

計算機方式研究室における
データ駆動型並列計算機の研究開発

弓場敏嗣 (Yuba Toshitsugu)
電気通信大学名誉教授
元・電子技術総合研究所

【あらまし】

通商産業省工業技術院電子技術総合研究所において、第2次世界大戦後の電子計算機研究を所掌してきたのは計算機方式研究室であった。1980年代、計算機方式研究室の名前は、以下の理由により、国の内外を問わず広く知られるところとなった。

- データ駆動型並列計算機の研究において、先駆的な研究成果を挙げた。
- 当該分野における指導的立場の人材を多数輩出した。

本稿では、筆者である弓場敏嗣が1982年4月に計算機方式研究室長就任後、1993年3月電子技術総合研究所(以下、電総研)を辞任するまでの11年間を中心として、その間に経験した計算機方式研究室での研究活動を思い起こし、書き綴っておく。今を去ること四半世紀前の出来事であり、書き残すことに如何ほどの意味があるかの判断は難しいが、「元電総研研究者の回顧録」と考えて貰えればよいかと思う。この期間に、計算機方式研究室が成就した主たる研究開発の成果は、以下の3つである。

1. SIGMA-1: 科学技術計算用データ駆動計算機
2. EM-3: LISP 指向データ駆動型マルチマイクロプロセッサシステム
3. EM-4/EM-X: データ駆動型高並列計算機

それぞれの歴史記述においては、関連文献を参照しつつ研究開発小史を綴る。その間に学術メディアに発表した文献の存在は、本稿を書き進めるうえで不可欠なものであった。学術研究の遂行においては、書き残す、書き留めることが大切であることを改めて知った。研究発表を行った論文別刷の他、在職中に自分が作成した書類の写しは、個人ファイルに極力残しておいた。本原稿を書いて後、もう参照することもないキングジムファイル10冊の殆どを処分できることが、私の気分を明るくする。なお、文中、歴史的文書であることを考慮して、すべての固有名詞の敬称を省略した。本稿で記した事実関係については、後述する計算機方式研究室の関係各位にチェックをお願いした。

【原稿投稿:2018年7月7日版】

【目次】

- 第1章 計算機方式研究室の研究序論
 - 1. 1 研究開発前史
 - 1. 2 筑波移転当時の研究室
 - 1. 3 1982 年からの 10 年余で実施した研究課題
 - 1. 4 研究の実施体制
 - 1. 5 研究成果の発表
- 第2章 科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究開発
 - 2. 1 工業技術院大型プロジェクトの開始
 - 2. 2 開始直後における電総研内での議論
 - 2. 3 SIGMA-1 計画の背景と目的
 - 2. 4 SIGMA-1 研究実施体制
 - 2. 5 SIGMA-1 研究開発小史
 - 2. 6 SIGMA-1 の独創的研究成果
 - 2. 7 SIGMA-1 研究余話
- 第3章 記号処理用データ駆動計算機 EM-3/EM-4 の研究開発
 - 3. 1 データ駆動計算機研究の動機
 - 3. 2 EM-3/EM-4 計画の背景と目的
 - 3. 3 EM-3/EM-4 研究実施体制
 - 3. 4 EM-3 研究開発小史
 - 3. 5 EM-4 研究開発小史
 - 3. 6 EM-X 研究開発小史
 - 3. 7 EM-4/EM-X の独創的研究成果
 - 3. 8 EM-4/EM-X 研究余話
- 第4章 研究室人物列伝
 - 4. 1 「電総研サファリパーク」の呼称
 - 4. 2 SIGMA-1 研究要員の強化－平木敬の配属
 - 4. 3 EM-4 研究要員の注入－坂井修一の入所
 - 4. 4 電総研の組織改革と人事異動
- 第5章 研究室余話
 - 5. 1 研究成果の解説的文献と博士学位論文
 - 5. 2 外部研究者往来
 - 5. 3 電総研研究者のロールモデル
 - 5. 4 学会における交流と「戦友」への謝辞

第1章 計算機方式研究室の研究序論

1.1 研究開発前史

通商産業省工業技術院電子技術総合研究所(当時は電気試験所、以下、電総研)における電子計算機研究を所掌してきたのは計算機研究室(後に計算機方式研究室)であった。計算機研究室が果たしてきた歴史的役割を俯瞰し、データ駆動型並列計算機の研究を展開するに至った意識の根底を見ておく。電総研における電子計算機研究の歴史は、1950年代の国産電子計算機の黎明期に遡る。戦後の経済復興に合わせて、国産電子計算機は目覚ましい発展を見せる。この時期、外国からの直接的な支援を受けることなく、日本の計算機技術は格段の進歩を遂げる。国立研究機関である電気試験所は国産計算機の研究開発を主導し、研究成果を国内各社に技術移転して商用機開発に結び付けている。1954年、電気試験所電子部の和田弘、高橋茂、西野博二らがトランジスタを用いた電子計算機 ETL-Mark3 の研究開発を開始した。同計算機はトランジスタ 130 個、ダイオード 1,800 個からなり、1956年7月に稼働している。トランジスタを論理素子とする計算機としては、米国の IBM、Bell 電話研究所に次いで世界で3番目であった。プログラム内蔵式トランジスタ計算機としては、世界で最初のものとなっている。その後、470 個の接合形トランジスタと 4,600 個のダイオードを用いた ETL-Mark4 が開発され、国内の民間各社に技術移転された。日本電気は 1958 年 NEAC NEC2201 を、日立製作所は翌年 HITAC301 として商品化した。国産計算機産業を牽引してきた日立製作所、日本電気、富士通などにおける電子計算機事業の歴史はこの時期に始まる。詳しくは、以下の文献を参照されたい。

- ◆ 弓場敏嗣: 日本における計算機の歴史と発展, 電子情報通信学会会誌, Vol.83, No.1, pp.8-13 (2000).

1966 年、米国 IBM 社の IBM360 登場に衝撃を受け、日本は計算機産業存続への官民一体となった対応に迫られる。米国およびヨーロッパの企業が次々と計算機事業から手を引く中で、当時の国産電子計算機 6 社は生き残りを賭けた対応を迫られる。通産省は産業技術立国のためには官民一体となった産業技術の育成が重要であるとして、工業技術院に 1966 年大型プロジェクト制度を導入した。その最初の施策として、「超高性能電子計算機の研究開発」が取り上げられることとなった。1960 年代中頃からソフトウェア、中でもオペレーティングシステムの重要性が叫ばれ、大型プロジェクト「超高性能電子計算機の研究開発」(プロジェクトリーダー・電子計算機部長野田克彦)に関連して、電総研はオペレーティングシステムの研究開発に取り組んだ。計算機の方式設計とその実現を目指した研究開発は、電総研では冬の時代を迎えることとなった。電子計算機部計算機方式研究室では、同プロジェクトの一環として時分割方式のオペレーティングシステム ETSS(ETL Time-Sharing System)の研究開発を行っている。集積回路技術が進展する 1970 年代、半導体技術の国際競争力を得た国内各社は IBM 互換路線を歩み、世界の計算機市場において優位な立場を占める。1980 年代にはいと、日米技術摩擦が顕在化し、計算機分野においても独自性のある国産技術開発が求められるようになった。

1981年、通産省は大型技術開発プロジェクトとして、「第五世代コンピュータ」および「科学技術用高速計算システム」の研究開発を開始させた。前者は人工知能応用を指向した新世代の知識処理用高性能計算機を、後者は科学技術計算を指向した次世代スーパーコンピュータを目指すものであった。

1.2 筑波移転当時の研究室

1979年11月、電子技術総合研究所は、東京都千代田区永田町から筑波研究学園都市に移転した。1982年4月、前任の藤井狷介室長を継いで、弓場敏嗣が電子技術総合研究所電子計算機部計算機方式研究室の新室長となった。弓場敏嗣は計算機方式室長を6年6ヶ月間担当し、その後、知能システム部長、情報アーキテクチャ部長を経て、1993年4月に文部科学省電気通信大学に異動した。この間に、計算機方式研究室の名前は、以下の理由により、国内外に広く知られるところとなった。

- データ駆動型並列計算機の研究において、先駆的な研究成果を挙げた。
- 当該分野における指導的立場の人材を多数輩出した。

本稿では、弓場敏嗣が室長就任後電総研を辞任するまでの11年間を中心として、経験した計算機方式研究室での研究活動を思い起こし、書き綴る。今を去ること四半世紀前の出来事であり、書き残すことに如何ほどの意味があるかの判断は難しいが、「元電総研研究者の回顧録」と考えて貰えればよい。

筑波移転後2年を経て、電総研は移転にともなう混乱期を脱し、腰を据えた研究への取り組みが開始されていた。電総研情報部門(電子計算機部、ソフトウェア部、パターン情報部、制御部)に関連する研究分野では、1981年から通産省プロジェクト「第五世代コンピュータの研究開発」、工業技術院大型プロジェクト「科学技術用高速計算システム(次世代スーパーコンピュータ)の研究開発」が開始された。前者については、研究開発実施機関として「新世代コンピュータ開発機構(ICOT)」が設立され、電総研からもプロジェクトリーダーのパターン情報部長淵一博を始め、プロジェクトの中核となる研究者が出向し、当該研究開発を推進した。後者の大型プロジェクト「科学技術用高速計算システム」(プロジェクトリーダー・電子計算機部長柏木寛)においては、参加企業と電総研は研究開発の内容を棲み分け、電総研は基礎的な技術開発を担当することになった。これを受けて、電総研ではジョセフソン素子、ガリウム砒素素子などの新高速デバイス素子の研究開発と、データ駆動アーキテクチャをもつ新世代スーパーコンピュータの研究開発を行うことになった。

1.3 1982年から10年余で実施した研究課題

電総研においては、予算項目「特別研究」で実施する研究が各研究室の中核的研究課題とな

る。予算項目「指定研究」に類別される大型プロジェクトに属する研究課題と異なり、研究室が所掌する研究分野でもっとも重要かつ意義深いものが研究室自身の判断で選択され、その課題を克服することが目的となる。大型プロジェクト予算は指定研究費で、予算金額は大きいはその分、予算の組み替えなど運用が窮屈である。研究開発の過程で、プロジェクトリーダと大型プロジェクト開発官室の評価を受ける。しかし、特別研究費予算は、電総研内部での審査なので運用の拘束条件が緩やかであり、より基礎的な研究に挑戦することができた。

大型プロジェクトに関わる指定研究として、計算機方式研究室は研究項目「並列処理アーキテクチャの研究」に取り組むことになった。1982年度～1987年度の6年間に渡って、同課題名のもとで新世代スーパーコンピュータを目指す科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1の研究開発を実施した。一方、特別研究においては、中項目「情報システム技術に関する研究」が終了し、1982年度からは新しい中項目「情報システムアーキテクチャに関する研究」が開始された。それに合わせて、計算機方式研究室では1982年度～1987年度の6年計画で、小項目「データ駆動計算機の研究」に取り組むことになった。データ駆動計算機という名称を予算計画書の研究課題名に取り上げ、研究遂行の覚悟を示した。その後、1988年度～1993年度の6年間は、中項目「柔構造情報処理方式に関する研究」のもとで、小項目「高並列データ駆動計算機の研究」に取り組んでいる。

計算機方式研究室としては、データ駆動計算機に関わる2つの研究計画を同時期に実施することになったが、これは研究室の強い意向であった。両者ともデータ駆動原理に基づく並列性の高い新世代並列計算機を目指すものであるが、用途の位置づけを科学技術計算用と記号処理用と異なるものとした。少ない予算と研究要員を2つの研究課題に振り分けることについて、電総研内部から多くの批判を浴びた。研究室の成果を最大化する処方箋であるとして、周辺を説得し研究室の意見を通した。結果的に見て、これは奏功した戦略であったといえる。こうした背景のもとに、2つの研究計画を明確に区別する一方、研究室の研究成果が途切れなく出せるように相互補完すべく配慮した。この期間に達成した主たる研究成果は、以下の3つである。

1. SIGMA-1: 科学技術計算用データ駆動計算機
2. EM-3: LISP 指向データ駆動型マルチマイクロプロセッサシステム
3. EM-4/EM-X: データ駆動型高並列計算機

1.の SIGMA-1 は大型プロジェクトによる研究成果である。ハードウェアの論理回路設計から、システムソフトウェア、高水準言語処理系(コンパイラ)までの全てを計算機方式研究室で開発した。命令水準の細粒度並列実行を行う世界初の実用規模データ駆動計算機である。2.の EM-3 は特別研究によるものであり、促成的に研究成果が得られることを意図して開発した。市販のマイクロプロセッサ基板にデータ駆動機構(待ち合わせ機構)を外付けして基本プロセッサを構成し、それら8台を研究室で開発したゲートアレイによる相互結合網で接続したマルチマイ

クロプロセッサシステムである。データ駆動計算機のソフトウェア・ハードウェア混成型シミュレータと見なすことができる。3.の EM-4/EM-X は研究室が本来目指したデータ駆動型並列計算機である。EM-X は EM-4 の後継機として、浮動小数点計算機能を付加するなど、実用化に向けた機能強化と性能向上の工夫を図っている。

1. 4 研究の実施体制

研究の流れを大型プロジェクトの SIGMA-1 と、特別研究の EM-3 および EM-4/-X の 2 つに分けて、それぞれの研究開発過程を振り返る。まず、1983 年 4 月時点での研究室員の配置を見てみる。電総研では、毎年年初めに、新年度の実施計画に関する所長ヒアリングが催されていた。1983 年 1 月 13 日に提出された研究項目担当者一覧表によると、担当者、従事者とその従事割合(各人の持ち点 10)は以下の通りである。大型プロジェクトの研究項目「並列処理アーキテクチャの研究」(予算費目上の名称)では科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究開発、特別研究の研究項目「データ駆動計算機の研究」(予算費目上の名称)では記号処理用データ駆動計算機 EM-3 の研究開発が行われた。「経常研究」は人頭研究費として室員数に応じて研究室に配算され、将来に向けた基礎的な研究の研究経費の他、図書費、コピー費など研究室の生活費的な支出に充てられていた。なお、経常研究の研究項目名は、研究室の名前を冠し、その後に「～の基礎研究」を付け加えることが多かった。

● 電子計算機部計算機方式研究室：1983 年度研究項目担当者一覧表

1. 大型プロジェクト「並列処理アーキテクチャの研究」
担当者・弓場敏嗣
従事者・島田俊夫(9)、平木敬(9)、西田健次(9)、内堀義信(2)
2. 特別研究「データ駆動計算機の研究」
担当者・弓場敏嗣
従事者・山口喜教(9)、戸田賢二(9)、内堀義信(2)
3. 経常研究「計算機方式の基礎研究」
担当者・弓場敏嗣
従事者・古谷立美(10)、内堀義信(6)、島田俊夫(1)、山口喜教(1)、平木敬(1)、戸田賢二(1)、西田健次(1)

この人員配置から分かるように、大型プロジェクトでの科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究と、特別研究での記号処理用データ駆動計算機 EM-3(および、その後の EM-4)の研究は、研究室内で並列かつ同時進行的に進められた。研究の従事割合を明確に区別したのは、それぞれの担当する研究に責任と自覚をもってもらうためであった。なお、古谷立美はニューラルネットワークに興味をもち、データ駆動計算機の研究には関与しなかった。彼はその後間もなく当該研究室を離れ、ニューラルネットワーク情報処理を所掌する記憶機構研究室に移動している。研究成果を所外発表するとき、研究室員すべてが出席する事前の発

表練習を行うが、そのときにグループ間の情報交換が行われる。もちろん、日頃机を並べているので、必要に応じた議論はそこ此处で行われていた。

研究開発の同時進行的展開は、課題を研究室内で2つに分割することで開発過程を重複させ、スムーズなつまり間隔の空かない研究成果の発表に繋げるべく企図した結果でもある。一般に、ハードウェア製作は設計、製作、評価に時間を要することに加えて、ハードウェア製作中は論文を書けない。時宜を得た研究室成果を発表し続けるためには、2つの研究プロジェクトの成果を織り交ぜることによって、外からは研究活動の空白あるいは停滞と見える期間をできるだけなくする必要があった。大型プロジェクトでのSIGMA-1の開発は、真っさらな設計段階から始まり、最初の研究成果と呼べる予備試作版基本プロセッサをベースとした論文発表まで、2年余の年月を要している。その間を特別研究のEM-3で研究成果を繋ぎ、計算機方式研究室の存在感を維持することに心掛けた。

1.5 研究成果の発表

研究開発の成果は、論文発表の形で世間に向けて公表される。研究成果の公表のみを目的とするのではなく、それまでに得られた結果について関連する研究者たちに意見を求め、それ以降の研究に役立たせる意味がある。公開の場での関連研究者による評価は、それが高くても低くても反省と発憤の材料になる。研究管理者の立場からすれば、定期的に対外的な発表の場を意図的につくることは、研究者の研究行程管理の上で重要である。過去何年もの間、何も対外的な発表をしていない研究者は、それ以降も活性化しないのが通例である。研究行程管理を自覚的にできる研究者は信頼できるが、個人差が大きい。発表を義務づけるような指導もときとして必要なことがある。電総研情報部門における研究発表の媒体としては、以下に掲げるものがあつた。

1. 情報処理学会等全国大会での口頭発表
2. 同じく学会研究会での口頭発表
3. 国内会議(シンポジウム)での講演(投稿・採録、または招待)
4. 国際会議での講演(投稿・採録、または招待)
5. 学会論文誌掲載(投稿・採録)

研究成果は、学会全国大会、国内研究会、査読付国内会議、国際会議、学会論文誌の順に質的内容が高まる。当然ながら発表の審査基準も、この順に難易度が上がる。発表、講演とその後の討論を通じて得られる知見は、研究の発展と活動の活性化に繋がり、何物にも代え難い。時宜を得た研究成果は、通常、こうした過程を経て、世間に向けて発信される。投稿から査読、採録、印刷、発刊までの時間がかかる学会論文誌は、研究の進捗を把握するには時間遅れがあり、あまり適切な媒体とはいえない。電総研では、当時は権威ある国際会議での発表が重視されていた。その後の学会論文誌投稿は、博士の学位取得のためなど研究者の個

人的意向に委ねられる側面が強かった。従って、以下で研究開発の流れを概観するときは、国際会議、査読付国内会議での論文発表が中心となる。論文査読のない国内研究会、学会全国大会などにおける口頭発表については、研究の切っ掛けとなった重要なもののみを引用する。

第2章 科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究開発

2.1 工業技術院大型プロジェクトの開始

1982年1月から、通産省工業技術院大型プロジェクト「科学技術用高速計算システム(次世代スーパーコンピュータ)の研究開発」が開始された。研究開発期間は9年間、研究開発費総額は約175億円であった。プロジェクトリーダーは開始から殆どの期間を、電子技術総合研究所(電総研)の電子計算機部長柏木寛が務めた。参加企業6社(富士通、日本電気、日立製作所、三菱電機、東芝、沖電気工業)と電総研は研究開発の内容を棲み分けし、企業は米国クレイ社のCRAY-1に対抗する実用的な次世代スーパーコンピュータの技術開発を担当した。参加企業6社は技術研究組合を組織し、主契約企業は富士通が務めた。通産省からの委託費によって当該研究組合が開発する成果物(総合システム)の目標性能は10GFLOPSとされた。スーパーコンピュータの速度性能は、当時一般的であったリバモアグループと呼ばれる標準問題(ベンチマークプログラム)を用いて評価された。この目標性能の数字は、当時の世界最速のスーパーコンピュータCRAY-1の性能100MFLOPSに比べて100倍に相当するものであった。

電総研は長期的な展望に立ち、新世代スーパーコンピュータの基礎的、先導的な技術開発を担当した。大型プロジェクトの開始に際して、電総研が実施する研究課題の選定に当たって、以下の基本方針を確認した。

1. 実施する研究課題は、大型プロジェクトでの基礎的かつ先導的役割を担う。
2. 企業が構築する最終成果物を評価検証するとき、新しい知見を与えうる。
3. 研究開発費の重点的投資に配慮し、総花的配分による責任の分散を回避する。
4. プロジェクト終了後、新しい研究課題に繋がる。
5. 失敗の危険性を含む挑戦的課題である。

当該大型プロジェクトにおける基盤的な技術開発の研究開発対象は、システム系では多数のプロセッサを同時に動作させ高速化を実現する並列処理技術、デバイス系ではシリコン素子に代わる新しい高速論理素子および記憶素子技術に設定されている。電総研では、次世代スーパーコンピュータの根幹となる非フォンノイマン型と呼ばれる革新的な並列処理方式の研究開発と、ジョセフソン素子、ガリウム砒素素子などのシリコン素子に代わる新しい高速デバイス素子の研究開発に取り組むことになった。紆余曲折の議論の末、システム系では電子計算機部計算機方式研究室、デバイス系ではジョセフソンコンピュータ特別研究室(室長早川尚夫)が主として担当することになった。

2.2 初期における電総研内での議論

1982年1月、プロジェクトリーダー柏木寛は、上記の基本方針に基づき、電総研情報部門の関連研究室に対して研究課題募集を行った。システム系の課題選別に当たっては、以下の基準が

設定された。

1. (具体性の要請) 提案課題は充分具体的か？
2. (関連性の要請) 成果が得られたとして、プロジェクト上の位置付けは明確か？
3. (基礎研究の要請) 企業研究との直接的競合関係はないか？
4. (確実な実施の要請) 研究担当者の人員確保の見通しはあるか？

電総研情報部門の電子計算機部、ソフトウェア部、パターン情報部、制御部の 4 部にまたがる 8 研究室から、この時点では、以下の 8 件の応募があった(括弧内は提案研究室と提案者)。

1. データ駆動計算機、高度並列計算機(計算機方式研究室:藤井狷介)
2. 柔構造記憶システム(記憶システム研究室:国分明男)
3. 実時間連続系処理システム(アナログ情報研究室:飯田喜久雄)
4. 柔構造高速処理システム(論理システム研究室:田村浩一郎)
5. 画像処理表示システム(視覚情報研究室:白井良明)
6. 項書換え型言語向き計算機システム(言語処理研究室:鳥居宏次)
7. 並列アルゴリズム、インテリジェントインタフェース(情報システム研究室:棟上昭男)
8. 次世代シミュレーション技術(人間機械システム研究室:渡辺定久)

1982 年 5 月、電総研で行う大型プロジェクト・中項目「並列処理方式の研究」について、再度、この中項目の枠内で実施を希望する新規課題の募集が行われた。1982 年 1 月に応募のあった研究室から、先の提案を具体化した以下の 10 件の課題申請書が提出された。括弧内に申請した研究室と室長を示す。

● 科学技術用並列計算機システム

1. 数値計算用データ駆動計算機(計算機方式研究室:弓場敏嗣)
2. アルゴリズムの並列実行とその VLSI 化(言語処理研究室:鳥居宏次)
3. VLSI 用高度設計支援システム(人間機械システム研究室:渡辺定久)
4. 柔構造並列処理システム(論理システム研究室:田村浩一郎)

● 高度並列型専用計算機システム

5. 並列画像処理システム(視覚情報研究室:白井良明)
6. 超並列処理方式(記憶システム研究室:国分明男)
7. 実時間連続系処理システム(アナログ情報研究室:飯田喜久雄)
8. シミュレーション用機能集積型並列計算機(人間機械システム研究室:渡辺定久)

● 科学技術用高速計算システムの評価

9. 対話型分散処理方式(情報システム研究室:棟上昭男)
10. 計算機システムの分析・評価(アナログ情報研究室:飯田喜久雄)

採否の審査に当たっては、大型プロジェクトの研究課題としての適合性・整合性・今日性、研究推進体制の充足性、他の提案課題との重複などが考慮された。その結果、新世代スーパーコンピュータの基幹となる並列処理方式、とくに並列処理アーキテクチャ技術に関連する課題が重視され、科学技術計算を指向するデータ駆動型並列計算機の研究を中核とする方針が決定された。基礎的、先導的な技術開発であり、企業が委託研究として実施する次世代スーパーコンピュータの研究開発との相補的な関係も評価された。当時、非フォンノイマン型と呼ばれるデータ駆動アーキテクチャが世界的な関心を集めていたこともあり、電総研で同研究開発を推進することへの企業側からの後押しもあった。

現実問題として、大型プロジェクトの予算は、電総研情報部門の研究インフラストラクチャの整備に貢献してきたという経緯があった。今回、そうした位置付けができなくなることに、多くの研究室から懸念が呈された。当時の情報部門共用計算機 DEC20/60 は筑波移転とほぼ同時に導入され、相当期間その継続的運用が保証されていた。また、研究インフラストラクチャを支える計算機環境は、高性能ワークステーション、スーパーパーソナルコンピュータと称される小型計算機群を LAN で接続した分散システムの時代へと移行しつつあった。こうした事情もあって、計算機方式研究室への大型プロジェクト予算の重点投資は最終的に了承された。

2.3 SIGMA-1 計画の背景と目的

大型プロジェクトの研究予算のもとで、計算機方式研究室は科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究開発に取り組むことになった。予算項目上の研究課題小項目名は「並列処理アーキテクチャの研究」であり、研究期間は 1982 年度～1989 年度(8 年間)である。但し、SIGMA-1 の稼働は 1987 年秋であり、核心となる期間は最初の 6 年間であったといえる。1988 年度以降の 2 年間は、SIGMA-1 ハードウェアの性能調整、言語処理系の高度化、応用プログラムを用いた総合評価が行われた。SIGMA-1 の研究開発費は最終的に総額 62,600 万円であった。大型プロジェクト予算は予算規模が大きい分、予算の組み替えなど運用が窮屈である。また、研究計画との整合性の他、世間に見える形の成果が求められ、随時、プロジェクトリーダーと大型プロジェクト開発官室の評価を受ける。

大型プロジェクトの指定研究予算枠は、企業向けの開発委託費と電総研向けの研究開発費がある。委託費では、大型プロジェクトの最終成果物として、企業 6 社からなる研究組合が 10GFLOPS の性能をもつ「科学技術用高速計算システム」(総合システムと呼称)を製作することを目標とした。大型プロジェクトの中で電総研が担当する研究開発費は、技術的に評価が定まっていない未踏技術への投資であり、新世代並列処理の技術基盤の確立を意図していた。つまり、最終成果物として、商用スーパーコンピュータに直接結びつく実用的な成果が期待されている訳ではなかった。新世代スーパーコンピュータに関連して、当時の時代背景として、以下の状況が存在していた。

- 高度並列処理を実現可能とする VLSI 技術の進展
- 命令水準の並列処理が可能なデータ駆動計算機の提案

VLSI の高速化・高集積化技術の進歩は著しいものがあり、論理素子を高集積化した VLSI を多数利用可能な技術的環境が生まれつつあった。VLSI 技術は経済性、信頼性の面で、高並列処理アーキテクチャとの整合性がよかった。並列要素数が 4~10 であった時代から、100 を超え、さらに将来は 1,000 規模の要素数をもつ並列計算機の出現が期待された。従来のフォンノイマン型プロセッサを高並列に配置する並列計算機では、効率よく並列処理を行う困難さが指摘されていた。そうした困難を解決するにはコンパイラ、オペレーティングシステムなどのソフトウェアに頼るしか方法がなかった。それを克服する方策として、汎用並列処理を可能とする非フォンノイマン型のデータ駆動計算機が提案された。

データ駆動方式は、どんなプログラムに対しても、それが本来的にもつデータ依存性を侵さない範囲で、命令水準の並列実行をアーキテクチャ的に可能とする。1970 年代中頃、新しい世代の並列処理方式として、世界的な注目を浴びていた。並列計算機にデータ駆動方式を適用するというアイデアは、米国 MIT 教授 Jack Dennis によって最初に提案された。しかし、ハードウェアの製作には至らず、実機の開発は英国マンチェスタ大学教授 John Gurd たちによって先行して進められていた。マンチェスタ大学における世界最初のデータ駆動計算機プロトタイプ稼働は 1981 年 10 月と報告されている。1980 年 3 月、MIT 教授 Arvind が(財)日本電子技術振興協会に招聘され、「データフローアーキテクチャの研究開発」と題する 세미나 講演を行った。国内企業、大学、研究機関の研究者が聴講し、データ駆動方式(講演ではデータフロー方式)についての関心が高まった。SIGMA-1 計画では、長期的な研究目的を以下のように定め、1982 年度から研究開発を開始した。

- 科学技術計算応用におけるデータ駆動型並列計算機の実現可能性の検証
- 同計算機の技術的課題の克服と新しい課題の発見

予算要求の初年度である 1982 年 6 月、計算機方式研究室長弓場敏嗣が島田俊夫と合議の上作成した「1983 年度概算要求書」には、研究目標として以下の記述がある。最終目標に向けて確信のもてない雰囲気、短い文章表現の中に醸し出されている。

科学技術用超高速計算機の実現を目指して、自然な形で高度な並列実行が期待される数値処理用データ駆動計算機の開発を行う。具体的には、1,000 台程度の基本プロセッサからなる並列計算機構成とし、性能的には数値処理応用に対して基本プロセッサ 1 台の場合の 30~100 倍の処理速度改善を得ることを最終目標とする。

企業が開発を担当する大型プロジェクトの研究目標と違って、電総研での研究は目標性能が明確には記述されていない。並列処理方式の研究という項目名の影響もあり、この時点では

計算機自身の速度性能ではなく、並列処理方式の効果を評価指標としている。因みに、4年後の「1987年度概算要求書」では以下のように研究目標が変更され、より具体的に確信をもって記述されている。なお、CMOS ゲートアレイ技術を用いたハードウェア実装によって、この目標とした速度性能は最終的に実現された。

次世代の科学技術用高速計算システムの実現を目指して、多数の基本プロセッサを協調動作させて高速化をはかる並列処理アーキテクチャとして有望な科学技術計算用データ駆動計算機の研究開発を行う。試作するプロトタイプは 128 台の基本プロセッサによって構成され、全体として 100MFLOPS 程度の平均処理速度を達成することを研究目標とする。

2.4 SIGMA-1 の研究実施体制

1982年6月から、計算機方式研究室に研究実施体制を組み、科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究を開始させた。研究発足当初における SIGMA-1 グループの従事者は弓場敏嗣、島田俊夫、平木敬、西田健次の4名であった。島田俊夫は1980年8月から1年間、米国 MIT の Arvind 研究室に滞在し、Arvind Machine と称された仮想データ駆動計算機のソフトウェアシミュレータを作製した経験があった。1982年4月入所で同年6月に計算機方式研究室配属された平木敬は、東京大学後藤英一研究室で FLATS 計算機の開発に携わり、ECL デバイスを用いた高速プロセッサの設計・製作について豊富な経験を有していた。慶應義塾大学相磯秀夫研究室出身の西田健次は1981年4月に入所し、計算機方式設計の経験はなかったが物づくりに高い意欲をもっていた。

SIGMA-1 開発における仕事の役割分担は、概ね以下の通りである。研究室長の弓場敏嗣はグループ責任者として、大型プロジェクトのプロジェクトリーダー(電子計算機部長)、大型プロジェクト開発官室(霞ヶ関)、業者との対応を担当した。具体的な業務としては、大型プロジェクト予算書の作成、研究費獲得、執行、進捗管理、広報など、主として研究環境整備と渉外的役割を担当した。島田俊夫は技術的な責任者として、SIGMA-1 計画全体の進捗を管理し、グループを取りまとめた。平木敬は実機の製作を委託した業者に対する技術指導を含めて、SIGMA-1 ハードウェアの設計・製作そして保守を担当した。予備試作版基本プロセッサの浮動小数点演算部の試作については、西田健次が担当した。その後、西田は1985年4月から1989年3月まで、第五世代コンピュータの研究開発を行う新世代コンピュータ開発機構(ICOT)に出向した。SIGMA-1 計画開始から2年後の1984年6月、筑波大学で高並列計算機 PAX の利用に経験をもつ関口智嗣が研究室に配属された。彼はグループ内では主としてシステムソフトウェア、高水準言語処理系(コンパイラ)と性能評価を担当した。

グループではほぼ毎週進捗管理の会議がもたれ、研究進捗、成果発表、学会参加、関連情報などに関する議論と決定が行われた。弓場は SIGMA-1 計画の全体的な進捗状況の把握に務

め、研究的、技術的な方向性については、技術的責任者である島田が担当した。弓場の関与は研究管理的側面に留まり、グループに対して自主的な技術的判断を任せて計画遂行への責任を委ねた。従って、SIGMA-1 の論文発表では、総説的研究内容を弓場が自分で執筆した場合を除き、共著者に弓場の名前は載せられていない。研究者たる弓場は、研究面では特別研究「データ駆動計算機の研究」のもとで実施された後述する記号処理用データ駆動計算機 EM-3 および EM-4 の研究開発に従事した。

2. 5 SIGMA-1 研究開発小史

SIGMA-1 に関する成果発表論文を渉猟しつつ、開発計画の経年的な進捗過程を辿ってみよう。なお、以下で取り上げる論文発表は開発過程の里程碑を象徴的に示すものであり、必ずしも論文的価値が高いものを参照している訳ではない。

1. 島田俊夫: 科学技術用データ駆動計算機の構想, 情報処理学会全国大会, 2F-9 (1982).
2. 島田俊夫、平木敬、西田健次: 科学技術用データ駆動計算機 SIGMA-1 のアーキテクチャ, 電子通信学会電子計算機研究会, EC-83-20, pp.47-53 (1983).

これらは SIGMA-1 計画の嚆矢となる論文であり、計算機方式研究室における SIGMA-1 計画の構想を学会で初めて発表したものである[1, 2]。当初、市販のマイクロプロセッサを並列配置して高並列実験環境を構築する案も議論された。しかし、ハードウェア設計を担当した平木の意志を尊重して、データ駆動アーキテクチャをもつ予備試作版基本プロセッサの製作に着手することとした。予備試作版では信頼性、経済性、設計・製作の容易さを優先して、市販の CMOS 型 IC/LSI デバイスを電子部品として用いた。予備試作版基本プロセッサを試作する目的は、以下の通りであった。

- 実機によるデータ駆動方式の動作確認と性能検証
- 200 台規模の基本プロセッサからなる並列計算機の実装上の技術課題を抽出

1983 年 5 月、発注先を(株)中央電子(本社、東京都八王子市)に決定し、予備試作版基本プロセッサ 1 台の実機製作の契約を結んだ。試作委託の段階では、大手計算機企業 3 社を含む延べ 7 社に可能性を打診した。大手企業では、同時期に開始された第五世代コンピュータ計画への対応が優先されていた。データ駆動計算機の開発経験がないこと、開発要員の確保が難しいことなどの理由で、受託の意向を示したのはごく限られていた。

1984 年 2 月に、浮動小数点演算部を含めて 6 枚のプリント基板から構成される予備試作版基本プロセッサが納入された。同ハードウェアの正味の開発期間は、設計 6 月、製作 3 月(マルチワイヤリング基板)、デバグ 3 月の延べ 1 年間であった。ホスト計算機 VAX-11/750 に接続して

ソフトウェア環境を構築することにより、単一基本プロセッサにおけるデータ駆動方式の基本動作と性能が確認された。稼働を始めた予備試作版基本プロセッサに関して、新たにグループに加わった関口智嗣が中心となって、ソフトウェア環境の整備と予備試作版の性能評価を行った。中央電子における予備試作版の製作と並行して、平木敬は最終的な多数結合版 SIGMA-1 に用いるゲートアレイを多用した LSI 版基本プロセッサの設計を行った。大規模な数の基本プロセッサを相互結合するために、消費電力と物理サイズの制約に対応する必要があった。実装上の必要性から、最終的に 200 台規模の基本プロセッサを並列配置するためには、ゲートアレイ技術を用いた LSI 化による小型化、低消費電力化が不可欠であると判断した。同設計にあたっては、CAD システム (Metheus) 上で動作する論理回路シミュレーションシステム Hilo-2 が使用された。

1984 年 2 月に米国サンフランシスコで開催された IEEE の主催する「コンピュータに関する国際会議 (IEEE/COMPCON Spring)」で、島田俊夫は SIGMA-1 の研究開発について発表した[3]。この時点は、研究室における科学技術計算用データ駆動計算機の開発に見通しを得た段階であり、性能評価を含まない経過報告であった。同年夏、平木敬は「並列処理に関する国際会議 (ICPP)」で、SIGMA-1 のハードウェア設計について講演を行った[4]。その直後に英国オックスフォード大学で開催された「計算科学におけるベクトルおよび並列計算機に関する国際会議 (VAPP)」では、弓場敏嗣が SIGMA-1 計画の現状に関する発表を行った[5]。これらの連続した国際会議での講演により、電総研の SIGMA-1 開発計画は国際的に知られる存在となった。

3. Toshio Shimada, Kenji Nishida and Kei Hiraki: An Architecture of a Data Flow Machine and its Evaluation, Proc. of IEEE COMPCON Spring, pp.486-490 (1984).
4. Kei Hiraki, Toshio Shimada and Kenji Nishida: A Hardware Design of the SIGMA-1, A Data Flow Computer for Scientific Computations, Proc. of International Conference on Parallel Processing (ICPP), IEEE, pp.524-530 (1984).
5. Toshitsugu Yuba, Toshio Shimada, Kei Hiraki and Hiroshi Kashiwagi: SIGMA-1: A Dataflow Computer, Proc. of International Conference on Vector and Parallel Processors in Computational Science (VAPP), pp.141-148 (1984).

1984 年 4 月、200 台規模の基本プロセッサを多数結合した LSI 版 SIGMA-1 の設計製作に着手する。基本プロセッサの LSI 化に際しては、当時、商業的に利用可能となったゲートアレイ技術を最大限に利用することとした。ゲートアレイ LSI は 1 品種で多くの部品を製造することが宿命づけられているが、並列計算機の特徴は同機能 LSI を多数用いるという点で両者には経済的な整合性があった。並列計算機においては電子部品数の増大が不可避であり、システムの信頼性、安定性に影響をもたらす。その意味では、研究開発のための試作といえども、可能な限りゲートアレイ化を進めることが重要であった。基本プロセッサの予備試作版は 6 枚の基板で構成されたが、LSI 版ではゲートアレイ LSI を用いることで 1 枚の基板に収めることができた。基本プロセッサの内、演算プロセッサでは 9 種類、合計 27 個、構造プロセッサでは 3 種類、合

計 8 個のゲートアレイ LSI が用いられている。基本プロセッサを多数接続するために相互結合網が用いられ、SIGMA-1 を構築するためには並列配置の規模に応じた結合網の基板が必要となる。なお LSI 版 SIGMA-1 の製作は、予備試作版基本プロセッサとの技術的接続性が承認され、(株)中央電子が発注先として決定された。

1986 年 6 月、ACM の主催する「計算機アーキテクチャに関する国際シンポジウム (ISCA)」が東京で開催された。計算機アーキテクチャの分野で世界的に最も権威のある同会議で、島田俊夫は予備試作版 SIGMA-1 の性能評価に関する論文発表を行った[6]。筑波へのテクニカルツアーが企画され、会議参加者に稼働している予備試作版 SIGMA-1 と製作途中の LSI 版基本プロセッサを公開する機会を得た。引き続き同年 8 月、IEEE の「並列処理に関する国際会議 (ICPP)」において、平木敬は LSI 版 SIGMA-1 ハードウェアの開発状況を発表した[7]。翌 1987 年 10 月、米国ダラスで開催された ACM の「秋期コンピュータ会議 (FJCC)」では、弓場敏嗣が SIGMA-1 計画の全貌と進捗状況を報告した[9]。

6. Toshio Shimada, Kei Hiraki, Kenji Nishida and Satoshi Sekiguchi: Evaluation of a Prototype Data Flow Processor of the SIGMA-1 for Scientific Computations, Proc. of 13th International Symposium on Computer Architecture (ISCA), ACM, pp.226-234 (1986).
7. Kei Hiraki, Kenji Nishida, Satoshi Sekiguchi and Toshio Shimada: Maintenance Architecture and Its LSI implementation of a Dataflow Computer with a Large Number of Processors, Proc. of International Conference on Parallel Processing (ICPP), IEEE, pp.584-591 (1986).
8. Kei Hiraki, Kenji Nishida, Satoshi Sekiguchi, Toshio Shimada and Toshitsugu Yuba: The SIGMA-1 Dataflow Supercomputer: A Challenge for New Generation Supercomputing Systems. Journal of Information Processing, IPSJ, Vol.10, No.4, pp.219-226 (1987).
9. Toshitsugu Yuba, Kei Hiraki, Toshio Shimada, Satoshi Sekiguchi and Kenji Nishida: The SIGMA-1 Dataflow Computer, Proc. of Fall Joint Computer Conference on Exploring Technology: Today and Tomorrow (FJCC), AFIPS/ACM, pp.578-585 (1987).

SIGMA-1 の研究開発の主眼は、非フォンノイマン型アーキテクチャをもつ新世代のスーパーコンピュータを開発することであった。計算機はハードウェアのみでは機能しない。システムソフトウェア、とくに利用者が所要のプログラムを書くための高水準のプログラミング言語が不可欠である。SIGMA-1 用高水準言語として、以下の論文[10, 11]で示す DFC およびその改良版 DFC II を開発している。

10. 島田俊夫, 関口智嗣, 平木敬: データフロー言語 DFC の設計と実現、電子情報通信学会論文誌, Vol.J71-D, No.3, pp.501-508 (1988).
11. 関口智嗣, 島田俊夫, 平木敬: 同期構造を埋め込んだ SIGMA-1 用高級言語 DFCII,

1988年3月の情報処理学会全国大会では、科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の成果発表セッションを確保し、国内学会向け最終報告の意味を込めて4件の論文を連続して口頭発表した。会場となった教室は大勢の立ち見の参加者で溢れ、世間の関心の高さが窺えた。同年3月14日、大型プロジェクトの成果の1つとして、SIGMA-1 をプレス発表した。同年6月17日には、「大型プロジェクト研究成果報告会」が開催された。次世代スーパーコンピュータに関する企業委託の研究成果と合わせて、電総研で開発した SIGMA-1 についても、その成果と意義について報告された。最終年度の研究計画として、「1989年概算要求書」(1988年4月作成)には以下の記載がある。

科学技術計算用データ駆動計算機の研究計画にあたって、当該計算機のハードウェアプロトタイプを開発する。その研究開発の目的は次の通りである。

1. データ駆動型実行制御機構の機能検証を行う。
2. データ駆動計算機の定量的性能評価を行う。
3. データ駆動計算機の VLSI 技術への適合性を実証する。

これらの評価検証によって、データ駆動計算機の実用化への見通しを明らかにする。プロトタイプの開発と並行して、当該計算機用高水準プログラミング言語の処理系を作成する。同言語によって実用水準の評価用応用プログラムを記述し、実用性の観点から総合的な性能評価を行う。本年度は科学技術計算用データ駆動計算機の実用性検証を目指して、その有用性について総合評価を行う。同評価にあたって、粒子系シミュレーションなど幾つかの応用プログラムを用いた性能測定実験を行う。

実用性検証のためには、言語処理系を整備し、SIGMA-1 上で実用水準の応用プログラムを実行することが必要である[12]。振り返ってみると、SIGMA-1 の定量的な性能の評価検証が不十分であったとの反省がある[13, 14]。最大の原因は、SIGMA-1 ハードウェア開発で中心的役割を果たした平木敬が、米国 IBM の Watson 研究所に招聘され、2年間の在外研究を行うことになったことである。平木の不在で SIGMA-1 の保守に支障をきたすようになり、SIGMA-1 を第三者、すなわち計算機方式研究室以外の研究者の使用に供することが難しくなった。製作を外注した企業による保守管理への対応は限られており、システム全体を健全な状態で維持することができなくなった。1988年10月、平木がIBMに出張したのと同時に、弓場敏嗣は計算機方式研究室長を退任し、同じ電総研情報部門ではあるがロボットや視覚情報技術を所掌する知能システム部長となった。後任の同室長は島田俊夫が継承した。

12. Satoshi Sekiguchi, S. Sugihara, Kei Hiraki and Toshio Shimada: A New Parallel Algorithm for the Eigenvalue Problem on the SIGMA-1, Proc. of International

Conference on Vector and Parallel Processing in Computational Science (VAPP III), 1987.

13. 島田俊夫, 平木敬, 関口智嗣: データフロー計算機 SIGMA-1 の基本性能評価, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.4, pp.690-698 (1993).
14. Kei Hiraki, Toshio Shimada and Satoshi Sekiguchi: Empirical Study of Latency Hiding on a Fine-grain Parallel Processor, Proc. of International Conference on Supercomputing (ICS), ACM, pp. 220-229 (1993).

2. 6 SIGMA-1 の独創的研究成果

科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究開発によって得られた独創的技術は、概ね次の通りである。

1. CMOS 技術により商用スーパーコンピュータに匹敵する高速性能 100MFLOPS を達成
2. 2 段の命令実行パイプラインをもつデータ駆動型プロセッサアーキテクチャ
3. 連鎖法に基づくハッシングハードウェアによる待ち合わせ記憶
4. 構造記憶への非同期アクセスを行う構造プロセッサ
5. 構造プロセッサを用いた高機能ベクトル処理方式
6. 動的負荷分散機能をもつ階層型結合網
7. 128 台の演算プロセッサと同数の構造プロセッサを相互接続した高並列構成
8. 高度な検査・保守・性能測定を可能にする高並列向き保守アーキテクチャ
9. データ駆動型高水準言語 DFC の設計と処理系の実装

SIGMA-1 の研究開発期間は 1982 年度～1989 年度の 8 年間であり、研究開発費の予算総額は 62,600 万円を要した。この費用には SIGMA-1 ハードウェア製作費以外に、ホスト計算機 DEC VAX11/750、SUN Microsystems SUN-3、論理回路シミュレーション用 CAD システム Metheus の購入費、さらには高水準言語処理系 DFC の開発委託費が含まれている。当然ながら、この総額には研究員(電総研職員)の人件費は含まれていない。欧米からの来訪者からは、欧米では研究予算の半分以上は研究者の人件費に充当されると聞かされた。彼等は、研究開発費の全額を試作品の発注、備品購入などに使える日本(電総研)の事情を羨ましく思っていたようだ。

2. 7 SIGMA-1 研究余話

■ SIGMA-1 の新規性

科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 は、その筐体の一部が国立科学博物館に保管されている。現在に至るも世界最大のデータ駆動型並列計算機である SIGMA-1 の研究開発は、世界からも注目される成果を挙げた。SIGMA-1 の新規性について、Arvind Machine との違いを

問題視されることがあった。島田俊夫が MIT の Arvind 研究室に 1980 年 8 月から 1 年間留学していた経緯もあり、Arvind が設計したものを電総研で実機に造りあげただけという陰口も叩かれた。SIGMA-1 には、先に示した独創的研究成果がある。加えて、数頁の学術論文として紙の上に書かれた仮想的な計算機が、そのまま実機に投影できるほど計算機製作は簡単なものではない。世の中に論文で提案された仮想計算機は数多あるが、電源が入れられて、プログラムが実行される水準までプロトタイプ化されたものはごく少ない。計算機方式研究室で実機開発を決めたとき、データ駆動計算機として稼働していたのは英国マンチェスター大学のもののみであった。MIT では Arvind 研究室の他、Dennis 研究室からもデータ駆動計算機に関する論文は発表されていたが、実機が稼働するまでには至ってなかった。因みに、その後 Jack Dennis はデータ駆動計算機を製作するベンチャー企業を立ち上げ、ベンチャーキャピタルを探していたようだ。日本の商社系企業から、同ベンチャーの将来性について問い合わせを受けたことがある。また 1988 年、Arvind からは SIGMA-1 の稼働を称賛するとともに、システムの一部を借用したいとの申し出があった。MIT での活用はデータ駆動計算機の新しい知見をもたらす可能性があり、研究室の意向としては借用の申し出に応じたいと考えた。しかし、電総研という組織の判断として、知的所有権の問題を理由に断ることになった。国立研究機関の研究成果の普及を願うとき、こうした問題での柔軟な対応が望まれる。

■ 平木敬の活躍

振り返ってみるに、平木敬が入所した 1982 年 4 月から在外研究のため日本を離れる 1988 年 9 月までの 6 年余が正味の SIGMA-1 研究開発期間であった。SIGMA-1 の方式設計は、獅子奮迅の働きをした平木の仕事である。論理回路設計用 CAD システムを駆使しつつ、製作を委託した企業(中央電子)からの技術員約 5 名を熱血的に指導し、SIGMA-1 ハードウェアを完成させた。予備試作版基本プロセッサの製作がピークを迎えていた 1984 年の春頃、平木は疲労性の帯状疱疹に冒され数週間加療に努めた時期があった。当時、平木は東京の上野池之端に住んでおり、筑波の電総研まで JR 常磐線と自転車で通勤していた。千葉県我孫子市居住の弓場は自動車通勤をしており、大体において午後 8 時頃に職場を離れるのが通例であった。帰宅前に製作中の SIGMA-1 が置かれた機械室を覗き、椅子に座り込んでデバッグしている平木に進捗を尋ねることを日課にしていた。帰宅を誘い、職場から常磐線我孫子駅までを車に同乗する機会も何度となくあった。途中の車の運転は彼に任せた。運転の巧拙もあったが、何よりも車中での議論が私の運転の妨げとなるのが運転交替の理由であった。つまり、彼の口数を減らすために運転を委ねた。

平木敬は IBM ワトソン研究所から帰国後間もない 1991 年 1 月、東京大学に異動した。2017 年 2 月、平木は東京大学退職時の最終講義で、SIGMA-1 開発の感想を以下のように語った。

- 今日では常識になっている並列コンピュータの難しさを初体験した。
- 高並列システムを作るのは大変である。
 1. 1 台が超安定に動いても 128 台だとぼろぼろになる。

2. 1本のパッチ線でも128台分あてる必要がある。
 3. 測定ツールを挿入すると時間関係が変わりデバッグが難しい。
- 並列言語の重要性がよく分かった。
 - 学会、業界などの周囲の意見は参考にならない。
 1. メーカーの主要な技術者に、何度も頭おかしいと言われた。
 2. 何の役にたつのかとも、常に言われ続けた。
 3. きっと動かないという不吉な予言を何度も聞かされた。

この感想を聞いて、思い出したことがある。1988年3月、SIGMA-1の研究開発成果をプレス発表した。当時の電子計算機部長田村浩一郎が、最初に挨拶を兼ねて、「これは予想以上の成果である」と発言した。引き続いて説明に立った計算機方式研究室長の弓場敏嗣は、「これは予想通りの成果である」と言い直し、計算機の方式設計に予想以上というのではないと苦言を呈した。電総研内部における開発の歴史を示す微妙な食い違いとして、翌日の日経産業新聞にこの発言が報道されてしまった。世間に数多ある非フォンノイマン型計算機研究が具体的成果を出さない中で、SIGMA-1の開発は明るい展望を与えると同記事では好意的に書かれていた。



図1. 科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1

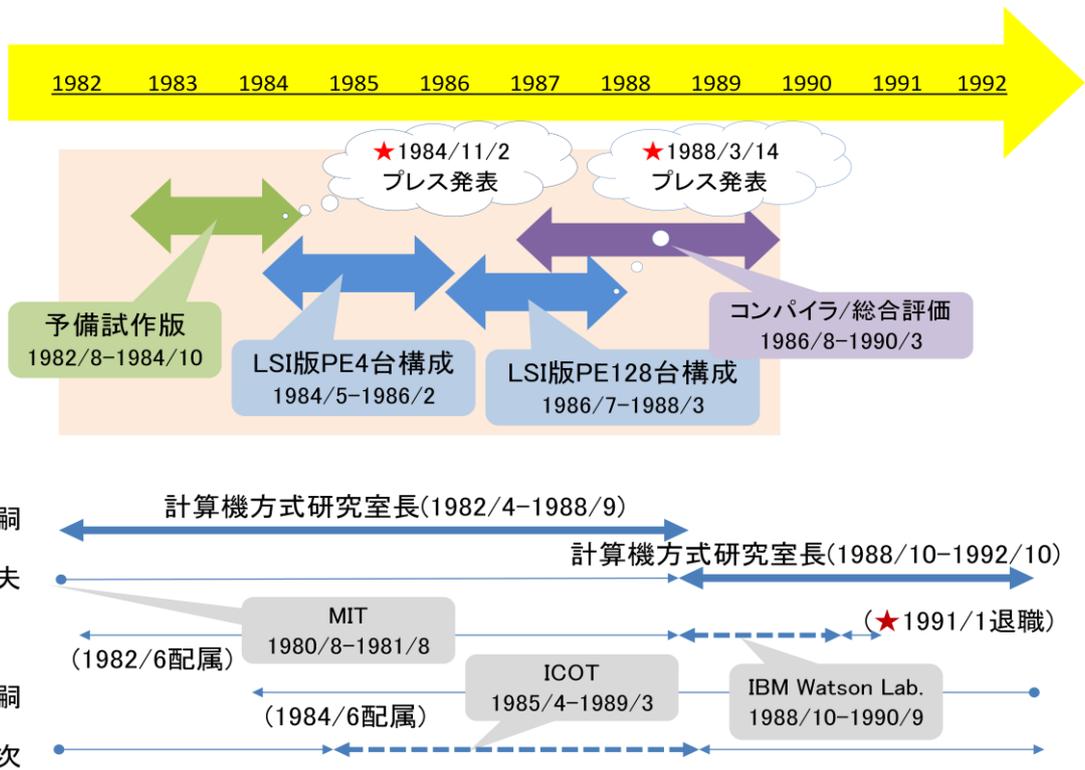


図2. SIGMA-1 の研究開発(1982/4~1990/3)

第3章 記号処理用データ駆動計算機 EM-3/EM-4 の研究開発

3.1 データ駆動型並列計算機研究の動機

1980年頃、計算機方式(プロセッサアーキテクチャ)の研究の流れは、並列処理とLSIにおける技術革新をいかに取り込んで行くかが焦点であった。並列処理は、計算機の高速化に向けた王道と呼べる方法である。並列計算機では、並列動作の要素となるプロセッサ数、記憶容量が増大する。加えて、それらを接続する相互結合網でも電子部品数が増し、計算機全体のハードウェア規模が圧倒的に拡大する。大規模集積化技術の進歩により、そうした並列計算機を受け入れやすい時代となりつつあった。一方、非フォンノイマン型アーキテクチャと呼ばれるプロセッサ技術そのものに革新的な並列性を求める動向が生まれていた。プログラムのもつ本来の命令水準の並列性を引き出すことができるデータ駆動アーキテクチャが提案され、その有効性の検証に向けて、実機の開発が試みられ始めていた。データ駆動アーキテクチャをもつデータ駆動型並列計算機(データ駆動計算機)は、フォンノイマンによって発明されたデジタル式電子計算機の原理を打ち破るものであり、世界の計算機方式研究者達に強い関心を引き起こしていた。なお、1982年度から開始された通産省の第五世代コンピュータ開発計画では、論理型プログラミング言語 PROLOG を指向した並列推論マシンの研究開発が展開されようとしていた。並列推論マシンの場合、並列実行の要素となる個々の基本プロセッサは、従来のフォンノイマン型の逐次処理を行うものであった。なお、本章の標題を記号処理用データ駆動計算機 EM-3/EM-4 としたが、以下に述べるように本研究開発では、EM-3、EM-3U、EM-4、EM-X と異なる計算機を逐次的に開発している。それぞれの果たした役割が異なるが、本研究開発計画において中心的な位置を占める EM-3/EM-4 をその代表として標記した。

3.2 EM-3/EM-4 計画の背景と目的

1982年4月、電子技術総合研究所における記号処理を指向したデータ駆動計算機の研究は、予算的には「特別研究」の枠組みで行われることになった。大型プロジェクトの「指定研究」枠で実施する科学技術計算用データ駆動計算機 SIGMA-1 の研究開発と同時期の開始であった。SIGMA-1 開発計画は、研究開発費の額が大きく世間的な関心度も高く、所内外から注目を浴びる存在であった。一方、特別研究で行う記号処理用データ駆動計算機の研究は、電総研内部に対する説明対策として、SIGMA-1 との重複を避けかつ短期的に成果を積み重ねる必要があった。設計、試作、デバッグ・調整、評価と、ハードウェアであれソフトウェアであれ、ものづくりには時間がかかる。拙速な成果を求めると、長期的には無駄な時間投資に陥りかねないことに留意しつつ、計算機方式研究室内において、2つの研究課題を同時並行的に進めることとした。

記号処理用データ駆動計算機に取り組む前提として、計算機方式研究室においては山口喜教、島田俊夫による LISP マシンの研究蓄積があった。高水準言語としての LISP を指向したフォンノイマン型パーソナルマシン ELM(ETL LISP Machine)を開発した経験をもとに、データ駆動ア

アーキテクチャへの適用を考えるものであった。研究にあたって、以下のような目的を設定した。

1. LISP マシン開発の系譜を継承する。
2. 記号処理に特徴的な機構の導入を図る。
3. 短期的な研究成果を求める一方、長期的な研究展望に繋ぐ。
4. SIGMA-1 開発の先行的課題を試行する。

計算機方式研究室で開発した過去の 2 世代に渡る LISP マシンを継承する意味を込めて、EM-3(ETL LISP Machine-3)と名前付けた。因みに、本研究室における第 1 世代の LISP マシンは、ヒューレットパッカード社のミニコンピュータ HP-2100A の動的マイクロプログラム機能を用いた。基本となる LISP 命令をマイクロプログラム記述することで高速化する、いわゆる高級言語マシンを実装した。第 2 世代の ELM(ETL LISP Machine)はパーソナル LISP マシンを目指したもので、16bit マイクロプロセッサ PULCE(東芝製、大型プロジェクト「パターン情報処理システム」の研究成果)にリスト処理命令を高速化するハードウェア機構を付加した。

EM-3 開発では、短期的に成果が期待できることを考慮し、基本となるプロセッサに市販マイクロプロセッサを使用する方法を選択した。並列実行を複数台のマイクロプロセッサの並列動作とし、LISP 指向データ駆動型マルチマイクロプロセッサシステム EM-3 を製作した。その後、長期的研究展望による成果として、当時利用可能な最先端のゲートアレイ技術を用いてデータ駆動型プロセッサをシングルチップ化し、高並列データ駆動計算機 EM-4 を開発している。SIGMA-1 の予備試作段階では、多数結合版の設計で LSI 化をどこまで進めることが可能であるが課題であった。EM-3 の開発は、それを先行的に確認する役割を担っていた。現実には、並列計算機の開発で不可欠な基本プロセッサを接続する相互結合網のみを、EM-3 ではゲートアレイ技術を用いて実装した。並列計算機開発におけるゲートアレイ技術の有用性・重要性が確認され、SIGMA-1 開発に継承された。さらに SIGMA-1 開発における多種類かつ大規模なゲートアレイの使用経験が、その後のシングルチップ化したデータ駆動型プロセッサから構成される EM-4 の設計と製作に活かされている。結果的に見て、これら 2 つの研究が経験を相互に継承するという意味で、相補的に適切に機能したといえる。

3.3 EM-3/EM-4 研究実施体制

1982 年 4 月から、特別研究・大項目「情報技術」、中項目「情報システムアーキテクチャに関する研究」、小項目「データ駆動計算機の研究」が 6 年計画で開始された。この時点での研究従事者は、弓場敏嗣、山口喜教、戸田賢二である。弓場敏嗣はグループを統率する責任者として、予算関係の他、開発するデータ駆動計算機 EM-3 の計算モデル部分を担当した。山口喜教は計算モデルに加えて、マルチマイクロプロセッサによる EM-3 のアーキテクチャ設計と実装を行った。なお、山口は 1984 年 9 月から 1 年間、英国マンチェスター大学で在外研究を行っている。1982 年 6 月に研究室配属された戸田賢二は、2,000 ゲート規模のゲートアレイによるルータ

チップを設計・製作し、基本プロセッサを接続する相互結合網を構築した。

1982 年度研究経過録をみると、島田俊夫と内堀義信が研究従事者として括弧付きで載せられている。MIT での在外研究を終えて 1981 年 8 月に帰国した島田俊夫は、データ駆動アーキテクチャ、とくに Arvind Machine に関する知見を有していた。また、内堀義信はハードウェア実装について豊富な知識を有していた。それらの知見と経験を生かした研究体制を配慮していた。特別研究の枠組みでは、大型プロジェクトと違って、研究実施に際して緩やかな共同研究が可能であった。例えば、山口が英国のマンチェスタ大学に出張している間に、内堀は EM-3 をブラッシュアップして改造し、ハードウェア的に安定性がある改良版 EM-3/U を実質 1 年間で製作している。

1986 年 4 月、坂井修一が研究室に配属された。新しい戦力を得たこの時期に、EM-3 から、本格的な新世代データ駆動計算機 EM-4 へ研究展開が図られた。SIGMA-1 開発でのハードウェア知見を継承する必要から、平木敬は助言者の立場で本研究グループに関わっている。その後、1988 年 6 月になって児玉祐悦がグループに加わり、坂井の指導のもとに EM-4 の後継機となる EM-X の開発を行った。1991 年 4 月、研究室に配属された佐藤三久は、EM-4/EM-X の高水準言語処理系(コンパイラ)として EM-C を開発し、その後のシステム評価と利用者の広がりをもたらした。1992 年 6 月に坂根広史、1993 年 4 月には山名早人が相次いで配属された。彼等は安定的に稼働していた EM-4/EM-X を一般利用者の立場で使用し、その性能評価と高並列計算機としての有効性を明らかにした。

3. 4 EM-3 研究開発小史

最初に取り組んだのは、データ駆動計算機のソフトウェアモデルをソフトウェアシミュレータで製作することであった。データ駆動方式で並列計算機を動作させるとき、命令実行の結果はトークン(パケット)として、基本プロセッサ間を行き交う。8 台の基本プロセッサからなる並列計算機モデル上で、簡単なプログラムを実行させトークンが画面上を飛び交いながら処理が並列に進行するさまを、当時普及し始めたパーソナルコンピュータ NEC/PC9800 を用いてカラーモニタ上に図形表示した。このシステムの主たる目的は見学者対応であり、並列計算機上でパケットが飛び交い、並列処理が実行されている様相を理解してもらうことに役立った。ある若い外国の研究者からは“Lovely!”との反応があった。以下では、LISP 指向データ駆動型マルチマイクロプロセッサシステム EM-3 に関する成果発表論文を渉猟しつつ、経年的に研究開発の歴史を辿ってみよう。SIGMA-1 におけると同様に、研究開発の歴史の里程を示す論文を取り上げている。

EM-3 研究の目的の 1 つは、記号処理に特徴的な並列実行機構の導入を図ることであった。LISP プログラムの並行処理において遅延評価(lazy evaluation)という機構が提案されており、それにアイデアを得て先行評価(eager evaluation)機構を導入した。関数評価において、評価

結果を擬結果として予め出力し、プログラム実行を先に進める方式である。データ駆動方式の中に取り込むことで、より多くの並列性抽出が期待できた。これを、**擬結果を用いた先行制御機構**と名付けて、**1981年12月**に国内の研究会で発表[1]、1983年3月には下記の学術論文誌に論文が掲載された[2]。これらは、EM-3の名前を国内外に向けて公にした最初の論文である。引き続いて、離散事象シミュレーション言語 Simura で記述した EM-3 ソフトウェアシミュレータを DEC20/60 計算機上で作成し、擬結果の概念の有効性を検証している。その結果を **1983年6月**にスウェーデンで開催された米国 ACM (Association for Computing Machinery) の「**計算機アーキテクチャに関する国際シンポジウム (ISCA)**」で、山口喜教が発表した[3]。

1. 山口喜教, 弓場敏嗣, 島田俊夫: データ駆動計算機 EM-3 の関数評価機構, 電子計算機研究会, 電子通信学会, EC81-57, pp.1-8 (1981).
2. Toshitsugu Yuba, Yoshinori Yamaguchi and Toshio Shimada: A Control Mechanism of a Lisp-based Data-driven Machine (EM-3), Information Processing Letters, North-Holland Publishing Co., Vol.16, No.3, pp.139-143 (1983).
3. Yoshinori Yamaguchi, Kenji Toda and Toshitsugu Yuba: A Performance Evaluation of a Lisp-based Data-driven Machine (EM-3), Proc. of 10th International Symposium on Computer Architecture, ACM, pp.163-169 (1983).

国際会議での発表で自信を得て、**山口喜教**は EM-3 のハードウェア製作に力を注いだ。基本プロセッサ 8 台を 1 筐体に収納した小規模プロトタイプが、**1984年中頃**に実験的稼働を始めた。マイクロプロセッサはモトローラ社の MC68000 を採用している。基本プロセッサは購入したマイクロプロセッサ基板に、ワイアラッピング配線で製作した待ち合わせ機構部とパケット記憶部を外付けして実現した。基本プロセッサを接続する相互結合網は、CMOS ゲートアレイで製作したルータチップを用いて構成した。研究室として初めて採用したゲートアレイ技術を用いて、**戸田賢二**は 2,000 ゲート規模のルータチップを設計した。並列計算機試作に不可欠な技術として、研究室のその後の研究開発に重要な経験を残した。プロトタイプは小さなベンチマーク問題が走る程度の安定性で、性能評価用のデータ収集にも苦勞を強いられた。1984年11月、東京で開催された「**第五世代コンピュータの国際会議 (FGCS)**」で総括的な発表をしたが、絶対的な速度性能が惨めで、ハイブリッドシミュレータの限界を知らされた[4, 5, 6]。ハードウェア製作技術的な完成度は十分なものではなかったが、計算機方式研究室で短期間に開発された最初のデータ駆動計算機であり、思い入れは強いものがあった。なお、EM-3の研究期間は1982年度～1984年度(3年間)であり、研究開発費は **5,400万円**を要した。この開発費には、EM-3 本体および相互結合網の製作費、ホスト計算機の他、当該研究室の研究環境整備のための費用が含まれている。

4. Yoshinori Yamaguchi, Kenji Toda., Jayantha Herath and Toshitsugu Yuba: EM-3: A Lisp-based Data-driven Machine, Proc. of International Conference on Fifth Generation Computer Systems (FGCS), ICOT, pp.524-532 (1984).

5. Kenji Toda, Yoshinori Yamaguchi, Yoshinobu Uchibori and Toshitsugu Yuba: Preliminary Measurements of the ETL Lisp-based Data-driven Machine, Fifth Generation Computer Architecture (Woods, J.V., Ed.), North-Holland Publishing Co., pp.235-253 (1986).
6. 山口喜教, 戸田賢二, 弓場敏嗣: 先行制御機構をもつデータ駆動計算機 EM-3 の評価, 電子情報通信学会論文誌, J72-D-I, 3, pp.182-195 (1989).

我々が提案した擬結果と類似した概念として、下記の MultiLisp の論文で”future”が提案されている。1984 年 11 月、MIT 教授 Arvind が「第五世代コンピュータ国際会議(FGCS)」に出席のために来日した。そのとき彼を筑波の電総研に招き、在外研究中の山口の代理で戸田賢二が行った同会議での発表[3]の練習に付き合って貰った。そのとき、Arvind から、EM-3 の擬結果の概念は MIT の MultiLisp の”future”に似ているとの指摘があった。しかし、その時点では MultiLisp に関する公開された出版物はなく、のちに下記の文献で”future”が効果的な並列処理を狙った機能であることを我々は知った。何れにしても、Arvind との議論では、文献[2]で定期的にも先に提案しているので問題はないという結論になった。

- ◆ R. H. Halstead, Jr.: MultiLisp: A Language for Concurrent Symbolic Computation, ACM Trans. Programming Languages and Systems (TOPLAS), Vol.7, No.4, pp.501-538 (1985).

EM-3 の改良版 EM-3/U [7]について触れておきたい。基本プロセッサ 8 台を結合した EM-3 はワイアラッピング配線で実装されており、ハードウェア的な安定性に欠けていた。山口喜教の在外研究中、性能評価のデータ収集を行ったが、製作者不在のもとでは十分な評価検証が行えなかった。システムが不安定であるために、関数型並列言語 EMLisp を実装して、擬結果の概念の有効性検証することもできなかった。そこで 1984 年秋、内堀義信はプリント基板配線の改良版 EM-3/U を提案し、それを実質 1 年余の短期間に製作した。EM-3 のパケット入力部と待ち合わせ記憶部の基板を除去し、それらの機能をマイクロプロセッサ基板に組み込んでいく。また、ルータによる相互結合網は EM-3 と同じ方式を用いている。基本プロセッサ数も 16 (最大 64) 台とし、並列処理実験環境と位置付けた。なお、EM-3/U ハードウェアの製作費(外注委託分)は 770 万円であった。並列オペレーティングシステム、並列プログラミング言語などの研究を行うための並列処理研究用テストベッドとしての役割が期待されたが、テストベッドとして利用できるソフトウェア開発環境が充分整備できなかった。EM-3/U はハードウェアとしての完成度は高かった。しかし、結局の所、EMLisp の実装も担当者の意欲が持続せず、EM-3/U を活用する人手がないまま役割を終えた。

7. 内堀義信, 山口喜教, 戸田賢二, 弓場敏嗣: 並列処理研究用テストベッドの試作, 電子技術総合研究所彙報, Vol.52, No.9, pp.1-32 (1988).

3.5 EM-4 研究開発小史

SIGMA-1 研究開発小史と同じく、EM-4に関する成果発表論文を渉猟しつつ、開発計画の進捗過程を辿る。参照論文は、必ずしも論文的価値が高いものを優先している訳ではない。研究室の中で初めて新世代データ駆動型並列計算機 EM-4 の計画が取り沙汰された記録は、1983年度特別研究実施計画資料として弓場敏嗣が作成した「特別研究の進捗状況と将来展望」(1983年1月)における記載である。ゲートアレイ技術の積極的採用と VLSI 化、高並列構成、RISC アーキテクチャを企図した EM-4 は、1984年4月の概算要求書で具体的に取り上げられた。なお、この時点では、ゲートアレイによるシングルチップ化がゲート規模的に実現可能か、フルカスタム LSI を研究試作に経済的に利用可能かなどを問題点として挙げている。1985年9月、山口喜教がマンチェスタ大学から帰国し、翌1986年3月には平木敬の設計した LSI 版 SIGMA-1 は最小構成で実験的に稼働を開始していた。更に1986年4月には、坂井修一が研究室に配属され、計算機方式研究室独自のアイデアに基づく EM-4 の開発について、研究室の気運が盛り上がっていた。

1986年5月、電子情報通信学会・データフローアーキテクチャと並列処理時限研究専門委員会が主催する「データフローワークショップ」で、山口喜教はデータ駆動型シングルチッププロセッサによる並列計算機 EM-4 に関する構想論文を発表した[8]。1,000台規模の高並列性とサーキュラオメガ網の各節に基本プロセッサを配置する相互結合方式を提案している。その2ヵ月前、平木敬は「シングルチップデータ駆動計算機の要点」と題する1頁の研究室メモを書き、SIGMA-1 の経験をもとにして基本プロセッサのシングルチップ化の可能性を議論している[9]。連想記憶による待ち合わせ機構を廃止し、命令実行の発火機構を単純化するなど、シングルチッププロセッサ実現のための要件を検討している。合計25,000ゲート規模でシングルチップ化は実現可能との定量的検討結果を示している。

8. 山口喜教, 平木敬, 弓場敏嗣: データ駆動型シングルチッププロセッサによる並列計算機の構想, データフローワークショップ予稿集, 電子情報通信学会, pp.9-15 (1986).
9. 平木敬, 坂井修一, 山口喜教, 弓場敏嗣: データ駆動型シングルチッププロセッサのアーキテクチャ, 情報処理学会第33回全国大会, 5C-9 (1986).

1986年9月、基本プロセッサのシングルチップ化に向けて、利用可能な CMOS ゲートアレイの選定を進めた。富士通、NEC、沖電気、リコー、セイコーエプソン、ヤマハ、LSI ロジックなどの会社がゲートアレイの市販を始めていた。国内企業が提供する利用可能なゲート数は、すべて2万ゲート以下であった。検討した中でゲート数最大のものは、(株)LSI ロジックが提供する5万ゲートであった。ゲートアレイ開発環境として、論理回路シミュレーション用 CAD システムの存在が不可欠である。(株)LSI ロジックの開発環境は、SIGMA-1 開発で使い慣れていた CAD システム Metheus と親和性があったこともあり、同社をゲートアレイの発注先として選定した。EMC-R と名付けたデータ駆動型シングルチッププロセッサのゲートアレイ設計は、1986年4月

研究室に配属された坂井修一が担当した[10, 11]。

10. 坂井修一, 山口喜教, 平木敬, 児玉祐悦, 弓場敏嗣: データ駆動型シングルチッププロセッサ EMC-R のアーキテクチャ, 電子情報通信学会研究会, CPSY88-9, pp.17-24 (1988).
11. Shuichi Sakai, Yoshinori Yamaguchi, Kei Hiraki, Yuetsu Kodama and Toshitsugu Yuba: An Architecture of a Dataflow Single Chip Processor, Proc. of 15th International Symposium on Computer Architecture (ISCA), ACM, pp.46-53 (1989)

1987年3月、弓場敏嗣は「強連結枝モデルについて」と題する2頁の研究室メモを書き、データ駆動アーキテクチャの計算モデル水準の新機軸として、EM-4に向けた強連結枝モデルを提案している。この概念はデータ駆動型とフォンノイマン型の計算実行モデルの融合を図るもので、データ駆動計算機の実用化に向けたアイデアである。グラフで表現された並列プログラムにおいて、命令群をブロック化しブロック内では逐次実行を可能とする。厳密なデータ駆動モデルを緩和し、敢えて細粒度の命令水準の並列実行をしないことで命令実行サイクルを高効率化する。また、不可分命令を作成することで、資源管理における相互排他制御を可能にする。さらに、オペレーティングシステムの構築において、入出力制御、エラー処理などに不可欠な機能を実現することを狙いとしている。1987年6月に開催された情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会で、坂井修一によって EM-4 アーキテクチャの全体的な提案が行われた[12]。引き続き1987年10月に開催された「データフローワークショップ」において、データ駆動型シングルチッププロセッサ EMC-R への強連結枝モデルの組み込みに関する論文を発表している[13]。

12. 坂井修一, 山口喜教, 平木敬, 弓場敏嗣: データ駆動計算機 EM-4 のアーキテクチャ, 情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会, 66-7 (1987).
13. 坂井修一, 山口喜教, 平木敬, 弓場敏嗣: データ駆動型シングルチッププロセッサ EMC-R における強連結枝モデルの導入, データフローワークショップ予稿集, 電子情報通信学会, pp.231-238 (1987).

1987年3月から翌1988年2月までの1年間、山口喜教は電総研企画室に出向し研究現場を離れている。一方、1988年6月児玉祐悦が研究室に配属された。児玉は、EM-4 シングルチッププロセッサ EMC-R の詳細設計とデバッグ、さらにはホスト計算機 SUN3 上の制御ソフトウェアなどの利用環境造りを担当した。1988年夏、EMC-Rを基本プロセッサとするEM-4基本部の製作を三洋電機(株)に発注している。基本プロセッサ80台を1筐体に収納した最終的なEM-4プロトタイプは、1990年4月に本格的な稼働が確認された。同プロトタイプは最大処理速度1GIPSの性能をもつものであった。経済的な制約で80台構成となったが、筐体数を10倍程度、すなわち基本プロセッサ1,000台規模の構成に拡張可能な設計になっている。この研究成果は1989年8月開催の「世界コンピュータ会議(IFIP)」、および1990年10月開催の「情報処理

学会 30 周年記念国際会議」で発表された[15,16]。

14. 坂井修一, 平木敬, 山口喜教, 児玉祐悦, 弓場敏嗣: データ駆動計算機のアーキテクチャ最適化に関する考察, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.12, pp.1562-1572 (1989).
15. Yoshinori Yamaguchi, Shuichi Sakai, Kei Hiraki, Yuetsu Kodama and Toshitsugu Yuba: An Architectural Design of a Highly Parallel Dataflow Machine, Proc. of IFIP World Computer Congress, pp.1155-1160 (1989).
16. Yuetsu Kodama, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: A Prototype of a Highly Parallel Dataflow Machine EM-4 and its Preliminary Evaluation, Proc. of International Conference Organized by IPSJ to Commemorate the 30th Anniversary (InfoJapan90), pp.291-298 (1990).

3. 6 EM-X 研究開発小史

児玉祐悦は(株)LSIロジックの10万ゲート規模のゲートアレイを用いて高機能データ駆動型シングルチッププロセッサ EMC-Y を設計し、1993年7月、「スーパーコンピュータに関する国際会議(ICS)」で発表している[17]。また、EMC-Y を組み込んだEM-4の後継機 EM-X は1995年春に稼働開始し、性能評価結果を1995年6月ACMの「計算機アーキテクチャに関する国際会議(ISCA)」で発表している[18]。EMC-R から EMC-Y への進化は、最先端のゲートアレイ技術の採用に加えて、以下の機能を強化している。なお、EM-X のホスト計算機は SUN SparcStation 10 であった。

1. 使用ゲートアレイ規模を5万ゲートから10万ゲートに拡大
2. クロック速度を12.5MHz から20MHz に高速化
3. ネットワークスループットを25MB/秒/ポートから40MB/秒/ポートに高速化
4. 記憶容量を4倍に拡大
5. 浮動小数点演算機能40MFLOPSを追加
6. 遠隔記憶へのアクセス機能の追加
7. 高機能なパケット処理の追加
8. 画像出力機能をもつ基板の追加

これらにより、EM-X はEM-4 よりも速度性能のみならず、「使える並列計算機」としての実用性を高めた。命令水準並列実行に加えて細粒度のメッセージ処理を可能とし、メッセージ通信型と共有記憶型を融合したプロセッサ間通信方式を実現している。図3で示すように、EM-4 とEM-X はほぼ同じ大きさの筐体に収納されている。EM-X の基本プロセッサ数はEM-4 と同じ80台であり、並列計算機としての台数規模は拡大されていない。そうなったのは予算上の制約である。願わくは、EM-X のアーキテクチャ的な拡張容易性を検証し、より多くの並列性が抽出

可能なことを実験、評価するために、最大構成 1,000 台規模に近い並列計算機を実現できればよかったと思う。

17. Yuetsu Kodama, Yasuhito Koumura, Mitsuhsa Sato, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: EMC-Y: Parallel Processing Element Optimizing Communication and Computation, Proc. of International Conference on Supercomputing, pp.167-174 (1993).
18. Yuetsu Kodama, Hirofumi Sakane, Mitsuhsa Sato, Hayato Yamana, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: The EM-X Parallel Computer: Architecture and Basic Performance, Proc. of 22nd International Symposium on Computer Architecture, ACM, pp.14-23 (1995).

研究開発した計算機はベンチマーク問題を用いて評価し、所期の性能が実現できているかを検証する。通常、研究室で開発されたハードウェアとしての成果物は、そこまでの評価検証で終わることが多い。我々の場合も、EM-3 および SIGMA-1 の開発においては、高水準言語処理系(コンパイラ)を始めとする環境ソフトウェアが不十分であり、ハードウェア開発者が自分でベンチマーク問題を記述して評価する水準に留まった。EM-4/EM-X ではそれを打破するとの意識をもって臨み、アーキテクチャ開発に直接関与しない第三者利用者が使用可能な高水準言語処理系、システムソフトウェア環境を整備している。

1991年4月に研究室配属された佐藤三久は高水準言語処理系の開発に才能を発揮し、EM-4言語処理系 EM-C および EM-4 プログラミング環境を構築した[13, 14]。それらを用いて、EM-4/EM-X 上で多くの応用プログラムが作成され、実行された。新しいアーキテクチャの上で実行される応用プログラムは、その並列実行性能を評価することで新規な発見が期待された。記号処理と数値計算の応用例を以下に記す[15, 16, 17, 18]。これらのプログラムは、基本的に並列実行による性能向上を評価するためのベンチマーク問題である。従って、プログラム実行時間は高々数秒、多くは1秒以下である。もっとも実行時間の大きいプログラムは、EM-X 上で64ノードを用いた疎行列ソルバのCG kernel である。その実行時間は30秒弱、マルチスレッド化で10秒程度である[19]。

13. Mitsuhsa Sato, Yuetsu Kodama, Shuichi Sakai, Yoshinori Yamaguchi and Yasuhito Koumura: Thread-based Programming for the EM-4 Hybrid Dataflow Machine, Proc. of 19th International Symposium on Computer Architecture, ACM, pp.146-155 (1992).
14. 佐藤三久, 児玉祐悦, 坂井修一, 山口喜教: 並列計算機 EM-4 の並列プログラミング言語 EM-C, 並列処理シンポジウム予稿集, pp.183-190 (1993).
15. Yuetsu Kodama, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: Evaluation of the EM-4 Highly Parallel Computer Using a Game Tree Search Problem, Proc. of FGCS, ICOT, Vol.2, pp.731-738 (1992).

16. Hayato Yamana, Mitsuhsa Sato, Yuetsu Kodama, Hirofumi Sakane, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: A Macrotask-level Unlimited Speculative Execution on Multiprocessors, Proc. of International Conference on Supercomputing, ACM, pp.328-337 (1995).
17. 児玉祐悦, 佐藤三久, 坂根広史, 山名早人, 坂井修一, 山口喜教: 高並列計算機 EM-X による radix ソートの実行, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.9, pp.1726-1735 (1997).
18. 坂根広史, 児玉祐悦, 小池汎平, 佐藤三久, 山名早人, 坂井修一, 山口喜教: EM-X による密行列計算の細粒度並列処理 -ウェーブフロント型並列性の効率的実行-, 並列処理シンポジウム予稿集, pp.29-36 (1997).
19. 佐藤三久, 児玉祐悦, 坂根広史, 山名早人, 坂井修一, 山口喜教: 細粒度通信機構をもつ並列計算機 EM-X による疎行列問題の並列処理, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.9, pp.1761-1770 (1997).

3. 7 EM-4/EM-X の独創的研究成果

記号処理用データ駆動計算機 EM-4/EM-X に関して、誇りうる独創的研究成果を簡単にまとめておく。これらの成果は SIGMA-1 のそれに比べて、新世代の並列計算機としての革新性が増している。SIGMA-1 の研究開発は、米国の MIT、英国のマンチェスター大学の成果を踏まえ、未経験なデータ駆動アーキテクチャへの挑戦であった。EM-4/EM-X の場合は、SIGMA-1 開発の経験を踏まえ、それを発展させるという余裕が存在した。研究の離陸期に、必要な人材と時間さらには予算が得られたことが、多くの独創的成果に繋がった。

1. CMOS ゲートアレイ技術を用いたデータ駆動型シングルチッププロセッサ
2. 80 台の基本プロセッサを用いた高並列計算機(最大構成は 1,000 規模)
3. 80 台の基本プロセッサ構成で最大処理速度 1.6GIPS / 3.2GFLOPS を達成
4. 強連結枝型データ駆動モデルをアーキテクチャ水準で実現
5. ダイレクトマッチング方式の待ち合わせ記憶
6. 5×16 のサーキュラオメガ型相互結合網
7. 外部への画像入出力機能をもつ専用基板
8. 言語処理系 EM-C を始めとする EM-4/EM-X プログラミング環境

結局の所、EM-4 の研究期間は 1985 年度～1989 年度(5 年間)、研究開発費は 5,200 万円を要した。EM-X については、研究期間 1988 年度～1993 年度(6 年間)、研究開発費は 7,100 万円である。これらの費用には、EM-4/EM-X ハードウェア製作費の他に、SUN-4 や SUN SparcStation10 などのホスト計算機の購入費も含まれる。

これらの研究成果を顧みて心残りに思うのは、データ駆動アーキテクチャの技術的有効性に

ついでの評価を極められなかったことである。EM-4/EM-X はハードウェアの安定性もあり、評価のためのプログラミング環境も、第三者利用が可能な程度に整備されていた。しかしながら、命令水準の並列処理を可能とするデータ駆動型並列計算機の、フォンノイマン型アーキテクチャに対する優位性の検証は十分には行われていない。また、強連結枝モデルの有効性あるいは限界についても、その後の研究において議論されていない。先端技術分野の研究開発においては、モノを造ることで息切れをしてしまい、その後の評価あるいは検証作業が疎かとなる一般的傾向がある。さらに、プロジェクト研究の宿命といえるが、研究グループの短いサイクルでの離合集散は息の長い研究の継続を難しくしている。何年か後に、データ駆動型並列計算機の研究が再度注目を浴びるであろうと考えている。

3. 8 EM-4/EM-X 研究余話

■国際会議 SC への研究展示

山口喜教が計算機方式研究室長を務めていた 1996 年と 1997 年の 2 回、米国で毎年開催されている「スーパーコンピューティング国際会議 (International Conference on Supercomputing; SC)」の研究展示コーナーに電総研ブースを設け、EM-X の基板を展示している。同会議 SC は、世界中のスーパーコンピュータの製造業、大規模計算需要をもつスーパーコンピュータ利用者、スーパーコンピュータの研究開発に取り組む人達が挙げて集まるスーパーコンピュータ業界の世界的な祭典である。1998 年以降は担当者を関口智嗣に引き継ぎ、電総研/産総研ブースとして GRID 研究関連の研究試作品を展示している。電総研の研究成果は、従来、論文発表のみに拠っていた。しかし、より説得力をもって世の中に成果を訴えるためには、関心をもつ人々が集まる場所に実物展示することが必要であり、それを実現した意義は大きい。

■EM-4/EM-X の技術継承

EM-4/EM-X のその後への技術的な継承について触れておきたい。「第五世代コンピュータの研究開発 (FGCS)」プロジェクトが終了後、1992 年度から通商産業省は新たな国家プロジェクト「リアルワールドコンピューティングの研究開発 (Real-World Computing; RWC)」を開始している。FGCS プロジェクトは人間が行う情報処理の論理的側面を追求したのに対して、RWC プロジェクトは直観的側面を実世界応用指向の新しい情報処理の枠組みと位置付けた。その枠組みのもとで必要な計算基盤となる高性能計算機として、新世代の高並列計算機 RWC-1 の研究開発が計画された。EM-4 の設計者坂井修一は RWC プロジェクトの推進機構に出向し、3 年間、設計責任者として RWC-1 の開発を担当した。RWC-1 は、EM-4/EM-X のデータ駆動アーキテクチャを継承かつ発展させたスーパースレッディング方式を提案している[20, 21]。また、実用性を高めるために、キャッシュ機構を付加した実装となっている。

20. Shuichi Sakai, Kazuaki Okamoto, Hiroshi Matsuoka, Hideo Hirono, Yuetsu Kodama and Mitsuhsa Sato: Super-Threading: Architectural and Software Mechanisms for Optimizing Parallel Computation, Proc. of International Conference on Supercomputing

(ICS), pp.251-260 (1993).

21. Shuichi Sakai, Hiroshi Matsuoka, Kazuaki Okamoto, Takashi Yokota, Hideo Hirono, Yuetsu Kodama and Mitsuhsa Sato: RWC-1 Massively Parallel Architecture, Proc. of High Performance Computing Conference (HPCC), pp.33-38 (1994).



図3. 記号処理用データ駆動計算機 EM-4 と EM-X

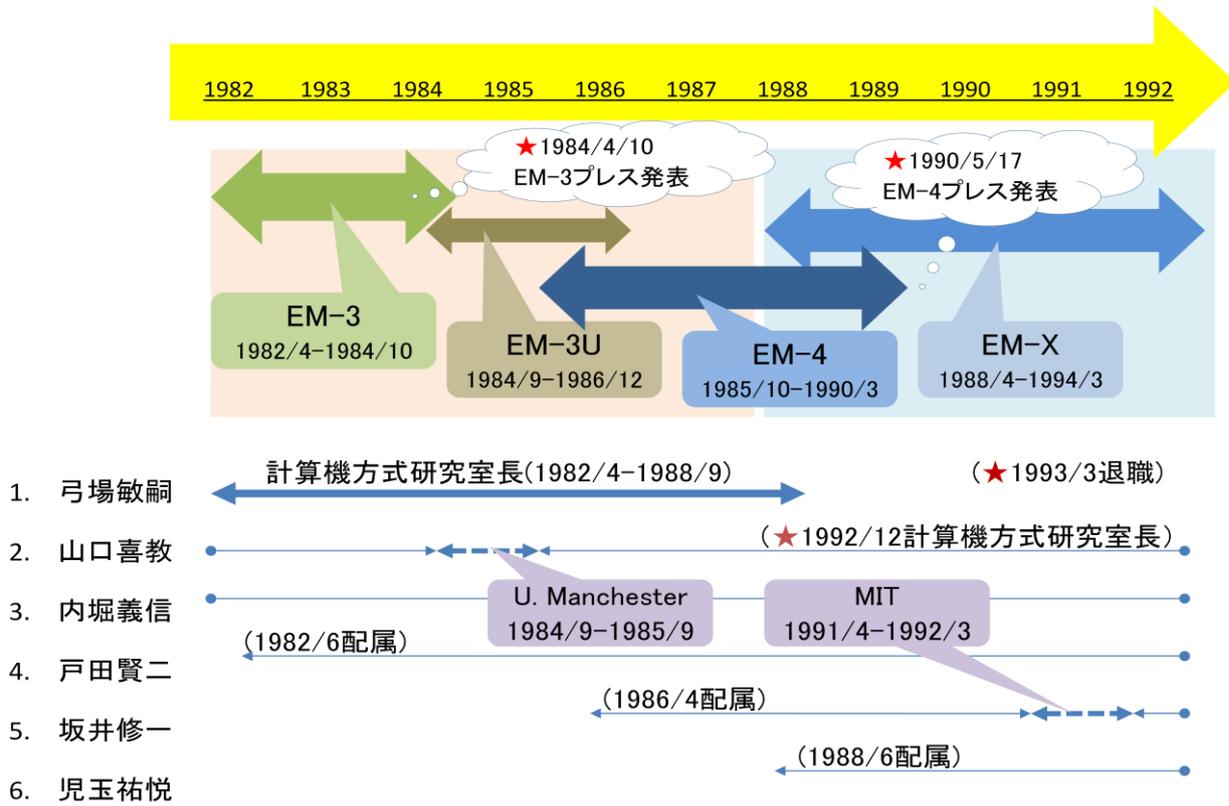


図4. EM-3/EM-4/EM-X の研究開発(1982/4~1994/3)

第4章 研究室人物列伝

4.1 「電総研サファリパーク」の呼称

本稿を書くに至る動機、あるいは、切っ掛けの1つは、計算機方式研究室に籍を置いた研究者の「人物伝」を書き残しておきたいというものである。決して、学問的成果を誇ることを目指すものではない。往時、学会の研究者仲間から、計算機方式研究室は「電総研サファリパーク」と揶揄的に語られていた時期があった。1982年4月から10年余の間、延べ13名の研究者がデータ駆動型並列計算機の研究に取り組む研究集団としての存在感が認知されていた。世間では猛獣と称された面々(研究室員)が棲息し、その間の室長は差詰め猛獣使いとして多少の尊敬の眼で見られていた。尊敬というのは当たらず、学会の研究会などで好き勝手に活動する研究室員の働きぶりを見て、その取りなしの苦労を忖度してのことであつたかと思う。2001年4月、通商産業省工業技術院は**独立行政法人産業技術総合研究所**となり、電子技術総合研究所はその傘下の研究部門に組み込まれる。計算機方式研究室の名残が消え失せて以来、もはや20年の歳月が流れている。という訳で、当時の様子を思いつくままに綴り、計算機方式研究室が過去に存在した証明を書き留めておきたいと考えた。

1982年4月、弓場敏嗣が計算機方式研究室長に就任し、覚悟を決めて正面からデータ駆動型並列計算機の研究に取り組むことを決定した。当時、計算機方式研究室所属の研究者は、弓場敏嗣、島田俊夫、内堀義信、古谷立美、山口喜教、西田健次(入所年次順)の6名であつた。同時期から、計算機方式研究室は次世代スーパーコンピュータに関する大型プロジェクト(の一部)を担当することになった。その影響もあって、1982年6月、平木敬と戸田賢二の2名が新規に研究室員として配属された。当時の電総研における各年の新規人員配置は4研究室に1名程度であり、1研究室に2名配属されるのは希有のことであつた。研究室として見れば、大型プロジェクトを引き受ける見返りではあつた。しかし、当時の電子計算機部長柏木寛としては、弱体の研究室に大型プロジェクトという重い荷を負わせたことを懸念してのことだつたろう。本稿の執筆対象は、1982年から1993年までの約10年間を中心としている。ここでは、その間に計算機方式研究室に配属された8名の研究室員の人物像を時の流れに沿って紹介する。

4.2 SIGMA-1 研究要員の強化－平木敬の配属

1982年4月、**平木敬**は電総研に入所し、6月に計算機方式研究室に配属された。配属を巡っては、当人を研究室に招いて意向を聞くとともに、研究室側でも彼の配属を所に対して要望するか否かを議論した。研究室の談話コーナーに彼を招いて面談した。私以外の室員は彼の圧倒的な個性に押され、研究室への配属を希望はするが消極的であつた。彼は東京大学後藤英一研究室で、高級言語指向計算機 FLATS のハードウェア開発に従事していた。ハードウェア開発経験の少ない当時の計算機方式研究室の状況では、実戦力として期待するところ大であつた。室長の弓場敏嗣は、面談の中で彼に賭けるしかないと覚悟を決め、人事の権限をもつ電子計算機部長柏木寛に研究室への配属を強く要望した。第五世代コンピュータ計画の発足と

同時期であったため、電総研内でも同プロジェクト推進機構(ICOT)への出向要員として、平木を期待する研究室があった。同研究室との競合となったが、首尾よく平木敬を獲得することに成功した。平木は1982年4月の時点では東京大学大学院理学系研究科博士後期課程の単位取得退学の身分で、博士の学位は未取得であった。指導教官の後藤英一からは、FLATSを実稼働させることが学位授与の条件とされていた。電総研入所2年後にFLATSを稼働させて、東京大学から理学博士の学位を授与されている。当研究室におけるSIGMA-1開発の合間を縫って、FLATSのデバッグに出かけていた姿が思い出される。その後、科学技術計算用データ駆動計算機SIGMA-1の開発によって、彼の活躍は広く世界的に知られることとなった。平木敬は1988年10月、招聘したIBM研究員Harold Stoneの仲介によってWatson Laboratoryに招かれ、2年間、同地で新世代の並列計算機開発に従事している。電総研企画室などから、米国の私企業での在外研究について問題視する向きがあったが、時代の趨勢を主張し押し切った。帰国後間もない1991年2月、東京大学に異動した。

1982年4月、平木と同期入所の戸田賢二は、慶応義塾大学斎藤信男研究室で修士課程を終えていた。並列処理に興味をもっていたが、研究室配属前の面談では研究室に同時に2人の配属は難しいとの状況を伝えた。別の研究室との競合があったが、計算機方式研究室への本人の強い配属希望もあり獲得することができた。同年6月の研究室配属後は、記号処理用データ駆動計算機EM-3の研究開発に関与した。データ駆動機構の一部をハードウェア化したマルチマイクロプロセッサ方式の並列計算機EM-3は、データ駆動計算機の可能性を予備的に評価することに有用であった。ゲートアレイを用いた相互結合網のルータチップを開発し、SIGMA-1におけるゲートアレイ技術の適用を見極めることに貢献した。戸田はEM-3の開発後、マクロデータフロー処理、実時間処理方式へと研究を発展させた。

1984年6月には、筑波大学森正武研究室出身の関口智嗣が配属された。彼は修士課程で、筑波大学が開発した数値計算用並列計算機PAXコンピュータの利用者としての経験を有していた。計算機方式研究室では、この時点でSIGMA-1の予備試作版基本プロセッサが稼働し、その上で動作するソフトウェアの開発が急務となっていた。SIGMA-1用制御ソフトウェア、高水準言語処理系(コンパイラ)、評価用応用プログラムの開発を担う不可欠な人材として、計算機方式研究室への配属を要請した。他の研究室との競合もあったが、研究室としての研究成果が上がりつつあったこともあり、彼の配属は実現した。予備試作版という不安定なハードウェア上でのソフトウェア開発という状況で、PAX利用経験者としての知見を有効に生かすことができた。その後も、開発途上の安定しないハードウェア環境のもとで、LSI版SIGMA-1のシステムソフトウェア開発に従事した。SIGMA-1用高水準言語処理系DFCの開発、およびSIGMA-1評価用応用プログラムの製作に貢献した。本稿執筆の時点で、関口智嗣は、国立研究開発法人産業技術総合研究所の理事、(兼)情報・人間工学領域長を務めている。計算機方式研究室に所属した研究者としては、いわゆる出世頭である。

4.3 EM-4 研究要員の注入－坂井修一の入所

1986年4月には、東京大学元岡達研究室から、博士後期課程を修了し選考採用された坂井修一を迎え入れた。正確には坂井の指導教官元岡達は1985年11月に病没し、当該研究室を継承した田中英彦が学位取得時の指導教官である。因みに、博士の学位を所持する新入所員は、研究室配属は実質的に選考採用時に決定している。当時は入所後の新人研修も省略され、研究室配属も4月1日付となっていた。坂井の博士課程の研究課題は並列計算機の相互結合網に関する方式設計であったが、ハードウェア構築については、8ビットマイクロプロセッサの設計とTTLによる実装の経験を有するのみであった。彼曰く、「自分が大学でやったのは、今から見ると幼稚園の工作だった」とのことである。彼が入所した1986年度当初には、研究室ではゲートアレイを多用したLSI版SIGMA-1基本プロセッサの設計を終了し、128台の基本プロセッサから構成される最終版の製作が進捗していた。また、記号処理用のデータ駆動型マルチマイクロプロセッサシステムEM-3の開発を終了していた。その後継の研究計画として、新たなデータ駆動型シングルチッププロセッサを構成要素とする高並列データ駆動計算機EM-4の具体化を開始していた。

坂井修一はEM-4の研究開発を担う人材として注入された。1987年3月から翌年2月まで山口喜教は企画室に出向し、研究現場を離れることになった。EM-4研究グループはその間、弓場敏嗣と坂井のみで毎週の定例会議を行っていた。データ駆動型シングルチッププロセッサEMC-Rの設計途上にあり、強連結枝モデルのアーキテクチャの実現、ダイレクトマッチングと称した命令発火機構などの具体的実装の議論は2人だけで行われた。毎回、坂井は手書きの検討資料を作成し、私を相手にその内容を説明する中で、自分自身が問題点を発見しそれを解決するということを繰り返した。EMC-Rアーキテクチャの論理設計は坂井の仕事である。EM-4はデータ駆動型並列計算機として多くの新規性をもち、国際的にも高い評価を受けた。1991年4月、坂井はマサチューセッツ工科大学(MIT)から招聘され、Laboratory for Computer Scienceで1年間在外研究を行っている。その後、1993年3月から新情報処理開発機構(RWCP)に3年間出向した。1996年3月電総研に復職後、1996年10月に筑波大学、さらに1997年4月には東京大学に異動している。

1988年6月、東京大学和田英一研究室で修士課程を修了した児玉祐悦が、計算機方式研究室に配属された。彼は、大学では仮想マシン水準でリダクションマシンを設計した経験をもっていた。1988年3月、研究室では、SIGMA-1の研究成果についてプレス発表を終え、大型プロジェクトも最終段階を迎えていた。また、EM-4の開発も目途がたっていたこともあり、彼の計算機方式研究室配属には、他研究室に配慮して積極的ではなかった。過去6年間に延べ4人の研究員を迎え入れた研究室長の立場からは、強い配属希望は憚られた。当時の電子計算機部長柏木寛は研究者教育の場として計算機方式研究室は優れていると判断し、その結果、児玉祐悦は計算機方式研究室に配属されることになった。この判断は正しいものであったと今にして思う。理想的な研究環境を与えられた児玉祐悦は、坂井修一の指導のもとに高並列データ駆動計算機EM-4の改良版EM-Xの基本プロセッサEMC-Yを開発し、完成度の高いデータ駆

動計算機 EM-X の環境を構築した。1996 年 11 月、米国ピッツバーグで開催された「スーパーコンピューティング国際会議(SC)」に参加し、EM-X 基板の実物を研究展示することで参加者に強い印象を残した。2011 年 1 月、筑波大学に異動後、現在は理化学研究所に所属し、国家プロジェクトである次世代スーパーコンピュータの開発に携わっている。

4. 4 電総研の組織改革と人事異動

1988 年 10 月に電総研の組織改革が実施されたとき、計算機研究室長の弓場敏嗣は、知能ロボット研究を所掌する知能システム研究部長に異動した。弓場敏嗣の後任として、島田俊夫が情報アーキテクチャ部計算機方式研究室長に就任した。電子計算機部とソフトウェア部が部分的に統合され、計算機方式研究室が属する部名は情報アーキテクチャ部に変更された。当時、組織改革に合わせて、部名、室名は原則として変更するとの所の意向が示されたが、それに抗した結果、計算機方式研究室の名前は残ることになった。弓場敏嗣は部長昇任後、新人採用の面接に立ち会うようになる。採用面接では所長、企画室長、各研究部の部長が面接官を務め、限られた定員枠を競う構図である。入所希望者の個人面接の後、推薦する部長が応募者の応援演説をし、面接官全員で投票を行う。私の経験した面接試験の合格率は 5 割ほどだったと思う。計算機方式研究室に配属された以下の佐藤三久、坂根俊史、山名早人の 3 名については、その意味で多少の感慨を覚えざるを得ない。その後の 1993 年 4 月、情報アーキテクチャ部長であった弓場敏嗣は電気通信大学に異動する。

1991 年 4 月、東京大学後藤英一研究室から、高水準言語処理系(コンパイラ)で博士論文をまとめた佐藤三久が計算機方式研究室に配属された。博士の学位論文をまとめるに際して、何件かの学会誌論文、国際会議発表論文などを研究成果として残しているのが通常である。しかし、彼の場合、指導教官の研究方針を受けて、成果といえる研究業績(論文)が少なく、選考採用の面接では苦勞をさせられた。材料系、エレクトロニクス系の入所希望者の場合、論文発表件数は驚くほど数が多い。研究業績を論文数だけで勝負すると、情報系の人間は勝ち目がない。大学時代の佐藤を知る平木敬、関口智嗣から、強い推薦があった。また、佐藤の異能プログラマとしての活躍を教えられていた。EM-4 およびその後継機種 EM-X のプログラミング環境を整備することが研究室として急務であり、彼にはそれらの高水準言語処理系(コンパイラ)を開発することが期待された。実際に、彼は計算機方式研究室史上最強のプログラマとして、EM-4 および EM-X を第三者が利用できる高水準言語 EM-C およびそのプログラミング環境を構築した。2001 年 4 月、佐藤は筑波大学に異動後、現在は理化学研究所に所属し、児玉祐悦と同じく次世代スーパーコンピュータの開発に携わっている。

1992 年 6 月、電気通信大学鈴木務研究室で修士課程を終えた坂根広史が、計算機方式研究室に配属された。坂根は、大学では合成開口レーザーにおける分解能向上の研究を行っていた。配属後は、佐藤三久が開発した EM-C 言語およびプログラミング環境を用いて、EM-4 および EM-X が有するアーキテクチャ上の新機軸の評価を行い、その有効性を検証する研究を推

進した。その後、2002年4月から2005年3月の期間、坂根は米国のデラウェア大学で在外研究を行っている。更に2008年5月から2012年5月まで、米国商務省標準技術研究所(NIST)で情報セキュリティに関する動向調査と技術開発に従事している。

1993年1月、計算機方式室長**島田俊夫**は4年3ヶ月の室長在任期間を経て、名古屋大学に異動した。島田は大学に移って2年後の1995年に、拡張型心筋症という重篤な心臓病に冒される。2001年8月、米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校付属病院で心臓移植手術を受け、手術に成功後リハビリを経て、同年10月末に帰国した。病癒えて現役に復帰後、名古屋大学で定年を迎えた。現在も、元気で退職後の生活を楽しんでいる。当時、名古屋大学と連携して、「島田俊夫さんの心臓移植を支援する会」を立ち上げ、広汎な募金活動を行ったのも懐かしい思い出である。支援する会の名古屋地区代表は名古屋大学名誉教授堀井憲爾、東京・つくば地区代表は元工業技術院長柏木寛が務めた。米国での受け入れ先の病院が決まったあと、患者の移送にともなう経費を米国航空会社ノースウエストに負担してもらえないかと、会社まで要請に出かけた。患者以外に付き添いの看護スタッフ、親族の介護者分の航空機代金を含めて、通常の6人分ほどの往復費用が必要とされた。名古屋大学に作成して貰った説明資料をもとに切々と訴えるのだが、賛同が得られないことは最初の10分くらいで予測できた。それでも資料作成に多大の時間を使った名古屋大学の方々の顔が浮かび、1時間は粘らなくては申し訳がたたないと苦闘した苦い思い出がよみがえる。

1993年1月、**山口喜教**が島田俊夫の後任として、計算機方式室長に着任した。その後、1997年4月電総研の組織改革によって研究室制度はなくなり、歴史のある「計算機方式研究室」の名前は消失した。研究組織として、新たにラボ制なるものが施行された。ラボ制は予算毎に研究グループを構成するもので、研究予算の配置でラボの寿命は決定する。研究人材を育てる哺場としての研究室はその存在理由を失う。室長在任4年4ヶ月間を経て、山口喜教は特別研究「統合型並列処理システムの研究」の予算項目に依拠する並列処理ラボを引き継いでいる。山口は、1999年3月に筑波大学に異動する。

1993年4月、情報アーキテクチャ部長であった弓場敏嗣の退職と入れ替わりに、早稲田大学理工学部の村岡洋一研究室で博士後期課程を終えた**山名早人**が計算機方式研究室に配属された。並列計算機におけるマクロタスクの投機的実行の分散制御に関する研究で学位を取得していた。入所後は、その時点で安定した稼働状態にあったデータ駆動計算機EM-4/EM-Xの性能評価を行う一方、同計算機上でのマクロタスク間投機的実行制御の研究を展開した。ハードウェアから研究開発した実機のソフトウェア開発環境は著しく不十分であったが、そうした状況下で、応用プログラムを効率的に実行させる並列計算方式に関して多くの貢献をした。山名は入所7年後の2000年4月、早稲田大学に異動している。短い在職期間中に、通商産業省機械情報産業局電子機器課、電総研企画室への出向を果たしている。

第5章 研究室の研究余話

5.1 研究成果の解説的文献と博士学位論文

■解説的文献

1980年代における計算機方式研究室での研究成果を、解説的に取りまとめた文献は下記の通りである。文献[1]は、1990年10月に開催された情報処理学会の「創立30周年を記念する国際会議」における招待講演である。データ駆動型並列計算機 SIGMA-1 と EM-4 に関する研究成果の総括的な報告を行っている。文献[2]は、ACMの「スーパーコンピュータに関する国際会議(ICS)」に招待されて発表した論文である。この論文では、当時活発であった日本におけるデータ駆動型並列計算機研究の情勢についても総説的に報告している。これらを通じて、計算機方式研究室での研究成果は国内外で高く評価され、電総研の知名度向上に貢献した。文献[3]は、電子情報通信学会編「コンピュータアーキテクチャシリーズ」の1冊として刊行されたものである。同本の巻末に425の参考文献が掲げられている。情報処理学会誌では2002年2月、日本の大学、企業で研究開発されたが商用化されなかった試作計算機を「知られざる計算機」として取り上げ、その特集号を発刊した。文献[4, 5]は、同特集号に向けて、学会から依頼を受け執筆された回顧論文である。計算機方式研究室で開発された SIGMA-1 および EM-4 の概要と思い出を、それぞれの設計製作を担当した平木敬と坂井修一が語っている。

1. Toshitsugu Yuba, Toshio Shimada, Yoshinori Yamaguchi, Kei Hiraki, Shuichi Sakai, Satoshi Sekiguchi and Yuetsu Kodama: Dataflow Computer Development at the Electrotechnical Laboratory, Proc. of International Conf. Organized by the IPSJ to Commemorate the 30th Anniversary (InfoJapan90), IPSJ, pp.271-278(1990).
2. Toshitsugu Yuba, Toshio Shimada, Yoshinori Yamaguchi, Kei Hiraki and Shuichi Sakai: Dataflow Computer Development in Japan, Proc. of International Conf. on Supercomputing, ACM, pp.140-147 (1990).
3. 弓場敏嗣, 山口喜教: データ駆動型並列計算機, 電子情報通信学会編, オーム社 (1993).
4. 平木敬: SIGMA-1: データフロースーパーコンピュータ, 情報処理学会誌, 特集「知られざる計算機」, Vol.43, No.2, pp.127-129 (2002).
5. 坂井修一: 電総研 EM-4, 情報処理学会誌, 特集「知られざる計算機」, Vol.43, No.2, pp.132-133 (2002).

■博士学位論文

計算機方式研究室におけるデータ駆動型並列計算機の研究に直接関わる博士学位論文は4件ある。島田俊夫は、「細粒度ダイナミックデータフロー計算機の研究」と題する電総研研究報告(1992年12月)をまとめている。内容的には SIGMA-1 に関する研究成果であり、東京大学への博士学位論文(工学博士)となっている。山口喜教は、「記号処理向きデータ駆動計算機のアーキテクチャに関する研究」と題する電総研研究報告(1994年3月)をまとめ、東京大学か

ら博士(工学)の学位を得ている。**児玉祐悦**は、「細粒度通信に基づく並列計算機アーキテクチャに関する研究」と題する博士学位論文をまとめ、東京大学から博士(工学)の学位を取得している(2002年12月)。本論文は <http://hdl.handle.net/2261/51179> から参照できる。以上3件の学位論文は、東京大学における学位審査会主査として同大学院教授田中英彦にお世話頂いている。**坂根広史**は、電気通信大学大学院情報システム学研究科博士後期課程に社会人学生として入学し、「細粒度通信機構をもつ並列計算機のメモリアーキテクチャに関する研究」と題する博士学位論文を執筆し、2001年3月、博士(工学)の学位を取得している。

5.2 外部研究者往来

■共同研究者

データ駆動型並列計算機の研究開発を実施中、数多くの外部研究者が来訪している。その中には、開発した計算機を利用して共同研究を行った外部研究者、我々が知見を交換するために招待した研究者、単なる見学者などがいる。研究室への「来訪者記録簿」はある時期用意していたが、いつの間にか消失した。共同研究の場合は共著の論文が発表されている。以下では、共著論文に主著として外部研究者が執筆した代表的論文を年代順に掲げる。

1. **大塚喜久**, 坂井修一, 弓場敏嗣: データ駆動計算機における命令水準の静的負荷分散, 電子通信学会, 信学技報 CAS86-136, pp.75-84 (1986).
2. **Jayantha Herath**, Yoshinori Yamaguchi, Nobuo Saito and Toshitsugu Yuba: Dataflow Computing Models, Languages and Machines for Intelligence Computations, IEEE Trans. Software Engineering, Vol.14, No.12, pp.1805-1828 (1988)
3. **Kazuaki Okamoto**, Yuetsu Kodama, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: Methodologies in Development and Testing of the Dataflow Machine EM-4, Parallel Computing, Vol.18, pp.901-912 (1992).
4. **Andrew Shaw**, Yuetsu Kodama, Mitsuhisa Sato, Shuichi Sakai and Yoshinori Yamaguchi: データ駆動計算機 EM-4 におけるデータ並列プログラミング、並列処理シンポジウム(JSPP) 予稿集, pp.179-186 (1992).
5. **Andrew Sohn**, Mitsuhisa Sato, Shuichi Sakai, Yuetsu Kodama and Yoshinori Yamaguchi: Non-numeric Search Results on the EM-4 Distributed-Memory Multiprocessor, Proc. of International Conf. Supercomputing, pp.301-310 (1994).
6. **高畠志泰**, 大澤範高, 弓場敏嗣, 佐藤三久, 山口喜教: EM-X 用 SISAL コンパイラにおける並列粒度調整方式, 並列処理シンポジウム(JSPP) 予稿集, pp.37-44(1997).

■海外からの招聘者

海外から招聘した主な研究者は、以下の通りである。これらの多くは大型プロジェクトの海外流動研究員制度を利用したもので、招聘期間は1週間、費用は渡航費込みで45万円程度であった。この制度は先端技術の吸収以外に、研究室の研究成果を世界に広報する意味合いが大

きかった。

- Dr. Chris C. Kirkham, University of Manchester, September, 1984
- Prof. Arvind, Massachusetts Institute of Technology, November, 1984
- Prof. Jack Dennis, Massachusetts Institute of Technology, October, 1986
- Prof. Wolfgang Handler, University of Erlangen-Nurnberg, June, 1986
- Dr. Harold Stone, International Business Machine, December, 1987
- Prof. Kai Hwang, University of Southern California, March, 1988
- Prof. Constantine D. Polychronopoulos, The University of Illinois, June, 1988
- Dr. John Sergeant, University of Manchester, August, 1988

招聘研究者ではないが、1982年6月、Carnegie-Mellon University 教授の Gordon Bell が研究室に來訪し、EM-3 の原型機となったパーソナルリスプマシン ELM (ETL Lisp Machine) を見学した。彼の帰国後しばらくして、米国ボストンに建設中の Computer Museum に、ELM を展示したいとの申し出があった。ELM は評価実験を継続中であり、博物館行きにはまだ早いという趣旨の返事を書き、結論を先延ばしにした。ELM は世界的に見てパーソナル型の高水準言語計算機としてもっとも早い時期の研究開発であり、その後の展開を考えれば、素直に提供しておけばよかったかの想いは残る。

5.3 電総研研究者のロールモデル

ものづくりを趣旨とする研究プロジェクトにおいて、最終的にまとまった形で成果物を実現するためには、その成果物に夢を抱き情熱を燃やす研究者 A の存在が不可欠である。最終的にまとまった成果物という言い回しが微妙であるが、プロジェクト終了後に研究成果を振り返ったとき、目に見える記念碑として佇立するものという意味合いである。そしてその人物 A は、その成果物と心中するくらいの思い入れをもちつつ、日夜、研究開発に励み取り組んでいるはずである。人物 A が生み出した成果物の研究的価値によって、人物 A の研究者としての評価が定まるという意味において、研究者の人生は熾烈である。

電総研の研究者である人物 A について、1つのロールモデルを描いてみたい。研究室に配属されてあまり時間をおかないで、取り組む研究課題(プロジェクト)に関わる、あるいは関わらされる。周りに意見を聞ける人は存在するが、基本的に単独で当該研究課題の成果物の設計を任される。もちろん、研究の枠組みは研究計画で与えられている。数頁で書かれた研究の構想あるいは概念的な設計図は存在し、想定される予算規模の制約は知らされる。人物 A は研究に必要な基礎知識を習得し、意欲が集中的に継続する 1 年間で基本設計を終了させる。その内容については学会の研究会で発表し、世間に対して研究実施を宣言する。2 年目に予算執行をとまなうものづくり(製作)に取りかかり、3 年目で研究成果物の試作を終える。保守環境を整えつつ予備的な評価実験を行い、予想した結果と比較検討を行う。計算機開発の場合、

予想以上の結果というのはあり得ない。4 年目には、その結果を論文の形で学会発表し、世間の評価を受ける。

大学で博士後期課程を修了し 30 歳前後で入所した人物 A は、この時点で 30 歳中頃の年齢となっており、欧米の大学・研究機関での長期在外研究(原則 1 年間)を目指す。人物 A の在外研究で管理者不在となった成果物は、十分な保守が得られない環境に置かれる。この辺りは当該成果物の完成度、信頼性に依存するが、研究開発という位置づけで製作された成果物は一般に壊れやすい。成果物の故障マニュアルが不十分だとお手上げとなる。人物 A の性格にもよるが、整備された故障マニュアルであっても、開発者当人不在では解決不能な事例も多く発生する。整備不良と新たなバグ発生により、成果物の寿命が尽きてしまう。在外研究後、人物 A は電総研における新たな研究への取り組みが期待されるのだが、研究室での研究継続に意欲を失い、新たな研究の場への挑戦に踏み出すことが多い。

電総研の研究者には、上記のようなく幸せな研究人生>以外に、研究管理部門への出向という仕事がある。人物 A の意向はそれなりに尊重され、出向は義務というほどの強制感はない。多くの場合 1 年間のお務めとなる出向先としては、電総研内の企画室、霞ヶ関の工業技術院大型プロジェクト開発官室、通産行政の拠点機械情報局電子機器課などがあつた。キャリアパスと見なされることもあり、世間を広く知るにはよい機会ではある。しかしながら、こつこつと励む地味な研究生活が厭わしくなり、それ以降、論文を書くことを止めてしまう研究者も例外的には存在した。

5. 4 学会における交流と「戦友」への謝辞

データ駆動計算機の研究開発を進めるために、データ駆動(データフロー)という並列処理パラダイムに関心をもつ研究者を組織化する必要があつた。1982 年秋頃、東京近辺の並列処理研究拠点の大学、研究機関の研究室に呼びかけて、並列処理技術に関する研究会をつくつた。電総研計算機方式研究室の弓場敏嗣を発起人として、東京大学(田中英彦)、筑波大学(星野力、小柳義夫)、慶應義塾大学(所真理雄)、早稲田大学(村岡洋一)、NTT 基礎研究所(雨宮真人)、ICOT(内田俊一)の各研究室に呼びかけ賛同を得た。2 ヶ月に 1 度程度の頻度で各研究拠点を巡回する、持ち回りの研究連絡会であつた。訪問先の研究室では、当該拠点における研究の進捗状況報告と見学会が開催された。2 巡ほどすると、もう少し公的な組織にすべきとの声が強くなった。それで、この並列処理研究会を母体として、国内全体にデータ駆動アーキテクチャの気運を盛り上げるために、既存の学会に所属するいわば公的な研究会を組織化することを企画した。

1986 年 5 月、電子情報通信学会の中でデータフローアーキテクチャと並列処理時限研究専門委員会を発足させ、同委員会主催の「データフローワークショップ 1986」をつくば市の工業技術院で開催した。ワークショップの委員長は田中英彦(東京大学)、幹事は雨宮真人(NTT)と弓

場敏嗣(電子技術総合研究所)が務めた。同ワークショップは、データフローアーキテクチャ(データ駆動アーキテクチャと同義)という新しい並列処理パラダイムの出現を受けて、並列処理技術全般における新展開に挑戦することがうたわれた。第五世代コンピュータ計画を牽引する 淵一博(ICOT)が「述語論理パラダイムとデータフローアーキテクチャ」と題する基調講演を行った。その他 23 件の論文発表があり、参加者は 2 日間で 105 名と成功裏に会議を終えた。翌 1987 年 10 月、前年と同じ実行委員会体制で、神戸市の大学セミナーハウスで「データフローワークショップ 1987」を開催した。寺田浩詔(大阪大学)の基調講演に引き続き、3 件の特別講演と 36 件の論文発表が行われた。

電子情報通信学会時限研究専門委員会は 2 年間の期限付研究会であったため、「データフローワークショップ」を発展的に解消することとし、1989 年 2 月からは「並列処理シンポジウム (Joint Symposium on Parallel Processing; JSPP)」と名前と内容を拡大して存続させることにした。JSPP はより広く並列処理一般の研究分野を対象として、並列処理・分散処理に関する理論、ソフトウェア、アーキテクチャ、応用に跨る横断的な研究交流の場として役割が期待された。共催研究会として、情報処理学会から計算機アーキテクチャ研究会、プログラミング言語研究会、オペレーティングシステム研究会、数値解析研究会、アルゴリズム研究会、電子情報通信学会からはコンピュータシステム研究専門委員会が名前を連ねた。さらに、ソフトウェア科学会からも協賛を得ている。第 1 回の JSPP1989 は 1989 年 2 月熱海で 3 日間開催され、50 件の論文発表があった。田中英彦(東京大学)が実行委員長、雨宮真人(九州大学)、牛島和夫(九州大学)、斎藤信男(慶応義塾大学)、弓場敏嗣(電総研)が副委員長を務めた。各共催研究会の主査を含めて、全国 16 大学、計算機関連企業 9 社などから 28 名が実行委員として名を連ねた。第 2 回の JSPP1990 では、実行委員長は弓場敏嗣、副委員長は長島重夫(日立製作所)と米澤明憲(東京大学)であった。さらに第 3 回の JSPP1991 の実行委員長は米澤明憲、副委員長は富田真治(京都大学)、林弘(富士通)と大学と企業のバランスが配慮されている。JSPP はそれ以降、2002 年まで延べ 14 回に渡って毎年継続的に開催され、並列処理技術に関して日本で最も権威ある研究発表の場となった。2003 年からは SACSIS (Symposium on Advanced Computing Systems and Infrastructures) と名前を変更し、対象分野をより広く高性能コンピューティングとその基盤環境へと拡大し、並列処理技術からの脱皮が図られている。

計算機方式研究室の研究成果を発表するいわば主戦場は、「データフローワークショップ」と「並列処理シンポジウム(JSPP)」であった。本稿で回顧した計算機方式研究室におけるデータ駆動型並列計算機研究の 10 余年の年月は、これら 2 つの会議の誕生から終焉までの 17 年間に含まれる。『電総研サファリパーク』との呼び名も、こうした研究交流の中で生まれた。会議での参加者との率直な議論を介した切磋琢磨が、より大きな研究成果に繋がった。その意味で、これらの会議で意見を戦わせた研究者達はいわば戦友であり、口角泡を飛ばした風情が懐かしく偲ばれる。田中英彦(東京大学)を始め、上記の「データフローワークショップ」、「並列処理シンポジウム(JSPP)」の役員として名前が出てくる同業諸氏には、戦友を代表する研究仲間として深甚なる感謝の意を表したい。

1980年代から1990年代の中頃まで、電総研においてデータ駆動型並列計算機の研究開発に明け暮れた13名の仲間(本稿では、便宜的に「データフロー13」と略称)がいる。該当期間の人事異動とその後の転職先を付録1~3に示す。2018年4月1日現在で、産業技術総合研究所(昔の電総研)に勤務するのは、関口智嗣、坂根俊史と非常勤研究員の戸田賢二の3名に過ぎない。残る9名のうち、弓場敏嗣(電気通信大学)、島田俊夫(名古屋大学)、山口喜教(筑波大学)、平木敬(東京大学)の4名は、すでに転職先の大学を定年退職している。坂井修一(東京大学)、児玉祐悦(筑波大学を経て理化学研究所)、佐藤三久(筑波大学を経て理化学研究所)、山名早人(早稲田大学)、西田健次(東京工業大学)の5名はまだ現役の大学教員、研究者として活躍している。なお、内堀義信は定年退職まで電総研に所属していた。電総研計算機方式研究室は、データ駆動型並列計算機の研究開発という因縁に基づいて、延べ13名の人間(データフロー13)の人生が刻まれた空間であった。共有した10年余の時間は、その後の各自の人生に大きく影響を残している。データフロー13の方々には、資料提供、記憶の確認など本稿執筆に際してさまざまな協力を頂いた。記して感謝の意を表したい。

■ 著者紹介 弓場敏嗣 (ゆば・としつぐ、Yuba Toshitsugu)

1966年、神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。(株)野村総合研究所を経て、1967年、通商産業省工業技術院電気試験所(その後、電子技術総合研究所に改名。現在、特定研究開発法人産業技術総合研究所)に入所。以来、計算機のオペレーティングシステム、見出し探索アルゴリズム、データベースマシン、データ駆動型並列計算機などの研究開発に従事。その間、計算機方式研究室長、知能システム部長、情報アーキテクチャ部長等を歴任。1993年より、電気通信大学大学院情報システム学研究科教授。2007年3月、同大学を定年退職、名誉教授。主たる研究領域は並列処理・分散処理の科学技術一般。工学博士。情報処理学会、電子情報通信学会、各フェロー。退職後、徒歩による四国八十八箇所遍路、スペインサンチャゴ巡礼、富士山登頂を果たす。また、国際キリスト教大学非常勤講師の他、居住地域への社会貢献として、千葉県我孫子市の社会教育委員、小学校評議員、平和事業推進市民会議委員、ひとり親・児童福祉推進市民研究会委員を務めた。

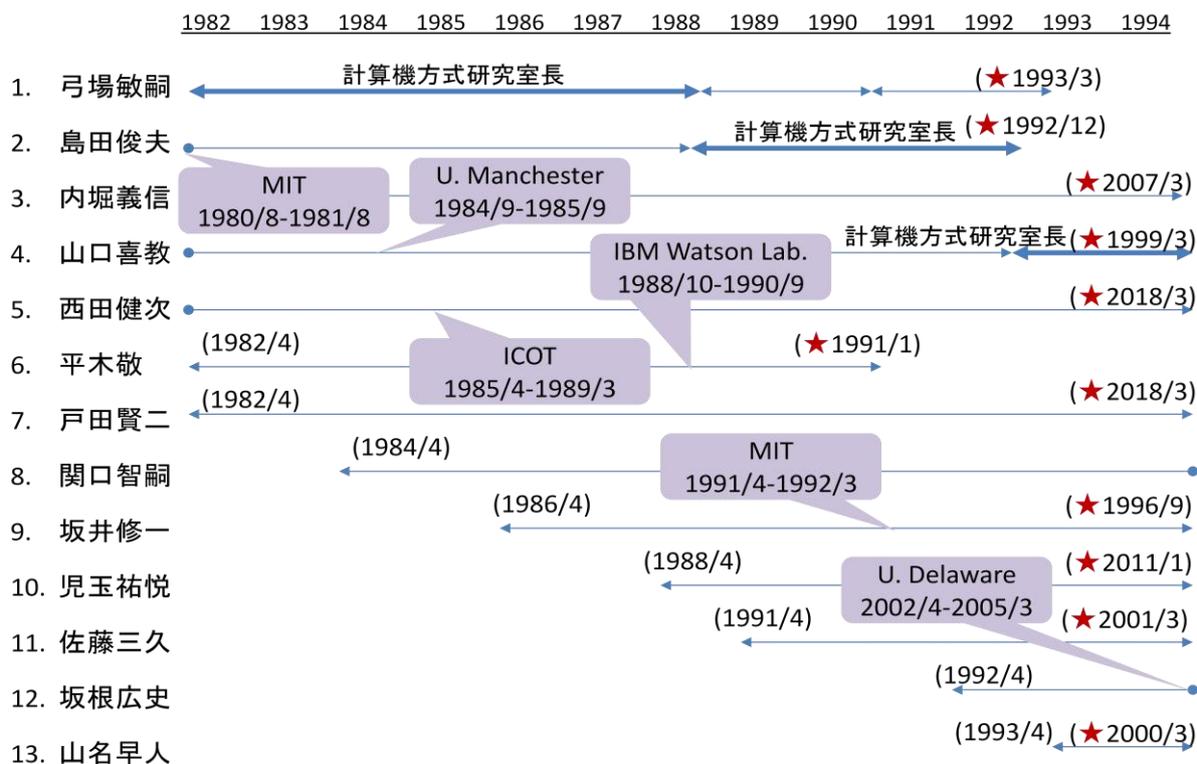
■付録1. 計算機方式研究室の人事異動(1980年4月～2001年4月)

- 1979/11 ★電子技術総合研究所、千代田区永田町から筑波研究学園都市に移転
- 1980/04 ●藤井狷介、電子計算機部計算機方式研究室室長(～1982/03)
- 1980/08 島田俊夫、MIT で在外研究(～1981/08)
- 1981/06 西田健次、計算機方式研究室配属
- 1982/04 ●弓場敏嗣、計算機方式研究室長(～1988/09)
- 1982/06 平木敬、戸田賢二、計算機方式研究室配属
- 1984/06 関口智嗣、計算機方式研究室配属
- 1984/09 山口喜教、Univ. Manchester で在外研究(～1985/09)
- 1985/04 西田健次、新世代コンピュータ開発機構出向(～1989/03)
- 1986/04 坂井修一、計算機方式研究室配属
- 1987/03 山口喜教、企画室併任(～1988/02)
- 1988/06 児玉祐悦、計算機方式研究室配属
- 1988/10 ★組織改革で部名変更(電子計算機部→情報アーキテクチャ部)
- 弓場敏嗣、知能システム部長(～1991/02)
- 平木敬、IBM Watson Lab.で在外研究(～1990/09)
- 1988/10 ●島田俊夫、計算機方式研究室長(～1992/12)
- 1991/02 平木敬、東京大学異動
- 1991/03 弓場敏嗣、情報アーキテクチャ部長(～1993/03)
- 1991/04 佐藤三久、計算機方式研究室配属
- 坂井修一、MIT で在外研究(～1992/03)
- 1992/06 坂根広史、計算機方式研究室配属
- 1992/12 島田俊夫、名古屋大学異動
- 1993/01 ●山口喜教、計算機方式研究室長(～1997/03)
- 1993/03 坂井修一、新情報処理開発機構出向(～1996/03)
- 1993/04 弓場敏嗣、電気通信大学異動
- 山名早人、計算機方式研究室配属
- 1996/04 山名早人、通産省機械情報局電子機器課出向(～1997/03)
- 1996/10 坂井修一、筑波大学異動
- 1997/04 ★組織改革で「ラボ制度」導入(計算機方式研究室の名称消失)
- 1998/04 児玉祐悦、通産省機械情報局電子機器課出向(～1999/03)
- 1999/04 山口喜教、筑波大学異動
- 2000/04 山名早人、早稲田大学移異動
- 2001/04 ★独立行政法人産業技術総合研究所に改組
- 佐藤三久、筑波大学異動

■付録2. データフロー13の電総研在職期間

1. 弓場敏嗣	1967/07-1993/03
2. 島田俊夫	1970/04-1992/12
3. 内堀義信	1971/04-2007/03
4. 山口喜教	1972/05-1999/03
5. 西田健次	1981/04-2018/03
6. 平木敬	1982/04-1991/01
7. 戸田賢二	1982/04-2018/03
8. 関口智嗣	1984/04-現在
9. 坂井修一	1986/04-1996/09
10. 児玉祐悦	1988/04-2011/01
11. 佐藤三久	1991/04-2001/03
12. 坂根広史	1992/04-現在
13. 山名早人	1993/04-2000/03

■付録3. 電子技術総合研究所における在職期間 (★:電総研退職年月)



受理日：2018年7月9日