

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2018～2021

課題番号：18KT0058

研究課題名(和文) 雪の力学負荷を考慮した果樹通年保全技術の提案

研究課題名(英文) Preservation of fruit tree branch under various mechanical stress including snow load

研究代表者

藤崎 和弘 (Fujisaki, Kazuhiro)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90435678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：積雪寒冷地での果樹栽培においては、風雨被害のみならず雪害も深刻であり、様々な力学負荷から幹枝の折損を防ぐことが重要である。本研究では曲げ変形理論に基づき、樹枝の大きなたわみを再現可能な力学シミュレーション手法を提案し、変形時のひずみ解析を行った。この解析結果とひずみゲージによる実測に基づいて、樹枝に作用する積雪負荷の作用形態の解析と、様々な荷重が作用した時の折損位置の推定や枝保全技術の最適化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の気象変化に伴い、暴風、豪雨に加え、積雪由来の被害が無視できなくなっている。果樹は毎年の枝剪定により成形されるが、この作業は経験則を基に生産量調整や収穫のしやすさを考慮して実施されることが多い。本研究は枝保全に重要となる力学的視点の知見を提供するものである。特に埋雪状態にある構造物には融雪期に大きな荷重が作用し破損に至ることがある。ここでは変形のシミュレーションと実測により樹枝に作用する雪負荷の可視化を実現した。

研究成果の概要(英文)：Fruit tree branches are subjected to various environmental loads caused by wind, rain and snow. In this study, a numerical analysis method considering large deformations under bending conditions was proposed, and used to simulate the deformation of fruit tree branch. The bending strain of tree branch was investigated based on both the simulation method and strain measurement of the tree branch. The strength of fruit tree branches with emphasis on the maximum bending strain was investigated under several load configurations including snow loads. And the optimization of support position of tree branch under distributed load was conducted by using the method.

研究分野：機械工学

キーワード：力学解析 負荷計測 果樹栽培 雪害 農工連携

1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地では近年の気象変化に伴う暴風、豪雨に加え、寒波や積雪由来の被害が無視できない。このような環境で育成される果樹には図1に示すように1年を通じて様々な力学的負荷が作用する。果樹は毎年新しい枝を伸ばして実をつけるため、春になると枝の剪定が行われる。これは通常、経験則を基に生産量調整や収穫のしやすさを考慮して行われることが多い。果樹は毎年繰り返されるこの剪定作業により非常に独特な形態をとる。その形態は自然のままの姿ではなく、人の意志により戦略的に計画されたものである。様々な力学負荷が枝に与える影響を可視化し、その負荷の大きさに耐えうる幹枝を形成することができれば、生育・収穫のサイクルを恒久的に繰り返すことが可能になる。一方で、雪負荷の作用形態については未解明な点が多く、雪が積もる際の重みや雪崩れる際の負荷だけではなく、埋雪構造物に雪解け期に作用する沈降負荷が甚大であると言われている。融雪期にある雪は溶解と再結合を繰り返し、固体・液体間の体積変化や他の固体への付着を伴うことから、構造物を巻き込み大きく流動する。降雪時は樹枝の上に載る雪の重さだけを考慮すれば良いが、融雪期の枝埋没状態では雪が力学的に接続する全範囲の重量が負荷として加わることになる。雪の変形・流動現象は連続的ではなく、状態変化も発生することから数学的に記述することが難しい。雪の様態や樹枝への作用形態をいかに正確に力学モデル化するかということが本研究における課題である。

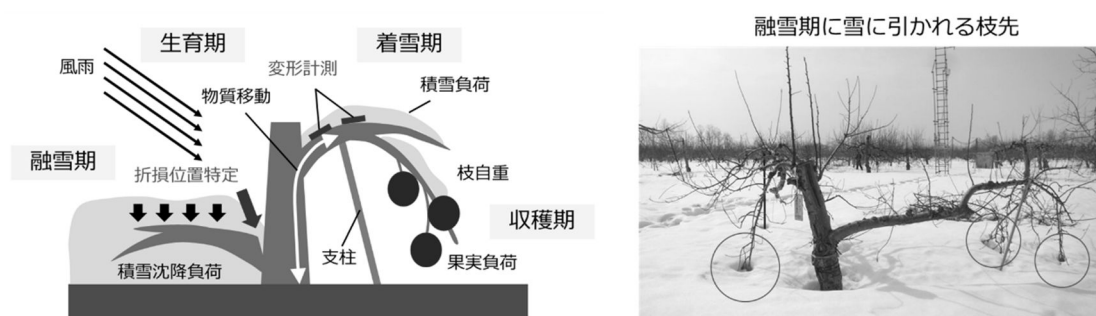


図1 果樹に作用する力学的負荷の例

2. 研究の目的

本研究期間においては、樹木の変形計測と力学解析に基づき、果実重量や力学環境負荷に耐えうる理想的な果樹形状の形成と、支柱入れや吊り、除雪といった効果的なサポート技術の提案を目指す。現在の科学的知見では評価することが難しい雪害に着目するため、次のような複数の課題を設定し、それぞれについて検討していく。

- ・果樹枝の長期にわたる変形(ひずみ)計測を実施し、風雪などにより樹枝が受ける負荷の大きさを実測値に基づいて評価する【樹木負荷計測】。
- ・樹木枝に作用する負荷を解析的に求めるための数値解析アルゴリズムを確立し、果実重量や雪負荷が作用した際の枝変形を表現できるようにする【幹枝の力学解析】。
- ・負荷形態が明らかになっていない積雪沈降時の雪の様態・動態を、埋雪状態にある樹枝のひずみ分布の計測と、その経時変化から解明する【積雪沈降現象解明】。
- ・解析結果に基づき、支柱入れ、枝吊りといった従来の雪害対策の妥当性評価と最適化、枝の折損リスクを軽減するための意図的な融雪方法の確立を目指す【保全技術の提案】。

これら対策の有効性をシミュレーションに基づいた解析ならびに実測から評価し、生育期の観察と合わせて通年の樹木保全技術を提案する。

3. 研究の方法

(1) 樹木負荷計測

実際の果樹枝に作用する負荷を計測するため、リンゴ樹、サクラ樹の枝にひずみゲージを貼り、環境負荷による枝変形を長期的に計測する。遠隔地での樹木負荷モニタリング技術としての実用化を想定し、データの長期記録のみならず無線通信技術についての試行実験も計画する。図2に機器設置時の様子を示す。ひずみ計測回路から得られる信号を小型のマイコンで取得し、低消費電力で長距離の無線通信を可能とする技術(LPWA)を利用した機器を介することにより長期的かつ遠隔モニタリングが実現する。

(2) 幹枝の力学解析

複雑な形状を有する構造物に作用する力学負荷を解析する場合、有限要素法等の数値解析手法が有効である。枝は長く先細りの形状であり柔軟性が高いことから、力やモーメントといった力学負荷が加わると大きくたわむ。代表者らは、曲げ変形理論を基本として、細長い構造物に生じる大きなたわみを解析し、変形形態をシミュレーション可能な計算アルゴリズムを提案して

いる。図3に曲げ変形理論によるモデル化の一例を示す。本手法では初期形状から外力作用時の変形形態を推定し、予測された変形形状が力とモーメントのつり合いを満たすように予測形状の最適化を行う。本研究では汎用的な表計算ソフトウェアにこのアルゴリズムを実装することで、様々な形状の樹枝の解析に対応する。本手法にて幹と枝の接続部（枝基部）について角度を変えた際の枝変形形態の変化、荷重分布あるいは強制的な変位が生じた時の枝各部に作用するひずみの可視化を行う。一方、解析に用いる物性値については実際の枝を利用した負荷試験により実測する。

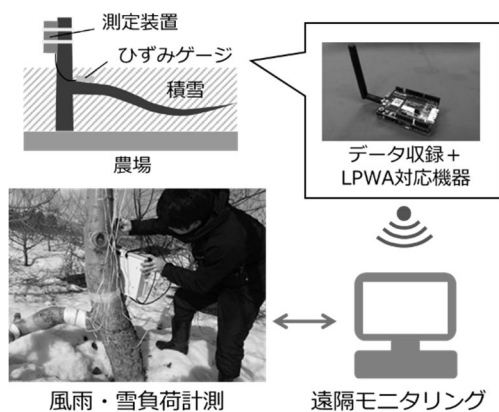


図2 屋外での長期ひずみ計測

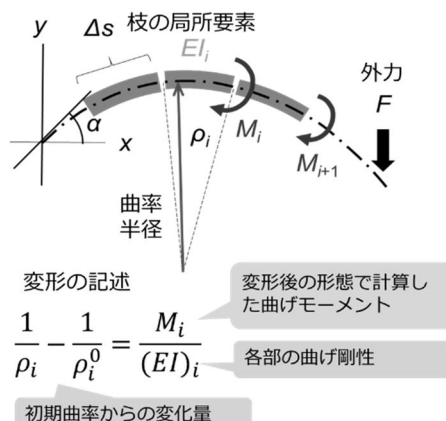


図3 枝変形解析のための曲げ変形理論

(3) 積雪沈降現象解明

融雪期に枝に作用する荷重を前述のシミュレーション手法とひずみ計測による実測から明らかにする。栽培の実態に合わせ、枝の一部が雪の沈降に合わせて引き下げられる場合の枝変形の解析や、埋雪時の負荷の大きさを分析した。なお、実験時期が例年より積雪の少ない年であったため、周囲から雪を集めて枝に載せることで埋雪状態としている。実際の雪害状況を観察して得られた折損等の発生形態の知見をもとに、降雪、埋雪が樹枝に与える負荷の作用形態を推定する。これらの結果から雪害に強い樹枝の形成法を提案することで農業分野への情報提供とする。

(4) 保全技術の提案

枝変形シミュレーションに基づき、枝の局所に作用するひずみの分布に注目することで、折損危険性の高い部位を明らかにする。また、既存の保全技術である吊り、支柱入れ、補強の合理性判断と最適化を行う。

4. 研究成果

(1) 樹木負荷計測

埋雪させた4m程度の太い枝の幹側上部にひずみゲージを貼り、融雪期間におけるひずみ計測を行った。この枝が下にたわむとひずみの値が大きくなる。融雪期の数日間のひずみ計測実験の様子と結果を図4に示す。この時作用していたひずみは0.2% (2000×10^{-6})程度であり、本枝では中央に250kgfを負荷した時と同程度の変形量であった。また、一日の気温の変化に伴ってひずみが増加しており、雪解け時にひずみが増加することが確認できた。本例では融雪が進む日中に負荷が大きくなり、再凍結が起こる低温になるとやや軽減される結果となった。ひずみ測定結果は枝の形状や融雪段階によっても変わり、日照により樹が温められ枝周辺に融雪による空洞ができるような条件では、ひずみが増加して軽減される結果が得られた。

(2) 幹枝の力学解析

本シミュレーションでは、枝の各部に負荷をかけた時の変形形状の提示ならびに、部分的に強制変位を与えた時の変形形状を提示可能である。また、変形に基づいて各部のひずみが計算できる。枝の力学解析結果の一例を図5に示す。本例では枝先端に2Nの負荷をかけた時の枝の変形形状から枝の材料パラメータである弾性率を推定し、この弾性率に基づいて再構成した枝モデルにおいて、4N負荷時の枝形状を再現したものである。計算結果と実形状が精度良く一致することが確認できた。また、枝を傾けた際のシミュレーション結果も実測結果と良く一致していた。

(3) 積雪沈降現象解明

枝の先端が沈降により強制的に下方に引かれることを想定し、ひずみの解析を行った。図6に結果の一例を示す。本結果では枝先端が下方に10cm引き下げられることで枝の損傷につながる1%を超えるひずみの発生が確認できた。積雪沈降のように雪が枝の一部を強制変位させる場合、枝の負荷は甚大といえる。

埋雪時に枝に作用する負荷の形態を調査するため、細いモデル枝を雪に埋没させ、融雪時に生じるひずみ分布を測定した。この測定結果に基づき、シミュレーション手法を用いて負荷の分布

形態を逆推定したところ、枝先端で小さく、幹側に向かって指数関数的に増大する荷重形態であることがわかった。完全に埋雪された状態では沈降に伴って幹側に大きな荷重が作用することから、枝分岐部の裂けなどに注意する必要がある。実際に幹側のみ除雪した状態で融雪を始めると、最大ひずみの発生が大きく抑制されることを確認した。このように、ひずみの実測値と変形シミュレーションを併用することにより雪荷の可視化が実現し、効果的な融雪方法の提案にもつながることがわかった。

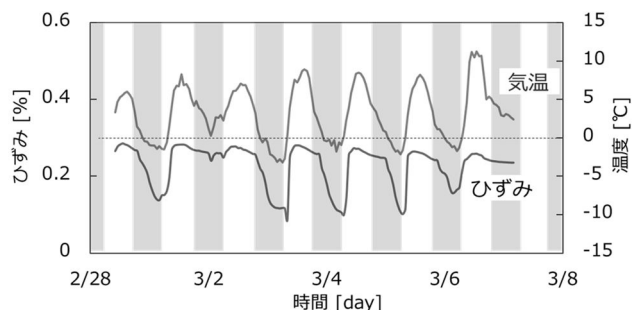
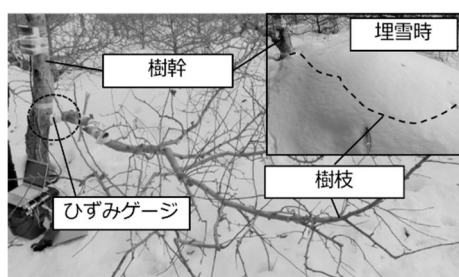


図4 屋外果樹枝に作用するひずみの測定（融雪期の測定例）

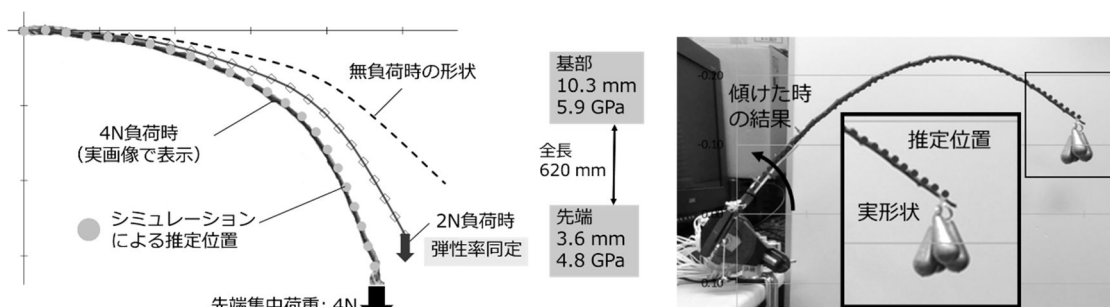


図5 シミュレーション結果と実験による検証

(4) 保全技術の提案

既存の枝保全技術である吊りや支柱入れを想定し、枝の一部の変位を拘束した条件下での、吊り位置と枝に生じる最大ひずみの関係を調査した。図7に直径6mm一定とした直線枝に20N/mの等分布荷重を与えた時の吊り位置と、その位置で生じるひずみ、幹側基部に作用するひずみの計算結果を示す。両位置でのひずみの絶対値が最も小さくなる条件を最適な吊り位置と考える。直径が一定の枝においては変形量を微小と仮定した理論解を算出することができることから、この結果を図に付記する。本条件では枝全体の変形が小さくなる吊り位置が最適吊り位置となることから、この結果は理論計算値とほぼ一致する。実際の枝はテーパ形状であり、理論解の導出が困難な場合もあるが、本シミュレーションを利用することで複雑な形状の枝であっても最適な吊り位置を探索することができる。

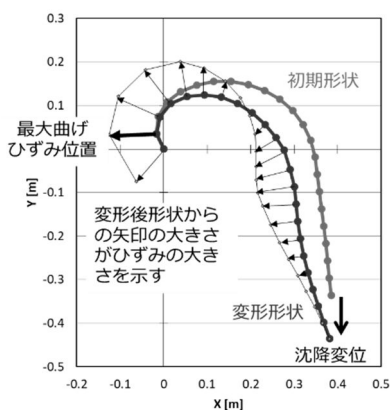


図6 枝先端部沈降時の変形とひずみ

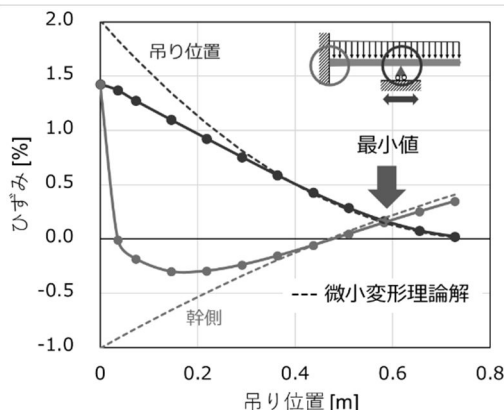


図7 吊り位置による負荷軽減効果

以上、本研究では枝構造の曲げ変形シミュレーション手法を提案し、ひずみの解析と実測に基づいて果樹枝に作用する力学負荷を評価した。本シミュレーションを活用することで、様々な負荷状況下にある樹枝の折損位置の推定や、効果的な保全技術の提案が可能になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kenta Ishii, Kazuhiro Fujisaki, Kazuhiko Sasagawa, Takeshi Moriwaki	4. 巻 17
2. 論文標題 Strain analysis of fruit tree branch under large deflection considering flexural deformation characteristics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 21-00092.1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jbse.21-00092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 石井健太, 藤崎和弘, 仁藤 尊徳, 笹川和彦, 森脇健司	4. 巻 34
2. 論文標題 樹枝の曲げ変形計測と力学解析に基づいた融雪期負荷の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 東北の雪と生活	6. 最初と最後の頁 9-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岩谷隆寿, 藤崎和弘, 笹川和彦
2. 発表標題 果実負荷が作用する樹枝の有限要素解析に基づいた枝吊りの負荷軽減効果検証
3. 学会等名 日本機械学会東北支部 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤崎和弘
2. 発表標題 曲げ変形解析に基づいた果樹枝の強度評価と折損対策 ～材料力学の観点からみた自然～
3. 学会等名 日本材料学会東北支部 第1回材料工学サマーセミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤崎和弘, 石井健太, 笹川和彦
2. 発表標題 果樹枝の大たわみシミュレーションに基づいた曲げ負荷の解析
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤崎和弘, 太田直樹, 石井健太, 笹川和彦, 森脇健司
2. 発表標題 果樹枝の曲げ変形解析に基づいた枝吊りの効果検証
3. 学会等名 日本材料学会 第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤崎和弘
2. 発表標題 変形計測と力学解析に基づいた果樹枝の通年負荷評価
3. 学会等名 令和2年度日本材料学会東北支部材料フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤崎和弘, 石井健太, 笹川和彦, 森脇健司
2. 発表標題 樹枝の大たわみ解析に基づく果樹形の力学特性評価
3. 学会等名 第32回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Ishii, Kazuhiro Fujisaki, Kazuhiko Sasagawa, Takeshi Moriwaki
2. 発表標題 Stress analysis of fruit tree branch considering flexural deformation characteristics under actual loading
3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井健太, 藤崎和弘, 笹川和彦, 森脇健司, 伊藤大雄
2. 発表標題 果樹枝の曲げひずみ計測に基づいた融雪期負荷評価
3. 学会等名 日本雪氷学会雪氷研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井健太, 藤崎和弘, 仁藤尊徳, 笹川和彦, 森脇健司
2. 発表標題 樹枝の曲げ変形計測と力学解析に基づいた融雪期負荷の推定
3. 学会等名 日本雪氷学会東北支部大会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井健太, 藤崎和弘, 笹川和彦, 森脇健司
2. 発表標題 結実による負荷を考慮した果樹枝の変形解析
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤崎 和弘, 森脇 健司, 笹川 和彦
2. 発表標題 積雪負荷による果樹枝の曲げ変形形態と局所ひずみの分布特性
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 第50回 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	横田 秀夫 (Yokota Hideo) (00261206)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・ チームリーダー (82401)	
研究分担者	伊藤 大雄 (Ito Daiyu) (00333716)	弘前大学・農学生命科学部・教授 (11101)	
研究分担者	森 洋 (Mori Hiroshi) (20631493)	弘前大学・農学生命科学部・教授 (11101)	
研究分担者	森谷 慈宙 (Moritani Shigeoki) (30539870)	弘前大学・農学生命科学部・准教授 (11101)	
研究分担者	田中 紀充 (Tanaka Norimitsu) (40559259)	弘前大学・農学生命科学部・助教 (11101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石田 祐宣 (Ishida Sachinobu) (60292140)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関