

氏名(本籍)	樋口佳樹(岐阜県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第112号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項
学位授与年月日	平成23年2月14日
学位論文題目	周囲環境を考慮した建築熱負荷シミュレーションに関する研究
論文審査委員	主査 宇田川 光 弘 副査 大 橋 一 正 野 部 達 夫 柳 宇 中 島 裕 輔 永 田 明 寛 (首都大学東京准教授)

## 論文要旨

### 研究の背景と目的

近年、地球温暖化問題によって、ますます二酸化炭素排出量の抑制が急務となっている。それに伴い、先進国を中心に住宅性能の底上げに取り組んでいる。その中でも、ゼロエネルギー(もしくはゼロカーボン)住宅の義務化を法令で定める動きも活発化している。日本では、二酸化炭素排出量の部門別内訳の中で、住宅からの排出量は、2008年度で約14%となっており、1990年以降増え続けている。しかし、次世代省エネルギー基準の施行から9年が経過しているが、次世代省エネルギー基準に準拠している住宅は、いまだ10%程度といわれている。家庭部門からの二酸化炭素排出量を削減することが急務となっており、ますます快適でエネルギー消費量の少ない住宅を実現することが非常に重要になっている。

また、建物の長寿命化を進めることも重要であるが、そのためにも、新築の建物性能を評価するだけでは不十分で、建物のライフサイクルの中で、刻々と変化する外部環境および住宅の劣化に対して、室内の熱環境がどのような影響を受けるのかを予測することも非常に必要とされる。

そのためには、住宅単体のみにとどまらず隣接建物の影響、地域規模の住宅配置を含めた熱・光環境およびエネルギー消費量に関する研究が必要である。しかし、一般的な熱負荷シミュレーションでは、外部環境(隣接建物や樹木など)は、冷暖房負荷への影響が大きい、取り扱いが煩雑であるため無視されることが多く、実用的に使用しうる方法が望まれている。また長波長放射については、定量的に十分に把握されていないのが現状である。

したがって、本論文では、密集した住宅地などでも、より現実的に熱負荷およびエネルギー消費量を計算できるシミュレーションプログラムの開発を行った。次に、外部環境が住宅に及ぼす影響を定量的に把握することを目的とし、開発したシミュレーションプログラムを用いて、住宅密度や樹木の配置による熱負荷への影響や、密集住宅地におけるゼロエネルギーハウスの可能性について検証、日射熱取得の難しい密集住宅地における屋根面でのアクティブソーラーの有効性などの検証を行った。

### 研究内容

本論文は、開発編と実践編に大きく分かれ、全10章で構成されている。第2章から第4章が開発編となり、第5章から第9章が開発したプログラムを用いた実践編となる。

第1章では、本研究の背景および目的を述べた。

第2章では、周囲環境を考慮した熱負荷シミュレーションのアルゴリズムについて述べた。周囲環境の影響については、短波長放射、長波長放射、建築外表面の対流熱伝達率、自然換気量や通風量などが考えられるが、本研究では、日射熱取得や自然採光に関わる短波長放射すなわち日射および建築外部での長波長放射の扱いを中心に検討した。日影計算、形態係数計算法を作成し、外表面(窓面、外壁、屋根など)が受ける日射、長波長放射計算プログラムを作成した。計算法の作成にあたって、外部障害物の形状を多角形およびそれらの集合体(立方体、直方体、樹木など)とし、直線と平面の交点が平面の内部か外部を判別する計算を容易にできるようにした。これにより、モンテカルロ法を用いた確率による形

態係数の算出と、外表面を微小四角形に分割して、外表面の影面積を求めることが容易になり、かつ外部環境に対して汎用性のあるプログラムを作成した。本研究で作成した外表面における日射・長波長放射計算プログラムを汎用熱負荷シミュレーションEESLISMに移植を行い、屋外の放射環境を考慮できる熱負荷シミュレーションプログラムに拡充した。

第3章では、第2章で作成した外部環境のアルゴリズムを含めEESLISMに対する、一般ユーザーの利用の利便性向上を目的とし、入力データの入力支援機能や、出力結果の分析などについてのGUI (Graphic user interface) によるフロントエンドの開発について述べた。外部障害物および対象建物の入力データ作成には、CADと連動させて入力データを作成する方法と、直接テキスト形式で入力データを作成する方法が考えられるが、EESLISMではテキスト形式での入力を基本としている。ただ、テキスト入力の場合、入力データの確認作業に大きな労力が必要となる。そこで、建物配置および建物形状をCGによって俯瞰表示し、入力データが適正に作成されているか否かを直感的に確認できるプログラムを開発した。

第4章では、第2章で作成した周囲環境の影響を考慮するアルゴリズムを実測によって検証した。筆者が実務で設計した新宿区西落合の家の実測を行い、影の計算および形態係数の計算の精度について確認した。西落合の家は、L型の建物で、かつピロティがあり、自分自身の影を受ける。さらには、簾によるブラインドやバルコニーなどの付設障害物、そして樹木、隣棟が迫っており、外部環境の入力およびアルゴリズムの確認には最適であったため採用した。

結果として、居間南窓面からみた外部環境に対する形態係数は、ほとんど実測値と一致した。また、南窓および西窓からの入射日射量の比較においても、実測値とほぼ等しかった。これにより、簾や自分自身の影による日射量の減少を考慮できていることが分かった。

第5章、第6章、第7章、第8章および第9章では、第2章で作成した周囲環境の影響を考慮できるプログラムを用いて、実際に住宅の密度や向き、樹木の影響、さらには住宅地におけるゼロエネルギーハウスの可能性などの検証を行い、外部環境の影響について定量的に評価した。

第5章では、2種類の建物配置について検討した。ひとつは、住宅地の建蔽率を変え、年間暖冷房負荷に与える影響を検証した。具体的には、建蔽率が53%、33%および26%の場合と、通常のシミュレーションで想定している隣棟の無いケースの合計4ケースにおける室温および熱負荷を比較した。もうひとつは、南向き住宅と北向き住宅の熱負荷の比較を行った。南向きの住宅が一般的であるが、敷地条件によっては必ずしも南向きでないこともあり、そのようなダイレクトゲインの得られにくい住宅における熱負荷への影響を検討することも重要であるため検証した。

建物密度の違いによる負荷の比較結果より、建蔽率が53%の場合に、年間の暖冷房負荷が30%増加した。それに対して、建蔽率が33%以下のケースでは、負荷の増加が10%以内となった。都市部近郊の住宅地の建蔽率は、40%から60%程度であり、隣接建物の影響は無視できないことが分かる。

建物方位の違いによる負荷の比較結果では、北向き住宅は、南向き住宅に比べて1.3倍程度の負荷の増加がみられた。南からのダイレクトゲインの減少による暖房負荷の増加が大きな原因となった。

第6章では、住宅の室温・熱負荷に及ぼす樹木の影響について検討した結果を示す。樹木は隣棟とは違い、落葉樹の場合は、夏期の日射をさえぎり、冬期の日射を取り込むといった優れた機能を備えている。そのような樹木の効果を定量的に把握することを目的とし、3つのパターンの樹木配置による建物内部の熱環境への影響を検証した結果を示した。

南庭に2本の落葉樹を配置したケースと2本の常緑樹を配置したケースの比較では、冷房負荷は樹木なしに比べて、落葉樹の場合で15%、常緑樹の場合で20%削減された。暖房負荷は、落葉樹の場合は8.5%増加したが、常緑樹の場合は26%の増加となった。結果として、落葉樹を植えることで、冷房負荷の削減と暖房負荷の増加を抑えることができ、年間暖冷房負荷では、樹木なしに比べて5%削減することができた。

第7章では、密集住宅地におけるアクティブソーラーシステムの効果について検討した。第5章より、密集した住宅地では、窓面からのダイレクトゲインが得られにくいため、建蔽率が50%以上となると、年間暖冷房負荷が30%程度大きくなるという結果を得た。したがって、このような住宅地において、屋根面からの日射の取得は非常に有効であることが考えられる。この章では、

屋根面での集熱を居室の床暖房および給湯に用いるアクティブソーラーシステムの有効性を定量的に把握した。

隣棟のないケース(A)と、隣棟があるケース(B)と、隣棟がありソーラーシステムを搭載しているケース(C)の3つをシミュレーションにより比較した。結果より、ケースBでは暖房負荷がケースAの3倍となったが、ケースCではほぼケースAと同程度の暖房負荷となった。これにより、都市部でのアクティブソーラーシステムの有効性を確認できた。

第8章では、密集住宅地におけるゼロエネルギーハウスの可能性に関する検証について述べた。パッシブ効果や発電量に対して条件の厳しい密集した住宅地でのゼロエネルギーの可能性を検討することが重要であるため、第7章の検証を踏まえて、都市部近郊に多くみられる第一種低層住居専用地域に立地する住宅密集地域を想定して、ゼロエネルギー住宅のモデル設計を行い、EESLSIMを用いて、密集住宅地におけるゼロエネルギーの実現の可能性を技術面および経済面から詳細に検討した。モデル住宅は、延べ床面積119m<sup>2</sup>の木造2階建て住宅とし、第一種高度斜線などの法的建築制限を加味したモデルを設計した。設備仕様は、オール電化仕様と太陽熱給湯仕様の2タイプで検討した。

結果として、技術的にもコスト的にも十分都市部でもゼロエネルギーハウスを普及できる可能性があることを示した。

第9章では、第8章で得られたゼロエネルギーハウスの設計ノウハウを基にして、つくば豊里の杜におけるゼロエネルギー建売住宅の環境設計について述べた。ゼロエネルギーハウスの研究はこれまで、比較的最新の技術を詰め込んだ実験棟的な検証が多くみられたが、本章では、普及を目的としたローコストのゼロエネルギー住宅を提案した。

第8章の仕様と同様、オール電化タイプと太陽熱給湯タイプの2棟のゼロエネルギーハウスを建設した。ともに、4.2KWの太陽光発電を搭載することで、ゼロエネルギーを達成している。イニシャルコストの増加分は約400万となった。これにより、建売住宅でもゼロエネルギーハウスが安価に手に入れることができることを示した。

第10章では、各章の研究結果を総括し、結論を述べた。

本研究により、より具体的に周囲の環境を考慮し、さらに汎用性と正確性を兼ね備えた周囲環境の影響を考慮

できる建築熱負荷シミュレーションプログラムが開発された。これにより、長寿命化、省エネ化が進むこれからの住宅について、周囲環境の変化にも対応できる詳細なエネルギー消費予測も可能となり、また、樹木の影響など、従来定量的に効果を把握しづらいパッシブ手法についても定量的に検証することもできるため、これからの住宅設計、住宅地計画、さらには省エネ改修などのリフォームにも大きく寄与すると思われる。

課題としては、計算速度の向上や入力手間のさらなる削減が挙げられる。利便性については、第3章で述べたが、実務レベルで幅広く利用してもらうには、毎時行っている影面積の計算を出力結果から読み込むようにするなどの改善により、計算時間を短縮していく取組が今後も必要である。

### 論文審査要旨

本論文は、住宅の環境・エネルギー性能に関するシミュレーション手法およびその住宅設計への応用に関する研究結果を述べたものである。室内環境を良好な状態に維持しつつ、様々な建築的、設備的な省エネルギー手法によって二酸化炭素の排出量を削減し、地球への環境負荷を低減することは、現代の建築設計や設備設計において必ず求められる課題である。しかしながら、建築設計・設備設計において必ずしも種々の省エネルギー手法の効果がシミュレーションにより定量的に評価され、合理的に設計が進められている訳ではない。一方で、暖冷房時の室内熱環境、熱負荷のシミュレーションに対する研究は1970年代からアメリカ、日本、ヨーロッパ諸国で行われてきており、汎用シミュレーションプログラムが開発されているが、対象建築の周囲環境の影響は熱負荷に大きく影響するにもかかわらず、これまでに十分な研究はなされていなかった。日本の都市近郊に見られる密集住宅地では、暖房負荷への隣接建物の影の影響が大きいと考えられる。また、夏季に樹木の影によって冷房負荷が軽減されることが期待されているが、効果を定量的に示されてはいない。本研究では、このような建築外部の周囲環境の影響を定量的に評価しうる計算手法を構築し、シミュレーションプログラムを開発した。さらに、開発したシミュレーションプログラムを利用して、住宅地の建築密度と熱負荷、樹木の影響、住宅密集地のソーラーハウスの性能やゼロエネルギーハウスの可能性の検討などを行っている。

本論文は、全部で10章で構成されている。第1章では、本論文の背景、目的を述べ、第10章で総括的結論を述

べている。第2章から第4章はシミュレーション手法に関する研究結果を述べている。第2章では、建築の熱負荷計算における周囲環境の影響について、本研究では、日射および建築外部での長波長放射の扱いを中心に検討している。日影面積計算法、形態係数計算法を作成し、窓面、外壁、屋根などの外表面が受ける日射量、長波長放射を計算するプログラムを作成した。このプログラムを汎用熱負荷シミュレーションプログラムEESLISMに移植し、屋外の放射環境を考慮しうるシミュレーションプログラムに拡充した。第3章では、第2章で作成した外部環境を考慮しうるシミュレーションプログラムの利用の利便性向上を目的とし、GUIの開発について検討し、入力データが適正に作成されていることを確認できるプログラムを開発した。第4章では、第2章で作成した周囲環境の影響を考慮するシミュレーション手法を実在住宅の実測データによって検証した。

第5章から第9章は開発したプログラムを利用し、種々のモデル住宅の熱負荷についての検討結果を述べている。第5章では、建物配置について検討した。まず、住宅地の建蔽率の異なる4ケースについて、年間暖冷房負荷を検討し、都市近郊の住宅地では、隣接建物の影響は無視できないことを示した。次に、北向き住宅と南向き住宅について年間熱負荷の比較結果を行い、北向き住宅では1.3倍程度熱負荷が増加することを示した。第6章では、住宅の室温・熱負荷に及ぼす樹木の影響について、落葉樹、常緑樹を想定し検討した。落葉樹、常緑樹それぞれの暖房負荷、冷房負荷への影響を示した。第7章では、窓面からの日射の暖房効果が期待できない密集住宅について、太陽熱集熱器を用いるアクティブソーラーシステムの熱負荷軽減効果を検討し、都市部でのアクティ

ブソーラーシステムの有効性を示した。第8章では、都市部にみられる第一種低層住居専用地域に立地する住宅密集地域を想定して、ゼロエネルギーハウスのモデル設計を行い、技術的にもコスト的にも都市部でも十分ゼロエネルギーハウスを普及できる可能性を示した。第9章では、第8章で得られたゼロエネルギーハウスの設計法を基礎として、郊外の住宅団地に建設されるローコストゼロエネルギーハウスの環境設計について述べた。運転費とともに設備費についても検討し、ローコストゼロエネルギーハウスが可能であることを示した。第10章では、第2章から第9章までに述べた研究結果についての総括的結論である。

本研究は、隣接建物や樹木など建築周囲の放射環境の影響を考慮した熱負荷シミュレーションに必要な計算法を構築し、プログラムを開発することにより、周囲環境を考慮した熱負荷シミュレーションを可能にした。さらに、そのシミュレーションプログラムを使用して周囲環境が建築の熱負荷や室内熱環境に与える影響を定量的に評価できることを示した。本研究の手法は、隣接建物の増改築や樹木の成長など周囲環境に変化が生じた場合に既存建築の熱負荷や室内熱環境に対する影響も具体的に示すことができる。このため、本研究の成果は新築時の建築計画・設計時の環境性能評価に利用されるとともに既存建築についての周囲環境の経年変化の影響も含めた改修計画にも利用できることで建築の長寿命化にも少なからず貢献すると考えられる。以上から本論文の成果は、今後、建築の環境性能の向上に、広く寄与してゆくと考えられる。よって、本論文は、博士（工学）の学位に値するものと認められる。