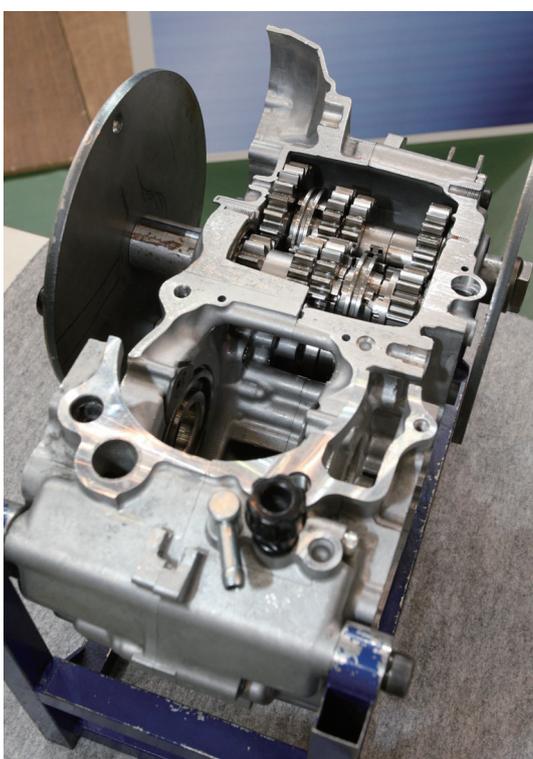


part
2

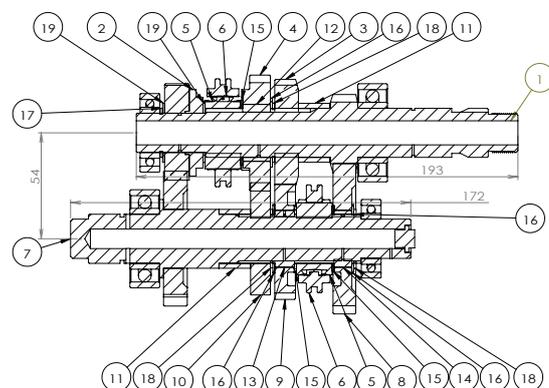
京都大学に見る シームレストランスミッションの 開発概要

京都大学フォーミュラプロジェクトKART 2018年 プロジェクトリーダー 長尾 順



部品番号	部品名	個数
1	InputShaft	1
2	Inputgear2	1
3	inputgear3	1
4	inputgear4	1
5	GearHub	2
6	ClutchRing	2
7	OutputShaft	1
8	outputgear1	1
9	outputgear3	1
10	outputgear4	1
11	Spacer	2
12	25×14Color	1
13	25×10Color	1
14	25×9Color	1
15	25-33Washer	3
16	25-35Washer	3
17	20LockWasher	1
18	25LockWasher	3
19	20Washer	2

SOLIDWORKS 教育用製品 (教育目的でのみ使用可)



断面図 A-A

Project:	Car Number:	University:	Kyoto University
Material:	System:		
Scale:	2:3	Assembly:	
Date:	2017/05/07	Rev:	
Amount:		ID:	
Designer:	長尾 順	Input & Output	

ベアリングは純正品を使用
20ワッシャー、スナップリングは市販品を使用

チームの背景

京都大学フォーミュラプロジェクトKARTは、創立15年目を迎えたチームです。チームの車両コンセプトは8年前に大幅に変更され、フレームは軽量なアルミスペースフレーム、エンジンは軽量かつパワーバンドの広い単気筒450ccエンジンを採用しました。結果、軽量でコンパクトかつ低イナーシャモーメントによるクイックなコーナリングを得意とする車両となり、以降年々その特性を伸ばせるように設計変更を行ってきました。

また2014年度からはCFRP製エアロデバイスを搭載し、得ら

れるダウンフォース（以下DF）により、さらに車両のコーナリング性能を向上させることができました。また、他チームと異なりサイドウイングを搭載することで、より大きなDFが得られるようになりました。このエアロデバイスは年々進化を遂げ、2年目にはばね下マウントのツインシャシーエアロデバイスを搭載し、車両走行中の姿勢変化に関わらず安定したDFが得られるようになりました。3年目の昨年は問題であった車両整備性を改善し、ばね下つり下げの構造をブラッシュアップさせました。

エンジンについては、単気筒ならではの軽量、低燃費、広いパワーバンドというメリットを生かしつつ、デメリットである出力の低さを改善できるように設計を進めてきました。チームで自作したエンジンベンチによる出力や筒内圧、排気圧の測定とGT-SUITEによる解析だけではなく、近年では他チームもまだ検討の少ない筒内の燃焼の実測、解析をベースに設計を進め、主にカムプロフィールや圧縮比変更やボアアップを行ない、出力増を図ってきました。

ここでパワートレイン全体を見た際に、アクセラレーションとコース走行を行なう際にタイム短縮を見込めるファクターが駆動系であり、チームでは8年前のコンセプト変更時より自作のファイナルギヤボックスを用いたシャフトドライブを採用しています。しかしながら、トランスミッションに関しては、使用しているエンジンの兄弟機に搭載されているレシオの異なるトランスミッションと比較検討を行なってきたのみであり、改善の余地は大きいと考えていました。

まず私たちの理想とする車両コンセプトについて説明します。

まず、モノコックフロントフレーム、リヤチューブラーフレームを車両の主要構造とし、前後フレームは整備性や構造的な問題からボルト締結とします。さらにトランスミッションはエンジンの後ろからケースごと設置できるようにすることで、アクセラレーションとコース走行で最適なギヤレシオを選択できるようにしました。またサスペンション、エアロデバイス等、計6個のモジュールにて車両を形成することで、整備性と設計性の向上を目指しています。

●3カ年計画

昨年度段階での車両とは大きく異なる、上記の理想の車両を実現するために、KARTでは「3カ年計画」を設定しました。3年という長期的な計画を立てた理由は、過去にスーパーチャージャーやツインシャシーなどの大きなチャレンジをした際、1年という短い期間では設計製作そして熟成までを十分にこなすことができなかつたためです。

KARTが立てた3カ年計画の内容は以下のとおりです。

- 1年目 …………… カーボンモノコックと置換型シームレストランスミッションの開発
- 2年目 …………… 使用するエンジンの検討を含むパワートレインの見直し
- 3年目 …………… エンジン別体シームレストランスミッションとサイドウイングを含む空力パーツの搭載

3カ年計画を導入したことにより、モジュールごとに十分な時間をかけて着実に開発していくことができると考えています。

●トランスミッション・デザイン・コンペティションへの応募を決めた考えかた

現在、KARTを含め学生フォーミュラの大半のチームはバイクエンジン等の内蔵純正トランスミッションを使用しています。しかし、これらのトランスミッションに採用されているギヤレシオは、さまざまなコースレイアウトや走行条件に最適なものではありません。最適化されていないギヤレシオを使用するとパワーバンド使用率の低下による正味出力の減少や、コーナリング時の操作性の低下を招きます。そこで、走行形態に合わせてギヤレシオを選択することができるようにしました。ところが、ギヤレシオの最適化により、走行においてより多くのギヤ段数を使用することとなるので、シフトチェンジ時間が増加することとなります。この負の側面を解決すべくシームレストランスミッションを採用しようと考えました。シームレストランスミッションとはシフトアップの際のトルク切れをなくすることができる機構を持つトランスミッションのことです。この機構によってさらなる走行タイム向上が見込まれます。

開発計画

2015年度は、トランスミッション設計の初年度である上シームレス機構という複雑な機構を開発するため、長期計画を立てました。トランスミッションを開発するうえで、すべてを新設計するのは時間と費用を集中させる必要があり、開発が困難となります。そのため現在の車両の中で換装できるパーツから設計を進めることとしました。具体的な計画としては、初年度はバイクエンジン内のトランスミッションをシームレストランスミッションに置換し、次年度以降にエンジン別体シームレストランスミッションを設計することとしました。また初年度のバイクエンジン内換装型トランスミッションに関しては、まだ例のないIST（イケヤシームレストランスミッション）のバイクエンジンへの搭載を実現することとなります。したがって、この開発を経て、現在市販されているバイクを大きな改造なしに、シームレスバイクとすることができるようになります。

シームレストランスミッションとは

世界には様々なシームレストランスミッション機構があります。そのうちほぼすべてが一瞬同時かみ合いをさせるという点で共通しています。F1などに採用されたワンウェイクラッチを使用したものがその代表例です。またIST（イケヤシームレストランスミッション）というものもあります（ここではそれぞれの機構についての説明は省略します）。これらには先に述べたように共通点もありますが、もちろん違いもあります。ワンウェイクラッチ型シームレストランスミッションはシャフト内に複雑な構造を持ち、それを動かすアクチュエータを必要とす

る上、多くの細かい部品も使用します。さらに制御が複雑であるという短所も持ちます。それに対しISTは衝撃力を受ける部品が多くなる一方、構造的には単純であり、シャフト内構造を持たない上、制御も複雑ではないという長所を持ちます。以上からバイク内蔵で私たちが設計する上で適切であるものはISTであると考えました。

ギヤレシオの選定

ギヤレシオを決定する際にまず、検討初期条件として検討対象のコース、エンジン使用回転領域と車両スペックの設定をしました。

まず検討対象となるモデルコースを設定しました。初年度は1パターンのギヤレシオしか選択できないため、全日本学生フォーミュラ大会のコースをモデルコースとしました。また最適な手法ではありませんが、同じギヤレシオで0-75mの加速競技も行なうため、その距離での加速性能も評価の基準としています。

次に、エンジン使用回転領域を決定しました。標準使用回転領域を最大出力の85%以上(7,400~10,300rpm)と定め、その回転領域でモデルコース全域を走行するものとします。

最後に車両のスペックを決定します。コースの形状や吸気等の出力制限から鑑み、最高速度を110km/hとし、エンジン内の空間的制限からギヤ段数を最大の4段としました。

モデルコースでのコーナリング性能を検討します。ここで検討することは主に2点です。まず、モデルコースのコーナーやストレートをどの速度域で走行しているか、走行データより分析します。そしてアウトオブコーナーで使用率の高い速度域を特に出力の高い領域で走行するようにします。今回は全日本学生フォーミュラ大会でのエンデュランスコースをモデルコースとしているため、コーナーでの使用率の高い速度域は35~45km/hであり、その使用率は全コーナーの約70%となります。その速度域を特に出力の高い領域で走行するため、今回は、最大出力の95%以上の回転数域の前半30%(8,000~9,500rpm)を使用することと設定します。これは高い速度でコースを走行することを重視し、可能な限り早く加速するためです。

上記のような検討をもとに加速性能の評価を行ないます。ここでは、減速比を設定すると加速性能をタイムや最高速で評価する自作シミュレーションを用いました。この際のシミュレーションで考慮するパラメータとは主に、エンジントルク、走行抵抗(転がり抵抗や空気抵抗)、変速時間、変速タイミング(どの回転数でシフトアップするか)です。その他のパラメータは

実走行のタイムと比較し追加します。このシミュレーションでは、コース走行での条件を満たすいくつかの減速比を設定し、その中で最適なものを採用する、という流れで減速比を決定します。

以上の検討により理論的に最適な減速比は決定されます。しかし製作する上で制限となるパラメータがいくつか存在します。まずモジュール選択です。JIS規格により規定されているようにモジュールを選択するのですが、軸間距離は変更できないため転移係数で調整を行ないます。しかし歯車の強度上、転移係数の選択の幅も制限されており減速比の選択の幅を狭めることとなります。次に歯車設計の制限です。歯車はシャフトにはめ込むため中心に穴をあける必要があります。さらに歯車設計の基本として噛み合い率や切り下げ等を考慮に入れなければなりません。また歯の摩耗を考え、歯数を互いに素となるようにします。こうすることで同じ歯にあたる回数を減らし偏った摩耗をしないようにすることができます。このように歯車の様々な寸法に制限が課されるため、その分設計の自由度を失います。

このようにあらゆる条件を総合して可能な範囲での最適解を求め、それを今回の減速比として選択しました。

構造的設計の流れ

コンペティションでは、初期コンセプト→専門家の方を招いての検討会→2次コンセプト→DMG森精機との製造を踏まえた検討会→最終設計、という大きな流れのもと設計を進めてまいりました。トランスミッションというその大部分を経験則や膨大な知識をもとに進めなければならない事柄を初期から最終までどのように考えどのように改善していったか、また、今回トランスミッションを既存エンジンのミッションルームに入れ込むという制限のある形で開発を行なったため、構造的に様々な工夫を要しました。ですから検討会を重ねて大きくコンセプト変更を行なった2部品をピックアップし紹介いたします。

全体的なレイアウト

まずギヤの段数に関しては空間的に最大である4段を選択。またどのギヤをドグギヤとするのか決定しなければなりません。ミッションケースの形状からドグギヤを1軸上に並べることができないため、2軸それぞれに2速ずつドグギヤを配置し、クラッチリングの性質上その二つのギヤをクラッチリングの両側に配置しました。1軸上に配置することのメリットとして考えられるのは構造を簡素化することが挙げられます。ドグギヤのない部分は基本的にシャフトに対して固定するだけでよく、ワッシャーやシャフトのスプライン等無駄なく製作することができます。さらに1速のドライブ側は歯車の径からドグギヤとすることは難しく、1、3のドリブン側と2、4のドライブ側をドグギヤとしました。また各シフト配置ですが、理想としては使用

率の高い2、3速を中央に配置することでシームレスシフトのさらなる性能の向上を目指すというものがあります。しかし後述の通りドライブ側に2速が構造上2分割するため結合用の形状が必要です。ドグギヤは前提としてシャフトに対してはニュートラル時に自由撻動する必要があるため、スプラインを持ったシャフトに対してはカラーをはめる必要があります。しかし結合用の形状のためギヤ内径を広げることができないため、妥協案として2速をシャフト端に配置しその部分のスプラインを削り取ることでその問題を解決しました。

①2ndGear…

【初期コンセプト】 この歯車はドライブ側の2速であり、歯底円が小さくなっています。そのため歯車創成時にドグを削り取ってしまいます。よくある製品ではドグを多少であれば削り取ってそのまま使用していますが今回は双方の干渉が大きく、ドグの強度を保つことができないと判断したため、ドグ部と歯車部を2部品として製作し、アセンブリすることで一つの歯車として機能させることとしました。

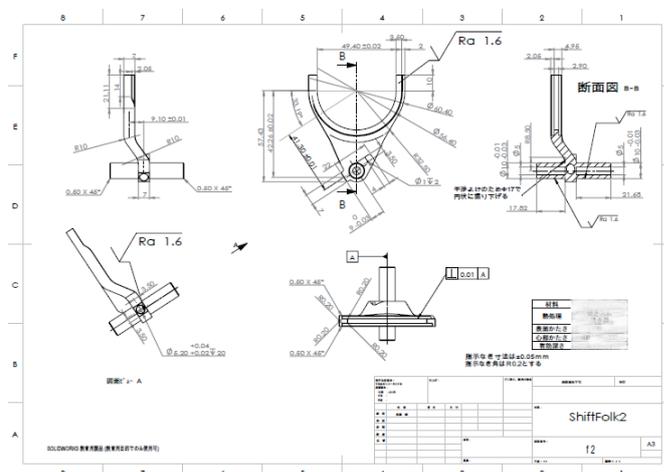
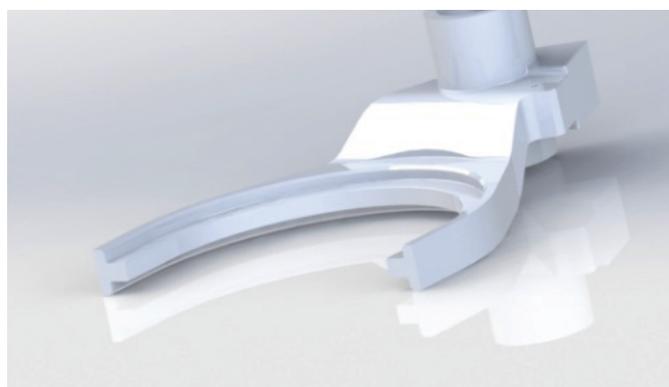
【2次コンセプト】 しかしその際に問題となるのが、検討によりご指摘いただいたアセンブリによる同心度などの精度の低下、さらにはドグと歯車の締結部分にかかる大きな撃力です。これらの問題を克服すべく、アセンブリによる精度低下に対しては歯車部とドグ部は精度よく成形しアセンブリ後内径を仕上げることにしました。また内径と外形の同軸度を向上させるため、内径にボスと穴をそれぞれの部品に作り、アセンブリ時に嵌め合わせることによって幾何公差を保証するようにしました。さらに締結部に関しては歯車とドグ部のあたり面の平面度を高くすることで接地面を増加させ、そこでの摩擦力で力を受けるというコンセプトのもと設計しました。



②シフトフォーク

【初期コンセプト】 IST特有の大きな撃力が加わる部品です。しかし空間的に制限され大きくできない上に、単純に大きくするとフォーク移動時における慣性などにより動作に支障をきたすため、小さく強い構造でなければなりません。シフトフォークのフォーク部は細いうえに大きな撃力がかかるため、ここにT字構造を採用することによってこの問題に対する解決策としました。またクラッチリングのみではどうしてもドグトゥードグとなった時のクラッチリングの傾きが大きくなると判断し、フォークの根元部分でもクラッチリングを支持する構造としました。さらにシフトフォークとドラムをつなぐピンは可能であればシフトフォークシャフトの中心上にあることが理想的です。しかしISTの構造上ピンは可動式であるためその理想にのっとりするとシフトフォークシャフトとシフトフォークは一体型でなければなりません。しかし加工の大変さや空間上の制約により2つのうち1つをフォークとシャフトを別体としました。

【最終設計】 大きな構造はわかりませんが、機能上多くの公差の含まれる部品であり、かつ強度も必要とする部品であります。このような部品は焼き入れ後、仕上げを行ないますが、材料と使用工具等の関係により、焼き入れ等の工夫が必要なため、人部品の中でもそれぞれの求められる機能ごとにフィーチャーごとの処理方法を決定しました。



実走行で出た課題

実走行で出た課題として主に2点ありました。

①シフトフォークの焼き付き

以上の初期コンセプトにのっとりクラッチリングに沿うようにシフトフォークのフォーク部を設計したところ、フォーク中央部において潤滑不良による焼き付きが発生してしまいました。フォークという潤滑油の届きにくい場所では、まず可能な限り摺動面を減らすことと、オイルがミスト上でも流入できるような構造にしておかなければなりません。

以上のような課題を受け、フォーク中央部の肉を取ることで改善を図っております。

②シフトダウンにおける時間制御

ISTとはその構造上、一般的なトランスミッションと比べてシフトダウン時にギヤが抜けにくくなる可能性があります。よってISTではシフトダウン時にクラッチを切るとは必須となっておりますが、時間的な条件も整わず、シフトダウンとクラッチを切るタイミングを時間で制御する機構を確立できておりませんでした。そのためシフトダウン時にギヤが抜けず、車両挙動が大きく乱れることとなってしまいました。

この課題に対しては、自作TCUを用いて時間制御を行ない改善してまいります。

今後の展望

現在、シームレス走行の実現を果たしており、今後は試走を重ね信頼性の向上を目指しております。まだまだ完成ではなく、過渡期であり、かつ大きな可能性を秘めた分野でもと思います。制御や構造等、現状からの改善点を洗い出し次期トランスミッション開発に向けての第一歩となるよう継続してまいります。



車両スペック

Dimensions	Units						
Overall Dimensions	mm	Length:	3052.8	Width:	1560	Height:	1020
Wheelbase & Track	mm	Wheelbase:	1700	Front Track:	1350	Rear Track:	1350

Powertrain	Units				
Manufacturer / Model		YAMAHA, WR450F, J326E			
Cylinders & Fuel		Cylinders:	1	Fuel Type:	Gasoline
Displacement & Compression		Displacement (cc):	449	Compression (∵):	12.3
Bore & Stroke	mm	Bore:	95	Stroke:	63.4
Engine Output		Peak Power (kW)	34	Peak Torque (Nm)	38
Design Speeds	rpm	Max Power:	9000	Max Torque:	8000

Drivetrain	Units						
Drive Type		Spiral Bevel Gear					
Differential System		Mechanical Limited slip differential, 1.5 way					
Final Drive Ratio		3.23					
Gear Ratio		1st gear:	2.0833	2nd gear:	1.4375	3rd gear:	1.1579
		4th gear:	0.9524	5th gear:	N/A	6th gear:	N/A

