欧州におけるネットワーク AI 研究*

北村 泰彦

1996 年 5 月 1 日

1 概要

欧州におけるネットワーク AI に関連する研究開発動向を調査するために，平成 7 年 10 月 31 日より 12 日間の日程でドイツ，イギリスを訪問した．今回の訪問では，分散人工知能 (DAI) に関する研究に調査対象を絞り，ドイツにおいては，その分野での代表的な研究者である Daimler Benz の Kurt Sundermeyer 博士，またイギリスにおいては，分散人工知能と分散データベースの融合を目指した協調知識ベース研究の第一人者である Keele 大学の S. Misbah Deen 教授を訪問し，意見交換と見学を行った．さらに Queen Mary and Westfield College の Nick Jennings 博士がコーディネーションを行った "Intelligent Agents and their Business Applications" セミナーに参加し，欧州だけでなく米国も含めた第一線の研究者の発表を聴講した．本稿では欧州における全体的な研究動向をまず述べ，その後，訪問，出席した研究機関，セミナーに関して個別に報告を行う．

欧州における代表的な DAI 研究としては ESPRI による ARCHON と IMAGINE プロジェクトがあげられる．ARCHON(ARchitecture for Cooperative Heterogeneous ON-line systems) プロジェクトは，ドイツ，フランス，イギリス，ギリシャ，スペイン，オランダ，ポルトガル，スイスの企業，大学，研究機関の参加により，1989 年 1 月から 5 年間の計画で開始された．この中核的なメンバーにはイギリス Queen Mary and Westfield College の Nick Jennings 博士がいる．プロジェクトの目標は産業分野における実用的 DAI システム開発のための汎用アーキテクチャ，ソフトウェアフレームワーク，方法論を開発することにあり，エキスパートシステムを一つのエージェントとしてカプセル化し，それらを互いに協調させる ARCHON アーキテクチャを提案した．このようなアプローチをとることにより，既存のシステムを再利用することが可能になり，システム開発のコストを軽減することができる．この手法を実証するために，電力配送／供給，セメントキルン制御，素粒子加速器制御，組立ロボット制御などの分野に応用している．特に電力供給システムに関してはスペインの電力会社 IBERDROLA において実用化されることが決定しており，世界で最初に実用化された DAI システムであるといえる．ARCHON プロジェクトで用いられている協調手法自体はタスクグラフやスクリプトをベースにしたものであり，目新しさはないが，実世界での応用に力点をおき，それなりの成果を上げることができたという意味で，よく評価されたプロジェクトであったといえる．本プロジェクトに関する文献としては Thies Wittig 編集によるプロジェクトの中間レポート "ARCHON:An Architecture for Multi-agent Systems"(ISBN 0-13-044462-6) が Ellis Horwood より出版されている．また，Nick Jennings による "Cooperation in industrial multi-agent systems"(World Scientific, ISBN 981-02-1652-1) も本プロジェクトから得られた成果をまとめたものである．さらに Nick Jennings の WWW ホームページ (http://www.elec.qmw.ac.uk/dai/) からも関連情報を得ることができる．

次に IMAGINE(Integrated Multi-AGent INteractive Environment) プロジェクトは，イギリス，ギリシャ，ドイツ，フランス，オランダの企業，大学の参加により，1990 年 11 月から当初 5 年間の計画とし

*TR96-1: 日本情報処理開発協会 「ネットワーク AI 専門委員会」報告書

て開始された．今回訪問した Keele 大学の S. Misbah Deen 教授も本プロジェクトのメンバーであった．プロジェクトの目標は人間と計算機から構成されるマルチエージェントシステムのモデル化と構築のための汎用的形式化手法とプログラム環境を開発することにあった．その主な成果は，マルチエージェントシステムの概念設計，仕様，プロトタイプ実装のための言語 MAIL，MAIL を実装するためのプロセス指向言語 April，協調アプリケーション構築用マルチエージェント環境 MECCA(Multi-agent Environment for Constructing Cooperative Applications) である．IMAGINE プロジェクトにおいて，エージェントは Head,Communicator,Body にモデル化され，それぞれ協調，通信，問題解決モジュールの役割を果たす．MAIL は知識処理とエージェント間の協調を記述できる言語である．知識ベースはタプルの集合から構成され，それを操作するアクションは前提条件，手続き，事後条件から構成される．手続きは逐次あるいは並列的に実行することができる．また協調のためのプリミティブとして言語行為論に基づき，propose,refine,modify,accept,reject,order,request,tell が用意されている．April は MAIL の実装を目的とした言語で，プロセス管理，メッセージ交換，マクロ機能などの特徴がある．また MECCA における研究では都市交通管制やカレンダー管理を対象としたプロトタイプ作りがおこなわれた．しかしながらこのプロジェクトは本来の研究期間より短縮され，1994 年半ばで打ち切られてしまった．このプロジェクトでの目標はマルチエージェントシステム構築のためのプログラム環境であったが，得られた二つの言語の記述能力はその目標に比べるとまだ低いレベルにしかないといえる．最近では Telescript などのマルチエージェントを指向した言語は商品化の段階まで到達しており，これらの言語を普及させるのはかなり難しいように思われる．本プロジェクトに関する文献はあまり公開されていないが，Keele 大学より出版された CKBS'94 Proceedings(ISBN 0-9521789-2-3) 中の Hans Haugeneder, Donald Steiner, and Frank G. McCabe による "IMAGINE: A Framework for Building Multi-agent Systems" がある．なお，April の開発者である Frank G. McCabe 氏は現在，富士通研究所に所属している．

2 Daimler-Benz

ベルリンにある Daimler-Benz Research in Systems Technology の Kurt Sundermeyer 博士の研究室を訪問した．DAI に関連する研究は COSY(COoperating SYstems) プロジェクトのもとで行われている．本プロジェクトは概念と方法論を研究する COmeth，開発ツールを研究する COtool，応用に関して研究する CO<appl>に分けられ，CO<appl>はさらに COroad (運転者シミュレーション)，COlayout (VLSI 設計)，COprod (生産工程スケジューリング)，COmoves (配送スケジューリング) に細分されている．COSY プロジェクトではエージェントをオブジェクトの拡張として，心理状態 (信念，欲望，意図など)，協調能力，社会的役割をもつオブジェクトとしてとらえ，その上で汎用的なエージェント指向技術の開発を目指している．エージェントは<intention,action,perception,resource>の 4 つ組で表され，intention は長期目標や欲望，役割など，action は推論，メッセージ送信を含めた動作，perception はメッセージやセンサー情報の受信，resource は問題解決に必要な知識や信念を表している．各エージェントは単一の知識ベースシステムであり，問題解決や協調はスクリプトベースで行われる．以上のフレームワークはシミュレーションツールである DASEDIS(Development And Simulation Environment for DIstributed Intelligent Systems) により実現され，様々なマルチエージェントシステムのシミュレーション実験を行うことができる．DASEDIS は単一の SUN ワークステーション上で X-Windows と Allegero Common Lisp を用いて実装されていた．

応用に関しては生産工程スケジューリングと配送スケジューリングのデモを見ることができた．生産工程スケジューリングでは工場内における材料搬送車のスケジューリングを対象問題としていた．工場内には原材料保管場所と複数の工作機械があり，要求に応じて，適切な順序で時間的制約を満たしながらリソース (材料や半製品) を機械間で移動させる必要がある．リソースの移動は複数台の搬送車により行われ，これらの搬送車の効率的なスケジューリングが研究の目的となる．この問題は最適化問題の一つと見なすこ

とができるが，要求の変動，工作機械や搬送車の故障などの外乱により，従来の手法を用いることができない．また現場においては多くの計算コストをかけて最適解を保証することよりも，耐故障性や実時間性が重要視される．そこで耐故障性を上げるためにエージェントは分散して処理を行い，外乱に対処するためにエージェントが協調するマルチエージェントを用いた解法を採用している．タスク割当の具体的手法としては契約ネットプロトコルが用いられ，中央のコーディネータからのタスク要求に対して，各搬送車に存在するエージェントがタスク実行の計画を立案し，コーディネータに返送する．その中で制約を充足するものが選択され，タスクがその搬送車に割り当てられる．このように中央にコーディネータの存在を前提とすることから，必ずしも分散的に問題解決を行っているわけではないが，この点に関しては彼らは “as decentralized as possible, as centralized as necessary” の立場をとっており，現実的な応用に関しては問題解決において分散と集中をうまく使い分けることが必要であると説明していた．

もう一つのデモは配送スケジューリングに関するものであるが，これは単一の企業内でもモデルではなく，複数の競合的企業間での協調を扱うものである．複数の配送会社が存在し，それぞれ貨物車による配送ネットワークをもっている．ここで自社の配送能力を超えた要求が顧客から与えられた場合，その要求を満たすために他社にその配送を引き受けてもらうわけである．これが例えば営業所間など，単一企業内での協調であれば単なる貨物車のスケジューリング問題といえる．しかし，ここでは企業間での協調を対象としており，各企業はそれぞれの利潤が大きくなるように利己的に取引を進めるわけで，そのための交渉の手法を研究の対象としなる．このような問題はインターネットによる商取引が可能になった現在ではより現実的な問題になったといえる．

以上の研究成果はまだプロトタイプ的な段階であり，実用化にむけてはさらに詳細な問題を解決してゆく必要があるが，生産管理や流通管理は DAI の応用が有望な領域あると感じることができた．

3 Keele 大学

Keele 大学では S. Misbah Deen 教授により分散データベースと分散人工知能技術の融合を図る協調知識ベース (CKBS) の研究が行われている．Keele 大学ではすでに 1990 年と 1994 年に協調知識ベースに関する国際会議を主催し，その会議録は Springer(Cooperating Knowledge Based Systems 1990, ISBN 3-540-19649-8) と Keele 大学 (CKBS'94 Proceedings, ISBN 0-9521789-2-3) よりそれぞれ出版されている．またイギリス国内の研究者のための研究会である CKBS-SIG 活動でも中核的働きをしており，その会議録 (CKBS-SIG Proceedings 1992 [ISBN 0-9521789-0-7], CKBS-SIG Proceedings 1993 [ISBN 0-9521789-1-5]) は Keele 大学から出版されている．

CKBS はデータベース技術を用いることにより，DAI のより現実的な応用を目指している．その特徴として，汎用性のための階層的アーキテクチャ，高レベル言語，柔軟な協調戦略定義，ユーザインタフェースがあげられる．近年の成果としてはタスク割当に基づく transaction-oriented な応用のための CKBS アーキテクチャフレームワークの提案がある．これに関する論文は S.M. Deen, “An Architecture Framework for CKBS Applications”, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol.8, No.4 (August, 1996) に出版予定である．

このアプローチの特徴はエージェントの協調 (データ交換とタスク割当) をデータベースの概念である関係スキーマを用いて表現しようとしている点である．エージェント間でのデータの受け渡しは external relation により行われ，内部データを表現する internal relation のビューとなっている．またエージェント間でのタスクの受け渡しは export shadow と import shadow により行われ，タスクの実行要求は自分の export shadow に action tuple を書き込むことによりなされる．export shadow は他エージェントの import shadow と連動しており，それによりタスクの受け渡しが行われる．具体的な協調戦略は COAL (Co-Operating Agent Language) と呼ばれる言語により記述される．

しかしながら，このアプローチはエージェント間の協調をデータベース的な観点から整理したという点では意味があるかもしれないが，DAI の立場からは目新しいものはあまり感じられなかった．

4 Intelligent Agents and their Business Applications セミナー

11 月 8,9 日にロンドン Westbury Hotel において Intelligent Agents and their Business Applications セミナーが開催された．ARCHON プロジェクトに参画した Queen Mary and Westfield College の Nick Jennings がコーディネートしたセミナーで欧米の第一線の研究者の講演があった．全体的な内容は分散協調的な問題解決を行う DAI 的エージェントよりも，利用者のネットワークインタフェースとなるソフトウェアエージェントに重点が置かれていた．講演者と講演タイトルを以下に示す．

1. Nick Jennings and Mike Wooldridge: Overview of agent theories, applocations, language and architecture
2. Pattie Maes: Agents that reduce work and information overhead
3. Christine Guilfoyle: Vendors of agent technology
4. Katia Sycara: Intelligent agents and the information revolution
5. Jerry Foss: The use of agents in information brokering systems
6. Betty Atkinson: IBM applications of intelligent agents
7. Marius Busuioc: Intelligent agents managing novel service in integrated fixed-mobile networks
8. Michel Plu: Agents in network environment
9. Nick Jennings: Seminar Review

以下，特に印象が強かった 3 件の講演を中心に，それぞれの概要を記す．

4.1 Nick Jennings and Mike Wooldridge

本セミナーのコーディネータである Nick Jennings と彼の共同研究者である Manchester Metropolitan University の Mike Wooldridge によるサーベイ講演である．エージェントの定義に続いて，エージェント理論，エージェントアーキテクチャ，エージェント言語，エージェントアプリケーションについてのサーベイが行われた．エージェントの定義に対しては，ソフトウェアエージェントを Weak Agency，DAI エージェントを Strong Agency に分類することにより区別していた．エージェント理論に関しては，エージェントを信念，欲望，合理性などを表現できる intentional system として定式化を行った．これらはマルチエージェントシステムの動作に意味付けを行うものである．しかしながらこのような定式化は単純な機構の説明ができるにすぎず，現実の応用問題を扱うには抽象的すぎる．

エージェントアーキテクチャに関しては，熟考性と即応性の観点から分類がなされ，実例として Bratman, Israel, Pollack による Intelligent Resource-bounded Machine Architecture (IRMA)，Jennings による GRATE*，Brooks の Subsumption Architeture，Ferguson の Touring Machine Architecture が挙げられた．

エージェント言語に関しては，weak agent language として ACTOR (Hewitt, Agha)，TCL/TK，Telescript，strong agent language として AGENT0 (Shoham) と Concurrent METATEM (Wooldridge)，またそれ以外のものとして KQML と KIF が紹介された．

エージェントの応用に関しては，DAI，Information Agent，Interface Agent，Believable Agent に分類し，分散 AI に関しては Nick Jennings 自らが関わった ARCHON プロジェクトにおける電力ネットワークの事例が紹介された．Information Agent に関しては，Etzioni, Weld の Softbot，Interface Agent に関しては Maes の News Filtering Agent の事例が紹介された．

以上のサーベイは Jennings と Wooldridge による独自の視点がかなり強く，米国における DAI 研究の成果はほとんど紹介されていなかった．

4.2 Pattie Maes

Pattie Maes は MIT Media Laboratory に所属し，様々なソフトウェアエージェントの研究を進めている．ソフトウェアエージェントは一種の利用者インタフェースであるが，利用者のパーソナルアシスタントを目標としている．エージェントは学習機能により利用者の興味や嗜好を学習し，個別的，自律的，適応的に利用者を支援する．ソフトウェアエージェントの実例として，カレンダー管理，電子メール管理，電子ニュース管理，WWW 検索，エンタテイメント選択，商取引，電子マッチメイキングなどが紹介された．

しかしながらこのようなソフトウェアエージェントはパーソナルアシスタントとしての役割をどこまで果たしてくれるのであろうか．示された実例は表層的なものばかりで，実用化しようとするとかなりの知識や常識がエージェントに要求されるように思われる．講演の中で「エージェントに賢さは必要ない．利用者から賢さを学習すればよい．」という発言があったが，これは大いに疑問である．

4.3 Katia Sycara

Katia Sycara は CMU Robotics Institute に所属し，これまで分散制約充足など DAI の分野において主に研究を進めてきたが，最近はソフトウェアエージェントにも関心をもち始めている．Sycara のアプローチは Maes のものに比べてより分散指向といえる．その理由として，Sycara は単一のエージェントが様々な問題解決のアシスタントを行うためには膨大な知識が必要になり，またその処理を単一のエージェントで行うことは困難である．また現在のエージェントの学習能力には限界があり，新しい情報源が現れるごとにプログラムしなおさなければならないと述べている．このように多数のソフトウェアエージェントの協調により利用者をアシストしようというアイデアは DAI の立場からは興味深い．示された応用例としては研究所訪問者スケジューリングシステム，投資管理システム，緊急医療支援システム，電子取引などである．

4.4 その他

その他，Christine Guilfoyle(The Trefoyle Partnership) は電子メールや PDA などのエージェント技術関連商品の市場動向に関して，Jerry Foss(GPT) は情報提供者と情報利用者との仲介を行う情報ブローカリングサービスに関して，Betty Atkinson(IBM) は IBM でにおけるエージェント技術への取り組みについて述べ，その応用事例としてシステム / ネットワーク管理，移動アクセス管理，電子メール，情報アクセス管理，コラボレーション，ワークフロー管理，電子取引，適応的利用者インタフェースをあげていた．また共通アーキテクチャに関する話題もあった．Marius Busuioc(BT Laboratory) は移動体通信ネットワーク上でのエージェント技術について述べた．最後に，Michel Plu(France Telecom) は通信ネットワーク上でのサービス統合のためのエージェント技術に関して講演をした．

5　まとめ

今回のセミナーで感じたことはエージェント技術に対する期待の大きさである．しかしながらここでエージェントという用語の定義にはかなりばらつきがある．分散問題解決を行う DAI エージェント，カスタマイズ可能な利用者インタフェースとなるソフトウェアエージェントだけでなく，PDA に対してまでもエージェントという呼び方がなされている場合がある．現在，エージェントという言葉にはインターネット上での通信アプリケーションに付加価値を与えるもの，そしてそれがビジネスチャンスにつながるものとしての期待が込められているように思われる．その中でも特にソフトウェアエージェントに対する関心は大きいが，簡単な学習能力をベースにする現在の機能ではあまり高度な処理は期待できそうにないと思われる．

DAI エージェントは問題解決に力点がおかれ，その重要な機能にエージェント間の協調　(相互作用) がある．これに関しては今回調査したいずれのアプローチにおいてもスクリプトで記述するという方法がとられていた．エージェント間の協調はまだまだモデル化が不十分な分野であり，今後の研究が期待される．そのためには基礎的な研究だけでなく，ARCHON プロジェクトでとられたように応用分野を積極的に開拓して，得られた技術を実証してゆくというアプローチも重要であると思われる．また Sycara のようにソフトウェアエージェントを協調的なマルチエージェントシステムとして実現するというアプローチも興味深い．