

統合電動駆動システム構築と車両外乱安定性 に関する研究

神奈川工科大学
工学研究科 機械システム工学専攻
井上・小宮研究室

1984004 中沢 允

目次

1. 背景； IED (Integrated Electric Drive system) とは？
2. 目的
3. 小型・高出力「駆動モータ」の設計
 - 3.1 量産モータの性能予測に基づく目標設定
 - 3.2 損失要因からの形状(軸長幅／外径比)の最適化
 - 3.3 磁石配置のパラメータスタディとリラクアンストルクの最適化
 - 3.4 進角制御での性能向上
 - 3.5 総合的モータの設計結果
4. 外乱入力に対する IED ロバスト性に関する解析
 - 4.1 従来型差動機構(従来デフ)の課題とIED
 - 4.2 Matlab/Simulink Simscapeによる伝達特性の解析
 - 4.3 シミュレーション結果と考察
5. まとめと今後

1. 背景; ; IED (Integrated Electric Drive system)とは?

- ✓ 駆動モータ, 新差動機構, T/M(減速機), 駆動力配分機構が一体となった「統合電動駆動システム」
- ✓ 新差動機構, 駆動モータ軸, 中間減速, 駆動軸が全て平行軸で構成され, ギヤ噛合いを最適化
- ✓ 駆動力配分モータ~駆動軸間の減速比を大きくとれる

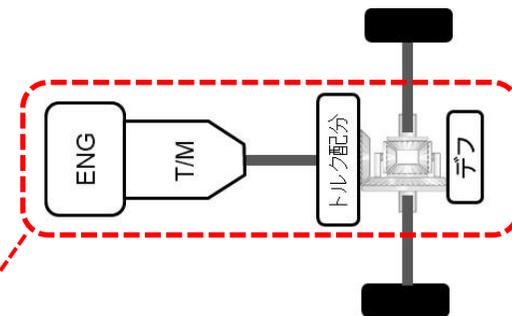
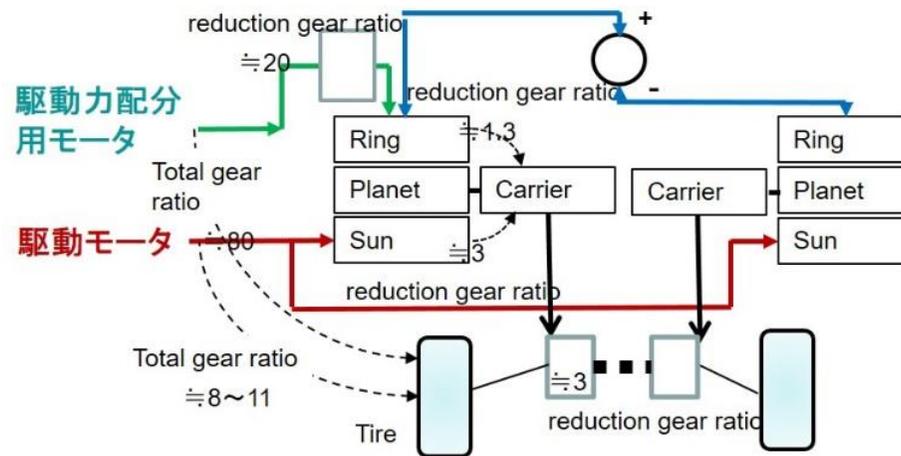
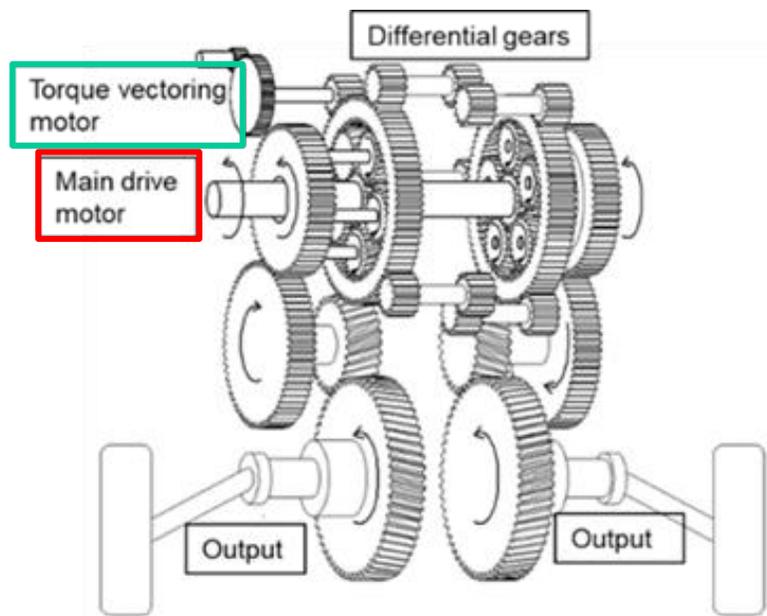


Fig. 1 Conventional drive-train

一体化



(4)久保愛三, 杉谷伸芳: 車両の駆動装置及び電気自動車 国際公開番号: WO 2020/250453

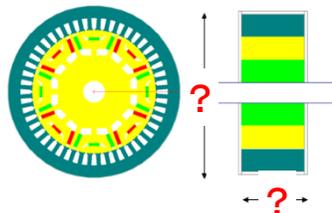
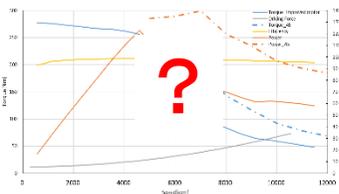
Fig. 2 Integrated electric drive system*4

2. 目的

- ① IEDの核となる駆動モータの小型・高出力を目指した最適設計の実施
→シミュレーション(Speed)モデル作成による要因分析, 磁場解析
- ② IEDの高減速比構造による外乱入力に対するロバスト性の明確化
→Maltab/Simulink Simscapeモデル作成による伝達系解析

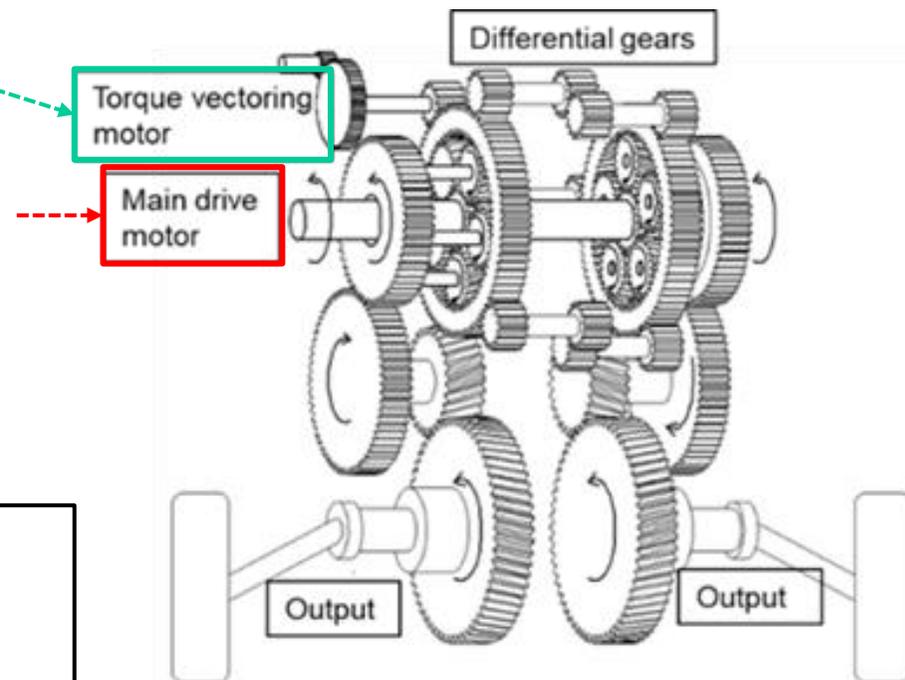
② How is the robust effects of IED on disturbances ?

① How is an optimal design of main drive-motor performance and physique ?



設計目標 (詳細後述)

- リラクタンストルク比率 ; 70[%]以上
- 体積 ; 5[L]以下
- 最大トルク ; 270[Nm]
- 最高速度 ; 12,000[rpm]以上(180km/h相当)



IED; Integrated electric drive system

3. 小型・高出力「駆動モータ」の設計

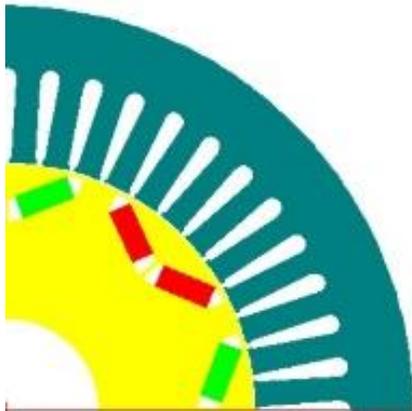
3.1 量産モータの性能予測に基づく設計目標設定

最高レベルの3つ量産モータ(EV/HV搭載)の基本諸元からシミュレーションモデルを作成し各性能を予測・分析→設計目標を設定

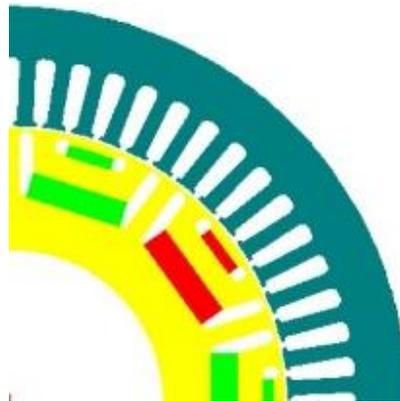
Type1 (2009) -HV用
最高回転数：13480[rpm]
大径-軸長幅小 (扁平型)

Type2 (2014) -EV用
最高回転数：12000[rpm]
大径-軸長幅

Type3 (2015) -HV用
最高回転数：18000[rpm]
低トルク化で小型を実現⁽³⁾
小外径で遠心力低減



$\Phi 264 \times 50\text{mm}$
Power : 60[kW]
Max. torque:207[Nm]



$\Phi 246 \times 150\text{mm}$
Power : 85[kW]
Max. torque:**270[Nm]**



$\Phi 210 \times 52\text{mm}$
Power : 50[kW]
Max. torque:200[Nm]

Fig.3 Comparison of three mass production motors

(3) 春野健太郎他：小型ハイブリッド車用新型モータの開発，自動車技術会2016年春季大会学術講演会予稿集，p.1095-1099,2016年

3.1 量産モータの性能予測に基づく設計目標設定

リラクタンストルクとは？

- ステータとロータ間の磁気抵抗による突極性により発生
- 磁気抵抗を最小にするようトルクが働く
- 同期モータ(回転磁界と回転子が同期)であるためこのトルクが発生し続ける。

磁気抵抗: **磁場解析**により磁束による
磁気抵抗を改善
電流増加: **進角制御**により電流アップ

$$T_{rel} = \frac{mp}{2} (L_q - L_d) I_d I_q \quad (1)$$

m: 相数 P: 対極数

I_q: q軸電流

L_q: q軸インダクタンス

L_d: d軸インダクタンス

I_d: d軸インダクタンス

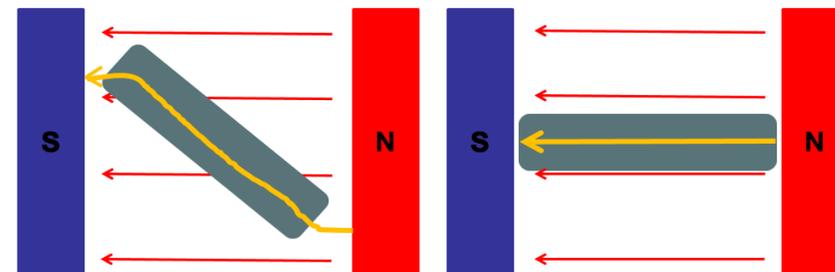


Fig.4 principle of reluctance torque

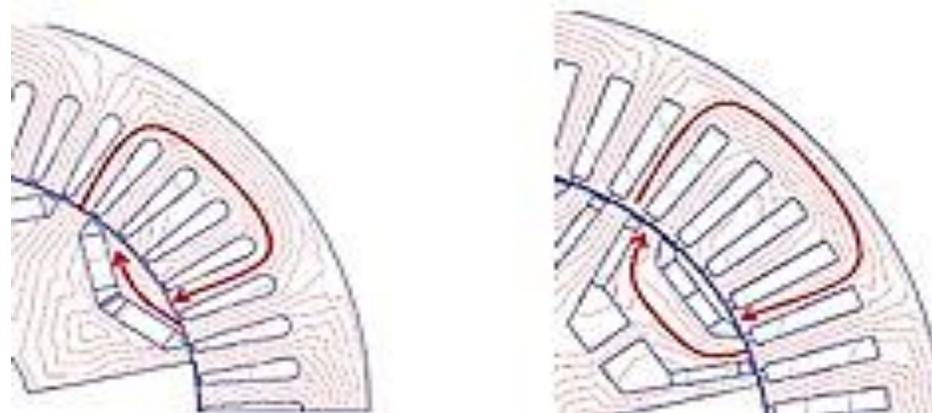


Fig.5 Motor reluctance torque by simulation

3.1 量産モータの性能予測に基づく設計目標設定

・体格の違うモータであるため **単位体積当たりのトルク[Nm/L]** で比較
・ **マグネットトルク** と **リラクタンストルク** のトルク比率を比較
→ リラクタンストルクの比率を大きくすることでモータを **小型・高トルク化** できる知見が得られた。 → **リラクタンストルク比率 70[%]以上を目標に設定**

性能予測結果(シミュレーション)

1. Type3のモータが1[L]あたりのトルク[Nm/L]が最大
2. さらにType3はリラクタンストルク比率が59[%]と最大
3. またType3は単位トルク当たりの磁石使用量が一番少ない

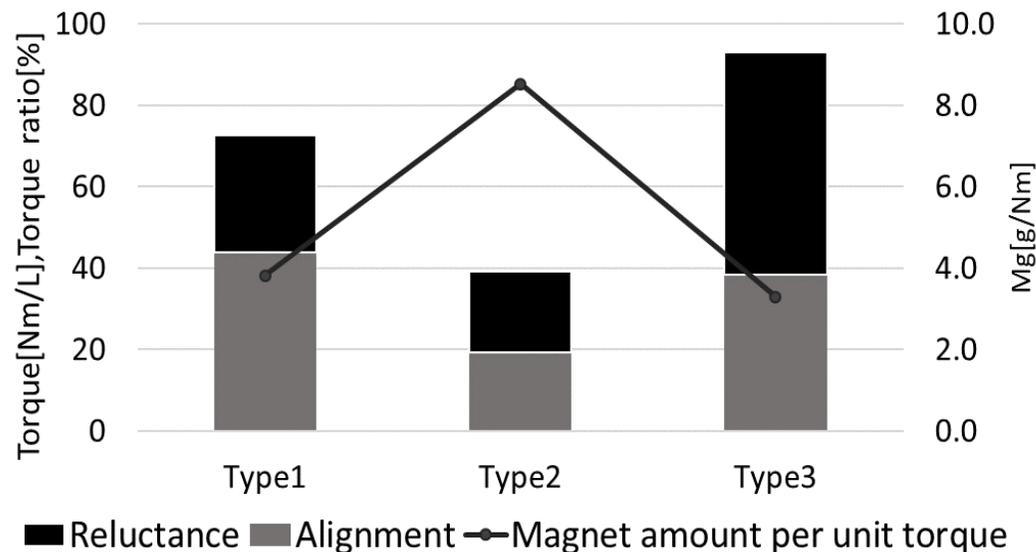


Fig.6 Comparison of torque output per motor volume and of magnet usage per unit torque

設計目標

- ・ リラクタンストルク比率 ; 70[%]以上 (Type3以上の効率)
 - ・ 体積 ; 5[L]以下
 - ・ 最大トルク ; 270[Nm]
 - ・ 最高速度 ; 12,000[rpm]以上(180km/h以上)
- } (Type2並みの最大トルクをType1,2の中間体積で)

3.2 損失要因からの形状(軸長幅/外径比)の最適化

同体積(5L)での形状違いによる損失を比較

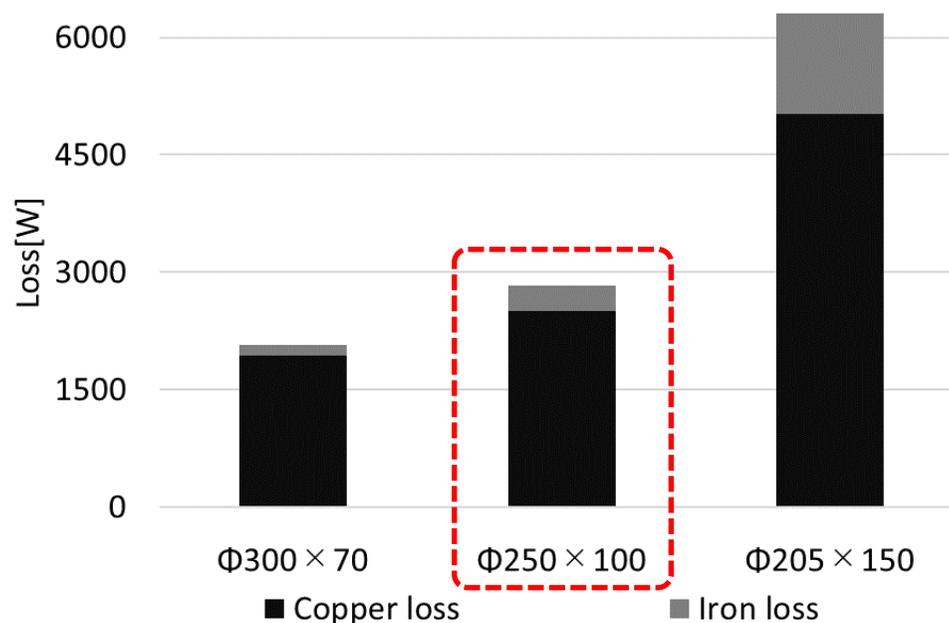
- ・銅損と鉄損が主要因(他に, ヒステリシス損・渦電流損)→特に銅損が支配的である.
- ・大径-軸長小($\phi 300 \times 70$)が小径-軸長大($\phi 205 \times 150$)に比べ損失が少ない.
 - 同じ巻き数でも巻線長さが異なるため抵抗が増え銅損が増える. 線径も小さくなる.
 - 同じ電磁鋼板だと積層数が多いほど鉄損増える.
- ・大径型は遠心力大 → 高回転型に向かない.

銅損 $P_c = I^2 R$ (2)

ヒステリシス損 $P_h = k_h f B_m^2$ (3)

渦電流損 $P_e = K_e (df B_m)^2$ (4)

巻線抵抗 $R = \frac{\rho L}{S}$ (5)



→ $\Phi 250 \times 100$ を選択

Fig.11 Comparison of copper and iron loss with different motor shapes

3.3 磁石配置のパラメータスタディとリラクアンストルクの最適化

量産モータ分析に基づき磁石2層配列タイプを採用

- 350[V], 3000[rpm]時の軸トルク出力値の最適値を抽出(Factor A)

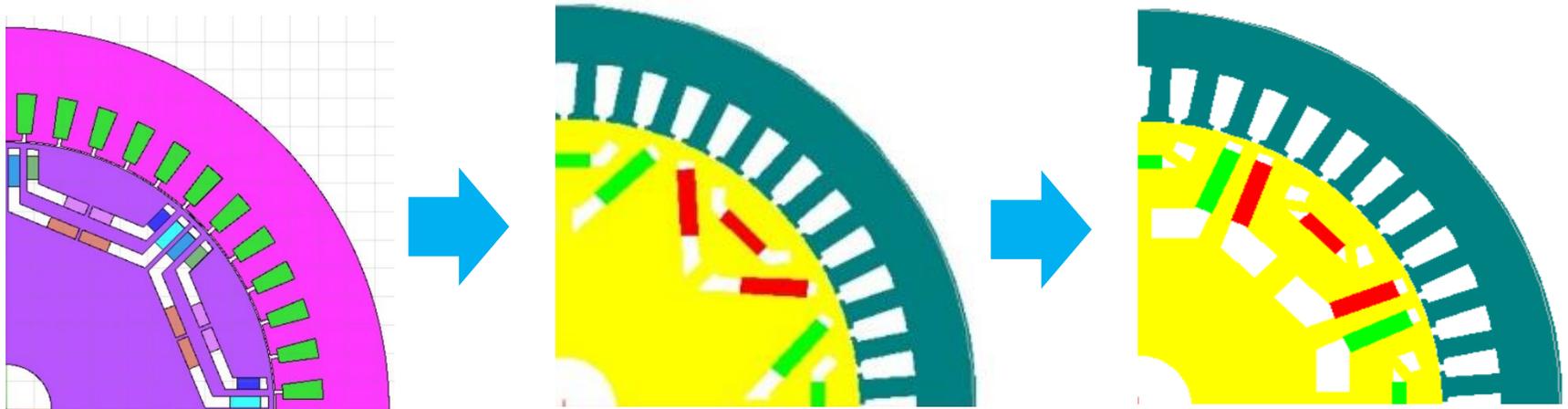


Fig.7 Increasing shape of flux barrier length (Factor A)

$$T_{shaft} = T_{gap} - \frac{MechLoss}{\omega_m} \quad (6)$$

$$T_{gap} = T_{ei} + T_{rel} \quad (7)$$

パラメータスタディにより246[Nm], リラクタンストルク比率54.9[%]

3.3 磁石配置のパラメータスタディとリラクアンストルクの最適化

外側の磁石配置の検討(Factor A)

- 磁場解析シミュレーションにより磁束, 磁束密度の飽和を解析
- 磁石固定用リブを追加

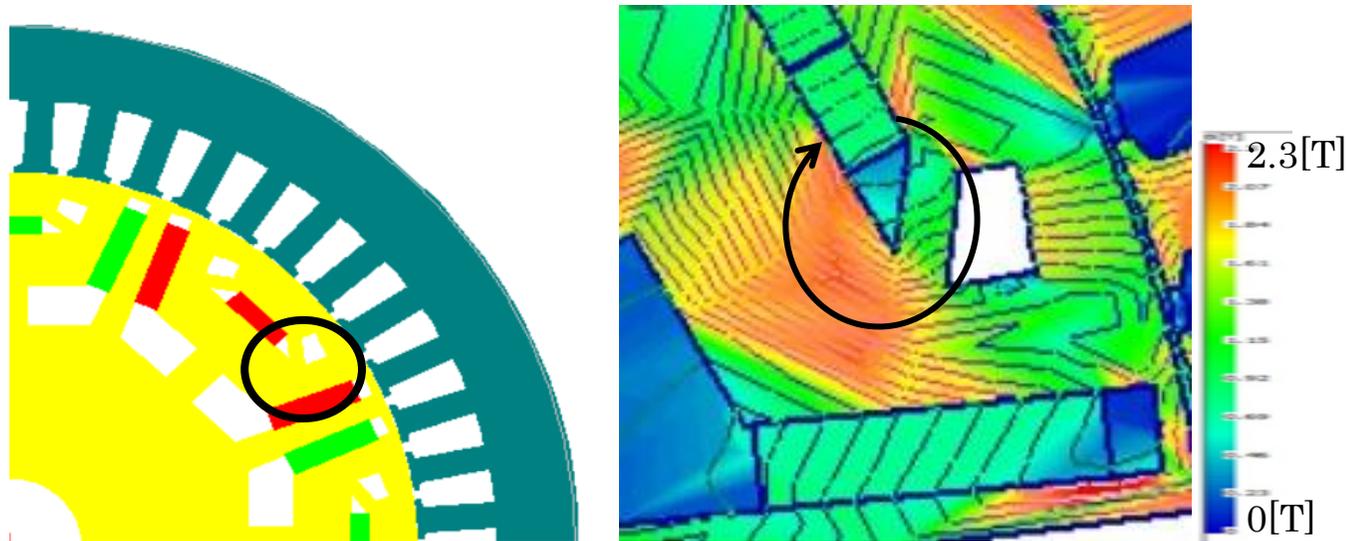


Fig.8 Magnetic flux density distribution result of Factor A in the outer layer

磁石の磁束が内周側へ漏れている

Factor	Max. Torque [Nm]	Reluctance Torque Ratio[%]
Factor A	246	54.9

3.3 磁石配置のパラメータスタディとリラクアンストルクの最適化

外側の磁石配置の検討 (Factor B の効果)

- 支持方法を変更し改善

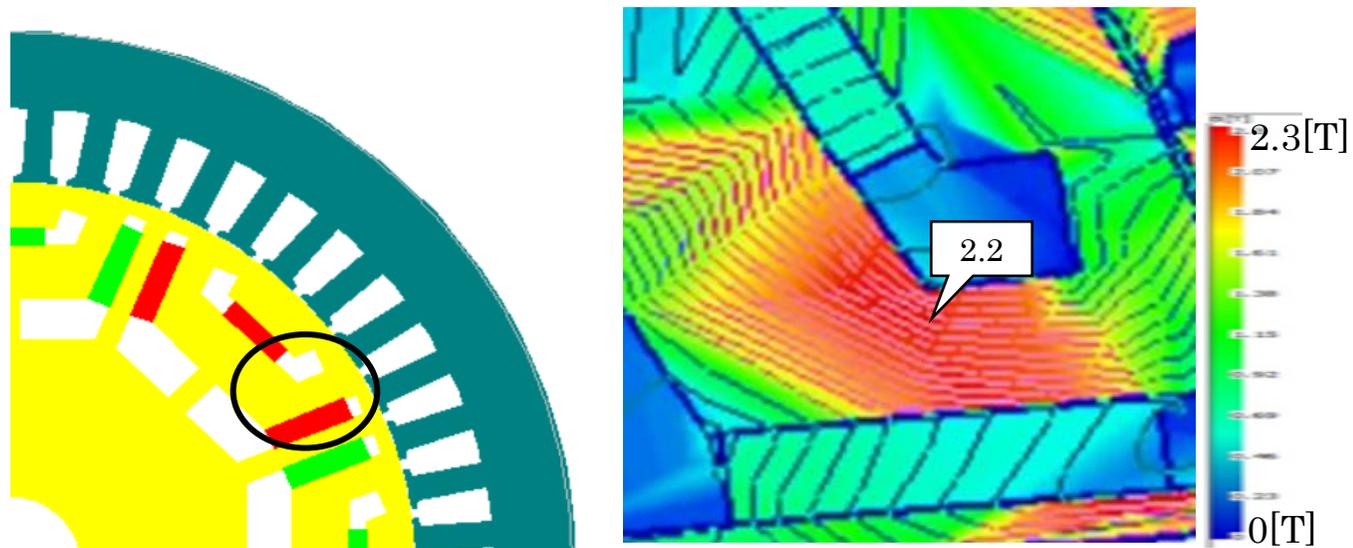


Fig.9 Magnetic flux density distribution result of Factor B in the outer layer

飽和磁束密度を超えている領域が存在

Factor	Max. Torque [Nm]	Reluctance Torque Ratio [%]
Factor A	246	54.9
Factor B	265	58.1

3.3 磁石配置のパラメータスタディとリラクアンストルクの最適化

外側の磁石配置の検討 (Factor Cの効果)

- フラックスバリア (磁束を通さない層) の幅を変更

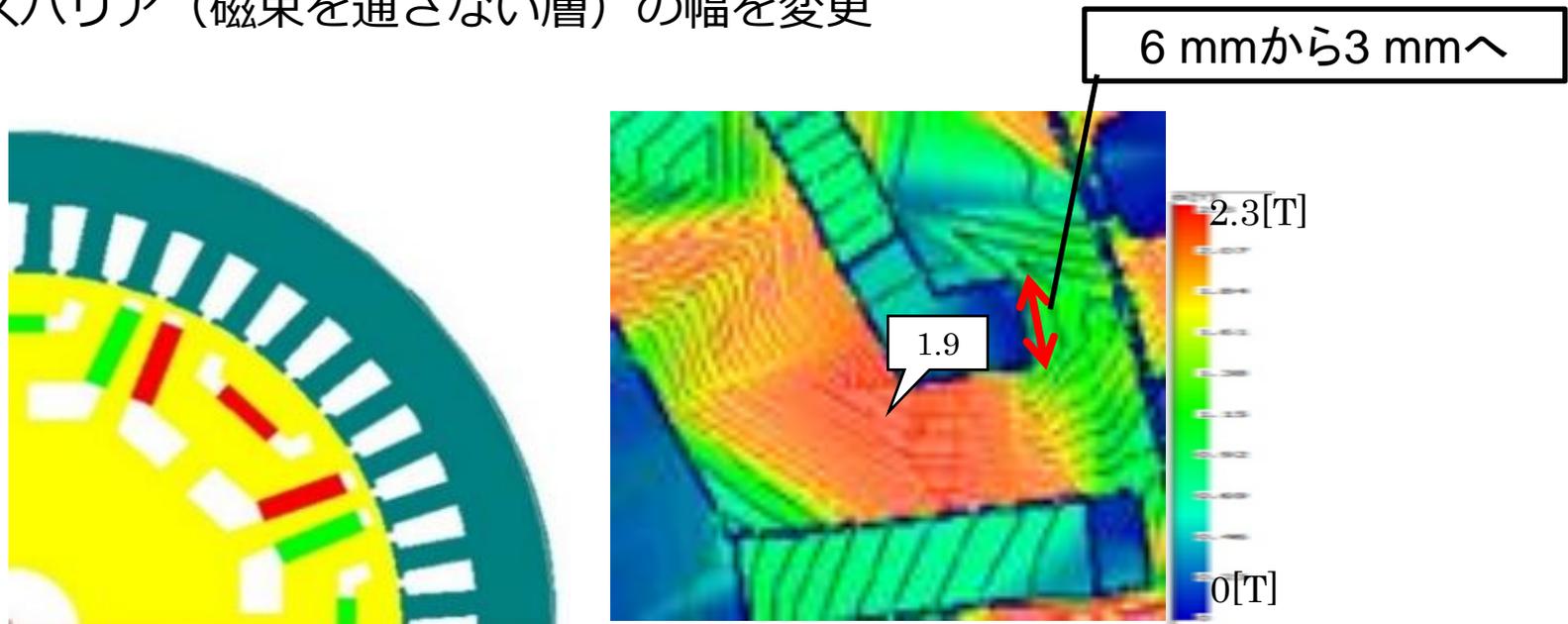


Fig.10 Magnetic flux density distribution result of Factor C in the outer layer

磁束の飽和を解消

Factor	Max. Torque [Nm]	Reluctance Torque Ratio [%]
Factor A	246	54.9
Factor B	265	58.1
Factor C	277	62.9

3.3 磁石配置のパラメータスタディとリラクタンストルクの最適化

改良効果

- トルクとリラクタンストルク比率の推移
- トルク-回転数出力特性

Table 3 Reluctance torque improvement by factors

Factor	Max. Torque [Nm]	Reluctance Torque Ratio [%]
Factor A	246	54.9
Factor B	265	58.1
Factor C	277	62.9

- 目標最大トルク270[Nm]を達成.
- しかしリラクタンストルク比率 70[%]を未達.
- 約150[km/h]が限界となり不十分

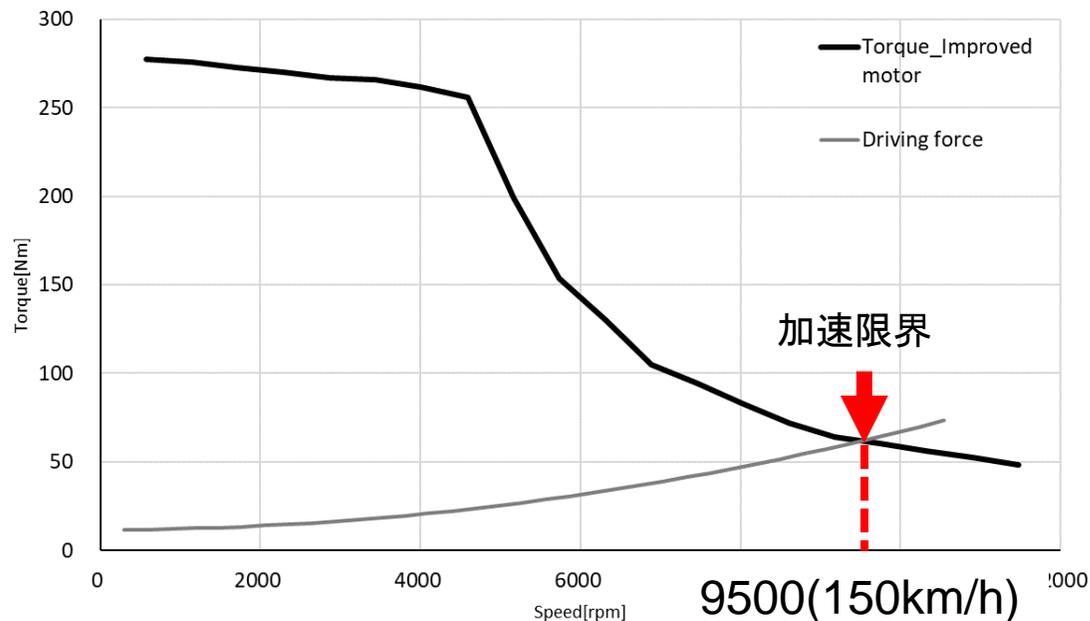


Fig.11 Improvement effect of motor torque by factors C

3.4 進角制御での性能向上

進角制御

- d軸電流を誘起電圧より電気角を進めて流す制御
- d軸方向の磁束を減磁させることができ、誘起電圧を低くする
- 電流を制御前より流すことができ最高回転数を上げることができる
- インバータ・電池の耐電圧を上げる必要がある

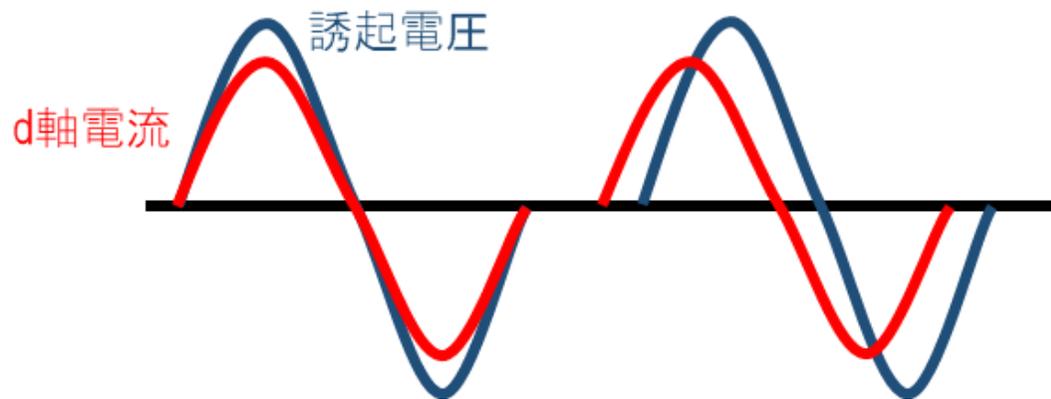


Fig.12 Principle of angle advance control

逆起電力を増大させないことを考慮し、Type3モータ（55[°]）より少ない制御量での目標達成を試みた

3.4 進角制御での性能向上

35° ~50° まで電気角を変更し,トルクを算出.

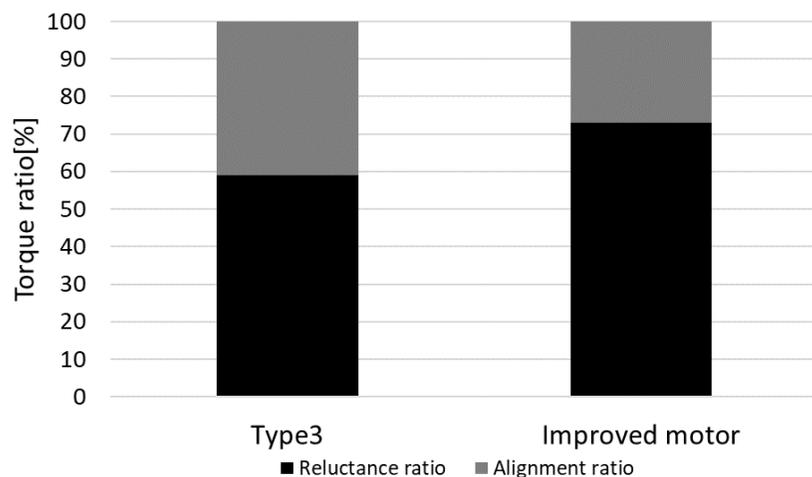


Fig.18 Reluctance torque ratio improvement by total improved motor

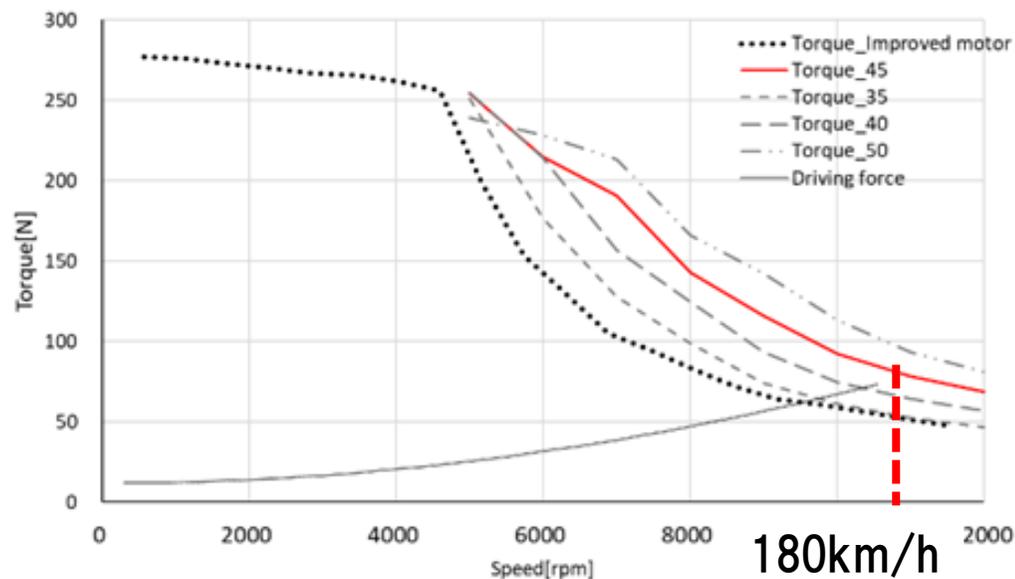


Fig.19 Advance angle control result

- 50[°]でリラクタンストルク比率71.6[%]を達成
- 45[°]で180[km/h]走行を達成

3.5 総合的モータの設計結果

Type2と同等トルクを32%低減体積で達成することができ、小型高トルクのモータ設計を達成！

Table4 Improved motor specifications

設計項目	達成結果	目標
極数	8	—
スロット数	48	—
電圧[V]	350	—
最大出力[kW]	120	—
体積[L]	4.95	5L以下
最大トルク[Nm]	277	270以上
リラクタンストルク比率[%]	71.6	70%以上
最高回転数[rpm]	12,000	12,000以上
総質量[kg] (水路含まず)	32.5	—
電流密度[A/mm ²]	15.6	—

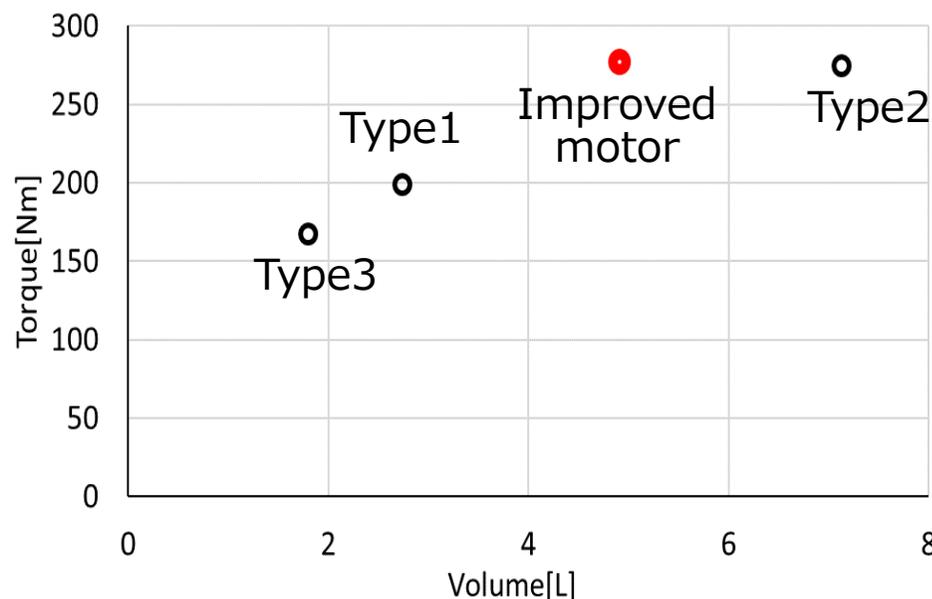


Fig.22 Volume-Torque plot

3.5 総合的モータの設計結果

- 小型高性能モータの設計によりIEDの搭載自由度が更に広がり，画期的PTを提案.
- 自動車駆動用の実用的な高効率 磁石型モータを出来た.

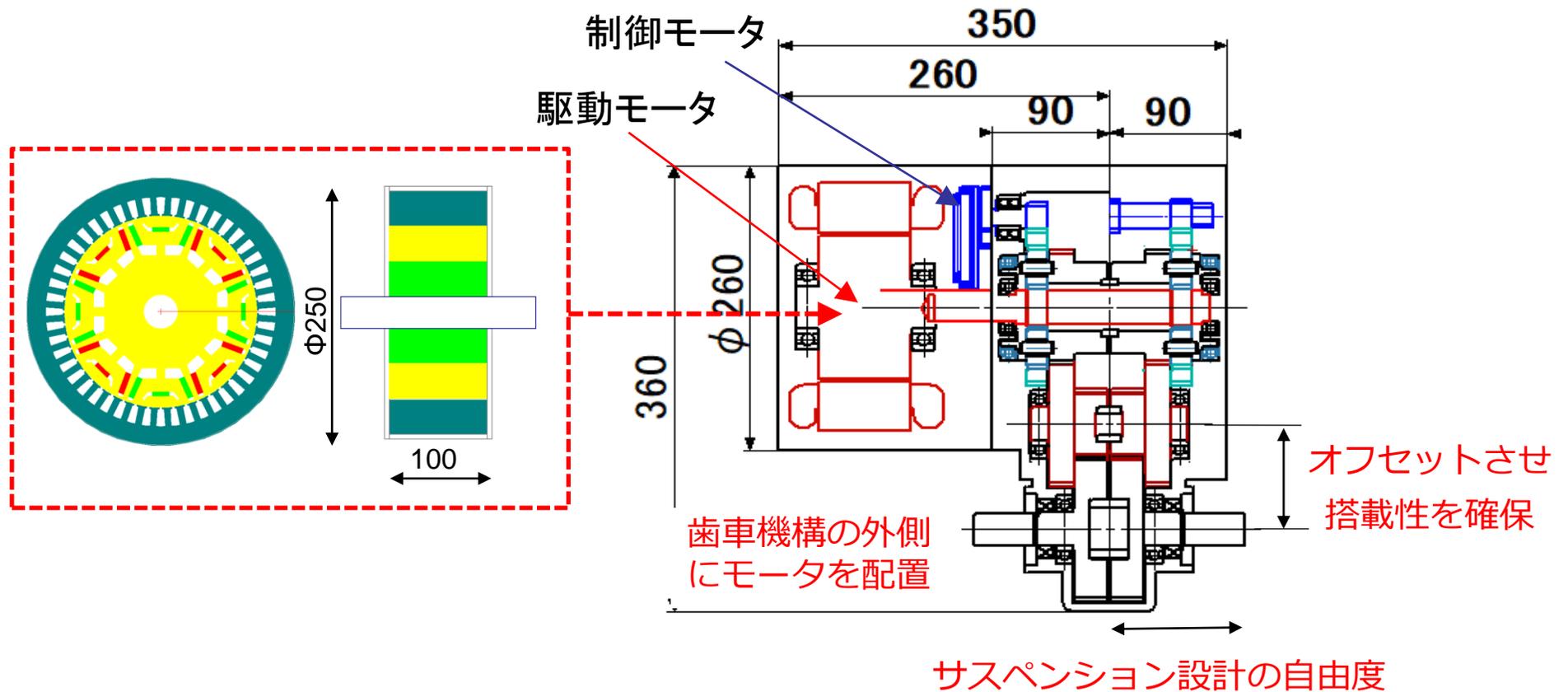


Fig.3 High installation ability of motor in IED

4. 外乱入力に対する IED ロバスト性に関する解析

4.1 従来型差動機構（従来デフ）の課題

2つの走行条件を設定.

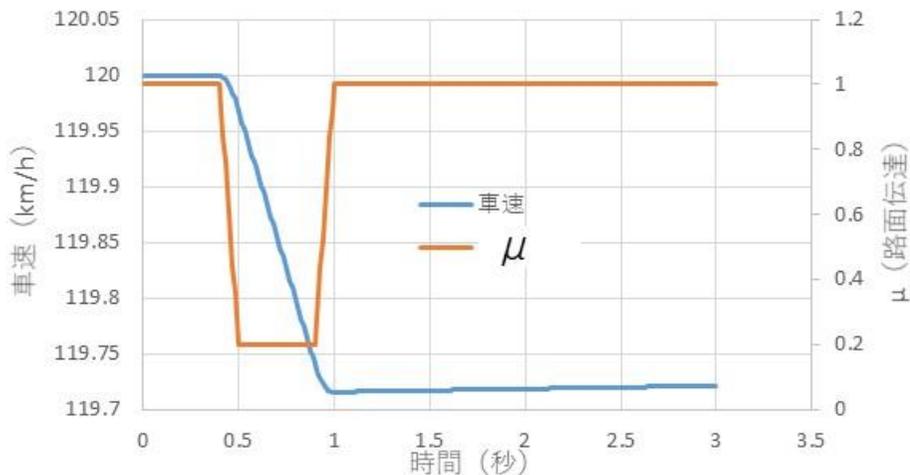
- (A) 高速走行中に左輪が、瞬時インパルスの(0.5sec間)に、 $\mu=0.15$ 路面を通過
- (B) 0km/hから50Nm駆動トルク加速中に、左輪が低 μ 路走行(跨ぎ路)

Open diff.
課題

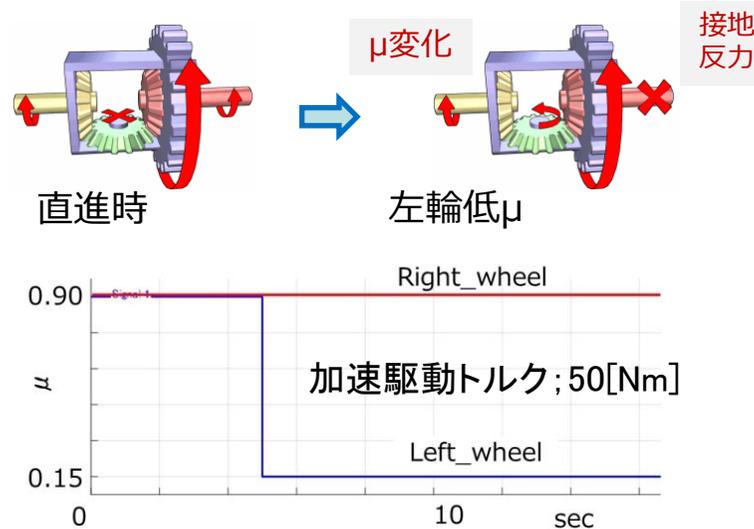


(A)の場合、Open diff. は、低 μ 輪で一瞬、反力トルクを失い、スリップ~反力復帰過程で、車速(駆動力)の低下と、外乱による不安定をもたらす。
 (B)では、スリップ輪で反力を失い、デフにより差動しトルクが逃げて加速できない。(トラクションコントロールシステムが必要理由).

(A) 120km/h走行時 0.5sec間左輪が低 $\mu=0.2$



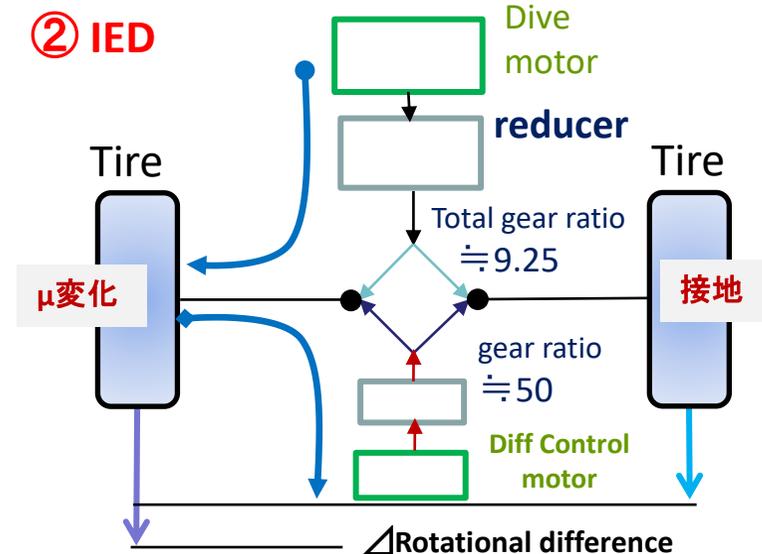
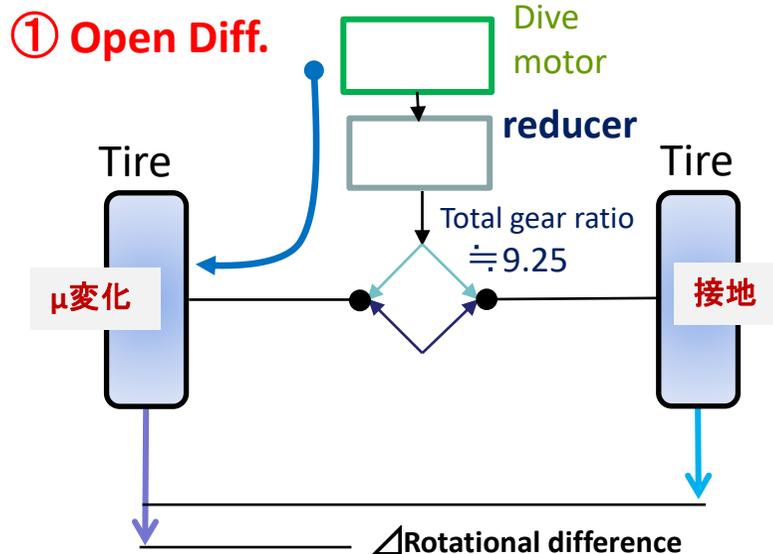
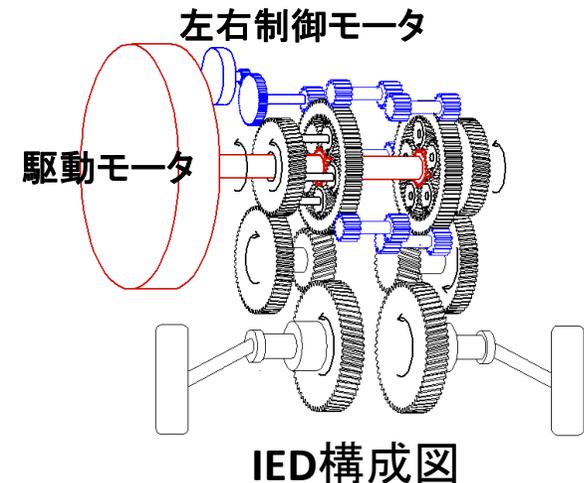
(A) 高速時 瞬時片輪外乱条件



(B) 0km/h発進加速中_片輪低 μ 路条件

4.2 Matlab/Simulink SimscapeによるIED伝達特性の解析

- ・IEDは、Open deff.に比べ、高減速比がとれる。
 - (1) **逆入力特性**; タイヤ入力から見て、制御モータ慣性モーメントが大きく、外乱に対して動きにくい。
 - (2) **正入力特性**; 制御モータの小さなトルクで応答性の良い左右トルク配分制御が可能。
- Simscapeシミュレーションを使い、(A)(B)走行条件での左右の車輪トルクと回転速度差を解析。



4.2 Matlab/Simulink SimscapeによるIED伝達特性の解析

Simscapeにて物理モデルを作成

- (1) Open diff., IEDのモデル化
- (2) Drive shaft, Tire model, 各慣性モーメントもモデル化

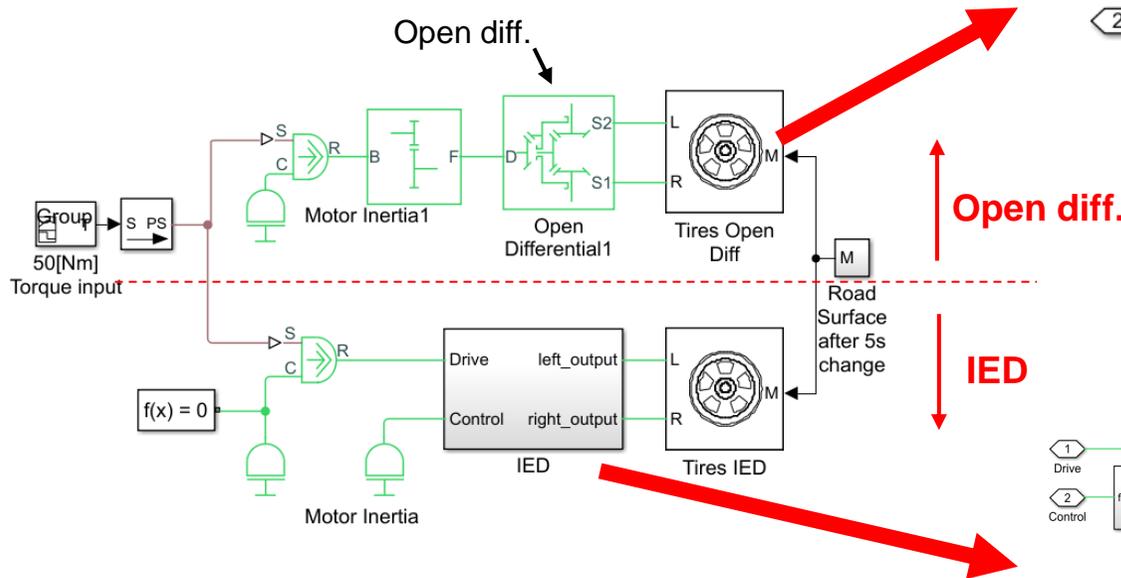


Fig. Simulation model

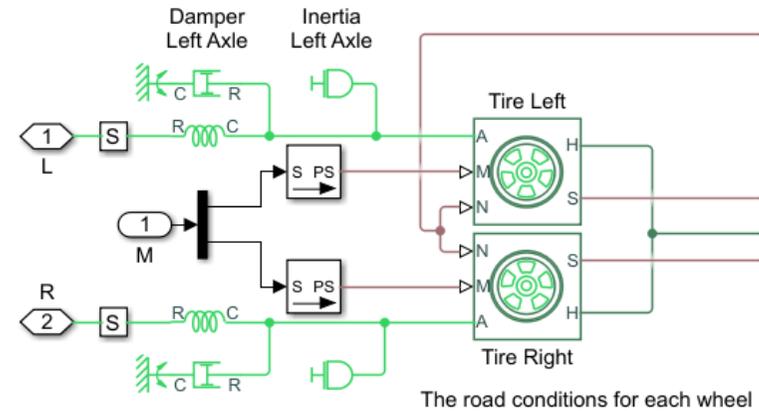


Fig. Drive shaft model

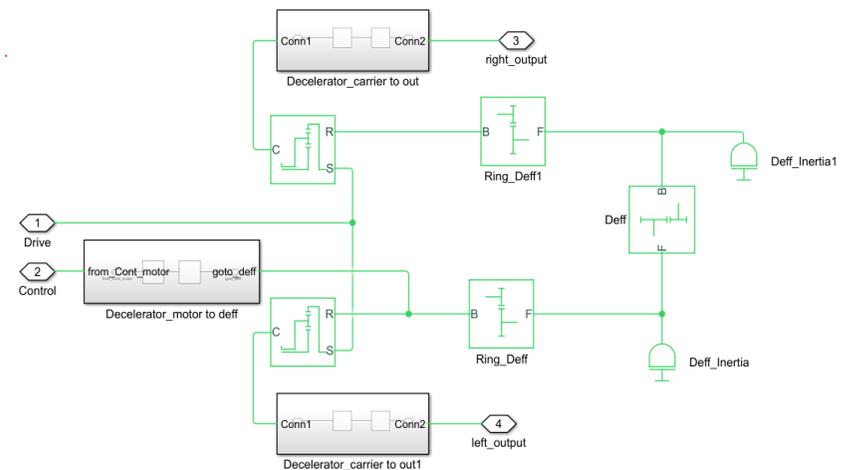
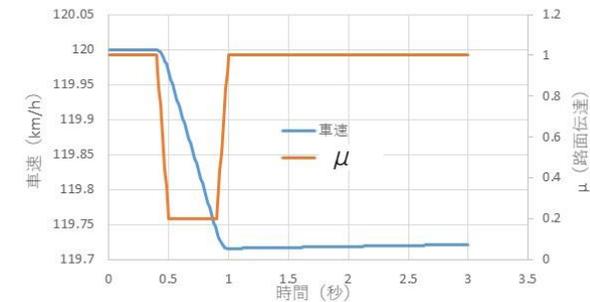


Fig. IED model

4.3 シミュレーション結果と考察

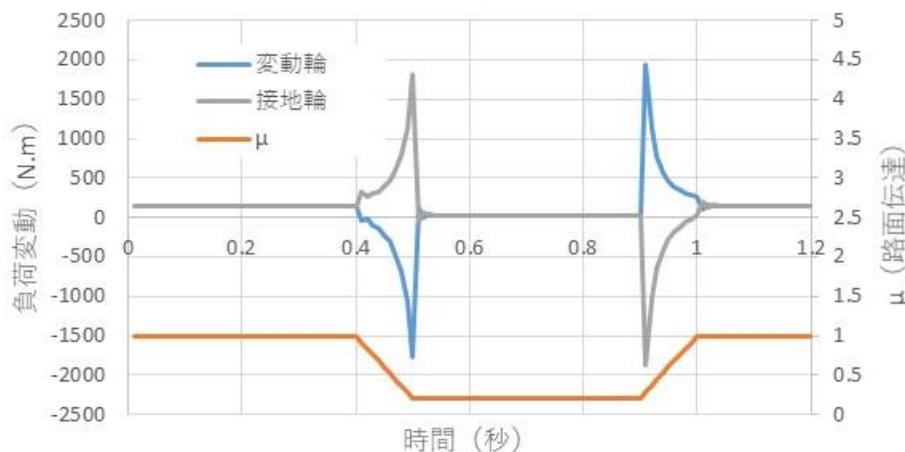
(A) 高速時 瞬時片輪低 μ 条件

- Open diff.に比べ、IEDでは、低 μ 輪の接地が抜ける時、復帰時の両方でタイヤトルクの変動が大幅に低減されている。
→制御モータの慣性モーメントが外乱に対して変動を抑える効果がある。



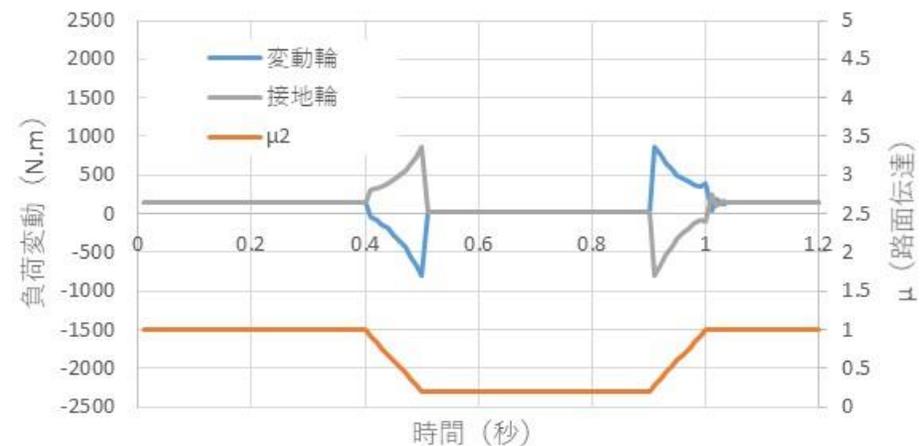
(A) 120km/h走行時 0.5sec間左輪が低 $\mu=0.2$

① Open Diff.



変動トルク大；
→従来デフの現象に傾向が合っている。

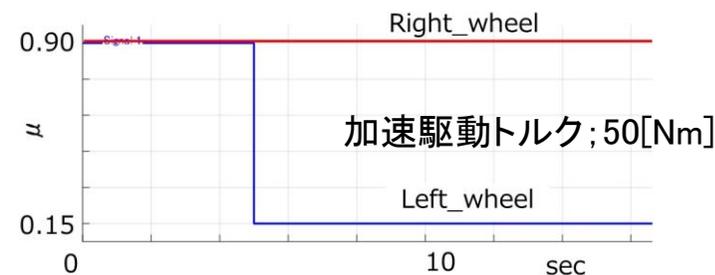
② IED (制御モータ慣性モーメントのみ)



変動トルク小；
→制御モータ慣性モーメントの効果大

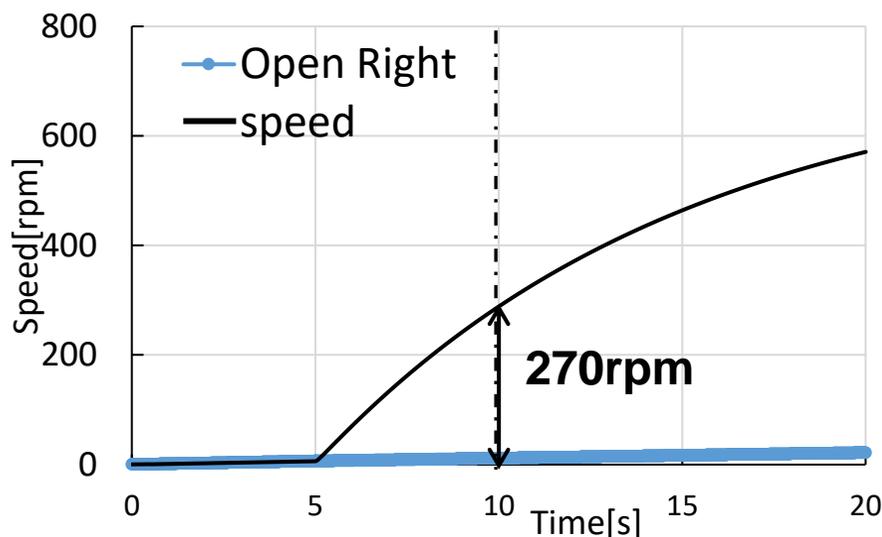
4.3 シミュレーション結果と考察 (B) 0km/h発進加速中_片輪低 μ 路条件

- ・(B)条件でも, IEDは, 制御モータ慣性モーメントを定義しただけで, Open diff.に比べ, 低 μ 輪/高 μ 輪の左右回転数差は, 270rpm \rightarrow 150rpmと大幅に減少.
→外乱に対して左右伝達がロバストな系になっていると言える.

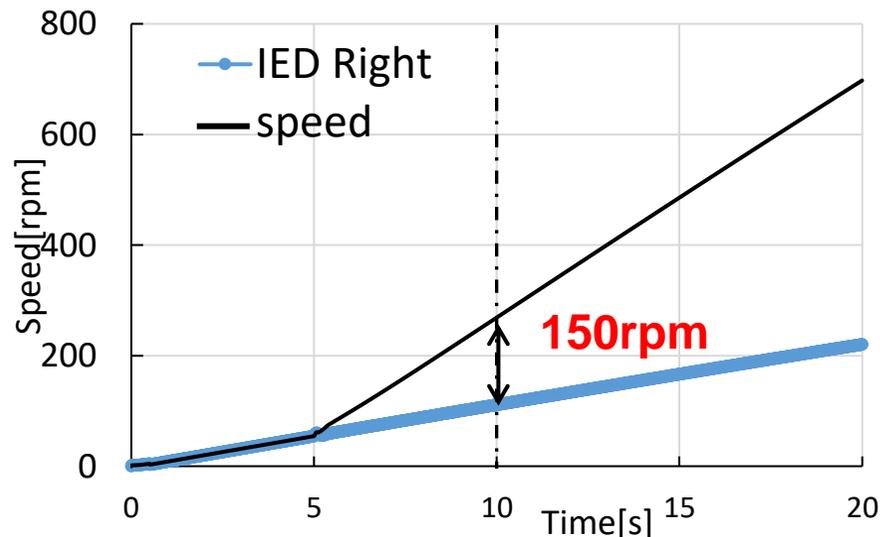


(B) 0km/h発進加速中_片輪低 μ 路条件

① Open Diff.



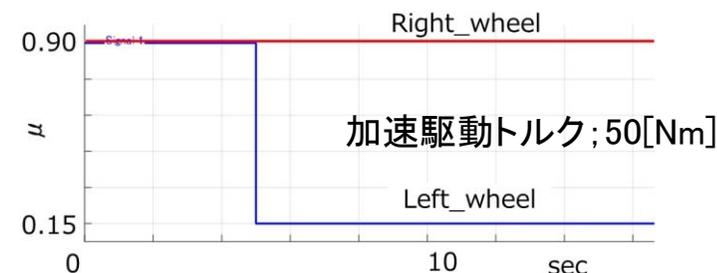
② IED (制御モータ慣性モーメントのみ)



4.3 シミュレーション結果と考察

正入力特性の確認;
IED制御モータにトルク10[Nm]を負荷

- ・(B)条件で, 制御モータから正入力特性を確認.
 - ・226[Nm]という大きなタイヤ駆動力を制御モータでの10[Nm]の小トルクで差動制限まで持っていける.
- 正入力に対しても, 従来にはない制御性能をもっていると言える.



(B) 0km/h発進加速中_片輪低μ路条件

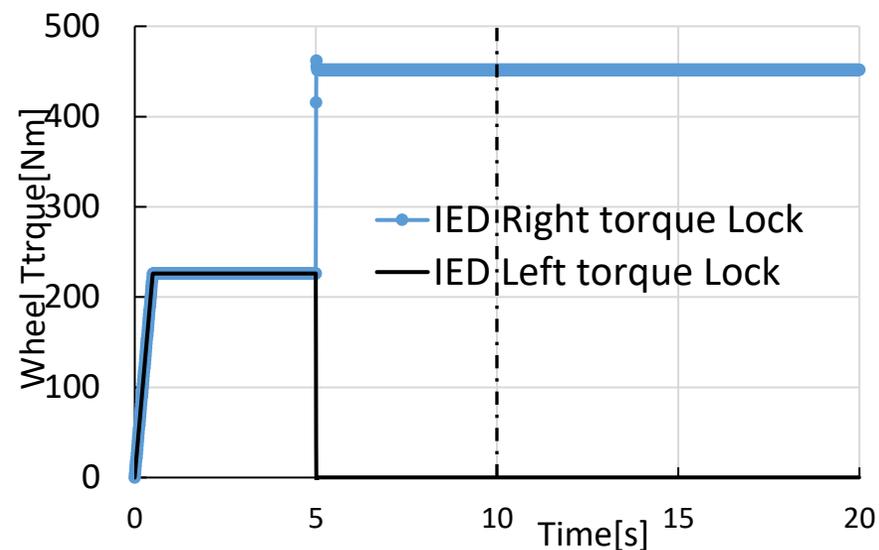
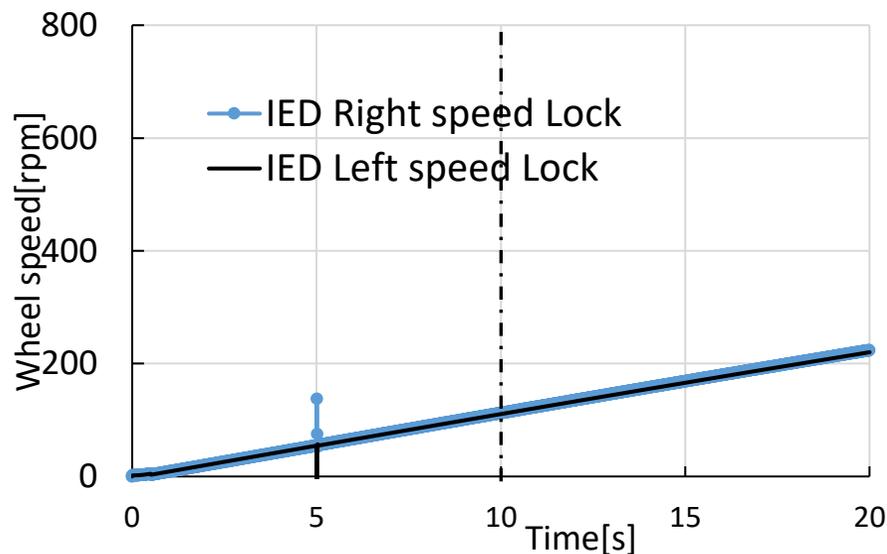


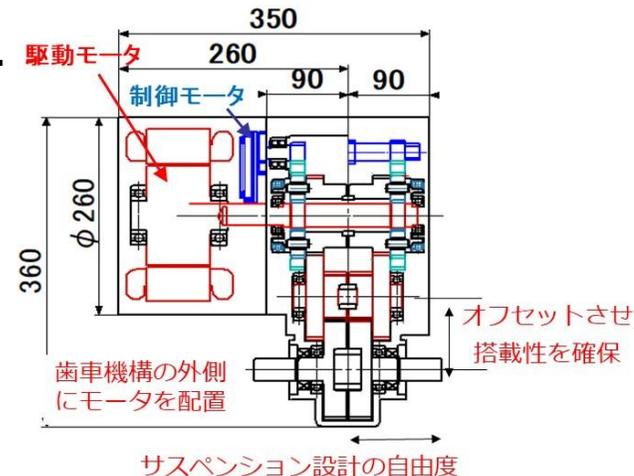
Fig. Control performance on active torque differential

5. まとめと今後

1. 統合電動駆動システム; IEDの核となる最高水準の

「小型・高出力駆動モータ」の設計を完結できた。

- ・シミュレーションを駆使した要因分析/磁場解析の実施
- ・量産モータの性能予測による設計目標の設定
- ・設計目標を全て達成した高スペックなモータ完成
→ 体格; $\phi 250 \times 100$ (4.95L), リラクタンストルク比率; 71.6%,
最大出力トルク; 277Nm, 最高回転数; 12,000rpm (180km/h)



2. IEDの高減速比と新差動機構から, 制御モータ慣性モーメントが外乱入力に対し従来にないロバスト性をもつことが解析できた.

- ・逆入力に動かされ難く, 正入力で制御性の良いトルク配分機能であること
- ・Maltab/Simulink Simscapeモデル作成による伝達系解析の達成

→ 今後, IEDの詳細な動特性解析を進め, 車両性能向上を予測していく.