

クール/ヒートチューブの簡便な性能予測と設計手法提案に関する研究

熱交換性能パラメータスタディとその指標を用いた設計手法の検討

稲垣 友規 尹 奎英

丹羽 英治(日建設計総合研究所)

本研究では、土壌熱交換システムであるクール/ヒートチューブの冷却効果を空調機的设计へ反映させるため、チューブ的设计出口温度の推定方法とその推定方法を用いた设计手法の提案を行う。そのため、妥当性を確認した3次元単純熱伝導の数値解析モデルによるシミュレーション結果を用いて、クール/ヒートチューブのパラメータスタディを行い、各パラメータのチューブ出口温度への影響について考察した。その結果より、単位導入風量あたりのチューブ伝熱面積という指標を提案し、その指標を用いた设计出口温度の推定及びチューブ的设计手法を考案し、加えてモデル建物を例に设计手法について説明する。また、建築の初期段階におけるシステム導入の検討を簡便に行なえるよう、容積率と建蔽率から単位導入風量あたりのチューブ伝熱面積を概算できないか試みた。

キーワード：クール/ヒートチューブ 導入風量 伝熱面積 设计出口温度 容積率 建蔽率

1. はじめに

現在、地球温暖化及びエネルギー需給安定化対策としてCO₂排出量やエネルギー消費量の抑制が求められている。このような要求に対し、自然エネルギーを利用した省エネルギー手法が更に注目を集めるようになった。クール/ヒートチューブもこの自然エネルギー利用手法のひとつで、外気を予冷・予熱して室内へ取り込むことで外気負荷を軽減する手法である。このクール/ヒートチューブ利用による外気顕熱負荷軽減効果を空調機设计に反映していくためには、チューブ出口温度の簡便な予測手法の提案が有効である。

張ら¹⁾は3次元熱伝導の数値解析モデルを用いたシミュレーション結果より、チューブ出口温度の推定式を提案した。しかし、管長や埋設深さは固定値として検討されていた。

そこで本研究では、チューブの管長や埋設深さ等の各設計パラメータの異なるクール/ヒートチューブの簡便な性能予測と設計手法の提案を目的とする。本報ではチューブの各設計パラメータが熱交換性能にどのような影響を与えるか、シミュレーション結果より検討し、その結果を用いた設計手順を提案した。加えて、モデル建物を対象に提案する設計手順によりチューブ設計出口温度ならびに外気顕熱負荷軽減量を推定した。また、建築初期段

階におけるシステム導入の検討を簡便に行なえるよう、容積率や建蔽率などの情報より導入しうるチューブの性能についても推定できないか検討を行なった。

2. 各設計パラメータがチューブ出口温度に与える影響

2.1 シミュレーション概要

表-1 シミュレーション設定条件(計128パターン)

地域	大阪
地表面状況	芝(日陰)
土質	砂質
管材料	PVC(硬質塩化ビニル)
管長	20m 40m 60m 80m
管径	0.35m 0.5m
埋設深さ	0.3m 0.5m 1.0m 2.0m
管内風速	0.5m/s 1.0m/s 2.0m/s 3.0m/s
運転時間・期間	夏季6~9月 冬季12~3月 中間期4~5月 10~11月 日運転時間：12時間(8:00~20:00)

先行研究²⁾により妥当性を確認した、顕熱のみを考慮した3次元単純熱伝導の数値解析モデル^{註1)}を用いて、表-1に示す各設計パラメータの条件下にてシミュレーションを行った。

これより算出した、計128パターンチューブにおける年間のチューブ出口温度を用いて、導入風量や管長、埋設深さがチューブ出口温度へ及ぼす影響について検討した。更に、チューブ出口温度の夏季にわたる推移と最高出口温度の出現タイミングが設計パラメータにより、どのように変化するかについても検討した。なお、今回は6~9月の夏季を対象として検討している。

2.2 管長と導入風量がチューブ出口温度に与える影響

まず、管長と導入風量がチューブ出口温度にどのような影響を与えるかについてシミュレーション結果を用いて検討する。

図-1と図-2に、チューブ運転時間中における外気温とチューブ長さ別の出口温度との相関図を示す。なお、図中に各設計パラメータとチューブ長さ別のプロット点に対する回帰式を示す。

図-1と図-2を見ると外気温に対してチューブ出口温度は低くなっており、チューブによる外気の冷却効果が確認できる。一方、外気温が比較的低いときには、外気温に対してチューブ出口温度の方が高い場合もあり、外気を加熱している時間帯が見られる。ここで、導入外気がチューブにより冷却された時間帯について着目すると

図-1のように同一の導入風量に対してチューブ長さが20mから80mと長くなるにつれ出口温度は低くなるのがわかる。これは、導入風量に対するチューブ内側表面積(以後、チューブ伝熱面積と記す)が大きくなったためである。この傾向は、導入風量が小さいケースの図-2でも同様であり、出口温度の低下度合は大きくなっている。

以上のようにチューブの冷却効果は伝熱面積には比例、導入風量には反比例して変動していることが確認されるため、単位導入風量当りのチューブ伝熱面積(以後、 A/V と記す)という指標を提案すると共にチューブ出口温度との関係を図-3に示す。なお、プロットは全て外気温が最高となった時刻(8月8日12時)のものである。

図より、 A/V が大きくなるにつれ、チューブ出口温度が対数関数あるいは二次関数的推移を示しながら低くなるのがわかる。また、それに伴い A/V が大きいほど埋設深さを深くすることによる熱交換性能の向上(チューブ出口温度の低下)も大きくなっていることが確認できる。これは、導入風量に対するチューブ伝熱面積が大きいほど、土壌との熱交換がより行われるためであると考えられる。

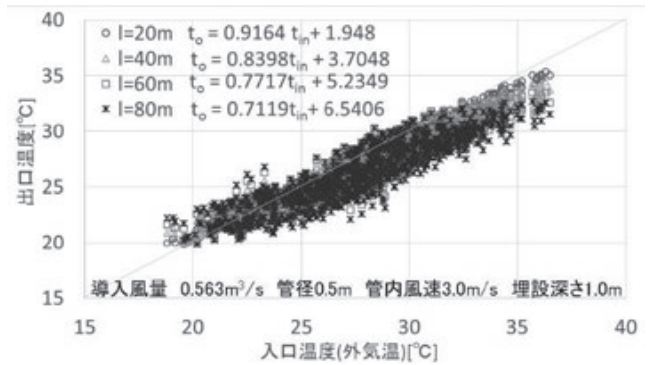


図-1 チューブ出入口温度の相関関係(導入風量大)

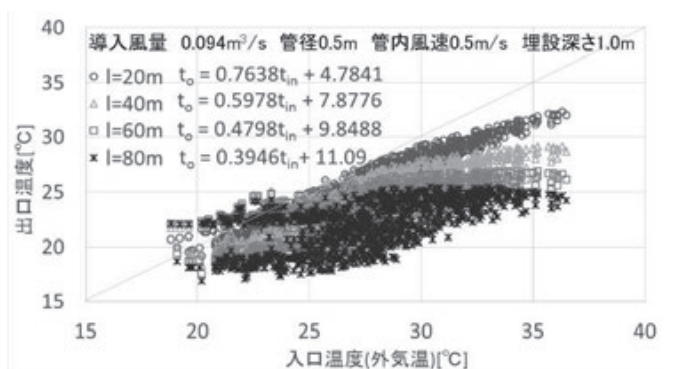


図-2 チューブ出入口温度の相関関係(導入風量小)

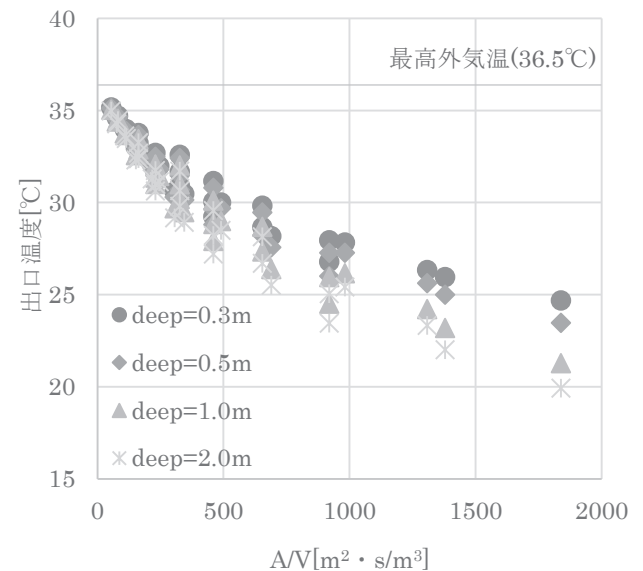


図-3 最高外気温時の A/V とチューブ出口温度との関係

2.3 最高出口温度の出現日時

ここでは、チューブ最高出口温度の出現日時についての検討を行う。図-4は最高外気温が出現してから何時間後に最高出口温度

が現れたかを縦軸に、 A/V を横軸に取り示す。図示のとおり、最高外気温の出現と同時刻に最高出口温度が現れるケースはなかった。また、最高外気温の出現から最高出口温度が出現するまでの時間は最短でも3時間後であった。そして、最高外気温の出現から A/V が $900 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{m}^3$ 以下では約3時間~3日、 $900 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{m}^3$ 以上では約1日~1ヶ月の間に最高出口温度が出現しており、 A/V の大きさによって最高出口温度の出現タイミングの傾向が異なることがわかる。

次に、 A/V の大きさにより最高出口温度が出現するまでの時間に異なる傾向が現れる要因について検討する。図-5に、夏季における外気温と地中深さ1mにおける自然土壌温度、チューブ運転時間中における A/V ごとのチューブ出口温度の移動平均(当該時刻の前後24時間の平均)を示す。 A/V が $54.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{m}^3$ の場合、夏季に亘る出口温度の推移は外気温に近づき、 A/V が $1839.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{m}^3$ の場合は土壌温度の推移に近づいていることがわかる。

このことから、 A/V が小さい場合、チューブ出口温度の夏季に亘る推移が外気温に近くなるため、最高外気温の出現から数時間以内に最高出口温度が出現する傾向にある。また、 A/V が大きい場合には最高外気温の出現から1ヶ月ほど経ち、地中温度が高くなっていく9月で最高出口温度が出現する傾向となる。以上のこ

とが、図-4に示した最高外気温とチューブ最高出口温度の出現時刻の時間差が A/V により異なる主な要因と考えられる。

これと同様に前出の

図-1と図-2の中に示す回帰式の傾きは、外気温とチューブ出口温度の推移の関係を示す指標となり、 A/V が小さいケースほど回帰式の傾きは1に近い値を示し、 A/V が大きいケースほど傾きは小さくなる。

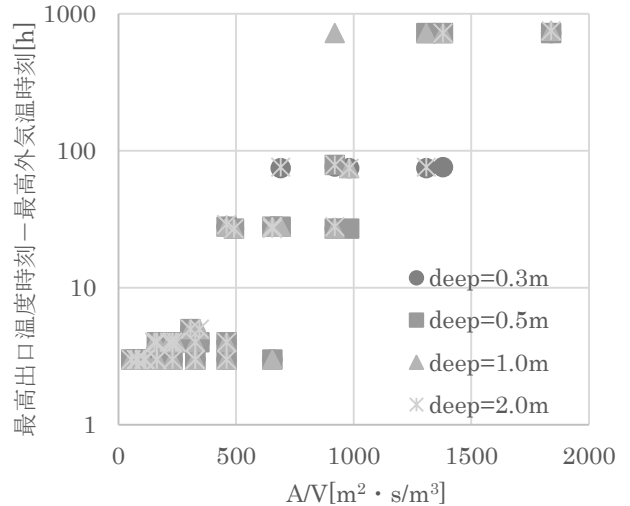


図-4 A/V ごとの最高出口温度の出現時間

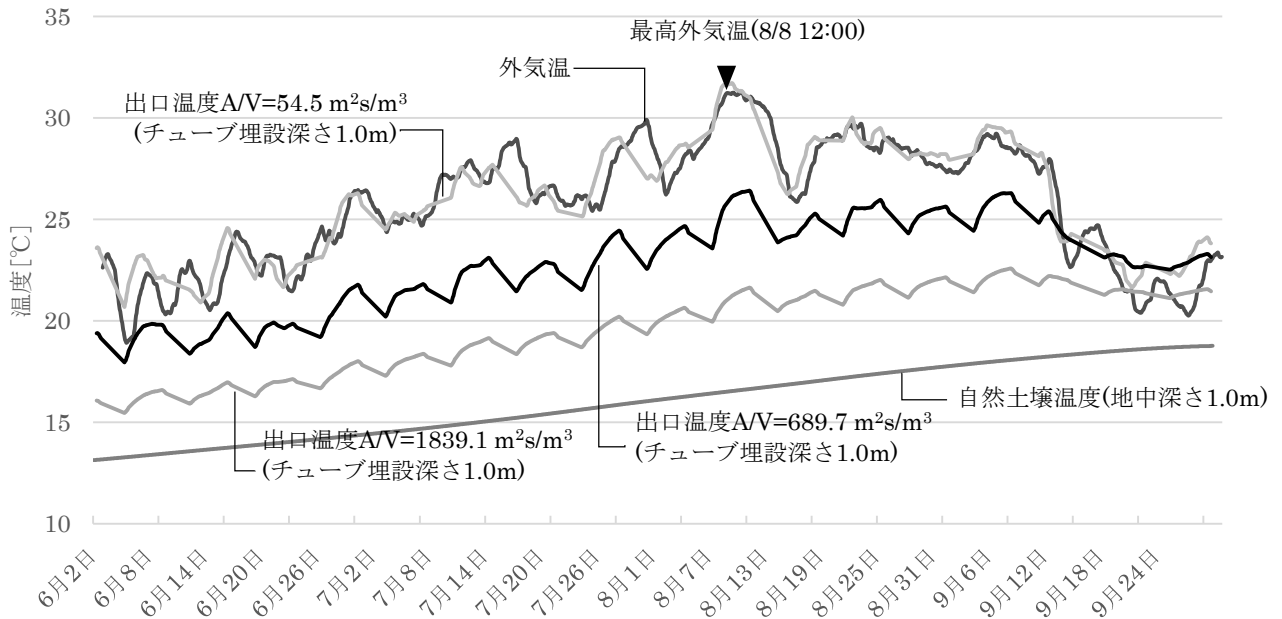


図-5 夏季における各温度の移動平均

3. AV を用いたクールチューブの設計手法の検討

図-3においてAVの大きさとチューブ出口温度に相関関係が見られた。そこで、夏季のチューブ運転時間中におけるチューブ出口温度の上位 2.5%にあたる値を設計出口温度(TAC2.5%)として、チューブ 1 本あたりの単位導入風量当りチューブ伝熱面積 A_1/V_1 との関係を図-6 に示す。また図中にプロットに対する回帰線を埋設深さ別に示し、表-2 にその回帰式を示す。なお、表-2 に示す回帰式は二次関数とし、 R^2 の値はどれも約 0.98 であった。この設計出口温度を、設計条件から算出した A_1/V_1 の大きさ(1840 $m^2/s/m^3$ 程度を上限として)から簡便に予測することを前提に、クールチューブの設計手順を検討する。

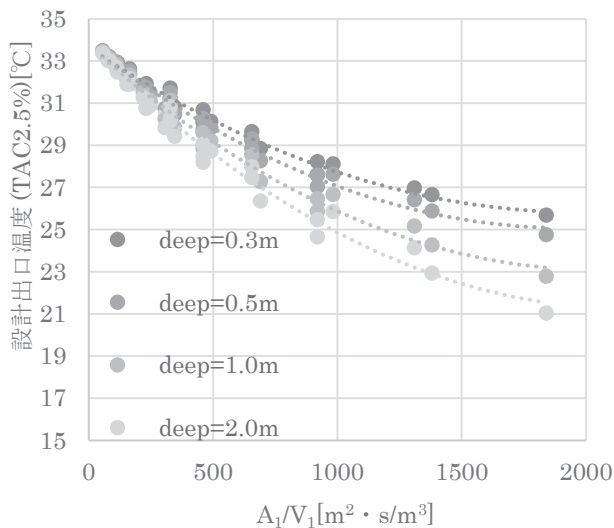


図-6 設計出口温度(TAC2.5%)の推定図

表-2 図-6 中の埋設深さごとの回帰式

埋設深さ	回帰式	R^2
0.3m	$t=2E-6(A_1/V_1)^2 - 0.0079(A_1/V_1) + 33.63$	0.983
0.5m	$t=2E-6(A_1/V_1)^2 - 0.0090(A_1/V_1) + 33.71$	0.985
1.0m	$t=3E-6(A_1/V_1)^2 - 0.0103(A_1/V_1) + 33.67$	0.983
2.0m	$t=3E-6(A_1/V_1)^2 - 0.0114(A_1/V_1) + 33.64$	0.980

3.1 建物概要

図-7 に示す実在建物を例にとり、提案するクールチューブの設計手法について述べる。対象建物は名古屋市所在の大学キャンパスの建物である。本建物は 4 階建てで延べ床面積は約 2040 m^2 である。用途は主に事務室と研究室、講義室である。人員密度は 0.2 人/ m^2 と仮定し必要換気量は 30 $m^3/人 \cdot h$ と設定している。

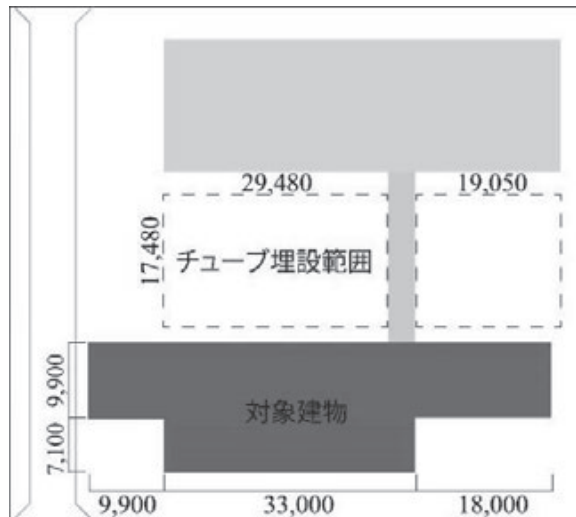


図-7 対象建物配置図

3.2 クールチューブの設計手法とケーススタディ

図-8 にクールチューブの設計フローを示し、以下に各手順について述べる。なお、括弧内に対象建物における計算値を記す。

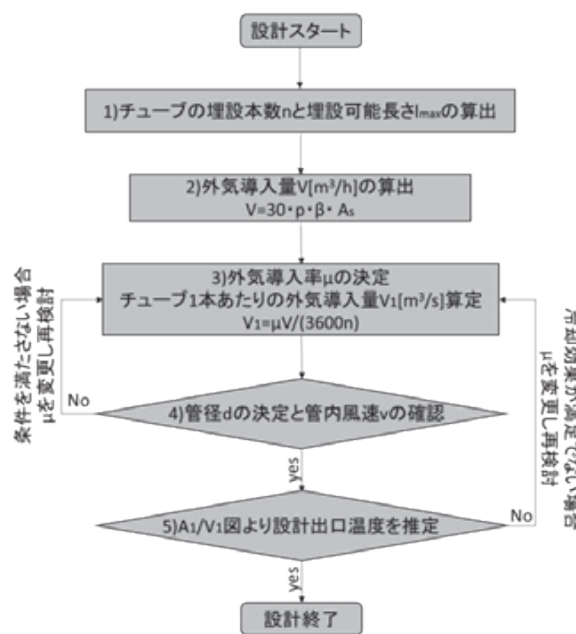


図-8 クールチューブの設計フロー

1) チューブの埋設本数・埋設可能長さ算出

まず、図-7 に示すように建物の建っていない範囲をチューブ埋設可能範囲とする。これは、本シミュレーションにおける地表面の設定を日陰の芝としているためである。なお、チューブ導入を計画段階から検討する場合は埋設可能範囲面積を以下の式により求めるとよい。

$$A_t = (1 - \alpha)A_s - A' \dots (1)$$

そして、チューブ埋設可能範囲を幅 5m に分割し、その奥行き方向をチューブ埋設可能長さ $l_{max}(=17.48m)$ と置き、分割した幅 5m の区画数を、チューブ埋設本数 $n(=8)$ とする。区画の幅を 5m としたのは、近接するチューブ同士が熱交換性能に影響を与えないようにするためである。

2) 外気導入量の算出

ここで、建物の必要外気導入量 $V(=12,240m^3/h)$ を算出する。なお、必要導入外気量は図-8 中に示すように想定される容積率 β や人員密度 p 等より算出できる。

3) チューブ 1 本あたりの外気導入量 V_1 の算定

必要導入外気量の内、チューブに導入する割合 $\mu(=1.0)$ を仮決定する。次に、チューブの埋設本数で除して、チューブ 1 本あたりの外気導入量 $V_1(=0.425m^3/s)$ を算出する。

4) 管径の決定と管内風速の確認

シミュレーション内で設定可能な管径は 0.35m と 0.50m であり、管内径が大きいほど A_1/V_1 は大きくなり、外気冷却効果をより見込める。そのため、この設計手法において外気冷却効果を優先する場合、管径を 0.5m(概略内径 0.489m) と設定すると良い。管径を決定したら、導入風量とチューブ断面積より管内風速 $(=2.26m/s)$ を算出する。その値がシミュレーションの設定条件である 0.5 ~ 3.0[m/s] 以内でない場合、外気導入率の再検討を要する。管内風速にこのような設定可能範囲を設けたのは、ファン動力に対して得られる冷却効果を考慮したためである。

5) 設計出口温度の推定

ここでは、チューブ 1 本あたりの伝熱面積 A_1 を算出し、 $A_1/V_1(=63.2m^2 \cdot s/m^3)$ を求める。そして、図-6 より設計出口温度を読み取る。なお、図-3 と同様に図-6 においても A_1/V_1 が小さい場合の埋設深さを大きくすることによる出口温度の低下度合も小さくなった。そのため、施工上の制限がないと仮定した上でコスト面を考慮し、対象建物におけるチューブの埋設深さは 0.3m とした。この時点で満足する冷却効果が得られない場合、外気導入率を小さくして再検討を行う。以上の手順により設計した対象建物の設計出口温度(TAC2.5%)は 33.1°C となった。また、外気温 TAC2.5%の値は 34.4°C となった。よって、外気温

TAC2.5%のピーク時における、チューブによる外気顕熱負荷軽減量は 5.25kW 以上を見込むことができる。

なお、図-9 にチューブ設計出口温度について TAC2.5%を考慮した場合と考慮しない場合との出口温度差を示す。 A_1/V_1 が $54.5m^2 \cdot s/m^3$ のとき、設計出口温度が 1.92°C 小さくなっていることがわかる。そのため、TAC 温度を考慮して設計出口温度を推定し、その A_1/V_1 が小さい際は、設計出口温度より比較的高い出口温度となる時間帯があることに注意が必要である。

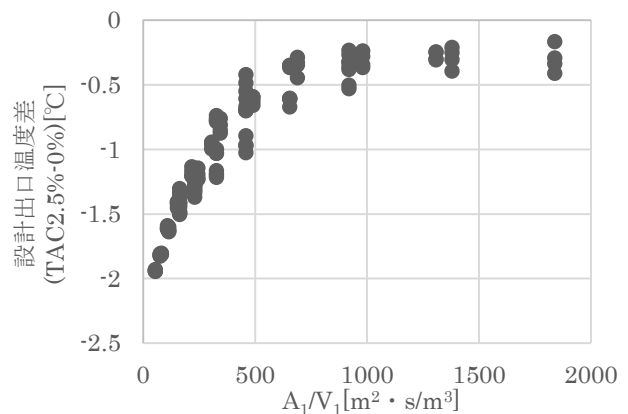


図-9 TAC2.5%の考慮をした場合としない場合における設計出口温度の差

4. 容積率・建蔽率と AV の関係

このように AV という指標を用いてチューブ設計出口温度の推定が可能である。そのため、企画や基本計画など建築の初期段階において、簡便に AV を概算することによりクール/ヒートチューブ導入による外気負荷軽減効果を予測可能とし、チューブの導入検討を容易にできないか検討する。

AV はチューブの伝熱面積と導入風量を変数に持っているが、チューブ伝熱面積は管長、管径により決定され、導入風量は必要換気量と外気導入率により決定される。今回のシミュレーションの設定条件では、建物直下にチューブは埋設しないよう設定をしており、敷地面積と建蔽率が決定していれば式(1)の通りにチューブの埋設可能な面積を算出でき、チューブの埋設間隔で除すことで管長を概算できる。また、導入風量についても容積率と人員密度が決定していれば式(2)に示すとおり算出できる。

$$V_1 = \mu(30 \cdot p \cdot \beta \cdot A_s) / n \dots (2)$$

そこで、敷地面積は平成 25 年度の東京における事務所ビルの平均敷地面積^(注2)3468m² として、容積率と建蔽率、外気導入率を変更しながら、AV との関係を確認した結果を図-10 に示す。

なお、本検討においては人員密度を 0.2 人/m²、必要換気量を 30m³/人・h、チューブ埋設間隔を 5m、管内風速を 0.5~3.0m/s とした。加えて、容積率と建蔽率の積の大小による敷地と建物状況の違いを図-11 に示す。

図-10、図-11 より、容積率と建蔽率の積が小さいほど、必要換気量に対してチューブ埋設可能面積は大きくなり、A/V と外気導入率を大きく設定できることがわかる。しかし、A/V 推定するためには外気導入率を決定しなければならない。

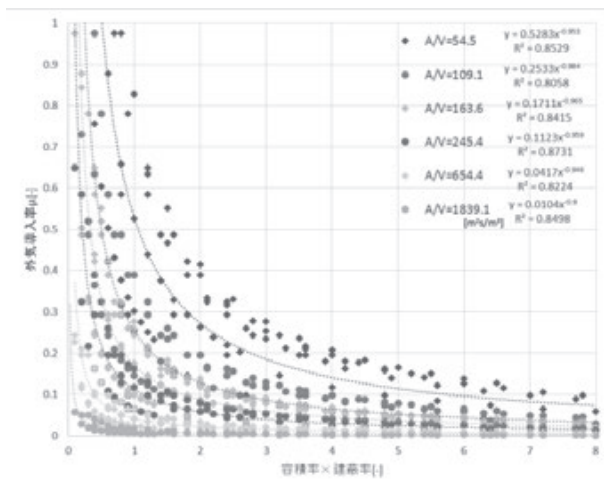


図-10 容積率と建蔽率の積により選択可能なA/Vと外気導入率の変化

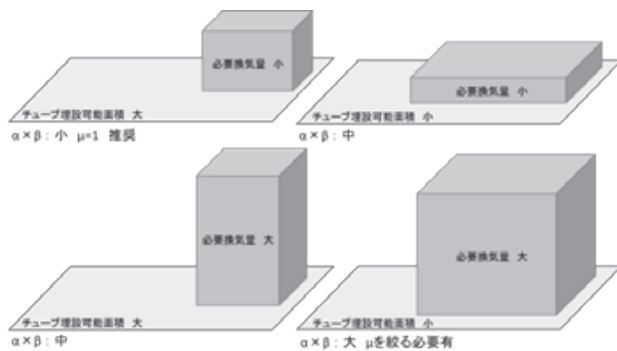


図-11 容積率と建蔽率の積の大小による敷地と建物状況の変化

同一の敷地・建物を対象に A/V と外気導入率を検討する場合には以下のような方針が考えられる。

- ・外気導入率を大きくしチューブへの導入風量が大きくなるが、A/V は小さくなり図-5 からわかるように夏季のチューブ出入口温度差の積算値は小さくなる。
- ・A/V を大きくとり夏季のチューブの積算出入口温度差を大きくし、外気導入率は絞りチューブへの導入風量を小さくする。

このような場合に、どちらの交換熱量が大きくなるか知ることとでチューブの性能を評価できるが、この点が現段階では不明瞭となっている。そのため、A/V の大小による積算交換熱量または積算チューブ出入口温度差の予測方法を検討することを要することとなる。

5.まとめ

本報では、三次元単純熱伝導の数値解析モデルによるシミュレーション結果を用いて、夏季におけるチューブ出口温度についてチューブのパラメータスタディを行なった。その結果より単位導入風量当りのチューブ伝熱面積を変数に持つ二次関数によりチューブ設計出口温度を示し、併せてチューブの設計方法の提案とケーススタディを行なった。また、容積率と建蔽率の積ごとに、外気導入率と単位導入風量あたりのチューブ伝熱面積の設定可能範囲を概算したが、外気導入率の設定方法を提案する必要がある。今後は、A/V による積算交換熱量や積算出入口温度差の推定方法の検討が主な課題となる。

記号

t_o : チューブ出口温度[°C] t_m : チューブ入口温度(外気温)[°C] n : チューブ本数[本] l_{max} : チューブ埋設可能長さ[m] V : 外気導入量[m³/h] p : 人員密度[人/m²] A : チューブ内側表面積[m²] A_t : チューブ埋設可能面積[m²] A' : 日陰の芝以外の地表面積[m²] A_s : 敷地面積[m²] α : 建蔽率[-] β : 容積率[-] μ : 外気導入率[-] v : 管内風速[m/s]

添え字 1: チューブ 1 本あたり

注釈

注 1)数値解析モデルの地中における熱収支式

$$c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial z^2} \right)$$

θ : 温度[°C] λ : 熱伝導率[W/m・K] c : 比熱[kJ/kg・K] ρ : 密度[kg/m³]

t : 時間[h] 添え字: s 土壌

注 2)日本ビルディング連合会(<http://www.jboma.or.jp/>)より

参考文献

- 1) 張、石原: クールチューブの設計出口温度と冷却エネルギー量の検討 第2報、日本建築学会計画系論文集第 477 号、pp.11-18、1995.11
- 2) 尹、奥宮、田中ら: 近接埋設されたクール/ヒートチューブの熱交換特性 その1、日本建築学会環境系論文集第 579 号、pp.45-52、2004.5