談
話
室

BIOMOD: 分子ロボティクスの 次世代育成大会

佐藤佑介^{1,2}, 瀧ノ上正浩³, 野村 M. 慎一郎¹

¹東北大学大学院工学研究科・ロボティクス専攻

²日本学術振興会特別研究員(DC2)

³東京工業大学情報理工学院情報工学系

1. 分子ロボティクスとは

デバイス群がシステム化されると、ロボットになる。著者らの取り組む学問分野である分子ロボティクスでは、さまざまな分子デバイスを設計しシステム化することによって、動作をプログラムできるような分子複合構造「分子ロボット」の構築¹⁾を目指している。それを通じて、自然界では使われていない生体分子システムの潜在能力を発見し、利用することが目的である。本学会年会でも幾度かシンポジウムが開催されており、生物物理学をはじめ化学、工学など分野を横断して活発な研究が行われている。生物物理学は基礎と応用の両面を持っている²⁾と言われるが、分子ロボティクスはまさにその好例である。

分子ロボティクスの重要なキーワードの一つに分子デザインがある。その対象は分子構造、刺激に対する分子の応答や分子反応のネットワークなどさまざまである。分子ロボットをデザインする上で有用な技術の一つが「DNA ナノテクノロジー」である。これは、DNA 分子の 4 種の塩基 (A, T, G, C) の配列を任意の二重らせんが形成されるようにデザインすることで構造や反応経路などを作製するものである。数千におよぶ塩基配列を、こんがらからないようにすべて人の手で設計することは極めて困難であるが、近年では DNA 構造設計支援のための Web ツール (caDNAno) などが公開されている。そして、合成 DNA のコストも 1 塩基あたり数十円と下落したことから、DNA 分子デザインを始めるにあたっての障壁は劇的に下がってきている。また、DNA を用いて分子反応のネットワークをデザインすることで、分子デバイスとその制

御用計算回路をまとめて一種類の分子で配線 (Wiring) できることも大きな利点である。こうした背景のもと、米国の Shawn Douglas 博士らの発案によって 2011 年から米 Harvard 大 Wyss 研究所主催によって開催されているのが国際学生生体分子デザインコンペティション, BIOMOD である [Biomod.net]。

2. BIOMOD とは

BIOMOD は、生体分子 (核酸, タンパク質, 脂質など) を材料とする人工分子のデザイン大会である。学部学生がチームを組み、テーマを決めて約半年の活動を行う。実験の大部分は夏休みを利用して行われ、プロジェクトの紹介 Web ページと動画を作成し、11 月に米国での本大会 (Jamboree と呼ばれる) でプレゼンテーションを行ってその出来映えを競う。教員や先輩学生はアドバイザー・メンターとして参加する。毎年世界中からチームが参加しており、昨年は 12 の国と地域から 30 チームが Jamboree 会場のボストンに集まった。今年の舞台は西海岸 UCSF である。

日本からも 2011 年の初年度より毎年複数のチームが参戦しており、独自に国内中間大会 (本大会と同様の採点方式) を開催するなど大いに盛り上がっている。同様の大会としては、先輩筋にあたる合成生物学の学生コンペティション iGEM が有名である [igem.org]。生物改造選手権の iGEM, 分子工作選手権の BIOMOD, といった棲み分けであろうか。BIOMOD では、設定するテーマは「分子をデザイン」していれば何でも OK である。ちなみに、2015 年大会の総合優勝は、単独種の分子によって直線状の重合数 = 長さが制御できる、というプロジェクトだった。分子は DNA オリガミで

BIOMOD: Road to Molecular Robotics

Yusuke SATO^{1,2}, Masahiro TAKINOUE³ and Shin-ichiro M. NOMURA¹

¹Department of Robotics, Graduate School of Engineering, Tohoku University

²JSPS research fellow (DC2)

³Department of Computational Intelligence and Systems Science, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

デザインされ、筒と、その内部に回転できる「ねじれた」シャフトがある。この筒が直線状に連結すると内部のシャフトのねじれ角が蓄積して、重合数が決定される、というものであった³⁾。

チームプロジェクトの評価には明確な基準があり、オリジナリティと達成度、説明の明瞭さが重視されている。そして、プロジェクトを紹介するための Web ページと 3 分の動画、Jamboree (本大会) での成果発表の合計得点で賞が決まる。各国のチームがしのぎを削る中で、プロの研究者に匹敵する取り組みや成果を見せるチームもある。たとえば、2013 年大会で総合優勝した独 LMU チームのプロジェクトは、2015 年に学術論文として報告されている⁴⁾。

このイベントを教育的な側面から見てみよう。学部生にとって、いきなりプロジェクトの立案から実験・まとめ・プレゼンテーションまでのすべてを行い、外部審査員に評価され順位づけられるという経験は相当にタフなものである。したがって、学生は控えめに言って飛躍的に成長する。言語はもちろんすべて英語であり (この点は多くの日本人学生にとって最大の困難とも言える)、留学生と仲良くなったり、大会後に留学したりと、急速に英語力を伸ばすきっかけでもある。メンターとして学部生を指導する先輩学生、院生らにとっても実験結果の解釈や文章の添削を通じて学ぶ機会が多い。一方で、科学的に足りない部分や説明不足を見抜き、チームを磨くアドバイザーの役割もまた大きい。

3. 経験談話室

N「…というわけで S 君、BIOMOD 実際どうでした？」
S「のめり込みましたね。頭の中で想像した分子の様子が、たとえば DNA オリガミは透明な液体でももちろん見えないけれど、混ぜて温めて冷やして (AFM で) 叩いて観ると確かに設計通りの構造がある。初めて見たときは感動しました。設計通りにできた面白さ、そしてできない時の謎解き大会。ぼくらが出場した第 1 回大会では絶対に自分たちが 1 位だと思いました。結構頑張った…でも勝てなかった。テーマの明快さ、伝えることの重要性に気づかされました。」

N「君ら悔しがってリベンジを直訴にきたもんなあ、夜中に。…あ、初年度いきなり世界 2 位のアドバイザー T 氏じゃないですか。いかがでした？」

T「いや、あれ正直大変ですよ。場所提供したり助言したりその他、学部学生を海外に連れて行けるようなグラントを探して申請したり。でも学生が頑張ってる、できることはしてあげたくなる (笑)」

N「アイデア持ち込んでくる学生を片っ端から迎撃する“醍醐味”も、ですね。大会後のくらしはどう？」
S「BIOMOD は自由な発想で自由にプロジェクトを進められる大会なので、そこに参加した自分たちだからこそ生み出せる価値観がある、という思いで過ごしています。夢中で研究できる現役 BIOMODer が正直羨ましいですね (笑)。先輩としても彼らから質問されて答えられないのは嫌なので、つい先回りして調べ物をしてしまう。彼らの文章を添削すると自分が書くときの参考になることが多いです。」

N「教員も教員で、つい口を出したくなる、と」

T「でその口出しをまとめると妙にアツい教科書⁵⁾ができて、無料配布される、と」

S「旧世代からのご支援ありがとうございます！」

N & T「…旧！」

4. 次世代の研究者による分子ロボティクス

BIOMOD 大会から次世代の研究者が続々と育つか？と問われたならば、甲子園球児とプロ野球選手の関係に近いと答えるのが当たらずといえども遠からず、だろうか。BIOMOD を絶好のトレーニングの機会として、その経験をもとに分子ロボティクスに挑戦し続ける若手が確実に残っており、BIOMOD メンターたちの立ち上げた「分子ロボティクス若手の会」が年 2 回開催とハイペースな活動を続けている⁶⁾。

さて、人工の分子デバイス群をシステム化するという分子ロボットのデザインの一つに、脂質膜小胞 (リポソーム) をシャシーとして分子デバイス群、分子機械たちをインストールするボトムアップ様式の「人工細胞タイプ」があり、BIOMOD でもしばしば提案されている。ただ袋に全溶液を混ぜるだけでなく、分子のふるまいをいかにプログラムするか、つまり人の意思を分子の現場にどのように伝えるか、という部分が今後の研究の焦点になる。人工 DNA 回路による配線はその一例であり、遺伝子発現系やエネルギー変換系など、生物から抽出・精製・改変された組み込み可能な制御用分子回路が次々実装され、制御方法が編み出されてゆくだろう。今はまだ簡単な運動の ON/OFF スイッチしかできない分子ロボットであるが、今後の複雑化・精緻化によって既存の生命システムを超える分子システムを人間が作れるようになった時、生体分子システムについて本当に分かったと言え、その先に天然と人工の壁を越えた人間の活動を拡大できるような本当の分子工学が誕生するのではないだろうか。それを実現するきっかけが学生の力であったなら、相当に痛快であろう。学生大会が分子レベルからのデザイ

図 1
BIOMOD 本大会発表のひとこま。

ンについて自由な広がりを見せるのを横目に、プロはヒトゲノムを全合成すると宣言するし⁷⁾、タンパク質デザインの時代もすぐそこに迫っているようだ⁸⁾。

さあ、あなたなら次に何をつくりますか？

文 献

- 1) Murata, S. *et al.* (2013) *New Gener. Comput.* **31**, 27-45. DOI: 10.1007/s00354-012-0121-z.
- 2) 石渡信一 (2010) *生物物理* **50**, 1. DOI: 10.2142/biophys.50.001.
- 3) <http://teamsendai.github.io>
- 4) <http://openwetware.org/wiki/Biomod/2013/LMU> からの Zhang, T. *et al.* (2015) *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 9776-9779. DOI: 10.1021/jacs.5b04857.
- 5) 分子ロボティクス研究会編「DNA 分子デザインのすべて～BIOMOD 虎の巻」, CBI 学会 ebook シリーズ第 2 巻 http://cbi-society.org/home/pub_ebook.html.
- 6) http://www.molecular-robotics.org/2016/07/4th_wakate/
- 7) Boeke, J. D. *et al.* (2016) *Science* **353**, 126-127. DOI: 10.1126/science.aaf6850.
- 8) Bale, J. B. *et al.* (2016) *Science* **353**, 389-394. DOI: 10.1126/science.aaf8818.

佐藤 佑介 (さとう ゆうすけ)

東北大学大学院工学研究科ロボティクス専攻, 博士課程後期 2 年・日本学術振興会特別研究員 (DC2)

BIOMOD2011 Team Sendai リーダー, 東北大学工学部機械知能航空工学科卒, 2015 年より現課程に進学, 16 年より日本学術振興会特別研究員 (DC2)

研究内容: ペシクル型分子ロボットの構築

連絡先: 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

E-mail: sato@molbot.mech.tohoku.ac.jp

URL: <http://www.molbot.mech.tohoku.ac.jp/>

瀧ノ上 正浩 (たきのうえ まさひろ)

東京工業大学情報理工学院准教授

東京大学理学部物理学科卒, 同・物理学専攻博士課程修了, 博士 (理学), 京都大学理学研究科博士研究員, 東京大学生産技術研究所特任助教, 東京工業大学大学院総合理工学研究科講師および准教授, JST さきがけ「細胞構成」兼任を経て, 2016 年より現職。

研究内容: 人工細胞・分子ロボット構築に関する生物物理学

連絡先: 〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G3-53

E-mail: takinoue@c.titech.ac.jp, masahiro.takinoue@takinoue-lab.jp

URL: <http://www.takinoue-lab.jp/>

野村 M. 慎一郎 (のむら しんいちろう)

東北大学大学院工学研究科ロボティクス専攻, 准教授

静岡大学工学部卒, 京都大学大学院理学研究科博士 (理学), 21 世紀 COE「歯と骨」特任講師, JST さきがけ「界面」兼任, WPI iCeMS 研究員などを経て 2011 年より現職。

研究内容: 人工細胞工学, 分子ロボティクス

連絡先: 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

E-mail: nomura@molbot.mech.tohoku.ac.jp

URL: <http://www.molbot.mech.tohoku.ac.jp/>