

資 料

パイプハウスの仕様検討に向けた構造解析事例

道垣内 将司*・小松原 聡*・福田 健一*・椋 重芳**・佐藤 響太**・石津 文人***

1. 目 的

県産業の重要な柱のひとつである農業は、島根創生計画に基づき、魅力向上に向けた取り組みが進められている。県産農作物として、例えばトマトやメロンなどはハウス栽培による年間を通じた計画生産が行われ、近隣都市圏に通年出荷されている。これらは現状でも優れた評価を受けている一方、さらに価値を高めるため、商標登録による県産品種のブランド化や、栽培方法の改良が進められている¹⁾。農業の振興に向けては、これら特色ある作物の育成を生産性・収益性高く行う必要がある。

島根県農業技術センターでは、ハウス栽培作物の収量の向上を目的として、“トマト・イチゴの収量を飛躍的に高める栽培技術の確立 (H30～R4)”を戦略的研究と位置づけ、作付面積の拡大、栽培条件の検討および制御技術の確立を進めている。これらの取り組みの一環として、ハウス間口を従来の7.2 mから8.0 mに拡張する新たな構造のハウスを検討しており、高収益ハウスとして標準化を目指している。しかしながら既存の設計基準や指針には8.0 m間口ハウスの設計手法は記載されていない。そのため、本設計にあたり構造物としての強度を事前に評価することは困難である。

島根県産業技術センターでは、コンピュータシミュレーションを用いた各種解析技術を有しており、本技術の活用により県内企業の高付加価値なものづくりの実現を支援している²⁾。その解析のひとつに、構造物に荷重を付加することで生じる力学性状を計算する“構造解析”があり、これにより構造物の強度を評価できる。そこで、この構造解析を高収益ハウスの3次元モデルに適用して積雪荷重と風荷重を付加した際のシミュレーションを行い、パイプハウスの各部材にかかる応力を計算した。本報告では、それらのうち積雪荷重の解析事例について報告する。

2. 方 法

2.1 構造解析に用いたソフトウェア

解析には、ANSYS Inc.製の有限要素法解析ソフトウェアであるANSYS Mechanical R19.2を用いた。

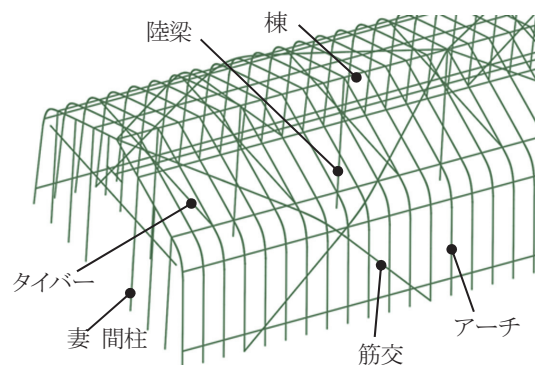


図1 パイプハウス3次元モデル

表1 パイプハウスの寸法

	高収益ハウス	従来型ハウス
間口[m]	8.0	7.2
肩高[m]	2.1	1.9
軒高[m]	4.1	3.7
パイプ間隔[m]	0.6	0.5



図2 パイプ締結部分

2.2 モデル形状

パイプハウスの建設では、アーチ、棟、筋交、妻柱などで外郭を形成し、使用環境に応じて陸梁などの補強が行われる。これらは全て鋼材パイプが使用され、各パイプを締結部品で固定することで骨組みが造られる。この骨組みに扉などを取り付け、農業用ビニールを張ることでハウスとして完成する。そこで、仕様検討段階の高収益ハウス平面図をもとに、図1に示す3次元モデルを作成した。表1に従来型のハウスと高収益ハウスの骨組みの寸法を示す。今回は、

* シミュレーション・可視化技術応用プロジェクトチーム

** 島根県農業技術センター, *** 元 島根県農業技術センター

解析に要する時間を短縮するためパイプ材はビーム要素とし、円筒断面を定義してモデル化した。なおビーム要素は計算負荷低減には有効である一方、パイプの潰れのような断面の変形には対応できないなど、結果が現実と乖離する部分があることに注意が必要である。またモデル化にあたっては、農業用ビニールを省略したほか、パイプ交差部分は十字溶接のように交点で一体化した状態と設定し、図2(矢印)で示す締結部分の固定具を省略した。さらに実際の筋交は直管をハウスの内側に沿わせるように押し当てて変形させた状態で骨組みと締結されるため、ハウスを持上げる向きの内部応力が掛かっているが、3次元モデルではハウス内面に沿った曲線として作図するため、内部応力は再現されない。

2.3 構造解析条件

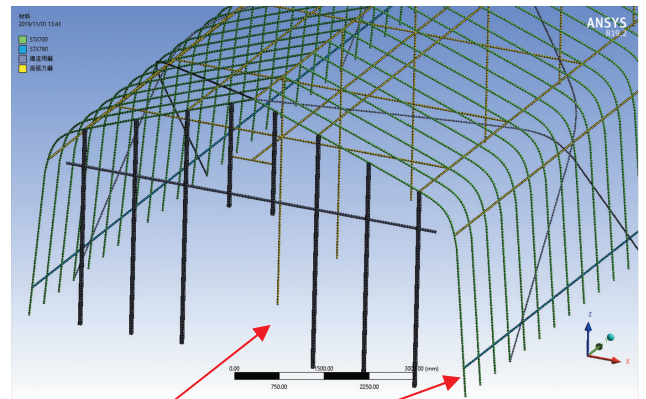
図3に積雪荷重を受ける場合の解析モデルの境界条件を示す。アーチ材、妻間柱、筋交の地中部分は固定とし、陸梁は地面に接地させたうえでピン支持とした。積雪荷重は積雪深1cmあたり10N/m²を屋根部面積に乗じて算出し、屋根部のパイプに均等に負荷した。強度の計算方法については、園芸用施設安全構造基準³⁾を参考にした。積雪量の設計用数値も本基準の付表に示されている値を用いた。この値は各地の最大積雪深の観測記録を基に再現期間毎に記載されている。例えば再現期間15年とすると、浜田で26cm、松江で52cm、横田で114cmといった積雪深が得られる。これらをもとに今回は、積雪深30, 50, 100cmの3条件で構造解析を行い、計算結果としてパイプに加わる曲げモーメントと変形量を得た。メッシュサイズはいずれの解析も50mmとした。

2.4 座屈解析条件

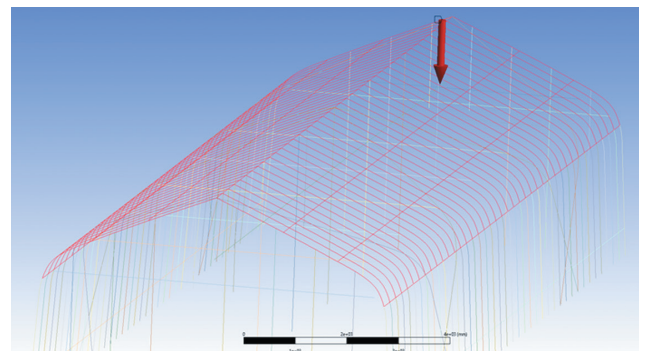
座屈が起こった場合、材料強度より小さい荷重であっても大きな変形が引き起こされ、ハウスが倒壊に至る可能性を有している。本条件では積雪荷重による座屈も懸念されることから、前項の構造解析に加え、同じくWorkbench R19.2を用いて座屈解析も実施した。解析モデルも前項と同じものを使用した。なお今回行った線形座屈解析は、座屈が起こるときの荷重である座屈荷重 P_k を求めるための解析であり、計算結果として荷重係数を出力する。荷重係数は、解析時の設定荷重と座屈荷重 P_k の比率を表すものであり、設定荷重に荷重係数を乗じることで座屈荷重 P_k が求まる。以上の関係から、通常は線形座屈解析では単位荷重が用いられる。ここでは積雪荷重を1Nと設定して解析を行った。

2.5 材料物性値

すべてのパイプは鋼材が使われることから、ヤング率203GPa、ポアソン比0.3を用いた。なお仕様案では使用部位によって構造用鋼、一般高張力鋼、高張力農業用パイプ鋼材などが割り当てられており、出力した曲げモーメントから算出した応力値と材料の降伏値を比較することで破壊の可能性を検討した。破壊の検討方法については、森山の報告を参考にした⁴⁾。



(a) 支持条件



(b) 積雪荷重
図3 境界条件

3. 結果

3.1 構造解析

図4に積雪深50cmの場合の積雪荷重による変形量と曲げモーメントの分布を示す。なお変形量については、原寸表示では変化がわかりにくいため、変形量を20倍に誇張して表示している。図示は行わないが、積雪深30cmの場合も変形や曲げモーメントの分布は図4と同傾向であった。

図4(a)から棟間のアーチおよび筋交にたわみが発生していることが確認され、変形量としては積雪深30cmで約23mm、50cmで約39mmであった。

図4(b)から、棟とアーチの接続部分(矢印位置)に最大の曲げモーメントが発生していることが確認された。このときパイプに発生する応力値は σ :曲げ応力、 M :曲げモーメント、 Z :断面係数として(1)式で算出される。

$$\sigma = M/Z \quad (1)$$

なお丸パイプの場合の断面係数 Z は、パイプ内径を d_1 、外径を d_2 として(2)式で求められる⁵⁾。

$$Z = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32d_2} \quad (2)$$

式(1)によって算出した最大曲げモーメントによる応力値は、積雪深30cmで145MPa、50cmで239MPaであった。これらの応力値は、一般的な高張力鋼の降伏強さ(≥500MPa)と比較しても半分以下の負荷であることから、50cm

以上の積雪が稀な沿岸部でのハウス設置では、材料強度においては従来から使用されているパイプ材でも間口の拡張に耐えるものと考えられる。

同条件で積雪深を100 cmとした解析を行った。すると計算が収束せず、途中で停止する事態が発生した。そこで積雪深を98 cmに変更して再度解析を行ったところ、計算は収束した。図5は、このときのハウスの変形量である。今回も変形量は20倍に誇張してある。図4(a)と同様に棟間のアーチ材にたわみが発生しているのに加え、陸梁とタイバーも大きく変形しており、構造物として不安定な状態となっていることがわかる。なお今回のモデルでは、積雪深98 cmで計算が収束する上限であった。積雪深100 cmでは垂直荷重を支持できなくなり、ハウス全体が短時間で大きく変形することで、計算が発散したと推測される。この結果から、積雪深が98 cmを超えるとハウス全体が急激に変形し倒壊する危険性が示唆される。

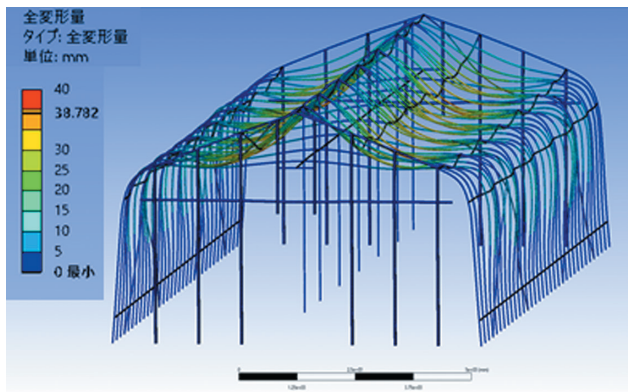
3.2 構造解析による改善検討

一般的に、従来から積雪対策として陸梁の管径を拡大することが行われている。そこで仕様案に記載された材料リストの範囲で変更を考えることとし、 $\phi 31.8 \times t1.6$ mmから、 $\phi 48.6 \times t2.3$ mmに断面形状を変更して積雪深100 cmでの追加計算を行った。本変更により、(2)式による断面係数が約3.4倍大きくなることから、(1)式に従いパイプに発生す

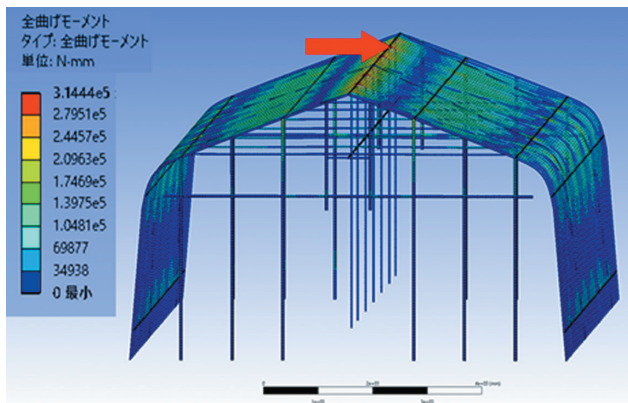
る応力を1/3.4に抑える効果が期待される。変更したモデルで解析を行ったところ、計算は収束して最後まで完了した。追加計算における変形量の結果を図6に示す。アーチ材のたわみ量は図5と比べて変化ないものの、陸梁およびタイバーに発生していた変形が抑制されており、ハウス全体として積雪深100 cmの垂直荷重を支えることができている。なお図は省くが、このとき曲げモーメントの最大値は図4(b)と同じくアーチと棟の接合部に発生した。この曲げモーメントを応力に変換すると478 MPaであり、一般的な高張力鋼の降伏強さと同等となった。この結果からアーチ材に関しては設計上の余裕がないと考えられ、100 cmを超える積雪が発生しうる山間部での本仕様のパイプハウスの設置にあたっては、アーチに使用する材質にも注意が必要である。

3.3 座屈解析

図1のモデルに対し、図3(b)で表した積雪荷重を1Nと設定して座屈解析を行った結果を図7に示す。座屈解析では、荷重係数および座屈する際の形状特性が得られる。図7では陸梁に高い値が表示されていることから、座屈する際の変形箇所は陸梁であると予測でき、図5で示した構造解析とも一致する結果が得られた。また単位荷重を用いた本計算では荷重係数44720がそのまま座屈荷重 P_k を表しており、 4.47×10^4 Nが座屈の起こる限界荷重であると予測できる。この荷重を積雪深に変換すると30 cmにも満たない



(a) 変形量 (20倍誇張)



(b) 曲げモーメントの分布
図4 積雪深50 cmの解析結果

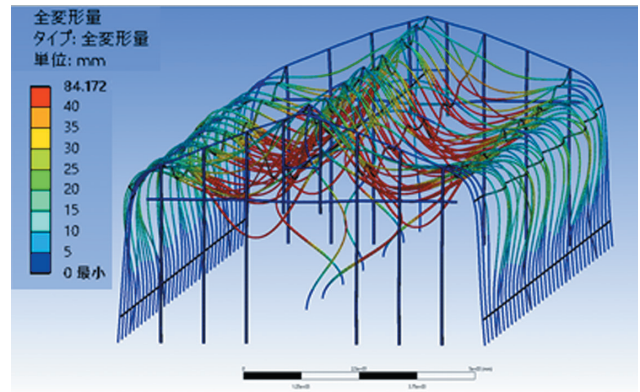


図5 積雪深98 cm変形量

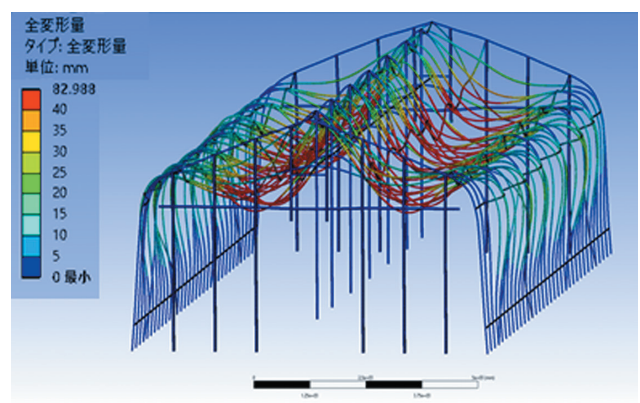


図6 積雪深100 cm変形量 (陸梁変更後)

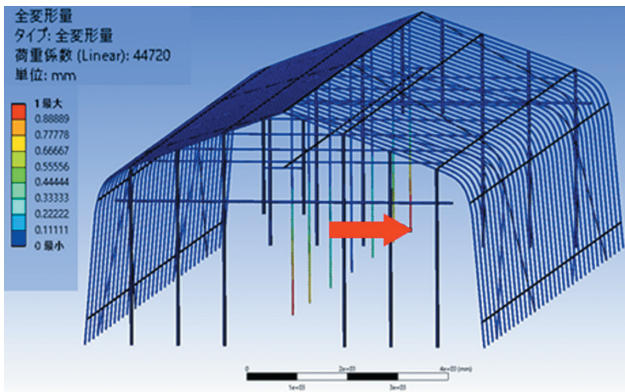


図7 座屈解析結果

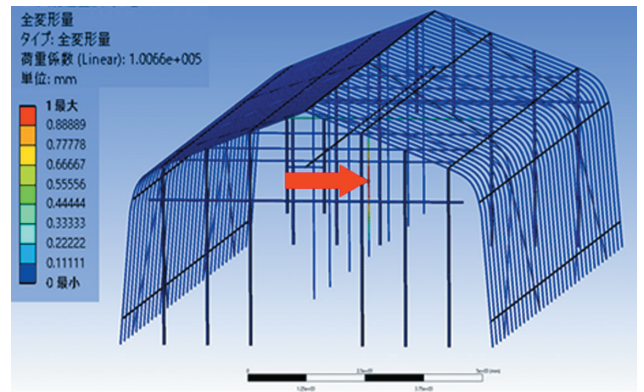


図8 座屈解析結果（陸梁固定変更後）

量であり、今回の条件では島根県の沿岸部の積雪量であっても座屈が起こる可能性がある。

3.4 座屈解析による改善検討

高収益ハウスは間口の拡大を設計方針とするため、同時に全高も高くなり、従来型ハウスと比較して座屈の懸念が大きくなると予想される。積雪荷重を支持する目的で設置される陸梁は、これまでの計算結果からも特に座屈の懸念が大きい部材である。陸梁の変形に対し、3.2項ではパイプ径の拡大による改善を検討し、断面係数の増加による応力値の低減効果を見積もったが、本項では座屈の点からも陸梁の改善案の検討を行う。

今回の陸梁部のパイプのように、単純な棒状部材に圧縮荷重が加わる際の座屈荷重は式(3)にて計算される⁵⁾。

$$Pk = n \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

ここで、 E ：ヤング率、 I ：断面二次モーメント、 L ：部材長さである。また n ：部材の端末状態による係数であり、両端とも回転支持の場合は1、両端とも固定支持の場合は4などと与えられる。丸パイプの断面二次モーメント I は式(4)で表される。

$$I = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{64} \quad (4)$$

式(3)から、パイプ径およびパイプ肉厚の拡大は断面二次モーメント I を大きくする方向に作用する。3.2項での検討と同様のパイプ径変更を行った場合、断面二次モーメントが約5倍に大きくなり、座屈荷重を5倍大きくとることができることから、座屈の防止策としても有効である。また同じく式(3)から、座屈荷重は部材長さ L の2乗に反比例することがわかる。今回のモデル化では陸梁を接地のピン支持としたが、冬場のみ取り付けられる陸梁は、実際は固定治具を装着したうえでジャッキアップさせて使用するのが慣例である。このことから、図7の境界条件は実際よりも陸梁が長いほか、接地部の回転を拘束する治具を考慮していないため、実際よりも座屈しやすい条件と言える。以上を踏まえ、陸梁の支持位置を地面から300mmの高さとし、ピン支持から固定支持に変更することで、固定治具と

ジャッキを用いた場合を想定した座屈解析を実施した。結果を図8に示す。陸梁の支持条件を変更したことで荷重係数は $1.0066e+5$ となり、座屈強度としては図7と比較して2.25倍程度大きく見積もれる結果となった。なお、このときの座屈荷重を積雪深に換算すると60cm強に相当することから、慣例通りの設置方法であれば陸梁のパイプ径を拡大せずとも沿岸部での使用で座屈が起こる可能性は低いと推測される。他方で山間部での設置にあたっては、パイプ径を太めにするなどの検討が必要と考えられる。

座屈による変形は、図7では妻面に近い矢印で指した陸梁ほど変形が大きくなる結果であったが、図8では矢印で指したハウス中央の陸梁の変形が大きく、それを受けるタイバーが座屈する結果となった。このことから、過大な積雪荷重がハウスに加わった場合、当初モデルのようなピン支持の陸梁では妻面付近から倒壊が起こると考えられるが、接地点の回転が拘束された陸梁の場合はハウス中央から破壊が起こる可能性が示された。

以上、大型構造物であるパイプハウスの構造解析に向け、ビーム要素を用いて変形量と曲げモーメントを求め、設計段階で強度を評価する手法を検討した。モデル作成や解析条件の設定において複数の仮定を含むため、出力した数値を設計に反映することはできないが、全体的な傾向を掴むことは可能であり、負荷が高い部位や変形量の大きな箇所を事前に把握することで、実際の設置前に部材選定などの対策が検討できた。

文 献

- 1) 椋重芳, 石津文人. 島根県オリジナルメロン'島交1号'の果実肥大に及ぼす植物成長調整剤の影響. 島根県農業技術センター研究報告. 2020, 47, p.23-28
- 2) 小松原聡, 福田健一, 江木俊雄, 中島剛, 清水一郎. 応力解析を活用した平板瓦の高強度化の検討. 島根県産業技術センター研究報告. 2018, 54, p.19-22.
- 3) 園芸用施設安全構造基準 平成28年度版. 一般社団法人 日本施設園芸協会. 2017
- 4) 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. 2008
- 5) 機械実用便覧 改定第6版. 日本機械学会. 1990