

ソーラーチムニーの自然換気性能と換気因子の検討

Study on the Ventilation Factors and Natural Ventilation Performance of Solar Chimney

宋 城基^{*1}
Sung-Ki SONG

Abstract

The measured results of the ventilation performance of natural ventilation system with solar chimney in a school building are described focusing to some ventilation factors. The measurements were made continuously for the spring and summer periods and the natural ventilation rate equivalent to the air change rate ranging from 0.25 to 2.0 h⁻¹ was observed. The ventilation factors such as solar radiation, wind speed and direction, and the temperature difference between inside of solar chimney and indoor spaces were found to enhance the ventilation rate. When the temperature difference between inside of solar chimney and outside was more than 3 degrees C, the ventilation rate was increased by synergy of the outdoor wind velocity, but this tendency was not seen with less than 3 degrees C. Thus the characteristics of these ventilation factors could be clarified from the long term on-site measurements.

キーワード：ソーラーチムニー、自然換気システム、換気性能、換気因子

Key Words: Solar Chimney, Natural Ventilation System, Ventilation Performance, Ventilation Factors

1. はじめに

中東のような暑熱乾燥地域では冷房と換気の目的で、バードギア(Badgir)などのタワーを用いた伝統建築が多くみられる。これらのタワーを用いた建築は、建築意匠と自然換気および省エネルギー等の観点から注目されており、日本ではソーラーチムニーを自然換気システムとして中低層の学校建築に導入した幾つかの実例がある。また、これらの建築について行われた実測研究では、その換気性能に関する報告^{1),2)}がなされている。また、丁ら^{3),4)}はソーラーチムニー温度差換気に着目し、アトリウム型ソーラーチムニーにおける自然換気と避難路の確保と遮煙のためのソーラーチムニー高さ、給気口と排気口の面積比について模型実験と数値計算により検討している。また、ソーラーチムニーの給気口と排気口のみを着目し、これらによる換気への影響について2次元数値計算で検討した研究^{5),6)}と、チムニーの日射受熱量を多く確保するためチムニーを斜めに設置した場合について、その傾斜角と換気量および室内気流分布を2次元数値計算で検討した研究^{7),8)}もある。趙ら^{9),10)}は夏季を想定した模型実験からソーラーチムニーの高さと水平断面形状について検討しており、この研究結果は

2001年竣工した北九州市立大学の新学部校舎のソーラーチムニーの設計に生かされている。この新学部校舎について開校後4年間にわたり実測調査を継続して行ったが、ソーラーチムニーの自然換気は冷暖房が行われていない中間期と夏季の夜間が主であり、この期間の自然換気に影響する換気因子については十分な検討がなされていない。

そこで、本研究では同大学に設置されたソーラーチムニーを対象に自然換気時における換気性能を示し、自然換気に影響する換気因子とその関係について検討を行った。実測と解析は自然換気が行われている開校前の2001年3月と開校後の2008年5月である。

2. 建物概要とソーラーチムニー概要

対象建物は延床面積34,600m²の4階建てで、図1に示すように北棟、南棟、事務棟からなっている。北棟と南棟は長さ幅約168mでそれぞれ4つの区画、計8区画に区別され、各区画の屋上には図2に示す約4m(幅)×2m(奥行)×8m(高さ)のソーラーチムニーが1本ずつ設けられている。ソーラーチムニーの南面と西面は日射をソーラーチムニー内部に取り込み、内部の空気温度上昇による煙突効果を促進させるため、ガラス張りとなっている。また、ソーラーチムニーの北面と東面は昼間の日射熱を蓄え、夜間にも温度差換気を継続させるため、熱容量があるコンクリートとなって

*1 広島工業大学環境デザイン学科准教授 (〒731-5143 広島市佐伯区三宅 2-1-1)
e-mail: s.song.wt@it-hiroshima.ac.jp
(原稿受付: 2013年12月5日)

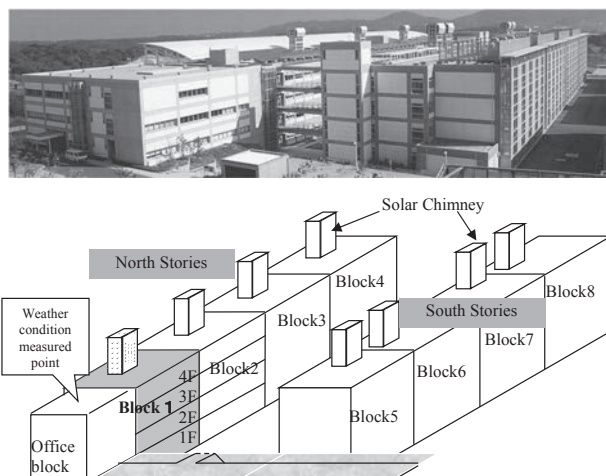


Fig.1 Building overview and section conceptual diagram

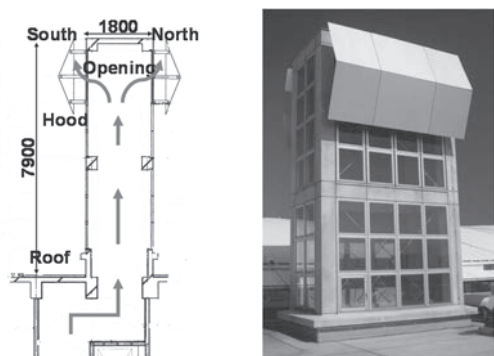


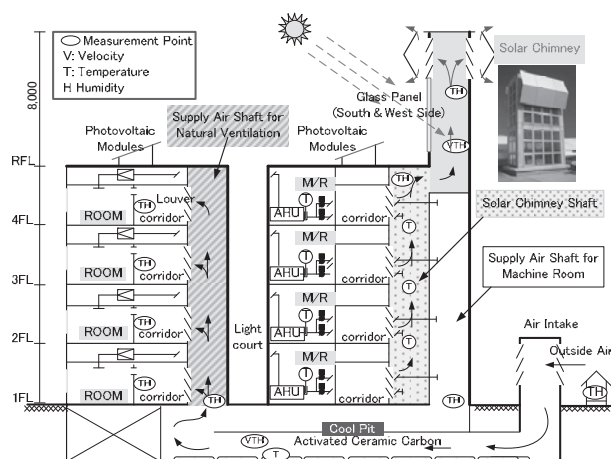
Fig.2 Chimney vertical cross-section and chimney photo

いる。さらに、ソーラーチムニー上部の南北には1ヶ所ずつ約3.3m(幅)×1.7m(高さ)の開口部(排気口)があり、その外側には風の逆流と雨除けのためのフードが設けられている。このフードの形状は桂木ら¹¹⁾の外気風速のみを考慮したCFDシミュレーションによる検討結果から現在の形となった。

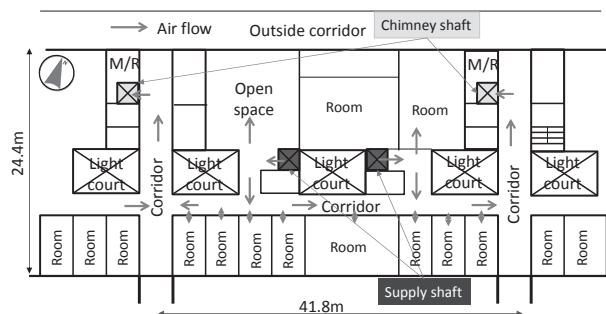
図3に示すように自然換気的主要ルートは、外気が1Fレベルに設置されている給気塔から地下ピットおよび縦の給気シャフトを経由し、各階廊下の給気ガラリを通して廊下と室内へ入る。その後、空気は再び廊下を経由し、ソーラーチムニーの縦シャフトを通して屋上のソーラーチムニーから外に流出される。このルート以外に自然換気ルートは廊下側の光庭の窓の開閉と研究室の廊下と反対側にある室内の窓の開閉によるルートもある。ここで、給気塔から流入する風量とソーラーチムニーから流出されるそれぞれの風量を給気量と排気量と称する。

3. 実測概要

ソーラーチムニーと地下ピットの性能とその効果を竣工後でも継続的に把握するため、実測は図1に示すように北棟の区画1と区画2に計測装置を常設させて行った。その測定項目は日射量と外気温湿度および外気風速風向、地



(A) South-North vertical cross-section



(B) 2nd floor plan of the north building (the Block 2)

Fig.3 Measurement location and natural ventilation path

Table.1 Measurement item

Object	Measurement item	Number of measurements	Interval
Weather	Solar radiation, Temperature, Humidity, Velocity, Wind direction, Rainfall	each 1 Point	10min
Cool Pit	Floor surface temperature, Temperature, Humidity, Velocity	each 2 Point	
Corridor	Temperature and Humidity (each floor)	16 Point	
Supply Shaft	Temperature and Humidity (Inlet)	2 Point	
Chimney Shaft	Temperature (2F, 3F, 4F), Humidity (4F)	each 1 Point	
Chimney	Temperature and Humidity (4m and 6m from roof), Surface temperature (North and East), Velocity	each 2 Point	

下ピットの空気温湿度と風速、各シャフトの入り口空気温湿度、外調機の入り口空気温湿度、ソーラーチムニーの空気温湿度と風速等であり、すべてのデータは10分間隔で連続測定し、自動収集できるようになっている。常設測定位置を図3に、測定項目と測定数等を表1に示す。特に、給気量と排気量は既往研究で3次元超音波風速計と常設風速計から求めた面風速係数^{12), 13) 14)}と常設風速計の風速および断面積により算出した。ここで、ソーラーチムニーと地下ピットの面風速換算係数とは、各断面を30×12メッシュに区切り、区切られた各場所において3次元超音波風速計による風速と同時に測定した常設風速計の風速により求めた係数である。面風速係数を求める際には、常設計測とは別途に1秒間隔10秒間測定した平均値を用いた。

4. 実測結果

ソーラーチムニーの換気性能に影響を及ぼす人為的な要素をなるべく排除するため、建物への人の出入りがほとんどいない開校1ヶ月前の2001年3月の1ヶ月間の測定データを用い、解析を行った。建物とソーラーチムニーの方位は南面が20度西へ向いているため、測定した外気風速・風向データはソーラーチムニーを基準に補正した。例えば、測定データの外気風速・風向が風速3m/s・風向30°の場合、補正後は風速3m/s・風向50°となる。

4.1 室内外気温とソーラーチムニー気温変動

図4に室内外気温とソーラーチムニー内部気温および水平全日射量の変動を示す。ここで、建物内部での暖冷房が行われていないことと内部発熱がないことから、建物内部からチムニーシャフトへ流れ込む4階高さレベルの気温を室内気温として扱い、これを以下室内気温と称する。1日の室内気温の変動は小さいが、それに比べ外気とソーラーチムニー内の気温は大きく変動していた。特に、ソーラーチムニー内の気温はほとんどの時間帯において外気温より高いが、室内気温に対しては夜間と同じかやや低く、昼間は常に高かった。また、3月13日から3月25日の昼間の室内気温は外気温より低く、夜間は外気温より同じかやや高かった。しかし、これ以外の期間の室内気温は昼間と夜間ともに外気温より高かった。このことから建物の換気は昼夜ともにソーラーチムニー内外温度差の駆動力により、チムニーから外へ排気されることが推測できる。また、測定期間中の水平面全日射量は3月17日を除けば、ほぼ毎日0.5~0.9kW/m²の変動をしていた。

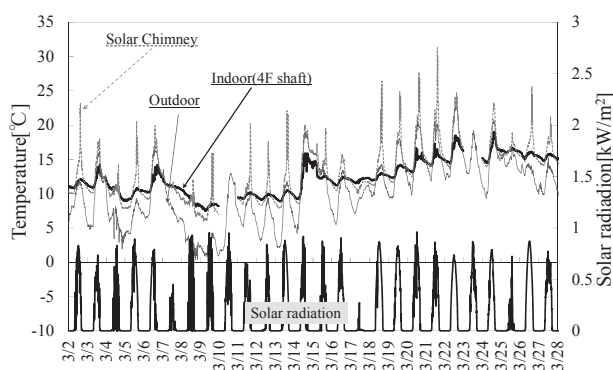


Fig.4 Temperature and solar radiation

4.2 ソーラーチムニーの排気量

図5に示すように区画1の地下ピットからの給気量とソーラーチムニーからの排気量はほぼ同じ量で変動しており、このことから測定期間中はソーラーチムニーを経由する自然換気ルートから換気が行われていたと推測できる。また、この排気量は約1,000~20,000m³/hの範囲で変動し、平均4,000m³/hであった。このことから自然換気は途絶え

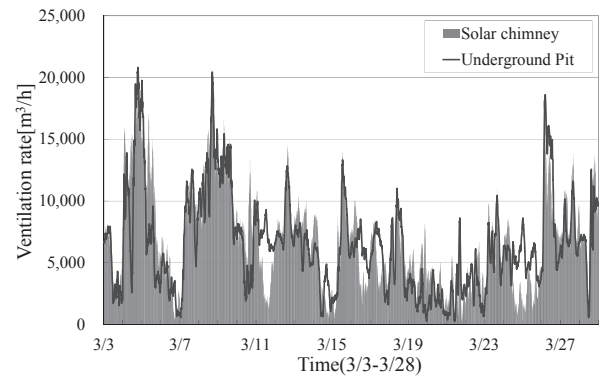


Fig.5 Flow rate of underground pit and chimney

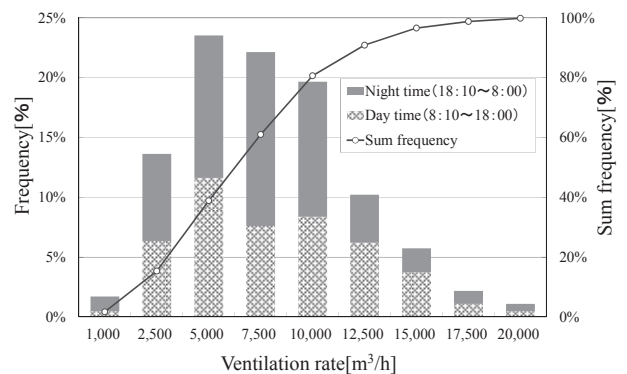


Fig.6 Frequency of the solar chimney ventilation rate

ることなく連続的に行われていたことがわかる。また、区画2の排気量も区画1とほぼ同じ量で同じ変動を示していたため、各区画は同じ排気量が確保できていたものと推測できる。

図6に昼間(8:10~18:00)と夜間(18:10~8:00)におけるソーラーチムニー排気量の出現頻度を示す。昼間と夜間ともに2,500~10,000m³/hの範囲の排気量の出現頻度が一番多く、1,000m³/h(換気回数は約0.1回/h相当)以上の排気量の累積頻度は約98%であった。また、排気量5,000m³/h(換気回数約0.5回/h相当)以上の累積頻度は60%であった。このことからソーラーチムニーの存在によって昼間と夜間ともに自然換気は継続的に行われ、自然換気期間中の約6割以上の時間は0.5回/h以上の換気が確保されていたと考えられる。

5. 換気因子の検討

ソーラーチムニーは温度差換気として日射量とソーラーチムニー内外温度差(以下、チムニー内外温度差)と室内外温度差(室温-外気温)に影響を受け、風力換気として外気風速とソーラーチムニー頂部の排気口位置と外気風向に影響を受けると考えられる。これらの換気因子について次の検討を行った。

5.1 西垂直面日射量別室内外温度差と排気量

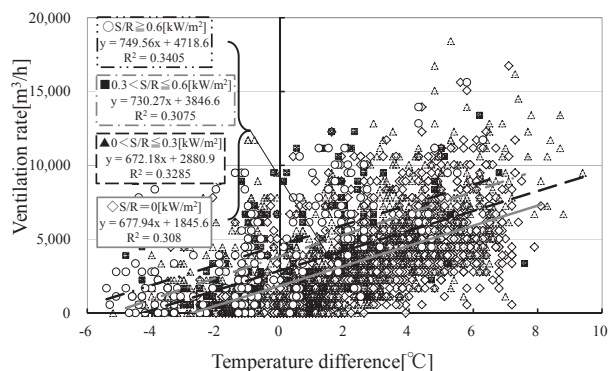


Fig.7 Relationship of ventilation rate and the temperature difference by the west vertical solar radiation

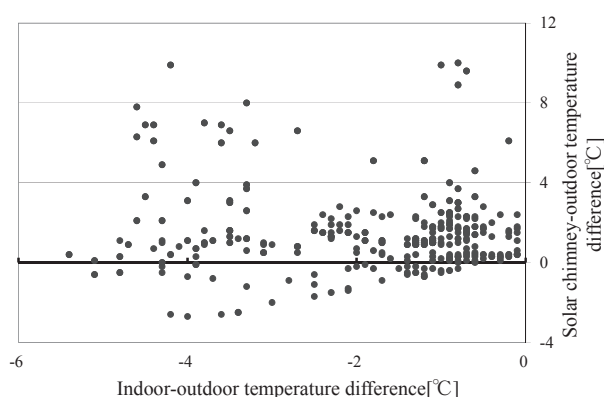


Fig.8 Chimney inside and outdoor temperature difference at 0 °C less than indoor and outdoor temperature difference

図 7 に西垂直面日射量別の室内外温度差と排気量の関係を示す。ここで、西垂直面日射量別に解析したのはソーラーチムニーの西面と南面がガラスであり、排気量は日射量に多く影響を受けるためである。また、南面日射量より傾向がわかりやすい西面日射量のみを示す。測定期間中の室内外温度差は-5~10℃の範囲であり、排気量は室内外温度差が大きくなると増加し、なお同じ室内外温度差においても西垂直面日射量が大きくなると排気量は増加する傾向にあった。また、室内外温度差がマイナス、すなわち、室内気温が外気温より低くなる時間は少ないが、この時は図 8 に示すようにチムニー内外温度差はプラス、すなわち、チムニー内の気温が外気温より高くなるため、チムニーからの排気はチムニー内外温度差によるものと推測できる。

5.2 外気風速別のチムニー内外温度差と排気量

図 9 に外気風速別のチムニー内外温度差と排気量の関係を示す。測定期間中のチムニー内外温度差は最大 10℃であり、排気量はその温度差とともに増加した。また、同じチムニー内外温度差において、外気風速が大きくなると排気量はさらに増加した。このことから、排気量はチムニー内外温度差のみならず、外気風速にも大きな影響を受け、なおチムニー内外温度差と外気風速の相乗効果により排気

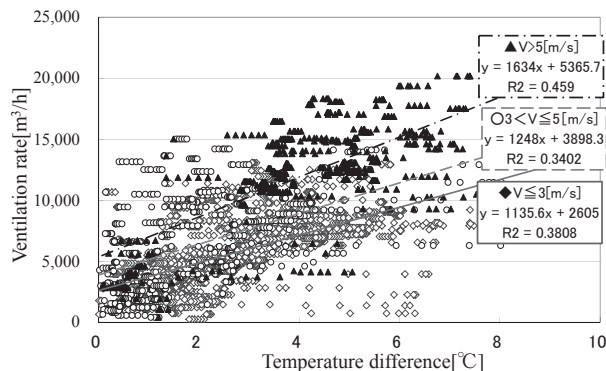


Fig.9 Relationship of chimney inside and outdoor temperature difference and ventilation rate by outdoor wind velocity

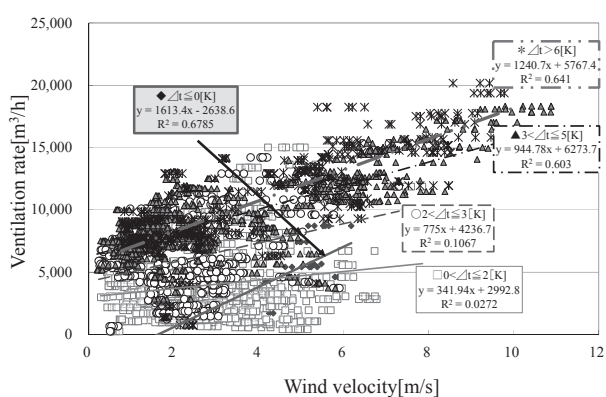


Fig.10 Relationship of outdoor wind velocity and ventilation rate by chimney inside and outside temperature difference

量が増加することがわかった。ここで、チムニー内外温度差と室内外温度差がマイナスのデータはかなり少ないため、解析対象外としたが、温度差換気は行われない場合においても、外気風速による排気量が発生することが推測される。また、この時はソーラーチムニーから室内へ逆流もありうると思われるが、桂木ら¹¹⁾の研究結果によるソーラーチムニー頂部のフード形状は外気風による外へ誘引される形状であることから、逆流はほとんどないと推測できる。しかし、逆流が起こったとしても自然換気期間におけるソーラーチムニーから室内への流入も自然換気として有効であると考えられる。

5.3 チムニー内外温度差別の外気風速と排気量

図 10 にチムニー内外温度差別の外気風速と換気量を示す。外気風速が大きくなると排気量は増加する傾向にあった。特に、チムニー内外温度差がマイナスの場合、排気量は外気風速とともに増加しており、このことから排気量は外気風速に大きく影響を受けていることが確認できた。また、チムニー内外温度差が 0℃以上 3℃未満では外気風速と排気量は比例傾向はみられるものの、相関はかなり低い結果となった。しかし、チムニー内外温度差が 3℃以上では外気風速と排気量の相関も大きく、外気風速に対する排気量の傾きも大きくなる傾向にあった。このことから実測

対象ソーラーチムニーはチムニー内外温度差が 3°C 以下において外気風速とともに排気量の増加は小さいが、それ以上の温度差ではチムニー内外温度差と外気風速の相乗効果により排気量はさらに増加することがわかった。また、チムニー内外温度差が 0°C 以上 3°C 未満の場合は、その温度差がマイナスの場合よりも外気風速の増加とともに排気量が増加することはないことから、この温度差域では外気風速がチムニーからの排気を妨げていると推測できる。

5.4 外気風向別の外気風速と排気量

図 11 に外気風向別の外気風速と排気量との関係を示す。ただし、ソーラーチムニーは南北に排気口があり、左右対称であるため、データを北-南と東-西に分け、さらに各方位の重心から $\pm 15^{\circ}$ のデータのみを抽出し解析を行った。また、南風のデータはチムニー内外温度差が小さく、外気風速と排気量の関係が見受けられなかったため、風向別の解析には除外した。

ソーラーチムニー頂部の排気口の対向風である北風の場合は、平行風の東・西風の場合より外気風速が大きくなると排気量は常に大きい結果であった。このことから排気量は排気口と外気風の方位に影響を受けており、排気量は排気口と対向の風に増大することがわかった。また、北風の場合はチムニー内外温度差が小さいほど相関が高く、東・西風の場合はチムニー内外温度差が大きいほど相関が高くなる傾向であった。このことから排気量の増加は、排気口の対向風である北風の場合は外気風速に、東・西風の場合はチムニー内外温度差に大きく影響されることがわかった。

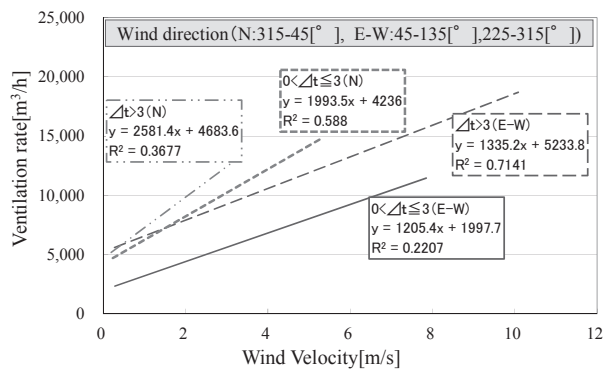


Fig.11 Relationship of outdoor wind velocity and ventilation rate by outdoor wind direction

5.5 開校後の排気量と換気因子

前節までは人の出入りがほとんどなく、自然換気の状態を比較的忠実に把握できる開校前 2001 年 3 月の計測データによる解析結果である。図 12 と図 13 には人の出入りが多く、ドアや換気窓の開閉などが不均一である開校後の 2008 年 5 月の 1 ヶ月におけるチムニー内外温度差と外気風速による排気量の実測結果を示す。ここで、この期間においても自然換気のみが行われるようするため、施設を運用

管理しているエネルギーセンターにおいて各室の機械換気操作ができなくなるようにした。開校後の排気量は開校前に比べ、約半分程度減少している結果であった。これは、チムニー排気口の内側に鳥やゴミの侵入を防ぐために設けた網に塵が詰まったことが大きな原因と考えられるが、それ以外にも人の出入りと窓の開閉などによりチムニー以外の換気ルートの自然換気があったためと考えられる。しかし、開校後においてもチムニー内外温度差と外気風速が増加すると排気量は増加し、また両因子の相乗効果により排気量が増えていることは開校前と同じであった。このことから開校後の排気量は開校前より少なくなっているが、換気因子の影響は同様であることが確認できた。また、排気量を多く確保するためには、空調機フィルター掃除のように自然換気に抵抗となる部分の掃除などのメンテナンスも必要と考えられる。

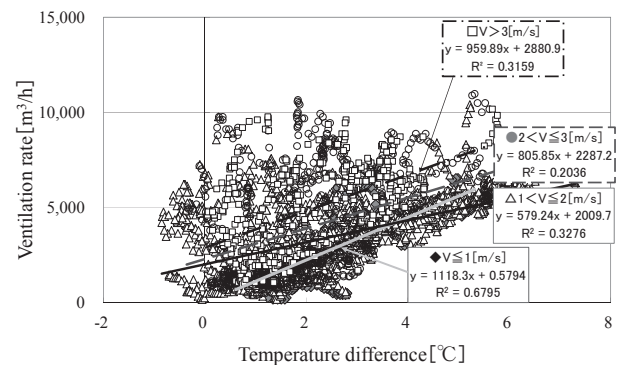


Fig.12 Relationship of chimney inside and outdoor temperature difference and ventilation rate by outdoor wind velocity in 2008

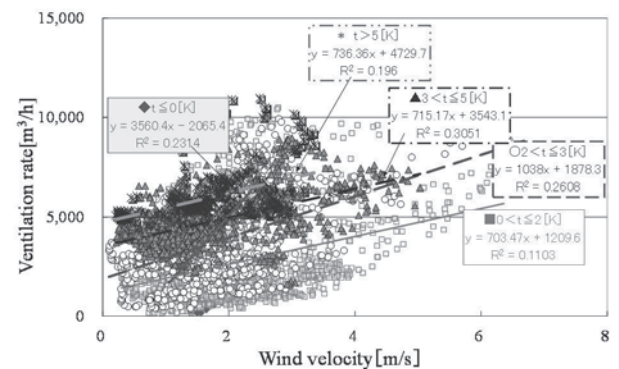


Fig.13 Relationship of outdoor wind velocity and ventilation rate by chimney inside and outside temperature difference in 2008

6. 結論

4 階建ての北九州市立大学工学部に設置されたソーラーチムニーの自然換気時における換気性能とその換気因子について検討した結果、以下の知見を得た。

1) 実測期間中は計画したソーラーチムニー経路の自然換気ルートによる換気が行われ、自然換気は途絶えることなく行われていることが確認できた。また、排気量は計測

8 割以上の時間で 2,500m³/h (換気回数 0.25 回/h 相当)を示し、最大では約 20,000m³/h (換気回数 2 回/h 相当)を示した。

- 2) チムニー排気量は室内外温度差とともに西面垂直日射量が大きくなると増加する傾向にあった。しかし、室内気温が外気温より低くなる時間はチムニー内の気温が外気温より高いため、チムニーからの排気はチムニー内外温度差により行われると推測できるが、外気風速による誘引効果により行われることも考えられる。
- 3) チムニー内外温度差は最大 10℃であり、チムニー排気量はチムニー内外温度差のみならず、外気風速にも大きな影響を受け、なおチムニー内外温度差が 3℃以上になると外気風速の相乗効果により排気量はさらに増加することがわかった。
- 4) チムニー排気量は排気口と外気風の方位に影響を受けており、排気量は排気口と対向の風に増大することがわかった。また、排気量の増加は、排気口の対向風である北風の場合は外気風速に、東・西風の場合はチムニー内外温度差に大きく影響されることがわかった。
- 5) チムニー排気口に設けた鳥やゴミの侵入を防ぐための網に塵が詰まったことにより開校後の排気量は開校前より少なかったが、換気因子は開校前と同様の関係を示した。また、排気量を多く確保するためには、自然換気の抵抗となる排気口の網部分の掃除などのメンテナンスが必要である。

謝辞 本研究の解析にアドバイスをしてくださった早稲田大学木村建一名誉教授と北九州市立大学相楽典泰名誉教授、(株)テクノ菱和品田宜輝、(株)日本設計の桂木宏昌氏および計測データの提供してくださった千代田計装(株)の森利之氏と永末憲治氏に、ここに記して感謝の意を表す。また、この研究の一部は(財)前田記念工学振興財団の研究助成により行ったものである。

参考文献

- 1) 永瀬修、大塚雅之、飯塚宏、湯沢正信、鈴木孝彦、新村浩一：ダブルスキン・ソーラーチムニーの熱的特性に関する実験研究（その 1 ～その 3）、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1385-1390、2006. 9
- 2) 前坂彰子、早川眞、吉原和正、樋渡潔、永田修三：大学校舎のソーラーチムニーの換気性能評価と設計法に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 13 巻第 26 号、pp. 623-628、2007. 12
- 3) 丁文婷、長谷見雄二、峰岸良和：アトリウム型ソーラーチムニーにおける自然換気と避難経路遮煙の両立可能性、日本建築学会環境系論文集、NO. 569、pp. 1-6、2003. 7
- 4) 峰岸良和、長谷見雄二、丁文婷：煙制御機能を持つアトリウム型ソーラーチムニーのゾーンモデルによる自然換気性能予測-アトリウム型ソーラーチムニーにおける自然換気と避難経路遮煙の両立手法-、日本建築学会環境系論文集、NO. 580、pp. 1-7、2004. 6
- 5) Gan G, Riffat SB: A numerical study of solar chimney for

natural ventilation of buildings with heat recover, Appl Therm Eng 1998; 18, pp. 1171-1187.

- 6) H.F. Nouanegue, L.R. Alandji, E. Bilgen: Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings, Renewable Energy, 33, 2008, pp. 434-443.
- 7) B. Ramadan, K. Nader: An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation, Energy and Buildings, 40, 2008, pp. 865-873.
- 8) B. Ramadan, K. Nader: Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate, Energy and Buildings, 2008, pp. 1-7.
- 9) 趙晟佑、木村建一：校舎建築の自然換気システムにおけるソーラーチムニーの性能予測に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第537号、pp. 37-42、2000. 11
- 10) 趙晟佑、木村建一：ソーラーチムニーによる自然換気システムの性能予測に関する実験研究、空気調和・衛生工学会論文集、NO. 81、pp. 11-19、2001. 4
- 11) 桂木宏昌、木村建一、榎本丈二、趙晟佑：ソーラーチムニーを利用した自然換気システムの研究（その1）システム概要とソーラーチムニー頂部の気流特性、日本建築学会大会学術講演会概要集、pp. 523-524、2000. 9
- 12) 榎本丈二、品田宜輝、木村建一、桂木宏昌：ソーラーチムニーとクールピットを組み合わせた校舎建築の自然換気システムの実測研究（その1）システムの設計と開校前の実測調査、空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集、p. 37-40、2001. 9
- 13) 品田宜輝、榎本丈二、木村建一、桂木宏昌：ソーラーチムニーとクールピットを組み合わせた校舎建築の自然換気システムの実測研究（その2）開校前後の運用状態における換気性能実測調査、空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集、p. 41-44、2001. 9
- 14) 品田宜輝、木村建一：多層建築の自然換気システムにおける各階給排気量の多点同時連続計測システムの開発と現場実測結果、日本建築学会環境系論文集、NO. 639、pp. 595-601、2009. 5