

「IoT社会実現に向けた次世代人工知能・センシング等中核技術開発」
成果報告会

主催：NEDO & モノづくり日本会議

特別講演

IoT時代のセンシング技術の将来展望

東京工業大学名誉教授
次世代センサ協議会（JASST）会長

小林 彬

◆2022年6月16日（木） 13:00～13:30（含む質疑応答）
JA共済ビルカンファレンスホール

講演内容

- I . IoT、Society5.0、DX化の時代、センシング技術適用分野の拡大
 - II . 効用:生産性向上1.0 ⇒ 生産性向上2.0
 - III . 複合計測化と予測技術への展開
 - IV . 新インデックスを求めて
 - V . センシング技術普及とSUCSの開発
 - VI . 量子センシング系の動向と新センサ材料(時間があれば)
- 参考 小林 彬 略歴

計測新領域

IoT: Internet of Things

むしろ **S&IoT: Sensor & Internet of Things**



製造業



故障診断

水産養殖業



水温管理

農業



水量管理

流通業



荷物の管理

アミューズメント



人流監視

社会インフラ



老朽化評価

教育



ロボコン

飲食業



換気管理

医療



遠隔治療

防災



浸水

**このような状況を前にして
何を準備して置かなければ
ならないのか！**

適用分野の拡大はセンシング技術にとって何を意味するのか

◇製造業(例えばプロセス産業)

⇒ 非製造業(例えば社会インフラ; 道路橋梁)
ビジネス形態が変わることにより何がかわるのか

◆センシング技術上の相違項目

①管理すべき測定項目

例; 温度、圧力、流量、レベル、等

⇒ 振動、撓み、劣化・損傷、固有周波数、等

②考慮すべきマネジメント項目

例; エネルギー効率、生産速度、**歩留まり**、等

⇒ 橋梁健全度、残存寿命、等

◆その他の相違

③価値観、思考パターン、文化、習慣、等

④行政・一般人との繋がり濃さ、等

新しい分野への展開

●新しい測定項目

●新しい評価項目

への対応が要求される

◆世の中が変化する:
➤新しい機能・性能を持つ
システムを要求

新機能・性能を確認する
インデックスの表示が必要

センサを制する者は
システムを制する!

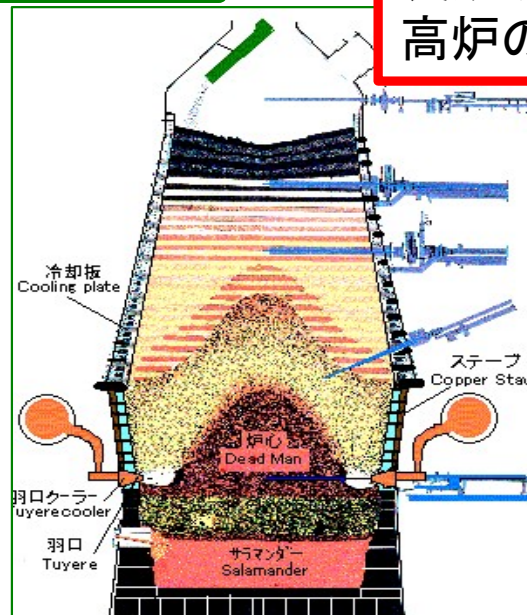
良いセンシング系を開発すれば
便利なシステムを創出できる！

センシング技術に期待が
かけられている理由

機械化・オートメーション化の時代 生産性向上1.0

今振り返れば

製鉄所における
高炉の計装



様々な
機器計測化
機械化
ロボット化
自動化
等の技術が
導入された

- § 生産活動における生産性向上
- ・生産速度の向上
 - ・生産効率の向上
 - ・生産における省エネルギー化
 - ・測定の機器計測化
 - ・点検検査時間の短縮 等

- § 開発における生産性向上
- ・製品改良のリードタイム短縮
 - ・製品開発のリードタイム短縮
 - ・性能検証期間の短縮 等

更なる高度化

物理量
の測定



自動車工場における
オートメーション

特に《サービス業等分野支援への展開》の場合

人間作業におけるリードタイムの短縮！

自然発生的
ニーズ

作業の中身は？

新たに
生産性向上2.0
というべき！

状況の判断及び意思決定の連鎖！

最早、物理量
ではない

的確な
状況モニタリング

客観的な
評価指標の提示

知的センシング

知能化！

気づき・見守り

生産性向上： 1.0 → 2.0

◆オートメーションの時代：

生産性向上1.0

- △機器計測化
- △機械化
- △ロボット化
- △自動化



- § 生産活動における生産性向上
- § 開発における生産性向上

対象は

製造工程

◆IoT、Society5.0の時代：

生産性向上2.0

- △見える化（視覚化）
- △見守り化
- △総合化（知能化）
- △多次元化（多様化）
- △安全・安心化

（含：自然災害減災、交通安全）

- § 判断のための**状況認知の支援**
- § 人的作業のリードタイム短縮

対象は

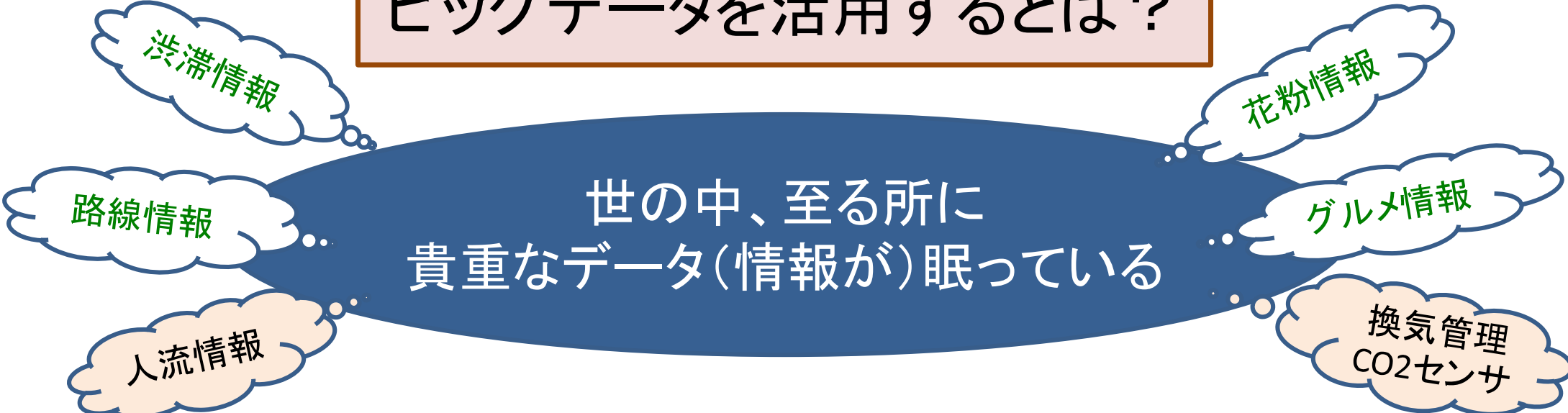
意思決定者

オンライン
視覚的情報
(画像情報)
の重要性

5G、6G技術への期待

**新しく創出される一つの機能は
生産性向上2.0のフェーズである！**

ビッグデータを活用するとは？



データを拾い出すには

SoT: Sensor of Things

データを集めるには

IoT: Internet of Things



S&IoT

簡便に実現できる
センシングアーキテクチャー
の要望

SUCS

- 複合計測による新インデックスの創出と見える化
- AI技術利活用によるセンシング系のマスカスタマイズ

ビッグデータを活用するには
SoT、IoT、AIの連携が重要である！

ニーズに
2つのこぶがある

◆SUCS
4つのユニットの
連結で実現する
センシング系

底辺を拡げる

◆新インデックス創出
説明可能AIによる
有効認知型データ
の探求

最先端の強化

DX化の意味：デジタル情報技術の活用 生産性向上2.0の実現！

デジタル情報が
アナログ情報と
異なる大きな違い

- 情報の検索可能性
- 情報間の紐付けによる
関連情報提供の容易さ

- 紐付けの
NW、DBの整備

意思決定者の
作業過程

- 客観的状況（情報）の
迅速な把握と認知
- 認知に連鎖する
関連情報の収集
- 統合判断による
的確な意思決定

- この作業過程に
上記NWを組み込む
- センシング技術に
より収集される様々な
デジタル情報を
積極的に活用する

センサ → センスパイヤ (SENSPIRE) へ

●この数年次世代センサ協議会では、「五感のもつ知覚機能」を実現する進化型センサをSENSPIREの名称で提唱してきた！

●SensorとInspireの言葉を掛け合わせた造語、

「センサの活用でシステムの性能・機能を高度化でき」

&

「新システム創出には新センサの開発が求められ、

⇒ **新センサ無くして新システムの構築は成立しない、**

と言った**付加価値を創出する双方向のInspire 関係**を表現したもの。

●付加価値創出の基本は！

「眼も耳もそこから発せられる信号自体では情報知覚の観点で何の意味も持たないが、

脳で処理されて初めて認知・判断が実現される」

これが知覚です。すなわち、センサに付加価値をつけるということは知覚機能を実現することに他なりません。

ニーズから
ニーズへ

ニーズから
ニーズへ

Senspireは複数の
センサ等の計測連携
により、より高度の
情報提供を目指す！

センサの発展進化系
SENSPIRE = Sensor x Inspire

参考

Big Data

深層学習

Smart Sensor

Sensor-fusion

マイクロプロセッサ

自立電源

A-Sensor
B-Sensor
C-Sensor

演算
信号処理
統計処理

◆センサの
複合利用

◆カスタムアルゴリズム

比較・分析
統合・適応

インデックス値出力

クラウド/ネットワーク

A"-Sensor
B"-Sensor
C"-Sensor

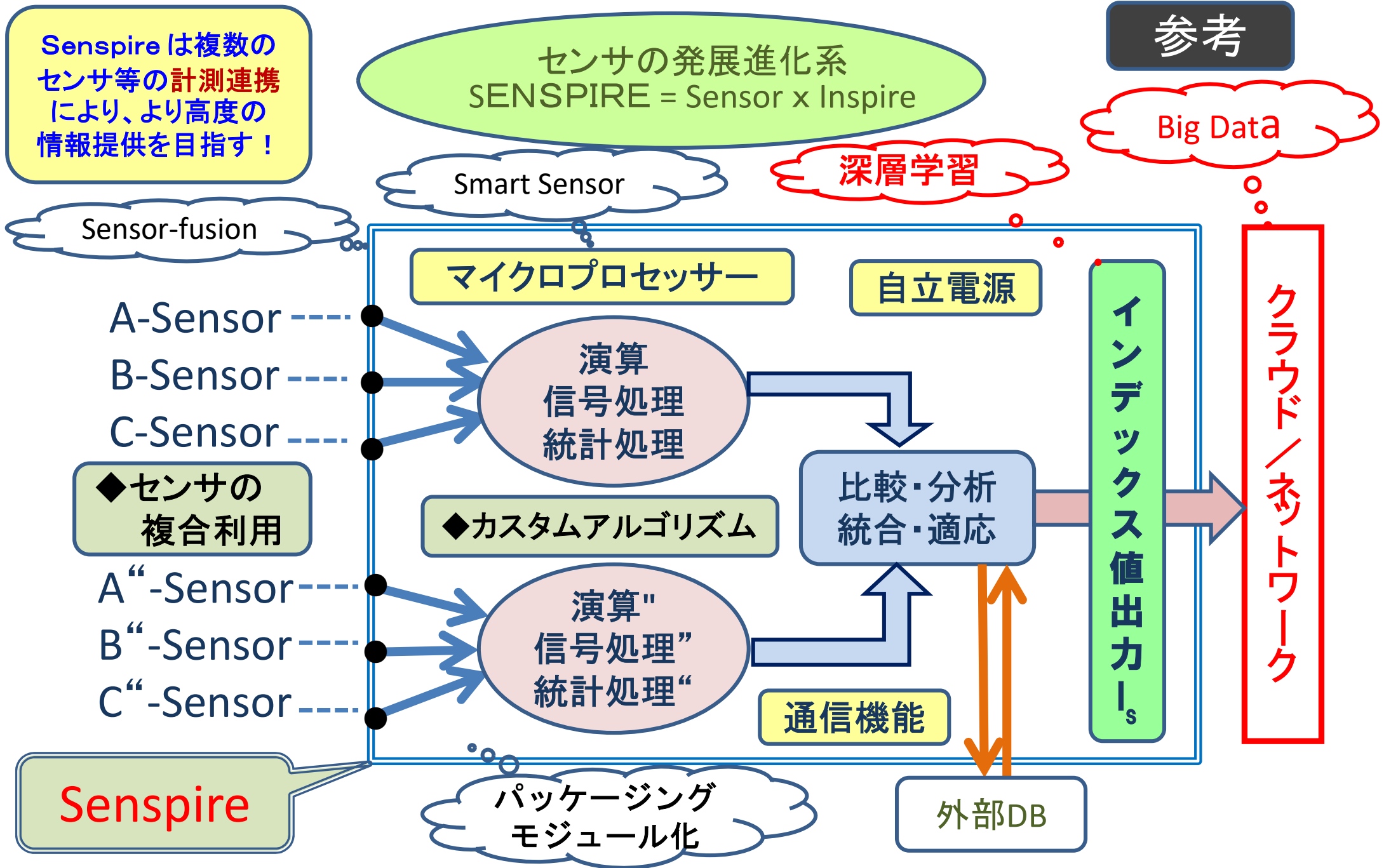
演算"
信号処理"
統計処理"

通信機能

外部DB

Senspire

パッケージング
モジュール化



統合的判断

複合計測化を推進しよう！

多種・多様なデータの収集

◆複合計測系の構成

◎複数のセンサ出力
◎広域に渡る関連情報
◎長期間の観測データ
◎多次元時空間データ
等

+

◎信号処理
◎統計処理
◎カスタムアルゴリズム
◎見える化技法
等

◆インデックス

◎予測
◎診断
◎行動指示
◎識別
等

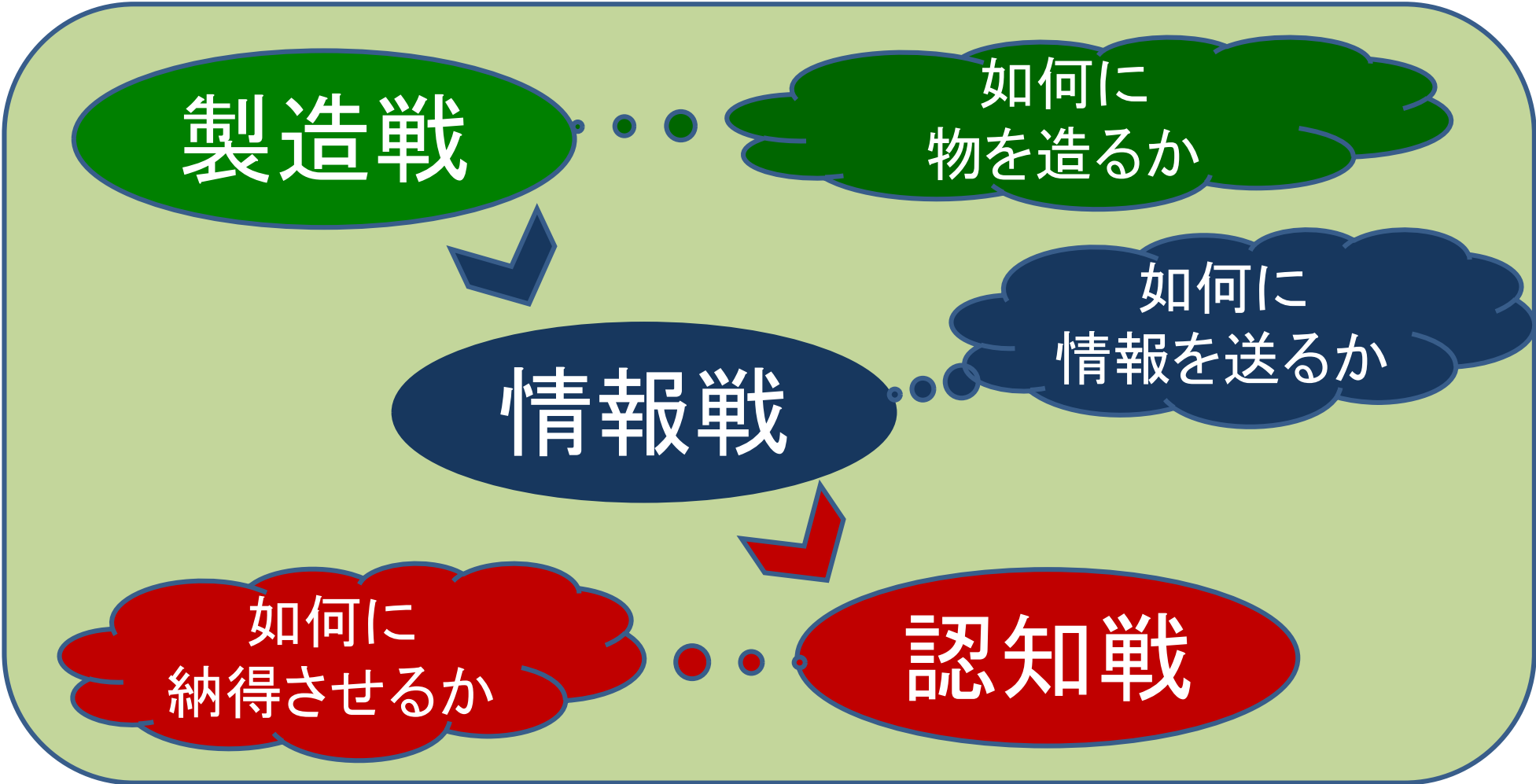
センサ技術
観測機器は
基本一次データを
取得する上で
重要且つ必須

要望される情報は
最早物理的情報の
段階を越えて、
的確な判断・意思決
定に繋がるデータが
求められる

センサ情報と
適正なアルゴリズム
の連携により、
有効で理解し易い
インデックスを
追求することが
必要である！

無理なく
広義のリード
タイム短縮を
実現すること
が新時代の
生産性向上

新しい戦い



見える化を巡る重要視点

多種・多様な
データの
適正な総合

何を
測りたいのか

測定領域の
拡大に対応

時間的変化の
適正な表示

何を
伝えたいのか

見える化

何を
判断して
貰いたいのか

想定外の
少ない
情報の提供

伝えたいことが
効果的に
伝わっているか

予知・予測に
適した表示

複合センシング系; 災害予測

主たる
大規模自然災害の対象

洪水浸水想定

土砂災害想定

津波浸水想定

IoT水位計

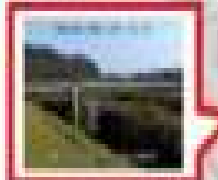


AI氾濫予測

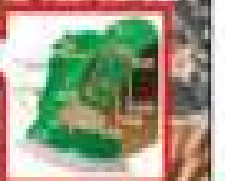
人工衛星・ドローン



Webカメラ



斜面計測監視



自然災害
減災のための
予測技術と
支援システム

インフラIoT管理



IoT雨量計



AI土砂災害予測





高速道路入口ゲート(料金所)

- ◆一般に高速道路の入口ゲートでは、各通過車両の軸重荷重が測定されている。
- ◆荷重超過があれば、退出等のアラームが発せられる。



- ◆他方、鋼橋については、軸重荷重の3乗(?)に比例した入力の数積が橋梁の疲労亀裂発生に繋がるとされ、10t車換算累積軸数により、疲労亀裂予知を行うことが提案されている。
- ◆10t車換算累積軸数が3,000万回で疲労亀裂が始まるとされる。
- ◆荷重測定にとどまらず、橋梁のマネジメントにつながる情報を提供することは、複合計測系の効用の一つである。

軸重計の設置



軸重計としてロードセル等を利用

この領域の下に軸重計

計量仕様

ひょう量	20t
目量	0.1t
使用時精度	±1.0t
最高速度	40km/h



疲労亀裂発生予測システムの可能性

転ばぬ先の杖

複合計測系による
予測計測技術の開発が
期待されている

今後は
線状降水帯の予報
も提供される

次世代センサ協議会に SUCSコンソーシアムが設立された 2021. 7.

SUCS : **S**enspire **U**niversal **C**onnecting **S**ystem

Senspireの考え方に立った、
新規センシング技術開発に便利な
センサシステムアーキテクチャー

◇センシング系を、
センサユニット、AD変換ユニット、電源ユニット、通信ユニット
のユニット連結構成で実現するものと捉え、
各ユニットの接続に関する標準化を推進する

センシング系構成上の隘路

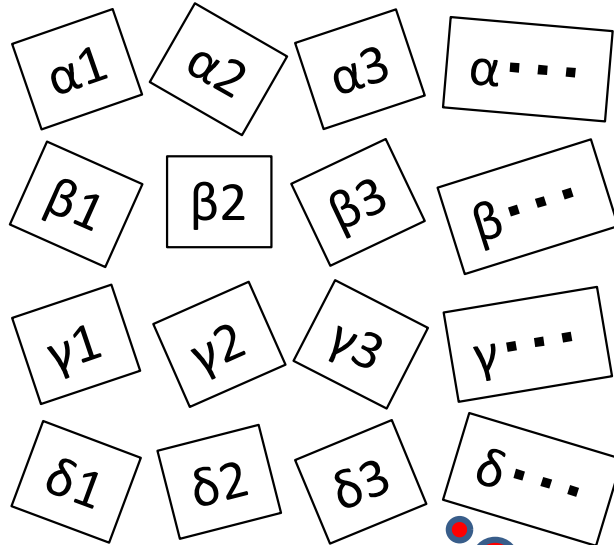
SUCSが目指すもの！

α ; センサユニット

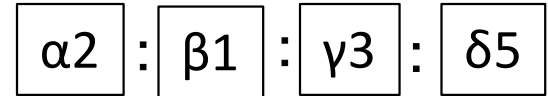
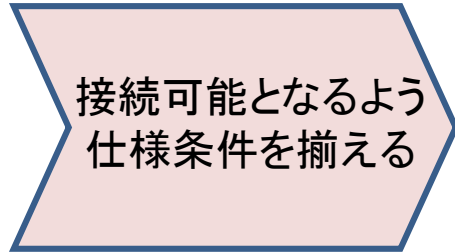
β ; AD変換ユニット

γ ; 通信ユニット

δ ; 電源ユニット



接続の標準化



容易な相互接続

センシング系
構成ユニット

同一目的だが
異なる仕様のユニット



組合せての
接続が
簡単にはできない

各技術を連携させ、
横断的に活用する上
で隘路になる

技術的には、
既に各種の
デバイスが
存在するが、
仕様はバラ
バラである

- ◆ 組合せ & 交換自由の実現！
 - ◇ 機能・性能の変更
 - ◇ 容易な修理・修繕
 - ◇ ヴァージョンアップ対応
 - ◇ 簡便な試行錯誤
 - ◇ オープンなセンサ開発

● 接続接栓
・サイズ ・接点仕様 ・プロトコル 等

◆メタデータとは何か

- 1) データの氏・素性を明らかにする情報(データ): メーカー名や型番
- 2) センサ類の設置場所や状況の情報(データ): センサ類をどこに設置
- 3) 測定環境の情報(データ): 設置場所、測定環境の情報
- 4) 測定対象の情報(データ): 橋梁、トンネル、河川、斜面
- 5) 管理担当者の情報(データ):
- 6) その他: その他多くの情報がメタデータになり得る

※そのメタデータの存在によって有効な分析結果が得られたり、マネジメント判断に繋がられたりすること等、その種の効用があるかどうかを考慮して選択することが重要と思われる。



◆「データ+メタデータ」の役割: 例

- I. 飲食業における新型コロナ対策用モニタリング: CO₂センサ、気流センサ
「密」の回避、換気対策、快適な環境提供、空調効率、排気装置、排気状況、
⇒ マネジメント上最適な換気系を設計するのに役立つ
- II. プレス機械群の稼働率管理: 振動センサを中心に
プレス機の稼働状況、製品不良と製造パターンのフェーズ、振動センサの配置、
プレス機相互の成績、プレス機の設置環境・設置状況に
⇒ 操業状況の把握と生産システムの改善計画



トラブル要因
抽出のため

メタデータの重要性

意味のある
分析のため

プレス機械群



- ◆稼働率管理:振動計
- ・何時稼働しているか
- ・振動計はどこに設置?
- ・プレス機毎の歩留まり
- ・何時不良は発生
- ・プレス機相互の比較
- ・プレス機設置環境
- 等

ビッグデータも
メタデータの存在がないと
その価値を発揮できない

スマート農業



- ◆広域水田管理
- ・水温&水位管理(タイムスタンプ)
- ・何処の水田?灌漑水路情報
- ・水温計設置状況
- ・地理的状况(設置周囲環境)
- ・気象状況&日照情報
- ・収穫量&品質
- 等

自然災害予測



- ◆予測品質の向上
- ・各観測器の配置位置
- ・データ観測時刻
- ・観測器の仕様
- ・観測器設置仕様
- ・地理情報(流域情報)
- 等

流通業



- ◆搬入出状況マネジメント
- ・パレットの運行経路把握
- ・重さ&体積:負荷情報
- ・荷物の種類(仕分け)
- ・無負荷状況
- ・作業曜日&時刻
- ・作業時間
- ・作業品質
- 等

今後のセンシング技術の 新シーズとして何処に注目するか

量子センシング技術
の開発

計測新素材
の開発

社会実装のためには
センシングシステム全体の
構成に関する吟味が必要

量子センシング系（量子化現象応用）の動向

◆暫く前までは

◎ジョセフソン効果の応用

●ジョセフソン-電圧標準

●超伝導量子干渉計：SQUID

(superconducting quantum interference device)

◎トンネル効果の他の応用 等

STM:走査型トンネル顕微鏡

◆最近の話題

◎ダイヤモンドNV中心 超高感度磁気計測

◎量子慣性センサ 等

※ジョセフソン効果 (Josephson effect)

弱く結合した2つの超伝導体の間に、超伝導電子対のトンネル効果によって超伝導電流が流れる現象である。

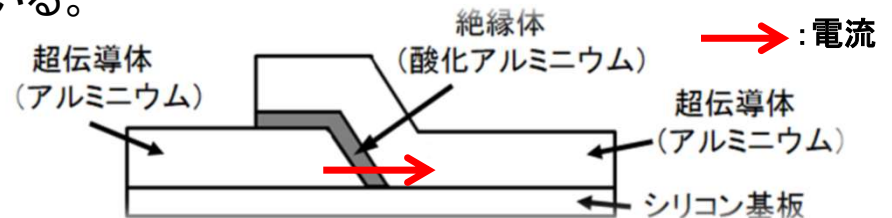
※ジョセフソン電圧標準

◆Sn-SnOx-Sn, Al-AlOx-Alのように数nmの絶縁物薄膜を二つの超伝導体ではさんだジョセフソン素子に、周波数fのマイクロ波を照射し、数Kの極低温で電圧-電流特性をとると階段状の電圧のステップ現象が認められる。

◆n番目のステップ電圧をVn, eを電子の電荷, hをプランク定数とすれば, 次の関係がある。

$$nf = \frac{2e}{h} V_n \quad \frac{2e}{h} = 483594.0 \text{ [GHz/V]}$$

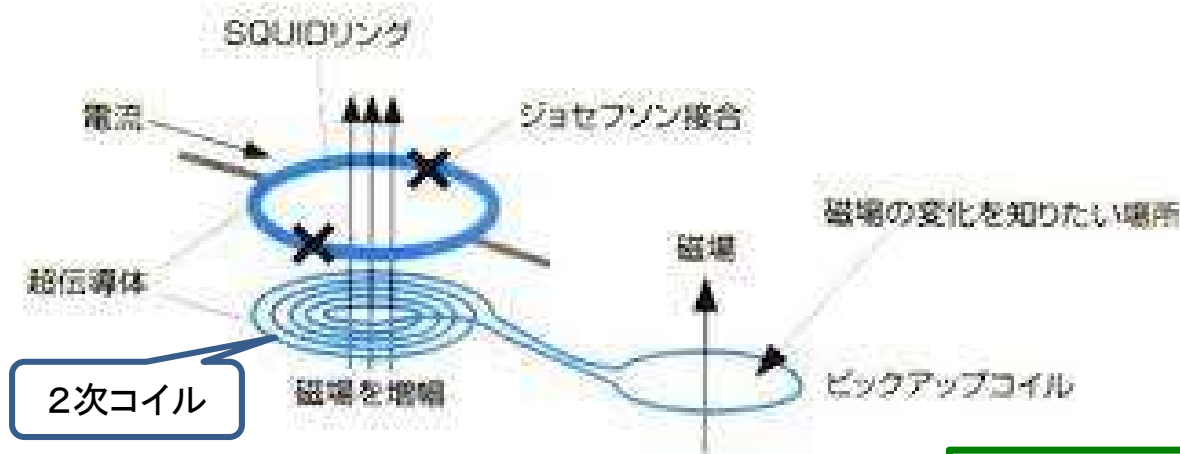
◆通常周波数fは10GHz, n=246, 2個の素子を直列に接続すると約10mVが得られる。この電圧を100:1の抵抗分圧器を介して, 標準電池の起電力と比較し, 値付けを行っている。



ジョセフソン素子(極低温+マイクロ波照射)

※SQUID

- ◆ Super Quantum Interference Deviceの略であり、超伝導の量子化現象を利用した超高感度磁気センサーのこと
- ◆ 超伝導状態では、超伝導リングに外部から磁場 B を加えると、超伝導リングの中に磁場 B を通過させないように(それを打ち消すよう)遮断電流 I_s が流れる。 I_s は B に比例する。しかし超伝導リングは電気抵抗がゼロであるから電圧は発生しない。
- ◆ そこで超伝導リングの一部にジョセフソン接合と呼ばれる接合部を作る。
- ◆ ジョセフソン接合部では超伝導の性質がやや劣るため、わずかな遮断電流 I_s が流れただけで超伝導状態が崩れてしまう。
- ◆ 超伝導状態が崩れることは、常伝道状態になることを意味し、リングには電気抵抗が生じ、電圧 V が発生する。
- ◆ この電圧 V は I_s に比例し、遡って B に比例することにもなるので、 V を測定することで、わずかな磁化の変化を捕らえることができる。



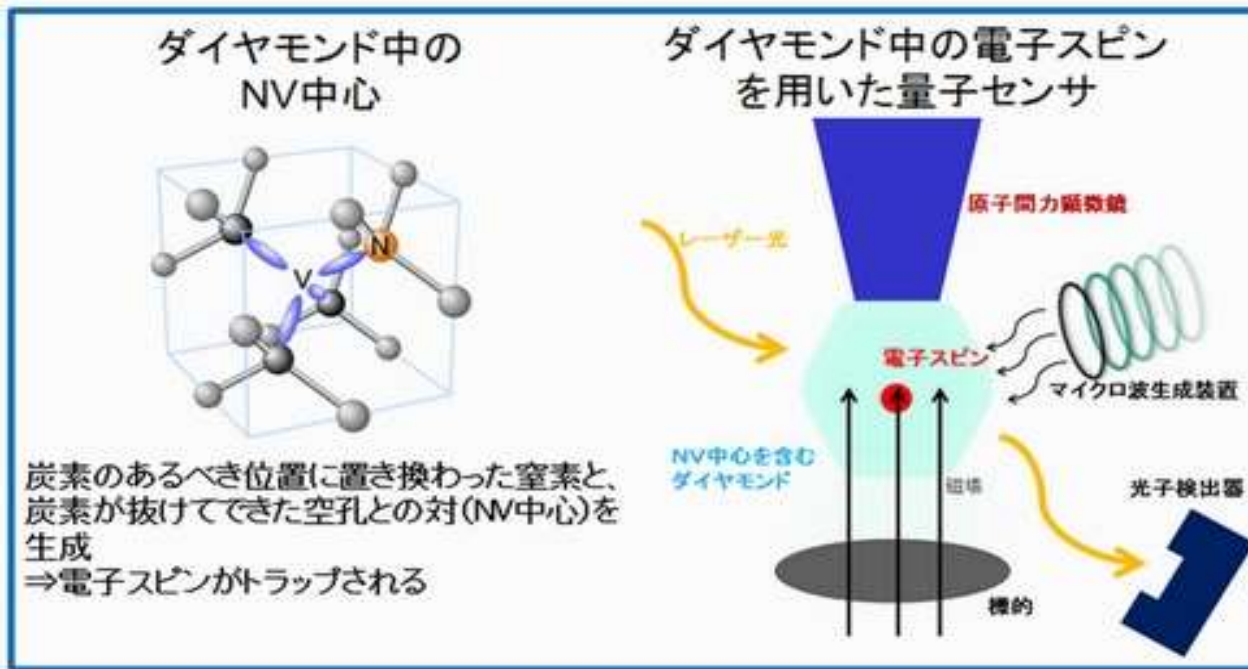
SQUIDの原理

- ◆ SQUID磁束計では試料の磁化を捕らえるために探査コイル(ピックアップコイル)を用いており、このコイルは超伝導線からできている。
- ◆ 探査コイルは試料を走査するが、試料から離れた位置にある2次コイルおよびジョセフソン接合素子を通じて、試料の磁化に相当する電圧信号を測ることができる。

◇液体窒素冷却で動作する、高温超伝導SQUIDセンサーが最近になって出始めている。

NVセンター: 量子センサ実現への期待 (磁場、電場、温度の高感度検出)

ダイヤモンド中の電子スピン
⇒量子センサ実現の候補(磁場、電場、温度の高感度検出)



※ダイヤモンド中のNV中心(センター)とは

- 窒素を取り込んだダイヤモンドでは、ダイヤモンド中に、窒素(N)と空孔(V)がペアとなったNV中心と呼ばれる欠陥が生じる。
- 窒素を取り込んだダイヤモンドでは炭素原子とは結合しない残りの1方向には(本来4方向がある)窒素の孤立電子対が分布するため、この方向の隣接部には炭素が入ることが出来ず、ダイヤモンド中には窒素(N)と空孔(V)がペアとなったNV中心と呼ばれる欠陥が生じる。

※NV中心の性質

- 電子を捕獲(トラップ)して負に帯電し易い。

「空孔に隣接する3炭素から3個の電子」と「窒素から供給された電子対」、「捕獲した電子1つ」の計6電子がNV中心に存在する。この6電子はスピン状態[↑↓][↑↓][↑][↑]でNV中心の位置の軌道に入る。この結果、電子2つ分のスピンの生き残る。

- NV中心は、スピンが持つ量子特有の「重ね合わせ状態」を室温でも長く保持させることができる。

●NV中心のスピン状態は周辺の磁場環境に鋭敏に反応するが、電子のスピン状態は核磁気共鳴(ODMR: optically detected magnetic resonance)法といった光学的手法で検知可能であり、高感度磁気量子センシングが実現できる。

- NV中心は磁場以外、電界、温度、ひずみに対しても高い感度を示すとされている。

新素材の出現

《メタマテリアル(英: meta-material)》

●自然界の物質には無い振る舞いをする人工物質(人間の手で創生された物質)。光を含む電磁波に対して、負の屈折率を持った物質が代表例。

●物質構成

「単位素子」と呼ばれる微小単位が電磁波の波長に比べて充分小さな距離で人為的に等間隔で配置(電磁波に対して均質な媒質として振舞う)。

※メタマテリアルとするために必ず等間隔で配置されなければならない訳ではない。

●その他の例

◇人工誘電体; 金属ワイヤを一定方向に向きをそろえて等間隔に配置した構造体

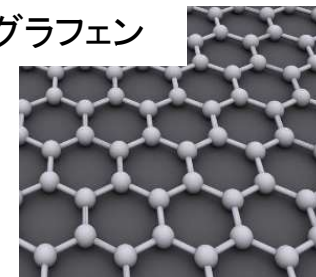
◇人工磁性体; Cの字型に一部を切断した金属円環も金属スプリット・リング共振器と呼ばれる人工磁性体

●応用と期待; 超分解能「スーパーレンズ」の開発と、それに伴う半導体製造技術の微細化、光ファイバー、光通信、光ディスク、遮蔽装置、等。

《メタマテリアル(英: meta-material)》

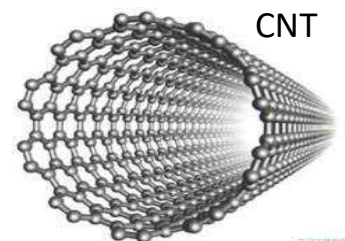
《グラフェン(英: graphene) & カーボンナノチューブ(CNT)》

グラフェン



《グラフェン(英: graphene) & CNT》

●「グラフェン」は炭素原子が蜂の巣状(ハニカム状)に互いに強固に共有結合した単原子シートです。



※グラフェンが3次的に積層した結晶がグラファイト(黒鉛)で、鉛筆の芯にも使われる身近な物質です。層間の結合は弱いファン・デル・ワールス力なので、グラファイトは劈開性に富み、鉛筆で線が描ける。

●NO2ガスセンサへの応用

小さい気体分子を、さらに小さい網で絡め取る。

●CNTは、炭素元素で構成される直径がナノメートルサイズのチューブ状の物質。

●密度はアルミの半分、最大引張強度は鋼の50倍以上、高電流密度耐性は銅の1000倍、熱伝導性は銅の10倍以上。

MEMS,
NEMSを越えて

新しいセンサ材料開発の考え方

量子力学的技術の
利用

考える視点

設計項目

計測の選択性

センサ材料の開発

物性型
として
捉える

●エネルギーバンド構造
・エネルギー準位
・電子のスピン

◎電磁氣的相互作用
◎光学的相互作用
◎量子論的相互作用
等

構造型
として
捉える

●篩(フィルタ)の機能
・穴の大きさ
・穴の形状

◎分子の大きさ
◎分子の形状
◎接触壁との相互作用
等

新しいクロマトグラフィの可能性

センサ材料の機能・性能は
構成元素の配置のさせ方で決まる

混合比でなく
煉瓦の積み方

まとめ

- ◆ 以上、IoT、Society5.0、DX化の時代におけるセンシング技術進展を考える視点として
 - 1) センシング技術適用分野の拡大
 - 2) 新貢献・効用として、生産性向上1.0 ⇒ 生産性向上2.0
 - 3) 見える化の要求とセンスパイア (SENSPIRE) の考え方
 - 4) 今後の方向としての複合計測化と予測技術への展開
 - 5) SUCSの開発とメタデータの重要性
 - 6) 2つのセンシングシーズ：量子センシング系、新センサ材料



ご静聴
有難うございました！

※小林彬略歴

参考

- ①1960.4.～1969.3. 東京工業大学&大学院 学生時代⇒工学博士
計測制御学を学ぶ。博士論文:「計測用空間フィルタとその応用」
- ②1969.4.～2004.3. 東京工業大学工学部&大学院理工学研究科;
助手～教授、定年退職⇒名誉教授・・・計測制御学の教育、研究、指導、学会活動
●空間フィルタ法、帯関数モデル型一対比較法、高度能動計測法としての信号場、等
- ③2004.4.～2007.3. 大学評価学位授与機構客員教授;大学評価問題
- ④2004.4.～2011.3. 帝京平成大学現代健康メディカル学部教授
臨床工学技士の養成及び教育(医療治療機器学)
- ⑤2014.7.～現在 次世代センサ協議会会長
- ⑥1974.4.～1995.3. 日本電子工業振興協会;各委員会の委員・幹事・委員長
- ⑦1982.4.～1997.3. 日本産業用ロボット工業会;調査委員会委員長
人命救助, 消火, 林野火災, 海上油流出, 地震, 風水害, 救急活動, など
災害対応ロボット技術の概念設計
- ⑧1996.9.～2002.8. 第17期&第18期日本学術会議「計測工学専門委員会委員長」;
日本における「計測」の現状を全般的に調査総括し、今後の方針を答申
§ 日本の「計測」分野に広く携わり、多様性が求められる今日その経験を活かしたい