

換気効率の現場測定法
ANSI / ASHRAE 129 : 換気効率の測定

正会員 伊藤一秀 (東京工芸大学)

1. 序

本報は ANSI / ASHRAE standard 129-1997 の換気効率測定法(Measuring Air- Change Effectiveness)の概要を紹介するものである^{文1)}。

ASHRAE 129 は機械換気される建築空間を対象として、呼吸域レベルにおける空気交換効率 (Air-Change Effectiveness)の測定法を定めており、ASHRAE Standard 62 “ventilation for Acceptable Indoor Air Quality” で定義される空気交換効率の現場測定法に関する情報を補完するものである。

2. ASHRAE standard 129 の構成

表 1 に示すように、ASHRAE 129 は 9 つの章と 8 つの Appendix (A~H)より構成される。

本論では、表 1 の ASHRAE 129 の構成に従って空気交換効率の測定法を概説することとし、必要に応じて Appendix に言及する。

3. Air- Change Effectiveness の定義

ASHRAE 129 の換気効率である空気交換効率(Air Change Effectiveness)は(1)式のように定義される。

$$E = \tau_n / A_{avg} \quad (1)$$

ここで、 E は空気交換効率、 τ_n は名目換気時間、 A_{avg} は測定対象空間内の呼吸域における平均空気齢を示す。ASHRAE 129 では空気齢を基にした換気効率のみを対象としている。また、ここでは、室内での汚染質発生の不均一性は考慮されていない。

(1)式は時間の概念により示されているが、同式を平均濃度の概念を用いて表現すれば、(2)式となる。

$$E = C_p / C_a \quad (2)$$

ここで、 C_p は完全混合を仮定した場合の汚染質濃度、 C_a は実際の汚染質混合状態での呼吸域平均汚染質濃度、を示す。取り入れ外気の汚染質濃度は 0 と仮定している。(2)式で示される空気交換効率は HASS 102 で定義される規準化居住域濃度(この場合は呼吸域)の逆数に対応している^{文2)}。

ASHRAE 129 では、(1)式中で用いられている呼吸

表 1 ANSI / ASHRAE standard 129 目次

1章	目的
2章	適用範囲
3章	用語の説明
4章	許容可能な測定対象空間の基準
5章	器具、設備
6章	空気交換効率測定の手順
7章	計算法
8章	測定対象空間及び HVAC システムに関する情報のレポート
9章	参考文献
Appendix	
A.	参考文献一覧
B.	ANSI / ASHRAE Standard 62-1989 における空気交換効率との関係
C.	トレーサガス濃度を基にした空気齢測定のための厳密式
D.	測定間隔が十分でない場合の一連の濃度測定における平均トレーサガス濃度の定義
E.	測定の不確かさ
F.	濃度減衰法もしくはステップアップ法の選択
G.	トレーサガス注入量の評価
H.	サンプリングシステムにおける無視可能な漏気量確定の為の推奨手順

域平均空気齢 A_{avg} をトレーサガス法により測定する方法を詳細に示している。呼吸域平均空気齢 A_{avg} は、以下に示すトレーサガス減衰法、若しくは Step-up 法による濃度測定結果を基に算出される。

3-1. トレーサガス減衰法

トレーサガス減衰法では、以下に示す(3)式により平均空気齢が算出される^{注1)}。

$$A_i = (t_{stop} - t_{start}) C_{i,avg} / C_i(t_{start}) \quad (3)$$

ここで、 A_i は i 点における空気齢、 t_{stop} は最終的な濃度測定時刻、 t_{start} はトレーサガスの注入を中止し濃度減衰を開始した時刻、 $C_{i,avg}$ は i 点における測定時間内(t_{start} から t_{stop} まで)の時間平均濃度、 $C_i(t_{start})$ は i 点における時刻 t_{start} 時点での濃度を示す。

3-2. トレーサガス Step-up 法

トレーサガス Step-up 法では、以下に示す(4)式によ

り平均空気齢が算出される。

$$A_i = (t_{end} - t_{start}) \left\{ 1 - \left[\frac{C_{avg}}{C(t_{end})} \right] \right\} \quad (4)$$

ここで、 t_{end} は最終的な濃度測定時刻(定常に達した時刻)、 t_{start} はトレーサガスの注入を開始した時刻、 $C(t_{end})$ は i 点における時刻 t_{end} 時点での濃度を示す。

3-3. 名目換気時間

(1)式で定義される空気交換効率を算出する為には平均空気齢の他、名目換気時間を測定する必要がある。名目換気時間は(5)式により算出される。

$$\tau_n = \frac{\sum_m (Q_{ex,m} A_{ex,m})}{\sum_m Q_{ex,m}} \quad (5)$$

ここで、 m は各排気口の番号、 $Q_{ex,m}$ は m 番の排気口における排気流量、 $A_{ex,m}$ は m 番の排気口における平均空気齢を示す。名目換気時間は測定対象室の容積 V と吹出口からの換気量 Q_{in} が測定されれば、(6)式により算出することも可能である。

$$\tau_n = V / Q_{in} \quad (6)$$

上記(3)~(5)式中に現れる時間、濃度、換気量等は後述する手順に従い、現場測定される。

4. 換気効率測定法の詳細

ASHRAE 129 では、測定対象室が満たすべき基準、使用する測定・分析装置の精度、濃度測定手順、及び測定結果をまとめる報告書の書き方に至るまで詳細に推奨基準が定められている。以下に、項目別に手順・基準を箇条書きで紹介する。

4-1. 測定対象室が満たすべき基準

再現性があり正確な空気交換効率の測定を行うことが可能な測定対象空間(スペースもしくは建築物)の基準として以下の項目が挙げられている。

- 測定対象空間はその全体、もしくは一部が他の室内空間に囲まれており、居住者が存在する空間を代表する場所であること。
- 機械換気された室を対象とし、給気量、排気量、環気量等の変動は 10%以内に維持されること。
- 熱負荷の変動、居住人員の変動、及び換気量の変動は 10%以内に維持されること(居住者は無しの状態でも可)。排気空気の温度変動は 3.3°C 以内とする。
- 漏気量、及び周囲の空間との空気交換量が把握できること。

4-2. 濃度測定・分析装置の精度

4-2-1. トレーサガス

- トレーサガスは毒性が無く、換気による除去量に関して吸脱着量、及び化学反応量は十分に小さいこと。
- Federal Clean Air Act Amendments of 1990 で禁止されている化合物は使用しないこと。
- ASTM Standard E741 に記載されたトレーサガスの特性を参照すること。

4-2-2. トレーサガス分析装置

トレーサガス分析装置は使用するトレーサの種類と測定濃度より決定され、干渉ガスの影響の少ないものを選定する。十分な測定精度と安定性を確保するための目安は以下に示すとおりである。

- 測定時のトレーサガス最大濃度と、最大濃度の 5%濃度に相当する校正ガスを用いて 10 回連続測定を行い、平均値に対する標準偏差が 4%以内とする。
- 校正ガスによる 10 回連続測定を 6 時間経過した後も再度行い、上記の精度が確認されること。6 時間とは一般的な空気交換効率の測定時間である。

4-2-3. 校正

- 現場測定を行う 3 ヶ月前までを目安に 6 種以上の校正ガスで校正を行うこと。
- 濃度 0 と、予想される最大濃度、及びその間に含まれる濃度(4 段階以上)の校正ガスを用意し、それぞれの既知濃度の校正ガス濃度に対する偏差が 5%以内とする。
- 測定開始の直前(1 時間以内)に 2 種以上の校正ガス(校正レンジの上下 30%程度)で再校正を行うこと。この時点で校正誤差が 5%以上の場合は、6 種以上の校正ガスで再校正を行うこと。

4-2-4. トレーサガス注入装置

Step-up 法に使用するトレーサガス注入装置は、トレーサガスの注入量を一定量に制御可能な装置とし、少なくとも 30 分毎に平均注入量の 2%以上の解像度を持つ測定器でトレーサ注入量を測定すること。注入量の変動は 5%以内とする。

また、トレーサガス注入装置のトレーサ注入部に蓋をして、注入装置自体からのリークを測定すること。

4-2-5. トレーサガスサンプリング装置

サンプリングシステムのリークを確認し、問題の無いことを確認すること。推奨手順に関しては Appendix H に詳細な記述がある。

配管内でのトレーサガスのロスが無視可能なレベルとするために、以下の手順を推奨している。

- (a) 最小限のメタルチューブを介し、校正ガスを直接分析器に導入し 10 回の連続測定を行う。
- (b) 実際の測定で使用するチューブを(最大限の長さで)接続し、同様の校正ガスを注入し、10 回の連続測定を行う。
- (c) 10 回の連続測定による平均濃度が上記(a)及び(b)で 5%以内の誤差とする。

サンプリングを行う前に、サンプリングチューブのパーシを以下の手順で行うこととしている。

- (d) 最大濃度の校正ガスと最長のサンプリングチューブを用いて測定時の流量を 10 分以上維持する。
- (e) 上記(d)の作業を行った後、新鮮外気をサンプルチューブに供給し、測定される濃度が校正ガス濃度の 3%以下を基準とし、この基準が満たされない場合は、サンプリング流量、チューブ長さ等を変更すること。

上記のサンプリングシステムに関する検討は最初の測定時、及びサンプリングシステムに変更を加えた時に行うこと。

4-2-6. グラブサンプリング

グラブサンプリングとは捕集器の中にトレーサガスを含む空気を保管し、一定期間の後、分析する方法であり、サンプリングは 30 秒以内で行う。グラブサンプル中に保存する期間にトレーサのロスをなくすために以下の手順を推奨している。

- (a) 校正ガスを注入した 10 個のグラブサンプルを用意し、6 時間以上、もしくは予想される保存期間以上、放置する。
- (b) グラブサンプル中の空気を分析器に導入し、濃度を測定する。
- (c) 同様の校正ガス、メタルチューブを用いて直接濃度を測定する。
- (d) 上記(c)の濃度と(b)の平均濃度(10 個の平均)は 5%以内の誤差とする。
- (e) 10 個のグラブサンプル中の濃度のばらつきが平均値の 5%以内とする。
- (f) 上記の手続きはサンプリングシステムに変更があった場合は常に行うこと。

4-2-7. サンプルバックによる時間平均濃度測定

サンプルバックによるサンプリングは、サンプリング期間の時間平均濃度が測定される。正確な測定の為には、バックに一定量吸引すること、吸着及びリーク等によるトレーサガスの損失を防ぐことが必要となる。バックサンプリングの精度を確保する

ためには次に示すバックサンプリング装置や測定手順に従う必要があるとしている。

- (a) 最初の測定、もしくは少なくとも 10 回に一度は 6 時間継続(30 分毎にモニタリング)の流量測定を行うこと。
- (b) 平均流量に対する標準偏差は 5%以内とする。
- (c) 測定の前に、バックに空気を満たし水中に沈めることでリークのチェックを行うこと。
- (d) テスト方法は前節(4-2-6)で示したグラブサンプリングの場合と同様に行うこと。

4-2-8. 主流からのサンプリング

主流から取り込むサンプルは主流の横断面(クロスセクション)の平均濃度を代表するものである必要がある。サンプルに十分な代表性を持たせるために、次のような検証を行う必要があるとしている。

- (a) 測定に用いるサンプリング方法、測定器を使用して捕集したサンプル中のトレーサガス濃度を測定する。
- (b) 主流断面より、1 分以内のサンプリング時間で少なくとも 6 個のグラブサンプルを用意する。
- (c) 6 個以上のグラブサンプルのトレーサ濃度の平均値の偏差が $\pm 5\%$ 以内とする。

4-2-9. サンプリングポンプ

直接サンプリングを行う際に使用するサンプリングポンプ、もしくはサンプリングバックは気密性が確保されなければならない。

4-2-10. 流量測定

測定器と測定手順に関しては ANSI / ASHRAE 41.7-1984 (RA91)に詳細に記述されている。圧力測定の精度は $\pm 4\%$ 以内とする。また、どのような測定器・測定手順を用いて流量測定を行っても最大の不確かさ(uncertainty)は $\pm 10\%$ 以内とする。計測の不確かさに関しては ANSI / ASHRAE 111-1988 に詳細に記述されている。

4-3. 空気交換効率の測定手順

内部負荷、家具、換気システム等は、測定期間中は一定にすることとし、天候の変動等の微細な変動、家具の位置の微細な変動(椅子の位置が若干変わる等)は無視してもよいとしている。

4-3-1. トレーサガス減衰法による測定手順

- (1) 濃度及び温度を測定するための機材、トレーサ注入装置を所定の位置に設置する。
- (2) その後、室内空気中にトレーサガスを一様に注入する。一般的な 2 つの方法は次の通りである。
 - (a) 外気導入を一時的に停止した状態で、即座

に一定量のトレーサを給気に注入する方法。
(b) 外気導入を停止することなくトレーサを定期的に注入する方法。

- (3) 対象空間内の濃度分布の標準偏差が 10%以下、最大最小濃度の比が 1.2 以下となった状態で排気のトレーサガス濃度測定を開始する。
- (4) 各排気の 1 回目の測定が完了した後に、外気を含む給気を開始し、その後、呼吸域レベルでのサンプリングを開始する。
- (5) サンプリングは全排気濃度が 95%低下するまで継続的に行う。概略的には名目換気時間の 3 倍程度を目安とする。時間は常に記録する。
- (6) より高精度な測定を行うためには、全排気濃度が 97%低下するまで継続的にサンプリングを行う。Appendix C に詳細が示されている。

4-3-2. トレーサガス Step-up 法による測定手順

Step-up 法を開始する前に以下の点を確認する。

- (a) 複数の外気導入口が存在する場合には全てのトレーサ濃度が一定となるようにする。誤差は 15%以内とする。
- (b) トレーサ混入空気は測定対象室内に供給される前に完全に混合させる必要がある。トレーサの混合状態は給気口断面の 6 箇所以上でチェックする。再循環空気を含む場合には、トレーサ注入から 10 分以内にサンプルの捕集を行う。
- (c) 各測定点で捕集したサンプルの濃度誤差は平均濃度に対して±15%以内とする。

上記(a)~(c)を確認後、以下の手順で測定を行う。

- (1) 濃度及び温度を測定するための機材、トレーサ注入装置を所定の位置に設置する。
- (2) 排気の濃度測定を開始する。
- (3) 少なくとも 1 回以上の全排気口の濃度測定が完了した後に、外気に対するトレーサの注入を開始する。時間は常に記録する。
- (4) トレーサの注入と同時にサンプリングを開始する。測定前の排気濃度は step-up 終了後の排気濃度の 10%以下とする。排気濃度の上昇率が 8%以下となるまでサンプリングを継続する。概略的には名目換気時間の 3 倍程度を目安とする。
- (5) より高精度の測定を行うためには、トレーサ濃度が完全に定常に達するまで測定を継続する。詳細は Appendix C に解説されている。
- (6) トレーサガスの注入を停止する。

4-3-3. 換気量及び還気量の測定手順

一般にダクト内でのリークの問題より、室に入った、

もしくは室から出た換気量と室外から対象室に供給する、もしくは室外に排気する換気量は異なる。そのため、空気交換効率測定期間中の換気量、還気量(return air)及び排気量を測定する。

(還気量+排気量)に対する全供給空気量の割合は、誤差が 10%以内とする。この基準を満たしていない場合は、リークが過大であり本測定基準を満たしていないこととなる。

4-3-4. トレーサガス濃度測定位置の決定

測定は居住者の代表的呼吸域レベル(座位が主の場合は床面より 1.1m、立位が主の場合は 1.7m、子供が主の場合は居住者に合わせて呼吸域高さを選択)において行うこと。

測定場所は少なくとも 10 箇所以上で、測定対象スペースに均等に分布させることとする。

4-4. 報告書の取りまとめ

ASHRAE 129 では報告書に記載する必要がある情報として以下の項目を挙げている。

- (a) 名目換気時間、もしくはその逆数(換気回数)
- (b) 全供給空気量
- (c) 各排気口での排気流量
- (d) 各給気口における供給空気量
- (e) 還気(return air)量
- (f) 供給空気中の外気導入量
- (g) 測定期間中の給気及び排気の温度履歴
- (h) 空気齢測定(の床面からの)呼吸域高さ

5. 結論

ANSI / ASHRAE 62 で定義されている空気交換効率(Air- Change Effectiveness)、及び ASHRAE 129 に示された空気交換効率の現場測定法に関して概説した。ASHRAE 129 による現場測定法は、概要のみでなくその測定条件・手順等が本文中に厳密に定められている点に特徴がある。現場において想定しうる最良の精度を確保するための測定法が示されていると言える。

[注]

(1) グラブサンプリングによる空気齢の算出式。トレーサガス法による空気齢測定の厳密式は Appendix C に詳しく解説されている。

[参考文献]

- (1) ANSI / ASHRAE 129- 1997, ASHRAE Standard, Measuring Air- Change Effectiveness
- (2) 空気調和・衛生工学会規格 HASS102-1997、1997

[謝辞]

本論は(社)空気調和・衛生工学会 換気性能評価小委員会で議論された資料を整理し、再構成したものである。関係各位に深甚なる謝意を示す。