

(4) 地球惑星科学分野

① 地球惑星科学分野のビジョン

地球惑星科学は太陽系全般における固体、流体、気体、プラズマ、そこに芽生える生命の多様な形態、さらにそれらと人間の関係を研究の対象とする幅広い学問分野である。特に地球という惑星は我々にとって身近な存在であり、この惑星の起源・進化・現在・未来の研究を通して太陽系の他の惑星、さらには系外の惑星系までを理解しようとする、野心的な学問分野でもある。

地球惑星科学は自然現象の理解という基礎科学的な面と様々な環境問題や災害等に対応するための応用科学的側面を併せ持っている。

ア 基礎科学的側面

地球惑星科学は、地球と太陽系全体を構成する要素によって作られている自然体系を「地球惑星システム」として捉え、特に地球の自然及び社会体系の進化とダイナミクスを理解し、その将来予測を目指す総合的な学問領域である。さらに、生命の存在と進化について、その本質を理解することを目指している。

地球惑星科学コミュニティが解明しようとしている研究テーマは、以下のように多岐にわたっている。

- ・地球を太陽系の一惑星、太陽系を銀河内の一惑星系とみなし、生命が存在する地球の普遍性と特殊性をより客観的に理解し、さらに地球と生命の 40 億年以上にわたる共進化を理解すること。
- ・太陽活動の変動が地球周辺の宇宙環境や地球大気に及ぼす影響を理解すること。同時に、大気及び海洋、陸水系における物質の運動と化学組成、さらに高層の電離圏や磁気圏とそれらの相互作用を理解すること。
- ・固体地球や惑星内部の進化・変動を統一的に理解すること。地震・火山噴火のような瞬間的活動から造山運動・マンテル対流のような長期的活動まで、様々な時間・空間スケールにおいて地球惑星システムを解明すること。
- ・地球の表層部分で展開される人間の様々な活動と地球の相互作用を分析し、その情報を蓄積して、社会に開かれた研究基盤とすること。また、様々な階層からなる複雑系である地球惑星システムの変動を大規模計算を通じて理解し予測すること。

現在、これらをさらに統合し、地球史から人間生活までの時間スケール、太陽系から分子レベルまでの空間スケール、微生物から人間までの生物活動スケールを俯瞰した総合的な学問が誕生しつつある。この新しい学問によって、地球惑星システムの挙動と進化を様々な時間スケールと空間スケールで記述し、さらに未来の状態を予測することが可能になるだろう。

地球惑星科学は、基礎研究、モデル研究並びに継続的な観測調査とデータベース構築を基盤としている。特にモデル研究においてはどの分野においても、大規模な計算機科学がバックボーンとなっている。これらの研究の推進と並行して、地球を

理解し人間社会のあり方を考える力を養う一貫した教育の振興にも積極的に取り組むことが重要である。

イ 応用科学的側面

地球惑星科学は上記のように基礎的学問としての発展を目指すと同時に、以下の2つの社会的役割を果たすべきだと考えている。

(ア) 地球環境問題にアプローチし、これを解決する方向性についての発言を積極的に行うこと

太古から、人間は地球そのもの、或いは惑星としての地球の運動等に依存して活動してきた。例えば、時、暦、天体の位置関係に基づいた航法等は、古来、人間生活の基本となっている。鉱物資源や化石燃料等を通じて宇宙そして地球から恩恵を受けている。地球の状態を維持してきたのは太陽と地球内部システムからのエネルギーであった。しかし、近年、人間活動が自然に影響を及ぼすほどに大きくなってきている。地球は有限の小さな惑星である。現在、世界人口は70億人に達しており、2065年には100億人を超えると予想されている。エネルギー、水、食料、資源の枯渇が問題になっており、それらの消費増大による環境負荷、地球生態系の変化等、地球は劇的な変動の最中に置かれている。私たちと地球はどこへ行くのか、誰もが深い関心を抱いているが、その予測は簡単ではない。それは、地球自体が様々な変動を内包し、さらに太陽からの影響も受けており、その複雑な地球システムの挙動が未だ十分に解明されていないからである。

地球温暖化に象徴される環境問題、地すべり・土砂災害、砂漠化や水不足等、人々の生存に関わる出来事は、すべて惑星地球と人間の活動に起因している。この人間活動を含む新たなシステムの将来について、我々は学問的に責任ある発言をしていかなければならない。

(イ) 自然災害の規模を予測し、災害に備え、起きた災害にどのように対応すべきか発言していくこと

日本列島が面している海洋プレートの沈み込み帯は、巨大地震・津波や火山活動の源である。つまり、我が国は、地震や火山等の地球活動の最も活発な地域に位置しており、また地球上で最大の大陸と最大の海洋の境界という、地球環境を把握する上で極めてユニークな場所にある。反面、この事実は、私たちが常に自然災害と向き合わなければならない運命にあることも意味している。その意味で、地球惑星科学の振興は、我が国の国益に直接繋がっており、また、国際的な使命でもある。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、未だ人類の持っている知識・経験が悲劇的災害に立ち向かうのに十分ではないことを教えてくれた。しかしながら、現時点では完全ではなくても、このような巨大地震・津波や火山噴火の再来周期や災害リスクの見積もりのもとになるデータを、将来はさらに多

くの情報を社会に提供する義務を負うのが地球惑星科学である。

② 地球惑星科学分野の夢ロードマップの考え方

我々の最も良く理解している惑星地球の姿は、永久の昔からこうであったのではない。地球には起源があり、今とは異なる姿を取りつつ現在に至ったのである。この地球の歴史を調べ、さらには地球の未来の姿にも迫る必要がある。地球惑星科学の目指す方向は

(A) まず宇宙に開いた地球像の創出を行う

地球は唯一無二であるかという問いに答え、
地球の持つ個性と普遍性、銀河史の中の地球史を理解する

(B) 次に太陽系内及び系外惑星の多様性の理解を行う

地球システム全容の理解と社会への貢献を考え、
地球の起源・進化・現在・未来を理解する
さらに惑星圏・表層環境・内部活動の変動機構解明と高精度予測にアプローチし、
地球環境と人間活動の関係解明、災害・地球環境問題の克服に尽くす

(C) 最終的には生命を育む地球惑星環境の理解が必要となる

惑星環境と生命の共進化を理解し、
第2の地球・生命生存可能惑星について考察する

この目標に至るため、5つの学問分野が関連し合い、協力し合っている。それらは、

- ・宇宙惑星科学
- ・大気水圏科学
- ・地球人間圏科学
- ・固体地球科学
- ・地球生命科学

と呼ばれる。これらの分野をあまねく理解することにより上に述べた地球科学がバランス良く発展するのである。地球惑星科学の総合的な学会組織である日本地球惑星科学連合は上記5つの科学に対応する5つのセクションから成り立っており、以下は、これらの将来ビジョンを示すものである

ア 宇宙惑星科学の夢ロードマップ

宇宙惑星科学は他の地球惑星学問分野と同様に、或いはそれ以上に探査技術、観測技術、分析技術の進歩と歩調を合わせ進んでいく。特に日本における惑星探査はごく少数の成功（始源天体イトカワからの試料回収）を例外として、未だ達成され

ておらず、これが行われると新しいものにアプローチできるという点で飛躍的な進歩を遂げる。

進歩のステップは大きく 10 年ごとに 3 つに分かれる

- (A) 宇宙における惑星系形成の仕組みを明らかにする
- (B) 第 2 の地球・生命居住可能惑星を宇宙に見出す
- (C) 生命を育む様々な惑星環境を理解する

(A) を達成するためにはまず太陽系の様々な惑星を訪ね、その環境を理解しそれぞれを比較する必要がある。その中には、地球を含む各惑星と太陽との相互作用の様々なあり方も含まれる。惑星の探査は技術的理由から、地球に近くまた太陽に近い惑星から始まり、次第に太陽から離れた惑星に展開していく。これはより始源的な環境を調べるという方向性とも一致する。また系外惑星の観測を開始し、これを計算機によるシミュレーションと比較していく必要がある。探査機は発展途上段階にあり、大規模探査の前にイプシロンロケットを使った小型高性能探査がまず初めに行われるべきである。

(B) を達成するためには太陽と惑星の相互作用をより深く理解すると共に、太陽そのものをさらによく知らなければならない。そして、目を外に向ければ第 2 の地球と呼ばれるものが発見されていくだろう。天文観測と太陽系探査の融合がなされるステップである。また宇宙からやってくる物質を分析する方法が確立される時期でもある

(C) は宇宙惑星科学と生命科学の融合のステップである。惑星を持つ恒星系は普遍的なものであると考えられ、様々な太陽系の中で我々の太陽系がどのような位置を占めるかが明らかにされる。

注意しなければならない点は、これらの進歩がすべてその場における探査によるのではなく、地上の観測（多種の地上観測の総合化）、地上での分析技術の進歩、また宇宙天気・機構研究の基盤としての長期連続モニタリング等と連携して行われることである。統合された観測のデータベースの構築も必須である。

イ 大気水圏科学の夢ロードマップ：基礎過程の理解及び予測と監視

本分野の発展は、単に技術の向上だけによるものではない。観測やモデルの「高精度・高解像化、多次元化・多様化、結合領域拡大、観測空白域縮小」と捉えるのが妥当である。また、観測とモデルのそれぞれにおける発展が重要であり、大気海洋陸水・環境を理解し予測するためには、両者は協調して進むべきものである。したがって、常に意識すべき大きな方向性は、「新しい観測網の展開、計算機技術・

数値モデルの発展」と考える。また、本分野は、人間生活に深く関わる分野であるため、社会への貢献或いは社会への責任という視点での記述も加えた。また、本分野は、国際的にトップレベルの学術成果を発信していく一方、アジアにおける観測網の充実等国際社会の中での役割分担も意識して発展させる必要がある。

以下、現在の科学レベル、近未来、遠い未来において実現が期待される科学をキーワードにより記述する。

(ア) 現在

階層モデル・結合モデルの開発・利用、観測網の拡充・空白域へ観測拠点整備、長期気候データの蓄積が重点的に行われている。

結合モデルとしては、全大気モデル/海洋階層構造モデル/生態系・水循環結合モデルが既の実現されており、また、メソ気象解像度実用・雲解像度開発/エアロゾル・化学・乱流/雲/重力波パラメタリゼーションにおける大きな発展があった。

観測と監視の視点では、太陽活動の気候影響研究/大型大気レーダ観測網/定常気象・水文・生態系観測網/再解析長期気候データ/小規模集中観測（雲ライダー・各種ゾンデ・航空機・地上ステーション等）/漂流ブイ観測（物理気候）/アジア生物多様性観測/地球観測衛星（雲・水蒸気・風・大気組成）・GPS 衛星（可降水量・気温）/ドームふじ氷床コア解析・次世代コア技術が国際的なコンセンサスの中で実現しつつある。

計算機技術の発展が本分野には深く関わっており、特にモデル研究には重要である。地球シミュレーター、次世代スーパーコンピューターの利用が現在では重要で、これにより温暖化予測は実現し、シビアウェザー（竜巻・台風・短時間豪雨）の予測も実現しつつある。これらは社会貢献にも結び付いている。

(イ) 近未来

観測・モデルの多元化・総合化が進み、社会ニーズにも迅速に対応できる機動的観測システム整備が進むと考えられる。多元的総合的な地上観測網が充実し、多機能な衛星観測も発展してゆく。社会貢献としては、水・GHG・汚染物質の把握と予測、エネルギー管理・防災・交通管理・土地利用/農業への応用が実現するものと考えられる。

(ウ) 遠い未来

着実に地上及び宇宙からの観測網が充実し、宇宙・大気全層・海洋の精密監視が定常的に行われるようになる。また、観測データのモデルへの同化技術も高度化し、宇宙・大気全層・海洋の高精度予測が実現する。アジア域において主導的観測研究がなされ、環境監視とジオエンジニアリングを組み合わせた気候変動と環境変化に関する高度な対策技術も目指す必要がある。

ウ 地球人間圏科学の夢ロードマップ：持続可能な日本、アジア、世界の実現への道

21世紀前半の我が国における地球人間圏科学の最大の課題を、「持続可能な日本、アジア、世界の実現への貢献」と規定し、それを地域・社会のサステナビリティ及び知識・情報の質・量・モビリティ等で決まる広い意味でのサイエンスレベルの向上により実現するという道筋を描いた。全期を以下の通り3期に分け、全期を通じてサイエンスレベルを押し上げる力として教育・研究により駆動される人・情報・知識の循環を掲げた。

(ア) Phase I (2014年頃～2023年頃)

ICSU（国際科学会議）の提唱する長期的研究計画 Future Earth の想定期間と重なる。この間に FE の指針に沿って地球人間圏が抱える諸問題の実態把握と改善の道筋を明らかにし、地球人間圏科学の研究・教育の充実と世界的展開の流れを確実にする。具体的には以下の研究・実践活動を進める。

- ・陸域持続可能性研究：土地利用・被覆変化、土地・資源・エネルギー、都市、農村、林野、土壌、水文、環境保全、生態系保全、環境劣化、廃棄物、統合モデル、地球情報整備等
- ・沿岸・縁辺海域・海洋持続可能性研究：陸域－縁辺海域システム、沿岸・縁辺海域利用、環境保全、生態系保全、海洋資源、汚染の発生と浄化等
- ・自然災害（ハザード）研究：気候変化影響、地震動、洪水、津波、地すべり等
- ・災害リスクの統合的研究：災害リスク統合研究(IRDR)等国际研究計画の日本拠点の形成、災害原因の学際究明と評価、データ・情報の統融合、リスクガバナンス、地域特性を踏まえたレジリエンス研究、災害リスクに係る自然・社会・人間の関連性の解明と防災・減災への貢献、分野間連携・科学－社会連携の強化等
- ・地殻災害軽減の研究：「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」（2009～2014）を継承する「災害軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（2014～2019）等による災害科学としての地震火山災害誘因（ハザード）予測等
- ・地球人間圏科学研究・教育・情報ネットワーク：学校市民参加モニタリングネットワーク、ESD、地球人間圏科学教育、グッドプラクティスの発掘と推進等

(イ) Phase II (2024年頃～2033年頃)

Phase I の成果を活かし、全人類的パートナーシップを確立し、持続可能な日本、アジア、世界への道を見出すことを目標とする。具体的には、

- ・地球人間圏科学研究・教育・情報ネットワークの一層の充実と世界的展開

- ・陸域・沿岸・縁辺海域・海洋持続可能性研究の一層の充実と世界的展開
- ・リスクマネジメント研究・教育の一層の充実と世界的展開
- ・グッドプラクティスの充実と推進

(ウ) Phase III (2034年頃～2043年頃)

Phase II の成果を活かし、地球人間圏科学・教育の充実と世界的展開に努めると共に、すべての人類の協和、英知の結集、地球環境倫理の確立を実現し、以下の目標を達成することに寄与する。

- ・持続可能な世界を生きるための新しい地球観、生命観、自然観、人間観、世界観の創出
- ・地球環境問題の克服：人口問題、食糧問題、土地・資源・エネルギー問題、温暖化問題
- ・汚染の縮小、自然災害の減少、格差・貧困の削減
- ・持続可能な世界を導き維持する地球人間圏科学のさらなる高度化と教育の推進
- ・科学の果実の全人類の共有

以上により、人と自然が調和した平和で持続可能な日本、アジア、世界を実現することに最大限の貢献をすることが、我が国の地球人間圏科学の「夢」である。

エ 固体地球科学の夢ロードマップ：稠密観測・極限実験・高感度分析が拓く固体地球科学

地球は、海、陸、生命が存在し、大きな衛星「月」との強い相互作用、及びプレート運動、地殻変動、ダイナモ作用を伴う活動的な惑星である。なぜ地球がこのように活動的であるのか、未来の地球と人間社会の関わりはどのように変化していくのか、また宇宙の中でもユニークであるのか普遍的であるのか、これらの疑問のもと、系外惑星の探索、発見と共に「地球」の描像が大きく変わりつつある。地球での知見がリファレンスであると同時に、より一層、惑星「地球」の深い理解が求められている。

地球は、便宜的に固体地球圏、気圏、水圏、生物圏等に分けられるが、地球の根源的理解のためには、明らかにこれらを1つのシステムとして捉える必要がある。その中でも、質量の99.98%を占める固体地球は重要な部分であり、火成・脱ガス作用、大陸形成、プレート物質循環等を通して、表層環境や生物進化に深く関わる。固体地球の徹底的な理解は、人間社会にとっても重要である。巨大な地震・津波・噴火を含む変動現象の評価・予測と防災、資源の探求及び開発、環境の保全と改善等への貢献を通して、人間や社会活動と深く関わる。

惑星「地球」とそこでの現象の理解には、形成から現在に至るまで、及び表層から深部までの構造、進化の全容解明が必要である。それらに基づき、宇宙の中での「地球」の個性と普遍性が明らかになり、未来予測や人間社会への貢献も可能となる。すなわち、「地球の構造、変動、歴史を解明」をさらに推し進め、「惑星『地球』のシステム全容を理解し予測する」ことが、「宇宙に拓いた地球像を創出する」ことに繋がるのである。

(ア) 項目・キーワードの関連性

a 地球の構造、変動、歴史を解明

表層－中心核の実験的再現・数値計算

- ・地殻－マントル－核とメルトの相平衡・転移（高輝度 X 線・中性子ビームライン）
- ・プレート・マントル対流、MHD ダイナモ

陸域稠密観測－海域掘削と構造・資源・ダイナミクス

- ・地震－測地観測網（Hi-net、DONET/2）、重力、素粒子（ニュートリノ、ミューオン）
- ・巨大変動（地震・津波・噴火）評価・予測と社会還元（災害科学・防災施政との連携）
- ・大規模高精度波形・データ解析、トモグラフィー（地震波動理論の高度化）
- ・海陸地質－元素資源マッピング（深海掘削、超深度掘削、海陸新資源）

地球史解読

- ・リターンサンプルによる形成初期進化（サンプルリターン）
- ・地球史・生命環境史の特異点研究

b 惑星『地球』のシステム全容を理解し予測する

全地球の組成・物性・ダイナミクス

- ・次世代高輝度ビームライン物性実験（レーザー圧縮物性測定、氷惑星）
- ・全地球・マイクロマクロ変動結合計算（第一原理計算シミュレーター）
- ・素粒子による熱源分布トモグラフィー（ニュートリノトモグラフィー）

海陸常時稠密観測と高精度予測（新環境制御、廃棄物処理）

- ・日本一周ケーブル、太平洋地球物理観測網（地殻変動高精度予測）
- ・地震・津波・火山噴火活動評価手法高度化（強振動予測定量化）

地球史－生命発生・進化

- ・地球形成過程：マグマ海、GI (Giant Impact)、月（スーパーアース、ガス惑星）
- ・地球史化学・生物層序と内外営力（同位体精密分析顕微鏡、冥王代、初期地球）

c 宇宙に拓いた地球像を創出する

岩石・ガス惑星物性、資源（惑星地質・構造探査、太陽系新資源）

- ・超高温高压下での惑星内部構造と新物性
- ・惑星：地質、新資源、ハビタビリティ、利用検討

最先端稠密全球ネットワークによるリアルタイム観測（長期地球変動予測）

- ・固体地球・表層・月・太陽相互作用の稠密観測
- ・地震・火山噴火・変動高精度予測、防災手法確立

シームレスな地球形成・進化史：データとシミュレーション（固体地球－表層・生命圏－宇宙圏統合進化モデル）

- ・集積過程：冥王代から現在まで、
表層環境から地球中心まで、
全地球システム史と未来予測

段階的に、地球科学、惑星・天文学、生命科学を融合し、地球の個性と普遍性の理解、銀河史の中の地球史の理解を目指す。

(イ) 基盤手法

これらの進展は、主に固体地球科学の夢ロードマップの副題及びロードマップ下部に掲げられている以下の手法によって支えられる：(1) 表層から中心核まで、及び地球史に及ぶ稠密観測：物質科学的観測（地質・岩石・鉱物学、古生物学、地球化学的手法による全地球・地球史野外調査、組織構造解析、試料サンプリング）及び地球物理学的観測（地震－測地観測網、重力、素粒子による海陸連結稠密常時変動観測）、(2) 室内実験及び数値実験による極限実験：地球惑星物質の物性に関わる超高温高压発生実験、スーパーコンピューターによる第一原理計算、地球内部及び全地球システムの大規模連結シミュレーターによるダイナミクスの解明、ビッグデータ解析によるシステム解読、(3) 生体物質を含む地球惑星物質の高感度分析：高解像度構造解析、ナノスケール全元素・同位体分析。

a 全元素－同位体分析、分子構造解析：物質分化・生命進化の解明

4次元グローバルサンプリングによって得られる宇宙・地球の無機・有機・生体物質試料について、全元素・全同位体存在度及び分子構造を解析し、冥王代の実態解明に加え、地表付近の諸過程（生命誕生・進化、酸素大気の出現、炭素や栄養塩の循環、大陸及びプレートの形成・進化、火成作用の変遷、気温・組成の急変事件と生物進化、宇宙線強度変化）、地球内部プロセス（マントル対流とプレート物質の循環・分化、内核の成長とダイナモ作用）及び内部と表層の相互作用（水・炭素循環等）を解読する。極微量／ナノスケールの局所分析を駆使し、隕石、初期地球物質（例えば結晶中包有物）、初期生命の痕跡を徹底探索・解析する。

b 大規模稠密観測による地球内部構造と変動機構の解明

全地球を覆う地球物理学的観測（GPS、VLBI、応力計、超伝導重力計、地震・電磁気、素粒子（ニュートリノ、ミュオン）による観測）を展開し、地殻・マントル・核の構造と変動を捉える。特に、海域にも陸域と同程度の稠密高精度観測網を設置することにより、従来は見えなかった領域及び高解像度で地球内部を透視し、プレート物質の大循環、コア・マントル境界の実態、核内部の構造と変動に加え、ほぼリアルタイムでプレート内及び境界の構造とダイナミクス（地震、火山現象を含む）を捉える。これらが、活動的惑星「地球」の個性と普遍性の理解、及び巨大変動現象（巨大な地震・津波・噴火を含む）に対する近未来の高精度評価・予測の基礎となる。

c 4次元グローバルサンプリングによる地球史及び内部構造の解明

初期地球物質（隕石、生体物質を含む）の徹底探索による集積からマグマオーシャン、コア形成、ジャイアントインパクト、大気・海洋・大陸地殻・プレート及び生命の出現に至る構造とプロセスを解明し、隠された時代「冥王代」の実態に迫る。全時代・全地域・超深度に及ぶ稠密サンプリングにより、地球の物質科学的構造と進化を地球史に及ぶ時空間（4次元）で捉え、内部一表層を包括する地球システムを実証的に解明する。

d 形成から現在、地表から中心に至る条件での物性・反応実験

地球の形成と進化に関わる幅広い温度・圧力・組成条件に対応し、物性、相平衡・化学反応の実験を、全元素・全同位体分析・分子構造解析技術、高輝度X線・中性子線ビームラインと大容量試料（mm~cm）の物性再現・測定装置等と組み合わせ、物質の状態や構成則を制約する。集積やジャイアントインパクトに関連する岩石・鉱物の衝突や蒸発・凝縮、マグマオーシャンに関連する溶融、大陸やプレートの形成に関わる物質分化と物性、コアの形成・進化・構造に関わるメタル・ケイ酸塩反応、生命現象に関わる鉱物表面での反応、高分子や有機物合成等様々な物性や反応を制約する。

e スーパーコンピューティング：連結モデル、データ解析、未来予測

惑星形成過程から初期地球の大規模分化に至るシームレスなシミュレーション、炭素・二酸化炭素等物質循環の地球内部一表層の連結シミュレーション、ゲノム・メタゲノム、タンパク質解析等による生物多様性・進化の解析、コア・マントル・地殻を統合したダイナモ・プレート運動・大陸移動を含む統合シミュレーション、地震サイクル・地殻変動を含む局所高精度計算により、地球システムの振る舞いを定量的に理解、予測する。大規模なグリッド、大きな物性コントラスト（例えばプレートとその境界）、膨大なデータ等を含むシミュレーション・解析のために、大容量メモリ（~10¹⁰ ギガバイト）を用いた超高速

演算を行う。

オ 地球生命科学の夢ロードマップ

地球生命科学の向こう 30 年間の目標は、地球システムの中における生命の役割を明らかにすることである。これは、我々現代人類の地球史的背景を理解することに繋がる。2040 年までを以下のように大きく 3 つのステップに分ける。これらは、10 年ごとにどのレベルまで解明されることが期待されるのかを示すものである。

- (A) 地球における生命圏の仕組みを明らかにする
- (B) 地球生命圏の広がり・限界を探索する
- (C) 地球とは何か、生命とは何か、現代人類とは何かを理解する

(A) の達成のためには、40 億年にわたる地球生命史の解読、地球史上の様々な環境変動イベントの要因の解明、極限環境（地球外も含む）の生命に関する理解等、基礎的な情報を整備する段階である。(B) では、(A) で整備された情報をデータベースにする等により体系化した上で、さらに新たな情報を得るためのテクノロジーを開発する一方で、生物資源の利用等の応用的な方向にも足を踏み出す段階である。

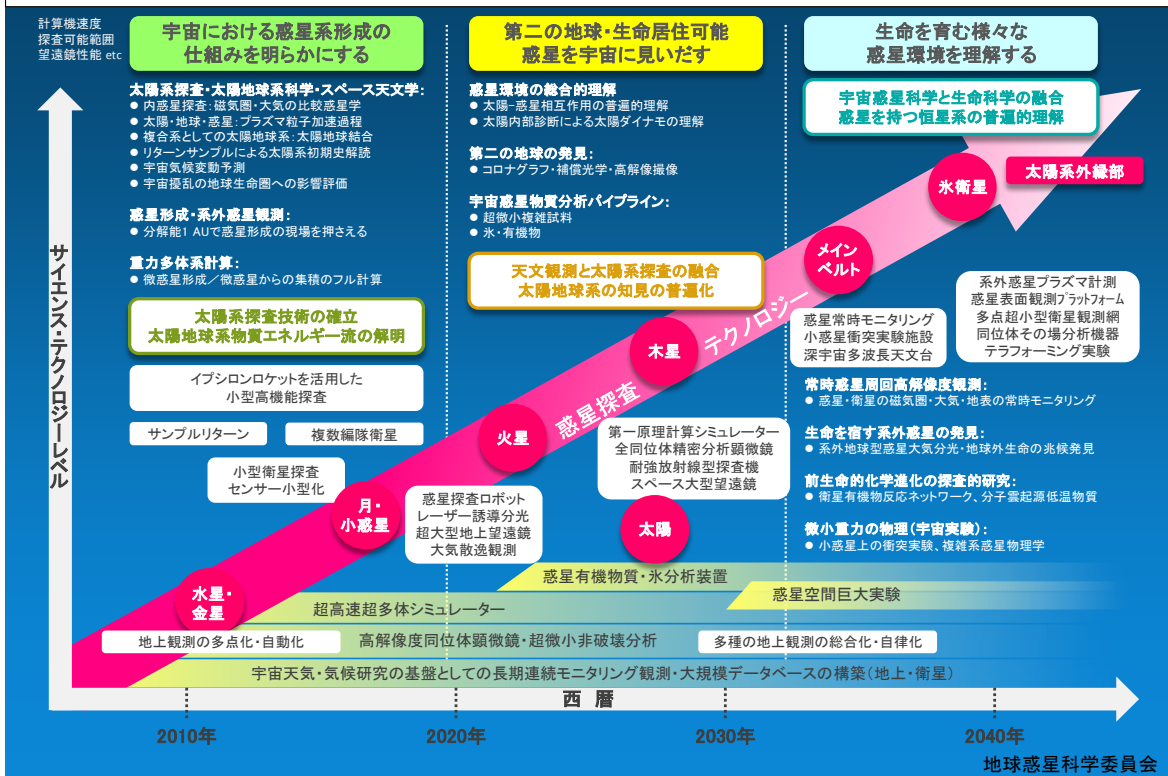
(C) では、地球生命を機構レベルで本質的に理解する段階に到達する一方で、地球外生命の存在に関してはより実証的な研究に進む。また、それら研究成果が社会に還元され、地球生命に対する人々の理解が大きく進む。

なお、これらのステップを達成するためには、サンプル探査や分析・実験等の技術的レベルの向上に加え、研究試料の収集・管理のようなアーカイブの継続的整備も必要である。

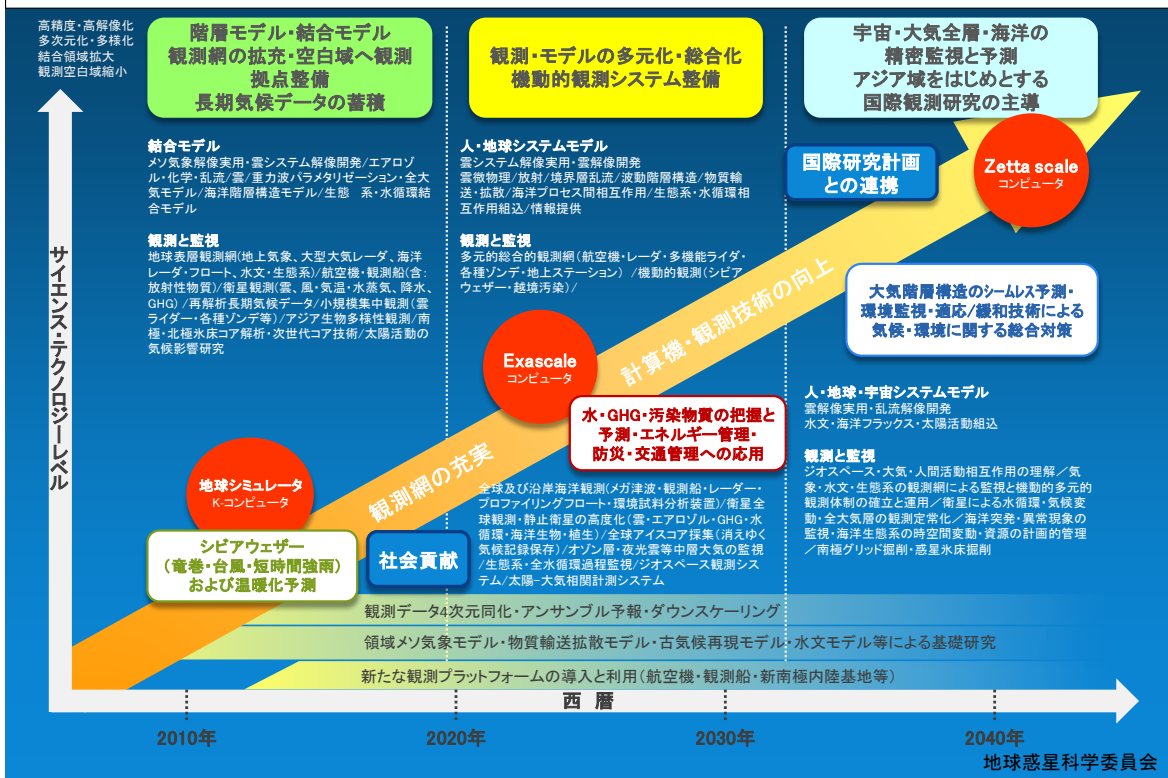
4 地球惑星科学分野の夢ロードマップ 概要



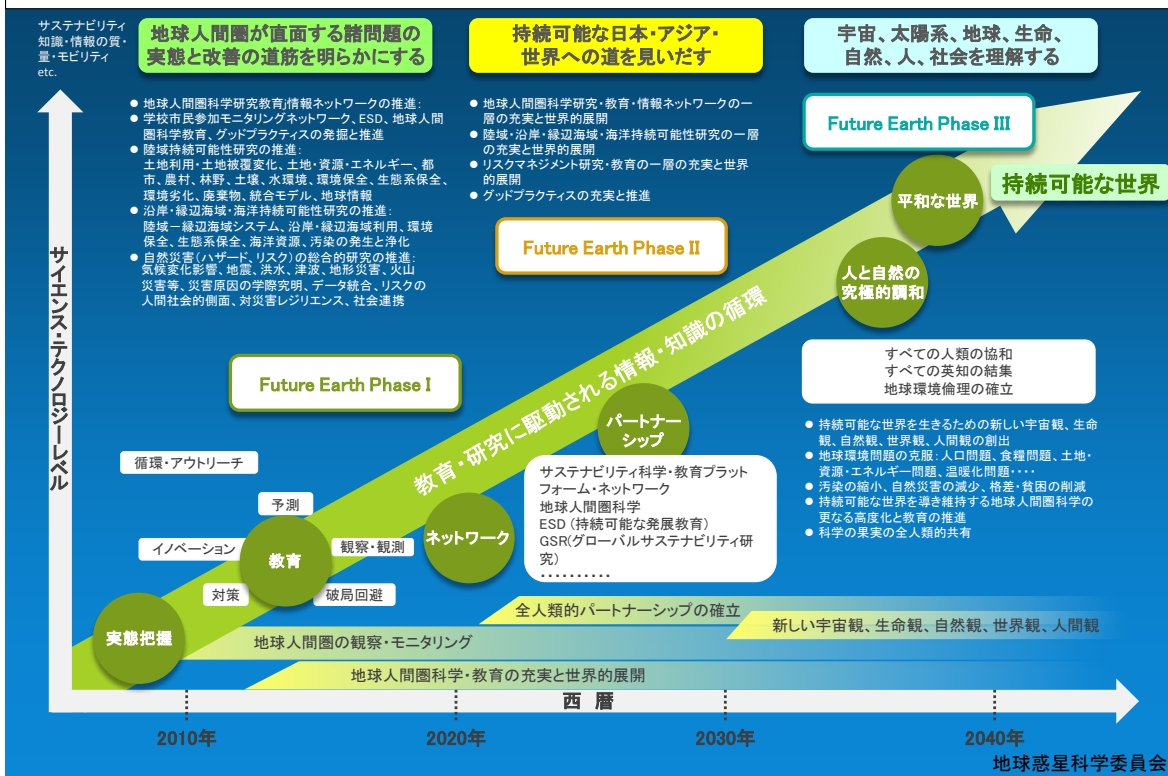
4-1 宇宙惑星科学の夢ロードマップ ～究極の探査・観測・分析が切り拓く宇宙惑星科学～



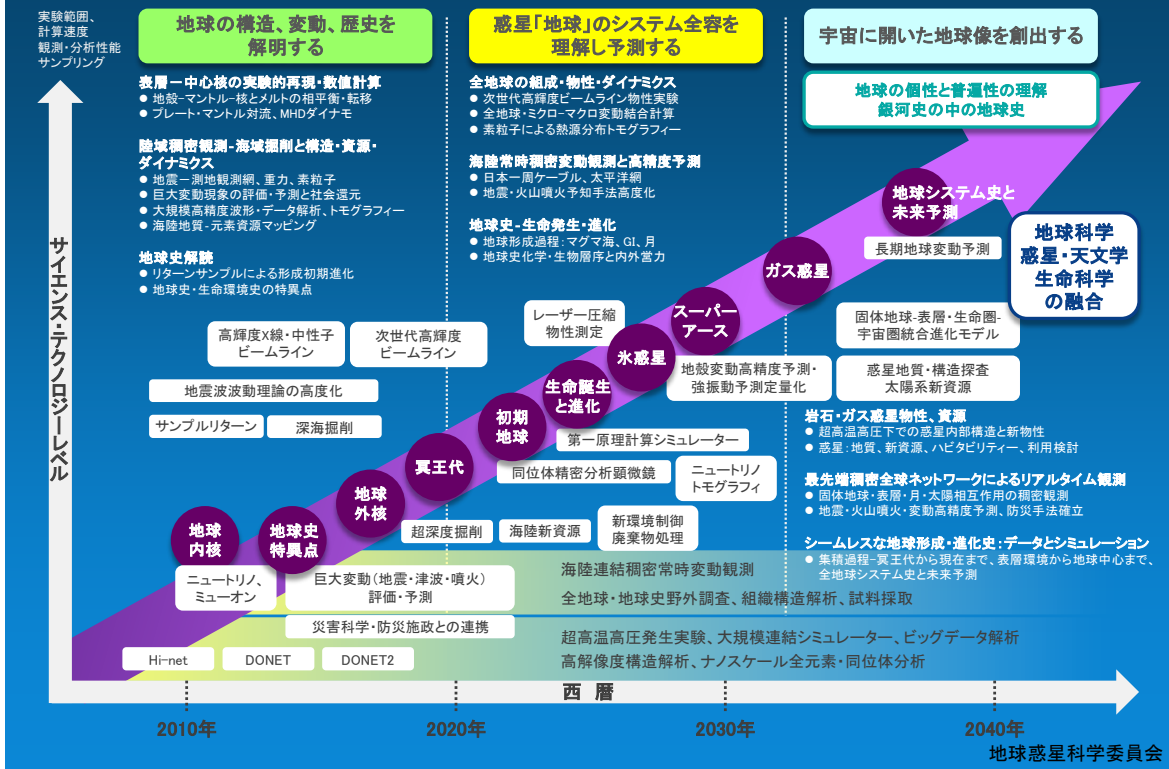
4-2 大気水圏科学の夢ロードマップ ～基礎過程の理解と気候予測および気候監視～



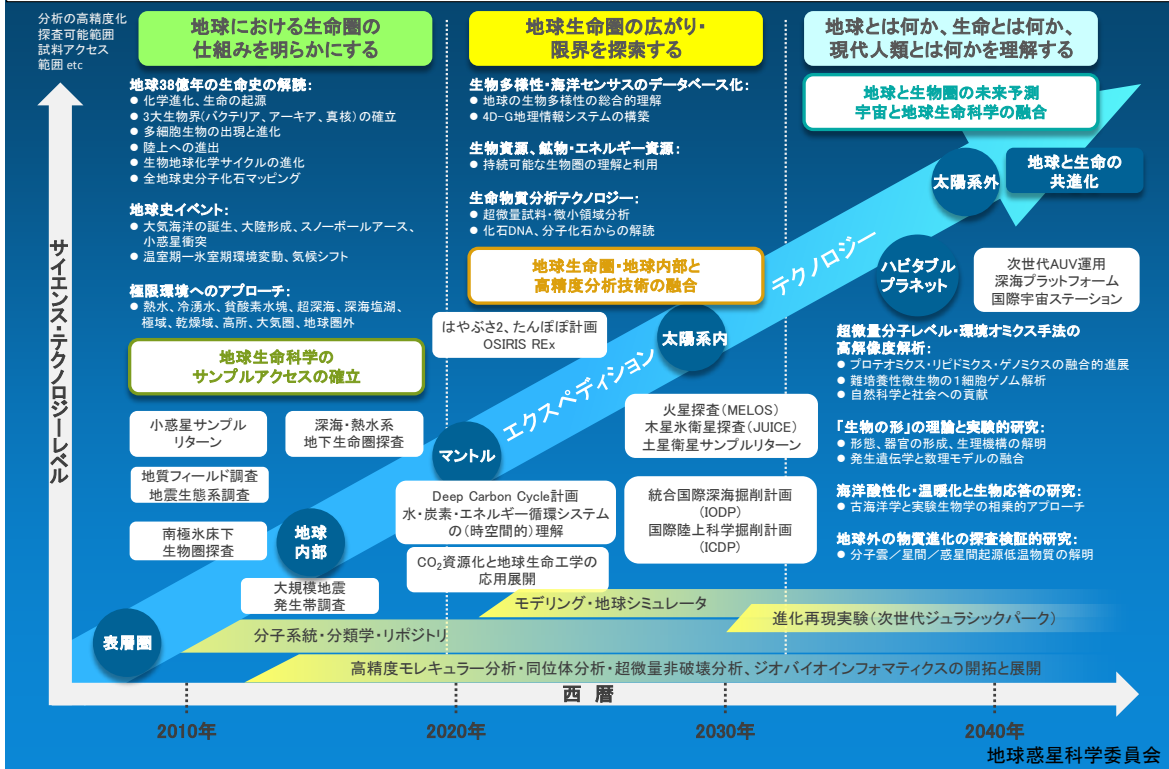
4-3 地球人間圏科学の夢ロードマップ ～持続可能な日本、アジア、世界の実現への道～



4-4 固体地球科学の夢ロードマップ ～稠密観測・極限実験・高感度分析が拓く固体地球科学～



4-5 地球生命科学の夢ロードマップ ～次世代の探査・観測・分析が描く地球の生命像～



(5) 情報学分野

① 情報学分野のビジョン

従来、情報学分野、特にその根幹をなす情報処理技術のロードマップは要素技術のみにより語られることが多かった。しかし、スマートフォンやインターネットの日常的な使用に垣間見られるように、情報処理技術が人間生活の隅々にまで浸透し、情報処理技術を基盤とした生活様式が構成されることで、あたかも文字の発明が新しい文化体系を形成したかのごとく、情報処理技術によって新しい文化が花開き、人間生活の方向や価値に多大な影響を与えるようになると思われる。すなわち情報処理技術は、単に理工学の一分野として技術の発展のみで語ることはできず、生活様式も取り込んだ形での展開様式で議論することが重要となってくる。そこで、この情報学分野のロードマップにおいては、要素技術だけでなく、情報学分野の基盤となる諸技術と人間生活との関わり合いを示唆するようなロードマップを考えることにした。この際、人間社会において実現を望む「夢」の社会に関する4つの柱を立て、それぞれの柱についての諸技術の関わり合いを論じることとした。ここで、4つの「夢」の社会とは、以下に記す「人智高資産化社会」、「活力高生産社会」、「安心安全快適社会」、「持続可能社会」である。

ア 人智高資産化社会

人智高資産化社会では、高精度・高速な電子化技術、光学計測技術、大量データの蓄積・検索・送受信技術、超臨場感表現技術の発達により、多様な文化資源や日常体験のデジタルアーカイブ化が行われ、人智の再構成が進み、効率的に臨場感ある体験が可能となる。その結果、五感で感じる世界遺産・遺跡の電子化（eHeritage）や過去の成功失敗の体験、歴史的イベント等が臨場感を持って学習できるようになる。

また、構築されたアーカイブを基本データベースとする新しい学問体系「サイバーヒューマニティ」が展開されるようになる。さらに、大規模公開オンライン講座（MOOC）等のEラーニングが世界的に普及し、学習に対する国や地域の差が縮小していく。

一方、現実環境をコンピューター上に拡張する拡張現実感（Augmented Reality: AR）や複合現実（Mixed Reality: MR）等の技術は、その規模と感覚器官をさらに拡張し、メディアアーカイブ技術と連携して新たな現実・非現実感体験を生むようになる。さらには、3次元（3D）プリンタや機能に関する高次表現方法の普及により、個々人の嗜好に合致するものを要望する量だけ生産するテーラーメイドプロダクションの実現が進展していく。

イ 活力高生産社会

活力高生産社会では、エンターテインメントコンピューティング技術、ウェアラブルセンシング技術の発展により、嗜好に合うもの、或いは望ましく思うものの定量

化への途が拓け、これと知的ロボット技術の発展とが相まって、人間の活動の肩代わりが進み、個々人が行いたいことが遠隔操作によって効率的に実現できるようになる。

歩行やグローバル・ポジショニング・システム（GPS）による位置情報等の日々の活動がライフログとして記録され、またセンシング技術の発達に伴い、活動だけでなく視覚、聴覚、嗅覚等といった五感のセンシングも行われるようになる。やがては、脳との直接的な入出力による効率的な意図の伝達が可能となる。

また、研究対象であったヒューマノイドは技術開発が継続的に発展し、自律的な適応が可能なレベルまで到達する。さらに、例えば、故人のアーカイブされた情報をもとに、電子的に人格等の身代わりを可能とするようなロボットまで登場する。

ウ 安心安全快適社会

安心安全快適社会では、治療記録を始めとしたカルテの電子化が進み、それぞれの地域や病院で管理されていたデータがやがて相互運用できるようになる。アクセス制御と本人認証技術の発達に伴い、最終的には医療記録の自己管理（Personal Health Record: PHR）が実現する。

高齢化社会に対しては、インターネットに接続された家電製品を応用した見守りサービスから始まり、介護やリハビリを支援するロボット等が実現されていく。最終的には、自律して能動的な介護を行うエージェントにまで発達する。

また、センシング技術や高度情報化交通システムの導入により、運転の支援や渋滞の予測等が実現していく。さらに、車両の種類等が限定される可能性はあるものの、無人の自動運転技術が登場する。

物理的な安全社会だけではなく、サイバー社会についても多くの技術革新が見られる。深刻度が増している不正アクセスに対する早期検出技術が浸透してだけでなく、不正者の追跡が可能になる能動的なセキュリティ基盤が整備されていき、迷惑メールやマルウェアが撲滅された安全なサイバー社会が実現する。

また、共通番号制度と認証技術の発達により、大規模で安全な個人認証が可能になる一方、個人情報やサイバー社会での行動が匿名化されたり、或いは秘匿解析技術（プライバシー保護データマイニング）が適用されたりすることで、プライバシーが保護されたままでもビッグデータ技術を活用した情報推薦や個別化（パーソナライズ）されたサービスが享受できるようになる。

エ 持続可能社会

持続可能社会では、電子政府・電子行政サービスが国民一人一人に行き渡り、必要なサービスがいつでも受けられ、災害時においても麻痺することがない頑強性の高いインフラが提供されるようになる。現在のマイポータルサイト（ワンストップ行政サービス）では、サービス利用のために利用者の申請手続きが必要であるが、やがて申請不要で教育や医療等の必要な社会サービスが利用可能になっていく。さ

らには、エージェント技術の普及に伴い、個々人対応の行政エージェントが実現する。

また、地震や台風等の災害に対しても、必要な災害情報を正確かつ迅速に通知するサービスが普及する。さらに、サービスが停止することなく、しかも災害耐性が高い（レジリエントな）情報基盤やエネルギー管理基盤が提供される。

② 情報学分野の夢ロードマップの考え方

ア 基盤的な研究開発の進展に関する夢ロードマップ

ドッグイヤーと称される情報学分野の発達は極めて早く、さらにはサービスの自由度と多様性が高く、将来の予想はなかなか困難である。そこで、情報処理学会の「コンピュータサイエンス(CS)領域」に属する全研究会の主査が中心となって、情報学分野の基盤的な研究開発内容に関して、次の4つの軸の上で2030年までに実現していくと予想される重要項目を列挙した。その結果をもとに、2010年から2030年までの10年ごとの基盤的な研究開発の進展に関するロードマップを作成した。

- ・アーキテクチャ
- ・オペレーティングシステム／プログラミング
- ・データベース
- ・アルゴリズム

なお、それぞれの軸上に記載されている重要項目は、最先端、或いは今後を予見した研究トピックとの関わりが深い。したがって、現状では広く一般に認知されていない項目名が多分に含まれていることに留意されたい。

イ 人智高資源化社会の夢ロードマップ

人智高資源化社会に関するロードマップは、情報処理学会のコンピュータビジョンとイメージメディア研究会、コンピューターと教育研究会等が所属する「メディア知能情報(MI)領域」が中心となって作成した。情報学分野の学術体系の継続性を重要視する観点から、日本学術会議第三部 報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」[1]の46頁に掲載されている前回の情報学分野の夢ロードマップにおける次の4つの項目をベースにして、人智高資源化社会の今後の発展を検討した。

- ・フィジカルアーカイブ
- ・メディアアーカイブ
- ・サイバースクール
- ・超臨場感メディア

これらの項目に関する技術は相関が高く、互いに関連して発展することが予想されている。例えば、ブレン・マシン・インタフェース(BMI)を用いた学習技術が実現すると、それを応用した全感覚没入体験が可能な超臨場感メディアに応用されると考えられる。そのような関連する技術を矢印で結んでいる。この矢印の意味は、

他の社会に関するロードマップでも同様であり、両方向の矢印は相互に関連することを意味する。

ウ 活力高生産社会の夢ロードマップ

活力高生産社会に関するロードマップは、人智高資源化社会に関するロードマップと同じく、情報処理学会のエンターテイメントコンピューティング研究会やゲーム情報学研究会を有する「メディア知能情報(MI)領域」が中心となって策定した。人智高資源化社会の場合と同様に、前回の情報学分野の夢ロードマップで挙げられている次の4つのキーワードを選び、それらに関わる技術の発達を予測している。

- ・金融システム
- ・エンターテイメントコンピューティング
- ・ウェアラブルセンシング
- ・知的ロボット

金融システムの電子化については、銀行口座情報を始めとして既に実現しているものもあるが、今後はゲーム内通貨を始めとしたサイバー社会における財産との融合も進むことが予想される。さらに、五感のセンシングや身代わりロボットの進展により、より人間を主体とする技術の確立が予想される。

エ 安心安全快適社会の夢ロードマップ

安心安全快適社会に関するロードマップは、情報処理学会のコンピュータセキュリティ研究会、インターネットと運用技術研究会等が所属する「情報環境(IE)領域」が中心となって技術予測を行い、策定した。前出の2つの社会の場合と同様に、前回の情報学分野の夢ロードマップで挙げられているからキーワードから次の5つを選び、その技術動向を予測している。

- ・パーソナルヘルスケア
- ・高齢化対策
- ・高度情報化システム
- ・サイバーセキュリティ
- ・プライバシー

医療データの電子化や電子カルテの一部は、現在までに既に一部実現している。今後は、それらが標準化プロトコルを介して互いに結合した大規模医療データベースの構築へと結び付いていくことが予想される。ただし、個人の健康に関する個人情報が悪用されたり、本人の意図しない目的で利用されたりしてはならない。そこで、各種の暗号技術、認証基盤、及び匿名化技術の発展と合わせて、これらを安全かつ快適に活用していくことが求められている。

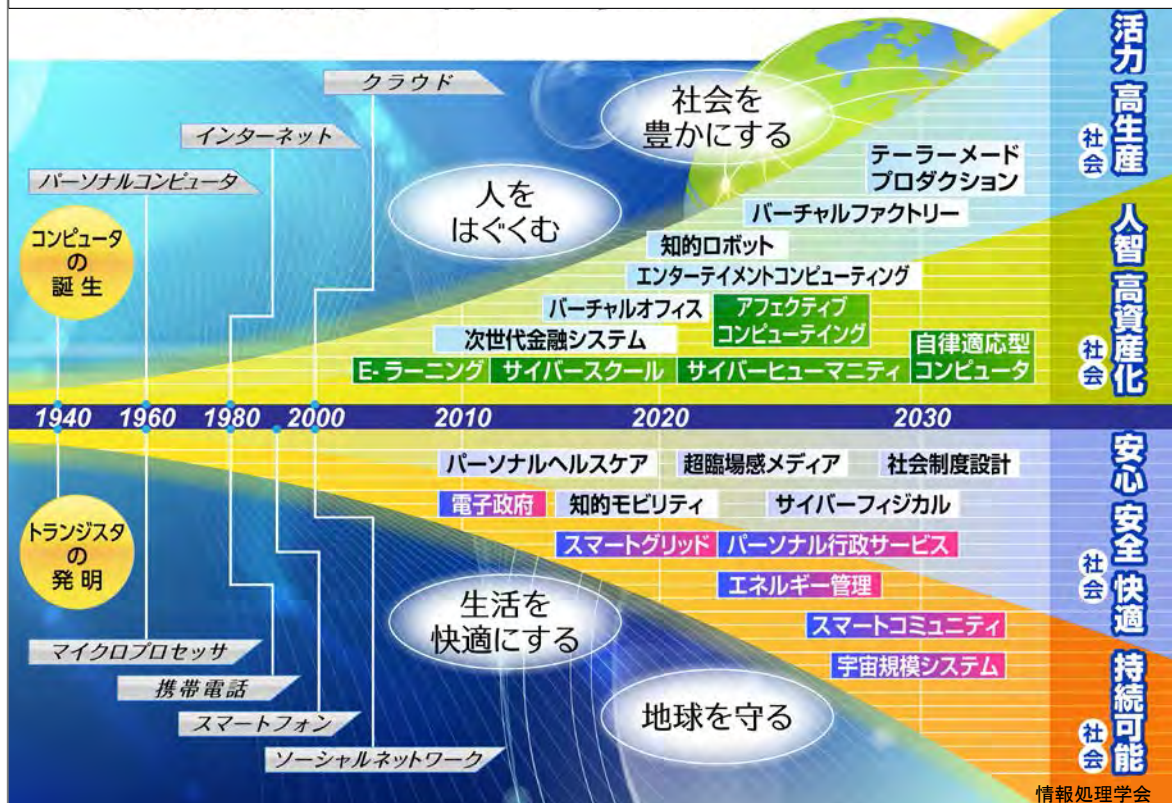
オ 持続可能社会の夢ロードマップ

持続可能社会に関するロードマップは、安心安全快適社会のロードマップと同じく、情報処理学会の情報システムと社会環境研究会やモバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会が所属する「情報環境(IE)領域」での議論に基づいて策定した。他の社会の場合と同様、前回の情報学分野の夢ロードマップから次の4つのキーワードを選び、それらに関するより詳細な検討を行った。

- ・ パーソナル行政サービス
- ・ 電子政府
- ・ レジリエント社会
- ・ サイバーフィジカル

電子政府は、現時点でも一部のサービスが実現しているが、その利用は限定的であり、投票や年金記録等の行政サービスは未だ実現されていない。それらは、共通の認証基盤の普及と共に、緩やかに実現していくものと予想されている。ただし、強制的な電子政府の利用を進めた場合、デジタルデバイドを生じてしまうことが懸念される。プライバシー保護等の課題解決を図りつつ、信頼できる電子政府の基盤の実現が望まれる。また、地震や台風等の各種災害に対しても、麻痺することがない頑強性の高い(レジリエントな)情報基盤やエネルギー管理基盤も合わせて実現されていくことを予想している。

5 情報学分野の夢ロードマップ ～全体図～

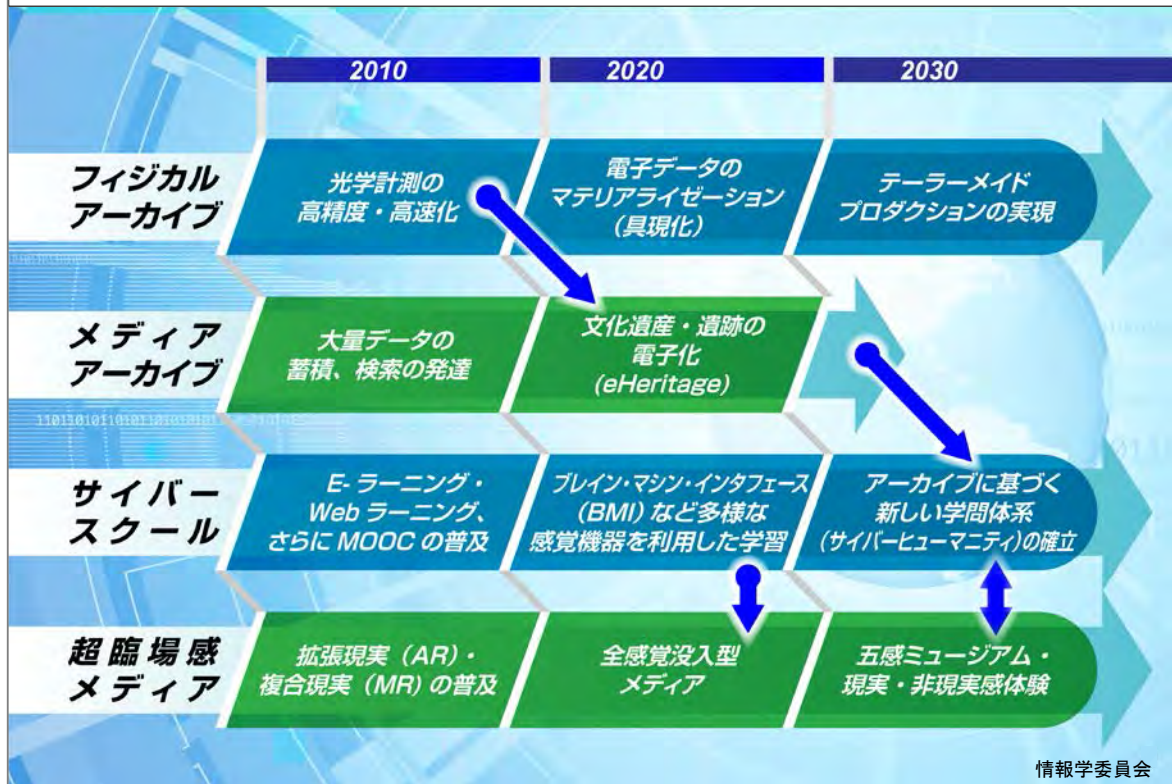


5-1 基盤的な研究開発の進展に関する夢ロードマップ

2010	2020	2030
アーキテクチャ		
<ul style="list-style-type: none"> 階層的並列性 積層ハードウェア (3D メモリー) メニーコア高性能プロセッサ 省通信 / 耐遅延 / 省電力技術・アルゴリズム マルチスケールフィジックス 	<ul style="list-style-type: none"> 高ヘテロアーキテクチャ 非半導体記憶装置 二次記憶モデルの刷新 動的プログラマブルネットワークアーキテクチャ Everything as a Service アーキテクチャ 	<ul style="list-style-type: none"> 多階層ヘテロ型アーキテクチャ 非半導体プロセッサ 量子コンピュータ 有機物コンピュータ
オペレーティングシステム (OS) / プログラミング		
<ul style="list-style-type: none"> 大規模データ処理基盤技術 モデル駆動開発 コンテキスト指向プログラミング ディペンダブルソフトウェア工学 セキュリティ要求工学 	<ul style="list-style-type: none"> クラウドと Internet of Everything の統合化技術 オープンディペンダブル OS サイバーフィジカル OS 高ヘテロ大規模システム開発技術 ハイブリッド型量子プログラミング 	<ul style="list-style-type: none"> 高ヘテロ・超並列・超分散 OS モデル 量子計算ハイブリッド型 OS モデル 超並列・超分散プログラミングモデル 量子プログラミング
データベース		
<ul style="list-style-type: none"> ビッグデータ管理フレームワーク 多メディアビッグデータ解析 クラウドソーシングフレームワーク 情報検索高速化 ストリームマイニング 	<ul style="list-style-type: none"> 異種ビッグデータ管理フレームワーク連携 多メディアビッグデータのリアルタイム解析 異種情報源の横断的・リアルタイム検索 クラウドソーシング信頼性管理基盤 プライバシー保護データマイニング基盤技術 	<ul style="list-style-type: none"> テラーメイド型大規模マイニング ビッグデータ解析の近未来・災害予測応用
アルゴリズム		
<ul style="list-style-type: none"> ビッグデータ解析 マイニング技術、多様性解析 超並列処理アルゴリズム 高機能自律分散アルゴリズム 匿名化、秘匿計算 	<ul style="list-style-type: none"> 超高速知識情報処理 超高速情報伝達アルゴリズム アルゴリズム的ゲーム理論 	<ul style="list-style-type: none"> 異分野融合マイニング セマンティクス融合処理 計算困難性限界の解明

情報学委員会

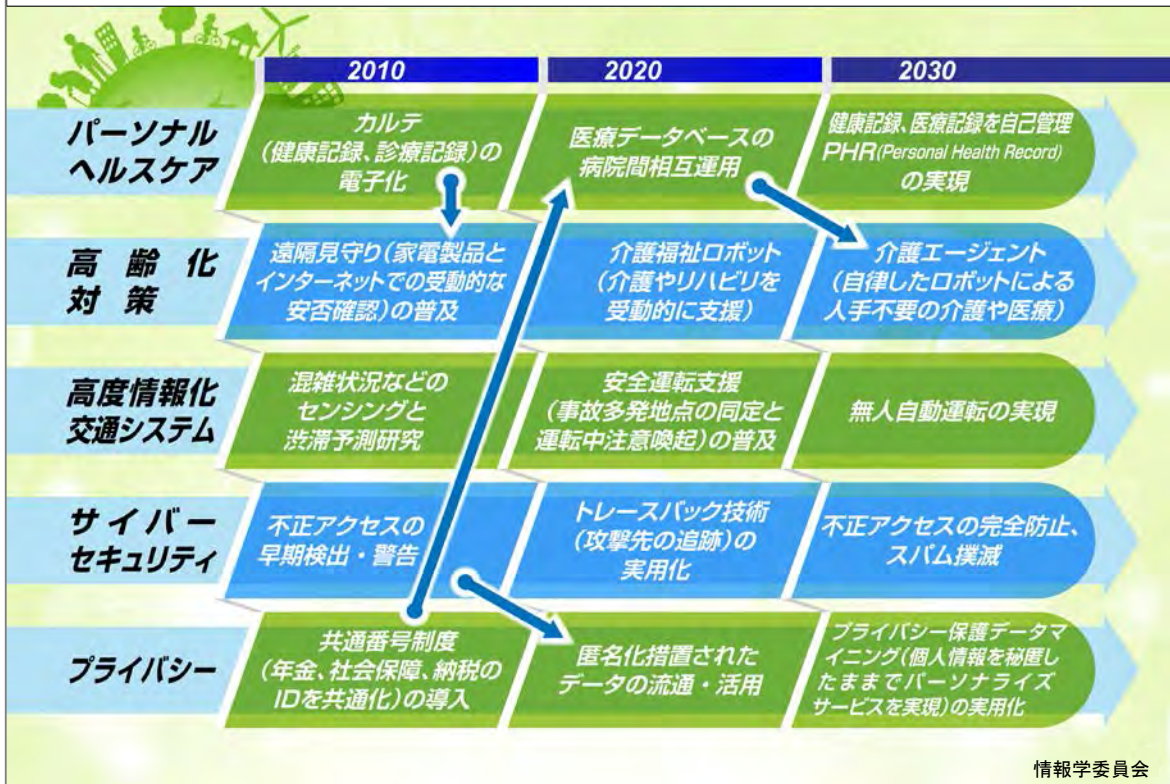
5-2 人智高資源化社会



5-3 活力高生産社会



5-4 安心安全快適社会



5-5 持続可能社会

