# 卒業論文

自転車フレームのパーソナル・ファブリケーション

- 現代のコンテクストに合わせた新しい形の検討 —

# 関島慶太

慶應義塾大学 総合政策学部 学籍番号 71004480

2014年1月20日 指導教員 田中浩也准教授

#### 概要

身の回りの人工物の形が変化する要因は、使用者の不満や失敗の蓄積と、技術の進歩の二つに大別される。 前者は、失敗学で知られるヘンリー・ペドロスキーの「形は失敗にしたがう」の理論に代表されるように、 使用者の失敗が動力となり形が改革されてきた場合。後者は、素材技術や加工技術など、人工物を取り巻く 技術環境が進歩したことで、それまで不可能だった新たな形を実現できるようになった場合である。人工物 の形はこれらのどちらか、もしくは両方が要因となって変化している。

自転車フレームの形は、使用者が現在の画一化されたフレームの形に対して不満を抱かず、技術環境の目立った進歩も無かったことから、約 100 年に渡って変化していない現実がある。

しかし、デジタル・ファブリケーションの社会への浸透により、多種多様な素材の複雑な加工が容易となった現在、自転車フレームの新たな形が生み出される条件は整ったと言える。また、デジタル・ファブリケーションの民主化は、使用者自ら生産者となり、自らの個別性を製品に反映させること(パーソナル・ファブリケーション)も可能にしている。

そこで本研究では現在のデジタル・ファブリケーションの技術環境を踏まえ、木材を素材に用いて、自転車フレームの新たな形の検討を個人の目線からボトムアップに実践する。「パラメトリック・モデリングツールの操作によるデータの生成」→「デジタル機械によるデータの切削」→「他のパーツと組み立て」という一連のプロセスを通して、現代のコンテクストに合わせた新しいフレームの形を探索する。

# 目次

1.	はし	じめに	4
	1.1	人工物の形	4
	1.	1.1 フォーク	5
	1.	1.2 ゼムクリップ	7
	1.	1.3 ファスナー	9
	1.2	自転車フレームの形	11
	1.	2.1. ダイヤモンド形	. 12
	1.	2.2 スタッガード形	. 14
	1.	2.3 ダブルループ形	. 15
2.	関連	重する研究・活動	. 16
	2.2	デジタル・ファブリケーション	. 18
	2.3	パーソナル・ファブリケーション	. 20
	2.4	本研究の目的	. 22
	2.5	Holz Racer	. 23
	2.6	Bike CAD	. 25
	2.7	Greencycle	. 27
3.	設計	計・制作	. 29
	3.1	木製自転車フレームの制作	. 29
	3.2	パラメトリック・モデリングツールの開発	. 34
	3.3	新しい形の検討	. 40
1	<b>士</b> ]	とめ・展望	12
4.		まとめ	
	4.2	展望	. 45
参	考資	科	. 46
϶ͰͰ	<b></b>		10

### 1. はじめに

### 1.1 人工物の形

私たちが日々使用している身の回りの人工物は、比較的単純なものから複雑なものまで、あらゆる形を纏って存在しているが、現在の形がその誕生と同時に完成されていたものなど無い。長い年月を経て現在の形に至ったものばかりである。本章では、人工物の形がどのように変化していくのか、事例をとりあげながら見ていく。

人工物の形については先人たちからも、その発生について活発な議論が行われてきた。特に建築の世界では、「建築の形はどう決定されるべきか」といった議論が絶えないが、そのなかで建築の形と「機能」の関係性を主張する者は多かった。

ル・コルビジェは「家は住むための機械」と述べ、建築から装飾を排除し、人間の生活機能を満たす家の形を 追求した。また、建築の機能と装飾の調和を理想としたルイス・サリヴァンも「形は機能にしたがう」として、 建築の形と機能が密接な関係にあることを主張している。

建築からスケールダウンして身の回りの製品においては、失敗学のヘンリー・ペトロスキーが知られている。ペトロスキーは、コルビジェやサリヴァンら機能主義者の「形は機能にしたがう」という理論は製品においては適切ではなく、「形は失敗にしたがう」が真だとしている。身の回りの製品は、過去を生きた人々の使用体験を通して蓄積された「不満や失敗」から、改善を繰り返した結果現在の形に行き着いたと主張する。

ペドロスキーの理論では形の変化の要因が使用者の「不満や失敗」に一括されているが、実際にはそれと同等に、「技術環境の進歩」も大きな要因の一つと言えるだろう。普段使用者が不満や失敗を感じていない人工物であっても、素材技術や加工技術が進歩したことで、それまで考えられもしなかったような新たな形が生まれることもありうる。また、「不満や失敗」と、「技術環境の進歩」の両方が等しいバランスで要因となることもある。

ペドロスキーが、著書[1]の中で「形が失敗にしたがう」理論を説明する例として取り上げている人工物を以下でいくつか紹介しながら、それぞれに対する見解を述べていく。尚、本章で使用する図については、全て同氏の著書[1]から引用する。

### 1.1.1 フォーク

今では毎日食事を通して、特にその形を意識せずに当たり前のごとく使用しているフォーク。しかしその歴史は意外と浅く、現在の4本歯の形が完成されたのは今から 200 年ほど前である。フォークは、歯の数が1本から2本、2本から3本と増えていき、現在の4本に至った。つまり、フォークは当初「ナイフ」だったとも言える。

1本歯のフォーク(ナイフ)の始まりは古代まで遡り、当時はフリントや黒曜石といった岩石の破片を成形したもので柄は付いてはいなかった。その後、素材が岩石から金属に取って代わられ、加工技術の進歩により成形の方法が変化し、持ちやすいようにと柄がつけられた。また、当初は先端が鋭利で口に運ぶ際に危険であったため、先端が丸く加工されるなどの工夫もされた。

これらの変化が起こってもなお、両手に一本歯のフォーク (ナイフ) を持ち、片方で食べ物を固定してもう片方で食べ物切るという食事スタイル自体は、地域差はあるものの少なくとも 12 世紀まで続いた。自国の食事文化において保守的であったイギリスにおいては 17 世紀まで続いたとされている。

その後2本歯のフォークが調理用として誕生し、一本歯に勝る利便性から食事においても使用されるようになった。17世紀以後、2本歯のフォークは、より食べ物を刺しやすく、口へ運びやすくするため、3本、4本へと順調にその歯の数を増やしていった。

このようにフォークの形は、口に食べものを運ぶ道具としての使用体験を通して得られた様々な「不満や失敗」の蓄積が要因の主体となって、現在の形へと徐々に変化していったと言えることから、正にペドロスキーの「形は失敗にしたがう」理論の通りと言える。フォークの形の変化においては、「技術環境の進歩」よりも使用者の「不満や失敗」が要因として占める割合は大きい。素材技術の進歩はフォークの素材を塗り替えたが、歯数が増えるたびに発生した新しい形は、技術環境との関連性は低く、新しい形は純粋に「不満や失敗」から生み出されたと言える。



図 1.1.1-1 古代の一本歯のフォーク (ナイフ)

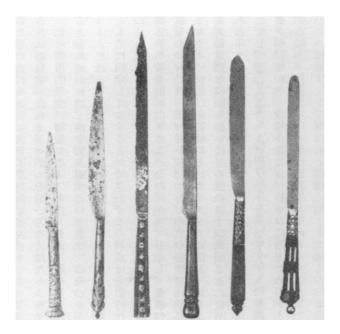


図 1.1.1-2 16-17 世紀に使用された一本歯のフォーク (ナイフ)

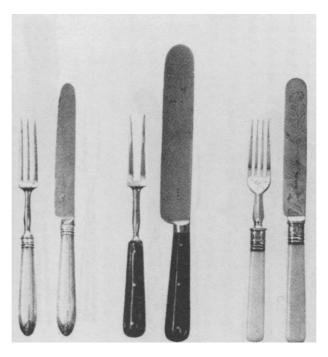


図 1.1.1-3 19 世紀に使用されたフォークとナイフのセット

### 1.1.2 ゼムクリップ

日々何気なく使用している文房具の代表格とも言えるゼムクリップ。複数枚重ねた紙を止めておくというシンプルな目的のために発明されたが、針金を約一回転半巻いた現在の形が完成したのは 1930 年代で現在から 100 年も経過していない。

フォークの形がはじめ一本歯でナイフと同等あったように、ゼムクリップもはじめは単なる「ピン」であった。 ピンは、細長く加工した金属を適当な長さに切った上で、その先端を尖らせただけの簡素なものあったが、重 ねた紙をまとめるという役割はしっかりと果たしていた。

ピンの歴史は極めて長く、紀元前から石や動物の骨を削るなどして作られては衣服をとめるために使われていた。やがて素材は金属に代わられ、19世紀になると生産の機械化も実現した。

こうして安定した量産化も実現されたピンであったが、その形には少なからず欠点を含んでいた。

一つは、紙を傷つけてしまうこと。重ねた紙をピンで固定すると、紙に穴が空いてしまうことから重要な書類 の固定には不向きであった。もう一つは、怪我をする危険があること。先の尖ったピンの扱いは難しく、使お うと手に取った際に誤って指を刺してしまうことも多々あった。

そういった不満や失敗から、19 世紀にはバネを用いたペーパークリップが発明されたが、これもまた止めた 跡が紙に残ってしまう問題や、ペーパークリップで固定した書類同士を重ねた際にかさばる問題が生じていた。 こうした問題を解決するべくして、ゼムクリップは発明されたのである。このように、複数枚重ねた紙をとめ るという目的のもとで得られた使用者の不満や失敗が、ゼムクリップの発明までの過程には常に見て取れる。

しかし、ここで注意しなければならないは、ゼムクリップの発明には針金の素材技術が不可欠であったということだ。適度な弾性を持った針金のような素材が無ければ、使用者の不満や失敗によってゼムクリップのアイデアはもたらされても、実現はしなかったであろう。日本でも江戸時代に既に針金を使った工芸が発達していたことからも分かるように、針金はゼムクリップの誕生よりも以前に存在する素材技術であったが、ゼムクリップに最適な弾性を実現するためには試行錯誤が繰り返されたと、ペドロスキーの著書にも書かれている。つまり、人工物の形の変化要因である「不満や失敗」と「技術環境の進歩」が等価に発生していたため、ゼムクリップは誕生したと言える。

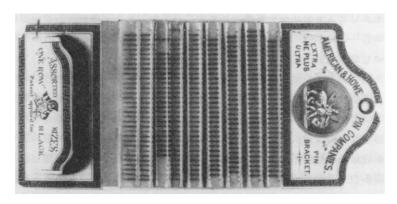


図 1.1.2-1 19世紀半ばに売られていたピンのセット



2. That which clips, or clasps; a device for clasping and holding tightly, as: a A grappling iron. b A clasp or holder for letters, bills, clippings, etc. c An embracing strap, as of iron or brass, for connecting parts together; specif., the iron strap, with loop, at either end of a whiffletree.

d Any of various devices for confining the bottom of a various forms of Clips for papers. trousers leg, used in bicycling. e Scot. & Dial. Eng. An instrument for lifting pots, etc., from a fire, or for carrying barrels, etc.



### 図 1.1.2-2 紙をとめるための道具たち

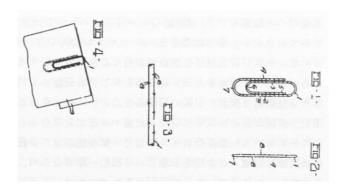


図 1.1.2-3 ゼムクリップの形

### 1.1.3 ファスナー

ファスナーの発明も、前述してきた製品に並んで偉大なものである。衣服の端同士を留めるという目的を果たすために最初に発明されたのは、上にも挙げたピンのような形であった。動物の骨や岩石を加工して古代は作られていたと考えられるが、後にそれは鉄などの金属に代わられる。ピンは、衣服の端を留めるという機能は確かに満たしたが、しばしば抜け落ちてどこかへ行ってしまう問題に使用者は悩まされていた。身体と一緒に衣服が動いても固定を持続させる改良がピンには求められていた。

そんな悩みを解決したのが、19 世紀になって発明された安全ピンであった。バネの原理を用いてピンが開閉するように設計された安全ピンは、それまでのピンのように抜け落ちることが無かった。しかしそれでも尚、身体にぴったりフィットするような衣服の端は安全ピンでは十分に固定できなかった。安全ピンで固定した箇所の布がスルスルと動いてしまうからである。その点で安全ピンよりも優れていたフックやボタンは13世紀に既に発明されていたが、取り外しにかかる時間は安全ピンと同じく、もしくはそれ以上に使用者をイライラさせていた。

こういった使用者の不満を一掃したのが、19 世紀になって発明されたファスナーであった。金属の爪を交互 に噛み合わせたファスナーのおかげで、衣服に限らず靴などにおいても素早い着脱が可能になったのである。

ペドロスキーはファスナーにおいても「形は失敗にしたがう」の理論が適用され、使用者の不満の蓄積が発明を呼んだのだと主張しているが、この場合は無から有を生むような発明であるため、少し事情が異なるように思える。ファスナーの発明される以前には、確かに衣服の着脱においての不満が存在していたが、それまで存在していたピンや安全ピン、さらにはフックやボタンの形とは、ファスナーの形はかけ離れている。

また、ファスナーは製品として流通しはじめの時期にうまく開閉ができない事故が連発しており、かえって使用者に不満を与える結果となってしまっていたと言う。そのたびに細かな改良を繰り返して、現在の問題なく開閉が行える形に至った点からは、前章で取り上げた針金の素材技術に見られたような、試行錯誤から確立される技術の一面を感じさせられる。

したがって、ファスナーの発明は技術環境そのものを変化させたと言えるので、「使用者の失敗」から形が発生したとは必ずしも断言はできないと思われる。この場合、「技術環境の進歩」がファスナーの形を発生させたと言った方が適切かもしれない。

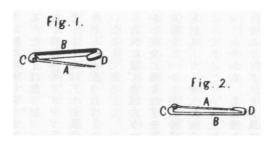


図 1.1.3-1 安全ピンの形

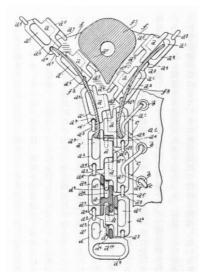


図 1.1.3-2 19 世紀後半に発明されたファスナー

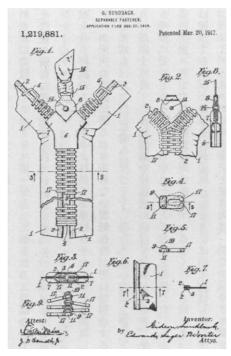


図 1.1.3-3 20 世紀初頭の安定した開閉の行えるファスナー

# 1.2 自転車フレームの形

ここまで身の回りの製品のなかから実例を示しながら述べてきたように、日々私たちが使用している人工物の 形は、使用者の不満や失敗の蓄積、技術環境の進歩のいずれか、もしくは両方によって変化がもたらされてき たことは確かである。

そんななか自転車フレームは、使用者の不満が蓄積されず、技術環境も大きな進歩を見せなかったことから、 約 100 年に渡って形が変化していない。

実際に歴史を紐解いてみると、現在最も一般的なダイヤモンド形に落ち着いて以後、新たな形の提案がされていないことがわかる(図 1.2-1)。長い年月をかけて改善や改良を繰り返すなかで、金属パイプの溶接加工によって一定の強度、軽量化、生産性を実現できるダイヤモンド形に、良くも悪くも落ち着いてしまっていると言える。

本章では、ダイヤモンド形と、その次に一般的なスタッガード型、ダブルループ型の三種類を取り上げ、それ ぞれの特徴を示す。

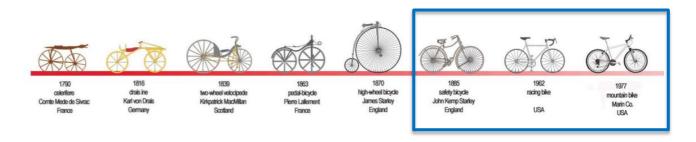


図 1.2-1 自転車フレームの形の変化の歴史[2] (青色で囲まれた期間において形に変化が無い)

### 1.2.1. ダイヤモンド形

日本工業規格 (JIS) の自転車フレームに関する記載 [3] を見ると、ダイヤモンド形とその他とに大別されて 定義されていることからも分かるように、現在市場に流通するフレームの形はダイヤモンド形が主流である (図 1.2.1-1)。

前後二つの三角形を合体させたダイヤモンド形は、安全型自転車(前輪と後輪で同じサイズのタイヤを装着するなどして、安全性を高めた自転車)の発明後、多くの自転車に採用されてきたが、その理由としては生産性や重量、強度において好都合であることが大きい。

素材に金属パイプを用いる前提において、湾曲させる必要もなく切断と溶接といった加工のみでつくられるダイヤモンド形は、生産性が極めて高い。また、金属パイプの骨格だけでフレームの構成できることから軽量でありながら、構造上強度も実現できる。(表 1.2.1-3)

「ママチャリ」と呼ばれるようなシティサイクルには、後述するスタッガード型やダブルループ型が最近では多いが、マウンテンバイクやクロスバイク、ロードバイクといったスポーツバイクではダイヤモンド形が大半を占めている。



図 1.2.1-1 JIS に登録されている自転車フレーム (左) [3] 図 1.2.1-2 ダイヤモンド形フレームの自転車 (右) [4]

車種	フレームの	荷重 (重り質量[kg])			振動	加速度		
	種類	ヘッド部	シート	ハンガー	合計	数	[m/s <sup>2</sup> ]	加振回数
			部	部		[H		[回]
						z ]		
一般用自転車	菱形	5	5 0	2 0	7 5	5 ~	19.6	100,000
						1 2		
	その他	5	4 5	1 5	6 5	5 ~	17.6	70,000
						1 2		
マウンテンバイク類形車	菱形	1 0	5 0	2 5	8 5	5~	22.0	150,000
						1 2		

表 1.2.1-3 フームの耐振性試験条件(JIS D9401)[5]

# 1.2.2 スタッガード形

スタッガード形は、ダイヤモンド形の次に代表的な形で、トップチューブ (上管) を低くしたフレームである。 トップチューブが低く取り付けられており、前から足を上げてまたげるので、女性や子供、高齢者にとっても 乗りやすい。

しかし、その分ダイヤモンド形に比べると強度が劣るため、管を太くするか、肉厚を大きくしなければならず、 重量も増してしまう。

「ママチャリ」をはじめとするシティサイクルの場合、強度や重量といった点は重視されないため、「乗りやすさ」を重視したスタッガード形や、後述するダブルループ形が採用されている。



図 1.2.2 スタッガード形フレームの自転車[6]

# 1.2.3 ダブルループ形

ダブルループ形は、スタッガード形と並んでダイヤモンド形に次ぐ流通度の高いフレーム形である。スタッガード形をベースとして、トップチューブ(上管)を湾曲させることにより、さらに前からまたいで乗りやすくしている。

乗りやすさに関してはスタッガード形をも上回るが、その代償として強度は本章で取り上げた三種類のうちでは最も弱く、また重量も最も重い。シティサイクルのフレームは、このダブルループ形が最も多い。 最後に、本章で紹介した三種類のフレームの特徴を表にまとめた(図 1.2.3-2)。



図 1.2.3-1 ダブルループ形フレームの自転車[7]

	ダイヤモンド形	スタッガード形	ダブルループ形
強度	強い	やや弱い	弱い
重量	軽い	やや重い	重い
特徴	スポーツサイクルに用いられる。最	シティサイクルに用いられる。トップチ	「ママチャリ」に用いられる。スタッガ
	もシンプルだが、剛性があり、軽量	ューブ (上管) が低くされ、前から跨い	ード形よりさらに前から跨いで乗りや
	である。	で乗りやすい。	すい。

図 1.2.3-2 フレームの形の比較

# 2. 関連する研究・活動

本章では、本研究と関連する研究や活動を取り上げる。また、本研究の理論を支えるデジタル・ファブリケーションや、パーソナル・ファブリケーションについて説明する。

### 2.1 オーダーメイドシステム

自転車フレームの種類には前述してきた通り、ダイヤモンド形やスタッガード形、ダブルループ形の三種類が 主で、非常に限定的である。また、その差もトップチューブ(上管)の高さだけに留まるような状況である。

画一化されたフレームの形に倦怠感を覚える場合には、オーダーメイドシステムが一つの解決策としてある。 フレームのオーダーメイドシステムの多くは、競技用のロードバイクなど走行性を追求する目的で提供されているが、日常的に使用する自転車のフレームにおいてもオーダーメイドでつくることが可能である。

通常は自分の身体の寸法から乗りやすさを最適化する形でオーダーするが、純粋に自分が好きな形ということであっても、オーダーすることはできる。

しかし、オーダーメイドシステムを利用する際には高いコストが避けられない。代表的なオーダーメイドシステムで Panasonic の提供する「POS(Panasonic Order System)」では一台 10 万円以上かかってしまうことから、社会への浸透度は低い現状にある。自転車を愛好する一部のユーザーを除き、高いコストを払ってまで自分の欲しい形の自転車を求めることは無いだろう。



図 2.1 POS (Panasonic Order System) [8]

### 2.2 デジタル・ファブリケーション

近年レーザーカッターやミリングマシン、3D プリンタといったデジタルデータをもとに加工を行うデジタル工作機械が、メイカーやデザイナーだけでなく、エンドユーザーの間においても利用が広がっている。機械の操作性が高まったことや、低価格化や小型化が進んだことがその背景にある。従来の工業用として使用されてきた 3D プリンタと、現在のデスクトップタイプの 3D プリンタの大きさを比べるとそれは顕著である(図 2.2-1,2)。そうしたデジタル工作機械を用いたものづくりを「デジタル・ファブリケーション」と呼ぶ。

従来のものづくりとの比較においてデジタル・ファブリケーションが優れているのは、素材の複雑な加工が行 える点にある。デジタルデータをもとに素材を加工することから、アナログでは不可能だったような複雑な形 状も実現できる(図 2.2-3)。

個人にとっては、加工できる素材の幅が広がったこともメリットとして大きい。たとえば、これまで DIY と言えば、加工ツールの制約から木材が使用されることが多かったように思うが、デジタル・ファブリケーション技術を利用すれば、アクリルや樹脂、ガラスや金属の加工も可能である。

しかし、デジタル・ファブリケーションの真義は、デジタルとフィジカルを等価に、そして可逆的に扱えることである。デジタル・ファブリケーションで使用される 3D スキャナは、フィジカルな物質をデジタルなデータへ変換、3D プリンタはデジタルなデータをフィジカルな物質へ変換する機械である。

また、3D プリンタで最小構成要素となるモジュールを出力し、それを複数アセンブリして構造物をつくると すれば、その構造物は分解と組み立ての自由が担保されることから、可逆的なものづくりも実現する。

このように、デジタル・ファブリケーションがもたらす可能性は広域にわたっている。



図 2.2-1 工業用 3D プリンタ[9]



図 2.2-2 小型化した 3D プリンタ[10]



図 2.2-3 木材に複雑な切り込みを入れたもの[11]

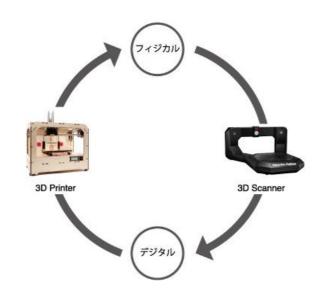


図 2.2-4 デジタル・ファブリケーションにおける、 デジタルとフィジカルの関係性[12,13]

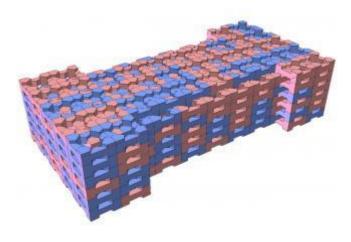


図 2.2-5 最小構成要素でつくられた構造物[14]

### 2.3 パーソナル・ファブリケーション

デジタル・ファブリケーション機器の小型化、低価格化によってそれがエンドユーザーにも解放されたことで、「生産者」と「消費者」という明確な分断は薄れ始めている。デジタル工作機器は、単に消費者によるものづくりを盛んにしただけではなく、従来の量産化を目的とした製造業では満たせなかった製品の個別性を実現した。

大量生産の下では生産効率が重視され、製品設計の均一化が前提とされることから、使用者それぞれが持つ異なるニーズを満たすことは困難であった。たとえば、オランダのデザイナーJens Dyvik の開発した椅子のパラメトリック・モデリングツールを使用したチェロ奏者は、演奏時の姿勢に最適な椅子を自ら設計し、CNC (Computer Numerical Control) 機器を使用して制作した。彼女(チェロ奏者)は、市販される椅子のなかから、演奏時の特殊な姿勢に合った高さ、形の椅子を探すことが困難であったそうだ。「チェロを演奏する際に座る」という市場の製品では満たせなかった非常にニッチなニーズを、デジタル・工作機械を使用して形にしたのである。まさに、「自分による自分のためのものづくり」である(図 2.3・1.2)。

デジタル工作機械を消費者が使用することの最大の意義は、こうした大量生産では満たせなかった個々人のニーズの実現にあり、このように消費者が自分のニーズを最大限反映させた製品を設計・生産することを「パーソナル・ファブリケーション」と呼ぶ。

今まで大量生産もしくは少量生産しか製造業ではコスト管理の側面から実現できなかったが、個人が生産者となるパーソナル・ファブリケーションならば、適量生産が可能となり、一品からでも生産することができるのである。従来からある DIY 文化と比較すると、個人による個人のためのものづくりという側面は同じであるが、従来工業にしか使われてこなかった高性能なデジタル工作機械をツールとする点で、パーソナル・ファブリケーションは進歩的と言える。





図 2.3-1 自らデジタル工作機械を使用して椅子を制作する (左) [15] 図 2.3-2 パーソナル・ファブリケーションによって実際に制作された椅子 (右) [15]

ここまで、本研究の重要な背景となる、デジタル・ファブリケーションとパーソナル・ファブリケーションについて述べてきたが、その登場以前と以後について、下図(図 2.3-3)にまとめた。

データをデジタル工作機械の使用を通して加工するデジタル・ファブリケーション技術は、はるか以前から存在していたが、それが小型化したのはここ数年の出来事である。また、それに伴ってデジタル・ファブリケーションでつくられるものも変化した。それまで、デジタル制御のポテンシャルを生かした複雑な形状のものをつくるために使用されてきたが、小型化によりエンドユーザーへも使用が拡大したことで、身近なものづくりにも使用されるようになった。そして同時にそれは、ものの形にも大きな影響を与えている。それまで技術環境の制約を受けていた使用者らのアイデアは解放され、これまで市場に存在しなかったようなものの形が生み出されつつある。



図 2.3-3 デジタル・ファブリケーションの登場前後の比較[16-19]

### 2.4 本研究の目的

デジタル・ファブリケーション技術の民主化は、エンドユーザーのものづくりを活発化させたが、それは単なる既存製品の自作ではなく、市場には存在しなかったものをデジタル工作機械でつくる、「自分による自分のためのものづくり」パーソナル・ファブリケーションをもたらした。生産者によって提供される製品を使用者が享受するという従来のトップダウンから、使用者自ら生産して使用するボトムアップに、ものの生産と消費の図式は塗り替えられつつある。またそれは、ものの新たな形を生み出してもいる。今まで技術環境の制約を受けていたエンドユーザーのアイデアは解放され、自由な発想でものをつくることが可能となっている。

これによって、過去およそ 100 年にわたって形が変化しない自転車フレームにおいても、新たな可能性が広がっている。製品として流通している自転車フレームの形は、金属パイプを素材として用いることが前提とされてきたことからダイヤモンド形やスタッガード形、ダブルループ形に限定されてきたが、多様な素材に対して複雑な加工を行えるデジタル・ファブリケーション環境の下では、個人が自分の好きな形のフレームを生産することもできる。

そこで本研究では、デジタル・ファブリケーションの社会への浸透を踏まえ、パラメトリック・モデリングツールの開発を通して、自転車フレームの新たな形の検討を行う。素材には、デジタル工作機械で加工のし易い木材を使用する。「パラメトリック・モデリングツールの操作によるデータの生成」→「デジタル機械によるデータの切削」→「他のパーツと組み立て」という一連のプロセスを通して、現代のコンテクストに合わせた新しいフレームの形を探索する。

### 2.5 Holz Racer

本研究ではパラメトリック・モデリングツールの操作を通じて生成されたデータをもとに、CNC (Computer Numerical Control) 工作機械「ShopBot」で木材を加工することで、新しい形の自転車フレームを制作する。 同様の方法で自転車フレームを制作している事例として「Holz Racer (図 2.5-1)」を紹介する。

Holz Racer は既製フレームのパイプの一部を切断し、木材のフレームに埋め込むことで、ハンドルやペダルといった金属パーツとの摩擦を解決しているが、本研究でもこの方法でフレームを制作している。木材でできたフレームに直接他のハンドルやペダルといった金属製パーツを埋め込むと、それらの運動によって木材部分が摩耗してしまうため、このような方法を採用している。

木材をデジタル工作機械で加工し、一部金属パーツを埋め込んで木製の自転車フレームを制作している Holz Racer は、加工の過程や素材は同一であるが、パラメトリック・モデリングツールの開発とその使用を通して新たな形を検討する本研究とは異なる。

また、Holz Racer はデジタル工作機械と設計ソフトの熟練者によって実現したものであり、パーソナル・ファブリケーションを前提とした本研究とは違いがある。



 $\boxtimes 2.5-1$  「Holz Racer」 [20]



図 2.5-2 CNC をつかって木材を加工する[20]



図 2.5-3 金属パーツを埋め込む[20]

### 2.6 Bike CAD

自転車フレームの新たな形の探索を目的としてパラメトリック・モデリングツールの開発を行う本研究に対し、 既存している自転車フレームの設計ツールとしては、代表的なものに「Bike CAD (図 2.6)」がある。 無償版と有償版 (Bike CAD Pro) とがあり、有償版ではより本格的な形の設計が行える。

しかし、Bike CAD はあくまでフレームの外観の検討を行うことが目的のツールであり、エンドユーザーより もメイカーのエンジニアがターゲットとされている。そのため、フレームの形の他に、色やプリント文字など、 装飾部分を操作できる機能が充実しているおり、製品としての完成イメージを想像しやすくなっている。この ことから、個人によるパーソナル・ファブリケーションを前提としている本研究とは異なる。

また、工作機械で加工する図面を、Bike CAD で設計した形から生成することはできないことから、実際に工作機械で加工可能なデータを生成する本研究のパラメトリック・モデリングツールとは性質に違いがある。

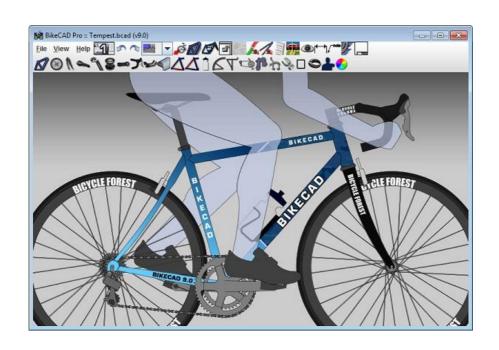


図 2.6-1 「Bike CAD」 [21]



図 2.6-2 Bike CAD Pro で設計されたフレーム[22]



図 2.6-3 Bike CAD で設計されたフレーム[22]

### 2.7 Greencycle

オークランド工科大学の Paulus Maringka は修士論文において、途上国地域において最適な自転車のあり方を「Greencycle(図 2.7-1」」の制作を通して提案している。本来自転車は移動手段として発明されたが、現在多くの途上国では、荷物や人の輸送手段として使用されている。このような場合、設計時の想定を超えるような荷重がかけられていることから、故障も頻繁に起こる。そこで、自転車の輸送手段としての機能を拡張、改良することで、途上国地域の生活を改善するというのが Maringka の研究のコンセプトである。

さらに Maringka は、自転車フレームをローカルなマテリアルから生産することで、自転車のサステナビリティを高めようとした。研究の拠点としたインドネシアでは竹が豊富に入手できたことから、竹製のパネルを切り出し(図 2.7-2)、オリジナルのジョイントパーツを金属加工する(図 2.7-3)ことで、Greencycle のフレームの制作を行っている。

Maringka の研究と本研究は、モチベーションや文脈は異なるものの、ファブリケーションに関しては共通点が見られる。デジタル・ファブリケーション環境下でフレームを制作し、タイヤやハンドルといったその他のパーツは既製品を用いている点は類似している。

しかし、不要になった金属フレームの一部を切断して木製のフレームに埋め込むという方法を本研究と上述した Holz Racer ではとっているのに対し、Greencycle の場合オリジナルの金属パーツを一から設計、制作して用いている点では違いが見られる。



 $\boxtimes 2.7-1$  「Greencycle」[2]



Fig 121. Cutting diagram showing the number of bicycle parts that can beproduced out of a 1200 x 2400mm bamboo based panel

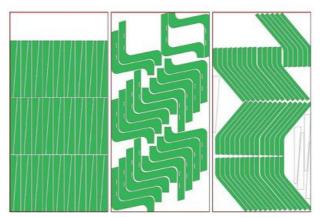


Fig 122. Cutting diagram showing identical parts cut out on individual panels

# 図 2.7-2 Greencycle のパーツの CNC 加工データ[2]



図 2.7-3 Greencycle のジョイントパーツ[2]

### 3. 設計·制作

### 3.1 木製自転車フレームの制作

本研究では、パーソナル・ファブリケーションを前提として自転車フレームの新たな形の検討を行うことから、 実際に制作する自転車フレームの素材には、専門家でない個人でもデジタル工作機械を使用した加工が行い易い木材を用いる。

自転車フレームと言えば、金属パイプの溶接によってつくられたものが一般的であるため、木材では強度を不 安視する意見も多いかもしれない。しかし、木材を素材に使った自転車フレームは世界を見渡してみるとけし て珍しくはない。デジタル工作機械を使用して、たくさんの個人によってつくられている。

各国で木材を素材として自転車フレームを制作している個人のモチベーションは、「自転車が好きだから」という非常にシンプルなものである。「polycycle」と名付けられた木製自転車フレームを自宅のガレージで制作した Merlin Crossingham は、木製自転車フレームを自作した理由を以下のように述べる。

For a long time I had mentioned to people how I would like to build a wooden bike. Eventually I had said it to so many people that I was running out of excuses as to why I hadn't started. So I set about designing and making a wooden bike. I wanted to create a hand made bike in my garage using every day tools. Although I don't have any special training or skills, I have always liked making things, so while I was confident I could do it, I had a steep learning curve. Frame geometry, material strength, aesthetics all things I had to get to grips with before I started building.

「長い間、私は木製の自転車フレームを制作したいと人に話していた。そしてついに、制作を始めない口実を使い果たした。だから私は木製の自転車フレームを設計し、制作に着手したのだ。私は日用的なツールを使用して、自分のガレージで自転車フレームを自作したかった。特別な技術を持ってないけれども、ものづくりが好きだったので、私は自分を信じて必要な技術を一通り習得した。フレームの形状、材料強度、美学など、私は全てのことを制作開始する前に習得しなければならなかった。」

Crossingham が、工作スキルが全くないなかで自転車フレームを自作できたことは、彼の言葉にあるように、「自転車が好きだから自分でつくってみたい」という非常にシンプルなものだった。「ooが好きだ」という事実は、人にそれを自作したいと思わせる十分な理由になる。世界中でつくられた木製フレームを見てみると、一般的なダイヤモンド形やスタッガード形とは異なる斬新な形のものを見られることから、本研究のモチベーションと同じく、新しい形を追求して制作した個人も中にはいるかもしれない。



図 3.1-1 世界中でつくられた木製自転車フレーム数々

このように木製フレームの制作事例は、前章で関連研究として取り挙げた「Holz Racer」や「Greencycle」の他にも数えきれないほど多く存在していることが分かった。しかしそれでも、人が乗った際に十分な強度を木製フレームが保ち得るかは、実際の制作を通してしか分からない部分が多い。そこで、パラメトリック・モデリングツールの開発と、その操作を通じた新たな形の検討へと移る前に、デジタル・ファブリケーションで木製フレームの自転車を制作可能か、そして乗ることができるかのテストを実施した。

今回は、上記の実証が目的であるため、フレームの形において新しさは追求せず、木材を二次元平面で加工したパーツを組み合わせて制作しやすい形を設定し、手作業で一から設計を行った。

まず、三次元 CAD ソフトの Rhinoceros[23]を使用してフレームの設計をし(図 3.1-2)、それをもとに加工図面として使用する二次元データを生成する(図 3.1-3)。

そして、CNC(Computer Numerical Control)切削機械の「ShopBot[24]」で、厚さ 18mm と 30mm の合板を材料として加工図面から切削を行う(図 3.1-5)。ShopBot はベクターデータをもとに、加工の深さや順序といったパラメータを入力することで素材を切削できる機械で、3\*6 板や 4\*8 板といった建築材に使用されるような大型な素材でも加工できることから、家具スケールから建築スケールまで、デジタル・ファブリケーションの様々なシーンで活用されている。

ShopBot でフレームの木材部分のパーツを切り出せたら、次は不要になった金属フレームを切断して得たジョイントパーツ (図 3.1-6) を埋め込む。最後に、タイヤやハンドルといった他の既製パーツと組み合わせることで、一台の自転車を完成させた (図 3.1-7)。

完成した自転車は、大人が乗っても壊れない十分な強度を持つことが確認できた。

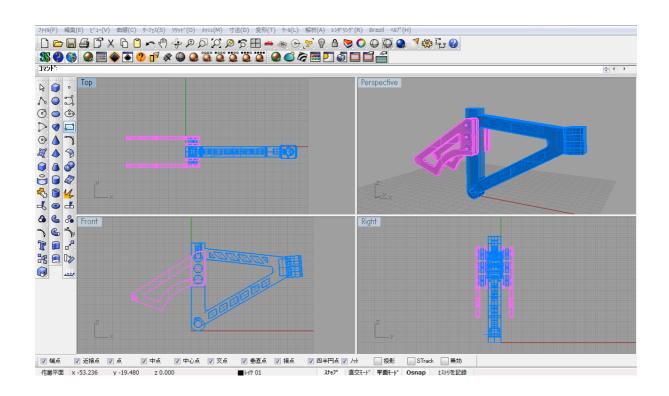


図 3.1-2 Rhinoceros で設計した三次元データ



図 3.1-3 設計した三次元データのレンダリング画像

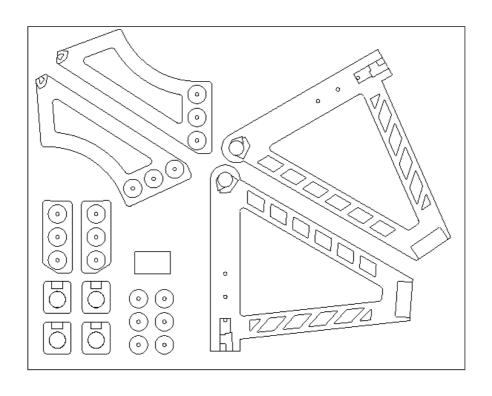


図 3.1-4 ShopBot で加工する二次元データ



図 3.1-5 ShopBot でデータをもとに切削を行う



図 3.1-6 金属フレームを切断して得たパーツ



図 3.1-7 実際に制作した木製フレームの自転車

### 3.2 パラメトリック・モデリングツールの開発

本章では、自転車フレームの新たな形の探索を目的として開発した設計支援ツールの概要について述べる。

今回開発したパラメトリック・モデリングツールは、三次元 CAD ソフトの Rhinoceros と、そのグラフィカルアルゴリズムエディターのプラグインである Grasshopper[25]を使用して実装した。Grasshopper は、コンポーネント(命令や数値を入れた箱型のオブジェクト)をつなぐことで、プログラミンング言語を記述するようにパラメトリック・モデリング(三次元モデルの一部を変数で定義し、代入値を変えることでモデルの形状修正する設計手法)を行うことができる。

たとえば、図 3.2-1 では、「Line」 コンポーネントに二つの「Point」 コンポーネントを Grasshopper 上(右 ウィンドウ)でつなぐことで、二つの頂点を結ぶ直線を Rhinoceros 上(左 ウィンドウ)で描いている。

Grasshopper は、このようにパラメータとコンポーネン使いこなし、視覚的な操作を通して設計していくインターフェースであることから、ビジュアル・プログラミングとも呼ばれる。アルゴリズミックな複雑性をもったモデルの設計や、その形状修正も素早く行えることから、建築分野で多く使用されている。

今回は、自転車フレームの各所における寸法や角度といったパラメータを変えながら、新しいフレームの形を 検討可能な環境を開発する必要があったため、Grasshopperを使用することにした。

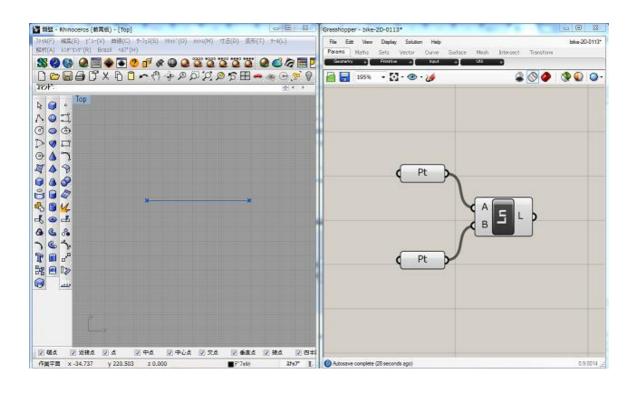


図 3.2-1 「Grasshopper (右)」と「Rhinoceros (左)」

そして、今回 Grasshopper と Rhinoceros を使用して開発したパラメトリック・モデリングツールが下に示した図 3.2-2 である。Grasshopper(右ウィンドウ)上のスライダーを使って変数への代入値を変えることで、Rhinoceros(左ウィンドウ)上の自転車フレームの形を変えていく。

設計したフレームは、CNC(Computer Numerical Control)機械で加工できるように展開図として Rhinoceros 上に生成される。この展開図を「Bake」(Rhinoceros 上にベクターデータとして焼き付ける) すれば、あとはそのまま CNC で加工し、組み立てることで自転車フレームが完成する。

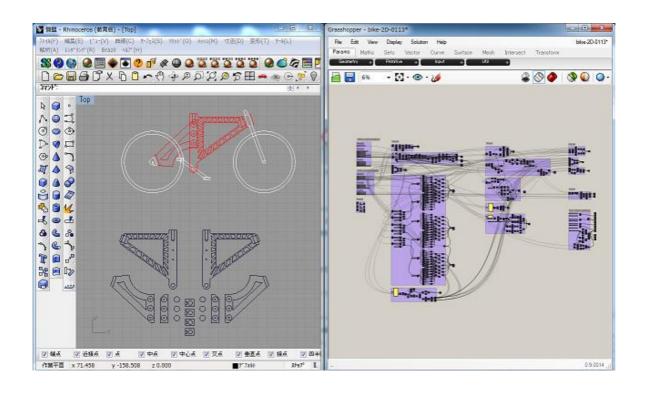


図 3.2-2 設計支援ツールの画面

Grasshopper で実装したパラメトリック・モデリングツール(図 3.2-2)のスクリプトについて以下で説明していく。図 3.2-2 に示した通り、スクリプトは①から⑧までの部分に分かれており、実際にフレームの設計時に操作するのは、パラメータを変えるスライダー群が含まれた①、②と、設計完了後 Grasshopper から Rhinoceros へとベクターデータを焼き付ける(出力する)③のみである。

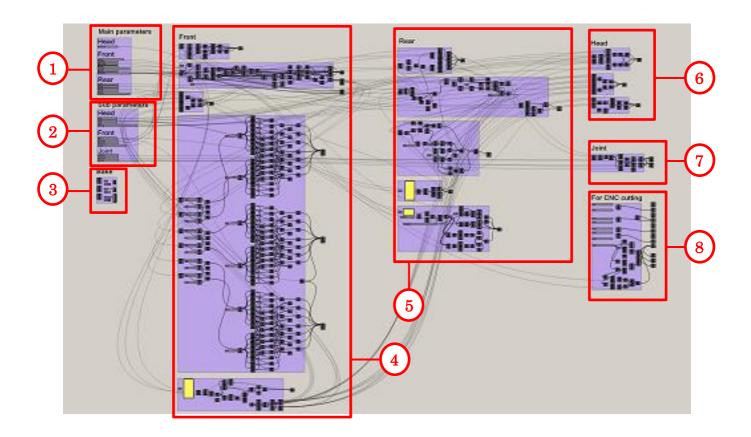
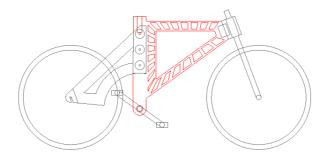


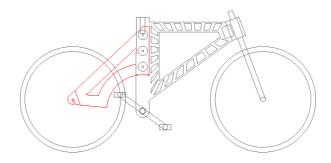
図 3.2-2 Grasshopper で実装したパラメトリック・モデリングツールの操作画面

- ① 「Main Parameters」... フレームの形を大きく変化させるパラメータ群。(数値の表示されている Box をスライドさせることでパラメータを変える。)
- ② 「Sub Parameters」... 細かな箇所を変化させるパラメータ群。(数値の表示されている Box をスライド させることでパラメータを変える。)
- ③ 「Bake」... 「For CNC cutting」で生成されたデータを Rhinoceros 上に焼き付ける。(「Bake」と書かれたコンポーネント上で右クリック→「Bake」を選択)

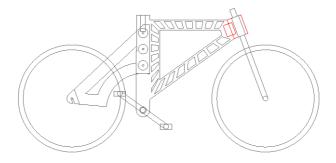
④ 「Front」... フレームの前方部分の形を生成する。



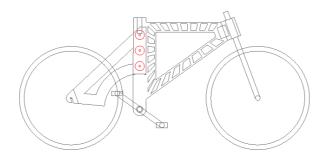
⑤ 「Rear」... フレームの後方部分の形を生成する。



⑥ 「Head」... フレームの最前部の形を生成する。



⑦ 「Joint」... 前方部分と後方部分をつなぐジョイントパーツを生成する。



⑧ 「For CNC cutting」... 設計したフレームを CNC で加工するための二次元データを生成する。

本ツールはこのように非常に多くのコンポーネントで構成されているが、ユーザーが設計の際に実際に操作するのは、①と②、つまり、パラメータを設定するスライダー群のみである。

以下で、全パラメータ「Main parameters」と「Sub parameters」について詳細な説明を行う。 それぞれ Head / Front / Rear / Joint の部分ごとに細分化されている(図 3.2-3)。

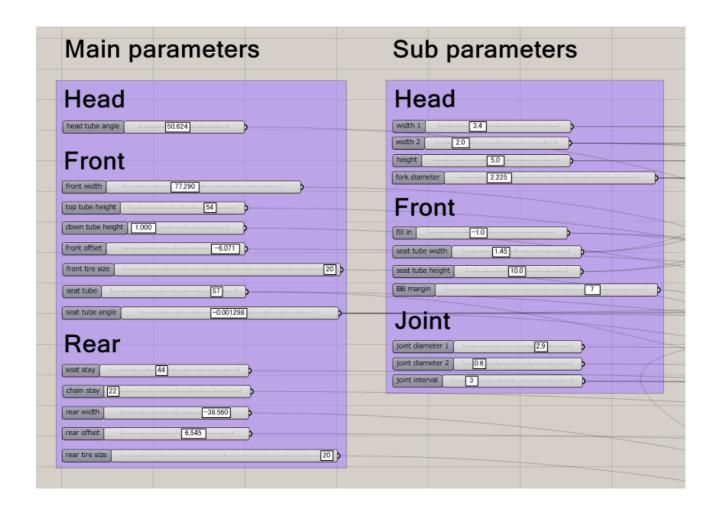


図 3.2-3 「Main parameters」と「Sub parameters」

各パラーメータを操作すると、具体的にフレームのどの箇所が変形するのか、以下に順に述べる。

#### [Main parameters]

- -Head
  - ・head tube angle ... ハンドルの角度を変えることができる。
- -Front

- ・front width ... フレーム前方部分の幅を伸ばしたり縮めたりできる。
- ・top tube height ... フレーム前方部分の上管の高さを変えることができる。
- ・down tube height ... フレーム前方部分の下管の高さを変えることができる。
- ・front offset ... フレーム前方部分の上管・下管の太さをかえることができる。
- ・front tire size ... 前輪の大きさを変えることができる。
- ・seat tube ... 座面の高さを変えることができる。
- ・seat tube angle ... 座面の角度を変えることができる。

#### - Rear

- ・seat stay ... フレーム後方部分の上管の高さを変えることができる。
- ・chain stay ... フレーム後方部分の下管の高さを変えることができる。
- ・rear width ... フレーム後方部分の幅を伸ばしたり縮めたりできる。
- ・rear offset ... フレーム後方部分の上管・下管の太さを変えることができる。
- ・rear tire size ... 後輪のサイズを変えることができる。

#### Sub parameters

#### Head

- ・width 1 ... フレーム最前部分のジョイントパーツの幅(左側)の長さを変えることができる。
- ・width 2 ... フレーム最前部分のジョイントパーツの幅(右側)の長さを変えることができる。
- ・height ... フレーム最前部分のジョイントパーツの高さを変えることができる。
- ・fork diameter ... フロントフォーク (前輪軸を支持しながら転舵させる部位) の直径を変えることができる。

#### - Front

- ・fill in ... フレーム前方部分の肉抜きの具合を変えることができる。(フレームの軽量化が目的)
- ・seat tube width ... 座面の支柱の太さを変えることができる。
- ・seat tube height ... 座面の支柱の高さを変えることができる。
- ・BB margin ... クランク (ペダルが装着される部分) の軸の高さを変えることができる。

#### - Joint

- ・joint diameter 1 ... フレームの前方と後方を接続する円形パーツ(太)の直径を変えることができる。
- •joint diameter 2 ... フレームの前方と後方を接続する円形パーツ(細)の直径を変えることができる。
- joint interval ... フレームの前方と後方を接続する円形パーツ(太と細)の間隔を変えることができる。

### 3.3 新しい形の検討

前章で触れたパラメトリック・モデリングツールを使用して、自転車フレームの新しい形の検討を行った。本 ツールの操作を通して生成された新しいフレームの形は、5つの要素の組み合わせによって成り立つと言える。 その5つの要素 (パターン)を次ページで詳しく説明する。

尚、本ツールでフレームの形を設計する上で前提とされる最もベーシックな形が以下(図 3.3-1)に示したものである。ダイヤモンド形をモデルとし、また、木材を素材としたデジタル・ファブリケーションによる加工を想定してこのような形となっている。

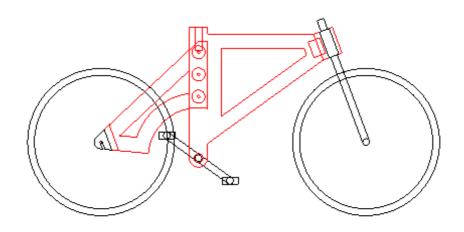
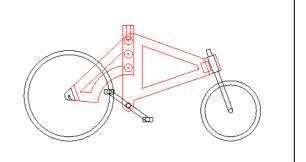


図 3.3-1 ベーシックなフレームの形

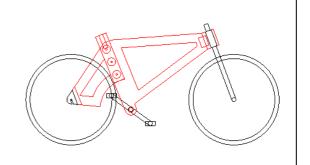
#### ① 前後で異なるタイヤを使用した形

近年では前輪と後輪に同じサイズのタイヤを用いることを前提としてフレームが設計されているが、 本ツールを用いれば、前後で異なるサイズのタイヤを使ったフレームを設計することもできる。



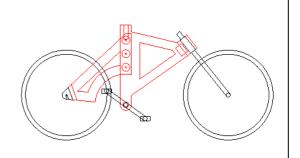
# ② 座面の取り付け角を前傾もしくは後傾にした形

一般的なフレームでは、使用者の身長差は座面の高さにより調整を行うが、本ツールでは座面の高さの他に、角度を変えられることから、身長の高い人は後傾に、低い人は前傾にすることができる。



### ③ フロントフォークの取り付け角を変更した形

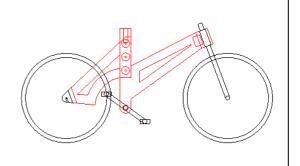
フロントフォークの取り付け角 (ヘッド角) は通常 60~75° であるが、より前傾、もしくは後傾にした フレームとすることができる。



# ④ フロント/リアの上管/下管の取り付け位置

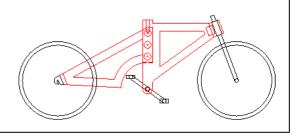
#### を変更した形

フレーム前方部のトップチューブ(上管)とダウン チューブ(下管)、後方部のシートステイ(上管)、 チェーンステイ(下管)の取り付け位置を変更でき る。



# ⑤ フロント/リアの長さを変更した形

フレームの前方部と後方部を伸ばしたり、縮めた り、長さを変更できる。



以上の5つの要素を踏まえたうえでその組み合わせによって、以下(図3.3-2)のような新しい形のフレームを、本ツールを使用して実験的に設計した。

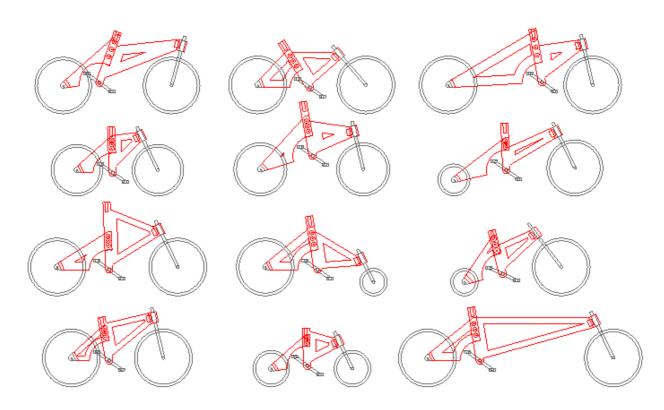


図 3.3-2 新しい形のフレームの数々

さらに、そのうちの一つ (図 3.3·3) を、実際にデジタル工作機械を使用して制作した。 制作の過程は、前章において木製フレームが実際に乗れる強度を確保し得るかを確認した際と同じである。

まず、CNC の ShopBot で加工可能な二次元データを用意する。本ツールでは、設計したフレームのベクターデータを生成することができるので、それを用いればよい。データをもとに ShopBot で木材を切削した後は、不要となった金属フレームを切断して金属パーツを用意し、それらを組み立てることで、フレームは完成する。フレーム以外のパーツは既製品を用意し、それらと組み合わせることで自転車として完成させた(図 3.3-4)。今回は、前後で異なるサイズのタイヤを装着するフレームの形を設計したので、大小それぞれのタイヤも用意した。

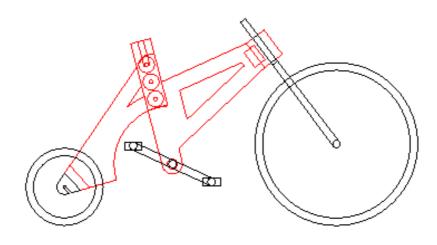


図3.3-3 パラメトリック・モデリングツールにより設計した二次元データ



図 3.3-4 実際に制作した自転車

# 4. まとめ・展望

#### 4.1 まとめ

本研究では、過去 100 年間にわたり変化のない自転車フレームの形に対して、現代のコンテクストに合わせた 新たな形の検討を、開発したパラメトリック・モデリングツールの操作を通して行ってきた。

デジタル・ファブリケーション技術が進歩し、パーソナル・ファブリケーションというかたちで個人へもその使用が拡大している現在、自転車フレームは、必ずしも、現在のような金属パイプでつくられ、現在のような形である必要はもはや無くなった。いま様々な分野でものの形が、パーソナル・ファブリケーションによって個人の立場からボトムアップに進化している。

本ツールの操作によって生成されたフレームの数々のように、素材も形も従来のものとは異なるフレームの形が、今後生まれていくだろう。

最後に、パーソナル・ファブリケーションの意義をもう一つ付け加えておきたい。それは、自分のためのもの を、自分でつくることにより生じる、ものへの愛着心である。

他人によって作られたものを買って使用するよりも、自分自身でつくったものを使用する方が、人は幸せを感じる生き物である。そして、愛着を抱いたものを人は長く使用することから、ものの使用期間も伸びる。

パーソナル・ファブリケーションは、消費社会におけるものの短命化に対する、持続可能な解決の一つでもあるのだ。

#### 4.2 展望

本研究で開発したパラメトリック・モデリングツールを使用して、実験的につくりだしたフレームの数々は、 各部位の長さや大きさ、角度を変化させた点では新しいと言えるが、その形の基本となっているのが既存のダ イヤモンド形であることは否めない。

市場に流通するフレームの形をベースにして形を検討した結果であることから、真の意味で「新しい形」とは 言い難いのは事実である。

デジタル・ファブリケーションという新しい技術環境と、その個人への開放であるパーソナル・ファブリケーションがもたらすのは、既存のものの形との連続性のない、全く新たな発想の上に成り立つ形かもしれないと、本研究を進めるうちに考えるようになった。

例えば、現在衣服に用いられるファスナーは発明された当時、それまで同様の機能を満たすために存在していたボタンやフックといったものの形とはかけ離れていた。ファスナーの形は、それまでとは全く異なる、本当の意味での「新しい形」であったと言える。

自転車が二輪であることから、既存の形から一定の発想の制約は受けざるを得ないかもしれないが、既存のものの延長線には存在しない、無から有を生むような「新しい形」を今後生み出していきたいと思う。

また、今回開発したパラメトリック・モデリングツールの使用を通して生成した新しい形の自転車フレームの数々は、実際に日常生活において使用を行っていない。形は新しくとも、実際に使用してみたら乗りにくいといった結果もあり得ることから、社会での実用においても今後検討を行っていきたい。

# 参考資料

本論文で使用した図の引用元、および参考文献を以下に記載する。

- [1] ヘンリー・ペドロスキー,「フォークの歯はなぜ四本になったか」,平凡社
- [2] Greencycle, <a href="http://aut.researchgateway.ac.nz/handle/10292/1059">http://aut.researchgateway.ac.nz/handle/10292/1059</a>
- [3] 生活の中に生きる自転車 「ママチャリ文化」 その1 ママチャリ誕生前(昭和30年代)

http://www.cycle-info.bpaj.or.jp/history/mamachari/mamachari30.html

- [4] HANWA Ltd. TRAILER BGC-C70, http://www.b-grow.com/brand/TRAILER/BGC-C70
- [5] 自転車探検! フレーム 耐震性, http://www.geocities.jp/jitensha tanken/frame.html
- [6] Bianchi METROPOLI LADY ACERA V-BRAKE 21SP,

http://www.cycleurope.co.jp/bianchi/bikes/urban/metropoli/metropoli lady-acera v-brake 21sp.html

- [7] Bianchi PRIMAVERA-L, <a href="http://www.cycleurope.co.jp/bianchi/bikes/urban/viaggio/primavera-l.html">http://www.cycleurope.co.jp/bianchi/bikes/urban/viaggio/primavera-l.html</a>
- [8] Panasonic Order System, <a href="http://cycle.panasonic.jp/products/pos/">http://cycle.panasonic.jp/products/pos/</a>
- [9] voxeljet Industrieller 3D-Drucker VX2000, http://www.voxeljet.de/systems/3d-druckervx2000/
- [10] Cube 3D Printer, <a href="http://cubify.com/blog/introducing-the-new-cube-3d-printer/">http://cubify.com/blog/introducing-the-new-cube-3d-printer/</a>
- [11] Wood Loop auf Biegen und Brechen,

http://www.detail.de/architektur/news/wood-loop-auf-biegen-und-brechen-020166.html

[12] CNET MakerBot Replicator 3D printer beams in,

http://www.cnet.com/8301-33372\_1-57355399/makerbot-replicator-3d-printer-beams-in/

[13] MakerBot Digitizer Desktop 3D Scanner,

 $\frac{\text{http://www.microsoftstore.com/store/msusa/en }US/pdp/MakerBot\text{-}Digitizer\text{-}Desktop\text{-}3D\text{-}Scanner/productI}{D.287399300}$ 

[14] Rapid Assembly for Physical Voxel Fabrication (Digital Materials),

http://creativemachines.cornell.edu/Rapid Assembler

- [15] Layer Chair, http://www.dyvikdesign.com/site/portfolio-jens/products/the-layer-chair
- [16] Laser cutting, http://en.wikipedia.org/wiki/Laser cutting
- [17] Epilog Mini 18 Laser System, http://www.epiloglaser.com/legend\_mini18.htm
- [18] accessories, <a href="http://www.instructables.com/id/accessories/?lang=ja">http://www.instructables.com/id/accessories/?lang=ja</a>
- [19] Sporknife by doob, http://www.fortytwo.sg/sporknife-by-doob.html
- [20] Holz Racer, <a href="http://vimeo.com/43574644">http://vimeo.com/43574644</a>
- [21] BikeCAD, http://www.bikecad.ca/
- [22] Design Archive, <a href="http://www.bikecad.ca/archive">http://www.bikecad.ca/archive</a>

- [23] Rhinonceros, <a href="http://www.rhino3d.com/">http://www.rhino3d.com/</a>
- [24] ShopBot, <a href="http://www.shopbottools.com/">http://www.shopbottools.com/</a>
- $[25] \quad Grasshopper, \ \underline{http://www.grasshopper3d.com/}$

## 謝辞

本研究をすすめるにあたり、お世話になった方々に感謝の意を表したいと思います。

2年生の秋学期からこれまで、誰よりも長い間熱心なご指導をいただいた田中浩也先生に心より感謝申し上げます。SFC でものづくりがしたかった私に、デジタル・ファブリケーションという新たな文脈を与えて下さり、研究の方法や姿勢まで数えきれぬほどのことを学ばせていただきました。田中先生の「なんでも研究になる」という言葉は、本研究のテーマを設定する際に私の背中を大きく押して下さったものであります。

田中研で制作や研究をともにした先輩方や後輩、そして同期にも感謝したいと思います。なかでも、本研究の サポートを快く引き受けてくれた淺野義弘くんの協力がなければ、ORF での展示に無事作品を出展すること はできなかったでしょう。ありがとうございます。

田中研に入る以前にお世話になった、加藤貴昭先生、田島英一先生へも感謝申し上げます。2年生の春学期から半年間在籍した加藤研では、ピクトグラムのデザインをテーマに、人生で初めて研究に取り組みました。2年生の秋学期から半年間在籍した田島研では、自分自身がキリスト教であることも相まって、日本人の無宗教性について研究しました。加藤研と田島研での研究活動は、それぞれ半年という短い期間でしたが、現在の私の価値観に少なからず影響を与えています。

また、今年度採択していただいた山岸学生プロジェクト支援制度において、研究費のご支援をいただきました グリー株式会社の副社長山岸太郎様、ありがとうございました。お陰様で円滑に研究活動を行うことができま した。同制度で研究への批評をいただいた運営委員会の先生方、関係者の方々にも感謝いたします。

最後に家族や友人たちに感謝します。家族の理解や協力、友人の支えが無ければ、この充実した 4 年間の大学 生活はあり得ませんでした。本当にありがとう。