

CO₂センサーにより室内でのCOVID-19の感染リスクを低減

HICHAM RIFFI, Infineon Technologies

住宅やオフィスビルの一般的な空気交換率では病原体が何時間も室内に留まるため、室内環境が健康保護に重要な役割を果たします。そのため、新鮮な空気の供給量を増やすことが推奨されます。空気の質を監視、制御するために、インフィニオンの新製品XENSIV™ PAS CO₂のような革新的なCO₂センサーでは、高精度でコスト効率が高く、省スペースなソリューションを提供します。

アメリカ合衆国環境保護庁 (EPA) などの最新の統計によると、人々はほぼ90%の時間を室内で過ごしており、室内における一部の汚染物質の濃度は、屋外における代表的な濃度の2~5倍になることが多いそうです。CO₂濃度は、空気の質を示す重要な指標です。今から約140年も前に、マックス フォン ペッテンコーファーが二酸化炭素濃度の研究を行い、現在の空気の質に関する規制の基礎を築いたことは注目に値します。建物内のCO₂濃度が高くなると、室内の人にとって快適ではなくなります。風通しの悪い部屋では、CO₂濃度は急速に上昇します。たとえば、約4m²の空間に1人でいると、わずか45分でCO₂濃度が500ppm (0.05%) から1,000ppm (0.1%) 以上にまで上昇します。このレベルになると、無臭、無色のガスが頭痛や眠気、集中力の低下などを引き起こし、生産性の低下を招くことが多いと言われています。2,000ppm (0.2%) を超えると、人間の認知能力にまで影響を及ぼし、さらに高い濃度レベルでは、健康への大きなリスクがあるとされています (図1)。

しかし、室内のCO₂濃度に関連した健康リスクは他にもあります。呼気中のCO₂が多いと、エアロゾルの数も増えます。エアロゾル濃度が高いと、その部屋にいる他の人たちの感染リスクが高まります。特にCOVID-19の時代には、オフィスや学校、お店などにおいて、エアロゾルへの対応が重要になります。コロナウイルスに感染した人が咳をしたり、声を出したり、くしゃみをしたりと、飛沫やエアロゾルからなるスプレーが発生し、それが室内の空気に浸透して広がっていきます。論文「Aerosol transmission of SARS-CoV-2」^[2]では、複数の研究者が、換気が不十分な、あるいは換気されていない室内空間では、COVID-19のエアロゾル感染の可能性が高まることを示しています。換気が不十分だと、ウイルスの長距離空気感染や日和見感染につながる可能性があります。ベルリン工科大学の研究^[3]では、住宅やオフィスビルの一般的な空気交換率では病原体が何時間も室内に留まるため、室内環境が健康保護に重要な役割を果たすことが明らかになりました (図2)。沈降速度と空気の入替わりプロセスにはかなりの時間がかかります。そのため、新鮮な空気の供給量を増やすことが推奨されます。空気の質を監視、制御するために、インフィニオンの新製品XENSIV™ PAS CO₂ (図3) のような革新的なCO₂センサーでは、高精度でコスト効率が高く、省スペースなソリューションを提供します。これにより、室内の空気の質を最適化し、より健康的で生産性の高い室内環境を実現します。

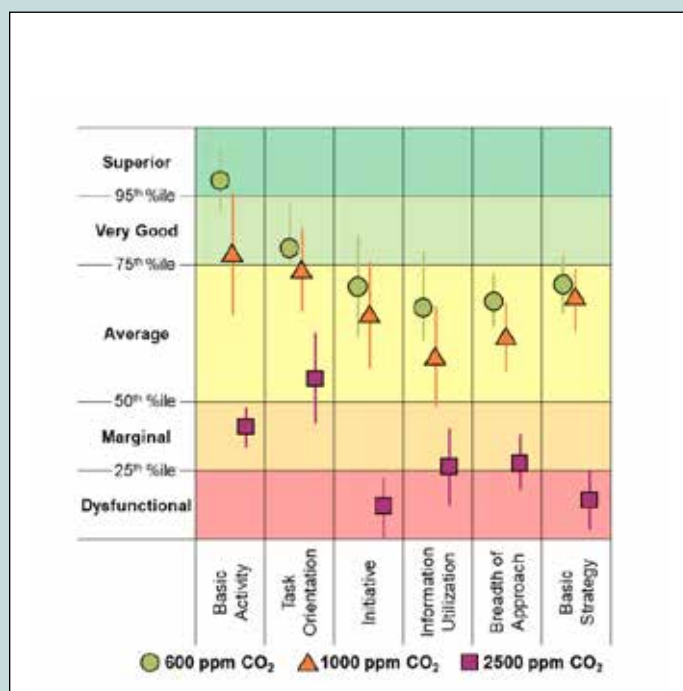


図1: CO₂が2000ppmを超えると、認知機能に大きな影響を与えるため重要である

CO₂センサーにより室内でのCOVID-19の感染リスクを低減

コロナウイルスの感染拡大時、授業やオフィスワークではエアロゾルと感染のリスクが懸念されます。部屋の中に大勢の人がいると、CO₂ (二酸化炭素) を含む呼気がかなりの量になります。ドイツの連邦環境庁やASHRAE (米国暖房冷凍空調学会) は、コロナウイルス発生はかなり前に勧告を発表しています。ちなみに、外気のCO₂濃度は400ppmです。このように、教室やオフィスだけでなく、ジムやバー、レストランなどの屋内の公共スペースにCO₂測定器を設置することは、ウイルスの拡散を防ぐという意味があります。もちろん、空気中のエアロゾルを測定し、過度に高くなった場合には警報を鳴らすことも可能です。しかし、そうした測定器は複雑で高価です。一方、安価でコンパクトなCO₂測定器は、空気中のCO₂濃度の高さ、つまりエアロゾルの濃度を警告できるようになっています。これにより、コロナウイルスの感染リスクが高まっていることを示せるようになりました。

信頼性の高いCO₂モニタリングは、COVID-19に関して重要なだけでなく、室内で過ごす際の総合的な健康状態や生産性についても有益です。CO₂センサーが二酸化炭素の濃度を測定することで、室内の空気の状態を知ることができます(図4)。しかし、周囲の空気の状態を向上させ、その結果、室内の快適性や人々の生産性を高めるためには、より信頼性が高く、手頃な価格のCO₂センサーが必要です。現在、2つの選択肢があります。高精度なものの大型で高価なセンサー/デバイス、または小型なものの精度が低く、適切な制御に適さない概算値を提供するセンサーです。

それに対し、XENSIV™ PAS CO₂センサーは、幅広い用途に対応し、コンパクトなサイズで正確な測定結果を提供します。

空気制御によるエネルギーとコストの削減

換気システムは、人の福利厚生に役立つだけではありません。住宅や商業ビルの空気を効果的にコントロールすることで、エネルギーを節約し、同時にそれに伴うコストやCO₂排出量を削減することができます。換気システムのアップグレードは、一般家庭においてもメリットがあります。米国の家庭では、1年間に平均約2,000ドルのエネルギーを消費しています。適切なアップグレードを行えば、年間約400ドルの節約になるという試算があります。しかし、信頼性の高いCO₂測定に基づいて空気の状態をコントロールすることは、他の分野でもメリットがあります。学校、病院、レストラン、店舗などは、必要なエネルギーが多く、費用もかさみます。米国などの国では毎年400億ドル以上を、すべての建物へのエネルギー供給に費やしています。また、アメリカ国内で発電された電力の約74%が使用されており、これは同国の総エネルギー支出の約40%にも及びます(図5)。デマンド制御換気(DCV)と呼ばれる、換気も制御する効果的なビルオートメーションを導入すれば、米国のビルの電力消費量は最大で20%削減でき、年間約800億ドルのエネルギーコストを削減することができます^[4]。最初から建物を適切に計画、建設、運用し、デマンド制御換気(DCV)などを導入することで、建物のエネルギー効率、HVAC(暖房/換気/空調)のエネルギー使用量を最大30%^[5]改善することができます。これにより、全体のエネルギー需要を削減でき、エネルギー不足という地球規模の問題をも解決します。また、他方では環境への脅威を軽減することもできます。

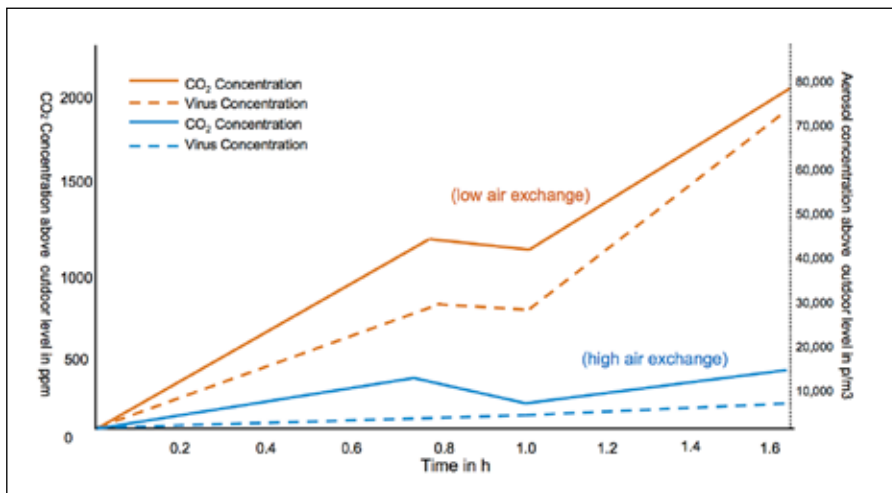


図2: 休憩を挟んで2回の授業を行った場合の、教室内のCO₂濃度(左軸)とエアロゾル濃度(右軸)の増加量



図3: The XENSIV™ PAS CO₂ センサーのサイズはわずか13.8 × 14 × 7.5 mm

典型的な例を挙げると、平均的な広さが約7,000m²の米国の学校^[6]では、年間のHVACエネルギー消費量が約5.6US\$/m²となっています^[7]。DCVによるエネルギー効率を20%と仮定すると、年間約8,000US\$の節約になります。これは80,000kWhの節約(10セント/kWhとした場合)となり、35トンのCO₂排出削減に相当します。これは、1,600本の木を植えた森林の1年間のCO₂消費量に相当します。

CO₂センサーのアプリケーション例

CO₂センサーで測定されたデータは、さまざまな用途に利用できます。DCVでは、HVACシステムがこの値を利用して、対象アプリケーションの要件に応じて、室内の混合気を外気の混合気に合わせて、自動的に調整します。これにより、室内の二酸化炭素濃度を一定の値に保つことができます。例えば、米国ASHRAE規格の「住宅における換気と許容室内空気質」では、1,000ppm以下となっています。健康面

や感染症リスクの軽減など、CO₂センサーの利点を考えると、教室、オフィス、ジム、バーなどで、空気質の低下を検知するCO₂センサーが広く採用されることが期待できます。CO₂信号機と呼ばれるものが一例で、CO₂レベルが高くなるとCO₂濃度が高いことを居住者に警告し、部屋の換気を促す明確な信号となります。こうしたセンサーは、データインテリジェンスとリモートアクセス向けのクラウドソリューションに接続されたセンサーネットワーク上に編成することができます。

CO₂センサーには他にも様々な潜在的な用途があります。小型のCO₂センサーは、空気清浄機やサーモスタットなどのスマートホームアシスタントやIoT機器に適しています。将来的には、乳幼児のモニタリング、食品の品質管理、フィットネストラッキング、農業など、他の用途にも応用できる可能性があります。

CO₂センサーにより室内でのCOVID-19の感染リスクを低減

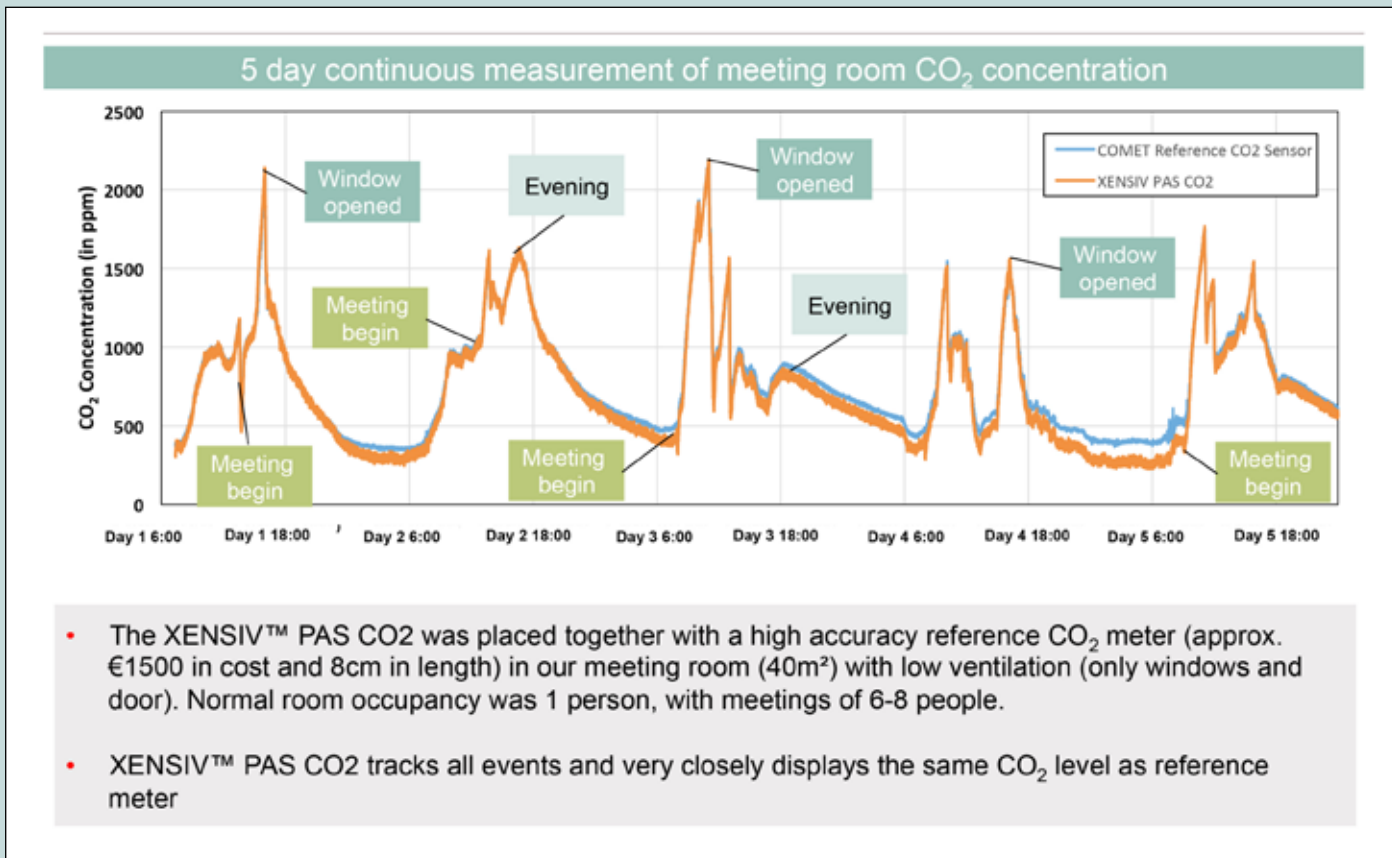


図4: インフィニオンの一会議室におけるCO₂濃度の推移

既存のCO₂センサーソリューションの限界

NDIRセンサー(非分散型赤外線吸収式センサー)は、最近ではビルディングオートメーションによく使われています。赤外線光源、サンプルチャンバー、光学フィルター、参照用および吸収用の赤外線検出器で構成されているため、比較的大型で高価です。真の意味で正確なCO₂測定が可能です。物理的サイズが大きいため統合が難しく、小型のIoT機器やスマートホームコンポーネントへの搭載には適していません。

室内のさまざまな汚染物質は、eCO₂センサーと呼ばれるセンサーでも検知できますが、NDIRセンサーとは異なり、実際に測定はしません。その代わりに、アルゴリズムを用いてCO₂換算値を算出します。CO₂負荷を増大させる原因となる人の数など、多くの仮定に基づいて推定値を提供します。この方法では適切なタイミングで空気の質が改善されるとは限らず、空調システムが不必要に多くのエネルギーを消費することになります。現在のところ、正確で真のCO₂測定が可能、かつ小型で費用対効果の高いソリューションは、市場に存在しません。

光音響分光法を用いたCO₂センサー

インフィニオンは、MEMS技術における経験と業界トップのポジションを活かし、光音響分光法(PAS)(図6)を用いた新しいCO₂センサーの開発に成功しました。PAS方式は、1880年にアレクサンダーグラハムベルが発見した光音響効果を利用しています。インフィニオンは、センサーの設計からシステムの実装に至るまで、PAS技術に関する包括的な特許ポートフォリオを保有し、継続的に拡大しています。この方法は、気体の分子が特定の波長の光しか吸収しないという事実を利用しています。例えば、二酸化炭素の場合、その波長は4.2μmです。

この波長の光、すなわちエネルギーを、光学フィルターを備えた赤外線源を介して、気体に次々と供給します。急激な加熱と冷却により、熱膨張と収縮が起こり、圧力変化が発生します。この圧力変化は、低周波用に最適化された音響検出器で記録されます。この信号を評価して、CO₂の量を判断します。信号が強ければ強いほど、高いCO₂濃度を表します。

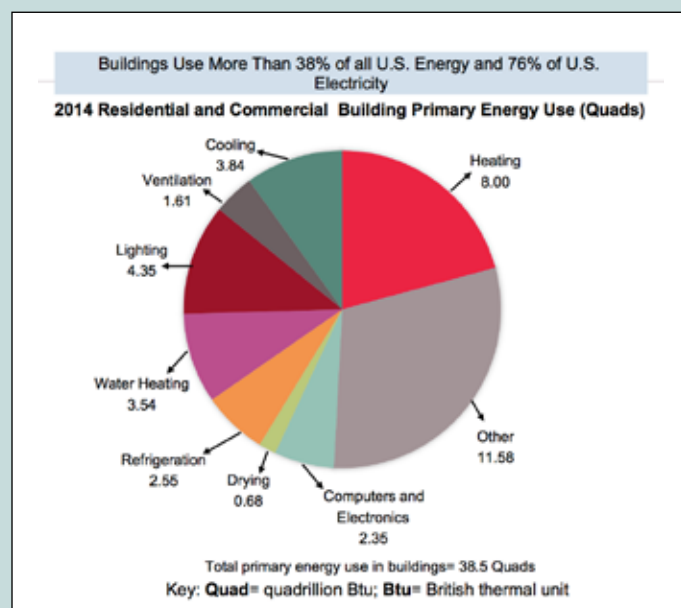


図5: 欧米の総エネルギー消費量の40%を占める建築エネルギー

CO₂センサーにより室内でのCOVID-19の感染リスクを低減

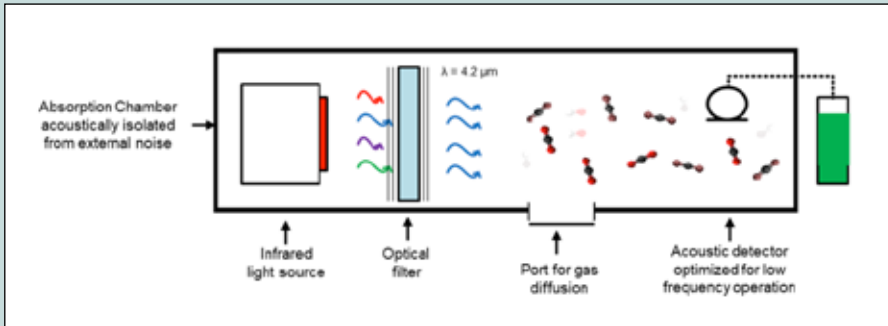


図 6: 光音響分光法 (PAS) の原理 (出典: DOE, U. [2015]. Chapter 5: Increasing Efficiency of Building Systems and Technologies. Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities, 143-181.)

高感度MEMS音響検出器は圧力センサーとしても機能するため、これを検出器として使用することで、大幅な小型化を実現しました。

インフィニオンのCO₂センサーは、光音響変換器と検出器、赤外線源、光学フィルターを小型PCBに実装したものです。本センサーは、オンボードの信号処理、高度なアルゴリズム、および赤外線源を動作させるためのMOSFETにマイクロコントローラーを使用しています。

PASを利用したCO₂センサーを開発する上での大きなチャレンジは、検出器の性能を限界まで高め、システムノイズを最小限に抑えること、つまり、MEMS検出器を外部ノイズから隔離し、チャンバー内のCO₂分子による圧力変化のみを検出することでした。吸収チャンバーは、正確なCO₂検知情報を提供するために外部ノイズから音響的に隔離されています。そうでなければCO₂検知の機能が著しく阻害されてしまいます。インフィニオンは音響学とその関連アプリケーションにおける長年の経験を活かしてこのソリューションを開発しました。MEMSマイクの応答のモデリング、特許取得済みの拡散ポートの遮音、そしてモデリング結果を検証するための迅速な試作により、最適なシステム設計が可能になりました。

CO₂センサーの利点

インフィニオンは、センサーとMEMSマイクにおける最先端の能力を活用して、CO₂の破壊的な環境センシング技術を開発しました。

表1：CO ₂ センサーPASの主な仕様	
動作範囲	400 ppm ~ 10,000 ppm
精度	400ppm~5,000ppmの間で読み取り値の±30ppm+3%
製品寿命	1分間に1度の計測で10年
動作温度	0°C ~ 50°C
相対湿度	0% ~ 85% (結露なし)
インターフェースと補償	I ² C、UART、PWM
電源電圧	エミッタ用12.0V、その他の部品用3.3V
平均消費電力	11mW (1分間に1度の計測)
パッケージサイズ	13.8 × 14 × 7.5 mm

XENSIV™ PAS CO₂ (表1) は、光音響分光法 (PAS) の原理を応用した本格的なCO₂センサーです。このセンサーには、インフィニオンの高感度MEMSマイク XENSIV™ が使用されており、外部からのノイズを拾うことなく、センサーキャビティ内のCO₂分子から発生する圧力変化を検出します。出力として、CO₂濃度をppmで表示します。このデータは、わずかな圧力変動でも高品質な結果を示します。したがって、少量のガスで十分に正確な測定を行うことができるため、サンプルチャンバーのサイズに適した小型設計を行うことができます。

XENSIV™ XENSIV™ PAS CO₂は、一般的なNDIRセンサーに比べて大きさが1/4 (14mm x 13.8mm x 7.5mm)、重さ1/3 (2g) という非常に小さなサイズ

を実現しているため、お客様のシステムにおいて75%以上の省スペース化を実現します。さらに、市販のNDIRセンサーの大半は、大量生産の組立基準に対応していないコネクタが付属しており、製造工程に時間がかかるという問題があります。それに対して、XENSIV™ PAS CO₂は、大量自動生産を念頭に置いて設計/提供 (テープ&リール) されており、SMT (表面実装) にも対応できるため、組み立てが容易で、お客様のシステムに素早く組み込むことができます。そのため本センサーは、超コンパクトなデザインでありながら高い精度を実現しており、省エネや主要なスマートビルディング規格 (LEED、WELLなど) への準拠を可能にするHVAC制御 (DCV) アプリケーションに最適な製品となっています。

製品提供と今後

すべてのセンサー部品は、高い品質基準に基づいて社内設計、開発されています。インフィニオンは、今後もPAS技術の開発を進め、さらなる小型化とコストの最適化を図るとともに、産業用および民生用の他のCO₂センシングアプリケーションへの性能適合を目指します。また、PAS技術は、他のガスにも応用できる可能性があります。さらに、インフィニオンとサイプレスのエコシステムを活用して、センシング、プロセッシング、アクチュエーター、コネクティングを含むフルシステムの製品を市場に提供していきます。

新しいPAS CO₂センサーのプロトタイプは、すでにお客様の主要アプリケーションにおいてテスト・検証されています。現在、PAS CO₂評価キットのサンプル提供を行っています。また、PAS CO₂評価ボード (PAS CO₂評価ボード、ArduinoベースのShield2Goボード、Adafruit featherベースのPAS CO₂ウィングボード、インフィニオン/サイプレスエコシステムベース)、ソフトウェアライブラリ、アプリケーションノートを含む包括的なドキュメントを近日中に提供し、お客様をサポートし、PAS CO₂センサーの市場投入を加速させる予定です。PAS CO₂センサーは、室内の空気環境を改善することで、私たちの健康にも大きく貢献します。

REFERENCES

- [1] U.S. Environmental Protection Agency. 1989. Report to Congress on indoor air quality: Volume 2. EPA/400/1-89/001C. Washington, DC.
- [2] Li, Yuguo, et al.; Aerosol transmission of SARS-CoV-2; medRxiv; <https://bit.ly/34MbyhC>
- [3] Hartmann, Anne; Kriegel, Martin; Risk assessment of aerosols loaded with virus based on CO₂-concentration; Tech-nische Universität Berlin; <https://bit.ly/33SAlmj>
- [4] <https://bit.ly/3IT93RQ>
- [5] DOE, U. (2015). An assessment of energy technologies and research opportunities. Quadrennial Technology Review. United States Department of Energy.
- [6] <https://bit.ly/2SSu6HM>
DataTrends_K12Schools_20150129.pdf
- [7] Typical energy cost is \$1.30/ft² (in 2007).