

CAP プロジェクト(1)

—ねらいと構想—

7L-1

廣瀬健, 横井俊夫, 横田一正, 坂井公, 玉井哲雄  
(早稲田大学) (ICOT) (ICOT) (ICOT) (三菱総合研究所)

1. はじめに

CAP (Computer Aided Proof)は、数学者の日々の活動を補佐し、協調して問題を解決してゆくためのシステムの実現をめざしている。そこには多くの活動——定理の証明、数式の操作、論文の執筆、など——が考えられる。もちろんこれらの活動は数学者だけではなく、物理学者やコンピュータ科学者や経済学者など、数学を利用するすべての分野の人々のおこなう活動である。CAP はこれらを補佐するツールを研究、開発するために、ICOTおよび同ワーキング・グループが進めているプロジェクトである。

2. 知的プログラム・システムとCAP

このCAP プロジェクトは、ICOTの知的プログラミング・システムの研究、開発の一環としておこなわれており、その全体はデータを中心に考えると図1 のようになっている。ここでJSL, PTS, TRS, FMS とは

- ・ JSL (Japanese Specification Language)  
日本語仕様記述から形式的仕様記述への変換システム
- ・ PTS (Program Transformation System)  
形式的仕様記述からプログラムへの変換システム
- ・ TRS (Term Rewriting System)  
項書換えシステム
- ・ FMS (Formula Manipulation System)  
数式処理システム

のためのプロジェクトを意味している。CAP はこれらと有機的に関連したプロジェクトである。

もちろんそれらの全体を「有機的」に結合するのは容易ではない。そのために仕様、プログラム、証明、計算、アルゴリズム、書換え規則、などを問い直すことから始めている。その中で現在もっとも先行した活動をおこなっているのがこのCAP プロジェクトである。

3. CAP プロジェクトのねらい

このプロジェクトの最終目標の1つは、ほとんどの数学者がもっている膨大な知識の他に、さまざまなユーティリティ——証明エディタ、2次元入出力、数式処理など——を備えた一般的な定理証明のための協調問題解決システムである。しかしこれはICOTプロジェクトの短い期間と限られた労力では実現はなかなか容易でない。そこでICOTでの研究、開発はそのためのプロトタイプの研究、開発であり、現在ワーキング・グループを中心に多くの数学者の協力を得ている。

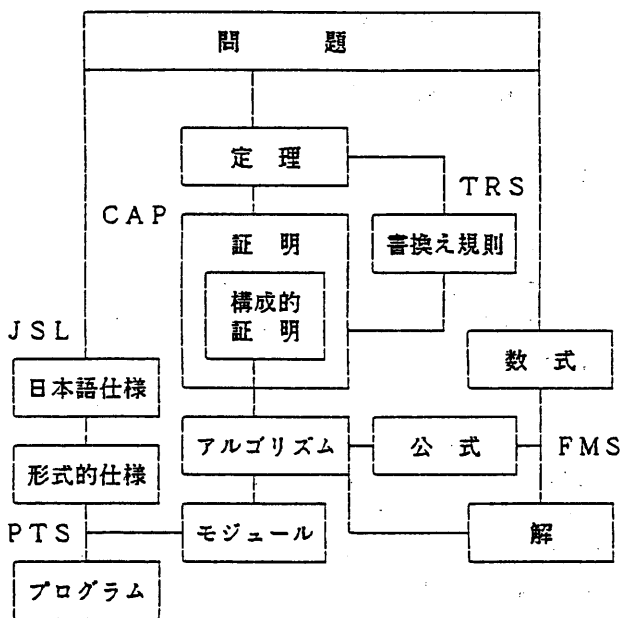


図1 知的プログラミング・システムの枠組

もう1つの目標は、プログラムの変換、合成、検証への定理証明技術の適用である。ICOTで研究している論理プログラミングがこのような数学的な扱いに適しているのはいうまでもないが、変換、検証などの技術が十分に成熟しているとはいいがたい。そこで数学とプログラムとの類似性に着目して、知的プログラミングの基礎技術としてCAP を考えている。すでにプログラムの導出過程を証明過程と対比させて記述するという実験もおこなっており、今後のより密接な関係が予想されている。

4. 証明チェッカの構想

しかし現在のわれわれのこの分野における経験はあまり多くない。そこで方針として、まず数学者がノートがわりに使用できる、数学の特定分野の証明チェッカのシステムを開発し、その経験に基づきシステムを徐々に機能アップしてゆくことにした。

証明チェッカは、与えられた証明が妥当かどうかをチェックするシステムである。そのためには、定理や証明を記述するための形式的な証明記述言語がまず必要になる。そしてその入力や修正のための証明エディタも重要である。これを軽視すると「ノートがわり」に利用することが困難になってくる。次に証明の正しさを検証するためのチェック機能が必要である。ふつうの数学の教科書では、証明の行間にかなり隙間があるが、それをどの程度認めるかがこ

のチェック機能の大きな問題である。そして公理や定理を管理するための知識ベース機能も考えなければならない。

この証明チェッカから得られるさまざまな経験、とくにそのような活動に適した協調問題解決システムのための人と機械とのインタフェースの経験、TRS を含んだ強力な推論メカニズムの経験、論理式や数式を扱うのにふさわしい知識ベースの研究は、次のステップのシステムに大きく役立つだろう。

われわれは、実際に開発する証明チェッカのために次の3つの分野を選んだ:

- (1) 線形代数(LA) [1]
- (2) QJ [2],[3]
- (3) 総合微分幾何(SDG) [4],[5]

LAは言うまでもなくもっともよく知られた数学の分野である。この証明チェッカの目標として、大学初年度の線形代数の教科書を選び、そこに掲載されているすべての証明のチェックをめざしている。行列の扱いはまた2次元入出力についての経験にもなるだろう。

QJは東京大学の佐藤によって設計された論理体系であり、またプログラミング体系でもある。QJに基づいたプログラミング言語Quteは、QJ 証明チェッカの実装言語ともなる。QJでは超数学の扱いも可能であり、Godel の不完全性定理の証明チェックを最初の目標にしている。

3番目のSDG はKockによって創始されたひじょうに新しい分野であり、微分幾何学をカテゴリの枠で研究することをめざしている。この証明チェッカは、項書換えを中心にした証明の作成ができることをめざしている。

この3つはそれぞれ独立したサブプロジェクトとして構想されているが、いずれも数学の特定分野に限定した証明チェッカというわけではなく、汎用的な証明チェッカをめざしており、将来はすべてが統一された定理証明のための協調問題解決システムを考えている。

### 5. CAP プロジェクトの進行状況

現在これらのサブプロジェクトの中では、LAがもっとも先行している。これまでのCAP およびLAの歴史を簡単に述べよう:

- (1) 1982年9月にICOTの基礎理論ワーキング・グループ(WG5)が第5世代コンピュータの理論的土台作りのために設立された。
- (2) 1983年11月より証明チェッカの検討が始まり1984年4月WG5のプロジェクトの1つとなった。
- (3) 1984年に数学の知識はもっていない証明チェッカの開発が始まり、1985年3月に完成した。
- (4) 1985年4月より、具体的な教科書に沿ってLA証明チェッカの研究、開発が始まり、1986年3月に1.0版が完成予定である。
- (5) 1985年9月にCAP ワーキング・グループが設立され、

LAの2.0版の検討、3つのシステムの統一化構想など、将来のCAP システムについて議論をおこなっている。

### 6. 他システムとの比較

CAP に類似したシステムはすでにいくつか作られている:

- ・LCF(Logic for Computable Function) [6]
- ・EKL [7]
- ・Mizar [8]

LCFは当初スタンフォード大学で、そして現在はエディンバラ大学とINRIAで研究、開発されているシステムであり、LAシステムと比較的類似している。EKLはスタンフォード大学で作られたTRSを基にしたシステムであるが、SDGシステムとよく類似している。Mizarはワルシャワ大学で開発されたシステムであるが、現在ではアメリカの大学でも使用されており、自然言語に近い証明記述と長い使用経験が特徴である。CAPはこれらの経験を参考にしながら、今後の研究、開発に生かしてゆきたいと考えている。

### 謝辞

CAP プロジェクトのためにいつも多大な時間を費やしていただいているCAP ワーキング・グループの委員ならびにオブザーバの方々に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] K.Sakai and K.Yokota, "CAP Project—An Approach to the Mechanization of Mathematics", Proceedings of the Third Japanese-Swedish Workshop, pp10-12, Nov.13-14, Tokyo, 1985.
- [2] M.Sato and T.Sakurai, "Qute: A Functional Language based on Unification", Proceedings of the International Conference on Fifth Generation Computer Systems, pp157-165, 1984.
- [3] M.Sato, "Typed Logical Calculus", ICOT CAP-WG資料, 1985.
- [4] M.Hagiya and S.Hayashi, "Some Experiments on EKL", ICOT TM-101, 1985.
- [5] S.Hayashi, "Towards Automated Synthetic Differential Geometry 1—basic categorical construction", ICOT TR-104, 1985.
- [6] M.J.Gorden, A.J.Milner and C.P.Wadsworth, "Edinburgh LCF", Lecture Notes in Computer Science, 78, Springer, 1979.
- [7] J.Ketonen and J.S.Weening, "EKL—An Interactive Proof Checker, User's Reference Manual", Department of Computer Science, Stanford Univ., 1983.
- [8] A.Tryburec and H.Blair, "Computer Assisted Reasoning with Mizar", IJCAI'85, pp26-28, 1985.

# CAP プロジェクトとその後

玉井哲雄<sup>†</sup>

東京大学大学院総合文化研究科<sup>†</sup>

竹内プログラム委員長から「温故知新セッション」のお誘いを受けたが、およそ全国大会で発表した記憶がない。調べてみるとこの 5 人連名の末尾に自分の名前がある「CAP プロジェクト(1)」が大会予稿集に名前のある唯一のものらしい。登壇発表者は今は亡き広瀬健氏である。これでは資格がないので竹内さんに一旦お断りしたら、広瀬氏を偲ぶという趣旨で話したらどうかとの示唆を得た。中にはこのような変わったものもあっても面白いかと、お引き受けした。

これは ICOT(第 5 世代コンピュータ)プロジェクトの 1 つを紹介したものである。テーマは数学者の道具となる定理証明系の開発である。広瀬氏は CAP(Computer Aided Proof)プロジェクト委員会の委員長で、共著者の横井(現東京工科大)、坂井(現筑波大)、横田(現岡山県立大)は、ICOT メンバーとしてこのプロジェクトを主体的に動かしていたリーダー達であった。いずれも現在は大学に席を置かれて活躍されている。

しかし、このプロジェクトには他にも多くの有力な参加者があった。一部の名前を挙げると佐藤雅彦(現京大)、筧捷彦(現早大)、林晋(現神戸大)、永田守男(当時慶大)といった人達である。このうち永田氏も若くして亡くなられてしまった。

タイトルの「CAP プロジェクト(1)」が暗示するように、この発表はシリーズもので、同じ時間枠にさらに(2)から(6)までが並んでいる。そのサブタイトルを順に挙げると、

- (2)証明記述支援環境
- (3)証明記述言語
- (4)証明の検証
- (5)証明支援ユーティリティ
- (6)等式の検証

となっている。その著者には上にすでに名前を挙げた方々のほかに、当時 ICOT の大須賀昭彦、高山幸秀、三菱総合研究所の藤田正幸、西山聡、小久保岩生、藤瀬哲朗といった人たちが並んでいる。筆者は、当時(株)三菱総合研究所に所属し、ソフトウェアの開発その他、このプロジェ

クトに関わる作業の委託を受ける外注先という立場であった。この顔ぶれを見ると、曲がりなりにも中間管理職として、若い人たちを動員して仕事をしていたらしいことがわかる。

筆者自身は定理証明系の専門家であったわけではなく、それ以前もその後もこの分野を研究の中心においたことはないが、多少とも関連した仕事はいくつかある。1970 年代には研究的なプログラム検証系を開発したが、その際必要に応じて、とくに等式と不等式を扱う機能をもった簡単な定理証明系を自己流で作った。1990 年代の初めに、グラフ上の不動点問題を統一的扱う枠組みを作り、その上での一般的なアルゴリズムを記述してその正当性を人手で検証したが、後に山本光晴(現千葉大)がそれを HOL の上で証明するという仕事をしてくれて、萩谷昌巳(東大)等と共著の論文ができた。しかし、筆者自身は定理証明系の HOL に触ってもいないので、HOL についてほとんど知識はない。

2000 年になってから中島震(現 NII)との共同研究で、モデル検査技法をコンポーネントに基づく開発手法の信頼性を向上させるのに応用するという仕事をしてきている。中島が主、玉井が従の仕事ではあるが、Enterprise Java Beans フレームワークの仕様のあいまい性を検証するなどの成果があった。モデル検査は同じ形式手法でも定理証明手法とは異なる狙いと方法を持つものであるが、両者それぞれに特徴があり、今後はその組合せが工夫されていくことになるだろう。というわけで、CAP 以降も定理証明系との間に多少なりとも縁が続いてきたとは言えるだろう。

廣瀬健氏が亡くなって、早くも 10 年が過ぎた。それを期に追悼文集を出すという計画が進められており、筆者も思い出の記を寄せている。「温故知新」セッションのような企画には、元氣なら廣瀬氏はきっと喜んだだろう。ぜひとも当人に話をしてもらいたかったところである。

最後に、「CAP プロジェクト(1)」の復刻に快く同意された、横井俊夫、横田一正、坂井公、各氏に感謝します。なお、鬼籍にある人を除き敬称は略させていただきました。

CAP Project and Thereafter

<sup>†</sup> Tetsuo Tamai, Graduate School of Arts and Sciences,  
The University of Tokyo