

日本学術振興会 科学研究費助成事業・基盤研究 B (2022～2024)

身体適合型自転車フレームのカスタムメイドデザイン

兵庫県立工業技術センター

後藤泰徳 福井航 吉岡淳也 兼吉高宏 福田純 森亮太 平田一郎

1. はじめに

本研究開発では、砂型 3D プリンタを活用し、筋骨格シミュレーションにもとづく自転車フレームのカスタムデザイン・製作の可能性を追求している。プロダクトデザイン分野においては、これまで規格化や金型による量産化によってコストダウンを図り安価に消費者に提供することで、生活の質 (QOL) 向上に貢献してきたが、近年、ラピッドプロトタイピング技術が進み、Industrial4.0 など IoT の急速な進化により、より個人のニーズに直結した個別化した製品を提供することが可能になりつつある。さらに、産業の IoT 化だけでなく、人間の活動情報のデジタル化をも視野に入れたスマート社会が謳われるようになった。兵庫県立工業技術センターでは早くからこの点に着目し、スマートフォン撮影画像から生成した足 3D デジタル

モデルに基づくランニングシューズのカスタムデザインシステム開発などに取り組んできた。

当センターでは日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究(B)「研究テーマ:身体適合型自転車フレームのカスタムメイドデザイン (2022～2024)」により、これまで取り組んできたプロダクトデザインにおける身体特性のデジタル化とその特性活用技術(筋骨格モデルによるシミュレーション)、さらに県内金属産業と取り組んできた砂型 3D プリンタを活用して、筋骨格シミュレーションにもとづく身体適合型自転車フレームをデザインモチーフ(課題)として設定し、これからのスマート社会にあったプロダクトデザイン方法の構築(図1)を目指した。

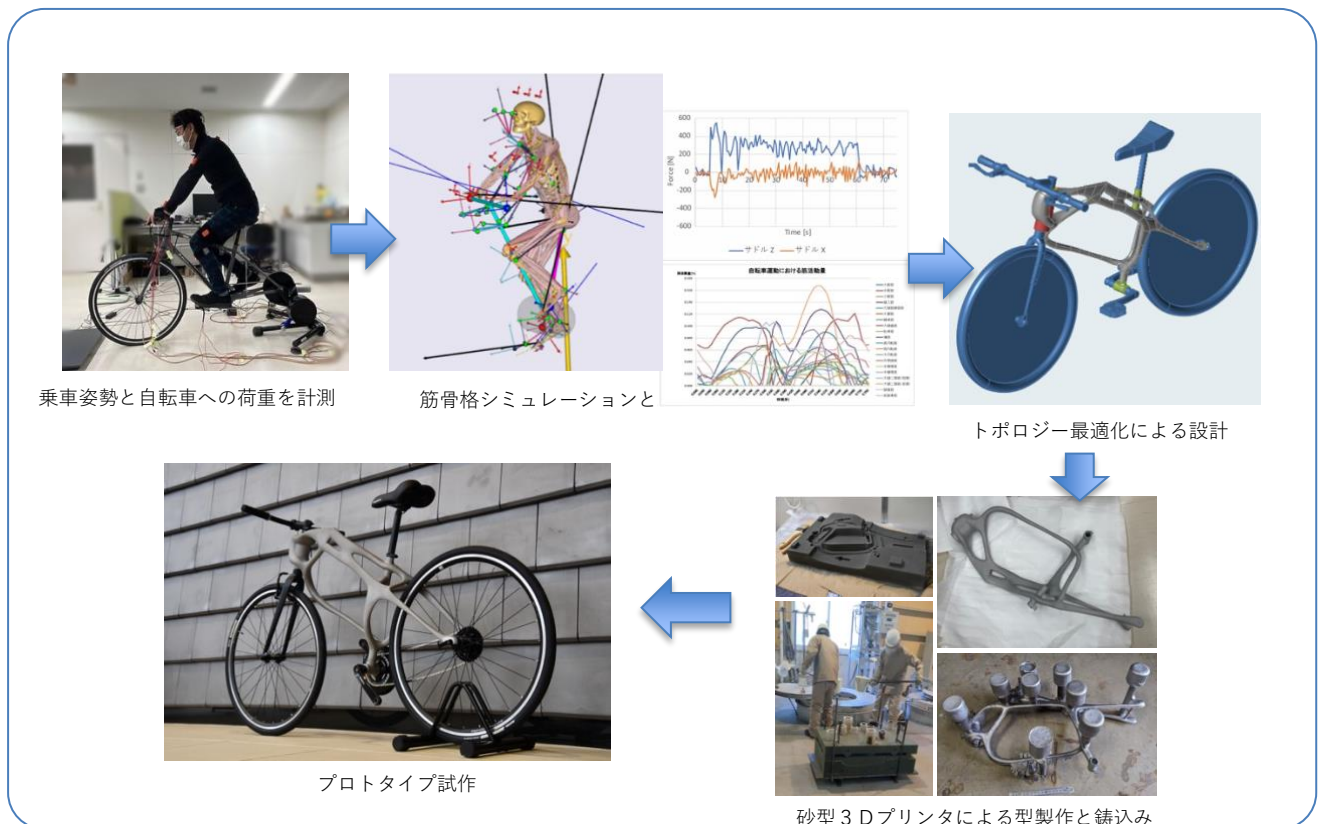


図1 研究開発の流れ

2. 計測

走行速度は舗装路を軽快に走る速度を基準として計測自転車の乗車姿勢を解析するためには、モーションキャプチャで計測する被験者の動きデータ以外に自転車と接触する部分（ハンドル、サドル、ペダル）の力および自転車の回転駆動部分（後輪）の仕事量を計測する必要がある。そこで、市販の自転車フレームやセンサ類を用いて、独自の計測システムを構築した。

2. 1. 計測システム構築

開発したシステムを図2（写真）・図3（構成図）に示す。自転車は Khodaa Bloom 社の RAIL ACTIVE(サイズ 440mm) を利用した。ハンドルおよびサドル、ペダルに掛かる負荷をひずみゲージで計測し、その反力を被験者に掛かる力とした。ひずみゲージのデータ取得には Arduino の AD 変換機能を利用し、計測用 PC との通信には Microsoft Excel のアドインである Microsoft Data Streamer for Excel を利用した。また、ペダルは常に姿勢が変わるため、IMU センサを取り付けて力の向きを補正した。被験者の動きは IMU センサ式モーションキャプチャ（Xsens、図4）を利用して計測した。後輪出力は Wahoo 社の KICKR スマートトレーナーを利用して計測した。

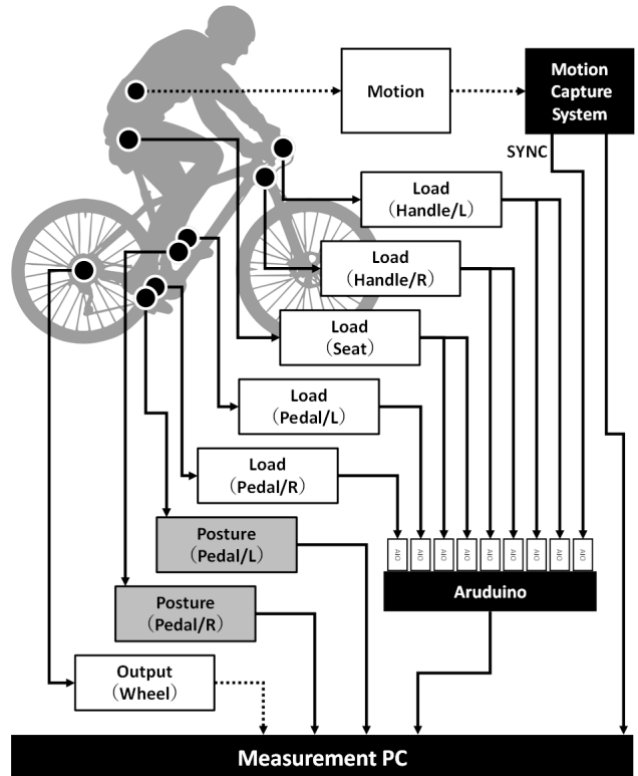


図3 計測システム構成

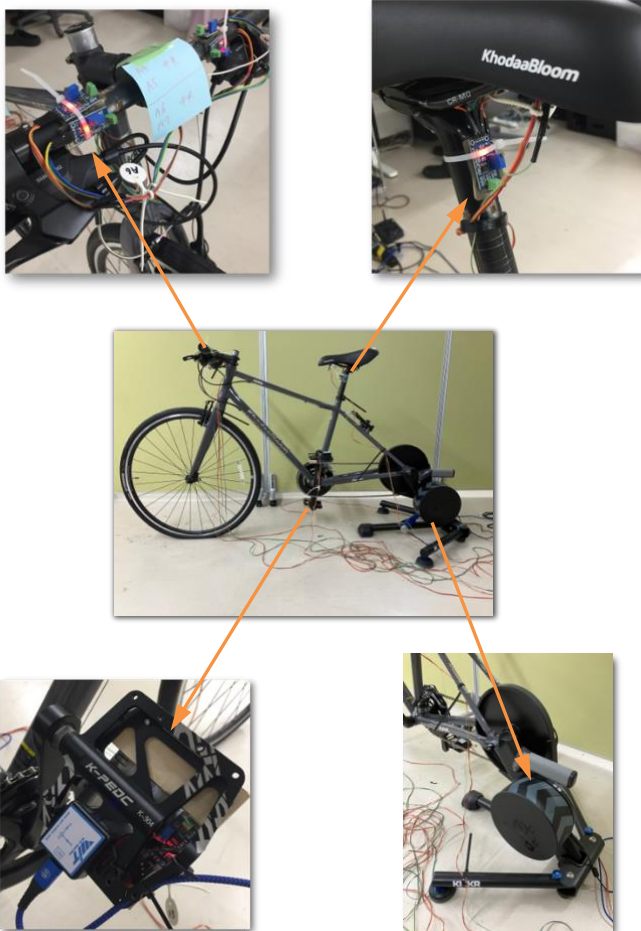


図2 計測システム

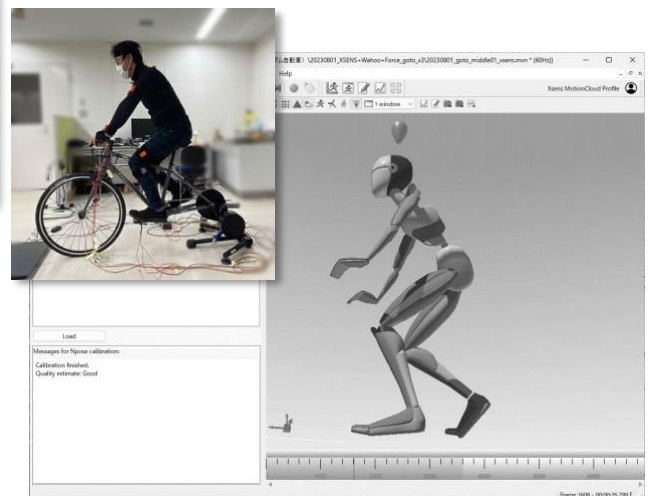


図4 モーションキャプチャシステム

2. 2. 計測

サドルの高さはフレームの構成上最も下げられる位置を基準（0 cm）とし、臀部をずらさずにペダルを踏み込める上限位置（+12 cm）、その間を 2 cm 刻みで高さ設定した。ハンドルの高さはサドルが +6 cm の位置（中間位置）を基準としてサドルとハンドルが水平になるように高さを設定した。ハンドルの高さはサドルの高さによらず固定とした。

走行速度は舗装路を軽快に走る速度を基準として 18km/h と設定し、計測は被験者の前に KICKR スマートトレーナーで計測される時速をリアルタイム提示し、定速

(18km/h) 走行を行うように指示した。ギア比を決めるために、サドル高さを最も低い位置（最も漕ぎにくい姿勢）に設定して予備実験を行った。実験条件を揃えるため、サドルが最も低い位置でも無理なく走行できるギア比として、前 46T、後 16T にギアを固定して実験を行うものとした。以上の条件設定に従い、被験者の男性 A（以下被験者 A という）による走行実験を行った（図 5）。表 1 に、その時の平均速度分布を示す。



図 5 被験者による実験

Table 1 Average Speed and Variance [km/h]

[mm]	0	20	40	60	80	100	120
AVE	18.3	17.9	18.2	18.4	18.1	17.9	18.4
VAR	0.011	0.040	0.144	0.042	0.015	0.031	0.030

表 1 平均速度分布

3. 解析

3. 1. 解析システム

筋骨格シミュレータはヒトの筋骨格モデルに動作と人体各部に作用する力を与えたときの筋出力などを逆動力学解析で算出できるソフトウェアである。今回は AnyBody（開発元：AnyBody Technology A/S）を利用した（図 6）。入力したデータはモーションデータ、反力データ（サドル、ハンドル（左右）、ペダル（左右）、後輪出力である。

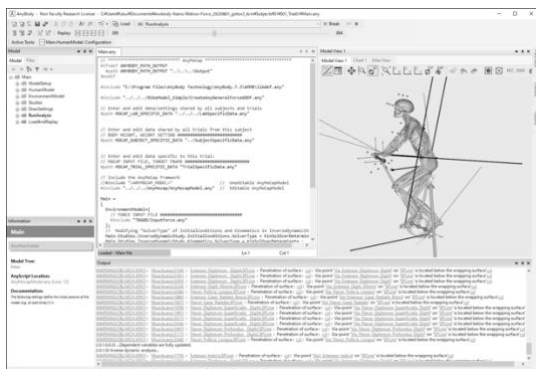


図 6 筋骨格シミュレータ

3. 2. 解析結果

各サドル高さにおける被験者 A の全身、上半身、下半身の代謝エネルギーを図 7 に示す。0 mm の場合が突出して高いが、これは両足が踵まで着地する程度の高さであり、ペダルが最上部にある場合に膝が曲げにくく不自然な姿勢であるため、無理やりペダルを回していたためと考えられる。上半身と下半身の値を足すと全身の値になるが、90%以上が下半身の運動であると分かる。

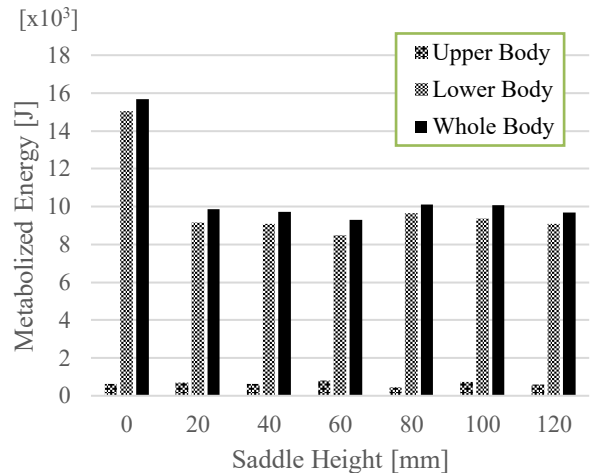


図 7 サドル高と代謝～上体と下体の比較

全身および上下半身の代謝エネルギーに関して、サドル高 20～120 mm は同程度の代謝エネルギーであったため、次に左右差について比較する。各サドル高さにおける右半身、左半身、体幹の代謝エネルギーを図 8 に示す。体幹の代謝エネルギーは非常に少なく、全身の代謝エネルギーに対して 4%以下であった。折れ線は右半身と左半身の差分を全身の代謝エネルギーで割ったもの（右軸）である。サドル高 120 mm が 0 に近く左右バランスよく代謝していると分かる。これは両足が伸び切る程度のサドル高であり、被験者が左右の脚のクセを出し難い姿勢であったためと考えられる。ただし、関節が伸び切った姿勢では力を発揮できず、慣性でペダルを回すしかないため、自転車を漕ぐのに適したサドル高だとは考えにくい。一方でサドル高 40 mm においても左右差は 0 に近い。

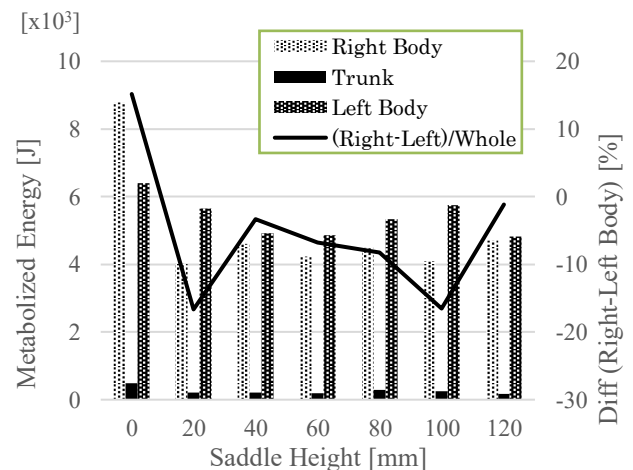


図 8 サドル高と代謝～左右半身の比較

表 2 に骨盤周辺、大腿部、下腿部、全身の代謝エネルギーを示す。大腿部が最も筋活動が活発であると分かる。全身の代謝エネルギーに対する大腿部（左右）の代謝エネルギーが占める割合は 60～67%であった。図 9 に下半身を骨盤周辺、大腿部、下腿部における左右各部位の代謝エネルギーを示す。

Table 2 Metabolized Energy (Lower Leg) [$\times 10^3$ J]

Saddle Height	0	20	40	60	80	100	120
Around Pelvis	1.63	1.06	1.14	0.94	1.16	1.23	1.40
Upper Leg	9.91	6.33	6.05	5.97	6.72	6.01	5.96
Lower Leg	3.22	1.65	1.80	1.50	1.62	2.00	1.68
Whole Body	15.66	9.85	9.73	9.28	10.09	10.08	9.70

表 2 サドル高と代謝～各部位

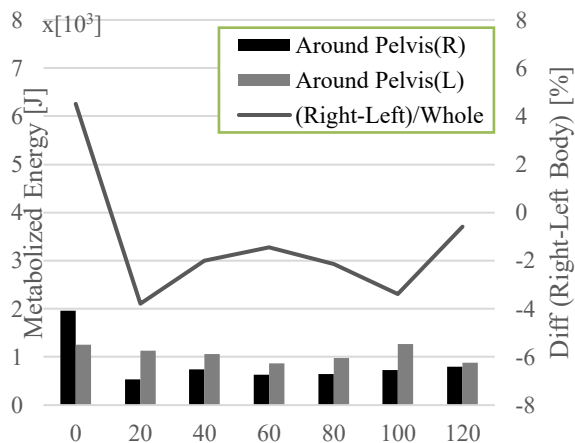


図 9 (a) サドル高と代謝～左右骨盤付近

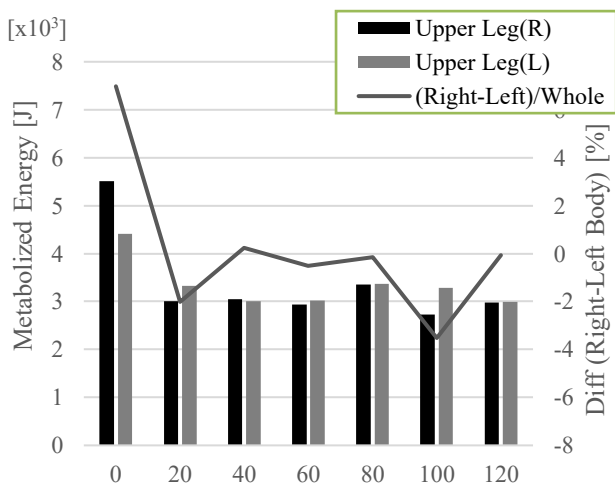


図 9 (b) サドル高と代謝～左右大腿比較

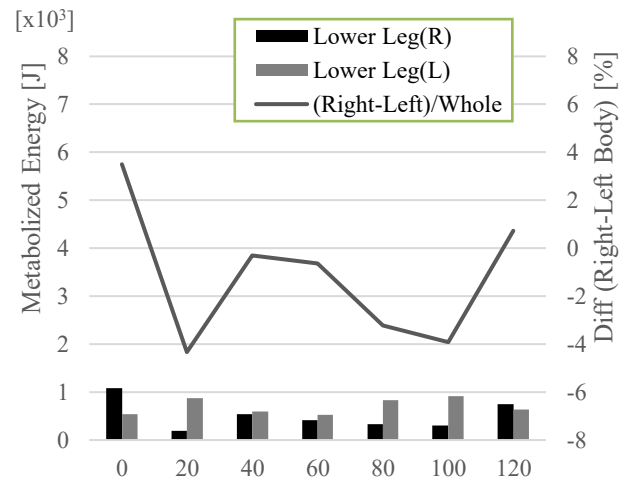


図 9 (c) サドル高と代謝～左右下腿比較

折れ線は左右の差分を全身の代謝エネルギーで割ったもの（右軸）である。図 9 (a)～(c)を比べると、総じて左脚の方が代謝エネルギーは高いという特徴が見られた。ほとんどのサドル高においては左脚の方が高く、その傾向がそのまま図 6 の左右差に表れている。一方で、サドル高 40mm の大腿部においては右脚が高い。

そこで、代謝エネルギーに左右差が生じている時のハンドルとペダルの負荷状況について述べる。

3. 3 被験者 A の動作特性

前述のように被験者 A の自転車走行計測実験では、サドル高を 0～120mm を変え、計測を行ったが、その中で比較的 60mm 高の時に左右脚の代謝エネルギーバランスが取れており「負担が少なく快適である」を想定した。図 10 はこの状況を分かりやすくするために可視化したものである。各部位の筋の代謝量が増加するにつれ緑から赤へと遷移するよう表示している。この図では 0cm 時と 6cm 時の代謝量を比較しているが、0cm に比べ、6cm の方が大腿の代謝量が減少している。

そこで、サドル高 6cm の高さで実験した時に同期計測したハンドル部とペダル部の歪みゲージによって得られたデータを参考とすることにした。

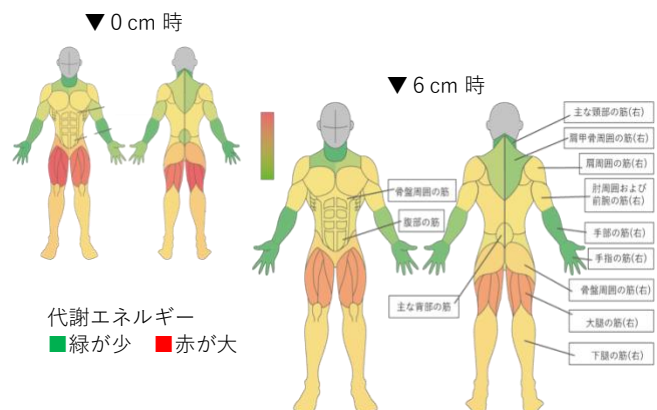


図 10 代謝エネルギーの可視化

図 11 は被験者 A の動作実験時における、左右ハンドル・ペダルの歪みを計測した図である。実験をはじめて 15 秒前後辺りでペダル右を強く踏む様子が見られた（実験直後の大きな振れは乗車時のもの）。同時に左ハンドルにも負荷が掛かる様子が見てとれた。

逆に、その前後の時間帯においては、ペダル右を強く踏む様子が見られ、同時に左ハンドルにも負荷が掛かる様子が見てとれたので、以上の実験で得られた被験者 A の走行特性を考慮したフレームの設計を行うこととした。

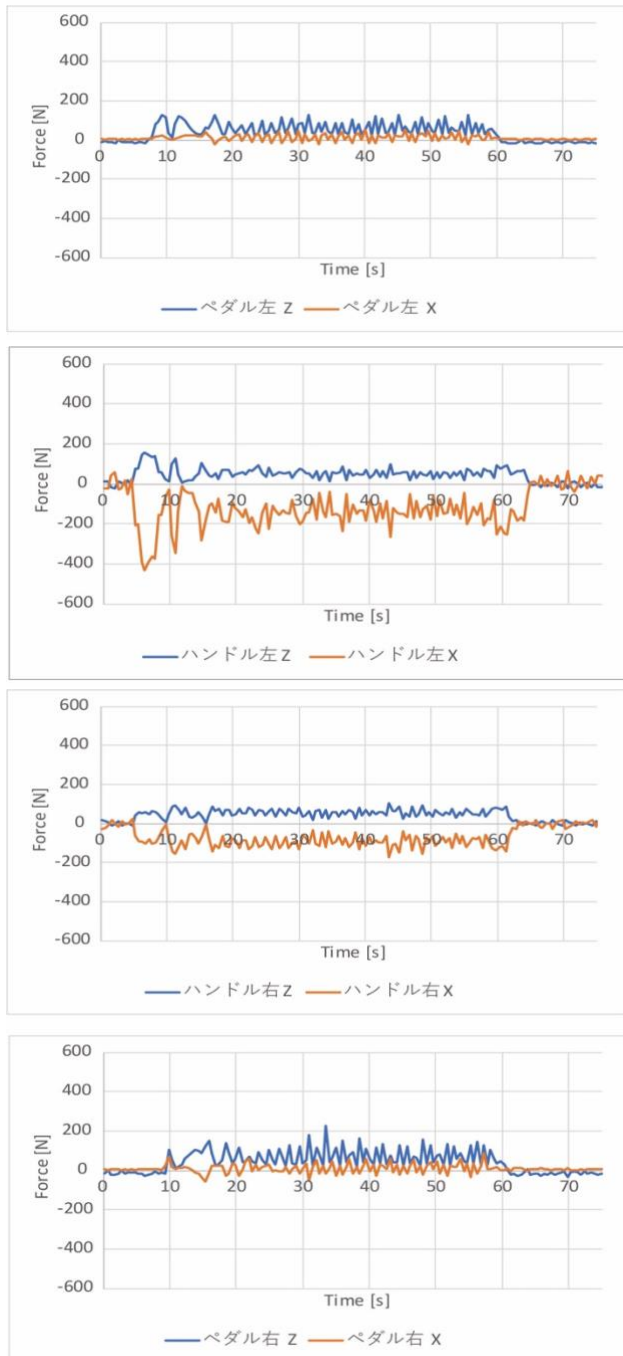


図 11 左右ハンドル・ペダル各部位での力の差異（サドル高さが+6cm の場合の計測結果）

4. 設計と試作

4. 1. 設計指針

これまでの実験で、被験者 A の場合、右脚によるペダルの踏み込みが強いことが分かった。さらに右足踏み込み時に、左手が把持する左ハンドルにも負荷が強めにかかることが分かった。動作の特徴をプロダクトデザインに活かすためには、ユーザー特性からどの解を導き出すか？である。例えば特性を活かして「より早く走行可能にするのか？」、「より永く使用可能にするのか？」によって、同じパラメータからであっても設計コンセプトが異なる。今回は「鋳造砂型 3D プリンタの利点＝自由形状制作可能」を活かすため、後者に焦点を絞り、設計を進めることとした。

そこで、この砂型鋳造プリンタによる造形自由度の高さを十分に活用するため、本研究開発では「トポロジー最適化」によるフレームデザインを求めることとした。一般的な開発業務であれば、工業デザイナーが手掛けるこのプロセスを敢えてコンピュータに任せることで、どのような造形がもたらされるのか？を追求することにした。

4. 2. トポロジー最適化によるフレーム設計

トポロジー最適化とは、形状制約や荷重、拘束などの条件の中で最も効率の良い材料配置を行う構造最適化のことである。トポロジー最適化を適用すると、応力負荷の小さな箇所などの不要な材料を削り、構造として必要な箇所のみが残った形状となる。形状の自由度が高く従来の加工技術では作製が困難な形状になることがあるため、3D プリンタとの相性が良いとされている。

本研究では、Altair HyperWorks ソフトウェアの「Inspire」を用いてトポロジー最適化を行った。トポロジー最適化により形状変更を行う設計領域として、図 12 中の茶色箇所のような初期形状とした。これは、設計領域を大きく取ることで、最適化によって得られる形状の自由度を高めるためである。

荷重条件は漕ぎ動作から得られたフレームにかかる荷重を基に設定した。時間によってフレームの各所にかかる荷重が異なることから、右ペダルの X 方向、Z 方向、左ペダルの X 方向、Z 方向、ハンドル、サドルそれぞれにかかる荷重が最も大きい時間を抽出し、その時間で各所に掛けていた荷重を与えた。ハンドル、サドルは X 方向、Z 方向で最大荷重となる時間が同一だったため荷重条件を統合し、合計 6 種の荷重条件とした。拘束条件はタイヤの底面に接触するような地面を完全拘束として設定した。

最適化目標は「質量の最小化」とし、安全係数を制約条件とした。6 種の荷重条件全てで制約条件を満たしつつ、最も質量が小さくなる形状をトポロジー最適化により導出した。

トポロジー最適化により得られる形状は、材料が細すぎる、配置してはいけない箇所に材料が配置されるなどの、不都合な材料配置が行われることがある。それらの解消のため、PolyNURBS という材料の再設計機能にて、不都合が無いようにモデルを調整した。以上の過程を経たデザインが図 13 である（以後、このデザインしたフレームを 0 号機とする）。

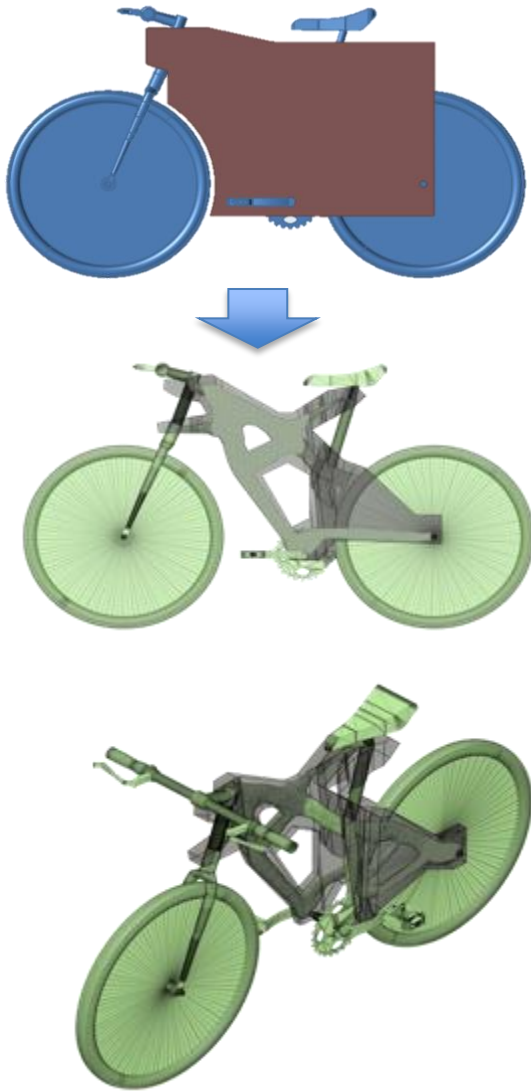


図 12 トポロジー最適化プロセス

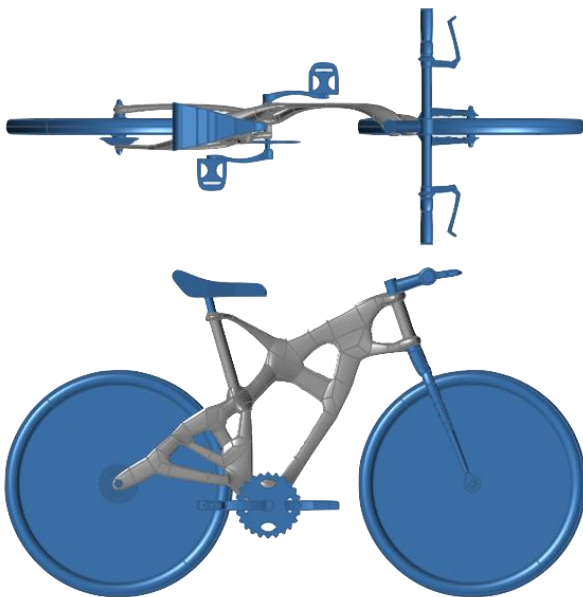


図 13 フレーム 0 号機デザイン

4. 3. 0号機フレーム 1/4 スケールモデル casting trial

0号機の形状について工業技術センターにある小型の砂型 3D プリンタ CMET 製 SCM-800 を用いて鋳造の可能性について検討した。鋳型作製に先立ち法案決定が必要なため、鋳造シミュレーションソフト (JSCAST) により湯流れ 状態、凝固状態を調べ、方案を決定した(図 14)。重要なのは方案道理の鋳型をどのように分割して作成するかということである。工技センターが所有する CAD 能力上鋳型の見切りが直線となり、複雑な自由形状に適した見切りを行うことができない。そこで鋳型を 6 分割に細分して作成し、組み合わせることとし、AC4C(アルミニウム合金)を鋳込み成型した (図 15)。湯回りの的には問題なく、試作鋳造ができた。

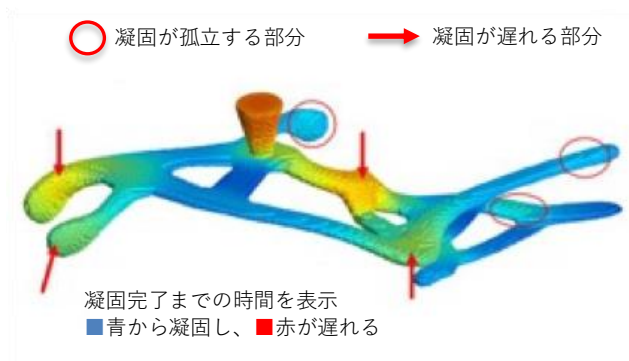


図 14 フレーム 0 号機の流動解析



図 15 フレーム 0 号機の鋳型と鋳造したフレーム

5. 1号機モデルフレームのデザインと試作

5. 1. フレームデザイン

次に0号機のスケールモデルを参考にリデザインの検討を進めた。将来的な運動性能を考慮し、重心が中央下部になるようにトポロジー解析を行った結果、図4のような構造のフレームデザインを得た。他にも様々な案があったのだが、時間的制約もあり、今回はこのデザインを1/1スケールの実機「1号機モデル」として試作することにした。

1号機モデルの設計・拘束条件は6種の荷重と地面の完全拘束を与え、制約条件の安全係数は24とした。

トポロジー最適化により得られた形状(図16)は、前輪とペダルとの間やサドルと後輪の間など細すぎる箇所があり応力負荷が大きくが見られたので、その箇所を拡幅化し高強度になるよう再設計した。また、ハンドル部分は、重心制約を満たすほかハンドルの支柱部品を取り付けるために、大きく覆うように材料を配置した(図17)。

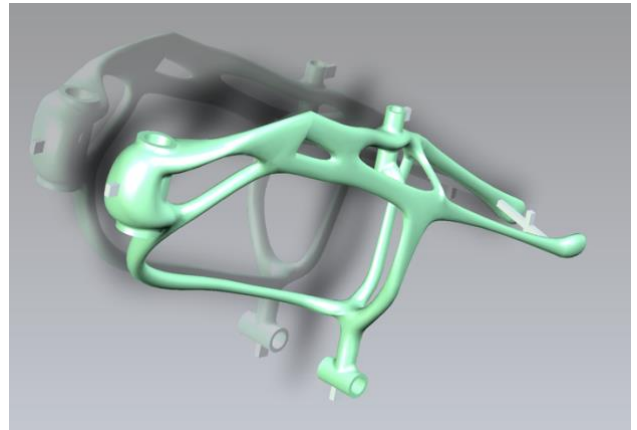


図18 1号機加工用3Dデータ

5. 2. 鋳造

図17のフレームデザインは鋳造後の歪みを押さえ車輪やクランク、ハンドルなどの嵌合部の精度の良い穴加工が必要である。さらに、このデザインは自由曲面のみで構成されているため、嵌合部の加工には固有の治具が必要である。さらに加工される側のフレームにも基準面となる部位が必要である。そこで、あらかじめ、このフレームのデジタルデータに上記の点を考慮した部位を付加した(図18 灰色箇所)。この加工のための3Dデータ修正・追加した。このデータに基づき鋳造時の流動シミュレーションを行い、制作した金型モデルと3D鋳型モデルが図19である。

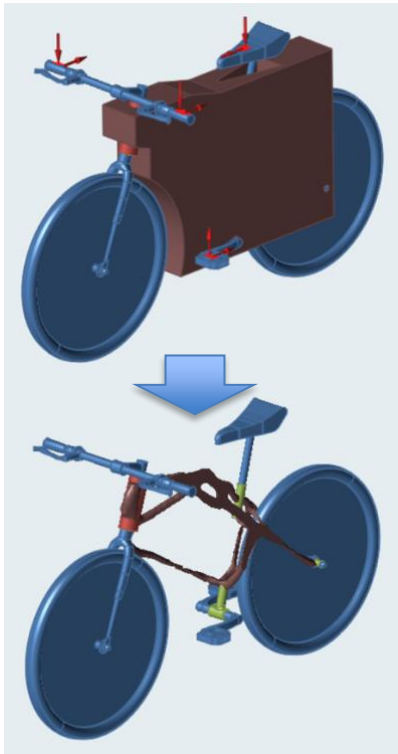


図16 1号機のトポロジー最適化



図17 1号機の最終デザイン案

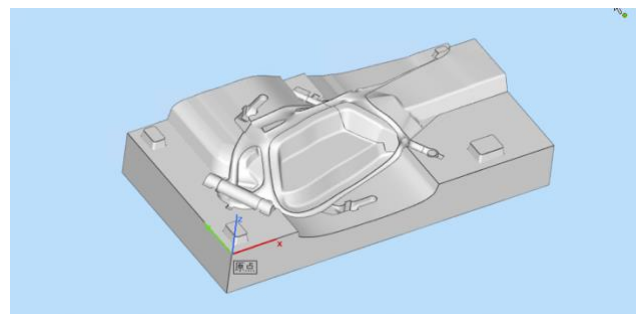
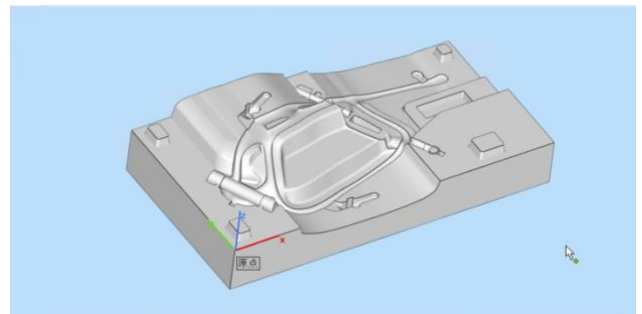


図19 1号機の鋳型データ

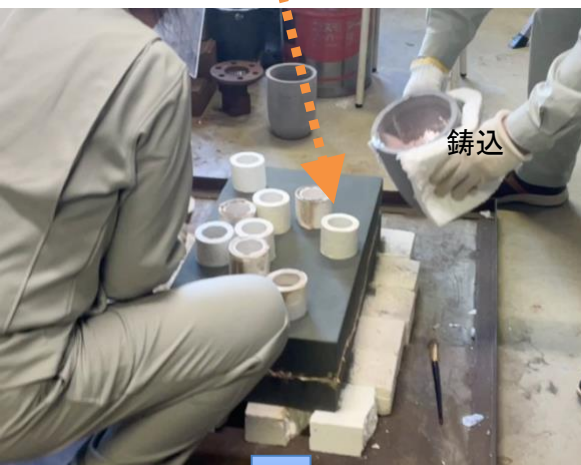


図 20 1号機 1/2 スケールモデル 鑄造工程

鑄造にあたり、流動シミュレーションと型方案（型設計）を行った。複雑な形状の場合、溶けた金属が均一に行き渡るためには「湯口の場所をどこにするか？」といった型設計一つとってもシミュレーションと経験が必要である。そこで、工業技術センターでは、形状検討用として1/2スケールモデルを制作した（図 20 下図）。

1/1 スケールのサイズは 940mm×660mm×174mm、材質は AC4C（アルミニウム合金）、重量約 7 kg となる。計画当初は工業技術センター保有 3D プリンタによる型を複数組み合わせての制作予定だったが、今回は株式会社コイワイ協力により 1/1 スケール型製作も含め鑄造までの一連の過程を同社に委託することとした（注）。型製作には、株式会社コイワイ保有の Ex One 社製 S-MAX による。この 3D プリンタは、最大 1,800×1,000×700mm の鑄型作製が可能である。今回の自転車フレームの鑄型も 1 回の造形で作製が可能だった。

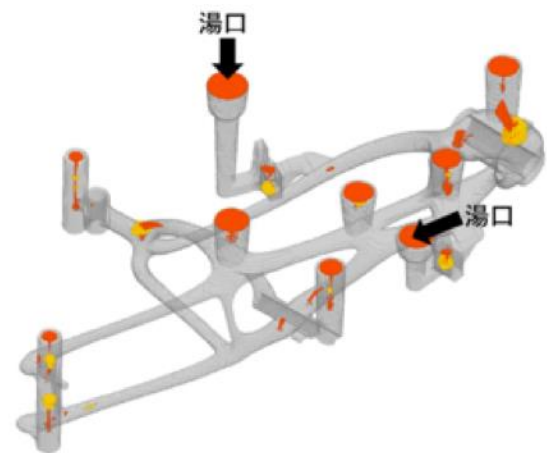


図 21 1号機の流動シミュレーションと方案検討
（解析ソフト：ADSTREAM）

方案作成には鑄造シミュレーション(ADSTREAM)を活用しており、図 21 にシミュレーションの一例を示す。要所に押湯を配置し、必要に応じ、ガス抜きを兼ねたサイド押湯も設置している。方案における特徴は下記の 2 点である。この特徴は湯口位置と湯道により確認できる。

- ・湯口を 2 か所に設けることで湯回りを確保している
- ・湯道を設けて製品サイドから溶湯を流し込むことで巻き込みを防いでいる

鑄型作製では自由形状に合わせて上下型を曲線的に見切ることにより、上型、下型と中型の 3 個で鑄型を構成することができる。自由曲面見切りにより、スマートな鑄型に仕上がっている（図 22・図 23）。この砂型による鑄込みが

図 24 である。図 25 は、型から取りだした直後のフレームである。図 26 は不要部分を取り去り、仕上げ加工、熱処理を行った後の铸造フレームである。最適化設計により得られた形状が铸造によりダイナミックに実体化されている。



図 22 (株)コイワイにおける 1 号機 1/1 モデル鋳型



図 24 1 号機 1/1 モデル鋳込み



図 25 鋳込んだ直後の 1 号機フレーム



図 23 鋳型組み



図 26 仕上げ加工した 1 号機フレーム

5. 3. 嵌合部切削加工と組み立て

鑄造したフレームは自転車として組み上げるためには、ボトムブラケットやハンドルポスト、サドルなどを装着しなければならない。以上の部品に関しては、走行実験で使用した市販自転車と同等の型式の部品を用いることとした。これらの部品を問題なく嵌合できるように、その金属切削加工を図 27 に示す仕

様や、別途図面により(株)アイデアに(注)委託した。

その結果、要求仕様どおりの加工仕上がりとなり、各部品を問題なく嵌合することができた。図 X の各部位写真のうち左が加工後の状態で、右側はボトムブラケットやハンドルポスト等を嵌合した後の写真である。

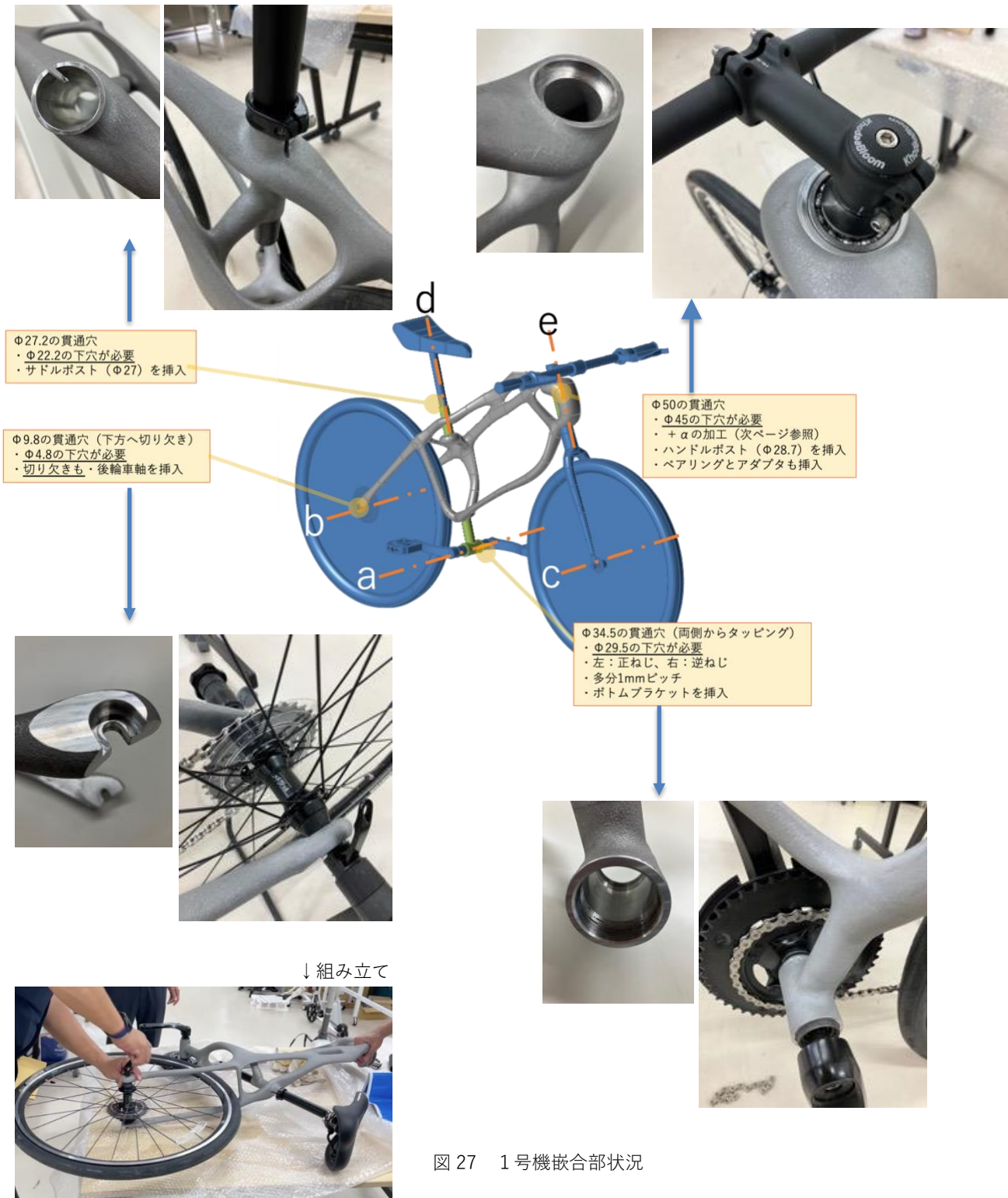


図 27 1号機嵌合部状況

(注) フレーム制作協力

株式会社コイワイ <https://www.tc-koiwai.co.jp>

株式会社アイデア <https://idea-idm.co.jp>

5. 4. 1 号機モデルの完成

フレームの鋳造と嵌合部の切削加工を終え、組み上げたのが図 28 である。「動作計測→筋骨格モデルシミュレーション→トポロジー最適化設計」という新たなデザインプロセスによって、これまでにない外観の自転車デザインが完成した。その第一印象はまるで生物の骨格のような有機的フォルムであり、おそらくプロダクトデザイナーでは造形し得ないフォルムである。今回の開発では、最新の技術を活用することで、既存の製品分

野であっても、製品進化の道が続いていることを実感した。

以上のように、フォルムデザイン的には十分な成果は得たが、さらなる改善のため、2 号機的设计・試作を行うこととした。造形上の可能性追求もさることながら、「軽量化とチェーンのテンションに耐えうる構造修正が必要では？」という技術者からの意見もあり、この2点を解消すべく、最終年度に2号機フレームの設計・制作に取り掛かった。

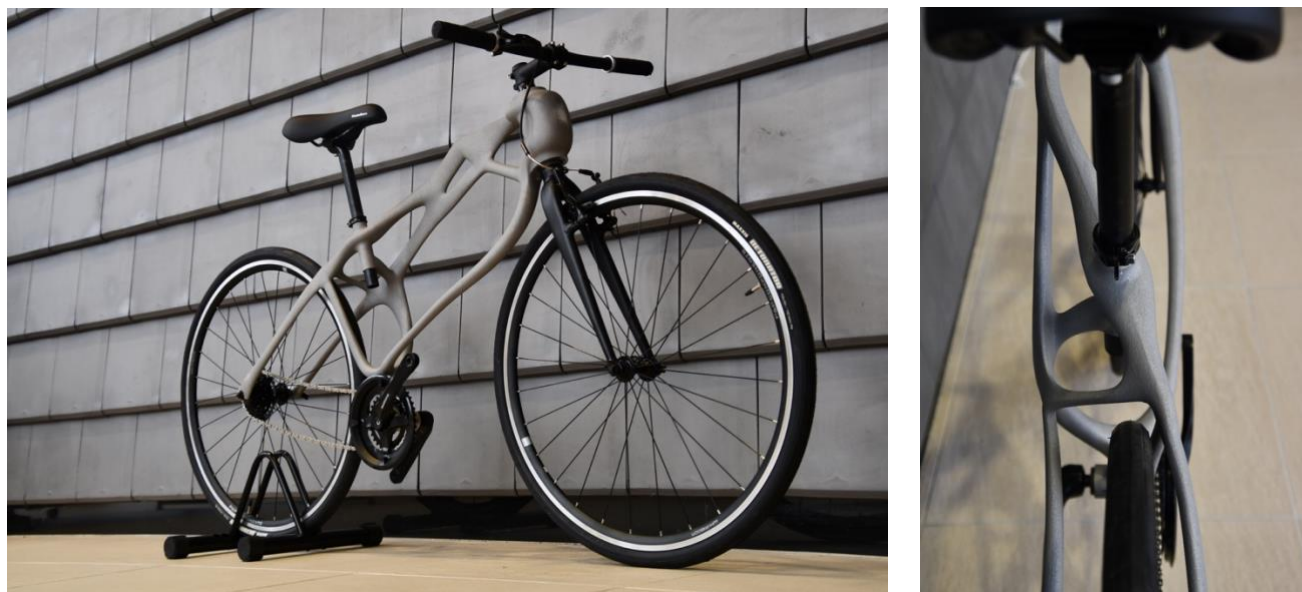


図 28 完成した 1 号機フレームのフォルム（上図↑、下図↓）



6. 2号機モデルの設計・制作

6. 1. トポロジー最適化設計

2号機の設計は、1号機よりも軽量で、チェーンのテンションも考慮した形状であることを目標とした。荷重条件として、ペダルの付け根部分にチェーンの荷重を与えた。

トポロジー最適化により得られた形状を図29に示す。1号機の設計時と同じく材料が細すぎる、つながっていないなどの材料配置の問題点のほか、2号機の最適化形状ではギアやチェーンと干渉する可能性のある箇所があった。ギア、チェーンが存在する範囲をモデル内に生成し、それとの干渉を避けつつモデルを再設計し、問題点の解消を行った。1号機では重心制約やハンドル部の部品取り付けを考慮し、ハンドル部分を覆うように設計していた。2号機では1号機作製時のノウハウを生かし、大きく膨らませず最小限の材料配置でハンドル部の接続を行った。また、再設計した形状に応力解析を行ったところ、ペダル付近に応力集中が発生していた。応力集中部は多く材料を配置し、比較的応力が発生しない箇所を細くすることで、応力集中を解消しつつ軽量化を可能な限り行った。



図29 2号機フレームの最終デザイン

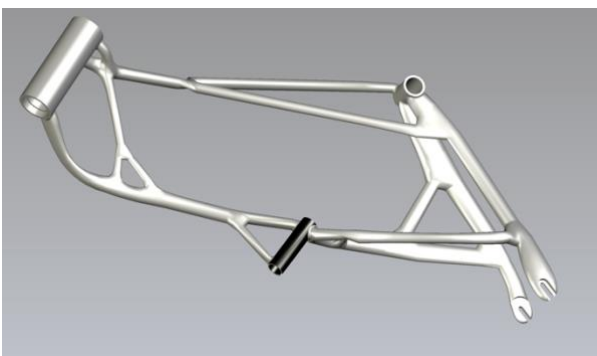


図30 2号機フレームデータ(嵌合部加工想定図)

6. 2. 加工

以上のトポロジー最適化設計により1号機より軽量化・強度を向上した2号機フレームの設計データが完成した。図30は嵌合部切削加工後の完成データ、図31は嵌合部の切削加工を依頼する(株)イデアに提出したデータである(赤丸印が加工用に付加した部分)。

*なお、これ以降の工程は1号機と同様なので、制作過程詳細は割愛し、途中段階のフレーム設計データや完成した鋳造フレームや組み立て完了した2号機フレーム自転車について掲載する。

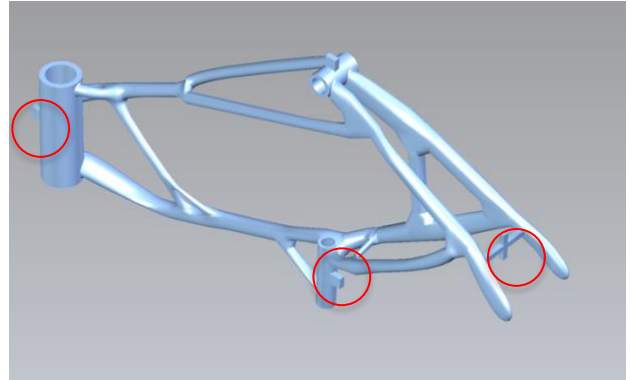


図31 2号機フレームの加工用データ



図32 鋳造した2号機フレーム



図33 2号機フレームの嵌合部(組み立て後)

6. 3. 2号機モデルの完成

1号機の改良を施した設計データにもとづき、「砂型制作→フレーム鋳造→嵌合部切削加工→組み立て」工程を終了し、2号機モデルが完成した(図34)。

1号機は動物の骨を想起させる有機的なフォルムであったが、2号機の外観は、趣が異なり樹木のような外観である。

2号機もまた、「動作計測→筋骨格モデルシミュレーション→トポロジー最適化設計」という新たなデザインプロセスによって、これまでにない外観を有することとなった。0号機を含め、1号機・2号機、いずれも新たなデザインプロセスによる、有機的なフォルムを有する外観の自転車デザインである。



図34 2号機フレーム外観(上図↑、左図←、下図↓)



7. 終わりに

本研究開発では、砂型3Dプリンタを活用し、筋骨格シミュレーションにもとづく自転車フレームのカスタムデザイン・製作の可能性を追求した。プロダクトデザインは、これまで規格化や金型による量産化によってコストダウンを図り安価に消費者に提供することで、生活の質（QOL）向上に貢献してきたが、近年、ラビッドプロトタイピング技術が進み、Industorial4.0などIoTの急速な進化により、より個人のニーズに直結した個別化した製品を提供することが可能になりつつある。その先には、人間の活動情報のデジタル化をも視野に入れたスマート社会の到来が見え隠れする。

そこで、未来社会を見据えた先行研究として、筋骨格シミュレーションモデルによる個人の運動（走行）特性をベースにしたカスタムメイドフレームデザインを目指した。被験者となったAは運動特性として左右脚の強さに差があるため、その「運動性向に耐え得る構造設計」という観点から、トポロジー最適化設計を進めた。しかしながら、個人の運動特性を設計に活かす方向性は多様であり、例えばその特性を活かし、「より早く走行する」ことを目指すのか？または、「負荷を科すことでトレーニング効果を目指すのか？…など、目指すべき方向性によって解決方法も形も構造・機構も異なってくるものであり、このような方向性の決定こそが「デザイン・コンセプト」の第一歩であろう。今回は、砂型3Dプリンタを活用したアルミ鋳造フレームという生産手段に依拠することもあり、「運動性向に耐え得る構造設計」に力点を置いたデザインを進めた。

「形は機能に従う」は米国の建築家ルイス・サリヴァンの有名な言葉で、「プロダクトデザイン」を学ぶ者は必ず習うモダン

デザインの指標の一つでもある。初期のモダンデザインでは、機能的な形態といえば、ミニマリズムに代表される直線を基調とした幾何形体による造形が多かった。それは美学的な意味もさることながら、技術的にアールヌーヴォーに代表される曲面形状のような造形が、量産に向かなかったこともあると考えられる。そのような時代の中で、1970～80年代に活躍した工業デザイナーのルイジ・コラーニは生物のような直線で構成できない有機的フォルムにスタイリングによって一世を風靡し、多くの人々に「未来」を感じさせた。だが、彼らのような活躍があってもなお、当時の多くの工業製品は「自然な形態＜作りやすい形態」のままであり、いかに製造技術の制約の中で魅力的なスタイリングを提供できるか？が当時のデザイナーの腕の見せどころであったと記憶している。

時を経て技術が進歩し、CAD・CAE・3次元プリンタが進化し、製品やその型をはじめ、素材も樹脂・金属粉末・砂など多角化し、任意な造形が可能になりつつある。また一方で、それを使用する人間に対する測定・解析技術も進み、明示可能になっている。例えば今回利用した人間の動きを測定するモーションキャプチャーシステム、人間の動きデータから筋活動モデルをシミュレーションするシステムがそうであるし、他にも人の体型の3次元スキャンするシステムなどがある。生物としての人間活動を様々な角度から工学的に解析できるようになり、その結果から最適化した（＝生物としての人に親和性の高い）自由な形状を造形できる技術が進めば進むほど、「自然な形態＞作りやすい形態」と進化するのではないだろうか。本研究開発がその一例となれば幸いである。

（問合せ先 後藤泰徳）