

D-07

## 閉じた空間でのセンサーネットワークによる CO<sub>2</sub> モニタリングとその統計処理による環境因子の相関

### CO<sub>2</sub> monitoring by the sensor network in the closed space and correlation of the environmental parameter by the statistics processing

森本旭紘†

大西克実†

中野秀男†

Akihiro Morimoto

Katsumi Onishi

Hideo Nakano

#### 1. 要約

今日では地球環境問題、とりわけ CO<sub>2</sub> 排出量削減の取り組みについて、様々な分野で議論がされており、その解決の一つとして情報社会の発展に寄与し、未だにその進化を続ける ICT を応用して貢献することが期待されている。改正された省エネ法やビル管理法により、CO<sub>2</sub> 排出量について、ビル・建物の管理者や事業者、そして利用者は、より精度の高い管理と削減を求められるようになってきた。本研究では、ビルなどの閉じた空間に対してセンサーネットワークを用い、CO<sub>2</sub> のモニタリングを行い、与えられた閉じた空間内での環境因子との相関を統計処理により解析することで CO<sub>2</sub> 削減に向けた新たなデバイスを見つけ、省エネに寄与する解決策を探ることを目的とする。

#### 2. はじめに

1997 年 12 月に議決された京都議定書では 2008 年から 2012 年までの期間中に先進国全体の温室効果ガス 6 種類の合計排出量を 1990 年に比べて少なくとも 5%削減することを目標にしている。(日本は 6%減) 排出量削減対象となっていて、環境省において年間排出量などが把握されている物質としては、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)(=一酸化二窒素)、ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)、パーフルオロカーボン類(PFCs)、六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)の 6 種類である。CO<sub>2</sub> を除いた他の物質についても体積あたりでは CO<sub>2</sub> 以上に温暖化を促進させる物質もあるが、やはり排出する総量としては CO<sub>2</sub> が群を抜いて多い。また生活環境下にも直接関わってくる身近な物質として注目されているのはいうまでもない。

このように注目を浴びている CO<sub>2</sub> に対する取り組みは先述したように改正された省エネ法やビル管理法に関わるような企業や公共機関だけではない。大学などの教育機関でも近年取り組まれるようになってきた。例えば東京大学の本郷キャンパスが東京都内における CO<sub>2</sub> の排出負荷が最大の事業所であるという調査結果が出たことに対し、東大グリーン ICT プロジェクト<sup>[1]</sup>を立ち上げ、産学一体となって CO<sub>2</sub> 排出量削減の取り組みを強化しており、その活動が活発である。

そんな CO<sub>2</sub> 排出量削減の取り組みが盛況を見せる一方で 2005 年 5 月に Live E!プロジェクト<sup>[2]</sup>が立ち上がり、超小型センサーを分散させることで今までわからなかった細かい区域での気象観測が可能になり、様々な分野で活

用されている。目新しい話題ではゲリラ豪雨の察知などがその活躍の例である。2008 年 12 月の時点で世界 12 ヶ国に 100 台を越えるセンサーにより、リアルタイムの気象データを取得することが可能になった。

本研究では ICT と Live E!プロジェクトで使用されているようなこの小型で分散型のセンサーをタイアップさせ、環境に対しての有用性を検証してみたい。所謂、都市環境での応用が期待されているセンサーネットワークである。センサーネットワークはその利点として無線でそのコントロールやある種のトリガーを引かせることが可能であるため既存のビルでも大々的な工事が必要なく、改造費用の負担も少なく済むことなど近年注目されている新技術である。

#### 3. CO<sub>2</sub> と地球温暖化

##### 3.1 人口増加と環境問題

18 世紀半ばに始まった産業革命以後の科学技術の進歩に伴い、世界の人口は 10 億人から 60 億人と急激に増加した。地球の定員がオーバーになったその結果、食糧問題、生活の場の拡大、排出物の増加など様々な問題が起こっている。環境問題が抱える分野は広く、大気、水、土壌、河川の汚染、生態系など多分野に及んでいるため複雑な系を作り上げている。環境問題がなかなか解決しない理由はこの多分野に及ぶ複雑な系に加えて世界の国同士の足並みが揃わないことや生活に密接に関係している問題も多いためでもある。また原因の発見が難解であることも言えよう。例えば東アジアの国々は現在でも森林伐採をし、それを輸出して資金に変換している。自国の自然を喪失させていることは承知しているものの、目の前の利益の方が彼らにとっての優先順位としては高いのであろう。全世界が共通してもつ価値観とまではおよそ到達していない。

熱帯林が消えるだけでも食料・燃料の喪失、大気中の CO<sub>2</sub> の残存、保水力の消失、野生動物の絶滅、砂漠化など多くの環境問題に繋がる。産出するエネルギーが産業革命以後、人口増加と相俟って指数的に増加したのに対し、同時に自然の資源が指数的に減少していることを予想するのはそう難しいことではないであろう。

†大阪市立大学大学院創造都市研究科

Graduate School for Creative Cities, Osaka-City University

### 3.2 CO<sub>2</sub>の増加と対策<sup>[3]</sup>

生き物の始祖である植物は太陽のエネルギーを利用して大気中の CO<sub>2</sub> を固定して有機物を生産する。これを生態系の純一次生産というが、この生産された有機物は動物や微生物の生命活動により最終的に CO<sub>2</sub> まで分解され地球全体として安定した炭素循環を形作っている。しかし、この人口増加や科学技術の進歩に伴い、エネルギー消費量の急激な増加により石油や石炭などの化石燃料が大量に燃やされるようになり大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が 1888 年から現在までの約 120 年間に 275ppm から 375ppm にまで上昇したといわれている。2050 年には産業革命前の 2 倍の 550ppm を越えることが予測されている。大気中の CO<sub>2</sub> などのガスは太陽の光は良く通すが地表から出る赤外線は吸収するためエネルギーを地表へ再び放熱する。所謂、温室効果を生むのである。これにより地球全体の熱収支のバランスが崩れ始め、この 100 年間で平均気温が約 0.8 度上昇したといわれている。地球温暖化は我々人間を含めた動植物の生態系や気象や海面の上昇などの自然界に大きな影響を与えることはいままでのない。

2007 年 2 月に国連の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が発行した第 4 次評価報告書 (AR4) によって膨大な量の科学的知見が集約された。因みに AR4 で集約された科学的知見によると 2100 年には平均気温が 1.8-4°C、海面水位は約 38.5cm 上昇するといわれている。

IPCC AR4 によると現在の様々な対策の効果は温暖化を抑制するには全く足りていないとされるが、今後、20-30 年間の GHG 排出量の緩和努力が大きな影響を持つとされており、その手法は多岐に亘る。エネルギーや農業・畜産業など人為起源の二酸化炭素の排出量を抑制する努力、および森林の維持・育成や二酸化炭素回収貯蓄 (CCS) 技術の開発など、二酸化炭素を固定する努力が進められている。また排出権取引などを活用して、世界的に二酸化炭素の排出量削減を促進する努力も行われている。

## 4. センサーネットワーク

### 4.1 センサーネットワークの特徴

今までのセンサーといえば主に機器や製品に組み込まれたものが多く、その殆どが自動化や安全性を向上させるためのものであった。しかし、これからのセンサーは人が持ち歩いたり、身につけて使用したり、また多くの場所に分散配置されたり、必要に応じて自分自身で動き回ったりするようなセンサーまでできるであろうといわれている。そこでセンサーと通信機能を併せ持つ小型のコンピューターを組み合わせることで今までになかったネットワークを構築することが可能になり近年ではこれをセンサーネットワークと呼ばれるようになった。

このセンサーネットワークでは小型の無線通信装置が個々のセンサーに内蔵され、センサー同士が自律的に情報の交換を行い、集めたデータからある種のトリガーを引かせることが可能であるなどその場に応じた対応を可能にすることができる。今まででもネットワークセンシングとして情報のセンシングは存在していたがセンサーネットワークの強みは最終段階のネットワーク部分を無

線にすることにある。有線であった場合、当然ながらセンサーを備えた小型端末 (センサーノード) は他のセンサーノードやサーバと通信ケーブルにより接続されていないといけない。そのため、センサーノードの配置に関する自由度が低くなり、新しくその環境にセンサーノードを追加するにあたって大きな手間が必要となってしまう。また、センサーノード自身がそれぞれ移動するものである場合は、その範囲も狭い範囲に限られてしまうであろう。そこで、最終段階のネットワーク部分を有線ではなく無線にすることで、より自由度が高く、手間のかからない便利なものとなる。

### 4.2 センサーネットワークの可能性

近年の様々な技術の発達により、センサーネットワークの可能性は広まる一方で、その例としては、温度、湿度、音、風速などの環境状態を取得するもの、位置、速度、加速度、高度、姿勢、圧力などを把握するもの、バーコード、IC タグ、RFID タグ、指紋、顔、声紋、静脈などの特定のものや識別するもの、ガス検知、煙、炎、熱、放射線、化学物質などの異常を検知するものなどがある。このようなセンシングを利用することにより、様々なアプリケーションを提供することが出来る。センサーネットワークの応用分野の例としては、施設管理、環境モニタリング、医療、交通、防犯・セキュリティ、防災等が挙げられる。例えば、建造物内にノードを分散配置させて温度や湿度、明るさなどを検知して空調や照明を制御したり、農作地にノードを分散配置させ、温度や湿度、日照量、降雨量、CO<sub>2</sub> 濃度、土壌成分などの気象・環境情報を収集することで農作物を管理したり、作物の病気への早急な対応が可能になる。また小型センサーノードを身に付けることにより血圧や脈拍などの健康状態を自動的に取得し、パソコンでの管理や病院へ情報を送信することにより、高齢者の一日の健康状態の変化の把握や、突発的な体調異常の素早い対応が可能になる。他には、火災や不審者の検知などのホームセキュリティ、人の立ち寄れない場所の状況把握などにも使う事ができる。これらのようなアプリケーションの実現に向けて、現在様々な研究が行われている。

## 5. センサーネットワークを用いた CO<sub>2</sub> 測定実験

### 5.1 通信方式<sup>[4]</sup>

本研究では、CO<sub>2</sub> 濃度と気温を検出できるセンサーである SenseAir 社の aSense (図 3, 図 4) と、それを制御するノート PC を 1 つのセンサーノードとし、複数のノードを無線で接続し、センサーネットワークとする構成を検討した。

aSense は居住環境での取付けを前提に設計された軽量・ローコストのトランスミッターで雰囲気空気中の CO<sub>2</sub> 濃度と温度を測定し、それらの測定データを出力信号に変換してノート PC に送る。

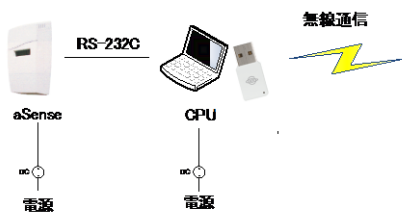


図1 CO<sub>2</sub>測定機器（ノード）

ノード間通信方式は、無線 LAN の通信方式であるアドホックモードを用い、省電力で動作し、LAN 配線等の工事を必要としないものとして設計した。

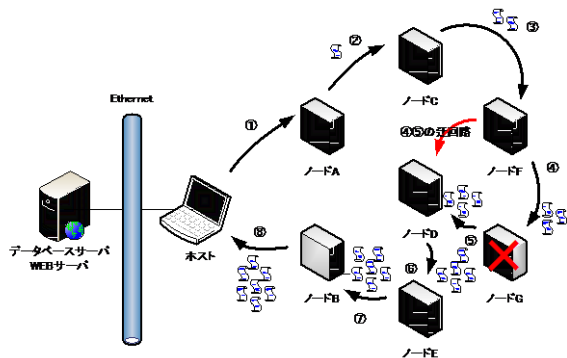


図2 ノード間の通信

ノードより得られるデータをパッケージにして伝達し、通信ルート上に障害が発生した場合は、近隣のノードに対して迂回路を確保し、障害の影響を最小限度に留めるようにする。下記の例の場合は、通常①→②→③→④→⑤→⑥・・・と通信を行うが、ノード G に障害が発生した場合は、ノード F はノード D と通信を行い、データをリレーする。その場合は、①→②→③→④⑤迂回路→⑥・・・のルートを通ることになる。

## 5.2 センサーの紹介と測定原理<sup>[5] [6] [7]</sup>

NDIR (Non Dispersive Infrared Gas Analyzer) 方式を用いた SenseAir 社の aSense (図 3, 図 4) を本研究では使用する。CO<sub>2</sub> 分子のような複数の原子より構成される多原子分子の内部エネルギーには電子エネルギー、振動エネルギー、回転エネルギーを有している。電子エネルギーは分子の軌道電子エネルギー状態を示すもので紫外・可視領域のエネルギーを持つ電磁波の吸収によって観測される。振動エネルギーは分子の振動状態を示すもので赤外領域の電磁波エネルギーに相当し、回転エネルギーは分子の重心軸回りの回転によって決定されるエネルギー状態でありマイクロ波領域のエネルギーに相当する。このうち NDIR では赤外領域の吸収を利用するので、CO<sub>2</sub> 分子の場

合、波長 4.26 ミクロンの赤外線を選択的に吸収する性質を持っているため CO<sub>2</sub> 分子が高濃度で存在するとそれはより強く吸収する事になるわけである。この性質を利用したのが NDIR で、ガス濃度は有名なランベルト・ベールの法則に基づき求められるので次式のようなになる。

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot L \cdot X}$$

- I : CO<sub>2</sub> を通過した後の光の強度
- I<sub>0</sub> : CO<sub>2</sub> を通過する前の光の強度
- α : その波長の光に対する CO<sub>2</sub> の光吸収係数
- L : 光の CO<sub>2</sub> 中の通過長
- X : CO<sub>2</sub> 濃度

参照光の強度を I<sub>0</sub> としてこの式から CO<sub>2</sub> 濃度を求めることになる。



図3 SenseAir 社の aSense<sup>[7]</sup>



図4 aSense の CO<sub>2</sub>Engine<sup>[7]</sup>

### 5.3 実験方法<sup>[8]</sup>

閉じた空間内で空調の流入口と吸気口にそれぞれセンサーを設置し、外気からの流入口に設置したセンサーをブランク装置として使用し、外気と閉じた空間内での生産された CO<sub>2</sub> 量を一定期間計測する。集められたデータはサーバー内に保存していく。また CO<sub>2</sub> 量に関わる人数のカウントや空調性能の評価（空気流量や空調の数など）も同時に行い、その相関を後の統計処理に生かす。

## 6. 統計処理による解析<sup>[9][10]</sup>

### 6.1 適切な統計処理の探索

CO<sub>2</sub> との相関因子を特定するためには幾つかの統計処理を用いて診断する。複数の項目の評価については様々な多変量解析は勿論のこと、SD(Semantic Differential)法やQDA(quantitative descriptive analysis)法などが使用されているが近年では複数の結果に対し、レーダーチャートも数多く用いられている。本研究ではこのレーダーチャートを用いた総合評価にも目を向けてみたい。レーダーチャートはビジュアル的で対象物の特徴を簡潔かつ明瞭に表すことができるが、総合評価には殆ど用いられていない。この点を克服すれば元々明瞭なレーダーチャートが総合評価にも活用できるという有意義な評価システムとしての可能性も見出せるであろう。様々な統計処理を施し、都市環境を評価する上でどのような統計処理が適切であるのかも本研究で探究したい項目の一つである。

### 6.2 CO<sub>2</sub>濃度と環境因子の相関

CO<sub>2</sub>濃度と CO<sub>2</sub>濃度に関わる様々な環境因子の間に何か強い相関が現れ、判別分析法などの評価により、センサーネットワークが都市内部において運用するに値するかどうかの簡易的な判定などができれば、都市内部においてセンサーネットワークを効率よく張り巡らすことが可能であり、ネットワークなどシステム構築に際しても事前にその診断が簡易的に判るため、IT化を図る際のコスト削減にも繋がっていくと考えられる。

主な閉じた空間での環境因子としては簡易的に挙げてみても

- ・温度
  - ・人数（男女比率を含む）
  - ・時間帯（人が CO<sub>2</sub> を多く吐き出す時間帯）
  - ・空調（換気方式、空調の数、流入口や吸気口の数）
- など幾つか挙げられる。

### 6.3 空調性能の評価によるエネルギーの抑制

閉じた空間内での CO<sub>2</sub> 濃度と大きく連動している空調性能を評価することにより、適切な稼動状態を見出せば空調稼動を効率良く制御することができるので、過剰なエネルギーの産出を抑制することが可能になると考えている。

## 7. おわりに

進捗として本稿執筆現在、大阪市立大学キャンパス内においてこの CO<sub>2</sub> 濃度モニタリングの実験を開始し、データをリアルタイムで収集している。

センサーネットワークと小型の分散型センサーとのタイアップは社会全体の動向がセンサーネットワーク社会へ移行することを思えば、おそらく近い将来もっと増加していくと思われる。何か一つのセンシングからそれを解決すべきトリガーを引かすことのできるこのようなセンサーネットワークが発達すれば先述したような様々な恩恵が受けられるようになる。一方でセンサーネットワークに利用される小型の分散型センサーについては電源の確保など課題も残されているが、充電機能の発達や少ない電力で稼動するセンサーの開発、また最新の ICT の研究ではパケットによる電力の送信も考えられているなど一昔前では不可能に近かった課題についても徐々にその解決の糸口が見え始め、CO<sub>2</sub> を取り巻く環境問題についてもセンサーネットワークによる細かな電力の制御により大きく前進する可能性も期待される。また本研究でも取り上げている適切な統計処理により都市環境での CO<sub>2</sub> との相関因子が特定できればセンサーネットワークを運用する上でも有効な鍵となるであろう。

本研究が 2010 年度における中野・大西研究室でのテーマの一つである「センサーネットワークに関する研究」の創始の研究として今後生かされるよう努力したい。

## 参考文献

- [1] グリーン東大工学部プロジェクト, <http://www.gutp.jp/>
- [2] Live E! project, <http://www.live-e.org>
- [3] 武田博清・占部城太郎 編集『地球環境と生態系』（共立出版,2006）
- [4] 小牧省三・間瀬憲一・松江英明・守倉正博 共著『無線 LAN とユビキタスネットワーク』（丸善株式会社,2004）
- [5] 赤岩英夫・柘植 新・角田欣一・原口紘丞 著『分析化学』（丸善, 1991）
- [6] P. W. ATKINS 著『物理化学』（化学同人, 2001）
- [7] SenseAir 社 aSENSE 製品紹介 <http://www.senseair.se/includes/products/asense.php> (2010)
- [8] 環境省 水・大気環境局『環境大気常時監視マニュアル』
- [9] 桶井良幸・桶井貞美 著『図解でわかる多変量解析』（日本実業出版社,2001）
- [10] 池田貞雄・松井敬・富田幸弘・馬場善久 共著『統計学 データから現実をさぐる』（内田老鶴圃,1991）