

DISS. ETH NO. 20545

**SUSTAINABLE WOODEN BUILDING CONCEPT  
FOR CENTRAL JAPAN**

A dissertation submitted to

**ETH ZURICH**

for the degree of

**DOCTOR OF SCIENCES**

presented by

**YUTAKA GOTO**

MS. Agr., The University of Tokyo

born November 17th 1984

citizen of Japan

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Holger Wallbaum, examiner

Dr. Karim Ghazi Wakili, co-examiner

Prof. Dr. Naoto Ando, co-examiner

Prof. Dr. Mario Fontana, co-examiner

2012

## SUMMARY

In light of the high probability of global warming, the mitigation of climate change is one of the most urgent issues. As long as human society is expected to grow further, the fundamental philosophy of technology development must be based on sustainability. Developing technologies should not deteriorate the equal opportunity for people to continue growing through time and space.

Under such global agreement, the major issues are resource depletion and the rapid growth of developing regions. Even though the rational use of resources has been intensively discussed, the utilization of renewable resources has not been fully implemented yet. Among many renewable resources, wood is of high importance because of its diverse usages and its ability to absorb and store CO<sub>2</sub>. Also very related to the issue of resource consumption, the growth of developing regions has a significant impact on the environment and human society on a global scale. These urban developments need to be supported by sustainable measures. It should be noted that large parts of such emerging economies are situated in subtropical regions. Hence, solutions to deal with subtropical conditions are increasingly needed.

Today it is widely recognized that the construction industry is playing a key role in both resource depletion and urbanization of developing regions. Rational management of construction activities and buildings may have significant impact on mitigating climate change. Among other aspects, the selection of construction methods and materials and the advancement of energy efficiency are key points to consider. In the field of energy efficiency of buildings, there have been numerous studies and many technologies have already been in practical use for some time. The state-of-art building technology is super-insulated and airtight buildings, which are often a hybrid of passive (driven by no energy consumption) and active (driven by active energy consumption) measures. Those technologies have been developed based on experiences in primarily cold/mild climatic regions.

Considering the issues addressed above and the proportion of the country characterized by a subtropical climate, Japan has great potential for improving its construction industry from a sustainability viewpoint, especially given its market size (e.g. 1 000 000 newly-built houses in 2008) and its rather backward energy standard. When developing new construction methods, the following points should be considered thoroughly.

Japan has diverse climatic conditions due to its geographic characteristics. The northern regions have a continental climate similar to central/northern European conditions, while the central and southern regions have a subtropical climate. It is divided into six climate-zones in accordance with the Japanese law on the rational use of energy in the housing sector. This climatic diversity should be carefully taken into account as much as possible when discussing the design of a building.

The use of domestic forest resources is another important issue for Japan. Although 93% of the detached houses in the housing stock (2008) are wooden constructions and 66% of the land is covered by forest, the self-sufficiency rating of wood (including paper/pulp and others) is only around 26% (2010). An extensive forestation program was carried out as a national policy after the Second World War in order to secure the supply of the raw material. Nowadays those densely planted forests are causing environmental damage to the ecosystem such as decreasing the capacity of CO<sub>2</sub> storage, increasing the risk of landslides and so on. At the same time the economy of domestic forestry has been going through long-term depression due to the low cost of imported timber. For conducting sustainable forest management, it is absolutely necessary to come up with measures which stimulate the forestry economy by creating profit. The key is to add value even to the unprofitable forest products such as the thin timbers.

The latest effort in the Japanese housing industry can be characterized by two measures, namely employing foreign technologies especially for energy efficiency and high-tech housing services, such as sophisticated heat pumps, fuel cells and so on. As for the implementation of foreign technologies, the rather rapid change by direct transfer without sufficient consideration on the local climatic conditions as well as socio-cultural aspects have resulted in problems regarding building physics and conflicts in terms of social acceptance. As the Japanese government plans to implement obligatory regulation on energy efficiency for all buildings in the coming decade, there is a strong need to develop building technologies which soundly deal with both the subtropical climate and socio-cultural aspects. Considering the need for utilizing domestic timber and the already well-developed housing service technologies, a novel wooden building envelope, which ensures the rational use of resource and energy efficiency, may be one such sound solution.

In order to deal with the issues, a vapor-open wood-based building envelope system was developed within the research and development project funded by the Commission for Technology and Innovation (grant number: 9755.1 PFIW-IW). The envelope consists mainly of layers of natural materials, namely an external insulation layer of wood fiber board, a structural layer of cross laminated timber consisting of slats with small section and an interior finishing layer composed of a wood and clay composite. Each component is made of hygroscopic material with moderate vapor permeability. Therefore the system allows the moisture flux to move through the wall in both directions. Also the thickness of each layer can be determined regardless of the other layers. These features solve the moisture related problems inside exterior walls under subtropical conditions. Besides the considerations regarding building physics, the design philosophy of the envelope also comprises ecological, economic and social aspects. The components are based on natural materials, and so it may be produced using local resources. Local production also promotes the local economy creating a local value chain. The local climatic conditions and socio-cultural aspects, such as user behaviors, can be taken into account by the flexibility assured by the layered structure.

In this thesis the building physics, economic and ecological performance of the envelope system under Japanese conditions was quantitatively assessed. The specific purpose was to evaluate the

feasibility of the envelope system for implementation in the Japanese market. At the same time, the application of the evaluation method developed within this dissertation on other construction methods and in other regions was also considered.

The verification of the system's overall performance was carried out within an interdisciplinary framework. Firstly, in order to investigate the durability, the hygrothermal performance of the envelope was analyzed with a transient heat and moisture transfer model. This model was validated by experiments with full-scale wall specimens. Secondly, in order to investigate the energetic performance of a building with this envelope system, a model was created to simulate the indoor temperature, relative humidity and the heating/cooling demand, combining the hygrothermal model of the envelope itself, heat balance model of the whole building and the moisture balance model, taking into account the interaction of the envelope and ambient air. Finally, in order to investigate the feasibility of applying the envelope system to Japanese conditions, a model was created to define the economic and ecological optimal insulation thickness, using the transmission heat loss model described above, simplified Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Assessment (LCCA) methods. In the optimization model several scenarios were considered for taking the uncertainty of the future economic situation into account.

This thesis is a cumulative dissertation, and consists of six chapters. Chapter 1 presents the overall background and the goal of the study. In section 1.1, a general concept of sustainability in technology development is presented as an orientation with which to begin the study, and then global issues in the construction sector and the rapid economic growth in subtropical regions are introduced. In section 1.2, the specific conditions of the Japanese housing industry are elaborated upon in order to highlight particular problems. In Chapter 2, the detailed design philosophy of the envelope system is introduced, and finally the methodologies for evaluating its performance from the viewpoints of building physics, economics and ecology are introduced by reviewing past studies.

The three following chapters (3, 4 and 5) consist of three research papers (Paper I, II and III). Chapter 3 presents Paper I, which was published in a peer-reviewed scientific journal (*Paper I: Building and Environment - Preliminary Investigation of a Vapor-open Envelope Tailored for Subtropical Climate*). Chapter 4 presents Paper II, which was published in a peer-reviewed scientific journal (*Paper II: Building Simulation - Heat and Moisture Balance Simulation of a Building with Vapor-open Envelope System for Subtropical Regions*). Chapter 5 presents Paper III, which was published in a peer-reviewed scientific journal (*Paper III: Energy and Buildings - Economic, Ecological and Thermo-hygric Optimization of a Vapor-open Envelope for Subtropical Climates*).

In Chapter 3 (Paper I), the hygrothermal performance of the envelope system, investigated by means of testing full-scale walls in a climate chamber, and the corresponding one-dimensional transient heat and transfer simulation are presented. In order to maintain consistency between

calculation and measurement, the individual materials were tested for their hygric and thermal properties. The results in Chapter 3 show that the experiment and the numerical simulation corresponded to each other with high accuracy. Based on these findings, attempts were made to calculate the behavior of a wall assembly under real climatic conditions of central Japan, Kyoto. As a result, it was shown that no risk of interstitial condensation and mold growth was predicted under the real climatic conditions of Kyoto.

In Chapter 4 (Paper II), the heat and moisture balance model of a building with the envelope system is proposed. In the moisture balance model the moisture buffering by the interior materials was taken into account in addition to the standard factors, such as air infiltration, indoor moisture load due to human activities, etc. The prediction of the moisture buffer value (MBV) of the interior finishing materials was attempted and validated by empirical data. Subsequently, the whole building calculation was carried out under the condition of a Japanese city, Hikone, and energy consumption and the contribution of the moisture buffering to indoor comfort was investigated. The results of Chapter 4 are as follows. The MBVs of the mineral-based materials were predicted with high accuracy. However the MBVs of the wood-based composite were much higher than the experimental value. In order to create a more accurate MBV prediction model, nonlinear moisture conductance on the fiber scale should be taken into account when modeling wood-based materials. The heating and cooling demand of a test house was  $9.4 \text{ kWh/m}^2$  and  $14.5 \text{ kWh/m}^2$  respectively. The moisture buffering contributed to a significant reduction of humidity fluctuation. It was concluded that the envelope system can be implemented to provide highly energy efficient buildings under subtropical conditions. In order to enhance both energy efficiency and indoor comfort of buildings in subtropical regions, there is still a strong need to develop a more holistic method for finding the optimum building design, considering not only moisture buffering by interior materials but also all the relevant factors, such as shading, active dehumidification and so on.

In Chapter 5 (Paper III), the optimal insulation thickness of a building with the envelope system was investigated under the conditions of eight cities in Japan by an economic and ecological model, taking into account both initial and running cost. The basic intention was to define the optimal insulation thickness of a building dealing with the trade-off between economic and ecological performance (“the thicker the insulation is, the less heating energy is consumed and the more material is used”). The thermo-hygric minimum thickness was also determined in order to ensure the longevity of the buildings. The transmission heat loss model for those simulations was based on the whole building model proposed in Chapter 4. Consequently, the following main findings were made: 1) the ecological optimal thickness was larger than the economic optimal thickness, 2) the thermo-hygric minimum was within the economic optimal range in most of the cases, and 3) the interest rate of the currency and the electricity price increase have a significant influence on the result of the optimization analysis. With the aid of the optimization model, it was shown that applying this envelope system is feasible in Japan, especially in the central and southern regions.

Finally the overall conclusion of the thesis is given in Chapter 6, summarizing and discussing the findings and discussions in Chapter 3 to 5. The main conclusions were made as follows:

- The hygrothermal performance of the envelope system was modeled and validated successfully.
- With the aid of the heat and moisture balance model suggested, it was made possible to predict indoor temperature, relative humidity and heating/cooling demand, and the envelope system can be used for providing highly energy efficient building under subtropical conditions.
- With the aid of the insulation optimization model proposed, it was shown that implementing the envelope system is feasible in Japan, especially in the central and southern regions.

However, there remain several deficits to be improved upon in the models, such as the inadequacy of the hygrothermal model with wind driven rain, the limitation of the modeled volume in the whole building simulation and limited parameters in the optimization model on local conditions (material price, energy mix, etc.). There is potential for expanding the overall model by optimizing the insulation thickness and housing service setting for dealing with the trade-off between the energy consumption and indoor comfort.

It was concluded that the envelope system proposed in this study has a high potential for implementation in central Japan to enhance the sustainability of the Japanese housing industry. It is also applicable to other regions that have similar climatic conditions. The modeling methods (the whole building hygrothermal model and the insulation thickness optimization model) can be applied to other construction methods with minor adjustments. The whole building hygrothermal model will be validated by empirical data from a test house in the future (anticipated construction in Ohmihachiman in May 2013).

## ZUSAMMENFASSUNG

Angesichts der zu erwartenden globalen Erwärmung ist die Abmilderung des Klimawandels eine der drängendsten Aufgaben. So lange wie die Gesellschaft weiter wächst, muss Nachhaltigkeit daher die Grundlage der technologischen Entwicklung sein. Die Entwicklung der Technologien sollte dabei die Chancengleichheit der Menschen für weiteres Wachstum unabhängig von Zeit und Ort gewährleisten.

Unter diesen globalen Randbedingungen sind die grössten Herausforderungen die Ausbeutung der nicht nachwachsenden Rohstoffe und der schnelle Wachstum der Entwicklungs- und Schwellenländer. Obwohl der vernünftige Einsatz der Rohstoffe bereits ausgiebig diskutiert wurde, ist eine Verwendung erneuerbarer Rohstoffe bisher noch nicht zu ihrem vollen Potential implementiert. Neben vielen anderen erneuerbaren Rohstoffen ist Holz aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und seiner Eigenschaft während der Wachstumsphase CO<sub>2</sub> zu absorbieren und zu speichern von grosser Bedeutung. Insbesondere in Hinblick auf den Verbrauch von Rohstoffen hat das Wachstum von der Entwicklungs- und Schwellenländer einen entscheidenden Einfluss auf die globale Fragen zu Umwelt und die Gesellschaft. Diese Entwicklungen und Veränderungen müssen durch nachhaltige Technologieentwicklung unterstützt werden. Dabei sollte beachtet werden, dass grosse Teile der benannten Regionen in subtropischen Zonen liegen. Technologien zum Einsatz von erneuerbaren Rohstoffen in subtropischen Bedingungen sind daher von zunehmender Bedeutung.

Es ist heutzutage allgemein anerkannt, dass der Bauindustrie sowohl bei Rohstoffverbrauch als auch bei der Urbanisierung von Wirtschaftsregionen eine Schlüsselrolle zukommt. Nachhaltigeren Bauweisen und Bauwerken können einen entscheidenden Einfluss auf die Abmilderung des Klimawandels haben. Insbesondere die Wahl von Bauweise und Baustoffen und die Verbesserung der Energieeffizienz sind von besonderer Bedeutung. Es existiert eine Vielzahl an Studien, die die Energieeffizienz der Bauwerke untersuchen. Zudem sind verschiedenste Technologien bereits seit geraumer Zeit im Einsatz. Der Stand der Technik sind hoch-isolierte und luftdichte Gebäude, mit einer Mischung aus passiven (unter Vermeidung von Energieeinsatz) und aktiven (mit aktiven Energieeinsatz) Massnahmen. Diese Technologien wurden jedoch basierend auf der Erfahrung in vorwiegend kalten und milden Klimaregionen entwickelt.

Mit Blick auf die zuvor beschriebenen Aufgaben und den Anteil des Landes, das durch subtropisches Klima aufweist, hat Japan ein enormes Potential seine Bauindustrie nachhaltiger zu gestalten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Grösse seines Marktes (z.B. 1'000'000 neugebaute Häuser im Jahr 2008) und seinem eher rückständigen Energiestandard. Bei der Entwicklung neuer Bauweisen sollten die folgenden Punkte sorgfältig beachtet werden.

In Japan weist aufgrund seiner geographischen Eigenschaften stark unterschiedlichste klimatische Bedingungen auf. Die nördlichen Regionen haben ein kontinentales Klima vergleichbar mit dem in Mittel- und Nordeuropa wohingegen die zentralen und südlichen Regionen ein subtropisches Klima haben. Japan ist in den Gesetzen zum sinnvollen Einsatz von Energie im Bausektor in sechs Klimazonen eingeteilt. Diese klimatische Vielfalt sollte bei der Planung von Bauwerken so gut wie möglich beachtet werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für Japan ist der Einsatz von Holz aus einheimischen Beständen. Obwohl 93% der freistehenden Häuser aus Holz konstruiert sind (2008) und 66% des Landes bewaldet ist, beträgt die Selbstversorgungsquote nur 26% (2010). Um die Versorgung mit dem Rohstoff Holz sicherzustellen wurde nach dem Zweiten Weltkrieg ein ausgiebiges Aufforstungsprogramm betrieben. Heutzutage stellen diese dichtbepflanzten Wälder aufgrund ihrer verringerten CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit und der gesteigerten Gefahr von Erdbeben ein massives Problem dar. Parallel befindet sich die einheimische Forstwirtschaft in einer langanhaltenden Rezession durch den Import von niedrigpreisigen Hölzern aus dem Ausland. Für ein nachhaltiges Waldmanagement ist es daher absolut notwendig geeignete profitable Massnahmen zur Ankurbelung der Forstindustrie zu schaffen. Der Schlüssel besteht auch darin unprofitablen Produkten wie dünnen Hölzern einen Mehrwert zu geben.

Die aktuellen Bemühungen der japanischen Bauindustrie konzentrieren sich auf den Einsatz ausländischer Technik im Bereich passiver Energieeffizienz und der bereits hochentwickelten japanischen Haustechnik, wie fortschrittliche Wärmepumpen, Brennstoffzellen und ähnlichem. Die rapide Änderung durch direkten Ersatz heimischer Produkte ohne eine ausreichende Berücksichtigung von lokalen Gegebenheiten und sozio-kulturellen Aspekten resultiert in bauphysikalischen Problemen durch Feuchteschäden und führt zu Problemen in der allgemeinen Akzeptanz solcher Lösungen beim Nutzer. Da die japanische Regierung eine obligatorische Regulierung der Energieeffizienz für alle Gebäude innerhalb des nächsten Jahrzehnts plant, besteht der dringende Bedarf nach Lösungen, die sowohl das subtropische Klima als auch sozio-kulturelle Aspekte entsprechend berücksichtigt. Mit Hinblick auf die erforderliche Verwendung einheimischer Hölzer und die bereits hochentwickelte Haustechnologie kann vor allem eine neuartige Gebäudehülle, die den sinnvollen Einsatz von Rohstoffen und Energien sicherstellt, ein Teil der Lösung sein.

Zur Lösung dieser Aufgaben wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts, das durch die Kommission für Technologie und Innovation gefördert wird (Förderungsnummer: 9755.1 PFIW-IW), ein dampfdiffusions offenes System einer Gebäudehülle auf Basis von Holzwerkstoffen entwickelt. Die Hülle besteht hauptsächlich aus Lagen natürlicher Materialien, in Form einer äusseren Isolationsschicht aus Holzfasernplatten, einer tragenden Schicht aus Brettsperrholz aus Brettlamellen mit kleinem Querschnitt und einer inneren Schicht bestehend aus einer vorgetrockneten Lehmplatte als Trockenwerkstoff. Jede Komponente besitzt hygroskopische Eigenschaften bei einer moderaten Dampfpermeabilität. Das System erlaubt einen beidseitigen Feuchtetransport durch die Wand. Die Dicke der einzelnen Schichten kann unabhängig



voneinander gewählt werden. Dieses Konzept erlaubt es das Problem von kritischer Feuchtigkeit im Inneren von Aussenwänden unter subtropischen Bedingungen zu lösen. Neben den bauphysikalischen Fragestellungen müssen bei der Planung einer nachhaltigen Gebäudehülle ökologische, ökonomische und sozio-kulturelle Aspekte berücksichtigt werden. Die verwendeten Komponenten bestehen aus natürlichen Materialien und können daher unter Verwendung lokaler Rohstoffe produziert werden. Diese Produktion stärkt die regionale Wirtschaft und erzeugt so Wertschöpfungskette zur Förderung der Forstwirtschaft. Die örtlichen klimatischen und sozio-kulturellen Bedingungen, wie dem Nutzer-verhalten, können durch die anpassungsfähige Struktur der einzelnen Schichten der Gebäudehülle berücksichtigt werden.

In dieser Doktorarbeit wurde das bauphysikalische, ökonomische und ökologische Verhalten des Gebäudehüllensystems unter den japanischen Randbedingungen bewertet. Im Fokus stand es die Möglichkeit der Einführung dieses Systems in den japanischen Markt zu evaluieren. Ebenfalls untersucht wurde die Anwendung der Entscheidungsgrundlagen und Lösungsansätze auf andere Bauweisen und Regionen.

Die Überprüfung des allgemeinen Systemverhaltens wurde innerhalb einer interdisziplinären Zusammenarbeit durchgeführt. Zunächst wurde das hygrothermische Verhalten der Gebäudehülle mithilfe eines Modells zur Simulation instationärer Feuchte- und Wärmeleitung analysiert. Dieses Modell wurde durch Experimente an massstabsgerechten Wandaufbauten überprüft. Im nächsten Schritt wurde ein Modell zur Simulation der Innentemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und der Heiz/Kühlkosten erstellt, um das energetische Verhalten eines Gebäudes mit der entwickelten Gebäudehülle zu untersuchen. Dabei wurde der hygrothermische Zustand der Gebäudehülle selbst und des gesamten Gebäudes kombiniert um auf diesem Weg die beidseitige Interaktion der Gebäudehülle zu berücksichtigen. Abschliessend wurde ein Modell zur Bestimmung der ökonomisch und ökologisch optimalen Dicke der Isolierung erstellt. In diesem Ansatz wurde das oben beschriebene Modell der Transmissionswärmeverluste mit Methoden der vereinfachten Lebenszyklusbewertung (Life Cycle Assessment (LCA)) und einer Lebenszykluskostenbewertung (Life Cycle Cost Assessment (LCCA)) verknüpft. Es wurden verschiedene Sensitivitätsszenarien untersucht um die Unsicherheit über die zukünftige wirtschaftliche Situation zu berücksichtigen.

Diese Doktorarbeit ist eine Cumulative Dissertation und besteht aus sechs Kapiteln. Kapitel 1 beschreibt die allgemeinen Hintergründe und das Ziel der Arbeit. In Teil 1.1 wird eine Einführung in das generelle Konzept der Nachhaltigkeit in der technologischen Entwicklung als Orientierungshilfe zu Beginn der Arbeit, sowie eine Einführung in die globalen Herausforderungen für den Bausektor und in Rahmenbedingungen der relevanten subtropischen Regionen gegeben. In Teil 1.2 werden die besonderen Bedingungen der japanischen Bauindustrie und ihre spezifischen Probleme erläutert. In Kapitel 2 wird der Lösungsansatz des Gebäudehüllensystems vorgestellt. Abschliessend werden die Methoden zur Bewertung des Systemverhaltens hinsichtlich der Bauphysik, Ökonomie und Ökologie anhand der Begutachtung vorhandener Studien behandelt.

Die folgenden drei Kapitel (3, 4 und 5) bestehen aus drei Forschungsartikeln (Paper I, II und III). Kapitel 3 beinhaltet Paper I, das in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift (peer-reviewed) publiziert wurde (Paper I: Building and Environment - Preliminary Investigation of a Vapor-open Envelope Tailored for Subtropical Climate). Kapitel 4 beinhaltet Paper II, das in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift (peer-reviewed) publiziert wurde (Paper II: Building Simulation - Heat and Moisture Balance Simulation of a Building with Vapor-open Envelope System for Subtropical Regions). Kapitel 5 beinhaltet Paper III, das in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift (peer-reviewed) publiziert wurde (Paper III: Energy and Buildings - Economic, Ecological and Thermo-hygric Optimization of a Vapor-open Envelope for Subtropical Climate).

In Kapitel 3 (Paper I) werden das hygrothermische Verhalten des Gebäudehüllensystems anhand von Versuchen an massgetreuen Wandaufbauten in einer Klimakammer und die zugehörigen eindimensionalen Simulationen des instationären Wärme- und Feuchtedurchgangs vorgestellt. Um die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung zu gewährleisten, wurden die einzelnen Materialien hinsichtlich ihres Feuchte- und Temperaturverhaltens untersucht. Die Ergebnisse in Kapitel 3 zeigen, dass die Versuche und numerischen Simulationen sehr genau übereinstimmen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Ansätze zur Berechnung des Verhaltens eines Wandaufbaus unter realen klimatischen Bedingungen in Zentraljapan (Kyoto) erarbeitet. Die Ergebnisse zeigen, dass unter korrekter Auslegung des Wandsystems für die realen klimatischen Bedingungen in Kyoto kein Risiko der Kondensation von Feuchte im Wandaufbau und damit verbundenes Schimmelwachstum besteht.

In Kapitel 4 (Paper II) wird das Modell zum Wärme- und Feuchteverhalten eines Gebäudes mit dem Gebäudehüllensystem vorgestellt. In dem entwickelten Modell wurde die Feuchtespeicherung durch die innenseitigen Materialien zusätzlich zu den üblichen Faktoren wie Lufteintrag, Feuchtelast der Innenräume durch menschliche Aktivitäten etc. berücksichtigt. Es wurde versucht eine Vorhersage des Feuchtespeicherungswertes (moisture buffer value (MBV)) der inneren Oberflächenmaterials zu treffen, die durch empirische Daten überprüft wurde. Daraufhin wurde die Gebäudeberechnung unter den Randbedingungen der japanischen Stadt Hikone durchgeführt und der Energieverbrauch und der Beitrag der Feuchtespeicherung auf den Komfort im Innenraum untersucht. Die Ergebnisse des Kapitels 4 können wie folgt zusammengefasst werden: Der MBV von mineralischen Materialien wurde mit hoher Genauigkeit vorhergesagt. Hingegen waren der MBV der holzbasierten Materialien deutlich grösser als die Ergebnisse aus Versuchen. Für eine genauere Vorhersage des MBV sollte für holzbasierte Materialien die nichtlineare Feuchteleitfähigkeit auf Faserebene berücksichtigt werden. Der Heizbedarf für das Versuchshaus betrug  $9.4 \text{ kWh/m}^2$ , der Kühlbedarf betrug  $14.5 \text{ kWh/m}^2$ . Die Feuchtespeicherung der verwendeten Materialien resultierte in einer signifikanten Senkung der Feuchteschwankungen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das Gebäudehüllensystem für hoch energieeffiziente Gebäude unter subtropischen Bedingungen angewendet werden kann. Um sowohl die Energieeffizienz als auch den Innenraumkomfort von Gebäuden in subtropischen Regionen zu verbessern, ist die Entwicklung einer ganzheitlichen Methode zur Bestimmung des optimalen

Gebäudeentwurfs notwendig. Hierbei ist es wichtig die Feuchtespeicherung der Innenraummaterialien als auch allen weiteren relevanten Faktoren wie Verschattung, Entfeuchtungsmassnahmen und weiteren zu berücksichtigen.

In Kapitel 5 (Paper III) wurde die optimale Dicke der Isolation eines Gebäudes mit dem Gebäudehüllensystem unter den Bedingungen in acht Städten in Japan durch Kombination eines ökonomischen und ökologischen Modells unter Berücksichtigung sowohl der Anfangsinvestitionen als auch der laufenden Kosten ermittelt. Grundlegendes Ziel war es die optimale Dicke der Isolation eines Gebäudes unter Abwägung der ökonomischen und ökologischen Aspekte zu bestimmen („Je dicker die Isolation, desto weniger Heizenergie aber desto mehr Material wird verbraucht“). Die zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Gebäudes notwendige minimale thermo-hygrische Dicke wurde ebenfalls bestimmt. Das in dieser Simulation verwendete Modell für die Transmissionswärmeverluste basierte auf dem in Kapitel 4 vorgestellten Gebäudemodell. Die folgenden Erkenntnisse konnten gewonnen werden: 1) die ökologisch optimale Dicke ist grösser als die ökonomisch optimale Dicke, 2) das hygro-thermische Minimum lag in einem Grossteil der Fälle innerhalb des ökonomisch optimalen Bereichs und 3) der Zinssatz der Währung und der Anstieg des Strompreises haben einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis des Optimierungsprozesses. Mit Hilfe des Optimierungsmodells konnte gezeigt werden, dass die Anwendung des Gebäudehüllensystems für Japan ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, insbesondere in den mittleren und südlichen Regionen.

Abschliessend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse und Erörterungen der Kapitel 3-5 zusammengefasst und diskutiert. Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

- Das hygrothermische Verhalten des Gebäudehüllensystems wurde erfolgreich modelliert und überprüft.
- Mit Hilfe des vorgeschlagenen Modells zum Wärme- und Feuchtegleichgewicht war es möglich die Innenraumtemperatur, die relative Feuchte und den Heiz/Kühlbedarf vorherzusagen und die Eignung des Gebäudehüllensystem für das realisieren von hoch energieeffizienten Gebäuden unter subtropischen Bedingungen zu verifizieren.
- Mit Hilfe des vorgeschlagenen Optimierungsmodells für die Isolation konnte gezeigt werden, dass die Einführung des Gebäudehüllensystems in Japan ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, insbesondere in den mittleren und südlichen Regionen.

Es verbleiben verschiedenen Defizite in den Modellen, die nachfolgend behoben werden sollten. Dies betrifft das Verhalten des hygrothermischen Modells bei Schlagregen, das begrenzten Volumen in der Gebäudesimulation und die begrenzte Anzahl an Parametern im Optimierungsmodell bezüglich lokaler Randbedingungen (Materialpreis, Energiemix, etc.). Es wird eine hohes Potenzial gesehen das allgemeine Modell durch eine Optimierung der

Isolationsdicke und der Haustechnik zum Ausgleich zwischen Energieverbrauch und Komfort im Innenraum zu erweitern und Aussagen so breiter abzustützen.

Es kann zusammengefasst werden, dass das in dieser Arbeit vorgeschlagene Gebäudehüllensystem ein grosses Potenzial für die Einführung in Zentraljapan hat, um einen Beitrag zu erhöhter Nachhaltigkeit der japanischen Bauindustrie leisten. Dies gilt ebenso für andere Regionen mit ähnlichen klimatischen Bedingungen. Die Methoden der Modellierung (das hygrothermische Gebäudemodell und das Optimierungsmodell für die Dicke der Isolation) können zukünftig mit geringen Anpassungen auch auf andere Bauweisen übertragen werden. Das hygrothermische Gebäudemodell wird in Zukunft durch empirische Daten aus einem Versuchshaus validiert werden (voraussichtliche Fertigstellung in Ohmihachiman in Mai 2013).

## 要約 (Summary in Japanese)

地球温暖化問題の顕在化と今後の更なる進展の可能性が高い現状にあたって、気候変動の緩和は緊急の問題である。人間社会の今後の更なる発展が望まれるとするのならば、技術開発のありようはサステナブルであることを基本としなければならない。新たに開発される技術について、その生産・運用のプロセスは、同時代の、そして未来の世代の平等な発展の機会を損なうものであってはならない。

このような人類共通の理解の中、主に取り組むべき課題は資源の枯渇と新興地域の急激な発展の二点である。資源の有効活用について、活発な議論が今日まで行われ来てはいるものの、現状では再生可能資源の有効活用は十分になされているとはいえない。再生可能資源のなかでは、その材料の汎用性とCO<sub>2</sub>の吸収・貯蔵機能ゆえ、木材は重要な材料と言える。資源枯渇の問題と大いに関係して、新興地域の急速な発展が自然環境および人類社会に地球規模で大きな影響を与えている。このような地域のこれからの発展はサステナブルな方策・技術を基になされなければならない。重要なのは、振興地域の多くは亜熱帯性の気候を持つ地域に位置していることが多い点である。すなわち、亜熱帯性の気候に適した解決策をもって問題に取り組むことが肝要といえる。

建設産業は上記の問題の上で重要な役割を果たしており、より合理的な建設活動と建設物の運用により気候変動の緩和に大きく貢献することが期待されている。建設活動そのものには様々な側面があるが、中でも使用される材料および工法の選択、そして運用期間内におけるエネルギー効率が要点である。建物の省エネルギー性については、様々な研究がこれまで行われており既に実用化されている技術も多い。最新の技術は建物の高断熱・高气密化であり、パッシブデザイン（エネルギーの消費を伴わない建物内気候の制御）とアクティブデザイン（エネルギーを消費する建物内気候の制御）の両方をあわせた手法による建物の設計が主流である。このような技術は主に寒冷地域において開発された技術が基本となっている。

上述の問題を背景にして、温暖湿潤性の気候を持つ日本の建設産業は、その規模（2008年でおおよそ100万戸の新築住宅）と世界的に見てやや遅れている省エネルギー基準ゆえ、改善の余地が大いにあるといえるが、新たな工法を開発するにあたり、以下の点を十分に考慮に入れなければならない。

日本はその地理的特性を理由に非常に多様な気候を持っている。大陸性気候を持つ北部地域は中央・北ヨーロッパと同様の気候特性を示す一方、中部および南部は温暖湿潤性（亜熱帯性）の気候を有する。その国土はエネルギー使用の合理化に関する法律において六つの気候区域に区分されている。この様な気候の多様性は建物の設計の際には可能な限り考慮をされるべきである。

もう一つの重要な問題は国内の森林資源の利活用である。国内の戸建て住宅市場のストックの実に93%が木造であり、また国土の66%を森林で覆われているのにも関わらず、木材の自給率は2010年の時点で26%にとどまっている。第二次大戦後の木材供給の確保のために過密に植林された森林が、今日では自然環境に悪影響を与えつつある。例えばCO<sub>2</sub>の吸収能の低下や土砂災害の危険性の上昇が例として挙げられる。これと同時に林業経済は低価格の輸入材の影響を受け長期間にわたる不況となっている。将来にわたって持続可能な森林・林業経営を行うためには、収益性のある事業により林業経済に刺激を与えることが極めて重要である。要点は間伐材・羽柄材等の小径の木材にさえも利用価値を与えることである。

日本の住宅産業での近年の技術革新は、外国で開発された（主に省エネルギーに関する）技術の移植・応用と自国内での高性能なヒートポンプや燃料電池といった住宅設備の活用に代表される。外国技術の応用に関しては、日本独自の環境的条件を十分に考慮にいれない性急かつ直接的な技術の運用により建築環境工学上あるいは技術の消費者からの支持についての問題が生じている。日本政府が今後十年程度のうちに住宅の省エネルギー基準の適合を義務化することを計画していることもあり、温暖湿潤性の気候と人々の住まい方の両方を考慮した住宅技術の開発が強く望まれる。国産木材の利用と既存の高性能の住宅設備の応用を考えると、資源の有効活用と建物のエネルギー効率を十分に加味した木造の建築外皮（envelope）の開発は有効な手段といえる。

このような背景を受け、水蒸気の透過性のある（以下水蒸気に対して「オープン」と表現する）木造の建築外皮のシステムの研究開発がスイス連邦のCommission for Technology and Innovationの助成により行われた（grant number: 9755.1 PFIW-IW）。当建築外皮は木材繊維による外断熱層、小径の板で構成されるクロスラミナの木質構造パネル、木材繊維と土の複合材料による室内側の仕上げにより構成される。それぞれの部材が自然素材由来で、適度な透湿性と吸放湿性を有する材料である。従って水蒸気は壁内を双方向へ移動することができる。また、それぞれの層の厚さは他の層からは独立して任意の厚さを与えることが出来る。これらの設計上の特性により温暖湿潤性の気候下においての外壁内の水分の蓄積の問題を解決することができる。これらの建築物理学上の考慮の他、経済的、環境的そして社会的な側面についても配慮されている。各部材はごく一般的な自然素材由来であるため、日本各地の地場産の材料による生産の可能性がある。地域内の材料の供給および生産は地域経済に貢献しうる。また、日本各地の多様な気候特性と住まい手のライフスタイルを加味して外皮の構成を柔軟に変えることが出来る。

本論文ではこの建築外皮システムの建築物理的、経済的そして環境的性能の定量的評価を行った。限定的な目的としては当建築外皮システムの日本の市場での活用の可能性の評価であるが、同時に当論文において提案される評価手法自体は他の工法あるいは他の地域への応用を念頭においたものである。

当建築外皮システムの性能評価は学際的な手法により行った。まず、外皮の耐久性の検証のために、このシステムを用いた壁構造の温湿度に関わる性能を1次元の非定常水熱同時移動モデルを用いて分析した。このモデルは実大の壁試験体を用いた実験によりその精度

を検討した。さらに、当建築外皮を用いた建物全体のエネルギー性能の検証のために、建物内の気温、相対湿度および冷暖房負荷を予測するモデルを上述の外皮の温湿度性能モデル、建物全体の熱収支そして壁の吸放湿性能まで考慮した居室の水分収支モデルにより構築した。そして、日本の各種条件下での適用可能性の検証のために、経済性および環境性の両方を加味した最適な断熱層の厚さを求める最適化モデルを、上述の建物全体の熱水分収支モデルおよび簡易なライフサイクルアセスメント、ライフサイクルコストアセスメントのモデルにより構築した。この最適化モデルにおいては将来予測の不確実性を考慮し複数のシナリオが用いられた。

本論分は六つの章から成る。第1章 (Chapter 1) は本研究の総合的な背景について述べる。第1.1節 (section 1.1) では本研究の技術開発の方向付けとして、技術開発におけるサステナビリティの一般的概念について述べた後、地球規模で見た建設産業と亜熱帯地域における急速な経済発展について概観する。第1.2節 (section 1.2) では日本の住宅産業について詳述し、問題提起を行う。第2章では、本研究の目的として、当建築外皮システムの設計思想を詳述した後、既往の研究の概観を含めながらその建築物物理的、経済的そして環境的性能の定量的評価手法を示す。

続く3つの章 (Chapter 3,4 および5) は3つの研究論文 (Paper I, II およびIII) により構成される。第3章 (Chapter 3) では査読付き学術誌にて出版された論文 (*Building and Environment - Preliminary Investigation of a Vapor-open Envelope Tailored for Subtropical climate*) により成る。第4章 (Chapter 4) では査読付き学術誌にて出版された論文 (*Building Simulation - Heat and Moisture Balance Simulation of a Building with Vapor-open Envelope System for Subtropical Regions*) により成る。第5章 (Chapter 5) では査読付き学術誌にて出版された論文 (*Energy and Buildings - Economic, Ecological and Thermo-hygric Optimization of a Vapor-open Envelope for Subtropical Climates*) により成る。

第3章 (Chapter 3) (Paper I) では当建築外皮システムによる壁の温湿度に対する応答性能について、実大の壁試験体を用いた実験およびそれに即した1次元の非定常水熱同時移動モデルによって検証を行った。より精度の高いシミュレーションを行うために、壁を構成する部材それぞれの熱と水分に関する材料物性の測定を行った。結果、測定値と計算値は高い精度で符合し、このモデルの有効性が確認された。この結果に基づき、日本の実際の気候条件下での壁の温湿度挙動を検証するために、京都市の気象観測データを用いてシミュレーションを行い、この条件下で外壁内の結露およびカビの発生リスクを避けることが可能であることが示された。

第4章 (Chapter 4) (Paper II) では当建築外皮システムを用いた建物の熱水分収支モデルを提案した。水分収支モデルにおいては、外気の流入や室内の人間活動といった一般的な要素に加え、室内内装材による吸放湿も考慮に入れられた。内装材の吸放湿特性値 (Moisture Buffer Value, MBV) の予測が試みられ、実験値との比較が行われた。続いて、建物全体の熱水分収支のシミュレーションを彦根市の気候条件を基に行い、建物のエネルギー消費および吸放湿の快適性への影響を検証した。結果は以下の通りである。まず、鉦

物系の内装材のMBVは高精度で予測された。しかし、木質系材料のMBV予測値は測定値よりも大幅に高い値が得られた。木質系材料のより正確なMBVを予測するためには、吸放湿の木繊維レベルの非線形伝導性を考慮に入れたモデルの作成が必要である。建物全体の暖房および冷房負荷はそれぞれ9.4 kWh/m<sup>2</sup>、14.5 kWh/m<sup>2</sup>であった。内装材の吸放湿により、室内の湿度の変動が大幅に低減された。従って当建築外皮を用いた建物により、高い省エネルギー性能を持つ建物を温暖湿潤地域において達成できることが示された。温暖湿潤地域の建物の省エネルギー性と快適性の両方をより高めるためには、内装材による吸放湿のみではなく、日射遮蔽や除湿などを含めたより総合的な最適な手法の開発が必要である。

第5章（Chapter 5）（Paper III）では当建築外皮システムを用いた建物について、日本内の八都市の条件下、初期投資およびランニングコストの両方を考慮に入れた経済性および環境性の定量化モデルのよりその断熱層の最適な厚さを検証した。その意図の根底は最適な断熱厚さの定義において経済性と環境性の二律背反（「断熱層を熱くすると、暖房負荷は下がるが材料の使用量は増える」）を考慮する点にある。水分によるダメージを避け、建物の寿命を保証するためにも熱水分に関わる最低限の断熱厚さも定義した。これらのモデル内の建物の熱損失モデルには第4章（Chapter 4）で提案した建物全体の熱水分収支モデルが適用された。得られた主な結果は以下の通りである。（1）環境的最適厚さはすべてのケースにおいて経済的最適厚さを上回った、（2）熱水分に関わる最低厚さはほとんどのケースにおいて経済的最適厚さの範囲内であった、（3）通貨の利率と電気料金は最適化モデルによる解析結果に大きな影響を与える。提案された最適化モデルを用いて、当建築外皮システムを用いた建物の中部および南部日本における適用性の高さが示された。

最後に、第6章（Chapter 6）において第3-5章での結果と考察をまとめ、総括的結論が示される。主な結論は以下の通りである。

- 当建築外皮システムの温湿度への応答のモデル化が行われ、その有効性が示された。
- 本研究で提案された熱水分収支モデルを用いて、当建築外皮システムを用いた建物の室内気温、湿度および冷暖房負荷を予測することができ、温暖湿潤気候下において高い省エネルギー性を達成することが出来ることが示された。
- 本研究で提案された断熱厚さ最適化モデルを用いて、当建築外皮システムを用いた建物の中部および南部日本における適用性の高さが示された。

各モデル内の改善が必要な主な点として、温湿度応答モデル内の液水移動特性、全建物の熱水分収支モデルの空間ボリュームの節点数の制限、断熱厚さ最適化モデルの地域特性に関する変数（材料の費用、エネルギーミックス等）の制限が挙げられる。また、モデル全体の拡張可能性として、エネルギー消費と室内の快適性の二律背反を加味した断熱厚さと建築設備の最適化モデルの追加が挙げられる。

以上より、本研究により提案された建築外皮システムの、日本の住宅産業のサステナビリティを増進するために活用されるポテンシャルの高さが示された。この建築外皮システム



は同様の気候特性を持つ別の地域においても活用することが出来る。また、システム全体の評価手法（全建物の熱水分収支モデルおよび断熱厚さの最適化モデル）は軽微なモデルの変更をもって他の工法システムへも応用することができる。全建物の熱水分収支モデルは滋賀県近江八幡市に建てられる実験住宅（2013年5月竣工予定）での温湿度測定によりその精度が検証されることになっている。