

大空間における気流動実測 (e. 性能評価としての環境実測)

正会員 ○森太郎*1
 正会員 小西崇永*2
 正会員 西澤繁樹*3
 正会員 絵内正道*4
 正会員 羽山広文*5

大空間 実測 気流 自由浮遊気球

1 概要

著者らは、北海道において、数例の大規模空間の環境実測を行ってきた。環境実測を行っていく上で、最も苦労したのが、大規模空間の気流動の実測である。本報告では、アトリウムと体育館の実測を例に挙げ、「なぜ気流動の実測を行わなければならないのか」、「気流動の実測から見出されたものはなにか」、「今後どのように気流動の実測を行っていけばよいのか」について考えていきたい。

2 なぜ実測するのか

a. 大空間の空調はトラブルが発生しやすい？

そもそも、大空間を普通の居住空間並みに空調することは不可能である。しかし、多くの設計図書には冷房時(27℃, 50%)、暖房時(22℃, 50%)とか書かれているのである。大空間であったら、27℃くらいとか、27℃~32℃(場所によって違います)と書かれていてもいいような気がする。大空間の場合には、小さな空間に比べ「空間容積/壁面積」の値が大きくなる。これは、通常、壁(天井, 床を含む)に設置される空調機器が一台が担当する容積が大きいことを意味する。空気という人間の意のままにはなかなか動いてくれない物を用いて、空調機器の効果を遠方まで伝えなければならない、ということである。したがって多くのトラブルが発生する。大空間ならではのトラブルの主な原因は、

1. 室内なので緩速気流場⇒分布に偏りが発生しやすい。
2. 分布を発生させないために、攪拌したい⇒大空間を攪拌しようとすると大きなエネルギーロスであるし、そもそも、攪拌は音や気流の面で空間のクオリティを悪化させる。と考えられるのではないか、これらの原因に対する設計側の解答は、分布をある程度認めながら、必要な場所のケアをする以外にはないであろう。

b. なぜ測定するのか？

上記のような理由から、設計者は、大空間において、居住域空調を選択する人が多い。しかし、建物を運用していくのは建物の管理者である。二者の間にはどう頑張っても乖離があり、実際には、「全体空調が可能なシステムを用いて居住域空調を行えるようにしてあり、黙っていれば全体空調が行われる」のが現状だろう。そこに、「測る」ことの意味があるのではないか。設計者の考えたシステムが実際に活用できることを管理者に示し、また、うまく行かない場合には、その原因の把握と改善策を提示するのである。しかし、言うは易し、行うは難しである。

c. 特に気流測定を行う意味は

著者らが気流動の実測を行う場合、その第一の目的は、温度分布や気流分布の成因や性状の把握である。温度や湿度の分布と気流の分布は互いにインタラクティブな関係にある。した

がって、建築空間において何れかひとつを知ればいいという関係にはない。気流の分布を知ることによって、大空間内の温度や湿度の分布状況とその原因をより詳細に解析することができるようになる。

第二に建築空間内の気流の流速・流向を知ることができれば、気流が環境や人体にどのような影響を与えているかが分かってくる。特に、大空間では障害物が少なく卓越した気流動が発生しやすい。そのような空間では、ダウンドラフトなどが直接的に滞在者や利用者の快適性に悪影響を与えるようになる。

3 大空間用の気流動測定手法の変遷

ここでは、筆者らの利用してきた気流動測定手法の概要とその変遷について説明する。

a. 気象観測用気球の動揺¹⁾

筆者らは大空間の温度分布測定に、Heを充填した気象観測用気球を利用してきた。その動揺を用いて、気流の風向、強さを知らうとする手法である。

b. 白煙を用いる方法

気流の分布をみる手法としては一般的であるが、筆者らはほとんど使用したことがない(大規模市場の測定等に、この方法を使用した経験はある)。その理由としては、すぐに拡散してしまい、その後しばらく何もできないことに加え、準備(火災報知器の関係等)の煩雑さに比べ、あまり有用なデータが取得できないこともその理由である。

c. 風速計

定量的なデータを所得したい時には最も頼りになる方法である。しかし、大空間で3次元的な分布を知らうとするのは、測定点数、時間の問題、また、設置場所の問題等からほとんど不可能である。

d. 自由浮遊気球²⁾

筆者らが開発した方法で手前味噌ではあるが、大空間の気流動を簡易に可視化、定量化できる手法である。開発の段階によって以下のような実測方法があった。

- 1) 自由浮遊気球を空間内に放出し、1台のビデオカメラでその様子を撮影、その後、ビデオ画面上にフィルムを貼り、一定時間ごとの気球の動きをフィルム上にプロットしていく方法。
- 2) 自由浮遊気球を空間内に放出し、2台のデジタルビデオカメラでその様子を撮影、その後、コンピューターの画面上で、それぞれのカメラで撮影した画像内の気球の位置を特定(画像上をクリック)し、その位置から気球の三次元座標を得る方法。
- 3) 上記2)のクリックしていく作業を自動化した方法。

写真1に実測風景(2台のデジタルビデオカメラを用いて気球を撮影している際の1台目のカメラから得た画像)を示す。画像内には、気球と、もう1台のカメラが写っている。また、図1に、この測定手法のキャリブレーションを行った際に得た

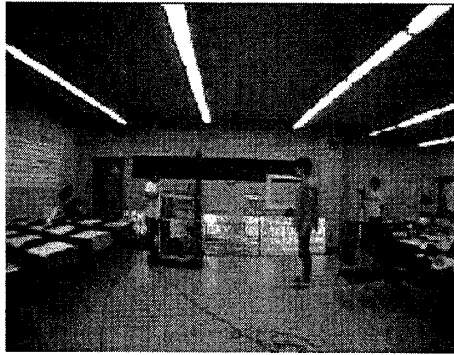


写真1 自由浮遊気球の実測風景

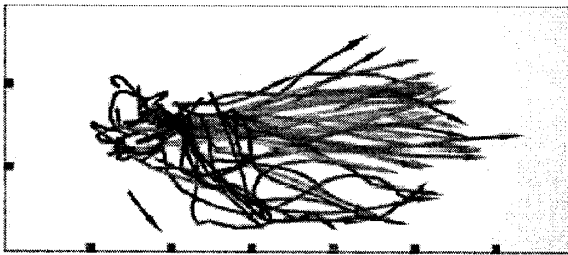


図1 自由浮遊気球の実測結果例

流線図（気球の軌跡）を示す。この流線図はファン周辺の気流場に気球を放出して、その軌跡を観測したものである。ファンを中心として、速い空気の流が徐々に拡大していく様子がわかる。これらの手法は、単に流線が描けるだけでなく、一応、バグの移動速度から気流速を定量化できることがメリットである。但し、簡易とはいっても、かなりの時間がかかる。また、カメラの精度上の問題もある（遠く離れた自由浮遊気球では1PIXELあたりの距離が大きくなる。その結果、気流速の精度が落ちる）。そのため、他の手法（風速計）と組み合わせて使用している。

4 大空間の測定例

a. 大規模アトリウムFの測定³⁾

この節では、著者らが行った気流動の実測から、特徴的な4件の概要と結果について報告する。まず、Fは大規模商業施設の中核として計画されたアトリウムである。竣工は1994年である。アトリウムの気積が100,000[m³]もある非常に大規模な空間で多雪地域では、未だ、これ以上の規模のアトリウムは作られていない。空調に関しては、アトリウムの底面のレベルを居住域空調するとともに、上下二箇所自然換気口が設置された。

実測の主な目的は、自然換気口の効果を温度分布、湿度分布、気流分布から把握することである。気流動の実測には自由浮遊気球（おもちゃの魚型の風船）を初めて利用した。ヘリウムの量によって、中立浮力に調整した自由浮遊気球を、アトリウム内に放出し、その浮遊する様子をビデオカメラによって撮影し、後日、テレビ画面にOHPフィルムを貼って、その動きをトレースする手法を用いた。この実測時には、1台のビデオカメラで撮影を行っており、また、非常に大規模な空間であったため、

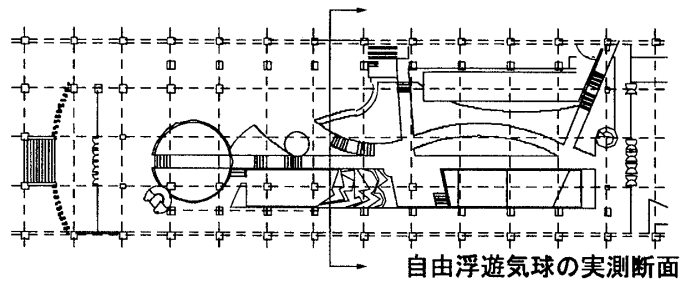


図2 自由浮遊気球の実測結果例

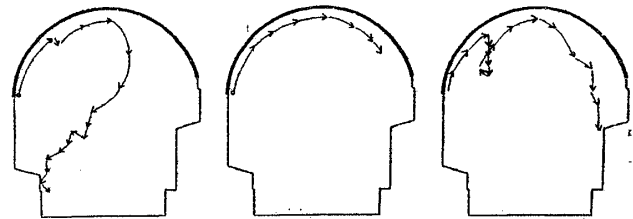


図3 Fアトリウム—気流動の実測結果例

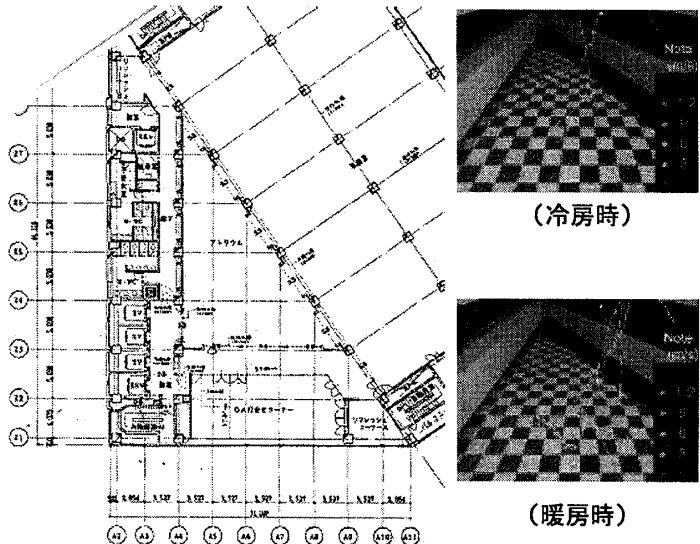


図4 Dアトリウムの平面図と実測結果例

風船の位置（風船の座標）を得ることができなかった（奥行きがわからないだけではなく、撮影した画像内に気球を見つけることができないものも多くあった。正直な話、気流動の実測は失敗した）。報告書を書く際には、気球を飛ばしながらとっていたメモが非常に役立つ。

b. 光井戸型アトリウムDの測定⁴⁾

Dは1997年3月に竣工した、ある建設会社の本社屋である。内部のアトリウムの形状は3Fから10Fまで吹き抜けた三角柱状の光井戸タイプで床面積は230[m²]、高さは35[m]である。また、4Fから10Fまではアトリウムとオフィス間に仕切りのないオープンタイプのアトリウムになっている。

このアトリウムは、オフィス側を正圧とし、オフィスとアトリウムを挟んで反対の北側から第三種換気を行う設計になっている。またトップライト部分（最頂部）には夏季の温気排出の目的で、冬期にはダンパーを切り替え、ガラス面に空気を吹き付けて結露を防止

する目的で送風機を設けている。

このアトリウムの気流動の実測には自由浮遊気球を用いた。自由浮遊気球をアトリウム内に放出し(数個の気球を複数回放出した)、2台のデジタルビデオカメラで撮影、実測後、研究室にて三次元のデータに変換した。

図に冷房時、暖房時のアトリウム底部でのバグの動きを示す。3Fの上部に居住域用の空調吹き出し口があり、アトリウムの下部はその影響を強く受けている。したがってアトリウム内の空気の流れは4F以下とそれ以上では大きく異なる。

冷房時のアトリウムの底部では冷房空気の積層と、吹き出た冷房空気によって生成される下向きの流れが生じているので、冷房期に3Fでバグを放出しても、冷房空気の下向きの流れに押されて4F以上には上がらない。しかし4F以上の空間ではこのような卓越した流れはほとんど観察できなかった。これらの気流の速度は上記の冷房空気によって起こされる下向きの流れの場合、多少速く、0.5~1.0[m/s]の速度となっているが、それ以外の場所ではバグの速度は遅く、ほとんどの場合が0.3[m/s]以下である。

冬期におけるアトリウムの気流動を見ると、アトリウム3F上部の吹き出し口から暖房空気が上昇流となっている様子、またその流れに誘引される流れの様子がわかる。アトリウムの気流環境は冷房期の場合と同様に、アトリウム3F上部の空調吹き出しの影響が強い。暖房時は、吹き出し口から出た空気は上向きに上昇し、そこから上の空間全体を攪拌している。アトリウム底部の居住域には暖房空気が到達していないため冷気が溜まっている。暖房の上昇気流の速度は1[m/s]を超える気流も観察できる。夏期に比べて気流動が大きく、アトリウム全体が攪

拌されている様子が分かる。

このアトリウムの底面は、冬季になるとなかなか温度が上がらなかった。気流動の実測を行った結果、暖房空気が居住域に到達する前に上昇してしまっていることがわかり、アトリウム底面の居住域に対する暖房の配慮不足を把握することができた。これは将来の設計の際に有用なフィードバックと考えることができるのではないかと。

c. S 高校体育館¹⁾

S 高校体育館は、1994年の断熱改修時に、道立高校の体育館としては初めて本格的な床暖房が採用された体育館である。この実測は、断熱改修と床暖房という当時あまり採用されていない設備更新が、他の同規模の体育館と比較して、どのような環境を作るのかを確認するために行われ、その一環として自由浮遊気球(Fアトリウムと同じ手法で)を用いた、気流動の実測を行った。

図5に定常状態に達した後の自由浮遊気球の動き(5秒毎のバグの動きを○で表している。)を示す。壁近傍でダウンドラフト(断熱性能の低い窓が原因)が生じている様子と空間中央部で上昇流が生じている様子がわかる。どちらの動きも非常にゆっくりとしていて安定した気流環境にあるのがわかる。実測時の多くの道立高校の体育館は屋根、壁ともに断熱が十分でなかった。そのため、他の体育館の暖房は、使用時に限定した空気方式または高温の輻射暖房で、局所的に大量のエネルギーが放出されるため、場所によっては3[m/s]を超えるような気流動が観測されていた。断熱改修の効果とそれによって可能になった低温の輻射暖房のもたらす静穏な気流環境を実測によって証明することができた。

d. 大規模体育館H⁶⁾

H 体育館は、平成12年4月に竣工した。国際競技大会や全国規模の競技大会などに加え、各種イベントにも対応できる総合的な施設である。本体育館の中核を占めるメインアリーナの規模は、およそ南北80[m]、東西100[m]、最高点26[m]、最大収容人数は約10000[人]である。空調システムは、送風量50000[m³/h]×4台の空調機による可変風量方式を採用し、給気はダクトを通して上部のノズルから吹き出し、還気は周壁面下部のスリットを通り床下空間経由で空調機に戻しているまたアリーナ上部には、冬期の暖房立ち上がり効果を高め、大空間の温度分布を均一化する目的でサーキュレーションファン(本報告では以下C-Fanと称する)が設置されている。

上記のように、この体育館は、屋内競技を行う体育館としては、北海道最大規模でS高校の体育館等で得られた経験を元に厚い屋根断熱が施された。実測は、体育館の温熱環境やエネルギーの使用状況を把握するために行われ、その一環として気流動の実測を自由浮遊気球と風速計の併用によって行った。

ここでは測定結果から、特に、C-Fanの運転の有無が空間の気流動に与える影響について紹介する。図7に実測から得た高さ別の気流速分布を示す。C-Fan停止させているときは、抽出データの大部分が0.15[m/s]以下と極めて安定した気流環境を実現していることがわかる。床面に沿った水平方向の流れが確認される他は無風に近い状態である。この体育館は、屋根の断

表1 S 高校体育館, 建物概要	
構造	規模 : S 造, 905.5 [m ²]
屋根仕様	木毛セメント板 25 [mm] + EPS40 [mm]
壁仕様	ウレタン 25 [mm] + GW24K100 [mm]
設備仕様	ゴムチップパネル温水床暖房

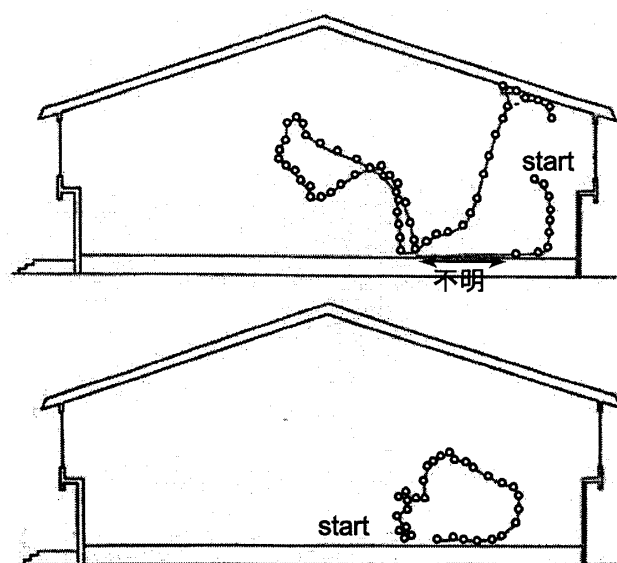


図5 S 高校体育館の実測結果例

熱性能が非常によく、外界の影響を完全に遮断しているため、空調空気と空間内の温度差が小さく、温度差による空気の流れがあまり生じないためと考えられる。この程度であれば開催される各種競技には影響が出ないものと考えられる。

一方C-Fanを運転した場合には、高さとは無関係に空気の垂直・水平動を確認できる。C-Fanを運転すると空間内の空気は万遍なく攪拌されることが分かる。1[m/s]を超えるデータも確認できる。観測中の目視でもC-Fanの直下で、バグが勢いよく降下することが確認され、下向きの気流を感じた。

設計者は、なぜC-fanを設置したのだろうか？実は、このことについては、しっかりとした確認を行っていないのだが、おそらく、安全保障のためと考えられる。たくさんの観客が入って、暖房や冷房が間に合わない場合、空間内を強力に攪拌することによって目的の環境を実現させようと考えたのではないかと。実のところ設計者もこのファンをどのように使うのかというビジョンは持っていなかったような気がする。実測を行った結果、少なくとも競技を行っている際には、C-Fanを作動させるのは避けたほうがよい、ということがわかった。一方、冬季の暖房立ち上げには効果を発揮することが確認された。実測を行った結果、体育館の管理者との話し合いの中で、冬季に大規模な搬入の直後等に使用するべきという提案をすることができた。

5 まとめ

本報告では、大空間の環境実測において、気流動の実測を行う意義について述べ、また、著者らの行ってきた気流動の実測について紹介した。著者らの経験では、他の環境実測に比べ、気流動の実測は非常に手間がかかる。しかし、監視データ等のように簡単に得られるデータにはない情報も含んでおり、実測された環境の形成要因やトラブルの解決法を気流動の実測から見出すこともしばしばある。今後も機会があれば、実施していきたい。

今後の気流動の実測については、建物の運用とのかかわりをさらに持つことが必要と考えている。数値シミュレーションが簡単に行われるようになり、設備システムが高度化してきている。一方で、建物の管理、運営は計画時に予測できなかったことが次々に起こるのが普通である。高度な設備システムは予測不可能な事柄に弱いような気がしている。せつかくの高級な設備システムの能力を引き出すためにも、実測を行うことが必要と考えている。同時に、実測データから様々な発見をするためには、経験が必要である。大学の研究室等で学生のOJTとして実測を行うことは彼らのために有用な経験となると考えている。

【参考文献】

- 1) 永井他, 「屋内体育館の暖房設備と上下温度分布」, 日本建築学会北海道支部研究報告集 N068, 1995/3, pp369-373
- 2) 森他「重力に平衡した自由浮遊バグによる気流動の可視化」, 日本建築学会技術報告集第7号, pp87-94
- 3) 武道他, 「積雪寒冷都市型アトリウムの熱環境その4浮遊気球で観察した気流性状と数値解析の比較検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集D, 1994/9, pp645-646

*1 釧路工業高等専門学校 助教授

*2 関電工

*3 独立行政法人建築研究所

*4 北海道大学大学院工学研究科 教授

*5 北海道大学大学院工学研究科 助教授

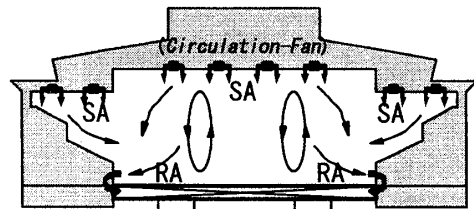
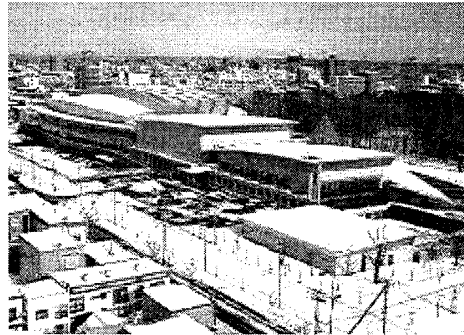
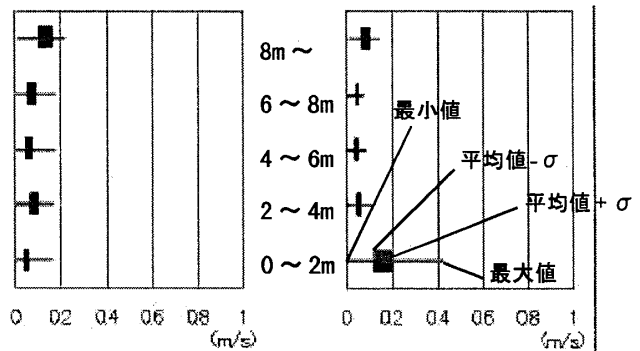
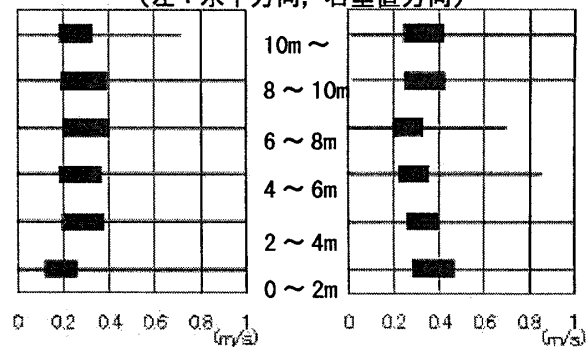


図6 大規模体育館の写真と設備概要



C-Fan停止時の高さ別気流速

(左: 水平方向, 右垂直方向)



C-Fan稼動時の高さ別気流速

(左: 水平方向, 右垂直方向)

図7 大規模体育館の気流動実測結果

- 4) 森他, 「光井戸型アトリウムの熱・気流環境調査その1冷房時の環境」など, 空気調和衛生工学会北海道支部第32回学術講演論文集, pp135-138
- 5) 森他, 「北海道立総合体育センターの温熱環境調査結果(夏・冬)」など, 空気調和衛生工学会北海道支部第34回学術講演論文集, 2000/3, pp37-40

*1 Kushiro national college of technology

*2 Kandenko co.Ltd

*3 Building research institute

*4 Graduate school of eng., Hokkaido university

*5 Graduate school of eng., Hokkaido university