

TABLE OF CONTENTS

Newsletter of the Japanese Society for Mathematical Biology No. 68 September 2012

【特集:震災関連研究】

規制科学としての数理生物学	川口 勇生 .....	1
放射線の健康影響とそのモデル化	大内 則幸 .....	5
集合系の科学としての災害関連シミュレーション	阿久津 典子 .....	9
「門外漢とわきまえて」放射性物質と向き合う	瀬戸 繭美 .....	13

【研究会報告】

シンポジウム「細胞システムの動態と論理IV」報告	黒澤 元 .....	17
研究会「Ethology and Rheology of Physarum and Its Related Topics」 参加報告記	及川 典子 .....	19

【ニュース】

第22回日本数理生物学会のご案内 .....	21
2014年日米数理生物学会合同大会のお知らせ .....	24
学会事務局からのお知らせ .....	25
研究集会カレンダー .....	28
編集後記 .....	28

# 日本数理生物学会 ニュースレター

September **68**  
2012



**【特集：震災関連研究】****規制科学としての数理生物学**

川口 勇生\*

**1. はじめに**

平成 23 年 3 月 11 日に起こった東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所の原子力災害により、広範囲にわたる放射性核種による環境汚染が引き起こされた。私が所属している放射線医学総合研究所（以下放医研と略す）は、3 月 12 日より、オフサイトサイトセンターや J ビレッジに職員を派遣、各行政機関への対応、高線量被ばく者の受け入れ、24 時間対応の一般市民のための電話相談窓口を設置、避難住民や発電所内作業者のスクリーニングなど全職員で対応を行った。その後事故の経過に合わせて、避難区域への一時立ち入りの支援、線量測定、線量評価、講演等への講師派遣、各種委員会や国際機関等への専門家の派遣と対応を行ってきた。また、平成 24 年 5 月より福島復興支援本部を組織し、支援体制を強化しているところである。一方、事故後国民的関心事になったのは、放射線のリスクはどれくらいか?ということである。19 世紀末のレントゲンによる X 線の発見以降、放射線が生物に与える影響について研究がおこなわれ続けており、科学的な知見が蓄積されている [17,7,21]。疫学についても、原爆被ばく者の寿命追跡調査を始め様々な知見が存在する [18]。これら科学的な知見には限界があり様々な不確実性が存在するが、リスク評価やそれに基づく規制体系構築は往々にしてこのような限界や不確実性が内在する科学的情報を用いて行われるため、様々な外挿や”割り切り”が必要とされる。しかし、このような規制体系における割り切りも科学的な合理性が乏しければ受け入れられない。”規制科学”はこのような科学的合理性と規制体系等で必要とされる社会的合理性を調和しようと試みる学問である。本稿では、私が放医研に来て規制科学研究の一環として関わってきた放射線の生態リスク評価を例に概説した後、規制科学と数理生物学の関わりから今後の課題点について述べてみたい。

**2. 放射線の生態リスク評価**

放射性物質による環境汚染はヒトへの健康被害のみならずヒト以外の野生生物への影響も懸念されている。

放射線のヒト以外の生物へのリスク評価の枠組みは 2000 年代に入って整備されてきた。20 世紀中ごろからのヒト以外の生物への影響データの蓄積により、ヒトは他の生物より放射線感受性であるため、国際放射線防護委員会 (ICRP) は 1990 年代まではヒトが適切に防護されていれば他の生物も防護されていると信じるという立場であった。しかし、環境保護への意識の高まりをうけて、近年は生態リスク評価の枠組みを提案するまで至った [6,8,10]。リスク評価手法は主に、どれくらいの線量で生物にどのような影響が生じるかを評価する影響評価と、対象となる生物がどれくらい線量を受けているかを評価する線量評価の二つから構成される。欧米ではこれらの基本の枠組みを元に、独自に評価モデルを構築しているが、日本では未だ放射線の生態リスク評価の枠組みは構築されていない。そこで本稿では既存の評価モデルを紹介し、日本への適用可能性について議論する。

**2.1 ヒト以外の生物の影響評価について**

ヒト以外の生物の放射線影響試験の歴史は古く、例えば 1980 年代には急性致死線量について分類群ごとにまとめられており [22,16]、ほ乳類がもっとも感受性が高くなっている。生態リスク評価の目的は生物種の多様性の維持であるが、これら生物の影響データはすべての生物について得ることは不可能であるので、データがない生物については外挿が行われる。外挿方法については、化学物質の生態リスク評価で用いられる種の感受性分布 (Species sensitivity distribution: SSD) を用いた方法がヨーロッパでは採用されている [5]。SSD は生物及び各エンドポイント (致死、繁殖阻害、罹病率) の放射線影響試験のデータを感受性の低い順にランク付けすると、特定の分布 (例えば対数正規分布) をするという考え方である [19]。この SSD を用いて 95% の種が保護される線量を推定し、さらに不確実性を考慮した値が  $10\mu\text{Gy/h}$  となり、ヨーロッパのリスク評価ツールではこれをスクリーニング線量率として用いている [5]。米国 DOE (エネルギー省) では、これとは別に原子放射線に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) において合意された値 [16] をスクリーニング線量率として使用している。

\*放医研・規制科学研究プログラム

## 2.2 ヒト以外の生物の線量評価について

放射線のリスク評価では、対象となる生物がどれくらい放射線量を受けているかを推定することが重要である。ヒトと同様に外部被ばく及び内部被ばく線量の推定が必要であるが、この時の単位は吸収線量 (Gy:グレイ) である。ヒトの場合は人体形状を考慮し臓器ごとの吸収線量の推定を行い、臓器の確率的影響の感受性に応じた係数で足し合わせた実効線量 (Sv:シーベルト) を放射線防護のための線量として用いるが、ヒト以外の生物については、生物の形状が多岐にわたるため、すべての生物について臓器を考慮して線量を推定することは困難である。従って、ヒト以外の生物については、形状は回転楕円体のように単純化され、体内の臓器は考慮せず、放射性核種が体内に均一分布をしていると仮定されている [20]。このような単純化により、多種多様な生物について、土壌や水など環境媒体中や生物体内の放射能濃度から生物の吸収線量へ換算が可能となっており、ICRP では 12 種の生物について、形状、体重、寿命、生息域等を設定して換算係数を提供している [9]。生物体内の放射能濃度については、実測できない場合は推定する必要がある。推定方法は環境媒体中の放射能濃度と生物体内濃度の比である移行パラメータ (濃縮係数, 移行係数) を用いる手法や、単純な食物連鎖を仮定して動的に推定する手法が用いられる。ICRP では 12 種の生物について、移行パラメータのセットを提供している [9]。このようにヒト以外の生物線量推定についてはかなりの単純化が行われており、単純化の妥当性が問題となる。国際原子力機関 (IAEA) では、各評価モデルを持ち寄って同一条件で推定を行い、各モデルの改善に役立てる場を提供している [29,25]。また、いくつかの実測値との比較が行われており、モデルの妥当性の検証の場となっている。チェルノブイリ居住禁止区域でのネズミの外部被ばく線量との比較では、各モデルの推定結果は一種のネズミを除いて、実測値の誤差範囲内に収まっていることが確認された [2]。

## 2.3 段階的リスク評価

多くの場合、リスク評価の対象となる地域は膨大であるため、段階的なスクリーニングによって、対象となる地域を絞り込む方法が採用されている。ヨーロッパや米国の線量評価ツールでは 3 段階のスクリーニングが取られている。まず、第一段階では、必要とされるのは環境媒体中の放射能濃度の最大値であり、想定される生物の線量を最大限過大評価するようになっていく。過大評価された生物の吸収線量と導出されたスクリーニング線量率を比較し、スクリーニング線量率よりも低い場合は影響がないと判断し、超えた場合には、生物の形状や生物体内の濃度等を現実的にしていくことによって、リスクの有無を判断するようになっていく。

## 2.4 日本への適用可能性

我々は事故以前の段階において、生態リスク評価体制の整備の一環として、欧米の生態リスク評価ツールの適用可能性について、検討を行った [27,28]。生物線量換算係数はヨーロッパの手法を用いることとし、まず、体内濃度推定のための移行パラメータの検討を行った。草本類について、日本で取得された移行パラメータと評価ツールにあらかじめ設定された移行パラメータを比較した結果、Sb, Zr 以外は、一般的に保守的な値が用いられており、スクリーニング目的で用いるのであれば妥当な値であると判断された。ただし、Cs などいくつかの元素については、収集したデータの最大値よりも評価ツールの値が 1 桁以上高い移行パラメータを設定しており、第 2 段階以降の評価時に用いる場合は現実的ではなく、より適切な移行パラメータを用いる必要があると考えられた。Zr については、日本におけるデータの最小値よりも一桁程度低いことから、ヨーロッパの評価ツールを用いてこれらの元素についてスクリーニングを行う際は注意が必要であることがわかった。一方、スクリーニング線量率についても検討を行った。ヨーロッパの手法と同様に SSD を用いて、日本で取得されたデータにより解析した結果、5% 影響線量率が  $76.4\mu\text{Gy/h}$  (C.I.  $16.0\text{--}595\mu\text{Gy/h}$ ) となり、スクリーニング線量率は  $10\mu\text{Gy/h}$  となった。これはヨーロッパの値 (5% 影響線量率:  $81.8\mu\text{Gy/h}$ , スクリーニング線量率:  $10\mu\text{Gy/h}$ ) と比較して、近い値になった。しかし、もともとのスクリーニング線量率の導出に用いたデータは、 $\gamma$  線の影響データに絞っているのに対して、今回はメダカで低エネルギーの  $\beta$  線を放出するトリチウムのデータを用いるなど、データの質がそろっておらず、生物種も、ほ乳類、鳥類、爬虫類、両生類、無脊椎動物、植物のデータが少ないなどあり、データを収集し検証が必要と考えられた。

## 2.5 空間線量率との比較

これまで見てきたように、生態リスク評価に必要とされるのは、環境媒体中及び生物体内の放射能濃度である。しかし、放射線の測定は専門ではないものにとって、放射能濃度を測定することは容易ではない。そこで、空間線量率からの生物体内の放射能濃度の概算を可能にするために、1m 上での空間線量率と生物の吸収線量率の比較を行った [26]。比較に用いたのは ICRP が提案する 12 種の生物のうち、陸域に生息する生物である。文部科学省で公表されている土壌のデータから各放射性核種の比率を算出し、空間線量率及び生物の吸収線量率をそれぞれ計算した。平成 23 年 6 月 16 日時点での土壌に沈着した核種の比率を用いると空間線量率に対して、生物線量率はシカで 14 倍ほど高く、ハチは 2 倍程度となった。また、生物体内の放射

能濃度推定に用いる移行パラメータのばらつきは体サイズが大きい生物に強く影響し、体サイズが小さいカエル、ハチ、ミミズはほとんど影響を受けないことがわかった。

### 3. 規制科学と数理生物学

前節ではこれまで提案されている放射線生態リスク評価の枠組みと日本環境への適用について概説してきた。提案された枠組みは、化学物質の生態リスク評価を参考にしつつ、線量について放射線特有の考え方に基づいている。しかし、スクリーニング線量にSSDを用いるか他の別の考え方を用いるかは未だ合意を得ていない。SSDを用いる場合には、暗に5%の種に影響が見られても生態系には影響がないと仮定されているが、この仮定が妥当かどうかは検証が必要である。我々は3種の微生物生態系と対応する個体ベースモデルを構築しており[4,3,12]、これらを用いて妥当性の検証する予定である。また、生物体内濃度についても複雑な食物網の中でどのように推定するかは、数理生態学的なアプローチが必要とされている。線量推定については、環境媒体中の一様分布が仮定されているが、環境中の分布は不均一分布でありさらに移動分散距離も考慮しなければならないだろう。空間生態学の知見がより精度の高い線量推定に役立つと期待される。最後に生態リスク評価の重要な指標は種の多様性の維持であるが、データは個体レベルの影響試験データに基づいている。個体レベルの影響からより高次の階層の影響を結ぶために数理モデルが必要とされている[11]。以上は生態リスク評価についてであるが、数理生物学的アプローチはヒトのリスク評価でも利用されている。ヒトのリスク評価では疫学データが重要視されているが、低線量域では統計的な限界のため、高線量域からの外挿に頼っている。一方、低線量影響研究は近年の分子生物学的手法の発展に伴い、多数の知見が集積されつつあるが、発がんまでは潜伏期が長く、分子・細胞レベルから個体レベルの階層をいかにしてつなぐかは、大きな課題となっている。一方ヒトの発がんモデルでは、古くは1950年代のNordlingのマルチヒットモデル[15]やArmitage-Dollの多段階発がんモデル[1]や1970年代のMoolgavkarらの2段階クローン増殖モデル[13,14]など基本的なモデルから、近年はシステム放射線生物学の一環として様々な数理モデルが提案されており、低線量域でのリスク評価手法の改善に取り組んでいる[23,24]。がんリスクの年齢依存性は発生生物学と深く関連する分野であり、今後の発展が期待されている。これまでは、科学的知見をリスク評価につなげるための数理生物学という視点であったが、規制体系そのものについても数理生物学は研究対象とすることが可能である。規制体系は様々な単純化や合理化

が行われているため、手法の妥当性の検証や、線量評価等の不確実性があるなかでの意思決定手法、放射線のリスクと規制コストの最適化、放射線と他のリスクの比較など様々な検討課題があり、それぞれに数理モデルが有効であると考えられる。

### 4. おわりに

これまで私は放射線の生態リスク評価や発がん機構モデル、線量評価など規制科学研究として数理生物学の手法を用いて課題に取り組んできた。一見別々の問題でも、同様の手法が使えるということで切り込んでいけるところが数理生物学の醍醐味の一つであると感じている。このような見方ができるのも、出身研究室である九大・数理生物学研究室の研究対象が多様であり、セミナー等を通して先端の研究に触れる機会が多かったことが大きいと思う。改めて、巖佐教授、総研大の佐々木教授をはじめ九大・数理生物学研究室関連の方々へ感謝申し上げたい。最後に、震災及び原発事故で被災された方々にお見舞い申し上げるとともに、復興の一助となれるよう、放医研職員として微力ながら尽力していきたい。

### 参考文献

- [1] P. Armitage and R. Doll. The age distribution of cancer and multistage theory of carcinogenesis. *Br. J. Cancer*, 8:1-12, 1954.
- [2] N.A. Beresford, C.L. Barnett, J.E. Brown, J.-J. Cheng, D. Copplestone, S. Gaschak, A. Hosseini, B.J. Howard, S. Kamboj, T. Nedveckaite, G. Olyslaegers, J.T. Smith, J. Vives i. Batlle, S. Vives-Lynch, and C. Yu. Predicting the radiation exposure of terrestrial wildlife in the chernobyl exclusion zone: an international comparison of approaches. *J. Radiol. Prot.*, 30:341-373, 2010.
- [3] M. Doi and I. Kawaguchi. Ecological impacts of umbrella effects of radiation on the individual members. *J. Environ. Radioact.*, 96:32-38, 2007.
- [4] S. Fuma, I. Kawaguchi, Y. Kubota, S. Yoshida, Z. Kawabata, and G. Polikarpov. Effects of chronic gamma-irradiation on the aquatic microbial microcosm: equi-dosimetric comparison with effects of heavy metals. *J. Environ. Radioact.*, 104:81-86, 2012.
- [5] J. Garnier-Laplace, D. Copplestone, R. Gilbin, F. Alonzo, P. Ciffroy, M. Gilek, A. Aguerro, M. Bjork, D.H. Oughton, A. Jaworska, C.M. Larsson, and J.L. Hingston. Issues and practices in the use of effects data from frederica in the erica integrated approach. *J. Environ. Radioact.*, 99:1474-1483, 2008.
- [6] ICRP. *A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species*, volume 33 of ICRP Publication 91. 2003.
- [7] ICRP. *Low-dose Extrapolation of Radiation-related*

- Cancer Ris*, volume 35 of *Annals of the ICRP*. ICRP Publication 99, 2006.
- [8] ICRP. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, volume 37 of *Annals of the ICRP*. ICRP Publication 103, 2008.
- [9] ICRP. *Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants*, volume 38 of *Annals of the ICRP*. ICRP Publication 108, 2010.
- [10] ICRP. *Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants*, volume 39 of *Annals of the ICRP*. ICRP Publication 114, 2012.
- [11] IUR. *Towards an ecosystem approach for environment protection with emphasis on radiological hazards*. IRSN, Paris, 2012.
- [12] I. Kawaguchi, M. Doi, and S. Fuma. Mathematical model approach to understand the ecological effect under chronic irradiation. *Radioprotection*, 46:S535–S538, 2011.
- [13] A. G. Knudson. Mutation and cancer: Statistical study of retinoma blastoma. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 68:820–823, 1971.
- [14] S.H. Moolgavkar and D.J. Venzon. Two-event models for carcinogenesis: Incidence curves for childhood and adult tumors. *Math Biosci.*, 47:55–77, 1979.
- [15] C.O. Nordling. A new theory on cancer-inducing mechanism. *Br. J. Cancer*, 7:68–72, 1953.
- [16] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionising radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1996 Report to the General Assembly with Scientific Annex*. United Nations, New York, DC, 1996.
- [17] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionising radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annex*. United Nations, New York, DC, 2000.
- [18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionising radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annex*. United Nations, New York, DC, 2006.
- [19] Leo Posthuma, Glenn W. Suter II, and Theo P. Traas, editors. *Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology*. CRC Press, Boca Raton, Fla., 2001.
- [20] A. Ulanovsky and G. Proehl. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. *Rad. Environ. Biophys.*, 45:203–214, 2006.
- [21] National Research Council (U.S.). *Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase 2*. National Academy of Sciences, Washington, DC, 2005.
- [22] F. Ward Whicker and Vincent Schultz. *Radioecology: Nuclear energy and the environment*. CRC Press, Boca Raton, Fla., 1982.
- [23] 甲斐 倫明 and 川口 勇生. 発がん数理モデルの理論とデータ解析の現状. **放射線生物研究**, 42:243–263, 2007.
- [24] 川口 勇生. システム放射線生物学の現状. **放射線生物研究**, 45:367–378, 2010.
- [25] 川口 勇生. Emras I & II の動向. 「ヒト以外の生物への放射線影響」京都大学原子炉実験所専門研究会報告書, pages 16–25. 京都大学原子炉実験所, 2011.
- [26] 川口 勇生. リファレンス動植物におけるスクリーニングレベルと空間線量率. 「環境放射能モニタリングと移行挙動研究」京都大学原子炉実験所専門研究会報告書, pages 72–78. 京都大学原子炉実験所, 2012.
- [27] 川口 勇, 高橋 知之 and 内田 滋夫. 生物線量評価モデルの日本の環境への適用性に関する検討. **保健物理**, 45:282–289, 2008.
- [28] 川口 勇生, 高橋 知之 and 内田 滋夫. 環境生物影響評価体制構築のための橋制科学研究. 「放射線防護における規制科学研究とその展望」, pages 33–38. 放射線医学総合研究所, 2011.
- [29] 川口 勇生 and 土居 雅広. Emras-biota dosimetry working group の閣要報告. **保健物理**, 45:246–252, 2008.
-



## 【特集：震災関連研究】

## 放射線の健康影響とそのモデル化

大内 則幸\*

## 1. 放射線影響研究の歴史

2011年の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の電源喪失事故により、大量の放射性物質が環境中に放出された。その結果放出された放射性物質の大気拡散に伴い、東日本を中心に広い範囲に半減期が約2年のCs-134と半減期が約30年のCs-137がほぼ1:1で分布している事が昨年度の文科省の調査で明らかになった（ちなみに1Bqあたりの放射能の強さはおよそCs-134:Cs-137=2.6:1）。2011年中は連日のように各地域の空間線量率が毎時〇〇シーベルトとか、いかに放射能が体に悪影響を与えるか、また放射線によるDNA損傷や修復メカニズムの話やチェルノブイリの事故との比較、がんでの死亡率などの解説をあちこちで目にする事になり、良くも悪くも放射線影響研究に世間一般から非常に注目が集まっている事を感じた一年であった。

このように日本において一般に注目されるようになった放射線の人体影響に関する研究であるが、その歴史を振り返ってみると実に紆余曲折を経ており、古くから認知されているが現在においても未解決な問題が数多存在することがわかる。また歴史的に見ても放射線の発見とほぼ同時に、その未知のモノはヒトの健康に大なり小なりの影響を与えるという事が認識されてきた。ここで簡単に放射線の発見及び健康影響の歴史について述べておきたい。ただし放射線影響の研究のほとんどは、高線量な放射線の影響研究であり、いわゆる「低線量放射線被ばく」の研究とは少々異なっている点に注意したい。

放射線は目に見えず、科学的な測定でしか存在を確認できない。そのような放射線や放射性物質の存在は19世紀末の数年に集中して発見された。最初の始まりは、1895年にドイツの物理学者Röntgenによる。Röntgenは当時盛んに研究されていた真空放電の研究中に、黒いカーボン紙に覆われた真空管から蛍光紙を発光させる「何か」が出ている事を発見した。この何かは従来知られていたような電磁波とは異なる性質を持ち、とりあえず未知のものを表す記号「X」を用いてX線と名付けられた。このRöntgenの発見は、人工



図1 1896年1月に世界で初めて公の場で撮られた生体のレントゲン写真

的に発生される放射線の最初のものであるが、1896年にはフランスの物理学者であるBecquerelによってウラン塩から自然に放射線が生じていることが発見される。これが自然界に存在する放射能の発見である。その2年後、Curie夫妻が放射性元素であるポロニウムとラジウムを発見し、さらに混合鉱物であるピッチブレンドから純粋ラジウム塩の精製に成功した。

このように発見されてきた放射線であるが、発見当初から医学的な「道具」として用いられている。X線の医学的な応用に関する最初の報告は1896年のLancetの論文で、酔っ払った船乗りの背中に刺さったナイフの破片を摘出するため、その場所の特定に用いられたというものだ。またRöntgenがX線を発見してその性質をデモする際に撮られたレントゲン写真が残っている(図1)。

同様に、新しく発見された放射線が人体に影響を与える事もX線の発見とほぼ同時期に科学者に認知されている。記録に残る限り最初の放射線の人体影響に関

\*日本原子力研究開発機構・放射線影響解析研究Gr.

する記述は Becquerel によるもので、実験で使ったラジウム入り容器をうっかり上着のポケットに入れたままにしたところ、2週間後に皮膚に赤斑が生じ、潰瘍を形成して治るまでに数週間かかったというものだ。さらに Pierre Curie は Becquerel の観察を元に、ラジウム入りの管で自分の前腕に潰瘍を発生させ、その治療過程を記録したという。これは放射線の生物作用を調べるという観点から、広義の放射線生物学の始まりと言えるかもしれない。1900年頃には、X線に関わる多くの科学者や医療従事者の間では、X線は“非常に強い強度、あるいは回数を多く”浴びると皮膚に炎症を起こすことが認識されていた。

記録によると放射線の発見からのほぼ10年で、現在良く知られている様々な放射線障害が知られる事となった。特に放射線発見の初期においては、モノを透過させて見せてくれるX線の性質から医療用途のみならず見世物的にも用いられた。また発明家の Edison が開発中の X線撮影装置の開発で助手の Clarence Dally がデモの為に何度も X線を浴びた結果、皮膚がんから悪性腫瘍が発生し、1904年に不幸にも亡くなってしまっている。放射線発見初期は、放射線の人体への影響に関する知見もない状態だった為、実験などでかなりの量の放射線を浴び、その結果様々な障害を引き起こすことになったが、ある者は腕を切らねばならない程のダメージを受けるが、特に影響のない者もあり、個人毎にその影響に差がある事も認識されていた。このような状況から、放射線の生物影響を科学的に調べる必要性も高まり、また純粋に科学的な目的からも放射線の生物影響の研究は行われて、1906年には、放射線の影響の程度（感受性）は未分化である程大きい、というベルゴニエ・トリポンドーの法則が発見された。これは現在でも放射線の影響の程度を推測するために用いられており、実際に細胞が頻繁に分裂している骨髄やリンパ、腸上皮などは放射線感受性が非常に高く、逆にあまり分裂していない神経や筋肉、骨は感受性が低い。「放射線感受性」という言葉は少々あいまいではあるが、大雑把に説明すると放射線によって生じる細胞への変化の程度や細胞の生存率の違いの事であると考えると良いだろう。その後、1927年にはアメリカの生物学者 Muller によってショウジョウバエへの X線照射が、当時はまだ仮説であった突然変異を誘発する事が発見され、放射線が当時まだ具体的には知られていなかった遺伝物質へ影響を与える事が示された。しかし、当時はヒトに現れる放射線障害とショウジョウバエの突然変異の関連性に関しては特に認知されていなかったようである。DNAの二重らせん構造を発見した一人である Watson は、Muller の研究に刺激を受けシカゴ大学から当時 Muller の在籍したインディアナ大学に移って学位を取得している。また1946年に Muller は X線による突然変異誘発に関連する業績でノーベル賞

を受賞しているが、彼の研究は“放射線が遺伝を担う何らかの物質を変化させる”という事を明らかにしており、その結果、第二次世界大戦で広島・長崎に投下された原爆による放射線の影響に関して一般的に注目される事になり、遺伝に関する研究予算の増加が後の DNA 二重らせん構造の発見や分子生物学の勃興に繋がっていく。

## 2. Quantitative Radiation Biology の出現

初期の放射線生物学者たちは、細菌や単細胞生物、ウイルスなどの生物に X線を照射してどうなるかという実験を盛んに行なっていた。そんな折、広島・長崎の原爆やアメリカ国内で起きた核施設での事故などのデータからある事実がわかってきた。その一つが単細胞生物とヒト個体の平均致死線量に大きな隔りがあるという事であった。例えばゾウリムシなどは増殖を阻害するために最低 200Gy 程度の X線を照射する必要があるが、ヒトの場合は、その半分が死に至るという半致死線量でおよそ 4Gy である。ここで、Gy(グレイ)は放射線の単位質量当たりのエネルギー付与に関する単位で、SI単位系で  $1\text{Gy}=1\text{Jkg}^{-1}$  である。さらに付け加えると、放射線防護で用いられる単位 Sv(シーベルト)も SI単位系ではこの Gy と同じ  $\text{Jkg}^{-1}$  であるが、Gy で得られる吸収線量に放射線ごとの人体への影響を考慮した係数をかけて計算される。X線や $\gamma$ 線の場合は係数は1であるので、 $1\text{Gy}=1\text{Sv}$  となる。さらに、放射線のエネルギーの特性に関しても非常に関心が持たれていた。例えば X線の 4Gy 全身照射を考えると、そのエネルギーは 60kg の体重のヒトを考えた場合で  $4\text{Gy}\times 60\text{kg}=240\text{J}=57\text{cal}$  程度の付与エネルギーとなる。1Jのエネルギーは 1Nの力を受けた物体を 1m動かすのに必要なエネルギーなので、体重 60kg のヒトの場合、地上からおよそ 40cm 程度持ち上げるのと同じエネルギーになる。このように放射線の致死線量のエネルギーで考えた場合の低さは特筆すべきものであった。

この理由として、単細胞生物などよりもヒトの個体、あるいはヒト細胞は、はるかに放射線感受性が高いのではないかと考えられたが、実際にヒト細胞に対して照射実験を行なっても、細胞機能を破壊するにはゾウリムシの場合と同程度の 100Gy 程は必要であった。放射線に対する細胞レベルの生存率と個体レベルでの生存率のこの大きな差は分子生物学的な知見のない当時、未説明の問題と捉えられていた。

また、放射線の作用に関しては、1920年代頃から演繹的に捉えようとする研究も盛んに行われるようになっていた。主に物理学者によって行われたというのが、それは生物という対象に対する「作用」としての放射

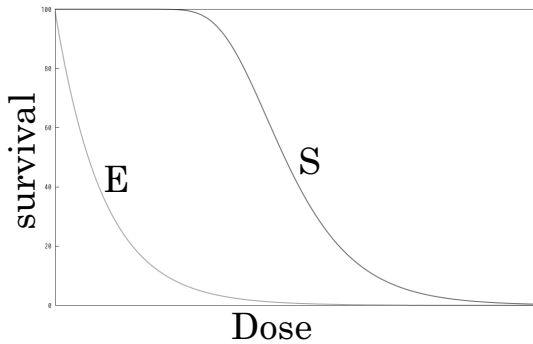


図2 生存率曲線で一般に見られる2つの関数形. Eは指数型でSはシグモイド型

線と、その「応答」として影響を見るという方法で、今日では放射線影響研究では一般的な考え方になっている「線量-効果関係」と呼ばれる論理構造である。「効果」として主に用いられていたのは、死亡率あるいは生存率、が多かった。具体的には、様々な生物（細菌、ウイルス、ハエの卵、など）を対象に照射した放射線に対する生存率（ウイルスなどの場合は非活性率）を実験にて測定していた。このような測定データをプロットした曲線は一般に「生存率曲線」と呼ばれ、通常は縦軸に生存率、横軸に放射線の線量をプロットするが、様々な照射実験から生物体に依存して大きく2つの関数形が存在することがわかった(図2)。このような生存率曲線の測定による放射線応答としての線量-効果関係の測定は現在でも一般に用いられている大変重要な指標である。しかし後で述べるように、これら生存率曲線の関数形の違いを生物メカニズムから綺麗に説明可能なモデル/理論はまだ無いというのが現状である。

初期の放射線生物学研究において、放射線の照射の対象としては単細胞生物などが用いられてきたが、上述したようなヒト個体と単細胞生物との致死線量の大きな違いを調べるために、ヒト細胞を対象に放射線影響を調べる実験を行う必要性が高まっていた。そのためには、ヒト細胞単体で *in vitro* で観察可能な環境が必要であった。

1900年初頭に議論されたのが、サイズの大きい神経繊維は多数の細胞が融合してできたのか、それとも一個の神経細胞が伸長したものであるのか、という問題だが、その論争を検証するために1907年にHarrisonによって開発された組織培養という画期的な実験が基礎となり、細胞単体で増殖をさせる、いわゆる cell culture (培養細胞) という実験技法が開発された。これは今日の放射線生物学のみならず、一般の生物学の実験において欠かせない技術となっている。さらに1956年にPuckとMarcusによって考案された“コロニー形成法”を用いることにより、ヒト細胞を用いて

放射線応答としての生存率曲線を実験で測定することが可能になった。培養細胞によってシャーレ上で単一の細胞を繰り返し増殖できるようになり、PuckとMarcusは照射した細胞をシャーレ上で培養して、それぞれの細胞が増殖することによって形成する単一細胞由来の“コロニー”の数から細胞生存率を測定することを考案したのである。照射された細胞で生存しているものは細胞分裂を繰り返し、単一細胞由来のコロニーを形成するが、死んでしまった細胞は細胞分裂を数回しか起こさないので大きなコロニーは形成しないため、最初に蒔いた細胞の全体数に対する生存した細胞数(=コロニー数)という関係から生存率を測定できるというアイデアである。彼らのアイデアによって、これまでは細胞死を起こしたのも、起こしていないものも混ざった状態で増殖が見られたので、個々の細胞に対するピュアな生存率が測定できていなかったが、コロニー形成法で細胞死を起こしたものと起こしていないものから生存率を測定することにより、これまで大きく隔たりがあると考えられてきたヒト個体とヒト細胞の平均致死線量にほとんど違いがないという事が判明した。細胞死=増殖死という観点が実は非常に重要だった訳である。彼らの仕事は、quantitative cellular radiation biologyの始まりと呼ばれている。コロニー形成法の開発のおかげで、ヒト細胞も含む様々な哺乳類の細胞に対して放射線による生存率曲線の測定実験が行われた。その結果、様々な事実が明らかになった。例えば、A:哺乳類細胞、B:*E.coli*、C:酵母、D:phage staph E、E:*Bacillus megaterium*、F:ジャガイモウイルス、などの生存率曲線をプロットすると、その傾きはA>B>C>D>E>Fという順になる。傾きが大きいう事はより放射線感受性が高い、つまり放射線に対して弱い、という事になるが、この放射線感受性の違いは現在ではDNAの量の差、それに加えてDNA損傷の修復システムの効率の差、として理解されている。

さて、このように様々な生物また放射線の種類によって異なる生存率曲線(図2)を数理的に説明する為のモデルが1946年にLeaによってまとめられたTarget theory (標的理論)である。標的理論は簡単に説明すると、何らかのサイズを持つ“標的”が存在し、それに放射線という離散的なものがヒットする、と考える事で細胞死が起きる、というアイデアである。標的理論では、あるサイズを持つ標的に放射線がヒットする事象がPoisson分布を持つと仮定することから始まる。ヒットの期待値が  $m$  の場合、 $n$  回ヒットする確率は  $P(n) = e^{-m} m^n / n!$  ここで標的の体積を  $V$ 、単位体積あたりのヒット数を  $a$  とすると、 $m = Va$  である。またヒット数  $a$  は照射線量  $D$  に比例するだろうから、定数  $\alpha$  を用いて  $a = \alpha D$  と書けるだろう。標的理論には、考える標的の数と細胞死に必要なヒット数の組み合わせ



せでいくつかの種類が存在するが、いわゆる1標的1ヒットモデルと多重標的1ヒットモデルに関して記述する。まず標的が1つで1ヒットで対象が死ぬ（不活性化）場合、細胞の生存率はヒットしない確率、つまり $n=0$ であるので、 $S=P(0)=e^{-m}$ である。したがって $S=e^{-m}=e^{-V\alpha D}$ となる。ここでヒットの期待値が1である線量を $D_0$ とすると、 $m=V\alpha D_0=1$ 、つまり $V\alpha=1/D_0$ であるので、 $S=e^{-D/D_0}$ となる。これからひとつの標的を持つ細胞が細胞死を生じる確率 $D$ は $D=1-S=1-e^{-D/D_0}$ となる。この曲線は(図2)のE形の曲線と良く合う。

次に、標的の数が2つの場合を考えると、細胞死の確率 $D_2$ は乗法から $D_2=(1-e^{-D/D_0})^2$ になるため、標的が2つの場合の生存率 $S_2$ は $S_2=1-(1-e^{-D/D_0})^2$ 、したがって一般に標的の数が $k$ 個ある場合その生存率は $S_k=1-(1-e^{-D/D_0})^k$ となる。この曲線は(図2)のS形の曲線と良く合う事がわかる。Leaは主にウイルスを対象に、この標的理論の検証を行った。ウイルスのサイズと非活性化する線量の関係など、様々な測定結果で標的理論を検証した結果、上で現れた標的の体積 $V$ はちょうどウイルスそのものの大きさであることも判明した。なお、ここで考えられている“標的”には特に意味はなく、概念的なものであった。現在ではDNAがその対象であると考えられている。

さて、このように実験データをうまく説明可能に思える標的理論であるが、実は線量が低い領域において実際の実験データよりも高い生存率になってしまう事がわかっている。つまり低い線量域において、標的理論で予想されるよりも多くの細胞死が生じていることになる。同様に低線量だけではなく、単位時間あたりの照射線量の低い“低線量率”照射の実験のデータとも合わないことがわかっている。放射線の照射に関する時間率である線量率とその積分である線量の関係は、いろいろ興味深いデータがあるのだが、紙数の都合から省略したい。また標的理論において $D_0$ は線量と名前がついているが、実際はパラメータであり、このパラメータを調整することで、実験データに対して1標的1ヒットモデルでも多重標的1ヒットモデルでも、どちらでも実によく実験データと合うことがわかる。つまり、どちらも良く合うということは、本質的なダイナミクスを反映していないという可能性が高いと考えられる。

この成長率曲線を説明するモデルをもうひとつ紹介しておく。それはLQモデル(Linear-Quadratic model)である。LQモデルでは、生存率を $S=e^{-(\alpha D+\beta D^2)}$ という形で考える。このような関数形の生物学的な意味はどういうものなのか？別の観点からのLQモデルを説明してみる。LQモデルは染色体異常の線量に対する発生頻度の線量-効果関係もよく説明できる。染色

体異常の発生頻度は切断が線量に対して線形で増加す

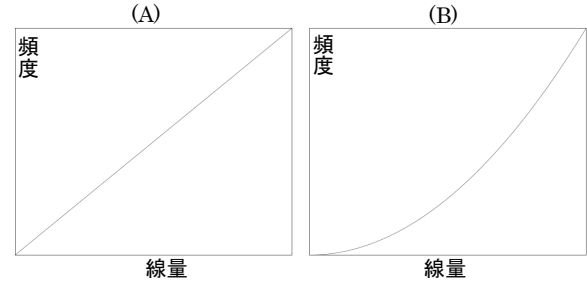


図3 染色体異常の線量-効果関係の概念図。(A)が切断、(B)が転座

る頻度で生じるのに対して、転座は線量に対して2次関数で増加する(図3)。これを説明するのがLQモデルで、1箇所の切断で生じるような1ヒットの事象は線量に線形に比例するが、2箇所の切断で生じるような2ヒットの事象は線量の2乗に比例する。したがって染色体異常もその切断数を考えるとその線量-効果関係はLQモデルでうまく説明できる。細胞死と染色体異常を関係づけると、成長率曲線のLQモデルによる解釈が可能になる。しかし実際の染色体のスケールとDNAの鎖切断のスケールはあまりにも差がありすぎるため実際の生物メカニズムを考えると、単純に鎖切断の個数が染色体異常の構造に結びつくという訳でも無さそうである。

### 3. まとめ

ここまで、放射線影響研究として放射線生物学の歴史を振り返りながら現象といくつかのモデルに関して述べてきた。1953年にWatsonとCrickがDNA2重らせん構造を解明して、遺伝という現象が物質に依存している事が判明し、生命現象がある種の物質科学的なものへと変貌し、その結果放射線影響研究も主に放射線のターゲットであるDNAとその周辺に関する研究にシフトした。

今回はいわば古典放射線生物学とでも呼ぶべき、1950年代辺りまでの放射線影響研究に関して記述した。古典放射線生物学は、放射線の影響がすぐに現れるような高線量領域を研究対象としているが、現在大きな問題になっているのは“低線量影響”である。低線量の場合、すぐにはその影響が出ないため、線量-効果を調べようにも非常に長いタイムスケールが必要であり、また発生頻度もかなり低いために統計的に有為なデータを得るためには、地球の全人口を対象に研究を行なっても足りないくらいである。分子生物学の洗礼を受けた放射線生物学や低線量放射線の生物影響に関しても今回書ききれなかったいろいろな未解明の現象が存在する。それらに関してはまたの機会にでも。

【特集：震災関連研究】

# 集合系の科学としての災害関連シミュレーション

阿久津典子\*

## 1. はじめに

誰しも災害に出会うと「なぜこのようなことが自分の身近で起きたのか」と思わざるを得ない。現在はインターネットのお蔭で、知識としての事実は以前では考えられない程速く多量に集められるようになった。しかし、「事実」を知ったから納得できるとは限らない。なぜそのような「事実」に至ったのか、そしてこれからどのように進展するのか、同じような災害は再び起きるのか、今後同じような災害を防ぐことはできるのか、などを知りたいと思うとインターネットから得られる知識だけでは不十分である。

理論研究としてこれらの疑問に答えようとする、現象の特徴を捉えた連立微分方程式をたて、解析的・数値的に解いて考察することになる。様々な量の微妙なバランスの問題は知識だけでは納得できないことの一つだからである。連立微分方程式による方法は大変有効で、様々な研究機関で大規模に実施されている。そして得られた結果の一部は、信頼できる研究結果としてTV放送などを通じ一般の人々にも公開されている。

互いにゆるく相互作用をする集合系で生じる現象も知識だけでは納得しにくく、かつ頭の中で想像したり予測したりしにくい現象である。信頼できる結果を参考にしながら、小規模な研究室で災害現象を自らの知力で考察したいと考えた場合、私が学生時代には考えられない程安価になったパソコンを合理的思考加速ツールとして使わない手はない。特に、集合系で生じる現象に対しては多体系のセル・オートマトン法シミュレーションが威力を発する。

相互作用をしている集合系では、個々の要素の振る舞いから予想できないような意味ありげな時間-空間的パターンがマクロに生じ、現象の進行を支配していることがある。セル・オートマトン法によるシミュレーションを行えば、自発的に生じた空間の不均一さと場所に依存した時間変化をパターン変化として記述できる。近年、このような視点から阿久津研究室ではセル・オートマトン法による災害関連シミュレーションを行っているのもその一部について報告する。

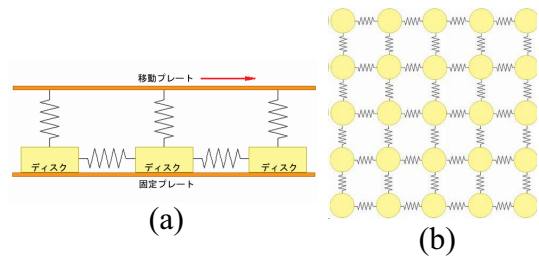


図1 spring-block 模型

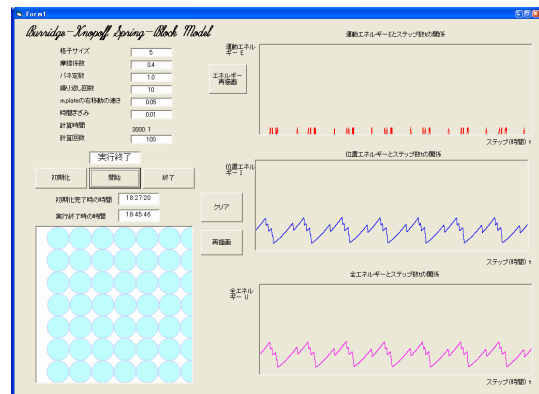


図2 地震シミュレーションの例

## 2. 地震

地震現象は自己組織臨界状態 (self organized criticality), あるいはカオスの縁 (edge of chaos) で発生する現象 [1] と言われている。力学模型としては stick-slip 模型や spring-block 模型が知られている [1]. 我々は, spring-block 模型を用いてプレート型地震のシミュレーションを行った (図1, 図2)。

東北地方は北米プレートに太平洋プレートが潜り込んでおり、関西ではユーラシアプレートにフィリピン海プレートが潜り込んでいる。上下を逆転し、上側のプレートが潜り込むプレートであるとし等速度で移動するものとする (図1 (a)). 潜り込まれる側のプレートは固定されているものとする。2枚のプレートの上に2次元正方格子状に並んだ複数枚の岩盤 (ディスク) があり、図1 (a) (b) のように互いにバネで結ばれている。固定プレートとディスクは摩擦係数  $\mu$  (図2では0.4) で接しているものとする。静止摩擦係数と動摩擦係数は区別していない。摩擦力は、ディスクが静

\*大阪電気通信大学工学部環境科学科

止している場合はバネの合力と反対側に働くものとし、ディスクが動いている場合はディスクの速度ベクトルと反対の方向に働くものとする。ディスクの水平方向には周期境界条件を課す。以上の配置のもとにニュートンの運動方程式に基づきディスクの運動に関するシミュレーションを行う。このプログラムはエンジン部分を平成15年度阿久津研究室卒業研究生の稲田賢悟君と北里優典君が開発し、インターフェース部分を平成16年度卒業研究生の大野克彦君が開発した。

繰り返し回数が2000~3000ステップの場合の結果の図が図2である。図2の右側の図は上から運動エネルギー、位置エネルギー、全エネルギーの時間変化を表す。運動しているディスクは図2の左下に赤色で示すが、3000ステップの時は地震が起きていないので赤色のディスクは無い。運動エネルギーがゼロでない時に地震が起きたと解釈すると、その時同時に、位置エネルギーが緩和していることが判る。また、前震、本震、余震の構造が自発的に生じていることが図から判る。さらに時間が経つと前震、本震、余震の構造は少しずつ変化し、間欠性カオス [2] を示唆している。この、前震、本震、余震構造の自発的発生は摩擦係数が0.4でしかもディスク数が5×5の時はシミュレーションの開始直後から顕著に見られる。このことは平成23年度阿久津研究室卒業研究生の半田正法君が見付けてくれた。

ディスク数3×3、摩擦係数が0.1の場合は、稲田君と北里君が長時間のシミュレーションを行った。初期(~5×10<sup>6</sup>ステップ)は激しいカオスを示すが、その後突然約周期的な地震が起きるようになり、1×10<sup>7</sup>~1.4×10<sup>7</sup>ステップは再びカオス的になった。

地震のエネルギーと発生頻度の統計的性質について言えば、文献 [1] で言われているような自己組織的臨界状態を意味するべき乗則が得られた(平成3年度卒業研究:吉井常雄,吉村幸司,平成12年度卒業研究:上野貴紀,秋島達也)。

以上の研究から、プレート型地震は間欠性カオスを示す力学系に近いと思われる。従ってカオスではあるが、何らかの方法で再帰写像の図 [2] を作ることが出来れば短期予測が可能になりそうである。

### 3. 津波

表面波の2次元波動方程式を差分化して津波のシミュレーションを試みた。すなわち、 $x-y$ 面内にある表面波の表面応力を $P(x,y)$ とすると、 $\partial^2 P(x,y)/\partial t^2 = c^2 \nabla^2 P(x,y)$ である。ここで、 $c$ は表面波の速度であり、海の深さ $h(\text{km})$ と $c = c_0 \sqrt{h}$ の関係がある。 $c_0$ は時速11.27(km/h)であることが知られている。以下、平成23年度卒業研究生の林正博君と馬場圭一君の開発したプログラムに沿って説明する。

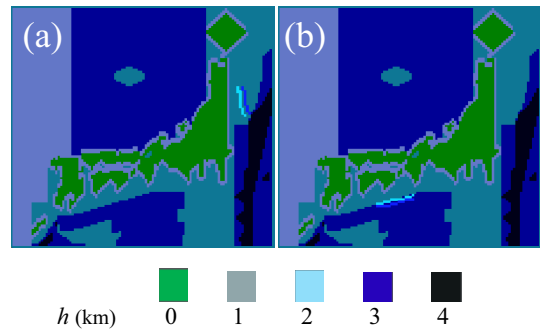


図3 海の深さと震源

図中の曲線が震源を表す。明るい色：沈下，暗い色：隆起。

(a) 東日本大震災を想定。(b) 東南海地震を想定。

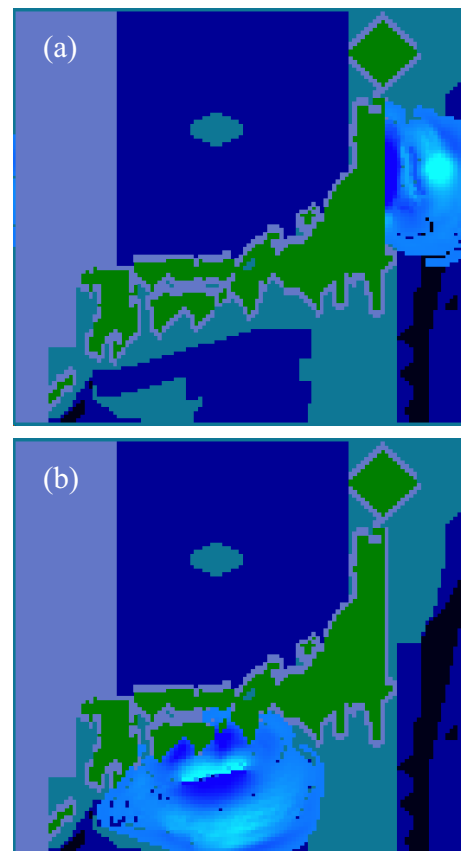


図4 地震から58分経過後の津波

明るい色：引き波，暗い色：押波。(a) 東日本大震災を想定。

(b) 東南海地震を想定。



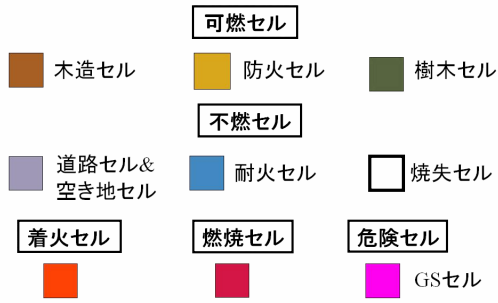


図5 セルの状態と表示色

図3に日本付近の地形を110×110の升目に切り日本近海の平均深さを4段階で表示した図を示す。震源も合わせて表示した。海流(移流)の効果は入っていない。このシミュレーションでは、東日本大震災で宮城県(宮古)に18分で津波(引き波)が到達したので、それを再現するように速度パラメタを決定した。すると青森県(八戸)には39分で引き波が到達し、実測値35分と10%の誤差で一致した。

図4に58分経過後の津波の様子を示す。東日本大震災のシミュレーションと同じパラメタの値を用いて東南海地震の津波シミュレーションを行った。すると、和歌山(串本町)には15分、大阪(大阪市)には40分で津波(引き波)が到達することが得られた。

非常に単純化したシミュレーションであるにも拘らず、東日本大震災の津波について到達時刻、押波引き波の区別などについてほしい再現できている。このプログラムはスマトラ沖地震津波(平成17年度卒業研究、長濱光伸)のシミュレーションプログラムを基に開発したが、スマトラ沖地震津波シミュレーションでも津波の到達時刻、押波引き波の区別などは再現できていた。升目をもっと細かくし、日本付近の海底の地形図をもっと細かく精密に設定すれば精度はより高くなると考えられる。

一方、個別観測点の津波の高さの時間変化はうまく再現できなかった。流体力学的効果を取り入れるともう少し精度が上がると思われる。しかし、最近のTV報道[3]によれば、震源付近の地形変化を詳しく再現しないと津波の高さの説明ができないそうである。個別観測点の津波の高さの不一致はかなり大きいことから、今後、予測精度を上げるには震源のモデル化の工夫も必要であることが解った。

#### 4. 都市火災

地震などで火災が起きると、都市では瓦礫などにより消防による消火が阻まれ、大規模な火災になる。都市ではどのように火災が延焼していくか、文献[4]を参考にしてセルオートマトン法でシミュレーションを行った。

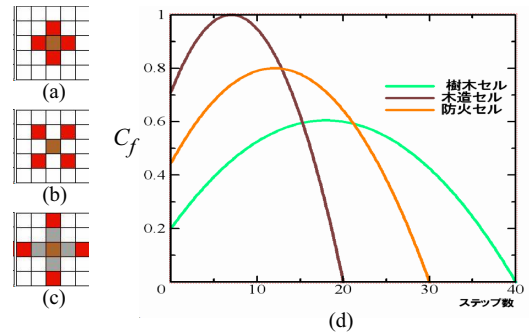
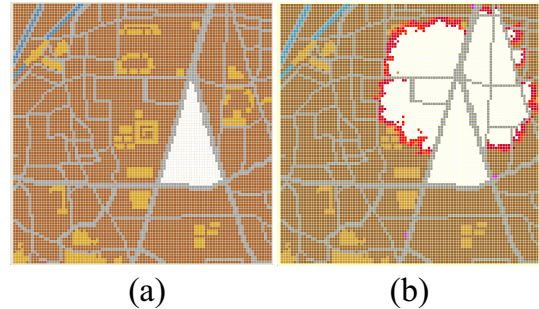
図6 延焼規則と  $C_f$  の図

図7 寝屋川市の火災シミュレーション例

(a) 樹木セル, GS (ガソリンスタンド) 無し。(b) 樹木セル無し。

図5にセルの状態と表示色を示している。各セルは1~145のいずれかの状態量  $i$  を持つ。例えば木造セルは  $i=28$  としている。着火セルは燃えているが延焼能力が無いセルであり、5ステップ経つと燃焼セルに変化する。燃焼セルは延焼能力がある。例えば木造着火セルは  $i=1\sim6$  であり、木造燃焼セルでは  $i=7\sim27$  である。中心のセルが燃焼セルの場合、図6の(a), (b), (c)の赤いセルの位置にある可燃セルは確率  $P=C_b C_f / C_d$  で着火する。 $C_b$  は火の着き易さを表し、木造セルでは0.11、防火セル(鉄筋コンクリートの建物)では0.055とした。樹木セルでは文献に値が無かったので0.036と仮定した。 $C_f$  は燃焼の激しさを表し、木造セルと防火セルの燃焼セルについては文献[4]に従った。樹木セルについては図6(d)のように仮定した。 $C_d$  は火元との距離  $r$  に依存するパラメタで  $C_d=5^{r-1}$  とした。

図7に寝屋川市におけるシミュレーション例を示す。寝屋川市の地図をもとに100×100のセルに分割し状態量を設定した。(a)の図から幅広の道路によって延焼が食い止められていることが判る。(b)の図では(a)の図と同じ場所から火災が発生した場合であるが、ガソリンスタンドが配置されている。ガソリンスタンドに延焼爆発し、道路を越えて延焼している。鉄筋コンクリートの建物(防火セル)は延焼を食い止めると期待されているが、このシミュレーション規則では着火までの時間稼ぎとしての効果は有るものの、結局は焼失してしまう。規則が不適切なのかとも思ったが、阪

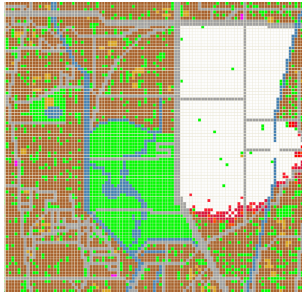


図8 四條畷市のシミュレーション例

樹木セルは公園の他に0.1の密度でランダムに配置した。

神大震災で鉄筋コンクリートの建物が炎上していたのを見るとあまり防火効果は無いのかもしれない。

このシミュレーション・プログラムは平成17年度の卒業研究生新井賢澤君と福永恵三君が開発した。

図8に四條畷市の火災シミュレーション例を示す。ここでは樹木の効果を調べた。道路や小川は延焼を食い止める効果があることが判る。しかし、川にフタがされているとそこから延焼して燃え広がってしまうことも図から見て取れる。

樹木の密度が上がると焼失面積が減るので樹木には延焼を食い止める効果があることが判った。しかし100回実施した平均で見ると、樹木が無い場合の焼失セル数が2300に対し、樹木を0.1の密度でランダムに配置すると焼失セル数は2100になる程度である。バラバラにある少数の樹木は着火までの時間稼ぎの効果はあるが延焼を食い止めるとまでは言えないようである。

このシミュレーション・プログラムは平成23年度卒業研究生の富永貴大君が開発した。

以上のシミュレーションで取り入れていない効果がまだまだ有る。なかでも気象条件は重要であろう。風力と風向きは特に重要なパラメタになると予想される。また、山火事が発生するほど乾燥した気象では、樹木に対する $C_f$ が図6に示した関数では不適切になり、木

造セルに近くなると思われる。その他、道路に放置車両などがあればそれが延焼を引き起こすかもしれない。以上の効果をさらに取り入れたシミュレーションを行うのが今後の課題である。

## 5. おわりに

阿久津研究室では、災害時の建物からの避難シミュレーションも文献[5]を参考にして行っているが、ページが尽きたのでここでは紹介しない。興味のある方は阿久津研究室の卒業研究 Web ページ [6] を訪問して頂きたい。

平成23年度の卒業研究生諸君が一齐に災害シミュレーションを卒業研究テーマとして選んだのは驚きであった。彼らは日常生活では震災について何も言わないが、心の深いところで東日本大震災に大きな衝撃を受けたようである。シミュレーションによる思考実験を通して災害現象に対する理解を深め、何がしかの「納得」と「教訓」が得られたら良いと思っている。

## 参考文献

- [1] Z. Olami, H. Jacob, S. Feder, and K. Christensen, Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 1244. P. バック, 陳侃, 「大地震や経済恐慌を説明する数学理論」, 日経サイエンス 3月号 (1991) 22.
- [2] P. ベルジェ, Ch. ビダル, Y. ポモウ共著, 相沢洋二訳, 「カオスの中の秩序」, (産業図書, 1992年).
- [3] NHK スペシャル MEGAQUAKE 巨大地震II, 第2回 「津波はどこまで巨大化するか」 2012年4月8日放送.
- [4] 紀本孝, 材野博司: 「日本建築学会近畿支部研究報告集」 (1999) 661. 山田篤, 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲: 「日本建築学会近畿支部研究報告集」 (1999) 657.
- [5] 森下信著, 「セルオートマトン—複雑系の具象化—」 (養賢堂 2003年).
- [6] 阿久津研究室卒業研究 Web サイト [www.osakac.ac.jp/labs/akutsu/22year/ob.html](http://www.osakac.ac.jp/labs/akutsu/22year/ob.html).



**【特集：震災関連研究】****「門外漢とわきまえて」放射性物質と向き合う**

瀬戸 繭美\*

**1. はじめに**

東日本大震災後、私が初めて故郷である福島県福島市に足を踏み入れたのは同年5月のゴールデンウィークに入ってからのことでした。電話やメールで無事を確認してはおりましたが、家族や友人の笑顔を目の当たりにしたときの感慨は筆舌に尽くしがたいものでした。昔からのつきあいの心友が集り、仲間内の一人が懇意にしている山菜料理が好評のレストランにて再会を祝う運びとなりました。久々に食べるこしあぶら、うるい、たらの芽、筍... 福島の恵みに感謝し、お腹いっぱいになるまで皆でいただきました。

筍の出荷制限が課されたのはその翌日のことです。

山菜類やきのこからは畑作による農作物で検出されるよりも高い放射線量（主に放射性セシウムによる）が検出される傾向にあり、現状でも一部地域において出荷制限が課されています（平成24年7月27日、現在[5]）。これはチェルノブイリの事故後に報告された現象と同様であり、その原因として、森林生態系においては植物・菌類の枯死により放射性セシウムが取り除かれずに循環すること、土壌中に粘土鉱物が少ないためセシウムの吸着除去が行われず可給態として土壌中に存在することなどが挙げられています[2]。

私に十分な知識があれば、友人達に山菜の摂取を控えるように忠告することができたはずでした。それができなかったのは私が偏に放射性物質に関して無知であったためです。そのような状態から私が放射性物質関連の研究に着手致しましたことは早計に聞こえるかもしれませんが、しかしながら、本研究に着手したきっかけそのものは故郷を思う慕情だったとしても、現在は放射性物質のリスク管理において自分が貢献できる役割を見出し、研究活動を続けております。

福島第一原子力発電所の事故から一年以上が経過し、現在このような記事を書かせていただく機会が得られる程度には放射性物質と向き合ってまいりました。その際にいつも私が心がけてきたことは、「門外漢とわきまえて」放射性物質に関わる研究に携わることです。

この言葉に私が託す想いについてはまた後述させていただきます。

次章からはこれまで我々が手がけてまいりました「食品の放射性物質検査と放射線防護の在り方の科学的検証」の研究に至った背景を中心に、数理的取り組みによる本問題への貢献の可能性について紹介したいと思います。

**2. 放射性物質検査と食の安全性への不信**

福島第一原子力発電所での事故後、厚生労働省の要請のもと各地方自治体において緊急時モニタリングが行われました。その結果、暫定規制値を上回る放射性ヨウ素・セシウムが飲料水、野菜、牛乳などから検出されたため、各地域の一部もしくは全県に対して出荷もしくは摂食制限が課されました[1]。現在多くの食品項目で出荷制限が解除されていますが、それにも関わらず少なくない消費者が一度出荷制限が課された地域から食品を購入することに抵抗を示しています。

事故後続けられてきた放射性物質検査は、各生産地における生産物の安全性を保証するために行われてきたはずですが、ところがそれが機能していないのは何故でしょうか？その原因は多岐に渡るようですが、わたしが重要な一因と見なしているのはこれまでに行われてきた放射性物質検査のあり方とそれの保証する「食の安全性」の根拠です。

2011年3月28日の読売新聞に「食の放射能検査、不満続々... 国で統一基準を」の題目で記事が掲載されました[8]。事故直後における食品を対象とした放射性物質検査では統一的な基準を欠いておりました。例えば、1回の放射性物質検査に用いるサンプル数等について詳細な基準を持たず、サンプリングの在り方は概ね地方自治体に委ねられてきました[6]。厚生労働省のホームページには昨年より膨大な量の食品項目並びに食品中の放射性ヨウ素、放射性セシウムの報告値がアップデートされています。しかし、ある市区町村のうち1つの村、さらに1つの食品項目に着目すると、たった数点のサンプルの濃度しか表示されていない場合があることに気がつくことでしょう。

一度でも実際の環境測定に携わったことのある者、

\*奈良女・理・情報科学科

もしくは基礎的な統計の知識を持つ者であれば、サンプル集団中の放射性物質濃度にばらつきがあることは想像に容易いことです。出荷制限解除の判断は、サンプル集団における放射能濃度のばらつきなどを考慮した上でなされるべきでしょう。そのためにはより多くのサンプルを抽出し、放射能濃度を測定することでサンプル集団中の放射能濃度の分布や分散を調べる必要があります。しかしながら、これまで行われてきた放射性物質検査による出荷制限の解除判断の際には、このことは特に問題視されていなかった様子です。

2012年5月、世界保健機関(WHO)は、汚染の程度が著しかった福島の一部地域を除き、事故後の日本国民の実効線量・甲状腺等価線量の推定量はそれぞれ年間5 mSv・50m Svを下回るとする見解を報告しました[4]。これらの値は事故後食品安全委員会が「公衆の放射線防護のため対策をとるべきレベルの下限値」として厚生労働省に提案した線量です[10]。つまり、当初の厚生労働省の目標は概ね達成されたこととなります。しかし、上記に述べたような対応を鑑みるに、もししたら日本国民の被曝線量は「結果的に」目標値より小さくなったに過ぎないのではないかという不安がよぎります。

### 3. サンプル集団中の放射能濃度分布を考慮する重要性

サンプル集団中の放射性物質の濃度分布を考慮して放射線のリスクを評価することの重要性について、以下の問いを例に説明したいと思います。

Q: ある地域のハウレンソウ集団に着目します。これらのハウレンソウの汚染直後( $t=0$ 時)の放射性セシウム $^{137}\text{Cs}$ (以下 $^{137}\text{Cs}$ と表記)の平均濃度が $120 \text{ Bq kg}^{-1}$ であるとき、この集団に属するハウレンソウを成人が毎日摂取することで被る年間積算実効線量を予測せよ。

#### 3.1 ホウレンソウ摂取による $^{137}\text{Cs}$ の年間積算実効線量

ハウレンソウを毎日摂取することによる $^{137}\text{Cs}$ の年間積算実効線量 $H$ は「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」に基づき、「被曝線量算定の基礎式」を参考にして算出することとします[7]:

$$H = KC_0 M f_d f_m \int_0^{t_{max}} \exp(-\lambda t) dt \quad (1)$$

ここで、 $K$ は $^{137}\text{Cs}$ の経口摂取による実効線量への換算係数( $\text{mSv Bq}^{-1}$ )、 $C_0$ は $t=0$ 時のハウレンソウ中の $^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度( $\text{Bq kg}^{-1}$ )、 $t_{max}$ はハウレンソウの摂取期間(日)、 $M$ はハウレンソウの1日あたりの

摂取量( $\text{kg 日}^{-1}$ )、 $f_d$ はハウレンソウの調理加工による除去率係数、 $f_m$ は市場希釈係数と呼ばれ、市場に出回るハウレンソウのうち、汚染されていない地域から出荷されるハウレンソウに対して汚染されたハウレンソウが占める割合を示します。 $\lambda$ は $^{137}\text{Cs}$ の物理的崩壊定数( $\text{日}^{-1}$ )です。ハウレンソウ中の放射能濃度の動態は暗に

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C \quad (2)$$

が仮定されています。Eq. (2)は物理的崩壊で放射性核種が不安定な核種から安定な核種に変わっていく放射壊変を表します。ここでは $^{137}\text{Cs}$ の新たな負荷は考えません。また、実際の環境中では $^{137}\text{Cs}$ は物理的崩壊以外の要因によっても減少しますので、この基礎式では通常実効線量を過大評価することを注記致します。

今、 $f_d$ と $f_m$ はそれぞれ1とし、 $K$ 、 $M$ は「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」よりそれぞれ $1.3 \times 10^{-4} \text{ Bq kg}^{-1}$ 並びに $16 \times 10^{-3} \text{ kg 日}^{-1}$ 、 $t_{max}$ は365日、 $\lambda$ は $^{137}\text{Cs}$ の半減期を10950日として $6.3 \times 10^{-6} \text{ 日}^{-1}$ とします。全てのハウレンソウサンプルが等しく $^{137}\text{Cs}$ に汚染されている場合( $C_0 = 120 \text{ Bq kg}^{-1}$ )、この時の年間積算実効線量の推定値は $0.09 \text{ mSv 年}^{-1}$ になります。

#### 3.2 初期 $^{137}\text{Cs}$ 濃度の分散に対する年間積算実効線量の依存性

次にハウレンソウサンプル集団中の濃度にばらつきがある場合を考慮します。ここではハウレンソウ集団中の初期 $^{137}\text{Cs}$ 濃度 $C_0$ と時刻 $t$ における $^{137}\text{Cs}$ 濃度 $C_t$ を確率変数とします。 $^{137}\text{Cs}$ の濃度の時間動態はEq. (2)に従います。初期 $^{137}\text{Cs}$ 濃度分布にはガンマ分布を仮定します:

$$g(c_0; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} c_0^{\alpha-1} e^{-\frac{c_0}{\beta}} & \text{for } c_0 > 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3)$$

ガンマ分布を仮定した理由は、実際に3月中にサンプリングされた福島県産(全域)、茨城県産(全域)のハウレンソウ中の $^{137}\text{Cs}$ の濃度分布がガンマ分布に従っていたためです[3]。

ここで、ガンマ分布の分散に対する年間積算実効線量の依存性を調べます。Eq. (3)において平均は $\alpha\beta$ 、分散は $\alpha\beta^2$ で与えられます。初期 $^{137}\text{Cs}$ の平均濃度は $120 \text{ Bq kg}^{-1}$ で与えられているため、 $\alpha$ か $\beta$ の一方を任意に与えらるともう片方のパラメタの値も決定します。 $K$ 、 $M$ 、 $\lambda$ は前章の値を用い、年間積算実効線量を1万回シミュレーションした結果が図1です。ここでは $\beta$ を変化することでガンマ分布の分散を変化させています。また、初期 $^{137}\text{Cs}$ 濃度の分散の大きさは、3月中にサンプリングされた福島県産(全域)のハウレンソウ

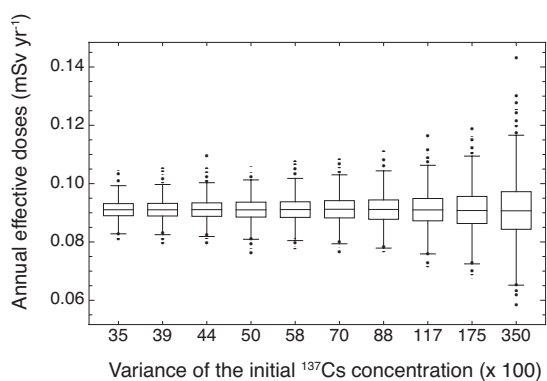


図1  $t=0$  時において平均  $^{137}\text{Cs}$  濃度  $120 \text{ Bq kg}^{-1}$  のハウレンソウを市民が毎日食べ続けたときの年間積算実効線量の予測。年間積算実効線量はそれぞれ1万回ずつ計算した。

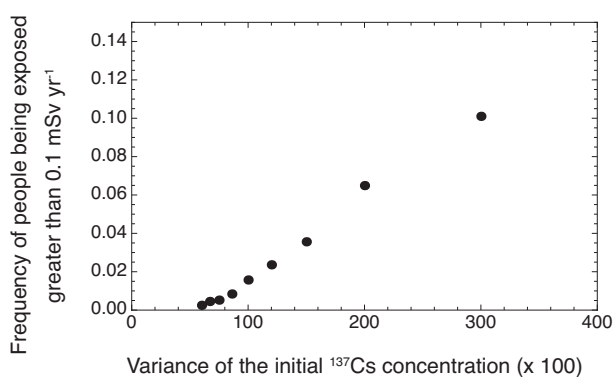


図2 市民が  $t=0$  時において平均  $^{137}\text{Cs}$  濃度  $120 \text{ Bq kg}^{-1}$  のハウレンソウを市民が毎日食べ続けたとき、年間積算実効線量が  $0.1 \text{ mSv yr}^{-1}$  を上回る頻度。年間積算実効線量はそれぞれ1万回ずつ計算した。

ウで観測された分散の値を参考に設定しました [3]。年間積算実効線量の平均は常に概ね  $0.09 \text{ mSv 年}^{-1}$  となりますが、初期  $^{137}\text{Cs}$  濃度の分散が大きくなるほど年間積算実効線量の分散も大きくなります。ここで、仮にハウレンソウの摂取による  $^{137}\text{Cs}$  の年間積算実効線量が  $0.1 \text{ mSv 年}^{-1}$  を上回らないように防護目標を設定したとします。2011年度段階においては、放射性セシウムに対して実効線量が  $5 \text{ mSv 年}^{-1}$  を超えないように防護目標が設定されており、5つの食品分類群に対してそれぞれ  $1 \text{ mSv 年}^{-1}$  ずつ許容値が振り分けられていました [9]。そこで、野菜群に振り分けられた  $1 \text{ mSv 年}^{-1}$  の  $1/10$  となる値を、ここではハウレンソウの摂取による  $^{137}\text{Cs}$  の年間積算実効線量の防護目標として便宜的に用います。図2に市民がハウレンソウを摂取することで  $0.1 \text{ mSv 年}^{-1}$  以上の実効線量を被る頻度を示しました。この場合も分散が大きくなるほど防護目標を超える実効線量を被る市民の割合が増加します。

どちらも直感的に容易に予想できる結果ですが、

現実には放射性物質検査の際に濃度の分散や分布に対して特に注意が払われてこなかったことが問題です。野菜群に対する  $^{137}\text{Cs}$  の暫定規制値は2011年度段階では  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$  に設定されていました。このハウレンソウ集団の平均濃度は暫定規制値以下となります。しかしながら濃度の分散が大きい場合、低濃度に汚染されたサンプルしか口にしない市民もいれば高濃度に汚染されたサンプルを摂取してしまう市民も存在し得ます。このため一部の市民において目標とする防護レベル以上の年間積算実効線量を被る可能性が生じます。本来は、放射性核種の濃度の分散や分布を考慮した最適な放射性物質検査並びに出荷制限解除が行われる必要があったはずですが、

#### 4. 我々の研究の現状と今後の取り組みについて

我々の研究では更に放射性物質検査、出荷制限の解除判断の過程のシミュレーションを行い、1回の放射性物質に用いるサンプル数に依存して年間積算実効線量または甲状腺等価線量がどれくらい変化し得るかを調べました。また、放射性物質の初期濃度分布が既知であると仮定し、1回の検査に必要とされるサンプル数を推定致しました。こちらは今後投稿予定の論文の中で詳細をご報告できればと思います [3]。

現在は、測定にかかる時間・経済的なコストを考慮した上で最適な放射性物質検査の方法などを模索しているところです。今後も内部被曝に対するより望ましい放射線防護の在り方について科学的な根拠を与えるべく研究を進展させて行く予定です。また、本研究の方法論は放射性物質のみならず、その他の化学物質による食品汚染のリスク管理にも役立てることができるとのではないかと考えております。

#### 5. おわりに

最後に、何故わたしが「門外漢とわきまえて」放射性物質と向き合うことが重要だと考えているかについてお話したいと思います。福島第一原子力発電所の事故から現在に至るまで、多くの心ある放射線科学の専門家、また異なる分野の科学者達が福島に住む方々のために何かできないかと活動してくださっています。福島を故郷とする者として、皆様には感謝の念に堪えません。その一方で、一部の「似非専門家」から放たれてきた無責任な「安全だ」「危険だ」という言動の数々が、大いに国民の心を惑わし、福島に住む方々を苦しめ、一部風評被害を増長させる要因になったのも事実です。残念なことに、良識ある専門家の発言は、

不用意で断定的な似非専門家の発言に覆われてしまいがちです。このような状況を引き起こさないために重要なことが、「門外漢としてわきまえて」放射性物質と向き合い、研究に携わることだと感じております。具体的には自分の素性(専門分野)を明らかにし、自分の専門分野の知識に基づき科学的に信頼に足ると判断された場合に発言を限る姿勢が大切かと思えます。これは放射性物質に関する研究に限らずどの研究分野にも通じることです。

一方で、「門外漢としてわきまえる」ことは「専門でないからわからない」の免罪符にはなりません。わからないことをわからないと言うことは重要ですが、市民とのリスクコミュニケーションの場は大切にしたいと考えております。なぜならば、それがリスク評価研究の本分であるためです。放射性物質の研究に携わる限り、「放射線は安全なのか危険なのか」という質問の投げかけからは逃れられません。放射性物質が安全か危険かという問い立て自体が適切な問いではないと思いますが、その問いは市民の方々の漠然とした不安の中から絞り出された一言です。そのような皆さんの不安の軽減のために、専門家でなくとも幾ばくかの力添えをすることは可能です。例えば線量をX線照射の線量と比較したり、放射線による発がんリスクを他のリスク(例えば喫煙リスク)と比較することは、市民が放射線のリスクを理解する手助けとなります。その際には可能な限り出典も添えるようにしております。それにより、科学的な根拠を提示し、情報に信頼性を与える一方で、誤った伝聞が拡散することを防ぐことができます。

リスクコミュニケーションは研究を遂行するのとはまた異なる能力を要求されます。今回のような場合、特に科学と社会との架け橋となる対話が必要でしたが、それが大いに不足していたように感じております。今後、大学の教育の場において科学コミュニケーションの訓練を導入していく必要があるのではないかと考える次第です。

## 6. 謝辞

本原稿執筆にあたり、放射線医学総合研究所・放射線防護研究センターの川口勇生氏にご助言をいただきました。有り難うございました。

## 参考文献

- [1] N. Hamada and H. Ogino. Food safety regulations: what we learned from the fukushima nuclear accident. *J. Environ. Radioactivity*, 111:83-99, 2012.
- [2] IAEA. Environmental consequences of the chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Vienna, 2006.

- [3] M. Seto and K. Uriu. The validity of protection measures for food contaminated with radioactive materials. in prep.
- [4] WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 great east japan earthquake and tsunami. Avenue Appia 20 - CH-1211 Geneva 27 Switzerland, 2012.
- [5] 厚生労働省. 原子力災害対策特別措置法に基づく食品に関する出荷制 等 (平成 24 年 7 月 27 日 現在) .
- [6] 厚生労働省. 地方自治体の検査計画について, 2011 年.
- [7] 厚生労働省医薬局食品保険部監視安全課. 緊急時における食品の放射能測定マニュアル, 4 月 4 日 2002 年.
- [8] 読売新聞. 食の放射能検査、不満続々... 国で統一基準を, 3 月 28 日 2011 年.
- [9] 食品安全委員会. 放射性物質と食品に関する Q & A (6 月 13 日更新).
- [10] 食品安全委員会. 放射性物質に関する緊急とりまとめ, 3 日 2011 年.

## 【研究会報告】

# シンポジウム「細胞システムの動態と論理IV」報告

黒澤元\*

## 1. はじめに

シンポジウム「細胞システムの動態と論理IV」は、4月5,6日の2日間、桜が満開の理化学研究所和光キャンパスで開催された。このシンポジウムは一分子イメージングの研究で著名な佐甲靖志先生（理研）の研究室の主催で毎年行われていて、タイトルからわかるように今年で4回目である。このシンポジウムの一番の特徴をあげるとすれば、分子レベル・細胞レベル・組織レベルにおける最先端の実験系の研究を、関連する理論研究と一緒にゆっくり聞ける所である。ご存知のように、最近の生命科学における可視化技術は凄まじいスピードで進展している。数理生物学者にとっては、現在の技術によりどれだけの時間・空間分解能で生命を捉えることができるのか、あるいはどんな現象が新たに見えるようになってきたのか、気になる所ではないだろうか。そうしたことを知りたいとき、このシンポジウムは大きな助けになる。2日間参加すれば最新の実験系研究を最先端技術とともに広く勉強できる。さらに、質疑応答や休憩の時間が十分にとられているので、他の参加者と話をしつつ何がこれから面白くなりそうかじっくり考えることもできる。私自身、このシンポジウムは勉強になるので2年前（「細胞システムの動態と論理II」）から参加している。昨年は口頭発表させて頂き、今年は聴講者として参加した。本稿では、今回のシンポジウムで私が興味を持った研究をいくつか紹介したい。

## 2. シンポジウムのスケジュール

口頭発表が16件、ポスター発表は21件。参加者数は70人を越えていたと思われる。以下に、口頭発表の講演者と演題を挙げる。

(1) 「一分子酵素反応の動態解析における虚実：我々は何を観ているのか？」小松崎民樹（北大）、(2) 「生体分子の1分子FRET時系列計測」岡本憲二（理研）、(3) 「タンパク質一分子の構造・ダイナミクス解析」鎌形清人（東北大）、(4) 「免疫細胞におけるインテグリン1分子解析」石橋宗典（阪大）、(5) 「B細胞分化シグナルのシステム解析」篠原久明（理研）、(6)

「少数分子反応ネットワークの展開」富樫祐一（神戸大）、(7) 「アレルギー性免疫応答初期における免疫細胞動態の理論解析」中岡慎治（理研）、(8) 「上皮成長因子シグナル伝達経路の一分子粒度細胞まるごとモデルの構築」岩本一成（理研）、(9) 「ラマン散乱で見える細胞分化ダイナミクス」盛田伸一（理研）、(10) 「イメージングで迫る出芽酵母のメンブレントラフィック」黒川量雄（理研）、(11) 「Dynamic organization of paracrystalline actin bundles」大谷哲久（理研）、(12) 「走化性細胞の形と勾配認識」馬場昭典（理研）、(13) 「アメーバ細胞の変形を伴う走化性運動に関する理論」平岩徹也（理研）、(14) 「ゴルジ体再集合過程の物理モデル」立川正志（理研）、(15) 「左右非対称性を作り出す遺伝子ネットワークの力学的性質」齋藤大助（理研）、(16) 「動物胚の相似性を保証する発生場スケージングの制御機序」猪股秀彦（理研）、

発表の分野を大きく分けると、新しいアプローチを用いた「最先端の観測技術」((3,9))、生データの解釈に必要な「定量化の数理」((1))、新しい生命現象にアプローチする「定量性のある実験研究」((2,4,5,10,11,16))、それと「数理モデル」((6-8,12-15))である。

## 3. 新しい技術が捉える生命現象

シンポジウムでは、これまで見たこともないようなデータにたくさん出会うことができた。例えば、相同組換えのプロセス（岡本氏）や、ゴルジ体による物質の輸送（黒川氏）など、これまで時系列を捉えることが難しかった現象に対して、GFPやFRETなどを用いてアプローチした研究があった。新しい技術の発表としては、ラマン分光を使って細胞内の分子組成を調べた研究（盛田氏）と、タンパク質の折り畳み現象を長時間観測した研究（鎌形氏）があった。鎌形氏の開発した手法は、蛍光色素を修飾したタンパク質がキャピラリーを流れる様子を画像化することにより、折り畳み現象を数秒のオーダー（既存の手法の1000倍）で続けて観測できるのだという。この技術によって初めて明らかになった長時間スケールのタンパク質の動きについて、ミトコンドリアに結合するシトクロムCというヘムタンパク質を例に示していた。シトクロムC

\*理化学研究所・望月理論生物学研究室



は、ほどけた立体構造から安定な構造に遷移した時、安定な構造が保たれ続けるわけではないらしい。安定な立体構造の他に、準安定な立体構造があるからだ。鎌形氏の時系列データは、数秒の間に複数の状態間を何度も行ったり来たりする様子を示していた。もちろん、立体構造の状態遷移が起きているのはシトクロムCだけではないのだろう。もしかすると、生体分子の種類によって遷移のダイナミクスが違っていたり、温度など環境パラメータが遷移過程の形に影響を及ぼしたりすることもあるのかもしれない。仮に、注目している生命現象でタンパク質が複数の状態間を遷移しているとしたら、どんな数理モデルが相応しいだろうか。例えば、1種類のタンパク質を1変数と捉えた制御ネットワークモデルよりも、1つの分子における状態遷移も含めた複数の階層からなるネットワークモデルを使うことが（注目する現象にもよるが）有効かもしれない。

#### 4. スパコンと単純化モデル

岩本氏は、大型計算機を用いたアメーバのシグナル伝達経路のシミュレーションについて発表した。比較的単純なシミュレーションであられる、スイッチ的なリン酸化現象が、より大規模な今回のシミュレーションでも起きることを確認したという報告で、今後さらにモデルを拡張して現実の細胞サイズや分子の数に近づけて行くのだという。大型計算機を用いた研究は最近増えつつある。私は、大規模シミュレーションの研究が、必要な構成要素だけを抜き出して考える単純化モデルのアプローチに対してどんな影響を及ぼしうるのか、以前から気になっていて、岩本氏の話も興味深く聞いた。以下に、岩本氏の話を書いて考えたことを書かせて頂こうと思うが、その前に大規模計算機を用いた物理学における試みを紹介したい。宇宙物理学では、暗黒物質により形成される宇宙を大規模シミュレーションで理解しようとする研究が行われている (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>を参照)。星1つを1分子として、10の10乗分子のスケール、計算にはもちろん大型計算機を用いる。理論物理の人に聞くと、こうした大規模シミュレーションを用いて初めてわかることがあるそうだ。宇宙には、星が集中する所とそうでない所がある。そうした不均一性の存在は単純化モデルから説明できていた。しかし、具体的に集中している星の分布がどれくらいのサイズであるかといった情報は大規模シミュレーションの計算で初めてわかるのだという。同じように、細胞内の分子の分布についても、大規模シミュレーションによって初

めてわかることは、きっとたくさんあるのだろう。例えば生体分子の拡散について、核膜や細胞膜など膜の傍における拡散速度と、細胞質中における拡散速度とで違うことは十分ありうる。では仮に、こうした情報が得られたとして単純化モデルにどんな新しい展開がありうるか。具体例として、遺伝子からタンパク質ができて、それが遺伝子の発現を制御する場合について考えてみたい。まず、この現象を記述する最も単純なモデルの一つに、mRNAとタンパク質を変数とする2変数モデルがある。もしも、大規模シミュレーションと一分子イメージングとによって、分子の拡散速度が局所ごとに調べられ、核膜・細胞膜傍と、細胞質のそれ以外の部分とで拡散速度が1桁とか違うことがわかったとしたら、最早2変数モデルは現象を理解するモデルとして相応しくないかもしれない（注目する現象にもよるが）。2変数モデルの代わりに、細胞を区画化して捉え、細胞膜傍のタンパク質、細胞質内のタンパク質、核膜傍のタンパク質、核内のタンパク質、というように変数を増やしたモデリングは有効だろう。もしくは、ただ変数を増やすだけでなく、全く異なった単純化モデルが要請されるのかもしれない。

#### 5. おわりに

本稿では、私が興味を持った研究についていくつか紹介させて頂いた。ここで紹介した以外にも、細胞運動（馬場氏、平岩氏）、ゴルジ体再構成のモデル（立川氏）、左右差形成のメカニズム（齋藤氏）、免疫のモデル（中岡氏）など、興味深い数理的研究はたくさんあった。読者の皆さまには、来年度以降このシンポジウムに参加することをおすすめしたい。はじめに書いたように、シンポジウムは毎年4月の初め頃に行われていて、会期は2日間であるが3日目には近くの公園で花見も行われている。私は下戸なのでこの花見に参加したことはないがとても楽しいと聞く。2013年のシンポジウムについては2月頃に理研のHPに情報が載るはずなので、チェックして頂きたい。なお、今年の発表者には所属が理研の人が多いが、この会は内輪の会議ではない。どなたでも参加できてオープンである。今後も、一分子イメージングなどの可視化技術は益々進み、近い将来in vitroとin vivoの違いの詳細も明らかになるにちがいない。このシンポジウムのような場で新しい現象、見たこともない実験データ、新しい数理モデルの試みに触れることは、数理生物学者にとって、研究中の数理モデルの妥当性を落ち着いて考えたり、未解明の生命現象のモデリングへチャレンジしたりする、よい機会になるのではないかと私は思う。

## 【研究会報告】

# 研究会「Ethology and Rheology of Physarum and Its Related Topics」参加報告記

及川典子\*

## 1. はじめに

2012年7月2, 3日の2日間にわたり、函館市中央図書館視聴覚ホールにおいて「Ethology and Rheology of Physarum and Its Related Topics」と題した研究会が開催された。この研究会は日本–スウェーデン戦略的研究共同プログラムにおける活動の一環であり、Uppsala 大学と日本の共同研究グループを中心に生物輸送ネットワークのダイナミクスに関する最近の進展を報告する場として設けられた。研究会の主催は公立はこだて未来大学の中垣俊之先生が務められ、講演プログラムの一部は大学に場所を移して行われた。私も運営をお手伝いさせていただいた。

本研究会の中心的話題は *Physarum polycephalum* という真正粘菌の行動についてであったが、その周辺の問題として粘菌以外の生物に関する発表もあり、厚みのある内容となった。研究会全体としては数理モデルに関する講演が大半を占めたため、講演を通じて参加者は生物に見られる現象を積極的に数理モデルを用いて理解しようとする研究の方向性を共有していたように思う。

## 2. 真正粘菌の特色

真正粘菌は多核性単細胞生物で、ゲル部分の表皮とゾル部分の内質からなる原形質の塊である。アメーバのように運動し、餌やより良い環境を求めて樹状突起を伸ばしたり、ネットワーク構造を形成したり、毒物や悪環境から逃れるといった行動をとる。粘菌が数理科学における研究対象になったきっかけとして最も印象深いものは、2000年に中垣らにより粘菌が迷路の最短経路問題を解くという現象が発表されたことであろう [1]。これは数理モデルとしては、粘菌の管の内部の原形質流動にポアズイユ流を仮定して、流量に正のフィードバックを入れることにより説明される。特にこのフィードバックを、流体の流れやすさを示す伝導率の時間変化が流量の1乗に比例するとした場合に常に最短経路を選択するようになり、この指数が1の場合を *Physarum solver* と呼んでいる。

粘菌のもう一つの大きな特徴に原形質流動の往復運

動が見られるということがあり、この振動は粘菌の厚さから容易に測定することができる。この振動現象に関して、同じく2000年に高松らにより粘菌の結合振動子系における同期現象が報告されている [2]。原形質流動の往復運動は粘菌のゲル状組織の周期的な収縮がポンプの役目となって起こるものであり、結合振動子系では粘菌の小さな塊（以下、粘菌パッチと呼ぶ）同士が管内の圧力を通じて相互作用する。

以上のように、粘菌には自身のネットワーク構造を形成・変形する経路探索の性質と、各部分ごとに独立した振動リズムを持ち得るという結合振動子系としての性質がある。以下ではこの二つの性質を各講演の紹介をする際のガイドとして用いることにしよう。

## 3. 講演者氏名および演題

以下に今回の研究会の講演者及び講演題目を挙げる。

(1) David Sumpter: “Quantifying collective animal behavior”

(2) 上田肇一: “Decision making by resonance of rheological deformation and biochemical oscillations in an amoeba”

(3) 立川正志: “Nonlinear viscosity of cytoplasm and movement in *Physarum plasmodium*”

(4) David Vogel: “Interaction networks of *Physarum polycephalum* in a exploration and foraging context”

(5) Audrey Desselour: “Foraging strategy comparison of American, Australian and Japanese *Physarum polycephalum*”

(6) Anders Johansson: “The *Physarum solver* solves linear programs”

(7) Christian Yates: “Stochastic Simulation of *Physarum polycephalum*”

(8) 伊藤賢太郎: “Coupled oscillatory cylinder model for *Physarum oscillation*”

(9) Stamatiou Nicolis: “Circadian rhythms modulated patterns of collective decision-making”

(10) Qi Ma: “Modeling the foraging behavior of *Physarum polycephalum*”

(11) Natalia Zabzina: “*Physarum polycephalum* decision making”

\*公立はこだて未来大学複雑系知能学科

(12) Christopher Reid: “Physarum uses an externalized spatial memory system to navigate in complex environments”

## 4. セッションの概要

### 4.1 ネットワーク構造に関する講演

粘菌が樹状突起を伸ばしながら広がっていく時、この樹状突起はたびたび分岐して方向を変え、外部に何らかのバイアスのない状況においては時間・空間的にランダムに運動しているように見える。Qi Ma と Christian Yates はこの樹状パターンの成長ダイナミクスをモデル化するために Physarum solver の式に含まれる流量に拡散の効果を導入した。Qi Ma は特に上述したフィードバックの指数を変えたときのパターンの変化を追い、Christian Yates は更新するサイトの数を絞り、それを確率的に選択するという計算方法によっても樹状パターンの特徴が再現されることを示した。

Audrey Desselour, Natalia Zabzina からは、種の異なるアメリカ、オーストラリアおよび日本の粘菌の比較実験に関する発表があった。餌に対する探索能力を調べた実験における、オーストラリアの粘菌は速度は遅いが正しい餌の場所にたどり着く確率が高い、日本の粘菌は速度は速いが正確さに欠ける、という結果は意味深長である。David Vogel は同形の粘菌パッチを空間的に一定間隔に置いたときの連結率についての実験結果を報告し、Chris Reid は粘菌が外部環境に残る自身の粘液を“外部記憶”として利用することで効率良い経路探索を実現しているとする仮説を実験的に検証することを試みた。Anders Johansson による講演は純粋な数学に関するもので、Physarum solver を利用して化学反応におけるある種の線形最適化問題を解くための定式化についてであった。

### 4.2 結合振動子系に関する講演

粘菌のネットワークのノード点につながっている各管の収縮弛緩振動や、移動中の粘菌の収縮弛緩振動においては、常に位相差が伴うことが知られている。この位相差は、原形質流動を促す圧力差や粘菌の移動を促すゲルの厚みなどの空間変化を生じさせることと関わりがあるのだろうか？このことを議論するためには、原形質流動にニュートン流体、収縮弛緩運動に調和振動を仮定してきた既存のモデルでは十分ではない。立川は結合振動子の数理モデルを用いて、原形質の応力特性として知られている非ニュートン流体の性質を考慮することによって平均値が等しい周期関数をもつ結合振動子においても一方向の圧力差を取り出せるようになることを示し、特に同一の周期をもつ場合には位相差が本質的に重要であると結論づけた。また上田は、外部環境の変化に対する粘菌の行動パターンを粘菌内

部の振動する化学反応と圧力をもとにモデル化し、振動子と原形質流動の相互作用を仮定することによって振動子の位相差に応じたゲルの厚みの変化を再現できることを示した。しかしながら両者どちらの場合においても、収縮リズムとして調和振動を仮定するとやはり空間対称性を破ることはできないとのことであり、このことについて議論がなされた。

先に挙げた高松らの報告によると、3つの粘菌パッチをリング状につなげた結合振動子系において、振動の回転モード、部分同期モード、一つの振動子の周期が半分になる半周期モードが現れ、それらが時間的に遷移することがわかっている。伊藤はこのモード間の遷移を、系全体で保存される圧力のダイナミクスと、圧力と相互作用する位相のダイナミクスとを取り入れた結合振動子モデルによって再現した。

### 4.3 その他の講演

David Sumpter は生物の集団運動について実験的に調べており、講演では魚、鳥、蟻などの生物が最近接個体に速度や角度を合わせるよう行動していることが見事な統計処理から示された。Stamatios Nicolis は蟻の巣に入る数と出る数から測った活性度のダイナミクスをモデル化し、サーカディアンリズムの周期的な振動や、準周期振動、カオスなどが現れることを示した。

## 5. おわりに

生物としては比較的単調な動作しか示さない粘菌に関する研究が世界中で多彩なテーマを繰り広げているのは、そのシンプルさ故なのであろう。原形質流動の効率、細胞内の化学反応による物質の構造変化などが他の器官を通さず直接的に目に見える現象とつながっていると期待できることが、粘菌研究の魅力であるように思う。今回の研究会では、このようなシンプルな生物に対する研究者各人の研究の展開の仕方を通観することができたことも意義あるものであった。

会議が終わり、ディナーの後は、函館山にタクシーで登頂した。前日まで霧に覆われていた空は一転して澄み渡り、世界三大夜景の一つに数えられる函館市の夜景は参加者をもれなく感嘆させた。さらにその夜景から少し目を移すと満月に照らし出された海の静かな水面を臨むこともでき、これらの幸運に恵まれたことはこの研究会をより印象づけるものとなった。

## 参考文献

- [1] T. Nakagaki, H. Yamada and Á. Tóth, *Nature* **407**, 470 (2000).
- [2] A. Takamatsu, T. Fujii and I. Endo, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2026 (2000).

## 第22回日本数理生物学会のご案内

2012年9月10日(月)～12日(水), 岡山大学

The 22th Annual Meeting of Japanese Society for Mathematical Biology

September 10-12, 2012, Okayama University

第22回日本数理生物学会大会を9月10日(月)～12日(水)の日程で, 岡山大学(津島キャンパス北部)自然科学研究科棟を中心にして開催いたします。

本大会の企画シンポジウムは7題です(登録順, 2節参照)。その他, 総合講演を2件予定しています。

### 総合講演:

三村昌泰教授(明治大学・先端数理科学研究科)

「自己組織化と反応拡散系: Alan Turing の貢献」

巖佐庸教授(九州大学・理学研究院)

「生態学の数理モデリングのこれまでとこれから」

大会のプログラムと講演要旨は大会ホームページ

<http://www.ems.okayama-u.ac.jp/~jsmb12/>

でご覧いただけます。印刷した講演要旨集は, 大会会場受付で配布いたします。多数の皆様のご参加をこころよりお待ちしております。

第22回日本数理生物学会大会委員長 梶原 毅

## 1. 大会スケジュール

### 9月10日(月)

9時から 受付

10時から12時30分

**企画シンポジウム S3** Phytosanitary における理論と実践

**一般講演**

12時30分から14時

**ポスターセッション** パート1(奇数番号)

14時から15時

**総合講演** 三村昌泰 明治大学教授

15時から18時

**企画シンポジウム S2** 計算ウイルス学の展開

**企画シンポジウム S7** 発生現象への多面的アプローチ - 数学・物理・生物実験を通じて理解する発生のメカニズム

### 9月11日(火)

9時から12時

**企画シンポジウム S5** 生物のかたちを理解するための数理的手法: 発生から適応まで

### 一般講演

12時から13時30分

**ポスターセッション** パート2(偶数番号)

13時30分から16時

**企画シンポジウム S1** 疾病の数理モデル

**一般講演**

16時から17時

**総会**

17時から18時

**研究奨励賞受賞講演**

18時30分から

**懇親会**

### 9月12日(水)

9時から12時

**企画シンポジウム S4** フリーライダーの進化生物学

**一般講演**

13時から14時

**総合講演** 巖佐庸 九州大学教授

14時から17時

**企画シンポジウム S6** 血管形成のイメージングと数理モデル

**一般講演**

17時

閉会

## 2. 企画シンポジウム

**S1) 疾病の数理モデル-FIRST 共催シンポジウム-**

**企画者** 田中 剛平(東京大学), 岩見 真吾(九州大学/JST)

複雑系数理モデル学の解析・制御手法を応用する事により, 医学・公衆衛生分野における緊急かつ重要な課題の解決, 及び, 実効的な予防法や治療法を提案する事を目標にした研究を紹介する。また, 本シンポジウムは, 内閣府最先端研究開発支援プログラム(FIRST)との共催シンポジウムである。

**S2) 計算ウイルス学の展開**

### 企画者 岩見 真吾 (九州大学/JST), 中林 潤 (横浜市立大学)

私たちは数理科学と実験科学を融合した「計算機ウイルス学」という新たな研究領域を開拓することを企画し、免疫不全ウイルス、肝炎ウイルス、インフルエンザウイルスなどを対象として、実験と理論を組み合わせた研究を進めている。今回のシンポジウムでは、実験研究、理論研究双方から多くの研究者に演者として参加していただいたので、それぞれの研究内容を紹介し、計算ウイルス学の今後の展開などについてディスカッションしたい。

### S3) Phytosanitary における理論と実践

#### 企画者 鈴木 清樹 (農研機構・中央農業総合研究センター)

植物防疫上の公衆衛生に関する研究分野において、理論生物学に対するニーズとは何なのか？理論と実践のすり合せはどの程度可能なのか？これらの点を踏まえて Phytosanitary に関連する諸問題を扱う研究者の取組みを紹介する。

### S4) フリーライダーの進化生物学

#### 企画者 大槻 久 (総合研究大学院大学) 小林 豊 (東京大学) 若野 友一郎 (明治大学)

本シンポジウムでは、協力の利益にただ乗りする「フリーライダー」に焦点を当て、社会性昆虫や細菌、ウイルス等におけるフリーライダーの実例を交えて、協力者とフリーライダーの二者系が示す多様な進化動態を論じる。

### S5) 生物のかたちを理解するための数理的手法：発生から適応まで

#### 企画者 野下 浩司 (九州大学)

多様でありながら規則性を見て取れる”生物のかたち”を理解するために、ゲノム、遺伝子ネットワーク、分子から組織レベル、そして適応など異なるスケールと視点からのアプローチを試みる研究を紹介するとともに、それらをどのように統合し、またどういったシミュレーションでは分離して議論できるかを探る。

### S6) 血管形成のイメージングと数理モデル (共催：新学術領域「動く細胞と場のクロストークによる秩序の生成」)

#### 企画者 三浦 岳 (京都大学), 西山 功一 (東京大学)

循環器系は、体内の酸素および栄養を供給する重要な器官系である。また、発生段階で非常に早いうちから機能しはじめるため、形態形成と生理機能の達成を

ほぼ同時に行うというユニークな器官系であるとともに、体中の組織のどこにでもあるユビキタスな器官系でもある。この血管網は、はじめに内皮細胞のメッシュワークが形成されてから、リモデリングによって樹状構造が形成される vasculogenesis と、既存の血管から新たな枝が出芽する angiogenesis に分けられる。この血管系の形成に関しては、古くから数理モデル化が行われてきたが、最近になって実験分野でのイメージング技術の発展により、血管形成過程を定量化できるようになってきた。本シンポジウムでは、このようなモデルと実験の相互作用から、血管形成のメカニズムの解明に迫る。

### S7) 発生現象への多面的アプローチ - 数学・物理・生物実験を通じて理解する発生のメカニズム -

#### 企画者 森下 喜弘 (理化学研究所), 李 聖林 (理化学研究所)

器官形成は分子、細胞、組織という異なるスケールで起こるマルチフィジクス (情報論的、幾何的、力学的) な現象が協調的に働くことで達成される。こうした自由度の高いシステムを理解するために、現象を良く観て詳細に解析し、現象の本質を捉えることを目指す。

## 3. 一般講演 (口頭発表・ポスター発表) 発表要項

発表時間は、講演質疑応答、交代時間も含めて 20 分です。発表は PC によるプロジェクターでのプレゼンテーションになります。原則として、発表は持ち込みの PC を接続して行なっていただきます。予備の PC も用意いたしますが数が限られますので、ご希望の場合には事前にご連絡ください。なお、PC 接続にかかる時間も発表時間に含まれます。各自で発表前にパソコンの接続テストをしておいていただきますようお願いいたします。

ポスター発表では、幅 90cm、高さ約 200cm のパネルを用意します。A0 サイズまでのポスターを貼ることができます。ポスターは 10 日 (月) の午前から掲示可能で、11 日の 16 時までには撤去してください。撤去されていないときは、実行委員の方で強制的に撤去し廃棄しますので、あらかじめご了承ください。奇数、偶数番号のコアタイムをそれぞれ 10 日 (月) 12:30 14:00 と、11 日 (火) 12:00 13:30 に設定しています。コアタイムの時間帯には、発表者の方は必ずポスターの前で説明をお願いします。なお、例年のようにポスター賞を実施いたします。参加者の方はポスター賞の投票にご協力ください。



#### 4. 懇親会

2日目である9月11日(火)18時30分から岡山大学生協ピーチユニオン3階において懇親会を行う予定です。懇親会の申し込みは8月28日(火)までとなっております。参加登録ファイルに記載されるか、直接メールでご連絡ください。料理、ビール等に加えて、珍しい日本酒も用意しております。多数の方の参加をお待ちしております。

#### 5. 参加費と事前振込みのお願い

7月31日までに登録していただいて8月2日までに振り込まれる会員の方の大会参加費は、一般4,500円、学生2,500円です。それ以外の場合の会員の方の大会参加費は、一般5,000円、学生3,000円です。非会員の大会参加費は、一般5,500円、学生3,500円です。7月31日までに登録していただいて8月2日までに振り込まれる方の懇親会費は、一般4,500円、学生3,000円です。参加費・懇親会費は、通信欄に振込みの内容(参加費、懇親会費等)と連絡先を明記し、下記の口座へお振込みください。もう既に参加登録済みの方におかれましては、速やかに参加登録費をお支払いいただきますようお願い申し上げます。参加予定でまだ参加申し込みをされていない方におかれましては、大会本部にて当日参加を承っております。ただし、大会当日は混みあうことが予想されますので、なるべく予めご登録の上、大会参加費をお支払いいただければ幸いです。

会員の方の事前振込みの方法は、ニュースレター6月号に同封されていた振込み用紙を使っていただければわかりやすいと思います。銀行振込みも可能ですが、この場合には振込み人氏名の先頭に年会登録番号を記

入していただければ幸いです。

**ゆうちょ銀行の受領書は大切に保管し、参加初日に大会会場受付へご持参ください。**

振込先は次の通りです。

加入者: JSMB 2012

口座番号: 01380-6-101850

#### 6. 大会実行委員と問い合わせ先、交通案内

梶原毅(岡山大学・環境生命 委員長)、佐々木徹(岡山大学・環境生命 副委員長)、竹内康博(青山学院大学・理工)、難波利幸(大阪府立大学・理学)、濱谷義弘(岡山理科大学・総合情報)、佐藤一憲(静岡大学・工)、宮崎倫子(静岡大学・工)、高須夫悟(奈良女子大学・理)、時田恵一郎(大阪大学・サイバー)、中岡慎治(理化学研究所・免疫数理モデリング)、岩見真吾(九州大学・理学)

大会全般に関するご質問は、大会事務局  
jsmb12@ems.okayama-u.ac.jp  
までお願いします。

会場は岡山駅からバス、タクシーが便利です。岡山駅西口から岡電バス47番岡山理大行きで岡山大学西門下車、または岡山駅東口から岡電バス17番妙善寺行きで岡山大学東門下車となります。津山線法界院駅から、徒歩約10分です。津島キャンパス北部については、次のURLをご覧ください。

<http://www.okayama-u.ac.jp/>

[tp/access/soumu-access\\_tsushima\\_n.html](http://access/soumu-access_tsushima_n.html)

ホテルは岡山駅近辺を始めとして多数ありますので、各自直接ご予約ください。

## 2014年日米数理生物学会合同大会のお知らせ

難波利幸\*

Society for Mathematical Biology (SMB) と日本数理生物学会の合同大会 (JSMB/SMB 2014) が、2014年7月28日から8月1日にかけて、大阪国際会議場で開催されます。これまで、2001年のハワイと2007年のサンノゼの2回の合同大会を経験していますが、日本国内で開催するのは初めてとなります。アジアで開催される大会ですので、中国数理生物学会 (CSMB) と韓国数理生物学会 (KSMB) にも協力を依頼し、日本とアメリカの数理生物学だけではなく、アジアの数理生物学の発展に貢献できる大会を目指します。



大会会長は、次期日本数理生物学会会長の三村昌泰さんです。三村さんの下に、SMB, CSMB, KSMBからもメンバーを募って Scientific Advisory Board を構成し、基調講演者の選定などにあたっていただきます。

また、Local Organizing Committee には、実務的な運営を行うのみならず、大会の学術的な内容を魅力的なものにするために、幅広い専門分野の多くの方々に加わっていただきました。

関係者一同、この合同大会を、将来の数理生物学を担う若手研究者にとって刺激的なものにするよう努力いたします。周辺分野の方々も含めて数多くの方々の

\*大阪府立大学理学系研究科

ご参加をお待ちしています。

ミニシンポジウムの企画募集や、contributed session, poster session などの講演の募集は、メーリングリスト biomath でアナウンスするとともに、学会ホームページからリンクを張られるホームページで随時ご案内します。

### Scientific Advisory Board

三村昌泰 (明治大学) (Chair)

巖佐 庸 (九州大学)

重定南奈子

竹内康博 (青山学院大学)

山村則男 (同志社大学)

SMB から5名程度

CSMB と KSMB から各2名を予定

### Local Organizing Committee

難波利幸 (大阪府立大学) (Chair)

阿久津達也 (京都大学)

江副日出夫 (大阪府立大学)

稲葉 寿 (東京大学)

梶原 毅 (岡山大学)

三浦 岳 (京都大学)

望月敦史 (理化学研究所)

森下喜弘 (理化学研究所)

森田善久 (龍谷大学)

中岡慎治 (理化学研究所)

大槻 久 (総合研究大学院大学)

笹井理生 (名古屋大学)

佐々木 颯 (総合研究大学院大学)

瀬野裕美 (広島大学)

瀬戸繭美 (奈良女子大学)

柴田達夫 (理化学研究所)

高橋 智 (奈良女子大学)

高須夫悟 (奈良女子大学)

藤 博幸 (産業技術総合研究所)

時田恵一郎 (大阪大学)

若野友一郎 (明治大学)

矢田哲士 (京都大学)

山内 淳 (京都大学)

## 学会事務局からのお知らせ

事務幹事長 山内 淳

### 1. 2012年日本数理生物学会年次総会のお知らせ

2012年度の年次総会が第22回日本数理生物学会岡山大会（2012年9月10日-12日）に合わせて開催されます。日時および場所は、9月11日（火）16時より、岡山大学大学院自然科学研究科棟大講義室です。

#### ■ 議題（予定）

- (1) 2013年日本数理生物学会大会について
- (2) 2014年SMB・JSMB合同日本大会について
- (3) 2015年日中韓コロキウムについて
- (4) 大久保賞選考委員（1名）の改選
- (5) 2011年度決算および2012年度予算
- (6) 2013年-2014年度会計監査委員の承認
- (7) 事務局から（名誉会員について、その他）
- (8) その他

#### ■ 報告事項（予定）

- (1) 研究奨励賞 第7回受賞報告
- (2) 事務局からの報告（2013年-2014年役員選挙報告、その他）
- (3) その他

### 2. 大久保賞選考委員候補者の推薦のお願い

日本数理生物学会会則第17条に基づき、大久保賞選考委員候補者（改選1名）の推薦をお願いいたします。被推薦者は本学会員である必要はありません。現在の委員は佐々木徹、難波利幸、山村則男の3氏です。過去6年以内に委員を勤められた方々は委員になることができませんので、上記の3氏に加えて、松田裕之、佐々木顕、関村利朗、高須夫悟、中島久男、稲葉寿の6氏も候補にはなりませんのでご注意ください。推薦は電子メール、FAXまたは郵送により、下記山内淳幹事長あてにお送りください。推薦締め切りは2012年9月7日（金）とさせていただきます。

〒520-2113 滋賀県大津市平野2丁目509-3 京都大学生態学研究センター 山内淳

Email: a-yama@ecology.kyoto-u.ac.jp, Tel & Fax: 077-549-8259

### 3. 日本数理生物学会研究奨励賞 第7回受賞報告

この度、第7回研究奨励賞の受賞者が以下のように決まりましたのでお知らせいたします。

佐竹暁子 氏

（北海道大学大学院地球環境科学研究院）

増田直紀 氏

（東京大学大学院情報理工学系研究科）

なお、受賞講演は今年度の日本数理生物学会大会において行われる予定です。

#### ■ 選考報告

2012年度研究奨励賞選考の結果を以下の通りご報告致します。

佐竹暁子 氏

（北海道大学大学院地球環境科学研究院）

増田直紀 氏

（東京大学大学院情報理工学系研究科）

今年度は5名の候補者がありました。内3名が任期なし有職者でした。まず、審査第一段階として、各候補者に関する書類を選考委員6名が個々に吟味した後、各選考委員の持ち点を7点とし、候補者に配点し、所見とともに委員長に報告しました。その評価結果を委員長がまとめたものを各委員に配布し、授賞の対象者の選定の議論を進めました。審査第一段階での評価結果では、各候補者に対する配点の6名の委員の配点分布、平均点および分散をまとめました。平均点において、1位と2位の方が、3位以下の方に比べて、明らかに高配点を得た結果でした。また、3位の方については、配点の分散が他の方に比べて明らかに大きくなっていました。委員長により、この上位2名の方を有力な候補として、審査第二段階として、5名の各委員からの受賞候補者の選考意見を文面で求めたところ、「数理生物学に貢献をしている本学会の中堅または若手会員の優れた研究を表彰することにより、研究の発展を奨励し我が国の数理生物学の一層の活性化をはかるため、日本数理生物学会研究奨励賞を設ける」との会則に基づいて、業績の優劣のみならず、若手研究者の研究奨励の観点でも、候補者全員の受賞資格につい

て検討すべきであるとの意見を受け、選考委員会全員で慎重に議論を重ねました。その結果、候補者中4名に受賞の資格を認めるものの、細則で定められている受賞者2名以内という枠内で、上記の2名に研究奨励賞を授与することを選考委員会の結論とするに至りました。なお、選考委員会の議論において、数理生物学の生き生きとした発展を促す意義があるものとして、研究職に就く以前の若手研究者に対する奨励賞授賞についても、しっかりと視野に入れた選考を行ってゆくことの重要性を確認したことを申し添えます。

佐竹暁子氏は、2002年に九州大学大学院理学研究院生物学専攻において学位取得後、日本学術振興会特別研究員として、Pennsylvania State University (USA)、京都大学生態学研究センター、Princeton University (USA)での研鑽を経て、2007年4月-2008年2月には、Swiss Federal Institute of Aquatic Science & Technologyにおいて、理論生態学グループリーダーを勤められました。その後、北海道大学創成研究機構テニュアトラック助教を経て、2011年より北海道大学大学院地球環境科学研究院准教授を勤めておられます。2008年10月-2012年3月には、科学技術振興機構さきがけ研究員も兼任されておられます。その秀でた業績の中でも、成り年現象に関する理論を提案した著名な研究が数理生物学への貢献として重要です。これまで主に数理生態学における研究を行ってこられました。その経験を礎に、自らの数理生物学研究の世界を広げる研究に取り組んでおられ、今後、中堅として、数理生物学の発展への寄与が大いに期待される研究者であると認められます。

増田直紀氏は、2002年に東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻において学位取得後、日本学術振興会特別研究員、理化学研究所基礎科学特別研究員（脳科学総合研究センター）として研鑽を重ね、2006年10月に東京大学大学院情報理工学系研究科数理情報学専攻の講師に就かれた後、2008年9月より同専攻准教授を勤めておられます。2008年10月-2012年3月には、科学技術振興機構さきがけ研究員も兼任されておられます。ネットワーク理論の若手第一人者として活躍されながら、ネットワーク理論を駆使した物理学バックグラウンドの数理生物学関連研究を幅広く行ってこられました。数理生物学におけるネットワーク理論応用の気鋭の研究者として、今後の発展が大いに期待されます。

若手から中堅に向かおうとする世代お二人の受賞が、後進の若手の鼓舞となることを期待します。また、異なるバックグラウンドをもつ二人の受賞は、今後の日本の数理生物学研究の豊かな広がりを期待させるものでもあります。

上記に従いまして、佐竹暁子氏と増田直紀氏の両氏は「数理生物学に貢献をしている本学会の中堅または若手会員の優れた研究を表彰することにより、研究の発展を奨励しわが国の数理生物学の一層の活性化をはかる」という授賞基準に十二分に値する資質を有する研究者であることを選考結果とし、ここに、佐竹暁子氏と増田直紀氏の両氏を日本数理生物学会研究奨励賞の受賞者として推薦する次第です。

日本数理生物学会  
研究奨励賞選考委員会

#### 4. 数理生物学会が主催・共催・後援する学会・研究集会

生命医薬情報学連合大会（日本数理生物学会協賛）  
2012年10月14日-17日  
タワーホール船堀（東京都江戸川区船堀4-1-1）

#### 5. 会費納入のお願い

今年度ないし過去の会費未納の方は下記口座への納入をお願いいたします。

ゆうちょ銀行の振替口座：

口座番号：00820-5-187984

口座名称（漢字）：日本数理生物学会

口座名称（カナ）：ニホンスウリセイブツガツ  
カイ

他銀行から振込：

店名（店番）：0八九（ゼロハチキュウ）店  
（089）

預金種目：当座

口座番号：0187984

## 日本数理生物学会 2011年度決算

会計幹事 江副日出夫

一般会計		2011年度予算	2011年度決算
収入			
繰越		3,200,000	3,546,685
会費		1,279,000	1,265,246
大会還元金		0	294,743
利子等		0	41
	計	4,479,000	5,106,715
支出			
ニュースレター	冬印刷	50,000	58,170
	冬郵便	35,000	46,530
	春印刷	55,000	47,670
	春郵便	35,000	35,470
	秋印刷	50,000	42,420
	秋郵便	35,000	34,950
名簿印刷		0	136,920
選挙		50,000	61,205
通信費等	通信費	20,000	3,650
	ドメイン名経費	4,500	0
	研究奨励賞経費	15,000	15,270
事務局経費	事務員経費	100,000	0
	事務諸経費	70,000	23,700
特別会計へ		100,000	394,743
	小計	619,500	900,698
	予備費(次年度繰越)	3,859,500	4,206,017
	計	4,479,000	5,106,715
特別会計		2011年度予算	2011年度決算
収入			
繰越		1,200,923	1,043,180
繰り入れ(一般)		100,000	394,743
	計	1,300,923	1,437,923
支出			
大会費		50,000	0
旅費		250,000	60,400
	小計	300,000	60,400
	予備費(次年度繰越)	1,000,923	1,377,523
	計	1,300,923	1,437,923

## 監査報告

日本数理生物学会の2011年度の収入および収支に関する証書類を調べ、全て適正に執行され、決算報告にも誤りのないことを確認しました。

会計監事 佐藤 一彦  
2012年8月7日





## 研究集会カレンダー

2012年8月10日付(前号 No.67 からの差分)

### 2012 December

#### Dec 13-14 名古屋大学

第18回 交通流のシミュレーションシンポジウム  
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/>

#### Dec 15-19 San Francisco, CA

American Society for Cell Biology Annual Meeting  
[http://www.ascb.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=858&Itemid=361](http://www.ascb.org/index.php?option=com_content&view=article&id=858&Itemid=361)

#### Dec 17-21 京都大学

数学と生命現象の連関性の探求～新しいモデリングの数理～  
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/hones/RIMS2012/MBNW2012.html>

### 2013 January-

#### Jan 3-6 Denver, CO

Dynamics Days 2013  
<http://dynamicsdays.info/>

#### Jan 9-12 San Diego, CA

2013 Joint Mathematics Meetings  
<http://jointmathematicsmeetings.org/jmm>

#### Feb 15-18 Barcelona, Spain

2013 International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods  
<http://www.biophysics.org/>

#### Feb 25- Mar 1 Boston, MA

SIAM Conference on Computational Science & Engineering  
<http://www.siam.org/meetings/cse13/>

#### Mar 4-6 理研 CDB

The Making of a Vertebrate  
<http://www.cdb.riken.jp/sympo2013/>

#### Mar 4-6 Honolulu, HI

5th International Conference on Bioinformatics and Computational Biology  
<http://bicob.ece.iastate.edu/>

### 編集後記

68号をお届け致します。今回は、震災関連の研究を特集しました。2011年3月におこった震災は、今なお大きな爪痕をこの国に残しています。ニュースレター編集委員会では、一日も早い復興を祈りつつ、震災関連の問題に立ち向かう数理生物学者の取り組みを紹介することにしました。いずれも読み応えのある力作で、4人の執筆者（阿久津典子さん、大内則幸さん、川口勇生さん、瀬戸繭美さん）の皆様には感謝致します。なお、ご寄稿いただいた原稿の中には美しいカラーの図も含まれていましたが、予算の都合上、ニュースレターはモノクロで印刷させて頂きました。カラーの図（阿久津さんの記事など）につきましては、是非ともオンライン版をご覧下さい。他に、及川典子さんには研究会「Ethology and Rheology of Physarum and Its Related Topic」の参加報告記事をご寄稿いただきました。真正粘菌の移動をテーマに、新しい研究が様々なアプローチからなされつつあるようです。執筆者の及川さんに感謝致します。さて、9月はいよいよ日本数理生物学会の年会が開催されます。梶原毅さんに年会の案内記事を書いていただきましたので、ご覧下さい。今年度も興味深いシンポジウムがたくさん企画されています。それでは、岡山で皆様にお目にかかれるのを楽しみにしています。

(黒澤)

日本数理生物学会ニュースレター第68号  
2012年9月発行

編集委員会 委員長 望月 敦史  
mochi@riken.jp

理化学研究所基幹研究所  
〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

発行者 日本数理生物学会  
The Japanese Society for Mathematical Biology  
<http://www.jsmb.jp/>

印刷・製本 (株) ニシキプリント