

ICTによる大変革期を前に思うこと

概要

ここ数年話題を振りまいている生成AIは突然現れたものではなく、螺旋状に発展してきたICTの必然的な成果である。本講演では過去から未来のICTの発展について概観し、マイルストーンを確認するとともに、今までとは異なる未来のあり方も含めた将来像、また、将来に向けて今から検討を始めるべき課題などについて述べる。

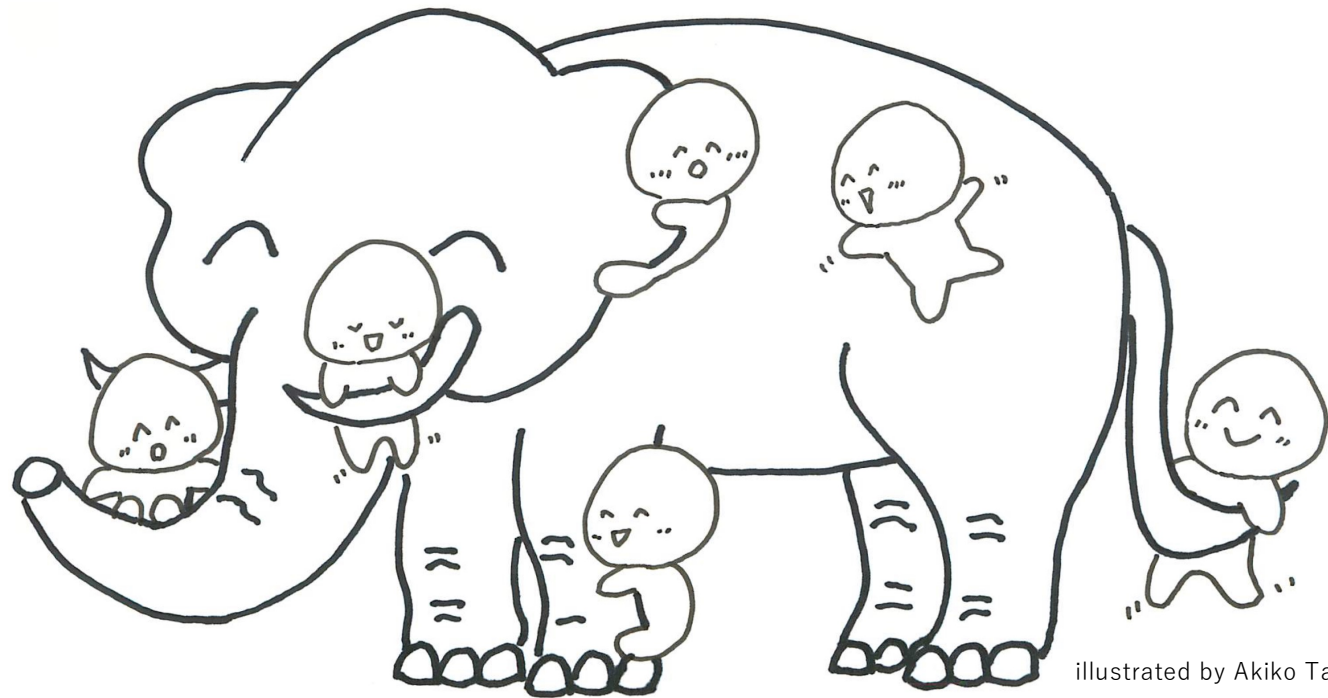
北陸先端科学技術大学院大学
副学長（アップスキリング担当）
CIO、情報環境・DX統括本部長
デジタル化支援センター長
アップスキリングセンター長

丹 康雄

2025.11.26

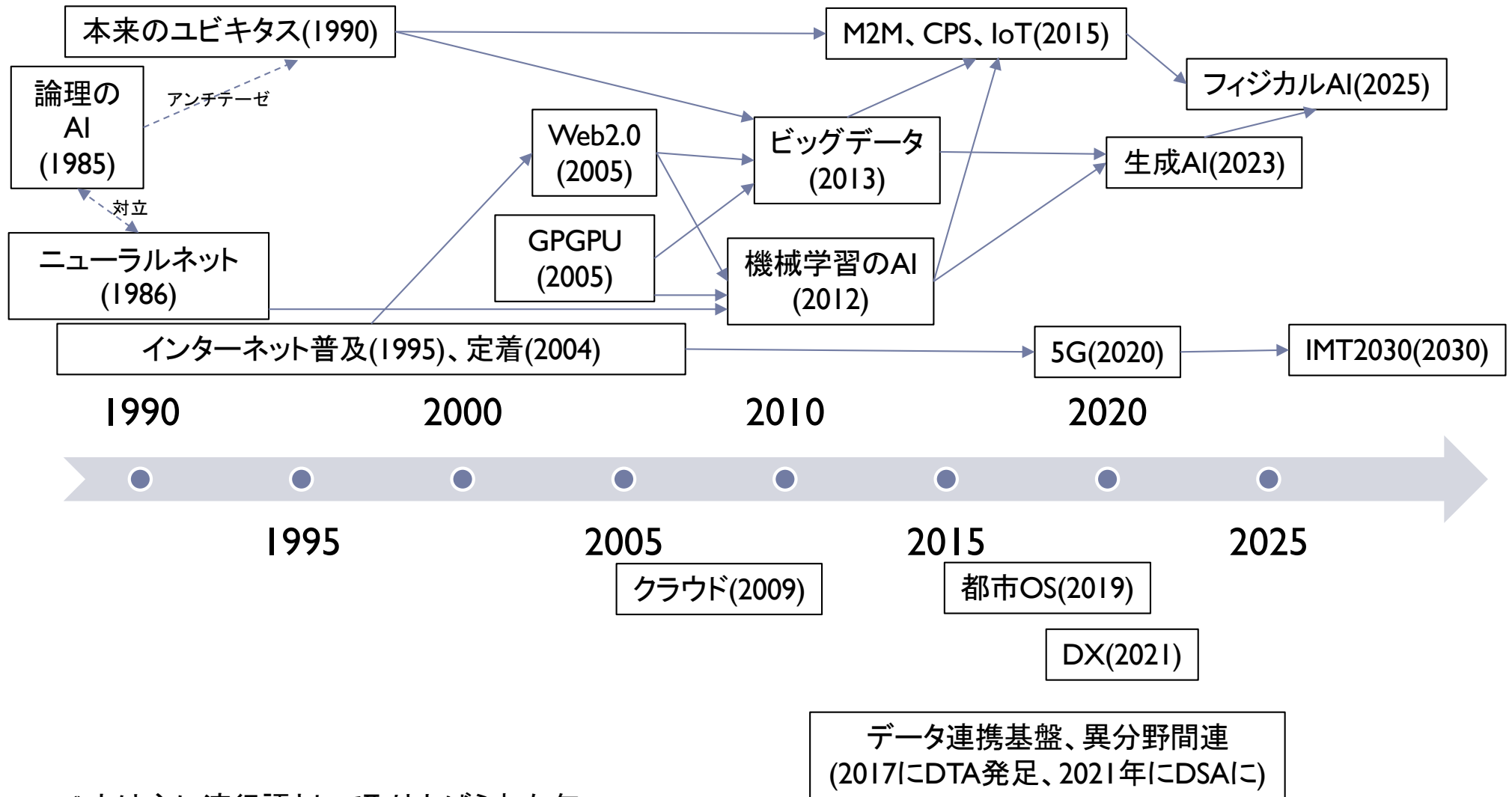
群盲評象

- ▶ ユビキタス、インターネット、GPGPU、Web2.0、クラウド、ビッグデータ、AI、M2M、CPS、IoT、5G、データ連携基盤、異分野間連携、都市OS、DX、生成AI、フィジカルAI、etc.



illustrated by Akiko Tan

キーワードの関係



()内は主に流行語として取り上げられた年

ICTの発展の経緯

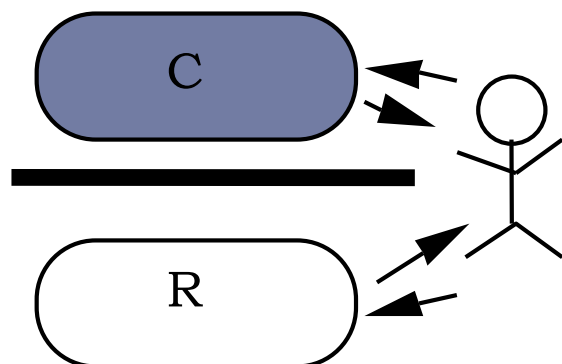
- ▶ 1980-1990年代の実世界指向コンピューティング
 - ▶ 組込みマイコンと機器間通信技術
 - ▶ 実世界とサイバー世界との接点の確立。センサ&アクチュエータ
- ▶ 2000年前後からの常時接続ネットワークの浸透
 - ▶ ブロードバンドインターネット
 - ▶ 時間と距離に依存しない定額料金の通信サービスの出現
- ▶ 2005年のWeb2.0以降のネット内の強力なインテリジェンス
 - ▶ 人の活動場所としてのサイバー空間。データの蓄積、集合知、ビッグデータ解析
 - ▶ 現在のAIにつながる機械学習の復権。その裏ではGPGPU
- ▶ 2014年頃から上記3つが組み合わされたIoTシステム
 - ▶ Industrie 4.0、Society 5.0といった国をあげての取り組みでは、単なる技術論ではない、働き方、人の一生のあり方、という話が出始める
- ▶ 2020年前後から異分野間連携を想定したシステムが現実
 - ▶ FIWARE(NGSI)による都市OS。 欧: GAIA-Xや日: DATA-EX
- ▶ 2025年ごろにはAIが次のステップに
 - ▶ 深層学習から生成AI(LLM)、そしてフィジカルAIへ

ICTの発展にみる転換点 -1

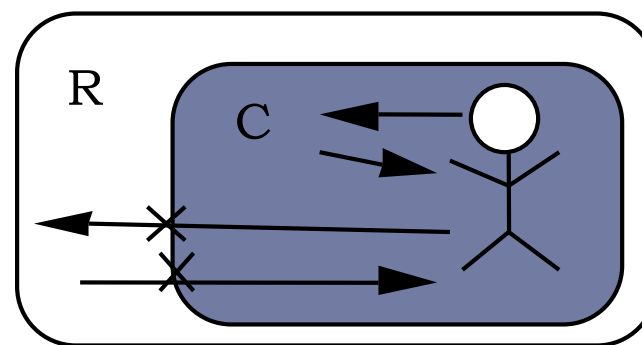
- ▶ 組み込みシステム → ユビキタスコンピューティング
 - ▶ コンピュータにセンサとアクチュエータがつながり実世界との関連ができるようになった
 - ▶ 更に、そうした組み込みシステムがネットワーク化し、サーバーなどつながり、ユビキタスコンピューティングとなった
- ▶ Web → Web2.0
 - ▶ Web技術により、ネットワークにつながれば誰でも情報発信でき、大企業も個人も同等になる可能性が取り沙汰された
 - ▶ 情報発信ではなく、人々が情報発信したり意見交換をする「場」を提供する企業が現れ、Web技術はHTTPサイトを構築するものではなく、こうしたサイバー空間内での活動のために用いられるものになった。これがWeb2.0。ここで生まれたのが巨大ITプラットフォーマーということで、大企業と個人の差は絶望的に広がる

ユビキタス 他のアプローチとの比較

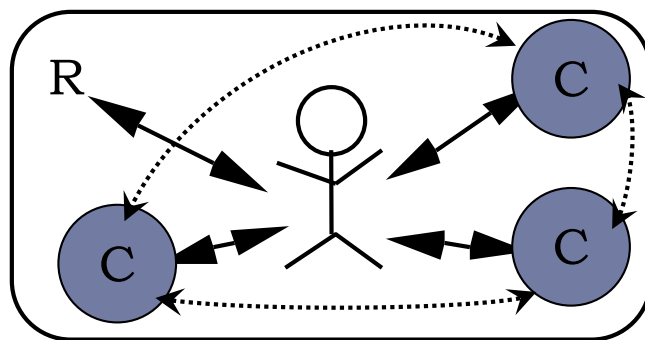
- ▶ 我々の住む実世界にネットワーク機能も含めた計算機内の仮想世界を持ち出す



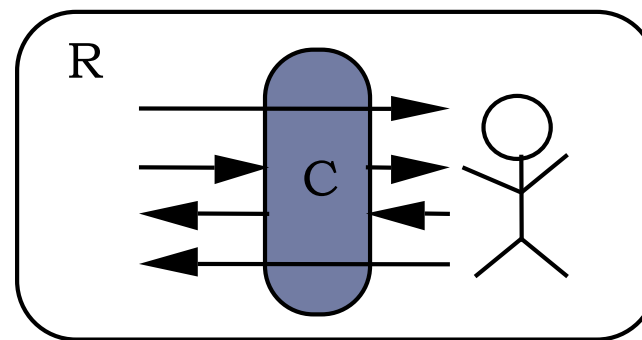
(a) GUI



(b) Virtual Reality



(c) Ubiquitous computing



(d) Augmented/Mixed Reality/Virtuality

Web2.0の変革ポイント

▶ 価値を持つもののシフト

▶ 最初はハード

- ▶ IBM PCが、いわばオープンソースハードとして登場することでコモディティ化が進み、一番価値のあるものではなくなる
- ▶ Windows, Officeのようなソフトに価値が移る

▶ 次はソフト

- ▶ Linuxに代表されるオープンソースの流れがソフトのコモディティ化をもたらす
- ▶ ソフトではなく、利用者がどのように使うか、何をするかのデータに価値が移る

▶ データこそが現在の価値の源泉

- ▶ 「集合知」 2006年くらいの流行語
- ▶ 何かの目的のために誰かがコストをかけて集めたデータではない
- ▶ 利用者がそれぞれの目的のために活動すると、自動的にたまっていくデータ
 - かな漢字変換への自分の名前の登録
- ▶ 現在では、テキストに代表される高次概念のデータからセンサデータに代表される生データへのシフト
- ▶ データの目的外利用こそがポイント

ICTの発展にみる転換点 -2

▶ Web2.0 → AI

- ▶ WebがWeb2.0で単に情報をやりとりするものではなくデータの蓄積の場となり、それと並行して、GPGPUの進展など、安価ながら強力な情報処理装置が利用可能となった。ニューラルネットワークの泣き所であった学習データの確保と計算量への対処、この2つが解消されてディープラーニングが2012年にブレイクした

▶ ユビキタスコンピューティング + AI → IoT

- ▶ 組み込みシステムが同じ組織の中のサーバーとつながるだけでなく、インターネット経由でクラウドにつながるようになった
- ▶ ディープラーニングを始めとするAIはテキストデータなどの抽象度の高いデータだけでなく、センサから取得したデータをも対象とすることができる。これにより可能となったスマートなユビキタスコンピューティングがIoTと呼ばれるようになった

人工知能でのもののやり方

- ▶ 論理的な推論

- ▶ 問題が論理で表現される場合には演繹的な推論ができる

- ▶ しらみつぶしの調べあげ

- ▶ 答えが取りうる範囲が決まっている問題では、それらを全部調べるという手が取れる

- ▶ 例題からの引用

- ▶ 人間が形を整えたデータを多数与えれば、それらとの照合を基本に答えを出していくことができる

- ▶ データからの学習

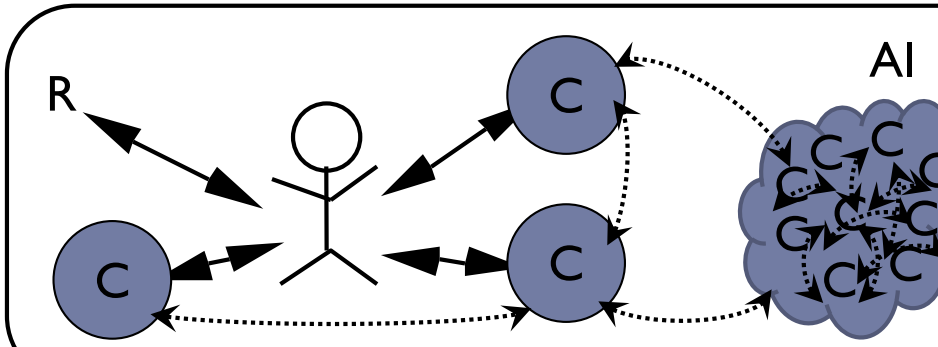
- ▶ データそのものを与えて、機械が正しい答えを出せるように学習していく

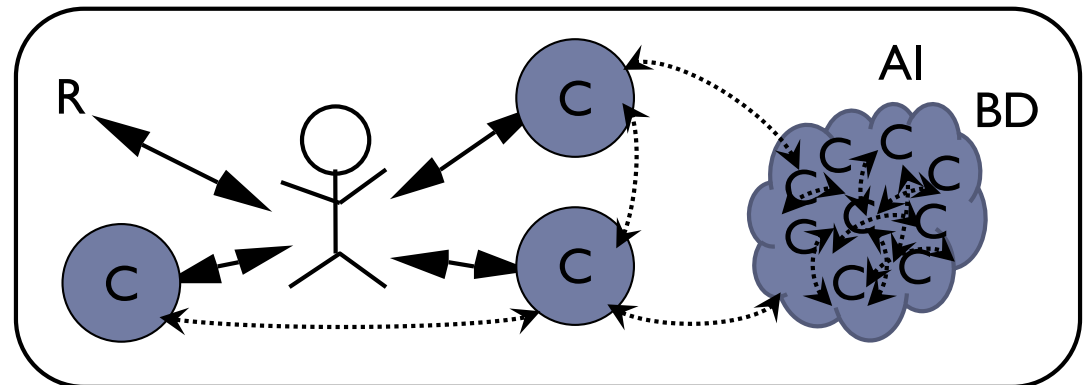
演繹と帰納の両方がある

最近使われるようになった ディープラーニング の意味

- ▶ 計算機が「学習」と言っても、かつては、
 - ▶ 人間が、問題の解き方は与えてやる
 - ▶ どこに注目しなさい、この入力については正解はこうです
 - ▶ 計算機はたくさんの入力と正解の組みを学習し、その後は学習しなかった入力にも妥当な答えを出せるようになる
- ▶ ディープラーニングという技術では、
 - ▶ 問題の解き方をも計算機が学習する
 - ▶ つまり、人間ならどこに注目するとか、これの答えはどうだとか教えない
 - ▶ 計算機はたくさんの入力について、自分で特徴を見分けて分類をするしくみを構築する
 - ▶ 人間から見て計算機のしている分類が、人間はどう呼んでいるものかについて教えてやる
- ▶ 50年来のブレークスルーであると考えられている

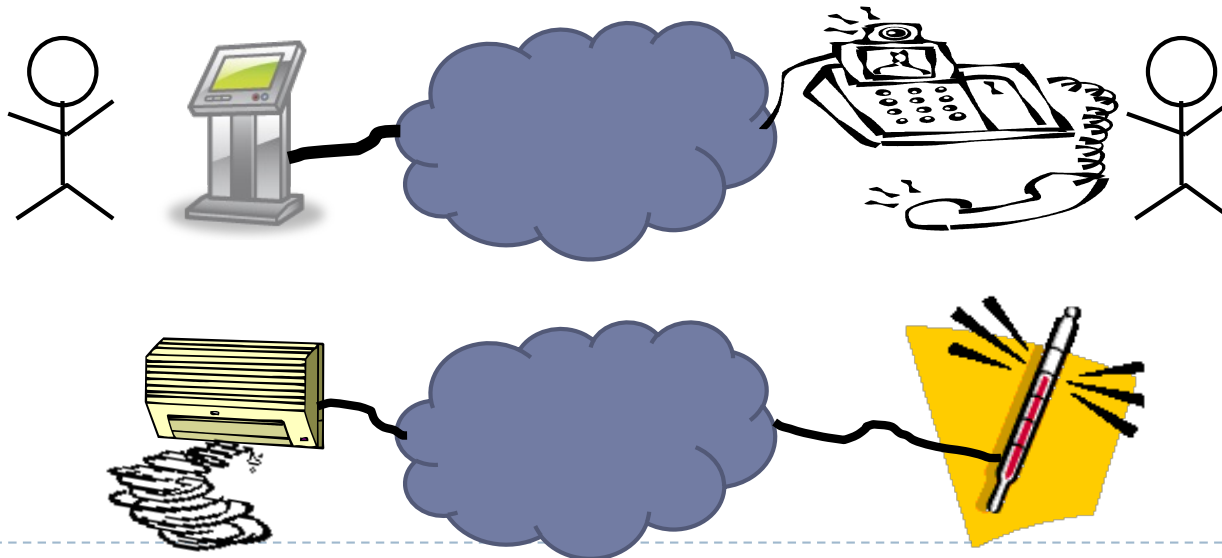
IoTシステム

- ▶ 従来型の計算機(IT)システムとも、組み込み計算機(ET)システムとも異なる
 - ▶ その二つの融合した形態に近い
 - ▶ 実世界とのやりとりがあること
 - ▶ センサ アンド アクチュエータ
 - ▶ CPS(Cyber Physical Systems)
 - ▶ ネットワークを利用し、個々の要素が連携すること
 - ▶ M2M(Machine to Machine), IoT(Internet of Things), IoE(Internet of Everything)
 - ▶ SoS(System of Systems)
 - ▶ インテリジェンスがネットワークのどこかにあること
 - ▶ クラウド
 - ▶ ビッグデータ
- 



Machine to Machine (M2M)の通信

- ▶ ヒトとヒトではなく、モノとモノの通信
- ▶ ヒトとヒトの通信でも両側に端末が存在するが、ヒトがインテリジェンスを持つ
- ▶ M2Mの場合には端末の後ろにヒトがない
- ▶ ヒトとモノが同じ空間内に存在していることで間接的にヒトに貢献する



今までの状況から観察できること -1

- ▶ 量の増加が質の変化を生んできた
 - ▶ 接続時間や通信量に依存しないインターネット(ダイヤルアップから常時接続への変化)がサイバー空間を新たに生じた
 - ▶ 一度打ち捨てられていたニューラルネットワークが、百万倍速い計算機で蘇り、驚くような成果を上げるようになった
 - ▶ クラウドコンピューティングのスケラビリティが蓄積可能なデータの量を飛躍的に増大させた結果、分析結果の質が変わってきた
 - ▶ 人々の活動を逐一データとして残すことのできるWeb2.0以降のデータベースは今まで人間自身が認識していなかった意味を持つデータも利用できるようにした

今までの状況から観察できること -2

- ▶ 言語のような抽象的なデータから生データへ対象の拡大が起きた
 - ▶ 人間が入力したテキストは抽象度が高く、また、そもそもが計算機に扱いやすい形となっており、その特質を利用すれば一定程度の知的な処理はできたが、そうではなく、パターンとしてとらえる情報処理がディープラーニング以降は主流となった
 - ▶ 「Google IMEは日本語のルールを知らないが、ATOKに引けを取らない変換を可能としている」(元Google副社長の村上憲郎氏)
 - ▶ 人間のトップ棋士を負かしたGoogle DeepMind社のAlphaGoは、囲碁のルールや定石を実装したものではなく、画面として碁盤を捉え、ひたすら学習をした(数千万回自分自身と対局した)ことで対局の仕方を実装している。このプログラム自体は他のゲームにも適用することも可能である

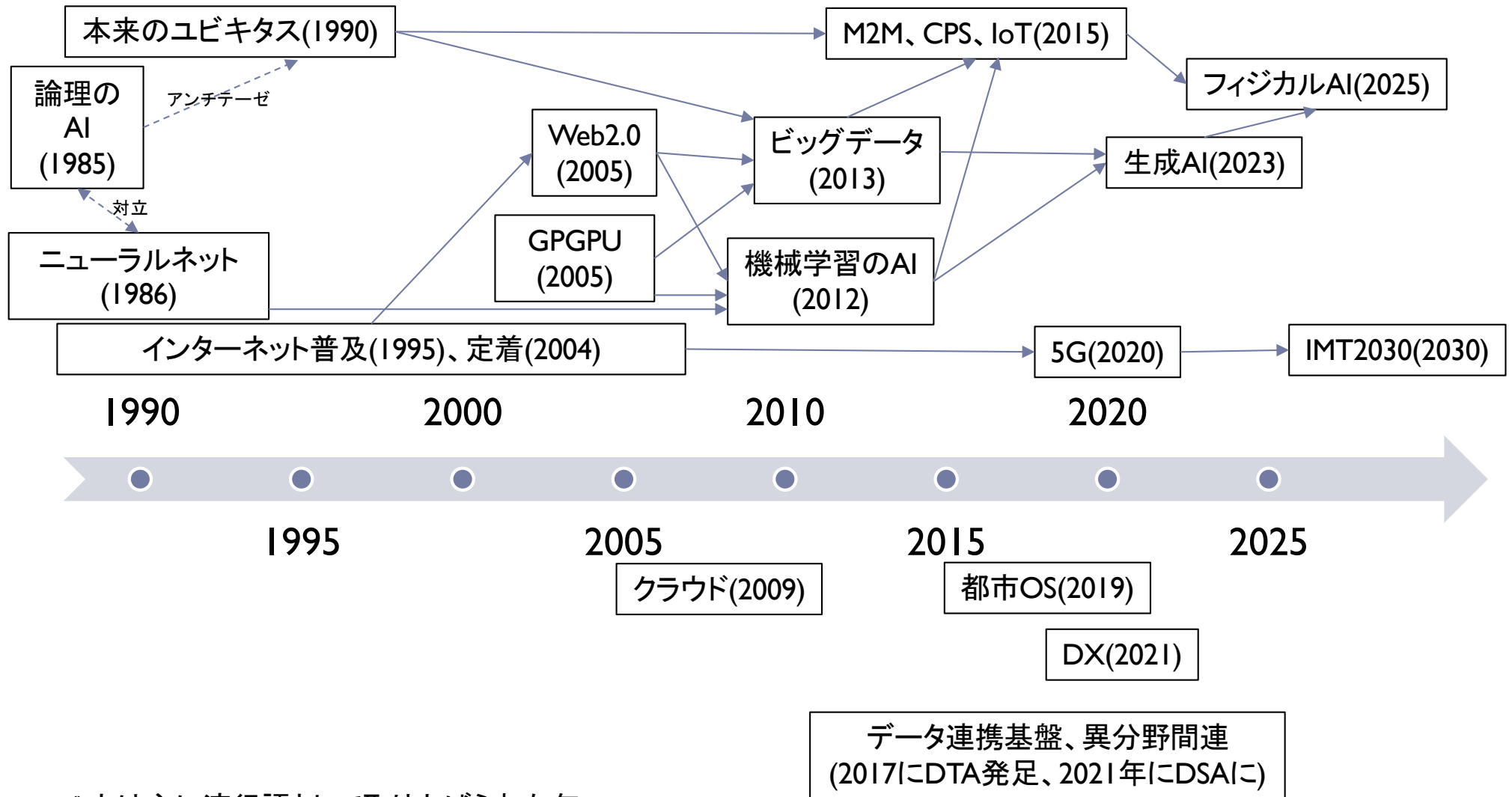
今までの状況から観察できること -3

- ▶ サイバー空間と実空間との進化の速度は異なっている
 - ▶ 人工知能などのサイバー空間での議論は1960年代から行われているが、そうした動きと、センシングとアクチュエーションによるオートメーションは別物という流れが続いていて、それぞれの変化速度は異なっている
 - ▶ 工場ではIT系のシステム(ネットワーク)と制御系のシステム(ネットワーク)が併存して必要に応じて接続という形になっている
 - ▶ ユビキタス以降の実世界指向コンピューティングパラダイムでは統合されて然るべきなところ、いまだにそうならないのは、実空間のシステムでは物理空間や物理現象を相手にするための制約があるから。ただし、未来永劫それが続くとも思えない

出てくると思われ、実際に出てきたもの

- ▶ IoT + 生成AIで、物理空間から物理空間への処理をするフィジカルAI
 - ▶ ディープラーニングのしくみをパーツとして用い、より複雑な構造の機械を組み上げることで、入力に対しての出力を返すのではなく、これの次にはこれがきて、更にはこうなって、という積み上げで「生成」するAIが実現。これがデータからの学習でできてしまう
 - ▶ ユビキタス + クラウド(AI)がIoTだったが、そのAIが生成AIになるとどうなるか
 - ▶ 生成AIに物理世界とのインタフェースをもたせると、物理空間で取得した情報に基づいて、物理空間に継続的に影響を与える機械ができる。これが「フィジカルAI」。人形ロボットはその例ではあるが、そのイメージに限定しないことが重要

キーワードの関係(再)



()内は主に流行語として取り上げられた年

今後問題となること

▶ 新鮮なデータが不足する

- ▶ Web2.0以降、とり貯めたデータは粗方使ってしまった
- ▶ 学習データをAIで生成するという方法もあるが、他のAIが学習したデータの結果を学習データとするものであり、一次的なあるいは原点となるデータが不足してくる
- ▶ 解決するにはデータの取得が必要となる
 - ▶ 人間の生成するデータとともに、物理世界の生データをもっと大規模に取得することが必要となる

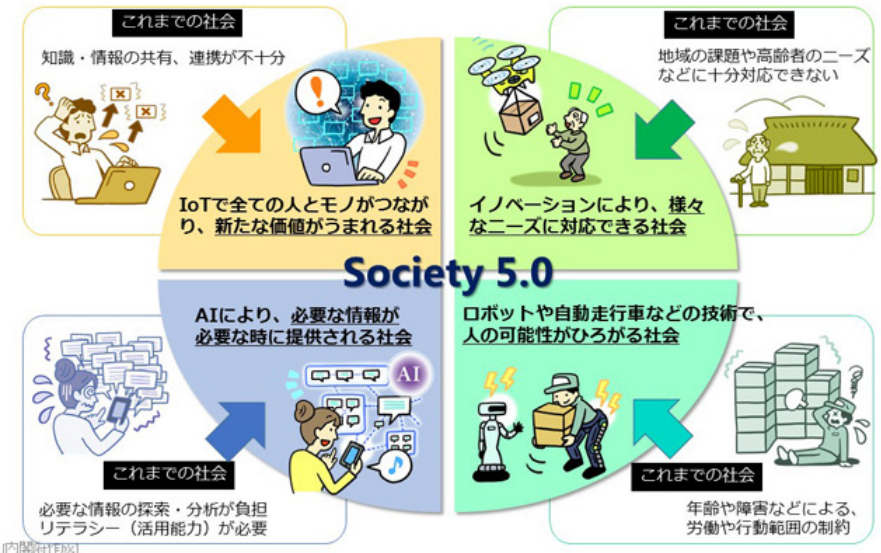
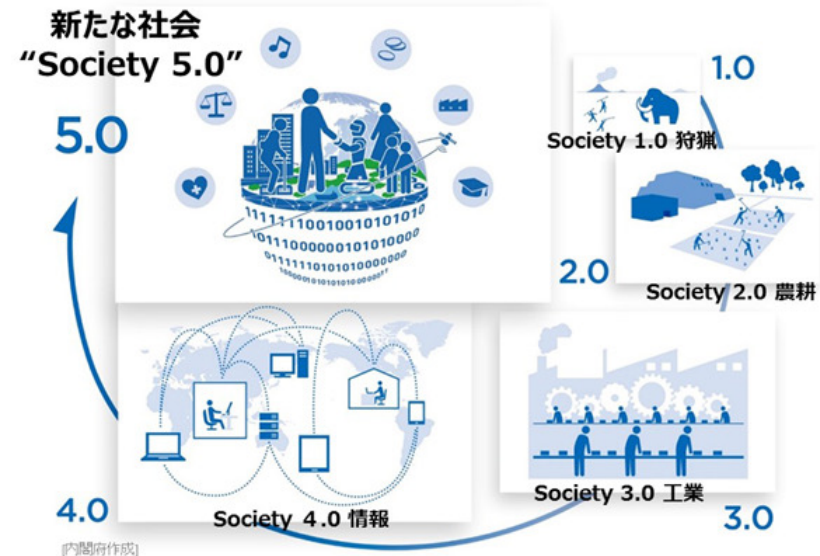
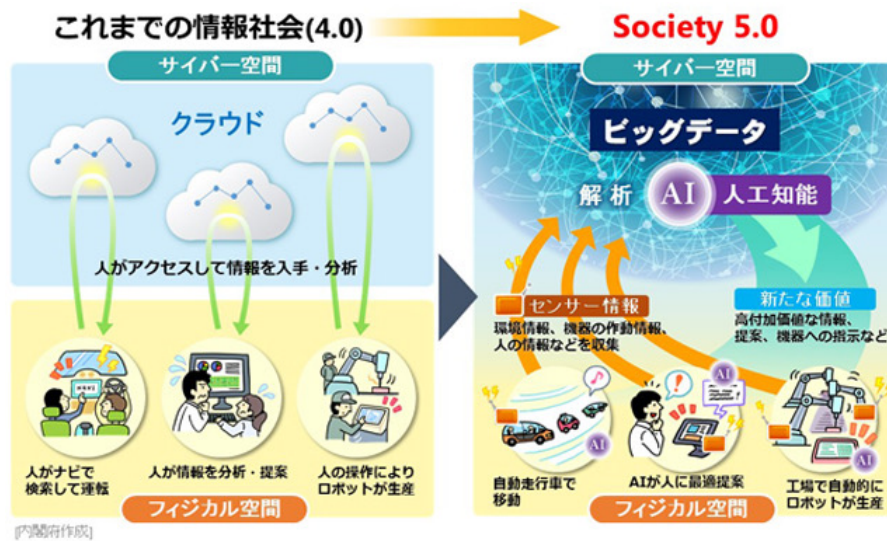
▶ 複数のAIシステムの間での連携が必要となる

- ▶ 異分野データ連携基盤でやろうとしていたことは、この段階になると現実味を持ち出す
 - ▶ AIの存在する世界でのリスクマネジメント
 - ▶ 従来のリスクマネジメントがベース
-

Society 5.0

https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html

- ▶ 日本政府としてIoT時代の国のあり方を語ったもの
- ▶ 技術的、制度的裏付けがあるわけではなく、それをつくっている段階



スマートシティ
リファレンスアーキテクチャ第4版

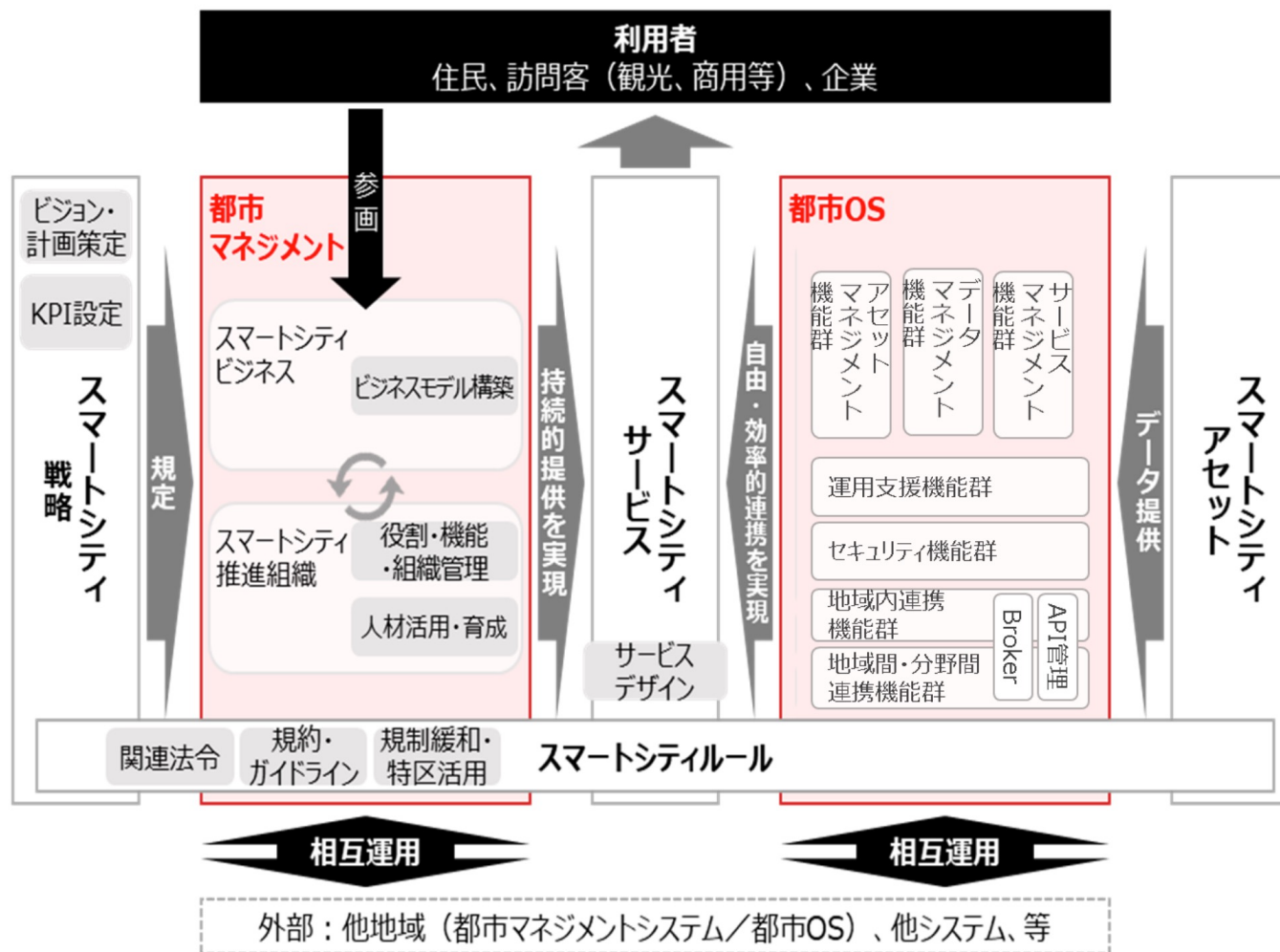


図 2.2-2 スマートシティリファレンスアーキテクチャの全体像

スマートシティ リファレンスアーキテクチャ第4版

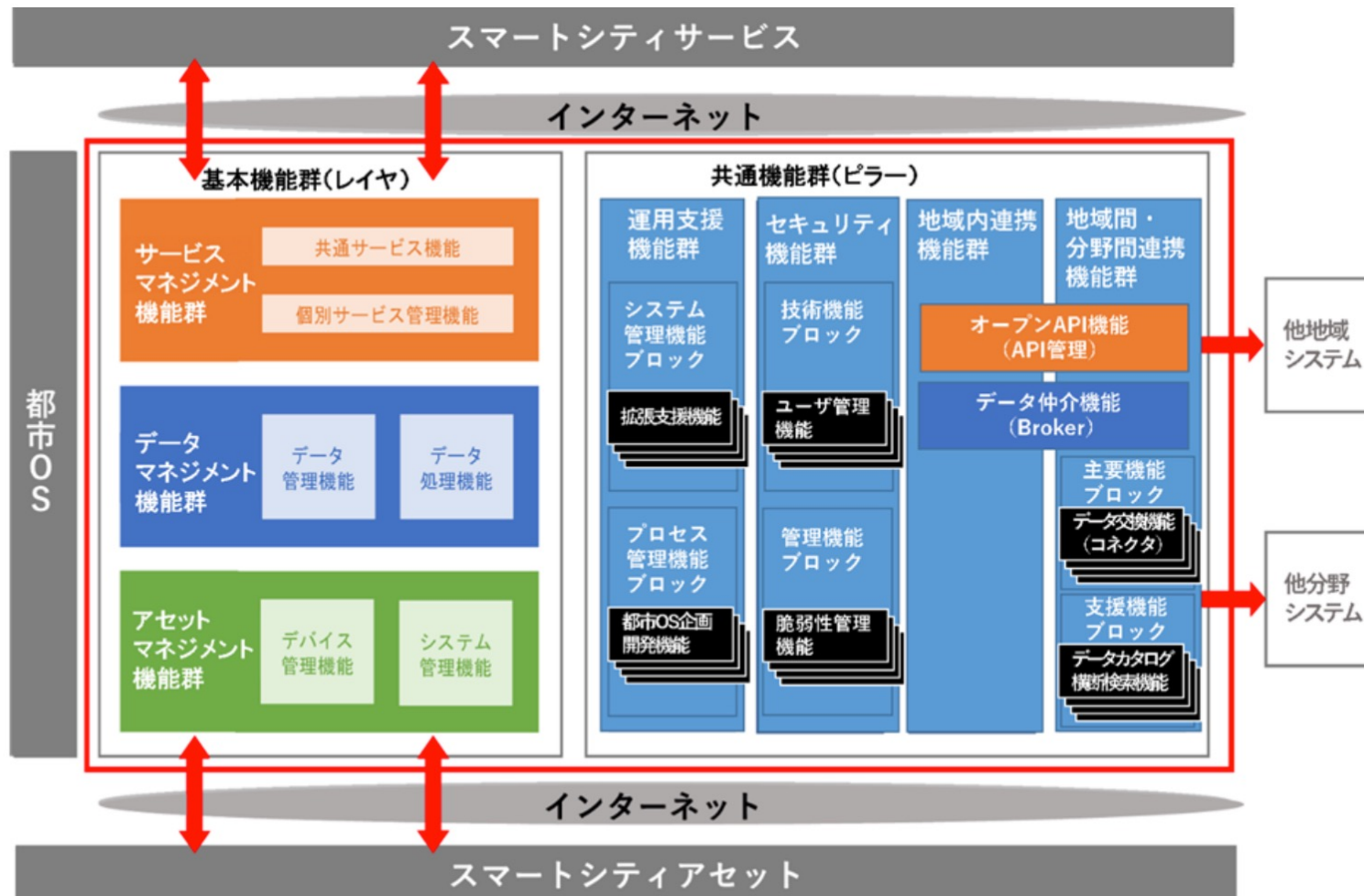


図 7.2-1 スマートシティリファレンスアーキテクチャにおける都市 OS の機能の全体像

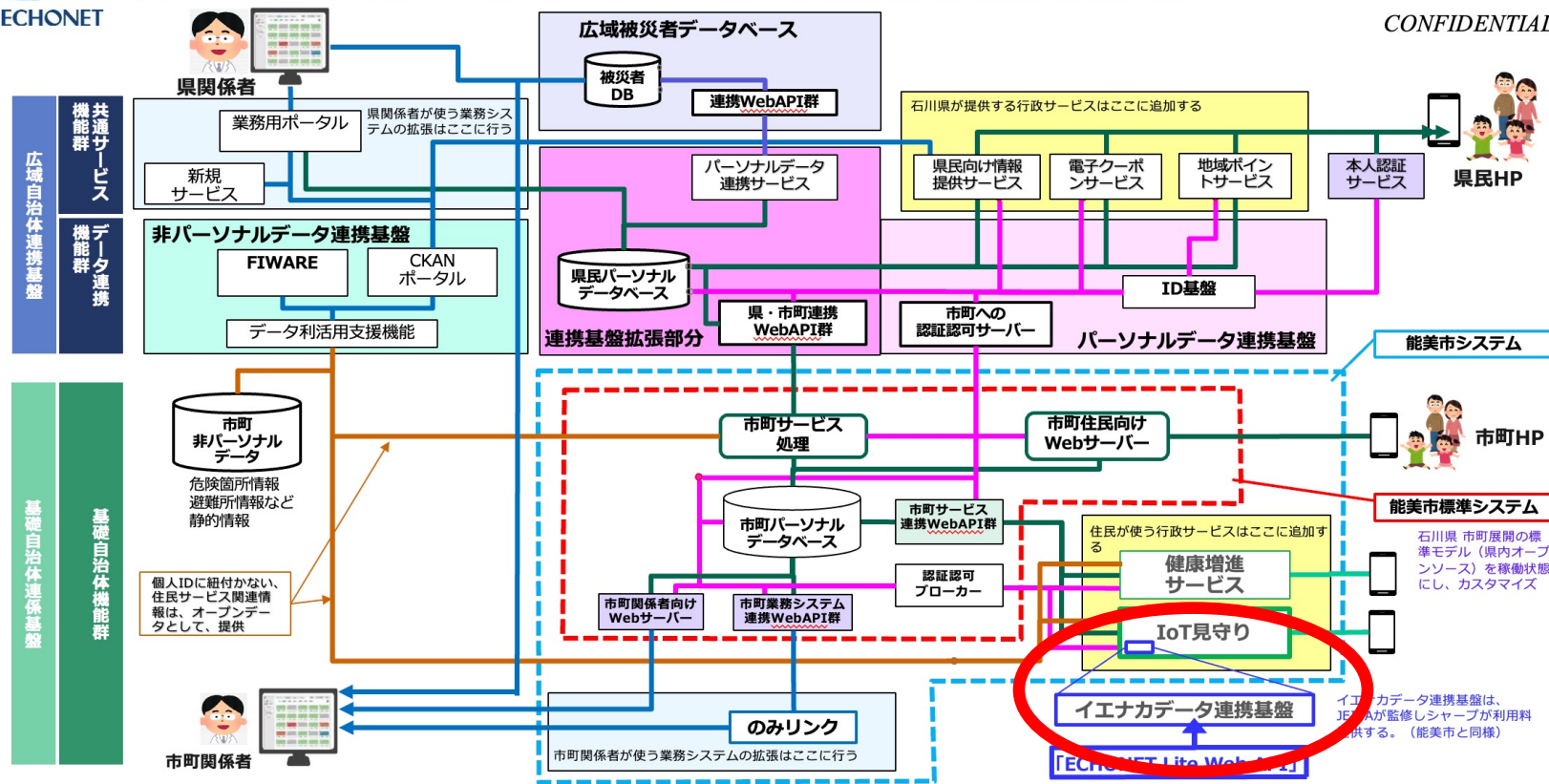
自治体側からみた連携基盤



石川県 標準モデルシステム構成図

JEITA

CONFIDENTIAL



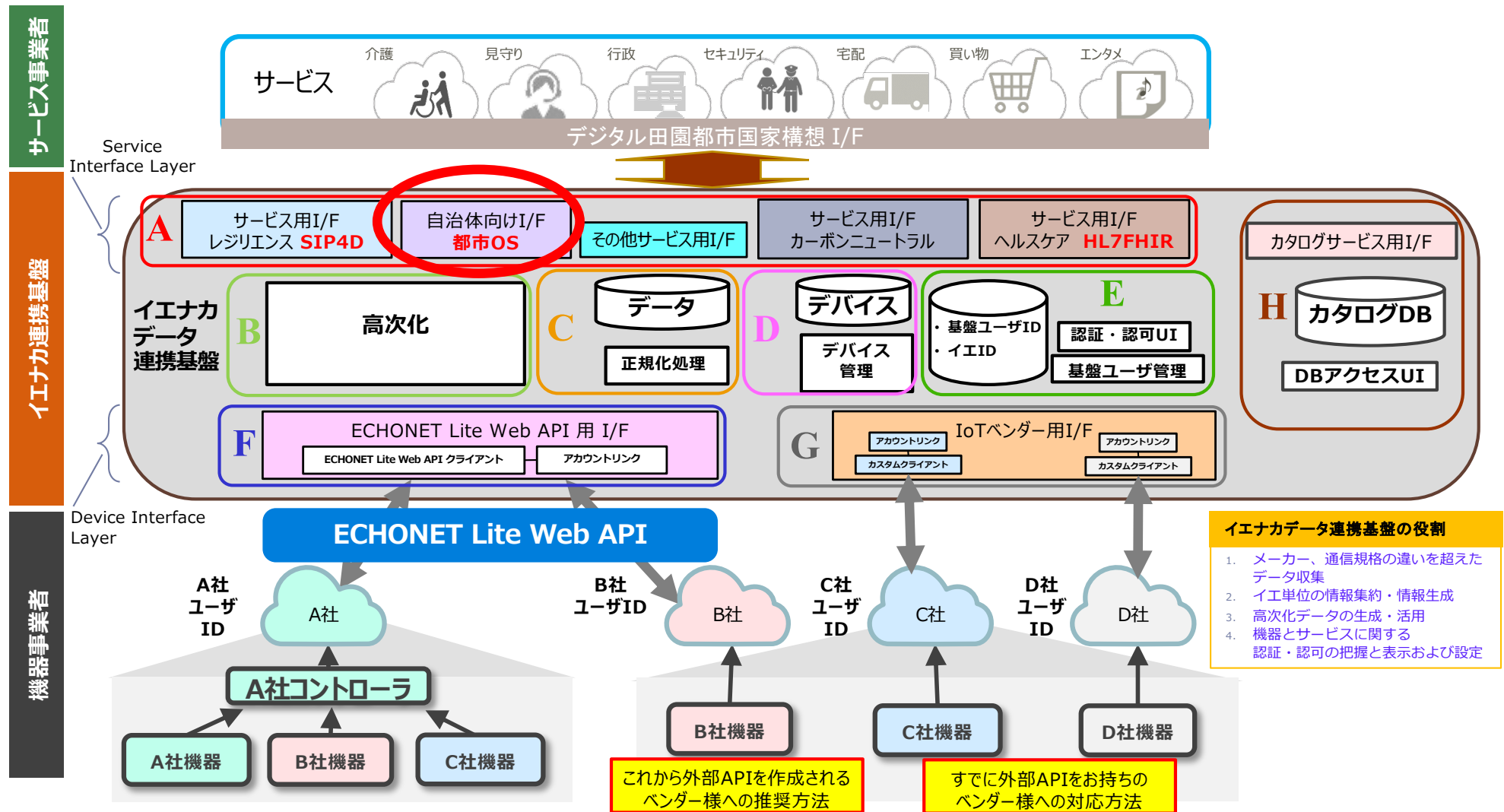
データそのものもさることながら、ID管理や認証機能の実現が重要

スマートホームが関係するのは一サービスに見えている

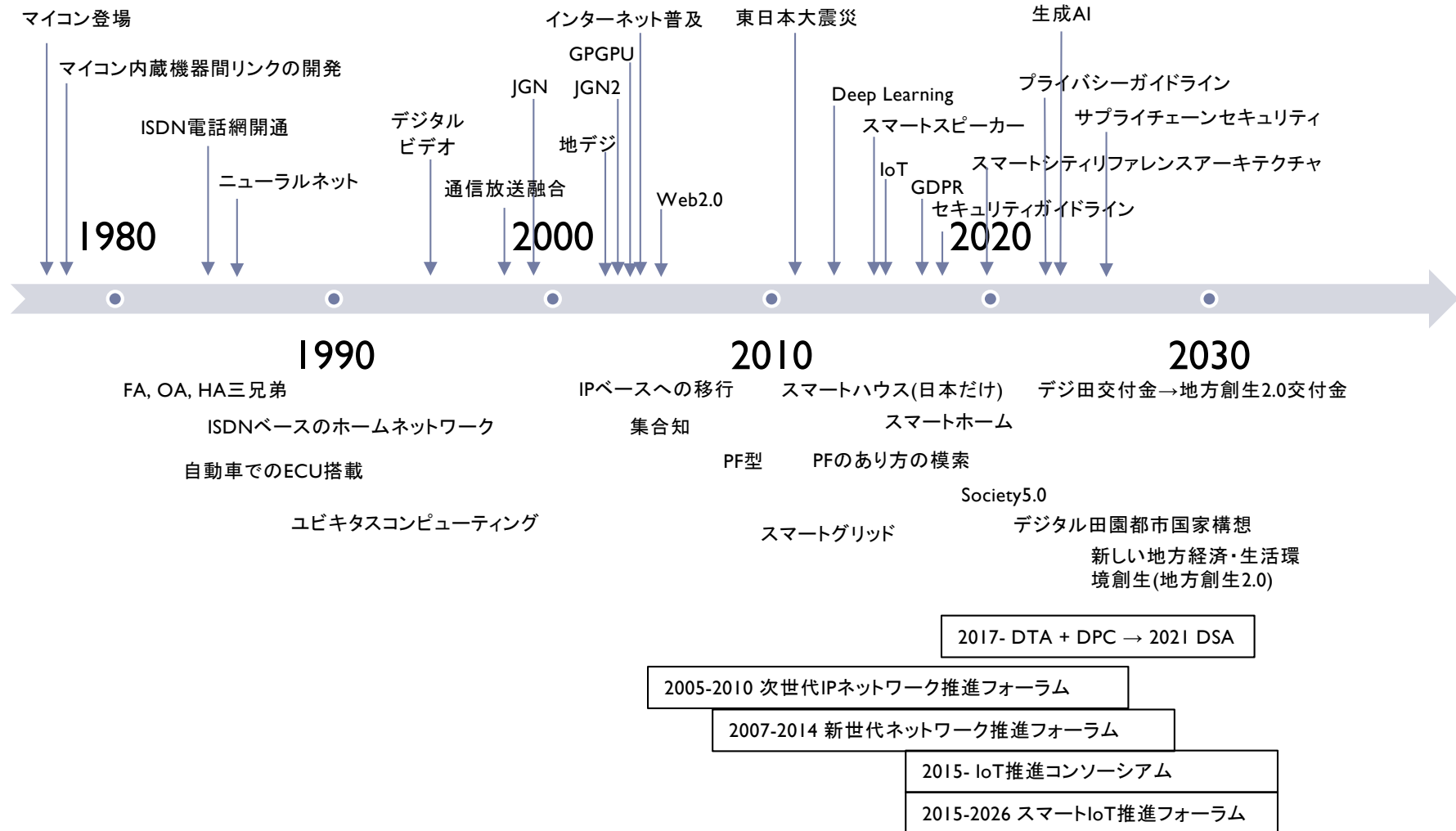
© 2024 TAN Yasuo

スマートホーム業界からみた連携基盤

イエナカデータ連携基盤 構造概念図 (3層フルツケキ版)



丹の研究分野の例 ホームオートメーションからスマートホーム、スマートシティへ



起こるかもしれない困りごとへの対処

- ▶ 社会を構成するものが複雑化、高度化するのに連れて、起こり得る困りごと(リスク)への対処も高度化
 - ▶ 信頼性(dependability)
 - ▶ 道具が故障するかもしれない
 - ▶ 安全性(safety)
 - ▶ 人間に危険が及ぶようなことがあるかもしれない
 - ▶ セキュリティ(security)
 - ▶ 情報が正しく扱われないかもしれない
 - ▶ プライバシー(privacy)
 - ▶ 個人の秘密にしたい情報が漏れるかもしれない
 - ▶ 信用性(trustworthiness)
 - ▶ 情報が嘘かもしれない
-

ICTの外側の話

- ▶ もともとRay Kurzweilのシンギュラリティの議論というのは、人工知能(ロボット)、バイオテクノロジー、ナノテクノロジーの三位一体で語られていたもの
- ▶ バイオテクノロジーでは、IPS細胞のような技術はよく知られているが、John Craig Venterらが2016年に既に人工生命(ゲノム編集ではなく、ゲノム合成による生命体)を作っていることはあまり知られていない
- ▶ ナノテクノロジーは、素材分野やエレクトロニクス分野での一技術という様相が今は強いものの、能動的なナノサイズ人工物の実現は医療をはじめ、多くの分野で飛躍的な変化をもたらす
- ▶ 2045年にこれらが勢揃いしていれば確かに「特異点」を迎えそうな気もしてくる

おわりに

- ▶ ICT分野はバズワードのオンパレードであるように思われているが、実はそれぞれがパズルのピースのように最新のICT技術にはめ込まれている
- ▶ 平坦に進化していったというよりも、別だったものがくっついたり、量的な変化が質的な変化をもたらしてきた
- ▶ 過去数十年の動きをみると、次に何が来そうかはある程度わかる
- ▶ 人間が中身に立ち入らないで新しい機械ができてしまう状況のもと、何をせねばならないかを今までとは違う視点で考える必要がある



付録: 危機管理の様々な側面

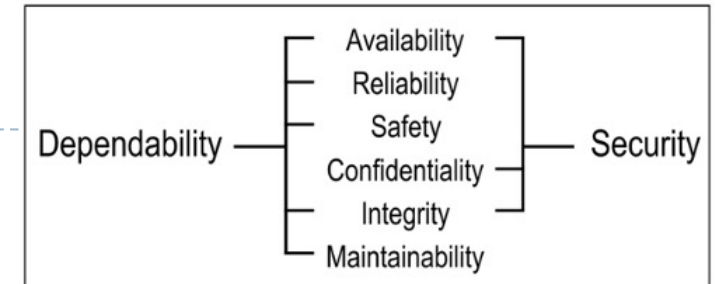
信頼性(dependability)

- ▶ 何かのシステムが正常に動作しなくなることへの対処が目的
 - ▶ スペースシャトルでは3台のコンピュータで多数決をとった結果を使い、1台が故障しても問題が生じないようにしていた
 - ▶ メインフレームと呼ばれるコンピュータは、内部的に複数のコンピュータを持ち、故障の際には瞬時に切り替えて動作継続
- ▶ 「冗長性」を使って問題を解決
 - ▶ システムの費用やサイズ、消費電力などは増える
- ▶ 本質は正常動作(仕様)からの逸脱に対する対処
 - ▶ 仕様のないことを求めた場合への対処は定義されない
- ▶ 関連する概念
 - ▶ error, fault, failure, fault-tolerance, fault-avoidance, fault-forecasting, fault removal, fail safe, availability, reliability, safety, integrity, maintainability, etc.

安全性(safety)

- ▶ 好ましくないことが起きるのを許容範囲に抑えるのが目的
 - ▶ 交通事故をなくすために自動車そのものを禁止すると、経済活動をはじめとして社会全体としてはマイナス要因が大きい
- ▶ リスク(risk)という考え方
 - ▶ 危害が起きてしまうとどれだけ酷いことになるか、と、危害が起きる確率はどれだけか の関数(組み合わせ)
 - ▶ リスクを引き起こす要因が脅威(threat)
- ▶ 本質安全に対する機能安全
 - ▶ 立体交差と踏切しゃ断機の違い。安全を実現する機能。電子回路や計算機で付加された機能の安全のことを機能安全ということもある
- ▶ 意図した機能の安全性(SOTIF: Safety of the intended functionality)
 - ▶ 誤用、性能限界を超えた利用への対処。自動運転の実現で急速に開発が進む
- ▶ 協調安全(collaborative safety)
 - ▶ ヒト、システム(モノ)、環境の3者の協調で安全を実現

セキュリティ (security)



▶ 情報セキュリティは、C, I, Aの確保が目的

▶ JIS Q 27002 (ISO/IEC 27002)

- ▶ 機密性 (confidentiality): 情報へのアクセスを認められた者だけが、その情報にアクセスできる状態を確保すること
- ▶ 完全性 (integrity): 情報が破壊、改ざん又は消去されていない状態を確保すること
- ▶ 可用性 (availability): 情報へのアクセスを認められた者が、必要時に中断することなく、情報及び関連資産にアクセスできる状態を確保すること
- ▶ 更に、以下のような要素を考慮する場合もある
 - 真正性 (authenticity): ある主体又は資源が、主張どおりであることを確実にする特性。真正性は、利用者、プロセス、システム、情報などのエンティティに対して適用する。
 - 責任追跡性 (accountability): あるエンティティの動作が、その動作から動作主のエンティティまで一意に追跡できる事を確実にする特性。
 - 否認防止 (non-repudiation): ある活動又は事象が起きたことを、後になって否認されないように証明する能力
 - 信頼性 (reliability): 意図した動作及び結果に一致する特性

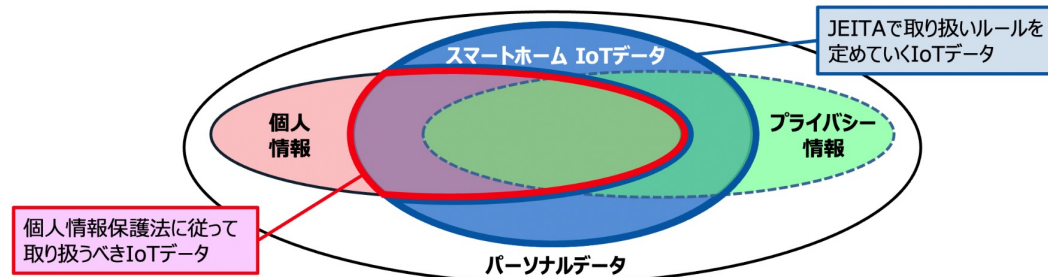
▶ サイバーセキュリティは、サイバー空間の治安維持が目的

- ▶ 人為的な行動に対する対処であり、故障も、情報セキュリティ上の問題がなくても生じる

プライバシー(privacy)

- ▶ 個人や家庭の、他人に知られたくない情報が他の個人や社会に知られず、干渉を受けないことが目的
- ▶ 個人情報と混同している人があまりにも多いが別モノ
- ▶ 導入しようとしているシステムに対して、適切な評価を事前に行うことが必要
 - ▶ PIA: Privacy Impact Assessmentは、自治体では行われるようになってきており、国際標準(ISO/IEC29134)、それに対応する国内標準(JIS X 9251)という、手順を規定する標準規格もできている

- スマートホームで取り扱うIoTデータには、必ずしも法で定められる個人情報には該当しないデータも存在する
 - 一方で、IoTデータにはプライバシーに注意して取り扱うべきデータも含まれる
 - プライバシーの感じ方は、個々人により、また時代によって移り変わっていくため、個人情報には該当しないIoTデータ全てを対象とした取り扱いルールを定めていく
- お客様に安心してIoTデータをお預けいただけるよう、業界として取り組む



JEITAスマートホーム部
会が発行するプライバ
シーのガイドライン文書
より

信用性(trustworthiness)

- ▶ 情報そのものの信憑性の確保が目的
- ▶ 近年頻繁に問題となるフェイクニュースの問題もこれ
- ▶ 情報セキュリティとサイバーセキュリティの関係のように、人間が意図的に誤った情報を提供する場合と、情報が適切に取得できず結果として誤った情報が提供される場合がある
- ▶ 対処方法は、複数の情報入手経路を担保すること
 - ▶ サイバーセキュリティではサイドチャネル攻撃という、本来の情報の経路からではない別の経路(機器が発する電磁波や、電力消費の変動など)から情報を得る攻撃があるが、ここではむしろ、いかにサイドチャネルを確保するか
 - ▶ 機器の場所や、向いている方向などを特定できるインフラを整備して人為的ではない誤情報を防ごうとする動きもある

震災のような災害時には...

- ▶ 設備や機器の故障により、信頼性(dependability)の問題(=正常に働かない)が生じる
- ▶ 機能安全が働かなくなり、安全性(safety)の問題が生じる。また、家屋の倒壊など、想定していない状況も生じ、SOTIF上での問題が生じる。避難所や復興現場では、急ごしらえの人員、機器や設備、建物の損傷などで制御されていない環境の元で協調安全を図っていかねばならない
- ▶ 情報システム以前に物理的なプライバシーが担保できない環境となる。一方で、救助のためには平常時にはプライバシー上保護されている情報も参照する必要が出てくる
- ▶ ほとんどの情報システムが正常に動作しなくなることから、情報のAvailabilityが担保できなくなる
- ▶ SNSのアクセス数を増やすために偽画像を流したり、偽の救助支援を発信したりするなど、信用性の問題が生じる。また、センサの取り付け場所が壊れ、本来とは異なるデータを送ってくるような場合もある