

# 情報処理

2022  
**3**

Vol.63 No.3  
通巻 684 号

## 特集 **オンライン** 知能コンピューティング — AI とハードウェアの出会い —



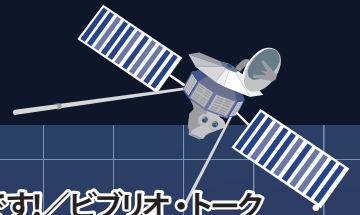
巻頭コラム

クリエイターからクリエイタークリエイターへ  
中村俊介

教育コーナー：べた語義

連載：5分で分かる!? 有名論文ナメ読み / 情報の授業をしよう! / 先生, 質問です! / ビブリオトーク

委員会から  
学会活動報告



電子版もご覧ください



電子版を読む (会員無料)  
情報学広場



iPhoneなどで読む (有料)  
Kindle



電子版を購入 (有料)  
Fujisan



Web公開 (無料/有料)  
note



一般社団法人  
**情報処理学会**  
Information Processing Society of Japan



# FUJITSU

目の前の課題は、  
壁か。扉か。

**未来は、持続可能だ。  
「Fujitsu Uvance」が答えていく。**

この瞬間も、さまざまな課題が生まれている。  
爆発的な人口増加、深刻な気候変動、地域の分断や格差…。  
そして、COVID-19は、価値観や生活様式を一変させた。  
課題を見つめるほどに、不安も見えてくる。  
しかし、富士通は思うのです。  
目の前の課題は、壁ではない。扉だ、と。  
その一つ一つをひらき、突き進んだ先にこそ、  
あるべき社会や未来が待っている。

今こそ、私たちは扉をひらきます。  
「Fujitsu Uvance (ユーバンス)」のもと、  
社会課題の解決を起点に、  
持続可能な社会とビジネス変革の両立を実現します。

環境に負荷をかけない、循環するものづくりを。  
長寿の幸福度を上げる、ウェルネスを。  
一人ひとりの多様性を考えぬいた、顧客体験を。  
安心と安全が息づく、次世代につながる街づくりを。

日常を変える。それがいちばん、この星を変える。  
あらゆる境界線を超えて、考える。  
つねにサステナブルな視点で、答え続ける。  
イノベーションによって社会に信頼をもたらし、  
世界をより持続可能なものに。

すべての課題を、扉に変えていく。富士通の挑戦です。

# Fujitsu Uvance

# インテル® oneAPI ツールキット 2022

## インテル・ソフトウェア開発製品の新バージョン

インテル® oneAPI ツールキットは、インテルの CPU、GPU、FPGA、その他のアクセラレーターを含むクロスアーキテクチャー・プログラミングに対応する開発ツールです。インテルの CPU、GPU、FPGA の性能を最大限に引き出したい開発者向けに、生産性と効率の良いヘテロジニアス・プログラミングを支援します。

**NEW!** 開発コード名 Alder Lake を含む最新のハードウェア、開発コード名 Sapphire Rapids 向けのプレリリース・ソフトウェア開発に対応しました。多くの新機能が追加されたほか、既存の多くの機能も改良されました。

インテル® oneAPI ツールキットには、ベース・ツールキット、および用途ごと (HPC、IoT、レンダリング) のニーズに対応する専門的なツールを加えた計 4 つの構成があります。

ベース・ツールキット	<p>oneAPI から新しく追加されたデータ並列 C++ (DPC++) コンパイラーとパフォーマンス・ライブラリー、それらにより高速化される Python* 実行環境、およびアプリケーションの性能解析ツールが含まれます。1 つのプログラミング・モデルで複数のインテル® アーキテクチャーにわたって高いパフォーマンスを発揮できるコードの開発を支援します。</p> <p><b>NEW!</b> インテル® oneAPI DPC++/C++ コンパイラーとインテル® oneDPL に、インテル® GPU や FPGA でプログラミングの生産性を向上させる SYCL* 2020 機能を追加しました。</p>
ベース & HPC ツールキット	<p>ベース・ツールキットの内容に加えて、これまでの C/C++ および Fortran コンパイラーと、最適化された MPI ライブラリーを含む MPI アプリケーション開発ツールが含まれます。単一の PC からクラスターシステムまで、さまざまなプラットフォーム向けに継続してコードを最適化できます。インテル® Parallel Studio XE の後継バージョンに相当します。</p> <p><b>NEW!</b> LLVM テクノロジー・ベースの新しいインテル® Fortran コンパイラーのリリースにより、世界初の CPU/GPU 向け C++/SYCL*/Fortran 統合コンパイラー環境を実現しました。</p>
ベース & IoT ツールキット	<p>ベース・ツールキットの内容に加えて、Eclipse* IDE へ統合できる C/C++ コンパイラー、スレッドとメモリーエラー検出ツールであるインテル® Inspector が含まれ、スマートなコネクテッド・デバイスを構成する優れた IoT アプリケーションの開発を支援します。インテル® System Studio の後継バージョンに相当します。</p> <p><b>NEW!</b> OpenEmbedded で提供される meta-intel レイヤーを活用できるようになりました。</p>
ベース & レンダリング・ツールキット	<p>ベース・ツールキットの内容に加えて、インテルが提供する CPU と将来の GPU 向けに最適化されたレンダリング・ツールとライブラリーにより、優れたビジュアライゼーション・アプリケーションやソリューションの開発を支援します。</p> <p><b>NEW!</b> 各コンポーネントの機能の改良、新機能の追加、サポート範囲の拡張を行いました。</p>

製品の詳細に関するお問い合わせ先： .....

**XLSoft** エクセルソフト 株式会社

〒108-0073 東京都港区三田 3-9-9 森伝ビル 6F  
Tel: 03-5440-7875 Fax: 03-5440-7876 E-mail: intel@xlsoft.com

製品詳細、評価利用はこちらから  
[www.xlsoft.com/intel/ipsj03/](http://www.xlsoft.com/intel/ipsj03/)





# デジタルツインを実現する VRCGソフトとF8VPS

グローバルエンジニアリングソフトウェアカンパニー  
**FORUM8**

UC-win/Road

F8VPS

Shade3D

フォーラムエイトCMキャラクター  
パトリック・ハーラン氏

## F8VPS FORUM8 VIRTUAL PLATFORM SYSTEM バーチャルプラットフォームシステム



Web会議機能



VRモード

Webプラットフォーム 3DリアルタイムVR

**F8VPSは、あらゆる空間の  
バーチャルシステムを構築！**

基本ライセンス ¥550,000 (税込)~

業界最先端の技術によって、御社のオープンプラットフォーム化を強力に推進。最小限のコストで、クラウド上での開発・展開から、テレワーク 商品PR・広報まで、DX時代に必須のバーチャルプラットフォームシステムを構築します。

### F8VPS活用事例

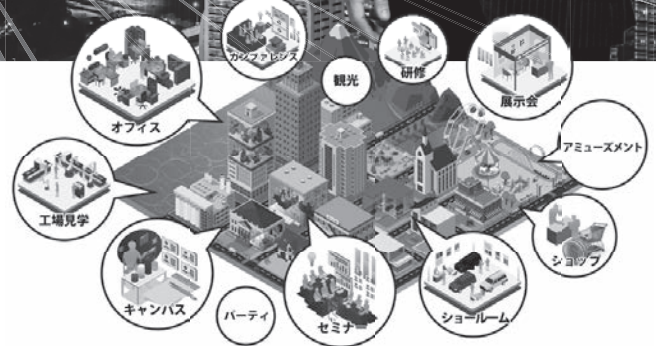


バーチャルツアーで敷地内を見学できるほか、実験施設の紹介ムービーの再生なども可能



バーチャル展示会事例  
(アカマツ株式会社「アカマツハイブリッド展示会」)

バーチャルキャンパス事例  
(東京工業大学 Tokyo Tech ANNEX)



## 表現技術検定 (クラウド-AI) 新設！

AI・クラウドの基本・活用事例を通し、実務に活かせる最新知識を習得

日時	2021年3月8日 (火) 9:30~16:30
場所	本会場：フォーラムエイト 東京本社 セミナールーム 大阪・名古屋・福岡・仙台・札幌・金沢・岩手・宮崎・沖縄+オンライン
受講料	12,000円 (検定証発行手数料込み、税込)
検定試験 検討委員	大石裕一 (ソフトバンク株式会社) 荻野調 (DeepScore株式会社 Founder & CEO) 林憲一 (日本ディープラーニング協会マーケティングディレクター) 他



検定詳細

### フォーラムエイトの 出版書籍

表現技術検定  
公式ガイドブック  
情報処理 / データベース

著者 石河 和喜  
出版 フォーラムエイトパブリッシング  
価格 3,080円 (税込)



DX時代のビジネスの必須知識を基礎から学ぶ教習本。「情報処理編」では確率・統計に加えてプレゼン表現やAI技術までを扱う。表現技術検定受験者向け公式テキスト。



書籍のお求めは



フォーラムエイトは、FIA世界ラリー選手権 FORUM8 Rally Japan 2022をタイトルパートナーとして応援しています

※表示価格はすべて税込です。※製品名、社名は一般に各社の商標または登録商標です。

株式会社 フォーラムエイト 東京本社  
東京都港区港南 2-15-1 品川インターシティ A 棟 21F  
Tel (代表) 03-6894-1888 (営業窓口) 0120-1888-58  
Fax 03-6894-3888 | E-mail f8tokyo@forum8.co.jp

◆ショールーム: 東京・大阪・名古屋 ◆セミナールーム: 東京・大阪・名古屋・福岡・仙台・札幌・金沢・岩手・宮崎・沖縄 / 上海・青島・台北・ハノイ

**FORUM8**  
フォーラムエイト®  
www.forum8.co.jp



# 機械学習プロフェッショナルシリーズ 深層学習 改訂第2版 **新刊**

岡谷貴之・著

A5・384頁・定価：3,300円（税込）

ISBN 978-4-06-513332-3

ベストセラーの改訂版。最高最強のバイブルが大幅にパワーアップ！トランスフォーマー、グラフニューラルネットワーク、生成モデルなどをはじめ、各手法を大幅に加筆。深層学習のさまざまな課題とその対策についても詳説



# 実践 Data Science シリーズ ゼロからはじめるデータサイエンス入門 R・Python 一挙両得

辻真吾・矢吹太郎・著

B5変・400頁

定価：3,520円（税込）

ISBN 978-4-06-513232-6

RとPython両方学べる。コスパ最強の一冊！

「データサイエンスの準備」にページを割いたから、プログラミング経験ゼロで大丈夫



たちまち  
2刷

# ディープラーニング 学習する機械 ヤン・ルカン、人工知能を語る

ヤン・ルカン・著 松尾豊・監訳

小川浩一・訳

A5・384頁・定価：2,750円（税込）

ISBN 978-4-06-523808-0

フランスで10万部発行のベストセラーがいち早く日本上陸。Facebook副社長のヤン・ルカン氏がエキサイティングに綴る！



# Juliaで作って学ぶベイズ統計学

須山敦志・著

B5変・240頁

定価：2,970円（税込）

ISBN 978-4-06-525980-1

最適化、確率・統計などの基本的な計算から、ハミルトニアンモンテカルロ法、階層ベイズ、状態空間モデルの原理までを丁寧に解説！



たちまち  
2刷

東京都文京区音羽 2-12-21

<https://www.kspub.co.jp/>



KODANSHA

編集 ☎03(3235)3701

販売 ☎03(5395)4415

# 「情報処理」は amazon/kindleでも ご購入いただけます！

情報処理学会では、会誌「情報処理」をオンライン通販サイトamazon/Kindle（電子版）でも販売しています。ぜひご利用ください。

## ◀ 「情報処理」（毎月15日発行）

各分野のトップレベルの方々が、最新技術を分かりやすく解説しています。著名人による巻頭コラム、特集、解説、報告、連載、コラムなど。

◆ 価格 1,760円（税10%込）



会誌編集部 E-mail: [editj@ipsj.or.jp](mailto:editj@ipsj.or.jp)  
Tel.(03)3518-8371 Fax.(03)3518-8375

ご注文は ⇒ <https://www.amazon.co.jp/>

# 3



## PREFACE

### 巻頭コラム

106 クリエイターからクリエイタークリエイターへ 中村俊介

## SPECIAL FEATURES

### 特集

## 知能コンピューティングー AI とハードウェアの出会いー

108 編集にあたって 袖美樹子

110 概要

#### お知らせ

特集記事はオンラインのみの掲載となります（本誌には「編集にあたって」「概要」のみ掲載されます）。オンライン記事（電子図書館）の間覧方法につきましては143ページに掲載しておりますのでご確認くださいませよう願いたします。

112 連載：★先生，質問です！

#### 教育コーナー：ぺた語義

115 ■★ 高校時代に学んだプログラミング 坂東宏和

116 ■ 大学における新型コロナウイルス感染症発生状況提供サイト 井上 仁

120 ■ 大学の情報環境を支えるユーザサポートの今とこれから 近堂 徹

#### 連載：情報の授業をしよう！

125 ■ Scrapbox と Scratch とロイノートを組み合わせたプログラミング授業実践 魚住 惇

#### 委員会から

132 今年度もやります！全国大会の“デリバリー” 坊農真弓

#### 学会活動報告

134 IFIP ー情報処理国際連合一近況報告 相田 仁

#### 連載：★ピブリオ・トークー私のオススメー

144 データ立国論 石黒正揮

#### 連載：★5分で分かる!? 有名論文ナナム読み

146 C-C. Chen, M. Watabe, K. Shiba, M. Sogabe, K. Sakamoto and T. Sogabe : On The Expressibility and Overfitting of Quantum Circuit Learning 曾我部東馬

#### 《記号の説明》

■ 基礎 ■ 専門家向け  
■ 応用 ■ 一般（非専門家）向け ★ Jr. ジュニア会員向け  
※各記事に指標がついていますので参考にさせていただきます



# 情報処理

常時更新中!

## 「情報処理」オンライン版 目次

[https://www.ipsj.or.jp/magazine/contents\\_m\\_e.html](https://www.ipsj.or.jp/magazine/contents_m_e.html)

※オンラインでのみ掲載している記事の目次を掲載しております(目次から電子図書館の各記事へリンクしております)。



### ■ Vol.63 No.3

特集：知能コンピューティング— AI とハードウェアの出会い—

- e1 1. AI は新しいハードウェアを欲しているか？—知能と計算とアーキテクチャの新しい関係(本村真人)
- e8 2. 確率的コンピューティングの再開拓—その場学習が可能な極低電力エッジ AI に向けて—(浅井哲也)
- e15 3. 画像の解像度と知的処理の関係を見つめ直す—知的な高解像度リアルタイム処理に向けて—(池辺将之)
- e23 4. 機械学習に適したハードウェア・ハードウェアに適した機械学習アルゴリズム(高前田伸也)
- e31 5. ランダム・スパース・ストカスティック—新しい計算の形を目指して—(劉 載勳)

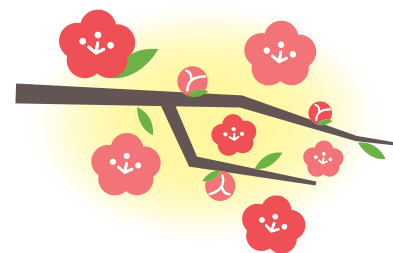
## 「情報処理」note

<https://note.com/ipsj>

※人気記事や最新記事のチラ見せ、無料で読める記事などさまざまなコンテンツを公開していきます。



- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 143 【ご案内】会誌「情報処理」のオンライン記事について                    | 159 2022年度会誌「情報処理」モニタ募集のお知らせ |
| 149 論文誌ジャーナル掲載論文リスト/論文誌トランザクション掲載論文リスト/IPSJカレンダー | 161 英文目次/アンケート               |
| 152 会員の広場  | 162 編集室/次号予定目次               |
| 155 人材募集   | 163 掲載広告カタログ・資料請求用紙          |
| 156 会告   | 164 賛助会員のご紹介                 |



### ■会誌編集委員会

編集長：稲見 昌彦  
 副編集長：大山 恵弘・加藤 由花・中田真城子  
 担当理事：井上 創造・高橋 尚子  
 本号エディタ：  
 天野 由貴・五十嵐悠紀・伊藤 将志・上松恵理子・江渡浩一郎・大石 康智・大島 浩太・太田 智美・折田 明子・桂井麻里衣・金子 格・川上 玲・楠 房子・櫻 惇志・酒井 政裕・清水 佳奈・白井詩沙香・袖 美樹子・高木 拓也・中島 一彰・西川 記史・橋本 誠志・福地健太郎・古川 雅子・細野 繁・堀井 洋・松浦 健二・水野加寿代・山本ゆうか・湯村 翼

理事からのメッセージ：  
[https://www.ipsj.or.jp/annai/aboutipsj/riji\\_message.html](https://www.ipsj.or.jp/annai/aboutipsj/riji_message.html)

### ■情報処理学会事務局本部

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-5 化学会館4F  
 Tel(03)3518-8374 (代表) Fax(03)3518-8375  
 E-mail: soumu@ipsj.or.jp <https://www.ipsj.or.jp/>  
 郵便振替口座 00150-4-83484  
 銀行振込 (いずれも普通預金口座)  
 みずほ銀行虎ノ門支店 1013945  
 三菱UFJ銀行本店 7636858  
 名義人：一般社団法人 情報処理学会  
 名義人カナ：シヤ) ジョウホウシヨリガツカイ  
**■規格部 情報規格調査会**  
 〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館308-3  
 Tel(03)3431-2808 Fax(03)3431-6493  
 E-mail: standards@itscj.ipsj.or.jp <https://www.itscj.ipsj.or.jp/>  
**■支 部** 北海道/東北/東海/北陸/関西/中国/四国/九州

電子版  
-DIGITAL VER-



Kindle



Fujisan



情報学広場



# クリエイターからクリエイタークリエイターへ

## ■ 中村 俊介



世界中すべての人をクリエイターにしたい。その思いから、Springin' (スプリングイン) という、スマホがあれば誰でも感覚的にゲームを開発してシェアできるプラットフォームを開発しています。

2002年、九州芸術工科大学の大学院生だったときに、体の動きで演奏するAR楽器「KAGURA」を開発しました。カメラ映像をリアルタイムで画像処理をして、動きが検出された座標に音楽理論に基づいて関連付けられた音を鳴らすことで、適当に身体を動かしても気持ちよく演奏ができるというメディアアートです。

この作品がきっかけで、2005年に「しくみデザイン」を設立し、参加型サイネージやSMAP等アーティストのリアルタイム映像演出から科学館やテーマパークのアトラクションなど、日本全国で1,500作品以上を制作してきました。

ところがある日、気づいちゃったんです。つくることこそが一番のエンタテインメントなんじゃないか、自分たちが一番楽しいところを独占しちゃってるんじゃないか、と。いつまでも自分たちがクリエイターでいるんじゃなくて、みんなをクリエイターにするしくみをつくらなきゃ、と。

デジタル作品をつくるためには、プログラミングが不可欠です。一方で、このプログラミングの習得が難しいことがボトルネックでもあります。そこで、最初のプログラミング学習コストを限りなくゼロに近づけて、直感的にデジタルコンテンツが作れる手法を考えました。



■ 中村 俊介  
(株) しくみデザイン 代表取締役

名古屋大学建築学科卒業後、九州芸術工科大学大学院にてユニバーサルデザインの研究の傍らメディアアーティストとして活動し、大学院修了後にしくみデザイン設立。アメリカ、スペインをはじめ世界各国 30 個以上のアワードを受賞している。博士（芸術工学）。



まず、文字は一切使わず、物理現象や自然現象をアイコン化してオブジェクトに与えていくことで、能力や関係性を設定することにしました。そして、「エラー」の概念そのものを無くしました。予想と違う動きになることはありますが、エラーが出て止まるということはありません。

さらに、できあがった作品はそのままマーケットで販売できます。クリエイターの立場として「作品はつくっただけではなく人を楽しませてこそ価値が生まれる」と強く実感しているので、作るだけでなく人に届けるところまでを、機能として実装したかったのです。

元々は年齢性別関係なくすべての人がクリエイターになれるような、人類が初めて手にするクリエイティブツールになるようにと開発しました。ところが2020年に小学校でプログラミング教育が必修化されたことで小中学生のユーザが急増。教育機関から多くの要望を受けて、指導者支援サービス「Springin' Classroom (スプリングンクラスルーム)」を開発し、日本のプログラミング教育を変えようとしています。

テクノロジーの発展は、コモディティ化を促進させます。Instagramが画像制作を、TikTokが映像制作をコモディティ化しました。次はSpringin'がゲーム開発をコモディティ化する番です。

すべての人をクリエイターにする、クリエイタークリエイターを目指して。

特集

# 知能コンピューティング — AIとハードウェアの出会い —

## 編集にあたって

袖美樹子 | 国際高等専門学校

AI処理に特化した半導体はAIチップと呼ばれる。ディープラーニング（深層学習）が原動力となり第3次AIブームが起こっている。画像認識、音声認識、自然言語処理、予測など各種技術の実用化が始まっている。それに伴い高速で低消費電力なAIに特化したハードウェアの要求も高まってきている。

AIチップは3種類に分類できる。1つ目は、マイクロプロセッサ、GPU、FPGAなど既存チップをAI処理に活用するものである。GPUがその代表であり、当初は高速画像処理向けチップとして誕生している。2つ目は、AI処理の一部機能に特化したハードウェア化したチップでGoogle社のTensor Processing Unit (TPU)が代表格だ。ディープラーニングに特化した特定用途向けチップである。3つ目は、ニューラルネットワークの機能と構造をハードウェアで模した脳型チップ（ニューロモーフィッ

ク・チップ）である。近年Intelのニューロモーフィックチップ「Loihi」などAIチップの一種である脳型チップの研究開発も盛んに行われている。

コンピュータアーキテクチャ分野においては次のパラダイムシフトが起こりつつある。本特集ではAIチップの動向およびAIの各種機構をハードウェア化するための着眼点を紹介いただき、これまでのノイマン型コンピュータとは異なった新しいコンピュータの在り方を紹介いただく。

第1の記事は、東京工業大学本村真人氏による「AIは新しいハードウェアを欲しているか？—知能と計算とアーキテクチャの新しい関係」である。Google社の機械学習アルゴリズムの演算に特化したプロセッサTPUなど知能コンピューティングへのパラダイムシフトは進んでいる。なぜAIチップが脚光を浴びているのか？ 知能を支える新しいハードウェアはどのようなものなのかを紹介いただく。





第2の記事は、北海道大学浅井哲也氏による「確率的コンピューティングの再開拓—その場学習が可能な極低電力エッジAIにむけて—」である。ニューラルネットワークの演算に拡張可能な確率的コンピューティング技術の概要と確率的コンピューティングを用いたニューラルネットワークの実装例を紹介いただく。

第3の記事は、北海道大学池辺将之氏による「画像の解像度と知的処理の関係を見つめ直す—知的な高解像度リアルタイム処理に向けて—」である。IoTなどエッジコンピューティングでは画像をクラウドにアップロードしAI処理を行うのではなく、エッジに知能コンピューティングを搭載しリアルタイム処理する要求が多く存在する。エッジ型知能コンピューティングの例としてカメラ向けCNNを用いた画像処理技術を紹介いただく。

第4の記事は、東京大学高前田信也氏による「機械学習に適したハードウェア・ハードウェアに適した機械学習アルゴリズム」である。ハードウェア設計特有の考え方は大きなパズルを解くような発想の柔軟さであり、真理を追究し続ける力である。機械学習の観点からハードウェア設計の考え方、面白さを解説いただく。

第5の記事は、東京工業大学劉載勳氏による「ランダム・スパース・ストカスティック—新しい計算の形を目指して—」である。プログラム内蔵方式のノイマン型コンピュータから量子コンピュータ、脳型チップなどへ大きな変化点を迎えているコンピュータアーキテクチャ、パラダイムシフトの現状を解説いただく。

ムーアの法則に従いCPUは処理能力を上げ、2000年まではCPUクロック周波数はどんどん上昇した。その後伸び悩み、最近では3GHz～5GHzあたりで頭打ちになっている<sup>☆1</sup>。この問題を打開すべくマルチコア化が始まった。2010年NVIDIAのFermiが発売されGPUが広く使われるようになり、AIの技術進歩を後押しした。それから約10年、現在量子コンピュータやAIチップなど新たなパラダイムシフトが起こっている。この息吹を共有したく本特集を企画した。日本の半導体を再度世界一に押し上げる一助となれば幸いである。

(2022年1月8日)

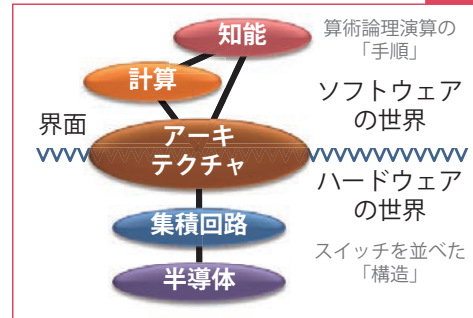
<sup>☆1</sup> ACM Queue, <https://queue.acm.org/detail.cfm?id=2181798>, Andrew Danowitz, Kyle Kelley, James Mao, John P. Stevenson, Mark Horowitz, Stanford University: CPU DB: Recording Microprocessor History With this open database, you can mine microprocessor trends over the past 40 years.

## 知能コンピューティング—AIとハードウェアの出会い—

### 1 AIは新しいハードウェアを欲しているか？ —知能と計算とアーキテクチャの新しい関係—

本村真人 | 東京工業大学

「知能コンピューティング」に呼応する計算機のアーキテクチャ技術はどうあるべきなのか。これは現代の計算機における中心的な課題であり、我々は情報処理能力の爆発的な発展を60年以上にわたって支えてきたムーアの法則の減退という苦しい状況の中で答えを出さねばならない。本稿では、活況を呈する現在の知能コンピューティング向けハードウェア基盤技術研究のムーブメントを俯瞰し、今後の技術発展を展望する。

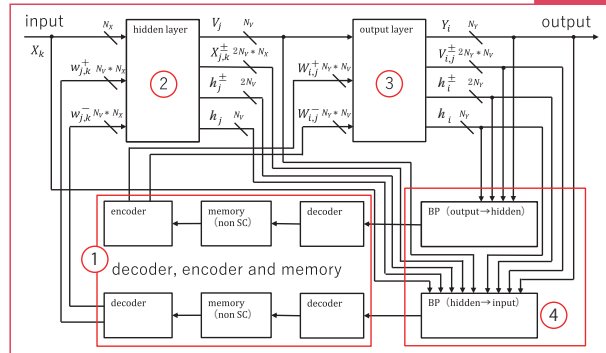


基  
般  
★  
Jr.

### 2 確率的コンピューティングの再開拓 —その場学習が可能な極低電力エッジAIに向けて—

浅井哲也 | 北海道大学大学院情報科学研究院

1960年代に提唱された確率的コンピューティング(SC)は、その簡便な論理回路構成・低電力動作の可能性から、さまざまな情報処理に組み込まれようとしてきたが、通常演算とのインターフェースのオーバーヘッドの大きさが問題となっていた。この問題を解決するためには、なるべく多くの演算をSCで実行する必要がある。本稿では、多層ニューラルネットにおける推論と学習に関するすべての演算をSCで実行できる例を紹介する。

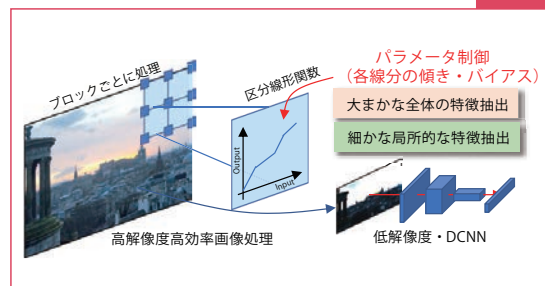


基  
般  
★  
Jr.

### 3 画像の解像度と知的処理の関係を見つめ直す —知的な高解像度リアルタイム処理に向けて—

池辺将之 | 北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター

イメージセンサの性能向上が進み、その出力表現も研究がされてきた。その中で、輝度表現に関する技術(トーンマッピング)やノイズ除去は重要であり、画像補正のみならず、監視、車載、医療など幅広い応用が可能である。近年、深層畳み込みニューラルネットワークを活用した手法も多く提案されている。そこでは画像解像度の扱いが処理の効率化に強くかかわっている。本稿は知的処理と処理解像度の関係と今後の展開について述べる。



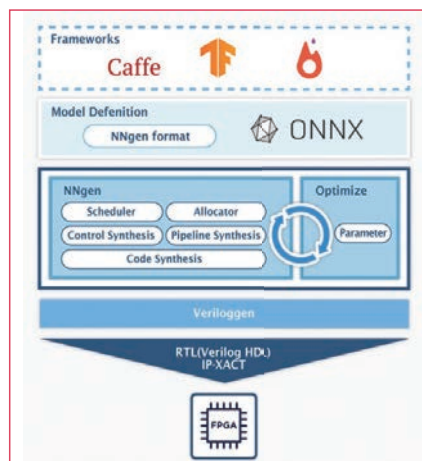
基  
般  
★  
Jr.



## 4 機械学習に適したハードウェア・ ハードウェアに適した機械学習アルゴリズム

高前田伸也 | 東京大学

コンピュータアーキテクチャ界隈においても、機械学習、特にディープラーニングに関する研究が盛んに行われるようになってきた。本稿ではその理由を考察する。また、コンピュータアーキテクチャの研究者が行った機械学習の研究の一例として、筆者が実際に取り組んできたハードウェア指向の機械学習に関する研究をいくつか紹介する。そして最後に今後の展望を述べる。



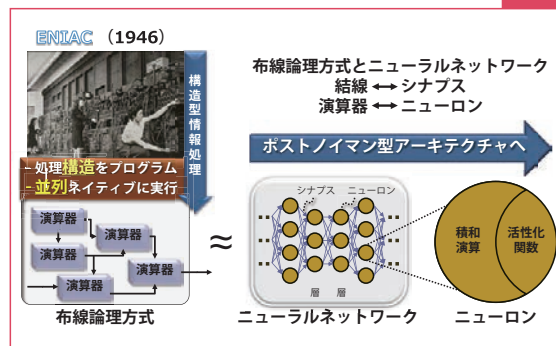
基  
般



## 5 ランダム・スパース・ストカスティック —新しい計算の形を目指して—

劉 載勳 | 東京工業大学

近年の人工知能ブームにより、我々にはノイマン型アーキテクチャから脱却し、ポストノイマン時代への扉を開くことが期待されている。本稿では、ハードウェア処理基盤を「計算の形」として捉え、ニューラルネットワークにおけるランダム性・スパース性・ストカスティック性の3つの性質について述べる。またいくつかの研究成果を通してこれらの性質が「計算の形」に及ぼす影響について考える。



基  
般



[知能コンピューティングー AI とハードウェアの出会いー]

# 1 AI は新しいハードウェアを欲しているか？

## —知能と計算とアーキテクチャの新しい関係—

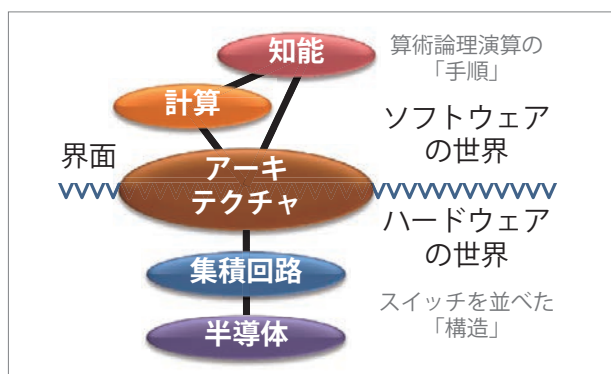
本村真人 東京工業大学



計算機に求められる中心的な処理は、人間がより知的な作業に集中できるように補完したり、人間のより良い判断を助けたりする「知能コンピューティング」へと急速に変貌しつつある。これに呼応する計算機のアーキテクチャ技術は、従来通りの正常進化で良いのだろうか。それともその処理の特質を生かして、より高度で効率的な処理の実現に向けて変化するべきなのだろうか。

### 知能，計算，アーキテクチャ

この問いについて考える前に、まずこれら3つの言葉の間に存在する関係性について論じてみたい(図-1上)。ただし、ここでは知能という言葉をも、主に工学的に実現される疑似的な知能、すなわち人工知能(AI: Artificial Intelligence)ないしは機械知能(Machine Intelligence)を指す言葉としても用いている。



### 知能と計算

当たり前のことではあるが、その急速な技術展開により社会応用が広がりつつある AI 技術は、すべて何らかの計算機の上で実行されている。すなわち、人工的な知能は、すべて何らかの計算過程に分解され、計算アルゴリズムとして再構築され、計算機上のアプリケーションプログラムとして実行されている。この在り方は、人間における知能の本来的な発現形態とは大きく違うものの、現在の情報処理技術を踏まえた工学的アプローチとしては至極まっとうである。21 世紀は、まさしくデータの世紀であると同時にアルゴリズムの世紀である。

計算という言葉は、Computation と Calculation の両方の意味を持つが、前者の解釈に絞ったとしても、その本質は何かという問いに真正面から答えることは案外難しい。計算機を頭に思い浮かべた上で一般的な見立てとしては、算術論理演算を主たる構成要素とする一連の手順だとは言えるが、それは果たして知能を支える計算技術としては適切と言えるであろうか。たとえば、AI の中心技術として君臨する深層学習 (Deep Learning) ないしは深層ニューラルネット (DNN: Deep Neural Network) 分野は、大量の積和演算を必要とすることは知られているものの、認識・推論などの機能を実現しているカギは、実は積和演算の間々に埋め込まれた非線形演算であると言われている。また、古くて新しい計算概念として近年注目されるようになったリザー



## 特集

Special Feature

バ計算<sup>☆1</sup>の世界では、非線形性がその中心的位置を占めている。さらに、生体神経回路網に学ぶニューロモルフィック<sup>☆2</sup>な知能アプローチの場合、その基本的な仕組みは、時間的な信号系列の蓄積と確率的な発火として定義されている。しかし、従来の計算機には非線形演算は定義されていないし確率的な挙動も織り込まれていない。これらはいずれも、アルゴリズム上の工夫により、計算機が備える計算機構で実行しやすいように変換ないしは近似され、代替されている。

さらに視野を広げて、自然計算という言葉で知られているような、自然界の現象や物理現象を使って等価的に計算を行うモデルや、自然界のエネルギー最小化原理を模擬して最適化問題や条件充足問題に対する解を探索するアニーリング計算の概念まで考えに入ると、果たして計算とは何か、知能を支える適切な計算技術はいかなるものか、という問いの奥深さはさらに増す<sup>1)</sup>。少なくとも、現代の計算機が備えている計算機構は必ずしも知能を実現するために適したのではなく、逆に、知能を実装するためのアルゴリズムが計算機の現実に寄り添い、その計算過程になじむように知能を分解・再構築してきたのだと言えそうである。

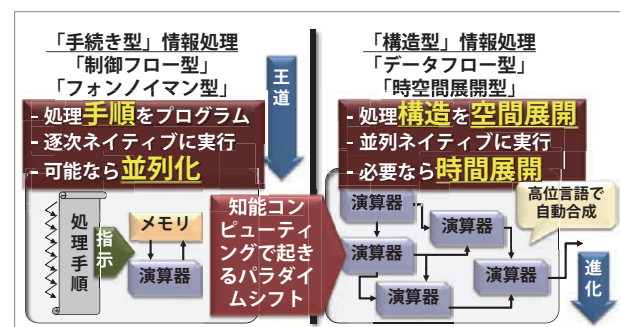
## 計算とアーキテクチャ

現在の計算機は、ほぼすべてフォンノイマン型アーキテクチャに則っているとって過言ではない。その本質は、処理対象を基本演算ステップに分解し、これを手続き（すなわち制御フロー構造）として表現して、その指示に従って、メモリとALU（Arithmetic Logic Unit：算術論理演算器）の間でデータをやり取りしつつ「手続き型処理」の計算を行うことである（図-2左）。この成り立ちを背景に、これまでの計算機アーキテクチャの主

流の研究は、永らく、1) その場の判定で制御フローを動的に変える条件分岐を無害化する予測・先読み等の技術や、2) 頻繁なメモリアクセスが性能律速要因となるフォンノイマンボトルネックを緩和するためのメモリーシステム階層構築の技術の2つの分野に集中してきた。

一方で、フォンノイマン型に代わる「非ノイマン型」のアーキテクチャ思想を打ち立てる挑戦的な研究も古くから続いている。1980～1990年代を中心として、その一派としてデータフロー型計算機が盛んに研究されていた。電総研（現産総研）を始めとして日本でも有力な研究がいくつも進められ（SIGMA-1, EM4, Impp等）、第5世代コンピュータプロジェクトでも「知識情報処理を支える新時代の計算機アーキテクチャ」として注力対象として取り上げられた。これは、主に処理並列化の観点から、制御フローに基づく実行制御を捨て、演算が可能になったデータから処理すること（すなわちデータフローに従って並列計算すること）を是とする計算パラダイムであった。

データフロー型計算機概念は、一時期の研究の盛り上がりした後、フォンノイマン型プロセッサにおけるマルチスレッド実行や順序外命令並列実行、あるいはマルチプロセッサ環境でのスレッド並列実行機構などの形で技術展開・貢献しながら、アーキテクチャ流派としては静かに主流派に吸収されていった。その理由の1つとして、制御フローのくびきから離れて並列実行することにより、分



■ 図-2 手続き型と構造型

☆1 非線形素子の相互結合網による時系列データの学習を主眼とする再帰型ニューラルネットの一種。

☆2 ニューラルネット分野と比べ、より忠実に生体神経回路網の動作・構成を忠実に模擬することを志向する知能処理アプローチ。



岐実行やメモリアクセスの局所性が崩れ、結果的には実行効率が下がってしまうという問題があった。すなわち、データ駆動並列実行による時間的・空間的局所性の棄損というマイナス面の顕在化である。その技術展開の経緯は、計算機アーキテクチャが制御フローの呪縛からは離れられず、制御フローの統治の中での民（計算ステップ）の自由として、データフロー並列が生き残った、という見立ても成り立とう。また、後述のムーア則に基づく単体プロセッサ高速化の波に飲み込まれたという面や、そもそも当時の計算機の処理対象ワークロードが手続き処理型向きだったという面も指摘できる。これらについては後述する。

## 知能とアーキテクチャ

脳の情報処理については分からないことがまだ多いと言われているし筆者の専門からも遠い。ここでは、知能的な処理の種類と効率という観点で、大脳と計算機のアーキテクチャをきわめて大雑把に比較してみたい。

2015年、AlphaGoが最高位の棋士を囲碁で破ったことが話題になった。AlphaGoが稼働していた計算サーバの消費電力は250KW程度であったと言われている。一方、人間の脳の消費電力は20W程度と言われており、当時の囲碁で競っていたということは、このゲームの情報処理の電力効率としては、大脳の方が10K倍以上高かったということの意味しよう。これを以て大脳のエネルギー効率の良さを喧伝する向きもあるが、それは事柄の一面しか捉えていない。別の極端な例として、四則演算をひたすら続けるような計算課題を考えてみよう。ざっくり勘定してみると、GHzを超える高速動作クロックと数千以上に及ぶ並列演算の威力により、この場合は計算サーバの方が大脳よりも1億倍以上エネルギー効率が高いことが分かる。

この簡単な目の子勘定から明らかになることは、求められる情報処理の種類により、最適なアーキテ

クチャが異なるということである。大脳はより高度で直感的な知能の実現に、計算機はより低位で機械的ないしは論理的な情報処理には向いており、その向き不向きが処理効率に直結しているという仮説が成り立ちそうである。多量のALUを核に持つ計算サーバのアーキテクチャにとって、四則演算はネイティブに実行できる演算である。一方、囲碁等の知能的なプログラムに関しては、その基本的な計算機構の上に、仮想的な計算機構を上部構造として装着（オーバーレイ）して実行していると言える。

すなわち、この例は、知能を実現しそのエネルギー効率を上げるためには、その目的に沿ったアーキテクチャを構築してなるべくオーバーレイ計算構造を避ける、すなわち、極力ネイティブ実行可能なアーキテクチャを構築する戦略が必要なことを物語っている。

## アーキテクチャと集積回路と半導体

前節では、知能の実現に向けて、その処理の特徴に合わせて計算の基本要素やアーキテクチャの構成を最適化することの重要性を論じた。計算機の世界において、アーキテクチャとはソフトウェアとハードウェアを結ぶ界面であり、両者の間の約束事を定義するものである。今度はハードウェアの世界からアーキテクチャを眺めてみたい（図-1下）。

### 半導体と集積回路

昔、「コンピュータ、ソフトがなければただの箱」という言葉があった。それに倣えば「半導体、回路が載らなきゃ高い石」であり、集積回路すなわちシリコン半導体上に大量のスイッチを並べ接続した構造物は、その価値の源泉である。

電子工学の世界で最も有名なムーアの法則、すなわち「集積回路の密度は1.5年で2倍になる」は、1960年近くにわたり続いてきた。近年の新型コロナウイルス感染症により指数関数による爆発的な増大の

脅威は人類共通の認識となったが、情報処理—電子工学の世界は、60年間にわたってこのムーアの指数関数則とともに生き、その威力を味わってきたと言える。

ムーアの法則の根っこは、加工最小線幅を1.5～2年で0.7倍にするという半導体製造技術上の努力目標であり、それが長年達成し続けられたことで、集積回路の継続的規模拡大・速度向上・電力効率向上が続いてきた。その意義は、半導体の物理的な技術則の観点よりは、むしろ集積回路の経済則として見たときに正しく理解できる。その意味するところは、大まかに言えば、同一機能・性能を実現するための集積回路の価格は、数年で1/10になる、ということである。この強烈で永続的なコモディティ化が情報処理技術の発展とそれによる社会変革を支えてきた<sup>2)</sup>。

### 集積回路とアーキテクチャ

そのムーアの法則が続くかどうか、ここ数年にわたって議論が尽きない。ただ、半導体微細化観点での技術則としてはまだ続こうとも、集積回路経済則としての役割は終えようとしている。それは、あまりにも高難度化・高製造コスト化が進んだ最先端技術が半導体製造の寡占構造を生むとともに、その生命線であったコスト低減によるコモディティ化を生み出さなくなっているからである。

これまでの集積回路の性能向上の主たる貢献は実はムーアの法則によるものであり、純然たるアーキテクチャによる貢献分は実は少ないと言われている。その背景には、ムーアの法則によるチップ集積の境界線の絶え間ない更新を性能向上に反映する作業にアーキテクチャ側が忙しかったからであり、時の経過とともに性能が向上する、という流れの中で大胆なアーキテクチャ更新を行うことが難しかったからでもある。

今やその流れは変わろうとしている。ムーアの法則による半自動的な集積回路の性能向上・効率向上・コスト低減に期待を持てなくなった現在、今後の継

続的な情報処理の発展のためには、アーキテクチャ技術を前面に押し出したポストムーアの技術革新が真に求められている。

### 知能を支える新しいハードウェアの形

ここまで、図-1上部に関する前半の議論の指し示すところは、知能コンピューティングの実現や効率化に向けて計算とアーキテクチャの変革が必要であるという、ソフトウェア側からのプルが存在であった。一方、図-1下部に関する後半の議論が導き出すのは、ムーアの法則の減衰に伴い今こそアーキテクチャの貢献が求められるというハードウェア側からのプッシュの存在である。

このプルとプッシュの2つの意味で、より進んだ知能を実現するためのアーキテクチャ技術の研究が、より重要になっている。世界的な「アーキテクチャ黄金時代」の到来は（残念ながら日本のコミュニティが十分にその中に入れていないと言いがたいが）、至極当然の帰結である。

### 知能コンピューティング技術

福島によるネオコグニトロンに源流を発する畳み込みニューラルネット（CNN）が画像分類精度で従来手法を大きく超えることが2012年に報告<sup>3)</sup>され、大規模学習データ、高性能計算機、さまざまな学習手法の改善も相まって、CNNに代表される深層ニューラルネット技術（DNN）は一躍脚光を浴びることとなった。この知能コンピューティング技術の代表的系譜が対象としているのは、計算機の「入力」となる大量のデータ（データ爆発）からいかに人間にとって役立つ知見を得るか、という課題である。

一方、DNNに少し遅れて、種々の組合せ最適化問題をスピン格子のエネルギー最小化問題に置き換え、その近似解を並列に求めるアニーリング計算の分野も広く注目を集めている。その発端は量子ア



## 特集

Special Feature

ニーリングに対する興味の高まりだが、今やアニーリング計算は複雑化する社会に必要な技術として多面的な研究が進みつつある。この智能コンピューティング技術の系譜は、計算機の「出力」である計算結果の爆発に関係する。大量に存在し得るさまざまな組合せ結果（組合せ爆発）の中から、良い解を選択して提供するという課題である。技術的には、DNNの学習はニューロン間結合重み係数空間のエネルギー最小化問題であるが、アニーリング計算モデルはその逆問題（重み係数を固定して、スピン[バイナリニューロンとも見なせる]値空間のエネルギー最小状態を探索する問題）であり、深層学習との関連性は深い。

さらに、DNNの興隆の影響を受けて、生体神経回路網の動作を出来る限り精密に模擬することを通して知能の実現を探るニューロモルフィック分野も活性化している。生体模倣の目的や工学的な意義については慎重に考える必要がある（鳥を忠実に模倣しても飛行機は実現できない）が、先に述べた計算の基本構成要素の違いを探求し、その本質を「智能コンピューティング」に向けて融合していくことができるならば、それは大きな意味を持ち得ると言えよう。

## 構造型と時空間展開型

筆者は、この変革のチャンス（プル）を活かし差し迫った要求（プッシュ）に応えるために、「構造型」情報処理の拡大と発展を支える「時空間展開型」アーキテクチャ技術をいかに構築するか、が重要な課題であると考えている。

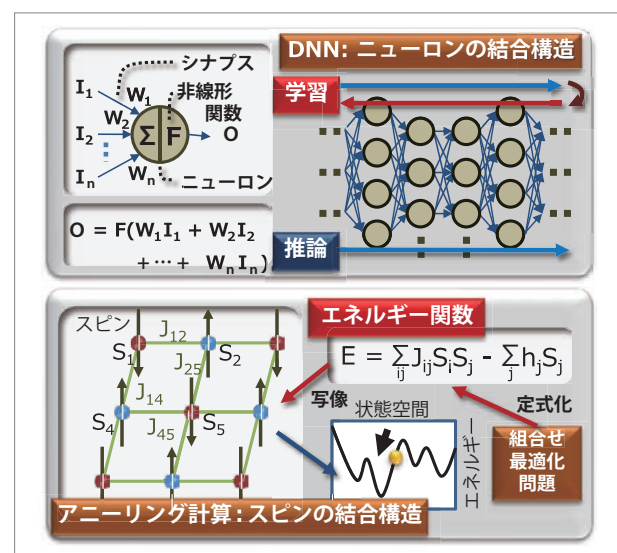
DNNは、大量・多層に並べられたニューロン間の複雑な結合網という「構造」の中に入力データストリームを流し込んで学習や推論を行うという意味において、「構造型」の情報処理課題である。一方のアニーリング計算も、相互作用を持つスピン（すなわちバイナリニューロン）の状態を、系のエネルギー状態に応じて次々に更新していくという点において、同

様の意味で「構造型」の情報処理課題である（図-3）。

従来の情報処理の中心は「手続き型」課題であったため、制御フローを中心に据えるフォンノイマン型が王道であった。構造型の情報処理課題に対してはどのようなアプローチがネイティブであろうか。ここでいう「構造」とはデータフロー構造そのものであり、そこに制御フローはほとんど存在しない。当然の帰着として、それはデータフロー型であろう。すなわち、計算ステップに分解して手続き的な構造をオーバーレイして実行するのではなく、データフロー構造をネイティブに実行できるアーキテクチャが求められていると言える（図-2右）。

これをハードウェア技術の観点で見た言葉が、時空間展開型アーキテクチャとなる。その基本的なコンセプトは、

- 処理対象のデータフロー構造を空間展開してハードウェア要素にマッピングし、処理対象に内在する並列性をそのまま活かして並列実行する
- ハードウェア量の物理制限が存在するため、そのままでは解ける問題のサイズが制約されてしまう。そこで、いったん空間展開された構造を時間展開する。すなわち、空間構造を時間的に切り替えながら実行する



■ 図-3 構造型情報処理



## 特集

Special Feature

ことであり、これは、動的再構成（ダイナミックリコンフィギュラブル）ハードウェアとして知られている技術コンセプトそのものである。この分野は、実は AI 分野と並んで日本の研究コミュニティによる技術蓄積が豊富な分野であることは指摘しておきたい<sup>4)</sup>。

## 研究事例と課題

筆者らのグループはこれまで新しい智能コンピューティング向けハードウェア技術の確立に向けた取り組みとして、いくつかの研究成果を発表してきた<sup>5)</sup>。代表的な例をいくつか簡単に紹介する（より最新の成果はほかの稿に譲る）。

2016 年から、バイナリ DNN のアルゴリズム（重み係数／ニューロン値を 2 値で表現して DNN の演算を大幅に軽量化するアルゴリズム）に一早く注目してアーキテクチャと実行方式の研究を進め、2017 年の国際会議 VLSI シンポジウムで世界初のバイナリ DNN 推論エンジン LSI-BRein Memory を発表した（図-4[1]）。メモリに密結合した並列回路

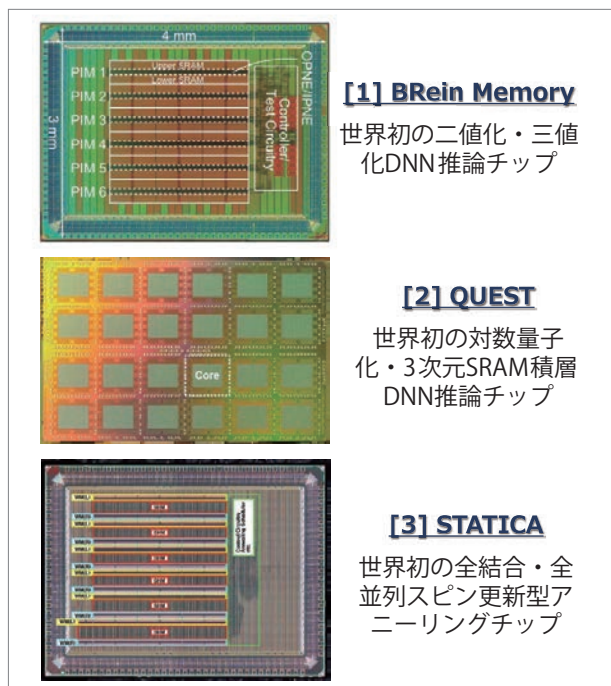
でバイナリ DNN 処理をニアメモリ・リコンフィギュラブル型で処理するとともに、容易に多段接続拡張して DNN のレイヤ数増大に対応可能な HW 方式が最大の特徴であり、CPU/GPU/FPGA に比べてそれぞれ 30K 倍／3K 倍／1K 程度の高いエネルギー効率を実現可能なことを実証した。

さらに、1 ビットから最大 4 ビットまでの対数量子化（2 のべき乗表現の重み係数／ニューロン値の指数を量子化）アルゴリズムをスケラブルにカバーする DNN 推論アーキテクチャを提案し、用途ごとに推論精度と HW 量をバランスすることが可能な新たなメモリ密結合型・リコンフィギュラブル型 DNN 処理エンジン LSI-QUEST を実現した（図-4[2]）。短レイテンシ・高バンド幅の SRAM と 3 次元積層することで DNN 推論時のメモリボトルネック問題も解消した上で、畳み込み層・全結合層を含む DNN 全般に広く適用可能な柔軟なビットシリアルプロセッサアーキテクチャを実現しており、2018 年の国際会議 ISSCC で発表している。

また、先述の、アニーリング計算におけるスピン系とバイナリ化された DNN の間の類似性に着目し、上記のバイナリ DNN チップのアーキテクチャの系統を踏みつつ、アニーリング計算のアクセラレータアーキテクチャにも踏み込んで研究を進めてきた。並列にスピンを更新できる新しいスピン更新モデルとして、新しく確率的セルラーオートマトンモデルを提案するとともに、このモデルに基づく全結合・全スピン並列型アニーリング LSI-STATICA を国際会議 ISSCC2020 で発表している（図-4[3]）。

## Hope or Hype?

DNN の認識能力が人間を超えつつある現在でも、先に述べたような、脳と DNN のエネルギー効率の大きな違いはどこから（マクロレベルの情報処理方



■図-4 筆者らのグループの研究事例

## 特集

## Special Feature

式、メゾなアーキテクチャ、マイクロな計算ステップ等)どのように生まれるのか、まだ解明されていない。今後、構造型情報処理と時空間展開型アーキテクチャを出発点としながら、計算—アーキテクチャ—回路の多層にまたがる協創により、大脳レベルに迫る高エネルギー効率ハードウェアの実現を目指した総合的な知能コンピューティングの研究が必要であろう。

本特集の著者らは、ここまで述べてきた問題意識を踏まえ、1) DNN 処理エンジンのアーキテクチャ技術やその画像処理応用技術を中核として、2) 組合せ最適化問題をエネルギー最小化問題に変換して並列に近似解を導出するアニーリング計算機技術、3) より忠実に生体神経回路網を模倣することを目指したニューロモルフィック HW 技術、4) 非線形性からの知能の発現を探索するリザーバ計算技術、など関連分野の新たな知見・研究進展を総合的に結集し、既存 DNN 処理の枠を超えて発展する知能コンピューティングを支えていく革新的アーキテクチャ基盤技術の構築を目指す研究を展開している<sup>6)</sup>。ここで特に重要となる課題は、個々の知能処理に特化したアプリケーションスペシフィックなアプローチではなく、知能コンピューティングの領域(ドメイン)を過不足なく俯瞰しつつその共通要求を定義し、以てドメインスペシフィックな基盤アーキテクチャ技術を確立していくことであると感じている。

DNN の勃興に呼応したアーキテクチャ研究の隆盛や新しい DNN アクセラレータの相次ぐ提案は、一過性のブームではないかという否定的な見方もある。しかし、過熱している面は否めないが、筆者にはとても一過性のムーブメントとは思えない。それは、本特集の他稿にも現れているように、知能コンピューティング技術自体がまだ発展途上で次々に新しい知見が見つかっている状況だからであり、現時点で優れたハードウェア技術がたとえば十年後も最適である保証などどこにもないからである。

この重要な分野は、国際的な競争の最前線でもある。昨今、日本でも経済安保的な側面での「半導体戦略」が取りざたされているが、それに加えて(あるいはそれ以上に)、知能コンピューティングに向けた国際技術競争と協創の「集積回路戦略」が必要なのではないか、と強く思う。先人たちの努力により、AI 分野、データフローアーキテクチャ分野、動的再構成ハードウェア分野など、コアとなる技術領域に、それぞれの冬の時代と言われた期間にも継続されてきた日本の技術開発の強みが集積されている。これらが今後の知能コンピューティングを支える強固な技術基盤となって結実することを願ってやまない。

参考文献

## 参考文献

- 1) 丸山 宏: 計算の未来と社会, [https://japan.cnet.com/blog/maruyama/2019/08/21/entry\\_30022971/](https://japan.cnet.com/blog/maruyama/2019/08/21/entry_30022971/)
- 2) 池田信夫: 過剰と破壊の経済学, アスキー新書(2007).
- 3) 岡野原大輔: ニューラルネットの逆襲, <https://tech.preferred.jp/ja/blog/deep-learning/>
- 4) 天野英晴 他: FPGA の原理と構成, 8 章, オーム社(2016).
- 5) 本村真人 他: 深層ニューラルネットワーク向けプロセッサ技術の実例と展望, 信学会論文誌 C, Vol.J103, No.5, pp.288-297.
- 6) 科研費 基盤 S, <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-18H05288/>

(2021 年 12 月 6 日受付)

■本村真人(正会員) [motomura@artic.iir.titech.ac.jp](mailto:motomura@artic.iir.titech.ac.jp)

1987 年京大修士(物理学), 1996 年同博士(工学). 1987 年~2011 年 NEC 研究所および NEC エレクトロニクス, 1992 年 MIT 研究員. 2011 年 北大教授, 2019 年 東工大教授. AI コンピューティングの研究等に従事. 1992 年 IEEE JSSC Best Paper, 1999 年 本会最優秀論文, 2011 年 信学会業績賞, 2018 年 ISSCC Silkroad Award を各受賞. 信学会, 人工知能学, 日本工学アカデミー正会員, IEEE Fellow.





[知能コンピューティング— AI とハードウェアの出会い—]

## 2 確率的コンピューティングの再開拓

—その場学習が可能な極低電力エッジ AI に向けて—

浅井哲也 北海道大学大学院情報科学研究院



### 確率的コンピューティングとは

確率的コンピューティングは、行いたい演算を確率事象の演算に対応させる相似計算の1つであり、その源流はなんと1960年代に提唱されている<sup>1)</sup>。通常のデジタル演算回路と比較して、きわめて小規模の論理ゲート等により演算が可能であるが、できる演算が限られている（多くはアルゴリズム上の工夫が必要である）。また、高精度演算にも不向きである。そのため、比較的単純な演算の繰り返しかつ高い演算精度が求められない「人工知能の演算」に適用することで、その低電力化や低リソース化に貢献する可能性がありそうだ。本稿では、その具体例とともに、問題点と可能性を洗い出してみたい。

確率的コンピューティングを行うためには、演算したい数値をバイナリビットストリームに変換（エンコード）し、必要な演算（人工知能の演算では、乗算、積和演算、微分、非線形変換など）を行い、その演算が完了したら演算結果（これもまたバイナリビットストリーム）をもとの数値表現に戻す（デコードする）必要がある。本稿ではまずその手順から解説する。

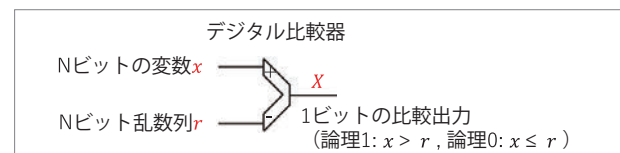
### 数値をバイナリビットストリームに変換する「エンコード」

図-1に示すようなデジタル回路により、変換したい変数 $x$ （ $N$ ビット、正の値）と、それと同じビット数の一様乱数列 $r$ （線形帰還シフトレジスタ（LFSR）

などにつくった疑似乱数）を用意し、それらの大きさをデジタル比較器で比較する。ここで、変換したい $N$ ビット変数 $x$ と乱数列 $r$ を1に規格化した値変数をそれぞれ $\bar{x} (\equiv x/2^N)$ 、 $\bar{r} (\equiv r/2^N)$ で表すと、この比較器の出力 $X$ は確率 $\bar{x}$ で論理1となる（確率 $\bar{r} = 1 - \bar{x}$ で出力が論理0となる）バイナリビットストリームとなる。たとえば、 $\bar{x}$ が0.1であれば、 $\bar{r}$ は確率0.9で0.1よりも大きい値となることから、確率0.1で $X$ は論理1となる。この変換（変数 $x$ と乱数列 $r$ の比較）を、ここでは「エンコード」と呼ぶ。数値 $x$ を確率的コンピューティングの世界で扱うバイナリビットストリーム $X$ （確率 $\bar{x}$ で論理1となる時系列）にエンコードすることが、確率的コンピューティングを行うための入口（最初の準備）となる。

### バイナリビットストリームを数値に変換する「デコード」

図-1の比較器の出力 $X$ は一定値ではなく、疑似乱数の値を更新するたびに变化するバイナリビットストリームである（ただし、 $\bar{x} = 0, 1$ の場合を除く）。この乱数の更新を $2^N$ 回行うとし、その都度 $X$ の値



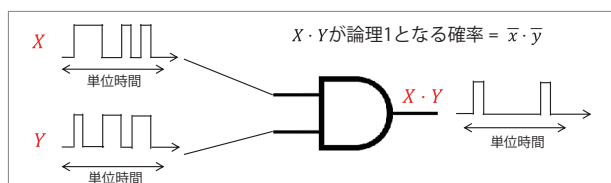
■ 図-1 変数のエンコード方法



を観測する。この観測値のうち、 $X$ の値が論理1であった回数を  $N_{x=1}$  とすれば、 $N_{x=1}$  は  $x$  の値 ( $N_{x=1}/2^N$  は  $\bar{x}$  の値) を表す。  $N$  の値が大きければ  $N_{x=1}/2^N$  は  $\bar{x}$  に漸近する。この観測行為 ( $N_{x=1}$  のカウントおよび  $N_{x=1}/2^N$  の計算) をここでは「デコード」と呼ぶ。通常は、カウンタ回路を用いてバイナリビットストリーム  $X$  中の論理1のビット数をカウントして、もとの (通常の計算を行う) 世界の変数値  $\bar{x}$  にデコードする。確率的コンピューティングで何らかの演算が行われ、その結果がバイナリビットストリーム  $X$  で表されているとき、それを取り出すには上記のデコード (通常の世界に演算結果を取り出すための出口) が必要である。

### 確率的コンピューティングのオーバーヘッド

確率的コンピューティングを行っている途中で、確率的コンピューティングではどうしても実行できない演算があったとする。この場合、その直前の演算結果を一度デコードした後、通常のデジタル回路を用いて演算し、それをまたエンコードすれば確率的コンピューティングの演算を続けることができる。しかし、エンコード、デコードにはそれぞれ比較器、カウンタが必要であり、これらが確率的コンピューティングのオーバーヘッドとなるため、エンコード、デコード (を行う回路) の数を極力減らす必要がある。そのためには、なるべく多くの演算を確率的コンピューティングで行うよう工夫しなければならない。さらに、メモリやレジスタが必要な演算では、それらの値自体もバイナリビットストリームで表現されなければならない。



■ 図-2 確率的コンピューティングによる乗算

### 確率的コンピューティングの基礎

二変数の確率的コンピューティングの例をいくつか説明する。なお、確率的コンピューティングにおいては、各変数のエンコードで使う乱数列は互いに独立である必要があることに注意されたい<sup>1)</sup>。

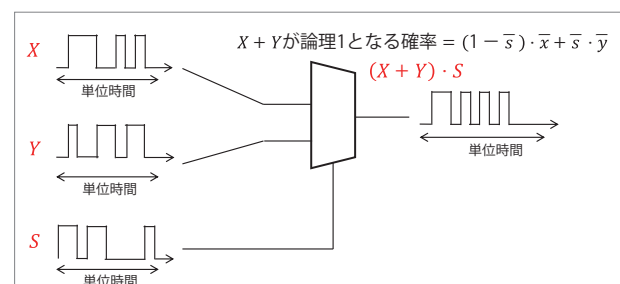
#### 乗算

$x$  と  $y$  がエンコードされたバイナリビットストリーム  $X$  と  $Y$  は、それぞれ確率  $\bar{x}$  と  $\bar{y}$  で論理1を出力している。ここで、 $X$  と  $Y$  の論理積を考える。 $X$  と  $Y$  が同時に論理1を出力したときのみ  $X$  と  $Y$  の論理積が論理1となる (図-2)。そうなる確率は  $\bar{x}$  と  $\bar{y}$  の積で表される (確率論で言うところの積事象)。よって、 $X$  と  $Y$  の論理積をデコードすると、その値は  $\bar{x} \cdot \bar{y}$  (乗算) を表すことになる。これが確率的コンピューティングの乗算の基本的な仕組みであり、行いたい乗算を確率の積事象の演算に対応 (相似) させたものである。

#### 重み付き加算

確率は0から1の連続値で表されるため、確率的コンピューティングでは扱う値の最小値、最大値がそれぞれ0、1となるような規格化が行われる。このような規格化を伴う加算は、バイナリビットストリーム  $X$  または  $Y$  を確率的に選択して出力する行為により実現する。

まず、確率  $\bar{s}$  で論理1となる信号  $S$  を用意する (図-3)。この  $S$  も  $x$ 、 $y$  のエンコードで使う乱数列



■ 図-3 確率的コンピューティングによる重み付き加算

とは別の乱数列で生成しなければならない。選択信号  $S$  が論理 0 で  $X$ 、論理 1 で  $Y$  が出力されるようなマルチプレクサを考えると、出力は  $(1 - \bar{s}) \cdot \bar{x} + \bar{s} \cdot \bar{y}$  となる。このような演算を重み付き加算と呼ぶ。 $\bar{s} = 0.5$  となるような選択信号を用いると出力は  $(\bar{x} + \bar{y}) \cdot 0.5$  となり、これは  $x$  と  $y$  の和が 1 に規格化される。

## 不完全加算

図-2 (乗算) で導入した論理積を論理和で置き換えると、「不完全加算」と呼ばれる非線形演算が行われる ( $\bar{x} + \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}$ ) (図-4)。これは、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  の値が小さい ( $\bar{x}, \bar{y} \ll 1$ ) ときはそれらの加算値で近似される。

## 負の値の表現

確率的コンピューティングでは、負の値を直接的に表現できない。そのため、正負の演算が必要な場合は差動表現が用いられる。たとえば、正と負の値を取り得るニューラルネットワークの1つの重み  $w$  を、 $w^+$  と  $w^-$  ( $0 \leq w^+, w^- \leq 1$ ) の2つの変数の差 ( $w^+ - w^-$ ) で表す。この方法は、古くはアナログ電子回路 (現在は不揮発メモリ素子のクロスバー構造) によるニューラルネットワークの積和演算で用いられており、確率的コンピューティングにおいてもしばしば用いられる。

## その他の演算

$\bar{x}$  の論理反転を行うと、 $1 - \bar{x}$  といった演算ができる。さらに、排他的論理和やフリップフロップを組み合わせたより複雑な演算 (除算や積分など) も提案されている。詳細説明は文献1) に譲る。

## 確率的コンピューティングとニューラルネット

上述した確率的コンピューティングの基本演算を少

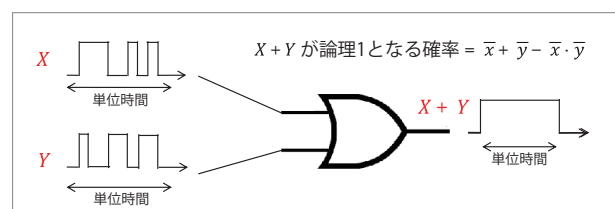
し拡張すると、人工知能 (脳の神経回路の一部を模した数理モデルであるニューラルネットワーク) の演算ができるようになる。以下にその要素を説明する。

## 活性化関数

ニューラルネットワークの活性化関数 ( $= g(x)$ ) には、シグモイド関数 ( $g(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ ) や ReLU ( $g(x) = \max(0, x)$ ) などの非線形関数が用いられる。文献2) では、 $g(x) = \tanh(x)$  の活性化関数が確率的コンピューティングにより実現されているが、その必要リソースはきわめて大きい。ここでは、より簡便な方法でシグモイド関数に似た非線形関数を確率的コンピューティングに導入する方法を紹介する<sup>3), 4)</sup>。図-4において、不完全加算 ( $\bar{x} + \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}$ ) の仕組みを説明した。ここでもし、 $\bar{x} = \bar{y}$  であれば、不完全加算の結果は  $2\bar{x} - \bar{x}^2$  となる。先に説明した乗算を用いて、ある乱数列で作られた  $2\bar{x} - \bar{x}^2$  と、別の乱数列で作られた  $2\bar{x} - \bar{x}^2$  の積を計算すると、 $(2\bar{x} - \bar{x}^2)^2$  が得られる。この演算を  $n$  回繰り返せば演算結果は  $(2\bar{x} - \bar{x}^2)^{2n}$  となり、強い非線形性を持つ関数が得られる。図-5に  $n=1$  の例を示す。シグモイド関数と似た非線形関数となる。なお、図中の D-FF は、バイナリビットストリームを1クロック遅延させて独立した系列にするためのものである。

## 短絡抑制による減算相当演算

ニューラルネットワークの演算において必要となる「減算」をより簡便な方法で置き換える手法を紹介する<sup>3), 4)</sup>。ある正の入力  $X$  を与えたことによりニューロン (神経細胞) が電位を持ち、その電位が

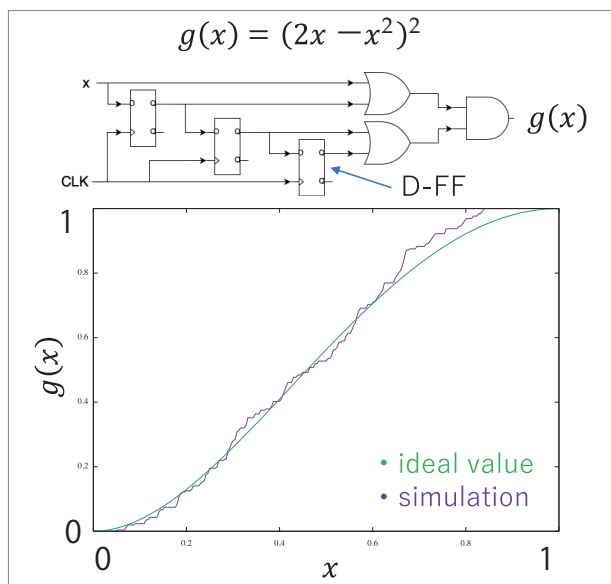


■ 図-4 確率的コンピューティングによる不完全加算

維持されているとする。この電位を減らすためには、負の入力  $Y$  をニューロンに与える方法 (減算  $X-Y$ ) に相当)、または別の入力  $Y$  により電位の基となる電荷をニューロンの外へ逃がす方法 (「短絡」により電氣的な逃げ道を作ることに相当)、の 2 通りがある。後者の方法でニューロンの電位を減らすことを「短絡抑制」と呼ぶ<sup>5)</sup>。ここでは、 $X(1-Y)$  のような乗算と反転の演算により電位の抑制が行われる。 $Y$  の値が小さければ  $X$  の値はほぼ  $X$  であり、 $Y$  の値が大きくなれば (1 に近づけば)  $X(1-Y)$  の値は 0 に近づくため、定性的には  $X(1-Y)$  と  $X-Y$  は同じ性質を持つ。確率的コンピューティングでは、 $X(1-Y)$  を  $Y$  の反転 ( $1-Y$ )、およびその値と  $X$  の論理積により計算できるため都合がよい。この方法でニューラルネットの順伝搬演算におけるすべての減算を表現し、逆伝搬演算についても (デコードと同時にされる重みの更新方向を決定するための減算を除いた) すべての減算がこの演算で置き換え可能である<sup>3), 4)</sup>。

## 積和演算と活性化

上述した重み付き加算を用いれば、ニューラルネットの積和演算における和の計算 (総和演算) が



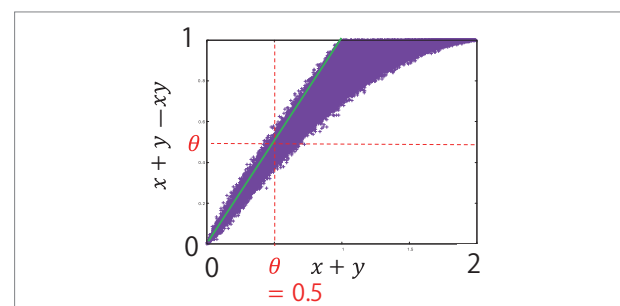
■ 図-5 活性化関数の例

可能である。その総和値を活性化関数に与えればニューロンの出力が得られるが、重み付き加算では、その演算結果が総入力数で規格化されてしまうため、入力数に応じて活性化関数のしきい値を変更しなければならない。そもそも、傾きがシグモイド関数で活性化されることを前提とした総和演算の結果は、その値がシグモイド関数のしきい値よりも大きい場合は、正確な値でなくても良いと考えられる (シグモイド関数の入力値が大きい場合は、出力が 1 に貼りつく傾向になるため)。そのため、総和演算は、不完全加算 (小さな値の加算は正確、大きな値の加算は不正確) でも十分かもしれない、という考えに至る。

不完全加算による演算結果を、同じ入力を与えた際の単純加算と比較した結果を図-6 に示す。不完全加算では全体として精度が落ちるが、入力値  $x, y$  がともに小さい場合や、活性化関数のしきい値 (約 0.5) 付近では、演算精度はさほど低くない。よって、活性化関数への入力を前提とした演算では重み付き加算よりも不完全加算が適していると考えられる<sup>3), 4)</sup>。

## 多層パーセプトロンの実装

多層パーセプトロンとは、順伝搬型ニューラルネットワークの基本形である単純パーセプトロン (複数の入力データを重み付け加算した値を活性化した、1 つの値を出力する関数) を多出力化・多層化したものであり、人工知能の標準形とも言われる。ここでは、上述した手法を用いて、図-7 に示す構



■ 図-6 不完全加算と通常加算の誤差



特集  
Special Feature

造の三層パーセプトロンの順伝搬および逆伝搬演算を実装する。活性化関数を  $g(x)$ ，不完全加算による総和演算を  $OR\Sigma$  と定義すると，入力総から中間層への順伝搬の演算は，

$$h_{V_j}^+ = OR \sum_{k=0}^{N_X-1} w_{j,k}^+ X_k \quad (\text{積の不完全加算})$$

$$h_{V_j}^- = OR \sum_{k=0}^{N_X-1} w_{j,k}^- X_k \quad (\text{積の不完全加算})$$

$$v_j = g(h_{V_j}^+ (1 - h_{V_j}^-)) \quad (\text{短絡抑制と中間層の活性化})$$

で表される。ここで， $h_{V_j}^+$  と  $h_{V_j}^-$  が  $h_{V_j}$  の差動表現となっており，それらが短絡抑制されて ( $h_{V_j}^+ - h_{V_j}^-$  と定性的に同じものとして) 活性化関数に与えられる。中間層から出力層への順伝搬は，同様に

$$h_{Y_i}^+ = OR \sum_{j=0}^{N_V-1} W_{i,j}^+ V_j \quad (\text{積の不完全加算})$$

$$h_{Y_i}^- = OR \sum_{j=0}^{N_V-1} W_{i,j}^- V_j \quad (\text{積の不完全加算})$$

$$y_i = g(h_{Y_i}^+ (1 - h_{Y_i}^-)) \quad (\text{短絡抑制と出力総の活性化})$$

となる。次に，誤差関数を

$$E_i = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_Y-1} (Y_i - Z_i)^2$$

と定義する。ここで， $Z_i$  は教師ラベルである。すると，通常の勾配降下法による各重みの更新量は，

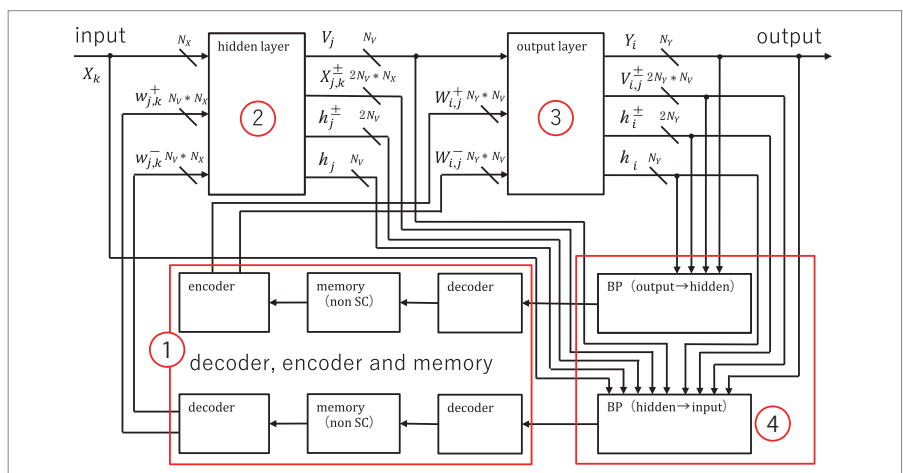
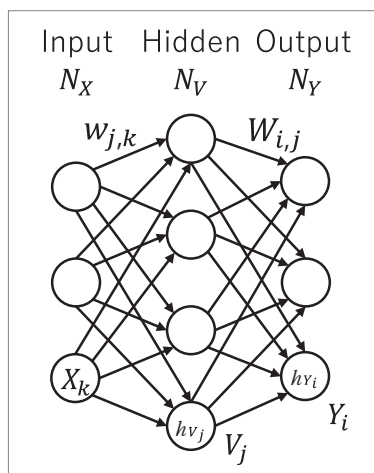
$$\Delta W_{i,j}^+ = -\eta \frac{\partial E_i}{\partial w_{i,j}^+}, \quad \Delta W_{i,j}^- = -\eta \frac{\partial E_i}{\partial w_{i,j}^-}$$

$$\Delta w_{j,k}^+ = -\eta \sum_{i=0}^{N_Y-1} \frac{\partial E_i}{\partial w_{j,k}^+}, \quad \Delta w_{j,k}^- = -\eta \sum_{i=0}^{N_Y-1} \frac{\partial E_i}{\partial w_{j,k}^-}$$

となる。これらを展開して確率的コンピューティングでその値を計算することにより，各重みの更新量を得る<sup>3), 4)</sup>。

図-7の構造の順伝搬と逆伝搬の演算を行うブロック図を図-8に示す。①のブロックは，確率的コンピューティングで扱うことができないメモリブロックであり，重み ( $w_{j,k}^+$ ,  $w_{j,k}^-$ ) を保持する通常のメモリ回路を使うために，エンコード・デコードを行うための回路ブロック (encoder, decoder) が挟まれている。②と③のブロックは，それぞれ中間層，出力層における積和演算と活性化の演算を行うブロック，④は重み更新量 ( $\Delta w_{j,k}^+$ ,  $\Delta w_{j,k}^-$ ) を算出するブロックである。①のブロックを「確率的メモリ<sup>☆1)</sup>」で丸ごと置き換えることができれば，すべての演算が確率的コンピューティングで完結するため，省リソース・低電力かつ推論とその場学習 (オンライン学習) が可能なエッジ向け人工知能ハードウェアが構築できる可能性がある。現在のエッジ向け AI チップは推論専用であり (学習はその場 (エッジ) ではなくクラウドで行われる)，その場 (エッジ) で学習ができ

☆1) インクリメンタルな更新が可能 (自身の記憶値を少し増やす，または減らすことができる)，かつその出力が自身の記憶値に相当する確率で論理1となるビットストリームを出力するメモリ。真正乱数発生回路とアナログ不揮発メモリ素子の組合せにより実現できる可能性があるが，筆者が調査した範囲では現時点でそのような「確率的メモリ」は存在しないようである。確率的コンピューティングですべてのメモリ要素に同時にアクセスする必要があるため，現在のメモリアレイのような構造は好ましくない。確率コンピューティングのための各論理回路のすぐそばに必要な確率的メモリが置かれる「インメモリコンピューティング」アーキテクチャとなる。



■ 図-7 三層パーセプトロンとパラメータ ■ 図-8 順伝搬と逆伝搬演算のブロック図

るようになれば、ユーザや環境などへの適応や、ユーザ自身による AI の教育が可能となることから、多くの新しいアプリケーションが生まれるだろう。

## 性能評価

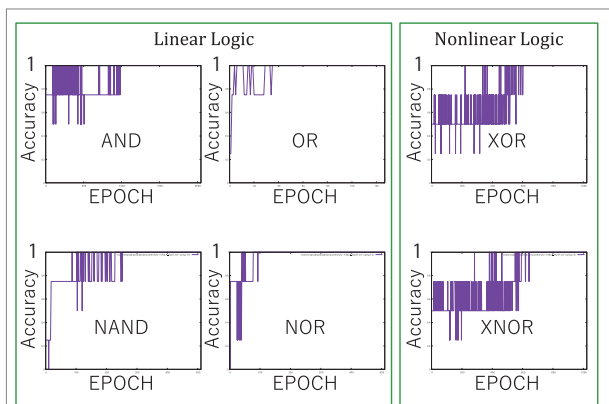
上述した手法を用いて図-7 に示す三層パーセプトロンを実装し、評価した例をいくつか紹介する。

### 論理関数の学習

最も簡単な例として、二入力の論理関数を学習させた例を紹介する ( $N_x=3, N_v=4, N_y=1, \eta=0.3$ )。図-9 (横軸は学習回数、縦軸は精度 ( $\times 100\%$ )) に示すように、AND や OR といった線形分離可能な論理演算だけでなく、XOR や XNOR のような線形分離不可能な論理演算についても数百回程度の更新で正しく学習できている。

### 線形回帰問題

次に 8 ビットの線形回帰問題の例を紹介する ( $N_x=9, N_v=32, N_y=8, \eta=0.3$ )。100 通りの数値に対して出力  $Y = \text{教師 } X$ 、および出力  $Y = \text{教師 } X/2$  として、4,069 回のオンライン学習を行い、256 通りの入力に対して推論を行った結果を図-10 (横軸は入力値、縦軸は出力層の出力値 (バイナリ) を数値に変換したもの) に示す。この例でも学習は問題なく完了している。



■ 図-9 基本的な論理関数の学習結果

### 非線形回帰問題

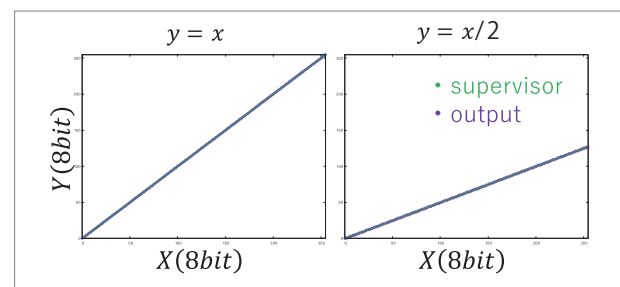
次に 8 ビットの非線形回帰問題の例を紹介する ( $N_x=9, N_v=128, N_y=8, \eta=0.3$ )。256 通りの数値に対して出力  $Y = \cos(X)$ 、および出力  $Y = \sin(X)$  として、4,069 回のオンライン学習を行い、25 通りの入力に対して推論を行った結果を図-11 (横軸は入力値、縦軸は出力層の出力値 (バイナリ) を数値に変換したもの) に示す。ここでも学習は問題なく完了している。

### 縮小 MNIST の評価

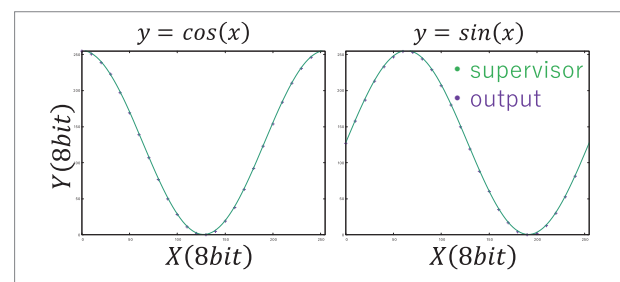
手書き文字のデータセットを小規模化した縮小 MNIST<sup>6)</sup>を用いた評価の一例を紹介する ( $N_x=197, N_v=128, N_y=10, \eta=0.3$ )。58,078 個の手書き文字データとラベルを用いてオンライン学習を行い、9,534 個のテストデータを用いて精度を評価したところ、およそ 80% 程度の正解率を示している (図-12: 横軸は学習回数、縦軸は精度 ( $\times 100\%$ ))。オンライン学習であるため、正解率は低めとなる。

### 消費電力の見積り

このアーキテクチャの消費電力について紹介する。前節の縮小 MNIST の評価を行った場合と同じ



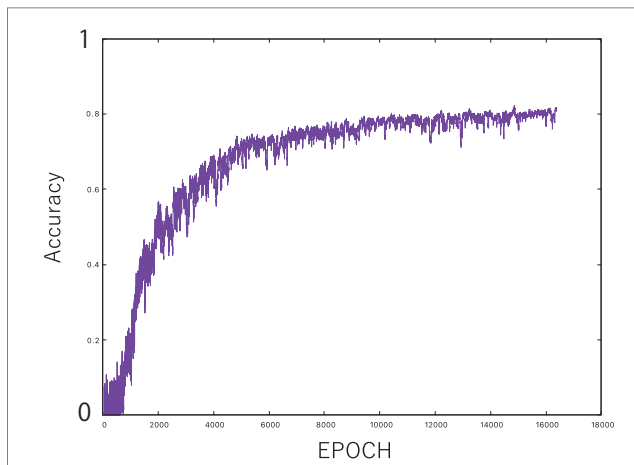
■ 図-10 線形回帰問題の推論例



■ 図-11 非線形回帰問題の推論例

ネットワーク構造 ( $N_x=197, N_y=128, N_v=10$ ) を想定した。不完全加算を行う回路は超多段の OR ゲートとなるため、多数決ゲートにより構成し、その電力が NAND2 相当であると仮定すると、消費電力はおおむね表-1 のように計算できる。

少々古いプロセス (0.18 $\mu$ m プロセス) のスタンダードセルライブラリを用いて論理合成した結果より算出された値ではあるが、この値をもとに、先端プロセスを用いた場合の消費電力を (スケーリング則により) ラフに見積ることも可能である (例: 28nm プロセス, 250MHz 動作, 1.1V コア電源における推論動作の消費電力は約 3.3 mW, 学習動作の消費電力は約 24.6mW, 等)。これから確率的コンピューティングの集積 AI に取り組んでみたいという方々の参考値となれば幸いである。



■ 図-12 縮小 MNIST の学習 (精度変化) の様子

■ 表-1 推論時および学習時の消費電力 (推定)

Software	Software (without decoder, encoder and memory)	
Technology	UMC 0.18- $\mu$ m 1P6M CMOS	
Function	training	inference
Network Configuration	197-64-10	
Supply Voltage	1.8 V	
Frequency	100 MHz	
TOPS	2.0*	0.02*
Dynamic power	57.4 mW	4.45 mW
Static power	32.9 mW	7.66 mW
Total power	90.3 mW	12.1 mW

\* Stream length = 256 (10P = 256 stochastic operation)

## 残る課題

確率的コンピューティング技術の概要、およびその技術を用いたニューラルネットワークの実装例を紹介した。ニューラルネットワークの一部の演算を確率的コンピューティングで置換する先駆的アプローチ<sup>2)</sup>に続き、本稿で紹介した技術は、メモリ (重みの記憶) 機能以外のすべての演算 (推論・学習) を確率的コンピューティングで置換できるものであり、確率的コンピューティングに基づく「集積可能な」人工知能チップの実現へあと一步といふところまで近づいたものと思われる。本稿でも述べたが、自身の記憶値に相当する確率でビットストリームを出力する「確率的メモリ」の実現が確率的コンピューティングに基づく人工知能集積回路の最後の砦であり、その攻略に今後も注力したい。

### 参考文献

- 1) Gaines, B. R. : Stochastic Computing Systems, Advances in Information Systems Science, pp.37-172, Springer (1969).
- 2) Sato, S., Nemoto, K., Akimoto, S., Kinjo, M. and Nakajima, K. : Implementation of A New Neurochip Using Stochastic Logic, IEEE Trans. Neural Networks, Vol.14, No.5, pp.1122-1127 (2003).
- 3) 浅井哲也, 西田浩平, 佐々木義明: 学習装置, 減算回路および活性化関数回路, 特願 2021-118326 (2021年7月16日).
- 4) Sasaki, Y., Muramatsu, S., Nishida, K., Akai-Kasaya, M. and Asai, T. : Digital Implementation of A Multilayer Perceptron Based on Stochastic Computing with Online Learning Function, NOLTA, IEICE, Vol.13, in press.
- 5) Asai, T., Kanazawa, Y. and Amemiya, Y. : A Subthreshold MOS Neuron Circuit Based on The Volterra system, IEEE Trans., Neural Networks, Vol.14, No.5, pp.1308-1312 (2003).
- 6) Mochida, R., and Kohno, K., et al. : A 4M Synapses Integrated Analog ReRAM Based 66.5 TOPS/W Neural-network Processor with Cell Current Controlled Writing and Flexible Network Architecture, in Proc. 2018 IEEE Symposium on VLSI Technology, pp.175-176 (2018).

(2021年12月13日受付)

■ 浅井哲也 asai@ist.hokudai.ac.jp

1999年豊橋技術科学大学博士課程修了。博士 (工学)。1999～2001年同大助手, 2001～2015年北海道大学准教授。2016年から同大教授。





[知能コンピューティングー AI とハードウェアの出会いー]

### 3 画像の解像度と知的処理の関係を 見つめ直す

—知的な高解像度リアルタイム処理に向けて—

池辺将之 北海道大学 量子集積エレクトロニクス研究センター



#### 画像処理の基本 「画像を綺麗に見せること」

スマートフォンや監視カメラに使われているイメージセンサは性能向上が進み、その出力をどのように表現・表示するかも長年研究が続けられてきた。

イメージセンサは、光を電気に変換する画素回路が2次元に配列している。光情報として画素回路に届いた光を電子に変換し、アナログ電圧として中間出力した後、アナログ・デジタル変換器によって、画素ごとのデジタル出力値を得る。得られたデジタル画像出力は、信号処理により加工される。このとき、加工した後の画像として人が美しい／綺麗であると感じる処理結果を得ることは、メーカや研究機関に属するセンサ開発や画像処理の研究者らにとって、普遍的な課題として捉えられている。

人が美しい／綺麗であると感じる画像の特徴として主に、画像全体の明暗部のバランスが取れ、細部のコントラストが明瞭であることや不必要な信号成分（ノイズ）が少ないことが挙げられる。そのため、画像の明るさを示す入力輝度を変換し、どのような出力輝度とするかをマッピングする関数の定義付け（トーンマッピング）と画像信号に含まれるノイズを除去する技術は重要である。

一般的に、画像全体の明暗のバランスを調整する

にはすべての画素に対して、同じ入出力関数を適用するグローバルな演算、細部コントラストを調整するには局所領域の輝度情報で定義した入出力関数によるローカルな演算がそれぞれ行われる。そのため、この2つの演算を適切に扱うことで、画像全体の大まかな特徴を考慮しながら、細かいテクスチャなどのコントラストを明瞭に調整することが可能となる。

また、星空や夜景のように光量の少ない暗い画像はノイズの割合が多く、そこから鮮明な画像を得るにはノイズ除去は欠かせない。イメージセンサ内で発生するノイズについては、物性／回路研究の進展が進み改善されてきた。最終的にノイズ除去の目標として、センサ外の物理的要因によるポアソンノイズが重要課題となっている。

ポアソンノイズは、信号の粒子性すなわち光子数の時間揺らぎに相当するノイズである。例として1,000,000個の光子が単位時間で単位面積に到達するような明るい環境下では、その平方根である1,000個の光子揺らぎを生じる（ノイズの影響は0.1%）。100個の光子が到達するような暗い環境下では、その平方根である10個の光子揺らぎを生じてしまう（ノイズの影響が10%まで上昇）。

トーンマッピングとノイズ除去による「綺麗である画像の取得技術」は、人の思いを美しく残すだけでなく、監視、車載、医療など幅広く使われ、生活

特集  
Special Feature

を豊かにすることにも繋がっている。最終的に「綺麗」と感じるのは人間であり、人の感性に寄り添う画像の輝度分布／バランスなど、人工知能のような画像の捉え方と処理が重要になってきている。

そのため、これらの技術にも深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN : Deep Convolutional Neural Network) が活用されてきており、画像内のシーンの特徴をも組み入れた処理ができるようになってきた。そして、トーンマッピングとノイズ除去に適した DCNN 用の教師画像データも提供されている状態である。ただし、現行 DCNN が実時間で処理可能な解像度 (例 : 640 画素 × 480 画素) とイメージセンサが出力する解像度 (例 : 4k2k 動画 3840 画素 × 2160 画素) は大きくかけ離れており、画像解像度の扱いと処理負担の関係を精査する必要がある。

本稿では「画像を綺麗に表現すること」の基本的な技術であるトーンマッピングおよびノイズ除去について、処理解像度の関係と深層畳み込みニューラルネットワークを用いた知的処理の今後の展開についても述べていく。

## 画像変換と CNN

### トーンマッピングの理解

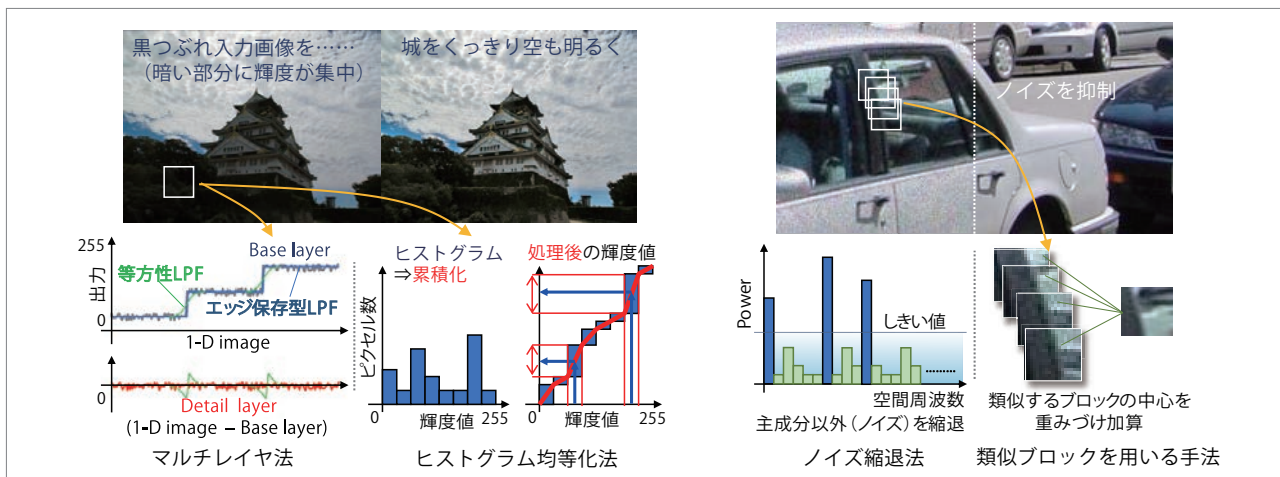
外界は輝度レベルとして約  $10^6$  カンデラ /  $m^2$  (夜

空) から約  $10^6$  カンデラ /  $m^2$  (太陽光) もの広い明暗差 (ダイナミックレンジ) があり、その中で 20 ビット (約  $10^6$ ) のダイナミックレンジを持つデジタル値として出力できるイメージセンサも開発されてきた。

しかしながら、ディスプレイは、主に 10 ビット (約  $10^3$ ) のダイナミックレンジしか扱えない。このとき、外界から取得した輝度情報の範囲を、ディスプレイ表示できる輝度範囲に合わせて、入出力関係を定義し、見た目の良さを保ちながらダイナミックレンジ圧縮する必要がある。

トーンマッピングにおいて、画像全体の大まかな特徴と細かなテクスチャを制御するには、ほぼ大きく 2 つの手法があり、画像を上記特徴ごとに分割して扱う複数レイヤ法と局所領域ごとの輝度の統計量に基づいた局所ヒストグラム均等化 (LHE : Local Histogram Equalization) 法が使われている (図-1 左下)。

複数レイヤ法では、入力画像に低域通過フィルタ (LPF : Low Pass Filter) を適用し、画像の低周波成分からなる Base Layer、入力画像から Base Layer を差し引いた高周波成分 (画像の細かいテクスチャなど) からなる Detail Layer を輝度制御に扱う。上述のダイナミックレンジ圧縮では、室内の窓から晴れた室外を俯瞰する場合、Base Layer の大まかな明暗差 (室内と室外の大まかな明るさ) を抑制した上で、強調された Detail Layer (室内と室外それぞれ



■図-1 トーンマッピングとノイズ除去



## 特集

## Special Feature

れシーン内のコントラスト)との合成を行う。その結果、本来室内に着目した場合、室外が白飛びしたり、室外に着目した場合、室内が黒つぶれしたりする画像表示を、室内と室外両者ともに適切な明るさで表示できる。

複数レイヤ法は、層分離に単純な低域通過フィルタ(ぼかしフィルタ)を用いた場合、画像中の物体のエッジ付近に不自然さが現れる。これは、ぼかしフィルタが物体境界のエッジもぼかすため、入力画像と Base Layer の差分により得られた Detail Layer にエッジの明暗差情報が含まれてしまうことによる。そのため通常は、エッジ保存型低域通過フィルタを用いて Base Layer を得る。

また、各レイヤをどのくらいの大まかさ細かさで取得するかフィルタの帯域制御、細かさをどの程度はっきりさせるかの Detail Layer の増幅度、各レイヤの合成比率なども考慮しなければならない。複数レイヤ法を適用するためには、適切なパラメータを自動的に設定する仕組みが必要である。

ヒストグラム均等化法は、画像全体や局所領域の統計量に基づいた非線形トーンマッピングの1つで、輝度の情報をヒストグラム化して、処理後のヒストグラム分布が均等になるよう処理が施される(偏った輝度の情報が表示範囲に均等に分配される)。例として図-1左上の城の画像の輝度分布について考えてみる。城の部分は黒つぶれしており、輝度が低い領域に特定の輝度が集中している。ヒストグラム均等化は、特定の輝度値に集中してしまった画素群を広い表示範囲に割り当てる。その結果ヒストグラムの分布が広がって均等化する。

ヒストグラムを累積し、縦軸を表示範囲に正規化した関数は、この条件にあてはまり、そのままマッピング関数となる。局所領域ごとにヒストグラム均等化を行う場合、グラデーションなどもディスプレイ表示範囲全体に輝度を割り当てるので過強調を起しやすく、同時に膨大な計算量が課題となる。過強調はヒストグラムをあらかじめ滑らかにしておく

と均等化した後のヒストグラム形状との差が抑制されて改善する(Smoothed LHE)。

ARM社が買収した Apical Iridix<sup>1)</sup>は、局所ヒストグラム均等化に似た手法を採用しており、スマートフォンや市販カメラの画像補正において市場独占に成功している。Iridixでは、フーリエ級数展開のように直交変換された局所ヒストグラムからマッピング関数を再構成する。低周波側から4~6個の直交基底関数で構成された滑らかな累積ヒストグラムを直接計算して、演算時間と過強調の問題を同時に解決している。

## ノイズ除去の理解

画像のノイズ除去は、トーンマッピング同様に従来から研究されてきた普遍的な技術課題である。基本的には画像の特徴とノイズ成分を分離して、いかにノイズ成分だけを抑制するかが鍵となる。画像の特徴はテクスチャやエッジ成分に存在するとされ、いままでエッジ保存型低域通過フィルタがこの分野でも使われてきたが、トーンマッピングの Base Layer 抽出のように大まかな物体領域を指定するようなマスキング用途の応用へと移っていった。

そのため、ノイズ抑制に主に使われる技術は直交変換により得られた画像の空間周波数成分から、画像を構成する成分とノイズ成分を分けて、ノイズ成分をシュリンクする技術や画像の中で似ているテクスチャを持つ微小領域を重ね合わせて平均化することで画像の特徴を強調しながらノイズのみを抑制する手法などが用いられている(図-1右)。

## CNNと出力解像度

畳み込みニューラルネットワークを利用した画像変換というタスクでは、演算負荷と出力解像度の関連性を考える必要がある。画像変換は、カラー化/白黒化、欠損補完、超解像、絵画風など見え方を変更するスタイル変換など、多くの一般的なコンピュータビジョンの応用を実現するための重要な技



## 特集

## Special Feature

術である。ここでの課題は、ある画像セットから別の画像セットへのマッピングを学習・推論することであり、画像セットの特性はどのような画像変換を目指すかに依存する。トーンマッピングやノイズ除去の目的は、画像解像度を保ちながら、与えられた画像を変換することであり、物体を認識して分類することではない。

画像変換のための典型的なネットワーク・アーキテクチャは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN : Convolutional Neural Network) を基にしたエンコーダ・デコーダである。画像変換では、特徴を得るだけでなく、その特徴を再利用して、画像を再構成しなければならない。

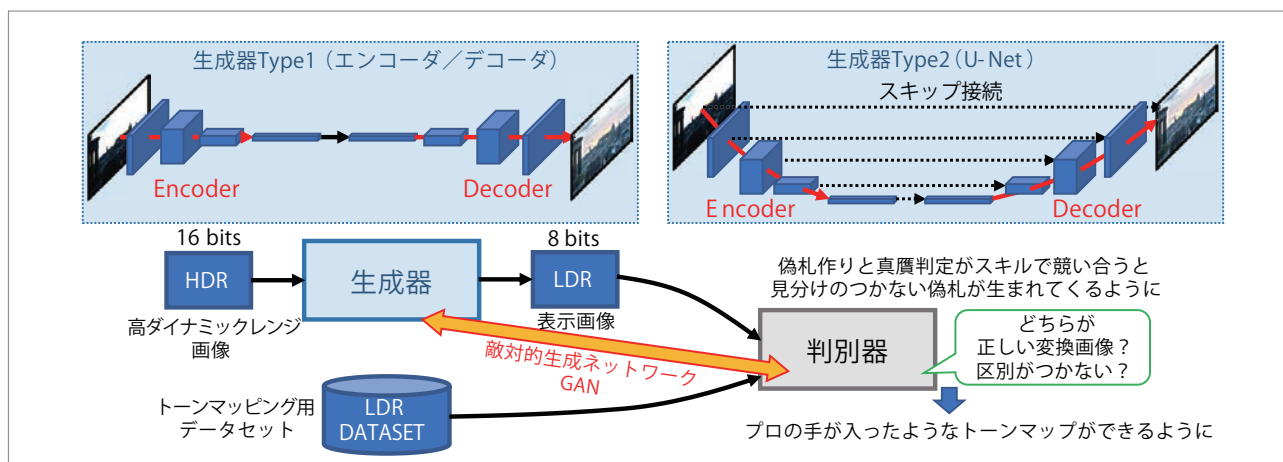
図-2 左上に示すようにエンコーダは、画像の低レベルの特徴の空間的な寸法を縮小するプーリング畳み込み層を配置して特徴を段階的に統合していく。特徴の統合により高レベルの複雑な特徴を得ることが可能な一連の畳み込み層を実現する。デコーダは、入力-出力 (ターゲット) 画像の解像度 (超解像などのタスクでは出力解像度が異なる場合がある) に合わせて特徴の空間的な寸法を拡大して再現していく。統合された特徴の再現について、拡大する逆畳み込み層を配置した層構造を組み合わせて用いる。

単純な CNN モデルでは、画像の高周波特性が失われ、ぼやけてしまう可能性があり、同一解像度

の層間で情報の伝達を行うためのスキップ層を持つ U-Net (図-2 右上) や敵対的生成ネットワーク GAN (Generative Adversarial Networks) が用いられる。GAN は、画像を生成するネットワークとその生成された画像が正解画像に即して、同じ特徴を有しているかを判別するネットワークからなる。この2つのネットワークを競い合わせて学習する。

最終的に判別ネットワークが生成画像と正解画像を区別できなくなったならば、その生成ネットワークは正解画像と同じ特徴を持つ画像を生成し得る能力を持つことになる。紹介したネットワーク構造は、入力と出力同じ解像度の出力画像を再構成するため、認識・分類用ネットワークと比較して構造が大きくなり演算量が増えてしまう (図-2 下)。

トーンマッピングを CNN で実現するには、エンコーダ・デコーダ構成または U-net を生成ネットワークとして GAN の中に組み込み実装する。判別ネットワークは物体認識・分別用のネットワークを使う。トーンマッピング用 CNN を学習するには、外界の情報に相当する高ダイナミックレンジ画像とそれをプロの写真家が修正してディスプレイ表示可能な輝度範囲に落とした画像をセットにして行う。その結果、生成ネットワークは、高ダイナミックレンジ画像に対して、あたかもプロの写真家が修正したかのような画像変換を行うことができるようになる。



■図-2 トーンマッピングと深層畳み込みネットワーク

## トーンマッピングと CNN

### CNN との高効率処理の相互変換

CNN ベースのトーンマッピングを考えた場合、イメージセンサ出力は現在、静止画で数千万画素レベル、動画では 4K2K 解像度が一般的となり、その解像度でのリアルタイム処理（4K 解像度 @60 フレーム/秒）が求められる。現在のハードウェア構成ではこの要求を満たすことはきわめて難しい。そのため、高解像度で高速性を考慮した新しい画像変換処理用のアーキテクチャとアルゴリズムが必要となる。

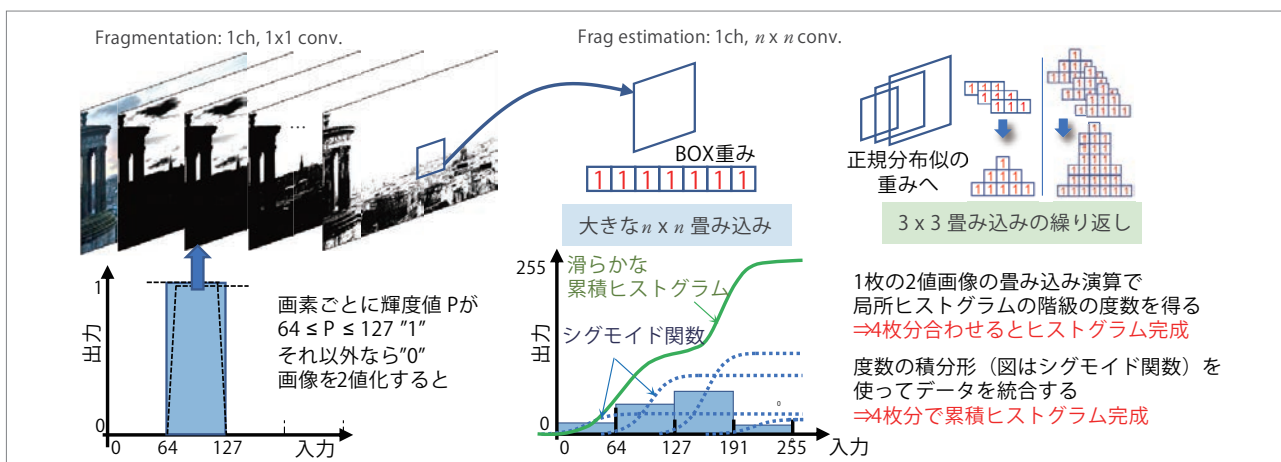
もし、トーンマッピングの基本要素と CNN の関係性が明らかになれば、高解像度の計算負荷の高い CNN 演算を従来の高解像度向けの高効率処理に相互変換することができる。そして余った演算能力を識別など高度な演算に振り分けることにも繋がる。ここでは、局所領域ごとのヒストグラム均等化 (LHE) と CNN の関係性について考えてみよう。LHE の出力は非線形関数である累積ヒストグラムである。輝度階級ごとに得られた度数を積分（累積）していくことと CNN の関係性を考えなければならない。

まず図-3 の左上に示すように、入力画像を輝度階級ごとに分割してみよう。トーンマッピングでは入力として 8 ビット以上の画像を扱うことが多い

が、ここでは 8 ビット（0～255 までの輝度範囲）とする。そして、簡単のため 4 つの階級（0～63, 64～127, 128～191, 192～255）を持つヒストグラムの生成を考える。画像全体に対して 64 以上 127 以下に当てはまる画素だけ 1 にしてほかは 0 とするとその条件を反映した 2 値の画像ができる。同様に、それぞれの階級の条件に沿った 2 値画像を作ることができる。この作業は、1 画素単位の条件を全画面に適用した処理となっている。

次にここで得られた 4 枚の画像に対して図-3 上に示すように  $n \times n$  の領域で 1 の画素を集めてみよう。これは  $n \times n$  の領域で重みが等しい BOX フィルタをかけることと同じである。一方、 $3 \times 3$  の BOX フィルタを繰り返し行うと中心極限定理から、 $5 \times 5$  の領域サイズで中心に空間重みを持つフィルタなり、次に  $7 \times 7$  の領域サイズで正規分布を近似した空間重みを持つようなフィルタとして局所領域内の 1 の数を積算できる。

さらに図-3 右下に示すように、特定の領域に対して、4 枚の 2 値画像から得られた情報を統合すると、4 階級を持つ局所ヒストグラムが完成する。情報統合の前に、1 の数の積分値（積分関数としてシグモイド関数や Relu6）と階級ごとのオフセットを与えれば、直接、累積ヒストグラムが求まってしまうのである。累積ヒストグラムはトーンマッピング



■図-3 トーンマッピングと CNN の相互変換



のマッピング関数であることは前章で述べたとおりである。このようにして、トーンマッピングの基本要素である LHE は画素ごとの演算と畳み込み演算および結果の統合処理に相互変換が可能なのである。

## 解像度を考慮したアーキテクチャの工夫とリアルタイム処理

CNN を活用したトーンマッピングは、入力画像の解像度を保持する必要がある。高解像度の実時間処理には工夫が必要である。しかし、現行の画像変換用のネットワーク・アーキテクチャでは高解像度による演算負荷で実現が難しい。

そこで、低解像度 DCNN により画像の特徴を得ることで、高効率な高解像度トーンマッピング処理の制御を行うアーキテクチャを考察してみる。

Gharbi らの HDR-Net ではバイラテラルグリッドと呼ばれる高効率な高解像度トーンマッピング処理手法に対して、低解像度 DCNN によるパラメータ制御を行っている。バイラテラルグリッドでは、ブロックごとに分割された局所領域ごとに、累積ヒストグラムに似たパラメトリックな区分線形関数を用いている。図-4 に示すように、低解像度 DCNN を用いて画像の大きな特徴を抽出して、バイラテラルグリッドにおける区分線形関数の各線分の傾きとバイアスを制御する。

この構成で使われる DCNN は低解像度で扱っているため、演算負荷が小さいとともに出力がパラメータであるためエンコーダも必要としない。DCNN と高解像度処理とのデータ転送量も削減する

ことができ、知的かつ高解像度な実時間トーンマッピングが実現できる。

ただし、HDR-Net のようなシステムを実現するためには、片翼であるバイラテラルグリッドのような高効率な高解像度処理アルゴリズム、高解像度処理の学習用データセットとアーキテクチャ全体を通じた学習方法が必要であることに注意すべきである。

## ノイズ除去と CNN

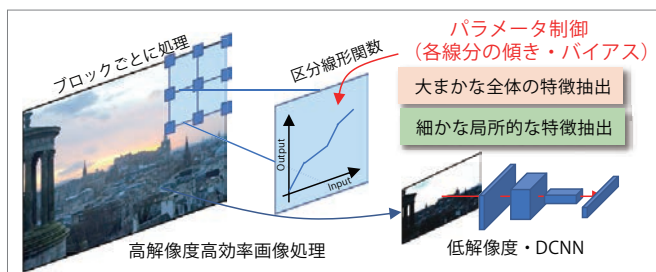
### CNN による実装

CNN を活用したノイズ除去は、ノイズ自体の推定を行うものが多い。推定されたノイズと入力画像の差分からノイズのない画像を得る。また、学習のためノイズを含む／含まない画像セットを GAN で作る試みもなされている。また、U-net のダウンサンプリング機構を活用して、細かい特徴から大まかな特徴に対して直交変換を模した解析からノイズと画像の主要成分を分離する。画像の中で似ているテクスチャを持つ微小領域グループを学習に用いて、ノイズ成分を推定する手法も提案されている。

### U-net による実装と処理解像度

ここでは、U-net を用いた手法について考えてみよう。まず、低解像度および高解像度の画像にノイズが乗っている状態を想像してほしい。低解像度の画像では、画像の細かい特徴がつぶれて、ノイズとの違いが見つけにくいのではないだろうか？ 逆に高解像度の画像では、ノイズが含まれていても元の構造を想像しやすい。

これは、解像度が高いとノイズの拡がりとそのに埋もれている特徴を分離しやすくなり、画像の一部を切り出してもノイズの推定ができることを意味する。すなわち、画像をブロックごとに分けて、それぞれにブロックサイズの小規模ネットワークで処理できることを示唆しているのである。そして、ブロック処理用のネットワークはサイズが小規模なので、



■ 図-4 低解像度 DCNN によるトーンマッピング

## 特集

Special Feature

複数の処理ユニットを用意することや処理ステージを分けてステージ間に一時的な記憶領域を設けることでパイプライン化も可能となる。これは小規模ネットワークだから実現可能な構成である (図-5)。

## 処理画像と見た目

ノイズ除去の性能向上のため、U-Net を複数個、カスケード接続してみよう。このとき、初段 U-Net で得られた出力に含まれるノイズの特徴は、入力画像のノイズが持っていた特徴と異なる。そのため、次段 U-Net は新しいノイズ成分に対して学習し、その除去を行うこととなる。ただし、カスケード接続したネットにより出力された画像は、ノイズが減って滑らかな画像に作り替えられる。これは、入力画像が持つ画像の特徴さえも整形して見た目を良くしてしまう可能性があるのだ。そのため、ノイズ除去と画像の見た目の判断に新たな指標が必要となる。次節で、見た目にかかわる人の感性と CNN の関係について考えてみよう。

## 人の感性と CNN

### 人の感性によるデータセット構築

トーンマッピングやノイズ除去は、主観である見た目と大きくかかわっている。トーンマッピングでは、画像の自然さを損なわずに見た目を向上させることが求められる。ノイズ除去も同様である。

そのため、データセットの作成において、Bychkovsky らは一眼レフカメラを用いて、さまざまな風景、被写

体、異なる照明条件で 5,000 枚の写真を撮影し、これらの写真を、5 人のプロの写真家の協力を得て、Adobe Lightroom を使って手動により色調を調整したデータセットを作成している。

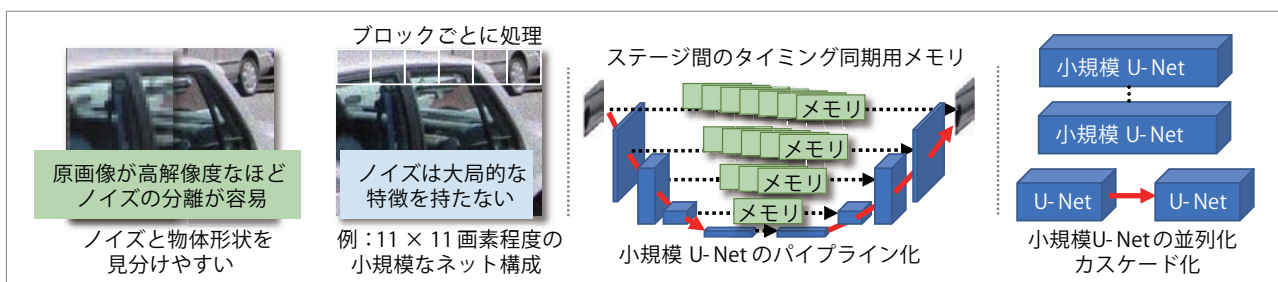
最近では、Panetta らが、456 枚の高ダイナミックレンジ画像からなるデータセットを公開している。これらの画像は、屋内、自然、夜間、川辺の夕日の 4 つのカテゴリに分類されており、さまざまな照明条件で撮影され、高ダイナミックレンジ画像として、Photoshop の機能を用いて、5 つの異なる露出を融合して作成されている<sup>2)</sup>。

### 感性の定量化と今後の展開

自然さや見た目は主観的要素が強く、これらの定義や定量評価は難しい。医療画像では見た目の良い画像変換を行うことで、画像診断 DCNN の性能向上にもつながる報告もなされている。この場合、トーンマッピング機能やノイズ除去が DCNN の一部として組み込まれる。

「自然さ」という概念を深掘りするには、第一にガラスや金属などの個々の物体の材質がなぜそれっぽく見えるのか、画像内のマテリアルの特徴量の問題として考えることができる。そして、マテリアル特徴解析の分野は、議論が活発になってきている (Motoyoshi ら 2007<sup>3)</sup>, Sawayama ら 2017<sup>4)</sup>)。

これらの研究は画像の印象から「金属っぽさ」などの特徴量をもとに材質変換にも研究を進めている。筆者らはその知見を活用し、いかに画像内のマテリアル群の特徴量の統合的に定義するかと、いかに統



■ 図-5 小規模 DCNN (U-Net) を用いたノイズ除去用アーキテクチャ



## 特集

## Special Feature

合的な特徴を保ったまま画像変換できるかに着目しており、質感を包含する「自然さ」という、より大きな概念を数理記述することを目論んでいる。

そして、画像の見た目については錯視も関連している。例として皆さんが一度は目にしたことがあるチェッカーシャドウ錯視など、物体の模様と陰影などの状況から引き起こされる錯視はまさに人の内部で生み出された感じ方と言えよう。DCNN と錯覚においては、蛇の図柄がなぜ回転するように見えるか<sup>5)</sup>、その特徴量の抽出に成功している。同時にさまざまな錯視をGANで生成しようという試みもなされているが、こちらは失敗しているようである。

さて、人の感じ方が大きくかわる錯視の効果は定量化できるのであるか？ ここでは、文系の学術分野である心理物理学がその定量化のノウハウを有している。金子らは、実験心理学的研究により、「見え」の主観を定量化しヒトの視覚の情報処理メカニズム（特に低次視覚特徴の処理機構）の解明を目指してきた。特に錯覚の発生機序に関する研究を多数行っている<sup>6)</sup>。

自然さや見た目など、人の感性がかかわる主観的要素の解析は、文工の学術分野における新しい連携の形を示す。それとともに解析の結果は、人が考えるより大きな概念の定量化に結び付いて、それを利用したAIとの新しい関係や人の感性を模したデー

タセットの生成、人に近い画像変換システムの最適化につながっていくと考えている。幅広い学術分野の連携と人を主体とした新しいAI産業の発展を強く望むとともに、その研究を進めていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Chesnokov, V. : Image Enhancement Methods and Apparatus Therefor, US Patent 7,302,110 (2007).
- 2) Panetta, K., Kezebou, L., Oludare, V., Agaian, S. and Xia, Z. : TMO-Net : A Parameter-Free Tone Mapping Operator Using Generative Adversarial Network, and Performance Benchmarking on Large Scale HDR Dataset, IEEE Access, 9, 39500-39517 (2021).
- 3) Motoyoshi, I., Nishida, S. Y., Sharan, L. and Adelson, E. H. : Image Statistics and The Perception of Surface Qualities, Nature, 447(7141), 206-209 (2007).
- 4) Sawayama, M., Nishida, S. Y. and Shinya, M. : Human Perception of Subresolution Fineness of Dense Textures Based on Image Intensity Statistics, Journal of vision, 17(4), 8-8 (2017).
- 5) Watanabe, E., Kitaoka, A., Sakamoto, K., Yasugi, M. and Tanaka, K. : Illusory Motion Reproduced by Deep Neural Networks Trained for Prediction, Frontiers in psychology, 9, 345 (2018).
- 6) Kaneko, S. and Gilchrist, A. : Lightness in a Flash : Effect of Exposure Time on Lightness Perception, i-Perception, 11(6), 2041669520983830 (2020).

(2021年12月6日受付)

■池辺将之 ikebe@ist.hokudai.ac.jp

2000年、北海道大学大学院電子情報工学専攻博士課程修了。2000年、大日本印刷(株)半導体製品研究所。2004年、北海道大学大学院情報科学研究科准教授。2018年、北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター教授。2021年、北海道大学病院次世代遠隔医療システム開発センター副センター長兼任。



[知能コンピューティングー AI とハードウェアの出会いー]

## 4 機械学習に適したハードウェア・ ハードウェアに適した機械学習アルゴリズム

高前田伸也 東京大学



### なぜコンピュータアーキテクチャの 研究者が機械学習の研究に取り組む のか

この特集は「AI とハードウェアの出会い」というお題目をいただいて執筆するものであるが、この章ではまず「コンピュータアーキテクチャの研究者と AI の出会い」について述べたいと思う。筆者の主な研究分野はコンピュータアーキテクチャである。コンピュータアーキテクチャとは、計算速度、電力効率、信頼性、コスト、使いやすさなど、さまざまな指標で「優れた」コンピュータの構成とその実現方法を追求する分野である。ところが、すべての指標で優れた方式を実現することは容易ではなく、こちらを立てればあちらが立たないことが多い。たとえば、高速化のために並列ハードウェアを導入すれば、当然のように消費電力は増え、さらに並列化のオーバーヘッドで電力効率は低下する。また、並列ハードウェアを使いこなすためには、並列プログラミングが必要となり使いやすさが低下する。だからこそ、複数の指標を並立する、「チラチラと見え隠れする、針の穴のような突破口を突く」<sup>1)</sup>ことの喜びが大きい研究分野であると個人的には思う。多くの大学の情報系学科におけるコンピュータアーキテクチャの講義（たとえば、筆者が所属する東京大学理学部情報科学科であれば「計算機構成論」）では、マイクロプロセッサ（いわゆる CPU）の基本的な仕組みや、

プログラムを効率的に処理するための方式や概念、たとえばパイプライン、キャッシュメモリ、分岐予測、命令レベル並列性、アウトオブオーダー実行といった事柄が教示されていると思われる。これらの講義で取り扱われる CPU の高度化技術は、アプリケーションごとに得意不得意は多少あるものの、特定のアプリケーションに限定されるものではなく、プログラム全般を効率的に処理するための汎用的なものである。コンピュータアーキテクチャの研究も同様に、CPU を中心とした汎用的な技術に関するものが主流で、優れた CPU の内部構成方式（マイクロアーキテクチャ）に関する研究は花形であると個人的に思う。

ところが、コンピュータアーキテクチャとその周辺分野の国際学会においては、今回のテーマでもある「AI のためのハードウェア」に関する発表が多く見受けられるようになってきた。たとえば、2021 年 10 月に開催されたコンピュータアーキテクチャのトップ会議の 1 つである MICRO (International Symposium on Microarchitecture) 2021 では、21 の論文発表セッションのうち、4 つがアプリケーション・ドメインに特化したアクセラレータに関するものであり、その多くの論文は機械学習処理の効率化に関するものである（なお「マイクロアーキテクチャ」と冠したセッションは 2 つのみであった）。FPGA (Field Programmable Gate Array, 利用者が回路構成を変更可能なやわらかいデジタル集積



回路)の原理と利活用に関する国際学会においても、従来は多様性に富んだアプリケーションの高速化事例が発表されていたが、最近ではディープラーニングの高速化や軽量化に関する論文の割合が増している。なぜ、コンピュータアーキテクチャの研究者がここまで活発に機械学習に関する研究に取り組むようになったのであろうか。

## 理由1：ディープラーニングのための計算能力の要求

理由の1つは、ディープラーニングの急速な普及により、より高速かつ高効率にその計算を行うコンピュータシステムの必要性が高まってきたからである。ディープラーニングが普及した理由の1つとしてコンピュータの高速化が挙げられるが、その中心となったハードウェアはGPU (Graphics Processing Unit) である。名前のおとおり、元々GPUは画像処理のためのハードウェアであったが、大量の演算器で構成される並列アーキテクチャにより行列計算をCPUよりも高効率に処理できるため、たちまちディープラーニングでは欠かせないハードウェアとなった。

一方で、優れたディープラーニングモデルの学習と推論には大きな計算コストを要することが問題視されはじめている。たとえば、OpenAIが開発した自然言語処理向けのディープラーニングモデルであるGPT-3は、その学習には単一GPU換算で355年分という膨大な計算コストを必要とすると言われて<sup>2)</sup>いる。また、ディープラーニングモデルのTransformerの学習に要するエネルギー量を二酸化炭素量に換算すると、乗用車5台分の製造から廃棄までの間に排出する二酸化炭素量に匹敵すると言われて<sup>3)</sup>いる。今後の持続的なディープラーニング技術の進展には、エネルギー効率に優れる環境負荷の少ないコンピュータシステムの創出が強く求められている。そこで、GPUよりもさらにディープラーニングの計算を高効率に処理可能なハードウェアが求められるようになってきた。有名な例では、GoogleはTPU (Tensor Processing Unit) と呼ばれるディープラー

ニングに特化した専用チップを独自に開発し、実際のサービスで活用している。Microsoftは、多数のFPGAで構成されるBrainwaveと呼ばれるディープラーニングプラットフォームを運用している。また、大企業以外でもDNNに特化したハードウェアの開発の事例が見られる。たとえば、Cerebrasはウェハースケールの巨大なチップによるディープラーニングシステムを提供するなど、競争の激しい領域である。このように、機械学習、特にディープラーニングの計算を高速・高効率に処理するためのコンピュータシステム・ハードウェアへの要求が高まるのに伴い、そのための研究が活発に行われるようになった。

## 理由2：マイクロプロセッサの性能向上の困難さ

関連する別の理由としては、従来のマイクロプロセッサの改善だけでは要求される効率を達成することが困難になってきたことが挙げられる。マイクロプロセッサは汎用であるが故、どのようなアプリケーションに対してもそれなりの高速性を達成するためのハードウェア機構を有しており、そこに多くのトランジスタと電力を消費している。しかし、ポラックの法則と呼ばれる、投入するトランジスタの数を増やし、マイクロプロセッサのコアに複雑なハードウェア機構を投入したとしても、得られる性能は複雑性の平方根程度にしかならない、という悲観的な法則が知られている。もちろん、マイクロプロセッサの研究者と開発者は、複雑性が低く性能向上の利得が大きいハードウェア方式の研究開発を今も進めており、ありがたいことにその性能は伸び続けているが、針の穴のような突破口を新たに見つけては突き続けるような苦労があると思われる。また、これまでのマイクロプロセッサの性能は、半導体の集積密度が2年間で2倍になるとなるというムーアの法則に牽引され伸び続けてきた。これまでは、関係各位の努力によりなんとかトランジスタの微細化を継続してきたが、物理的および産業的な理由により、その限界が近いという見方が強い。つまり、多くの

## 特集

## Special Feature

トランジスタと電力を投入したとしても、それに見合った性能向上が得にくく、その上、トランジスタの微細化すら期待できなくなるという状況で、コンピュータの性能を向上させ続けるという難しい課題に立ち向かわなければならぬ。ところが、後述のとおり、機械学習、ディープラーニング計算の効率化という目的に対しては、マイクロプロセッサの汎用性は必ずしも必要ではないため、その汎用性を捨て、ディープラーニングに特化したシンプルかつ高並列なハードウェアにトランジスタと電力を投入するアーキテクチャへとシフトするのは自然である。

### 理由3：面白いから

もう1つの理由は、単純に「面白い」からではないかと筆者は考えている。従来のマイクロプロセッサに関する研究は、命令セットアーキテクチャと呼ばれるハードウェアがソフトウェアに提供するインタフェースを汎用に保ったまま変更することなく、ハードウェアのマイクロアーキテクチャの工夫により、速度や電力効率を改善することを目指すものが主流であった。ソフトウェア側から見れば、ソフトウェアをほとんど変更することなく高速化の恩恵を受けることができ、同じソフトウェアをそのまま異なるプロセッサ上で実行できるポータビリティが提供される点で好ましいアプローチである。一方、ハードウェア側から見れば、汎用性の死守という大きな制約の下で戦うことを強いられる。もちろん、制約があるからこそ面白いという見方ができるが、できることが限定されてしまうのは事実である。

ところが、ディープラーニング自体はさまざまな用途で利用できる「汎用的な」技術であるが、そのディープラーニングというドメインに絞ることで、汎用性の死守という足かせは大幅に緩和される。ディープラーニングにおけるプログラミングは、モデルの計算グラフを記述し、学習データによりモデルの振る舞いを規定するという、データドリブン・プログラミングと捉えることができる。利用者からすれば、記述したディープラーニングモデルに対応する計算

が、期待どおりかつ高効率に行われれば、CPUだろうがGPUだろうが専用チップだろうが構わないのである。もちろん、従来の命令セットアーキテクチャに縛られる必然性はまったくない。つまり、死守すべき汎用性のレイヤを、従来の命令セットアーキテクチャから、ディープラーニングというレイヤに移すことで、従来とは異なるハードウェアとソフトウェアの間のインタフェースの定義が許容されやすくなる。そして、コンピュータアーキテクチャの研究が、より自由な発想が強く求められるようになり、今までよりも面白いものになったと言える。

### コンピュータアーキテクチャの研究者が行う機械学習の研究

コンピュータアーキテクチャの研究者が行う機械学習研究は、理論的な側面よりもシステム化を意識したものが多く、たとえば、機械学習、特にディープラーニングの計算に特化したハードウェア・回路の構造や、ハードウェアを意識したディープラーニングのアルゴリズムに関するものである。前者は、畳み込みなどの計算パターンの特性を活かした演算器やメモリシステムの構成を採用することで、データの読み書きや移動の量を削減し、与えられたディープラーニングのモデルの計算を短時間かつ少ないエネルギーで処理できるようにするものである。後者は、演算や値の冗長性や類似性を活用した計算省略手法や、量子化や枝刈りといったモデル表現の簡略化に関するものが多数見受けられる。より優れたディープラーニングシステムの実現には、前者と後者を併せて、ディープラーニングの計算の特徴を捉えたハードウェアの仕組みと、ハードウェアにおける得失を考慮したディープラーニングのアルゴリズムやモデルを同時に考えることが好ましい。筆者はコンピュータアーキテクチャの専門家（のはず）であるため、コンピュータアーキテクチャの知見を活かして、ディープラーニングの計算アルゴリズムを変化させたときにハードウェアにどのような変化



## 特集

Special Feature

が起こるかを想像して、ハードウェアにとっては負担が大きくないにもかかわらず、精度向上の恩恵のあるアルゴリズムに関する研究に取り組んでいる。前置きが長くなったが、以下、筆者がこれまでに取り組んできた、ハードウェア指向のディープラーニングに関する研究についていくつか紹介する。

## Dither NN/DeltaNet：回路中の一時情報を活用する二値化ニューラルネットワークの高精度化手法

GPUを用いたニューラルネットワークの計算では、モデルのパラメータ（ウェイト、重み）と活性化値（アクティベーション）を浮動小数により表現し、計算に用いることが一般的である。浮動小数の代わりに整数を用いてこれらを表現することで、ハードウェア・回路を小型化と低消費電力化しつつ、適切なビット幅を選定することで浮動小数と比較してもほぼ変わらない精度が達成できることが知られている。このように数値表現を整数で近似することを量子化（Quantization）と呼ぶ。この中でも、1つの数値を1ビットのみを用いて表現することを二値化（Binarization）と呼ぶ。メモリ量を削減することができ、乗算を単一のExclusive NOR（XNOR）で実現できるため回路面積および消費エネルギーの点で優れており、最小のビット幅で数値を表現している点が美しいと筆者は感じる。しかし、表現可能な数値状態の数に制限があるため、達成可能な認識精度が低いことが知られている。ここで、推論ハードウェアに入出力される数値は1ビットに制限したまま、ハードウェアに内在する多ビットの数値情報を活用することで、要求メモリ量とハードウェア複雑性を増やすことなく認識精度を向上させるハードウェア指向のニューラルネットワークのアルゴリズムのDither NN<sup>4)</sup>とDeltaNetを紹介する。

Dither NNとDeltaNetは共通して、入出力の値を1ビットで表現しても、ハードウェア内部には多ビットの数値表現が必ず出現し、それらは最終的には捨てられていることに注目して、捨てられる情

報を低コストに活かして二値化ニューラルネットワークの精度を向上するハードウェア指向のアルゴリズムである。図-1に二値化ニューラルネットワークのアクセラレータ回路の簡略化した構成を示す。メモリから読み出された値の各ビットが活性化値や重みに対応し、ビット値'1'が+1、ビット値'0'が-1に対応する。このとき、+1/-1のみが入力される乗算は論理演算のXNORで実現され、積算は乗算結果のpopcount（'1'の数の数え上げ）に対応する。このとき、popcountの結果を保持するためには複数ビットの加算回路とレジスタが必要となる。二値化ニューラルネットワークにおける活性化関数にはSign関数（入力が正なら+1、負なら-1を返す関数、バイナリ表現の場合には入力が正なら1、負なら0を返す）を用いることが多く、popcountの結果と閾値との大小比較で実現され、最終的に1ビットの値が出力され、適宜メモリに書き込まれる。つまり、メモリ上に配置される値には1ビットの値のみを用いるが、計算回路の内部では複数ビットの整数表現を用いる。

図-2に示すように、Dither NNは画像処理におけるディザリング（入力値を少ない階調表現に変換する際の量子化誤差が、領域全体で平均的に小さくなるように切り上げ・切り捨てを選択する手法）に着想を得た方式である。中間色を表現可能なグレースケール画像を、単一の閾値により二値化すると白つぶれ・黒つぶれが発生する。ここで、二値化時の量子化誤差を隣接ピクセルに拡散し、その後二値化することで、各ピクセルは通常二値化と同様に



■ 図-1 二値化ニューラルネットワークハードウェアにおける数値表現の変化

## 特集

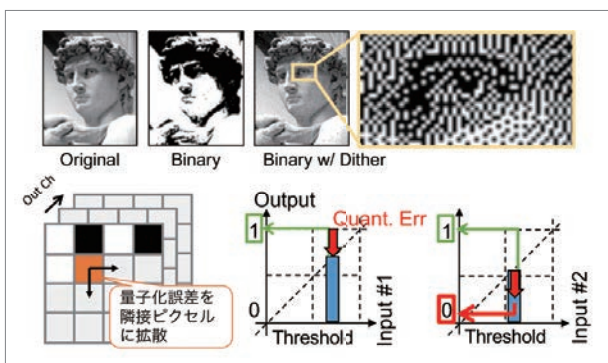
## Special Feature

白黒のみで表現されるが、画像全体では白黒の濃淡により疑似的に中間色を表現することが可能になる。Dither NNはこの誤差拡散法に基づくディザリングを二値化ニューラルネットワークの活性化関数に適用したものである。二値化ニューラルネットワークでは、各ピクセルの活性化前の値を求めた後、各ピクセルに対して Sign 関数を適用するが、Dither NNでは Sign 関数により発生する量子化誤差を隣接ピクセルに繰り越す。量子化誤差の量に応じて、隣接のピクセルの活性化後の値が変化し、各チャンネルの空間方向で疑似的に中間値を表現することが可能になる。このとき、実際の二値化ニューラルネットワークハードウェアにおける量子化誤差の繰越は、pop-count の値を保存する中間レジスタの値から Sign 関数のための閾値を減算し、同一の回路で隣接ピクセルの計算を行うだけでよい。つまり、新たに外部に対するデータの読み書きはいっさい発生せず、回路構成の変更はきわめて小さい。このように、二値化ニューラルネットワークのハードウェアに対する利点を損なうことなく Dither NN は実現できる。FPGA を対象とした評価では、Dither NN の適用による回路規模の増加量は 0.3% であり、VGG-9 をベースとするモデルにおいて CIFAR-10 に対する精度は 1.3% 向上することを確認した。

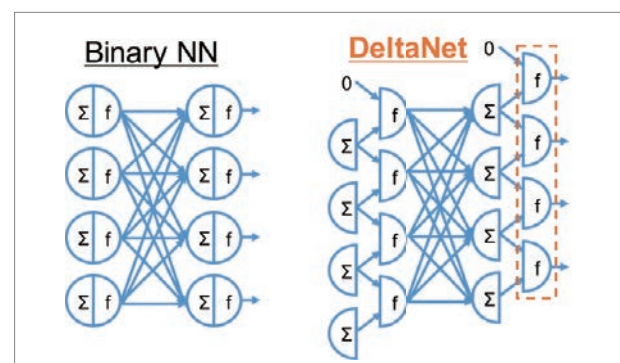
関連する技術として、差分二値化によるハードウェア指向ニューラルネットワークである DeltaNet も紹介する。二値化ニューラルネットワークの精度低下の要因の 1 つは、活性化関数適用前の値の強

弱が Sign 関数により失われることにある。たとえば、+1/-1 で活性値と重みが表現される二値化ニューラルネットワークにおいて、活性化関数適用前の値がどちらも正で異なる絶対値を持つ場合に、どちらも Sign 関数を適用すると +1 に変換される。ここで、片方がもう一方よりも大きな絶対値を持つということは、何らかの特徴がもう一方の特徴よりも強く検出されていることになるが、強弱に関する情報は Sign 関数により失われている。DeltaNet は、[図-3](#)に示すように、活性化関数適用前に隣接の活性化前の値との差分を求め、その差分を二値化する方式である。つまり、どちらの特徴がより大きいかを後続の層に伝播し、部分的に値の順序を保存することが可能になる。Dither NN と同様に FPGA を対象とした評価では、DeltaNet の適用による回路規模の増加は 3% であり、GoogLeNet をベースとするモデルにおいて CIFAR-10 に対する精度は 1.2% 向上した。

一般に、精度向上の恩恵のある方式はハードウェアの負荷が大きく、こちらを立てればあちらが立たないことになる。しかし、ハードウェアの内部に潜んでいる情報を、回路的には簡単な仕組みで活用することができれば、両方を立てることができる。残念なことに、上記の手法を用いたとしても浮動小数により表現されるモデルの精度には及ばないのが現状である。しかし、このような突破口を積み重ねることで、精度とハードウェア効率の両面で優れた究極的な技術を実現したいと筆者は考えている。



■ 図-2 ディザリングに基づく二値化ニューラルネットワーク Dither NN



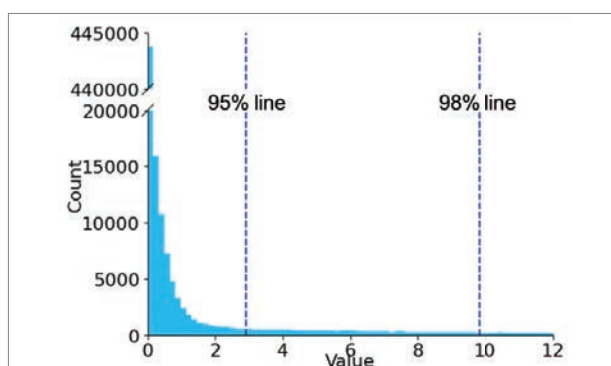
■ 図-3 差分二値化関数を用いる二値化ニューラルネットワーク DeltaNet



## ASBNN：アーキテクチャとアルゴリズムの協調によるベイジアンニューラルネットワークの高速化

ニューラルネットワークは一般にデータを用いて学習するものであるため、学習データとは性質の異なる入力に対しては特に誤った認識をしてしまうことがしばしばある。信頼されるAIシステムには、「分からないこと」が分かることが好ましい。そのための方法の1つとして、重みや活性値に確率分布を用いるベイジアンニューラルネットワーク (Bayesian Neural Network) と呼ばれる技術がある。出力の確率分布を観察することで、その出力の確信度を知ることができるという特徴があり、確信度に基づく後続処理が可能になるという利点がある。しかし、出力の確率分布を得るためには、同一のモデルに対して、モデルの重みの確率分布から値を複数回サンプリングして、ニューラルネットワークの順伝播計算を繰り返す必要がある。そのため、一般のニューラルネットワークよりも計算コストが増加するという課題が存在する。ここでは、ベイジアンニューラルネットワークに現れる値の特性を活かして、出力の品質を保ったまま計算を高速化するアルゴリズムとハードウェアアーキテクチャのASBNN<sup>2)</sup>を紹介する。

ベイジアンニューラルネットワークでは、順伝播の計算ごとに重みの値を新たにサンプリングし、各層の計算を進める。このとき、順伝播ごとに各層の出力はどの程度変化するかを図-4のヒストグラムに示す。横軸が初回の順伝播との差分の絶対



■ 図-4 ベイジアンニューラルネットワークのサンプリングごとの活性値の変化量

値、縦軸がその出現回数である。観察の結果、各層の出力の多くは初回の順伝播と似た値をとっており、ごく少数の値のみが大きく異なることが分かる。ASBNNはこの特性を活かして、ニューラルネットワークの計算中に出現するスパース性(ゼロの割合)を増やし、計算回数を削減する方式である。

ASBNNでは、初回にサンプリングを用いずに各層の出力を求める。各層の出力  $\text{output}_{(k, \text{first})}$  は、 $\text{input}_{(k, \text{first})}$  を各層の初回の活性値、 $\overline{w}_k$  をそれぞれの重みが正規分布に従うとしたときの平均、 $\overline{b}_k$  をそれぞれのバイアスを正規分布に従うとしたときの平均とすると、以下の式で与えられる。

$$\text{output}_{(k, \text{first})} = \text{Conv}(\text{input}_{(k, \text{first})}, \overline{w}_k, \overline{b}_k)$$

$\Sigma_{(w, k)}$  と  $\Sigma_{(b, k)}$  がそれぞれの重みとバイアスの標準偏差とし、 $\epsilon_w$  と  $\epsilon_b$  を標準正規分布に従うとすれば、以下のとおり、k 回目にサンプリングされた重みとバイアスは、平均値のみに従い決定的に定まる項と、確率的な項に分解できる。

$$w_k = \overline{w}_k + \epsilon_w * \Sigma_{(w, k)}, \quad b_k = \overline{b}_k + \epsilon_b * \Sigma_{(b, k)}$$

以上に基づき、k 回目の出力  $\text{output}_k$  は、以下の式のように近似することができる。

$$\begin{aligned} \text{output}_k &= \text{Conv}(\text{input}_k, w_k, b_k) \\ &\simeq \text{Conv}(\text{input}_k, \overline{w}_k, \overline{b}_k) \\ &= \text{Conv}(\text{input}_k, \overline{w}_k, \overline{b}_k) + \text{Conv}(\text{input}_k, \epsilon_w * \Sigma_{(w, k)}, 0) \\ &= \text{Conv}(\text{input}_{(k, \text{first})}, \overline{w}_k, \overline{b}_k) \\ &\quad + \text{Conv}(\text{input}_k - \text{input}_{(k, \text{first})}, \overline{w}_k, 0) \\ &\quad + \text{Conv}(\text{input}_k, \epsilon_w * \Sigma_{(w, k)}, 0) \\ &= \text{output}_{(k, \text{first})} + \text{Conv}(\text{input}_k - \text{input}_{(k, \text{first})}, \overline{w}_k, 0) \\ &\quad + \text{Conv}(\text{input}_k, \epsilon_w * \Sigma_{(w, k)}, 0). \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) では、バイアスの標準偏差は重みのそれと比べて小さいため、サンプリングせずに平均のみを用いて計算することで得られる。畳み込みの出力は、式 (2) のように、平均のみを用いて求めた初回の結果と、それとの差分に分解することができる。ここで、式 (2) の第2項は初回の活性入力と各回の活性入力の差分に対して重みの平均を用いて畳み込みを行ったもの、第3項は各回の活性入力に對

## 特集

## Special Feature

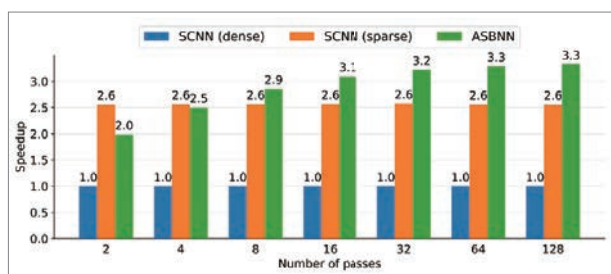
して、重みの標準偏差と標準正規分布により畳み込みを行ったものとなる。ASBNN では、活性入力の差分が小さければ、第2項の計算を省略し、活性入力の値そのものが小さければ第3項の計算を省略することにより、高速化を達成する。つまり、各層の計算において、入力値(=前層の出力)が初回の順伝播と大きく異なる場所に限定して差分を計算するというアルゴリズムである。また、本アルゴリズムに対応する、差分個所のみを効率的に計算する、スパース構造に特化したハードウェアアーキテクチャを組み合わせることで、精度を低下することなく計算コストを大幅に削減することに成功している。図-5にASBNNによる速度向上率を示す。従来の密行列を対象とするアクセラレータおよびスパース行列に適したCNNアクセラレータSCNNと比べて、サンプリング回数が128回のときに、それぞれ3.3倍、1.27倍の速度向上を達成している。ここで、アルゴリズムとハードウェアをコデザインすることで、片方だけでは到達できないところに達することができる点が、研究を進める上で面白いところである。

## NNgen：ディープラーニングのモデル特化ハードウェアを生成するオープンソースコンパイラ

ディープラーニングは、サーバなどの高性能なコンピュータシステムだけではなく、組み込みシステムと呼ばれる、低消費電力かつ小型なシステムにも用いられる。そのような場面での高速化方法として、GoogleのEdge TPUなどの専用チップ(いわゆる

AIチップ)を用いるほかに、利用者が設計・再構成可能なハードウェアであるFPGAを用いる方法がある。FPGAを用いることで、画像の前処理回路などといったディープラーニング以外の回路と、周辺デバイスに接続される入出力インタフェース回路を1つのチップ上に集積することが可能になり、データの入力から最終出力までの遅延を削減することができるというメリットが存在する。FPGA上にディープラーニングの処理回路を実現する方法としては、FPGAベンダが提供するAIツールを用いることで、一般的な深層学習フレームワークを用いた学習で得られたモデルをFPGA上にデプロイすることができる。しかし、FPGAベンダが提供するツールでは他社のFPGAには実装できず、改変は容易ではない。また、必ずしも深層学習モデルの特徴を踏まえたハードウェア構成ではなく、ターゲットとなるFPGAや混載される回路の規模と、要求速度や精度に応じた回路を実現することは一般に難しい。

NNgen<sup>6)</sup>は、学習済みモデルから、そのモデルに特化したハードウェアアクセラレータのハードウェア記述(Verilog HDL)を生成する、オープンソースの高位合成コンパイラである。NNgenを用いることで、ハードウェア記述を一切することなく、FPGA上にニューラルネットワークの処理システムを実現することができる。NNgenのコンパイラ構成は図-6のとおりである。NNgenは、ONNX(Open Neural Network eXchange)形式の学習済みモデルや、Define and Run方式で記述されたNNgen形式のモデル記述から、Verilog HDLで記述されたニューラルネットワークのハードウェアアクセラレータを自動的に生成する、Pythonにより実装された高位合成コンパイラである。図-6に、NNgen形式のモデル記述の例を示す。入力データに対応する'placeholder'、学習済み重みに対応する'variable'、'conv2d'や'max\_pool'といったオペレータを組み合わせることで計算グラフを構築する。計算グラフ中のオペレータに対して並列度などのアトリビュートを指定することで、同一の計算グラフから異なる構成



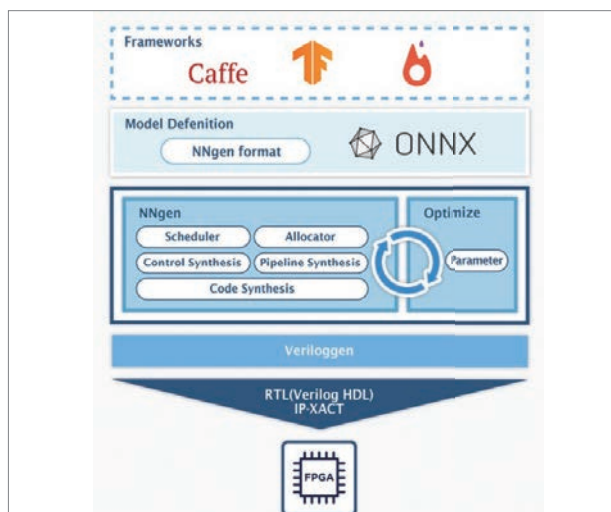
■図-5 ASBNNによる速度向上率



のハードウェアを生成することができる。そして、'to\_ipxact' および 'to\_verilog' といったメソッドにより、計算グラフが実際のハードウェア記述へとコンパイルされる。また、ONNX 形式のモデルを入力とすることもできる。

浮動小数の演算回路は多くの回路資源を要するため、重みと活性値を数ビットの整数で表現することが好ましい。NNgen は学習済みのモデルを整数量子化する機能を有しており、利用者が独自の量子化を適用することも可能である。また、NNgen の計算グラフは、ハードウェア化することなく、計算グラフと等価なソフトウェアの関数として実行することができる。これを活用することで、量子化前後のニューラルネットワーク振る舞いの変化をあらかじめ評価することができ、許容できる量子化結果が得られた後にハードウェア化すればよい。

コンピュータアーキテクチャの研究者であっても、ハードウェアの開発はしんどい。そのしんどい個所をソフトウェアによる自動化で解決することで、コンピュータアーキテクチャを意識した機械学習の研究がより加速されるものと筆者は考えている。現在、NNgen により生成されたニューラルネットワークアクセラレータは実際の製品でも利用されており、今後もさらなる高速化と回路規模の軽量化に向けて開発を進めていく。



■図-6 ニューラルネットワークハードウェアの自動合成コンパイラ NNgen のアーキテクチャ

## コンピュータアーキテクチャと機械学習の分野連携？

筆者の場合には、コンピュータアーキテクチャの研究者がもがきながらも、楽しく機械学習の研究を行っているわけであるが、逆に、機械学習の理論やアルゴリズムが専門の研究者がコンピュータアーキテクチャの研究を行うことも楽しいのではないかとと思う。もちろん、より応用に近い研究者が機械学習の方式とコンピュータアーキテクチャを同時に考えてもよい。つまりは、優れた機械学習システムが実現できれば、誰が何をやってもよいわけである。異なる専門を持つ研究者同士が、相手の言っていることがよく分からないながらも交流することで、今は見つかっていない機械学習システムのあるべき姿が見えてくるかもしれない。そのような場所に積極的に飛び込んでもがくことが、コンピュータアーキテクチャと機械学習システムの進化に重要であると信じて、引き続きあれこれ取り組んでいきたい。また、読者の皆様にもお付き合いいただければ幸いである。

### 参考文献

- 1) しげの秀一：頭文字 D, 11 巻, 講談社 (1998 年 4 月)。
- 2) OpenAI's GPT-3 Language Model : A Technical Overview, <https://lambdalabs.com/blog/demystifying-gpt-3/>
- 3) Strubell, E., Ganesh, A. and McCallum, A. : Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP, 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL), Florence, Italy (July 2019).
- 4) Ando, K., Oba, Y., Hirose, K., Uematsu, R., Kudo, T., Ikebe, M., Asai, T., Takamaeda-Yamazaki, S. and Motomura, M. : Dither NN : An Accurate Neural Network with Dithering for Low Bit-Precision Hardware, The 2018 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT'18) (Dec. 2018).
- 5) Fujiwara, Y. and Takamaeda-Yamazaki, S. : ASBNN : Acceleration of Bayesian Convolutional Neural Networks by Algorithm-hardware Co-design, The 32nd IEEE International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP 2021) (July 2021).
- 6) NNgen : A Fully-Customizable Hardware Synthesis Compiler for Deep Neural Network, <https://github.com/NNgen/nnngen>

(2021 年 12 月 6 日受付)

■高前田伸也 (正会員) shinya@is.s.u-tokyo.ac.jp

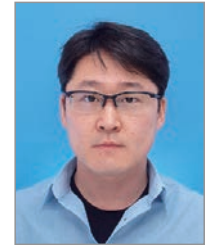
2014 年東京工業大学博士課程修了。博士 (工学)。2014 ~ 2016 年奈良先端大助教, 2016 ~ 2019 年北海道大学准教授。2019 年から現職。

[知能コンピューティングー AI とハードウェアの出会いー]

# 5 ランダム・スパース・ストカスティック

ー新しい計算の形を目指してー

劉 載勲 東京工業大学



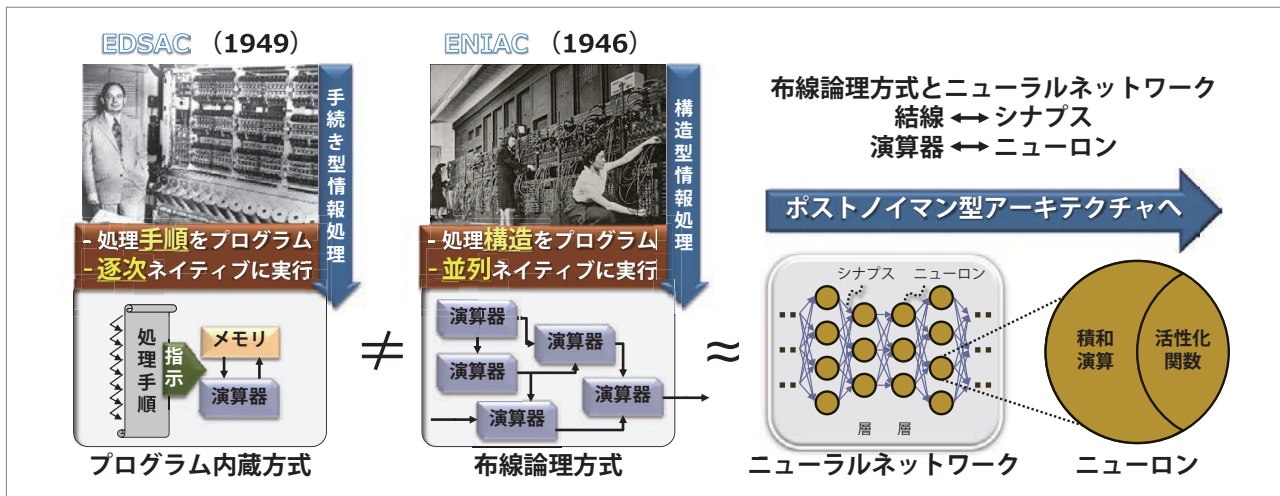
## 計算の形

「形」とは何か？ 広辞苑によると、外見に現れた姿や格好を意味するという。それでは、「計算の形」とは何か？ 計算が演算結果を求め出す無形の処理であることを考えると、その組合せ自体が少し矛盾しているようにも思える。筆者は、知能コンピューティングにおけるアルゴリズムとハードウェアの協調設計を主な研究分野としており、本稿では、ハードウェア処理基盤を「計算の形」として捉え、近年のニューラルネットワークの発展がもたらしたハードウェア処理基盤の変化を見ていこうと思う。中には微妙な意味合いの違いが気になる読者もいると思うが、筆者は、言語学者でもなければ、日本語の母語話者でもないの、その部分においては寛大な心

で許していただきたい。

## 汎用性で決まる「計算の形」

現代の計算機アーキテクチャはプログラム内蔵方式のノイマン型がその主流となっている。しかし、計算機アーキテクチャの黎明期には、プログラム内蔵方式以外にも、布線論理方式のアーキテクチャが存在していた (図-1 参照)。プログラム内蔵方式のアーキテクチャがメモリからデータの処理手順、すなわちプログラムを読み出し、実行することに対して、布線論理方式は物理的な結線で処理を実行する。言い換えると、プログラム内蔵方式にはソフトウェア(プログラム)とハードウェア(計算機)に明確な区別が存在していたのに対して、布線論理方式にはその区別がなく、ハードウェア構造そのものがソ



■ 図-1 プログラム内蔵方式と布線論理方式、そしてポストノイマン型アーキテクチャ



## 特集

## Special Feature

フトウェア処理でもあったと言える。

ノイマン型アーキテクチャが現代の主流になった理由は、決して非ノイマン型アーキテクチャの計算能力が劣っていたからではない。プログラム内蔵方式が逐次的制御に基づく演算処理を行っているのに対して、布線論理方式は演算器を物理結線することで高い並列性を実現できるものであった。1946年に作られた布線論理方式のENIACは、8万223時間の稼働時間の間、有史以来人類が行ったすべての演算よりも多くの演算を行ったとも言われている。

容易に想像できるように、布線論理方式の問題はプログラムの煩雑さにあったと言える。布線論理方式では計算対象に合わせて物理結線を手で切り替える必要があり、汎用的な用途には向いていなかった。さらにその並列処理構造は、逐次的な処理構造に比べてより高度な制御を要していたため、布線論理方式のアーキテクチャは歴史教科書の一部となってしまったのである。

## 機械学習がもたらすポストノイマン時代

機械学習に基づく人工知能ブームの中、我々は再び「構造＝処理」の構図を目のあたりにしている。それは皆さんもよく知っているニューラルネットワークである。積和演算と非線形変換、そしてそれを結線することで構築されるニューラルネットワークは、前述した非ノイマン型の計算機アーキテ

クチャと同一の形を共有する。違いがあるとすれば、機械学習の恩恵により、あらゆる問題に対して人間がプログラムを考える必要がなく、データからニューラルネットワークの構造と重みを学習することでプログラムできる点である。つまり非ノイマン型の弱点であったプログラム性や汎用性の問題が克服できるのである。

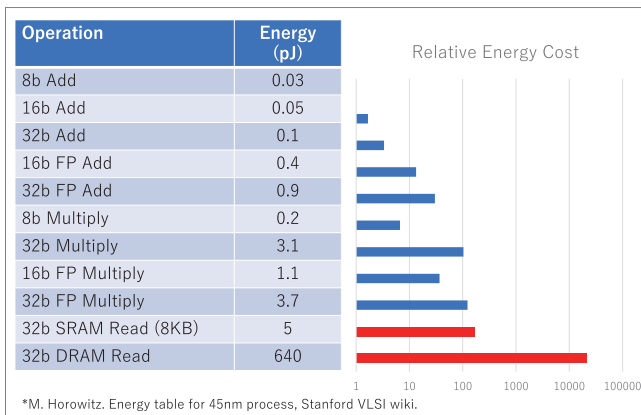
現在は、さまざまなニューラルネットワークモデルが提案され、アルゴリズム的にも急激に変化している中、計算機アーキテクチャはその後を追う形で発展している。まだ過渡期的な段階でその終着点は定かではないが、ニューラルネットワークと非ノイマン型アーキテクチャが率いるポストノイマン時代はもうすぐそこまで来ていると言える。それではここからの「計算の形」はどのような方向に向かうのだろうか。

## 肥大化するネットワーク

ここ十年でニューラルネットワークの推論精度は飛躍的に進歩しているが、それに伴い爆発的に肥大化するニューラルネットワーク規模は我々にとって大きな悩みである。たとえば、近年話題になったViT (Vision Transformer) は重みの数が百億を優に超える。このようなニューラルネットワークの肥大化は、それを実行するハードウェア処理基盤を設計する上で大きな負担となる。

ハードウェア処理基盤の設計は、回路面積と電力バジェットの制約の下で、決められた演算を効率よく処理するための最適化問題を解く過程である。本来、複数の要素がトレードオフ関係を持ち、複雑に絡み合うものであるが、本稿ではシンプルに図-2に示す各処理における消費エネルギーを基に、電力バジェットの観点から話を進めていく。

図-2では、整数と浮動小数点の加算と乗算にかかるエネルギーと、SRAMとDRAMからのデータ読み出しにかかるエネルギーを示している。その数値から分かるようにDRAMからのデータ読み出し



■ 図-2 各処理における消費エネルギーの比較

が最も支配的であり、ニューラルネットワークの積和に必要な重みをチップの外から読み出すことが積和演算よりも 100 倍以上のエネルギーを要することが分かる。しかし、オンチップ SRAM として搭載できるのはせいぜい数 10MB 程度 (NVIDIA A100 で 40MB) であり、32 ビット重みだと格納できるのは数千万個 (NVIDIA A100 で 1 千万個) となるが、定番の ReNet-50 における重みの数が 2 千 5 百万個を超えていることや計算に必要なワークスペースを考えると、オンチップ SRAM ですべてを賄おうとするのは現実的ではない。

一方 GPU などではデータ再利用によりこの問題を解決している。複数の入力データを束ねて処理 (バッチ処理) し、オフチップメモリから一度読み込んだ重みを数百回分の計算に用いることで、データ読み出しと演算処理のエネルギーバランスを保てるのだ。難敵に見えた問題がいつも簡単に解決できたように見える。

しかし残念ながらそう簡単にはいかない。多くの実アプリケーションでは即応性が求められる。そのためもって入力データを集めて束ねて処理することは困難である。たとえば、自動運転で 1 秒あたり 30 フレーム撮影できるカメラの入力を同時に 128 フレーム分バッチ処理するとする。最初のフレームから 128 番目のフレームが入力されるまで最低でも 4.2 秒 (≒ 128 フレーム / 30 フレーム) 以上かかり、ハードウェア処理基盤の処理速度にかかわらず、その間は目くらまし運転になる。車がどうなるかは想像するだけでも恐ろしい。

## 三匹が斬る

肥大化するニューラルネットワークが諸悪の根源だとして、我々がとれる方策には何があるだろうか。モデル規模と計算量を軽量化しなければならないのは間違いないが、ハードウェアの都合で勝手にアルゴリズムを改変するのは、ニューラルネットワーク

の推論精度を損なう可能性が高く、本末転倒である。当然のことながらニューラルネットワークが持つ性質を見抜き、それをうまく活用することが必要になるだろう。そこでここではニューラルネットワークが持つランダム性・スパース性・ストカスティック性の 3 つの性質に注目し、それらがハードウェア処理基盤に与える影響について見ていきたい。

## ランダム性

2019 年の ICML にはニューラルネットワークに関する興味深い仮説を提唱した 1 本の論文が発表された<sup>1)</sup>。MIT の Frankle と Carbin によって「宝くじ仮説」と命名されたこの仮説は、乱数初期化された密なネットワークには、同程度の学習で、元のネットワーク (original network) の学習結果に匹敵する部分ネットワーク (subnetwork) が存在するという仮説である。この部分ネットワークを宝くじにおけるあたりくじに例えている。Frankle と Carbin はこの仮説に基づき、通常の枝刈りでは見つけることのできない高い推論精度を持つスパースモデルを学習できる手法を提案している。

しかし、その後の研究で分かったさらに面白い事実は、重みを学習していない、乱数初期化状態の部分ネットワークにもすでに当たりくじ (高い精度の部分ネットワーク) が存在していたことである。2020 年 CVPR で Ramanujan らが発表した「What's Hidden in a Randomly Weighted Neural Network?」という論文<sup>2)</sup>で、著者らは乱数初期化状態のネットワークから必要な重みを選び、部分ネットワークを抽出するだけで、通常学習されたネットワークと同等の推論精度が達成できることを示した (図-3 参照。左: 二値乱数とスーパーマスクで定義された、右: Hidden Networks (HNNs) の学習手法であるエッジ・ポップアップ (edge pop-up) アルゴリズム。順伝播時にはスーパーマスクで選択された結線のみを使用し、逆伝播時にはすべての結線に対して重みの重要度であるスコアを更新)。本稿では便宜上こ



特集  
Special Feature

の手法を「Hidden Networks (HNNs)」と呼ぶことにする。

HNN の発見がハードウェア処理基盤に及ぼす影響は実に大きい。今まで膨大な重み数を持つモデルを記憶するためのメモリとその重みを読み出すための電力を必要としていたが、重みが乱数であればメモリは不要になり、必要なときに疑似乱数生成器で作ればよくなったのだ。後の章で少し触れることになるが、我々の研究チームではすでにこの事実を活用し、重みの格納と読み出しを不要とするハードウェア処理基盤を開発している。

### スパース性

モデル規模が削減できるのであれば、次に注目すべきは計算回数である。ニューラルネットワークは重みと活性値に大きなスパース性を持つ。重みの場合、影響力の少ない小さな値を7, 8割程度枝刈りしてもほとんど精度劣化が発生しないことが知られている。さらに活性値の場合、バッチ正規化<sup>☆1</sup>と活性化関数 ReLU (Rectified Linear Unit)<sup>☆2</sup>を用いていれば、活性値の約5割はゼロとなる。バッチ正規化で積和演算結果が平均ゼロの分布に整えられ、

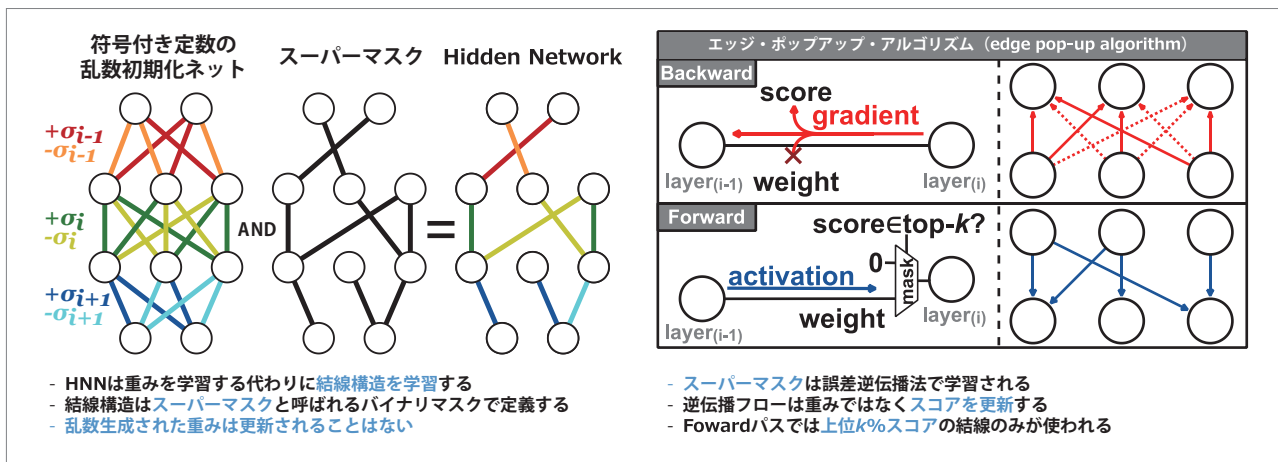
その半数を占める負の値が ReLU によってゼロの活性値になるのだ。

積和演算においてゼロ乗算は計算結果に影響を及ぼさないので、これらの重みと活性値に対する計算は推論時にリスクなく省略できる。違いがあるとするれば、重みのスパース性は学習段階で静的に決まるのに対して、活性値のスパース性は推論段階で動的に決まる。それではこれらのスパース性はハードウェア処理基盤にどのような影響を与えるのだろうか。

実はニューラルネットワークのスパース性を活用するにはかなりの手間がかかる。NVIDIA 社の Tensor Core や Google 社 TPU では密なネットワークモデルを想定し、高い並列度をシンプルなデータパスで実現している。それに対してスパース性を活用する場合は、まずゼロデータの位置を把握し、非ゼロ要素の演算をスケジューリングする必要がある。これを実現する方法はさまざまであるが、基本的にはメモリからデータを先読みし、比較回路によりゼロ判定を行った後、非ゼロ要素をかき集めて集約し、演算器アレイに入力することになる。さらにそれによって得られた計算結果は、入力データに応じてアドレスを計算し、メモリに書き戻す必要がある。そのため、ハードウェア処理基盤の並列度が上がるほどその制御は難しくなり、それに伴う周辺回路は複雑化することになる。GPU や TPU でスパース性の

☆1 層の入力分布を再センターリング・再スケーリングする正規化。一般に平均0, 分散1の分布にする。

☆2 ニューラルネットワークに用いられる非線形関数の一種。入力  $z$  に対して出力  $y$  を  $y = \text{MAX}(z, 0)$  で定義。



■ 図-3 乱数ネットワークから機能する部分ネットワークを抽出する「Hidden Network」

利用を諦め、シンプルデータパスを採用しているのも恐らくこれが理由なのだろう。

しかし、それでもスパース性の利用は、高い並列度を必要としない小規模のハードウェア処理基盤では、依然有効な選択肢であると言える。何と言っても計算の9割くらいが削減できるのだ。ただし、これも使用するメモリや計算精度によっていろいろ話が変わってくるので、その微妙なさじ加減に気を付けなければならない。

## ストカスティック性

機械学習が導き出す答えには常に曖昧性が内在する。機械学習は、データをもとに仮説集合の中から学習対象の事象を説明するもっともらしい仮説を選択することを目的とする。現実世界では事象そのものがゆらぎを持ち、そこから得られるデータ自体にも観測誤差が上乘せされる。そのため、解の確かさは確率的にしか保証できない。機械学習を利用する上で、これは大きな不安要素であるが、その処理基盤を考える際にはむしろ好都合である。天文学や物理学のような科学分野における高い計算精度を、機械学習は必要としないのだ。

機械学習の確率的な性質はハードウェア処理基盤において近似計算の形で現れる。たとえば IBM の Agrawal と Lee らが 2021 年 ISSCC と JSSC に発表した AI チップ<sup>3), 4)</sup>では、既存研究の知見に基づき、学習に 8 ビットまたは 16 ビット浮動小数点 (FP8/FP16) を、推論に 2 ビットまたは 4 ビット整数 (INT2/INT4) を選択的に使用する設計となっている。GPU による通常学習で単精度浮動小数点を用いることを考えると、推論と学習に必要な演算器の回路面積とその処理にかかる消費電力を大幅に削減できることが分かる。その計算効率は最大 3.5 TFOPS/W (1 ワットあたりの浮動小数点演算回数) で、0.78 TFLOPS の NVIDIA 社 A100 の 4 倍以上にも上る。

しかし、なぜニューラルネットワークの学習は推論に比べて高い計算精度を必要とし、それ以上サボ

ることができないのだろう。それは学習に用いられる誤差逆伝播が古典的な数値最適化手法であることに起因する。機械学習の確率的性質が数値計算の曖昧さを含むのに対して、学習を実現する数学的な道具はそれを厳密な最適化問題として解いているのである。我々がさらなる高みを目指すには、まず「曖昧な問題」を「正確に解く」というこの矛盾した状況から脱却する必要があるのかもしれない。

## 変貌する「計算の形」

我々の研究チームでは、アルゴリズム的な変化に歩調を合わせ、HNN に基づく AI 推論アクセラレータを開発した。既存ハードウェア処理基盤がネットワークモデル情報を外部メモリアクセスに依存していたのに対して、新たな AI 推論アクセラレータは HNN の特徴を活かし、チップ内部でネットワークモデルを再構築することでその依存度を大幅に軽減したものとなっている。

**図-4** に示すように 4 次元の並列度を利用する 4K 個の演算器を中心に、スーパーマスクと乱数重みを提供するスーパーマスク伸張ユニット (SEU : Supermask Expansion Unit) と重み生成ユニット (WGU : Weight Generation Unit) が上下に配置され、同期して各層のネットワークモデルを構築している。スーパーマスクは外部メモリから ZRL (Zero Run Length) 圧縮で符号化されて ZRL メモリに書き込まれ、SEU がそれをスーパーマスク用のメモリに展開する。HNN が 7, 8 割のスパース率で精度のピークを迎えるため、スーパーマスクの ZRL 圧縮が外部メモリアクセスの軽減に有効に働く。

しかし、まだいくつかの課題は残されている。特に気になるのは、HNN が乱数重みを使用してメモリ要求を大幅に削減できる一方で、より高い推論精度を実現するための効率的な学習手法はいまだ確立されていないことである。HNN の元論文ではチャンネル数を増やすことで、精度が向上できることを



特集  
Special Feature

示しているが、モデル規模を大きくして精度を上げるのでは既存のアプローチに比べてあまり進歩しているようには感じない。

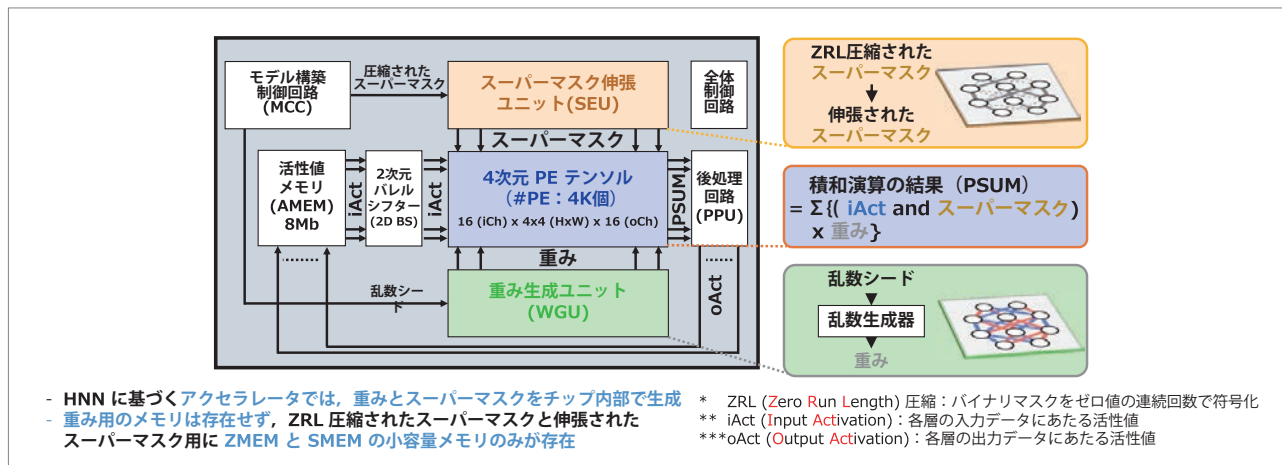
### さらなる革新はアルゴリズムから再び

個人的な意見としては、技術的な突破口はいつもアルゴリズムの研究が先行し、ハードウェア処理基盤の研究がそれを支えることで実現しているように思う。この視点からすると、最初に考えるべきはアルゴリズム的な改良である。ここではさらなる革新を目指し、まずHNNの改良について考えることにする。

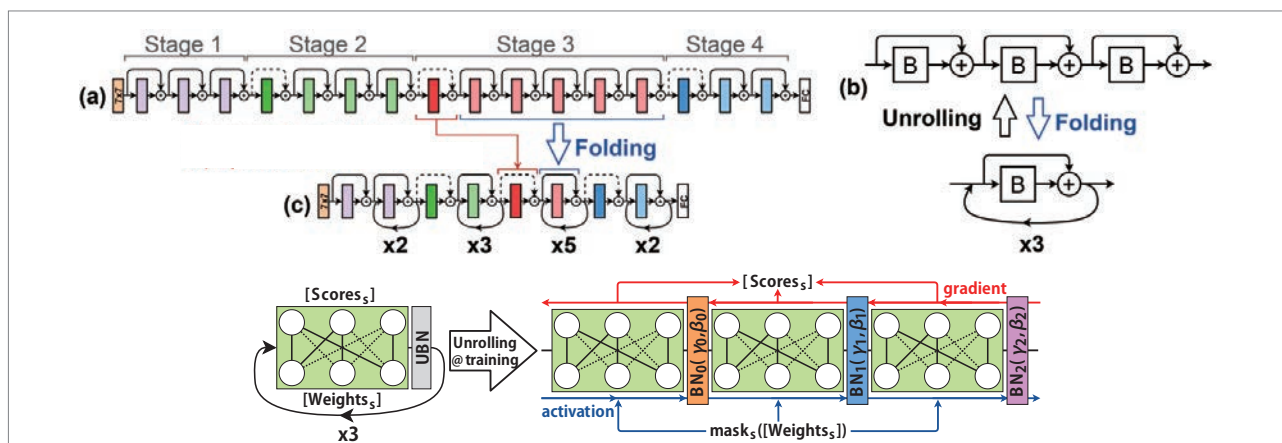
ニューラルネットワーク分野において深層化は表現力を向上させる有効な手段として知られるが、実

は人間の視覚野はたったの4層から6層構造が再帰的に使われていると言われている。もしHNNでもこのような再帰構造が使えるのであれば、そのモデル規模を大幅に軽量化できる可能性が出てくる。この発想は既存研究<sup>5)</sup>において重みを学習する通常のニューラルネットワークに適用され、数%の精度劣化を許容することで、モデル規模を削減できることが知られており、特段に奇抜なアイデアではない。しかし、この後で紹介する、そこからの知見は非常に興味深いものであった。

我々の研究グループではBMVC 2021にて、HNNと再帰構造を融合したHFN (Hidden-Fold Networks) というモデルを提案した<sup>6)</sup>(図-5参照。上段:(a) ResNetの基本構造, (b) 複数の同一ブロックにお



■図-4 HNNに基づきチップ内部でモデルを生成する新たなAI推論アクセラレータ



■図-5 HNNとFoldingを融合した「Hidden-Fold Network」

## 特集

Special Feature

ける Folding と Unrolling の関係, (c) Folding された ResNet の構造. 下段: HNN における学習手法「edge-popup」の HFN 拡張における概要). ResNet<sup>☆3</sup> における同形の残差ブロックを1つに統合し, 再帰的使用するよう変更した上で, HNN と同様に乱数重みの部分ネットワークを抽出したのである. 元の HNN からの変更点は, スーパーマスクを抽出するためのスコア計算を再帰的な回数分累積したところである.

図-6 は HFN におけるモデル規模 (重みの数) と精度のトレードオフを既存 HNN や再帰的なネットワーク (Folding) の結果と比較したものである. 注目してほしいのは, 通常の ResNet に対して HNN も再帰的構造の Folding もその推論精度が劣化しているのに対して, 2つを融合した HFN はなぜかモデル規模を大幅に減らしながらもそれらより高い精度を達成している点である. また同一規模 HFN であっても再帰回数を増やすとその精度が向上することも明らかになった. これらの原因についてはまだ定性的な議論しかできないが, さらなるアルゴリズムの改良を通じて新たなハードウェア処理基盤の可能性が垣間見える.

☆3 Kaiming He らによって提案された残差を用いたニューラルネットワーク. 現在提案されている多くのネットワークが基本構造として採用している.

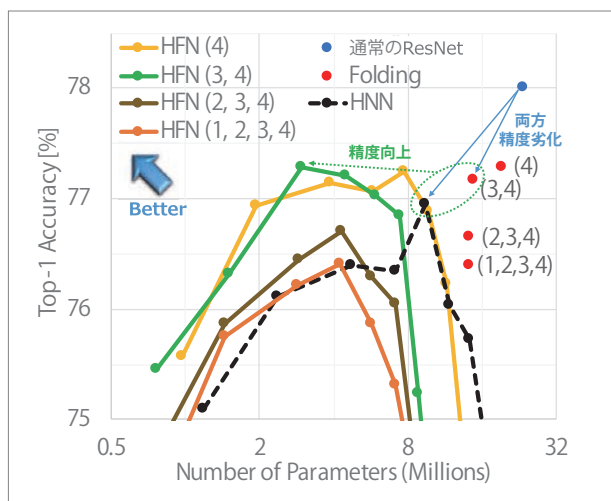


図-6 ImageNet における HFN の推論精度

## ポストノイマン時代の計算の形

本稿では, ニューラルネットワークがもたらしたハードウェア処理基盤への要求を通して変化する「計算の形」について考えてみた. 主に我々の研究チームが行ってきた成果を中心に話を進めたため, かなり偏ったアプローチの話になっていることは否定できないが, ニューラルネットワークにおけるランダム性・スパース性・ストカスティック性の3つの性質を正確に捉え, それをうまく活用することが, 今後のポストノイマン時代を切り拓く鍵となることは皆さんにも共感していただきたく思う.

### 参考文献

- 1) Frankle, J. and Carbin, M. : The Lottery Ticket Hypothesis: Finding Sparse, Trainable Neural Networks, ICML (2019).
- 2) Ramanujan, V. et al. : What's Hidden in a Randomly Weighted Neural Network?, CVPR (2020).
- 3) Agrawal, A. et al. : 9.1 A 7nm 4-Core AI Chip with 25.6TFLOPS Hybrid FP8 Training, 102.4TOPS INT4 Inference and Workload-Aware Throttling, ISSCC (2021).
- 4) Lee, S. K. et al. : A 7-nm Four-Core Mixed-Precision AI Chip With 26.2-TFLOPS Hybrid-FP8 Training, 104.9-TOPS INT4 Inference, and Workload-Aware Throttling, JSSC (2021).
- 5) Liao, Q. and Poggio, T. : Bridging The Gaps Between Residual Learning, Recurrent Neural Networks and Visual Cortex, arXiv (2016).
- 6) López, G.-A. A. et al. : Hidden-Fold Networks : Random Recurrent Residuals Using Sparse Supermasks, BMVC (2022).

(2021年12月6日受付)

劉 載勳 (正会員) yu.jaehoon@artic.iir.titech.ac.jp

京大電気電子工学科 2005 年卒業, 同大情報学研究科 2007 年修了, 阪大情報科学研究科 2013 年博士. 2013 年より阪大情報科学研究科助教を経て, 2019 年より東工大科学技術創成研究院准教授.







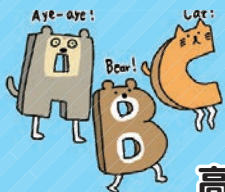
連載

★ Jr.

# 先生、質問です！



提案手法の略称に加えて、自然科学分野におけるネーミングについてもご回答いただきました。



高橋響子

【学生会員】

大学院生

大学院生です。提案手法の略称の決め方が気になります。特にユニークなものは意図して付けたものだったりするんですか（それとも偶然？）？

Q

どんなに良い研究でも、他人に知ってもらえないと届きません。名前や略称は他人に紹介しようとしたときに最初の接点になるので、とても重要です。

では、良い名前とはどういう名前でしょうか。もちろん語呂の良さやググラビリティ（googlability / 検索での探しやすさ）も大切ですが、何よりも「その研究で伝えたいことが端的に表現されていること」が良い名前の必須条件だと思います。

その提案手法の独自性はどいうところにあるのか。アピールポイントは何か。その研究でどういう未来を実現したいのか。名前を考えるとというのは、改めて自分の研究を客観的に俯瞰し、いちばん大事にしたいポイントを明確にしていく作業でもあります。

まずはその研究のキーワードをいくつか書き出してみるから始めてみてください。その上で、単語に優先順位をつけたり、組み合わせたり、部分的に抽出したりしながら、ぴったりの名前を見つけてあげてください。



米澤香子

Wieden + Kennedy  
Tokyo

A

「先生、質問です！」・「先生が質問です!!」への質問・回答募集

▶ Web から質問する：下記の Web ページ内の投稿フォームから質問をご記入ください。

「先生、質問です！」 <https://www.ipsj.or.jp/magazine/sensei-q.html>

「先生が質問です!!」 <https://www.ipsj.or.jp/magazine/senseiga-q.html>



先生、質問です！



先生が質問です!!

▶ 回答募集：情報処理学会 Facebook ページ (@IPSJ.official) Twitter アカウント (@ipsj\_shinsedai)



# A

地球上では膨大な種数の生物が暮らし、我々人間（ヒト）もその一種にすぎません。文明の発展とともにヒトは周りにいるさまざまな生物を認識し、それらに『名前』を与えてきました。近代に入ると、西洋の博物学者が書物の中であらゆる生物種に対して世界共通の学術的な生物種名、いわゆる『学名』を命名するようになりました。現在はスウェーデンの博物学者カール・フォン・リンネ（Carl von Linné）が1750年代に体系立てた2語のラテン語（例：ヒトは *Homo sapiens*）で種の学名を示す手法が採用されています。新種が発見されるとニュースなどで話題になることがあります。この『新種の見つけ』とは、これまで学名が与えられていなかった生物種に対して学名が命名されたことを意味します。言い換えると、これまで誰も目にしたことのない生物種が発見されても、学名が命名されない限りその種は『名無しの権兵衛』というわけです。

一部の例外を除き、学名は何かしらの意味を伴って名付けられます。ヒト *Homo sapiens* は『（物事を）理解する人間』という“性質”にちなんだ意味を、旧人類ネアンデルタール人 *Homo neanderthalensis* は『ネアンデルタルの人間』という“発見地”にちなんだ意味をそれぞれ持ちます。近年アメリカ人研究者らが東北地方で発見し、新種として発表した魚類に *Ammodytes heian* という種がありますが、“heian”は地震によって甚大な被害を受けた東北地方の平和を願ったものとなっており、学名には命名者の色々な想いが詰まっていると考えさせられました。

一方、とても大変なのが学名を考える（＝作る）過程です。特に昆虫や魚類など種数が多い分類群では、命名しようとする新種と似たような特性を持つ既知種（＝すでに学名が与えられている種）がたくさん存在しています。このようなときは、同じ意味を持つ別のラテン語単語を搜したり、他言語の単語を翻訳ではなく強引にラテン語化したりします。ラテン語化の例として、先の“heian”は英語の“peace”を日本語の“平安”へと翻訳し、“heian”としてラテン語化したものです。古い時代には、アナグラムといって同じ単語のアルファベット配列を入れ替える裏技が流行ったこともあるようです。ほかにも、人の名前を学名に用いる『献名』という方法があり、研究でお世話になった人、尊敬する人、家族、好きな俳優など、さまざまな人の名前が生物の学名に用いられています。

一度命名された生物種の学名は基本的に未来永劫残ります。植物種イチヨウ *Ginkgo biloba* の学名も先のリンネが1771年に命名したものです。この大きさゆえ、新種の学名の命名は多くの人々の憧れとなっていますが、不適切・不適當な命名行為は時に混乱をもたらし、倫理的に受け入れがたい状況を引き起こす可能性もあります。そこで制定されたのが『命名規約』と呼ばれる国際ルールで、学名の命名法に関するありとあらゆるルールが、生物群ごとに定められた命名規約で示されています。これはつまり、学名は命名規約に則ってさえいけば、命名者の自由で名付けることが可能ということの意味です。よく聞かれる質問として「命名者自身の名前を付けられるのか？」がありますが、答えとしては『可能』です。ただし、そのような事例はほぼ皆無です。

我々日本人にとって、異言語のアルファベットで示される学名は少々受け入れにくいものです。しかし、学名には数百年以上の歴史と命名者の想いが存在しています。辞書を片手に学名の語源（etymology）を調べることで、“ネーミング”にまつわる見識を広げることができるかもしれません。



**田城文人**  
北海道大学総合博物館

提案手法の略称の決め方についてのご質問ですが、ここでは研究成果となる手法やシステムのネーミングの仕方についてご紹介します。

我々の研究室では、研究で提案する手法や概念、開発するシステムの名前には、主にアルファベット表記を使っています。ネーミング（名前づけ）をする際には、大きく2つのアプローチを採っています。

1つは、研究のコアなアイデアが現れるような英単語で構成されるフレーズを作って、その頭文字を組み合わせることでアクロニム（頭字語）として名前を作る方法です。まず、その研究にかかわるようなワードやフレーズを、20個から30個、1行に1単語ずつ、名詞、動詞ばらばらに書き並べてみます。列挙された単語列を眺めながら、これとこれの組み合わせでフレーズを作れば各単語の頭文字はこういう並びになる、といったパズルのようなことをしていきます。かっこいいフレーズを先に作ってアクロニムを生成し、そのフレーズの前後に英単語を足すことで、発音しやすい長めの文字列を考えたりもします。候補となりそうな文字列がいくつかできあがってきたら、それぞれ、ネガティブだったり不適切な意味（たとえばスラング）を持たないことを辞書で確かめます。同時に、その文字列をWebで検索してみて、その名前を持つ類似のシステムや研究、社会的にネガティブなことがらと関連するものでないことも確かめます。

また、その文字列をどのように読むかについても考えて決めます。ALEという文字列を、「エーエール」とアルファベットそのままでもよいし「エール」と英単語で発音してもよいのですが、一貫して同じように呼び続けるところがポイントです。

もう1つのネーミングの方法は、この名前をつけたい、という強い思い入れのある名称（たとえば研究の鍵になるコンセプトや、研究者が大好きなキャラクタの名前）が先にある場合です。その名前をアルファベットで書いてみて、それがうまくアクロニムとなるような、研究のコアなアイデアを表すような英語のフレーズを作り出していきます。この際にも、その研究にかかわるようなワードやフレーズを書き並べてみる人が多いです。

このほかにも、研究のコアなコンセプトに名前をつけて、そのコンセプトを踏襲する複数のシステムにそれぞれ「コンセプト名+番号」でネーミングしたり、提案する原則を用いて異なるアプリケーション領域で展開するモデルに、「コンセプト名+領域名」でネーミングしたりする場合があります。

研究の知は、研究コミュニティで論文を介して積み上げられていくものです。論文は半永久的に残ります。研究成果を論文で発表したあと、ほかの研究者がその成果を語る（引用したり言及したりする）際にも、また自分自身で研究を積み上げていく際にも、その成果を構成する手法名やシステム名を使うことがしばしばあります。研究で提案する手法や開発したシステムには、覚えやすい、呼びやすい、そして何よりも、自分で言及したり、人に呼ばれて嬉しくなるような名前をつけておくことは、とても重要だと考えます。『名前と人間』（田中克彦著、岩波新書）によれば、名付けはあやかりでもあります。識別子としての名前という役割以上に、その研究成果にこめられた思いや展望をその名前に託せるような、そんなネーミングのデザインを心がけています。

# A

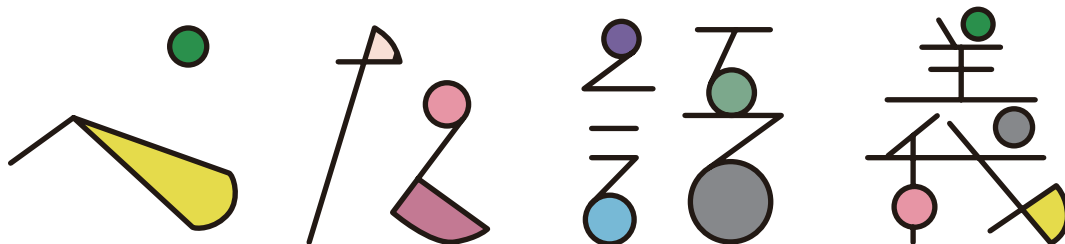


**中小路久美代**

【正会員】

公立はこだて未来大学





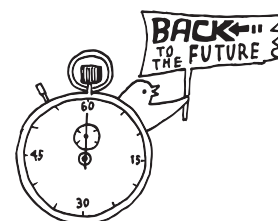
Vol.126

## CONTENTS

- 【コラム】高校時代に学んだプログラミング…坂東 宏和  
 【解説】大学における新型コロナウイルス感染症発生状況提供サイト…井上 仁  
 【解説】大学の情報環境を支えるユーザサポートの今とこれから…近堂 徹

## COLUMN

### 高校時代に学んだプログラミング



約30年前、私は比較的新しい高校の情報技術科でFortran77<sup>☆1</sup>を用いてプログラミングを学んでいました。しかし、大学に進学してからは主にC言語を利用することになり、結局卒業後にFortran77を利用したことは一度もありません。高校時代に学んだことは無駄だったのか？ 大学入学後にC言語を使い始め、社会ではFortran77があまり使われていないことを知ったときにそう感じたこともありました。でも実際には、高校時代に学んだプログラミングの基礎は、プログラミング言語が変わっても共通で無駄になることはなく、今でもそのときの学びが役立っています。

社会ですぐに役立つ実践力を身につけるという意味では、さまざまな分野で広く活用されているプログラミング言語を学ぶのが早いのかもかもしれません。しかし、自身の経験から考えると、大部分のプログラミング言語の基本的な考え方は共通ですので、最初は実用的かということあまり考えずに、グラフィックや音声等を容易に扱うことができ、分かりやすいプログラミング言語で学び始めた方が、興味を持ちやすく楽しく学ぶことができるので良いように感じています。

ところで、高校を卒業してから30年近く経過していますので、具体的にどのような授業であったのかはほとんど忘れてしまいましたが、今でも記憶に残っている授業がいくつかあります。その1つがクイックソート<sup>☆2</sup>です。クイックソートのアルゴリズムに感動して……という理由ではありません。先生が「新しいアルゴリズムを勉強したので……、間違っていたら申し訳ないけど」と話しながら説明されたのを聞いて「先生も日々新しいことを勉強してるんだなあ。自分も頑張らない」と感じたことが印象に残っています。今、本会学会誌の編集委員として、連載「情報の授業をしよう！」の記事を毎月読んでいます。これらの記事には、入学してくる学生が高校まででどのようなことを習ってきているのかを確認できるだけでなく、大学の初年次教育でも活かせるような授業のアイデアが詰まっています。先生方の教育に対する熱意や努力も感じられ、高校のクイックソートの授業のときに感じたことを改めて思い出しました。

さて、本誌では、連載「情報の授業をしよう！」の著者を募集しています。自薦・他薦どちらでもOKです。「教え方の工夫を紹介したい」「あの先生の授業をぜひ紹介したい」と思われた初等中等教育の先生がおられましたら、著者名・御所属・授業内容の概要を本会事務局「editj@ipsj.or.jp」までお送りください。皆様の積極的なご応募をお待ちしております。

☆1 主に数値計算に適したプログラミング言語。

☆2 データを大きい順・小さい順等、ある順番に基づいて並べかえる方法の一種。詳細はIPSJ MOOCを参照。IPSJ MOOC、第3章ストーリー2 アルゴリズム、4-1. 基本的なソートクイックソート、<https://sites.google.com/a/ipsj.or.jp/mooc/list/C3-2> (2021年11月29日参照)。



坂東宏和 (獨協医科大学) (正会員) bandoh@fw.ipsj.or.jp

2014年より獨協医科大学情報基盤センター講師。本会論文誌教育とコンピュータ (TCE) 編集委員会編集幹事、会誌編集委員会専門委員会 (EWG) 幹事。2020年度学会活動貢献賞受賞。シニア会員。

LOGOTYPE DESIGN...Megumi Nakata, ILLUSTRATION&PAGE LAYOUT DESIGN...Miyu Kuno

# 大学における新型コロナウイルス感染症 発生状況提供サイト

井上 仁

群馬大学

2020年から猛威をふるった新型コロナウイルス感染症(以下「COVID-19」)は、本稿執筆の時点では第5波が収束し落ち着いたように思われるものの、新たな変異種が出現し今後の感染拡大が懸念されている状況である。

COVID-19に関して、筆者は「2020年7月からの大学における新型コロナウイルス感染症陽性者状況」というWebサイト(ブログ)<sup>☆1</sup>を公開している。本稿では、サイトの概要について紹介する。

## サイト構築の動機

COVID-19の感染状況は、自治体ごとに、年代、性別、職業、ほかの陽性者との関連等の正確な情報が日々公表されており、今後の感染対策の情報として重要な役割を果たしている。

大学関係者の感染は2020年2月頃から大学公式Webサイトやマスメディアで公表されるようになり時折目にしていたが、2020年7月くらいから目立つようになってきた。しかしながら、大学における感染状況は、個々の大学公表の情報はあるものの自治体のようにまとまっていない。そこで、一覧にしておいたほうがよいのではないかと考え、「(2020年)7月からの大学における新型コロナウイルス感染症陽性者状況」というWebサイト(ブログ)を構築し公開した。

当時は、大学で陽性者が判明すると誹謗中傷を受け非難される傾向にあった。しかしながら、国内全体での感染の拡大に伴い大学関係者の感染も避けることができなくなってきていた。公表している大学を非難するのではなく、感染はもはや特別なことではない

☆1 <http://blog.jin-lab.jp/2020/07/covid19.html>

ことを示したい、公表している大学があるので他大学でも積極的に公表してほしいという思いもあった。

個人のブログであり、すべての情報を収集することは困難であることから、情報は正確であるものの完全である必要はないと当初考えた。しかしながら、大学の対応や方針に関するさまざまな意見が聞かれるようになってくるうちに考えが変わってきた。たとえば、大学での感染は多いという意見もあれば少ないという意見もある。また、学生を守るためには対面授業ではなく全面的にオンライン授業に移行すべきであるという主張に対して、大学生だけが不自由を強いられるのはおかしいという対立した主張もあった。これらの議論の際に、大学における感染状況を正確に把握して意見が述べられていることが少ないと感じられた。そこで、大学が公開している情報を可能な範囲で収集し、議論のためのデータを提示できればと考えるに至った。

## 掲載している情報

本サイトでは、大学の公式Webサイトに公表されている情報を元に各種データを提供している。サイト開設当初は、公表日、大学名、URLのみを掲載していたが、感染の拡大に伴い、グラフを中心にさまざまな情報を追加して掲載している<sup>1)</sup>。

### □ 大学陽性者数、国内陽性者数

主なグラフは、[図-1](#)の大学陽性者数と国内陽性者数(累計)と、[図-2](#)の大学陽性者数と国内陽性者数(7日間平均)である。

国内陽性者数との比較のために、同じグラフに国



内の状況も表示している。学校基本調査<sup>2)</sup>によると、大学・短期大学の学生数が300万人強、専任教職員数が数10万人であること、国内人口が1億2,000万人強であることから、グラフの左縦軸を大学陽性者数、右縦軸を国内陽性者数として、目盛の比を1:40としている。国内陽性者数はNHKの「新型コロナ データ一覧」<sup>3)</sup>を参照している。なお2020年7月を比較の起点とするために、国内陽性者数は実際の数から2020年6月までの分を減じている。

2021年7月から陽性者数が急増しているため、ほかの期間の大学陽性者数と国内陽性者数との差が分かりづらい。そこで、国内陽性者数に対する大学陽性者数の割合を示した図-3のグラフを提供している。授業期間と休業期間とで明白な差がある。このことから、授業による活動と陽性者数は関連性があると考えられるが、これに関しては議論の余地がある。

図-1から図-3のグラフは、都道府県によって状況が異なるので、陽性者数の多い東京都、大阪府、愛知県、京都府、福岡県、北海道、兵庫県については、

都道府県別のものも提供している。

ほかに、都道府県別・大学構成員数と陽性者数の割合(図-4)、大学陽性者数、学生数(都道府県別)(図-5)、授業実施状況ごとの学生数と陽性者数の散布図(図-6)、発生場所別のクラスターの状況等を掲載している。

## 大学 Web サイトで提供される情報

2021年11月末現在で719の大学・短期大学の情報

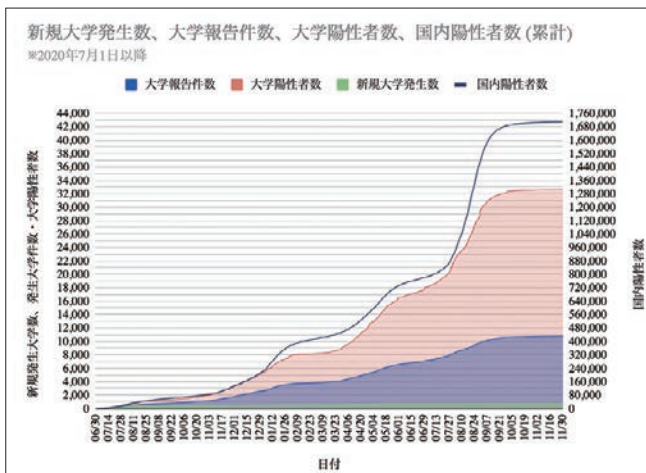


図-1 大学陽性者数、国内陽性者数(累計)

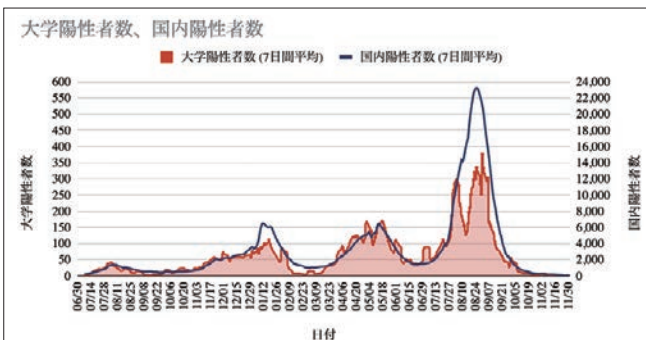


図-2 大学陽性者数、国内陽性者数(7日間平均)

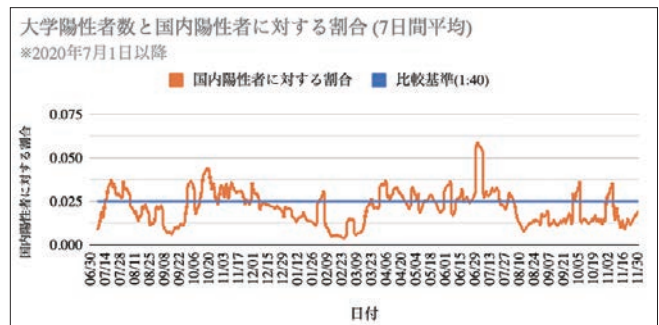


図-3 大学陽性者数と国内陽性者数に対する割合(7日間平均)

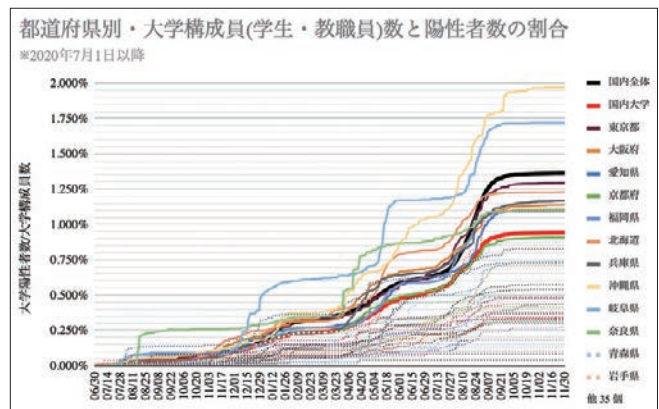


図-4 都道府県別・大学構成員数と陽性者数の割合

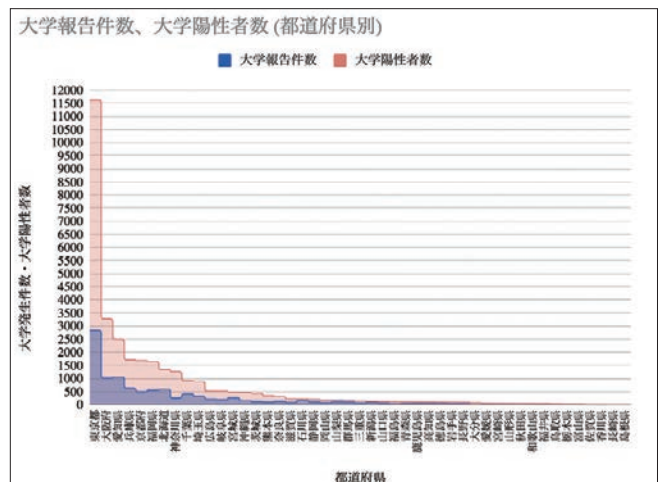


図-5 大学陽性者数、学生数(都道府県別)



を入手しているが、掲載されている情報は大学によって差がある。そのため、本サイトに掲載しているデータは、陽性判明日あるいは公表日（月単位にまとめて公表される場合は月末、数カ月分の場合は、全体の月ごとの人数比で按分）、人数のみとしている（人数さえも公表されていない場合は1名としている）。

## □ 大学による提供情報の差

公表している情報が陽性者の確認というだけの大学がある一方で、年代、性別、感染経路、学内入構の有無、学内関係者の濃厚接触の有無と人数、濃厚接触者の感染状況等の詳細を記載している大学もある。また、学内への入構や濃厚接触の有無の判断基準は大学によって異なる。

## □ 情報の持続性

Webサイトに掲載された情報は永久に参照できるわけではなく、大学により方針が異なる。

- (a) 異なる URL で情報を提供
- (b) 同じ URL で情報を追加して提供
- (c) 同じ URL で情報を更新して提供
- (d) (a) から (c) の形態で一定期間後公開停止

(a) と (b) は情報が持続して提供されるので、本サイトに掲載していない詳細情報を後日参照することができる。(c) や (d) の場合、更新が頻繁に発生すると情報を入手しそこなう恐れがある。また詳細情報

を後日参照することができなくなる。

## □ 情報の正確さ

大学における感染状況の把握の多くは、当事者からの自己申告による。そのため、保健所での把握数と大学での把握数に差がある可能性がある。ここでは、大学での把握数と本サイトでの把握数の差について述べる。両者を含めて次の4段階がある。

- (a) 大学での把握数
- (b) 文部科学省での把握数
- (c) 大学 Web サイトへの公表数
- (d) 本サイトでの把握数

文部科学省から大学に対しては、陽性者数を報告するように指示があることから、(a) と (b) は一致していると考えられる。(a) と (c) との差に関しては、大学によってはまったく公表していないところもある。また事前に設定した基準を満たす場合だけ公表すると明言している大学もある。(c) と (d) の差は当然あり得ることであり、実際、数カ月経過後に把握し遡及入力する場合がある。

(b) と (d) との差を調べるために、文部科学省が把握しているデータと比較した。Facebook のグループ「新型コロナのインパクトを受け、大学教員は何をすべきか、何をしたいかについて知恵と情報を共有するグループ」の発起人である関西学院大学・岡本仁宏教授が文部科学省に対して行政文書の開示請求された情報には、2020年3月から同年12月中旬までの状況が週単位でまとめられている。

図-7は、文部科学省で集計分と本サイトでの収集分を比較したグラフである。文部科学省の集計日の設定と本サイトで陽性確定日に差があるため、本サイトでの陽性者数が文部科学省の集計数を上回ることもあるが、おおむね文部科学省の集計に近く、約9割の情報が収集できていることが分かった。

残りの約1割は、(b) と (c) との差、あるいは (c) と (d) との差であるが、いずれにせよ、ほとんどの大学が Web サイトに公表しており、また本サイトによる収集もほとんど漏れがないと考えられる。

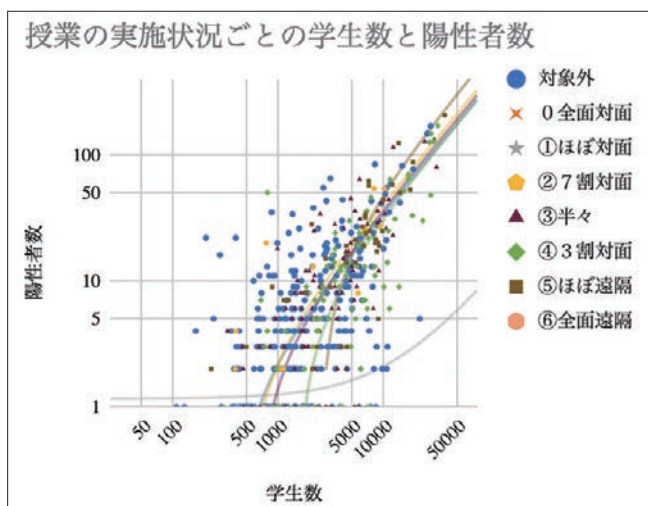


図-6 授業実施状況ごとの学生数と陽性者数の散布図



## サイトの構築

本サイトの当初の目的は大学での状況を一覧にするということであった。そのため、Google 検索や SNS 等で入手した情報を大学の Web サイトで確認し記録するというきわめて原始的な方法をとっている。感染の急増により、若干の自動化を試みているが、手動に頼っているところが多い。

### □ 情報の収集

Google 検索 (Google API) でキーワードを「コロナ 発生」として、検索の対象を「ac.jp」、期間を 24 時間として毎日検索している。Google 検索では見つからないサイトもあるため「Web alert<sup>☆2</sup>」というアプリケーションプログラムにより、あらかじめ登録した URL の更新を定期的に確認している。この 2 つの方法以外に、大学の陽性者の状況を定期的に Twitter で発信してくれるアカウントから情報を入手して補足するようにしている。

### □ 情報の抽出

収集した大学のサイトから、陽性者の状況が記載されているかどうかを目視で判断している。多くの場合、検索時の概要で判別できるが、実際にサイトを訪問する必要がある。また、本サイトでは情報を提供していないが、感染経路、学生・教職員の種別、学内入構の有無、学内関係者との接触の有無等の記載がある

☆2 <https://apps.apple.com/jp/app/web-alert/id1346597571?mt=12>

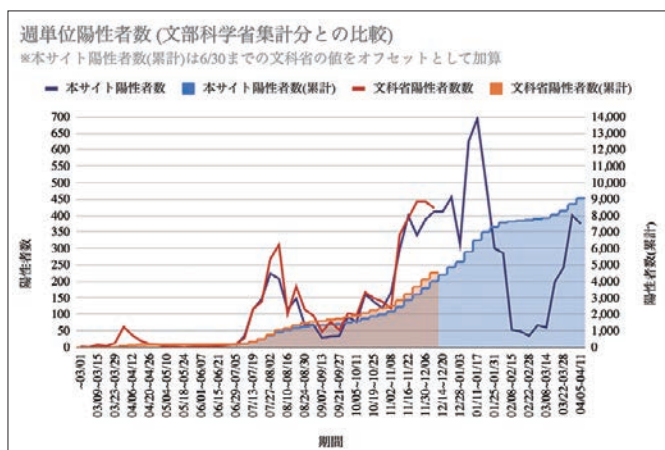


図-7 文部科学省集計との比較

場合には内部データとして記録しているため、これらの確認は人間の判断とならざるを得ない。

### □ 情報の保存(アーカイブ)

情報の持続性で記載したように、Web サイトが継続して参照できない場合がある。そのため、定期的なクロールと情報のアーカイブが必要となる。アーカイブは一般に公開されているアーカイブサイト<sup>☆3</sup>を利用している。

### □ 本サイトの今後

COVID-19 は当面継続すると予想される。そのため正確な状況把握は今後も必要であると考えられる。

望むべきは、各大学から文部科学省に報告されている情報を文部科学省が一元的に整理して提供してくれることである。また、大学からの報告の書式の統一と情報の集約を組織的に運用することである。とはいえ、残念ながら現時点ではどちらも期待できるとはいえない。

幸いなことに、本稿の読者には、情報の収集・抽出・分析・保存の自動化を得意とする方が多いため、COVID-19 のような今後も発生すると思われる状況への即応を期待する。

なお、COVID-19 が終息し本サイトが不要になることが最大の望みである。

### 参考文献

- 1) 井上 仁: 大学における新型コロナウイルス感染症発生状況提供サイトの構築, 医療情報学 41(Suppl.), 1130-1135 (2021年11月).
- 2) e-Stat 政府統計の総合窓口・学校基本調査: <https://www.e-stat.go.jp/statistics/00400001> (2021年11月30日参照).
- 3) NHK・新型コロナ データ一覧: <https://www3.nhk.or.jp/news/special/coronavirus/data-widget/> (2021年11月30日参照). (2021年12月6日受付)

☆3 <https://web.archive.org/>



井上 仁 (正会員) hitoshi.j.inoue@gunma-u.ac.jp

情報通信技術を利用した教育学習環境の運用と研究に従事。現在群馬大学・数理データ科学教育研究センター准教授。教育システム情報学会、日本教育工学会、人工知能学会、日本医療情報学会、日本医学教育学会、学習分析学会、イグ研会員。



# 大学の情報環境を支える ユーザサポートの今とこれから

近堂 徹

広島大学

みなさんは大学や職場でパソコンやネットワークのトラブル・障害に直面したとき、どのような対応をされているでしょうか？

大学や企業など社会活動においてICT（情報通信技術）は必要不可欠なものとなりました。特に、2020年初頭から発生した新型コロナウイルス感染症以降、多くの大学でオンラインによる教育研究や業務活動を余儀なくされ、企業でもテレワークが急速に広がりました。ZoomやMicrosoft Teams, WebExといったWeb会議ツール・オンラインコラボレーションツールが爆発的に普及し、それらを活用した新たな教育研究、業務の進め方について多くの取り組みが今も行われています。今後は、ハイブリッド・ハイフレックス授業など、物理的なキャンパスの枠に縛られることなく持続的かつ多様な教育研究環境が必要とされることは想像にかたくありません。

このようにICTの利活用が必須となった今、特に重要性を増しているのが組織におけるユーザサポートです。ICTサポート、ヘルプデスクサポートなどとも呼ばれますが、一般的には「組織が提供するネットワークや情報システム・サービスなど情報環境に関するエンドユーザからの問合せを受け付け、技術的なサポートを行いながら解決に導く仕組み」を指します。大学であれば、規模の大小はあるものの、全学の共同利用施設として情報系センターや情報部門がその役割を担っています。

ここでは、筆者が所属する広島大学情報メディア教育研究センターにおけるICTサポート部門の役割と

コロナ禍における取り組みについて紹介するとともに、先進的な事例を紹介しながら、大学の情報環境を支えるICTサポートのこれからについて考えます。

## 大学の情報環境とユーザサポート

広島大学情報メディア教育研究センター（以下、メディアセンター<sup>1)</sup>）では、キャンパスネットワーク（キャンパス内のインターネット接続、Wi-Fi環境、実験ネットワーク）、全学構成員が利用する電子メールサービスやストレージサービス、Microsoft 365やGoogle Workspaceなどのオンラインコラボレーションツール、キャンパス内に設置する教育用情報端末、学習支援システムなど、さまざまな教育研究にかかわる情報サービスの企画・設計・導入・運用を担当しています。これらのサービスを利用するためのユーザIDの発行や管理業務も行います。また、学部新入生の必携パソコン<sup>2)</sup>を利活用するための初期講習会や利用相談なども受け付けています。情報基盤整備から運用、セキュリティ、利用相談まで、ICTを活用した教育研究を支えるためのさまざまな活動をしています。メディアセンターでは、システム利用者である構成員（主に教職員や学生）へのサポートは、センター内のユーザサービス部門が一時窓口として対応しています。

ICTサポートにおいて構成員との接点となるサポートチャンネルの概要を図-1、対応方法の比率を図-2に示します。一般的には、メールやWebフォームからの問合せ、教職員の方は内線電話等での問合



せが多くを占めます。そして、事務室や図書館内に設置しているサービスデスク(対面カウンタ)での相談では、実際にパソコンやスマホを持ち込んで相談をお受けする場合も多くあります。サポートチャンネルは、どれか1つに固定するわけではなく、構成員が状況に応じて選択できるように複数のチャンネルを用意しておく必要があります。このようなサポート体制は本学に限らず、多くの大学や企業で一般的に行われている形といえます。

一方で、大学におけるICTサポートの特徴の1つに多様性があります。キャンパスには年齢、性別、

国籍問わず多様な利用者が存在するため、さまざまな配慮も必要になります。最近では持ち込みパソコン(BYOD)を活用した授業も多く、OSの言語設定やキー配列、インストールされているソフトウェアなど、端末環境や使い方もさまざまな中で問題を特定していく必要があります。想像以上に多くの時間を要することもあります。

ここで一例として、メディアセンターにおける2020年4月から2021年10月までの問合せ数の推移を図-3に示します。

問合せ内容は時期によって一定の傾向があります。

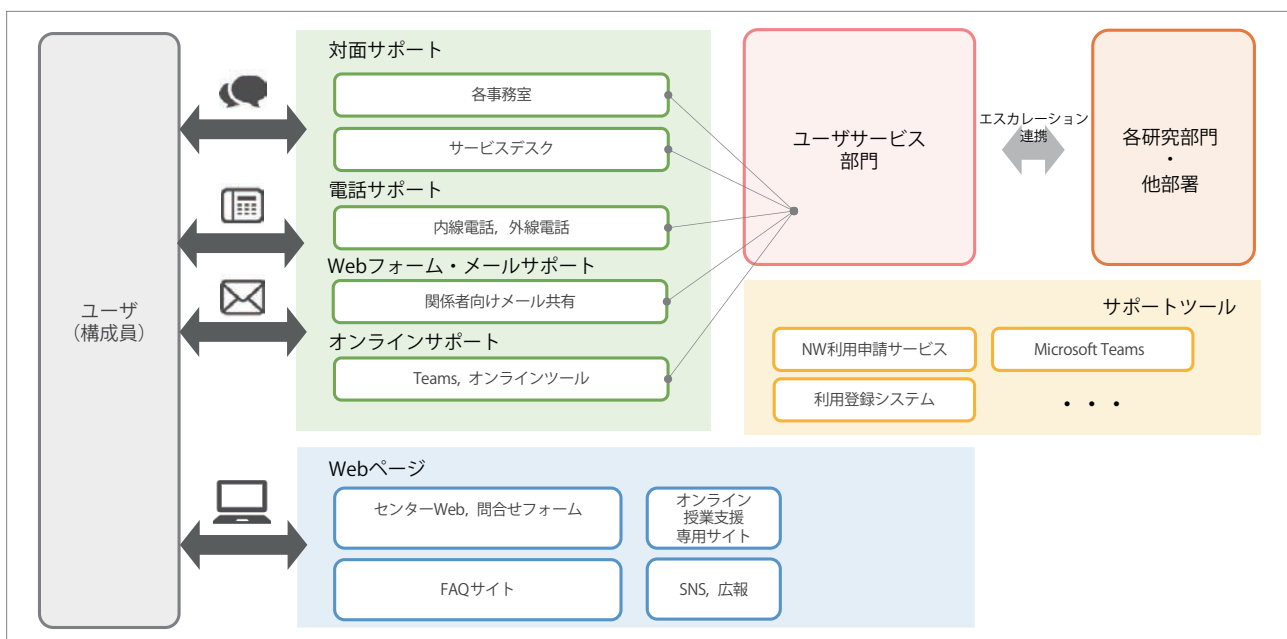


図-1 サポートチャンネルの概要

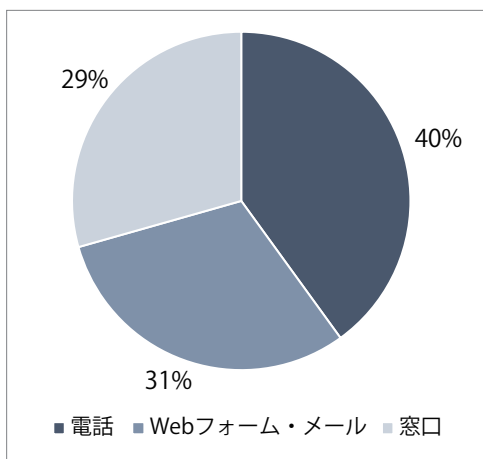


図-2 問合せ方法の比率(2021年度)

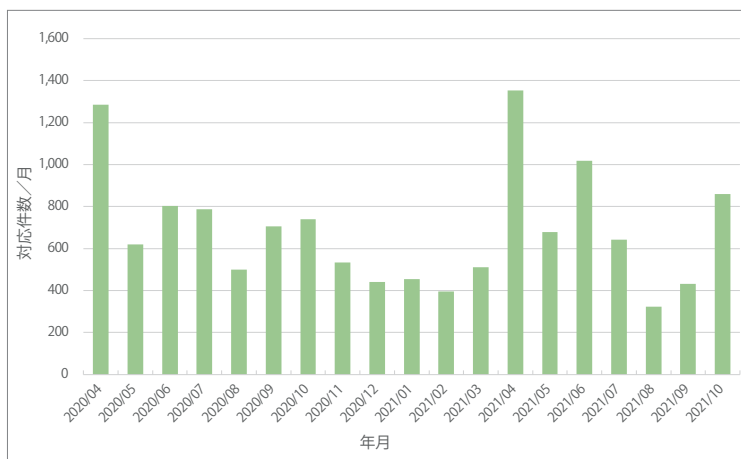


図-3 問合せ件数の推移



たとえば、4月には新入生に対するアカウント発行やパソコン初期セットアップ、システムへのログイン方法に関する初心者向けの問合せが多く、授業期末になると学習支援システムの問合せが増えます。9～10月は後期入学の留学生の方からの質問が増え、2～3月は進学および卒業に伴うアカウントやデータ取り出しに関する問合せが増える傾向があります。

もちろん、システム障害発生時の問合せ(〇〇が使えない、など)が突発的に集中することもあります。システム障害時には迅速な障害把握と広報等が必要になりますが、近年はクラウドサービスの利用が進み、障害発生時の影響範囲が観測しにくい状況になっています。具体的には、組織内の特定の利用者の方のみに事象が発生しサポート部門で再現できないケースもあり、利用者からの指摘で情報を収集、サービス提供元とやりとりをしながら対応をする必要があるなど、サポートコストが上がっている現状があります。

## 新型コロナウイルス感染症による業務の変化

2020年初旬より発生した新型コロナウイルス感染症の影響により、多くの組織でICTサポートを取り巻く状況は一変しました。特に、2020年3月から5月にかけて、多くの組織で大幅な活動制限が求められ、大学ではオンライン授業への移行が必要となりました。学習支援システムの増強やWeb会議ツールなどの利用方針策定や環境整備と並行して、ICTツール利用支援体制(教員の利用支援、学生の利用支援)も広く求められるようになりました。

一方で、このような組織全体で大きな変更を伴うことによる利用支援がこれまでなかったかというところではありません。たとえばシステム更新や新規サービスの導入の際には、全構成員に対して、日本語・英語のマニュアル提供や講習会、利用者支援などに関する総力的な利用相談が必要となる場合があ

ります。しかしながら、今回の新型コロナウイルス感染症での対応で大きく違うのは、サポートする側の体制も大きな変更を求められたことでした。

メディアセンターでは、大学の行動指針(レベル)に合わせてサポート体制についても変更する運用としました(表-1)。ユーザサポート窓口(スタッフ勤務場所)を分割したり、テレワークでもサポート業務に従事できる形にしたりするなど、これまで電話や対面での対応していた部分の多くをオンラインで実施する体制に移行しました。また、学生に対しては、来学できず自宅などで遠隔授業(オンライン授業)を受講するにあたって、パソコンやネットワークに関して分からないこと・困ったことを相談できる窓口を設けることも必要でした。学生同士でのコミュニケーションがとれない中で、学生スタッフによるオンライン授業の受講サポートを開始し、チャットや映像・音声を用いた遠隔相談窓口を設置しました。

新型コロナウイルス感染症の影響により、質問数は爆発的に増え、また質問のバリエーションも広がりました。これまでは「大学が提供する情報環境に関する質問」が主だったところに対して「大学生活の中で接するさまざまなICTに関する質問・相談」へのシフトしていった感があります。これは、センターのサポート部門の認知度が上がったのも1つの要因であり、困ったら「ICTヘルプデスクに相談しよう」という意識付けができたことによるものかもしれません。

このようなコロナ禍でのサポート業務の経験を経て、課題も見えてきました。

1つ目は「ナレッジの蓄積と共有・活用」です。これまでユーザサポートの現場では問合せ対応記録を可能な限り蓄積し、同様の質問がきたときに活用するなどの対応は行ってきました。しかしながら、ナレッジとして継続的に活用していくためにはサポートツールの利便性を高めたり、定期的な見直しを行ったりしないと陳腐化は避けられません。日々寄せられるさまざまな質問の傾向を適切に把握し、ユーザが求める回答を提示していく必要があります。



す。先述の通り、質問には季節性があるため、必要な時に必要なナレッジを分かりやすく提示することや、自己解決を促すためのナレッジへの導線設計が大切になります。一方で、Microsoft 365 や Google Workspace などのパブリッククラウドサービスの活用においては、大学に閉じたナレッジではなく大学間で連携した共有の仕組みを作ることで、サポートコストを減らしていくための努力が求められるようになってくるでしょう。

2つ目は「オンラインコミュニケーションの重要性」です。ユーザサポートでは、聞かれたことに対して答えることはもちろんですが、そこからさらに深掘りをしてユーザが何を実現したいのかを考えていくことが必要です。オンラインでのユーザサポートでは、さまざまなツールを活用することでそれなりのサポートを行うことができるようになりましたが、一方で、利用者にとっては遠隔での支援に関するハードルがまだ高い状況にあることも明確になりました。対面では機器を見ながら状況を確認できていたところが、遠隔で困っている状況を適切に聞き

出し解決に導くためには多くの時間を要します。サポートする側とされる側が継続した関係性を保つためには、オンラインコミュニケーション方法の改善を常に考えていかねばなりません。近年では、対話型のチャットボットやヘルプセンターツールなど、個々の問合せに適した情報をセルフサービスで提供できるようになってきました。初めから有人での対応ではなく、自己解決のための環境をしっかりと整備し、疑問や質問をいつでも解消できるようにしておくことが必要になります。

3つ目は「サポートを受ける側の意識を育てる」です。オンラインシフトが進んだことにより、さまざまな立場の人がユーザ対応を必要とするようになりました。必ずしも ICT に慣れた利用者ばかりではない中で、デジタルリテラシーを向上させるためには、質問へのサポートを通じて自らの環境に興味を持ってもらい、事前に問題を切り分けられる能力を養うことで、ICT サポートだけに頼るのではなくセルフサービスで自己解決率を上げていくための仕掛け作りも必要になります。

表-1 コロナ禍におけるサポート体制

レベル	窓口運用業務	端末室・セミナー室運用・センター関連サービスの予約	スタッフ体制
0 (通常)	通常通り		
1 / 1.5 (要注意) (一部の活動制限)	<ul style="list-style-type: none"> <li>感染拡大防止対策の上、窓口業務を継続</li> <li>メール、電話での問合せを積極的に周知</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>教職員のみ新規予約を受付（学生は停止）</li> <li>既存予約は継続して利用可</li> <li>オープン利用は席数を間引いて利用可とし、入室および退室を記録する</li> <li>利用時は感染拡大防止対策を周知する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>感染拡大防止に最大限留意して、通常通りの勤務とする</li> <li>時差出勤・テレワークを積極的に活用</li> </ul>
2 (要警戒) (中程度の活動制限)	<ul style="list-style-type: none"> <li>サービスデスクの休止</li> <li>事務室は感染拡大防止対策（対応場所を分離、入退室記録の取得等）の上、窓口業務を継続</li> <li>建物は短縮開館</li> <li>メール、電話での問合せを積極的に周知</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>教職員のみ新規予約を受付（学生は停止）</li> <li>授業利用・学内関係者のみでの利用可</li> <li>オープン利用は席数を間引いて時間短縮で利用可とし、入室および退室を記録する</li> <li>利用時は感染拡大防止対策を周知する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>スプリットチームにより、対応場所を分割</li> <li>一部テレワークに移行</li> <li>学生スタッフはテレワークもしくは事務室でオンラインサポート対応</li> </ul>
3 (高度警戒) (大幅な活動制限)	<ul style="list-style-type: none"> <li>一部事務室・サービスデスクの休止</li> <li>事前予約でのみ対面でのユーザ対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新規予約を停止</li> <li>既存予約の利用を停止</li> <li>オープン利用の停止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>職員の半数をテレワーク</li> <li>学生スタッフはテレワークにてオンラインサポート対応</li> </ul>
4 (緊急事態の恐れ) (ほとんどの活動を制限)	<ul style="list-style-type: none"> <li>すべての事務室での対面でのユーザ対応を休止</li> <li>問合せフォーム、オンラインサポートのみを実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新規予約を停止</li> <li>既存予約の利用を停止</li> <li>オープン利用の停止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>テレワークで実施</li> <li>状況に応じて電話対応の必要最低限の人員のみが出動</li> </ul>
5 (緊急事態) (必要最小限の活動)	<ul style="list-style-type: none"> <li>すべての事務室でのユーザ対応を休止</li> <li>問合せフォーム、オンラインサポートのみを実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新規予約を停止</li> <li>既存予約の利用を停止</li> <li>オープン利用の停止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>テレワーク</li> </ul>



## ユーザとの対話を増やすために

ICT サポートは、日々の問合せに対応していくことが求められる中で、受け身の運営になりがちです。しかしながら、大学でICTサポートを持続的に運営していくには、学生を取り込んだ積極的なサポート体制を作っていくことが必要ではないかと筆者は考えています。

ここで、ICTサポートにおける大学先進的な事例をいくつかご紹介します。

東京大学ではオンライン授業・Web会議に関連したサポート窓口を円滑に運営するために、学生スタッフであるコモンサポーターと教職員が一体となってサポートする体制(コモンサポーター制度)<sup>3)</sup>がとられています。学生を大学のサービス運営のためのサポートスタッフとして組み入れ、コモンサポーターの意見を尊重しながら改善を進めています。学生視点のサポートの在り方として非常に参考になる事例です。

もう1つは香川大学の事例です。香川大学では、情報技術を学ぶ香川大学の学生を中心にDX(Digital Transformation)ラボを立ち上げ、香川大学のDX推進に資する業務システムの内製開発やコンサルティングなど、学生と教職員が共創した取り組みを進めています<sup>4)</sup>。

ここで紹介した2つの取り組みでは、ともに学生スタッフがICTサービスの運営やユーザ対応の frontlineで活動している点が共通しています。紹介したような取り組みのほかに、その他の大学でも同様の取り組みが行われているところがあります。大学におけるユーザサポートの在り方について、これからす

べきことがまだまだ残されているといえるでしょう。大学の情報環境を取り巻く状況はコロナ禍以降急速に変わっています。大学が提供する情報環境以外にも多種多様なツールが利用できる時代となり、これらのツールを使いこなせることが、今後の大学生活あるいはその後の活動をより豊かにしていくことには変わりありません。一方で、システムが複雑化しセキュリティの脅威なども今後ますます注意する必要があります。このような環境を支えるユーザサポートでは、単に「なんとかしてください」に応えるだけではなく、ユーザに対しても質問した内容をしっかり学んでもらえる、自分が使っている環境に興味を持ってもらえるように支援していくこともICTサポートの役割の1つだと考えています。

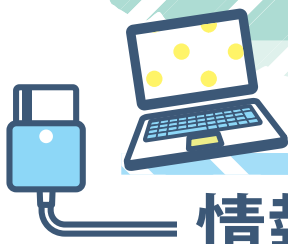
### 参考文献

- 1) 広島大学情報メディア教育研究センター, <https://www.media.hiroshima-u.ac.jp> (参照日: 2021-11-23)
- 2) 広島大学, ノートパソコンの必携化について, [https://www.hiroshima-u.ac.jp/about/initiatives/jyoho\\_ka/hikkei\\_pc](https://www.hiroshima-u.ac.jp/about/initiatives/jyoho_ka/hikkei_pc) (参照日: 2021-11-23)
- 3) utelecon—オンライン授業・Web会議ポータルサイト@東京大学, <https://utelecon.adm.u-tokyo.ac.jp/support/> (参照日: 2021-11-23)
- 4) 椎木卓巳, 山田 哲, 末廣紀史, 武田啓之, 國枝孝之, 米谷雄介, 後藤田中, 林 敏浩, 八重樫理人: 香川大学における学内業務システム内製開発にむけたアイデア創出と要件抽出の取り組み, 学術情報処理研究, No.25, pp.78-85 (2021). (2021年11月30日受付)



近堂 徹 (正会員) tkondo@hiroshima-u.ac.jp

2006年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。博士(工学)。現在、広島大学情報メディア教育研究センター准教授。2018年より同大学先進理工系科学研究科を兼任。キャンパスネットワーク・教育研究用計算機システムの設計・導入や管理運用、ユーザサポート業務に携わるほか、リアルタイムマルチメディア通信、仮想化技術、クラウドコンピューティングに関する研究などに従事。



連載



## 情報の授業をしよう! =

本コーナー「情報の授業をしよう!」は、小学校や中学校で情報活用能力を育む内容を授業で教えている先生、高校で情報科を教えている先生や、大学初年次で情報科目を教えている先生が、「自分はこの内容はこういう風に教えている」というノウハウを紹介するものです。情報のさまざまな

内容について、他人にどうやって分かってもらうか、という工夫やアイディアは、読者の皆様にもきっと役立つことと思います。そして「自分も教え方の工夫を紹介したい」と思われた場合は、こちらにご連絡ください。

(E-mail : editj@ipsj.or.jp)

# Scrapbox と Scratch とロイロノートを組み合わせたプログラミング授業実践



魚住 惇 | 愛知県立杏和高等学校

## プログラミング教育に向けて

2022年度からの教科「情報」の選択必修科目は現行の「社会と情報」・「情報の科学」から「情報I」に再編される。これにより、これまで「情報の科学」にしか含まれていなかったプログラミングが「情報I」に盛り込まれることで、「情報I」を履修するすべての生徒がプログラミングを経験することとなる。

私自身は大学でC言語とPerlに触れ、自身のブログではWordPressを使っていることからPHPも覚えた。校務では成績処理作業の簡略化のためにVBAを使うこともある。趣味の一環としてPythonも書くようになった。

ところが現実には残酷なもので、講師時代には「企業に入ってからのことを考えてWord・Excel・PowerPointが使えるように指導して」と言われたままに授業を行ったこともあり、情報の授業でプログラミングを教え始めることに目覚めるまでに時間がかかってしまった。

私がプログラミング教育を始めたのは、前任校の愛知県立幸田高等学校からである。普通科の生徒全員が「情報の科学」を履修して当然のようにプログラミング教育を実施していたことに感銘を受け、自分もまた、それまでは趣味の一環でしかなかったプログラミングを教えられるようになりたいと強く考えるようになった。

本稿では、「Scrapbox」、「Scratch」、「ロイロノート」という3つのツールを活用しながら、個別最適化を目指しつつ生徒同士の学び合いに繋がる、プログラミングの授業を行ったので紹介する。

## 教材公開・演習環境

### Scrapbox を活用したプログラミング教材公開

授業でプログラミングを教える際、主に教科書を用いているが、教科書に記載されている例題や練習問題のみでは問題数が不足しており、とてもスモールステップとは言いがたい。そこで私は事前準備として、自作の教材を作成することにした。ここで多



くの先生方は紙に印刷して使用するプリントを作成するのだが、情報の授業はコンピュータ室で行うことや、印刷のコストを考え、私はデジタルデータのまま生徒に配布しようと考えた。紙に印刷しなれば、A4やB4などの紙独特のレイアウトの制約を受けることなく、自由に作成できる。編集や追記もリアルタイムで反映される。この特性を活かすために、教材をすべてScrapbox上で作成することにした。

Scrapboxとは個人が使えるメモを管理するサイトで、ページ同士をリンクで繋げることにより、情報整理を手軽に行うことができる、Wikiのようなサービスだ。ページを作成することがとても簡単で、Googleアカウントがあれば気軽に使うことができる。Scrapboxは、これまでの情報整理ツールとはまったく違う考え方で情報を整理することができる。階層構造をあえて作成できないようになっているのが最大の特徴だ。すべてのページをカード形式にフ

ラットに並べて、探したいものがあれば検索を使って情報を引き出す仕組みになっている。また、ページ内にハッシュタグを追記したり、そのページに関連するほかのページへのリンクが手軽に作成できるようになっているので、リンクを辿りながら必要な情報にいきつくこともできる(図-1)。

プログラミングを教えるにあたり、私は教科書に記載されている順次構造、選択構造、繰り返し構造、逐次探索、二分探索、ソートについての課題に加え、素数判定、進数変換、ユークリッドの互除法、閏年判定のプログラムを組む課題を用意した。Scrapboxの特性を活かし、1ページ内には問題と動作例のみを記載した。ヒントや解答に必要な知識などはリンクを設定し、ページを移動することで見られるようにした。

Scrapboxで作成したこれらの教材は、すべて



■図-1 Scrapbox で作成した教材サイトのトップページ

Webで公開し、外部から見られるようにした<sup>☆1</sup>。Scrapboxの利点はリンクを使った知のネットワークを形成するだけでなく、それらをそのままWebページとして公開できることだ。外部に公開することで、生徒はスマホからもアクセスでき、自宅で学習する際にも役立つ。紙とは違って失くす心配もないし、更新内容も即座に反映される。

## Scratch を活用したプログラミング演習環境

情報の授業で扱うプログラミング言語はどれを選択すべきだろうか。情報の教員として、常に尽きない悩みである。しかしどの言語であっても、プログラミングを通して学ぶことは、問題解決における手法の1つとしてのアルゴリズムである。となれば、アルゴリズムを考えなければならないときに、プログラミング特有の記述にかかわるルールや実行方法について悩むことを極力減らした状態で生徒らに課題に取り組ませたい。

そこで私が言語として選んだのが「Scratch」だ。ScratchはScratch財団とマサチューセッツ工科大学が共同開発したビジュアルプログラミング言語である。2006年に登場して以来、主に小中学校でプログラミングの体験活動に取り入れられてきた。ブロックを組み合わせることでプログラムを組むことが可能なので、テキストコーディングと比べて記述ミスが起りにくいのが特徴である。

Scratchは2021年現在、バージョン3がリリースされ、ブラウザで実行するブラウザアプリとしてリリースされている。今回の授業実践では、バージョンはあえて1.4という初期の頃のものを使用した。Scratchのバージョン1の開発はすでに終了しており、その最終バージョンが1.4であるため、Scratch公式サイトでは今でもバージョン1.4のダウンロードが可能となっている。私がバージョン1.4を使い続けている理由は、ブロックの見え方にある。Scratchはバージョン2より、フラットなデザイン

に変更された。配色も少し明るい色合いに調整されている。しかし、バージョン2やバージョン3を使用して授業を行った際、「見続けていると目が痛くなるし、ブロックの色の違いがよく分かりません」と色覚異常を持つ生徒からの申し出があった。その生徒にとって最も見やすい配色だったのが、バージョン1.4だったのである。

ブロックの数は新しいバージョンになるほど増えており、より便利に使うことができるようになっている。たとえばバージョン2以降では、変数内の数値の小数点以下を切り捨てるブロックが追加されている。バージョン1.4では、こうしたブロックが追加されていないため、工夫をしながらブロックを組み合わせる必要がある。

小数点以下を切り捨てる場合は、その変数内の数値から、その数値を10で割ったときの余りを引く必要がある。この計算をブロックで表現すると、見た目は複雑そうに見えるが、この計算の過程をブロックを組み合わせることも、プログラミングの醍醐味であると考えている。最新バージョンではないため、実装されている機能が少ないという欠点はあるものの、バージョン1.4はまだまだ使えると考えている。

さらに、iPad版として、バージョン1.4が移植されたPYONKEEというアプリがリリースされている(図-2)。Scratchのバージョン3などはブラ



図-2 iPad用Scratch互換アプリ「PYONKEE」

☆1 Scrapbox を活用した教材公開サイト：<https://scrapbox.io/joken>

ウザから利用する必要があるが、授業で使用するバージョンを1.4にすることで、iPadでもオフラインで動く同じバージョンのアプリが利用できる。今回の授業実践では生徒がiPadを活用したわけではないが、私自身が個人購入のiPad（学校長より使用を許可されたもの）を授業で活用する際、PYONKEEを活用した。

## ロイロノートを活用した課題提出

従来の授業では課題として作成したScratch1.4のプロジェクト「.sb」ファイルをコンピュータ室内のWindows Serverに設定された共有フォルダに保存していた。課題を保存する、あるいは提出するという意味で言えば、共有フォルダに保存するだけでも十分役割は果たせているとこれまでは思っていた。ただ、新型コロナウイルスの感染拡大によりGIGAスクール構想が前倒しで進められる中、愛知県教育委員会はすべての県立高校にロイロノート・スクール（以下ロイロノート）を導入した。活用するかしないかは学校ごとの判断にゆだねられたが、何をどう活用すればよいのか分からないからこそ、これまでは実現できなかった授業形態が実践できる

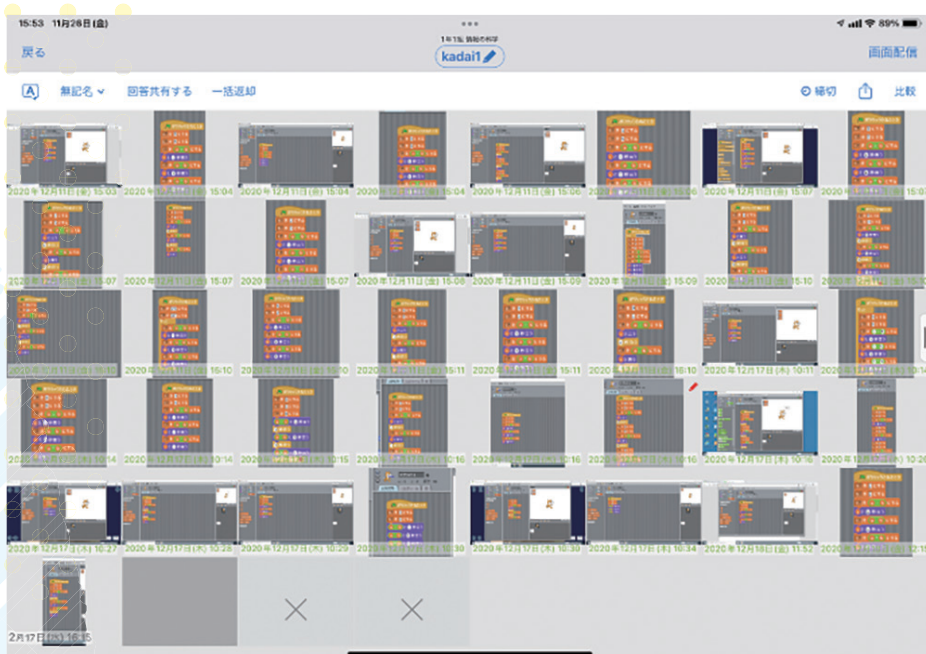
のではないかと期待し、授業に導入した。

ロイロノートは、生徒らが1人1台端末を使うことを前提に設計されたノートアプリ・サービスである。既存のOffice系アプリとは違い、情報をカードの形式にして平面に配置していくことでまとめていくことを目的としたアプリだ。2021年現在、iOS/iPadOS用とAndroid用のアプリがそれぞれのストアにリリースされている。Microsoft StoreにもWindows用アプリがリリースされているが、バージョンが最新ではないためブラウザからの利用が推奨されている。iOS/iPadOSアプリはネイティブアプリとして動作しているが、Androidアプリは内蔵ブラウザで動作するWebアプリなのでブラウザからのアクセスと実質変わらない。積極的に活用するためにはネイティブアプリが用意されていて、なおかつ画面が広く使えるiPadが望ましい。情報の授業はコンピュータ室で行うため、生徒用端末にGoogle Chromeをインストールし、ロイロノートのログインページをホームに設定した状態でデスクトップにショートカットを配置した。年度はじめの頃はログインに時間がかかっていたが、今ではクラス全員の生徒がログインを終えるまでに2分ほどで

済むようになった。

ロイロノートには、提出箱という機能がある。課題を設定し、そこに生徒がカードを提出するための場所だ（図-3）。

今回の実践では、Scratchで作成したプログラムのスクリーンショットを保存し、その画像をロイロノートの提出箱に提出するよう生徒に指示した。



■図-3 ロイロノートの提出箱



## 個別最適化したプログラミング授業の実践

### 授業概要

本稿で紹介する授業は、愛知県立杏和高等学校の普通科1年生6クラス240名を対象とし、普通教科「情報」の共通科目「情報の科学」において7時間(50分×7)かけて実施したものである。

1時間目はScratchの基本操作や作成したプログラムの提出方法、ファイルの保存場所などを指示した上で、課題の進め方を解説した。Scrapbox上に用意されている課題や解説を読み進めながらScratchでプログラムを組み上げ、ロイロノートの提出箱に提出するという流れである。実際に操作している画面を提示しながら説明した後で、内容をまとめたカードをロイロノートで配布した。次回以降の授業で、提出や保存の手順を忘れたことによる質問対応にかかる時間を短くし、内容に関する質問に対応する時間を増やすためだ。

また、授業中は教員が全体に向けて話をしていないときは、教室を自由に移動し、クラスメイトらと自由に相談しながら課題に取り組むことを許可した。

2時間目以降は、プログラミングの基本構造である順次構造、選択構造、繰り返し構造の説明を冒頭に行い、3時間目以降はすべて演習の時間とした。授業で扱う課題のすべてはScrapboxで公開され、常に見られる状態になっている。生徒は自主的に課題に取り組み、学習を進めることができる。課題に取り組むために必要な補足知識などもScrapboxのリンク機能で解説ページに繋がっているので、演習を進めるための知識に辿りつきやすくなっている。Scrapboxの特性を活かして1つのページにはなるべく多くを書かないようにしているので、課題の文章のみを見て取り組む生徒にとっては最低限の情報だけを閲覧することになり、逆に関連情報なしには取り組むことができない生徒はリンクから関連情報が載っているページを探して確認することができる。Scrapbox上に課題のページ、取り組むための知識

について解説してあるページなどをすべて用意することで、生徒は自主的に課題に取り組み、学習を進めることができるわけである。個別対応が必要な生徒に対しては随時質問を受け付けるような形で、なるべく多くの生徒に個別に対応した。

生徒それぞれの理解度を高めるためには、教師の話を生徒が一方的に聞くのではなく、コミュニケーションを取りながら解説を進めていき、ときには理解の度合いを確かめながら、生徒が「分かった!」と思えるまで対応することが必要だ。

こうした限られた授業時間の中で個別最適化した授業が実践できたのは、前述の通りScrapbox上に教材を用意し、課題の提出先をロイロノートの提出箱にしたからである。この2つのサービスを組み合わせることで、自律的に課題に取り組むことができる環境が整い、課題の提出状況が瞬時に把握できるようになった。そのため、生徒からの質問対応と、提出された課題の確認、未提出者へのアプローチが授業内で行えるようになった。これまでは人の手でやっていた作業を自動化することで、授業の個別最適化を実現できたのである。

### 協働的な学びの促進

グループワークなどで活動させる際、成績上位層の生徒が下位層の生徒に解説などをする場面を見ることがある。教える側にとっては、自分の理解度を確かなものにできるし、教わる側にとってはクラスメイトから説明が聞けるので、より理解が進むという効果が期待できる。しかし、今回の授業実践においては、そうした動きとは少し違った場面が見られた。

個別に対応した生徒、いわゆるヒントや解説などを聞かないと理解できない層の生徒が、自分と同じ理解度の生徒に教えるようになったのである。解説を聞き、ヒントを得ることで課題をクリアした生徒は、プログラミングに対して苦手意識を持ちながらも課題に取り組んだ。その結果、無事動作するプログラムが組めたときに味わう喜びは、上位層が難なく課題をクリアすることよりも大きいように感じら

れた。その成功体験が、自分と似た境遇の生徒にプログラミングを教えるという行動に結びついたものだと考えられる。

一方で、成績上位層の生徒は、すべての課題を終えた後に周囲の生徒に教えるようになった。課題に取り組んでいる最中は、上位層の生徒同士で相談し合いながら学習を進めていた。彼らからの質問は多くなかったが、クラスメイトらと助け合いながら課題に取り組む姿が見られた。

## Scratchの独特な言い回しに苦戦することもあった

プログラミングが苦手とは言っても、苦手とする理由はさまざまで、そもそもScratchの操作に不慣れだったりするし、PCの操作が苦手な場合もある。特にScratchのブロックをドラッグ&ドロップで操作して、変数ブロックを制御ブロックに入れる作業なども、慣れていない生徒にとっては難しいと感じる。また、Scratchの日本語版の独特の言い回しも、混乱を招く元となることがあった。たとえば、Pythonなら「 $a = a + 1$ 」だったり「 $a += 1$ 」と記述すれば済む内容が、Scratchだと「変数aを(変数a + 1)にする」となるようにブロックを組み合わせなければならない。英語を直訳したものだと考えたら言葉の通りだが、「(変数a + 1)を変数aに代入する」というテキストコーディング独特の言い回しと混同する場合もある。本来ならテキストコーディングが苦手な生徒のために存在しているScratchが、ブロックが日本語で書かれているScratchならではの独特の言い回しによって、逆に分かりづらい思いをすることがあった。

## ロイロノートの提出箱の共有機能による学びの実現

ロイロノートの提出箱は、生徒側は自分が提出した分のカードしか表示されないように設定されている。そのため、主に提出した課題の内容を確認するために使われる。ところが、提出箱の設定を変更し

回答を共有することで、生徒側からも同じクラスの他の生徒が提出した課題を見ることができるようになる。その際、提出箱内の生徒の氏名の表示を消すこともできる。どの生徒が何と答えたかは分からないが、同じクラスの中でこういう回答を提出した生徒がいたということが、生徒同士で確かめることができるようになる。

この機能を利用することで、生徒が提出した課題の内容をいくつかピックアップし、授業内で比較することができた。たとえば、順次構造をおさらいする課題「変数aに整数値3、変数bに整数値5を入力し、和と差と積を1秒ごとに表示せよ」を生徒に課したところ、[図-4](#)のような回答が提出された。

[図-4](#) (1) では、変数に数値を代入した後、「言う」ブロックの中で計算までさせている。ブロックの数を減らすことに注力したものである。[図-4](#) (2) の生徒はそれに比べて、変数cを間に挟んでいる。[図-4](#) (3) は和を出力した後に変数aと変数bに再度数値を代入している。[図-4](#) (4) はせっかく変数に数値を代入したにもかかわらず、計算部分では変数を使っていない。同じ課題を行うにしても、取り組む生徒によってブロックの組合せがここまで異なってくる。良いプログラムとは何かという問いについて、正解というものは一概には言えないものだが、それでもこれらのプログラムを比較すると、取り入れるべきものが見えてくる。特に[図-4](#) (3) では、その都度変数に数値を代入している部分について、同じ値を使うのであれば省略した方がよいのではないかと考えられるし、[図-4](#) (4) については、変数a、bを使わないのはもったいない。ここについては、変数そのものについての理解が進めば減ってくる事例ではないかと考えられる。

今回の実践のポイントは、さまざまなブロックを組み合わせた結果を、ロイロノートを活用することで提出や比較が手早くできて、回答を共有することで生徒の画面からも閲覧できるようになることだ。完成したプログラムはこれまでも共有フォルダに保存することで提出させてきたが、ほかの生徒が見る



ことはなかった。プログラミングの醍醐味は数多くあるが、ほかの人が組んだプログラムを見て、その人の思考から学ぶことも、私はその1つだと考えている。生徒それぞれが組み立てたプログラムを見比べてみると、私自身勉強になることもあるし、その生徒の考え方も見えてくるようになる。それがクラス全員と共有できるので、深い学びに繋がるのである。

## 今の教員に求められているのは自身のアップデート

今回は、情報の科学のアルゴリズムとプログラムの単元を、Scrapbox・Scratch・ロイロノートを組み合わせて活用することで実現した授業を実践した。GIGA スクール構想が急速に進む中、2022年度にはいよいよ中学校で1人1台端末を文房具と同じように活用してきた生徒が高校に入学してくる。そして、共通テストへの対策も始まる。1人1台端末を生徒が活用する授業を行うためには、我々教員もGIGA スクール構想に合わせて登場した学習支

援ツールに慣れなければならない。私自身は好奇心旺盛なこともあり、これまでに Google 認定教育者(レベル1とレベル2)という資格を取得し、ロイロノート社よりロイロ認定ティーチャーや授業デザイントレーナーとしての認定を受けた。Apple からも Apple Teacher として認定を受けた。

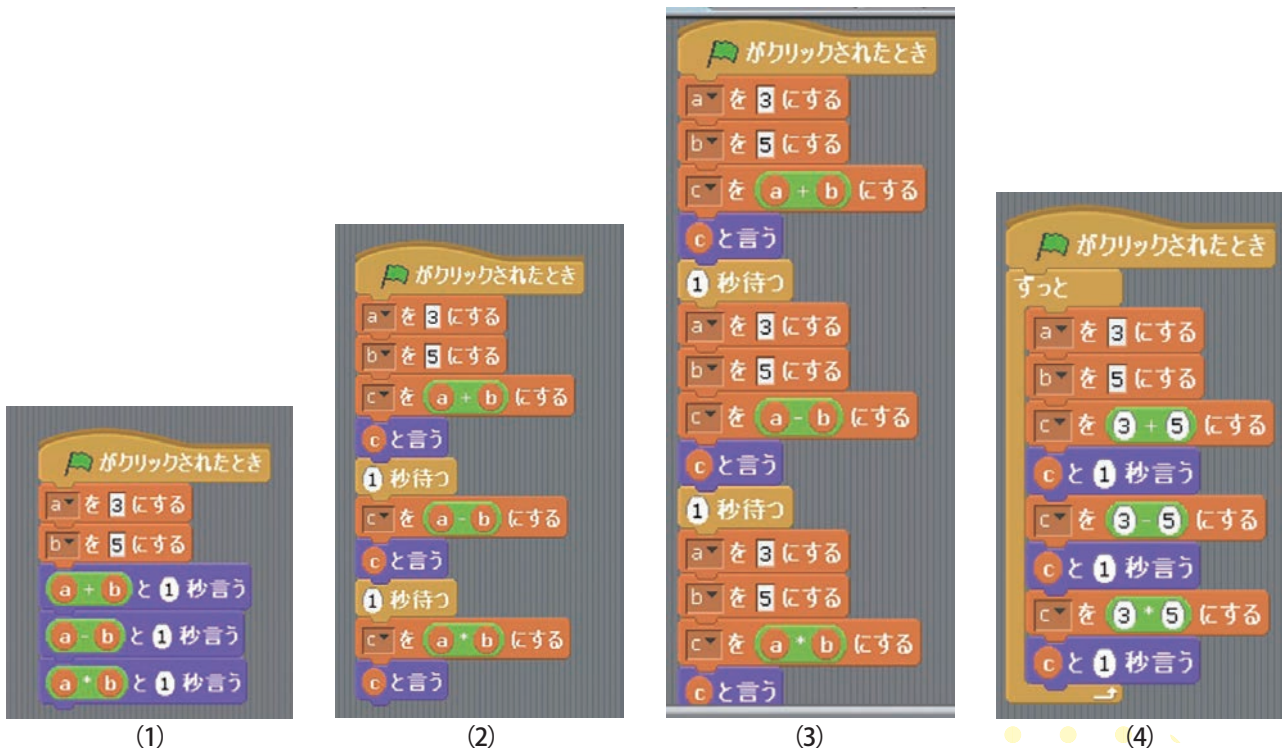
新学習指導要領では、情報活用能力を言語能力と同様に「学習の基盤となる資質・能力」と位置付けている。予測不可能な時代とされる今後の社会に巣立つ生徒に、少しでも多くの学びを提供できるよう、今後も授業実践の試行錯誤を続けていきたい。

(2021年11月29日受付)



魚住 惇  
uozumi5010@aichi-c.ed.jp

愛知県立杏和高等学校教諭(情報科)。著書『教師のiPad仕事術』。Google 認定教育者レベル2。ロイロ認定ティーチャー。授業デザイントレーナー。メディア掲載歴：ねとらぼ、HHKB Life、『スクールプランニングノート公式ガイドブック1』、『スクールプランニングノート公式ガイドブック2』、『はじめてのiPad超活用術』など多数。こだわりらいふ Newsletter (<https://kodawari.substack.com/>) を毎週水曜日に配信中。



■図4 授業内で共有され比較に利用した提出例



Info-WorkPlace 委員会企画 「お届けInfo」

# 今年度もやります! 全国大会の“デリバリー”

坊農真弓 | Info-WorkPlace 委員会委員長/国立情報学研究所

**お届けInfo**とは、学会で発表されたできたてほやほやの情報や知識を、有志の取材をしてくださる会員（以下、デリバリー会員）がその場の臨場感とともに、学会会員の皆さま（以下、カスタマー会員）のお手元にお届けするサービスです。家族のイベントで参加できない、家族の病気やさまざまな事情があって参加できない……。このようなカスタマー会員のアクセシビリティを確保します。デリバリータイプは3種類を予定しています。

- **ビデオデリバリー**：発表録画を配信します（3日以内に届きます。50件募集）
- **速報メールデリバリー**：メールで発表のサマリーを送ります（3日以内に届きます。5件募集）
- **note 記事デリバリー**：ブログ形式で発表概要を掲載します（3カ月以内に掲載します。5件募集）



第84回情報処理学会 全国大会イベント企画  
**お届けInfo**  
オーダー受付期間：大会プログラム開示から2022年2月末まで  
IP SJ全国大会期間：2022年3月3日（木）～5日（土）

選べる3つのデリバリータイプ

ビデオデリバリー	速報メールデリバリー	note 記事デリバリー
発表録画を配信します 3日以内に届きます (50件募集)	メールで発表のサマリーを送ります 3日以内に届きます (5件募集)	ブログ形式で発表概要を掲載します 3ヶ月以内に掲載します (5件募集)

このイベントを企画している Info-WorkPlace 委員会は、ダイバーシティ社会を活性化するために育児中・介護中といった様々なライフイベントの只中にある会員をサポートする活動に取り組んでいます。

デザイン：木塚あゆみ

## やる気いっぱい若者編



※全国大会参加者のオーダーは無料で承ります。  
 ※デリバリーは抽選とさせていただきます。抽選結果はデリバリーの発送をもってかえさせていただきます。

申込締切 2月 22日

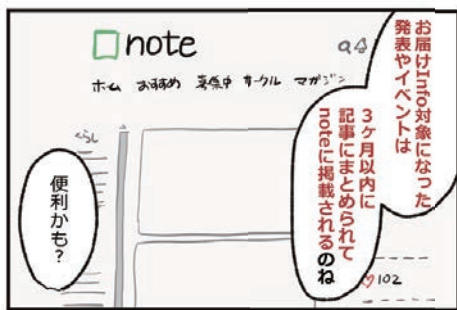
詳細・お申込みは  
 こちら



<https://forms.gle/nYFqE8fnN5hLx6Tm8>

## お届けInfo使ってみた!

### 出産・育児で大忙し編



漫画: ヤシ

### デリバリー会員さんの知識を拝借!編



### 録画ビデオだけ送ってもらお!編



漫画: nam



# IFIP—情報処理国際連合— 近況報告



相田 仁 | IFIP 日本代表 / 東京大学

IFIPの総会(GA: General Assembly)は、毎年1回開催され、IT領域全体にかかわる多くの問題について議論が行われる。新型コロナウイルスの影響により、2020年に引き続き、2021年の総会もオンラインで開催された。

今回の総会には、各国のメンバ学会代表者が29名、特別会員(International Members at Large)のACMおよびCLEIから2名、国代表ではない役員7名、技術委員会(Technical Committee: TC)の委員長13名、準会員(Affiliate Members)1名、名誉会員1名の計53名の総会構成員のほか、オブザーバ3名、IFIP事務局1名が参加した。日本からは日本代表として相田が、オブザーバとして本会の木下事務局長が参加した。

役員選挙における投票の匿名性を高めるため、今回からNemoVoteというシステムを用いることになり、投票テストが行われたが、うまく投票できない参加者がいたため、それらの参加者は事務局にメールを送って事務局で得票数に加えることで進められた。

## 60周年記念行事関係

当初2020年9月28日にUNESCOでIFIP 60周年記念行事を行う予定だったが、新型コロナウイルスの影響で延期することになり、ちょうど1年遅らせてUNESCOのInternational Day for Universal Access to Informationと一致させ、60周年の年を締めくくりにUNESCO側も協力的であったが、それも不可能となった。現時点の予定としては、半

日程度のオンラインイベントを12月21日頃行う方向でUNESCOと調整している。

これとは別に副会長のAnthony Wongを委員長とする60th Anniversary Event Coordination Committeeが組織され、各種のイベントを60周年記念行事として位置づけることにした。IFIPのWebサイトにそれらのイベントへのリンクが掲載されている。これまでに40以上のイベントが開催または開催予定であり、そのうち6つのイベントで会長が挨拶した。

## 参加国の状況

2020年の総会以降、総会メンバによる電子投票によりナイジェリアコンピュータ学会とデンマークの大学のコンソーシアムであるDANFIPが国代表として承認された、しかしナイジェリアコンピュータ学会はまだ会費を払っていないので、規程(Bylaw) 2.8により、会費を払うまで会員資格は発生しない。

ここ2年ほどの間、ボツワナ、タイ、バングラデッシュ、タンザニアの学会と会員になる可能性について話をしている。

## 規約改正

今回の総会では3件に分けて規約改正が諮られた。1件目は事務局からの提案で、総会で新しい国代表や特別会員の承認を電子投票で行う場合の定足数を50%から33%に下げよう規程の3.8を改正するもので、電子投票の定足数不足のリスクを軽減さ



せるものである。投票の結果承認された。

2件目は、12月末までに定款 (Statute) を修正しないと IFIP が免税の扱いを受けられなくなる恐れがあると指摘されたことを踏まえて、定款 8.1 に IFIP の目的を達成するための理想的な手段 (ideal means) を追記するものである。定款の改正には、本来、総会の 40 日前に総会メンバに対して内容を事前通知する必要があるが、期限が差し迫っていることから、それを緩和することを含めて諮られた。投票の結果承認された

3件目は技術委員会および Specialist Group の Chair の集まりである Technical Assembly から提案されたもので、まず、定款 5.3.1 で、「Technical Assembly に推薦された現在の技術委員会の Chair」を総会においてカウンシラー (Councillor) に選出する、となっているのを、「Technical Assembly に推薦された現在または最近の過去の (current or recent past) 技術委員会の Chair」に変更することが提案されたが、「最近の過去の」の意味が曖昧であるとの指摘がなされ、投票の結果、改正に必要な 2/3 の賛成が得られなかったため否決された。また、規程 4.1.2 に Technical Assembly の Chair は「会長が指名し、通常は副会長となる」となっているのを「Technical Assembly メンバにより選出され、(自動的に) 副会長となる」に置き換えること、および、定款 5.4.1 に「Technical Assembly の Chair は Executive Committee のメンバとなる」を追記することが提案された。これらに対して、ほかにも委員会は多数あるのに Technical Assembly だけ特別扱いにするのはおかしいとの指摘もあったが、議論の結果、「(自動的に) 副会長となる」を除く修正をした上で承認された。技術委員会の収入が学会に大きく貢献していることが考慮されたものと思われる。

改正後の規約類は IFIP Web ページの Rules & Forms から参照できる。

## 役員を選出

今回、任期満了に加えて、Honorary Treasurer だったスロバキアの Milan Ftáčnik が 5 月に急逝し

たため、それらの後任の選挙が前述の NemoVote を用いて行われた。結果として、会長には現副会長の Anthony Wong、次期 Honorary Secretary には現 Honorary Secretary の Max Bramer (再任)、Honorary Treasurer にはドイツの Kai Rannenberg、副会長に Moira de Roche、IP 3 推薦のカウンシラーとしてオランダの Wouter Bronsgeest、会長推薦のカウンシラーとして英国の Alastair Irons が選出された。

## 財務関係

Honorary Treasurer の死去に伴い、オンラインで執行委員会 (Executive Committee) が開催され、規約 5.4.2 (a) および (b) に基づき、総会で Honorary Treasurer が選出されるまでの間、会長が Treasurer を務めることとなった。

2020 年度は有価証券からの利益がゼロであったため、全体として 44.4K ユーロの赤字となった。この有価証券利益ゼロの状況は 2022 年遅くまで続く見込みであり、大きな問題となっている。

2021 年 6 月までの半年間では 62.5K ユーロの黒字であるが、これは新型コロナウイルスの影響で旅費等の支出が抑えられた面もあるが、収入の大部分が年の早い時期にあるのに対して多くの支出は年を通じて一定であるためである。

2022 年度の予算については、ロイヤリティの収入は 2020 年から 2021 年にかけておおよそ保たれており、2022 年も同様であることが期待される。イベント収入はある程度改善される一方で、旅費はまだ以前と比べて少ないと思われる。予算要求にあたって保守的であることを求めた上で、すべての要求を盛り込んでいる。

## 出版関係

現在 IFIP Publication に対するオープンアクセスは、新 IFIP Digital Library<sup>☆1</sup>、Springer Link<sup>☆2</sup>、

<sup>☆1</sup> <https://hal.inria.fr/IFIP/>

<sup>☆2</sup> <https://link.springer.com>

IFIP Select<sup>☆3</sup>, 旧 IFIP Digital Library<sup>☆4</sup> の4つのチャンネルで行われている。それらの詳細については2020年の総会報告に記したが<sup>1)</sup>, それらを合わせると, Springerで2005年頃から出版され, 3年以上経ったものはほとんどすべて自由にアクセスできる。これに加えて, 1995年にKluwer Academic Publishers (KAP) がIFIPの公式出版社となって以降の多くの会議録も利用可能である (KAPは2004年にSpringerと合併した)。

2021年8月27日時点でアップロードされている全文テキスト数は16,414となっている。新型コロナウイルスの影響によりアップロードのペースが落ちたが, 追いつきつつある。2020年のアクセスのおよそ74%が論文のダウンロード, 26%がビューであり, メタデータのダウンロードは0.34%であった。2021年に入ってからの月間ビューおよびダウンロード数は72,007から116,068とおおよそ30~53%増加している。

Springerで出版されたIFIP出版物にはSpringerによりDOIが作成され, デジタルライブラリにも記録されているが, eCollectionやePublicationのようなSpringerでない出版物におけるDOIの必要性と費用や副作用について検討した結果, 2023年末までの試行としてCrossrefに加盟し, IFIPがDOIを発行できるようにした。試行期間中に必要となる総費用はおおよそ960ユーロである。試行の結果は遅くとも2023年の総会で評価する。

オランダのKNVIが出版物の一部をIFIPのDL (Digital Library) に格納する可能性について問い合わせてきたことを踏まえて, IFIPのePublicationと同様の機能をIFIPのメンバ学会に提供することが検討されている。出版委員会では, メンバ学会が品質と内容の準備に責任を持つIFIP DLの特別セクションの可能性について分析した。現在執行委員会がIFIPの免税との関係などについて調べている。

UNESCOのソフトウェア遺産イニシアチブが

<sup>☆3</sup> <https://www.ifip.org/select>

<sup>☆4</sup> <https://dl.ifip.org/>

IFIPに協力を求めている。IFIPにはInternational Congress on Mathematical Software (ICMS) が出版したガイドラインがあり, DLにソフトウェアや研究データといった人工物を加えることを検討している。

## 表彰関係

IFIPやIFIPの重要なイベント組織における活動に対して贈られるService Awardは, TC13 (Human-Computer Interaction) から推薦された2名とTC8 (Information Systems) から推薦された4名への授与が決定された。また, IFIPの目的に照らして重要な成果を挙げたものに対して隔年で贈られるSilver Core Awardには5名の推薦があり, 5名全員への授与が決定された。さらに, IFIPの構成員 (作業部会, 技術委員会, 総会, 領域委員会, IP3等) の情報処理分野における顕著な貢献に対して贈られるIFIP Fellow Awardには, 18名の推薦があり, 12名への授与が決定された。また, プロ意識の促進や倫理の伝道, 多様性の育成などに貢献した人物や組織に対して贈られるDavid O'Leary賞に対して4件の推薦があり, Don Gotterbarnへの授与が決定した旨, Professionalism Program (IP3) から報告があった。これらの受賞者は, IFIPのWebページで公開されている。

## 各種委員会等報告

Member Societies Assembly (MSA), Professionalism Program (IP3), Technical Assembly (TA), InterYIT, モノのインターネットに関する領域委員会 (Domain Committee on Internet of Things), デジタルエクイティ委員会 (Digital Equity Committee) の各委員会から報告があった。また, ヘルスケアに関する領域委員会 (Domain Committee on Health Care) の委員長が多忙のため休眠状態であるが, この話題は多くの技術委員会や作業グループの興味に関連するので, 興味のある技術委員会があればモデルしたいと会長から発言があった。

## 会議開催予定

2021年はオンラインで行われた役員会の次回は、2022年3月23～24日にベルリンで対面開催される予定だが、それが不可能となった場合には3月23～24日にオンラインで行う。

次回総会は2022年9月にフランスのLilleで開催する予定で、開催日が決定次第総会メンバに通知する。

WCC (World Computer Congress) はインドが Delhi または Bhubaneswar での開催に興味を持っている。WITFOR (World Information Technology Forum) はホンデュラスとペルーが開催を検討している。WCF (World CIO Forum) については、パンデミックが始まったときに開催地の検討を始めたところだった。旅行制限などを考慮すると、どのイベントについても2023年より前に開催されることはないものと思われる。

### 参考文献

1) 相田 仁: IFIP—情報処理国際連合一近況報告, 情報処理, Vol.62, No.3, pp.152-161 (Mar. 2021).

は16の国際学会開催に寄与した。

## TC 2 (Software Theory and Practice)

代表: 五十嵐淳(京都大学)

2021年度のTC2会議は7月8日にオンライン開催された。TC2 ChairはドイツTU BraunschweigのIna Schaefer, Vice ChairはドイツUniv. Duisburg-EssenのMichael GoedickeとオーストリアTU WienのStefan Biffl, secretaryはフランスInria/Sorbonne Univ.のJulia Lawallとなっている。会議の主な内容は次の通りである。(1)各WGのメンバに関して議論した。WG Chairには変更がなく7名の新しいWGメンバと4名の名誉メンバが承認され、9名が除名された。(2)Judith Bishop氏, William Waite氏, Anthony Wasserman氏がIFIP Fellow (2020)の称号を授与された。(3)Manfred Paul AwardはVadim Zaytsev氏に授与された。TC2のWebページ <https://ifip-tc2.paluno.uni-due.de/>

## TC 1 (Foundations of Computer Science)

代表: 廣川 直(北陸先端科学技術大学院大学)

TC1は計算機科学の基礎に関する専門委員会である。IFIPは設立60年を記念してサーベイ集IFIP Advances in Information and Communication Technology (AICT 600)を出版した。TC1からはMartin Kutribらが記述計算量理論, Filippo Bonchiらがシグナルフロー理論の記事を寄稿した。前回のTC1会合で検討されていたサマースクールの実施は、コロナ禍の影響により延期となっている。

TC1は8つのWGからなる。WG 1.6 (Rewriting)とWG 1.8 (Concurrency Theory)でChairがそれぞれCynthia Kop氏(オランダ)とPedro R. D'Argenio氏(アルゼンチン)に交代した。WG 1.9 (Verified Software)はChairを選出中でありJim Woodcock氏(英国)が一時的にChairを務めている。コロナ禍で停滞していた学会活動は再び活性化しており、2020年8月から2021年10月の期間にTC1

## TC 3 (Education)

代表: 斎藤俊則(星槎大学)

2021年度のTC3の主な活動は定例会議, OCCE 2021 (Open Conference on Computers in Education 2021), およびZanzibar Declaration Webinarの開催であった。定例会議は4月21～22日にオンラインで開催された。OCCE 2021はIFIP TCによる初めてのハイブリッドカンファレンスであり, “Digital Transformation of Education and Learning - Past, Present and Future”をテーマに2021年8月17日から20日にかけて開催された。開催地はフィンランドのタンペレ市であり, 定例カンファレンスの例年の参加者数より多い合計72名(うちオンライン参加62名, 現地参加10名)の参加者があった。Zanzibar Declaration WebinarはTC3が2019年にザンジバル島で開催したOCCE 2019ののち, その成果としてまとめられた「ザンジバル宣言」に基づく全4回のウェビナーであり, 'Sustainable



Education in a Digital Age of rapidly Emerging Technologies' にかかわる4つの教育に関する重要なテーマに基づいて講演と議論が行われた。

今後のTC3に関連するイベントの予定は以下の通りである。

- Zanzibar Declaration Conference, 15th to 17th November 2021, invited online: Developing a Zanzibar Declaration on Sustainable Education in a Digital Age of rapidly Emerging Technologies
- IFIP60 Event, Zanzibar Declaration, 6th December 2021, online: Outcomes of the Zanzibar Declaration on Sustainable Education in a Digital Age of rapidly Emerging Technologies
- WCCE 2022, 20th to 24th August 2022, Hiroshima, Japan (hybrid) : Towards a Collaborative Society through Creative Learning.

### TC 5 (Information Technology Applications)

代表：村山優子(津田塾大学)

TC5は、情報技術のアプリケーションを支えるための基本概念、モデル、理論のほか、多様なアプリケーション等学際的な研究開発にかかわる。Tadeusz Czachorski教授(ポーランド科学アカデミー Institute of Theoretical and Applied Informatics)が2期目のChairを務める。

現在、11のWGが多様な課題に取り組む。WG 5.12 (Architectures for Enterprise Integration) 主査として、新たに Arturo Molina Gutiérrez 教授 (Tecnológico de Monterrey, メキシコ) が就任した。

生産システムや生産管理システムにかかわるWG 5.7 (Advances in Production Management Systems) には、日本人メンバが9名(名誉会員2名含)登録されている。当該WGの国際会議 APMS (Advanced Production Management System) は、2021年9月5~9日に、フランスのナントで開催予定であったが、オンラインで開催された。

2020年6月に筆者らが設立した災害情報処理のWG 5.15は、年次国際会議 ITDRR (IT in Disaster

Risk Reduction) 2021を、2021年10月25~27日に、本会からのIFIP60周年イベントとして、佐々木淳教授(岩手県立大学)が組織委員長となり、岩手県盛岡市内の会場とオンラインのハイブリッドで開催した。

IFIP 60周年記念事業の一環として、Springerより2021年8月に出版された書籍『Advancing Research in Information and Communication Technology Anniversary: IFIP's Exciting First 60+ Years, Views from the Technical Committees and Working Group』にはTC5からは、6論文が掲載された。

### TC 6 (Communication Systems)

代表：相田 仁(東京大学)

2021年は、2021年3月29日にTC6の第1回会合、2021年11月16日に第2回会合がいずれもオンラインで開催された。第1回会合では、TC6 Chairの任期切れに伴い、現ChairのBurkhard Stillerが満場一致で再任された。また、2021年9月から中国からの代表がTC6に加わった。WGからの活動報告では、多くの国際会議が開催形態をオンラインに変更して実施されている中で、会議録が出版された後で会議が中止となった例や、例年IEEEやACMと共催している会議で相手学会の単独開催となった例があることが紹介された。TC6の財務的には、会議のオンライン化により収入が減ったものの、旅費等の支出も減ったため安定している。また、オーストラリアのCoreランキングでTC6のflagship conferenceであるIFIP Networkingが従来Aランクだったのが現在Bランクとなっていることに関して、理由をCoreに問い合わせることになった。また、旧IFIP TC6 DLのコンテンツをINRIAの新IFIP DLに移行する作業が進められているが、とりあえず2021年11月12日からコンテンツの置き場所をチューリッヒ大学に変更したことが報告された。

IFIP Networking 2021は当初2021年6月21~24日にフィンランドのAaltoで開催する予定だったが、新型コロナウイルスのため完全オンライン開

催に変更となった。IFIP Networking 2022 はイタリアで開催する予定である。

## TC 7 (System Modelling and Optimization)

代表：張 勇兵(筑波大学)

TC 7 Conference および TC 7 meeting は隔年に開催され、2020 年が第 29 回目の定例開催年であった。しかし、COVID-19 の影響で 2021 年 8 月 30 日～9 月 3 日に延期され、エクアドル共和国 Quito で開催される予定であったが、最終的にオンライン開催になった<sup>☆5</sup>。今回の TC 7 Conference は 26 minisymposia セッションと 2 contributed talks セッションからなり、plenary speaker 5 名であった。次回の Conference は 2022 年 7 月 4～8 日にポランドワルシャワで開催されることになった。

傘下の WG について、TC 7 委員会は、その設立・改廃の際にかかわるのみであり、各 WG はほぼ独立に各々の活動を続けている。会議期間中に行われる TC 7 meeting において各 WG の活動の報告が行われるが、TC 7 conference や TC 7 委員会へのかかわりに対する積極さにも、各 WG の間に依然として違いがある。

## TC 8 (Information Systems)

代表：内木哲也(埼玉大学)

TC 8 は組織および社会での活動基盤である情報システム (Information Systems) の計画立案から、分析設計、開発、運用管理、利用評価、さらには組織設計や運営、社会的評価までも含む、人間—技術システムのマネジメント全般を対象としている。2021 年の第 52 回 TC 8 年次総会は、コロナ禍の状況下、昨年同様に遠隔にて 10 月 28～29 日に開催され、7 カ国の代表委員と 7WG 代表委員の 18 名により開催された。今回も、遠隔で短時間の審議を余儀なくされたため、各 WG と継続中の TC 8 の社会貢献事業の活動状況についての審議が中心

<sup>☆5</sup> [https://modemat.epn.edu.ec/ifip\\_tc7\\_2020/](https://modemat.epn.edu.ec/ifip_tc7_2020/)

で、基本的に次年度も各活動を継続することで了承された。今期改選となる Chair には現職の Isabel Ramos (Portugal NR) が全会一致で再任された。なお、昨年改選だった Vice Chair には遠隔投票により Jolita Ralyté (Switzerland\_NR) が選出されている。今回は欧州情報システム国際会議 ECIS の後の 2022 年 6 月 23～24 日にルーマニア共和国ティミショアラ (Timisoara) にて開催の予定。

## TC 9 (ICT and Society)

代表：小向太郎(中央大学)

TC 9 (ICT and Society) は、隔年でシンポジウム HCC (Human Choice and Computers) を開催しているほかに、9 つの WG (Working Group) を設置して活動を行っている。TC 9 Chair の David Kreps が中心となって取りまとめた倫理指針 (IFIP Code of Ethics and Professional Conduct) が、2020 年 9 月の IFIP General Assembly において承認されており、IFIP の 60 周年記念イベントの 1 つとして、こうした取り組みに関するパネルディスカッション (IFIP Code of Ethics and Professional Conduct: A Document for its Time) を、10 月 4 日にオンラインで行った。

TC 9 の 2021 年度の年次会合は、7 月 26 日にオンラインで行われ、HCC や WG の活動について、実施状況や今後の計画、新型コロナウイルスの影響下で効果的な活動を維持していくためのオンライン活用などについて議論している。

HCC (第 15 回) は、「人類の選択とデジタル・バイ・デフォルト：自律とデジタル決定の相克」をテーマに、2022 年 9 月に東京の中央大学市谷田町キャンパス (中央大学 iTL) で開催する予定である。

## TC 10 (Computer Systems Technology)

代表：金川信康(日立製作所)

TC 10 はコンピュータシステムの技術、すなわち各階層における設計・評価技術とその概念、方法論、ツールに関する情報交換と協調促進を目的としてい

る。執行部は2021年よりChair: Achim Rettberg(ドイツ代表)以下21名のメンバから構成されている。2021年度は全体会議は11～12月に開催予定である。2020年6月にオンラインで開催された全体会議では、近年低迷気味であるTC活動を活性化(revitalizing)させる方法(アクティブなメンバ名簿の再確認、会議開催回数増等)について話し合われた。これを受けて各WGともに新たにプロジェクトを起こそうと努力しているが、COVID-19の影響で会議を開催するのに苦労している。

TC 10は10.2 – Embedded Systems, 10.3 – Concurrent Systems, 10.4 – Dependable Computing and Fault Tolerance, 10.5 – Design and Engineering of Electronic Systemsの4つのWGより構成されている。

#### TC 11 (Security and Privacy Protection in Information Processing Systems)

代表：越前 功(国立情報学研究所)

TC 11は情報セキュリティに関連する分野を取り扱うTCである。TC 11の活動は全体活動とWG活動に分かれており、全体活動ではTC 11の運営を決める年次ミーティングと国際会議SEC (International Information Security Conference)を開催している。WG活動では各WGが国際会議やワークショップ等を開いている。

今回のSEC 2021は、36回目となり、新型コロナウイルスの蔓延のため、オンラインで2021年6月22～24日の3日間開催された。今回は、TC 11ノルウェー代表のAudun Jøsang教授(オスロ大学、ノルウェー)とWG 11.8元主査のLynn Fitcher教授(ネルソンマンデラ大学、南アフリカ)が組織委員長を務めた。Jøsang教授はプログラム委員長も兼務した。

例年通り、SEC 2021に先立ち、6月21日にTC 11の年次委員会が、オンラインで開催された。会議は、グリニッジ標準時で朝の7時から昼の12時まで開催された。例年は終日行われるが、昨年と同様に今回は時差のある中でのオンライン開催のため、短い会議となった。来年のSEC 2022は、デンマー

クのコペンハーゲンで2022年6月13～17日に開催予定である。TC 11スウェーデン代表のSimone Fischer-Hübner教授(カールスタッド大学)が中心となり、準備中である。

TC 11では、現在14のWGが活動している。

#### TC 12 (Artificial Intelligence)

代表：栗原 聡(慶應義塾大学)

TC 12は1989年に設立され、現在、Ulrich FURBACH教授(コブレンツ＝ランダウ大学、ドイツ)がChairを務めている。AI(人工知能)全般をカバーしており、現在33カ国が参加し、Knowledge Representation and Reasoning, Machine Learning and Data Mining, Intelligent Agents, Artificial Intelligence Applications, Knowledge Management, Social Networking Semantics and Collective Intelligence, Computational Intelligence, Artificial Intelligence & Cognitive Science, AI for Energy & Sustainability, AI Governance, の10のWGが運営されている。

#### TC 13 (Human-Computer Interaction)

代表：北村喜文(東北大学)

Human-Computer Interactionの分野を担当するTC 13が主催する国際会議INTERACT (International Conference on Human-Computer Interaction)は隔年開催で西暦の奇数年に開催されている。18回目のINTERACT 2021は、世界的なコロナ禍の中、8月30日～9月3日に、予定されていたイタリアのBariに感染拡大防止措置を取りつつ集まる欧州の人々と、オンラインで世界中から参加する多くの人々が参加するハイブリッド形式で開催された<sup>☆6</sup>。参加者は合わせて約400名と報告されており、105件のLong Papers, 72件のShort Papers, 35件のPosters, 8件のIndustry Papers, 3件のパネル, 5件の招待講演, 12件のWorkshop等が実施

<sup>☆6</sup> <http://www.interact2021.org/>



された。欧州時刻でプログラムが運営されたが、オンライン参加者と現地参加者の間の交流がうまくとれなかったことが今後の課題として挙げられていた。なお、会議予稿集は Springer の Lecture Notes in Computer Science series として出版されている<sup>☆7</sup>。INTERACT 2023 は、2023 年 8 月 28 日～9 月 1 日に、英国 York で開催される予定である<sup>☆8</sup>。

TC 13 の各国代表が集まる全体会議は、9 月 28 日にオンラインで開催された。IFIP60 Events への協力要請や、各国加盟学会組織に基づく正式な IFIP TC 13 の代表が現時点で不在となっている国（カナダ、シンガポール、香港、中国、韓国、ジンバブエ等）との連携方法等が議論された。

IFIP TC 13 の詳細は、Web ページ <http://if-ip-tc13.org/> 参照のこと。

### TC 14 (Entertainment Computing)

代表：星野准一(筑波大学)

TC 14 は、2002 年 SG 16 (Specialist Group on Entertainment Computing, Chair: 中津良平氏) として出発し、設立以来 5 年が経過した 2006 年 8 月にチリ、サンチャゴで行われた IFIP 総会において、TC への昇格が認められ、TC 14 として活動を開始することとなった。中津氏の Chair の任期が終了したので、2012 年度に 2002 年より Vice Chair を務めていた Matthias Rauberberg 氏 (オランダ) が Chair に選出された。

2018 年から Rainer Malaka 氏 (ドイツ) が議長を担当しており、Vice Chair は Letizia Jaccheri 氏 (ノルウェー)、Esteban Clua 氏 (ブラジル)、星野准一 (日本) である。中津良平氏は WG 14.3 の Chair を担当している。また星野は WG 14.4 Entertainment Games の Chair を兼任している。

Entertainment Computing ジャーナル (ELSEVIER) の運営に力を入れており、論文のダウンロード販売などの経営面でも好調である。

昨年 1 年間の TC 14 の構成員の変更・主たる活動は以下の通りである。

- (1) TC 14 の主催する国際会議 ICEC 2021 の開催準備を行った。
- (2) 2021 年 9 月時点で TC 14 の国際委員の数は 26 名、WG の数は 10 である。

### IP 3 (International Professional Practice Partnership)

代表：掛下哲郎(佐賀大学)

IP 3 は、各国の高度 IT 人材資格制度を認定することにより、世界の IT 専門家の強化に資することを目的としている。本会は、IP 3 の活動が認定情報技術者 (CITP) 制度の確立に有意義と考え、2009 年 6 月より参加し、ボード・メンバを務めている。参加団体は、オーストラリア ACS、ACS、南アフリカ共和国 IITPSA、カナダ CIPS、日本 IPSJ、ニュージーランド IITPNZ、ジンバブエ CSZ、韓国 KIISE、エジプト ITI、スリランカ CSSL、オランダ NGI/VRI、スイス SI の 11 学会と、IIBA、ISACA の 2 協会である。

現在、IP 3 はサイバーセキュリティ人材の育成や、認定審査のオンライン化を推進している。また、ISO/IEC 24773 の改訂を踏まえた認定基準の改訂等にも取り組んでいる。

本会は、1～2 カ月ごとに開催されるオンライン会議による理事会への出席に加え、ML を活用して各種の活動を行った。本会では 2020 年度にデータサイエンス分野の資格制度や教育に関連してさまざまな活動を行ったので、その成果を IFIP 60 周年記念イベントの中で報告した。2022 年度には IP 3 による認定継続審査を受審し、これらの成果に対する評価も受ける予定である。また、ISO/IEC JTC 1/SC 7/WG 20 にて ISO/IEC 24773 の改訂作業が進行しており、これに関する IP 3 への情報提供も行っている。

<sup>☆7</sup> <https://www.interact2021.org/proceedings.php>

<sup>☆8</sup> <http://www.interact2023.org/>

### TC 1 : Foundations of Computer Science

- WG 1.2 Descriptive Complexity
- WG 1.3 Foundations of System Specification
- WG 1.5 Cellular Automata and Discrete Complex Systems
- WG 1.6 Rewriting
- WG 1.7 Theoretical Foundations of Security Analysis and Design
- WG 1.8 Concurrency Theory
- WG 1.9 Verified Software (joint with WG 2.15)
- WG 1.10 String Algorithmics & Applications

### TC 2 : Software : Theory and Practice

- WG 2.1 Algorithmic Languages and Calculi
- WG 2.2 Formal Description of Programming Concepts
- WG 2.3 Programming Methodology
- WG 2.4 Software Implementation Technology
- WG 2.5 Numerical Software
- WG 2.6 Database
- WG 2.7 User Interface Engineering (joint with WG 13.4)
- WG 2.8 Functional Programming
- WG 2.9 Software Requirements Engineering
- WG 2.10 Software Architecture
- WG 2.11 Program Generation
- WG 2.13 Open Source Software
- WG 2.14 Service-Oriented Systems (joint with WG 6.12/8.10)
- WG 2.15 Verified Software (joint with WG 1.9)
- WG 2.16 Programming Language Design

### TC 3 : Education

- WG 3.1 Informatics and digital technologies in School Education
- WG 3.3 Research into Educational Applications of Information Technologies
- WG 3.4 Professional and Vocational Education in ICT
- WG 3.7 Information Technology in Educational Management

### TC 5 : Information Technology Applications

- WG 5.1 Global product development for the whole life-cycle
- WG 5.4 Computer Aided Innovation
- WG 5.5 Cooperation infrastructure for Virtual Enterprises and electronic business (COVE)
- WG 5.7 Advances in Production Management Systems
- WG 5.8 Enterprise Interoperability
- WG 5.10 Computer Graphics and Virtual Worlds
- WG 5.11 Computers and Environment
- WG 5.12 Architectures for Enterprise Integration
- WG 5.13 Bioinformatics and its Applications
- WG 5.14 Advanced Information Processing for Agriculture
- WG 5.15 Information Technology in Disaster Risk Reduction (ITDRR)

### TC 6 : Communication Systems

- WG 6.1 Architectures and Protocols for Distributed Systems
- WG 6.2 Network and Internetwork Architectures
- WG 6.3 Performance of Communication Systems
- WG 6.6 Management of Networks and Distributed Systems
- WG 6.8 Mobile and Wireless Communications
- WG 6.9 Communication Systems in Developing Countries
- WG 6.10 Photonic Networking
- WG 6.11 Communication Aspects of the e-World
- WG 6.12 Service-Oriented Systems (joint with WG 8.10/2.14)

### TC 7 : System Modelling and Optimization

- WG 7.2 Computational Techniques in Distributed Systems
- WG 7.3 Computer System Modeling
- WG 7.4 Inverse Problems and Imaging
- WG 7.5 Reliability and Optimization of Structural Systems
- WG 7.6 Optimization - Based Computer Aided Modeling and Design
- WG 7.7 Stochastic Control and Optimization
- WG 7.8 Nonlinear Optimization

### TC 8 : Information Systems

- WG 8.1 Design and Evaluation of Information Systems
- WG 8.2 The Interaction of Information Systems and the Organization
- WG 8.3 Decision Support
- WG 8.4 E-Business Information Systems: Multi-disciplinary research and practice
- WG 8.5 Information Systems in Public Administration
- WG 8.6 Transfer and Diffusion of Information Technology

- WG 8.9 Enterprise Information Systems
- WG 8.10 Service-Oriented Systems (joint with WG 6.12/2.14)
- WG 8.11 Information Systems Security Research (joint with WG 11.13)
- WG 8.12 Industrial Information Integration

### TC 9 : ICT and Society

- WG 9.1 Computers and Work
- WG 9.2 Social Accountability and Computing
- SIG 9.2.2 Special Interest Group on Framework on Ethics of Computing
- WG 9.3 Intelligent Communities
- WG 9.4 The Implications of Information and Digital Technologies for Development
- WG 9.5 Our Digital Lives
- WG 9.6 Information Technology: Misuse and The Law (joint with WG 11.7)
- WG 9.7 History of Computing
- WG 9.8 Gender, Diversity and ICT
- WG 9.9 ICT and Sustainable Development
- WG 9.10 ICT Uses in Peace and War

### TC 10 : Computer Systems Technology

- WG 10.2 Embedded Systems
- WG 10.3 Concurrent Systems
- WG 10.4 Dependable Computing and Fault Tolerance
- WG 10.5 Design and Engineering of Electronic Systems

### TC 11 : Security and Privacy Protection in Information Processing Systems

- WG 11.1 Information Security Management
- WG 11.2 Pervasive Systems Security
- WG 11.3 Data and Application Security and Privacy
- WG 11.4 Network & Distributed Systems Security
- WG 11.5 IT Assurance and Audit
- WG 11.6 Identity Management
- WG 11.7 Information Technology: Misuse and The Law (joint with WG 9.6)
- WG 11.8 Information Security Education
- WG 11.9 Digital Forensics
- WG 11.10 Critical Infrastructure Protection
- WG 11.11 Trust Management
- WG 11.12 Human Aspects of Information Security and Assurance
- WG 11.13 Information Systems Security Research (joint with WG 8.11)
- WG 11.14 Secure Engineering

### TC 12 : Artificial Intelligence

- WG 12.1 Knowledge Representation and Reasoning
- WG 12.2 Machine Learning and Data Mining
- WG 12.3 Intelligent Agents
- WG 12.5 Artificial Intelligence Applications
- WG 12.6 Knowledge Management
- WG 12.7 Social Networking Semantics and Collective Intelligence
- WG 12.9 Computational Intelligence
- WG 12.10 Artificial Intelligence & Cognitive Science
- WG 12.11 AI for Energy & Sustainability (AIES)
- WG 12.12 AI Governance (AIGOV)

### TC 13 : Human-Computer Interaction

- WG 13.1 Education in HCI and HCI Curricula
- WG 13.2 Methodologies for User-Centered Systems Design
- WG 13.3 Human Computer Interaction, Disability and Aging
- WG 13.4 User Interface Engineering (joint with WG 2.7)
- WG 13.5 Human Error, Resilience, Reliability, Safety and System Development
- WG 13.6 Human-Work Interaction Design
- WG 13.7 Human - Computer Interaction & Visualization (HCIV)
- WG 13.8 Interaction Design and International Development
- WG 13.9 Interaction Design and Children
- WG 13.10 Human-Centered Technology for Sustainability

### TC 14 : Entertainment Computing

- WG 14.1 Digital Storytelling
- WG 14.2 Entertainment Robot
- WG 14.3 Theoretical Foundation of Entertainment Computing
- WG 14.4 Entertainment Games
- WG 14.5 Social and Ethical Issues in Entertainment Computing
- WG 14.6 Interactive TeleVision
- WG 14.7 Art and Entertainment
- WG 14.8 Serious Games
- WG 14.9 Game Accessibility
- WG 14.10 Sound and Music Computing

## 【ご案内】会誌「情報処理」のオンライン記事について

会誌「情報処理」の特集記事は、これまで冊子、オンライン（電子図書館）の両方に掲載しておりましたが、次のとおり オンラインのみへの掲載 に変わりました。また、オンライン限定記事の掲載も始まりました。

◆開始月：2020年11月号（発行日：2020年10月15日）

◆閲覧方法：会員区分によって異なりますので以下をご確認ください。

### 【個人会員の皆様】

電子図書館（情報学広場：<https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/>）にログインし、該当記事のpdfをダウンロードしてください。すでに電子図書館をご利用いただいている方は今までどおりです。

電子図書館を初めて利用される方は、会員としてのユーザ登録が必要になります。

未登録の方には毎月上旬に次の件名のメールを送信しておりますので、到着次第、登録してください。

- 件名：[情報学広場:情報処理学会電子図書館] ユーザー登録のご案内
- 差出：ipsj-ixsq@nii.ac.jp

【個人会員】



電子図書館  
(情報学広場)

★詳細：電子図書館利用方法（個人用）－利用までの流れ（<https://www.ipsj.or.jp/e-library/ixsq.html#anc2>）

ご案内メールをお急ぎの方や閲覧方法が分からない方は、会員サービス部門（E-mail: [mem@ipsj.or.jp](mailto:mem@ipsj.or.jp)）に会員番号を添えてご連絡ください。

### 【賛助会員各位・購読員の皆様】

賛助会員・購読員の企業・大学に所属されている方に「情報処理」（冊子）を貸し出した場合、特集の閲覧方法について照会がございましたら、次の手順をお知らせください。

#### <手順>

- (1) 「情報処理」の特集ページ（扉または概要ページ）を開く。
- (2) 閲覧申込のURLにアクセスする（またはQRコードを読み取る）。
- (3) 必須事項を入力し送信する。
- (4) 次の件名（3月号の場合）の受信メールに従って、電子図書館から特集のpdfをダウンロードする。

- 件名：情報処理 2022年3月号（Vol.63, No.3）「チケットコード」とご利用方法のご連絡

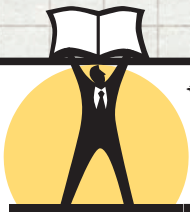
#### ★注意事項

- 法人アカウントではご利用いただけません。
- 閲覧される方が電子図書館のユーザIDをお持ちでない場合は、ご自身でユーザ登録する必要があります。

本件に関する問合せ先：一般社団法人情報処理学会 会員サービス部門 E-mail: [mem@ipsj.or.jp](mailto:mem@ipsj.or.jp)







連載

ビブリア・トーク  
—私のオススメ—

… 石黒正揮 ((株) 三菱総合研究所)

## データ立国論

宮田裕章 著

PHP 研究所 (2021), 990 円 (税込), 232p., ISBN: 978-4-569-84930-0



「データの時代」を生き抜くマインドセットやテクノロジーなどについて指南する書籍は多いが、本書は、目指すべき社会像やその根底をなす理念を提示している点で特徴的であり、データを活用する技術者、研究者にとっても有益な示唆を与える書籍である。

これまでの社会は「最大多数の最大幸福」を実現することを目指す中で、多数から取り残される人々が生じていた。これからの社会は、データを活用することにより、きめ細かく人々に対応することで、「最大“多様”の最大幸福」を実現することが可能になると主張している。現時点でデータはその力を十分に発揮できていない。すなわち、「価値=貨幣」という経済合理性を至上とする価値観から脱することができず、多様な価値観やライフスタイルの実現には程遠い状況である。データは貨幣のような「所有財」ではなく、「共有財」である。データは、専有するのではなく、共有すればするほど、自分も社会も豊かになるという構造を持っている。たとえば、1人の医療データはそれだけではあまり価値を生まないが、100万人の医療データがあつまれば、重要な医学的な知見や治療法につながることもある。

著者は、医療分野がデータ革命の1丁目1番地として挙げる。アメリカ食品医薬品局により糖尿病治療用アプリとして認可を受けた BlueStar, Google が生命保険分野に進出、平安グッドドクターのアプリを最大限活用した医療保険サービス、Apple がデバ

イスを売る会社ではなく、人々に健康をもたらした会社になると公言したことなどの動きを挙げている。

厚生労働省から提案されたプラットフォームのコンセプト PeOPLe は、情報共有の主権をデータの提供者一人ひとりにあると規定する。日本では患者の保険医療データ、医療機関、保険者、自治体など分散するデータを PeOPLe に繋げることで、データの価値は大きく高まる可能性がある。

世界におけるデータへのアプローチは異なる。「アメリカ型」は、GAFAをはじめとするテックジャイアントが社会の流れを作る企業主導型である。「EU型」は、個人の権利を重視する。「中国型」は、社会信用スコアを導入して信用経済を強力に推し進める。日本は、これらの3つのタイプの長所を組み合わせた「価値共創社会」を目指すべきと主張する。

著者は、データの力で、貨幣以外の価値、たとえば、信用や環境への貢献など多面的な価値を可視化することにより、社会の中で「共有価値 (Shared Value)」が生まれ、人々が響き合いながら共に構成する社会を目指すべきとして「データ共鳴社会」を描いている。

データ共鳴社会のヒントとなる新しい都市づくりの例が挙げられている。たとえば、スペインの人気観光スポットであるバルセロナ市で宣言したスマートシティ構想「ファブ・シティ」は、モノづくりを表す「ファブ」という言葉に象徴されるように、3Dプリンタやレーザーカッターなどの街づく

り施設が連携し地域の創造性を高めたり、気温、湿度、騒音、太陽光など環境情報を市民一人ひとりが測定し、インターネット上のサーバにアップロードできるセンサーを開発し、市民との共創によりビッグデータを活用した都市マネジメントの模索がはじめられた。

幸福や豊かさを指す指標である「Well-being」の概念に対して、著者は、個人の行動が世界とつながっている現代では、個人の Well-being が共存し共鳴する「Better Co-Being（ともによりよくあること）」が実現される未来像を描いている。

著者が言う「データ共鳴社会」においては、データを通じて社会における個人や企業の透明性、信頼性、ガバナンスが高められることにより、SDGs

(Sustainable Development Goals (持続的な開発目標)) の取り組みを過剰に見せる SDGs ウォッシュではなく、本来あるべき社会価値への貢献に自然な形で方向づけられ、そのような企業や個人がトラスト（信頼）を獲得することができると思われる。

(2021年12月1日受付)

石黒正揮（正会員）

masa@mri.co.jp

博士（情報科学）。東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。現在、(株)三菱総合研究所サイバーセキュリティ戦略グループ。サイバーセキュリティ、ソフトウェア工学、AI／数理データ解析、リスク評価などを専門とする。日米欧アジアにおけるセキュリティ政策・技術戦略、セキュリティ経済学、デジタル経済学に関する調査コンサルに従事する。





## C-C. Chen, M. Watabe, K. Shiba, M. Sogabe, K. Sakamoto and T. Sogabe : On The Expressibility and Overfitting of Quantum Circuit Learning

ACM Transactions on Quantum Computing, Vol.2, No.8, pp.1-24 (2021)

### 過学習, PAC 学習理論

本稿の紹介を始める前に, 背景知識となる学習理論, 過学習そして VC 次元について簡単にふれたい. 機械学習は常に, 過学習と呼ばれる潜在的な危険性がある. この場合, 学習モデルはデータのノイズにさえ適合してしまい, 未知のデータに対する予測精度が著しく低下する現象である. それは知識を本当に理解せずに「丸暗記」して学習する学生のようなもので, 未知のデータに対する対応能力が喪失する. 未知の問題に対する汎化機能の獲得は機械学習分野の中心タスクである.

過学習を扱う研究手法や理論は多数開発されている. その中で代表的な理論は 1970 年代に Vapnik and Chervonenkis によって提案された VC 次元理論である<sup>1)</sup>. VC 次元より以前に, ヘフディングの不等式を拡張した Union Bound という汎化誤差を評価する基準が提案されているが, 学習モデルの集合サイズ  $|\mathcal{H}|$  が有限の場合しか適用できないという制限があった. それに対して, VC 次元理論は無限の集合サイズ  $|\mathcal{H}|$  でも学習モデルの汎化誤差の上界を定量的に解析でき, 機械学習理論の発展に大きく貢献した. また, Union Bound 学習理論も VC 次元理論も基本的には, 汎化誤差を訓練誤差を通して確率的に評価する「近似的に正しい学習: PAC (Probably Approximately Correct) 学習」の仕組みとなっている<sup>2)</sup>.

### VC 次元理論の概略

VC 次元の理論背景と詳しい導出は紙面の都合上,

省略するが, 図-1 の例を通して要点だけ説明する. 3つの2次元データ赤と青の2値分類に対して, 線形分離器  $h(x) = \text{sign}(a^T x + b)$ ,  $a \in \mathbb{R}^2$ ;  $b \in \mathbb{R}$  を適用すると仮定する.  $a$  と  $b$  の値は連続的に変化することが可能なので, 図-1 (a) のように, 分類できる学習モデルの集合サイズは  $|\mathcal{H}| \rightarrow \infty$  になってしまい, 従来の Union Bound 学習理論が適用できなくなる. そこで, VC 次元理論は, 単純に学習モデルの数を数えるのではなく, 学習器が分類できるデータの数を元に集合サイズ  $|\mathcal{H}|$  を定義するという斬新な理論体系となっている. VC 次元理論の VC 次元  $d_{VC}$  は堅く定義すると次のようになる: 「仮説集合  $\mathcal{H}$  の仮説  $h$  による  $(x_1, \dots, x_n)$  のラベルのセット  $(h(x_1), \dots, h(x_n))$  の成長関数  $\text{Growth}(H, n)$  を  $2^n$  としたときの最大のサンプル数  $n$  を VC 次元  $d_{VC} = n$  とする」. ちょっと分かりにくい概念なので, 例を通して簡単に説明する. 図-1 (b) に示すように, 3つのデータの赤と青の組合せパターンは8となる. 図-1 (b) の左側に示している3つのデータの位置関係であれば, 図-1 (a) に示した線形分離学習

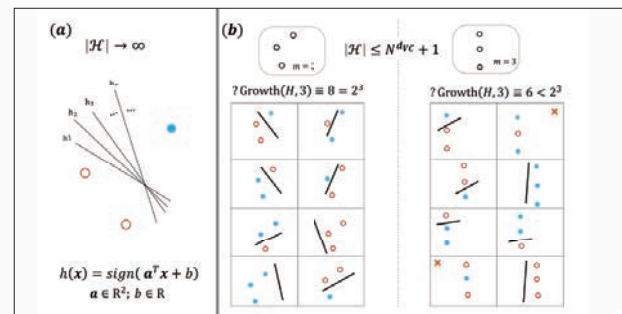


図-1 VC次元の模式図 (a) 従来の Union Bound 理論における線形分離学習モデルの集合サイズ  $|\mathcal{H}|$  が発散, (b) VC次元による線形分離学習モデルの集合サイズ  $|\mathcal{H}|$  が上界  $(N^{d_{VC}} + 1)$  を持つ



器を使用した場合、8パターンに分離できることは図からすぐ検証できる。VC次元の定義から2変数の線形分離学習器の成長関数  $\text{Growth}(H, 3)$  は最低でも  $2^3=8$  となる可能性が示される。また、定義の中に最大のサンプル数  $n$  という制約条件があるので、図-1 (b) の右側の6パターンにしか分離できない3つのデータの位置関係の場合は、成長関数として見なさない。しかし、分離できる最大サンプル数  $n$  の上限が果たして  $n=3$  以上あるのかどうかは不明である。実はこれがVC次元の理論を活用する上での最大の難所といえる。VC次元  $d_{VC}$  の正確な値は数的にしか証明できないので、複雑な学習モデルを用いた場合、 $d_{VC}$  を決定するのは非常に困難である。そういう難点があるものの、VC次元に基づいた学習理論は、ほかの学習理論にないいくつかの利点がある。(1) 分離できる最大サンプルを元にした理論であるため、入力データの分布に依存しない；(2) 漸近的ではなく小さなサンプルサイズにも適用できる；(3) 学習モデル集合の特性を表しているため、個々のモデルから独立している；(4) ノイズの多いデータに対しても機能する。これらの利点は、最新の機械学習にとって重要で、VC理論は、後に人工ニューラルネットワークに適用され、さらに一世を風靡したサポートベクターマシン (SVM) のアルゴリズムの中核にもなったのである。

以上、本論文の内容を理解するための過学習や汎化誤差の上界、VC次元理論、そしてVC次元の計算の困難さとその応用上の利点に関する背景知識を紹介した。今回紹介する論文の中心テーマである「量子コンピュータを用いた量子機械学習」のようなまだ黎明期の最先端研究分野においては、VC次元の計算が容易ではないの

で、VC次元理論を適用した量子機械学習モデルの汎化誤差評価に関する研究はほぼなかった。

## 量子VC次元の確立とテンソルネットワーク理論

この論文で著者らはVC理論と量子回路学習の関係の確立を試みた。Control Z-gate Hardware Efficient Ansatz (CZ-HEA) という特定の量子回路学習モデルのVC次元は、有限の上界と下界を持つことを理論的に証明した。それによって、当量子回路学習モデルはPAC学習可能であることを世界ではじめて示した。また、VC次元に基づく量子回路学習モデルの過学習評価の正当性を考察するために、量子回路の説明能力を評価する情報理論基準 KL-divergence を用いて比較実験も行い、両者の一致性からVC次元の信頼性を左証した。ここで、本論文の研究成果に最も寄与したテンソルネットワーク理論に関連する内容を簡単に要約する。VC次元のより厳密な上界を導出するために、テンソルネットワーク理論のライトコーン制限を導入した。図-2は

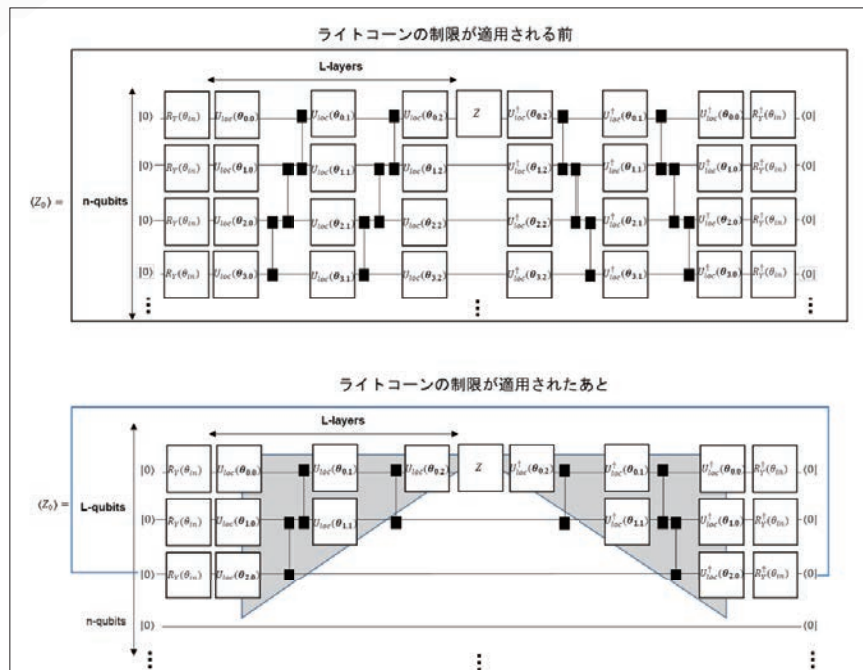


図-2 CZ-HEA量子回路におけるライトコーン制限の模式図

CZ-HEA という特定の量子回路を示している。ライトコーン制限を考慮しなければ、図-2 (a) に示しているように、 $d_{VC}$  は一般的に知られている上界

$$d_{VC} \leq \left(2 \frac{n}{d} + 1\right)^{2d}$$

として与えることができる。ここでの  $d$  は入力データの次元あるいは (特徴の数)  $n$  は量子ビット数とそれぞれ対応している。しかし、この一般化した  $d_{VC}$  は量子ビット数が無限に増大するにつれ、汎化誤差が上界を持たなくなり、学習モデルの PAC 学習能力の保証を失ってしまう。それに対して、図-2 (b) に示しているようにライトコーン制限を考慮した場合は、量子ビット数  $n$  は無限に増大しても、学習に寄与する有効な量子ビット数はライトコーン制限の元で、量子回路の深さ  $L$  に制限される。それ故、VC 次元は下記のような有限な上界を持つことが証明された。

$$d_{VC} \leq \left(2 \min\left(\frac{n}{d}, \left\lfloor \frac{2L+1}{d} \right\rfloor + 1\right) + 1\right)^{2d}$$

量子機械学習は近年、量子コンピューティング分野においてホットピックの1つとして、量子技術と最先端の AI 技術の融合による相乗効果が期待されている。量子回路学習モデルは、御手洗らによ

て提案され<sup>3)</sup>、2018 年 IBM によって実験的に実証された<sup>4)</sup>。本論文は学習理論から量子回路学習モデルの汎化誤差を世界で初めて厳密に評価できたので、量子機械学習の分野においては、まさに歴史に残る論文の1つとして位置づけられるかと思う。読者にもぜひご一読をお勧めしたい。

#### 参考文献

- 1) Vapnik, V. N. and Chervonenkis, A. Ya. : On the Uniform Convergence of Relative Frequencies of Events to Their Probabilities. *Theory of Probability & Its Applications* 16, 2 (1971), 264-280, <https://doi.org/10.1137/1116025>
- 2) Valiant, L. G. : A theory of The Learnable. *Commun ACM* 27, 11 (1984), 1134-1142, <https://doi.org/10.1145/1968.1972>
- 3) Mitarai, K., Negoro, M., Kitagawa, M. and Fujii, K. : Quantum Circuit Learning, *Phys Rev A* 98 (2018), 032309, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.98.032309>
- 4) Havlicek, V., Corcoles, A. D., Temme, K., A. Harrow, A. W., Kandala, A., Chow, J. M. and Gambetta, J. M. : Supervised Learning with Quantum-Enhanced Feature Spaces, *Nature* 567 (2019), 209-212, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0980-2>

(2021 年 11 月 25 日受付)



#### 曾我部東馬 (正会員)

sogabe@uec.ac.jp

電気通信大学 i-パワーエネルギーシステム研究センター准教授。先進エネルギーデバイスと AI 融合技術研究ステーション長。エネルギー創生・変換、量子アルゴリズムの開発と AI を用いた量子制御に関する研究に従事。

## ● 論文誌ジャーナル掲載論文リスト

Vol.63 No.2 (Feb. 2022)

### 【特集：人文科学とコンピュータ】

- 特集「人文科学とコンピュータ」の編集にあたって 山田太造
- 一次史料における時間的コンテキストを含む社会関係記述モデルの提案と実践 小川 潤 他
- 事前学習モデルを用いた近代文語文のニューラル機械翻訳 喜友名朝視 他
- 訓点データベースと点図の自動判別 堤 智昭 他
- 人名辞典からの知識抽出 白井圭佑 他
- 民話体験を拡張する一人称 VR システム 小川時央 他
- Geometric Correction of Historical Maps Based on Vector Field Analysis Takeshi Miura 他
- 郷土に残存する江戸期古記録の機械可読化を目的とした市民参加および機械学習による固有表現抽出 吉賀夏子 他
- 仏教学のためのデジタル学術編集システムの構築に向けたモデルの提案と実装 永崎研宣 他
- 既存作品中の物語の基本パターンに基づく物語構造の自動生成 村井 源
- 本文表記の Ngram を用いた室町時代書写の源氏物語写本の分類 齊藤鉄也
- 古典中国語 (漢文) Universal Dependencies とその応用 安岡孝一 他
- 提示型検索モデルに基づくミュージアム電子ガイドとその利用ログを用いた事前学習・事後学習支援 莊司慶行 他

### 【特集：インタラクションの理解および基盤・応用技術】

- 特集「インタラクションの理解および基盤・応用技術」の編集にあたって 井上創造
- 機械学習による画像診断の差分画像による解析 綾塚祐二 他
- ギター演奏支援装置 “F-Ready” の開発 西ノ平志子 他
- COVID-19 の流行による在宅勤務時の職場の同僚間の関係性とメンタルヘルスの分析\* 赤堀 渉 他
- 視線を用いた 1 次元ポインティングにおける 1 次サッカーボール率のモデル化 島田雄輝 他
- Lens Shaping Method and Applications using UV Printer Koji Tsukada 他
- PartsSweeper：電子部品や工具をさりげなく整理するインタラクティブ・デスクの研究 折原征幸 他
- 垂直方向の加速度の知覚強度を増幅する錯視技法 齋藤文人 他
- 音像定位を利用した単一振動子による運指表現手法の提案 武田十季 他
- LightTouch：画面発光をタッチ入力に変換するタッチスクリーン用ガジェット 池松 香 他
- Posture-based Golf Swing Instruction using Multi-modal Feedback Yuka Tanaka 他
- DeskWalk：パソコンを利用した作業時のキー入力を身体動作で置き換えることによる運動不足解消システム 清水裕介 他
- 水冷回路と導電性銀ナノ粒子インク印刷による電熱回路を統合した高速サーモクロミズム制御手法† 増井元康 他
- 組織全体の認知症ケアスキル向上のためのビデオコーチング実践データに基づく介入指導インタラクションの分析と実証実験 小俣敦士 他

### 【特集：ネットワークサービスと分散処理】

- 特集「ネットワークサービスと分散処理」の編集にあたって 野呂正明
- 検索クエリに配慮した配置による分散ログ検索の高速化 小山智之 他
- 揮発性 / 不揮発性メモリ混載計算機での高速なプログラム実行を可能にする OFF2F プログラムの性能評価 谷口秀夫 他
- 複数の時間間隔に基づくオーバーレイネットワークにおけるルーティング効率化手法 久保達也 他
- 自律移動型 UAV の協調動作を用いた効率的な探索データ収集手法 伊藤太清 他
- NDN におけるキャッシュの冗長性排除を目的とした人気コンテンツ集約 中田有哉 他
- 検査パケットによる帯域圧迫を抑制可能な L2 ループ検出手法 野呂正明 他
- ミリ波無線通信システムの受信信号強度と RGB-D カメラ動画像を用いた通信端末の位置推定\* 三原翔一郎 他
- On Interactions between Evacuation Behavior and Information Dissemination via Heterogeneous DTN\* Yudai Yahara 他
- 開放環境無線センサネットワークにおける自己組織化マップを用いた改ざんノード協調的排除方式 木村圭希 他
- Vehicular Edge Computing における コンテナ応答時間を削減するためのコンテナ再配置手法 豊田 陸 他
- モバイルクラウドセンシングにおける複数タスクオークションを考慮した持続的なインセンティブメカニズム 溝口貴大 他
- 五本指でのタップ動作による仮名入力規則の評価 勝間 亮 他
- 人の移動データに基づく地域のクラスタリングと入込観光客数予測への応用 落合桂一 他
- 複数人の観光における休憩の指標を導入した観光支援システムの開発 宗森 純 他
- 複数の経路において複数の TCP 接続を用いるタイマ駆動のプログレッシブダウンロード方式 舟阪淳一
- 屋内環境におけるトポロジ多重化用いた集約型自己組織化位置推定方式とその実装評価 川田千尋 他
- BAAS : Backscatter as a Sensor for Ultra-Low-Power Context Recognition\* Yoshihiro Nakagawa 他
- 需要分布に基づくロードプライシングにおける計算量削減とミクロ交通シミュレーションによる評価 村田航希 他
- 宛先到着遅延を考慮して渋滞を緩和する自動車の経路誘導手法 松井雄資 他
- 脈拍データを用い風で刺激する脈拍上昇抑制システムの開発 宗森 純 他
- 誤り訂正符号を用いた秘密分散による効率的な秘匿部分一致検索 岩村恵市 他
- チャットコミュニケーションの構造的特徴分析に基づく集団活動の生産性評価 齊藤裕樹 他

### 【特集：組込みシステム工学】

- Editor's Message to Special Issue of Embedded Systems Engineering Kenji Hisazumi
- Mapping Method Considering Clustered Many-Core Platform for Simulink Model Yutaro Kobayashi 他

### 【一般論文】

- ハンディキャップのある対戦に対する Bradley-Terry モデルの適用 新沼広大 他



- UAV 協調型センシングにおける残余電力を考慮した動作制御手法\* 神崎映光 他
- A Privacy-preserving Outsourcing Scheme for Zero-knowledge Proof Generation † Makoto Nakamura 他

\* : 推薦論文 Recommended Paper

† : テクニカルノート Technical Note



- 教養・基盤系科目における PBL ベースの質問紙調査入門講義の分析 —対面環境および遠隔環境での実践比較— 平井佑樹
- 情報リテラシー科目のオンライン実践と学習活動への影響の評価 長瀧寛之 他
- 香川大学の DX 推進環境の整備と DX 推進の取り組みについて—業務システムの内製開発による DX 推進— 石川颯馬 他
- 科目「プログラミング基礎」における対面授業とオンライン授業の比較 河村一樹



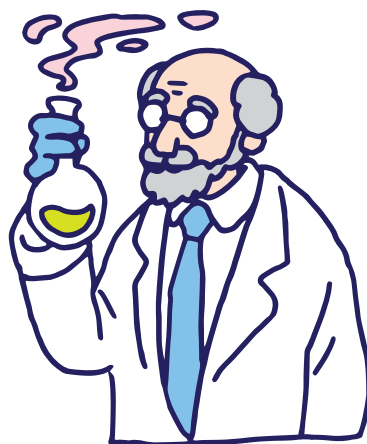
## ● 論文誌トランザクション掲載論文リスト (Jan. 2022)

### 【論文誌 教育とコンピュータ Vol.8 No.1】

- 「主體的・対話的で深い学び」の実現に向けた教育 AI 活用の現状と展望 森本康彦
- 身近に存在する知的財産権の保護対象物を利用した作問学習の実践と評価 高木正則 他
- Ruby on Rails の初学者の躓き要因の分析支援ツール 高橋圭一
- オンライン上でのコンピューティング実習支援システム「CreCoSpeek」の開発と評価 松澤芳昭 他
- 教育のデータ駆動化：データベースシステム研究者からの一考察 喜連川優

### 【論文誌 デジタルコンテンツ Vol.10 No.1】

- 対戦型格闘ゲームを対象にした視線情報に基づく試合振り返り支援インタフェース 梶並知記 他
- SIGMA Retriever：イメージベースドモデリング・レンダリングのための検索機構の設計と実装 山崎賢人 他
- 再生中断時間短縮のための無線放送型ビデオオンデマンドシステム 松本 哲 他



## ◎ IPSJ カレンダー◎

学会イベントの最新情報を下記 URL でご案内しています。新型コロナウイルス感染症拡大を受け、開催方法の変更、開催中止などの可能性がありますので、最新情報をご確認いただきますようお願いいたします。

<https://www.ipsj.or.jp/calendar.html>



# 情報処理学会 第84回全国大会

大会テーマ：変わる社会と情報処理

開催日 2022.3.3(木)～5(土)

会場 愛媛大学 城北キャンパス(ハイブリッド開催)

事前申込受付期間 2021.12.6(月)～2022.2.15(火)

聴講参加費(税込) 現地参加、オンライン参加共に同価格です。

申込種別	価格(2/16～最終日)
大会イベント企画限定聴講参加	無料
大会共通聴講参加(正会員)*全論文のPDFアクセス権付	10,000円
大会共通聴講参加(一般非会員)*全論文のPDFアクセス権付	17,000円
大会共通聴講参加(学生会員・ジュニア会員・学生非会員)	無料

◆ハイブリッド開催について

オンラインミーティングツール Zoom を併用しながら現地でイベント企画・各発表セッションを開催致します。インターネット・オーディオ機器に接続できるPCとヘッドセットを各自で必ずご準備願います。

イベントによってはオンラインのものがあり、現地ではパブリックビューイング会場でご覧いただけます。



皆さまお誘い合わせの上、奮ってご参加ください

大会イベント企画 (聴講無料)

## 3/3(木)

一次産業とICT  
2021年サイバー事件回顧録  
～技術と法制度の両面から～  
革新的アルゴリズム基盤の構築に向けて  
8周年を迎えた認定情報技術者制度CITP  
(Certified IT Professional)の現状と  
今後の方向性  
～コンピュータバイオニアが語る～  
「私の詩と真実」  
IoTが拓く未来：～2030年の未来予想図～  
AI TECH TALK  
IT情報系キャリア研究セッション

## 3/4(金)

ヘルスケア情報の利活用に資する匿名加工技術の  
実現に向けて～匿名加工コンテストPWS Cup 2021～  
アジャイル開発の契約上の問題点と対策  
一般情報教育と数理・データサイエンス・AI  
知能と計算とアーキテクチャの新しい関係を目指して  
新世代委員会のこれまでとこれから  
日本機械学会／情報処理学会 合同企画  
モノづくりと情報処理における人材育成について  
論文必勝法  
スパコン富岳による飛沫エアロゾル感染リスク評価の  
デジタルトランスフォーメーション  
「ポスト量子」暗号 --- 量子計算機に対して安全な暗号の最前線  
ランチョンセッション  
インダストリアルセッション



## 3/5(土)

IPSJ-ONE  
情報入試ー共通テストと個別試験  
第3回初等中等教員研究発表セッション  
情報科学の達人  
Exciting Coding!Junior2022@Ehime  
第14回情報システム教育コンテスト  
デジタルが地域に変革をもたらす  
ー愛媛から始めるDXー  
①IPSJ KIDS, ②大学共通テスト解説  
第4回中高生情報学研究コンテスト  
切迫する社会課題の克服に向けたAI/  
ビッグデータビジネスの新展開と人材育成



今月の会員の広場では、12月号へのご意見・ご感想を紹介いたします。

#### 巻頭コラム「第二大航海時代に向けて」

- 時代の急激な変化が伝わってきた。(祖父江真一)
- 興味を惹かれる書き方の文章である。(鈴木広人)
- IchigoJamの開発者であることを知った。本稿では、それを改良し新たな製品を開発した。(近藤 正)
- このコラムからかつて読んだ『宇宙移民計画—環境と資源を求めて』(講談社ブルーバックス)を連想しました。コンピュータとともに進化する人類についてのロマンある文章だと思います。(松浦満夫)
- 第二航海は、どうしていきたくないか、伝わっていない。(祖父江真一)
- 2ページ目に記載されている内容を掲載している意図が不明。(鈴木広人)

#### 特別解説「教職課程に関する規則の改正と教員免許更新制廃止

- 教職課程に関する規則の改正において、本会からICT活用指導力を総論的に修得できる科目の新設等について意見を提出していることを初めて知りました。(鶴岡信治)
- 免許更新制度が廃止になったことはよかったです。(近藤 正)
- とても興味深い記事でした。教育現場で本当に必要な知識や技術を広げる努力がまさに必要だと感じました。(小西敏雄)
- マスコミに本会からICT活用指導力を総論的に修得できる科目の新設等について意見を提出したことを大きく報道するように呼びかけていただきたい。(鶴岡信治)
- 実務的なリテラシー科目の必要性の有無や、今後の展開など議論されているとさらに良い。(匿名希望)

#### 特集「植物と情報処理」

##### 「0. 編集にあたって」

- 「植物」テーマは容易でなかったと思います。(伊藤治夫)
- 確かに植物学を追究している人にも否応なくIoTやAI情報化電子情報通信技術の進歩という新しい波は押し寄せている。その分野からの知見の提供や課題開示は新しいものを生み出す原動力になり得るだろう。特集として面白い企画である。(広野淳之)

■「植物+情報処理」工業化への関門の病気検知を混ぜてほしかった。(伊藤治夫)

##### 「1.1 植物の運動を駆動する情報処理とメカニクス」

- 対比とLINKのさせ方が目からうろこでした。(祖父江真一)
- 植物の高速運動を実現している、バネ構造を示した図が分かりやすかった。(鈴木広人)
- 近い将来、植物をモデルにし、植物中の情報処理を模倣したロボットが造られるかもしれない、と感じた。(佐藤章博)
- 植物構造を応用した機械等の例を紹介してほしい。(鈴木広人)

##### 「1.2 花の中の知られざる情報処理」

■植物の中の処理と情報処理学を照らし合わせる表現が面白い。(匿名希望)

■多くの細胞が協調して植物体を成長させる様子はこれからの世界の情報体にとって示唆的で刺激的な記事でした。(岡本克也)

■素人にはたとえば図2の中の各組織が識別しにくい。(匿名希望)

##### 「1.3 ゲノムに隠された情報が進化を導く」

■温度や湿度、風速といった単純なパラメータではなくもっと高次の情報を検知できる、気候センサ、気象センサと呼べるようなデバイスが、植物を模倣することで今後作られていくかもしれない。(佐藤章博)

##### 「1.4 植物の窒素吸収を制御する長距離情報伝達」

■分子の伝達方法にまだ、機械は追いついていないのかと改めて思いました。(祖父江真一)

■植物の「全体的窒素要求シグナリング」の分子メカニズムを解明した研究がとても興味深いです。(松浦満夫)

##### 「2.1 AI技術による植物発生研究」

■植物学がこれほど情報処理技術、特にAIと密に関係して研究されているとは知らず、大変ためになりました。今後、植物学とAIがそれぞれさらに進化するに従い、ますます連携の度合いも深まっていくと思いました。(後藤正宏)

■細胞の増え方は、一定サイクルで個々が2つに分裂するが、誕生後最初のサイクルだけ分裂しないで成長に費やす、と単純化でき、これに従うと細胞の総数はフィボナッチ数列で表され、隣接2項の比は黄金数に収束する、という例を思い出す。実際、植物の形態はかなり奥深くモデル化が可能なのだろう。(佐藤章博)

##### 「2.3 植物の生産力を最大化する情報処理技術」

■植物工場はSDGsを実現する有効な手段だと思います。資源に乏しい日本にとって、この分野はとても重要であり、今後、得意分野として発展していくことを期待します。(後藤正宏)

■実用化され、SDGsの目標(2, 3, 7や9)に役立つものになる、そんな未来が訪れることを期待したい。(佐藤章博)

##### 「2.4 画像認識分野から見た植物の研究」

■私も情報技術の人間なので、植物学とは真反対の技術者と感



じていました。筆者も植物学との文化の違いに戸惑われたとありましたが、その感覚はよく理解できました。しかし、その畑違いの学問と連携されて新たな研究にチャレンジされていることに共感しました。(後藤正宏)

■著者の立場における植物と情報処理のつながりを、経緯を通して理解できた。(匿名希望)

■植物の葉の重なりに関してもう少しボリュームがあれば、その認識の難しさが伝わったと思う。(匿名希望)

「3. 座談会：ゴール設定の違いが難しさ「情報植物学」という新たな分野への挑戦」

■植物学者と情報学者とが組み「新学術領域」を作れるかという議論は興味深かった。ほかの領域から見た情報学の立ち位置を改めて考える機会になった。(小橋喜嗣)

■植物学者と情報学者で「情報」の解釈・意味が同じなのか、植物は情報処理に熱を出さないのに、なぜコンピュータは熱くなるのか、という議論が面白い。(匿名希望)

#### 教育コーナー「べた語義」

「プログラミングの面白さを伝えるには」

■どんな学習か見てみたいになりました。特に助言内容に興味津々です。(伊藤治夫)

■ご意見に同感です。プログラミングの面白さを伝えることは技術者養成には欠かせないと思います。(小西敏雄)

■具体例は書きにくいと思いますが、消化不良でした。(伊藤治夫)  
「未就学児を対象にしたプログラミング教育」

■未就学児を対象にした場合の課題と考察がされており、良い知見を得られた。(印部太智)

■ビジュアルプログラミングによるプログラム教育の効果に今ひとつ納得できないので、「本当に正しいビジュアルプログラミングによるプログラム教育の事例だ!」と感じました。(山本一公)

■実際に操作させていただきました。図がもう少し大きいと、どのように幼児が学んだかが分かり、さらに理解が深まったと思います。(匿名希望)

「ジェンダーインクルーシブなプログラミング教材の開発」

■米国での数値も知りたかったが世界的にはほぼ同じ傾向なのだろう。少なくとも教育現場においては、すべての生徒が興味を抱くようなカリキュラムを構成するべきである。(広野淳之)

■「データの視覚化」を行うプログラミング教育という視点が良かったです。(松浦満夫)

■男女共学の高校でプログラミングを教えていました。興味は教材や指導にも関係すると思います。やってみることで興味を持ち、進路を変えた生徒もいます。アートを介したプログ

ラミングに興味を持つ女子・男子の数など具体的効果が気になります。(匿名希望)

■筆者が期待するIT分野での女性の活躍参画が高まることと、プログラミングができるようになることは、直結するのだろうか。昨今、さまざまなツールもあるのでその使用方法を学ぶところからスタートというアプローチもあるように思う。(広野淳之)

#### 連載「情報の授業をしよう!:ピクトグラムを用いた横断的な授業実践」

■新学習指導要領の「情報」を実際に指導されている先生の苦労がよく理解できました。今回は「情報」の中の「コミュニケーションと情報デザイン」に関するご報告でしたが、デザインの内容など改めて「情報」という教科がいろいろな側面を持った教科であり、限られた時間で指導するのは大変なことだと感じました。(後藤正宏)

■面白い試みだと思いました。(小西敏雄)

■生徒が作成したピクトグラムは、人の役に立ったのか、将来外国人にも危険を知らせることができるのか、という見地の授業も期待します。(匿名希望)

■対象生徒の学習状況や卒業後など、多くの生徒の学習習熟度が分かると、さらにヒントとなる気がします。(匿名希望)

#### 連載「ビブリオ・トーク：Rethinking Engineering Education The CDIO Approach (Second Edition)」

■法的学位がまだ認められない高専がCDIOイニシアチブに複数校が加盟している紹介は感謝するばかりです。理論と実践を重んじる工学教育に注目していただきありがとうございます。(伊藤治夫)

■PBL教育については知っていたがCDIO教育については初めて知った。理論だけでなく実践にも目を向け始めた教育現場の変化には注目していきたい。(広野淳之)

■企業の研究開発部門でたたきに使われる「新規性」研究とモノ造りを遠ざける魔の言葉にも触れてほしかった。(伊藤治夫)

■筆者のCDIO教育に対する熱意は伝わったが、書の内容についてもう少し示してほしかった。(広野淳之)

#### 連載「ビブリオ・トーク：イラストで学ぶ 人工知能概論 改訂第2版」

■気になっていた本についての書評で参考になった(上田晴康)

■どのような本がよく分かる紹介で良かった。わがままを言うと、紹介者にとっての個人的な感想のようなものがもう少しあると、より面白いと思う。(柴田 晃)

■ちょうどこんな本を探していたので良いタイミングでした。さっそく読んでみます。(岡本克也)

■大学の初学年向けあるいは人工知能の全体像をざっとおさらいしたい研究者向けの本の書評を強く意識しているが、内容の網羅性とその関連がよく伝わり、ぜひ読んでみたいと思わせる書きっぷりである。(匿名希望)

連載「5分で分かる!? 有名論文ナメ読み: John Jumper et al.: Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold」

■タンパク質の立体構造予測の精度が AlphaFold2 により向上していることが興味深い。(匿名希望)

■偶然かもしれないが特集記事(植物と情報処理)と関連のある書評だった。特集記事の「編集にあたって」と、本書評の間で相互に参照できるようになっているとより良かった(見落としてしまう可能性が減るので)。(上田晴康)

連載「先生、質問です！」

■質問が素晴らしい。また、回答によって本会の歴史が知れたのも良かった。(柴田 晃)

■今月号の記事とは直接は関係ないですが、このコーナーの対象読者が誰なのか、質問内容を見ていて不明瞭なときがある。連載最初 2018 年 8 月号にまで遡ればコーナーの主旨についての記述があるが、新入会員や会員外の読者などには位置づけが不明と感じる読者がいるかもしれない。ページ内のどこかに「ジュニア会員からの質問に答えるコーナー」など記述するというのはいかがでしょうか?(広野淳之)

委員会から「今年度もやります! 全国大会の“デリバリー”」

■4コマ漫画で概要が分かりやすく、興味を持ったので応募してみようと思う。(柴田 晃)

■全国大会のページなどでは、もう少し活動の内容を詳しく書いてほしいと思いました。メールで送る場合はどの程度の記事が期待されているのかなど読み取れなかった。多分専門分野として登録した領域で、お届け依頼があった場合に採用されるのだろうかということは4コマから読み取れたが、それ以外がよく分からない。(柴田 晃)

連載「教科『情報』の入学試験問題って?:『情報通信ネットワーク』の例題」

■分かりやすい記事でした。(井手広康)

■プログラミングだけでなくネットワークも対象であることが新鮮だった。(匿名希望)

■家庭内のネットワークを例にデータの流れや障害の発生個所の確認はとても身近に感じられました。(岡本克也)

会誌の内容や今後取り上げてほしいテーマに関して、以下のようなお意見やご要望をお寄せいただきました。今後の参考にいたします。

■量子コンピュータを取り上げてほしい。(匿名希望)

■メタバース特集を読みたいです。(匿名希望/ジュニア会員)

■行政システムの電子化から十数年経過したが、市民がスマートデバイスを手に入れてどう変化しているのか知りたい。(匿名希望)

「先生、質問です！」には以下の質問をいただきました。

■「ビジコン 141-PF」の歴史的価値?(伊藤治夫)

■大学教員と企業研究所の働き方の違い。(匿名希望)

■触覚の伝送の話題はありましたが、味覚、嗅覚の伝送は近々実現されますか?(匿名希望)

note「情報処理」(<https://note.com/ipsj>)に掲載されている記事に関して、以下のようなご意見やご要望をお寄せいただきました。今後の参考にいたします。

■にわか技術者とは別の視線が参考になります。(伊藤治夫)

■note形式は読みにくい。PDFの方がよい。(匿名希望)

EPUBに関して、以下のようなご意見やご要望をお寄せいただきました。今後の参考にいたします。

■記事として見づらくはないが、スクロールが多くなり読む気が少し下がる。(匿名希望)

■検索や記事を探しやすいレイアウトに仕上がっています。文字の大きさも丁度良く、読みやすいです。(匿名希望)

オンライン化について、以下のようなご意見やご要望をお寄せいただきました。今後の参考にいたします。

■保管スペースがいらす、検索できるので、有用である。(鶴岡信治)

■「一言居士」慎重論はあるとは存じますが、できれば最先端を!(伊藤治夫)

■ローカルで参照できるのでPDF版は必要と考えています。(匿名希望)

■紙媒体でゆっくり読めるメリットを残してほしいです。(小西敏雄)

【本欄担当 梁 俊、伊藤将志/会員サービス分野】

これらのコメントは Web 版会員の広場「読者からの声」< URL : <https://www.ipsj.or.jp/magazine/dokusha.html> > にも掲載しています。Web 版では、紙面の制限などのため掲載できなかったコメントも掲載していますので、ぜひ、こちらもお見逃しください。会誌や掲載記事に関するご意見・ご感想は学会 Web ページでも受け付けております。今後もより良い会誌を作るため、ぜひ皆様のお声をお寄せください。

「情報処理」アンケート回答フォーム▶

<https://www.ipsj.or.jp/magazine/enquete.html>



# 人材募集

(有料会告)

**申込方法:** 任意の用紙に件名, 申込者氏名, 勤務先, 職名, 住所, 電話番号および請求書に記載する「宛名」, Web掲載の有無などを記載し, 掲載希望原稿 ([募集職種, 募集人員, (所属), 専門分野, (担当科目), 応募資格, 着任時期, 提出書類, 応募締切, 送付先, 照会先]) を添えて下記の申込先へ, E-mail, Fax または郵送にてお申し込みください。

\*都合により編集させていただく場合がありますので, ご了承ください。

**申込期限:** 毎月15日を締切日とし翌月号(15日発行)に掲載します。

**掲載料金:** 国公立教育機関, 国公立研究機関 22,000円(税10%込)

賛助会員(企業) 33,000円(税10%込)

賛助会員以外の企業 55,000円(税10%込)

\*本会誌へ掲載依頼いただいた場合に限り, 追加料金4,400円(税10%込)で同一内容を本会Webページに掲載できます。

**申込先:** 情報処理学会 会誌編集部(有料会告係) E-mail: editj@ipsj.or.jp Fax(03)3518-8375

\*原稿受付の際には必ず原稿受領のお知らせを差し上げています。もし3日以内(土日祝日除く)に返信がない場合は念のため確認のご連絡をください。

有  
料  
会  
告

## \*特に指定がないかぎり履歴書には写真を貼付のこと

### ■神奈川工科大学情報学部情報メディア学科

**募集人員** 教授または准教授(特任可) 1名

**専門分野** 人間情報工学, コンテンツ工学などのデジタルコンテンツ制作にかかわる技術分野

**担当予定科目** メディアコンテンツ制作概論, 基礎ユニット, 専門ユニット, メディア実践講座, 卒業研究等。これら以外にも新規開設科目を担当していただくことがあります

**応募資格** 次の(1)から(3)の条件をすべて満たす方

(1) 本学情報メディア学科において, 人間情報工学, コンテンツ工学などのデジタルコンテンツ制作にかかわる技術分野の教育・研究に熱意を有すること, (2) 博士号取得もしくは同等の業績あるいは関連分野の業務成果を有すること, (3) 本学の業務に, 積極的かつ協調的に取り組むことができること

**着任時期** 2022年9月1日またはそれ以降のできるだけ早い時期

**提出書類** (1) 履歴書<sup>☆1</sup>, (2) 研究業績リスト<sup>☆2</sup>, (3) 所属学会および社会における活動等<sup>☆3</sup>, (4) 主要論文5編以内(コピー可), (5) 教育・研究に対する抱負(1,000字程度), (6) 推薦書(1通) または応募者について照会できる方2名の氏名・所属・連絡先

(1)(2)(3)は本学Webページ「教職員採用情報」(<http://www.kait.jp/recruit/>)から本学所定の教員用履歴書・業績書(Wordファイル)をダウンロードし, 記入してください

<sup>☆1</sup> 履歴書(A)に記入

<sup>☆2</sup> 学協会印刷発表論文は履歴書(B-1)に, 査読付き国際会議発表論文は履歴書(B-2)に, 作品, その他の発表論文・特許等は分類して履歴書(B-3)に, それぞれ新しい順に番号を付けて記入

<sup>☆3</sup> 履歴書(C)に記入

**応募期間** 2021年12月23日~2022年3月31日

なお, 応募書類を受付次第, 順次, 面接~決定を実施する場合がある

**送付先** 〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030

庶務担当部長気付 情報メディア学科・コンテンツ技術・教員選考委員長

応募書類は, 封筒の表に「情報メディア学科教員(コンテンツ技術)応募」と朱書し, 簡易書留または書留でお送りください。なお, 応募書類に記載された個人情報, 本選考以外の目的で使用しません。また, 提出書類は返却いたしません

**照会先** 情報学部情報メディア学科 西口磯春

E-mail: nishiguc@ic.kanagawa-it.ac.jp

### ■九州工業大学大学院情報工学研究院

**募集人員** 准教授または助教 1名(テニュアトラック)

**専門分野** 情報工学分野(バイオインフォマティクス等)

**担当教育研究** 生命医科学, 化学, 情報科学, 工学を統合する教育・研究に強い意欲を持ち, バイオインフォマティクスの新領域を開拓すること。近年の生命医科学分野で生み出されてきた多階層オミックスデータ等のビッグデータの解析, AI・機械学習を用いたデータ駆動型アプローチによる医療・創薬などのヘルスケア研究を遂行すること

**着任時期** 2022年9月1日以降のできるだけ早い時期

**応募締切** 2022年4月15日(必着)

**その他** 【任期】採用後5年間のテニュアトラック制

応募資格, 提出書類, 送付先, 照会先を含む詳細は下記をご覧ください

<https://www.kyutech.ac.jp/information/saiyo/kyoin.html>

[https://jrecin.jst.go.jp/seek/SeekJorDetail?fn=3&id=D122010123&ln\\_jor=0](https://jrecin.jst.go.jp/seek/SeekJorDetail?fn=3&id=D122010123&ln_jor=0)





**情報処理学会 第 84 回全国大会 聴講申込受付中**  
**イベント企画のみの聴講参加は「無料」!! ハイブリッド開催**  
 申込はこちらから⇒ <https://www.ipsj.or.jp/event/taikai/84/>  
 ぜひ皆様お誘い合わせの上、奮ってご参加ください

『変わる社会と情報処理』

大会会期：2022年3月3日（木）～5日（土）  
 大会会場：愛媛大学 城北キャンパス（愛媛県松山市文京町3） ハイブリッド開催  
 共 催：愛媛大学  
 後 援：愛媛県 愛媛県教育委員会 全国高等学校情報教育研究会

情報処理学会第84回全国大会の「大会聴講参加」の申込を受付中です。

- イベント会場・特別会場において開催される「特別講演／招待講演／イベント企画／各種展示」を聴講・ご覧になる場合  
→「大会イベント企画限定聴講参加」（無料）
- 上記に加え、「一般セッション／学生セッション」を聴講する場合  
→「大会共通聴講参加」（有料）

イベント企画のみ聴講希望の方は、大会 Web ページから申込みをする際、「大会イベント企画限定聴講参加」にお申し込みください。  
 通常の一般セッション・学生セッションも聴講希望の場合は、「大会共通聴講参加」にお申し込みください（聴講参加費は有料となります）

**申込受付期間：2021年12月6日（月）～2022年2月15日（火）**

**招待講演・特別講演・公開講演企画【聴講参加無料】**：招待講演4件、特別講演3件、公開講演1件を予定しております。

招待講演 -1	3日（木）16：20～16：35 「Changing Society and Information Processing - It is all about Big Data!」(The Korean Institute of Information Scientists and Engineers)
招待講演 -2	3日（木）16：35～16：50 「CCF, Advanced during the Epidemic in 2021」(China Computer Federation)
招待講演 -3	3日（木）16：50～17：05 「Charting a Path for the Computing Profession」(IEEE Computer Society)
招待講演 -4	3日（木）17：05～17：20 「Intelligence? Smartness? Emotion? What do we expect from future computing machinery?」(Association for Computing Machinery)
特別講演	4日（金）15：20～16：20 「『ポスト量子』暗号 -- 量子計算機に対して安全な暗号の最前線」
	4日（金）16：30～17：30 「スパコン富岳による飛沫エアロゾル感染リスク評価のデジタルトランスフォーメーション」
	5日（土）15：30～17：30 IPSJ-ONE
公開講演	5日（土）13：20～15：20 「デジタルが地域に変革をもたらす - 愛媛から始める DX -」

**イベント企画【聴講参加無料】**：各イベント企画では、その分野の最前線で活躍されておられる方をお招きし、講演・パネル討論等の開催を予定しております。

第1 イベント会場	3日 9：30～11：30 「一次産業と ICT」
	4日 9：30～11：30 「ヘルスケア情報の利活用資する匿名加工技術の実現に向けて～匿名加工コンテスト PWS Cup 2021～」
	4日 12：40～15：10 「知能と計算とアーキテクチャの新しい関係を目指して」
	5日 9：30～12：00 「情報入試ー共通テストと個別試験（仮題）」
	5日 13：20～15：20 「① IPSJ KIDS, ②大学共通テスト解説」
第2 イベント会場	3日 9：30～11：30 「2021年サイバー事件回顧録～技術と法制度の両面から～」
	3日 12：40～15：10 「～コンピュータパイオニアが語る～『私の詩と真実』」（オンライン）
	4日 9：30～11：30 「一般情報教育と数理・データサイエンス・AI」
	4日 12：40～15：10 「新世代企画委員会のこれまでとこれから」
	5日 9：30～15：20 「第14回情報システム教育コンテスト」
第3 イベント会場	3日 9：30～11：30 「革新的アルゴリズム基盤の構築に向けて」
	3日 12：40～15：10 「IoT が拓く未来：～2030年の未来予想図～」
	4日 9：30～11：30 「アジャイル開発の契約上の問題点と対策」
	4日 12：40～15：10 「日本機械学会／情報処理学会 合同企画 モノづくりと情報処理における人材育成について」
	5日 9：30～12：00 「初等中等教員研究発表セッション」

第4イベント会場	3日 9:30～11:30	「IT情報系キャリア研究セッション」
	3日 12:30～13:30	「AI TECH TALK」
	3日 15:20～17:20	「IT情報系キャリア研究セッション」
	4日 15:20～16:20	「インダストリアルセッション」
	5日 9:30～12:00	「情報科学の達人」
5日 13:20～15:20	「中高生情報学研究コンテスト」(オンライン)	
第5イベント会場	3日 9:30～11:30	「8周年を迎えた認定情報技術者制度 CITP (Certified IT Professional) の現状と今後の方向性」(オンライン)
	4日 12:40～15:10	「論文必勝法」(オンライン)
	5日 13:20～15:20	「切迫する社会課題の克服に向けた AI/ビッグデータビジネスの新展開と人材育成」(オンライン)
第6イベント会場	5日 9:30～11:30	「Exciting Coding! Junior2022@Ehime」

#### 一般セッション・学生セッション【聴講参加 有料】：

約1,500件の研究成果発表があります。大会3日間でおおよそ30会場を使用して、190あまりのセッションが生まれ、活発な発表、議論・討論が行われます。

#### ■聴講参加費・講演論文集代(税込)

現地参加、オンライン参加ともに同価格です。学生の大会共通聴講参加費は「無料」です。

申込種別	価格(～最終日)
大会イベント企画限定聴講参加	無料
大会共通聴講参加(正会員) *全論文のPDFアクセス権付	10,000円
大会共通聴講参加(一般非会員) *全論文のPDFアクセス権付	17,000円
大会共通聴講参加(学生会員・ジュニア会員・学生非会員)	無料

#### ◇留意事項

※「大会イベント企画限定聴講参加」は、特別講演、招待講演、イベント企画、IT情報系キャリアセッションのみ聴講参加可能です。一般セッション・学生セッションの聴講はできませんのでご注意ください。

一般セッション・学生セッションも聴講参加希望の場合には、大会共通聴講参加(有料)にお申し込みください。学生の方は大会共通聴講参加費が「無料」です。

※「大会共通聴講参加」は、一般セッション・学生セッションを含む大会すべてのセッションの聴講参加が可能です。

※講演参加申込の方、座長、イベント企画者および登壇者は聴講参加申込は不要です。座長には別途ご請求の案内をいたします。

#### ◇ハイブリッド開催について

オンラインミーティングツール Zoom を併用しながら現地でイベント企画・各発表セッションを開催致します。インターネット・オーディオ機器に接続できる PC とヘッドセットを各自で必ずご準備願います。

イベントによっては、オンラインのみのものがあります。現地ではパブリックビューイング会場でご覧いただけます。

#### ■懇親会(有料)

大会参加者の皆様の親睦をぜひ深めてください。

開催日時：2022年3月3日(木) 18:00～20:00(予定)

開催会場：ホテルメルパルク松山(松山市道後姫塚123-2)

#### ■講演論文集代(税込・送料込)

残部のある限り販売を行います。受け取りは大会終了後の郵送となります。

申込種別	価格
講演論文集分冊(個人・法人問わず)	14,000円
講演論文集セット *DVD-ROM 1枚付き(個人・法人問わず)	66,000円
講演論文集 DVD-ROM(個人)	10,000円
講演論文集 DVD-ROM(法人)	60,000円

#### ■聴講参加および講演論文集の予約申込、詳細は、以下のサイトからお願いいたします。

第84回全国大会公式 Web サイト <https://www.ipsj.or.jp/event/taikai/84/>

#### ■問合せ先

一般社団法人情報処理学会 事業部門

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-5 化学会館4F 電話 (03) 3518-8373 E-mail: ipsjtaikai@ipsj.or.jp



# FIT 2022 第 21 回情報科学技術フォーラム 選奨論文・一般論文 講演募集予告

会 期：2022年9月13日（火）～15日（木）

会 場：慶應義塾大学 矢上キャンパス

受付期間(予定)：2022年3月29日（火）～5月11日（水）

- ◆論文ページ数：2～8ページ程度
- ◆講演時間：20分
- ◆3ページ目以降は追加ページ代（4,000円／ページ）が必要です

電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ（ISS）並びにヒューマンコミュニケーショングループ（HCG）と情報処理学会（IPSI）、2002年から毎年秋季に合同で「情報科学技術フォーラム(FIT: Forum on Information Technology)」を開催しています。2022年9月には、21回目を慶應義塾大学 矢上キャンパスで開催します。FITは、両学会の大会の流れをくむものであると同時に、従来の大会の形式に変わらずに新しい発表形式を導入し、タイムリーな情報発信、活気ある議論・討論、多彩な企画、他分野研究者との交流を実現してきます。皆様の研究成果発表の場として、標記のとおり論文発表を募集致しますので奮ってお申込み下さい。

## ◆申込主要日程（予定）

登録申込／投稿受付期間：2022年3月29日（火）から 2022年5月11日（水）まで

最終掲載原稿締切：2022年6月24日（金）

※ FIT2017 より、査読付き論文は廃止とし、選奨論文制度を取り入れました。

※ 登録申込と原稿投稿は上記のFIT2022 Webページよりお願い致します。詳細は決定次第 Webページでお知らせ致します。

## ◆表彰

FITには、以下の表彰制度がありますので是非ともチャレンジして下さい。

いずれの賞も、電子情報通信学会又は情報処理学会の会員であることが受賞条件となりますのでこの機会に是非御入会下さい。

船井ベストペーパー	選奨論文の中から、FIT 学術賞選定委員会で審査の上3件選定。賞金は船井情報科学振興財団より20万円贈呈。

## ◆選奨論文（4～8 ページ程度）

投稿された論文の担当研究会を決定していただきます。FIT2022 Web ページに掲載の研究会取り扱い分野をよく御確認のうえ御自身の論文内容と一致した研究会を、申込者御自身の責任において投稿時に適切に選択して下さい。

船井ベストペーパー賞、FIT 論文賞への審査を希望する場合は、Web からの講演申込みの際に必ず論文形式で『選奨論文』を選択して下さい。但し、賞を前提とした論文形式となりますので、電子情報通信学会又は情報処理学会の会員であることが投稿条件となります。非会員の方は御入会手続きをお済ませの上御投稿下さい。選奨論文は FIT 初日の選奨セッションに組み込まれ、各セッションにて選奨委員2名による1次審査を行います。1次審査の結果は当日の夕方までに大会会場に掲示されます。2次審査はFIT終了後実施され、上位3件が船井ベストペーパー賞、次点7件程度がFIT 論文賞の受賞となります。

※4 ページ以上の投稿が必須ですが、3 ページ目からは追加ページ代（4,000円／ページ）が発生します。例えば6 ページ投稿の場合、4 ページ分の追加ページ代が発生しますので、講演参加費のほかに「4,000円×4=16,000円」の追加費用が必要となります。

## ◆一般論文（2～8 ページ程度）

FIT2022 Web ページに掲載の研究会取り扱い分野をよく御確認のうえ御自身の論文内容と一致した研究会を、申込者御自身の責任において適切に選択して下さい。

※3 ページ以上の投稿される場合は、3 ページ目からは追加ページ代（4,000円／ページ）が発生します。例えば4 ページ投稿の場合、2 ページ分の追加ページ代が発生しますので、講演参加費のほかに「4,000円×2=8,000円」の追加費用が必要となります。

## ◆論文誌推薦制度

選奨論文の中から船井ベストペーパー賞の審査を通して優秀な論文と判断されたものを、FIT プログラム委員会が電子情報通信学会または情報処理学会（FIT 講演申込フォームの講演応募分野（研究会）で選択した研究会が属する学会）の論文誌へ推薦します。掲載の採否は、それぞれの学会の論文誌編集委員会が決定します。論文誌への投稿の際には、投稿先論文誌編集委員会の評価基準を満足しうる、完成度の高い論文に仕上げて頂くことをお勧めします。なお、推薦を辞退することも可能です。

## ◆問合せ先（FIT2022事務局）

〒101-0062 千代田区神田駿河台1-5 化学会館4階

情報処理学会 事業部門 TEL. 03-3518-8373 FAX. 03-3518-8375 E-mail: ipsjfit@ipsj.or.jp



# 2022 年度会誌「情報処理」モニタ募集のお知らせ

会誌編集委員会

会誌「情報処理」をより良くするために編集委員一同努力を続けておりますが、会員の方々の評価や希望をうかがい、今後の改善に役立てるために、モニタ制度を設けております。関心のある方はぜひふるってご応募ください。

**応募の資格** 本会会員で、モニタの役割を積極的に果たしていただける方。

**モニタの役割** 学会 Web ページ (<https://www.ipsj.or.jp/magazine/enquete.html>) から、毎月アンケートに回答する。  
◇記事に対する評価 ◇記事に対する感想 ◇意見 ◇記事テーマの提案  
◇そのほか全般的な意見・提案など

注) 記事をすべて読むといったことは必ずしも必要ではありません。自分の立場や問題意識、得意とする分野などを基準とした「独断と偏見による」自由な意見を期待します。

**期 間** 原則として1年間(2022年4月～2023年3月)。\*最長3年までとします。

**対 象 号** 会誌「情報処理」63巻5号～64巻4号

**謝 礼** 貴重なご意見をいただいた方には、モニタ任期終了後薄謝または記念品を贈呈します。

**募集人員** 特に定めませんが、応募者数によっては当委員会で調整させていただくことがあります。

**応募締切** 2022年2月25日(金)必着

**そ の 他** ジュニア会員で、会誌(冊子体)の送付を希望される方には、モニタ期間中会誌を送付いたします。(先着50名、アンケート(12回)に必ず回答いただくことを条件とします)  
希望する場合は、申込書の要望欄に<会誌送付希望>とお書きください。

**申 込** 以下 Web ページ内<2022 年度 会誌「情報処理」モニタ申込フォーム>よりお申し込みください。

<https://www.ipsj.or.jp/magazine/topics/2022monitor.html>



**照 会 先** 情報処理学会 会誌編集部門(モニタ係) E-mail: editj@ipsj.or.jp



この記事のこんなところが良かった!



こんな記事が読んでみたい!



この記事のここを改善してほしい

ご意見お待ちしております!

# 情報処理学会の会員になりませんか!

www.ipsj.or.jp

新規会員  
募集中

一般社団法人 情報処理学会は、IT に関する専門家集団として健全な情報化社会の実現に向けて、学術・文化・産業等の多方面に貢献しています。

## ■活動の概要

- 出版活動（学会誌「情報処理」、論文誌、デジタルプラクティス、単行本の発行）、電子図書館への掲載
- 各種行事の開催（研究発表会、全国大会、FIT（情報科学技術フォーラム）、シンポジウム、連続セミナー、短期集中セミナー他）
- 教育活動（大学の標準カリキュラム策定、JABEE 認定審査、認定情報技術者（CITP）認証、教員免許更新講習）
- 国際交流（IFIP への加盟、海外学協会との提携）
- 標準化活動（情報技術に関する国際標準規格開発および普及活動）
- その他の活動（各種提言・コンピュータ博物館の運営・情報処理技術遺産の認定・表彰・支部活動他）

## ■会員になるには

入会金（正会員のみ）と会費をお振り込みの上、入会申込書をお送りください。理事会で承認後会員証（賛助会員除く）をお送ります。情報処理学会の会員は、個人会員と賛助会員から構成されています。

### 個人会員

- 名誉会員：本会の活動において特別な功績があり、総会で推薦された個人
- 正会員：本会の目的に賛同して入会した個人で、本会の中心的会員
- 学生会員：学校に在学中の個人
- ジュニア会員：小学生～大学学部3年生以下の学生（会費無料）

### 賛助会員

本会の活動をサポートする団体または個人

## ■ご入会いただくと、こんな良いことがあります。

### 1 最新技術を紹介する会誌「情報処理」が毎月お手元に届きます（ジュニア会員は電子版のみ）。

特集：より自由でより没入感の高いイマーシブメディア／デジタルアーキテクチャデザイン／触覚と情報処理／最新のデジタル・フォレンジック事情／人の動きを捉え社会を動かす人口流動統計／身近になった対話システム／観光情報学—スマートツーリズムに向けた研究動向—／植物と情報処理／自動運転元年／スマートファクトリーは工場の何を変えるのか？ 他

### 2 IT実践の現場で創出された創意工夫、新しい利用法、教訓などを紹介する「デジタルプラクティス」を読むことができます（電子版のみ）。

特集：オープンサイエンスを支える研究データ基盤／感性情報学 最前線／快適な運用管理を支えるインターネットと運用技術／DXのプラクティス／ビッグデータのデータサイエンス 他

### 3 電子図書館で「情報処理」の過去の記事を見ることができます。

### 4 「連続セミナー」に会員価格（4,000 円お得）で参加できます。

時代に即しかつ技術の先進性に富んだ内容をテーマに、その分野の第一線で活躍している講師を招いて年数回にわたり開催しています。2021年度は「ニューノーマル時代に向けた情報技術の潮流」をテーマに、12回オンラインにて開催しました。

### 5 ホットピックスに対応する「シンポジウム・セミナー」（5,000 円以上お得）や「研究会」に会員価格で参加できます。

クラウドコンピューティング、ソフトウェア開発、システム・アーキテクチャ、情報家電システム、LSI設計、高性能計算技術、プログラミング、アルゴリズム、ゲーム工学、セキュリティ、量子ソフトウェア、IoT、情報デザイン、情報倫理、バイオ、高齢社会デザイン、コンピュータグラフィックス、ビッグデータ、モバイルヘルスケア、スマートコミュニティ、音楽情報処理、ラーニングアナリティクス、障害者支援技術...

### 6 出版図書が会員割引で購入できます。

IT Text シリーズ、日本のコンピュータ史等

他にも会員向けサービスがたくさんあります。詳細は学会 Web サイトをご覧ください。



2021年度

ホット  
ピックス

お問合せは、  
一般社団法人 情報処理学会 会員サービス部門

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-5 化学会館 4F  
Tel.(03)3518-8370 Fax.(03)3518-8375 mem@ipsj.or.jp

## CONTENTS

### Preface

- 106 **To CREATORS-creator from a Creator**  
Shunsuke NAKAMURA (SHIKUMI DESIGN, Inc.)

### Special Features

#### *Intelligent Computing - AI Encounters Hardware -*

- 108 **Foreword**  
Mikiko SODE TANAKA (International College of Technology)
- 110 **Outline**

### "Peta-gogy" for Future

- 115 **Programming Studied in High School Days**  
Hirokazu BANDO (Dokkyo Medical Univ.)
- 116 **Construction of a Website to Provide Information on Outbreaks of COVID-19 at Universities**  
Hitoshi INOUE (Gunma Univ.)

- 120 **User Support for ICT Services in the University : Now and in the Future**  
Tohru KONDO (Hiroshima Univ.)

### Let's Learn Informatics

- 125 **Learning Programming with Scratch, Scrapbox, and LoLoNotes**  
Jun UOZUMI (Aichi Prefectural Kyowa High School)

- 
- 112 **Questions for Experts**
- 132 **Committee Reports**
- 134 **IP SJ Activity Report**
- 144 **Biblio Talk**
- 146 **Skimming a Famous Paper in Five Minutes**

### Online Only

### Special Features

#### *Intelligent Computing - AI Encounters Hardware -*

- e1 **Does AI Require New Hardware to Ride?**  
Masato MOTOMURA (Tokyo Institute of Technology)
- e8 **Re-pioneering Stochastic Computing Towards Low-Power Edge-AI Devices with Inference and Online Learning Abilities**  
Tetsuya ASAI (Hokkaido Univ.)
- e15 **Reconsidering the Relationship Between Image Resolution and Intelligent Processing - Towards High-resolution Real-time Processing Using AI -**  
Masayuki IKEBE (RCIQE, Hokkaido Univ.)

- e23 **Hardware for Machine Learning, Machine Learning Algorithm for Hardware**  
Shinya TAKAMAEDA-YAMAZAKI (The Univ. of Tokyo)
- e31 **Random/Sparse/Stochastic : Towards a New Structure of Computation**  
Jaehoon YU (Tokyo Institute of Technology)



### 読後のご意見をお送りください

本誌では、現在約 200 名の方々に毎号のモニタをお願いしておりますが、より多くの読者の皆さんからのご意見、ご提案をおうかがいし、誌面の充実に役立てていきたいと考えておりますので、以下 Web ページから奮って事務局までお寄せください。

「情報処理」アンケートページ <https://www.ipsj.or.jp/magazine/enquete.html>

一般社団法人 情報処理学会 会誌編集部門 E-mail: editj@ipsj.or.jp



私は「僕と一緒にAIチップを作ろう。夢ではない、実現できる」という言葉に騙され半導体の道に進んだ。当時パーソナルコンピュータに心酔していた私は希望に燃え社会人としての第一歩を踏み出した。しかしスーパーコンピュータなど最新技術開発に携わることはできたが、AIのAの字も見えない会社生活を送っていた。

NVIDIAがGPUを発売し、大きな成果を出し始めると自分の見識のなさを理解した。我々が開発していたベクトル型のアーキテクチャは正にGPUと同じ仕組みと言っても過言ではなかったからである。NVIDIAのGPU成功を垣間見、半導体を変える世界の大きさを体感し、半導体の開発に携わることができてよかったですと感じるとともに、最初の目標である脳の神経細胞を模試したAIチップを作りたいとも思った。

ハードウェア設計は非常に特殊な分野だと思う。設計、製造に多額の研究費が必要で、かつハードウェア設計を学ぶ本もほとんど出版されていない。技術用語の多くはほかの分野の方に

は分かりにくい。そのためベールに隠された領域と言えると思う。しかし一方でハードウェアの進歩なくして現在の技術は語ることができず、その恩恵は計りしれない。

本特集を企画するにあたり、ハードウェア設計の面白さ、重要性を伝えたいと考えた。また、ハードウェア設計になじみがない人に読んでいただきたいと考えた。そこで、無理難題と思われるジュニア会員にも理解できるAIチップの特集をしたいとお願いをお願いを重ね実現した企画である。いただいた原稿に対しても、多くの修正をお願いし、ハードウェアの専門家でなくても分かるをモットーに著者の方々には無理なお願いをした。

この場をお借りして無理なお願いに快くご対応いただいた著者の方々にお礼を述べたい。本特集がジュニア会員をはじめ多くの方々の一読いただき、ハードウェア設計の面白さを伝えることができれば幸いである。

(袖美樹子／本特集エディタ)

## 次号 (4月号) 予定目次

編集の都合により変更になる場合がありますのでご了承ください。

※はオンライン版のみの掲載となります

### 「特集」社会インフラシステムにおけるサイバーセキュリティ※

5G移動通信システムのサイバーセキュリティー移動通信におけるセキュリティ対策の変遷とこれからー／電力分野におけるサイバーセキュリティの現状と今後の展望ー社会インフラシステムの要 (かなめ) としての役割ー／金融分野におけるサイバーセキュリティを巡る国際的な議論の動向／化学プラントのサイバーセキュリティーOTシステムのセキュリティ脅威に対する取り組みと今後の展望ー／クラウドサービスにおけるサイバーセキュリティ／産業制御システムセキュリティの動向

寄稿：計算機科学を推進した富田悦次君を悼む

教育コーナー：べた語義

連載：5分で分かる!! 有名論文ナメ読み／教科「情報」の入学試験問題って?※／情報の授業をしよう!／先生、質問です!／

ビブリオ・トーク

コラム：巻頭コラム

会議レポート：IWSEC 2021 会議報告

ほっとタイム

#### 複写される方へ

一般社団法人情報処理学会では複写複製および転載複製に係る著作権を学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は、学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している複製利用許諾システムもしくは転載許諾システムを通じて申請ください。

尚、本会会員 (賛助会員含む) および著者が転載利用の申請をされる場合には、学術目的の利用に限り、無償で転載利用いただくことが可能です。ただし、利用の際には予め申請いただくようお願い致します。

権利委託先：一般社団法人学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
E-mail: info@jaacc.jp Tel (03)3475-5618 Fax (03)3475-5619

また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡してください。  
Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone: 1-978-750-8400 Fax: 1-978-646-8600

#### Notice for Photocopying

Information Processing Society of Japan authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights and reuse rights of copyrighted works. If you wish to obtain permissions of these rights in the countries or regions outside Japan, please refer to the homepage of JAC (<http://www.jaacc.org/en/>) and confirm appropriate organizations.

You may reuse a content for non-commercial use for free, however please contact us directly to obtain the permission for the reuse content in advance.

<All users except those in USA>

Japan Academic Association for Copyright Clearance, Inc. (JAACC)  
6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan  
E-mail: info@jaacc.jp  
Phone: 81-3-3475-5618 Fax: 81-3-3475-5619

<Users in USA>

Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone: 1-978-750-8400 Fax: 1-978-646-8600

..... 広告のお申込み .....

■広告料金表（価格は税 10%込）

掲載場所	4色	1色
表2	363,000円	—
表3	302,500円	—
表4	423,500円	—
表2対向	330,000円	—
表3対向	291,500円	170,500円
前付1頁	275,000円	148,500円
前付1/2頁	—	88,000円
前付最終	—	162,800円
目次前	—	162,800円
差込 (A4変形判 70.5kg未満 1枚)	302,500円	
差込 (A4変形判 70.5kg～86.5kg 1枚)	385,000円	
同封 (A4変形判 1枚)	385,000円	

■「情報処理」

発行 一般社団法人 情報処理学会  
 発行部数 20,000部  
 体裁 A4変形判  
 発行日 毎当月15日  
 申込締切 前月10日  
 原稿締切 前月20日  
 広告原稿 完全版下データ  
 原稿寸法 1頁 天地 250mm × 左右 180mm  
 1/2頁 天地 120mm × 左右 180mm  
 雑誌寸法 天地 280mm × 左右 210mm

■問合せ・お申込み先

〒169-0073 東京都新宿区百人町2-21-27  
 アドコム・メディア(株) (Tel/Fax/E-mailは下に記載)

\*原稿制作が必要な場合には別途実費申し受けます。  
 \*同封のサイズ・割引の詳細についてはお問合せください。

..... 掲載広告の資料請求 .....

掲載広告の詳しい資料をご希望の方は、ご希望の会社名にチェック  を入れ、送付希望先をご記入の上、Faxにて（またはE-mailにて必要事項を記入の上）アドコム・メディア（株）宛にご請求ください。

■「情報処理」 63巻3号 掲載広告（五十音順）

- エクセルソフト ..... 表2対向       フォーラムエイト ..... 前付最終  
 講談社 ..... 目次前上       富士通 ..... 表2  
 人事院 ..... 表3  
 日立製作所 ..... 表4       すべての会社を希望

■資料送付先

フリガナ  
お名前 \_\_\_\_\_

勤務先 \_\_\_\_\_ 所属部署 \_\_\_\_\_

所在地 (〒 - ) \_\_\_\_\_

TEL ( ) - FAX ( ) -

ご専門の分野 \_\_\_\_\_



お問合せ・お申込み・資料請求は

広告総代理店 **アドコム・メディア(株)**

Tel.03-3367-0571 Fax.03-3368-1519 E-mail: sales@adcom-media.co.jp

## 賛助会員のご紹介

本会をご支援いただいております賛助会員をご紹介します。  
Web サイト (<https://www.ipsj.or.jp/annai/aboutipsj/sanjo.html>) 「賛助会員一覧」のページからも  
各社へリンクサービスを行っておりますので、ぜひご覧ください。

照会先 情報処理学会 会員サービス部門 E-mail: [mem@ipsj.or.jp](mailto:mem@ipsj.or.jp) Tel.(03)3518-8370

### ●●● 賛助会員 (20 ~ 50口)

**HITACHI**  
Inspire the Next

(株) 日立製作所



三菱電機 (株)

**FUJITSU**

富士通 (株)



(株) サイバーエージェント

Orchestrating a brighter world

**NEC**

日本電気 (株)



日本アイ・ビー・エム (株)

### ●●● 賛助会員 (10 ~ 19口)



(株) リクルート



グーグル合同会社



(株) NTTドコモ



(株) 東芝



日本電信電話 (株)



日本マイクロソフト (株)



(株) フォーラムエイト

### ●●● 賛助会員 (3 ~ 9口)



(一社) 情報通信技術委員会



(株) NTT データ



グリー (株)



(一財) インターネット協会



(一社) 情報サービス産業協会



トレンドマイクロ (株)



(株) BFT



NTT コムウェア (株)



NTT テクノクロス (株)



(株) うえじま企画



エッジテクノロジー (株)



沖電気工業 (株)



コアマイクロシステムズ (株)



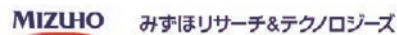
三美印刷 (株)



ソニー (株)



(株) テクノプロ  
テクノプロ・デザイン社



みずほリサーチ&テクノロジーズ (株)



## 国家公務員採用試験

## 「デジタル区分」申込受付開始

申込受付期間  
(2022年度・インターネット)2022年3月18日 (金)  
～4月4日 (月)総合職試験  
「デジタル区分」  
第1次試験日4月24日  
(日)一般職試験  
「デジタル・電気・電子区分」  
第1次試験日6月12日  
(日)

## 総合職試験「デジタル区分」

- 政府においてデジタル人材を確保する観点から、2022年度に新設します。
- 情報系の知識を持って、各府省の政策の企画立案に参画する人材を募集します。
- 問題選択の柔軟性が高く、受験者の専門性に合わせて受験が可能です。

## 一般職試験「デジタル・電気・電子区分」

- 「電気・電子・情報」区分を見直した上で名称変更します。
- 情報系専攻の受験者、電気・電子系専攻の受験者いずれも自身の専攻分野で受験が可能になります。

※受験資格や試験科目、試験問題例などの詳細情報は「国家公務員試験採用情報NAVI」でお知らせしています。

# 社会をよくする、魔法はないけど。

世界中の人が、願っています。

昨日よりも今日、今日より明日がキラキラと輝く日々でありますようにと。

いま、世界中で取り組まれている「SDGs」や、日本が掲げる「Society 5.0」が注目を集めているのも、そうした願いがあるからこそだと思います。より良い社会を一瞬で実現するための魔法はありません。

だから日立は、皆さんの願いにデジタルソリューションで応えていきたい。社会のあらゆるデータに光をあて、デジタルとリアルをつなぎ掛け合わせながら今までにない価値を生み出す「Lumada」。日立は、お客さまと一緒に、より良い社会づくりを加速していきます。

# HITACHI

Inspire the Next

株式会社 日立製作所 システム&サービスビジネス統括本部

■お問い合わせURL <https://www.hitachi.co.jp/lumada/>



〒101-0062  
東京都千代田区神田駿河台一―五  
編集人 稲見昌彦

東京都千代田区神田駿河台一―五  
発行所 一般社団法人 情報処理学会  
発行人 木下泰三

電話 東京(〇三)三五―八―八三七四  
振替口座 〇〇―一五〇―一四―八三三四八四

東京都荒川区西日暮里五―七―一七  
印刷所 三美印刷株式会社

会員外発売所 東京都千代田区神田錦町三―一  
株式会社 オーム社

定価 1,760円 (本体 1,600円 + 税 10%)

本誌広告一手取扱い アドコム・メディア株式会社  
〒169-0073 東京都新宿区百人町 2-21-27 TEL.03-3367-0571 FAX.03-3368-1519

雑誌 05269-03



4910052690325  
01600

訂 正

本誌 63 巻 3 号 (2022 年 3 月号) の特集：知能コンピューティング—AI とハードウェアの出会い—「編集にあたって」に一部誤りがありました。お詫びして訂正いたします。

P.109 左段 17 行目

(誤) 高前田信也

(正) 高前田伸也