スマートシティ実現に向けた車載型大気情報センシングシステム

岸野 泰恵[1] 須山 敬之[2] 納谷 太[1] 米澤 拓郎[3] 中澤 仁[3] 徳田 英幸[3]

概要：本稿では，藤沢市のゴミ清掃車に搭載して大気情報を収集するセンシングシステムについて述べる．街中を網羅的な経路で移動するゴミ清掃車にセンシングシステムを搭載すれば，市全体の大気情報を収集できる．現段階では 1 台のゴミ清掃車に試験的にセンシングシステムを搭載している段階であるが，将来的に複数台のゴミ清掃車にセンサを搭載し，時間的空間的連続性を考慮した手法でデータを補間できれば，あたかも市全体に大気情報センサを設置したかのようなデータをアプリケーションで利用できるようになる．本稿では，このような情報提供を目標とした，車載型大気情報センシングシステムの設計と実装，実際のゴミ清掃車に搭載した実験について報告する．

Vehicle-mounted atmospheric sensing system toward smart city

Kishino Yasue[1] Suyama Takayuki[2] Naya Futoshi[1] Yonezawa Takuro[3] Nakazawa jin[3]
Tokuda Hideyuki[3]

1. はじめに

近年，無線通信の技術の発展や各種センシングデバイスの普及により，IoT（Internet of Things，モノのインターネット）が注目を集めている．一方で，インターネット上のコンピュータリソースを用いてユーザにサービスを提供するクラウドコンピューティングが一般的に使われるようになっている．筆者らは，モノのインターネットである IoT をクラウドコンピューティングと融合させ，さまざまなモノも情報源として利用できるようにすることで，街をよりスマートにすることを目的とした ClouT プロジェクト [7] を進めている．図 1 に ClouT プロジェクトの目指すアーキテクチャの概念図を示す．

IoT とは，ユーザが日常生活で使う日用品や，屋外・屋内の建物設備など従来ネットワークに接続されてこなかったさまざまなモノに，センサやアクチュエータを備えたデバイスを取り付けたり埋め込んだりして，インターネット経由でそのセンサ情報を取得したりアクチュエータを制御できるようにする概念である．近年の無線通信デバイスの小型化やセンサやマイコンの省電力化により実現されつつある．

クラウドコンピューティングとは，多くのユーザ端末がネットワークに接続するようになって可能になった，クラウドサーバに接続することであたかも無限の計算リソースと記憶リソースがあるかのように使えるコンピューティング形態である．そのリソースの一つとして IoT デバイスが使えるような基盤を検討することが ClouT プロジェクトの重要な目標の一つとなっている．

この 2 つの技術の融合により，街の中のさまざまなものが IoT デバイスとしてクラウドコンピューティング上で利用可能になることで，街をスマート化し，市民に役に立つサービスを提供し，それによりエネルギー管理や経済発展といった課題に取り組めるようにすることが本プロジェクトの目的である．ClouT プロジェクトは日欧の企業，大学，研究所が連携した日欧共同研究プロジェクトであり，藤沢市や三鷹市，サンタンデール市，ジェノバ市といった

1 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation
2 国際電気通信基礎技術研究所 認知機構研究所
Cognitive Mechanisms Laboratories, Advanced Telecommunications Research Institute International
3 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

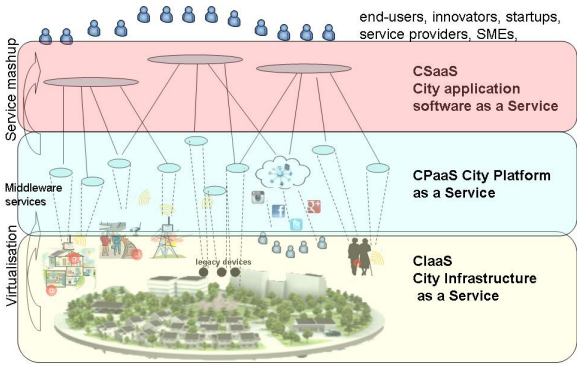


図 1　ClouT プロジェクト [7]

自治体も協力者として参加しているため，これらの自治体で実証実験を行う計画となっている．

筆者らは，ClouT プロジェクトの実証実験の一つとして，藤沢市のゴミ清掃車に大気の状況を測定するセンサを取り付け，市民に情報提供を行ったり，外出支援といったアプリケーションを実現することを計画している．本稿では，市民へのサービス提供を目的として，藤沢市のゴミ清掃車にセンサを搭載して，さまざまな大気の状態をセンシングするシステムについて報告する．

2.　大気情報センシング

大気の状態をセンシングすることは，産業の近代化に伴う大気汚染対策などの観点から重要である．さらに最近では，PM2.5 に関して注意喚起に関する暫定的な指針が決定され濃度が高い日には屋外での活動を控えたり，花粉症の患者は日々の花粉飛散予測を見て外出や洗濯物の屋外干しを控えるなど，市民の日々の生活にも大きな影響を与えている．このため従来から，各自治体では，環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめくん）[9] や環境省花粉観測システム（はなこさん）[10] に代表されるように，数か所の固定的な大気汚染の状態や花粉の飛散状況をセンシングする装置を設置し，大気情報のセンシングを行ってきた．しかし，市民にとっては，限られた数か所の情報だけしか知ることができず，実際に自身のいる局所的な大気の状況を知ることはできなかった．

大気の分布は，それぞれの場所の地形は，発生源からの距離などによって異なってくるため，それぞれの局所的な大気の状態を詳細に知ることができれば，より細かな対策をとったり，安心して生活を送ることができる．大気情報をセンシングするセンサを各個人の家に設置すれば詳細な情報を得ることはできるが，そういったセンサは高価であるため，各個人の家に設置することはできない．そこで本研究では，街中を走り回るゴミ清掃車に大気情報をセンシングするセンサを取り付けてデータを収集するシステムの

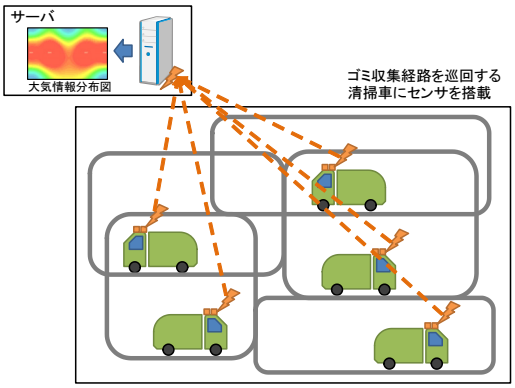


図 2　ゴミ清掃車を用いた大気情報センシングのイメージ

研究開発を行っている．

3.　ゴミ収集業務と大気情報センシング

ゴミ収集業務では，清掃車は定期的に同じ経路をあらかじめ決められたスケジュールでゴミを収集しながら移動する．自治体のサービスとしてすべての住民からゴミを収集する必要があるため，住民がいる場所をすべて網羅する経路が設計される．このため，ゴミ清掃車に大気の状態を計測するセンサを取り付けてデータを収集すれば，ゴミ収集の頻度で，自治体全域の大気の状態をセンシングすることが可能となる．藤沢市では，ゴミ清掃車は平日は割り当てられた数か所の区域をゴミの種類（燃えるゴミ，プラスチックゴミなど）を変えながら，収集に回る．資源ゴミ等一部のゴミに関しては外部委託の業者が収集するため，藤沢市の清掃車が収集に行かない曜日もある．

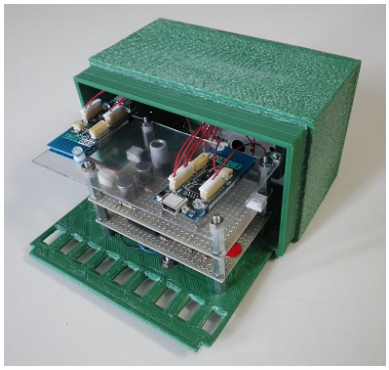
車載型のセンシングシステムを開発すれば，網羅的な経路を通る車に搭載することで，より細かな情報を市民に提供できるようになると考えられる．図 2 にイメージ図を示す．今回の実証実験では，ゴミ清掃車にセンサを搭載する計画となっているため，日に一度しか巡回しないが，同じように街中を網羅的に移動して回る車としては，宅配便や郵便の配達車，市の広報車や，パトカーなど何種類かの車がある．また，大気の状況には，地理的な相関性があると考えられるため，日に一度収集した全体的な傾向を元に大気汚染物質広域監視システムなどから取得した固定センサの値を用いてデータを補完することも考えられる．藤沢市内には 5 か所の測定点がある．

4.　大気情報センシングシステム

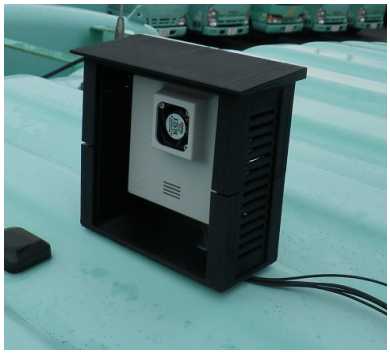
4.1　センサ

センシングするセンサの種類は以下の 10 種類とした．

- 温度湿度センサ（センシリオン SHT71）
- 照度センサ（ローム BH1710FVC）
- 一酸化炭素（CO）センサ（フィガロ TGS2442）
- オゾン（O_3）センサ（SGX センサテック MICS-2614）
- 二酸化窒素（NO_2）センサ（SGX センサテック MICS-



(a)：大気センサケース（上段にセンサノード，中央段に空気の汚れセンサと一酸化炭素センサ，下段にオゾンセンサと二酸化窒素センサ，奥にほこりセンサを備える）



(b)：花粉センサケース（撮影のため前面のスリットを外している）

図 3　ゴミ清掃車に搭載したセンサケース

2714）

- ほこりセンサ（シャープ GP2Y1010AU0F）
- 花粉センサ（神栄テクノロジー PS2）
- 空気の汚れセンサ（フィガロ TGS2600）
- 空気の汚れセンサ（フィガロ TGS2602）

一般的なセンシング項目として温度，湿度，照度の各センサの他には，大気汚染になりうる項目の中からセンサのコストや入手可能性を検討して一酸化炭素，オゾン，二酸化窒素の各センサを選択した．これらのセンサは，ClouT プロジェクトで共同研究を行っている欧州側のメンバーが以前行っていた Smart Santander プロジェクト [3] と同じ（あるいは後継の）センサを選択した．今後サンタンデール市と藤沢市で大気情報の比較を行うことも可能である．

花粉センサ以降は今回のセンシングで新たに選定したセンサである．花粉センサは市民に詳細な花粉分布マップを提供できれば，大変有益であると考え，花粉センサの中では比較的入手しやすい神栄テクノロジの PS2 を選択した．空気の汚れセンサは，エタノールやアンモニア，硫化水素などを検知するセンサであり，煙草や調理臭に反応する．街中をセンシングする清掃車に取り付けることで，悪臭などを検出できないか試すことは意味があると考えて 2 つの種類のセンサを選択した．

4.2　センサのハードウェアとケーシング

ゴミ清掃車の外側にセンサを取り付けるため，センサは以下の要件を満たすように設置する必要がある．

- 長期間安定して動作すること．
- 雨風と日々の洗浄に耐えられること．
- 外気に十分に触れられること．
- 清掃車に容易に取り付けられること．
- メンテナンスが容易であること．

センサを制御し，センシングを行うセンサノードには，これまでに筆者らが開発したセンサノードを用いた．このセンサノードは，これまでに 2 年以上屋内の環境センシングに用い，半年間ビニールハウスのセンシングなどで利用し，氷点下になることもあったが，特に耐久性に問題なく使用してきたものである [4], [6]．センサノードのモジュールには TWE-001 を用いた．TWE-001 にはアナログデジタル変換（ADC）ポートが 3 ポートしかないが，出力がアナログであるセンサが多かったため 2 台のセンサノードを用いてセンサを制御する．

特に検討を要したのは，ケースの設計である．通気性と耐水性を考慮した結果，百葉箱を参考に図 3 のようなケースを作成した．このケースは 3D プリンタで出力して作成した．スリットの内側はファンのスポンジ状フィルタで水滴が直接センサにかからないようにしている．さらに底面には排水穴を設け，万が一ケース内に水がたまった際に速やかに排水されるような設計とした．センサケースの底面には，磁石を備え，磁石で車体に接着する形で，清掃車の運転席の上に設置することとした．車体の前後さまざまな位置を検討したが，運転やゴミ収集作業の邪魔にならず，万が一外れた際にゴミに紛れ込まない箇所を検討した結果運転席の上に設置することとした．

4.3　センサノードのソフトウェア

センサを制御するソフトウェアにはこれまでに筆者らが開発した CIL 仮想マシン（CILIX）[6] を用いた．前節で述べたセンシング実験でもこの仮想マシンを用いた．このため，この仮想マシンに関しても長期間安定して動作することは確認済みである．実際のセンシングのソフトウェアは C#を用いて Windows 上で開発した．ただし，ほこりセンサのみ仮想マシン上のプログラムでは扱えないミリ秒以下の ON/OFF 制御が必要だったため，仮想マシンにほこりセンサ制御機能を付け加えた．

ほこりセンサはほこりを感知した時にピーク的にセンサの値が高くなる性質をもつため，20 ミリ秒毎にセンサの値を記録し，10 秒毎の最大値を出力とした．他のセンサはほこりセンサ程急激に変化が起こるとは考えにくいため，30 秒毎にセンシングを行うこととした．花粉センサは粒子を検出する度に値を出力するセンサであるため，すべての出力を記録する．

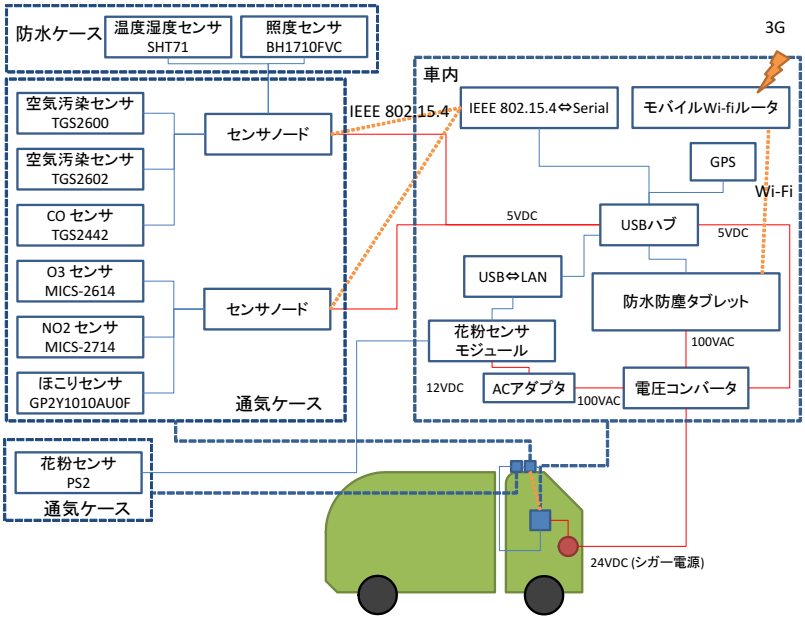


図 4　システム構成図

図 5　センサデータ確認インタフェース

図 6　センサを設置したゴミ清掃車（一部画像を加工.）

4.4　システム構成

図 4 に作成したシステム構成図を示す．花粉センサ，NO2 センサ，SO2 センサ，CO センサ，オゾンセンサ，ほこりセンサ，空気の汚れセンサ，温度センサ，湿度センサ，照度センサの各センサを搭載する．これらのセンサの制御とデータの取得には，これまでに筆者らが開発してきたセンサノードを利用した．センサデータは車内に設置した Windows タブレットに集約して GPS データと共に携帯電話回線でサーバに送信する．サーバ側のソフトウェアは受信したセンサデータをデータベースに保存する．

Windows タブレットのソフトウェアは C#で作成した．ゴミ清掃車の電源は不安定なため，いったん認識したデバイスも途中で認識されなくなる可能性がある．そのためソフトウェアにはデバイスが認識されなくても，定期的に各 USB デバイスへ認識を試みる機能を組み込んだ．また，システムの動作の確認と，実験に協力いただいた清掃員の方に現在のセンサ値を提示するため，図 5 のようなインタフェースを用意した．

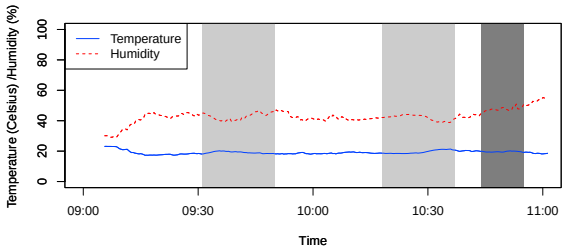
5.　実験

2014 年 3 月末に大気情報センシングシステムを 1 台をゴミ清掃車に試験的に搭載し，データを収集する実験を開始した．図 6 に実際にセンサを設置したゴミ清掃車の写真を示す．

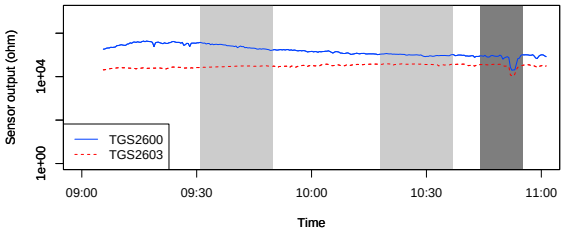
今回の実験で利用したゴミ清掃車は 2 週間のうちに 9 日ゴミ収集業務を行う．ゴミ清掃車の稼働時間は，平日の午前と午後にそれぞれ 2 時間程度であるため，システムの電源を毎日朝投入し，夕方には停止する運用を取ることにした．この操作は Windows タブレットの電源ボタンのみで行えるようにシステムを設定し，清掃員の方に日々の電源投入とシャットダウンをお願いした．

5.1　実験結果

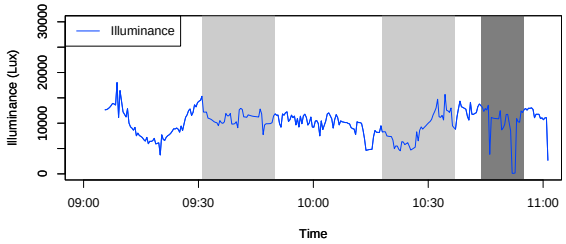
実験結果の一例として 2014 年 3 月 26 日のゴミ清掃車の走行ログを図 7 に，収集したセンサデータをセンシングした結果を図 8 に示す．図 8 の各グラフは横軸が時間であり，縦軸は (a) が温度と湿度，(b) が照度，(c) が一酸化炭素と



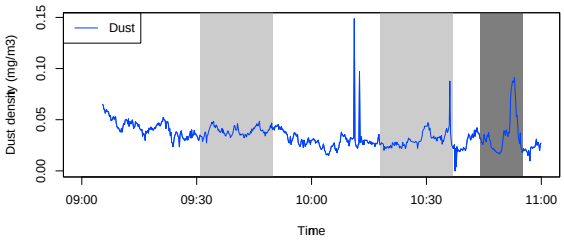
(a) 気温，湿度データ



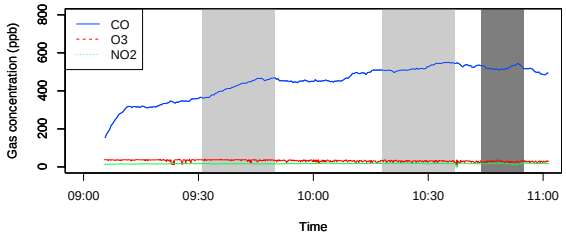
(d) 空気の汚れセンサのデータ



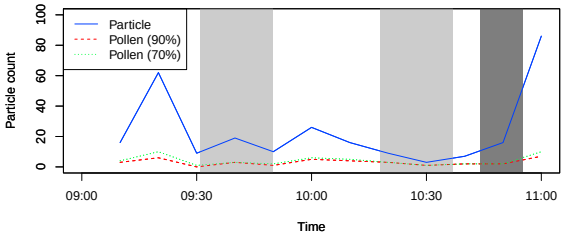
(b) 照度データ



(e) ほこりセンサのデータ



(c) 一酸化炭素，オゾン，二酸化窒素データ



(f) 花粉センサのデータ

図 8　センサデータ（2014 年 3 月 26 日，明るいグレーがゴミ収集作業中，濃いグレーが焼却場敷地内にいた時間を示す．）

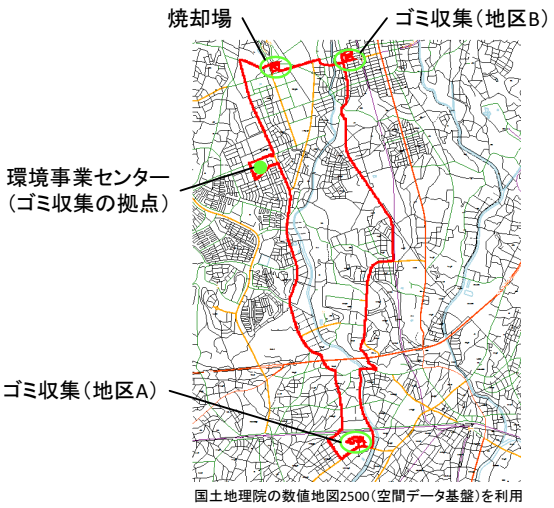


図 7　ゴミ清掃車の走行ログ（2014 年 3 月 26 日）

オゾンと二酸化窒素，(d) が空気の汚れセンサの出力値（対数軸），(e) がほこりセンサ，(f) が花粉の粒子数となっている．空気の汚れセンサの出力は，メタンやエタノール，トルエンなどの値を総合して空気の汚れを出力するセンサであり，単純な物理値に変換することができなかったため，センサの出力をそのままグラフにしている．出力が低いほど空気が汚れていることを意味する．(c) のセンサの出力値は，いずれも 100ppb や 0ppb の際の値との相対値を出力するようになっているため，藤沢市の 2013 年 3 月の月間の平均値や最小値を参考に変換しているが，今後さらに検証する必要がある．花粉センサの単位はセンサ中を通過した粒子の個数であり，30 分毎の合計値を表示している．花粉センサの単位の分母は公開されていないが，公的な機関が公表している花粉飛散量と相関があることは確認できている．

ゴミ清掃車は環境事業センターを出発して藤沢市を反時計回りに走行し，地区 A と地区 B の 2 か所でプラスチックゴミを収集し，焼却場へゴミを運び込む．運転中に何度かほこりを検出し，さらに地区 B のゴミ収集でもほこりを検出している．さらにゴミ焼却場では，照度が下がり建物内に入ったと思われる部分で空気の汚れセンサが反応して

いるため，建物内の空気がゴミの影響で汚れていることが予想される．また，この日は午後から雨が降り出す天気であったため，ゆっくりと湿度が上昇している．このようにゴミ清掃車に搭載したセンサからそれぞれのセンサデータが収集できることが確認できた．

現在（2014 年 5 月）も実験を継続中であるが，さまざまなトラブルのために継続的に安定してセンシングが行える状況にはいたっておらず，改良を重ねている途中である．特に筆者らがこれまでに経験してきたフィールド環境におけるセンシングでは，センシングシステムはいったん電源を接続したら数週間連続して動作し続けるが，今回のゴミ清掃車に搭載したシステムでは，日々電源が朝投入され，夕方には停止される．そのためこまでに経験のなかった，電源投入時に毎回 Windows タブレットのシリアルポートが入れ替わる問題や，不安定な電源のためにセンサノードが停止し復帰しない，などの問題が発生している．前者はソフトウェアの改良で解決し，後者は当初センサノードに接続していた電池を取り外すことで毎日電源を入れなおして停止しても復帰できるようにすることで解決したが，その他にも電源ノイズなど改良すべき点が残っている状況である．

6. 関連研究

参加型センシングの研究分野では，車の走行情報などを集約して，運転者に役に立つ情報を提供しようとするさまざまな研究がおこなわれている [2], [5]．これらのシステムでは，車や自転車に搭載した GPS を用いて，渋滞などの走行情報を収集する．本研究では走行情報そのものではなく，市民がさまざまなサービスで使えるようなセンサ情報を車に搭載したセンサで収集することを目的としている．

車に搭載したセンサでさまざまな情報を収集しようとする研究例としては，自転車に窒素酸化物センサを搭載して大気の状態を収集しようとする研究 [1] や，放射線量をバスに搭載したセンサで計測する試験例 [8] がある．これに対して本研究では，さまざまな種類のセンサ情報を，多数の車に搭載したセンサから収集し，補間を行うことで，あたかもすべての箇所にセンサが設置されているかのようにデータを扱えることを目標としている．

7. 議論

7.1 センサの仮想化

ClouT プロジェクトでは，最終的にはこのセンサをクラウドコンピューティングに接続したセンサリソースの一つとして扱うことを想定している．複数台のゴミ清掃車にセンサを搭載することができれば，藤沢市全体の大気情報を日に一度はセンシングできるため，その際の分布と藤沢市内に 5 か所設置された固定局の値を合わせてクリギングなどの手法でデータを補間することで，あたかも藤沢市内のあらゆる場所にセンサが設置されているかのようにセンサデータを利用できるようになると考えられる．今後，安定的にセンシングできるようになり次第，センサを搭載するゴミ清掃車の数を増やし，センサの仮想化に取り組む予定である．

7.2 センサの種類

約 1 ヶ月実験を行ったところ，藤沢市は海に近いためか，ほこりセンサには錆が出てきた．これまでに筆者らが行ったセンシングの実験フィールドは山の中が多かったため，塩害は予想していなかったが，今後耐久性を確認していきたい．一方で，今後は塩害をセンシングして市民に洗濯物情報を提供することも検討している．

また，清掃員の方からは PM2.5 の値を気にする声も挙がっているため，今回は入手できなかったために搭載しなかったが，PM2.5 センサを搭載することも検討している．そのほかに市民に役に立つ情報としては UV センサを搭載して，日焼け情報を提供することも可能である．

8. まとめ

本稿では，車載型の大気情報を多大気情報センシングシステムについて述べ，その設計や実装と，藤沢市のゴミ清掃車に搭載して行った実験の結果について報告した．1 台のゴミ清掃車に試験的にセンシングシステムを搭載して実験を行ったところ，データが収集できることは確認できたが，システムの安定性の面で難点があり，現在改良を行っているところである．

今後，清掃車に搭載したセンサで収集されたデータだけでなく，他のセンシングシステムで収集されたデータや，Web 上に発信されている様々な情報を組み合わせてサービスを構築できるよう，これらの情報源をサービスとして相互互換性のある形で仮想化し，クラウドコンピューティング上のサービスとして利用できるようにすることで ClouT プロジェクトを推進していく予定である．

謝辞

本研究の一部は，独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤」によるものです．また，実験に協力いただいた藤沢市役所環境事業センターの皆様に感謝いたします．

参考文献

[1] 中村隆幸, 荒川豊, 山本淳, 柏木啓一郎, 東島由佳, 南裕也, 中村元紀, 松尾真人, ”ユビキタスデータ共有機構 uTupleSpace の提案とフィールド実験への適用評価,” 信学会和文誌 B Vol. J95-B No. 11 pp. 1414–1426, Nov. 2012

[2] 斉藤裕樹, 菅生啓示, 間博人, テープウィロージャナポンニワット, 戸辺義人, ”sBike:参加型センシングを志向し

たモバイルセンシングによる自転車走行状態収集・共有機構," 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 2, pp. 770–782, Feb. 2012.

[3] Sanchez, L., Gutierrez, V., Galache, J.A., Sotres, P., Santana, J.R., Casanueva, J., and Munoz, L., "SmartSantander: Experimentation and service provision in the smart city," the 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2013), pp.1–6, June 2013.

[4] 須山敬之, 納谷太, 柳沢豊, "センサネットワークによるビニールハウス環境センシング," マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, pp. 938–944, July 2013.

[5] 植原啓介, "プローブ情報システム：車載センサを活用した環境情報の取得," 情報処理, Vo. 51, No. 9, pp. 1144–1149, Sep. 2010.

[6] 柳沢豊, 須山敬之, 寺田努, 塚本昌彦, "小型無線センサノード用仮想マシン CILIX の適用事例," 情報処理学会研究報告 ユビキタスコンピューティングシステム, 2013-UBI-37(23), pp. 1–8, Mar. 2013.

[7] ClouT プロジェクト, http://clout-project.eu/ .

[8] GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA, http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/kurama/ .

[9] 環境省大気汚染物質広域監視システム, http://soramame.taiki.go.jp/ .

[10] 環境省花粉観測システム, http://kafun.taiki.go.jp/ .