction Factor	gl:	Glucose	o2:	Oxygen
K_:	Saturation Coefficient	h+:	Hydrogen ion	p,po:	Phosphate
C_:	Concentration	h:	Heterotrophic	ph:	Poly-hydroxy-alkanoate
a:	Autotrophic	lp:	Lipid	pp:	Poly-phosphate
aa:	Amino Acid	m,me:	Methane	pr:	Protein