

# 日本林業の蘇りを目指した新たな技術開発

## — 日本林業の特異性を克服する伐倒マニピュレータの提案 —

白井 裕子

最初に日本林業の特異性について解説することで、日本林業の課題を示す。そこから目標に「日本林業の蘇生」をあげ、目標を達成するためのシナリオを示し、そこで、どのような研究が求められているか解説する。この中で、我々が取り組んでいる技術開発の位置付けと役割を述べる。また具体的な技術開発の実施例として、立木を伐り倒すマニピュレータTATSUMIの詳細と実証実験結果について報告する。TATSUMIは、作業者一人で持ち運べるよう小型軽量で、現場に普及しているエンジンチェーンソーを着脱して使い、立木を伐り倒す機械である。そして、さらに日本の山林を相手にする機械開発に対して、新たな設計手法を見出したことについても述べる。

**キーワード:** 日本林業、設計手法、マニピュレータ、立木の伐倒作業、モビリティ

## A revolutionary technical development to revitalize Japanese forestry

### —A proposal for a portable tree felling manipulator to address specific properties of Japanese forestry—

Yuko SHIRAI

First, we present issues in Japanese forestry based on an explanation of the specific properties of Japanese forestry. Then, taking the revitalization of Japanese forestry as a goal, we present a scenario for the achievement of that goal and comment on the type of research that is needed for it. This includes descriptions of the positioning and role of the technical development currently undertaken by the authors. As a concrete example of machine development, we report on the details of a manipulator for cutting down trees, "TATSUMI", and the results of verification tests. The TATSUMI manipulator is a machine that is compact and lightweight enough to be carried by a single worker. This machine cuts down trees using mountable/dismountable chainsaws that are commonly available at forestry sites. We also discuss new design methods for machine development that were identified as suitable for the mountain forests of Japan.

**Keywords:** Japanese forestry, design methods, manipulator, tree felling operation, mobility

### 1 はじめに

我々は、山林内の立木を伐り倒す2種類のマニピュレータと山林内の不整地を走破するモビリティを開発している。このほか森林情報を計測、可視化するシステム<sup>[1]</sup>や地形条件等から山林内の林業用の路網を自動生成するシステム<sup>[2]</sup>を手がけている。

この論文では、最初に日本林業の特異性について解説する。そこから研究全体の目標として日本林業の蘇生をあげ、目標達成へのシナリオを示し、ここに求められる研究課題を設定する。この中で我々は林業の安全性と生産性の問題に対して、新たな機械を提案し開発している。この論文では、この実施例として、山林内の立木を伐り倒す「伐倒ポータブルマニピュレータ TATSUMI」を取り上げて報告する。

山林内の作業環境も作業対象となる立木も、二つと同じ

ものがなく、そしてその環境差、個体差も大きい。立木を伐り倒す作業方法自体も経験則により数値的根拠も得られていない。日本の山林を相手にする機械開発に対しては、これまでのVモデルやアジャイルといった設計手法で対応するのは困難である。そこで新たな設計開発手法を見出した。この設計手法についても報告する。

### 2 日本の林業の特異性

日本林業の特異性について解説する(図1)。まず欧米と比した時に、日本林業を難しくしている理由に、我が国の自然環境がある。ヨーロッパで林業は「森」で行われ、日本で林業は「山」で行われている。これが根本的な違いである。次から研究課題を導き出すため、日本林業の特異性を一つずつあげて解説する。

## 2.1 資源の種類と量、そして位置

国土の67%が森林で、面積(2,500万ha)、蓄積(49億m<sup>3</sup>)の絶対量も多い。特筆すべきは、我が国は、単位面積あたりの蓄積量が大きいことである<sup>[3]</sup>。さらにその蓄積量が増え続けている。また量を増やしているのは、人が植えた人工林である。1年間に木が成長する量を成長量といい、この7割を伐って良いとされ、スウェーデン、フィンランド、オーストリアは、毎年、成長量の約7割を収穫している<sup>[4][5]</sup>。しかし我が国では成長量の約2割しか収穫していない<sup>[5][6]</sup>。林業のみならず、自然環境の保全のためにも、我が国では森林資源を利用すべきである。

またこれらの数値は推計値であり、この増え続ける莫大な資源について、どこに、どのようなものが、どれだけあるかは、正確には把握されていない。そして、その資源には、所有者や所有境界が不明なものがある。これも日本林業を難しくしている点である。

この資源の計測は、主に国家資源を把握する目的と、林

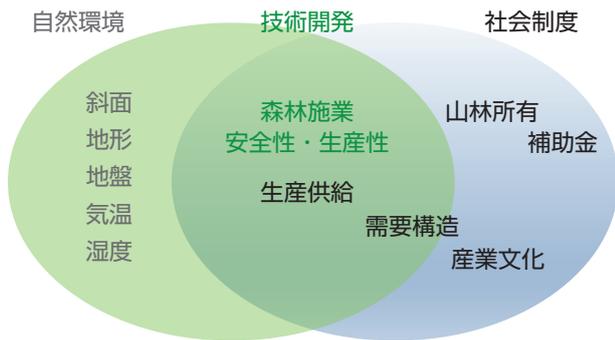


図1 日本林業の特異性

業を目的に行われる。そしてその計測のほとんどが手作業である点もあげる。

## 2.2 山林所有

森林の所有権をどう扱うか、欧州と日本では対照的である。日本の行政は、個人の財産としての権利を守る方向に動くが、ヨーロッパでは、所有する権利に対して、責任を問う方向に制度が設計されている。またドイツ等の森林法では、森林に立ち入る権利は万人に保障されている<sup>[7]</sup>。著者のドイツ調査では、他人が所有林に入ることの、所有者の負担を推計しており、行政の担当官は、所有者が犠牲を払って、公共に尽くしてくれるから、補助金を与えると回答している。一方、日本では山の手入れをするため、その山林所有者を捜し出すことに、行政が時間と費用を費やしている。

## 2.3 補助金

林道、造林に対する行政投資額、つまり補助金は2,962億円/年で、木材生産額2,143億円/年を超えている<sup>[8][9]</sup>(図2)。なお林業産出額のうち、きのこの生産額は2,037億円/年で、木材生産額と同等である<sup>[9]</sup>。

現在の日本林業は、その時々補助金を得るために、行政の指示通りに作業を行っている組合、事業者が多く、そして補助金自体もその時の時勢によっているだけで、そこに何らかのルールも見出せない。本来イノベーションが生まれるのは現場である。しかし現行の制度は、現場が試行錯誤し、創意工夫できる環境を用意していない。

## 2.4 森林施業の安全性・生産性

### 2.4.1 労働災害

林業の死傷事故は1970年代には、1年に16,000件を

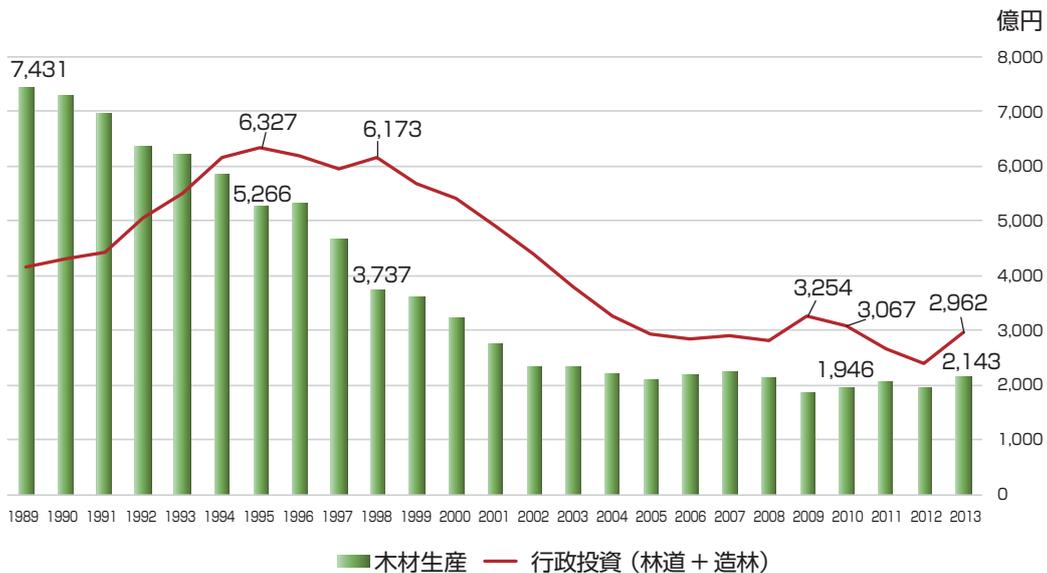


図2 木材生産額と行政投資額<sup>[8][9]</sup>

超え、死亡者は250人近くにもものぼっていた<sup>[10]</sup>。林業の労働災害の発生率を災害の発生度合いを表す「千人率」で他産業と比べると、現在でも、全産業の中で最も高く、全産業平均2.1に対して、林業は27.7と突出している(2011)<sup>[11]</sup>。図3に林業の労働災害を示す。死傷事故は2011年まで2000件を切らず、近年では2010年に59人の死者を出している<sup>[10]</sup>。木材収穫の生産性も低い、その前に安全性に問題がある。

我々が開発している伐倒マニピュレータは、立木を伐り倒す作業を対象にしている。伐倒作業は、林業において最も危険な作業で、労働災害の半数が伐木作業中に発生している。

作業者が高速回転(7,000～10,000 rpm)する刃物を取り付けたチェーンソーを握り、高さ15、6 m、重量数百キログラムある立木の真下で伐り倒す。また人間による伐倒は、その作業精度が低く、安定しない。このため高速回転する刃物や思わぬ時に思わぬ方向へ倒れる立木に接触することで、致命的な労働災害が発生する。

### 2.4.2 林業機械

林業機械には、チェーンソー等の在来型林業機械に対して、大型の高性能林業機械<sup>用語1</sup>がある。また切った木を車両に積んで集める(車両系)か、また空中にワイヤーを張って、そこに吊して集める(架線系)かの違いがある。主に車両系の高性能林業機械は欧米で開発され、その多くは複数の機能を有する大型林業機械である。我が国では車両系建設機械をベースに、海外で開発、製造、そして輸入、または模倣して我が国で造られたアタッチメントが取り付けられている。またベースごと輸入する場合もある。

高性能林業機械は1988年の23台から2014年には7,089台に急増している<sup>[12]</sup>。補助金はこの大型の林業機械に対しても支払われており、補助率は2分の1である。しかしこの急増にともない、生産量が増えたり、死傷事故が減ったりはしていない。欧米で林業は、なだらかな丘陵地で行われ、高性能林業機械は、そこで使用されている機械である。日本でその効率と性能を十分に発揮することは難しい。

日本の山林は、欧米に比べて斜面が急で、地形が複雑、そして地盤も軟弱、さらに高温多湿で、欧米ほど路網の整備とその維持管理は容易ではない。また山林内の路網密度も19.5 m/ha(2013)<sup>[13]</sup>と低い。立木を伐倒する大型の林業機械には、ハーベスタ並びにフェラーバンチャがある。これら大型林業機械は、一般道は走行できず、一般道が林業用路網につながる地点まで、トレーラ等で運搬する。そこから、これらの大型の林業機械が進入できるのは、林内に走行可能な道が整備されたエリアのみである。また作業範囲は、そこからブーム、アームの届く範囲に限られる。

図4に静岡県傾斜分布図を示す。静岡県の森林率は64%で、海岸沿いに広がる市街地以外は森林が占める。この図からも林業が急傾斜地で行われているのが分かる。大型の林業機械が走行する道を、急傾斜地に整備すること自体危険である。そこを走行し、作業するのは、言うまでもない。

現在でも、日本の伐倒作業の多くは、チェーンソーで行われている。日本の山林ほど、条件は厳しくはないが、ヨーロッパで比較的急傾斜と言われるオーストリアでも、伐倒作業の89%がチェーンソーであると、著者の現地調査でオーストリア農科大学の研究者が回答している。日本林業

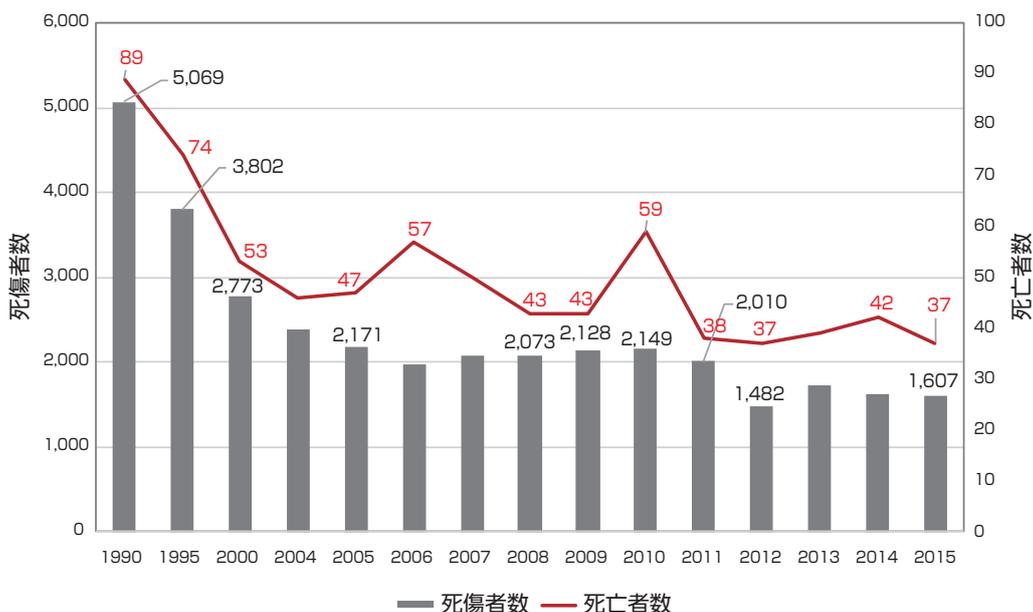


図3 林業の労働災害<sup>[10]</sup>

では、チェーンソーや本提案機のように、人が持ち運べる「可搬式機械」と、ワイヤーを張ってそこに木を吊して集める架線系の林業機械は、今後も使われ続け、これらの改良、開発も必要である。もしこれらの機械がなくなると、日本では木材を収穫できない地域が出てくる。

## 2.5 生産供給と需要構造

日本林業の特異性として、需要先と量、そして価格が未定のまま、生産し、供給している点をあげる。誰がどれだけ、いくらで買うか分からないまま、補助金による誘導で、全国各地から一斉に同じような木材が出されれば、材価は下落する。国産材の価格は下がり続け、輸入材よりも安くなった<sup>[14][15]</sup>。

## 2.6 産業文化

チップ、パルプは、もともと主に広葉樹が原料で、さらにチップ、パルプは取引金額も低く、チップ、パルプだけを生産していても、山林に再生産費を還すことができない。

我が国のスギ、ヒノキは、建築用材として収穫するために、植林されている。しかし国内生産量も落ち込み、そのうち製材用は現在1960年代の35%（2013年）になった<sup>[15]</sup>。また木造建築を集成材や合板ではなく、木そのものの性質を活かす無垢材で建築しようとする、その入手に困る。海外の木材製品として入ってくる木の方が、流通が整備されている。

特に我が国の伝統木造建築が必要とする木材は、その価格も高く、単位面積あたりの木材使用量も多い。しかし伝統的な木造建築は住宅レベルでも、現在の法制度上、建築の手続きに時間も費用もかかり、建築困難になっている。

我が国の歴史は、木の文化を誇っていた。しかし木を木として扱う産業、文化が衰退している。日本林業の健全性

に寄与する、これら木材の付加価値を高める産業と文化も損なわれつつある。

## 3 目標とシナリオ

現在の人工林の多くは、戦後の拡大造林時に植林されたもので、これが伐期を迎えている。拡大造林前に自然林であった地域は、戦後、国家の指示通りに、植林、保育を行ってきただけである。このため林業の経験は乏しい。しかし一方で、日本には中世から林業を行っていた歴史を持つ林業地もある<sup>[16]</sup>。前述した日本林業の特異性に対して、機械の輸入または模倣、また海外の制度による外発的発展は長続きしない。日本の自然、産業文化や歴史、地域社会に立脚した日本林業の蘇生を目指すべきである。ここで、目標として日本林業の産業としての蘇生をあげ、目標を達成するための要素、そしてそのシナリオを描く。

目標達成に向けて研究が求められる要素として、技術課題以外には、まず山林の所有者や所有境界が確定できない問題、また所有権の強さゆえに効率的な林業の展開が行いにくい問題、そして補助金制度、生産供給と需要構造等の問題がある。

まずイノベーションは現場で起こる。現場の創意工夫、そして意志決定や責任を担う能力を奪い、産業の自立性や持続性を損なってはならない。補助金制度により、民間企業や現場作業者の主体性を損なうのは、本来の目的と反する。補助金は現場を行政の思い通りに動かすツールではなく、補助した事業や産業が、行政の手を離れて、離陸していくように設計すべきである。

また林業の特徴として、森林の公益的機能が、市場経

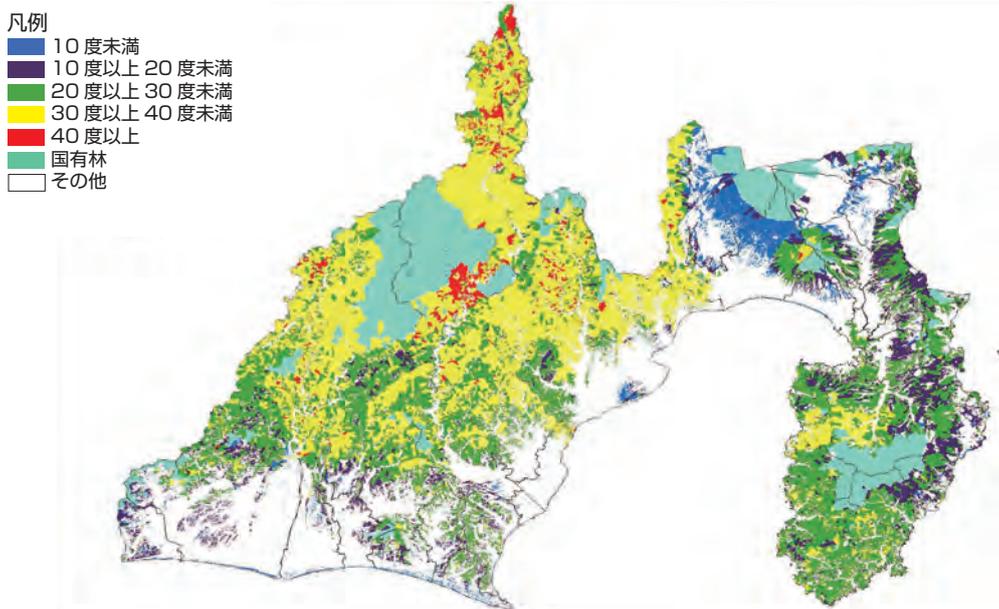


図4 静岡県の傾斜分布図（静岡県庁提供資料）

済を通さない外部効果に關与する点をあげる。欧州において、この森林の公益的機能、役割の維持保全を山林所有者が「所有するという権利」に対する「責任」として捉える傾向がある。しかし我が国は、むしろその逆で、森林の公益的な役割を理由に、それが私有林であっても、公的な資金や制度により保護する傾向が強い。

税金である補助金を用い、人に何かをさせる制度を、どう設計するかではなく、誰しも自分が主体者たる現場で本来の役割を果たすことが大事である。行政ならば、行政にしかできない、まずは、森林の公私の役割を、どのように社会制度に作り込むか、それにより林業の産業としての自立性や持続性を回復し、高めるための制度をどう作っていくのか、期待されている。

さらに生産供給と需要構造について言えば、本来の植林の目的に立ち返り、まず山に再生産費を還せる付加価値の高い木材の加工、流通を現代に再興する必要がある。木を木として扱う産業、文化の再興である。こういった我々人がつくった人為的な社会の仕組みを見直し、そこで厳しい自然環境下において、まず安全性、そして生産性確保を目指した技術開発が生きてくる。技術開発だけでは、日本林業の蘇生には限りがある。

### 3.1 本技術開発の位置付けと役割

技術開発も、海外のイノベーションに頼るのではなく、日本林業の特異性から着意すべきである。また「日本の山林を相手にするには<日本的な>発想で技術開発」をする必要がある。そこで我々は、高性能林業機械でも、在来型林業機械でもなく、両者の中庸を得た技術開発を提案している。

森林施業は、地拵え<sup>用語<sup>2</sup></sup>に始まり、植林、下刈、枝打ち、そして除伐、間伐等を経て、最終的な収穫作業を行う。この収穫においては、立木を1本、1本調べる毎木調査<sup>用語<sup>3</sup></sup>

に始まり、立木を伐り倒す作業、枝を払い、丸太にする造材作業、土場まで集める集材作業があり、そこから市場まで運ぶ作業がある。この運材を一般道に出てトラックが行う以外は、何らかの技術開発をする必要がある。著者の調査から、安全性なら立木を伐り倒す作業、生産性なら集材作業、労働強度なら下刈作業に関する技術開発を行う必要があることが分かった<sup>[17]</sup>。技術開発のシナリオにおいては、まず林業に従事することで、人が死に、傷を負うことを減らし、なくすことが最重要である。まず個々の作業から労働災害の原因を取り除く。そして次に生産性の向上を目指す。これには各作業の高度化、そして個々の作業を滞ることなくつなぎ、作業全体の効率をあげるシステム全体の開発が求められる。山土場や原木市場で、木材が滞ることなく、山林から消費者までをつなぐ生産流通体制を構築する必要もある。そしてこれからは需要から供給、生産、山づくりを考える必要があるだろう。図5に、目標とシナリオにおける要素を抽出し、そこに本開発の位置付けを示した。

### 3.2 本機械開発着手に至るまでの調査

著者はまず山林の伐採現場から、森林組合、原木や製品市場、製材所等、現場へ赴き、ニーズとシーズを照合する調査をはじめた。その後、農林水産省の融合新領域研究戦略的アセス調査（2006年度）に応募、採択された。この事業において、問題を整理し、技術ニーズを抽出し、開発に向けた目的と課題設定を行った。これらの知見は、日本ロボット学会で解説論文<sup>[17][18]</sup>として発表した。また森林から木材、木造建築に至るまで、それまでの研究から得られた知見を一般社会に対して、一般書として報告した<sup>[19]</sup>。その後も国内外の現場で調査を続け2011年に農林水産省事業に採択され、実際の機械開発に着手した。

### 3.3 先例のない開発に着手するために採ったアプローチ

立木を伐倒する技術として、防振対策に特化したチェー

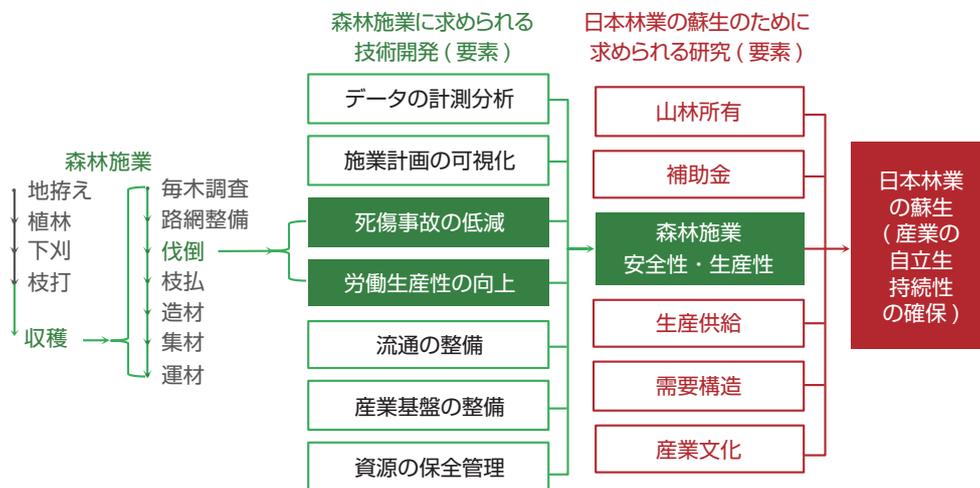


図5 目標とシナリオにおける技術開発の位置づけ

センサーの自動化が試みられたことがある<sup>[20]</sup>。しかし実用化に至らず、1970年代以降、行われていない。既往研究をもとに、開発を始めることができなかった。また設計にあたり、考慮しなければならない与条件が多過ぎる。そこでシミュレーション等で設計指標となる代表値を収集することから始めるのではなく、最初から簡単な機械装置を作り、現場で実作業することから始めた。なぜ現場から始めたのか。それは数値や言葉に示せ、それを基準に判断できることが限られているからである。ある指標で事象を代表させると、その数値に漏れる事象が無視される。機械開発にあたり、林業技術者同様に、現場での経験と勘を培う必要があると考えている。逆に生き物としての総合的な感覚、判断が必要とされない作業ならば、これだけの労働災害は発生せず、すでに作業を代替する機械が開発されていたと思う。

### 3.4 一つの解ではなく、最適解を導く

立木は、作業者がその立木の直径から目安をつけて、立木に入れる切り目の寸法を決める。この寸法も経験則であり数値的根拠はない。また山林内の作業環境は、土壌や林床にある枝葉、切り株、そして周囲の木との位置関係等、二つと同じ条件はなく、それぞれの違いも大きい。また作業対象である立木は、杉の含水率を例にしても、50～250%と個体差が大きく、一つの個体でも、切り込みを入れる部位により木理の通り方も異なる。そこで作業環境と作業対象を一つのモデルに収束させるシミュレーションでは、一つの解は得られるが、それが多くの作業環境、作業対象に対応可能であるかは、分からない。そこで一つの解ではなく、最適解を求める必要があると考えた。それには必要最少の動きを実現するプロトタイプを作り、実際の現場で実作業を行い、この結果から、次の開発へと、このプロセスを繰り返して最適解のモデルに近付けるように、設計開発を進めた。この結果、下記の新たな設計論に至った。

## 4 新たな設計論の構築

### 4.1 日本の山林を相手にする機械の設計論

機械開発に着手する前段で、新たな設計開発手法を見出し、この方法を採用したことで開発着手から2年で、製作した機械装置で作業を実証することに成功した。日本林業の現場へ行き、そこで調査し、現場で本当に使える機械を考えた末に、必然的に至った設計論である。

設計論としては、Vモデル<sup>[21]</sup>等がある(図6)。しかし日本の山林を相手にする機械の開発、特に実用化を前提にしている場合には、機械でも特にロボットと言われてイメージされる機械の設計手法を用いて、現場に通用するものを

開発するのは困難である。何でもできそうな機械は、結果的に何の役にも立たないことがある。

Vモデルを例にとると、図6の左上から下に下り、右上に至る<sup>[21]</sup>。左上から下へ、最初に考え得るすべて設計に対する要求を洗い出し、そこに制約条件も考慮し、仕様を精査し、設計を詰めていく。そして開発し、下から右上へと順次実験を行い、最終的に現場で実証実験に至る。この論文で述べる設計論では、この流れに逆行し、右上、つまり現場で動かす、実作業することから始める。必要最少の動きをする機械装置を作り、実際の作業現場で動かす、作業することから始める。考え得るどのような動作も機械に代替させようとするのではなく、日本の山林を相手にする場合、まず「どうしてもこれだけは機械にさせなければならない動き」に絞る。我が国では、それは死傷事故が多発する作業、もしくは重労働である。また自然環境下において人間のセンシング、コントロールに勝るものはない。これを無理に作業員から取り上げる必要もない。またそれは危険につながる。代替可能な限りの作業を、機械に代わらせようとする、かえって人間ではなく機械にさせる優位性を損なう。この閾値を超えた失敗例は、現場で使うはずの目的で開発されたロボットに見られる。この反動として、ロボット開発においても、単機能化を目指す傾向も見られるようになった。

右上の現場での実証実験から始め、仕様が明確化した部分については、屋内実験も取り入れていく。右上から下へと下る。機械が担うべき必要最少の動き、そこに必要な機能要件を付加し、その結果として仕様を列挙する。そして最後にシステムの全体像を作り、下から左上へと至る。

本機械開発の設計論を図7にまとめる。本報で述べるTATSUMIの目的は、伐倒作業の安全性確保である。この目的を達成するために、最重要な「どうしてもこれだけは機械にさせなければならない動き」を、必要最少の形と機構で実現することを、まず目指した。そしてマニピュレータを使う環境も対象も二つと同じ条件はなく、それぞれの違いも大きい。このため要求仕様を明確に設定して設計を始

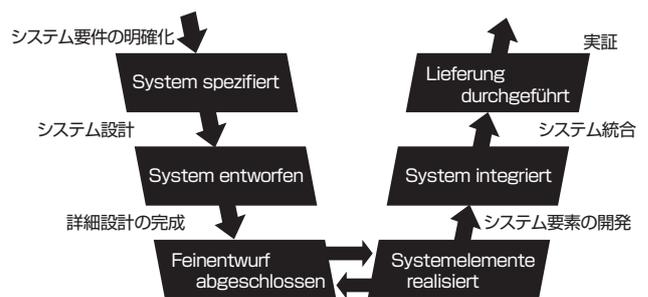


図6 Vモデル<sup>[21]</sup>

めると実際には使えない機械になる恐れがあり、また一旦決めた仕様も変更せざるを得なくなることもある。そこで図7の赤のループ「設計仕様決定ループ」を回す必要がある。このループで TATSUMI I, II を開発した。これは Web の設計論と似ており、多様な自然環境に、個々作業者が対応することが、Web 関連技術の「どのような接続環境で、誰がどのように使用するかわからない」そして「実際に作って、現実の世界に実装して動かしてみないと、何が起こるか分からない」という特徴に共通しているからである。ともに人を含む使用環境との相互作用を経験しないと、現実の社会での使用に堪える仕様にはならない。

そして次に TATSUMI III に入り、緑の「システム統合ループ」で開発を進めた。本機械開発は、この設計仕様決定ループとシステム統合ループが統合されたものであり、特に前段の設計仕様決定ループによる開発が重要である。

#### 4.2 日本林業の現場から着想した機械

設計開発プロセスの右上から下へ下るプロセスで、伐倒ポータブルマニピュレータの異 TATSUMI では、市販のチェーンソーをそのまま使うことに決めた。もし左上のシステム要件の明確化から始めていたら、そのままのチェーンソーを採用せず、切削機能自体から設計していたであろう。しかし現場で使える機械を目指すなら、まずはチェーンソーをそのまま着脱できる方が、現実的であると判断した。

高性能林業機械のハーバスタも、ソーチェーンを搭載している。立木を切削する刃物として、ソーチェーンを超えるものはまだない。またチェーンソーは林業従事者約 5 万人 (2010) に対して、公称で 18 万台 (2014) 普及している<sup>[12]</sup>。作業員ならば、所有しない、使用しない者はいない。どの現場にもある。また林内の路網密度は 19.5 m/ha (2013)<sup>[13]</sup> と低く、作業員がみずからの足で入る現場に対応できることが重要である。日本のチェーンソーは、コンパクトに進化

してきた機械である。この小さく軽く改良が続けられているチェーンソーを採用することで、マニピュレータの小型軽量化も目指した。

伐木作業中の事故には、作業員が切っている最中に、立木が思わぬ時に、思わぬ方向に倒れ始め、作業員がその立木の下敷きになったり、また立木が目標とは違う方向に倒れて、かかり木<sup>用語4</sup>になり、そのかかり木の近くの立木を、作業員が伐り倒している最中に、そのかかり木が倒れてきて、作業員がその下敷きになる等がある。この災害で死者が出る。人は、立木の根元でチェーンソー操作に集中しており、周囲や稍近くの変化を察知するのが難しく、立木が倒れ始めても、気付かず、逃げ遅れて、死傷事故が発生する。人が、立木の根元で、チェーンソーを握り、操作していなければ、これらの危険は回避できる。また作業員の思わぬ時に思わぬ方向に倒れるのは、人による作業では、精度が定まらないことも一つの原因である。機械でチェーンソーを操縦すれば、作業精度を安定させることができ、目標方向に倒すことにつながり、作業員が立木の下敷きになったり、かかり木等が発生することも防げる。

さらにチェーンソーのエンジンの回転数は、フルスロットルで 1 分間に 10,000 rpm を超える。伐倒作業中に、この高速回転する刃物から距離を保つことは、死傷事故の回避のみならず、振動障害の低減にもつながる。

立木とチェーンソーから作業員を引き離すことで、この二つの危険物に起因する労働災害を排除し、同時に機械による作業で、立木を切る精度を安定させ、目標方向に立木を倒すことを機械開発の目的に据えた。

## 5 実施例

本章では実際に開発した成果について述べる。表 1 に開発機の概要を示す。機械として、異 TATSUMI<sup>[22][23]</sup> と天竜 TENRYU (図 8)<sup>[24]</sup> と名付けた立木を伐り倒すマニピュレータ、そして林業用路網も整備されていない林地を、作業員について、走破し、重量物を運ぶモビリティ (図 9)<sup>[25]</sup> を開発している。この論文では、異 TATSUMI を取り上げる。なお、これから述べる伐倒ポータブルマニピュレータ異 TATSUMI III と IV の設計の詳細と実験については、日本機械学会の論文<sup>[22]</sup>、特許<sup>[23]</sup> で発表した内容を含んでいる。

### 5.1 TATSUMI I

TATSUMI I (図 10) は、チェーンソーを 3 軸で、直線的に送る直進対偶<sup>用語5</sup>のみで構成した。なお、次に開発した TATSUMI II (図 11) は回転対偶のみで構成し、TATSUMI III (図 19) は、この TATSUMI I, II から得られた知見から、直進対偶と回転対偶を組み合わせた。

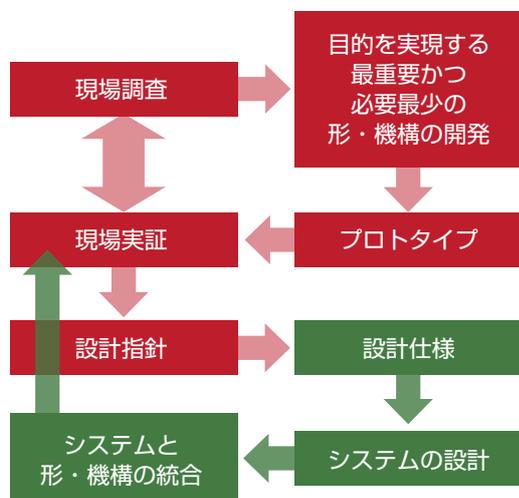


図7 設計仕様決定ループとシステム統合ループ

表1 開発機の概要

名称	特徴	開発時期
TATSUMI I	直進対偶 <sup>用語5</sup> のみで構成、3自由度 ※提案機のフィジビリティを検証	2011-2012
TATSUMI II	回転対偶のみで構成、3自由度	2012
TATSUMI III	直進対偶 1、回転対偶 3 の 4 自由度 ※一つのマニピュレータモデル（最適解）を提示	2012-2013
TATSUMI IV	直進対偶 1、回転対偶 3 の 4 自由度 ※関節の改修とチェーンソーの回転数制御機能を付加	2013-2014
TATSUMI V	直進対偶 1、回転対偶 3 の 4 自由度 ※マニピュレータの設置部と作業部を分け 取り付け、取り外し、設置、運搬の作業性を向上	2014-
TENRYU I	直進対偶のみで構成 ※提案機のフィジビリティを検証	2011-2012
TENRYU II	切削断面の直径分のドリル・エンドミルを開発し搭載 ※IIとIIIの主な違いは、刃長と切削軌道	2012
TENRYU III	切削断面の半径分のドリル・エンドミルを開発し搭載 ※一つのマニピュレータモデル（最適解）を提示	2012-
MOBILITY I	クローラ部 <sup>用語6</sup> のみで構成	2012-2013
MOBILITY IR	クローラ部と牽引アーム部で構成 ※牽引アームにより、登坂性能を向上	2013-2014
MOBILITY II	新たに開発したクローラ部のみで構成 ※斜面や地面の凹凸に対する荷重変化、姿勢変化への対応性を向上	2014-

TATSUMI Iにエンジンチェーンソーを自動操縦させ、現実的に、切削作業が正常に維持されるか確認し、振動によるチェーンソー固定のゆるみやモータやエンコーダへの影響、また通常の使用状態では発生しない本体姿勢の変化による燃料漏出、燃料供給停滞がなく、定速送り、定速回転による立木への切り込みができることを確認した。

## 5.2 TATSUMI II

TATSUMI IIは、TATSUMI Iを直進対偶のみで構成

したのに対し、回転対偶のみで構成した。IとIIから得た知見より、次機 TATSUMI IIIにおける最適な関節の種類と配置について検討した。

## 5.3 設計指針

現場での調査、TATSUMI IとIIから得た設計指針を述べる。

- (1) ハードウェアの「形」と「機構」を突き詰めた必要最少の機械装置。そして必要最少の外界認識と制御を求める。



図8 天竜TENRYU：左からI、II、III



図9 モビリティ：左からI、IR (Iの改良)、II

- (2) 機械装置が生み出すシンプルな動きで、多様な環境と多様な作業に対応する。つまり、あらゆる環境において、あらゆるパターンの作業を実現する、シンプルな動き、それを生み出す機械装置を目指す。機械装置そのものが、あらゆるパターンの作業を実現するのではない。
- (3) メカニズムの考案には、伝統的に踏襲されてきた「型」と「所作」を重んじる。
- (4) 日本柔道のように、相手（対象物）の形や重さを利用した仕組み、巧みな技で仕事ができる機械装置を目指す。これにより小型軽量化を実現する。
- (5) 作業プロセスにおいて、最重要構成要素は人

まず(1)はハードウェアの形とその仕掛けを突き詰めることで、簡素な機械装置を目指すこと、そして特に必要最少の外界認識と制御方法を求めることをあげる。その理由として、まず林内で使用する機械は我が国の山林環境下における気温差、多雨多湿に耐えなければならないからである。海外の林業機械も日本では電子回路において腐食が発生する等の問題が発生している。また自然環境内は識別が困難な要素で構成されており、自動感知に依存した機械装置の制御は、誤作動が発生し易く、特に刃物を高速回転させる作業では、危険が生じる。そしてまた日々の保守点検、並びに修理の多くは、現場の作業者ができなければならない。そのため機械装置自体が分かり易い構造でなければならない。

(2)と類似する発想を持つ機械として、日本の在来型林業機械に「集材機」がある。集材機自体は、ワイヤーを繰り出し、巻き取るだけの機械である。この集材機は、どのような山林の集材にも使用できる。またチェーンソーも、機械そのものは、ソーチェーンを回転させているだけである。しかしこのチェーンソーで、たいていの立木を伐り倒すことができる。この対極にあるのが、ヒューマノイドロボットと言われてイメージする機械である。この開発過程で、さまざまな知見が得られる。しかしヒューマノイドそのものを現場で使おうとすると話は異なる。人間のように、あらゆることができそうな機械は、人がする意味と機械に代替

させる意図が曖昧になり、かえって機械本来の優位性を損なう可能性がある。

また作業についても、林業には似た考えで捉えられる作業が多い。最も一般的な伐倒方法は、受け口・追い口切り<sup>用語7</sup>による伐倒である。この手法は、基本はチェーンソーで三面を切り込むだけで、多くの立木を伐り倒すことができる。また我々が異 TATSUMI とは別に開発している天竜 TENRYU は、我が国 1300 年の歴史がある「三ッ紐伐り」を採用している<sup>[26]</sup>。「三ッ紐伐り」は、伊勢神宮の御用木を伐り倒す手法である。立木を三か所から切り込み、たいていの巨木を安全に伐り倒すことができる。儀式では斧を用いるが、これをドリルとエンドミルの機能を併せ持つ特殊刃物を搭載したマニピュレータで再現している<sup>[24]</sup>。

また(3)ではメカニズムの考案にあたり、伝統的に踏襲されてきた作業方法を尊重している。本提案機の異 TATSUMI で採用した受け口、追い口切りも(図12)、その弦<sup>つる</sup>(図13)<sup>用語7</sup>の寸法は経験的に受け継がれてきたもので、科学的根拠はない。しかしこれら伝統的な手法は長い時間をかけ、合理的な型や所作に淘汰されている場合が多いからである。

(4) 長大な重量物な対象物(立木)に対して、欧米の大型機械のように、力に力<sup>あらが</sup>で抗うのではなく、日本柔道のように、相手をいなす、つまり相手(対象物)の形や重さを利用した仕組み、巧みな技で仕事する装置を目指す。言い換えると<日本のな>発想で技術開発を行う。

そして(5)では、作業プロセスにおいて、人が最重要構成要素であり、全自動を目指すのではなく、作業による認識と判断、作業の補正・補助を入力できるシステムを目指している。このため作業者が直感的に使い易い機械であることを目標としている。

## 5.4 TATSUMI III

### 5.4.1 仕様

TATSUMI I と II の成果から TATSUMI III の仕様を導出した。

- (1) 作業者が路網から外れた林地内でも運搬できる重量：



図10 TATSUMI I: 直進対偶のみで構成



図11 TATSUMI II: 回転対偶のみで構成

18 kg 以下

- (2) 自立稼働の保証：エンジンチェーンソーの搭載（電動チェーンソーは、山林内の伐倒作業には対応できない）
- (3) 作業性の確保：チェーンソーの着脱（チェーンソーは、伐倒前後の作業で多用）
- (4) チェーンソーに最適な伐倒手法の選択：受け口・追い口切りの採用
- (5) 伐倒時の作業者の安全確保：自動動作（立木（戦後の植林された杉檜）は高さ15、6 m、重量数百キロで、その直下で作業は行われ、また高速回転する刃物を扱う。この二つから作業者が距離を保つことができれば、事故は防げる）
- (6) 対応直径・対応樹種：間伐目的 350 mm まで、植林された人工の杉檜

### 5.4.2 鋸断軌道

立木を伐り倒す鋸断軌道を図12、13に示す。前述の通り受け口・追い口切りを採用する。伐倒方向は図12、13とも左方向である。受け口は幹の伐倒方向に作る三角形の空間で、追い口は受け口の反対側から切り込む1面の平面である。このように受け口と追い口は、平面切削を得意とするチェーンソーに適し、3つの平面を切り込み、立木を伐り倒す。受け口と追い口を切削した後に残る部分を弦と呼び、図のCにあたる。受け口を入れて追い口を入れると、この弦が蝶番の役割をして立木は受け口方向（図12、13左方向）に倒れる。

### 5.4.3 機能要件

TATSUMI I、II から得られた知見をもとに、最適解に近づくよう機能要件を導いた。

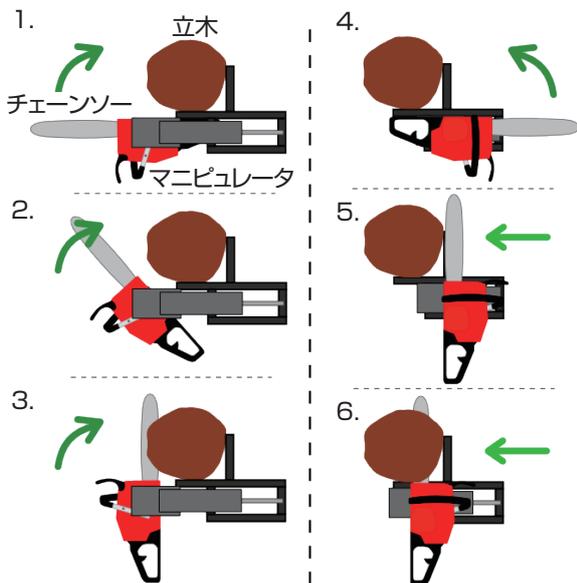
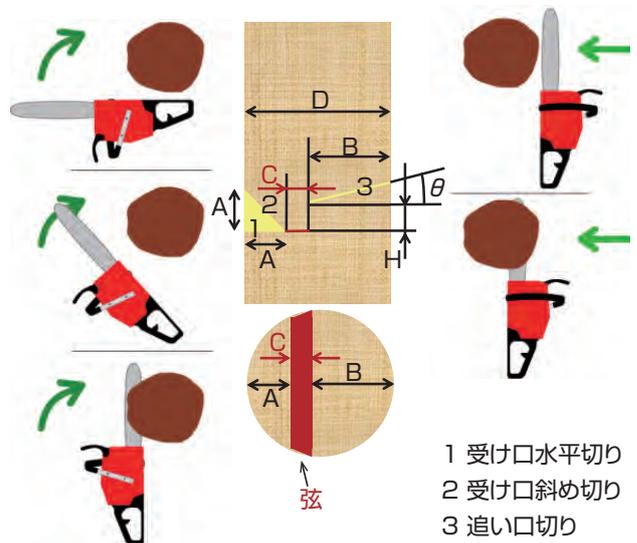


図12 受け口と追い口切り

- (1) 鋸断面を下げる：収穫した立木を用材とする場合、最大直径が得られる根元近くが最も価値があり、伐根（鋸断面）を下げた方が良い。（IIIにおいてL字型のアームを考案し、IIにあった中間の回転関節を排し、その結果、IIIではIIより鋸断面の高さを150 mm下げることができた）
- (2) 受け口はチェーンソーを回転させて切る：図13の左側に示したように、回転で木を切れば、チェーンソーを立木の外側まで移動させる必要がなく、マニピュレータの移動域を縮小でき、本体自体の小型軽量化につながる。
- (3) 追い口はチェーンソーを回転させるのではなく、チェーンソーを平行に移動させて切る：追い口も受け口同様に回転で切ると、残る弦幅が不均一になる状態が発生し、切削中に不意に倒れ始める危険性がある。この現象を避けるため追い口切りは、受け口の切り終わり線（会合線）とガイドバーの向きを常に平行に保ち切り進める。
- (4) アーム自体を移動させ、対応直径を広げる：アームの根本が回転しかせず、そのものの移動を拘束された条件で、作業領域すなわち対応可能な樹木の直径を広げようとすると、アーム長を長くする必要がある。この方法を取ると根本の関節に求められるトルクが増大し、



- A: 受け口の高さと深さ
- B: 追い口の深さ
- C: 弦幅
- D: 鋸断直径
- H: 追い口の高さ
- $\theta$ : 追い口の角度
- $A=1/4D \sim 1/3, C=1/10D, B=D-A-C, H=2/3A$

図13 切削寸法と切削順序

受け口は2回の回転の動きで、追い口は1回の平行移動の動きで切削

装置全体の重量増や大型化を招く。そこで、アーム自体を平行移動させることで、小型・軽量を維持したまま作業領域を広げる方式を取る。この方式で設計したIIIは、最大鋸断直径が350 mmまで広がり、IIより大きな立木を伐倒できるようになった。

#### 5.4.4 主要寸法の決定—L字型アーム—

全体形状と寸法（図14）、自由度配置（図15）、そして各対偶への直進と回転の振り分けを示す。まず条件として鋸断面の高さを下げる必要がある。そこでベース、つまり立木への固定位置からチェーンソーのブレードまでの高さが最も低くなるアーム形状を求めた。まず高さをあげることに繋がる機構をベースとチェーンソーの間から排した。さらに受け口切りの回転時に、チェーンソーがアームと干渉しない形状とした。そして受け口の姿勢を取った際に、チェーンソーがベースに最も接近する機構と形状を求めた。これら条件に、搭載するチェーンソーを抱え込める最小寸法で設計し、L字型アームを導いた。アームの寸法を図16、図17、図18に示す。L1とL2がL字型アーム部の寸法で、L3とL4はアームの先端にチェーンソーを取り付けた際に、先端の回転軸から鋸断位置までのオフセットを表してい

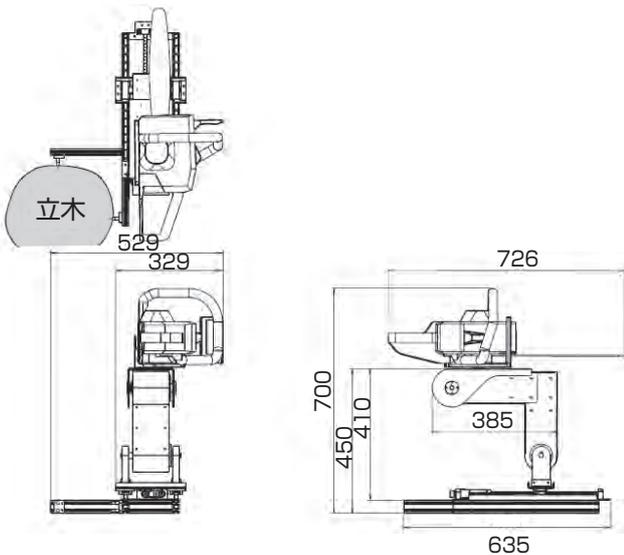


図14 全体形状と寸法

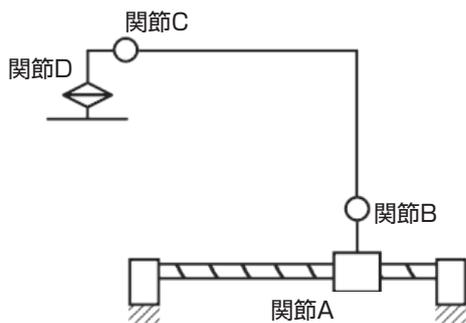


図15 自由度配置

表2 関節の可動域

関節	可動域
関節 A [mm]	0.0-320.0
関節 B [deg]	0.0-127.4
関節 C [deg]	-180.0-10.0
関節 D [deg]	32.0-45.0

る。またベースの直動部の長さは、受け口・追い口切りに必要となるアームの移動量を算出して導いた。

マニピュレータの総重量はチェーンソー約6 kgを加えて18 kg以下となった。チェーンソーはゼノア (G3711EZ)、排気量約40 ccを搭載した。高さ方向の寸法は700 mm、長手方向のサイズは約725 mm、そして短辺方向は529 mm、ベースのバーを除けば329 mmに納まる。

#### 5.4.5 関節の構成

本項では関節数とそれぞれの配置を述べる。前述の鋸断軌道を実現するためには、最少4自由度が求められた。直進による最下端の節（関節A、直進対偶）、そして一軸の回転でチェーンソーを回す節（関節D、回転対偶）、そしてL字型アーム自体を回転させる節（関節B、回転対偶）、

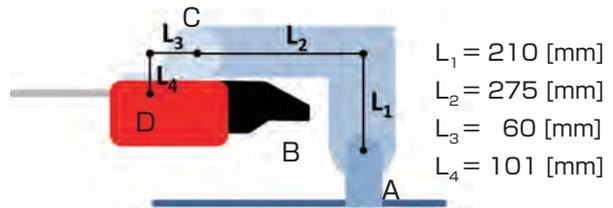


図16 アームの寸法

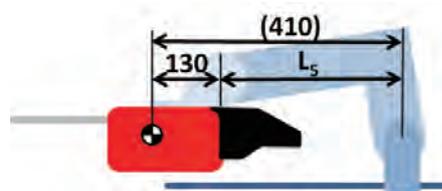


図17 関節Bの最大伸展サイズ

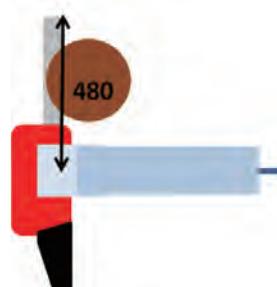


図18 チェーンソーの回転半径

表3 減速比

関節	名称	減速比
関節 A	ギアヘッド	139:1
関節 B	タイミングプーリ	3:1
	ハーモニクドライブ	160:1
	計	480:1
関節 C	タイミングプーリ	4:1
	ハーモニクドライブ	100:1
	計	400:1
関節 D	タイミングプーリ	4:1
	ハーモニクドライブ	100:1
	計	400:1

表4 モータの仕様

	関節 A	関節 B	関節 C	関節 D
メーカー	マクソン	マクソン	マクソン	マクソン
機種	RE25	EC60flat	RE30	RE30
モータ質量 [g]	130	470	260	260
公称電圧 [V]	24	24	24	24
定格出力 [W]	20	100	60	60
最大連続トルク [mNm]	26.3	221	85.6	85.6
最大許容回転数 [rpm]	14000	6000	12000	12000

表5 ギアの仕様

	関節 A	関節 B	関節 C	関節 D
メーカー	マクソン	ハーモニク・ドライブ・システムズ		
機種	GP26A	CSD-20-160-2UH	CSD-17-100-2UH	
質量 [g]	93	650	460	460
減速比	139:1	160:1	100:1	100:1
許容最高入力回転速度 [rpm]	8000	6500	7300	7300
平均負荷トルクの許容最大値 [Nm]	4.5	34	27	27

チェーンソーを反転させる節（関節 C、回転対偶）の 4 つの関節を設けた。各関節の可動域を表 2 に示す。

各関節の設計について述べる。チェーンソーはソーチェーンの形状から切り進むように作られている。このため切削時の反力は、最初に立木に接触し、切り込み始める時が最大である。この反力は計測で約 20 N であった。この値を関節 A、D の設計で参考にした他は、静止時における回転モーメントから各関節の機構を設計した（表 3、表 4、表 5）。

メカニズムの考案にあたり、伝統的に踏襲されてきた手法を参考にしている。受け口・追い口切りは、作業者がチェーンソーを用いて行うものであり、作業者に最も負担が少ない伐倒方法の一つとして踏襲されている。本提案は人の手

作業をマニピュレータで代替するものであり、TATSUMI の I、II でも、マニピュレータにも人力を超える過大な反力は生じないことを確認した。

#### 5.4.6 制御システム

作業を数値制御するプログラムを開発した。このアルゴリズムで、材寸から鋸断軌道を自動計算し、制御プログラムに渡し、マニピュレータを制御する。言語には汎用性を考慮して C++ を用いた。

### 5.5 実証実験

#### 5.5.1 TATSUMI III の実証実験

TATSUMI III を用いて、実際に山林内の立木を伐り倒す実証実験を行った（図 19）。実験地は静岡県浜松市



図19 TATSUMI III

①・②受け口の斜め切り、③・④追い口の切り込み。

の天竜地域で、実験対象としたのは人工林の杉、胸高直径は240 mm、鋸断部直径は265 mmで、樹高は約15 mである。

伐倒作業の精度は作業現場では、受け口と追い口の寸法、弦の形状、そして立木を伐り倒し、予定伐倒方向に対し実際に木が倒れた方向（実伐倒方向）で評価しており、その手法に準じ、マニピュレータ III の性能を評価した。

TATSUMI III で、受け口の水平切りから始め、斜め切りを行い、受け口を切り落とし、姿勢を変えて追い口を切削し、立木を伐り倒すまでの作業を一貫してできることを実証した。

課題としては、受け口の斜め切りが目標線より下がり、受け口が小さくなった。これはマニピュレータの根元と先端の両関節において、トルクを伝達するシャフトが十分に押さえられていなかったためである。



図20 TATSUMI IV

### 5.5.2 TATSUMI IVの実証実験

そこで TATSUMI IV では、TATSUMI III の関節部を改修し、設置ベースをマニピュレータから取り外せるようにし、またチェーンソーの回転数の制御を、遠隔から操縦できる機能を搭載した。TATSUMI IV (図 20) で実施した4回の実験において、マニピュレータが受け口の水平切りから始め、斜め切りを行い、受け口を切り落とし、姿勢を変えて追い口を切り込み、立木を伐り倒すまでの作業を一貫してできることを実証した。図 21、22 に示した4本の立木の鋸断直径は、それぞれ  $D=260$  mm、250 mm、230 mm、270 mm である。受け口を入れて、立木を伐り倒すまでの時間は、それぞれ 278 s、330 s、219 s、267 s であった。チェーンソーはフルスロットルで立木に切り込み、マニピュレータはチェーンソーを 5 mm/s で送った。

### 5.5.3 受け口・追い口、弦の切削線

林業では伐倒作業の上手、下手は、受け口と追い口、弦の切削線で判断するため、これを評価に用いる。人による作業は安定せず、また正確に受け口と追い口ができず、予定通りに弦が切り残らない。このため人による作業では、作業途中の立木が予期せぬ時に予期せぬ方向に倒れ、死傷事故が発生することもある。作業の安定性や鋸断精度は、作業後に残った受け口と追い口、弦の切削線から評価できる。

図 21 は伐り倒した立木の伐根を縦断面で見た図である。青が目標線、赤が実際の切削線である。すべての実験で切削線の傾きが目標線とほぼ一致した。立木の倒木

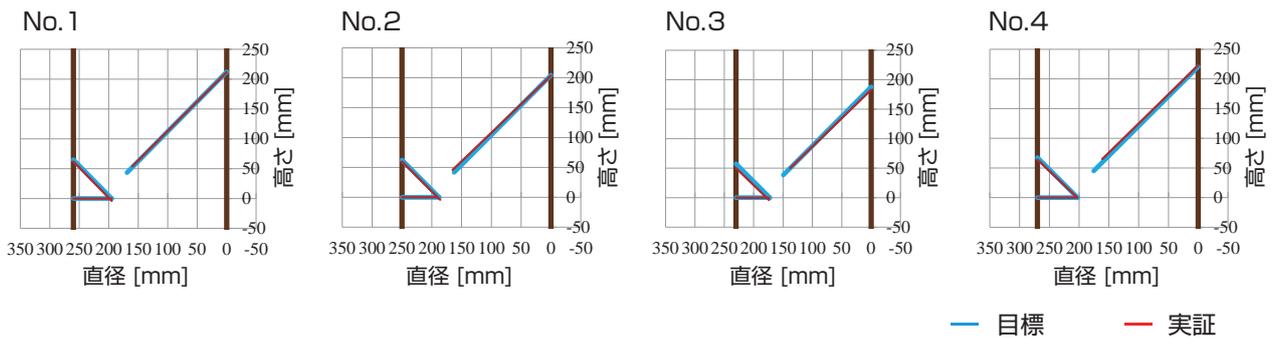


図21 受け口、追い口の切削線

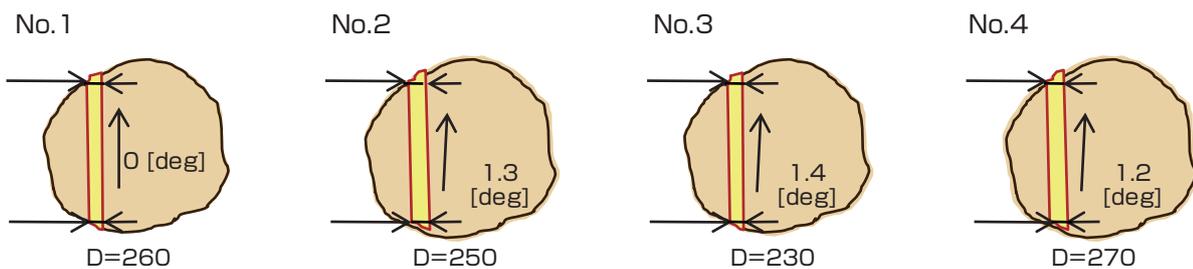


図22 弦の形状

方向を制御するには、特に伐倒方向側に作る受け口が目標通りに切り取られる必要がある。実験では受け口の水平切りと斜め切りの切り終わりの線も一致している。提案した機械システムによる作業は安定しており、また鋸断精度も高いことを確認した。

図 22 に伐根に残った弦形状を示す。プログラムが目標値とした弦幅は直径の 1/10 である。立木が伐根から切れて離れる時に弦を引きちぎる現象を考慮に入れると、プログラムの指示通り、弦は作成できたと言える。チェーンソーのガイドバーは全長にわたって一定幅ではなく、ラグビーボールのように先端ほど先細る。鋸断直径がガイドバーの有効長に近くなると、マニピュレータと反対側の弦がガイドバーの形状に倣って、弦が厚く残されると予想していた。そのためガイドバーの形状に起因して奥側の弦が厚く残り、弦が切れにくくなり、伐倒方向が乱れるといった現象も予想していた。しかし、実験では、伐倒方向に影響するほどの不均一な幅の弦とはならず、伐倒方向の狂いも 1.4 deg 以下となり、ほとんど発生しなかった。

死傷事故の原因となる長大で重量のある立木と、高速回転するソーチェーンから、作業者が離れた状態で、マニピュレータによる作業を実証した。また作業自体も安定しており、その鋸断精度も評価でき、提案したマニピュレータの有効性を示すことができた。

## 5.6 TENRYUとMOBILITY

TENRYU は「三ツ紐伐り」を斧ではなく、ドリルとエンドミルの機能を併せ持つ特殊刃物で実現する。この特殊刃物のエンドミル部の刃数を 2 枚、4 枚そして TENRYU III では 3 枚として、TENRYU I と II で鋸断直径分あった刃長を、III ではその半分の刃長とした。TENRYU III において、立木の伐倒作業を実証することができた。その後、マニピュレータの剛性をあげるなどの改良を行っている。MOBILITY は I と IR の開発後、その知見を生かし、新しいサスペンション機構を提案して II を開発した。II では、山林内の不整地を想定し、片側のクローラ<sup>甲</sup>のみで 245 mm の障害物を乗り越えるなど、山林内の不整地で求められる性能を実証している。

## 6 日本林業の蘇生に向けた展望

### 6.1 TATSUMIの展望

大学の一つの役割は、社会で問題になっていることを紐解き、その問題の解き方を考え出し、そこに、これまでになかった新しい考えや仕掛け、仕組みを提示することである。ここまでの研究で、伐倒作業の安全を確保する、ある最適解を提示することができた。今後は、実用化に向け、この一つの新しいアイデアを民間企業に渡し、ともに

開発を進めていく予定である。企業は大学の研究とは違う目的を持つため、これからは販売、普及等企業内の当該専門家も交えて開発を進めることになるであろう。現在の TATSUMI の課題として、さらなる小型軽量化と運搬と立木への設置の容易性の向上をあげる。また将来展望としてチェーンソーのエンジンの検討をあげる。日本林業で使われるエンジンチェーンソーの排気量は 40 ~ 60 cc で、単車のエンジンを抱えて、人もマニピュレータも作業していることになる。そこでエンジン以外の動力の検討や動力とブレードの分離も視野にある。

TATSUMI の技術以外の課題には、普及方法がある。マニピュレータの制作費から、コストそのものの設定では、特に問題ないと考えている。なお伐倒機能を有するハーベスタ、フェラーバンチャ等高性能林業機械は、そのアタッチメントだけで、数千万円である。

### 6.2 技術開発の展望

日本林業の蘇生のために研究が求められる要素のうち、技術開発は主に林業の安全性の確保と生産性の向上が重要である。技術開発の順としては、まず個々の作業から死傷事故をなくすこと、そして次に生産性の確保、そして作業を次の作業へと滞ることなくつなぐ、作業システム全体の構築が求められる。単一の作業効率が向上しても、その前後の作業が変わらなければ、作業はそこで停滞する。山林を調べ、収穫対象を決め、伐倒して、集め運び出すまで、一つの収穫作業においても、作業システム全体を向上させなければ、生産性は向上しない。

冒頭の第 2.1 節に記述したように、国家資源として、また林業として資源の計測やデータ分析の高度化は必要である。その技術開発も着手され始めているが、現在もそのほとんどが手作業である。この膨大な作業の高度化が必要である。また山林内にどのように路網を配置するか、架線を張るかは、現場技術者の経験と勘によっている。土砂災害が発生しても、そのフィードバックも不可能である。また山林やその地域全体で、どのように路網を整備していくのか、現状ではビジョンを作ることもできない。またそこから、どのように林業をするのか、施業計画を可視化する技術も必要であろう。山林内とその作業を「見える」ようにする、つまり作業をリアルタイムで把握できるようにする技術も求められている。

### 6.3 技術開発以外の展望

第 2 章で日本の林業の特異性を解説しながら、技術開発のみならず、まずは社会制度の見直し、新たな設計が必要であることを述べた。ここでは異なる観点から、日本林業の蘇生について述べる。

ドイツでは農林家が多く、林業用として、もとは農業機

械に丸太を牽引するウインチを取り付けたものもある。日本では、農業との兼業はほとんどなく、他産業に従事している者は、所有している山林の存在を忘れていた程である。この TATSUMI のような機械の出現により、林業が専業ではない人々から、新しい日本林業に対して関心を寄せ、彼らが山の手入れに関わり始めるきっかけになることも期待している。

工業製品は早く、安く生産することが重要で、また出荷時点が最高で、その後、商品価値は下がる。しかし木材製品は、山林で立木を仕立てることから、その乾燥を含む加工、木造建築に至るまで、手間をかけて生産し、そして時の経過で価値を増す性質がある。このような製品の生産と流通を許容し、その価値を評価する社会を取り戻す必要もあるだろう。著者の海外現地での調査からも、欧州では、地域社会における職人やその職能、仕事が大事にされ、工業化社会との共存に配慮されていることが分かっている。我が国の 67 % を占める山林に関わる林業を始めとした産業をどう蘇生し、成立させ続けるかを考えることで、地域社会再興への糸口につながるかもしれない。

## 7 おわりに

この論文で報告した TATSUMI は、2011 年に開発費を獲得し、2012 年度に I 号機を開発し、そして同年に III 号機で一つのマニピュレータモデルを提示した。III 号機で、受け口から追い口まで一貫して作業をし、作業者が距離を保った位置から、立木を切り倒すことに成功した。次の IV 号機では、鋸断精度の高さを評価し、目標の伐倒方向に伐り倒すことを実証した。鋸断精度に狂いがなく、安定していることも確認した。その後も改良を続けている。当初から実用化を目標とした開発であり、我々が採った設計論は評価できると考えている。

著者は、民間企業で研究者、コンサルタントとして、研究に従事した経験がある。そこには、研究を必要とし、そこから得られた成果で、何かしらの問題を解決する「相手」がいて「現場」があった。相手も現場も一つではなく、与条件も多様で、そして一つ一つの与条件を、一つの値に代表させては、顧客の要望に応えることができなかった。そこで一つの解ではなく、専門家としての経験や勘、つまり感覚や判断が交じった最適解を求めることになる。この時の判断を間違えないために、重要なことは、自分みずから現場へ行き、自分の経験を通じて、理解することである。さまざまな分野において、行き着いた場所には、既視感がある。現場へ行き、そこで何かしらの経験を得て、物事を理解することは、あらゆる分野において重要であると思う。

## 謝辞

国立研究開発法人森林総合研究所の多くの研究者にお世話になっています。また静岡天竜の方々には、実証実験でご協力を頂いています。そして現在、キャノン財団の研究助成を受けて研究を続けています。皆様に感謝を申し上げます。

## 用語の説明

- 用語1: 高性能林業機械<sup>\*1</sup>: 1991年に農林水産省が公表した高性能林業機械化促進基本方針に掲げた多機能を有する作業性能の高い伐出用機械および育林用機械をいう。
- 用語2: 地拵え<sup>\*1</sup>: 苗木を人工植栽するのに先だって、造林予定地に苗木を植付けやすくする準備作業をいう。
- 用語3: 毎木調査<sup>\*1</sup>: 林分成長量の測定、林分構造を明らかにするための基本的な調査方法である。
- 用語4: かかり木: 伐り倒そうとしている木が、周辺の立木にひっかかり、倒れなくなる。このかかり木は、いつ倒れてくるか分からず、またこのかかり木を解消しようとする作業でも、災害が発生する。
- 用語5: 対偶<sup>\*2</sup>: 二つ以上の節がたがいに拘束しあって限定した運動をする時、これらの節は対偶 (pair) をなすという。
- 用語6: クローラ: キヤタピラである。クローラは、ベルトが地面と接している面積がタイヤより広く、軟弱地盤や多少の不整地で、タイヤより走行が有利となる。一方、タイヤより、速度は遅くなる。
- 用語7: 受け口・追い口切りと弦: 立木を伐り倒す方法の一つである。受け口・追い口切りでは、立木を伐り倒す方向に、まず受け口をつくる。受け口は、水平と斜めに切り込みを入れ、図13の寸法Aは、直径の3分の1から4分の1とする。そして弦の寸法Cが、直径の10分の1残るように、反対側から追い口を入れる。また弦は、立木を伐り倒す際に蝶番の役目を果たす部分である。通常、追い口は水平に入れる。立木が倒れ始めない場合には、最後に追い口側の切り目に楔くさびを入れて打って倒す。このマニピュレータでは、追い口を水平ではなく、斜めに入れている。これはハードウェアの干渉を避け、そして斜めに入れることで、立木が自然に倒れ始めるようにするためである。

\*1 日本林業技術協会編: 森林・林業百科事典, 丸善, 2001

\*2 日本ロボット学会編: ロボット工学ハンドブック, コロナ社, 1990

## 参考文献

- [1] T. Kato, A. Kato, N. Okamura, T. Kanai, R. Suzuki and Y. Shirai: Musasabi: 2D/3D intuitive and detailed visualization system for the forest, *SIGGRAPH 2015 Posters*, 79, (2015).
- [2] 白井裕子, 野澤直樹, 藤井祥万, 佐藤隆哉, 加藤卓哉: 路網ルート設計装置及びそのプログラム、並びに路網ルート生成表示システム, 特願2016-95747, 出願日2016年5月12日.
- [3] 林野庁編: 森林・林業統計要覧2015, 日本林業協会, (2015).

- [4] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): UNECE Statistical Database, Forestry (FOREST EUROPE/UNECE/FAO), [http://w3.unece.org/PXWeb2015/pxweb/en/STAT/STAT\\_\\_26-TMSTAT1\\_\\_005-TM15Others](http://w3.unece.org/PXWeb2015/pxweb/en/STAT/STAT__26-TMSTAT1__005-TM15Others), 閲覧日2016-08-12.
- [5] 石井寛, 神沼公三郎: ヨーロッパの森林管理, 日本林業調査会, (2005).
- [6] 林野庁: 木材需給表 長期累年統計表, (2016).
- [7] ドイツ連邦森林法の第14条 (Bundeswaldgesetze §14 Betreten des Waldes), <https://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html>, 閲覧日2016-08-12.
- [8] 総務省: 行政投資実績, (1992~2016).
- [9] 農林水産省: 生産林業所得統計, (1991~2016).
- [10] 林業・木材製造業労働災害防止協会: 林業労働災害防止関係統計資料, [http://www.rinsaibou.or.jp/cont03/03\\_frm.html](http://www.rinsaibou.or.jp/cont03/03_frm.html), 閲覧日2016-08-12.
- [11] 厚生労働省: 労働災害統計, [http://anzeninfo.mhlw.go.jp/information/h08\\_26\\_sen01.html](http://anzeninfo.mhlw.go.jp/information/h08_26_sen01.html), 閲覧日2016-08-12.
- [12] 農林水産省: 平成27年度森林・林業白書 (平成28年公表), (2016).
- [13] 農林水産省: 平成26年度森林・林業白書 (平成27年公表), (2015).
- [14] 農林水産省: 木材価格統計調査 長期累年統計表, (2015).
- [15] 農林水産省: 木材統計調査 長期累年統計表, (2015).
- [16] 土倉梅造: 完全復刻 吉野林業全書, 日本林業調査会, (1983).
- [17] 白井裕子, 菅野重樹: 林業高度化に向けたロボティクスへの期待, *日本ロボット学会誌*, 28 (1), 43-48 (2010).
- [18] 白井裕子, 菅野重樹: ロボットの実用化に関する一考察, *日本ロボット学会誌*, 27 (6), 634-639 (2009).
- [19] 白井裕子: 森林の崩壊, 新潮社, (2009).
- [20] 舟渡清人: リモコンチェーンソ開発への歩み, *林業技術*, 424, 13-16 (1977).
- [21] V-Modell XT Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte Version: 2.0, Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V. (Weit e.V.) c/o 4Soft GmbH, [http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell\\_xt\\_node.html](http://www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html), 閲覧日2016-08-12.
- [22] 白井裕子, 飯塚隆真: 伐倒ポータブルマニピュレータ 巽TATSUMIの開発, *日本機械学会論文集*, 81 (831), 15-00169 (2015).
- [23] 白井裕子, 飯塚隆真, 松尾雄希, 遠藤寛士, 菅野重樹: 樹木の伐倒システム, 樹木情報検出装置及びそのプログラム, 特願2013-63309, 出願日2013年3月26日.
- [24] 白井裕子, 松尾雄希, 飯塚隆真, 遠藤寛士, 堀場一輝, 菅野重樹: 樹木の伐倒装置, 特願2013-63308, 出願日2013年3月26日.
- [25] Y. Shirai and H. Endo: Crawler-type transport mechanism that can travel over forest land, *Journal of the Japan Forest Engineering Society*, 31 (3), 113-120 (2016).
- [26] 坂巻俊彦: 残したい三ツ紐伐り, 平河工業社, (1988).

## 執筆者略歴

白井 裕子 (しらい ゆうこ)

早稲田大学理工学術院准教授。早稲田大学理工学部建築学科卒業、稲門建築会賞。ドイツパウハウス大学留学。早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了、早苗賞。株式会社野村総合研究所勤務。早稲田大学にて博士（工学）、日本学術振興会特別研究員（PD）、フランス国立科学研究機構研究員、2010年より早稲田大学理工学術院准教授、現在に至る。一



級建築士、著書に森林の崩壊（新潮新書）。理工学の視点から森と水などの我々の生活に深く結びついた社会基盤、その制度について研究しており、その知見から技術開発も行っている。この論文のすべてを執筆。

## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント (小林 直人: 早稲田大学)

この研究の中で、日本の林業の現状の問題点を概観した上で、産業として自立し得ていない最大の課題を解決する手段として新たな技術開発を提供するという、極めて野心的で重要な目標を設定しています。また、その目標を達成するためのシナリオを構築し、具体的方策として安全で使い易い伐倒マニピュレータを開発することを選択しました。この論文では、その技術開発の詳細を述べると同時に、その過程で発見した新たな設計手法も紹介しています。論文の構成も明確でしっかりしており、シンセシオロジー誌に掲載する論文として相応しいと考えられます。

コメント (今富 裕樹: 東京農業大学)

林業界におけるとても重要な課題である安全性確保に向けた新たな機械開発研究として評価すべき研究論文と考えます。この論文では、我が国における林業の特異性を考慮しながら、日本林業の産業としての蘇生を目標として、目標達成に向けた研究要素が提示されています。また、目標達成に向けた研究要素とこの研究の技術開発要素の位置付けがよく理解できます。専門分野以外の読者に対しても理解し易いように、最終原稿の改訂をご検討ください。

### 議論2 設計論について

コメント (小林 直人)

この論文の中で、著者はユニークな設計論を主張しています。特にドイツで生まれたVモデルとの比較を行い、今回は本来V字の左上から出発し右上で終わるVモデルと全く異なり、右上から出発して右下に至ると述べています。Vモデルはソフトウェア開発のシステム設計論として生まれた経緯があり、当初から全体システムの要求仕様を明確に決定して出発することができます。一方、今回のマニピュレータの開発のように使用環境が非常に複雑な場合、初期の設計仕様が不明確であると同時に、一旦それを決定してもすぐに変更せざるを得なくなることも考えられます。また著者はWeb設計論との比較を行い、こちらの設計論に近いことも述べています。これらに共通なことは環境（人を含む）との相互作用を何度も経ないとシステムの設計仕様が決まらないということだと思われます。仮の設計仕様が決まりそれによる一定のプロトタイプ開発を想定しても、さらにその修正が必要になると思われます。したがって、今回の設計では、以下に説明するプロセスになるのかと考えました。まず、前段に設計仕様を決定するループがあり、これを何度も回すことにより設計仕様を決定することができます (TSUNAMI I, II)。次にこの決定された設計仕様に基づいたより大きなループでシステム設計やシステム開発を行い実証に至ります。この後半のループ (TSUNAMI III等) は基本的にはVモデルに近いものと考えられます。このようにこの研究での設計論は「①設計仕様決定ループと②システム統合実証ループ」が統合されたもので、特に前段の「設計仕様決定ループ」が極めて重要であると理解しました。このような考え方はいかがでしょうか。

回答 (白井 裕子)

4.1に設計仕様決定ループとシステム統合ループを示す図を追加するとともに、関連する加筆を行いました。

### 議論3 可搬式伐倒機械を今後も使用する必要性について

コメント (今富 裕樹)

立木を伐り倒すことができる林業機械として、現在、我が国では

チェーンソーの他に、フェラーバンチャ（伐倒・集積機能を有する）やハーベスタ（伐倒・造材機能を有する）があります。この研究ではチェーンソーを利用した伐倒マニピュレータの開発をなされていますが、チェーンソーやこの研究開発機械のような可搬式機械を我が国では今後も使用していかなければならない必要性について、森林地帯における地形傾斜の分布等のデータも示しながら明確に示しておくことが理解を深める意味でよいと思いますが、いかがでしょうか。

回答（白井 裕子）

「2.4.2 林業機械」を加筆し、ハーベスタやフェラーバンチャについて触れ、チェーンソーやこの研究開発機械のような「可搬式機械」を我が国では今後も使用しなればならない必要性について述べました。またここで一例として静岡県における傾斜分布図を示しました。

#### 議論 4 この研究開発機械の普及について

コメント（今富 裕樹）

我が国においては立木の伐倒にはチェーンソーが使用されることが一般的です。チェーンソーは可搬式機械として小型化、軽量化、高性能化が実現し、我が国の林業においてなくてはならない存在となっています。このような中で安全化に向けた考え方からこの研究では、伐倒マニピュレータの開発がなされているところですが、チェーンソーといった高性能な林業機械が存在する中で本開発機械のような新しい機械の普及方法はそう簡単ではないと思います。本開発機械の完成度が高まった時の普及方法について示しておかれるとよいと思います。

回答（白井 裕子）

「6.1 TATSUMIの展望」に普及に向けた展望に関する記述を加筆しました。