

呉工業高等専門学校

# 研究報告

第32巻 第2号 (通巻第59号)

平成9年2月 (1997)

## 目次

1. 意味関係に関する一考察 .....	川 尻 武 信	1
2. CBNホイールのドレッシング条件が研削表面粗さに及ぼす 影響 (I) .....	池 上 廉 平	5
3. Schwarzschild 時空におけるエネルギー運動量テンソルとBack- Reaction問題 .....	深 澤 謙 次	15
4. 器械出し看護婦ロボットに関する研究—透過型照明を利用した 手術器具画像認識システム— .....	岩 本 英 久 大 崎 紘 一 神 代 充 慳 野 泰 司 佐 藤 幹 彦 関 州 二	29
5. アルゴングロー放電中の分子不純物の挙動 .....	山 崎 勉	39
6. 長鎖脂肪酸の嫌氣的分解過程における硫酸塩還元細菌とメタン 生成細菌の基質競合 .....	山 口 隆 司 市 坪 誠 原 田 秀 樹 山 崎 慎 一	51

# 意味関係に関する一考察

(一般科目) 川 尻 武 信

## Some Cases of Sense Relations

(Department of General Education) Takenobu KAWAJIRI

There are systematic relations between words within a language. This paper examines some relations between words, using English and Japanese examples.

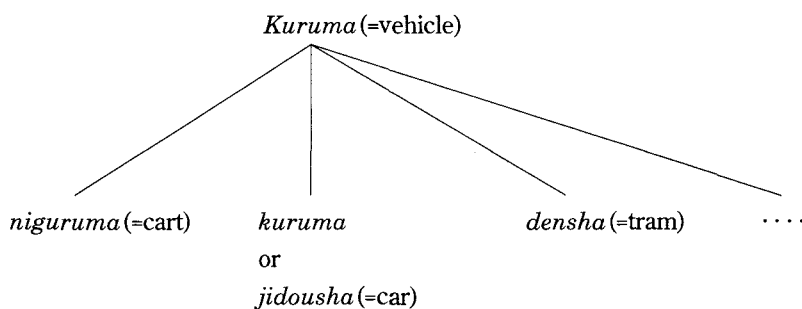
Key Words: hyponymy, antonymy, converseness, synonymy, homonymy, polysemy

上下関係, 反義関係, 逆意性, 同義性, 同音異義性, 多義性.

### § 1. Hyponymy

'Hyponymy' is a relationship between words in which the meaning of one word includes the meaning of another. For example, a *knife* is a type of *cutlery* and so is a *fork*. The general term *cutlery* is called a superordinate or hypernym. A superordinate can have some hyponyms, which are called co-hyponyms. *Knife*, *fork* and *spoon* are co-hyponyms of *cutlery*.

The hierarchical relation between a superordinate and a hyponym is not always a rigid one. There are some cases where no superordinate exists. The same word may occur in several places in the hierarchy. The latter example is shown as follows:



### § 2. Antonymy

The term 'antonymy' refers to oppositeness of meaning. However, there are many ways in which words can stand in opposition to each other, creating a controversial problem of how many types of oppositeness one should accept. This paper will address three basic types of antonymy and under the head of antonymy two types will be touched upon.

The first type of antonymy is called binary antonymy. If one looks at the pair *alive* / *dead*, one finds

that the contrast between them is absolute. If one word is used, the other cannot be used and vice versa. One would not say, "My dog is neither alive nor dead." The following opposites can also be included in this type of antonymy: *normal* / *abnormal*, and *seikai*(=correct answer) / *goto*(=wrong answer).

The second type of antonymy is called graded antonymy. Unlike the binary antonymy, there is no absolute contrast. For example, something which is not *far* is not altogether *near*. It may be somewhere between the two distances. The same thing can be true of the pair *utsukushii*(=beautiful) / *minikui*(=ugly). When these words are graded, norms vary according to the context. This can be easily understood in the following sentence, "A slow convertible can run faster than a fast sprinter." The norm is set by the object being discussed. Between binary antonym and graded antonym there is a sharp distinction. In the former, the opposites contrast with each other at two extremes whereas the latter has a graduation between the opposites. However, one may add that the two types of antonymy are similar to each other in that both show incompatibility. Another point one should emphasise is that sometimes no absolute difference between the two types occurs. For example, the phrase "more dead than alive" demonstrates that we can use binary antonyms as graded ones.

### § 3. Converseness

"Converseness" is the third type of oppositeness. This type of antonymy is also referred to as relational opposition. A pair such as *teach* / *learn* illustrates this relationship. If individual A teaches something to individual B, then B learns it from A. There is an interdependent relation in meaning between the pair. One item of the pair shows that the other must exist. Another example is *buy* / *sell*. A pair of *yanushi*(=landlord) / *shakuyanin*(=tenant) is a Japanese example of converseness.

It is pointed out that there is a parallel between converseness and gradability although converseness has no gradable relations. As noted earlier, because different antonymy classifications exist, this area needs to be investigated more thoroughly.

### § 4. Synonymy

'Synonymy' refers to sameness of meaning. The term synonym describes a word which has the same or nearly the same meaning as another word. It is, however, highly unlikely that there are perfect synonyms. Two words do not have exactly the same meaning because they are not interchangeable in all contexts. However, two words with almost the same meaning are not hard to find in both English and Japanese. An English example is *build* / *erect* and a Japanese example is *setsuyakukano* (=thrifty) / *kechina* (=stingy).

Several things about the use of synonyms should be kept in mind. First, one word may be more suitable in a particular context than another. For example, *erect* can be more suitable than *build* in a formal context. Secondly, as the Japanese example shows, one word sometimes has a good connotation while the other word has a bad one. Thirdly, collocational restrictions vary among synonyms. For example, *big* and *large* are synonyms but only a *big day* can be found in English.

### § 5. Homonymy

A homonym is a word which has the same form (spoken or written) as another, but differs in meaning. The relation homonyms form is called 'homonymy'. 'Love(=a strong feeling for another

person)' and 'love(=no points)' are English examples of the homonyms. It is often said that the Japanese language abounds in homonyms because *Kanji* (Chinese characters) can be read in different ways, thus producing a lot of homonyms. For example, 'kojo' has at least eight different meanings (ruined castle, factory, friendship, statement, improvement, kindness, constancy and colloid). There is an important theoretical problem of how to differentiate between homonymy and polysemy. This problem will be discussed under the next heading.

## § 6: Polysemy

'Polysemy' represents a word having two or more meanings. In the case of the English word 'flat (adjective)', a dictionary gives nine meanings. Some of them are 'parallel with the ground', 'spread out fully', 'dull' and 'without enough air in a type'. A Japanese dictionary sets up eight semantic items in the word 'kuchi'. Some of them are 'mouth', 'speech', 'taste' and 'job'.

The distinction between polysemy and homonymy has been a theoretical problem for linguists. Several interpretations of the problem have been given. One interpretation is that polysemy items can be traced back to the same source. This etymological interpretation is not satisfactory if one looks at the fact that 'pupil(=a person who is being taught)' and 'pupil(of the eye)' are treated as homophony in spite of their same historical origin. Another interpretation is that one should feel intuitively that polysemy items have closely related meanings. This interpretation is also insufficient. One cannot define closely related meanings. The problem of the distinction between polysemy and homonymy explains that a word is regarded as a polysemy in some dictionaries while it is not in other dictionaries. When one looks at our English examples by comparing two dictionaries, one finds that one dictionary treats 'love(=a strong feeling for another person)' and 'love(=nil)' as polysemy but the other dictionary gives each meaning under the same entry.

So far we have discussed six cases of sense relations although converseness can be included under the heading of antonymy. We need to consider the sense relations in both speech and writing. It is also necessary to utilise the knowledge of the sense relations in foreign language teaching, especially in vocabulary teaching.

## References

1. Hurford, J.R. and Heasley, B. (1983), *Semantics : A course book*. C.U.P.
2. Leech, G. (1981), *Semantics*. Second ed. Penguin.
3. Palmer, F.R. (1981), *Semantics*. Second ed. C.U.P.

(平成 8 年 11 月 25 日 受付)

# CBNホイールのドレッシング条件が研削表面粗さに及ぼす影響(I)

——ビトリファイドボンドCBNホイールによる焼入れ鋼の研削において——

(機械工学科) 池 上 廉 平

## The Effect upon Ground Surface Roughness by Dressing Condition of CBN Wheel(I)

——In the Case of Grinding Hardened Steel by Vitrified Bonded CBN Wheel——

(Department of Mechanical Engineering) Rempei IKEGAMI

At present, vitrified bonded CBN wheels are used very often in the case of grinding hardened steels on NC grinder by the reasons of less wear, easy truing and dressing operation of the CBN wheel. But even now, it seldom succeeds to grind hardened steels with CBN wheel on Machining Center on which every cutting tool with a long and stable tool life should be used, because it is very difficult to get fine surface roughness for many hours in finish grinding, if some of conditions of dressing CBN wheel were changed even a little.

Therefore, the test of step plange grinding hardened steel(SKH51, Hrc>61) by using vitrified bonded CBN wheel(grain size #170) was proceeded on a vertical machining center, for the purpose of finding suitable conditions of dressing the CBN wheel, in order to get fine surface roughness ( $R_{\max} < 3\mu\text{m}$ ) for many hours in a stable condition.

This paper reports the result of the test, regarding the surface roughness and other characteristics of grinding operation, obtained by changing some of the conditions of dressing the CBN wheel, for example, the type of dresser, the dress lead and the removal of the CBN wheel on dressing.

Key Words: vitrified bonded CBN wheel, finish grinding, hardened steel,  
truing and dressing operation, surface roughness, grinding ratio  
ビトリファイドボンドCBNホイール, 仕上げ研削, 焼入れ鋼,  
ツルーイングとドレッシング(砥石修正), 表面粗さ, 研削比

### § 1 はじめに

現在, 高硬度焼入れ鋼のNC研削には, 研削ホイールの摩耗が少なく, そのツルーイングとドレッシングが同時に簡単に行えるとの理由で, ビトリファイドボンドCBNホイールが多く使用されている。

しかし, 長くて安定した工具寿命の切削工具の使用が望まれるマシニングセンタでは, CBNホイールはドレッシングのやり方の少しの違いで, 良好な表面粗さを長時間, 安定して得ることが相当困難であることから, 今でも, CBNホイールによる焼入れ鋼の研削はすべて成功しているとは言いがたい。

多種類の切削加工を全自動でおこなうマシニングセンタに, 研削加工を加えて, 更に加工集約化による生産性の向上を計るためには, CBNホイールによる焼入れ鋼の研削に最適なドレッシング

条件の定量化を急ぐとともに、CBNホイールの長くて安定した工具寿命(=ドレス・インターバル)を早期に確定することが必要である。そして、次のステップでは、研削中にホイール摩耗の進行から工具寿命(=ドレス・インターバル)を予知する実用的簡易モニターの開発が強く望まれている。

本研究は上記課題の解決に向けて、ビトリファイドボンドCBNホイールによる焼入れ鋼の研削において、ホイールのドレッシング諸条件の違いにより、得られる表面粗さとCBNホイールの摩耗の推移、その他の研削性能の違いを明確にすることにより、常時、長時間、安定して良好な表面粗さ( $R_{\max} < 3\mu\text{m}$ )を得ることのできる最適なドレッシング条件を見いだすことを目的として、立形マシニングセンタを用いて、焼入れ鋼の平面研削テストを次の要領で行った。

今回は、仕上げ研削表面粗さに大きな影響を及ぼすビトリファイドボンドCBNホイール(砥粒サイズ#170)のドレッシング諸条件の内、ドレッサの形式、ドレッシング・リード、およびドレス量を変えてツルーイング・ドレッシングして、焼入れ鋼(SKH51,  $H_{RC} > 61$ )をステップ・ブランジカット方式で平面研削をし、得られる表面粗さと、それが  $R_{\max} = 3\mu\text{m}$  を越えるまでの累積研削量、CBNホイール累積摩耗量、研削比、研削動力などの研削性能が、上記のドレッシング条件の差異によって受ける影響について調べた。その結果をまとめ、ここに報告する。

なお、今回のテストでは、CBNホイールのドレッシング速度はドレッサ・メーカー推奨の周速比0.5に固定しているが、次回はドレッシング速度も変化させ、これによる影響も調査の予定である。

〔注1〕 研削比 = (累積研削量) / (CBNホイール累積摩耗量)

〔注2〕 周速比 = (ホイール周速) / (ドレッサ周速)

〔注3〕 本研究の範囲では、ビトリファイドボンドCBNホイールのツルーイング(=形状修正)とドレッシング(=切れ味回復)が、一つのドレッサ(別名; ツルア)で同時に行われるので、ここでは表記を簡略化するために、以後ドレッシング(=砥石修正)の一語で表すこととする

## § 2 実験方法

### 2.1 CBNホイールのドレッシング方法 — 図 1-a, 図 1-b 参照

本実験では、ビトリファイドボンドCBNホイールのドレッシングを、一般的、能率的なロータリ式ドレッシング装置により、 $\phi 78$ ディスク形と $\phi 25$ カップ形の二種類のダイヤモンド・ドレッサを用いて、立形マシニングセンタ上で、研削油剤をかけて実施した。その条件は、両ドレッサとも、ドレッシングはダウンカットで周速比を0.5に固定し、ドレッシング・リードとドレス量を変えて行った。

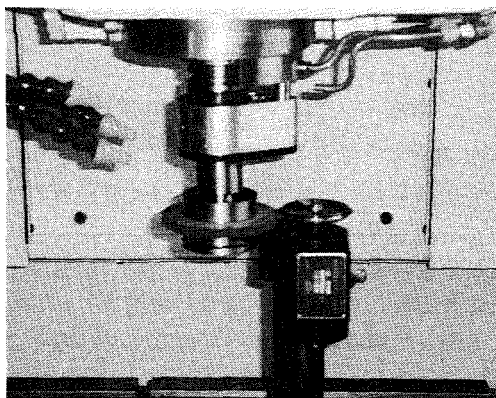


図 1-a  $\phi 78$ ディスク形ドレッサによる  
CBNホイールのドレッシング,

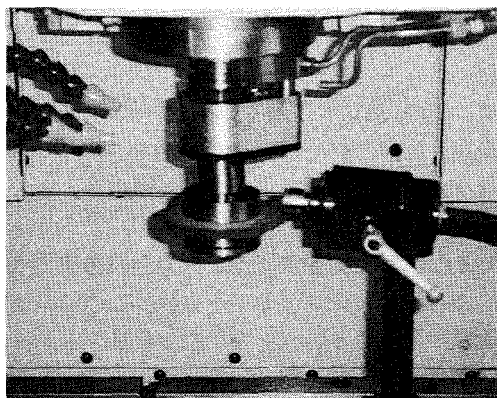


図 1-b  $\phi 25$ カップ形ドレッサによる  
CBNホイールのドレッシング

### 2.1.1 ビトリファイドボンドCBNホイール（有気孔タイプ）の仕様；

- (1) B170F100VC3： CBN粒度 #170,(仕上研削用)  $\phi 120 \times 10t$  (外径\*厚み)
- (2) B140F100VC3： CBN粒度 #140,(中研削用)  $\phi 120 \times 10t$  (外径\*厚み)

### 2.1.2 ドレッサの仕様とドレッシング条件表

ドレッサの形式	(a) ディスク形 $\phi 78 \times 1.1t$	(b) カップ形 $\phi 25 \times 20L$
ドレッサの仕様	SD40N90MSA-0.5	SD40M64
ドレッシング状況	面切削(ドレッサ軸がホイール軸に平行)	線切削(ドレッサー軸とホイール軸の交角が $80^\circ$ )
ドレッサ周速 ( $V_d$ )	868 m/min	275 m/min
ホイール 〃 ( $V_w$ )	434 m/min	141 m/min
周速比 ( $=V_w / V_d$ )	0.5	
ドレッシングリード	50, 70, 100 $\mu\text{m}/\text{rev}$ of CBN wheel	
ドレッシング切込み	0.002 mm/回	
ドレス量/ホイール半径	0.06, 0.13, 0.2 mm	

## 2.2 焼入れ鋼の研削テスト———図 2-1, 図 2-2(次頁)参照

研削テストは図2-1,図2-2 に示す如く、立形マシニングセンタのテーブル上に取付けた焼入れ鋼 (SKH51, Hrc>61,  $40 \times 40 \times 300$ ) を、マルチオイルホルダを介して主軸に取付けたビトリファイドボンドCBNホイールによって、研削油剤をかけて、ステップ・プランジカット方式で平面研削をした。

そして得られる表面粗さと、それが  $R_{\max} = 3\mu\text{m}$  を越えるまで、累積研削量、ホイール累積摩耗量、研削比、研削動力などの研削性能が、ドレッシング条件の差異により如何に変化するかを調査した。

今回の研削テストでは、CBNホイールのドレッシング後、マシニングセンタでの実作業を想定した研削サイクル(後に説明あり)を繰り返し実行して、その都度得られる表面粗さと諸研削性能を計測し、ゼロカットで表面粗さが  $R_{\max} > 3\mu\text{m}$  となった所で、その研削サイクルを全て終了とした。

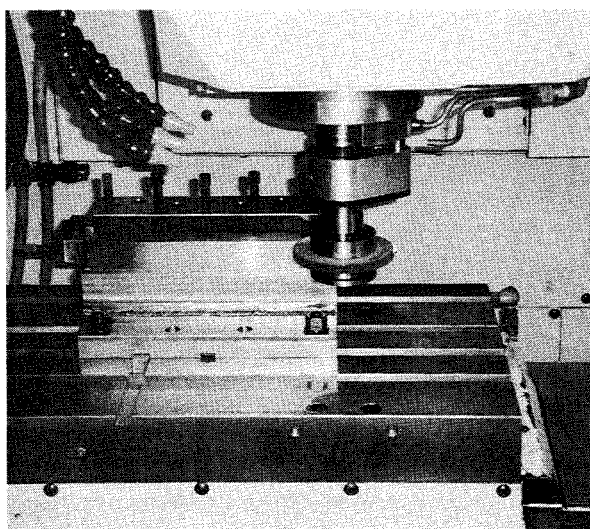


図 2-1 CBNホイールによる焼入れ鋼の研削テスト

### 2.2.1 焼入鋼の研削条件(立形マシニングセンタ上)

- (1) 研削ホイール；ビトリファイドボンド CBN ホイール, (#170,  $\phi 120 \times 10t$ )
- (2) テストピース；SKH51, HRC>61,  $40 \times 40 \times 300(mm)$
- (3) 研削油剤；エマルジョンタイプ, Alpha cool:WM [1:25]
- (4) ホイール周速度；1 2 5 5 m/min
- (5) テストピース送り速度；2 0 0 0 mm/min
- (6) 切込量；2 0, 5, 0  $\mu m/回$
- (7) ステップ・プランジカット送り量；5 mm/回

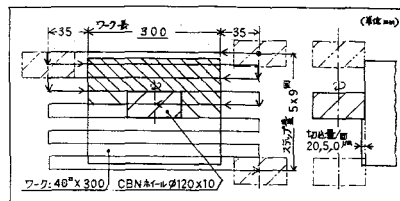


図 2-2 ステップ・プランジカット

### 2.2.2 焼入れ鋼の研削サイクルと諸研削性能の計測

	研削サイクル			計 測 項 目						
	切込量 ( $\mu m$ ) /回	繰り 返し 回数	研削量 ( $mm$ ) /サイクル	テストピース			消費電力		表面 粗さ	ホイール径 摩耗量
				厚さ	硬度	温度	主軸	送り		
(a) CBNホイールドレッシング後	—	—	—	*	*	*	—	—	—	*
(b) 1 サイクル										
(1) 20 $\mu m$ サイクル ①	20	3	720	*	*	*	*	*	*	*
(2) 5 $\mu m$ サイクル	①	20	480	—	—	—	—	—	—	—
	②	5	3	180	*	*	*	*	*	*
(3) 0 カットサイクル	①	20	240	—	—	—	—	—	—	—
	②	5	2	120	—	—	—	—	—	—
	③	0	3~5	0	*	*	*	*	*	*
(1 サイクル 計)			(1740)							
(c) $R_{max} > 3 \mu m$ 後	—	—	—	*	*	*	—	—	*	*

〔注1〕 この研削サイクルは、CBNホイールのドレッシング後、上表の1サイクルを実行する中で、得られる表面粗さと上記の諸研削性能を計測しながら、このサイクルを繰り返す、ゼロカットでの表面粗さが  $R_{max} > 3 \mu m$  となった所で、その研削サイクルを終了とした。

〔注2〕 テストピース研削面の表面粗さの測定には、触針電気拡大式表面粗さ測定器を使用した。

〔注3〕 CBNホイールの摩耗量測定には、ホイール断面形状の安全剃刀刃への転写法を用いた。

〔注4〕 研削動力は、マシニングセンタの主軸モータと送り軸モータへの入力電圧を自動測定した。

〔注5〕 焼入れ鋼の硬度と温度は各研削サイクルの前後で測定したが、殆ど変化は見られなかった。



### §3 CBNホイールのドレッシングに関する実験結果と考察

#### 3.1 ドレッシング・リード量の研削面表面粗さへの影響——図3 参照

図3は、CBNホイール(#140)をφ78ディスク形ダイヤモンド・ドレッサで、リード量を変えてドレッシングした後、焼入れ鋼(SKH51)を研削して、得られる表面粗さへの影響を調べたものである。

[注] リード量(mm/rev) = CBNホイールの軸方向送り速度(mm/min) / CBNホイールの回転数(rpm)

結果は図3に示すように研削面の表面粗さの内、研削方向はドレッシング・リード量には殆ど影響されず、常時  $R_{\max} = 1\mu\text{m}$  程度の良好な表面粗さが得られたが、研削と直角の方向(=ホイールのステップ送りの方向)の表面粗さはリード量の大小に大きく影響された。

しかし、研削と直角の方向の表面粗さもリード量の減少により著しく向上し、それが  $50\mu\text{m}/\text{rev}$  で安定の兆しを示し、それを更に下げて  $35\mu\text{m}/\text{rev}$  以下にするとホイールを削ることが難しくなった。

以上のことより、φ78ディスク形ドレッサによるCBNホイール(#140)のドレッシングでは、良好な表面粗さを得る為の最適リード量は  $50\mu\text{m}/\text{rev}$  であるとの結論とした。

[注] φ25カップ形ドレッサのリード量は、寿命の点より、メーカ推奨値の  $27\mu\text{m}/\text{rev}$  とした。

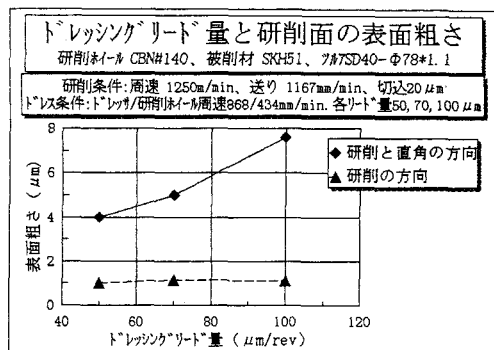


図3 ドレッシング・リード量と表面粗さ

#### 3.2 ドレス量の表面粗さへの影響——図4 参照

図4は、CBNホイール(#170)をφ25カップ形ダイヤモンド・ドレッサで、ドレス量を変えてドレッシングした後、焼入れ鋼(SKH51)を研削して、得られる表面粗さへの影響を調べたものである。

[注] ドレス量(mm)は、一般にドレッサのCBNホイールの半径方向への切込み量(mm)で表すが、本テストでは、ドレッシング前後のCBNホイールの半径減少量を転写法による測定値で示した。

結果は図4に示すように研削面の表面粗さの内、研削方向はドレス量にはあまり影響されず、常時  $R_{\max} < 1\mu\text{m}$  の良好な表面粗さが得られているが、研削と直角の方向の表面粗さはドレス量の大小に大きく影響されている。しかし、研削と直角の方向の表面粗さもドレス量の増加により著しく向上しドレス量を  $0.2\text{mm}$  程度にすると、 $R_{\max} < 1\mu\text{m}$  の良好な表面粗さが得られることが判明した。

従来、ビトリファイドボンドCBNホイール(有気孔タイプ)では、それ自体に切粉溜まりを有するため、ホイールのツルーイングさえできれば、それ以上のドレス量は殆ど不要であるとの考えが一般的であるが、良好な表面粗さを長時間得るためには、やはり充分な切粉溜まりを準備する必要があるが、そのためには、ある程度のドレス量を確保する必要があることを、このテスト結果が実証していると言える。

以上のことより、良好な表面粗さを長時間得るためには、最適ドレス量はホイール半径で  $0.1\text{mm}$  以上必要であるとの結論とした。

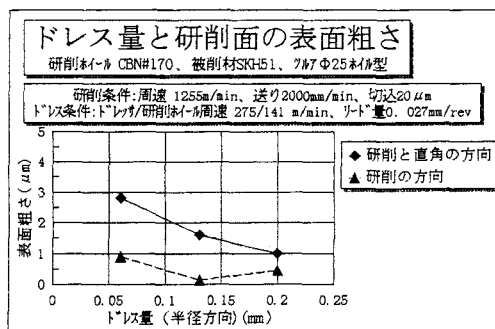


図4 ドレス量と表面粗さ

#### § 4 ドレス条件の異なるCBNホイールによる焼入れ鋼の研削サイクルテストの結果と考察

このテストは、先の実験で求めた良好な表面粗さを得る為の最適なりード量とドレス量に基づき、 $\phi 78$ ディスク形、(b)  $\phi 25$ カップ形と形式の違うドレスサでドレッシングしたCBNホイールを用いて、焼入れ鋼の研削サイクルテストを行い、ドレス条件の相違により、得られる表面粗さ、CBNホイールの累積摩耗量などの研削性能がどの様に推移するかを長時間、継続して調べる目的で行った。

##### 4.1 研削サイクルテストで用いたCBNホイール(#170)の2種のドレッシング条件

	ドレスサ仕様 (ダイヤモンドサイズ SD40)	ドレッシング速度 (m/min)			ドレスリード/ ホイール回転 (mm/rev)	ドレッシング 切込み量 (mm/回)	ドレス量/ ホイール半径 (mm)	備 考
		ドレスサ	CBNホイール	速度比				
(a)	$\phi 78 \times 1.1t$ ディスク形	868	434	0.5	0.05	0.002	0.2	面切削
(b)	$\phi 25 \times 20L$ カップ形	275	141	0.5	0.027	0.002	0.2	線切削

[注1] 使用のホイールは、先の2.1.1項(1)に記載のビトリファイドボンドCBNホイール(有気孔タイプ)；B170F100VC3(CBN粒度#170)， $\phi 120 \times 10t$ (外径×厚み)である。

[注2] ホイールのドレッシングは、(a)，(b)両場合とも、ドレスサによるダウン・カットとした

[注3] 両ドレスサによるCBNホイールのドレス量をともに0.2mmとしたのは、このテストでは  $R_{max} < 3\mu m$  の良好な表面粗さになるべく長時間にわたって得られることが望ましいため、先のテストで(図4参照)ドレス量が0.2mmの時  $R_{max} < 1\mu m$  の良好な表面粗さが得られた事による

##### 4.2 ドレッシング条件の異なるCBNホイールによる焼入れ鋼の研削サイクルテスト結果と考察

[注] この焼入れ鋼(SKH51,  $HRC > 61$ )の研削サイクルテスト要領の詳細は 2.2.1 研削条件、および、2.2.2 研削サイクルと諸研削性能の計測を参照のこと

##### 4.2.1 各サイクルの切込み量に対する表面粗さの推移と、ゼロカット後の表面粗さが初めて $R_{max} > 3\mu m$ となったサイクル数について——図5-a, b 図6-a, b(次頁)参照

(1) 各サイクルの研削方向と直角の表面粗さと、ゼロカット後  $R_{max} > 3\mu m$  となったサイクル数；

(a)  $\phi 78$ ディスク形ドレスサによるホイールで研削——図5-a, 10サイクルで  $R_{max} > 3\mu m$

(b)  $\phi 25$ カップ形ドレスサによるホイールで研削——図5-b, 4サイクルで  $R_{max} > 3\mu m$

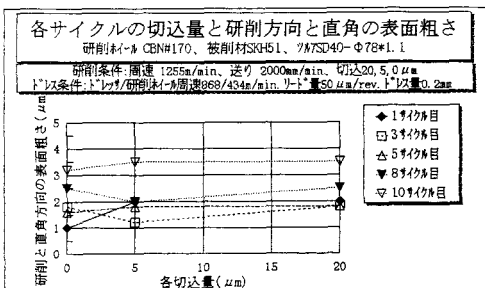


図5-a 各サイクルの研削方向と直角の表面粗さ  
( $\phi 78$ ディスク形ドレスサによる場合)

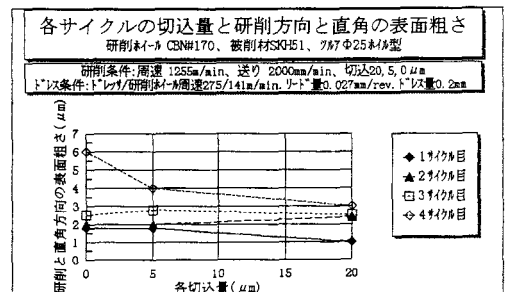


図5-b 各サイクルの研削方向と直角の表面粗さ  
( $\phi 25$ カップ形ドレスサによる場合)

## (2) 各サイクルの研削方向の表面粗さ；

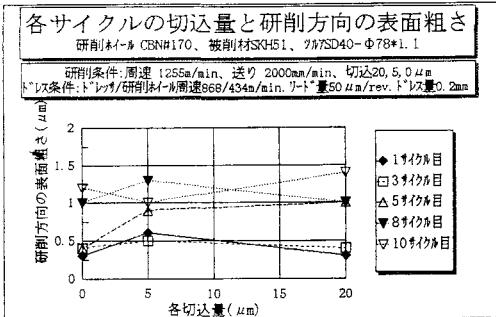
(a)  $\phi 78$ ディスク形ドレッサによるホイールで研削——図 6-a(b)  $\phi 25$ カップ形ドレッサによるホイールで研削——図 6-b

図6-a 各サイクルの研削方向の表面粗さ

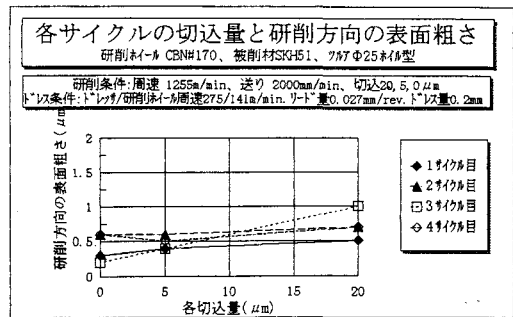
(  $\phi 78$ ディスク形ドレッサによる場合)

図6-b 各サイクルの研削方向の表面粗さ

(  $\phi 25$ カップ形ドレッサによる場合)

## [考察]

- ①  $\phi 78$ ディスク形ドレッサによるホイールで研削の場合(以下 (a)  $\phi 78$ ディスク形の場合と略す),  $\phi 25$ カップ形ドレッサによるホイールで研削の場合(以下 (b)  $\phi 25$ カップ形の場合と略す)共に, 研削サイクルの初回では研削方向の表面粗さは  $R_{\max} < 0.5 \mu\text{m}$ , 研削方向と直角の表面粗さは  $R_{\max} < 2 \mu\text{m}$ と, とともに良好な粗さを得ている。
- ② 研削サイクルを重ねて行くに従い, どちらの表面粗さも悪化するが, それは研削方向よりも, 研削方向と直角の表面粗さの悪化の度合いが極めて大きい。
- ③ (b)  $\phi 25$ カップ形の場合は, 研削方向と直角の表面粗さの悪化傾向が急であり, 特に 4 サイクル目で  $R_{\max} = 6 \mu\text{m}$  となり, 良好な表面粗さの設定値  $R_{\max} < 3 \mu\text{m}$  を大幅に越えた。  
(注: この 4 サイクル目の研削方向の表面粗さは  $R_{\max} = 0.6 \mu\text{m}$  と良好な粗さを保っている)
- ④ (a)  $\phi 78$ ディスク形の場合は, 研削方向と直角の表面粗さの悪化傾向も緩やかで, 5 サイクル目で  $R_{\max} = 1.6 \mu\text{m}$ , そして 10 サイクル目で  $R_{\max} = 3.2 \mu\text{m}$  と, 設定値を僅かではあるが越えた。  
(注: この 5, 10 サイクル目の研削方向の表面粗さは, 各々  $R_{\max} = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $R_{\max} = 1.2 \mu\text{m}$  と極めて良好な粗さを保っている)
- ⑤ ホイールの切込み量の違いによる表面粗さの差異は, 研削方向, 研削方向と直角ともほとんど無く, また, どのサイクルでも, (b)  $\phi 25$ カップ形の場合の 4 サイクル目を除いて, その差は僅少であった。
- ⑥ 上記⑤に関連して, (a)  $\phi 25$ カップ形ドレッサによる場合の研削方向と直角の表面粗さ(図5-b)を見ると, 初回の研削サイクルで  $R_{\max} < 2 \mu\text{m}$  であった表面粗さは, その後少しずつ悪化して, 4 サイクル目の第 1 工程(切込み量; 20  $\mu\text{m}$ )後は  $R_{\max} = 3 \mu\text{m}$  であったものが, 第 2 工程(切込み量; 5  $\mu\text{m}$ )後では  $R_{\max} = 4 \mu\text{m}$  と大きく悪化し, そして, 第 3 工程(切込み量; 0  $\mu\text{m}$ )後では,  $R_{\max} = 6 \mu\text{m}$  と急激に, 大幅な悪化をしている。これはホイール面の目づまりによる劣化が急に来たことを示したものと考える。

上記③～⑥をまとめると, (a)  $\phi 78$ ディスク形の場合, (b)  $\phi 25$ カップ形の場合の両方式とも, 良好な表面粗さが確実に得られるように, ドレス量 0.2mm を等しく与えたにも係わらず, 後者のホイール寿命(ドレス・インターバル)が前者の半分にも至らなかったことは, (b)  $\phi 25$ カップ形ドレッサによるホイールのドレッシング効率が比較的低いために, ドレス量が 0.2mm に達してドレッシング終了の時点で, ホイールに未だ充分な切粉溜まりが出来ていなかったことによると考える。

この両者による同一ホイールのドレッシング結果の違いは、(a)  $\phi 78$  ディスク形ドレッサによる場合は(図1-a 参照)ドレッサとホイールの両軸が平行なため、両外周面は正面から強く押し合った状態でホイール外周面を面切削の要領でドレッシングするので、CBN砥粒の微細破碎を起こし易く、充分な切粉溜まりも作り易いのに対して、他方、(b)  $\phi 25$  カップ形ドレッサによる場合は(図1-b 参照)ドレッサの外周先端(エッジ)がホイール外周面に $10^\circ$ の角度で接した状態で線切削の要領でドレッシングするので、ホイール外周面のツルーイングは出来ても、CBN砥粒の微細破碎は起き難く、充分な切粉溜まりも出来難いという、両ドレッサのホイールに対する姿勢の違いに起因すると考える。

#### 4.2.2 累積研削量に対する表面粗さとホイールの累積摩耗量の推移について

ここでは、前掲4.2.1 各サイクルの切込み量に対する表面粗さの推移での研削サイクルテスト結果を、累積研削量を基準として表面粗さとホイールの累積摩耗量の推移を示し、これら三者の相関関係を見てゆく。なお表示する表面粗さは実用上問題となる、各サイクルのゼロカット(第3工程)後の研削方向と直角な表面粗さを採り上げ、ホイールの累積摩耗量は1サイクル終了毎に摩耗量を計測、加算した値である。

(a)  $\phi 78$  ディスク形ドレッサによるホイールで研削——図7-a,

(b)  $\phi 25$  カップ形ドレッサによるホイールで研削——図7-b,

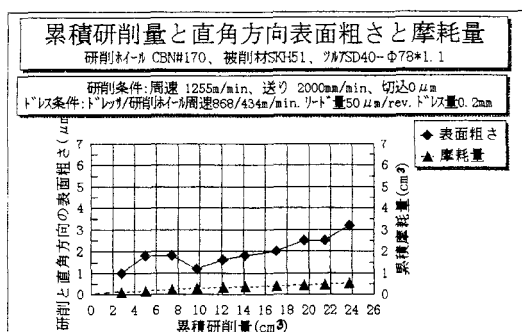


図7-a 累積研削量と直角方向表面粗さとホイール摩耗量 ( $\phi 78$  ディスク形ドレッサの場合)

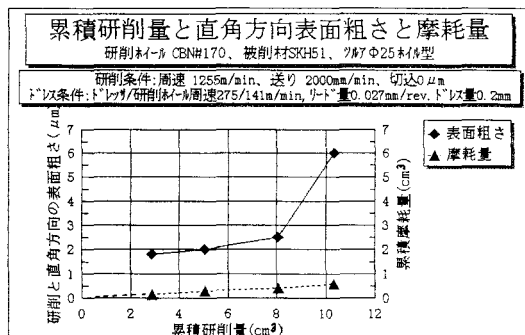


図7-b 累積研削量と直角方向表面粗さとホイール摩耗量 ( $\phi 25$  カップ形ドレッサの場合)

#### [考察]

- ① 研削方向と直角の表面粗さは、両場合とも、累積研削量の増加とともに漸増するホイールの累積摩耗に関連して、累積摩耗量が $0.5\text{cm}^3$ までは徐々に悪化するが、その値は $R_{\text{max}} < 3\mu\text{m}$ であるが、累積摩耗量が $0.5\text{cm}^3$ を越えると著しく悪化して、それは $R_{\text{max}} > 3\mu\text{m}$ となっている。特に、(b)  $\phi 25$  カップ形の場合は、その大きさが $R_{\text{max}} = 6\mu\text{m}$ と一挙に大幅悪化している。この表面粗さ悪化の原因は、ホイールの累積摩耗量が $0.5\text{cm}^3$ 以下の表面粗さが徐々に悪化する範囲では、CBN砥粒の摩耗が主原因、そしてホイールの累積摩耗量が $0.5\text{cm}^3$ を越えて表面粗さが大幅に悪化するのは、CBN砥粒の摩耗に加えて、切り粉による砥粒間の目詰まりが主原因であると考えられる。
- ② ホイールの累積摩耗量は、両場合とも、累積研削量の増加につれて増加している。(a)  $\phi 78$  ディスク形の場合の累積研削量の増加に対するホイールの累積摩耗量の増加の割合は緩やかであるのに比べて、(b)  $\phi 25$  カップ形の場合は累積研削量に対して、前者の約2倍のホイールの累積摩耗量となっている。この原因としては、(b)  $\phi 25$  カップ形の場合は、CBN砥粒の摩耗と共に4.2.1で述べたホイールのドレッシング時に進行しなかったCBN砥粒の微細破碎が早い時点より進行したため、ホイールの累積摩耗量が大きく増加したのと考えられる。

#### 4.2.3 累積研削量に対するホイールの累積摩耗量と毎分単位研削量当たりの研削動力の推移

これは研削サイクルテスト結果を、累積研削量を基準にホイールの累積摩耗量と毎分研削量当たりの研削動力の推移を示す。研削動力は各サイクル中の切込み量 $20\mu\text{m}$ の研削中の測定値である。

- (a)  $\phi 78$ ディスク形ドレッサによるホイールで研削——図8-a,  
 (b)  $\phi 25$ カップ形ドレッサによるホイールで研削——図8-b,

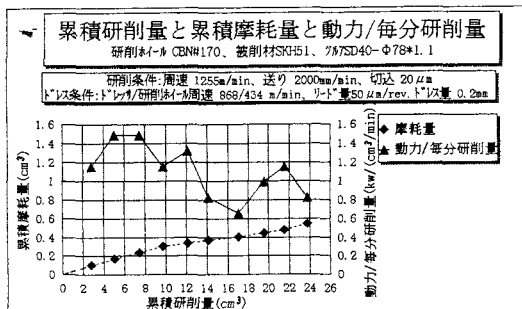


図8-a 累積研削量とホイール摩耗量と研削動力  
 ( $\phi 78$ ディスク形ドレッサの場合)

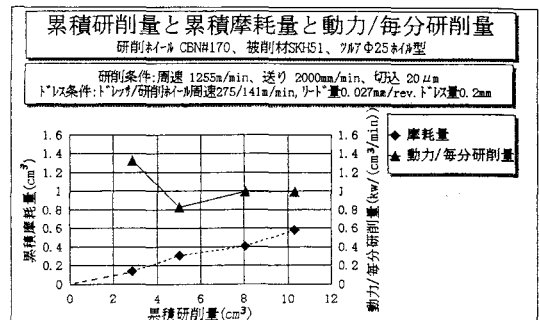


図8-b 累積研削量とホイール摩耗量と研削動力  
 ( $\phi 25$ カップ形ドレッサの場合)

#### 〔考察〕

- ① 毎分単位研削量当たりの研削動力( $\text{kW}/\text{cm}^3/\text{min}$ )は、上図に見るように、両場合ともサイクル研削の開始時はかなり高い値を示しているが、それは累積研削量が増す初期段階で相当減少するが、その後は累積研削量の増加につれて研削動力は徐々に増加する。これはCBN砥粒の摩耗によるものであり、また、表面粗さもこの段階では徐々に悪化している。(図5-a,b,図7-a,b 参照)
- ② そして研削方向と直角の表面粗さが $R_{\text{max}} > 3\mu\text{m}$ となった時点では、研削動力の増加は止まるか、相当の減少も見られる。((a) $\phi 78$ ディスク形ドレッサの場合) この原因としては、CBN砥粒の破碎による自生発刃がおり、ホイールの切れ味が回復した結果と考えられる。

#### 4.2.4 焼入れ鋼の研削テスト結果に見られる形式の異なるドレッサの影響

次の表は、焼入れ鋼の研削サイクルテストにおいて、ゼロカット・サイクルで研削方向と直角の表面粗さが $R_{\text{max}} > 3\mu\text{m}$ となった研削サイクル終了時点の結果をまとめ、比較したものである。

この表によると、(a) $\phi 78$ ディスク形ドレッサでドレッシングした場合が、累積研削量、研削比ともに(b) $\phi 25$ カップ形ドレッサによる場合の、各々2.3、2.4倍と好結果を示している。

研削性能 \ ドレッサ形式	(a) $\phi 78$ ディスク形	(b) $\phi 25$ カップ形	備 考
(1) 焼入れ鋼の累積研削量 ( $\text{cm}^3$ )	23.8	10.3	研削サイクル開始よりゼロ・カットの表面粗さが $R_{\text{max}} > 3\mu\text{m}$ となる迄
(2) ホイール累積摩耗量 ( $\text{cm}^3$ )	0.54	0.58	
(3) 研削比 $[(1)/(2)]$	43.4	17.8	
(4) 研削動力 ( $\text{kW}/\text{cm}^3/\text{min}$ )	1.1	1.05	切込 $20\mu\text{m}$ の研削サイクル中

## § 5 結論

本研究では、CBNホイールによる焼入れ鋼の研削において、CBNホイールのドレッシング条件が研削表面粗さに及ぼす影響を究明するため、立形マシニングセンタ上で、種々条件を変えてドレッシングしたビトリファイドボンドCBNホイール(粒度#170)により、焼入れ鋼(SKH51,  $H_{RC} > 61$ )を、ステップ・プランジカットで平面研削のサイクルテストを行い、表面粗さと、それが $R_{max} > 3\mu m$ となるまでの累積研削量、CBNホイールの累積摩耗量、研削動力の推移を調べた。今回のテストで得られた結果より「良好な表面粗さ( $R_{max} < 3\mu m$ )が長時間、安定して得られるドレッシング条件について」まとめると以下の通りである。

- (1) ドレッサ形式は、ディスク形がカップ形よりもドレッシング効果が大きい(4.2.1, 4.2.4参照)

ディスク形ドレッサでは、ドレッシング時にドレッサがホイール外周を正面から押し合った状態で面切削するので、ホイールのツルーイングのみならず、CBN砥粒の微細破碎による切れ刃の先端揃えと切り粉溜まりを容易に作る事が出来るので、カップ形ドレッサに比べて効果的である。

- (2) ドレス量はホイール半径で0.1mm以上与えることが必要である(3.2, 4.2.1参照)

ビトリファイドボンドCBNホイール(有気孔タイプ)でも、ドレッシング時にツルーイングのみで終了すると、CBN砥粒間に十分な切り粉溜まりを確保できないので、良好な表面粗さを長時間得るためには、ドレス量を0.1mm以上与えて、十分な切り粉溜まりを確保する必要がある。

- (3) ドレッシング・リード量は0.05mm/ホイール回転が適正值である(3.1参照)

リード量を小さくする程得られる表面粗さは良くなる傾向であるが、リード量をあまり小さくするとCBN砥粒が削り難くなるので、テストで好結果を示した0.05mmを適正なリード量とする。

〔注1〕ドレッサの1回の切込み量は、ドレッサのダイヤモンド砥粒とホイールのCBN砥粒の各々の保持力により決めるもので、それが普通の量であれば研削表面粗さには殆ど影響はないと考えられるので、本テストでは 切込み量/回=0.002mm/回 とした。

〔注2〕今回はホイールのドレッシング速度は、各ドレッサの周速をロータリ・ドレッシング装置の最高回転数によるものとし、ホイールの周速をその1/2(=速度比0.5)に固定して、全テストを行ったが、次回はこのドレッシング速度を変化させて、研削表面粗さに及ぼす影響を調べる。

〔注3〕今回の研削サイクルテストで見られた表面粗さが $R_{max} > 3\mu m$ となる時の、研削動力が減少する傾向については、表面粗さ劣化の予知要素の一つとして、今後引き続き調べる。

## 謝辞

本研究に色々アドバイスを頂いたクレノートン(株)・茶山達志氏、豊田バンモップス(株)・大岩 満氏にまた、テストを手伝ってくれた平成7年度卒業生の下道正徳君、幟立 晃君に感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 横川宗彦：ドレッシング条件が砥粒切れ刃の形成に及ぼす影響 (第2報)  
1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集pp23~24.
- (2) 厨川常元ほか：軟鋼研削におけるビトリファイドボンドCBNホイールの異常摩耗,  
精密工学会誌Vol.62.No.8,1996,pp1117~1121.
- (3) 海野邦昭：新しい課題にいかに対応するか(研削加工), 機械と工具, 1996年6月, pp10~16
- (4) 東江真一：超砥粒ホイールのツルーイング・ドレッシング, 機械と工具, 1996年6月, pp35~39
- (5) 竹中規雄ほか：「研削加工のドレッシング・ツルーイング」誠文堂新光社 (1971)
- (6) 横川和彦ほか：「CBNホイール研削加工技術」工業調査会 (1988)
- (7) 海野邦昭：「CBN・ダイヤモンドホイールの使い方」工業調査会(1991)

(平成8年11月25日受付)

Schwarzschild 時空における  
エネルギー運動量テンソルとBack-Reaction問題

(機械工学科) 深 澤 謙 次

Energy-Momentum Tensor and Back-Reaction  
Problem in Schwarzschild Spacetime

Kenji FUKAZAWA

Abstract

In this paper we calculate the expectation value of the energy-momentum tensor of Hawking radiation near the horizon as the difference between the expectation values of the energy-momentum tensor for the Hartle-Hawking and Boulware vacua of a free massive scalar field and show that the back-reaction problem can be solved at first order in  $\hbar$ . It is found that the expectation value of the energy-momentum tensor of Hawking radiation does not depend on the curvature coupling constant  $\xi$  and the value of this coupling constant is never restricted by the behavior of the entropy, which is on the contrary to the result of Anderson, Hiscock, Whitesell, and York, Jr.

**Key Words :** Hawking radiation, black hole, Schwarzschild spacetime, back-reaction problem

ホーキング輻射, ブラックホール, シュバルツシルト時空, back-reaction 問題

## §1 はじめに

ホーキングが真空中に置かれたブラックホールが熱輻射を放出することを発見して以来、ブラックホールは熱浴と(おそらく不安定な)熱平衡状態にあることができると信じられてきた。適切な熱浴は例えばブラックホールのある時空における質量ゼロの自由場の量子から作ることができる。熱浴の重力的な効果は重力的に作られたストレスエネルギーテンソルで特徴づけられる。曲った時空における場の量子論ではこのテンソルと時空の計量との関係が問題になる。適切に設定された真真空に対するストレスエネルギーテンソルの期待値はアインシュタイン方程式での源と見做され、計量に対してこの方程式を自己完結的に解くことが望まれる。これが back-reaction 問題である。このようにして求められた計量は源のないアインシュタイン方程式を解いて得られた計量よりも熱平衡にある時空に対するよりよい近似を与えることが期待される。

本論文では上述の back-reaction 問題を  $\hbar$  の 1 次のオーダーまで解く。物質場として自由なスカラー場を考えこの場は古典的な Schwarzschild 時空の中で熱平衡状態あるいは Hartle-Hawking 真空の状態にあるとする。このときのストレスエネルギーテンソルの期待値を重力場の源とする。この場合ストレスエネルギーテンソルの期待値は Schwarzschild 座標系で計算されるべきであり、したがって  $r=2M$  での発散は取り除けないはずである。期待値は座標系に依存するので、例えば Kruskal 座標系または自由落下系で計算された量を Schwarzschild 座標系に変換したとしても Schwarzschild 座標系で求めたものとは一般に異なる。期待値として  $r=2M$  での発散を繰り込んだものを考えることはできるが、その場合結果は異なってくる。ともかくここで述べた方法では背景となる時空は完全に静的であり計量の量子論的揺らぎは無視する。ブラックホールが熱浴とエネルギーの変換をするためには計量の量子揺らぎが本質的なのでこの方法が正当化されるかどうか疑問に思われるかも知れない。さらに量子重力場を考えると重力子のストレスエネルギーテンソルも考慮しなければならないということもある。しかし量子スカラー場だけによって起こされた半古典的な計量の back-reaction を考える場合は正当化されると思われる。この方法の結果は計量の back-reaction は単に摂動的に意味があるということである。つまりスカラー場のストレスエネルギーテンソルの効果は古典的な Schwarzschild 時空の摂動と見做されるのである。

スカラー場のストレスエネルギーテンソルの期待値は  $\hbar$  のオーダーであるが、これは漸近的に定数に近付くので補正された計量は漸近的に平坦にはなり得ない。したがって上述の摂動が成り立つためには  $r$  の範囲に何らかの制限を加えなければならない。そのためにここでは球状の質量の無視できる薄い壁を考え、ブラックホールはこの壁で囲まれているとする。壁の半径を適切に設定しておけば壁の内部では摂動が成り立つと考えることができる。 $r$  の範囲に制限を加えることにはさらに別の理由もある。つまり境界条件を課すことによって back-reaction 問題を一意に解くことができるのである。境界条件としてここではブラックホールがマイクロカノニカル集団に属しており、したがって壁における系の全エネルギーが固定されているとする。これは壁が輻射を全反射することを意味する。

本論文では、 $\hbar=c=G=k_B=1$  の単位系を用い、計量の符号は参考文献 6) に従うことにする。

## §2 実スカラー場のエネルギー運動量テンソルの期待値

### 2.1 Schwarzschild 時空における実スカラー場

4 次元 Schwarzschild 時空の線素は

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (1)$$



で表される。ここで、 $M$  はブラックホールの質量である。また、質量を持つ実スカラー場のラグランジアン密度は

$$L = \frac{1}{2}(-g)^{\frac{1}{2}} \{g^{\mu\nu} \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi - m^2 \phi^2 - \xi R \phi^2\} \quad (2)$$

で表される。ここで、 $m$  はスカラー粒子の質量、 $\xi$  は実スカラー場と重力場との結合の強さを表す結合定数である。これから場の方程式は

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} \partial_t^2 \phi - \frac{1}{r^2} \partial_{r_*} (r^2 (1 - \frac{2M}{r}) \partial_{r_*} \phi) \\ - \frac{1}{r^2 \sin \theta} \partial_\theta (\sin \theta \partial_\theta \phi) - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \partial_\varphi^2 \phi + m^2 \phi = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

となるから、地平線近傍における正値振動数モードの直交関数系は

$$\begin{aligned} u_{\omega \ell n}^{(\sigma)} &= N_{\omega \ell} e^{-i\omega t} \frac{1}{r} f_{\omega \ell}^{(\sigma)}(r_*) Y_{\ell n}(\theta, \varphi), \\ f_{\omega \ell}^{(\sigma)}(r_*) &\sim C_{\omega \ell}^{(\sigma)} e^{\sigma i \omega r_*}. \end{aligned}$$

と表される。ここで  $Y_{\ell n}(\theta, \varphi)$  は球面調和関数であり、 $\sigma = 1$  は out-going modes を表し  $\sigma = -1$  は in-coming modes を表す。

ここで

$$X = t - r_*, \quad Y = t + r_*$$

とおくと、地平線上での Schwarzschild modes は

$$u_{\omega \ell n} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\omega}} \frac{1}{r} (e^{-i\omega X} + A_\omega e^{-i\omega Y}) Y_{\ell n}(\theta, \varphi) \quad (4)$$

となる。ここで  $A_\omega$  は位相因子であり、 $|A_\omega| = 1$  である。超平面を future horizon 上にとると、スカラー積は

$$(\phi, \varphi) = i \lim_{X \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} dY \int d\Omega r^2 \sin \theta (\phi^* \partial_Y \varphi - \varphi^* \partial_Y \phi) \quad (5)$$

となり、式 (4) は規格化条件

$$(u_{\omega \ell n}, u_{\omega' \ell' n'}) = \delta(\omega - \omega') \delta_{\ell \ell'} \delta_{nn'}$$

を満たすことがわかる。

式 (4) より地平線近傍での Schwarzschild vacuum に対する Hadamard's 関数は

$$G_S^{(1)}(x, x') = \int_0^\infty ds g_S(x, x'; \omega), \quad (6)$$

$$g_S(x, x'; \omega) = \sum_{\ell, n} (u_{\omega \ell n}(x) u_{\omega \ell n}^*(x') + u_{\omega \ell n}^*(x) u_{\omega \ell n}(x')) \quad (7)$$

と表せる。

## 2.2 Kruskal 時空における実スカラー場

$$U = v - u, \quad V = v + u$$

とおくと Kruskal 座標系での地平線上  $U = 0$  での正値振動数モードの直交関数系は

$$\tilde{u}_{k\ell n} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\omega_{k\ell}}} \frac{1}{r} \exp\left[-i\frac{\omega_{k\ell} - k}{2}V\right] Y_{\ell n}(\theta, \varphi), \quad (8)$$

$$\omega_{k\ell} = \sqrt{k^2 + \tilde{m}_\ell^2}, \quad (9)$$

$$\tilde{m}_\ell^2 = \frac{4}{e} [(2Mm)^2 + \ell(\ell+1) + 1] \quad (10)$$

と表せる。超平面を地平線 ( $U = 0$ ) にとるとスカラー積は

$$(\phi, \varphi) = i \int_{-\infty}^{\infty} dV \int d\Omega r^2 \sin\theta (\phi^* \partial_V \varphi - \varphi^* \partial_V \phi)_{U=0} \quad (11)$$

となり  $\tilde{u}_{k\ell n}$  が規格化条件

$$(\tilde{u}_{k\ell n}, \tilde{u}_{k'\ell'n'}) = \delta(k - k') \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'}$$

を満たすことがわかる。定義により Kruskal vacuum に対する Hadamard's 関数は

$$G_K^{(1)}(x, x') = \sum_{\ell n} \int_{-\infty}^{\infty} dk (\tilde{u}_{k\ell n}(x) \tilde{u}_{k\ell n}^*(x') + \tilde{u}_{k\ell n}^*(x) \tilde{u}_{k\ell n}(x')) \quad (12)$$

と表せる。

2つの関数系  $u_{\omega\ell n}, \tilde{u}_{k\ell n}$  の間の Bogoluibov 変換は

$$\tilde{u}_{k\ell n} = \sum_{\ell'n'} \int_0^\infty d\omega' (\alpha_{k\ell n, \omega'\ell'n'} u_{\omega'\ell'n'} + \beta_{k\ell n, \omega'\ell'n'} u_{\omega'\ell'n'}^*) \quad (13)$$

で表され, Bogoluibov 係数  $\alpha_{k\ell n, \omega'\ell'n'}, \beta_{k\ell n, \omega'\ell'n'}$  は

$$\alpha_{k\ell n, \omega'\ell'n'} = (u_{\omega'\ell'n'}, \tilde{u}_{k\ell n}), \quad (14)$$

$$\beta_{k\ell n, \omega'\ell'n'} = -(u_{\omega'\ell'n'}^*, \tilde{u}_{k\ell n}) \quad (15)$$

で定義される。計算の結果

$$\begin{aligned} \alpha_{k\ell n, \omega'\ell'n'} &= A_{\omega'} \frac{2M}{\pi} \sqrt{\frac{\omega'}{\omega_{k\ell}}} \left(\frac{\omega_{k\ell} - k}{2}\right)^{-4iM\omega'} e^{2\pi M\omega'} \Gamma(4iM\omega') \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'} \\ &\quad + \lim_{X \rightarrow \infty} \left(C_{k\ell, \omega'}^+ e^{i\omega'X} + C_{\omega'}^- e^{-i\omega'X}\right) \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \beta_{k\ell n, \omega'\ell'n'} &= A_{\omega'} \frac{2M}{\pi} \sqrt{\frac{\omega'}{\omega_{k\ell}}} \left(\frac{\omega_{k\ell} - k}{2}\right)^{4iM\omega'} e^{-2\pi M\omega'} \Gamma(-4iM\omega') \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'} \\ &\quad + \lim_{X \rightarrow \infty} \left(D_{\omega'}^+ e^{i\omega'X} + D_{k\ell, \omega'}^- e^{-i\omega'X}\right) \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'} \end{aligned} \quad (17)$$

となることがわかる。式 (16), (17) の右辺第2項は Riemann-Lebesgue lemma により式 (13) に寄与しない事が分かり無視できる。式 (16), (17) より

$$\begin{aligned} \sum_{\ell, n} \int_{-\infty}^{\infty} dk \alpha_{k\ell n, \omega'\ell'n'} \alpha_{k\ell n, \omega''\ell''n''}^* &= \frac{\exp[8\pi M\omega']}{\exp[8\pi M\omega'] - 1} \delta(\omega' - \omega'') \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'}, \\ \sum_{\ell, n} \int_{-\infty}^{\infty} dk \beta_{k\ell n, \omega'\ell'n'} \beta_{k\ell n, \omega''\ell''n''}^* &= \frac{\exp[8\pi M\omega']}{\exp[8\pi M\omega'] - 1} \delta(\omega' - \omega'') \delta_{\ell\ell'} \delta_{nn'}, \\ \sum_{\ell, n} \int_{-\infty}^{\infty} dk \alpha_{k\ell n, \omega'\ell'n'} \beta_{k\ell n, \omega''\ell''n''}^* &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

が成り立つ事が分かる.

式 (13), (18) を使うと式 (12) は

$$G_K^{(1)}(x, x') = \int_0^\infty ds \frac{\exp[8\pi M\omega] + 1}{\exp[8\pi M\omega] - 1} g_S(x, x'; \omega) \quad (19)$$

と表せる事が分かる.

式 (6), (19) より

$$\frac{1}{2}[G_K^{(1)}(x, x') - G_S^{(1)}(x, x')] = \int_0^\infty ds \frac{1}{\exp[8\pi M\omega] - 1} g_S(x, x'; \omega), \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \lim_{\vec{x}' \rightarrow \vec{x}} g_S(x, x'; \omega) &= (e^{-i\omega(t-t')} + e^{-i\omega(t-t')}) \mu(\omega, r), \\ \lim_{\vec{x}' \rightarrow \vec{x}} g_{S,i}^{i'}(x, x'; \omega) &= (e^{-i\omega(t-t')} + e^{-i\omega(t-t')}) \mu_{i,i'}^{i'}(\omega, r), \\ \lim_{\vec{x}' \rightarrow \vec{x}} g_{S,i}^i(x, x'; \omega) &= (e^{-i\omega(t-t')} + e^{-i\omega(t-t')}) \mu_{i,i}^i(\omega, r) \end{aligned} \quad (21)$$

となる。ここで

$$\mu(\omega, r) = \frac{1}{4\pi\omega} \sum_{\ell, n} \frac{1}{r^2} (2 + A_\omega e^{-2i\omega r_*} + A_\omega^* e^{2i\omega r_*}) |Y_{\ell, n}(\theta, \varphi)|^2 \quad (22)$$

である。

式 (21) からわかるようにエネルギー運動量テンソルの期待値を求めるには  $\mu(\omega, r)$  とその空間共変微分を求める必要がある。そのために参考文献 7) の結果を使うことにすると、地平線の近くでは

$$\begin{aligned} < 0_S | \phi_{;0} \phi^{;0} | 0_S > \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \left\{ \frac{3}{2\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \tau^{-4} + \frac{m^2}{8\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-1} \tau^{-2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{m^4}{32\pi^2} \left( \gamma + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1}{4} m^2 \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) \tau^2 \right] \right) + \frac{m^4}{2(8\pi)^2} \right\} \\ &\sim \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{8\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \int_0^\infty d\omega \omega^3 (e^{-i\omega\tau} + e^{i\omega\tau}), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} < 0_S | \phi_{;1} \phi^{;1} | 0_S > &= < 0_S | \phi_{;2} \phi^{;2} | 0_S > = < 0_S | \phi_{;3} \phi^{;3} | 0_S > \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \left\{ -\frac{1}{2\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \tau^{-4} - \frac{m^2}{8\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-1} \tau^{-2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{m^4}{32\pi^2} \left( \gamma + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1}{4} m^2 \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) \tau^2 \right] \right) - \frac{3m^4}{2(8\pi)^2} \right\} \\ &\sim -\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{24\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \int_0^\infty d\omega \omega^3 (e^{-i\omega\tau} + e^{i\omega\tau}), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} < 0_S | \phi^2 | 0_S > &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \left\{ -\frac{1}{4\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-1} \tau^{-2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{m^2}{8\pi^2} \left( \gamma + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1}{4} m^2 \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) \tau^2 \right] \right) - \frac{m^2}{16\pi^2} \right\} \\ &\sim \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{8\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \int_0^\infty d\omega \omega (e^{-i\omega\tau} + e^{i\omega\tau}) \end{aligned} \quad (25)$$

と表される。したがって

$$\nabla_i \nabla^{i'} \mu(\omega, r) \sim -\frac{1}{12\pi^2} \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \omega^3,$$

$$\begin{aligned}\nabla_i \nabla^i \mu(\omega, r) &\sim \frac{1}{12\pi^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-2} \omega^3, \\ \mu(\omega, r) &\sim \frac{1}{4\pi^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} \omega\end{aligned}\quad (26)$$

となる。ただし  $i = 1, 2, 3$  であり、 $i$  について和をとらない。

### 2.3 エネルギー・運動量テンソルの期待値

この小節では前小節までの議論を基に球対称な壁の内部での Kruskal vacuum と Schwarzschild vacuum に対するエネルギー・運動量テンソルの期待値の差を計算する。ここで考えているのは、星が重力崩壊してブラックホールになる前後での、無限遠で静止している観測者が観測する場のエネルギー・運動量の変化である。したがって、本来は星が有限時間でブラックホールになる現実的なモデルを考えるべきであるが、ここでは簡単のためブラックホールがその周りを囲んでいる熱浴と平衡状態に達している場合を考えることにする。この場合、ブラックホールが誕生した後の場の状態は Kruskal vacuum で表され、星がブラックホールになる前の場の状態は Schwarzschild vacuum で表される。初め、星は Schwarzschild vacuum の状態にあると仮定すると、ブラックホール誕生後、場の状態は Kruskal vacuum に変わる。したがって、星がブラックホールになったことによって生じる輻射のエネルギー・運動量は

$$\langle T_\mu^\nu \rangle \equiv \langle 0_K | T_\mu^\nu | 0_K \rangle - \langle 0_S | T_\mu^\nu | 0_S \rangle \quad (27)$$

である。ここで

$$\begin{aligned}\langle \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi \rangle &= \langle 0_K | \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi | 0_K \rangle - \langle 0_S | \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi | 0_S \rangle \\ \langle \phi \nabla_\mu \nabla_\nu \phi \rangle &= \langle 0_K | \phi \nabla_\mu \nabla_\nu \phi | 0_K \rangle - \langle 0_S | \phi \nabla_\mu \nabla_\nu \phi | 0_S \rangle \\ \langle \phi^2 \rangle &= \langle 0_K | \phi^2 | 0_K \rangle - \langle 0_S | \phi^2 | 0_S \rangle\end{aligned}\quad (28)$$

とおくと、式 (27) は

$$\begin{aligned}\langle T_\mu^\nu \rangle &= (1 - 2\xi) \langle \nabla_\mu \phi \nabla^\nu \phi \rangle + (2\xi - \frac{1}{2}) \delta_\mu^\nu \langle \nabla_\rho \phi \nabla^\rho \phi \rangle \\ &\quad - 2\xi \langle \phi \nabla_\mu \nabla^\nu \phi \rangle + \frac{1}{2} \xi \delta_\mu^\nu \langle \phi \square \phi \rangle + \frac{1}{2} (1 - 3\xi) m^2 \delta_\mu^\nu \langle \phi^2 \rangle\end{aligned}\quad (29)$$

と表せる。正則化法として点分離法を用いることにすると式 (28) は

$$\begin{aligned}\langle \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi \rangle &= \lim_{x' \rightarrow x} \frac{1}{2} \nabla_\mu \nabla'_\nu [G_K^{(1)}(x, x') - G_S^{(1)}(x, x')] \\ \langle \phi \nabla_\mu \nabla_\nu \phi \rangle &= \lim_{x' \rightarrow x} \frac{1}{2} \nabla_\mu \nabla'_\nu [G_K^{(1)}(x, x') - G_S^{(1)}(x, x')] \\ \langle \phi^2 \rangle &= \lim_{x' \rightarrow x} \frac{1}{2} [G_K^{(1)}(x, x') - G_S^{(1)}(x, x')]\end{aligned}\quad (30)$$

と表される。ここで  $\nabla_\mu$  は  $x^\mu$  での、 $\nabla'_\mu$  は  $x'^\mu$  での共変微分を表す。式 (20), (21), (26), (30) を使うと地平線の近傍では

$$\begin{aligned}\langle \nabla_0 \phi \nabla^0 \phi \rangle &\sim \frac{1}{2\pi^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-2} \int_0^\infty d\omega \frac{\omega^3}{\exp[8\pi M\omega] - 1}, \\ \langle \nabla_1 \phi \nabla^1 \phi \rangle &= \langle \nabla_2 \phi \nabla^2 \phi \rangle = \langle \nabla_3 \phi \nabla^3 \phi \rangle\end{aligned}$$

$$\sim -\frac{1}{6\pi^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-2} \int_0^\infty d\omega \frac{\omega^3}{\exp[8\pi M\omega] - 1}, \quad (31)$$

$$\langle \phi^2 \rangle \sim \frac{1}{4\pi^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} \int_0^\infty d\omega \frac{\omega}{\exp[8\pi M\omega] - 1},$$

$$\langle \phi \nabla_\mu \nabla^\mu \phi \rangle = -\langle \nabla_\mu \phi \nabla^\mu \phi \rangle \quad (\mu \text{ について和をとらない})$$

となる。したがって求める  $\langle T_\mu^\nu \rangle$  は

$$\langle T_0^0 \rangle \sim \alpha \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-2}, \quad (32)$$

$$\langle T_1^1 \rangle = \langle T_2^2 \rangle = \langle T_3^3 \rangle \sim -\frac{1}{3} \alpha \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-2}, \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty d\omega \frac{\omega^3}{\exp[8\pi M\omega] - 1} \quad (34)$$

と書ける。これはホーキング温度  $1/8\pi M$  の輻射のエネルギー運動量を表している。

### §3 Back-Reaction 方程式

Back-reaction 問題は半古典的アインシュタイン方程式

$$G_\mu^\nu = -8\pi [T_c^\nu{}_\mu + \langle T_\mu^\nu \rangle + \langle \tau_\mu^\nu \rangle] \quad (35)$$

を古典的な計量

$$g_{\mu\nu} = \hat{g}_{\mu\nu} + \Delta g_{\mu\nu}$$

について解くことである。ここで  $\hat{g}_{\mu\nu}$  は背景となる曲がった時空の計量であり、 $T_{c\mu\nu}$  は古典的なエネルギー運動量テンソルを、 $\langle T_{\mu\nu} \rangle$  は時空  $\hat{g}_{\mu\nu}$  のもとでの量子場のエネルギー運動量テンソルの期待値を、また  $\langle \tau_{\mu\nu} \rangle$  は量子重力場の量子揺らぎの効果を表すとする。ただし、ここでは  $\langle \tau_{\mu\nu} \rangle$  は考えないので以下では無視する。 $\Delta g_{\mu\nu}$  は式 (35) の右辺の第 2、3 項によって現れる効果を表す。計量  $\hat{g}_{\mu\nu}$  から作られるテンソル  $\hat{G}_{\mu\nu}$  は

$$\hat{G}_\mu^\nu = -8\pi T_c^\nu{}_\mu$$

の関係を満たすので

$$\Delta G_{\mu\nu} = G_{\mu\nu} - \hat{G}_{\mu\nu}$$

とおくと

$$\Delta G_\mu^\nu = -8\pi \langle T_\mu^\nu \rangle$$

が成り立つ。 $\Delta G_{\mu\nu}$  の線形部分を  $\delta G_{\mu\nu}$  とすると第 1 近似で

$$\delta G_\mu^\nu(\hat{g}, \Delta g) = -8\pi \langle T_\mu^\nu \rangle \quad (36)$$

となる。これは線形の Back-reaction 方程式であり、これを解くことができる。ただし、 $\delta G_\mu^\nu$  はピアンスキ恒等式を満たすとする。

ブラックホールの蒸発がある場合、右辺の  $\langle T_c^\nu{}_\mu \rangle$  は前節で求めたエネルギー運動量テンソルである。式 (36) を解くためにエディントン・フィンケルシュタイン座標

$$v = t + r_*, \quad \tilde{r} = r$$

を導入する。この座標系を使うと線素は

$$ds^2 = (1 - \frac{2M}{\tilde{r}})dv^2 - 2dv d\tilde{r} - r^2 d\Omega^2,$$

エネルギー運動量テンソルは

$$\begin{aligned} T_v{}^v &= T_t{}^t, \\ T_{\tilde{r}}{}^v &= (1 - \frac{2M}{r})(-T_t{}^t + T_r{}^r), \\ T_{\tilde{r}}{}^{\tilde{r}} &= T_r{}^r, \\ T_{\theta}{}^{\theta} &= T_{\varphi}{}^{\varphi} \quad \text{は不変} \end{aligned}$$

となる。 $g_{\mu\nu}$  は  $\hat{g}_{\mu\nu}$  と同様に静的で球対称だとすると計量は一般に

$$ds^2 = e^{2\psi}(1 - \frac{2m}{r})dv^2 - 2e^{\psi}dv dr - r^2 d\Omega^2$$

の形に表すことができる (以後  $\tilde{r}$  を  $r$  で表すとする)。ここで  $\psi = \psi(r)$ ,  $m = m(r)$  である。この場合

$$\begin{aligned} G_v{}^v &= -\frac{2}{r^2} \frac{dm}{dr}, \\ G_r{}^v &= \frac{2}{r} e^{-\psi} \frac{d\psi}{dr}, \\ G_r{}^r &= \frac{2}{r^2} [r(1 - \frac{2m}{r}) \frac{d\psi}{dr} - \frac{dm}{dr}] \end{aligned}$$

となり、 $G_{\theta}{}^{\theta}, G_{\varphi}{}^{\varphi}$  成分はピアンキ恒等式から決まる。またその他の成分は 0 である。計量の線形化は

$$e^{\psi} \simeq 1 + \hbar \rho(r), \quad m \simeq M[1 + \hbar \mu(r)] \quad (37)$$

とおくことでなされる。これから線形の Back-reaction 方程式は

$$\frac{d\mu}{dr} = \frac{4\pi\alpha}{M} r^2 (1 - \frac{2M}{r})^{-2}, \quad (38)$$

$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{16\pi\alpha}{3} r (1 - \frac{2M}{r})^{-3}, \quad (39)$$

$$r(1 - \frac{2M}{r}) \frac{d\rho}{dr} - M \frac{d\mu}{dr} = \frac{4\pi\alpha}{3} r^2 (1 - \frac{2M}{r})^{-2} \quad (40)$$

となる。式 (40) は式 (38), (39) から導かれるので式 (38), (39) だけを解けばよい。さらに  $(\theta, \theta)$  成分、 $(\varphi, \varphi)$  成分の Back-reaction 方程式は線形化されたピアンキ恒等式の結果自動的に成り立つ。式 (38), (39) より

$$\mu(r) = \hat{\mu}(r) + \mu_0, \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(r) &= c_0 \{ (\frac{r}{2M} - 1)^3 + 6(\frac{r}{2M} - 1)^2 + 18(\frac{r}{2M} - 1) \\ &\quad - (\frac{r_H}{2M} - 1)^3 - 6(\frac{r_H}{2M} - 1)^2 - 18(\frac{r_H}{2M} - 1) \\ &\quad + 12 \ln |\frac{\frac{r}{2M} - 1}{\frac{r_H}{2M} - 1}| - 3(\frac{1}{\frac{r}{2M} - 1} - \frac{1}{\frac{r_H}{2M} - 1}) \}, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\rho(r) = \hat{\rho}(r) + \rho_0, \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(r) &= c_0 \{ (\frac{r}{2M} - 1)^2 + 8(\frac{r}{2M} - 1) - (\frac{r_H}{2M} - 1)^2 - 8(\frac{r_H}{2M} - 1) \\ &\quad + 12 \ln |\frac{\frac{r}{2M} - 1}{\frac{r_H}{2M} - 1}| - 8(\frac{1}{\frac{r}{2M} - 1} - \frac{1}{\frac{r_H}{2M} - 1}) \} \end{aligned}$$

$$-\left[\frac{1}{\left(\frac{r}{2M}-1\right)^2}-\frac{1}{\left(\frac{r_H}{2M}-1\right)^2}\right]\}, \quad (44)$$

$$(c_0 = \frac{1}{3^2 \cdot 5 \cdot 4^4 \pi M^2})$$

が得られる。ここで  $\mu_0$  と  $\rho_0$  は境界条件から決まる積分定数であり、 $r_H$  はブラックホールの半径である。古典的には  $r_H = 2M$  である。Hawking radiation によりブラックホールはエネルギーを失うので  $\mu_0 < 0$  ( $M_{BH} < M$ ) と考えられる。 $r > r_H$  の範囲で考え、 $g_{\mu\nu} = \hat{g}_{\mu\nu} + \Delta g_{\mu\nu}$ ,  $\hat{g}_{\mu\nu} =$  Schwarzschild metric とすると

$$\begin{aligned} \Delta g_{vv} &= \left(1 - \frac{2M}{r}\right) 2\hbar \rho(r) - \frac{2M}{r} \hbar \mu(r), \\ \Delta g_{vr} &= -2\hbar \rho(r) \end{aligned}$$

であり、形式的には  $r = r_H$  で正則であることがわかる。

## §4 Back-Reaction 方程式の解の性質

### 4.1 事象の地平線

事象の地平線の生成子は外向き未来向きの測地線ヌルベクトル場であり、これをここでは

$$\ell^\mu = \left(1, \frac{1}{2}e^\psi \left(1 - \frac{2m}{r}\right), 0, 0\right)$$

ととる。動径方向内向きの測地線ヌルベクトル場は

$$\beta^\mu = (0, -e^{-\psi}, 0, 0)$$

とすると

$$\beta_\mu \ell^\mu = 1$$

のように規格化されているのがわかる。apparent horizon は  $\ell^\mu$  の expansion  $\Theta$  が 0 になることから決まる。

$$\Theta = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{2m}{r}\right) e^\psi$$

であるから  $\hbar$  のオーダーで

$$r_H = 2m(r_H) = 2M(1 + \hbar\mu_0) \quad (45)$$

と決まる。ここで式 (37), (41) を使った。静的な時空では apparent horizon と event horizon は同じなのでこれはまた事象の地平線でもある。式 (45) から量子補正された時空でのブラックホールの質量が決まる。すなわち

$$M_{BH} = M(1 + \hbar\mu_0) \quad (46)$$

である。これはブラックホールの実効質量と考えられる。積分定数  $\mu_0$  は事象の地平線の位置、したがってブラックホールの質量を決めるという物理的な役割を果たしていることがわかる。

また surface gravity を求めると

$$\begin{aligned} \kappa &= -\beta^\mu \ell^\nu \nabla_\nu \ell_\mu \\ &= \frac{1}{2} e^\psi \frac{d}{dr} \left(1 - \frac{2m}{r}\right) + e^\psi \left(1 - \frac{2m}{r}\right) \frac{d\psi}{dr} \end{aligned}$$

となるから、事象の地平線上では  $\hbar$  のオーダーで

$$\begin{aligned}\kappa_H &= \frac{1}{4M_{BH}} \left\{ 1 + \hbar \left[ \rho(r_H) - 2M \frac{d\mu(r_H)}{dr} \right] \right\} \\ &= \frac{1}{4M_{BH}} \left\{ 1 + \hbar [\rho_0 + c_0(\hbar\mu_0)^{-2}] \right\}\end{aligned}\quad (47)$$

となる。

静止観測者に対する半径  $r$  の内部にある全実効質量エネルギーは

$$m(r) = M + \hbar M \mu(r) \quad (48)$$

与えられる。輻射のエネルギーは  $\hbar$  のオーダーで

$$E_{rad}(r) = \int_{r_H}^r 4\pi r^2 T_t{}^t dr = \hbar M \bar{\mu}(r) \quad (49)$$

となるので、式 (46), (48), (49) を使うと

$$m(r) = M + \hbar M \mu_0 + E_{rad}(r) = M_{BH} + E_{rad}(r)$$

と書ける。式 (38), (41) からわかるように  $\mu(r)$  は  $r = r_H$  で  $\mu_0$  であり、 $r > r_H$  で単調に増加していき、 $r \rightarrow \infty$  で

$$\mu(r) \sim \frac{c_0}{8} \left( \frac{r}{M} \right)^3$$

となる。したがって

$$E_{rad}(r) \sim a T_H^4 V, \quad (r \rightarrow \infty)$$

となることがわかる。ここで  $T_H$  はホーキング温度、 $V$  は平坦な時空の場合の体積である。これは平坦な時空の場合に得られる結果と同じであり、Schwarzschild 時空は  $r \rightarrow \infty$  で平坦なのでこうあるべき結果である。

新しい計量を解釈するためにエディントン・フィンケルシュタイン変換とよく似た変換によって Schwarzschild タイプの座標系に戻すことにする。改めて  $r$  を  $\tilde{r}$  で表すと計量は

$$ds^2 = e^{2\psi} \left( 1 - \frac{2m}{\tilde{r}} \right) dv^2 - 2e^\psi dv d\tilde{r} - \tilde{r}^2 d\Omega^2$$

である。ここで  $(t, r, \theta, \varphi)$  への変換を

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 1, \quad \frac{\partial v}{\partial r} = e^{-\psi} \left( 1 - \frac{2m}{r} \right)^{-1}, \quad \tilde{r} = r$$

で定義すると計量は

$$ds^2 = e^{2\psi} \left( 1 - \frac{2m}{r} \right) dt^2 - \left( 1 - \frac{2m}{r} \right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

となる。 $\hbar$  のオーダーでは

$$ds^2 = \left( 1 - \frac{2M(1 + \hbar\mu(r))}{r} \right) (1 + 2\hbar\rho(r)) dt^2 - \left( 1 - \frac{2M(1 + \hbar\mu(r))}{r} \right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2 \quad (50)$$

となる。

$T_\mu{}^\nu$  の効果を Schwarzschild 時空に対する摂動とみなせるための必要条件は式 (37), (45), (47) より

$$|\hbar\rho_0| \ll 1, \quad |\hbar\mu_0| \ll 1, \quad |\hbar[\rho_0 + c_0(\hbar\mu_0)^{-2}]| \ll 1$$



であるから

$$|\hbar\rho_0| \ll 1 \quad (51)$$

$$\sqrt{c_0\hbar} \ll |\hbar\mu_0| \ll 1 \quad (52)$$

となる。 $M$  が十分大きいとすると  $\rho_0, \mu_0$  を式 (51), (52) を満たすように選ぶことができる。

数値計算の結果、 $r < 10M$  範囲であれば十分に  $T_\mu{}^\nu$  の効果を Schwarzschild 時空に対する摂動と見做せることがわかる (図 1, 2)。

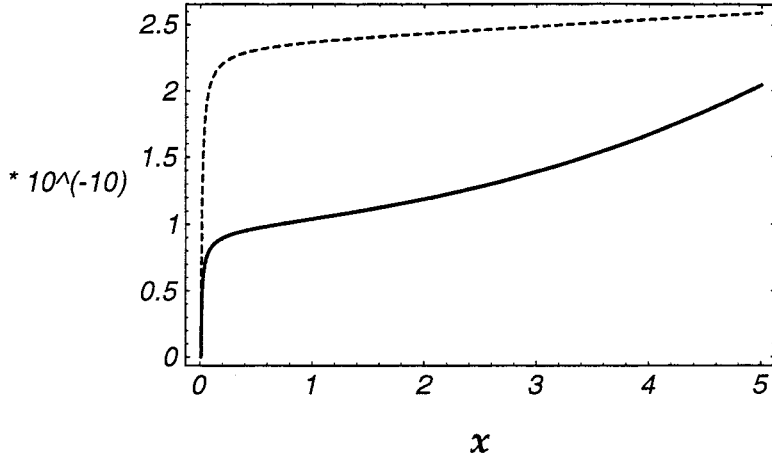


図 1.  $\hat{\mu}(r), \hat{\rho}(r)$  のグラフ ( $M = 10^4$ ,  $\frac{r_H}{2M} - 1 = 0.01$ )

横軸に  $x = \frac{r}{2M} - 1$  をとり、 $10^{-10}$  を単位として  $\hat{\mu}(x), \hat{\rho}(x)$  をプロットした図。実線は  $\hat{\mu}(x)$ 、破線は  $\hat{\rho}(x)$  のグラフを表している。

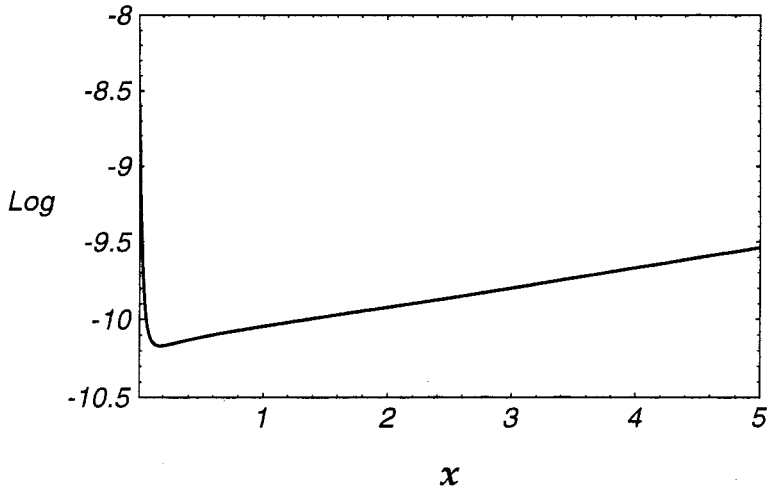


図 2. surface gravity の古典項に対する量子補正項の割合

( $M = 10^4$ ,  $\frac{r_H}{2M} - 1 = 0.01$ )

横軸に  $x = \frac{r}{2M} - 1$  をとり、 $\text{Log}_{10}(\Delta\kappa)$  をプロットした図。ここで

$\Delta\kappa = \frac{\kappa - \kappa_{cl}}{\kappa_{cl}}$ 、 $\kappa_{cl} = \frac{M}{r^2}$  は surface gravity の古典項を表す。

## 4.2 境界条件

ここではブラックホールが理想的な質量の無視できる全反射する球状の壁で囲まれているとしているので、境界条件として球の内部のエネルギーが固定されていると考える。つまり

$$m(r_0) = M_{BH} + E_{rad}(r_0) = \text{fixed.}$$

この場合壁が非常に薄く壁の質量が無視できるとすると、壁の外側は質量  $m(r_0)$  の漸近的に平坦になる Schwarzschild 時空になる。したがって  $r > r_0$  のとき

$$g_{tt} = 1 - \frac{2m(r_0)}{r}$$

となる。 $g_{tt}$  が  $r = r_0$  で連続であるとする

$$\rho_0 = -\hat{\rho}(r_0)$$

と決まる。 $r_0 = 10M$  とすると

$$\hat{\rho}(r_0) < 1$$

であり、 $\hat{\rho}(r)$  は単調増加関数であるから条件 (51) は満たされると考えてよい。したがって  $g_{tt}$  の連続性から  $\rho_0$  が決まり、球状の壁の外側では計量は

$$ds^2 = \left(1 - \frac{m(r_0)}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{m(r_0)}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

となる。計量は  $r = r_0$  で連続であるが壁の外側は Schwarzschild 解であるから計量の  $r$  に関する偏微分は  $r = r_0$  で不連続になる。また  $r_H < r \leq r_0$  では

$$ds^2 = \left(1 - \frac{m(r)}{r}\right) (1 + 2\hbar[\hat{\rho}(r) - \hat{\rho}(r_0)]) dt^2 - \left(1 - \frac{m(r)}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

となる。

## 4.3 平衡状態の温度分布

球状の壁に囲まれたブラックホールが平衡状態に達したときの温度分布は

$$T_{loc}(r) |g_{tt}(r)|^{\frac{1}{2}} = T_* = \text{const} \quad (53)$$

で決まる。Back-reaction を考えない場合  $T_* = T_H = \hbar(8\pi M)^{-1}$  である。問題は back-reaction の効果で  $T_*$  が変わるかどうかである。Schwarzschild 時空でより一般的な表式は

$$T_* = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi} \quad (54)$$

であり、これはすべてのブラックホール時空で成り立つ表式である。したがってここでは  $T_*$  として式 (54) を適用する。式 (50) より

$$|g_{tt}(r)|^{-\frac{1}{2}} \sim (1 - \hbar \hat{\rho}(r) - \hbar \rho_0) \left(1 - \frac{2m(r)}{r}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

であり式 (47), (54) より

$$T_* = \frac{\hbar}{8\pi M_{BH}} \{1 + \hbar[\rho_0 + c_0(\hbar \mu_0)^{-2}]\}$$

であるから式 (53) を使うと

$$T_{loc}(r) = \frac{\hbar}{8\pi M_{BH}} (1 - \hbar\hat{\rho}(r) + \hbar c_0(\hbar\mu_0)^{-2}) (1 - \frac{2m(r)}{r})^{-\frac{1}{2}} \quad (55)$$

となる。したがって温度分布は  $\rho_0$  に依らない。つまり壁の位置に無関係に  $T_{loc}(r)$  が決まる。言い換えると  $T_*$  と重力ポテンシャル  $g_{tt}(r)$  の量子補正は  $T_{loc}(r)$  が  $\rho_0$  に依らないように打ち消し合うということである。このことは壁の内部の光子の運動を考えると当然といえる。

#### 4.4 エントロピー

量子スカラー場を伴うブラックホールの熱力学的エントロピーは量子補正された計量を用いて計算することができる。エントロピーを計算するためには参考文献 8) に従って

$$dS = \frac{dE}{T_{loc}} = \frac{1}{T_{loc}} \left( \frac{\partial E}{\partial M} \right)_r dM \quad (56)$$

を使うことにする。ここで  $E$  は系の準局所エネルギーである。重力場と最小結合している古典的な場に対しては

$$E = r - r|g^{rr}|^{\frac{1}{2}} \quad (57)$$

となることが厳密に示されている。最小結合以外の場合式 (57) の関係は厳密に導かれていないが、エントロピーの計算にこの関係式を使うことにする。その理由は  $E$  が動径座標  $r$  の連続関数であり  $r \rightarrow \infty$  の極限で正しい ADM 質量を与えるという条件を満たすものの中で最も単純な表式であるからである。式 (50), (57) を使うと

$$\left( \frac{\partial E}{\partial M} \right)_r = (1 + \hbar\mu(r)) \left[ 1 - \frac{2M(1 + \hbar\mu(r))}{r} \right]^{-1/2} \quad (58)$$

となるので式 (55), (56), (58) より

$$dS = \frac{8\pi M}{\hbar} \{1 + \hbar[\hat{\rho}(r) + \hat{\mu}(r) + c_1]\} dM, \quad c_1 = 2\mu_0 - c_0(\hbar\mu_0)^{-2}$$

が得られる。これを積分して

$$S = S_0 + S_1, \quad (59)$$

$$S_0 = \frac{4\pi M^2}{\hbar}, \quad (60)$$

$$S_1 = 8\pi \int^M M[\hat{\rho}(r) + \hat{\mu}(r) + c_1] dM \quad (61)$$

となる。ここで  $M = 0$  のとき  $S_0 = 0$  とした。  $S_1$  については  $S_1(r_H) = 0$  という境界条件を設定すればよいように思われる。式 (38), (39), (61) より

$$\frac{dS_1}{dr} = 8\pi \int^M M \left\{ \frac{16\pi\alpha}{3} r \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-3} + \frac{4\pi\alpha}{M} r^2 \left( 1 - \frac{2M}{r} \right)^{-2} \right\} dM > 0$$

であるから  $S_1$  は  $r$  と共に単調に増加し、  $S_1, S$  は非負である。これらは物理的エントロピーが持っているはずの性質である。

## §5 まとめ

本論文では free massive scalar field に対して Hawking radiation に相当するエネルギー運動量を Hartle-Hawking vacuum と Boulware vacuum の  $T_{\mu}{}^{\nu}$  の期待値の差として求めた。地平線の近傍での結果は式 (32), (33), (34) より  $\xi$  に依らない。これは参考文献 10) の結果とは異なる。参考文献 10) では massless scalar field を考え Hartle-Hawking vacuum に対する繰り込まれた  $\langle T_{\mu}{}^{\nu} \rangle$  を計算しているが、問題は subtraction scheme である。彼らは minimal subtraction scheme で計算しているが、一方物理的な状況から subtraction は Hartle-Hawking vacuum と Boulware vacuum との期待値の差になっているべきであると考えられる。minimal subtraction scheme がこれに相当すると言う理由はなく  $\langle T_{\mu}{}^{\nu} \rangle$  の  $\xi$  依存性の有無はここに起因するのではないかと考えられる。参考文献 9) では熱力学の第2法則から  $\xi$  の値の範囲が限定されると主張しているが、 $\langle T_{\mu}{}^{\nu} \rangle$  が  $\xi$  に依存しなければこのような制限は当然生じない。この意味からも minimal subtraction scheme の正当性を検証する必要がある。

また本論文で計算した  $\langle T_{\mu}{}^{\nu} \rangle$  は地平線上の発散が取り除かれていないが、この  $\langle T_{\mu}{}^{\nu} \rangle$  を使って back-reaction problem を  $\hbar$  のオーダーまで解くことを試みた。Black Hole の mass  $M$  が十分大きいとすると Schwarzschild metric に対する  $\hbar$  の1次の correction が求められる。Schwarzschild modes と Kruskal modes は地平線の近傍での解であるので、ここで求めた correction は地平線の近傍でのみ意味がある。数値計算の結果、 $r < 10M$  の範囲であれば十分に  $T_{\mu}{}^{\nu}$  の効果を Schwarzschild 時空に対する摂動と見做せることがわかる。

本研究は文部省からの平成7年度特定研究費(単年度)を得て行なわれたものである。

## 参考文献

- 1) S.W.Hawking, Commun.math.Phys. 43 (1975) 199.
- 2) B.S.DeWitt, Phys.Rep. C19 (1975) 295.
- 3) W.G.Unruh, Phys.Rev. D14 (1976) 870.
- 4) D.W.Sciama, P.Candelas, and D.Deutsch, Adv.Phys. 30 (1981) 327.
- 5) P.Candelas, Phys.Rev. D21 (1980) 2185.
- 6) N.D.Birrell, and P.C.W.Davies, *Quantum fields in curved space*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1982).
- 7) S.M.Christensen, Phys.Rev. D14 (1976) 2490.
- 8) D.Hochberg, T.W.Kephart, and J.W.York,Jr., Phys.Rev. D48 (1993) 479.
- 9) P.A.Anderson, W.A.Hiscock, J.Whitesell, and J.W.York,Jr., Phys.Rev. D50 (1994) 6427.
- 10) P.A.Anderson, W.A.Hiscock, and D.A.Samuel, Phys.Rev.Lett. 70 (1993) 1739.

(平成8年11月25日受付)

# 器械出し看護婦ロボットに関する研究

—透過型照明を利用した手術器具画像認識システム—

(機械工学科) 岩本英久

(岡山大学工学部) 大崎紘一, 神代 充

(豊橋技科大) 檜野泰司

(NTT) 佐藤幹彦

(岡山大学医学部) 関 洲二

## A Study on the Nurse Robot Preparing Surgical Instruments

— An Image Recognizing System of the Instruments Using the Transmitted Light —

Hidehisa IWAMOTO, Hirokazu OSAKI

Mituru JINDAI, Yasuji KASHINO

Mikihiko SATO, Shuji SEKI

There is not enough of the total number of the nurses in Japan. Moreover, the nurses have been obliged to support surgical operations for a long time. The robot system plays an important role to reduce work of the nurses, so that we develop the system to prepare surgical instruments. Therefore, this systems is indispensable for recognizing the kind and position of the instruments.

In this paper, we propose the system recognized the instruments by using the image processing. Surgical instrument images taken by the CCD camera are processed by the binalization and then the labeling. The center - contour distances of the instruments are calculated by recognizing the outline and center of the instrument to express the feature of configuration. The instruments are distinguished to compare the image data with the instrument database which is a wave form shown the relation between the center - contour distance and outline length.

Key Words: Robot system, Image recognition, Surgical instrument, Nurse supporting

ロボットシステム, 画像認識, 手術器械, 看護婦支援

### § 1. 緒言

現在, 医療現場では看護婦不足が深刻な問題となり, かつ看護婦の仕事量も役割も多大なものとなっている。数多い仕事の中で手術作業を直接介助する看護婦の役割は主に器具の管理と手術者への器具の受渡である<sup>(1)</sup>。手術器具を管理しながら手術者に器具を手渡しすることを“器械出し”という。この作業を行う看護婦は, 医学的な知識や器具に関する知識だけでなく手術の流れを把握しなければならず, そこには経験と知識の蓄積が必要である<sup>(2)</sup>。また, 長時間の手術も多いので看護婦にとって負担が大きい。したがって, 手術作業を直接介助する看護婦の作業を軽減するために, 手術器具を外科医に手渡す器械出しロボットシステムを考案する。このロボットシステムには, ロ

ポットが手術器具をつかむために、器具の種類を判定して把持点を正確に認識するシステムが必要不可欠である。

そこで本研究では、画像処理を用いた手術器具認識システムの開発を試みる。本システムは、器具の輪郭を明確にするために透過型照明を用いて手術器具の画像をコンピュータに取り込み、二値化およびラベリングなどの画像処理を行う<sup>(3)~(5)</sup>。器具の形状を定量化するために、器具の重心と輪郭線を抽出して<sup>(6)</sup>、重心から輪郭線までの距離(重心距離)を算出する。横軸に輪郭線の長さを取り、縦軸に重心距離をとる波形を形状の特徴として定量化し、あらかじめ登録した器具のデータベースと比較して器具の判別を行う。

## § 2. 手術器具認識システム

手術器具を判別するために、以下のような過程で手術器具の識別を行う。

CCDカメラにより、手術器具をカラー画像で取り込み二値化を行う。ラベリングにより個々の器具を1つの物体として認識し、それぞれの物体について重心および輪郭線を抽出する。物体の外形特徴を定量化するために重心から輪郭線までの距離(重心距離)を算出する。重心距離が最大である点を比較するデータの最大点と一致させて、ある点における輪郭線長さと重心距離の関係をデータベースにした上で、あらかじめ登録しておいた手術器具のデータと比較する。すべての登録データについて、重心距離の差の絶対値の総和を算出して、総和が最小となる登録データを取り込まれた器具として判定する。

### 2.1 手術器具認識システムの構成

手術器具認識システムは、CCDカメラ(SONY; CCD-TRV60)、カメラスタンド、透過型照明(LION; T-45)、画像取り込みソフト(Adobe-System; Adobe Premiere 日本語版Ver. 4.0.1)、画像圧縮ボード(INTERWARE; Power Video630/AV)、コンピュータ(APPLE COMPUTER; Power Macintosh 7100/80AV)を用いて、図1のように構成される。照明方法には、透過型照明の他に、自然光などを用いた反射光、レーザー光線などによる加工光などがある。反射光を用いると、被写体が手術器具である場合、ハレーションが生じて正確に画像を取り込むことができない。また、レーザー光を発生させる装置は高価であるので、本システムでは透過型照明を用いる。

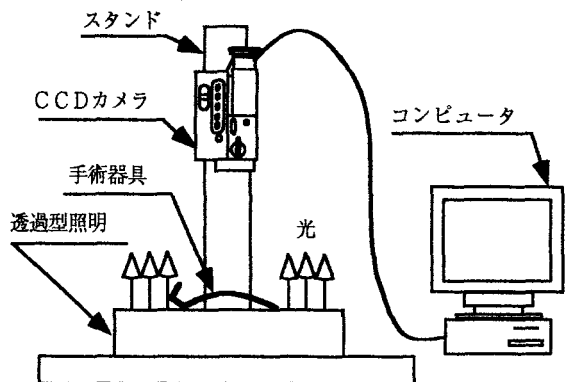


図1 手術器具認識システム

### 2.2 画像処理方法

カラー画像(RGB信号)のままでは、二値化処理を行うことができないので、グレーの256階調の白黒画像(輝度信号)に変換する。 $f_r$ ,  $f_g$ ,  $f_b$ はそれぞれ赤、緑、青の三原色の濃度とする。画面上の座標( $X_i$ ,  $Y_j$ )にある点の輝度値を $V(X_i, Y_j)$ とすると式(1)で求められる<sup>(6)</sup>。

$$V(X_i, Y_j) = 0.3 \times f_r(X_i, Y_j) + 0.59 \times f_g(X_i, Y_j) + 0.11 \times f_b(X_i, Y_j) \quad \dots \dots \dots (1)$$

また、本システムでは白を物体として認識するので、背景より暗く映る物体を白に反転させる必

要がある。そこで閾値を256階調の中間値である128を用いて二値化する。閾値処理後の白黒輝度値を $P(X_i, Y_j)$ とすると(2)式により表される。

$$P(X_i, Y_j) = \begin{cases} 0 & (V(X_i, Y_j) \geq 128) \\ 255 & (V(X_i, Y_j) < 128) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (2)$$

### 2.3 特徴抽出方法

取り込んだ画像の中にある器具の個数を把握したり輪郭線を抽出するためにラベリングを行う。ラベリングとは、連結しているすべての画素に同じラベルをつけ、異なった連結成分にはちがうラベルをつける処理である<sup>(3)</sup>。ラベリングによって分離された個々の器具についてその重心を求め、輪郭線を抽出する。ラベリングについては文献(3)～(6)を参考にしてもらいたい。

#### 2.3.1 重心

ラベリングによって分離された個々の物体についてその重心を求める。

ここで、ある物体の画素番号を $m$ とし、その物体の全画素数を $rs$ とする。また、画素番号が $m$ である座標を $(X[m], Y[m])$ とする。物体の重心 $G(X_g, Y_g)$ は座標 $(X[m], Y[m])$ の平均値であり、(3)の式により表される。

$$(X_g, Y_g) = \left( \frac{1}{r \cdot s} \sum_{m=0}^{rs-1} X[m], \frac{1}{r \cdot s} \sum_{m=0}^{rs-1} Y[m] \right) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$0 \leq m \leq rs-1 \quad (m \text{ は整数})$$

#### 2.3.2 輪郭線の探索

輪郭線を抽出するために、物体の周囲を探索する。

ある物体における $q$ 番目の輪郭点を $A[q](X[q], Y[q])$ とし、輪郭点の全画素数を $qs+1$ とする。

画像上を左端から走査して、あるラベル値 $k$ の付いた画素 $P(X_i, Y_j)=k$ を探し、その左隣の画素 $P(X_{i-1}, Y_j)$ を輪郭点 $A[0](X[0], Y[0])=255$ とする。輪郭点 $A[0](X[0], Y[0])$ の周辺 $3 \times 3$ 画素内で互いに隣り合った2点について、以下の8つの条件を満たす2点の中で、ラベル値 $k$ でない点を次の輪郭点 $A[1](X[1], Y[1])$ とする。

$$\left\{ \begin{array}{l} P(X_{i-1}, Y_{j-1}) \neq k \cap P(X_{i-2}, Y_{j-1}) = k \quad \dots \quad (i) \\ P(X_{i-2}, Y_{j-1}) \neq k \cap P(X_{i-2}, Y_j) = k \quad \dots \quad (ii) \\ P(X_{i-2}, Y_j) \neq k \cap P(X_{i-2}, Y_{j+1}) = k \quad \dots \quad (iii) \\ P(X_{i-2}, Y_{j+1}) \neq k \cap P(X_{i-1}, Y_{j+1}) = k \quad \dots \quad (iv) \\ P(X_{i-1}, Y_{j+1}) \neq k \cap P(X_i, Y_{j+1}) = k \quad \dots \quad (v) \\ P(X_i, Y_{j+1}) \neq k \cap P(X_i, Y_j) = k \quad \dots \quad (vi) \\ P(X_i, Y_j) \neq k \cap P(X_i, Y_{j-1}) = k \quad \dots \quad (vii) \\ P(X_i, Y_{j-1}) \neq k \cap P(X_{i-1}, Y_{j-1}) = k \quad \dots \quad (viii) \end{array} \right.$$

また、出発点から $q$ 番目の輪郭点までの長さを輪郭線長さ $d[q]$ とする。 $q+1$ 番目の輪郭点が $q$ 番目の輪郭点に対して水平または垂直に位置する場合と斜めに位置する場合に条件を分けて、(4)式で計算する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{条件 (i), (iii), (v), (vii) の場合 (垂直, 水平に位置する場合)} \\ \quad d[q+1] = d[q] + 1 \\ \text{条件 (ii), (iv), (vi), (viii) の場合 (斜めに位置する場合)} \\ \quad d[q+1] = d[q] + 1.4142 \end{array} \right\} \quad \dots \dots (4)$$

最終輪郭点A[qs](X [qs], Y [qs])の座標がA[0](X [0], Y [0])の座標に一致するまで繰り返す。

### 2.3.3 重心から輪郭線までの距離(重心距離)の算出

輪郭線上の境界点から重心までの距離(重心距離)を計算する。ある物体において始点からq番目にある輪郭線上の輪郭点をA[q](X [q], Y [q])とする。重心をG(X<sub>g</sub>, Y<sub>g</sub>)とし、重心距離をZ[q]とすると、重心距離は(5)式によって算出される。

$$Z[q] = \sqrt{(X[q]-X_g)^2 + (Y[q]-Y_g)^2} \quad \dots\dots(5)$$

## 2.4 器具判定方法

CCDカメラによって取り込まれた手術器具とあらかじめ登録されている手術器具の形状を比較して種類を判定する。そのための形状の定量化と判定方法について説明する。

### 2.4.1 形状の定量化

手術器具の形状は、2.3.2で算出される輪郭線長さを横軸に、2.3.3で算出される重心距離を縦軸にとった座標系の波形で表現できる。しかし、同じ物体でも取り込む尺度を変えると画面上の大きさが異なるために形状の比較ができなくなる。また、大きさの異なる器具を比較することもできない。そこで、輪郭線長さを0から999までの距離番号で表すものとする。また、CCDカメラの移動や尺度の変更にも対応させるために、重心距離は0から1までの値をとるように変換する。

2.3.3で算出される重心距離は輪郭線の画素番号に基づくものである。形状の定量化を行う際には、輪郭線の長さを表す距離番号に基づく重心距離に変換する必要がある。

まず、ある点までの輪郭線長さをd[q]とし、輪郭線長さの最大値をd[qs]とする。このとき、0から999までの実数値をとる輪郭線長さをdr[q]とすると、dr[q]は式(6)により変換される。

$$dr[q] = \frac{d[q]}{d[qs]} \times 999 \quad \dots\dots(6)$$

始点からの距離を0から999までの整数a(距離番号)とし、そのときの重心距離をZZ[a]と表現する。0から順に、ある画素qまでの距離dr[q]と距離番号の差を(7)式のように場合分けを行ってZZ[a]を算出する。aと比べるdr[q]は、aより大きいdr[q]の中の最小値である。

$$\left. \begin{array}{l} \text{(i) } dr[q]-a=0 \text{ の場合} \quad ZZ[a]=Z[q] \\ \text{(ii) } dr[q]-a>0 \text{ の場合} \end{array} \right\} \dots\dots(7)$$

$$ZZ[a] = \frac{Z[q]-Z[q-1]}{dr[q]-dr[q-1]} a + \frac{dr[q]Z[q-1]-dr[q-1]Z[q]}{dr[q]-dr[q-1]}$$

また、重心距離の最大値をZ<sub>max</sub>とし、ある距離番号における重心距離をZZ[a]とする。0から1までの値をとる重心距離をZ<sub>r</sub>[a]とすると、Z<sub>r</sub>[a]は式(8)によって算出される<sup>(7)</sup>。

$$Z_r[a] = \frac{ZZ[a]}{Z_{max}} \quad \dots\dots(8)$$

### 2.4.2 手術器具のデータベース

器具の形状は、横軸に輪郭線の長さを表す距離番号をとり、縦軸に重心距離をとる波形によって定量化する。器具の特徴データは、距離番号と重心距離である。あらかじめ器具の特徴をデータベースにして、CCDカメラによって取り込まれた器具と比較して器具の種類を判定する。



### 2.4.3 比較判定方法

CCDカメラによって取り込まれた器具をあらかじめ登録された器具の波形とを比較することによって種類を判定する。輪郭線を探索する始点によって距離番号が異なると同じ器具でも波形が一致しない。そこで、比較する際、図2のように重心距離の最大値をとる距離番号を一致させて波形を合わせる。

登録データにおける重心距離が最大である距離番号を $a_m$ とし、取り込まれた器具における重心距離が最大である距離番号を $b_m$ とする。最大値をとる距離の差を $ds$ とすると、 $ds$ は式(9)で表される。

$$ds = a_m - b_m \quad \dots (9)$$

取り込まれた器具の距離番号を $a$ とし、最大値をとる点を一致させた後の距離番号を $b$ とすると、 $b$ は式(10)によって計算される。

波形を一致させた後、ある距離番号における重心距離を $Zr[a]$ とし、登録された器具の重心距離を $Zb[b]$ として、その差の絶対値の総和を $S$ とすると、 $S$ は(11)式によって求められる。

$S$ が最小となる登録データをCCDカメラから取り込まれた手術器具として判定する。ただし、最小値がある限界値以上の場合には未登録物体として判定するものとする。

$$\left. \begin{aligned} b &= ds + a & (0 \leq ds + a \leq 999) \\ b &= ds + a + 1000 & (ds + a < 0) \\ b &= ds + a - 1000 & (ds + a > 999) \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

$$S = \sum_{a=0}^{999} |Zr[a] - Zb[b]| \quad \dots (11)$$

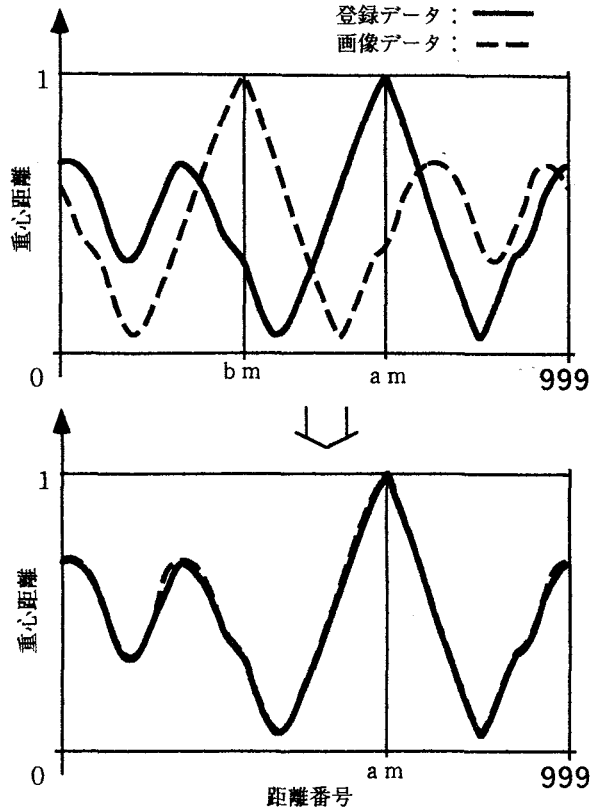


図2 登録データと画像データの波形合わせ

## § 3. 適用例

8種類の手術器具の特徴をデータベースにして、CCDカメラにより器具を透過型照明を用いてカラー画像で取り込み、尺度および器具の形状変化による判定能力を検討した。

### 3.1 器具の種類

判別実験に使用する8種類の手術器具は、組織や針をつかむ目的の鉗子類が5種類、組織や糸を切断する剪刀類が3種類である。鉗子類は、持針器、血管鉗子、有鉤止血鉗子、モスキート大鉗子、モスキート小鉗子である。剪刀類は、直剪刀、太彎剪刀、細彎剪刀である(図3～図8)。鉗子類には、組織や針を把持した際に、その状態を保つためにこの歯状の止め具が数段設けてある。各器具の特徴や使用目的を表1にまとめる<sup>(8)(9)</sup>。

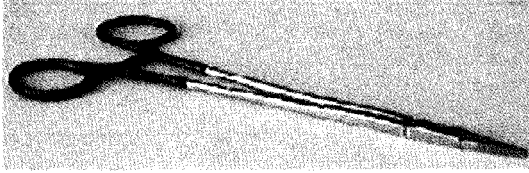


図3 持針器

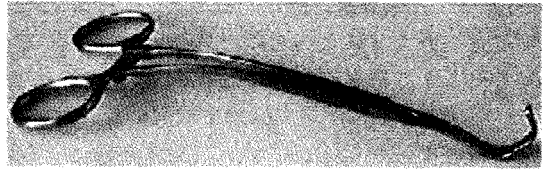


図4 血管鉗子

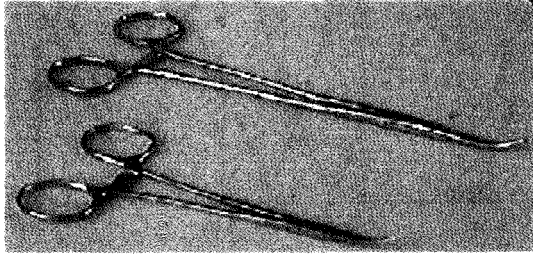


図5 モスキート(大・小)鉗子

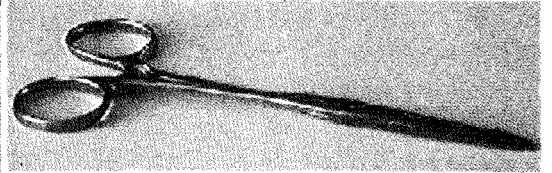


図6 有鉤止血鉗子

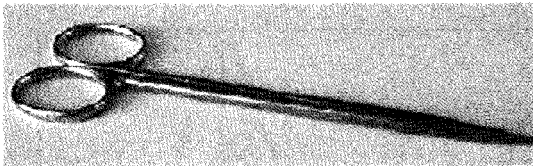


図7 直剪刀

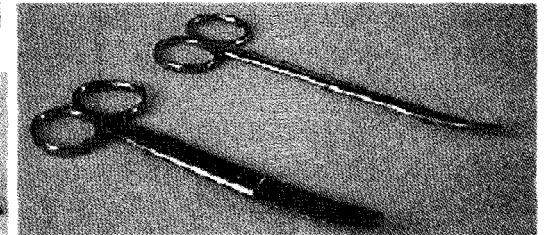


図8 (太・細)彎剪刀

表1 適用例で使用する手術器具の特徴

手術器具名	特徴・用途	全長 (cm)	のこ歯止め 具数 (個)
持針器	縫合針の把持	18	3
血管鉗子	血流の遮断 中央部・先端が大きく湾曲	17.5	7
モスキート鉗子 (大・小)	組織の止血・把持・剥離 先端が湾曲	18.5 (大) 12.5 (小)	3 (大) 3 (小)
有鉤止血鉗子	組織の止血・剥離 先端に鉤	14.5	3
直剪刀	組織・糸の切断	14.5	なし
彎剪刀 (太・細)	組織の剥離 先端が湾曲	14 (太) 14.5 (細)	なし

### 3.2 画像処理例

器具の種類を認識するための画像処理過程について説明する。図9のようにCCDカメラにより透過型照明を利用して持針器をカラー画像でコンピュータに取り込む。式(1)によりグレイ処理をして、(2)式により図10のように2値化する。ラベリングを行い、図11のように輪郭線を抽出して、式(3)により重心を算出する。図12のように形状を波形として定量化する。

### 3.3 取り込み尺度による影響

本システムでは、重心距離を0から1の値に、距離番号を0から999までの整数に変換するので尺度の影響はないと考えられる。しかし、画面上で取り込む器具を小さくすると輪郭線の画素数が減少するので波形が乱雑になり、正確な特徴をとらえにくく判別の精度が下がる。そこで登録した

大きさを1として取り込む尺度を6分の1から6分の5まで変化させて判定実験を行った。結果は、表2にまとめた。○は判定結果が正しかったことを示す。判定結果が誤った場合は、判定された器具名を記した。

血管鉗子以外すべて正確に判定できた。血管鉗子については、尺度が1の時のみ正確に認識されたが、6分の5から尺度が小さくなると持針器と判定された。

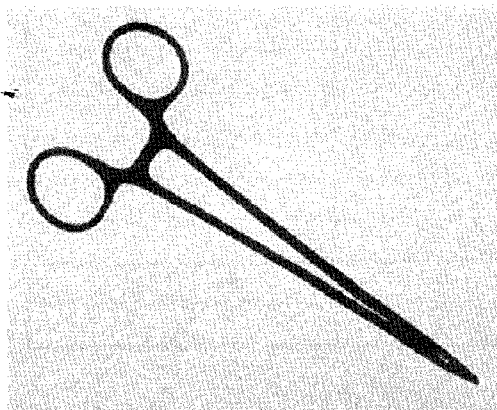


図9 原画(持針器)

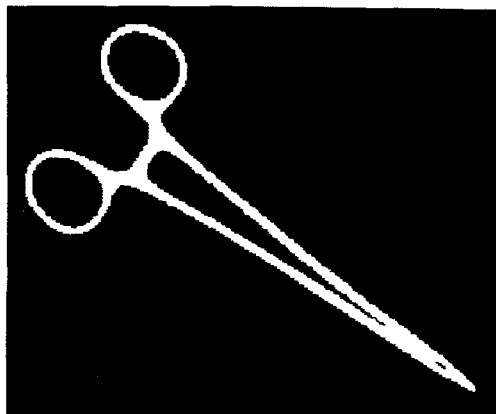


図10 二値化された画像

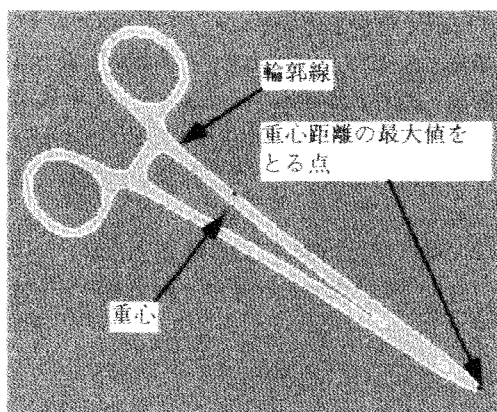


図11 抽出された輪郭線と重心

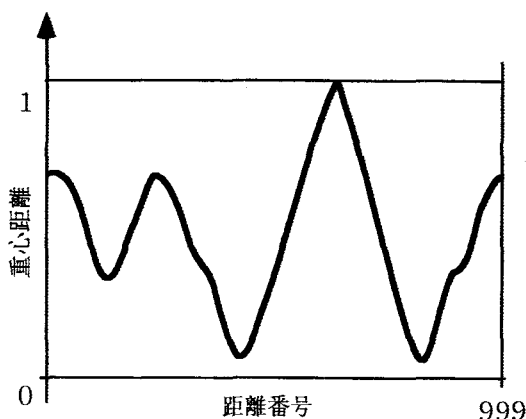























図12 波形例(持針器)

表2 尺度の違いによる判定結果

判定結果	持針器	血管鉗子	有鉤止血鉗子	モスクート小鉗子	モスクート大鉗子	直剪刀	彎剪刀(細)	彎剪刀(太)
尺度	2/6 (1/3)	○	持針器	○	○	○	○	○
	3/6 (1/2)	○	持針器	○	○	○	○	○
	4/6 (2/3)	○	持針器	○	○	○	○	○
	5/6	○	持針器	○	○	○	○	○
	6/6 (1)	○	○	○	○	○	○	○

表3 形状の違いによる判定結果

 : 登録形状

判定結果	持針器	血管鉗子	有鉤止血鉗子	モスキート小鉗子	モスキート大鉗子	直剪刀	彎剪刀(細)	彎剪刀(太)
形状条件	1個止め		×					
	2個止め		×					
	3個止め							
	4個止め							
	5個止め							
	6個止め							
	7個止め							
	閉							
	開	×	×	×	×	×	×	×

### 3.4 器具の形状変化による判定能力

手術器具には剪刀のように可動部をもったものが多い。したがって、取り込む際に可動部を動かすことによって同じ器具でも形状が異なるので、形状変化に対する判定能力を検証する。そこで、8種類の手術器具に対してそれぞれの可動部に条件を付けて判定実験を行った。

鉗子類については止め具が付いているので、止め具を1段ずつ止めていき、その際の形状変化について判定実験を行った。剪刀類については開いた場合と閉じた場合の2つの条件について判定を行った。登録した器具の形状は、持針器、有鉤止血鉗子、モスキート大鉗子、モスキート小鉗子が止め具1個止めであり、血管鉗子が止め具5つ止めである。剪刀類については、すべて閉じた状態とした。これらの判定結果を表3に示す。

判定結果は、可動部を動かして止め具を開いた状態では判定できないことがわかったが、その他の条件では正確に判定することができた。血管鉗子において、1個止めおよび2個止めの場合は先端が $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 程度開いた状態になるので判定できなかった。

## § 4. 結言

本研究では、器械出し看護婦ロボットのための手術器具認識システムを開発した。本システムの特徴は以下に示す通りである。

- (1) 手術器具の輪郭線を明確に取り出すために、透過型照明を用いて手術器具の画像をCCDカメラからコンピュータに取り込んだ。
- (2) 取り込まれた画像を二値化してラベリングを行った。輪郭線を抽出して、重心から輪郭線までの距離を算出した。輪郭線の長さを表す距離番号を横軸にとり、重心から輪郭線までの距離を縦軸にとった波形で手術器具の形状を定量化した。
- (3) 適用例において、8種類の手術器具のデータベースを構築して、判定能力を検討する実験を行った。その結果、取り込み尺度を変化させない場合はすべて正確に判定できた。しかし、器具を閉じた状態で登録した場合、先端や止め具が開いた状態になると正確に判定できなかった。

## 参考文献

- (1) 藤枝和子他，手術室看護マニュアル，メヂカルフレンド社，1994，pp58～59，pp68～72
- (2) 菅原能子他，手術介助手順 直接介助編，医学書院，1984，pp12～13
- (3) 井上誠善他，Mac版C言語で学ぶ実践画像処理，オーム社，1994，pp20～25，pp34～55，pp63～76，pp86～104
- (4) 森本吉春他，パソコン画像処理ハンドブック，共立出版株式会社，1989，pp78～79
- (5) 本多庸悟他，画像処理と視覚認識，オーム社，1995，pp128～130
- (6) 八木伸行他，C言語で学ぶ実践画像処理，オーム社，1992，pp35，pp96～107，pp114～119
- (7) 宮原繁，整数，化学新興社，1979，pp30～31
- (8) 菅原能子他，写真で見る各科手術器械の準備第7版，医学書院，1984，pp32～40
- (9) 桜井健司，処置・検査各科手術で用いるナースのための器械器具，メジカルビュー社，1989，pp100～131

(平成8年11月25日受付)

# アルゴングロー放電中の分子不純物の挙動

(電気工学科) 山 崎 勉

## Behaviour of Molecular Impurities in an Argon Glow Discharge

Tsutomu YAMAZAKI

To investigate behaviour of impurities of nitrogen and water in an argon glow discharge, spectroscopic measurements were carried out. In the recorded spectral intensity distribution of negative glow plasma, many spectral bands were found as well as line spectra of neutral argon and ionized argon, such as second positive bands of molecular nitrogen, first negative bands of ionized molecular nitrogen, OH radicals' bands, and some line spectra of hydrogen atom. Then rotational temperatures of these spectral bands were calculated to identify the excitation processes of them. It is confirmed that radiating molecules of nitrogen second positive bands with upper vibrational quantum number of  $v=0$  or 1 and that of OH bands were excited by collisions with argon metastable atoms and other bands were electronic collisions. To estimate the effect of these impurities simulations were carried out in positive column plasma, and it showed that reduction of metastable atoms by these impurities cause the increase of electric field intensity.

Key Words: argon glow discharge, effect of impurities, band spectra of nitrogen and OH, rotational temperature

アルゴングロー放電, 不純物の効果, 窒素とOHの帯スペクトル, 回転温度

### § 1. まえがき

放電気体中の不純物は放電特性に影響する事が知られている。<sup>1)</sup> ペニング効果は放電電圧を低下させるために、<sup>2)</sup> また気体レーザの選択励起にも利用されている。<sup>3)</sup> そして不純物の発光はプラズマ診断にも利用されている。<sup>4)</sup> 一方、いくつかの気体を混合して特定の分子反応を強調したグロー放電は半導体製造等に広く使われている。<sup>5)</sup>

これまで純度の低い(99/9%)アルゴン気体を用いて低気圧グロー放電を点灯した場合に現れる不純物の発光の分光診断を行い、その挙動を検討して放電特性に及ぼす影響について調べてきた。<sup>6)–9)</sup> 本論文ではそれらの実験結果をまとめ陽光柱プラズマのシミュレーション結果と比較検討する事を目的としている。放電に混入する不純物としては真空漏れで侵入する空気や脱ガスが不十分で放電管に吸着した水分が考えられる。<sup>5)</sup> アルゴンに対するこれらの不純物の影響を検討する。

### § 2. 実験装置と分光測定結果

#### 2.1 実験装置

放電装置と分光測定系を図1に示す。図中に破線で示す位置にステンレス鋼管製ホロー陰極HC(内径19.4mm, 長さ150mm)があり、陽極Aはニッケル製の円筒(内径40mm, 長さ40mm)でガラス管に封

入してある。陰極は2½インチ系の真空フランジに取付け、真空排気装置に接続してある。ガス導入口よりアルゴン気体を導入し直流グロー放電を点灯した。ここで使用したアルゴンは溶接用高压ガスでJIS規格によると純度99.9%で不純物として窒素、水素、酸素および水が含まれている。ホロー陰極の中心部の発光を分光器(CT-100CP日本分光)に導き光電子増倍管R292(浜松ホトニクス)で観測し、結果をXYレコーダで記録した。

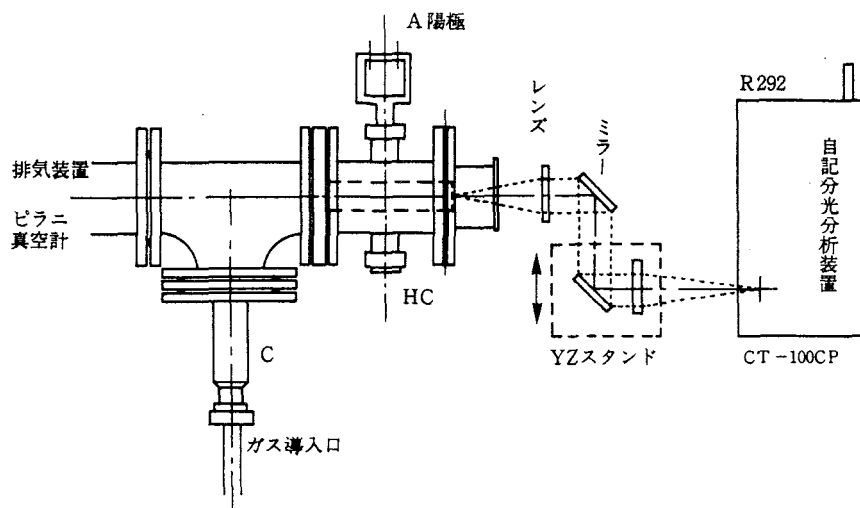
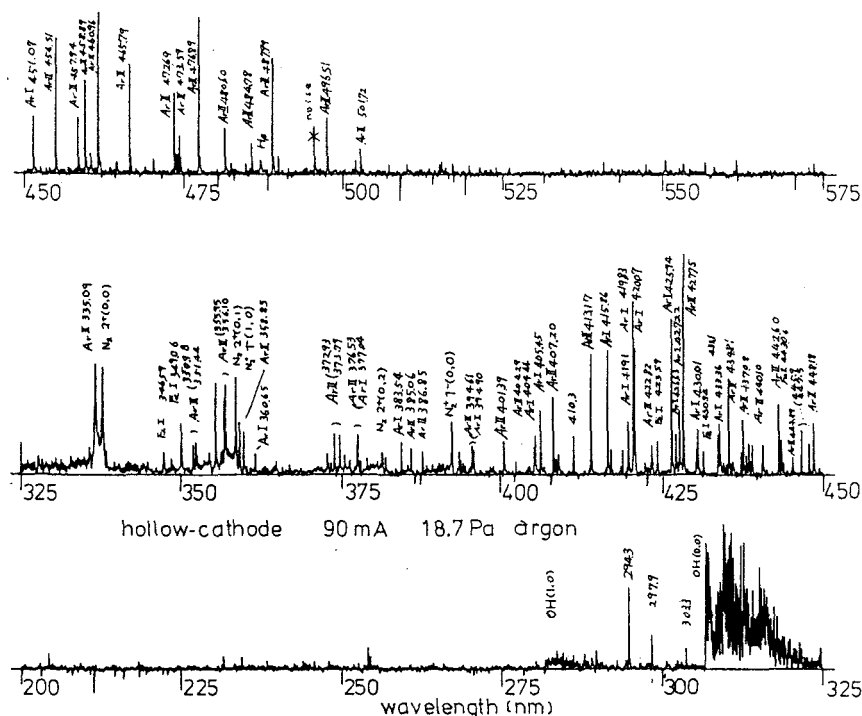


図1 放電装置と測定系の配置



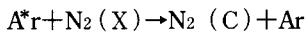
スペクトル線の豊富なホロー陰極の発光スペクトル分布の例を図2に示す。放電気体に不純物が含まれる時にはその発光スペクトル分布にアルゴン以外の原子や分子による発光が検出される。図を見ると400nm台にアルゴンの中性線やイオン線が多数認められその他に水素原子H $\beta$ 、窒素分子の第二正帯316nm(1,0), 337nm(0,0), 358nm(0,1), 381nm(0,2), OH 283nm(1,0), 306nm(0,0)窒素分子イオンの第一負帯359nm(0,0), 391nm(1,0)等の発光が確認できる。ここで分子帯は最大の発光強度を示す波長とその振動遷移(上準位の振動量子数, 下準位の振動量子数)の形式で表した。なお, OHは水が放電内で解離して生じたものと考えられ同時に水素原子も発生している。<sup>10)</sup>

窒素第一正帯や酸素分子の発光帯はほとんど検出されなかった。図2では分光感度補正は行っていない。以前に白熱電球で測定した分光感度校正結果(320nm以上)と320nm以下の波長域について光電子増倍管と分光器の感度から推定すると250nmから500nmでほぼ一定の感度を持っていると考えられる。<sup>6)</sup>

## 2.2 分子帯の励起機構

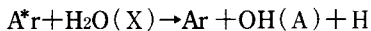
回転量子のエネルギーが小さく多数の気体分子間衝突が期待できる場合、分子基底準位(X)の回転準位占有密度分布は気体分子温度で定まるボルツマン分布で表される。<sup>10)</sup> 電子衝突や原子や分子との衝突により励起される時その影響を受け励起準位の占有密度分布が変化する。<sup>11)</sup> それを反映して発光スペクトル分布が定まる。

各分子の電子励起準位への励起は電子衝突励起の他には次のような過程が知られている。以下では原子の基底準位Ar準安定準位(\*)電離した正イオン(+), 分子の基底準位(X)励起準位(A, B, C...)を用いて表す。窒素第二正帯については次の過程がある。



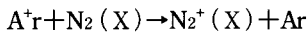
アルゴン準安定準位と窒素分子C準位のエネルギー差は $11.55 - 11.03 = 0.52\text{eV}$ である。これが振動励起(振動量子数 $v$ )と回転励起(回転量子数 $j$ )に分配される。準安定アルゴンのエネルギー準位は $v=0$ では $j=40$ ,  $v=1$ で $j=23$ に相当し,  $v \geq 2$ では励起エネルギーが不足する。<sup>12)</sup> その結果 $v=0$ では $j=40$ または $v=1$ では $j=23$ を中心に占有密度分布が加わり, 上準位の振動量子数が2以上ではその影響は受けずほぼ基底準位の占有密度分布を保持している。

次にOHの発光について考える。



水分子を解離してOHをA準位に励起すると $11.55 - 5.12(\text{解離}) - 4.05(\text{励起}) = 2.38\text{eV}$ のエネルギーが残る。これらの電子遷移で残ったエネルギーは振動準位や回転準位の励起および分子の並進運動に使われる。

以上の二つの過程は上準位の占有密度分布がアルゴン励起原子との衝突で変化し発光スペクトル分布も変化する。次にアルゴンイオンと窒素分子の電荷転移衝突と窒素第一負帯について考える。



アルゴンイオンと窒素分子の電荷移動衝突では $15.76 - 15.58 = 0.03\text{eV}$ となる。振動や回転になるエネルギーは小さい。窒素分子イオンの発光にはこれより $3.17\text{eV}$ 上にあるB準位へ励起する必要がある電子衝突励起が必要であると考えられる。

さて分子帯についてその励起機構を明らかにするため詳しく分光測定を行い, 分子の回転スペクトル分布より回転温度を求めた結果を以下に示す。

## 2.3 窒素分子

窒素分子の発光帯は $C^3\Pi_u$ から $B^3\Pi_g$ の(三重項)電子遷移による第二正帯が強く現れている。<sup>13), 14)</sup> その中で最も強く現れていた振動遷移(0,0)の回転スペクトル分布の測定例を図3に示す。放電電流



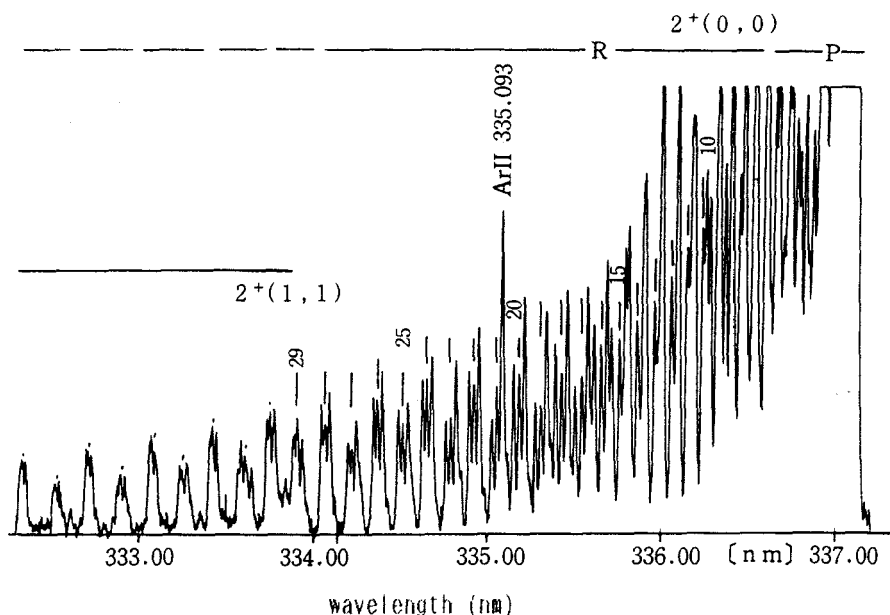


図3 窒素第二正帯(0,0)付近の回転スペクトル分布

30mA, 電圧328V, 気圧13.7Paでアルゴンイオン線と334nm以下には同じ分子帯(1,1)のスペクトル分布が重なって現れている。遷移に伴う回転量子数の変化量が $-1$ と $+1$ に対してそれぞれP枝とR枝があり、長波長側に集中した帯頭をもつP枝と短波長側へ広がって分布するR枝が確認できる。図中の数値は回転量子数を表し、三重項の中央の発光線に対して印をした。遷移の上準位の回転準位占有密度分布を反映して発光強度が定まっている。この回転スペクトル分布の特性を表す目安として回転温度がある。各回転スペクトル線の波長はほぼ一定であると仮定してボルツマン・プロットを描く。すなわち横軸に回転準位のエネルギー、縦軸にその発光強度をその統計重率で割った値の対数値を図示すると各点は直線上に分布しその傾きが回転温度の逆数に比例する。R枝を用いて描いたボルツマン・プロットの一例とそれより求めた回転温度の放電電流依存性を図4に示す。 $j=10$ から29に対して描いている。 $j=20$ 付近から大きい所では測定点が広く散らばりその強度も大きくなってきている。これは $j=40$ 付近にアルゴン準安定準位による励起するためと考えられる。これらの点より最小二乗法で温度を求めると78meVとなった。この回転温度は気圧が高い方が高く、電流によらずほぼ一定温度になっている。

図5に窒素第二正帯(2,4)の例を示す。<sup>8)</sup> その回転スペクトル分布は回転量子数の大きな所まで分布が観測できた(0,0)とは異なり、回転量子数の小さい領域に分布している。また同じ放電条件で(0,2)(1,3)(2,4)(3,5)に対するボルツマン・プロットの例と回転温度の電流依存性を図6に示す。上準位の振動量子数 $v \geq 2$ では発光強度が弱く読み取り誤差が多くなり、ボルツマン・プロットの各点が広く分散している。振動遷移が(0,0)とは異なる回転スペクトル分布について回転温度を求めると振動遷移の上準位が $v=0$ または $v=1$ では高く、 $v \geq 2$ では低い回転温度が得られた。回転温度は放電電流とともに増加している。

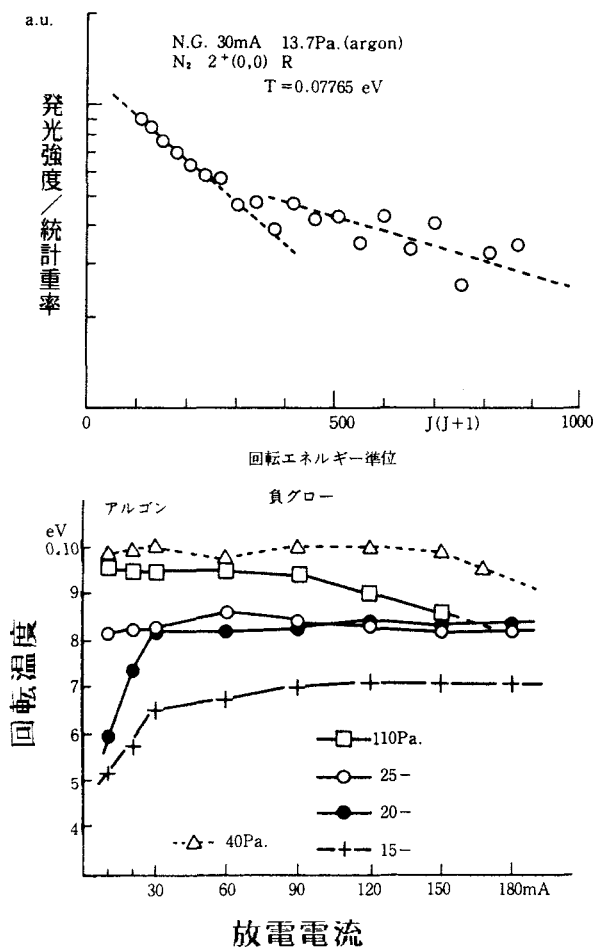


図4 窒素第二正帯(0,0)のボルツマン・プロットと回転温度の放電電流依存性

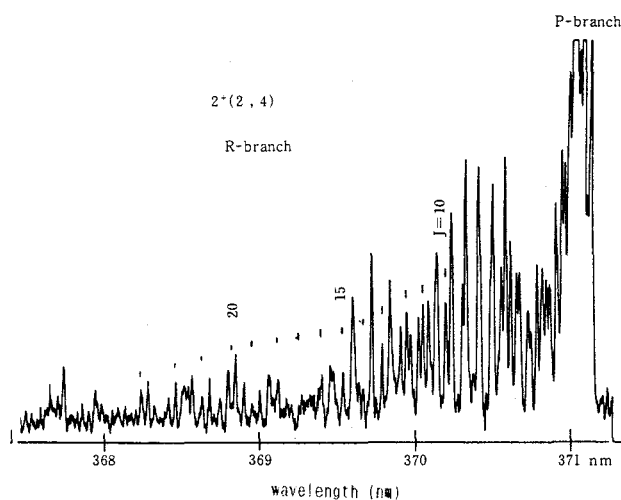


図5 窒素第二正帯(2,4)の回転スペクトル分布

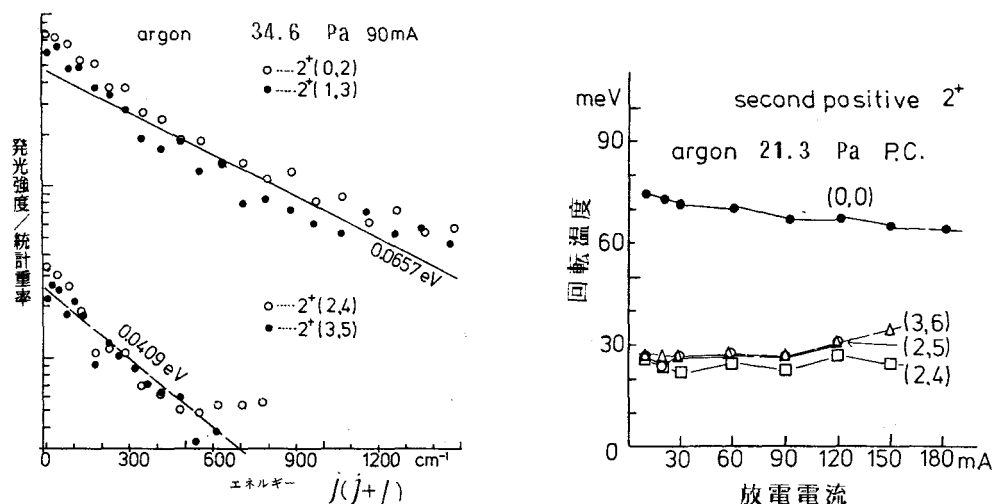


図6 窒素第二正帯(0,0)以外のボルツマン・プロットと回転温度の放電電流依存性

## 2.4 OH

最も強く現れていたOHの発光スペクトル分布を図7に示す。この発光帯は $A^2\Sigma$ から $X^2\Pi$ への(二重項)電子遷移で振動遷移(0,0)に対する回転スペクトル分布である。<sup>14)</sup> その遷移は回転量子数変化量が $-1, 0, +1$ に対しそれぞれP枝, Q枝, R枝がある。R枝は短波長側に帯頭を形成し密集して分布, それより波長が長い方向にP枝とQ枝が分布している。また分子を構成する原子を結ぶ直線の周りの全角運動量に対する量子数 $\Omega$ の値が下単位(X)には二つありその準位にエネルギー差があるため二つの系列が現れるので大文字( $\Omega=3/2$ )と小文字( $1/2$ )で区別した。<sup>14)</sup> 312nmから

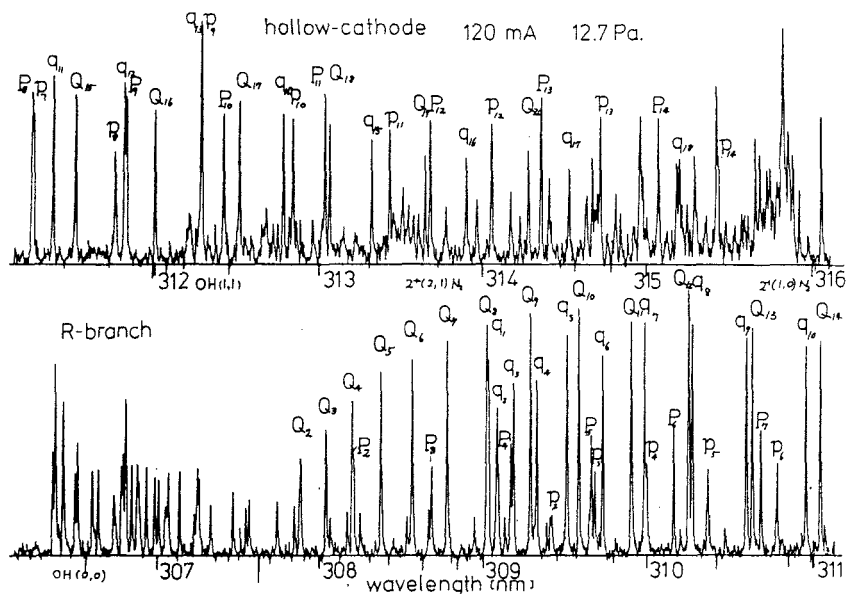


図7 OH(0,0)~(1,1)の回転スペクトル分布

O H (1,1), 窒素第二正帯(2,1) (1,0)が重なってきている。P 枝とQ 枝のボルツマン・プロットと回転温度の電流依存性を図8に示す。これより得られる回転温度はおよそ300meVで電流に依らず一定値になっている。陽光柱プラズマと負グロープラズマともにほぼ同じ温度を示し、前者では電流とともに僅かに減少し後者では逆の傾向が見られる。アルゴン準安定原子の衝突により水が解離されO Hの回転準位に励起される。この時占有密度分布は解離曲線により決定される。

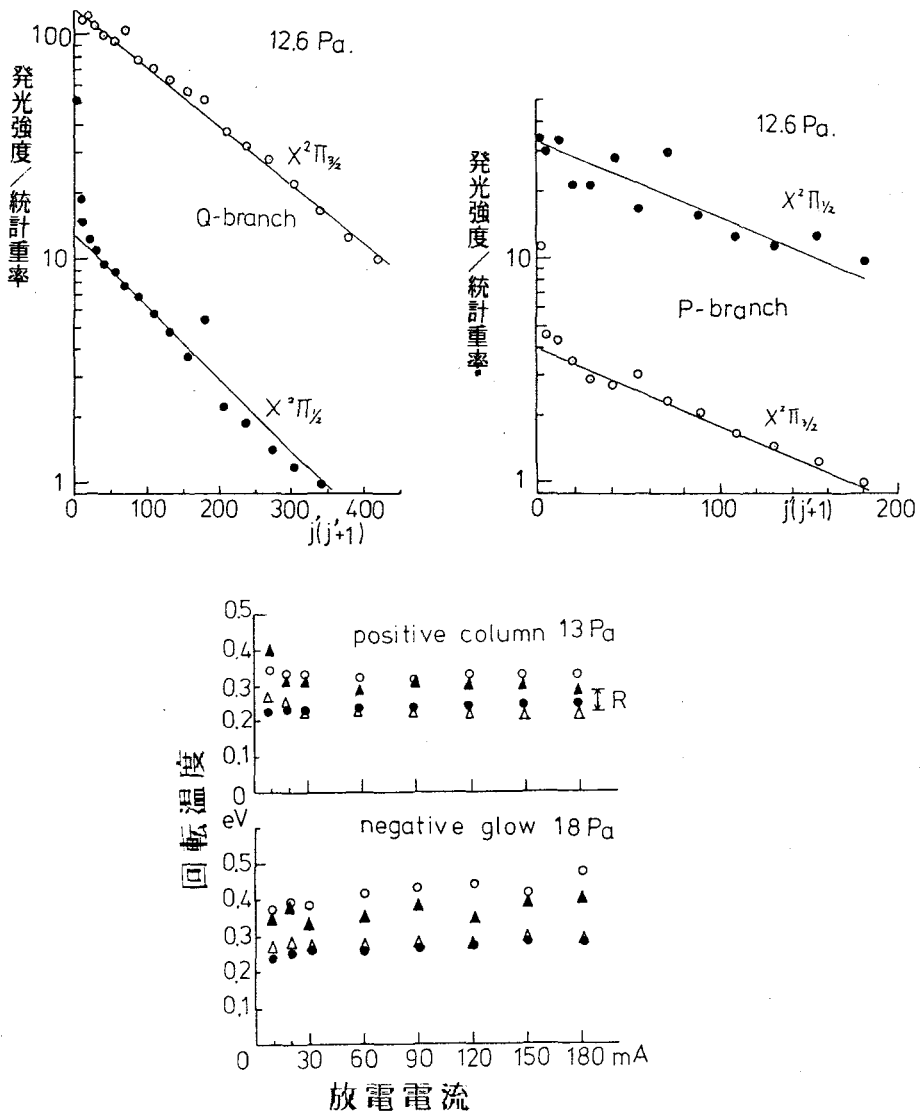


図8 OH (0,0)のP 枝とQ 枝のボルツマン・プロットと回転温度の放電電流依存性

## 2.5 窒素分子イオン

窒素第一負帯で最も強く現れた(二重項)電子遷移 $B^2\Sigma u$ から $X^2\Pi g$ で振動遷移(0,0)の回転スペクトル分布を図9に示す。回転量子数変化量 $-1, +1$ に対してP枝とR枝が現れている。<sup>9)</sup> R枝の発光強度は核スピンのため交替している。<sup>7)</sup> このR枝に対するボルツマン・プロットと回転温度の電流依存性を図10に示す。これより得られる回転温度は低く、<sup>13)</sup>  $v \geq 2$ の窒素第二正帯での結果とほぼ等しい温度になっている。

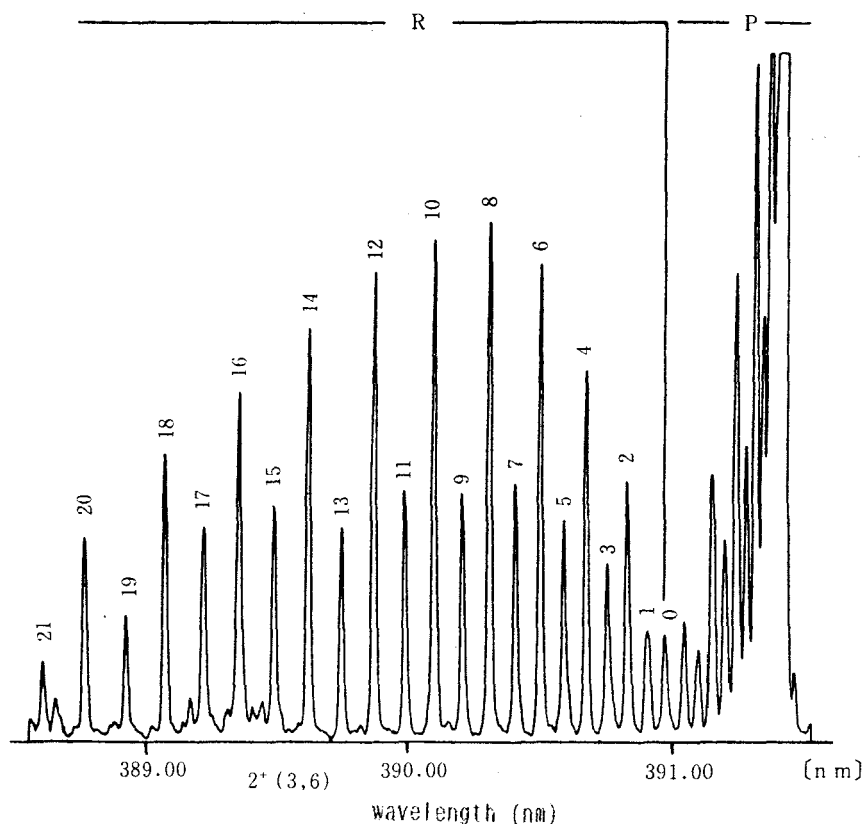


図9 窒素第一負帯(0,0)の回転スペクトル分布

## § 3. 結果の考察

### 3.1 回転温度の放電電流依存性とアルゴン準安定原子

OHと窒素第二正帯(上準位  $v=0,1$ )ではアルゴン準安定原子による分子の衝突励起が主な励起過程となっているため回転温度が高くほぼ一定値になっていると考えられる。電子衝突励起が主と考えられる窒素励起分子イオンの回転準位占有密度分布はアルゴン気体分子温度すなわち放電気体温度にほぼ等しいため、他の二つより低く現れた。また窒素第二正帯の上準位の振動量子数  $v \geq 2$  では準安定原子の影響がないため回転温度は低くなり、放電電流とともに増加する結果が得られた。これらのことから衝突励起過程にアルゴン励起原子が影響していることが確かめられる。

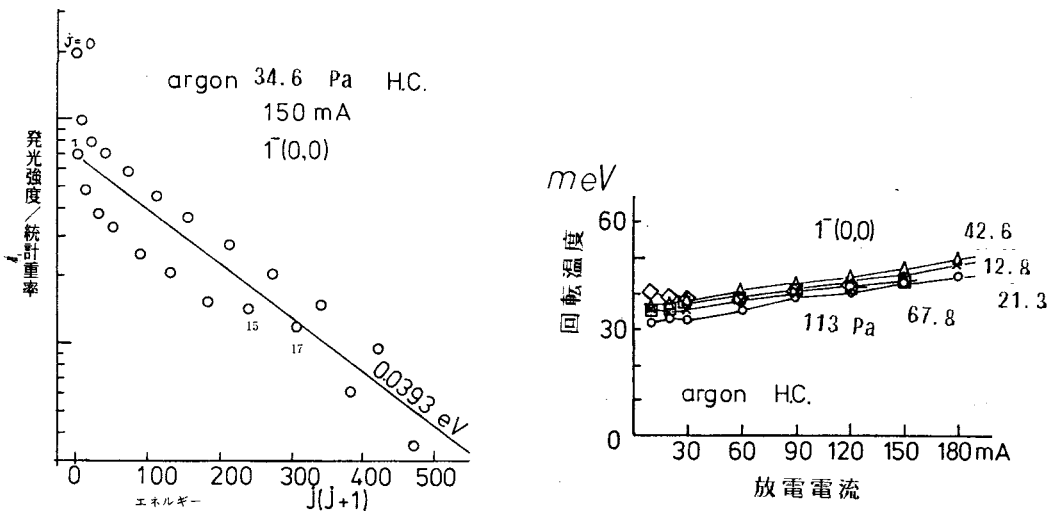


図10 窒素第一負帯(0,0)のボルツマン・プロットと回転温度の放電電流依存性

### 3.2 アルゴングロー放電への窒素と水の影響

アルゴングロー放電への窒素と水の影響について考える。気体放電では準安定準位の重要性が指摘され、その励起準位モデルとして図11に示すものを採用する。<sup>15)</sup> 低気圧グロー放電中の電子供給源は基底準位からの直接電離に加えて、図中に二重線で示す準安定原子を介して行われるペニング電離や累積電離が重要な役割を果たしている事が知られている。これに対して分光測定結果よりアルゴン準安定原子は窒素や水の分子と反応してその数を減少させ放電に影響を与える事が考えられる。

さて、一様な軸方向電界をもつ円筒形陽光柱プラズマを考える。<sup>15)</sup> はじめにボルツマン方程式より得られた電子エネルギー分布関数より各種の電子輸送係数を計算する。次に図11で示した励起準位に対するレート方程式より占有密度や電子密度を計算し、陽光柱の電界と電流の関係が求まる。この時、各粒子の径方向損失は両極性拡散を仮定しその密度分布は零次のベッセル関数で近似した。

### 3.3 シミュレーション結果

アルゴン気圧20Paおよび約80Paについて、直径37mmの陽光柱プラズマを想定して不純物密度を窒素と水ともに0.1%とした場合の計算結果を図12に示す。<sup>16)</sup> 破線が不純物を含む場合で反応係数は、窒素 $0.36 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$  水 $1.40 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ を用いた。<sup>17)</sup> アルゴンの4s軌道に電子が励起した四つの準位(準安定1s5, 1s3と共鳴準位1s4, 1s2パッシェン記法)の占有密度と電子密度が示してある。放電電流の増加に対し電子密度は増加し、占有密度も同様であるが準安定準位については飽和が見られる。電界強度は電流に対し少しずつ減少し、不純物があると励起原子密度の減少に比例して電界は大きく増加しアルゴンの気圧が高い方が大きな影響を受けている事が分かる。

これに対し図11に気圧20Pa、直径37mm長さ96cmの陽光柱プラズマの占有密度と電界強度の測定結果を示す。<sup>18)</sup> 計算値と比べると測定した各占有密度は小さく表れているが、各量とも放電電流依存性はよく合っている。実験時には真空系の脱ガスが不良で不純物含有量(特に水分)は前述のアルゴンの規格値より大きいと考えられる。不純物の増加は4s占有密度の減少と電界強度の増加をすることから、実験と計算が定性的には一致していると考えられる。

以上の結果から不純物の窒素や水は放電特性に次のようにして影響を与える。これらの不純物はアルゴン準安定原子から励起エネルギーを吸収し光量子として放電外部に放出する。累積電離の減

少は大きなエネルギーを要する直接電離で補われ、そのため外部から注入されるエネルギーを増やす必要がある。その結果電界強度の増加、放電電圧の増加となる。アルゴングロー放電に空気が混入した時放電電圧が高くなることは実験経験することである。

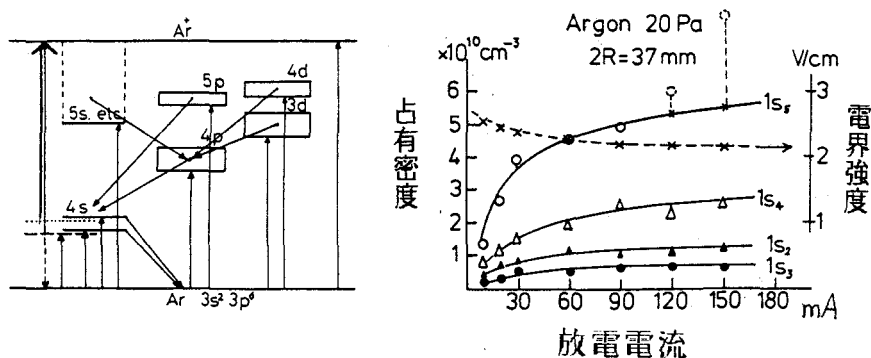


図11 使用したアルゴン励起準位のエネルギー準位モデルと陽光柱プラズマでの占有密度と電界強度の放電電流依存性(実験結果)

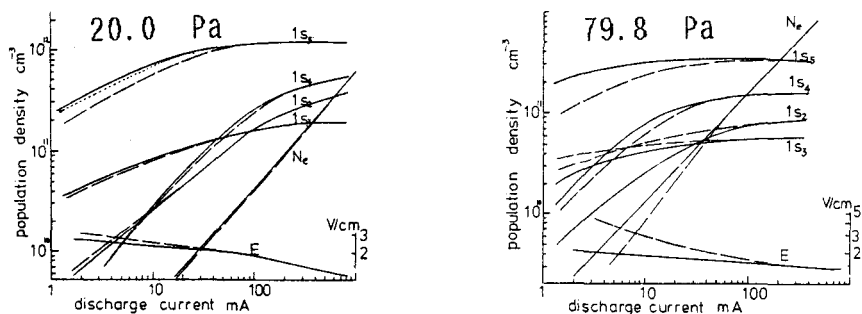


図12 アルゴン・グロー放電陽光柱プラズマ内の占有密度と電界強度の計算結果

#### § 4. まとめ

アルゴングロー放電の発光スペクトル分布より、放電気体中に混入する不純物として窒素と水(OH)がある事を確かめた。これらの分子帯の回転スペクトル分布と回転温度よりそれらの励起過程の中にはアルゴン準安定原子が寄与している物がある事がわかった。その影響は放電の電圧電流特性にも現れる事が陽光柱プラズマのシミュレーション結果からも確認された。

## 参考文献

- (1) G.R. Scheller, R.A. Gottscho, D.B. Graves, T. Intator: J. Appl. Phys. vol. 64(2) (1988) pp598-606
- (2) 電気学会編集：「放電ハンドブック」電気学会 (1978)
- (3) 稲場文男, 霜田光一他編集：「レーザーハンドブック」朝倉書店 (1973)
- (4) P. Blau, I. Smilaski: J. Appl. Phys. vol. 72(2) (1992) pp29-38
- (5) 塙輝雄編集：「実用真空技術総覧」産業技術サービスセンター (1990)
- (6) 山崎勉：呉高専研究報告vol. 27(1) (1991) pp19-26；同vol. 27(2) (1992) pp29-38
- (7) 山崎勉 呉高専研究報告vol. 28(1) (1992) pp117-125
- (8) 山崎勉 呉高専研究報告vol. 28(2) (1993) pp63-72
- (9) 山崎勉 呉高専研究報告vol. 29(1) (1993) pp65-73
- (10) G. Herzberg: "Spectra of Diatomic Molecules" 2nd ed. Van Nostrand Reinhold Company (1950)
- (11) H.S.W. Massey: "Electronic and Ionic Impact Phenomena III" Clarendon Press (1971)
- (12) A.A. Radzig, B.M. Smirnov: "Reference Data on Atoms, Molecules and Ions" Springer-Verlag (1989)
- (13) H. Kirkici, D. Bruno, J. Preiss, G. Schaefer: J. Appl. Phys. vol. 67(10) (1991) pp6041-6044
- (14) G. Herzberg: "Electronic Spectra and Electronic Structure of Polyatomic Molecules" Van Nostrand Reinhold Company (1966) p469
- (15) C.M. Ferreira, J. Loureiro, A. Ricard: J. Appl. Phys. vol. 57(1) (1985) p85-90
- (16) 山崎勉 呉高専研究報告vol. 21(2) (1986) pp39-50
- (17) 山崎勉 呉高専研究報告vol. 29(2) (1994) pp21-30
- (18) 山崎勉 呉高専研究報告vol. 27(2) (1992) pp29-38

(平成 8 年11月25日受付)



# 長鎖脂肪酸の嫌氣的分解過程における硫酸塩還元細菌と メタン生成細菌の基質競合

(環境都市工学科) 山口隆司, 市坪 誠

(長岡技術科学大学) 原田秀樹

(高知工業高等専門学校) 山崎慎一

## Competition between Sulfate-Reducing Bacteria and Methane-Producing Bacteria in Anaerobic Degradation of a Long-Chain Fatty Acid.

(Department of Civil Engineering) Takashi YAMAGUCHI and Makoto ICHITSUBO

(Nagaoka University of Technology) Hideki HARADA

(Kochi National College of Technology) Shinichi YAMAZAKI

Contribution of sulfate-reducing bacteria (SRB) as a hydrogen- and a acetate-decomposer in anaerobic degradation of a long-chain fatty acid was investigated by the comparison with methane-producing bacteria (MPB). The two kinds of sludge were cultivated in a fill-and-draw mode by feeding with palmitate as a major carbon source (feeding concentration :  $1.0 \text{ g-COD} \cdot \ell^{-1}$ ) in two completely stirred tank reactors, but without sulfate (R1) and with sulfate (R2, sulfate concentration :  $0.3 \sim 1.2 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$ ).

Characteristics of the sludge cultivated for 6 months was the following : 1) activity ratio of sulfate-reducing to methane-producing (COD equivalent) was evaluated, 0.0019 on R1 and 12 on R2 for hydrogen, 0.004 on R1 and 0.005 on R2 for acetate. 2) ratio of coenzyme F<sub>420</sub> content of R2 to R1 was decreased to 1/8.1 with the cultivation time. 3) The MPN ratio of SRB to MPB utilizing hydrogen for R1 and R2 were  $1/10^{3.6}$  and  $10^{2.0}$ , respectively. Using acetate the values were  $1/10^{2.1}$  for R1 and  $1/10^{1.7}$  for R2.

As for R1, symbiosis between proton-reducing acetogens (PRA) and MPB performed a degradation of palmitate, but the contribution of SRB to decomposition of hydrogen and acetate was negligibly. For R2, SRB acquired a niche as a hydrogen-scavenger, and it decomposed palmitate by symbiosis with PRA.

Key Words : anaerobic digestion, competition, long-chain fatty acid, methane-producing bacteria, sulfate-reducing bacteria

嫌氣性消化, 競合, 長鎖脂肪酸, メタン生成細菌, 硫酸塩還元細菌

### §1. はじめに

水圏環境に広く且つ高い割合で存在することが知られてる<sup>1,2)</sup> 硫酸塩還元細菌(Sulfate-reducing bacteria, SRB)の生育・生態特性を把握することは, 水質制御を行う上で重要と考えられるようになってきている。著者らは, これまで, 嫌氣的環境下における硫酸塩還元細菌の生態学的役割について検討を行ってきた。

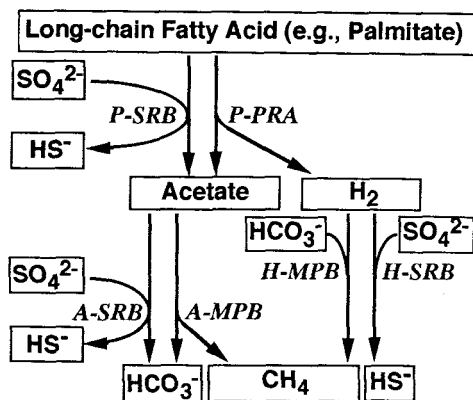


Fig.1 Schematic of anaerobic degradation for long-chain fatty acid (e.g., palmitate).

既報<sup>1)</sup>では、長鎖脂肪酸(Long-chain fatty acid, LFA)の直接酸化(酢酸生成)に対するSRBの寄与について評価を行った。既報<sup>1)</sup>の実験では、パルミチン酸(自然界での存在割合が最も高い飽和長鎖脂肪酸<sup>3)</sup>、炭素数16)を同一の主要炭素源( $1.0\text{gCOD}\cdot\ell^{-1}$ )とし、異なる硫酸塩負荷( $600, 300, 0\text{mgSO}_4^{2-}\cdot\ell^{-1}$ )で3種の汚泥を培養して、その汚泥をバイアル回分実験に供した(Fig.1にパルミチン酸分解過程の概要図を示す。図中の略号配下の通り：P-、パルミチン酸；H-、水素；A-、酢酸；PRA、水素生産性酢酸生成細菌(Hydrogen-producing proton-reducing acetogen)；MPB、メタン生成細菌(Methane-producing bacteria)。その結果から次の2点を提示した。(1)硫酸塩存在下でパルミチン酸分解が、3者のトロフィックグループで遂行されること(①パルミチン酸資化性PRA(Palmitate-utilizing PRA, P-PRA)と水素資化性SRB(Hydrogen-utilizing SRB, H-SRB)の共生系、②P-PRAと水素資化性MPB(Hydrogen-utilizing MPB, H-MPB)の共生系、③パルミチン酸資化性SRB(Palmitate-utilizing SRB, P-SRB)、(2)トロフィックグループ①～③のパルミチン酸分解寄与度が、以下のように整理できること；硫酸塩負荷 $600\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ の培養系：①が卓越し、②、③のそれぞれ2倍程度となった；硫酸塩負荷 $300\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ の培養系：②、①、③の順で優勢で、②は③よりワンオーダー高かった；硫酸塩負荷ゼロの培養系：②のみが卓越し、①と③の寄与は無視できる程度であった。

SRBの生態に関する報告は未だ乏しいが、LFA分解環境にSRBを考慮した報告に至っては皆無に等しい状況である。

そこで、本報では、LFA直接酸化について評価した既報<sup>1)</sup>の続報として、LFA分解過程における水素・酢酸除去に対するSRBの生態学的位置をMPBのそれと比較して検討した。実験では、先ず、パルミチン酸を既報<sup>1)</sup>と同様に分解対象LFAに用い、硫酸塩添加系・無添加系の2基の完全混合型反応器で汚泥を培養した。次いで、培養汚泥を、(1)バイアル活性試験、(2)補酵素F<sub>420</sub>含量測定試験、(3)菌数計数試験に供した。

## §2. 実験装置・方法

### 2.1 実験装置・培養方法

実験には汚泥培養槽として2基の嫌気性完全混合型反応器(以下、R1、R2と称す。共に有効容積 $10\ell$ 、 $35^\circ\text{C}$ 恒温室内に設置)を用いた。R1とR2の培養条件の主な相違点は、硫酸塩負荷にあり、R1は硫酸塩無添加系、R2は硫酸塩添加系(硫酸塩は、培養期間を通して濃度 $300\sim 1200\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ 程度

であった)とした。R2には、硫酸塩還元反応の結果生成する硫化物による保持汚泥活性の低下軽減を目的に、生成ガスを反応器気相部と脱硫カラム(容積2.0ℓ，酸化鉄ペレット(日産ガードラー触媒，N-IDS)を充填)間を循環させることで反応槽の硫化物を除去する脱硫装置を付加した(循環ガス流量：5ℓ・min<sup>-1</sup>；20min運転，40min停止サイクル)。

汚泥培養方式は半連続培養とし、基質供給をフィル・アンド・ドロー(fill and draw)操作により水理学的滞留時間が20日となるよう1日1回行った。炭素源には、パルミチン酸1.0 gCOD・ℓ<sup>-1</sup>と酵母エキス0.10 gCOD・ℓ<sup>-1</sup>を供した(基質供給時濃度)。R2への硫酸塩の添加は、硫酸水溶液を用いてパルミチン酸の投入と同時にを行った。また、培地は、リン酸緩衝液25mM(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>とK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>で構成，pH7.0)と微量元素(既報<sup>1)</sup>)に同じ)を含み構成した。培養におけるpHを、7.0±0.3に保つため適時、塩酸と水酸化ナトリウム水溶液をpH調整に用いた。

種汚泥には、当研究室で長期間運転している182ℓ容量のUASB反応器(原廃水：牛乳，入基質濃度 3800 mgCOD・ℓ<sup>-1</sup>，硫酸塩濃度 25 mg・ℓ<sup>-1</sup>，容積負荷 6 kgCOD・m<sup>-3</sup>・d<sup>-1</sup>，COD除去率 90 %以上，35℃)から採取したグラニュール汚泥を用いた。グラニュール汚泥は嫌氣的条件下で分散処理しR1，R2共に 11 gVSS・ℓ<sup>-1</sup> liq. vol.で植種した。

## 2.2 メタン生成・硫酸塩還元活性試験の方法

培養期間中適時、種汚泥と培養汚泥に対して、パルミチン酸，酢酸，水素をテスト基質としてメタン生成活性および硫酸塩還元活性を評価した。汚泥を遠心分離により洗浄後，培地(リン酸緩衝液，無機塩，還元剤，酸化還元指示薬等を含む)が分注してあるバイアルに供し，35℃恒温とし，テスト基質を添加，ガスの量と組成，有機物濃度，硫酸塩濃度を経時的に測定した(詳細手順は既報<sup>1)</sup>参照)。ただし，活性試験で硫酸塩を投与する場合には，硫酸塩供給制限とならないように，また，微生物群の分解能を考慮して適宜初期濃度を300～1000 mgSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>・ℓ<sup>-1</sup>とした。

## 2.3 補酵素F<sub>420</sub>含量測定

補酵素F<sub>420</sub>含量測定方法は，種々<sup>4,5)</sup>あるが本研究では，Dolfing ら<sup>5)</sup>の方法を若干改良して行った(試薬濃度は，Dolfing らの方法に従い，希釈操作を改良した)。J Dolfing らの方法では，2 ml の試料を用いて精度±10%で補酵素F<sub>420</sub>が測定可能と報告されている。これに対して，筆者らの分析における標準誤差は，濃度1 gVSS・ℓ<sup>-1</sup>の汚泥を4，8，12，16 mlを供する場合，それぞれ，14，2，2，2 % (各供試汚泥量，n = 3)であった。このため，本実験では，8 mlの汚泥を分析に供した。補酵素F<sub>420</sub>含量は，分光蛍光光度計で，励起波長420nm，吸収波長470nmにおける蛍光強度を測定して求めた。

## 2.4 菌数計数

培養汚泥のパルミチン酸資化性細菌(培地に硫酸塩添加系及び無添加系の両系)，酢酸・水素資化性MPB，酢酸・水素資化性SRBの菌数をMPN法で計数した。計数操作は，曾らの方法<sup>6)</sup>に依った。ただし，培地の最終パルミチン酸濃度は，1 mM(737 mgCOD・ℓ<sup>-1</sup>)<sup>7)</sup>とした。また，パルミチン酸を炭素源とする培地には，塩化カルシウムを最終濃度 2.5 mM(278 mg・ℓ<sup>-1</sup>)となるように添加した<sup>8,9)</sup>。

## 2.5 走査電子顕微鏡観察

培養汚泥を遠心分離(4350×G,10min)により回収後，グルタルアルデヒド溶液で固定，エタノールシリーズで脱水，臨界点乾燥，金蒸着の操作を順に行い，観察に供した(詳細は珠坪らの方法<sup>10)</sup>に依った)。

## 2.6 分析方法

分析方法是以下の通り；補酵素F<sub>420</sub> 蛍光強度(日立F-4000形分光蛍光光度計，励起波長420nm，吸収波長470nm)；ナトリウムイオン(原子吸光度計，島津 AA-630-12)。ガス組成，揮発性脂肪酸，長鎖脂肪酸及び硫酸塩の分析は，既報<sup>1)</sup>と同様である。また，他の分析は下水試験方法<sup>11)</sup>に従った。

## §3. 結果及び考察

### 3.1 汚泥の培養

Fig. 2, Fig. 3 に，それぞれ，R1 とR2 の回分毎のパルミチン酸分解能(Fig.a)，メタン生成能と硫酸塩還元能(Fig.b，硫酸塩還元能はR2 のみ)，回分終了時槽内酢酸濃度とナトリウムイオン濃度(Fig.c)，回分終了時槽内溶存水素濃度(Fig.d)の経日変化を示す。

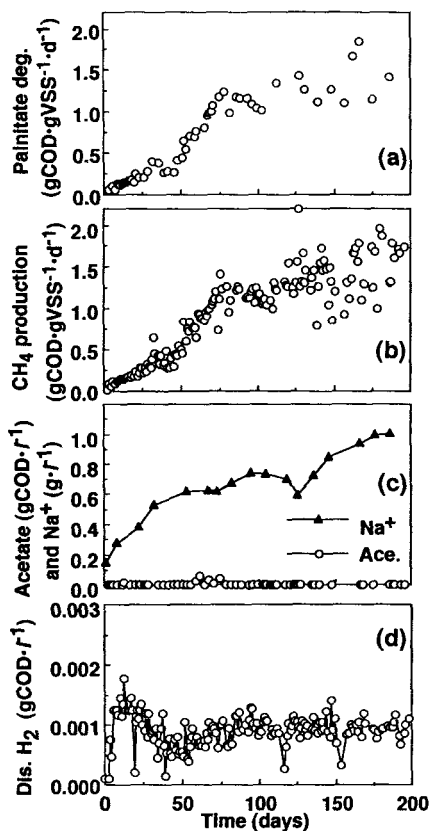


Fig.2 Cultivation of R1 (without sulfate).

- Palmitate degradation rate in batch period.
- Methane production rate in batch period.
- Acetate and sodium concentration.
- Disolved hydrogen concentration.

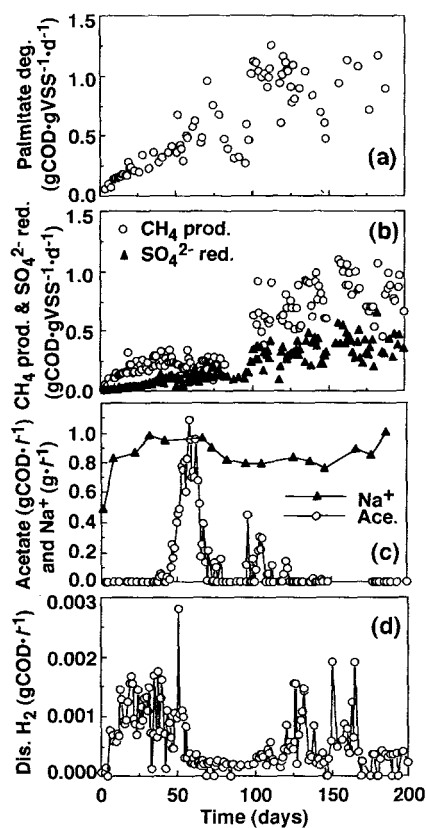


Fig.3 Cultivation of R2 (with sulfate).

- Palmitate degradation rate in batch period.
- methane production rate and sulfate reduction rate as COD equivalent in batch period.
- Acetate and sodium concentration.
- Disolved hydrogen concentration

パルミチン酸分解能 (Fig.a,  $\text{gCOD} \cdot \text{gVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) は、培養を通して上昇傾向にあり、培養100日以降においてR1では1.0~1.6, R2では0.8~1.2を許容した。R1, R2共にメタン発酵がなされ (Fig.b), R2では硫酸塩還元反応も進行した (Fig.2-b)。尚, R2の硫酸塩濃度は、培養期間を通して300~1200  $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$  程度であり (データ不提示)、供給制限となっていなかった。即ち、培養における増殖制限因子は電子供与体であった。VSS/SS比は、種汚泥で0.90であったが、R1で運転150日頃までに0.5にまで低下し、R2で70日頃までに0.6にまで低下しそれぞれ一定となった。反応槽内pHは、200日の運転期間を通してR1, R2共に $7.0 \pm 0.3$ であった。

R2では、運転経過日数50~70日の期間、メタン生成能が低下し、反応槽内に酢酸が蓄積 (Fig.2-c) した。この原因には、①過負荷なパルミチン酸投与による吸着阻害と、②硫化物蓄積の2点が考えられたため、経過日数50~80日の期間、水理学的滞留時間を定常時の3倍程度 (60日) とし (容積負荷低減措置)、また、61日目から脱硫装置の循環通風量を2倍に増加 (20min運転, 10min停止サイクル;  $5 \ell \cdot \text{min}^{-1}$ ) した (硫化物除去措置)。これらの措置によりメタン生成能は回復した。メタン生成能低下の主因は、①の吸着阻害と考えられる。なぜなら、メタン生成能が低下した初期のR2のパルミチン酸供与メタン生成活性 (詳細後述) が0.37 (42日目), 0.42 (52日目)  $\text{gCOD} \cdot \text{gVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  であったのに対して、R2の培養における汚泥負荷は、0.38 (42日目), 0.51  $\text{gCOD} \cdot \text{gVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (53日目) と高負荷となっていた。

### 3.2 硫酸塩還元反応によるCOD除去割合

Fig. 4に、R2の運転における総COD除去量に対する硫酸塩還元反応によるCOD除去量の割合の経日変化を示す。ここで、総COD除去量とは、硫酸塩還元反応によるCOD利用量とメタン生成量の和であり、Fig. 3-bを基に算出した。硫酸塩還元反応によるCOD除去量の割合は、70日目頃まで増加し、その後 $0.325 \pm 0.049$  (70日以降の平均±標準偏差) で推移した。量論式(1)式に従えば、パルミチン酸が不完全酸化した場合、分解CODの69.6%が酢酸に、30.4%が水素に分解される。

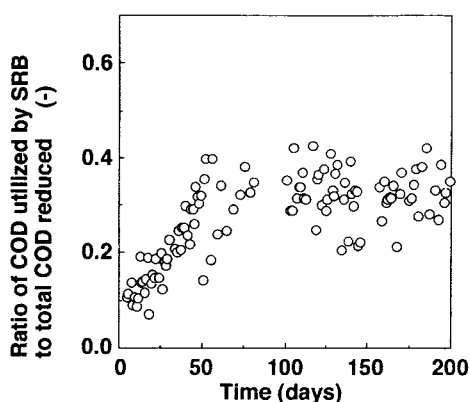
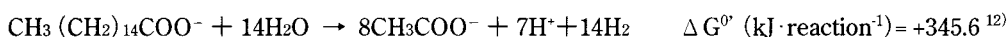


Fig.4 Ratio of COD utilized by SRB to total COD reduced in R2 operation.

(1)本実験で得られた硫酸塩還元反応によるCOD除去量の割合0.325は、水素経由で代謝されるCODの割合0.304に近似であった。このことから、パルミチン酸分解過程においてSRBがH<sub>2</sub>-scavenger(水素除去者)として寄与したことが示唆される。既報<sup>1)</sup>の培養汚泥(培養条件:パルミチン酸濃度1.0gCOD・ℓ<sup>-1</sup>, 硫酸塩濃度600 mg・ℓ<sup>-1</sup>)における、硫酸塩還元反応によるCOD除去量の割合も、培養80日間を通して0.26±0.11(平均±標準偏差)と、3割程度のレベルであった。また、同培養汚泥でH-SRBは、H<sub>2</sub>-scavengerとしてH-MPBより優勢であった。

### 3.3 硫酸塩還元活性

Fig. 5に硫酸塩還元活性(Sulfate-reducing activity, SRA)評価実験の結果を示す。148, 183日目は、各汚泥毎にバイアル活性実験を3回行い、平均と標準偏差を求めた。テスト基質のなかでR2の水素資化性硫酸塩還元活性(Hydrogen-utilizing SRA, H-SRA)は顕著に増加し、運転148日目では、パルミチン酸供与硫酸塩還元活性、酢酸資化性硫酸塩還元活性(Acetate-utilizing SRA, A-SRA)に対していずれも11倍に達した。この結果から、SRBがパルミチン酸の分解課程において主にH<sub>2</sub>-scavengerとしてのニッチを獲得することが明らかとなった。

Table 1に、報告されている水素と酢酸を電子供与体としたSRAとSRA/メタン生成活性比(SRA/MPA比)を示す。パルミチン酸分解に関与するH-SRBの活性(gCOD・gVSS<sup>-1</sup>・d<sup>-1</sup>)は、既報(Table 1中, Ref. 1)では0.13~0.14(硫酸塩添加培養系, 培養44日目)であったのに対して、本報では同時期においてFig. 5のように、0.33(R2, 32日目), 0.54(R2, 42日目)と高かった。この原因には、本実験のHRT(20日)が既報のHRT(40日)よりも短く、硫酸塩存在下でパルミチン酸分解を行う菌叢形成が進んでいたことが考えられる。

Table 1のSRAから、汚泥性状(グラニュール/分散汚泥)に関わらず混合培養系でSRBは、酢酸よりも水素除去に寄与しやすいことがわかる。また、SRA/MPA比より、SRBがMPBに代わって基質分解者としてのニッチを獲得する供給基質のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/COD比は、酢酸、水素に対してそれぞれ120以上(反応槽の脱硫操作を行わない場合)、30以上と推察できる。

Table1 Sulfate-reducing activities for hydrogen and acetate as electron acceptor in this study and presented literature.

Cultivation Reactor	Cultivating period	Temp. (°C)	Fed organics (mgCOD・ℓ <sup>-1</sup> , composition)	Fed SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /COD (g/g, %)	Estimation <sup>a)</sup> Temp. (°C)	Sulfate-reducing activity as COD equivalent (gCOD・gVSS <sup>-1</sup> ・d <sup>-1</sup> )		SRA/MPA ratio <sup>b)</sup> (-)		Ref.
						hydrogen	acetate	hydrogen	acetate	
UASB	long term	35	500 (starch:sucrose=1:1)	6	35	0.35	0.10	0.42	0.081	37
UASB	long term	35	500 (starch:sucrose=1:1)	30	35	1.56	0.35	3.5	0.25	
UASB	long term	35	500 (starch:sucrose=1:1)	120	35	2.28	0.43	114	2.9	
UASB	6 months	35	2000 (suc:prop:ace:pep) <sup>e)</sup>	5	35	0.36	0.0075	0.36	0.0060	38
UASB	6 months	35	2000 (suc:prop:ace:pep) <sup>e)</sup>	150	35	0.30	0.21	MPA=0 <sup>g)</sup>	MPA=0	
digester	- <sup>c)</sup>	meso. <sup>d)</sup>	- (domestic wastewater)	-	35	0.14	0.0025	0.97	0.058	
UASB	12 months	25	500 (cellulose:suc:pep=5:18:2)	20	25	0.50 ~ 0.51	0.01 ~ 0.05	1.0	0.15~0.02	39
UASB	18 months	35	3800 (commercial milk)	0.7	35	0.16	0.0044	0.10	0.013	1
CSTR	44 ~ 52 d.	35	1100 (palmitate:yeast=10:1) <sup>f)</sup>	0	35	0.038	0.0037	0.023	0.0074	
CSTR	44 ~ 52 d.	35	1100 (palmitate:yeast=10:1) <sup>f)</sup>	27	35	0.13	0.0055	0.11	0.011	
CSTR	44 ~ 52 d.	35	1100 (palmitate:yeast=10:1) <sup>f)</sup>	55	35	0.14	0.0015	0.16	0.0050	
UASB	30 months	35	3800 (commercial milk)	0.7	35	0.044	0.008	0.022	0.022	This
CSTR 1	6 months	35	1100 (palmitate:yeast=10:1)	0	35	0.019	0.008	0.0019	0.0041	study
CSTR 2	6 months	35	1100 (palmitate:yeast=10:1)	109~27	35	1.15	0.01	12.4	0.0053	

<sup>a)</sup> In estimation, either disintegrated or dispersed sludge was used.

<sup>b)</sup> ratio of sulfate-reducing activity to methane-producing activity as COD equivalent.

<sup>c)</sup> not reported. <sup>d)</sup> mesophilic.

<sup>e)</sup> 2000(sucrose:propionate:acetate:pepton = 45 : 22.5 : 22.5 : 10), <sup>f)</sup> HRT 40days. <sup>g)</sup> methane-producing did not occur.

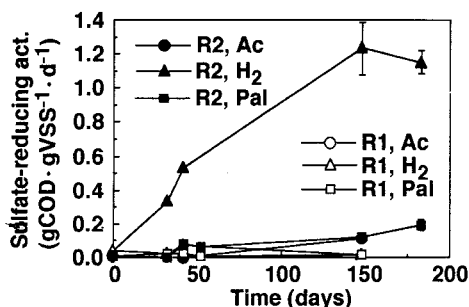


Fig.5 Variation of sulfate-reducing activity from palmitate, hydrogen and acetate for R1 and R2.

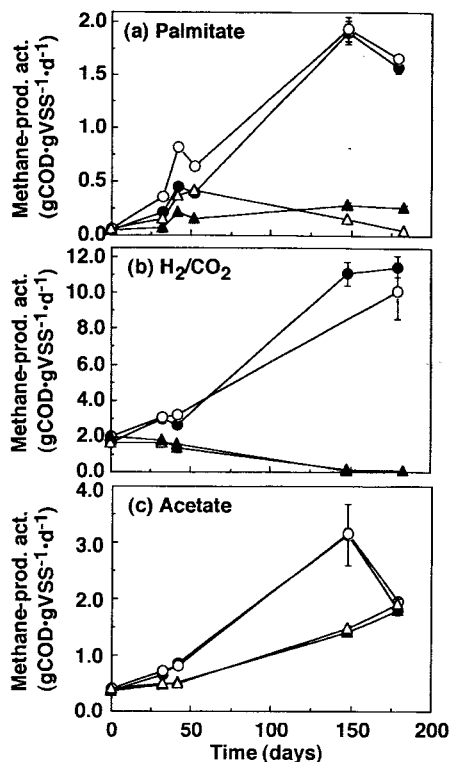


Fig.6 Variation of methane-producing activity from palmitate, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and acetate for R1 and R2.

● R1, with SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>      ○ R1, with SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>  
 ▲ R1, with SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>      △ R1, with SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

### 3.4 メタン生成活性

Fig. 6 に、各テスト基質に対して硫酸塩添加系と無添加系のメタン生成活性(Methane-producing activity, MPA)を、R1 とR2 について評価した結果を示す(Fig. 6-a：パルミチン酸供与メタン生成活性, Fig. 6-b：水素資化性メタン生成活性(Hydrogen-utilizing MPA, H-MPA), Fig. 6-c：酢酸資化性メタン生成活性(Acetate-utilizing MPA, A-MPA)。148, 183日目は、各汚泥毎にバイアル活性実験を3回行い、平均と標準偏差を求めた。

R1 の MPA は、3 種のテスト基質ともに種汚泥から上昇傾向を示した。即ち、R1 ではパルミチン酸資化性 PRA と MPB の共生系が卓越し、パルミチン酸分解を行った。

一方、R2 のパルミチン酸供与MPA の時間変遷をみると、硫酸塩添加系 MPA は上昇傾向であったが、硫酸塩無添加系 MPA は、52日目まで上昇した後に低下した。培養52日目では無添加系 MPA が添加系 MPA の 2.7 倍と高かったが、その後の培養で硫酸塩添加系 MPA の方が高くなった(培養 148, 183日目で、それぞれ、無添加系 MPA の 1.9, 5.0 倍となった)。この結果から、R2 では培養によって SRB がパルミチン酸からのメタン前駆物質生成に寄与するようになったことがわかる。

R2のH-MPAは、培養の経過にともなって低減し、148日目では $0.0 \text{ gCOD} \cdot \text{gVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ にまで駆逐された。この結果は、H-SRBが培養によって優勢となったこととは対称的であり、 $\text{H}_2$ -scavengerがH-MPBからH-SRBにシフトしたことをよく説明するものである。R2のA-MPAは、培養期間中上昇し続け、183日目ではR1のA-MPAと同程度のレベルとなった。MPBが酢酸分解者として卓越した結果は、水素基質に関してH-MPBがH-SRBに駆逐されたこととは対称的である。

### 3.5 メタン生成活性とパルミチン酸負荷の関係

ここで、本活性試験で評価されたMPAのレベルに注目する。

まず、本実験において、パルミチン酸供与MPAが、培養におけるメタン生成能(Fig.2, 3-a)よりも低く評価されたことに注目する。パルミチン酸供与MPAが低く評価された原因には、活性試験時のパルミチン酸供与濃度( $0.5 \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$ )が、培養時のパルミチン酸供与濃度( $1.0 \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$ )より低かったことが挙げられる。即ち、培養における基質量/生物量の比(F/M比)は、培養73日目以降において、R1, R2で、それぞれ、 $1.6, 1.3 \text{ gCOD-Palmitate/gVSS}$ 、これに対して、MPA試験(183日目)におけるF/M比は、R1, R2でそれぞれ、 $0.38, 0.34 \text{ gCOD-Palmitate/gVSS}$ と低かった。

Fig.7にR1(133日目)とR2(135日目)の培養汚泥について、F/M比とMPAとの関係の評価した結果を示す(バイアル内のVSS濃度( $\text{g} \cdot \ell^{-1}$ )は、R1で $0.538 \pm 0.099$ (バイアル相互の平均±標準偏差)、R2で $0.609 \pm 0.047$ であった)。MPAは、F/M比によって大きく変動しており、F/M比が1.8で最大MPA、F/M比が0.5(R2について)および4で最大MPAの5割となった。Rinzemaら<sup>13)</sup>は、カプリン酸供与MPAが初期カプリン酸濃度に依存することを報告している。また、Hanakiら<sup>14)</sup>は、LFAのように吸着性のある基質の分解速度は、基質濃度自体よりもF/M比により強く依存することを指摘している。

次に、 $\text{H}_2$ -scavengerとしてH-MPBが卓越したR1のH-MPAレベルに着目する。R1のH-MPBは、6ヶ月間の培養を通して $11 \text{ gCOD} \cdot \text{gVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ という高いレベルにまで上昇した。このH-MPAのレベルは、H-MPBが本来有しているH-MPA(Table 2中の $V_m$ 、および、Table 4中H-MPA(Bacterium欄)参照)のオーダーといえる。この結果から、本実験のように完全混合型反応器で培養された分散汚泥の方が、UASB反応器で培養されたグラニューール汚泥(Table 4中H-MPA(Sludge欄)参照)よりも、高いH-MPAを発現する傾向にあることが示された。

R1, R2のA-MPAは、培養を通して、 $2.0 \text{ gCOD} \cdot \text{gVSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ のレベルにまで上昇した。混合型反応槽で培養された分散状汚泥のA-MPAが、グラニューール汚泥のA-MPAよりも高くなる傾向は、既往の報告にもみられる(Table 3中No.15~No.26の $V_m$ を参照)。

曾ら<sup>15)</sup>は、異なる直径のグラニューール汚泥をメタン生成活性試験に供して、MPAの大小の差異が、グラニューール内部での基質拡散に起因していることを報告している。Grotenhuisら<sup>16)</sup>は、培地のプロピオン酸と酢酸基質濃度がMPAに与える影響を評価し、基質濃度が低いときにはMPAが低下することと、グラニューール内部に死滅菌体が存在することを報告している。グラニューール汚泥の代謝活性が低い理由には、基質供給律速によって、死滅菌体が分散状汚泥よりも高い割合で存在していることが考えられる。また、グラニューール内部のpH分布や基質拡散がマイクロセンサーを用いて測定され、グラニューール内部で微生物活性が様でないことも報告されてきている<sup>17,18,19)</sup>。

### 3.6 硫酸塩還元細菌とメタン生成細菌の水素利用特性

メタンの前駆物質である水素と酢酸に対してSRBがMPBと競合し、優勢となる機構については、これまで、基質親和定数 $K_m$ と最大基質分解速度 $V_m$ の動力学的特性を基に説明されている<sup>1,20~23)</sup>。Table 2とTable 3に、それぞれ、水素利用、酢酸利用のSRBとMPBの動力学定数を示す。



Table2 Kinetic parameters in literature for hydrogen-utilizing SRB and MPB.

No.	Bacterium and Sludge	Temp. (°C)	K <sub>m</sub> (gCOD·l <sup>-1</sup> )	V <sub>m</sub> <sup>a)</sup> (gCOD·gVSS <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	V <sub>m</sub> /K <sub>m</sub> (l·gVSS <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	Na <sup>+</sup> conc. <sup>b)</sup> (g·l <sup>-1</sup> )	Ref.
<b>SRB</b>							
1	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	37	3.0×10 <sup>-5</sup>	0.68	2.3 ×10 <sup>4</sup>	3.2	21,23,40
2	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	37	2.9×10 <sup>-5</sup>	2.03	7.0 ×10 <sup>4</sup>	3.2	
3	<i>Desulfovibrio</i> G11	37	1.8×10 <sup>-5</sup>	1.27	7.1 ×10 <sup>4</sup>	3.2	
4	<i>Desulfovibrio</i> PS1	37	1.1×10 <sup>-5</sup>	1.27	11.5 ×10 <sup>4</sup>	3.2	
5	<i>Desulfovibrio</i> DG2	37	2.2×10 <sup>-5</sup>	0.54	2.5 ×10 <sup>4</sup>	3.2	
<b>MPB</b>							
6	<i>Methanospirillum hungatei</i> JF1	37	8.0×10 <sup>-5</sup>	1.61	2.0 ×10 <sup>4</sup>	3.2	21,23,40
7	<i>Methanospirillum</i> PM1	37	4.0×10 <sup>-5</sup>	2.07	5.2 ×10 <sup>4</sup>	3.2	
8	<i>Methanospirillum</i> PM2	37	6.6×10 <sup>-5</sup>	0.15	0.23×10 <sup>4</sup>	3.2	
9	<i>Methanosarcina barkeri</i> MS	37	21. ×10 <sup>-5</sup>	2.53	1.2 ×10 <sup>4</sup>	3.2	
10	<i>Methanobrevibacter smithii</i>	37	1.8×10 <sup>-5</sup>	90	500. ×10 <sup>4</sup>	1.2	41,42
11	<i>Methanobrevibacter arborophilus</i>	35	10.6×10 <sup>-5</sup>	46.1	44.0 ×10 <sup>4</sup>	1.04	20
12	<i>Methanobrevibacter arborophilus</i>	33	60. ×10 <sup>-5</sup>	35. <sup>b)</sup>	5.8 ×10 <sup>4</sup>	1.6	43,44

a) Originally reported in nmol·min<sup>-1</sup>·mg protein<sup>-1</sup>, assuming a protein content of 0.5 g·gVSS<sup>-1</sup>.

b) Sodium concentration in medium for estimation of kinetic parameters.

c) estimated as  $\mu_{\max} \cdot Y^{-1}$ .

Table3 Kinetic parameters in literature for acetate-utilizing SRB and MPB.

No.	Bacterium and Sludge	Temp. (°C)	K <sub>m</sub> (gCOD·l <sup>-1</sup> )	V <sub>m</sub> (gCOD·gVSS <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	V <sub>m</sub> /K <sub>m</sub>	Na <sup>+</sup> conc. <sup>a)</sup> (g·l <sup>-1</sup> )	Ref.
<b>SRB</b>							
1	<i>Desulfobacter postgatei</i>	30	0.0041	4.76 <sup>b)</sup>	1161	4.7	37
2	<i>Desulfobacter postgatei</i>	30	0.0049	4.92 <sup>b)</sup>	1004	4.7	
3	SRB, biofilm (fed with acetate)	30	0.010	0.99	98	3.9~6.0	22
4	digester (fed with acetate)	31	0.0061	8.9	1456	1.2	45
5	digester (fed with acetate)	25	0.098	7.6	77	1.2	
6	digester (fed with acetate)	20	0.267	5.3	20	1.2	
<b>MPB</b>							
7	<i>Methanothrix soehngenii</i> GP6	37	0.054	1.487 <sup>b)</sup>	28	nr. <sup>e)</sup>	46
8	<i>Methanothrix soehngenii</i> FE	37	0.025	3.487 <sup>b)</sup>	140	nr.	
9	<i>Methanothrix soehngenii</i> MTAS	37	0.031	7.810 <sup>b)</sup>	252	nr.	
10	<i>Methanothrix soehngenii</i> MTKO	37	0.0749	4.473 <sup>b)</sup>	59.7	nr.	
11	<i>Methanothrix soehngenii</i> MTHI	37	0.0762	3.872 <sup>b)</sup>	50.8	nr.	
12	<i>Methanothrix soehngenii</i>	37	0.029	4.7 <sup>b)</sup> c)	162	1.2	25
13	<i>Methanosarcina barkeri</i>	37	0.257	8.6 <sup>b)</sup> c)	33	0.81	47
14	<i>Methanobacterium</i> sp.	30	0.011	4.47 <sup>b)</sup> c)	406	2.1	48,49
15	brewery granule	37	0.029	5.45	188	1.0	50
16	granule	35	0.110	8.1	74	nr.	
17	biofilm	30	0.0350	1.95	55.8	3.9~6.0	22
18	digester (acetate-enrich, SRT3.85d)	35	0.057	5.03	88.2	1.84	51
19	sludge	35	0.0792	20.1	253	nr.	52
20	sludge	35	0.197	9.13	46.4	0.46~8.0	30
21	sludge (acetate-enrich)	35	0.18	10	52	0.9	53
22	digester (acetate-enrich, SRT≥9.6d)	35	0.015	4.40	293	1.84	54
23	digester (acetate-enrich, SRT6.6d)	35	0.043	6.56	153	1.84	
24	digester (acetate-enrich, SRT4.6d)	35	0.421	11.6	27.6	1.84	
25	digester (acetate-enrich)	37	0.193	2.47 <sup>d)</sup>	12.8	nr.	55
26	digester (glucose-enrich)	37	0.198	0.666 <sup>d)</sup>	3.36	nr.	

a) Sodium concentration in medium for estimation of kinetic parameters.

b) gCOD·g(dry weight of cell)<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>.c) Estimated by  $\mu_{\max}/Y$ .d) Assuming a protein content of 0.5 g·gVSS<sup>-1</sup>.

e) not reported.

先ず, Table 2 に着目すると, 水素基質に関して H-SRB が H-MPB より高い基質親和性を有している傾向にあることがわかる<sup>20,21)</sup>。

動力学特性値  $V_m/K_m$  に依ってのみ水素利用の優先菌種が決定されるならば, Table 2 で優先菌種は, *Methanobrevibacter* sp. となる。しかしながら, 本実験では, H-SRB が優先種となった。*Methanobrevibacter* sp. が優勢となり得ない理由には, *Methanobrevibacter* sp. が硫化物に対する阻害耐性に乏しいことが挙げられる<sup>21)</sup>。Grotenhuis ら<sup>24)</sup>は, プロピオン酸を主要炭素源として UASB 反応器で培養したグラニュール汚泥中に *Methanobrevibacter arborophilus* AZ が H-MPB としてとても高い割合で存在することを報告しているが, この培養における培地中の硫化物は,  $6.4 \text{ mg S}^2 \cdot \ell^{-1}$  であった<sup>16,25,56)</sup>。また, Zehnder らは<sup>27)</sup>, *Methanobacterium* Strain AZ の増殖に至適な添加全硫化物濃度は,  $3.2 \sim 0.32 \text{ mg S}^2 \cdot \ell^{-1}$  と提示している。これらの硫化物濃度に対して, R2 の運転における全硫化物濃度(99日目)は,  $62 \text{ mg S}^2 \cdot \ell^{-1}$ , 溶解性硫化物濃度は,  $52 \text{ mg S}^2 \cdot \ell^{-1}$  と高かった。

Table 2 中の動力学定数をミカエリス・メンテン式に与えて, 水素濃度に対する基質利用活性の関係を解析すると(*Methanobrevibacter* sp. は硫化物耐性が低い(上述)ため解析では除く), 水素濃度  $3 \times 10^4 \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$  程度を境界として, 高い水素濃度域で H-MPB が優勢となり, 低い水素濃度域で H-SRB が優勢となることが推測できる。この水素レベルに対して, 本実験の R1 の槽内水素レベルは, 運転期間を通して  $9.0 \times 10^4 \pm 2.5 \times 10^4 \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$  (平均±標準偏差) と高かった。一方, H-SRB が卓越した R2 の溶存水素濃度レベル ( $\text{gCOD} \cdot \ell^{-1}$ ) は, 運転 0~42 日, 43~148 日, 149~200 日の期間で, それぞれ,  $9.5 \times 10^4 \pm 4.7 \times 10^4$ ,  $4.5 \times 10^4 \pm 4.3 \times 10^4$ ,  $4.8 \times 10^4 \pm 4.6 \times 10^4$  と,  $K_m$  と  $V_m$  から求めた境界水素濃度 ( $3 \times 10^4 \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$ ) と同程度にまで低下する傾向を示した。培養経過に伴い R2 の槽内水素濃度が低下した理由には, 水素に対する基質親和性の高い H-SRB が, H-MPB に代わって  $\text{H}^2$ -scavenger の役割を果たすようになったことが考えられる。また, これら溶存水素濃度の結果 (Fig. 2, 3-d) から, H-MPB と H-SRB による保持水素レベルは, それぞれ,  $9 \times 10^4$ ,  $4 \times 10^4 \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$  程度と推察される。Isa ら<sup>2)</sup>は, 硫酸塩含有エタノール・酢酸混合基質を供した充填型嫌気性反応器内の水素濃度が  $6.4 \times 10^{-7} \sim 2.2 \times 10^{-5} \text{ gCOD} \cdot \ell^{-1}$  となると, SRB による COD 分解の割合は総除去 COD の 10~20% にまで達したことを報告している。

### 3.7 硫酸塩還元細菌とメタン生成細菌の酢酸利用特性

Table 3 を基に, SRB と MPB との酢酸基質競合に対する酢酸濃度の影響について, 本実験の酢酸濃度の場合を考察する。Table 3 の  $K_s$  と  $V_m$  を ミカエリス・メンテン 式に与えて, 酢酸濃度に対する基質利用活性の関係を解析すると, ①純粋培養系に着目した場合, 酢酸濃度  $40 \text{ mgCOD} \cdot \ell^{-1}$  以下では SRB (*Desulfovibacter postgatei*) が優勢に,  $40 \text{ mgCOD} \cdot \ell^{-1}$  以上では MPB (*Methanothrix soehngenii* MTAS) が優勢となること, ②混合培養系では, 酢酸濃度  $50 \text{ mgCOD} \cdot \ell^{-1}$  を境界にして, 低濃度域で SRB, 高濃度域で MPB が優勢とになることが推測できる。これに対して, R2 の回分終了時の酢酸濃度 ( $\text{mgCOD} \cdot \ell^{-1}$ ) は, 0~42, 43~149, 149~200 日の期間で, それぞれ,  $7.1 \pm 16.1$  (平均±標準偏差),  $186 \pm 280$  (同), 2 未満 (平均) であった。

R2 では, A-MPB の活性は上昇し続けたが, A-SRB は抑制されており酢酸の分解に寄与するようにはならなかった (R2, 148 日目の A-SRA / A-MPA = 0.0053 (0.01/1.90))。R2 で A-MPB が優勢となった原因には, ①R2 の運転中期において, 槽内酢酸濃度が,  $K_s$  と  $V_m$  から解析した境界酢酸濃度  $40 \sim 50 \text{ mgCOD} \cdot \ell^{-1}$  よりも高い傾向にあったこと (Fig. 3-c の酢酸濃度は回分終了時のレベルであり, パルミチン酸分解過程では酢酸濃度は更に高かったと考えられる), ②種汚泥中に A-SRB の存在が極めて少なく増殖に堪えないこと等が考えられる。

### 3.8 硫酸塩還元細菌・メタン生成細菌の増殖とナトリウムイオン濃度の関係

A-SRB が A-MPB を徐々に駆逐して優勢となる例は、自己固定型嫌気性反応器に硫酸塩含有人工排水(炭素源：酢酸<sup>22)</sup>、スターチとシュクロース<sup>23)</sup>)を供して汚泥を長期培養したケースにみられる。以下に、本実験の R2 において *Desulfobacter postgatei* のような基質親和性の高い SRB が優勢になり得なかった原因を、反応槽の運転におけるナトリウムイオン濃度が微生物増殖に与える影響に注目して考察する。

反応槽内のナトリウムイオン濃度は、R1 では運転期間を通して  $0.1 \sim 1.0 \text{ g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  にまで上昇して定常となった (Fig. 2-c)。R2 では、運転期間中  $0.8 \sim 1.0 \text{ g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  で一定であった (Fig. 3-c)。このナトリウムイオン濃度に対して、*Desulfobacter postgatei* 用培地<sup>28)</sup>の添加 NaCl 濃度は、 $12 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$  であった(動力学定数評価実験におけるナトリウムイオン濃度については、Table 2 と Table 3 中に示した)。*Desulfobacter postgatei* は、淡海水の水路の嫌氣的な底泥から単離された SRB であり、単離操作の過程では培地の添加塩化ナトリウム濃度が  $7.0 \text{ g NaCl} \cdot \ell^{-1}$  ( $2.75 \text{ g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$ ) とされていた(培地の最終ナトリウムイオン濃度は、培地にナトリウム種が NaCl の以外にあることから、 $4.5 \text{ g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  となっていた)<sup>29)</sup>。Widdel ら<sup>29)</sup> は、淡水性 SRB 培地の塩化ナトリウム濃度  $1.0 \text{ g NaCl} \cdot \ell^{-1}$  ( $0.39 \text{ g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$ ) の場合では、*Desulfobacter postgatei* 等の好淡塩水・海水性 SRB の増殖が高まらないことを報告している。

一方、*Methanothrix soehngii* は下水処理プラントの消化汚泥から単離された MPB で、その単離において総ナトリウムイオン濃度は、 $1.2 \text{ g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  であった。Kugelman<sup>30)</sup> らは、A-MPB に至適なナトリウムイオン濃度を  $230 \text{ mg Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  とし、Perski ら<sup>31)</sup> は、H-MPB (*M. bacterium* sp., *M. brevibacter arboriphilus*, *M. spirillum hungatii*, *M. sarcina barkeri*) のナトリウムイオンに対する基質飽和定数を  $10 \sim 25 \text{ mg Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  と報告している。*Methanobacterium formicicum* のメタン生成には  $350 \text{ mg Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  の濃度が要求されることが知られている<sup>32)</sup>。また、*M. thrix*, *M. sarcina* 等の MPB の代謝を 10, 50, 100% 阻害するナトリウムイオン濃度は海洋性 MPB を除いて一般に、それぞれ 4~6, 6~8, 8~10  $\text{g Na}^+ \cdot \ell^{-1}$  の範囲であると報告されている<sup>33,34)</sup>。

これらのことから、本実験の R1 と R2 の運転におけるナトリウムイオン濃度は、淡海水を好む微生物の生育には不向きであったが、淡水系微生物の生育に適したレベルといえる。このため、動力学的特性では優勢となり得る SRB も、MPB を駆逐できなかった。尚、純粋培養系で淡水性 SRB の酢酸利用のついての基質親和定数に関する報告は未だ無く、それらの動力学特性の知見の収集は、SRB と MPB の酢酸競合を説明するためにも期待されるものである。

### 3.9 補酵素 F<sub>420</sub> 含量の経日変化

Fig. 8 に R1, R2 の単位 VSS 当たりの補酵素 F<sub>420</sub> (以下 F<sub>420</sub> と略す) 含量を、種汚泥を 100 とした相対含量でとらえた結果を示す。また、Fig. 8-b は、Fig. 8-a の測定時毎の (R1 汚泥中の F<sub>420</sub> 含量) / (R2 汚泥中の F<sub>420</sub> 含量) を示す。F<sub>420</sub> は MPB 特有の補酵素であり、菌体質量当たりの F<sub>420</sub> 含量は、酢酸資化性メタン生成細菌よりも蟻酸・水素資化性メタン生成細菌に高い傾向のあることが知られている。また、蟻酸が電子供与体の場合、F<sub>420</sub> 含量と MPA は相関関係にあることも報告されている<sup>5,35)</sup>。Table 4 に種々の汚泥と MPB の F<sub>420</sub> 含量とメタン生成活性を示す。Fig. 8-a の F<sub>420</sub> 含量は R1 で上昇しており、R2 では上昇の後、70 日目頃から低減した。また、R1 に対する R2 の F<sub>420</sub> 含量の比 (Fig. 8-b) は、運転期間を通して上昇傾向にあり、187 日目には 8.1 となった。F<sub>420</sub> 含量の時間的変遷は、Fig. 6-b に示した H-MPA の経日変化とよく対応し、H-SRB が H-MPB を駆逐したことをよく説明している。

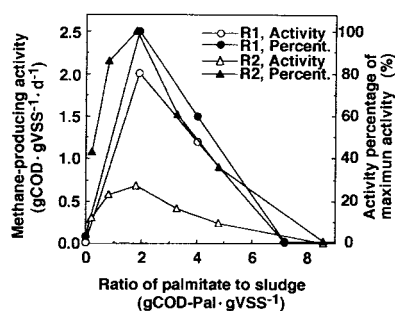


Fig.7 Relationship between palmitate-loading to sludge and methane-producing activity for R1 (133rd day) and R2 (135th day). The results are presented in percentage of the maximum activity.

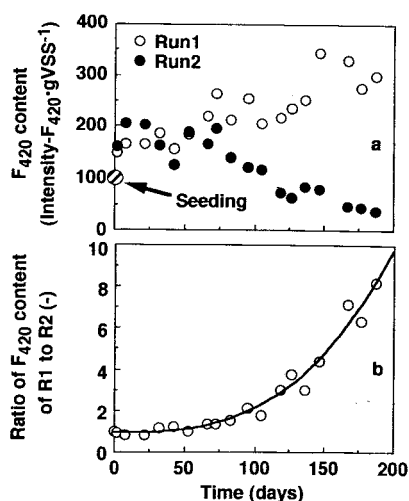


Fig.8 Variation of F<sub>420</sub> content of R1 and R2.  
(a) Intensity of F<sub>420</sub> per gram VSS.  
(b) Ratio of F<sub>420</sub> content of R1 and R2.

### 3.10 補酵素F<sub>420</sub>含量とメタン生成活性の関係

Table 4 に、酢酸を基質として馴養した汚泥に対する各汚泥のF<sub>420</sub>含量比(以下、F<sub>420</sub>含量比と略す。また、純菌では*Methanothrix soehngii* に対するF<sub>420</sub>含量比)を報告者毎に示す。本実験で得られたF<sub>420</sub>含量比の対照としてUASBで馴養されたグラニュール汚泥のF<sub>420</sub>含量比を示したが、外村ら<sup>35)</sup>とDolfingら<sup>5)</sup>は、いずれも、顕微鏡観察の結果、酢酸基質で培養されたグラニュール汚泥の菌叢は、*M.thrix* 様の細菌種が卓越していたことを報告している。Table 4 中、外村らとDolfingらがそれぞれ測定した酢酸培養グラニュールのF<sub>420</sub>含量0.0030, 0.0046mgF<sub>420</sub>·gVSS<sup>-1</sup>は、純粋な*M.thrix soehngii* のF<sub>420</sub>含量(0.28 mgF<sub>420</sub>·g·(dry wt.cell)<sup>-1</sup>)に比べて低いものの、相互に同程度の含量であり、*M.thrix* 様の細菌種が卓越する汚泥のF<sub>420</sub>含量比の対照として適当と考えられる。

Table 4 において、F<sub>420</sub>含量比2以下(本実験の運転6か月後のR2汚泥の領域)では、蟻酸・水素資化性MPA が0.5 gCOD·gVSS<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>以下であり、有機物の高速分解を許容し難い汚泥性状となっている。また、F<sub>420</sub>含量比2以下のレベルで、基質のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/COD比率(g/g,%)が30以上の汚泥では、H-SRB がH-MPBに代わってH<sub>2</sub>-scavengerの役割を果たすことが推察できる(Table 1, SMA/MPA比参照)。

一方、F<sub>420</sub>含量比2以上(2.8~21.5の領域)では、グラニュール汚泥の蟻酸・水素資化性MPAは、それぞれ、1.0~3.2, 0.8~3.6 gCOD·gVSS<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>であり、メタン発酵システムにおいて蟻酸・水素除去を担うには十分な活性レベルとなっている。また、F<sub>420</sub>含量比が2以上のA-MPAは、0.4 gCOD·gVSS<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>以上であり、メタン発酵システムの安定な運転を許容すると考えられる。

Table4 Summary of F<sub>420</sub> content in various mesophilic sludge and their methane-producing activity on formate, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and acetate.

Sludge and Bacterium			Coenzyme F <sub>420</sub> content			Methane-producing activity			Ref.
Sludge Reactor	Cultivating period	Fed organics (mgCOD·l <sup>-1</sup> , composition)	Fed SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /COD (g/g, %)	(mgF <sub>420</sub> ·gVSS <sup>-1</sup> )	Ratio <sup>a)</sup> (-)	formate	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> (gCOD·gVSS <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	acetate	
Digester	- c)	- (domestic)	-	0.022	0.73	0.055	0.032	0.017	35
UASB	long term	5000 (lac:buty:prop:ace:yeast) <sup>d)</sup>	2.0	0.645	21.5	2.10	1.33	0.73	
	long term	7000 (starch)	1.4	0.402	13.4	1.33	1.30	0.90	
	long term	3000 (sucrose:pepton=14:1)	3.3	0.206	6.87	1.30	1.37	0.62	
	long term	3000 (acetate:yeast=29:1)	3.3	0.030	1	0.086	0.11	2.1	
UASB b)	long term	500 (srarch:sucroce=1:1)	6.0	0.511	17.0	-	0.84	1.23	37
	long term	500 (srarch:sucroce=1:1)	30	0.049	1.6	-	0.89 <sup>e)</sup>	1.24 <sup>e)</sup>	
						-	0.45	1.38	
	long term	500 (srarch:sucroce=1:1)	120	0.008	0.27	-	0.04 <sup>e)</sup>	1.34 <sup>e)</sup>	
						-	0.02	0.15	
						-	0.04 <sup>e)</sup>	0.09 <sup>e)</sup>	
UASB	-	- (sugar wastewater) as inoculum	-	0.128	2.78	1.01 (0.02) <sup>f)</sup>	0.78 (0.071)	0.37 (0.005)	5
	3-4 months	2000-15000 (ethanol)	<(15-2)	0.553	12.0	3.21 (0.10 )	3.63 (0.28 )	0.75 (0.02 )	
	3-4 months	2000-15000 (ethanol:acetate=1:0.21)	<(15-2)	0.489	10.6	1.77 (0.051)	2.36 (0.17 )	0.42 (0.030)	
	3-4 months	2000-15000 (propionate)	<(15-2)	0.668	14.5	2.60 ( - )	1.10 (0.062)	0.55 (0.02 )	
	3-4 months	2000-15000 (propionate:acetate=1:1.6)	<(15-2)	0.370	8.04	2.17 (0.12 )	0.90 (0.16 )	1.06 (0.035)	
	3-4 months	2000-15000 (acetate)	<(15-2)	0.046	1	0.18 (0.01 )	0.18 (0.01 )	1.16 (0.10 )	
UASB	-	1954 (industrial, starch processing)	8.0	0.186 (0.104)	-	-	-	0.116(0.0059)	55
AF	-	2080 (domestic)	7.2	0.334 (0.058)	-	-	-	2.5(0.5)×10 <sup>-4</sup>	
Activated	-	945 (domestic)	4.3	0.193 (0.048)	-	-	-	8.3(3.4)×10 <sup>-4</sup>	
CSTR	steady state	- (acetate)	-	3.7-1.1	1	-	-	0.61 - 0.91	56
	steady state	- (cheese whey)	-	2.7-0.3	0.73-0.27	-	-	0.16 - 0.33 <sup>g)</sup>	
	steady state	- (nutrient broth/Scroce)	-	1.4-0.3	0.38-0.27	-	-	0.22 - 0.32 <sup>g)</sup>	
UASB	18 months	3800 (comatial milk)	0.65	-	-	-	1.61	0.33	1
CSTR	44-52 days	1100(palmitate:yeast=10:1)HRT40 d.	0	-	-	-	1.68	0.50	
	44-52 days	1100(palmitate:yeast=10:1)HRT40 d.	27	-	-	-	1.17	0.49	
	44-52 days	1100(palmitate:yeast=10:1)HRT40 d.	55	-	-	-	0.86	0.30	
UASB	30 months	3800 (comatial milk)	0.65	-	2.7h)	-	2.00	0.37	This study
CSTR 1	6 months	1100(palmitate:yeast=10:1)	0	-	8.1h)	-	10.1 (1.6 )	1.96 (0.66 )	
CSTR 2	6 months	1100(palmitate:yeast=10:1)	109-27	-	1b)	-	0.093(0.003)	1.90 (0.10 )	
Bacterium			mg-F <sub>420</sub> ·g·(dry wt. of cell) <sup>-1</sup>		Ratio <sup>a)</sup> (-)	formate	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> gCOD·g·(dry wt. of cell) <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	acetate	
Formate-utilizing	<i>Methanobacterium formicicum</i>	-	2.5-3.3	8.9-11	-	21.5	-	-	5
Hydrogen-utilizing	<i>Methanobacterium formicicum</i>	-	1.0	3.6	-	-	32-51	-	
	<i>Methanobacterium bryantii</i>	-	1.2-2.0	4.3-7.1	-	-	28	-	
	<i>Methanobrevibacter ruminantium</i>	-	0.03	0.11	-	-	-	-	
	<i>Methanobrevibacter arborisnigri</i>	-	1.5	5.4	-	-	55	-	
	<i>Methanogenium marisnigri</i>	-	0.6	2.1	-	-	-	-	
	<i>Methanospirillum hungatei</i>	-	1.6	5.7	-	-	24	-	
Acetate-utilizing	<i>Methanoxithrix soehngelii</i>	-	0.28	1	-	-	-	2.3	
	<i>Methanosarcina acetivorans</i>	-	0.023	0.082	-	-	-	18	

a) Ratio of coenzyme F<sub>420</sub> content of sludge to each cultivated sludge fed with acetate.

b) UASB was inoculated with the digestive sludge presented by Hokamura et al.(reference number 35).

c) not reported.

d) Composition, lactate:butyrate:propionate:acetate:yeast = 15:10:10:13:2.

e) Activity was estimated in the presence of excess sulfate.

f) Numbers in parentheses are standard deviation of three activities.

g) Methane-producing activity of each fed substrate.

h) Ratio of coenzyme F<sub>420</sub> content to R2, methane-producing activity from acetate was enhanced, but methane-producing activity from hydrogen was negligible.i) Ratio of coenzyme F<sub>420</sub> content of bacterium to *Methanoxithrix soehngelii*.

### 3.11 電子顕微鏡観察

F<sub>420</sub>含量測定の結果、運転183日目のR2とR1のA-MPAが同レベルであるにもかかわらず、R2汚泥に対するR1汚泥のF<sub>420</sub>含量比は、8.1となった。この結果に適合するための、Table 4中の*M.thrix*と*M.sarcina*のR2における微生物構成は、Table 4から前者が主で後者が従と考えられる。また、実際にR1、R2においてA-MPBとして*M.thrix*が優勢となったことは、走査電子顕微鏡観察で確認できた。フラットセブタムを有する*M.thrix*様の短桿菌はR1、R2共に容易に観察できた(Fig. 9)。 *M.thrix*様微生物は、R2ではフィラメント状であったが、R1ではショートロッドタイプで観察された。一方、運転132日目のR2汚泥の走査電子顕微鏡観察(Fig. 9-b)で、*M.sarcina acetivorans*の菌体直径(1.9×10<sup>-6</sup> m)<sup>36)</sup>を有するの微生物は観察できなかった。R1、R2内に*M.thrix*様微生物が観察されたことは、F<sub>420</sub>含量測定実験と動力学定数解析において、*M.thrix* sp.が出現しやすいという推測が得られたことによく対応する。

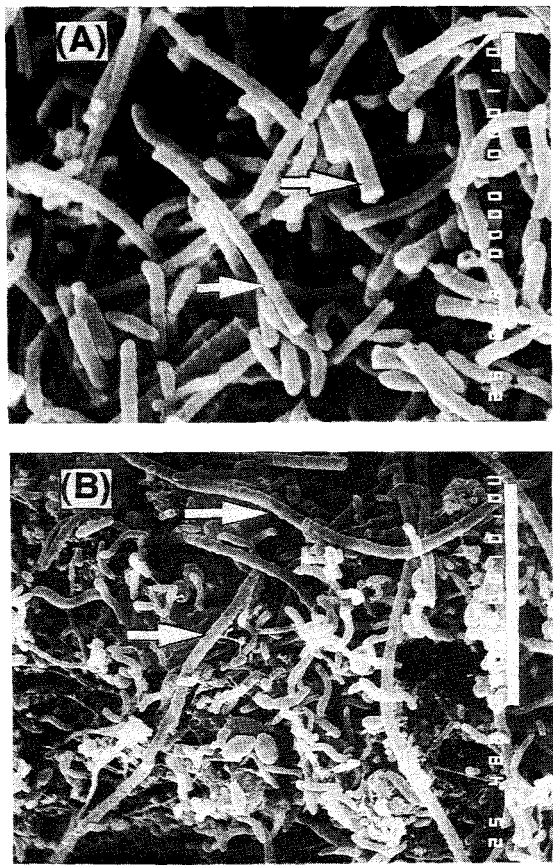


Fig.9 Scanning electron micrographs showing sludge retained in R1 and R2 operated for 132 days. *Methanothrix*-like orfanism indicated by arrows. (A) Sludge frown in R1. Bar; 1μm. (B) Sludge frown in R2. Bar; 10μm.

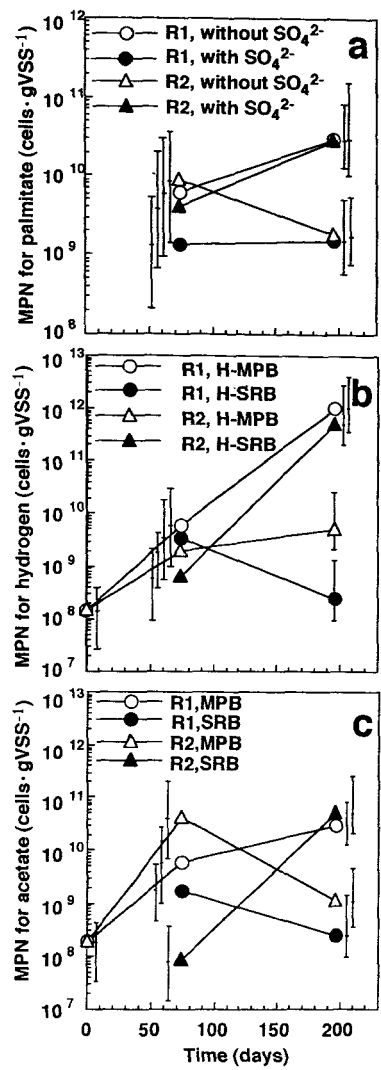


Fig.10 The viable cell number of (a) palmitate-degrading bacteria in the presence and absence of sulfate, (b) hydrogenotrophic sulfidogen and methanogen and (c) acetoclastic sulfidogen and methanogen. Bars indicate 95% confidence limits.

### 3.12 細菌数計数

Fig.10に種汚泥(メタン生成細菌数)、反応器運転74日目および196日目の培養汚泥のパルミチン酸資化性細菌、酢酸・水素資化性MPB、酢酸・水素資化性SRB の菌数計数結果を示す(Fig.10中のバーは、95%信頼限界を示す)。

Fig.10-a では、2 オーダー以上の菌数変化はみられなかったが、運転196日目の計数では、R1、R2ともに培養条件に近い条件下で、パルミチン酸利用細菌数が高い傾向となった。Fig.10-bでR1における水素利用細菌の菌数を比較すると H-MPB の菌数が H-SRB の3 オーダー程度高かった。酢酸・水素 MPB の細菌数は、R1 が R2 と相対して高いが、とりわけメタン生成活性が顕著に上昇した H-MPB の菌数は高く、同菌群が汚泥中に集積し水素除去に対して卓越していたことがわかる。逆に、R2 では H-SRB が H-MPB より2 オーダー程度高かった。これら菌数計数結果からも R2 では SRB が優勢となり、H<sub>2</sub>-Scavenger としてのニッチを得ていたことが説明できる。Fig.10-c で、R2 の A-SRB の菌数は運転74日から196日の期間におよそ3 オーダー上昇した。Fig. 5において酢酸資化性硫酸塩還元活性は低かったものの、Fig.10-cより、A-SRBも増殖していたことが分かる。

## § 4 まとめ

硫酸塩無添加系(反応器 R1)・添加系(反応器 R2、培養期間における硫酸塩濃度300~1200 mg·ℓ<sup>-1</sup>)の2基の完全混合型反応器を用いて、パルミチン酸を主要炭素源(1.0gCOD·ℓ<sup>-1</sup>)として汚泥を半連続培養し、培養汚泥を①バイアル活性試験、②補酵素F<sub>420</sub>含量測定試験、③菌数計数試験に供して、パルミチン酸分解過程における水素・酢酸除去者としての硫酸塩還元細菌の寄与を、メタン生成細菌と比較・検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) R2では、パルミチン酸の嫌気性分解過程において、総COD除去量に対する硫酸塩還元反応によるCOD除去量の割合は、反応器運転70日以降では0.325±0.049で定常となった。
- (2) 水素基質に関する硫酸塩還元活性/メタン生成活性比(活性、gCOD·gVSS<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)は、種汚泥で0.022(0.044/2.00)、培養6カ月後のR1で0.0019(0.019/10.1)、R2で12(1.15/0.093)となった。また、酢酸基質に関する活性比は、種汚泥で0.022(0.008/0.37)、培養6カ月後のR1で0.004(0.008/1.96)、R2で0.005(0.01/1.90)となった。
- (3) 水素基質に関する硫酸塩還元細菌数/メタン生成細菌数比(細菌数、cells·gVSS<sup>-1</sup>)は、培養6カ月後のR1で1/10<sup>3.6</sup>(2.4×10<sup>8</sup>/9.8×10<sup>11</sup>)、R2で10<sup>2.0</sup>(5.3×10<sup>11</sup>/5.3×10<sup>9</sup>)となった。また、同様に酢酸基質に関する活性比は、培養6カ月後のR1で1/10<sup>2.1</sup>(2.5×10<sup>8</sup>/3.0×10<sup>10</sup>)、R2で1/10<sup>1.7</sup>(5.3×10<sup>10</sup>/1.1×10<sup>9</sup>)となった。
- (4) 単位VSS当たりの補酵素F<sub>420</sub>含量は、種汚泥に対して培養6カ月後のR1で3.0倍にまで上昇し、R2では0.37に低下した(R1に対するR2のF<sub>420</sub>含量比は、培養6カ月間で1/8.1にまで低下した)。
- (5) R1では、パルミチン酸分解過程における硫酸塩還元細菌の寄与は無視できる程度であり、パルミチン酸分解は、パルミチン酸資化性水素生産性酢酸生成細菌とメタン生成細菌との共生系で遂行された。
- (2) R2で硫酸塩還元細菌は、パルミチン酸分解過程におけるH<sub>2</sub>-scavengerとして優勢となった。また、R2で硫酸塩還元細菌の酢酸除去者としてのニッチは低く、メタン生成細菌に対して無視できる程度であった。

## 参考文献

- (1) 山口隆司, 原田秀樹, 桃井清至, 曾 怡禎(1995)高級脂肪酸の嫌氣的分解過程における硫酸塩還元菌の生態学的役割, 水環境学会誌, Vol.18, 499-510.

- (2) Isa, Z., Grusenmeyer, S. and Verstraete, W. (1986) Sulfate reduction relative to methane production in high-rate anaerobic digestion: Microbiological aspects, *Appl. Environ. Microbiol.*, 51, 580-587.
- (3) Harwood, J.L. and Gurr, M.I. (1991) *Lipid biochemistry*, 23-118, Chapman & Hill.
- (4) Pause S.M., Switzenbaum M.S. (1984) An investigation of the use of fluorescence to monitor activity in anaerobic treatment systems, *Biotechnol. Letters*, 6, 77-80.
- (5) Dolfig, J. and J.W. Mulder (1985) Comparison of methane production rate and coenzyme F<sub>420</sub> content of methanogenic consortia in anaerobic granular sludge, *Appl. Environ. Microbiol.*, 49, 1142-1145.
- (6) I-Chang Tseng, H. Harada, Sy-Yung Chen Wang, K. Momonoi (1994) Adhesion and aggregation mechanisms of methanogenic sludge consortia developed in an UASB reactor, *Proc. of Environmental Engineering Research*, 31, 69-80.
- (7) Widdel, F. and Bak, F. (1992) Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria (in *The Prokaryotes 1992 4th ed.*), 3352-3392.
- (8) Roy, F., Albanac, G. and Samain, E. (1985) Influence of calcium addition on growth of highly purified syntrophic cultures degrading long-chain fatty acids, *Appl. Environ. Microbiol.*, 49, 702-705.
- (9) 亀井昌敏, 加藤 薫, 桃井清至, 滝沢 智, 原田秀樹 (1990) 嫌気性細菌群に及ぼす高級脂肪酸の阻害機構, *日本水環境学会年会講演集*, 255-256.
- (10) 珠坪一晃, 原田秀樹, 曾 怡禎, 桃井清至 (1994) 高温 UASB リアクター保持微生物のグラニュール形成過程における構造的特性とメタン生成活性の推移, *環境工学研究論文集*, 31, 57-67.
- (11) 社団法人日本下水道協会, *下水試験方法* 1984年版.
- (12) 花木啓祐, 松尾友矩, 長瀬道彦 (1981) 嫌気性消化における脂肪酸の代謝, *下水道協会誌*, 18, 30-39.
- (13) Rinzema, A. and Lettinga, G. (1988) The effect of sulphide on the anaerobic degradation of propionate, *Environ. Tech. Lett.*, 9, 83-88.
- (14) Hanaki, K., Matsuo, T. and Nagase, M. (1981) Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process, *Biotech. Bioeng.*, 23, 1591-1610.
- (15) 曾 怡禎, 原田秀樹, 桃井清至, 陳 是瑩 (1992) 上昇流スラッジブランケット (UASB) 反応器におけるグラニュール汚泥の細胞外ポリマーとメタン生成活性の挙動, *環境工学研究論文集*, 29, 213-223.
- (16) Grotenhuis, J.C.T., J.C. Kissel, C.M. Plugge, A.J.M. Stams and A.J.B. Zehnder (1991) Role of substrate concentration in particle size distribution of methanogenic granular sludge in UASB reactors, *Wat. Res.*, 25, 21-27.
- (17) 野上和宏, 原田秀樹, 桃井清至 (1995) 微小電極による嫌気性微生物集塊内の pH 及びグルコース濃度勾配の測定, *土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部(B)*, 1198-1199.
- (18) Beer, D. D., J. W. Huisman, J. C. Van Den Heuvel and S.P.P. Ottengraf (1992) The effect of pH profiles in methanogenic aggregates on the kinetic of acetate conversion, *Wat. Res.*, 26, 1329-1336.
- (19) Lens, P.N.L., D.D. Beer, C.C.H. Cronenberg, F.P. Houwen, S.P.P. Ottengraf and W.H. Verstraete (1993) Heterogeneous distribution of microbial activity in methanogenic aggregates: pH and glucose microprofiles, *Appl. Environ. Microbiol.*, 59, 3803-3815.
- (20) Kristjansson, J.K., Schönheit, P. and Thauer, R.K. (1982) Different K<sub>s</sub> values for hydrogen of methanogenic bacteria and sulfate reducing bacteria: An explanation for the apparent inhibition of methanogenesis by sulfate, *Arch. Microbiol.*, 131, 278-282.



- (21) Robinson, J.A. and Tiedje, J.M. (1984) Competition between sulfate-reducing and methanogenic bacteria for H<sub>2</sub> under resting and growing condition, Arch. Microbiol., 137, 26-32.
- (22) Yoda, M., Kitagawa, M. and Miyaji, Y. (1987) Long term competition between sulfate-reducing and methane-producing bacteria for acetate in anaerobic biofilm, Wat. Res., 21, 1547-1556.
- (23) Harada, H., Uemura, S. and Momonoi, K. (1994) Interaction between sulfate-reducing bacteria and methane-producing bacteria in UASB reactors fed with low strength wastes containing different levels of sulfate, Wat. Res., 28, 355-367.
- (24) Grotenhuis, J. T. C., M. Smit, C. M. Plugge, X. Yuansheng, A. A. M. Van Lammeren, A. J. M. Stams and A. J. B. Zehnder(1991)Bacteriological composition and structure of granular sludge adapted to different substrate, Appl. Environ. Microbiol., 57, 1942-1949.
- (25) Zehnder, A. J. B., B. A. Huser, T. D. Brock and K. Wuhrmann (1980) Characterization of an acetate-decarboxylating, non-hydrogen-oxidizing methane bacterium, Arch. Microbiol., 124, 1-11.
- (26) Wolin, E.A., M.J. Wolin and R.S. Wolfe (1963) Formation of Methane by Bacterial Extracts, The Journal of Biological Chemistry, 238, 2882-2886.
- (27) Zehnder, A.J.B. and K. Wuhrmann(1977)Physiology of a *Methanobacterium* Strain AZ, Arch. Microbiol., 111, 199-205.
- (28) Ingvorsen, K., A. J. B. Zehnder, B. B. Jorgensen(1984)Kinetics of sulfate and acetate uptake by *Desulfobactor postgatei*, Appl. Environ. Microbiol., 47, 403-408.
- (29) Widdel, F. and N. Pfennig(1981)Studies on dissimilatory sulfate-reducing bacteria that decompose fatty acids 1. Isolation of new sulfate-reducing bacteria enriched with acetate from saline environments. description of *Desulfobactor postgatei* gen., sp. nov., Arch. Microbiol., 129, 395-400.
- (30) Kugelman, I. J. (1971) Toxicity, synergism, and antagonism in anaerobic waste treatment process, Adv. Chem. Ser., 105, 55-90.
- (31) Perski, H.J., P. Schonheit and R.K. Thauer(1982)Sodium dependence of methane formation in methanogenic bacteria, Elsevier Biomedical Press, 143, 323-326.
- (32) Patel, G.B. and L.A. Roth(1977)Effect of sodium chloride on growth and methane production of methanogen, Can. J. Microbiol., 23, 893-897.
- (33) Kugelman, I. J. and P. L. McCarty (1965) Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment, JWPCF, 36, 97-116.
- (34) Rinzema, A., J. Van Lier, G. Lettinga(1988)Sodium inhibition of acetoclastic methanogens in granular sludge from a UASB reactor, Enzyme Microb. Technol., 10, 24-32.
- (35) 外村雅生, 原田秀樹, 桃井清至(1988)UASB反応器馴養グラニュール生物のメタン生成活性と補酵素F<sub>420</sub>の関係, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第2部, 1066-1067.
- (36) Sowers K.R., S. F. Baron and J. G. Ferry (1984) *Methanosarcina acetivorans* sp. nov., an acetotrophic methane-producing bacterium isolated from marine sediments, Appl. Environ. Microbiol., 47, 971-978.
- (37) 貝谷吉英, 中村雅彦, 桃井清至, 滝沢智, 原田秀樹(1990)UASB反応器で培養した汚泥のメタン生成活性に対する硫酸塩の影響, 日本水環境学会年会講演集, 253-254.
- (38) 本間誠二, 原田秀樹, 桃井清至(1993), UASB法による高濃度硫酸塩含有廃水の処理特性, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第2部, 1350-1351.
- (39) 福原泰明, 原田秀樹, 桃井清至(1992), 低濃度有機性廃水を対象としたUASBプロセスにおける硫酸塩還元菌の役割, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第2部, 782-783.

- (40) Widdel, F. (1988) Microbiology and ecology of sulfate- and sulfur-reducing bacteria, in *Biology of Anaerobic Microorganisms* (Ed. Zehnder, A.J.B.), Wiley Interscience, 469-584.
- (41) Pavlostathis, S. G., T. L. Miller and M. J. Wolin (1989) Cellulose fermentation by continuous cultures of *Ruminococcus* and *Methanobrevibacter smithii*, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 33, 109-116.
- (42) McInerney MJ, Bryant MP, Phennig N (1979) Anaerobic bacterium that degrades fatty acids in syntrophic association with methanogens, *Arch. Microbiol.*, 122, 129-135.
- (43) Gujer, W., and A. J. B. Zehnder (1983) Conversion process in anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, 15, 126-167.
- (44) Zehnder, A.J.B. and K. Wuhrmann (1977) Physiology of a *Methanobacterium* Strain AZ, *Arch. Microbiol.*, 111, 199-205.
- (45) Middleton, A. C., Lawrence A. W. (1977) Kinetics of microbial sulfate reduction, *JWPCF*, 49, 1659-1670.

Ohtsubo S, Demizu K, Kohno S, Miura I, Ogawa T, Fukuda H (1992) Comparison of acetate utilization among strains of an aceticlastic methanogen, *Methanotheroxis soehngenii*, *Appl Environ Microbiol*, 58, 703-705.
- (47) Wandrey, C. and A. Aivasidis (1983) Continuous Anaerobic Digestion with *Methanosarcina barkeri*, *Annals New York Academy of Science*, 413, 489-500.
- (48) Cappenberg T.E. (1975) A study of mixed continuous cultures of sulfate-reducing and methane-producing bacteria, *Microbial Ecology*, 2, 60-72.
- (49) Cappenberg T.E. (1974) Interrelations between sulfate-reducing and methane-producing bacteria in bottom deposits of a fresh-water lake. I. Field observations, *Antonie van Leeuwenhoek*, 40, 285-295.
- (50) Wu, Wei-Min, M. K. Jain, J. H. Thiele and J.G. Zeikus (1995) Effect of storage on the performance of methanogenic granules, *Wat. Res.*, 29, 1445-1452.
- (51) 張 祖恩, 野池達也, 松本順一郎 (1983) 嫌気性消化のメタン生成槽における混合基質の利用特性, *土木学会論文報告集*, 335, 79-87.
- (52) Lin, C.Y., T. Noike, H. Furumai and J. Matsumoto (1989) A kinetic study on the methanogenesis process in anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, 21, 175-186.
- (53) Lawrence, A.W. and P.L. McCarty (1969) Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment, *JWPCF*, 41, R1-R17.
- (54) Noike, T., G. Endo, Juu-En Chang, J. Yaguti and J. Matsumoto (1985) Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion, *Biotech. Bioeng.*, 27, 1482-1489.
- (55) Lens, P.N., M.P. de Poorter, C.C. Cronenberg and W.H. Verstraete (1995) Sulfate reducing and methane producing bacteria in aerobic wastewater treatment systems, *Wat. Res.*, 29, 871-880.
- (56) Pause SM, Switzenbaum MS (1984) An investigation of the use of fluorescence to monitor activity in anaerobic treatment systems, *Biotechnol. Letters*, 6, 77-80.

(平成8年11月25日受付)

## 編 集 委 員

田	邊	達	雄
小	山	通	榮
岩	本	英	久
綿	井	伸	爾
山	口	隆	司
間	瀬	実	郎

呉工業高等専門学校

研 究 報 告

第32巻 第2号 (1997)

(通巻 第59号)

平成9年2月 印刷

平成9年2月 発行

編集者  
発行者

呉工業高等専門学校

〒737 呉市阿賀南2丁目2-11

電話 (0823) 73-8406

印刷所

株式会社ニシキプリント

〒733 広島市西区商工センター7丁目5-33

電話 (082) 277-6954

# MEMOIRS OF THE KURE NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY

Vol. 32, No. 2 (Consecutive No. 59)  
February, 9th Year of Heisei (1997)

## CONTENTS

1 . Some Cases of Sense Relations .....	Takenobu KAWAJIRI	1
2 . The Effect upon Ground Surface Roughness by Dressing Condition of CBN Wheel ( I ) .....	Rempei IKEGAMI	5
3 . Energy-Momentum Tensor and Back-Reaction Problem in Schwarzschild Spacetime .....	Kenji FUKAZAWA	15
4 . A study on the Nurse Robot Preparing Surgical Instruments - An Image Recognizing System of the Instruments Using the Transmitted Light - .....	Hidehisa IWAMOTO Hirokazu OSAKI Mitsuru JINDAI Yasuji KASHINO Mikihiko SATO Shuji SEKI	29
5 . Behaviour of Molecular Impurities in an Argon Glow Discharge .....	Tsutomu YAMAZAKI	39
6 . Competition between Sulfate-Reducing Bacteria and Methane - Producing Bacteria in Anaerobic Degradation of a Long - Chain Fatty Acid .....	Takashi YAMAGUCHI Makoto ICHITSUBO Hideki HARADA Shinichi YAMAZAKI	51