

環動昆

渡辺弘之：日本環境動物昆虫学会20年の歩み 149

特集：シロアリ研究の最前線

総説

吉村 剛・川口聖真・青柳秀紀：シロアリとエネルギー 153

板倉修司：研究資源としてのシロアリ 165

原著

仲井一志・三谷友彦・吉村 剛・篠原直毅・角田邦夫・今村祐嗣：
アメリカカンザイシロアリに対するマイクロ波
照射の影響（英文） 179

大村和香子・片岡 厚・木口 実：
イエシロアリの走光性に及ぼす波長の影響 185

短報

ニケン・スベクテイ・吉村 剛：3種地下シロアリ，日本産イエシロアリ及び
ヤマトシロアリ，並びにインドネシア産 *Macrotermes gilvus* Hagen
唾液における α -アミラーゼ活性（英文） 191

会 報 195

会 則 208

投稿規定 210

Vol. 20

4

2009

日本環境動物昆虫学会



JSEEZ

日本環境動物昆虫学会

日本環境動物昆虫学会20年の歩み

渡辺 弘之

(京都大学名誉教授)

はじめに

編集委員会より本学会20年の回顧の原稿依頼を受けた。事務的な年表だけでいいのかなとも思っていたのだが、書き出してみると、私の思いがでてしまった。もとより、古い会員の一人として、本学会のさらなる発展を期待しての私個人の感想あるいは提言であることをお断りしておく。

これまでの役員、大会開催地、学会奨励賞・学会受賞者名など、学会事務局高木良吉さんには関連する資料を提供していただいた。記して厚くお礼申し上げる。

目標・目的

本学会の目的は会則第2条に「本会は、人間の生活環境を清潔、快適ならしめるため、昆虫および動物の学術的・総合研究の発展ならびに被害防止技術の向上を促進することを目的とし、もって公共の福祉に寄与することとする」とある。他学会の多くがその目的を「〇〇学の進歩と普及」などとしているのに、昆虫・動物に限られるにしろ関連する分野・範囲は広く、目的が漠然としているとの感は否めないであろう。「公共の福祉に寄与する」と目的に掲げたのも他にないことであろう。会誌「環動昆」第1巻第1号(1989)に西本孝一初代会長によって「創刊によせて」として本学会設立の経過が記録されている。

本学会の設立は当初、日本家屋害虫学会西日本支部として計画され、その設立総会日まで設定されていたのに本部の意向で突然中止になり、急遽本学会設立へ動いたとされている。本学会会員にシロアリ、ハエ・カ、食品害虫など家屋内害虫の基礎・応用に関する研究者の多いこと、それが特徴になっていることが納得できる。しかし、最近の本学会大会の研究発表をみると、より広い範囲の自然保護に関する研究が多くなっていることが伺える。このことも広い分野を研究対象とする本学会の目的に合致しているといえよう。

近年、特定のテーマを掲げる新しい学会が次々と設立され、学会は細分化に向かっている。それだけに対象分野の広いことは一面では弱いとの判断にもなる。それは少子化、公務員の定員削減、企業の採用の手控えなどの中で、会員の奪い合いが起っていることと大きく関係する。そのことは質の高い論文の奪い合いということでもある。とくに、学生会員にとっては評価の高い学会誌への論文の掲載がその後のポスト確保にも大きく影響する。

本学会と大きく関連する学会に衛生動物学会、家屋害虫学会、野生生物保護学会、応用動物昆虫学会、樹木医学会などがある。これまで衛生動物学会、家屋害虫学会、樹木医学会などは、合同大会、同時大会などを開催したことがある。他学会といかに共存共栄を図るのかは、いつに本学会の今後の活動にかかっているが、明確な目的をもつことは大切であろう。創設20年が経過した今、このことは新たためて銘記すべきである。

会員の動向

本学会発足時(1988年10月)の会員数は維持会員24社、賛助会員25社、正会員171名、学生会員10名、合計230名(社)であったが、20年を経た2008年9月現在、維持会員16社、賛助会員20社、正会員378名、学生会員26名である。

現今の経済不況を反映して維持会員、賛助会員の減少があるものの、正会員は20年で2倍以上と大きく会員を増やしている。学会の努力を多としたい。しかし、同規模の他学会の会員構成と比較して学生会員の少ないことは十分に認識され、学生会員数の増加への努力がなされないといけない。

もう一つ、会則には「入会希望者には正会員2名の紹介を要する」とある。この条項は実質的にはすでに無視されているのであろう。削除した方がいいのかも知れない。

役員

	会長	副会長	
第1期 (1988年10月～1990年9月)	西本 孝一	加納 六郎	笹川 満広
第2期 (1990年10月～1992年9月)	西本 孝一	加納 六郎	笹川 満広
第3期 (1992年10月～1994年9月)	西本 孝一	松村 武男	勝田 純郎
第4期 (1994年10月～1996年9月)	西本 孝一	深海 浩	勝田 純郎
第5期 (1996年10月～1998年9月)	深海 浩	保田 淑郎	川上由紀夫
第6期 (1998年10月～2000年9月)	深海 浩	保田 淑郎	川上由紀夫
第7期 (2000年10月～2002年9月)	保田 淑郎	渡辺 弘之	安部八洲男
第8期 (2002年10月～2004年9月)	保田 淑郎	渡辺 弘之	安部八洲男
第9期 (2004年10月～2006年9月)	今井長兵衛	今村 祐嗣	南手 良裕
第10期 (2006年10月～2008年9月)	今井長兵衛	今村 祐嗣	南手 良裕
第11期 (2008年10月～2010年9月)	今村 祐嗣	石井 実	南手 良裕

会員数同規模の他学会と比較して本学会に役員（理事・評議員）の多いことも特徴として挙げられるであろう。会則によれば、理事は会長1名、副会長2名、常任理事10名以内を含め30名以内、会長は理事中より互選で決めると定められている。評議員は70名とされ、細則では評議員のうち10名は会長が指名するとされている。会員の意思を反映させるのに多くの理事、評議員が任命されていることの利点はある。しかし、正会員380名に理事30名、評議員70名は多いのではと思う。会員の意思反映を図るなら、直接選挙での会長、評議員選出の方がすっきりするのかもしれない。

委員会と出版

本学会には細則で決められた編集委員会、企画委員会、研究部会がある。研究部会とは「生物保護とアセスメント手法研究部会」ということであろうが、1991年の第1回講演会以来、2009年6月の第19回講演会まで多様な内容の講演会を開催し、毎回、環境アセスメント動物調査手法テキストを発行している。そのテキストにはきわめて有用なものが含まれている。それらの中から、また会員の努力で学会出版物として、「チョウの調べ方 1998」、「トンボの調べ方 2006」、「テントウムシの調べ方 2009」が刊行されていることは学会活動として高く評価されていいであろう。好評ですでに品切れ、再販を準備されていると聞く。特定の昆虫だけを対象としたものだけでなく、別の切り口からの出版計画が検討されてもいい。

また、企画委員会として、これもこれまでに18回の一般市民向けセミナーを開催している。時機を得た講演内容など工夫をこらしているが、セミナー参加者・受講者数の確保には苦勞しているようである。他学会、NPO（NGO）などとの共催があってもいいのかもしれない。本学会会員には多様な分野の研究者がいる。その研究内容・研究成果を知ってもらいたい機会として、会員に講演者としてもっと積極的な参加をお願いしたい。

年次大会

これまでの年次大会の開催地および大会長は下記の通りである。

- 第1回 (1989) 近畿大学 (布施五郎)
- 第2回 (1990) 東京農業大学 (桧垣宮都)
- 第3回 (1991) 京都大学 (高橋正三)
- 第4回 (1992) 香川県教育会館 (岡本秀俊)
- 第5回 (1993) 大阪府立大学 (保田淑郎)
- 第6回 (1994) 神戸市産業振興センター (松村武男)
- 第7回 (1995) 科学技術庁研究交流センター (田端勝洋)
- 第8回 (1996) 近畿大学 (杉本 毅)
- 第9回 (1997) 名古屋女子大学 (佐藤正孝)
- 第10回 (1998) 京都大学 (西本孝一)
- 第11回 (1999) 奈良女子大学 (正田洋子)
- 第12回 (2000) 名古屋市立大学 (岡本紀久)
- 第13回 (2001) 大阪府立大学 (石井 実)

- 第14回 (2002) 関西大学 (吉田宗弘)
- 第15回 (2003) 大阪府立大学 (石井 実)
- 第16回 (2004) 信州大学 (中村寛志)
- 第17回 (2005) 近畿大学 (杉本 毅)
- 第18回 (2006) 日本大学 (岩田隆太郎)
- 第19回 (2007) 京都学園大学 (桑原保正)
- 第20回 (2008) 京都大学 (今村祐嗣)
- 第21回 (2009) 大阪青山大学 (安部八洲男)

開催地が会員の分布を示し、近畿圏に集中していることがわかる。以前、「環動昆」は「関(西)動(物)昆(虫)学会」と誤解されているのではないかとあったことがあるが、全国に会員を増やし、開催地を広げること、逆に会員確保のために会員の少ない地域での開催といったことも必要かも知れない。会員増加の潜在能力はあるように思われる。

奨励賞と学会賞

平成19年10月の第20回通常総会において、これまでの研究奨励賞は若手研究者(年齢40歳未満)を対象とした奨励賞 (Research Promotion Award) と改められた。同様に、本学会の学問分野の進歩に貢献した会員を顕彰し学会の活性化に資するため学会賞 (Society Award) が設定された。

これまでの奨励賞・学会賞の受賞者は下記の通りである。

・研究奨励賞・奨励賞

第1回 (1994)

- 川田 均：マイクロカプセル化殺虫剤の作用機構に関する研究
- 神崎 務：新規殺虫成分シラフルオフェンの実用化に関する研究

第2回 (1995)

- 夏原 由博：室内塵性ダニ類の生態ならびにアレルギー対策に関する研究
- 吉村 剛：イエシロアリの寄生生物に関する研究

第3回 (1996)

- 今井長兵衛：都市に身近な生物を再生させるための基礎的研究
- 宇賀 昭二：公園砂場におけるトキソカラ属線虫卵汚染状況の調査研究

第4回 (1997)

該当なし

第5回 (1998)

- 平林 公男：湖沼におけるユスリカ類の生態と防除に関する研究
- 高田 容司：日本産イエバエのプレスロイド抵抗性機構に関する研究

第6回 (1999)

- 中村 寛志：チョウ類群集の構造解析による環境評価に関する研究
- 藤井 義久：アコースティック・エミッション (AE) を用いたシロアリの食害活動の探知に関する研究

第7回 (2000)

- 石井 実：里山 (広義) の昆虫とその生息場所に関する一連の研究

第8回 (2001)

- 松永 忠功：家庭用殺虫剤の水生化に関する研究
- 大村和香子：蒸煮カラマツ心材抽出物を利用したイエシロアリ防除への応用基礎研究

第9回 (2002)

- 北原 正彦：富士山山麓のチョウ類群集の多様性に関する一連の研究

第10回 (2003)

- 板倉 修司：シロアリのピルビン酸デヒドロゲナーゼ複合体に関する研究
- 吉田 宗弘：チョウ類群集を指標にした都市環境評価の試み

第11回 (2004)

- 内海与三郎：毒餌剤を用いた害虫防除剤の実用化に関する研究

第12回 (2005)

該当なし

第13回 (2006)

中嶋 智子：衛生動物の重要度の時間的・空間的変動

第14回 (2007)

広渡 俊哉：鱗翅目昆虫を利用した森林環境の評価に関する研究

第15回 (2008)

久保田俊一：シロアリ防除用殺虫剤の作用特性に関する研究

・学会賞

第1回 (2008)

桑原 保正：ダニ類の分泌物を中心とした化学生態学の研究

会員からの受賞候補者の推薦がきわめて少ないのが実情のようだ。1件しか推薦がなかった場合など、選考委員の苦勞はより大きなものになる。積極的な推薦は研究者にとって大きな励みになるし学会の発展にも寄与する。

学会誌

第1巻1号より第15巻4号(2004)まではB5サイズであったが、第16巻1号(2006)よりA4サイズになり、第20巻1号(2009)から選定された学会ロゴマークが表紙に入った。しかし、表紙は「環動昆」の大きな文字だけ、ちょっと地味だと思っているのは私だけだろうか。研究対象の多様な動物の生態写真などを入れてもいいのかも知れない。論文の質を高める、国際的評価を高めるとなると、英文誌といったことになるのだろう。これにしてしまうと会員をつなぎ止められない。解説、総説、書評といったものをもう少し増やしていただいてもいいのかも知れない。

シロアリとエネルギー

吉村 剛^{1)*}・川口聖真²⁾・青柳秀紀³⁾

- 1) 京都大学生存圏研究所
- 2) 京都大学生存圏研究所, 現: ベトナム南部林業試験場
- 3) 筑波大学大学院生命環境科学研究科

(Received October 6, 2009 ; Accepted October 31, 2009)

¹⁾Tsuyoshi Yoshimura. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan. ²⁾Seima Kawaguchi. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan. Present address : Forest Science Sub-Institute of South Vietnam, Ho-Chi-Minh, Vietnam. ³⁾Hideki Aoyagi. Graduate School of Life & Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8572, Japan.

Abstract

Many scientists are now paying great attentions to termites as the nature bio-converting machine of lignocelluloses, a most abundant biomass resource on the earth. Recent research activities on the novel energy options from termites such as utilization for foods stuffs, for bio-fuel processing, and for energy gas production are reviewed. Termites are well known as high calorie foods with the higher fat contents, and it is estimated that world termite population can meet almost all calorie requirements by Japanese populations. Termites and intestinal symbiotic microorganisms produce cellulases, and their utilization for the bio-fuel production has been studied mainly by Japanese scientists. Termites emit a great amount of bio-gasses such as hydrogen and methane by the anaerobic fermentation of lignocelluloses. The multi-collaborative research works among many research disciplines including ecology, biochemistry, entomology, applied microbiology, and chemical-/bio-engineering enable us to develop a novel energy production system with termites in the near future.

Keywords : Termites, Energy, Food stuff, Cellulase, Bio-fuel, Bio-gas

はじめに

西暦0年(イエス・キリストの生まれた頃)の世界人口は2億5千万人程度であったと推定されている。当時は基本的に薪炭(木材)をエネルギーとして使っていた。それが2倍の5億人にまで増えるのに1600年かかっている。その後、産業革命以後の石炭を燃料とする時代になると、1830年の10億人が1930年に20億人へと、わずか100年で人口が2倍になった。石油の時代になると、人口倍増年数は、石炭時代の半分50年に縮んだ(1980年に40億人)。そして2009年10月の地球上の人口は68億人(U.S. Census Bureau, <http://www.census.gov/ipc/www/popclockworld.html>)に達し、今なお増加の一途をたどっている。

薪炭、石炭、石油は燃料として使うと二酸化炭素を生成する。これらは炭素原子と水素原子を含むが、その構成比は燃料によって異なる。薪炭は水素原子1個に対して炭素原子が10個の比率で存在している。石炭は水素1個に炭素が2個である。石油になると水素2個に炭素が1個、天然ガスの主成分であるメタンでは水素4個に炭素が1個であるため、燃焼しても炭素を出す量は薪の40分の1、石炭の8分の1となる。つまり、人類は炭素の少ない燃料を求め、その獲得に成功して急激に人口を増やし繁栄してきたとすることができる。その結果、衣食住のほとんどすべてを化石資源に依存するようになってしまった。こうした人口の増加、化石資源の大量消費は、結果として大気・水の汚染、地球温暖化、生態系の破壊といった地球環境問題を引き起こすこととなり、

*Corresponding author : tsuyoshi@rsh.kyoto-u.ac.jp

地球の生存圏の荒廃が進みつつある。

しかしながら、これらの化石資源は有限であり、現在明らかとなっている埋蔵量、使用量から推定すると、石油はあと 45 年、石炭、天然ガスなどを全部合わせても約 100 年しかもたないことがほぼ確実視されている(児玉, 2001)。そのため、化石資源依存型社会から再生可能資源、つまりカーボンニュートラルな資源であるバイオマス資源依存型社会への変革が志向されるゆえんである。

ここで注意しなければいけないことは、木質バイオマスを薪炭エネルギーとして直接利用するのでは、上述した様に二酸化炭素の排出を抑えることはできないということである。では、どのような形で木質バイオマスを利用すれば、クリーンなエネルギー源を生み出すことができるのだろうか?。ここに木質バイオマスの分解者、バイオプロセッサーとして生態系、特に熱帯の生態系で重要な位置を占めるシロアリ(安倍, 1989)の出番があると考えられる。

シロアリは、その消化管内に多種多様な微生物相を有し、これらとの消化共生によって木質バイオマスの分解を非常に効率良く行っていることが知られている(Breznak and Brune, 1994; Ohkuma, 2003)。シロアリ共生微生物による木質バイオマスの嫌氣的分解によって、必然的に水素やメタンといったエネルギーガスが排出される(Sugimoto, 1998)。また、最近では、この微生物相の持つ酵素群の網羅的解析結果を背景に、バイオエタノール製造に対するシロアリの活用を期待する向きもある。さらに、シロアリセルラーゼの工業的利用も日

本の研究者を中心に模索されている。

本稿では、現在世界的に精力的に行われている、直接的あるいは間接的なシロアリとエネルギーに関する研究を紹介するとともに、今後のあるべき方向について考察してみたい。

シロアリは直接エネルギーとなりうるか?

まず、シロアリを直接的にエネルギー源として利用する方向について考えてみたい。といっても、シロアリを燃やす、あるいは炭にして用いるということではない。シロアリを人間の食料として利用するということである。

シロアリは知る人ぞ知る高カロリー食品であり、日本の調理師免許の試験問題に出題されたことがある(矢島・望月, 2002)。アフリカでは、シロアリ(主としてキノコシロアリの仲間)の翅蟻を油で炒めたり、蒸し焼きにしておやつとして食べる習慣があり、森林総合研究所の所によれば、ケニアでは翅蟻を“クンビクンビ”と呼び、季節の贈り物として賞味しているとのことである(所, 2000)。また、マレーシア理科大学の Lee 博士やインドネシア・タンジュンプラ大学の Indrayani 博士によれば、両国ではシロアリの女王を精力剤、あるいは栄養剤として生で食することもあるらしい(私信)。しかしながら、シロアリの食品としての詳細な分析例はほとんどない。最近、近畿大学の板倉らは、日本産のイエシロアリとヤマトシロアリの詳細な成分分析を行い、表1の結果を報告した(Itakura *et al.*, 2006)。表1の結果から、シロアリの脂質含有量の多さがカロリーの高さとな

表1 イエシロアリおよびヤマトシロアリの成分分析結果 (Itakura *et al.*, 2006 より作成)

	イエシロアリ		ヤマトシロアリ		
	職 蟻	ニンフ	職 蟻	ニンフ	
水分 (%)	75.73	49.80	67.18	59.03	
灰分 (%)	7.494	3.206	8.850	6.41	
炭水化物 (%)	グリコーゲン	2.476	0.147	0.264	0.051
	還元糖	1.466	0.383	1.123	0.758
	トレハロース	1.895	0.374	1.548	0.953
	総量	5.837	0.904	2.935	1.762
総食物繊維 (%)	16.70	14.12	13.49	14.01	
総脂質 (%)	46.46	64.33	61.15	69.08	
総窒素 (%)	6.687	4.103	4.907	3.183	
総タンパク質 (%)	29.80	15.50	20.98	9.83	
100g当たりのカロリー*	560kcal	645kcal	646kcal	668kcal	

*: [(100g中のタンパク質+糖質) × 4 kcal] + [100g中の脂質 × 9 kcal] で計算

て現れていることがよくわかる。脂質の内訳としては、オレイン酸が圧倒的に多く半分以上を占め、次いでリノール酸、パルミチン酸およびステアリン酸が比較的多く含まれていた。さらに、必須アミノ酸および非必須アミノ酸が含有されていた。

木質バイオマス分解能力を活かした形でシロアリの食料としての利用を考えた場合、建築廃材や古紙などの廃棄物をシロアリに餌として摂食させ、そのシロアリを人間が利用すれば一挙両得となる。トロント大学の Myles は、シロアリに古紙を摂食させ、増殖させた後に人間の栄養源として利用するシステムを提案した (Myles, 1993)。最近では、オーストラリア CSIRO の Lenz が京都大学の角田らとの共同研究によって、イエシロアリとヤマトシロアリによる紙の処理について予備的な検討を行い、クラフトパルプおよびティッシュペーパーでヤマトシロアリの高生存率と産卵を観察したが、古紙によるシロアリの大量飼育は難しいと結論している (Lenz *et al.*, 2009)。上述した板倉らは、キノコ栽培によって発生する廃菌床の有効利用という観点から、ブナシメジ廃菌床でヤマトシロアリを飼育し、幼形生殖虫による産卵促進効果を報告した (Itakura *et al.*, 2008)。さらに、エノキタケ、マイタケおよびブナシメジ廃菌床の 50% エタノール抽出物を添加した濾紙でヤマトシロアリを飼育し、幼形生殖虫の有意な分化を報告している (板倉ら, 2009)。

ここで、シロアリの食料としての可能性を計算してみる。例えばイエシロアリ職蟻 1 頭の湿重量を 3 mg、1 コロニーの個体数を 100 万頭、体の水分量を 70% と仮定して計算すると、1 コロニー全個体の乾燥重量は 900 μ g ということになる。これは、表 1 のデータから約 5,000 kcal に相当し、大人の 1 日当たりの必要カロリーを 2,000 kcal と仮定すると、2.5 日分のカロリーになる。つまり、イエシロアリの最大級のコロニーを家庭で 1 個飼育したとしても、わずか 1 人を 2 日半しか養えないことになり、シロアリ・コンポストが実用化できる可能性は極めて低いといえる。

しかし、地球上 (特に熱帯、亜熱帯地域) には膨大な数のシロアリが存在している。Zimmerman らは、大気中のメタン、二酸化炭素および水素シロアリの役割を評価する上で、地球上のシロアリ個体数を 2.4×10^{17} 頭と推定している (Zimmerman *et al.*, 1982)。この推定値をもとに、イエシロアリ職蟻のサイズを全シロアリの平均サイズと仮定して推算を行うと、地球上のシロアリが支えることのできる人・日数は、

$$\begin{aligned} & \cdot \text{大人 } 1 \text{ 人} \times 2.5 \text{ 日} \times 2.4 \times 10^{17} / 100 \text{ 万} = \\ & 6 \times 10^{11} \text{ 人} \cdot \text{日} = 6,000 \text{ 億人} \cdot \text{日} \end{aligned}$$

となる。つまり、1 年間 16.4 億人分のカロリーを供給できるということになる。これが持続的であるためには、個体数が短期的に回復することが必要不可欠であること

は言うまでもない。筆者の研究室では、イエシロアリを 3 コロニー (総個体数は 200~300 万頭と推定される) 飼育し、安定に維持している。現在、年間で 30~50 万頭を実験に供しており、このことは、総個体数の 20% 程度の年間消費量であれば成熟したコロニーの維持は可能であることを示している。したがって、地球上のシロアリ全てを人間の食料として持続的に利用する場合、上記計算結果の 5 分の 1、つまり約 3 億人分を支えることが可能という計算になる。もちろん、これは地球上のすべてのシロアリを人類が食料として利用すると仮定した場合の机上の計算値である。現実的には、他のシロアリ食性の動物たち (例えばアフリカのツチブタ、南米のアリクイ、オーストラリアのナンバットなど) との競合や、自然界での生存競争から考えて、その数分の 1 が実際に利用可能といったところであろう。それでも、日本の人口程度は地球上のシロアリで養うことができると考えられるのである。この数字を大きいと見るか小さいと見るか。筆者は“シロアリ侮るべからず”，と考えることにしている。

タンパク源としての昆虫食という習慣は、アジア一円に広く見られ、特にタイでは多種多様な昆虫がマーケットに並んでいる (渡辺, 2003)。日本でもかつてはイナゴなどが農村における貴重なタンパク源として普通に食されていた。意外と近い将来にシロアリあるいはシロアリ由来の食品が普通に入手できる時代が来るのかもしれない。

シロアリ由来酵素群の産業的利用の可能性

シロアリを用いた間接的なエネルギー利用としてまず頭に浮かぶのは、そのセルラーゼの利用であろう。しかしながら、木質バイオマスをエネルギー源、より直接的に言えばバイオエタノール源として有効かつ低コストで利用できるかどうかは、不要なリグニンをいかにエネルギーを使わずに取り除くことができるか否かにかかっている。具体的には、これまでに知られている高温の硫酸の中で処理する方法などに比べて、より環境に優しく効率の良いリグニン除去方法を開発することが、木質バイオマス資源有効利用の切り札として求められているのである。

シロアリは木質バイオマス中のセルロースを非常に効率良く消化・吸収していることが知られている (Itakura *et al.*, 1995)。言い換えれば、非常に効率良くバイオパルピングを行っているのである。シロアリにおける効率的脱リグニン機構の詳細については現在のところまだ不明であるが、不思議なことに、これまでの研究からはリグニン分解に直接関与する酵素群は、キノコシロアリ菌園におけるラッカーゼ活性 (Johjima *et al.*, 2006) 以外ほとんど見つかっておらず、シロアリはリグニン分解を伴わないバイオパルピングという離れ業を行

っていると考えられている。この機構として、大顎や前腸そ嚢による機械的破碎によるセルロースの露出 (Itakura *et al.*, 1995), 共生微生物による部分的リグニン分解 (Kyo *et al.*, 1996; Hyodo *et al.*, 1999; Katsumata *et al.*, 2007; Geib *et al.*, 2008) などが提案されている。今後の重要な研究ターゲットであると考えられる。

次に、セルロースからバイオエタノールにいたる最重要酵素であるセルラーゼについて、この分野において世界の最先端にある日本人による一連の研究をもとに考えてみたい。

木質バイオマスへの応用を念頭においたシロアリセルラーゼに関する先駆的研究は、京都大学の東らによって行われた (Azuma *et al.*, 1984)。彼らは、イエシロアリの頭、腸および腸を取り除いた後の胴体部を用いて多数の糖加水分解酵素活性を調査し、一部の酵素について精製とキャラクターゼーションを行った。その後、1990年代になって農業生物資源研究所の渡辺および琉球大学の徳田らの研究グループは、種々の日本産シロアリを対象とした内源性セルラーゼの分泌部位やその性質に関する一連の詳細な研究を行った。本稿では、個々の細かい研究内容に触れることはしないが、研究の歴史も含めて興味のある方は渡辺らによる総説 (渡辺, 2001, 2007a, 2007b; Watanabe and Tokuda, 2001) を参照されたい。また、下等シロアリの後腸に生息する原生動物の有するセルラーゼ系についても、日本の研究者を中心にその性質が詳しく調査されつつある (Watanabe *et al.*, 2002; Todaka *et al.*, 2007)。さらに、現在、渡辺らの研究グループにより、いくつかのシロアリで内源性セルラーゼをベースとした改変シロアリセルラーゼの大腸菌による生産が可能になっている (Ni *et al.*, 2005; 2007)。

渡辺は、これらの研究結果を踏まえ、シロアリセルラーゼの産業的利用に関して下記の目標を挙げている (渡辺, 2007a, 2007b)。

- ・リコンビナント生産技術の高度化
- ・シロアリ中腸における高い酵素濃度の再現による木材分解効率の向上 (目標: 数日で20%)
- ・原生動物のセルラーゼ系をベースとした装置との統合
- ・最終的に90%以上の木材分解効率の実現

また近年、別のグループにより、麴菌を用いたシロアリ原生動物由来のセルラーゼの生産も研究されている (Sasaguri *et al.*, 2008)。

一方、2005年5月25日、当時米国ローレンス・バークレー国立研究所長であった Chu 博士 (ノーベル物理学賞受賞者) は、シロアリ共生微生物によるバイオフェーセル生産の可能性について提言を行った (abc NEWS)。ちなみに、Chu 博士は現在オバマ政権のエネルギー省長官を務めている。この提言を受け、エネルギ

ー省はシロアリを用いた代替エネルギーに関する研究に着手し、ブッシュ大統領 (当時) も、2006年2月13日に、石油依存症の悪弊を断ち切る鍵の一つとして、一般教書演説の中でセルロースを原料とするエタノール製造に触れ、シロアリの腸に棲む微生物の可能性に言及した。また、Bourne は、「National Geographic」誌の “Green Dreams” と題した新エネルギーに関する記事の中で、自然のセルロースエネルギー工場であるシロアリの腸に言及している (Bourne, 2007)。このような米国における政府主導の研究の流れの中で、エネルギー省の Warnecke らは、南米産の食材性テングシロアリ (*Nasutitermes* 種) を用い、その腸内微生物のメタゲノム解析から、セルロースとキシランの加水分解に関連する多様なバクテリア遺伝子の存在を報告した (Warnecke *et al.*, 2007)。

このように、米国においては政府が主体となってシロアリを用いたエネルギー研究を推進しつつあるが、日本においてもこれまでに下記に示す大型研究プロジェクトが遂行または実施中であり、ここで紹介した研究成果の多くはこれらのプロジェクトから生まれたものである。

- ・科学技術振興機構 ICORP 型 / 国際共同研究事業「バイオリサイクルプロジェクト」(代表: 理化学研究所 工藤俊章) 1999-2004
- ・生研センタープロジェクト「進化工学手法によるシロアリセルラーゼの改変と高効率セルロース糖化系の開発」(代表: 農業生物資源研究所 渡辺裕文) 1999-2003
- ・科学技術振興機構 さきがけ「高効率バイオリサイクル共生システムの解析」(代表: 理化学研究所 大熊盛也) 2002-2005
- ・NEDO「シロアリ共生系のセルラーゼ遺伝子群: 麴菌による大量発現系の構築とバイオマスの高度利用技術の開発」(代表: 理化学研究所 工藤俊章) 2005-2006
- ・生研センタープロジェクト「バイオエネルギー生産のためのシロアリ共生系高度利用技術の開発」(代表: 理化学研究所 守屋繁春) 2007-2011

今年の初め、米国の ZeaChem 社は、2011年からの稼働を目指してシロアリ微生物を用いたバイオエタノール製造プラントを立ち上げるとウェブサイトで発表した (CNET News, January 7, 2009)。オレゴン州 Boardman に建設予定のプラントに要する費用は3千4百万ドルで、年間150万ガロンのエタノール生産を目指しているとのことである。図1にそのプラントの概要を示すが、これはホームページ (<http://zeachem.com/>) に掲載されている図から筆者が作成したものである。このシステムは、生化学的プロセスと熱化学的プロセスのハイブリッド型になっており、1トンの乾燥原料から135ガロン (約511リットル) のエタノールが得られる

と試算されている。まず、木材チップなどのセルロース系バイオマスを硫酸によって化学的に分別した後、セルロースとキシロースを発酵槽に送り、ここでシロアリ由来の細菌を用いた酢酸発酵に供する。次に、生成した酢酸を酢酸エチルに変換し、これを最終的に水素で還元してエタノールに変換するというものである。ZeaChem社はこのプロセスの特徴として、

- ・古典的な酵母を用いた発酵よりも高効率なシステムであり、二酸化炭素を発生しないこと
- ・還元用いる水素を、原料の分別で得られたリグニンのガス化から得ること
- ・リグニンガスの水素以外の部分用いて、十分なチームと電力を得ることができること

の3点を強調している。

このプラントが実際に計画通りに稼働するのか否かは不明であるが、意欲的な取り組みとして期待したい。ただし、前処理法として、硫酸を用いた熱化学的プロセスが組み込まれているのが、現状では仕方がないとはいえ、残念である。上述した様に、この部分を完全に生化学的プロセスに置き換えるための研究、つまり生物学的脱リグニン技術の開発が早急に望まれる。

シロアリによるエネルギーガスの効率的生成

よく知られているように、シロアリはその消化管内で微生物による木質バイオマスに含まれるセルロースの嫌氣的発酵を行い、結果としてエネルギーガスである水素およびメタンが発生する (Sugimoto, 1998; 新里・渡辺, 2002; Ohkuma 2003)。その詳細は省略するが、シロアリに取り込まれたセルロースは、まずシロアリ自身、あるいは原生動物のセルラーゼによってセロビオース、グルコースにまで分解され、最終的に酢酸生成菌のプロトン還元による水素生成を伴いながらシロアリのエネルギー源となる酢酸にまで分解され、シロアリに利用される。定量的にはイエシロアリ、ヤマトシロアリなどの下等シロアリにおいては、原生動物体内でグルコース1分子から水素が4分子生成し、同時に存在するメタン生成古細菌、窒素固定細菌および酢酸生成菌によって、それぞれメタン、アンモニアおよび酢酸が作られる (図2)。つまり、シロアリから生成する水素とメタンは、腸内細菌の質と量によってそのバランスが決まるのである。最近、下等シロアリの原生動物体内に種々の機能を有する細菌類が生息していることが明らかになり、シロアリ-原生

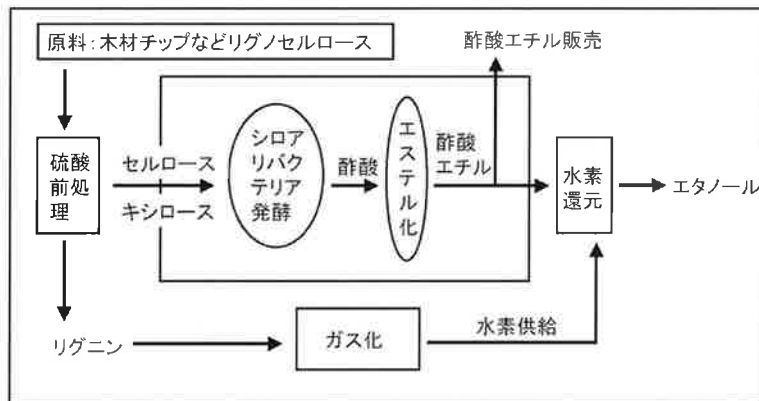


図1 ZeaChem社によるシロアリバクテリアを用いたエタノールプラント (ZeaChem社ホームページより作成)

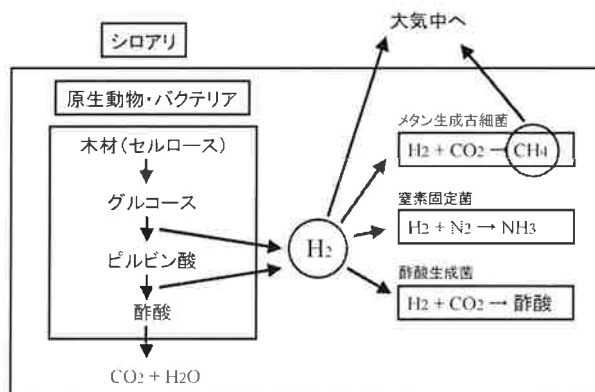


図2 シロアリによるバイオガスの生成

動物—細菌の3者による共生機構の詳細が明らかになりつつある (Hongoh *et al.*, 2007a, 2007b, 2008a, 2008b; Ohkuma, 2008; 大熊・本郷, 2008). しかしながら現状では、未だにシロアリ腸内の原生動物の培養が成功していないばかりでなく、大部分の腸内細菌も依然として培養は不可能である。その為に、未解明な点が多く残されているとともに、実用面での利用には全く至っていない。

シロアリは地球のメタン収支においてかなりの部分を担っていると言われており、近年の推定によるとメタンガス排出量の最大 10% がシロアリ由来であると考えられている (Zimmerman *et al.*, 1982; Sanderson, 1996).

メタンは天然ガスの主成分であり、水素 4 個と炭素 1 個から構成され、化石資源の中では最もクリーンなエネルギーガスである。生物学的なメタン生成は絶対嫌気性古細菌であるメタン生成菌によってのみ行われる。メタン生成 (メタン発酵) は、下水処理法として長い応用の歴史を持ち、また、中国やインドなどの農村地域においてバイオマス廃棄物の処理・エネルギー再生産システムとして現在でも活用されている (西尾・中島田, 2002). 京都大学生存圏研究所の角田らは、イエシロアリからのメタン生成量について、餌の違い (Tsunoda *et al.*, 1993b; Kawamura *et al.*, 2001) および供試個体数の違い (Tsunoda *et al.*, 1993a) の影響を報告している。

一方、水素は究極のエネルギーガスであり、燃焼によって水を生じるのみである。現在のところ水素は、天然ガスやナフサなどの化石資源を原料として膨大な電力を消費しながら生産されているが、将来的にはバイオマスを原料とした方向へシフトすることが期待される。これまでに、多くの微生物が有機物から水素を生成すること

が知られており、これらは大きく非光合成微生物と光合成微生物とに分けられる (浅田ら, 2002). 表 2 に、これまでに知られている代表的な水素生成微生物を示す (浅田ら, 2002).

シロアリを用いたエネルギーガス、特に水素の生産については、水素分圧が高い状態でも働く新規の鉄ヒドロゲナーゼが、最近井上らによってイエシロアリ共生原生動物 *Pseudotrichonympha grassii* から報告され、注目を集めている (Inoue *et al.*, 2007). 彼らは、イエシロアリの水素生産能を $0.7 \mu\text{mol/g-termite/h}$ と報告しており、餌の摂食量から換算して、これはグルコース 1 mol 当たり 0.75 mol の水素生成量に相当する。上述した様に、理論上は 1 mol のグルコースからは 4 mol の水素が生成することから、この生成能は 20% 弱ということになる。

筆者らは、2004 年～2007 年、科学研究費基盤研究 A 「木材劣化生物を用いた保存処理廃材のバイオプロセッシングと新規エネルギーの創成」 (<http://kaken.nii.ac.jp/ja/p/16208017/2006/3/ja>) を実施し、シロアリを用いたエネルギーガスの生産とその利用について検討を行った。以下、その成果のなかから重要な部分を紹介する。

① コロニー間でのエネルギーガス生成量の違い

(Kawaguchi, 2006; Kawaguchi *et al.*, 2005, 2006)

京都大学生存圏研究所木材劣化生物飼育棟で室内飼育中の 3 つのイエシロアリのコロニーからの成熟職蟻を用いてバイオガス排出量の季節変化を 1 年間調べたところ、メタン排出量についてはコロニー間で大きな違いはみられなかった。一方、水素排出量についてはコロニー間で 2 倍以上の差があり、コロニー間で水素生成する微生物群と消費する微生物群のバランスが異なることが示唆された。

表 2 代表的な水素生成微生物 (浅田ら, 2002 より改変)

グループ	代表的な例 (属)	基質 (電子供与体)
非光合成細菌		
絶対嫌気性細菌	<i>Clostridium</i>	有機物 (糖など)
通性嫌気性細菌	<i>Enterobacter</i>	有機物 (糖など)
嫌気性窒素固定細菌	<i>Klebsiella</i>	有機物 (糖など)
好気性窒素固定細菌	<i>Azotobacter</i>	有機物 (糖など)
光合成生物		
非硫黄性光合成細菌	<i>Clostridium</i>	有機物 (有機酸など)
硫黄性光合成細菌	<i>Chromatium</i>	有機物, H ₂ S など
らん藻	<i>Anaebena</i>	水
	<i>Spirulina</i>	貯蔵グリコーゲン
緑藻	<i>Chlamydomonas</i>	水, 貯蔵グリコーゲン
下等シロアリ共生原生動物	<i>Pseudotrichonympha</i> (イエシロアリ)	セルロース, ヘミセルロース

② 餌成分とエネルギーガス生成

(Kawaguchi, 2006 ; Kawaguchi *et al.*, 2005)

イエシロアリに各種炭水化物（各種セルロース、セロビオースおよびグルコース）を摂食させてバイオガス排出量の変化を調べた結果、原生動物の利用できるセルロース系物質を摂食させた職蟻はメタンと水素を排出し、共生原生動物の利用できないセロビオース、グルコースを摂食させた職蟻はこれらのガスをほとんど排出しなかった。このことからシロアリが排出する水素ガスは原生動物に由来することが確認された。また、セルロースを摂食させることで、シロアリからの水素排出量は最大で2倍となった。これは原生動物の分解効率が高くなったことに起因すると考えられた。

③ 抗生物質処理のバイオガス生成への影響

(Kawaguchi, 2006 ; Kawaguchi *et al.*, 2005)

イエシロアリ職蟻に抗生物質で処理したろ紙を摂食させて水素およびメタンの排出量の変化を調べた。抗生物質を投与することによって水素排出量は3~6.6倍に増加し、最大で17.6 nmol/termite/hとなった。これは抗生物質によって水素を消費する細菌類が死滅するか、活性が抑えられたためであると考えられた。この値を、井上らのようにシロアリ1グラム当たり換算すると、約0.6 μ mol/g-termite/hとなり彼らの結果とほぼ一致している。1コロニー100万頭と仮定し、最大排出率から1日当りの水素排出量を計算すると、10 L/colony/dayと推定された。

④ シロアリホモジェネートによる水素生成

(Kawaguchi, 2006 ; Kawaguchi *et al.*, 2006)

より効率的かつ簡易に水素ガスを得ることを目的とし、イエシロアリおよびヤマトシロアリを好気条件下でホモジェネートにし、グルコースを含んだ液体培地で静置および振とう培養して水素およびメタンの発生量を測定した。静置したシロアリホモジェネート培養液から水素は発生し（pH低下）、振盪培養すると水素は発生しなかったことから、グルコースを嫌氣的に発酵し、有機酸とともに水素を生成する微生物が増殖したと考えられた。静置培養液から寒天培地に分離したコロニーを液体培地で再び静置培養すると、イエシロアリおよびヤマトシロアリから分離したコロニーから水素が発生した（3.6 μ mol/ml-culture）。培養液のpHは低下せず、酸生成を伴わない反応によって水素が生成された。16SrDNAを解析した結果、イエシロアリおよびヤマトシロアリから分離したコロニーはともに腸内細菌の *Enterobacter cloacae* と高い相同性（99~100%）を示した（図3）。

⑤ 農林産廃棄物を利用したシロアリによるバイオガス生産（吉村ら, 2009）

農林産廃棄物を利用したシロアリによるバイオガス生産の可能性を探るために、モウソウチク、バガスおよびケナフを摂食させたイエシロアリおよびヤマトシロアリからの水素およびメタンの排出量について調査した。しかしながら、これらを摂食したシロアリからの水素およ

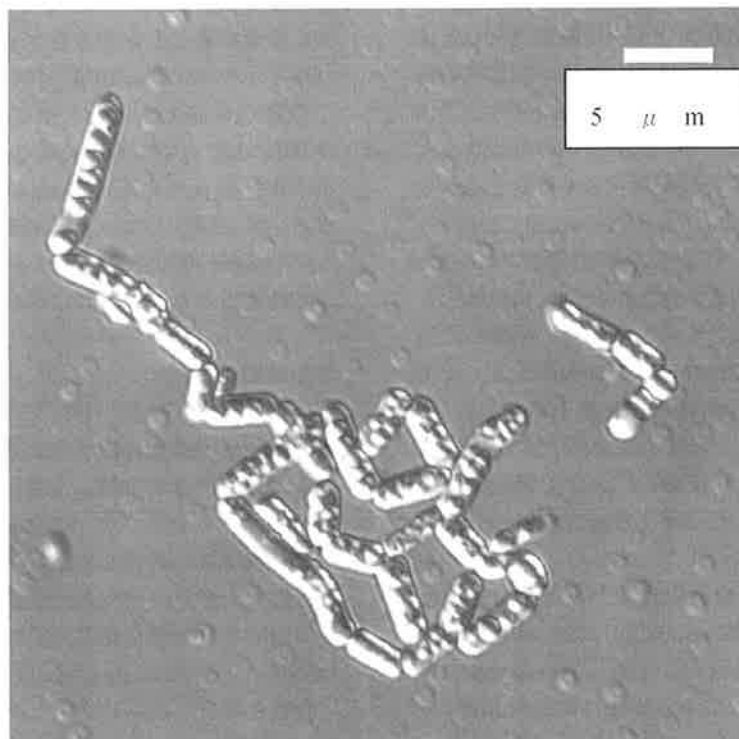


図3 イエシロアリより単離した水素生成細菌。 *Enterobacter cloacae* と高い相同性（99~100%）を示す（Kawaguchi, 2006）。