

特集 科学技術計算におけるソフトウェア自動チューニング

＜ソフトウェア自動チューニングを支える基盤＞

ソフトウェア自動チューニングのための 支援ツール

伊藤 祥司 理化学研究所 情報基盤センター

5

ソフトウェア自動チューニングを支援するツールとは？

自動チューニング (AT) 機能付き線形計算ライブラリを想定して、それに関連する研究開発を支援するツールについて解説する。ソフトウェア開発や既成のソフトウェアプロダクトの利用に対し、それらを支援するさまざまなツールが開発されている。コマンド入力に対する GUI 化による支援、ベクトル化コンパイラや並列化のためのディレクティブなどは典型的なものである。このような支援ツールの利用により、プロダクトのユーザビリティは格段に向上し、ソフトウェア利用やプログラム開発の初期における所要作業工数や計算時間の削減へも繋がる。一方で、AT の研究開発のフェーズが黎明期から発展期へと移行するにつれ、同様に支援ツールの必要性を痛感してきているものの、現状では AT 支援ツールと特定できるものがまだ世の中に十分に公開されていない。

果たして、AT 特有の支援ツールとは一体どのようなものであろうか。どのような機能が必要とされるのであろうか。本稿では、「AT におけるユーザとは」という検討から始めて、それらのユーザが必要とすると思われる要求・要件を分析する。そして、各タイプのユーザが必要とする支援内容に対し、AT ならではのアプローチを考える。さらに、日本の自動チューニング研究グループ (AT 研究会) により取り組まれてきている、AT 支援ツールの具体的な研究開発事例についても紹介する。

AT 支援ツールのモデル

支援対象となるユーザ層と各々の要求要件を想定し、支援内容について検討を行い、AT を支援するツールのモデルを考える。その分析過程と、最終的に辿り着く AT 支援ツールを図-1 として示した。図中では、ツール開発をする前にあらかじめ想定される関連性の高い項目

を実線で繋いでいる。

本章では、図-1 の左から右に向かう分析過程と各項目の内容について説明する。図中に記載した項目は、本文の中では「◎」で記した。

■ 支援対象のユーザ層

最初に、AT に関連するユーザを分類する。図-1 のクリーム色の項目である。

考慮すべきユーザ層として、下記に示す 3 階層がある。これらのユーザ層のそれぞれにとって必要な支援内容も違ってくる。ここではイメージの助けとして、ABCLib (AT 機能付き数値計算ライブラリ) と ABCLibScript (ABCLib の AT 機能開発経験を元に設計・開発されたディレクティブ) とのかかわりも例として挙げた。両者とも ABCLib の Web サイト¹⁾にて公開されている。

◎ エンドユーザ層

AT 機能を持つソフトウェアを利用する人。たとえば、数値シミュレーションプログラムで ABCLib を使用する。

◎ システム開発者層

AT 機能を持つソフトウェア (AT ソフトウェア) を開発する人。たとえば、ABCLibScript を用いて ABCLib などの AT ライブラリ (AT 機能を持つライブラリ) を開発する。

◎ AT 研究者層

AT 技術自体に対する研究開発をする人。たとえば、ABCLibScript 自体の開発や、その仕様を研究開発する。

上記のユーザ層以外には、特に AT を意識せず AT ソフトウェアを使用しているユーザ層、そして、アプリケーション分野などで性能パラメタに対する手動チューニングの経験を持つユーザ層などもあるが、ここでは上記 3 階層のユーザを想定することにする。

■ 各階層のユーザの要求要件とツールの支援内容

ここでは、各々のユーザ層がどのようなツールや支援

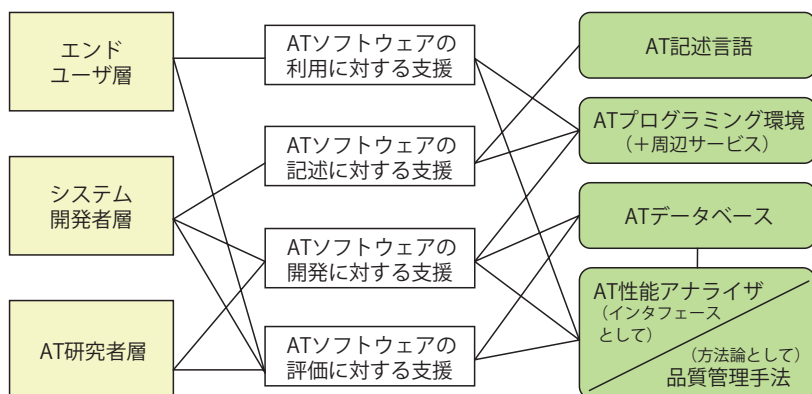


図-1 各ユーザ階層の要求に対する支援内容とAT支援ツール

を期待するか、主な支援の枠組みを考える。図-1の白色の項目である。

◎ ATソフトウェアの利用に対する支援

ATライブラリの利用などで、エンドユーザはATソフトウェアの利用を容易にするような支援を受ける。

◎ ATソフトウェアの記述に対する支援

ATソフトウェアの開発や拡張を行うとき、システム開発者はAT仕様を記述するための専用言語を必要とする。システム開発者は同言語の支援を受けてATの対象となる適用範囲や最適化する目的関数などを記述する。

◎ ATソフトウェアの開発に対する支援

ATソフトウェアの開発では、モデリングやアルゴリズム選択も含めて、多くの試行錯誤を伴う。たとえば、数値計算アルゴリズムの適切な選択にあたっては、必要な情報をあらかじめ収集し提供することが期待される。この場合、支援を受けるのは主にシステム開発者である。

◎ ATソフトウェアの評価に対する支援

ATソフトウェアの開発後には、それらの有用性やATモデルの妥当性や有効性など、多くの評価を行う。それら評価を効率的に支援するツールの存在は不可欠である。この場合、ツールによって支援を受けるのは、ATモデルの妥当性や有効性の検証と改良を目指すAT研究者およびシステム開発者である。そして、エンドユーザもATソフトウェアの有効性を評価するときには支援を受ける。

■ ツールの具体化に向けた着眼点

ここでの検討内容自体は図-1には描写されていないが、ATにおける支援内容をツールにするにあたって着眼や価値観について説明する。

まず、支援のタイミングを考える。ATライブラリ開発のプログラム記述における支援ツールは、AT仕様を記述する専用言語とATに特化したプログラミング環境

である。また、ATソフトウェアの開発後には、性能データのログを採取し、性能評価ツールを用いて評価を行う。

次に、人(ユーザ)との関与とそこでの自動化の可能性について考える。AT支援ツールでは、基本的に人との関与方法もデザインする。支援を必要とする人と支援するシステムが存在し、人はシステムから適切な支援を適宜受けながら、必要とする性能を自動的あるいは半自動的に提供されることになる。たとえば、線形方程式求解アルゴリズムの選択では、どれが有効であるかという判断を要するものの、まだまだ自動選択には至らないため、ツールの支援を得て半自動的に判断する。最良のもの選択が難しい場合には、不適切なものの優先度を下げるなどの対応を支援する。ここで、アルゴリズムごとの性能や特性のバラツキを“求解品質”のバラツキと考えると、その定量化や評価を行うための方法論も必要になってくる。

ATにおける特徴として、求解品質のバラツキの中から特徴や傾向を見出して、より良い条件のものを取り出す。つまり、一般的な品質管理で議論される、バラツキを最小に抑えることにとどまらない価値観も有する。もちろん、予測性能と実測性能との差に対するバラツキについては最小に抑えるべきであり、これもATの対象である。後者のようなパラメタ最適化のための数理手法の研究開発については、本特集の須田の記事で述べられている。

■ AT支援ツールとその機能

これまでに検討した内容から考案されるAT支援ツールとその機能を以下に挙げる。図-1の緑色の項目である。なるべく、エンドユーザに向けた支援内容やツールでは利用方法と仕様を明確にし、研究者に向けた支援内容やツールでは自由度の高い使い方ができることが望ま

5 ソフトウェア自動チューニングのための支援ツール

しいであろう。AT 支援ツール群を特徴付けることにもなる、これらのツールが達成することとは、作業の効率化、性能計測、分析と評価である。

◎ AT 記述言語

ユーザが、対象となるプログラムに AT 機能を付与するプログラミングを行う上で、AT ソフトウェアを記述する専用言語を用意することは、AT 支援のみならず自動チューニング研究の出発点でもある。AT 記述言語 ABCLibScript^{1), 4)} は、その代表であり、並列計算も含めた数値計算に必要とされるさまざまな自動チューニング機能を記述する言語として、世界の先駆でもある。この利用形態としては、ディレクティブを手作業で対象プログラムに挿入して使用する。この言語の記述例などは、本特集の片桐の記事で解説されている。

◎ AT プログラミング環境と周辺サービス

AT ライブラリを利用する際のプログラミング支援ツールや、AT 記述言語を用いて AT ソフトウェアを開発する際の支援ツールなど、AT プログラミング環境が必要である。有効性の分析・評価を支援するツールの利用においても、AT プログラミング環境と連携していると利便性も向上する。また、自動チューニングに特化したことではないが、ドキュメンテーションやサンプルプログラムの整備なども重要である。このような AT プログラミング環境の事例として VizABCLib¹⁾ があり、次章で紹介する。

◎ AT データベース (ATDB)

性能に影響するパラメータや性能情報を抽出し、それらログをデータベースに格納する。AT プログラミングの中で目的とする計算スキーム、アルゴリズムなどが複数あるとき、どれを選択したらよいか指針を示す情報が必要である。ATDB は、選択対象となる計算スキーム、アルゴリズムなどの性能や特性パラメータとそれらのデータ値を永続的な知識として保持する。

◎ AT 性能アナライザ (分析機構の制御系とそのインタフェースとして)

AT プログラミングの特徴は、性能と最適性を追求することである。AT ソフトウェアの開発、利用の過程で、性能に対する量的および定性的分析・比較評価を行うフェーズが生ずる。AT 性能アナライザは ATDB の情報を分析し、情報可視化なども用いてユーザに提示する。ここでは、分析評価手順に従い自動的に処理されるものと、アナライザのインタラクティブ操作や自由な分析により半自動的に生成されるものがあり、それら評価結果の二次情報もログとして ATDB に格納される。

	SL	PE	DB	PA	QC
ABCLibScript	○				
VizABCLib					
プログラム表示機能		○			
ログ表示機能				○	△
近似曲線表示機能				○	△
線形方程式求解プロセスの分析・評価					
求解品質・AT ポリシー				○	○
特性要因図					○
体系的性能評価			○	○	○

本表の中では、下記の通り AT 支援ツールを略記している。
SL: Specification Language (AT 記述言語), PE: Programming Environment (AT プログラミング環境), DB: DataBase (AT データベース), PA: Performance Analyzer (AT 性能アナライザ), QC: Quality Control (品質管理手法)

表-1 AT 支援ツールの対応

◎品質管理手法(性能分析の方法論として)

AT 支援ツールのデータ分析・評価では、数理的手法、データ計測手法、情報可視化手法など実験科学としての要素が必要となるものの、このような方法論は十分に確立されていないため、重要な研究課題である。これらの主旨に適うと期待できるものとして、QC7つ道具、新 QC7つ道具をはじめ、統計的解析、多変量解析など、種々の分析手法がある⁶⁾。また、これらの手法を用いることは、求解品質のバラツキの分析・評価のみならず、問題発見や新しい知識発見にも繋がる。

試作中の AT 支援ツールの紹介

支援ツールの実現に向けた土台ともなる研究開発が、すでに着手されてきている。本章ではそれらを紹介する。

前章で提示した AT 支援ツールとの関係を、表-1 として示した。○は直接の対応を示し、△は間接的な対応である(本表中の△はいずれも QC7つ道具の「グラフ」に対応するものの、これらのツール開発の時点では品質管理の側面は特に意識されていない)。

■ VizABCLib: ABCLibScript を用いたプログラム開発の支援ツール

これまでに研究開発されてきた AT 支援ツールの事例として、AT 記述言語 ABCLibScript のプログラム開発を支援するための情報可視化ツール VizABCLib について説明する。同ツールは、AT に特化したプログラム表示機能、自動チューニングログ表示機能、近似曲線表示機能から構成されており、Web ブラウザ上や Java アプ

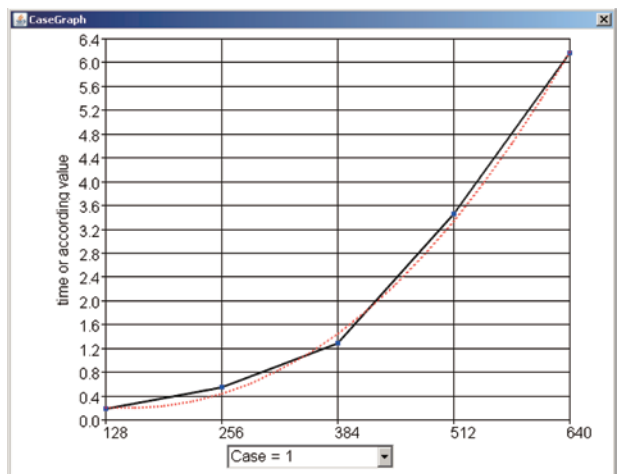
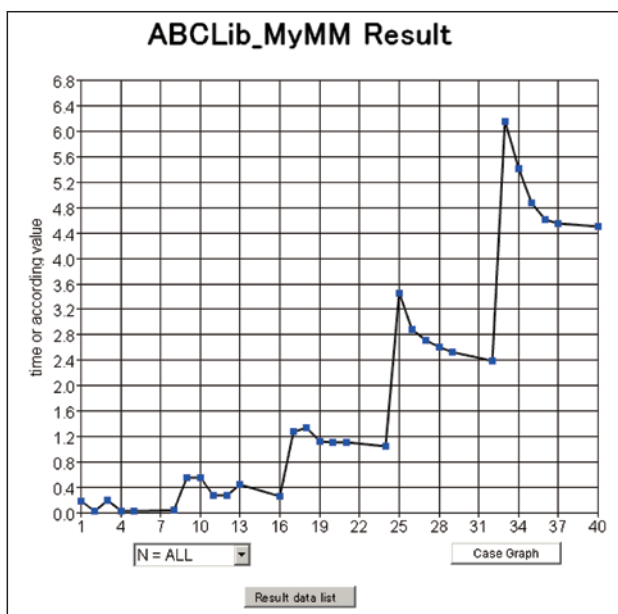
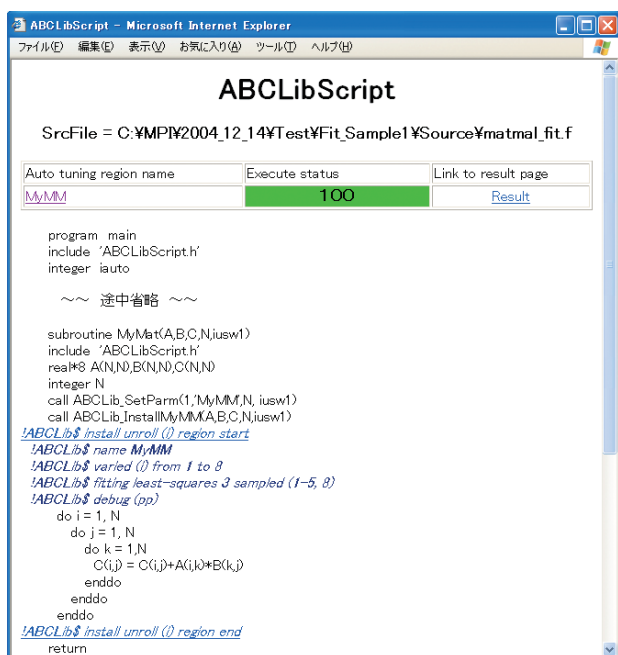


図-2 VizABCLib による AT 性能情報の可視化

レットとして表示する。これは ABCLib プロジェクトの Web サイト¹⁾にて、ABCLibCodeGen に付随するツールとして提供されており、同ページでは、オンラインマニュアルやサンプルプログラムも整備されている。

◆ プログラム表示機能

本機能は、AT 機能の指定個所をソフトウェア開発者に容易に伝えることにより、AT ソフトウェアの開発効率を高めるものである(図-2 上)^{☆1}。下記に主な機能を挙げる。

- ABCLibScript の指示文を色表示する。
- ABCLibScript の記述がある領域 (AT 領域) ごとに見出しを自動的につけ (見出しは、図-2 上の上部のテーブル内に記載されている)、クリックすると指定個所に飛び、当該個所のソースコードを閲覧できる。

◆ 自動チューニングログ表示機能

AT の結果をプログラマへ可視化表示する機能は、各ユーザが AT の有効性を知るために有用である。本機能は、AT 記述言語処理系により目的コードが生成され、自動実行テストされて得られたログ (AT 性能情報) を、グラフなどで表示する (図-2 中)。また、問題サイズを変更し、各々の性能データの変化を表示することも可能である。

◆ 近似曲線表示機能

性能予測式と AT による実際の実行時間との差異を知ることが、AT ソフトウェア開発において非常に重要な事柄である。VizABCLib では、目的関数による性能予測式のグラフや、問題サイズを変動させたときの実行時間を表示する機能を用意しており、性能予測式の妥当性を確認できる。図-2 下は、性能予測式による予測値を赤い点線で、実測値を青の実線で表示しているところである。

■ 品質管理手法を用いた線形方程式求解プロセスの分析・評価

筆者は現在、品質管理手法を用いた線形方程式求解プロセスの分析・評価を行っている³⁾。これは AT 支援ツールの構築に不可欠な要素技術の 1 つでもある。

◆ 大規模数値シミュレーションにおける線形方程式求解に向けた AT 支援ツール

AT 全般の研究開発の中でも大規模線形計算のライブラリ構築は主要なターゲットであるが、数値シミュレーションでも多くの計算時間を費やす部分であり、工夫を要する。計算時間の短縮にとどまらず、アルゴリズムの

^{☆1} 図中の「～ 途中省略 ～」は、本機能の説明に必要な部分のみが表示されるよう、手作業で編集したものである。

5 ソフトウェア自動チューニングのための支援ツール

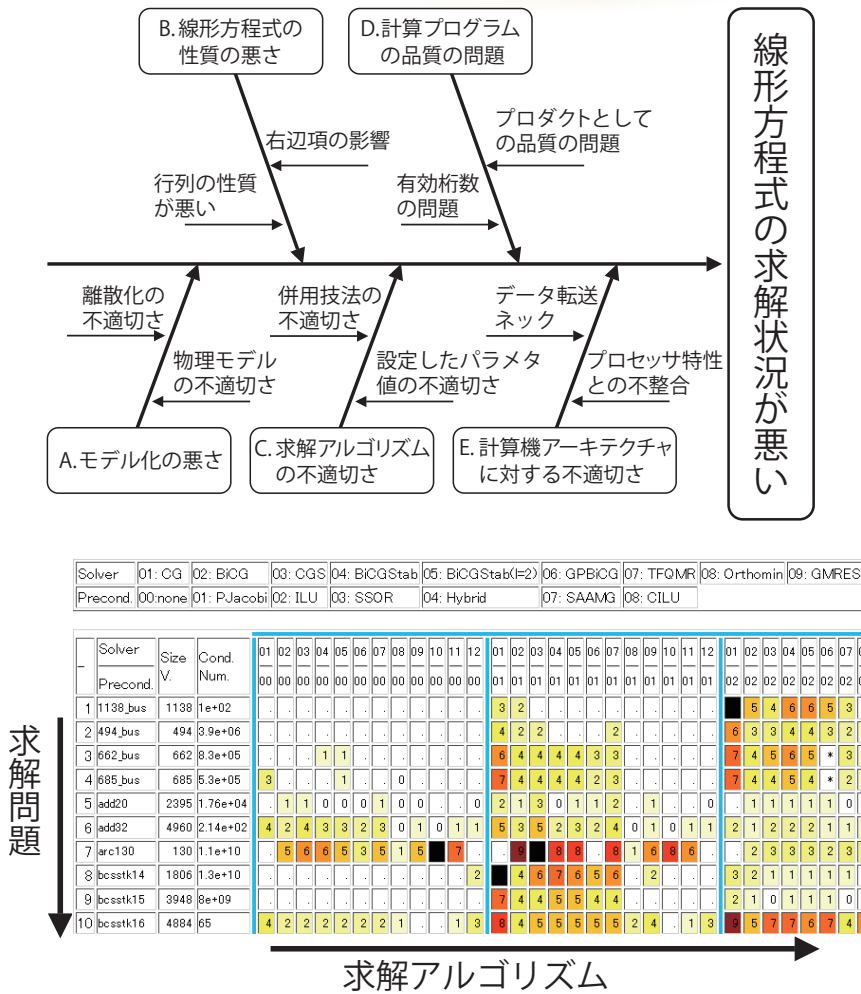


図-3 線形方程式求解に対する品質管理のアプローチ

選択次第では数日に及ぶ計算を行った末、解が得られない事態は避けたい。そのような線形方程式求解において出くわす問題点に対して、品質管理の方法論を用いて分析・評価し、問題解決することを試みる。

ここでは、「工業製品製造プロセス」と「製品の品質」とを、「線形方程式求解プロセス」と「計算の求解品質」とに対応させる。このとき、ユーザの要求とは、計算速度や求解精度に代表される求解安定性を指す。さらに、それら以外にも、所要計算機資源などがATポリシーとして与えられる⁵⁾。

◆ 線形方程式求解における品質管理と体系的性能評価

図-3上は、「線形方程式の求解状況が悪い」という特性に対し、QC7つ道具の1つである「特性要因図」を要因追求型として表してみたものである。これは、数値シミュレーションにおいて頻繁に直面する問題でもあり、本図では、反復解法の求解状況が悪いときの品質特性（「線形方程式の求解状況が悪い」という状況）の要因を示している。A～Eの各項目は品質特性に影響を与えてい

る代表的な要因であり、各太矢印に向かっての細矢印は要因を組立てている要素の一例を示す。

要因分析に際しては、他の品質管理手法や数理手法を用いて、実測データの分析・評価を行う。その1つとして、本研究の中で構築しているアルゴリズム性能情報のATDBにアクセスし、体系的に性能評価するためのマトリックス・データ（新QC7つ道具の1つである）を描画するWebアプリケーションを作成した²⁾。例として、Web表示の一部を拡大したものを図-3下に表した。この図では、縦方向にテスト問題、横方向に求解アルゴリズム^{☆2}が並び、各々の問題求解におけるアルゴリズムの相対性能（性能を表す数字と配色は対応しており、黒が最高、薄色になるにつれ性能が低いことを示す。また、求解問題とアルゴリズムの組合せによっては求解不可能だったものもあり、その内容ごとに“.”や

^{☆2} ここでは、反復解法(Solver)、および、それら解法の求解効率を変えるために併用する前処理(Preconditioning)の組合せを求解アルゴリズムと呼ぶ。

“*”で表示)に応じて配色している。1行目では、「1138_bus」という問題を用いて構成される線形方程式に対する求解アルゴリズムの性能を示している。また、「Size V.」や「Cond. Num.」とは、求解問題のサイズなどの特性情報であるが、このWebアプリケーションの機能により、他の情報へ切り替えることも可能である。

これは、求解アルゴリズムの性能や特性をあらかじめ戦略的に分析・評価したものであるが、このような新しい手法が必要である^{☆3}。本図では青枠により前処理ごとにグループ分けしているが、解法ごとのグループ分けもでき、解法別や前処理別の効果の比較等もできる。

これら数値計算特有の分析・評価方法の研究開発は、新しいATソフトウェアや高性能計算に対する支援ツールの機能拡張へと繋がるであろう。

AT 支援ツール開発に向けて

本稿では、ソフトウェア自動チューニングの嚆矢であり中核とも言える数値計算を中心にAT支援ツールを考えてきた。従来からの取り組みの中では、ABCLibの開発を中心にして、演算形態から見た最適化パラメタの抽出と、計算機アーキテクチャの特性も考慮して性能に影響するパラメタの抽出を実現してきた。ここでは、ABCLibScriptのような記述言語、および、VizABCLibによるプログラミング環境と実行結果の可視化表示機能をAT支援ツールとして開発してきている。

実は、日本のAT研究グループでも、チューニング前後の性能情報をDB化し分析評価する必要性が出てきた。それは、自動チューニングの研究開発の取り組みを通して、あるいは、AT研究メンバ自身もエンドユーザ同様の立場となってATソフトウェアを利用していく

^{☆3} この研究開発における成果物の1つである本ツールは、文部科学省次世代スーパーコンピュータ・プロジェクトの開発グループディレクターである理化学研究所姫野龍太郎博士からの勧めにより、情報基盤センターのスパコンユーザに対する支援ツールとして、同所内向けに公開する予定である。

中で出てきた要求事項でもあった。その実現に向けては、方法論の検討も含め、別途、筆者が取り組んできていた品質管理手法を用いた分析評価が主旨に合うものの1つであった。本稿で想定してきたことの裏付けとして、このような背景もある。

これまでに自動チューニングの研究開発の中で実現してきたことは、作業の効率化、ライブラリ実効性能に対する情報可視化も採り入れた分析である。計測手法、情報蓄積手法と、蓄積された情報に対する分析評価手法の確立については現在着手している。今後の自動チューニング自体の研究開発の展開によって、AT支援ツールもさらに具体化されていくであろう。

謝辞 品質管理手法を用いた線形方程式求解プロセスの分析と評価については、日頃から貴重なご意見をいただいている東京大学大学院情報理工学系研究科の杉原正顕教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) ABCLib, <http://www.abc-lib.org/>
- 2) 伊藤祥司: 体系的性能評価から見た線形方程式求解に対する前処理の実効性能, 情報研報, HPC-116, pp.115-119 (2008).
- 3) 伊藤祥司, 杉原正顕: 線形方程式求解プロセスの体系的性能評価に対する品質管理としての考察, 日本応用数学会 2008 年度年会講演予稿集, pp.141-142 (2008).
- 4) 片桐孝洋: ソフトウェア自動チューニング, 慧文社 (2004).
- 5) 直野 健, 猪貝光祥, 木立啓之: 数値計算ポリシーを入力とするベクトル群の直交化ライブラリ, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol.46, No.SIG 7 (ACS10), pp.35-43 (2005).
- 6) 森口繁一 (編): ソフトウェア品質管理ガイドブック, 日本規格協会 (1990).

(平成 21 年 3 月 26 日受付)

伊藤 祥司 (正会員) itosho@riken.jp

1990年筑波大学第一学群自然科学類卒業。同年富士通(株)を経て、2001年筑波大学大学院工学研究科電子・情報工学専攻修士(工学)。同年同大学院システム情報工学研究科助手、講師を経て、2007年より現職。数値計算アルゴリズムの性能評価と特性分析の研究開発を中心として計算科学領域の研究支援にも携わる。日本応用数学会、SIAM、ACM各会員。