原著論文

快適性と身体部位の温冷感の構造方程式モデリング†

久保 新悟*1・青木 真吾*1・中野 雅之*1・

辻 洋*1・井上 修紀*2・三村 英二*2

日常生活における快適性と省エネルギーのバランスをとるための基礎実験として、本論文は構造方程式モデリングを用いた分析結果について述べる。分析は、「体の各部位の温冷感が体全体の快適性にどのように影響を与えるか」に関するものであり、使用したデータは22人の被験者が9条件のもので徐々に暖房したときの体感について10分毎にアンケートに回答したものである。モデルの変数として、(1)ある時点での体感値、(2)ある時点とその前の時点での体感値、(3)ある時点の体感値とその前の時点からの差分、(4)ある時点でのその前の時点との差分、の4種類のモデルを構築したところ、次の3つの知見を得た：(1)4番目のある時点とその前の時点との差分に基づくモデルがもっともよいモデル適合度指標を得た、(2)尻と胸の温冷感の変化が体全体の快適性にもっとも影響を与えた、(3)疲労感は体の部位の温冷感とは相関をもたなかった。

キーワード：構造方程式モデリング、データ・マイニング、温冷感申告、アンケート分析、スマート・ハウス

1. はじめに

地球温暖化をはじめとする環境問題に注目が集まっている一方で、民生部門では、生活水準の向上やサービス産業への移行により、エネルギー需要が増加傾向にある。実際、冷暖房設備の発達により、人々はより快適さを求めている。このような背景の下、理想的な生活空間を作り出すためには、少ない消費エネルギーで快適な環境を作り出すことが必要である。

我々は、将来、スマート・ハウスやユビキタス・コンピューティングで語られるように[1]

- ・家庭内ネットワークが敷かれ、
- ・多くの多様なセンサが遍く設置される

と考え、そのときには、複数の冷暖房設備は独立して稼動するのではなく複合制御されるべきだと考える。

各設備は、それぞれ、体のどの部位をどのように体感させるかの強み・弱みをもっており、人間の日常生活の場面にあわせてそれらを制御することが可能となれば、快適性を保持したまま省エネルギーを実現することが可能となろう。そのための一歩として、エネルギーの利用と快適性についての基礎データを集めるこ

とは意義があると考えている。

これまでの関連研究を振り返ると、エネルギーの利用については、業務部門と住宅部門が混在する比較的小規模な地域を対象としたエネルギー供給システムの最適化モデルが提案されたり[2]、従来測定が進んでいなかった住宅内のエネルギー消費量が測定されたり[3]、その需要予測に関する研究[4]がなされるなどシステムズ・アプローチがとられている。また環境の変化における影響を確認するために、給湯を事例に家庭内エネルギー消費に関する評価や感度解析の枠組みも提案されている[5][6]。しかし、これらの研究は、日常生活行動に関連する快適性については言及していない。

一方、快適性については、これまでにP. O. FangerがPMV(Predicted Mean Vote, 予測温冷感申告)を提案し、A. P. GaggeらはSET*(Standard New Effective Temperature, 新標準有効温度)を提案している[7]。これら2つの指標は服装や行動を含めて全身の快適性を示すものであるが、体のどの部位が体全体の快適性にどのように影響を与えるかについては示していない。そのため、空調機器と床暖房機器というように複数の機器を効率的に組み合わせて利用する方法を決定する上では参考となりにくい。

快適性と体の部位の温冷感については、著者らの先行研究がある。マーケティング分野で用いられたコンジョイント分析によるもの[8]、コンジョイント分析・回帰分析・構造方程式モデリングの比較に関する

† Structural Equation Modeling for Comfort and Thermal Sensation

Shingo KUBO, Shingo AOKI, Masayuki NAKANO, Hiroshi TSUJI, Shuki INOUE and Eiji MIMURA

*1 大阪府立大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

*2 関西電力 エネルギー利用技術研究所

Energy Use R&D Center, The Kansai Electric Power Co., Inc.

もの[9]があり、モデル適合の視点からは構造方程式モデリングがよい結果を得てきた。しかし、この比較において、ある時点での温冷感にのみ着目しており、ある時点と次の時点での温冷感の変化が与える影響については、考察がなされていなかった。

そこで、本論文では、温冷感の変化に関する変数を導入して、先のモデル[9]と比較しながら、快適性と温冷感との間の因果関係を分析する。体の部位ごとに、温冷感の変化の快適性に対する影響の有無が明らかになれば、空調機器の制御をより効率的に実施することが期待できる。

以下では、まず本論文が扱う問題を説明する。その後、今回分析に用いた構造方程式モデリング手法の概要とそれらを利用するために実施した前処理である因子分析、さらにモデルに関する4つの代替案について述べる。そして収集したデータに対する分析結果を示した後、最後に、得られた知見について考察・検討を加える。

2. 問題の記述

2.1 目標

最初に、本論が想定する将来の家庭における冷暖房設備の複合制御についてイメージを示す。家庭内に温度、湿度などのセンサが設置されるとともに、人間の服装、所在、活動内容などもセンサで取得されると考える。

これらセンサで取得された情報は、家庭内ネットワークを介して家電機器制御用の計算機に収集され、それがエアコン、床暖房、各種暖房機器を制御する。この最適制御は人間の快適性を保持しつつ、省エネルギーを実現するものである。

このイメージを図1に示す。これを実現するには、体の部位の温冷感と快適性の因果関係を解析すること

が最低限必要である。本論は、この基礎データを収集するための試みを報告するものである。

2.2 分析に用いるデータ

本研究において用いたデータは、女子学生22人の申告に基づくものである。実際の居室に近い実験用LDK住宅にて、体の各部位の多様な温冷感が生じるように、エアコンと床暖房の設定温度、座っている位置を様々に変更させた[10]。

冬場に、人工的に設けた9つの温熱条件で、各条件70分間測定を行った。どの被験者も肌着、長袖のTシャツ、トレーナー、靴下を着用とした。被験者各々は、各条件下で10分毎にアンケートに回答した。つまり一条件あたり8回アンケートに回答したので、データ数は1,584個(22人×9条件/人×8個/条件)となる。

実験で行った9つの温熱条件の詳細を表1に示す。空調機器の設定温度は、OFF、20℃、23℃の3通りで、床暖房機器の設定温度は、OFF、25℃、30℃の3通りである。被験者の座っている位置は、床に直接座っているか(つまり尻も床暖房の効果を直接受ける)、椅子に座っているかの2通りを設けた。

また、本研究で用いた被験者に対するアンケート項目の回答として求めた値、その意味を表2にまとめる。これらは主観値であるため、個人差もあれば個人の体調にも依存すると考えられるが、個々のあいまいなデータをみるのではなく、大量のデータに潜む因果関係を見ることに意義があると考え、本研究を進めた。

表1 実験室の機器のパラメータと被験者の座位

Condition	Preset Temperature		Sitting Position
	Air Conditioner (degree centigrade)	Floor Conditioner (degree centigrade)	
1	20	30	Floor
2	OFF	30	Chair
3	23	OFF	Floor
4	20	30	Chair
5	20	25	Floor
6	23	OFF	Chair
7	OFF	30	Floor
8	20	25	Chair
9	OFF	25	Floor

図1 将来の家庭における冷暖房機器の複合制御イメージ

表2 被験者の回答項目一覧

#	Items	Abbreviation	Range and Meanings			
			Minimum Value	Meanings	Maximum Value	Meanings
1	Thermal Sensation Vote(of Face, Chest, Hand, Sole, Buttock and Whole Body)	TSV	-4	Very Cold	+4	Very Hot
2	Thermal Comfort Vote	TCV	-3	Uncomfortable	+3	Comfortable
3	Fatigue Impression Vote	FIV	0	Not Tired	+4	Very Tired
4	Room Control Vote	RCV	-3	Want to Lower Temperature under 5 °C	+3	Want to Raise Temperature over 5 °C
5	Comfort Environment Vote	CEV	0	Very Uncomfortable	+50	Very Comfortable
6	Thermal Environment Vote	TEV	0	Very Cold	+50	Very Hot

なお、表2においてTSVは空気調和・衛生工学会が提唱している評価尺度に従い目盛が設定され、TCV、FIVは正負の方向がある一方、FIVは一方向と考え設定されている。CEVとTEVについては程度の差を詳細に申告できるように目盛が設けられている。

3. 構造方程式モデリングによる分析

3.1 手法の概要

構造方程式モデリング(SEM)は、多変量解析を複数統合して、因子分析やパス解析を組み合わせて潜在変数間の因果関係を分析する統計的手法とされている[11][12]。構造方程式モデリングでは、変数を結ぶ強さを表すパス係数を算出する。変数として、実際に観測することができる変数(観測変数)だけでなく、観測することができない変数(潜在変数)を人為的に導入して、適合指標の高いモデルを追求する。

分析を行ううえで、まず仮説を立て、それを図(パス図)で表し、変数間の関係の強弱や仮説全体を適合指標で評価して統計的に検証する。本研究はSPSSとAmosのソフトウェアを用いて分析を行った[11][12]。

3.2 モデルの構造の決定

まず、どの観測変数をもとに潜在変数を見つけるかを検討する。基礎となる観測変数はTSV、TCV、FIV、RCV、CEV、TEVの6つである。ここでTSVが他の5つの変数に影響を与えようとする。これを図2に示す。我々の目標はこのブラックボックスに潜む変

数を構造方程式モデリングで明らかにすることである。

次に、顔、胸、手、足底、お尻の温冷感(TSV)の中にある因子を探した。分析によって得られた因子負荷量等の値を表3に示す。各TSVと各因子が交わる値は、因子負荷量を表す。因子負荷量というのは、観測変数に対して因子がどれくらいの強さで影響を与えて

図2 体の部位の温冷感と快適性の因果関係

表3 観測変数の因子負荷量、共通性及び因子の寄与率

	Factor 1	Factor 2	Commonality
TSV of Face	0.12	0.49	0.20
TSV of Chest	0.01	0.45	0.24
TSV of Hand	-0.01	0.49	0.25
TSV of Sole	0.87	0.06	0.65
TSV of Buttock	0.80	0.07	0.76
Factor Contribution	1.45	0.65	
Contribution Rate	29.07	12.93

図3 分析に用いた基本構造

いるかを示したものである。

表3より，顔，胸，手のTSVは因子2に影響があるのに対し，足底，お尻のTSVは因子1に影響があるといえる。つまり上半身と下半身の温冷感の因子があると想像される。共通性というのは観測変数ごとの因子負荷の2乗和で，これが大きくなると採用した共通因子で説明される割合が大きい。顔，胸，手のTSVは共通性の値が低いので，それらの観測変数は独自にもっている因子(独自因子)の影響が大きい。また，寄与率というのはその因子が全ての観測変数に対してどれくらいの寄与をしているのかを示す値で，今回，因子1の方が因子2より観測変数を説明しているといえるが，いずれも無視できない。

この分析結果により，2つの潜在変数(下半身快適性，上半身快適性)を導入する。さらに，全身の快適性を表す，「快適性」という潜在変数を加え，合計3つの潜在変数を用いて，「上半身快適性と下半身快適性は，お互いに影響があり，それら2つは快適性に影響がある」という仮説を立てた。そしてその仮説をパス図で表し，その図を元に分析を行った。分析に用いた基本構造を図3に示す。

3.3 モデルの代替案の設定

図3に示したモデルの変数は，時間変化に関する情報を含んでいない。つまり，ある時点で体の温冷感がどうかのみに言及しており，ある時間で温冷感がどう変化したかについては考慮できていない。

本研究では，温冷感の変化が快適性に影響を与えるかどうかを調べるために，次の4つのモデルを構築し，それらが手元のデータに適合するかどうかを調べた。

- (M1) ある時点での体感値(先行研究[9])，
- (M2) ある時点とその前の時点での体感値，
- (M3) ある時点の体感値とその前の時点からの差分，
- (M4) ある時点でのその前の時点との差分，

モデル(M1)から(M3)については，TCV，FIV，RCV，CEV，TEVをそのまま観測変数として利用したが，モデル(M4)についてはそれらについても変化

量を観測変数(以下ではC_TCVのように先頭にC_を付加して記載する)とした。

4. 分析結果

4つのモデルについて，SEMでパス係数と適合度指標を求めた。データ数に関しては，モデル(M1)は70分の計測で8個が有効となるため1,584個であるが，(M2)から(M4)は70分の計測で7個しか利用できないため，1,386個となる。

パスに関して得られたことを表4に示す。モデル(M2)～(M4)では，快適性の潜在変数の周辺の係数が負の値となったため，潜在変数の意味合いとしては「快適性」ではなく「不快性」として得られた。このこと自体は本質的なことではないと思われる。一方，モデル(M1)(M2)(M4)ではFIV(疲労感)あるいはその変化C_FIVに対するパス係数が小さく，他の観測変数と相関がないことが分かった。

次にモデルの適合度指標を表5に示す。SEMではGFI(データに対する適合性)，AGFI(不安定度をあらわす指標)，RMR(残差平方平均平方根)，RMSEA(平均二乗誤差平方根)という4つの指標を調べることが推奨されている。前の2指標は1に近いほうが適合しているとされ，後ろの2指標は0に近いほうがあてはまりがよいとされる。表4からは，モデル(M4)の温冷感の変化に着目するとともにデータをうまく説明していることになる。これはモデル(M1)のように体の温冷感そのもの(TSV)が快適性に影響を与えると考えるよりも体の温冷感の変化(C_TSV)が快適性の変化に影響を与えると考えるべきであるということの意味している。さらに変化を変数とすることにより，2章で言及した目盛の設定の仕方や個人差を吸収しているとも考えられる。

さらにモデル(M4)の結果の詳細について，考察を加えよう。図4はモデル(M4)のとりパス係数を示したものである。この係数をもとに各体の部位の温冷感の変化(C_TSV)が快適性の変化(C_TCV)に影響を与える度合いを計算したものが表6である。表6のInfluence1は潜在変数2つを経由した影響，同2は3つを経由した影響であり，その輪が全体の影響の強さとなる。これより，尻と胸の温冷感の変化(C_Buttock，C_Chest)がもっとも快適性の変化(C_TCV)に影響を与えていることが分かった。

表4 モデルの代替案

Model	Observed Var.		Latent Var.	Deleted Var.
	Input	Output		
M1	TSVs	TCV, FIV, RCV, CEV, TEV	Thermal Comfort, Thermal Comfort of Upper Body, Thermal Comfort of Lower Body	FIV
M2	TSVs of time t and t-10		Thermal Discomfort, Thermal Comfort of Upper Body, Thermal Comfort of Lower Body	FIV
M3	TSV and C-TSVs			C.Chest, C.Hand
M4	C-TSVs	C _i (TCV, FIV, RCV, CEV, TEV)		C.FIV

表5 モデルの適合度指標

Model	Fitness Indices			
	GFI	AGFI	RMR	RMSEA
M1	0.91	0.83	0.51	0.14
M2	0.76	0.66	0.38	0.18
M3	0.84	0.77	0.46	0.14
M4	0.98	0.96	0.16	0.06

図4 モデル M4 のパス係数

表6 モデル M4 における各部位の温冷感変化の影響度

	Indirect Influence 1	Indirect Influence 2	Total Influence	Order of Degree of Incidence
C.Face	-0.29	-0.11	-0.40	3
C.Chest	-0.30	-0.12	-0.42	2
C.Hand	-0.20	-0.08	-0.28	5
C.Sole	-0.23	-0.15	-0.38	4
C.Buttock	-0.26	-0.17	-0.43	1

5. おわりに

快適性を保持しつつ省エネルギーを実現するための基礎データを取得するために、体の部位の温冷感と快適性の因果関係を分析した。実際の居室に近い実験室で収集したデータに対して、構造方程式モデリングを用いて、4つのモデルの適合度指標を調べた。今回の

データは女子学生を被験者とした申告に基づくものであり、一般化可能か否かについては追試が必要であるが、次の知見を得た。

- (1) ある時点とその前の時点との差分に基づくモデルが4つの指標すべてにおいて最も良いモデル適合度指標を得た、
- (2) 尻と胸の温冷感の変化が、体全体の快適性に最も影響を与えた、
- (3) 疲労感（FIV）は、体の部位の温冷感とは相関をもたなかった。

そもそも快適性というものは、個人個人に強く依存するばかりでなく個人の体調などにも依存するので、データの信頼性を求めてしまうと何も評価できなくなる。しかし、個人差があったり一貫性にかけたりするあいまいなデータがあることも許容した上で、本研究のようなアプローチをとることが、複数機器の複合制御を実現するには不可欠であると考えている。

この考えを発展させ、現在、ある部位の温冷感の変化が全体の快適性にどのように影響を与えるかのベイジアンネットワークで解析しつつある[13]。構造方程式モデリングが体の部位の温冷感と快適性の因果関係とその強さを示すことに有用であるのに対し、ベイジアンネットワークを用いると「快適であるときに、どの部位の温冷感が増加すると不快になる可能性が高いか」「不快であるときにどの部位の温冷感を操作すると快適性が増加する可能性が高いか」など感度解析を行える。このベイジアンネットワークのモデルは構造方程式モデリングで精度がよいとされたモデルを参考に構築でき、その後、暑がり・寒がりといった人の特性をネットワークに付加した拡張が可能であろうと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実験データを利用することを許可頂いた奈良女子大学の磯田憲生教授に感謝します。

参考文献

- [1] Ralph Lee Smith. : Smart House : The Coming Revolution in Housing : Go Courseware (1987)
- [2] 杉原英治・河本純・辻穀一郎: 地域特定型総合サービスにおける都市エネルギーシステムの多目的最適化モデルの開発, 電学論B, 123, 2, pp. 151-161 (2003)
- [3] 村田博士・小野田崇・由本勝久・中野幸夫・近藤修平: 建物の外から電気機器の使用実態を把握するモニタリングシステム-実家庭への適用試験-, 電学論C, 124, 9, pp.1874-1880 (2004)
- [4] 佐野史典・鈴木東新・上野剛・佐伯修・辻穀一郎: 住宅用途別エネルギー消費日負荷曲線の推定-関西文化

- 学術研究都市における計測調査報告 (その1), エネルギー・資源, Vol.24, No.5, pp.50-56 (2003)
- [5] 金蔵武史・青木真吾・辻洋: データ包絡分析法を用いた家庭内エネルギー消費評価の試み, 電学論C, 125, 10, pp.1530-1536 (2005)
- [6] A. Koretsune, S. Aoki, T. Konzo, H. Tsuji, Y. Jinno, E. Mimura: "Framework for Sensitivity Analysis on Domestic Energy", The First World Congress of the International Federation for Systems Research, S4-2-4, pp.297-299 (2005)
- [7] P.O. Fanger, "Thermal Comfort", Danish Technical Press (1970)
- [8] 中野雅之・久保新悟・是常彰宏・辻洋・神野幸弘・三村英二: コンジョイント分析による身体部位の温冷感と快適性の因果関係, 電学論C, 127, 1, pp.17-23 (2007)
- [9] A. Koretsune, S. Kubo, M. Nakano, H. Tsuji, Y. Jinno and E. Mimura: Causal Analysis for Thermal Comfort Votes, IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp.1382-1387 (2006)
- [10] 磯田憲生・佐々尚美・天川章史・宮永俊之: 電気式床暖房環境における温熱的快適性に関する研究その1 青年女子の皮膚温及び温冷感申告への影響, 第28回人間-生活環境系シンポジウム報告集, p.219-222 (2004)
- [11] 小塩真司: SPSSとAmosによる心理・調査データ解析-因子分析・共分散構造分析まで, 東京図書 (2004)
- [12] 山本嘉一郎・小野寺孝義: Amosによる共分散構造分析と解析事例, ナカニシヤ出版 (2002)
- [13] S. Aoki, E. Mukai, H. Tsuji, S. Inoue and E. Mimura: Bayesian Networks for Thermal Comfort Analysis, IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp.1919-1923 (2007)
- (2007年8月16日 受付)
(2007年11月5日 採録)
- [問い合わせ先]
〒599-8531 堺市中区学園町1-1
大阪府立大学大学院工学研究科
辻 洋
TEL: 072-254-9353
E-mail: tsuji@cs.osakafu-u.ac.jp

著者紹介

くほ しんご
久保 新悟 [非会員]

1983年生。2003年大阪府立大学工学部経営工学科入学, 2006年同中退。同年大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程入学, 2008年同修了。この間ドイツのカイザースラウテルン大学に交換留学。現在, (株) 日立製作所勤務。

あおき しんご
青木 真吾 [正会員]

1976年生。1998年東京理科大学理工学部経営工学科卒業, 2000年同理工学研究科修士課程修了, 2003年同博士課程修了。同年より大阪府立大学大学院工学研究科助手。2007年同大学助教。博士(工学)。IEEE, OR学会などの会員。

なかの まさゆき
中野 雅之 [非会員]

1983年生。2002年大阪府立大学工学部経営工学科入学, 2005年同中退。同年大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程入学, 2007年同修了。2007年同博士後期課程入学, 2008年同中退。2006年~2007年, フランスの大学院大学 EISTI に交換留学。現在, (株) ソニー勤務。

つじ ひろし
辻 洋 [非会員]

1953年生。1978年(株) 日立製作所入社。この間, カーネギーメロン大学客員研究員, スタンフォード日本センター客員研究員。2002年より大阪府立大学大学院工学研究科教授。博士(工学), 技術士(情報工学), IEEE, ACM, 情報処理学会などの会員。

いのうえ しゅうき
井上 修紀 [非会員]

1960年生。1985年関西電力(株) 入社, 現在同社研究開発室エネルギー利用技術研究所主任研究員。

みむら えいじ
三村 英二 [非会員]

1958年生。1983年関西電力(株) 入社, 現在同社研究開発室エネルギー利用技術研究所主席研究員。

Structural Equation Modeling for Comfort and Thermal Sensation

by

Shingo KUBO, Shingo AOKI, Masayuki NAKANO, Hiroshi TSUJI,
Shuki INOUE and Eiji MIMURA

Abstract :

As an experimental study for balancing daily human comfort and energy saving, this paper describes a structural equation modeling for questionnaire data. The goal is to clarify the causal relation among thermal comfort and thermal sensation of body parts. The experimentation data include 22 experimental subjects' votes for their feeling on nine conditions. There are four alternatives for variables in modeling : (1) thermal sensation vote (TSV) of time t , (2) TSV of time t and time $t-10$, (3) TSV of time t and its change, (4) change of TSV. Then numerical study got three findings as follows : (1) The fourth model dealing with the changes of thermal sensations has the fittest indices, (2) Change of thermal sensations of buttock and chest have great impact on comfort, and (3) Change of fatigue impression has no relation with thermal sensations.

Keywords : Structural Equation Modeling, Data Mining, Thermal Comfort Votes, Questionnaire Analysis, Smart House

Contact Address : **Hiroshi TSUJI**

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka, JAPAN

TEL : 072-254-9353

E-mail : tsuji@cs.osakafu-u.ac.jp