

JAMB Newsletter No. 19

数理生物学懇談会
ニュースレター

第19号

1996年4月

*Japanese Association
for
Mathematical Biology*

お知らせ

研究集会

" Mathematical Topics in Biology "

場所：京都大学数理解析研究所

期間：平成8年6月13日－15日

目的：これまで毎年1回開催されてきました研究会で、特に今回はその前半
に開かれます国際研究集会のサテライトとして開催する予定です。

講演希望者は下記宛に（電子メールあるいはFAXが望ましい）ご連絡
ください。

三村 昌泰

〒153 東京都目黒区駒場3-8-1

東京大学大学院数理科学研究科

Tel & Fax 03-5465-7025

e-mail mimura@ms.u-tokyo.ac.jp

大久保先生の思い出

盛岡大学専門基礎部門 井川輝美

私は、New York州立大学Stony Brook校海洋学研究所の大久保先生のもとに1991年9月から1993年8月まで滞在する機会をいただきました。その間、先生には公私ともに大変お世話になり、思い出は留まるところなく湧いてきます。一体何を書けばよいのか未だ筆が定まりませんが、大久保先生の研究活動の終わりも間近な時期に共に過ごした思い出をいくつか述べさせていたいただきたいと思います。先生は日本語で話すのが大変お好きでした。また、無類の日本食好きでした。日本食を一緒に食べながら、子供の頃の話、学生時代の話、アメリカに来てからの話など身ぶり手振りまじえて、また、古い写真なども持ち出して尽きることなく語っていただきました。古い日本での、また、ベトナム戦争をはさむアメリカでのそれは興味深い話でした。この一筆ではむしろ出来る限り先生御自身の語られた話を再現したいと思います。

1925年2月5日のお生まれの先生は、戦時中に学生生活を送られ、気象庁の海洋化学の部門で研究をされたあと1959年に渡米されました。その時はプロペラ機で30時間もかかっていた太平洋横断で、アメリカ到着早々高熱を出して寝込んでしまったそうです。その後、The Johns Hopkins大学Chesapeake Bay InstituteのD. W. Pritchard教授のもとで1963年に博士号を取得されました。New York州立大に来られたのは1974年のことですが、これにはいくつかいきさつがあったようです。ベトナム戦争の頃、軍事研究の一環とされかねない御自分の研究になにか虚しいものを感じていた頃、昆虫が群れて飛ぶのを見かけたそうです。その時、虫達の群は一見ランダムに飛んでいるようなのに、一向に拡散していかないのがとても不思議に思えたそうです。その時から昆虫の群飛（swarming）の研究を始めたいと思い立ち、Minnesota大学のChang先生がmidgeの動きを8ミリカメラで撮影して解析しておられるのを見つけて驚喜したそうです。それから、群飛の研究が始まったわけですが、先生は群飛の研究が高じてついには現職を捨てることまでされました。しばらく、就職浪人をし、人にだまされたり、生活のためイヌの運動のアルバイトまでされたそうです。その話を、面白おかしくされたとき、一緒に聞いていたアメリカ人が一体なんという才能の浪費だろうとあきれたように言いました。先生によると、その時（ベトナム戦争とその後しばらく）は、アメリカはそんな時代・世相・・・思い立って職を捨ててしまうことも当然のように起こる・・・だったのだそうです。しかし、この浪人時代も終わりが来ました。Chesapeake Bay Instituteで一緒だったJerry Schubelさんが若くしてNew York州立大海洋研究所の所長として招聘されたとき、大久保先生にも声をかけたのです。その時の先生

の返事はふるって"swarming"の研究しかしないけどかまわないか、と言ったそうです。しかし、Schubelさんがまた、大変太っ腹な人でそれでもいっこうにかまわない(但し、海洋拡散を研究したい若い研究者が一人いるのでその力になってくれさえすれば)、という返答が来ました。大久保先生のその後の生態学・海洋学両方における旺盛な研究活動を見ればSchubelさんがその約束を最後まで守り通されたことは明らかです。私も蚊の群飛の研究者であり、まったく海洋学とは関係のないものでしたが、Schubelさんは快くvisitorとして受け入れ、いろいろと便宜を図っていただきました。

New York州立大学では、大久保先生は海洋学研究所の海洋物理学の教授のほかDepartment of Ecology and Evolution とDepartment of Applied Mathematicsの教授も兼任されてきました。実際に教鞭を執られていたのは海洋学研究所で、わたしも授業を聴講させていただきました。実際に特権を得ました。先生の教えられた科目はまず、秋の学期の生物系の学生のための数理生物学です。この授業はわかりやすく丁寧なことで大変人気があって、多くの生物系の学生が受講していました。私が聴講していたときは、金髪の小柄なお嬢さんが大変がんばって勉強して夜遅くまで先生の研究室に質問に来ていました。この時の女子学生達数人で先生をさそって海辺のハイキングを計画しました。学生たちも日本食が大好きで、その日は豪勢なお刺身をつくり、浜辺でおいしいお昼を食べて過ごし、夜は先生のアパートで先生の大好きなチャプリンの映画を楽しみました。その時の女子学生たちに囲まれた先生の楽しそうな笑顔の写真がいまも手元に残っています。この数理生物学の授業を通して、学生たちが数学恐怖症から解放され、"Akira"あるいは"Sensei"が物理系以外の多くの学生にも親しまれるようになったと思います。それから、海洋物理学を専攻する学生のために隔年で流体力学の講義、これはぐっと学生の数も少なくなりました。そして、流体力学の次の年に、カオスとフラクタルの講義をされました。この講義は一応生物系の学生も対象となっており、興味深く且つ平易な素晴らしい授業でした。

先生の御研究は多岐にわたっていました。海洋物理学者としての海洋拡散の御研究、そして、ベトナム戦争のころから始められた昆虫の群飛の御研究、150報を超える論文の共著者の数だけでも100人を越えるそうです。私は蚊の群飛の研究のほかに、海洋学研究所滞在中にもうひとつの研究を始めてしまいました。これは、先生のかかわられた最後の研究のひとつと言えるかもしれません。それは外洋にすむ昆虫の理論研究です。先生がある時、Ocean skatersと呼ばれる昆虫に関する論文を見せてくださいました。Ocean skatersはHalobates属に属するアメンボの一種です。昆虫は地球上で100万種以上も生息し、その種数においてもまた多種多様な生活形態においても最も繁栄した種族といえます。しかしながら、外洋にはこのHalobates属の5種しかいないのです。かれらは、太平洋、大西洋、

インド洋の赤道を中心とした領域に広大な分布域をもっています。この分布図を見たとき、昆虫学専攻の私は何とかこの虫の研究が出来ないものかと思うようになりました。しかし、勿論採集に出かけられるわけでもありません。それまでに大久保先生の授業や海洋学研究所でのセミナーで聞いた海洋の話とHalobatesの論文の内容を頭の中で思いめぐらしていました。突破口が開かれたきっかけはそのころ出席していた英作文のクラスで毎週書いていたエッセイでした。どうにもHalobatesのことが頭から離れない私は海洋昆虫のこと、Halobatesのことを題材に英文を書き散らし、Halobatesが大海原でどうやって群をつくることができるか、という考察を試みました。その時は、ラングミュアサーキュレーションのような海洋でのconvergenceを利用しての群形成を考えていました。そのとき、とても親切な(しかも頭が切れることで有名な) Dong-Ping Wangという海洋物理学者に質問に行きました。この人の答えは意外なもので、むしろ海洋上では群の拡散は少なく、群から群に昆虫が移動していけるかどうかのほうが問題だということです。この日から、ついにおぼつかない足どりながらHalobatesの研究は始まりました。半信半疑だった大久保先生も引っぱり込んでしまい、多くの海洋学者とも議論してついに海洋の拡散の力がいかにHalobatesの生活に影響を与えるかという方向でいくつかの表や図が出来始めたのです。Halobatesは海表面だけで生活します。群飛というよりはこれは2次元の群ですねえ、といいながら楽しそうにHalobatesの話をする先生のご様子が忘れられません。

この2月、先生の訃報を受け取ったのは、アメリカ・サンディエゴで開催されるOcean Science Meetingへ出発する直前でした。この会議ではHalobatesの研究発表をする予定でした。長い御闘病の後に、2月1日午前3時昏睡に入り、その朝7時45分に息を引き取られたとき、先生の顔には実に平和な表情が広がっていたということです。学会のポスターには先生の写真を飾りました。それは、私がStony Brookを去る前の日、さわやかな晩夏の夕暮れ、先生のアパートで最後の研究の打ち合わせをしていたときの写真でした。それは、日本食を食べながら、尽きることなくHalobatesの話を・・・海洋の拡散と昆虫の群の話を・・・していたときの写真でした。

University of Washington

Telephone (direct): (206) 685-9298
Personal secretary: (206) 685-2841
Department: (206) 543-5493
FAX: (206) 685-1440
email: murrayjd@amath.washington.edu

Department of Applied Mathematics
Box 352420
Seattle, WA 98195-2420

13th March 1996

From:

Professor J.D. Murray FRS

Professor Akira Okubo - some reminiscences

Since the loss of my close friend Professor Akira Okubo is still so fresh in my mind it is good to recall one of the happiest times we had together. Although we had met several times before 1987, and of course I had been an enthusiastic admirer of his work long before that, it was really in the Spring of that year that Akira and I spent extended and relaxed periods of time together during which our friendship blossomed as did our scientific collaboration. At the time I was Professor and Director of the Centre for Mathematical Biology in the University of Oxford. When the Centre was founded, among the first senior people I wanted to have visit were Professor Okubo and Professor Teramoto. Although Professor Teramoto had arranged to visit unfortunately it turned out not to be possible as he had planned. Professor Okubo was able to come, the first time for three months in the Spring of 1987 and again the following year.

The university in Oxford is a perfect place to appreciate nature in the small, with its numerous colleges and their large, highly cultivated and beautiful gardens which have been planned and developed over the past few centuries. Akira and I regularly used to cross St. Giles', the street between the Centre and St. John's College to walk in the college garden in which, even in such a tourist time of the year, we could always find tranquil places to talk. As members of the university we could go into college gardens when they were closed to visitors - a special treat for Akira and I since we frequently had these huge gardens almost to ourselves.

It was during one of our walks in St. John's Garden that we saw some of the grey squirrels that initiated the discussion which resulted in the research that Akira and I did, together with Professor Mark Williamson in Biology in the University of York and Dr. Philip Maini of Oxford and who at that time was a post-doctoral of mine. Akira's love of nature was profound. Although he very much liked the more formal aspects of the college gardens, it was in the wilder parts in which the profusion of birds seemed to aggregate, that he particularly enjoyed and where we sat speculating on squirrel populations in general.

I mentioned that I had never seen a red squirrel in England, but knew that before the introduction of the grey squirrel they were the native species and used to cover the whole of England. Akira then proceeded, as he so often did, to tell me things about animal behaviour of which I was completely unaware. He started to speculate as to how the grey squirrel might have supplanted the red squirrel in England. Akira, with his usual kindness, explained why my first suggestion, related to the more aggressive nature of the grey squirrel, was clearly not the cause. He then proceeded to justify a competition model based on the versatility of the grey squirrel to exploit a wider range of food sources than the red squirrel. Subsequently Mark Williamson provided some of the data while Philip Maini actively participated in the modelling and carried out the numerical simulations of the equations which demonstrated the wave of advance of the grey squirrel and the corresponding wave of extinction of the red. We eventually published a paper in the *Proceedings of the Royal Society* *. With the English love of animals almost anything to do with animals provokes a reaction among the public and this work was no exception.

There is a long-standing custom in England of writing letters to the *London Times* but when it involves anything to do with animals these letters invariably express strongly held views. Our paper on the squirrel was the topic of a "Comments" article in *Nature* and

so got into the popular press almost immediately. It gave rise to an extended and very heated correspondence in the Letters to the *Times* which produced a wide variety of personal theories as to why the red squirrel had disappeared. Akira read these and treated them seriously, however crazy the theories might be. He was delighted with the various propositions made and, with his usual gentle candour, explained how they could not possibly be right.

Akira was unquestionably one of the gentlest collaborators I have ever had. He listened to my ideas with enormous patience and frequently, in the kindest of ways, showed that they were completely untenable.

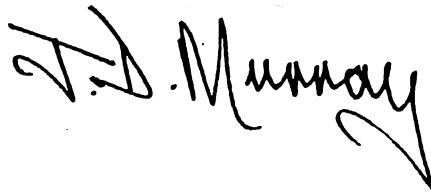
During his time in Oxford, Akira lectured all over Europe and was in great demand as a speaker. After these trips, we used to go walking in the University parks to catch up on news and on what was going on in the universities and countries he visited. Of course our talks was not all science. I remember on one occasion his very graphic and extremely funny description of how he had tried to make tobacco with a variety of plant leaves and chemicals: the 'cigarettes', he said, were absolutely awful.

The following year, 1988, he again visited the Centre. After a trip to Barcelona, where he was given a large honorarium for his talk, he insisted on giving it as a gift to the Centre for Mathematical Biology since he said he did not need it. He felt very strongly that young people should be encouraged to go to meetings and travel to find out what the scientific community was like outside of Oxford and to meet other young scientists. This gesture was so typical of his genuine concern for others. Akira was one of most popular and one of the most appreciated visitors to the Centre with everyone but particularly with the students. His office was always open to any of them who wished to come and talk. I have never known him not to have an interesting or insightful comment on a student's research.

When I moved to the University of Washington, many of us very much hoped that when Akira retired from Stony Brook he would come to Washington. Indeed he was planning to do so. It was typical of his concern for others that instead of retiring when he could, he remained at Stony Brook to ensure that his position in the university would not be eliminated. His concern for the future was so totally unselfish. Although he spent considerable time in Washington, sadly for all of us he was never able to fulfil his wish to retire here permanently.

His delight in nature never abated and on one occasion, when at our home on Bainbridge Island (near Seattle), he saw two eagles just in front of our house hunting fish in the sea. Their beauty and elegance clearly moved him.

Akira Okubo will be greatly missed by the scientific community. His contribution to developing the field of theoretical ecology cannot be overestimated. There is no doubt that Professor Akira Okubo will be remembered as a giant among the founders of theoretical biology. However, it is his personal qualities that I shall miss most such as the sparkle in his eyes and the small, almost embarrassed, smile that came over his face when he made a joke. My deep regret is that Akira and I did not meet many years earlier.



*A. Okubo, P.K. Maini, M. Williamson, J.D. Murray: On the spatial spread of the grey squirrel in Britain. *Proc. Roy. Soc. (Lond.) B* 238: 113-125, 1989.

大久保明先生の思い出

創価大学工学部 田口哲

先生との初めての出会いは、私がカナダ科学省奨励研究員としてノバスコシア州ダートマウスにあるベッドフォード海洋研究所に在職していた時である。当時先生はニューヨーク州立大学で教えておられた。私の上司であるプラット氏は植物プランクトンの分布に当時大変興味があり、特にパッチの仕事をしていたので先生の拡散の研究には特に関心があった。そのため先生を何とかベッドフォード海洋研究所の職員として招聘しようと、相当な努力をしたが実現しなかった。しかし研究の上では密接なつながりを持っていた。先生の指導のもと発表した論文が植物プランクトンのパッチを扱った論文であった。この論文はその後教科書にもよく引用されており、いかに先生の影響が偉大なものであったかよく理解できる。そんな先生と上司の関係で私はよく先生に数学的な御指導を受けた。その後何回か米国内における学会でお会いし、拡散のお話をよくうかがうことが出来た。そんな中でシアトルであった米国陸水海洋学会で先生は京都大学から留学されてきた重定氏を私に紹介して下さった。その時「彼女は植物プランクトンのセルフシェイディングの仕事をしています。」と云われた。その後発表された論文を読み、「なる程」と思ったりした。その後いくつかの先生の論文の別刷をいただき勉強させていただいた。その中でも私が日本に戻ってきてから発表された人工衛星のデータから海洋の表層混合層を測定する論文は、一気に読みすませたという位興奮を覚えたことを今でもはっきり憶えている。私の研究生活においてこの3編の論文は忘れることの出来ない先生の考え方がよく伝わってくる論文であった。「拡散」の分野では世界一優秀な研究者であったのにも関わらず、後半は職に恵まれずに異国の土地で斃れてしまわれたことには、何とも無念の気持ちである。アメリカの社会で生きていくことの難しさを物語るものかもしれないと思ったりする。今後、我々は先生が残された研究の極め方をよく勉強することが、先生に対する感謝の気持ちとして伝わることであろう。

寺本英先生を偲んで
新聞記事から

毎日新聞 The Mainichi (日刊)
昭和28年9月19日 (土曜日)



天晴れ！無名の青年科学者

病いに克ち新理論

「フーリ」博士 家庭訪問が楽しみ

講演する寺本君

ロマネスク風の薄暗い室内にガラス窓を通し鈍い秋の西陽がさし込んで十八日夕、国際理論物理学会議第二会場の京大人文学研究所講堂では日本の無名の一青年科学者の研究発表をめぐって静かな興奮が場内を満たしていた。正面壇上の青年は油気のない髪をかきあげかきあげ無造作な英語で説明を続けて行く。

(一) 座長席のI・プリゴジンヌ博士(ベルギー) 最前列に陣取ったP・フロリー博士(米) からもおだやかな微笑を浮かべて聞き入っている――。

この青年は京大量子化学研究助手、寺本英君(二十八) 論題は「鎖状高分子統計理論」最近の高分子の中心の問題として取上げている「排除体積効果」に対する明確な理論と実験的裏づけを展開したもので、新しい生物物理の問題を解くカギとみられ内外学者の異常な注目を集めたのだった。

しかも外人学者が舌を巻いたのも無理はない。この「奇妙な」実験はただの紙の絵だけをうい統計学上の完全調査をしとげたわけで、その陰に貧しい青年科学者の「愛と知」の物語が秘められていた。寺本君が最初「排除体積効果」の精密な理論を生み出したのは一昨年、同君が二十五才の春だった。この理論は世界の学会に先んじて鎖状高分子の統計力学へ新しい着想を導入したものだだったが、同年六月学会発表を前に寺本君は血を吐いて倒れた。複雑な計算の過労から胸を冒されたのだったが病床でも同君はノートを手放さなかつた。(二) 当時P・J・フローリー博士(米) をはじめ翌二十七年にはノーベル賞受賞者のデバイ(米) ヘルマン(オランダ) から諸氏の手で欧米各国では統々と「排除体積効果」の問題が打ち出されてきた。しかしいづれもあきたらぬものであつた。寺本君はベッドで歯がみしながら考えていた。(三) 自分の理論を裏付ける実験がしたい。だが大学から渡される実験費用は年間約一万円にも足らぬ。(四) 同年秋やと病床を離れた寺本君は酒を断ち身銭をきつて乏しい実験にかかつた。(五) 実験材料は紙と鉛筆だけしか使わない。タテ十五センチ、横十センチのグラフ用紙に高分子構造の各種の型を書きぬきそこから一定の確率を割り出していく方法だった。はじめはサイコロを使って任意抽出方式をとつたが見事に失敗した。不屈の学究心に燃え上がった寺本君は一からやり直す決心を固め、あらゆる分子構造を描き出すことにした。手間もひまももの数ではなかつた。手伝いの学生は神経衰弱で倒れていった。やがてこの仕事に京大工学部の倉出講師らの高分子グループか

- (一) 僕は先生の英語をまともに聞いた覚えがありません。
- (二) 先生は数理生物の数理モデルを解析するとき、大学ノートに突きつちりと計算をまとめていらつしやつたのを見ています。典型的なA型だと話したこともあります。
- (三) 先生は大学ではあの座敷の部屋にあぐらをかいて書類書きをされていたように思っていました。どこか(たぶん家?) で自分の研究の計算もきつちりされていたようです。
- (四) このころの物価がどのくらいかについてのデータは身近にはありませんでしたが、ちなみに、この毎日新聞が一月契約で二百八十円(一部九円) です。
- (五) この文章の一部は本当でしょうか?!

ら協力の申出があつた。寺本君の妻幸子さん(二十六) も毎晩二時、三時まで若い夫の片腕となって研究を助けた。幸子さんは旧京都府立女専数学科を卒業後二十四年の秋寺本君と学問で結ばれた仲、計算や製図はお手のものだ。そして実験は意外にはかどつた。これら一群の人々の水も洩らさぬ協力によって書きあげられたグラフ用紙はすでに十数万枚、長身の寺本君の背よりもうず高くたまっている。

(二) こうして実験の結果は寺本君が予言した「排除体積効果」の理論が完全に証明され、ようやくこの国際物理学学会を機会に世界の学会に向つて発表されたのであつた。

実際面にも大きな価値

フローリー博士談 寺本君の業績はまったく素晴らしい。数学的に偉大であるばかりでなく高分子のゴムや繊維、プラスチックなどの品質向上という実際面でも大きな価値がある。経済的にめぐまれない日本の若い科学者が実験上の不利を頭脳によつて補っているのはたのもししい限りだ。私は二十一日の晩寺本君の家庭を訪問する約束で、いまからのしみにしている。

小谷正雄東大教授談 寺本君の理論は世界高分子界の水準をはるかに抜く非凡なものだ。三年間陽の目をみずにもれてはいたが、こんど世界の指導的学者の前に発表の機会を得てこんなうれいしいことはない。かつての教え子の将来のため祝福したい。

寺本君談 発表のあとでフローリー博士が握手をして喜んでくれた。ボクとしてはこの「排除体積効果」の理論には自信がある。(三)

- (一) この話は生前に寺本先生から幾度か聞いた覚えがあります。手回しのタイガー計算機で計算されたことをなつかしうに話しておられました。
- (二) 「あの」寺本先生らしい?!

※もとなつた新聞記事は毎日新聞第七面(現在ですと社会面)の一番大きな記事で、その全内容を転載しました。同面には、他には、「急ぐ消防車の身替り 踏切警手が殉職」「酔払い運転で五名負傷 三輪、電柱に衝突」などの記事、中共地区(中国)からの高砂丸による帰国者に関する記事などが掲載されています。比較的きれいなコピーは毎日新聞営業所を通じて有償で容易に入手できます。別ページの写真は新聞のものを利用して拡大してあります。また、文中の脚注は新聞記事を使ったこの記事を構成した瀬野(奈良女子大・理)が勝手につけました。 [瀬野裕美(奈良女子大・理)]

しなやかな大木 ―寺本英先生を偲んで―

防衛医科大学校 芦田 廣

京都大学理学部の生物物理学科に学生定員が認められた1967年（昭和42年）、この年に私は大学に入った。二年生の秋になって、専門でどの学科に進むかを定める分属に関する説明会が開かれた。寺本先生と初めて出会ったのはこの時である。

分属についてのこの説明会に、生物物理学科からは岡田節人、寺本英の二人の先生が来られた。岡田先生は、「京大の生物物理では物理学ではなく、生物学をやります。物理的発想や手法も生かして生物学を研究するということです」と原則を述べられる。ところが具体的な話になると、「なんで彼は彼女が好きなのか、と言うような事まできちんと判ったら面白いかなあ」等と雲を掴むような、岡田先生特有の関西弁漫談であった。さらに次に出て来られた寺本先生は、真面目な顔で「要するに、よう判らんことが一杯あるからやってみようということです」と言われる。具体的な話は一切出てこない。「生き物が生きている哲学を学べたら」と言われたかと思うと、「そんなものが判るなどと、だいそれたことは考えてない」と話される。この余りの曖昧さ、肩透かしのような抽象的な説明に驚くと同時に、よくは判らないけれど、何か新しいことを始めようとしてられる雰囲気だけは感じ取れた。

この分属説明会の後、理学部は無期限ストライキに入る。その次に寺本先生と出会ったのは、バリケードを挟んでであった。寺本先生は自分で「俺は右翼やから」とよく言われたが、学科分属と必須科目廃止については最も柔軟な考えを持っておられた。最低限必要な学習内容があると主張する物理や化学の先生が多い中で、寺本先生は、「新しい学問は枠に囚われないところから生まれてくる」と言って規制廃止の立場を取られた。

そのうち、ストを続けていた学生一人一人宛に理学部から郵便が来た。分属を廃止し、緩やかな系にするとのことであった。そして各系ごとに履修ガイダンスをするとのことであった。この時に配られたガイダンス資料の中に、『「理論生物学」を指向する人に』という説明があり、そこで生物系の顧問であった寺本先生は、「理論生物学と言った危ういものを指向する人は、数学と物理と生物を勉強しておく方がよいでしょう」と書いておられたのを感じている。でもここでも理論生物学や数理生物学の具体像はない。それに寺本先生自身がどういう考えで物理学科から生物物理学科に移られたのか、物理学でない生物物理を明確に意識してられたのか、少しも判らなかつた。

学部の学生の時には、寺本先生の「生命の起源」という珍しい講義もあった。寺本先生が

Oparin や Bernal の話をされるのかと思って出席したが、この講義は、俺にこんな講義が出来るわけがないという言い訳の時間のような物であった。「エネルギー・エントロピー論」の講義はほぼ毎年開講されていた。確率、情報、熱力学、統計力学をエネルギーとエントロピーの視点から横断的に論じるという非常に興味深い講義であった。しかし最も強く残っている印象は、Boltzmann の苦悩と熱力学に対する寺本先生の思い入れ、熱を込めた語りである。「とことん考えると自殺せんならん」と話された。

生物学の理論に具体的イメージが持てないまま、しかしある意味ではこの訳の判らなさから引かれて大学院に進んだ。寺本先生の研究室に所属し、先生自身が数理生態学を研究分野にすると旗色を鮮明にされた頃に、先生が「今の物理には哲学がない」と言われるのを何度か聞いた。そして「熱力学的発想が大切である」とも、「数学だけでなく、物理的発想が必要だ」とも言われた。その頃既に寺本先生は、その後二十年以上続けられた熱力学的発想に基づく数理生態学の構築を考えてられたのかもしれない。

決して大上段に振りかぶった考えを話されることはなく、壮大な構想など口にされるはずもなかった。我々学生や大学院生に対しても、研究内容や方法について具体的に指摘・指導を口にされることはほとんどなかった。しかしその包容力の大きさに大勢の人が集まり、既成の枠に囚われない柔軟さに、先生に従うものは多かった。構えたところ、肩肘張ったところが無く、柔らかな自然流の姿勢が寺本流であったと思う。丁度、風にしなやかにそよぐ木、それでいて根はしっかりと張っている大木のような先生であった。そのしなやかさ故に手応えがやさしく、それを物足りなく思う若い未熟な日もあった。

1970年代中頃、場所はたいてい木屋町の小料理屋「めなみ」であった。寺本先生は宗教を始めるのだと言われた。酒の席での戯れ言だったのか、ある程度本気だったのか、明らかではない。しかし、酒が入り、ある程度酔っ払ってくると、必ずこの話を持ち出された時期がある。素面の時に聞いたことはない。しっかりした教義を考えておられる風ではなく、ただ「平家物語」的な無常感から宗教を口にされていたようにも思う。しかし今になってみると、私自身を含めて大勢が寺本教の信徒になっている。教祖が亡くなった今も、寺本教は消えそうにない。

寺本先生の思い出

1996年2月9日

先生がなくなったとの知らせを受けたのは一昨日のことだった。2週間の予定でサイモン・レビン教授のいるプリンストンについて2日目の朝だ。サイモンは前日の夕食のとき、つい最近に大久保明先生がなくなったが、同じ病気だった寺本先生についても大丈夫なのかと心配していた。「寺本先生は大丈夫ですよ。6月の国際会議には元気な姿が見られるでしょう」、と返事をした。それからまだ数時間しかたっていないのに、何ということだろう。学部学生として寺本先生に会ってから、寺本研究室に近付いて、指導を受けて、と次々と思い出されてきた。なかなか寝つけないので先生の思い出を書き付けようと思う。

寺本先生の名前を知ったのは、大学に入ってすぐだった。あこがれだった湯川秀樹先生が講演会で、「物理は我々がすべてやってしまいますからこれから若い人は生物物理学を目指しなさい」といわれた。その講演の中で、寺本先生の名前があがっていたように記憶している。

当時、「現代物理学の基礎」のシリーズが岩波書店から出版されて、それで物理学を勉強した。その中の「生命の物理学」は、大沢文夫先生と寺本先生の編集によるもので、繰り返し読んだ。またそのころ、生物物理という学会誌で生物物理学の将来に関する討論会が頻繁にあり、必ずといってよいほど寺本先生が出てこられて、「新たな現象論を発展させるときだ」という発言をされた。私はその言葉を、生命を担う物質がなんであるかにはそれほどこだわらずに、情報としての生命のあり方や動態に注目せよといわれたのだと勝手に解釈した。

寺本先生は2回生向けに「エネルギー・エントロピー論」を開講されていた。タバコの煙をくゆらしながら、ランダムとは何か、熱力学、エルゴート理論、情報理論などと先生のオリジナルなストーリーにしたがって話が進められていった。

普通、講義といえば知識を身に付けるためのもの、物理学ならば計算の仕方や根拠を教えて演習問題を解くというはずが、寺本先生の講義はまったく違っていた。知識は各自が勉強してくればよいので、講義ではさまざまな異なる分野のパースペクティブを与えるものだという立場に徹するといっただろう。

その講義で参考書として紹介された「マルコフ過程と力学過程」（槓書店）という白く薄い本を、まだ油引きの建物だった教養部の図書室の奥の柵に見つけて、ページをゆっくり繰り返しながらかみながら理解していくという経験をした。寺本先生の講義口調を思いだしながら、これが学問の楽しみ、というものかもしれないと思った。

いろいろと迷った末に、寺本先生の教授室をたたき、どのような講義をとったらよいか、

などと聞きにいったことがあった。そのとき、何を思われたのか、「思い付いたらすぐにメモをしておかないといけない、忘れてしまって、あとでしまった、と思うことがよくある」と言われた。ご本人が折角の素晴らしいアイデアを忘れてしまって、悔しい思いをされていたに違いない。私はすぐに京大式カードを買いこんできて、何でもメモを付けた。2年ほどしかつづかなかったけれども、最近本箱から出てきて読んでみると、いろいろと妙なアイデアが書き留めてあった。

寺本研に入ってからすぐ、「巖佐はソリトンの計算でもしてみるか」といわれた。それ以上は一切言われず、放任して下さった。研究室にいた6年半の間にも、学問の上の細かな指導や、この論文を読みなさい、とかこういう風に積分すればよい、などといったことはまったく言われなかった。ただ修士論文を完成させるころには「しごき会」といわれる泊り込み長時間セミナーが開かれて1人ずつの話をじっくり聞いてアドバイスをされた。私の場合、修士の間には空間分布のある個体群動態や種分化モデルなどいろいろ試みていたが、「『戦略』はなかなか面白い」という先生の一言で、進化生態学の適応戦略のモデルを博士課程でのメインテーマにしようと決めた。当時は、最適化やゲームの数理が生物学で役立つとはほとんど認められていなかったときである。

その代わりとっては何だが、「スポーツの日」というのを月に1度設けたり、春と秋には必ず遠足があったり、といった遊びのシステムは寺本先生が率先して設定された。

寺本先生は、来る人をこばまず、色々な人を研究室に受け入れて、研究室の雰囲気調節し、そこで、面白い成果が自然に醸成・醗酵されてくるのを待つというやり方であった。研究分野も生物学関係の理論に関するものであれば高分子、発生、神経系、生態など何でも受け入れられた。

寺本研究室に集まってきていた人は、寺本先生の人柄をしたって、という言葉がこれ以上ないほどあっていると。先生に「人をひきつける力」があるということは外国人でも認めている。温かく、面白い話をして、忘れられない魅力がある。風格という言葉が似合うだろう。寺本先生の姿を一度だけみたことがあるという九州大学の大学院生が、「いかにも親分という感じがする人だ」といったのを聞いてなるほどと思ったものである。

私達大学院生や研修員は、セミナーをしながら囲碁を続けたり、昼もソファベッドで寝ていたり、かなり傍若無人だった。困ったもんだと思っておられたに違いないが、苦言を発することもなく勝手にやらせて下さった。

数えてみれば私の大学院の時代には寺本先生は50歳代前半だったはずだ。年を経るごとに先生は出張と会議でどんどん忙しくなられ、週に1度の研究室のセミナーにも、顔を出されることが少なくなった。学内のとりまとめや学会の世話だけでなく、中国との交流、京都学派ともいべき人文科学／社会科学関係者との交友である。でもそれらの幅の広いさまざまな分野の人との交流は楽しんでおられたように思う。

寺本先生は、お酒を飲んで興にのってくるといつも、「これからの学問の方向についても今にはっきり示すつもりだ、今の状況には問題を感じている」とぼそぼそ言われるのだが、実際にはその「方向」については一言も発言されなかった。これは、引き下がって、控え目にしておきたいという寺本先生の美学を通されたのだと思う。またいろいろな立場の人がいることから、思いもかけず行動をしぼったり、先生の意向と立場との間で板挟みになるといったことを避けたいと思われたのかもしれない。

「生物物理学会だけで生態系モデルの話をしていても仕方がないじゃないですか、生態学会に出て行って叩かれましょう」このような発言をしたのは私が修士1年生のときだった（なんと生意気な学生か!）。「まあ行ってこい」といって山村さん川崎さんと3人で送り出してくださった。

2年目に大挙して生態学会で発表しようとしたときに、数理生態学の自由集会を企画しようとしたところ、「最初はず、これまで生態学会で数理的な手法を使ってこられた方のお話を聞いて、勉強させていただくということが大事だ。それをきちんとしておかないといけない」、と行って下さった。なるほどと思ったものである。寺本先生からそのようにいわれたことを重定南奈子先生に伝えると、「寺本先生は学生にそのようなことを仰る人ではない。よっぽど心配しておられるに違いない」と言われた。鉄砲玉のように、あぶなっかしくて見ていられないと思っておられたのかもしれない。

生態学会では、ご自分が表に出て会を企画したりはされなかったが、先鋒突撃隊である私達が他の先生に協力をお願いに行くときには、電話を入れたりして援助してくださった。

6月の国際会議には九州大学の数理生物学講座の所属員の全員が発表して、寺本先生の意志をついでいる若手研究者がどんどん育っていることを見せたい、と思っていた。先生がご病気だとは分かっていたが、まさかこんなに早く亡くなるとは。これまで、寺本先生に「なかなか面白い」と行っていただけることを目標にして仕事をしてきたような気がするのに、これからはどうすればよいのだろう。

寺本先生、これからも私達を見守っていてください。先生が言っておられた「現象論的な生命の物理学」は、必ず私達の手で作りに上げて見せますから。

巖佐 庸

プリンストンにて

P S これは、寺本先生の死去のことを聞いて2-3日中に書いた文章で、個人的な思い出ばかりが書かれていますが、修正せずに出します。

網元の親方と理科の先生との組み合わせ -- 寺本先生のお人柄

中島久男（立命館大学理工学部）

私が寺本先生に初めてお会いしたのは大学3年生の時ですから、今から30年近く前のことでした。統計力学の講義を先生から受けましたが、本部キャンパスの法経教室というとても広く広い教室での授業でした。理学部キャンパスから毎週自転車で来られていた先生は、教授という威厳は表には露ほどもなく、自由人という雰囲気は漂っていました。授業はエルゴード理論の紹介から始まり、古典統計の様々な形の分配関数の導出を系統立てて、かつ近似の過程も明確にされた非常にわかり易い講義でした。1年間の講義で量子統計までたどり着き、最後にブラウン運動に関する確率過程の入門がされるといった、ゆったりとしたペースで進められていましたが、授業の進度を学生のペースに合わせたと同時に、そこで自分なりに納得しながら講義を進めていたように思います。

4年生になってから、私は寺本先生ではなく福留先生のグループに配属になりましたが、物理学教室の4階にあった寺本研理論グループの院生の大部屋に4年生用の机を1つあてがわれ、山村さんなどと数人で毎日その部屋に出入りし、勉強もしていましたが遊びの方もかなり盛んでした。そんなことで、同じ部屋にいた重定さんや石井さん達には、大変ご迷惑をおかけしてしまいました。その部屋は3階にあった寺本教授室とは離れていたためか、先生がお見えになることは余りありませんでした。しかし一方で、教室内の研究室対抗バレーボール大会とか、研究室内のハイキングとか、野外の行事でお会いすることが多かったのです。

バレーボール大会は、前年度は宿敵浅井研を敗って優勝していましたので、その年の寺本研の熱の入れようは大変なものでした。4年生のわれわれは、主力チームとは別のヴィールス2世というチームを編成し、毎日3時過ぎからの特訓を2週間ほど受けました。バレーのうまい先輩の院生から、回転レシーブの練習を物理教室の前の芝生でやったこともありましたが、先生も真剣に練習しておられました。ある時は、秘密練習と称して、宇治キャンパスのバレーコートまで出かけて、ヴィールス1世とヴィールス2世との練習試合をやったりもしました。そんなバレーボール熱は、中心となる院生と助手の方が色々な計画をされ、先生はその方針に従って動いていたのですが、全体の動きを見ながら全員に対する激励を色々な形でなされていました。しかし残念ながら、それら全ての努力にもかかわらず、浅井研に優勝をさらわれるという結果になってしまいました。まだ学部学生だった私にとっての感動は、大学の研究室全体が、教授も含めてスポーツ大会に真剣に打ちこみ、かつ愉しんでいるということでした。

その年の秋に大学院進学が決まって間もなく、初めて先生から教授室に呼び出されて今

後のことについての話をしました。そこでのお話しは、「大学院入学までの6ヶ月はゆったりと自分の好きなことができる時間であり、一生のうちで幾度とはない貴重な時間である」こと、「大学院では何か自分に合った数学的あるいは物理的な手法を身に付け、それを武器とした方がよい」ことなど、具体的な研究テーマの話ではなく、これからの気構えを話されました。

それ以後の大学院時代においても、今漠然と考えている問題意識や研究の進行状況をセミナーで報告しますが、そのやり取りの中で、「それぞれの学生は、それぞれの個性に合ったやり方で、その学生に一番合ったテーマを研究することが最良である」という考え方を、先生は一貫して持っていたことがよくわかりました。その一方で、学生を放ったらかしにするというのではなく、適切なアドバイスをセミナーの中でしてくださいましたし、ほとんどの場合、それは学生を元気づける方向でなされていました。また、研究がうまく進行していない時期でも、研究室でお茶をのみながら遊びに関する話など、研究と直接関係ない話題で学生を元気づけていただいております。

その当時の寺本研では、大学院の1学年が4人程度でしたので、研究室の規模が20名程度という大所帯でした。それらの人達が全て順調に研究が進行するはずはなく、壁にぶち当たっている時期もあれば、何かの切掛けで大いに進展することもあり、みんながその過程を別々のフェーズで進行していたわけです。先生はバランス感覚の優れた方でしたから、そんな学生達の中で、特にスランプ状態にあるものに対してかなり気を使われて、ある時ははっきりと激励しある時にはそれとなく元気づけられておりました。それは、順調に研究が進んでいる時期の者にとっては、先生から自分に対する反応がそっけなさすぎたり厳しかったとかの印象を持たされるときもありました。

大学紛争とその後処理にかかわる様々なことがほぼ収束したころ、研究室の研究テーマが、それまでの「反応速度論の確率論的理論」から「数理生態学」へと変わっていきました。先生は40代の後半の頃でしたが、これまでの物理的な現象とは毛色の全く異なった分野に進まれるときの意気込みは大変なものでした。ご自宅の階段下のかなり狭い空間なのですが、そこで毎晩遅くまで勉強されていたそうです。朝、研究室に来たとき秘書の人に、「きのうの勉強でこんなことが解かった」と京大教授というよりは青年学生のように喜びと興奮の表情で話されていたそうです。また、その当時の国際的プロジェクトであったIBPのシンポジウムが東京であったときも、夜行バスで出かけて行くといった熱心さでした。これまでは、狭い意味での生物物理という分子レベルから見た生物の研究でしたが、今度は、生態学というスケールの異なる視点からの生物学となり、その中に先生がこれまで抱いていた物理学的視点（物理的視点ではなく）からの生物現象の解明が大いに発展できるのではないかという期待が強くあったのではないかと思います。このことについては、いつか先生から詳しくお話しを伺いたいと思っていたのですが、それが果たせずに終

わってしまったのが残念でなりません。

取り留めもなく、先生の思い出話をしてきましたが、この文を書く中で、先生の国の内外を問わず誰からも慕われ信頼されたお人柄とは何だったのだろうかということを考えてみました。先生のお父さんは理科の先生をしていたそうです。また、お祖父さんかその先代は出雲の網元の親方だったそうです。荒くれ者の男達をうまく使いこなす網元の親方、自然に対する真摯な考え方をもち、かつ生徒達にはそれを解かりやすく教える教師、この両者を先生は持ち合わせていたのです。4年ほど前、アメリカでワークショップがあり、ニューヨークで2晩ホテルの同じ部屋で泊まって色々な話をしていたとき、先生のお父さんの話題が出たので、「今になって思えば、先生が大学院生に対する接し方は、教育者であったお父さんの影響があったのではないですか？」と尋ねたことがあります。それに対して、「そんなことを言われたのは初めてだし、そう思ったこともなかったけど、考えてみるとそうかも知れない。」という返答でした。もちろん先生はそんなことを意識しながら行動していたのではなく、幼年期や青年期にご家族との接触の中でかなりの部分が自然に身に付いたものと思われまます。そんなすばらしいお人柄の先生と接することができ、遅ればせながらもその影響を受けた私ですが、まだまだ戸惑いながらも学生や大学院生と接している今日此頃です。

環境汚染物質のリスク評価における損失余命

蒲生昌志（東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻）

現在、環境中にはおびただしい数のいわゆる環境汚染物質が存在し、私たちは日々それらに曝されている。私たち（私+中西準子：横浜国大環境科学研究センター教授+岡敏弘：福井県立大経済学部助教授）は、化学物質への曝露によるリスクを、損失余命という尺度を用いて評価することを提案している。本稿では、環境汚染物質のリスク評価に関する背景や損失余命の算出について簡単に紹介する。

リスクの評価方法の観点からいうと、化学物質は、発がん性物質と非発がん性物質に大別される。発がん性物質にはしきい値（それ以下では毒性が発現しない用量）がなく、ごく少量の曝露でも相応のリスクが生じるとされる。リスクの値は、化学物質ごとに動物実験により推定されるCancer Potencyをもとに、生涯発がん確率（生涯曝露を受けたとして、その曝露が原因で生涯の間に発がんする確率）として 10^{-5} のような形で表現される。一方、非発がん性物質のリスク評価においては、まず、動物実験より得られる毒性のしきい値を安全係数（通常100前後：動物種差や個体差などを考慮）で除してADI（Acceptable Daily Intake：一日摂取許容量）を算出する。曝露量をADIと比較することによって、リスクは「安全か否か」の2分法で評価される。この場合の「安全」とは、実際には、ある安全率の仮定による「十分な安全」に過ぎないのだが、「絶対の安全」として認識されるのが通例である。ただし、曝露集団における個人差の問題、複数の物質への同時曝露の問題、ADI付近（又は僅かに超える）の曝露の問題を考えると、非発がん性物質においても「安全か否か」の2分法ではなく、曝露量に応じた定量的なリスク評価が求められる。

定量的なリスクの評価は、リスク／ベネフィット解析に代表される手法には必要不可欠である。すなわち、環境汚染物質においては、リスクが便益と引き換えに生じていたり、リスク削減に非現実的なほど莫大なコストがかかる場合が少なくない。その場合、環境汚染物質によるリスクを定量的に評価し、便益やコストなどと比較した上で（＝リスク／ベネフィット比を考慮して）対策を講じるのが現実的かつ合理的なアプローチである。例えば、自動車排ガスによる健康影響は、特に沿道に住む者にとっては大きな関心事である。しかし、自動車の価格を極端に引き上げるような排ガス除去装置の義務化や、全面的な自動車利用の禁止などは、対策としては有り得ない。これはあたりまえのことである。自動車の利用は、私たちの日常生活に必要不可欠だからである。様々な規制対象についてリスク、便益、コストを相互に比較することは、個別の物質の規制に偏らないという意味で、リスク削減に関する政策の透明性を高めると共に、政策の効率を改善する効果がある。自動車の例のように、現実には、これまでも暗黙の内にリスクと便益のバランスがはかられてきたのであるが、これから将来の環境政策においては、明示的にリスクを評価し管理

すべきである。

リスクの定量的評価において重要なのは、エンドポイントの設定である。評価軸あるいは評価尺度の設定と言ってもよい。化学物質によるリスクは様々な側面から捉えることができ、様々な尺度がありうる。環境汚染物質によるリスクを定量的に評価し、リスク／ベネフィットに基づいた環境政策という立場から、用いられる尺度には次のような性質が求められる；1) 発がん性や非発がん性を問わず様々な毒性影響に適用できること—物質ごとに異なった評価では、リスクやリスク／ベネフィット比を相互に比較できない。2) 化学物質のリスクが持つ最も重要な側面を反映していること—これなくしては、その尺度に基づいた政策の意味は薄れる。3) 実際に推定が可能であること—あたりまえのことだが重要である。残念ながら、従来はこのような条件を満たすような評価尺度や評価手法は存在していなかった。そこで、新たな評価尺度として損失余命を提案したのである。

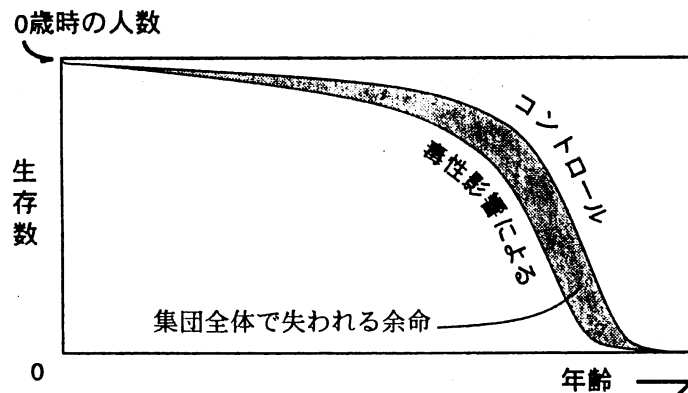


図1

図1に、損失余命推定の概念図を示した。図中の曲線は生存曲線であり、曝露を受けた集団と受けない（コントロール）集団のそれぞれの年齢別死亡率をもとに計算できる。年齢別死亡率が上昇すれば、曝露集団はある生存延べ年数を失うことになる（図中のグレーの部分）。この延べ年数を集団の初期人数で除したものが、集団における損失余命である。曝露を受けない場合の平均余命と受けた場合の平均余命の差と言ってもよい。損失余命の推定に必要な情報は、化学物質への曝露と年齢別死亡率の上昇との関係である。

前段落に示した条件に沿った形で、評価尺度としての損失余命の特徴を整理すると次のようになる；1) 死亡率の上昇を推定できる限りにおいて、発がんや非発がんによらず、あらゆる健康影響を同様に評価できる。2) 寿命の短縮は、健康影響の結果として公衆衛生学的に高い重要性を持つ。3) 推定に必要な情報（＝死亡率の上昇）は、疫学の分野において最も一般的な指標のひとつであり、様々な健康影響が死亡率の上昇の形で評価されている。2)に関連して少々補足すると、損失余命は死亡を扱った指標である。そのため、次のような感想を抱かれるかもしれない；「死亡は健康影響の中で最も重篤なものであり、より軽微な毒性影響（例えば、頭痛であるとか）などが評価されない。したがっ

て、損失余命は環境汚染物質によるリスクを評価する指標としてはふさわしくない」。しかし、慢性的で比較的軽微な毒性影響も、ある程度の死亡率の上昇をもたらし、結果として寿命の短縮が生じると考えられる。したがって、比較的軽微な健康影響についても、その重篤度に応じた死亡率の上昇が推定できれば、損失余命による評価が可能である。推定された結果の解釈として留意すべき点は、損失余命という尺度は集団におけるリスクの期待値（言い換えると集団で平均化されたリスク）であって、特定の個々人の受けるリスクではないという点である。ただし、環境汚染物質のリスク評価や環境政策の評価に関しては、多くの場合、その違いは問題ではないと考えている。

化学物質への曝露による損失余命を計算するためには、曝露により上昇する年齢別死亡率を推定する必要がある。まず、これまで許容できる発がんリスクの上限とされてきた 10^{-5} の生涯発がん確率を損失余命に換算することについて説明する。発がん性物質については、曝露を受けた集団における x 歳での死亡率 $=\lambda(x)$ を、

$$\lambda(x) = \lambda_0(x) + \Delta\mu(x)$$

として計算する。 $\lambda_0(x)$ は、コントロール集団の x 歳における死亡率である。 $\Delta\mu(x)$ は、発がん性物質への曝露により x 歳において増加するがん死亡率である。 $\Delta\mu(x)$ を推定するために次のような仮定を用いた；1) $\Delta\mu(x)$ は、自然がん死亡率に比例する、2) $\Delta\mu(x)$ は、曝露の累積量に比例する、3) 曝露は若年において大きな効果を持つ、4) 曝露から影響が生じるまでの期間が10年。さらに、化学物質への曝露により新たに発がんする人の数を、曝露の結果のがんによって死亡が早められた人の数と等しいと見なした。すなわち、 10^{-5} の生涯発がん確率とは、曝露を受けた10万人に1人が新たに発がんするリスクレベルである。曝露の結果のがんにより死亡が早められた人の総数は、全年齢での総和として、

$$n = \sum \{S(x) \times \Delta\mu(x)\}$$

によって計算される。 $S(x)$ は、0歳時10万人の集団の x 歳における生存数、 $\lambda(x)$ により計算される。ここで、 $n=1$ になるように $\Delta\mu(x)$ を設定する。

推定の結果、 10^{-5} の生涯発がん確率は、約66分の寿命の損失に相当すると推定された。 10^{-5} の生涯発がん確率が許容できる上限である根拠は様々に説明されるが、実際には、必ずしも厳密な根拠のある数字ではない。私が気に入っている解釈(?)は「極めて小さい確率を『万が一』と言うが、 10^{-5} はそれより一桁小さい確率である」というものである。 10^{-6} を上限とする人々もいる。環境汚染物質の規制は、このような小さなリスクレベルにおいて議論されているのである。

非発がん性物質においては、あるレベルの曝露を受けた集団の年齢別死亡率を、

$$\lambda(x) = R \cdot \lambda_0(x)$$

にとして計算する。Rは曝露を受けた集団のコントロール集団に対する相対死亡率である。この値には、SMR（標準化死亡率）をはじめとして、既存の疫学調査の結果が利用できるが、化学物質と毒性影響の組み合わせは多岐にわたるため、必ずしもRの推定が容易でない場合もある。そこで、実現可能な次善の策として次のような方法を考えた。毒性影響の結果生じる症状を、一般的な意味での健康度の低下として捉える。つまり、より毒性の強い物質に曝露すれば、また、曝露の量がより大きければ、より重度の毒性症状が生じ、より大きな健康度の低下を招くと考えるのである。健康度の低下とRとの関係については、化学物質の種類や具体的な症状とは独立した形で推定する。健康度の低下を、死亡率の上昇との関連を持った形でどのように定量化するかについては、いまだ模索の段階である。今のところ、ある化学物質への曝露による毒性影響の程度を問診票の類を用いてスコア化することが有効だと考えている。

私たちは、シロアリ防除剤クロルデン（有機塩素系）が化審法により禁止されクロルピリフォス（有機りん系）に代替されたという事例について、クロルデンの発がん性のリスクとクロルピリフォスの非発がん性のリスクを損失余命によって比較するという研究を行った。その中で、CMI（コーネル・メディカル・インデックス）という問診票を用いて、クロルピリフォスへの曝露により生じる毒性影響から死亡率の上昇を推定し、損失余命を計算した。CMIと死亡率の上昇との関係は、ある疫学調査の結果をもとに、

$$R = \exp(0.013 \times \text{CMIスコア})$$

という関係式を用いた。推定の結果、薬剤散布者や防除処理を行った家屋の住人については、薬剤の切り替えによってリスクは削減されているどころかむしろ増加している可能性が示唆された（リスクのレベルとしては数日の損失余命）。このような解析は、健康影響の種類によらず評価できる損失余命という尺度を用いることによって初めて可能になった。

環境汚染物質の種類は多岐にわたり、環境政策には総合的な視野が求められる時代になってきている。損失余命という尺度は、そのような時代の流れに対応するための回答／提案のひとつである。ただし、化学物質によるリスクの定量的な評価と管理、および、評価軸としての損失余命の推定に関する研究はまだ緒についたばかりである。過去の環境政策をこの評価軸で整理することを通じて、方法論としての完成度を高めるとともに、将来の環境行政のあり方を示唆していきたいと考えている。

最後に、本稿に関連した書籍をいくつか紹介する。

中西準子 著：「水の環境戦略」岩波新書324（1994）

中西準子 著：「環境リスク論」岩波書店（1995）

J.V.ロドリックス 著／宮本純之 訳：「危険は予測できるか！」化学同人（1994）

山口喜一 他 編著：「生命表研究」古今書院（1995）

グラフ変換法 (The Graphic Transformation Method)

茂木健一郎 (もぎけんいちろう)

Department of Physiology, University of Cambridge, United Kingdom
e-mail km10009@cus.cam.ac.uk

1. イントロダクション

私は、現在は上記でpostdocをしています。研究テーマは、視覚における「結び付け問題」や、アクション・ポテンシャルが有限の時間をかけてニューロンからニューロンに伝わる時のニューラル・ネットワークを記述する時空構造はどんなものかといった問題です。私は、もともとは元々は筋収縮（あるいは一般に酵素共役反応）の理論の研究をやっていました。阪大の柳田先生の仕事に魅了された一大学院生だったわけです[4]。今回ご紹介する研究も、この流れから出てきました。

この原稿では、私が発明？した「グラフ変換法」の宣伝をしたいと思います。その理由は、主に、

(1) これが非平衡の定常状態が平衡状態とどう違うのかを、明示的に表せる便利な方法であること（特に、定常状態におけるnet flowの存在を、異なるエネルギー値の間のinconsistencyの結果として表現できること）

(2) それにもかかわらず、数学的にはグラフ変換法はその表現が非常に原始的で、恐らくもっと深い意味があるのだろうけど、わからないこと

この原稿を読んでもくださった皆さんが、原論文 ([2], [3]) に当たって下さり、何か素晴らしい一般化をしてくださると良いのですが・・・

2. King & Altmanの方法

「グラフ変換法」は、KingとAltmanが1956年に発表した化学反応解析のグラフ法に基づいて、それを「改良」したものである。King & Altmanの方法とは、化学反応などを表すMaster equation (1) の定常解を、方向付きグラフを使って表す方法だ。

$$\frac{\partial P(i,t)}{\partial t} = \sum_{j=1}^n K(i,j)P(j,t) - K(j,i)P(i,t) \quad (1)$$

ここに、 $P(i,t)$ は、 i 番目の状態をとる確率を表す。定常状態（平衡状態ではないが、系の状態が時間の並進に対して不変）では、 t を含まないbalance equation

$$\sum_{j=1}^n K(i,j)P(j) - K(j,i)P(i) = 0 \quad (2)$$

を考えれば良い。King & Altmanの方法の要点は、(2)の解が、注目している状態へ向かうspanning in-tree $G_i(m)$ の有効辺の上での反応速度の積の和として書けるということである。(Reviewは[5]参照)。

$$p(i) = \frac{w(i)}{W}$$

ただし

$$W = \sum_{i=1}^n w(i)$$

$$w(i) = \sum_{m=1}^{n_i} \prod_{(s,t) \in G_i(m)} K(s,t) \quad (3)$$

ここにspanning in-treeとは、全ての状態を通り有効辺がある1頂点へ向かう単連結のループのないグラフのことで、例えば

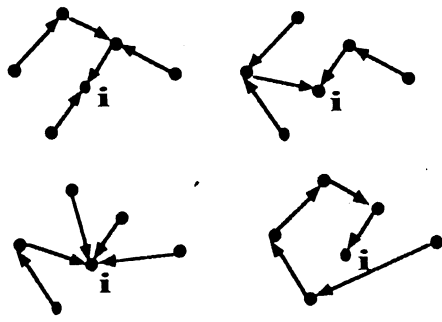


Fig. 1 Examples of $G_i(m)$

Fig.1のようなもの。 n_g は、このようなグラフの数で、一般に非常に大きな数になる。 n 個の状態が全てお互いに結合し合う場合には、

$$n_g = n^{n-2} \quad (4)$$

と書ける。

King & Altmanの方法は、化学反応ネットワークにおける平衡状態及び定常状態において各状態を取る確率を計算する便利な方法として、主にコンピュータによる計算において使われてきた。

3. グラフ変換法

平衡状態における化学反応論では、反応速度の間に、次のようなArrhenius の関係があることを仮定する。

$$\frac{K(i,j)}{K(j,i)} = e^{-\beta(E(i)-E(j))} \quad (5)$$

酵素共役反応([2])、あるいは非対称結合神経回路網 ([3]) のような非平衡状態(定常状態)では、上の式に、次のような平衡状態からのずれの項が加わると考えるのがよい。

$$\frac{K(i,j)}{K(j,i)} = e^{-\beta(E(i)-E(j)+d(i,j))} \quad (6)$$

ただし、 $d(i,j)$ は

$$d(i,j) + d(j,k) + d(k,i) = 0 \quad (7)$$

を満たす。

さて、(3) の表式は、注目している状

態 i に向かっているspanning in-tree $G_i(m)$ 上で表されているが、これを、適当な標準状態 i^0 に向かっているspanning in-tree $G_{i^0}(m)$ 上の表現に変換することを考えよう。このためには、Fig.2に見るように、 $G_i(m)$ において、標準状態 i^0 から注目している状態 i へ至る経路 $P_{ii^0}(m)$ に属する有効辺の向きを逆にし、経路 $P_{i^0i}(m)$ に変換すれば良い(グラフ変換法)。

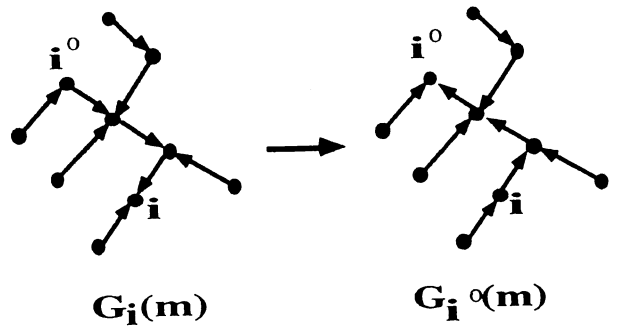


Fig.2 Graphic Transformation Method

Fig.2の変換に伴って、(3) の表式は、

$$\begin{aligned} w(i) &= \sum_{m=1}^{n_g} \prod_{(s,t) \in G_i(m) - P_{ii^0}(m)} K(s,t) \prod_{(s,t) \in P_{ii^0}(m)} K(s,t) \\ &= \sum_{m=1}^{n_g} \prod_{(s,t) \in G_i(m) - P_{ii^0}(m)} K(s,t) \prod_{(s,t) \in P_{ii^0}(m)} K(t,s) \times \\ &\quad e^{-\beta(E(s)-E(t)+d(s,t))} \\ &= e^{-\beta(E(i)-E(i^0))} \sum_{m=1}^{n_g} \prod_{(s,t) \in G_{i^0}(m)} K(s,t) \times \\ &\quad \prod_{(s,t) \in P_{i^0i}(m)} e^{-\beta d(s,t)} \end{aligned} \quad (8)$$

と変換される。この変換の際に、経路 $P_{ii^0}(m)$

上でとられた

$$e^{-\beta(E(s)-E(i))}$$

の積が、両端点 i 、 i^0 を除いては打ち消し合うことが、グラフ変換法がうまくいく最大の理由である。この点は数学的にも nontrivial なところで、その意味が何なのかに興味を引く。なお、(8) の変換では、グラフとして

$$G_i(m) - P_{i^0}(m) + P_{i^0}(m) = G_{i^0}(m)$$

の関係があることも使っている。

(8) の表式は、もし平衡状態からのずれの項 $d(i,j)=0$ とすると、

$$w(i) = w_0 e^{-\beta E(i)} \quad (9)$$

に帰着する。ここに、 w_0 は、標準状態 i^0 だけを含む定数である。(9) は、良く知られた平衡状態の分布の式である。一般の場合には、(8) 式に定数を適当にかけて

$$w(i) = \frac{e^{-\beta E(i)} \sum_{m=1}^{n_g} \prod_{(s,t) \in G_i^0(m)} K(s,t) \prod_{(s,t) \in P_{i^0}(m)} e^{-\beta d(s,t)}}{\sum_{m=1}^{n_g} \prod_{(s,t) \in G_i^0(m)} K(s,t)} \quad (10)$$

を得る。 $d(s,t)=0$ の時、(10) が平衡分布に帰着することは明白だろう。(10) の特徴は、定常状態の平衡状態からのずれが、非対称項 d の関数としてあからさまに表されていることである。これができることが、グラフ変換法の最大の売りだ。

グラフ変換法の結果は、あらかじめ、速度定数を

$$K(i,j) = L(i,j) e^{\frac{-\beta(E(i)-E(j)+d(i,j))}{2}} \quad (11)$$

ただし

$$L(i,j) = L(j,i)$$

$$= \frac{K(i,j) + K(j,i)}{e^{\frac{-\beta(E(i)-E(j)+d(i,j))}{2}} + e^{\frac{-\beta(E(j)-E(i)+d(j,i))}{2}}}$$

(12)

と書き直しておく、

$$w(i) =$$

$$e^{-\beta E(i)} \times$$

$$\frac{\sum_m \gamma(m) \prod_{(p,q) \in G(m)} L(p,q) e^{-\beta \sum_{(p,q) \in G_i(m)} \frac{d(p,q)}{2}}}{\sum_m \gamma(m) \prod_{(p,q) \in G(m)} L(p,q)}$$

(13)

と書くことができ、こちらの方が見通しが良いことがある。何よりも、この形式は、標準状態 i_0 を明示的に含まないので気持ちが良い。ただし、 $G(m)$ は方向を考えない spanning tree である。また、 $\gamma(m)$ は

$$\gamma(m) = e^{-\beta \sum_i \frac{1}{2} (\lambda_i(m)-2) E(i)} \quad (14)$$

と表される。 $\lambda_i(m)$ は spanning tree $G(m)$ において、状態 i に接する辺の数であり、全結合の場合、

$$\sum_i \lambda_i(m) = 2(n-1) \quad (15)$$

を満たす。

4、非対称結合神経回路網への応用

グラフ変換法を、非対称結合神経回路網に適用してみよう[3]。対称結合神経回路網には、平衡状態が存在するが、非対称結合の場合には、平衡解は存在しない。非対称

結合神経回路網は、生物学的に対称結合の場合よりも自然であるばかりではなく、時間を含む情報のコードを考える場合には不可避である。グラフ変換法は、非対称結合神経回路網の解析の有力な手段を提供する。

今、 N 個のニューロンが存在する神経回路網の状態を

$$S = (s_1, \dots, s_N) \in \{0, 1\}^N \quad (16)$$

で表す。ただし1は発火している状態、0は休止している状態を表す。ニューロンは重み w_{ij} のシナプス結合をし、敷居値 θ_i を持つ。標準的なニューロン・モデルの一つであるBoltzmann machineの形式から出発して、二つの状態 $S^p, S^q \in \{0, 1\}^N$ の間の遷移速度が

$$\frac{K(S^p, S^q)}{K(S^q, S^p)} = e^{-\beta(E(S^p) - E(S^q) + d(S^p, S^q))} \quad (17)$$

の関係を満たすことを示すことができる。

ただし、 E は、平衡状態におけるエネルギー関数

$$E(S) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} s_i s_j + \sum_i s_i \theta_i \quad (18)$$

であり、非対称項は

$$d(S^p, S^q) = -\frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (w_{ij} - w_{ji}) (s_i^p - s_i^q) (s_j^p + s_j^q) \quad (19)$$

と表される。シナプス結合が対称($w_{ij} = w_{ji}$)の時は、非対称項は0になることに注意しよう。また、一度に状態を変えるニューロンは1つだけだとすると、考慮する必要のある速度定数の数は

$$N \cdot 2^{N-1} \quad (20)$$

となる。

この系にグラフ変換法を適用し、定常解

を求めると、結果は基本的に(10)と同型になる。というか、非対称神経回路網も、ある条件下で(1)のようなMaster Equationで記述できるので、このような結果になるのである。

この解は、 n_g 個の異なるエネルギー値

$$E(S) + \sum_{(S^p, S^q) \in P_{SS^0}(m)} d(S^p, S^q) \quad (21)$$

がそれぞれ重み

$$\prod_{(S^p, S^q) \in G_{S^0}(m)} K(S^p, S^q) \quad (22)$$

で重ね合わされたと解釈することができる。

(もし、非対称項 $d(i, j) = 0$ ならば、(21)の異なるエネルギー値は、単一の値 $E(S)$ に収束する。) この、異なるエネルギー値が共存することによる「歪み」が、平衡状態に比べた場合の定常状態を特徴付ける量であると考えられる。

というわけでめでたしメデタシのようだが、実はこの場合次元は

$$n_g = 2^{(2^N - N - 1)} \prod_{i=1}^N i^{\binom{N}{i}} \quad (23)$$

と非現実的に大きいので、このままではこの手法は実用的とは言えない。

定常状態において、どれくらい系にnetな流れが存在するかを計算してみる。状態 S^y から S^x への定常流 $F(S^x, S^y)$ を

$$F(S^x, S^y) = K(S^x, S^y)P(S^y) - K(S^y, S^x)P(S^x) \quad (24)$$

で定義する。定常解を代入して整理すると、定常流は、 n_g 個のspanning treeに対応した値

$$F_m(S^x, S^y) = K(S^x, S^y) \times$$

$$e^{-\beta E(S^y)} \left(1 - e^{-\beta \left(\sum_{(S^p, S^q) \in \text{Loop}(S^x, S^y, m)} d(S^p, S^q) \right)} \right) w(i)$$

(25)

の線型和によって特徴づけられることがわかる。ここに、 $\text{Loop}(S^x, S^y, m)$ は、spanning tree $G(m)$ の上で S^y から S^x へ向かう経路 $P_{S^y S^x}$ に、 S^x から S^y へ向かう辺(ユニークに決まる)を加えることによって定義される (Fig.3 (a))。

この定常流の表現で興味深いのは、ループの上で非対称項の和をとる際に、0ではない寄与をするのは、お互いに「絡み合った」(tangled) ニューロンの状態遷移のみであるということだ。「絡み合っていない」(untangled) ニューロンの状態遷移の寄与は、打ち消しあって0になってしまう。

(Fig.3(b)) 残念なことに、グラフ変換法本体と同様、この興味深い結果の意味はまだよく分からない。

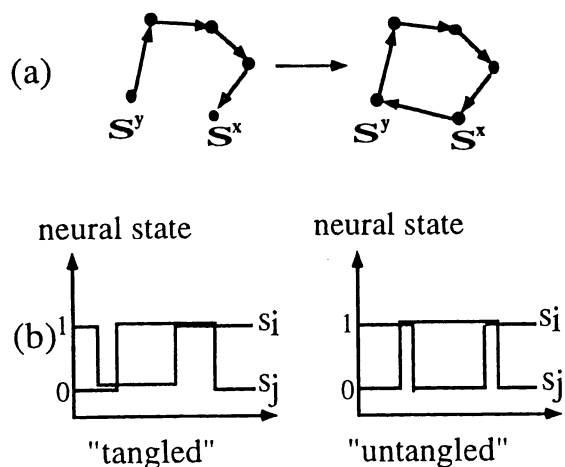


Fig.3 Formation of the $\text{Loop}(S^x, S^y, m)$ and the "tangled" and "untangled" pair of flip-flop transitions

以上が、グラフ変換法の概要である。

グラフ変換法の最大のメリットは、系が定常状態にあるとき、その平衡状態からのずれを、非対称項の関数としてあからさまに表せることである。そして、netな定常流の存在は、複数の異なるエネルギー値の共存による「歪み」の結果として理解できる。

一方、グラフ変換法の問題点は、そのより一般的な数学的表現が見いだされていないところである。つまり、グラフ変換に伴う系を特徴付ける量の変換性が、系のどのような対称性(あるいは対称性の欠如)を表現しているのかが今一つ判らないことである。また、spanning treeの数が極めて大きくなることも、実用上の問題だ。

参考文献

- [1] King, E.L. & Altman, C. (1956). A schematic method of deriving the rate laws for enzyme-catalyzed reactions. *J. Phy. Chem.* **60** 1375-1378.
- [2] Mogi, K. (1993) Graphic Analysis of Coupling in Biological Systems *J.theor. Biol.*, **162**, 337-352.
- [3] Mogi, K. (1994) Multiple-valued energy function in neural networks with asymmetric connections. *Phys. Rev. E*, **49**, 4616-4626.
- [4] Mogi, K. (1994) On the absolute meaning of energy scale $\sim kT$ in the thermal interference involved in enzyme coupled reactions. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, **445**, 529-541.
- [5] Chou, K. C. (1990). Applications of graph theory to enzyme kinetics and protein folding kinetics. *Biophys. Chem.* **35**, 1-24.

神経細胞の非線形ダイナミクスから神経コーディングへ
大阪大学基礎工学部生物工学科 佐藤研究室 土居伸二

大阪大学基礎工学部生物工学科における数理生物学

「数理生物学懇談会へ直ちに（それも妻と共に）入会し、そのニュースレターに生物工学科の紹介もしくは佐藤研究室の紹介もしくは自分の研究紹介でも何でもいいからとにかく原稿を書くこと」これが私に編集長から与えられた使命である。確かに数理生物学懇談会でこの生物工学科がもう少し話題に登ってもいいような気がする。しかし、私が佐藤研究室はもとより生物工学科の紹介を書くのは到底私の能力の及ぶところではない。なので、そのような紹介少しと、ここ数年佐藤教授のもとで行っている研究を少し紹介してお許し願うこととする。

さて、大阪大学基礎工学部生物工学科は昭和42年度に設置された。英語名は Department of Biophysical Engineering である。現在は、ヘモグロビンなどの蛋白を研究している森本英樹研究室、神経生理学の村上富士夫研究室、筋肉の滑り運動機構の研究の柳田敏雄研究室、生体膜やイオンチャネルの研究の葛西道生研究室、人工神経回路網の研究の福島邦彦研究室、そして生体工学の佐藤俊輔研究室の6研究室がある。

この中で、数理生物学に近いのは最後の二つの研究室であり、福島教授はパターン認識モデルのネオコグニトロンで有名であり、神経回路モデルを用いた脳の情報処理機構の解明やそれらを応用した実用システムの開発を目指している。同研究室の倉田講師は生物のパターン形成や脳のトポグラフィックマッピングから進化のモデルまで幅広く数理生物学関連の研究を行っている。

佐藤教授は、確率過程論、信号理論、非線形力学系の理論などの数学的理論を用いて、生体から得られる様々な信号の解析、及び生体に見られる種々の現象や機能の数学モデルを用いた解明を目指している。これまでの研究を（数理生物学にごく近いものだけ）私が勝手にいくつか挙げてみると、南雲-佐藤のモデルとして知られている神経細胞のシンプルモデル、神経細胞の発火活動の確率（拡散）過程モデル、白色雑音を用いて非線形システムを解析する Wiener 展開・Wiener の非線形汎関数の理論（これは網膜内神経回路網の研究などに用いられる）などがある。近年は、後述するような、Hodgkin-Huxley モデルを始めとする様々な神経モデルを用いて、その非線形ダイナミクスの解析や神経系での情報コーディングの研究も行っている。

この他にも当学科には数理生物学に関係の深い実験的研究（私の勝手な見解であるが）がたくさんある。例えば、中岡保夫助教授はゾウリムシの研究で有名で

あり、古くは、その走性の研究から最近はその繊毛運動のダイナミクスなどを研究しているようである。また、筋肉の滑り運動機構の研究や神経生理学など数理生物学の恰好の研究対象がたくさんある。

以上が当生物工学科における数理生物関連の概略であるが、これだけでは編集長の要求を満たすことができないので、佐藤教授のもとで近年行っている研究の一端を紹介することとする。

神経細胞の非線形ダイナミクス

ご存じのように、最も代表的な神経細胞の（膜電位変化を記述する）数理モデルは Hodgkin-Huxley (HH) モデルである：

$$\frac{dV}{dt} = -[I_{Na}(V, m, h) + I_K(V, n) + I_L(V)] + I_{ext} \quad (1a)$$

$$\frac{dm}{dt} = \phi(T)[(1-m)\alpha_m(V) - m\beta_m(V)] \quad (1b)$$

$$\frac{dh}{dt} = \phi(T)[(1-h)\alpha_h(V) - h\beta_h(V)] \quad (1c)$$

$$\frac{dn}{dt} = \phi(T)[(1-n)\alpha_n(V) - n\beta_n(V)] \quad (1d)$$

$$I_{Na}(V, m, h) = \bar{g}_{Na} m^3 h (V - V_{Na})$$

$$I_K(V, n) = \bar{g}_K n^4 (V - V_K)$$

$$I_L(V) = \bar{g}_L (V - V_L)$$

この方程式は、ヤリイカの神経細胞の巨大軸索の電気生理学実験から得られたデータをもとに1952年に作られた現象論的モデルである。また、いわゆる空間固定の式であり、軸索の軸方向の神経インパルスの伝搬は考慮していない。ここで、 V は細胞内の細胞外に対する電位を表しており、 I_{Na} 、 I_K はそれぞれ Na^+ チャネル、 K^+ チャネルを流れるイオン電流、 I_L はその他の漏れ電流の項である。 m 、 h 、 n はいわゆるゲート変数であり、イオンチャネルのコンダクタンスの膜電位依存性を表すために導入された無次元量である（0と1の間の値をとる）。すなわち、 $\bar{g}_{Na} m^3 h$ 、 $\bar{g}_K n^4$ はそれぞれ Na^+ チャネル、 K^+ チャネルのコンダクタンスを表す。また、 m 、 n は膜電位が増加するにつれてチャネルコンダクタンスを増大させるように作用するので活性化変数、 h は逆に作用するので不活性化変数とも呼ばれる。 V_{Na} は Na^+ イオンの平衡電位であり、 Na^+ の濃度が細胞内外で異なるために、それを拡散によって打ち消そうとするときの釣り合いの電位である。 K^+ チャネルについても同様である。

これらのチャンネルコンダクタンスの膜電位依存性が実験データに“合うように” α_m 、 β_m などの関数形は

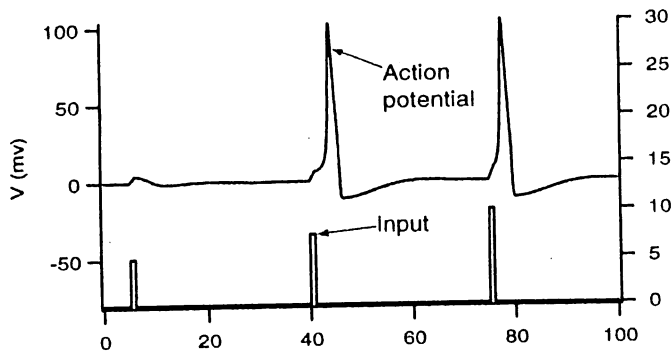


図 1: HH モデルの膜電位 $V(t)$ の時間波形

決められており、このモデルは実験データを定量的にも非常によく再現するがあくまでも現象論的モデルである。図 1 は (1) を数値的に解いて、膜電位の時間波形を示したものである。お馴染みの活動電位 (Action potential) のかたちである。膜電位波形といっしょに入力の矩形波 ((1a) 式での I_{ext} の時間波形) を示した。このモデルは外部から適当な大きさの入力が加えられることで初めて活動電位を発生する (興奮する)。

HH モデルはヤリイカで得られた実験データをもとに作られたヤリイカの巨大軸索という神経細胞のモデルである。ここでは、主として Na^+ チャンネル、 K^+ チャンネルの二つのチャンネルの存在が仮定されていた。生物の種類や神経細胞の種類が異なっても、これらと同種のチャンネルは存在する。しかし、細胞の種類が異なればヤリイカの巨大軸索の場合とは α_m 、 β_m などの関数形や V_{Na} などの平衡電位の値が異なる。また、 Na^+ チャンネル、 K^+ チャンネルとは異なるイオンチャンネルも存在する。

心臓の細胞の電気活動のモデル

図 2 は Noble が心臓の Purkinje (プルキンエ) 繊維のモデルとして提案したもの (Noble モデル) の時間波形である。このモデルは、基本的には HH モデルと同一の形をしているが、 α_m 、 β_m などの関数形や V_{Na} などの平衡電位の値が HH モデルとは異なる。図から分かるように図 1 とは相当異なった活動電位のかたちを持っている。とくにインパルスに続く比較的緩やかなカーブの部分 (プラトー相と呼ばれる) が特徴的である。プルキンエ繊維は心臓を収縮させるために、全体に電気信号を伝導する役割を持っているので、この活動電位のかたちが心臓をうまく機能させるための合目的性を持っているものと考えられる。

Noble モデルは、実際のプルキンエ繊維の実験データに基づいて HH モデルを修正することで得られた。その後、プルキンエ繊維の電気生理学的実験により MacAllister, Noble, Tsien (1975) によって “より精密な” モ

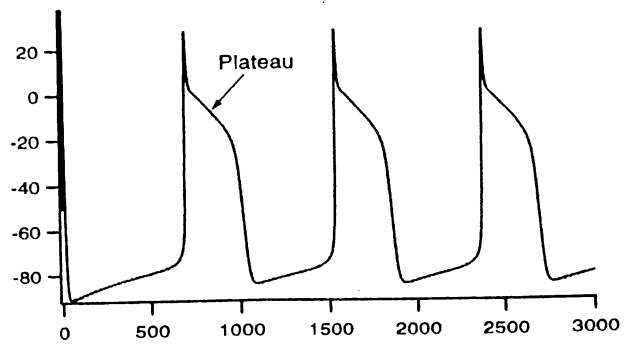


図 2: Noble モデルの膜電位波形

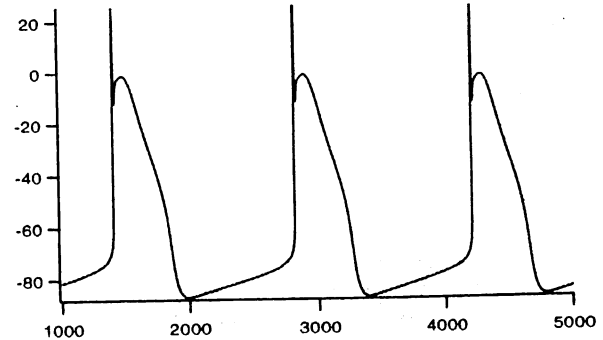


図 3: MNT モデルの膜電位波形

デルが提案された (MNT モデル)。MNT モデルは 4 変数の HH モデルとは異なり、10 変数の非線形連立微分方程式で記述される。それらを全て記述するのは煩雑になるので、HH モデルの (1a) に相当する式だけ記述する：

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -[I_{Na}(V, m, h) + I_{si}(V, d, f) + I_{K_2}(V, s) \\ & + I_{x_1}(V, x_1) + I_{x_2}(V, x_2) + I_{qr}(V, q, r) \\ & + I_{K_1}(V) + I_{Na,b}(V) + I_{Cl,b}(V)]/C \\ & + I_{ext} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで C は膜容量を表す。HH モデルとは異なり合計 9 種類のイオンチャンネルを流れるチャンネル電流が考慮されている。またそれらのチャンネルのゲート変数は 9 種類ある。したがって、HH モデルの (1b)-(1d) に対応するゲート変数の時間変化を記述する式は 9 個ある。

図 3 に MNT モデルの膜電位時間波形を示した。4 変数の Noble モデルとは少し異なった形をしているが、全体としては類似している。この図のような波形を作るためだけなら、Noble モデルのように 4 変数でも (つまり、もっと少ないチャンネル数でも) よさそうである。しかし、現実のプルキンエ繊維にこれほど多種類のイオンチャンネルとイオン電流が存在することはどういう意味を持つのだろうか。

心臓にはプルキンエ繊維以外にも多くの種類の細胞が存在する。Beeler と Reuter (1977) が提案した心室筋

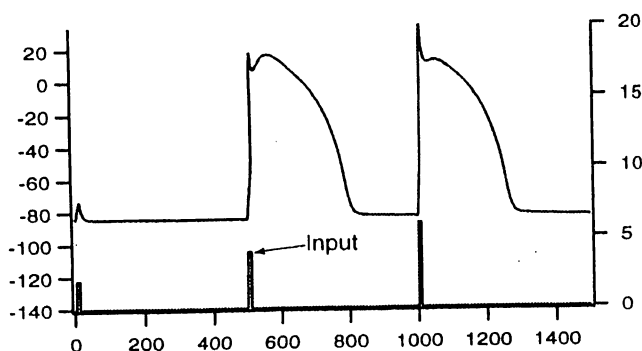


図 4: BR モデルの膜電位波形

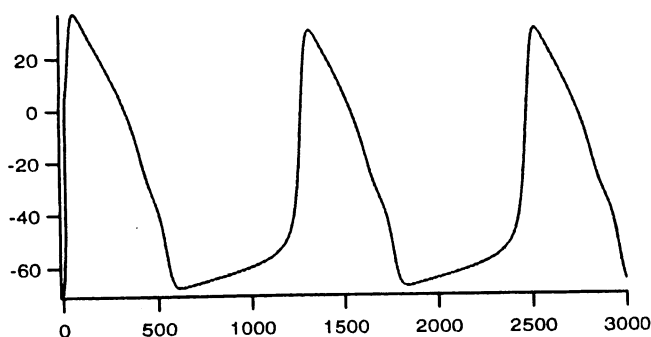


図 5: BR モデルの自発興奮時の膜電位波形

繊維のモデルは 8 変数の微分方程式で記述される (BR モデル):

$$\frac{dV}{dt} = -[I_{Na}(V, m, h, j) + I_s(V, d, f, Ca) + I_{x_1}(V, x_1) + I_{K_1}(V)]/C + I_{ext} \quad (3)$$

ここで、(2) 式と同様にゲート変数に関する式は省略した。ただし、上述の式と異なる点の一つがある。それは、 Ca はいわゆるゲート変数ではなく、細胞内での Ca^{2+} の濃度を表す変数である。したがって、 Ca の時間変化を記述する式は (1b)-(1d) とは形が異なる。

図 4 は BR モデルの膜電位の時間波形を示している。その波形は Noble モデルや MNT モデルと類似しているが、大きく異なる点は BR モデルは外部からの刺激なしには活動電位を発生しない可興奮タイプの細胞になっていることである。つまり、Noble モデルや MNT モデルでは $I_{ext} = 0$ としても自発的に (周期的に) 興奮する性質を持っていた。ところが BR モデルは心室筋のモデルであるので、自分から勝手に興奮 (従って収縮) することはなく、外部 (他の細胞) からの入力を受けてはじめて興奮するようになっている。

ところが、心室筋細胞を適当な (上述の BR モデルを導出した時とは異なる) 実験的環境下においてやると (モデルの言葉で言えば BR モデルのパラメータを少し変更すると) 自発的に活動電位を発生することが知られている。図 5 はその時の時間波形である。この

形は主に心臓の周期的収縮を司る洞房結節部のペースメーカー細胞の振る舞いに非常によく似ている。ほんの少しパラメータを変えただけでも図 4 と図 5 のように相当異なる様相を呈する。心臓の細胞のモデルが複雑になっているのは (現実の細胞に様々なイオン電流が存在するのは) このように、様々な環境に適応した膜電位波形を作るためなのかもしれない。そうだとしたら、これらの膜電位波形の多様性は心臓の機能とどのように関わっているのか。

膵臓の β 細胞のモデル: バースト振動

図 6 は Chay (1985) によって提案された膵臓の β 細胞のモデルの膜電位時間波形である。右図は左の図の拡大図である。連続的に活動電位を発生する活動相 (Active phase) と活動電位を発生しない静止相 (Silent phase) が交互に周期的に繰り返している。このような現象はバースト振動として知られており、膵臓に限らず生体内の (末梢から中枢にいたるまで) 様々な部位の神経細胞において観察される。上述したモデルのふるまいとは大きく異なることが分かる。

以上、様々な細胞の電気的興奮現象を記述する現象論的モデルを用いて、そのダイナミクスの多様性を見た。もちろん、電気的興奮現象を示す細胞はこの他にもたくさんあり、その中でも数式モデルが構築されているものは一部である。本稿で取り上げたのはそのまたごく一部である。

上述したモデルは何れのモデルも数多くのパラメータを含んでいる。それらのパラメータは同種類の細胞でも細胞ごとに異なり、式中のパラメータはそれらの平均的なものと考えられる。また、同一の細胞でも、細胞が置かれている環境が変わればパラメータも変わるし、同一環境でも時々刻々と変化していると考えられる。

本稿で示した波形の例はそれらのパラメータを固定したときの例であり、パラメータを変化させれば、神経モデルの振る舞いは定量的に変わるだけでなく、定性的にも大きく変化する。そのような変化は数学の言葉で分岐 (Bifurcation) と呼ばれる。神経モデルが非常に複雑な非線形の微分方程式で記述されることを考慮すれば、パラメータを変化させれば様々な分岐現象が起こることは想像に難くない。

実際、分岐理論の観点からいくつかの神経モデルが調べられており、余次元 1 の saddle-node 分岐、Hopf 分岐、余次元 2 の Takens-Bogdanov 分岐、degenerate Hopf 分岐、twisted-saddle-loop 分岐、... 例を挙げればきりが無い。標語的にいえば神経モデルは分岐現象の宝庫である。では、いったい神経細胞はこのような分岐現象を生体内での情報処理や制御に利用している

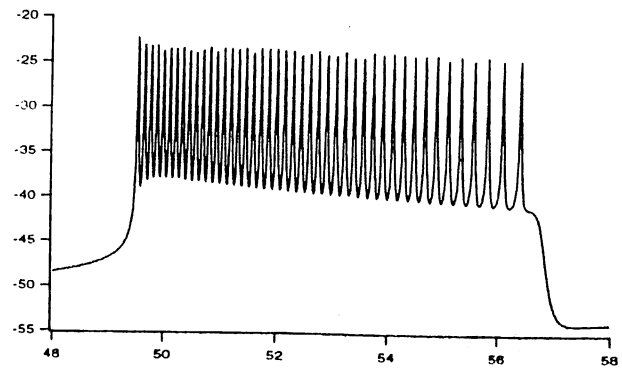
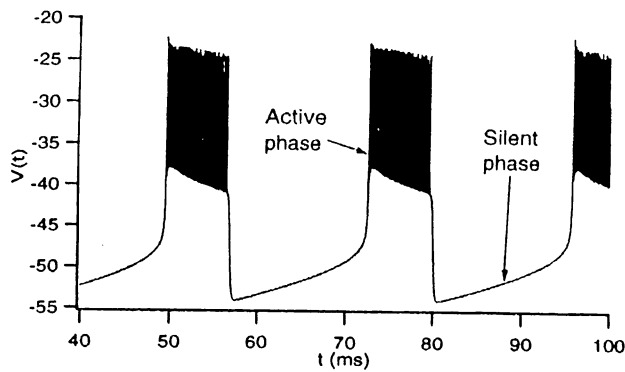


図 6: 膵臓の β 細胞のバースト振動

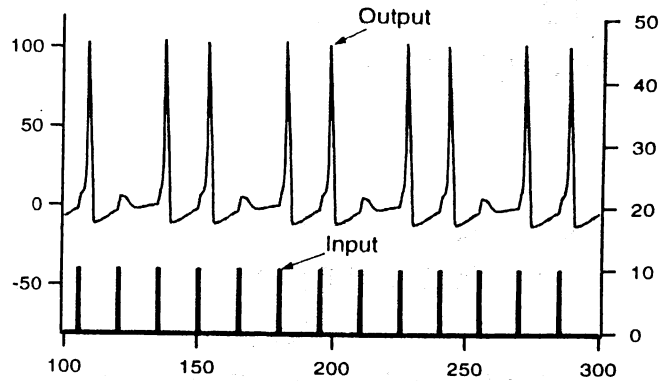
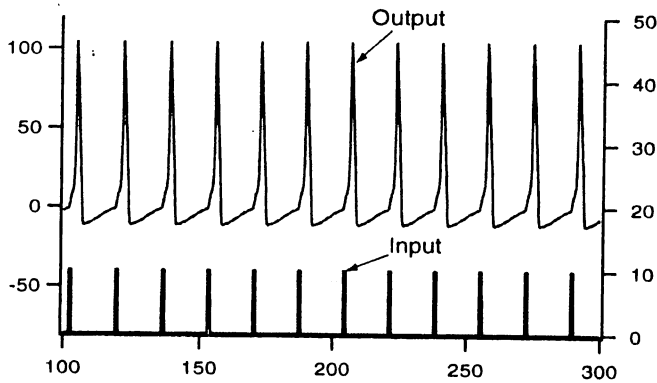


図 7: HH モデルでのパルス列変換

のか. 利用しているとしたら, どのように利用しているのか. 今後の研究が待たれるところである.

神経コーディング

これまで見たのは一個の細胞の“内在的な”ダイナミクスである. 神経細胞は他の細胞からの電気信号(情報)を入力として受け取り, それを細胞のダイナミクスを利用して何らかの変換をすることにより, また他の細胞へ信号を出力する. つまり, 一個の神経細胞は信号の変換素子である. 神経系では活動電位の列, インパルス列に情報が符号化されていると考えられており, その符号化の仕組みや神経細胞において行われているであろう情報の変換機構を解明するのが神経コーディングの研究である.

図 7 は神経細胞(モデル)における信号変換の最も単純な例を示している. これは, HH モデル(1)の外部刺激入力 I_{ext} の項を周期パルス(矩形波)列として, そのときの活動電位波形(出力)を入力と同時に描いた. 右図の方が左図より入力周期が短い. 左の図では入力のパルス全てに対してインパルス(活動電位)が出力されているのに対して, 右図では入力のパルス 3 個に対して 2 個のインパルスが出力されている. つまり, 左では入力信号は何も変換されずにそのまま出

力されているのに対して, 右では神経細胞(HH モデル)において変換がなされている.

これは神経細胞における情報変換の極めて単純な例である. もちろん, ある神経細胞に別の神経細胞から入力されるものは周期信号などといった単純なものではない. また, 1 個の神経細胞はたくさんの細胞から入力を受け, たくさんに出力する. 神経系に限らず生体は数多くの細胞が複雑に入り組んで情報のやりとりをしている. そのような複雑な生体内での情報処理や制御の機構を 1 個や少数個の細胞の非線形のダイナミクスから理解しようという要素還元主義は無謀なことにも見える. しかし, 実際の神経細胞が多様な非線形ダイナミクスを持っている以上, それらを何らかの形で生体全体の機能に利用しているのではないかと考えるのは自然なことではないだろうか.

以上が佐藤研究室で行っている「神経細胞の非線形ダイナミクス」「神経コーディング」に関する研究の概略である(研究そのものの紹介というよりは, その雰囲気だけを伝えるだけだが). ほとんど周知の事実の羅列になった感はあるが, これを見て若い学生さんが一人でも当生物工学科や佐藤研究室に興味を持って頂ければうれしい限りである.

リスたちの戯れる UCLA のキャンパスより

名古屋大学 情報文化学部 有田 隆也
ari@info.human.nagoya-u.ac.jp

緑溢れるキャンパスの中を自由気ままに跳ね回る可愛いリスたちの姿に視線をそれほど動かされなくなってきたこのごろです。私のカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)での10ヶ月間の滞在も半分をすぎました。本小文では、UCLAのこと、生物学科のこと、お世話になっている教授のこと、私のここでの研究のことなどについて、ざっくばらんに紹介させていただくことにします。みなさんの何かのご参考になるのならば幸いです。

☆☆☆☆

UCLAは日本人にもとてもよく知られた大学だと思えます。ファッションや商品名とかでそのロゴがよく利用されたり、スポーツが強いことがその理由ではないでしょうか。比較的軽いイメージが一般にはあると思うのですが、教育水準は高く、西海岸でもスタンフォード大学、カリフォルニア大学本校バークレイなどにひけをとらないレベルにあるとされ、アメリカ全体でも上位にランクされます。学部生22000人、大学院生12000人の規模で、きわめて優雅なキャンパスを誇ります。さまざまな人種を積極的に入学させるという方針のおかげで、実に多様な人種がキャンパスにはあふれています。授業は1年4期制です。1学期10週間で厚い教科書も平気で終わらせるので学生も必死です。廊下でも外でも平気ですわりこんで勉強しています。生物学科の教授であり、また、同校の認知科学研究プログラムのディレクタでもあるCharles Taylor教授のところに私はいます。生物学科は進化、行動、海洋などを含む生態学系統と発生などを含む分子生物学系統とニューロサイエンスなどを含む比較的新しい生理学系統の3つに分かれています。

☆☆☆☆

Charles Taylor教授は集団遺伝学と進化に関する研究を長年行ってきましたが、特に、最近では生物学、計算機科学、数学、人工知能、哲学などを含む複合的領域である人工生命(進化論的計算理論)研究の確立、及び推進のリーダーのひとりとして世界的に活躍しています。1987年から開催されている人工生命に関する国際会議(International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, 略称ALIFE会議、今年の5月に京都で開かれます)の編集委員会に加わっており、また、1993年に創刊された学術誌Artificial Life (MIT Press発行)のAssociate Editorのひとりでもあります。Taylor教授の現在の研究は次の2つに分けることができます。

- 1) 生物学における伝統的な進化理論を拡張し、より一般的な複雑適応システムの構築

や解析のための手法を開発する。

2) 1)で得られた知見を基にして動物生態学や進化に関わる具体的な問題に対して、シミュレーションを行いつつ取り組む。

1)に関しては、Taylor 教授はさまざまな生命的な挙動や特性（知覚、学習、コミュニケーション、評価、移動、死）を示すコンピュータプロセスの研究手法を幅広く追究してきました。UCLAの研究者たちとともに開発してきたシステムとして、Genesys/Trackerシステム、及び、RAMシステムが有名です。また、16000個のプロセッサを持つ超並列コンピュータ上に実現されたニューラルネットワークを用いて、性の進化、あるいは進化と探索に関する一般化にも取り組んできました。2)に関しては、マラリアを伝染する蚊のコントロールを目指すユニークな研究²⁾を行っています。西アフリカに棲息する数千の蚊を捕まえ、マーキングしてから逃がし、それを再び捕獲して群の移動分散を調べる実験を行う一方で、その結果を使って、人工生命の研究手法を用いた超並列コンピュータ上のシミュレーションにおけるパラメータを調整し、両者のギャップをなくしていくというものです。

☆☆☆☆

私はこちらでは授業や委員会のような定期的なすべき義務は基本的にはありません（文部省在外研究員「平成7年度海外研究開発動向調査」はいうまでもない職務ですけど）。研究者として実に幸せな時間をすごさせてもらっています。定期的に行われるセミナーには内容次第でいろいろ顔を出しています。さまざまな人たちの興味深い話をキャンパスにいながらにして聴けるのですから。そのひとつが、毎週月曜日に開かれる「認知科学研究プログラム」主催のセミナーです。いくつか印象に残った話をあげますと、Colin Allen, "Why be Conscious?"やMark Bedau, "Emergent Models of Supple Dynamics of Life and Mind"です。「進化と生命の起源に関する研究センター」主催のセミナーも毎週水曜日に開かれており、さまざまな話が聴けます。Jerry Joyce, "Experimental Simulation of the RNA World"やGreg Stock, "The Future Evolution of Homo Sapiens"などです。さらに同センター主催の年一度のシンポジウムにも出席できました。今年は「知性の起源と進化」がテーマでして、Robert Seyfarth, "Function and Intention in the Natural Vocalization of Primates", Steven Pinker, "The Language Instinct", あるいは、Sue Savage-Rumbaugh, "Communication with Chimpanzees"などのオールスターキャストの講演が聴けました（最後のパネルディスカッションのときには92歳のあのErnst Mayr博士が質問をして大いに盛り上がりました。後日、Taylor教授らとともに博士と昼食を一緒にする機会にもめぐまれました）。

☆☆☆☆

こちらで私は言語／通信の進化というテーマに関して、人工生命研究の手法を用いて研究しています。もともと東京大学工学部計数工学科の中野馨先生のご指導のもとで卒業研究として四苦八苦して作り上げたモデルがありまして、それは（人工）ニューラルネット

ワークで構成された脳をもつ一組の仮想生物間でどのように情報を伝え合うようになるかということを検討したものです。それを多数の集団が世代交代をしながら進化論的枠組みの中でどのように言語を確立し、進化させていくかという方向に進めています³⁾。言語というにはまだほど遠いシンプルなモデルですけれど、Robert Seyfarthらの研究したヴェルベットモンキーのような単純な信号ではなく、概念の抽出などを含むもう少し高度なレベルの通信を、人が明示的に埋め込むのではなく、進化メカニズムにより創発できないかと取り組んでいます。同時に、計算機科学科にあるロボット群を用いて実際に言語を進化させて協調的に効率よく仕事ができるようになるかを試しています。もうひとつ、これは名大の人間情報学研究科の大学院にいる小鹿君と行っているテーマですが、捕食者被食者間の相互作用の中の特に体表パターンによる対捕食者防御（仮装、擬態、混同など）に注目し、その進化メカニズムをばっさりと単純化形式化してモデルを作っています。それを用いて計算機上で美しいカラーパターンを次から次へと自動的に生成するシステムを構築しようとしています⁴⁾。この研究は以前本誌に報告したテーマ⁵⁾の延長線上にあるものです。

★☆☆☆

私のUCLA滞在に関連することを簡単に書きましたが、もし、何かご興味のある点などございましたらお問い合わせください。

参考文献

- 1) "UCLA Campus Guide", UCLA Japanese Student Association, 1995.
- 2) J. Carnahan, S. Li, C. Costantini, Y. Toure and C. E. Taylor, "Computer Simulation of Dispersal by Anopheles Gambiae s.l. in West Africa", Artificial Life V, 1996 (in press).
- 3) T. Arita and C. E. Taylor, "A Simple Model for the Evolution of Communication", The Fifth Annual Conference On Evolutionary Programming, 1996 (in press).
- 4) T. Arita and A. Ojika "Generation of Color Patterns Based on the Interactions between Predators and Prey", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996 (in press).
- 5) 有田隆也, "捕食関係に基づく生物群進化に関する人工生命的アプローチ", 数理生物学懇談会ニュースレター, No. 16, pp. 10-13, 1995.

(1996年3月15日)

ウッズホール村、あの至福の時間

北海道東海大学国際文化学部 高田 壮則

もう一年半以上も前のことで時宜を失した感があるが、約5ヶ月間の海外留学のチャンスを得て米国に赴いた時の様子を手短かに紹介したい。滞在先はマサチューセッツ州にあるウッズホール海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution; 以後 WHOI: 現地の人は「フーイ」と呼んでいた) という私立の研究所で、アメリカ西海岸のスクリプス海洋研究所と並ぶ東海岸の海洋研究のメッカである。ここ十年来、植物の個体群生態学に関する推移行列モデルを扱ってきた私が何故海洋研究のメッカへ?との疑問をもたれる方もおられるかも知れない。私自身にとってもホストプロフェッサーの Hal Caswell 氏が海洋研究所に在籍していることは不思議なことであった。WHOI の生物学部門に所属している氏は、世界的に有名な生物学における推移行列モデルの研究者であり、研究論文も海洋関係の論文に偏っていたわけではない。いや、むしろ植物学者との共同研究や植物を意識しての数理モデルが多いような印象を受けていた。だから、私の研究の実質上の大先輩であり、また非常に近い同業者であると思っていた。そのため、私の当地での研究テーマは「多年生植物の生活史進化に関する数理的解析」と設定した。今思えば、海洋研究所ということから何のクレームもつかなかったのだろうか?よくも受け入れてくれたものだ。

WHOI はマサチューセッツ州の州都ボストンから約100マイル、車で2時間半ほど南へ下ったケープコッドの西南端に位置する。ウッズホール村は、17-19世紀には捕鯨船団の基地として栄えた港町である。その時代に、ジョン万次郎は嵐で遭難し無人島に漂着したところを捕鯨船に助けられ、のちにマサチューセッツ州に連れて来られたと記憶している。村は20世紀に入って捕鯨漁業が衰退してくるにつれ荒廃してきた。WHOI はその頃 (1930年)、数人の研究者有志たちの努力によって私立の研究所として設立された。ウッズホール村は Times 社の Atlas にも掲載されていない人口7千人の小さな漁村であり、その村の最大の企業がこの私立の研究所である。ボストンのローガン国際空港からは1日に数便の高速バスを利用してアクセスが可能であるが、Caswell 氏は、初めてのゲストにはわかりにくいだらうということで私が投宿した空港近辺のホテルまで自家用車で迎えに来てくれた。WHOI の中にある客員研究員のための宿舎は研究所から歩いて約15分ほどの距離にあり夜遅くまで研究をしても困らないようになっている。宿舎の建物は、以前は村民が住んでいたと思われるこじんまりした民家を買って上げて若干の手を加えたもので、まさにニューイングランドの片田舎のたたずまいである。しかし、夏には、臨海実習の学生や全世界からの研究者たちの来訪で宿泊の予約が困難になるほど賑わう。昭和天皇が生前に渡米した時に、侍従に「立ち寄りたい所はないか?」と聞かれ、この研究所の名を挙げたという話は有名である。その宿舎には6年以上も住んでいるという中国や

ロシアの研究者などもいて実に国際色豊かである。私はそこに約20日間滞在し、その後の生活のための住居を借りることとなった。生活するうえで欠かせないのは住居、自家用車、保険、銀行口座などであるが、それらをすべて整えるのに約3週間の時間を要した。

当初の予定どおり、ウッズホール到着の十日後、ちょうど日本のゴールデンウィークの時期に国際シンポジウムが開催された。Caswell氏によるこの会のネーミングは、"The first accidental symposium on matrix population models and applications"であった。たまたま数ヶ国の研究者が同時期に集まった機会を利用してのシンポジウムに対する彼のユーモアが感じられるネーミングであった。氏の主導のもとで推移行列モデルを現実の生物集団へ応用する研究を試みているスウェーデン、ベネズエラ、マサチューセッツ大学からのゲストを交え、日本からは私が、またWHOI所属の若き研究者達が参加し、1日かけて研究発表会が行われた。総勢9名の講演は刺激的であり、非常に興味深いものであった。というのも同じ推移行列モデルという数理的手法を用いているが、対象としている生物集団は二枚貝数種、プランクトン、鳥、温帯・サバンナ・極地に生育する多年生植物と多岐にわたり、また推移行列モデルの応用の仕方も、各人が対象としている生物種の特徴を反映するように工夫され多様であったからである。

Caswellのもとには、ポスドク、大学院生あわせて4人の若き研究者がおり、客員研究員の私とコンピューター専門の技術員をあわせると総勢7名の構成であった。Danという名のこの技術者はCaswellがWHOIに採用されるときに要求して雇ってもらったそうだが、WHOIでは様々な種類のテクニシャンが充実していた。Graphic serviceやPhoto labでは、スライド作成や図作成、果てはポスター発表のためのポスターを作ってくれるスタッフがいて、日本でもこのようなシステムを取り入れて欲しいと強く思った。現在の日本では、コンピューターのメンテナンスから始まってほとんどすべての作業は研究者が自前でやるのが当たり前になっている。Caswellの研究室では、コンピューターに関するトラブルはすべて

Danに頼めば次の日には何とか解決してくれていた。ソフトやシステムのバージョンアップも彼の職務である。もう一つ、日本でも取り入れて欲しいと思ったシステムは、WHOIの図書館のシステムである。24時間オープン、論文コピーサービス（雑誌にコピーして欲しい部分を書いたフォームを挟んでおくと、二、三日後に配送されてくる）。書籍の貸し出しは職員を介さずに自己申告で行う。この原則なので、24時間オープンが可能になっている。おっと、寄り道が過ぎたようだ。Caswellの講座の話に戻そう。面白いのは講座のメンバー7名の国籍である。日本、メキシコ、アルゼンチン、カナダ、アメリカと5カ国にわたっていた。基本的には英語でコミュニケーションが行われているが、時にはスペイン語が、また時にはフランス語が飛び交うこともあるといったインターナショナルな雰囲気であった。これらのメンバーも含めて数理生物学に興味のある人々が週に1回集まってセミナーが行われていた。議論する題材をCaswellが提供したり、あるいは個々人の研究の中間発表が行われたり、ゲストが訪れたときにはその講演を聞いたりというように

運営されていた。私の滞在中に九州大学の巖佐氏がたまたま訪れたときにもこのセミナーで話していただいた。この参加者の中には、本年日本で開催される Kyoto Conference on Mathematical Biology に参加される Andrew Solow 氏も含まれていた。

7月にはいって夏休みが始まると、通例の "Geophysical Fluid Dynamics Seminar" が約2ヶ月間にわたって開催され、それに参加した。このセミナーは12年前から行われ、会期の間アメリカ全土から講師が招聘され、毎日異なる講師の講義を午前中約2時間受講するというものである。午後は講師、聴講生たちの間の議論に費やされる。聴講生たちもアメリカ全土から申し込み、その期間研究所の宿舎で寝起きを共にする。招聘される講師たちは海洋物理学における偏微分方程式モデルを専門とする研究者が中心で、いく人かは過去12年間にこのセミナーを受けた全米からの聴講生たちが成長した姿である。このセミナーをきっかけに、ウッズホールにいながらにして Simon Levin, R. A. Armstrong, S. D. Tuljapurker などの数理生態学者たちとの交流をはかることができた。

8月初めにはテネシー州ノックスヴィルで開催された AIBS (American Institute of Biological Sciences) の第45回の年会に参加しポスター発表を行った。この年会は、アメリカンシダ学会、植物分類学会、植物学会、生態学会など8学会の合同の年会で多くの北米の生物学者たちが集まる。また、ノックスヴィルのすぐ近くのオークリッジにはオークリッジ生物学研究所があり、その研究所の数理生物学部門の研究者やテネシー大学の数理生物学部門の人々と交流をもてた。というのも、その年会が開催される前日に、テネシー大学の

Hallam 教授の別荘（これがまた土地も広く、なんてもんじゃない。一山全部が所有地）でテネシー風バーベキューパーティーが行われたからである。Caswell はそのようなパーティーがあると必ず私を誘ってくれた。私の滞在中、月に二、三回は何らかのパーティーに参加していたように思う。バーベキューパーティーというと串焼きの牛肉を連想するが、テネシー風とはハンバーグステーキや牛肉のフレークをハンバーグ用のパンの間に挟んで食べるという形式のバーベキューであった。所変われば、である。そこには、DeAngelis, Levin, Hastings, Nisbet およびオランダから訪れていた Koojiman、Hallam 教授の所の院生が参加していた。8月末には短期間であるが、英国 Manchester で開催された国際生態学会に出席し発表した。日本人の参加者が異常に多く、逆にアメリカやカナダの北米からの参加者が少ないのが驚きであった。AIBS に参加したときに多くのアメリカ人が「参加する予定だったがやめた。」と話していたことを思い出した。会期が近すぎたのも北米からの参加者が少ないことの大きな要因だったろう。

これらの諸行事の間に、共同研究者である Caswell 教授とは "A mathematical analysis on delayed maturation (繁殖遅延*に関する数理的解析)" のテーマのもとに研究を行った。これは、どのような問題を解析するべきかを議論し、1週間の間解析を進めて、解析の結果を毎週議論・検討するというスタイルで進められた。彼は忙しいときでも、週に3時間は私との議論の時間をとってくれた。大変感謝したいところなのだが、逆にこれはなかなか

のプレッシャーであった。1週間の間に議論するに足る結果を出さなければならなかったし、3時間も英語を1対1で話し続けていると頭の中の言語中枢が麻痺してくるような感覚を経験する。それが徐々に楽になってきた頃に帰国せざるを得なかったのは非常に残念であった。留学をされる後輩諸子には最低1年以上、できれば2年の留学をおすすめしたい。

Cole(1954)以来、生物の生活史戦略の進化に関するいくつかの問題が数理生態学の分野で扱われてきたが、その中でも繁殖遅延の問題は1980年代に入ってから比較的新しいものである。理論的に考えれば、もし生物個体が誕生後すぐに成熟して繁殖することが可能ならば、その個体は高い適応度が得られるだろう。内的自然増殖率を計算すれば大きい値になるだろうと予想されるからである。その結果として、自然選択によって、誕生後すぐに繁殖可能になるタイプが多く存在するべきだと考えられるが、多くの生物では繁殖を開始するまである程度の期間、未成熟な状態の時期がある（繁殖遅延と呼ばれる）。上記の我々の共同研究ではその現象の適応的意義を考えるために、繁殖遅延が適応的に有利になるための主要な条件をもとめた。その条件は3つにまとめられる。

- (1) 成熟時期が遅れるほど、成熟個体の繁殖能力が増し繁殖率が增大する場合
- (2) 成熟時期が遅れるほど、繁殖によるコストが低下し、死亡率が減少する場合
- (3) 成熟後、急激に個体の死亡率が増大する場合

条件(1)と(2)の一部は、スイス、バーゼル大学のStearns一派の精力的な研究によって、繁殖遅延が有利となる仮説として提示され、数理モデルを使ってそれらの仮説が成立することが確かめられている。我々の研究は繁殖遅延が有利となる新たな仮説を一つ提示する(3番目の条件)とともに、Stearnsらの2番目の仮説の幅を広げたものとして位置づけられるだろう。

本年2月7日に恩師寺本英先生が逝去された。留学が決定した際にご報告したところ大変喜んでくださり、また帰国のご挨拶にうかがった時にも楽しそうに土産話を聞いてくださった。このようにまとまった形で文章にしたものをご覧になったら、「あいつ遊んでばかりや。」などと苦笑いをしてくださったことだろう。遅まきながらの報告であるが、寺本先生の霊にこの小文を捧げたいと思う。

* delayed maturation を「繁殖遅延」と訳することには若干の抵抗があるが、きちんと確立された訳語が見あたらないため、ここでは「繁殖遅延」としておいた。

Macintosh を使った WWW サイト

大阪大学理学研究科数学専攻 岩崎晃也

高橋研究室修士1回生の岩崎といいます。以前試験的にマックでWWWサイトを立ち上げようとしたことがあるので、さっちゃん（高橋先生）に書いたら？と言われました。現在はUNIXでホームページを立ち上げています。マックを使ったWWWの立ち上げ方は、宮崎医科大学のホームページ (<http://www.miyazaki-med.ac.jp/MMC-HP.html>) あるいは長崎大学の山内さんのページ (<http://133.45.208.37/>) にも紹介されています。

ネットワークに繋ぐ

WWWサーバーを立ち上げるには、まずマックがインターネットに直結していて、MacTCPがインストールされていることが必要です。最近では多くの大学がネットに直結していますがまだのところもありますので、そのへんは詳しい人に聞いて下さい。

マック用の HTTPD ソフトを入手する

WWWのページを送るソフトをHTTPD（ハイパー・テキスト・トランスファー・プロトコル・デーモン）と呼びます。フリーウェアから数万円するものまでいろいろありますが、ほとんどネットから入手可能です。代表的なものには

httpd for Mac 1.3b、フリーウェア

MacHTTP2.2、教育機関 \$65、その他 \$95

WebSTAR、教育機関 \$295、その他 \$499

などがあります。httpd for MacとMacHTTP2.2は、Info-macのミラーサイトから入手できます。WebSTARはMacHTTP2.2を改良したStarNine社の製品ですが、<http://www.starnine.com/webstar/> から入手可能で、10日間の無料試用ができます。私自身はMacHTTPとWebSTAR（10日間だけ。）で試していました。

ソフトの選び方ですが、財布に余裕があれば、WebSTARがいいでしょう。MacHTTPはバックグラウンドで動きますが、一度に大量のアクセスがあると動作が極端に重くなりどうしようもなくなることがありました。フリーのhttpd for Macは試していないので、何とも言えません。WebSTARはその辺を解決しているようで、確かに動作は軽く感じました。逆に、もう使わない古いマックなどをサーバーにする場合には重くなっても構わないでしょう。

ソフトのインストール

インストールは無茶苦茶簡単です。UNIXのように、自分のマシンに合わせてどうこうということは一切必要無く、一般のアプリケーションと同様にインストールできます。それぞれのソフトのreadmeファイル等を参考にして行って下さい。大体StuffIt Expanderで解凍するだけでしょう。インストールが完了したら、HTTPDを立ち上げた状態でWWWブラウザを使って試して下さい。

`http://あなたのマックのアドレスあるいはIPアドレス/`
があなたのサーバーのURLです。MacHTTPとWebSTARでは、さいごのスラッシュの後のファイル名を省略するとHTTPDのあるフォルダのdefault.htmlというファイルが参照されます。同じく、

`http://あなたのマックのアドレスあるいはIPアドレス/japanese/`
などとすると、HTTPDのあるフォルダのjapaneseというフォルダの中のdefault.htmlというファイルが参照されます。

サーバーとクライアントは同一マシンでも問題ありません。うまくインストールされていれば、MacHTTPやWebSTARのデフォルトのページが表示されるはずですが。

またよく見かけるURLに `http://www.` で始まるものがありますが、これは1つのマシンにわざわざ `www.` というもう1つのホスト名を与えている場合がほとんどです。ネットワークの管理者に相談すればもらえるかもしれません。例えば阪大の自然科学棟（ワニドメイン）のURLは `http://www.wani.osaka-u.ac.jp/` となっていますが、`http://ikoma.phys.wani.osaka-u.ac.jp/` でも同じようにつながります。

自分のページを作ろう

それでは自分のページを作りましょう。ホームページのファイル名をdefault.htmlにすれば、URLを簡略化できます。ページは必ずHTTPDのあるフォルダの中になければいけないので注意して下さい。フォルダの下にさらにフォルダを作るのは一向に構いません。

HTML について

ページを書くには、HTMLと呼ばれる命令付きテキストを使います。好きなエディタを使って書いて構いません。命令（タグと呼ばれる。）については、

`http://w3.lab.kdd.co.jp/technotes/HTML/html-enhanced.html`
に詳細が載っています。最新のHTML 3.0やJavaScriptについての説明もあり、ほぼ完璧なマニュアルであると思います。私はいつもこのページをエディタの隣においてHTMLを書いています。

今回はそのうちよく使われるものをいくつか紹介します。タグは大文字でも小文字でも構いません。高橋研のページを例として書きましたので、時間があればソースをダウンロードして見比べながらお読みください。アドレスは
<http://starking.math.sci.osaka-u.ac.jp/~takahasi/takahasi.html> です。

1.<HTML>...</HTML>

この文書がHTMLで書かれていることを示し、全ての文書をこの<HTML>と</HTML>の中に挟むように書きます。

2.<HEAD>...</HEAD>

この中には、タイトルやスクリプトなどのヘッダ部分を入れます。

3.<TITLE>...</TITLE>

書類のタイトルを書きます。これがブラウザで見たときのウインドウのタイトルとなります。我々のホームページでは

```
<title>高橋研究室ホームページ</title>
```

となっています。

4.<BODY>...</BODY>

本文は全てこの中に挟みます。

5.

改行します。ソースが改行されていても、このタグが無い限りブラウザで見たときには改行されません。

6.<P>

改行し、さらに1行開けます。

7.<H_y>...</H_y>

見出し等を書きます。yは1から7までの数字で、小さいほど大きな見出しになります。見出しは太字で書かれ、自動的に改行されます。我々のホームページでは

```
<H2>高橋研究室ホームページへようこそ！</H2>
```

となっています。

8.bbb

リンクを張ります。ブラウザでみると、bbbの部分が違う色で見えます。ここをクリック

するとaaaのアドレスへ飛ぶことができるのです。aaaはフルアドレスでもかまいませんし、自分のサイトの他のファイルへのリンクならば、ファイル名だけでも構いません。また、aaaをmailto:メールアドレス とすることでブラウザからそのアドレスにメールを送ることができます。我々のホームページでは

```
<a href = "intro.html">現 4 回生によるゼミ紹介</a>
```

```
<A HREF="http://gi.ics.nara-wu.ac.jp/">奈良女子大学 重定研究室</A>
```

```
<a href="mailto:iwasaki@diana.math.wani.osaka-u.ac.jp">僕に連絡して</a>
```

などを使っています。

9.

画像を貼ります。aaaには自分のサイトのファイル名はもちろん、フルアドレスを使えば世界のどのサーバーの画像も自分のページに貼ることができます。ただし、遠いサイトを指定すればダウンロードに時間がかかりますし、無断で他人の画像を自分のページに貼り込むのはよくありません。我々のホームページでは

```

```

などを使っています。

マックならではの注意点

マックはUNIXと違ってファイル名の自由度が高くスペースなども使えますが、HTMLを書いたファイルの名前には使えません。

また、画像のフォーマットとしてマックでは標準のPICT形式は使えません。UNIXやWindowsでは見れないからです。世界標準のGIF形式やJPEG形式を使って下さい。その際、.gif や .jpg などの拡張子が必要となります。

以上で簡単なWWWサイトが作れると思います。あとはたくさんの人に宣伝して自分の作ったページを見てもらいましょう。知り合いのページにリンクを張ってもらうのもよい方法です。

また、たいていのブラウザではWWWページのHTMLソースを見ることができます（例えばNetscape 2.0ではViewメニューのDocument Sourceを選ぶ）。他人のサイトを見ていて「これどうやってるんやろう？」と思ったときはソースを見て研究しましょう。

工学部における数理生物学の存続と絶滅 静岡大学工学部システム工学科の紹介

竹内 康博

数年前から計画されていた静岡大学工学部システム工学科が昨年発足し、現在80名の第1期生を迎えました。今年4月からは学科学定員が30名増え、理工学研究科博士前期課程システム工学専攻（学生定員26名）博士後期課程システム科学専攻（定員8名）と積み上げられることになりました。完成時には教授13、助教授11、助手9のスタッフ構成となり今後教授4、助教授4、助手7名を採用していく予定です。システム工学科はシステム数理、システム情報、環境システム工学、光電システム工学の4大講座からなり、前2者がシステム工学の基礎、後2者が応用を担当する構想です。

工学部は、一般的に「ものづくり」をめざした学部ですが、私がシステム工学科設立に関わる中でもち続けている基本的視点は「ものづくり」に直接関わらない学科や講座があってもよいのではないかとということです。システム工学そのものが個々の工学技術を要素としてそれらを組み合わせて大きなシステムをつくるものであり、逆に環境や社会といった複雑で巨大なシステムを解析するための手法を与えるものであるからです。この観点からシステム数理講座の柱はモデリング、最適化、制御となっていて、システム情報講座とは計算機を用いたシミュレーションというキーワードで関連づけられています。大学院博士前期課程では、上の3つの柱を発展させ「自然の数理論」「社会の数理論」「非線形モデリング論」「最適化理論」「非線形制御論」といった科目を設け、これらは後期課程の自然や社会における複雑なシステムをモデリング・解析する分野と物理系と環境を含む巨大複雑系を扱う分野へと結びつけられています。

このようなシステム数理講座の全体像の中で数理生物学は存続できるでしょうか？組み合わせ最適化問題に遺伝的アルゴリズムを適用したり、生物や人工のシステム一般を相手にする枠組みとして人工生命が脚光を浴びていること、離散的なロジスティックモデルで発見されたカオスが工学の諸分野で現実的に応用されつつあること、等々。生命現象を数理的に理解しようとする数理生物学は工学において「知的技術」を産み出す宝物として発展できるのではないかと考えています。

システム数理講座は近々、教授、助教授、助手の各1名の新しいスタッフを採用します。また、博士前・後期課程の学生も募集しています。数理生物学懇談会の会員が応募して下さいます。

4月からの私の研究室は、D2が1名、M1が2名（4年生は未定）となります。私は、これまでロトカ・ヴォルテラモデルの大域的安定性を中心に、環境へのパッチ構造の導入や新しい種の導入が生態系における生物種の存続や絶滅にどのように影響するかを調べてきました。最近は、（1）時間遅れをいれた伝染病流行モデルや（2）リサイクリングプロセスを考慮したケモスタットモデルの安定性と（3）薬物を赤血球に封入してから点滴するという医学上の治療方法に対する最適制御問題等を考えています。D2の馬君は不等式を用いた中立型遅延微分方程式系の安定性とその数理生態モデルへの応用を調べています。M1の梶原君は、電気回路システム（やはり時間遅れのはいった方程式）の安定性とカオスを、日高君のテーマは未定です。対象は生物から工学システムまで、何か面白い現象を見つけてきて、それをモデル化し解析しようということが私の研究室のテーマです。

最後にコマーシャル： この春に World Scientific Pub. から "Global Dynamical Properties of Lotka-Volterra Systems" が出版されます。

静岡大学工学部システム工学科教授、 助教授（又は講師）公募

公募人員: 教授 1 名、助教授（又は講師） 1 名

担当分野: システム工学分野における教育と研究に熱意があり、

(i) 主として社会や環境、生態システムまたは工学システムにおける数理モデリングに関する講義

(ii) システム工学におけるオペレーションズリサーチの理論の講義のいずれかを担当できる方。

応募資格: 博士の学位を取得している方（取得見込みを含む）

着任時期: 平成 8 年 10 月 1 日以降できるだけ早い時期。

提出書類: ! 履歴書（写真貼付）

’ 研究業績（著書、論文、研究発表等）の目録

主要論文の別刷りまたはコピー

\$ 推薦書または本人に関する所見を求めうる人の氏名

% 教育と研究についての抱負（2000字程度）

公募締切: 平成 8 年 7 月 19 日（金）必着

書類の送付先及び問合せ先:

封筒に応募書類在中と朱書きの上、下記まで簡易書留で送付して下さい。

〒432 浜松市城北 3-5-1

静岡大学工学部システム工学科 竹内 康博

Tel:053-478-1200

e-mail:y-takeuchi@ipch.shizuoka.ac.jp

* 補足 *

平成 7 年 10 月 1 日に発足した本学科は 4 大講座—システム数理、システム情報、環境システム工学、光電システム工学—で構成され理工学研究科博士前期課程システム工学専攻、同後期課程システム科学専攻または電子科学研究科と積み上げられています。本公募はシステム数理講座の 2 つの柱である数理モデリングとオペレーションズリサーチの分野のいずれかを担当できる教授、助教授を 1 名ずつ求めるものです。

数理生物学京都会議

1996年 6月9日~6月13日, 京都

この国際会議は、数理生物学における最新の成果について、相互に情報と議論を交わす目的で開催されるものです。今回の会議では、集団ダイナミクス、生態系プロセス、進化生態学、パターン形成の研究を焦点として、理論から応用まで幅広い話題に関する発表と討論が期待されます。

ADVISORY BOARD

S.A. Levin, 松田博嗣

✱

組織委員会

重定南奈子 (chair), V. Capasso, D. DeAngelis

O. Diekmann, C. Godfray, A. Hastings, 三村昌泰

山村則男, 中島久男, 川崎廣吉, 難波利幸, 巖佐 庸

嶋田正和, 東 正彦, 松田裕之, 瀬野裕美, 高須夫悟

✱

共催

数理生物学懇談会

✱

後援

日本生態学会, 個体群生態学会, 日本生物物理学会

日本応用数理学会, The Society for Mathematical Biology

The European Society for Mathematical and Theoretical Biology

✱

予定スケジュール

6月9日

(夕方)

参加受付&レセプション

6月10日

(午前)

Special Lectures

Levin, S.A. "Akira Okubo and Theoretical Ecology: A sampling of work inspired by the master of Diffusion"

Segel, L.A. "Population dynamics of the immune system"

(午後)

Poster session

organized by 難波利幸, 松田裕之

ポスターセッションは、今回の会議の研究交流の重要な場の一つであり、特別講演の後を受け、初日の午後に行われます。また、ポスターは会議の終了時までそのまま展示してもらい、参加者がいつでもポスターを見ながら著者と議論することができるよう配慮します。会期中を通じてポスターの周りで議論の花が咲くことを期待しています。ポスター発表として国内外から70件程度の研究を発表していただきますが、口頭発表のセッションテーマを越え、数理生物学のより広い範囲をカバーするものになるでしょう。発表者の氏名・題名等の詳細については、4月末に発行予定の3rd circularをご覧ください。

6月11日

(午前)

Session 1: Ecosystem Processes

organized by 東 正彦, D.L. DeAngelis

- DeAngelis, D.L. "Modeling the spatial population dynamics of a fresh water mussel species (Hooi Ling Lee & D.L. DeAngelis)"
Loreau, M. "Grazing optimization and nutrient cycling: some laws emerging (M. Loreau & C. de Mazancourt)"
Cohen, J. "(to be announced)"
Solow, A. "(to be announced)"
Cosner, C. "Models for predator-prey systems at multiple scales (C. Cosner & R.S. Cantrell)"
Higashi, M. "Trophic pyramid and nutrient cycling (M. Higashi & E. Teramoto)"
Grover, J.P. "Resource competition and the trophic cascade as constraints on food webs"
Nakajima, H. "Mathematical analysis on the absorption of effects due to the environmental changes -- On the basis of inflow sensitivity analysis"

(午後)

Session 2: Population Dynamics

organized by 川崎廣吉, O. Diekmann & A. Hastings

- Diekmann, O. "Why and how to avoid differential equations when modelling structured populations"
Hastings, A. "Transient spatial dynamics in ecological models"
Caswell, H. "Demographic modelling with few data and much uncertainty: A Monte Carlo approach to the status of harbor porpoise in the North Atlantic"
Powell, T. "Complex dynamics in an N-P-Z model forced with a periodically varying light field"
Lewis, M.A. "A tale of two tails: The mathematical link between dispersal, patchiness and variability in a biological invasion"
Reade, B. "Population dynamics of multi-pathogen systems (B. Reade, A. Pugliese, R.G. Bowers & M. Begon)"
Namba, T. "Predation by carnivorous plankton on fish larvae and stability of a fish-plankton system (T. Namba & N. Hirose)"
Takeuchi, Y. "Delay effect on stability of SIR epidemic models with varying population size (Y. Takeuchi & E. Beretta)"
Matsuda, H. "Effects of predator-specific defense on biodiversity and community complexity in two-trophic-level communities (H. Matsuda, M. Hori & P.A. Abrams)"

(夕)

Session 2 [Extended Session]: Lattice Model

organized by 川崎廣吉, O. Diekmann & A. Hastings

- Matsuda, H. & Sato, K. "Studies of lattice population in Japan"
Harada, Y. "Analyses of spatial patterns and population processes of clonal plants"
Tainaka, K. "Unpredictability on biospecies extinction"
Kawasaki, K. "The speed of range expansion of invading species -- From a stochastic cellular-automata model (K. Kawasaki, N. Ohsawa, F. Takasu, H. Caswell & N. Shigesada)"

6月12日

(午前)

Session 3: Pattern Formation

organized by 三村昌泰, V. Capasso

- Capasso, V. "Saddle point behaviour for reaction-diffusion systems modelling a class of spatially structured epidemic systems"
Maini, P.K. "Mathematical models for spatial and spatiotemporal pattern formation during embryogenesis"
Mimura, M. "Pattern formation of bacterial colonies"
Polezhaev, A.A. "spatial coexistence of competing populations: Noise-induced pattern formation in a modified Volterra-Lotka model (A.A. Polezhaev & A.B. Goryachev)"
Honda, H. "Formation of the vascular branching system from a capillary network (H. Honda & K. Yoshizato)"

- Kishimoto, K. "A Lotka-Volterra approach to explain segregation patterns in metropolitan areas in the USA"
- Sekimoto, K. "Motor protein mediated contraction and sorting in a bundle of actin filaments with random polarity (K. Sekimoto & H. Nakazawa)"
- Shimizu, H. "Mechanism of body shape development in hydra"

(午後)

Session 4: Evolutionary Ecology

organized by 巖佐 庸, C. Godfray

- Taylor, P.D. "Evolutionary stability: Inclusive fitness and quantitative genetics"
- Frank, S. "Policing of cooperation when resources vary"
- Takahasi, K. "Runaway culture: A population memetic approach to the evolution of transmission bias in cultural inheritance"
- Abrams, P.A. "Coevolution of species in variable environments"
- Ellner, S. "Selection in fluctuating environments and the maintenance of diapause polymorphisms in the copepod *Diaptomus sanguineus*"
- Ray, T.S. "Evolution in the digital medium"
- Yamamura, N. "Models of evolutionary conflict resolution"
- Godfray, C. "Parent-offspring conflict and biological signaling"
- Iwasa, Y. "Evolution of genomic imprinting: Why are so few genes imprinted? (Y. Iwasa, A. Mochizuki & Y. Takeda)"

6月13日

エクスカージョン

(希望者のみ)

＊

会場

同志社新島会館 (京都市上京区)

＊

発表申し込み締め切り

1996年1月31日

＊

参加費

1996/5/10までは一般15,000円/学生7,500円

同5/11以降 (含当日参加) 一般18,000円/学生9,000円

(外国人参加者の参加費についてはお問い合わせ下さい)

＊

＊

申し込み等の詳細問い合わせ先

〒630 奈良市北魚屋西町

奈良女子大学理学部情報科学科

瀬野裕美

KCMB96事務局

PHONE & FAX. 0742-20-3442/ EMAIL. sent@ics.nara-wu.ac.jp

編集後記

多くの会員の方がすでに御存知と思いますが、この2月は数理生物学懇談会にとって大変悲しい月となってしまいました。海洋科学や数理生態学の分野でアメリカで長く活躍されていた大久保明先生が1日に亡くなられたという連絡が入り、その悲しみも癒えない中、2月7日には本会の創設者の一人でもある寺本英先生の訃報が飛び込んできました。尊敬するお二人を一度になくし、多くの方々同様、私も寂しさと何処かに穴が開いてしまったような想いを感じています。

6月に京都で開催される数理生物学京都会議は、お二人の古希を祝うものでもあったのですが、追悼を兼ねた会議となってしまいました。そこでは、Simon Levinさんと重定南奈子さんがお二人の業績を紹介する講演をされ、10日の夜には数人の方に両先生の思い出を語っていただく非公式の集まりも企画されています。次号には、Levinさんと重定さんの講演の要旨を掲載したいと考えています。また、両先生の追悼文は他の学会誌等にも掲載されますし、寺本先生の追悼文集を出す企画もあるようです。

そこで、これらの企画と重複しないよう、今回は寺本先生が数理生物に移られてからの直接の弟子と、大久保先生のもとに留学された経験のある若い方に両先生の思い出についての原稿をお願いしました。ただ、大久保先生は長い間アメリカで活躍されましたので、海外からJim Murrayさんにも大久保先生の思い出を書いていただくことにしました。人選は私の一存で行いましたので、両先生について語りたいという方は他にもたくさんおられるかもしれません。追悼文の掲載を希望される方は編集局までご一報ください。次号への掲載を検討します。

ところで、今回のニュースレターに掲載された土居伸二さんの一文で、私が大変強権的な編集者であることが明らかになってしまいました。今後は、宗教法人法に触れるような強引な原稿依頼は慎み、会員の皆様の自発的なご協力に期待したいと思います。次号は9月に発行し、数理生物学京都会議の特集を組む予定です。特に、国際会議に初めて出席する若い方の参加印象記を掲載したいと思います。自薦・他薦を問いませんので適任者をご推薦ください。次号の原稿締切は7月12日(金)です。ただし、編集作業の進展次第でこれ以降でも掲載可能な場合が生じるかもしれませんし、間に合わなかった場合は第21号に回すことも可能ですので、ニュースレターに掲載する材料をお持ちの方は随時原稿をお送りください。(難波)

目次

研究集会 " Mathematical Topics in Biology "	表紙見返し
追悼 大久保 明 先生・寺本 英 先生	
井川 輝美	1
J. D. Murray	4
田口 哲	6
瀬野 裕美 (新聞記事から)	7
芦田 廣	9
巖佐 庸	11
中島 久男	14
論文、研究紹介	
環境汚染物質のリスク評価における評価尺度としての損失余命 グラフ変換法 (The Graphic Transformation Method)	蒲生 昌志 17
神経細胞の非線型ダイナミクスから神経コーディングへ	茂木 健一郎 21
	土居 伸二 26
寄稿	
リスたちの戯れるUCLAのキャンパスより	有田 隆也 30
ウッズホール村、あの至福の時間	高田 壮則 33
Macintoshを使ったWWWサイト	岩崎 晃也 37
静岡大工学部システム工学科の紹介	竹内 康博 41
お知らせ	
静岡大工学部システム工学科教授・助教授 (講師) 公募	42
数理生物学京都会議	43
新入会員、会員情報変更	46
編集後記	裏表紙見返し
目次	裏表紙