

イネの簡易力学モデルの提案と倒伏のシミュレーション

Simplified Mechanical Model of Rice and Simulation of Lodging

伊藤亮¹⁾, 片山聖琉¹⁾, 津川暁¹⁾

Ryo Ito, Kiryu Katayama and Satoru Tsugawa

1) 秋田県立大学システム科学技術学部 (〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口84-4,
E-mail: ryo.ito@akita-pu.ac.jp)

Previous research has focused on clarifying the factors involved in rice lodging from a mechanical perspective, based on the shape and stiffness of rice plants. However, existing mechanical models have difficulty simulating the behavior of rice plants in clusters, including plant-to-plant interactions. Therefore, this study proposes a simplified mechanical model of rice based on the particle method, aiming to enable realistic simulations of densely grown rice in paddy fields. The proposed model exhibited good agreement with cantilever beam theory, but further refinements are necessary to improve accuracy for realistically simulating the behavior of rice plants.

Key Words : Rice lodging, Particle method, Simplified mechanical model, DEM, Paddy field

1. はじめに

イネは自重や強風などによる倒伏が原因で収量や品質が大幅に低下してしまうことがあるため、倒伏を軽減させることを目的に、これまで倒伏耐性に関する研究が盛んに行われてきた[1]。その多くは土・肥料の工夫や品種改良(倒伏耐性に関わる遺伝子の解明など)によるものであるが、イネの形状および剛性から力学的に倒伏に関わる因子を解明する試みもなされている[2]。この研究では実験に加えてイネの稈の力学モデルを考案し、倒伏耐性に重要なパラメータを調査しており、イネは稈が太くて柔らかいタイプと細くて硬いタイプに分類できること、イネの形状において最も倒伏に大きく起因するのは第一節間(穂に最も近い節間)の長さであることなどが明らかになった。しかしながらここで提案された力学モデルでは、イネが群生した状態で相互作用を含めたイネの挙動を模擬することが難しい。一方で実際の水田で発生するイネの倒伏は群生するイネ同士の相互作用も大きな影響を及ぼしていると考えられる。

そこで本研究では、水田でイネが群生した状態をシミュレート可能にすることを目指し、粒子法をベースとし

たイネの簡易力学モデルを提案する。

2. イネの力学モデル

粒子を一列に並べたものを考える。図1に示すように粒子の物理量計算は個別粒子法[3]をベースとして考えるが、同じイネを構成する粒子同士の法線方向の力においては図2に示すものを考える。並んで位置する粒子 i 、粒子 j および粒子 k において、粒子 j の中心から粒子 k の中心に向かう座標ベクトルと粒子 i の中心から粒子 j の中心に向かう座標ベクトルとがなす角を θ_i としたとき、粒子 i に作用する法線方向の力 f_{ti} を次式のように定義する。

$$f_{ti} = |\mathbf{F}_{ti}| = \frac{aEI}{\Delta l^2} \sin \theta_i \quad (1)$$

ここで、 Δl は粒子間距離、 E はヤング率、 I は断面二次モーメント、 a は実験等をもとに実際のイネの挙動に合うように調整するためのパラメータである。また、粒子 i に作用させた力の逆向きの力を粒子 j に付与する。こ

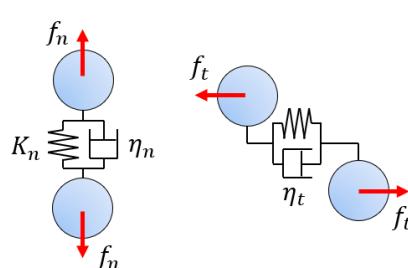


図1 DEMにおける粒子間の相互作用

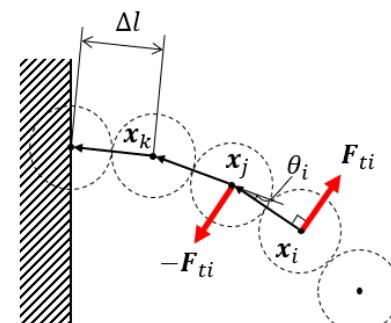


図2 法線方向の力の定義

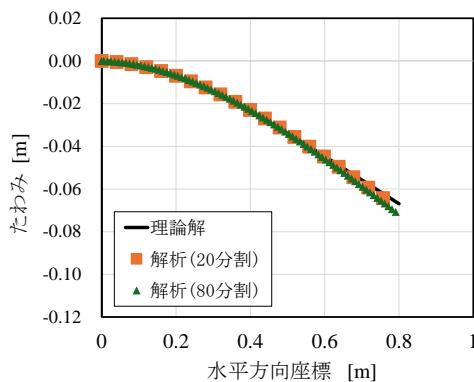


図3 片持ち梁の理論解との比較（分布荷重）

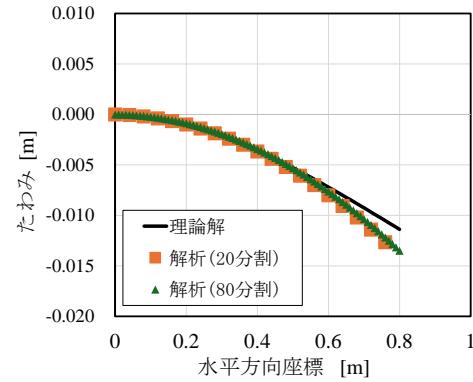


図4 片持ち梁の理論解との比較（先端荷重）

表-1 計算条件
(分布荷重)

L [m]	0.8
w [N/m]	1.96
EI [Nm ²]	0.15

表-2 計算条件
(先端荷重)

L [m]	0.8
F [N]	0.02
EI [Nm ²]	0.15

のモデルによって片持ち梁の計算を行い、たわみを理論解と比較した結果を図3および図4に示す。図3は一様な分布荷重、図4は先端のみに鉛直下向きに荷重を与えた。計算条件をそれぞれ表1および表2に示す。ここで、 L は梁の長さ、 w は分布荷重、 EI はヤング率と断面二次モーメントの積、 F は先端荷重の大きさを示している。パラメータ a が 3.2×10^{-2} のとき、たわみが概ね理論解と一致したため、以後この値を用いることとした。また、解析結果は粒子分割数の影響をほとんど受けないことが確認できた。次に分布荷重を付与した片持ち梁において、減衰項 η_t を小さくして振動させた場合の先端の変位の時間変化を図5に示す。振動の周期がおよそ385msであったため周波数は約2.6Hzとなる。このとき理論解は2.4Hzであるため多少の誤差はあるものの、概ね妥当な動的挙動であると考えた。

3. 解析

先行研究[2]の結果と比較するため、ここでは次式で表される無次元化パラメータ α 、 β を用いる。

$$\alpha = \frac{FL^2}{EI} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\rho L^3}{EI} \quad (3)$$

ここで、 α は穂の重さに関するパラメータ、 β はイネの茎の自重（密度）に関するパラメータとなっており、 ρ は単位長さ当たりの質量である。はじめに α を変化させた場合のイネの変形挙動について解析した結果を図6に示す。 β は2.0で一定とした。図中、実線は先行研究[2]の結果を示しておりマーカーによるプロットは提案モデルで

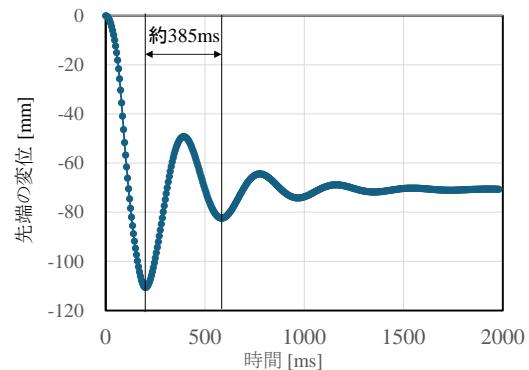
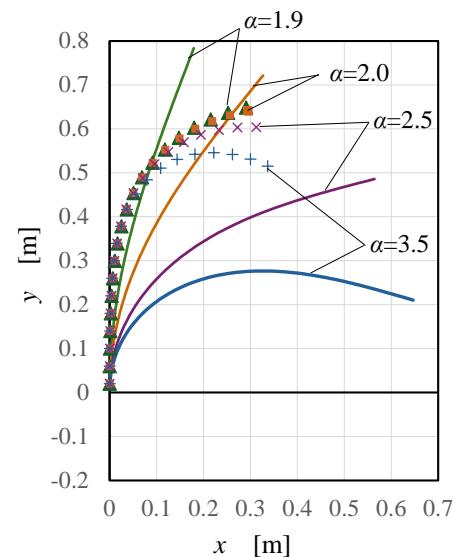


図5 片持ち梁の先端の変位（分布荷重）

図6 イネのたわみの解析（ α を変化させた場合）

の結果を示している。 α が大きくなるにつれてイネのたわみが大きくなる傾向は一致しているが、その変形挙動は大きく異なる結果となった。次に β を変化させた場合のイネの変形挙動について解析した結果を図7に示す。 α は2.0で一定である。こちらも図6と同様に β が大きくなる

についてイネのたわみが大きくなる傾向は一致しているものの、その変形挙動は大きく異なる結果を得た。最後に群生した状態での解析例として、等間隔・格子状に9本イネがあると見立ててモデルを作成し解析した例を図8に示す。ここではイネ同士の相互作用が低コストで模擬できることが確認できた。

4. まとめ

本研究では、水田でイネが群生した状態をシミュレート可能にすることを目指し、粒子法をベースとしたイネの簡易力学モデルを提案した。片持ち梁の解析で理論解とたわみの形状ができるだけ一致するようパラメータを設定し、このモデルを用いてイネのたわみの解析を行った。先行研究[2]との比較により、イネの変形は定性的に一致することが確認できたが、定量的には差異が大きい結果となった。今後は計算コストを増加させずにイネの変形を精度よく模擬できるようにモデルの改良を試みるほか、群生状態のシミュレーションを実施し、イネの倒伏に関わる因子の解明に役立てていく。

参考文献

- [1] 西羽瑞希ほか: 近年育成されたイネ品種の倒伏抵抗性と強稈関連遺伝子のハプロタイプの特性, 日本作物学会講演会要旨集, 251, pp.87-87, 2021.
- [2] S. Tsugawa, H. Shima, Y. Ishimoto and K. Ishikawa: Thickness-stiffness trade-off improves lodging resistance in rice, Scientific Reports, 13, 10828, 2023.

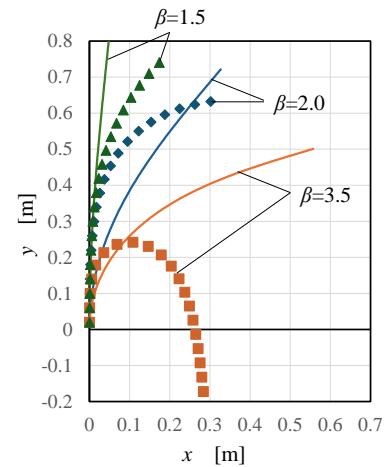


図7 イネのたわみの解析（ β を変化させた場合）

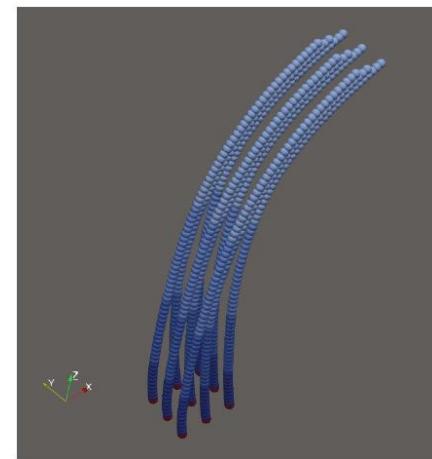


図8 群生した状態の解析例
(80粒子/1本, 長さ 0.8m)