

# フィールドサイエンス

*Journal of Field Science*

No.5 2006



東京農工大学農学部附属広域都市圏  
フィールドサイエンス教育研究センター

平成18年 3月

# フィールドサイエンス 第5号

## 目次

### 論文

- 1 溪流水位の連続観測と流出量の推定について—FM 多摩丘陵西の沢を対象として—／飯泉佳子・対馬孝治・小柳信宏・小倉紀雄
- 9 アカマツにおけるクロタマムシの脱出孔分布—穿孔虫類4種との比較—／谷脇 徹

### 研究資料

- 17 多摩丘陵の森林小流域における水位観測記録／小柳信宏・対馬孝治・飯泉佳子・苗村晶彦・小倉紀雄
- 23 食品残渣の家畜飼料・堆肥化におけるエネルギー利用システム確立の検討／板橋久雄・神田修平・松村昭治・月村光義・亀山秀雄・桜井 誠・秋澤 淳・濱本芳徳・柏木孝夫
- 37 FM 津久井におけるニホンジカ導入とその消化性研究／黒川勇三・板橋久雄・山根正伸
- 43 東京農工大学FM（フィールドミュージアム）大谷山，草木，唐沢山，秩父における動物生息状況の記録（第3報）／桑原 誠・金子 稔・木下浩幸・熊倉 充

### 解説

- 51 大気環境中における癌（変異）原物質—多環芳香族炭化水素とニトロアレーン—／久松由東

## 論文

## 溪流水位の連続観測と流出量の推定について —FM 多摩丘陵西の沢を対象として—<sup>\*1</sup>

飯泉 佳子<sup>\*2,3</sup>, 対馬 孝治<sup>\*2,3</sup>, 小柳 信宏<sup>\*2,4</sup>, 小倉 紀雄<sup>\*2,5</sup>

### Data Analysis of Water Level and Calculation of Discharge Amount -Case Study of Field Museum Tama Hill-<sup>\*1</sup>

Yoshiko IZUMI<sup>\*2, \*3</sup>, Kouji TSUSHIMA<sup>\*2, \*3</sup>, Nobuhiro OYANAGI<sup>\*2, \*4</sup>, Norio OGURA<sup>\*2, \*5</sup>

Water level of outflow from a nitrogen-saturated forested catchment at Field Museum (FM) Tama Hill in the suburb of Tokyo has been measured since 1976. In this research, the measurement accuracy of the analogue water gauge from June 2002 to January 2003 was examined and discussed. Also, the digital water gauge which has submersible pressure transducer was set closely to the analogue water gauge which was already installed above the V-notch weir, and measured water level. These two data sets were compared with a data set of water level that was hand-measured by using a rule at the V-notch weir. Outflow was estimated based on water level measured by the digital water gauge.

According to the results, there is a trend that the values measured by analogue water gauge are higher than the values measured by a rule. Moreover, the big errors were included in values measured by analogue water gauge. However, there is a strong correlation in the values measured by digital water gauge and the values measured by a rule ( $r=0.91$ ). Therefore, it is recommended that analogue existing water gauge is used with digital water gauge.

It was estimated that average ratio of discharge from the river was 15% during this monitoring period. It was presumed that the discharge ratio was controlled mainly by the precipitation amount because variability of monthly average precipitation was bigger compared to that of discharge. This indicates that monthly water discharge amount from the river and monthly precipitation amount at FM Tama Hill are calculable from monthly precipitation amount of AMeDAS at Hachioji. It means that this is usable for checking the measurement data and calculating the lacked data.

*Keywords* : long term monitoring, nitrogen-saturated forested catchment, water level observation, water discharge, Tama Hill

東京都郊外にあるフィールドミュージアム (FM) 多摩丘陵内の窒素飽和森林流域では、1976年より流出河川の水位が継続的に観測されている。本研究では、2002年6月から2003年1月のデータを用いて水位計の測定精度の検討を行った。さらに同期間、三角堰内に水圧式水位計を併設し、測定精度に関して検討した。また、回収されたデータを使用して水位—流量 (H—Q) 式を作成し、沢からの流出量を算出した。検討の

<sup>\*1</sup> Received Apr. 15, 2004; Accepted Sep. 23, 2005

<sup>\*2</sup> 東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター 〒183-8509東京都府中市幸町3-5-8: Field Science Center, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

<sup>\*3</sup> (現在) 独立行政法人 土木研究所 〒305-8516茨城県つくば市南原1-6: Public Works Research Institute, 1-6 Minamihara, Tsukuba, Ibaraki 305-8516, Japan

<sup>\*4</sup> (現在) 財団法人 新潟県環境衛生研究所 〒959-0291新潟県西蒲原郡吉田町東栄町8-13: Environmental Science Research Niigata, 8-13 Higashisakae-cho, Yoshida-machi, Nishikanbara-gun, Niigata 959-0291, Japan

<sup>\*5</sup> (現在) 東京農工大学名誉教授 Emeritus Professor, Tokyo University of Agriculture and Technology

結果、既存の水位計は測定誤差が大きく水位が過大評価される傾向があった。一方、新たに設置した水圧式水位計は越流水位の手測定値との相関関係が高く ( $r=0.91$ )、併用により高精度の検討を行うことが可能であった。水位観測を実施した西の沢流域において、沢からの流出率は期間中15%であった。降水量に対し沢水流出量の月平均値は変動幅が小さかったことから、年毎の流出率の変化は主に降水量の違いに起因することが示唆された。本報で提示した数式を用いて、八王子のアメダス観測月降水量からFM多摩丘陵の月平均降水量、沢水流出量を簡易的に算出することが可能であった。フィールドにおける観測結果のチェックや、欠測が出た際の推定方法として有効と考える。

キーワード：長期モニタリング、窒素飽和森林流域、水位観測、流出量、多摩丘陵

表1 水位の計測方法と水位計

	計測対象	計測原理	水位計
直接測定	基準点から水面までの高さ	ゲージを目視で読み取る ゲージの移動 フロートの昇降 フロート位置をスイッチのON, OFFで知る 超音波の伝播時間	量水標 (水位標) ポイントゲージ フロート水位計 リードスイッチ水位計 超音波水位計
間接測定	受感部の水圧	気泡の放出時のガス圧 ベローズの弾性ひずみ 光ファイバーのひずみ 水晶振動子の共振周波数の変化 半導体ひずみゲージ	気泡式水位計 水圧式水位計 光ファイバー水位計 水晶式水圧水位計 半導体式水圧水位計

吉野 (2003) より改変

## 1. はじめに

蒸発散により大気中に放出された水は、雨水となって地表面に降下し流出あるいは浸透する。このような水循環の過程で、水中に溶存する化学成分やその濃度は、自然環境や人間活動の影響を受けて大きく変化する。降水の化学組成は局地的、あるいは広域的な大気環境を反映する。大気中の窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ ) や硫黄酸化物 ( $\text{SO}_x$ ) はいわゆる酸性雨の原因となり、特に窒素酸化物の増大は森林の窒素飽和現象 (Ågren and Bosatta, 1988; Aber et al., 1989) や水域の富栄養化を引き起こす。山地渓流水の水質は、降水組成の他に土壌・地質や植生の影響を、また湧水・地下水の水質は涵養域の土壌や土地利用、下水道の普及状況などの影響を受けている (小倉, 2004)。降水や渓流水、地下水を長期間モニタリングすることにより、人間活動の影響を定量的に評価することが可能であり、環境保全施策を提案するための基礎資料を得ることができる。

東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター フィールドミュージアム多摩丘陵 (旧波丘地, 以下FM多摩丘陵と略す)

内の西の沢では、Baba and Okazaki (1998) により流域の窒素飽和現象が報告されている。同流域では水・物質循環の解明と、周辺の間活動が森林生態系に与える影響などを検討・評価することなどが求められている。FM多摩丘陵では、露場における気象観測は1959年 (昭和34年) より行われ、西の沢における水位の連続観測は1976年 (昭和51年) より実施されている。これらの観測は現在まで継続して行われており、流域の水・物質収支を検討する上で非常に重要な基礎資料となっている。しかし、水位観測データは気象観測データと比べ個々の研究者による部分的な利用にとどまり、測定精度の検討を含め全体として十分な整理が行われておらず、体系的な解析が必要とされている。

環境モニタリングを実施する際、測定精度を管理することは重要である。水面には常に波があり水位計の誤差を表現することは容易ではないが、水文観測業務ではどのような計測法を採用した場合でも、測定誤差を1 cm以下にすることを目標としている (吉野, 2003)。水位の計測方法とその原理および水位計の種類には表1のようなものがある。FM多摩丘陵に既設の水位計はフロート式で、フロートと

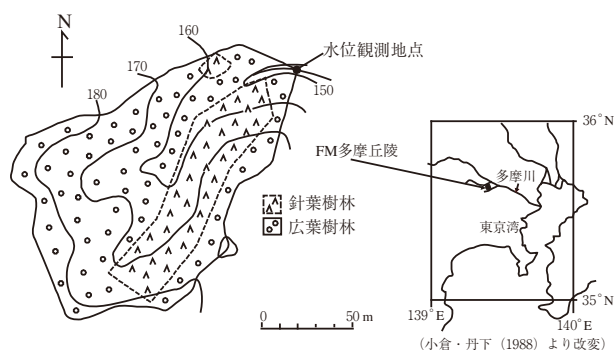


図1 調査地概況図

おもり（カウンターウェイト）、ワイヤ、プーリ、記録部から主に構成されている。水面に浮かぶフロートが水位変動に伴い上下することでプーリが回転する仕組みとなっており、この回転を水平軸の動きあるいは角度に変えて、記録して水位を知る。この方式では、水位が上昇から下降する際のプロット・ラッグ、平衡錘やワイヤ部の水没によるフロート吃水深の変化、などが記録上の誤差となるが1 cm 程度以下と考えられる（吉野，2003）。また、比較的汎用性の高い水圧式水位計には、水圧によるペローズ（蛇腹型の弾性素子）の変位を差動変圧器により電圧信号に変換する差動トランス型と呼ばれるものなどがある。大気圧を同時に計測して差し引くので水圧変化のみの計測が可能である。

本研究では、FM 多摩丘陵西の沢における水位観測の欠測期間とその理由に関する整理を行うとともに、測定結果について精度の検討を行った。また、比較的簡便に連続的な観測データが得られると期待される水圧式水位計を堰内に設置し、定規を使用して手測定した堰の越流水位との関係について検討し、沢からの流出量に関する解析を行った。

## 2. 試料および方法

### 2.1 調査地概要

調査地は、八王子市にあるFM 多摩丘陵の西の沢流域である。1980年から1996年までの年間平均気温は14.6℃で、月平均気温の最低は3.8℃（1月）、最高は26.1℃（8月）である（馮ら，1999）。年降水量は1,762 mm であり、卓越風向は南西である（佐々木，1989）。集水域の面積は2.15 ha、標高は140～190 m で、東側はスギ、ヒノキからなる針葉樹林（0.6 ha）、西側はコナラやアカシデなどの広葉樹林（1.55 ha）である。土壌は黒ボク土で、地質は下位より平山砂層、三沢泥岩層、連光寺互層、御殿峠礫層、関東ローム層が堆積している（寿円、

1959）。

### 2.2 調査および解析データ

1976年から流域下端に60度の三角堰が設置されており、減水位計（池田計器製作所，RR-40）により水位が連続的に観測されている。また、記録紙交換時（通常、毎週金曜日の9時頃）に堰の越流水位が定規を用いて手測定されており、記録されている。記録紙の保管されている1994年11月25日から2003年3月31日までの期間について、データ整理を行った。特に、2002年6月28日から2003年1月26日の期間で手測定値と比較し、測定精度の検討を行った。また同期間、水圧式水位計（コーナシステム株式会社，KADEC-MIZU）を堰内に設置して5分間隔で水位観測を行い、越流水位の手測定値と比較し両者の関係を数式化した。さらに沢からの流出量を算出し、流域近傍の露場に設置されている転倒マス式雨量計の降水量データを用いて流出率を求めた。

観測機器および手法の詳細等を以下に示す。本調査地に設置されている減水位計（池田製作所，RR-40）は、河川等の水位変化をフロートにより検出し、減水位量としてドラムロール式記録紙にアナログ記録するものである。データは水位の記録線と記録紙の方眼メモリとの交点を読み、分解能と測定精度はそれぞれ1 mm と± 1 mm である。FM 多摩丘陵では横軸の1メモリ（1 mm）が1時間に相当するよう送り速度が設定されている。一方、定規を使用して水位を手測定する手法の分解能は1 mm で、流動する河川の水位を目視により判読するため測定精度は± 1 mm 程度かそれ以下と考えられる。水圧式水位計（コーナシステム株式会社，KADEC-MIZU）の水位センサーは半導体トランスデューサーを使用しており、水位を圧力として測定し水温や大気圧の変化による誤差を補正してロガーにデジタルデータとして記録するものである。分解能は1 mm で、測定精度は± 0.1%程度である。

## 3. 結果および考察

### 3.1 減水位計による観測水位

測定中、様々な要因により欠測が生じており、その期間および理由を表2に整理した。欠測理由のうち、観測者によって記録紙にコメントの記載がある場合はそのまま引用した。凍結やレンジオーバーの他、堰上流部からのオーバーフローや水漏れ等が原因となっていた。また、調査期間に対する欠測期間

表2 欠測期間及び理由

年	月	日	時	月	日	時	理 由
1995年	1	19		~	3	16 9	凍結
	6	29	12	~	7	6 8	故障
	12	26		~	12	28	水位低下 (実測マイナス値)
1996年	1	1	5	~	3	28 8	不明
	5	29	13	~	6	30 16	故障 (実測マイナス値)
	7	7	5	~	7	11 9	不明
	7	21	6	~	7	25 8	大雨のためはずれる
	9	22	10	~	9	22 14	オーバーフロー
	11	11	1	~	11	14 9	不明
1997年	1	23		~			凍結
	1	29	0	~	3	20	不明
	3	20		~	3	27 8	線のかすれ (一部判読困難)
	6	20	6	~	6	26 8	オーバーフロー (台風7号)
1998年	1	21	6	~	1	29 10	不明
	6	11	10	~	6	12 9	不明
	6	15	14	~	6	19 9	不明
	8	5	17	~	8	7 9	不明
	8	28	7	~	8	28 11	レンジオーバー
	9	16	1	~	9	16 10	不明 (8時を除く)
	10	18	6	~			レンジオーバー
1999年	2	12	17	~	3	8 9	不明 (2/22-3/1は線が二重に)
	7	29	12	~	8	8 3	線のかすれ (一部判読困難)
	8	8	4	~	8	9 8	不明
	8	14	9	~	8	14 20	レンジオーバー
	8	23	9	~	8	24 19	線のかすれ (一部判読困難)
	8	30	9	~	12	31 23	線のかすれ (一部判読困難)
	12	11	6	~	12	13 9	ねじの巻き忘れ (?)
	12	11	6	~	12	13 9	ねじの巻き忘れ (?)
2000年	1	1	0	~	1	7 11	線のかすれ (一部判読困難)
	1	28		~	3	24 3	マイナス
	8	10	9	~	8	11 9	不明
	9	12	9	~			レンジオーバー
	9	16	10	~	9	16 19	レンジオーバー (一部)
	9	29	1	~	9	29 8	不明
2001年	10	26		~	10	29 11	水漏れ
2003年	7	11		~	7	23 14	水漏れ, 堰の補修工事

の割合は、インクのかすれにより記録の判読が困難な期間を含め18%程度であった。

図2に、手測定と減水位計の測定値の関係を示す。減水位計の水位は、2002年6月28日と7月26日、8月23日の計3回、手測定値によりゼロ補正した。減水位計の測定値と手測定値は本来良好な比例関係を示すはずだが、比較的ばらつきが大きい傾向が示された。また、減水位計の読み値は実際の水位より高くなりやすいことがわかった。手測定した水位の平均は23 mm (範囲0 - 45 mm) で、手測定値と減水位計チャート紙の読み値の差は平均9 mm

(範囲3 - 15 mm) であった。この測定誤差は用紙交換に由来するものと、水位計の構造や老朽化等に起因するものと思われる。記録紙を巻きつけるドラムは用紙の幅に対して若干のゆとりがあり、巻きつける位置が微妙に上下にずれることによって数mm程度の誤差を生ずると考えられる。また、水位計のフロートが水位に対して敏感に反応していない場合やフロートの上下動が記録紙側に伝わっていない場合は、数mmからそれ以上の誤差を生じると考えられる。減水位計の測定値が越流水の手測定値より高くなる要因としては、後者が考えられる。

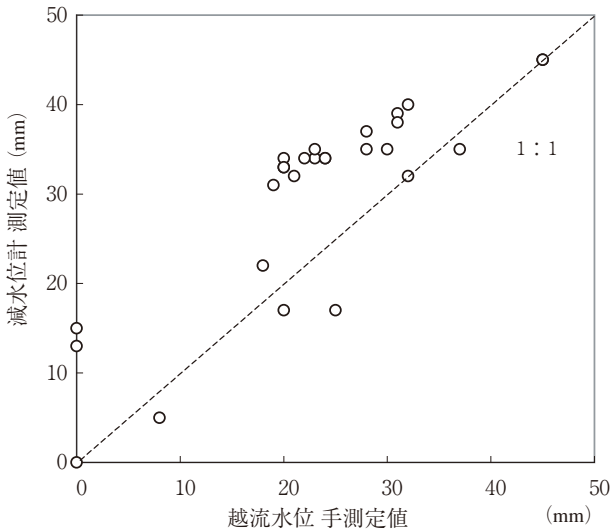


図2 減水位計の測定値と越流水位の手測定値の関係

今後、記録紙から水位データを読み取る際には、1週間ごとに手測定値による補正を行うこと、さらに得られた値が妥当であるかどうか降雨強度と比較するなど検討して使用することが望ましいと考える。

### 3.2 水圧式水位計による観測水位（沢からの流出水）

設置した水圧式水位計の測定値をもとに、沢からの流出水量を連続的に算出することを試みた。設置した水圧式水位計の測定値と越流水位の手測定値の関係を図3に示す。両者の間には以下のような関係式が成り立つことが示された ( $r=0.91, S. E. (standard error)=4.9$ )。

$$H=0.64 \times D-49 \quad \dots (1)$$

H：越流水位 (mm)

D：圧力センサー部の設置水深 (mm)

また、同沢では Baba and Okazaki (1998) により三角堰の越流水位と流量の関係が下式のように求められている。

$$Q=0.0117 \times (10 \times H)^{2.43} \quad \dots (2)$$

Q：流量 ( $l \text{ sec}^{-1}$ )

(1), (2)式により、水圧式水位計を用いて5分間隔で測定した水位から測定時の流量 ( $l \text{ sec}^{-1}$ ) を算出し、日流出量を求めた。その結果、観測期間中の平均流量は  $0.22 l \text{ sec}^{-1}$ 、流出水量は流域面積に割り付けると平均  $0.86 \text{ mm day}^{-1}$  であると推定された。相関係数が高いことから、水圧式水位計の設置により、西の沢からの流出水量が連続的に比較的精度よく求められることが示された。

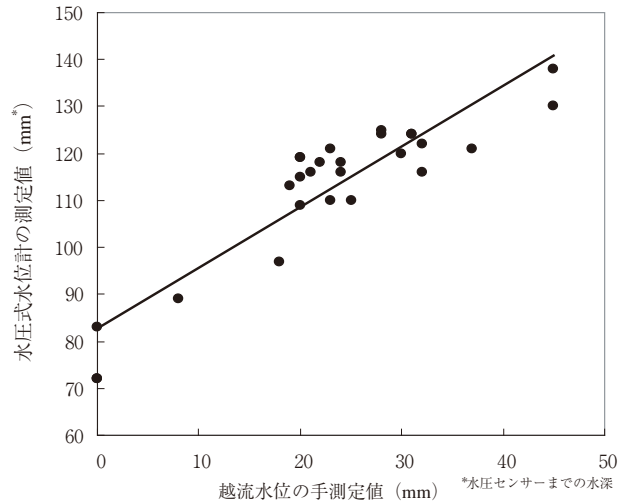


図3 水圧式水位計の測定値と越流水位の手測定値

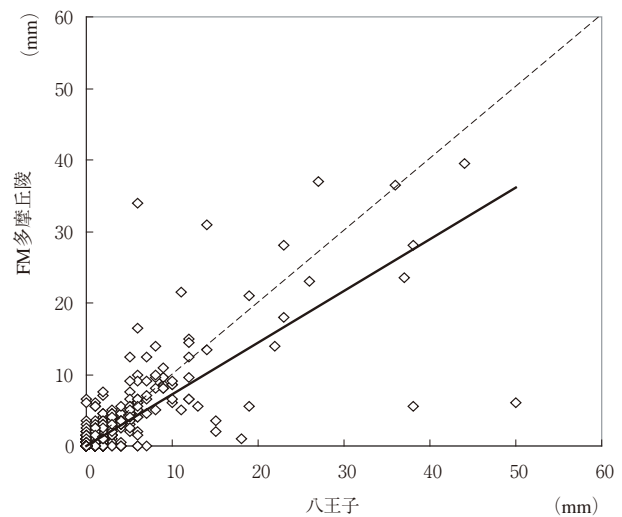


図4 時間降水量の比較

### 3.3 降水量

2002年11月14日～31日の期間で降水量観測に欠測が生じたため、比較的近い八王子市のアメダスの観測結果とFM多摩丘陵の観測結果を比較した(図4, 5)。両者の関係は時間降水量でばらつきが大きいのにに対し、月降水量では非常によい相関関係 ( $r=0.98$ ) であることが示された ( $S. E. = 22.2$ )。時間降水量には両地点における降水の時間差や風向、風速、降雨強度等の影響が表れているためと考えられる。本報告では以下の式を用い、11月の総降水量を  $35.2 \text{ mm}$  と算出した。

$$P_{Ta}=0.92 \times P_{Ha}+10 \quad \dots (3)$$

$P_{Ta}$ : FM多摩丘陵の月降水量 (mm)

$P_{Ha}$ : 八王子市の月降水量 (mm)

観測と推定の結果をあわせて、2002年6月29日～2003年1月26日の約7ヵ月間の降水量は  $1453 \text{ mm}$

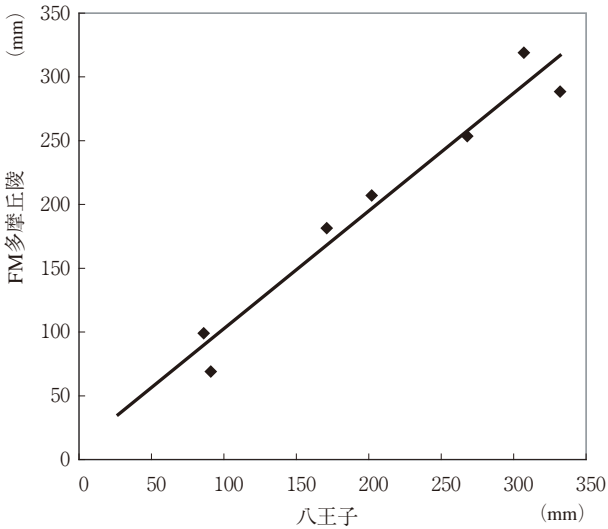


図5 月平均降水量の比較

で、1日当たり6.8 mm day<sup>-1</sup>であると見積もられた。

### 3.4 沢からの流出率

図6に降水量と流出量の経時変化を示す。流出量は降水量の変動に比較的良好に対応した傾向を示した。また、7月から9月上旬にかけて沢水の枯れが複数回確認された。これは、夏季に流域内の蒸発散量が増加し、基底流出量が低下したためと考えられる。このことは、月ごとの平均降水量と流出量を示した図7の結果とも一致する。

月平均降水量は最低1.1 mm day<sup>-1</sup> (1月) から最大12 mm day<sup>-1</sup> (6月) まで変化したのに対し、流出量は最低0.4 mm day<sup>-1</sup> (11月) から最大1.6 mm day<sup>-1</sup> (10月) と変動幅が小さかった (図7)。月流出率は最大58.7% (1月), 最小8.3% (8月), 平均22.3%であった (*S. D. (standard deviation) = 17.4*)。また、調査期間内の平均降水量と流出量はそれぞれ5.8 mm day<sup>-1</sup>と0.9 mm day<sup>-1</sup>で、流出率は15%と見積もられた。本結果は通年のものではないが、過去のデータと比較すると、1987年は9.5%, 1988年は26%, 1989年は32%とする佐々木 (1989) と、1999年6月から1年間は8.4%とする馮ら (1999) の間に位置した。月平均流出量の変動幅が小さいことから、これら数値の差は水位や流量の測定・算出方法の違いのほか、主に降水量の差に起因するものと考えられる。

図8に月ごとの平均降水量と流出量の関係を示す。両者の間には下式が成り立った ( $r=0.85$ )。

$$\text{Out} = 0.12 \times \text{In} + 0.43 \quad \dots (4)$$

Out: 月平均流出量 (mm day<sup>-1</sup>)

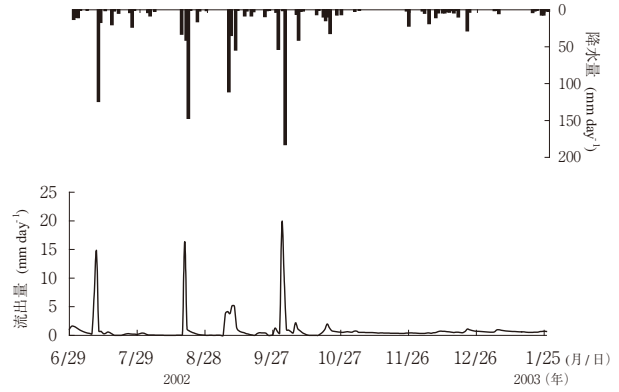


図6 降水量と流出量の関係

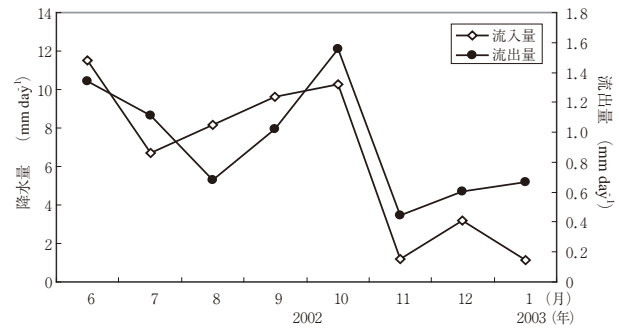


図7 平均降水量と流出量の推移

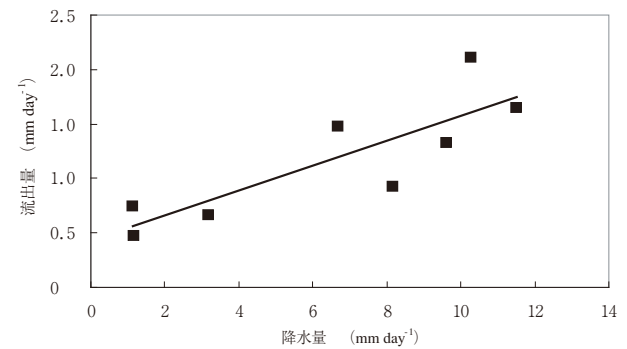


図8 月別平均降水量と流出量の関係

In: 月平均降水量 (mm day<sup>-1</sup>)

また、InはP<sub>Ta</sub>から求められ、(5)式のように表すことができる。

$$\text{In} = P_{Ta} / \text{月日数} \quad \dots (5)$$

(5)式を(4)式に代入し、(6)式がえられる。

$$\text{Out} = 0.12 \times \{(0.92 \times P_{Ha} + 10) / \text{月日数}\} + 0.43 \quad \dots (6)$$

流域における正確な降水量、流出量を推定するためには、フィールドにおける実際の観測作業が必要不可欠であるが、本報告書に示した(2)~(6)式を使用することにより、八王子のアメダス降水量の月間値から、FM多摩丘陵の月平均降水量および流出量を推定できることが示された。



#### 4. まとめ

本報では、1994年から記録紙で保管されている減水位計のデータについて欠測期間を整理し、測定精度の検討を行った。今後、記録紙から水位データを読み取る際には、1週間ごとに実測値補正を行うこと、さらに得られた値が妥当であるかどうか降雨強度と比較するなどして検討することが望ましいことを示した。また今後、水圧式水位計を併用することにより、高精度の検討を行うことが可能であることを示した。

期間中、西の沢流域において沢からの流出率は15%であった。降水量に対し流出量の月平均値は変動幅が小さかったことから、年毎の流出率の変化は主に降水量の違いに起因することが示唆された。

関係式を用い、八王子のアメダス観測月降水量から西の沢の月平均降水量、流出量を簡易的に算出できることが示された。フィールドにおける観測結果のチェックや、欠測が出た際の推定方法として有効であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究資料の作成にあたり、FM 多摩丘陵の原宏教授にご協力いただきましたことを深謝いたします。また、富沢実技官には水圧式水位計の設置および撤去にご協力いただきましたことを心より感謝申し上げます。

#### 引用文献

小倉紀雄・丹下勲（1988）多摩丘陵表面流出水中の

- 窒素化合物. 波丘地研究, 第6号, 242-255.
- 小倉紀雄（2004）降水および地下水の長期モニタリングからみえてきたこと. 日本化学会酸性雨問題研究会創立10周年記念シンポジウム講演集, 38-43.
- 気象庁-編（2003）アメダス年報.
- 佐々木佳恵子（1989）多摩丘陵小流域における酸性降水物と物質収支. 東京農工大学修士論文, 15-21.
- 寿円晋吾（1959）多摩丘陵の地形と地質. 波丘地農業研究所報, 1, 27-45.
- 馮延文・小倉紀雄・馮宗嶠（1999）北京郊外および東京郊外の小流域における降水の化学組成及び物質収支に関する研究. 陸水学雑誌, 60, 185-200.
- 吉野文雄（2003）水文量の計測技術—その原理と計測誤差を中心にして—. 水工学に関する夏期研修会講義集, 39, A, A. 6.1-A. 6.21.
- Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P. and Melillo, J. M.（1989）Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems. *Bio Science*, 39, 378-386.
- Ågren, G. I. and Bosatta, E.（1988）Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 54, 185-197.
- Baba, M. and Okazaki, M.（1998）Acidification in nitrogen-saturated forested catchment. *Soil science and plant nutrition*, 44, 513-525.

## 論文

アカマツにおけるクロタマムシの脱出孔分布  
—穿孔虫類 4 種との比較—<sup>\*1</sup>谷脇 徹<sup>\*2</sup>Distribution Patterns of Emergence Holes of *Buprestis haemorrhoidalis japonensis*  
(Coleoptera: Buprestidae) on *Pinus densiflora*  
—Comparison with Four Pinewood Borers—<sup>\*1</sup>Tooru TANIWAKI<sup>\*2</sup>

We investigated emergence hole distributions of *Buprestis haemorrhoidalis japonensis* and four other wood borers on *Pinus densiflora* logs at various diameters and bark thicknesses. Emergence hole densities were high for small diameters and thin bark for *Monochamus alternatus endai*, for large diameters and thick bark for *Arhopalus rusticus* and *Sipalinus gigas*, and for moderate diameter and bark thickness for *B. haemorrhoidalis*. Densities of *Chalcophora japonica* emergence holes were high for large diameters and moderate bark thickness. There were little mixing of emergence holes on each log for *B. haemorrhoidalis* and *A. rusticus*. In contrast, emergence holes of *B. haemorrhoidalis* and *M. alternatus* were mixed on many logs and larval habitats seemed to overlap each other. Although the emergence hole distribution of *B. haemorrhoidalis* was considered to fundamentally depend on adult oviposition forms, from which the maximum mixture density between *B. haemorrhoidalis* and *M. alternatus* was revolved to the linear, it is possible that the original distribution pattern of *B. haemorrhoidalis* was transformed due to interspecific interaction with *M. alternatus*.

Keyword : *Buprestis haemorrhoidalis japonensis*, density control, emergence hole, wood borers, *Pinus densiflora*

アカマツ丸太におけるクロタマムシ（以下クロタマ）および穿孔虫類 4 種の直径階別および樹皮厚別の脱出孔分布を調査した。脱出孔密度はマツノマダラカミキリ（以下マダラ）では細くて樹皮の薄い部分、ムナクボカミキリ（以下ムナクボ）およびオオゾウムシでは太くて樹皮の厚い部分、クロタマではこれらの中間的な部分で高かった。ウバタマムシの脱出孔密度が高かったのは、太くて中間的な樹皮厚の部分であった。丸太単木ごとにみるとクロタマとムナクボの脱出孔はほとんど混在しなかった。一方、クロタマとマダラの脱出孔には混在が認められ、幼虫期における生息域の重なりが推察された。クロタマの脱出孔分布は、基本的には親成虫の産卵様式に依存すると考えられるが、マダラとの脱出孔の最大混在密度が直線回帰されたことから、種間関係によってクロタマ本来の脱出孔の分布型が変化した可能性がある。

キーワード：アカマツ，クロタマムシ，穿孔虫類，脱出孔，密度調節

## 1. はじめに

穿孔虫類であるタマムシ科 (Buprestidae) のクロタマムシ (*Buprestis haemorrhoidalis japonensis*)

(以下、クロタマ) はマツ類の衰弱木や丸太に寄生する建材害虫として知られている (野淵・鈴木, 1993)。また、梁材から羽化脱出した個体がしばしば屋内で発見されるため (野淵・鈴木,

<sup>\*1</sup> Received Sep. 30, 2005; Accepted Nov. 21, 2005

<sup>\*2</sup> 東京農工大学大学院連合農学研究科 〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8 : United Grad. School of Agric. Sci., Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

1993), 家屋害虫に含まれることもあり, 林業上重要な害虫である。過去に水道鉛管や架空鉛被ケーブルを加害した記録もある (宮本, 1959)。

樹木に穿孔するタマムシ類の生態に関する研究は, スギ, ヒノキの生理的異常木を加害して枯死させるマスタクロホシタマムシ (*Ovalisia vivata*) (越智, 1981; 1984) や, 柑橘類の衰弱木や老木に寄生するミカンナガタマムシ (*Agrilus auriventris*) (田中, 1928; 大串, 1963, 1966 a, b; Ohgushi, 1967) については若干みられる。しかし, その他の穿孔性タマムシ類に関する研究は少なく, クロタマでもほとんどみられないのが現状であった。

2001年に茨城県東茨城郡内原町で発生したアカマツ (*Pinus densiflora*) 枯死木を, 東京都府中市に持ち帰って野外網室に入れておいたところ, 2003年および2004年の夏期にクロタマの羽化脱出が確認された。これまで, クロタマが樹木のどのような部分に寄生するのかについては明らかにされていないことから, クロタマの脱出孔の分布状況 (丸太の直径階および樹皮厚別) を2004年冬期に調査した。

クロタマの樹木への寄生状況を把握する際, 他種の寄生状況との比較を行い, 限られた生息域である樹木への寄生がどのような種間関係のうえに成り立っているのか検討することが不可欠と考えられた。このため, クロタマ以外に羽化脱出の確認されたマツ類の代表的な大型穿孔虫類であるカミキリムシ科 (Cerambycidae) のマツノマダラカミキリ (*Monochamus alternatus endai*) (以下, マダラ), ムナクボカミキリ (*Arhopalus rusticus*) (以下, ムナクボ), タマムシ科のウバタマムシ (*Chalcophora japonica*) (以下, ウバタマ) およびオオゾウムシ科 (Rhynchophoridae) のオオゾウムシ (*Sipalinus gigas*) (以下, オオゾウ) の脱出孔分布についての調査も同時に行った。

本論文では, クロタマと他の穿孔虫類4種で脱出孔の分布状況がどのように異なるか把握し, これらの穿孔虫類の樹木への寄生状況の違いに関わる要因およびクロタマと他の穿孔虫類はどのような種間関係にあるのかを検討したので報告する。

本文を草するにあたり, 終始指導して下さった東京農工大学 FS センター自然環境教育研究分野長岸洋一教授に, 心からの謝意を表します。

## 2. 材料および方法

### 2.1 供試丸太

供試丸太には, 2001年夏期から秋期にかけて茨城県東茨城郡内原町の一林分 (18年生アカマツ林) で発生したアカマツ自然枯死木を用いた。伐倒作業は2002年1月に行い, 伐倒木は長さ2 m程度に玉切った。これらの丸太を東京都府中市の東京農工大学農学部苗圃内の, 下層植生のある雑木林内にはい積みに置いた。その後, 2002年の5月下旬から6月上旬にかけて日当たりのよい野外網室に搬入し, 壁面に立てかけた状態においた。供試丸太の表面積の合計は53.6 m<sup>2</sup>, 体積の合計は1.3 m<sup>3</sup>であった (Table 1)。なお, Table 1の数値は剥皮後の測定値である。

Table 1. Surface area and volume in each diameter class of *Pinus densiflora* logs.

Diameter class (cm)	Surface area (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
2	0.45	0.002
3	2.12	0.016
4	1.48	0.015
5	1.74	0.022
6	1.90	0.029
7	4.29	0.075
8	4.90	0.098
9	7.57	0.170
10	8.01	0.200
11	6.25	0.172
12	6.29	0.189
13	0.00	0.000
14	2.37	0.083
15	3.39	0.127
16	0.90	0.036
17	1.92	0.082
Total	53.60	1.316

### 2.2 脱出孔調査

羽化脱出個体は, クロタマでは2003年6月下旬～8月上旬および2004年6月中旬～7月中旬, ウバタマでは2003年および2004年の夏期, ムナクボでは2003年6月上旬～9月上旬および2004年6月上旬～8月下旬, マダラでは大部分が2002年5月下旬～7月中旬, わずかに2003年5月下旬～6月中旬, オオゾウでは年度は不明であるが秋期に観察された。脱出孔調査は2004年の各種穿孔虫類の羽化脱出終了後の冬期に行った。このとき, 各丸太の長さ, 中央径

および樹皮厚を記録し、丸太ごとに穿孔虫類の脱出孔の数、形状および大きさを測定した。丸太の直径は1 cm 括約で記録した。また、樹皮厚は、2 mm 以下、2~5 mm、5 mm 以上の3段階に分けて記録し、それぞれの厚さに樹皮厚指数として1, 2, 3点を与えた。なお、樹皮厚は最大で12 mm 程度であった。また、脱出孔の大きさはクروتマ、ウバタマおよびオオゾウについてはすべて測定し、脱出孔数の多かったマダラとムナクボについては調査数を100とした。

### 2.3 データ解析

脱出孔の観察された供試丸太の直径階および樹皮厚指数の中央値を各穿孔虫類について算出し、Steel-Dwass法を用いて差の有意性を検定した。

## 3. 結果

### 3.1 脱出孔の密度と形状

各種穿孔虫類における総脱出孔数、総表面積あたりの密度、形状および大きさをTable 2に示す。脱出孔密度はムナクボが51.14個/m<sup>2</sup>と最も高く、マダラ(9.83個/m<sup>2</sup>)、クروتマ(2.28個/m<sup>2</sup>)、オオゾウ(0.62個/m<sup>2</sup>)の順に高く、ウバタマでは0.11個/m<sup>2</sup>と最も低かった。脱出孔の形状は、マダラおよびオオゾウでは円形であり、大きさも同程度であったが、樹皮下での食痕や虫糞、材内穿入孔が異なり、識別は容易であった。ムナクボでは垂直方向に長い楕円、クروتマでは水平方向に長い楕円である。ウバタマの脱出孔も楕円形をしていたが、観察例が多くないため、どの方向に長くなる性質を持つのか定かではない。

### 3.2 直径階別の脱出孔分布

各種穿孔虫類の各直径階における脱出孔密度をFig. 1に示す。脱出孔のみられた直径階の範囲は、クروتマが4~15 cm、ウバタマが10~14 cm、ムナクボが7~17 cm、マダラが2~17 cm、オオゾウが8~15 cmであった。また、脱出孔密度のピー

クがみられた直径階は、ムナクボが16 cmと最も大きく、ウバタマ(14 cm)、オオゾウ(12 cm)、クروتマ(7 cm)の順に大きく、マダラでは4 cmと最も小さかった。

脱出孔が観察された丸太の直径階中央値をFig. 2に示す。直径階中央値は、ムナクボおよびウバタマが最も大きく、次にオオゾウ、クروتマの順で大きく、マダラでは最も小さかった。各群の中央値について、ウバタマ-ムナクボ間、およびウバタマ-オオゾウ間で有意差はなかったが、その他の群間には有意差が認められた。

### 3.2 樹皮厚指数別の脱出孔分布

各種穿孔虫類の各樹皮厚指数における脱出孔密度をFig. 3に示す。脱出孔のみられた樹皮厚指数の範囲は、クروتマが1~3、ウバタマが2、ムナクボが2~3、マダラが1~3、オオゾウが2~3であった。また、脱出孔密度のピークがみられた樹皮厚指数は、ムナクボおよびオオゾウが3と最も大きく、マダラが1と最も小さく、クروتマおよびウバタマが2と中間的であった。

脱出孔が観察された丸太の樹皮厚指数中央値をFig. 4に示す。樹皮厚指数中央値はムナクボおよびオオゾウが最も大きく、クروتマおよびウバタマが中間的であり、マダラが最も小さかった。各群の中央値について、ムナクボ-オオゾウ間、およびクروتマ-ウバタマ間で有意差はなかったが、その他の群間には有意差が認められた。

### 3.3 丸太1本ごとの脱出孔の混在状況

クروتマ-マダラ間、およびクروتマ-ムナクボ間におけるアカマツ丸太単木での脱出孔の混在状況をFig. 5に示す。クروتマ-マダラ間では、脱出孔密度がクروتマで12.9個/m<sup>2</sup>以下、マダラで51.8個/m<sup>2</sup>以下の場合に脱出孔が混在する丸太がみられた。両者の脱出孔は様々な密度で混在したが、クروتマ(y)の脱出孔密度が小さくなるとマダラ(x)の脱出孔密度は大きくなる傾向がみら

Table 2. Density, figure and size of emergence holes of five wood borers on *Pinus densiflora* logs.

Species	Number Density (/m <sup>2</sup> )		Figure	Size (mm) †
<i>Buprestis haemorrhoidalis japonensis</i>	122	2.28	Horizontal ellipse	HA; 8.40 ± 1.10, VA; 5.11 ± 0.79
<i>Chalcophora japonica</i>	6	0.11	Ellipse	MaA; 11.62 ± 0.82, MiA; 6.50 ± 1.22
<i>Arhopalus rusticus</i>	2741	51.14	Vertical ellipse	HA; 3.59 ± 0.73, VA; 6.48 ± 1.18
<i>Monochamus alternatus endai</i>	527	9.83	Circle	D; 6.98 ± 1.13
<i>Sipalinus gigas</i>	33	0.62	Circle	D; 7.92 ± 1.32

†, values are mean ± SD. HA, horizontal axis; VA, vertical axis; MaA, major axis; MiA, minor axis; D, diameter.

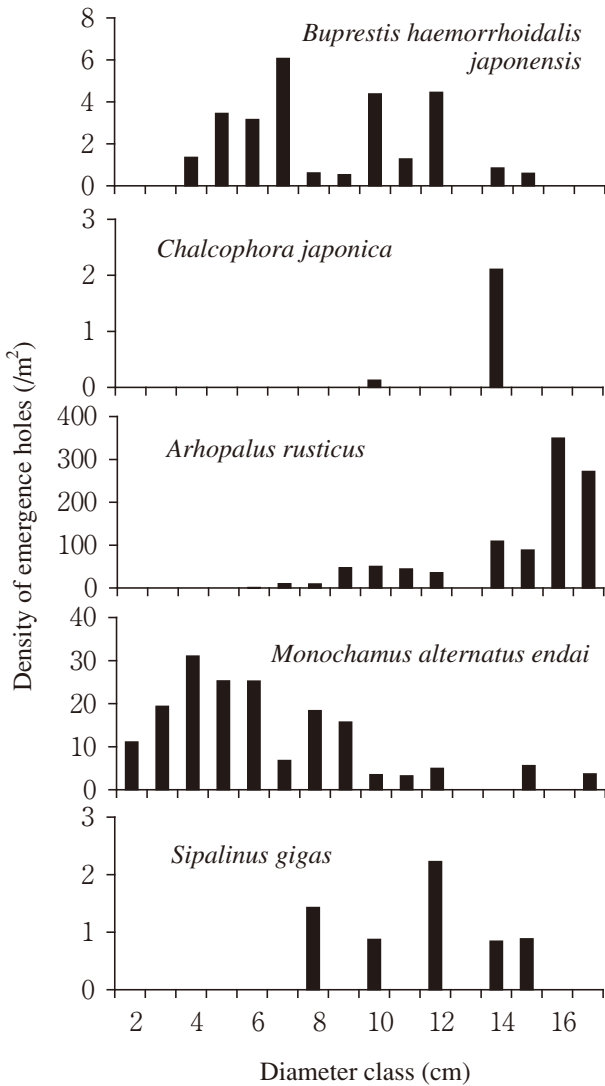


Fig. 1. Density of emergence holes of five wood borers in each diameter class on *Pinus densiflora*.

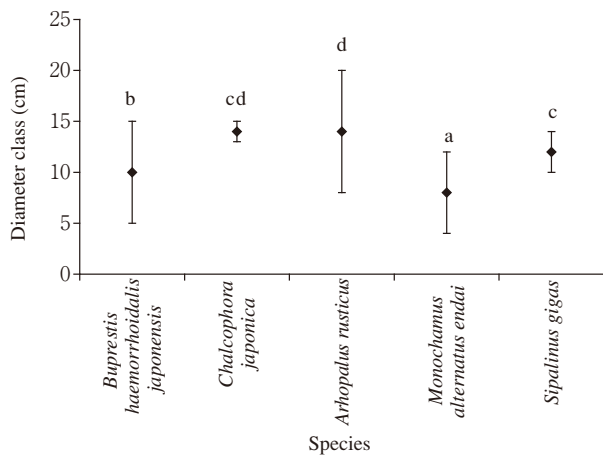


Fig. 2. Medians of diameter class of *Pinus densiflora* at emergence holes of five wood borers. Vertical bars are the quartile deviations. Medians with different letters are significantly different at 5% level (Steel-Dwass test).

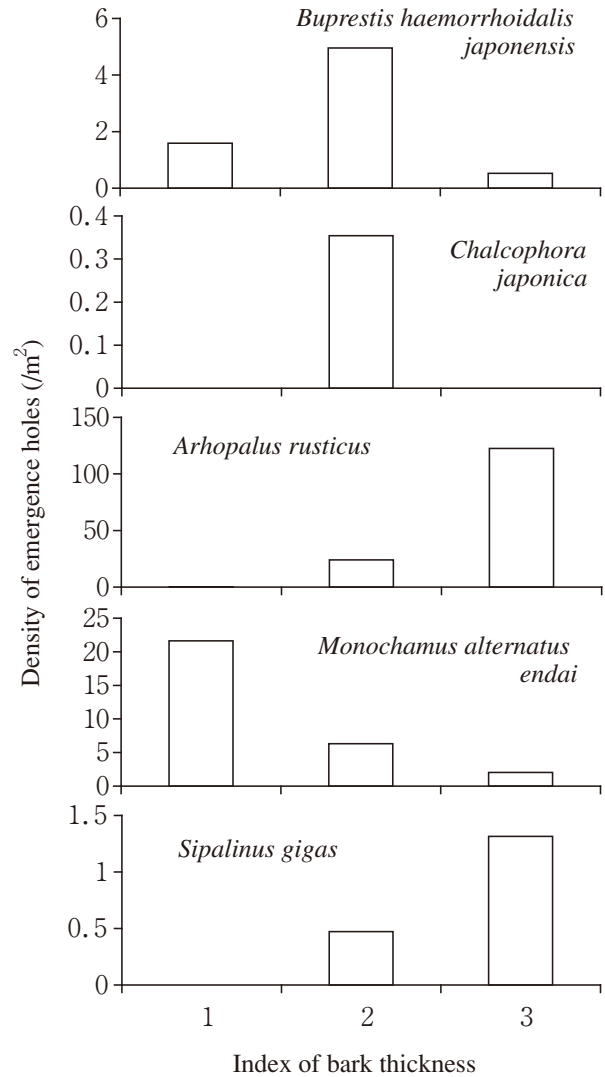


Fig. 3. Density of emergence holes of five wood borers at various bark thicknesses on *Pinus densiflora*. One point for thin bark (< 2 mm), two points for moderate thickness bark (2 - 5 mm), and three points for thick bark (> 5 mm) are given as the index of bark thickness.

れ, 最大混在密度には,  $y = -0.228x + 13.967$  ( $r^2 = 0.9818$ ) の関係が成り立っていた。

クロタマ-ムナクボ間では, 脱出孔密度がクロタマで19.5個/m<sup>2</sup>以下, ムナクボで122.6個/m<sup>2</sup>以下の場合に脱出孔が混在する丸太がみられた。クロタマ-マダラ間とは異なり, 脱出孔が混在するのは一方の相対的な脱出孔密度が低い場合のみであった。

#### 4. 考察

脱出孔密度は, マダラでは厚皮部にも認められたが通常は細くて樹皮の薄い部分, ムナクボおよびオオゾウでは太くて樹皮の厚い部分, クロタマでは直径, 樹皮厚ともにマダラとムナクボの中間的な部分で高かった (Fig. 2, 4)。また, ウバタマの脱出孔

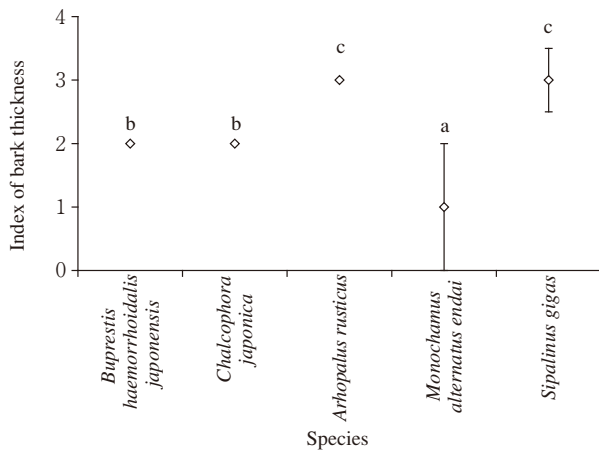


Fig. 4. Medians of the indices of bark thickness of *Pinus densiflora* for emergence holes of five wood borers.

Vertical bars are the quartile deviations. Medians with different letters are significantly different at 5% level (Steel-Dwass test). One point for thin bark (< 2 mm), two points for moderate thickness bark (2 - 5 mm), and three points for thick bark (> 5 mm) are given as the index of bark thickness.

密度が高かった部分の直径はムナクボおよびオオゾウと同様であったが、樹皮厚はクロタマと同様であった。

マダラは産卵場所として薄皮部を好み (小林 1975), また高い位置を选好し (滝沢1980), 産卵加工を行って (片桐ら1964; 小島1960) 通常1卵ずつ産卵し (井戸・武田1975; 永井・遠田1974; 越智

1969), 産卵痕の分布は一様分布となる (小林 1975)。ムナクボは産卵場所として厚皮部を好み (横原1983), 産卵加工を行わずに (小島1960), 樹皮の割れ目から樹皮下に卵塊で産卵し (小島1960; 横原1983), 材内穿入孔は強度の集中分布を示す。

以上の知見は, 本研究で得られたマダラおよびムナクボの脱出孔の分布状況と合致する (Fig. 1, 3)。穿孔虫類の幼虫は内樹皮や材部を食い進んで移動するため, 産卵地点からの移動距離はそれほど大きくないと推測される。すなわち, 穿孔虫類の脱出孔の分布は, 産卵加工の有無, 樹皮厚や直径および高さの選好性, 1回の産卵時の産卵数など, 親成虫の産卵様式に依るところが大きいといえる。

マダラの脱出孔が広範囲の直径および樹皮厚でみられたのは (Fig. 1, 3), 産卵場所の選択性が広いと推察される。一方, クロタマやムナクボでは脱出孔のみられた樹皮厚にばらつきが小さく (Fig. 2, 4), 脱出孔分布には樹皮厚とより強い関連性があると考えられた。このことは, クロタマおよびムナクボの産卵場所選択には樹皮厚が大きな要因となっていることを示唆するものであった。オオゾウは比較的湿った材に好んで産卵するが (野淵ら, 1978; 牧野・吉田, 1993), 本研究の結果から産卵場所の選択には直径や樹皮厚との関係が推察された。ウバタマの脱出孔密度の高かった樹皮厚が同じタマムシ類のクロタマと同様であったにもかかわらず, 直径がクロタマよりも大きくなったことにつ

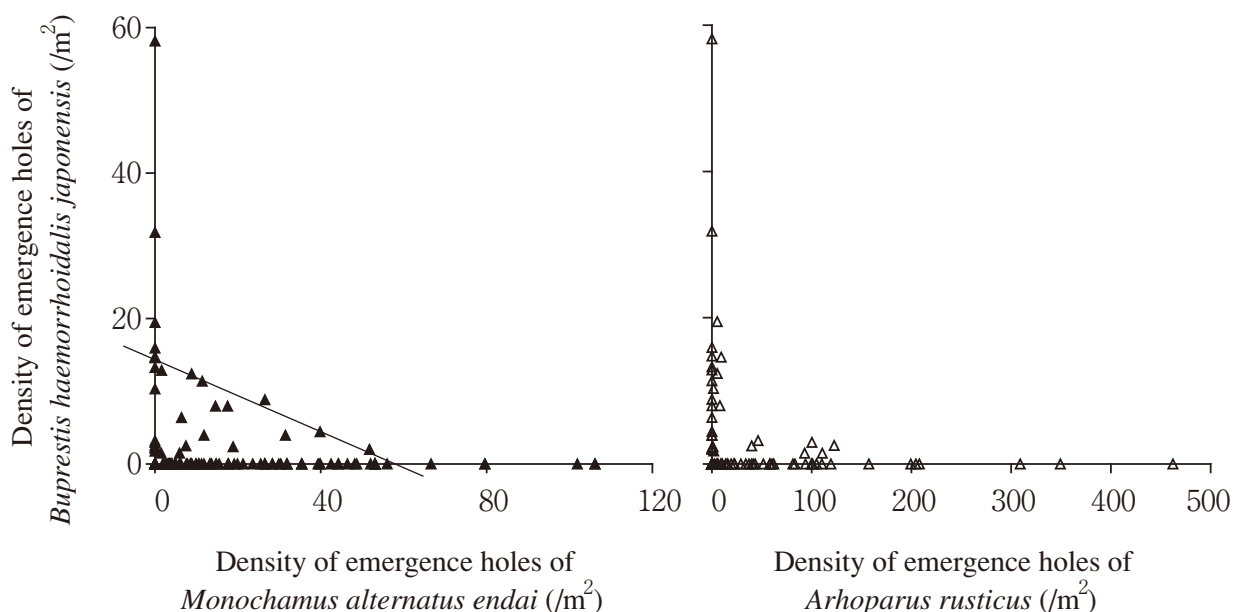


Fig. 5. Relations of density of emergence holes on *Pinus densiflora* logs, between *Buprestis haemorrhoidalis japonensis* and *Monochamus alternatus endai*, and between *B. haemorrhoidalis* and *Arhopalus rusticus*.

いても、種による産卵様式の違いに起因すると考えられた。

丸太単木単位でみると、クロタマの相対的な脱出孔密度が高い場合、マダラおよびムナクボの脱出孔はほとんど混在しなかったが、ある程度以下の密度になると混在がみられた (Fig. 5)。クロタマとムナクボの脱出孔はどちらかの相対的密度が低い状態で混在しており、材内での生息域は基本的にほとんど重なることはないと考えられた。一方、クロタマとマダラでは様々な密度での混在が認められ、幼虫期における生息域の重なりが推察された。

クロタマ ( $y$ ) とマダラ ( $x$ ) の脱出孔は、どのように混在しても  $y = -0.228x + 13.967$  の関係よりも高い密度で混在することはなかった。このことは、限られた資源をめぐる産卵時あるいは幼虫期に、両種間において競争あるいは競争の回避、あるいはすみ分けなど、なんらかの形で密度調節が行われた結果と推察される。クロタマでみられた直径階別および樹皮厚別の脱出孔分布は (Fig. 1, 3), 基本的には親成虫の産卵様式に依るところが大きいと考えられるが、マダラとの種間関係 (Fig. 5) によってクロタマが本来もっている脱出孔の分布型に変化が生じた可能性が示唆された。

なお、穿孔虫類の脱出孔調査を行っている際、クロタマの脱出孔が鉛直方向にほぼ1列に並んでいることがしばしば観察された。同じタマムシ類のマスダクロホシタマムシは直射日光の当たる側に産卵することが知られており (森本・林, 1980), クロタマの産卵場所についても直射日光の有無との関連性が示唆された。

以上のように、クロタマの脱出孔の直径階別および樹皮厚別分布状況を把握し、他種との関係や影響する要因について検討した。本研究との関連から、クロタマ成虫における産卵様式と、樹皮下および材内における幼虫期の生活様式の解明が望まれる。

### 引用文献

井戸 規雄・武田 丈夫 (1975) マツノマダラカミキリ成虫飼育による産卵と生存期間に関する2・3の知見, 86回日林講, 337~338.  
片桐 一正・越智 鬼志夫・宇賀 正郎・小島 圭三 (1964) マツノマダラカミキリの成虫の行動, げんせい14, 3~4.  
小林 富士雄 (1975) 森林昆虫の密度および分布の調査法に関する研究 (第1報) マツの穿孔虫類

の樹体内分布, 林試研報274, 85~124.

小島 圭三 (1960) 日本産カミキリムシ類の生態学的研究—成虫の産卵と幼虫の食性—, げんせい10, 21~46.  
楨原 寛 (1983) 解説 樹木の主要カミキリムシ (2) サビカミキリ, 森林防疫32 (10), 18~19.  
牧野 俊一・吉田 成章 (1993) 葉枯らし材の害虫とその対策, 林業技術612, 7~10.  
宮本 秀雄 (1959) 昆虫による鉛被ケーブルの被害, 通研経過資料763号, 67 pp.  
森本 鉄美・林 未敏 (1980) ヒノキ林におけるマスダクロホシタマムシの加害事例と生態, 日林九支研論33, 123~124.  
永井 正樹・遠田 暢男 (1974) マツノマダラカミキリの産卵推移, 85回日林講, 225~226.  
野淵 輝・遠田 暢男・越智 鬼志夫・五十嵐 豊 (1978) ヤナセスギ丸太を喰害する害虫の防除法, 昭和52年度国有林野事業特別会計技術開発試験成績報告書, 157~172.  
野淵 輝・鈴木 憲太郎 (1993) 乾材害虫と屋内で発見される昆虫—同定, 生態, 被害, 防除—, 96 pp, 林業科学技術振興所, 東京.  
越智 鬼志夫 (1969) マツ類を加害するカミキリムシ類の生態 (II) *Monochamus* 属2種成虫の羽化と産卵習性などについて, 日林誌51, 188~192.  
越智 鬼志夫 (1981) 四国地方におけるマスダクロホシタマムシの生態と被害, 森林防疫30 (7), 108~112.  
越智 鬼志夫 (1984) マスダクロホシタマムシ, 林業と薬剤89, 1~4.  
大串 竜一 (1963) ミカンナガタマムシの卵巢の発育と産卵前期間について, 応動昆7 (2), 92~96.  
大串 竜一 (1966 a) ミカンナガタマムシの生態に関する研究, 第1報, 成虫の発生時期について, 応動昆10, 55~63.  
大串 竜一 (1966 b) ミカンナガタマムシの多発環境の研究, 園芸学会雑誌35 (4), 361~366.  
Ohgushi, R. (1967) an out break of the citrus flat-headed borer, *Agrilus auriventris* E. SAUNDERS in Nagasaki Prefecture, Res. Popul. Ecol. 9, 62~74.  
滝沢 幸雄 (1980) 餌木の高さとマツノマダラカミ

キリの産卵痕数，日林東北支誌32，212～213.  
田中 顕三（1928）柑橘の大害虫ミカンナガタマム

シについて（予報），農業及園芸3，1437～  
1444.



## 研究資料

多摩丘陵の森林小流域における水位観測記録<sup>\*1</sup>小柳 信宏<sup>\*2,3</sup>・対馬 孝治<sup>\*2,4</sup>・飯泉 佳子<sup>\*2,4</sup>・苗村 晶彦<sup>\*2,5</sup>・小倉 紀雄<sup>\*2,6</sup>

## The Observation Record of Water Level in a Small Forest Basin in Tama Hill

Nobuhiro OYANAGI<sup>\*2,3</sup>, Kouji TSUSHIMA<sup>\*2,4</sup>, Yoshiko IZUMI<sup>\*2,4</sup>, Akihiko NAEMURA<sup>\*2,5</sup>,  
and Norio OGURA<sup>\*2,6</sup>

This report summarizes water level observations, recorded in the approximately 8 years from December 1994 to March 2003, for mountain streams in small forested watershed in the Field Museum Tama Hills, Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology. Observations were intermittent, and thus seasonal changes in the amount of runoff water are unclear; however, there was a tendency for the amount of runoff to be comparatively high when the amount of precipitation up to 24 hours before was 20 mm or more. When amounts of runoff water were compared in watersheds at two adjacent locations, magnitude trends in the amount of runoff water varied depending on the observation period. Although the reason for this is unclear, it is possible that differences in the slope or soil layer thickness of the different watersheds have an effect on the runoff paths and retention time of precipitation.

*Keywords* : small forested watershed, water level observation.

東京農工大学 FM 多摩丘陵の森林小流域における溪流の水位観測記録を1994年12月～2003年3月の約8年間についてまとめた。観測が断続的なため、流出水量の季節変化は明らかでないものの、24時間前までの先行降水量が20 mm 以上のとき流出水量は比較的多い傾向であった。隣接する2か所の流域で流出水量を比較したところ、観測期間によって流出水量の大小傾向が異なった。この理由は明らかでないものの、各流域における傾斜や土層厚の違いが、降水の流出経路や滞留時間に影響している可能性が考えられた。

キーワード：森林小流域、水位観測

## I. はじめに

世界の森林面積は約38億7千万 ha といわれている(国際連合食糧農業機関, 2002)。これは陸地面積の約3割であるが、太陽エネルギーを利用した森林の高い物質生産性により、森林の植物体バイオマ

スは陸地全体の約9割と大部分を占めている。また、森林土壌に降水が浸透するときの物理的・化学的な過程は、河川の洪水と渇水、水質形成に大きな影響を及ぼしている。このように、森林は木質資源の供給源であるだけでなく、水源涵養機能や水質浄化機能をもち、人間の生活に不可欠なものである。

<sup>\*1</sup> Received 2004. 5. 25 : Accepted 2005. 2. 23

<sup>\*2</sup> 東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター 〒183-8509東京都府中市幸町3-5-8 : Field Science Center, Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

<sup>\*3</sup> 現在：財団法人 新潟県環境衛生研究所 〒959-0291新潟県西蒲原郡吉田町東栄町8-13 : Environment Research Science Niigata, Yoshida, Niigata 959-0291, Japan

<sup>\*4</sup> 現在：独立行政法人 土木研究所 〒305-8516 茨城県つくば市大字南原1-6 : Public Works Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305-8516, Japan

<sup>\*5</sup> 現在：財団法人 平岡環境科学研究所 〒220-0102 神奈川県津久井郡城山町原宿5-15-6 : Hiraoka Environmental Science Laboratory, Shiroyama, Kanagawa 220-0102, Japan

<sup>\*6</sup> 現在：東京農工大学名誉教授 Emeritus Professor, Tokyo University of Agriculture and Technology

東京農工大学FM多摩丘陵（東京都八王子市堀之内）では、森林生態系の物質循環に関する研究を行うために設定された試験流域において、1976年から溪流の水位観測が継続されている。FM多摩丘陵における近年の研究報告によれば、1970年代後半から1990年代後半にかけて、降水中の無機態窒素濃度は増加傾向にある。この原因の一つとして、周辺地域の住宅・土地開発および道路網整備により、自動車の排ガス量が増加したことが指摘されている（吉川ら、2001）。また、このように多量の窒素負荷を受けている森林の渓流水からは、年間を通して硝酸態窒素が比較的高濃度で検出されている（Baba and Okazaki, 1998）。窒素は、植物の生長に欠かせない養分元素であるが、過剰な負荷が続いた場合、森林に及ぼす悪影響が懸念される。人間活動と森林生態系における物質循環の相互作用を解明するために長期モニタリングを必要とする研究にとって、溪流の水位観測記録は基礎的な資料の一つとなっている。

今日、野外における様々な環境教育活動が行われている。大学などの教育・研究機関も、このような地域活動に積極的に取り組んでゆくことが求められる。FM多摩丘陵の森林地域における水位観測記録は、気象や動植物相などの記録とともに、人間活動の影響を強く受けている森林の定置観測資料として貴重である。現地スタッフの研究者および技術者は、観測を継続しつつ、順次それらを公表していくことが望まれる。

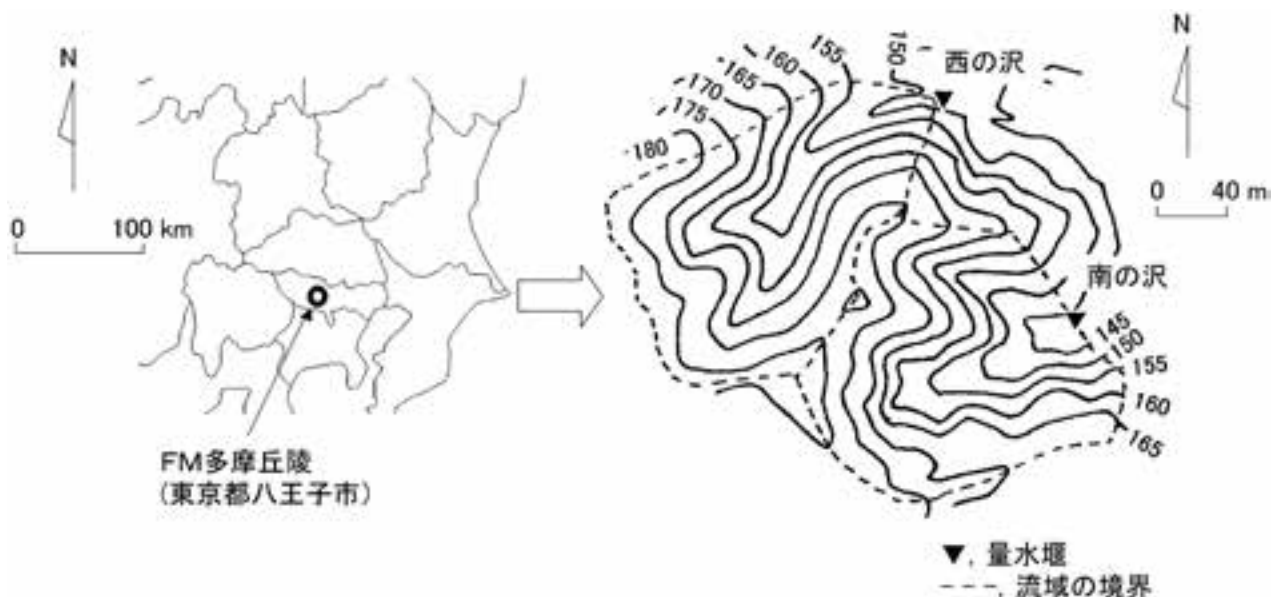
本報告では、FM多摩丘陵の森林流域における水位

観測記録について、記録紙で保存されている1994年12月～2003年3月の約8年間についてとりまとめを紹介する。

## II. 観測地の概況と観測方法

東京農工大学FM多摩丘陵は、多摩川の支流である大栗川の源流域に位置する。本稿の観測地は、「西の沢」および「南の沢」と呼ばれる2か所の森林小流域である（図1）。西の沢は、流域面積が2.15 ha、植生はコナラ（*Quercus serrata*）を主とする落葉広葉樹二次林（1.55 ha）と、スギ（*Cryptomeria japonica*）およびヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）の針葉樹人工林（0.60 ha）である。南の沢は、流域面積が2.2 ha、植生はコナラを主とする落葉広葉樹二次林である。

西の沢では、流域下端に設置した量水堰において、1976年からVノッチの越流水位を減水位計により観測している。また、週1回の記録紙交換時に、減水位計の調整のため、定規を用いて1 mm 間隔で水位を直接観測している。保存されている1994年12月以降の記録紙のデータを整理した結果、水位計の観測記録と定規を用いた観測記録の間にいくつかの不一致（大きなもので25 mm 程度）が認められ、このような不一致の認められた期間は水位計の記録を補正する必要があることがわかった。この課題については別報で検討することとし、本報告では、定規で直接観測した水位記録のみを1994年12月～2003年3月の約8年間についてとりまとめた。



図一 観測地の概況

また、隣接する西の沢と南の沢で流出水量に違いがみられるか確認するために、2002年10月～2003年3月のおよそ5か月間、それぞれの流域で水位と流出水量の観測を週1回の間隔で行った。流出水量は、量水堰のVノッチを越流する水が採水容器を満たす時間を測定し算出した。なお、採水容器は、流出水量に応じて1 Lまたは5 Lのものを使用した。

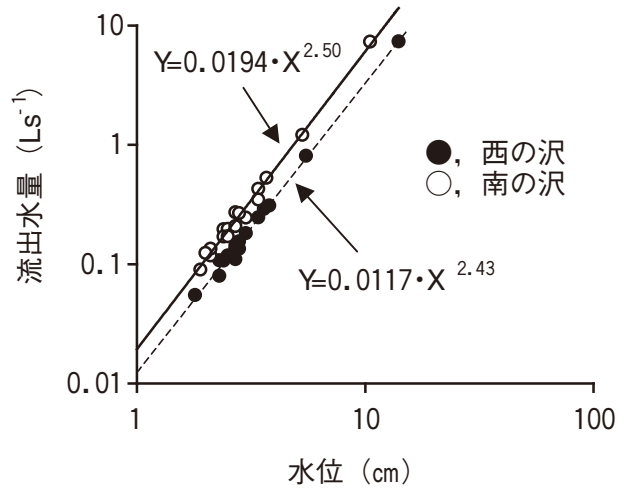
降水量は、円筒形に掘った地下部に2 Lのガラス瓶を置き、地上部から直径約16 cm、高さ約36 cmのブリキ製漏斗を被せてガラス瓶に接続したものを付近の露場に設置し、毎朝9時頃に観測を行った（富沢ら、1995；富沢ら、1999）。

水位の観測時刻から24時間前までの積算降水量（先行降水量）を求め、降水量と流出水量の関係について検討を行った。先行降水量は、付近の露場に設置してある転倒マス式自動雨量計（安藤計器 AN-2）の記録より求めた。

### Ⅲ. 観測結果

水位と流出水量の関係を図2に示す。南の沢では、最小二乗法により（1）式を得た。

$$Y = 0.0194 \cdot X^{2.50} \quad \dots(1)$$



図一2 水位と流出水量の関係

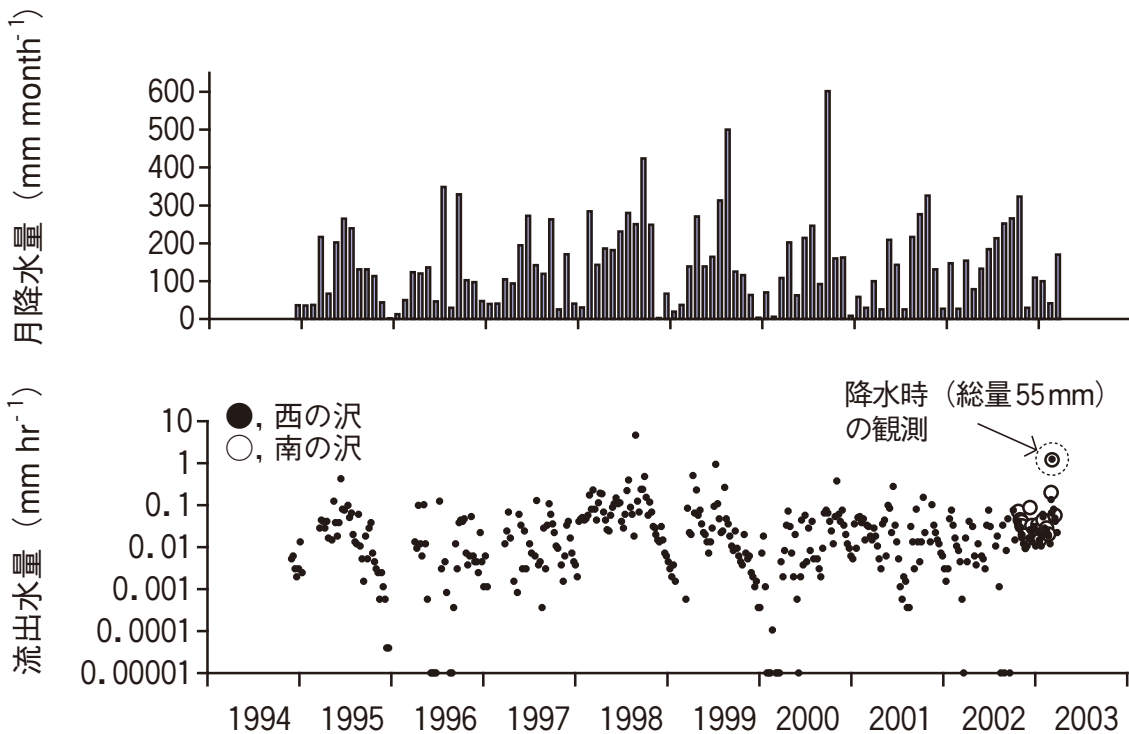
南の沢（実線）の関係式； $\text{Log } Y = (-1.712 \pm 0.033) + (2.50 \pm 0.07) \cdot \text{log } X$ 、

$R^2 = 0.990$ ,  $n = 14$ ；Y, 流出水量 ( $\text{L s}^{-1}$ )；X, 水位 (cm)； $\pm$ , 標準誤差。

西の沢（破線）の関係式は Baba and Okazaki (1998) による。

ここで、Y：流出水量 ( $\text{L s}^{-1}$ )、X：水位 (cm) である。

西の沢では、図2の破線で示したように、Baba and Okazaki (1998) によって水位と流出水量の関



図一3 月降水量と流出水量の季節変化

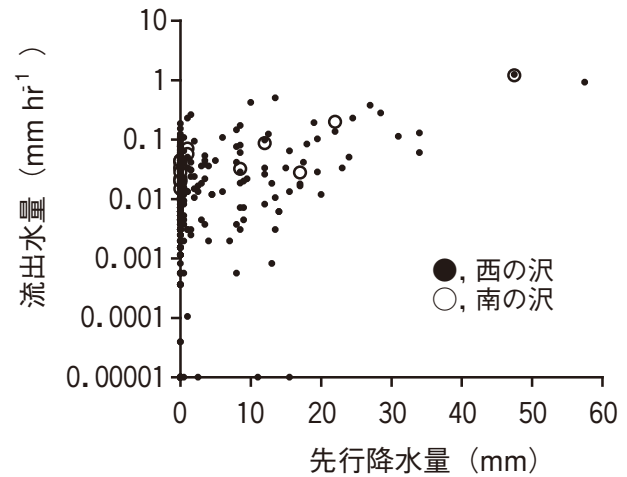
水位の検出限界（1 mm）未満の流出水量（およそ  $0.000007 \text{ mm hr}^{-1}$  未満）は、縦軸最小目盛り（ $0.00001 \text{ mm hr}^{-1}$ ）上に表記した。

係が得られている。本調査で観測された西の沢における水位と流出水量の最大値（それぞれ14.0 cm,  $7.37 \text{ L s}^{-1}$ ）は, Baba and Okazaki (1998) が観測した最大値（それぞれおよそ6 cm,  $1 \text{ L s}^{-1}$ ）を大きく上回ったものの, ほぼ同一の近似線上にあった（関係式において,  $X=14.0(\text{cm})$  のとき  $Y=7.13(\text{L s}^{-1})$  であった）。このように, 本調査で観測されたかなり大量の出水時でも, 既存の関係式（Baba and Okazaki, 1998）により水位から流出水量の算出が可能なが確認された。

1994年12月～2003年3月の月降水量と流出水量の季節変化を図3に示す。1995年～2002年の年間降水量の平均値（±標準偏差）は1,759（±310）mmであった。毎年5月から10月にかけての降水量は, 年間降水量の69～76%と集中しており, 高温期に雨量が多い日本の気候の特徴を示していた。一方, 西の沢における流出水量は, 月降水量のような明瞭な季節変化は認められなかった。これは, 観測記録が断続的なためといえる。流出水量の変動は, 観測前の降水量などと併せて検討する必要がある。

西の沢では, 1996年, 2000年および2002年に, 流出水量が非常に少ないか渇水の状態が観測された。渇水は連続観測されることが多く, 最初に渇水が観測された日から2週間程度前まで無降水期間である場合が多かった。このことから, 西の沢では, 2週間程度の無降水期間で基底流出が低減しやすいといえる。また, 2003年3月の総量55 mmの降水時に行った観測では, 西の沢と南の沢のいずれも流出水量が増加した。降水が集中する5月～10月には, 1回の降水の総量が100 mm以上の場合もあった。そのような出水時のピーク流量は, 2003年3月の観測値を上回ると予測される。5月～10月のように, 降水量が多く, 樹木や土壤微生物の活動が盛んな高温期には, 森林における雨水を介した物質の流入・流出量が一般に多い。したがって, 森林生態系における水および溶存物質の移動量を把握する上で, 高温期における降水量および流出水量を正確に観測することが重要といえる。

水位の測定時刻から24時間前までの積算降水量（先行降水量）と流出水量の関係を図4に示す。先行降水量と流出水量の関係は, いずれの流域もばらつきが大きかった。しかしながら, 先行降水量が20 mm以上になると, 流出水量は比較的多くなるようにみられた。先行降水量が少ない場合は, 土壌中の間隙量の違いなどが降水の流出経路や滞留時間に影

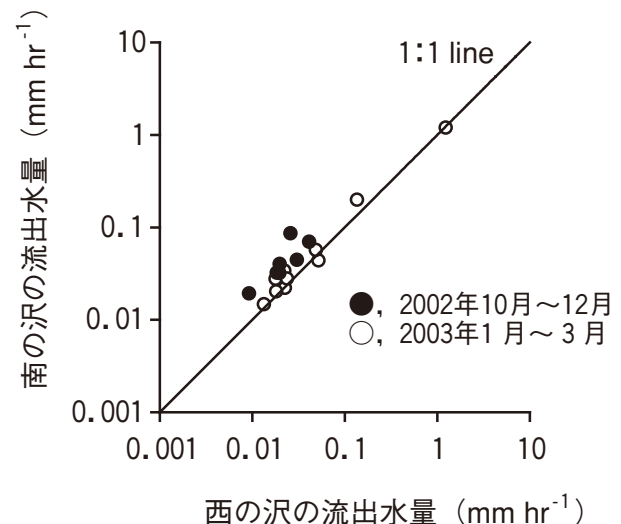


図—4 先行降水量と流出水量の関係

水位の検出限界（1 mm）未満の流出水量（およそ  $0.000007 \text{ mm hr}^{-1}$  未満）は, 縦軸最小目盛り（ $0.00001 \text{ mm hr}^{-1}$ ）上に表記した。

響し, 流出水量に違いが生じるものと推測される。田中ら（1984）は, 南の沢で降水時の流出成分を解析した結果, 土層中に形成されたパイプ状の穴が降水時の主要な流出経路として重要であることを指摘した。また, 新藤ら（1988）は, そのようなパイプの形成と崩壊が斜面土層中で絶えず生じることにより, 同じ流域でも降水に伴う流出特性は一定でないとして述べている。

西の沢と南の沢における流出水量の関係を図5に示す。2002年10月から12月までの期間は, 南の沢の流出水量が西の沢に比べて1.5～3.3倍と常に多かった。一方, 降水量が少ない2003年1月から3月までの期間は, 各流域の流出水量は同程度であった。観測期間によって流出水量の大小傾向が異なる理由は



図—5 西の沢と南の沢における流出水量の関係

明らかでないものの、各流域における傾斜や土層厚の違いが、降水の流出経路や滞留時間に影響している可能性が考えられる。

#### Ⅳ. おわりに

渓流水位の長期的な観測記録は、森林生態系における物質循環を明らかにするための基礎的な資料の一つである。しかしながら、野外における観測は、豪雨による量水堰の水漏れや計器の故障などにより、データの欠測を生じることが少なくない。本報告でとりまとめた観測記録は、定規を用いて週1回の間隔で直接観測した断続的なものであったため、降水時の流出特性や年間流出水量を明らかにすることはできなかった。定規による観測記録を用いたのは、前述のように連続観測を行っている水位計が不調となる時期があり、本報告のとりまとめ結果も参考にしながらデータの補正を検討する必要があるためである。このような不具合が生じた原因の一つは、流域の水位観測が個々の研究者による調査研究を目的として数か月程度の短期間で行われ、年間を通じた観測データの変動や計器の変調に留意することが少なかったためかもしれない。渓流水位のモニタリングは、本報告で紹介したFM多摩丘陵のみならず、森林を保有し学術的に利用する全ての施設において、組織的な仕事として継続していく必要がある。

本報告の作成にあたり、東京農工大学FM多摩丘陵の原 宏教授、富沢 実氏に多大なご助力をい

ただいた。記して感謝いたします。

#### 引用文献

- Baba, M. and Okazaki, M. (1998) Acidification in nitrogen-saturated forested catchment. *Soil Science and Plant Nutrition* 44 : 513-525.
- 国際連合食糧農業機関 (2002) 2002年版 世界森林白書 (2001年報告) (国際食糧農業協会 翻訳・発行), 311 pp, 農山漁村文化協会 発売, 東京.
- 新藤静夫・丹下 勲・寺島治男 (1988) 斜面末端部における地中水の挙動—その水文地形的意味—. *波丘地研究* 6 : 124-143.
- 田中 正・安原正也・丸井敦尚 (1984) 多摩丘陵源流域における流出機構. *地理学評論* 57-1 : 1-19.
- 富沢 実・富澤徳重・小倉紀雄・鈴木重義・安部喜也 (1995) 多摩試験地の気象観測データ 1989年~1993年. 東京農工大学農学部波丘地利用実験実習施設, 12 pp.
- 富沢 実・楊 宗興・安部喜也・小倉紀雄・土器屋由紀子 (1999) 多摩試験地の気象観測データ 1994年~1998年. 東京農工大学農学部波丘地利用実験実習施設, 12 pp.
- 吉川哲生・苗村晶彦・土器屋由紀子 (2001) 波丘地の降水の化学成分. 多摩丘陵の自然と研究—フィールドサイエンスへの招待—, 土器屋由紀子・小倉紀雄・安富六郎・内川 武編著, 134 pp, けやき出版, 東京 : 58-68.

## 研究資料

食品残渣の家畜飼料・堆肥化におけるエネルギー利用  
システム確立の検討<sup>\*1</sup>板橋 久雄<sup>\*2</sup>・神田 修平<sup>\*2</sup>・松村 昭治<sup>\*2</sup>・月村 光義<sup>\*3</sup>・亀山 秀雄<sup>\*4</sup>  
桜井 誠<sup>\*4</sup>・秋澤 淳<sup>\*5</sup>・濱本 芳徳<sup>\*5,6</sup>・柏木 孝夫<sup>\*5</sup>Investigation for the Establishment of Energy Utilization System during  
Animal Feed and Manure Processing from Food Waste Products <sup>\*1</sup>Hisao ITABASHI<sup>\*2</sup>, Syuhei KANDA<sup>\*2</sup>, Syoji MATSUMARU<sup>\*2</sup>, Mitsuyoshi TSUKIMURA<sup>\*3</sup>,  
Hideo KAMEYAMA<sup>\*4</sup>, Makoto SAKURAI<sup>\*4</sup>, Atsushi AKISAWA<sup>\*5</sup>, Yoshinori HAMAMOTO<sup>\*5</sup>  
and Takao KASHIWAGI<sup>\*5</sup>

Recently, many projects were carried out on the usage of the biomass energy, for example the usage of methane from the organic wastes. However, until now due to the economic restriction and problems in the energy transfer methods, these techniques were not practically applied. In this research, the new methane fermentation system by using biomass, the energy transfer system and energy using systems were studied to establish the energy recycling system.

## 1. The methane fermentation system

By using the wastes of two growing cattle, changes of the temperature in methane fermentation tank and quantity of gases were measured continuously. The methane fermentation system is a simple structure, which consists of five parts, including ingredients throw tank, adjustment tank, methane fermentation tank, sulfa removing equipment and gas holder. It was simple structure.

Amount of cattle waste input was as low as 6 kg/day, and methane production was about 0.1 m<sup>3</sup>/day. It might be due to low temperature. It was interesting that methane bacteria were active even at low temperature. When fermentation tank was warmed, the production of methane gas increased by 5 to 12 times compared to the untreated condition.

Hydrogen sulfide was not detected from the gas holder tank. Amounts of methane and carbon dioxide in the gas holder tank were 63% and 12% respectively. The pH of the ingredients was 7.0, and liquids of methane fermentation tank and methane ingested tank tended to be more alkaline. Ammonia concentrations showed similar pattern to pH. The phosphoric-ion, nitrite nitrogen and nitric nitrogen were not detected in these tanks.

<sup>\*1</sup> Received Jun. 9, 2005; Accepted Sep. 25, 2005

<sup>\*2</sup> 東京農工大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター 〒183-8509東京都府中市幸町3-5-8: Field Science Center, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

<sup>\*3</sup> ピークワークス株式会社 〒327-0821栃木県佐野市高萩町1056-28: Peculier Works Corp., Sano, Tochigi 327-0821, Japan

<sup>\*4</sup> 東京農工大学大学院共生科学技術研究院 〒184-0012東京都小金井市中町2-24-16: Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology Koganei Tokyo 184-0012 Japan

<sup>\*5</sup> 東京農工大学大学院生物システム応用科学研究所 〒184-8588東京都小金井市中町2-24-16 BASE, Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

<sup>\*6</sup> 現九州大学大学院工学研究院 〒819-0395福岡市西区広岡744

## 2. The settlement of energy transfer system

It is expected that gas including about 60% methane occurs from the methane fermentation tank, which can be combusted at 300 C. the combustion heat can be used to dry garbage processes. The methane fermentation tank was an one-tank equipment produced by P Works Co. Ltd. The novel combustion device was produced by ALCAT Co. Ltd. with the technology of Kameyama Lab., Tokyo University of Agriculture and Technology. It can deal with methane of 24 m<sup>3</sup>/day, flow rate of 0.5 m<sup>3</sup>/min (3 % methane). The catalyst combustion device was applied to burn 60% methane from the fermentation tank. Gas chromatograph results show that the composition of the inlet gas was CH<sub>4</sub> 63%, CO<sub>2</sub> 22%, (N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>) 15%. The flow rate was 0.025 m<sup>3</sup>/min. The results show that the exit gas temperature can keep at 200°C when the combustion temperature is controlled at 300°C. Furthermore, the exit temperature can be varied from 200 to 400°C freely when the air ratio is controlled.

In addition, the installed novel catalytic deodorization device was also produced by ALCAT Co. Ltd. with the technology of Kameyama Lab., Tokyo University of Agriculture and Technology. 90% offensive odor can be decomposed by the device at 0.5 m<sup>3</sup>/min (concentration of 100 ppb). The result shows that 177 ppb propionic acid can be decomposed completely by the device, which proves the device is promising for the deodorization of a cow house.

## 3. The feasibility to produce cooling by an advanced adsorption heat pump

The objective of this study is to evaluate the feasibility to produce cooling by an advanced adsorption heat pump utilizing the heat released from a fertilizing process. The study investigated the performances of the heat exchanger and the adsorption chiller experimentally.

Taking the property of discharged gas from the process and the specification of the machine into account, possible recovered heat of 60°C was estimated as 190 kW and 50 kW for the beginning stage and the following stage, respectively. The gas at the beginning stage contains much humidity due to drying process. So, heat recovery performs well because it can recover latent heat as well. Experiments that actually recovered heat from humid air of various conditions were conducted to measure the heat transfer performance. The results indicate that heat transfer from humid air is more effective than that from dry air by the factor of 6 to 17.

Because produce cooling from 60°C heat source is difficult for conventional adsorption chillers, the advanced cycle of 2 stage adsorption chiller was examined with various heat source temperatures. The chiller uses Silica-gel and water as the working fluid. The performances of the cooling capacity and COP show that cooling is possible even at 53°C, which implies that the proposed system is technologically feasible.

Based on the results, cooling performance is estimated to be 28 kW and 7 kW for the beginning stage and the following stage, respectively.

*Keywords* : food waste, biomass, feed and Inanure processing, energy utilization system

バイオマスエネルギーの利用については、廃棄物から得られるメタンを燃料として利用するなどの取り組みが始められてきたが、経済性の制約やエネルギー変換技術の確立等の問題からまだ本格的な導入段階には至っていない。本研究では、バイオマスエネルギー利用における新たなメタン発酵システム、エネルギー変換システムとエネルギー利用システムを開発し、エネルギーリサイクルシステムを確立するための基礎的な検討を行った。

### 1. 牛糞を用いるメタン発酵装置の設置

育成牛2頭分の排泄糞をメタン発酵装置に投入し嫌気発酵を行った。それらから発生するガス量、組成、これらの変動等について調査した。メタン発酵装置は、原料投入槽、調整槽、メタン発酵槽、ガス貯留槽、脱硫装置およびガスホルダーの5パーツから構成された比較的簡易な構造であり、操作も安易であった。糞投入量は、平均約6 kg/日と少なく、メタン発生量も0.1 m<sup>3</sup>/dayとやや少なかった。これは、冬場でメタン発酵槽内の温度が平均12.5℃と低かったためであるが、低温にもかかわらずメタン菌が比較的良く活動していたことは興味深い。メタン発酵槽を加温した場合、メタンの発生量は5～12倍と著しく増加した。

脱硫装置を通過させたガス貯留タンクから硫化水素は、検出されなかった。ガス貯留槽ではメタンガス濃度63%、炭酸ガス濃度22%であった。投入槽の溶液はpH 7.0と中性であり、メタン発酵槽・メタン消化槽では弱アルカリ性となった。電気伝導度と塩類濃度については投入槽が、メタン発酵槽とメタン消化槽に比べてやや高かった。また、アンモニア濃度も同様の傾向であった。燐酸イオン、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素は、3者ともに検出されなかった。

### 2. エネルギー変換システムの設置

メタン発酵槽では、メタンを約60%含むガス類が発生すると予想されるが、これを300℃程度で触媒燃焼させ、その燃焼ガスを生ゴミの乾燥処理用熱源にする。メタン発酵槽は、(株)ピーワークス製の簡易な一槽型のものを利用した。触媒燃焼装置は、東京農工大学工学部亀山研究室で開発された触媒技術の提供を受けて(株)アルキヤットが製造する新型燃焼装置（最大メタン燃焼量24 m<sup>3</sup>/日、3%メタン含有ガス燃焼能力0.5 m<sup>3</sup>/分）を設置した。触媒燃焼装置を用いて発酵槽で発生したガスの燃焼実験を行った。今回の発生ガスの組成は、CH<sub>4</sub>63%、CO<sub>2</sub> 22%、[N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>] 15%であった。発生ガス量は0.025 m<sup>3</sup>/分であった。その結果、発生メタンを300℃レベルで触媒燃焼させ、200℃の燃焼ガスを定常的に得られることが分かった。空気比を調整して触媒燃焼温度を制御することにより、200℃から400℃の範囲で燃焼排ガスを自由に得られることが確認された。

また、本システムからは臭気が発生するので、それを除去するのが課題であるが、そのために、同様に本学工学部亀山研究室で開発されたアルマイト触媒技術の提供を受けて(株)アルキヤットが製造する新型触媒脱臭器（100 ppb臭気を0.5 m<sup>3</sup>/分で90%分解）を導入して設置した。その結果、臭気ガスであるプロピオン酸177 ppbを本装置で完全に分解でき、牛舎の脱臭装置として使用可能であることが分かった。

### 3. 飼料化装置排熱による冷熱製造

飼料化装置の排気ガスから熱を回収し、それを吸着冷凍機に投入することによって冷水を発生させるシステムの可能性評価を目的として実験を行った。冷水は空調機を通じて畜舎の冷房に利用することが想定される。そこで、排熱回収熱交換器と吸着冷凍機の2点について実験的に性能を検証した。排熱交換器については飼料化装置の初期および後期の排気ガス性状（温度、湿度）を考慮して、現有の飼料化装置の仕様に基づき60℃での回収可能熱量を推定した。その結果、飼料化初期においては約190 kW、後期においては約50 kWの熱回収が可能と見込まれた。また、実際に熱交換器を用いて湿り空気からの熱回収実験を行った。その結果、湿り空気に対する熱通過率は乾き空気に対する値よりも6～17倍大きいことが確認され、飼料化工程から排出される湿り状態の排ガスから熱交換する効率が高いことが検証できた。一方、60℃温水によって冷水を発生させるためには、従来の単段型吸着冷凍機では困難である。そこで、二段型吸着冷凍サイクルの実験機を用いて、駆動熱源温度の低温化に伴う性能（冷凍能力、成績係数）の変化を実測した。その結果、二段型吸着冷凍サイクルを用いれば53℃でも冷熱発生が可能であることが確認できた。

以上より、現有飼料化装置から発生可能な冷熱量は、飼料化初期では28 kW、後期では7 kWと推定された。

キーワード：食品残渣、バイオマス、飼料・堆肥化、エネルギー利用システム



## 1. はじめに

近年、各種のバイオマスエネルギーの利用については、食品廃棄物等から得られるメタンを燃料として利用するなどの取り組みが始められてきたが、現段階では、これらの利用方式は、その収集・運搬体制、経済性の制約およびエネルギー変換技術の確立等の問題から本格的な導入段階には至っていない。

食品廃棄物は家畜の飼料や肥料としても利用できるので、東京農工大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター（FSセンター）では、給食残渣（生ゴミ）を乾燥処理装置で飼料化し、乳牛の飼料の一部として用い、その排泄物（糞）の新規かつ経済的なエネルギー利用システムを開発しようとしている。この研究では、家畜排泄物バイオマスをメタン発酵させ、触媒技術により効率的に熱源に変換し、生ゴミの乾燥処理に利用するとともに、処理過程で生じた排熱をさらに吸着冷凍装置により冷熱を発生させ、牛舎などの冷房に利用する新たなエネルギーリサイクルシステムの開発をめざしている（図1）。

そこで、バイオマスエネルギーの導入促進を積極的に図るための一環として、このエネルギー利用システムにおける経済データ、エネルギー変換効率、利用方法に係わる運用データなどの各種の資料を収集し、本システムの実用性について検証した。

## 2. 給食調理残渣の飼料化処理

バイオマス収集システムで収集する給食調理残渣（生ゴミ）は、府中市環境安全部でのリサイクル事業の一環として府中市給食センターから1日に約

100 kgがFSセンターに搬入された。この残渣は主に野菜より成りすべて植物由来であった。これをフスマ約13 kgと混合し生ゴミ乾燥処理装置（図2、日立湘南電子製 ED-250型）に投入し、灯油バーナーによる高温下（約80℃）で好気性菌（バチロンZ）を2 g添加し、約4時間攪拌乾燥後、約30 kgの一次処理物を得た。この処理物の成分は、乾物87%、粗タンパク質21%、中性デタージェント繊維26.5%であった。処理物を乳牛の飼料の一部として用い、排泄された糞のエネルギー源としての利用の効率化を図るために以下の3点につき検証した。

はじめに、牛の排泄物を簡易な発酵槽で嫌気処理し、エネルギーとして利用するために効率的にメタンを発生させる方法を検討した（メタン発酵システム）。次に、発生したメタンなどのガスを回収し、本学工学部で開発されたアルマイト触媒燃焼技術で燃焼させ、スチーム熱源とし、生ゴミの乾燥処理用の熱源の一部として利用するための検討を行った（エネルギー変換システム）。さらに、本学大学院生物システム応用科学教育部（BASE）と工学部で開発された低温排熱利用吸着ヒートポンプを用い、熱利用後の排熱を利用して冷熱を発生させ、農業施設などの冷房への利用を前提とした検討を行った（エネルギー利用システム）。また、工学部で開発されたアルマイト触媒を用いた脱臭技術を導入し、家畜関連施設の脱臭を目指した実験も行った。

以上のように、バイオマスエネルギー利用における新たなかつ経済的に成立しうるバイオマス収集・運搬体制、メタン発酵システム、エネルギー変換システムとエネルギー利用システムを開発し、エネルギーリサイクルシステムを確立するための実験・検

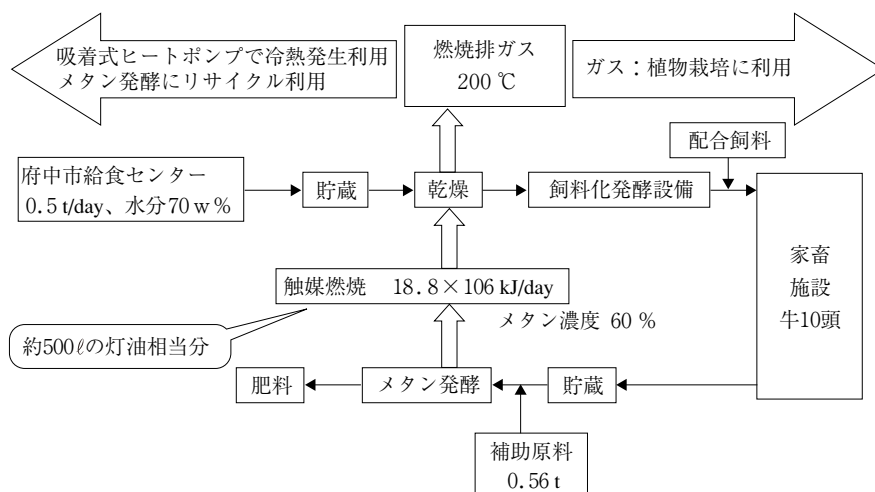


図1 新たなエネルギーリサイクルシステム

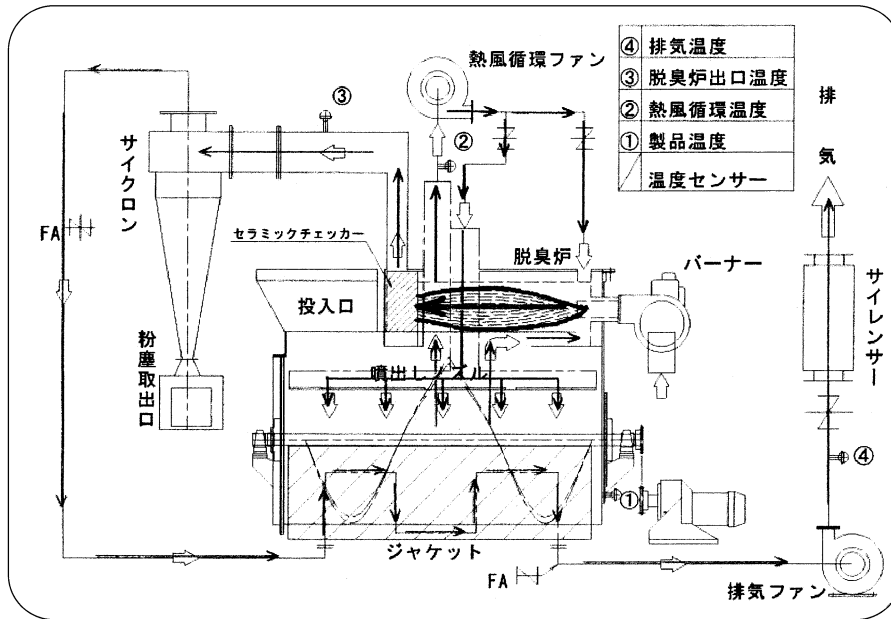


図2 飼料化装置のフローシート

証を行った。

### 3. メタン発酵システムの設置と問題点

メタン発酵システムでは乳牛の排泄糞をメタン発酵装置に投入し、発生するガスの量と組成、およびこれらの変動等につき、経時的に調査した。本装置でのメタン発酵は中温菌のメタン菌によるものであるが、冬季の低温時に発酵能力が低下しないか、また低下した場合の対策等が課題であった。投入原料と消化液の成分および発生ガスの成分等も測定した。

乳牛2頭分の排泄糞を用いてメタン発酵装置（ピーワークス製）で嫌気発酵を行った。メタン発酵槽は一槽式の比較的簡易な構造（図3、図4）

であり、操作も安易であった。装置は原料投入槽（0.74 m<sup>3</sup>）、調整槽（0.30 m<sup>3</sup>）、発酵槽（2.46 m<sup>3</sup>）、貯留槽（1.99 m<sup>3</sup>）、脱硫装置（0.17 m<sup>3</sup>）およびガスホルダー（2.83 m<sup>3</sup>）から構成されている。脱硫装置は酸化鉄が主成分（約50%）である。投入原料は粘調度がかかなり高かった。

排泄糞の投入量は平均約6 kg/日であった。一般的に排泄物30 kg（1頭）当りのメタン発生量は0.8 m<sup>3</sup>と予想されるので、1日当りのメタン発生量は0.16 m<sup>3</sup>となる。それと比較するとメタン発生量は約0.1 m<sup>3</sup>とやや少なかつたが、これは測定を行なったのが冬季のためメタン発酵槽内の温度が平均12.5℃と低かつたためである（図5、図6）。発酵槽内のメタンは長野県伊那市の高冷地で採取したも

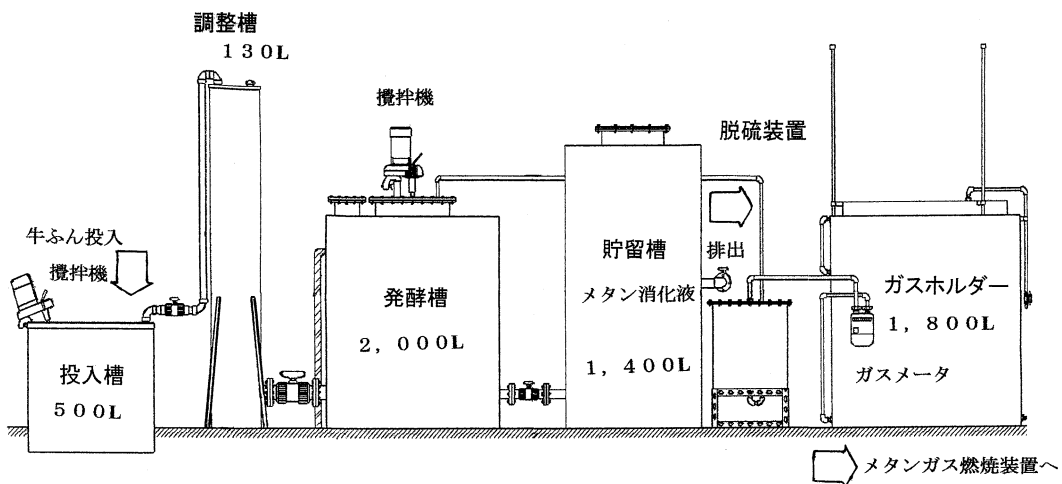


図3 メタン発酵装置の概要



図4 設置したメタン発酵装置

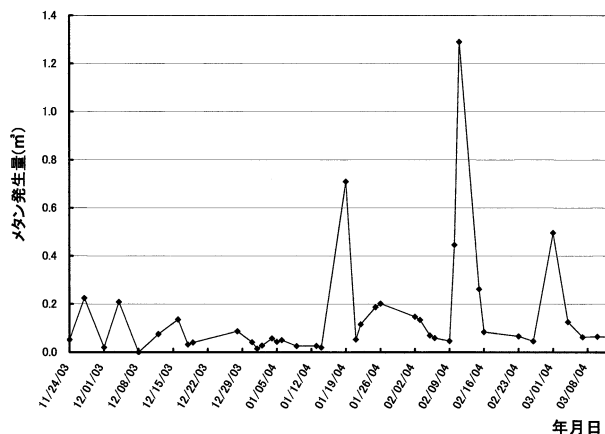


図5 メタン発生量の経日変化

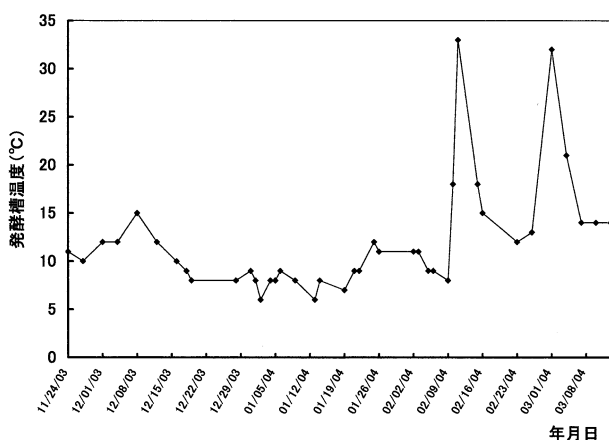


図6 メタン発酵槽温度の経日変化

のであるが、そのため、低温にもかかわらずメタン発酵が営まれたと考えられる。メタン発酵槽を加熱し、発酵槽内の温度を約30℃まで上昇させるとメタン発生量は5～12倍に増加した。したがって、冬季以外では発酵能力はかなり高まると推察された。

メタン発酵槽では硫化水素濃度は3.6 ppmであったが、脱硫装置を通過させたガス貯留槽では硫化水素等は検出されなかった。ガス貯留槽のメタンガス濃度は約63%、炭酸ガス濃度は約22%であり、他の有害ガス類は検出されなかった(表1)。今後は、メタンガスの濃度をさらに上げることが課題と考えられる。

原料投入槽のpHは平均7.0であり、貯留槽のpHは平均7.8と弱アルカリ性であった。電気伝導度(EC)と塩類濃度は投入槽に比べ発酵槽と貯留槽で高く、塩類がしだいに集積されると考えられた。アンモニア濃度はいずれの槽でも比較的低かった。燐酸イオン、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素はいずれの槽からも検出されなかった(表2)。

#### 4. エネルギー変換システムの設置と問題点

ここでは、給食生ゴミ飼料化装置で発生するガス類を回収し、飼料化装置の熱源ならびに食品の冷凍用の冷熱として利用する事業化可能性を評価することを目的とした。そこで、家畜排泄物の発酵過程で生ずるアンモニア、メタンなどのガス類を本学で開発されたアルマイト触媒体で燃焼させ、排ガスを熱源とし、飼料化装置の熱源の一部として利用するための燃焼装置を設置しその運転結果からエネルギーシステムとしての可能性を評価することにした。

メタン発酵槽では、メタンを約60%含むガス類が発生すると予想されるが、これを300℃程度で触媒燃焼させ、その燃焼ガスを生ゴミの乾燥処理用熱源にする。触媒燃焼装置は、東京農工大学工学部亀山研究室で開発された触媒技術の提供を受けて(株)アルキヤットが製造した新型装置を用いた。発酵槽で発

表1 メタン発酵槽およびガスホルダーでのガス類の濃度

ガス成分	濃度 (ppm)	
	メタン発酵槽	ガスホルダー
メタン	—	63,000
アンモニア	n.d.	n.d.
アミン類	n.d.	n.d.
硫化水素	3.6	n.d.
二酸化イオウ	n.d.	n.d.
塩素	n.d.	n.d.
二酸化窒素	n.d.	n.d.
一酸化炭素	n.d.	n.d.
二酸化炭素	5,000<	22,000

n.d. : 検出されず, — : 測定せず

表2 投入槽，発酵槽および貯留槽における pH, EC および各種成分の濃度

成分	原料投入槽	発酵槽	貯留槽
pH	7.0	7.7	7.8
EC(ms/cm)	0.012	5.3	4.3
塩類濃度(%)	0	0.3	0.22
アンモニア態窒素(ppm)	3.0	6.0	6.0
リン酸イオン(ppm)	0	0	0
亜硝酸態窒素(ppm)	0	0	0
硝酸態窒素(ppm)	0	0	0

生じた濃度約60%のメタンをこの触媒燃焼装置に通すことにより21,480 kJ/m<sup>3</sup>の熱量が得られる。これらは主に飼料化装置の熱源として利用される。余剰の熱源が得られたときには乳牛舎の冷房・暖房に利用される。

本変換システムでは、牛3頭から30頭までの規模に対応できる容量の装置（3%メタン含有ガス燃焼能力0.5 m<sup>3</sup>/分）1台を導入して設置した。今回の発生ガスの組成は、ガスクロマトグラフの測定によれば、CH<sub>4</sub> 63%, CO<sub>2</sub> 22%, [N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>] 15%であった。発生ガス量0.025 m<sup>3</sup>/分で燃焼実験を行った。

なお、本システム環境からは臭気が発生するので、それを除去するのが課題であるが、そのために、同様に本学工学部亀山研究室で開発されたアルマイト触媒技術の提供を受けて(株)アルキヤットが製造した新型触媒脱臭器を用いた。本装置は100 ppb臭気を0.5 m<sup>3</sup>/分で90%分解できる性能を有している。

4.1 通電式アルマイト触媒調製技術

通常のアルマイト触媒は、アルミニウム層があるため、使用温度が500℃以下に制限される。特殊なアルミクラッド材を用いたアルマイト触媒は、1,000℃の温度に変形せず、250℃から800℃の間を5,000回以上繰り返し急速通電加熱と空気冷却を繰り返しても皮膜がはがれない耐熱性と通電加熱性を有している。図7に調製の原理を示す。通電加熱できるニッケル・クロム系の心材の両面にアルミニウムの板材を圧延接合させたアルミクラッド材を使用する。これを通常のアルマイト触媒の調製法とはほぼ同じ手順で処理することにより、アルミニウム部分が残らない触媒担体を調製することができる。

図8にその断面写真を、図9に通電時間と表面温度の関係を示した。このアルマイト担体に触媒を担持させ、室温から800℃まで数秒で昇温できる通電

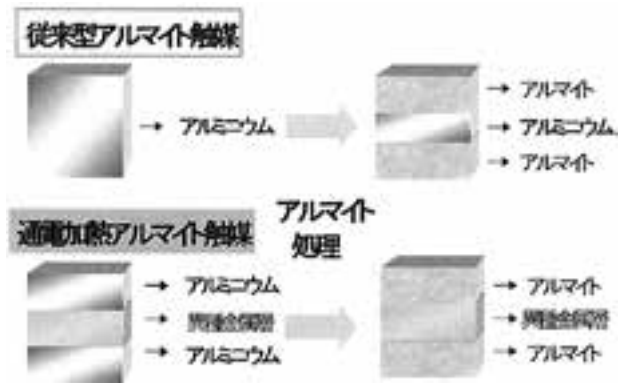


図7 耐熱性通電加熱アルマイト触媒の原理



図8 通電加熱アルマイト担体の断面写真

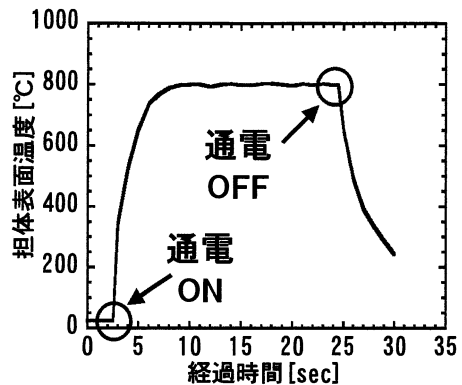


図9 触媒の通電時間と表面温度

加熱触媒体を開発した。図10に繰り返し試験の様子を示した。これは5,000回の繰り返しに対して耐久性を示した。

図11に今回設置したメタン燃焼装置を示した。この装置を農学部のFSセンター内のメタン醗酵装置の横に設置して、燃焼実験を行った。図12に示すように発生メタンを300℃レベルで触媒燃焼させると、200℃の燃焼ガスを定常的に得られることが分かった。空気比を調整して触媒燃焼温度を制御することにより、200℃から400℃の範囲で燃焼排ガスを自由に得られることが確認された。今回の実験は、

タンクにたまった発生ガスを使用して、メタン換算で毎時0.9 m<sup>3</sup>相当のメタン燃焼を行った。これは、牛27頭分の糞尿からのメタン発生量に相当する。装置設計処理ガス能力からすれば、同装置で20倍規模のメタン発酵システムにも対応できることになる。すなわち、540頭の牛からの糞尿処理規模のシステムにも同じ装置で対応できることが明らかとなった。これは、約60.5 kリットルの灯油相当の燃焼システムに相当することから、約300万円の燃料費節約にあたる。本燃焼装置の価格を100万円程度に押さえれば、発酵装置の価格を考慮しても経済的に成立する可能性があることが分かった。



図10 通電加熱試験  
(室温から800℃まで5000回の加熱試験にパス)

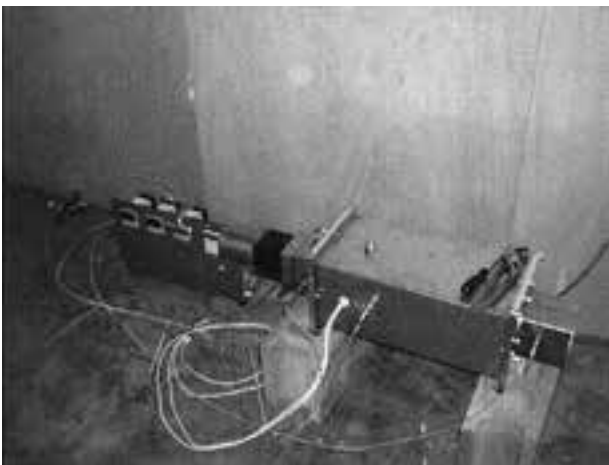


図11 通電加熱アルマイト触媒を使用したメタン燃焼装置

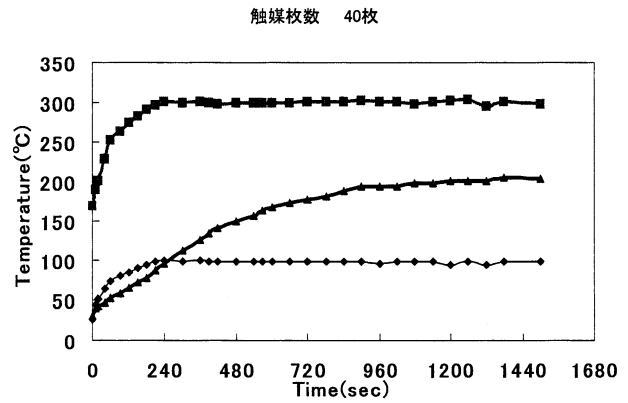


図12 発酵メタンの燃焼実験結果

#### 4.2 牛舎の脱臭装置

図13に通電加熱アルマイト触媒を使用した脱臭装置を示した。これをFSセンターの乳牛舎に設置して脱臭実験を行い、アンモニア等の臭気が除去できることが分かった。図14は、臭気ガスであるプロピオン酸177 ppbを本装置で分解した実験結果である。メッシュ状のアルマイト触媒のデータは外部ヒーター加熱が必要であるが、通電加熱はその必要がなく、直接通電するだけで低濃度の臭気を分解していること示された。

本試験で導入したメタン燃焼装置ならびに脱臭装置は、牛の糞尿を原料にしたバイオマスエネルギー変換システムについて、十分な装置性能を示した。そして、100頭規模のシステムにおいて、経済的に成立する可能性があることがわかり、そのような規模での実証試験により経済性を評価する必要があると考えられた。



図13 通電アルマイト触媒を用いた脱臭試験装置

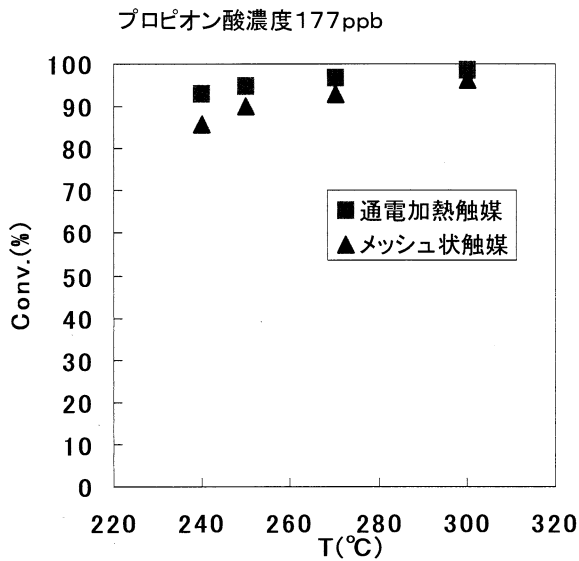


図14 臭気ガスの分解実験結果（流量0.5 m<sup>3</sup>/min）

### 5. エネルギー利用システムの設置と問題点 (飼料化装置排熱による冷熱製造)

地球温暖化抑制の観点からみればバイオマスエネルギーは炭素を循環させて太陽エネルギーのキャリアとなる役目を果たしている。木質バイオマスはCO<sub>2</sub>を固定し、燃焼時にそのCO<sub>2</sub>を放出するので、炭素循環の典型的な例である。本研究で取り上げる家畜糞についても、CO<sub>2</sub>を固定した植物から栄養源を取り除いた残さであり、炭素循環の一部をなす系とみなすことができる。家畜糞はウェット系（水分を多く含む）バイオマスの一つであり、通常メタン発酵プロセスを通じてエネルギー回収がなされている。生産されたメタンを主成分とするバイオガスはガス燃料として用いられ、ガスエンジンに投入され発電に利用される事例が多く見受けられる。

一方、本研究ではこれらとは異なり、回収されたバイオガスから冷熱を取り出そうとする点が大きな特徴である。乳牛は冷涼な気候の下で生育することが、牛乳生産にとって望ましい。その観点から、牛糞から発生させたメタンガスの熱を回収し畜舎冷房に用いることができれば、バイオマスエネルギー利用として家畜生産系内で循環系を形成し、一つの自立的なシステムを構築することにつながると期待できる。

冷熱を発生する技術はいわゆるエアコンであるが、電力で圧縮機を運転するタイプ（家庭用エアコンなど）と熱で冷凍サイクルを駆動するタイプ（業務用ガス吸収冷凍機など）に大きく分かれる。吸収

冷凍機は比較的高温（90℃以上）を必要とするが、シリカゲルを吸着材として使用する吸着冷凍機はそれよりも低温（70～80℃）で運転できる特徴がある。近年、さらに駆動熱源温度を低くできる吸着冷凍サイクルの研究が進められており、50～60℃でも運転可能なサイクルが実証されている。この技術を適用すればバイオガスの燃焼排ガスによって冷熱を取り出すことが可能である。

そこで、本研究ではメタンガス発酵による発生ガスを触媒燃焼し、飼料化装置を通過させた後の排気ガスから60℃程度の熱を回収し、吸着冷凍機を用いて冷熱を発生させるシステムの可能性を実証することを目的とした。そのため、生ゴミ乾燥工程で発生する湿度を含んだ排気ガスからの熱回収性能を実験的に確認した。また、低温駆動に適した2段型吸着冷凍機を用いた実験により、60℃程度の排熱から発生可能な冷凍能力等の性能の測定を行った。

#### 5.1 エネルギー利用システムの構成

本研究で対象とするシステムの全体系および冷熱製造に関わる部分を図15に示す。本システムは1) 家畜糞からのバイオガス製造および燃焼工程、2) 食品廃棄物の飼料化工程、3) 燃焼排熱からの冷熱製造の3つの系から構成されている。バイオガスの燃焼ガスは飼料化装置の乾燥用熱源に利用される。その排気ガスから冷熱を製造し、最終的には畜舎の冷房に用いる。冷房に際しては、発生した冷水を畜舎まで輸送し、室内空調機で畜舎屋内の空気と熱交換する。ただし、本研究では冷水発生までを検討対象とした。

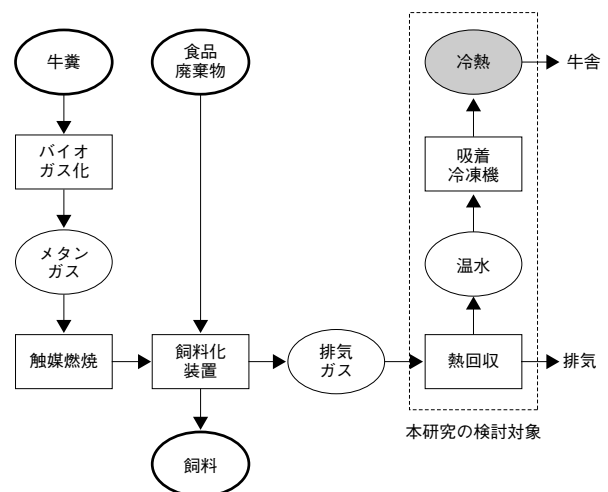


図15 システム全体と対象とする範囲

5.2 吸着冷凍サイクル

5.2.1 吸着を利用した冷凍サイクルの原理

従来70~80℃の温度域の熱によって駆動される冷凍サイクルは、吸着冷凍機が唯一といってよい。吸着冷凍機としてはシリカゲルを吸着材、水を吸着質(冷媒)に用いるものが、比較的溫度の低い排熱利用に向いている。吸着現象により冷熱を発生させる原理は次の通りである(図16)。

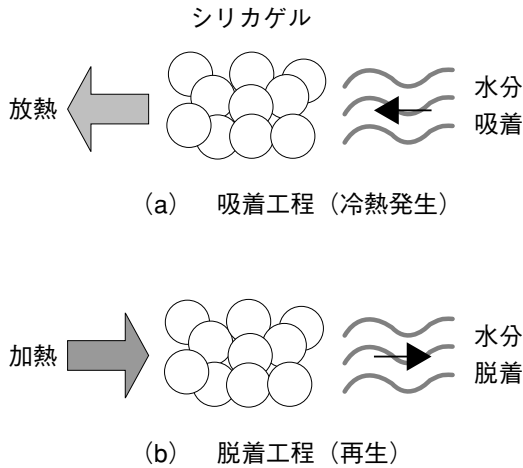


図16 吸着による冷熱発生メカニズム

- 【吸着】・吸着材が冷されると平衡吸着量が増大する。
- ・蒸発器から水蒸気を吸着する。それにより蒸発潜熱を奪い冷水を発生する。
- ・吸着時に吸着熱を発生するが、熱は冷却水に廃棄される。
- 【脱着】・吸着工程の後に吸着材を加熱する。
- ・吸着材の温度が上がると平衡吸着量が低下し、蒸気が脱着される。
- ・脱着した蒸気は凝縮器で冷却され、液化する。

上記の吸着工程と脱着工程を繰り返すことによって冷熱を発生させるが、吸着工程しか冷熱を発生しないので、吸脱着反応器を2基用意し半周期ずらしで動作させることによって連続的に冷熱を得るように運転する。この反応器を2基持つ方式を単段型サイクルと呼ぶ。

5.2.2 二段型吸着冷凍サイクル

前述の単段型サイクルは70~80℃で運転されるが、60℃レベルでは運転できない。低い温度に対応できる吸着冷凍サイクルとして二段型サイクルがある。単段型は商用化されているが本方式はまだ実用化はされていない。図17に示すように二段型サイク

ルは単段型サイクルを2段積み重ねた形態であり、下段で吸着した冷媒を脱着して上段に吸着させ、最終的に上段から凝縮器に送り込む。すなわち、2段階の吸脱着工程を経て1サイクルを形成することにより、60℃レベルの温度域でも運転可能になっている。一方、吸着した蒸気を凝縮器まで移動させるのに二段型は2度の加熱を要している。単段型は1度の加熱でサイクルを駆動することと比較すれば、二段型の変換効率(COP:成績係数)は単段型よりも小さくなる点に注意が必要である。

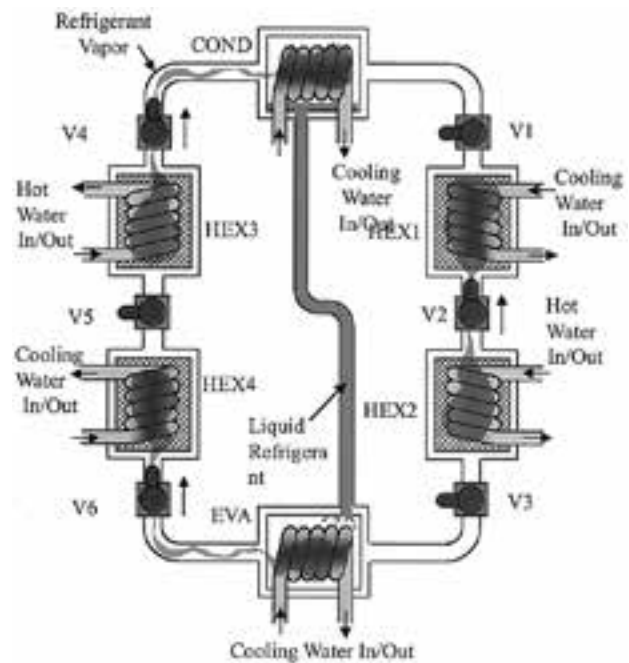


図17 二段型吸着冷凍機

5.3 排熱回収工程

5.3.1 飼料化装置

飼料化装置のフローは図2に示した通りである。飼料化装置の排気ガスに関連する条件は表3の通り想定した。飼料化初期には水分を十分含んでいるため排気ガスの相対湿度は100%と仮定した。一方、飼料化後期にはすでに乾燥が進んでおり湿分は少ないと考えられる。熱交換工程としては顕熱変化のみを考慮することとし、相対湿度としては0%とみなした。

表3 飼料化装置め運転条件

項目	飼料化初期	飼料化後期	備考
風量	23 m <sup>3</sup> /h		設計資料
温度	80℃	200℃	運転実績
湿度	100%	0%	〃

### 5.3.2 回収熱量の推定

排気ガスからの熱交換における温度条件は次の通りとする。

【1次側】 出口温度： 60℃  
出口湿度： 100%

【2次側】 温水入口温度： 55℃  
温水出口温度： 60℃

交換熱量は次式によって計算できる。

$$Q=m(h_{\text{ain}}-h_{\text{aout}}) [W]$$

ただし、 $h_a$ ：排気ガスのエンタルピー[J/kg]

$m$ ：質量流量[kg/s]

$Q$ ：交換熱量[W]

添字  $in$ ：入口

$out$ ：出口

湿りおよび乾燥空気のエントルピーは次の通り与えられる。

80℃, 100%  $h = 1,526 \text{ kJ/kg}$

60℃, 100%  $h = 458 \text{ kJ/kg}$

200℃, 0%  $h = 200 \text{ kJ/kg}$

60℃, 0%  $h = 60 \text{ kJ/kg}$

これを上記の式に代入し、飼料化初期および後期の交換熱量として次を得る。

飼料化初期：188 kW

飼料化後期：47 kW

飼料化初期には排気ガス中の湿分の凝縮潜熱も回収されるため、飼料化後期に比べて4倍の熱量を取り出すことができる。

また、熱交換器を用いて湿り空気からの熱回収実験を行った結果、熱通過率が乾き空気との熱交換時と比べて6～17倍大きいことが確認できた。これは湿り空気中の水分が凝縮する際の潜熱まで回収することに起因する。潜熱回収型の熱交換器は高効率ガス給湯器に実用化されており、本システムに適用することは十分可能と考えられる。

## 5.4 冷熱製造工程

### 5.4.1 実験装置および実験条件

図18に二段型吸着冷凍サイクル実験装置外観を示した。装置の仕様は次の通りである。

冷凍能力：2 RT（約7 kW）

吸着材：シリカゲル A 型

外形寸法：W 1,400 mm × H 2,300 mm  
× D 1,800 mm

標準の実験条件を表4に示した。ここでは加熱温水温度、冷却水温度、サイクルタイムを変化させて性能に与える影響について実験的に検証した。な

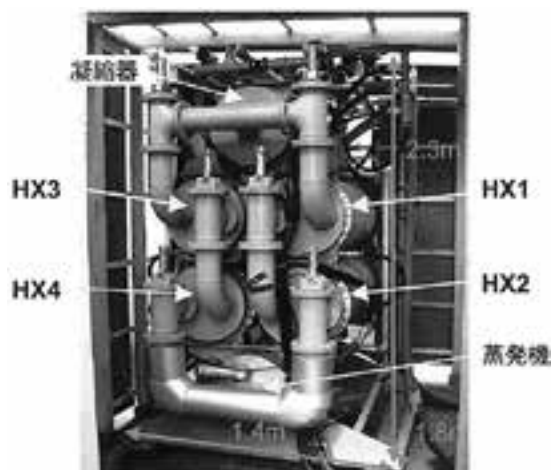


図18 二段型吸着冷凍サイクル実験装置外観

表4 二段型吸着冷凍機の実験条件

項目	単位	標準設定	変化範囲
温水入口温度	℃	55	53～61
冷却水入口温度	℃	30	20～36
冷水入口温度	℃	14	—
加熱冷却時間	sec	420	200～800
準備工程時間	sec	30	—

お、性能指標である冷凍能力およびCOPは次式で定義される。

$$\text{冷凍能力[kW]} = \text{冷水流量[kg/s]} \times \text{比熱[kJ/(kgK)]} \times \text{温度変化[K]}$$

$$\text{COP[-]} = \text{冷凍能力[kW]} / \text{加熱量[kW]}$$

### 5.4.2 実験結果

#### (1) 温水温度が及ぼす影響

図19に加熱温水温度が変化したときの冷凍能力、COPの変化を示した。一般的に冷凍サイクルにおいて温水温度が低下するにつれて冷凍能力は低下するが、その傾向が見て取れる。二段型吸着冷凍機を用いれば、53℃の温水であっても冷凍能力が取り出せることが確認できた。また、COPの挙動を見ると59℃付近に最大値があることがわかった。今回予定している60℃温水回収において最も効果的にエネルギーを利用できるといえる。

#### (2) 冷却水温度が及ぼす影響

図20に冷却水温度が変化したときの冷凍能力、COPの変化を示した。一般的に冷凍サイクルにおいて冷却水温度が低下するにつれて冷凍能力は上昇するが、その傾向が見て取れる。

#### (3) サイクルタイムが及ぼす影響



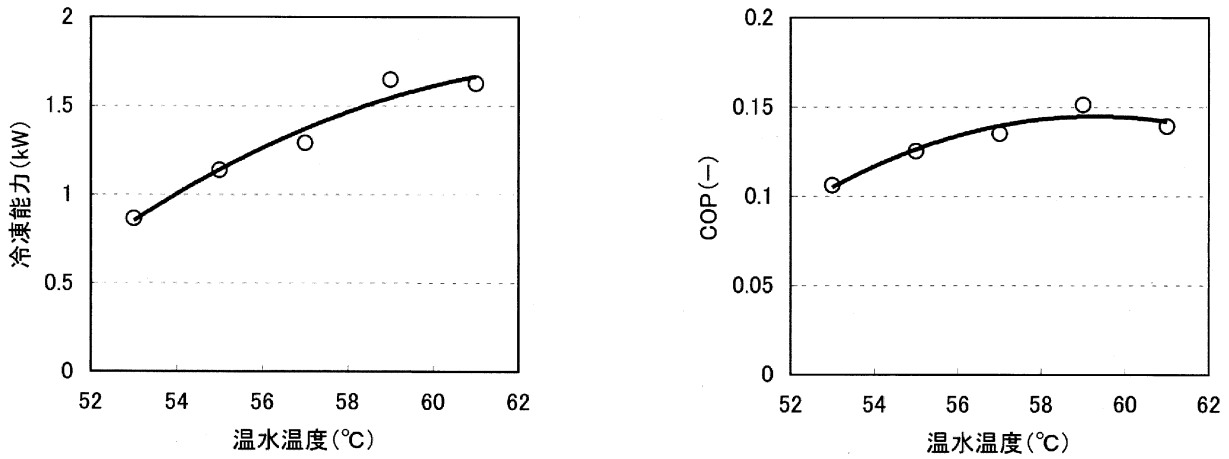


図19 温水温度の影響

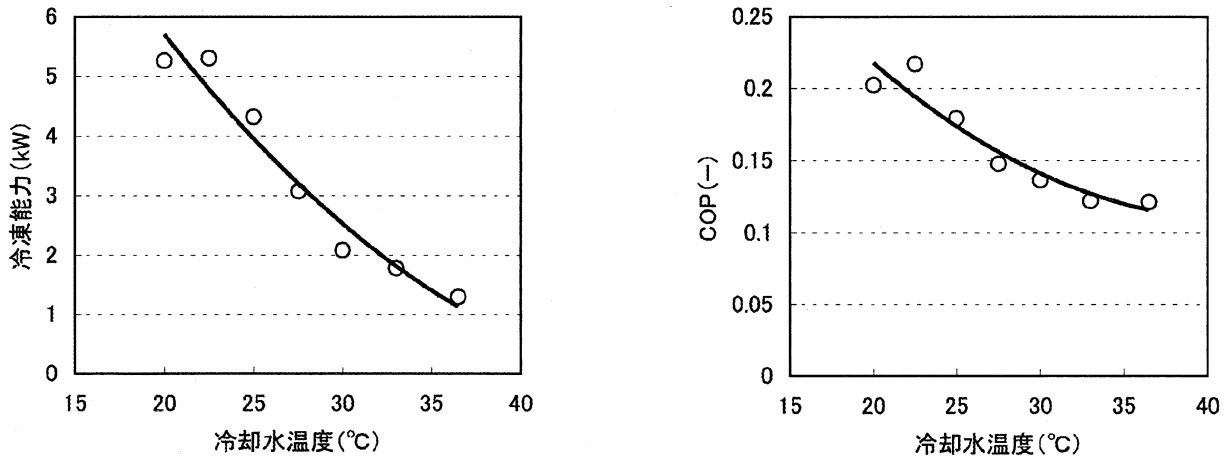


図20 冷却水温度の影響

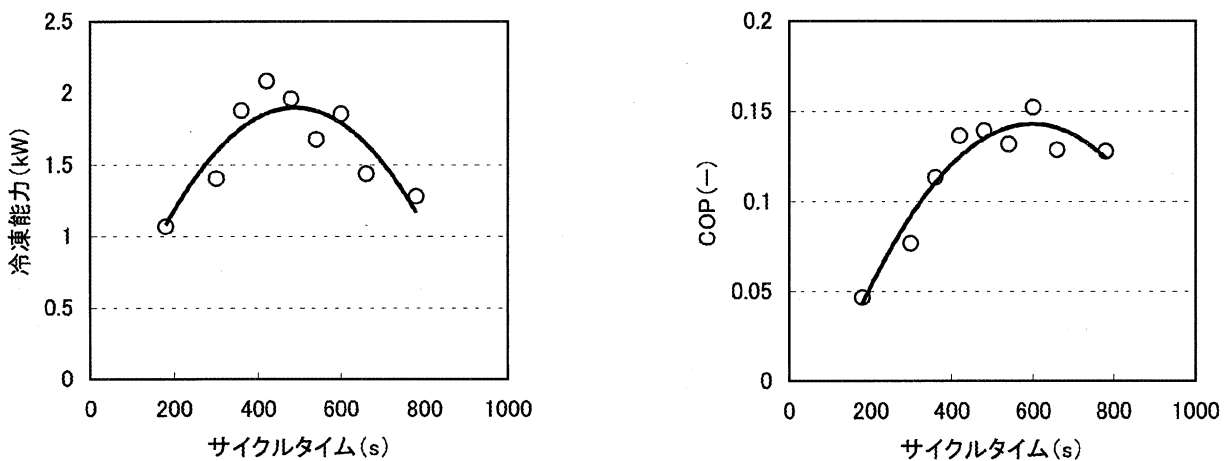


図21 サイクルタイムの影響

図21にサイクルタイム（加熱冷却時間）が変化したときの冷凍能力，COPの変化を示した。冷凍能力，COPのいずれにも最適なサイクルタイムが存在することが見て取れる。今回の実験装置の場合で

は，サイクルタイム400～500秒において最も冷凍能力を発揮できる。一方，COPにおいては600秒あたりで最も効率的なエネルギー変換が実現される。すなわち，能力を上げるためにはサイクルタイムを短

めに、効率を上げるには長めに設定すればよいことが分かった。

### 5.5 冷熱発生量の推定

以上の実験結果より、今回想定する飼料化装置排気ガスから回収する60℃温水によって冷水製造が可能であることが示された。そこで、温水回収熱量と二段型吸着冷凍機のCOPから得られる冷熱量を推定すると、次のような結果となる。

【飼料化初期】回収温水熱量：188 kW

冷凍機 COP：0.15

冷熱発生量：28 kW

【飼料化後期】回収温水熱量：47 kW

冷凍機 COP：0.15

冷熱発生量：7 kW

これより、飼料化初期には28 kWの、飼料化後期には7 kWの冷熱が得られることがわかった。回収熱量が減少するため、冷熱発生量は後期には初期の1/4に低下することが明らかとなった。

### 5.6 おわりに

本研究では飼料化装置からの排気ガスから温水回収し、二段型吸着冷凍機によって冷熱を製造する技術的可能性について検証するとともに、発生量を推定した。その結果、次のことを確認できた。

- (1) 現行の飼料化装置排気ガスから、飼料化初期において約190 kWの、後期において約50 kWの60℃温水が回収可能と見込まれる。
- (2) 飼料化初期では含まれる湿分の凝縮熱も回収できるため後期に比べて回収量が4倍程度多い。また、熱通過率で見ると乾燥空気との熱交換と比べて6～17倍程度大きいと予想される。
- (3) 二段型吸着冷凍機により60℃温水から冷水を

製造することが可能である。現行装置においては、飼料化初期では約30 kWの、後期では7 kWの冷熱が得られると推定される。

以上より、提案システムにより畜舎冷房用の冷熱を得ることが可能であることが示された。

### まとめ

以上のように、各システムにおいて必要な装置の開発・利用と技術的問題点の整理を行い、経済性、普及性、環境性などを総合的に調査し検証を行った結果、これらは、中規模の酪農家に適用が可能な実用的技術になりうることが明らかになった。今回、牛糞の投入量が少なかったために、発酵槽内消化液の回収までには至らなかったが、これについては速やかに実験を行い、その液状肥料としての施肥効果を明らかにする予定である。

### 謝辞

本調査研究はNEDOによる平成15年度「生ゴミの家畜飼料・堆肥化におけるエネルギー利用システム実証試験事業調査」として行なわれたものの概略であり、ご指導いただいたNEDO関係者に感謝の意を表す。本事業調査に対してご指導とご助言をいただいた「生ゴミエネルギー利用システム実証試験事業調査」委員会委員の久留島 守広博士（東洋大学国際地球学部教授）・小倉 紀雄博士（東京農工大学名誉教授）に感謝の意を表す。また、飼料化装置は平成12年度東京農工大学学長裁量経費により導入されたものであり、関係諸氏に感謝申し上げます。

## 研究資料

FM 津久井におけるニホンジカ導入とその消化性研究\*<sup>1</sup>黒川 勇三\*<sup>2</sup>・板橋 久雄\*<sup>2</sup>・山根 正伸\*<sup>3</sup>

## Introduction of Sika Deer and Research on Their Digestibility at FM Tsukui of FS Center in TUAT

Yuzo KUROKAWA\*<sup>2</sup>, Hisao ITABASHI\*<sup>2</sup> and Masanobu YAMANE\*<sup>3</sup>

ニホンジカの採食量、体重、消化率など、養分要求量に関する基礎的データを得ることを目的に、FM 津久井にシカ飼育施設を建設し、ニホンジカを導入し、飼育を開始した。飼育施設および飼育実験の概要をまとめた。採食量の季節変化とアルファルファハイキューブの消化性について、新しい知見が得られつつあり、今後の研究の進展が期待される。

キーワード：ニホンジカ、飼育、導入、採食量、消化率

## 1. シカ飼育施設の目的

平成16年、東京農工大学農学部附属 FS センター FM 津久井（神奈川県津久井郡津久井町）内に、シカ飼育施設を整備した。目的は、丹沢に近い環境でニホンジカを飼育することで、採食量や体重、消化率の変化などの基礎データを採取し、丹沢に生息するシカの養分要求量を推定することである。一年目である平成16年は、ルーメンフィステルを装着後、樹皮を添加してルーメン内で飼料（アルファルファハイキューブ）の消化性が変化するかどうかが *in situ* 実験を行った。

## 2. シカ飼育施設の概要

本施設は約15 m×15 m の広さで、高さ約 3 m の柵によって囲われている（図1）。飼育施設の入



図1 シカ飼育施設の全体像

り口は、シカ脱柵防止のため、2重扉になっている。柵の中に、雨よけ（図1左端、図2）の屋根と、個別飼育用ケージ（図1右端、図3）が設置されて

\*<sup>1</sup> Received Jun. 9, 2005; Accepted Oct. 3, 2005\*<sup>2</sup> 東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター 〒183-8509東京都府中市幸町3-5-8: Field Science Center, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan\*<sup>3</sup> 神奈川県自然環境保全センター研究部 〒243-0121神奈川県厚木市七沢657: Kanagawa Prefectural Nature Conservation Center, 657 Nanasawa Atsugi, Kanagawa Pref. 243-0121, Japan



図2 雨よけ屋根  
(第1回搬入個体ミドリとその子ジカ)



図3 個別飼育用ケージ

いる。個別飼育用ケージは、個体ごとの採食量を管理しながら実験を行う際に使用した。飼育場内には目隠し、シカの隠れ場所などの目的で、スギやササなどを定植した。また柵の外周を取り囲むように、スギが定植してあり、これも目隠しの効果を期待したものである。

### 3. 飼育状況

#### 1) シカ搬入状況

・第1回搬入(4月12日) まず、雌1頭が丹沢にて捕獲され、搬入された(1頭目、名前は「ミドリ」)。その後もう1頭丹沢にて捕獲、搬入する(2頭目)が、1頭目のシカに落ち着きがなく、何度も柵から首を出し、脱柵を試みた。そのため、首の皮がむけ、出血が認められた。2頭目は1頭目よりも体が小さく、脱柵の可能性と、1頭目と同じ状況に陥り、怪我をする可能性があり、危険と判断したため、麻酔から覚める前に山に返した。翌日、シカが柵から首を出すことを防ぐため、柵の外周の約1mの高さで、細かい目の網を張り、さらに寒冷紗などで目隠しをした。1頭目の首の怪我は、保定が



図4 個別飼育用ケージでの飼育

できないために特に治療を行わなかったが、徐々に回復した。

・第2回搬入(9月8日) 山北からシカ2頭(いずれも雌、名前は「Q」と「モモ」)が搬入された。この2頭は消化実験に用いるため、すぐに個別飼育用ケージに入れ、飼育を開始した(図4)。

#### 2) 出産

ミドリが、6月11日に出産したことを確認した。正確な出産日は不明である。子ジカは順調に発育し、その後、雄であることが確認されている。

#### 3) フィステルの装着

11月12日に、第2回搬入のシカ2頭(Qとモモ)に、ルーメンフィステルを装着した(図5)。手術後の経過は順調で、2頭とも手術直後は採食量が減少したが、すぐに回復し、手術そのものは成功したものと考えている。ただし、その後12月9日に1頭のフィステルがルーメン内に落ち込むという事故が発生した(後述)。



図5 ルーメンフィステルを装着したシカ

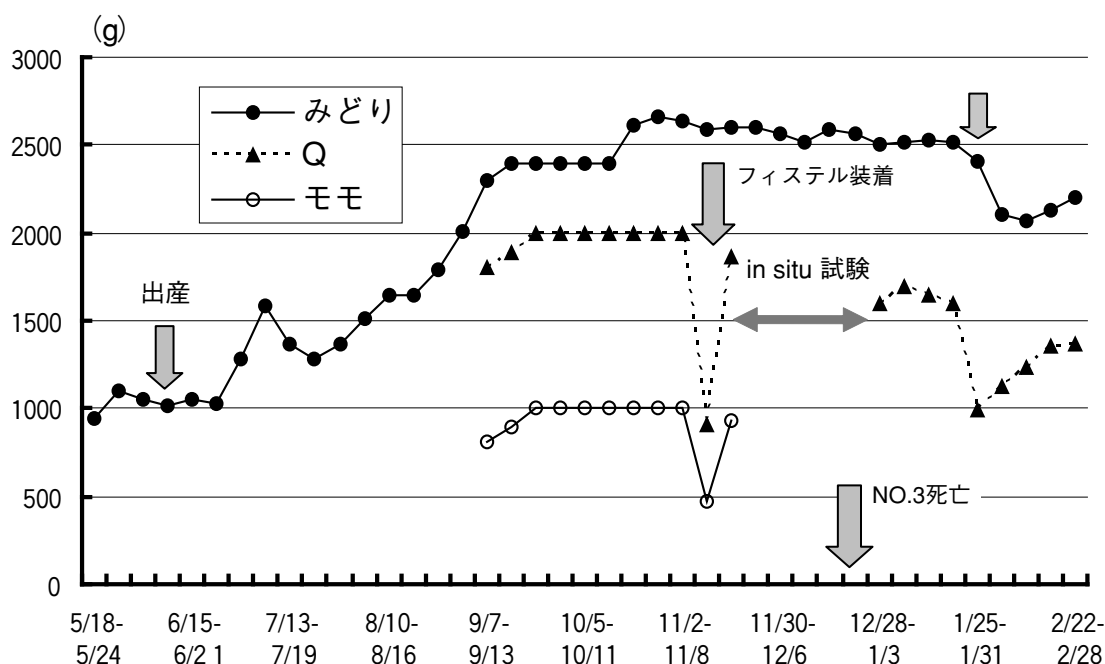


図6 アルファルファ採食量の推移

#### 4) ルーメンフィステル脱落事故

12月9日にモモのルーメンフィステルがルーメン内に落ち込む事故が発生した。自然環境保全センターの協力により、麻酔をかけ、フィステルを鉋で切り刻んで取り出し、簡単な縫合をしてルーメンに開いた穴をふさいだ。同時に抗生物質を筋肉内注射した。

その後12月12日には採食量が回復し、12月16日までは状態はほぼ良好であると考えていた。しかし17日より残飼の量が増加し、ルーメン液の漏れも観察されたため、ゴムの板などを加工して、ルーメンに開いた穴をふさいだ。しかし、採食量は回復せず、20日頃にはほとんど餌を食べなくなり、1日中座り込む姿が観察された。夜には体温低下を防ぐために、ペットボトルにお湯を入れて、ケージ内においた。21日にはルーメンの穴から、温湯に溶かした電解質を含む清涼飲料を1リットル注入した。

しかし22日朝、死亡しているのが確認された。神奈川県自然環境保全センターにて死体を冷蔵し、27日に剖検を行った。その結果、ルーメンに開いた穴からルーメン液が漏れたため、ルーメン発酵が極端に低下し、体温維持が困難になったことが直接の死因と判断された。

#### 5) その他の全体的な飼育状況

飼料は当初アルファルファのペレットを給与していたが、ハイキューに変更した。いずれも採食状況は良好であった（採食量は後述）。飼育期間を通

じて、1日1回給餌とした。また、実験者への馴致を主な目的として、アオキ、リンゴ、サツマイモなどを適宜給与した。いずれも採食状況は良好であった。

Qとモモ（いずれもフィステル装着個体）は、12月27日まで個別飼育ケージにて飼育し、それ以降はケージから出して飼育した。平成17年1月上旬に、ミドリとその子ジカを個別飼育ケージに閉じこめ、馴らそうと試みたが、3日後にケージの網を壊して柵内に出てしまい、元どおりの飼育を続けることとした。平成17年2月以降、給餌場所は2カ所設け、3頭のシカを柵内で一緒に飼育した。Qは、体は大きいにもかかわらず、社会的順位でミドリよりも劣位にあるように見受けられ、腰のあたりをかじられるのが何度も観察されている。

#### 4. 採食量その他の観察結果

##### 1) 体重

ミドリとその子ジカの体重測定は行えなかった。Qとモモの2頭については、3回体重測定を行った。結果は表1の通りである。

搬入後、約2ヶ月でそれぞれ約6 kg、9 kg 体重が増加した。健康状態が良好で、飼料の摂取（後述）も順調であったためと考えられる。

##### 2) 採食量

図6にアルファルファ採食量の推移を示す。図中の「NO.1」とは、ミドリとその子ジカの2頭を指

表1 シカ体重の推移

シカ個体	9月8日(搬入)	11月12日 (フィステル手術)	11月23日(抜糸)
NO.3	20 kg	26 kg	24 kg
NO.2	41 kg	50 kg	49.5 kg

し、NO.2とNO.3はそれぞれQとモモである。また、1月28日以降は、3頭(ミドリとその子ジカ、Q)が2カ所の給餌場所で採食可能な状態であるが、各個体が主に採食する場所での採食量を、個体ごとの採食量として記述してある。

図に示すとおり、ミドリの採食量は出産後急激に増加した。泌乳のための要求量が増したことが第1の原因と考えられる。子ジカの採食量も含まれていると考えられる(割合は不明)が、10月以降、5月の2.5倍の2500g(原物重量、以下同様)を記録している。なお、6月以降、アオキやササなどの採食選択性の実験が随時行われており、この部分の採食量は含まれていない。

全体的な傾向として、10月から11月までの採食量が最も高く、12月から徐々に低下する傾向が認められている。1月下旬にいったん急激に低下して1頭あたり1000gとなり、2月以降、徐々に増加傾向にある。しかし、12月以前の採食量までは回復していない。この季節変化の傾向は、ミドリとQで一致してみられており、何らかの生理的な変化に起因している可能性が高い。一般的には、ニホンジカの採食量は、夏以降徐々に低下し、冬に最も低いといわれている。FM津久井での結果は、その傾向とは一致しなかった。その原因を明確できていないが、野生の状態での採食が厳しく制限されていた条件から、飼料を十分に摂取することができる人為管理下に移した1年目という特殊な条件が影響している可能性は否定できない。この点は今後の課題として、継続して調査をする必要がある。

### 3) 飼育場内の植生などの状況

飼育場内には当初、スズメノカタビラやハコベ、オオバコなどの植生が見られたが、3月現在ほぼ消失している。目隠しなどの目的で当初定植したスギ、ササなどはシカによる採食を受けて、生育状況は悪化している。

また、スギを利用した柵の柱は、秋以降シカによる樹皮はぎを受けているのが観察されている。

表2 *in situ* 試験におけるスズタケの乾物分解率

シカ個体	試験期	ルーメン内培養時間	
		18 h	48 h
NO.2	対照期	22.6	33.9
	樹皮添加期	22.8	36.1

## 5. *In situ* 消化実験の実施と結果の概要

### 1) 目的

ニホンジカは森林に生息し、木本類の葉のみならず、枝や樹皮まで利用している。シカの胃内容物には、樹皮および枝が数パーセント程度とはいえ、年間を通して含まれていることが植物組成調査によって明らかにされている(Takatsuki and Ikeda 1993; Yokoyama *et al.* 2000)。リグニン含有率の高い飼料給与により、ルーメン内の消化率が高まる可能性を示す研究(Campa *et al.* 1984; Milne *et al.* 1978)がいくつか行われている。しかし、ルーメン内の繊維消化に対して、全体としてどのような影響を与えるか、必ずしも明らかになっていない。そこで、本実験では、リグニン含量の高い樹皮をニホンジカに給与することにより、ルーメン内でリグニンの構造や細胞壁多糖類の分解が影響を受けるかどうかを明らかにすることを目的に、慣行飼料に樹皮を添加し、ナイロンバッグ法による *in situ* 消化試験を行った。

### 2) 材料と方法

#### ・供試動物

フィステル装着ニホンジカ雌1頭(Q)

#### ・給与飼料

対照期：アルファルファハイキューブを体重の2.5%給与した。

樹皮添加期：対照期飼料の4%をウラジロモミ樹皮に置き換えた。この4%という比率は、Takatsuki & Ikeda (1993) に報告されている、小枝および樹皮がシカのルーメン内容物に占める割合(夏4.1%、秋4.4%)を参考に決定した。

#### ・実験方法

10日間の予備的飼料給与を行った後、ナイロン

バッグ法による3日間の本試験を行った。ルーメン内培養時間は18および48時間とした。ナイロンバッグ（目開き：77 $\mu$ m）には2 mmメッシュのスクリーンで粉碎したスズタケを封入した。

・実施期間

平成16年11月27日～12月25日

3) 結果と考察

これまでのアルファルファヘイキューブを用いた実験から、シカのルーメン内飼料滞留時間は18時間程度であることが示されている（Asano et al.; 2005）。本実験のナイロンバッグルーメン内培養時間は18時間と48時間である。シカにおけるルーメン内滞留時間と消化率の関連は必ずしも明らかにはされていないが、本実験のナイロンバッグルーメン内培養時間は、実際のルーメン内消化に近いと推測される18時間と、それよりもはるかに長い48時間の2種類を設定した。

結果を表2に示した。わずか1例ではあるが、対照期より樹皮期のDM分解率の方が高くなった。その理由として、樹皮、すなわちリグニン資材を添加することにより、繊維成分の分解を高めるルーメン微生物叢へと変化した可能性が示されたと考えられた。この傾向はルーメン内培養時間を48時間としたときにより顕著であった。

以上のことより、樹皮等粗剛な食物を採食できる能力を備えたニホンジカにおいて、樹皮採食による、他の飼料、特にイネ科草本のルーメン内消化率を改善する可能性について、今後追求する価値があるものと考えられた。

## 6. まとめと今後の課題、計画

1) シカの飼育について

研究を行う上で、次の点が課題として残されている。

a. シカの馴致

保定枠に馴らして、実験を行う際に保定が容易になるようにしなければならない。広い飼育場から直接保定枠に入れるのは、現状から不可能であるので、まず個別飼育ケージに入れ、そこから保定枠に入れる訓練を行い、入るようになったところで、保定枠の中で実験者に取り扱われる状況になれる訓練を行う必要がある。保定枠は改良を進めているところであり、*in situ* 実験などに利用可能になると考えている。

b. 例数の確保

ルーメンフィステルを装着した個体が1頭になってしまったので、*in situ* 実験の例数確保が困難な状況にある。この点については今後の課題である。

c. その他

体重測定装置の整備が不十分であったため、経時的に体重測定を行うことができなかった。飼育場内に体重計を設置する場所を整備中で、連続的な体重測定が可能になると考えている。

6月に生まれた個体（雄）は今後、去勢する予定である。

2) 今後の研究課題と計画

a. 採食量と体重の季節変化に関する研究

飼料の採食量と体重変化の季節変化は、シカの養分要求量算定の基礎となる。採食量は個別飼育を行って測定することで、より正確な数値を得ることが可能になる。また、体重変化と、飼料採食量との関係を調べることにより、成シカが体重を維持するための飼料要求量が明らかになるものと考えられる。これらのデータに、木本類の葉に対するシカの選択性のデータを加えることにより、丹沢山系のシカに対する環境収容力に関する考察が可能になると考えている。

b. 消化率に関する研究

*in situ* 実験を継続する。ルーメン内微生物叢の変化や、ナイロンバッグ内残渣の分析をすすめて、リグニンの分解に関するデータを得る必要がある。これらを実施して、リグニン含有率の高い飼料給与が、ルーメン内消化に及ぼす影響について、明らかにする。この研究により、樹皮はぎのシカの消化にかかわる意義が明らかになり、植生の管理とシカ個体群管理との関連を考察する際に有益な情報となると考えている。

## 付記

本研究は、丹沢大山総合調査の一部として、神奈川県自然環境保全センターの委託を受けて行われたものである。

## 謝辞

ルーメンフィステルの装着手術、剖検などで、FSセンター野生動物保護管理教育研究分野の鈴木馨助教授に多大なご助力をいただきました。本学の古林賢恒助教授、時田昇臣客員研究員には実験に関してご助言をいただきました。本学学生の浅野早苗氏、及川真里亜氏には、シカの日常管理と実験並びに

データの整理等で、本研究実施の重要な部分を担って頂いています。神奈川県自然環境保全センターの三橋正敏技能技師には、シカ飼育施設の建設と管理に多大なご協力をいただきました。本学FSセンターFM津久井の乃万了技術職員には、日常管理と、保定枠の改良に、ご理解と多大なご助力をいただきました。以上の方々に、感謝の意を表します。

#### 引用文献

- Asano, S., S. Ikeda, Y. Kurokawa, S. Kanda and H. Itabashi (2005) Comparison of digestibility, passage rate and rumen fermentation between sika deer (*Cervus Nippon*) and cattle fed alfalfa hay cubes. *Animal Science Journal* 76, 447-451.
- Campa, H., D. K. Woodyard, and J. B. Haufler (1984) Reliability of captive deer and cow in vitro digestion values in predicting wild deer digestion levels. *Journal of Range Management* 37 : 468-470.
- Milne, J. A., A. S. I. Loudon, A. M. Sibbald, J. D. Curlew and A. S. McNeilly (1990) Effects of melatonin and a dopamine agonist and antagonist on seasonal changes in voluntary intake, reproductive activity and plasma concentrations of prolactin and tri-iodothyronine in red deer hinds. *Journal of Endocrinology* 125 : 241-249.
- Takatsuki, S. and S. Ikeda (1993) Botanical and chemical composition of rumen contents of Sika deer on Mt. Goyo, Northern Japan. *Ecological Research* 8 : 57-64.
- Yokoyama, M., K. Kaji and M. Suzuki (2000) Food habits of sika deer and nutritional value of sika deer diets in eastern Hokkaido, Japan. *Ecological Research* 15 : 345-355.



## 研究資料

東京農工大学 FM (フィールドミュージアム) 大谷山, 草木,  
唐沢山, 秩父における動物生息状況の記録 (第3報)<sup>\*1</sup>桑原 誠<sup>\*2,4</sup>・金子 稔<sup>\*2</sup>・木下 浩幸<sup>\*3</sup>・熊倉 充<sup>\*3</sup>

## Animals observed in TUAT University Forests between 1960~2005

Makoto KUWABARA<sup>\*2,4</sup>, Minoru KANEKO<sup>\*2</sup>, Hiroyuki KINOSHITA<sup>\*3</sup>  
and Mituru KUMAKURA<sup>\*3</sup>

The frequency of wild animals observed at the TUAT university forests from 1960 to 2005 was classified into five categories (A-no observations, B-once every several years, C-once per year, D-once per month, E-once per week).

Populations of wild animals at the university forests in 2005 were considered from the category fluctuations. Six mammal species (*Sus scrofa*, *Cervus nippon*, *Capricornis crispus*, *Ursus thibetanus*, *Macaca fuscata* and *Microtus montebelli*) increased, 4 ones (*Lepus brachyurus*, Sciuridae spp., *Petaurista leucogenys* and *Meles meles*) did not fluctuate and 4 species (*Mustela sibirica*, *Martes melampus*, *Vulpes vulpes japonica* and *Nyctereutes procyonoides*) decreased. Three bird species (*Nycticorax nycticorax*, *Phasianus versicolor* and *Bambusicola thoracica thoracica*) decreased and 5 species (*Graphophasianus soemmerringii scintillans*, *Coturnix coturnix japonica*, Anatidae spp., *Streptopelia orientalis* and Scolopacidae spp.) did not fluctuate. Four snake species (*Agkistrodon acutus*, *Natrix tigrina*, *Elaphe quadrivirgata* and *Elaphe climacophora*) and 1 frog species (*Bufo formosus*) did not fluctuate.

**Keywords** : frequency of observation, mammal, bird, snake, frog, 1960-2005

東京農工大学農学部附属 FS センターの FM 草木, FM 大谷山, FM 唐沢山, FM 秩父において, 哺乳動物14種, 鳥類10種, 爬虫類4種, 両生類1種の1960~2005年に観察された頻度を5段階(まったく見ない, 数年に1回見る, 年に1回見る, 年に数回見る, 月に数回見る)に記録した。その結果, 哺乳動物の生息数は, 6種(イノシシ, ニホンジカ, ニホンカモシカ, ツキノワグマ, ニホンザル, ハタネズミ)で増加し, 4種(ノウサギ, リス類, ムササビ, アナグマ)で大きく変動せず, 4種(イタチ, テン, ホンドキツネ, タヌキ)で減少した。鳥類の生息数は, 3種(ゴイサギ, キジ, コジュケイ)で減少し, 5種(ヤマドリ, ウズラ, カモ類, キジバト, シギ類)で大きく変動しなかった。爬虫類の4種(マムシ, ヤマカガシ, シマヘビ, アオダイショウ)および両生類の1種(ヒキガエル)の生息数は大きく変動しなかった。

**キーワード** : 観察頻度, 哺乳動物, 鳥類, 蛇類, 蛙, 1960~2005

<sup>\*1</sup> Received Sep.7, 2005 ; Accepted Dec.24, 2005

<sup>\*2</sup> 東京農工大学農学部附属 FS センター・FM 大谷山 〒376-0304 群馬県みどり市東町神戸字上の平277 : Field Science Center, Tokyo University of Agriculture and Technology, Godo, Azuma, Midori-city, Gunma, 376-0304, Japan

<sup>\*3</sup> 東京農工大学農学部附属 FS センター・FM 唐沢山 : Field Science Center, Tokyo University of Agriculture and Technology

<sup>\*4</sup> Corresponding author

## 1. はじめに

森林の伐採や大気汚染物質の放出など主に人的な要因により、地球環境は近年大きく変貌している。例えば、野生動物の生息地として重要な森林環境を、茨城県が民有林について調査したところ、1978から1996年の僅か18年間に、森林面積は89% (16.6から14.7万 ha) に減少し、樹種別面積率はマツ (34%)・スギ (26%)・ヒノキ (4%)・広葉樹 (32%) から、スギ (33%)・マツ (13%)・ヒノキ (10%)・広葉樹 (37%) へと激変した。また、林業が不活発なため伐採地・植栽地が少なくなり、老齡過熟林が急増して若齡林が急減した。このように森林環境が大きく変化したためか、茨城県で行った野鼠 (ハタネズミ) と野兎 (ノウサギ) の調査では、それらの生息数は僅か数年で激減していた<sup>3)</sup>。

日本各地の森林環境も大きく変化しているの、そこに生息する野生動物の生息状況は、その影響を強く受けていると思われたが、生息状況の全国的な調査例は大型哺乳類を除くとほとんどなかった。したがって、調査が進展すると、一地域のみならず日本全体で絶滅に瀕している、または向かっている野生動物が見いだせるかもしれない。または近年になり、里山から追われて森林地帯に移ってきたものがあるかもしれない。それらがいつ、どこで、どれくらいの個体数で生息していたかを記録することは、野生動物研究やレッドデータブック作成などのさいの重要な基礎資料となる。

群馬県、栃木県および埼玉県にある東京農工大学の4 FM (フィールドミュージアム, 旧称演習林) では、技術系職員が常駐し、そこに生息する野生動物の生息状況の変動を、直接観察やフィールドサイン等により調査している。これらの地域では野生動物の生息状況に関する長期の記録例はほとんどなかったため、第1報<sup>1)</sup>では哺乳類、第2報<sup>2)</sup>では哺乳類以外の鳥類、爬虫類、両生類のうち観察・記録しやすかった種の観察頻度を報告したが、観察頻度は僅か数年の経過でも激変する種があった。報告後10年を経過したので、モニタリング調査の一環として第3報をここに報告する。

本文を草するにあたり、終始指導して下さった東京農工大学 FS センター自然環境教育研究分野長岸洋一教授に、心からの謝意を表します。

## 2. 調査地および調査方法

### 2.1 調査地の概要

FM 大谷山, FM 草木, FM 唐沢山, FM 秩父 (第1報の埼玉の改称) の概要は、第1報<sup>1)</sup>および第2報<sup>2)</sup>を参照下さい。

### 2.2 調査方法

FM 大谷山は筆者の一人金子稔が、FM 草木は筆者の一人桑原誠が、FM 唐沢山は筆者の一人熊倉充が、FM 秩父は筆者の一人木下浩幸が、勤務時の経験と旧職員に対する聞き取り調査にもとずき、2000年および2005年における動物類の観察頻度を記載した。頻度は、まったく見ない(A), 数年に1回程度見る(B), 年に1回程度見る(C), 年に数回一活動期に月に1回程度一見る(D), 月に数回以上一活動期に週に1回以上一見る(E), の5段階とした。実物を見なくても新鮮なフィールドサインも、観察頻度に加えた。環境省から発行される鳥獣関係統計書より、猟期中の鳥獣類捕獲総数と狩猟者数を調べ、参考にした。

## 3. 結果および考察

### 3.1 哺乳類

森林系 FM における哺乳類の観察頻度を、表1に示す。

イノシシ (*Sus scrofa*) は、FM 大谷山と FM 草木ではまったく見られなかったのが1985~1990年以後、年に数回観察されている。FM 秩父ではまったく見られなかったが1985年から増加し、1990年以後は月に数回観察されている。FM 唐沢山ではその生息は確認されていない。

ニホンジカ (*Cervus nippon*) は、FM 大谷山と FM 草木ではほとんど見られなかったのが1975~1980年以後増加し、近年は月に数回観察されている。FM 秩父ではまったく見られなかったのが1990年以後急増し、月に数回観察されている。FM 唐沢山ではその生息は確認されていない。

ニホンカモシカ (*Capricornis crispus*) は、FM 大谷山と FM 草木ではまったく見られなかったのが1975年以後増えて、近年では月に数回見られる程度に急増した。FM 秩父ではまったく見られなかったのが1990年以後急増し、月に数回観察されている。FM 唐沢山ではその生息は確認されていない。

ツキノワグマ (*Ursus thibetanus*) は、FM 大谷山と FM 草木ではまったく見られなかったのが



1980～1990年以後増えて、近年では年に1回程度観察されている。FM秩父では1960年より年に1回程度見られたが、近年では年に数回観察されている。FM唐沢山では、その生息は確認されていない。

ニホンザル (*Macaca fuscata*) は、FM大谷山とFM草木ではまったく見られなかったのが1970～1980年以後増えて、近年は年に数回観察されている。FM秩父ではまったく見られなかったのが、1990年以後になると月に数回見られる程度に急増した。FM唐沢山では、その生息は確認されていない。

ノウサギ (*Lepus brachyurus*) は、FM大谷山では月に数回観察されていたが、近年は減少している。FM草木とFM秩父では年に数回の、FM唐沢山では月に数回の観察頻度が、1960年より維持されている。

リス類 (*Sciuridae spp.*) は、FM大谷山では月に数回、FM草木では年に数回見られたが近年は減少し、年に1回程度観察されている。FM唐沢山ではまったく見られなかったが2000年以後急増し、近年は年に数回観察されている。FM秩父では年に数回の観察頻度が、1960年から維持されている。

ムササビ (*Petaurista leucogenys*) は、FM大谷山では生息は確認されていない。近接するFM草木ではまったく見られなかったのが1985年以後、数年に1回観察されている。FM唐沢山では月に数回見られたが、1980年から減少の一途をたどり、2005年には数年に1回程度観察されている。FM秩父では年に数回の観察頻度が、1960年から維持されている。

ハタネズミ (*Microtus montebelli*) は、FM大谷山では1965年から、FM草木では2000年から、FM唐沢山では1960年から、月に数回観察されている。FM秩父では年に数回の観察頻度が、1960年から維持されている。

イタチ (*Mustela sibirica*) は、FM草木ではまったく見られなかったが、1980年以後生息が確認されている。近接するFM大谷山では、生息はまだ確認されていない。一方、FM唐沢山では月に数回見られたが1980年頃から減少を始め、1990年以後は年に1回観察されている。FM秩父では年に数回の観察頻度が、1960年から維持されていたが、2005年には年に1回に減少した。

テン (*Martes melampus*) は、FM草木ではまったく見られなかったのが、1985年以後生息が確認さ

れた。近接のFM大谷山では、生息は確認されていない。一方、FM唐沢山では月に数回見られたが1990年頃から減少を始め、2005年にはまったく観察されなくなった。FM秩父では年に数回見られたが、1995年以後年に1回観察される程度に減少した。

アナグマ (*Meles meles*) は、FM秩父では年に1回見られたが1990年以後減少し、2005年に回復した。FM大谷山、FM草木、FM唐沢山では、生息は確認されていない。

ホンドキツネ (*Vulpes vulpes japonica*) は、FM大谷山では年に1回見られたが1985年以後減少し、近年は数年に1回観察されている。近接するFM草木ではまったく見られなかったが1975年以後増加し、近年は年に1回観察されている。一方、FM唐沢山では月に数回見られたが、近年減少している。FM秩父では年に数回見られたが、2000年以後は数年に1回観察される程度に減少している。

タヌキ (*Nyctereutes procyonoides*) は、FM大谷山とFM草木では年に数回見られたが、近年は年に1回観察される程度に減少した。FM唐沢山では月に数回の観察頻度が維持されている。FM秩父では年に数回見られたが、近年は年に1回観察される程度に減少した。

以上を概説すると、2005年時点の森林系FMでは、大型哺乳動物は増加傾向、中小哺乳動物は減少傾向にあり、前報<sup>1,2)</sup>と同様の傾向であった。

なお、環境庁と林野庁の全国統計をもとに、1960～2000年度の猟期中の鳥獣類捕獲総数と狩猟者数の変動を表2に示す。狩猟者数は、1960年に対し1965～1995年は増員したが2000年は95%とほぼ同数であった。したがって、1960年と2000年はほぼ同数の狩猟者によって鳥獣類が捕獲されたので、鳥獣類捕獲総数は野生生物生息状況を反映する全国的指標の1つと考えた。表2より、1960年度よりも2000年度に生息数が増加したと推察される狩猟対象獣類は、大型哺乳動物のイノシシ、オスジカ、ツキノワグマと中型哺乳動物のキツネであった。減少した獣類はヒグマとタヌキであり、野ウサギ、リス類、ムササビ、オスイタチ、テン、アナグマは激減した。大型哺乳動物の増加と中・小型哺乳動物の減少は全国的傾向であった。森林系FMに生息する哺乳動物のうち、ノウサギ、リス類、ムササビ、イタチ、テン、アナグマおよびタヌキの観察頻度が現在高くても(表1)、全国的傾向から判断するといずれ減少に

表2 1960～2000年度の猟期中の鳥獣類捕獲総数と狩猟者数の変動 (1960年度を100とした時の割合) (環境庁・林野庁 各年度の鳥獣関係統計書の全国統計より)

種名	1960 ( 頭・人数 )	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
イノシシ	100 ( 27,683)	127	194	223	250	184	208	258	363
オスジカ	100 ( 7,580)	170	189	161	241	280	413	670	831
ツキノワグマ	100 ( 592)	97	181	143	140	156	147	123	114
ヒグマ	100 ( 185)	85	73	66	69	52	71	58	70
野ウサギ	100 ( 907,611)	87	98	79	52	38	24	13	7
リス類	100 ( 58,034)	92	114	61	43	14	8	1	1
ムササビ	100 ( 27,906)	54	25	15	12	4	2	3	-
オスイタチ	100 ( 115,492)	58	26	15	11	5	2	1	0
テン	100 ( 9,056)	90	90	95	122	121	43	18	14
アナグマ	100 ( 3,740)	73	35	43	47	53	28	17	15
キツネ	100 ( 2,166)	162	263	438	827	755	544	385	186
タヌキ	100 ( 43,542)	87	72	96	157	153	76	53	41
ゴイサギ	100 ( 11,640)	42	62	58	237	84	63	27	14
オスキジ	100 ( 466,076)	114	169	142	97	68	58	38	28
ヤマドリ	100 ( 399,301)	115	198	122	78	46	29	15	11
ウズラ	100 ( 130,441)	82	53	32	34	9	5	4	2
コジュケイ	100 ( 446,638)	188	292	269	162	68	38	16	8
カモ類	100 ( 809,658)	92	115	102	97	99	84	76	58
アイサ類	100 ( 6,777)	49	53	21	19	14	8	-	-
バン類	100 ( 27,773)	110	164	26	31	25	24	19	19
キジバト	100 ( 1,545,609)	130	197	181	155	97	66	35	22
シギ類	100 ( 185,028)	102	107	83	69	37	27	14	8
狩猟者	100 ( 208,214)	164	256	249	207	148	123	108	95

(- : 統計書に記載なし ; 0 : 若干頭数の記載あり)

向かうと考えられる。その中でも、ノウサギ、リス類、ムササビとイタチは、近い将来希少種になる恐れが充分ある。現在のところ生息状況を観察頻度から類推するしかないが、将来的には生息数の変動要因を解析し、種の保全を目的とした生息数の維持・増加法を積極的に解明したい。

### 3.2 鳥類

森林系 FM における鳥類の観察頻度を、表3に示す。

ゴイサギ (*Nycticorax nycticorax*) は、FM 大谷山、FM 草木、FM 秩父ではまったく見られなかった。FM 唐沢山では、1960～1970年には月に数回見られるほど多数生息していたが急減し、1995年以後はまったく見られなくなった。

キジ (*Phasianus versicolor*) は、FM 大谷山では宿舎周辺において1960～1980年に、FM 秩父では1960～1965年に、年に数回見られる観察頻度であったが、以後は急減してまったく見られなくなった。

FM 唐沢山では、月に数回見られる観察頻度をほぼ維持している。FM 草木ではまったく見られなかった。

ヤマドリ (*Graphophasianus soemmerringii scintillans*) は、FM 大谷山と FM 唐沢山では月に数回見られたが、近年は年に数回見られる程度に減少した。FM 草木では5林班を中心に年に数回見られ、一時増加したが、近年は年に数回見られる観察頻度に戻った。FM 秩父では年に数回見られる観察頻度を45年間維持したが、近年は増加している。

ウズラ (*Coturnix coturnix japonica*) は、FM 草木、FM 大谷山、FM 秩父ではまったく見られなかった。FM 唐沢山では4、5林班を中心に月に数回見られたが、1995年以後は年に数回、2005年には年に1回見られる程度に減少した。

コジュケイ (*Bambusicola thoracica thoracica*) は、FM 大谷山では苗畑を中心に、FM 草木では4林班を中心に月に数回、FM 秩父では不特定な地点にお

表3 1960~2005年に森林系FMにおいて観察された鳥類の頻度 (A:まったく見ない, B:数年に1回見る, C:年に1回見る, D:年に数回見る, E:月に数回見る)

種名	FM	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
ゴイサギ	大谷山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	E	E	E	D	D	D	C	A	A	A
	秩父	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
キジ	大谷山	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	D	E	E
	秩父	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
ヤマドリ	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	D
	草木	D	D	D	D	D	D	D	E	E	D
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	D	D	D
	秩父	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E
ウズラ	大谷山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	D	D	C
	秩父	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
コジュケイ	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	A	B
	草木	E	E	E	D	D	D	D	D	A	A
	唐沢山	E	E	E	E	E	D	D	E	E	D
	秩父	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
カモ類	大谷山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
アイサ類	大谷山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	秩父	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
バン類	大谷山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	秩父	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
キジバト	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	草木	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
シギ類	大谷山	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	D	D	D	C
	秩父	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

いて年に数回見られる観察頻度を1995年まで維持したが、2000年以後には急減してほとんど見られなくなった。FM唐沢山では月に数回見られたが、1985年以後は減少と増加を繰り返している。

カモ類 (*Anatidae* spp.) は、FM大谷山、FM草木、FM草木ではまったく見られなかった。FM唐沢山では不特定の地点において、月に数回の高い観察頻度が45年間維持されている。

アイサ類 (*Mergus* spp.) とバン類 (*Rallidae* spp.) は、各FMでまったく見られなかった。

キジバト (*Streptopelia orientalis*) は、FM大谷

山、FM草木、FM唐沢山の不特定の地点において月に数回、FM秩父では不特定の地点において年に数回の高い観察頻度が45年間維持された。

シギ類 (*Scolopacidae* spp.) は、FM大谷山、FM草木、FM草木ではまったく見られなかった。FM唐沢山では不特定の地点において月に数回見られたが、1990年以後減少を続け、2005年には年に1回見られる観察頻度となった。

哺乳動物と同様、表2の鳥獣類捕獲総数は野生生物生息状況を反映する全国的指標の1つと考えると、1960年よりも2000年に生息数が増加したと推察

表4 1960~2005年に森林系 FM において観察された爬虫類と両生類の頻度 (A:まったく見ない, B:数年に1回見る, C:年に1回見る, D:年に数回見る, E:月に数回見る)

種名	FM	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
マムシ	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	D	C
	草木	D	D	D	D	D	D	C	C	D	D
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
ヤマカガシ	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	D	E
	草木	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
シマヘビ	大谷山	C	C	C	C	C	C	C	C	A	B
	草木	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
アオダイショウ	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	草木	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
ヒキガエル	大谷山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	草木	D	D	D	D	D	D	D	D	E	D
	唐沢山	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	秩父	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

される狩猟対象鳥類はまったくなく、激減した種がほとんどであった。森林系 FM に生息する鳥類でも、キジバトの現状維持を除けば、増加傾向にあると考えられる種はなかった。現在のところ生息状況を観察頻度から推察するしかないが、将来的には生息数の変動要因や FM 間での個体数変動の違いを解析し、種の保全を目的とした生息数の維持・増加法を積極的に解明したい。

### 3.3 爬虫類—蛇類と両生類—蛙

森林系 FM における蛇類と蛙の観察頻度を、表4に示す。

マムシ (*Agkistrodon acutus*) は、FM 唐沢山では月に数回、FM 秩父では年に数回の高い観察頻度が45年間維持された。FM 草木では年に数回見られたが、1990年以後減少し、近年回復した。FM 大谷山では1林班を中心に、月に数回の高い観察頻度が1995年まで続いたが、2000年には年に1回見られる程度へ減少した。

ヤマカガシ (*Natrix tigrina*) は、FM 大谷山と FM 唐沢山では月に数回、FM 草木と FM 秩父では年に数回の高い観察頻度がほぼ45年間維持された。

シマヘビ (*Elaphe quadrivirgata*) は、FM 唐沢山では月に数回、FM 秩父では年に一回の観察頻度が45年間維持された。FM 大谷山では年に一回の観察頻度が1995年まで続いたが、近年はほとんど見られなくなった。FM 草木ではほとんど見られなかつ

た。

アオダイショウ (*Elaphe climacophora*) は、FM 大谷山、FM 草木と FM 唐沢山では月に数回の、FM 秩父では3, 4林班を中心に年に一回の観察頻度が45年間維持された。

ヒキガエル (*Bufo formosus*) は、FM 大谷山と FM 唐沢山では月に数回、FM 草木と FM 秩父では年に数回の高い観察頻度が、ほぼ45年間維持された。

爬虫類で調査したものは、蛇類のみであった。各 FM において、蛇類4種の生息数はほぼ維持されていた。しかし、原因は不明であるが、FM 大谷山において2000~2005年に、マムシとシマヘビの生息数が同時に減少したことが注目される。

両生類で調査したものは、ヒキガエルのみであった。蛙の減少が両生類研究者の間で話題になっているが、ヒキガエル生息数の増減は、各 FM では特に認められなかった。

### 引用文献

- 1) 岸 洋一・金子喜一郎・桑原 繁・松崎秀司・内田武次 (1999) 東京農工大学演習林における動物生息状況の記録 (1960~1995) (第1報) 哺乳類. 森林環境資源科学 37: 53-59.
- 2) 岸 洋一・金子喜一郎・桑原 繁・松崎秀司・内田武次 (2001) 東京農工大学フィールドミュージアム (FM) における動物生息状況の

記録(1960~2000)(第2報)鳥類・蛇類・  
蛙. 森林環境資源科学 39:107-112.

(1996) 林地における野鼠, 野兎の被害. 茨城  
県病害虫研究会会報 35:32~34.

3) 岸 洋一・小倉健夫・寺崎正孝・細田浩司



解 説

大気環境中における癌 (変異) 原物質  
—多環芳香族炭化水素とニトロアレーン—\*1

久松 由東\*2,3

Mutagenic and Carcinogenic Compounds in the Environmental Atmosphere  
—Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Nitroarene—\*1

Yoshiharu HISAMATSU \*2,3

1. はじめに

大気浮遊粒子中に存在し、発癌物質である多環芳香族炭化水素は石油、石炭などの化石燃料や木材、プラスチック類などほとんどの有機物の燃焼過程で生成し、魚など食品の焼け焦げにも含まれている。大気環境試料から多環芳香族炭化水素が検出されたのは1952年にロンドンの大気からであり、それ以来分析が進められ世界主要都市の大気等あらゆる場所の大気に含まれている事が明らかにされて来た。多環芳香族炭化水素は低蒸気圧のものが多く、種々の発生源内部で、または発生源から高温のガス状で排出された後、共存する浮遊粒子上に凝縮、付着する。粒子に付着した多環芳香族炭化水素類は大気中

に拡散していくと考えられている。多環芳香族炭化水素についての研究は、癌研究の初期から発癌や代謝機構などに取り組みられているばかりでなく、分析方法、環境存在量、動態や反応性などについても研究が行われ、これらの研究から、図1に示すような多環芳香族炭化水素類に関連する多くの知見が得られてきた。

1978年にカリフォルニア大学の Pitts らはベンゾ[a]ピレンやベリレンを塗布したフィルターに痕跡量の HNO<sub>3</sub> を含む 1 ppm または 0.25 ppm の NO<sub>2</sub> を暴露させた反応生成物はサルモネラ菌株に対し強い変異原性を示し、ニトロ基を有するニトロベンゾ[a]ピレン等が生成することを見出した (Pitts et al, 1978)。この生成した芳香族ニトロ化合物は変異原性が強く、大気反応により生成することが示唆された。それ以来、環境変異原物質として芳香族ニトロ化合物に対する関心が高まり、また簡易な変異原性試験法が開発されるに伴って環境試料に対する芳香族ニトロ化合物 (ニトロアレーン) の研究が活発に進められてきた。これまでに大気中から検出されたニトロアレーンのほとんどは、低蒸気圧であり、大気浮遊粒子中に存在する。ニトロアレーンの多くは強い直接変異原性を示す一方で、発癌性を示す物質も増加しており、多環芳香族炭化水素と共に大気浮遊粒子中に含まれる重要な発がん物質とされるに至っている。また、多環芳香族炭化水素やニトロアレーンが汚染物質として重要視されるのは、燃焼由来の粒子のほとんどは粒径 2 μm 以下の微小粒子であり、長距離輸送されうることや呼吸器系に沈

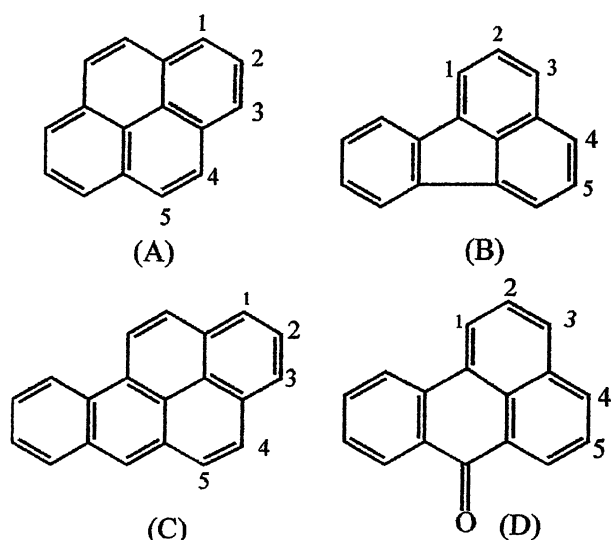


図1 ピレン(A), フルオランテン(B), ベンゾ[a]ピレン(C), 及びベンズアントロン(D)の分子構造

\*1 Received Jun. 9, 2005; Accepted Feb. 22, 2006

\*2 国立保健医療科学院 特別研究員, 〒351-0197埼玉県和光市南2-3-6: Special Researcher, National Institute of Public Health, 2-3-6 Minami, Wako, Saitama Pref. 351-0197, Japan

\*3 東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センター 客員教授 〒183-8509東京都府中市幸町3-5-8: Visiting Professor, Field Science Center, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

着し易いために、ヒトへの健康影響が懸念される事による。わが国の成人病の動向調査によると、主要死因別にみた死亡率の年次推移では癌による死亡が1位で増加傾向を示しており、特に肺癌の増加傾向は著しい。このように変異（癌）原物質である多環芳香族炭化水素やニトロアレンについて、ヒトへの影響評価、実態把握、生成やそれに影響を及ぼす因子等について明らかにしていくことは重要である。本稿では大気浮遊粒子及び粒子に含まれる多環芳香族炭化水素とニトロアレンの変異（癌）原性や大気環境中に於けるニトロアレンの生成について解説する。

## 2. 大気浮遊粒子と多環芳香族炭化水素

イギリスの煙突掃除人の陰囊に皮膚癌が多く、煤が関与していることがP.Pottによって報告されている（Pott, 1778）。1915年に、山極、市川はうさぎの耳にコールタールを塗布し耳に皮膚癌を発生させている。その原因物質の検出のため分析実験が進められ、1933年にCookとHewettによりベンゾ[a]ピレンが発見されるに至った。石炭媒など種々の試

料からベンゾ[a]ピレンが分離、分析されたが、大気浮遊粉塵中のベンゾ[a]ピレンの存在を証明したのはWallerがLondon Smog事件の起きた1952年に肺癌死亡率の高い英国の諸都市の試料からであった。以後、ベンゾ[a]ピレンの存在量について分析が進められ、さらには動物実験による発癌性についても報告されている。我が国においては、札幌市など北海道の数都市で冬季の浮遊粉塵中のベンゾ[a]ピレンなどの分析が行われ、1958年に報告されている。1963年に報告された北海道中心部の諸都市ではベンゾ[a]ピレン濃度は空気1 m<sup>3</sup>当り、冬季35~213 ng, 夏季6~46 ngである（角田, 1963）。人口の多い都市、次いで2次産業を中心とした都市に多い傾向があり、ベンゾ[a]ピレンの主要発生源は石炭を用いた暖房排煙、すなわち石炭暖房であり、工場煤煙の汚染ではみられぬほど極端な高濃度汚染を示していることを報告している。また、図2に示す1974年から1992年に至る札幌市内のベンゾ[a]ピレン濃度の3ヵ年移動平均値は1975~1976年の平均値、4.89 ng/m<sup>3</sup>が、1989~1991年には0.81 ng/m<sup>3</sup>と減少している。ベンゾ[a]ピレン濃度の季節変動

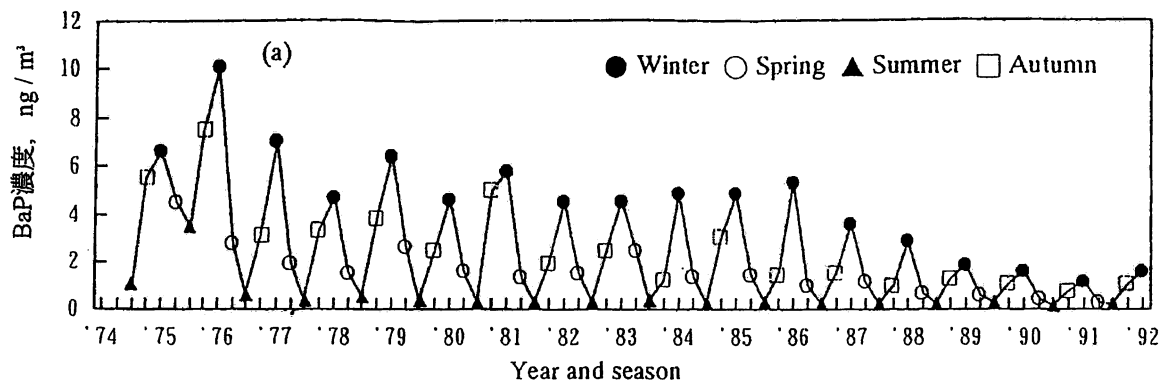


図2 札幌市におけるベンゾ[a]ピレン濃度の季節変動

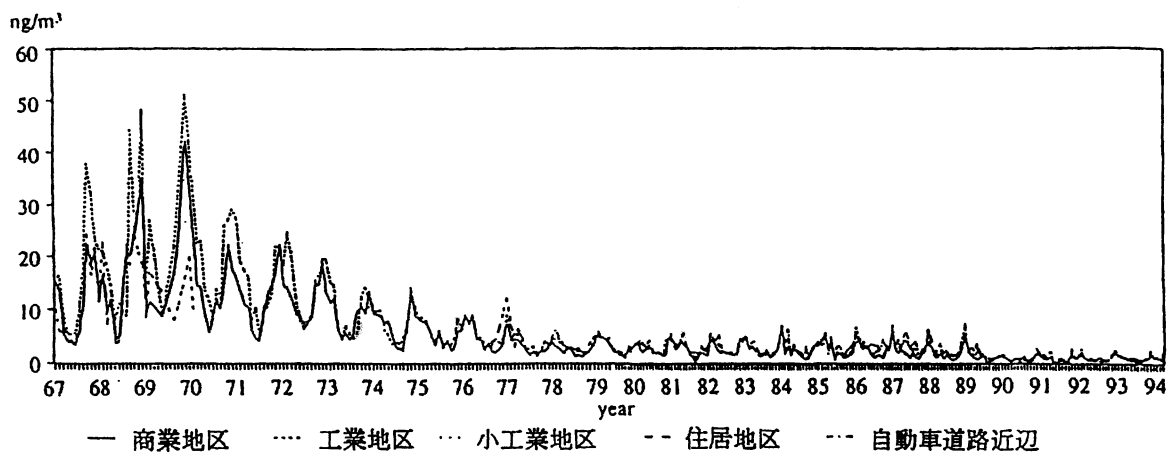


図3 大阪市におけるベンゾ[a]ピレン濃度の変動（1967年～1994年）

は冬季に高く、夏季に低い(Matsumoto et al., 1998)。このような季節変動は我が国の諸都市だけでなく他の国の諸都市でも認められている。また、濃度変動の要因は冬季の暖房に使用する化石燃料の燃焼によるベンゾ[a]ピレン等の多環芳香族炭化水素の生成量の増加と、夏季の紫外線による酸化や分解反応等の進行による減少等が考えられる。1960年代から他の諸都市で開始された測定の一例として大阪市の地域別大気中のベンゾ[a]ピレン濃度を図3に示す。1967年に測定を開始後、最高値を示した1969年は年平均値が工業地区26.86 ng/m<sup>3</sup>、商業地区19.73 ng/m<sup>3</sup>、住居地区13.31 ng/m<sup>3</sup>であったが、10年後の1979年には工業地区2.77 ng/m<sup>3</sup>、商業地区2.24 ng/m<sup>3</sup>、住居地区2.71 ng/m<sup>3</sup>になり、23年後の1992年にはそれぞれ1.12 ng/m<sup>3</sup>、1.020 ng/m<sup>3</sup>、0.81 ng/m<sup>3</sup>となり現在に至っている(Kawaraya et al., 1998)。この濃度の低下は、札幌市に於けると同様に、1968年の大気汚染防止法の成立、1970年の大気汚染防止法の改正、さらに1974年の改正では総量規制が導入されるなどにより、石炭から石油へのエネルギーの転換と同時に、公害防止施設の普及、燃焼管理の効果等の結果に因るものと考えられている。

ベンゾ[a]ピレン等の多環芳香族炭化水素は種々の有機物の熱分解や燃焼過程で容易に生成するため、多環芳香族炭化水素の環境分布は広く、様々な生活関連物質を通し、体内に取り込んでいる。大気浮遊粒子に含まれ、癌(変異)原性を示す多環芳香族炭化水素は、ベンゾ[a]アントラセン、ベンゾ[e]フェナントレン、ベンゾ[a]ピレン、ベンゾ[e]ピレン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[j]フルオランテン、ジベンゾ[a, h]アントラセン、ピセン、クリセン、ベンゾ[c]クリセン、ジベンゾ[a, h]ピレン、ジベンゾ[a, e]ピレンなど4~6環系のものがほとんどである。多くの多環芳香族炭化水素について変異原性試験や発癌実験が行われており、発癌性は示さなくても、そのメチル基、アミノ基やニトロ基の置換体は発癌性を示したり、増強する物質もあり、またピレン、フルオランテン、ベンゾ[ghi]ペリレン等はベンゾ[a]ピレンの発癌性を促進させる補助的な作用を示す。

### 3. 大気浮遊粒子の変異原性

化学物質の変異原性は、代謝活性化系の存在下、または非存在下で活性化された化学物質がDNA付

加体を形成し、遺伝形質の担い手である遺伝子に変化が生じて引き起こされる突然変異を示し、サルモネラ菌などの微生物を用いた変異原性試験では、いったん突然変異を起こした形質が、新たな突然変異によって元の野生株に戻る復帰突然変異を用いている。California大学のAmes教授らがサルモネラ菌を材料として、突然変異を指標とする変異原性試験法を開発したのは1971年である(Ames et al., 1971)。それ以来改良や菌株等の開発など急速な進展を遂げ、いろいろな化学物質や環境試料などの変異原性試験が進められた。この方法(エームス法)では材料としてヒスチジン要求性のサルモネラ菌(TA 98, TA 100菌株など)を用い、ヒスチジン非要求性への復帰突然変異を指標として調べている。

このエームス法が広く用いられるようになったのは、1)感受性の高いサルモネラ菌株、TA 98, TA 100等を開発したこと、2)化学物質は哺乳動物体内で代謝活性化を受けてDNA損傷性を発現するが、微生物にはこの代謝活性化機能が欠損しているから薬物代謝酵素系、すなわちフェノバルビタール等の薬物で酵素を誘導したラット肝臓を9,000 xgで遠心し、その上清(S9)に助酵素を添加した代謝活性化系(S9 mix)を試験系に加えたこと、3)変異原物質で処理した後、生育阻害が発現しない濃度範囲で復帰突然変異株の出現数を調べる方法を用いたこと、である。これにより、以前の試験法では代謝活性化を必要としなく、細胞内で代謝された後その代謝産物がDNAと反応する直接変異原物質が変異原性を示していたのが、S9 mixを用いた多くの間接変異原物質が変異原性を示し、検出できるようになった。一般に変異原性の検出にはフレームシフト型のサルモネラ菌株TA 98と塩基対置換型のTA 100菌株が汎用されている。また、後述する芳香族ニトロ化合物(ニトロアレーン)等は環境中に極めて微量存在するため、より高い検出感度を有する菌株の開発が望まれた。また、ニトロアレーンは微生物の持つニトロ還元酵素によりN-水酸化体へ還元され、その後アセチル転移酵素により活性化され生じたニトレンウムイオンがDNAに攻撃するものと考えられている。そこで、サルモネラ菌株TA 1538菌株からニトロ還元酵素とアセチル転移酵素の遺伝子をクローニングし、遺伝子の持つマルチコピープラスミドをTA 98やTA 100菌株に導入して、ニトロアレーンや芳香族アミンに感受性が高く、特異性を有するYG 1021, YG 1024等の菌株が

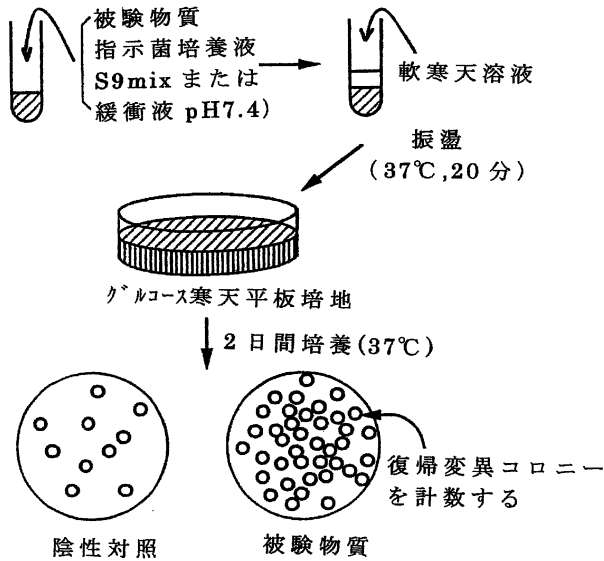


図4 エームス法による変異原性試験の操作方法（プレインキュベーション法）

開発されている（能美ら1990）。

変異原性試験は、いわゆる遺伝毒性を評価するというより、むしろ発癌性を予測するための短期スクリーニング試験として用いられている。

エームス法ではその一部を改良したプレインキュベーション法（Yahagi et al., 1977）が良く用いられており、試験操作法を図4に示す。この方法では被験物質を指示菌と共に薬物代謝酵素系（S-9 mix）の存在下または非存在下の条件で、37°C、20分間振盪した後、少量のヒスチジンを含む軟寒天溶液と混和し、グルコース寒天平板培地上に播く。2日間培養した後、出現してくる復帰突然変異コロニー数を自動コロニーカウンター等を用いて計数する。

この変異原性試験法を用いて多くの都市大気浮遊粒子の有機溶媒抽出物について変異原性試験結果が報告されている。著者らが年間を通して大気浮遊粒子を捕集し、抽出物の変異原性試験を行った結果では、TA 98, TA 100両菌株に対し、S 9 mix 添加の有無に関わらず変異原性が認められ、変異原比活性は捕集日より大きく変動する。各月とも S 9 mix を添加しない（非存在下）時の変異原比活性の高い日が多い。特に冬季に多く、代謝活性化しなくても変異原性を示す直接変異原物質が大気浮遊粒子に含まれていることを示している。大気浮遊粒子に含まれるベンゾ(a)ピレンなど多環芳香族炭化水素の多くは S 9 mix を添加した系で変異原性を示す間接変異原物質である。また同時に測定したベンゾ(a)ピレン、ベンゾ(k)フルオランテン、ペリレン等の濃度

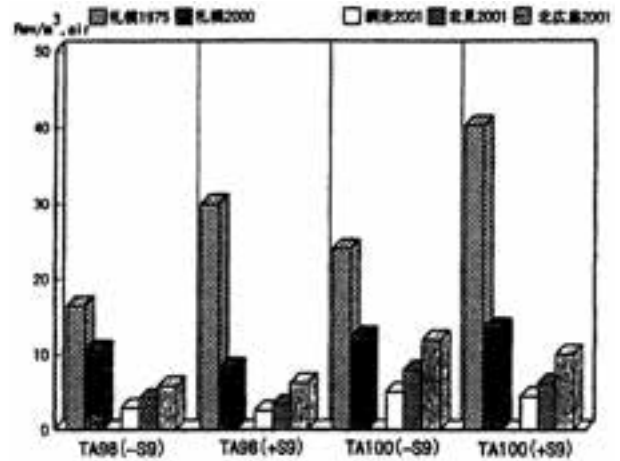


図5 大気浮遊粒子の変異原比活性の年度平均値（1975年、2000年）の比較

の経日変動と S 9 mix を添加した系の変異原比活性のそれとは類似している（後藤ら，1982）。さらに、1974年から長期間にわたって札幌市内で捕集した大気浮遊粒子の変異原比活性を測定した結果によると、図5に示すように、1975年と比べ2000年では間接変異原性と直接変異原性の活性比（+S 9/-S 9）が減少している（Matsumoto et al., 1998, 芥川ら，2002）。この結果は25年間における札幌市の大気浮遊粒子に含まれる有機物質成分の質的な変化を示しており、その要因として石炭消費量が大幅に減少したこと、NO<sub>2</sub>濃度が減少しなく、一定かわずかな増加傾向を示すことや、自動車、特にディーゼル車の増加による排出物成分の変化（ニトロアレン等）などを挙げている。

#### 4. 発癌物質と評価

（職業）癌が P. Pott により報告されたのはおよそ230年も以前になる（Pott, 1778）。その後、多くの発癌物質と発癌部位について報告されている。そのほとんどは特定の職業に従事する人が職場の特定な発癌因子に暴露されて生じる癌である職業癌によるものである。癌発生が明らかになるのは数年月の潜伏期間を経てのことである。

化学物質による発癌過程、すなわち正常細胞が悪性細胞になり癌を形成する過程には「多段階説」と呼ばれるいくつかの段階がある。図6に示すように、発癌の第一段階は、細胞に進入した化学物質が酵素的に代謝された後、その代謝物が遺伝物質である DNA に作用して付加体を形成して DNA に損傷が起き、その損傷に起因して DNA 上に変異が起き変異細胞が生成して来る。この過程はイニシエー

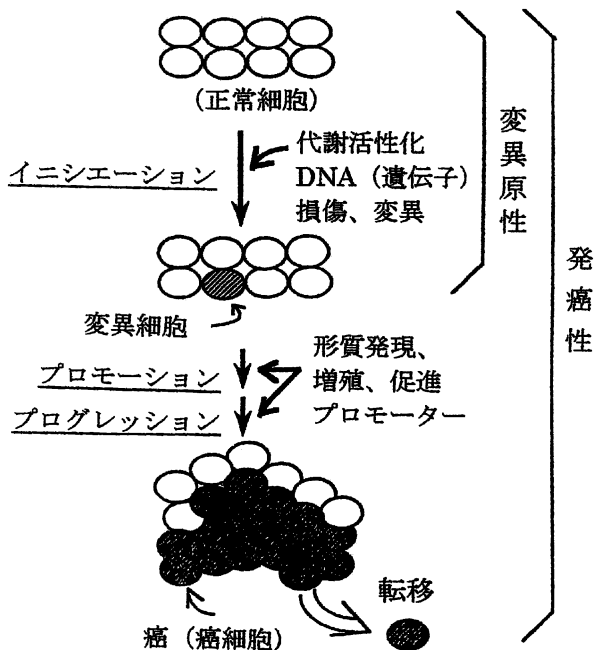


図6 化学発癌過程（多段階説）

ション過程（変異原性）と呼ばれ、化学発がんにおいて重要な過程と考えられている。微生物や哺乳動物細胞及び動物を用いた変異原性試験ではこのイニシエーション過程を検出出来る。第二及び第三段階は細胞分化や細胞形質発現の促進などによる細胞増殖に異常が起こるプロモーション過程、および悪性化した細胞が増殖し、正常組織や臓器の中に湿潤していく、プログレッション過程と呼ばれる。この過程には発癌プロモーター、各種の増殖因子やホルモンなどが関与していることが知られている。

発癌実験では単一の物質または要因によっては癌の発生がみられたり、みられなかったり、動物の感

受性に大きな差がみられる。また、前記したようにピレンやフルオランテン等は発癌に関して補助的、cocarcinogenic、に作用したりする。

これら個々の発癌物質、発癌補助物質等についての評価は、世界中で報告される文献を基に、WHOのIARC (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 国際がん研究機関) によって行われており、実験動物による発癌性、生化学的知見や疫学的知見が重要視される。そのモノグラフにより詳細な情報を得ることが出来る (IARC Monographs, 1982)。これらの情報をもとに環境中の諸物質について、表1に示すように、発癌性がグループに分類され、評価されている (IARC Monographs, 1987)。大気浮遊粒子に含まれる多環芳香族炭化水素の中で、ベンゾ[a]アントラセン、ベンゾ[k]フルオランテン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[j]フルオランテン、クリセン、ジベンゾ[a,h]アクリジン、ジベンゾ[a,h]アントラセンやジベンゾ[c,g]カルバゾール等は動物実験で発癌性が証明されている化学物質であるが、ヒトに対し疫学的に発癌性が明らかにされていない物質である。発癌研究の初期に見だされ、強発癌性を示すベンゾ[a]ピレンは、ヒトに対して発癌性の可能性のある化学物質として分類されている。このグループではさらに、発癌性の可能性の高いもの (2A) として、アクリロニトリル、アフラトキシン、ベンゾ[a]ピレン、ニッケル化合物など、可能性がやや低いもの (2B) として、アセトアルデヒド、四塩化炭素、クロロホルム、DDT、PCBなどに分けている。一方、グループ1の人体に対して発癌性が十

表1 IARCにより分類された発癌物質

- 1) 人体に対して発癌性が十分に証明されている化学物質 (グループ1)
  - 4-アミノピフェニル、ヒ素及びヒ素化合物、アスベスト、ベンゼン、ベンジジン、2-ナフチルアミン、ビス(クロロメチル)エーテル、N,N'-ビス(2-クロロエチル)-2-ナフチルアミン、ラドン、六価クロム、塩化ビニル、コールタール、マスタードガス、すす及びすす抽出物、たばこ煙、2, 3, 7, 8-テトラクロロジベンゾパラダイオキシンなど
- 2) 人体に対して発癌性の可能性がある物質 (グループ2)
  - (グループ2A)
    - アクリロニトリル、アフラトキシン、ベンゾ[a]ピレン、ベリリウム、クレオソート、フェナセチンなど
  - (グループ2B)
    - アセトアルデヒド、アドレマイシン、AF-2, オーラミン、ベンゾトリクロライド、PCB, クロロホルム, DDT など
- 3) 動物に対して発癌性が十分に証明されている化学物質 (グループ3)
  - ベンゾ[a]アントラセン、ベンゾ[k]フルオランテン、ベンゾ[b]フルオランテン、ジベンゾ[a,h]アクリジン、ベンゾ[j]フルオランテン、ジベンゾ[a,h]アントラセン、ジベンゾ[c,g]カルバゾールなど

分に証明されている化学物質として、表1に示すように、4-アミノピフェニル、アスベスト、ベンゼン、コールタール、塩化ビニル、すす、煙草煙などが分類されている。ベンゼンは動物を用いた発癌実験では骨髄性白血病の発生を示唆する知見は少ないが、疫学研究では急性骨髄性白血病やリンパ球性白血病等、リンパ組織と腫瘍発生との関連が報告されていることから、グループ1の人体に対して発癌性が十分に証明されている化学物質として分類されている。これは疫学研究によって人体への暴露と発癌性の因果関係が認められたのである。同様に、1997年2月にダイオキシンは実験動物での肺の扁平上皮癌などの発症や疫学的知見が重要視され、グループ2Bからグループ1に変更された。

### 5. 大気環境中におけるニトロアレーンの生成

前記したPittsらの初期の研究では、ガラス繊維製フィルターに塗布したベンゾ[a]ピレンに痕跡量のHNO<sub>3</sub>と0.25 ppmのNO<sub>2</sub>を含む空気を8時間暴露させると、約20%のベンゾ[a]ピレンが6-ニトロベンゾ[a]ピレンと少量の1-ニトロベンゾ[a]ピレンおよび3-ニトロベンゾ[a]ピレンに変換した。この反応では間接変異原物質であるベンゾ[a]ピレンが、直接変異原物質である6-, 1-および3-ニトロベンゾ[a]ピレンに変換したことになる。さらに、ピレンと1 ppmのNO<sub>2</sub>の24時間の暗反応では、痕跡量の硝酸が存在するとニトロ化反応の収率が0.02%から2.85%に増加した。また、大気汚染物質である二酸化硫黄が共存すると、ニトロ化反応が促進されることが認められた。しかし、ガス状HNO<sub>3</sub>が共存した時程ではなく、このガス状HNO<sub>3</sub>やSO<sub>2</sub>がどのように作用するのかについては十分に検討されていない。

このような実験室レベルでのニトロ化反応が大気浮遊粒子の移流、拡散中に実際の環境中で起きるか、否かについても検討された。たとえば、米国大陸のDelawareから大西洋、Bermuda島への移流中のニトロ化反応による生成を解析するため、大気浮遊粒子の流跡線解析とBermuda島内の局所発生源の影響の有無や、微小粒子中に共存する元素状炭素、PbやSeを燃焼による排出の指標物質（トレーサー）と仮定して、トレーサーに対する多環芳香族炭化水素と芳香族ニトロ化合物の比を比べることにより移流、拡散等以外による芳香族化合物誘導体の濃度変化を調べた。その結果、1-ニトロピレ

ンとヒドロキシピレンの比は他の物質の比より高く、これは明らかに移流中の二次生成によるものとした(Gibson et al., 1986)。

一方、ディーゼルエンジン排気粒子や都市郊外で捕集した大気浮遊粒子のジクロロメタン抽出物から分取型高速液体クロマトグラフィーで芳香族ニトロ化合物を分離、分取し、GC/MSで分析した結果、多くの芳香族ニトロ化合物が検出された。ディーゼルエンジン排出粒子から検出され、比較的多く含まれるニトロフルオレン、ニトロフルオランテンおよびニトロピレンについて表2に示す。また、大気浮遊粒子抽出物からもニトロナフタレン、ニトロピフェニル、ニトロフルオレン、ニトロピレンやニトロフルオランテンなど数種の芳香族ニトロ化合物が検出されている。ニトロフルオレン、ニトロピレンおよびニトロフルオランテンなどの変異原性については、表3に示すように、変異原性の強いものが多く、特にジニトロ体は強い。そこでニトロ化合物の生成反応について詳細な検討が加えられている。例えば、都市郊外で経時的に捕集した大気浮遊粒子のジクロロメタン抽出物から検出された1-および2-ニトロピレンと2-および3-ニトロフルオランテンについて表4に示す。表4から分かるように、1-ニトロピレンと2-ニトロフルオランテンは日中および夜間に捕集された大気浮遊粒子に含まれているのに対し、2-ニトロピレンは日中に捕集された粒子のみから検出されている(Pitts et al., 1985)。一方、表2に示すように、2-ニトロピレンと2-ニトロフルオランテンはディーゼルエンジン等自動車排出粒子抽出物から検出されていなく、他の燃焼由来の排出粒子抽出物からも検出されていない。また、前記したようにHNO<sub>3</sub>を含むNO<sub>2</sub>とピレンやフルオランテンとの暗反応でも検出されなかった。

そこで、大気中での速いニトロ化反応が推測されたため、OHラジカル種とNO<sub>2</sub>の共存下（存在する化

表2 ディーゼルエンジン排気粒子から検出されたニトロアレーン

2-ニトロフルオレン	1,8-ジニトロピレン
2,5-ジニトロフルオレン	1-ニトロフルオランテン
2,7-ジニトロフルオレン	3-ニトロフルオランテン
1-ニトロピレン	7-ニトロフルオランテン
1,3-ジニトロピレン	8-ニトロフルオランテン
1,6-ジニトロピレン	

\*IARC monographs, 46, 43 (1989) より一部抜粋

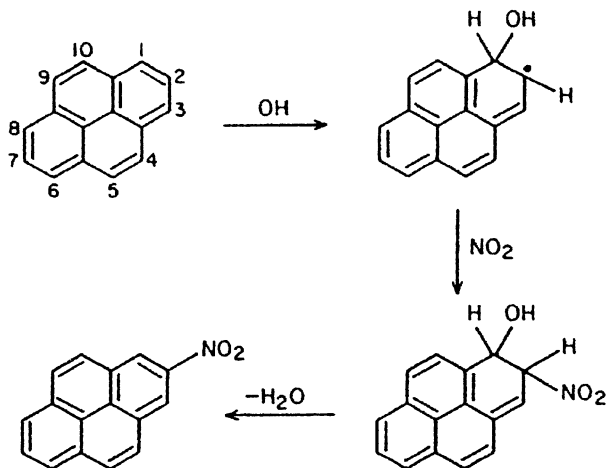


図7 2-ニトロピレンの生成反応機構

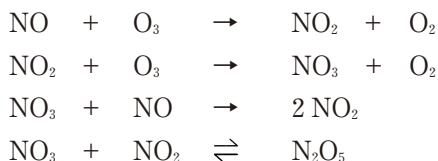
学種はOH, NO, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, HONOである), ピレンおよびフルオランテンとの気相光反応を検討した結果, テフロンチャンバーを用いた実験で, ピレンとの反応では2-ニトロピレンと極微量の1-ニトロピレンが生成し, フルオランテンとの反応では2-ニトロフルオランテンと少量の7-および8-ニトロフルオランテンが生成した。これらの実験結果から反応機構が提案され, 2-ニトロピレンの生成反応について図7に示す (Pitts et al., 1985, Arey et al., 1986)。

すなわち, 気相において, ピレンやフルオランテンにOHラジカルが電子密度の最も高い位置, ピレンでは1の位置, フルオランテンでは3の位置, に攻撃し, この反応は速いものと考えられている。次いでNO<sub>2</sub>のオルト(2-)位置への付加反応による2-ニトロ誘導体が生成し, 浮遊粒子表面に凝縮する。このピレンやフルオランテンのOH体に対するNO<sub>2</sub>の付加反応は, 大気中のO<sub>2</sub>やNO<sub>2</sub>濃度に依存した競争反応である。

一方, 木材の燃焼煙にNO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>や(NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>)混合物を添加し暗反応を行うと, その反応生成物の変異原性は(NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>)混合物を添加した系において直接変異原性が最も高く, 特に極性フラクションにおいて高い。このように直接変異原性が高くなっていることは, 煙中に存在しているピレン, フルオランテンや他の多環芳香族炭化水素とN<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の反応によりニトロ誘導体が生成したためと報告している (Kamens et al., 1984)。

多環芳香族炭化水素とNO<sub>2</sub>の暗反応では反応が非常に遅く, また反応性も低い。そこで, 下記に示すように, 夜間にNO<sub>2</sub>とO<sub>3</sub>の反応によって生成するNO<sub>3</sub>ラジカルやN<sub>2</sub>O<sub>5</sub>との反応について検討され

た。



NO<sub>3</sub>ラジカルは次のように光分解反応が速いので, 日中の濃度は低い。



このN<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub>系におけるフルオランテンの気相反応では2-ニトロフルオランテンが生成し, フィルター上に塗布したフルオランテンとの気-固相不均一反応では1-, 3-, 7-および8-ニトロフルオランテンが生成した。同様にピレンとの反応では1-ニトロピレンと少量の4-ニトロピレンが生成することが報告されている (Zielinska et al., 1986, Atkinson et al., 1994)。このチャンバー実験では, 日中での反応による2-ニトロフルオランテンの生成(3%)に比べ (Arey et al., 1986), 2-ニトロフルオランテンが24%の高収率で生成している。この系における反応機構については, 図8に示すようなNO<sub>3</sub>付加体を経る過程が提案されているが, 十分な検討がなされていない。

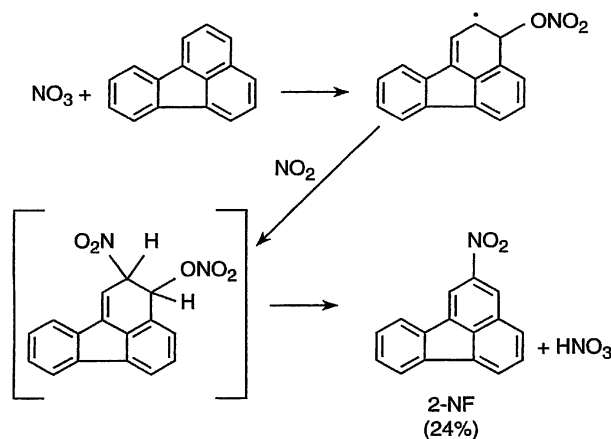


図8 NO<sub>3</sub>ラジカルによる2-ニトロフルオランテンの生成反応機構

このように大気浮遊粒子の有機溶媒抽出物がサルモネラ菌株 TA 98(-S 9 mix) に対して高い直接変異原性を示すのは, 多環芳香族炭化水素に依るのではなく, 多種類の強変異原性を示す物質を多く含むニトロアレーンによることが認められる。また, 大気

表3 ニトロアレーンのサルモネラ菌株 TA 98, TA 100, YG 1021及び YG 1024に対する変異原活性

ニトロアレーン	復帰突然変異コロニー数/nmol(-S 9 mix)			
	TA 98	TA 100	YG 1021	YG 1024
2-ニトロフルオレン	39	12	2,045	3,181
2,7-ジニトロフルオレン	2,282	64		
1-ニトロフルオランテン	74	124		
2-ニトロフルオランテン	930	781		
3-ニトロフルオランテン	4,668	2,156	4,670	57,000
7-ニトロフルオランテン	544	989		
8-ニトロフルオランテン	16,381	1,501		
3,4-ジニトロフルオランテン	4,117	3,270	8,200	52,000
3,7-ジニトロフルオランテン	123,224	24,820	157,000	6,600,000
3,9-ジニトロフルオランテン	103,660	20,790	104,000	1,190,000
1-ニトロピレン	467	119	470	2,870
2-ニトロピレン	2,225	742		
1,3-ジニトロピレン	85,850	30,048	22,700	1,190,000
1,6-ジニトロピレン	126,000	12,159	116,000	4,120,000
1,8-ジニトロピレン	257,000	55,420	131,000	4,780,000
3-ニトロベンズアントロン	208,000	29,700	129,000	6,290,000
9-ニトロベンズアントロン	84,000	3,270	26,100	490,000
3,9-ジニトロベンズアントロン	46,000	4,300	25,100	223,000
3,11-ジニトロベンズアントロン	3,000	360	3,110	12,200

表4 大気浮遊粒子中のニトロピレン (NPY) 及びニトロフルオランテン (NFL) の濃度

捕集日 (*)	捕集時刻 (time)	1-ニトロピレン-d <sub>9</sub> の回収率 (%)	濃度 (ngm <sup>-3</sup> )		
			1-NPY	2-NPY	2-NFL
9/18/84	1200-1800	94	0.02	0.003	0.07
9/18/84	1800-2400	85	0.03	ND	0.2
9/19/84	0000-0600	98	0.008	0.01	0.3
9/19/84	0600-1200	77	0.03	0.02	0.2

\*month/day/year

浮遊粒子に含まれるニトロアレーンは化石燃料等の種々の燃焼過程に伴って(一次)生成されるものと、大気中における二次生成物に依るものであることが分かる。

一方、著者らはピレン、フルオランテンやカルバゾールなど数種の多環芳香族炭化水素類と NO<sub>2</sub>の反応について種々の条件下で検討して来た(Hisamatsu et al., 1986)。それらの中で、大気浮遊粒子のジクロロメタン等の有機溶媒抽出物を分取型 HPLC で分離、分取した画分の変異原性は極性のより強い物質を含有する画分の変異原性が高い。大気浮遊粒子に存在する数多くの多環芳香族炭化水素類は光分解や酸化反応によりケトン体やラクトン体を容易に生成する。そこで、芳香族ケトン類の中で大

気浮遊粒子に多く含まれる数種について NO<sub>2</sub>との光反応および N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub>系の暗反応について検討した。その結果、ベンズアントロン(7 H-benz [d,e] anthracene-7-one)と NO<sub>2</sub>の光反応および N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub>系の暗反応の反応生成物の直接変異原性は著しく強く、主生成物は 3-ニトロベンズアントロン(3-nitro-7 H-benz [d,e] anthracene-7-one)であることを見出した(Enya et al., 1997)。合成した数種のニトロベンズアントロンの変異原性を表3に示した。3-ニトロベンズアントロンの変異原性は、今までに報告されている変異原物質の中で1,8-ジニトロピレンと同様に著しく強く、モノニトロ体では最も強い。また9-ニトロベンズアントロンおよび3,9-ニトロベンズアントロンも共に強い。



ベンズアントロンとNO<sub>2</sub>の光反応およびN<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-NO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub>系との暗反応の反応生成物の変異原性は、暗反応生成物の変異原性の方がおよそ15倍高い。光反応では2-及び3-ニトロベンズアントロンが生成するのに対し暗反応では3-ニトロベンズアントロンのみ生成する。また光反応ではSO<sub>2</sub>を添加すると、2-及び3-ニトロベンズアントロンの生成が促進されることが認められた。捕集した大気浮遊粒子に含まれる3-ニトロベンズアントロンの含有量は夜間に捕集した粒子の方が昼間の粒子より多く、前述したニトロピレンやニトロフルオランテンと同様に、化石燃料などの燃焼過程で(一次)生成したものと、大気環境中で(二次)生成したのものによるものと考えられる。また、大気浮遊粒子に存在する3-ニトロベンズアントロンは1,8-ジニトロピレンと等量かそれ以上測定されており、大気浮遊粒子の変異原性に対しかなり大きく寄与している(Inazu et al., 2005)。

また、SO<sub>2</sub>の共存効果については、NO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-air下での光反応ではSO<sub>2</sub>がOラジカルやO<sub>3</sub>と反応することによりNO<sub>2</sub>や基質がOラジカルやO<sub>3</sub>との反応により減少することを抑制することや、粒子にH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>として沈着し、HNO<sub>3</sub>との混酸によるニトロ化を促進すること、NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>-O<sub>2</sub>下の暗反応ではSO<sub>2</sub>がO<sub>3</sub>と反応し、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の不均一解離から生成するNO<sub>2</sub>の減少やニトロシル硫酸の生成により生じるNO<sub>2</sub>が加わること等が異性体やジニトロ体の生成に関与していることが考えられている(Inazu et al., 2000)。

さらに、大気浮遊粒子上での芳香族基質と窒素酸化物との反応には粒子に含まれる種々の金属酸化物が反応生成物の異性体分布に影響することは十分考慮しなければならない。また、金属酸化物粒子に塗布したフルオランテンとNO<sub>2</sub>の気-固不均一光反応では2-ニトロフルオランテンが生成することや、ニトロ体の生成量、異性体分布およびフルオランテンの減少速度が金属酸化物粒子の種類に大きく依存することが見出されている(Inazu et al., 1997)。

## 6. おわりに

多環芳香族炭化水素は人為的及び自然発生源の双方によるものであり、大気、水、室内空気、土壌、低質などのあらゆる環境に存在し、その濃度は燃焼機関の条件や人間活動の程度により異なる。多環芳香族炭化水素は大気汚染物質の重要な物質とされて

いながら、1997年4月施行の改正大気汚染防止法でベンゾ[a]ピレンが優先取組物質に指定された。多環芳香族炭化水素の誘導体であるニトロ化合物、ニトロアレーンは多環芳香族炭化水素と異なり非代謝活性化で変異原性を示す直接変異原物質であり、多くは多環芳香族炭化水素より変異原性の強い化合物が多い。また、大気浮遊粒子中のニトロアレーンはディーゼル車などの燃焼機関等からの一次生成と汚染物質である窒素酸化物との大気反応による二次生成に因るものである。大気浮遊粒子の直接変異原性の強さに対し、既知のニトロアレーンの含有量から求めた寄与率はかなり高い(50%以上)。一方、大気浮遊粒子の間接変異原性の強さに対し、癌(変異)原物質含量の指標とされているベンゾ[a]ピレン含有量の寄与率は長期に亘る調査(Matsumoto et al., 1998)で次第に低くなって来ている。これらの結果からも、既存の方法による変異原物質の検索(Ishii et al., 2000)を続けると共に、種々の化学物質に対する環境動態の研究や高感受性の菌株等の開発を行い、健康リスクの評価のための知見を蓄積していく必要がある。また、森林が存在することにより周辺の環境をよくすると共に、樹葉への粒子の沈着による浄化作用などについても検討することが望まれる。

## 参考文献

- Ames B.N.(1971) : The detection of chemical mutagens with enteric bacteria, in A. Hollaender(Ed.), Chemical Mutagens; Principles and methods for their detection, vol.1, Plenum, New York, 267-282.
- Arey, J., Zielinska, B., Atkinson R., Ramdahl, T., Pitts, J.N., Jr., (1986) : The formation of nitro-PAH from the gas-phase reactions of fluoranthene and pyrene with the OH radical in the presence of NO<sub>x</sub>, Atmospheric environment, 20, 2339.
- Atkinson, R., J. Arey (1994) : Atmospheric chemistry of gas-phase polycyclic aromatic hydrocarbons, Environ. Health Perspect., 102 (Suppl. 4), 117.
- 芥川智子, 酒井茂克, 松本 寛 (2002) : 道内3地域の大气及び土壌中変異原活性, 北海道環境科学センター所報, 29.
- Cook, J.W., Hewett, C.L., and Hieger, I.(1933) : The

- isolation of a cancer-producing hydrocarbon from coal tar-Parts I, II and III. *J. Chem. Soc., Transactions* 1: 395.
- Enya T., H. Suzuki, T. Watanabe, Y. Hisamatsu (1997) : 3-nitrobenzanthrone, a powerful bacterial mutagen and suspected human carcinogen founded in diesel exhaust and airborne particulates, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 2772.
- Gibson T.L., Korsog, P.E., Wolff, G.T. (1986) : Evidence for the transformation of polycyclic organic matter in the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 20 (8), 1575.
- 後藤純雄, 加藤幸彦, 田中一幸, 久松由東, 松下秀鶴 (1982) : 大気浮遊粉じんの変異原性の経日変動, *大気汚染学会誌*, 17, 295.
- Hisamatsu Y., T. Nishimura, K. Tanabe, H. Matsushita (1986) : Mutagenicity of the photochemical reaction products of pyrene with nitrogen dioxide, *Mutation Research*, 172, 19.
- Inazu, K., T. Saito, N.D. Vu, K. Aika, Y. Hisamatsu (2005) : Chemiluminescence detection of 3-nitrobenzanthrone and 2-nitrotriphenylene in airborne particles with on-line reduction HPLC system, *Bioluminescence & Chemiluminescence*, 10, 405.
- Inazu K., T. Kobayashi, Y. Hisamatsu (1997) : Formation of 2-nitrofluoranthene in gas-solid heterogeneous photoreaction of fluoranthene supported on oxide particles in the presence of nitrogen dioxide, *Chemosphere*, 35, 607.
- Inazu K., N. Tsutsumi, K., Aika, Y. Hisamatsu (2000) : SO<sub>2</sub>-enhanced nitration of fluoranthene and pyrene adsorbed on particulate matter in the heterogeneous reaction in the presence of NO<sub>2</sub>, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 20, 191.
- Ishii S., Y. Hisamatsu Y., K. Inazu, M. Kadoi, K. Aika (2000) : Ambient measurement of nitrotriphenylene and possibility of nitrotriphenylene formation by atmospheric reaction, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 1893.
- Kamens R.M., G.D. Rives, J.M., Perry, D.A. Bell, L.D. Claxton (1984) : Mutagenic changes in dilute wood smoke as it ages and react with ozone and nitrogen dioxide : an outdoor chamber study, *Environ. Sci. Technol.*, 18 (7), 523.
- Kawaraya T., A. Okamoto, K. Tomita (1998) : Trend and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in Osaka from 1967 to 1994, *Seikatsu Eisei*, 42, 229.
- IARC Monographs (1982) : Supplement 4 (WHO)
- IARC Monographs (1987) : Supplement 7 (WHO)
- Matsumoto Y., S. Sakai, T. Kato, T. Nakajima (1998) : Long-term trends of particulate mutagenic activity in the atmosphere of Sapporo. 1. Determination of mutagenic activity by the conventional tester strains TA 98 and TA 100 during an 18-Year period (1974-1992), *Environ. Sci. Technol.*, 32, 2665.
- 能美健彦, 渡辺雅彦, 石館基 (1990) : 遺伝子工学的手法を用いた新しいサルモネラ指標菌株の開発, *環境変異原研究*, 12, 57.
- Pitts J. N. Jr, van Cauwenberghe, K. A., Grosjean. D., Schmid, J. P., Fitz, D.R., Belser, W. L. Jr., Knudson, G. B. Hynds, P. M. (1978) : Atmospheric reaction of polycyclic aromatic hydrocarbons : Facile formation of mutagenic nitro derivatives, *Science*, 202, 515.
- Pitts Jr., J. N., Sweetman, J. A., Zielinska, B., Atkinson, R. (1985) : Determination of 2-nitrofluoranthene and 2-nitropyrene in ambient particulate organic matter : Evidence for atmospheric reaction, *Atmospheric Environment*, 19 (10), 1601.
- Pott, P. (1778) : *Cancer scroti*, 403, In *Chirurgical Works of Percival Pott*. Dublin, James Williams.
- 角田文男 (1963) : 発癌性炭化水素による大気汚染に関する研究, *北方産業衛生*, 29, 21.
- Yahagi, T., Nagao, M., Seino, Y. (1977) : Mutagenicities of N-nitrosoamines on Salmonella, *Mutation Res.* 48, 121.
- Waller, R. R. (1952) : The benzpyrene content of town air, *Brit. J. Cancer*, 6 : 8.
- Yamagiwa, K., and Ichikawa, K. (1915) : Experimentelle studie uber die pathogenese der epithelialgeschwulste. *Mitt. Med. Fak. Tokio*, 15 : 295.
- Zielinska B., J. Arey, Atkinson R., Ramdahl, T., Pitts, J.N., Jr. (1986) : Reaction of dinitrogen pentoxide with fluoranthene, *J. Am. Chem. Soc.*, 108, 4126.

## 投稿規程

「フィールドサイエンス」(英文名: Journal of Field Science) は、東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス教育研究センターの研究報告誌で年1回以上発行される。

本誌には、広くフィールドサイエンスに関する研究成果などを掲載する。

### 1. 目的

フィールドサイエンスに関する研究成果を公表し、その発展に寄与する。

### 2. 投稿者

東京農工大学に所属する者およびフィールドサイエンスに関心をもつ者

### 3. 報文の種類と内容

- (1) 原著論文: 独創的な研究で、価値ある結論あるいは実験・調査結果を含むもので未発表のものに限る。
- (2) 研究資料: 測定・観察記録、既成の知見の確認など研究上報告する価値のあるもので未発表のものに限る。
- (3) 総説・解説: フィールドサイエンスに関するレビュー、実験・調査方法に関する解説など。

### 4. 報文の原稿

- (1) 原稿は、和文または英文とする。
- (2) 原稿は、別に定める執筆要領に従って作成し、刷り上がり20ページ以内とする。

### 5. 投稿手続き

原稿は、原著論文では原文1部とコピー2部、その他原稿では各1部を次の様式による原稿送付状を添えて、編集委員長に提出する。

- (1) 著書名
- (2) 表題
- (3) 原稿枚数(表紙、本文、要旨、図、表および写真のそれぞれの枚数)
- (4) 報文の種類
- (5) 別刷り希望部数

### 6. 原稿の受理・採否

- (1) 原著論文の審査は編集委員会で委嘱した学内および学外の審査員各1名以上が行い、論文等の採否は、審査結果に基づいて編集委員会が行う。
- (2) 研究資料および総説・解説の原稿の審査

は、審査員1名以上で行う。

- (3) 原稿が受理されたのち、原稿が入力されたフロッピーディスク(DOS/V 1.44 MB)にテキストあるいは書式付きテキスト)を提出する。

## 7. その他

- (1) 別刷希望者は実費負担とする。

## 執筆要領

### 1. 原著論文

- (1) 和文原稿
  - 1) 和文表題
  - 2) 著者名
  - 3) 英文表題
  - 4) 著者名のローマ字書きフルネーム
  - 5) ランニングタイトル(和文)
  - 6) 英文要旨・キーワードおよび和文要旨・キーワード
  - 7) 本文(はじめに、試料と方法、結果、考察)
  - 8) 引用文献
- (2) 英文原稿
  - 1) 英文表題
  - 2) 著者名のローマ字書きフルネーム
  - 3) 和文表題
  - 4) 著者名
  - 5) ランニングタイトル(英文)
  - 6) 和文要旨・キーワードおよび英文要旨・キーワード
  - 7) 本文(Introduction, Materials and Methods, Results, Discussion)
  - 8) 引用文献
- (3) 原稿の表紙(第1枚目)には、上記1)~5)を記載し、脚注として著者の所属(学科名等)を和文および英文で記載する。

### 2. 用語等

- (1) 和文原稿は、A4判用紙(縦)を用い横書きとし、ワードプロセッサにより1000字(40字、25行)に印字する。
- (2) 英文原稿および英文要旨は、A4判用紙(縦)にワードプロセッサ1行約60字詰め、25行で印字する。
- (3) 動物・植物等の和名、外来語および原語によらない場合の外国の地名・人名はカタカナとする。学名はイタリックとする。

- (4) 用語は、原則として文部省編「学術用語集」に使われているものを用いる。
- (5) 量記号は、イタリックのローマ字もしくはギリシャ文字のアルファベットの1字、またはこれに添字を付けたものを用いる。
- (6) 単位は国際単位系 (S I) を用いることが望ましい。

### 3. 要旨・キーワード

- (1) 和文要旨は約500字以内に、英文要旨は約300語以内にまとめる。なお、和文原稿の英文要旨は約600語以内にまとめる。
- (2) キーワードは日本語および英語でそれぞれ5個以内とし、和文および英文要旨の後に書く。なお、英文の1つのキーワードは3単語以内とする。
- (3) 要旨は和文、英文ともそれぞれ別紙に記載する。

### 4. 本文

- (1) 和文、英文ともに本文の見出しはポイントシステムによる記号を用い、大見出し、中見出し、小見出しをそれぞれ1., 1.1, 1.1.1とする。さらに細分を要する場合は (a), (b), ……、を用いる。

### 5. 図・表

和文原著論文の場合、図・表の題名・注等は英文とする。

- (1) 図 (写真は図として取り扱う)
  - 1) 図の題名および注はその順序に図の下に書く。
  - 2) 図は白紙に鮮明に書く。また、図のサイズは印刷される大きさの約2倍に描く。
  - 3) 図は1枚ごとに別紙とし、図番号の表示は、Fig. 1. のようにする。  
本文中で図番号を示すときも同様とする。
  - 4) 写真は鮮明なものを用いる。題名および注はその順序に写真の下に記載する。
  - 5) 図の挿入箇所は、原稿の該当位置の右欄外に図番号を朱書きして指定する。
- (2) 表
  - 1) 表の題名は表の上に、注は表の下にそれぞれ記載する。

2) 表は1枚ごとに別紙とし、表番号の表示は、Table 1. のようにする。

本文中で表番号を示すときも同様とする。

3) 表の挿入箇所は、原稿の該当位置の右欄外に表番号を朱書きして指定する。

### 6. 研究資料および総説・解説

原著論文の執筆要領に必ずしも準じなくても良い。

### 7. 引用文献

- (1) 引用文献は著者名のアルファベット順に記載し、本文の該当箇所に (著者名, 年号) または著者名 (年号) のように明示する。
- (2) 雑誌の場合は、著者名 (年) 表題. 雑誌名, 巻または号 (通巻ページでないものは巻号) : 最初のページ-最後のページとする。
- (3) 単行本の場合は、著者名 (発行年) 書名. ページ, 発行所, 所在地とする。

#### 引用文献の書き方 (例)

文献は本文中に引用されたものすべてを記載する。雑誌名は原則として、省略しないで表記する。

##### (a) 雑誌論文

田中阿歌磨・星野隆一 (1933) 択捉島湖沼踏査概況及其の湖沼形態, 水の理化学的所見. 陸水学雑誌 3 : 1-19.

Birge, E. A. and Juday, C. (1934) Particulate and dissolved organic matter in inland lakes. *Ecological Monograph* 4 : 440-474.

##### (b) 単行本の全部

吉村信吉 (1937) : 湖沼学. 266 pp, 三省堂, 東京.  
Ruttner, G. E. (1957) *Fundamentals of Limnology* (Translated by Frey, D. G. and Fry, F. E. J.). 380 pp, Toronto University Press, Toronto.

##### (c) 単行本の章または分冊

小林繁男 (1993) 熱帯林土壌のせき悪化. 熱帯林土壌, 真下育久編, 385 pp, 勝美堂, 東京 : 280-333.

Syrett, P. J. (1962) Nitrogen Assimilation. *In* *Physiology and Biochemistry of Algae*, Lewin, R.A. (ed.), 670 pp, Academic Press, New York : 171-188.

## フィールドサイエンス編集委員会

**編集委員長** 服部 順昭 東京農工大学農学部 FS センター長, 教授

**編集委員** 原 宏 FS センター教授  
岸 洋一 FS センター教授  
鈴木 馨 FS センター助教授  
島田 順 FS センター教授  
板橋 久雄 FS センター教授  
松村 昭治 FS センター助教授  
横山 岳 生物生産学科助教授  
仲井まどか 応用生物科学科助教授  
佐藤 敬一 環境資源科学科助教授  
峰松 浩彦 地域生態システム学科助教授  
望月 学 獣医学科助教授

**事務局** 一宮 幹夫 府中地区総務副 TL (FS 担当)

## Editorial Committee of Journal of Field Science

### Editor-in-Chief

Nobuaki HATTORI Director of Field Science Center, Professor of Tokyo University of Agriculture and Technology

### Editorial Board

Hiroshi HARA Professor of Field Science Center  
Yoichi KISHI Professor of Field Science Center  
Kaoru SUZUKI Associate Professor of Field Science Center  
Jun SHIMADA Professor of Field Science Center  
Hisao ITABASHI Professor of Field Science Center  
Shoji MATSUMURA Associate Professor of Field Science Center  
Takeshi YOKOYAMA Associate Professor of Dep. of Biological Production  
Madoka NAKAI Associate Professor of Dep. of Applied Biological Science  
Keiichi SATO Associate Professor of Dep. of Environmental and Natural Resources Science  
Hirohiko MINEMATSU Associate Professor of Dep. of Ecoregion Science  
Manabu MOCHIZUKI Associate Professor of Dep. of Veterinary Medicine

### Management Office

Mikio ICHIMIYA Chief of Field Science Center Office

---

平成18年 3月27日 印刷

平成18年 3月31日 発行

**発行所** 東京農工大学農学部附属 FS センター  
☎183-8509 府中市幸町 3-5-8 ☎042-367-5799  
**印刷所** 電算印刷株式会社  
☎390-0821 松本市筑摩 1-11-30 ☎0263-25-4329

---



## Journal of Field Science

---

No.5

March, 2006

---

### Articles

- 1 Data Analysis of Water Level and Calculation of Discharge Amount -Case Study of Field Museum Tama Hill- / Y. IIZUMI, K. TSUSHIMA, N. OYANAGI and N. OGURA
- 9 Distribution Patterns of Emergence Holes of *Buprestis haemorrhoidalis japonensis* (Coleoptera : Buprestidae) on *Pinus densiflora* —Comparison with Four Pinewood Borers— / T. TANIWAKI

### Research materials

- 17 The Observation Record of Water Level in a Small Forest Basin in Tama Hill / N. OYANAGI, K. TSUSHIMA, Y. IIZUMI, A. NAEMURA and N. OGURA
- 23 Investigation for the Establishment of Energy Utilization System during Animal Feed and Manure Processing from Food Waste Products / H. ITABASHI, S. KANDA, S. MATSUMURA, M. TSUKIMURA, H. KAMEYAMA, M. SAKURAI, A. AKISAWA, Y. HAMAMOTO and T. KASHIWAGI
- 37 Introduction of Sika Deer and Research on Their Digestibility at FM Tsukui of FS Center in TUAT / Y. KUROKAWA, H. ITABASHI and M. YAMANE
- 43 Animals observed in TUAT University Forests between 1960~2005 / M. KUWABARA, M. KANEKO, H. KINOSHITA and M. KUMAKURA

### Review

- 51 Mutagenic and Carcinogenic Compounds in the Environmental Atmosphere—Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Nitroarene— / Y. HISAMATSU
- 

FIELD SCIENCE CENTER, TOKYO UNIVERSITY OF  
AGRICULTURE AND TECHNOLOGY  
Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan