

# キャッシュ、同期、プリフェッチ …3つの高速化技術

味曾野 智礼

スーパーコンピュータは演算コアの数を増やせば増やすほど、大規模な問題を処理できるようになります。しかし処理を並列化することによって生じるオーバーヘッドがあるため、ただ演算コアの数を増やすだけでは、それらがボトルネックになりシステム全体の性能が効率良く上がりません。

約760万コアを持つスーパーコンピュータ「富岳」のCPUは、そういったボトルネックを解消するための拡張機能を持っています。ソフトウェアがより効率良く多くのハードウェア・リソースを利用できるように、アプリケーションに合わせて細かく制御できる3つの拡張機能を紹介します。(編集部)

## 富岳のプロセッサ A64FX

### ● 特徴…Arm準拠でベクトル演算に対応する 52コア・プロセッサ

スーパーコンピュータ「富岳」で使用されているA64FXはArm v8-Aアーキテクチャに準拠するアウト・オブ・オーダー実行型のスーパスカラ・プロセッサです<sup>(1)(2)</sup>。特に自然科学シミュレーションで必要となるような大規模並列計算(High Performance Computing: 以下HPC)で高い性能を達成することを目標に設計されており、次のような特徴を持ちます。

#### ● ベクトル演算

Arm命令セットにおけるベクトル演算命令拡張であるSVE(Scalable Vector Extension)を採用し、128/256/512ビット長のベクトル演算をサポートします。

#### ● メモリ幅

メイン・メモリとして広帯域なHBM2(High Band Width Memory Gen2)を使用します。

#### ● プロセッサ間の接続用コントローラ

多数のシステム(プロセッサ)を効率的に接続するための6次元メッシュ/トラス型インターコネクトである、Tofu-Dインターコネクト・コントローラを内蔵します。

#### ● 48個のコア+4つの冗長コア

全体で52個ある物理コア(4個の冗長コアを含む)は、4つのグループに分割されています。1つのグループは13個のコアと独立したL2キャッシュ、メモリ・コントローラを持ちます。このグループをA64FXではコア・メモリ・グループ(CMG)と呼び、1つのCMGが1つのNUMAノード<sup>注1</sup>に相当します。

#### ● 独自の拡張機能

HPC領域においてアプリケーションの性能向上を目的とした独自のHPC拡張機能が実装されています。この機能の詳細は後述します。

### ● プロセッサの全体像

A64FXのコアやキャッシュの構成を模式的に表すと図1のようになります。PEはProcessing Elementの略で、Armにおける最小CPU単位です。A64FXは同時マルチスレッディング(SMT)は採用していないため、1PEが1つの物理コアに対応します(以降は物理コアのことを単にコアと呼ぶ)。

L1キャッシュはコアごとに存在し、命令用およびデータ用にそれぞれ64Kiバイト/4-way(1Kiバイト=1024バイト)のサイズです。

L2キャッシュはCMGごとに存在し、8Miバイト/16-wayのサイズです(プロセッサ全体で32Miバイト)。またキャッシュ・ライン・サイズは256バイトです。

A64FXのマイクロアーキテクチャの詳細仕様は一般に公開されています。最新のマイクロアーキテクチャ仕様書およびHPC拡張機能仕様書は公式のGitHubリポジトリ<sup>(3)</sup>を参照してください。

### ● 富岳は158976ノードのシステム

スーパーコンピュータなどのHPCでは、多数のノー

注1: NUMAとはNon-Uniform Memory Accessの略です。コアからのメモリ・アクセス時間が均一ではなく、アクセスするメモリ領域によって異なるシステムを指します。NUMAではコアとメモリがNUMAノードと呼ばれる幾つかのグループに分かれています。あるコアは自分が所属するノードのメモリ領域へのアクセスは、他ノードのメモリ領域へのアクセスに比べて高速に行うことができます。