

# News letter

離散幾何と材料

その共通項を探究する



Discrete Geometric  
Analysis for  
Materials Design

次世代物質探索のための離散幾何学

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
平成 29 年度～令和 3 年度

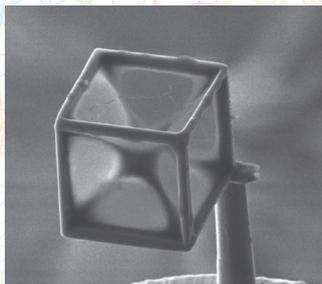
News letter **08**  
Vol.

## A03 班代表挨拶

A03 班では、物質分離・輸送を最適化する多層・多孔質材料の離散曲面論と題し、多連続多孔質構造などを離散曲面論により分類・最適化し、それを実際の合成プロセスで実現するために大域解析を用いた設計を行い、高度な界面制御技術により狙った構造を形成することを目的としています。

3 次元的に広がる規則構造・集合体のモデル化と、これを用いた新規構造・機能の提案・開拓は A03 班に共通する研究であり、数学・実験のさまざまな手法を活用した研究が行われると共に、研究者間の連携が進められています。その対象についても、炭素結晶、ナノコンポジット薄膜、炭素系触媒、リオトロピック液晶、多孔性炭素、光異性化分子、結晶形状、グラフェンナノ構造体、ジャイロイド相など多岐に渡っています。

ここに示す研究では、酸化ジルコニウムなど酸化物のナノ粒子を分散させたポリマーであるナノコンポジット材料を対象とし、その薄膜形状をマイクロメートルスケールで制御する手法の開発を目的としています。その実現に向け、まずナノ粒子を分散させたポリマー水溶液を調製し、その溶液の膜をマイクロメートルスケールの枠構造上に張り、極小曲面の形状を有する液膜を形成後に乾燥するという手法を提案しています。これまでに、マイクロメートルスケールの枠構造にも極小曲面の膜を形成できること、ナノ粒子を分散させたポリマー水溶液から液膜を形成し乾燥することでナノコンポジット薄膜を調製できること、3D プリンタなどで形成したサブミリメートル程度の枠の上に極小曲面としてナノコンポジット薄膜を形成できることを明らかにしています。



— 5 μm

名古屋大学大学院  
工学研究科 教授

高見 誠一



TAKAMI Seichi

研究分野：化学工学

研究テーマ：ナノ材料の合成プロセス開発

研究概要：反応工学に立脚し、目的とする組成・サイズを有するナノ材料の合成プロセスの開発を行っています。また、環境・情報・医療など様々な分野の研究者と連携し、合成したナノ材料の応用を進めています。特に本研究領域では、セラミックスナノ粒子をポリマー中に分散したナノコンポジット材料について、これをナノ・マイクロメートルスケールの極小曲面の形状とした材料の合成に取り組んでいます。

東北大学高等研究機構  
材料科学高等研究所 所長  
大学院理学研究科  
数学専攻 教授

小谷 元子



KOTANI Motoko

研究分野：幾何学

研究テーマ：離散幾何解析学とその材料科学への応用

研究概要：離散幾何解析学は、スケール間をつなぐ幾何学です。原子配列をネットワークと見たときに、その幾何構造がマクロな物性にどう反映するのかを研究する道具であるといえます。原子や分子などの離散データの背後にある連続構造を抽出し、数学的立場から求められる物性を持つ未知の構造を提案していきます。

名古屋大学大学院  
多元数理科学研究科  
准教授

内藤 久資



NAITO Hisashi

研究分野：大域解析・数値解析

研究テーマ：幾何学的変分問題、非線型微分方程式、離散幾何解析

研究概要：幾何学的変分問題に由来する非線型微分方程式や離散幾何解析などを中心的なテーマにして研究を行なっています。非線形偏微分方程式で記述された幾何学的対象を、その幾何学的性質を利用して解析的に研究しています。一方、物質科学で現れる結晶格子を高い対称性を持ったグラフと考え、さらには変分問題の解として理解することもできます。この立場から、対象の幾何学的性質を利用して、その性質を調べる研究を行なっています。

# A03 班研究の概要

A03 班には 3 つの計画研究があります。

- **A03-1 「3次元トポロジーに基づく静的・動的ネットワークの提案」** (研究代表：小谷元子)
- **A03-2 「ナノ極小曲面論による相分離過程の大域解析」** (研究代表：内藤久資)
- **A03-3 「界面活性剤を用いた多連続・多孔質構造の形成」** (研究代表：高見誠一)

A03-1 班では、離散幾何解析を用いて 3 次元ネットワークから得られる多連続構造の分類を行います。A03-2 班では、結晶格子を高い対称性を持ったグラフと考える立場から、対象の幾何学的性質を調べています。A03-3 班では、極小曲面形成の原理を用い、マイクロ・ナノメートルスケールでナノ材料の構造を制御・形成する手法を探索しています。

これらの計画研究に加え、2020 年度から 7 件の公募研究が採択されました。いずれも、数学・幾何学と材料との連携を扱うものであり、さまざまな数学的手法・対象とする物質にわたっています。さらに、数学を背景とする研究者と実験手法を背景とする研究者との連絡を円滑にする目的として、インターフェースの役割を担う研究者も 2020 年度より参画しています。

次ページ以降で、A03 班において採択された 7 件の公募研究の紹介を行います。

## 論文・書籍紹介

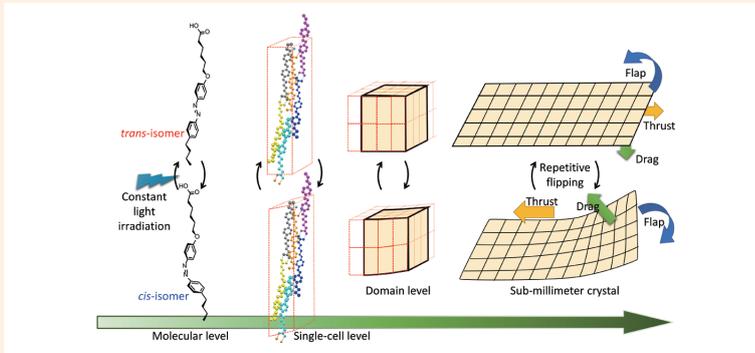
A03 班のこれまでの成果については下記の文献が参考になります。

- [1] T. Omori, "Exponentially harmonic maps of complete Riemannian manifolds", *manuscripta mathematica*, published online: Nov. 7 (2018).
- [2] T. Omori, H. Naito, T. Tate, "Eigenvalues of the Laplacian on the Goldberg-Coxeter Constructions for 3-and 4-valent Graphs", *The Electronic Journal of Combinatorics* 26 (3) (2019).
- [3] A.-A. Litwinowicz, S. Takami, S. Asahina, X. Hao, A. Yoko, G. Seong, T. Tomai, T. Adschiri, "Formation dynamics of mesocrystals composed of organically modified CeO<sub>2</sub> nanoparticles: analogy to a particle formation model", *CrystEngComm* 21 (25) (2019) 3836-3843.
- [4] S. Akamine, A. Honda, M. Umehara, K. Yamada, "Bernstein-Type Theorem for Zero Mean Curvature Hypersurfaces Without Time-like Points in Lorentz-Minkowski Space", *Bulletin of the Brazilian Mathematical Society, New Series* (2020).
- [5] S. Akamine, H. Fujino, "Reflection principle for lightlike line segments on maximal surfaces", *Annals of Global Analysis and Geometry* 59 (1) (2021) 93-108.

# A03班 公募研究紹介

## 研究内容

- 研究題目** ▶ 光異性化分子の「動き」がつくる分子集合体の「動き」を数理モデルから解き明かす
- 研究計画** ▶ 分子集合体に働く力学を考えた数理モデルにより、自律運動する分子集合体の時空間秩序構造や力学機能を解析する。



## 研究代表者

北海道大学大学院  
理学研究院化学部門 助教

景山 義之

KAGEYAMA Yoshiyuki



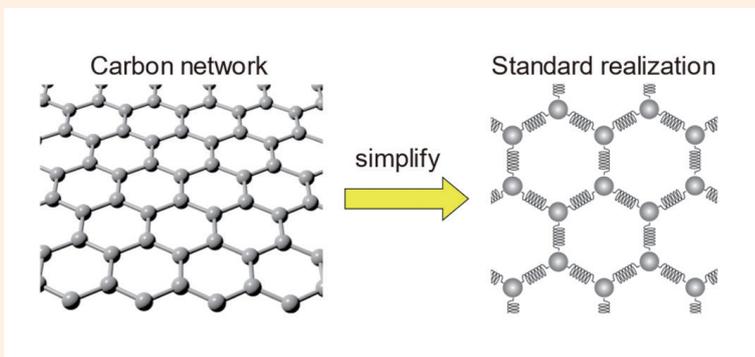
研究分野：超分子化学、有機化学、化学物理

研究テーマ：時空間自己組織化現象を創る 自律分子デバイスの創出

研究概要：ナノメートルの分子の動作で、実用スケールで自律運動する分子デバイスを創る合成的研究をしています。マクロな自律的力学系では、空間秩序と時間秩序が存在します。従来の化学は、準静的物性を、分子構造や結晶構造などの空間構造に結びつけて考察してきました。これに対し時間秩序は、時間二階微分の式で表される現象です。本研究では、時間微分の式と空間構造とを紐付け、分子デバイスの自律運動の特徴を明らかにしていきます。

## 研究内容

- 研究題目** ▶ カーボンネットワークの標準化モデルを用いた新規触媒の設計と開発
- 研究計画** ▶ 数学モデルを実験的に再現し、構造と触媒能力の相関を明らかにする



## 研究代表者

筑波大学  
数理物質系 准教授

伊藤 良一

ITO Yoshikazu



研究分野：材料科学、触媒、環境エネルギー

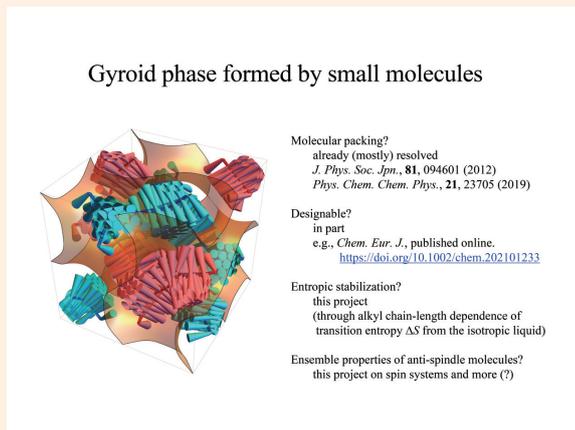
研究テーマ：ガウス曲率と平均曲率から構成される曲面は異元素をグラフェン格子に入れ込んだときの触媒特性を理解する上で重要な数学的特性である。これらを用いた標準実現から数理モデルを構築し、実験的にモデルを再現し、構造と触媒特性と結びつけることで、一般的な材料設計指針の確立やグラフェンの自在な機能化を目指す。

## 研究内容

- 研究題目** ▶ ジャイロイド構造形成の動的分子論の探究

- 研究計画** ▶

小分子からなる液晶性ジャイロイド相を検討対象としてジャイロイド構造の形成機構を探る



## 研究代表者

筑波大学  
数理物質系 教授

齋藤 一弥

SAITO Kazuyuki



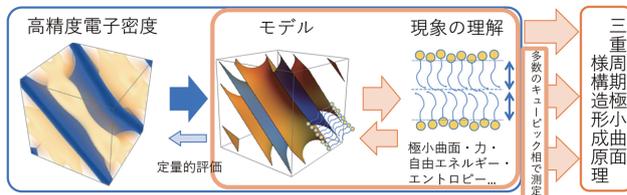
研究分野：物性物理化学

研究テーマ：柔らかい分子集合体の構造・物性・相転移など

研究概要：分子の集合体の性質に分子の個性がどのように関係するかに興味を持って研究を行っています。構造解析と熱容量測定が主要な実験手法です。熱容量測定はエントロピーを定量する手段でもあるため、構造形成におけるエントロピーの役割も問題意識になっています。液晶や分子結晶を主な対象とし、分子に形があること、とくに分子の内部自由度の持つ意味を考えています。

## 研究内容

### 研究題目 ▶ リオトロピック液晶共連続キュービック相の電子密度情報に基づく構造形成原理の解明



- 共連続キュービック相の単結晶領域の作成およびX線結晶構造解析
- 高精度の電子密度情報を基にこの構造が内包する現象を解明
- 構成分子の異なる多くの系で解析を行い共通点を見出す。
- すべての共連続キュービック相に共通となる三重周期極小曲面様構造の形成原理を明らかにする。

## 研究代表者

静岡大学  
理学部/電子工学研究所 准教授

岡 俊彦

OKA Toshihiko



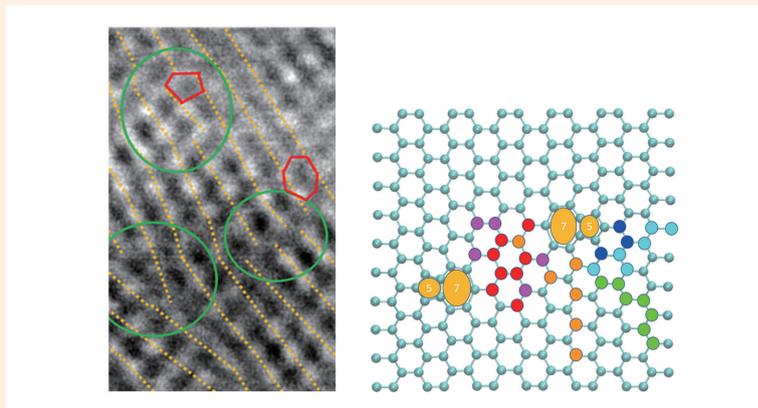
研究分野：ソフトマター物理、生物物理

研究テーマ：リオトロピック液晶の相転移・構造形成

研究概要：リオトロピック液晶キュービック相の構造形成に関する研究を行っています。単結晶を用いたX線構造解析により電子密度を求め、液晶内部での両親媒性分子や水の分布や構造形成機構を明らかにしたいと考えています。単結晶による回折はこれまで明らかにされてきた以上の構造情報を含んでおり、詳細な解析を行っていく予定です。また関連する技術開発も行っています。

## 研究内容

### 研究題目 ▶ 第一原理計算と離散曲面論を用いたグラフェンナノ構造体の触媒活性制御



## 研究代表者

大阪大学大学院  
基礎工学研究科 助教

大戸 達彦

OHTO Tatsuhiko



研究分野：理論化学・計算物理

研究概要：本研究では、欠陥・ドーパント・官能基を導入したグラフェンに対して水分解反応の第一原理計算を行う。ドーパントが導入されやすいサイトを離散曲面論によって示した上で、各サイトの水素発生、酸素発生反応を計算し、第一原理計算の結果と数学的モデルを用いて活性の高いサイトを突き止める。これらの結果をA03の実験グループにフィードバックすることにより、実際にグラフェンナノ構造を利用した触媒開発に結び付ける。

HARMONICS  
Column for math-mate collaboration

## 第8話 引き算は難しい？

「私は数学者です」と言うと、多くの人に内心では「変人でしょ?」と思われつつも「計算が得意なんですね」と反応されてしまう。これは、世間の数学者に対する大きな誤解である。少なくとも筆者の周りでは暗算が得意な数学者は非常に少なく、筆者自身が変人であるかはともかくとして、世間で言うところの計算は不得意である。実際、筆者は2桁の引き算は怪しく、3桁同士の引き算となると高い確率で正しい答を出すことはできない。増してや、飲み屋での割り勘は絶対に不可能である。このコラムでは、計算が不得意な筆者でも計算できる減算手法を位取り記数法とあわせて考えてみよう。

コンピュータでは数値を2進法で表す。時折、片手で31まで数えることができる変人もいるが、通常我々は10進法で数値を表している。多くの国で1、2、5、10の単位の紙幣が用いられているのは、それぞれが10の約数であることに起因するのだろう。また、時刻表記で60進法を用いられるのは、真偽のほどは確かではないが、60が多く約数を持つことが理由と言われている。古くは英国の補助通貨単位は12進法であったと言われ、筆者には対応できない世界だったのかもしれない。このように整数などの具体的な表記を与える方法が「位取り記数法」である。

我々が普通に考えている整数(数学では有理整数と呼ばれている)では、(常識的には)加法の単位元を0、乗法の単位元を1と書くこと以外には、数値の具体的な表記とは無縁である。しかし、整数の計算を行う場合には、数値を記述するための具体的な表記としての位取り記数法が必要と

6 ページへ続く

研究内容

研究題目 ▶ 離散幾何学と滑らかな幾何学をつなぐ幾何解析の展開と物質・材料科学との連携

研究計画 ▶

曲面の非等方的エネルギーについての変分問題及びそのエネルギー勾配流を研究することにより、離散幾何学と滑らかな幾何学をつなぐ幾何学を創造・展開します。そして、物質・材料科学との連携により、より広い学問領域並びに科学技術に応用します。

臨界点	エネルギー関数	付加条件	自然現象
極小曲面 (平均曲率0)	面積	なし	石鹸膜、界面活性剤周期構造を持つ微小物質
平均曲率一定曲面	面積	体積一定	シャボン玉 高分子共重合体の境界面
非等方的平均曲率一定曲面	非等方的表面エネルギー	体積一定	小さい結晶 ある種の液晶

下図は、種々のエネルギー密度関数  $\gamma: R^3 \rightarrow R$  に対する「同じ体積を囲む閉曲面の中で非等方的エネルギー  $|\gamma(N(p))| dA$  の臨界点」(シャボン玉、ある種の液晶、結晶の数理モデル)である。ただし、上式中の  $N(p)$  は曲面上の点  $p$  での単位法ベクトルを表す。

γの例1.

$$\gamma(r_1, r_2, r_3) = (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2)^{1/2}$$

γの例2. 臨界点は一意的ではない。

$$\gamma = \frac{(r_1^2 + r_2^2)^2 + 15(r_1^2 + r_2^2)r_3^2 + 15(r_1^2 + r_2^2)r_3^4 + r_3^6}{4(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2)^2}$$

γの例3.

$$\gamma = |r_1| + |r_2| + |r_3|$$

研究代表者

九州大学  
マス・フォア・インダストリ研究所 教授



小磯 深幸

KOISO Miyuki

研究分野：微分幾何学、幾何解析  
研究テーマ：幾何学的変分問題の解の安定性と解空間の構造の解析

研究概要：液体・(方向性のある) 液晶・結晶 (固体) の全ての表面エネルギーを含む一般的な概念として、曲面の非等方的エネルギーと呼ばれるものがあります。曲面の非等方的エネルギーの変分問題の解は、エネルギー密度関数の凸性や微分可能性に応じて、滑らかな曲面・カドのある曲面・多面体などになります。これらを統一的に扱うことにより、滑らかな微分幾何学や楕円型作用素が支配的な曲面の研究では扱えなかった曲面の解析を行うことを目指しています。

研究内容

研究題目 ▶ 幾何学構造に基づいた多孔性炭素の創製と電極特性開拓

これまでの代表的な手法

ゼオライト、シリカなどの無機多孔性結晶

- ・ 鑄型除去にHFが必要
- ・ 作製後のみ機能化が可能
- ・ 細孔径などの多様性の少なさ

応用

三次元多孔性炭素

エネルギーデバイスへの応用 (水素吸蔵、電池、触媒)

表面積、導電性、空孔

(1) 金属有機構造体(MOF)を鑄型とする炭素

MOF鑄型 → 炭化 → 多孔性炭素

形状の系統化と幾何分析

幾何学形状を数理モデルと比較し、形状分析や物性予測などを行う。

(2) SWNT/グラフェン複合体

ビラー物質 + グラフェン

Scherk第一曲面との関係

三次元グラフェン

研究代表者

関西学院大学  
教授



吉川 浩史

YOSHIKAWA Hirofumi

研究分野：物性化学、電気化学  
研究テーマ：幾何学構造に基づいた多孔性炭素の創製と電極特性開拓

研究概要：本研究では、ナノ構造の極小曲面や動的構造形成の概念といった幾何学構造に基づいて、金属有機構造体を鑄型とする多孔質炭素材料の新しい作製法を開発し、構造と電極特性の相関を明らかにし、高性能な炭素電極材料の創製を目指します。また、金属有機構造体のトポロジーに由来したガス吸着特性や構造安定性などにも着目し、新しい材料開発に幾何学が重要であることを示す研究を行います。

5 ページの続き

なる。我々が通常用いている  $b$  進表示 ( $b$  は 2 以上の整数) とは、非負の整数  $n$  を 0 から  $b-1$  までの数  $a_j$  を用いて  $n = a_k b^k + a_{k-1} b^{k-1} + \dots + a_1 b^1 + a_0 b^0$  とあらわし、このとき  $n = a_k a_{k-1} \dots a_1 a_0$  と表記する方法である。このとき、負の整数を表すには、先頭に符号 “-” をつける。各  $a_j$  に表れる「文字」を “digit” と呼び、digit として 0 から  $b-1$  の数を用いるとは、整数を  $b$  で割った剰余として  $\{0, \dots, b-1\}$  とをとることに他ならない。なお、整数を  $b$  で割った剰余のとり方には任意性があり、特に  $b$  が奇数  $b = 2c + 1$  のときには、 $a_j$  として  $\{-c, \dots, 0, \dots, c\}$  とすることも可能であり、この位取り記数法を平衡  $b$  進表示と呼び、負の整数を表すための符号 “-” を必要としない。このような位取り記数法による具体的な数値の表示が与えられると、加減算や大きさの見積りを具体的にを行うことが可能になる。

さて、 $b$  進表示の下での整数の加算と減算を比較すると、加算の方が容易であるのは納得してもらえらるだろう。加算よりも面倒と思われる減算も、実は各桁ごとの簡単な減算と加算のみで実現することができる。これは、「補数」を用いた減算と呼ばれている。例えば、10 進表示で  $1021 - 183 = 1021 + (-183) = 838$  の具体的な計算を見てみよう。そのためには  $-183$  に対して、(4 桁に揃えて) 0183 の各桁の数を 9 から引いた数 9816 に 1 を加えた 9817 を考える。すなわち、10 進 4 桁以下の数値を考えるという条件の下で  $-183 = 9817$  と考え、 $1021 + (-183)$  を計算する代わりに  $1021 + 9817 = 10838$  と計算する。この結果の 10000 に関する法をとれば、求めるべき計算結果 838 を得る。ここで求めた 9817 は 183 の「10 の補数」と呼ばれている。

CPU 内部では整数は 2 進表示に相当する方法で格納・計算されていることは広く知られている、多くの処理系では、 $-2^{n-1}$  から  $2^{n-1} - 1$  の範囲の整数を表し、負の整数は「2 の補数」を用いて表されている。桁数  $N$  の 2 進表示での 2 の補数とは、各桁の 0 と 1 を反転した数 (1 の補数)

7 ページへ続く

## 第1回 新学術基礎講義「非エルミート系におけるトポロジカル物性」

日時：2021年2月8日（月）19日（金） 会場：Zoomによるオンライン開催

新学術領域内でアンケートが行われ、その結果に基づいて特に関心を集めていたトピックとして「非エルミート系」に関する基礎的な講義が行われました。A01班公募班の吉田 恒也氏（筑波大学）に他分野の方々も理解しやすい基礎的な内容から、最先端のホットトピックまで、長時間に渡り丁寧な講義をしていただきました。

分野を問わず非常に多くの聴衆の方々に参加していただき、講義中には多くの質問が寄せられ、活発に交流が行われました。非常に好評だったため、当初は1日で終わる予定でしたが、2日目も追加で開催する運びとなりました。

## ワークショップ「The Geometry & Topology Behind Fabrics at Multiple Scales」

日時：2021年5月20日（木）21日（金） 会場：Zoomによるオンライン開催

AIMR、CREST と本新学術領域の共同でワークショップが開催されました。日本・アメリカ・ヨーロッパ・オーストラリアからの計15名の発表者によってファブリックの幾何学やトポロジーなどについて講演が行われました。発表者・参加者の方々の専門分野は数学・材料科学に限らず多岐にわたり、国際的・学際的なワークショップとなりました。

ワークショップは2日間の4セッションに分かれて行われました。あいだの休憩時間では、バーチャル空間を用いた休憩室が設けられ、オンラインでの距離を感じさせない自由で活発な議論や交流が行われました。

### 6 ページの続き

に1を加えた数である。この方法では、 $n$ ビットすべてが1となる数が $-1$ に対応する2の補数となる。なお、正の整数 $n$ に対して $-n$ の2の補数を得ることは、簡単な論理回路で実現することができ、CPU内部の演算回路を簡略化する大きな役割を果たしている。

また、時刻の差をとるという面倒な計算も補数を用いることによって比較的容易に行うことができる。時刻表示は60進法と言われることが多いが、1日は24時間であるので、日数を越えて60進表示となっているわけではない。では、「 $w_1$ 週  $d_1$ 日  $h_1$ 時間  $m_1$ 分  $s_1$ 秒」から「 $w_2$ 週  $d_2$ 日  $h_2$ 時間  $m_2$ 分  $s_2$ 秒」までの経過時間をどのように計算すべきだろうか。通常、両者を「秒」に書き直して差を求めろのだが、その計算は必ずしも容易ではない。そこで、これを「補数」を用いて計算してみよう。いま、「 $w$ 週  $d$ 日  $h$ 時間  $m$ 分  $s$ 秒」=「 $w \times (7 \times 24 \times 60 \times 60) + d \times (24 \times 60 \times 60) + h \times (60 \times 60) + m \times 60 + s$ 秒」である。ここまでは「基数 $b$ 」を固定して考えていたが、時刻表示を「基数7, 24, 60, 60」をとる「混合基数表示」と考えよう。このように考え方を変えることによって、時刻表示の差を（混合基数に関する）補数を使って計算することが可能となる。具体的には、十分に大きな数 $W$ を一つとると、「 $w$ 週  $d$ 日  $h$ 時間  $m$ 分  $s$ 秒」の補数は「 $(W-1-w)$ 週  $(6-d)$ 日  $(23-h)$ 時間  $(59-m)$ 分  $(59-s+1)$ 秒」となり、減算を補数を用いた加算で求めることができる。

実際、「6週1日2時間46分7秒-4週4日23時間48分11秒」を計算するためには、 $W=11$ ととり、「6週1日2時間46分7秒+ $(10-4)$ 週 $(6-4)$ 日 $(23-23)$ 時間 $(59-48)$ 分 $(59-11+1)$ 秒」を計算すれば、「12週3日2時間57分56秒」となる。この結果の $W=11$ 週による法をとることで、計算結果である「1週3日2時間57分56秒」を得ることができる。

ここで紹介した補数を用いた減算は紀元前から知られている計算方法であり、電卓やコンピュータが広く普及した現代では「忘れられた計算方法」となっているのかもしれないが、現代に至っても、コンピュータ内部での負の整数の表示という形で用いられている。筆者自身は、大学院生の頃にD. Knuthの名著“The art of computer programming”を読んで位取り記数法概念と補数による減算の方法を知った。近年の便利なツールの陰で忘れられかけている「いにしえからの知恵」はまだまだあちこちに残っているのかもしれない。

内藤 久資

1985年大阪大学理学部卒業、1988年名古屋大学理学研究科数学専攻中退、同年名古屋大学理学部助手、1995年名古屋大学多元数理科学研究科助教を経て現職。微分幾何学にあらわれる非線形偏微分方程式の研究を経て、現在は材料科学に関連する離散幾何解析を数学と数値計算を用いて研究している。

# 活動記録

2021年

- 2月8日、19日 第1回 新学術基礎講義「非エルミート系におけるトポロジカル物性」
- 2月12日、19日 第2回 新学術基礎講義「高次トポロジカル絶縁体の物理」
- 2月12日 オンラインセミナー「Geometric modelling of tangled structures」
- 3月5日 オンラインセミナー「数学と材料科学」
- 3月10日 - 11日 第18回 SPring-8 ユーザー協同体 顕微ナノ材料科学研究会  
第15回 日本表面真空学会 放射光表面科学研究部会  
第4回 日本表面真空学会 プローブ顕微鏡研究部会  
合同シンポジウム（会場：金沢大学サテライトプラザ）
- 3月14日 日本物理学会第76回年次大会
- 5月20日 - 21日 GTF2021  
The Geometry & Topology Behind Fabrics at Multiple Scales
- 5月29日 A02 班会議

※会場の記載がない場合はオンライン開催です。

## 募集

人材募集する場合は領域ウェブサイトにて情報掲載いたします。



### 問い合わせ先

小谷 元子（領域代表）  
東北大学材料科学高等研究所（AIMR）  
E-mail : [contact@math-materials.jp](mailto:contact@math-materials.jp) 領域ウェブサイト : <https://math-materials.jp/>

News letter Vol. 08 編集担当：渡部 淳、福田 瑞季、池田 進（東北大学 AIMR）