

空調制御用室内温度センサの時定数 に関する研究

林 茂 広*¹ 吉 田 治 典*²
鈴 木 正 美*³ 岡 田 勝 行*³
松 本 博*⁴

近年、空調システムの最適制御、最適運転、コミッショニングが注目されているが、その検討には空調システムで使用される機器それぞれの動特性把握が不可欠である。特に室温を計測するセンサは、その出力信号で空調システムの最も主要な制御対象である室温が制御され、また間接的には熱源システムの制御動作にも影響が及ぶので非常に重要である。しかし、センサの動特性を究明した既往の研究例はほとんどない。そこで本研究では、種々の条件のもと実験室実験と現実の室内での実験を実施し、室温センサの時定数を見だし検討を加えた。

キーワード：室温センサ，自動制御，時定数，実験，同定

はじめに

空調システムの主たる制御目標は、室空気の温度、湿度、清浄度であるが、システムを構成する多くのサブ機器は室温を制御するために稼働する。室温を制御するには、給気風量や冷水・温水コイルの水量が制御され、それらと連動して冷凍機、ボイラなど熱源システムも制御される。つまり、室温センサの出力する信号は空調システム全体の挙動に大きな影響を与える。

近年、欧米や日本では空調システムのコミッショニング（性能の検証）ツールの一つとして、動的シミュレーション手法が注目されている^{1), 2), 3)}。この手法は空調システムの運転管理の最適化やサブ機器の不具合を検知するために有効で^{4), 5)}、省エネルギー上重要である。

この研究を推進する上で、空調システムの制御挙動に大きな影響を持つ室温センサの動特性の把握が不可欠であるが、実システムに用いられるセンサの特性はメーカーの表示もなく、これを対象とした既往の研究もほとんど見られ

ない。

そこで本研究では室温センサを熱容量を持つ系として扱い、その動特性の把握とモデル化を目指す。具体的には、まず実験1として恒温恒湿室の風洞実験によって室温センサの時定数をその周辺気流の風速と風向別に表示し、次にその応答を熱容量系の非定常モデルで同定し比較・検証する。

次に実験2として居室に設置したセンサでも応答実験を行い、これから得た時定数を風洞実験のものと比較して現実的な時定数を提案する。

実際の空調システムに使用される室温センサの測温素子は、白金 (Pt)、サーミスタ (シリコン PTC)、銅 (Cu) が用いられることが多い。そこで本研究では最も多用されるタイプのセンサである Pt100Ω、PTC、Cu100Ω の3種類を用いることとした。センサの形状と内部における測温素子の位置を図-1に、その特性を表-1に記す。

1. 実験1 風洞による応答実験

1.1 実験装置と実験方法

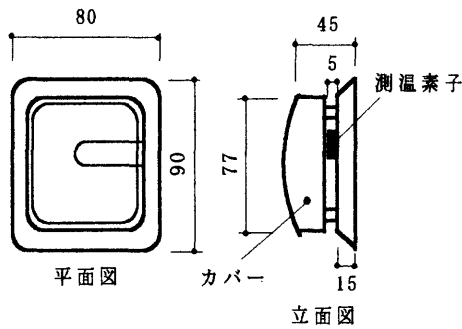
実験1では、風洞を用いて、定方向、定速度、定温度ステップ入力の気流を与えたときのセンサ応答を実測した。

*1 豊橋技術科学大学大学院 学生会員

*2 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 正会員

*3 新菱冷熱工学(株) 正会員

*4 豊橋技術科学大学工学部建設工学系 正会員



注 センサの形状は、Pt100Ω、PTC、Cu100Ωの3種類とも同じである

図-1 センサ形状 (単位 mm)

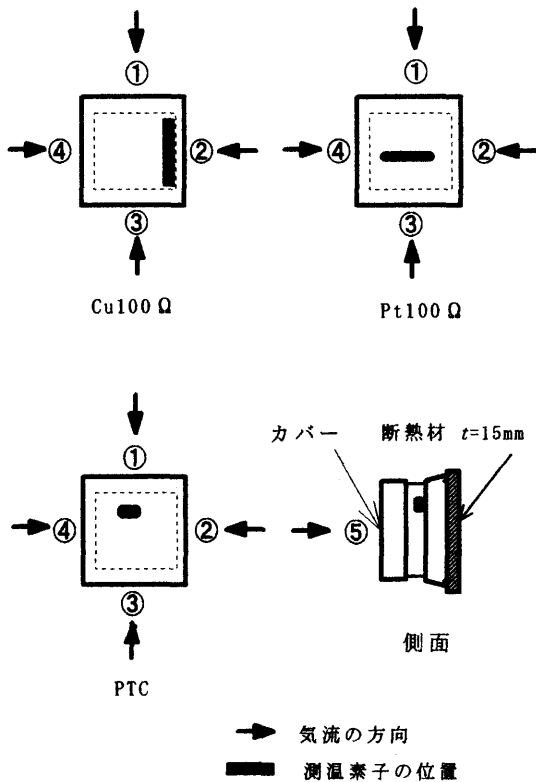


図-2 気流の方向

給気ファン、ダクト、電気ヒータなどで構成される風洞(図-3)を恒温恒湿室内に設置し、その内部にセンサを固定するための厚さ1.5mmの設置台を設けた。センサは、センサ背面からの熱伝導の影響を最小にするため台の上部に断熱材(15mm)を介して固定し、図-2に示すようにセンサ

側面の①~④、センサ正面である⑤の方向から定温度の気流を当てた。そして室温センサの出力値がほぼ定常であることを確認した後、電気ヒータによってダクト内部の気流を約2℃加熱してセンサに温度ステップ入力を与え、センサの出力を1秒間隔で2700秒間測定した。また、低温のステップ入力を与える実験も行った。これは、あらかじめ加熱したダクト内気流の温度が600秒間ほぼ定常であることを確認した後、ヒータをoffにすることによって達成した。

センサに当てる風速は、給気ファンの回転数を制御して0.15、0.25、0.35m/sの3段階に変化させた(表-2)。気流の温度がステップ状に変化することを確認するために、極細(0.1mmφ)の銅-コンスタンタン熱電対(T-CC)によって気流の温度を測定した。気流の風速は熱線微風速計を用いて測定した。

ダクトの断面方向における温度と風速の均一性を確認するため一本の熱電対と熱線微風速計を用いて、図-4、図-5に示す15点で1秒間隔にて180秒間測定して平均値を算出した。風速0.25m/sのとき、センサ設置場所におけるダクト断面の風速と温度を図-4、図-5に示す。これらから、センサ設置場所における断面方向の風速と温度は、ほぼ均一であることが確認できる。また測定中の恒温恒湿室内の気温と相対湿度は、常に24.5℃、45%(RH)に制御した。

表-1 室温センサの特性

	Pt100Ω	PTC	Cu100Ω
測温素子	白金測温抵抗体	PTCシリコン感温素子	銅測温抵抗体
	基準抵抗比 1.385	基準抵抗 25℃で 1035Ω, 正特性	Cu100Ω/℃
測温素子の温度検出精度	A級 0.15+0.002t (t:温度)	±0.1℃, 補償点 において ±0.3℃	0.5級相当
測定範囲	0~70℃	0~50℃	0~50℃
カバー	材質:ABS樹脂, 仕上げ:オフホワイト		

表-2 センサに当てる気流の条件

風向	①, ②, ③, ④, ⑤
風速 [m/s]	0.15, 0.25, 0.35
気流の加熱または冷却温度 [℃]	1.7~2.0

空調制御用室内温度センサの時定数に関する研究

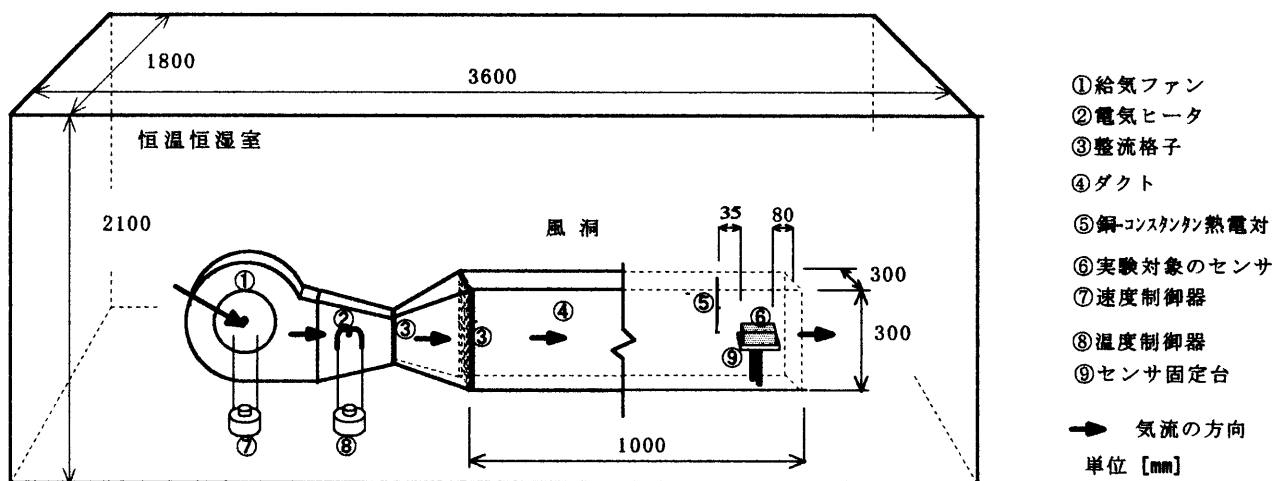


図-3 実験1 恒温恒湿室内の風洞実験装置

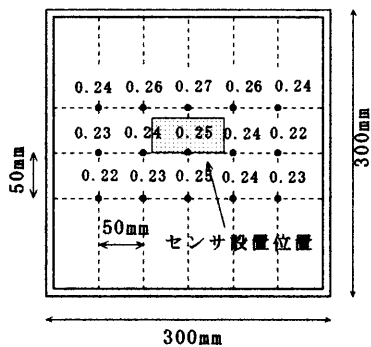


図-4 センサ設置場所の風速 [m/s]

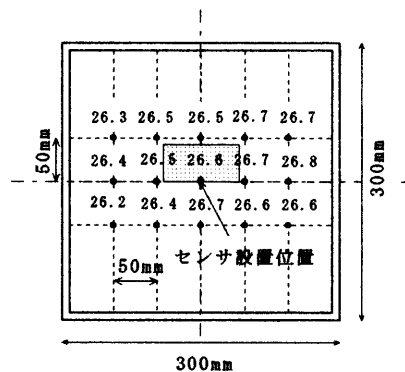


図-5 センサ設置場所の温度 [°C]

1.2 実験1の結果

図-6～図-8に、加熱時、冷却時におけるPt100Ω、PTC、Cu100Ωの1秒ごとの出力値を、T-CCでは8秒間の移動平均の出力値を示す。T-CCの推移より、本実験では、ほぼ満足のゆく温度ステップ入力が与えられたといつてよい。

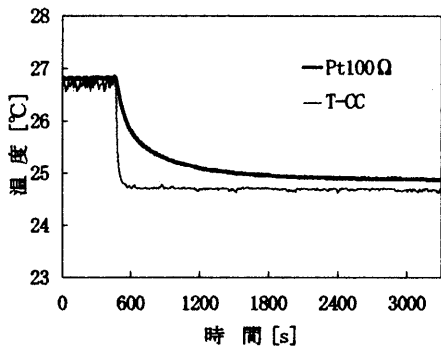


図-6 Pt100Ω実測値 (風速0.35m/s, 風向④)

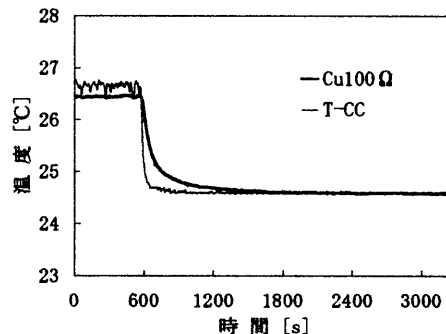


図-7 Cu100Ωの実測値 (風速0.25m/s, 風向②)

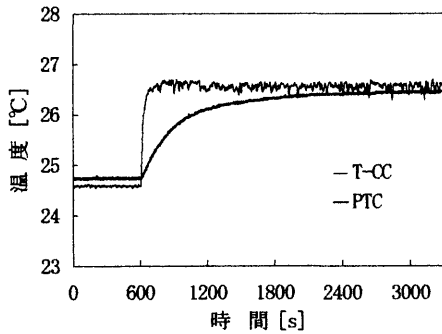


図-8 PTC 実測値 (風速 0.25m/s, 風向①)

センサに当たる気流に対して風速, 風向の条件別に算出した時定数を図-10~図-12, 表-3~表-8 に示す. また式(1)にて, 全風向に対し単純平均した時定数を, 標準偏差と共に表-3~表-8 に示す.

$$\tau_m = \frac{(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5)}{5} \dots (1)$$

ここに,

τ_m : 平均時定数 [s]
 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$: 各風向の時定数 [s]

なお, ここでは一般工業用の抵抗温度センサの時定数に関する定義^{9), 10)}より(図-9)時定数を算出した. ただし本報では, センサに温度ステップ入力を与える前の180秒間の気流平均温度(T_1)と, 温度ステップ入力を2700秒間与え続け, 定常に達した後の180秒間の平均温度(T_2)との差(ΔT)をとり, そして温度ステップ入力後0.632 ΔT となる時間を時定数とする. 以後, これを「実験時定数」と呼ぶことにする.

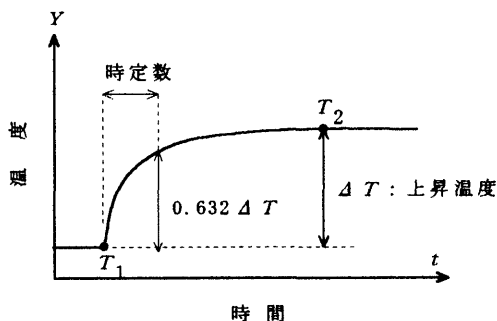


図-9 時定数の算出方法

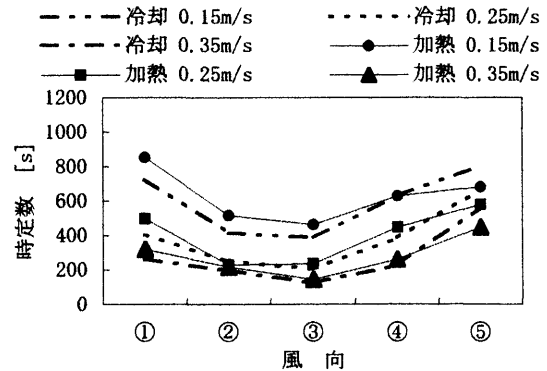


図-10 Pt100Ωの実験時定数

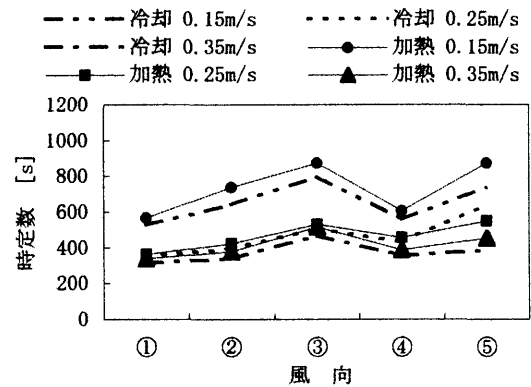


図-11 PTCの実験時定数

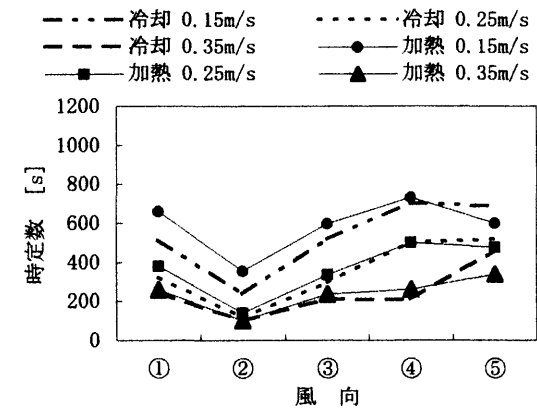


図-12 Cu100Ωの実験時定数

表-3 Pt100Ω加熱時の実験時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均時定数	標準偏差
	①	②	③	④	⑤		
0.15	852	516	463	629	682	629	152
0.25	496	227	233	447	512	383	142
0.35	320	245	143	260	498	293	131

表-4 Pt100Ω冷却時の実験時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均時定数	標準偏差
	①	②	③	④	⑤		
0.15	724	417	388	631	802	592	184
0.25	405	250	207	384	628	375	165
0.35	263	198	124	224	518	265	150

空調制御用室内温度センサの時定数に関する研究

表-5 PTC 加熱時の実験時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均 時定数	標準 偏差
	①	②	③	④	⑤		
0.15	567	737	874	607	865	730	142
0.25	363	423	532	457	548	465	77
0.35	340	379	516	386	453	415	70

表-6 PTC 冷却時の実験時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均 時定数	標準 偏差
	①	②	③	④	⑤		
0.15	527	643	799	557	731	651	115
0.25	353	397	508	435	638	466	111
0.35	319	340	468	356	383	373	58

表-7 Cu100Ω 加熱時の実験時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均 時定数	標準 偏差
	①	②	③	④	⑤		
0.15	661	355	597	706	601	584	136
0.25	380	140	335	502	475	366	144
0.35	258	103	236	262	338	239	85

表-8 Cu100Ω 冷却時の実験時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均 時定数	標準 偏差
	①	②	③	④	⑤		
0.15	514	238	521	699	690	532	187
0.25	326	119	297	504	521	353	166
0.35	246	102	211	210	461	246	132

1.3 実験時定数に対する考察

図-10～図-12, 表-3～表-8 より各実験時定数が, センサに当たる気流の風速, 風向の条件によって異なることが判る。風速が大きくなるにつれて時定数は小さくなり, 特に Pt100Ω, Cu100Ω の平均時定数を比較すると風速 0.15 m/s では 0.35 m/s の 2 倍以上となる。全実験に対する平均時定数は, Pt100Ω が 423 秒, PTC は 516 秒, Cu100Ω は 387 秒であり, Cu100Ω, Pt100Ω, PTC の順に時定数が大きくなる。これから外部形状が同じセンサに, 同一の風向, 風速, 温度ステップ入力を加えたとしても, 測温素子の違いによって時定数に約 30 秒～120 秒の違いがあること, 同種の測温素子を有するセンサであっても, センサに当たる気流の方向により時定数の大きさは 100～300 秒程度異なることが判る (図-10～図-12)。これはカバー内部における測温素子の位置の影響によるものであり, Pt100Ω では風向③の時定数が最小となり, PTC は風向①と風向④が, Cu100Ω は風向②の時定数が最小であった。また Cu100Ω は風向④, PTC においては風向③の時定数が最大であることから, 測温素子の位置が風上側に近いほど時定数は小さくなり, 遠いほど大きくなるという定性的に推測し得る結果が確認された。

また, 平均実験時定数と風速の関係は式 (2)～(4) の累乗近似式によってよく表現できる。

$$\tau_{m, Pt100} = 106 v^{-0.92} \quad (R = 0.999) \quad \dots\dots (2)$$

$$\tau_{m, PTC} = 191 v^{-0.67} \quad (R = 0.992) \quad \dots\dots (3)$$

$$\tau_{m, Cu100} = 90 v^{-0.97} \quad (R = 0.995) \quad \dots\dots (4)$$

ここに,

$$\tau_{m, Pt100}, \tau_{m, PTC}, \tau_{m, Cu100} : \text{各センサの平均実験時定数 [s]}$$

$$v : \text{センサに当たる気流の風速 [m/s]}$$

注 () は実測値に対する近似式の相関係数

式 (2)～(4) で風速 0.09m/s 以下を与えると, 各時定数が 900 秒を超え, 自動制御の観点からは好ましくない。そのため居室にセンサを取付ける位置は, ある程度風速の大きくなる場所を選定することが大切である。例えば時定数 600 秒以下を目標とすれば, 風速は Pt100Ω で $v > 0.15\text{m/s}$, PTC は $v > 0.18\text{m/s}$, Cu100Ω では $v > 0.14\text{m/s}$ となる。つまり 0.2m/s 以上の風速が望まれる。

なお, 同一センサで加熱時と冷却時の時定数が異なる原因は, 測温素子が持つヒステリシス^{9), 10)}と実験装置全体を含むわずかな測定誤差が影響していると考えられる。

1.4 熱容量系のモデルを用いた同定

上記の実験時定数は, 単熱容量系のモデルを仮定して求めた値である。しかしセンサの構造を詳細に見ると, センサ各部の温度は一樣でなく, 正確には指数関数一項で応答が表される訳ではない。そこで本報では, この仮定がどの程度成立するのかを検証した。

(1) 単熱容量系による時定数の同定

測温素子の温度分布を一樣, つまり単熱容量と仮定したモデルは次式で表せる。

$$C \frac{dT}{T_a - T} = U dt \quad \dots\dots (5)$$

ここに,

- T_a : 周辺空気温度 [°C]
- T : センサ温度 [°C]
- U : 測温素子の伝熱係数 [W/°C]
- C : 測温素子の相当熱容量 [J/°C]

式 (5) を T の初期値 T_0 を基に解けば次式が得られる。

$$T = T_a + \beta \exp \left[-\frac{1}{\tau} t \right] \quad \dots\dots (6)$$

ここに,

- β : $(T_0 - T_a)$ [°C]
- $\tau = (C/U)$: 時定数 [s]
- t : 時間 [s]

式 (6) は TRANSYS や HVACSIM+ など, 空調システムの動的シミュレーションプログラムで室温センサの応答特性を表すモデルとして使用されている^{11), 12)}。実際には, この式を

用いて実験値から最小二乗法によって時定数 τ を推定し、それを「同定時定数」と呼ぶことにする。なお、同定時定数は相当熱容量 C と伝熱係数 U の比として表せるが、熱容量の算定は難しく、伝熱係数は風速、風向に依存していることから、 U の特定も困難である。この同定時定数を用いて算出した応答と実験 1 で得られた実験結果の比較を図-13~図-16 に示す。また加熱時、冷却時における風向別、風速別の時定数と式(1)によって全風向を単純平均した平均時定数を表-12~表-17 に示す。また同表中には、平均実験時定数に対する同定値から求めた平均同定時定数の比も示す。表-9~表-11 には、センサ出力温度の実測値と同定時定数で得たセンサ出力温度推定値の相関係数を示す。

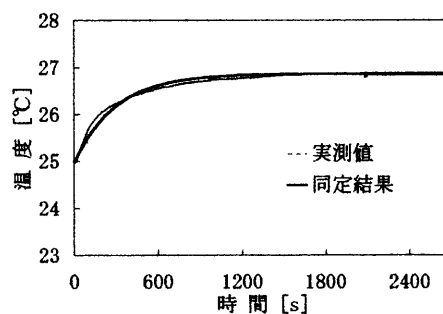


図-16 Cu100Ωの応答(風速0.35m/s, 風向①, $R=0.973$)

表-9 Pt100Ωの相関係数

風速 [m/s]	加熱時		冷却時	
	最小値	最大値	最小値	最大値
0.15	0.984	0.998	0.985	0.998
0.25	0.946	0.994	0.954	0.988
0.35	0.947	0.993	0.949	0.997
全平均	0.966		0.979	

表-10 PTC の相関係数

風速 [m/s]	加熱時		冷却時	
	最小値	最大値	最小値	最大値
0.15	0.993	0.998	0.993	0.998
0.25	0.995	0.998	0.994	0.998
0.35	0.995	0.998	0.996	0.998
全平均	0.995		0.997	

表-11 Cu100Ωの相関係数

風速 [m/s]	加熱時		冷却時	
	最小値	最大値	最小値	最大値
0.15	0.992	0.997	0.990	0.997
0.25	0.980	0.998	0.986	0.988
0.35	0.972	0.997	0.975	0.998
全平均	0.990		0.991	

表-12 Pt100Ω加熱時の同定時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均同定時定数
	①	②	③	④	⑤	
0.15	829	567	496	652	626	634 (1.01)
0.25	506	300	298	369	497	394 (1.03)
0.35	352	292	171	294	518	325 (1.11)

注：() 内は実験で得た平均時定数との比

表-13 Pt100Ω冷却時の同定時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均同定時定数
	①	②	③	④	⑤	
0.15	797	462	379	649	804	618 (1.04)
0.25	445	315	201	346	604	382 (1.02)
0.35	300	251	171	275	557	311 (1.16)

表-14 PTC 加熱時の同定時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均同定時定数
	①	②	③	④	⑤	
0.15	588	761	861	630	902	748 (1.02)
0.25	397	456	550	492	548	489 (1.05)
0.35	344	397	521	407	461	426 (1.03)

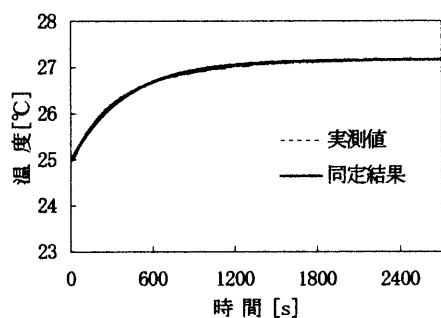


図-13 PTCの応答(風速0.35m/s, 風向②, $R=0.997$)

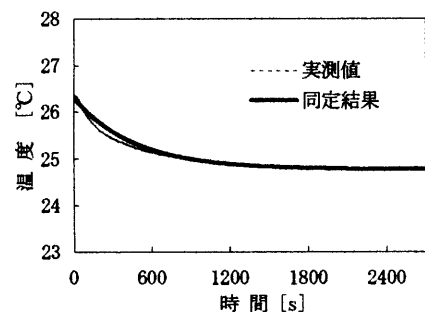


図-14 Pt100Ωの応答(風速0.25m/s, 風向④, $R=0.975$)

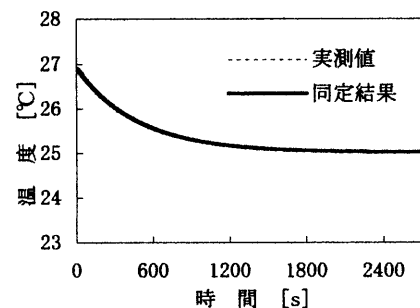


図-15 PTCの応答(風速0.25m/s, 風向④, $R=0.995$)

空調制御用室内温度センサの時定数に関する研究

表-15 PTC 冷却時の同定時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均同定 時定数
	①	②	③	④	⑤	
0.15	545	637	784	576	701	648 (0.99)
0.25	348	433	504	406	650	468 (1.00)
0.35	344	363	480	372	390	390 (1.05)

注：() 内は実験で得た平均時定数との比

表-16 Cu100Ω 加熱時の同定時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均同定 時定数
	①	②	③	④	⑤	
0.15	651	355	684	791	639	624 (1.07)
0.25	401	170	359	508	502	388 (1.06)
0.35	297	124	266	293	363	269 (1.13)

表-17 Cu100Ω 冷却時の同定時定数 [s]

風速 [m/s]	風向					平均同定 時定数
	①	②	③	④	⑤	
0.15	522	295	536	721	700	554 (1.04)
0.25	325	142	331	511	530	368 (1.04)
0.35	279	126	224	247	459	267 (1.09)

まず Pt100Ω センサについて考察する。センサ出力温度の実験値と同定によって得た推定値の相関係数は、全実験条件で 0.946~0.998 となった (表-9)。実験時定数と同定時定数の平均値の差は、風速 0.15m/s, 0.25m/s では 5%以内であるが、0.35m/s で最大 16% になった (表-13)。

次に PTC センサについて考察する。表-14, 表-15 に PTC の同定時定数を列挙する。風速, 風向別にみても相関係数は 0.993~0.998 の範囲にある (表-10)。実験時定数と同定時定数の差は、全風速条件において 5%以内であった。すべての実験条件で見ても、実験時定数と同定時定数の差は 10%以内であった。

次に Cu100Ω センサについて見ると、相関係数は 0.972~0.998 の範囲にある (表-11)。風速が 0.15m/s, 0.25m/s では、実験時定数と同定時定数の差は 7%以内であるが、風速 0.35m/s では、その差が 11%程度となる (表-16, 表-17)。

以上の結果から、風速が遅い、つまり時定数が大きい場合には、単熱容量系のモデルで十分にセンサの動特性が表せるが、風速が速い、つまり時定数が小さい場合には 10%程度の誤差が現れることがある。これは風速が速いとセンサの内部に温度分布が生ずるためと考えられる。このような差の最も大きな例を図-17, 図-18 に示す。

そこでセンサを 2つの熱容量系と見なしたモデルを用いて、どの程度モデルが改良可能かを検討する。

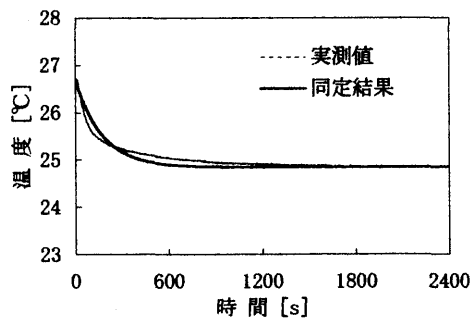


図-17 Pt100Ω の応答 (風速 0.35m/s, 風向③)

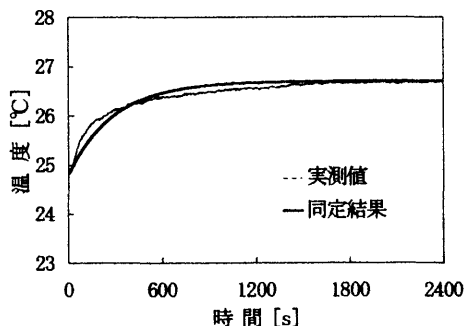


図-18 Pt100Ω の応答 (風速 0.35m/s, 風向②)

(2) 2熱容量系による時定数の同定

センサを 2つの独立な熱容量系 (それぞれを添字 1, 2 で示す) と考え、それぞれに式 (6) を適用する。

つまり

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T_a + \beta'_1 \exp\left(-\frac{1}{\tau_1} t\right) \\
 T_2 &= T_a + \beta'_2 \exp\left(-\frac{1}{\tau_2} t\right)
 \end{aligned}
 \quad \dots (7)$$

センサの温度出力は、これら 2つの温度が合成されたものとする。つまり

$$\begin{aligned}
 T &= rT_1 + (1-r) T_2 \\
 &= T_a + r\beta'_1 \exp\left(-\frac{1}{\tau_1} t\right) + (1-r) \beta'_2 \exp\left(-\frac{1}{\tau_2} t\right) \\
 &= T_a + \beta_1 \exp\left(-\frac{1}{\tau_1} t\right) + \beta_2 \exp\left(-\frac{1}{\tau_2} t\right)
 \end{aligned}
 \quad \dots (8)$$

ただし、 $\beta_1 = r\beta'_1$

$$\beta_2 = r\beta'_2$$

T_a : 周辺空気温度 [°C]

T : センサの出力温度 [°C]

r : 熱量 1 が全体に果たす比率 [-]

τ_1, τ_2 : 時定数 [s]

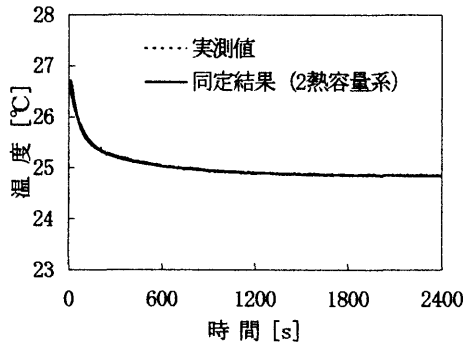


図-19 Pt100Ωの応答(風速0.35m/s, 風向③)

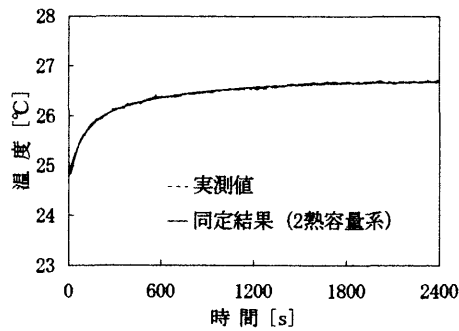


図-20 Pt100Ωの応答(風速0.35m/s, 風向②)

図-17, 図-18の実験結果を用いて式(8)のパラメータ $\beta_1, \beta_2, \tau_1, \tau_2$ を最小二乗法で同定し, その応答を図-19, 図-20に示す. これらから2熱容量系モデルは精度良く応答がモデル化できることが判る.

表-18 Pt100Ω加熱時の相関係数

風速	風向				
0.35m/s	①	②	③	④	⑤
単熱容量	0.974	0.947	0.948	0.981	0.993
2熱容量	0.998	0.998	0.997	0.998	0.996

表-19 Pt100Ω冷却時の相関係数

風速	風向				
0.35m/s	①	②	③	④	⑤
単熱容量	0.970	0.959	0.949	0.974	0.997
2熱容量	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998

表-20 Pt100Ω冷却時の相関係数

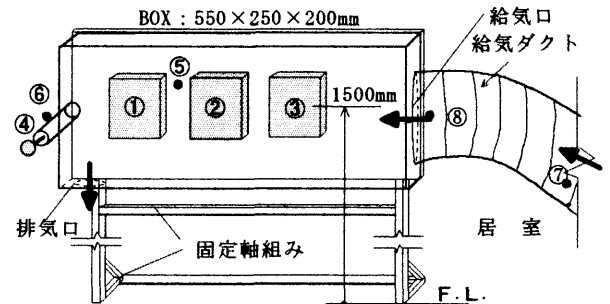
風速	風向				
0.25m/s	①	②	③	④	⑤
単熱容量	0.984	0.966	0.954	0.975	0.988
2熱容量	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998

2. 実験2 居室内に設置したセンサの応答実験

実験2では定風量空調システムによって制御され, 実際にオフィスとして使用されている居室において, 室温センサの応答実験を行った. そして実験1と同様に時定数を同定し, その結果を比較・考察する.

2.1 実験2の実験概要

実際に使用されている居室内ペリメータ部分の床面高さ約1.5mの位置に, 実験1と同様の方法でCu100Ω, PTC, Pt100Ωの室温センサを設置した(図-21). そして, センサ周囲を合板と断熱材で作った箱(以下; BOXと称する)で囲み, BOX内外に銅-コンスタンタン熱電対を, BOXの外側に熱線微風速計を設置した. BOXには給気口と排気口を設け, 実験1で使用した風洞からの給気をBOXの給気口から導入し, 居室より温度が約2°C高い気流を送風し続ける. こうしてBOX内の気温を約600秒間ほぼ一定に保った後, 素早くBOXを取り去って, 室温センサに居室の環境下による温度ステップ入力を与えた.



- ① Cu100Ωセンサ
- ② PTCセンサ
- ③ Pt100Ωセンサ
- ④ 熱線微風速計
- ⑤ ボックス内温度測定用 銅-コンスタンタン熱電対
- ⑥ 居室の室温測定用 銅-コンスタンタン熱電対
- ⑦ 給気温度測定用 銅-コンスタンタン熱電対
- ⑧ 給気温度測定用 銅-コンスタンタン熱電対

図-21 居室内応答の実験装置

2.2 結果と比較

実験結果を図-22に示す. また単熱容量系モデルを仮定した同定結果から算出した応答と実験値とを図-24に示す. 更に実験結果を用いて, 実験1と同様の方法(図-9)で求めた実験時定数と同定時定数を表-21に示す. BOXを取り去る直前の600秒間の平均温度(T-CC)は26.5°Cであり, BOXを除去した後の2700秒間の気温(T-CC)は約23.4~24.5°Cの範囲で変動し, その平均値は24.1°Cであった. これは室内温度センサに平均温度差, 約2.4°Cの温度ステップ入力を与えたことになる. また微風速計設置位置の風速は0.03m/s~0.25m/sの範囲で変動し, その平均風速は0.14m/sであった(図-23).

図-24より, PTCセンサの応答速度が最も遅く, つまりPTCの時定数が最大であり, 次にCu100Ω, Pt100Ωと続く. 実

空調制御用室内温度センサの時定数に関する研究

際の居室では室温センサに対して、ランダムな風向、風速、温度が作用していると考えられるが、実験1の冷却時で風速0.15m/sに対する値が最も近いと考え両者の比較を行う。実験1の時定数より実験2の時定数はPt100Ωセンサが4秒、PTCセンサが132秒、Cu100Ωセンサは89秒大きくなった。実験2の平均風速が0.15m/sより若干小さいことから、実験2の時定数が実験1の時定数より大きくなることは妥当である。

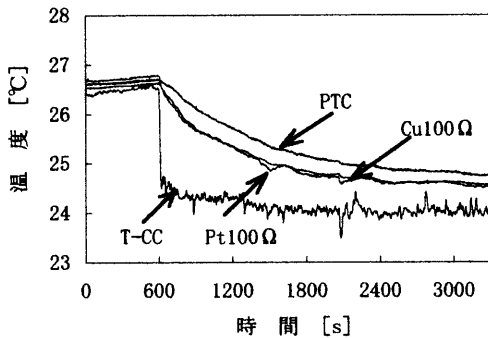


図-22 居室実験の実測値

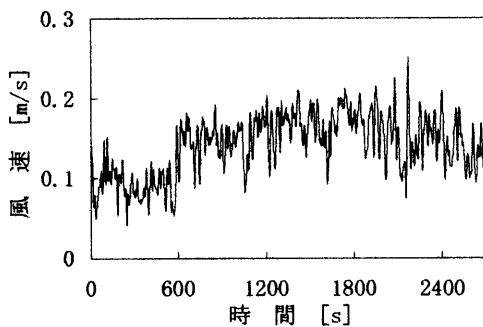
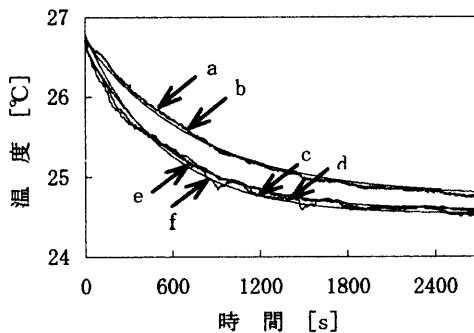


図-23 居室の風速



- a: PTC 同定結果 d: Pt100Ω 同定結果
b: PTC 実験値 e: Cu100Ω 同定結果
c: Pt100Ω 実験値 f: Cu100Ω 実験値

図-24 居室でのセンサ応答

表-21 居室実験の時定数 [s]

	Pt100Ω	PTC	Cu100Ω
A. 実験時定数	596	783	621
B. 同定時定数	533	778	586
A, Bの比 (A/B)	1.12	1.01	1.06

また実験時定数に対する同定時定数の差は、PTC, Cu100Ωでは10%以内(表-21)であり、Pt100Ωが最大であった。これは応答中、Pt100Ωの上下変動が他のセンサより大きい、つまりPt100Ωセンサ周辺の風速の変動が大きかったことが原因として考えられるが、その時定数は単熱容量系モデルを用いた場合でも10%程度の誤差で表せる。

まとめ

本研究では、これまでほとんど研究報告がなく、メーカー側からも明示されていない、一般ビル空調システム制御に使用される、室温センサの時定数を実験的に求めた結果を報告した。

実験では、最も一般的に用いられるCu100Ω, PTC, Pt100Ωの測温素子の室温センサに約2°Cの温度ステップを入力として与え、気流の風速、風向を変化させて温度センサの応答を測定した。また実際に空調された居室に設置したセンサの応答も計測した。そして、これらの実験値から求めた実験時定数と、熱容量系のモデルを用いて同定した時定数の比較を行った。以下に本報の結論を記す。

1) 実験室の風洞実験(実験1)より

a) 一定の風向、風速、温度ステップ入力を与えた3種類のセンサの全平均の時定数は442秒であった。各種別のセンサの平均時定数は、Cu100Ω, Pt100Ω, PTCの順に大きく、それぞれ387秒, 423秒, 516秒であった。最小のCu100Ωと最大のPTCには約130秒の差がある。また全平均時定数(442秒)に対する各種センサの平均時定数の比は、Cu100Ω, Pt100Ω, PTCに対してそれぞれ87%, 96%, 117%であった。

b) 同じセンサであっても、センサに当たる気流の風速によって時定数に2倍程度の差が見られる。風速0.25m/sを基準の時定数としたとき、風速0.15m/sと0.35m/sの時定数の比は、Pt100Ωでは、それぞれ+61%, -26%, PTCは+48%, -15%, そしてCu100Ωでは+55%, -32%であった。

c) 室温センサに当たる気流の風速が一定であっても、風向の違いにより温度センサの時定数は異なる。測温素子が風上側にあれば時定数は小さくなる傾向にあり、全風向を平均した時定数に対して、最小となる風向では時定数の減少率は、Pt100Ωでは-38%, PTCは-20%, Cu100Ωは-55%であった。

d) 実験で得た平均時定数は風速の関数として累乗近似式

で表現でき、これより平均時定数を 600 秒以下とするには風速 0.15m/s 程度以上が必要であることが判った。

- e) 単熱容量系の熱伝導モデルによって、最小二乗法で時定数を同定した。実験時定数に対する同定時定数の比は、全平均で Pt100Ω が +6%、PTC は +3%、Cu100Ω +7% であった。このことから時定数は文献 9) に記述されるものでも、同定法によって求めたものでも大差ないことが判った。
- f) しかし、Pt100Ω、Cu100Ω について風速が 0.35m/s であるとき、実験時定数と同定時定数の差は 10~15% 程度となる。そこで、これらの実験値に対して 2 熱容量系のモデルによる同定を試みたところ、室温センサの応答をほぼ完全に表現できることが判った。
- 2) 居室での実験 (実験 2) より
- a) 定風量空調システムによって制御された居室のペリメータ部で室温センサの応答を計測した。実験時定数は、Cu100Ω が 621 秒、Pt100Ω が 596 秒、PTC が 783 秒であり、3 種類の全平均は 667 秒となった。
- b) 実験時定数と同定時定数の差は、Pt100Ω が最も大きく +12%、最小の PTC が +1% となり、全 3 種類の平均では +6% であった。
- c) 実験 1 の冷却時・風速 0.15m/s で得た平均実験時定数に対する居室での実験時定数の比は、Cu100Ω が +17%、Pt100 が +20%、PTC は +1% であった。つまり現実に空調制御用のセンサが設置される環境下でも実験 1 で得た平均時定数を 20% 程度以下の誤差で用いることが可能であることが判った。

なお、風速も風向も不明な時点で空調システムの動的な制御性能を検討する場合には、室温センサの時定数として本実験で得られた 400~600 秒 (全平均値 442 秒) 程度を標準と考えてよい。

またセンサのモデルは、センサに当たる風速の速い場合に単熱容量モデルでは完全に動特性が表現できないこともあるが、それに起因する誤差は少ないことから、単熱容量系モデルでも十分と判断できる。

今後の課題としては、

- 1) センサを設置する空間の風速の予測方法も含めて、センサ内部の熱的な構造をモデル化して製品情報から直接時定数を見出す手法の開発
- 2) ダクト用や水用センサの時定数の予測が挙げられる。

謝 辞

本研究中の実験は、国際省エネルギー機構 (IEA) Annex25 委員会 (1992 年~1996 年) の作業の一環として実施した。実験に使用した室内温度センサと変換器等の提供、ならびに温度センサの出力設定に関して、中村政治委員 (横河ジョンソンコントロールズ) の御協力を得た。

また実験を行うにあたり中原信生委員長 (名古屋大学名誉教授) を始め、各委員の皆様にご貴重な御意見を頂いた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 中原信生, 朱頼心: 動的シミュレーションの意義と動向, 空気調和・衛生工学, Vol.68 No.3, (1994), pp.161~170,
- 2) 鄭明傑, 西谷義彦, 林茂広, 中原信生: 動的シミュレーション HVACSIM+ の再現性とパラメータの調整に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No75 (1999-10), pp.39~48
- 3) Mingjie Zheng, Yoshihiko Nishitani, Shigehiro Hayashi, Nobuo Nakahara: Comparison of Reproducibility of a Real CAV System by Dynamic Simulation HVACSIM+ and TRNSYS, Building Simulation' 99 Vol. III, (1999), pp.1407~1414
- 4) Harunori Yoshida: Identifying Faults in HVAC Systems: Innovative Approach to FDD, CIBSEA: Building Service Engineering Reserch Technology No. 17, (1996), pp. B13~34
- 5) Harunori Yoshida et al.: Typical Faults of Air Conditioning Systems and Fault Detection by ARX Model and Extended Kalman Filter, ASHRAE Transactions Vol. 102 Part1, (1996), pp.557~564
- 6) 林茂広, 吉田治典, 松本博, 岡田勝行, 鈴木正美, 空調制御用室内温度センサの時定数の分析, 空気調和・衛生工学会学会講演論文集, (1999), pp.1297~1300
- 7) 林茂広, 鈴木正美, 吉田治典: 空調制御用温度センサの時定数の実測, 空気調和・衛生工学会学会講演論文集, (1995-9), pp.281~284,
- 8) 空気調和・衛生工学会 蓄熱最適化委員会 平成 10 年度研究報告書 (1999-9)
- 9) (社) 計量管理協会ほか: センサの原理と使い方 (1), (1983), pp.30~36
- 10) 森村正直ほか: センサ工学, (1982), pp.62~67
- 11) 空気調和・衛生工学会学会: 蓄熱最適化委員会研究報告 HVACSIM+(J) 利用者マニュアル, (1999-10), pp.6-195~6-196
- 12) TRNSYS, SOLAR ENEGY LABORATORY OF UNIVERSITY OF WISCONSIN, (1996), pp.17

(2001 年 4 月 2 日 原稿受付)

空調制御用室内温度センサの時定数に関する研究

A Study on Time Constant of the Room Air Temperature Sensors used for Air Conditioning Control System

by Shigehiro HAYASHI*¹, Harunori YOSHIDA*², Masami SUZUKI*³,
Katsuyuki OKADA*³, Hiroshi MATSUMOTO*⁴

Key Words : Room air temperature sensor, Automatic control, Time constant, Experiment, Identification

Synopsis : The main object of HVAC system is to control room air temperature accurately. Because the signal transmitted from a room air temperature sensor governs the behavior of the overall HVAC system, it is important to obtain the precise dynamic behavior of indoor air temperature sensors. In our report time constant, which is fundamentally used to express the dynamic response of the sensors, is considered as the value expressing the dynamic behavior.

However, time constants of common indoor air

temperature sensors used for HVAC control systems are unclear and not much research works were done. Therefore, in this report, time constants were cleared from the experimental research at a laboratory and in an actual room. As a result, the time constants were recommend for the automatic control design.

The non-linear heat transfer models were used to identify time constants which were discussed by comparing to ones obtained by experiment.

(Received April 2, 2001)

*1 Graduate School of Engineering, Toyohashi University of Technology, Member

*2 Department of Global Environment Engineering, Kyoto University, Member

*3 R&D center of Shinryo Corporation, Member

*4 Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology, Member
