

科学技術未来戦略ワークショップ (電子情報通信系俯瞰WSⅡ) 報告書



目 次

要 旨	i
第1章 はじめに.....	1
第2章 新しい研究開発推進モデル (SPIN)	5
2.1 デイペンダビリティからの要請	5
2.2 開いたシステムの開発のためのスパイラルモデル	5
2.3 新しいプロジェクト像	6
第3章 分科会の検討結果.....	9
3.1 IT の社会応用分科会.....	9
3.1.1 IT の社会応用分科会の目的.....	9
3.1.2 IT の社会応用の観点からのデイペンダビリティの意味の整理.....	9
3.1.3 IT の社会応用の観点からの技術の俯瞰.....	11
3.1.4 IT の社会応用プロセスの変革.....	13
3.1.5 生活ダイナミクスコンピューティング	15
3.2 ロボティクス・制御分科会	17
3.2.1 ロボティクス・制御研究領域の俯瞰方針	17
3.2.2 ロボティクス・制御研究領域の俯瞰.....	18
3.2.3 設計原理からの俯瞰	19
3.2.4 制御からの俯瞰	20
3.2.5 アーキテクチャからの俯瞰	20
3.2.6 人工知能からの俯瞰.....	21
3.2.7 社会へのグラウンディングからの俯瞰.....	21
3.3 ネットワーク分科会	23
3.3.1 “Dependable” を視点とする研究課題	24
3.3.1.1 ネットワーク分野におけるデイペンダビリティの捉え方	24
3.3.1.2 重要な研究領域	27
3.3.2 “Peta/femto” を視点とする研究課題	32
3.3.2.1 ネットワーク分野における Peta/femto	32
3.3.2.2 重要な研究領域	34
3.4 コンピューティング分科会	39
3.4.1 検討の前提	39
3.4.2 デイペンダビリティの概念	42
3.4.3 コンピューティングの階層	45
3.4.4 アーキテクチャ・VLSI の立場からの技術俯瞰	46
3.4.5 ミドルウェア, アプリケーションの立場からの技術俯瞰	49
3.4.6 コンピューティング分野の技術俯瞰図	52

3.4.7	コンピューティング分野の重要技術	53
3.5	エレクトロニクス/フォトニクス分科会	54
3.5.1	センサ技術	55
3.5.2	ストレージ（記憶デバイス）	56
3.5.3	集積回路・高速電子デバイス	58
3.5.4	フォトニクス	60
3.5.5	ディスプレイ	60
3.5.6	重要な研究領域	61
3.6	SPIN にマップした重要技術分野	63
第4章	分科会をまたがった横断的検討	67
4.1	WG-A	67
4.1.1	WG-A のまとめ	67
4.1.1.1	IT が目指すべき重要な方向性	67
4.1.1.2	生活ダイナミクスコンピューティング	68
4.1.2	全体問題	69
4.1.3	要素問題	69
4.1.4	新しいWG の必要性	70
4.2	WG-B1	70
4.2.1	検討の前提	70
4.2.2	検討の結果のサマリ	70
4.2.3	戦略提言	75
4.3	WG-B2	75
4.3.1	検討の前提	75
4.3.2	検討の結果のサマリ	75
4.3.3	研究分野へのマッピング	78
4.3.4	戦略提言	79
第5章	今後の展望	81
付 録		
1.	「電子情報通信系俯瞰WSII」プログラム	87
2.	親委員会・分科会メンバーリストおよび参加者リスト	88
3.	検討体制	93
4.	準備のスケジュール	94
5.	統合俯瞰図	96
執筆者一覧		98

要 旨

独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター生駒グループでは、電子情報通信系の技術を俯瞰し重要研究領域を抽出するため、平成17年9月に専門家約30名による俯瞰ワークショップを実施した。

このワークショップの実施にあたっての特徴は以下のとおりである。

1. 推進体制として**親委員会と5つの分科会**を設置し、親委員会は全体の統括を、各分科会は専門分野の俯瞰と重要研究領域の抽出をそれぞれ担当した。5分科会としては、技術と社会との関わりを意識して、比較的要素技術の性格の強い**ネットワーク、コンピューティング、エレクトロニクス/フォトニクス**の3分科会と、これらを横断的に統合する性格の強い**ITの社会応用、ロボティクス・制御**の2分科会を設けた。
2. 俯瞰をおこなう際の発想のトリガとして、「**ディペンダビリティ (Dependability)**」と「**Peta/femto ($10^{16}/10^{-15}$)**」の二つのキーワードを設定した。ディペンダビリティとは、対象とするシステムやデバイスの提供するサービスが正確で信頼でき安心して利用できることであり、社会のあらゆる活動を支える電子情報通信技術が備えるべき要件であると考えて設定した。一方、Peta/femtoは性能追求を端的に表すキーワードとして設定した。
3. 各分科会における検討を横断的に結びつけた議論に発展させるため、5分科会のメンバーを含むワーキンググループを作り、**分野横断的な重要研究領域**の抽出を試みた。

ワークショップおよびその後の検討で得られた主な結論を示す。

1. ワorkshop終了後、議論がさらに発展し、ディペンダビリティを追求する研究開発推進方法論として**SPIN** (SPiral-up model for Innovator Nippon) の着想が得られた。SPINは設計・開発→サービス提供→価値・評価のステップをスパイラル的に繰り返す研究開発モデルであり、実世界での使用に耐えるディペンダブルなシステムを実現するには不可欠である。
2. **ITの社会応用分科会**では、「日常生活ダイナミクスコンピューティング」の概念を提案し、これを実現する要素技術としてセンシング、モデリング、サービスの3つが重要研究領域であるとの結論を得た。またそれぞれの研究領域についてさらにブレイクダウンした研究課題を時間軸とともに明らかにした。
3. **ロボティクス・制御分科会**では、ディペンダビリティを「実世界で機能する能力」と捉え、研究領域を設計原理、制御、アーキテクチャ、人工知能、社会へのグラウ

ンディングの5つの観点から俯瞰した。その結果、それぞれ「生物適応システム」、
「オープン制御システム」、「アダクティブロボティクス」、「マインドシステム理
論」、「サービスベースロボティクス」などが重要研究領域として抽出された。

4. **ネットワーク分科会**では、ディペンダビリティを安全安心なネットワークの構築の観点から捉えた。今後のネットワークの機能は情報の伝達にとどまらず情報交流・共創メディアへと拡大していくと予測した。重要研究領域としては、高位レイヤネットワークアーキテクチャ、ヘテロジニアスネットワーク、ネットワーク基盤技術などを抽出した。また Peta/femto の視点からの重要技術としては、超 100Gbps 級 LAN・光アクセス技術、テラヘルツ波帯の開拓と計測・観測、電波環境のアーカイブ/解析などを抽出した。
5. **コンピューティング分科会**では、アプリケーション、ミドルウェア、システムソフトウェア、アーキテクチャ・VLSI などに階層化して技術を俯瞰した。その結果を踏まえて今後の重要技術として、ディペンダビリティ評価技術、サービス指向仮想化技術、大規模データ管理技術、自律適応型高性能計算技術、VLSI システム技術を抽出した。
6. **エレクトロニクス/フォトニクス分科会**では、ディペンダブルな社会基盤を支える電子デバイスとして、センサ、ストレージ、集積回路・高速電子デバイス、フォトニクス、ディスプレイの5領域を取り上げて俯瞰した。特性のゆらぎを克服することが共通の課題である。俯瞰の結果をもとに重要研究領域として、集積回路の動作不良マスク技術、ネットワーク（ユビキタス）センサ、ユビキタスパワー、記憶材料と大容量化技術、エンハンスメント型化合物半導体素子、などが抽出された。
7. **分野横断的なワーキンググループ**による検討の結果、個々の技術分野の境界を超えた研究が必要な領域が抽出された。たとえば、プライバシー・セキュリティ、認証システム、思い出ネットワーク、ディペンダビリティの評価指標などである。またこれらの研究推進方法についての提案も得られた。
8. **電子情報通信系全般にわたって今後の研究を展望**すると、デバイスからシステムまでディペンダビリティ（セキュリティを含む）の追求は大きな方向性を与えると考えられる。またその技術をグローバルスタンダード化していく視点も必要である。ディペンダビリティに加え知的創造の切り口も重要であり、今後の深掘りが必要である。わが国の研究のあり方については、やはり先端技術を指向し常に新たな可能性を切り開いていくべきであり、その環境整備のためにグローバルな視点に立った努力が必要であろう。

この俯瞰ワークショップで得られた成果は電子情報通信グループにとって極めて貴重であり、今後さらに深掘りをおこなって平成 18 年度以降の戦略提言に結びつけていく所存である。

第1章 はじめに

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センターは、JSTの研究開発戦略を立案するとともに我が国の研究開発の推進に資することをミッションとして活動を行っている。このような活動を推進する手順として、我々はまず対象とする分野の技術全体を俯瞰し、それをもとに今後重要となる研究開発領域を絞り込み、課題およびその推進方法を明らかにするというステップを踏んでいる。

生駒グループは研究開発戦略センターの中で主として電子情報通信系*を担当しており、当系の俯瞰のために平成16年1月に専門家約50名（参加者総数は約80名）によるワークショップ（科学技術未来戦略ワークショップI）を開催した。そこで得られた俯瞰結果は当グループにおけるその後の活動の基盤となり、平成16年度にはその結果をもとに重要研究領域、テーマを絞りこんで戦略の策定を行い、「戦略プロポーザル」として提言した。さらに文部科学省との緊密な連携のもとに活動を推進した結果、提言が平成17年度の戦略目標に採用されJST戦略的創造研究推進事業として具体化がはかれるなどの成果に結びついた。

技術進歩の極めて速い電子情報通信系において、このような俯瞰は随時アップデートするとともに、メンバーや俯瞰の観点を変えながら多角的に見直す必要がある。このたび二回目の俯瞰ワークショップ（科学技術未来戦略ワークショップ（電子情報通信系）II、略称は俯瞰WSII）を開催し、前回とは異なる視点から電子情報通信系を新しい切り口で見直すこととした。

ワークショップの規模は専門家約30名（参加者総数は約60名）で前回よりは参加者数を絞った。メンバー構成としては、新しい見方で俯瞰することを重視する一方で、前回の俯瞰との継続性もある程度は必要と考えて選定をおこなった。その結果、専門家のうち約25%が前回からの継続メンバー、約75%が新メンバーという構成となった。また所属機関別に見ると、ほぼ大学65%、国研10%、民間企業25%の比率であり、これは前回とほとんど同じであった。

今回の俯瞰WSIIにおいては、前回のワークショップで得られた経験に基づきいくつかの新たな試みを行った。まず第一点はワークショップの推進方法に関する試みである。推進体制として、ワークショップ全体を総括する親委員会と、電子情報通信系の技術分野に対応する5分科会の二段階構成とし、その間のやりとりを繰り返して議論を煮詰める方式をとった。分科会としては、比較的要素技術的な性格の強いコンピューティング、ネットワーク、エレクトロニクス/フォトンクス分科会と、それらの要素技術を統合する性格の強い「ITの社会応用」分科会とロボティクス・制御分科会と

*実世界とサイバー世界とをつなぐ技術としてのRobotics Technologyを含む。IRT（Information and Robotics Technology）として拡張された「電子情報通信分野」。

の5つを構成した。準備期間に3~4カ月を当て、その間親委員会では全体構想の立案、途中経過のレビュー、分科会間の連携などを行った。一方、各分科会ではそれぞれの専門分野について俯瞰作業を行い、その上でワークショップに臨んだ。とくに社会のための技術という観点を意識して、分科会のひとつに「ITの社会応用」分科会を設けた点も新しい試みである。

第二点は、俯瞰をおこなうに当たり、発想のトリガとしてキーワードを提示し、それに基づいて専門家による俯瞰を行ったことである。キーワードとしては、ディペンダビリティとPeta/femtoの二つを設定した。社会のあらゆる活動が電子情報通信技術によって支えられ、今後その傾向が一層強まるのに伴って、偶然によるものか故意によるものかを問わず、一旦情報通信システムに不具合が発生した場合、社会的に甚大な被害が発生する。このような傾向を考えると、電子情報通信系の研究開発においてはディペンダビリティの追求が必須の要件と考えられる。そのため本ワークショップにおいてはディペンダビリティを一つのキーワードとして議論することとした。ディペンダビリティとは、対象とするシステムやデバイスが提供する「サービス」が正確で信頼でき安心して利用できることである。いまひとつのキーワードであるPeta/femtoについては、性能の向上に対する要求には際限がなく今後もその観点からの研究開発は継続すべきであることから、それを端的に表すキーワードとして設定したものである。この二つのキーワードは互いに相反する側面を持つ。すなわち、「Peta/femto」によって代表される性能を追求すると、半導体素子の微細化に伴う特性や動作の不安定性、ソフトウェアの大規模化・複雑化、通信における伝送帯域やS/Nの劣化などを必然的に招き、ディペンダビリティとは反対の方向へのベクトルが働く。これをいかにして克服し両者をともに追求するかは今回のワークショップのみならず今後の大きな課題である。

第三点は、各分科会の議論を横断的に結びつけて、システムからデバイスまでを通した一段と高い見地からの議論に発展させたことである。我々はこれを「aufheben(止揚)した議論」と呼んでいるが、これが可能になったのは上記のように各分科会で十分に俯瞰作業が出来ていたこと、親委員会でそれらを把握し連携の議論をしていたこと、さらには前記の「ITの社会応用」分科会において技術を社会に適用する具体例の議論がなされていたためと考えている。具体的には、ワークショップのプログラムのひとつとして分科会をまたがった3つのワーキンググループ(WG-A, B1, B2)を設けて重要研究領域を抽出する議論をおこなった。WG-Aでは、将来のDependable Systemの例をひとつ想定しそれを設計してみる作業を通じて、必要だが抜けている重要研究領域や問題点を洗い出そうという試みをおこなった。WG-B1およびB2では、各分科会から出された俯瞰図を眺めて、共通のあるいは大括りにすべき研究領域、国際競争力の観点から今後我が国として注力すべき研究領域を抽出する試みをおこなった。

またこれとは別に、ワークショップ終了後に関連のある分科会間にまたがる議論をさらに深めようという気運が分科会リーダーの間に高まり、各リーダーに集まっていたいでインター分科会を構成して議論を進めた。その結果、分野をまたがる俯瞰がなされるとともに、ディペンダビリティを追求する研究開発の方法論として SPIN (SPiral-up model for Innovator Nippon) モデルの概念が生まれてきた。これも本ワークショップの大きな成果の一つと考えている。なお「イノベータ日本」は平成 18 年度からスタートする第 3 期科学技術基本計画のなかで、6 つの政策目標の一つに掲げられている。

以上のように新しい試みを取り入れたワークショップであり、これらの試みはある程度成功したのではないかと考えているが、さらに改善が必要な点もあると思われ、詳細は現在さらに検証しているところである。いずれにしてもこのワークショップで得られた成果は当グループにとって極めて貴重であり、今回得られた成果をもとにさらに深掘りをおこなって平成 18 年度以降の戦略提言に結びつけていく所存である。

本報告書では、以下の各章においてこのワークショップの枠組み、得られた成果と今後の課題を述べる。本報告書の構成は以下の通りである。まず第 2 章で、本ワークショップの成果の一つであり、ディペンダビリティを追及する方法論のモデルとして以下の章で述べる各分科会に共通に適用できる SPIN の内容を説明する。次に第 3 章では各分科会での俯瞰の結果を詳しく示し、第 4 章では上記「aufheben (止揚) した議論」である分科会をまたがる WG-A, B1, B2 の検討結果を述べる。さらに第 5 章では今後の展望とわが国の研究のあり方を述べる。なお、本ワークショップのプログラム、参加者リスト、準備の経緯などを付録にまとめて示す。

第2章 新しい研究開発推進モデル（SPIN）

本章では、ディペンダビリティ追求のための研究開発推進方法論の提案であるSPIN（SPiral-up model for Innovator Nippon）について述べる。これはワークショップ終了後の議論の結果生まれた概念であり、実社会で使えるディペンダブルなシステムを目指した研究開発の進め方を提案するものである。

2.1 ディペンダビリティからの要請

あるシステムがディペンダブルであるとは、そのシステムが故障せずに確実に要求仕様通りに動作することは勿論のこととして、環境の変化や要求仕様の変更に対してシステムが頑健性を持って対応できることを含意する。耐故障性に関しては、部品が故障しないことではなく一部の部品が故障した場合にはシステム全体でその機能を補償できることを意味する。同じ考え方が環境の変化に対しても適用できる。故障や環境変化に対しては自動的に補償・追従できることが望ましいが、人間の関与が必要な場合もある。特に仕様の変更が加わった場合には人間の関与が必須となろう。それを含めてシステムを考える必要がある。

2.2 開いたシステムの開発のためのスパイラルモデル

ディペンダブルなシステムを構築するには、工学的に使用環境が厳密に定義された閉じたシステムではなく、環境の変動にも対応できる開いたシステムの構築技法が求められることとなる。このためには、技術開発→設計→構築→使用といったウォーターフォールモデルでは不十分である。ウォーターフォールモデルでは最初に使用条件が固定され、それに基づいた設計と開発が行われるわけだが、これでは使用条件の変動に対応できない。構築→使用→評価・再設計を有機的に繰り返すスパイラルモデルを採用する必要がある。

たとえばロボットを例にとると、極限作業ロボットなどの開発ではウォーターフォールモデルが採用され、ロボットを構築し、実環境でデモを行うとプロジェクトが完了とされて来た。デモでは一定の環境下での固定作業が成功すれば良い。デモではロボットが通る床の素材の変更や段差位置や高さの変更に追従することまでは要求されていない。これではディペンダブルなシステムにはならないと考えている。実環境のパラメータを様々に変化させても追従できるシステムを構築するには、デモで止まっただけではいけない。その後実際に様々な環境で使用し、その結果を再評価する必要がある。最初に定めておいた評価基準を見直すこともありうる。評価結果を反映し、新しい設計や、それに伴う新しい要素技術の開発が必要となるかもしれない。こうして2回目の開発ループに入る。このループはロボットが使われ続ける限り終わることがない。開発完了はありえないのである。飛行機や自動車の例を見れば自明であろう。飛行機

の完成形や自動車の完成形というのは存在しない。事故や故障の経験を通じて、そして社会ニーズの変化によって常に新しい設計が求め続けられている。

また、従来の技術開発の問題点として、技術オリエンテッドな考え方が指摘されている。「こんな技術があるからシステムを作ってみました」で止まる技術開発である。実際にはその枠組みの上でどのようなサービスを提供するのかという「コンテンツ」が重要である。入れ物の技術はその中身と共に開発されねばならない。完成したシステムにコンテンツを入れ、実用に供するのがサービスである。そしてサービスの結果を評価し、新しい価値指標を作り出す。そしてこれに基づいて次の設計に入ると同時に様々な知の集積がなされる。

サービス提供は主として企業が担って来たものであるが、情報通信システムを考える場合にはここを対象とした開発プロジェクトがあってしかるべきである。価値・評価に関する学問体系も存在し、特に社会科学などにその例が見られる。今後は社会科学との緊密な連携が必要である。我々は実証結果を再評価し、新しい価値観や評価基準を作り、それを再び設計や技術開発に戻して行くフェーズが必須と考えている。

ループをまわしながら改善が続けられるスパイラルモデルは、(前述の飛行機や自動車の例に見られるように) 実社会では当然とされて来た。携帯電話においてはサービスを提供してみると、ユーザの方が思わぬ使い方をし、それが新しいデザインに反映されたというような例もある。

2.3 新しいプロジェクト像

我々は2.2で述べた考え方を情報通信システムの開発プロジェクトにも当てはめることを提言する。これをSPIN (SPiral-up model for Innovator Nippon) モデルと命名した(図2.3.1)。このスパイラルから飛び出して起業し、成果の一部を他分野の実用に供することをSPIN-OFFというのである。

スパイラルの各局面はPLAN-DO-SEEのサイクルに対応していると考えられることができる。このスパイラルはどこから始めても良いのだが、通常は右下の「設計・知の集積」から始まる。これがPLANに対応するフェーズである。国が主導する従来のプロジェクトでは、この成果をもってプロジェクトの終了とすることが多かった。デモをする場合にも決められたシナリオにおける動作を保証すればそれで終わった。たまたま実証実験を伴うプロジェクトも組まれたが、実証実験の結果を吟味し、設計に戻すフェーズは用意されず、実証が済んだら、次は企業による実用化が残るのみという想定になっていた。

PLANに続くDOのフェーズに対応するのが上に来る「サービス提供」である。実証実験に留まらず、実社会におけるサービス提供がなされることが望ましい。それを支援するためには政府調達など、実用フェーズを促進する仕組みも必要とされよう。

最後に来るSeeのフェーズが「価値・評価」の見直しである。サービスの結果を評

- ・「入口イメージ」と「駆動力」(プロセス)がポイント
- ・大事なのは「出口イメージ」(完成形)ではない！！

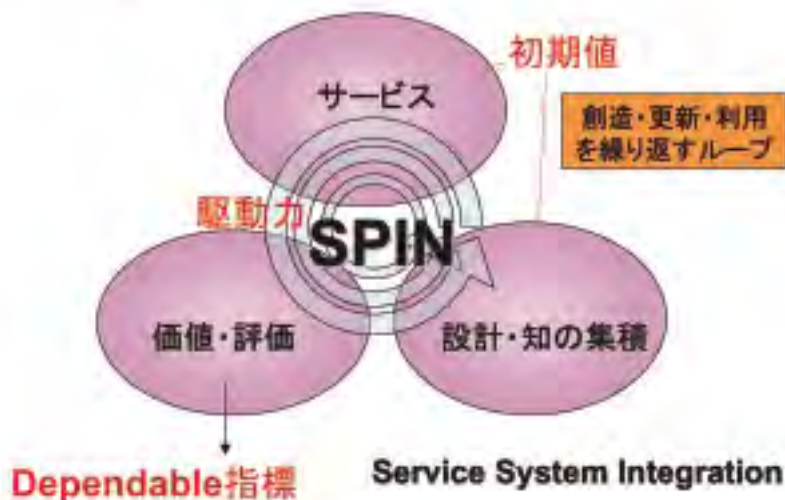


図2.3.1 SPiral-up model for Innovator Nippon

価し、新しい価値観の創造、評価基準の見直しを行う。これが従来のプロジェクトでは決定的に欠けていたものである。プロジェクト発足時に定められた評価基準のみによる評価がなされ、その評価は次のアクションにつながることはなかった。スパイラルモデルでは新しい基準で「設計・開発」に再突入することを要請している。

スパイラルの各局面：設計、サービス、評価はそれぞれがまたスパイラルになっている。従来型のプロジェクトは設計・知の集積部分でスパイラルを行って来たと考えられるし、今後もそのスパイラルは必要である。

さらに、スパイラルの各局面は更に三層構造をとる(図2.3.2)。一番上が社会サービスを考える層、その下にシステムインテグレーションの層、そして最下層がシステムの各要素を開発する層である。各層の研究開発もスパイラルとなる。このようにしてSPINモデルの全体はフラクタル構造を持つのである。

実社会で使えるシステムを構築するためにディペンダビリティを前面に押し出した開発プロジェクトは以下の要因を備えることが必要であると考え。

- ・完成図ではなく初期図で採用すべきである(完成図はループをまわすうちに変化するはず)。
- ・プロジェクト提案にはループをまわす手法の提言が含まれるべきである。
- ・プロジェクトフォーメーションに当たっては大学と企業の研究所だけではなく、事業部を取り込み、実使用を図るべきである。
- ・国がプロジェクトを立てる場合には、その成果物の政府調達を行い、自らが実用実験場所となるべきである。
- ・プロジェクトの評価は各ループを1回まわったときの変化度で計るべきである。
- ・完成図が変化しなくなったらプロジェクトを打ち切る。ただし、最初の2~3ループ

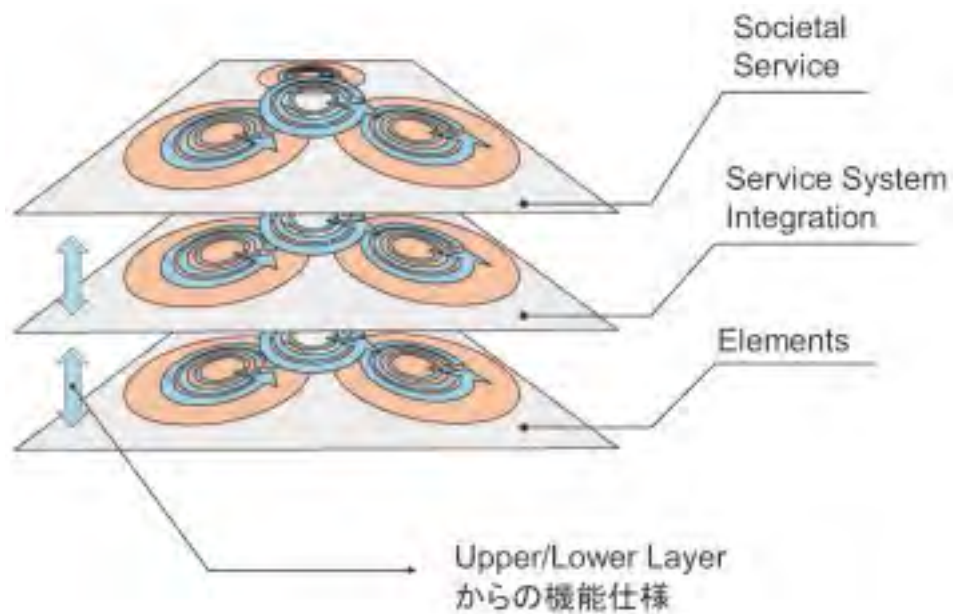


図2.3.2 三層構造のSPIN（上から最上位層，第2層，最下位層）

程度は評価なしに保証すべきであろう。

JSTの受け持つ研究開発分野は基礎研究の色が強いから、個別のプロジェクトはこのような個別分野のスパイラル支援に留まるかもしれない。JSTの様々な仕組みの間の連携あるいは他省庁のプロジェクトとの連携により全体としてのスパイラルを保証する仕組みが必要かもしれない。

第3章 分科会の検討結果

本章においては5つの分科会(ITの社会応用, ロボティクス・計測, ネットワーク, コンピューティング, エレクトロニクス/フォトニクス)における各分野の俯瞰および重要研究領域の検討結果を記す。

3.1 ITの社会応用分科会

ITの社会応用分科会では, ITを, 大きく, センシング技術, モデリング(シミュレーション)技術, サービス技術に分類し, これらの要素技術の俯瞰を行なった。その結果, センシング技術とモデリング技術に関しては, 「日常生活」が新たな情報処理対象となりつつあること, さらに, 日常生活空間がサービス提供技術の場となりつつあることが浮き彫りになってきた。このことは, これらの3つの要素技術(センシング技術, モデリング(シミュレーション)技術, サービス技術)を統合することで, 日常生活の場でセンシングし, モデリングし, サービスするという1つのループを完結することが可能になりつつあることを示している。さらに, このようなループを回転させ続けることで, 日常生活を支えるための技術や知識を社会(日常)の中で持続的に発展させることが可能になる。分科会では, この新しい知の体系創造システムを, 「日常生活ダイナミクスコンピューティング(Everyday Life Dynamics Computing: ELDC)」としてコンセプト化し, ELDC, および, これらを支える3つの要素技術を今後ファンディングすべき重要研究領域として切り出した。

3.1.1 ITの社会応用分科会の目的

ITの社会応用分科会の目的は, 『ITによって始めて可能となる Dependable な未来社会の設計』という観点から, 現状のITおよび科学技術を俯瞰し, 今後ファンディングすべき重要研究領域を提案することにある。重点研究領域の切り出しにあたっては, 現状技術を俯瞰しつつも, 個々の技術の一直線的な発展上にある未来社会像を予測するというよりも, むしろ, あるべき未来社会像を思い描き(設計し), それを実現するために技術がどうあるべきかというトップダウン的な観点からの分析を試みる。

本稿では, まず, Dependableな(頼れる)社会という視点から, ディペンダビリティの意味を整理し, 再定義する。次に, ITを, 大きく, センシング技術, モデリング(シミュレーション)技術, サービス技術に分類し, これらの要素技術の現状を俯瞰する。これらの分析や俯瞰に基づいて, 重要研究領域として切り出しを行い, その意義について議論する。

3.1.2 ITの社会応用の観点からのディペンダビリティの意味の整理

Dependableな社会を実現するための要件を考察する。通常, ディペンダビリティ

は、ある技術に対して用いられる特性であり、安定性、確実性、頑健性、可搬性を兼ね備えた特性を意味することが多い。しかしながら、それらは、最終目的である、安心・安全な社会（Dependableな社会）の実現に直結する特性ではなく、必要条件のうちのかなり限られたものである。ごく大雑把に述べれば、従来扱われてきた「安全」と、今後扱うべき「安心」の間には、大きなギャップがある。



図3.1.1 ITの社会応用の観点から見たディペンダビリティ

安心・安全な社会を実現するためには、個々の技術や、統合されたシステム全体の安定性、確実性、頑健性、可搬性といったシステム側の安全性に関する技術だけでなく、人間の欲求（ニーズ）、愛情・友情、正義、守秘・報知、経済などの安心に関わる技術が必要であり、これらの次元の異なる要求に包括的に応えていく必要がある。すなわち、安心感を生み出している人間の認知構造や、欲求構造とはいかなるものであるか？ であるとか、技術を正しく用いようとする場合の正義とは何であるか？ とか、守るべき情報と知るべき情報は何か？ などの問題が新たに扱われる必要がある。いかに安定性や可搬性に優れた技術でも、それが正しく用いられる必要があるし、経済的に成立するものでなければ意味を持たない。このことを整理したものが図3.1.1である。

安心・安全な社会を実現するためのさらに重要な点は、たとえ、安心や完全に関する現状でのコンセンサスのスナップショットが何らかの形で得られたとしても、未来永劫不変である保証はどこにもない点である。この問題に対応するには、ディペンダビリティの意味すら、常に更新し続ける必要がある。すなわち、図に示したような構成要素、それらの関係やダイナミクス、優先順位などは、現在のスナップショットに過ぎず、安心・安全な社会の実現といった非定常な目的を実現するには、持続的発展

性という、もう一つの特性が不可欠である。

3.1.3 IT の社会応用の観点からの技術の俯瞰

本節では、社会応用の観点から、要素 IT を大きく、センシング技術、モデリング技術、サービス技術に分類し、センシング技術とそれによって可能となったサービス、モデリング技術とそれによって可能となったサービスという観点から俯瞰する。

センシング技術 (IT) と社会応用の俯瞰

図 3.1.2 は、センシング技術 (IT) と社会応用の発展を示したものである。近年、センシング技術に関しては、ユビキタス型 (環境の至るところに存在している) センサや、ウェアラブル型センサといった物理的なセンサの発展もさることながら、Blog や Wiki といったセマンティックな情報を大量にセンシングできる技術も利用可能になりつつある。ユビキタス型センサは、全空間的な物理現象センシングの可能性があり、ウェアラブル型センサは、生体现象や日常生活現象のセンシングの可能性を秘めている。また、Web センシングは、全世界規模で社会現象を計測できる可能性を持っている。例えば、Web センシングによって、世論・常識・良識・意識・差別・関心など、従来は、センシングし難かった情報が取得できる可能性がある。このことは、我々の日常がマイクロ (物理のレベル)・マクロ (意味のレベル) な視点で定量的に記述可能になりつつあることを示している。

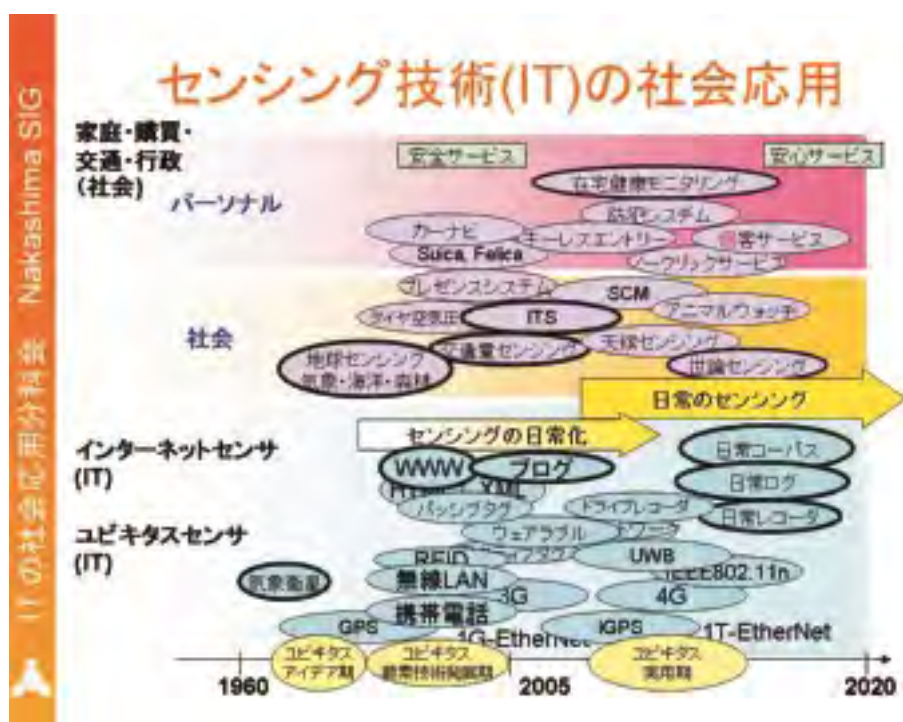


図3.1.2 センシング技術 (IT) と社会応用の俯瞰
(One-to-one の顧客サービス = 個客サービス)

モデリング技術 (IT) と社会応用の俯瞰

一方、モデリングの対象やそれに基づくサービスがどのように変化しているかを示したのが図 3.1.3 である。古くから、人間の生理・病理、認知・心理、脳といったものがモデリングの対象であったが、最近では、個性を持った人間のモデリングや、行動のモデリング、集団や社会・コミュニティのモデリングへと対象が拡大してきている。サービス提供の場も、オフィスといった目的が明確な場での支援から、個人個人で異なる多様な目的が存在していて、しかも、ダイナミックに変遷していくような家庭内や街角での支援へと拡大してきた。センシング技術の発展によって日常現象が記述可能になってきたこと、プロセッサ単体の発展やそれを組み合わせるミドルウェア・マルチエージェント技術といったソフトウェア技術の発展によって日常現象が処理可能になってきたことなどを技術背景として、我々の日常生活がモデリングの対象となりつつある。

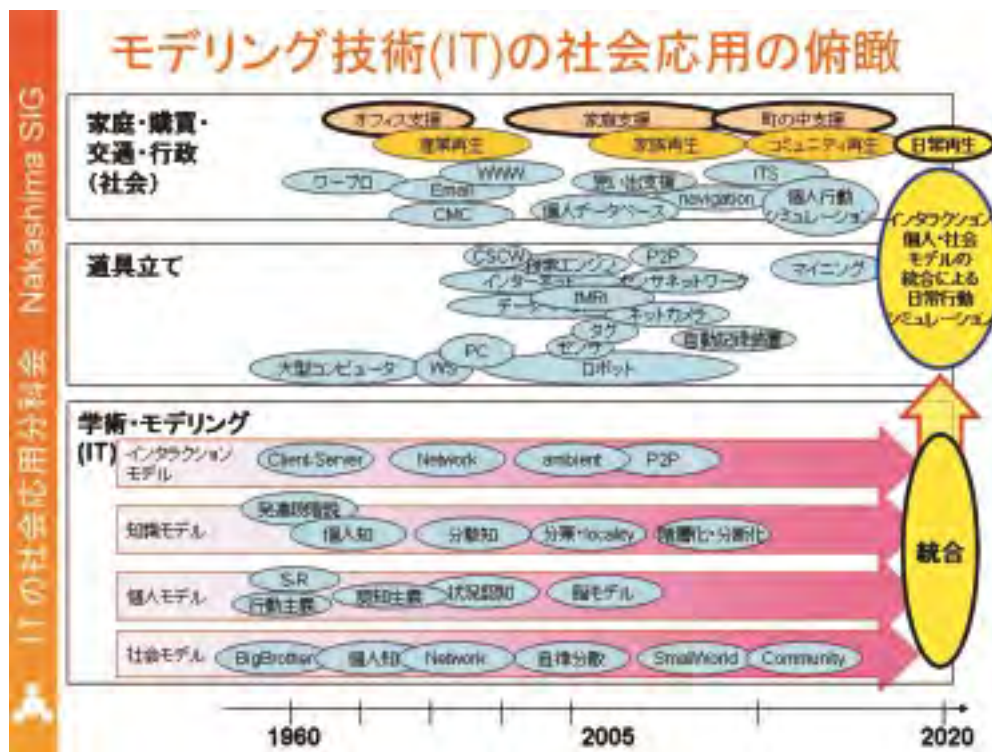


図3.1.3 モデリング技術 (IT) と社会応用の俯瞰

新たな情報処理対象としての「日常」

図 3.1.4 は、センシング技術やモデリング技術、それらに基づくサービスが対象としてきたものを示したものである。センシング技術に関しては、気象衛星などを用いた大気、海洋のセンシング技術などは 1960 年代から存在していたが、近年のセンシング技術やモデリング技術の発展に伴い、徐々に日常生活が新たな情報処理の対象となってきている。また、日常生活空間で情報提示サービスや物理的なサービスを行うための広義のメカトロニクス技術が利用可能になりつつある。

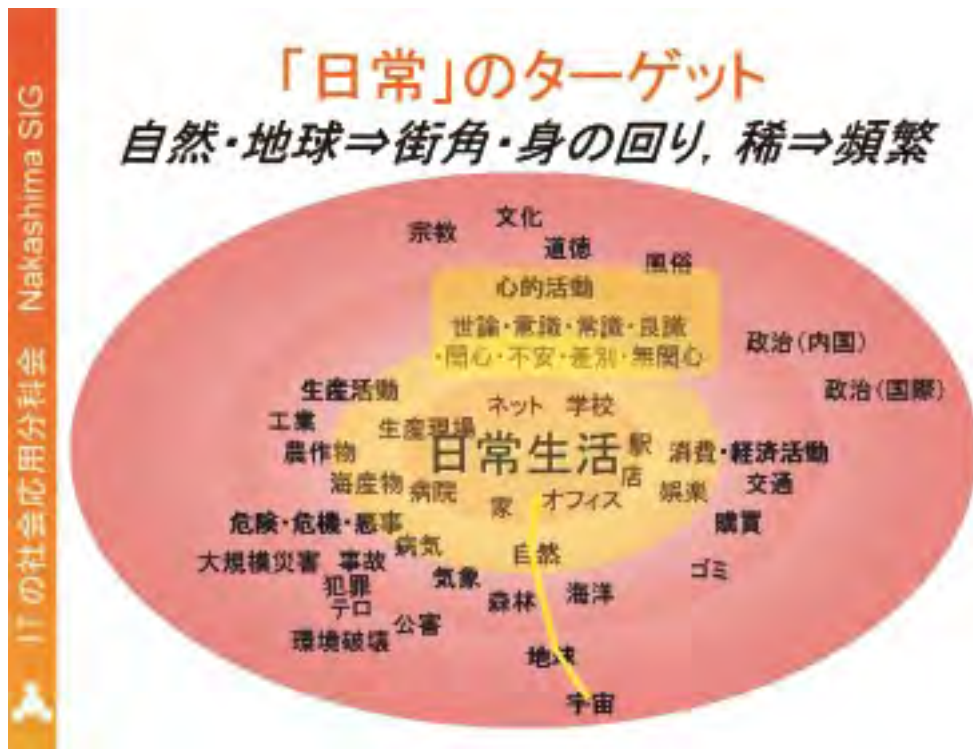


図3.1.4 新たな情報処理対象としての「日常」

図3.1.4が示しているように、空間という観点からは、宇宙・地球といった場所から徐々に街角・生活空間といった個人個人の身近な現象へとITの対象が変化しつつあり、一方、時間という観点からは、非常に稀にしか起こらない現象から、日常茶飯事に生じている現象へと対象が変化しつつある。時間的・空間的に我々と近い「日常」が新たなターゲットになりつつある。

3.1.4 ITの社会応用プロセスの変革

知識や技術は社会に還元されなければならない。ITに限らず一般的にある技術が社会に応用されていくプロセス、すなわち、技術の創造と社会応用のプロセスをクーンのパラダイム論的視点*から見る。通常、科学のプロセスは、現象の記述・理論の構築・理論の整備の3つからなる。理論の構築・理論の整備を一つに縮めてしまうと、1)現象・対象の記述、2)理論・技術の構築・開発・整備、となるがこの後に新たに3)社会応用を加えて、これら3つが技術の社会応用の典型的なプロセスを構成すると考えることができる。

これら1)から3)の要素的プロセスのIT化が進んでいくことで、社会応用プロセスが大きく変わりつつあるように見える。前節まで見てきたように、1)に相当するセンシング技術、2)に相当するモデリング技術は情報処理技術によって大きく変わりつつ

*トーマス・クーン，“科学革命の構造”，みすず書房，1971

あり、1)から3)のプロセスが渾然一体となって発展していく新たなプロセスが可能になりつつある。すなわち、従来の waterfall 型社会応用プロセスだけでなく、社会と共に持続的に発展し続ける社会応用プロセスが可能になりつつある。(図 3.1.5 参照)



図3.1.5 IT社会における応用プロセス

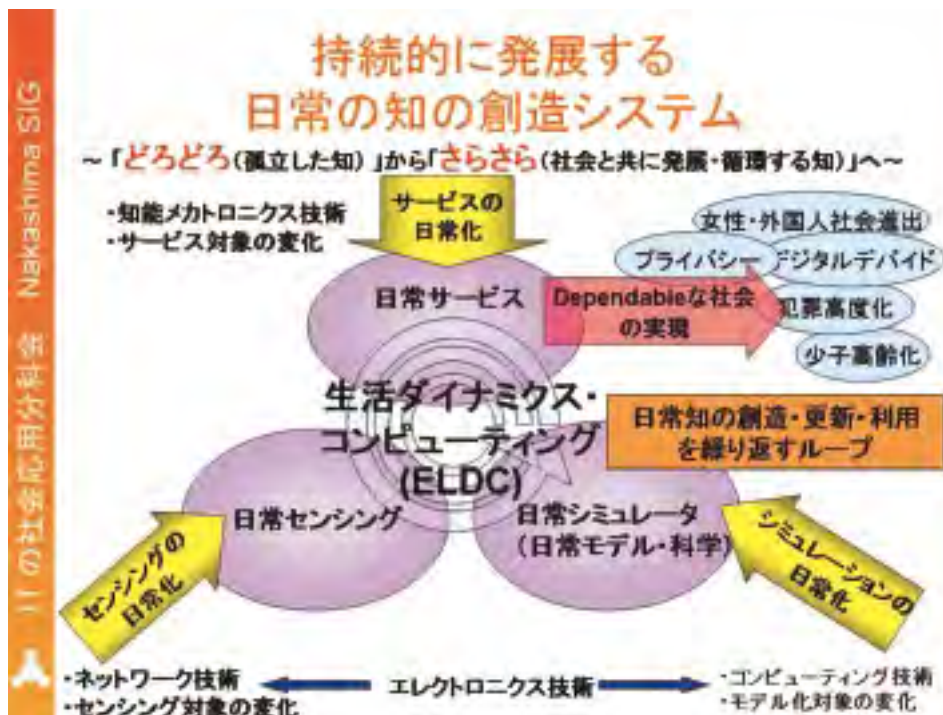


図3.1.6 生活ダイナミクスコンピューティング

3.1.5 生活ダイナミクスコンピューティング

これまでの分析や俯瞰から、日常生活の場でセンシングし、モデリングし、サービスするという1つのループを完結することが可能になりつつあることが分かってきた。さらに、このようなループを回転させ続けることで、日常生活を支えるための技術や知識を社会（日常）の中で持続的に発展させることが可能になる。この持続的発展性は、Dependableな社会を実現し続けるための解である。分科会では、こうした社会と共に持続的に発展する新しい知の体系創造システムを、「日常生活ダイナミクスコンピューティング（Everyday Life Dynamics Computing：ELDC）」としてコンセプト化した。図3.1.6は、日常生活ダイナミクスコンピューティングの概念図である。日常センシング技術、日常モデリング技術（日常シミュレーション技術）、日常サービス技術が一つのループとして回転することで、日常生活の知の創造、更新、利用が繰り返されることを示しており、研究室の中で閉じた知から、社会と共に発展・循環する知へと変革するシステムである。今、まさに、こうした新しいコンピューティングが可能になりつつある。このような観点から、ITの社会応用分科会では、日常生活ダイナミクスコンピューティング、および、これら支える3つの要素技術を今後ファンディングすべき重要研究領域として切り出した。

生活ダイナミクスコンピューティング（ELDC）の意義は、以下の3つである。

1. 持続的に発展する Dependable な社会の実現

少子・高齢化、犯罪高度化、核家族化、女性社会進出など、我々が直視すべき社会現象が次々と顕在化してきており、センシング技術、モデリング技術、サービス技術のそれぞれが個別に発展するのではなく、統合され、社会要請に応える形で持続的に発展していかなければ、我々に明るい未来はない。

2. 新たなコンピューティングの実現

センシング技術、モデリング技術、サービス技術がITをベースとして統合されれば、社会システムが一つの Computer、社会プロセスが一つの Computing となり得る。10年ごとにコンピューティングの発展を整理したものが、図3.1.7である。現在は、ユビキタスコンピューティングが現実化しつつある状況にある。しかしながら、サービスに結びつかない技術の発展には限界がある。インフラの整備を背景として、次の10年は、サービスやコンテンツといった我々の生活を支える価値の生産へとコンピューティングの対象が変化しなければならない。そして、それが、各要素技術の研究開発に推進力を与えることにつながる。

3. 新たな科学技術の方法論の実践

現在の典型的な研究様式を整理したものが図3.1.8である*。モード1は、好奇心

*マイケル・ギボンズ，“現代社会と知の創造 モード論とは何か”，丸善，1997
井上，佐藤，“日常認知の心理学”，北大路書房，2002

	コンピュータ	ソフトウェア	情報処理の対象
1950	第1世代 (真空管) ENIAC EDSAC	マシン語 アセンブリ言語 バッチ処理	数値
1960	第2世代 (トランジスタ) IBM7070	プログラム言語 FORTRAN LISP COBOL	数値配列
1970	第3世代 (IC) IBMシステム360	TSS 仮想記憶 システム記述言語	文字列 構造化
1980	第4世代 (LSI/VLSI) Apple II	C言語 オペレーティングシステム BASIC UNIX	印刷文書
1990	IBM-PC NEC-98	MS-DOS Windows	マルチメディア 音声・画像・動画
2000	第5世代 (VLSI)	インターネット WWW, JAVA, Linux 人工知能 i-mode	人間の位置 個人認証 コンテンツ WWW
2010	第6世代 (クラスター・モバイル・組み込み) 携帯電話 ヒューマノイド	エドルウェア ユビキタスコンピューティング グリッドコンピューティング	人間 日常生活情報
	第7世代 (IBT)	生活ダイナミクス・コンピューティング	

図3.1.7 新たなコンピューティング

Nakashima, SIG

ELDC as 科学の方法論

モード1: 従来の研究様式 ・閉ざされた個別学問領域の内的倫理に従い、研究の方向や進め方が決まる ・研究者と市民は対立 ・研究成果の価値は個別学問分野の知識体系の発展に寄与するかで決まる ・研究成果は学術誌などにより普及 ・研究成果の実用的な目的は、直接的には存在しない＝好奇心主導型	モード2: 従来の研究様式 ・社会に対して開かれており、研究の方向や進め方は社会の要請で決まる ・市民が発注者、研究者は請負者 ・研究成果の価値は社会問題の解決に寄与するかで決まる ・社会の具体的な問題を解決することが研究活動の目的＝問題解決型
モード3: 新たな研究様式 モード2の世界で、問題を発掘し、モード1の世界で分析・吟味・理論化、再び「モード2」の世界に還元する知の循環システム	

- ・ モード論は研究Attitudeの提案に留まる
- ・ ELDCは、モード論(モード3)の具現化の1つの方法

図3.1.8 モード論と生活ダイナミクスコンピューティング

駆動型で進められる研究様式で、学会において価値が付加される研究を指す。これに対し、モード2は、社会の問題を解決することを駆動力として進められる研究様式である。井上、佐藤(2002)*では、新たな研究様式としてモード3を提案している。これは、モード2の世界で、問題を発掘し、モード1の世界で分析・吟味・理論化、再び「モード2」の世界に還元する知の循環を行なう研究様式を指す。生活ダイナミクスコンピューティングは、モード3の研究様式を実践するものであり、その具体的な方法論を示そうとするものである。

日常センシング技術、日常モデリング技術を用いて、「日常」という大海に果敢に踏み込み、社会要請に応えながら、日常を科学や工学の研究対象として扱うことによって、真に役立つ技術開発を目指す時期が到来しつつあるのではないだろうか。ITをベースとして、センシング技術、モデリング技術、サービス技術という要素技術が、日常生活の中がかみ合わさり、ぐるぐると回り始めたとき、「実験動物としての人間ではなく、現実社会の中で生きている人間を深く理解し、支援するためのIT」(生活ダイナミクスコンピューティング)という新しい歯車が回り始めることを期待したい。

3.2 ロボティクス・制御分科会

3.2.1 ロボティクス・制御研究領域の俯瞰方針

経済産業省技術戦略マップのロボット分野ロードマップでは、現在より20年後までの将来に亘るロボット技術の出口イメージおよび、それを実現するための要素技術・デバイスが詳細に記載されている(図3.2.1)。出口イメージでは、掃除ロボットや留守番ロボットなどの専用ロボットに始まり、最終的に介護支援やセキュリティなど様々な機能を有する多機能ホームロボットが描かれ、一方、要素技術・デバイスでは、例えば、アームやハンドの軽量化、アクチュエータ・センサやエネルギーの高性能化などが予想されている。しかしながら、そこでは、要素技術・デバイスをどのように組み合わせて出口イメージを実現するかについて検討が十分でない。すなわち、システムとして要素技術・デバイスをどのように統合し、どのような機能を実現し、どのようにして現実世界・現実社会にグラウンディングさせるか? という点を明らかにする必要があると考える。

そこで、本分科会では、設計原理、制御、アーキテクチャ、人工知能、社会へのグラウンディングの5つの観点から、実現すべき機能を明らかにし、そのための研究領域を俯瞰し、経済産業省技術戦略マップ(ロボット分野)を補完することを試みた。

*井上、佐藤，“日常認知の心理学”，北大路書房，2002

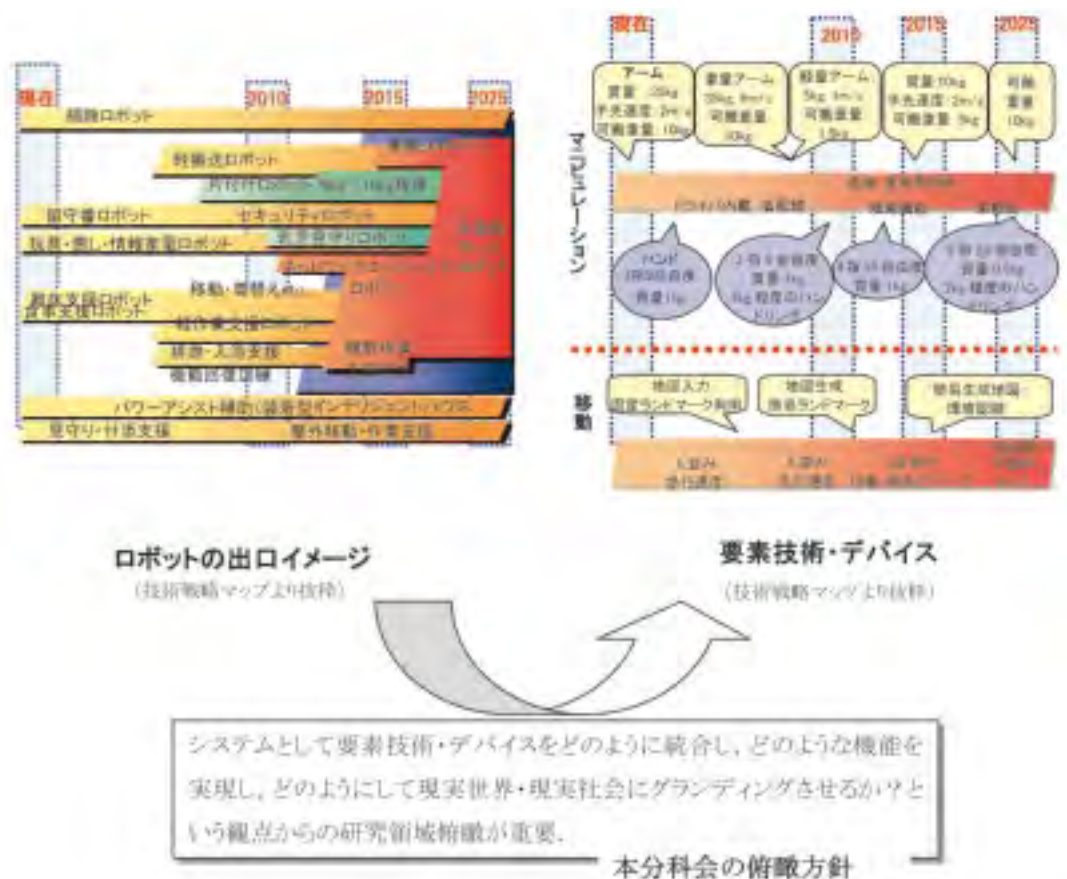


図3.2.1 経済産業省技術戦略マップ（ロボット分野）と本分科会の俯瞰方針

3.2.2 ロボティクス・制御研究領域の俯瞰

これまでのロボット開発では、主に、産業用ロボットに代表されるように予め設定された環境（構造化環境）のもとでの制御問題、いわゆる「良設定問題」を扱ってきた。しかしながら、ホームロボットなどのように人間を含む実世界で機能する次世代ロボットを実現するためには、非構造化環境下での作業を想定する「不良設定問題」を解くことが本質である。また、人間社会の生活空間の中で共存するホームロボットを目指すためには、これまでの製品主体のニーズに基づくロボット開発に代わり、サービスを提供するメディアとしてロボットを捉え、ユーザの満足度を考慮して環境や人間に対して適応的に機能するシステムインテグレーション技術を開発することも重要である。さらに、信頼、安全、安心を実現するための、ロボットの「心」に対する理論といった、未来のロボット技術を見据えた先駆的な研究領域も不可欠である。

このように、本分科会では、ロボットのディペンダビリティを「実世界で機能する能力」と捉え、それを実現するために

1. 非構造化（無限定）環境下における不良設定問題へのアプローチ
2. サービスを提供するメディアとしてのロボット開発
3. 「心」の理論

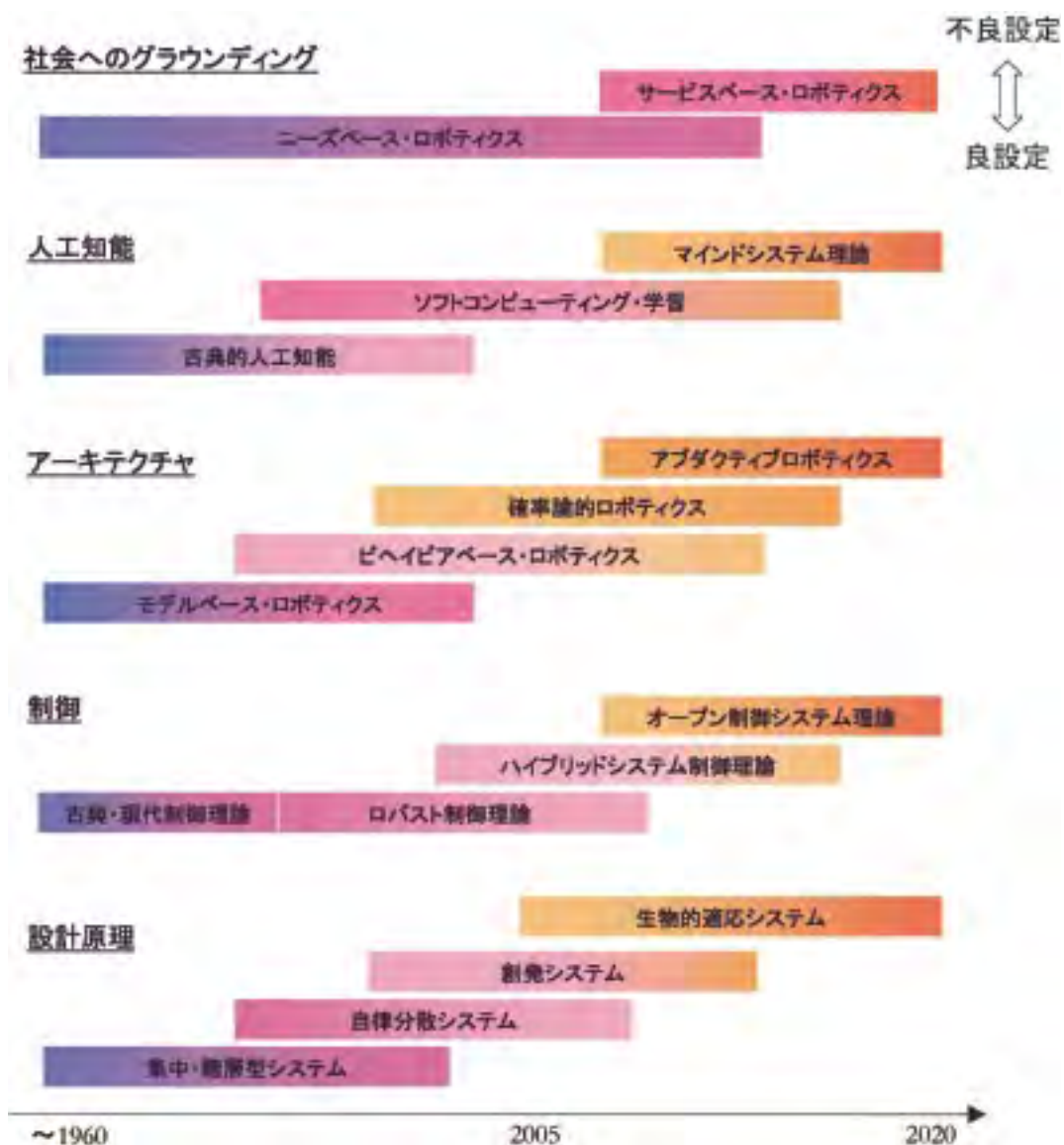


図3.2.2 ロボティクス・制御研究領域の俯瞰図

の3つの視点が重要であると考えた。これをもとにしたロボティクス・制御研究領域の俯瞰図が図 3.2.2 である。

俯瞰図では、「設計原理」、「制御」、「アーキテクチャ」、「人工知能」、「社会へのグラウンディング」のように、原理レベルから応用に近いレベルまで研究領域を5つの項目に分けて、1960年以前から2005年現在までの主な研究領域と、今後2020年までを見据えた重点研究領域を記載している。以下では、それぞれの項目ごとに、研究領域の変遷および展望を簡単に説明する。

3.2.3 設計原理からの俯瞰

これまで、集中型システムや階層型システムに始まり、自律分散システムや創発システムなどの新しい設計原理のもとで、様々なロボット設計論が論じられてきた。こ

これらの原理は、ある構造化（限定）された環境のもとでは有効であった。しかしながら、人間や生物のように、実世界で柔軟に機能するロボットを実現するためには、非構造化環境（対象に対する知識が無い未知の世界）のもとで適応的に行動することができる設計原理を構築し、それに基づいた次世代のロボティクス論を展開することが不可欠であろう。

そこで、このような実現を支える基礎研究として、複雑な環境に柔軟に対応できる生物の適応的行動メカニズムの原理を解明する研究領域「生物的適応システム」を挙げる。ここで、「環境」には、ロボット身体、その身体を取り巻く狭義の環境、そして群などの社会環境が考えられる。この観点に基づいて重点研究課題を、身体の適応、狭義の環境への適応、社会への適応という3つの項目と、そして、それらに共通の原理解明・設計に分ける（表3.2.Aを参照）。

3.2.4 制御からの俯瞰

制御理論の発展は、周波数領域上での1入出力系の制御系設計論である古典制御（～1960）、時間領域上での多入力系の制御系設計論（1960～1980）である現代制御を経て、1980年から2000年頃に至るまで、モデルの不確かさを考慮して制御系を設計する制御系設計論「ロバスト制御」が精力的に研究されてきた。一方で1990年代後半より、連続（物理）変数と離散（論理）変数が混在した動的システム、いわゆるハイブリッドシステムの制御系設計論が活発に研究され、現在ではシステム制御分野において最も注目されている研究トピックの1つとなっている。例えば、ロボットにおける論理的判断（論理変数の制御）と運動制御（連続変数の制御）を統合した知的制御系が挙げられる。しかしながら、これまでの制御系設計論は、環境に対して閉じた制御系、すなわち、環境の変化を想定しない制御系に焦点をあてて論じてきた。今後は、複雑に変化する無限定の環境に対して「開いた」制御系を設計する理論「オープン制御システム理論」の構築が重要である。そのために、環境に対して開いたハイブリッドシステム論をはじめ、環境を認識する機能を含む高次レベル制御系論、環境にリアルタイムで適応するためのリアルタイム制御論が重要な研究領域であると考え（表3.2.Aを参照）。

3.2.5 アーキテクチャからの俯瞰

制御系設計のアーキテクチャは、環境や制御対象のモデルに基づいたモデルベース型の設計に始まり、反射行動などのように外界から得られる信号の簡単な重ね合わせにより複雑な行動を発現させるビヘイビアアプローチを経て、近年は、環境モデルの複雑さを定量的に扱うために確率的アプローチが精力的に研究されている。例えば、非常に難しいとされてきた、移動ロボットにおける自身の現在位置と地図の同時獲得（Simultaneous Localization and Mapping, SLAM）問題が確率的アプローチを用

いることによって解かれ、この方面の研究は急速に発展している。今後も複雑な環境に対処するためには確率、統計を用いた設計理論の構築は発展していくものと考えられる。

こうした研究成果を踏まえ、複雑な環境に適応するための、さらなる展開を考えるとき、環境状況を認知し、行動を自己言及的に創発、生成する制御構造の枠組みが必要である。すなわち、観測された現象を説明する仮説を設定して行動し、その行動により観測される現象をもとにさらに仮説を立てる、といったように、仮説と行動を繰り返すことで環境状況を推論し、適応的行動を生成する「アダクティブ・ロボティクス」の理論構築が不可欠である（表3.2.Aを参照）。

3.2.6 人工知能からの俯瞰

エキスパートシステムに代表される古典的人工知能、ニューラルネットに代表されるソフトコンピューティング、統計的学習理論や強化学習などの学習理論は、様々なシステムに対する横断的な研究分野として今後も活発に研究されると思われるが、とりわけ人間と接するロボット分野の場合には、ロボットへの安心感や信頼性を実現するために「心」に関する工学的研究「マインドシステム理論」が15年後のロボット技術には欠かせない研究領域になるものと考えられる。

コミュニケーションのための自然言語認識など、意味論に関する研究領域は必須であることは言うまでもなく、自己保存として働く自律神経系・内分泌系による感情表現の工学的実現など身体性を伴う研究領域や、意図理解やコンテキストベースコミュニケーションなどの「心」を扱う研究領域が挙げられる（表3.2.Aを参照）。

3.2.7 社会へのグラウンディングからの俯瞰

現代の人間社会において産業用ロボットは高効率の労働力として欠かせない存在になっているが、その多くは、必要とされるロボットそのものの性能達成に価値をおいたニーズベース型の開発によるものであった。今後は、人間社会の身近な生活の場にも様々な形態でロボットは供給され、人間との共存関係を築いていくものと考えられる。このような状況では、利用する人（ユーザ）の立場に立った、すなわち、ユーザと接し、ユーザが価値を感じるサービスを予測し提供するロボット開発論「サービスベース・ロボティクス」の研究領域が重要である。

具体的な重点研究領域としては、ユーザモデリング、実時間行動分析、意図理解などのユーザ側の満足度に関与する研究や、サービスを提供するメディアとしてロボットを捉えた際の設計工学である、サービスシンセシスやサービスプロバイダ（サービスベース・システムインテグレーション）が挙げられる（表3.2.Aを参照）。

表3.2.A 各項目ごとの重点研究課題

	重点研究課題
生物的適応システム	<ul style="list-style-type: none"> ○身体の適応 <ul style="list-style-type: none"> ・神経生理学的モデリング ・ダイナミカルシステムモデリング ○環境への適応 <ul style="list-style-type: none"> ・アダクシオン ・環境共創 ○社会への適応 <ul style="list-style-type: none"> ・群行動 ・協調・競争 ○共通原理（移動知） <ul style="list-style-type: none"> ・調和的設計（制御系と機構系，神経系と身体系） ・身体可塑性
オープン制御システム	<ul style="list-style-type: none"> ○オープンハイブリッドシステム論 <ul style="list-style-type: none"> ・環境，人間を含むハイブリッドモデルと制御 ・多分解能的アプローチ ○高次レベル制御系設計論 <ul style="list-style-type: none"> ・アダクシオンと制御の統合 ・連想システム ・実世界ロバスト性 ○リアルタイム制御 <ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイム環境モデリング ・リアルタイム最適化
アダクティブロボティクス	<ul style="list-style-type: none"> ○認知 <ul style="list-style-type: none"> ・実時間状態予測 ・帰納的環境モデリング ・自己認知 ・学習 ○行動生成 <ul style="list-style-type: none"> ・能動的行動創発 ・調和型行動生成
マインドシステム論	<ul style="list-style-type: none"> ○意味論 <ul style="list-style-type: none"> ・自然言語認識 ・アダクティブパターン認識 ○身体性 <ul style="list-style-type: none"> ・超多自由度身体力学系 ・自己保存システム ○心性 <ul style="list-style-type: none"> ・感情システム ・コンテキストベース・コミュニケーション ・意図理解システム ・意識システム
サービスベース・ロボティクス	<ul style="list-style-type: none"> ○ユーザモデリング <ul style="list-style-type: none"> ・マルチスケールモデリング ・ユーザ正規化 ○実時間行動分析 <ul style="list-style-type: none"> ・多分解能行動分析 ・統計的モデルベース行動分析 ○意図理解 <ul style="list-style-type: none"> ・能動的コミュニケーション ・多分解能意図理解 ○サービスシンセシス <ul style="list-style-type: none"> ・ユーザオリエンティド・サービス設計 ○サービスプロバイダ <ul style="list-style-type: none"> ・ディペンダブルシステムインテグレーション ・ディペンダブルビジネスモデル

まとめ

本分科会では、ロボットのディペンダビリティを「実世界で機能する能力」と捉え、その能力を実現するために、設計原理、制御、アーキテクチャ、知能、社会へのグラウンディングという5つの観点から、それぞれ、「生物適応システム」、「オープン制御システム」、「アダクティブロボティクス」、「マインドシステム理論」、「サービスベースロボティクス」といった研究開発領域を俯瞰した。これらの研究領域は、経済産業省技術戦略マップ・ロボット分野のロードマップの実現に必要な不可欠であるとともに、世界に先駆けた全く新しい視点の研究領域であることを付記しておく。本分野において世界をリードしてきた日本がさらなる優位性を保つためにも、これらの研究領域における早期発展が望まれる。

3.3 ネットワーク分科会

ネットワーク分科会においては、“Dependable” および “Peta/femto” のいずれも重要な視点である。

“Dependable” は、「安全・安心」というキーワードで代表される視点であり、前身の白浜ワークショップでの議論をまとめた俯瞰図（図3.3.1参照）では、それを「ユビキタス」と相い並ぶ視点として、網羅的に関連研究領域を示していた。今回は、大きな変革期にあるネットワーク研究において近未来（5年後程度）から10年後を視野に入れた重要研究領域を俯瞰することとした。

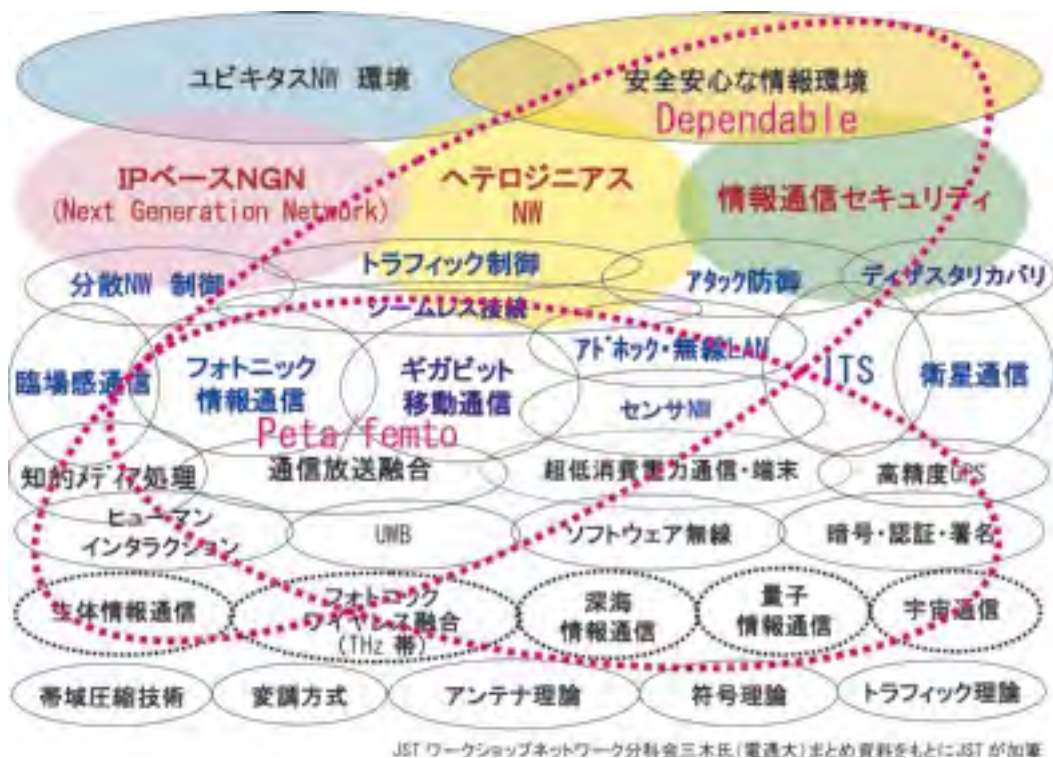


図3.3.1 研究開発分野俯瞰マップ例（白浜でのWS Iでのまとめ）

“Peta/femto”については、ネットワークの能力・性能に関わる視点であり、要素技術の重要研究分野を見極めることが必要であり、10～15年後に重要となる先駆的・基礎的な分野を俯瞰することとした。

3.3.1 “Dependable”を視点とする研究課題

3.3.1.1 ネットワーク分野におけるディペンダビリティの捉え方

ネットワークのデジタル化が実現し、移動通信とインターネットが急速に普及し、さらにブロードバンド化が進展しつつあることから、将来のネットワークは新たなパラダイムにもとづいて展開することになろう。その新パラダイムとして、ネットワークのサービス機能面では“Ubiquitous media”を目指し、ネットワークの性能・品質面では“ディペンダビリティ”を目指すこととなろう（図3.3.2参照）。現在は、丁度この2つの新パラダイムによる次世代ネットワーク研究のスタート時期といえる。ネットワークにおけるディペンダビリティにおいては、Security, Quality, Reliability, Availability, さらに Adaptability など全てが包含される。これらが、有機的に全て満たされた状態が、Dependable Networks と言える。しかし、これらの中で Security は特に重要であり今後益々そのウェイトが高まるものと考えられ、それだけで一大研究分野となる極めて重要なテーマであることは論をまたない。そこで、今回の当分科会の議論では、Security も認識しつつ、その他のディペンダビリティの視点を置くことにした。

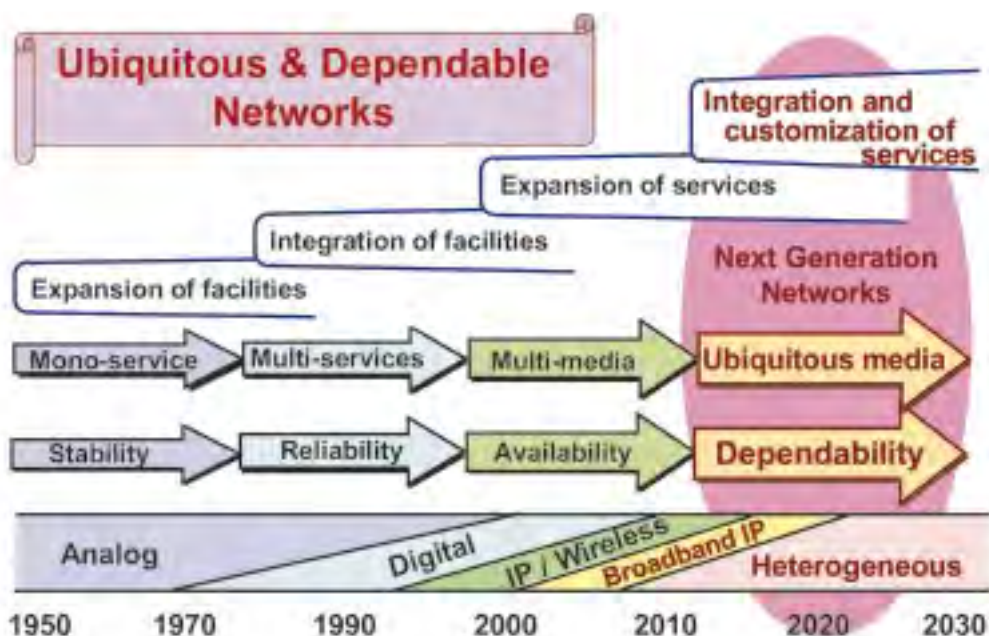


図3.3.2 情報通信ネットワーク発展の俯瞰

この分野の主要な技術については、ネットワーク構成技術としてコンピュータ技術を活用する度合いが益々高まり、逆に分散コンピューティング技術の普及に伴いコン

- ・ネットワーク(遅延時間)を意識しない分散コンピュータ環境
- ・コンピューティング(処理時間)を意識しない情報通信環境

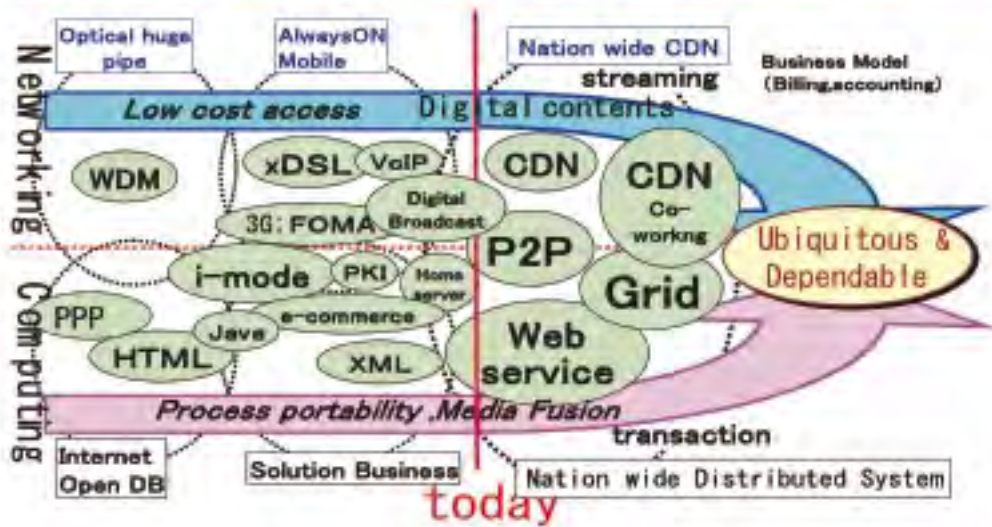


図3.3.3 N+C 環境から N・C 融合環境へ

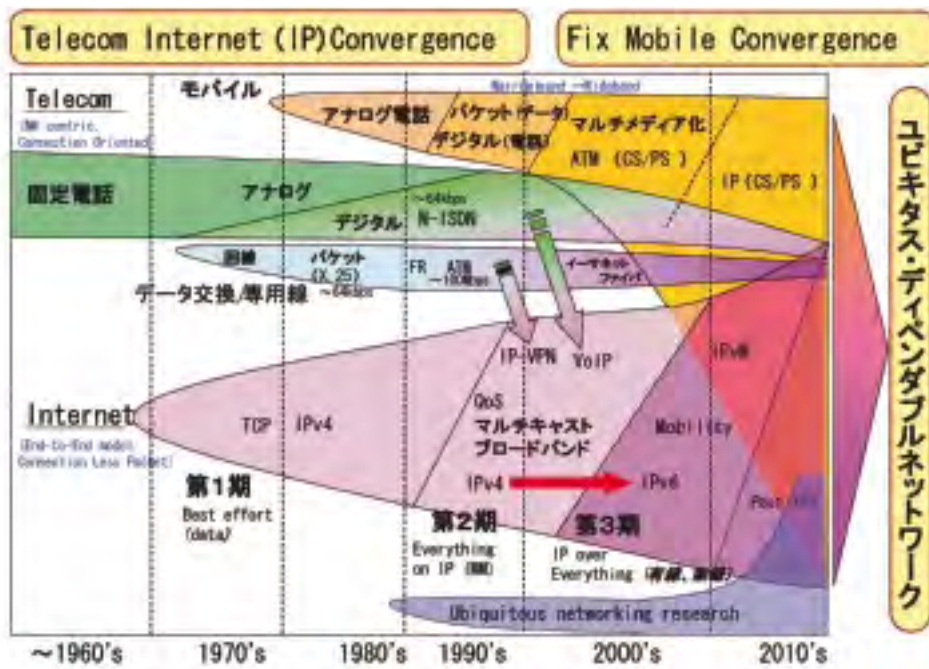


図3.3.4 TICとFMCによるユビキタス・ディペンダブル環境へ

コンピューティングにとってもネットワーク技術の重要性が高まっている。その典型はグリッドコンピューティングやP2P(Peer-to-Peer：対等通信)アプリケーションなどであり、今後はネットワーク・コンピューティング融合環境を前提としたネットワーク研究が必要である(図3.3.3参照)。また、各種のネットワークサービス間での統合が進む状況にある。すなわち、固定電話ネットワークはその役割を終えて、移動通

信による携帯電話とインターネットによる通話（IP 電話）へと移行する動向であるため、固定電話と IP 電話のサービス統合、固定電話と携帯電話のサービス統合が進み、ユビキタスネットワーク機能によって統合されて、今後の目標であるユビキタス・ディペンダブルネットワーク環境へと発展してゆく見通しである（図 3.3.4 参照）。

次に、将来のネットワークが提供するサービスについては、ユーザのおかれた状況とその目的によって、極めて多様なサービス機能が求められることになろう。図 3.3.5 は、現時点で想定されるサービス要素とその実現に必要な主要なネットワーク機能を



図3.3.5 ネットワークサービスビジョンと技術課題

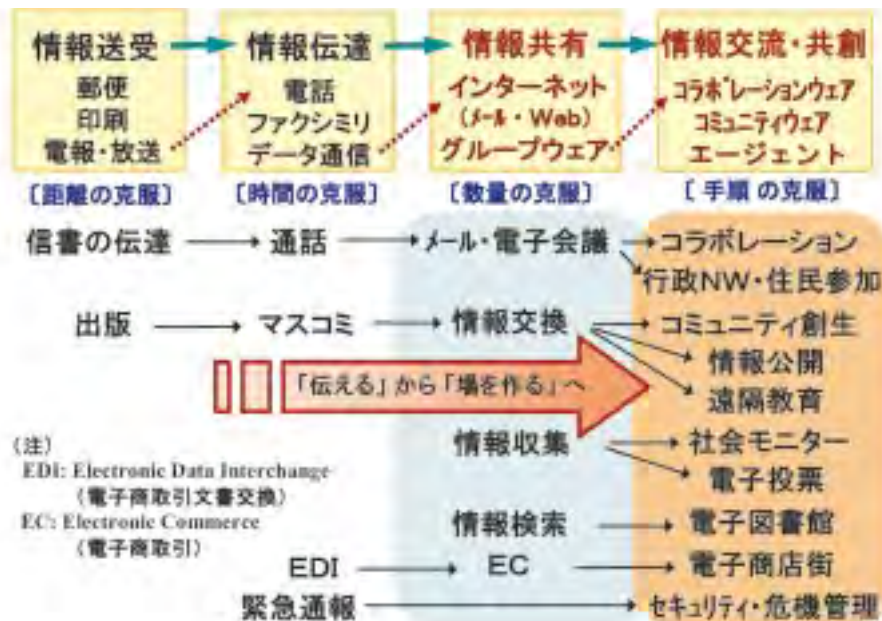


図3.3.6 今後のネットワークは情報交流・共創メディアへ

示したサービスビジョンの一例である。このような新たなサービスビジョンの捉え方は、現在のインターネットを用いる電子メール、Web、ファイル共有、グループウェアなどのベースである「情報共有」環境を提供するネットワークから、一步前進して「情報交流・共創」環境を提供するネットワークへと進化させ、個人あるいはコミュニティの独自のニーズにきめ細かに対応させることが必要になろう。このような、ネットワーク環境のパラダイム変換を図3.3.6に示す。ネットワークは、情報を伝えることは当たり前になり、情報交流の場を提供することが主たる役割になると考えられる。このような環境では、生活やビジネス活動のネットワーク依存度が益々高まるため、ネットワーク基盤と共にそこで提供されるサービスのディペンダビリティを追求することが、非常に重要な課題となる。

3.3.1.2 重要な研究領域

(1) 高位レイヤネットワークアーキテクチャ

ネットワークの機能が高度化して、種々のアプリケーションの開発が進むにつれて、またサービス機能が高度化するにつれて、高位レイヤに関わる機能の重要性が増している。特に、移動通信やIPネットワーク上でのアプリケーション・サービス開発が今後とも続々と続くことであろう。従来のOSI7レイヤモデルに基づくネットワークアーキテクチャの開発は、インフラとしてのネットワーク機能やデータ通信などの比較的低位の基本サービスを対象とした場合は、有用であり、ネットワークの効率的な開発に大きい役割を果たしている。しかし、インフラ上での情報流通のネットワークキングサービス機能や、さらにその上に位置するコンテンツを伴うサービス機能を問題にする研究開発が益々活発になる傾向にある。

このようなネットワークの高位レイヤ機能を、どのように抽象化して構造化すると、機能ブロックとして共通性・汎用性を高めることが出来るのか、そのような高位レイヤ機能のモデル形成、すなわち体系的なネットワークアーキテクチャの必要性が今後増してくるはずである。このアーキテクチャ研究は、特にセキュリティ機能にかかわる検討課題が多いと思われるが、Dependable ネットワークの構成技術を確立する上で重要な研究領域である。図3.3.7にこの研究の枠組みとキーワードの例を示す。

(2) ヘテロジニアスネットワーク

ネットワークの提供形態は、これからも多様な変化が想定される。旧来型のネットワーク機能から新しいネットワーク機能への変遷、異種のネットワークの組合せ・統合、ネットワークサービスの融合などが進むため、多様性と変化を前提としたヘテロジニアスネットワーク構成やネットワーク管理の研究が重要となる。このような環境での、ネットワークとして共通に検討すべき、特に重要な基盤的な研究課題の例をあげる。

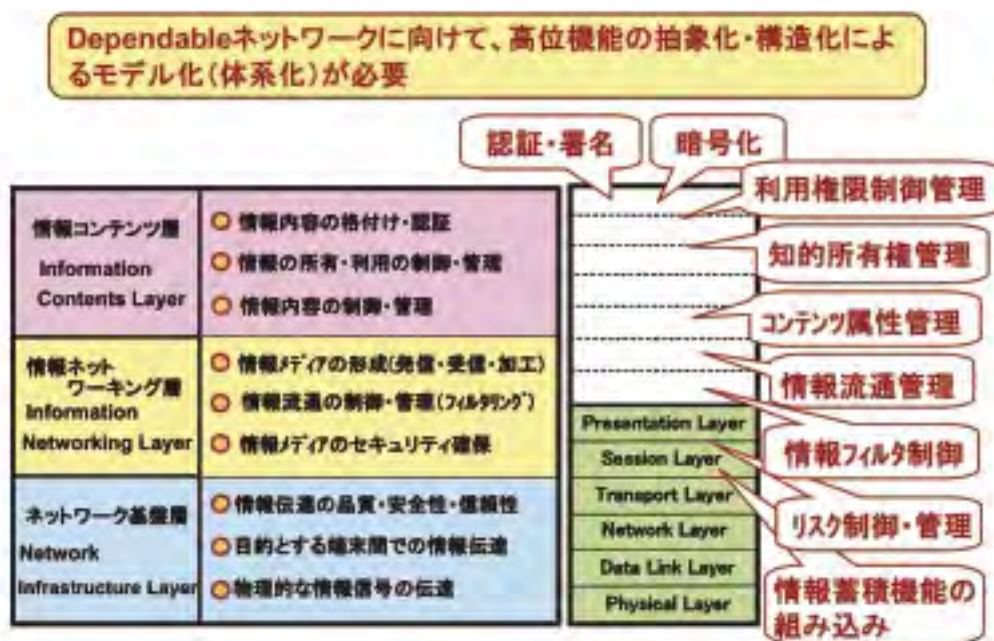


図3.3.7 高位レイヤネットワークアーキテクチャ研究

① 個人認証技術

複数のネットワークにまたがる Dependable なサービス機能を提供するには、認証機能が不可欠である。

② リスク管理技術

単一のネットワーク構成においても、非常災害や危機に対処する管理運用機能の構築は重要であるが、ヘテロジニアス環境ではネットワーク間にまたがるリスクに対処する管理をどのようにすべきか、また誰がどのように運用すべきか、について現実を踏まえた研究課題が重要である。

③ ネットワークモニタリング技術

単一ネットワークと異なり、一元的な制御・管理の困難なヘテロジニアスネットワークでは、ネットワークの状況やサービスの状況、トラフィックの状況を正確に把握し、それを多様に利用できるようにすることがネットワークやサービスの管理には不可欠の技術となる。

(3) サービス提供プラットフォーム

基本的なサービス共通機能をプラットフォーム技術として確立することは、今後のネットワークのヘテロジニアス化やサービスの高位レイヤ化が進むなかで、サービス提供の迅速化とディペンダビリティを考慮すると、非常に重要な研究領域となる。そのような観点から、いくつかの基盤的なプラットフォーム技術の例を以下に示す。

① P2P Webプラットフォーム

IP ネットワークにおける今後の可能性の大きいピア・ツー・ピア型のサービスを Web 技術ベースに構築することは、需要の大きい、また汎用性の高い技術として求

められるものである。その位置づけを図3.3.8に示す。

② センサネットワークプラットフォーム

今後のネットワークにおいて、センサ情報をネットワークから適宜利用できる機能は基本的な機能として構築することが、センサ情報のネットワーク化にとって重要であり、またセンサ情報は多くの利用法において信頼性やセキュリティが強く求められるものである。そのため、Dependableなセンサネットワークプラットフォームが、基盤的なプラットフォーム技術として確立されることが求められる。

③ 翻訳電話プラットフォーム

翻訳電話の研究は長い歴史をもつが、いくつかの利用場面ではようやく実用技術として利用可能になってきた。より汎用的な翻訳電話が実用域に達すれば、今後のグローバル化したネットワークにおいて、サービスプラットフォームとしての翻訳電話機能のニーズは大きい。

・ネットビジネスは、階層構造に分けて考えることができる

・P2PWeb プラットフォーム：ネットワークサービスインフラと各種サービスプラットフォームの間に入る → 新たなサービスインフラ階層

ネットワークサービスプラットフォームより上のレイヤでビジネスを行っている企業、もしくはビジネスを行う可能性が高い企業が、P2PWeb プラットフォームから見たASP となり、P2P サービス事業を行う際には、これらがアライアンスの候補対象になる。

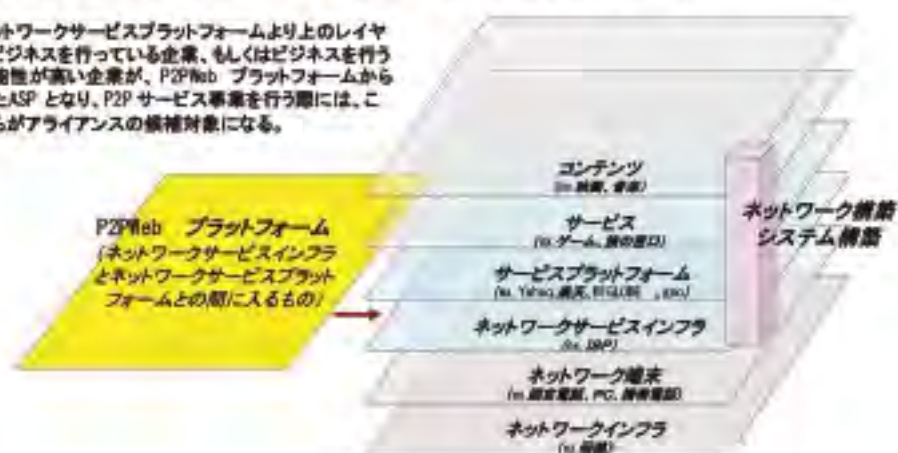


図3.3.8 P2P Web プラットホーム

(4) ネットワーク基盤技術

Dependableな視点から重要と考えられるネットワークの基盤技術は多いが、ここではその重要性が認識され、研究開発も進んでいる代表的な技術を以下にあげる。

① 超分散コンピュータネットワーク

分散コンピュータネットワークは、インターネットの普及とネットワークの高性能化にともない益々重要性を増す技術である。ハイエンドのグリッドコンピューティングから、ネットワークゲームに至る多様な展開が期待できる研究課題である。

② フォトニックネットワーク

爆発的に増大しつつあるトラフィックに対応するネットワーク基盤において、特にバックボーンネットワークの技術としては、光通信以外に候補がない。超高速の

光信号処理技術によって全光のネットワークを構成する技術として、フォトニックネットワークを実現することは、重要な基盤技術となる。フォトニックネットワークには、先端技術研究としての波及効果が数多く期待できる研究課題でもある。

③ 超高速データ移動通信

ネットワークのブロードバンド化にともない、移動通信での高速データ伝送のニーズは大きい。今後、移動環境での高速データ通信技術は重要な研究課題である。

④ 可視光通信

可視光による通信の特徴は、通信用の光信号の存在を肉眼で認識できることである。可視光通信は、室内や極めて短距離の無線通信の用途には利用可能なため、見ることがディペンダビリティに活かせる用途には非常に適した技術である。例えば、図3.3.9に示すように、視覚障害者の誘導用として検討されている例があり、ロボティクスなどへの応用も含めて特徴ある機能を実現する基盤技術となるであろう。



図3.3.9 可視光通信による Dependable サービスの例

(5) 基盤理論研究

Dependable な情報通信システムやネットワークを設計する基盤理論となるべき研究課題は、情報理論から発展した各種の誤り訂正などの符号理論、暗号・認証などの暗号理論、ネットワーク設計の基礎となるトラフィック理論、などがある。また、暗号通信には、鍵配送の盗聴が原理的に不可能な量子通信が基礎研究として期待され、近年その実現性が低速ではあるが実証されはじめた。これらの基盤研究の流れと位置づけを図3.3.10に示す。

① 符号理論と通信理論の統合

誤り訂正などの符号理論は Dependable な通信路を形成するための基盤技術であり、長い歴史があるが現在でも地道に発展している。ワイヤレス通信の高効率化に

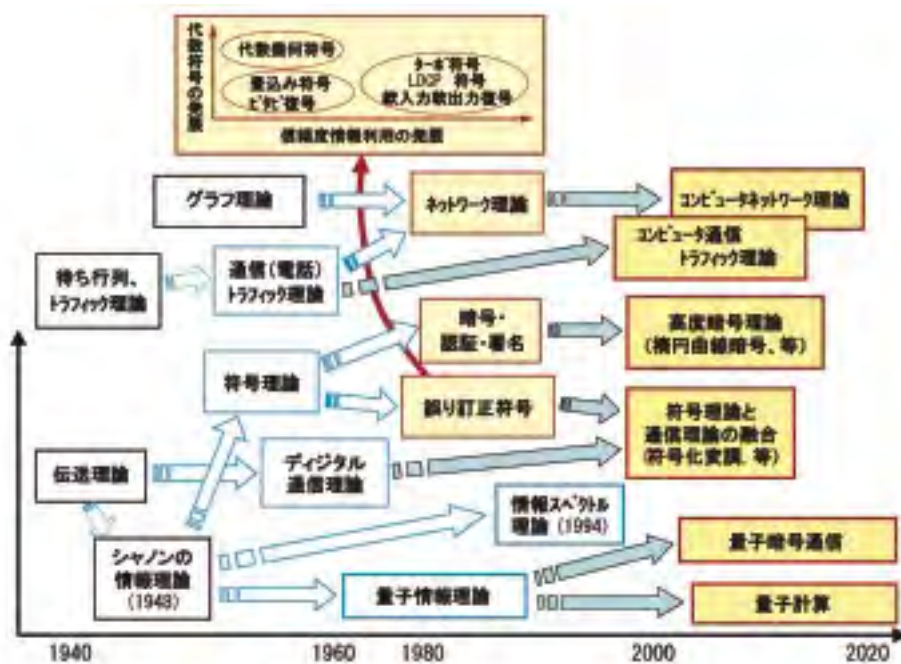


図3.3.10 Dependable 情報通信の基盤理論研究

求められる高度な変復調技術のベースとなる通信理論も一層精緻になってきている。通信路の環境変化に応じて適応的な符号割り当てを行うなど、符号理論と通信理論を統合した理論体系が重要になりつつある。近年盛んになってきたワイヤレス移動通信における適応符号化変調方式はその一例である。

また、パケット通信の主要な性能指標は、パケット損失率：PLR (Packet Loss Rate) と遅延である。パケット損失はデジタル伝送におけるビット誤り率：BER (Bit Error Rate) に対応しており、これら2つの指標には類似点が多い。実際、FEC (Forward Error Correction) はいずれにも使える技術である。

② 暗号・認証などの高度暗号理論

ディペンダビリティに最も重要なセキュリティの基盤技術が、暗号理論である。通信内容のセキュリティを維持するために、あらゆるところで暗号化の技術が使われる。また、正規の通信ユーザを見極める認証や署名はセキュリティ上の特に重要な基本手法であり、これらに共通な基盤技術である暗号理論は、常に発展させ不正利用者の追従を許さないように発展させなければならない必然性がある。

最近では、従来の素因数分解をベースとした暗号に加えて、楕円曲線関数などをベースとする高度な暗号理論が研究されるとともに、暗号強度の検証法などに関しても多様な理論的アプローチが試みられている。

暗号理論はセキュリティの根幹をなす基盤理論であり、この研究はデジタル通信のあるかぎり永遠の研究課題と言っても言い過ぎではない。

③ コンピュータ通信対応のトラフィック理論

ネットワークのトラフィック予測や、輻輳を避けるルーティング制御などに、ト

ラフィック理論は不可欠であるが、従来の電話網の設計に主眼をおいた研究から、今後の主たるトラフィックがパケットをベースとするコンピュータ通信であることから、コンピュータ通信対応のトラフィック理論の急速な進歩が求められている。コンピュータ通信では、コンピュータからのパケットの発生や、ルータでのパケット交換の振る舞いを適切に表現できる現実的なトラフィックモデルが必要である。コンピュータ通信のトラフィックはLRD (Long Range Dependency) という性質があり収束性が悪いために、その理論構築には多くの困難があるが、数学的裏付けが明確であり、かつ容易に活用できる実用的な体系の構築が強く求められている。

④ 量子情報理論

量子情報理論は、電子や光子などの物質の量子状態を利用する情報技術の可能性を示唆した新しい情報理論体系であり、具体的には量子暗号通信と量子計算の2つの方向で、現実の応用理論が展開している。理論が先行した研究であったが、近年は実験的にも具体性が出てきており、可能性の大きいのは量子暗号通信である。他の具体的な応用分野への可能性を探ることによって、新しい分野を切り開くことが期待されている。

3.3.2 “Peta/femto” を視点とする研究課題

3.3.2.1 ネットワーク分野における Peta/femto

Peta/femto は、エレクトロニクス、フォトニクスなどの先端技術が目標とする限界追求型研究を象徴しており、情報通信においてはどの時代においてもデバイスの限界追求と一体となって研究開発が進められてきた。その観点から、ネットワークが今後追求すべき課題を実現する上で、表裏一体となってエレクトロニクス、フォトニクス

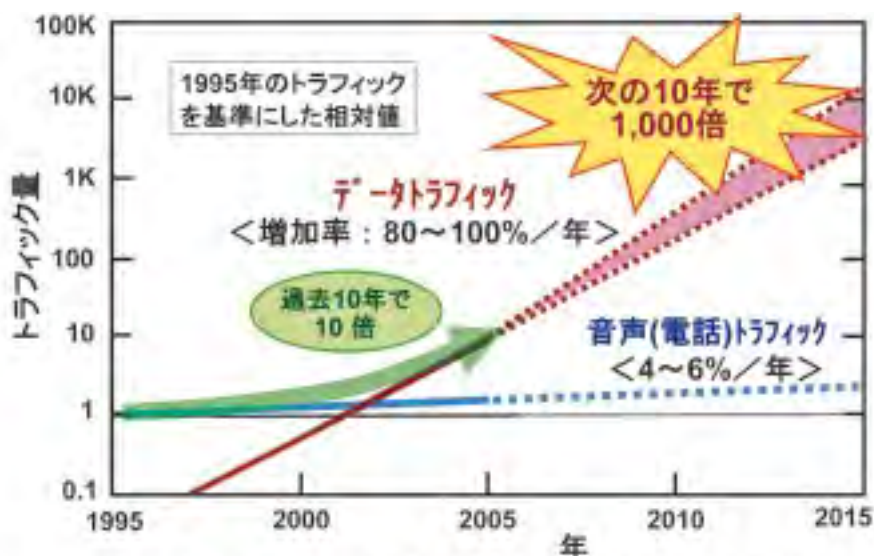


図3.3.11 情報通信トラフィックの増加傾向

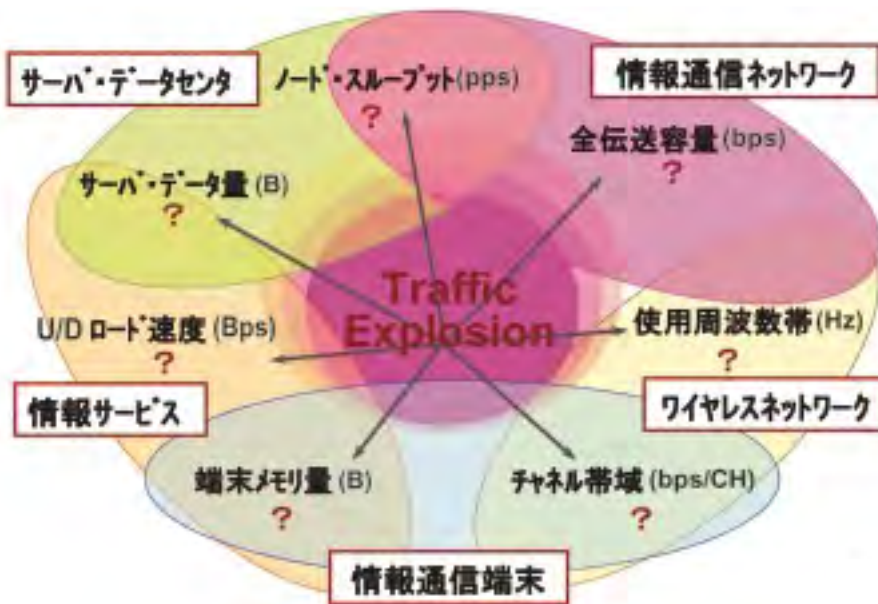


図3.3.12 “Peta/femto” の研究視点

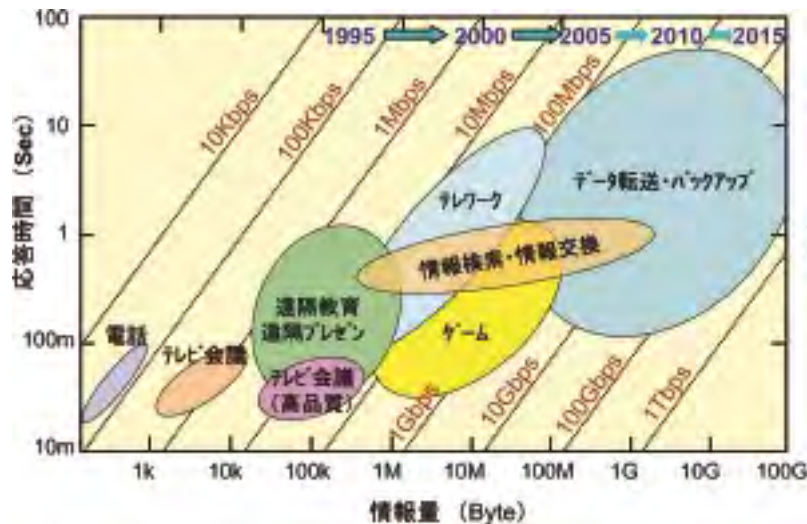


図3.3.13 ネットワークサービスに求められる応答性・伝送速度

などの研究課題が存在する。

ネットワークが今後10年スケールで乗り越えなければならない最大の課題は、年々倍増するブロードバンドインターネットのトラフィックである。単純に予測すれば、10年毎に1,000倍のトラフィックが増加することになる(図3.3.11参照)。特にバックボーンネットワークの大容量化は当面する大きな課題であり、移動通信においても求められる光通信並みの高速データ伝送能力は使用周波数帯の開拓をはじめ限界的な高能率信号処理技術が必要である。また、これらのトラフィックの蓄積・交換・処理には大容量ルータやサーバ機器が必要であり、超高性能コンピュータ技術と共通な高速処理技術を追求める課題がある。これらを図3.3.12にまとめて示す。

ユーザが端末から情報サービスにアクセスする場合の、所要情報量と所要応答速度の種々のケースをマップ化してみると、大よそ図 4.3.13 のようになる。今後の情報検索・情報交換、テレワーク、ゲームなどの大量の情報を瞬時に要求するケースでは、所要情報量は 1 MB~1 GB におよび、情報通信端末におけるチャンネルの速度は 10 Mbps~10 Gbps におよぶことになる。さらに大きな情報量を対象とするサービスとしては、大量データの転送や保存（バックアップ）がある。今後、10 GB~100 GB のデータを瞬時に転送する必要性が出てくるものと思われ、その場合 100 Gbps~1 Tbps 程度の超高速チャンネルが必要になるものと予測される。

3.3.2.2 重要な研究領域

(1) 超100 Gbps 級 LAN・光アクセス技術

最新の光アクセスは、ギガビットイーサをベースとしたものが主流となっており、ユーザインターフェースは 100 Mbps にしている場合が多いが、必要ならば 1 Gbps アクセスサービスが提供できる。上記のように、中小のオフィスや、将来は家庭からも超 100 Gbps クラスのデータ転送需要の発生が十分考えられる。

オフィスにおいては 1990 年代からイーサネットが広く普及しており、その伝送速度も着実に高速化が達成されてきた。それに伴ってルータの総転送容量の大容量化が進められてきている。これらの傾向を図示すると図 3.3.14 のようになる。上記のような需要がある限り、この傾向に従う高速化の研究開発はたゆまず必要であり、今後 10~20 年後の光アクセスの伝送速度については、現在の 100 倍~1000 倍の高速化を実現する超 100 Gbps 級の LAN・光アクセス技術の研究開発が必要であろう。これらを達成するために、性能・コスト比の優れたデバイス研究が重要課題である。

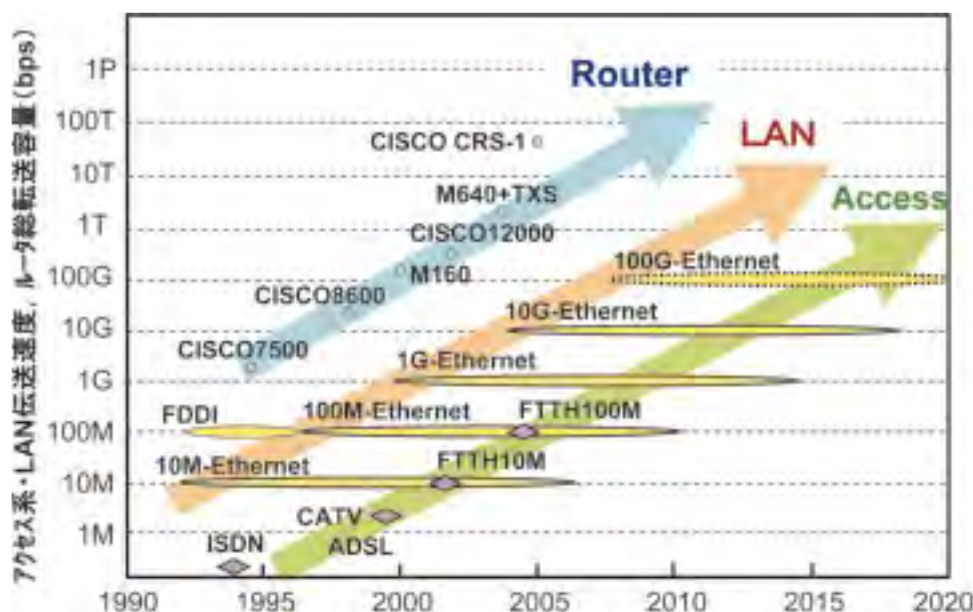


図3.3.14 アクセス系・LAN・ルータの高速化傾向

(2) 情報理論限界に迫る高性能通信技術

ワイヤレスアクセスは、現在の第3世代(3G: 3rd Generation)から次世代の4Gでは100 Mbps オーダのデータ伝送速度を目指して世界的に研究開発が進んでいる。しかし、その前段として間もなく、既存のワイヤレス LAN や W-CDMA の技術改良によって数 Mbps~10 Mbps オーダの Beyond 3G サービスが実用化されようとしている。

4Gでは、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) や MC-CDMA (Multi-Carrier-Code Division Multiple Access) などの変復調技術と共に、MIMO (Multi-Input Multi-Output) 技術によって移動通信の最大の難問である、マルチパスフェージングの影響を大幅に緩和することなどが各所で研究されている。NTT ドコモ研究所は、このような技術を用いて昨年、移動中の自動車から1 Gbps 程度までの実証実験を行っている。一方、室内などのほぼ固定通信と見なせる近距離において、有線と同等な速度を目指すワイヤレス技術として UWB (Ultra-Wide Band) が研究されている。これらの、研究開発をマップ化すると図 3.3.15 のようになる。

これらの移動通信においては限られた周波数資源を限界まで使いこなすために、状況への種々の適応制御技術を駆使することが必要であり、情報理論の限界に迫る高性能通信技術の研究が重要課題である。

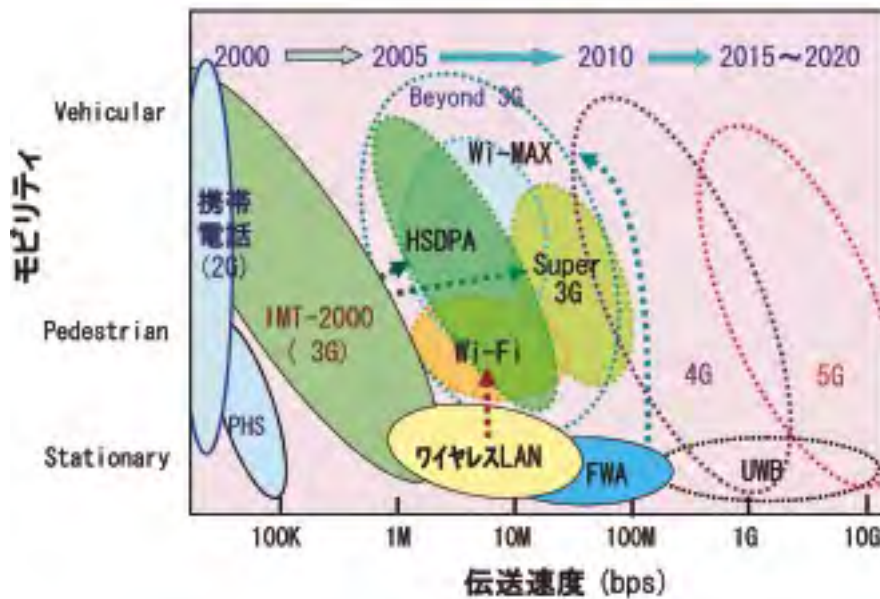


図3.3.15 ワイヤレスアクセス系のブロードバンド化

(3) 光バースト/光パケットフォトニックネットワーク技術

超大容量伝送を必要とするバックボーンネットワークでは、光ファイバーを凌駕する広帯域伝送媒体が存在しない現状では、光ファイバー通信の高度化が不可欠である。光通信の伝送容量を増す上で最も成功した光多重化技術は WDM (Wavelength Division Multiplexing) であり、伝送容量が1 Tbps 程度 (128 CH×10 Gbps) の方式が実

用化されている。長距離伝送に適する光ファイバーの低損失な帯域は大よそ 25 THz 程度に限られるため、伝送容量の可及的増加には多値伝送などが必要であり、最近の研究はそのような高能率伝送へと向かっている。4 ビット/Hz 程度の高エネルギー化が実現された場合には 100 Tbps の伝送が可能となる。WDM 伝送の研究開発の動向を図 3.3.16 に示す。

一方、光時分割多重 OTDM (Optical Time Division Multiplexing) によって波長当りの伝送速度を追求する研究も進んでおり、伝送距離が数 100 km 以下では 160 Gbps ないし 320 Gbps の伝送実験に成功している。その他の光多重化技術として、ワイヤレス通信で成功した CDMA (Code Division Multiple Access) を光領域で実現する OCDM (Optical Code Division Multiplexing) の研究も進んでいる。

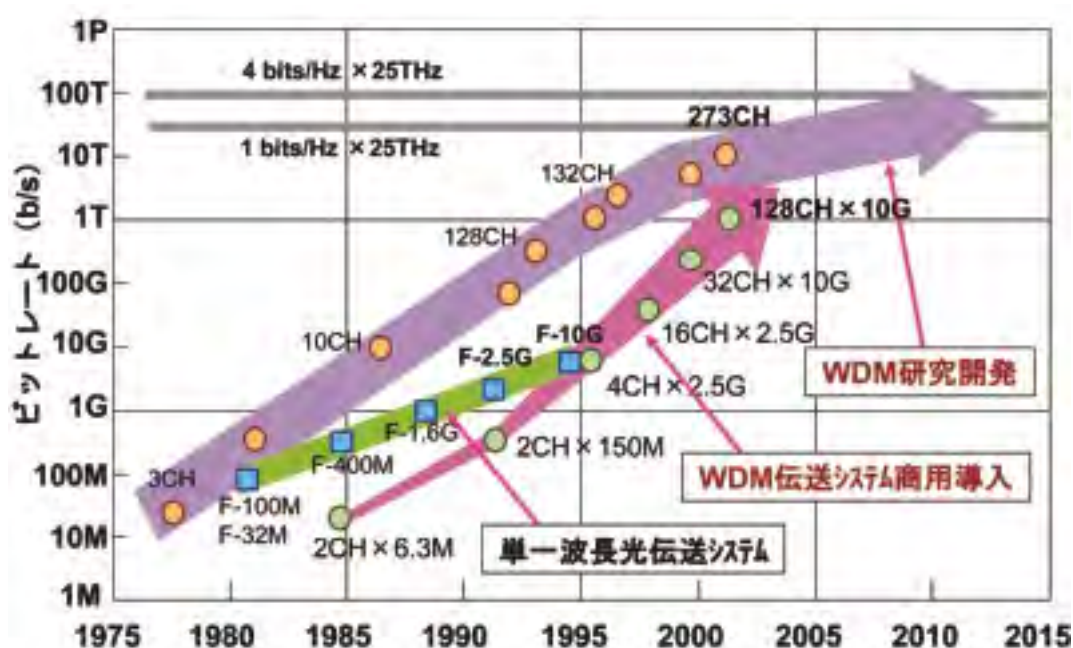


図3.3.16 光通信の大容量化の傾向

光多重化によって得られた超大容量の伝送能力を、ネットワークとしてトラフィックの疎通に直接活用するには、光領域において光回線あるいは光パスを形成し、そのルーティングを光信号のまま行う必要がある。このようなネットワークをフォトニックネットワークと称しており、ルーティングには種々の光回路技術と新たな制御技術が必要となる。WDM の各波長を切換えて相互に接続する OXC (Optical Cross Connect) と電気ルータとを組み合わせ、大きなトラフィックとなるルーティングを光信号のまま行うタイプが当面の現実解であり、すでに製品化に向けた開発段階にある。

次世代ネットワーク向けのフォトニックネットワークには、光バーストスイッチによるものと光パケットスイッチによるものが対象となる。瞬時に大容量ファイル転送を行うような目的では、OXC の光回線切替えをファイル転送中のみバースト的に行うタイプの光バーストフォトニックネットワーク (OXC スイッチ回線型) が有望である。

また、インターネットでの時々刻々とダイナミックに変動する対地間トラフィックをそれに見合う帯域の光パスで疎通させるような目的には、時間領域の超高速バーストスイッチによって帯域に見合うバーストサイズを制御するタイプ（ダイナミック帯域制御パス型）が有望である。電気領域でのルータと同様な機能を光領域で実現しようとする、光パケットスイッチによるフォトニックネットワークが必要である。これらは、通信要求への応答時間（スイッチ粒度）を如何に小さく、また帯域制御の単位（帯域粒度）を如何に小さく実現し得るかという指標によって図3.3.17のように位置づけられ、技術の進展は図中の傾向にそって高度なフォトニクスや光信号処理の研究の進歩と共に進むものと思われる。

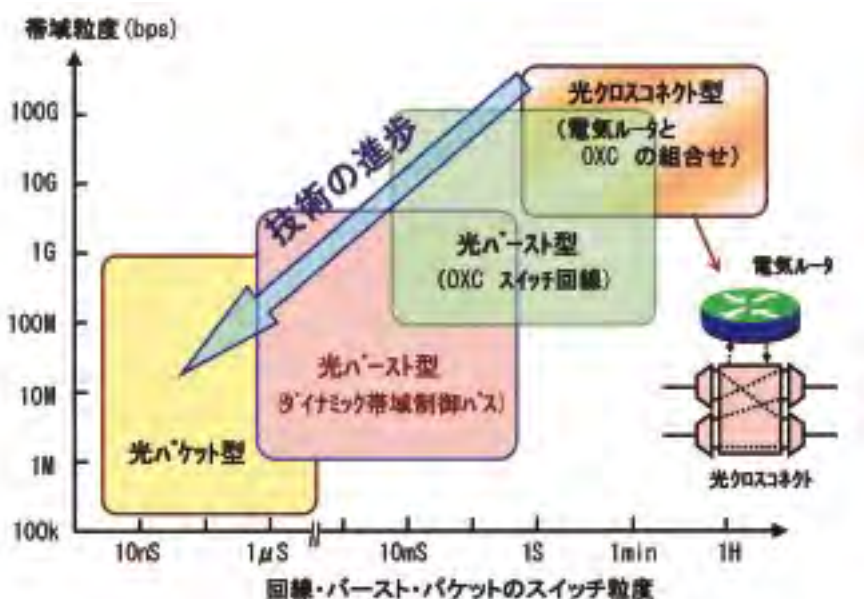


図3.3.17 フォトニックネットワークの研究トレンド

(4) テラヘルツ波帯の開拓とテラヘルツ波利用計測・観測

無線通信における次世代の周波数活用はミリ波帯であるが、さらに将来のICT（情報・通信技術）の活用にはテラヘルツ波帯の開拓が重要である。例えば、電波天文分野ではチリのアタカマ砂漠に建設中の電波天文台で観測を目論んでいる周波数域は約1 THzに及ぶ。一方、現在の光通信の周波数帯は約200 THzであるが、さらなる超低損失な伝送媒体はより長波長帯すなわち数10 THz帯において可能性が高い。このような、THz帯域の開拓は、当面の情報通信分野での需要は不明であるが、他分野へのICTの応用という観点では可能性が多い。特に、各種の計測や、医療における応用では、連続的にスペクトルがそろったことへの期待が大きい。

また、テラヘルツ帯のデバイス研究が進むことは、ミリ波帯の応用システムの研究開発を進める上で極めて重要なことである。

上記のようなことから、テラヘルツ波帯の開拓は、ICTの応用システムの可能性を広げる上で、重要な研究課題である。

(5) 電波環境のアーカイブ/解析

携帯電話、ワイヤレス LAN、ITS (Intelligent Transport System) など、近年のワイヤレス通信は非常に多様化すると共に、局数も指数関数的に増加している。同時に、それらによって行われる通信形態やサービスも急速に多様化が進んでいる。このような電波環境において、一旦問題が起きた場合にその原因を追及したり、解析する技術は将来非常に重要になると考えられる。例えば、免許の不要なワイヤレス LAN において故障が生じ妨害電波を出し始めたような場合それを的確に発見すること、AdHoc 通信において不法な通信が行われたことがわかった場合にそれを追及するようなこと、を解決する技術である。

これには、対象となる周波数帯を数多くの観測点で常時監視し、当該周波数スペクトルを全てアーカイブしておき、問題が顕在化したときに過去に遡って電波空間の解析を行い、その結果過去に生じた問題事象を発見するような仕組みが必要である。このような技術を実現するには、テラ bit/Hz 級の超高速 A/D 変換器と、その出力をしかるべき時間記録するためのペタバイト級の超大容量記録手段が必要となる。さらに、目的の解析を行うためには、空間的に配置された監視ポイントでの受信情報から目的の事象を抽出する高度な信号処理技術が必要となる。

このような、電波環境のアーカイブ/解析技術が実現した場合には、上記のような例のみならず、極めて多様な応用が考えられその波及効果は極めて大きいであろう。

(6) 量子光通信による暗号鍵配送の実現

量子情報通信の実現法として最も可能性の高い技術は、光ファイバーによって光子の量子状態を維持したままで伝送を行うことである。これを暗号通信の秘密鍵配送に使えば、途中での分岐などによって盗聴された場合に、量子状態が維持できない性質から、盗聴が不可能なことが原理的に保証されている。そのため、この技術が実現し

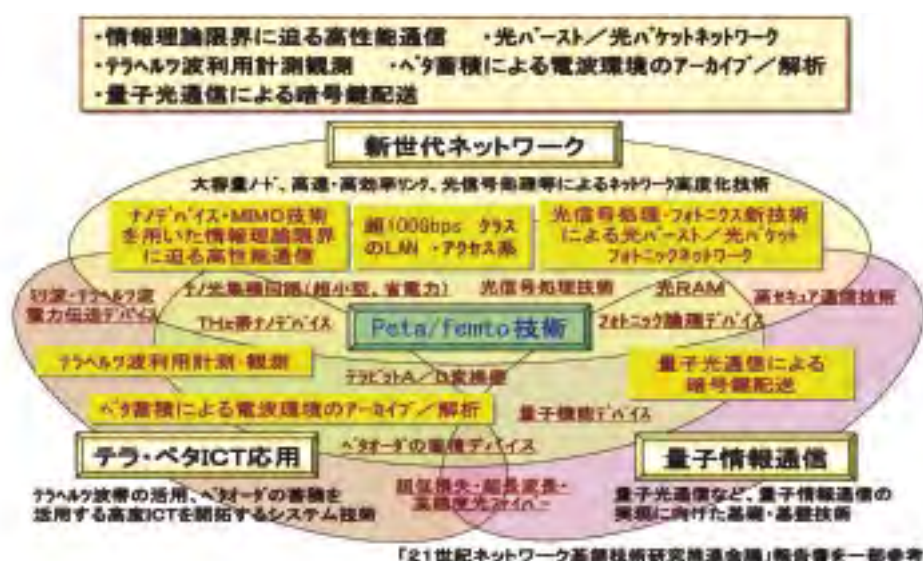


図3.3.18 “Peta/femto” 視点の連携が期待される課題

た場合には、従来の解読のための計算量の膨大さを論拠とした相対的な安全性ではなく、絶対的な安全性が保証できるようになる。

この目的のための光量子通信技術は、近年実験的に研究が進んでおり、最も進んだ結果は、日本電気と NICT による実験で得られており、16.3 km の距離で 13 kbps の速度での量子通信に成功している。このような研究を発展させ、実用に供しうる技術として実現させることが重要な課題である。

以上のような、現状技術の限界を打ち破る観点での情報通信技術を、図 3.3.18 に関連するそのほかの Peta/femto 技術と共に示す。

3.4 コンピューティング分科会

3.4.1 検討の前提

二つのキーワード、Dependable と Peta/femto、を軸にしてコンピューティング分野を俯瞰し、今後重要になる研究開発領域・課題を抽出するための検討を行った。その際、以下の諸点に留意した。

- 1) 10 年後に確立されるべき情報技術、コンピューティング技術を洗い出す。
- 2) このため、現状で予測し得る 15—20 年後の社会ニーズ(社会システム、生活スタイル、産業形態)をあえて想定する。
- 3) 現状の技術シーズを特に我が国の国際競争力を強化する観点から整理する。
- 4) コンピューティングシステムの階層構造の視点を導入する。
- 5) 他分野(社会応用、ロボティクス、ネットワーク、デバイス)との関連を示す。

現在から 15—20 年前の 1985 年から 1990 年を振り返ってみれば、社会の状況は、我が国全体が官も民もバブルに狂った時代であった。技術の状況は、我が国半導体メーカーが DRAM で世界市場を制覇してインテルをメモリ事業から撤退させ、ジャパン・アズ・ナンバーワンと持ち上げられて、人々が「もはや米国から学ぶものは何もない」と錯覚した時期であった。通信ネットワークとコンピュータネットワークは異なる技術と考えられ、通信分野では、ようやく NTT が携帯電話サービスを開始した時期であった。一方、コンピュータネットワーク分野では、米国の研究用ネットワーク CSNET に我が国の研究用ネットワーク JUNET が初めて接続されたばかりの時期であった。もちろん、ネットワークプロバイダなどはまだ存在せず、まして近年の Web サービスを中心とする携帯文化の隆盛を予見できた人はいなかっただろう。

これからの 15 年の技術の進歩、社会の変化はこれまでの 15 年とは比較にならないほど大きいと思われる。従って、現状で予測し得る 15—20 年後の社会ニーズの展望はその範囲、精度ともに極めて限定的なものにならざるを得ない。そのような状況であえて、これからの社会のニーズに応じて情報技術、情報システムが貢献すべき分野、提供すべきサービスのいくつかを例示すると以下のような事柄が挙げられる。

1) エネルギー/環境の保全

環境デザイン，総合エネルギー管理，物流・交通渋滞解消

2) 医療/人間機能の拡大

高齢者/障害者の支援・共生，非侵襲生体計測・医療

3) 安全/安心の確保

情報ネットワーク/サービスの安全性，信頼性，個人情報 の 保 全 ， 保 護

4) 経済/産業の活性化

知的創造支援，設計・シミュレーション支援，大量情報処理，意志決定支援

これらのサービスを想定してコンピューティング分野の研究・技術開発が目指すべき目標のいくつかを挙げるとすれば，それらは以下のようなキーワードで表現される。

1) ディペンダビリティ：安心，安全の保証を！

2) Eco computing (Low power)：環境と共生を！

3) Universal design：誰でもどこでも容易に！

4) High-quality：高品質で快適に！

情報システムの提供するサービスの品質として，従来は，主としてシステムの性能 (Performance) のみが追求されてきた。しかしながら，これからの情報システムが提供することを期待されるサービスは，まず第一に社会あるいは人々がそのサービスに信頼をおき，安心して依存できるものでなければならない。次に，エネルギー総需要抑制の観点からも，新産業創出と国際競争力強化の観点からも，そのサービスを提供するためのエネルギー消費は最小化されなければならない。さらに，この情報サービスは，あらゆる環境ですべての人々に提供されなければならない。情報システムのサービス品質 (Quality of Service) はこれらの属性をすべて包含したものでなければならない。従って，上記の4つのキーワードは必ずしも排反的ではないし，直交的でもない。

分科会では，これらのキーワードのうち，最も重要な技術目標の一つとして優先的に検討すべき技術概念は，科学技術基本計画において科学技術政策が目指すべき国の姿の一つとされている「安心・安全で質の高い生活のできる国」を実現するための普遍的概念である「ディペンダビリティ (Dependability)」とすべきであることを確認した。

「ディペンダビリティ」を情報システムにおける最も重要な技術概念とする背景には，ネットワークの急速な拡大，発展によって我々の向かう高度情報化社会に生じる次のような本質的なリスクの存在がある。

1) ブラックボックス化：

社会，政府，企業，個人が関わるあらゆる活動がネットワークに依存しているにもかかわらず，そのことが十分認識されておらず，システム全体の動作を誰も正確には把握できない状況で，しかもその事実が外からよく見えない。

2) システムの複雑化：

情報システムが巨大化し、複雑に絡み合った異種システムの予期せぬ相互作用や人間とシステムの予期せぬ相互作用が絶えず、至る所で、人知れず発生する可能性がある。ディペンダビリティを阻害する多くの問題は情報システムにおけるこの複雑な相互作用で生じる。

3) 情報量の大規模化：

世界中で毎日大量に生産され続ける巨大な情報量が国境を越えて蓄積，流通，処理されており，これが，国家安全保障，科学技術研究，経済・産業活動，公共サービス，個人生活などあらゆる局面に大きな影響を与え，ディペンダビリティに対する脅威になり得る。

4) 利用の多様化：

モバイル，ユビキタス環境は，経験のない無邪気なユーザも，悪意を持った練達のユーザもアクセス可能であり，故意の侵入によるセキュリティ上の問題に加えて，過失による侵入や人為的ミスの可能性が常に至る所に存在する。

5) 責任所在の不明確化：

ネットワークは，互いに独立に設計された巨大な数のシステムがすべて互いに接続されて成長を続ける「システムのシステム」であるが，それは明確に定義されたシステムにはなっておらず，その運用，品質，安全の保証に関して責任の所在が不明確である。

このような情報化社会の抱えるリスクは今後増加こそすれ，減少することはない。従って，ディペンダビリティの実現は情報技術の研究開発において最優先の挑戦課題である。

なお，コンピューティング分野の重要技術を検討するに当たっては，以下のようなシステム階層の存在を考慮することが有効であり，一般的である。

アプリケーション階層

ミドルウェア階層

システムソフトウェア階層

アーキテクチャ・VLSI 階層

一方，Peta/femto というキーワードは，コンピューティング分野の視点からは，1 Peta flops の計算性能を達成するスーパーコンピュータ，1 Peta bytes の記憶容量をもつストレージ，femto 秒オーダーの動作速度を達成するデバイスなど，今後の情報技術の発展を主としてハードウェア性能面から支える技術の進歩状況あるいは開発目標を表している。これらの性能目標はこれまでもコンピューティングシステムの技術開発で追求されてきたものであり，今後も続けられる。また，その達成はデバイス技術の進歩によるところも多い。従って，このキーワードに関してこの分科会で改めて議論することはしなかった。

3.4.2 ディペンダビリティの概念

このような状況を背景として、目指すべき目標として「コンピューティングシステム・ネットワークのディペンダビリティ」の定義と概念を確認する。

ディペンダビリティは、一言で表せば、「提供されるサービスが正確で信頼がおける」というコンピューティングシステムの性質であり、これから向かう高度ネットワーク社会の「安心・安全」を担保する基本的な技術概念である。

国際的には、25年前にIFIP（国際情報処理連合）のワーキンググループ10.4で、偶然あるいは過失によって生じ得るフォールトに対して情報システム・ネットワークの安心・安全を確保するフォールトトレランス（fault tolerance）と、意図的あるいは悪意で生じさせるフォールトに対して安心・安全を確保するセキュリティ（security）の概念を統合するコンピューティングシステムの性質として、ディペンダビリティの概念が次のように定義されている。

（詳細は <http://www.dependability.org/wg10.4/> に掲載されている）

....The notion of dependability, defined as the trustworthiness of a computing system which allows reliance to be justifiably placed on the service it delivers, enables these various concerns to be subsumed within a single conceptual framework. Dependability thus includes as special cases such attributes as reliability, availability, safety, security.

ディペンダビリティの概念を図示すると、図3.4.1に示すようになり、次の6つの属性を含む。

- 1) Availability
- 2) Reliability
- 3) Safety
- 4) Confidentiality
- 5) Integrity
- 6) Maintainability

一方、セキュリティ（Security）の概念はAvailability, Confidentiality, Integrityの属性によって構成される。従って、ディペンダビリティはセキュリティを包含する技術概念である。

ディペンダビリティを阻害する要因として障害（failure）、誤り（error）、フォールト（fault）があり、それらの関係を図示すると図3.4.2のようになる。

システムが提供するサービスがその仕様から逸脱したとき、障害が生じたという。障害を起こしたシステムの状態を誤りという。誤りの原因をフォールトという。システムに冗長性を導入して、誤り状態をマスクしたり、誤りを検出して訂正することによってシステムのインタフェースに障害が起きないようにすればフォールトトレランス（fault tolerance）が実現される。ある誤りが発生したとき、その原因となるフォ

ールトは一つとは限らない。フォールトは普通いつ発生したか分からないし、観測することもできない。観測できるのはシステムの誤り状態となって現れたときだけである。



図3.4.1 ディペンダビリティとセキュリティの属性

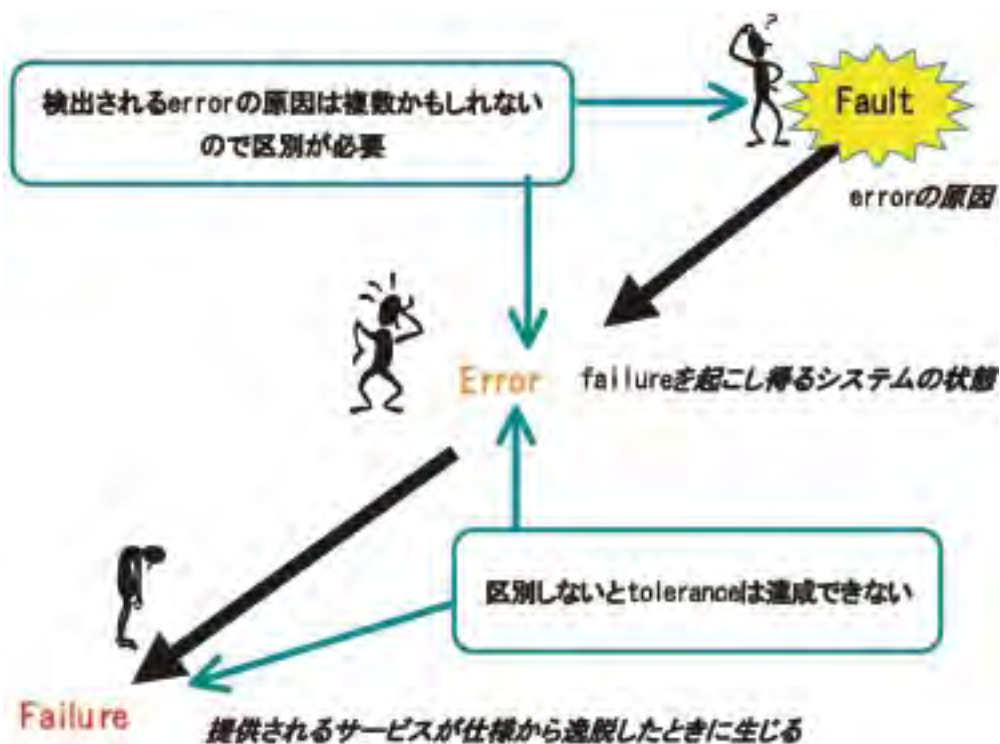


図3.4.2 ディペンダビリティの阻害要因

障害，誤り，フォールトの関係はシステム階層において，図3.4.3に示すように，再帰的な性格を持つ。システム階層のあるレベルにおいて生じる障害は，そのレベルを要素とする上位レベルのシステムにとってはフォールトと考えられる。そのフォールトが原因で上位レベルのシステムに誤りが発生し，それが障害を引き起こすと，それがさらに上位のシステムのフォールトになる。

そのフォールトはいくつかの仕方で分類される。発生フェーズによって，システム開発段階のフォールトとシステム稼働中のフォールトに分かれる。その他に，内部フォールトと外部フォールト，ハードウェアフォールトとソフトウェアフォールト，物理的フォールトと人為的フォールト，偶発的フォールトと悪意によるフォールト，過渡的フォールトと永久フォールトなどの互いに独立な分類ができる。

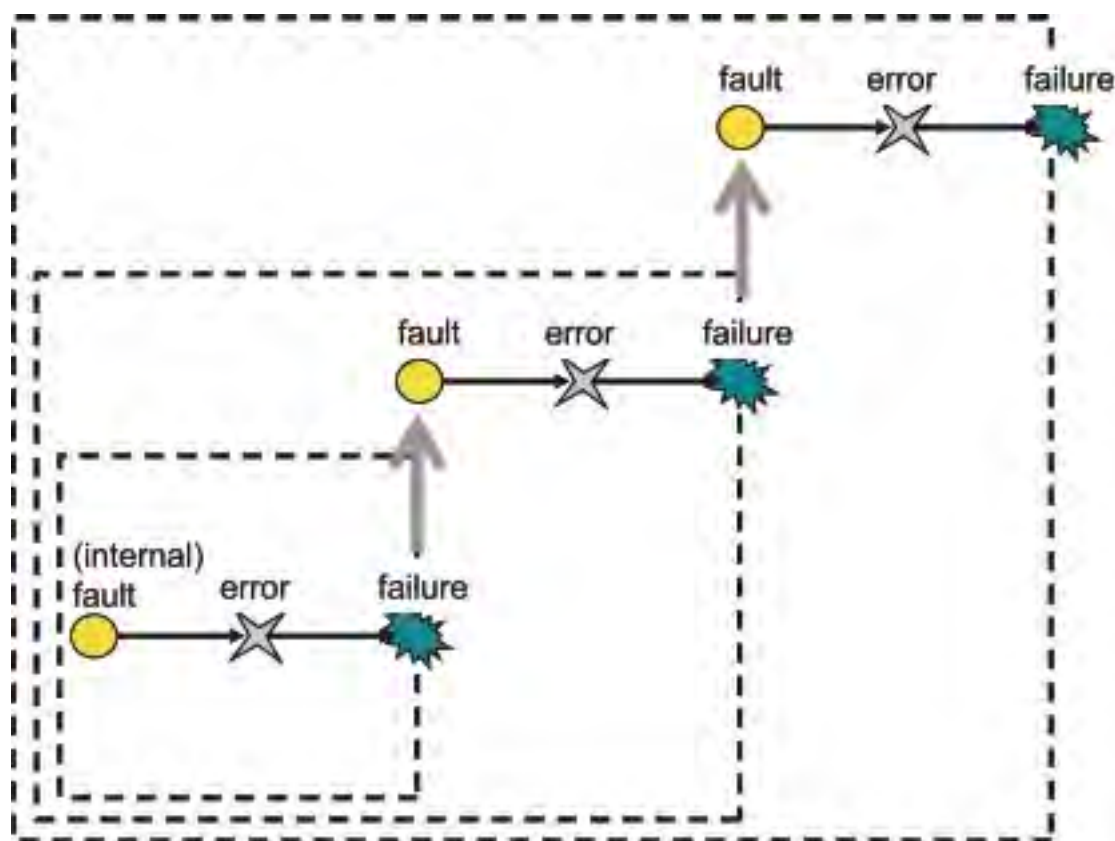


図3.4.3 障害，誤り，フォールトの再帰的關係

一例として，セキュリティ技術の対象となる侵入（intrusion）を従来のフォールトトレランス技術におけるフォールト，誤り，障害の再帰的關係と同じ枠組みで統一的に扱くと図3.4.4に示すような考え方になる。

アタック(attack)とは，セキュリティの属性である availability, integrity, confidentiality に対して意図的に違反する狙いで外部から悪意をもって行う行為である。脆弱性(vulnerability)とは，システムの仕様，設計，構成，使用法などに存在する悪意の，あるいは偶発的なフォールトであり，外部からの侵入を招く可能性を持つ。侵

入 (intrusion) とは、脆弱性を利用したアタックによって生じる悪意の操作フォールトである。

このように悪意による侵入もシステムに誤り状態を生じさせる，という点で伝統的な偶発的フォールトと同様な効果をシステムに与え，それがシステム障害を生じさせる，と考えることによって，従来のフォールトトレランス技術の多くの部分がセキュリティ技術にも使える。

これらの概念の整理と定義に関する議論は国際情報処理連合 IFIP (International Federation for Information Processing) の WG10.4 “Dependable Computing and Fault Tolerance” においてなされている。

詳細は，<http://www.dependability.org/wg10.4/>を参照。

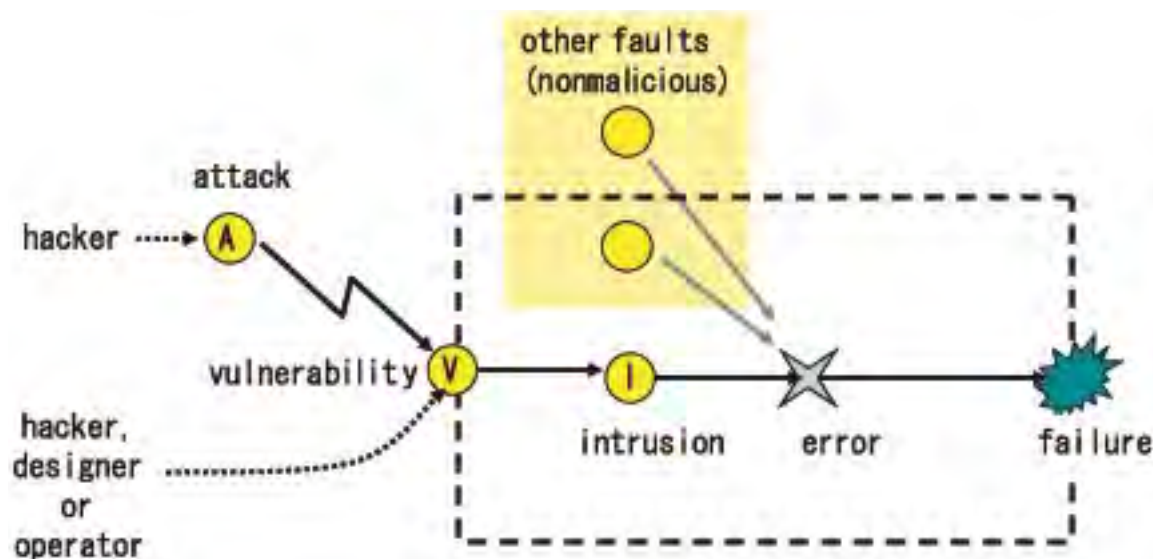


図3.4.4 侵入 (intrusion) を考慮したフォールトモデル

3.4.3 コンピューティングの階層

コンピューティング分野は図 3.4.5 に示すように階層化モデルとして表される。中核にネットワークで結合された多数のコンピューティングシステムがあり，それを様々なミドルウェアが覆い，ユーザとのインタフェースを提供する。コンピューティングシステムは，CPU，ストレージなどのほかに，OS，コンパイラなどのシステムソフトウェアで構成される。ミドルウェアの上に様々なアプリケーションが構築され，アプリケーションを効率的に組み合わせてサービスを提供するメタサービスの階層がある。最下層にはコンピューティングシステム，ネットワーク，インタフェースを支えるデバイスが存在する。ユーザインタフェースから見える階層はアプリケーションとミドルウェアであり，コンピューティングシステム，ネットワークはユーザからは見えない。

今回検討したキーワード「Peta/femto」は，コンピューティングシステム，ネット

ワーク、デバイスの性能、容量、集積度などの技術的進歩を表すものであり、ディペンダビリティは、インタフェースを通じてユーザに提供されるべきサービス品質を表すものである。

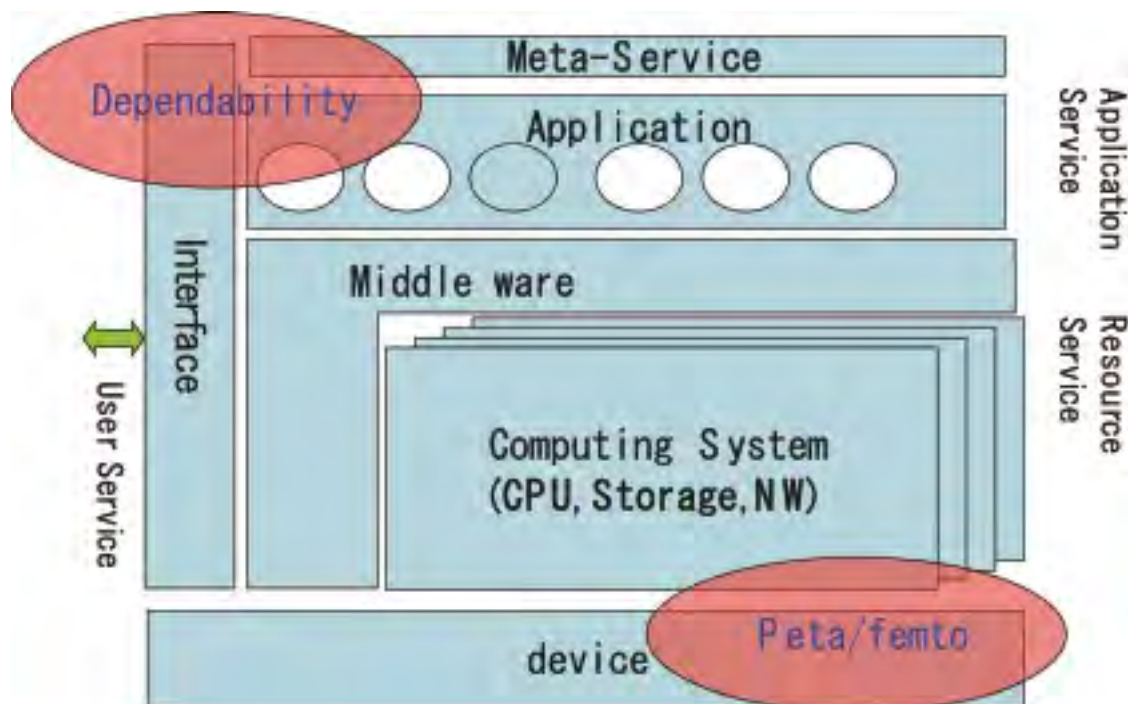


図3.4.5 コンピューティングの階層

3.4.4 アーキテクチャ・VLSIの立場からの技術俯瞰

アーキテクチャ・VLSIは図4.4.5のコンピューティング階層において主として中核のコンピューティングシステム（CPU、ストレージ、ネットワーク）に関わる技術分野である。

図3.4.6、図3.4.7、図3.4.8に、それぞれ、10年前（1995年）、現在（2005年）、10年後（2015年）におけるアーキテクチャ・VLSI分野から見た技術俯瞰図を示す。

VLSI、アーキテクチャ、OS、コンパイラなどを要素技術とするコンピューティングシステムは大きく3つの分野、すなわち、スーパーコンピュータなどのようにコストより性能を重視するハイエンド分野、組込みシステムなどのように性能よりコストや消費電力を重視するローエンド分野、その中間に位置するパソコン、サーバの分野、に分けられる。10年前（図3.4.6）は、半導体微細化技術の進歩に支えられ、「より速く、より小型に」を合い言葉に、計算性能、記憶容量、通信性能の増大要求に応えることを技術目標とした時期として特徴づけられる。ハイエンドでは、ハイパフォーマンスコンピューティング用途に、ベクトル計算機、超並列計算機、並列化コンパイラ、大規模データベースなどが開発され、ローエンドでは、携帯機器を始めとする組込みシステム用途に、RISCプロセッサ、リアルタイムOS、組込用ソフトウェアが開発され

た。またパソコン、サーバなどの中間領域では、スーパースカラプロセッサ、PC用RISCプロセッサ、OSなどのほか、論理合成・論理圧縮アルゴリズムに基づいたLSICADプログラムが開発され、商用化された。この間、パソコンやサーバ用途のマイクロプロセッサ、OS、データベース、ネットワークルータ、LSICADの分野では、米国が圧倒的な強さを発揮しており、この分野では、我が国がこれから重点的に強化を図ったとしても、米国に追いつき、追い越すことは容易ではないと考えられる。従って、パソコンやサーバの中間領域は米国に任せて、むしろ、我が国が技術的優位を確保しているローエンド分野、及び、技術的波及効果の大きいハイエンド分野に重点的に研究開発投資を振り向けるべきである。

現在（2005年）のコンピューティングシステムの状況（図3.4.7）は、ようやく「より速く、より小型に」という技術開発目標に限界が見え始め、代わって、ディペンダビリティの実現や低消費電力化が重要な目標になってきている。ローエンドの応用分野として、従来の組込み携帯用だけでなく、マルチメディア、ゲーム、情報家電、ユビキタス応用、ロボット、センサネットワーク、カーエレクトロニクスなど、我が国が得意とする組込みシステムの応用が急速に広がっている。これらの応用を実現する要素技術として、チップ間無線、ネットワークオンチップ、リコンフィギュラブルシステム、高位合成技術などがある。一方、ハイエンドでは従来のスーパーコンピューティング、大規模データベースに加えて、グリッドコンピューティング、高速光リンク技術の研究開発が進められている。

このような現状から10年後の2015年の技術状況（図3.4.8）を見通すとき、応用分

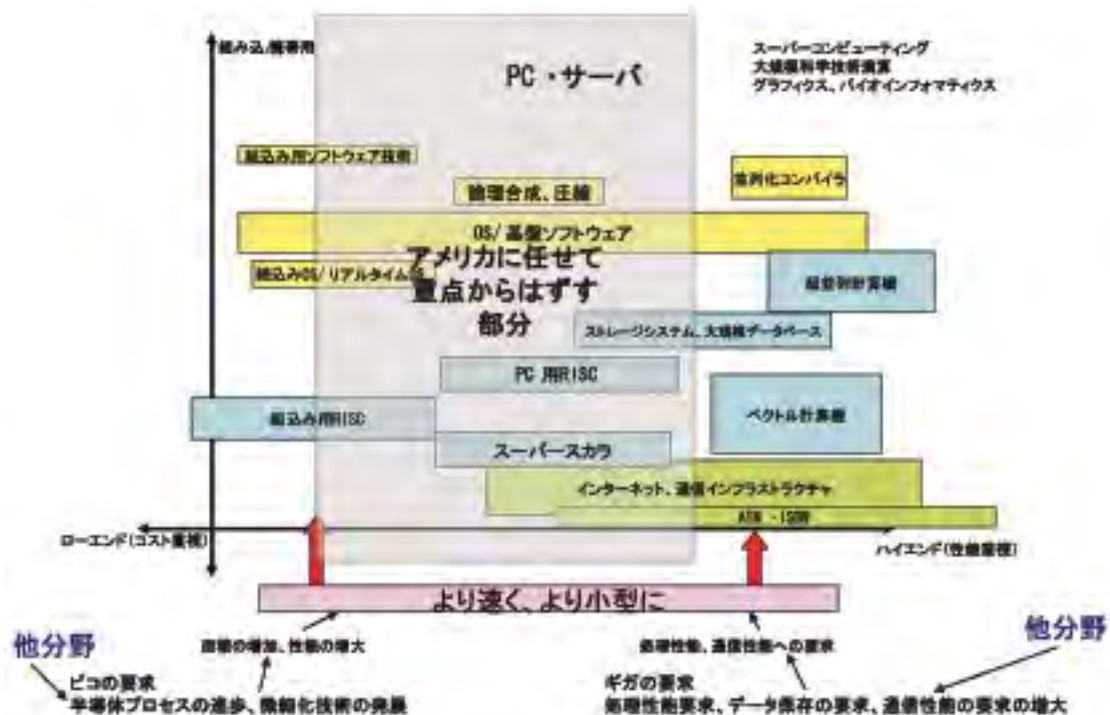


図3.4.6 コンピュータシステム（1995年の状況）

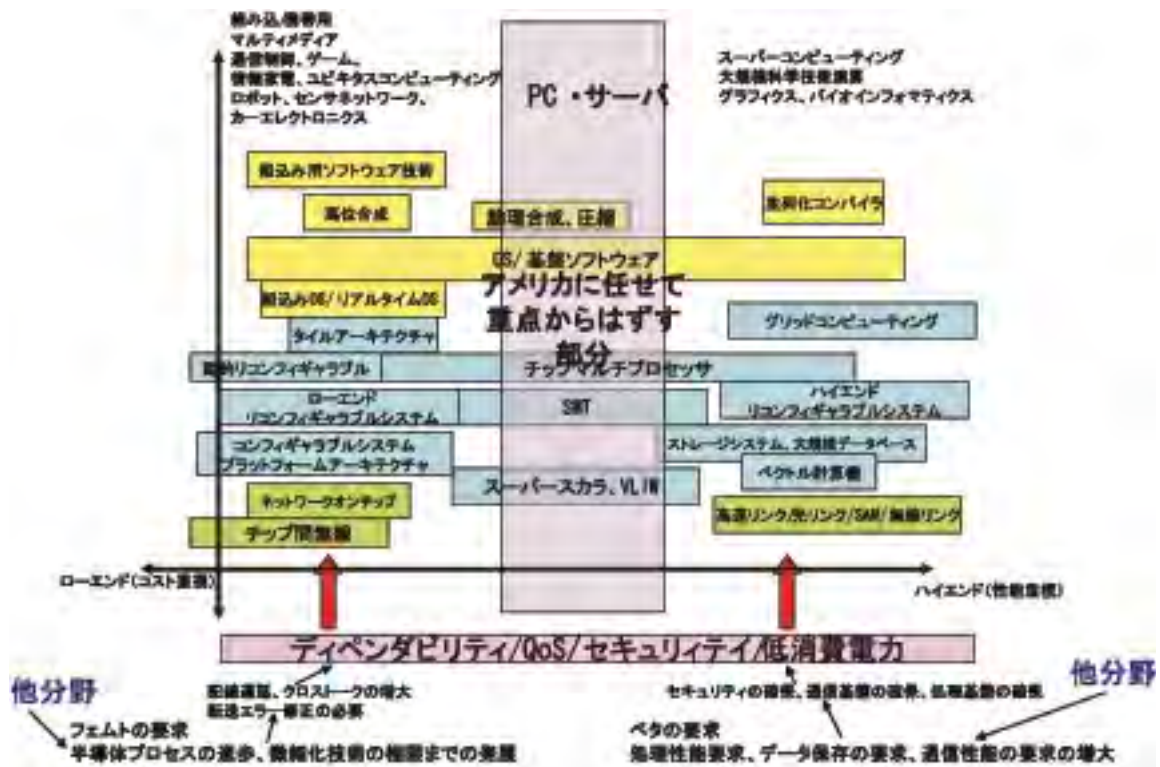


図3.4.7 コンピュータシステム (2005年の現状)

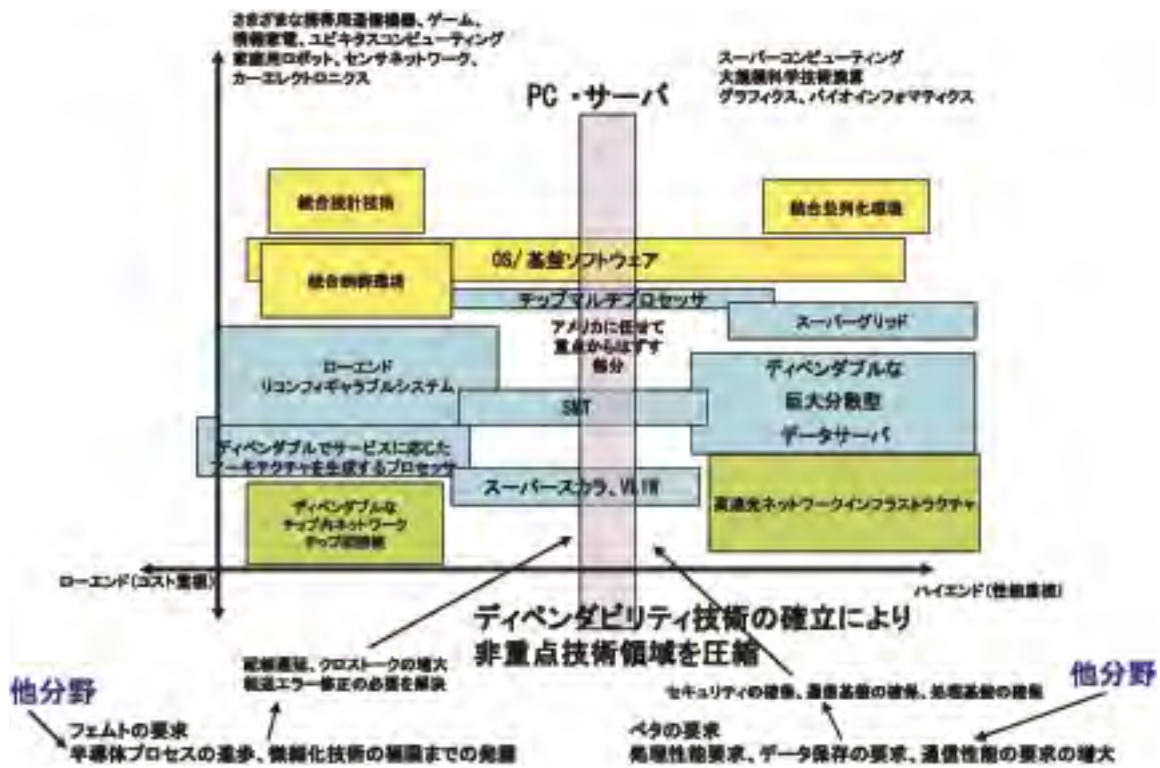


図3.4.8 コンピュータシステム (2015年の状況)

野にそれほど大きな変化はないが、ディペンダビリティ技術の確立は必須であり、ローエンドにおいては、チップ・ハードウェアからソフトウェアまでを統合する設計技術、統合制御技術、適応技術（リコンフィギュラブルシステム）の確立が予見される。またハイエンドにおいてはスーパーグリッド、巨大分散型データサーバ、高速光ネットワークインフラストラクチャの確立が予見される。その結果、現在のパソコンやサーバを中心とするコンピューティングシステムは、大きくその姿を変えるものと予想される。すなわち、ローエンド分野とハイエンド分野の発展の結果、現状で米国の圧倒的支配を許している中間領域が大幅に圧縮される可能性があり、また、そのような傾向が加速されるようなローエンド分野とハイエンド分野への重点投資が我が国のとるべき戦略であろう。

3.4.5 ミドルウェア、アプリケーションの立場からの技術俯瞰

図 3.4.9, 図 3.4.10, 図 3.4.11 に、それぞれ、10 年前(1995 年)、現在(2005 年)、10 年後(2015 年)におけるミドルウェア、アプリケーション分野から見た技術俯瞰図を示す。

ミドルウェア、アプリケーションからコンピューティング技術を俯瞰する場合には、サービスを提供するコンピューティングシステム自体に関わる課題と、サービスを受ける社会や人間の側が抱える課題を区別することが、将来の重要技術を俯瞰する上で見通しを良くする。

情報サービスを提供するコンピューティングシステム技術の進歩、発展を表すキーワードとして、超高速、超大容量、いつでもどこでも、自動運用・自動応答、自動検索・要約分類、安全、信頼などがある。これらの技術要素あるいは技術属性に関連して情報システムが直面する挑戦課題として、大規模発熱などによる製品信頼性低下、情報洪水による検索不能や社会的混乱規模の増大懸念、情報流失、過失、攻撃、犯罪によるディペンダビリティの阻害などが挙げられる。

一方、情報システムによるサービスを必要とする分野には、国際共存、資源・環境、食料、教育、医療・福祉、産業、ビジネス、行政、社会基盤、生活・文化、科学・学問など、およそ人類の活動に関わるあらゆる領域に及ぶ。これらの領域では、情報サービスによる解決が期待される問題、すなわち、資源対立、石油危機、食糧危機、生存環境悪化、感染症爆発、少子化・働き手不足、高齢化など、様々な課題がある。

これらの課題を認識した上で、ミドルウェア、アプリケーションに視点の重心を置いたコンピューティングシステムの階層としては、最下層にプロセッサ、クラスタシステム、センサ、ネットワークがあり、その上に OS、ファイルシステム、データベース、知識ベースなどのシステムが構築される。これらのインフラの上で、様々な問題を解くアルゴリズムや通信プロトコルが存在し、その上に、様々なアプリケーションシステムやデジタル資源が構築される。さらに最上位層としてサービスコンテンツが

実現される。

情報システムをこのような階層構造として見た場合、10年前の1995年頃（図4.4.9）には、最下層のネットワークレベルでコンピュータネットワークや携帯電話ネットワーク、アプリケーションレベルでWebアプリケーション、またサービスコンテンツレベルでデジタル資源蓄積や大規模検索エンジンの研究開発が盛んであった。2005年現在（図4.4.10）における技術開発の主要な話題としては、ネットワーク層ではアドホックネットワーク、P2Pネットワーク、ユビキタスコンピューティングなど、ファイルシステムレベルではXML、メタデータベース、大規模ファイルシステムなど、アルゴリズム層では言語処理、人工知能、パターン認識、最適化技術など、アプリケーション層ではWebサービス関数、セマンティックWeb技術など、サービス層では大規模のデジタル資源蓄積、個人デジタル資源蓄積、生物学や天文学の手法のデジタル化などが挙げられる。

今から10年後にあたる2015年頃には、今と全く異なる組織、制度、生活スタイル、技術文化などが出現する可能性は大きい。従って、アプリケーションあるいはサービス・コンテンツに関して10年後に重要になる技術項目を予測することは極めて難しいが、あえて挙げるとすれば、理系だけではなく文系の学問手法のデジタル化、個人デジタル情報の大規模保存、セマンティックWebエージェントなどの技術開発が予見される。

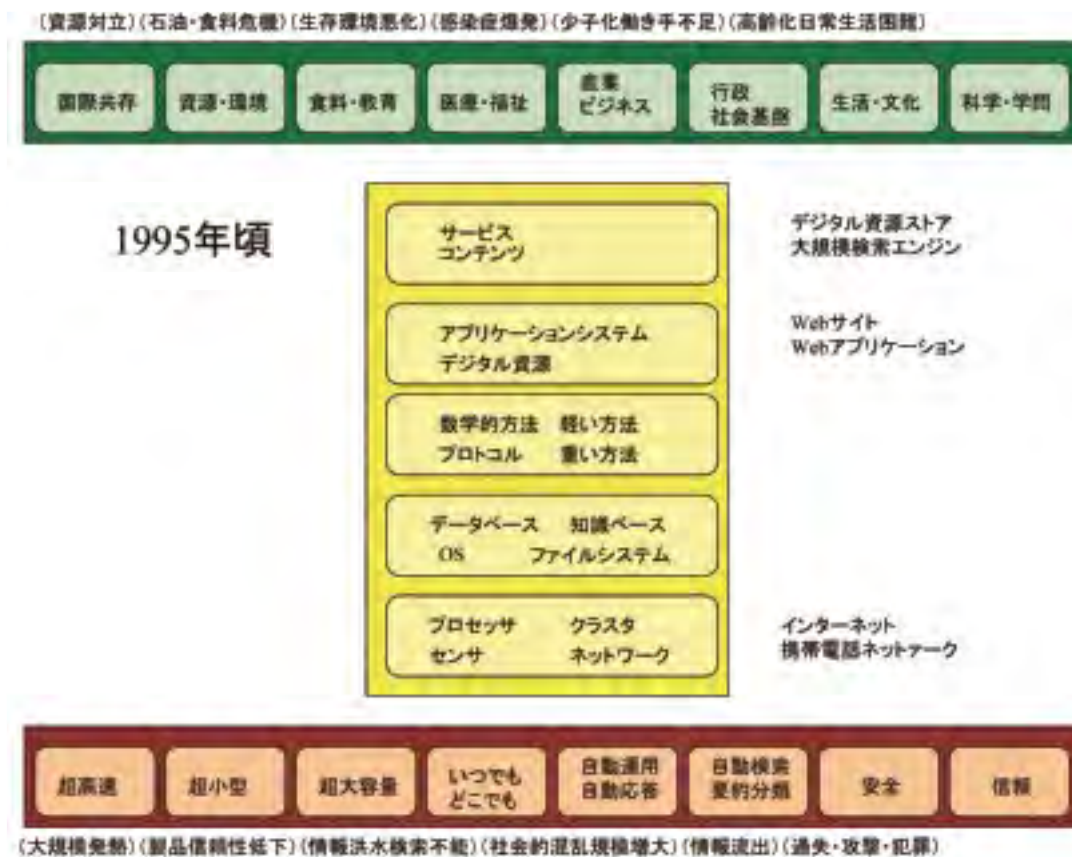


図3.4.9 ミドルウェア、アプリケーションの立場からの技術俯瞰（1995年の状況）

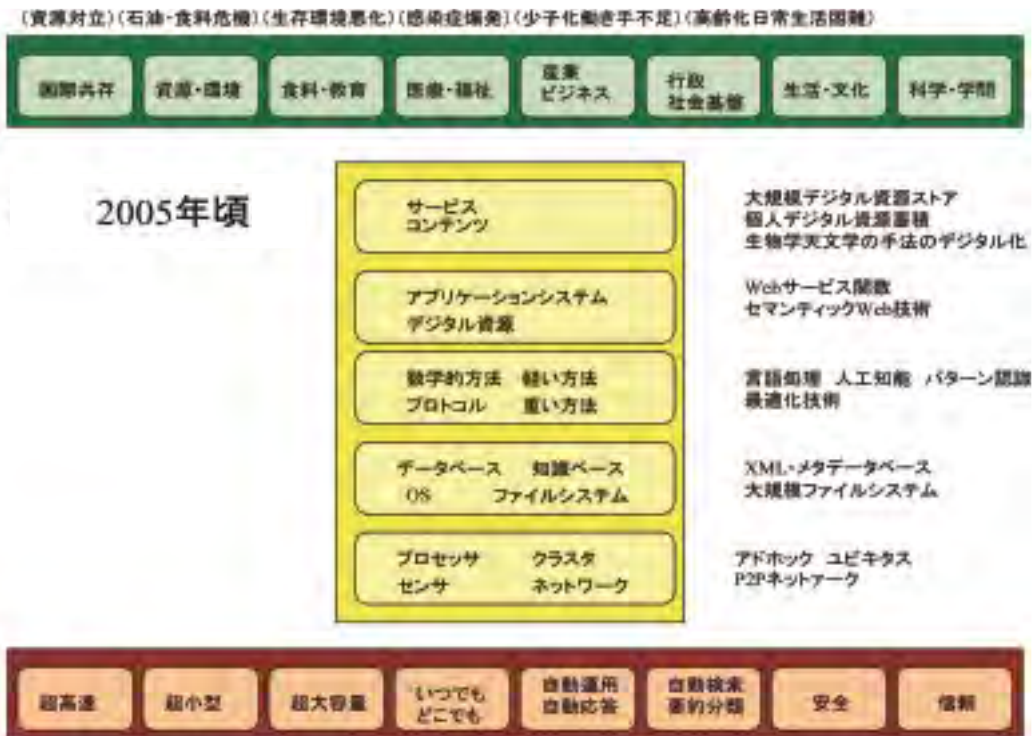


図3.4.10 ミドルウェア、アプリケーションの立場からの技術俯瞰（2005年の状況）



図3.4.11 ミドルウェア、アプリケーションの立場からの技術俯瞰（2015年の状況）

3.4.6 コンピューティング分野の技術俯瞰図

図3.4.12に、前項までの検討結果を総合したコンピューティング分野の10年後(2015年)の技術俯瞰図を示す。

図は、左下に示す Peta/femto で表現される基盤技術の目標性能を前提とし、右上に示す情報システムのサービス品質目標、ディペンダビリティ、Eco-computing, Universal design, High-quality の達成を目指して、左下から右上の方向に向かってコンピューティングのシステム階層の下層から上層分野における今後の重要技術項目を例示している。これらの技術俯瞰は、図の下辺に示した、2005年時点ですでに成熟している技術的基盤、社会的基盤、産業的基盤、並びに生活のリテラシーを前提としている。

左上の囲みに示すように、情報システムが最優先で目指すべきサービスのディペンダビリティを確立するために克服すべき課題は、情報化社会の不確実性、情報量の大量化、システムの複雑化、ネットワーク利用の多様化がある。また左上で隣接する囲みに示すように、ディペンダブルな情報システムを実現するためには、SLA (Service Level Agreement) に基づいた明確な要求仕様記述、異種システム・環境を統合化する設計、システムの検証とテスト、QoS (Quality of Service) の定量的評価、などを含むシステム設計方法論の確立が必要である。またディペンダブルなシステムを

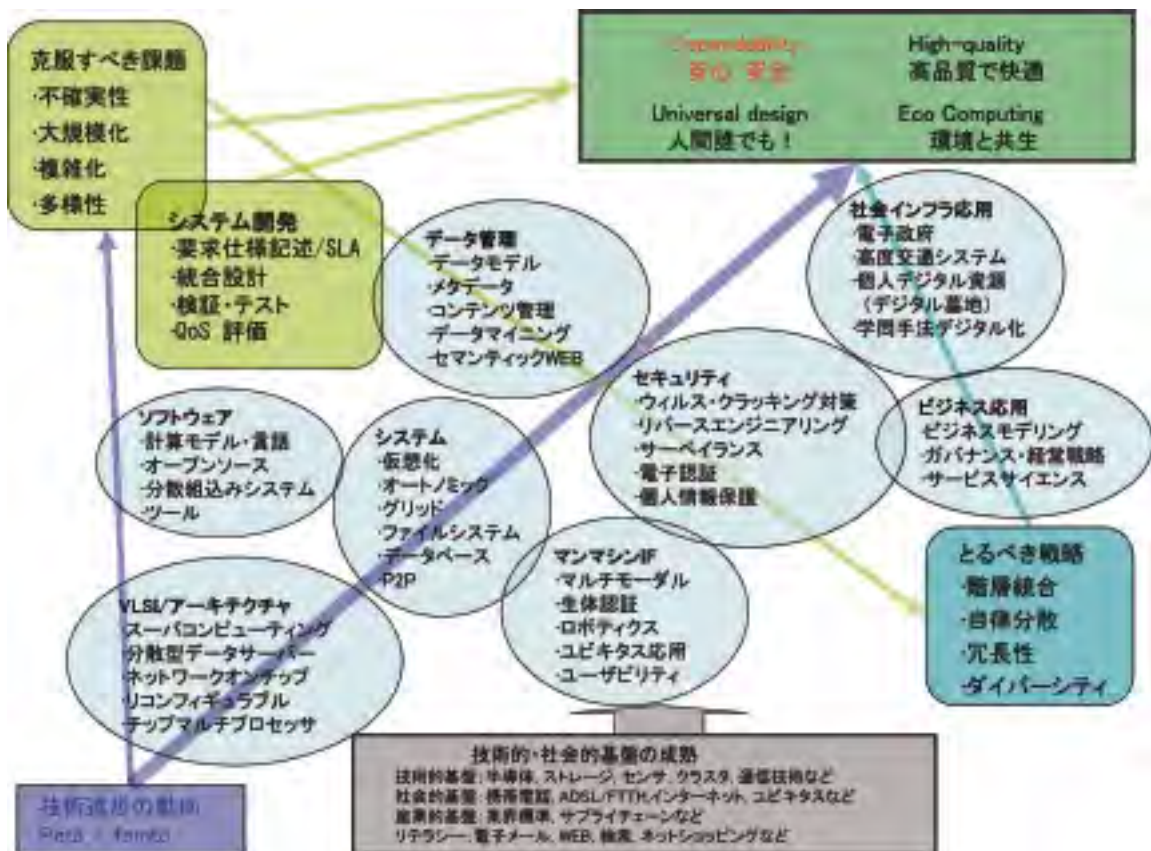


図3.4.12 コンピューティング分野の10年後(2015年)の技術俯瞰図

実現するためのアーキテクチャ構築に際してとるべき戦略は、右下に示されるように、システム階層の統合化、大規模システムの自律分散制御、システム要素の冗長性導入、リスクの分散化（ダイバーシティ）である。

これらの現状認識とシステム設計戦略を前提に、コンピューティング分野を、VLSI/アーキテクチャ分野、ソフトウェア分野、システム分野、マンマシンインターフェース分野、データ管理分野、セキュリティ分野、ビジネス応用分野、社会インフラ応用分野に分けて、今後の重要技術を例示している。

図 3.4.13 は、上で俯瞰したコンピューティング分野の重要技術をシステムの階層的構成のイメージに重ね合わせて表現したものである。ただし、描画の制約から、技術項目とシステム階層との関係を必ずしも厳密に表したものではない。この図では、これらの重要技術の根底をなす基礎理論、学問分野のいくつかも例示している。

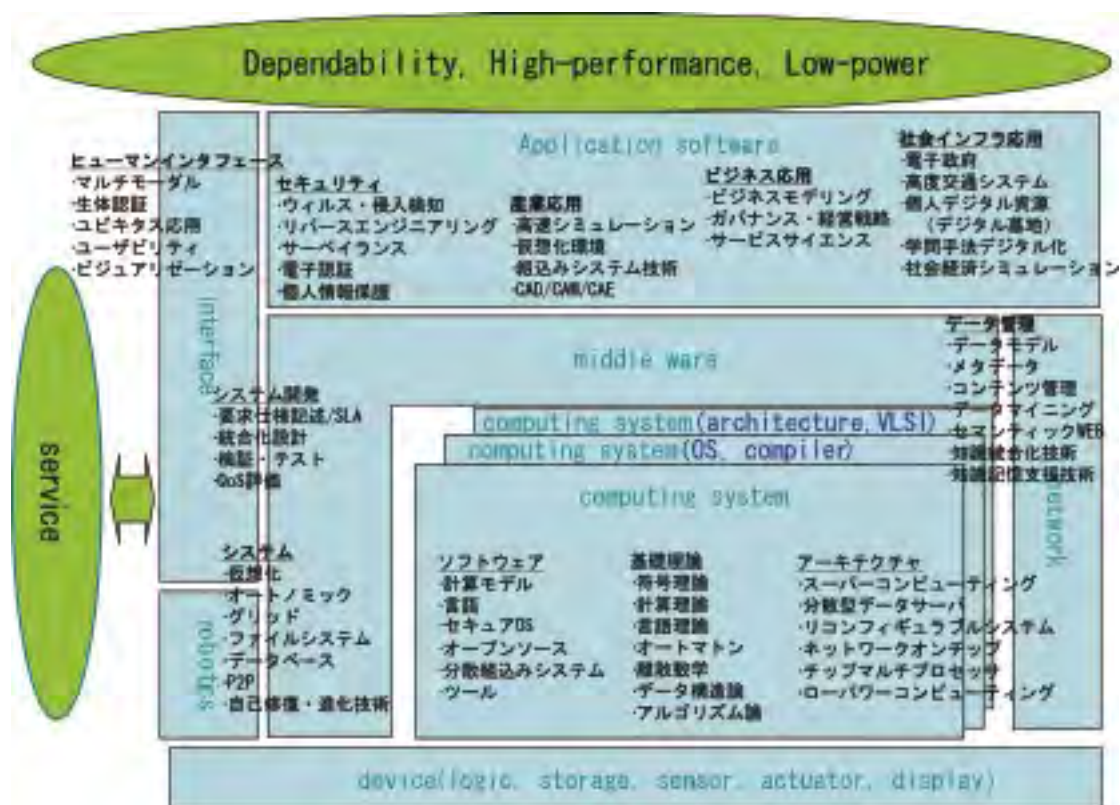


図3.4.13 コンピューティングのシステム階層に対応づけた技術俯瞰図

3.4.7 コンピューティング分野の重要技術

コンピューティング分科会では、上記の技術俯瞰を踏まえ、15—20年後の社会、産業に役立つ10年後の重要技術として以下の5つを抽出した。

① デイペンダビリティ評価技術

安全と安心を担保する情報システム・ネットワークを実現するために、その基本属性である「デイペンダビリティ」の定量的評価手法を開発し、その評価指標に向けた

健全な開発競争を通じてディペンダブルシステム・ネットワークの研究開発を促進することが必要である。そのために、情報システムがユーザ（社会、人間、情報システム）に提供するサービス品質レベルを人間系を含めた時間軸上で定義し、それに基づいた総合的なディペンダビリティの評価技術とシステム検証技術を確立する。

② サービス指向仮想化技術

ユーザが個別にその要求するピーク性能を満たす高価なコンピュータを保有することは、経済的にもディペンダビリティ確保の観点からもリスクが大きいため、ユーティリティコンピューティングの概念に基づく情報環境の実現がこれからの安心安全な社会の建設に必須である。電気、ガス、水道のように、ユーザが要求するサービスの提供に必要なときに必要なだけの計算能力、通信能力、記憶容量を提供するユーティリティコンピューティングを実現するために、ユーザがあたかも必要な計算資源を占有しているかのような状況を作り出すディペンダブルな仮想化技術を確立する。

③ 大規模データ管理技術

現在、ネットワークに蓄積されているデータ量の80%は今後一度もアクセスされないほどの大量データが生産され続け、今後その傾向は加速度的に増す状況で、有用な情報を検索し、合成し、管理する技術は、今後のディペンダブルな社会基盤建設のキー技術である。そのため、毎日世界中で大量に生産され、蓄積されている大規模データからディペンダブルな情報・サービスを効率的に検索し、合成し、獲得し、処理する大規模データ管理技術を確立する。

④ 自律適応型高性能計算技術

システムの大規模化、複雑化に伴って予期せぬ障害や侵入のリスクは増大し、不完全、不確実な情報が流通するネットワークにおいて、環境の変化に対応し、自己防衛機能、自己修復機能、最適化機能を自律的に達成する計算システム技術の確立が、ディペンダビリティ確保とメンテナンスコスト削減に必須である。そのため、不完全・不確実な情報に基づいて、システム全体として、予期せぬ障害や外敵の侵入に対するリスクを最小化するように自律的に適応し、要求されるサービス性能を最適化して提供する計算技術を確立する。

⑤ VLSI システム技術

VLSIの微細化によるプロセス変動がハードウェア信頼性の大きなリスク要因になる32ナノ以降の世代では、冗長設計などを含むシステム技術がVLSI設計にとって必須になる。そのため、プロセス微細化とシステム複雑化による不安定性、不確実性を克服するディペンダブルなVLSIシステム設計技術を確立する。

3.5 エレクトロニクス/フォトニクス分科会

本分科会では、「ディペンダブル」な社会基盤を支える信頼性の高い電子デバイスとして、この分野の全体像をカバーできる5項目（センサ、ストレージ、高速電子・集

積回路，フォトニクス，ディスプレイ）を取り上げ，10年先を見据えた技術の俯瞰を行った。その結果，以下で詳細が検討されているように「特性のゆらぎを克服する材料・デバイス・回路・システム技術」等が重要研究課題として浮かび上がってきた。

（図 3.5.1 参照）

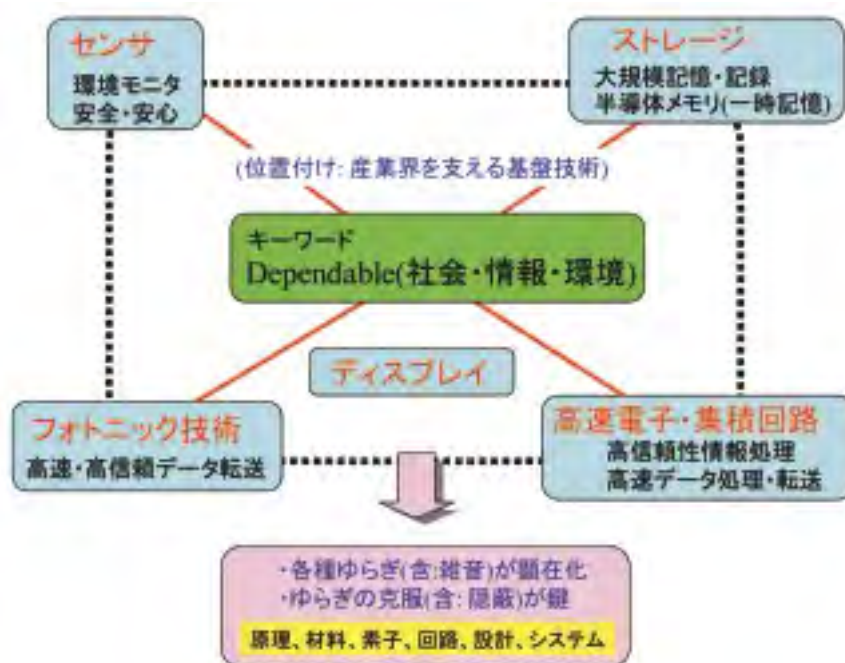


図3.5.1 Dependable な社会を支えるエレクトロニクス/フォトニクス分野の俯瞰図

3.5.1 センサ技術

センサを用途面から分類すると，①安心・安全を確保するためのセンサ，②人の利便性，快適性を促進するためのセンサ，③社会的な信用システム（銀行，役所など）を構築するためのセンサ，④医療応用（健康）センサ，がある。このようなセンシングデバイスを実現するには，①計測する物理量に対して高い感度を示す高感度・高機能材料の開発，②大きな信号対雑音比（SNR）を得るアナログ回路などの計測技術，③MEMS や NEMS などセンサ構造を造り出す技術などが重要である。指紋認識や虹彩検出などができるセンシングデバイスに情報処理プロセッサを組み込んだスマートセンサは安全・安心な社会の実現に向けて，今後，その重要性が増す。さらに，土木，建設，交通などの社会インフラに張り巡らされたネットワークに各種センサを組み込むと，災害発生の子知や構造物の劣化診断が可能となるだけでなく，利便性・快適性が増してディペンダブルな社会が実現できる。

しかし，現行のセンサ性能はユーザの要求仕様に適わない水準のものが多く，今後，新規センシング原理の提案を含めて，センサ機能・性能面での「品揃え拡充とセンサ感度の向上」のため，ノイズの中から微弱な信号を取り出す仕組みや高感度材料などの開発が欠かせない。（図 3.5.2 参照）

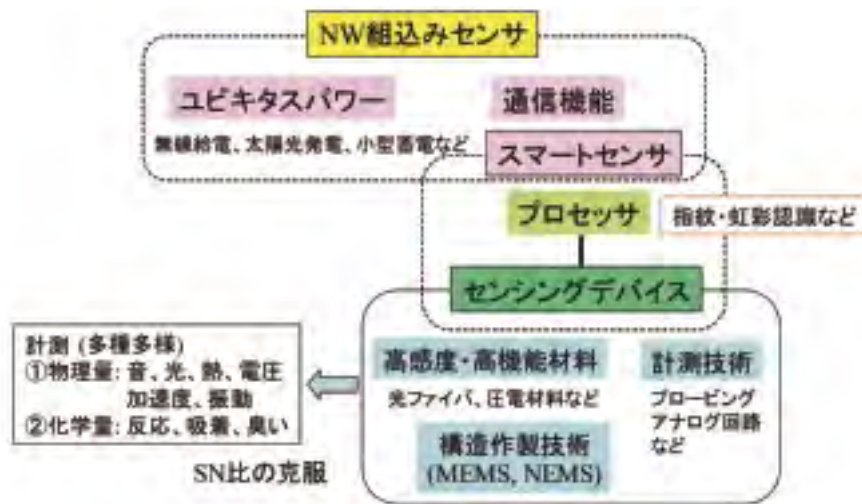


図3.5.2 センサ技術の俯瞰図

センサをネットワークに組み込んだ多点センシング技術では、①集積回路やMEMS・光MEMS技術による小型・低電力センサデバイスの開発と、②ユビキタスパワー、すなわち無線給電法、太陽光発電ならびに小型蓄電技術、③省電力でデータ転送を行う通信技術をセンサチップ上に集積化すること、などが重要な課題である。この他、最近実現性が見えてきた有機材料による大面積・集積化センサの研究や、シリコン集積技術と組み合わせたスマートピクセル（機能性VLSI撮像素子）や、応力発光体による面的センシング技術などの材料開発、高温・高圧等の劣悪環境化で動作する光・電子デバイスの開発など、センサ技術の研究・開発対象は多い。

3.5.2 ストレージ（記憶デバイス）

ディベンダブルな社会を実現する第2の柱はストレージである。

当面の重要な研究・開発課題はテラバイト級ストレージの実用化である。従来型の光ディスクでは光源の短波長化、光学系の工夫などにより記録サイズを小さくして大容量化（高密度化）を成し遂げてきたが、テラバイト級ストレージでは、光ディスク形状にとらわれない大容量化に適した新しいシステムの導入が鍵となる。すでに、HDD（磁気ディスク）および光ディスクでは近接場記録、ホログラム、三次元多層などの技術によりテラバイト級ストレージの研究開発が進んでいる。大容量化の動向からみると、次の目標は $100 \text{ Tb/in}^2 \sim 1 \text{ Pb/in}^2$ のストレージ方式の探索である。ストレージ分野は日本発の技術が市場を占有しており、将来の大容量化に向けた技術についても引き続き日本初の技術開発とその技術継承が期待される。（図3.5.3参照）

大容量化の方法は三つの方向に大別できる。ひとつは記録サイズの小径化、二つめは記録の多重化、三つめは多層化（体積記録化）である。数ナノメートル領域での記録が要求されるテラバイトを越すストレージ ($100 \text{ Tb/in}^2 \sim 1 \text{ Pb/in}^2$) では、従来の材料に替わる新しい材料の開発が重要となる。一方、ディベンダビリティの面からは、

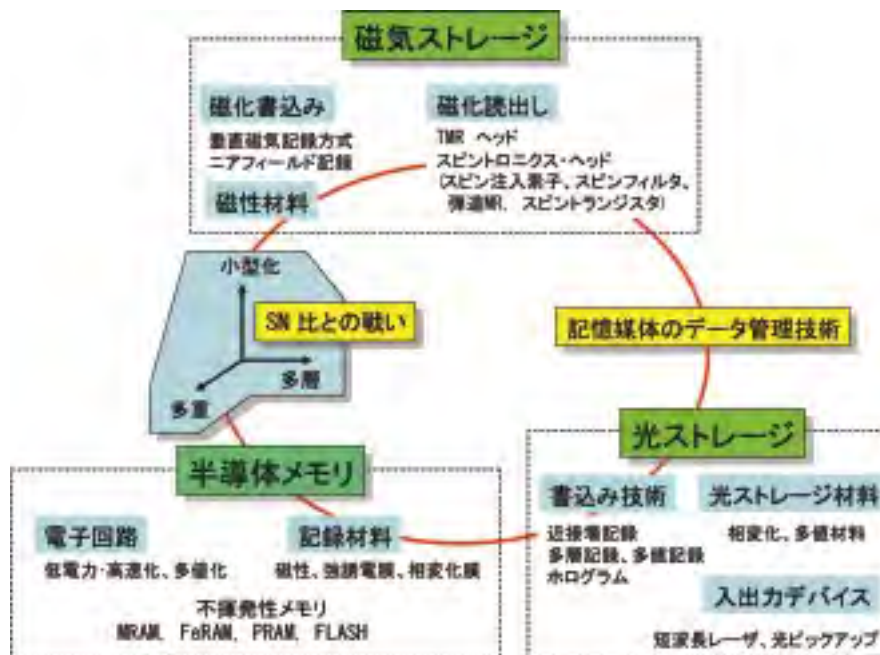


図3.5.3 ストレージ（記憶素子）技術の俯瞰図

①記録したデータを長期にわたり安定的に保存できるシステム，②膨大なデータの中から必要なデータを簡単に取り出すことができるシステム（ソフトウェア）の研究が重要となる。提案する重要研究課題は下記の通りである。

1) 記録材料技術

- ・ ナノサイズ磁性材料
- ・ 光波長多重記録材料
- ・ ナノサイズ光感応材料
- ・ 三次元記録材料

2) ソフトウェア技術

- ・ 人の感性に適合したデータ管理手法（曖昧な記憶から，求めるデータに容易にアクセスできる。不要なデータは自動的に消す。）

また，情報処理機器の頭脳に相当する DSP や MPU などの周辺には DRAM や SRAM などの大容量の半導体メモリが配置され，膨大な量のデータの書き込みと，そのデータの高速読み出しが行われている。特に，DRAM や SRAM などの標準的な半導体メモリに関しては，半導体デバイスの微細化によって今後もロードマップに沿った研究開発が推し進められるものと思われる。その一方で省電力の観点から電源をオフにしても記憶内容が消滅しない不揮発性メモリの実用化が期待されている。このカテゴリーのメモリとしては，現在，フラッシュメモリが市場を席巻しているが，書き込み速度が遅い問題を抱えている。このため，将来的には書き込み・読出し速度が共に速い不揮発性半導体メモリ（MRAM, FeRAM, OUM (Ovonic Unified Memory)) の開発が期待されている。この高速不揮発性メモリが安価に実用化されると，電源を

切っても待ち時間なしにすぐ利用できるコンピュータが実現するため、OA 機器の省電力化の切り札にもなり得る。

3.5.3 集積回路・高速電子デバイス

過去 30 年間にわたる集積回路技術の進展により、電子部品やそれを使うシステムの信頼性は大幅に向上し、信頼できる（ディペンダブルな）システムの構築が可能となった。しかし、Si デバイスの微細化限界が見え始めた現在、集積回路の信頼性を高く保つことが難しくなりつつある。それは、デバイスの寸法がナノスケールになった結果、不純物原子や空孔、電子や正孔などのミクロな粒子の挙動がデバイス特性に大きな影響を及ぼし始めたからである。このため、集積回路の設計についても従来のような特性ばらつきを無視した設計ではなく、製造歩留まりを考慮した設計手法（DFM：Design For Manufacturing）やテストを容易にする設計技術（DFT：Design For Test）を取り入れる必要がある。

この巨大産業に成長した集積回路産業は半導体ロードマップに示された「赤い壁」に直面しており、わが国の産と学が総力をあげて共同で智恵を出し合って逐次解決してゆかねばならない。なかでもプロセス・デバイス技術については現行の「経験と勘」に基づく製造技術から脱却し、大学の「智」と企業技術者の「技」との融合を図って科学的な根拠に基づく製造プロセス技術へと転換してゆく必要がある。

Si-集積回路の分野における今後の重要研究課題として下記の技術分野を提案する。

① 製造プロセス・半導体デバイスの基礎研究

今後、不純物原子の数や位置のばらつきにより MOSFET のしきい電圧はばらつき、MOS 型集積回路のノイズマージンが低下する。ロードマップに沿った MOSFET の微細化と電源電圧の低減を続けてゆくには、ドーパント位置やキャリア輸送の統計的ゆらぎを組み込んだ動作解析手法の構築が望まれる。また、高密度 DRAM では、正常に情報を保持していたビットが突然、不良ビットに変化する現象（Variable Retention Time）も観測されており、ナノスケールデバイスではもう一度基礎に立ち戻って素子特性や製造プロセスの問題を解明してゆく必要がある。

② 製造プロセス装置開発

ナノスケールのデバイスを再現性よく正確に製造するための装置開発も重要な課題である。なかでも広範囲にわたってナノ寸法の露光が可能な装置と微細パターンが形成できるエッチング装置の開発が今後の半導体集積回路の進展に大きな影響を与える。

③ DFM（Design For Manufacturing）、DFT（Design For Test）

DFM は集積回路の歩留まりを高めることを念頭に置いた設計の方法論である。ナノスケールデバイスでは特性がばらつくことを考慮した上で集積回路が正確に動作する設計をしなければならない。このために、あらゆる工程の製造プロセスデータベー

スと設計 CAD を有機的にリンクし、高い歩留まりで集積回路の製造ができる設計手法 (DFM) を採用することが重要である。この設計手法の開発は個別企業の努力でできる範囲を越えており、企業間コンソーシアムで本気で取り組むべき課題であろう。

④ 動作不良マスク技術

将来のナノスケールデバイスでは素子特性のゆらぎの他、熱雑音などによるクロックジッタが集積回路の動作に悪影響を及ぼす。これは、現在、アナログ回路で取り扱われている微細化による信号対雑音比 (SNR) の劣化問題がデジタル回路でも顕在化してくることを意味している。将来的には SNR の悪い論理集積回路にシステムレベルで誤動作を隠蔽するアーキテクチャを採用して、チップの外部からは不良が見えない仕組みにしなければならない。

⑤ 高密度・低コスト実装技術

経済的な面から必ず終焉を迎える集積化限界以降の要求に答えるために三次元の高密度実装技術の研究開発が期待される。(図 3.5.4 参照)

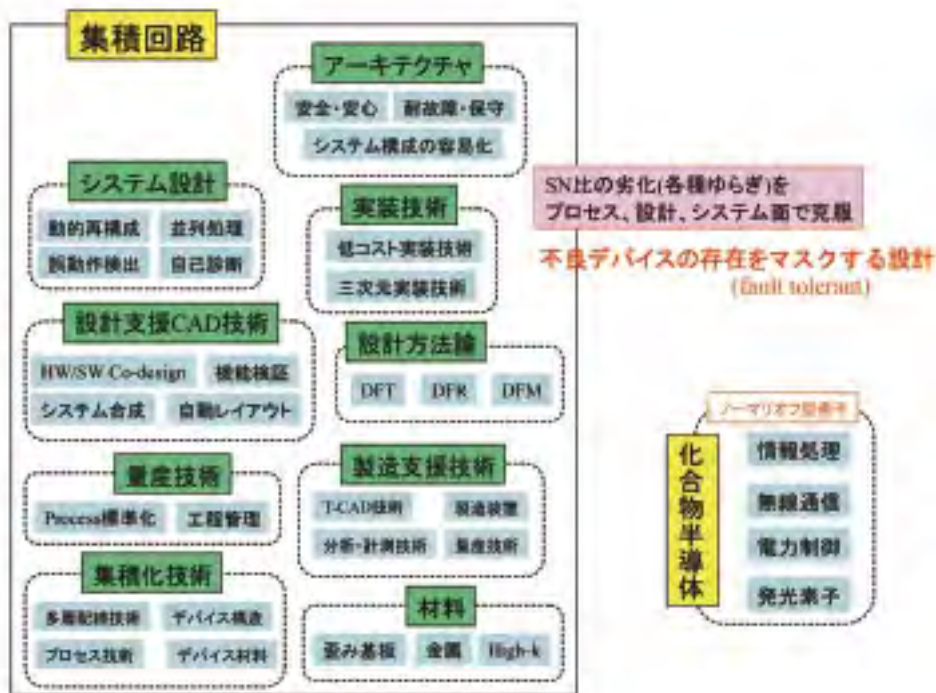


図3.5.4 高速電子・集積回路技術の俯瞰図

シリコン集積回路に対峙するもう一つの電子デバイスとして化合物半導体デバイスがある。高温・耐放射線材料としてディペンダブルなワイドバンドギャップ半導体は、パワーエレクトロニクス、超高速デジタル回路、高温動作デバイス、衛星搭載デバイスなどの幅広い分野への応用が期待される。化合物半導体は携帯電話基地局用の高出力 FET への応用を核に研究が進められてきたが、これらの FET の動作モードはディプレッション型が主流であった。これに対し、次世代自動車や家庭用電源などのパワーエレクトロニクス分野にはエンハンスメント型 (ノーマリオフ型) のスイッチング

FET が要求されている。エンハンスメント型の化合物半導体 FET を安定に実現できれば、GaN などの化合物半導体デバイスでコンプリメンタリ動作の論理回路を構成することが可能となり、高耐圧性と雑音余裕のあるディペンダブルな超高速システムが実現できる。

3.5.4 フォトニクス

図 3.5.5 に示すように光機能材料、光制御デバイス、半導体光源が光ストレージ、光通信、光情報処理などの光応用技術を支えるフォトニック基盤技術である。そこではフォトニック材料の開発、新しい機能を持ったフォトニクス部品の開発、高輝度の半導体レーザの開発が期待されている。しかし、フォトニクス技術の強さの源泉は光デバイス技術とエレクトロニクス技術との密な結合にあり、エレクトロニクス技術との融合が不可欠である。しかるに昨今のフォトニクス技術への国家プロジェクト支援は、光デバイスの要素技術開発やこれを適用したサブシステムの開発に限定されることが多く、通信分野におけるフォトニクス技術の競争力維持・向上には十分ではない。今後は、エレクトロニクス技術と融合したフォトニクス・システムの開発に研究支援の重心を移すべきであろう。

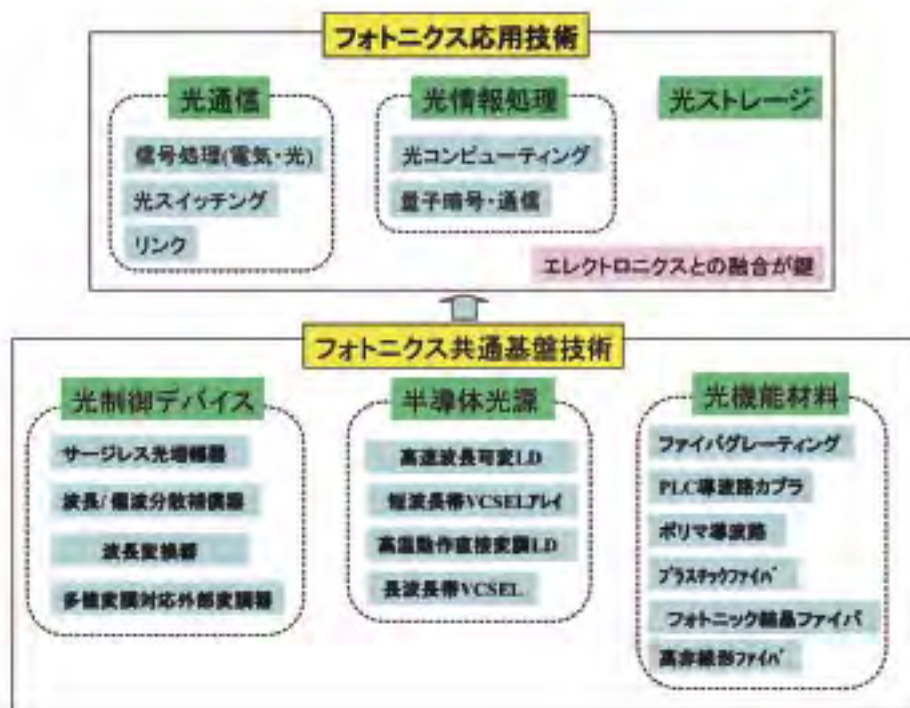


図3.5.5 フォトニクス技術の俯瞰図

3.5.5 ディスプレイ

現在、①ビデオ映像表示用途に重きを置いたディスプレイ開発と、②紙のような可撓性のあるディスプレイ（電子ペーパーあるいはペーパー・ライク・ディスプレイ）、の開

発が、高画質化、低価格化を目指して盛んに行われている。

映像表示としては、a) 現行のハイビジョン映像だけでなく、b) 次世代のウルトラハイビジョンに向けた高精細化（表示画素数の増大）、c) 紙のように取り扱えるディスプレイの薄型化、高精細化、が進んでいる。

ディスプレイ技術を「情報の可視化」技術ととらえれば、いかに実物と同じように表示するかが普遍的な技術課題といえる。(実物と同じという意味でディペンダブルな表示技術)「いかに実物と同じように表示するか」の指標を画質とすれば、画質の高度化の面から実現すべき技術は下記の3点にまとめられる。

1) 三次元表示技術

- ・平面上での擬似的三次元表示でなく、立体的に像を表示する技術

2) 色再現技術

- ・RGBの階調性だけでなく、実物の色感や光沢感などが表示でき、ディスプレイが異なっても同じように表示できる技術

3) 高精細技術

- ・スケーラブル解像度技術—一定の解像度ではなく、近づけばさらに細かな構造が見える技術

3.5.6 重要な研究領域

以上の検討から、表3.5.Aに示す重要な研究領域を抽出した。

表8.5.A

テーマ名	概要	理由説明
集積回路の動作不良マスク技術	最小寸法がナノスケールまで微細化すると集積回路の誤動作は避けられない。アーキテクチャなどの工夫により外部からは動作不良が発生しているようにはみえないチップを開発する必要がある。アーキテクチャ、システム、回路、デバイス、プロセスのすべての技術において産学が共同で真剣に取り組むべき課題である。	ディペンダブルな社会は集積回路が誤動作を起こさないことを前提として作られている。一方、半導体ロードマップによると、将来、素子の微細化によって各種のゆらぎが顕在化し、集積回路の誤動作が避けられない見通しである。システム屋とデバイス屋の意識のギャップを埋めるべく、集積回路レベルの動作不良をマスクする技術が期待される。
ネットワーク（ユビキタス）センサ	通信機能を具備したネットワークセンサの開発。各種の物理量・化学量の測定のためのセンサの品揃えが欲しい。被センシングの種類によってはナノテクを活用することも視野に入れる。これが実現すると膨大な数のセンサが市場に出回るので、製造コストが安価であることが望ましい。センサ感度はSN比との戦いとなるが、それを克服する技術開発が期待される。	空間に膨大な数の各種センサを配置し、それらをネットワークで結びつけて環境モニターやセキュリティに利用し、人間が安心して快適に生活できるディペンダブルな場を提供する。ネットワークセンサを生活環境に配置することで、検知データから、建造物の構造劣化や災害発生などの情報を得ることができるだけでなく、金融システムなどの信用取引にも大いに役立つ。
ユビキタスパワー	コンセントからの電力供給が不要な超小型給電システムの開発。例えば、無線給電システム、太陽電池、ナノタービン、高性能蓄電器など、極低消費電力回路技術、「寝た子(stand-by sensor)を起こす(active)」技術などの開発。	真のユビキタス社会、センサネットワークを実現するには電力線からのコンセントを必要としないシステムの構築が必須。
記憶材料と大容量化技術	磁気、光、半導体ストレージ材料の開発。大容量化：記録の多重化、多層（三次元）化などのハードと膨大なデータの中から必要なデータを取り出すソフトウェアの開発。	個人データやアーカイブなどで将来、膨大な情報の保存が見込まれる。新材料・新技術が開発されるとわが国の電子産業への波及効果は大きい。
エンハンスメント型化合物半導体素子	高価なSiC基板に代わるGaN系基板（GaN/バッファ層/Si基板）でノーマリオフ型素子の開発。	高変換効率パワーエレクトロニクス（自動車応用）。高電力アンプ（基地局PAなど）。光デバイスからの波及効果が期待できる。

3.6 SPIN にマップした重要技術分野

第2章で述べたようにディペンダビリティを求めるためには、SPIN が重要な技術方法論になるはずであると考えている。そこで SPIN 方法論に従って研究を進めるべき重要分野は何かを各分科会で議論し、それぞれの重要分野を同定した。SPIN 全体像と各分科会や WG の議論との関連を 1) ロボティクスシステム、2) ネットワーク、3) コンピューティング、4) エレクトロニクス・フォトニクスの順に述べる。

1) ロボティクス

ロボティクスシステムのディペンダビリティに関しては最上層のサービス層 (図 3.6.1) と 2 層目のシステムインテグレーション層 (図 3.6.2) の各々において「設計・知の集積」部分が問題となる。サービス層ではサービスベースロボティクスという概念を提唱している。システムインテグレーション層では実時間適応ロボティクスとして、生物的適応システム、オープン制御システム理論、アダクティブロボティクス、マインドシステム理論などを課題とする。

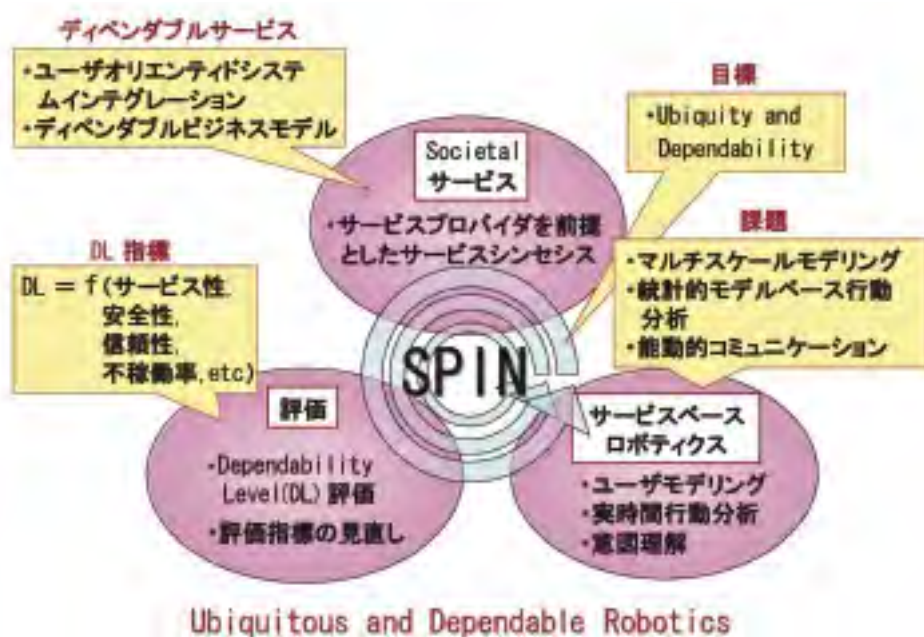


図3.6.1 ロボティクスシステムの最上位層のサービス層

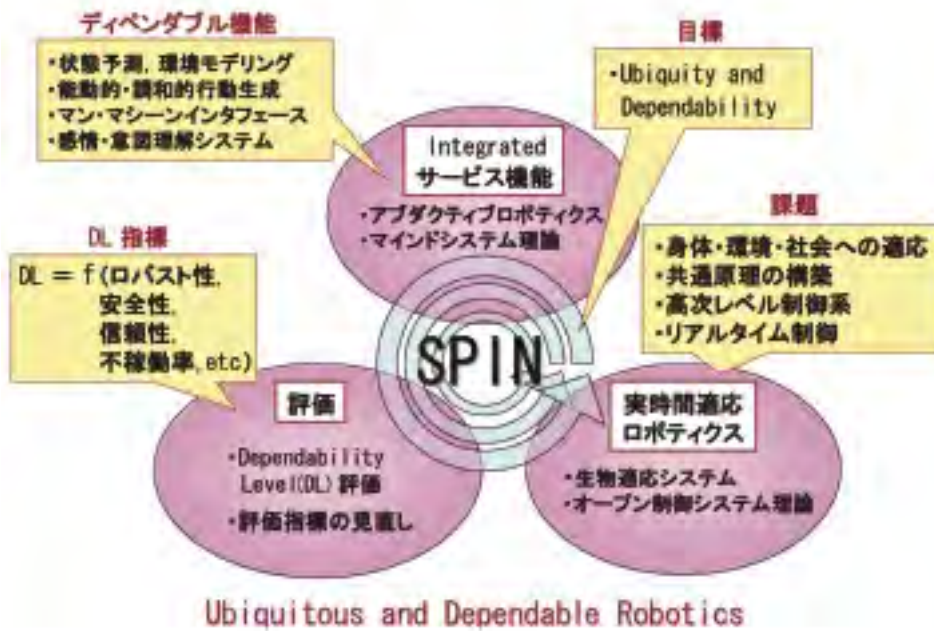


図3.6.2 ロボティクスシステム2層目のシステムインテグレーション層

2) ネットワーク

ディペンダブルネットワークは実用に供されたロボットなどのサービスシステムを支えるシステムインテグレーション層に必要な仕組みである (図3.6.3)。様々なサービスや技術を有機的に接続するための根幹となる。

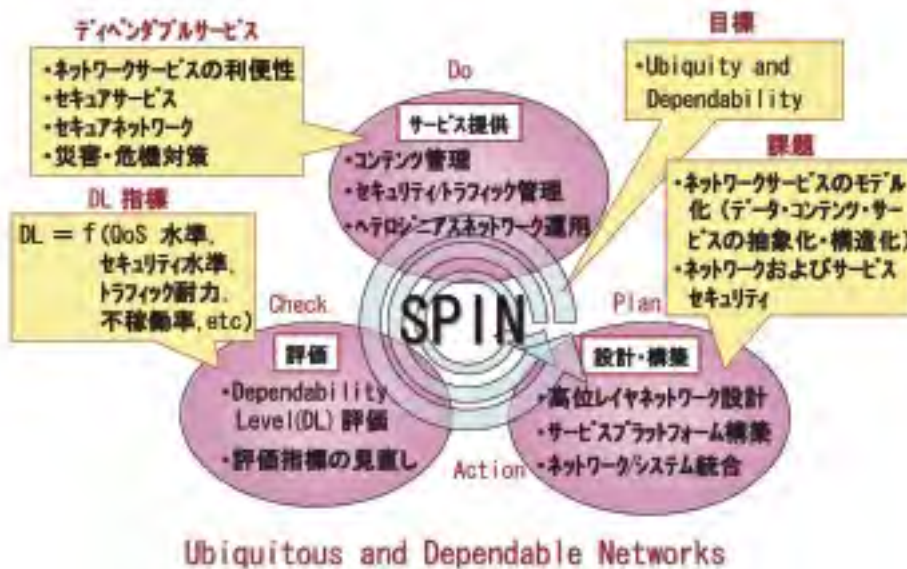


図3.6.3 ディペンダブルネットワークのSPIN図

3) コンピューティング

システムのディペンダビリティを追求するのは主として2層目のサービスインテグレーションの層が問題となる(図3.3.2)。評価に関してはディペンダビリティ評価やサービス品質評価のための指標が必要となるし、実使用を通して、新しい価値指標の更新も行われなければならない。その結果を要求仕様記述に反映し、検証・シミュレーション、統合化設計、実装・テストが行われる。システムを実サービスに供する場合にはサービス指向仮想化技術のほか、大規模データ技術、超高速計算技術、VLSIシステム技術などが下支えとなる。(図3.6.4参照)



図3.6.4 Dependable ComputingのSPIN図

4) エレクトロニクス・フォトニクス

最下層の要素技術としては材料・基盤・回路などの研究開発（エレクトロニクス・フォトニクス）が必要となる（図3.6.5）。この層は最上位層からの要求仕様を実現する他、独自の研究開発により上位層に新たな可能性を提供する役割を持つ。つまり縦方向のスパイラルも形成されることになる。

このように、様々な研究開発分野が相互に関連しながら大きなスパイラルとなって技術分野全体が発展し、より良い社会システムを提供するのがSPINである。



図3.6.5 エレクトロニクス・フォトニクスのSPIN図

第4章 分科会をまたがった横断的検討

分科会をまたがる議論によって重要研究領域の抽出を試みた。そのために3つのワーキンググループ（WG-A, B1, B2）を設けた。WG-Aでは、将来の Dependable System の例を想定してそれを設計してみる作業を通じて、必要だが抜けている重要研究領域や問題点を洗い出そうと試みた。WG-B1 および B2 では、各分科会から出された俯瞰図を眺めて、共通のあるいは大括りにすべき研究領域、国際競争力の観点から今後我が国として注力すべき研究領域の抽出を試みた。

4.1 WG-A

ワーキンググループ WG-A では、今後の IT が目指すべき重要な方向性として、「孤立から相互作用」、「閉から開」という2つの方向性を参加者で共有した。IT と社会応用の観点からは、生活ダイナミクスコンピューティングを、この2つの方向性を目指す重点研究領域として位置づけた。さらに、個別の技術分野を超えた横断的な取り組みが必要な全体問題と、各技術分野において取り組むべき要素問題を列挙し、今回ペンディングとなった課題を扱う新しい WG を提案した。

4.1.1 WG-A のまとめ

4.1.1.1 IT が目指すべき重要な方向性

今後の IT が目指すべき重要な方向性として、以下の2つの方向性を確認した。

- 孤立から相互作用へ
 - ▷ 個から集団へ (mass)
 - ▷ 点からネットワークへ (networking)
 - ▷ 静から動へ (dynamic computing)

情報処理システムは、様々な要素デバイスが統合され、大規模化している（個から集団へ）。計算機の形態も、計算機単体からグリッドコンピューティングのような複数の計算資源を活用する形態まで多様化している（点からネットワークへ）。また、最終的に人間が IT によって享受するサービスを議論するには、ハードウェアやソフトウェアが統合されたシステムだけでなく、人をも含んだシステムを扱う必要性も増している（機械相互の作用から人間との相互作用へ）。情報処理サービスの観点からは、特定の個人向けサービスからコミュニティーのサービスへと対象が拡大している（個から集団へ）。時間軸で見れば、世界が定常であると仮定した技術ではなく、現実社会の非定常性に対応できる技術が求められている（静から動へ）。

- 閉から開へ (ill posed open problem)
 - ▷ 特殊環境から日常へ

語弊を恐れず述べるならば、物理学は、世界を切り取り、切り取られ、閉じた世界

を記述しようとする学問であった。工学者も知らず知らずのうちに、物理学的アプローチをとってしまう傾向にある。しかしながら、断片として存在する社会ではなく、現実社会を扱うためには、これまでのマインドを変える必要がある。現実社会の全てをセンシングする技術や、説明し再現できる物理法則が存在しないので、現実社会の問題の多くは、ill-posedな問題である。例えば、ロボティクスでは、特殊環境から日常へ踏み出そうとしたとき、使用される環境を勝手に想定するわけにいかないため、その場で適応する能力が求められる。

4.1.1.2 生活ダイナミクスコンピューティング

「孤立から相互作用」「閉から開」への変革を実現する研究領域として「生活ダイナミクスコンピューティング」が位置づけられる。生活ダイナミクスコンピューティングでは、図4.1.1に示すように、日常の場でセンシングし、モデリングし、サービスするという1つのループを完結し、さらに、このようなループを回転させ続けることで、日常生活を支えるためのサービスとそれを支えるセンシング・モデリング技術を社会との相互作用の中で持続的に発展させることが可能になる。社会が望むサービスの実現という ill posed な問題へ、社会との持続的な相互作用を通じて挑戦する新たな研究領域である。

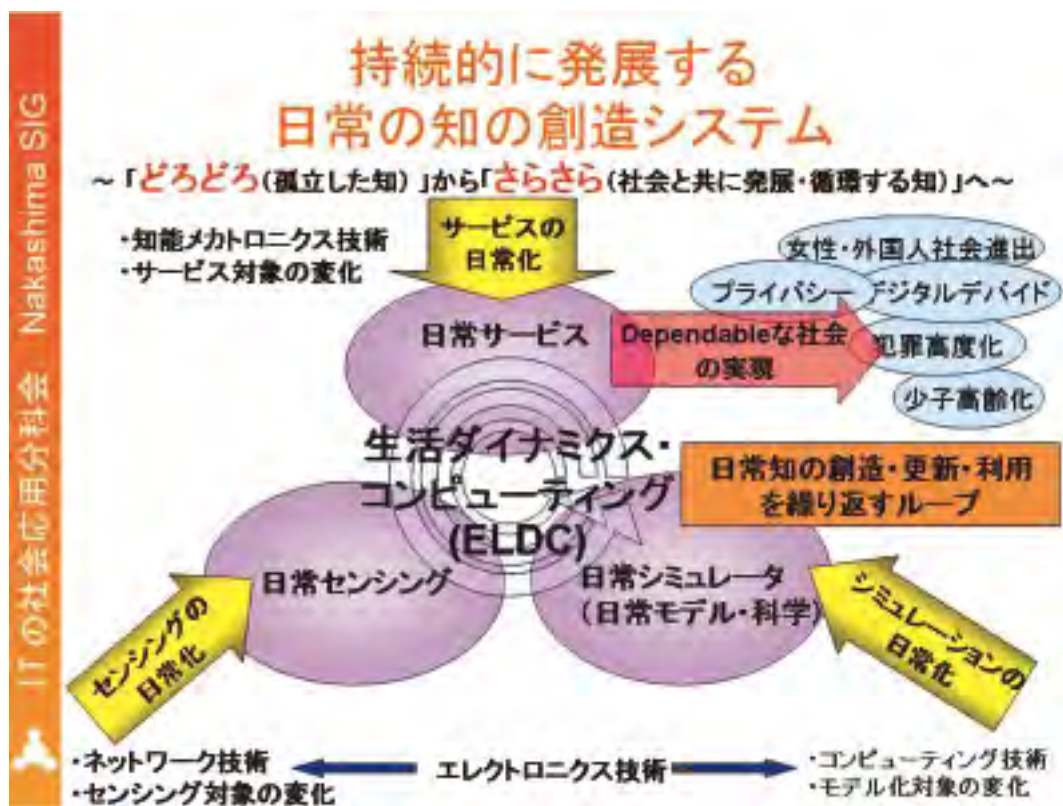


図4.1.1 生活ダイナミクスコンピューティング

4.1.2 全体問題

個別の技術分野を超えた横断的な取り組みが必要な全体問題としては、以下のよう
なものが取り上げられた。

- プライバシ・セキュリティ
 - ▷ Anonymity (無名)
 - ◇ 物理的インタラクション
 - ◇ Local authentication のためのロボット
 - ▷ ユーザによる制御
 - ◇ RFID 到達距離の制御
 - ▷ Intelligent data/active data
 - ◇ Life time, コピー回数の管理
- 技術の透明性
 - ▷ 素人ユーザによる承認・管理の技術
- 認証システム
 - ▷ 指紋/動脈⇒ Entity の抽象化不足
(例) サインと印鑑 (印鑑は, 抽象化されていない)
 - ▷ コンピュータで扱える物理世界が曖昧
 - ▷ トレーサビリティ
- ユビキタスパワー
- 災害時応用 IT
 - ▷ 通信手段の仮想化
 - ▷ 情報のシェアリング

4.1.3 要素問題

各技術分野において取り組むべき要素問題としては、以下のようなものが取り上げ
られた。

- ネットワークに関する問題
 - ▷ 接続の仮想化による接続の維持 (alternative, 抽象化)
 - ▷ 集団情報のシェアリング
 - ▷ Connectivity の可制御性
- コンピューティングに関する問題
 - ▷ 「サービス」指向アーキテクチャ
 - ▷ 計算論 (How ではなく, What)
 - ▷ インフラ系ミドルウェア ((例) 広義のグリッド)
- ロボティクスに関する問題
 - ▷ 実時間・実社会適応技術

◇ ユーザ適用，環境適用，リアルタイム性

4.1.4 新しいWGの必要性

ITの社会応用に関して，今回は議論が尽くせなかった領域として，社会の「知識」や「価値」を取り扱う社会システムが挙げられた。将来，社会システムの設計WGを作り，以下のような課題を検討する必要がある。

- ITによって大きく変わりつつある「知識」と「価値」
- 「知識」生成・共有システム
(例) 新しい教育システム，セマンティックコンピューティング，世論を操作してしまうブログの存在
- 「価値」生成・共有システム
(例) 国家の電子マネー，企業のマイレージ・クーポン，マイクロキャッシュ(円未満)と軽いサービス

4.2 WG-B1

4.2.1 検討の前提

このワーキンググループ(WG-B1)では，まず議論すべき視点の明確化を行った。全体討論で提起されたいくつかの視点から，「プロセス微細化とシステム複雑化<Dependable Systemを構成するための研究領域>」，「アプリケーションレイヤの構造化」，「Peta/femto技術進歩の壁を各階層でどう破るか」，「SW構成技術(Webサービス)」，「端の技術，ニッチ技術で重要な領域は？」，「マイクロ波給電」，「レーザ給電」などの視点を踏まえて，高度な目標に向けた長期研究の課題を議論することとした。ただし，検討の枠組みとしては「20年後の社会を支えるネットワーキングは？」を掲げて，専門分科会のいずれにも関わり，総合的な取り組みの必要な重要研究課題を抽出するように進めた。

また，別の視点として「F1技術をいかにコモディティ化するか，国が支援するか」についても，議論することとした。

このWGでの議論は時間的制約もあったため，各専門分科会で議論された項目が素材となったが，議論の過程で浮かび上がった研究課題や研究の推進方策についての提案もあった。

4.2.2 検討の結果のサマリ

Dependableの見方は，ユーザから見たときのネットワーク機能やサービスがディペンダブルであることという捉え方と共に，ネットワーク機能やサービスを構成するシステムやさらにその構成要素であるデバイスやソフトウェアがディペンダブルに動作するという捉え方があり，これら2つのディペンダビリティはいずれも重要である。

各専門分野が関わる研究テーマの見極めもあるが、各専門分野の研究者の協力関係を構築するための方策も非常に大事であるとの見方が、いずれの分野の研究者にとっても強く認識されていることが明確にされた。

サービスなどの上位レイヤと、その構成要素となるシステムレベルの中位レイヤ、さらにそのハードウェア・ソフトウェア構成要素のレイヤ間の協力が必要な総合的な研究テーマの場合、長期的な協力関係の必要性が理解されていても、研究計画の各段階で成果を挙げてゆくには、途中の段階における成果を出すこと、すなわち短期の目的を達するような研究スタイルに陥り易いという問題が常に存在している。構成要素としてのデバイスなどの研究では、システムやサービスが将来狙う目標に向けて比較的長い時間を掛けた計画的な研究資金の確保による地道な研究が必要であるが、その過程でシステムやサービスの研究計画や目標が変わるなどして、せっかく投入した研究リソースが実らないケースがままある。一方、サービスなど上位レイヤでの将来志向の研究テーマには、高い目標のシステムやデバイスの成果を期待して進める必要があるが、そのサービス研究の成果を実証するためにはシステムやデバイスの研究が実験に使えるレベルに達していないことが多く、やむを得ず手に入る範囲での構成要素を使うことになりかねない。そのため十分な機能やサービスの実現が出来ず、コスト・性能比の目標達成も困難ではないかとの評価となり、研究計画の見直しになることも多い。結果として、サービスからデバイスまでが連携する高い目標の研究は、途中で断念あるいは立ち消えになってしまいかねない。長期目標の研究には、このような問題を克服する研究連携の新たな手法を検討することが非常に重要である。

そこで、この WG では「20 年後の社会を支えるネットワーキングは？」という、長期的な研究目標に相応しい研究テーマの例としてどんなものが考えられるか、自由な意見交換を行った結果、ここでは以下の 3 つのネットワークが長期の分野間連携の必要性が高い重要研究テーマとして認識された。

- (1) 思い出ネットワーク
- (2) センサネットワーク
- (3) 自律的ネットワーク

WG での議論の捉え方を図示すると、図 4.2.1 のようになる。以下、それぞれの重要研究テーマに関してその構成要素となる重要研究課題の抽出を試みた。以下は、Peta/femto の視点が特に重要なハードウェアに関する重要研究課題を主としてまとめた結果である。

(1) 思い出ネットワーク (図4.2.2参照)

思い出ネットワークとは、ネットワーク上での大容量蓄積機能(個人の電子図書館)、デジタル写真の保存、ネットワーク蓄積機能による PC バックアップなど情報リソースの信頼性の向上、などを念頭においた将来の情報環境である。

蓄積サービスは、アメリカではすでに試みられて経験があり企業的には成り立たな

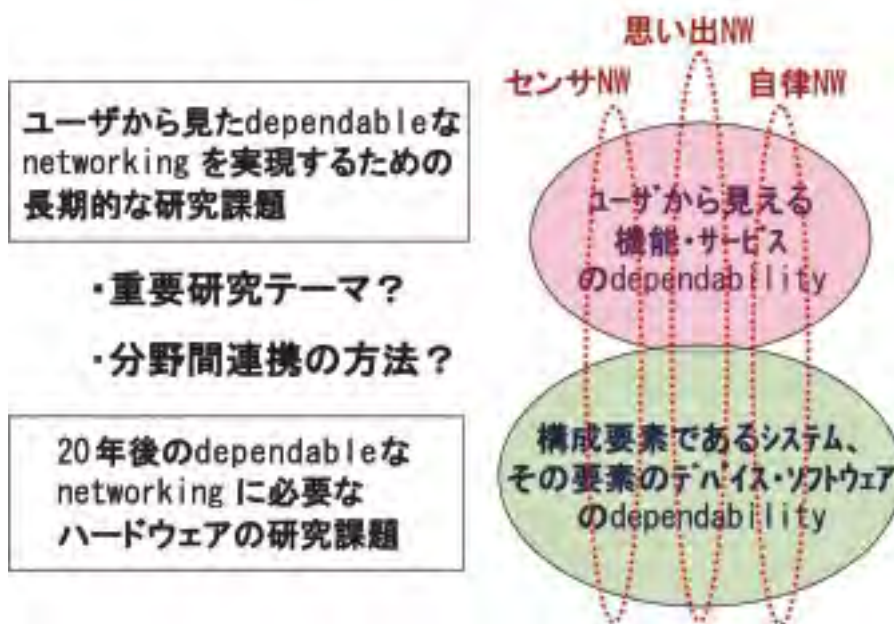


図4.2.1 WG での議論の捉え方

- ・ NW上での大容量蓄積機能(個人の電子図書館)
 - ・ デジタル写真の保存
 - ・ ネットワーク蓄積による信頼性のあるPCバックアップ
- ・ 蓄積サービスは企業的には成り立たない(アメリカの例)
- ・ ネットワークの基本サービスとして大容量蓄積機能
 - ・ 媒体の変化に長期に対応するハードウェア保証が必要
 - ・ コンテンツまで見分ける上位レイヤ機能が必要
 - ・ 端末の蓄積コストに見合う信頼性あるネットワーク蓄積技術
- ・ 個人データの100年蓄積保証(アーカイブ)を国策化
- ・ ユーザが信頼して使うネットワークへの観念を形成

図4.2.2 思い出ネットワーク

いとこの報告もあるが、入手可能な範囲のシステムやデバイスを前提にするのではなく、長期の総合的な分野間の連携研究としてはチャレンジに相応しい研究テーマであろうとの意見が多かった。

将来は、大容量情報蓄積機能をネットワークの基本サービス機能として組み込むことが有用である。情報通信機能と情報蓄積機能を連携させる多くの可能性も生まれる。

蓄積に関しては、システムや媒体が過去に多くの変遷をたどり、進歩も早いことから、媒体の変化に対して長期に対応するハードウェア保証をすることが必要となる。

一方、コンテンツまで見分ける上位レイヤ機能や、当然ながらセキュリティ機能の充実が不可欠である。

コストに関しては、端末での蓄積コストが非常に低下していることから、それに見合う信頼性あるネットワーク蓄積を可能とするシステム技術、蓄積デバイス技術は何であるか、が重要な研究課題である。

情報化社会の進化に伴い、今後の国策としても、個人データの記録、保護などを100年蓄積保証（アーカイブ）する、などの基本方針を策定することを検討すべきであろう。そして、ユーザが安心かつ信頼して使うようなネットワークへの新たなディペンダブルな観念を形成してゆくことが求められる。

(2) センサネットワーク (図4.2.3参照)

最近急速にセンサネットワークの研究が活発化しているが、無線 LAN や RF-ID タグ IC の進歩を受けて比較的近未来のシステム志向の研究が多い。ネットワーク機能としてセンサを位置づけ、またその機能実現のための本質的なセンシングデバイスなどハードウェアの革新を狙う総合的な研究テーマとすべきである。また、単に情報通信の機能高度化ではなく、ロボティクスや社会環境をも含むより広い観点でのテーマとして捉える必要がある。

センサは、そのセンシング情報の信頼性と精度が極めて重要なことから、一番基本的な電源の問題をどう解決するかに抜本的な研究が必要である。現在のセンサの電源は結局のところボタン電池に頼っているものが多いが、これに替わる無線給電技術の研究が重要である。近年、光ファイバーを用いるセンシングでは光信号または光電力をエネルギー源とすることで、給電問題を解決しているシステムが研究されているが、これは電源問題を解決している一つの例である。

- ・ 現状はシステム志向の研究面が先行
 - ・ ネットワークを前提にした本格的なハードウェア研究が必要
- ・ Dependableなハードウェア
 - ・ 有害・有寿命のボタン電池にかわる無線給電技術
 - ・ 光ファイバセンシングではセンシングと給電を同時に実現
 - ・ ロボットでは無線給電が最重要課題の一つ
 - ・ 端のところで必要な特殊機能デバイスも取上げる
- ・ 無線給電技術
 - ・ 小型・高電力の点でGaN素子は極めて有望
(高温動作: 400度、高電圧: 1kV、大電力: kWオーダー)
 - ・ ミリ波(例: 60GHz)

図4.2.3 センサネットワーク

応用分野としては、ロボティクスにおいて無給電のセンサ技術が特に重要である。また、センシングに求められるデバイスは特殊なものが必要とされる場合も多いが、そのような特殊デバイスの研究も長期の研究課題として十分取上げてゆく必要がある。

電源問題を解決する一つの重要研究課題として、マイクロ波などを用いる無線給電技術の研究にもっと力を入れる必要がある。大電力マイクロ波デバイスとして、近年急速に可能性が高まっているものとして、GaN デバイスは今後極めて有望な技術と考えられる。高温、高電圧、大電力に対していずれも従来の Si デバイスや他の化合物半導体を凌駕する特性を有している。60 GHz 程度のミリ波での可能性も高い。

(3) 自律的ネットワーク (図4.2.4参照)

ここで自律的ネットワークと称しているのは、ユーザが自分の意思で自律的にネットワーク機能のコントロールや管理を行えるようなネットワーク環境のことである。現在のインターネット上のサービスは言わば“お仕着せ”のネットワーク環境であり、ユーザの意思によってコントロールすることは非常に難しいことを克服したい、という要求に応えられるようなネットワーク環境を構築する研究テーマであり、まさにディペンダブルなネットワークを目指すものである。

このための研究課題は多岐に及ぶが、基本的な機能として、ネットワークがコンテンツまで見分ける機能や、異種のネットワークをユーザが選択して利用できるようにする機能などが不可欠である。また、現在のデジタル情報通信の最大の欠点は遅延が増大することであるが、特別な環境では遅延量が最小となるリアルタイム重視型の機能が必要であり、そのようなリアルタイム性重視の機能も保証する環境も求められる。

- **現状および近い将来の問題点**
 - ・現状のネットワークは、大量ジャンクメールの例のように、ユーザがコンテンツを制御できる機能がない
 - ・リスクの大きいネットワーク利用を強制されている
 - ・処理の高度化(複雑化)により遅延が増大
- **Dependableなネットワーク研究の方向性**
 - ・コンテンツまで見分けるネットワーク機能
 - ・リアルタイム性を保証(電話網レベル)するサービス
 - ・異種のネットワークを選択して利用できる環境の構築
(例えば、①インターネット、②品質・性能保証ネットワーク、③リアルタイムネットワーク)

図4.2.4 自律的ネットワーク

4.2.3 戦略提言

ここでは、例として上記の3つの20年後を目指して研究すべきネットワーキングという視点から、各分野が連携して抜本的な研究の取組みを行うべき重要研究課題を検討した。限られた時間内のため、示した課題そのものは議論を尽くした結論ではないが、このような課題抽出を本格的に行うためにも、分野間が連携してお互いの研究課題設定と長期的な視野で、どのようにしたら連携効果を高めることが出来るかの研究の進め方の方法論が非常に重要であるとの結論となった。

今後は、研究課題の抽出と共に、研究連携の方法論を同時に議論し、実際のプロジェクト形成に活かされるような事例を作ってゆくことが求められる。

4.3 WG-B2

4.3.1 検討の前提

各分科会の検討内容を参考にはしたが、コンピューティング分科会、ロボティクス分科会、ITの社会応用分科会、など横断的なメンバーが集まったことで、特に今までの検討結果にとらわれずに、二つのキーワード、DependableとPeta/femtoだけを軸に、自由な発想で検討を行った。

4.3.2 検討の結果のサマリ

検討は、二つのキーワードのうち、主にディペンダビリティに対するものになった。参加者の合意を一言で述べるとすれば、「人間系まで含んだディペンダビリティは新しいディシプリンになり得、かつ戦略的に研究開発を進めれば日本が主導権を取れる領域である」ということである。このためには a) ディペンダビリティに対する新しい客観的な指標が必要であり、b) その指標は人間系まで含んだサービスレベルのものであることと、c) システムのライフサイクル全体に渡るディペンダビリティ・マネジメントを含まなければならない。

以下、これらの内容につき、図4.3.1を示し詳細を述べる。

a) ディペンダビリティの客観的指標

ディペンダビリティを科学的及び工学的ディシプリンとして捉えるには、それを定義する客観的な指標が必要である。今日のIT(あるいはICT,あるいはITを含んだ社会システム)には、このような客観的な指標が欠如している。あるシステムXは別のシステムYに比べてよりディペンダブルと言えるのだろうか、あるいはそうでないのであろうか？

個々の機械装置に関しては平均故障間隔(MTBF または MTTF)、信頼度(reliability)、アベイラビリティ(availability)などの明確に定義された概念があり、これらがある意味で客観的な指標を提供している。しかしながら、ITシステムはコンピュータ、ネットワーク機器、オペレーティングシステム、ミドルウェア、アプリケーション

WG-B2における提言:「Measurable Dependability」-- それはサービスの アスペクトとライフサイクルのアスペクトを持つ



図4.3.1 WG-B2 における提言の説明図

ン、外部のインフラストラクチャ、ユーザ、運用管理者などを含む極めて複雑な系であり、これに対する客観的な指標は現在知られていない。QoS, SLAなどはIT サービスを提供する上での仕組みとして一定の評価を得られているが、多くの場合、複数のサービスを比べる上での客観的な指標としては機能していない。

ITシステムのユーザから見れば、わかりやすいディペンダビリティの指標はすなわちそのままリスク評価のベースになる。例えば、ITシステムのディペンダビリティがクラス1からクラス4までに（非常に大雑把に）分類されたとしよう。たかだかこれだけの指標があっただけでも、「生命・財産の維持に直接関わるサービスはクラス4にしよう」とか、「エンタテインメントはクラス1でよいだろう」とかの、リスク評価の指標になり得る。このような評価は、すなわちまた、ユーザや社会によるIT技術のアクセプタンスにつながる。したがって、IT研究開発者を含むIT業界にとってこのような指標は極めて重要である。

また同時に、このような指標は、健全な競争を通して研究開発を促進する。ディペンダビリティ・クラス3以上のシステムでなければ政府関係の調達基準に達しないとすれば、そしてクラス3が今現在得られるITの品質を超えているとすれば、ITのディペンダビリティは急速に向上することは間違いないだろうし、このような競争が、

ひいてはわが国の国際競争力を向上させると考えられる。また、このような指標が国際標準になれば、IT 業界における日本の指導力が飛躍的に高まることが期待できる。

b) サービスレベルのディペンダビリティ

ディペンダビリティの指標は、サービスレベルのものでなければならない。システムの品質はサーバ、ネットワーク、オペレーティングシステム、ミドルウェアなどの製品だけでなく、それを開発する開発者、運用する運用管理者、使うユーザなどによって影響を受ける。例えば、十分に訓練を受けていないユーザによって利用される航空管制システムは、例えハードウェアやソフトウェアの品質が高くても「ディペンダブル」とは言えないであろう。

従って、ディペンダビリティの指標は最終的にそのサービスの提供を受ける受益者を含む、各ステークホルダの観点から見た総合的なものでなければならない。このためには、教育やトレーニングを含めた、社会学的な考察も必要である。また、ステークホルダによっては、「ディペンダビリティ」は多分に主観的なものになり得る可能性もある。このような観点を取り込むには、各ステークホルダのモデリングが必要である。場合によっては、IT と付き合うことが気持ちよいか、という「ホスピタリティ」の概念が必要かもしれない。

c) システムのライフサイクル全体に渡るディペンダビリティ・マネジメント

特に熱く議論されたのが、ディペンダビリティのライフサイクルの問題である。これは一言で言ってしまえば時間軸上全体にわたっていかにディペンダビリティをマネージするかという問題である。

IT システムは多くの場合、要件定義→設計→テスト→運用→維持管理→次期システムへの更新というようなライフサイクルを持つ。システムのディペンダビリティは、それぞれのステップにおける品質と密接な関係がある。要件定義が正しくステークホルダの期待を反映していなければ、出来上がったシステムはそのステークホルダから見てもディペンダブルなものでないだろう。設計・テスト・運用に齟齬があった場合もディペンダビリティに大きな影響がある。システムが不可避な事象によって一時的に利用不可能になったり、メンテナンスを受けていたりする場合のディペンダビリティはどのように定義されるのであろうか。また、多くのシステムは、テクノロジーの入手可能性や、環境の変化により更新を余儀なくされている。しかし、ステークホルダから見れば、システムの継続性はディペンダビリティの重要なアспектだし、その移行は限りなくスムーズでなければならない。

今まで、このように、システムが廃棄され新しいシステムに更新されるようなサービスのディペンダビリティはあまり議論されていないように思える。一方、自然界における個体の死と種としての保存の仕組みは、このような時間軸上における高いディペンダビリティに対して大きなヒントになるかもしれない。いずれにせよ、システムに寿命があることを前提に、トータルな時間軸上のディペンダビリティの指標が必要

である、というのがWG参加者の結論である。

以上の a), b), c) を SPIN コンセプトにマップすると以下のようになる。

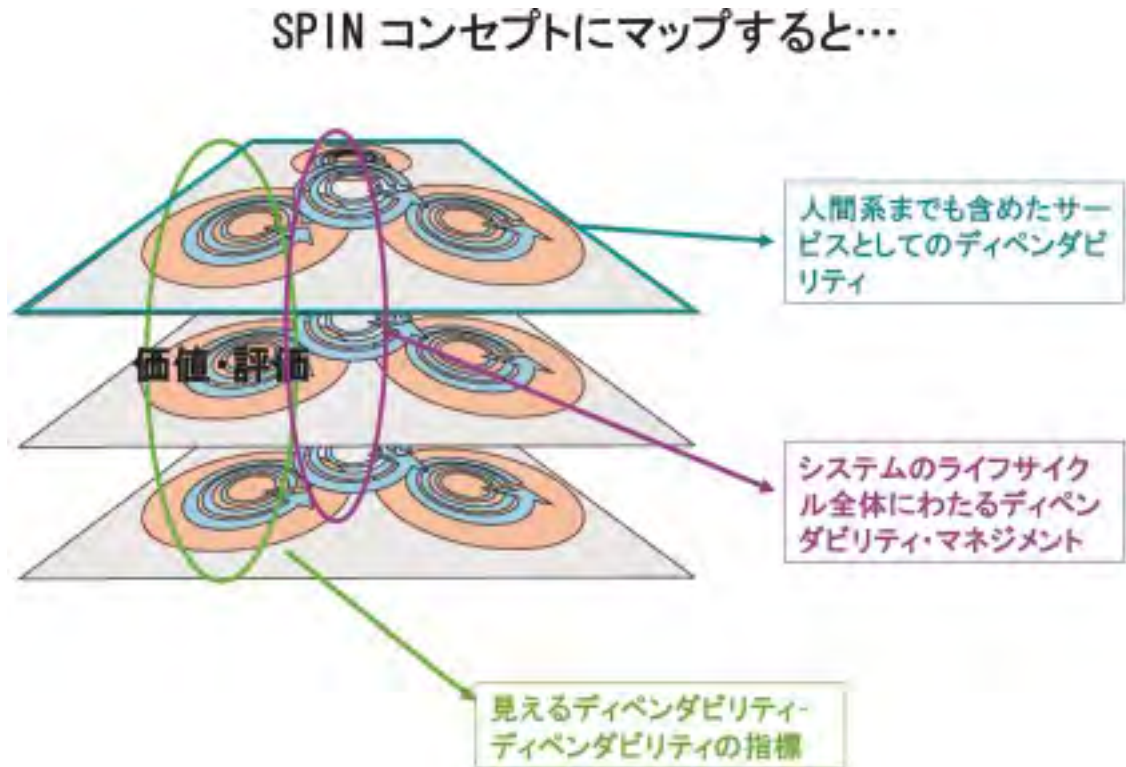


図4.3.2 SPIN コンセプトのマップ図

4.3.3 研究分野へのマッピング

以上のように、人間系を含むサービス全体として、なおかつ時間軸上の観点を含むトータルなディペンダビリティ指標が必要であるのだが、それは現在の研究分野とどのように関連付けられるのだろうか？ WG では、それぞれにつき、思いつく限りの既存研究分野をマップした。以下はそれをまとめたものである。

指標の観点

リスクマネジメント、経営、サービスサイエンス、認知科学、要求工学、ユーザモデル、安全倫理、ベンチマーキング方法論、障害分析、QoS 評価、SLA 保証

サービスレベルの観点

システム工学、制御工学、オープンスタンダード、システム設計、インテグレーション、疎結合分散システム、フォールトモデル、フォールトトレランス、リカバリ、サービスコンティニューイティ、セキュリティ、脅威モデル、マンマシンインタフェース

ライフサイクルの観点

ソフトウェア工学、ライフサイクルマネジメント、システムマネジメント、生物的協調計算、オートノミックコンピューティング

4.3.4 戦略提言

以上の内容を踏まえ、WG では、研究の進め方について以下のような提言を行う。まず、最初にディペンダビリティの基本概念を定義する。基本概念の確認のために、エンタプライズシステムを対象に先行技術開発を行う。次のステップは指標の開発を行うと同時に、指標の評価方法論を開発する。また目標値を設定し、自動車、医療、ロボット、デジタル家電、電子政府などに適用する。さらに次のステップでは、これらの目標値を政府調達基準とすると共に、国際標準化を目指す。

第5章 今後の展望

前章までの検討結果を踏まえて、本章では電子情報通信系全般にわたって今後の展望・課題を示す。

エレクトロニクス関係では、更なる微細化が進むが、動作の不確実性が問題になり始め、信頼性物理が重要になる。また、不揮発性メモリの利用で情報機器類も様変わりすることが期待される。エレクトロニクスが今後の産業の重要な役割を果たすということに変わりはなく、システムはエレクトロニクスによって物理的に実現される。従って、常にその先端技術を研究開発し、新たなデバイス技術を生むという努力は必要である。

通信分野では高速化が進み、品質保証したネットワークが求められよう。コンピュータと通信の融合が進展し、応用層の構造化が進む。場所や速度に捕らわれないユビキタス通信の進展や、また、ワームなどを低減させ通信本来の持つべき安定性を回復させる情報通信セキュリティの研究開発は必須の作業である。

一方、情報システムが機能しなくなった場合の影響は、システムの相互依存が益々進展する今後、甚大である。従って、システムへのディペンダビリティの向上技術は、正に今後の方向性を与える。これは言い換えれば、最終利用者のニーズを重視したシステム作りをするということで、他の分野で以前から言われている「顧客重視」路線と本質的には変わりはない。従って、システム分野も、その要求仕様を単なる信頼性・完全性・安全性など理論的指標から、より経験的・包括的なニーズ指標へと変えてゆく必要がある。

このシステム技術を世界のグローバルスタンダードとして普及させてゆくというのも、一つの方向ではなかろうか。各国利用者のニーズは国情や習慣によって異なり、一種類ではない。その多様な要求に柔軟に対応可能なディペンダブルシステム技術を作り上げるのである。このような個別の要請に合わせることこそが、世界中に広く受け入れられる今後のグローバルスタンダードではないか。世界で一つの仕様を作り、それを広めるという行きかたは限界があるように思う。

ロボティクスは、従来、静的であった人とシステム間のインターフェースの幅を広げ、物理的な操作をもそれに含めることを可能にしようとしている。これは大きな可能性を含んでいると同時に未経験な分野でもある。人との高次元レベルでのインタラクションを可能にするための研究や社会的受容性の検討などなすべきことは多い。また、実世界では、予想しない状況に出くわしたり、未知の場面に遭遇しても、なお自己判断が可能で行動を計画できる能力が今後は重要となろう。

応用から眺めたとき、今後の方向性として見えるのは、個人志向、実世界、ディペンダブル社会、である。従来のビジネス指向、企業システム向け、効率重視などに、これらが新たに付け加わる。個人支援に向けた様々な情報システムやサービスが考え

られ、様々なセンサシステムの発展とともに、今後大きな分野を形成することが考えられる。

知的創造という切り口も重要である。今後は、物理的な生産に加えて、知的活動による価値創造が大きな役割を持つ。それを情報技術がいかに支援できるかはポイントの一つである。従来の「読み・書き・算盤」という基本機能に加えて人間の知的活動を直接支援する機能の発達、その社会の知的生産能力、ひいては経済活動基盤を支える重要な要素になる。既に Google に代表される大規模情報検索サービスは、人の知的活動に大きな影響を持ち始めている。その検索結果への商業的介入からの自由性を担保しつつ、利用者の意図を直接反映する優れた情報検索システムを実現することは今後重要な課題である。他にも情報技術は知的活動に大きな影響を持つことが考えられるが、その場合の影響は必ずしも良いものだけとは限らない。「ゲーム脳」問題はその走りである。今後の望ましい方向性に関して、社会学者・心理学者を含めた深掘が必要であろう。

次に、広くわが国の研究のありかたについて触れてみたい。わが国の今後の研究のあり方はどうあるべきであろうか。従来技術による基本的な生産の場は、他の国々が得意とするところである。そこにわが国の特徴を求めることは困難である。わが国は、先端技術を指向し、新たな可能性を切り開いてゆくという役割を担うことが適切ではなかろうか。従来、わが国はそのような努力をして来た結果、その土壌が備わり始めている。

わが国の特徴的な先端的製品や技術として今見えているのは、ホーム情報化、携帯電話応用、高品質製品、メディアコンテンツなどである。人口が密で厳しい製品選択市場が存在し、多くのシニア世代を有するわが国は、高品質な先端製品を生み出し育てる優れた場である。

このような環境を利用し更にそれを進展させるためには、この役割を意識し、それを可能にするための環境を整える努力が必要である。すなわち、先端技術の研究開発環境と、製品の試行と新たな要求探索の場としての優れた市場環境の整備がポイントである。

先端技術の研究開発には、多くの優れた研究開発者が必要であり、それを国内だけで賄うことは困難であるし、また得策でもない。世界中から優れた研究者を集めることが必須で、それには優れた研究者を惹きつける魅力の形成が不可欠である。逆に、研究開発は日本が先端に立っていると世界に認識されれば自然、一流の研究者が集まる。当初は、この正帰還のループを限られた分野で立ち上げ、育ってくる勢いを利用して他分野の育成もおこなうという方策が必要ではないか。世界中から人々が集まることを阻害する様々な要因、取得困難な労働ビザ、高コストの住環境、などの改善は当然の課題である。

一方、高品質性は従来からわが国の得意とする特長であった。今後、この性質は世

界中で求められよう。あらゆる分野においてそれが必要となるし、その市場は必ず存在する。エレクトロニクス、情報、通信、ロボティクス技術等においても然り。これらの高品質性とシステムのディペンダビリティは世界中で求められる。それを支える技術を提供することはわが国の役割であろう。

わが国の周りには、多くの優れた人々がいる。物資も豊富な国がある。多くの資金を持った国もある。これらの資源を結合して、様々な新しい動きを形成することは、あらゆる国々が必要とする活動である。そこに積極的に関与すること、特に、先端的な新しい応用の研究開発を通してその新しい種を作り上げることには多くの寄与が可能であるように考える。

付 録

1. 「電子情報通信系俯瞰 WS II」プログラム

(1) 日 時：平成 17 年 9 月 29 日(木) 13:15 ~ 9 月 30 日(金) 16:30

(2) 開催場所：かずさアーク (かずさアカデミアホール)

千葉県木更津市かずさ鎌足 2-3-9

(3) 構 成

日	時 間	形式	項 目	会 場	担 当
9 月 29 日 (木)	~13:15		受付&事務処理	202B 前	
	13:15~	全体	開会挨拶	202B	生駒 俊明センター長
	13:20~	全体	進行説明	202B	丹羽 邦彦 SF
	13:30~	全体	〈分科会報告〉 IT の社会応用	202B	中島 秀之学長
	14:10~		ロボティクス・制御		小菅 一弘教授
	14:50~		ネットワーク		三木 哲也教授
	15:30~		休憩		
	15:40~	全体	コンピューティング	202B	南谷 崇教授
	16:20~		エレクトロニクス・フォトンクス		谷口 研二教授
	17:00~	全体	討論	202B	丹羽 邦彦 SF
	17:40~		散会/チェックイン		
	18:00 ~20:00	立食	夕食兼懇親会	有明の間	中島 啓幾 SF
	20:00~		自由時間		
9 月 30 日 (金)	~9:00		朝食&チェックアウト	カメラア	
	9:00~	WG	〈WG 議論〉 WG-A: Dependable System	101	中島 秀之学長
			WG-B1: 重要領域の洗い出し1	102	三木 哲也教授
			WG-B2: 重要領域の洗い出し2	103	南谷 崇教授
	12:00~		昼食	101~103	
	13:00~	全体	〈WG 報告〉 WG-A	202B	中島 秀之学長
	13:30~		WG-B1		三木 哲也教授
	14:00~		WG-B2		南谷 崇教授
	14:30~		休憩		
	15:00~	全体	〈ラップアップ〉	202B	丹羽 邦彦 SF
	全体	閉会挨拶	202B	生駒 俊明センター長	
16:30		終了			

2. 親委員会・分科会メンバーリストおよび参加者リスト

(五十音順)

2.1 親委員会メンバーリスト（8名）

氏名	所属・役職
小菅 一弘	東北大学大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻 教授
田中 英彦	情報セキュリティ大学院大学 情報セキュリティ研究科 研究科長、教授
谷口 研二	大阪大学大学院 工学研究科電気電子情報工学専攻 教授
中島 秀之	公立ほこだて未来大学 学長
南谷 崇	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
古田 勝久	東京電機大学 教授、理事
三木 哲也	電気通信大学 情報通信工学科 教授
三宅なほみ	中京大学 情報科学部 認知科学科 教授

2.2 分科会メンバーリスト リ：リーダー 補：リーダー補佐 サリ：サブリーダー

☆ITの社会応用（6名）

	氏名	所属・役職
リ	中島 秀之	公立ほこだて未来大学 学長
補	西田 佳史	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 人間行動理解チーム チーム長
	大場光太郎	独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門 空間機能研究グループ グループ長
	栗原 聡	大阪大学 産業科学研究所 知能システム科学研究部門 助教授
	田村 大	株式会社博報堂 研究開発局 主任研究員
	野島 久雄	成城大学 社会イノベーション学部 心理社会学科 教授

☆ロボティクス/制御（5名）

	氏名	所属・役職
リ	小菅 一弘	東北大学大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻 教授
補	井村 順一	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻 教授
	浅間 一	東京大学 人工物工学研究センター サービス工学研究部門 教授
	菅野 重樹	早稲田大学 理工学部 機械工学科 教授
	矢野 雅文	東北大学 電気通信研究所 教授（副所長）

☆ネットワーク（8名）

	氏名	所属・役職
リ	三木 哲也	電気通信大学 情報通信工学科 教授
補	西 一樹	電気通信大学 情報通信工学科 助教授
	今井 和雄	株式会社 NTT ドコモ ネットワーク研究所 常務理事兼所長
	江崎 浩	東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教授
	北山 研一	大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻 情報通信工学部門 フォトネットワーク工学領域 教授
	久保田文人	独立行政法人情報通信研究機構 情報通信部門 兼 フォトニックネットワークユニット 研究主管兼ユニット長
	中川 正雄	慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授
	並木 淳治	財団法人 C & C 振興財団 専務理事

☆コンピューティング（5名）

	氏名	所属・役職
リ	南谷 崇	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
補	丸山 宏	日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所 Distinguished Engineer
	天野 英晴	慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授
	関口 智嗣	独立行政法人産業技術総合研究所 グリッド研究センター センター長
	徳田 雄洋	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 計算工学専攻 教授

☆エレクトロニクス/フォトニクス（8名）

	氏名	所属・役職
リ	谷口 研二	大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻 教授
サリ	保立 和夫	東京大学大学院 工学系研究科 電子工学専攻 教授
補	成瀬雄二郎	株式会社東芝 研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー 研究主幹
	尾中 寛	株式会社富士通研究所 フォトニックネットワーク研究所 フォトニックシステム研究部 部長
	木村紳一郎	株式会社日立製作所 中央研究所 ULSI 研究部 主管研究員
	葛原 正明	福井大学 工学部 電気・電子工学科 教授
	安浦 寛人	九州大学 システム情報科学研究院 情報工学部門 教授
	横森 清	株式会社リコー 研究開発本部 研究開発企画室 兼 パーソナルマルチメディアカンパニー 次長研究員

2.3 WG 班分け表

分科会	ITの社会応用	ロボティクス /制御	ネットワーク	コンピューティング	エレクトロニクス /フォトニクス
WG-A (丹羽) (石正)	中島 秀之 西田 佳史	浅間 一 菅野 重樹	江崎 浩	関口 智嗣 徳田 雄洋	安浦 寛人 横森 清
WG-B1 (中島) (高橋)	野島 久雄	矢野 雅文	三木 哲也 西 一樹 中川 正雄	天野 英晴	葛原 正明 保立 和夫
WG-B2 (佐々木) (伊東)	田村 大	小菅 一弘	久保田文人 並木 淳治	南谷 崇宏 丸山 宏	谷口 研二 成瀬雄二郎

2.4 参加者リスト（親委員長および分科会メンバー 31名）（所属・役職は当時）

氏名	所属・役職
浅間 一	東京大学 人工物工学研究センター サービス工学研究部門 教授
天野 英晴	慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授
井村 順一	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 教授
江崎 浩	東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教授
葛原 正明	福井大学 工学部 電気・電子工学科 教授
木村紳一郎	株式会社日立製作所 中央研究所 ULSI 研究部 主管研究員
久間 和生	三菱電機 先端技術総合研究所 所長
久保田文人	独立行政法人情報通信研究機構 情報通信部門 兼 フォトニックネットワークユニット 研究主管兼ユニット長
小菅 一弘	東北大学大学院 工学研究科 教授
菅野 重樹	早稲田大学 理工学部 機械工学科 教授
関口 智嗣	独立行政法人産業技術総合研究所 グリッド研究センター センター長
田中 英彦	情報セキュリティ大学院大学 情報セキュリティ研究科研究科長、教授
土居 範久	中央大学 理工学部 情報工学科 教授
谷口 研二	大阪大学大学院 工学研究科 教授
田村 大	株式会社博報堂 研究開発局 主任研究員
徳田 雄洋	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 教授
中川 正雄	慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授
中島 秀之	公立はこだて未来大学 学長
成瀬雄二郎	株式会社東芝 研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー 研究主幹
並木 淳治	財団法人C&C振興財団 専務理事
南谷 崇	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
西 一樹	電気通信大学 情報通信工学科 助教授
西田 佳史	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 人間行動理解チーム チーム長
野島 久雄	成城大学 社会イノベーション学部 心理社会学科 教授
丸山 宏	日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所 Distinguished Engineer
保立 和夫	東京大学大学院 工学系研究科 教授
三木 哲也	電気通信大学 情報通信工学科 教授
三宅なほみ	中京大学 情報科学部 認知科学科 教授
安浦 寛人	九州大学 システム情報科学研究院 情報工学部門 教授
矢野 雅文	東北大学 電気通信研究所 教授（副所長）
横森 清	株式会社リコー 研究開発本部 研究開発企画室 兼 パーソナルマルチメディアカンパニー 次長研究員

参加者リスト（その他の参加者 18名）

氏名	所属
中里 学	文部科学省 研究振興局 情報課
立野 公男	文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター 情報通信ユニット
安田 篤	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課
亀屋 俊郎	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課
山根 正慎	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課
甲藤 二郎	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・情報技術開発部
三石 祥子	独立行政法人科学技術振興機構 社会技術研究開発センター
吉武 静雄	独立行政法人科学技術振興機構 社会技術研究システム推進室 ミッション・プログラムII担当
小林 康宏	独立行政法人科学技術振興機構 科学技術連携施策群ユビキタスネットワーク連携群
公野 昇	独立行政法人科学技術振興機構 科学技術連携施策群支援業務室
小原 英雄	独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造事業本部 研究推進部/研究領域総合運営室
生駒 俊明	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
丹羽 邦彦	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 情報・通信グループ
中島 啓幾	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 情報・通信グループ
佐々木和則	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 情報・通信グループ
伊東 義曜	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 情報・通信グループ
石正 茂	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 情報・通信グループ
高橋 良明	独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 情報・通信グループ

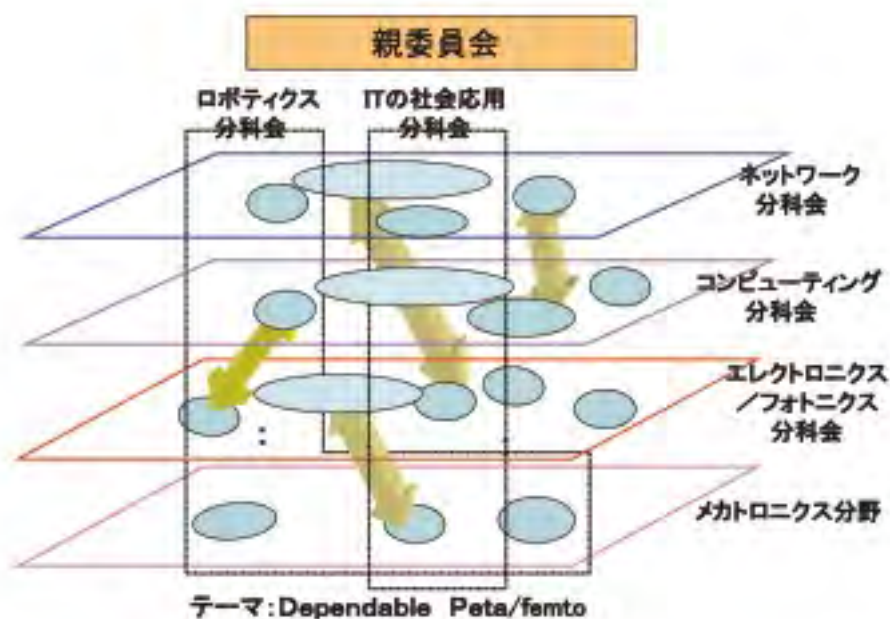
3. 検討体制

親委員会と分科会

親委員会は当初俯瞰ワークショップの「企画委員会」として開催し、俯瞰ワークショップ全体の設計についての議論を JST 側からの提案をもとに行い、ワークショップ全体の体制を決めた。分科会としては IT の社会応用 (6 名)、ロボティクス・制御 (5 名)、コンピューティング (5 名)、ネットワーク (8 名)、エレクトロニクス・フォトニクス (8 名) の 5 つの分科会を設置し、「企画委員会」を各分科会のコーディネータ (5 名) と有識者 (3 名) からなる親委員会 (メンバーは付録 2. を参照) として改組することにより、全体の統合的俯瞰のための体制をとった。なお、エレクトロニクス・フォトニクス分科会については、フォトニクスを担当するサブコーディネータを設けた。また、IT の社会応用分科会は、当初は認知科学系の分科会設置を意図していたが、コーディネータのご意見を尊重して IT の社会応用という切り口を入れることにしたものである。親委員会は、ワークショップ開催後にも開催し、とりまとめの方向性や今後の方針について議論する場とした。特に、開催直後 (10/1) の親委員会では、複数の分科会主要メンバーが集まる「インター分科会会合」を実施することを決めた。

分科会どうしの関係

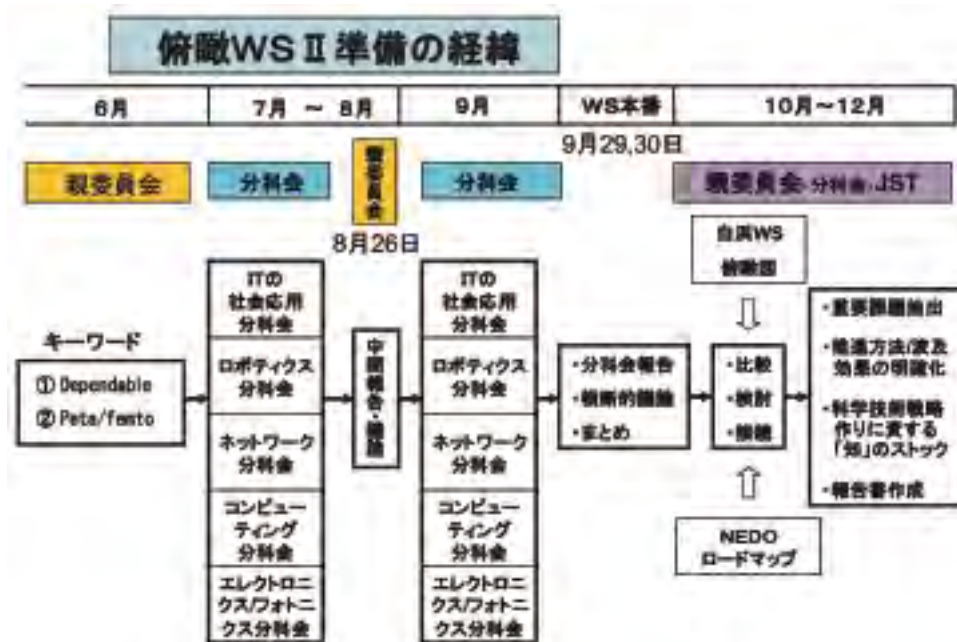
以上の結果、5 つの分科会どうしの関係は、元来統合的な分野である、IT の社会応用分科会とロボティクス・制御分科会と比較的要素技術的な色彩の強いコンピューティング、ネットワーク、エレクトロニクス・フォトニクスからなり、概念的には図・付録・1 のように整理出来る。



図・付録・1 俯瞰ワークショップⅡ分科会の構成

4. 準備のスケジュール

これらの会合体は、下記のような全体スケジュールで運営され、俯瞰ワークショップ前に各分科会において俯瞰作業を実施し、各分科会から得られる俯瞰結果から俯瞰ワークショップが開始されるようにした。これは、俯瞰ワークショップ I (平成 16 年 1 月 29 日～31 日、於：ラフォーレ南紀白浜) においては、分科会での議論がワークショップ当日から開始されたため、分科会同士の俯瞰結果の議論の場がなかったことによる反省に基づくものである。



図・付録・2 全体スケジュール図

各分科会は俯瞰ワークショップ前に 2～4 回の会合を行い、担当分野の俯瞰と重要研究領域の抽出を実行した。その結果を俯瞰ワークショップにおいて発表し、さらにそれらを混ぜ合わせるために、俯瞰ワークショップにおいてはワーキンググループを 3 つ設置した。

インター分科会会合

ワークショップ開催後、分科会毎の俯瞰およびワーキンググループでの議論を踏まえて、特に「IT の社会応用」分科会を軸とした全体的俯瞰の試みが提案され、第 2 章に記した SPIN のような提言につながった。

親委員会および分科会の開催状況

親委員会

- 5月20日(金) JST 研究開発戦略センター
- 5月28日(土) JST 研究開発戦略センター
- 6月25日(土) JST 研究開発戦略センター
- 8月26日(金) JST 研究開発戦略センター
- 10月1日(土) かずさアカデミアパーク
- 11月15日(火) JST 研究開発戦略センター
- 1月6日(金) JST 研究開発戦略センター

ITの社会応用分科会

- 第1回 7月21日(木)
- 第2回 9月9日(金)

ロボティクス分科会

- 第1回 7月19日(火)
- 第2回 8月17日(水)
- 第3回 8月22日(月)
- 第4回 9月15日(木)

ネットワーク分科会

- 第1回 7月25日(月)
- 第2回 8月19日(金)
- 第3回 9月5日(月)

コンピューティング分科会

- 第1回 7月20日(水)
- 第2回 8月8日(月)
- 第3回 8月19日(金)
- 第4回 9月20日(火)

エレクトロニクス・フォトニクス分科会

- 第1回 7月23日(土)
- 第2回 9月10日(土)

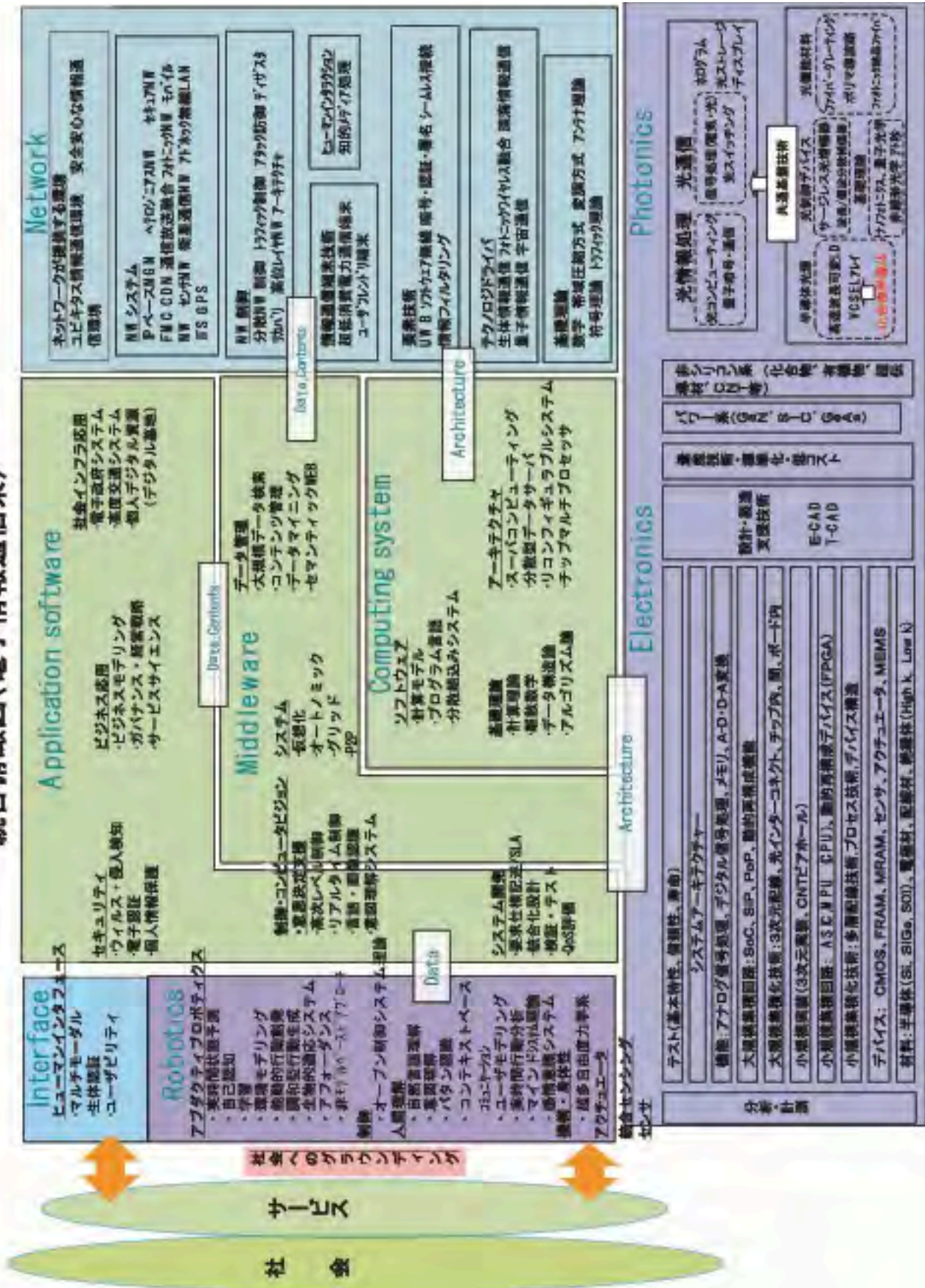
インター分科会

- 「ITの社会応用」・「ロボティクス」インター分科会
10月12日(水) JST 研究開発戦略センター
- 「ITの社会応用」・「コンピューティング/ネットワーク」インター分科会
10月13日(木) JST 研究開発戦略センター

5. 統合俯瞰図

今回のワークショップの分科会（付録：検討体制を参照）で検討された俯瞰図を基礎にして、電子情報通信系を統合して眺めるために、図・付録・3に示すような統合俯瞰図を作成した。各ブロック内では基礎理論や要素技術をベースにして上層のシステム応用技術に向かう階層構造になっている。各分野間の有機的な繋がりが分かるように、コンピュータ分野を中心に各分野をその周辺に配置し、分野間を結びつけるキーワードを記入した。このような全体像を認識することで、重要課題を抽出する基礎になるだけでなく、その波及効果を推測する一助になると考えられる。

統合俯瞰図〈電子情報通信系〉



図・付録・3 統合俯瞰図

執筆者一覧

◇ 要 旨	丹羽 邦彦
第1章 はじめに	丹羽 邦彦
第2章 新しい研究開発推進モデル (SPIN)	中島 秀之
第3章 分科会の検討結果	
3.1 IT の社会応用分科会	西田 佳史
3.2 ロボティクス・制御分科会	井村 順一
3.3 ネットワーク分科会	三木 哲也
3.4 コンピューティング分科会	南谷 崇
3.5 エレクトロニクス/フォトニクス分科会	谷口 研二
3.6 SPIN にマップした重要技術分野	中島 秀之
第4章 分科会をまたがった横断的検討	
4.1 WG-A	中島 秀之
4.2 WG-B1	三木 哲也
4.3 WG-B2	丸山 宏
第5章 今後の展望	田中 英彦

**科学技術未来戦略ワークショップ
(電子情報通信系俯瞰 WS II) 報告書**
CRDS-FY2005-WR-16

平成18年 3 月

発行者 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
生駒グループ

〒102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

印刷所 株式会社 プライムステーション

