

05B3

車体横曲げ剛性が学生フォーミュラ車両の 動的挙動に及ぼす影響

Effects of the body bending stiffness on the FSAE vehicle dynamics

広島工業大学 工学部 機械システム工学科

○本田晴樹 吉田憲司

研究背景①

学生フォーミュラ (FSAE)
学生がチームを組んで小型レーシングカーを、
企画・設計・製作したものを大会へ持ち寄り、
ものづくりの総合力を競う

車両の設計開発
モデルベース開発による手法を
学生フォーミュラで活用したい

モデルベース開発(MBD)とは

- コンピュータ上でシミュレーションを行い、
評価する開発手法
- 自動車開発では主流になりつつある
- 車両特性を予測・評価できる
- 効率的に設計製作の目標設定を行える



図1 学生フォーミュラ日本大会

車両モデルの構築

研究背景②

ボディ剛性の重要性

学生フォーミュラ車両の運動性能向上したい

→旋回性能向上

旋回時

タイヤが発生する摩擦力，遠心力が作用

⇒ボディが変形・振動

⇒タイヤの姿勢が変化⇒タイヤ摩擦力が変化

⇒運動性能が低下

車体横曲げ剛性

⇒車両挙動に大きく影響を及ぼす

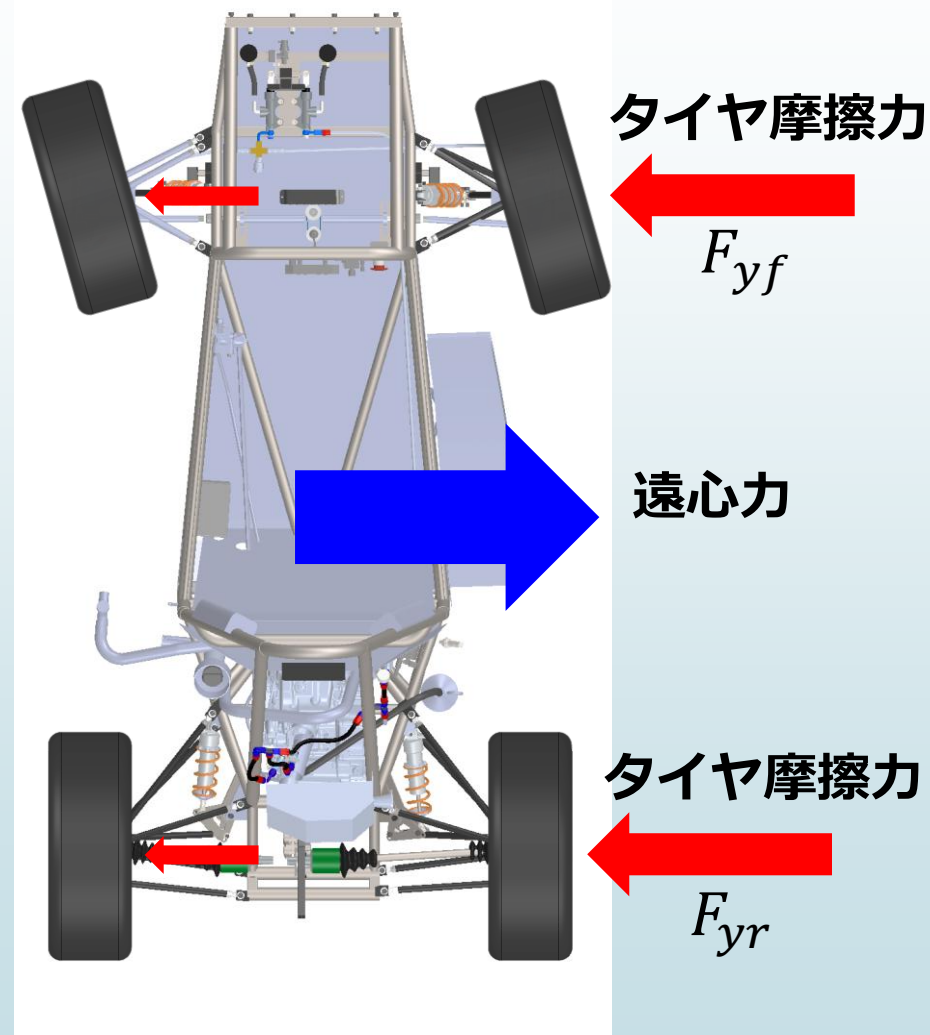


図2 2024年度学生フォーミュラ車両

研究目的

車体横曲げ剛性が車両の動的挙動に及ぼす影響を明らかにし、
必要十分な車体横曲げ剛性を定量的に明らかにする

シミュレーション

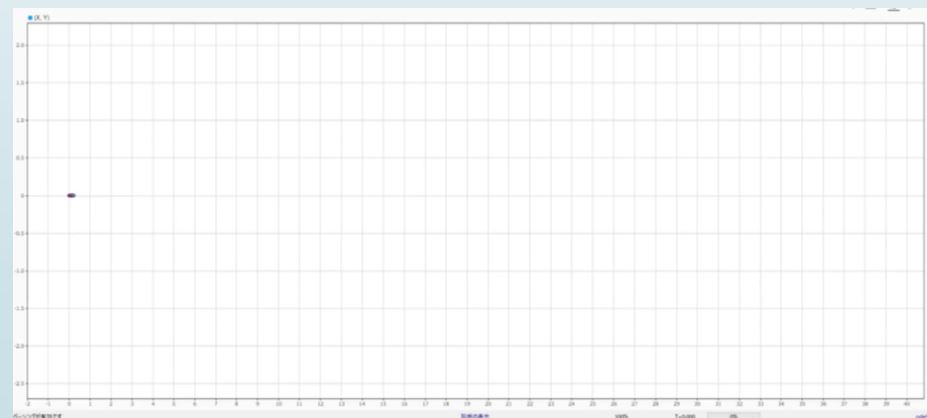


四輪モデルによる
シミュレーション



実車両による実験走行

実験走行



シミュレーション 本研究で用いるモデル

四輪モデル

① 平面2自由度モデル ← 平面上の並行移動, 車両重心回りの回転

+

② ロール1自由度モデル ← ロール時, 左右輪の荷重移動

+

③ タイヤモデル ← タイヤ摩擦力の非線形特性

- 各輪にかかる垂直荷重
- スリップアングル(SA)

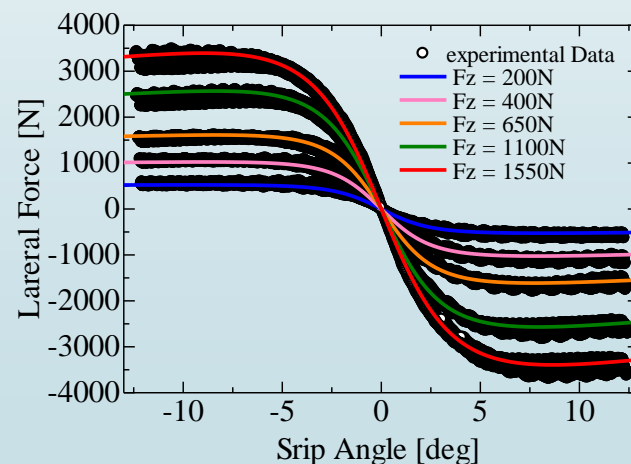


図3 垂直荷重ならびにSA変化によるタイヤ摩擦力の関係

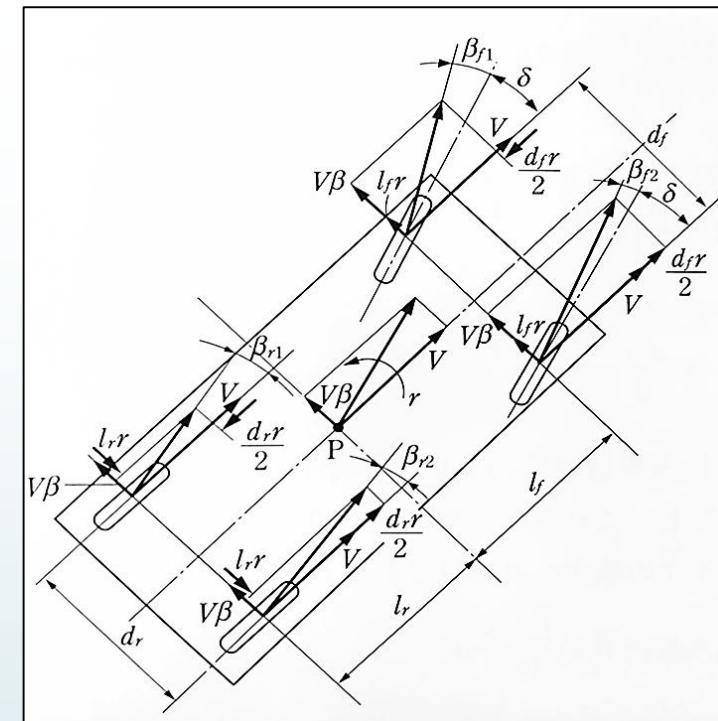


図4 平面2自由度モデルの概略図

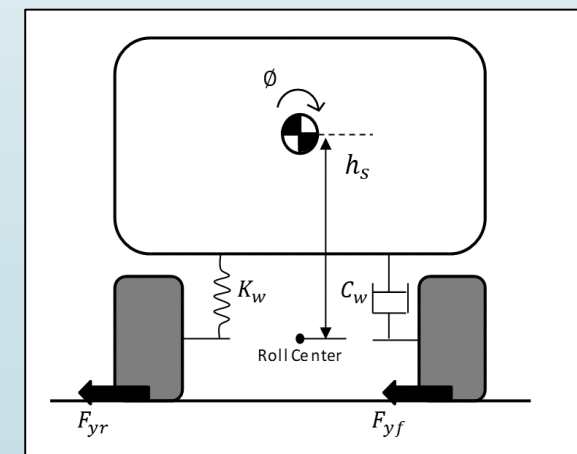


図5 ロール1自由度モデルの概略図

シミュレーション

7

②ロール1自由度モデル

ロール1自由度モデル

ロールセンター周りの運動方程式

$$I_x \ddot{\phi} = -K_x \phi - C_x \dot{\phi} + M_x \quad (8)$$

$$M_x = h_s m a_y \quad (9)$$

各輪の垂直荷重

$$F_{zfr} = \frac{mgl_r}{2l} + \frac{K_f d_f}{\rho_f^2} \frac{d_f}{2} \phi + \frac{F_{dfr} d_f}{\rho_f^2} \frac{d_f}{2} \dot{\phi} + \frac{ml_r}{l} a_y h_f \frac{1}{d_f} \quad (10)$$

$$F_{zfl} = \frac{mgl_r}{2l} - \frac{K_f d_f}{\rho_f^2} \frac{d_f}{2} \phi - \frac{F_{dfl} d_f}{\rho_f^2} \frac{d_f}{2} \dot{\phi} - \frac{ml_r}{l} a_y h_f \frac{1}{d_f} \quad (11)$$

$$F_{zrr} = \frac{mgl_f}{2l} + \frac{K_r d_r}{\rho_r^2} \frac{d_r}{2} \phi + \frac{F_{drr} d_r}{\rho_r^2} \frac{d_r}{2} \dot{\phi} + \frac{ml_f}{l} a_y h_r \frac{1}{d_r} \quad (12)$$

$$F_{zrl} = \frac{mgl_f}{2l} - \frac{K_r d_r}{\rho_r^2} \frac{d_r}{2} \phi - \frac{F_{drl} d_r}{\rho_r^2} \frac{d_r}{2} \dot{\phi} - \frac{ml_f}{l} a_y h_r \frac{1}{d_r} \quad (13)$$

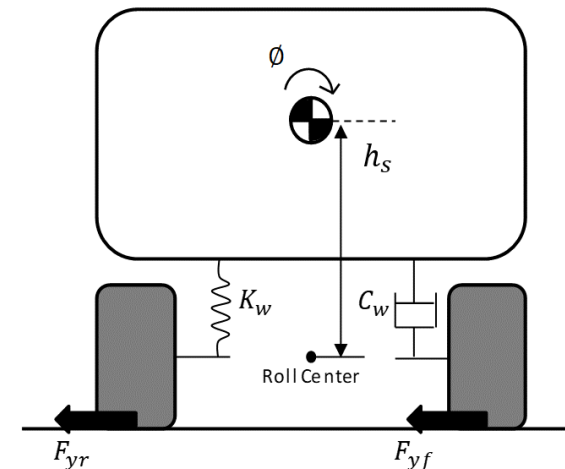


図7 ロール1自由度モデルの概略図

- I_x : 車両のロール慣性モーメント
- ϕ : ロール角度
- C_x : ロール減衰係数
- K_x : ロール剛性
- h_s : ロールセンターから重心までの距離
- a_y : 横加速度
- $F_{zfr}, F_{zfl}, F_{zrr}, F_{zrl}$: 各輪の垂直荷重
- $F_{zfr0}, F_{zfl0}, F_{zrr0}, F_{zrl0}$: 各輪の初期垂直荷重
- K_f, K_r : 各輪のバネ定数
- ρ_f, ρ_r : レバー比
- d_f, d_r : 前後輪のトレッド
- h_f, h_r : 地上からロールセンターまでの距離

シミュレーション

③ 詳細タイヤモデル

- 垂直荷重, スリップアングル変化⇒タイヤ摩擦力変化
- **極めて強い非線形特性**

Magic Formula タイヤモデル

$$F_y = D_y \sin \left[C_y \tan^{-1} \left\{ B_y a_y - E_y \left(B_y a_y \tan^{-1} (B_y a_y) \right) \right\} \right] + S_{vy} \quad (7)$$

[4]MF-Tyre MF-Swift 6.1.2 Equation Manual, 2010 TNO Automotive The Netherlands

スリップアングル(SA)
進行方向とタイヤの向いている方向のなす角度

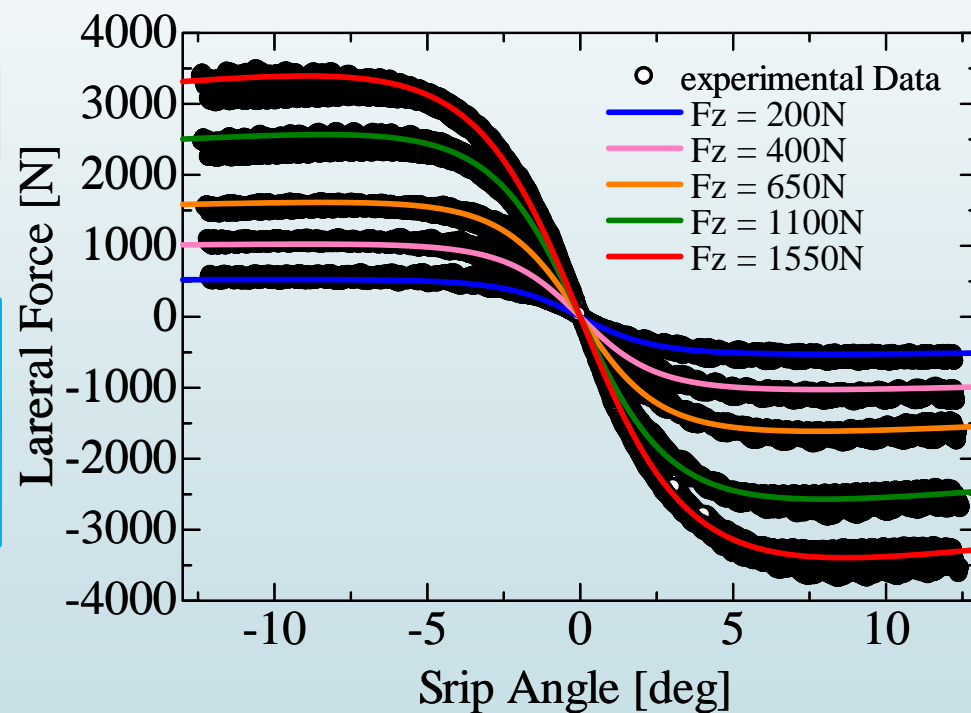


図8. 垂直荷重ならびにSA変化によるタイヤ摩擦力の関係

車体横曲げ剛性

ボディの横曲げ変形によるタイヤSAが変化する効果を考慮する

- ボディ：一本梁と仮定
- ボディを入力に比例して変形する**ばね**
⇒車体横曲げ方向のばね定数 k_b （車体横曲げ剛性）

車体横曲げ方向の変位に関する運動方程式

$$m_u \ddot{x} = -c\dot{x} - k_b x + F \quad (14)$$

⇒車体横曲げ方向の1次振動モードを考慮

ボディ変形によるタイヤのトー角変化量 δ_{bf} , δ_{br} は車体横曲げ変形量 x に比例すると考えた

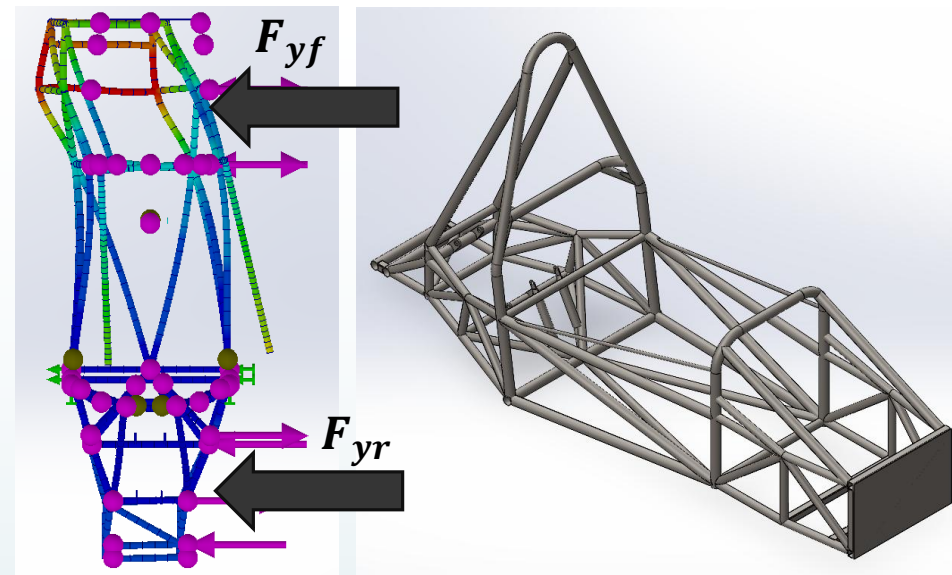


図9 2024年度FSAE車両のボディ

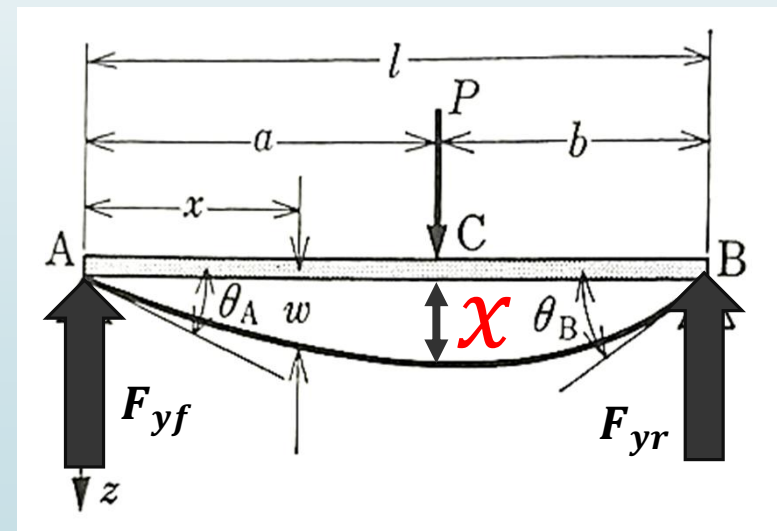


図10 梁の模式図

実験走行の概要

- 本学の2024年学生フォーミュラ車両
- データロガー, GPSを搭載
- リアルタイムで計測

計測可能なこと

車両軌跡, ステア舵角, ブレーキ圧, タイヤ温度,
エンジン回転数, 走行速度, ラップタイム等

内臓モーションセンサ

- 3軸加速度
 - 3軸ジャイロ
- ヨーレート, 横G等



これらのデータを活用
実験走行から車両の動的挙動を確認



図11 使用しているデータロガー
[1]Aim sports, 製品情報, EVO4S
<https://www.aimsports.jp/products/evo4s/>

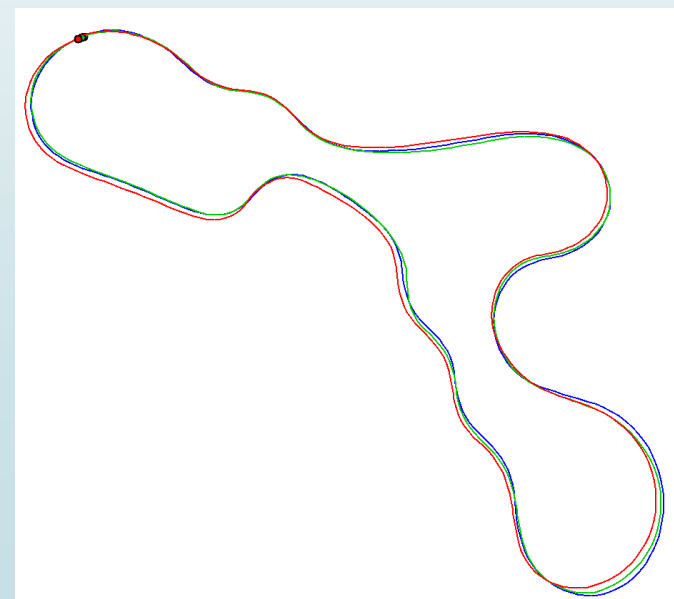


図12 GPS計測による車両軌跡

実車両による実験走行 走行条件

スラローム走行

走行条件

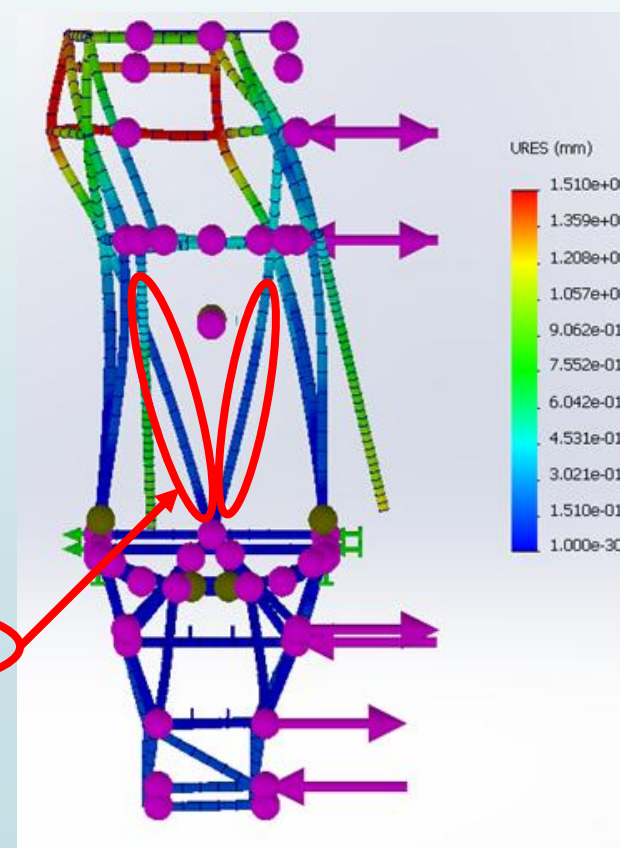
走行速度：40km/hで一定
前輪実舵角：±20deg
操舵角入力：サイン波状
(振動数：約1.0Hz, 1.3Hz)

走行環境

1/29 ドライ
気温：3°C
路温：4.5°C
ドライバー：発表者

変更するパラメータ

標準の横曲げ剛性 $k_b = 6084$ [N/mm]
剛性落とした場合 $k_b = 929$ [N/mm]



ブレース

実験結果

12

オンボード映像

標準の横曲げ剛性

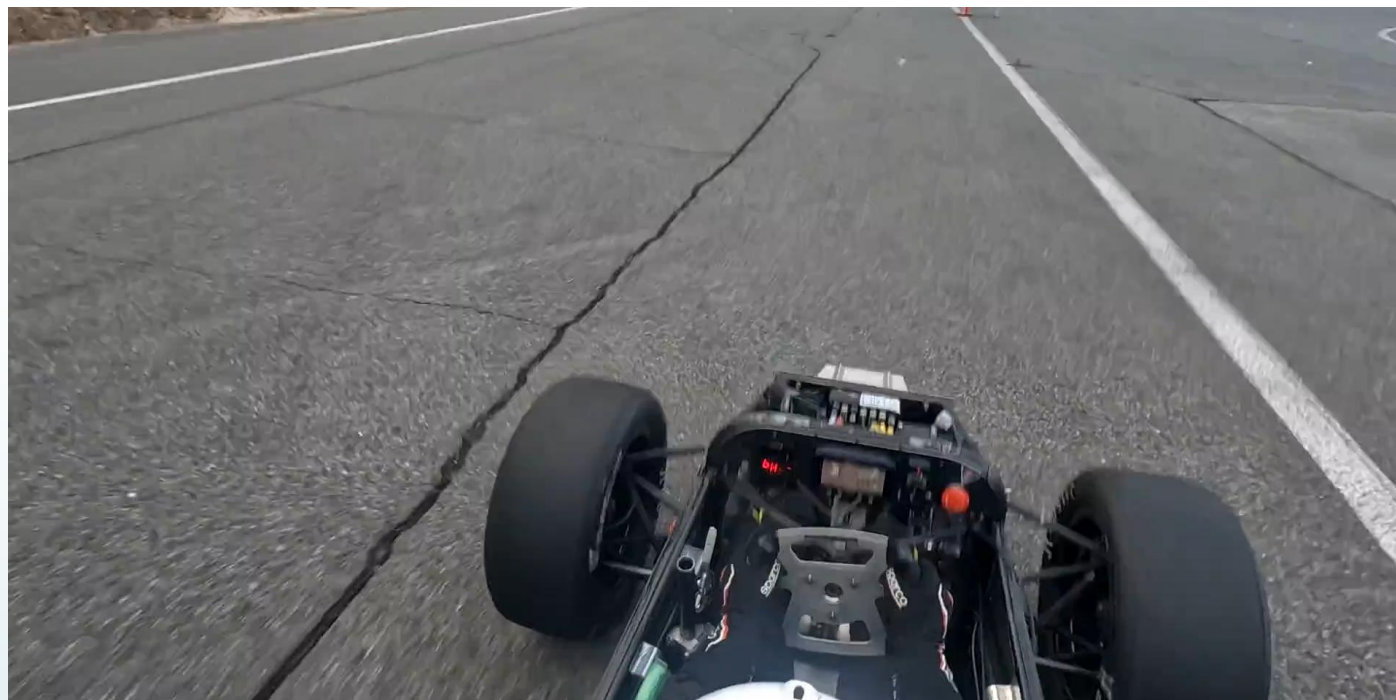
$$k_b = 6084 [\text{N/mm}]$$

操舵角入力振動数：1.3Hz

剛性落とした場合

$$k_b = 929 [\text{N/mm}]$$

運転時の感想：反応が鈍く、ステアリングを切っても曲がらないように感じた



実験結果（入力振動数1.3Hz） 車両軌跡とヨーレート

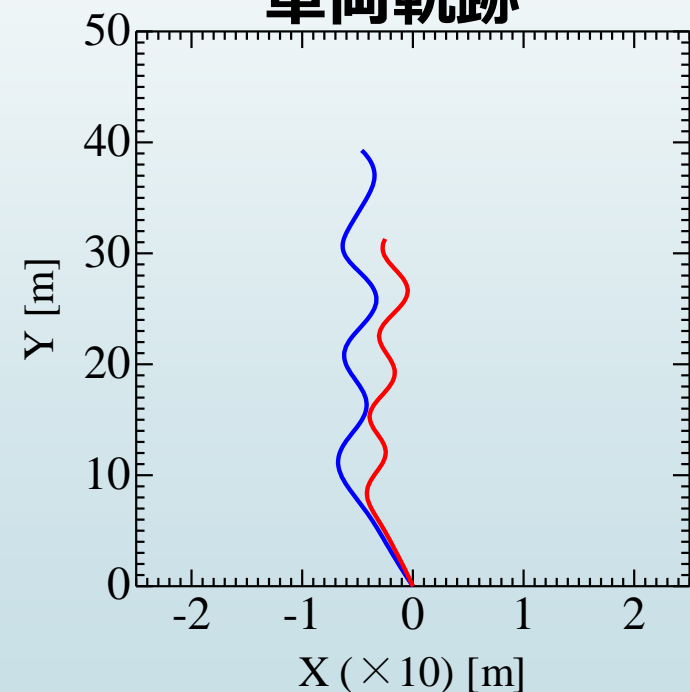
ヨーレート
車両の重心周りに回転し
ようとする回転角速度



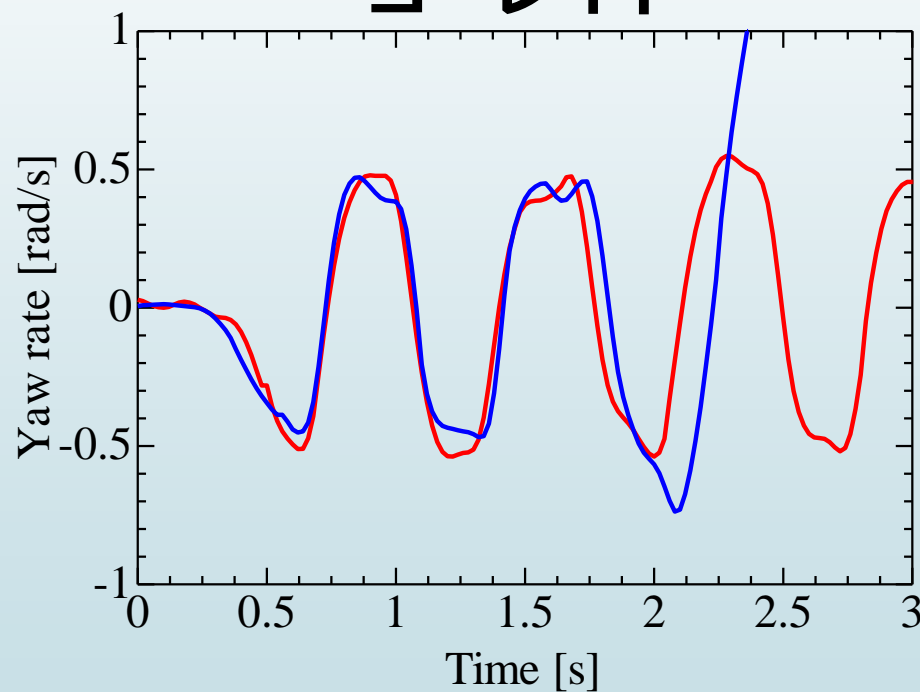
赤線：標準の横曲げ剛性 ($k_b = 6084$ [N/mm])

青線：剛性落とした場合 ($k_b = 929$ [N/mm])

車両軌跡



ヨーレート



剛性落とした場合

- ヨーレートの極値が不安定
- 車両軌跡の波長が広い
- 車両が曲がらず，間延び

2秒以降スピンモード，
制御不能に

**剛性を落とすと
車両挙動が不安定になる**

図13 車体横曲げ剛性を変化させた場合の
車両軌跡とヨーレートの時間変化

シミュレーション

必要十分な車体横曲げ剛性

周波数応答

周期的な操舵角入力に対する
車両の動的特性を調べる

変更するパラメータ

- 操舵角の入力振動数：0.1Hz~5Hz
- 剛体(Rigid body) ($k_b = \infty$)
- 車体横曲げ剛性 $k_b = 6084\text{N/mm}$ を基準
 $0.5k_b, k_b, 2k_b, 4k_b$

**必要十分な車体横曲げ剛性は
現行車両の約2~4倍程度**

剛性低い場合

ヨーレートゲイン 増加

操舵入力とボディが共振

車両挙動が不安定になる

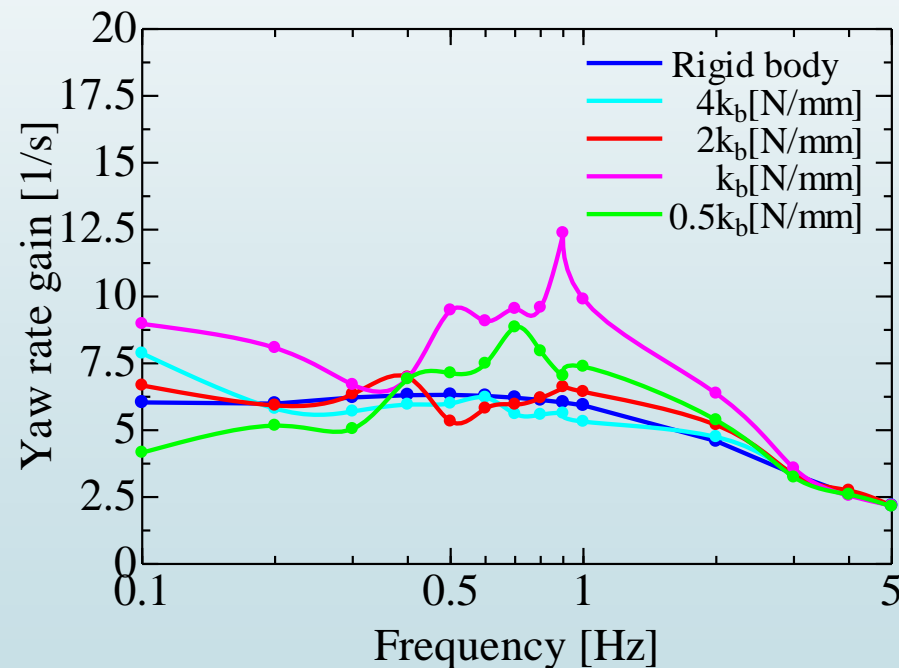
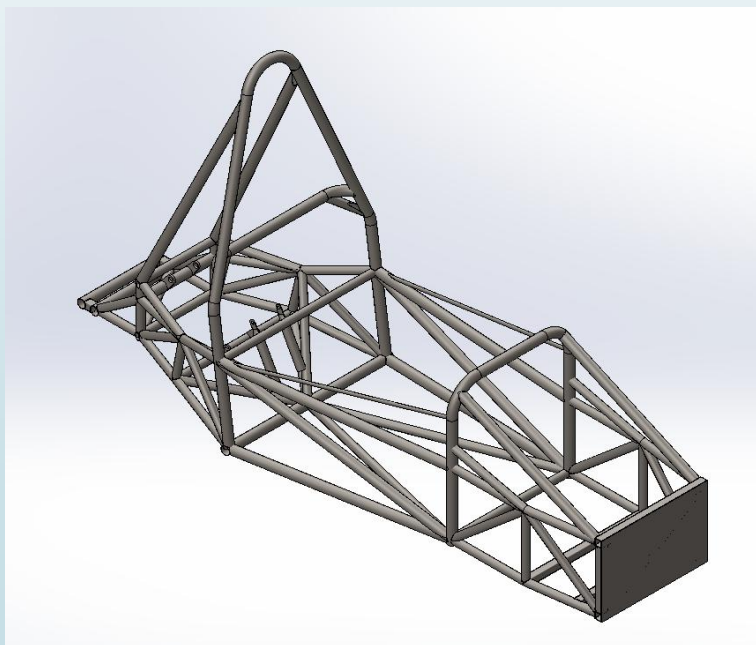


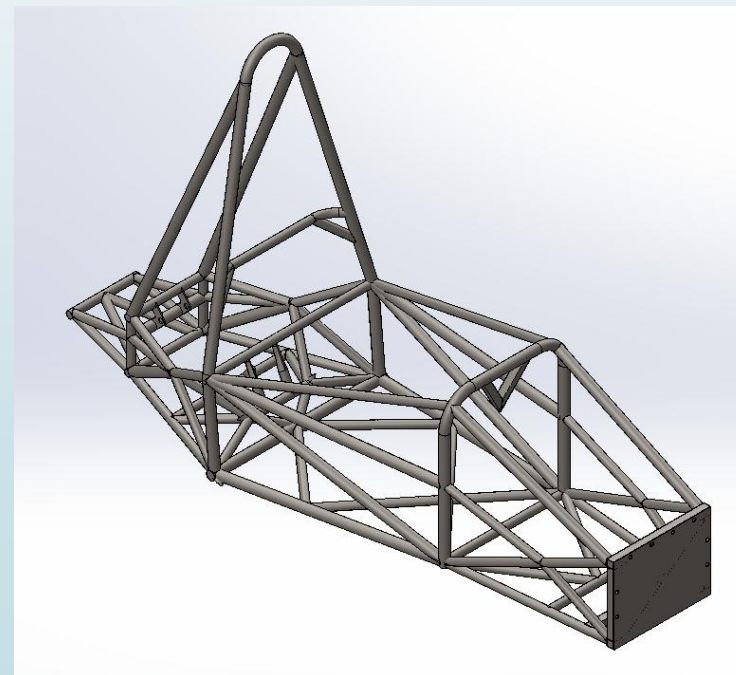
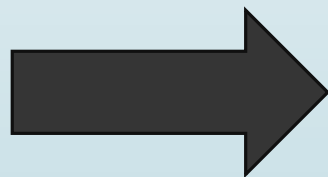
図14 車体横曲げ剛性を変化させた場合のヨーレートゲイン

結論

- 車体横曲げ剛性が車両の動的挙動に及ぼす影響を、実験走行とシミュレーションにより明らかにした
- 本学FSAE車両の必要十分の車体横曲げ剛性は現行車両の約2~4倍程度である
- 得られた知見に基づき、2025年度車両では2024年度の1.94倍の車体を設計・製作中である



2024年度



2025年度