

## 25. ICT ブルドーザの効率的な制御検証のための ニューラルネットワークシミュレーション手法

株式会社小松製作所

○ 挟間 優佳  
大林 薫  
齋藤 芳明

### 1. はじめに

近年、建設機械に対し容易な操作性や施工の効率化が求められており、ICT (Information and Communication Technology) の普及や機能改善に期待されるが多くなってきている。ブルドーザは地形や土質によって車体挙動が変動し、この車体挙動の変化は直接ブレードに影響するため出来形の精度確保に影響することになる。例えば、車体と比較して小さく柔らかい障害物であれば完全に踏み潰して走行するだろうし、比較的大きく硬い障害物であれば踏み潰せずに車体は障害物を乗越えて通過することになる。このような車体の動きは直接ブレードに伝わるためにブルドーザの操作を難しくしている要因の1つであると言える。従来のブルドーザでは、土質や含水率等様々な作業条件への対応はオペレータの熟練操作に頼るところが多かったため、熟練オペレータの不足や技術の伝承が課題となってきた。ICT ブルドーザの実用化により、初心者オペレータでも容易に計画図面通りの施工が可能となってきた。しかしながら、その ICT ブルドーザの開発過程において制御を作り込んでいくためには、多様な土壌での実機試験が必要となる。また、様々な土壌条件を用意し実機によってテストを行うには多大な工数を要することになる。このような課題に対し、土壌から受ける力や作業による土壌形状の変化をシミュレートする土壌モデルを作成し事前に多くの土壌パターンにおいて制御検証を実施することで実機試験の効率化が期待される。

土壌から受ける力や作業による土壌形状の変化をシミュレートする土壌モデルは非線形性を有しており、土壌を組成する成分や粒度、含水率によってブルドーザの履帯と土壌との相互作用が変動するため単純に物理式によって運動を規定することは難しい。先行研究において車輪と土との相互作用を車輪下に発生する土との反力について検討した研究<sup>1)</sup>、土壌変形に関しては有限要素法を使

用した研究<sup>2)</sup>が提案されているが、これらの先行研究は車輪走行時の動特性を対象としており、履帯における走行では挙動が異なると考えられる。一方で、数値シミュレーションとして個別要素法 (Discrete Element Method, 以下 DEM) を用いた土壌挙動のシミュレーションにおける課題として、土壌の形状変化を正確に模擬するには粒子径を小さくする必要があり、それによりシミュレーションの計算に多くの時間を要してしまう<sup>3)</sup>。また土壌を弾性体として内部で発生する力と変形を簡易的にモデル化する方法がある。これによりシミュレーションの高速化が可能になるが、多様な土壌を模擬するには限界がある。そこで本稿においては土壌の挙動を実測し、統計モデルの一種である Neural Network (以下 NN) を使ってモデル化することを検討した。NN は非線形性を考慮したモデル化が可能であり、車輪の走行において NN を用いた非線形モデリングに関する研究が報告されている<sup>1), 2)</sup>。本稿では、履帯走行において NN を用いた土壌モデル化を実施しシミュレーション結果と実測値を比較することで妥当性を検証した。2章では土壌から受ける力の NN モデルおよび作業における土壌形状の変化の NN モデルについて説明し、3章ではモデルパラメータの調整、4章ではモデルの妥当性検証について述べる。

### 2. モデル

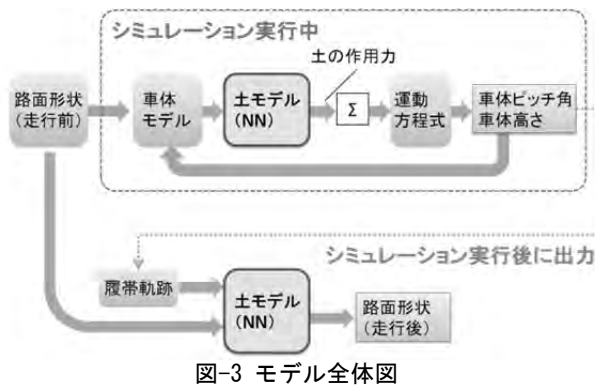
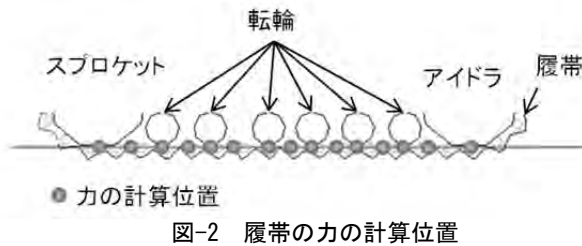
#### 2.1 シミュレーション概要

ブルドーザの車体挙動をシミュレーションで評価するにあたり、本稿ではまず図-1 に示すような二次元の車体運動および土壌を踏むことによる走行前後の路面形状変化を対象とした。



図-1 ブルドーザの車体挙動

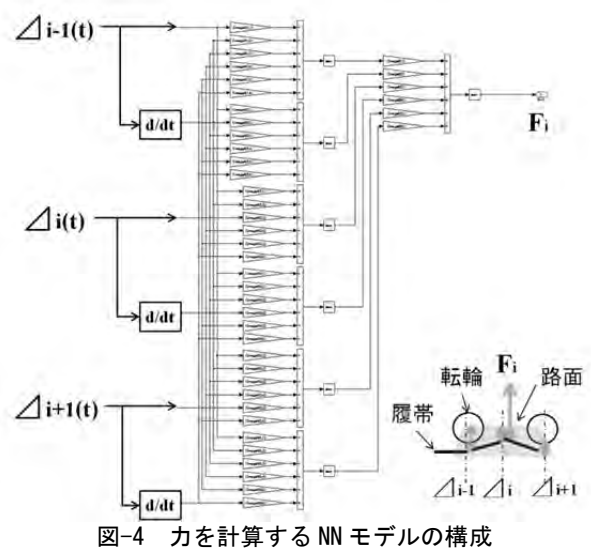
シミュレーションモデルでは車体の上下運動、ピッチ方向の回転運動を質点系の運動方程式で模擬した。車体運動の力の算出においては NN を用いた（以下、力の NN モデル）。さらに、車体挙動のシミュレーション結果から、走行前後の路面変化を NN によって再現した（以下、路面形状の NN モデル）。また、車体挙動のモデル化に関して、履帯にかかる力の計算は簡単化のため転輪と転輪の間を代表点として計算した（図-2）。以上のシミュレーションの全体図を図-3 に示す。



## 2.2 力の NN モデル

力の NN モデルは図-2 の力の計算位置にて発生する力を出力する。NN モデルの構造を図-4 に示す。入力変数は対象とする計算位置と隣り合った計算位置における履帯と路面の高さ差分  $\Delta$  とした（図-4 右下）。また、各路面高さの微分値も入力としたこれは運動の連続性を考慮するため、先行研究である NN を使用した車両挙動模擬の研究<sup>1)</sup>を踏襲した。NN モデルは3層構成としたが、これも NN を使用した先行研究<sup>4)</sup>では NN モデルは3層程度で構成されていたのを利用した。

NN モデルの入力値および出力値は0から1となるよう規格化した。6つの入力  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ) に重み係数  $w_{ij}$  をかけ、その合計がニューロンの入力  $y$  となる。重み係数は、その入力の寄与度を表しており、学習によって決まる値である。今回は6つの入力があり、最初の層 ( $j=1$ ) での計算は式(1)のとおりである。

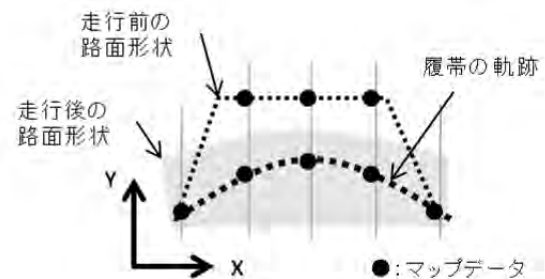


$$y = \sum_{i=1}^6 w_{i1} \cdot x_i \quad (1)$$

## 2.3 路面形状の NN モデル

車体挙動シミュレーション結果及び走行前の路面形状から、路面形状の NN モデルは走行後の路面形状を出力する。路面形状データは二次元マップ形式とした。走行前の路面形状マップとシミュレーション結果である走行後の履帯軌跡を入力変数とした（図-5）。路面形状マップは車体進行方向を X、鉛直上向きを Y とした。NN モデルはマップの各 X 点に対し、高さを算出し出力するとした。

NN モデルの構成を図-6 に示す。ここで計算位置  $X(i)$  における入力変数は、その地点での走行前路面高さ  $Y_{br}(i)$ 、車両の軌跡  $Y_{trac}(i)$ 、さらに隣り合った計算位置での車両軌跡  $Y_{trac}(i-1)$ 、 $Y_{trac}(i+1)$  とした。隣り合った計算位置を入れた理由は、履帯での走行では地形に階段のような不連続点が発生することはなく、地形の空間的な連続性を考慮したためである。路面形状を出力する NN モデルは以上4つのデータを入力とする3層のモデルとした。



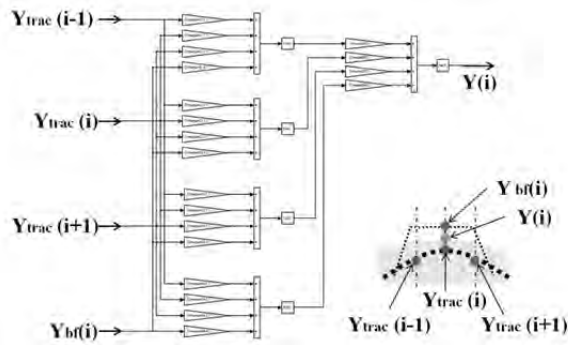


図-6 路面形状を出力する NN モデルの構成

### 3. モデルパラメータの調整

#### 3.1 計測

土台の形状変化が車体挙動に与える影響を解析するため、本研究では土台上を走行するときのブルドーザの車体ピッチ角と高さの時系列データを、土台の水準幅を変えて計測した。計測の概要を図-1に示す。両輪で十分乗り越えられる幅の土台を1つ作成し、その上を車体が時速1kmで走行し乗り越える。計測を容易にするため車速は時速1kmで一定とした。土台の高さは10cmとし、幅20cmの土台と幅40cmの2水準で計測した。車体挙動は、車体ピッチ角、高さを10ms間隔で計測した。

また、路面においては走行前と走行後の土台形状を、車体進行方向と鉛直上向きの二軸の路面形状マップとして計測した。図-7に路面形状マップ計測の方法について示す。路面形状マップは、車体の進行方向をX軸、車体の鉛直上向きをY軸にとった2軸で、履帯踏込み側の土台の端を原点とした。土台形状が変化する代表点の(X,Y)についてそれぞれメジャーを用いて計測した。1つの土台につき10点程度を計測し、その間は線形補完した。路面形状マップは1cm単位にて計測した。路面形状マップの単位精度は制御検証を行うシミュレーションの要求精度から決定した。

図-8に二種類の水準における計測結果を示す。上の図が走行前後の土台形状変化、下の図が車体挙動のデータである。このデータに対して幅を変えた土台を車体が乗り越える時のピッチ角と高さ変化を模擬する路面モデルをNNで作成し、妥当性を検証した。

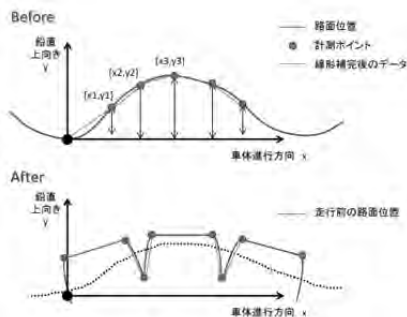


図-7 路面形状計測方法

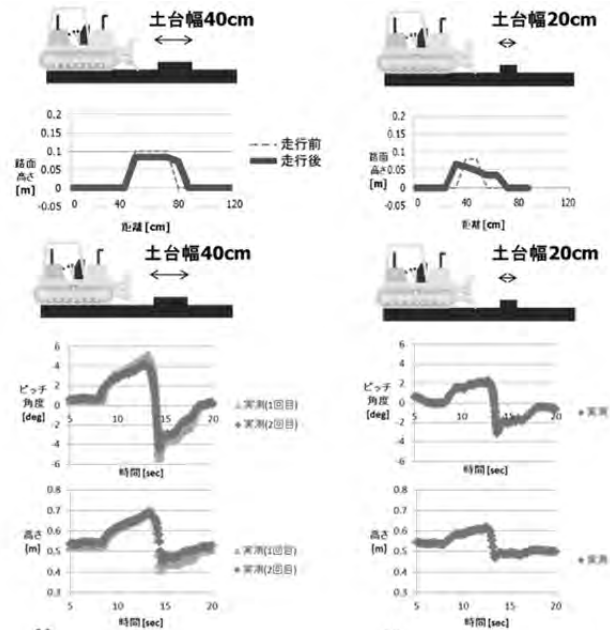


図-8 計測結果

#### 3.2 モデルパラメータ調整用データの取得

車体挙動を精度よく表現するためには路面が車両に及ぼす力を求める必要があるが、センサ等によってその力を取得するのは容易ではない。しかし本事例においては、車体が複雑な挙動を示していないためにバネマス系モデルを用いてシミュレーションを構築しそこから車両に及ぼす力を推測した。具体的にはバネ係数及びダンパ係数を調整することによって走行中の車両挙動を再現することで路面から受ける力を推定した。バネマス系モデルで再現しにくい事例では計算時間を要するがDEMを用いたシミュレーションにより今回と同様の手法で推測できると考えられる。

#### 3.3 モデルパラメータの調整方法

NNモデルにおけるパラメータ調整は、以下の学習則に基づいて行う。パラメータ調整は式(2)および式(3)で定義されている重み係数を $\delta$ 学習則によって決定する。本研究では $\delta$ 学習則の一つで一般的に使われるBackPropagation法<sup>6)</sup>を学習に用いた。BackPropagation法は出力側の差から入力側の重みを調整する方法で、式(2)から(5)を使用した。

$w_{ij}$  および  $v_{jk}$  は重み係数である。 $\alpha(x)$ 、 $\Delta$ は調整係数でありここでは固定値で0.001とした。 $f(x)$  はシグモイド関数である。

$$v_{jk}^{new} = v_{jk}^{old} - \frac{\Delta}{|X|} \sum_x \delta_{2k}(x) f(x) \quad (2)$$

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} - \frac{\Delta}{|X|} \sum_x \delta_{1j}(x) f(x) \quad (3)$$

$$\delta_{1j}(x) = \left\{ \sum_{k=1}^l \delta_{2k}(x) v_{jk} \right\} (1 - f^2(x)) \quad (4)$$

$$\delta_{2k}(x) = \alpha(x) [f(x) - d(x)] (1 - f^2(x)) \quad (5)$$

学習の処理の流れを図-9 に示す。学習する目標出力データ及び入力データは計測データ及びバネマス系モデルのシミュレーションデータとする。履帯が土台を乗り越え始めてから乗り越え終わるまで約 10 秒あるが、学習に使うデータは 0.5 秒間隔の 20 データとした。

BackPropagation 法による学習には局所解に陥りやすいデメリットがある。40 データの各データを時系列に学習する場合、その学習順によって重み係数が偏ったデータに調整されることで局所解になる可能性がある。従って今回は 40 の各データに対して評価関数を定義し(E), その合計を評価関数 E' として、E' が小さくなるよう  $w_{ij}$  を調整した。

以上の学習を 1,000 回繰り返す、最適な  $w_{ij}$  の値を求めた。

力の NN モデルの学習において使用した路面形状データは、土台幅 40cm の時系列データと 20cm の時系列データを直列に並べた 40 個 (ID) のデータを目指出力とした。路面形状の NN モデルの学習に使用した路面形状データは、土台幅 40cm のデータと土台幅 20cm のデータでそれぞれ 10 点のマップである。これを直列に並べた合計 20 個 (ID) の学習データとした。調整係数の  $\alpha(x)$ ,  $\Delta$  はそれぞれ固定値で 0.1 とし、学習回数は 50,000 回とした。

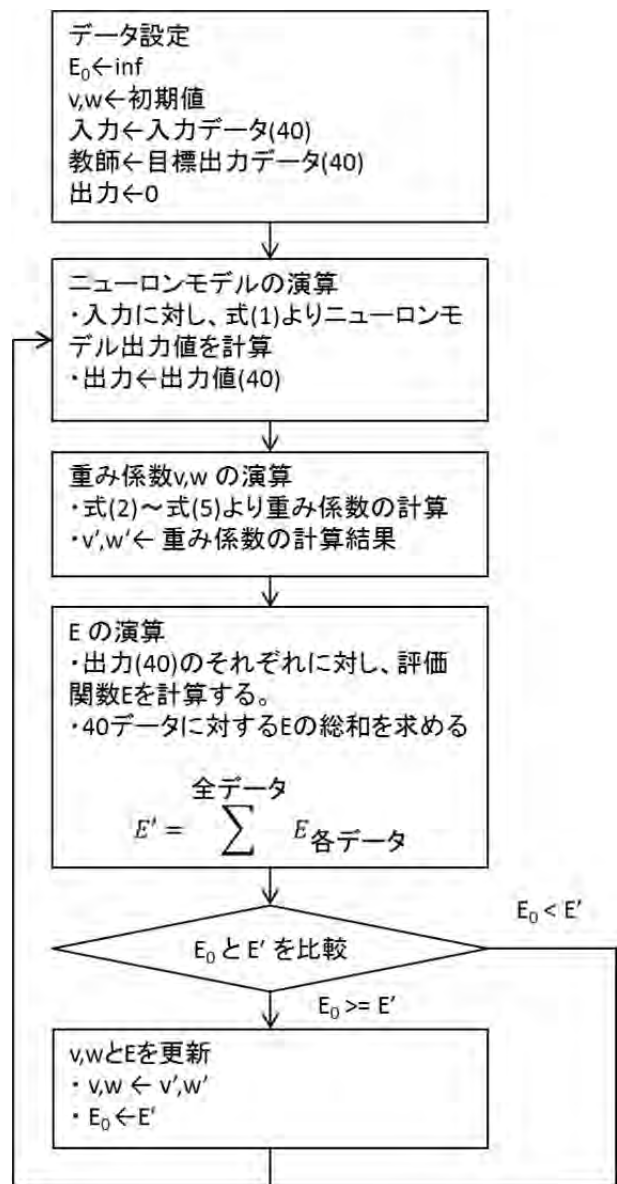


図-9 学習の処理フロー

#### 4. モデルの妥当性検証

NN モデルの妥当性検証の結果について述べる。図-10 に目標出力と NN モデルの出力を比較した結果を示す。上の図が力を出力する NN モデル、下の図が路面形状を出力する NN モデルの結果である。横軸はデータの通し番号 (ID) で、データは土台幅 40cm と土台幅 20cm の時系列データを直列につなげている。

図-10 から、全体的に NN モデルが教師信号のデータと同様の出力になっていることが分かる。しかし力の模擬において、ID8~10 付近と 33~35 付近において相違がみられる。これは先行研究<sup>1)</sup>にてデータが少ないことにより誤差が発生すると考えられており、ここでも同様の現象であると考えられる。

また、この NN モデルが車体運動のシミュレーションに適用可能であることを確認するために、

力の NN モデルと路面の NN モデルを図-3 に示したモデルに組み込み、実測と比較することで NN モデルの妥当性を検証した。車体運動モデルの出力値である車体ピッチ角と車体高さを土台幅 40cm と土台幅 20cm における実測と比較した結果を図-11 に示す。全体的に NN モデルを適用した車体運動モデルの出力値は実測データを再現できており、本研究で作成した NN モデルが車体運動のシミュレーションに適用可能であることを確認することができた。なお、教師信号として学習に利用したバネマスダンパモデルのデータを参考値として記載した。

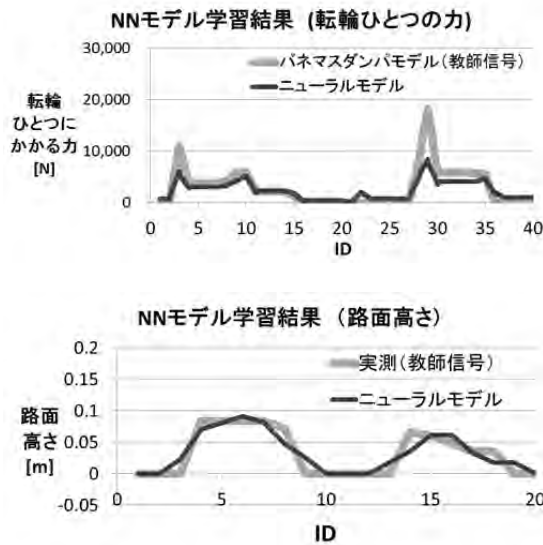


図-10 NN モデル出力の比較結果

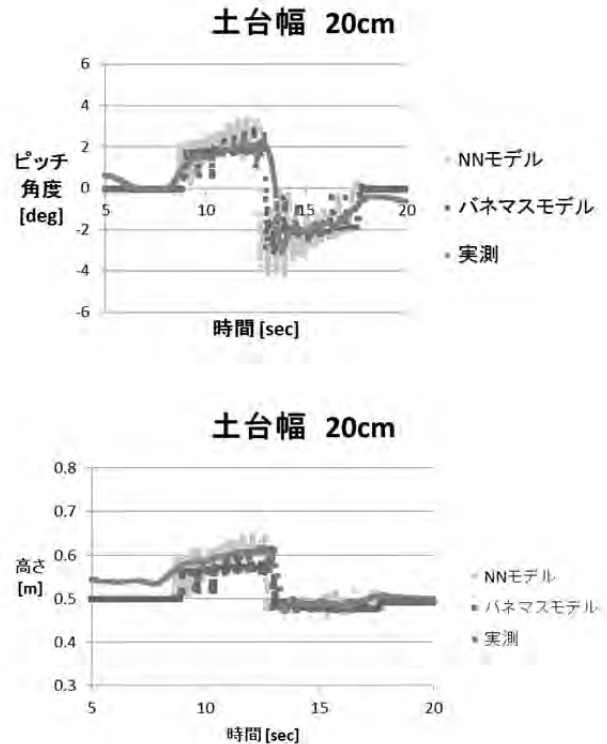
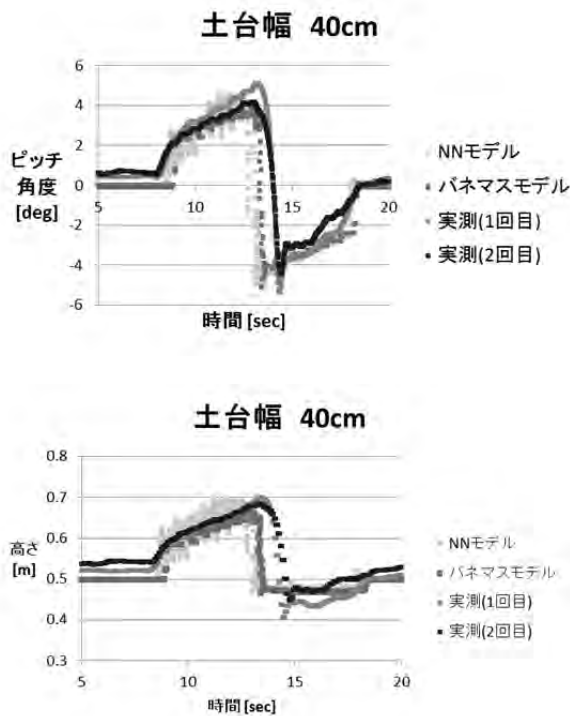


図-11 シミュレーション出力の比較結果

## 5. まとめ

ICT ブルドーザの制御開発のためのシミュレーション構築において、路面が車体に与える力および路面形状変化を模擬できる NN モデルを作成した。実測データを用いてモデルの妥当性を検証した結果、一部実測との誤差が見られたがおおむね実測値を再現できており、車体運動のシミュレーションが可能な精度のモデルであることを確認した。

今後の展開としては、今回提案した手法を他の土質および路面形状にも適用することで、様々な土壌状況下での制御検討が可能なシミュレーション環境を構築し、ばらつきの少ない制御の実現に取り組みたい。また、シミュレーションを活用することにより実機を用いるよりも短時間で制御検証を行えるため、制御開発の効率化にも貢献できると考えている。

## 参考文献

- 1) 王秀崙・田中孝・山崎稔：ラグ車輪と土との相互作用に関する研究(第3報)，農業機械学会誌，Vol.52，No.2，pp.11~18，1990
- 2) 広間達夫・太田義信・須山啓介：車輪下の土壌変形の有限要素法による解析(第2報)，農業機械学会誌，Vol.47，No.2，pp.201~209，1985
- 3) 中嶋洋・川瀬芳順・笈田昭：DEMの計算の高速化に関する検討，農業機械学会誌，Vol.66，No.Supplement，pp.291~292，2004
- 4) 野口伸・石井一暢・寺尾日出男：NNによる農用車両の

最適制御（第1報），農業機械学会誌，Vol.55，No.5，  
pp.83~92，1993

- 5) Wanrat ABDULLAKASIM et.al. : Neural Network Modeling and Sensitivity Analysis of the Bulk Density Response in Sandy Loam Soil under Vehicle-Induced Stress, Journal of JSAM Vol.67, No.2, pp.77~85, 2005

- 6) 上坂吉則：ニューロコンピューティングの数学的基礎，  
pp53~58, 1993