

森林の景観施業に関する基礎的研究

— コンピュータグラフィックスによる樹形生成モデル —

鈴木悌司*

Fundamental studies on forests landscape management

— A representation method for tree shapes

using computer graphics —

Teiji SUZUKI*

抄 録

本研究は、コンピュータグラフィックス技術を用いて樹木の成長や森林景観をリアルにしかも経時的、立体的に画像化するシステムを開発し、森林の景観施業および緑化計画の立案における視覚的評価にもとづく新しい計画手法に発展させることを考究した。針葉樹の樹形生成モデルについては、トドマツを事例にこれまでの報告例や実測値を補完データとして、樹形を支配する枝の数と角度、樹高および直径成長、枝寿命等の形状要素を時間（樹齢）の関数として樹形生成モデルを考察した。各種のパラメータを時間（樹齢）により変化させることにより、樹齢増加に伴う形状変化をはじめ、多様な樹形が表現できることを示した。

また、広葉樹の樹形表現としてはホオノキを対象樹種として、成長部位における光環境のシミュレーションモデルを考察し、受光量に応じた枝の伸長と枯死および直径成長など、光条件に対応した樹形生成のためのモデリングと単木形状の3次元表示を試みた。その結果、自然な枝振りをもつ広葉樹の樹形表示が可能なことを示した。

一定の広がりをもつ森林景観表示として、多様な個体の生成とそれらを集合表示させた人工林の景観表示、針広混交比率を変えた天然林の表示、さらに季節変化などの森林景観のシミュレーションが可能であることを示した。また、街路および建造物への樹木の配置による植栽景観のシミュレーションを試み、いずれも自然的な画像が表現可能なことを示した。

数値情報に加えコンピュータグラフィックス技術を用いることにより、樹種や成長にともなう景観変化等が画像上で時間的・空間的に予測することができ、視覚情報を必要とする森林の景観施業や緑化計画の立案や開発の手段を見いだすための大きな手がかりを得ることができた。

Abstract

The purpose of this paper is to develop growth models for tree shape indication using computer graphics, and develop tree planting plans and forest landscape planning on the basis of visual evaluation.

*北海道立林業試験場 Hokkaido Forest Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-01

[北海道林業試験場研究報告 第33号 平成8年3月, Bulletin of Hokkaido Forestry Research Institute, No. 33. March, 1996

We made a growth model that considered the branch number which ruled over tree shape on the bases of reported examples and field data. And our sample included Todo-fir (*Abies sachalinensis*) a conifer. Using branch angle and diameter growth as a function of time, we showed that we could express various tree shapes as an image by letting a parameter of every kind change. We also developed a growth model that considered light intensity using a basic Silver magnolia (*Magnolia obovata*): a broadleaf tree. This growth model of the broadleaf tree correspond with light condition, branch death, and diameter growth. We showed that a tree shape indication which had a natural shape was possible.

Considering both growth models expressed real tree shape well. The computer image could be formed which had a natural branch pattern, using this model.

目 次

緒 言	4
1 研究の背景と目的	4
2 研究小史	4
3 研究の方法	5
第1章 針葉樹型の樹形生成モデル	6
1 はじめに	6
2 研究方法と材料	6
3 樹形生成のための形状定義と成長モデル	7
1) 単木の形状定義	7
2) 樹高成長モデル	8
3) 1次枝の形状と成長モデル	9
(1) 輪生枝の発生数	9
(2) 発生角度	9
(3) 樹冠角度	9
(4) 初期伸長量	9
(5) 第2枝階以降の伸長量	9
(6) 成長停止年齢	10
(7) 着枝角度の変化	10
(8) 枯れ枝の着枝年数	10
4) 2次枝以下の各分枝階の形状と成長モデル	11
(1) 分枝角度	11
(2) 伸長量と発生率	11
(3) 成長停止年数と枯れ枝の着枝年数	12
5) 直径成長のシミュレーションモデル	12
4 単木形状の画像生成	12

1) 成長シミュレーション表示の手順	12
2) 樹冠形状の生成と評価	13
3) 樹冠疎密度の表現手法	14
4) 針葉樹の樹種表現	15
5) 単木形状の成長シミュレーション表示	15
第2章 広葉樹型の樹形生成モデル	17
1 はじめに	17
2 研究方法と材料	17
3 単木形状の生成モデル	18
1) 分枝モデル	18
2) 分枝の発生数と発生角度	19
3) 個葉形態と配置	19
4 受光量を考慮した成長モデルの開発	21
1) 受光量のシミュレーションモデル	21
2) 屈光性および光探索性	21
3) 受光量に対応した伸長量	22
4) 直径成長のシミュレーションモデル	23
5) 枝の枯上がりと消失モデル	24
5 単木形状の画像生成	25
1) 成長シミュレーション表示の手順	25
2) 生成樹形とその評価	26
3) 単木の成長シミュレーション	27
4) 競合成長シミュレーション	29
第3章 景観施業への展開	30
1 はじめに	30
2 森林景観の生成手法	30
1) 人工林の景観表示	30
2) 天然林の景観表示	32
3 施業計画の可視化	35
1) 間伐指針のシミュレーション	35
2) 施業体系の景観シミュレーション	36
4 緑景観計画への応用	36
1) 植栽景観のシミュレーション	37
2) 自然環境における建築景観シミュレーション	39
摘 要	39
文 献	41

緒 言

1 研究の背景と目的

コンピュータグラフィックスは、コンピュータを用いて図形や画像を生成する技術一般を意味する。基本的な技法としては、図形を数値データに変換してコンピュータに入力し、そのデータの一部を変換することにより物体の移動や視点位置の移動等原図を自由に変形させ、目的とする図形を描き出そうとするものである。コンピュータグラフィックスは、一度データを作成、入力することにより自由な視点からの表示とリアルタイムの画像生成が可能なことから機械設計、建築や都市計画におけるCAD (computer added design) システム、TV等の商業フィルムやアニメーションの製作等さまざまな分野で広く実用化されている。また、これまでのパース図や模型によるプレゼンテーションが内容の私意的誇張や臨場感に乏しい欠点があるのに比べ、コンピュータグラフィックスは、データに従った忠実な画像を生成できることから視覚的プレゼンテーション手法として有力な方法のひとつとされている。一方、近年、森林の施業計画において木材生産と環境保全が調和した施業技術の確立が求められており(和 1986)、特に景観に配慮した施業計画を立案する上で、数値情報の可視化と視覚的評価に基づく施業計画の重要性が増しているところである。とくに、コンピュータグラフィックスは視点位置や視点距離等3次元の視覚評価や経時的表現が必要とされる森林の景観施業、さらに樹木が重要な構成要素である自然景観や公園、街路の植栽計画等の緑化計画を立案する上でも有効な手段となろう。すなわち、これまで林分構造や樹木の情報は、立木位置、樹高、枝下高、胸高直径、樹冠直径等の数値情報によって示されていたが、コンピュータグラフィックス技術を用いることにより樹種や成長にともなう景観変化等が画像上で予測することができる。さらに、施業体系図や密度管理図と併用することにより新しい景観計画の策定手法として発展させることが可能と思われる。そこで、本研究はコンピュータグラフィックスを用いて樹木の成長や森林景観をリアルにしかも時間的・空間的に画像上で表現するシステムを開発し、視覚的評価に基づく新しい景観施業や緑環境計画へ発展させることを目的とするものである。

2 研究小史

これまで、森林構造の視覚的な把握方法としては樹冠投影図やベルトトランセクトによる側面図等、2次元の表示手法が一般的であった。これら2次元の表示手法は、個別の立木の樹冠部の位置関係を立体的に認識できないため、森林構造のシミュレーションに応用することが難しいとされてきた。森林構造を3次元的に解析した例は田中(1944)が針広混交林の樹冠部を解析した例がある。これはコードラート調査後の森林を皆伐し、全立木を樹幹解析し、このデータをもとに樹冠部のミニチュアを作成し、縮尺に合わせた位置に配置して写真撮影し、森林構造を観察するものであった。この方法の長所は森林の動態を把握できる点にあるが、対象となる森林が残らないこと、調査、解析に多大の労力を要する点が短所とされている(野堀 1990)。一定の広がりをもつ地域の森林構造をコンピュータグラフィックスを用いて3次元的に表示した例は少ない。Kojimaら(1972)、塩田・小島(1982)、塩田(1983)は森林景観における植生改変状況を表示する手法として、針葉樹、広葉樹等についてシンボル化したデータをあらかじめ作成準備しておき、実際の大きさと視点からの距離をもとに透視画面上での大きさを計算して描画する方法により、森林の現況および伐採状況について景観シミュレーション表示を行った。菱沼(1986)は、地形データをワイヤフレームにより3次元表示を行い、立体林相図を用いての地形解析や植生分布の解析手法を報告している。野堀(1990)は、基本的な森林構造を現地で実測し、伐採前後における森林構造の変化の3次元グラフィックスとその解析例を示し、コンピュータグラフィックスによる景観計画手法を報告している。しかしながら、これらにおける表示樹形はいずれも樹冠部をシンボ

ル化したものであり、樹冠の枝葉部まで表示されていないことから、遠景域のシミュレーション画像においては有効であるが、単木形状の表現を必要とする森林景観のシミュレーション画像としては十分なものはいえない。特に近景における景観シミュレーションにおいては樹種が特定できるレベルの樹形画像が必要となる（本條ほか 1992）。

コンピュータグラフィックスによる樹木の単木形状の3次元表示画像生成に関し、これまで多くのモデルが提案されている。Mandelbrot (1977) や Oppenheimer (1986) は、樹木の枝分かれにおける自己相似形に着目し、フラクタル理論を用いての樹形モデルを提案した。しかし、単純なアルゴリズムで、容易に樹木らしい形状生成を得ることができるが、実存の樹種の正確なモデル化は難しい。Lindenmayer (1968) や Aono・Kunii (1984) は、LシステムやAシステムと称する分枝モデルを提唱し、分枝パターンのモデル化を試みているが、実際の植物をモデル化するにはその定義づけが複雑になる。出原 (1974)、本多 (1978 a, 1981)、Smith (1984)、石井ら (1986) は、分枝パターンの関数モデル化による樹形生成モデルを提唱し、Prusinkiewicz ら (1988)、de Reffye (1988, 1990)、鈴木・大崎 (1991)、鈴木ら (1992 a)、大崎ら (1991, 1992) は種の特長としての遺伝的に定まる分枝や成長パターンを統計的に解析しモデル化する手法を提示した。これらのモデルの基本は、分枝角度や枝長や直径、あるいは枝の回転角度等のパラメータを変えることによってさまざまな樹種を表現する手法である。しかし、これらのモデルにより得られる樹形は、いずれも親枝からの分枝角度と枝の長さ等により決められることから、全体の樹形が単調な傾向にあること、さらに受光量のシミュレーション等がモデルに考慮されていないことから、隣接木の影響等競合成長のシミュレーションは行えない。自然な印象をもつ樹形を表現する手法として、成長過程での獲得形状のシミュレーション、すなわち成長シミュレーションのモデル化が重要であるとの立場から受光量不足による枝の枯死を考慮し、自然な枝密度を表現するための成長モデルが奥村・小川 (1986)、中島ら (1988)、安居院ら (1991) により報告されている。さらに、金丸ら (1987, 1991)、千葉 (1990)、Chiba ら (1993) はさまざまな樹種に共通する樹木らしき感じさせる樹形生成モデルとして、向日性や植物ホルモンを想定しての成長モデルを提唱した。このモデルは受光量や枝の回避等がモデル化されていることから成長過程の形状変化が追えるモデルであり、より自然的な枝振りをもつ樹形生成が可能となった。しかし、いずれのモデルも景観シミュレーションとして要求される近景で樹種が特定され、しかも樹木の形状が経年的に追える生成モデルとしては十分とはいえない。また、従来の景観シミュレーションにおける樹木は、ある時点での樹形表現が主であったが、景観シミュレーションは経年的な変化に対応した表現が非常に重要である。そこで、本研究は、景観シミュレーション技術における基本的な課題である自然的かつ写実的な樹形生成と森林景観のシミュレーション表示を目的に樹形生成モデルの開発をすすめた。

3 研究の方法

樹形生成のための成長モデルを開発するにあたり次の方法により研究をすすめた。幾何学的な樹冠形状を示す針葉樹と楕円形状の樹冠を持つ広葉樹では成長特性や形状が大きく異なることから、同次的にモデル開発を行うよりそれぞれの樹種特性に応じたモデル開発が効率的であると考え、本研究においては針葉樹に関しては形状データや成長モデルの豊富なトドマツを対象樹種とし、広葉樹については着葉数や枝数が少ないホオノキをそれぞれ対象樹種に、次の事項を考慮しつつ研究を進めた。針葉樹の樹形生成のための成長モデルとしては、針葉樹特有の枝の枯上がりや残枝等の樹冠形状と樹齢にともなう樹形の変化に関し、これまでの報告例や実測データを基に、樹高および直径成長、枝の数と角度等についての形状要素を時間（樹齢）の関数としてとらえ、樹形の成長モデルを考察した。また、多様な広葉樹型の樹形を生成するためには遺伝的な分枝パターンによる成長モデルに加え、成長過程での獲得形

状のシミュレーションが重要と考え、受光量のシミュレーションモデル、受光量に対応した成長モデル、受光量の不足による枝の枯損と消失、枝の探索性等を考慮した成長モデルについて検討した。特に、本研究においては、近景においても樹種表現が可能な樹形生成モデルが重要であることから、これまでの報告例や実測データをもとにしたモデルの原型を作成し、シミュレーションで得られた樹形に対し視覚的な評価をもとにモデルの改良を行う方法により研究をすすめた。

本研究を取りまとめるに当たり、終始懇切な御指導を賜った北海道大学農学部教授和孝雄博士をはじめ、論文の御校閲を賜った北海道大学農学部教授五十嵐恒夫博士、同教授浅川昭一郎博士に対して深甚な感謝を申し上げます。本研究の進行に際し平素から御指導御鞭撻を下された東京農業大学生物生産学部教授畠山末吉博士、新潟大学農学部助教授阿部信行博士に謹んで感謝の意を表します。また、本研究を進めるに際し、有益な御指導と御討論を頂いた岩手大学工学部教授千葉則茂博士、北海道立工業試験場山本寧科長、同大崎恵一研究職員には有益なご指導とご討論を頂いた。また本研究の遂行にあたり北海道立林業試験場主任研究員水井憲雄博士、佐藤孝弘研究主任ならびに関係職員の皆様には多大なご協力をいただいた。あわせて心から感謝申し上げます。

なお、本論文は「北海道大学学位審査論文」である。

第1章 針葉樹型の樹形生成モデル

1 はじめに

樹木の成長過程を経時的に図化する手法としては、従来から年輪が明瞭な針葉樹を対象に、樹高と幹の成長過程を年輪をもとに解析し、断面図として図示する樹幹解析法がある。しかし、これは樹形生成に必要な3次元の数値情報や枝葉部の形状データを有しないことから樹形を立体的に表現することはできない。樹木の成長過程を3次元的に表示した例としては菱沼(1992 a)、菱沼ほか(1992 b)の報告がある。これはトドマツの樹幹部の成長過程を樹幹形と年輪構成との関係から3次元表示したものである。樹幹形状の生成過程の3次元表示例としてこれまでにない有効な手法であるが、樹冠枝葉部の形状についてはモデル化されていない。一方、コンピュータグラフィックスによる針葉樹の3次元画像生成に関しては、これまでde Reffye(1988)や金丸ほか(1988)の報告例があるが、これらは針葉樹特有の樹齢にともなう枝の枯れ上がりや枝垂れ具合等の表示が十分ではなく、リアルに樹形表現できる成長モデルはほとんど見られない。そこで、本研究では北海道の代表的な針葉樹であるトドマツを対象樹種として、これまでの報告例や実測値をもとに景観シミュレーションのための樹形生成モデルを開発し、単木形状の3次元表示を行った。

2 研究方法と材料

針葉樹は、広葉樹と比較して幹と枝の区別が明瞭であること、樹冠は円錐形を呈し、幹および枝に枯枝の残存が目だつ等の外観的な特徴を有する。これらの形状は幹および枝の成長様式、葉序に規定される枝の出方や分枝パターン、さらには枝の疎密、枝や幹の太さ等種に特有の遺伝的形態に加え、個々の樹木の成長過程において形成される後天的な形状等から形成されたものといえる。したがって、コンピュータグラフィックスにより自然的な樹木の形状を表現するためには、樹形の基本となるこうした幹や枝等の骨格形状の定義と、幹や枝の発生様式、さらに樹高、直径、樹冠成長等時間(樹齢)にともなう樹冠形状の変化等の表現が可能な数式モデルを構築する必要がある。特に、針葉樹の樹形生成モデルにおいては、針葉樹特有の樹冠形状と樹齢にともなう樹形表示が可能な成長モデルが必要である。そこで、針葉樹の樹形生成モデルの作成にあたり次の事項について考慮しながらモデルの検討をすすめた。

- (1) リアルな樹形表示のための幹や枝等の形状解析

- (2) 樹冠形状を支配する幹や枝等の形状要素とパラメータの探索
- (3) 樹冠枝部の疎密感等樹勢の表現
- (4) 針葉樹特有の枝の枯上がりや残枝の表現
- (5) 樹齢にともなう形状変化の表現

こうした樹形生成のための成長モデルとパラメータについては、道有林岩見沢経営区76林班にあるトドマツ41年生林分内から得られた優勢木、平均木、劣勢木の伐倒供試木3本を対象に1次枝、および2次枝以下の諸形状の測定結果をもとに推定した。幹

および枝の形状解析として、発生に関しては発生位置と発生割合・発生方向、成長に関しては伸長量と直径成長量、形状変化については枝垂れや枯上がり、枝の消失等である。供試木一覧表を表-1に示した。

表-1 トドマツ樹幹解析木一覧表

資料	優占度	樹高	胸高直径	枝下高	樹冠直径
No.1	優勢木	21.7m	36.0cm	6.0m	8.0cm
No.2	標準木	18.1	21.1	8.8	5.2
No.3	劣勢木	14.4	13.0	9.7	3.3

3 樹形生成のための形状定義と成長モデル

コンピュータグラフィックスによる樹木を中心とした景観シミュレーションでは立体感のある樹木の表示が要求される。コンピュータグラフィックスによる樹形表示手法としては、手続的定義法により樹形を生成する方法が有効である(金丸ほか 1988)。この方法は、枝の発生する位置と数および方向等の骨格形状をあらかじめ3次元的に定義し、その伸長量と直径成長量、枝垂れや枝の枯上がり等を計算で求めてゆく方法である。またこの方法は視点位置を自由に設定できる利点があり、さらに形状生成の過程に時間的要素を組み込むことにより経時的な形状変化、つまり樹木の成長過程のシミュレーション表示が可能である。枝や幹の長さや太さ、枝垂れ、枯れ枝の残存等は樹木が成長していく過程で形成される成長の履歴であり、こうした定義方法により成長過程のシミュレーションが可能となる。

1) 単木の形状定義

そこで、本論文では手続的定義法による樹形生成(以下成長モデルとする)を前提に、トドマツ単木の形状定義を検討した。トドマツの樹形を模式的にみると、図-1に示すように幹(主軸)と幹から発生する輪生状の枝(輪生枝)から構成される。幹は単軸分枝型の成長様式を示し、枝は幹の成長とあわせて成長し、同時に側方へ枝を発生させる。当年に発生した輪生枝を第1枝階、その時の枝を1年生枝(当年生枝)、前年に発生した輪生枝を2年生枝、以下、順次樹齢に対応した枝階と枝齢が定義づけられる。さらに、枝は図-1に示すように幹から発生する1次枝、1次枝から発生する2次枝、以下3次枝、4次枝等の分枝階から構成される。全体の単木形状は、基本的にはこうした幹と枝の成長と分枝の繰り返しおよび樹齢や枝齢の増加にともなう枝の枯れ上がりや残枝により、針葉樹特有の樹冠形状が形成されていく。

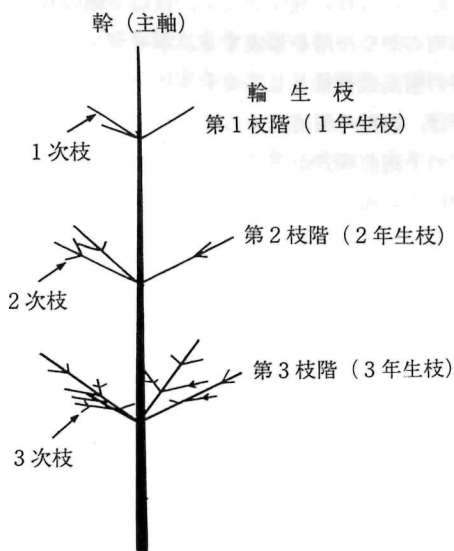


図-1 樹幹形状の模式図

こうした単木形状を表現するために、樹形を支配する幹の成長および枝の発生と消長、さらには樹齢

表-2 トドマツの形状と成長に関するパラメータ

	形状要素	パラメータ
幹	樹高成長 幹の直径	地位指数、樹齢 樹高、地上高、産地、樹冠級
	1 発生数 分枝角度	産地、輪生枝係数 樹齢、発生年次、初期分枝角度、 最終分枝角度、個体の寿命、枝齢、 年枝垂れ角
次 枝	発生方向 伸長量	発生数、枝序、発生年次、変動範囲 樹冠角度、初期分枝角度、枝齢、伸長量係数、 樹齢、初期樹冠角度、樹冠角度係数
	直径 反重力性	枝先からの長さ、相対成長係数 枝齢、上方向への変動量
2 次 枝 以 下	発生数 分枝角度	親枝の伸長量 遺伝成分、枝齢
	伸長量 直径 枝の乱雑さ 最小親枝長	親枝の伸長量、相対成長係数 枝先からの長さ、相対成長係数 2次枝の変動量 成長可能な親枝の最小長さ
形状 変化	成長停止年数 枝の寿命	1次枝の寿命 上位の枝の成長停止年数、活性度
	枯れ枝消失率 1次枝の消失	成長停止後の経過年数、着枝年数 成長停止後の経過数

増加にともなう樹冠の形状変化の表現が可能な成長モデルを検討した。すなわち、枝の発生に関しては発生位置と発生割合・発生方向、成長に関しては伸長量と直径成長量、形状変化については枝垂れや枝の枯上がり、枝の消失等である。なお成長モデルは、まず樹形に関与すると考えられる形状因子を、これまでの報告例や表-1に示した供試木の実測データをもとに推定してモデルの原形変化を作成した。次いで、シミュレーションで得られた樹形に対して視覚的な評価をもとにモデルの改良を行うとともに、さまざまな形状因子の組み合わせから樹形生成のためのパラメータを抽出し、モデル化を行った。これらのパラメータを形状要素別にまとめ表-2に示した。樹形生成のための成長モデルは次のように決めた。

2) 樹高成長モデル

コンピュータグラフィックスにより樹木の樹高成長シミュレーションを行うためには、生育条件や樹齢に対応した主軸の伸長量をあらかじめ時間（樹齢）の関数としてとらえ定義する必要がある。トドマツ、エゾマツ等の

針葉樹においては、春に梢端部から新梢（主軸）を伸ばし、春から夏にかけての短期間に伸長を停止させ、その年の樹高成長を終了する。また、伸長した主軸上には枝の発生がなく、枝は主軸の基部にまわって輪生状に発生するため、図-1に示したように明らかな枝階を形成する。本モデルにおいては1年間の主軸の伸長量を時間の関数（樹齢）とし、連年の樹高成長量としてモデル化を行った。一般に、樹高成長は、地形、土壌、気象等の立地条件の影響を受け、樹種や環境によってそれぞれ大きく異なっている。そのため、樹種と立地条件に対応した樹高成長の予測曲線式が多くの樹種を対象に報告されている。トドマツの樹高成長予測については、真辺（1982）や阿部（1989）がすでに報告している。阿部（1989）は、各種のトドマツ人工林の樹幹解析木から得られた樹高成長に、リチャード式、ゴンベルツ式、ミッチャリッヒ式を適合させ、その適合誤差について報告している。それによると、平均誤差率はリチャード式で4.8%、ゴンベルツ式で5.8%であるのに対し、ミッチャリッヒ式は解が発散する場合もあり、適合がよくなかった。したがって、本モデルにおいては連年の樹高成長に次に示すリチャード式による地位指数曲線式（阿部 1989）を採用した。

$$h_t = A(1 - e^{-kt})^{1/1-m} \quad (1)$$

ただし、 A は最大到達樹高、 k は成長速度を示すパラメータ、 e は自然対数の底、 t は樹齢、 m は成長の型を示すパラメータである。すなわち、樹齢 t 年における第1枝階の主軸（幹）の連年成長量（ Δh_t ）は、トドマツ地位指数曲線式から求められる当年の樹高（ h_t ）と前年の樹高（ h_{t-1} ）との差として定義した。

