

## 人生の転機になった CP-PACS プロジェクト

朴 泰祐

筑波大学電子・情報工学系／計算物理学研究センター（当時）  
筑波大学システム情報工学研究科／計算科学研究センター（現在）

私が CP-PACS プロジェクトに参加させて頂いたのは、まさに 1992 年 4 月のプロジェクトの正式発足時点からであった。その直前の同年 2 月 16 日、前所属だった慶應義塾大学物理学科助手を退職し、筑波大学電子・情報工学系講師として筑波大に赴任してきた直後だった。

慶大では「計算機工学出身者（実際には慶大には当時 CS 学科がなかったため卒業は電気工学科だったが）でありながら、物理学科の助手になる」という、非常に特殊な存在だった。CP-PACS の一つ前のプロジェクトである QCDPAX プロジェクトに関係していた川合敏雄先生（当時慶應義塾大学物理学科教授）が、QCDPAX の小型機を同大物理学科に導入し、その管理と計算物理学研究への応用を行うにあたり助手を探されており、同大で並列計算機工学の研究をしていた当時博士課程 2 年だった私が選ばれたという経緯だった。慶大には「博士課程在籍中に学生の身分のまま助手になる」という例はいくつかあったが、私のように学科（専攻）を跨いで適用された事例はほとんどなかったと思う。つまり、博士号を取得するまでは、物理学科では助手だが電気工学科では学生という不思議な立場だった。当時、慣れない物理数学の演習助手等を苦勞しながらやっていたが、今にして思えば、この「計算機出身で物理を手伝う」という立場に早くからいたことが今日までの自分のキャリアを作ってきたと思えてならない。

ともかく、4 年の任期の最終年度になり移転先を探していた私のところに、筑波大で講師を探しているという話が、当時筑波大構造工学系教授だった星野力先生から舞い込み、結果として筑波大にお世話になることになった。私としても、それまで研究室で実験的な並列処理システムをいくつか開発していたが、本格的な、しかも「超」がつく並列計算機プロジェクトへの参加は初めての経験だった。所属は電子・情報工学系で、CP-PACS プロ

プロジェクトの発足と同時に立ち上がった計算物理学研究センターで勤務することになり、中澤喜三郎先生(当時電子・情報工学系教授)の下で、中村宏さん(当時講師、現東京大学准教授)と3人で研究室を運営しつつ、CP-PACS プロジェクトに参加することになった。

慶大の学生時代は並列計算機工学、特に並列処理ネットワークと並列プログラミングの研究を行っており、中村さんがプロセッサアーキテクチャの専門家だったことから、「演算と通信」という高性能並列システムハードウェアの両輪を二人でそれぞれ担当し、システムの総まとめを中澤先生が指揮されるという形であった。当時、CP-PACS の並列通信ネットワークである3次元 Hyper-Crossbar (3D-HXB)網が既に日立から提案されており、私はこのネットワークの面白さに嵌ってしまった。CP-PACS で採用された3D-HXB網は、クロスバ網の柔軟性とメッシュ網の低コスト性を持ち、さらに Hyper-Cube より degree(ノード間接続の次元数に相当)が小さく、非常にバランスの取れたネットワークであった。

最大の問題点は実装の難しさで、2次元までは比較的コンパクトだが3次元になるとケーブルによる「空中配線」を行わなければならない。今でもCP-PACS の保存筐体を見るとその実装の大変さがわかる。2048 ノードというシステムサイズは当時としては大変なチャレンジであったが、何とか性能を落とさず実装できるぎりぎりのサイズだったと思う。結果的に、日立の技術力のおかげで、リンク当たり 300MB/s という、当時として極めて高いバンド幅が達成された。これは wave-pipelining 技術により、電線中の波を定在波にせず、次々に送り込む事でネットワークの動作周波数を高く維持できたことが成功の鍵であった。今日、講義や講演等で高性能並列処理における CPU 性能:メモリ性能:ネットワーク性能の比率について必ず語ることになっているが、300MFLOPS : 1.2GB/s : 300MB/s=1:4:1 という比率は今日ではまず考えられない理想的なバランスである。演算性能とメモリ性能のこのバランスは、まさに疑似ベクトル処理機構のたまものであり、“4B/FLOPS”という「ベクトル処理の矜持」を守ったシステムとなった。これがあるからこそ、ユーザは演算性能を最大限に活かしたプログラムを開発することが可能なのである。

3D-HXBは本当に研究甲斐のあるネットワークで、手始めに3D-HXBのクロックレベルシミュレータを開発し、いろいろな並列通信アルゴリズムの実装や、他の並列ネットワークの組み込み等の研究を続けた。当時始まったばかりのNAS Parallel Benchmarksのシミュレーション評価も大変実りのある研究だったし、3D-HXBが実はFat-Tree網の一部と等価である事、ADI法のために日本で研究されていたADENA網がほぼ完全に組み込める事、3D-HXB向けの効率的な集合通信アルゴリズム等、どれをとっても面白いテーマが一杯で、CP-PACSが完成する前から、これらのテーマの下で学生と共に研究を楽しんだ。最終的に、それまで固定ルーティング方式にしか対応していなかった3D-HXB上で、適応ルーティングを行う理論とアルゴリズムの研究まで進んだが、残念ながらこれはまだ実用にはなっていない。

同時に、CP-PACSの開発では、プロジェクト関係者全員参加で、毎月1回丸一日を費やして行われる筑波大・日立の合同ワークショップにおいて、特にネットワークの開発と性能評価に力を注いだ。プロジェクト3年目頃によく出て来たネットワークの詳細設計を見た時に、本当にマシンがもうすぐできるのだということを実感した。ハードウェアの基本設計、通信バッファの取り方、パケットヘッダの詳細、ハードウェアによる同期機構やCOMBUF通信とそのチェーニング機構(パケット列を順次自動的に転送する仕組み)等、高性能化を目指した非常に緻密な設計仕様を隅々までチェックし、バグを見つけ、評価予測を立てるという作業に非常な充実感を覚えたことを記憶している。

プロジェクトに関係した全ての人々の努力により、CP-PACSは1996年9月に2048ノードのフルシステムが完成し、同年11月のSC'96におけるTOP500リストで世界第一位にランクされることになった。この発表の場(TOP500 BoF)での話だが、実はCP-PACSプロジェクトの参加者はほとんどSC会場におらず、当時は上位ランクの表彰(certification 授与)やスピーチもなかったが、プロジェクト関係者として発言を求められたため、システムの概要について簡単に紹介した。当時、TOP500リストはまだ現在ほどは騒がれておらず、筑波大でもシステム開発が最優先で、システムに関する

論文が海外でほとんど出ていなかったため、多くの人が CP-PACS のことをよく知らないという状況であった。その後、いろいろな論文を発表し、世界での認識が深まっていったが、現在の TOP500 リストの騒がれようからはおよそ考えられないような話である。

CP-PACS の 3D-HXB の最大の危機は、システムがフル稼働してしばらくしてから訪れた。極めて緻密に作られ、クロック同期が取られている 3D-HXB 上で、どうしてもある確率で転送エラーが発生し、プログラムがダウンするという現象が起きていた。特に、CP-PACS での初期プロダクトランは QCDC 計算に集中していたため、256~1024、場合によってはシステム全体を使う 2048 ノードの大規模並列ジョブが絶えず走っており、1つのエラーによって計算全体が落ちてしまうという超並列処理の難しさが如実に現れていた。エラーが起きるたびに、wave-pipelining の調整のためケーブル長を修正し、クロックの位相修正をしていたが、どうしても局所的な修正では限界があることがわかってきた。そこで、日立の提案により、クロックの極性を逆転させ、パケット到着のタイミングがクリティカルにならないような改造を行うことが決まった。詳細は省略するが、これはシステムのハードウェア全体に対する「大手術」で、このためにシステムが長期間停止されたが、結果としてこの作戦は成功し、その後の稼働では見違えるように安定するようになった。

個人的には CP-PACS プロジェクトがきっかけで筑波大に来たわけだが、つくばという土地に移った事は自分を取り巻く研究生活に非常に大きな変化をもたらした。当時、同じように高性能並列処理の研究を進めていた産総研の研究チームと共同研究を行う事になり、毎月の定例ミーティングで産総研・お茶の水大学・筑波大学が協力して様々な HPC 研究を展開した。その中心は当時産総研の方式研・アーキテクチャグループにいた関口智嗣さん(現情報技術研究部門長)で、彼の周りの様々な HPC 研究者と深くかかわることになり、研究環境という意味での人脈が大きく広がった。その集まりの中で、当時同じく産総研アーキテクチャグループだった佐藤三久さん(現筑波大学計算科学研究センター長)と知り合った。最初から妙に息が合い、並列処理性能評価とツール作成というテーマでいろいろな議

論を行ったと思うが、その当時は今日のような繋がりにまでなるとは予想していなかった。

つくばという土地でのもう一つの大きな出来事は、CP-PACS とほとんど同時に始まった、通産省の RWCP プロジェクトの開始であった。RWCP の集中研究室がつくば三井ビルに設置され、ビル内の複数のフロアを占有するほど多数の研究者が集結していた。慶大の学生時代の研究室の先輩に当たる石川裕さん(現東京大学情報基盤センター長)が、産総研から出向して RWCP の立ち上げを行っており、いろいろな議論を行う機会ができた。そして、RWCP の後期に入ると佐藤さんが RWCP に出向し、石川さんのリーダーシップの下で超並列高性能 PC クラスタのための OS として SCore の開発が行われた(SCore はその後、CP-PACS の後継プロジェクトである PACS-CS で採用された)。その頃、私は佐藤さんの研究室から研究再委託を受け、彼との本格的な共同研究が始まった。そして、最終的に RWCP を終えた佐藤さんが筑波大計算物理学研究センター教授として就任することが決まり、研究室の共同運営がスタートした。また学内だけでなく、関口さんや佐藤さん、さらに大勢の HPC 研究者との繋がりの中で、情報処理学会 HPC 研究会の運営に携わるようになり、2006～2009 年度は HPC 研究会主査を任されることにもなった。国内外の数多くの HPC 研究者との繋がりが広がって行ったが、やはり国外では CP-PACS プロジェクトの一人として認識されたことが、様々な人達との繋がりのきっかけになったと思う。

このように、自分の周りに次々に魅力的な研究仲間が急速に増え、人との繋がりが学内から日本国内、さらに世界へと広がって行き、現在の自分の研究生活の基盤が作られて行ったが、その元を辿れば、星野先生と共に PACS 及び PAX シリーズの研究を開始した川合先生の助手になったこと、そしてそれを通じて CP-PACS プロジェクトに参加できたことが、世界一のマシンを作るという作業に参加できただけでなく、まさに自分の人生の転機になったと信じている。その意味で、川合先生・星野先生、そして CP-PACS プロジェクトとそれに関係した全ての方々へ感謝したい。

2005 年 9 月、CP-PACS はその稼働を終了することになり、多くの関係者

が集まる中、システムのシャットダウンと記念撮影、さらに懇親会が行われた。懇親会の場で星野先生が声をかけて下さり、「朴さんを筑波大に呼んで本当に良かった」という暖かいお言葉を頂いた。このエピソードをもって、本稿の結びとしたい。