

RWC プロジェクトを回顧する

大津 展之* (電子技術総合研究所)

要旨

第五世代コンピュータプロジェクトに続く通産省の10年の大型国家プロジェクトとして、新情報処理研究計画、すなわち、リアルワールドコンピューティング(RWC)プロジェクトが、1992(平成4)年度に始まり2001(平成13)年度で終了した。

第五世代コンピュータプロジェクトが人間の情報処理の論理的側面(記号処理)を追求したのに対して、RWCプロジェクトの狙いは、いわば直観的側面(パターン処理)を新しい情報処理の枠組みとして基礎づけ、21世紀の高度情報化社会に向けての新たな情報処理パラダイムとしての「柔らかな情報処理」、すなわち、実世界における多様な情報をより人間に近い形で直接かつ柔軟に処理する知的情報処理の実現を目指し、そのための基礎と基盤技術を育成するものであった。

本稿では、RWCプロジェクトの計画、立案、推進に深く関わった研究者として、その背景、研究開発の内容と体制、成果について概要を紹介するとともに、そのキーコンセプト、そしてアプローチの枠組についても、私見や思いを交えて回顧する。

1. はじめに

RWC(Real World Computing:実世界情報処理)プロジェクトは、第五世代コンピュータ・プロジェクト(1982-1992年度)の後継として、3年の準備計画期間を経て、1992年度から2001年度の10年間、通商産業省(現 経済産業省)によって実施された大型研究開発プロジェクトである。

掲げた目標は、21世紀の高度情報化社会に必要な新しい情報処理技術、すなわち実世界の多様な情報(画像や音声など)をそのまま柔軟にかつ知的に処理して利用する革新的な情報処理の基盤技術体系の確立であり、国内の企業や海外の研究機関が組合員として参加する技術研究組合新情報処理開発機構(RWCP)と電子技術総合研究所(現 産業技術総合研究所)が連携する体制で進められた。

前期5年間(1992-1996年度)は、探索的研究期間と位置づけ、新機能、並列システム、光技術等の分野において萌芽的研究を実施し、中間見直しを経て後期5年間(1997-2001年度)は、RWCプロジェクトの枠組みを継承しつつ、より明確な次世代情報処理基盤技術研究開発として、「実世界知能(RWI)」と「並列分散コンピューティング(PDC)」の2つの技術分野に研究資源を集約し研究開発が行われ、多くの先導的な成果を上げて終了した。

RWCプロジェクトは、成果は別として、第五世代(5G)コンピュータ・プロジェクトに比べて一般の知名度は残念ながら高くない。後者が、いわゆる「人工知能」や非ノイマン

* (国立研究開発法人) 産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

型コンピュータを面前に打ち出し、バブル時期に華々しくスタートし、マスコミの過剰なまでの注目を浴びて一般に広く知れ渡ったの対して、同じ知能技術でも少々難解なパラダイム（実はアンチテーゼ）を「柔らかな情報処理」や「実世界知能」の標語¹⁾のもとに探索的にスタートし、後期に2分野に分離したことも分かり難くした理由である。しかも、立ち上がり早々にバブルが弾けた時期でもあった。

近年、自動運転や「囲碁プログラムがチャンピオンに勝利」などのニュースで、再び人工知能 (AI) ブームが起こっているが、実は5G プロジェクトでの「人工知能」（記号と論理を主体とした古い AI）ではなく、「実世界知能」の流れに沿ったパターン学習に基づく AI である。Google などの大手 IT 企業が、膨大な実データを集めて強力な学習（Deep Learning など）によって認識や推論の精度を向上させ、実用レベルに近づきつつあることをアピールしていることが、ブームの理由である。

以下、こうしたパラダイムの変遷やキーコンセプトを含めて、RWC プロジェクトが何であったか、その技術的な背景、具体的な内容や成果を、立案と推進に深く関わった研究者の一人として回顧し、私見も交えて概説したい。

なお、資料等の詳細は、技術研究組合 (RWCP) の RWC プロジェクトの Web アーカイブ「RWCP メモリアル」[1] が作られているので、そちらを参照されたい。

2. 技術的・社会的な背景

まず、RWC プロジェクトへ至る技術的・社会的な背景について、回顧を含めて、幾分詳しく述べることにしたい。

2.1 電総研と情報処理プロジェクト

1971 年 4 月、筆者は、指導教官の退官とも重なり、大学を出て通産省工業技術院の電子技術総合研究所（1970 年 7 月に電気試験所から改名）に入所し、新設のパターン情報部（森英夫 所長が兼任）の数理基礎研究室（末包良太 室長）に配属となった。この研究室は、後藤以紀元 所長の遅延を含む論理数学理論の応用としてリレー式計算機 ETL-Mark I, II (1952, 1955) の開発を行なった応用数学研究室（駒宮安男 氏を経て末包良太 氏へ）の流れを汲む研究室で、古い道具箱に当時のリレーなどが散らかっていたのを覚えている。

電総研 (ETL) は、さらに 1954 年から 1965 年にかけて、和田弘 電子部長のもと、米国に負けじと世界初のトランジスタ式計算機 (ETL-Mark III~VI) や機械翻訳機 (やまと) の研究開発を行い、我が国のコンピュータ産業育成に大きく貢献した（詳細は例えば [2][3]）。

また、通産省工業技術院の大型工業技術研究開発制度（いわゆる大プロ）の一環として、「超高性能電算機の研究開発」（1966–1972）が行われ、終わろうとしていた時であった。その成果には、パターン認識理論の草分け的存在でもある飯島泰蔵氏（オートマトン研究室長、位相情報基礎特別研究室長）が考案した複合類似度法を用いて東芝が開発した超高性

¹⁾ 実は、RWC（実世界情報処理）を含めて、これらの標語は筆者が提唱したものである。

能 OCR (文字読み取り装置) ASPET/70, 71²⁾ が含まれていた。また、60 年代は、世界的にもパターン情報処理やパターン認識の研究が始まっていた時期でもある。

そういう情勢もあって、時は丁度、次期大プロの「パターン情報処理システム (PIPS) プロジェクト」(パターン大プロ: 1971–1980) の立ち上げ時期であった。芝分室での TSS の開発を終えて、淵一博氏が音声認識研究室長兼、新設の推論研究室長として戻られ、論理指向の人工知能や自然言語処理の研究グループを立ち上げていた。プロジェクトを巡って、喧々がくがく議論がなされていたのを思い出す。筆者も、これからはパターン認識や知能の研究が重要になるとの思いから、飯島理論も勉強しつつ関係論文を読みあさり、パターン認識の基礎理論の研究を始めた。

1972 年 11 月に西野博二氏がパターン情報部長に就任し、担当部長としてパターン大プロはスタートした。当初計画されていた基礎研究から開発研究へと大きく方向転換して、数理基礎研や飯島特研は基礎的過ぎるとの判断か、外されて、図形認識研を含むパターン情報部が電総研部隊として対応する体制となった。飯島氏は大学に転出、続いて末包室長も 1973 年に大学に転出され、西野部長の兼任となった。室員も大学へ転出していった。

取り残された私は、パターン大プロを横目で見つつ、窓から首相官邸が見える永田町の研究室で研究に励んだ。その時の信条は、大学の指導教官の近藤一夫教授³⁾の「真の研究は孤独と忍耐だ」や飯島氏の「10 年一仕事」であった。

当時アドホックな手法で行われていたが、パターン認識では基本となる重要な特徴抽出の基礎理論を手がけ、Lie 群論を用いた不変特徴抽出理論(幾何学的側面)[4]、そして変分法を用いた非線形判別特徴抽出理論(確率統計的側面)[5]を仕上げた。また、画像処理や画像認識への多変量解析の応用や、その特徴抽出理論の実践としての高次自己相関(HLAC)特徴と多変量解析を組み合わせた学習型汎用認識方式を提案し、1981 年に纏めて学位論文とした[6]。正に、パターン大プロと平行しての 10 年一仕事の独自研究であった。

得られた非線形判別特徴抽出理論の結論は、パターン認識や推論、正則化手法、さらには多変量データ解析などの本質根底には共通にベイズ(Bayes)の事後確率の構造があり、その学習が重要との知見であった。また、知識形成および推論の基礎には、確率分布の絡みの要約としての帰納的確率論理(柔らかな論理)があって、2 値(Boole)論理と違って、一般には排中律が成立しない一種の直観論理となっているとの知見であった(図 1)⁴⁾。

その間、70 年代には、パターン大プロと平行して、知能ロボットの研究や、ロボットの眼としてのコンピュータビジョンの研究が国内外で盛んになっていた。また、記号と論理を主体とした人工知能(AI)の応用として、プロダクション・ルール(If-then rule)を用いた知識工学(KE)の研究が米国で盛んに行われ、幾つかの成功を収めていた。しかし、実問題の不確かさと 2 値論理の固さの問題や知識獲得のボトルネックが指摘されるようになって、AI や KE の研究は冬の時代を迎えつつあった。一方、1969 年にコンピュータ間通信の ARPA-net (今日のインターネットの元祖)が始まり、70 年代後半の光ファイバ・ケーブル

²⁾ 今日の郵便番号読み取り装置の原形。

³⁾ 数理工学の研究室。先輩弟子には伊理正夫氏や甘利俊一氏がいて、末包良太氏は元助手であった。

⁴⁾ 詳しくは、付録 A を参照。

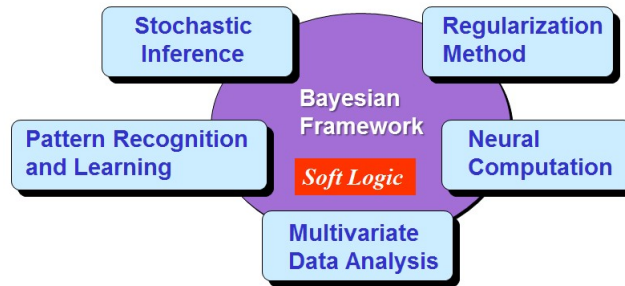


図 1: 基礎としてのベイズ枠組

の運用や 80 年代の通信プロトコル TCP/IP の提唱とともに急速な普及を迎えつつあった。

パターン大プロが 1980 年度で終了し⁵⁾、次の大型国プロとして、遅れて国内でブームとなっていた AI や KE の流れを受けて、知識情報処理を指向した新しいコンピュータ技術の研究開発や自然言語処理などの AI 応用を目標とした「第五世代 (5G) コンピュータプロジェクト」(1982–1992) が始まった。電総研から、一時パターン情報部長と数理基礎研究室長に就任した淵一博氏と横井俊夫氏、そして古川康一氏、内田俊一氏、他若手が新設の(財)新世代コンピュータ開発機構 (ICOT) に出向、淵氏が所長に就いて、大規模・世界最高速の並列推論マシン PIM などのプロトタイプシステムの試作、新 OS や並列型言語、応用としての法的推論システムなどの開発などが行われた。

また、ほぼ平行して、「科学技術用高速計算システム」(1981–1988) や「電子計算機相互運用データベースシステム」(1985–1992) の研究開発が電総研主導の大プロとして行われた。

その間、筆者は 1982 年から 15ヶ月間、カナダ NRC の研究所に客員研究員として渡航し、パターン認識の応用研究を行った。帰国すると、電総研では基礎シフトということで、田村浩一郎氏が数理基礎研究室長となって室員も増えていた。皆で「柔らかな論理」の調査研究を行い [8]、後を継いで筆者が室長となってからも、さらに非線形多変量解析理論の研究などを展開し [11]、パラダイムシフトとしての「From Boolean to Bayesian」⁶⁾ の構想を強く持つに至った [9][10]。

80 年代半ばにニューラルネットの誤差逆伝搬学習法が提案されて、第 2 次のニューロブームが起こった。これは、それまでのノイマン型の逐次処理方式や記号と論理に基づく AI や KE へのアンチテーゼとして、並列学習型の情報処理（主に、認識や連想、制御など）を提唱するものであった。このパラダイムシフトは 5G プロジェクトにとっては不幸な出来事ともなり、プロジェクトの終盤には世の中の関心はすっかりニューロコンピューティングへ移ってしまって、PIM も殆ど使われることなく、厳しい評価を受けてしまった。

筆者自身は、このニューロブーム以前の 70 年代に非線形判別特徴抽出理論や学習型汎用認識方式の研究を行っていて、ニューラルネットの逐次学習が究極のベイズ事後確率の構造をそれなりの非線形写像で近似していることを理解していたので、ブームに対しては冷

⁵⁾ 要素研究開発と言うこともあって当時の評価はあまり良くなかったが、その後、我が国におけるパターン情報処理の拡がりや応用につながり、後では再評価された。

⁶⁾ 類似のコンセプトに米国の Zadeh 教授が 1994 年に提唱した Soft Computing があるが [23]、統一的な理論体系ではなく、ファジィ技術とニューロ技術の組み合わせで不確実さを許容する柔軟な処理の提唱であり、その後は確率推論などいろんな関連分野を包括する総称となった。

に分極化した変遷をたどっている。以下、それぞれの研究の変遷を簡単に見てみよう [37]。

狭義 AI の研究

記号と論理を主体とした逐次手順のアプローチは、ノイマン型コンピュータのプログラミング方式との相性から、また推論といった高次レベルの知能へのアプローチとしても、急速に立ち上がっていった。1956 年には、米国で McCarthy と Minsky 主催のダートマス会議が持たれ、人工知能 (Artificial Intelligence) が提唱され、Newell 達が最初の AI プログラム “Logic Theorist” のデモを行った。その後、チェッカーゲームを行うプログラムや、幾何の定理証明を行うプログラムの作成など、野心的な試みがなされた。

60 年代には機械翻訳や自然言語理解の試みもなされ、1965 年には精神科医を真似た対話ができるプログラム ELIZA が作られ人気を集めた。しかし、1966 年には機械翻訳に対する否定的なピアス勧告が出て関連予算が削減された。また、1969 年には AI 研究の最大の難問である「フレーム問題」⁷⁾ が指摘され (McCarthy, Hayes)、また 1972 年には、NP 完全性の概念が考案され、巡回セールスマン問題の様な計算問題の多くが組み合わせ爆発で解答不能となることが明らかになった。そして、これらを契機に、狭義 AI (人工知能) の研究は「古き良き時代」を終焉していった。

しかし、応用領域を限定して適切に問題設定し、必要な知識データベースと推論機構を持つてすれば、AI の手法は実地的な手法として有効に適用できるとの考えから、70 年代には応用 AI としての各種「エキスパートシステム」(MYCIN や DENDRAL) がスタンフォード大学の Feigenbaum のグループを中心に試みられ、ある程度の成功を収めた。

これらの知識ベース AI (知識工学 KE と呼ばれた) の成果は、研究から実応用と言うこともあって、80 年代にかけての、特に我が国での、いわゆる人工知能ブームを引き起こしたが、80 年代は特に大きな研究上の進展は見られず、むしろ冬の時代を迎えつつあった。ただ日本では、1982 年に通産省の 10 年プロジェクトとして第五世代コンピュータ・プロジェクトがスタートして、内外の大きな注目を浴びることになった。

知識ベース AI では、その知識をエキスパート (専門家) に聞くとされるが、実問題への多くの応用では不確かさや経験 (勘) の問題もあって、専門家も明示的なプロダクション・ルール (If A, then B) の形で答えられないことが多く、いわゆる知識獲得のボトルネックが問題となった。このことが、応用 AI が下火になっていった大きな原因の一つである。

ニューラルネットワークの研究

閾値論理素子としてのニューロン・モデルの提案 (McCulloch-Pitts, 1943) とシナプス学習則の提案 (Hebb, 1949) は、工学者の興味を引くこととなり、学習や認識へのボトムアップなアプローチとしてのニューラルネットワークの研究が始った。

さらに、認識学習機械としての Perceptron の提案 (Rosenblatt, 1957) は、その方向を加速した (第 1 次ニューロブーム)。しかしながら、非線形ネットワークの学習過程は解析

⁷⁾ フレーム問題とは、(記号と論理で表される) 有限の情報処理能力しかない AI には限界があって、全ての場合を処理することは出来ない、言い換えれば、想定世界の「枠」を越えて多様な状況が存在し、全ての場合を予め想定して有限の手順としてプログラム出来ないことを言っている。

も困難であり、その後の研究はその理論的な解析に費やされた。理論的な成果としては、最小 2 乗線形判別関数の学習の視点からの学習則の拡張 (Widrow-Hoff, 1960)、さらに確率的急降下法の視点からの学習則の一般化 (甘利, 1967) がある。また、1968 年に Minsky と Papert は「Perceptrons」を出版し、論理命題計算としてのニューラルネットの可能性と限界を明らかにしたが、これがその後の研究に水を差すことにもなって、ニューラルネットの研究は下火になった。

80 年代に入ると、物理学者や認知科学者の参入によって再びニューラルネットワークの研究が活発となった。ボルツマン・マシンの提案 (Hinton, 1984)、組合せ最適化問題への応用 (Hopfield, 1985)、そして階層型ニューラルネットの誤差逆伝播学習アルゴリズムの開発 (Rumelhart 他, 1986) を契機に、再びニューロブームが起きた。これは、限界を見せていた記号論理的な知能へのアプローチ (狭義 AI) に対するアンチテーゼとして、コネクショニズムや PDP (Parallel Distributed Processing) の標語のもと、認知科学としても大いに盛り上がりを見せた。多くのパターン認識や学習、制御への応用が行なわれ成果を上げたが、上位の記号レベルへの統合は難しく、ブームは徐々に下火となって行った。しかし、信念ネットワークの定式化 (Pearl, 1988) を契機に、90 年代に入ると、理論的な研究としては、ベイジアンネットワークなど、確率統計的なパラダイムへと統合されて行った。

パターン認識の研究

「認識と理解」の原型としてのパターン認識の研究においては、確率・統計はその初期の理論において重要な役割を担った。それは誤り最小識別 (ベイズ識別) のための理論としての統計的決定理論の応用であった (Chow, 1957)。従って本来、論理の問題意識は少ない。その後、パターン認識の研究は、文字、画像、音声などメディアごとに個別専門化して、実際の手法、特に特徴抽出の技法と実験的な評価が中心となり、パターン認識全体としての理論的枠組の意識は希薄となっていった。

日本では、1971 年に通産省の 10 年プロジェクトとして「パターン情報処理システム」の研究開発が行なわれ、その成果は郵便番号読み取り装置やプリント基板の黙視検査の自動化など、実用化に繋がっていて、その後のパターン認識技術分野の日本の優位性に寄与した。

理論的な研究としては、先にも述べた 60 年代後半の電総研の飯島氏の観測理論や複合類似度法があった。同じ頃、海外でニューラルネットの Widrow-Hoff の学習則と Fisher の線形判別関数との関係 (Koford-Groner, 1966) やベイズ識別との関係 (Patterson-Womack, 1966) が指摘されていた。筆者は、さらに Fisher の線形判別関数および最小 2 乗線形判別関数を一般の非線形の場合に拡張し (1972, 1981)、統計的特徴抽出とベイズ推定との密接な関係を示した [6]。特に後者は、階層型ニューラルネットが誤差逆伝播学習で収束近似する先がベイズの事後確率であることを、それ以前に理論的に示していた (付録 A を参照)。

実世界情報処理へ: パラダイムシフト

以上、人工知能に関連する知能情報処理研究の変遷を概観したが、80 年半ばを境に、それまでの記号と論理を主体としたトップダウンな狭義の AI 研究から、生体に学びパターン

情報や学習を主体としたボトムアップな知能へのアプローチへと大きくパラダイムをシフトしたことがわかる。それは、言わば、想定世界から「実世界」へのパラダイムシフトである。思考の形式化としての狭義 AI の研究は、問題解決での演繹的論理の側面と知識表現の一部に成功をおさめたものの、その下部を支える曖昧な帰納的側面（いわばパターン認識の問題）の形式化に方法論としての限界を示したとも言える。

実際、コンピュータの知能（実は人間の知能をプログラムの形で仕組んだもの）と異なり、人間や他の生物は、多様な実世界において適応的に働く極めて柔軟な知能を発達させた。脳はそのような「実世界知能」を、パターン情報を介した実世界とのインタラクションにより獲得している。そしてパターン認識をベースに、記号的な高次の知識や知能が発現する。また、脳は情報を並列・統合的に処理するとともに、経験によって神経回路の結線重みを自ら変える学習・自己組織化機能によって、未知の状況や環境の変化への適応能力を高めていると考えられている。80 年代以降の人工知能関連の研究は、こうした実際の知能の持つ実世界性に視点を移すものであり、標語的には、以下のように言えよう。

- 単純・想定世界 (Toy world) から複雑・現実世界 (Real world) へ
- 実世界性：曖昧性、開放性、頑健性への対処
- 良設定 (Well-defined) 問題から不良設定 (Ill-defined) 問題へ
- 固い枠組から柔軟な枠組へ (点から線・面へ、離散から連続へ)
- 個別逐次処理から統合 (総合) 並列処理へ

キーアプローチ

そうした実世界知能の実現のためのキーアプローチとしては、曖昧さや不確かさを伴う多様な実世界の情報を統合し総合的な判断に利用する「情報統合機能」と、実世界の持つ開放性に対処すべくシステム自身の開放性としての「学習・自己組織化機能」が基本的な機能として重要である。そしてシステムの適応性や自律性のためには、それらの機能が陽な形で、処理や統合の在り方それ自体を対象とするメタレベルの処理としての「評価と最適化」のフィードバックループの枠組みの中に組み込まれ、認識や推論といった機能と一体化して扱われる枠組みが重要である。そのための方式としても、また不完全さや不確かさを伴う実世界情報への対処としても、確率統計的な定式化と手法の強化が重要となる。

3. RWC 研究計画と立ち上げ

1988 年のことだったと思うが、通産省の大プロの慣例とも言えるが、次期大プロの話が電総研の企画へ来た。5G プロジェクトがそろそろ終わりになるが、次期大プロとして「ニューロコンピュータの研究開発」はどうだろうとの打診であった。明らかに世のニューロブームを受けての発案であり、またしても新コンピュータの開発話しであった。

この分野に詳しいとのことで企画からコメントの提出を求められ、10 年プロジェクトとしては、ニューロブームは 5 年位で終わるだろうから、その先を目指すべき。しかもコンピュータの開発ではなく、コンピューティング (情報処理) の基盤研究が重要だと答えた。

すると通産省（電子機器課）から、ではどんな情報処理なのかとの質問が来て、我々の提唱していた柔らかな情報処理の概要を、例えばの話としてコメントした。

しばらくして、電子機器課から呼び出しがあり或る部屋に行くと、そこには担当の課長補佐が居て、その前には何と大学の研究室の大先輩にあたる甘利俊一教授が座っていた。担当者が、「実は次期大プロには是非二人の力を借りたい」と切り出した。驚いて、「理論屋の我々は大プロには合わない」と異口同音に答えると、「だからこそお願いしたい。実は通産省としては、技術ただ乗り論などの昨今の日本叩きに対処するためにも、基礎分野での国際貢献を目指して大プロを考えている」とのことであった。結局、この会合がきっかけとなり、筆者はRWCプロジェクトに深く関わることになってしまった。

3.1 準備と研究計画

翌年の1989年、21世紀に向けて我が国が世界の国々と取り組むべき新しい情報処理技術体系について検討を行うために、早速に関連する分野の多くの有識者（大学や電総研など）からなる「新情報処理技術調査研究委員会」（委員長：石井威望氏）が組織された。

同委員会では、3つの分科会（基礎研究分科会、計算機科学分科会、社会応用分科会）を設けて2年間にわたり熱心な議論と、海外研究動向調査や国際ワークショップ・シンポジウムの開催を通じて検討が重ねられ、「柔らかな情報処理」、「超並列超分散情報処理」などのキーコンセプトが提唱された[12]。そして1991年度には、この調査研究の成果をもとに企業幹部を交えたフィージビリティ調査が行われ、電総研が中心となってより具体的な研究計画書「リアルワールドコンピューティング・プログラム基本計画書」[13]が策定された。

当初は、取りあえず「新情報処理技術」NIPT (New Information Processing Technology) と呼ばれていたが、RWC (Real World Computing) という基本理念が提唱されたのは、1991年の秋のことであった⁸⁾。また、本研究計画の先端・未踏的な性格からも、従来の具体的な開発目標達成型の「プロジェクト」を避けて、敢えて包括型の「プログラム」と新しく呼んだのも筆者の強い思いからであったが、その後はプロジェクトと呼ばれるに至った。

3.2 当初計画における基本理念

当研究計画の基本理念は[12, 13, 15, 17, 18, 21]等に詳しいが、次のようなものである。

「コンピュータと通信技術の驚異的な発達に支えられ、情報処理技術は産業活動のみならず、広く社会および個人の生活様式にも浸透し、急速な変化をもたらしつつある。21世紀の高度情報化社会へ向けて、処理すべき情報は益々増大するであろう。それは単に量の増大のみではない。マルチメディア指向、各種センサー技術の発達、そして様々な分野への応用の拡大に伴い、情報の質の多様化と新たな情報処理技術への要求が増大しつつある。

こうした社会的背景と技術的ニーズは、単に従来の情報処理技術の直線的な延長というのではなく、その根底となる枠組からの新たな変革、新たなパラダイムを要求しつつある。

⁸⁾ これは、通産省の某審議官（実は5Gの名付け親）が「いつまでも新情報処理では分らない。3Dの実世界の多種多様な情報を実時間で処理するのだから四次元コンピュータ・プロジェクトと呼ぼう」として、さすがに研究者の矚意を買った。そこで筆者が名付けたものである。ただ、その意向は[16]などに残っている。

現在のコンピュータをより人間に身近なものとし、誰もが容易に使えて、実世界の多様な情報環境において人と共存し協調できる能力を持ったものにしてゆくことが望まれている。」

これは、四半世紀経った今でも色あせない先進的な理念と見識であったと自負出来る。より具体的（専門技術的）には、次の通りである。

「今日、コンピュータは強力な計算パワーを持ち、数値計算、文書処理、さらには論理的推論といった、いわば想定された情報世界で、解法のためのアルゴリズムが存在しプログラム言語で明確に記述可能な良設定問題を解く能力においては、人間を遥かに上回るに至っている。しかしながら、パターン認識、不完全情報の下での問題解決、学習能力といった多くの面で依然として人間に及ばない。解くべき問題の多くが不良設定でありアルゴリズムとして記述困難な実世界において人間の行なっている柔軟な情報処理に比べると、今日のコンピュータによる情報処理の枠組みは依然として柔軟ではない。論理/演繹に対して直観/帰納ともいえる情報処理の側面が、現在の情報処理技術において未だ未熟である。従って、実世界問題に対処し情報処理技術の新たな応用の地平を切り開くためには、ここでもう一度、人間の直観あるいは記号下（subsymbolic）レベルの情報処理に光を当てて、人間の持つ柔らかな情報処理の背後にある基本的な原理を追究し、発達するハードウェア技術の基盤の上に、それらを新しい情報処理技術として具現化してゆくことが重要かつ不可欠である。」

3.3 技術開発の概要と構成

リアルワールドコンピューティング（実世界情報処理）の応用分野は、実世界応用全般にわたる幅広いものとなるが、それらのシステムは次の特性によって特徴づけられる。

- 開放性: 予期せぬ状況にも自律的・適応的に自己を変化・拡張して対処できること
- 頑健性: 入力情報の雑音や環境の変化にも頑強かつ安定していること
- 実時間性: 現実的な時間内に解を求めること

そして、それらを実現するためのキーコンセプトとして、情報の曖昧さや不確実さを許容するとともに学習・適応能力を持った「柔らかな情報処理」と、相互に複雑に絡み合った多様な情報を超並列超分散的に処理する「超並列超分散情報処理」の二つが挙げられた。

この二つのキーコンセプトを実体化するための研究開発要素は多岐にわたるが、大きくは

- 実世界応用のための新しい要素機能「新機能」
- その「理論基盤」としての柔らかな情報処理の理論
- それらを支える計算基盤としての「システム基盤」

とする3層構成（図4）が、本研究プログラムの技術開発の基本的な枠組みとされた。

新機能に関する研究においては、広範な実世界問題を解決し実世界性を有したシステムを実現するために共通的に重要となる新しい要素機能が探求されることになる。ここでの主な研究課題は、多種多様な情報の柔らかな認識と理解、柔らかな情報ベースに基づいた柔らかな推論と問題解決、人間と機械の対話系のための柔らかな情報環境、そしてロボッ

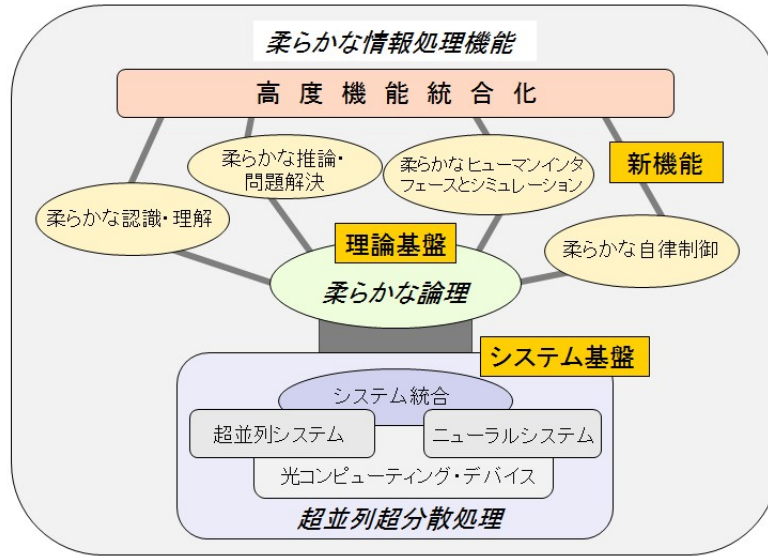


図 4: 技術開発項目の構成

トなどの自律システムの柔らかな制御であり、これらの要素技術を統合化する方法を探り、さらにその有効性を検証するために、いくつかの典型的な問題への応用を試みる。

理論基盤での研究課題は、柔らかな情報処理のための理論基盤を確立することである。このためには、まず、従来の情報処理の枠組みを、情報の表現、情報や処理モデルの評価、最適化の観点から、「柔らかな論理」（柔軟な確率的推論）などに基づき拡張・一般化し、それらの統合を図り柔軟化を目指すことが重要となる。特に、「多種多様な情報（および処理モジュール）の統合」と「学習と自己組織化」が最も基本的な項目となる。そして、これらの理論基盤を新機能へ繋げて裏付けることを目指す。

システム基盤の研究開発目標は、時空間的に分散した大量の情報を、それらの相互作用を配慮しながら高速に処理する計算基盤の提供である。耐故障性と信頼性を有し種々のパラダイムを効率良く支援する汎用超並列システム、専用システムの1つとしてのニューラルシステム、それらを柔軟に制御しユーザには過大な要求をしないソフトウェア、さらに、光インタコネクションなど、光の大容量性と超並列処理性を生かしたシステム・デバイス応用である。また同時に、これらの技術を統合する方法についても研究を進める。

当研究計画は、当時、国内外から注目され、専門誌や学会からの特集依頼が相次いだ[14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22]、マスコミ報道は、内容が少々専門過ぎたこともあって、5Gプロジェクトの人工知能騒ぎほどではなく、一般への知名度も大きくはなかった。しかしこれは、5Gプロジェクトの教訓を踏まえて敢えて我々推進者が意図したことでもあり、宣伝よりも、新しい未踏技術への研究開発に専念し、成果で勝負したかったからである。

3.4 推進体制

このような新しい先進的な研究開発を押し進めるための新しい推進体制として、当初の通産省の基礎分野での国際貢献との方針もあり、国プロとしては初めて海外を含めた国際性と学際性が許された。また、前半（1992-1996）での比較的広く探索的なフェーズから、

中間評価と見直しを経て、後半（1997-2001）でのより集約的なフェーズへといった、言わば評価に基づく「分散と協調」やGA⁹⁾的なダイナミクスが推進体制として採用された。

そして、RWC 計画の研究開発委託先として技術研究組合（参加国内企業等）を設立し、「より集中的な研究開発」を行う集中研（研究センター）と「より要素的な研究開発」を行う分散研（各組合員の研究拠点）を設置し、それらの有機的な連携を図りつつ研究開発を行うことになった。さらに、電総研も（少ない予算ながら）RWC 研究拠点を設けて先導的・基盤的研究を行ない、これらを横から支える形で研究協力を行う体制となった（図5）。

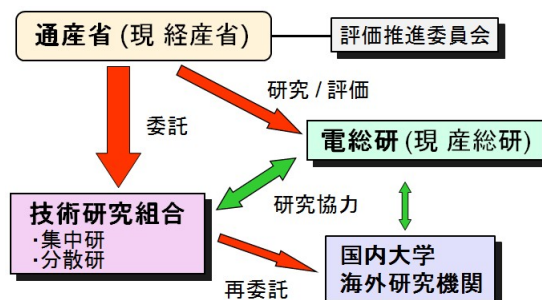


図 5: RWC 研究計画の推進体制

基本計画における推進方針は、以下の通りである [13]。

本研究プログラムの主目的は、単一のマシンを開発することではなく、重要でありながら未だ確立されていない要素技術の可能性を探求することである。この挑戦的かつ基盤的な目的を達成するために、当プログラムは下記のような方針にのっとり推進されるべきである。

柔軟な実施体制：本研究開発の推進に当たっては、統合性・象徴性・共通性の高い研究を集中研において、個別性・要素性の高い研究を分散研においてという研究課題の適切な配分を行ない、両者間の有機的で柔軟な連携を確保する。

競争原理の導入：研究開発の前期では、競争原理（様々なアプローチ間の競合による研究の効果的な進展）を導入し、中間評価時にはその結果に基づいて研究開発課題を絞り込む。

学際性と国際性：本研究開発の基礎的かつ挑戦的な目標を達成するため、学際的・国際的な連携を促進する。そのため、電総研や大学等の研究機関との共同研究を積極的に行ない、また、国内外の大学等の研究機関に対し再委託の公募等を行なう。

研究成果の公開性：研究成果の公開性を保つため、研究開発の進捗状況および成果を国内外の会議等で報告・公開し、また、シンポジウムやワークショップ等を積極的に開催する。

研究インフラの整備：以上の柔軟な実施体制と研究成果の公開性を支えるために、世界的な規模の分散研究基盤として、高速ネットワーク環境の整備を行なう。

⁹⁾ Genetic Algorithm（遺伝的アルゴリズム）：解の候補をパラメータ（遺伝子）で表し、その組み合わせと評価で最適解を絞り込み探索する手法。

4. RWC プロジェクトの経緯

1992年7月にRWC計画の研究委託先となる技術研究組合「新情報処理開発機構」(RWCP: RWC Partnership) が設立され(本部: 都内岩本町)、10月には電総研との研究連携の便宜もあって筑波に集中研「つくば研究センター (TRC)」、組合員企業内に分散研が設置され、研究がスタートする運びとなった。

集中研 (TRC) へは、いろいろあったが、電総研から光技術部長の島田潤一氏が所長として、また知能情報部から岡隆一氏が「情報統合研究室長」、情報アーキテクチャ部からは古谷立美氏が「ニューロ研究室長」、坂井修一氏が「超並列アーキテクチャ研究室長」、石川裕氏が「超並列ソフトウェア研究室長」、知能システム部からは末廣尚士氏が「能動知能研究室長」として出向した。筆者はRWC担当部長(パターン情報部の後の知能情報部)として電総研でのRWC研究を統括するとともに、TRCの首席研究員を併任してTRCと電総研の連携の架け橋を担うことになった。

また、RWC全体の評価推進委員会が通産省(機械情報産業局)に設置され、甘利俊一氏を委員長として関連分野の有識者(大学教授と電総研の関連部長)および島田所長が委員となった。

4.1 前期(1992–1996, H4–H8)の研究体制と内容

RWCPの研究従事組合員は、設立当初において12社であったが、2年目に海外も含み大幅に増え、3年目のピーク時で23社37分散研(新機能12、理論4、超並列6、ニューロ3、光12)となった(内、海外組合員はGMD、ISS、SNN、SICSの4機関で分散研数7)。

本プロジェクトの特徴の一つに、当初からの方針として、海外の研究機関が組合員や再委託先として参加している国際共同研究であることが挙げられる。広く海外からの参加を呼びかけた結果、組合設立後、ドイツの国立情報処理研究所(GMD、2001年にフラウンホーファー研究機構¹⁰⁾に統合)が組合員として参加、その後1993年5月にはシンガポール大学のシステム・ソフトウェア研究所(ISS、後半にKRDLに名称変更)、オランダのニューラルネットワーク協会(SNN)、スウェーデンのコンピュータ・サイエンス研究所(SICS)の3機関が組合員に加わった。

また、全体予算も、初年度9億円から次年度36億円、そして50億円、57億円と年ごとに順調に増加して通産省でも最大規模の予算となり、通産省の期待の高さが伺えた。

具体的な分野・研究室名と研究テーマ名を表1に示す。

以外とニューロ関係が少なく、光が多いことが分かる。これは、企業が当時のニューロブームにそれほど影響されていなかったことを示していて、その意味では当初のニューロコンピュータの開発とせずに、その先を目指すRWCとしていたのは正解であった。また、光が多いのは、島田所長の専門分野の影響とも考えられるが、実は当初NIPTの時代に、米国からの参加形態について日米政府間で協議された結果、米国側の意向として光分野で

¹⁰⁾ ドイツ全土に67の研究所・研究施設を構え、約24,000人のスタッフを擁する欧州最大の応用研究機関。現在の産業技術総合研究所に相当するが、規模でも10倍近い差がある。

表 1: 前期における組合研究室と研究テーマ [35]

RWCP	研究室	研究テーマ	H4	H5	H6	H7	H8
TRC	情報統合	情報統合対話システム	■	■	■	■	■
	超能動知能	実世界適応自律システム	■	■	■	■	■
	超並列ソフトウェア	超並列計算モデル、OS、プログラミング言語	■	■	■	■	■
	超並列アーキテクチャ	超並列実行モデルおよび超並列アーキテクチャ	■	■	■	■	■
	ニューラルシステム	適応と進化を行う計算機	■	■	■	■	
国内	新機能 シャープ	多元情報を用いたヒューマンインタフェース	■	■	■	■	■
	新機能 三洋	ビジョンベース自律作業システム	■	■	■	■	■
	新機能 NTT	脳における並列情報処理機構と注意機構		■	■	■	■
	新機能 富士通	自律学習成長機能を持つ移動ロボットシステム		■	■	■	■
	新機能 MRI	シンボル情報とパターン情報に共通するジェネリックタスク		■	■	■	■
	新機能 三菱	自己組織型情報ベース		■	■	■	■
	新機能 日立ー1	手話理解をピークルとした情報統合技術		■	■	■	■
	新機能 日立ー2	エピソード記憶に基づくデスクワーク支援			■	■	
	新機能 沖	異種知識に基づく協調型問題解決	■	■	■		
	理論 NEC	確率的知識表現の計算論的学習理論		■	■	■	■
	理論 三菱	ニューラルアーキテクチャによる視覚情報処理		■	■	■	■
	理論 富士通	集団型情報処理のソフトウェア・モデル		■	■	■	■
	超並列 NEC	適応型超並列システム	■	■	■	■	■
	超並列 三菱	超並列オブジェクト・モデル	■	■	■	■	■
	超並列 MRI	超並列プログラミング環境	■	■	■	■	■
	超並列 東芝	超大規模超細粒度相互結合網	■	■	■	■	■
	超並列 三洋	超並列コンピュータにおける資源管理手法	■	■	■	■	■
	ニューロ 東芝	構造化ニューラルネットに基づくパターン認識		■	■	■	■
	光 松下	積層型光コンピューティングシステム		■	■	■	■
	光 日立	光周波数アドレス技術を用いた光インタコネクションおよび光演算方式		■	■	■	■
	光 富士通	波長アドレス光インタコネクション		■	■	■	■
	光 NEC	光電融合プロセッサネットワーク		■	■	■	■
	光 沖	3次元光配線技術		■	■	■	■
	光 住電	光ファイバによる並列光インタコネクション技術		■	■	■	■
	光 フジクラ	空間型光偏向器		■	■	■	■
	光 古河	波長可変面発光 光 LD アレイ		■	■	■	■
	光 日板	集積化光バスシステム (OBIS)		■	■	■	■
	光 三菱	光ニューロコンピュータ		■	■	■	■
	光 三洋	光コンピューティングシステム3次元積層光素子		■	■	■	■
	光 東芝	空間多重光インタコネクション用面型多機能素子		■	■	■	■
海外	新機能 ISS	マルチメディア情報の柔軟な蓄積と探索			■	■	■
	新機能 SNN	能動的認知理解		■	■	■	■
	新機能 SICS	実時間対話ロボットのプログラミング		■	■	■	■
	理論 GMD	遺伝的アルゴリズムの理論基盤としての統計的推論		■	■	■	■
	超並列 GMD	超並列システムプログラミングモデルの開発・実現・評価		■	■	■	■
	ニューロ SICS	ニューラルコード化と実現		■	■	■	■
	ニューロ ISS	ニューロロジックネットワーク		■	■	■	

の研究協力に限る¹¹⁾ ことになって進められた、日米共同光エレクトロニクスプロジェクト (JOP) の影響と思われる。いずれにしても、光、とりわけ光インタコネクションが突出した配分は、並列分散システム分野での位置づけや、企業の光通信志向と RWC 本来の関係に置いて、評価推進会議でも問題を呈する形となったし、また後日の「内容がバラバラのプロジェクト」との巷の心ない論評の一因ともなったことは否めない。

国内外大学等への再委託も 2 年目から始まり、新機能（画像認識、音声認識、自然言語理解など）、自律システム（ロボット）、超並列システム、ニューロコンピューティング、光コンピューティング、光ニューロなど、本プロジェクトに関係した分野の基礎的・萌芽的研究に対して、国内大学は 34 研究室が再委託先となった。また、海外再委託としては、同年にはオーストラリアのシドニー大学、オーストリアの RISC-LINZ、イタリアの IRST が再委託先として研究に参加し、1994 年度からは並列分散システムの分野でイギリスのマンチェスター大学とドイツのエランゲン大学が加わった（詳細は [35]）。

電総研 (ETL) は、本 RWC 研究計画（プロジェクト）の策定段階から深く関与し、計画の遂行においても、先導的な基盤研究の拠点として、より実証的な研究の拠点となる RWCP つくば研究センター (TRC) との密接な連携を取りつつ計画全体を主導してゆくという重要な役割りを担っていた。そのため、少ない予算ながらも、当初から 9 テーマ、そして 2 年目からは横断的な新情報計画室を新たに設置して、理論基盤と新機能との接点 (RWC のキーコンセプト) となる情報統合と学習に関する研究を開始して、TRC を上回る計 10 テーマ、延べ 60 名の大部隊で RWC の先導的・基盤的研究を行なった (表 2) [20]。

表 2: 電総研研究室と研究テーマ

ETL-RWC 関連研究室	研究テーマ	H4	H5	H6	H7	H8
情報数理、認知科学	柔らかな情報処理の理論基盤	■	■	■	■	■
画像	適応的ビジョンシステム	■	■	■	■	■
音声	対話音声の認識・理解技術	■	■	■	■	■
自然言語	リアルタイム自然言語対話システム	■	■	■	■	■
自律システム、行動知能、視覚情報	柔らかなロボット技術	■	■	■	■	■
計算機方式	並列システム (EM-X)	■	■	■	■	■
分散システム	超流動 OS	■	■	■	■	■
計算機構	柔らかな連想機構	■	■	■	■	■
光情報、プロセス基礎	光演算システム	■	■	■	■	■
新情報計画室	情報統合と学習		■	■	■	■

1994 年 6 月には、RWCP および電総研そして大学等再委託先研究機関の前期中間発表会 RWCP Joint Symposium が開催され、述べ 500 名が参加して成果発表を行い、盛況であった。また、国内外の研究機関が一体となって研究を遂行するためには相互の密接な情報交換が必要との認識から、研究インフラとしての RWC ネットワークの整備も行われた。

¹¹⁾ 実は、筆者は当初 NIPT 時代に団長として調査や勧誘で欧米の関連大学や研究機関を訪問した。米国での反応は欧州同様に好意的であったが、「通産省から米商務省に政府チャンネルで打診が行ったため、ニューロや AI などの先端研究分野で通産省はまた米国の成果を利用しようとしているのではとの警戒感から、日本の進んだ光素子技術と米国の進んだシステム化技術での協力なら米国の利に叶うとの政治判断があった。そのため、それ以外の分野での参加が出来なくなって残念である。打診先を間違えた。」と、現場の研究者との後日談で知った。

前期の状況報告については[24]、研究動向（現状と展望、理念の強化）については[25]を、また研究開発の詳細内容については、[35]を参照されたい。

そうした順調な経緯の一方で、RWC計画の前期早々に例のバブル崩壊があり、監督元の通産省の電子機器課の人事異動もあって、当初の方針とは一変して、基盤研究よりも企業補助金的な実用的な開発へのシフトや、大学再委託の廃止や海外排除の動きも出て、それに抗し得ない立場の島田所長を筆頭とするRWCPと、それはおかしいとする甘利氏を委員長とする評価推進委員会の間の対立関係も生じてしまった¹²⁾。

そうした状況はTRC内でも電総研から出向した室長との間でも生じ始め、1994年3月にはニューロ研究室長の古谷氏が電総研に戻り、ニューロ研究室は岡氏の情報統合研究室に統合されることになったが、事実上、前期で消滅した。

筆者も、通産省への掛け合いや、心配する大学や海外への対応など多忙を極めることになったが、電総研でRWCの核となるコンセプトの深化と研究の芽を育てることが全体の研究開発の推進に急務であるとの認識から、1995年の4月からはTRCの首席研究員の兼任を辞して、これに専念することにした。

電子機器課は、前期終年度の予算を凍結し、企業がやりたいテーマに本プロジェクトの変更を検討する、と言う異例の事態ともなって、超並列マシンRWC-1を開発していた超並列アーキテクチャ室長の坂井氏、さらには作業ロボットの研究開発を行っていた能動知能研究室長の末広氏も、結局は前期で終了し、電総研に帰所することになった。

一部（特に過去に計算機開発プロジェクトを経験した電総研OBからも）、RWCプロジェクトは最初からよく分からないテーマをバラバラにやっていて、途中で厳しい評価を受けて潰れそうになって、何とか見直して後期も続いた、と言った意見があるが（例えば[3]）、これは誤解である。当初計画の基本方針にあるように、RWCは未踏分野の先進的な情報処理の基盤技術の育成と構築と言う性格から敢えて前期は広く探索的に、そして中間見直しを経て、後期に絞り込み重点化を図ると言う計画であったし、通産省の厳しい評価と言うよりは、上述のバブル崩壊を受けての方針変更が理由であった。

結局は、企業からの希望や説得力のある変更案は出ず、中間見直しや担当部署は、電子機器課から本来（予算元）の電子政策課へ移ることとなった。

4.2 中間評価と見直し（1996, H8）

前期最終年度の1996年に、評価推進委員会による計画の進捗状況の調査と成果の評価が行われ、また、後期に向けての体制も含めたテーマの見直しが、担当の電子政策課の課長補佐を中心に、筆者を含む電総研およびTRCのグループリーダーを含めた各準備委員会等を通じて、徹底的に検討された。

その結果、RWC研究計画のコアコンセプトを担っていた理論・新機能分野は「実世界知能（RWI）」分野として明確化すること、そのための計算基盤を担っていた並列分散システムや光通信基盤技術の分野は「並列分散コンピューティング（PDC）」分野として独

¹²⁾ 結局、これに抗議する形で甘利委員長は辞任され、後任の後期推進委員会の委員長には田中英彦氏（東京大学教授）が就任することになった。

自の目標を定めて、これまで連携が曖昧ではあった両分野を分かち、それぞれの分野内での連携を強化し研究資源を集約して研究活動の一層の先鋭化を図ることが望ましいとされた。そして、分野ごとに適切な方法と体制によって、後期研究開発を RWC 事業の枠組みを継承しつつ次世代情報処理基盤技術の開発として実施し、各分野における重要な要素技術の確立を図るとの方向が確認された。「実世界知能」技術分野においては、研究開発の詳細な内容の策定、実施（研究資源の配分を含む）等において電総研が具体的な枠組みの下で先導的役割を担い、実世界知能技術分野における研究開発を推進すること¹³⁾、「並列分散コンピューティング」技術分野においては、集中研（TRC）がリーダーシップを持って分散研との連携を強化して推進することとなった（[28]、後期基本計画書 [31] を参照）。

電総研では、丁度その頃、田村浩一郎 所長の発案のもと、これまでの幾分硬直化した研究室制度を改め、若手を含めた研究者の熱意と機会を生かすべく、より柔軟なラボ制度が検討され実施される時期であった。そこで、早速に、上記の方針に対応すべく「実世界知能」分野の領域設定を行い、それぞれをラボとするスーパーラボ「実世界知能研究センター（RWIC）」を後期初年度（1997）から設置して、センター長の筆者のもと各ラボリーダーが RWC 分散研との連携も含めて後期の実世界知能分野を推進する責任ある体制を整えた。

4.3 後期（1997–2001, H9–H13）の研究開発体制と内容

後期推進委員会も、田中英彦氏（東大）を委員長に、井上博允氏（東大）、米沢明憲氏（東大）、上坂吉則氏（理科大）、村岡洋一氏（早大）、大手企業の担当役員、TRC の島田所長、筆者（電総研、RWIC 長）の新たな委員構成となった。全体の推進体制は、図 6 に示すように、大きく 2 つの分野となり、実世界知能技術分野では、電総研の RWI 研究センターが統括に当たり RWCP と連携する体制となった [31][32][33]。

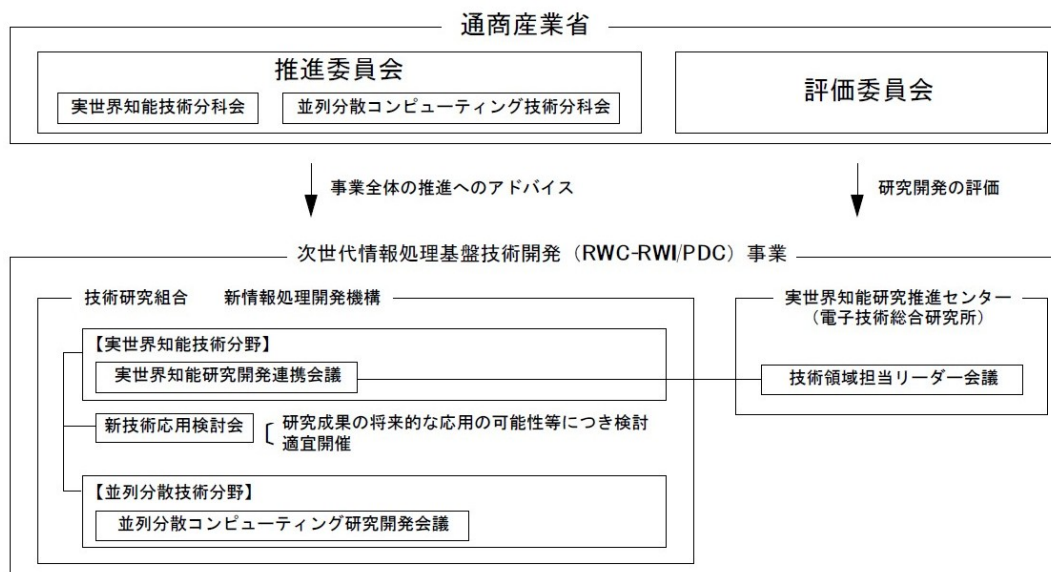


図 6: 後期の全体推進体制 [35]

¹³⁾ これは、当時の島田所長にとっては心安からぬ思いであったと思うが、TRC で孤軍奮戦する岡氏のサポートやプロジェクト全体を成功裏に導くための決断であった。

前述の基本方針に従って、それぞれの分野の研究開発テーマの絞り込みを行い、コア領域が設定された。

「実世界知能（RWI）」技術分野では、情報統合と学習・自己組織化の機能を共通の柱として、理論基盤の研究を行う「理論・アルゴリズム基盤領域」と、実際の応用場面に即した研究開発とが蜜に連携する体制が重要であるとの観点から、実世界知能の応用場面、すなわち知的システムがインタラクションする世界を人間（ユーザ）、情報世界、さらに実環境の3つの領域に分けて、それぞれ「マルチモーダル機能領域」、「自己組織化情報ベース機能領域」、「自律学習機能領域」を設定した。そして、それぞれ具体的なプロトタイプシステムに即して研究開発を進め、実世界知能の本質的な問題の解決と機能実証を行うことにした。さらに、これらの研究開発をハードウェアおよびソフトウェアの両側面から支援し、加速、評価するために、進化チップや光チップといった実時間・適応処理が可能な新しい適応デバイスの研究開発を行う「実世界適応デバイス領域」、そして各種の実世界情報データベース、ベンチマーク、ソフトウェアライブラリといった「研究開発用知的資源」の整備も重要であるとして、図7に示す研究開発体制となった[29][31]。

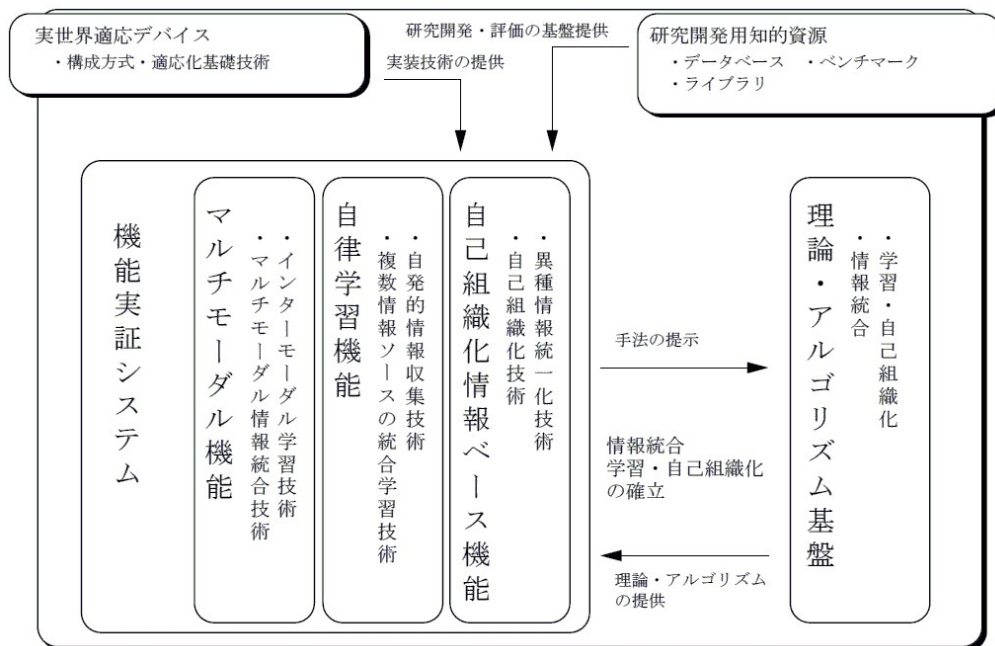


図 7: 実世界知能技術分野の構成 [35]

そして、電総研の実世界知能研究センター（RWIC）から、マルチモーダル機能領域は坂上勝彦氏（適応ビジョン・ラボ）、自律学習機能領域は松井俊浩氏（事情通ロボット・ラボ）、自己組織化情報ベース機能領域は橋田浩一氏（言語統合ラボ）、理論・アルゴリズム基盤領域は麻生英樹氏（学習統合基礎ラボ）、実世界適応デバイス領域は樋口哲也氏（進化システム・ラボ）、そして研究開発用知的資源は速水悟氏（情報統合対話ラボ）と浅井潔氏（RWC ライブラリ・ラボ）のラボリーダー達が推進担当を担うことになった。

また RWCP の集中研（TRC）では、前期に引き続き岡隆一氏が研究室長としてマルチ

モダル機能および自己組織化情報ベース機能の研究開発を行い、特に後者の自己組織化情報ベース機能領域全体の推進担当を担うことになった。

「並列分散コンピューティング (PDC)」技術分野では、「シームレス並列分散コンピューティング技術領域」を中心に、「並列アプリケーション技術領域」、「マルチプロセッサコンピューティング技術領域」¹⁴⁾の3領域が設定され、光インタコネクションはシームレス並列分散コンピューティング技術領域での要素技術と位置づけられた (図8) [30][31]。

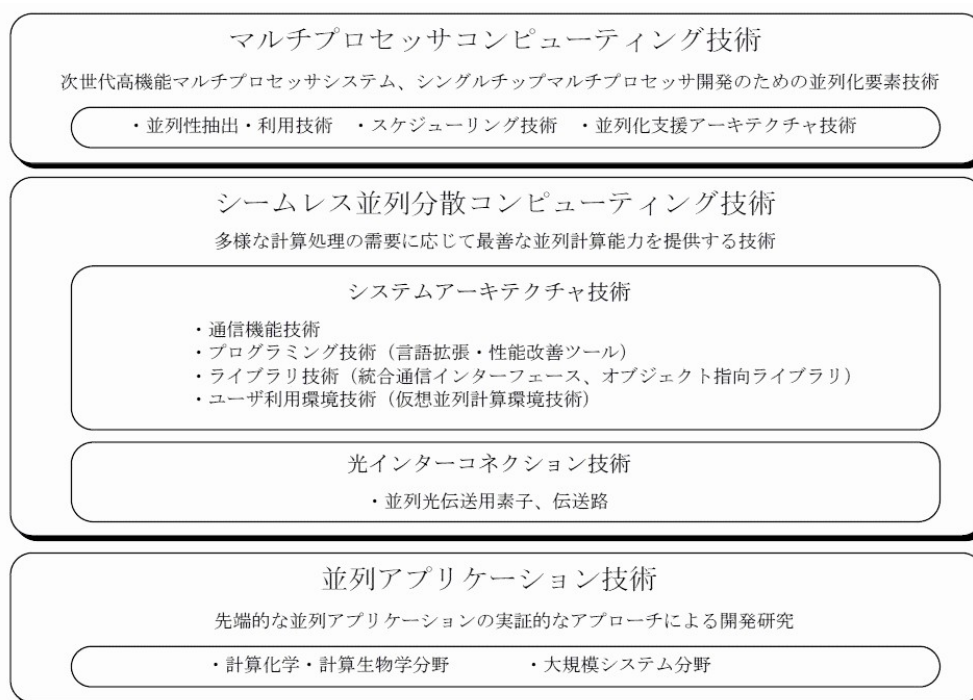


図 8: 並列分散コンピューティング (PDC) 技術分野の構成 [35]

そして、TRC では、前期に引き続き石川裕氏が並列分散システムソフトウェア研究室長、新たに電総研から佐藤三久氏が出向して同パフォーマンス研究室長、また東京工科大から工藤知宏氏が同アーキテクチャ研究室長、電総研から京大へ転出していた秋山泰氏が並列応用研究室長となって、この分野の推進を担うことになった。

具体的な後期の研究テーマは、表3 (RWIC) および表4 (RWCP) に示す通りである。

表 3: 後期における電総研「実世界知能 (RWI) 研究センター」での研究テーマ

RWI 領域	センター内ラボ	研究テーマ
マルチモダル機能	適応的ビジョン (坂上勝彦)	適応的ビジョンシステム
	情報統合対話 (速水悟)	音声と画像の統合による対話
自律学習機能	事情通ロボット (松井俊浩)	事情通ロボットの学習・統合型情報処理
自己組織化情報ベース機能	言語統合 (橋田浩一)	能動知能システムの評価
理論・アルゴリズム基盤	学習統合基盤 (麻生英樹)	学習統合型情報処理の理論基盤
	RWC ライブラリ (浅井潔)	並列システムの評価
実世界適応デバイス	進化システム (樋口哲也)	進化システムアーキテクチャの評価
	情報光学 (森雅彦)	高並列大容量演算システムの評価

¹⁴⁾ 2000 (H12) 年度から、分離して NEDO のアドバンスト並列化コンパイラ プロジェクトに引き継がれた。

表 4: 後期における組合（RWCP）研究室と研究テーマ

RWCP	RWI 領域	研究室	研究テーマ
TRC	マルチモーダル機能	同つくば	Cross Mediator におけるマルチモーダル対話システム
	自己組織化情報ベース機能	同つくば	Cross Mediator の構築
国内	マルチモーダル機能	日立	言語的ジェスチャ把握
		シャープ	非言語情報マルチモーダルインタフェース
		NTT	人間のマルチモーダル情報処理
		三菱	動的画像応答
		三洋	実世界モデル生成
	自律学習機能	富士通	移動エージェントを用いた自律学習機能
		MRI	自律学習移動ロボットのための音響環境理解
	自己組織化情報ベース機能	日立	画像情報の計量化と可視化
		三菱	文書情報空間の自己組織化
		東芝	適応的状況認知のための自己組織化アーキテクチャの開発
	理論・アルゴリズム基盤	NEC	分散能動学習方式
		東芝	記号パターン統合
	実世界適応デバイス	NEC	再構成可能適応型デバイス
		松下	デジタル・スマートピクセルと光実装
海外	マルチモーダル機能	ISS → KRDL	顔と表情の頑健な認識
	自己組織化情報ベース機能	ISS → KRDL	ユーザ依存の自己組織化マルチメディア情報ベース
	自律学習機能	SICS	分散型実時間自律行動系
		SNN	能動的地図獲得とセンサー情報表現
	理論・アルゴリズム基盤	SNN	確率的知識表現および能動的意思決定
		GMD	開かれた環境における能動学習と情報統合
		SICS	統計的パターンコンピューティング
RWCP	PDC 領域	研究室	研究テーマ
TRC	並列分散システム	ソフトウェア	コンピュータクラスタ上の基本ソフトウェア
		パフォーマンス	並列アプリケーションの探索的技術開発及び性能解析
		アーキテクチャ	省電力型高速光転送向インタフェース技術
	並列応用	同つくば	並列処理によるタンパク質情報解析システム（PAPIA）
国内	並列分散システム	富士通	並列ネットワークサーバ
		NEC	並高性能並列分散計算機システム
		住金	サーバアプリケーションへの並列分散技術の応用研究
		日立	大容量データバス用光インターコネクション
		富士通	光インターコネクション用低電圧動作面型レーザの研究
		NEC	低消費電力光インターコネクション
		沖	高密度光バス
		住電	波長多重型光 LAN
		フジクラ	スキュー低減型多芯高速伝送路
		古河	無調芯型面発光 LD モジュール
		日板	空間分割多重光インターコネクション
		日立	ヘテロジニアスコンピューティング共通インタフェースソフト
	並列応用	三菱	物理・統計融合型シミュレーション
		MRI	電力分野における並列情報処理の応用
		東芝	並列分散データマイニング
		三洋	マルチメディアデータベースの並列分散処理
海外	並列分散システム	GMD	大規模応用のための高機能データ並列プログラミング

RWI 分野は、分散研のテーマの方向付けや領域配置に電総研が介入することによって、本来らしい新規性のあるテーマが揃って連携が強化された。また、PDC 分野も、TRC を中心に、マシン開発を離れて PC クラスタを光通信基盤技術を含めてシームレスに繋いだ「並列分散システム」のソフトウェア環境の開発とその並列応用に集中することで、目標が明確となり、分散研との連携も強化された。

また、消えそうになった大学等への再委託も、各分散研あるいは TRC から、それぞれの研究開発に直接関連し実質有益と思われる所を限定採択することで再開され、産学官の連携が促進された。RWI 分野は 19 件、PDC 分野は 11 件であった（詳細は [35]）。

5. 成果とその後

本プロジェクトの内容や成果については、学会誌の特集 [21] や国際会議（例えば [18] [19]）、節目に応じて開催された RWC'92 ワークショップ [16] や RWC シンポジウム（'94, '95, '97, '98, '00, '01）の形で公開發表された。また、組合（RWCP）機関誌としての RWC NEWS（[1] に収録）が、1995 年 4 月の創刊号以来、毎年度四半期をベースとして発行され、上記シンポジウム報告を含め進捗状況や関連情報の広報活動として広く研究機関等に配布された。電総研 RWIC も、年度の論文集を大学等へ配布した。成果の概略については、例えば学会誌の特集 [38]、また全体の詳細な成果内容については総合報告書 [35] を参照されたい。

5.1 前期の成果

中間見直しの最中ではあったが、RWC 中間成果発表会として RWC'97 シンポジウムが 1997 年 1 月に東京（ホテルニューオータニ）で開催され、600 名を超える参加者で盛況であった。前期の探索的なフェーズにも係わらず、幾つかの時代を先取った成果がデモを含めて発表された。例えば、顔認識、手話翻訳、マルチモーダルなマンマシン対話¹⁵⁾、実環境における自律学習ロボット、「遺伝子 (GA) チップ」を組み込んだ進化ロボットや「意識チップ」を組み込んだヘビロボットの強化学習のデモ、並列コンピュータ EM-X のデモや RWC-1 の展示、PC クラスタのデモ、並列応用としての蛋白質構造予測など、また RWC-1 に採用予定の光デバイスや光インタコネクション、光ニューラルネット、人工網膜チップ、光ファジー制御など、RWC らしい技術や理論の芽が出て、後期のコアとなる方向性が出揃い始めていた。その詳細は RWC NEWS [26] に報告されている。特に、「コンピュータワールドとリアルワールド」のタイトルで特別招待講演を行なった評論家の立花隆氏（当時東大客員教授）は、RWC の理念を鋭く捉えていて流石であった [27]。

また、最後の特別セッションでは、中間見直しでの後期体制について担当の藤本康二氏（通産省電子政策課 課長補佐）から説明があり [28]、それを受けて、実世界知能（RWI）分野担当となる筆者と、並列分散コンピューティング（PDC）分野担当となる島田潤一 TRC 所長から、それぞれの分野の概要紹介が行われた [29][30]。

¹⁵⁾ 後日、北米の科学雑誌記者が取材で電総研を訪れ、「筑波に（SF 映画の）HAL 9000 が実現！」と報じた。

5.2 後期の成果

このような後期体制のもと、産官学一体となって研究開発が進められ、世界の最先端に行く多くの顕著な成果が得られた（詳細は [1] や [35] を参照されたい）。

実世界知能（RWI）分野では、手話認識、ジェスチャ認識、情報支援するウェアラブル・ビジョンシステム、実環境での対話音声や物音の認識、言い淀みを検知して補完する音声検索技術、視覚と音声認識・言語処理を統合した次世代インタフェースとしてのマルチモーダル対話システム、さらにそれをセンサ情報と統合した対話学習型の移動ロボット（Jijo2）、基礎としてのインターモーダル学習理論、分散能動学習方式、ベイジアンネット構築ツール（BAYONET）、また膨大な言語情報ベースの自己組織化、意味的情報検索、メディア間のインターモーダルな検索（CrossMediator）、光を含む適応・進化ハードウェアデバイスの開発と応用（超高速視覚や筋電義手）など、また、並列分散コンピューティング（PDC）分野では、シームレス並列分散コンピューティング技術としての高速ネットワーク（RHiNET）やクラスタシステム基本ソフトウェア（SCore）、並列コンパイラ（Omni OpenMP）、異種シミュレーションの統合技術や、並列応用としての蛋白質構造予測シミュレータ（PAPIA）など、そして各種光デバイスや光インタコネクション技術である。

2001 年 10 月 3 日～5 日、本プロジェクトの研究成果の集大成として「RWC2001 最終成果展示発表会」が東京お台場の会議場で開催され、600 を超える幅広い企業・大学・研究機関から 2,000 人を超える多数の来場者を得て、盛況裡に終了した。その詳細（開催報告）については、RWC NEWS Vol. 20 (最終号) [34] に詳しいので参照されたい。組合員企業内の事業部門や一般企業等の潜在的ユーザー等に広く理解を得るとともに、実用化等の次なる展開への意味ある契機になったと思われる。

10 年の RWC プロジェクトは総合報告書の形にまとめられ [35]、最終評価を受けた。

経済産業省に設置された本プロジェクトの評価委員会（産業構造審議会 産業技術分科会 評価小委員会「次世代情報処理基盤技術開発」評価ワーキンググループ）においても、「本プロジェクトは、ほぼ適切に実施され、その研究成果としては世界的にも評価される研究成果が得られたことから、研究開発プロジェクトとして、総じて成功を収めたと総括する。」という結論の評価報告書 [36] がまとめられ、高く評価されたものと理解している（付録 B に評価報告書の一部抜粋を参考までに添付する）。

研究組合 新情報処理開発機構（RWCP）そして産総研 RWIC もその役割りを終え、2002 年 3 月末日に解散する運びとなり、PWC プロジェクトは終了した。

5.3 その後

TRC（集中研）および RWI 研究センター、また企業分散研で活躍したリーダー達の多くは、その後東大はじめ幾つかの大学へ転出して学生指導に当たられているようである。

筆者も大学（東大の知能機械情報学専攻）からの誘いを受けていたが、RWC プロジェクトの最終年度でもあり、電総研から独法化で産業技術総合研究所（産総研）となったばかりで RWC 仲間のことが気になり、併任ならとの条件で引き受け、6 年間併任した。

そこでは、正に RWC の流れを引き継ぐ形で文科省の「21 世紀 COE プログラム：実世界情報システムプロジェクト（情報理工学系研究科）」[40] が 2001 年から始まり、これに参画した。また、パターン認識や知能情報処理分野で学生指導を行なった。RWC の準備と推進で 13 年間近く空白となっていた学会活動や自身の研究（主に HLAC や CHLAC を用いた学習型映像認識）¹⁶⁾ を再開でき、若手人材の育成や多くの賞にも繋がった。

また、RWC プロジェクトでの成果を生かすべく、産総研では坂上勝彦氏や樋口哲也氏のグループと共に、筑波大学（連携大学院）を巻き込み、2002 年から文科省の「都市エリア産学官連携促進事業-育成型：都市生活支援インテリジェント情報技術」、2005 年からは「同-発展型：次世代知的監視システム」のプロジェクト、さらに 2006 年からは科学技術振興調整費 重要課題解決型研究等の推進で「交通事故対策技術の研究開発：状況・意図理解によるリスクの発見と回避」のプロジェクトを行なった。

また、TRC から産総研に戻った秋山泰氏と浅井潔氏は、「生命情報工学研究センター」を設置し、RWCP の成果を利用した大規模 PC クラスタシステム（1024 cpu）を駆使して、RWC プロジェクトでの蛋白質構造解析などの研究を本格展開した。また、RWI 分野の理論基盤領域やマルチモーダル領域などで活躍した若手研究者は「サービス工学研究センター」で研究をさらに展開した。

近年になって、RWC プロジェクトで提唱した「実世界知能」の研究開発分野は、世界のトレンドとして成長していて、巷でも AI（人工知能）ブームとなっている。Deep Learnig（より多層で複雑なニューラルネットワークの学習）などのベイズ推定の手法の進歩による認識性能の向上とも相まって、Google をはじめとした多くの IT 企業が、資金に物を言わせて膨大なデータを駆使した学習や情報統合型の AI の実用研究開発に力を注いでいる。

負けじと経産省の後押しもあって、RWI 研究センターから 15 年近く経った 2015 年に、産総研に「人工知能研究センター」が設立され¹⁷⁾、我が国の AI 研究拠点として実応用を目指すことになった。電総研時代に RWI 研究センターの理論ラボにいた麻生英樹氏と本村陽一氏（ベイジアンネット 세미나 を主催していた [39]）が副センター長として頑張っているようだ。その意味では、RWC-RWI の流れは生きていると思われるし、今日やっと機が熟したように思われる。「老兵は死なず、ただ消え去るのみ」の心境でもある。

6. まとめ（考察と展望）

以上、RWC プロジェクトが何を目指していたか、その理念は何であったかを、私見も交えて回顧し、その経緯や成果等について述べた。

これまで、ICT（情報通信技術）の重要性が叫ばれてきたが、その指すところはインターネットや iPhone などのモバイル情報端末に代表される、いわゆるインフラとしての通信を主体とした狭義の情報処理の技術である。しかし近年、そうしたインフラの上でどのよ

¹⁶⁾ RWC プロジェクトでも、一部、顔認識やマルチモーダル対話システム等に使われた。

¹⁷⁾ 折角、RWC プロジェクトで実世界知能分野を推進して先鞭を付けたのに、遅きに失した感もあるが。ちなみにセンター長は、マイクロソフト・リサーチ・アジアの主席研究員をされていた元東大教授の辻井潤一氏である。

うな新しい知的情報処理の応用やサービスを展開していくかが益々重要となってきた。いわばインフラから「スープラ」への移行である。

RWC（実世界情報処理）プロジェクトは、未だコンピュータの性能も幼く、インターネットも始まったばかりの頃の四半世紀前に、今日のそのような将来を見据えて、インフラとスープラの次世代情報基盤技術を育てたプロジェクトであった。そして、人間の持つ柔軟な知能「実世界知能」の工学的実現は、実応用の基盤技術として、自動監視や自動運転を始めボトルネックとなっていた実環境での様々な知的応用、さらには、文字のみならず画像や音声などの多種多様な情報が氾濫し正に「実世界化」しているサイバースペースでの種々の知的検索やサービスにおいても、新たな実応用の地平を切り開くキーテクノロジーの一つとして、今後ますます重要性を増すものと思われる。その意味では、早過ぎた（また宣伝不足もあったかも知れない）が、今日の、そしてなお今後の新しい情報処理技術の流れを作る先導的なプロジェクトであったと自負している。

ただ、昨今の世界的な AI ブームを見るに、折角に先導的で、しかも実用化に近い多くの成果を生んだ RWC プロジェクト、特に RWI（実世界知能）分野の成果が、参加企業を始め、国内企業でのその後の実用化にうまく引き継がれなかったのは残念である。企業における研究所と事業部との連携不足、不況の折、先進的技術のリスクよりは目先の ICT、国プロが終われば全てめでたく終わりの伝統的体質、等々いろいろ理由や事情は考えられる。

確かに、国プロも伝統的に「打ち上げ花火」的な性格があった。本当は、その後の実用化を助成する制度などが有機的にリンクした「仕掛け花火」が重要であるのだが。いずれにせよ、RWC プロジェクトを最後に国主導の大型研究開発プロジェクトは終了して NEDO に移り¹⁸⁾、小口の公募的な制度になったように思える。単に縦割りの短期開発型プロジェクトの束ではなく、当初の RWC 計画のような先導的かつ包括的なプログラム（研究計画）も、相互作用により真に先進的で革新的な基盤技術を醸成するためには必要と思われる。

最後に、産総研 AI センターの再度の活躍と、RWC プロジェクトで育った多くの人々、また本稿を読んで何らかの刺激やヒントを得た若手研究者が奮起して活躍し、我が国の関連分野の研究や技術レベルの向上に繋がることを願って、筆を置くことにしたい。

謝辞

本稿をまとめる上で、RWC プロジェクト Web アーカイブの「RWCP メモリアル」[1]が大変役に立った。サイトの立ち上げと保存に関して、元 RWCP 専務理事の青柳桂一氏はじめ関係者の皆様に感謝致します。そして、島田潤一所長はじめ、本プロジェクトを長きに渡って共に遂行し研究開発に携わった多くの皆様、とりわけ、筆者を支え RWI 研究センターの運営に尽力頂いた坂上勝彦氏、樋口哲也氏はじめ、ラボリーダーを担って頂いた皆様に、この場を借りて改めて感謝の意を捧げたいと思います。

¹⁸⁾ 政策立案と研究開発推進の役割分担が理由とのことだが、RWC プロジェクト参加の或る企業の社長が、参加も知らずに某所で「通産省の大艦巨砲主義のプロジェクトはアナクロだ」と批判発言したのが理由だとの説もある。一方で、やはり国プロは必要との企業の声もある。

参考文献

- [1] 「RWCP メモリアル」, 10 年史 (下記文献 [13, 31, 35, 36] など貴重な資料や RWC NEWS などの資料を保存). (<http://keima.la.coocan.jp/rwcp/memorial/index.html>)
- [2] 日本のコンピュータ：黎明期のコンピュータ, 情報処理学会コンピュータ博物館. (<http://museum.ipsj.or.jp/computer/dawn/index.html>)
- [3] 高橋茂: 通産省と日本のコンピュータメーカ, 情報処理学会 連載：日本の情報処理技術の足跡, IPSJ Magazine, Vol. 44, No. 10 (Oct. 2003). (<http://museum.ipsj.or.jp/guide/pdf/magazine/IPSJ-MGN441015.pdf>)
- [4] N. Otsu: An Invariant Theory of Linear Functionals as Linear Feature Extractors, Bull. ETL, Vol. 37, No. 10, pp. 893–913 (1973).
- [5] N. Otsu: Nonlinear Discriminant Analysis as a Natural Extension of the Linear Case, *Behaviormetrika*, Vol. 2, pp. 45–59 (1975).
- [6] 大津展之: 「パターン認識における特徴抽出に関する数理的研究」, 電子技術総合研究所 研究報告, 第 818 号, 210 頁 (1981).
- [7] N. Otsu: Optimal Linear and Nonlinear Solutions for Least-square Discriminant Feature Extraction, Proc. of 6th Int. Conf. on Pattern Recognition, pp. 557–560 (1982).
- [8] 田村浩一郎, 大津展之, 宮川正弘, 梅山伸二, 栗田多喜夫, 麻生英樹: 「柔らかな論理に関する調査研究」, 電子技術総合研究所 調査報告, 第 211 号, 136 頁 (1985).
- [9] 大津展之: 認識と理解のための柔らかな論理, 電子情報通信学会誌, Vol. 71, No. 11, pp. 1231–1240 (1988).
- [10] N. Otsu: Toward Soft Logic for the Foundation of Flexible Information Processing, Bull. ETL, Vol. 53, No. 10, pp. 75–95 (1989).
- [11] 大津展之, 栗田多喜夫, 麻生英樹: 非線形形式化による多変量解析手法の統一的考察, 「人間行動の計量分析」 柳井晴夫 他 編, 第 5 章, pp. 113–127, 東京大学出版会 (1990).
- [12] 「新情報処理技術調査研究委員会報告書」, 通産省 機情局 電子機器課 編 (Mar. 1991).
- [13] 「リアルワールドコンピューティング・プログラム基本計画書」, 通産省 機情局 電子機器課 編 (May, 1992) in [35].
- [14] N. Otsu: Toward Flexible Information Processing: Theory and Novel Functions, Japan Computer Quarterly, JIPDEC, No. 89, pp. 9–17 (1992).
- [15] 大津展之: 理論と新機能 — 柔らかな情報処理を目指して, リアルワールドコンピューティング特集, Computer Today 5 月号 No.49 (1992).
- [16] 大津 他: RWC'92 ワークショップ, 機械振興 四次元コンピュータ特集, Vol. 25, No. 6 (1992).
- [17] 特集: 「やわらかな情報処理への挑戦」, 日経コンピュータ, 4 月号 (1993).
- [18] N. Otsu: Toward Flexible Intelligence – MITI's New Program of Real World Computing, *invited paper*, Proc. IJCAI-93, Vol. 1, pp. 786–791 (Chambery, 1993).
- [19] N. Otsu: Real World Computing Program – Overview, Theory and Novel Functions, Proc. IJCNN-93, pp. 1065–1070 (Nagoya, 1993).
- [20] 大津 他: リアルワールドコンピューティング研究計画における電総研の役割と研究体制 – RWC 特集への序論 – 他, 電子技術総合研究所 彙報, Vol. 12 (1993).
- [21] 大津 他: 情報処理の新たなパラダイムを目指して 他, 情報処理学会誌, RWC 研究計画 特集, Vol. 34, No. 12 (1993).
- [22] 大津展之: リアルワールドコンピューティング研究計画 – 実世界における柔軟な知能を目指して, 人工知能学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 358–364 (1994).
- [23] Zadeh: Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, Communication of the ACM, Vol. 37, No. 3, pp. 77–84 (March 1994).
- [24] 松原浩司 (電子機器課): RWC をとりまく最近の状況, RWC NEWS, Vol. 1 (Apr. 1995).
- [25] 大津展之: RWC 研究開発の動向 (現状と展望), RWC NEWS, Vol. 2 (Jul. 1995).
- [26] RWC 1997 中間成果展示発表会 (Jun. 1997), 同報告 in RWC NEWS, Vol. 8 (May. 1997).
- [27] 立花隆: コンピュータワールドとリアルワールド, RWC 1997 特別招待講演, *ibid* (1997).

- [28] 藤本康二（電子政策課）：次世代情報処理基盤技術開発事業の全体概要, RWC 1997 特別セッション, *ibid* (1997).
- [29] 大津展之: 実世界知能技術について, RWC 1997 特別セッション, *ibid* (1997).
- [30] 島田潤一: 並列分散システムについて, RWC 1997 特別セッション, *ibid* (1997).
- [31] 「次世代情報処理基盤技術開発 (RWC-RWI/PDC) 事業基本計画」, 通産省 機械情報産業局 編 (May, 1997) in [35].
- [32] 次世代情報処理基盤技術開発 (RWC-RWI/PDC) 事業の概要, 通産省 機械情報産業局 電子政策課, RWC NEWS, Vol. 9 (Aug. 1997).
- [33] 田中英彦, 大津展之, 島田潤一: RWC 後期プロジェクト特集, RWC NEWS, Vol. 10 (Nov. 1997).
- [34] RWC 2001 最終成果展示発表会 (Oct. 2001), 同報告 in RWC NEWS, Vol. 20 (Nov. 2001).
- [35] 「次世代情報処理基盤技術開発事業 総合報告」, 技術研究組合 新情報処理開発機構 編 (Feb. 2002) at [1].
- [36] 「次世代情報処理基盤技術開発」プロジェクト評価（事後）報告書, 産業構造審議会 産業技術分科会 評価小委員会「次世代情報処理基盤技術開発評価 WG」編 (Feb. 2002) at [1].
- [37] 大津展之: 人工知能の変遷と動向, 電気学会誌, Vol. 122, No. 4, pp. 240-243 (2002).
- [38] 大津 他: 特集「RWC – 実世界知能」, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 2 (2002).
- [39] 大津展之: 実世界情報処理とベイジアンアプローチ, 人工知能学会主催 ベイジアンネットセミナー資料 (<https://staff.aist.go.jp/y.motomura/bn2002/paper/Otsu.pdf>) (2002).
- [40] 「人と共存するコンピュータ・ロボット学 — 実世界情報システム」, 佐藤知正 編, 292 頁, オーム社 (2004).

付録 A: パターン認識研究の概要

1970 年代に行なった筆者の研究の概要である。パターン認識の理論研究を行うに当たって、まずその一般的な枠組を押さえた原理的な側面を数理的に考察することにした。

パターン認識は、一般に関数 $f(\mathbf{r})$ で表されるパターンに対し、その属する類（カテゴリ） C_j を対応付ける決定過程である。パターン（関数空間）から類（ラベルの離散集合）へ直接対応付けるのは困難なので、通常、パターンから何らかの特徴量 y_i を n 個抽出して、それら n 次元ベクトル $\mathbf{y}$ の張る特徴空間 Y （ベクトル空間）を間に設けて考える。

各類のパターンは変形やノイズによりばらつき、特徴空間での確率分布 $p(\mathbf{y}|C_j)$ を成す。また、各類の起きる先験確率を $P(C_j)$ とする。この時、統計的（ベイズ）決定理論の応用として、入力パターン $(\mathbf{y})$ をベイズの事後確率

$$P(C_j|\mathbf{y}) = P(C_j)p(\mathbf{y}|C_j)/p(\mathbf{y})$$

最大の類に決定する識別法（ベイズ識別）が、平均誤り確率最小の意味で最良の識別法となることは知られていた（Chow, 1957）。しかし、この理論は何らかの特徴抽出がなされている場合の最適な識別法を与えるものであって、どのような特徴を抽出すべきかは、重要であるが、別問題として残っていた。従って、個別認識対象に応じた種々のアドホックな手法が提案されていたが、特徴抽出の基本的な枠組について理論的観点から深く考察を押し進めることが重要と考えた。

特徴抽出には、幾何学的側面としての不変特徴抽出と、統計的側面としての判別特徴抽出が考えられ、それぞれに応じた２段階の特徴抽出が必要となる。

不変特徴抽出理論（幾何学的側面）

まず、パターンとしての観測像 f は、対象と認識主体との相対的な位置関係や運動により、平行移動、大小伸縮、回転など、さまざまな幾何学的変換を受けている。しかし我々は、これらの変換に関わらず対象がパターンとして何であるかを認識し、同時にそれがどのように変換を受けているかを認識できる（そのような変換を、パターンとしての認識を不変に保つ意味で不変変換と呼ぶ）。従って、このような認識が可能であるためには、どのような特徴量を観測像から抽出すればよいかという問題を理論的に考察することが重要である。これは特徴抽出の幾何学的側面である。

一般に、パターンを関数 f 、特徴量を x 、特徴抽出を汎関数 $x = \Phi[f]$ 、不変変換を作用素 $T(\lambda)$ で表すとき、類を規定する特徴は、まず不変変換に対して不変でなければならない。

$$\Phi_{inv}[T(\lambda)f] = \Phi_{inv}[f]$$

通常、位置合わせなど、正規化と呼ばれるパターンの前処理で済ませることが多いが、一般に連続群 (Lie 群) をなす不変変換のもとでの不変量 (不変特徴) を求めることが出来る。つまり、線形特徴抽出 $\xi = \int g(\mathbf{r})f(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$ をベースに無限小作用素を考えることにより、上記の不変特徴の条件は、 g や ξ に関する線形偏微分方程式に帰着され、その基本解として不変特徴の組 x_i が得られる。またこの理論により、逆にパターンがどれだけ変換を受けているか (λ) を計る特徴量も与えられ、

$$\lambda = \Phi_{var}[T(\lambda)f] - \Phi_{var}[f]$$

パターンとしての形 f の認識と変換 $T(\lambda)$ の認識の基礎理論となる [4][6]。

判別特徴抽出理論 (統計的側面)

不変特徴は原理的に認識に無関係な情報を捨棄したパターンの表現であり、不変特徴抽出により、不変変換で移り合う原理的に同値なパターンの集合 $T(\lambda)f$ は同値類として不変特徴空間 X の一点 (ベクトル $\mathbf{x}$) で捕らえられる (正規化処理は不要)。

しかし実際のパターンは許容しえる不規則な変形やノイズを伴っていて、理想的な点の回りの確率統計的な分布となる。従って、実際に認識に有効な特徴は、不変特徴 $\mathbf{x}$ に持ち込まれたこれらの確率統計的構造に基づいて、さらに抽出されることになる。これは特徴抽出の統計的側面である。

一般に判別特徴抽出は、 m 次元不変特徴空間 X から認識に有効なより少数次元 ($n < m$) の判別特徴空間 Y への写像 $\mathbf{y} = \Psi(\mathbf{x})$ として表され、最適な Ψ は、 Y での評価基準と X におけるパターンの確率統計的構造から求まることになる。

線形特徴抽出の場合には、 Ψ は $m \times n$ 行列 A を用いて、 $\mathbf{y} = A'\mathbf{x}$ となる (ここに A' は A の転置行列)。この場合、ノンパラメトリックな多変量解析手法がある。特に類が既知の場合のいわゆるパターン認識においては、良い特徴の条件は、同一類内は近くに集め異なる類間は遠くに区別すること、つまり類の分離を強調する判別的な特徴であることである。判別分析はこの場合の有力な手法である。判別基準は、 Y での類間分散を類内分散に対して大きく、つまりそれらの比を最大、一般には、 Y での類間、類内共分散行列をそれぞれ B_Y, W_Y とするとき、写像関数 Ψ の汎関数

$$J[\Psi] = \text{tr}(W_Y^{-1}B_Y)$$

を最大にすることである。

線形判別分析の場合には、 X での類間、類内共分散行列をそれぞれ B_X, W_X として、最適な写像行列 A は固有値問題

$$B_X \mathbf{a}_i = \lambda_i W_X \mathbf{a}_i$$

の最大 n 固有値に対応する固有ベクトルを列とする行列として求まる (ただし K を類の数として、 $n \leq \min(K-1, m)$)。特に 2 類の判別の場合には、唯一の非負固有値が得られ、Fisher の線形判別関数 (Fisher, 1936) を与える。

このように、実用的な観点から線形写像 (変換) に限定することで、データの簡単な 2 次までの統計量から解が得られる訳であるが、これは本質的な構造の線形近似に他ならないのは明らかである。実際、判別基準の「類内は近く、かつ類間は遠く」と言った二律背反的な要請は、線形写像の限界と本質的に非線形写像の必要性を示している。従って、線形制約を取り去って一般の非線形写像の場合の最適解を求めれば、背後の本質的な構造が明らかになると考えた。

多変量解析の専門家に聞くと、線形だから解けるのであって非線形の場合は無理だろうとの答えであった。しかし、評価関数が未知写像関数の関数、従って汎関数として陽に与えられているので、その最適化は変分問題の停留条件として解ける筈との思いから挑戦した。計算はかなり面倒でここでは省略するが、何と綺麗な解が得られた。その究極的に最適な非線形判別写像 (特徴抽出) は

$$\mathbf{y} = \Psi_D^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^K P(C_j|\mathbf{x}) \mathbf{c}_j$$

で与えられ、ベイズ事後確率（確率的推論）、従ってまたベイズ識別と密接な関係を持つことが示された。ここに、 Y における $\mathbf{c}_j$ （類の代表ベクトル）は、 X での各類の確率分布構造の絡みを要約した $K \times K$ の推移（条件付き）確率行列 $S = [s_{ij}]$,

$$s_{ij} = \int P(C_j|\mathbf{x})p(\mathbf{x}|C_i) d\mathbf{x} = P(C_j|C_i)$$

の最大 n 固有値（ただし、 $n \leq K-1$ ）に対応する固有ベクトルを列とする行列の行ベクトルとして求まる [5][6]。そして、最適写像の式から分かるように、元の分布 $p(\mathbf{x}|C_j)$ に依らず、写像先の判別特徴空間 Y は最大 $K-1$ 次元の単体となり、その簡単な重心分割がベイズ識別境界となっている。

同様な判別写像は、重回帰分析の観点から次の最小 2 乗判別の問題としても定式化できる。

$$\varepsilon^2[\Psi] = \sum_{j=1}^K P(C_j) \int \|\Psi(\mathbf{x}) - \mathbf{e}_j\|^2 p(\mathbf{x}|C_j) d\mathbf{x}$$

すなわち、 Y に設定した正規直交基底 $\mathbf{e}_j$ (j 要素のみ 1 で他は零、 $\mathbf{e}_i' \mathbf{e}_j = \delta_{ij}$) を各類 C_j の代表ベクトルとして、各類がその周りに集まる平均 2 乗誤差を最小化する問題である。この場合には、変分法の停留条件も簡単に次式となり、

$$\delta \varepsilon^2[\Psi] = 2 \int \sum_{j=1}^K P(C_j) \{\Psi(\mathbf{x}) - \mathbf{e}_j\} p(\mathbf{x}|C_j) \delta \Psi(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 0$$

これが任意の変分 $\delta \Psi(\mathbf{x})$ に対して成り立つ条件から最適解は容易に求まり、非線形判別写像と同様な形となる [6][7]。

$$\mathbf{y} = \Psi_R^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^K \frac{P(C_j)p(\mathbf{x}|C_j)}{p(\mathbf{x})} \mathbf{e}_j = \sum_{j=1}^K P(C_j|\mathbf{x}) \mathbf{e}_j$$

先の非線形判別分析（写像）は、この固定された $\mathbf{e}_j$ の配置を更に最適化したものとなっている。

また、平均 2 乗誤差基準 $\varepsilon^2[\Psi]$ は、後に提案されたニューラルネットの逆伝播学習（1986）での出力の評価基準に同じであり、 $\Psi_R^*(\mathbf{x})$ は、その一般の非線形の場合の最適解を陽に与えている。

このとき達成される最小平均 2 乗誤差は次式で与えられ、理論的な下限を与えている。

$$\varepsilon^2[\Psi_R^*] = 1 - \text{tr } \Gamma$$

ここに、 $\Gamma = [\gamma_{ij}]$ は各類の確率分布構造の絡みを要約した類間の同時確率の $K \times K$ 行列である。

$$\gamma_{ij} = \int P(C_i|\mathbf{x})P(C_j|\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x} = P(C_i \wedge C_j)$$

ベイズの公式を用いると、先の推移確率 s_{ij} とは次式の関係にあることが分かる。

$$P(C_i)s_{ij} = P(C_i)P(C_j|C_i) = P(C_i \wedge C_j) = \gamma_{ij}$$

柔らかな論理と柔らかな情報処理

上記の最適非線形判別写像は、ベイズ推定を空間的に具現した構造を示していて、判別特徴抽出とベイズ推定・識別との密接な関係を示している。そして、そこでの知識（統計量）は、線形の場合の 2 次統計量ではなく、類間の含意（推移確率） S や論理積（同時確率） Γ と言った、概念（類）の下部レベルにある特徴との確率構造の絡みを統計的に要約した帰納的確率論理としての「柔らかな論理」を示唆していて、 $P(C_i \wedge \bar{C}_i) \neq 0$ からも、排中律が成立しない直観論理の一種となっている。

このように、ベイズ推定は、パターン認識、確率的推論、さらにはニューロコンピューティングや多変量解析手法など、「柔らかな情報処理」の背後の本質的な枠組を成していることが分かる。

また、与えられたデータ D にモデル M を当てはめて理解する、いわゆるモデル推定の手法として、正則化手法（エネルギー最小化とも呼ばれる）があるが、これは形式的に次式で定式化される。

$$E[M] = \|D - M\|^2 + k\rho(M) \rightarrow \min \text{ for } M$$

ここに、第一項は誤差項、 $\rho(M)$ は制約項としてのモデルの不適切さの関数、 k は制約の重みである。

これと等価な次式で考えると、

$$e^{-E[M]} = e^{-\|D-M\|^2} e^{-k\rho(M)} \rightarrow \max \text{ for } M$$

右辺の第一項は尤度 $p(D|M)$ 、第二項は先験確率 $p(M)$ と見なせて、結局は、正規化係数倍を除き、

$$e^{-E[M]} = p(D|M)p(M) = p(M|D)p(D) \rightarrow \max \text{ for } M$$

つまり、正則化手法も、与えられたデータ D の下での事後確率 $p(M|D)$ が最大となるモデル M を選択するベイズ推定となっていることが分かる。

付録 B: 最終事後評価報告書 [36] からの抜粋

3. 研究開発実施者の事業体制、運営の妥当性

(1) 事業体制の妥当性

研究実施者の事業体制については、国内・国外の企業・研究機関にひろく跨り、多くの技術的知見を集める研究体制であり、国家プロジェクトにおける国研、民間企業、大学の三者の相互連携の新しいあり方を示したことから、概ね妥当である。

実世界知能技術分野においては、産官学が有機的な連携により各々の役割を果たすことが必要であり、研究開発の詳細内容の策定、実施等において産業技術総合研究所 RWI 研究班¹⁹⁾ (旧電子技術総合研究所) が先導的役割をになって分散研と連携し、並列分散コンピューティング技術分野においては、RWCP の集中研が中心的役割を果たして分散研と連携するという事業体制は、産業技術総合研究所による統率・連携と民間の技術力を最大限に引き出して具体的成果をあげる上で適切であった。実施者の選定においては、それぞれの領域の目的に沿って RWCP 研究所長、産業技術総合研究所 RWI 研究班長等の指導力、統率力が発揮された。

(2) 運営の妥当性

プロジェクト後期においては、中間評価に基づき、意志決定、進捗状況の把握、計画見直しの検討が適切に行われ、プロジェクトリーダーのリーダーシップの下、本事業の基本理念として実世界知能分野においては情報統合、並列分散コンピューティングではシームレス並列分散の基本思想が後期の事業に適切に反映され、目的、目標の設定及び目標達成に成果があったことから、目標に向けた的確な運営管理がなされたことは評価できる。並列アプリケーションのテーマについては、分野の広さのため個別テーマ間の有機的連携は必ずしも有効に働かなかったが、それぞれ実用的な大規模問題を取り上げて、並列分散処理により問題解決するという典型例を示したといえる。

4. 計画と比較した達成度、成果の意義

次世代の情報技術の根幹をなす斬新な要素技術を研究開発するという全体的な目標は、多くのテーマで当初目標を達成していることから、概ね達成したと言える。

(1) 実世界知能技術分野

マルチモーダル機能の研究については、言語、音声、画像等の情報統合化という研究テーマに世界に先駆けて取り組み、研究当初の想定以上の成果を挙げたことの意義は大きい。自己組織化情報ベースの研究については、テキスト、音、映像等個別メディアについて有効な検索方法を多数見出すことができ、世界最高水準の研究結果が得られたと評価する。理論アルゴリズムの研究については、理論研究の各テーマにおいて、世界でトップレベルの研究成果が得られている。各研究成果の間の関係を整理し、全体として統合していくことは、今後の課題として残っている。自律学習機能の研究については、自律ロボットという目に見える形で統合したことから、当初の想定以上の研究

¹⁹⁾ RWI 研究センター。最終年度となる 2001 年に独法化で電総研は産総研となり、新規センターとの区別のために名称を班とされた。

成果を挙げることができたと評価できる。実世界適応デバイスの研究については、GA を活用した進化システムをハードウェア化し、多様な分野でその有効性を実証したことは高く評価され、進化計算の理論的な研究が、ハードウェアの設計に利用できることを示し、当初の想定を越えたその実用レベルでの製品化を行った意義は大きい。

(2) 並列分散コンピューティング技術分野

シームレス並列分散コンピューティング技術の研究については、RHiNET や SCore クラスタシステムソフトウェアなど、世界的に見ても高い水準の成果が達成されたことは意義深く、今後のコンピュータ技術の方向を示すことが出来たと評価する。並列アプリケーション技術の研究については、異種シミュレーションの統合技術を研究し、タンパク質の構造を統計予測とシミュレーションとを結合して予測することを可能にした。光インターコネクションの研究については、並列分散コンピュータの光によるシームレス化を目指して、キーデバイスの開発を行い、世界トップのレーザーを開発するなど重要な注目すべき成果を出しており、今後の光情報処理への可能性を示したことの意義は大きい。

(3) 成果の普及、広報

論文の発表は、質・量ともに十分であり、特許は適切に取得されている。オープンソフトウェアの公開、MPEG7 等の規格化等、必要に応じ成果の規格化に向けた対応も十分な努力がなされた。情報処理分野では国際標準化への寄与、あるいはデファクトスタンダードとなることで成果を達したと認められるものが多い。この意味で今後とも、成果物を国際標準等に寄与させる活動が望まれる。また、成果の広報については、成果発表会、シンポジウムの開催、メディアによる発表等が積極的になされた。なお、一部の評価意見として、海外分散研の活動が、その設置国内でどの程度広報されているかについては、必ずしも十分とは言えないとの指摘があった。

(以下、各要素研究毎の具体的な評価は省略。詳細は [36] を参照されたい。)

執筆者 略歴

大津 展之 (おおつ のぶゆき)

1971 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科計数(数理)工学専攻修士課程修了。同年 4 月 電子技術総合研究所入所。パターン認識の理論と応用、特に特徴抽出理論とその実践としての画像認識の研究に従事。工学博士。

1985 年 4 月 数理情報研究室長を経て、1990 年 4 月 電総研 首席研究官、1991 年 4 月 知能情報部長に就任。RWC (実世界情報処理) プロジェクト (1992-2001 年度) の策定と推進、特に実世界知能の研究推進に従事。1997 年 9 月 電総研 実世界知能研究センター長を兼任。

2001 年 4 月 独法化後の産業技術総合研究所フェロー研究員に就任。1992 年 4 月から 2010 年 3 月まで筑波大学連係大学院教授を併任。2001 年 4 月から 2007 年 3 月まで東京大学大学院情報理工学系研究科教授を併任。

2012 年 3 月 定年退職 (産業技術総合研究所 名誉リサーチャー)。

受理日：2016年5月3日
