



技報



K O M A K U S A • 2014.10 •

## 大きな研究、小さな研究

信州大学 特任教授 宮入 圭一

研究助成  
報告

### 非接触動的トランスオーラルシステムによる 高精度パーソナル聴覚ディスプレイの開発

情報工学科 大谷 真 (現所属 京都大学工学研究科建築学専攻)

### 非平衡系が実現する超高密度Auナノ秩序構造

情報工学科 安川 雪子 (現所属 千葉工業大学工学部電気電子情報工学科)

## | 研 | 究 | 室 | 紹 | 介 |

新しい制御原理の発見に基づく最先端ロボット工学

機械システム工学科 准教授 酒井 悟

集積回路・デバイス研究室(宮地研)紹介

電気電子工学科 助教 宮地 幸祐

中屋研究室の紹介—地下水のフィールド・サイエンス&テクノロジー—

土木工学科 教授 中屋 眞司

寺内研究室の紹介

建築学科 准教授 寺内美紀子

バイオマス分解酵素の改良と利用

物質工学科 准教授 野崎 功一

新村國宗研究室

情報工学科 准教授 新村 正明 助教 國宗 永佳

鈴木研究室の紹介

環境機能工学科 准教授 鈴木 孝臣

No. 12

# 目 次

## 大きな研究、小さな研究

- ／信州大学 特任教授 宮入 圭一…………… 1

## 研究助成報告

非接触動的トランスオーラルシステムによる高精度パーソナル聴覚ディスプレイの開発

- ／情報工学科 大谷 真 (現所属 京都大学工学研究科建築学専攻) …… 2

非平衡系が実現する超高密度 Au ナノ秩序構造

- ／情報工学科 安川 雪子 (現所属 千葉工業大学工学部電気電子情報工学科) …… 6

## 研究室紹介

新しい制御原理の発見に基づく最先端ロボット工学

- ／機械システム工学科 准教授 酒井 悟……………13

集積回路・デバイス研究室 (宮地研) 紹介

- ／電気電子工学科 助教 宮地 幸祐……………14

中屋研究室の紹介—地下水のフィールド・サイエンス&テクノロジー—

- ／土木工学科 教授 中屋 眞司……………15

寺内研究室の紹介

- ／建築学科 准教授 寺内美紀子……………17

バイオマス分解酵素の改良と利用

- ／物質工学科 准教授 野崎 功一……………19

新村國宗研究室

- ／情報工学科 准教授 新村 正明・助教 國宗 永佳……………20

鈴木研究室の紹介

- ／環境機能工学科 准教授 鈴木 孝臣……………22

## 大きな研究、小さな研究

信州大学特任教授  
宮入 圭一

大きな研究といえば、多くの研究者で組織を作り、高額な研究費を使い、社会的影響も大きな課題に取り組むことを想像する。一方、小さな研究といえば、注目度が低く重要度が低い課題に取り組むことを想像しがちであるが、むしろ個性的で創造性があり、新規性が潜んでいることが決して少なくない。研究とは広辞苑によれば、「良く調べ考えて真理を究める」とあり、研究の結論は客観的で普遍的に正しく再現可能な成果であるべきである。理化学研究所から発表されたSTAP細胞の研究がどこまで詰めて検討した結果なのか、研究発表の仕方が問われている。大変注目され、重要度が高く時流に乗る研究であればある程成果の発表が急がれるが、誤った発信は学術界のみならず社会へも大きな影響を与え、さらには本人の研究生命にも関わる。多くの研究機関、大学では研究業績を上げることが要求されており、内容よりも概して論文数が評価されるので急いで多くの論文を発表する傾向にある。また、研究成果がプライオリティ、特許等に結びつく競争社会の中で研究活動が行われている背景もあるであろう。

物質・粒子の基本原則として我々が物理学で学ぶ「不確定性原理」はハイゼンベルグが学生時代から指導を受けていたゾンマーフェルド教授、問題提起をされたボーア教授、貴重なコメントをくれたアイシュタイン教授らとの徹底した討論を経て発見されたものであるという。ドイツが誇る科学者ハイゼンベルグの講演を大学院時代に聞いたことがあり、その姿はまさに真の学者であり大先生であった。日本のある著名な大学教授が「学問は人格である」と言われたのを覚えているが、研究のプロセス、結果の整理、発表等には人間性が現れる。ポアンカレが言うように「科学者は実益があるから自然を研究するのではなく自然に愉悦を感じるからこそこれを研究し、また自然が美しいからこそ、これに対して喜びを感じるのである」の境地で研究ができるならばこの上ないであろう。

本人の学問的好奇心、鋭い観察力と前例にとらわれない自由な発想で生まれる個性的で独創的な研究、一見思いつきで小さいと思われがちであるが、「何かきらりと光る」研究を重視したい。科学研究費補助金のように綿密な研究計画と過去の実績に基づいて助成される場合は研究の遂行がフレキシブルではない。本財団からの助成は金額が少ないので、時流に乗った研究で素晴らしい結果というよりは、萌芽的な研究に向けられ、研究の種になる課題、あるいは研究者自身の興味が沸く発見等があり、将来の研究に結びつけば、財団としての役割が果たされたといえるであろう。

## 非接触動的トランスオーラルシステムによる 高精度パーソナル聴覚ディスプレイの開発

大谷 真

信州大学工学部情報工学科 〒 380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

E-mail: otani@cs.shinshu-u.ac.jp



### 1. はじめに

次世代インタフェースや高臨場感テレコミュニケーション実現の基盤技術として、ユーザに対して真の臨場感を与えることのできる音響再生システムが必要とされている。本研究では、非接触にユーザの頭部運動を検出することで両耳における音響信号を制御するシステムを開発することで、パーソナルユースに適した高臨場感聴覚情報呈示装置（ディスプレイ）の実現を目指す。

人間は五感情報を有機的に統合して外界を知覚・認識している。中でも常に全方位をセンシングしている聴覚は極めて重要な役割を果たしており、ユーザに対して真に臨場感のある時空間情報を呈示するためには聴覚情報を高精度に呈示する必要がある。このように、仮想的に3次元聴覚情報を呈示するシステムを聴覚ディスプレイという。聴覚ディスプレイの実現方法として、音場の支配方程式である波動方程式に基づき、多数のスピーカを用いてユーザを囲む領域内の音場を制御する波面合成方式（WFS: Wave Field Synthesis）[1]がある。WFSは理論上では音場を高精度に再生できることが証明されているが、実際にシステムとして実現するためには極めて多数の小型スピーカから成る大規模なシステムが必要であり、パーソナルユースへ適用するのは困難である。

一方、聴覚ディスプレイを実現するもう一つの方式として、バイノーラル方式[2]がある。この方式は、頭部や耳介といった人体が音波に与える影響である頭部伝達関数（HRTF: Head-Related Transfer Functions）を考慮して両耳への入力信号を制御することで高い臨場感をユーザに与える方法である。バイノーラル方式では両耳への入力というわずか2チャンネルの信号を制御すればよいため、前述のWFSと比較して小規模なシステムで実現可能である。バイノーラル再生ではヘッドホンが用いられる場合が多いが、クロストークキャンセラと呼ばれるフィルタを用いることで少数のスピーカで両耳信号

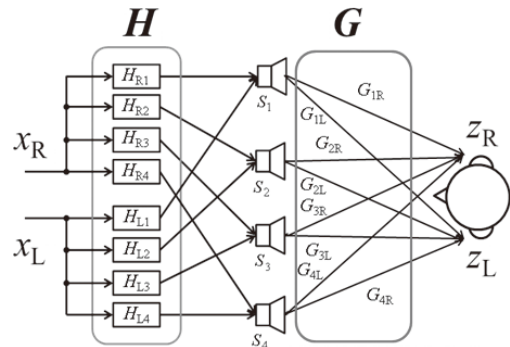


図1：音源が4つの場合のトランスオーラル再生系

を制御し同じ効果を得る方式を特にトランスオーラル方式[3,4]と呼ぶ。ヘッドホン使用及びトランスオーラル方式のいずれの場合でも、ユーザの頭部が動いた場合にはそれに追従してHRTFをリアルタイムで更新する必要があるが、特にトランスオーラル方式においては、HRTFだけではなくクロストークキャンセラを同時に更新しなければならない。

本研究では、頭部位置・運動を非接触に検出（トラッキング）し、両耳信号及びクロストークキャンセラをリアルタイムで更新する動的トランスオーラルシステムを開発し、かつ、その性能評価・最適化を行うことで、パーソナルユースに適した小規模システムによる高精度聴覚ディスプレイの実現、を目的とする。

### 2. 動的トランスオーラルシステムの開発

#### 2.1. クロストークキャンセラの設計法

図1に音源4つの場合の再生系のシステム図を示す。角周波数を $\omega$ 、左右の入力信号を $X_L(\omega)$ 、 $X_R(\omega)$ 、受聴者の両耳での再現信号を $Z_L(\omega)$ 、 $Z_R(\omega)$ とし、音源を受聴者から見て右から順に $S_i$  ( $i=1,2,3,4$ )とする。ここで、サンプル数 $m$ の時間遅延を表す伝達関数を $D_m(\omega)$ とし、

$$Z_L(\omega) = X_L(\omega)D_m(\omega)$$

$$Z_R(\omega) = X_R(\omega)D_m(\omega)$$

を満たすクロストークキャンセラの係数行列 $H$ は、

周波数領域での最小ノルム解として、

$$H = G^T (GG^T)^{-1} D$$

により算出される [5]。ここで、

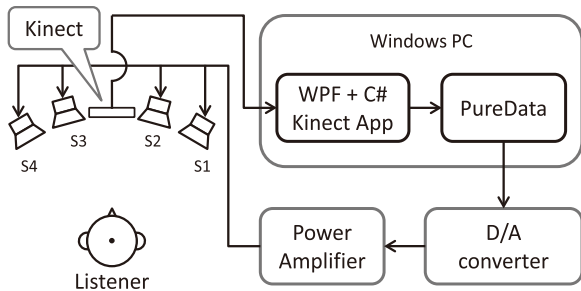


図2：動的トランスオーラル再生システムの構成

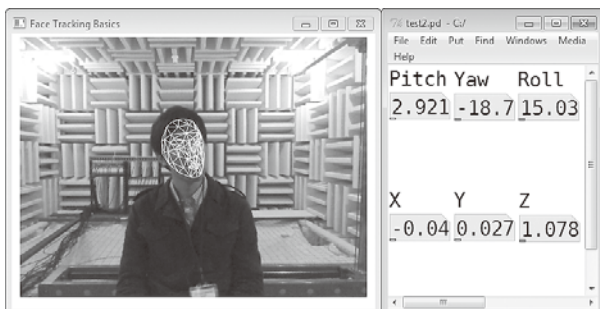


図3：KinectによるFace Trackingの動作例

表1：クロストークキャンセラの設計条件

音源数	4
音源までの距離	1 m
音源の水平角	± 15、± 30°
標本化周波数	44.1 kHz
頭部インパルス応答長	512 点
クロストークキャンセラ長	1,024 点
付加遅延	約 12 ms

$$H = \begin{bmatrix} H_{R1}(\omega) & H_{L1}(\omega) \\ H_{R2}(\omega) & H_{L2}(\omega) \\ H_{R3}(\omega) & H_{L3}(\omega) \\ H_{R4}(\omega) & H_{L4}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{1R}(\omega) & G_{2R}(\omega) & G_{3R}(\omega) & G_{4R}(\omega) \\ G_{1L}(\omega) & G_{2L}(\omega) & G_{3L}(\omega) & G_{4L}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_m(\omega) & 0 \\ 0 & D_m(\omega) \end{bmatrix}$$

であり、 $H_{Li}(\omega)$ 、 $H_{Ri}(\omega)$  はそれぞれ左右の入力信号から  $i$  番目の音源の間に挿入されるフィルタの係数、 $G_{iL}(\omega)$ 、 $G_{iR}(\omega)$  は  $i$  番目の音源と両耳の間の伝達関数を表す。上記のフィルタ設計法を用いて、事前に様々な頭部向きに対するクロストークキャンセ

ラのフィルタ係数を算出・保存し、データベース化して用いる。

## 2.2. 動的トランスオーラルシステムの概要

開発した動的トランスオーラル再生システムの構成を図2に示す。本システムは、受聴者の頭部運動を検出し、受聴者の頭部向きに応じてクロストークキャンセラを随時更新しつつトランスオーラル再生を行うことで、受聴者の頭部運動に頑健なトランスオーラル再生を目指すものである。本報告で述べる動的トランスオーラル再生システムでは受聴者前方に4つのスピーカを左右対称に配置した。

## 2.3. 非接触ヘッドトラッキング

受聴者の頭部運動のトラッキングは Microsoft Kinect 及びその Face Tracking 機能を用いて非接触に行われる。Kinect アプリケーションの開発には C# と Kinect for Windows SDK 1.5 を用いた。開発した Kinect アプリケーションの動作画面の一例を図3に示す。Kinect により得られる画像及び深度情報に基づいたパターン認識により、受聴者の骨格及び顔部のトラッキングを行い、頭部の位置 (x, y, z) 及び回転 (yaw, pitch, roll) の情報を OSC プロトコル [6] を用いてアプリケーション外部に向け送信する。

## 2.4. 信号処理

クロストークキャンセラや HRTF の時間領域表現である頭部インパルス応答 (HRIR: Head-Related Impulse Response) の選択、及びそれらと音源信号との畳み込み、音響信号の出力などの処理は Pure Data [7] (以下、Pd) を用いて行われる。

HRIR 及びクロストークキャンセラは事前に生成されデータベース化されたものを用いる。入力信号と HRIR の畳み込み、及びその結果得られる信号とクロストークキャンセラの畳み込みは、高速フーリエ変換を利用した Overlap-Add 法により行う。なお、現在のシステムは、受聴者の頭部回転 (yaw, pitch, roll) のみに追従する。表1にクロストークキャンセラ設計の際の条件を示す。

## 2.5. 頭部伝達関数

両耳信号の作成及びクロストークキャンセラ設計に用いた HRTF は、頭部コンピュータモデルと境界要素法による数値解析によって算出したものである。頭部コンピュータモデルは、実頭を対象として磁気共鳴画像装置により撮像した頭部断面画像から作成された。詳細については文献 [8] を参照されたい。

## 2.6. システム遅延

受聴者の頭部向きの変化が音響出力に反映される

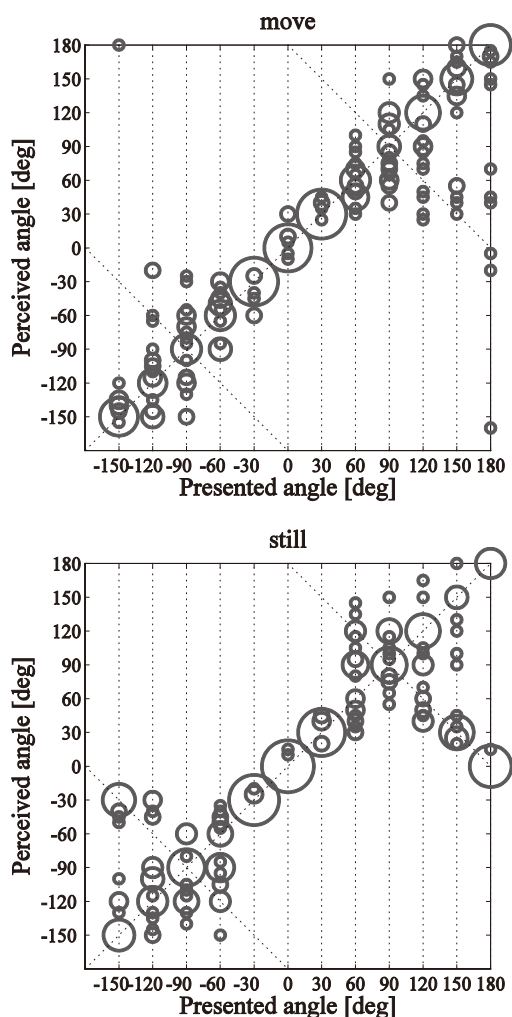


図4：定位実験結果（水平角、上：頭部運動条件、下：頭部静止条件）

までのシステム遅延について述べる。KinectのFace Trackingによる遅延を測定した結果、約90msであった。これにクロストークキャンセラの付加遅延や音響出力の遅延も加えると、合計で約100ms程度のシステム遅延が生じていると考えられる。この値は、動的な聴覚ディスプレイにおける遅延の検出閾値とされる60ms [9]を超過しており、受聴者はその遅延を知覚すると思われる。より自然な聴覚空間の呈示にはシステム遅延を低減する必要がある、今後の課題である。

### 3. 音像定位実験

開発した動的トランスオーラル再生システムの性能を評価するために、音像定位実験を行った。

#### 3.1. 条件

被験者は聴力正常な20代の6名とし、信州大学工学部総合研究棟の無響室内で行った。音源信号は信号長3sの白色雑音（標準化周波数：44.1kHz、量子化ビット数：16bit）とし、ダミーヘッド（高研SAMRAI）をKinectから1mの位置に設置し、

正面方向距離1mに音像を呈示した場合に、左耳での音圧レベルが約62dBであった。

音像の呈示方向は、正面を0°、反時計回りを正とし、-150°から180°まで30°毎に12方向とし、音像の呈示距離は全て受聴者の頭部中心から1mとした。試行回数は、各方向5回ずつの60回とし、頭部運動条件（move）と頭部静止条件（still）の2条件で合計120試行を行った。

#### 3.2. 方法

被験者はKinectから1mの位置に設置した椅子に着席した。椅子には背もたれがついているが、ヘッドレストは付いていない。被験者は音刺激を受聴し、音像位置（音像の水平角）を解答用紙に記入した。被験者は、水平角について5°間隔で-175°～180°までの範囲で解答した。音像距離0mは音像が頭内に定位した場合に相当する。解答用紙にはKinect及び4つのスピーカの位置が記載してある。

頭部運動条件（move）においては、被験者には音刺激の開始とともに頭部を回転させ受聴させた。受聴者は刺激が呈示されている間、正面・右・左・正面の順番で頭部を回転させる動作を1回行わせた。また、回転の範囲は、左右共に、両端のスピーカの方向を向くように指示した。すなわち、被験者には正面、右30°、左30°、正面の順で頭部を回転させた。頭部静止条件（still）においては、前述のKinectアプリケーションを起動せずに実験を行った。音刺激の呈示中は頭部を動かさずに正面を向いた状態で受聴させた。また、被験者にApple iPod Touchを持たせ、iPod Touchのタッチパネルに表示されたボタンをタッチすることで、音刺激の呈示が開始するようにし、被験者にこれを操作させた。

#### 3.3. 結果

定位実験の結果を図4に示す。これらの結果は全ての試行（被験者6名×60試行=360試行）をまとめた結果である。横軸は呈示された音像の水平角、縦軸は解答角度あるいは解答距離を表している。円の大きさが解答頻度を表している。図より、頭部運動条件（move）では、前後誤りが少なく、音像の水平角が高い精度で知覚できていることが分かる。前方に音像を呈示した場合と比較すると、側方から後方に音像を呈示した場合には、精度が低下している。頭部静止条件（still）では、頭部運動条件よりも前後誤りの頻度が多く、水平角の定位精度が低い。全試行における角度誤差の平均値は頭部運動条件で15.3°、頭部静止条件で34.8°であった。これらの結果は、動的トランスオーラルシステムが、受聴者の頭部運動に追従してクロストークキャンセラを更新

できていることを示している。

音像が頭内に定位した回数は、頭部運動条件で全360 試行中8回、頭部静止条件で全360 試行中2回、と頭部運動条件の方が多かったが、両条件において頭内定位はあまり生じなかった。

#### 4. 考察

音像の方向知覚に関して、音像を側方に呈示した場合には、前方に呈示した場合と比較して定位精度の低下がみられた。これは、音像が側方にある場合、両耳間レベル差が大きいにも関わらず、これを再現できていなかったためであると考えられる。これは、クロストークキャンセラの設計時に想定した受聴者と実際の受聴者が異なること、頭部トラッキングの誤差等によるものと考えられる。

また、被験者の内観報告からは、特に受聴者が頭部を回転させた場合に雑音を知覚していることが分かった。これは、システム遅延、トラッキングの誤差、クロストークキャンセラの更新角度(5度)の不足、などによりクロストークキャンセラが適切に動作せず、耳元で再現される音響信号の周波数特性に不要なピークが生じているためであると推測される。

#### 5. まとめ

非接触頭部トラッキングを利用した動的トランスオーラル再生システムを開発し、その性能を評価するため、音像定位実験を行った。その結果、頭部運動条件では、頭部静止条件の場合よりも音像方向が高い精度で知覚され、動的トランスオーラルシステムの効果が確認された。これにより、パーソナルユースに適した高精度聴覚ディスプレイを実現するための基盤技術を確立することができた。今後は、システム遅延の低減、スピーカの個数や配置などの最適化、などに取り組む。

#### 参考文献

- [1] A.J. Berkhout, "A holographic approach to acoustic control," *Journal of Audio Engineering Society* 36, 977-995, 1988.
- [2] J. Blauert, *Spatial Hearing*, revised ed. (MIT Press, Cambridge, MA, 1996)
- [3] M.R. Schroeder and B.S. Atal, "Computer simulation of sound transmission in rooms," *IEEE Convention Record*, 7, 150-155, 1963.
- [4] D.H. Cooper and J.L. Bauck, "Prospects for transaural recording," *Journal of Audio*

*Engineering Society* 37(1/2), 3-19, 1989.

- [5] 神沼充伸, "逆フィルタを用いて広い範囲を制御する音場再現システムに関する研究," 奈良先端科学技術大学院大学 博士論文, 2001.
- [6] <http://opensoundcontrol.org/>
- [7] <http://puredata.info/>
- [8] M. Otani, Y. Iwaya, Y. Suzuki, and K. Itoh, "Systematic behavior of resonance mode in pinna cavity," *Proc. Inter-Noise 2011*, Osaka, 2011.
- [9] S. Yairi, Y. Iwaya, and Y. Suzuki, "Estimation of detection threshold of system latency of virtual auditory display," *Applied Acoustics* 68(8), 851-863, 2007.

#### 本助成による研究業績

- [1] 倉林宏明, 大谷 真, 伊東一典, 橋本昌巳, 香山瑞恵, "非接触センサを用いた動的トランスオーラルシステムによる音像定位," 日本音響学会講演論文集, 831-834, 2013.
- [2] 大谷 真, 倉林宏明, "動的バイノーラル合成による音場の可聴化," 日本音響学会アコースティックイメージング研究会資料, AI-2013-20, 2013.
- [3] H. Kurabayashi, M. Otani, K. Itoh, M. Hashimoto, and M. Kayama, "Development of dynamic transaural reproduction system using non-contact head tracking," *Proc. 2<sup>nd</sup> IEEE Global Conference on Consumer Electronics*, 12-16, Chiba, Japan, 2013.
- [4] M. Otani, T. Tsuchiya, and Y. Iwaya, "Binaural synthesis of virtual acoustic field by numerous-channel reproduction," *Proc. Three Dimensional Systems and Applications Conference*, Paper No. 2014-080, Seoul, Korea, 2014.
- [5] H. Kurabayashi, M. Otani, K. Itoh, M. Hashimoto, and M. Kayama, "Sound image localization using dynamic transaural reproduction with non-contact head tracking," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* E97-A(9), 2014 (in press).

# 非平衡系が実現する超高密度 Au ナノ秩序構造

安川 雪子

信州大学 工学部 情報工学科

現所属 千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科

キーワード：Au ナノ粒子、スパッタリング、自己組織化、ナノ秩序構造



## はじめに

本報告は筆者が平成 22 年度から平成 25 年度まで在籍した信州大学 工学部 情報工学科 森迫・劉研究室において、森迫 昭光先生、劉 小晰先生のご指導のもとで行った研究内容をまとめたものです。この研究は先生方の多大なるご教授無くしてはできないものでした。また本研究は森迫・劉研究室の研究者と学生諸氏の多くの協力に基づいています。ここにすべての関係者各位に深く感謝の意を表しつつ、研究内容を報告します。

## 1. いま情報化社会で何が起きているのか

現代社会において、私たちは図 1 のイメージが示すように日々膨大なデジタルデータを創り出しそれを利用して利用しています。一般家庭にはデジタル家電が溢れ、私たちは当然のようにデジタル化されたデータを保存しています。一方、図 2 は世界中に存在するデジタルデータの全容量と、デジタルデータを保存する機器（情報ストレージ）が記録できる容量の年次推移を表しています [1]。図 2 を眺めてみると、デジタルデータの容量が保存できる記憶容量を大幅に上回っており、デジタルデータに対する情報ストレージの記憶容量が圧倒的に不足していることがわかります。数年後にはこの差がさらに顕著になると予測されています。

情報量が記憶容量を上回っているということは、何を意味しているのでしょうか？これは私たちが日々創り出しているデジタルデータが消えていること、すなわち私たちが創造している英知を未来の世

代に残せないことを意味しています。これまでの人類の歴史で、かつてこのようなことがあったでしょうか？元来、人類は「情報」を残すことに非常に積極的でした。これまで人類はロゼッタストーンやパピルス、羊皮紙に「情報」や「メッセージ」を記録し、次世代や後世に「情報」や「メッセージ」をバトンしてきました。しかしデジタルデータに頼りきっている現代の私たちは、図 2 が示すように 21 世紀の情報やメッセージを未来にバトンできないのです。

## 2. HDD に要求される「1 テラ (10<sup>12</sup>) ビット/平方インチ」

話を情報ストレージに戻しますと、情報ストレージの中核となっているのがハードディスクドライブ (HDD) です。近年ではソリッドステートドライブ (SSD) の普及が目覚ましいですが、世界中のすべての SSD が保存しているデジタルデータの容量は、すべての HDD が保存しているそれに対して僅か数%だと言われています。また 1 ビットあたりの製造コストは、現状では HDD の方が SSD よりも 1 桁ほど安価で [2]、現在の情報ストレージの主役は HDD です。

デジタルデータの容量が情報ストレージの記憶容量を凌駕している問題を解決するには、情報ストレージの主役である HDD の記憶容量を増加させれば良いことに気づきます。ではどのようにして HDD の記憶容量を増やせば良いのでしょうか？いつでも、どこでもデジタルデータを創って使いたい現



図 1：現代社会に溢れるデジタル情報

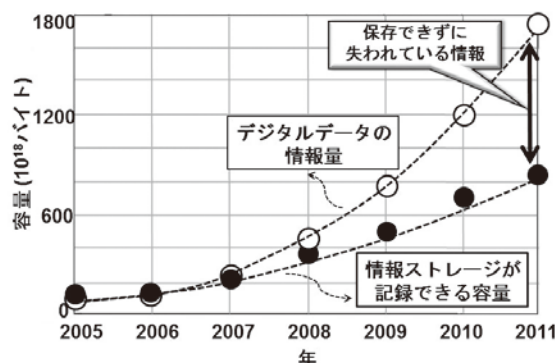


図 2：全デジタル情報を記録できない



代の私たちにとって、HDD の筐体の大型化は望ましくありません。気軽に持ち歩けるサイズの HDD や小型機器に内蔵できる小型 HDD の記憶容量を高めるには、HDD を高密度化するのが最適です。この課題に取り組んでいる「磁気記録」の分野では、HDD の円盤（この円盤を「磁気記録媒体」と言います）1 平方インチあたりに、1 テラ ( $10^{12}$ ) ビットを超える超高密度な磁気記録技術の開発を狙っています。

図 3 は HDD の中身を模式的に表しています。簡略化して表した磁気記録媒体の断面構造は挿入図のようになっており、現在、媒体には CoCr 系の磁性薄膜が使用されています。この CoCr 系磁性薄膜には目では見えないくらい微小な磁石が規則正しく決められたパターンで配列しています。この微小な磁石 1 つ 1 つが磁化を持っており、磁化の上向き / 下向きがデジタルデータの 0 や 1 となります。現在、磁気記録媒体上に配列している磁石のサイズは 6 ~ 7 ナノ ( $10^{-9}$ ) メートル [2] で、タバコの煙の粒子サイズ (~1 ミクロン [ $10^{-6}$ ] メートル) やウィルスのサイズ (~0.1 ミクロンメートル) よりもずっと小さいのです。図 3 の磁気ヘッドを使って、磁気記録媒体の微小磁石が持っている磁化を上向きから下向きに、あるいは下向きから上向きにひっくり返してデジタルデータが記録され、また記録されたデータが読み出されます。

ナノレベルの微小な磁石を作り、その磁化の向きを自在に制御し、エンジニアリングにとどまらずテクノロジーとして確立した人間の智慧と技術力に驚

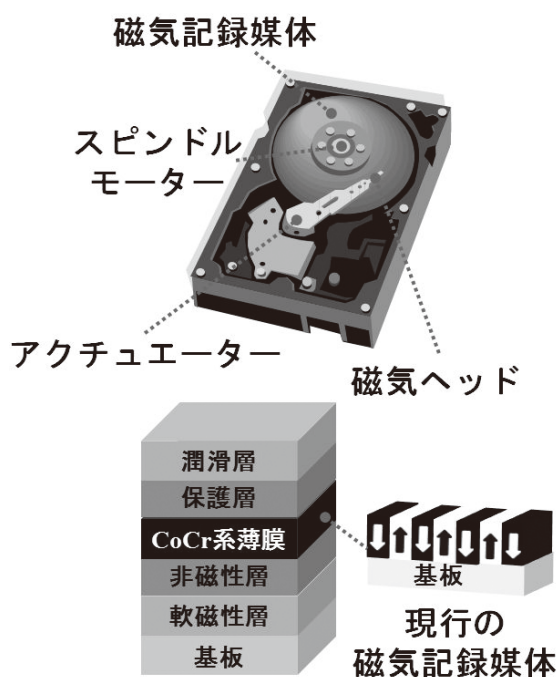


図 3 : HDD の内部と磁気記録媒体の構造

きます。

図 2 に示した問題を解決するために、今、私たちはこの磁気記録媒体上の微小な磁石をさらに微細化・超高密度化することによって HDD の情報記憶容量を増加することに挑戦しているのです。

### 3. どのような微小磁石を作るか

ではどうすれば磁気記録媒体の磁石を微細化 / 超高密度化できるのでしょうか？それには様々な方法が提案されていますが、私たちは磁気記録媒体を「パターン化」した「パターン媒体」の開発を通して磁気記録媒体の磁石の微細化 / 高密度化に取り組みました。「パターン媒体」は図 3 の CoCr 系薄膜部分に相当する磁気記録層（図 4 の「磁性薄膜」の部分）を数ナノメートル以下に切り分け、それぞれを分離・孤立させ、図 4 のように微小磁石が規則配列した磁気記録媒体のことで

### 4. 1 時間で 1000 枚の HDD 用磁気記録媒体を生産するスパッタ法

実際に市場に出回っている HDD の磁気記録媒体は「スパッタ法」という方法で量産されており、1 時間のスパッタで約 1000 枚もの磁気記録媒体が生産されています [2]。これは先にも書いたように、6 ~ 7 ナノメートルの微小磁石が規則正しく配列した磁気記録媒体を僅か 1 分間のスパッタで 17 枚近くも作る計算になり、やはり大変高度な技術です。

スパッタ法を利用することによって、目的とする物質をガラスや半導体基板上に薄膜として作製することができます。目的物質の原料（ターゲット）が設置された真空の容器（チャンバー）内に希ガスを導入します。チャンバー内には陰極として働くターゲットと陽極が置かれ、高電圧を印加するとプラズマが発生します。プラズマ中には無数の粒子が存在し、電子やイオンが強く相互作用しあっています。このプラズマ中のイオンが陰極であるターゲット面を叩くので、ターゲットに対向して置かれた基板上にターゲット材料を薄膜として堆積させることがで

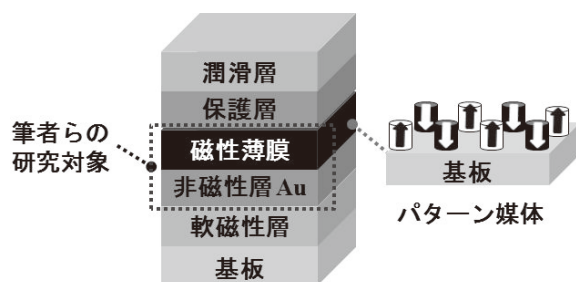


図 4 : Au を利用したパターン媒体の開発

きます [3]。

森迫・劉研究室では、工業的な観点から実際の量産法と同じスパッタ法でパターン媒体の開発を行っています。森迫・劉研究室に筆者が在籍していた当時に使用していたマグネトロンスパッタ装置の写真を図5に示します。

## 5. 「自己組織化」でパターン媒体を作る

パターン媒体の作製についても様々な方法が提案されていますが、私たちは図4に示すように、Auの「自己組織化」を利用することによってパターン媒体の開発を目指しました。

スパッタ法でAuを成膜する際に基板を加熱すると、基板には自己組織的に配列したAuのナノ粒子が形成しました [4]。一方、パターン媒体の磁気記録を担う磁性薄膜をAu上と基板上それぞれに

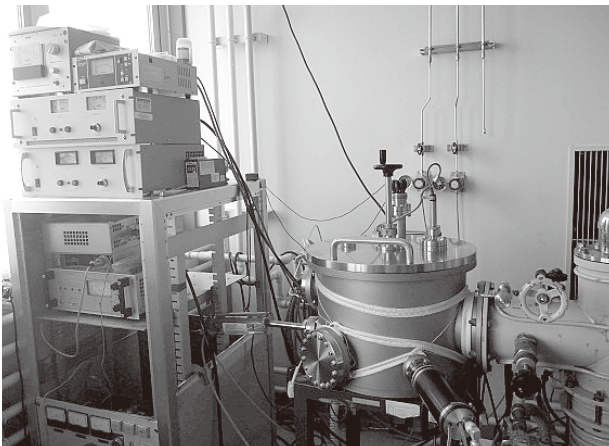


図5：高性能マグネトロンスパッタ装置

成膜して比較すると、Au上に成膜した方が基板の上に成膜するよりも低温で磁性薄膜が結晶化しました [5]。従って、ナノ粒子状のAuの上に適切な基板加熱条件のもとで磁性薄膜を成膜すれば、Au上の磁性薄膜だけがナノレベルで結晶化、つまり磁性体化し、Auナノ粒子同士の間隙部分に相当する基板上では磁性薄膜は結晶化せずに非磁性体となったパターン媒体を開発できる、というのが森迫・劉研究室の開発指針です。

## 6. 非平衡な系が生み出すナノ秩序構造

「自己組織化ハンドブック」[6]によると、「自己組織化」とは主に以下の3つの事象を指すと書かれています。

- 1) ある系において自由エネルギーが極小となる時に決定される構造
- 2) 特定の速度過程あるいは緩和により創り出すことのできる構造
- 3) エネルギーや物質の出入りが存在する条件下で生じる構造

また自己組織化によって次のような物理状況が発現します。1つは、ある一定の環境下の系がエネルギーや物質の流入口を持たない場合です。この場合、最終的に熱平衡状態が達成されますが、環境条件の変化によって系も変化し、系は置かれた環境に適合した秩序構造を形成します。秩序性を持つこのような平衡構造が自己組織化現象の第1クラスです。一方、系が外部から絶えずエネルギーや物質の

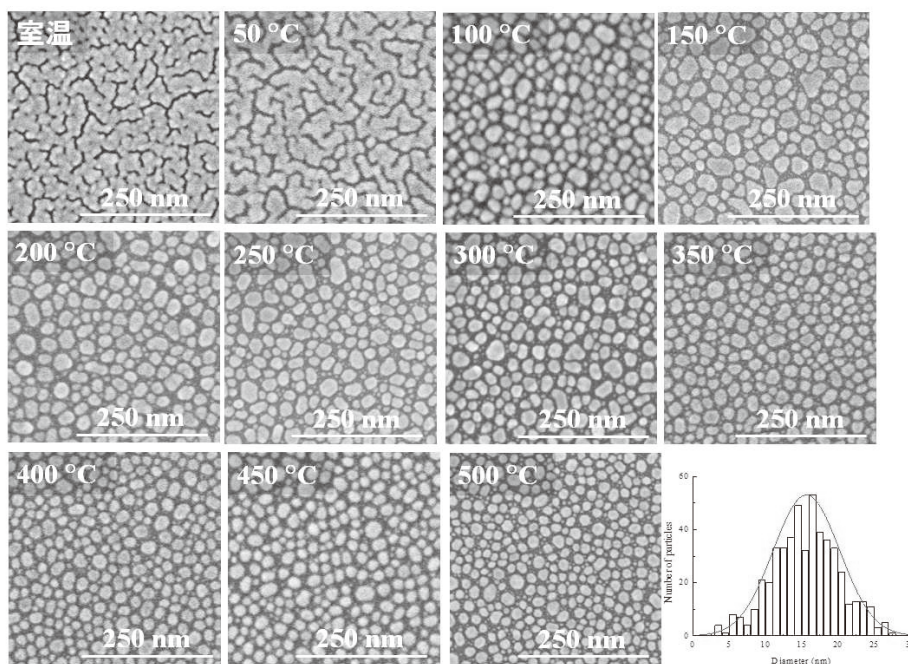


図6：直流マグネトロンスパッタ法によるAuの形態変化とナノ粒子径のヒストグラム

供給を受け、それらの形態を変換しながら動的な安定性を保持する場合があります。非平衡開放系と名付けられたこの系で見られる秩序構造は、自己組織化現象の第2クラスです。非平衡開放系では熱的な自己組織化も含まれます。熱的な自己組織化では原子、低分子、金属ナノ粒子、ブロック共重合体などが系の基本的構成要素となります。これらが自己組織化することによって生じる秩序構造は実に多様です。なぜなら物質の多彩さによる多様性に加え、安定な熱平衡状態というのが単一ではなく、準安定状態が数多く存在することによる多様性もあるからです [6]。

本研究ではスパッタ法で Au ナノ粒子の自己組織化構造を作製した非平衡系を利用した自己組織化構造に基づいています。Au ナノ粒子が形成するこの自己組織化構造の上に、さらにスパッタ法で磁性薄膜を堆積させ、これを自己組織化させて図4に示したパターン媒体の開発を試みました。

ここまで HDD の記憶容量の増加や高密度化の重要性、パターン媒体についてご紹介してきたのですが、誌面の都合上、本報告では Au ナノ粒子の自己組織化に関する研究結果についてのみ報告します。

## 7. Au ナノ粒子の自己組織化

当初筆者らは図5に示した装置を使い、直流マグネトロンスパッタ法で Au を基板上にスパッタしていました。その結果を図6に示します。これはスパッタ時に基板を室温から 500℃まで加熱し、Au が基

板上に堆積するのと同時に Au が熱せられた結果です。図6を見ると、基板温度が室温から 50℃までは Au はクラックの入った薄膜として基板上に堆積していることがわかります。基板温度が 100℃以上になると Au は粒子状になり、粒分離が起きています。これが Au ナノ粒子の形成と、それによって実現された自己組織化構造です。

Au には主にスパッタによる運動エネルギーと、基板の加熱による熱エネルギーが供給されています。そのため形態を変化させることにより表面エネルギーを小さくして系のエネルギーを安定化しようとしています。その結果が図6のようなナノ粒子の形成と、その自己組織化につながるのです。しかしパターン媒体の開発を考えると、直流マグネトロンスパッタ法で作製した Au ナノ粒子のサイズは大きすぎで、また基板上の粒子の配列が不規則でした。

これを克服するために、筆者らは高周波マグネトロンスパッタ法で実験を行うことにしました。高周波マグネトロンスパッタでは、13.56 メガ (10<sup>6</sup>) ヘルツの高周波の交流電圧を、直流成分阻止コンデンサと整合器を介して電極に印加しスパッタします。その結果を図7に示します。図6、図7の室温と 50℃の試料をそれぞれ比較すると、図6では Au は薄膜なのに対し、図7では Au は粒子になっています。さらに基板温度が 350℃までの結果を比較してみますと、Au はナノ粒子の自己組織化構造を形成していますが、粒子のサイズは直流マグネトロンスパッタの結果よりずっと微細化していることがわかりま

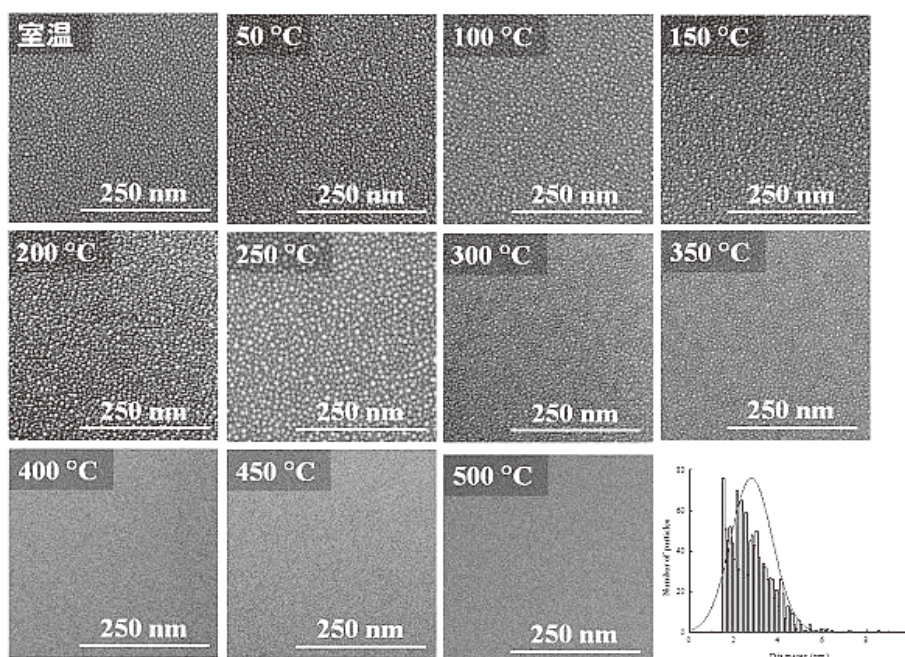


図7：高周波マグネトロンスパッタ法による Au の形態変化とナノ粒子径のヒストグラム

す。

一般的に、粒子が非常に微細な場合は粒子が球状になることが知られています。粒子の全エネルギーは表面エネルギーと体積エネルギーの和と考えられ、粒子径が小さくなると表面積が相対的に大きくなるので表面エネルギーの寄与が大きくなります。その結果として、粒子の表面エネルギーをできる限り小さくしようとして粒子は球形に近くなると言われています [7]。図7の結果から、高周波マグネトロンスパッタでは、Au に対して非常に大きなエネルギーが供給されていること、そのため Au は応力のかかった薄膜状ではなく、表面エネルギーをできるだけ小さくしてエネルギーを安定化させるため非常に微細な球状の粒子を形成したと示唆されます。一方図7では、400℃以上では Au は粒子ではなく薄膜を形成しています。この原因についてはまだわかっていませんが、粒子が一層微細化したことにより表面エネルギーの寄与がより大きくなり、融点降下が起きて薄膜状になった可能性 [7] も考えられます。

## 8. 10 テラビット／平方インチを超越する Au ナノ粒子

図6および図7を基に、数学的な統計処理からナノ粒子の平均粒子径を算出しました (図8)。この結果より直流マグネトロンスパッタ法による平均粒子径は～18ナノメートル、高周波マグネトロンスパッタ法による平均粒子径は～3ナノメートルでした。

しかしパターン媒体を実現するには、いくら磁性粒子やその下地の非磁性層である Au 粒子 (図4参照) が微細なだけでは必要十分とは言えません。これらの粒子が微細で、かつ超高密度に基板上に形成し、さらに各粒子の間隔が一定に規則配列していることが非常に重要なのです。そこで粒子径の算出と同様に、面積が1平方インチの試料にいくつ Au ナ

ノ粒子が存在するかを示す「面密度」を計算しました。その結果を図9に示します。直流マグネトロンスパッタ法で作製した Au ナノ粒子は1平方インチあたり 0.9～1.3 テラ個、高周波マグネトロンスパッタ法では1平方インチあたり 6～12 テラ個と、特に高周波マグネトロンスパッタ法は超高密度な Au ナノ粒子を形成できることがわかりました。

本法でパターン媒体を実現するには、下地層の Au 粒子と同じ位置に、上層の磁性層が同サイズ／同間隔でナノ粒子化、自己組織化することが要求されます。また図9で示したように超高密度な Au ナノ粒子と同程度の面密度で磁性ナノ粒子が高密度化することも必須です。

## 9. ナノ秩序構造の精密制御

前節では、パターン媒体として実用するためには分離した各磁性ナノ粒子が均一間隔で規則的に配列することの重要性について述べました。このためには下地層である Au ナノ粒子の粒子間隔を均一となるよう精密に制御する必要があります。

そこでまず高周波スパッタ法で作製した Au ナノ粒子の規則配列性がどのようになっているかについて、実験的に検証しました。その結果が図10a～10cです。図10a～10cは、図7から得られた知見を基に、高周波マグネトロンスパッタの条件をさらに工夫して作製した Au ナノ粒子の観察結果です。微細で高密度な Au ナノ粒子の自己組織化構造を作製することはできましたが、図10cの結果を見ると、各粒子の形状や粒子径が不均一で、粒子同士の間隔も不規則です。これでは、この Au ナノ粒子の上に磁性ナノ粒子の自己組織化構造を形成しても、磁化遷移領域が大きくなってしまってパターン媒体には向きません。

筆者らはトライ・アンド・エラーで実験的な検証を重ねた結果、基板上に直接 Au ナノ粒子を作製するよりも、下地として適切な「緩衝層」を基板に堆

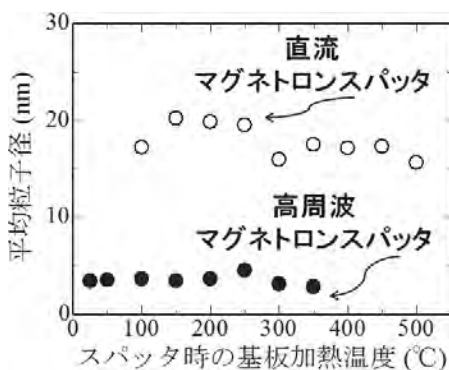


図8：Au ナノ粒子の平均粒子径

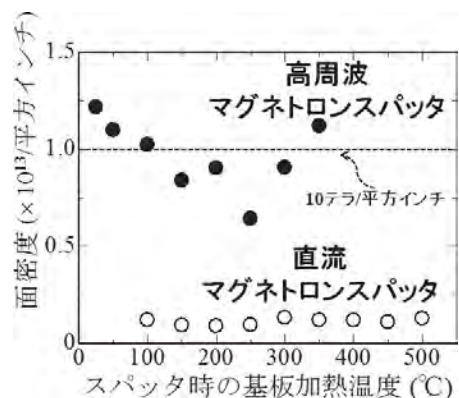


図9：Au ナノ粒子の面密度

積し、その上に Au ナノ粒子を形成する方が Au 粒子の間隔制御に有効なことがわかりました。

スパッタによって基板に入射した原子や分子は、そのままその位置にとどまり、その上に降り積もるように薄膜が形成されるわけではありません。入射した原子は表面拡散によって基板上を動き回ります。原子が単独で存在するのは不安定で、基板にある時間とどまった後に再蒸発します。しかし他の原子や原子クラスターと衝突して結合すると、原子と基板との結合エネルギーが増加するため、原子の再蒸発は起きにくくなります。また基板上の運動もしづらくなるため、原子が衝突により捕獲され易くなります。よってある大きさ以上の原子が結合した原子クラスターは、一層大きく成長し、結果として薄膜となります [7]。さらに、実際の基板表面にはステップや点欠陥、線欠陥、面欠陥など多くの欠陥があります [8]。また基板表面の吸着サイトの状態は一様ではなく、吸着エネルギーも均一ではありません。特に基板の欠陥部では吸着エネルギーが高く、吸着エネルギーの高い箇所で優先的に核形成が起こります [7]。従って欠陥箇所から生じる制御不可能な Au の核発生を抑制すれば、Au 粒子の配列規則性を改善できると考えました。

そこで再び実験的な検証から、厚さ約 7 ナノメートルの薄い Ta 薄膜を下地層として基板に堆積させ、その上に高周波マグネトロンスパッタ法で Au ナノ粒子の自己組織化構造を作製しました。その結果が図 10d ~ 10f です。図 10a ~ 10c と 10d ~ 10f では、Ta 層を基板に堆積したかしないかの相違のみで、

それ以外の実験条件はすべて同一です。図 10f から、特に粒子の形状と規則配列性が改善していることがわかります。よって形状とサイズが均一で、かつ極めて規則的に粒子が配列した超高密度な Au 粒子のナノ秩序構造を作製することができました。

もちろん実際はこんなに単純ではなく、基板や緩衝層に対する Au の濡れ性、Au 粒子の表面エネルギーや体積エネルギー、表面張力、表面電荷など、様々なパラメータ [9] がこの結果につながっていると考えています。

## 10. Au ナノ粒子秩序構造が拓く可能性

以上、本報告では微細で超高密度、高規則配列した Au ナノ粒子の秩序構造について述べてきました。この構造の上に磁性層を堆積すれば、下地の Au の構造を反映した磁性ナノ秩序構造、つまりパターン媒体を実現できることでしょう。

ところで、光が作る電界の中にナノ粒子が置かれると、ナノ粒子中には電気分極が生じます。ある条件が揃うと共鳴的に大きな分極が誘起され、ナノ粒子周囲の電界が増強されます。特に Au や Ag では、電気分極の共鳴振動は可視光付近の波長で発現しますので、可視光領域において Au ナノ粒子には興味深い光学的応答を期待できます。この光学応答は当然ながら粒子の形状や粒子径、周囲の環境に依存します [10]。従って本研究で作製した規則性の高い微細な Au ナノ粒子の秩序構造は、光学面での応用も期待でき、将来の要素技術として大きな可能性を秘めていると考えています。

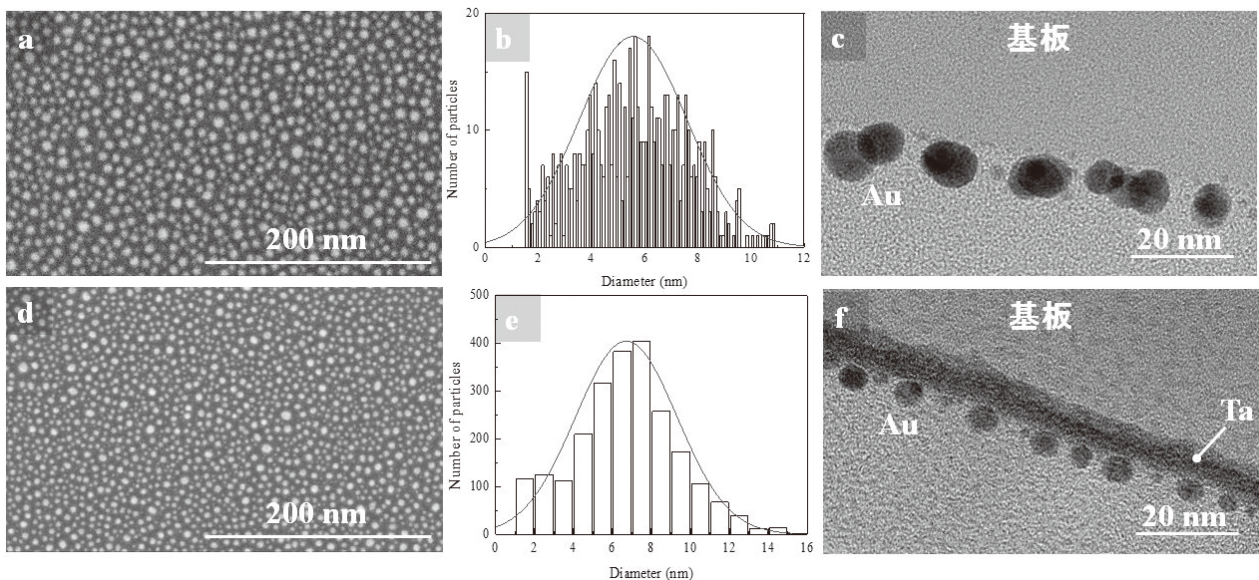


図 10：高周波マグネトロンスパッタ法で作製した Au ナノ粒子 (a, d)、粒子径のヒストグラム (b, e) および基板/Au ナノ粒子界面近傍の断面構造 (c, f)。a ~ c は基板に直に Au ナノ粒子を形成した結果、d ~ f は基板に Ta 下地層を堆積した上に形成した Au ナノ粒子の結果

## おわりに

本研究は信州大学 工学部 情報工学科 森迫・劉研究室において、研究室関係者の多くの温かいご協力のもとに行われました。また一般財団法人 信州大学 工学部 若里会様からは、平成 25 年度研究助成を頂きました。研究を遂行するにあたって経済的な問題に直面しがちな若手研究者にとって、本助成は大変ありがたいご支援でした。今後もこの助成が信州大学工学部の若手研究者に継続されていくことを希望します。

信州大学の特長の 1 つである「ものづくり」は、もともと日本の科学技術が得意とする分野でした。残念なことに近年はものづくりの重要性に対する認識が薄れ、それは大学教育にも顕著に反映されています。筆者は現勤務校において、信州大学で学んだ「ものづくり」の重要性と技術を継承していく所存です。

## 参考文献

[1] S. Iwasaki, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **320** (2008) 2845 および J. F. Gantz ほか: 「膨張するデジタルユニバース」, IDC, 2007 をもとに作成

- [2] 喜々津哲: 「磁気記録」, 第 37 回日本磁気学会サマースクール, 2014.
- [3] 菅井秀郎, 大江一行: 「プラズマエレクトロニクス」, オーム社, 2000.
- [4] A. Kaewrawang, G. Ishida, X. Liu, and A. Morisako, IEEE Transactions on Magnetics, **44** (2008) 2899.
- [5] A. Kaewrawang, A. Ghasemi, X. Liu, and A. Morisako, Journal of Physics: Conference Series, **191** (2009) 012026.
- [6] 国武豊喜ほか: 「自己組織化ハンドブック」, NTS 出版, 2009.
- [7] 吉田貞史: 「薄膜」, 培風館, 1990.
- [8] 志村史夫: 「半導体シリコン結晶工学」, 丸善, 1993.
- [9] 草野英二: 「はじめての薄膜作製技術」, 森北出版, 2012.
- [10] M. Wakaki and E. Yokoyama: “Optical Properties of Oxide Films Dispersed with Nanometric Particles” In “UV-VIS and Photoluminescence Spectroscopy for Nanomaterials Characterization”, ed. C. R. Kumar, Springer-Verlag GmbH, 2012.

## 新しい制御原理の発見に基づく 最先端ロボット工学

機械システム工学科 准教授 酒井 悟



2011年の東日本大震災では津波によって移動してきた岩（津波岩）をレスキュー隊が撤去できず人的被害が深刻化した。このような悲劇を回避するため我々は最大手の油圧アーム企業と共同してロボット制御を研究している。ロボット制御は

- モデルフリー制御（宮大工）
- モデルベースト制御（建築士）

に大別される。前者は宮大工の作業のように経験に基づく制御であり、ロボットが1つの作業環境で成功しても別の作業環境で成功するかどうかを評価するために制御実験が常に必要となる。後者は建築士の作業のように力学に基づく制御であり、理論や計算機によって実験がしばしば不要となるため、科学的にも経済的にも価値が高い。

多くの研究によって電動ロボットではモデルベースト制御が体系化されつつある。しかし油圧ロボットでは方程式が複雑で未知パラメータが多く、モデルベースト制御は半ば諦められつつあった。

朝食に箸で豆腐を持ち上げてから口元に運ぶまでを思い出してもらいたい。一組の箸のうち、下の箸は手の甲と一体となって運動するが、上の箸は中指関節などによって手の甲とは独立して運動する。簡単に言うと、下の箸が位置（豆腐がどの位置に存在してどの方向を向いているか）を制御するのに対して、上の箸は力（豆腐がどういう強さの力で押されるか）を制御する。下の箸を操作するときには微妙な力加減には拘っておらず、上の箸を操作するときには微妙な位置加減（箸の開度）には拘わっていないはずである。乱暴に言えば、上の箸も下の箸も制御できているのが電動ロボットであり、下の箸しか制御できていないのが油圧ロボットである。日常で目にするパワーショベルが津波岩を把持できないのはこのためである。

ところが2006年、数学のノーベル賞とされる

フィールズ賞を決定する4年に1回の国際数学者会議にて、招待講演として新しい機械力学の成果がオランダの研究者によって発表された。神秘的なことに、従来の機械力学における質点系や電動ロボットに似て非なる存在として油圧ロボットは数式表現されつつある。

実は、本研究室では新しい機械力学の視点を応用するだけでなく独自に展開することで、油圧ロボットの方程式を厳密に単純化した新しい数式表現の発見に至っている。教科書手法よりも計算時間を55%短縮する手法を提案するなど、モデルベースト制御系（図1）の基盤を整備しつつあり、成果は2013年から海外一流誌（IEEE TMEC）にも引用されている。

人類全体が短期的思考に陥っていると一部の海外学者が警告するなか、21世紀の日本は国際貢献と生活（医療福祉 etc）の質をどの程度維持していくだろうか？非専門家・報道機関などへの広報性がどれだけ高くとも、NASA・ホンダ・欧州ベンチャーが本気になれば実現できる（が市場性・商業性の低さから実現しない）ロボットの問題ではなく、彼らが（無意識に）解きたいが解けていない問題を設定して解決することが我々の担うべき長期的思考とする立場から、日々の教育研究をさせて頂いている。

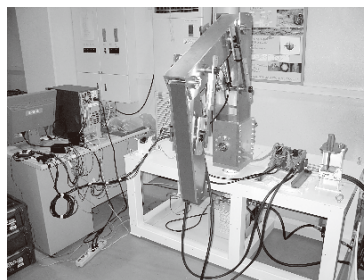
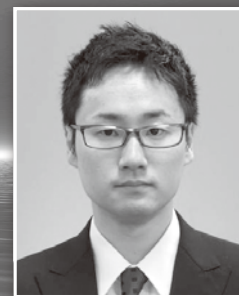


図1 モデルベースト制御系（左）vs  
モデルフリー制御系  
（右, <http://www.bostondynamics.com/>）

# 集積回路・デバイス研究室(宮地研)紹介

電気電子工学科 助教 宮地 幸祐



## 1. 宮地研究室について

宮地研究室は2013年4月より電気電子工学科に新しく発足した研究室です。専門分野は集積回路設計と集積回路デバイスで、発足2年目の現在、修士1年生2名、学部4年生3名で構成されています(図1)。研究室の学生には週1回の研究室ミーティングをはじめ、個別での研究指導も行うことで専門知識、論理的思考能力、資料作成・プレゼンテーション技術を養うようにしています。オリジナリティのある研究を行うためにも、多量の最先端の英語論文を読ませ、学生が足りないものを主体的に考えていけるようにしたいと考えています。また、多くのCADツールや測定器を使用して研究を行うため、情報処理やデータ整理の実用的なスキルも身に付けることができます。研究テーマの多くは共同研究という形を取っており、学内外の研究室との交流や学会活動を通じて学生の意欲を高めるように工夫しています。研究室ができてまだ日が浅いですが、研究室の文化を一緒に作っていきける元気な学生とともに歩んでいきたいと思えます。



図1 研究室の様子

## 2. 研究内容

現在の主な研究テーマは微細 NAND フラッシュメモリにおけるランダムテレグラフノイズ(random telegraph noise: RTN) の解析を行うデバイスグループとパワーマネジメント集積回路の設計を主に行う回路グループがあります。

## 2.1. 微細 NAND フラッシュメモリにおける RTN の解析

携帯機器のストレージやソリッドステートドライブ(SSD)の需要増加に伴い、NAND フラッシュメモリの大容量化を支える微細化が著しく進んでいます。現在は20nm世代以下のNANDフラッシュメモリが量産されていますが、その内部では1ビットを記憶するための電子の数は100個を切っており、電子1個が記憶情報に占める影響が無視できなくなっています。RTNはNANDフラッシュメモリの酸化膜界面付近の欠陥に単一電子がランダムに出入りすることで発生するノイズであり、上記のような背景においてRTNが大きいとNANDフラッシュメモリセルの読み出しエラーが生じてしまいます。まさに電子1個の挙動がメモリシステムの信頼性に影響を及ぼしているのです。実際にRTNエラーはデバイスレベルでは発生していると思われませんが(誤り訂正等を用いることでシステムやユーザーから見るとエラーはないようにしています)、RTNエラーがどういった状況で多く生じるのかはまだ不透明な部分が多く、デバイス物理と統計的な解析が必要となります。宮地研究室のデバイスグループでは東京大学の平本教授との共同研究にて3次元デバイスシミュレータをスーパーコンピュータ上で利用してRTNノイズのデータパターンやデバイス構造依存性について解析を行いながら研究を進めていま

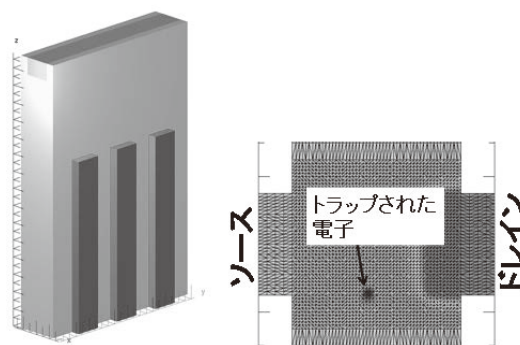


図2 3次元デバイスシミュレータ上のNANDフラッシュメモリセル(左)と電子がメモリセルにトラップされた時の電位分布(右)



す。

## 2.2. パワーマネジメント集積回路設計

全ての電子機器には電源を供給する必要があり、高効率で安定した電力供給には必ず電源回路が使用されています。宮地研究室の回路グループでは、携帯機器向けのワイヤレス給電やワイヤレスセンサーノード向け環境発電（エネルギーハーベスト）用途をはじめとする、高効率な整流回路や昇圧回路の研究を行っています。整流回路における電荷の逆流を防止するための制御回路や0.2V以下の非常に低い電圧から集積回路が使いやすい1V程度まで昇圧する回路を実際に試作しております（図3）。集積回路チップの試作には東京大学大規模集積システム設計教育研究センター（VDEC）を通して商用の設計ツールを使用することが可能で、試作と評価を行うことで多くの経験と知識が身に付きます。

また、宮地研究室では電気電子工学科の佐藤教授、曾根原准教授が研究開発されている光プローブ型大電流センサーのインターフェースにあるアナログ信

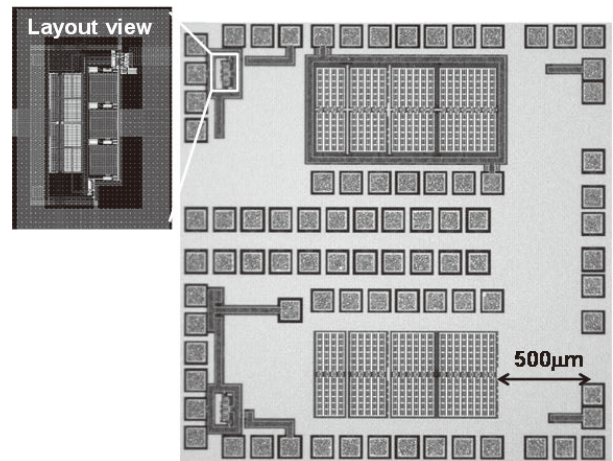


図3 設計した集積回路チップ

号処理回路の設計も行っており、電気電子工学科の磁気工学を専門とする研究室をはじめ、多くの研究室とも共同研究を行っています。新しいデバイスと集積回路の連携による高付加価値デバイスを生み出していきたいと考えています。

## 中屋研究室の紹介 —地下水のフィールド・サイエンス&テクノロジー—

土木工学科 教授 中屋 眞司



### はじめに

私が信州大学に赴任したのは、1999年の4月のことで、当時、長野オリンピックが閉幕し、まだ、その余韻が残っていた頃でした。赴任して初めて私の研究室配属になった学生達は、オリンピックのボランティアを経験しており、口々に刺激になったという話をしてくれました。私も新鮮な気持ちになったのを記憶しています。

現在、水、特に地下水に関する課題について、フィールド・サイエンスの手法に則り、作業仮説に基づいて、野外調査・計測、室内実験、数値解析と一連の作業を通して研究しています。

### フィールド調査・研究について

「フィールドに真実の鍵がある」と考え、フィールドで調査し、採取した水サンプルを分析する。自

身で出した分析データや収集したデータをもとに、真実をつきとめる、現象を理解し、推定する、といった作業を学生たちと体験していくと、若い学生たちがみるみる変わっていくのが分かります。



研究室コンパ風景

調査するには、例えば、井戸水のサンプリング1つをとっても、調査計画を練る、調査の目的を説明し、井戸の持ち主に許可をもらう、調査目的のために話を伺う、皆と協力して調査を進める、といった人との関係が生まれます。都会を離れて、ときには、採水のため山奥に行ったり、車も入れない地域で歩いて調査することもあります。海外調査は、最も困難をきわめますが、好奇心が勝っているので辛くありません。また、室内実験では、精度と信頼性を担保するため、極めて慎重で、適切な分析手続きを踏んで結果を出します。得られた結果が正しいか、二重、三重のチェックをしなければなりません。そのような辛くも楽しい体験が、学生たちを急成長させるのだと感じます。

## 研究について

さて、ここまで読んできて、具体的にはいったいどのような研究をしているのだろうと疑問に思われていることでしょう。実は、私は水や地下水に関する課題なら何でも興味があり、何でもしたい方なのです。ここ十年余りの研究は、水をキーワードに多義に渡ります。しかし、それらは、1) 水を資源ととらえた研究、2) 水を被害の原因ととらえた研究、3) 水を胚胎する地層（帯水層）に関する研究に分けられます。

1) に関する研究は、上水道水源として利用できる地下水の量はいったいどれくらいだろうか、水源となる水、特に見えない地下水は、どこで涵養し、どういった経路で流れ、涵養してから井戸水や湧水として私たちの手に入るまでにどの程度の期間、滞留（あるいは、循環）しているのか、保全すべき水源や水源林はどこなのか等、私たちが持続可能な状態で利用するのに根拠となる科学データを、調査により明らかにします。私たちは、これを「地下水の可視化」と呼んでいます。私の研究室では、地下水に溶存している化学物質（溶存イオンや環境同位体、溶存ガス）をトレーサーとして、地下水の可視化を実現する方法を研究しています。また、河川流量などの調査も併用し、水資源の研究に取り組んでいます。さらに、地下水は、大気中のCO<sub>2</sub>の数十倍～100倍の濃度のCO<sub>2</sub>を溶解します。帯水層地下水へのCO<sub>2</sub>貯留とそれに伴う酸性化問題についての研究にもアプローチしています。最近、地下水の年代測定装置を開発し、循環地下水の年齢を測定し、環境問題にアプローチしています。

2) に関する研究は、当研究室では洪水災害などは扱わず、もっぱら、地下水汚染の原因や汚染機構

の調査・研究をしています。汚染は水資源量の減少につながるだけでなく、健康被害を起こすので、重要な問題です。農業活動など人間活動に伴う地下水の硝酸汚染や、自然由来の汚染であるバングラデシュを代表とするモンスーンアジアの大規模地下水ヒ素汚染などをターゲットにしています。UNICEFやWHOでも長年、頭を悩ませている問題です。また、最近では、原発事故に伴う放射性元素による地下水汚染に関する研究にもアプローチしています。水とともに運ばれる土粒子に吸着した有害化学物質も対象になります。

3) に関する研究は、地下水を胚胎する地質構造や帯水層の透水性など水理定数の値やその異方性、定数の大きさや空間分布の不均質性を評価しようとする研究です。このような評価ができれば、現実の水文・気象条件や地球温暖化に伴う将来の水文・気象変動などを想定した仮想的な水文条件で、地下水の流動や水位変化、地下水資源量の変動などが数値シミュレーションできます。また、汚染機構の解明にもシミュレーションは威力を発揮します。例えば、バングラデシュの地下水ヒ素汚染調査では、他大学の研究者達と少人数の国際チームを組んで、現地のヒ素汚染地帯の井戸水を採取し、実態調査を行いました。並行して、地質調査やボーリング調査をし、地下の地質・帯水層構造を数値モデル化した後、毎年周期的に起こる洪水や雨季・乾季や灌漑用の揚水など現地の水文・気象条件を境界条件として、時々刻々と変化する地下水の流動を過去30年間、シミュレーションしました。シミュレーションでは、水粒子の動きを追跡することができます。ヒ素で汚染された井戸の採水位置から時間を遡って水粒子の動きを3次元的にバックワード追跡することもできます。そうすると、地下水がどこで涵養し、どのような移動経路で井戸にたどり着いたか、それには何年何カ月を要したかが見えます。すると、何と高濃度地下水ヒ素汚染ゾーン（ホットスポット）の高濃度ヒ素を運んできた水の流動経路長は200mより小さく、流動に要した時間（年齢あるいは、滞留時間）は10年以下程度であることが予測されました。表層から入った酸素を比較的多く含んだ水はまっすぐ下方に移動し、ヒ素を多く含む地層を通過する間に化学風化作用によってヒ素を溶かし出し、その後、30m程度の深さにある粘土層に近づくにつれ、水平方向に流れを変えたところで、家庭用の手押し井戸で揚水される。化学分析と地質分析、物理シミュレーションを組み合わせると総合的に判断すると、ヒマラヤから運ばれてきた表層部近くに堆積した細粒

砂からなる地層の中の緑泥石という鉱物中のヒ素が、洪水時の水や雨水の地下浸透過程で酸化的環境下で化学風化作用によって鉱物から地下水へリリースされ、地下水の流れによって近くの井戸まで輸送されてきた。そのように私たちは解釈し、私たちの調査地の原初的なヒ素汚染水形成機構に「化学風化説」をとりました。他の国の研究者らは別の地点の調査から還元環境下の酸水酸化鉄のバクテリア分解によるヒ素のリリースであると、還元説を提唱していて、論争は今も続いています。場所や地下環境による違いが大きく左右し、単一のメカニズムで説明できないと思っています。

### おわりに

バングラデシュでは、UNICEF や私たちも含め

ていろいろな研究機関は、粘土層をぶち抜いて深井戸を掘り、ヒ素を含むが環境基準以下である安全な地下水が得られる共同井戸を用意したり、ため池や貯水槽を作って浄化を図る研究チームもあります。しかし、およそ4,000万人がヒ素汚染地下水を飲用している現状は、なかなか改善しません。ローテクな浄化方法でないと、多くの貧しい村民が持続的にメンテナンスすることはできません。ポバティ（貧困）の研究でノーベル経済学賞をとったアマティア・センが主張したように、貧しい国でも、金持ちや政治家、官僚や軍人は災害を免れるが、被害にあうのはいつも貧しい人たちである。モンスーンアジアの調査をしていると、その言葉を実感します。

## 寺内研究室の紹介

建築学科 准教授 寺内美紀子



### 1. 研究室の始まり

寺内研究室は2012年4月に始まりました。現在、学部生6名、修士10名と私の計17名で活動しています。私たちの研究室では、建築意匠を専門に建築設計やまちづくりを行っています。また、こうした活動の理論的根拠を求めて、建築や都市空間を対象に空間構成論の研究も行っています。とりわけ、長野という豊かな歴史文化や自然風土をフィールドとしたプロジェクトは、最も重要な活動のひとつです。ここでは、2012年から携わっている長野県木祖村の村づくりに関する活動を紹介します。私たちが今後目指す研究室のあり方についてお話ししたいと思います。

### 2. プロジェクトの紹介

長野県木曾郡木祖村は、南信と中信の境に位置し、木曾川源流の里として豊かな自然に恵まれた山間地域です。江戸時代は中山道藪原宿が栄え、近代以降産業構造の変化とともにのどかな農村風景は多くの変遷を受けました。現在は、他の多くの地方都市同

様に過疎化、高齢化が進んでいます。まず、2012年から木祖村景観計画<sup>図1</sup>の策定に参画することになりました。前年に地元の有志と景観の専門調査員（長野県景観デザイナー派遣制度を利用）による検討委員会が設置され、「くらし」「産業」「歴史・文化」の3テーマでワークショップが開かれていました。景観計画では、通常、冒頭に計画を推進する上で最も重要な統一目標的な文言が示され、地域別目標や



図1：源流の里 木祖村景観計画 平成25年3月



図2：基本方針のための木祖村キーワード



図3：景観デザインのアイデア集

課題などがそれに続いて述べられます。あたかも統一目標が決まってそれに従って細目が決まるように読めますが、実際は異なります。各ワークショップで膨大な問題が指摘され、あるべき村の姿について言葉ひとつひとつを検討した結果、冒頭の文言となります。私たちは、このプロセスそのもの<sup>図2</sup>を景観計画に盛り込むことを提案しました。平易にみえる言葉の後ろ側に住民の様々な思いがあり、こうした思いを共有することが村づくりの一步と考えました。さらに、一般的な景観計画では珍しいことですが、資料編として景観デザインのアイデア集を載せました。景観計画には「規制」と「誘導」という側面が必ずあります。木祖村のような過疎で少子高齢化が深刻な地域では、どの側面であっても担い手不足が足枷になり、思い切ったアイデアが提案できません。そこで私たちは「イベント活動」「生活産業」「屋外デザイン」というカテゴリから、分かりやすいイラストやパースでアイデアを示しました<sup>図3</sup>。資本と人材を投入して屋外環境を整備することだけが景観計画なのではなく、既にある村のイベントや日常生活のなかから村の風景を考えるきっかけに、この景観計画のアイデア集がなってほしいと願っています。

そして、2013年から木祖村の重要な歴史遺産のひとつである中山道藪原宿の一角に地域交流施設が

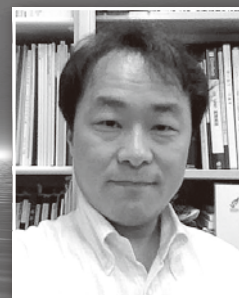
建設されることになり、私たちの研究室で設計監理を担当しています（在松本の建築設計事務所と共同設計）。カラマツやヒノキ、鉄平石といった材の使用に際して、地元の多大な協力を頂いていますし、景観計画策定後の公共建築第一号としても、責任重大です。今年度からは、これも景観計画策定時より重要案件であった、空き家対策に関して住民アンケートおよび建物立ち入り調査を始めています。これは今後、図面や模型、パースなどを使ってモデルプランを提案し、住民と意見交換するなかで理想的なデザインに修練させていく予定です。

### 3. 研究室のデザイン

私たちの研究室では、先述の木祖村以外に他の大学と連携して携わっている、「八潮街並みづくり100年運動」（埼玉県八潮市）や「気仙沼大島みらい会」（宮城県気仙沼市）などがあります。デザイン活動を軸に地域の抱える問題に真摯に向き合う研究室にしていきたいと思っています。また、そこで得られた手法や結論が、長野だけでなく他の地域にとっても有効性を持ちうるような、より普遍性のあるデザイン提案になることを目指しています。どんなデザインでもできる研究室をデザインするのが私たちの目標です。

# バイオマス分解酵素の改良と利用

物質工学科 准教授 野崎 功一



## 1. はじめに

私が所属する「生物化学研究室」は、天野良彦教授、松澤恒友特任教授および水野正浩助教とともに運営されております。ここでは、その中でも私自身の研究内容について紹介します。私の研究は、神田鷹久特任教授（現信州大学工学部若里会 理事長）の流れを汲むものあり、そこに新しい実験技術や解析手法を取り入れることで、さらなる発展を目指しております。私が直接指導する学生は、博士課程1名、修士課程2名および4年生4名ですが、ゼミや研究成果報告会を通して、また時には、たわいもない話をしながら同じ目標に向かって頑張っています。

## 2. 研究の目的

昨今の再生可能エネルギーに注目が集まる中で、我々が目指すものは、木質や草本などのセルロースを含有するバイオマスの分解利用に必用な酵素を作り出すことです。作るといっても実際に生産するのはカビの仲間の微生物で、利用可能な酵素を見つけ出し、取り出し、また遺伝子を操作して、酵素の生産量や性質を改良するが目標です。バイオマスは複数の酵素の作用によってグルコースなどの単糖やオリゴ糖に分解されると、燃料や食料、様々な化学材料の原料として利用することが可能となります。酵素は自然界ではゆっくりと枯れ木や落ち葉を分解し、地球の炭素循環に重要な役割を果たしています。しかし、我々が酵素を取り出して、容器の中で効率良く、短時間で目的のバイオマスを分解するためには、その反応条件に合致するように酵素自体の性質を改良して最適化する必要があります。

## 3. 研究内容

### (1) 酵素の魅力

新しい機能を持つ酵素、さらに有用な酵素など、未発見の酵素はまだ数多く存在します。さらに生物は常に進化や突然変異を繰り返し、そのたびに新しい酵素が出現しています。研究室では、1学生

に1つの酵素を担当してもらい、酵素の精製を行い、その性質を調査することから実験が始まります。何気ない発見が、新たな研究への発展につながるものがたびたび起こります。

### (2) 酵素を改良する

反応効率を上げるため、酵素を高温や高濃度で作用させる必要があります。バイオマスの分解には複数の種類の酵素が必要で、そのいくつかが不足すると全体の反応効率が著しく低下します。安定性が悪い酵素や活性が不足している酵素を見つけ出し、その原因がわかれば、酵素の構造を改良することも可能です。ただし、自然界に存在する酵素の完成度は非常に高く、ある性質を改善することによって、その他の性質が著しく低下することが良く起こります。

### (3) 微生物による酵素の生産性を上げる

バイオマス利用の最大の問題は、製品の生産コストが高くなることです。しかも、その大部分は酵素の値段によって占められています。性能が高い酵素を安く生産するには、その生産性を上げることが必要です。研究室ではセルラーゼを生産する糸状菌 *Trichoderma reesei* の酵素生産メカニズムに関する研究を行っています。この菌はソホロースという特殊な糖質が存在すると、セルラーゼを大量に生産し始めることが分かっています。ソホロースは、本菌自身によって生産されるため、その合成酵素の生産量を上げることでセルラーゼの生産量を間接的に増加できる可能性を見出しました。この研究は、私が7年前に



企業特別賞を受賞した郭さん(中央)、研究会会長(左)、企業代表者(右)

学に留学したことを発端に始めたもので、現在博士課程3年生の郭博洋さんが5年間の長い時間をかけて取り組み続けています。当時、ソホロースの合成に関与する酵素は分かっておらず、複数の候補遺伝子の取得から、遺伝子組換え酵素の作製、酵素精製やソホロース合成能の調査を行ってきました。お陰様で候補酵素がいくつか見つかリ、昨年はその研究成果によって郭さんが「企業特別賞」を受賞することができました(写真)。世界を代表する酵素メーカーから賞を頂いたことは、私どもにとりまして誠に名誉高きことであり、長年の研究成果が認められたものとして大変うれしく思っております。

#### 4. 研究室の学生諸君

物質工学科は化学系の学科であるにも関わらず、生物を扱う我々の研究室に配属し卒業・修了するた

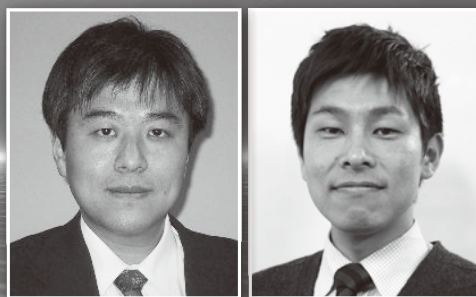
めには、大胆な意識改革と大変な努力が必要であると予想されます。それにも関わらず、配属した学生の大部分は、自分の研究に自信と生きがいを持っていることが感じられ、日々朝から夜まで真剣に研究に打ち込んでくれています。そのような学生達と共に過ごすことができるのは、教員である私にとって最高の楽しみと喜びであります。

#### 5. おわりに

何十年もの歴史ある研究室で、先代の先生や先輩方の地道な成果の積み重ねの重要性を実感しつつ研究を進めております。引き続き、この研究が社会の役に立つよう努めてまいります。また、若里会からは、平成25年度に研究助成のご支援を頂きました。この場を借りて関係者各位にお礼を申し上げます。

## 新村國宗研究室

情報工学科 准教授 新村 正明  
 情報工学科 助教 國宗 永佳



私たちの研究室ではICT(情報通信技術)を活用した、教育・学習を支援するシステムに関する研究を主に行っています。

教育・学習におけるICT活用は、教育機関だけではなく、企業の組織内人材育成や、生涯学習など様々なところで行われております。また、その活用のされ方についても、遠隔学習や授業・研修時間外の学習支援、授業・研修などの運営支援など、多岐に渡っています。

私たちは、これらの多様な教育・学習環境において有用な教育・学習支援システムの研究開発を行っています。

私たちが開発している学習支援システムの代表例を紹介します。

#### 【多読支援システム ERS】

多読とは、大意を把握するような読み方により、読解力や語学能力を高める学習方法です。信州大学においても、英語教育の一環として1年次の学生を対象に多読学習が取り入れられています。

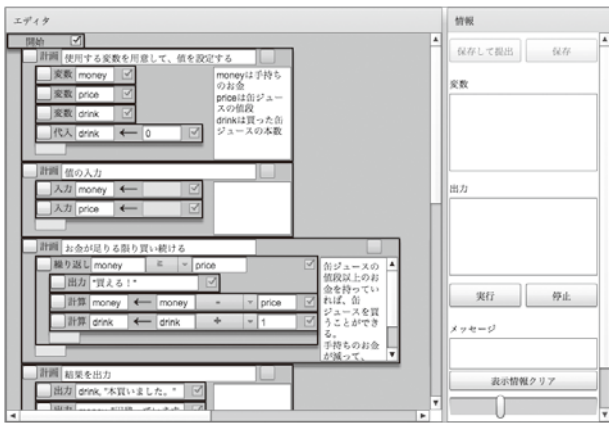


多読支援システム

私たちの研究室では、多読学習者において、学生間の情報共有による新しい本との出会いの提供や、多読に対するモチベーションの維持を図る多読支援システムの開発を行っています。

#### 【ビジュアルプログラミング環境】

信州大学工学部情報工学科では、アルゴリズム的思考法の授業を行ってきました。これは、実行した



ビジュアルプログラミング環境

い処理を利用可能な手続きに分解・整理し、アルゴリズムとして成立させる思考法です。

この授業を行う上で判明した種々の問題点を解決するために、アルゴリズム的思考法の授業を支援するビジュアルプログラミング環境を開発しました。このツールは、利用可能な手続きをブロックとして表現し、このブロックの組み合わせによりアルゴリズムを組み立てていくものです。

### 【研究室の様子】

私たち研究室では、大半の研究が、教育・学習支援システム開発であり、実際の授業で用いられています。このため、授業を担当する教員との打ち合わせを行うこともしばしばあります。

また、ほとんどの研究テーマに対してチームを組んで研究を行っており、チーム内で先輩が後輩の指導を行っています。教育支援システムの開発についても、学生自身が自分の目線で、学生にとって使いやすいシステムとなるよう開発を進めています。

私たちの研究室では、夏に合宿を行っております。合宿では、3つのグループに分かれて課題に取り組み、最終日に発表会を行っております。

普段は、研究テーマ毎のチームで研究を進めてい



授業担当教員との研究打ち合わせ



先輩による研究指導



合宿風景

ますが、チームの枠を超えたグループワークを行うことで、普段に研究においても、チーム間での情報交換・研究指導が円滑に進むようにしています。

## 鈴木研究室の紹介

環境機能工学科 准教授 鈴木 孝臣



いつも研究室見学に来た学生から「鈴木研の研究は何の役に立つのですか?」と聞かれる。真面目に答えるのが面倒くさいので、いつも「何の役にも立ちません。」と答えている。そんな捨て鉢の返事を聞いた学生が、私の研究室に希望して入ってくるはずがない。役に立たないという自虐的な表現をしつつも、役に立たないことに専念することほど高尚であるという姿勢でもあり、いささか snobbish な印象も与えているかもしれない。もちろん工学部にいながら応用研究に無関心であることの後ろめたさもないわけではない。せめてもの罪滅ぼしに自分の研究室以外の学生にも英会話や護身術の個人指導をしている。

研究の基本は表面張力である。表面張力という液体の表面積を小さくしようとする「力」である、という誤解がある。表面張力とは厳密には表面自由エネルギー密度、即ち、単位面積当たりの表面自由エネルギーである。表面自由エネルギーを  $G_{surf}$ 、表面張力を  $\gamma$ 、表面積を  $A$ 、とすると、これらの関係は

$$G_{surf} = A\gamma \quad (1)$$

と表すことができる。熱力学的ポテンシャルである表面自由エネルギー、 $G_{surf}$  が小さくならろうとする。表面張力  $\gamma$  は液体固有の定数であって小さくなりようがない。表面積が最小となることによって表面自由エネルギーは最小となる。液体の表面張力は簡単に測定できる。液膜を作り、それを引っ張ってやればよい。液体の表面張力計として商品化されている。

固体に関しては表面張力はない、という誤解もある。仮に表面張力が存在していても、その測定は不可能、あるいは困難である、という誤解もある。我々の研究は日々その誤解との戦いでもある。さて、固体にも表面張力はあるし、測定も可能である。次に示すヤングの式はよく知られている。

$$\gamma_s = \gamma_L \cos\theta + \gamma_{SL} \quad (2)$$

ここで  $\gamma_s$  は個体の表面張力、 $\gamma_L$  は液体の表面張力、 $\gamma_{SL}$  は固-液界面張力、そして  $\theta$  は液体の接触角である。即ち、液体の接触角を測定すれば固体の表面張力を求めることができる。

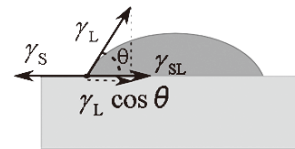


図1 固体、液体の表面張力と液滴の接触角の関係

接触角の測定にはデジタルカメラを使用する。その映像をパソコン画面上で分度器を使って測るだけである。金はかからない。しかし逆に、金がないから研究が進まないのだという言い訳も出来ない。ただ、この研究の難点は接触角の分布が広いことである。一見、この接触角測定は再現性に乏しいように見える。一つの固体表面に対して100枚以上の接触角撮影をして平均を取る必要がある。

最近金属の表面張力の測定を行っている。アルミニウムのような金属を引張り試験機で歪みを与え、公称応力の測定をすることは一般的によく行われている。金属に与えた歪みとそれに伴う金属の表面張力の変化の測定を行っている。液体であれば液膜を引っ張ることで簡単に表面張力の測定ができる。そこで同様に金属板を引っ張って表面張力が測定できないものかと考えたわけである。もちろんそんなことで金属の表面張力が測定できるはずはないが、しかし、あきらかに金属板を引っ張ることにより金属の表面張力に変化は見られた。まだ論文としては未発表なので詳細は書けないが、歪みを与えられた金属ではその表面張力が大きくなっていく傾向があるようである。



「技報 こまくさ」 第 12 号 平成 26 年 10 月発行  
(非売品)

発行者 一般財団法人信州大学工学部若里会  
〒 380-8553

住 所 長野県長野市若里 4 丁目 17-1  
TEL (026) 266-8209 (FAX 共有)  
E-mail : wakasat@shinshu-u.ac.jp

印刷・製本 株式会社アイデスク  
〒 381-0025 長野市北長池 1263-1  
TEL (026) 244-4551



一般財団法人 信州大学工学部 若里会