

論文の内容の要旨

生物材料科学専攻

平成 19 年度博士課程 進学

氏 名 金子 一弘

指導教員名 安藤 直人

論文題目 木造住宅のゼロ・エネルギー化に関する実験的研究

21 世紀は急激に増加する世界の人口の 60%を占める、アジア地域を中心とした途上国の経済発展に伴い、自動車や家庭電化製品の普及が化石エネルギー需要の急増（20 世紀末には 20 世紀初頭の 20 倍を超え）をまねいている。そのために世界では原油や天然ガス・石炭等の化石エネルギーの争奪戦が始まりエネルギー価格が上昇し、この原油の高騰は過去の 50 年間で 50 倍以上の上昇となっている。これら化石エネルギーの消費量の増加は大気中の二酸化炭素濃度を押し上げ 20 世紀初頭の 280ppm から現在では 380ppm へと地球温暖化の主な原因となっている。

この「人口」と「化石燃料の消費」の増加により、近年では「環境負荷」という概念がつけられ、この資源の争奪戦から抜け出し化石エネルギーに依存しない低炭素社会への移行が標榜されている。

このような社会情勢の下で 1993 年地元で育つ銘柄材東濃ヒノキをはじめとする国産材の流通合理化と木造住宅に関する情報発信を目的とした協同組合を設立し国や県・市の支援を受け木材流通施設と木造住宅を手掛ける大工・工務店のための研修施設を整備した。

この施設を活用し、設立当初より木造住宅の構造や省エネ性能に関する技術研修会や建築士等の養成講座・住宅を建てようとする消費者を対象とした住まい塾を開催している。

しかし、このような活動を通して国産材の需要の拡大に努めているが、地域で生産されるヒノキ材も住宅の洋風化や合理化工法の普及で、構造材の集成材化が進み一般製材品の需要は激減し価格も低迷を続けている。この需要の停滞により昭和 30 年代からの拡大造林で植林された東濃一円の山林は間伐や枝打ち等の手入れが進まず山は荒廃し集中豪雨時には崖崩れや土砂の流失が続き地域の社会問題となっている。

このように厳しい木材業界の経営環境の下でこれまで組合活動を通して国産材の流通合理化と並行して情報発信活動を継続して実施している。この木造住宅に関する情報発信は技術研修を主に構造の安全性や耐久性・居住性・省エネルギー性能等をテーマに東濃ヒノキ等の国産材と地域の大工技術で施工可能な木造住宅の性能向上に関する課題を取り上げている。また、継続的に開催する研修会とともに地域の木造住宅の性能向上を図るため、実験住宅8棟（既存改修1棟を含む）を建設し、技術改良や性能の検証・設計・施工法の普及及び消費者へのPR活動をおこなっている。このような活動を通して地域型木造住宅の省エネ技術の開発と普及を続けている。

この地域型省エネ住宅への取り組みは1995年から始まり、高断熱・高气密住宅をウレタンパネル工法により建設した。この建物は1997年に竣工し熱損失係数（Q値）が $2.01\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ で隙間相当面積（C値）は竣工時 $0.84\text{cm}^2/\text{m}^2$ で、現在の次世代基準IV地域の $2.7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ を遥かに上回る性能である。この熱損失係数での居住性は従来の住宅にはない快適な住空間を実現したが、年間の暖房負荷が $69.4\text{kW}/\text{m}^2\text{年}$ とこれまでの個別間欠暖房の住宅を上回るエネルギー消費量となってしまった。その後、グラスウール断熱パネル工法、And-Z構法¹⁾と合板気密構法²⁾を組み合わせた施工法で1998年、2002年と実験住宅を建設した。どちらも熱損失係数は $1.87\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ・年間暖房負荷 $62\text{kW}/\text{m}^2\text{年}$ 、熱損失係数 $2.23\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ・年間暖房負荷 $68\text{kW}/\text{m}^2\text{年}$ と施工方法を変更しているが、省エネ性能の向上にはつながっていない。

これらの工法は工場生産による断熱パネル（断熱・気密性能を外部の工場に依存）から断熱・気密施工を現場で大工が施工する方法への変更である。この3棟迄の高断熱住宅は、全館連続暖房を基本とした快適な居住性を実現したが暖房エネルギーの削減にはつながっていない。その後、2005年室蘭工業大学の鎌田紀彦教授の監修でK邸離れを建築する。

このK邸離れは南に大きな開口部を設け室内南側に黒御影石の下に+モルタル+コンクリートブロックを設けて蓄熱させる、パッシブ手法の住宅である。熱損失係数は $2.04\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、年間暖房負荷はシミュレーションで $60\text{kW}/\text{m}^2\text{年}$ となっているが実際には昼間の太陽熱が蓄熱され半分以上のエネルギーで全館連続暖房が可能となった。この床蓄熱による暖房エネルギーの削減効果は、その後の実験住宅へ手法を変えて受け継がれている。

次に2005年「自立循環型住宅への設計ガイドライン」が（財）建築環境・省エネルギー機構から発刊され、このガイドラインに沿って21世紀型モデルを建築した。このモデルは、蓄熱床で熱容量を付加し、従来の充填断熱に付加断熱を行い、顕熱交換換気扇を設置して熱回収をおこなった結果、熱損失係数（Q値）を $1.5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ・年間暖房負荷 $27.8\text{W}/\text{m}^2\text{年}$ とQ値を $0.5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 向上したことで、これまでの実験住宅の1/2以下に暖房負荷が削減されている。しかし、この石床蓄熱の手法は転倒時に大怪我をする危険性があると、消費者には受け入れられず1棟の受注にもつながっていない。

また、このモデルから太陽光発電 3.75kW と太陽熱給湯システム（平板 6.0m^2 ）により積極的にエネルギーの削減を図っているがネット・ゼロ・エネルギーには届いていない。この建物でも太陽光発電パネルを 3.0kW 増設すればほぼネット・ゼロ・エネルギー住宅とする

ことが可能である。また、建物に地窓と頂側窓を設け夏の夜間に重力差によるナイト・パージの工夫も取り入れられている。

2009年には、此れまでに得られた知見から無暖房住宅を目指し、南面開口部を積極的に大きく取った土塗壁モデルを建築した。熱損失係数は $1.32\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ・年間暖房負荷は $15.8\text{kWh}/\text{m}^2\text{年}$ と21世紀モデルの1/2の暖房エネルギーとし、それまでの蓄熱床を土塗壁による蓄熱へと変更している。土塗壁は室内に暴露する表面積が蓄熱床の10倍以上と広く直達日射による温度上昇より温度差は小さいが熱の吸放出時間が6~12時間程度と1日で熱移動が速やかで保温効果も大きく壁が建物全体にバランス良く配置されているため温度分布も良く、調湿効果も期待できる。この土塗壁への蓄熱は輻射と対流によるハイブリットな保温暖房とも言うことができる。このレベルの性能になると床面積 $100\sim 120\text{m}^2$ 程度の木造住宅が市販される最も小さなエアコン（暖房出力 2.5kW ・冷房出力 2.2kW ）の能力で全館連続暖冷房が可能となった。このエアコンの消費電力は太陽光発電パネル $1.5\text{kW}\sim 2.0\text{kW}$ 程度と組み合わせることで暖冷房エネルギー分の電力はネット・ゼロ・エネルギーとすることが出来る。

しかし、この実験住宅で発生した課題はオーバー・ヒートである。秋口から太陽高度が下がると庇では日射遮蔽が効かず、高断熱化された室内は午後 27°C を超える高温になってしまう。厳冬期であっても午後には $26\sim 27^\circ\text{C}$ に達し明け方には 18°C 程度へ下がり相対湿度も日に20%近く変化している。外気温が明け方 $-7\sim 8^\circ\text{C}$ であることからすれば暖かい室内も日温度差が 10°C にもなると寒いはないが快適とは言い難い環境である。この建物は南面開口部を積極的に取ったため屋根に太陽光発電が 2.56kW しか載せられずネット・ゼロ・エネルギーは難しい。また、このモデルから給湯システムに真空管集熱器 $1.5\text{m}^2\times 2$ 枚を水道水温が低い1月の太陽光入射角に合わせて設置し冬場の給湯負荷を削減している。

此れまでの実験住宅で得られた知見は、室内発生熱と熱損失係数（Q値）、日射取得量、蓄熱要素・容量のバランスが重要で、暖房エネルギーの削減は手法を間違えなければ簡単に削減できることである。日本の住宅のエネルギー消費量の1/4を占める（部分間欠暖房が殆ど）暖房エネルギーを全館連続暖房としても1/2以下に削減することは十分可能と考えている。この性能の住宅は高齢者の家庭内事故や疾病を減らし、高齢者施設を減らすことにつながる。今後の課題は冷房エネルギーの削減となる、この冷房も日射遮蔽と省エネ家電の採用により室内発生熱を削減し屋根面の断熱をしっかりした後、寝室や居室を中心に在室時間の長い空間を連続して定常負荷で小型高効率エアコンを運転し冷房する。この条件で連続運転すれば負荷は $400\sim 500\text{W/h}$ である。日照時間の長い夏場にはこの冷房方法と太陽光発電は相性が良く、第3章で報告する築後33年の木造住宅延べ床面積 163.13m^2 の既存改修工事後では1台のエアコンの年間全館暖冷房負荷が実測値で暖房期 $1,332,6\text{kWh}$ 、冷房期 303.1kWh の合計 $1,635.7\text{kWh}$ であった

このK邸既存改修工事は試算値で熱損失係数（Q値） $1.27\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ・年間暖房負荷 $29.4\text{kWh}/\text{m}^2\text{年}$ ・年間冷房負荷 $21.2\text{kWh}/\text{m}^2\text{K}$ であるがQ値の同定（実測）では $0.96\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ となっている。この試算結果との誤差は試算値が1次エネルギーで実測値は2次エネルギーであるこ

とエアコン（ヒート・ポンプ）の効率が良いこと、中間期の冷房はナイト・ページで蓄冷された土塗壁が冷房負荷を低減している。こうした知見より岐阜県東濃地方では熱損失係数(Q 値) が $1.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 前後で日射取得係数 (μ 値) が 0.05 前後、バランス良く配置された熱容量を付加する土塗壁と小型高効率エアコンを上手く太陽光発電と組み合わせることで暖冷房エネルギーのネット・ゼロ・エネルギー化が実現できる。

こうした、此れまでの知見により 2012 年 3 月に竣工した ZETH (Zero Energy Timber House) モデルでは、熱損失係数 (Q 値) $1.25\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、年間暖房負荷 $14.8\text{kW}/\text{m}^2\text{年}$ とし、熱容量 (版築壁・土塗壁・断熱された基礎コンクリート部分など) の大きな部材をバランス良く配置し、日射取得係数 (μ 値) を土塗壁モデルの過集熱の教訓から 0.050 以下の、0.049 とした上で給湯負荷を削減するために真空管ヒートパイプ式集熱器 $2.0\text{m}^2 \times 2$ 枚を真南 60° に設置し冬場の集熱効率と夏場の過集熱対策を図り、屋根に接した太陽光発電 9.2kW により建物運用時を上回る発電量でエネルギーを償還する計画である。今後は、この実験住宅 ZETH の性能評価を通して地域型木造住宅のネット・ゼロ・エネルギー化技術を整理し普及を進める。

この木造住宅のネット・ゼロ・エネルギー化には地域を知る工務店と現場で仕事をする職人の技術に依る処が大きく、特に既存住宅改修では職人達の知識と経験・技術に寄る処が大きい。