

風害および雪害に対する
温室設計技術の高度化に関する研究

2008年1月

森 山 英 樹

風害および雪害に対する
温室設計技術の高度化に関する研究

筑波大学大学院
生命環境科学研究科
生命産業科学専攻
博士(農学)学位論文

森山英樹

この研究は、筑波大学大学院生命環境科学研究科 山口智治教授の指導下で行われ、成果の一部が学術誌に掲載されたことを付記する。

2010年5月1日
森山英樹

関連文献一覧

1. 森山英樹・豊田裕道 (1999) : 1998年1月の大雪時における東北地方南部太平洋側の園芸施設の被災特徴について、農業施設、30(2)、205-214.
2. 森山英樹・佐瀬勸紀・小綿寿志・石井雅久 (2003) : 台風0221による千葉県・茨城県下の園芸施設構造の被災状況と考察、農業施設、34(3)、199-212.
3. Moriyama, H., Sase, S., Uematsu Y. and Yamaguchi, T. (2008): Wind Pressure Coefficient of a Pipe-Framed Greenhouse and Influence of the Side Gable Openings Using a Wind Tunnel, *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan*, 38(4), 237-248.
4. Moriyama, H., Mears, D. R., Sase, S., Ikeguchi, A. and Yamaguchi, T. (2008): Reinforcement for Pipe-Framed Greenhouse under Snow Load and Design Optimization Considering Steel Mass, *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan*, 38(4), 263-274.
5. Moriyama, H., Sase, S., Uematsu Y. and Yamaguchi, T. (2010): Wind Tunnel Study of the Interaction of Two or Three Side-by-Side Pipe-Framed Greenhouses on Wind Pressure Coefficients, *Transactions of the ASABE*, 53(2), 585-592.

目次

第1章 緒論	1
1.1 わが国における温室の現状	1
1.2 温室構造設計における積雪荷重および風荷重の考え方	3
1.2.1 積雪荷重の算定法	3
1.2.2 風荷重の算定法	6
1.3 温室の耐候性に関する既往の研究	9
1.3.1 積雪荷重下の温室構造に関する研究	9
1.3.2 温室の風圧係数に関する研究	12
1.4 本研究の目的	17
第2章 パイプハウスの風害および雪害の実態	20
2.1 積雪によるパイプハウス構造の被災実態	20
2.1.1 はじめに	20
2.1.2 調査方法	20
1) 調査地域	20
2) 被災時の気象概況	23
3) 被災状況の調査方法	26
2.1.3 調査結果と考察	26
1) 被災に対する気象要因の整理	26
2) 被災に対する気象要因の考察	29
3) 構造上の問題点の整理	30
4) 構造上の問題点の考察	33

2.1.4	積雪による被害のまとめ	35
2.2	強風によるパイプハウス構造の被災実態	36
2.2.1	はじめに	36
2.2.2	調査方法	38
2.2.3	結果および考察	39
1)	平坦地のパイプハウス	39
2)	防風林に隣接したパイプハウス	42
3)	大規模施設に隣接したパイプハウス	45
4)	妻面に開口部のあったパイプハウス	48
2.2.4	強風による被害のまとめ	51
2.3	結び	52
第3章	積雪荷重下のパイプハウスの補強および鋼材量を考慮した最適設計	53
3.1	はじめに	53
3.2	解析方法	54
3.2.1	骨組構造解析のための解析モデル	54
3.2.2	応力解析および座屈解析	59
3.2.3	パイプハウス構造の優劣の判定方法	62
3.3	結果および考察	64
3.3.1	最大許容積雪荷重および補強用ブレースの最適位置	64
3.3.2	最大許容積雪荷重に対する間口の影響	66
3.3.3	最大許容積雪荷重に対する棟高の影響	70
3.3.4	鋼材量および日射遮蔽率を最小にするアーチパイプ	72
3.4	結び	75

第 4 章	パイプハウスの風圧係数および妻面開口部が及ぼす影響	77
4.1	はじめに	77
4.2	実験方法	77
4.2.1	風洞および風の鉛直分布	77
4.2.2	風洞実験用模型	79
4.2.3	模型表面に生じる風圧の測定	83
4.2.4	風圧係数の求め方	86
4.3	結果および考察	89
4.3.1	桁行方向に直角に風が吹く場合の風圧係数	89
4.3.2	風力係数の比較	91
4.3.3	風向による風圧係数の変化	95
4.3.4	妻面開口部が風圧係数に及ぼす影響	98
	1) 外圧係数に対する影響	98
	2) 内圧係数に対する影響	98
4.4	結び	102
第 5 章	隣棟間隔がパイプハウスの風圧係数に及ぼす影響	104
5.1	はじめに	104
5.2	実験方法	104
5.2.1	風洞実験用模型および隣棟間隔	104
5.2.2	風の鉛直分布	110
5.2.3	模型表面における風圧の測定および可視化	110
5.3	結果および考察	112
5.3.1	2 棟のパイプハウスが隣接している場合の風圧係数	112
5.3.2	3 棟のパイプハウスが隣接している場合の風圧係数	114

5.3.3 気流の可視化による風圧係数の考察	117
5.4 結び	122
第 6 章 総括	124
Summary	131
謝 辞	139
参考文献	141

第 1 章 緒論

1.1 わが国における温室の現状

わが国における最初の近代的な温室は、東京府下の開拓使の敷地に 1870 年に導入されたガラス室である。その後、産地形成等で営利目的の温室は徐々に増加するが、戦前までは、あくまで料理店や上流階級を対象とした贅沢品の栽培が主な目的であったといわれている（板木、1983）。構造については、ガラス室の形状は戦後のそれと大きくは異なるものの、骨組はほとんど木造であり、大型の温室は少なかった（三原、1980）。本格的に施設園芸が普及するのは、1951 年に塩化ビニルフィルム、1954 年にポリエチレンフィルムがそれぞれ農業用に生産開始されてからである（立花ら、1979）。これらのフィルムを用いた施設は、当初はトンネル栽培が主流であったが、小型のプラスチックハウスを経て、大型温室にまで発展した。近年では、50a 以上の大規模温室も建設されている。温室の設置実面積の推移を Fig. 1.1 に示す。温室の設置面積は急増したが、近年では安定し、2005 年度では全国で 52,209ha であった。2005 年度の内訳は、ガラス室が 2,262ha であるのに対して、プラスチックハウスは 49,947ha である。プラスチックハウスが全体の 96% を占めているが、この割合は 1970 年代からほとんど変化がない。

温室は農作物の高品質化と周年供給を可能にし、安定的な農業所得を確保する上で重要な生産基盤である。また、露地栽培とは異なり、外部環境から温室内部を隔離することが容易である。そのため、温室内部の CO₂ 施用の効果的実施、害虫の侵入低下に伴う農薬散布量の抑制等、経済性や環境保護の面についても多くの特長を有している。このような温室の特長から、既に、一部の野菜に関する生産現場では、施設園芸は不可欠のものとなっている。例えば、トンネル栽培を除いて、キュウリおよびピーマンの 67%、トマトの 74%、イチゴに至っては 99% が施設園芸によって収穫されているのが現状である（農林水産省大臣官房統計部、2002）。

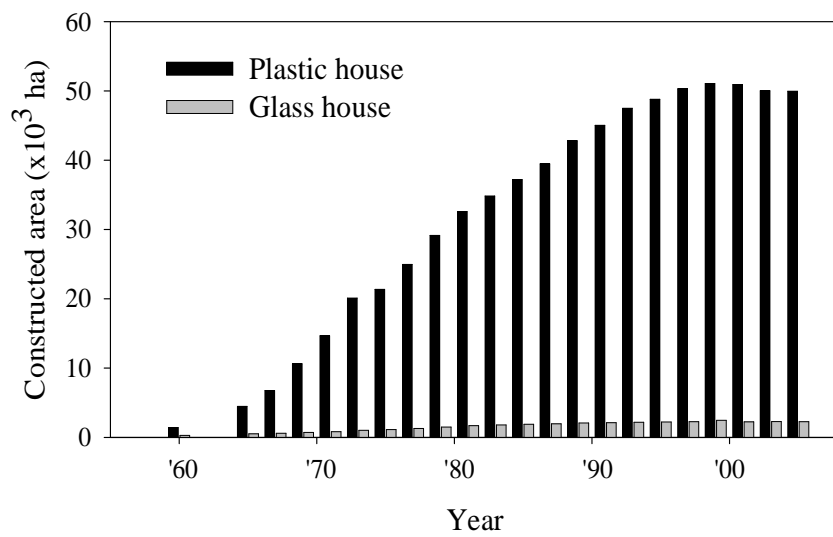


Fig. 1.1 Area of greenhouses in Japan from 1965 to 2005 (Japan Greenhouse Horticulture Association, 2007).

一方、温室は生産施設であり、採光性等の作物生育に適した内部環境の創出と同時に建設コストの抑制が求められる。そのため、骨組構造の部材断面の減少および部材の省略等によって日射を遮蔽する面積を極力小さくしたり、部材の接合部や基礎を簡略化することで建設コストの低減が図られてきた。人間の滞在時間が短いこともあり、構造強度は第一に犠牲にされやすい。ところで、わが国は世界有数の台風上陸国である。また、日本海側や北日本をはじめとする広い地域では、冬季に多量の降雪がある。これらの気象条件は、軽量、安価で簡便な使い勝手を前提として建設されている多くの温室、特にその大半を占めるプラスチックハウスの骨組構造にとって非常に苛酷である。実際、風荷重や積雪荷重によるプラスチックハウスの被災は毎年のように発生しており、園芸施設共済に加入しているプラスチックハウスの被害棟数の比率は、1996年～2005年の10年間の平均で、10.5%であった（農林水産省、2005）。

プラスチックハウスの中でも、アーチパイプおよび直管を組み合わせた骨組に、プラスチックフィルムで被覆するパイプハウス（Fig. 1.2）は、構造が簡単で部材も軽量である。施工に特別な技術および工具が不要であるため、生産者が自家労力で建設することが可能である。わが国は人件費が高いため、自家労力で建設できるパイプハウスを選択することで、生産者自身の労働コストを除けば全体の建設コストを低減することができる。このような特長から、パイプハウスは温室全設置面積の80%を占めるに至っている（日本施設園芸協会、2007）。以上のようなパイプハウスの長所を活かしたまま、耐風性能および耐雪性能を向上させる技術を開発できれば、わが国の施設園芸に対して大きな貢献となる。

1.2 温室構造設計における積雪荷重および風荷重の考え方

1.2.1 積雪荷重の算定法

園芸用施設安全構造基準（日本施設園芸協会、1997）によって、積雪荷重は基準積雪荷重を元に定めることとされている。基準積雪荷重は、Table 1.1 に示す雪の密

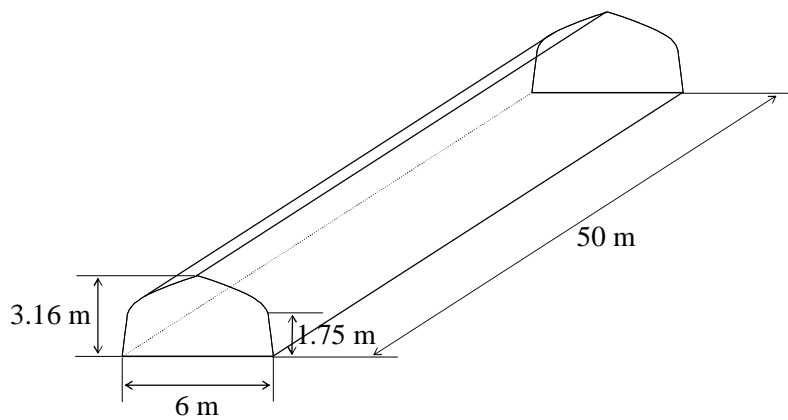
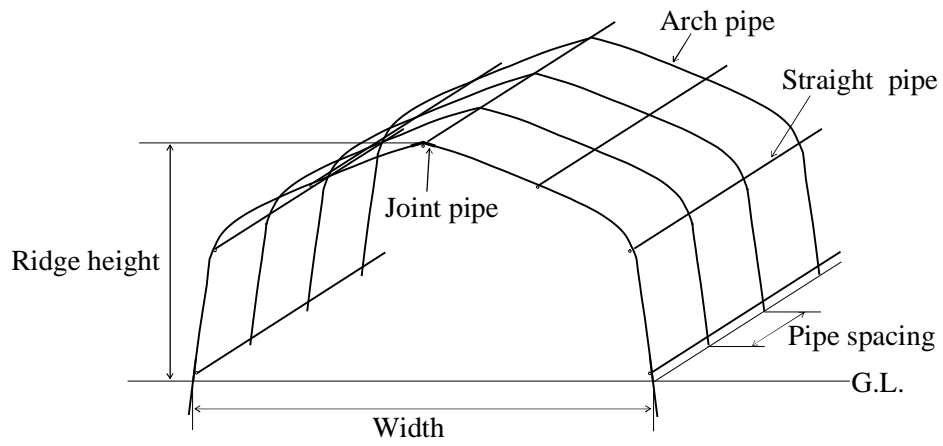


Fig. 1.2 A standard pipe house researched in this study: pipe house are consisted of arch pipes and straight pipes of 25.4 mm diameter with 1.2 mm thickness, and joints of 28.6 mm diameter with 1.2 mm thickness.

Table 1.1 Average snow density (Japan Greenhouse Horticulture Association, 1997).

Snow depth (cm)	Average snow density (kg/m ³)
50	100
100	150
200	220
400	350

When the snow depth is more than 50 cm, the average snow density is interpolated lineary.

度を積雪深に乗じることで求める。ただし屋根勾配、施設の設備および管理条件によって基準積雪荷重は低減できる。温室が単棟の場合は、軒下の完全な除雪・被覆材の整備点検・降雪時の外気の完全な遮断がなされていること、屋根面付近の室温が常時4°C以上であること、屋根勾配が20°以上であること、および被覆材がガラス、硬質プラスチック板もしくは硬質プラスチックフィルムであることを満たせば、積雪荷重を30kgf/m² (294N/m²) に低減可能である。日本施設園芸協会 (1998) は、パイプハウスについては、被覆材の形状および強度等から許容積雪深は20cm程度と考えている。従ってパイプハウスは、雪の密度を100kg/m³とした場合、20~25cmの積雪深が許容できる程度の強度を確保していれば充分であるとしている。以上から、パイプハウスについては、最大許容積雪荷重の基準値を300N/m² (30.6kgf/m²) とするのが妥当であると考えられる。

1.2.2 風荷重の算定法

積雪荷重と同様に、風荷重も前述の園芸用施設安全構造基準によって定められている。風荷重は以下の式に従って求める。

$$W = P A \quad (1.1)$$

$$P = q C_f \quad (1.2)$$

$$q = 0.016 V^2 h^{0.5} \quad (1.3)$$

$$C_f = C_{pe} - C_{pi} \quad (1.4)$$

ここで、 W : 風荷重 (kgf)、 P : 風圧力 (kgf/m²)、 A : 見つけ面積 (m²)、 q : 速度圧 (kgf/m²)、 C_f : 風力係数、 V : 設計用風速 (m/s)、 h : 構造体各部の地表面からの高さ (m)、 C_{pe} : 外圧係数、 C_{pi} : 内圧係数である。風力係数 C_f は、外圧係数 C_{pe} と内圧係数 C_{pi} の差として求められる。園芸用施設安全構造基準では、温室形状別の風力係数 (Fig. 1.3) を提示している。両屋根型のガラス室等は基準に示されている形状にきわめて近似しているため、正確な風力係数による設計が可能である。しかしパイプハウス形

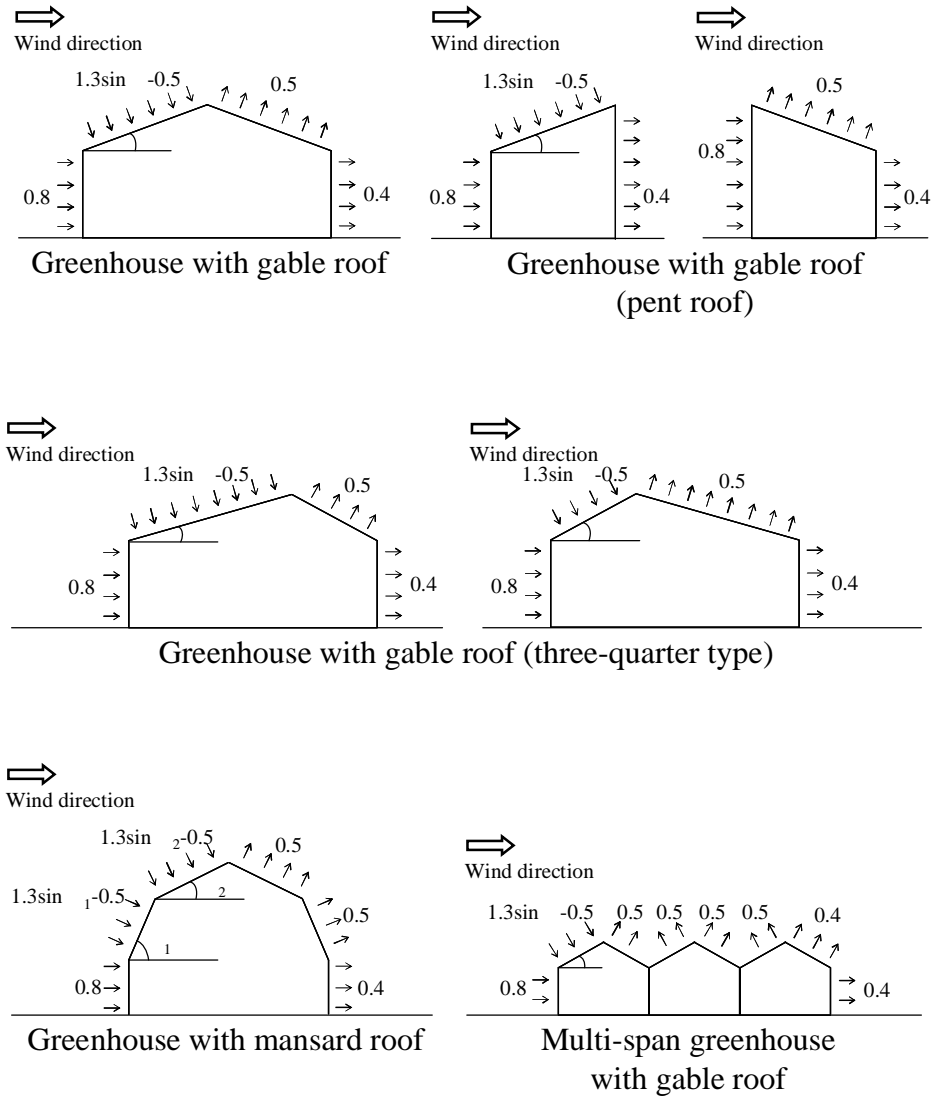


Fig. 1.3 (a) Wind force coefficient C_f for each shapes of greenhouses (Japan Greenhouse Horticulture Association, 1997).

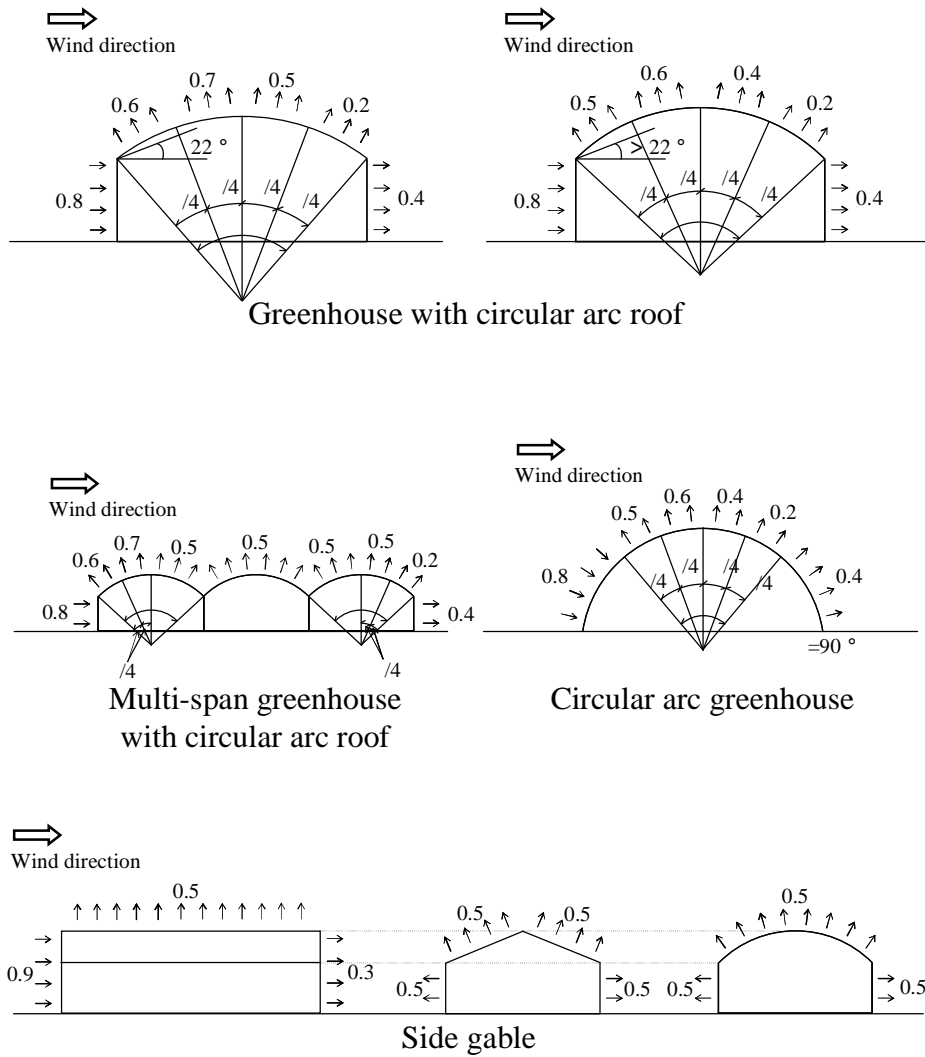


Fig. 1.3 (b) Wind force coefficient C_f for each shapes of greenhouses (Japan Greenhouse Horticulture Association, 1997).

状については正確な風力係数が定められていないため、不正確な設計荷重を風荷重として設定せざるを得ないのが現状である。

1.3 温室の耐候性に関する既往の研究

温室は軽量構造物であるため、地震による被害はほとんど報告されていない。建築物および社会的インフラに甚大な被害を与えた阪神・淡路大震災時ですら、軟弱地盤に建設されたガラス室を主に、地盤のずれに伴う床コンクリートの割れ、ガラス窓のひずみおよびガラスの破損があった程度とされる（羽倉、1995）。従って、温室の自然災害は、ほとんどが強風および多量の降雪によるものである。園芸施設共済統計表によって、奥島・奈良（1992）は1985年～1989年の5年間、佐瀬・豊田（2000）は1988年～1997年の10年間の温室被災原因別の被害額について調査している。どちらも、風害および雪害による温室被災の割合を全被害の約80%と算出している。

これまで、記録的な豪雪および台風によって温室の大規模な被災が生じるたびに、複数の調査研究が実施されてきた。それらの研究では、被災温室に関する現地調査、温室に作用する外力としての多量降雪時の積雪荷重および強風時の風圧力の測定およびそれらの軽減に関する実験、外力載荷時の温室の変形挙動に関する実験、構造強度に関する実験および数値解析が行われてきた。

次節では、積雪荷重および風荷重に関連する研究に分けて、既往の研究を整理する。

1.3.1 積雪荷重下の温室構造に関する研究

わが国では、戦後、“昭和38年1月豪雪”を筆頭に、多くの豪雪被害に見舞われてきた。温室が大雪によって被災するたびに、主に豪雪地帯に位置する試験研究機関が中心になって、被害実態の把握がなされてきた。現地における被災状況は、日本施設園芸協会（1974）、羽倉（1980）、北陸農業試験場（1981）、岩切（1982）、金谷・倉田

(1985)、村松ら (1998)によって、各雪害事例の概要が整理されている。調査結果に基づいて、温室構造の耐雪性の向上、融雪および除雪の必要性が提言されてきた。

積雪荷重に関しては、屋根面上に堆積した積雪荷重を測定することで、正確な積雪荷重を把握しようとする試みがなされた。深山ら (1980) は実際に積雪地帯における山形ラーメン構造の温室に使用されている構造材にひずみゲージを貼付し、積雪荷重下における温室の挙動を測定するとともに、屋根面上からの滑雪について観測した。その結果、被覆フィルムの外表面温度が 0°C まで上昇すると融雪水膜が摩擦抵抗を減少させることで滑雪が開始されること、融雪水膜を形成するためには温室内の室温を $2\sim 8^{\circ}\text{C}$ にする必要があることを明らかにした。高橋ら (1981) は、全国70箇所の気象台で記録された1941年～1973年の積雪深を元に、積雪荷重の地域的分布を計算した。また、典型的な形状のパイプハウスの屋根面上の滑雪試験を行った。その結果、パイプハウス設計については20年再現期間における新積雪重量を使用すること、温室内気温 4°C 以上、屋根勾配 27° 以上の条件で積雪荷重の緩和効果が大きいことを明らかにした。村松 (1998) は、屋根面からの滑雪現象に着目し、パイプハウスにおける滑雪の効果を検証した。その結果、屋根面の傾斜角度と温室内部の室温が特定の条件を満たす場合に限って、屋根面上の積雪荷重を 15kgf/m^2 (147N/m^2) まで低減可能であると主張した。従来、積雪地帯に建設される温室は、温暖な地域で使用されている温室の構造をほとんど改良しないまま流用することが少なくなかった。そのため、積雪地帯特有の気象条件である積雪荷重による温室の倒壊を避けるために、小規模の単棟温室の建設が主流であった。最近では、積雪地帯でも単一で大きな栽培面積を確保したいといった需要が多い。古野ら (2003) は連棟温室に設置する融雪装置の開発を行い、積雪地帯における連棟温室の設置可能性について研究を進めている。このように、積雪荷重を緩和する研究は発展を続けている。

わが国における標準的な温室、特にパイプハウスの耐雪性能に関する研究は少ない。プラスチックハウスの黎明期には、いくつかの実験的な温室構造が提案された。例えば、

森 (1971) は、積雪地帯用のパイプハウスとして、アーチパイプのうち、パイプハウス側面の部分を直管に置き換えた構造を提案した。これらの提案では、資材コストの試算はあるものの、構造的な実験および解析には至っておらず、科学的な根拠を有しているものは少ない。

パイプハウス構造の耐雪性に関する本格的な考察は、1980年代から開始された。長利・山下 (1980) は、積雪荷重および風荷重に対するパイプハウスの形状の最適化を数値解析によって試みた。しかし、彼らが提案したパイプハウス形状は、実際の営農現場における実用性ではなく、純粹に力学的な観点からのみ求められたものであった。そのためか、実際の営農現場で普及することはなかった。山下・佐藤 (1982) は、積雪荷重下の温室に関する実測結果とシミュレーション結果を比較し、シミュレーションによる温室設計が充分可能であることを明らかにした。小川ら (1989) は実物大のパイプハウスに対して積雪荷重および風荷重を模した載荷実験を行い、アーチパイプの地盤面における勾配が温室設計上重要であることを示した。それは、アーチパイプの地盤面における垂直角度が 2.9° 増加すると、棟における垂直変位が 25%、軒における水平変位が 15% 以上増加するというものである。また、アーチパイプが、例えば密に締まった不飽和地盤に差し込まれている場合は、数値計算におけるパイプハウスの支持条件を固定端として仮定できることを、実験値と比較して明らかにした。濱寄ら (1995) は、パイプハウスの補強方法として、従来から生産者が経験的に行ってきた中柱に注目し、その補強効果を算定している。そして、屋根上積雪の単位体積あたり重量を 30kgf/m^3 (294N/m^3) とすると、約 2m 間隔で中柱を一時的に設置することで、致命的な被災を免れることを示した。この方法は、常設の構造補強方法ではないため、小規模経営の場合は大雪に対応できるが、中規模以上になると労力の面で実施にやや難がある。

以上のように、温室構造に関する研究は限定的である。また、パイプハウスは細長比 λ (= 長さ l_k / 断面二次半径 i) の大きな骨組部材を使用しているため、標準的なパイプハウスにおける座屈による破壊が多いものと推測される。ここで座屈とは、荷重の作用

線が部材軸に一致していないこと等によって、軸方向の荷重がある限界値に達すると部材が軸の直角方向に大きくたわむ現象のことである。積雪荷重によって被災した多くの温室に関する調査結果は、アーチパイプの座屈によってパイプハウスの破壊が生じていることを示唆している。しかし、そのような座屈解析を含む包括的な手法によってパイプハウスの設計に検討を加えた研究はみられない。

パイプハウス建設の経済性に関する研究もまた、非常に数が限られている。近年、鉄鋼需給の問題、および温室建設に使用されるパイプの価格変動が顕著である。Fig. 1.4 は、2000 年 1 月から 2007 年 10 月の期間における、構造用鋼管に関する国内企業物価指数 (DCGPI) の推移 (日本銀行、2007) である。構造用鋼管は、パイプハウスの主要資材である。図からわかるように、鉄鋼の価格変動幅は非常に大きい。資材コストはパイプハウスの初期投資に直結するため、パイプハウス構造を補強するために追加設置する鋼材は極力少ないことが望ましい。温室建設の経済性に関する研究は、羽倉 (1976) による経済的、物理的投資限界曲線に関する考察がみられる程度である。パイプハウスの合理的な経済的設計を目的とした、鋼材量を考慮した工学的分析はまだ行われていない。

1.3.2 温室の風圧係数に関する研究

わが国は台風の通り道に位置しており、強風による温室の被害を毎年のように受けている。ところで、近年注目を集めている地球温暖化は、わが国周辺の台風に対してどのような影響を与えるのであろうか。予測結果次第では、わが国における温室の耐風設計に抜本的な変更が必要となる。Webster ら (2005) は、1970 年～2004 年における熱帯低気圧のカテゴリー別の発生数についての傾向を明らかにした。すなわち、35 年間で海水面温度が 0.5°C も上昇していたにもかかわらず、海水面温度と熱帯低気圧の発生数に有意な関係は認められなかったが、熱帯の海水面温度の増加に伴って、Saffir-Simpson scale におけるカテゴリー IV および V である風速 59m/s 以上の強い台

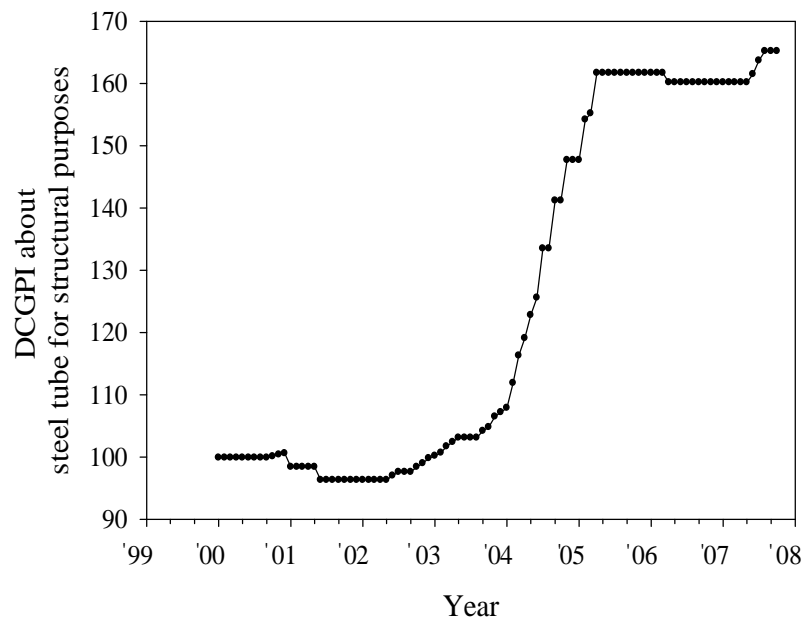


Fig. 1.4 Transition of Domestic Corporate Goods Price Index (DCGPI) about steel tube for structural purposes (Bank of Japan, 2007).

風の割合が増加する傾向にあることを明らかにした。つまり、台風の発生数については今後も変化はないが、風速は大きくなる可能性が指摘されている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 4 次レポートにおいても同様に結論づけられている (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)。全球大気モデルによる地球温暖化シミュレーション (Oouchi ら、2006) においても、今後 10 年の地球温暖化で、熱帯低気圧の発生数は 30% 程度減少するものの、最大風速が 45 ~ 60m/s の熱帯低気圧の発生数については、むしろ増加するという結果が得られている。従来は台風襲来時に構造を維持できた温室についても、今後は被災する可能性が大きくなることが予測される。従って、温室の強風害対策はひきつづき重要である。

わが国における強風による温室被害は、例えば、山本 (1964)、山下・小倉 (1982)、篠・中崎 (1988)、豊田ら (1998)、玉城ら (2007) によって調査されており、温室基礎、柱梁接合部、部材および温室立地条件等の被災特徴が整理されている。しかし、事例調査結果を踏まえて耐風性能を有する温室を設計するためには、温室に生じる風圧力分布を正確に把握しなければならない。従って、精密な風圧係数 C_p を求めることがきわめて重要である。

Hoxey・Richardson (1984) は、実物大の半円弧形状の温室を使用して、自然風によって温室外面に発生する風圧力の測定を行った。単棟の温室について、イギリスで市販されている 3 種類の断面形状の温室について実験が行われた。彼らは、温室の桁行方向に直角に風が吹く場合に、中央断面における C_p の分布は温室の形状に著しく影響を受けることを示した。実験結果に基づいて、各断面形状の温室に関する C_p を提案している。彼らの実験結果は、温室外面の C_p 分布に関する情報としてたいへん有益である。しかし、実験対象となった温室は、わが国で建設されている典型的なパイプハウスとは形状が異なっているため、わが国のパイプハウスの設計に適用することができない。

自然風によって実物大温室に生じる風圧力を測定することは、実際の状況に即した

測定であるため有効な研究方法である。もし計測およびデータ処理が正確であるならば、有益な情報を得ることができる。しかし、自然風は風向および風速が頻繁に変化し、定常状態を得ることがきわめて困難である。さらに、実物大温室の実験は一般的に費用が高額で、満足なデータを得るまで時間もかかってしまう。従って、現時点で構造上の風圧力を調査するためには、実験室における風洞実験が最も信頼性が高く、かつ比較的簡便な手法であると考えられている。温室の風圧力を求めるための風洞実験もいくつか実施されている。例えば、わが国では奈良（1983）によって、風のプロファイルを考慮した風洞実験が開始された。羽倉・藤野（1992）は、一様流と乱流境界層の2種類の風のプロファイルの中に両屋根型温室の模型を設置し、模型外面の風圧力を計測した。中央断面の風下側屋根および側面における C_p の分布は、風のプロファイルに影響されなかった。一方、風上側の C_p 分布は、風のプロファイルに強い影響を受けた。これらの結果は、風洞実験における気流作成の重要性を示している。近年では、Robertson ら（2002）が大型風洞に設置した大縮尺温室模型を使って、スクリーンおよびフィルム被覆の温室における風圧力を求めている。模型は、Hoxey・Richardson（1984）が実物大実験で使用した半円弧形状の温室と同じ形状に模している。彼らは被覆フィルムの変位および模型表面の風圧力を測定した。風洞実験で求めた風上側表面の C_p の値は、実物大実験で求めたものとよく一致した。しかし、棟および風下側表面における C_p の値は、風洞実験結果と実測値の間で著しく異なった。彼らは、風洞実験において、風の吹き出し口に取り付けた曲面（ベルマウス）上の風の剥離によって、この違いが生じたと指摘した。

数値流体力学（CFD）によって C_p 分布を求めようとする試みもある。例えば、Mathews・Meyer（2002）は、Hoxey・Richardson（1984）が実験した温室周囲の気流をコンピュータ上でシミュレートした。彼らは、桁行に直角方向に風が吹く場合の、温室中央断面の C_p 分布について解析した。風下側表面の C_p は、実測値に比べて、大きな負の値となった。彼らは、実測値と解析値の違いは、実物大温室において生じた変形

を、CFD 解析の境界条件として組み込まなかったことに原因を求めている。さらに、Mistriotis・Briassoulis (2002) は、桁行に直角方向の風が吹く場合の、妻面に換気口を有する半円弧形状の温室に関する C_p 分布を解析した。彼らは、換気口は内圧係数 C_{pi} に大きな影響を与えるものの、外圧係数 C_{pe} には全く影響を及ぼさないことを明らかにした。

パイプハウスに作用する風力は、外圧と内圧の差として導かれる。従って、特に温室の屋根面および妻面に換気口が設置されている場合に、内圧は風荷重を求める際に重要な役割を果たす。佐瀬ら (1980) は、単棟の両屋根型温室に関する内圧係数 C_{pi} を求めるために、風洞実験を実施した。彼らは、 C_{pi} の値は風向には依存するが、換気口の開口率にはほとんど影響を受けないことを明らかにした。実験値は、現在使用されている園芸用施設安全構造基準 (日本施設園芸協会、1997) で定められている値よりも、全般的に小さくなることを示した。さらに、風速がきわめて遅い場合に、 C_{pi} の値はレイノルズ数の影響を受ける可能性を示唆した。

温室の風圧係数については、以上のような研究例があるものの、わが国で普及している一般的なパイプハウスに対する研究はない。わが国で普及しているパイプハウスの断面形状は、緩やかな勾配の側面、側面と屋根面を曲面によって滑らかに接続する軒、複数の曲率半径を有する屋根面、および 30° 程度の角度を有する棟で構成される。その形状は、既往の研究で研究対象となった温室よりも複雑であるため、風圧力の分布も異なることが推測される。

風洞実験においては、模型の桁行長さに関する問題も避けられない。既往の研究における風洞実験では、主に風洞の規模に制約を受けて、間口 W に対する桁行長さ L の比 (L/W) が比較的小さな模型が使用されてきた。例えば、黄ら (1993) では L/W が 2.3 であり、Lee・Lee (1996) では 1.9 であった。実際に建設されているパイプハウスでは、 L/W が 4 以上であることが一般的である。 L/W が小さい場合、温室中央断面付近の C_p 分布は妻面の影響を受け、桁行方向に長いパイプハウスとは異なることが推測される。

そのため、実際のパイプハウスにおける正確な C_p 分布を求めるために、桁行方向に長いパイプハウスのモデルを使用すべきである。 C_p の間口方向の分布は、妻面からの距離に依存するはずである。さらに、 C_p の分布は、風向の影響も受けることが考えられる。これらの影響についても、温室設計に使用する設計風荷重に組み込むべきである。設計基準における風圧力は、桁行方向に直角の風が吹く場合に、温室中央断面に発生する C_p の分布に基づいている。しかし、温室に斜めに吹き付ける風について、妻面付近の C_p 分布は基準に示された分布とはかなり異なることが考えられる。また、そうした C_p の分布が、妻面付近の破壊に大きな影響を及ぼしていると考えられるべきであろう。

内圧が、開口部の大きさと位置に大きな影響を受けることは広く知られている (Holmes, 2007)。一般的に、パイプハウスは妻面に引き戸もしくは扉を有している。それらの扉は、強風の最中にしばしば破壊されている。扉が破壊されると、内圧および骨組に作用する風力が著しく増加し、パイプハウスの倒壊を引き起こす。既往の研究では、妻面開口部が C_{pe} および C_{pi} に与える影響について、詳細な検討が加えられていない。

1.4 本研究の目的

以上の背景から、本研究は、わが国で多数使用されているアーチパイプおよび直管を組み合わせてプラスチックフィルムで被覆するパイプハウスの耐候性向上、すなわち、耐風性能および耐雪性能を向上させる技術の高度化を図ることを目的とし、以下の内容について研究を行った (Fig. 1.5)。

- (1) パイプハウスの被災メカニズムに注目し、積雪荷重および風荷重によって実際に被災したパイプハウスの現地調査を行い、被災原因を明らかにする。
- (2) パイプハウスの解析モデルに対する有限要素法解析を行い、積雪荷重下のパイプハウスに対する低コストで設置可能な補強方法、パイプハウスの間口、棟高がパイプハウスの耐雪性能に及ぼす影響、および積雪荷重下のパイプハウスに適したアーチパイプ断面について検討を行う。

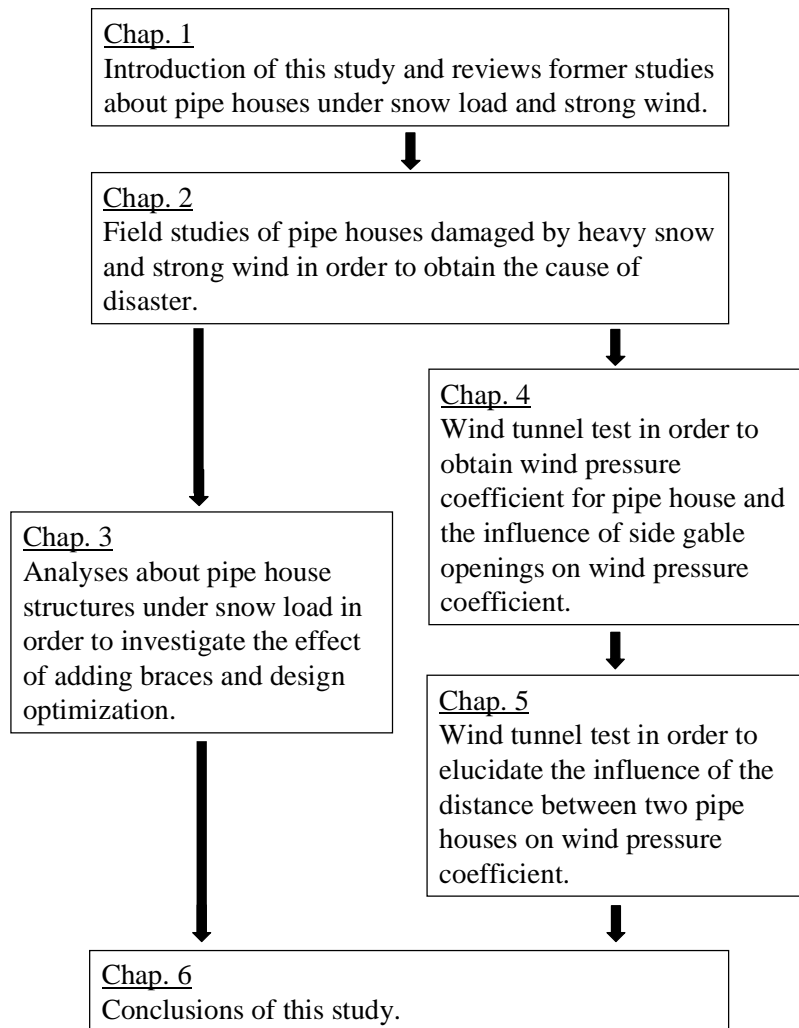


Fig. 1.5 Flowchart of this study.

- (3) パイプハウスの耐風設計の精度向上のために、風洞実験によりパイプハウス模型表面および内部に生じた風圧を計測し、パイプハウスのための風圧係数 C_p を求めるとともに、妻面開口部がパイプハウスの風圧係数 C_p に及ぼす影響について検討を行う。
- (4) 複数の同型パイプハウス模型を使用した風洞実験を行い、隣棟間隔がパイプハウスの風圧係数 C_p に及ぼす影響について検討を行う。

第 2 章 パイプハウスの風害および雪害の実態

2.1 積雪によるパイプハウス構造の被災実態

2.1.1 はじめに

1998 年 1 月 15 日から 16 日未明にかけて、関東甲信地方および東北地方の太平洋側に、発達した南岸低気圧による大雪がもたらされた。南岸低気圧による降雪は、例年では春先の 2～3 月であることが多く（宮沢、1982）、1998 年の大雪は季節外れの降雪であったといえる。その結果、多くのパイプハウスが十分な雪害対策が施されないまま、積雪荷重による被害を受けた。通常、多雪地帯に建設されるパイプハウスには、積雪荷重による被災を避けるため、構造補強や暖房設備の設置等の補強対策が付与されていることが多い。当然、これらの対策は、初期投資やランニングコストの上昇を招く。恒常的な豪雪地帯ではなく年に数回程度の大雪に耐えることを要求される地域のパイプハウスの対策としては、経済的に不適當である。

本章においては、雪害対策に大きなコストをかけられないパイプハウスに関する被害メカニズムを明らかにすることを目的として、実際に被災したパイプハウスの構造調査の結果について述べる。また、パイプハウスが被災に至った要因抽出のために、被災時の気象条件に関する検討結果について述べる。

2.1.2 調査方法

1) 調査地域

調査したのは、福島盆地および仙台平野におけるパイプハウスである（Fig. 2.1）。本事例のような大雪によるパイプハウスの大規模な被災は、いわゆる“昭和 56 年豪雪”以来である。しかし、太平洋側における降雪が恒常的に少ないというわけではない。Fig. 2.2 に、日本海側および太平洋側の各都市における、2 月中の降水量別日数（国立

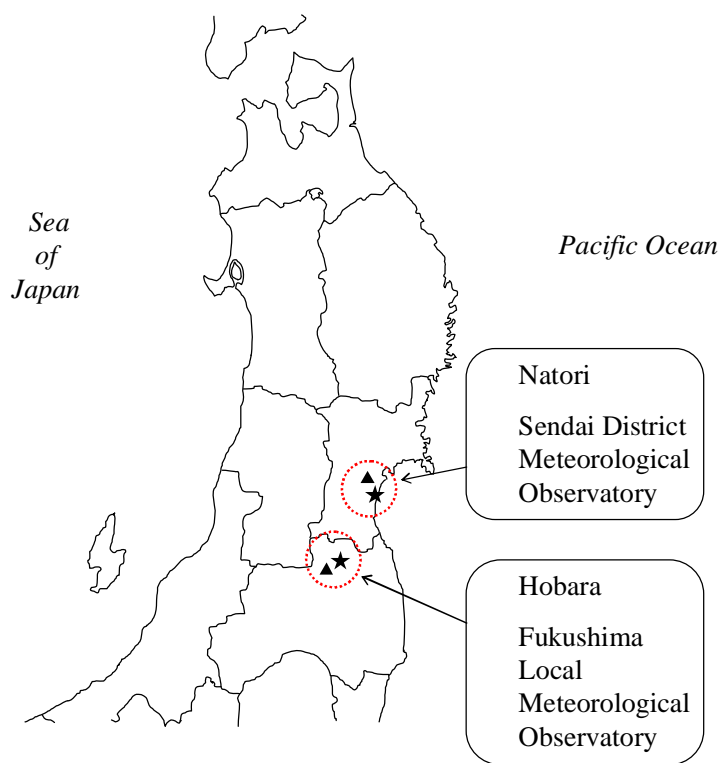


Fig. 2.1 Field investigation sites in Fukushima and Miyagi prefectures in 1998.

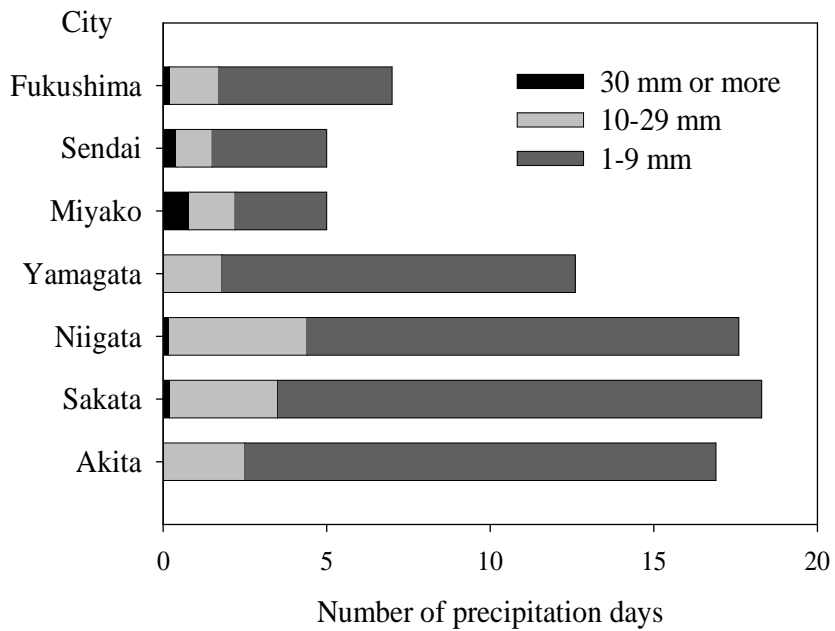


Fig. 2.2 Number of precipitation days (1-9, 10-29 and 30 mm/day) in February, 2004 (National Astronomical Observatory, 2004).

天文台、2004) を示す。太平洋側 (福島、仙台、宮古) の各都市における総降水量は、奥羽山脈の西側である日本海側 (山形、新潟、酒田、秋田) に比べてはるかに少ない。しかし、30mm 以上の降水量の日数では、日本海側と同じか、むしろ多い。これは、普段の降雪量は比較的少ないが、突発的な大雪が発生しやすいことを示している。

福島盆地における調査地点は、被害棟数および被害総額の大きな保原町 (現 伊達市) を選択した。調査地点はいずれも標高 40 ~ 50m の平野部にある。一方、仙台平野では、平野中央部に位置する名取市 (現 仙台市) で調査した。調査地点の標高は 0 ~ 数 m である。

2) 被災時の気象概況

1 月 15 日に関東甲信地方に大雪をもたらした南岸低気圧は、その後東北に移動した。そのため、15 日夜半から 16 日未明にかけて、東北地方太平洋側は大雪に見舞われた。Fig. 2.3 に、調査地点に近い、福島地方気象台および仙台管区気象台 (以後、それぞれ「福島」「仙台」と呼ぶ) における降水量と気温の推移を示す (気象庁、1998a)。これによると、降水は 15 日朝から始まり、16 日の 5:00 ~ 6:00 に終息している。気温の上昇は降水開始に前後して始まっており、「福島」では 16 日 0:00 に 0°C に達した。若干時間のずれがあるが、「仙台」においても 16 日未明に 0°C 前後に達した。

15 日夜から 16 日の明け方にかけて、調査地点周辺の風速は概ね 0 ~ 4m/s であったが、「仙台」では 7m/s 以上の風が吹いた時間帯もあった (気象庁、1998a)。日照時間は「福島」「仙台」ともに、0 時間であった。このことから、日射による融雪は顕著ではなかったことが推測できる。

Fig. 2.4 は「福島」における積雪深の推移である (気象庁、1998b)。15 日の朝から積雪が始まっていること、15 日以前に 10cm 程度の旧雪が既に存在していたことを示している。

なお、福島地方では、今回の被災に先立って、1 月 8 日 ~ 9 日にもかなりの降雪があ

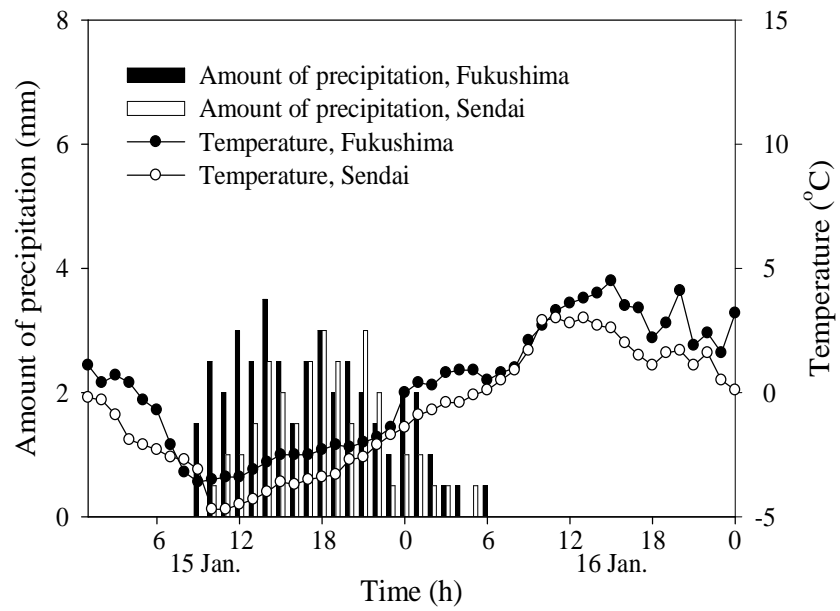


Fig. 2.3 Transition of amount of precipitation and temperature at Meteorological Observatory “Fukushima” and “Sendai” from 15 to 16 Jan., 1998 (Japan Meteorological Agency, 1998).

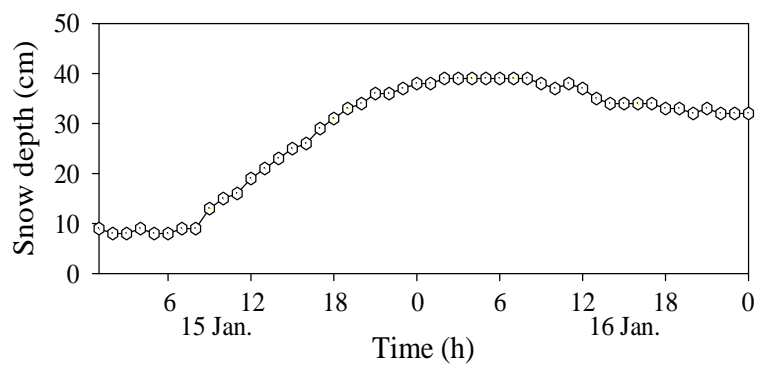


Fig. 2.4 Transition of snow depth at Meteorological Observatory “Fukushima” from 15 to 16 Jan., 1998 (Japan Meteorological Agency, 1998).

った。Fig. 2.3 および Fig. 2.4 に対応する 8 日～9 日の気象データを Fig. 2.5 および Fig. 2.6 に示す。「福島」では降雪前は 10cm であった積雪深が、最大で 42cm まで上昇している。Fig. 2.5 から、降水時間帯の気温は -2°C でほぼ一定であったことがわかる。

3) 被災状況の調査方法

生産者に対する聞き取り調査と、被災した 6 事例 21 棟のパイプハウスに関する損壊状況の観察を行った。聞き取り調査では、被災当時の現地の気象状況やパイプハウスの破壊挙動を把握することに主眼をおいた。パイプハウスの損壊状況に関する調査は、周辺の土地利用やパイプハウスの全体的な被災状況を把握するとともに、被災したアーチパイプの変形断面をメジャーで実測した。すべての調査を 1998 年 1 月 24 日から 27 日にかけて行った。

2.1.3 調査結果と考察

1) 被災に関する気象要因の整理

調査結果のうち、積雪荷重および気象に関する事項を、以下の 6 点にまとめた。

[調査結果 1] 被災 7 日前の 1 月 8 日～9 日にも降雪があり、「福島」では 42cm の積雪を記録した (Fig. 2.6)。聞き取り調査によると、このとき一部のパイプハウスでは屋根上に 30cm 程度の積雪が生じたが、倒壊には至らなかった。

[調査結果 2] 聞き取り調査によると、雪質は 1 月 15 日の降雪開始当初はサラサラとした軽い雪であったが、日没後に湿り気のある重い雪に変質した。雪質の変化が見られ始めたのは、18:00 頃～20:30 頃である。

[調査結果 3] Fig. 2.3 から、降水は 1 月 15 日の朝から始まり、16 日の明け方に終息した。一方、気温は降水開始と同時に上昇し、パイプハウスの被災時間帯である 15 日 22:30～16 日 2:00 の間に -1～0°C に達した。

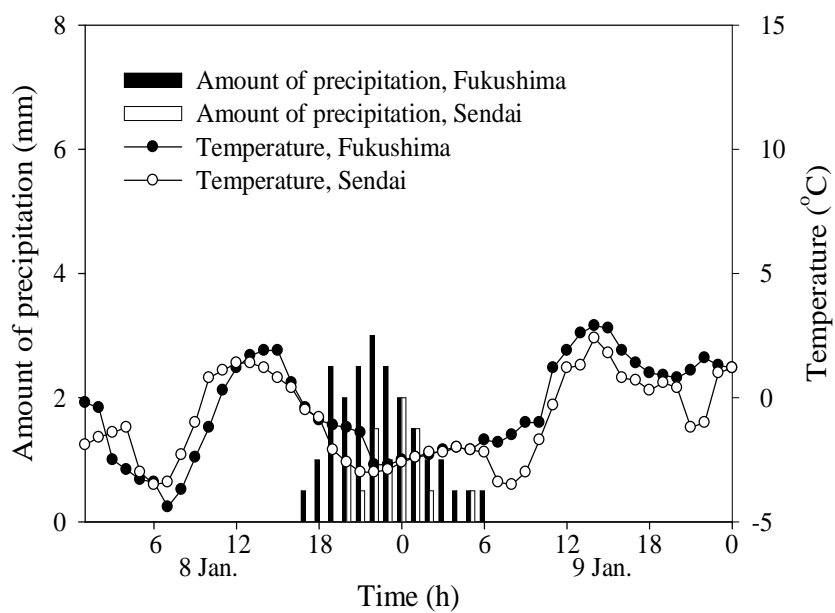


Fig. 2.5 Transition of amount of precipitation and temperature at Meteorological Observatory “Fukushima” and “Sendai” from 8 to 9 Jan., 1998 (Japan Meteorological Agency, 1998).

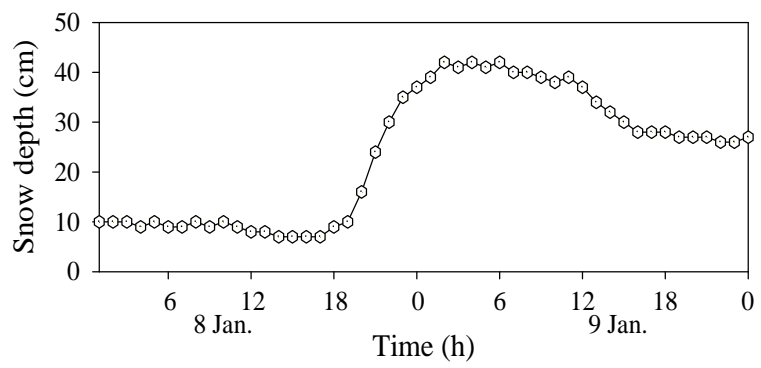


Fig. 2.6 Transition of snow depth at Meteorological Observatory “Fukushima” from 8 to 9 Jan., 1998 (Japan Meteorological Agency, 1998).

[調査結果 4]1月8日～9日の積雪が完全に融解するか、もしくは除雪される前に、1月15日～16日の大雪によって被災したパイプハウスも一部あった。

[調査結果 5]降雪強度が大きく、効果的な除雪ができなかった。

[調査結果 6]ハウス用抑えひも、ネット類、桁行直管等の構造上の凸部が積雪を助長した形跡は顕著ではなかったが、被覆材の弛み箇所に積雪して雪が滑落しなかった事例が認められた。被災したパイプハウスの被覆材には、概ね破断は認められなかった。

2) 被災に対する気象要因の考察

[調査結果 1]から、1月8日～9日にも大きな積雪があったにもかかわらず、パイプハウスの被災は顕著ではなかった。前述したように、1月8日～9日の降雪中の気温は -2°C でほぼ一定であった。1月15日～16日には、降雪時に気温が上昇し続けて、降水量が0mmになる前に 0°C に達している。降雪時の気温変化のパターンが異なることは、雪の性質も異なる可能性を示している。雪は降雪時の条件によって、粉雪および湿雪の2種類の性質に分かれる。今回の雪は南岸低気圧に起因する、比較的気温が高い条件下で生じた湿雪と考えられる。湿雪は粉雪よりも液体に近い構成なので密度が大きく、水の表面張力に由来する粘着力を有することから、物体に着雪しやすい(木下、1993)。つまり、湿雪は、構造物の積雪被害を引き起こしやすい雪であるといえる。このことから、1月8日～9日と1月15日～16日の被災状況を分けた要因の一つは雪質の変化にあると考えられる。

[調査結果 2]と[調査結果 3]は、1月15日夜から16日未明にかけて、雪質が湿雪へ変化したことを示している。粉雪が湿雪へ変化する気温については、他の物理的要素が関係するため単純には求められず、文献によっても様々である。今回の被災状況からすると、気温が -1°C 以上であれば着雪しやすい雪が生じ始めて、パイプハウスにとって危険な状態になった可能性がある。また、雪と雨の境である臨界温度が多くの研究により提案されている。臨界温度は大気中の気温や湿度の鉛直構造および降雪をも

たらず大気現象の違いによる地域差、季節差があるが、概ね 0～4℃ の範囲内にある(菊地ら、1995)。以上から、降雪強度が大きいかつ気温が 0℃ 前後に上昇するような予報が出された場合には、湿雪に変化する可能性が高く、屋根上の積雪荷重に対する対策の必要が生じると考えられる。

[調査結果 4]から、一部のパイプハウスでは、屋根面上に付着したしまり雪やざらめ雪といわれる旧雪が、新雪の滑落を阻害してさらなる積雪を助長した可能性もある。また、新雪の密度が 50～100kg/m³ であるのに対して、旧雪は圧密によって 200～500kg/m³ と大きく(日本建設機械化協会、1977)、そのため、見た目の積雪深から推定されるよりも大きな荷重となっていたことも考えられる。

[調査結果 5]と[調査結果 6]は積雪荷重の除去に関する問題点である。積雪荷重の除去には融雪による方法があるが、初期投資およびランニングコストの面から、すべての温室、特に設置費用が廉価であることから選択されているパイプハウスに対してこの種の装置を設置することは困難であると言わざるを得ない。

3) 構造上の問題点の整理

各事例調査および聞き取り調査から得られた結果のうち、パイプハウス構造に関するものを、以下の 5 点にまとめた。

[調査結果 7]屋根面の M 字型の陥没は、妻面から見て左右対称であるもの (Fig. 2.7 (a)) と、片側が大きく陥没したもの (Fig. 2.7 (b)) があった。

[調査結果 8]アーチパイプ埋設部が地表面で 5～6cm ほど水平に移動した形跡を残すパイプハウスがあった (Fig. 2.8)。

[調査結果 9]桁行直管同士の接合部が抜けた箇所のアーチパイプだけ被災しなかった事例があった。その場合、筋交は設置されていなかった。

[調査結果 10]パイプの発錆箇所と被災箇所の相関性は、特には認められなかった。

[調査結果 11]聞き取り調査によると、両側の軒の桁行直管同士を間口方向に渡した



(a)



(b)

Fig. 2.7 Mode of collapse for pipe house: (a) Symmetrical collapse (Hobara), (b) Asymmetrical collapse (Natori).



Fig. 2.8 Horizontal displacement of arch pipe at the ground level.

作物誘引用ワイヤの支持用ブレースで連結していたパイプハウス (Fig. 2.9) は被災しにくかった。

4) 構造上の問題点の考察

日射時間は 0 時間であったため、[調査結果 7]は、風によって、桁行方向に対して非対称の積雪が生じた可能性を示唆している。前述したように、「仙台」では被災時間帯の風速が 7m/s を超える風が記録された。屋根が非対称に陥没したのは、周囲に風の障害物がなく、開けた土地に建設されていた仙台平野のパイプハウスであった。防風林に隣接していたパイプハウスでは、左右対称に陥没していた。比較的風速の小さかった福島盆地で調査したパイプハウスでは、すべて対称に屋根が陥没していた。このように積雪が風の影響を受ける可能性のあることから、現実的な雪害対策を考える上で、均一な積雪荷重の他に非対称荷重も検討する必要がある。屋根面全面にわたって積雪荷重のある場合と、片側のみ作用している場合では、パイプハウス骨組に作用する外力が異なり、耐雪性能にも影響を及ぼす。日射による南側屋根面における雪の滑落、風による風下側への積雪荷重の集中等があるため、両者の積雪荷重条件を考慮する必要がある。また、屋根部の陥没は、アーチパイプの細長比が大きいことから、座屈による破壊の可能性もある。しかし、座屈解析によってパイプハウス構造を検討した研究はない。パイプハウスの補強を検討する上でも、座屈耐力に関する解析が必要である。

一部のパイプハウスでは、[調査結果 8]のように、地盤面におけるアーチパイプがパイプハウス外側に移動していた。この被災挙動は、より安全なパイプハウス設計のためには、埋設部の境界条件を単純な固定端だけではなく、ヒンジ端とした解析モデルも検討する必要があることを示唆している。

[調査結果 9]は、1 組のアーチパイプに変形が生じると、そのアーチパイプと接合されている桁行直管が、本来積雪荷重に耐えうる隣接するアーチパイプを引きずって連鎖的に倒壊するという破壊挙動の可能性を示している。そのため、積雪がパイプハウス

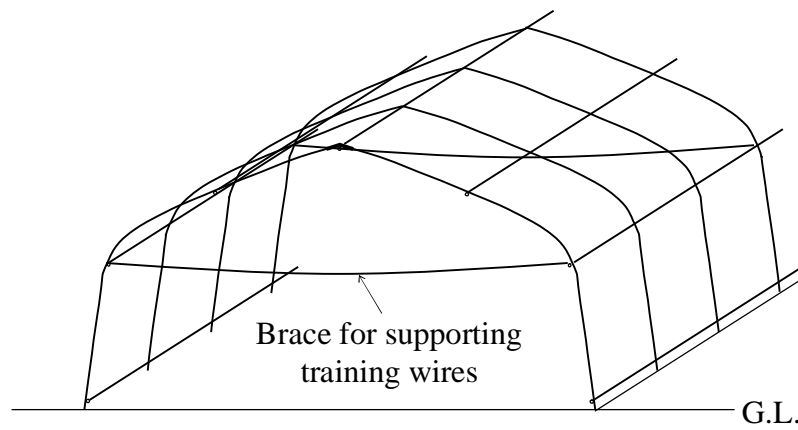


Fig. 2.9 Pipe house attached braces for supporting training wires: the end of brace was fastened at the straight pipes at each eaves of pipe house.

の一部分に集中するような立地条件である場合は、小さな降雪量でもパイプハウス屋根の広範もしくは全体が被災するおそれがある。また、[調査結果 10]から今回はパイプ等部材の強度低下による被災は認められなかった。しかし、錆が腐食にまで発展するとパイプの断面欠損から被災が生じることも充分予想される。

パイプハウスのための、積雪荷重に対する簡易な補強方法を検討する上で注目されるのが[調査結果 11]の、作物誘引用ワイヤを設置しているパイプハウスは被災しにくい傾向があったという事実である。作物誘引用ワイヤは、立作りを行うためにパイプハウス内部に張られたワイヤのことである。このワイヤを支えるために、支持用のブレースが間口方向に張られている。支持用ブレースは、たとえばメロン栽培ではアーチパイプの4～6間隔ごとに設置されていることが多い。今回の調査地域では多くのパイプハウスでメロンやキュウリを栽培していた。これらの作物用の誘引ワイヤが冬季も撤去されずにそのまま残されていることが多い。軒部でアーチパイプに接続された支持用ブレースがアーチパイプの外側へのひずみを抑制することによってアーチ効果を生みだし、屋根部を結果的に補強して積雪荷重に対する強度を維持できたことが考えられる。冬季はハウレンソウ等の葉物を栽培中であり、作物荷重がブレースに作用しなかったこともパイプハウスの被災を軽減した要因と考えられる。パイプハウスの構造やブレースの強度等が条件を満たせば、曲げモーメントの大きな箇所にもブレースを設置することによって骨組みの変形を阻止できる可能性があることがわかった。

2.1.4 積雪による被害のまとめ

積雪荷重によって被災したパイプハウスについて、構造に関する調査結果および気象概況から、被災要因の抽出を試みた。雪質は地域の気象条件、地形条件に大きく左右され、粉雪と湿雪の境界温度は一定ではない。しかし、少なくとも今回の調査地域では、降水時の地表部気温が0°C前後である場合に雪の密度が大きく、被覆材に付着しやすい、つまり雪害を引き起こす可能性の高い降雪となることが明らかとなった。ま

た、屋根上の積雪荷重は、風の影響を強く受けて片側の屋根面に集中することがある。パイプハウスを設計する場合には、片側の屋根上に積雪荷重が載荷する場合についても検討する必要がある。

パイプハウスの被災状況は、屋根部の陥没であった。細長比の大きなアーチパイプでは、座屈による破壊の可能性がある。また、パイプハウスの設計上、ヒンジ端による解析が必要である事例がみられた。ヒンジ端の場合、座屈耐力は著しく低下するため、座屈解析を検討する必要がある。

降雪強度が大きな場合は、積雪荷重が、短時間でパイプハウスの耐雪能力の上限まで到達してしまう。そのため、一時的にパイプハウスに補強部材を設置するといった耐雪対策に頼ることは、労働力が不足している場合は危険である。パイプハウスのための、常設の部材による補強対策が必要である。しかし、全国一律に、すべての積雪荷重に耐えることのできるパイプハウスを建設しようとする、過剰なコストをかけざるを得なくなってしまう。必要最小限の雪害対策方法として、ブレースによる屋根部の補強が有望であることが示唆された。

2.2 強風によるパイプハウス構造の被災実態

2.2.1 はじめに

2002年10月1日20時半頃に、台風0221が神奈川県川崎市付近に上陸した。本台風は、中心気圧965hPa、中心付近の最大風速35m/sの強い勢力を維持したまま関東地方太平洋側を北上した、関東地方における戦後最大級の台風であった（Fig. 2.10）。そのため、10月1日の夕方から夜遅くにかけて強風が吹き、落下物による死傷者の他、送電線鉄塔の倒壊や自動車運搬船の座礁等が発生した（東京管区気象台、2002a）。また、一部の地域では大雨を伴い、そのため土砂災害や浸水害が発生する等、未曾有の台風災害となった。

温室も、被覆材の破損のような比較的軽微な被害から構造全体の倒壊に至るまで、

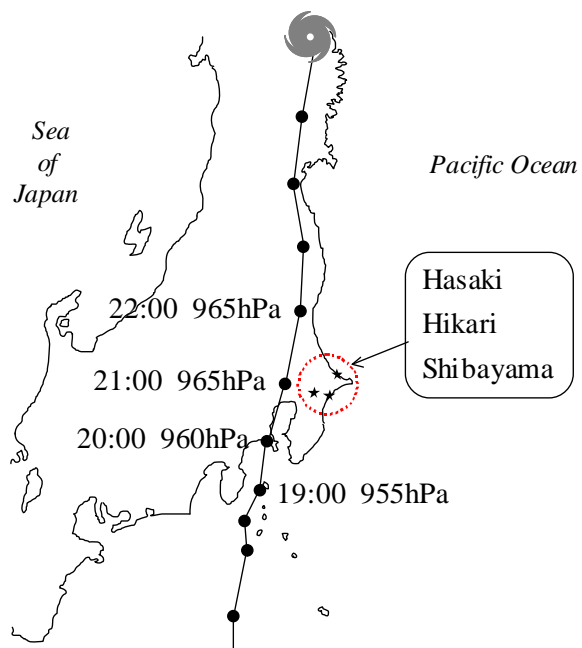


Fig. 2.10 Path of Typhoon 0221 and field investigation sites in Chiba and Ibaraki prefectures in 2002 (Tokyo District Meteorological Observatory, 2002).

広範かつ大規模な損害を受けた。農作物被害を除いた温室構造自体の被害は千葉、茨城両県で大きく、損害額は千葉県で32億円（被災面積486ha）、茨城県で22億円（同440ha、茨城県は雨よけハウス等を含んだ数値）にも達した（農林水産省関東農政局、2002）。特に台風危険半円に位置した千葉県東総地方および茨城県鹿行地方では、10月1日21時頃に非常に強い風が吹き、銚子地方気象台では観測史上最大の最大瞬間風速である52.2m/sを記録した（東京管区気象台、2002b）。

ここでは、強風によるパイプハウスの被災メカニズムを明らかにするために、台風通過直後の10月9日に千葉県東総地方、同月11日に茨城県鹿行地方において、被災したパイプハウス構造を調査した。

2.2.2 調査方法

被災地域において、被災したパイプハウスの構造部材寸法、変形状況および立地状況を調査した。また、被災時のパイプハウスの変形挙動および風の状況に関する聞き取り調査も可能な限り行った。現地調査は、4事例25棟のパイプハウスについて行った。

調査地点は、千葉県東総地方の芝山町、光町（現横芝光町）および茨城県鹿行地方の波崎町（現神栖市）である（Fig. 2.10）。千葉県東総地方では、周年トマト、あるいはトマトにキュウリ、メロン、スイカを組み合わせた栽培が盛んで、本台風通過時にも被覆材を展張していたパイプハウスが多かった。イチゴ栽培ハウスでは、10月末から11月初旬にかけて被覆材の展張を開始するため、本台風通過時にはパイプハウスは骨組だけの状態であり、大きな被災を免れることができた。一方、茨城県波崎町は海岸低地に位置する。宮崎、高知と並ぶピーマンの産地であり、ピーマン栽培のパイプハウスが圧倒的に多かった。

2.2.3 結果および考察

1) 平坦地のパイプハウス

2つの単棟を側面で連結し谷樋を設置して連棟化したパイプハウス（間口9m、桁行40m、棟高2.5m）2棟と、単棟パイプハウス（同4.5m、40m、2.5m）1棟を調査した。Fig. 2.11に平面図を示す。パイプハウスは海岸から5km弱離れた水田地帯に建設されていた。桁行方向は東北東 - 西南西であった。東北東側に5連棟の鉄骨ハウスが建設されていた以外は、水田に囲まれていた。

骨組部材には直径19.1mm、肉厚1.1mmのアーチパイプを使用し、棟部は外ジョイント形式で接合していた。パイプ間隔は45cmであった。2連棟パイプハウス中央のアーチパイプの脚部が重複している箇所は、マイカ線等によって緊縛および連結されており一体化していた。上記のアーチパイプ以外に、同径の追加アーチパイプがアーチパイプ6本毎に、内側6cmの位置に追加して設置されていた。追加アーチパイプは接合金物を使用して、合計4カ所でアーチパイプと接合されていた。

主な被害は、調査したパイプハウスの3棟とも、風上側側面の転倒および屋根面にかけての陥没、アーチパイプの折れ曲がりであった。最も風上側の2連棟パイプハウスのA棟およびB棟では、風上側アーチパイプが大きく折れ曲がり、風下側のアーチパイプは上方に大きく曲がっていた（Fig. 2.12）。アーチパイプ内側の追加アーチパイプは、アーチパイプとの接合箇所でねじれが生じており、部材の曲がり等の破壊もアーチパイプと同程度であった。もう1棟の2連棟パイプハウスのC棟およびD棟もほぼ同様の変形状況であったが、被災程度は若干軽微であった。単棟パイプハウスEは、風上側から押されるような形で、ほぼ完全に押しつぶされていた。E棟の地盤面近傍のアーチパイプはかなり腐食しているものがあり、地中埋設部がそのまま残留し、地表部で破断しているものがあった。いずれのパイプハウスにおいても、桁行方向の変形はほとんどみられなかった。

なお、調査したパイプハウスと同様に、水田の中に点在していた他の南北棟のパイプ

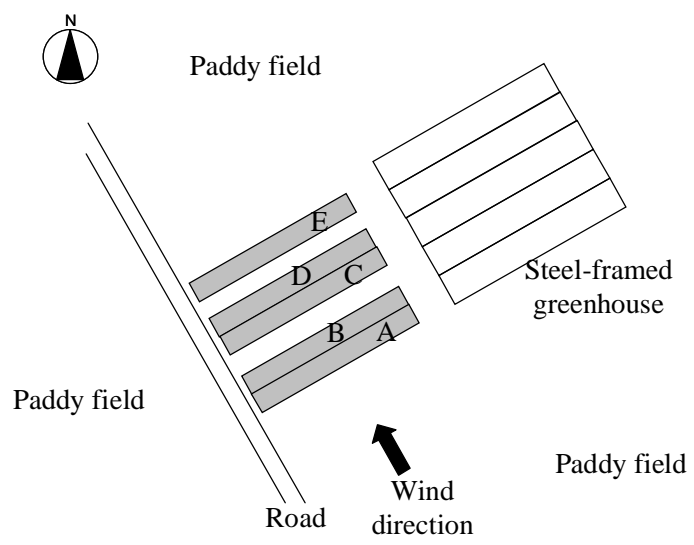


Fig. 2.11 Plain view of pipe houses constructed in open and flat ground.



Fig. 2.12 Mode of collapse for pipe house constructed in open and flat ground: the pipe house showed was pipe house A.

ハウスは筋かいを設置しており、若干、桁行方向に傾いている程度であった。筋かいが有効に作用したものと考えられる。

2) 防風林に隣接したパイプハウス

9棟のパイプハウス（間口4.5m、桁行57mおよび50m、棟高2.5m）を調査した。Fig. 2.13に平面図を示す。パイプハウスは東総台地上の畑地に建設されていた。桁行方向は東北東 - 西南西であった。パイプハウスI棟は、高さ12m、幅20m程度の屋敷林に1mほど離れて隣接していた。

すべてのパイプハウスは直径19.1mm、肉厚1.1mmのアーチパイプを使用し、棟部は外ジョイント形式で接合していた。パイプ間隔は45cmであった。多くのアーチパイプの地盤面近傍に、直径19.1mm、肉厚1.1mm、長さ60cmの直管を埋設し、アーチパイプを補強していた。これら補強用パイプの埋設深は30cmであった（Fig. 2.14 (a)）。

被災状況については程度の差はあるが、すべてのパイプハウスにおいてアーチパイプの風上側の軒から屋根にかけて押しつぶされていた（Fig. 2.14 (b)）。アーチパイプ、補強用パイプともに腐食しているものが多く、埋設部は残留したものの地表部で補強用パイプもろとも破断しているアーチパイプが目立った。調査したパイプハウスは1989年に建設されたが、一部のアーチパイプは、台風9617による被災後に導入されたため新しく、亜鉛メッキの光沢が残っていた。それら新しいアーチパイプの被害は認められなかった。

被災は、パイプハウスA棟～I棟のすべてにおいてみられたが、特に、パイプハウスG棟～I棟の、屋敷林の端部に隣接している箇所が著しかった。

この事例では、風上に屋敷林が一行に配置されていたが、その列がとぎれた箇所が開放空間となることによって風が縮流しやすくなる状況下にあった。風の縮流によって局部的に風速が大きくなる（真木、1987）ことにより、パイプハウスの被災が生じたものと考えられる。また、地盤が密に締まっている場合はパイプハウス支持端が固定端とな

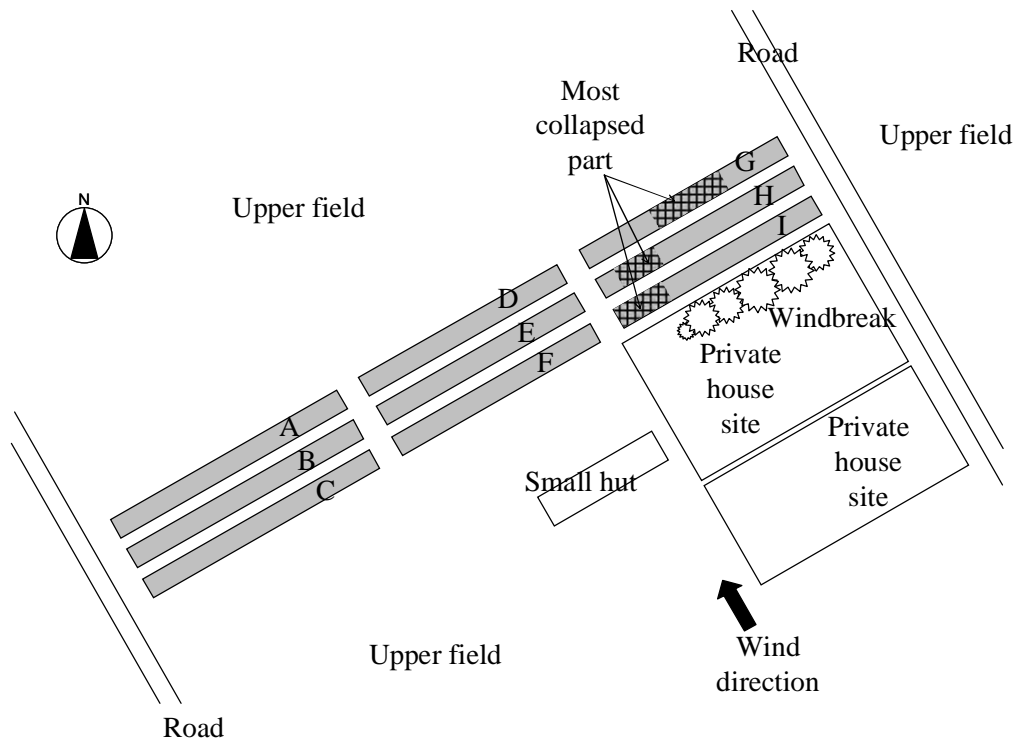


Fig. 2.13 Plain view of pipe houses beside windbreak.



(a)



(b)

Fig. 2.14 Pipe house beside windbreak: (a) Arch pipe at the ground level reinforced by a straight pipe, (b) Mode of collapse for pipe house.

るため、地盤面近傍のアーチパイプには大きな抵抗モーメントが生じる。腐食によるアーチパイプの破断が、抵抗モーメントの集中する箇所に位置していたため、被災を助長したものと考えられる。

3) 大規模施設に隣接したパイプハウス

幅 80m、高さ 15m 程度の工場が約 8m の距離で南側に隣接している、パイプハウス (間口 5.4m、桁行 47m、棟高 2.5m) 12 棟を調査した (Fig. 2.15)。桁行方向は、南南東 - 北北西であった。骨組部材は直径 22.2mm、肉厚 1.2mm のアーチパイプで、棟部を外ジョイント形式で接合していた。アーチパイプの間隔は 45cm であった。アンカーとしての効果を期待して、砂を詰めた質量 20kg の肥料袋を、10cm 深に埋設された根がらみに、桁行 10m 間隔で設置していた。さらに 75cm 長さに切断した直径 22.2mm の直管を、すべてのアーチパイプ地盤面近傍に密着するように埋設し、アーチパイプを補強していた。これら補強用パイプの埋設深は 45 ~ 50cm であった。パイプハウスの被覆材は、二重の固定張りであった。

アーチパイプの被害が著しかった箇所を Fig. 2.15 中に斜線で示す。パイプハウス D 棟 ~ H 棟では、パイプハウス G 棟の黒点箇所を中心として、直径 10m のクレーター状に、真上から屋根が押しつぶされるように陥没していた (Fig. 2.16)。アーチパイプの被災がない箇所でも、パイプハウス A 棟を除くすべてのパイプハウスで、被覆材の剥離、内張フィルム固定用のアーチパイプの折れ曲がりの被害がみられた。地盤面近傍のアーチパイプは、いずれもしっかりと固定されており、緩んでいる箇所はなかった。

パイプハウスの所有者によると、台風 9617 襲来時にも被害を受けたが、その時にはアーチパイプが横から押しつぶされ、アンカー用の砂袋が浮き上がり、飛散したアーチパイプもあったらしい。本台風の被災調査では、地盤面で浮き上がった形跡を残すアーチパイプは皆無であった。

この事例では、工場から剥離した風がパイプハウスに再付着することで、パイプハウス

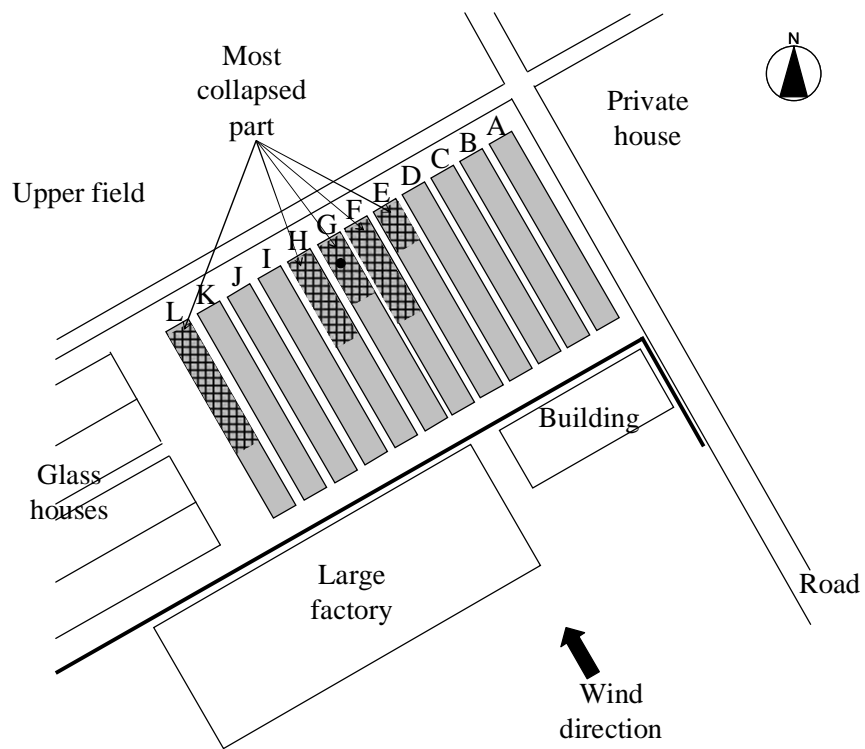


Fig. 2.15 Plain view of pipe houses beside a factory.

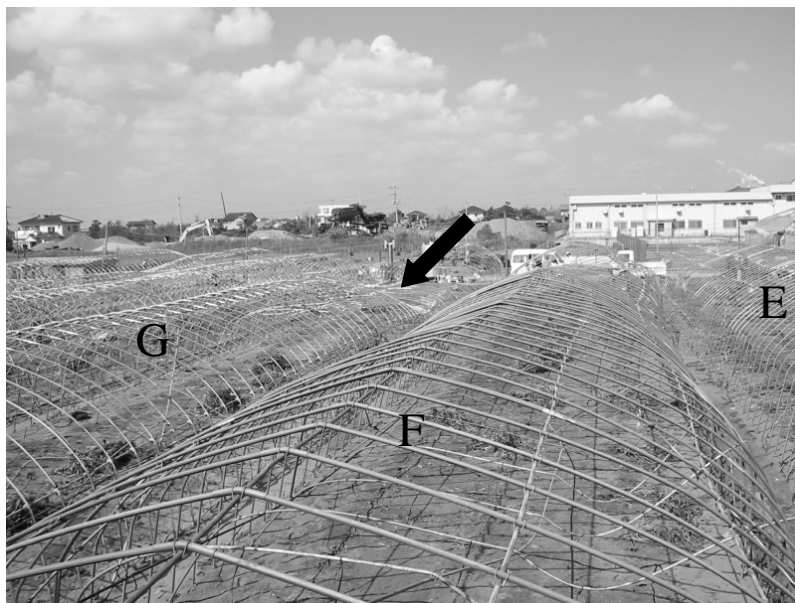


Fig. 2.16 Mode of collapse for pipe house beside a factory.

の被害を発生させたものと考えられる。1996年の台風被害の教訓として、補強用パイプによるアーチパイプの固定、砂袋埋設による構造全体の浮き上がりに対する耐力を向上させていたため、骨組の横方向の倒れや構造全体の浮き上がりは防止できた。しかし、上方から吹いてくる気流には構造強度が小さく、棟部が陥没したものと考えられる。このような再付着する風の場合には、現行の風圧分布の他に、別途、適切な風圧力算定方法を定める必要がある。パイプハウスに対するビル風の影響については、豊田ら(1999)が風洞実験によって研究している。しかし、ビル風の風速および風向は、パイプハウス風上の大型建造物の規模や形状によって規定される。そのため、パイプハウスに対するビル風の影響は、個別事例ごとに異なり、実験によって得られた結果の普遍化は困難であるのが実情である。それでも、パイプハウスの建設サイト決定時に、風の縮流による風速の増加領域を避けることが、強風対策上きわめて重要である。また、パイプハウスは複数のパイプハウスを隣接して建設する事が多い。ビル風に限らず、隣接するパイプハウスも相互の風圧分布に影響を与えることが推測されるため、パイプハウスの合理的な設計のために、その影響も解明しなければならない。

4) 妻面に開口部のあったパイプハウス

間口 6m、桁行 52m、棟高 3.1m のパイプハウスを調査した (Fig. 2.17)。骨組部材は、直径 25.4mm、肉厚 1.2mm のアーチパイプで、棟部は外ジョイントで接合していた。パイプ間隔は 45cm であった。このパイプハウスは、隣接する他のパイプハウス、水田、および高さ 3m 程度の樹木に囲まれていた。すべてのアーチパイプの地盤面近傍では、短く切断して、45 ~ 50cm 深に埋設した直径 19.1mm の直管を添えて補強していた (Fig. 2.18 (a))。

被災形態は、西北側の軒から東南側側面全体にわたる陥没であった (Fig. 2.18 (b))。桁行方向では、若干東北側に倒れていた。北東側妻面の引き戸が外側に引き倒されていた。

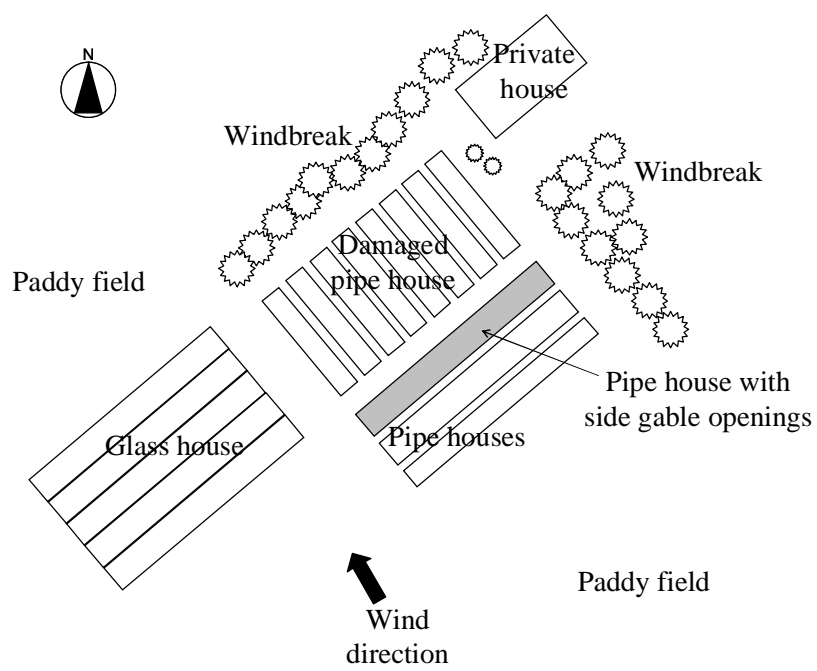


Fig. 2.17 Plain view of pipe houses with side gable openings.



(a)



(b)

Fig. 2.18 Pipe house with side gable openings: (a) Arch pipe at the ground level reinforced by a straight pipe, (b) Mode of collapse for pipe house.

パイプハウスの所有者は、台風が接近して風が徐々に強まる中、パイプハウスの防災作業を行っていたため、被災当時の様子を目撃することができた。聞き取り調査によると、被災時刻は10月1日21時少し前であった。所有者が、一度引き倒された南西側妻面の引き戸をつっかい棒により内部から補強した後、北東側妻面の補強作業中に被災した。その状況は、被覆材がいったんアーチパイプから40～50cm浮き上がり、直後に下向きに落下し、それとともにアーチパイプが変形したというものである。

北西側に隣接する8棟のパイプハウス（間口4.5m、桁行27m）も同様の被災状況であり、ほとんどのパイプハウスで、西南側の屋根が陥没していた。聞き取り調査によると、これらも、21時からの30分間に断続的に被災していった。

この事例では、風下側妻面の引き戸が引き倒されていたこと、および被災の直前に被覆材が上方に引っ張られている様子が目撃された。一般に、温室の構造計算に供される内圧係数ならびに風力係数は、温室がほぼ密閉されているという前提で、風洞実験から求めている。そのため、例えば風下側妻面の引き戸が引き倒されると、パイプハウス内部にさらに負圧が作用し、骨組構造を押しつぶそうとする風圧力が増加する。被災時に被覆材が上下動したのは、引き戸の破壊に伴うパイプハウス内部の圧力変動が考えられる。このような場合では、既存の風力係数では風荷重を過小に見積もる危険がある。合理的なパイプハウスの強風対策のために、開口部のあるパイプハウスに関する新たな風圧力分布を求めなければならない。

2.2.4 強風による被害のまとめ

開けた平坦地に建設されたパイプハウスの場合、風上側側面が押し倒されることによるパイプハウスの被災が顕著であった。しかし、パイプハウスに開口部が存在する場合は、屋根面が陥没するといった、異なる被災挙動を示した。これは、開口部の存在によって、温室内部の風圧力に大きな変化が生じている可能性を示している。ほとんどのパイプハウスには、妻面に開口部が設置されており、被災時には開口部の扉が破壊され

ている可能性もある。従って、厳密で現実的なパイプハウス設計のためには、開口部を考慮した風圧係数 C_p を求める必要がある。また、パイプハウスは同型のパイプハウスが隣接していることが多い。隣接するパイプハウスは、相互の風圧分布に影響を及ぼすことが推測されるため、このような配置条件におけるパイプハウスの風圧係数 C_p もあわせて明らかにする必要がある。さらに、防風林の端部や建築物にパイプハウスが隣接する場合は、剥離流の再付着や風の縮流による風速の増加によって、被害が拡大する可能性がある。パイプハウス建設サイトの決定に際しては、風が局所的に乱される場所を避けることが重要である。

2.3 結び

屋根面積雪荷重によるパイプハウスの被災形状として、屋根面の M 字型の陥没が顕著であった。細長比の大きなパイプハウス屋根部では、座屈破壊が被災原因である可能性がある。このような屋根部の破壊に対して、屋根部におけるブレースの設置が、有力な補強方法の選択肢となりうることが示唆された。また、積雪荷重条件について、日射や風の影響を受けた、片側載荷についても考慮する必要があることがわかった。経済性も考慮した設計の最適化とあわせて、第 3 章で検討する。

また、風荷重によるパイプハウスの被災としては、平坦地であれば軒部の押し倒し顕著である。また、妻面開口部が風圧力分布に及ぼす影響も認められた。風害は雪害よりも被災メカニズムが複雑であるため、合理的な設計のためには、第一に、パイプハウスにかかる載荷条件を明らかにする必要がある。ところが、パイプハウスのための厳密な風圧係数 C_p は明らかにされていない。一般建築物の C_p をパイプハウスに援用しているのが現状である。そこで、第 4 章で、妻面開口部の影響とあわせて、パイプハウスの風圧係数 C_p の分布を明らかにする。また、パイプハウスは同型のパイプハウスが隣接して建設されることも多いため、パイプハウスが相互の C_p に与える影響について、第 5 章で検討を加える。

第3章 積雪荷重下のパイプハウスの補強および鋼材量を考慮した最適設計

3.1 はじめに

パイプハウスは建設、撤去、メンテナンスが容易である。そのため、パイプハウスは温暖地域にとどまらず、東北地方や北海道等の積雪量が小さくない地域にまで普及している。ところで、第2章で明らかにしたように、東北地方の太平洋側に建設される、耐雪補強構造を有しないパイプハウスは、突発的な大雪によって被災することが多い。これらのパイプハウスについては、極端な大雪時以外は日常的な除雪による積雪荷重の緩和が可能であり、豪雪地帯と同等の構造補強対策をとることは経済的ではない。この地域における最大許容積雪荷重の基準値は 300N/m^2 (30.6kgf/m^2) (日本施設園芸協会、1997) である。除雪をはじめとするメンテナンス作業を前提とした基準値と同程度の荷重を支えることのできる雪害対策を確立することで、健全な営農を支援することが可能になる。

被災調査結果から明らかになったパイプハウスの破壊モードは、屋根部の陥没であった。屋根部の破壊を防ぐ必要最小限の雪害対策方法として、ブレースによる屋根部補強の有効性が示唆された。また、細長比の大きなアーチパイプでは座屈破壊の可能性があり、地盤の緩みによる座屈耐力の減少を考慮すると、座屈解析による設計を検討する必要がある。

そこで、本章では以下を明らかにする。

- (1) 積雪荷重下のパイプハウスに対する簡易な補強方法として屋根部のブレース補強に注目し、その最適設置位置を決定する。
- (2) パイプハウスの最大許容積雪荷重に及ぼすパイプハウスの間口および棟高、およびアーチパイプの断面係数の影響を明らかにする。

- (3) パイプハウス建設に必要な鋼材量およびアーチパイプによる温室内部の日射遮蔽率を最小にするアーチパイプ断面を明らかにする。
- (4) 積雪荷重下のパイプハウス設計に対する座屈解析の適用性を確認する。

3.2 解析方法

3.2.1 骨組構造解析のための解析モデル

パイプハウスの最大許容積雪荷重を求めるために、積雪荷重下のパイプハウスに対して有限要素法 (FEM) 解析を行った。FEM 解析のためのパイプハウスの解析モデルを Fig. 3.1 に示す。パイプハウスの間口および棟高は、それぞれ 6000mm および 3160mm である。この断面寸法は、わが国における最も典型的なパイプハウスの一つである。パイプハウスは、直径 25.4mm、肉厚 1.2mm の 2 本のアーチパイプで構成されている。隣り合うアーチパイプの間隔は、営農現場で一般的な 50cm とした。

載荷条件は、2 種類のパターンを設定した。一つは、屋根面全体 (Fig. 3.1 の E1 ~ E2 のスパン) に等分布荷重が作用している状態である。これは、曇天で無風時にしばしばみられる、パイプハウスの屋根全体に雪が堆積している状態に対応する。もう一つは、図中の E1 ~ R のスパン、つまり、片側の屋根面のみでの載荷条件である。この載荷条件は、北面の屋根に雪が溶けずに残っている状態や、風下側の屋根面のみで積雪している状態に対応する。勾配が 60°以上の屋根面では滑雪が見込まれるため、この部分の積雪荷重はないものとした。

支持条件には、多様な地盤状態に対応するために、地表面下 40cm のアーチパイプ末端において、ヒンジ端および固定端の 2 条件を設定した。

FEM 解析には、Structural Research and Analysis Corporation が開発した PC 用の有限要素解析アプリケーションである COSMOS/M2.0 (1998) を使用した。具体的な解析手法については、次節で説明する。

アーチパイプの機械的特性は、日本建築学会 (2001) に従った。アーチパイプの弾

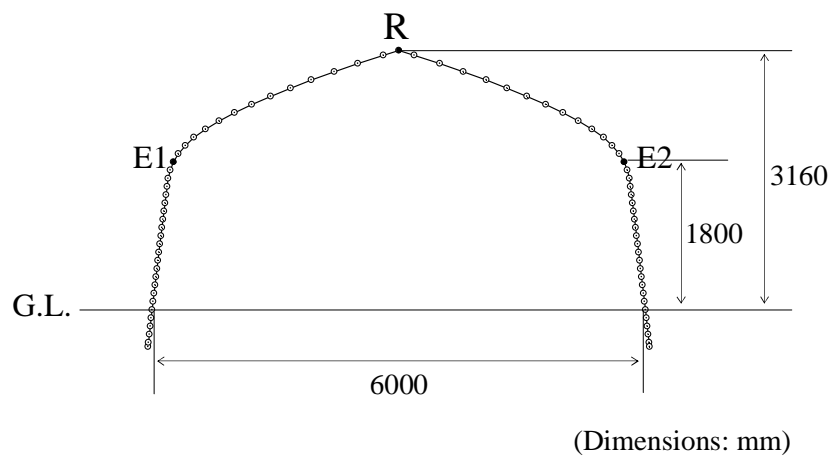
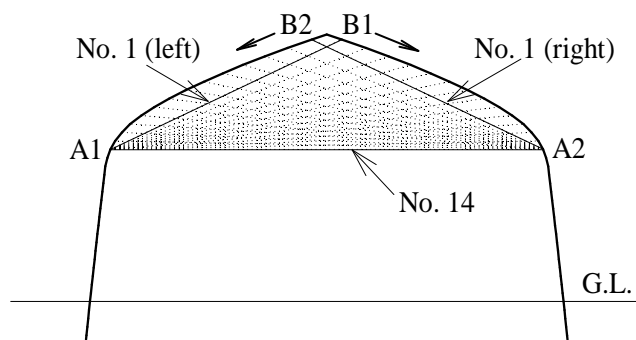


Fig. 3.1 An analytic model of the pipe house, standard section, for the FEM analysis; white center dots represent nodes of the model; uniformly distributed load on the roof of the pipe house over the entire span is represented from black dot E1 to E2; uniformly distributed load only on one side roof is from black dot E1 to R.

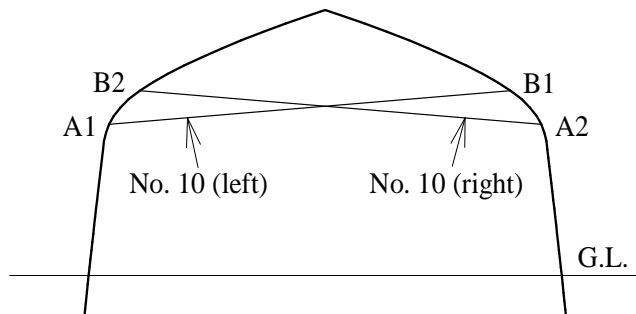
性係数および降伏値は、それぞれ $205 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ (20.9kgf/mm^2)、 235N/mm^2 (24.0kgf/mm^2) とした。

第2章で示したように、パイプハウスは積雪荷重によって屋根が陥没する。従って、ブレースによるパイプハウス屋根部の補強が効果的である。パイプハウスに対するブレースの補強効果を調べるために、2種類のパイプハウス構造を解析し、比較した。1つ目の構造は、補強を施していない、一般のパイプハウスである。2つ目は、同じパイプハウスに対して、2本の鉄線によってブレース補強を施した構造である。ブレース補強は、生産者自身による施工を前提とした。補強に十分な引張強度を有するとともに、ホームセンター等で入手が容易で、かつ人力によって曲げ加工が容易であることを考慮し、鉄線の直径は3.2mmとした。Fig. 3.2 (a)の破線は、No.1～14までの、14組のブレース設置パターンを示す。実際にはFig. 3.2 (b)のブレース No.10の例のように、No.14のブレース1本による場合を除き、2本のブレースを線対称になるように設置する。ただし、後述する、棟高2370mmのパイプハウスに対しては、実際の営農における頭上空間確保の観点から、ブレース補強は検討しなかった。すべてのブレース設置パターンに関して、最大許容積雪荷重を計算した。

パイプハウスの間口および棟高が最大許容積雪荷重に及ぼす影響を調べるために、FEM解析のための7種類のパイプハウスモデルを設定した (Fig. 3.3)。本研究では、Fig. 3.1に示す間口6000mm、棟高3160mmの解析モデルを、パイプハウスの標準断面と設定した。そして、最大許容積雪荷重に及ぼす間口の影響を調べるために、3つの間口、4500、6000および8000mmを設定した。これらの3つの間口は、実際に現場で使用されている寸法である。間口4500mmは6000mmの75%であり、間口6000mmは8000mmの75%である。棟高も同様に、2370、3160および4213mmを設定した。パイプハウス標準断面と相似断面 (間口4500mm、棟高2370mmの断面、および間口8000mm、棟高4213mmの断面) を比較できるように、これら3つの棟高は、3つの間口に比例するように計算して決定した。



(a)



(b)

Fig. 3.2 (a) All pairs of braces from No.1 to No.14; height of upper end of braces, B1 and B2, was lowered from 310 cm to 180 cm at intervals of 10cm as the case No. increases; the height of the other end, A1 and A2, was constant. (b) No.10 as an example.

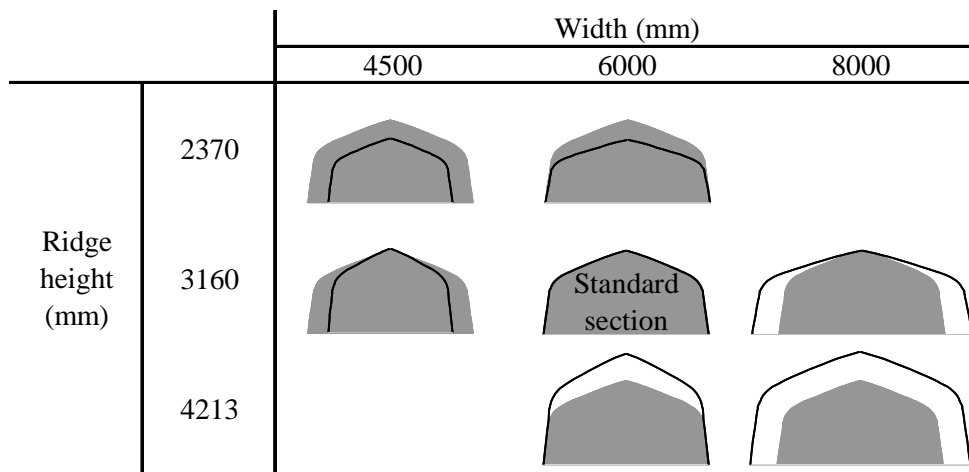


Fig. 3.3 Numerical models for the FEM analysis; Shaded is the standard section.

また、アーチパイプ建設に必要な鋼材量と最大許容積雪荷重の関係を決定できるように、標準断面および相似断面に関して、5つの異なる断面のアーチパイプについて解析した。Table 3.1 は、解析対象とした5つのアーチパイプの一覧である。外径 19.1mm のパイプ以外は JIS G 3445 (機械構造用炭素鋼鋼管) に規定される規格であり、外径 19.1mm、肉厚 1.1mm のパイプは上記 JIS 以外で現場において常用されているものである。

解析結果は、以下の観点で考察する。

- (1) パイプハウス標準断面に関する、ブレース補強の最適位置の解明
- (2) 間口が一定 (6000mm) で、棟高が異なる場合の、パイプハウスの最大許容積雪荷重の比較
- (3) 棟高が一定 (3160mm) で、間口が異なる場合の、パイプハウスの最大許容積雪荷重の比較
- (4) 最大許容積雪荷重が一定 (300N/m²) で、アーチパイプ断面の断面係数が異なる場合の、鋼材量の比較

3.2.2 応力解析および座屈解析

本研究では、前述した有限要素解析アプリケーション COSMOS/M2.0 を使用し、応力解析および座屈解析によって積雪荷重に対するパイプハウスの強度を求めた。応力解析では、積雪荷重を作用させた時にアーチパイプ各部に生じる抵抗モーメントを求めた。続いて以下の式によって、抵抗モーメントによって生じる部材の引張応力を求めた。

$$\sigma = \frac{M_R}{W_p} \quad (3.1)$$

ここで、 σ : 部材に生じる引張応力 (N/cm²)、 M_R : 抵抗モーメント (Ncm)、 W_p : アーチパイプの断面係数 (cm³) である。この引張応力と、アーチパイプの降伏値を比較し、引

Table 3.1 Five sections of arch pipes considered for pipe houses.

Diameter (mm)	Thickness (mm)	Section modulus (cm ³)	Mass per meter (kg/m)
19.1	1.1	0.26	0.488
25.4	1.2	0.53	0.716
31.8	1.6	1.09	1.190
38.1	1.8	1.78	1.610
42.7	2.0	2.49	2.010

張応力が降伏値を超えた段階でパイプハウスの破壊が開始すると判断した。パイプハウスの破壊が開始する時の積雪荷重が、許容積雪荷重ということになる。

一方、座屈耐力については、等分布荷重が作用している円弧の座屈を求めるための Timoshenko の式がよく知られている。以下はそれぞれ、ヒンジ端および固定端の場合の式である (Timoshenko・Gere, 1963)。

$$q_{cr} = \frac{EI}{R^3} \left(\frac{\pi^2}{\alpha^2} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$q_{cr} = \frac{EI}{R^3} (k^2 - 1) \quad (3.3)$$

ここで、 q_{cr} : 座屈荷重 (N/cm)、 E : 弾性係数 (N/cm²)、 I : 部材の断面二次モーメント (cm⁴)、 R : 円弧の曲率半径 (cm)、 α : 1/2 の円弧角度、 k : 円弧角度によって求まる係数、である。上記の式によって円弧座屈に関する厳密解が求められる。しかし検討対象のパイプハウスは単純な円弧形状ではなく、複数の曲率からなる複雑な形状を有している。またパイプハウス構造の屋根面にのみ地面に鉛直方向の積雪荷重が作用しており、上記式とは荷重条件が異なるため、パイプハウスのための正確な座屈耐力を求めることができない。COSMOS/M2.0 は線形・非線形の静構造解析の他に座屈解析のモジュールを有している。本研究におけるパイプハウスの座屈耐力は、このモジュールを使用することで求めた。座屈耐力は、応力解析と同じスパンに載荷した等分布荷重に、解析によって得られた座屈係数を乗じて求めた。

なお、Moriyama ら (2003) は直径 22.2mm、肉厚 1.2mm のアーチパイプで構成される、間口 5400mm、棟高 2850mm のパイプハウスについて、積雪荷重に対する強度を同様の解析手法で求めた。さらに、固定端で組み立てた実物大のパイプハウス骨組に対する同条件下の載荷実験を行った。パイプハウスの耐雪強度に関する解析結果は載荷実験結果と良く一致したことから、本研究における解析結果も保障されていると考えられる。

座屈解析では、固定端とヒンジ端の 2 つの異なる支持条件で、最大許容積雪荷重が大きく異なる。支持条件が固定端の場合は、解析によって求められる最大許容積雪荷重は著しく大きくなり、現地で見られるパイプハウスの破壊は生じなくなる。実際には、地盤はしばしば飽和して緩くなり、支持条件は固定端から外れ、ヒンジ端に近づいている。しかし、純粋な比較のために、固定端も支持条件として設定した。応力解析と座屈解析の結果は、2 つの解析手法の条件が異なっているため、それぞれ独立して考察した。

3.2.3 パイプハウス構造の優劣の判定方法

パイプハウスの設計を考察する上で、本研究では、次に述べる条件を満たす構造が“優れている”と判定した。

- (1) 大きな積雪荷重に耐えられるパイプハウス構造
- (2) 単位面積当たりの鋼材量が小さなパイプハウス構造
- (3) パイプハウス内部への日射透過を遮蔽する割合の小さなパイプハウス構造

日射遮蔽率およびアーチパイプの鋼材量は、パイプハウスの合理的設計に関する根本要因である。日射遮蔽率は、パイプハウス内部の床面積に対する、アーチパイプの垂直投影面積の割合として定義した (Fig. 3.4)。各解析モデルに関するアーチパイプの鋼材量および日射遮蔽率は、同一の最大許容積雪荷重の条件において直接比較した。つまり、積雪荷重に対して、同じ耐雪性能を有する解析モデルについて決定される日射遮蔽率と鋼材量を比較した。わが国の東北部において適用されることを想定して、この地域における最大許容積雪荷重の基準値 300N/m^2 (日本施設園芸協会、1997) によって解析した。パイプハウス構造のうち、アーチパイプの間隔を増減することで、最大許容積雪荷重を 300N/m^2 に調整した。

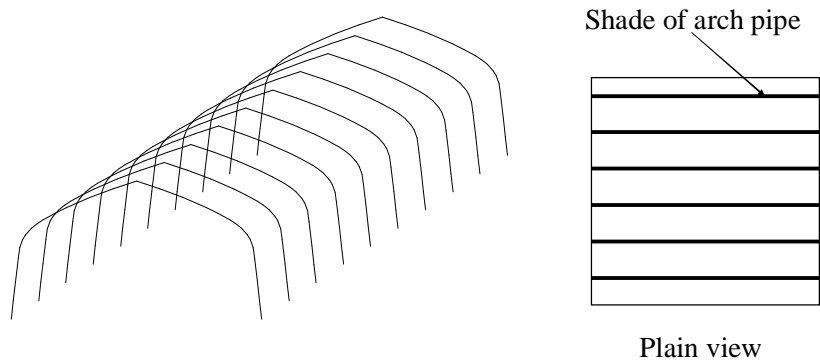


Fig. 3.4 A way to estimate the shading rate of insolation of pipe houses; The shading rate was estimated as a ratio of the perpendicular projected area of the arch pipes to a ground area inside the pipe house.

3.3 結果および考察

3.3.1 最大許容積雪荷重および補強用ブレースの最適位置

Table 3.2 に、補強を施していない標準構造のパイプハウス、およびブレースによって補強したパイプハウスにおける許容積雪荷重を示す。屋根全体もしくは片側の屋根に等分布荷重を載荷させたパイプハウスの許容積雪荷重を、応力解析および座屈解析によって求めた。支持条件を固定端としたパイプハウスの許容積雪荷重は、ヒンジ端に比べて著しく大きかった。実際、地盤は飽和度が高いと軟弱になり支持力が低下するため、安全設計の観点からは支持条件をヒンジ端とすることが重要である。従って、Table 3.2 に示すのはヒンジ端の解析モデルに関する結果である。

各ブレース設置パターンに関して、4 つの積雪荷重の最小値が、そのブレース設置パターンのモデルに関する許容積雪荷重を代表する。イタリック体の数値が、各ブレース設置モデルに関する 4 つの許容積雪荷重の最小値を示す。例えば、標準構造パイプハウスの許容積雪荷重は、応力解析から求めた 156N/m^2 である。このモデルに No.1 の位置にブレースを設置すると、許容積雪荷重は 151N/m^2 となり、No.2 の位置では 255N/m^2 となる。これらの最小許容積雪荷重は、特定の載荷条件および適用した解析方法に対して決定されるわけではなく、ブレース取り付け位置の違いを決定するために使用される。つまり、全 15 ケースにおける各イタリック体の数値の中で最大のものが検討しているパイプハウス断面に関する最大許容積雪荷重であり、その時のブレース設置ケースがパイプハウス設計に関する最適なブレース設置位置として定義されるのである。

この表は、異なる載荷条件および 2 つの解析方法がパイプハウスの設計に必要なことを示している。例えば応力解析の場合、片側の屋根に積雪荷重のある場合のブレース設置ケース No.14 の解析モデルに関する許容積雪荷重は、屋根面全体に積雪のある場合の 51%であった。このことは、片側の積雪荷重によって、応力がアーチパイプの片側に集中していることを示している。安全な設計のためには、積雪荷重が完全に

Table 3.2 The allowed snow loads for every bracing patterns.

Bracing	Allowable snow load by stress analysis (N/m ²)		Allowable snow load by buckling analysis (N/m ²)	
	Load on entire span	Load on one side roof	Load on entire span	Load on one side roof
	none	<i>156</i>	246	247
No.1	<i>151</i>	243	396	753
No.2	<i>255</i>	358	372	733
No.3	<i>236</i>	423	377	749
No.4	<i>268</i>	463	387	769
No.5	<i>309</i>	494	399	792
No.6	<i>351</i>	538	413	819
No.7	<i>392</i>	633	428	501
No.8	<i>434</i>	612	443	490
No.9	477	601	<i>458</i>	481
No.10	521	537	<i>471</i>	474
No.11	569	485	480	<i>469</i>
No.12	621	<i>443</i>	476	467
No.13	677	<i>408</i>	410	469
No.14	745	378	<i>237</i>	473

The allowed snow loads were obtained by the stress analysis and buckling analysis for every bracing patterns in the pipe house that with of 6000mm, the ridge height of 3160mm, and the diameter of arch pipe of 25.4mm; All results were obtained from the hinged end numerical models; Italic figures represent the minimum one of four allowable snow loads for each of the braced models.

屋根面全体にわたって分布しない場合も考慮して許容積雪荷重を見積るべきである。

最終的に、この表では、求められた 15 個の最小許容積雪荷重の中で、 471N/m^2 が最も大きな数値であった。従って、ブレース設置パターン No.10 (Fig. 3.2 (b))が、標準断面のためのブレース設置位置として最も適していることが明らかとなった。

Table 3.3 は、同様にして求めた、すべてのパイプハウス断面に関する最大許容積雪荷重を示す。補強したパイプハウスのすべての最大許容積雪荷重は、座屈解析によって導かれた。これらのパイプハウス設計に関する最適ブレース設置位置は No.10、No.11 および No.12 であった。これらの設置高さは、棟高の 63% から 70% にあたる。この範囲であれば、間口および棟高の様々な組み合わせにもかかわらず、ブレース設置位置はほぼ一定であると考えて良いだろう。つまり、パイプハウスのこれらの位置にブレースを設置することによって、頭上空間を減少させて営農空間に支障を来すことなしに、効果的に構造を補強することが可能になる。また、本研究で検討したブレースは直径 3.2mm の鉄線であるため、パイプに比べると日射遮蔽のおそれはきわめて小さい。この断面の部材であれば、周年にわたる常設に対して、生産者の抵抗感も小さいものと思われる。また、検討対象の鉄線の市販価格は約 7 円/1m である (経済調査会、2007)。これは、パイプハウス骨組に常用される直径 19.1mm、肉厚 1.2mm の直管の価格 156 円/1m の 4.5% に過ぎない。間口 6m、桁行 50m のパイプハウスに対するブレース資材費は約 7,000 円であり、例えば標準断面のパイプハウス (間口 6m、桁行 50m) の設置費 889,000 円 (渡辺パイプ、2006) に対してわずか 0.8% である。従って、ブレース設置による補強効果は、経済的にも充分満足できるものと考えられる。

3.3.2 最大許容積雪荷重に対する間口の影響

Table 3.4 に、棟高が 3160mm で一定の場合の、パイプハウスの最大許容積雪荷重を示す。間口の違いが、最大許容積雪荷重に及ぼす影響を求めるために、3 つの異なる間口の解析モデルについて結果を比較した。これらの解析モデルの間口は、それぞ

Table 3.3 The maximum allowable snow load with suitable braces installed into the structures.

Width (mm)	Ridge height (mm)	Bracing	Analysis method	Loading condition	Maximum allowable snow load (N/m ²)
4500	3160	No. 11	Buckling analysis	Load on entire span	674
6000		No. 10	Buckling analysis	Load on entire span	471
8000		No. 10	Buckling analysis	Load on one side roof	271
6000	2370	None	Stress analysis	Load on entire span	150
	3160	No. 10	Buckling analysis	Load on entire span	471
	4213	No. 12	Buckling analysis	Load on entire span	291

The maximum allowable snow load of numerical models with suitable braces installed into the structures were obtained; arch pipes with an outside diameter of 25.4 mm and a thickness of 1.2 mm; support conditions were all hinged end.

Table 3.4 The allowable snow load when the ridge height was constant at 3160 mm.

Width (mm)	Analysis method	Bracing	Allowable snow		
			load (N/m ²)	Bracing load (N/m ²)	
4500	Stress analysis	None	305	No. 11	1007
6000		None	156	No. 10	521
8000		None	76	No. 10	293
4500	Buckling analysis	None	386	No. 11	674
6000		None	247	No. 10	471
8000		None	150	No. 10	336

The allowable snow load when the ridge height was constant at 3160 mm were obtained; arch pipes with an outside diameter of 25.4 mm and a thickness of 1.2 mm; support conditions were all hinged end; load was on the entire span.

れ、4500、6000 および 8000mm である。棟高 3160mm で間口 6000mm の解析モデルが標準断面である。応力解析によって求めたパイプハウスの最大許容積雪荷重は、間口が狭くなるほど増加した。屋根面全体に積雪荷重のある、補強を施していない標準構造のパイプハウスの解析モデルに関して、最大許容積雪荷重は、間口が減少する順に、76、156 および 305N/m²であった。間口 4500mm のパイプハウスは標準断面の間口の 75% であるが、その最大許容積雪荷重は 196% であった。間口が 6000mm の標準断面の解析モデルに関しては、間口 8000mm の 75% であるが、最大許容積雪荷重は 205% であった。間口 4500mm のパイプハウスを間口 8000mm と比較すると、間口の減少割合が 56% に過ぎないのに対して、最大許容積雪荷重の増加割合は 401% であった。つまり、パイプハウスの耐雪性能は、間口が減少するにつれて大幅に増加し、最大許容積雪荷重の増加割合は、営農面積の減少割合を超える。

ブレースを設置しない条件では、最大許容積雪荷重の基準値 300N/m² を超えるのは、間口 4500mm の解析モデルだけである。実際の圃場では、4500mm よりも大きな間口を有するすべてのパイプハウスが、300N/m² の積雪荷重で被災するわけではない。しかし、地盤が飽和して支持条件がピン支持に近い状態になる場合を考慮すると、推奨できる安全なパイプハウスの間口は 4500mm となる。

Fig. 3.2 に示すように、標準構造のパイプハウスにブレースを設置することによって、パイプハウスの最大許容積雪荷重が増加する。間口ごとにパイプハウスの最大許容積雪荷重の改良率をみると、間口 4500mm で 330%、6000mm は 334%、8000mm では 386% であった。ブレース設置効果は、間口が増加するにつれて増加した。

座屈解析からも、間口が狭くなるにつれて、パイプハウスの最大許容積雪荷重が増加することが示唆された。屋根面全体に等分布荷重が作用している標準構造の解析モデルに関して、最大許容積雪荷重は、間口の減少する順に、150、247、386 (N/m²) であった。間口が 4500mm のパイプハウスの最大許容積雪荷重は、間口 8000mm のパイプハウスの 257% であった。最大許容積雪荷重に対する間口減少の効果は、応力解

析の 401%に比べて、座屈解析による方がはるかに小さかった。ブレース設置効果は、間口 4500mm で 175%、6000mm で 191%、8000mm で 224%であった。応力解析と同様、大きなブレース設置効果が認められた。このことは、ブレースを設置しさえすれば、他の部材を追加することなしに、パイプハウスを効果的に補強できることを示している。さらに間口が大きい場合、ブレース設置効果も大きいことを示している。ただし、間口 8000mm における応力解析結果の 293N/m^2 が最小の許容積雪荷重となっている。これは、基準値の 300N/m^2 とほぼ同じ値であるから、間口寸法は 8000mm が限界寸法であろう。

3.3.3 最大許容積雪荷重に対する棟高の影響

Table 3.5 に、間口が 6000mm で一定の場合の、パイプハウスの最大許容積雪荷重を示す。最大許容積雪荷重に及ぼす棟高の影響を調べるために、棟高の異なる 3 つの解析モデルを比較した。これらの解析モデルの棟高は、それぞれ、2370、3160 および 4213mm である。間口 6000mm で棟高 3160mm の解析モデルが標準断面である。

応力解析によって求められるパイプハウスの最大許容積雪荷重は、棟高の違いによる影響をほとんど受けなかった。屋根面全体に等分布積雪荷重がある、無補強のパイプハウスの解析モデルに関して、最大許容積雪荷重は棟高の減少する順に、163、156、150 (N/m^2) であった。いずれも基準値 300N/m^2 よりも小さい結果となったため、安全な設計のためにはブレースによる補強が必要である。

ブレース補強されたパイプハウスの最大許容積雪荷重は、補強されてない通常のパイプハウスに比べて著しく耐雪性が向上している。改善率は、軒高 3160mm で 334%、4213mm で 374%にも達した。ブレース設置効果は、棟高の増加に伴って増加した。

座屈解析により求めたパイプハウスの最大許容積雪荷重は、棟高の増加にともなって減少した。これは、支持されていない、つまり補強されていない長さが増加するほど、どのようなパイプ断面に対しても細長比が増大するためであると考えられる。これは、応

Table 3.5 The allowable snow load when the width was constant at 6000 mm.

Ridge height (mm)	Analysis method	Bracing	Allowable snow load (N/m ²)	Bracing	Allowable snow load (N/m ²)
2370	Stress analysis	None	150	-	-
3160		None	156	No. 10	521
4213		None	163	No. 12	610
2370	Buckling analysis	None	357	-	-
3160		None	247	No. 10	471
4213		None	163	No. 12	291

The allowable snow load when the width was constant at 6000 mm were obtained; arch pipes with an outside diameter of 25.4 mm and a thickness of 1.2 mm; support conditions were all hinged end; load was on the entire span.

力解析によって求めた結果と異なる。屋根面全体に積雪荷重のある無補強パイプハウスの応力解析結果では、最大許容積雪荷重は棟高の順に 163、247、357N/m²であった。棟高 2370mm のパイプハウスの最大許容積雪荷重は、棟高 4213mm の場合の 219%であった。座屈解析によって求めた、最大許容積雪荷重に対する棟高減少の効果は、応力解析の場合よりも小さかった。ブレースによる補強効果は、棟高 3160mm で 190%、棟高 4213mm で 179%であり、最大許容積雪荷重の著しい増加が得られた。しかし、棟高 4213mm での最大許容積雪荷重は 291N/m²であり、これは基準値 300N/m²とほぼ同じ値である。直径 25.4mm、肉厚 1.2mm のパイプを使用する限りでは、棟高は 4213mm が限界であると考えられる。

地盤における支持条件に対して、適した解析手法を適用することが重要である。土壌は飽和することがあり得るため、アーチパイプ末端がヒンジ端で支持されている骨組みを解析することが重要である。この境界条件下では、座屈解析の結果では棟高の増加にともなって最大許容積雪荷重が減少したため、応力解析のみでパイプハウスの耐雪強度を決定することは危険である。

3.3.4 鋼材量および日射遮蔽率を最小にするアーチパイプ

前節で述べたように、応力解析および座屈解析のどちらにおいても、間口が減少するにつれてパイプハウスの最大許容積雪荷重は増加する。一方で、棟高の変化については、座屈解析の場合のみ、棟高の減少に伴って最大許容積雪荷重が増加した。

しかし、間口が狭く、棟高が低い、内部空間の小さなパイプハウスは作物生育および農作業に適さない。パイプハウスの最適設計のために、それに適したパイプを選択すべきである。そこで、アーチパイプ断面が、パイプハウス構造に必要とされる鋼材量およびパイプハウス内部への日射遮蔽率に及ぼす影響を調べた。Table 3.6 は、異なるアーチパイプで構成される解析モデルの、鋼材量と日射遮蔽率を示す。解析モデルは、標準断面、およびその相似断面である。現在の設計基準に従い、アーチパイプの間隔を増

Table 3.6 The steel mass and shading rate of insolation.

Arch pipe		Width (mm)	Ridge height (mm)	Pipe spacing (cm)	Steel mass (kg/m ²)	Shading rate (%)
Diameter (mm)	Thickness (mm)					
19.1	1.1	8000	4213	6	14.60	31.8
		6000	3160	13	6.74	14.7
		4500	2370	24	3.65	8.0
25.4	1.2	8000	4213	13	9.89	19.5
		6000	3160	26	4.95	9.8
		4500	2370	48	2.68	5.3
31.8	1.6	8000	4213	29	7.37	11.0
		6000	3160	55	3.89	5.8
		4500	2370	101	2.12	3.1
38.1	1.8	8000	4213	49	5.90	7.8
		6000	3160	90	3.21	4.2
		4500	2370	163	1.77	2.3
42.7	2.0	8000	4213	69	5.23	6.2
		6000	3160	127	2.84	3.4
		4500	2370	228	1.58	1.9

The steel mass and shading rate of insolation of standard section and its similar typical unmodified common pipe house obtained by the stress analysis; support conditions were all hinged end; load was on the entire span.

減することで、最大許容積雪荷重を 300N/m^2 に調整した。これらの結果は応力解析によって算出した。

すべてのアーチパイプについて、棟高および間口が小さい、つまりパイプハウス断面が小さい場合に、鋼材量および日射遮蔽率がともに最小となった。例えば、直径 19.1mm のアーチパイプによって建設されたパイプハウスに関して、パイプハウス鋼材量は、間口 4500mm で 3.65kg/m^2 、 6000mm で 6.74kg/m^2 、 8000mm で 14.60kg/m^2 であった。

断面係数の大きなアーチパイプによるパイプハウスの鋼材量および日射遮蔽率は、小さな断面のアーチパイプを使用した場合よりも小さかった。例えば、直径 42.7mm のアーチパイプで建設されたパイプハウス標準断面の鋼材量と日射遮蔽率は、それぞれ、 2.84kg/m^2 および 3.4% であった。一方、直径 19.1mm の場合は、鋼材量は 6.74kg/m^2 、日射遮蔽率は 14.7% であった。これは、日射透過のよい、経済的なパイプハウス設計に関して、大きな断面係数のアーチパイプが最も適していることを示している。これは、大きな断面係数のパイプはパイプ間隔を大きくすることができ、従って、鋼材を十分に効率的に使用することができるからである。

さらに、アーチパイプの断面係数が増加するにつれて、パイプハウス断面の大きさの違い、つまり間口および棟高の違いが鋼材量および日射遮蔽率に及ぼす影響が減少した。直径 42.7mm のアーチパイプにおけるパイプハウスの鋼材量および日射遮蔽率の差は、それぞれ 3.65kg/m^2 および 4.3% であった。一方、直径 19.1mm の場合は、それぞれ 10.95kg/m^2 および 23.8% であった。パイプハウスに必要とされる鋼材量および日射遮蔽率の両方の視点からのパイプハウス設計の自由度は、断面係数の大きなアーチパイプを使用することによって増加することがわかった。パイプ間隔が増加する場合、被覆フィルムの引っ張り強度が充分要求を満たしていると仮定するならば、大断面のアーチパイプの使用が有効である。

座屈解析から求められた結果は、Table 3.6 の応力解析結果とほとんど同じ傾向を

示した。なお、Table 3.6 で、直径 19.1mm、肉厚 1.1mm のアーチパイプの場合、パイプ間隔は 6～24cm であった。圃場で実際に建設されているパイプハウスのパイプ間隔はもっと広く、50cm 以上が一般的である。飽和等によって地盤が悪い条件をも考慮した、無補強のパイプハウス設計のためには、少なくとも直径 31.8mm、肉厚 1.6mm のアーチパイプを使用することが望ましい。

3.4 結び

積雪荷重下のパイプハウスのための最適設計を明らかにするために、応力解析および座屈解析によって、間口および棟高を異にする 7 つの解析モデルに対するブレース補強効果、およびパイプハウスの間口、棟高およびアーチパイプ断面が最大許容積雪荷重に及ぼす影響を調べた。得られた結果は、以下の通りである。

- (1) 無補強のパイプハウスに対して、屋根部に 2 本のブレースを追加することで、すべてのパイプハウス構造に関して、最大許容積雪荷重を増加できる。ブレース設置によるアーチパイプ間隔の増加によって、鋼材量および日射遮蔽を減少させることが可能になる。
- (2) 間口は、パイプハウスの最大許容積雪荷重に影響を及ぼす。間口が狭くなるほど、パイプハウスの最大許容積雪荷重は増加する。この傾向は、応力解析、座屈解析ともに見られる。
- (3) 応力解析で求めたパイプハウスの最大許容積雪荷重は、棟高の違いによってほとんど影響を受けない。しかし、座屈解析では、棟高が高くなると、最大許容積雪荷重は著しく減少する。棟の高いパイプハウスは、同一直径の棟の低いパイプハウスに比べて、座屈が生じやすい。
- (4) 大きな断面係数のアーチパイプを使用したパイプハウスの鋼材量および日射遮蔽率は、小断面のパイプによるパイプハウスよりも小さい。さらに、アーチパイプの断面係数が増加するにつれて、パイプハウス寸法による鋼材量および日射遮蔽率の

違いは減少する。一般的な寸法の、無補強パイプハウスについては、少なくとも直径 31.8mm、肉厚 1.6mm のアーチパイプの使用が望ましい。

第 4 章 パイプハウスの風圧係数および妻面開口部が及ぼす影響

4.1 はじめに

パイプハウスは一般の建築物よりも低い安全率で設計されているため、風荷重に対して脆弱な軽量構造物となってしまう。実際、第 2 章で調査結果を整理したように、台風や季節外れの強風によってしばしば骨組が破壊される。温室の強風被害の基本的な原因は、適切な温室の耐風性能が実現できていないことにある。適切な温室の耐風設計を行うためには、強風によって温室表面に生じる風圧分布を明らかにする必要がある。特に、一般建築物と形状の異なるパイプハウスについて、設計に使用されている風圧係数 C_p の正確な値を求め直さなければならない。

以上のような視点に基づき、パイプハウス外面および内部の風圧係数 C_p 分布、つまり外圧係数 C_{pe} および内圧係数 C_{pi} を、風洞実験によって求めた。風洞実験では、自然界の風を正確に再現した乱流境界層を作成し、その中に典型的なパイプハウス形状を正確に模した風圧測定用模型を設置した。風向および妻面開口部が風圧係数 C_p に及ぼす影響についても検討した。

4.2 実験方法

4.2.1 風洞および風の鉛直分布

農村工学研究所所有のエッフェル型風洞 (Fig. 4.1) で実験を行った。風洞の計測胴は、長さ 20m、幅 4m、高さ 3m である。計測胴が十分に長いため、実際の風に近い乱流強度を粗度要素によって再現することが可能である。風速の範囲は 0 ~ 15m/s である。

開けた平坦地における自然風を再現する乱流境界層は、計測胴の床面に設置した



Fig. 4.1 The eiffel-type wind tunnel.

標準的なスパイヤおよびラフネスブロックによって作成した (Fig. 4.2)。床面からの高さ 1000mm までの平均風速のプロファイルは、3 次元熱線風速計 (model IFA300、TSI Inc.) によって測定した。風のプロファイルを Fig. 4.3 に示す。風のプロファイルは、以下の対数則に近似した。

$$U = 1.08 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.1)$$

ここで、 U : 平均風速 (m/s)、 z : 風洞床面からの高さ (mm) である。 z_0 は粗度長で、0.43mm であった。境界層の縮尺を 1/20 とすると、実物大の粗度長は約 1cm となる。この値は一般的に想定される粗度長に比べて若干小さいが、開かれた平坦地における実測値の範囲内に入っている (例えば Tieleman、2003)。今回の風洞実験における幾何学的縮尺は 1/20 とした。この縮尺では、高さ 158mm (風洞実験模型の頂上部にあたる棟までの高さ) における主風向の乱れの強さは 0.13 であった。

4.2.2 風洞実験用模型

本研究において実験対象としたパイプハウスは、第 3 章の数値解析で取り上げたものと全く同一の断面を有する。すなわち、間口 6m、棟高は 3.16m で、軒の高さは 1.75m である。桁行長さは 50m とした。間口 W に対する桁行長さ L の比 (L/W) は 8.3 であり、桁行に直角の方向に吹く風に関して、パイプハウス模型の中央断面部分の二次元流を実現するのに十分な長さであると考えられる。パイプハウスは両側の妻面に、幅 2.4m、高さ 2.0m の扉を有している。実物にあわせて、模型の扉も取り外しができるように作成した。

風洞模型は 1/20 の幾何学的スケールで作成した (Fig. 4.4)。すなわち、間口 300mm、棟高 158mm、桁行 2500mm である。風洞計測胴断面に対する風洞模型の閉塞率は、3.3% であった。このように小さな閉塞率であれば、風圧に対する閉塞効果は十分に小さいと考えられる (Jensen・Frank、1965; 石崎、1981)。従って、実験結果に対す

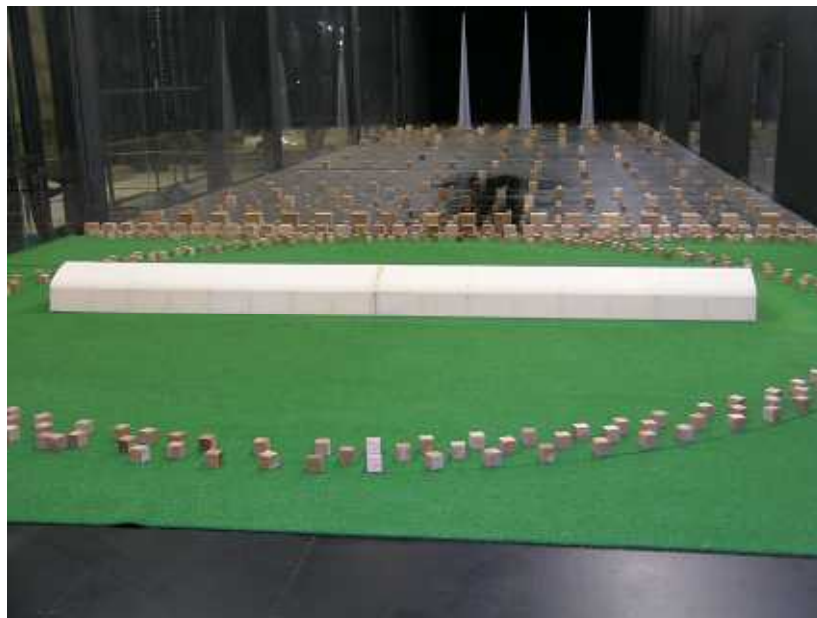
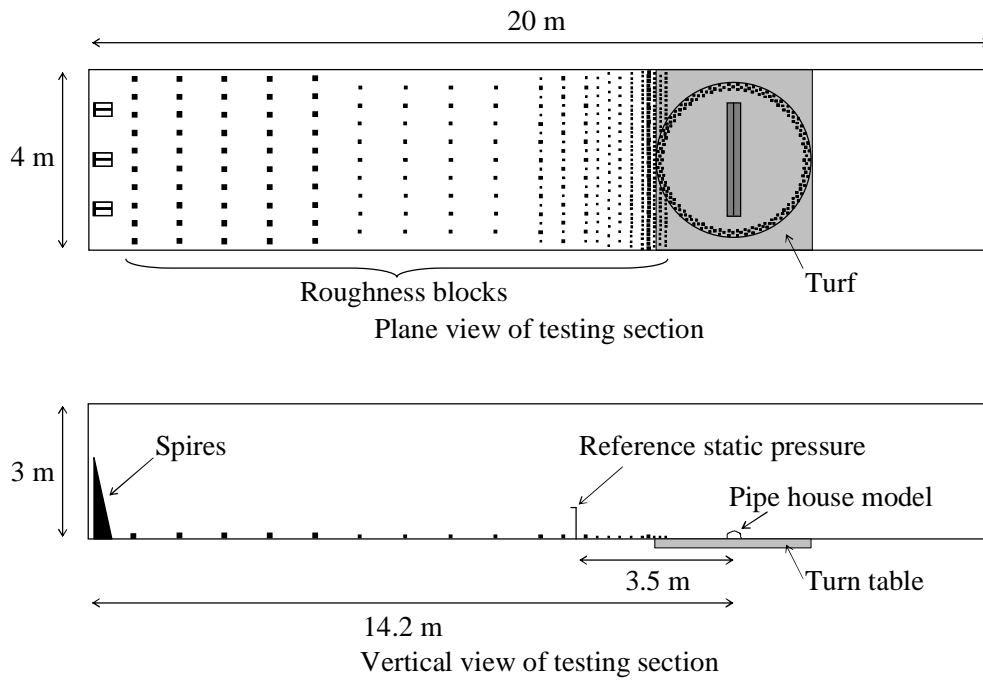


Fig. 4.2 Testing section of the wind tunnel.

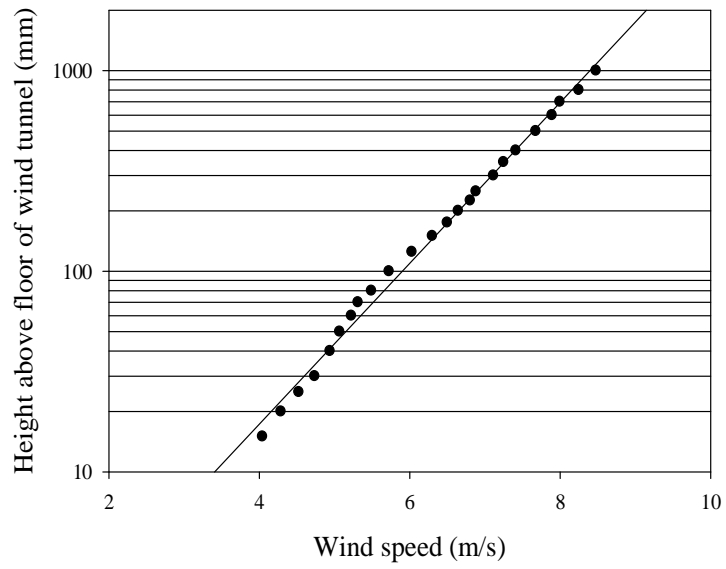


Fig. 4.3 Mean wind velocity profile at the center of the turntable in the wind tunnel.

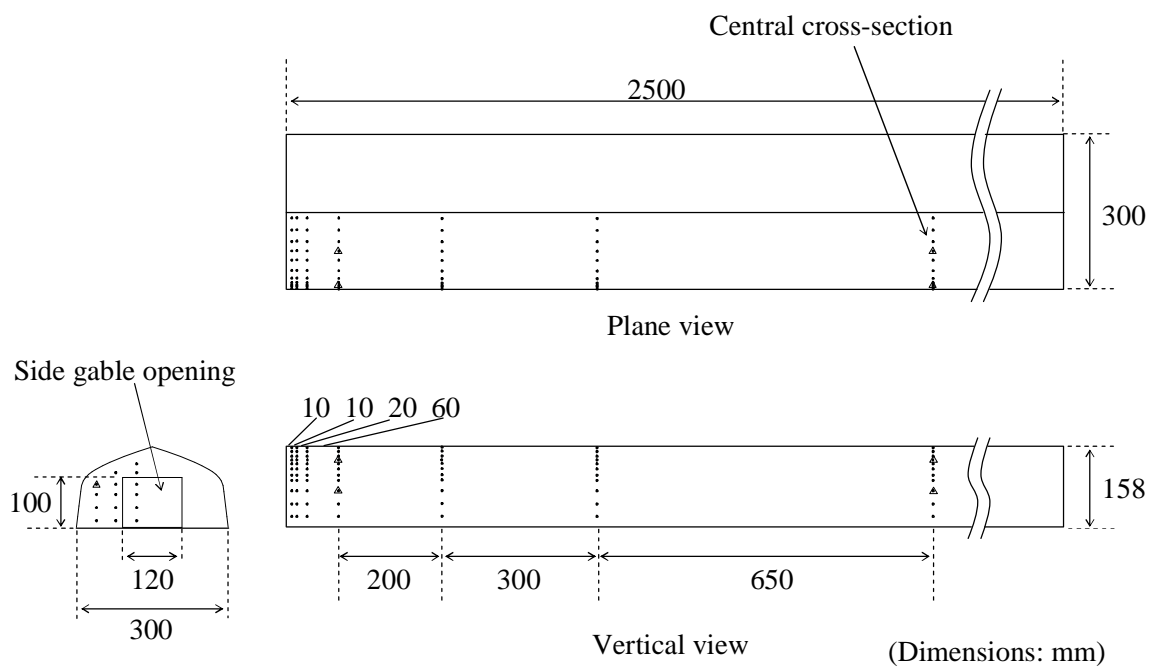


Fig. 4.4 Scale model used in the wind tunnel experiment: black dots represent the location of the pressure taps: triangles represent the location of the inside pressure taps.

る閉塞効果の補正は行っていない。模型の壁は、2枚のABS樹脂板によって内部に空間を設けたサンドイッチ構造である (Fig. 4.5)。2重壁にしたのは、圧力測定用チューブの配管のためである。2重壁内部の空間を含む模型の壁の厚さは、8mm である。直径 0.8mm の 77 個の圧力測定孔を屋根面および側面に、また、15 個の測定孔を妻面に開けた。また、5 個の測定孔を模型内部に設けた。これらの測定孔は、模型の対称性を考慮し、模型の 1/4 の領域に配置した。

4.2.3 模型表面に生じる風圧の測定

すべての圧力測定孔は、内径 1.37mm、長さ 300cm のビニルチューブを介して、圧力測定装置 (F98-6149、共和電業) に接続されている (Fig. 4.6)。ビニルチューブは、2枚のABS樹脂板を組み合わせて作成した2重壁の内部に配管されている。97カ所の風圧測定孔における風圧は、畜舎の風圧係数を求めた日本畜産施設機械協会 (1998) を参考に、サンプリングレート 200Hz、サンプリング間隔 40.96 秒で、同時に計測した。

高さ 500mm (実寸で 10m に相当) における風速を 7.7m/s とした。基準高さである棟高 H (158mm) における風速 U_H は、6.3m/s であった。風洞実験時における風速は、理論上はレイノルズ数 R_e を一致させて、以下の式を満たさなければならない (日本建築センター、1994)。

$$\left(\frac{V_m B_m}{\nu_m} \right) = \left(\frac{V_f B_f}{\nu_f} \right) \quad (4.2)$$

ここで、 V_m : 風洞実験における風速 (m/s)、 V_f : 実際の風速 (m/s)、 B_m : 風洞模型の幅 (m)、 B_f : 実際の建物の幅 (m)、 ν_m および ν_f : 空気の動粘性係数 (m^2/s) である。ところが実験時の動粘性係数は実際のものであり、風洞実験と実際の風速の比は次の式から導かれる。



Fig. 4.5 Model consists of a sandwich structure for tubes connecting between pressure taps and electronic pressure scanning system.

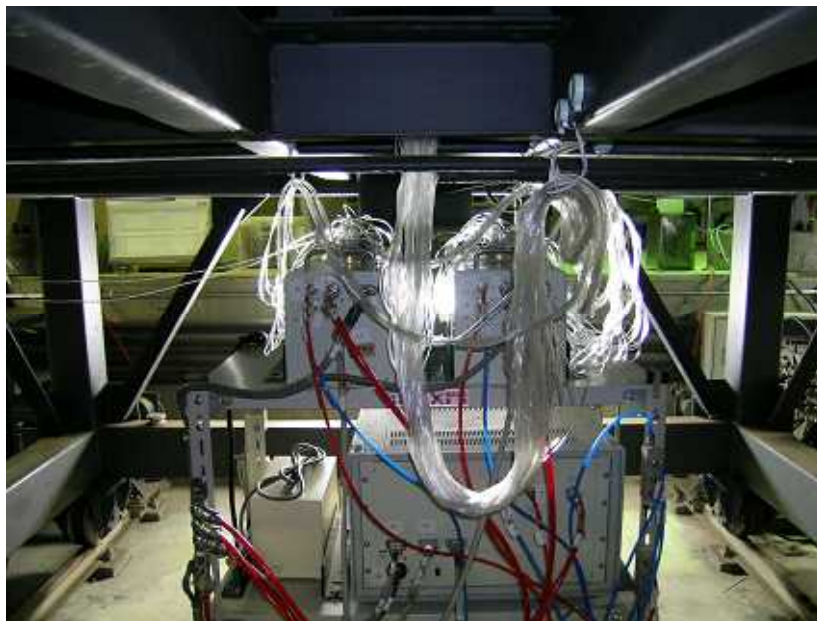


Fig. 4.6 All pressure taps were connected to the electronic pressure scanning system via flexible vinyl tubes.

$$\frac{V_m}{V_f} = \frac{B_f}{B_m} \quad (4.3)$$

模型の縮尺を考慮するときわめて非現実的な風速となってしまうため、風洞実験ではレイノルズ数を一致させることは不可能である。そのため、実際の風洞実験においては、風速は自由に設定できるものとされている（日本建築センター、1994）。従って本研究では、低層建築物の場合に重要な粗度長および乱れの強さについてのみ考慮した。なお、 U_H に対応するレイノルズ数 R_e は 6.6×10^4 であった。パイプハウスの屋根は2つ以上の曲面から構成されている。しかし、棟は 30° のエッジを有しており、桁行に直角の風向の場合、気流はおそらく棟で剥離する。従って、風圧に対するレイノルズ数の影響はきわめて小さいものと考えられる（大熊ら、1996）。

4.2.4 風圧係数の求め方

風向 θ を Fig. 4.7 に示すように定義する。桁行方向に直角の風向を 0° とした。従って、桁行方向の風は 90° である。模型に対する風向は、 0° から 90° まで、 5° 間隔で変化させた。模型に対して、同一の風向に相当する4つの風圧係数 C_p を測定し、1つに統合することで、模型全体の C_p 分布とした。例えば、 $\theta = 30^\circ$ の時の模型全体に関する C_p 分布は、ターンテーブルを 30° 、 150° 、 210° および 330° に回転させて模型の各 $1/4$ の領域に関する C_p を求め、4組の C_p を1つに統合させることで得た。

外圧係数 C_{pe} および内圧係数 C_{pi} に及ぼす妻面開口部の影響を調べるために、Table 4.1 に示す4つのケースについて実験を行った。ケース1は、開口部がすべて閉鎖されているパイプハウスに相当する。このケースは、多くの風圧係数に関する基準で、耐風設計の前提とされている状態である。ケース3では、模型の両妻面開口部が開放されているため、風は模型の内部を吹き抜ける。 $\theta = 90^\circ$ の場合、特に、模型内部の風速が高くなるものと推測される。

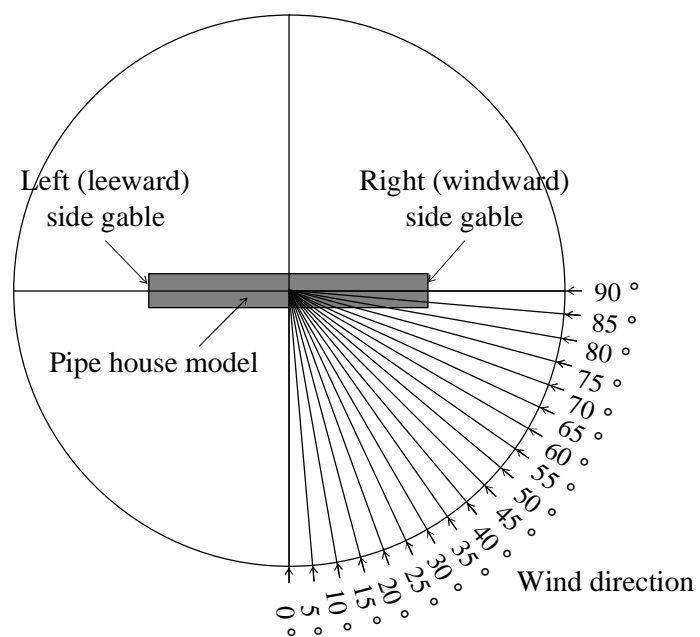


Fig. 4.7 Wind directions tested in the wind tunnel experiment.

Table 4.1 Tested cases for the combinations of the side gable openings.

Case	Left (leeward)	Right (windward)	Measured wind pressure coefficient
1	Closed	Closed	C_{pe}
2	Closed	Open	C_{pe}, C_{pi}
3	Open	Open	C_{pe}, C_{pi}
4	Open	Closed	C_{pe}, C_{pi}

C_p の値は、外圧係数 C_{pe} および内圧係数 C_{pi} とともに、以下の式によって定義される。

$$C_p = \frac{P - P_s}{\rho U_H^2 / 2} \quad (4.4)$$

ここで、 P : 模型に生じる圧力 (Pa)、 P_s : 風洞内の静圧 (Pa)、 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)、 U_H : 棟高における風速 (m/s)、である。静圧 P_s はターンテーブルの中心から風上側 3.5m の位置に設置したピトー管によって測定した。

4.3 結果および考察

4.3.1 桁行方向に直角に風が吹く場合の風圧係数

Fig. 4.8 は、閉鎖模型 (ケース 1) における、 $\theta = 0^\circ$ の場合の、妻面からの距離 $\xi = 40$ 、100、300 および 600mm と中央断面 ($\xi = 1250\text{mm}$) における風圧係数の分布を示す。x 軸は、風上側側面の地盤面から風上側軒、棟および風下側軒を経由して、風下側側面の地盤面に至る模型外周の実寸長である。中央断面の風上側側面の平均高さにおける C_p の値は 0.45 であった。風上側屋根面における C_p は、概ね負圧であった。軒付近の 0 から、棟に向かって負圧に漸減し、棟で -0.6 になった。風下側の屋根面および側面では、値はほぼ一定であり、屋根面で -0.6、側面で -0.54 であった。妻面から 600mm の断面における C_p の分布は、中央断面とほぼ同じであった。しかし、妻面からの距離が短くなるにつれて、 C_p の分布の差が、特に風下側屋根面と側面において増大した。つまり、パイプハウスの中央断面近傍の中央部分 (妻面からの距離 $\xi = 600 \sim 1900\text{mm}$) では、 C_p 分布は妻面からの距離に依存しない。一方、妻面に近い領域では、妻面からの距離が短くなるほど、パイプハウスの C_p 分布が中央断面とは著しく異なるということになる。これは、妻面に起因する気流の三次元効果に関連していると考えられる。妻面のエッジで剥離した気流が、妻面近傍の C_p 分布に影響を及ぼしている可能性が高い。実際に圃場で使用されている、桁行が長いパイプハウスの正確な C_p 分布を得るためには、中央部分が妻面の影響を受けない $L/W > 4$ の風洞模型を使うべきであること

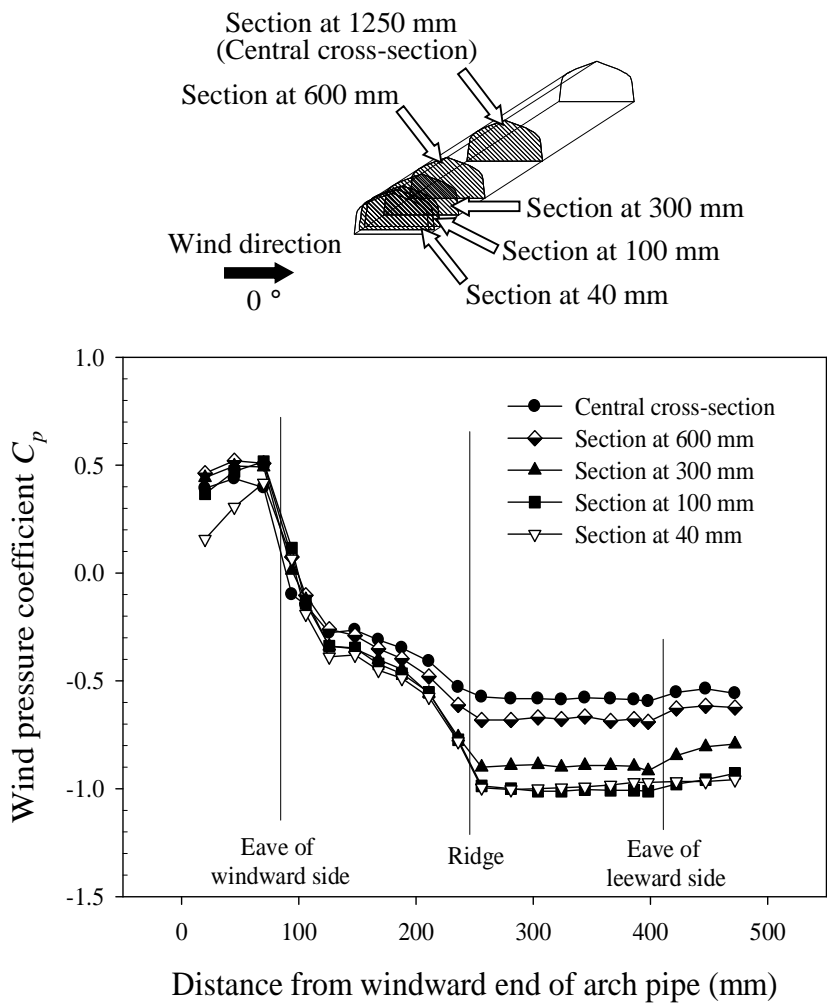


Fig. 4.8 C_p distribution at the center of the enclosed model (Case 1) for a wind normal to the ridgeline ($\theta = 0^\circ$).

が明らかとなった。

4.3.2 風力係数の比較

風力係数 C_f は、温室表面と内部の風圧係数、つまり外圧係数 C_{pe} と内圧係数 C_{pi} の差として求められる。Fig. 4.9 は、本研究における C_{pe} の実験結果から計算した風力係数 C_f と、現在温室の設計に使用されている、園芸用施設安全構造基準（日本施設園芸協会、1997）に記載されている風力係数 C_f を比較したものである。この基準には、パイプハウス断面のための C_f は提供されていない。従って、パイプハウスの C_f と比較したのは、Fig. 4.10 に示す両屋根型温室および円弧形状の屋根を有する温室（以後、円弧屋根型温室と呼ぶ）の、2種類の比較的パイプハウスと断面形状の似た温室の C_f とした。さらに、温室の内圧係数 C_{pi} の値は、-0.2 とされている（佐瀬ら、1995）。パイプハウスに関する C_f の分布は、Fig. 4.8 に示した風圧係数とよく似ているが、 C_{pi} の値である 0.2 だけ、正にシフトしている。パイプハウスの風力係数に関する本実験結果は、比較対象とした2種類の温室に関する従来の基準の C_f とは異なった。特に、円弧屋根型温室とは著しく異なる結果となった。パイプハウスの風上側屋根面および側面における C_f の絶対値は、円弧屋根型温室よりもかなり小さかった。このことから、円弧屋根型温室の風力係数を用いてパイプハウスの設計風荷重を求めると風上側においては風荷重を過大評価し、正確なパイプハウス設計が行えないことになる。一方、パイプハウスの C_f 分布は、多少の違いはあるものの両屋根型温室とは近似したため、円弧屋根型温室よりも両屋根型温室の C_f の方がパイプハウスの設計に適していることがわかった。しかし風上側側面の正圧、および風下側屋根面および側面の負圧は、両屋根型温室よりも小さな値となったため、両屋根型温室の C_f を適用した場合、パイプハウスについてはやや過剰な設計となってしまうことを示している。風上側屋根面のみパイプハウスの負の風圧の方が大きいですが、この負圧は被覆材を風上側に引っ張る作用をするため、むしろ風上側側面の正圧、および風下側側面の負圧を緩和する効果がある。従って、本研

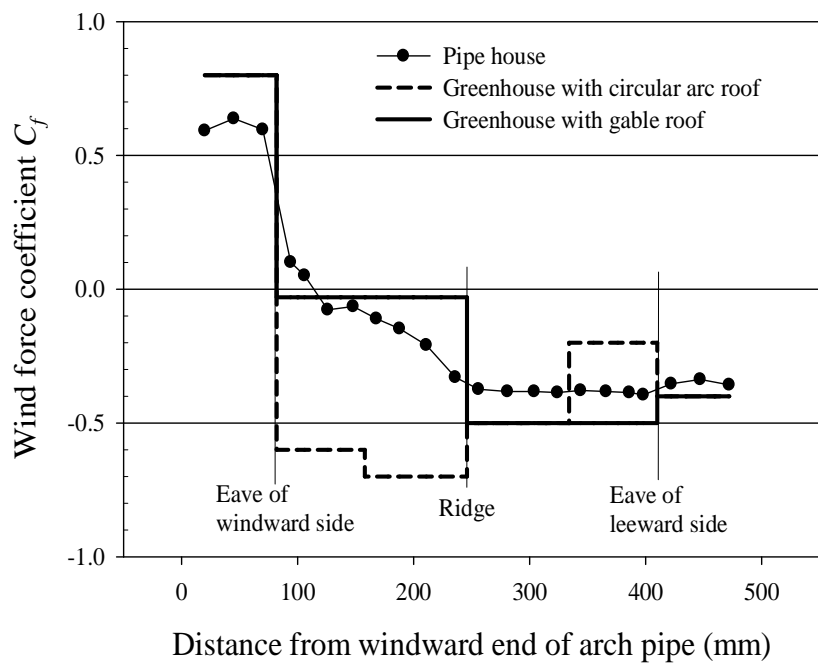


Fig. 4.9 C_f at the center of the enclosed model (Case 1) for a wind normal to the ridgeline ($\theta = 0^\circ$).

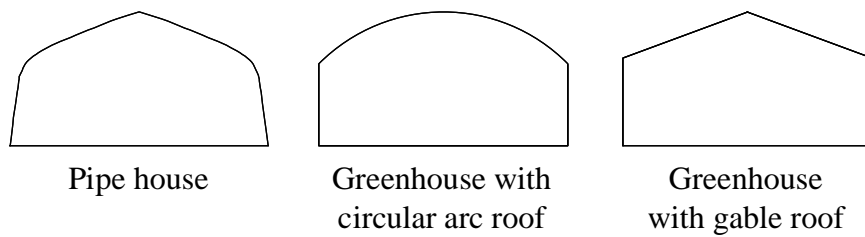


Fig. 4.10 Cross sections of the pipe house tested in the present study and two types of greenhouses with circular arc and gable roofs.

究で求められた C_f 値を使用することで、従来よりも実際に即したパイプハウス設計を行うことが可能になる。

パイプハウスの C_f 分布が両屋根型温室に近似したのは、温室構造周囲の気流のパターンが似ているためであると考えた。つまり、気流は、両屋根型温室、パイプハウスのどちらにおいても、気流は棟の位置で剥離する。しかし、側面の傾斜および屋根の曲面が、風上側表面に沿った気流に影響を与える。風上側側面における C_f 値は、両屋根型温室よりもパイプハウスの方が小さい。これは、Hoxey・Richardson (1984) の実験結果と同じように、側面の傾斜によるものである。風の流れに正対する垂直な壁に対して、気流は壁に衝突し、その結果、壁面には大きな正の C_p 値が生じる。それに対して、壁がわずかに傾斜している場合は、気流は壁が垂直の時よりもスムーズに壁の表面に沿って流れるようになり、その結果 C_p の値は減少する。さらに、パイプハウスの風上側屋根面の C_f 値は、両屋根型温室よりも大きな負の値となった。これは、両屋根型温室の曲率のない屋根面よりも、パイプハウスの曲面屋根面に沿った方が、気流が流れやすい。気流が速く滑らかに流れた結果、大きな負の圧力が風上側屋根面に生じたものと考えられる。

実験値と基準の値が異なった理由として、他の可能性を挙げるとすれば、風洞実験における風のプロファイルが異なったことである。本研究では、風のプロファイルとして、開けた平坦地における自然風に近似した乱流境界層を使用した。それに対して、現行の基準で提供されているのは、乱れの小さな流れ（いくつかのケースでは一様流）での実験値である。

パイプハウスの風力係数が、Fig. 4.9 に示されているような分布であるのであれば、風上側側面は正の風圧力で押される。一方、風下側屋根面と側面は、負の風圧力で風下側に引っ張られる。風上側屋根面の風圧力も負であるが、風下側に比べると、その数値は小さい。従って、風上側屋根面の負の風圧力は、風上側側面に発生する正の風圧力を大きく軽減することはできない。結局、風上側側面は風下方向に押され、過

度の抵抗モーメントによって倒壊する。強風時におけるパイプハウスの風下方向への倒壊は、上記のような大きな抗力によって引き起こされるものと考えられる。パイプハウスの被災調査においても、第 2 章の Fig. 2.12 に示すような、しばしば風上側の軒が強風によって押し倒されるという破壊モードがみられる。風洞実験で求められたパイプハウスに関する C_f の分布は、このようなパイプハウスの実際の破壊形態とよく一致した。

4.3.3 風向による風圧係数の変化

Fig. 4.11 に、閉鎖模型（ケース 1）の、各風向に関する風圧係数 C_p の分布を示す。前述したように、風向は 5° 間隔で測定している。そのため、ここでは、特徴的な風向の結果のみを示す。

風向 $\theta = 0^\circ$ の場合、妻面に近い風下側屋根部に大きな負圧が発生する。この負圧は、妻面における気流の三次元効果によるものである。気流中の立方体の稜線には、条件によっては円錐渦が発生し、大きな負圧が生じる (Kawai・Nishimura, 1996)。今回も、同様の現象が生じたものと考えられる。最も大きな負圧は、棟の風下における、 -1.03 であった (Fig. 4.11 (a))。風向が増加するにつれて、この大きな負の C_p は、さらに増加した。また、負圧領域も棟のラインに沿って拡大した。 $\theta = 25^\circ$ の時に、妻面近傍 ($\xi = 40\text{mm}$) で、最大の負の C_p である -3.46 を記録した (Fig. 4.11 (b))。

Fig. 4.12 に、 $\theta = 25^\circ$ の時の、妻面からの距離 ξ における各断面における C_p の変化を示す。また、比較する目的で、 $\theta = 0^\circ$ の時の中央断面における C_p 分布もあわせて図中に示す。 $\theta = 25^\circ$ の時の中央断面における C_p 分布は、 $\theta = 0^\circ$ の場合とほとんど同一であった。妻面からの距離 ξ が減少しても、風上側側面および屋根面の C_p 値はそれほど変化しなかった。しかし、風下側屋根面および側面においては、 C_p 値は著しく変化し、その分布は中央断面のものとは全く異なった。その傾向は、特に $\xi < 300\text{mm}$ の断面で明確であった。 $\xi > 900\text{mm}$ では、 C_p 分布は ξ が増加してもわずかしか変化せず (Fig. 4.11 (b))、 $\theta = 0^\circ$ の中央断面の分布と近似していた。 C_p 分布に関するこの傾向は、風向が

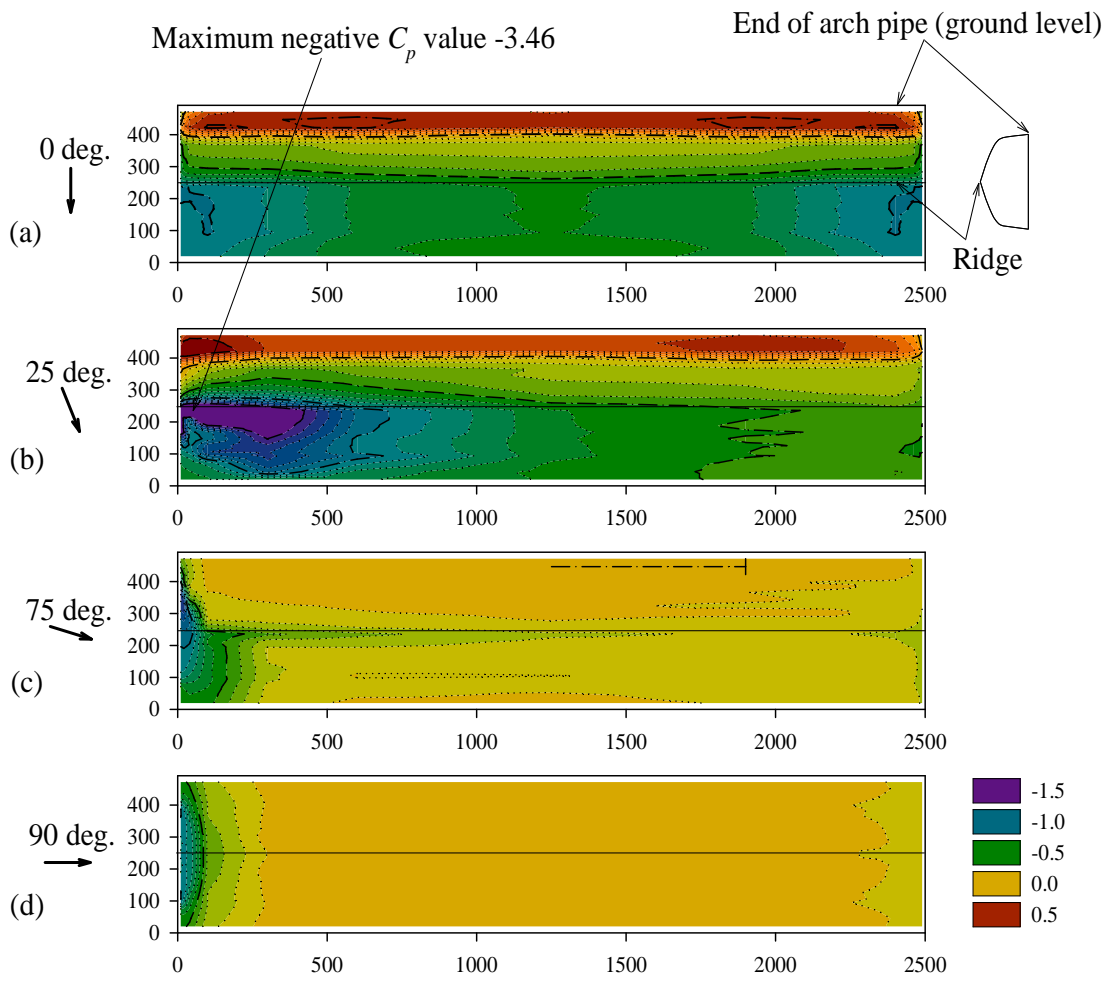


Fig. 4.11 The change of the typical distributions of C_p due to the change of the wind direction.

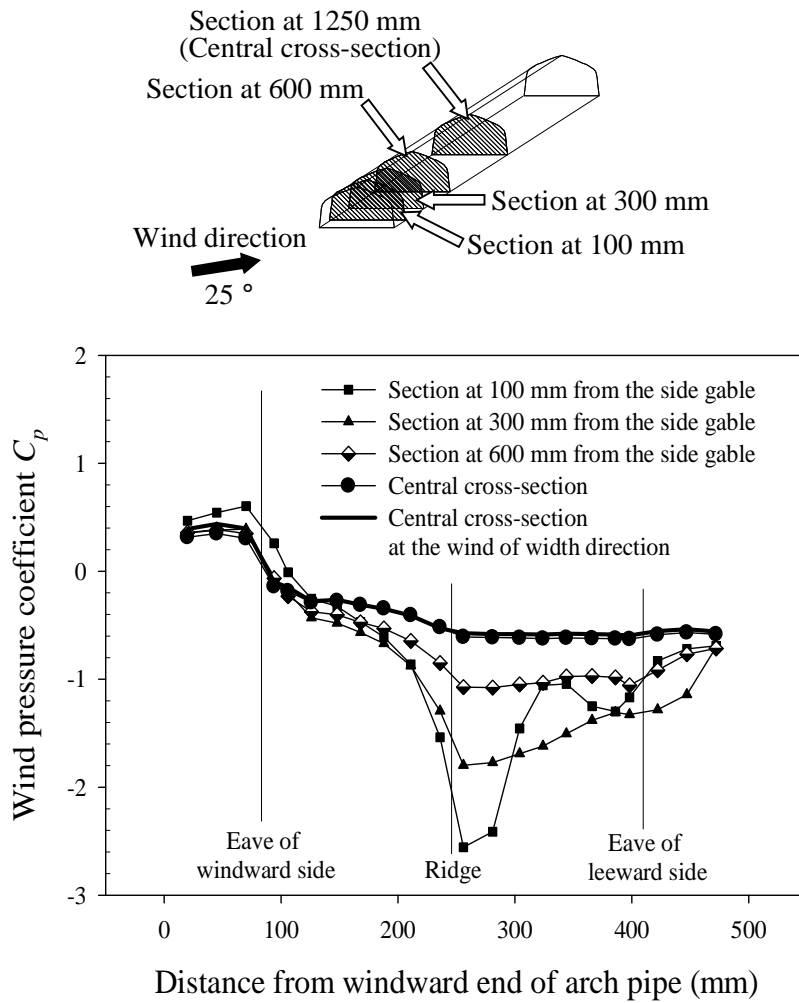


Fig. 4.12 Variation of the C_p distribution with distance from the gable wall when $\theta = 25^\circ$.

35°になるまでみられた。

θ がさらに増加すると、大きな負圧領域は収縮した。例えば、 $\theta = 75^\circ$ の時、大きな負圧は、風上側妻面近傍の領域にしか発生しなかった (Fig. 4.11 (c))。他の領域では、 C_p の値は - 0.2 から 0 と、概ね小さかった。 C_p 分布に関する同様の傾向は、 $\theta = 90^\circ$ 、つまり風向が桁行方向になるまで続いた (Fig. 4.11 (d))。

4.3.4 妻面開口部が風圧係数に及ぼす影響

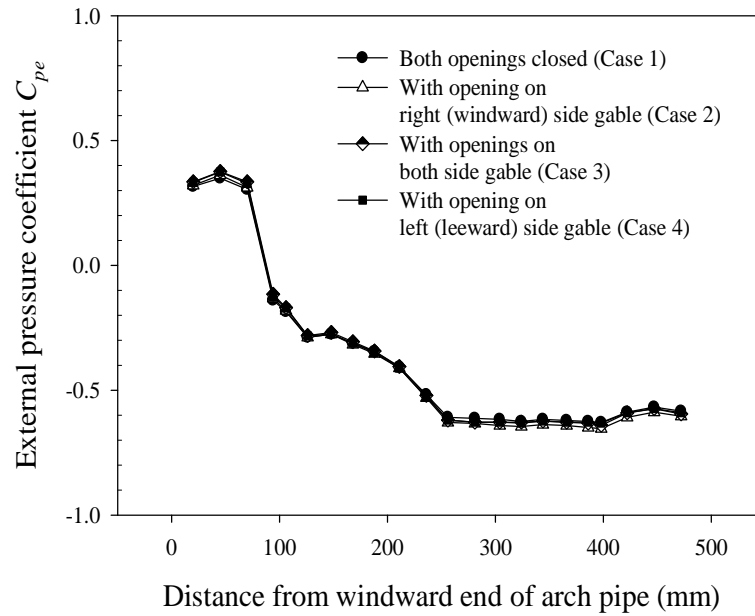
1) 外圧係数に対する影響

Fig. 4.13 に、 $\theta = 25^\circ$ の時の、中央断面および $\xi = 20\text{mm}$ の断面における外圧係数 C_{pe} 分布に及ぼす妻面開口部の影響を示す。4 ケース (Table 4.1 に示すケース 1~4) における C_{pe} 分布の結果を、図中にプロットした。結果は、 C_{pe} 分布が、妻面における開口部の状態に影響を受けないことを示している。風上側および風下側の両妻面に開口部のあるケース 3 では、風はパイプハウス内部を通ることによって、パイプハウス外面に作用する負の圧力を減少させる効果があると考えていた。しかし、実際には、 C_{pe} 分布には大きな変化はなかった。このことは、妻面の開口部の存在は、少なくとも C_{pe} 分布に影響を及ぼさないことを示唆している。

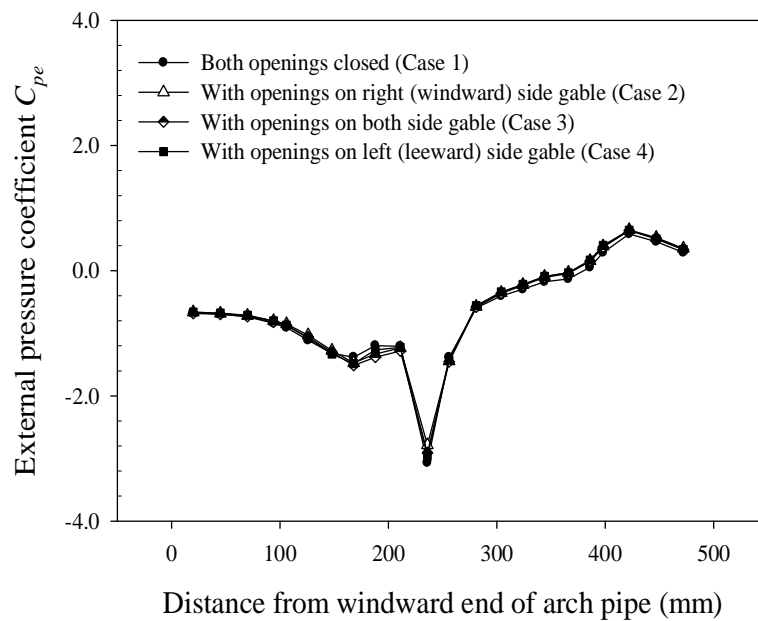
2) 内圧係数に対する影響

内圧は、ケース 2、3 および 4 について、模型内部の 5 点について測定した。内圧測定孔の位置は前掲の Fig. 4.4 に示した。内圧係数 C_{pi} の値は、気流が直接吹き込むような場所を除けば、ほとんど測定位置に影響を受けない。このような C_{pi} の特性は、Mistriotis・Briassoulis (2002) による数値解析結果でも同様である。従って、5 点の測定値の平均を、ここでは内圧として議論する。

Fig. 4.14 は、ケース 2~4 における θ の変化に伴う C_{pi} の変化を示す。 $\theta = 0^\circ$ の場合、すべてのケースで、 C_{pi} は - 0.9 であった。この値は、現行の基準で、開口部のない閉鎖



(a) Central cross-section.



(b) $\xi = 20$ mm.

Fig. 4.13 Influence of side gable openings on the C_{pe} distribution for $\theta = 25^\circ$.
 (a) Central cross-section, (b) $\xi = 20$ mm.

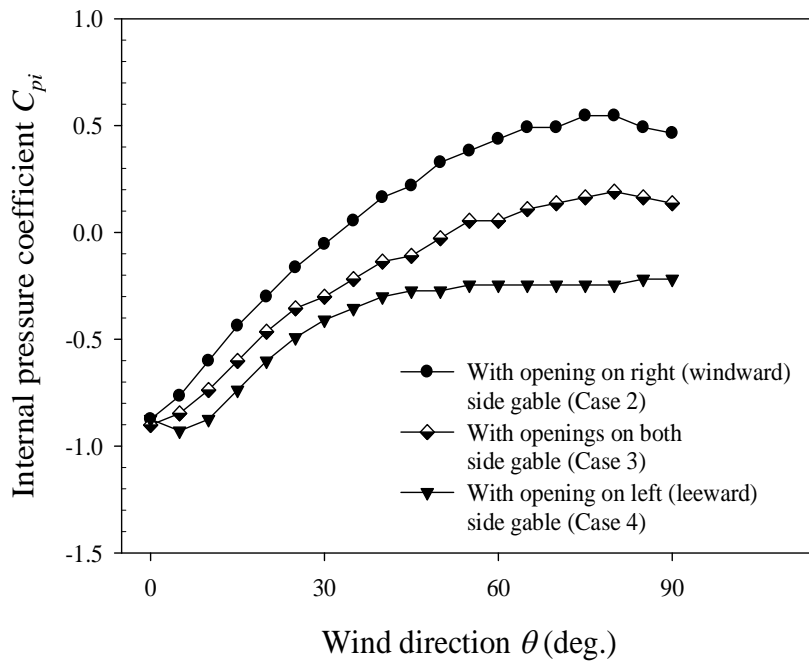


Fig. 4.14 Variation of the mean value of the C_{pi} with wind direction θ .

モデルに対して採用されている数値 - 0.2 に比べて、かなり大きい。この値を採用すると、外圧係数 C_{pe} と内圧係数 C_{pi} の差として求められる風力係数 C_f は風上側側面において、1.35 (=0.45 - (-0.9)) となり、0.65 (=0.45 - (-0.2)) よりも大きくなる (Fig. 4.9)。同様に、風上側屋根面の C_f は 0.8 から 0.3 の範囲になり、風下側屋根面と側面では、それぞれ 0.3 および 0.4 となった。つまり、風上側、風下側のどちらにもかかわらず、模型の全面にわたって、 C_f は正の値となった。特に、風上側側面と屋根面では大きな正の値となった。この C_f 分布は、Fig. 2.12 に示したような、パイプハウスの倒壊を引き起こす力を増大させるとともに、パイプハウスを押しつぶすような風圧力を生じさせる。

Fig. 4.14 の結果は、 C_{pi} が妻面開口部の状態と同様に、風向にも強く影響を受けることを示している。その値は、すべてのケースで、風向の増加とともに次第に増加している。風上側妻面だけに開口部のあるケース 2 では、 $\theta > 0^\circ$ のすべての風向で C_{pi} は最大であった。これは、内圧は主に、開口部の位置における風圧によって影響を受けるためである。つまり、開口部で正圧であるなら内圧も正圧となり、開口部が負圧であるならば、内圧もそれに従うということである。 θ が 65° から 90° の範囲では、 C_{pi} は約 0.5 であった。 $\theta = 90^\circ$ の時は 0.46 であった。Fig. 4.11(d) で示されているように、約 - 0.9 の大きな外圧係数 C_{pe} は、妻面の近傍、特に屋根面で生じた。この大きな負圧に大きな正の内圧が加わることで、パイプハウスの風上側端部近傍における骨組に大きな引き抜き力が生じることが推測される。このことは、基礎の設計に関してきわめて重要である。

風上側および風下側の両妻面に開口部のあるケース 3 では、 θ に対する C_{pi} の推移は、ケース 2 に似ていたが、全体的に小さな値であった。例えば $\theta = 90^\circ$ の場合、ケース 2 では 0.46 であったのに対して、ケース 3 では 0.14 にすぎなかった。これは、ケース 3 では気流が吹き抜けていたが、ケース 2 では模型内部に滞留したからであると考えられる。 C_f の大きさから判断すると、パイプハウスの被災の危険性は、ケース 2 よりケース 3 の方が少ない。強風によって風上側開口部のドアが破壊される場合は、風下側妻面のドアも開放した方がパイプハウス内部の風圧力を減少させ、パイプハウス骨組を維持するの

に有効であると考えられる。

風下側妻面のみ開口部のあるケース4では、いずれの風向においても、 C_{pi} は負の値であった。 θ が 45° から 90° の範囲では、 C_{pi} は約 -0.25 で一定であった。これは、閉鎖モデルであるケース1とほぼ同一の値である。

前述したように、パイプハウスの C_f の分布は、妻面における開口部の状態と同様に、風向によっても強い影響を受けることが明らかとなった。そのような特性は、パイプハウスの耐風性設計もしくは風力係数 C_f の基準値に対して、適切に考慮しなければならない。

4.4 結び

パイプハウスの風圧係数 C_p の分布を、風洞実験によって求めた。風洞実験では乱流境界層内に設置した縮尺 $1/20$ の模型表面および内部に生じた風圧を測定した。実験によって、以下の結果を得た。

- (1) 中央断面では、パイプハウスの風圧係数 C_p は、風上側側面の中央高さで 0.45 であった。風上側屋根面における C_p はおおむね負であった。軒の 0 から、棟の -0.6 まで負に漸増した。風下側屋根面および側面では、 C_p はそれぞれ -0.6 および -0.54 であった。
- (2) 中央断面をはじめとする、パイプハウスの中央部分における C_p 分布は、妻面からの距離に影響を受けない。一方、妻面に近い領域では、妻面からの距離が短い断面ほどパイプハウスの C_p 分布は、特に風下側屋根面および側面において、著しく異なる。この特性は、妻面のエッジに起因する、気流の三次元効果に関連している。そのため、正確なパイプハウス断面の C_p 分布を求めるためには、 L/W が 4 以上の模型を使用すべきである。
- (3) $\theta = 25^\circ$ の時、最大の負の C_p は、妻面近傍における -3.46 であった。一方、中央断面における C_p 分布は、 θ が 0° から 35° の範囲では、妻面による影響（気流の三次

元効果) を受けなかった。

- (4) 外圧係数 C_{pe} 分布は妻面開口部の有無に影響を受けなかった。
- (5) パイプハウスの風力係数 C_f の分布は円弧屋根型温室に関する基準値とは異なった。しかし、両屋根型温室とは比較的近い分布となった。しかし、風上側屋根面における C_f は、パイプハウスの方が負に大きかった。
- (6) 両妻面もしくは片側の妻面に開口部のあるパイプハウスに関して、内圧係数 C_{pi} は $\theta = 0^\circ$ で -0.9 であった。この値は、現行の基準の中で閉鎖された温室に対して適用されている数値 -0.2 よりもかなり大きい。 $C_{pi} = -0.9$ で風力係数 C_f を算出すると、風上側側面の C_f は 1.35 になる。その結果、開口部を有するパイプハウスが側面を押されることで倒壊する可能性は著しく増大する。
- (7) 風上側妻面に開口部のあるパイプハウスに関して、 $\theta = 90^\circ$ の時の C_{pi} は 0.46 であった。大きな外圧係数 $C_{pe} - 0.9$ は、風上側妻面の近傍、特にその屋根面において発生した。正の C_{pi} および負の C_{pe} の組み合わせで求められる大きな負の風圧力は、風上側妻面近傍の骨組に著しい引き抜き力を生じる。このことは、基礎の設計に関して重要な載荷条件である。

第 5 章 隣棟間隔がパイプハウスの風圧係数に及ぼす影響

5.1 はじめに

第 4 章では、単棟のパイプハウスに関する風圧係数 C_p の分布を明らかにした。ところで、パイプハウスは単棟で建設されるだけでなく、パイプハウス団地のように複数のパイプハウスが隣接するように並んで配置されることも一般的である (Fig. 5.1)。これらのパイプハウスに対して、桁行に直角方向に風が吹く場合、風上側および風下側のパイプハウスは、相互の C_p 分布に影響を及ぼしあうことが推測される。例えば、最も風上側のパイプハウスでは、棟における剥離後の空間が単棟の場合と異なるため、風下側に隣接するパイプハウスによって、風下側の屋根面および側面の C_p の値に何らかの影響を受けることが考えられる。また、風上側から数えて 2 棟目のパイプハウスは、風上側に隣接する 1 棟目のパイプハウスによって乱された気流の中に存在するため、特に風上側側面の C_p は単体の場合とは大きく異なることが考えられる。もし、隣接するパイプハウスがある場合にパイプハウスに生じる風圧分布が異なるのであれば、それに対応してパイプハウスの設計および補強方法を変更しなければならない。合理的なパイプハウスの耐風設計のためには、隣接するパイプハウスが存在する場合の C_p を把握する必要がある。そこで、隣棟間隔がパイプハウスの C_p に及ぼす影響を風洞実験によって求めた。

5.2 実験方法

5.2.1 風洞実験用模型および隣棟間隔

研究対象には、第 4 章と全く同じである、間口 6m、棟高 3.16m、桁行 50m のパイプハウスを選択した。すなわち、風圧測定用模型として使用したのは、第 4 章で風圧係数を求めた、間口 300mm、棟高 158mm、桁行 2500mm のパイプハウスの 1/20 縮尺模型 (以後、計測用模型と呼ぶ) である。隣接する複数のパイプハウスが検討対象であるた



Fig. 5.1 Common two or more single-span pipe houses stand in a row in the field.

め、計測用模型以外に、計測用模型に隣接する他の模型が必要である。計測用模型の風圧測定孔と風圧測定装置を接続するチューブがターンテーブル中央の開口部を経由する都合上、計測用模型を風洞内のターンテーブル中心から移動させることができない。しかし、計測用模型の風上、風下に適宜、隣接する模型を配置すれば、パイプハウスが隣接する状態を再現できる。要するに、隣接する模型については、風圧を測定する必要がなく、風圧測定孔等の風圧測定用装備は不要である。従って、計測用模型に隣接するパイプハウスの模型として、計測用模型と全く同一の外形だけを共有する模型（以後、ダミー模型と呼ぶ）を作成した。本研究では2棟、および3棟のパイプハウスが隣接して建設される場合を想定したため、ダミー模型は2棟準備した。実験時は、ダミー模型の妻面が、計測用模型の妻面と同一平面になるように風洞内にセットした (Fig. 5.2)。

隣棟間隔は、風上側モデルの風下側地盤面から、風下側に隣接するモデルの風上側地盤面までの距離を指す (Fig. 5.3)。実際に使用されているパイプハウスの隣棟間隔については、統一的な基準は定められておらず、生産者によって適宜選択されている。その選択の際も、パイプハウス構造の耐風性の観点から決定されるというよりも、栽培作物の必要な日射量の確保であったり、圃場の大きさによって適宜に間隔をとる程度である。そのようにして決定される一般的な隣棟間隔は、1～数 m 程度である。本研究では、隣棟間隔を、基準高さ H (1:20 縮尺模型の棟高 158mm) の 0.25、0.5、0.75、1、1.5、2、4、6 倍に設定した (Fig. 5.4)。実際の距離に換算すると、それぞれ 0.79、1.58、2.37、3.16、4.74、6.32、12.64 および 18.96m に相当する。実際のパイプハウスで適用される可能性の高い隣棟間隔の範囲を短い間隔で測定した。大きな隣棟間隔は、複数の生産者が同一地区にパイプハウスをランダムに建設する場合を想定している。また、大きな隣棟間隔は、風上棟による剥離流の再付着状況を確認することも目的としている。

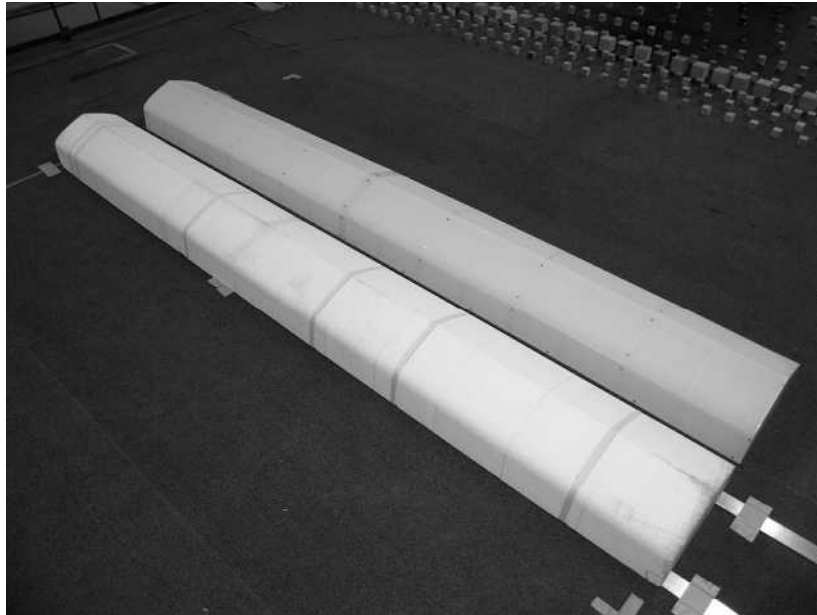


Fig. 5.2 The shape of “Dummy model”, this side, was quite the same as that of the wind tunnel model.

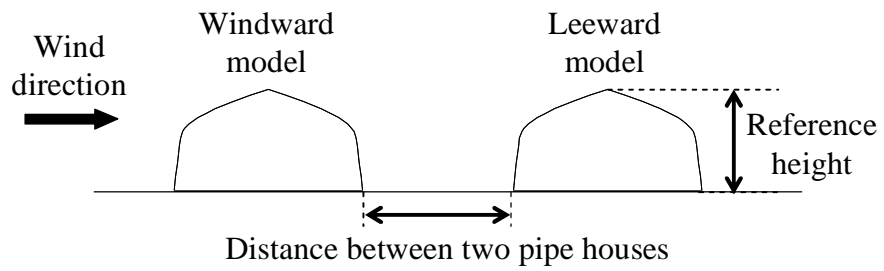
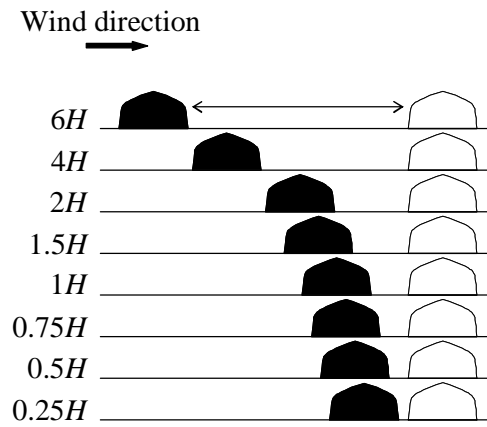
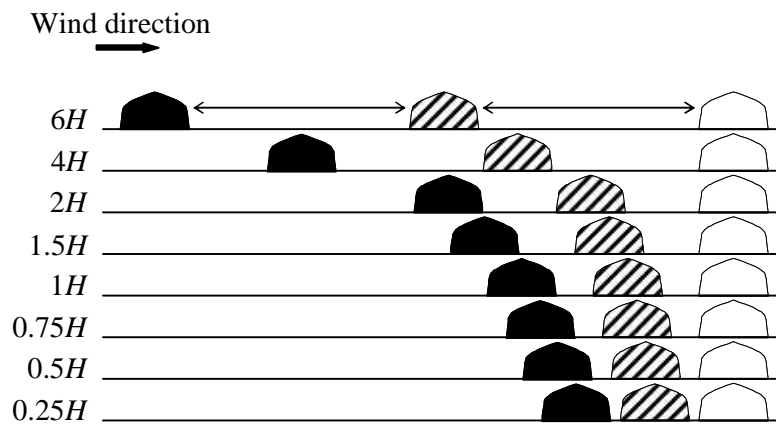


Fig. 5.3 Distance between two pipe houses are represented as the multiple of reference height H .



(a)



(b)

Fig. 5.4 Distance between two pipe houses tested in the wind tunnel; black symbol means windward model; white symbol means leeward model; hatched symbol means middle model: (a) In the case that two models were set in the wind tunnel, (b) In the case that three models were set in the wind tunnel.

5.2.2 風の鉛直分布

単棟の場合と異なり、隣接する複数のパイプハウスの風洞模型を風洞内に設置する場合に必要な風のプロファイルについて考える。もし計測用模型が風下側にあるのであれば、風洞内の風のプロファイルを、後背流内に位置する風下側の計測用模型の位置にあわせて設定することは望ましくない。最初に風が到達する風上側のダミー模型の位置で風のプロファイルを作成するのが、自然風の実現象に即しており合理的である。前述したように、一般の風洞実験では、圧力測定用チューブを床面に設置された特定の出口を介して風洞外の圧力測定装置に接続する必要上、計測用模型の位置を自由に変更することができない。従って、風上側ダミー模型を移動せざるを得ない。第 4 章で述べた風のプロファイルは、ターンテーブル中央に設置された計測用模型のために作成している。そのため、各ダミー模型位置における風のプロファイルの作成が改めが必要になる。そこで、設定した隣棟間隔ごとに、風上側模型の位置に適した風のプロファイルを、第 4 章で使用したラフネスブロックの配置を変更することで作成した。各隣棟間隔の場合の、基準高さにおける風速および乱れの強さ、および実物換算の粗度長を、Table 5.1 に示す。基準高さにおける乱れの強さを、すべての隣棟間隔の場合において、0.12～0.13 に設定することができた。高さの低い建造物の風洞実験の場合に重要である粗度長は 10～26mm であり、開かれた平坦地における実測値の範囲内に入っている (例えば Tieleman、2003)。

5.2.3 模型表面における風圧の測定および可視化

隣接するパイプハウスが風圧係数 C_p に与える影響は、桁行方向に直角の風の場合に最も大きいと考えられる。この風向は、温室設計の基本風向の一つでもある。そこで、桁行方向に直角に風が吹いた場合の風圧を、圧力測定装置 (F98-6149、共和電業) によって測定した。隣接する模型間の風の流れは複雑であることが予想される。そこで、計測用模型の風圧分布を求めるとともに、気流を可視化し、記録することによって、風

Table 5.1 Turbulent intensity and roughness length.

(a) In the case that one dummy model was set on windward side of measured model.

Distance between two pipe houses	Mean wind velocity at reference height (m/s)	Turbulence intensity at reference height	Roughness length (mm)
none	6.1	0.13	10
0.25H	6.0	0.13	13
0.5H	5.8	0.13	15
0.75H	5.9	0.13	15
1H	5.8	0.12	17
1.5H	5.9	0.13	19
2H	5.9	0.12	17
4H	5.9	0.13	24
6H	5.9	0.12	23

(b) In the case that two dummy model were set on windward side of measured model.

Distance between two pipe houses	Mean wind velocity at reference height (m/s)	Turbulence intensity at reference height	Roughness length (mm)
none	6.1	0.13	10
0.25H	5.8	0.12	22
0.5H	5.9	0.12	26
0.75H	5.9	0.13	20
1H	5.9	0.13	22
1.5H	5.9	0.12	18
2H	5.9	0.12	22

圧測定データの分析を補完した。レーザー発生器（Green Laser Sheet 1000m/G、カトウ光研）によって照射したレーザーシートに、シャボン玉発生装置（F230、ツクバリカセイキ）によって微小なシャボン玉を模型の風上から流し、シャボン玉の流れをビデオカメラおよびデジタルカメラで撮影することで気流を可視化した。なお、以後、模型の呼称を、2棟隣接の場合は風上側から順に風上棟および風下棟と定める。3棟隣接の場合は、風上棟、中間棟および風下棟とする。

5.3 結果および考察

5.3.1 2棟の模型が隣接している場合の風圧係数

風上棟における風圧係数の分布を Fig. 5.5 に示す。太実線は風上側、風下側のどちらにもダミー模型が隣接しない場合の計測用模型における C_p の分布を示す。これを、便宜上、標準風圧分布と呼ぶことにする。全体的な風圧分布は、隣棟間隔の違いにかかわらず、標準風圧分布に近似した。風上側側面では隣棟間隔の差がほとんど生じなかった。これは、風上棟の風上側側面が、最初に自然風が衝突する場所であるため、理解しやすい現象である。一方、風上側屋根面、風下側屋根面および風下側側面では、隣棟間隔が小さいほど負圧が大きかった。隣棟間隔が $0.25H \sim 1H$ の場合は、標準風圧分布よりも負側に C_p が分布した。最も大きな負圧を示した $0.25H$ では、風下側屋根面で、 -0.8 となり、標準風圧分布よりも -0.2 大きかった。 $1.5H$ は、ほぼ標準風圧分布と一致した。 $2H$ よりも大きな隣棟間隔では、逆に C_p が小さくなった。

風圧分布が標準風圧分布にほぼ近似したため、強風下のパイプハウスは Fig. 2.12 に示した破壊モードとなるはずである。2棟隣接の風上棟は、パイプハウスを設計する上で、単体で建設されるパイプハウスと同様の風圧分布特性が前提となることが示唆された。しかし、隣棟間隔が小さい場合には負圧が大きくなるため、注意が必要である。また当然、風向が逆になった場合、つまり2棟隣接の風下棟になった場合についても議論する必要がある。

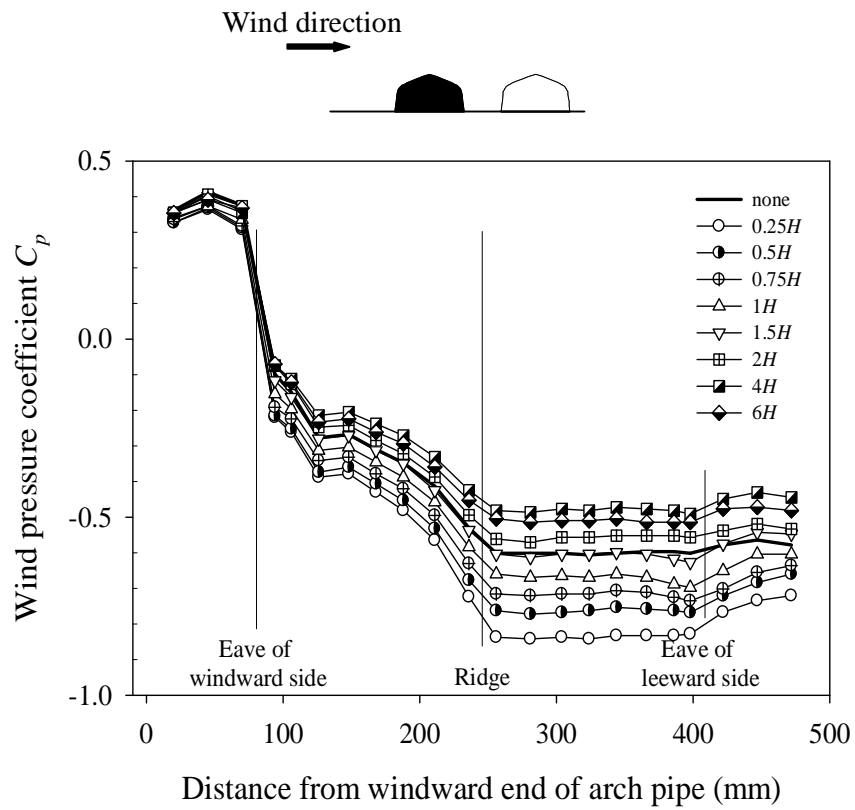


Fig. 5.5 C_p distribution at the center of the windward model in two models case.

風下棟における C_p の分布を Fig. 5.6 に示す。いずれの隣棟間隔においても、標準風圧分布とは異なる分布を示し、全体が負圧となった。特に、棟のすぐ風下できわめて大きな負圧が生じたことが特徴的であった。この大きな負圧は、風下側屋根面上で急速に小さくなり、風下側側面においては、標準風圧分布よりもむしろ小さくなった。隣棟間隔による差は、風上棟との“谷間”に位置する、風上側側面および軒に近い風上側屋根面で顕著であった。風上側側面では、隣棟間隔 $0.25H \sim 1H$ では、 C_p は $-0.6 \sim -0.8$ であった。隣棟間隔が大きくなるにつれて負圧が小さくなり、 $6H$ では -0.1 まで減少した。これは、隣棟間隔が小さい場合は、谷間の上を通過する気流によって大きな負圧が生じるが、隣棟間隔が大きくなるにつれて、渦が大きくなり、標準風圧分布に近づいていくためであると考えられる。

隣棟間隔 $0.25H \sim 1H$ では、風上棟の風下側側面における C_p と、風下棟の風上側側面、つまり正対する両側面における C_p がほぼ同一となった。これは、剥離流下の渦が両者間で均一に形成されていることを示している。ところが隣棟間隔が $1.5H$ になると、風下棟の風上側側面の負の C_p が風上棟よりも小さくなっている。これは、風上棟と風下棟の間に再付着点が生じ始めるためであると推測される。つまり、風下棟の風上側側面に衝突するような気流が生じているため、その領域の C_p が正側に移行していることが考えられる。

5.3.2 3棟のパイプハウスが隣接している場合の風圧係数

Fig. 5.7 に、3棟のパイプハウスが隣接している場合の風上棟の C_p を示す。2棟隣接の場合における風上棟の C_p (Fig. 5.5) と、ほとんど差がない結果となった。これは、風上棟の風圧分布は、直近の棟にのみ影響を受け、それよりも風下にある棟には全く影響を受けないことを示している。パイプハウス団地を建設する際、最も風上側のパイプハウスについては、棟数にかかわらず、単体で建設されるパイプハウスとほぼ同一の設計で構わないことが明らかとなった。ただし、隣棟間隔が $0.25H$ および $6H$ で、 C_p は最大で

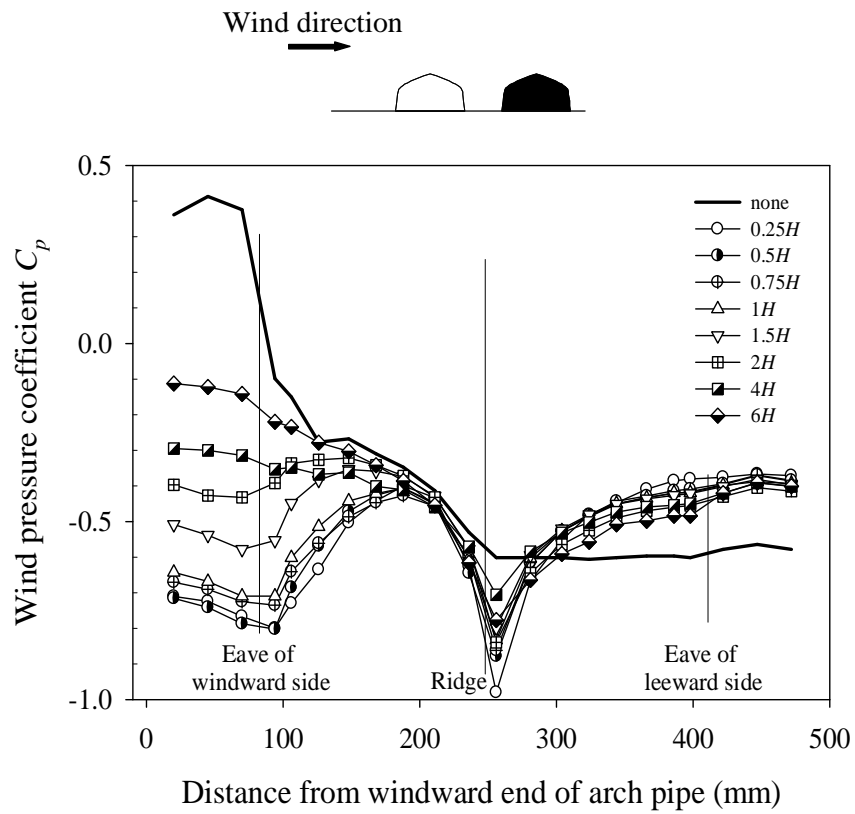


Fig. 5.6 C_p distribution at the center of the leeward model in two models case.

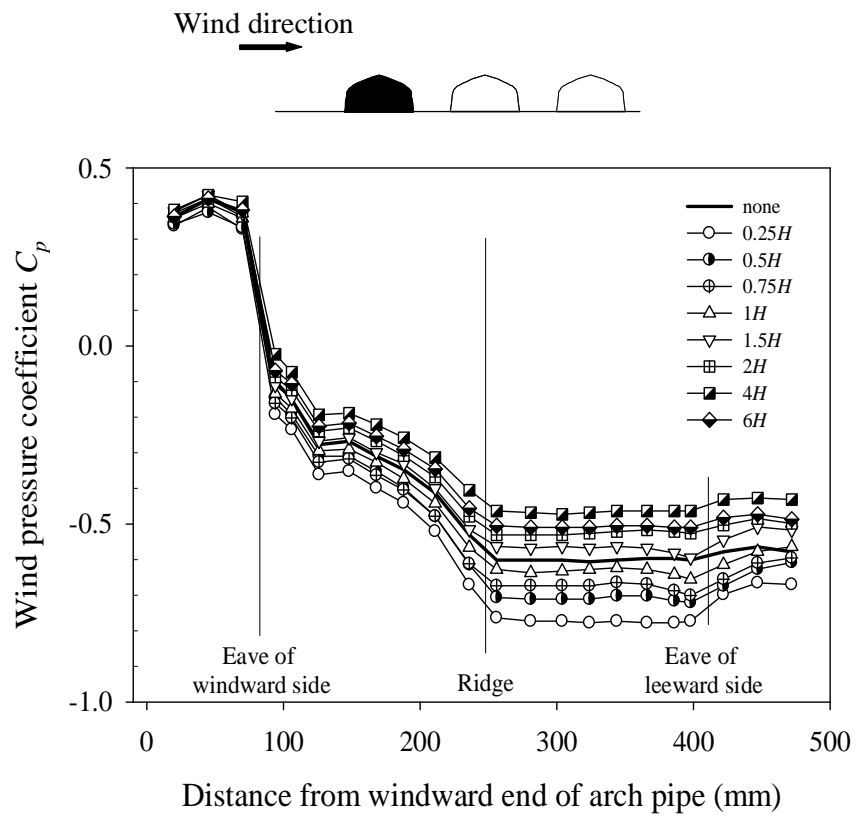


Fig. 5.7 C_p distribution at the center of the windward model in three models case.

0.2 異なることに留意しなければならない。

中間棟の C_p を Fig. 5.8 に示す。風上側側面および軒部近傍は、2 棟隣接の風下棟に関する風圧分布 (Fig. 5.6) に近似した。一方、風上側屋根面の中央から風下側にかけて傾向は似ているものの、やや負圧が小さくなっている。これは明らかに風下棟の影響を受けている。中間棟の風下側に風下棟が存在しなければ、剥離流の下側において大きな渦が生じ、風上側に逆流する流れができる。ところが、風下棟が存在することから、渦の強度が弱くなり、負圧を緩和したものと考えられる。なお、隣棟間隔が $6H$ の場合だけ、やや負圧が大きくなっている。この値は、Fig. 5.6 に示す、2 棟隣接の風下棟の C_p に非常に近い。従って、風下棟の影響は、 $4H$ と $6H$ の間の位置でかなり消滅することが考えられる。

Fig. 5.9 は風下棟の C_p である。中間棟に比べて、風上側ではかなり負圧が小さくなっている。風上側屋根面では、標準風圧分布よりも負圧が小さい。一方、風下側屋根面および側面は、2 棟隣接の風下棟 (Fig. 5.6) と非常によく似た風圧分布となった。つまり、最も風下のパイプハウスに関して、風下側屋根面および側面の風圧分布は、隣接する棟数にかかわらず一定となることがわかった。ただし、本研究では 3 棟隣接までの測定に留めている。4 棟以上の隣接の場合については、妻面の三次元効果も考慮しながら、別途、確認する必要がある。

5.3.3 気流の可視化による風圧係数の考察

Fig. 5.10 に、2 棟隣接の場合の、可視化した気流のスケッチを示す。隣棟間隔が小さい場合、風上棟の棟 (A 点) で剥離した気流は、基本的に風下棟の上空を越えて流れる。しかし、気流には時間的な変動があるため、この剥離流は、風下棟の棟よりも低い位置を流れる瞬間も存在する (図の破線)。このことは、可視化画像 (Fig. 5.11) においても見られる。その場合、風下棟の屋根部に再付着 (B 点) した気流は、風下棟の棟で再剥離 (C 点) した。風下棟の棟の直後で大きな負の C_p となった (Fig. 5.6)

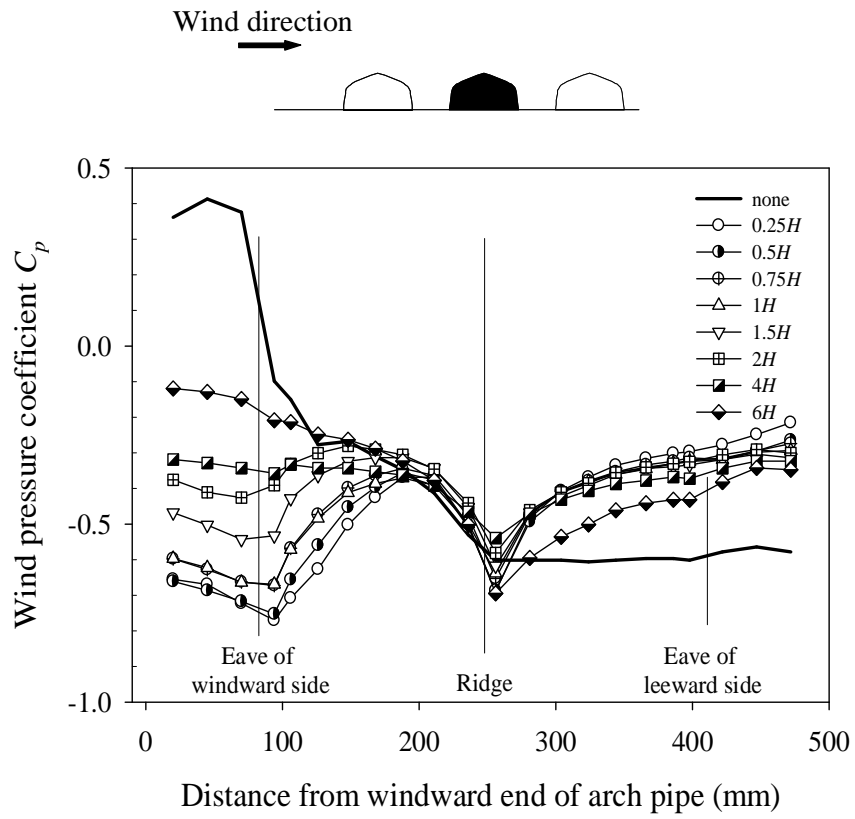


Fig. 5.8 C_p distribution at the center of the middle model in three models case.

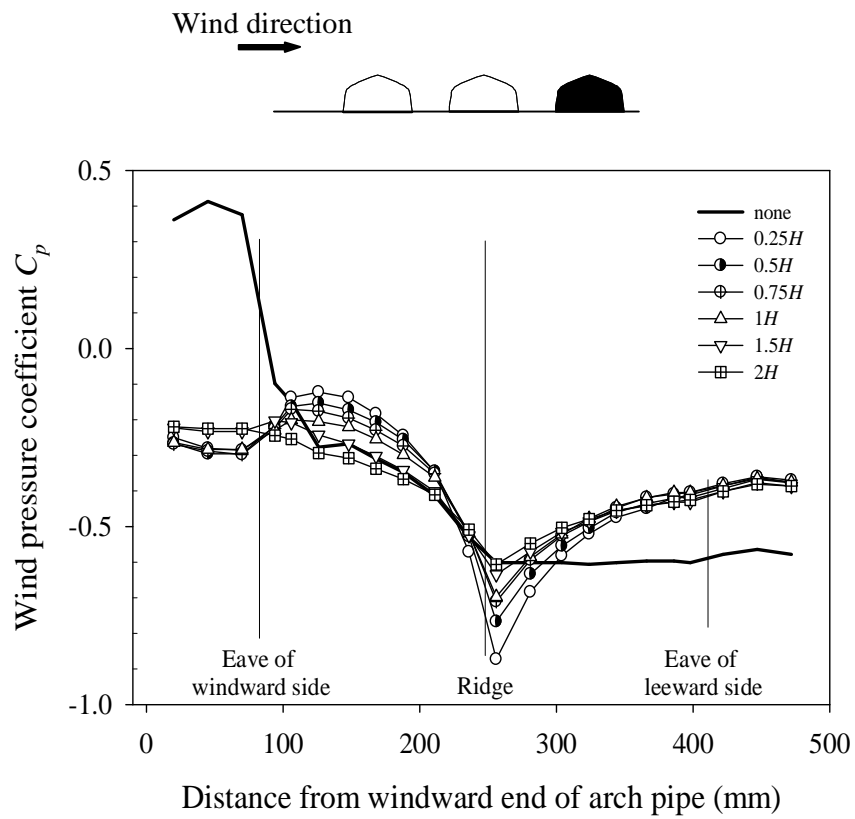


Fig. 5.9 C_p distribution at the center of the leeward model in three models case.

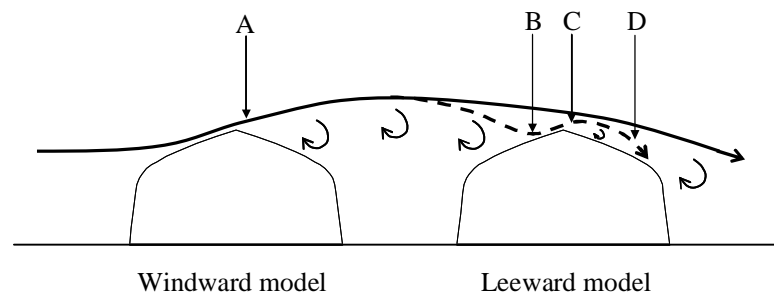


Fig. 5.10 Sketch of air flow pattern of separation and reattachment on the surface of two pipe houses from bubble visualization with video camera; dotted line means temporary air flow pattern; A, B, C and D represent points occurred first separation, first reattachment, second separation, and second reattachment respectively.



Fig. 5.11 Visualization of air flow using laser sheet and micro bubbles.

のは、この再剥離によるものであると考えられる。Fig. 5.6 で示されているように、風下側屋根面では急速に負圧が小さくなり、標準風圧分布よりも小さな負圧となった。これは、C 点で再剥離した気流が、風下側屋根面上のかなり短い距離で 2 度目の再付着を生じたためであると考えた。再付着距離は、風のプロファイルによって異なる。気流の乱れが大きくなるほど、カルマン渦の循環が弱くなり、再付着距離が短くなる（小野・田村、2002; 伊藤ら、2004）。風下棟は、風上棟によって強く乱された気流中に存在する。そのため、再付着距離が著しく短くなり、風下棟の棟における剥離流がすぐに再付着を開始したものと考えられる。

極端に大きな負圧は、パイプハウスを上方に引き抜く力を発生させる。この力によって、ジョイントの抜け等による屋根部の破壊が想定される。同型パイプハウスに囲まれているパイプハウスについて、棟部の変形抑止およびジョイントに関する接合の強化が、風害対策上、効果的であると考えられる。また、アーチパイプの引き抜きにも留意する必要がある。

5.4 結び

複数のパイプハウスが隣接している場合に、隣棟間隔がパイプハウスの風圧係数 C_p に与える影響を、風洞実験によって求めた。風洞実験では乱流境界層内に複数の同型パイプハウス模型を設置し、風上棟、風下棟および中間棟の風圧を測定した。実験によって、以下の結果を得た。

- (1) 最も風上の棟では、隣接棟数にかかわらず、ほとんど同一の C_p 分布を示した。隣棟間隔が $1.5H$ の時に、単棟の場合の C_p 分布とほぼ重なった。 $1.5H$ よりも小さい場合は、負圧が大きくなった。一方、 $1.5H$ よりも大きな場合は、負圧が小さくなった。単棟の C_p 分布と同様の傾向であったため、棟数にかかわらず、単体で建設されるパイプハウスとほぼ同様の設計で構わない。ただし隣棟間隔が小さな場合は負圧が大きくなるので注意が必要である。

- (2) 風上側に隣接模型のある模型、特に 2 棟隣接の場合の風下棟では、棟の直後で、顕著な負圧が発生した。これは、風上側屋根面に再付着した気流の再剥離によるものと考えられる。
- (3) 3 棟隣接の場合の中間棟では、風下側屋根面および風下側側面の負圧について、隣棟間隔が $6H$ の場合に、負圧が大きくなった。隣棟間隔 $4H$ と $6H$ の間の位置で、風下棟の影響が消滅した。
- (4) 最も風下の棟における、風下側屋根面および風下側側面は、隣接棟数にかかわらず、同一の C_p 分布を示した。パイプハウス群の風下側では、同一の補強対策が可能である。

第 6 章 総括

温室は、農作物の高品質化と周年供給を可能にし、安定的な農業所得を確保する上で重要な生産基盤である。そのため、温室には、採光性等の作物生育に適した内部環境の創出と同時に、建設コストの抑制が求められる。一方、わが国は台風上陸国であり、また、北海道、東北および日本海側を中心に降雪地帯も抱えている。温室の中でパイプハウスの設置面積はわが国の園芸施設の 80% を占めている。パイプハウスには、室内に日射を多く取り入れること、建設コストが廉価であること、施工が容易であることが求められるため、骨組部材数が少なく、アーチパイプの断面係数も小さい。そのため、パイプハウスは、強風および大雪によって被害を受けやすい。そのようなパイプハウスの耐候性を向上させることは、わが国の施設園芸にとって大きな貢献となる。そこで、風荷重および積雪荷重に対するパイプハウス設計の高度化を目指して、研究を実施した。

第 1 章において、パイプハウスの耐候性に関する既往の研究を整理した。その結果、パイプハウスの被災メカニズムを明らかにすること、積雪荷重下のパイプハウスに関する低コストの補強方法および合理的な設計方法を明らかにすること、パイプハウスのための風圧係数を求めることを本研究の主要な目的とした。

第 2 章においては、パイプハウスの被災メカニズムを明らかにすることを目的として、積雪荷重および風荷重によって実際に被災したパイプハウスに関する現地調査結果を元に被災原因を特定した。

積雪荷重による被災については、1998 年 1 月の大雪によって被災したパイプハウスについて、構造および被災時の気象条件を分析した。積雪荷重によって被災したパイプハウスは、屋根部の陥没が顕著な特徴である。パイプハウス断面は 1 組のアーチパイプを組み合わせて構成されている。アーチパイプは細長比が大きいため、座屈によって破壊することが推測された。すなわち、屋根部の補強によって、アーチパイプの座屈を

防ぐことが合理的な雪害対策であることがわかった。このことは、作物誘引用ワイヤの支持用ブレースを間口方向に展張していたパイプハウスが被災しにくかった事実からも裏付けられる。積雪荷重下のパイプハウスに対する屋根部補強の効果は、第 3 章で明らかにした。

地盤面におけるアーチパイプが移動した事例もみられた。土の飽和度が高い場合等には、地盤が緩むことがある。パイプハウスの構造解析では、支持条件を固定端とすることが多い。しかし、地盤が緩む可能性を考慮すると、支持条件をヒンジ端とする解析モデルも必要となる。また、座屈解析では、支持条件がヒンジ端となることで、パイプハウスの耐力が著しく減少する。従って、緩い地盤に建設されるパイプハウスを想定する場合には、応力解析だけではなく座屈解析も実施することが望ましい。

強風による被災については、台風 0221 によって被災したパイプハウスの事例について分析した。開けた平坦地に建設されたパイプハウスに桁行に直角方向の風が吹く場合は、風上側側面が押し倒されることによる被災が顕著であった。しかし、妻面に開口部のあるパイプハウスの場合は、屋根面が陥没し、閉鎖されたパイプハウスの場合と異なる被災挙動を示した。これは、開口部の存在によって、パイプハウス内部の風圧力に著しい変化が生じていることを示している。現在建設されているほとんどのパイプハウスに開口部が設置されている。また、開口部を閉鎖する扉は脆弱な構造であることが多く、強風時には、パイプハウスの倒壊に前後して破壊されている可能性もある。従って、現実的なパイプハウス設計のためには、開口部を考慮した風圧係数を求める必要があることを明らかにした。第 4 章で、妻面開口部も考慮したパイプハウスのための厳密な風圧係数を、風洞実験によって求めた。

第 3 章においては、積雪荷重下のパイプハウスに対する補強方法および合理的な設計方法を数値解析によって明らかにした。耐雪補強構造を施していないパイプハウスは、突発的な大雪によって被災することが多い。しかし、恒常的な豪雪地帯でない限り、除雪をはじめとするメンテナンス作業を前提とするのが経済的である。そこで、東北

地方太平洋側における基準値に基づき 300N/m^2 (30.6kgf/m^2) 程度の荷重を支えることのできる雪害対策を確立することを目的として解析を行い、以下の知見を得た。

パイプハウスは屋根部にブレースを設置することで、積雪荷重に対する強度を大幅に増加することができた。ブレース設置によって営農空間を狭めてしまう棟高 2370mm の解析モデルを除くと、すべての解析モデルにおいてブレース設置による効果があった。間口 4500～8000mm、棟高 3160～4213mm の範囲内であれば、ブレースの設置位置は棟高の 63～70%にまとまっている。そのため標準的なパイプハウス形状および寸法であれば、複雑な構造解析を実施することなく、棟高の 70%程度の位置にブレースを設置することで生産者が自家労力でパイプハウスを補強することができる。ブレース資材費については、間口 6m、桁行 50m のパイプハウスでは 7,000 円程度である。これは、温室設置費用の 0.8%程度ときわめて小さな初期投資額である。従来から直径 19.1mm 程度のパイプで屋根を補強する事例が多いが、本研究で検討対象とした鉄線は 1m あたりの価格がパイプの 4.5%程度である。なおかつ、直径が 3.2mm であるため、パイプに比べて日射遮蔽の割合が小さい。自家労力による低コストな手段を前提とするのであれば、ブレース設置は積雪荷重下のパイプハウスの補強方法としてきわめて優れていると考えられる。

パイプハウスの断面形状は、パイプハウスの許容積雪荷重に影響を与える。応力解析の結果、パイプハウスの許容積雪荷重は間口が広くなるにつれて減少することがわかった。ブレース補強のない解析モデルでは基準値 300N/m^2 を満たすことができそうな間口は 4500mm のみである。地盤が飽和する場合を考慮して安全な設計を行うのであれば、間口はかなり狭いパイプハウスに限定されてしまうことになる。ブレースによって屋根部を補強すると、パイプハウスの耐雪強度は著しく増加した。座屈解析からも同様の結果が得られた。しかし、応力解析結果から、ブレース補強した間口 8000mm の解析モデルに関する最大許容積雪荷重は、基準値 300N/m^2 とほぼ同じ数値であった。そのため、現在広く使われている直径 25.4mm、肉厚 1.2mm のアーチパイプでパイプハウスを

建設する場合は、間口は 8000mm が限界であろう。

棟高がパイプハウスの耐雪強度に及ぼす影響は、応力解析と座屈解析で異なった。応力解析の結果では、棟高の影響はほとんどなかった。いずれの棟高においても、パイプハウスの最大許容積雪荷重は基準値 300N/m^2 の半分程度であったため、ブレース補強が不可欠である。ブレース設置によって屋根部が補強され、パイプハウスの最大許容積雪荷重は著しく増加した。一方、座屈解析では、棟高が高くなるにつれて部材の細長比が大きくなり、耐雪強度は低下した。座屈解析においてもブレース補強効果が認められた。しかし、棟高 4213mm の解析モデルの許容積雪荷重は、基準値 300N/m^2 とほぼ同じ数値であるため、地盤が緩んでいる場合を想定すると、パイプハウスの棟高は 4213mm が限度である。

断面係数が大きなアーチパイプを使用することが、必要な鋼材量および日射遮蔽率を減少させるとともに、パイプハウスの設計に自由度を与えることがわかった。パイプハウスに広く使用されているのは、地域により違いはあるが、直径 22.2mm、肉厚 1.2mm および直径 25.4mm、肉厚 1.2mm のパイプが中心であり、場合によっては直径 19.1mm、肉厚 1.1mm の細いパイプも使用事例がある。しかし、飽和等による地盤の緩みを考慮すると、現実的なパイプ間隔 50cm を確保しながら安全なパイプハウスを設計するためには、少なくとも直径 31.8mm、肉厚 1.6mm のアーチパイプの使用が望ましい。アーチパイプの断面係数を大きくするほどパイプハウス設計にとって有利になることがわかったが、人力によるパイプの曲げ加工等が困難になるため、施工面を含めた検討が今後の課題である。

第 4 章においては、パイプハウスの外圧係数 C_{pe} および内圧係数 C_{pi} を風洞実験によって求めた。パイプハウスは一般の建築物よりも低い安全率で設計されている。そのため、第 2 章で示したように、台風や季節外れの強風によって、しばしば骨組が破壊される。強風によるパイプハウス被災の基本的な原因は、強風によってパイプハウス表面に生じる風圧分布が明らかにされていないことによる。そこで、風洞実験によってパイプ

ハウスの風圧係数 C_p を明らかにした。風洞実験では、乱流境界層を作成し、その中にパイプハウス形状を正確に模した風圧測定用模型を設置した。風向および妻面開口部が風圧係数 C_p に及ぼす影響についても検討した。実験の結果、以下の知見を得た。

間口の 8 倍以上である十分に長い桁行を有する風洞模型を使用して、パイプハウスに関する正確な C_p を求めることができた。求めた C_p から算定したパイプハウスの風力係数 C_f は、現行の両屋根型温室および円弧屋根型温室の C_f と異なる分布を示した。特に円弧屋根型温室に対しては、風下側の一部を除き、パイプハウスの C_f は正圧および負圧ともに小さな値を示した。現行の基準ではパイプハウス形状のための C_f が定められていないため、パイプハウスの耐風設計には比較的近似した断面形状の C_f が援用される。しかし風洞実験の結果から、現行の C_f では過大な風圧力を元にパイプハウスの設計を行っていることが明らかになった。両屋根型温室は比較的パイプハウスに近い風圧分布を示したが、風上側屋根面の負圧が小さい等の不一致を見せた。本研究で得られたパイプハウスの風圧分布は、現行の設計基準よりも風上側側面の風圧力が小さくなるため、より正確で経済的なパイプハウスの設計が可能になる。

風向については、間口方向から $25^\circ \sim 35^\circ$ 傾いた斜めに吹く風の場合に、妻面近傍の屋根面に大きな負圧が生じることがわかった。大きな負圧が生じる範囲は、妻面から実物換算で 12m 程度の屋根面である。つまりパイプ間隔が 50cm の場合は、25 番目のアーチパイプ近傍までは、この大きな負圧に対応した設計が必要になる。また桁行方向に風が吹くと、妻面近傍の屋根面に、やはり比較的大きな負圧が生じる。風上側の妻面に開口部がある場合は、パイプハウス内部の正圧が高まり、負の外圧と複合されることで、結果的に妻面近傍の骨組を上方に引っ張り上げる風荷重が作用するようになる。そのため、パイプハウス設計において、妻面近傍の耐風設計が特に重要となる。

間口方向に風が吹く場合は、妻面開口部の存在は、逆にパイプハウス内部に大きな負圧を生じさせる。この負の内圧はパイプハウス外部に生じるどの負圧よりも大きな数

値であるため、パイプハウス表面のすべての箇所で正の風圧力が作用することになる。このことはパイプハウスを押しつぶす結果を導く。この破壊モードを生じさせないためには、妻面の扉が強風時に離脱しないような対策が必要である。

以上のように第4章で明らかにしたのは、単棟のパイプハウスが開かれた平坦地に建設されている場合の風圧係数である。これは、通常的设计基準の前提に準じている。しかし、パイプハウスは単体で建設される場合だけでなく、複数のパイプハウスが隣接して建設されることも一般的である。これらのパイプハウスに対して桁行に直角方向に風が吹く場合、風上側のパイプハウスと風下側のパイプハウスは、相互の風圧分布に影響を及ぼすことが考えられる。従って第5章においては、このようなパイプハウス群を想定し、隣棟間隔がパイプハウス相互の風圧係数 C_p に及ぼす影響について検討した。すなわち、隣棟間隔がパイプハウスの風圧係数に与える影響を風洞実験によって求めた。風洞実験では、乱流境界層に、2棟隣接の場合は風上棟および風下棟、3棟隣接の場合は風上棟、中間棟および風下棟の模型を設置し、各模型表面に生じる風圧を測定した。実験の結果、以下の知見が得られた。

最も風上に位置するパイプハウスでは、単体の単棟パイプハウスの場合と同様の C_p の分布を示した。隣棟間隔の影響を若干受けるものの、風下側に隣接するパイプハウスにのみ影響を受け、さらに風下側のパイプハウスからは影響を受けなかった。このことは、パイプハウス団地のパイプハウスを設計する際、重要な特性であるといえる。すなわち、パイプハウス団地の風上側外縁に位置するパイプハウスについては、単体のパイプハウスと同様の耐風設計で構わないことが結論づけられる。ただし、隣棟間隔が小さな場合、つまりパイプハウスが密集して建設されるような場合には、負圧が大きくなる傾向があるため、注意が必要である。

風上側に他のパイプハウスが存在するパイプハウスでは、すべての箇所で負の C_p となった。隣棟間隔が棟高の 0.25 ~ 6 倍の範囲では、風上側パイプハウスの棟で剥離した気流は、概ね屋根の上方を流れていることがわかった。一般的に、建築物周囲の気

流を考える場合、風上側に棟高の 10 倍程度の開放空間があることが想定されている。風洞実験の結果は、このことに一致する。ただし気流は定常ではないため、瞬間的に剥離流が風上側屋根面に衝突することがある。その場合、気流が再び棟で剥離するため、棟の風下側で極端に大きな負圧が生じる。この負圧は、パイプハウスを上方に引き抜く力を発生させる。この力によって、棟ジョイントの抜け等による屋根部の破壊が推測される。パイプハウス団地において、周囲を別のパイプハウスに遮られているパイプハウスについては、棟部の変形抑止が耐風設計上、効果的であると考えられる。同時に、アーチパイプの引き抜きについても、風上側外縁のパイプハウスとは異なる設計が必要になる。

以上、パイプハウスを降雪地帯に導入する際、生産者が自家労力で設置が可能な耐雪補強構造および鋼材量を考慮した経済的な設計を提案することができた。また、単体もしくは複数のパイプハウスのための風圧係数 C_p を新たに求めることで、従来よりも精密なパイプハウスの耐風設計が可能になった。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。まず、動的な風圧分布の解明も重要である。現行では平均風圧にガスト係数を乗じることで、突風を想定した風圧分布を構造設計に使用している。実際にパイプハウスに動的に作用する風圧力は複雑であるため、風洞実験によってそれを把握することが望ましい。

耐風設計としては、強風に耐えられる設計にすること以外に、風圧力自体を減少させることも検討しなければならない。古くは防風林や防風網、近年ではネット被覆温室が試験的に使用されつつある。さらに、積極的な風圧力の回避方法として二重被覆のパイプハウスが挙げられる。二重被覆温室については、経験的に風荷重軽減効果が知られており、これを数量的に求めることは、温室の耐風性向上について大きな貢献が期待できる。

Study on Improvement of Greenhouse Design for Wind Pressure and Snow Load

Hideki Moriyama

Summary

Plastic film clad greenhouses are widely used in the agricultural and horticultural industries. Such greenhouses are usually designed to a lower level of structural safety than are conventional building structures, because of the need to minimize initial costs, the demand for a higher level of light transmission, the reduced risk of injury and so on.

Pipe-framed greenhouses (pipe houses) are simpler structures than large-scale greenhouses. A pipe house consists mainly of lightweight arch pipes and straight pipes covered with plastic film. Farmers can easily construct pipe houses by themselves. Japan's labor cost is relatively high, so the construction of pipe houses by farmers themselves is helpful to decrease greenhouse construction cost. In fact, pipe houses account for approximately 80 percent of the total area of greenhouses in Japan. Therefore, pipe houses play an important role in agricultural and horticultural industries in Japan. However, it is also a fact that most of the wind and snow damage to greenhouses is to pipe houses. Wind and snow loads are the most important external forces that determine pipe house design.

Chapter 1 introduces the background of this study and reviews former studies

about the performance of pipe house under snow load and strong wind.

Chapter 2 summarizes the results of the field study of pipe houses damaged by heavy snow and strong wind in order to obtain the cause of failure.

Important results were obtained by the field survey of pipe house damaged by heavy snow in 1998. For pipe houses under heavy snow, the roof was pushed down and collapsed like the character “M”. Arch pipes commonly used in the pipe house have a large slenderness ratio, thus these arch pipes have a possibility of failure by buckling. Therefore it is desirable to reinforce the roof of pipe houses by bracing.

Several arch pipes showed displacement horizontally at the ground level. When the support condition is assumed to be fixed, the maximum allowable snow load would be very large. But in practical application the soil is often saturated and softened, and then an end condition is mechanically equivalent to a hinged end. The hinged end condition should also be applied as a support condition for safe design when the pipe house is analyzed.

Investigations of pipe houses damaged by typhoons often show a collapse where the windward eaves were pushed down by strong winds. However, when there were side gable openings on pipe house, the behavior of collapse was quite different, the roof was pushed down and collapsed downward. It showed the internal wind pressure was greatly changed by the side gable openings. Most pipe houses having side gable openings and doors that could be open tend to fail by wind pressure. Consequently, the wind pressure coefficient C_p considering side gable openings should be obtained.

In Chapter 3, in order to investigate the effect of adding braces to the pipe house, two types of pipe house structure were analyzed and compared. One structure

was the unmodified common pipe house. Another was the same pipe house, but reinforced by one or two steel wires as braces. Numerical calculations were introduced to find the optimum design for the pipe house under snow load. To determine the influence of the width and the ridge height of the pipe house and the section modulus of arch pipe on the maximum allowable snow load of the pipe house, seven numerical models were analyzed by both stress analysis and buckling analysis. Results are as follows:

The width and ridge height of the structure influences the maximum allowable snow load of pipe houses. In stress analysis, the maximum allowable snow load of the pipe house decreased as the width increased. For the analytic model without bracing, the maximum allowable snow load of the model of 4500 mm width was roughly 300 N/m^2 , which is the standard snow load in this study. Only pipe houses of narrow width should be allowed to be constructed on ground softened due to saturation. Adding braces to the roof of the pipe house increased the maximum allowable snow load of the pipe house significantly. Similar results were obtained by buckling analysis. However, the maximum allowable snow load of the analytic model of 8000 mm width was almost the same as the standard snow load. Therefore, the maximum width is 8000 mm if arch pipes of 25.4 mm diameter with 1.2 mm thickness are used.

The influence of the ridge height on the maximum allowable snow load was different between stress analysis and buckling analysis. In stress analysis, there was little influence of the ridge height on the maximum allowable snow load. Maximum allowable snow loads for all analytic models of different ridge heights were roughly half of the standard snow load 300 N/m^2 , so the reinforcement by adding braces was needed. In buckling analysis, the maximum allowable snow load decreased, as the

ridge height increased and the slenderness ratio of the arch pipe increased. The maximum allowable snow load in buckling analysis also was increased by adding braces. The maximum allowable snow load for the analytic model of 4213 mm ridge height was almost the same as the standard snow load. Consequently the highest ridge height was 4213 mm for safe design of pipe houses.

The steel mass and the shading rate of pipe houses with larger size pipe on wider spacing were less than those of pipe house with smaller size pipe on closer spacing. Moreover, the difference of steel mass and shading rate by the size of pipe houses was decreased as the section modulus of the arch pipe increased. For the un-braced standard pipe house design, the arch pipe of at least 31.8 mm diameter with 1.6 mm thickness should be used.

Most importantly, the addition of the two simple wire braces significantly increased the maximum allowable snow load for all structural sizes and all shapes. With braces the arch spacing can be increased thereby reducing the mass of steel needed and reducing shading.

An essential cause for wind disasters of pipe houses may be a lack of knowledge of the wind resistance performance and wind loads on such structures. It is necessary to improve the design wind resistance for pipe houses. In particular, the wind pressure coefficients C_p to be used for the design of pipe houses should be estimated adequately. In Chapter 4, wind tunnel tests were done in order to obtain the precise C_p distribution of pipe houses. The C_p distributions on a pipe house have been evaluated with a 1:20 scale model in a turbulent boundary layer. The results can be summarized as follows:

At the central cross-section, the C_p value of the pipe house was 0.45 at the

mid-height of the windward wall. The C_p value on the windward roof was negative, gradually increasing in magnitude from 0 at the windward edge to - 0.6 at the ridge. On the leeward roof and wall, the values of C_p were - 0.6 and - 0.54, respectively.

The wind force coefficient C_f distribution of the pipe house, which is defined as a difference between external pressure coefficient C_{pe} and internal pressure coefficient C_{pi} , was different from that of the specification for a greenhouse with a circular arc roof. However, the distribution was similar to that for the gable-roofed greenhouse, while the C_f value on the windward roof for the pipe house was larger in magnitude than that of the gable-roofed greenhouse.

The C_p distributions of the cross-section in the middle part of the pipe house were independent of the distance from the gable wall. For the part closer to the gable walls, as the distance of the cross-section from the gable wall decreased, the difference in the C_p distribution for the pipe house became more significant; in particular, on the leeward roof and wall. This feature was related to a three-dimensional effect of the flow due to the gable walls. It was found that a wind tunnel model with $L/W > 4$ should be used when $\theta = 0^\circ$.

When $\theta = 25^\circ$, the maximum negative C_p value was - 3.46 at a point near the gable wall. On the other hand, the C_p distribution at the central cross-section was not affected significantly by the gable wall at a range of 0° to 35° in θ .

The C_{pe} distribution was not affected by the existence of openings on the gable wall.

For the pipe house with openings on one or both gable walls, the C_{pi} values were approximately - 0.9 when $\theta = 0^\circ$. This value was much larger in magnitude than the current standard of - 0.2 for enclosed greenhouses. With this value, the resultant C_f was as large as 1.35 on the windward wall, and may cause a collapse of

pipe houses with openings designed for the lower standard.

For the pipe house with openings on windward gable walls, when $\theta = 90^\circ$, the C_{pi} value was 0.46. A large C_{pe} value of approximately - 0.9 occurred in the area close to the windward gable wall, particularly on the roof. High suction combined with C_{pi} and C_{pe} , may cause large uplift forces on the frames near the windward edge. This feature is important for the design of foundations.

The C_p distributions on a pipe house that stands in open and flat ground have been evaluated in Chapter 4. However, it is common that several single-span pipe houses are constructed in a row at one site. In this situation, the C_p distributions of the pipe house might be affected by the adjacent pipe houses. In Chapter 5, the C_p distributions of windward and leeward models in a case of two pipe houses constructed near each other, and the C_p distributions of windward, leeward and middle models between windward and leeward models in a case of three pipe houses constructed were determined using a wind tunnel. The influence of the distance between two pipe houses on the C_p distributions was discussed.

For the windward model, the C_p distributions were roughly independent of the distance between two pipe houses. The C_p distribution of $1.5H$, (the leeward house with the distance between the houses 1.5 times of reference height H), almost agreed with the C_p distribution for a single pipe house in open and flat ground. The C_p in the cases of the distance between two pipe houses of more than $1.5H$ was smaller than that of a single pipe house. On the other hand, the C_p in the cases where the distance between two pipe houses of less than $1.5H$ were large negative values. The windward pipe house could be designed on the same basis as a single pipe house.

For the model next to an adjacent windward model, especially the case of two

pipe houses in a row, the large negative C_p value occurred at the leeward roof near the ridge. Separation of the flow from the leeward side of the first house that reattached on the windward roof induced this large negative C_p .

For the middle model in the case of three pipe houses, the C_p distribution on the leeward roof and wall converge at the same value in all cases, except the C_p in $6H$ that was a large negative value. The influence of the leeward model disappeared between $4H$ and $6H$.

The C_p distributions on the leeward roof and wall of most leeward model were not affected by the distance between two pipe houses. The most leeward side pipe house in a group of pipe houses may be designed and reinforced in same way in the case of two and three pipe houses in a row.

Chapter 6 summarizes the conclusions of Chapters 1 to 5. In this study, the reinforcement of pipe houses by bracing, the influence of the shape of pipe house on the allowable snow load of pipe houses, and suitable arch pipe for pipe house were determined. More over, the wind pressure coefficient C_p for pipe houses, which is the factor needed for the design of pipe houses, was obtained considering the influence of the side gable openings. These results are indispensable to establish the safety and economical design for pipe house.

In this study, only the time-averaged C_p values were discussed. However, the dynamic load effects of wind pressures have been recently considered important. The effects should be researched for the safe design of pipe houses.

Pipe houses covered with two layers with air inflation between are able to alleviate wind pressure themselves. The effect of the alleviation of wind pressure is well known empirically by farmers. It is important that the behavior of that type of

pipe house under wind pressure be tested and discussed.

謝 辞

本研究を博士論文にまとめるにあたり、研究全般にわたって懇切なご指導、ご助言ならびに励ましをいただきました筑波大学大学院生命環境科学研究科 山口智治教授に、深甚なる謝意を表します。また、本論文に貴重なご助言をいただきました同研究科 佐竹隆顕教授、同 杉浦則夫教授、同システム情報工学研究科 水谷孝一教授に、謹んで感謝の意を表します。

研究を遂行するに際し、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所の佐瀬勘紀博士には、広範なご指導をいただきました。また、同 奥島里美博士、石井雅久博士、久米京子氏、同 畜産草地研究所 池口厚男博士、同 中央農業総合研究センター 小綿寿志博士には、貴重なご助言、ご協力をいただきました。ここに、心から謝意を表します。

また、東京農業大学地域環境科学部 豊田裕道教授は、温室構造の研究を始めるきっかけを与えて下さいました。東北大学未来科学技術共同研究センター 植松 康教授には、風洞実験を始めとする、風工学に関する有益なご助言をいただきました。Dr. David R. Mears (Professor II, Rutgers, The State University of New Jersey, USA) には、パイプハウスの構造解析方法および今後の研究展開についてご助言いただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

さらに、現地調査を遂行するにあたり、各県の生産者の方々には、ご自身の被災時にもかかわらず、たいへん親切な対応をいただきました。また、宮城県、福島県、茨城県、千葉県の JA、県、市町村、農業共済組合、および農林水産省の関係者各位におかれましては、被災直後の多忙時にもかかわらず、現地案内および情報提供下さいました。あわせて謝意を表します。

最後に、筑波大学大学院入学前から折に触れて温かい励ましを下さいました元 独

立行政法人農業工学研究所農地整備部長 筒井義富博士ならびに東京農工大学大学院 向後雄二博士に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) COSMOS/M 2.0. (1998): Structural Research & Analysis Corp.
- 2) 古野伸典・佐瀬勘紀・石井雅久・川村啓造・阿部 清 (2003): 積雪地域における連棟ハウスの融雪システムの評価、農業施設、33(4)、pp9-15.
- 3) 羽倉弘人 (1976): 園芸用栽培施設の構造設計の考え方、農業施設、6(1)、pp33-39.
- 4) 羽倉弘人 (1980): 56 豪雪被害の調査から、施設と園芸、31、pp19-23.
- 5) 羽倉弘人 (1995): 園芸用施設の耐震性 - 阪神・淡路大震災の被害から -、施設と園芸、88、pp36-40.
- 6) 羽倉弘人・藤野宏道 (1992): ビニルハウスに作用する風荷重に関する研究 - 風洞実験による基礎的な風圧特性 -、農業施設、23(1)、pp15-24.
- 7) 濱寄孝弘・岡田益己・小沢 聖 (1995): 1994 年 1 月 29 日に岩手県北部沿岸で発生したパイプハウスの雪害 - 構造上の問題点と対策 -、農業気象、51(1)、pp53-56.
- 8) 北陸農業試験場 (1981): 昭和 56 年豪雪 北陸地域雪害緊急調査報告、北陸農業研究資料、9、p102.
- 9) Holmes, J. D. (2007): Wind Loading of Structures, second edition, Taylor & Francis, p313.
- 10) Hoxey, R. P. and Richardson, G. M. (1984): Measurements of wind loads on full-scale film plastic clad greenhouses, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 16, pp57-83.
- 11) 黄 裕益・相原良安・瀬能誠之・奈良 誠・佐瀬勘紀 (1993): 台湾における温室の自然換気に関する研究 (II) - パイプハウスの換気用風圧係数について -、農

- 業施設、23(3)、pp161-167.
- 12) Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): IPCC WGI Fourth Assessment Report - Summary for Policymakers-, p21.
 - 13) 石崎澁雄 (1981):耐風工学、朝倉書店、p151.
 - 14) 板木利隆 (1983):施設園芸 装置と栽培技術、誠文堂新光社、p572.
 - 15) 伊藤真二・奥田泰雄・大橋征幹・喜々津仁密・谷池義人 (2004):立方体屋根面の風圧特性に与える剥離せん断層の影響、第 18 回風工学シンポジウム論文集、pp257-262.
 - 16) 岩切 敏 (1982):「56 大雪」による北陸地方の農業雪害とその特徴、農業気象、38(1)、pp59-64.
 - 17) Jensen, M., and Frank, N. (1965): Model-scale tests in turbulent wind. Part II, Danish Technical Press.
 - 18) Kawai, H. and Nishimura, G. (1996): Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 60, pp211-225.
 - 19) 金谷 豊・倉田 勇 (1985):「59 豪雪」による施設ハウスの被害事例、「59 豪雪」雪害緊急調査報告書、北陸農業研究資料、12、pp174-179.
 - 20) 経済調査会 (2007):積算資料、2007 年 12 月号、pp40-41.
 - 21) 菊地勝弘・大畑哲夫・東浦將夫 (1995):降雪現象と積雪現象、古今書院、pp157-158.
 - 22) 木下誠一 (1993):雪と氷のはなし、技報堂出版、pp209-210.
 - 23) 気象庁 (1998a):地上気象観測原簿.
 - 24) 気象庁 (1998b):アメダス定時報 (雪) 帳簿.
 - 25) 国立天文台 (2004):理科年表、丸善、CD-ROM.
 - 26) Lee, S. G., and Lee, H. W. (1996): An analysis of wind force coefficients for

- structural design of greenhouses, *Acta Hort.*, 440, pp280-285.
- 27) 真木太一 (1987): 風害と防風施設、文永堂出版、p110.
 - 28) Mathews, E. H. and Meyer, J. P. (1987): Numerical modeling of wind loading on a film clad greenhouse, *Bldg. Environ.*, 22 (2), pp129-134.
 - 29) 三原義秋編 (1980): 温室設計の基礎と実際、養賢堂、p273.
 - 30) Mistriotis, A. and Briassoulis, D. (2002): Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with openings, *Comput. Electr. in Agric.*, 34, pp191-205.
 - 31) 深山一弥・村尾重信・足立一日出・福中 齊 (1980): 北海道における園芸施設の基礎土壌凍結と積雪荷重に関する研究、北海道農業試験場研究報告、127、pp135-160.
 - 32) 宮沢清治 (1982): 防災と気象、朝倉書店、pp81-82.
 - 33) Moriyama, H., Mears, D. R., Sase, S., Kowata, H. and Ishii, M. (2003): Design considerations for small-scale pipe greenhouses to prevent arch buckling under snow load, Paper Number. 03-4047 ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA. p.8.
 - 34) 森山英樹・佐瀬勘紀・小綿寿志・石井雅久 (2003): 台風 0221 による千葉県・茨城県下の園芸施設構造の被災状況と考察、*農業施設*、34(3)、pp9-22.
 - 35) 森山英樹・豊田裕道 (1999): 1998 年 1 月の大雪時における東北地方南部太平洋側の園芸施設の被災特徴について、*農業施設*、30(2)、pp99-108.
 - 36) 森 義夫 (1971): 耐雪型パイプハウスとその利用、*農業および園芸*、46(10)、pp1441-1444.
 - 37) 村松謙生 (1998): 園芸施設の設計用屋根雪重量の評価、*北陸農業研究資料*、37、pp1-16.
 - 38) 村松謙生・田中礼治・羽倉弘人 (1998): 園芸施設の雪害、*日本雪工学会誌*、

- 14(2)、pp29-34.
- 39) 奈良 誠 (1983): 温室の風圧係数に関する研究 (I) 風速分布と風圧特性について、農業土木試験場技報、151(LI-3)、pp1-6.
 - 40) 日本畜産施設機械協会 (1998): 畜舎用風力係数算定のための風洞実験測定報告書、p304.
 - 41) 日本銀行 (2007): 国内企業物価指数 (構造用鋼管)、<http://www.boj.or.jp>.
 - 42) 日本建築センター (1994): 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、日本建築センター出版部、p137.
 - 43) 日本建築学会 (2001): 鋼構造接合部設計指針、丸善、p296.
 - 44) 日本建設機械化協会 (1977): 新防雪工学ハンドブック、森北出版、pp7-9.
 - 45) 日本施設園芸協会 (1974): 豪雪と施設園芸・ハウスの構造、施設と園芸、5、pp6-20.
 - 46) 日本施設園芸協会 (1997): 園芸用施設安全構造基準 (暫定基準) - 平成 9 年版 -、p152.
 - 47) 日本施設園芸協会 (1998): 地中押し込み式パイプハウス安全構造指針、p57.
 - 48) 日本施設園芸協会 (2007): 園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況 (平成 16 年 7 月 ~ 平成 17 年 6 月間実績)、p206.
 - 49) 農林水産省 (2005): 平成 17 年度園芸施設共済統計表、<http://www.tdb.maff.go.jp>.
 - 50) 農林水産省大臣官房統計部 (2002): 平成 13 年度産 全国の露地・施設種類別作付面積・収穫量、平成 13 年度野菜生産出荷統計、<http://www.tdb.maff.go.jp>.
 - 51) 農林水産省関東農政局 (2002): 台風第 21 号による農業被害に関する資料.
 - 52) 小川秀雄・津下一英・佐藤義和・干場信司・山下 進 (1989): パイプハウスの強度に関する実験的研究 (I) - 実物大実験 -、農業施設、19(3)、pp29-38.

- 53) 奥島里美・奈良 誠 (1992): 施設園芸における災害の傾向 - 園芸施設共済統計表から -、農業施設、23(2)、pp45-51.
- 54) 小野佳之・田村哲郎 (2002): 一般座標系 LES の一様乱流中における二次元角柱まわりの流れへの適用性、日本建築学会構造系論文集、551、pp21-28.
- 55) 大熊武司・神田 順・田村幸雄 (1996): 建築物の耐風設計、鹿島出版会、p261.
- 56) Oouchi, K., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Kusunoki, S. and Noda, A. (2006): Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: frequency and wind intensity analyses, J. Meteorol. Soc. Japan, 84(2), pp259-276.
- 57) 長利 洋・山下 進 (1980): パイプハウスの断面形状と強度について (I)、農業土木試験場技報、A23、pp1-10.
- 58) Robertson, A. P., Roux, Ph., Gratraud, J., Sxarascia, G., Castellano, S., Dufresne, de Virel M. and Palier, P. (2002): Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 90, pp461-474.
- 59) 佐瀬勘紀 (1995): 風害対策、農業技術体系花卉編・第 3 巻 環境要素とその制御、農山漁村文化協会、pp513-517.
- 60) 佐瀬勘紀・古在豊樹・奈良 誠・根岸久雄 (1980): 温室の換気 I. 風洞実験による単棟温室の風圧係数と流量係数の測定、農業気象、36(1)、pp3-12.
- 61) 佐瀬勘紀・豊田裕道 (2000): 農業施設の被害と低減対策、日本農業気象学会・日本生物環境調節学会合同大会シンポジウム、pp1-6.
- 62) 篠 和夫・中崎昭人 (1988): 竜巻による施設園芸ハウスの被害について、農業土木学会誌、56(2)、pp107-111.
- 63) 立花一雄・羽倉弘人・高橋和彦・大塚 栄 (1979): 施設園芸ハウスの設計と施工、オーム社、p236.
- 64) 高橋久三郎・小林一雄・村松謙生・大沼匡之・鴨田福也 (1981): 園芸施設に対

- する積雪荷重とその軽減法、北陸農業試験場報告、23、pp197-234.
- 65) 玉城 磨・佐瀬勘紀・森山英樹 (2007): 台風 0314 による宮古島の園芸施設の被害特性、農業施設、38(1)、pp29-42.
- 66) Tieleman, H. W. (2003): Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 91, pp1627-1649.
- 67) Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1963): Theory of elastic stability, second edition, McGRAW-Hill, p541.
- 68) 東京管区気象台 (2002a): 平成 14 年 10 月 台風第 21 号に関する気象資料、
<http://www.tokyo-jma.go.jp/>.
- 69) 東京管区気象台 (2002b): 平成 14 年 10 月 1 日に茨城県潮来市、鹿嶋市、神栖市で発生した風害について、<http://www.tokyo-jma.go.jp/>.
- 70) 豊田裕道・森山英樹・瀬能誠之・前川孝昭 (1998): 園芸用プラスチックハウス等の風害発生事例とその特徴、農業施設、29(1)、pp21-30.
- 71) 豊田裕道・森山英樹・筒井義富・佐瀬勘紀・奥島里美・岡本佳久・小林康宏・瀬能誠之・前川孝昭 (1999): カントリーエレベータが周辺パイプハウス群の風環境に与える影響、農業施設、30(2)、pp11-20.
- 72) 渡辺パイプ (2006): グリーンハウス総合カタログ 2006、p256.
- 73) Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A. and Chang, H. R. (2005): Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, Science, 309, pp1844-1846.
- 74) 山本良三 (1964): 渥美半島における伊勢湾台風による園芸温室の倒壊とそのとき表面化した構造上の不備、伊勢湾台風災害の調査研究報告 (名古屋大学災害科学調査会)、pp160-175.
- 75) 山下 進・小倉 力 (1982): 園芸施設の台風による被害について、農業土木試験場技報、A28、pp61-84.

- 76) 山下 進・佐藤義和 (1982):園芸施設の豪雪による被害について、農業土木試験場技報、A28、pp35-60.