

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

ホイールサイズの最適化検討

2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

ホイールサイズの最適化検討
An Optimization Study of Reaction Wheel Size

市川 信一郎
Shinichiro ICHIKAWA

総合技術研究本部 システム誘導技術グループ
Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group
Institute of Space Technology and Aeronautics

2004年3月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

| | |
|---------|--|
| 和 文 抄 録 | <p>高トルク抵擾乱ホイールをベースに簡単な質量モデルを設定してホイールのロータ半径とホイール質量の関係を解析した。また、ホイール角運動量に対してホイール質量を最小化するロータ半径をもとめるとともに、これを基準にして、ホイールをロータ半径により系列化する検討を行った。</p> |
| 和文キーワード | ホイール |

目 次

| | |
|---|----|
| 1. ホイールサイズとホイール質量の最適化 | 1 |
| 2. ホイール質量モデル | 1 |
| 3. ロータ半径とホイール質量の関係 | 5 |
| 4. 最適なロータ半径と角運動量の関係 | 20 |
| 5. 13cm ロータと 16.5cm ロータホイールの角運動量範囲..... | 25 |
| 6. まとめ | 33 |
| 付録 Matlab プログラム | 34 |

ホイールサイズの最適化検討

1. ホイールサイズとホイール質量の最適化

高トルク低擾乱ホイールをベースに質量モデルを設定してホイールのロータ半径とホイール質量の関係を解析した。また、角運動量に対してホイール質量を最小化する、ロータ半径をもとめるとともに、これを基準にして、ホイールをロータ半径により系列化する検討を行った。

その結果、高トルク低擾乱ホイールとして開発されたホイール（ロータ半径16.5cm）は回転数を6000rpmとすると、50Nms以上で最適化されたホイールとして系列化出来ることが分かった。従って、もっとも需要の大きいと考えられる20Nms~50Nmsに関しては新たにロータ半径を設定した方が、全体的に国際競争力のあるホイールになることが分かった。

また角運動量範囲20Nms~50Nmsではロータ半径13cmが最適であることが分かった。

2. ホイール質量モデル

ホイールの質量モデルは以下の2つのモデルで、それぞれの外観を図2-1、2に示す。基本的には、ホイール質量がロータ半径の関数になるように設定された。それぞれのモデルはモータ配置等により3分類、ハウジング質量とロータ半径の関数関係（ロータ半径の2乗（シェル構造なので面積に比例）モデルと3乗（体積に）比例するモデル）により2分類し、これらの組合せにより全部で6モデルを設定した。以下に各モデルの概要をまた、表2-1に各モデル特徴を示す。

(1) モデル1、1a：ローティングマス、モーター一体型（高トルク低擾乱ホイールと同じモータ配置）

1：ハウジング質量はロータ半径の3乗に比例すると仮定、1a：2乗に比例すると仮定

(2) モデル2、2a：従来型ホイールのモータ配置（質量デメリットはあるがモータロストルク小）

1：ハウジング質量はロータ半径の3乗に比例すると仮定、1a：2乗に比例すると仮定

(3) モデル3、3a：モデル2のモーターロータを軽量化

3：ハウジング質量はロータ半径の3乗に比例すると仮定、3a：2乗に比例すると仮定

表2-1に各モデル特徴を示す。

表2-1 各モデルの特徴

| ハウジングモデル モータ構成 | ロータ半径の3乗に比例するモデル ハウジング質量が体積に比例すると仮定 | ロータ半径の2乗に比例するモデル シェル構造の質量は面積に非礼と仮定 |
|--|--|---|
| ローティングマス、モーター一体型 図2-1 表2-2 | モデル1： 高トルク低擾乱ホイールのモータ構成等を踏襲。ハウジングはロータ半径の3乗に比例 | モデル1a： 高トルク低擾乱ホイールのモータ構成等を踏襲。ハウジングはロータ半径の2乗に比例 |
| 従来型ホイールのモータ配置（モータロストルクを従来ホイールと同等とする） 図2-2 表2-3 | モデル2： 従来ホイールのモータ配置。ハウジングはロータ半径の3乗に比例 | モデル2a： 従来ホイールのモータ配置。ハウジングはロータ半径の2乗に比例 |
| 従来型ホイールのモータ配置（上記の軽量化） 図2-2 表2-4 | モデル3： 従来ホイールのモータ配置。ハウジングはロータ半径の3乗に比例 | モデル3a： 従来ホイールのモータ配置。ハウジングはロータ半径の2乗に比例 |

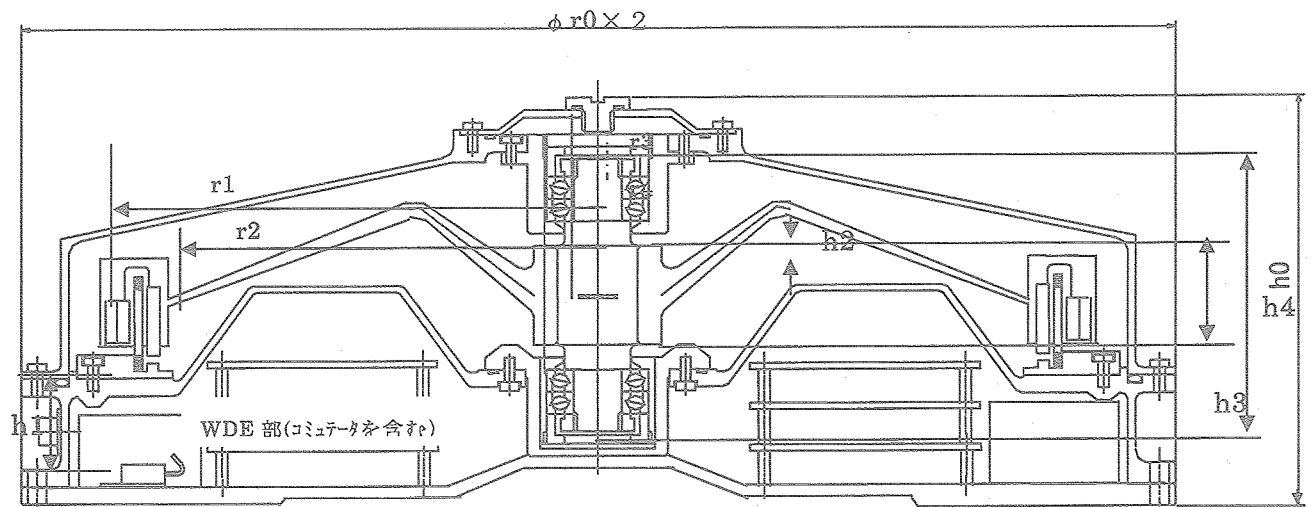


図 2-1 ホイール質量モデル 1, 1 a

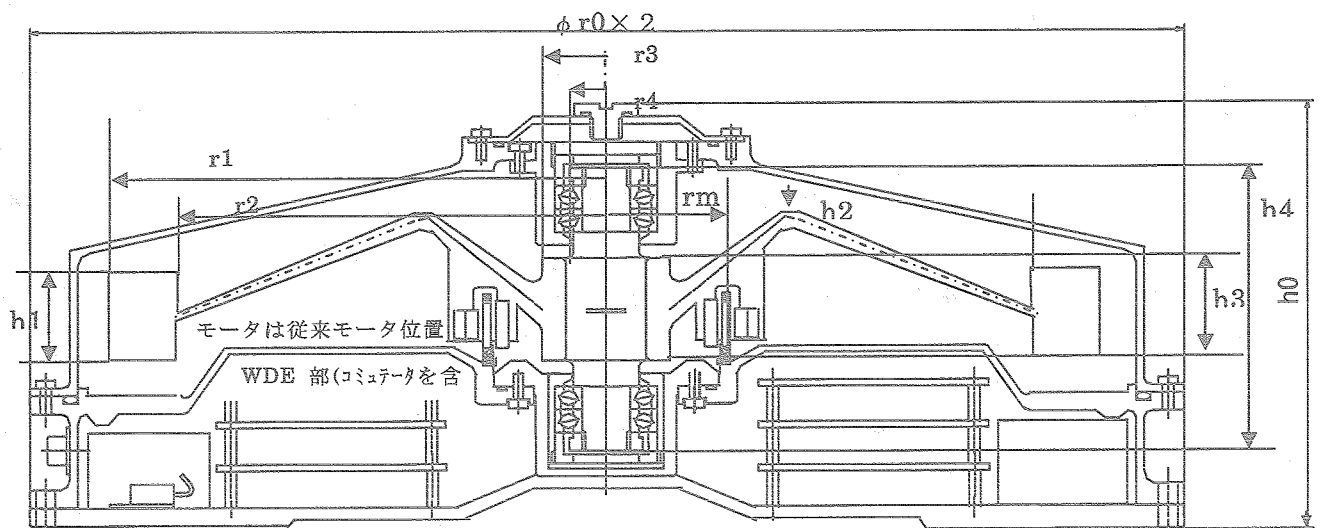


図 2-2 ホイール質量モデル 2, 2 a, 3, 3 a

$r1$: ロータ外形、 $r2$: ローターティングマス内径、 $r3$: ロータベース外形、 $r4$: シャフト平均径
 rm : モータ半径

ローターティングマス : 外形 $r1$ 、内径 $r2$ 、高さ $h1$ の円筒

ディスク : 外形 $r2$ 、内径 $r3$ 、高さ $h2$ の円筒

ロータベース(ロータ接続部) : 外形 $r3$ 、内径 $r4$ 、高さ $h3$ の円筒

シャフト : 外径 $r4$ 、高さ $h4$ の円筒

モータロータ (モデル 2 のみ) : 外形 $rm+1cm$ 、内径 $rm-1cm$ 、高さ 4 cm の円筒

ハウジングは ロータ外形の 3 乗に比例するものとする。また、マグネット、リターンパス等の回転部の部品質量は外形 (モデル 1) またはモータ半径 (モデル 2) に比例するものとし、慣性性能率の計算は集中質量として扱う。

同様にロータステータ質量も外形に比例すると仮定した。

上記の質量の他、ロータ半径の関数とならない電子回路部及び副資材の質量があるものと仮定した。

上記の様に仮定して場合の質量モデルを表 2-2、3、4 に示す。

表 2-2 ホイール質量モデル 1、1a (ローターティングマス、モータローター一体型)

| 項目 | 質量 (k g) | 高トルク低擾乱ホイールのパラメータ | 慣性能率 (k g m ²) | 高トルク低擾乱ホイールの質量／慣性能率 |
|--------------|---|--|-------------------------------|---|
| ローターティングマス | $m_1 = \pi(r_1^2 - r_2^2)h_1\rho_1$ | $r_1=16.5\text{cm}, r_2=13.5\text{cm}$ $\rho_1 = 4.3$ | $I_1 = m_1(r_1^2 + r_2^2)/2$ | ロータ全体で 7.2l k g / 0.11 k g m ² 4.5 k g / - |
| ディスク | $m_2 = \pi(r_2^2 - r_3^2)h_2\rho_2$ | $r_3 = 2 \text{ cm}, \rho_2 = 4.3$ | $I_2 = m_2(r_2^2 + r_3^2)/2$ | |
| ロータベース | $m_3 = \pi(r_3^2 - r_4^2)h_3\rho_3$ | $r_3 = 2 \text{ cm}, \rho_3 = 4.3$ | $I_3 = m_3(r_3^2 + r_4^2)/2$ | |
| シャフト | $m_4 = \pi r_4^2 h_4 \rho_4$ | $r_4 = 1.3\text{cm}, \rho_4 = 7.8$ | $I_4 = m_4 r_4^2 / 2$ | |
| マグネット・リターンパス | $m_m = K_{mm} r_1$ | $K_{mm} = 2700/16.6$ | | 2.7 k g / |
| ハウジング | モテ`1: $m_h = K_{mh} r_1^3$ モテ`1a: $m_h = K_{mh} r_1^2$ | $K_{mh} = 4000/16.6^2$ | | 4 k g |
| ステータ | $m_s = K_{ms} r_1$ | $K_{ms} = 750/16.6$ | | 0.75g |
| 電子回路 | m_e | 1000 | | 1 k g |
| 副資材 | m_s | 1500 | | 1.5 k g |
| ホイール全体 | m | | I | 12.5 k g |

表 2-3 ホイール質量モデル 2、2 a (従来型モータ配置)

| 項目 | 質量 (k g) | 高トルク低擾乱ホイールのパラメータ | 慣性能率 (k g m ²) | 高トルク低擾乱ホイールの質量／慣性能率 |
|--------------|--|--|-------------------------------|---|
| ローターティングマス | $m_1 = \pi(r_1^2 - r_2^2)h_1\rho_1$ | $r_1=16.5\text{cm}, r_2=13.5\text{cm}$ $\rho_1 = 4.3$ | $I_1 = m_1(r_1^2 + r_2^2)/2$ | ロータ全体で 7.2l k g / 0.11 k g m ² 4.5 k g / - |
| ディスク | $m_2 = \pi(r_2^2 - r_3^2)h_2\rho_2$ | $r_3 = 2 \text{ cm}, \rho_2 = 4.3$ | $I_2 = m_2(r_2^2 + r_3^2)/2$ | |
| ロータベース | $m_3 = \pi(r_3^2 - r_4^2)h_3\rho_3$ | $r_3 = 2 \text{ cm}, \rho_3 = 4.3$ | $I_3 = m_3(r_3^2 + r_4^2)/2$ | |
| シャフト | $m_4 = \pi r_4^2 h_4 \rho_4$ | $r_4 = 1.3\text{cm}, \rho_4 = 7.8$ | $I_4 = m_4 r_4^2 / 2$ | |
| マグネット・リターンパス | $m_m = K_{mm} r_m$ | $K_{mm} = 2700/16.6$ | | 2.7 k g / |
| ハウジング | モテ`2: $m_h = K_{mh} r_1^3$ モテ`2a: $m_h = K_{mh} r_1^2$ | $K_{mh} = 4000/16.6^2$ | | 4 k g |
| モータロータ | $m_m = \pi d h_m r_m \rho_3, r_m = 4.5\text{cm}$ $h_m = 4, d = 1$ | $\rho_3 = 7.8$ | $I_m = m_m(r_m^2 + d)$ | |
| ステータ | $m_s = K_{ms} r_m$ | $K_{ms} = 750/16.6$ | | 0.75g |
| 電子回路 | m_e | 1000 | | 1 k g |
| 副資材 | m_s | 1500 | | 1.5 k g |
| ホイール全体 | m | | I | 12.5 k g |

表 2-4 ホイール質量モデル 3、3 a (従来型モータ配置、モータロータ軽量化)

| 項目 | 質量 (k g) | 高トルク低擾乱ホイールのパラメータ | 慣性能率 (k g m ²) | 高トルク低擾乱ホイールの質量/慣性能率 |
|--------------|---|--|-------------------------------|--|
| ロータータイミングマス | $m_1 = \pi(r_1^2 - r_2^2)h_1\rho_1$ | $r_1=16.5\text{cm}, r_2=13.5\text{cm}$ $\rho_1=4.3$ | $I_1 = m_1(r_1^2 + r_2^2)/2$ | ロータ全体で 7.21 k g /0.11 k g m ² 4.5 k g /— |
| ディスク | $m_2 = \pi(r_2^2 - r_3^2)h_2\rho_2$ | $r_3=2\text{ cm}, \rho_2=4.3$ | $I_2 = m_2(r_2^2 + r_3^2)/2$ | |
| ロータベース | $m_3 = \pi(r_3^2 - r_4^2)h_3\rho_3$ | $r_3=2\text{ cm}, \rho_3=4.3$ | $I_3 = m_3(r_3^2 + r_4^2)/2$ | |
| シャフト | $m_4 = \pi r_4^2 h_4 \rho_4$ | $r_4=1.3\text{cm}, \rho_4=7.8$ | $I_4 = m_4 r_4^2 /2$ | |
| マグネット・リターンパス | $m_m = K_{mm} r_m$ | $K_{mm}=2700/16.6$ | | 2.7 k g / |
| ハウジング | モテ ³ /3: $m_h = K_{mh} r_1^3$ モテ ³ /3a: $m_h = K_{mh} r_1^2$ | $K_{mh}=4000/16.6^2$ | | 4 k g |
| モータロータ | $m_m = \pi d h_m r_m \rho_3, r_m = 4.5\text{cm}$ $h_m = 3.5, d = 0.8$ | $\rho_3=4.3$ | $I_m = m_m (r_m^2 + d)$ | 小型。チタンとして軽量化 |
| ステータ | $m_s = K_{ms} r_m$ | $K_{ms}=750/16.6$ | | 0.75g |
| 電子回路 | m_e | 1000 | | 1 k g |
| 副資材 | m_s | 1500 | | 1.5 k g |
| ホイール全体 | M | | I | 12.5 k g |

ホイール角運動量 (H) は、ロータ慣性能率 (I) とホイール回転数 (ω) の積になるので、

$$H = I \omega \quad (2-1)$$

上式から角運動量とホイール回転数が分かると、ロータの慣性能率を知ることができる。

慣性能率は回転数に反比例するので、回転数が大きくなると、慣性能率の減少にともなってホイール質量も小さくなる。図 2-1 にロータ半径、12.5~17.5 cm とした場合の表 2-1 のモデルに基づくホイール質量と回転数の関係を示す。

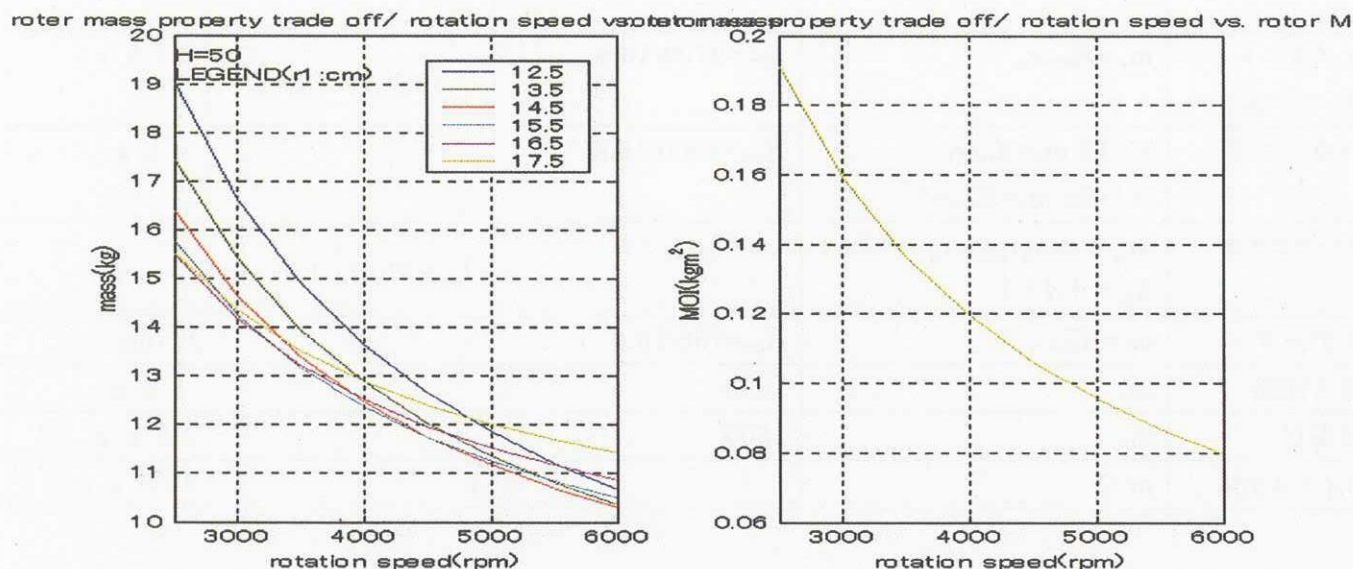


図 2-1 ホイール回転数とホイール質量の関係 (モデル 1) (mass3r.m)

慣性能率は表 2-1 の様に、ロータ半径の関数になる。同様に、ホイール質量もロータ半径の関数となるので、慣性能率が決まると、これに対応する、ホイール質量とロータ半径の関数を求めることが出来る。次節にホイールの質量とロータ半径の関係を示す。

3. ロータ半径とホイール質量の関係

2 節で設定したモデルは、ホールの慣性能率とロータの半径が決まると、ホール質量は以下のよう
に表すことができる。

$$m_t = m_r + m_d + m_h + m_m + m_s + m_o \quad (3-1)$$

ここで、 m_r はロータ質量、 m_d はディスク質量、 m_o はシャフト等の固定質量、 m_h はハウジング等ロータの半径の 3 乗比例する質量。ロータ半径の 3 乗に比例するモデルでは、

$$m_h = K_{mh} r_1^3 \quad (3-2)$$

ロータ半径の 2 乗に比例するモデルでは、

$$m_h = K_{mh} r_1^2 \quad (3-2)'$$

m_s と m_m はステータと磁石等の質量でモータの半径に比例する。

$$m_m = K_{mm} r_m$$

$$m_s = K_{ms} r_1$$

モータロータとローターティングディスクが一体のモデルでは $r_m = r_1$ とする。

また、ロータ全体の慣性能率を I_t 、ディスクの慣性能率を I_d 、シャフト等のロータの半径に関係なく固定された慣性能率を I_o 、モータロータの慣性能率を I_m すると、

ロータの慣性能率は

$$I_r = I_t - I_o - I_d \quad (3-3)$$

ロータとディスクの慣性能率はロータ半径の関数で、

$$I_r = m_r (r_1^2 + r_2^2) / 2 \quad (3-4)$$

$$I_d = m_d (r_2^2 + r_3^2) / 2 = m_d \{ 2r_1^2 - 2r_1(2d_1 + d_2) + d_1^2 + (d_1 + d_2)^2 \} / 2$$

$$m_d = \pi(r_2^2 - r_3^2) \rho_2 h_2 = \pi d_2 (2r_1 - d_1 - d_2) \rho_2 h_2$$

$$\text{ここで、} d_1, d_2 \text{ はローターティングマスとディスクの幅} \quad (3-5)(3-6)$$

$$r_2 = r_1 - d_1, r_3 = r_2 - d_2 = r_1 - d_1 - d_2$$

ロータとディスクの質量は、慣性能率とロータ半径で表すことができ

$$m_r = 2I_r / (r_1^2 + r_2^2) \quad (3-7)$$

(3-2)(3-7)式から、ホール全体質量 m_t は r_1 の関数として表すことで

$$m_t = K_{mh} r_1^3 + K_{mm} r_1 + K_{ms} r_1 + 2I_r / (r_1^2 + 2r_1 d_1 + d_1^2) \quad (3-8)$$

上式は I_r が I_d の関数となっており、 I_d が r_1 の関数なので、

(3-3)(3-4)(3-5)(3-6)式から、 I_d を r_1 の関数として解く必要がある。

ロータ質量は、通常はロータ半径が大きいほど小さくなる。一方、ハウジングはロータ半径の 3 乗に比例して増加すると仮定しているので、ホール全体では極小点が発生する。図 3-1、1 a に表 2-1 のモデル (3 乗モデルと 2 乗モデル) で高トルク・低擾乱ホイール (3200 rpm、40 Nms) のケースについての計算例を示す。図 3-1 から、高トルク低擾乱ホイールのロータ半径 (16.5cm) は、表 2-1 のモデル 1、1 a いずれの場合でも最適近傍になっていることが分かる。また、何れのモデルでも最適点付近での質量に対するロータ半径の感度は低く、高トルク低擾乱ホイールのロータ半径は、ほぼ最適になっていることがわかる (解析値の最適なホイール質量も 12.3 kg 程度で実ホイール質量 12.5 kg と概略一致している)。これらの解析結果により、表 2-1、2、3 のモデルの妥当性は概略確認できたと考える。

以下個のモデルを使って、ホイール質量を最小にするロータ半径 (最適ロータ半径)、ホイールの

ロータ半径による系列化等を検討する。

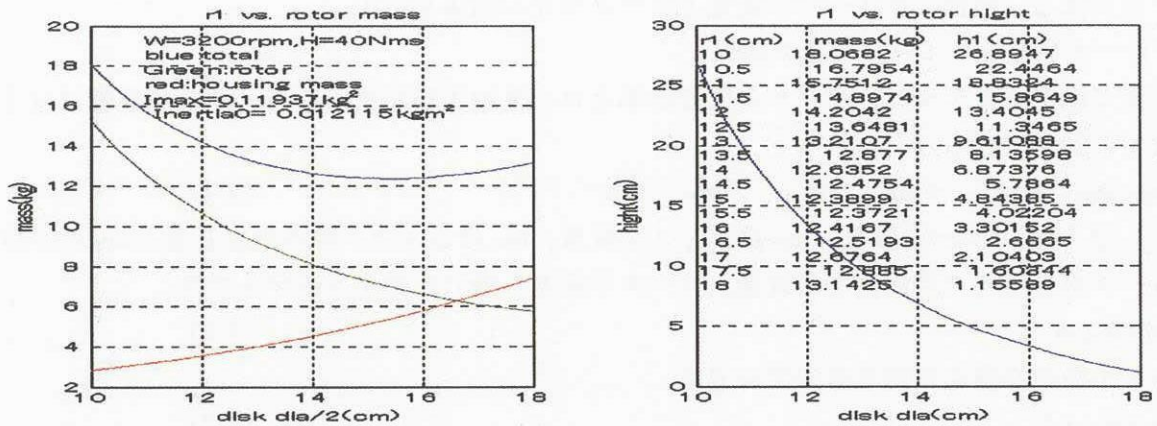


図 3-1 高トルク低擾乱ホイールを例にしたロータ半径とホイール質量の関係 (モデル 1) (massa.m)

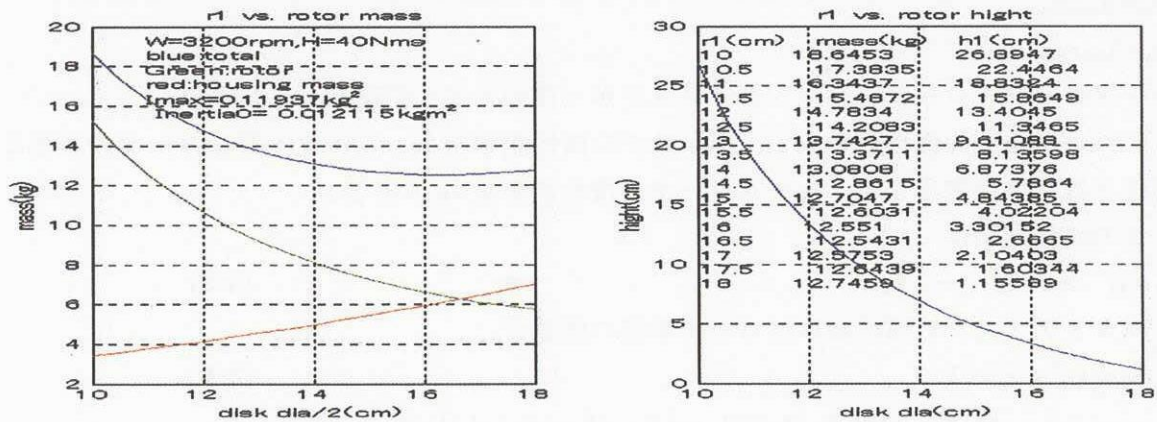


図 3-1 a 高トルク低擾乱ホイールを例にしたロータ半径とホイール質量の関係 (モデル 1 a) (massa.m)*

*(XXXX.m): 解析に使用した Matlab プログラム (以下同様。付録参照)

次節以下に、表 2-1, 2, 3 の各モデルに従って、角運動量を 20Nms~80Nms まで変化させた場合の、最適なロータ半径を求める解析を実施する。解析したケースは以下の通り (masspro.m, masspro2.m)。

(1) モデル 1、1a

- ① モデル 1 20Nms-80Nms 6000rpm
- ② モデル 1 a 20Nms-80Nms 6000rpm
- ③ モデル 1 20Nms-80Nms 5000rpm
- ④ モデル 1 a 20Nms-80Nms 5000rpm

(2) モデル 2、2a

- ① モデル 2 20Nms-80Nms 6000rpm
- ② モデル 2 a 20Nms-80Nms 6000rpm
- ③ モデル 2 20Nms-80Nms 5000rpm
- ④ モデル 2 a 20Nms-80Nms 5000rpm

(3) モデル 3、3 a

- ① モデル 3 20Nms-80Nms 6000rpm
- ② モデル 3 a 20Nms-80Nms 6000rpm
- ③ モデル 3 20Nms-80Nms 5000rpm
- ④ モデル 3 a 20Nms-80Nms 5000rpm

3. 3 ロータ半径とホイール質量との関係 モデル1による解析

(1)20Nms-80Nms 6000rpm

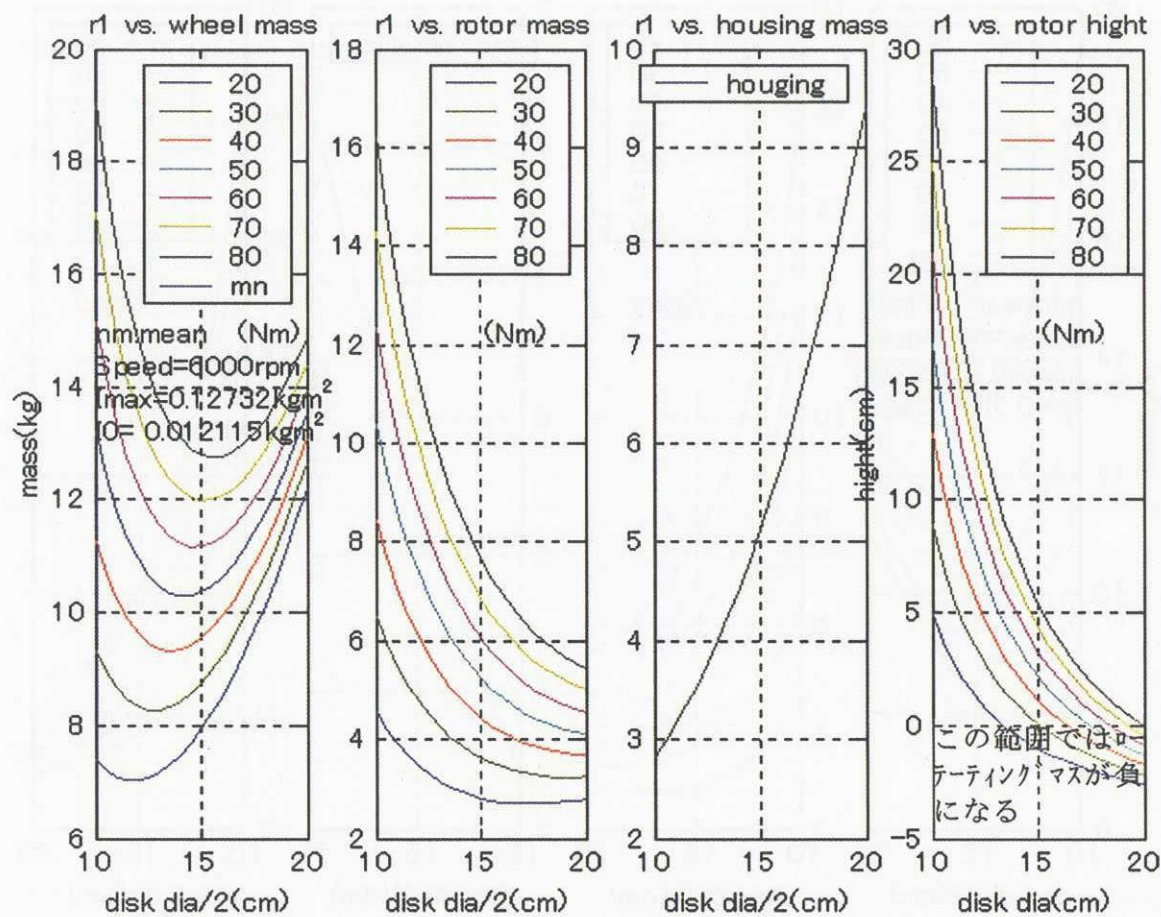


図 3-1 20Nms-80Nms 6000rpm (モデル1)

表 3-1 20Nms-80Nms 6000rpm (モデル1) (赤字は最小質量)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 7.3931 | 9.3341 | 11.2750 | 13.2159 | 15.1568 | 17.0977 | 19.0386 | 13.2159 |
| 10.5000 | 7.2025 | 8.9467 | 10.6908 | 12.4350 | 14.1791 | 15.9233 | 17.6675 | 12.4350 |
| 11.0000 | 7.0844 | 8.6602 | 10.2359 | 11.8117 | 13.3875 | 14.9633 | 16.5391 | 11.8117 |
| 11.5000 | 7.0291 | 8.4597 | 9.8903 | 11.3209 | 12.7515 | 14.1821 | 15.6127 | 11.3209 |
| 12.0000 | 7.0291 | 8.3337 | 9.6382 | 10.9428 | 12.2473 | 13.5519 | 14.8564 | 10.9428 |
| 12.5000 | 7.0789 | 8.2733 | 9.4677 | 10.6621 | 11.8565 | 13.0509 | 14.2453 | 10.6621 |
| 13.0000 | 7.1738 | 8.2714 | 9.3690 | 10.4666 | 11.5643 | 12.6619 | 13.7595 | 10.4666 |
| 13.5000 | 7.3104 | 8.3225 | 9.3346 | 10.3467 | 11.3589 | 12.3710 | 13.3831 | 10.3467 |
| 14.0000 | 7.4860 | 8.4222 | 9.3585 | 10.2947 | 11.2309 | 12.1671 | 13.1033 | 10.2947 |
| 14.5000 | 7.6986 | 8.5671 | 9.4356 | 10.3041 | 11.1727 | 12.0412 | 12.9097 | 10.3041 |
| 15.0000 | 7.9465 | 8.7544 | 9.5622 | 10.3701 | 11.1780 | 11.9859 | 12.7938 | 10.3701 |
| 15.5000 | 8.2284 | 8.9818 | 9.7352 | 10.4886 | 11.2420 | 11.9954 | 12.7487 | 10.4886 |
| 16.0000 | 8.5434 | 9.2476 | 9.9519 | 10.6561 | 11.3603 | 12.0645 | 12.7688 | 10.6561 |
| 16.5000 | 8.8909 | 9.5506 | 10.2103 | 10.8700 | 11.5297 | 12.1895 | 12.8492 | 10.8700 |
| 17.0000 | 9.2704 | 9.8896 | 10.5089 | 11.1282 | 11.7475 | 12.3668 | 12.9860 | 11.1282 |
| 17.5000 | 9.6815 | 10.2639 | 10.8464 | 11.4288 | 12.0113 | 12.5937 | 13.1762 | 11.4288 |
| 18.0000 | 10.1241 | 10.6729 | 11.2217 | 11.7705 | 12.3193 | 12.8681 | 13.4169 | 11.7705 |
| 18.5000 | 10.5981 | 11.1161 | 11.6341 | 12.1521 | 12.6701 | 13.1881 | 13.7061 | 12.1521 |
| 19.0000 | 11.1037 | 11.5934 | 12.0831 | 12.5728 | 13.0625 | 13.5522 | 14.0419 | 12.5728 |
| 19.5000 | 11.6408 | 12.1044 | 12.5681 | 13.0318 | 13.4955 | 13.9591 | 14.4228 | 13.0318 |
| 20.0000 | 12.2097 | 12.6493 | 13.0890 | 13.5286 | 13.9683 | 14.4080 | 14.8476 | 13.5286 |

(2) 20Nms-80Nms 6000rpm

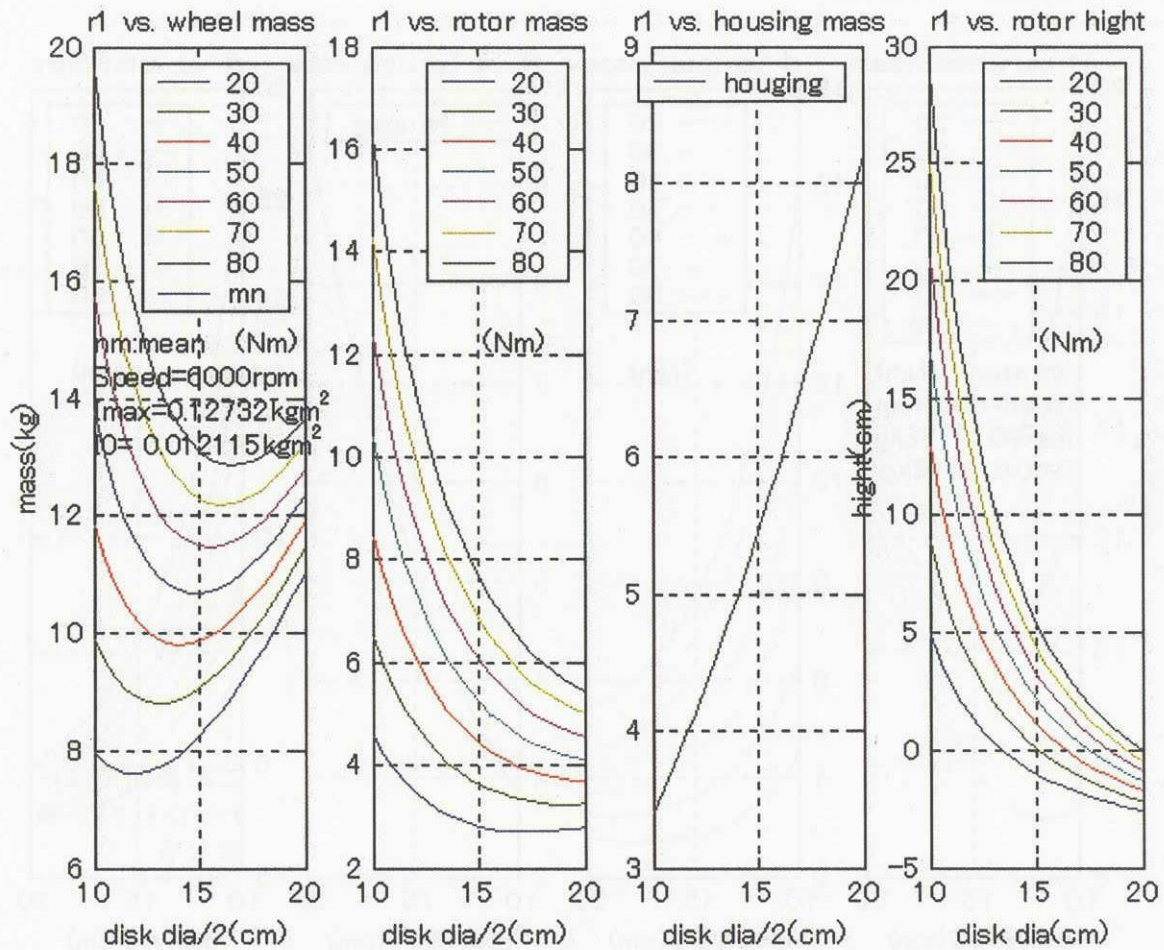


図 3-2 20Nms-80Nms 6000rpm (モデル 1 a)

表 3-2 20Nms-80Nms 6000rpm (モデル 1 a)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 7.9703 | 9.9112 | 11.8521 | 13.7930 | 15.7339 | 17.6748 | 19.6158 | 13.7930 |
| 10.5000 | 7.7906 | 9.5347 | 11.2789 | 13.0231 | 14.7672 | 16.5114 | 18.2556 | 13.0231 |
| 11.0000 | 7.6769 | 9.2527 | 10.8285 | 12.4043 | 13.9801 | 15.5559 | 17.1316 | 12.4043 |
| 11.5000 | 7.6189 | 9.0495 | 10.4801 | 11.9107 | 13.3413 | 14.7719 | 16.2025 | 11.9107 |
| 12.0000 | 7.6084 | 8.9129 | 10.2175 | 11.5220 | 12.8266 | 14.1311 | 15.4357 | 11.5220 |
| 12.5000 | 7.6391 | 8.8335 | 10.0279 | 11.2223 | 12.4167 | 13.6111 | 14.8055 | 11.2223 |
| 13.0000 | 7.7058 | 8.8034 | 9.9010 | 10.9987 | 12.0963 | 13.1939 | 14.2915 | 10.9987 |
| 13.5000 | 7.8044 | 8.8166 | 9.8287 | 10.8408 | 11.8529 | 12.8650 | 13.8771 | 10.8408 |
| 14.0000 | 7.9317 | 8.8679 | 9.8041 | 10.7403 | 11.6765 | 12.6127 | 13.5489 | 10.7403 |
| 14.5000 | 8.0847 | 8.9532 | 9.8217 | 10.6902 | 11.5587 | 12.4273 | 13.2958 | 10.6902 |
| 15.0000 | 8.2613 | 9.0692 | 9.8770 | 10.6849 | 11.4928 | 12.3007 | 13.1086 | 10.6849 |
| 15.5000 | 8.4595 | 9.2129 | 9.9663 | 10.7197 | 11.4731 | 12.2264 | 12.9798 | 10.7197 |
| 16.0000 | 8.6777 | 9.3820 | 10.0862 | 10.7904 | 11.4946 | 12.1989 | 12.9031 | 10.7904 |
| 16.5000 | 8.9147 | 9.5744 | 10.2341 | 10.8938 | 11.5535 | 12.2133 | 12.8730 | 10.8938 |
| 17.0000 | 9.1693 | 9.7886 | 10.4078 | 11.0271 | 11.6464 | 12.2657 | 12.8850 | 11.0271 |
| 17.5000 | 9.4405 | 10.0229 | 10.6054 | 11.1878 | 11.7703 | 12.3527 | 12.9352 | 11.1878 |
| 18.0000 | 9.7274 | 10.2762 | 10.8251 | 11.3739 | 11.9227 | 12.4715 | 13.0203 | 11.3739 |
| 18.5000 | 10.0295 | 10.5475 | 11.0655 | 11.5835 | 12.1015 | 12.6195 | 13.1375 | 11.5835 |
| 19.0000 | 10.3460 | 10.8357 | 11.3254 | 11.8151 | 12.3049 | 12.7946 | 13.2843 | 11.8151 |
| 19.5000 | 10.6765 | 11.1402 | 11.6038 | 12.0675 | 12.5312 | 12.9948 | 13.4585 | 12.0675 |
| 20.0000 | 11.0204 | 11.4601 | 11.8997 | 12.3394 | 12.7790 | 13.2187 | 13.6584 | 12.3394 |

(3)20Nms-80Nms 5000rpm

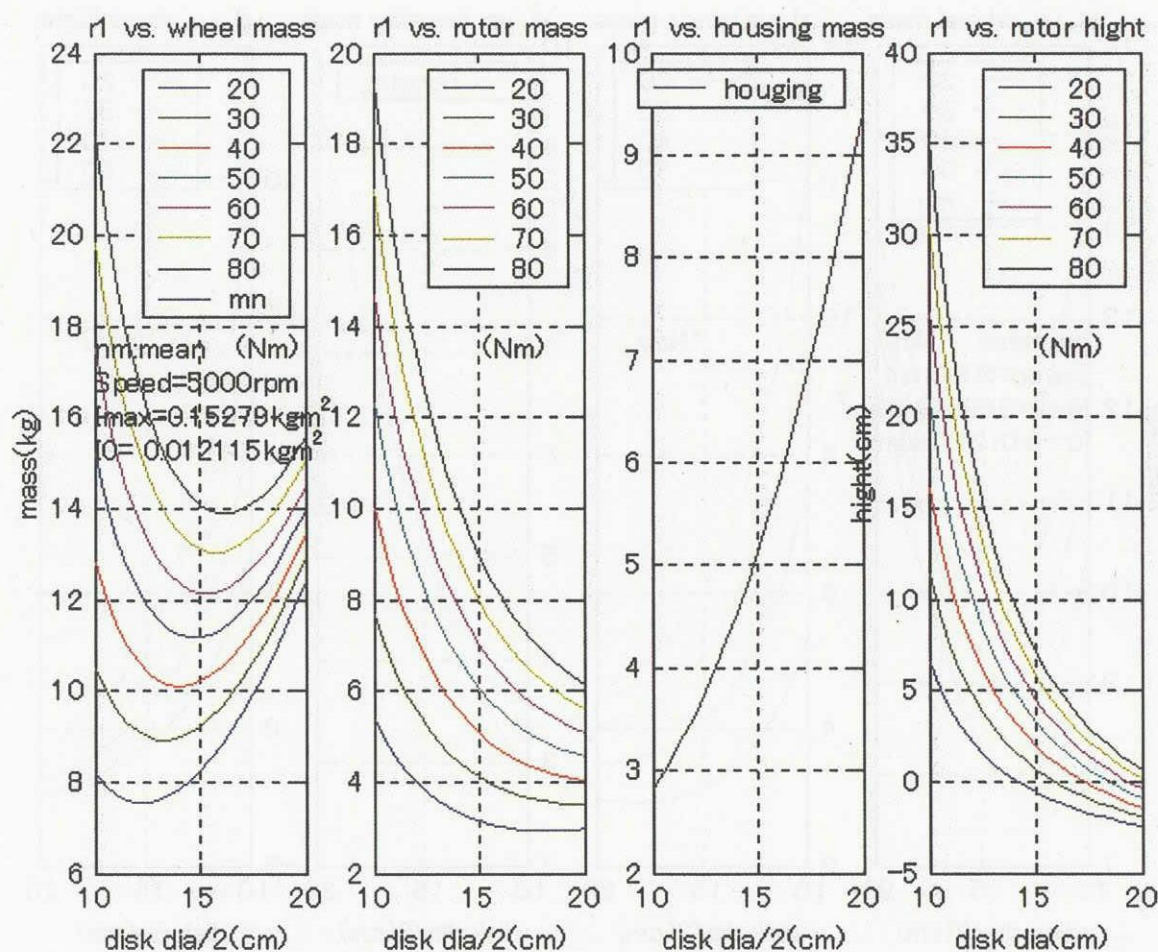


図 3-3 20Nms-80Nms 5000rpm (モデル 1)

表 3-3 20Nms-80Nms 5000rpm (モデル 1)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.1695 | 10.4986 | 12.8277 | 15.1568 | 17.4859 | 19.8150 | 22.1441 | 15.1568 |
| 10.5000 | 7.9002 | 9.9932 | 12.0862 | 14.1791 | 16.2721 | 18.3651 | 20.4581 | 14.1791 |
| 11.0000 | 7.7147 | 9.6056 | 11.4966 | 13.3875 | 15.2785 | 17.1694 | 19.0604 | 13.3875 |
| 11.5000 | 7.6013 | 9.3180 | 11.0348 | 12.7515 | 14.4682 | 16.1849 | 17.9017 | 12.7515 |
| 12.0000 | 7.5510 | 9.1164 | 10.6819 | 12.2473 | 13.8128 | 15.3783 | 16.9437 | 12.2473 |
| 12.5000 | 7.5566 | 8.9899 | 10.4232 | 11.8565 | 13.2898 | 14.7231 | 16.1564 | 11.8565 |
| 13.0000 | 7.6128 | 8.9300 | 10.2471 | 11.5643 | 12.8814 | 14.1985 | 15.5157 | 11.5643 |
| 13.5000 | 7.7152 | 8.9298 | 10.1443 | 11.3589 | 12.5734 | 13.7879 | 15.0025 | 11.3589 |
| 14.0000 | 7.8605 | 8.9840 | 10.1074 | 11.2309 | 12.3543 | 13.4778 | 14.6012 | 11.2309 |
| 14.5000 | 8.0460 | 9.0882 | 10.1304 | 11.1727 | 12.2149 | 13.2571 | 14.2993 | 11.1727 |
| 15.0000 | 8.2696 | 9.2391 | 10.2086 | 11.1780 | 12.1475 | 13.1170 | 14.0864 | 11.1780 |
| 15.5000 | 8.5297 | 9.4338 | 10.3379 | 11.2420 | 12.1460 | 13.0501 | 13.9542 | 11.2420 |
| 16.0000 | 8.8251 | 9.6702 | 10.5152 | 11.3603 | 12.2054 | 13.0505 | 13.8955 | 11.3603 |
| 16.5000 | 9.1548 | 9.9464 | 10.7381 | 11.5297 | 12.3214 | 13.1130 | 13.9047 | 11.5297 |
| 17.0000 | 9.5181 | 10.2612 | 11.0043 | 11.7475 | 12.4906 | 13.2338 | 13.9769 | 11.7475 |
| 17.5000 | 9.9145 | 10.6134 | 11.3123 | 12.0113 | 12.7102 | 13.4092 | 14.1081 | 12.0113 |
| 18.0000 | 10.3436 | 11.0022 | 11.6608 | 12.3193 | 12.9779 | 13.6365 | 14.2950 | 12.3193 |
| 18.5000 | 10.8053 | 11.4269 | 12.0485 | 12.6701 | 13.2917 | 13.9133 | 14.5349 | 12.6701 |
| 19.0000 | 11.2995 | 11.8872 | 12.4748 | 13.0625 | 13.6501 | 14.2378 | 14.8254 | 13.0625 |
| 19.5000 | 11.8262 | 12.3826 | 12.9390 | 13.4955 | 14.0519 | 14.6083 | 15.1647 | 13.4955 |
| 20.0000 | 12.3855 | 12.9131 | 13.4407 | 13.9683 | 14.4959 | 15.0235 | 15.5511 | 13.9683 |

(4)モデル 1 a 20Nms-80Nms 5000rpm

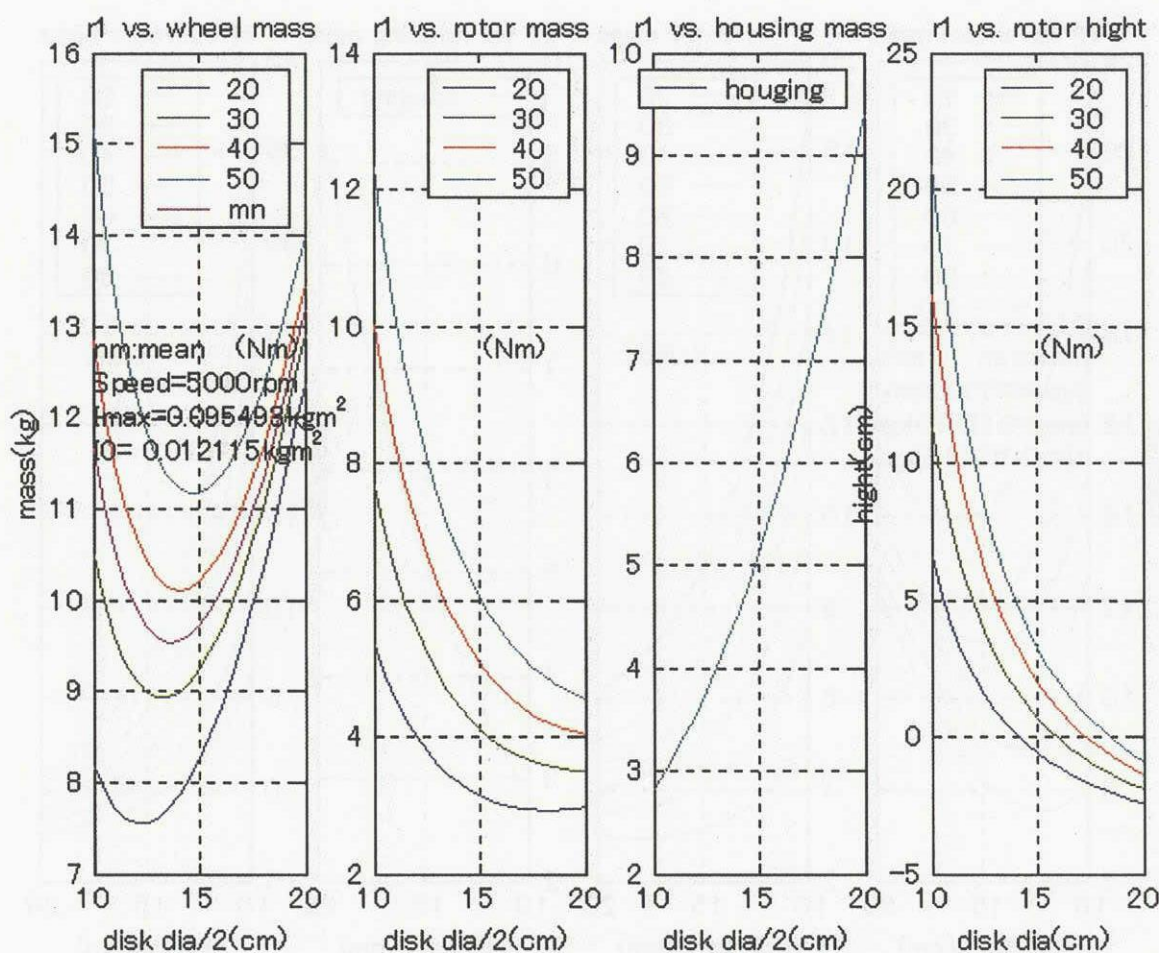


図 3-4 20Nms-80Nms 5000rpm (モデル 1 a)

表 3-4 20Nms-80Nms 5000rpm (モデル 1 a)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.7466 | 11.0757 | 13.4048 | 15.7339 | 18.0630 | 20.3921 | 22.7212 | 15.7339 |
| 10.5000 | 8.4883 | 10.5812 | 12.6742 | 14.7672 | 16.8602 | 18.9532 | 21.0462 | 14.7672 |
| 11.0000 | 8.3072 | 10.1982 | 12.0891 | 13.9801 | 15.8710 | 17.7620 | 19.6529 | 13.9801 |
| 11.5000 | 8.1911 | 9.9078 | 11.6246 | 13.3413 | 15.0580 | 16.7747 | 18.4915 | 13.3413 |
| 12.0000 | 8.1302 | 9.6957 | 11.2611 | 12.8266 | 14.3920 | 15.9575 | 17.5229 | 12.8266 |
| 12.5000 | 8.1168 | 9.5501 | 10.9834 | 12.4167 | 13.8500 | 15.2833 | 16.7166 | 12.4167 |
| 13.0000 | 8.1448 | 9.4620 | 10.7791 | 12.0963 | 13.4134 | 14.7306 | 16.0477 | 12.0963 |
| 13.5000 | 8.2093 | 9.4238 | 10.6384 | 11.8529 | 13.0674 | 14.2820 | 15.4965 | 11.8529 |
| 14.0000 | 8.3061 | 9.4296 | 10.5530 | 11.6765 | 12.7999 | 13.9234 | 15.0468 | 11.6765 |
| 14.5000 | 8.4321 | 9.4743 | 10.5165 | 11.5587 | 12.6010 | 13.6432 | 14.6854 | 11.5587 |
| 15.0000 | 8.5844 | 9.5539 | 10.5234 | 11.4928 | 12.4623 | 13.4318 | 14.4012 | 11.4928 |
| 15.5000 | 8.7608 | 9.6649 | 10.5690 | 11.4731 | 12.3771 | 13.2812 | 14.1853 | 11.4731 |
| 16.0000 | 8.9594 | 9.8045 | 10.6496 | 11.4946 | 12.3397 | 13.1848 | 14.0298 | 11.4946 |
| 16.5000 | 9.1786 | 9.9702 | 10.7619 | 11.5535 | 12.3452 | 13.1369 | 13.9285 | 11.5535 |
| 17.0000 | 9.4170 | 10.1601 | 10.9033 | 11.6464 | 12.3895 | 13.1327 | 13.8758 | 11.6464 |
| 17.5000 | 9.6734 | 10.3724 | 11.0713 | 11.7703 | 12.4692 | 13.1682 | 13.8671 | 11.7703 |
| 18.0000 | 9.9470 | 10.6055 | 11.2641 | 11.9227 | 12.5813 | 13.2398 | 13.8984 | 11.9227 |
| 18.5000 | 10.2367 | 10.8583 | 11.4799 | 12.1015 | 12.7231 | 13.3447 | 13.9663 | 12.1015 |
| 19.0000 | 10.5419 | 11.1296 | 11.7172 | 12.3049 | 12.8925 | 13.4802 | 14.0678 | 12.3049 |
| 19.5000 | 10.8620 | 11.4184 | 11.9748 | 12.5312 | 13.0876 | 13.6440 | 14.2004 | 12.5312 |
| 20.0000 | 11.1963 | 11.7239 | 12.2515 | 12.7790 | 13.3066 | 13.8342 | 14.3618 | 12.7790 |

3. 3 ロータ半径とホイール質量との関係 モデル2による解析

(1)20Nms-80Nms 6000rpm

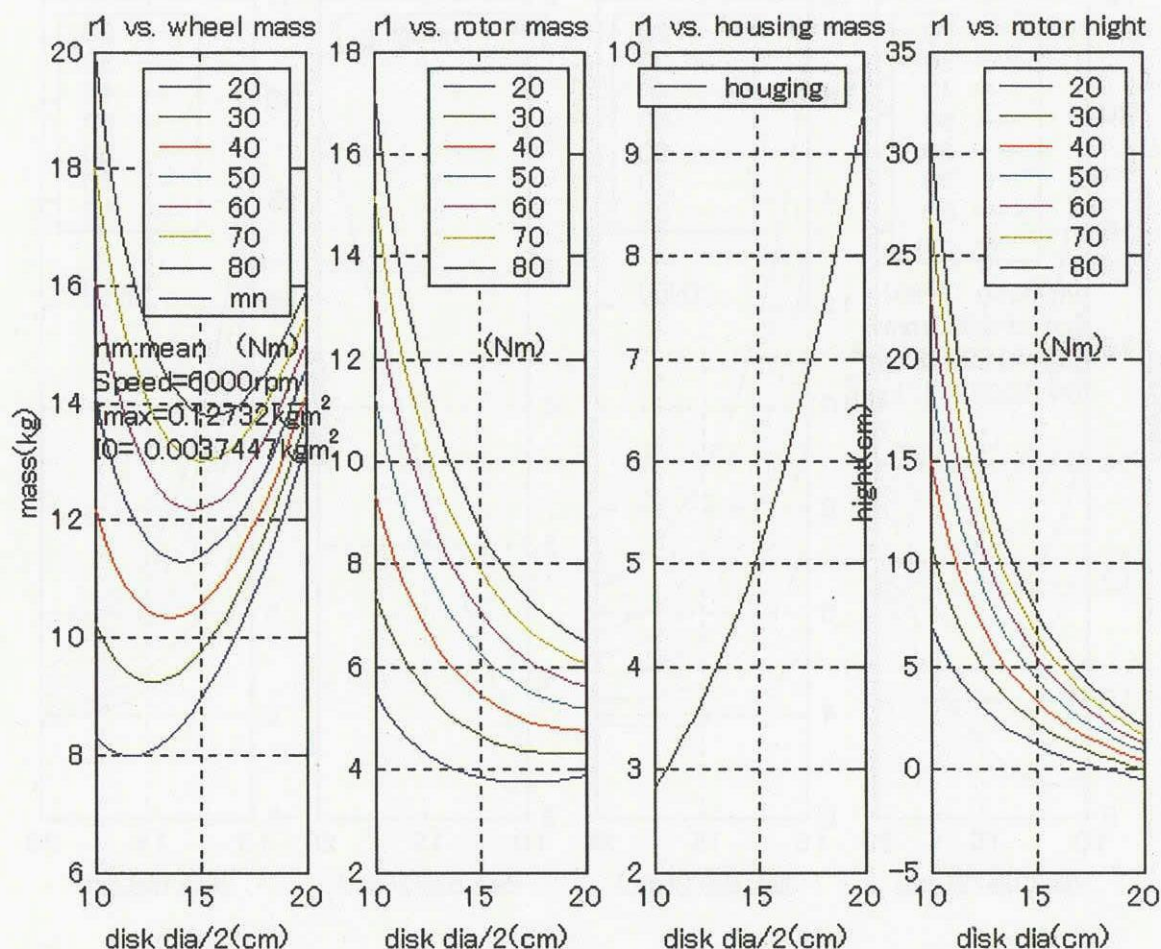


図 3-5 20Nms-80Nms 6000rpm (モデル2)

表 3-5 20Nms-80Nms 6000rpm (モデル2)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.2918 | 10.2327 | 12.1736 | 14.1145 | 16.0554 | 17.9963 | 19.9372 | 14.1145 |
| 10.5000 | 8.1233 | 9.8675 | 11.6117 | 13.3558 | 15.1000 | 16.8441 | 18.5883 | 13.3558 |
| 11.0000 | 8.0242 | 9.6000 | 11.1757 | 12.7515 | 14.3273 | 15.9031 | 17.4789 | 12.7515 |
| 11.5000 | 7.9852 | 9.4158 | 10.8464 | 12.2770 | 13.7076 | 15.1382 | 16.5688 | 12.2770 |
| 12.0000 | 7.9994 | 9.3039 | 10.6085 | 11.9130 | 13.2175 | 14.5221 | 15.8266 | 11.9130 |
| 12.5000 | 8.0614 | 9.2558 | 10.4502 | 11.6446 | 12.8390 | 14.0334 | 15.2278 | 11.6446 |
| 13.0000 | 8.1671 | 9.2647 | 10.3623 | 11.4599 | 12.5575 | 13.6552 | 14.7528 | 11.4599 |
| 13.5000 | 8.3132 | 9.3253 | 10.3374 | 11.3495 | 12.3616 | 13.3737 | 14.3859 | 11.3495 |
| 14.0000 | 8.4972 | 9.4334 | 10.3696 | 11.3058 | 12.2420 | 13.1782 | 14.1144 | 11.3058 |
| 14.5000 | 8.7172 | 9.5858 | 10.4543 | 11.3228 | 12.1913 | 13.0598 | 13.9283 | 11.3228 |
| 15.0000 | 8.9718 | 9.7797 | 10.5876 | 11.3954 | 12.2033 | 13.0112 | 13.8191 | 11.3954 |
| 15.5000 | 9.2597 | 10.0131 | 10.7665 | 11.5198 | 12.2732 | 13.0266 | 13.7800 | 11.5198 |
| 16.0000 | 9.5801 | 10.2843 | 10.9885 | 11.6928 | 12.3970 | 13.1012 | 13.8054 | 11.6928 |
| 16.5000 | 9.9324 | 10.5921 | 11.2518 | 11.9116 | 12.5713 | 13.2310 | 13.8907 | 11.9116 |
| 17.0000 | 10.3163 | 10.9356 | 11.5548 | 12.1741 | 12.7934 | 13.4127 | 14.0320 | 12.1741 |
| 17.5000 | 10.7314 | 11.3138 | 11.8963 | 12.4787 | 13.0612 | 13.6436 | 14.2261 | 12.4787 |
| 18.0000 | 11.1776 | 11.7264 | 12.2753 | 12.8241 | 13.3729 | 13.9217 | 14.4705 | 12.8241 |
| 18.5000 | 11.6550 | 12.1730 | 12.6910 | 13.2090 | 13.7270 | 14.2450 | 14.7630 | 13.2090 |
| 19.0000 | 12.1636 | 12.6533 | 13.1430 | 13.6327 | 14.1224 | 14.6121 | 15.1018 | 13.6327 |
| 19.5000 | 12.7035 | 13.1671 | 13.6308 | 14.0945 | 14.5581 | 15.0218 | 15.4855 | 14.0945 |
| 20.0000 | 13.2749 | 13.7146 | 14.1542 | 14.5939 | 15.0336 | 15.4732 | 15.9129 | 14.5939 |

(2)モデル 2 a 20Nms-50Nms 6000rpm

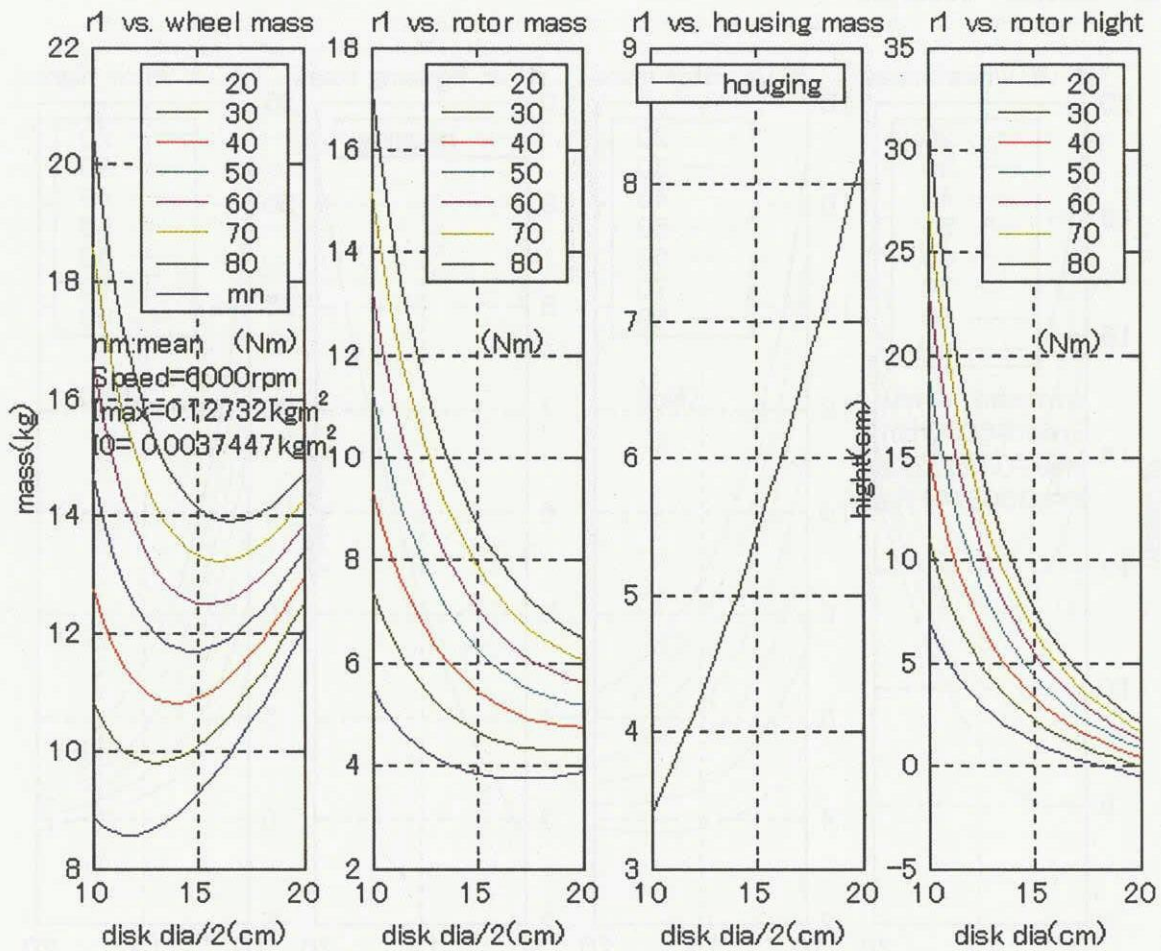


図 3-6 20Nms-50Nms 6000rpm (モデル 2 a)

表 3-6 20Nms-50Nms 6000rpm (モデル 2 a)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.8689 | 10.8098 | 12.7507 | 14.6916 | 16.6325 | 18.5735 | 20.5144 | 14.6916 |
| 10.5000 | 8.7114 | 10.4556 | 12.1997 | 13.9439 | 15.6881 | 17.4322 | 19.1764 | 13.9439 |
| 11.0000 | 8.6167 | 10.1925 | 11.7683 | 13.3441 | 14.9199 | 16.4956 | 18.0714 | 13.3441 |
| 11.5000 | 8.5750 | 10.0056 | 11.4362 | 12.8668 | 14.2974 | 15.7280 | 17.1586 | 12.8668 |
| 12.0000 | 8.5786 | 9.8831 | 11.1877 | 12.4922 | 13.7968 | 15.1013 | 16.4059 | 12.4922 |
| 12.5000 | 8.6216 | 9.8160 | 11.0104 | 12.2048 | 13.3992 | 14.5936 | 15.7880 | 12.2048 |
| 13.0000 | 8.6991 | 9.7967 | 10.8943 | 11.9919 | 13.0896 | 14.1872 | 15.2848 | 11.9919 |
| 13.5000 | 8.8072 | 9.8193 | 10.8314 | 11.8436 | 12.8557 | 13.8678 | 14.8799 | 11.8436 |
| 14.0000 | 8.9428 | 9.8790 | 10.8152 | 11.7515 | 12.6877 | 13.6239 | 14.5601 | 11.7515 |
| 14.5000 | 9.1033 | 9.9718 | 10.8404 | 11.7089 | 12.5774 | 13.4459 | 14.3144 | 11.7089 |
| 15.0000 | 9.2866 | 10.0945 | 10.9024 | 11.7102 | 12.5181 | 13.3260 | 14.1339 | 11.7102 |
| 15.5000 | 9.4908 | 10.2442 | 10.9975 | 11.7509 | 12.5043 | 13.2577 | 14.0111 | 11.7509 |
| 16.0000 | 9.7144 | 10.4186 | 11.1228 | 11.8271 | 12.5313 | 13.2355 | 13.9397 | 11.8271 |
| 16.5000 | 9.9562 | 10.6159 | 11.2756 | 11.9354 | 12.5951 | 13.2548 | 13.9145 | 11.9354 |
| 17.0000 | 10.2152 | 10.8345 | 11.4537 | 12.0730 | 12.6923 | 13.3116 | 13.9309 | 12.0730 |
| 17.5000 | 10.4904 | 11.0728 | 11.6553 | 12.2377 | 12.8202 | 13.4026 | 13.9851 | 12.2377 |
| 18.0000 | 10.7810 | 11.3298 | 11.8786 | 12.4274 | 12.9762 | 13.5250 | 14.0738 | 12.4274 |
| 18.5000 | 11.0864 | 11.6044 | 12.1224 | 12.6404 | 13.1584 | 13.6764 | 14.1943 | 12.6404 |
| 19.0000 | 11.4059 | 11.8956 | 12.3853 | 12.8751 | 13.3648 | 13.8545 | 14.3442 | 12.8751 |
| 19.5000 | 11.7392 | 12.2029 | 12.6665 | 13.1302 | 13.5939 | 14.0575 | 14.5212 | 13.1302 |
| 20.0000 | 12.0857 | 12.5253 | 12.9650 | 13.4046 | 13.8443 | 14.2840 | 14.7236 | 13.4046 |

(3)モデル 2 20Nms-80Nms 5000rpm

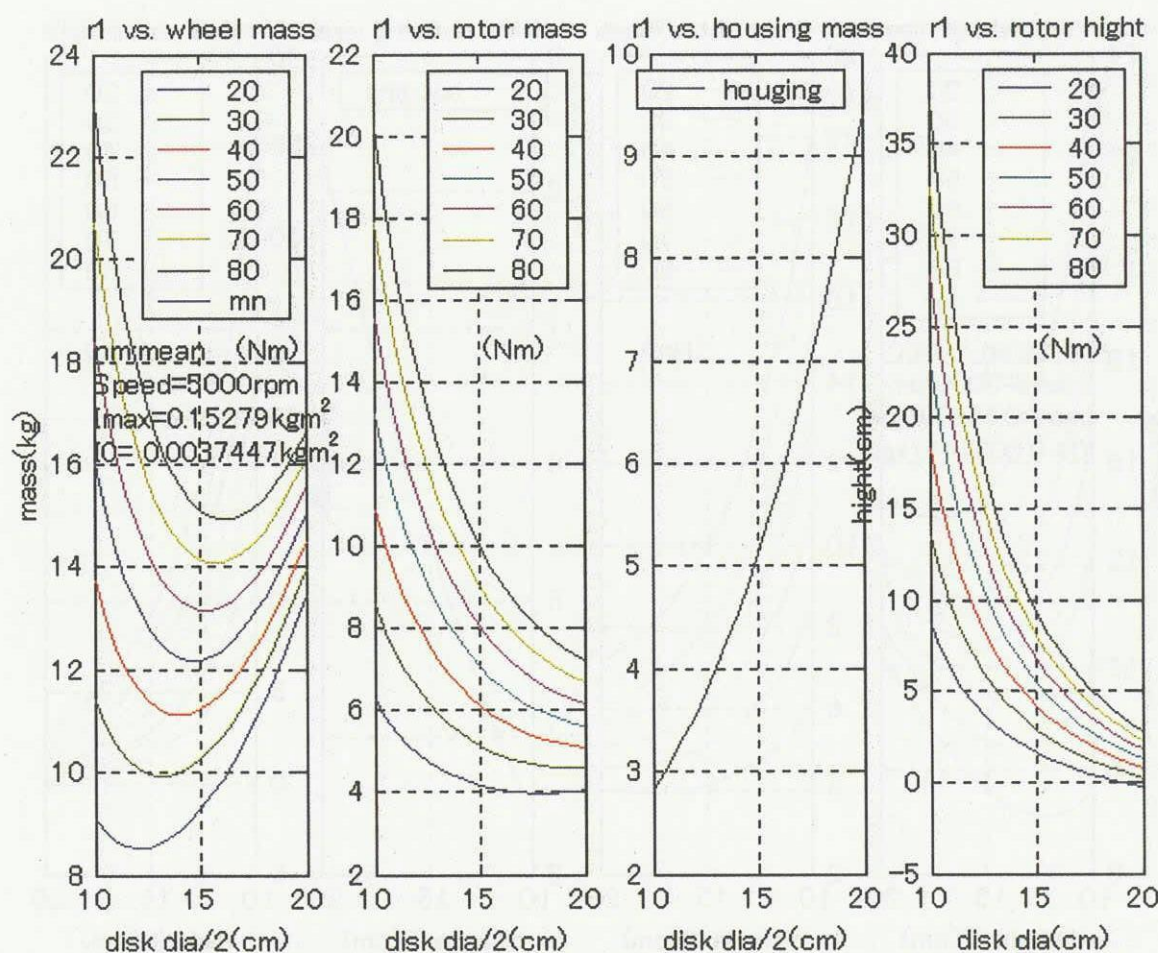


図 3-7 20Nms-80Nms 5000rpm (モデル 2)

表 3-7 20Nms-80Nms 5000rpm (モデル 2)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 9.0681 | 11.3972 | 13.7263 | 16.0554 | 18.3845 | 20.7136 | 23.0427 | 16.0554 |
| 10.5000 | 8.8210 | 10.9140 | 13.0070 | 15.1000 | 17.1930 | 19.2860 | 21.3790 | 15.1000 |
| 11.0000 | 8.6545 | 10.5454 | 12.4364 | 14.3273 | 16.2183 | 18.1092 | 20.0002 | 14.3273 |
| 11.5000 | 8.5574 | 10.2741 | 11.9909 | 13.7076 | 15.4243 | 17.1410 | 18.8578 | 13.7076 |
| 12.0000 | 8.5212 | 10.0866 | 11.6521 | 13.2175 | 14.7830 | 16.3485 | 17.9139 | 13.2175 |
| 12.5000 | 8.5391 | 9.9724 | 11.4057 | 12.8390 | 14.2723 | 15.7056 | 17.1389 | 12.8390 |
| 13.0000 | 8.6061 | 9.9232 | 11.2404 | 12.5575 | 13.8747 | 15.1918 | 16.5090 | 12.5575 |
| 13.5000 | 8.7180 | 9.9326 | 11.1471 | 12.3616 | 13.5762 | 14.7907 | 16.0052 | 12.3616 |
| 14.0000 | 8.8717 | 9.9951 | 11.1186 | 12.2420 | 13.3655 | 14.4889 | 15.6124 | 12.2420 |
| 14.5000 | 9.0646 | 10.1069 | 11.1491 | 12.1913 | 13.2335 | 14.2757 | 15.3179 | 12.1913 |
| 15.0000 | 9.2949 | 10.2644 | 11.2339 | 12.2033 | 13.1728 | 14.1423 | 15.1118 | 12.2033 |
| 15.5000 | 9.5610 | 10.4651 | 11.3692 | 12.2732 | 13.1773 | 14.0814 | 14.9855 | 12.2732 |
| 16.0000 | 9.8618 | 10.7068 | 11.5519 | 12.3970 | 13.2421 | 14.0871 | 14.9322 | 12.3970 |
| 16.5000 | 10.1963 | 10.9880 | 11.7796 | 12.5713 | 13.3629 | 14.1546 | 14.9462 | 12.5713 |
| 17.0000 | 10.5640 | 11.3071 | 12.0503 | 12.7934 | 13.5365 | 14.2797 | 15.0228 | 12.7934 |
| 17.5000 | 10.9644 | 11.6633 | 12.3623 | 13.0612 | 13.7601 | 14.4591 | 15.1580 | 13.0612 |
| 18.0000 | 11.3972 | 12.0557 | 12.7143 | 13.3729 | 14.0314 | 14.6900 | 15.3486 | 13.3729 |
| 18.5000 | 11.8622 | 12.4838 | 13.1054 | 13.7270 | 14.3486 | 14.9702 | 15.5918 | 13.7270 |
| 19.0000 | 12.3594 | 12.9471 | 13.5347 | 14.1224 | 14.7100 | 15.2977 | 15.8853 | 14.1224 |
| 19.5000 | 12.8889 | 13.4453 | 14.0017 | 14.5581 | 15.1145 | 15.6710 | 16.2274 | 14.5581 |
| 20.0000 | 13.4508 | 13.9784 | 14.5060 | 15.0336 | 15.5611 | 16.0887 | 16.6163 | 15.0336 |

(4)モデル 2 a 20Nms-50Nms 5000rpm

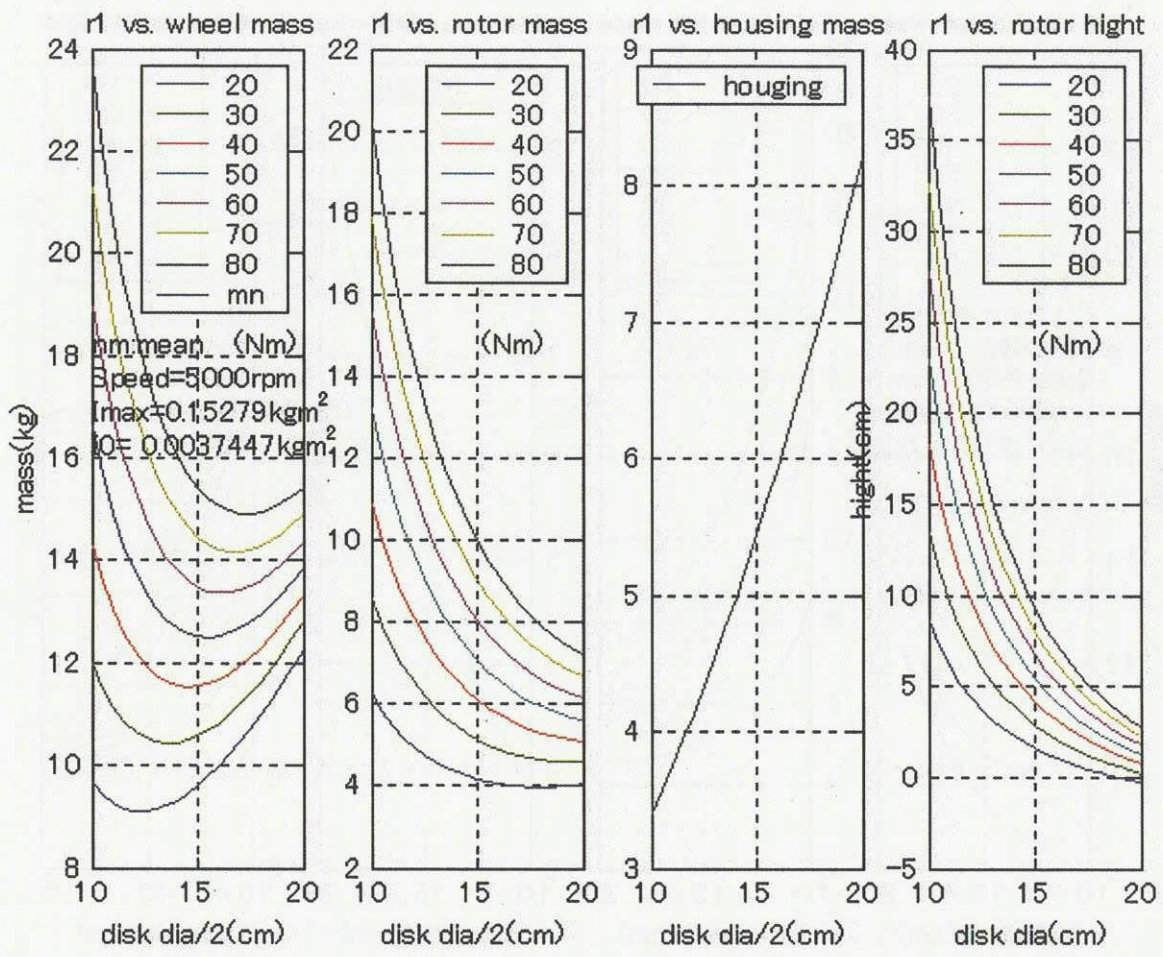


図 3 - 8 20Nms-50Nms 5000rpm (モデル 2 a)

表 3 - 8 20Nms-50Nms 5000rpm (モデル 2 a)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 9.6453 | 11.9744 | 14.3035 | 16.6325 | 18.9616 | 21.2907 | 23.6198 | 16.6325 |
| 10.5000 | 9.4091 | 11.5021 | 13.5951 | 15.6881 | 17.7811 | 19.8741 | 21.9671 | 15.6881 |
| 11.0000 | 9.2470 | 11.1380 | 13.0289 | 14.9199 | 16.8108 | 18.7018 | 20.5927 | 14.9199 |
| 11.5000 | 9.1472 | 10.8639 | 12.5807 | 14.2974 | 16.0141 | 17.7308 | 19.4476 | 14.2974 |
| 12.0000 | 9.1004 | 10.6659 | 12.2313 | 13.7968 | 15.3622 | 16.9277 | 18.4932 | 13.7968 |
| 12.5000 | 9.0993 | 10.5326 | 11.9659 | 13.3992 | 14.8325 | 16.2658 | 17.6991 | 13.3992 |
| 13.0000 | 9.1381 | 10.4553 | 11.7724 | 13.0896 | 14.4067 | 15.7238 | 17.0410 | 13.0896 |
| 13.5000 | 9.2121 | 10.4266 | 11.6411 | 12.8557 | 14.0702 | 15.2847 | 16.4993 | 12.8557 |
| 14.0000 | 9.3173 | 10.4408 | 11.5642 | 12.6877 | 13.8111 | 14.9346 | 16.0580 | 12.6877 |
| 14.5000 | 9.4507 | 10.4930 | 11.5352 | 12.5774 | 13.6196 | 14.6618 | 15.7040 | 12.5774 |
| 15.0000 | 9.6097 | 10.5792 | 11.5487 | 12.5181 | 13.4876 | 14.4571 | 15.4266 | 12.5181 |
| 15.5000 | 9.7921 | 10.6962 | 11.6003 | 12.5043 | 13.4084 | 14.3125 | 15.2166 | 12.5043 |
| 16.0000 | 9.9961 | 10.8412 | 11.6862 | 12.5313 | 13.3764 | 14.2214 | 15.0665 | 12.5313 |
| 16.5000 | 10.2201 | 11.0118 | 11.8034 | 12.5951 | 13.3867 | 14.1784 | 14.9700 | 12.5951 |
| 17.0000 | 10.4629 | 11.2060 | 11.9492 | 12.6923 | 13.4354 | 14.1786 | 14.9217 | 12.6923 |
| 17.5000 | 10.7233 | 11.4223 | 12.1212 | 12.8202 | 13.5191 | 14.2181 | 14.9170 | 12.8202 |
| 18.0000 | 11.0005 | 11.6591 | 12.3176 | 12.9762 | 13.6348 | 14.2934 | 14.9519 | 12.9762 |
| 18.5000 | 11.2936 | 11.9152 | 12.5368 | 13.1584 | 13.7800 | 14.4015 | 15.0231 | 13.1584 |
| 19.0000 | 11.6018 | 12.1895 | 12.7771 | 13.3648 | 13.9524 | 14.5401 | 15.1277 | 13.3648 |
| 19.5000 | 11.9246 | 12.4811 | 13.0375 | 13.5939 | 14.1503 | 14.7067 | 15.2631 | 13.5939 |
| 20.0000 | 12.2615 | 12.7891 | 13.3167 | 13.8443 | 14.3719 | 14.8995 | 15.4271 | 13.8443 |

3. 4 ロータ半径とホイール質量との関係 モデル3による解析

(1)20Nms－80Nms 6000rpm

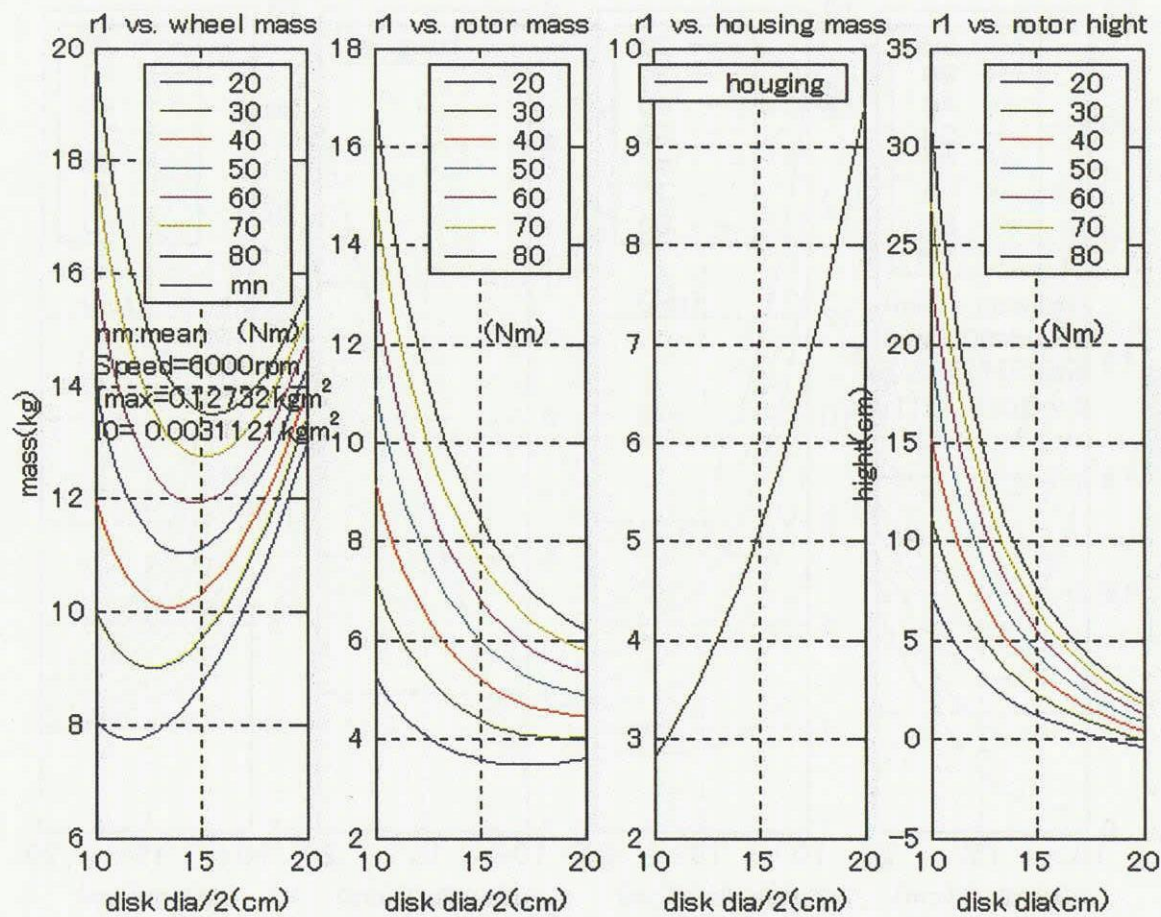


図 3－9 20Nms－80Nms 6 000rpm (軽量化モデル 3)

表 3－9 20Nms－80Nms 6 000rpm (軽量化モデル 3)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.0737 | 10.0146 | 11.9555 | 13.8964 | 15.8374 | 17.7783 | 19.7192 | 13.8964 |
| 10.5000 | 7.8975 | 9.6416 | 11.3858 | 13.1300 | 14.8741 | 16.6183 | 18.3624 | 13.1300 |
| 11.0000 | 7.7916 | 9.3674 | 10.9432 | 12.5190 | 14.0948 | 15.6706 | 17.2464 | 12.5190 |
| 11.5000 | 7.7468 | 9.1774 | 10.6080 | 12.0386 | 13.4693 | 14.8999 | 16.3305 | 12.0386 |
| 12.0000 | 7.7560 | 9.0606 | 10.3651 | 11.6697 | 12.9742 | 14.2788 | 15.5833 | 11.6697 |
| 12.5000 | 7.8137 | 9.0081 | 10.2025 | 11.3969 | 12.5913 | 13.7857 | 14.9801 | 11.3969 |
| 13.0000 | 7.9155 | 9.0131 | 10.1107 | 11.2084 | 12.3060 | 13.4036 | 14.5012 | 11.2084 |
| 13.5000 | 8.0582 | 9.0703 | 10.0824 | 11.0946 | 12.1067 | 13.1188 | 14.1309 | 11.0946 |
| 14.0000 | 8.2392 | 9.1754 | 10.1116 | 11.0479 | 11.9841 | 12.9203 | 13.8565 | 11.0479 |
| 14.5000 | 8.4566 | 9.3251 | 10.1936 | 11.0621 | 11.9306 | 12.7991 | 13.6677 | 11.0621 |
| 15.0000 | 8.7087 | 9.5166 | 10.3245 | 11.1324 | 11.9403 | 12.7482 | 13.5560 | 11.1324 |
| 15.5000 | 8.9944 | 9.7478 | 10.5012 | 11.2546 | 12.0080 | 12.7614 | 13.5148 | 11.2546 |
| 16.0000 | 9.3129 | 10.0171 | 10.7213 | 11.4256 | 12.1298 | 12.8340 | 13.5382 | 11.4256 |
| 16.5000 | 9.6635 | 10.3232 | 10.9829 | 11.6426 | 12.3023 | 12.9620 | 13.6217 | 11.6426 |
| 17.0000 | 10.0457 | 10.6650 | 11.2843 | 11.9035 | 12.5228 | 13.1421 | 13.7614 | 11.9035 |
| 17.5000 | 10.4594 | 11.0418 | 11.6243 | 12.2067 | 12.7892 | 13.3716 | 13.9541 | 12.2067 |
| 18.0000 | 10.9043 | 11.4531 | 12.0019 | 12.5507 | 13.0995 | 13.6483 | 14.1971 | 12.5507 |
| 18.5000 | 11.3804 | 11.8984 | 12.4164 | 12.9344 | 13.4524 | 13.9704 | 14.4884 | 12.9344 |
| 19.0000 | 11.8878 | 12.3775 | 12.8672 | 13.3570 | 13.8467 | 14.3364 | 14.8261 | 13.3570 |
| 19.5000 | 12.4267 | 12.8904 | 13.3540 | 13.8177 | 14.2814 | 14.7451 | 15.2087 | 13.8177 |
| 20.0000 | 12.9972 | 13.4369 | 13.8765 | 14.3162 | 14.7558 | 15.1955 | 15.6352 | 14.3162 |

(2)モデル 3 a 20Nms-50Nms 6000rpm

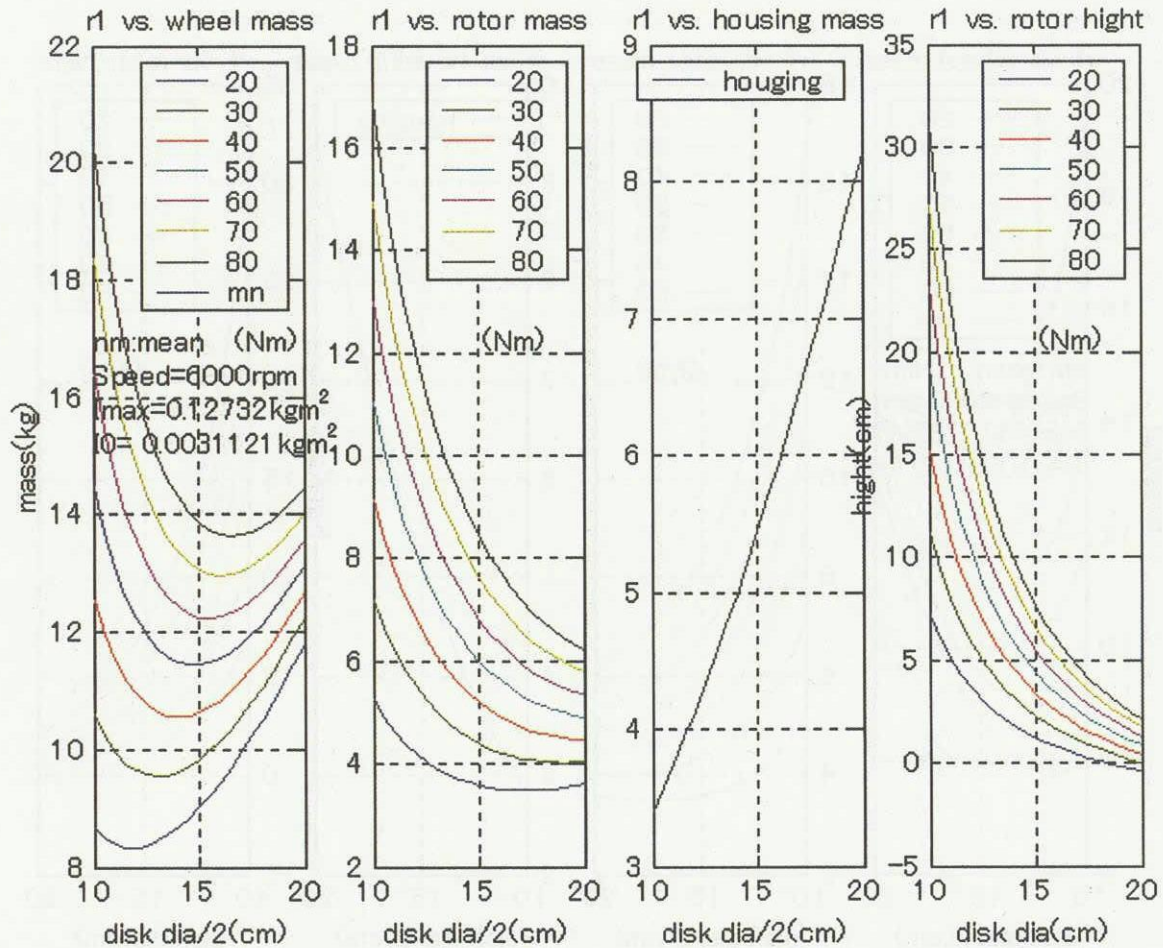


図 3-10 20Nms-80Nms 6 000rpm (軽量化モデル 3 a)

表 3-10 20Nms-80Nms 6 000rpm (軽量化モデル 3 a)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.6508 | 10.5918 | 12.5327 | 14.4736 | 16.4145 | 18.3554 | 20.2963 | 14.4736 |
| 10.5000 | 8.4856 | 10.2297 | 11.9739 | 13.7180 | 15.4622 | 17.2064 | 18.9505 | 13.7180 |
| 11.0000 | 8.3841 | 9.9599 | 11.5357 | 13.1115 | 14.6873 | 16.2631 | 17.8389 | 13.1115 |
| 11.5000 | 8.3366 | 9.7672 | 11.1978 | 12.6284 | 14.0591 | 15.4897 | 16.9203 | 12.6284 |
| 12.0000 | 8.3353 | 9.6398 | 10.9443 | 12.2489 | 13.5534 | 14.8580 | 16.1625 | 12.2489 |
| 12.5000 | 8.3739 | 9.5683 | 10.7627 | 11.9571 | 13.1515 | 14.3459 | 15.5403 | 11.9571 |
| 13.0000 | 8.4475 | 9.5451 | 10.6428 | 11.7404 | 12.8380 | 13.9356 | 15.0332 | 11.7404 |
| 13.5000 | 8.5523 | 9.5644 | 10.5765 | 11.5886 | 12.6007 | 13.6128 | 14.6249 | 11.5886 |
| 14.0000 | 8.6849 | 9.6211 | 10.5573 | 11.4935 | 12.4297 | 13.3659 | 14.3021 | 11.4935 |
| 14.5000 | 8.8427 | 9.7112 | 10.5797 | 11.4482 | 12.3167 | 13.1852 | 14.0537 | 11.4482 |
| 15.0000 | 9.0235 | 9.8314 | 10.6393 | 11.4472 | 12.2551 | 13.0630 | 13.8709 | 11.4472 |
| 15.5000 | 9.2255 | 9.9789 | 10.7323 | 11.4857 | 12.2391 | 12.9925 | 13.7459 | 11.4857 |
| 16.0000 | 9.4472 | 10.1514 | 10.8556 | 11.5599 | 12.2641 | 12.9683 | 13.6726 | 11.5599 |
| 16.5000 | 9.6873 | 10.3470 | 11.0067 | 11.6664 | 12.3261 | 12.9858 | 13.6455 | 11.6664 |
| 17.0000 | 9.9446 | 10.5639 | 11.1832 | 11.8025 | 12.4217 | 13.0410 | 13.6603 | 11.8025 |
| 17.5000 | 10.2183 | 10.8008 | 11.3832 | 11.9657 | 12.5481 | 13.1306 | 13.7130 | 11.9657 |
| 18.0000 | 10.5076 | 11.0564 | 11.6052 | 12.1540 | 12.7028 | 13.2517 | 13.8005 | 12.1540 |
| 18.5000 | 10.8118 | 11.3298 | 11.8478 | 12.3658 | 12.8838 | 13.4018 | 13.9198 | 12.3658 |
| 19.0000 | 11.1302 | 11.6199 | 12.1096 | 12.5993 | 13.0890 | 13.5787 | 14.0685 | 12.5993 |
| 19.5000 | 11.4624 | 11.9261 | 12.3898 | 12.8534 | 13.3171 | 13.7808 | 14.2444 | 12.8534 |
| 20.0000 | 11.8080 | 12.2476 | 12.6873 | 13.1269 | 13.5666 | 14.0062 | 14.4459 | 13.1269 |

(3)モデル 3 20Nms-80Nms 5000rpm

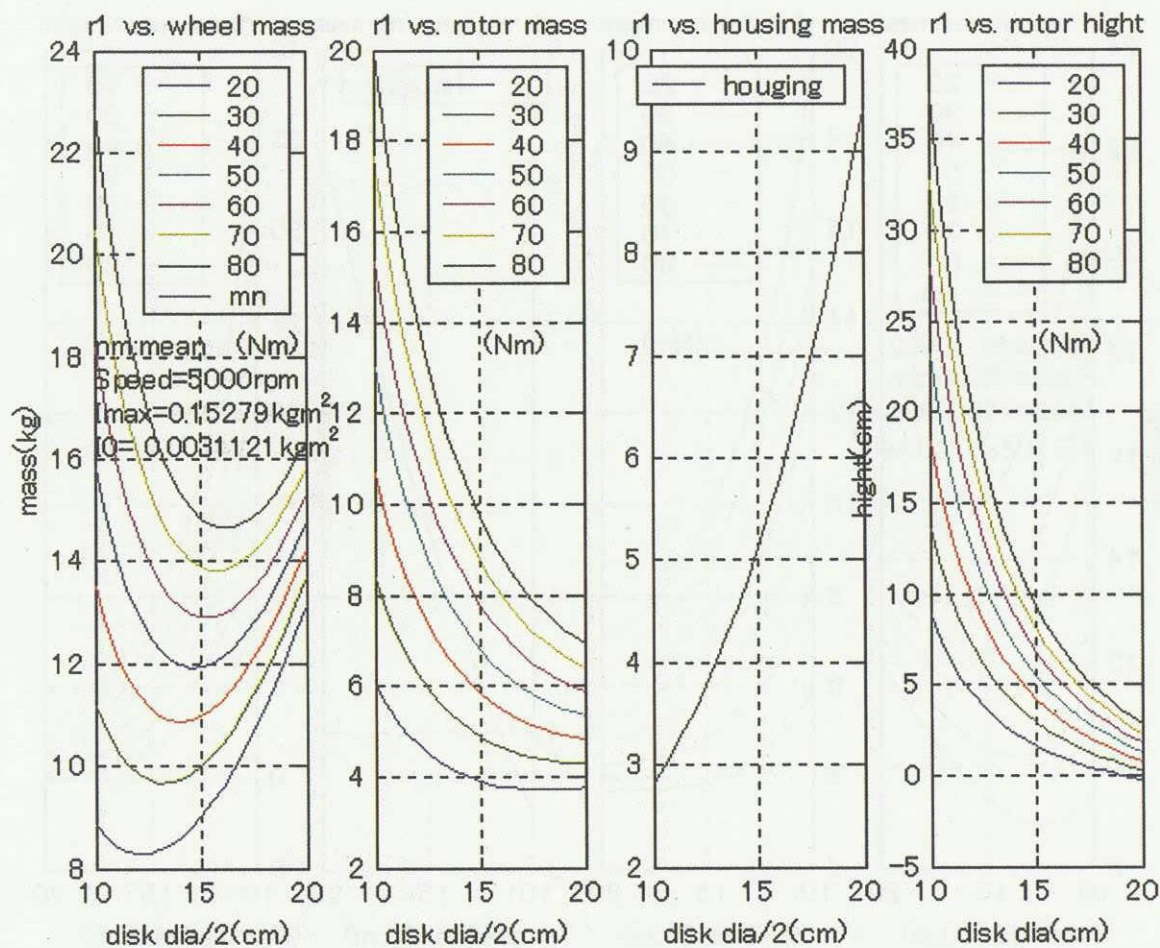


図 3-11 20Nms-80Nms 5000rpm (軽量化モデル 3)

表 3-11 20Nms-80Nms 5000rpm (軽量化モデル 3)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 8.8501 | 11.1792 | 13.5083 | 15.8374 | 18.1665 | 20.4956 | 22.8247 | 15.8374 |
| 10.5000 | 8.5951 | 10.6881 | 12.7811 | 14.8741 | 16.9671 | 19.0601 | 21.1531 | 14.8741 |
| 11.0000 | 8.4219 | 10.3129 | 12.2038 | 14.0948 | 15.9857 | 17.8767 | 19.7676 | 14.0948 |
| 11.5000 | 8.3191 | 10.0358 | 11.7525 | 13.4693 | 15.1860 | 16.9027 | 18.6194 | 13.4693 |
| 12.0000 | 8.2778 | 9.8433 | 11.4088 | 12.9742 | 14.5397 | 16.1051 | 17.6706 | 12.9742 |
| 12.5000 | 8.2914 | 9.7247 | 11.1580 | 12.5913 | 14.0246 | 15.4579 | 16.8912 | 12.5913 |
| 13.0000 | 8.3545 | 9.6717 | 10.9888 | 12.3060 | 13.6231 | 14.9403 | 16.2574 | 12.3060 |
| 13.5000 | 8.4631 | 9.6776 | 10.8921 | 12.1067 | 13.3212 | 14.5357 | 15.7503 | 12.1067 |
| 14.0000 | 8.6137 | 9.7372 | 10.8606 | 11.9841 | 13.1075 | 14.2310 | 15.3544 | 11.9841 |
| 14.5000 | 8.8040 | 9.8462 | 10.8884 | 11.9306 | 12.9728 | 14.0151 | 15.0573 | 11.9306 |
| 15.0000 | 9.0318 | 10.0013 | 10.9708 | 11.9403 | 12.9097 | 13.8792 | 14.8487 | 11.9403 |
| 15.5000 | 9.2958 | 10.1999 | 11.1039 | 12.0080 | 12.9121 | 13.8162 | 14.7202 | 12.0080 |
| 16.0000 | 9.5946 | 10.4396 | 11.2847 | 12.1298 | 12.9749 | 13.8199 | 14.6650 | 12.1298 |
| 16.5000 | 9.9273 | 10.7190 | 11.5106 | 12.3023 | 13.0939 | 13.8856 | 14.6772 | 12.3023 |
| 17.0000 | 10.2934 | 11.0366 | 11.7797 | 12.5228 | 13.2660 | 14.0091 | 14.7522 | 12.5228 |
| 17.5000 | 10.6923 | 11.3913 | 12.0902 | 12.7892 | 13.4881 | 14.1870 | 14.8860 | 12.7892 |
| 18.0000 | 11.1238 | 11.7824 | 12.4409 | 13.0995 | 13.7581 | 14.4166 | 15.0752 | 13.0995 |
| 18.5000 | 11.5876 | 12.2092 | 12.8308 | 13.4524 | 14.0740 | 14.6956 | 15.3172 | 13.4524 |
| 19.0000 | 12.0837 | 12.6714 | 13.2590 | 13.8467 | 14.4343 | 15.0220 | 15.6096 | 13.8467 |
| 19.5000 | 12.6122 | 13.1686 | 13.7250 | 14.2814 | 14.8378 | 15.3942 | 15.9506 | 14.2814 |
| 20.0000 | 13.1731 | 13.7007 | 14.2283 | 14.7558 | 15.2834 | 15.8110 | 16.3386 | 14.7558 |

(4)モデル 3a 20Nms-80Nms 5000rpm

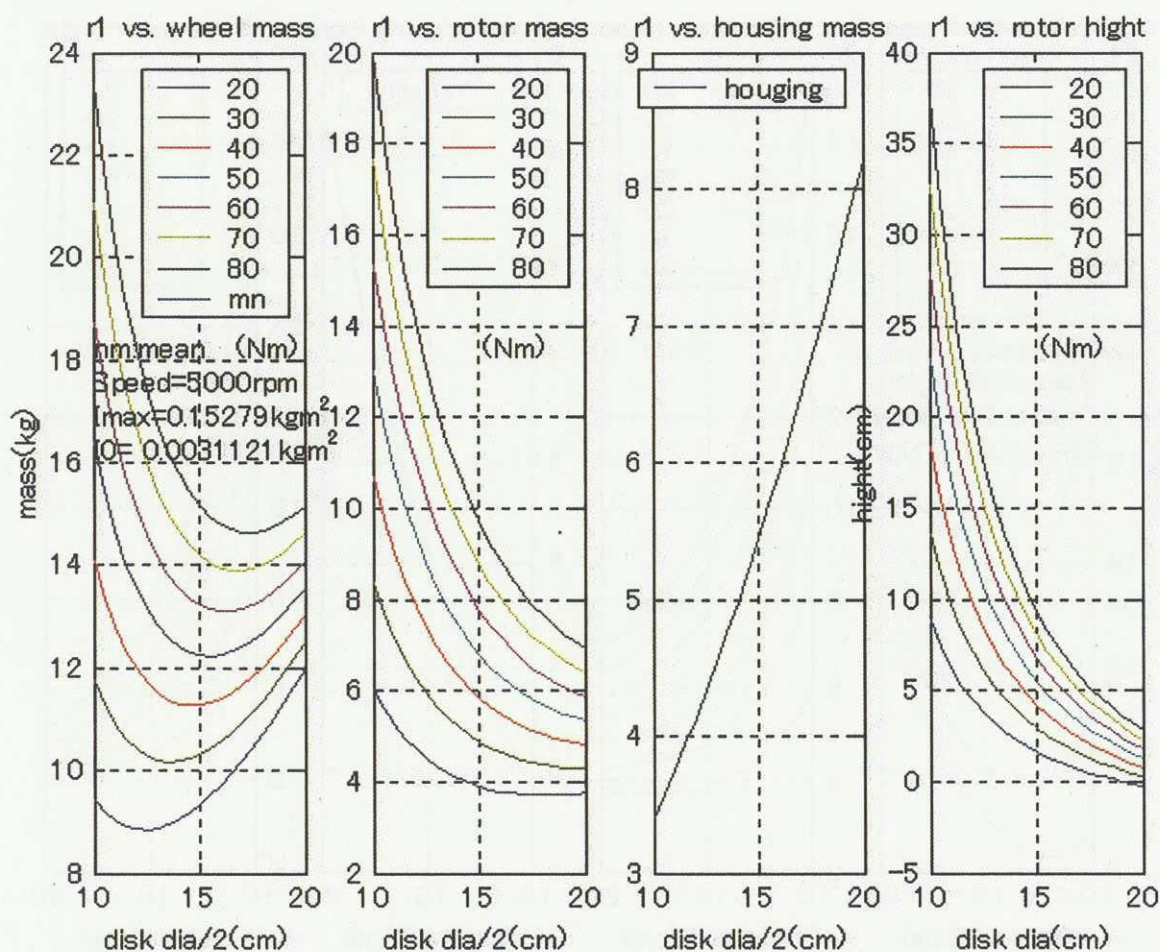


図 3-12 20Nms-50Nms 5000rpm (モデル 3 a)

表 3-12 20Nms-50Nms 5000rpm (モデル 3 a)

| ロータ外径 | 20Nms | 30Nms | 40Nms | 50Nms | 60Nms | 70Nms | 80Nms | 平均質量 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.0000 | 9.4272 | 11.7563 | 14.0854 | 16.4145 | 18.7436 | 21.0727 | 23.4018 | 16.4145 |
| 10.5000 | 9.1832 | 11.2762 | 13.3692 | 15.4622 | 17.5552 | 19.6482 | 21.7412 | 15.4622 |
| 11.0000 | 9.0144 | 10.9054 | 12.7963 | 14.6873 | 16.5782 | 18.4692 | 20.3601 | 14.6873 |
| 11.5000 | 8.9089 | 10.6256 | 12.3423 | 14.0591 | 15.7758 | 17.4925 | 19.2092 | 14.0591 |
| 12.0000 | 8.8571 | 10.4225 | 11.9880 | 13.5534 | 15.1189 | 16.6844 | 18.2498 | 13.5534 |
| 12.5000 | 8.8516 | 10.2849 | 11.7182 | 13.1515 | 14.5848 | 16.0181 | 17.4514 | 13.1515 |
| 13.0000 | 8.8866 | 10.2037 | 11.5208 | 12.8380 | 14.1551 | 15.4723 | 16.7894 | 12.8380 |
| 13.5000 | 8.9571 | 10.1716 | 11.3862 | 12.6007 | 13.8152 | 15.0298 | 16.2443 | 12.6007 |
| 14.0000 | 9.0593 | 10.1828 | 11.3062 | 12.4297 | 13.5531 | 14.6766 | 15.8000 | 12.4297 |
| 14.5000 | 9.1901 | 10.2323 | 11.2745 | 12.3167 | 13.3589 | 14.4011 | 15.4434 | 12.3167 |
| 15.0000 | 9.3467 | 10.3161 | 11.2856 | 12.2551 | 13.2245 | 14.1940 | 15.1635 | 12.2551 |
| 15.5000 | 9.5269 | 10.4309 | 11.3350 | 12.2391 | 13.1432 | 14.0472 | 14.9513 | 12.2391 |
| 16.0000 | 9.7289 | 10.5740 | 11.4190 | 12.2641 | 13.1092 | 13.9542 | 14.7993 | 12.2641 |
| 16.5000 | 9.9511 | 10.7428 | 11.5345 | 12.3261 | 13.1178 | 13.9094 | 14.7011 | 12.3261 |
| 17.0000 | 10.1923 | 10.9355 | 11.6786 | 12.4217 | 13.1649 | 13.9080 | 14.6511 | 12.4217 |
| 17.5000 | 10.4513 | 11.1503 | 11.8492 | 12.5481 | 13.2471 | 13.9460 | 14.6450 | 12.5481 |
| 18.0000 | 10.7271 | 11.3857 | 12.0443 | 12.7028 | 13.3614 | 14.0200 | 14.6786 | 12.7028 |
| 18.5000 | 11.0190 | 11.6406 | 12.2622 | 12.8838 | 13.5054 | 14.1270 | 14.7485 | 12.8838 |
| 19.0000 | 11.3261 | 11.9137 | 12.5014 | 13.0890 | 13.6767 | 14.2643 | 14.8520 | 13.0890 |
| 19.5000 | 11.6479 | 12.2043 | 12.7607 | 13.3171 | 13.8735 | 14.4299 | 14.9863 | 13.3171 |
| 20.0000 | 11.9838 | 12.5114 | 13.0390 | 13.5666 | 14.0942 | 14.6218 | 15.1493 | 13.5666 |

3. 5 ロータ半径とホイール質量との関係 解析結果のまとめ

前節までの結果を整理し与えられた角運動量を実現する最適なロータ半径（ホイール質量を最小とする）を表3-13に示す。以下に示すように、高トルク低擾乱ホイールのロータ半径は高速回転化では大きな角運動量に適用する場合に適しており、角運動量20～50 Nms という従来型のラージホイールの角運動量域では、最適な質量から外れることがわかる。

表3-13 最適なロータ半径とホイール最適質量（6000rpm）最適ロータ半径／ホール質量

| 角運動量 モデル | 20Nms | 30Nms | 35Nms 20-50 平均 | 40Nms | 50Nms 20-80 平均 | 60Nms | 70Nms | 80Nms |
|-------------|----------|----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| モデル1 | 12.5/7.0 | 13.0/8.2 | 13.0/8.8 | 13.5/9.3 | 14.0/10.2 | 14.5/11.2 | 15.0/12.0 | 15.5/12.7 |
| モデル2 | 11.5/8.0 | 12.5/9.3 | 13.0/9.8 | 13.5/10.3 | 14.0/11.3 | 14.5/12.2 | 15.0/13.0 | 15.5/13.8 |
| モデル3 | 11.5/7.7 | 12.5/9.0 | 13.0/9.6 | 13.5/10.1 | 14.0/11.1 | 14.5/11.9 | 15.0/12.7 | 15.5/13.6 |
| モデル1 a | 12.0/7.6 | 13.0/8.8 | 13.5/9.4 | 14.0/9.8 | 15.0/10.7 | 15.5/11.5 | 16.0/12.2 | 16.5/12.9 |
| モデル2 a | 11.5/8.5 | 13.0/9.8 | 13.5/10.3 | 14.0/10.8 | 15.5/11.5 | 16.0/12.5 | 16.5/13.2 | 16.5/13.9 |
| モデル3 a | 12.0/8.3 | 13.0/9.5 | 13.5/10.1 | 14.0/10.6 | 15.0/11.4 | 15.5/12.2 | 16.0/13.0 | 16.5/13.6 |

最適なロータ半径とホイール最適質量（5000rpm）

| 角運動量 モデル | 20Nms | 30Nms | 35Nms 20-50 平均 | 40Nms | 50Nms 20-80 平均 | 60Nms | 70Nms | 80Nms |
|-------------|----------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| モデル1 | 12.0/7.6 | 13.5/8.9 | 13.5/9.5 | 14.0/10.1 | 14.5/11.2 | 15.0/12.1 | 15.5/13.1 | 16.0/13.9 |
| モデル2 | 12.0/8.5 | 13.0/9.9 | 14.0/10.6 | 14.0/11.1 | 14.5/12.2 | 15.0/13.2 | 15.5/14.1 | 16.0/14.9 |
| モデル3 | 12.0/8.3 | 13.0/9.7 | 13.5/10.3 | 14.0/10.9 | 14.5/11.9 | 15.0/12.9 | 15.5/13.8 | 16.0/14.7 |
| モデル1 a | 12.0/7.6 | 13.0/8.8 | 13.5/9.4 | 14.0/9.8 | 15.0/10.7 | 15.5/11.5 | 16.0/12.2 | 16.5/12.9 |
| モデル2 a | 12.5/9.1 | 13.5/10.4 | 13.0/11.1 | 14.5/11.5 | 15.5/12.5 | 16.0/12.4 | 16.5/14.2 | 17.5/14.9 |
| モデル3 a | 12.5/8.5 | 13.5/10.2 | 13.0/10.9 | 14.5/11.3 | 15.5/12.2 | 16.0/12.1 | 16.5/13.9 | 17.5/14.6 |

以下に解析結果に関する考察を示す。

① 角運動量を最適にするロータ半径

最適なロータ半径は概略角運動量と回転数の関数となるが、各モデルにはそれほど依存しないことがわかる。しかしながらハウジング質量がロータの2乗に比例する場合と、3乗に比例する場合では若干の差が出来、2乗に比例するモデルの方が3乗に比例するモデルより、20Nmsで0.5cm、80Nmsでは1cm大きくなることがわかる。

20-50Nmsにおいて平均質量が最適となるロータ半径は角運動量35Nmsにたいして最適なロータ半径に相当することが、また、20-80Nmsの場合は50Nmsの最適ロータ半径に相当することがわかる。また、高トルク低擾乱ホイールのロータ半径は角運動量80Nmsをホイール回転数5000rpmで実現するときに最適になっていることがわかる。

ホイール質量を最適化するロータ半径は、概略以下のようになる。

- ・ モデル1, 1a, 2, 3 ----- 13cm
- ・ モデル2a, 3a, 5000rpm ----- 13.5cm

上記のロータ半径とした場合の各モデルのホイール質量を表3-14に示す。

ロータ等を軽量化することで、角運動量20Nmsのホイールが8kg、角運動量50Nmsのホイールが11.2kg程度の質量で実現できることがわかる。

表 3-14 ロータ半径とホイール質量 (6000rpm)

| 項目 | 20Nms | 50Nms | 20-50Nms の平均 |
|----------------|---------|---------|--------------|
| モデル 1 13cm | 7.2 kg | 10.3 kg | 8.9 kg |
| モデル 1 16.5cm | 8.9 kg | 10.9 kg | 9.9 kg |
| モデル 2 13cm | 8.2 kg | 11.3 kg | 9.8 kg |
| モデル 2 16.5cm | 9.9 kg | 11.9 kg | 10.9 kg |
| モデル 3 13cm | 7.9 kg | 11.2 kg | 9.4 kg |
| モデル 3 16.5cm | 9.7 kg | 11.7 kg | 10.7 kg |
| モデル 1a 13.5cm | 7.8 kg | 10.8 kg | 8.3 kg |
| モデル 1 a 16.5cm | 8.9 kg | 10.9 kg | 9.9 kg |
| モデル 2 a 13.5cm | 8.8 kg | 11.8 kg | 10.3 kg |
| モデル 2 a 16.5cm | 10.0 kg | 11.9 kg | 10.9 kg |
| モデル 3 a 13.5cm | 8.1 kg | 11.1 kg | 9.5 kg |
| モデル 3 a 16.5cm | 9.7 kg | 11.7 kg | 10.7 kg |

② ロータの高さ

ロータ半径を固定すると、ロータの慣性能率の調整はローターティングマスの大きさで実現することになる。しかしながら、図 3-1 等によれば、20Nms のホイールのローターティングマスは 13cm でほぼゼロになる。従って、この点からもロータ半径を 16.5cm のまま固定するのは問題があることが分かる。

4. 最適なロータ半径と角運動量の関係

3 節の解析から、ある角運動量で最適なロータ半径は、他の角運動量では最適ではないことがわかる。角運動量を 20-50Nms の範囲をカバーする最適なロータ半径は概略角運動量 35Nms の最適値であり、13.5cm 程度になることがわかる。一方このロータ半径で 80Nms を実現しようとする、最適質量から 1.1kg 重くなる。一方、20Nms では最適値からのずれは 0.2kg となる。

角運動量を 20-80Nms の範囲をカバーする最適なロータ半径は角運動量 50Nms の最適値であり、15.5cm 程度になることがわかる。このロータ半径で 80Nms をカバーしようとする、最適質量からの差は 0.6kg となるが、20Nms をカバーしようとする最適値からの差は 1kg になる。

これは、(10)式が極値の左側で $2K_{dx}(I_t - I_o)/(r_1^2 + 2r_1d_1 + d_1^2)$ が支配的になり、この項は、 $r_1 \rightarrow 0$ で急激に大きくなることによる。これは、同一のロータ半径で角運動量の広い範囲をカバー使用すると、角運動量の小さな領域で質量のペナルティが大きくなることを示している。

ロータ半径を固定した場合の(12)式で計算したホイール質量を最適とするロータ半径との質量差を計算し図 4-1 に示す。

図 4-1 から高トルク低擾乱ホイールのロータ半径はほぼ 80Nms で最適化されており、40Nms から 140Nms で使用する限り、最適値との差は 300g 程度であることがわかる。一方、このロータ半径を 20Nms で使用すると 1.8kg 程度最適より重いものとなることがわかる。

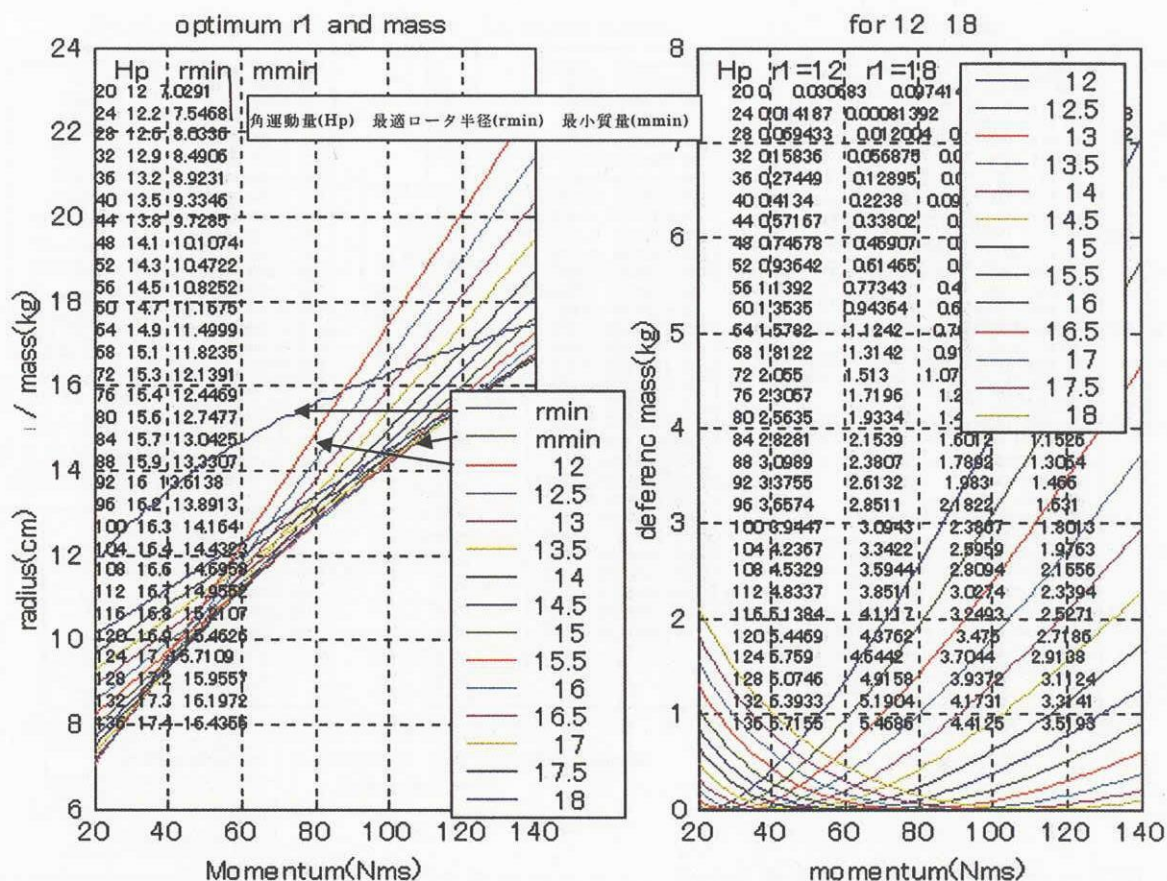


図4-1 ロータ半径を固定した場合の最適質量との差 (モデル1、6000rpm) (roptimizes.m)

図4-1から高トルク低擾乱ホイールのロータ半径では不利になり、20 Nms ~ 40 Nms 付近で最適になるロータ半径は13 cm ~ 13.5 cmであることがわかる。本節では、高トルク低擾乱ホイールのロータ半径を既存のものとし、高トルク低擾乱ホイールがカバーすると不利になる角運動量域をもう一つのロータ半径でカバーするとした場合の最適なロータ半径について検討した。数値的に最適なロータ半径 (ホイール質量を最小とする) を求め、最適なホイール質量との差を系列として最適化するロータ半径について検討した。

(1) 高トルク低擾乱ホイールのロータ半径の角運動量カバー範囲

高トルク低擾乱ホイールのロータ半径16.5 cmは、図4-1から分かるように、6000 rpmでは最適点が、80 Nms 近傍になり、40 Nms から140 Nms 程度の角運動量の範囲では、それほど大きな質量ペナルティ無しでホイールを構成できることが分かる。そこで、各モデルについて、角速度6000 rpmで、それぞれの角運動量に対して最適なロータ半径でのホイール質量と、16.5 cmロータのホイール質量の比較を行った (図4-2 参照)。

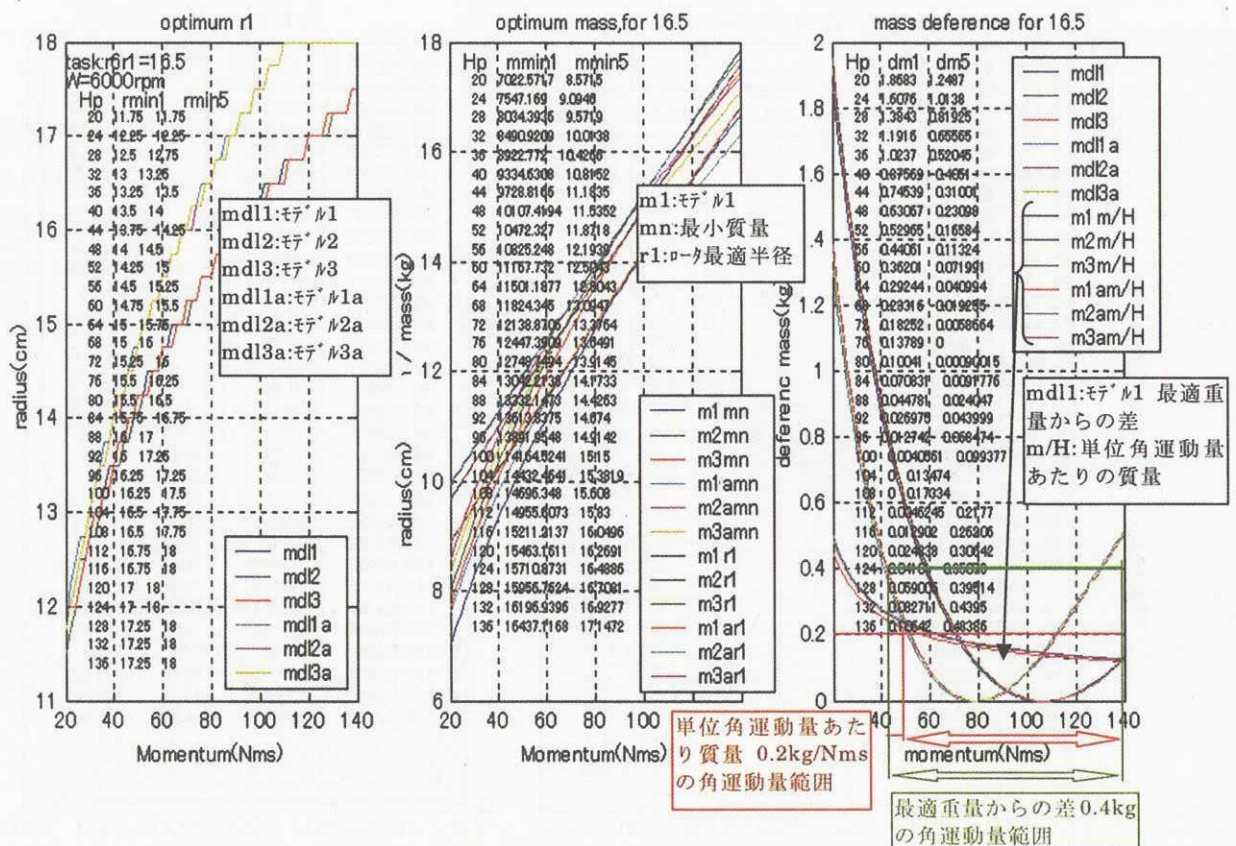


図4-2 最適ホイール質量と16.5cmロータのホイール質量の比較(roptimize0.m)

表4-1 16.5cmロータのホイール質量比較(角運動量20~140Nmsの平均)

| 平均値 | モデル | モデル1 | モデル2 | モデル3 | モデル1a | モデル2a | モデル3a |
|-------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 最適値からの増分 | | 0.3839 | 0.4005 | 0.3944 | 0.2909 | 0.2991 | 0.2961 |
| ホイール質量 | | 12.8492 | 13.8907 | 13.6217 | 12.8730 | 13.9145 | 13.6455 |
| 単位角運動量あたり質量 | | 0.1903 | 0.2074 | 0.2030 | 0.1907 | 0.2078 | 0.2034 |

以下に解析の結果を整理する。

(1) モデルの評価

各角運動量に対する最適なロータ半径は、モータの配置等には依存しない。

しかしながら、ハウジングの質量とロータ半径の関係には大きく依存する。特に、角運動量が大きな領域では顕著になり、その差は50Nmsでは0.5cm、100Nmsで1.25cmになる(ロータ半径の3乗に比例するモデルが大きくなる)。

16.5cmロータ半径のホイールでは、ロータ半径の3乗に比例するモデルの場合100Nmsが最適な角運動量となり、ロータ半径の2乗に比例するモデルでは80Nmsが最適な角運動量となる。

一方、ホイール質量の最小値は各モデルに依存し、角運動量20Nmsでは最軽量のモデルで7kg、最も重いモデルで8.5kgになり、1.5kgの差が生ずる。最適な質量は、角運動量が大きくなるとロータの占める質量が大きくなるので差が縮小する。従って、角運動量が小さい領域で競争力のあるホイールとするためには、ロータ半径の最適化と共に、ハウジングの軽量化も必要であることが分かる。

(2) 16.5 cm半径ロータの角運動量範囲

16.5 cm半径ロータの角運動量範囲を決める指標は、以下のようなものが考えられる。

① 単位角運動量あたりの質量で決める

この場合、単位角運動量あたりの質量は図4-2のようにどのモデルでも角運動量の単調減少関数となり、20～140 Nm s の範囲での平均は表4-1から0.2kg/Nm sとなる。これを超えないと言う基準を設定すれば、ロータ半径の3乗に比例するモデルの場合100 Nm s が最適な角運動量となり、ロータ半径の2乗に比例するモデルでは80 Nm s が最適な角運動量となり、概略50～140 Nm s 程度が16.5 cm半径ロータの角運動量範囲といえる。

② 最適質量からの質量増で決める

この場合、最適質量からの質量増はロータ半径の3乗に比例するモデルの場合100 Nm s が最適な角運動量となり、ロータ半径の2乗に比例するモデルでは80 Nm s で最小となる。また、20～140 Nm s の範囲での平均は表4-1から0.4～0.3kg となる。これらを超えないと言う基準を設定すれば、ロータ半径の3乗に比例するモデルの場合100 Nm s が最適な角運動量となり、ロータ半径の2乗に比例するモデルでは80 Nm s が最適な角運動量となり、概略45～140 Nm s 程度が16.5 cm半径ロータの範囲といえる。

(3) 50 Nm s より小さな角運動量のホイールの最適なロータ半径

また、前節までの解析から、角運動量20 Nm s ～50 Nm s では、概略中心の角運動量である35 Nm s 付近で最適化すれば良いことが分かった。35 Nm s に対応するロータ半径は図4-2から13 cm～13.5 cmであることが分かる。図4-3にロータ半径13 cm、図4-4にロータ半径13.5 cmの場合の、最適質量からの質量増等を示す。

解析の結果を整理すると以下の通り。

- ① ロータ半径13.5 cmは35 Nm s ～40 Nm s で、また13 cmは30 Nm s ～35 Nm s で最適化されていることが確認できた(20～50 Nm s の中間の角運動量35 Nm s 近傍で最適となることが確認できた)。
- ② 最適値からの質量増の平均は何れのモデルでも0.1 kg 以下になっているが、13.5 cmの方が若干最適値に近いホイールになっていることが分かる。
- ③ しかしながら、ホイール質量の平均では、ロータ半径の3乗に比例するモデルでは13 cm半径の方が若干軽くなっている(数十g)。
- ④ 13 cm、13.5 cm共に、20Nm s～50Nm s をカバーするロータ半径としては、ほぼ最適なものになっていることが分かった。
- ⑤ ホイールの質量は、ハウジング質量がロータ半径の2乗に比例するモデルでは全てのモデルで0.5 kg 程度重くなっており、この領域のホイールで競争力を確保するためにはハウジングの軽量化が必要である。ハウジングを軽量化すると13 cmが有利になる。
- ⑥ これまでのホイール出荷実績等から35 Nm s 以下のホイールで有利な13 cmを角運動量20 Nm s ～50 Nm s ホイールのロータ半径の第1候補とする。

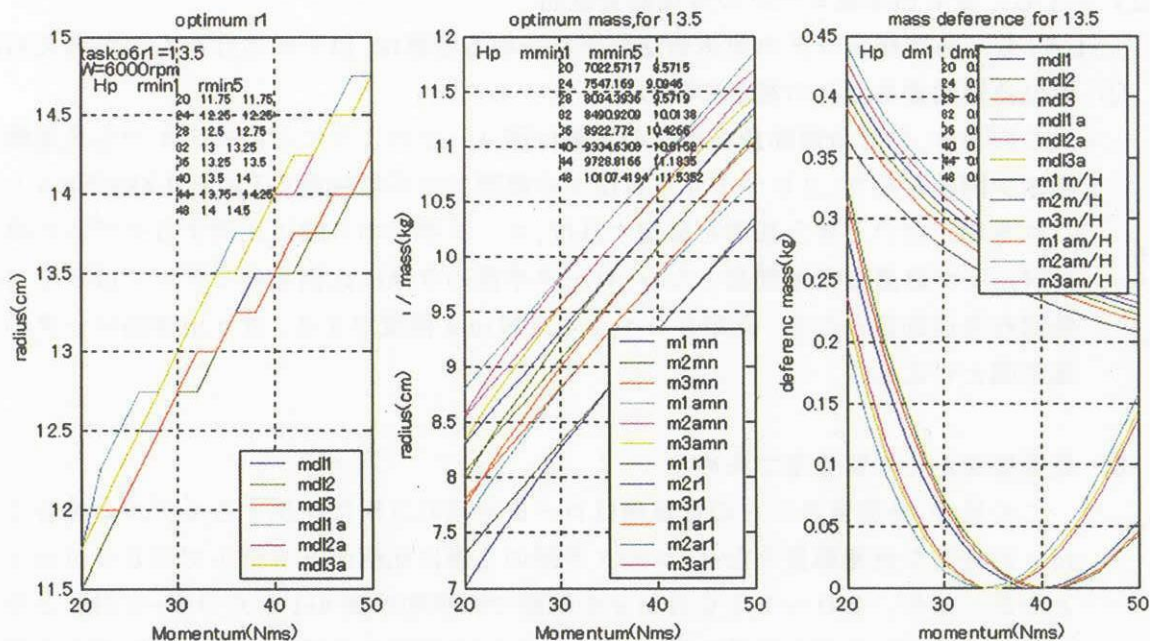


図 4-3 最適ホイール質量と 13.5 cm ロータのホイール質量の比較(roptimize0.m)

表 4-2 13.5 cm ロータのホイール質量比較(角運動量 20 Nms ~ 50 Nms の平均)

| | モデル1 | モデル2 | モデル3 | モデル1 a | モデル2a | モデル3a |
|-------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 最適値からの増分 | 0.0705 | 0.0804 | 0.0764 | 0.0657 | 0.0690 | 0.0676 |
| ホイール質量 | 8.8286 | 9.8313 | 9.5764 | 9.3226 | 10.3254 | 10.0704 |
| 単位角運動量あたり質量 | 0.2643 | 0.2952 | 0.2873 | 0.2795 | 0.3104 | 0.3026 |

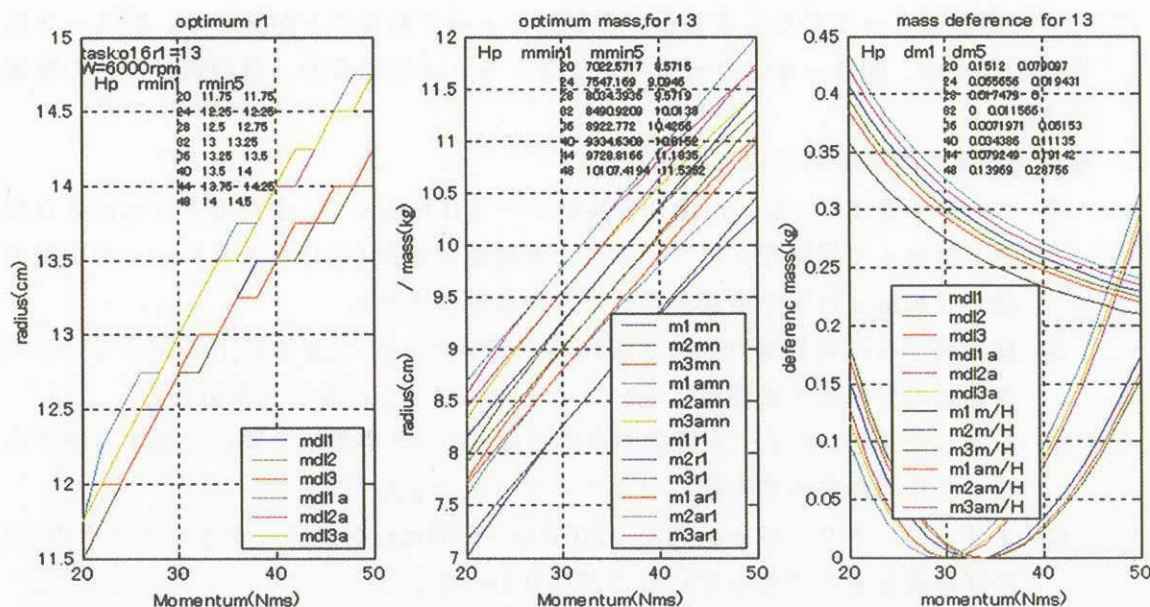


図 4-4 最適ホイール質量と 16.5 cm ロータのホイール質量の比較(roptimize0.m)

表 4-3 16.5 cm ロータのホイール質量比較(角運動量 20 Nms ~ 50 Nms の平均)

| | モデル1 | モデル2 | モデル3 | モデル1 a | モデル2a | モデル3a |
|-------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 最適値からの増分 | 0.0622 | .0625 | 0.0620 | 0.0953 | 0.0891 | 0.0912 |
| ホイール質量 | 8.8202 | 9.8135 | 9.5619 | 9.3522 | 10.3455 | 10.0939 |
| 単位角運動量あたり質量 | 0.2633 | 0.2940 | 0.2862 | 0.2797 | 0.3104 | 0.3026 |

5. 13cmロータと16.5cmロータホイールの角運動量範囲

13cmロータと16.5cmロータの2ホイールからなる系列を仮定した場合のそれぞれのホイールの角運動量範囲について以下のケースについて解析した。

① モデル1, 2, 3, 1a, 2a, 3a

② 回転数6000rpm、5000rpm

解析結果を図5-1～5-12に示す。また表5-1に解析結果をまとめる。

表5-1 ロータ半径13cmと16.5cmによる角運動量のカバレッジ

| ケース | 22Nms (16.5cm ホイールの質量増) | 34Nms (16.5cm ホイールの質量) | 分岐点 | 82Nms | 138Nms |
|---------------|----------------------------|---------------------------|--------------|--------|--------|
| モデル1/6000rpm | 7.2kg (1.6kg) | 8.8gk (1.1kg) | 11.5kg@60Nms | 12.9kg | 16.7kg |
| モデル2/6000rpm | 8.4 (1.8) | 9.7 (1.2) | 12.2@60Nms | 13.9 | 17.6 |
| モデル3/6000rpm | 8.1 (1.8) | 9.4 (1.1) | 12.2@60Nms | 13.8 | 17.4 |
| モデル1/5000rpm | 7.8 (1.5) | 9.4 (0.8) | 11.6@50Nms | 14.0 | 18.5 |
| モデル2/5000rpm | 8.8 (1.5) | 10.4 (0.8) | 12.6@50Nms | 15.1 | 19.5 |
| モデル3/5000rpm | 8.6 (1.5) | 10.2 (0.8) | 12.3@50Nms | 14.8 | 19.3 |
| モデル1a/6000rpm | 7.9 (1.1) | 9.2 (0.6) | 10.9@50Nms | 13.0 | 16.6 |
| モデル2a/6000rpm | 8.9 (1.1) | 10.8 (0.6) | 12.0@50Nms | 14.0 | 17.8 |
| モデル3a/6000rpm | 8.6 (1.1) | 10.0 (0.6) | 11.6@50Nms | 13.7 | 17.5 |
| モデル1a/5000rpm | 8.4 (0.9) | 10.0 (0.3) | 10.7@40Nms | 13.7 | 18.5 |
| モデル2a/5000rpm | 9.4 (0.9) | 11.0 (0.3) | 11.7@40Nms | 15.1 | 19.6 |
| モデル3a/5000rpm | 9.1 (0.9) | 10.7 (0.3) | 11.5@40Nms | 14.9 | 19.3 |

表5-2 主要なモデルの質量比較 (WDE 質量は1kgとした)

| ホイール案 諸元 | モデル3 16.5cmロータ | モデル3 16.5cmロータ | モデル1 13cmロータ | モデル2a 13cmロータ | モデル3a 13cmロータ | I社 Type-E | H社 HR-14 |
|-------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|
| 角運動量 | 50 ~ 140Nms | 20 ~ 60Nms | 20 ~ 50Nms | 20 ~ 50Nms | 20 ~ 50Nms | 20 ~ 50Nms | 25,50,75 Nms |
| 最大制御トルク | 0.2 Nm | 0.2 Nm | 0.2 Nm | 0.2Nm | 0.2Nm | 0.3Nm | 0.1(up to 0.2) |
| 最大回転速度 | 6000rpm | 6000rpm | 6000rpm | 6000rpm | 6000rpm | 3850rpm | 6000rpm |
| 制御回路 | 一体化 | 一体化 | 一体化 | 一体化 | 一体化 | 分離型 | 一体化 (分離型) |
| 質量(制御回路含む) | 13.2kg (60Nms) 14.8kg (80Nms) | 10.8kg (20Nms) 13.2kg (60Nms) | 8.2kg (20Nm) 12.5kg (60Nm) | 9.7kg (20Nm) 13.0kg (50Nm) | 9.2kg (20Nm) 12.6(50Nm) | 10.6kg +3kg | 8~11kg (7~10kg) |

以下に解析結果に対する考察を示す。

- (1) ロータ半径13cmは 50Nm s より小さな角運動量のホイールの最適なロータ半径全領域で最適からの増分は0.2kg程度で、準最適値になっていることが確認できた。
- (2) 13cmと16.5cmホイールの損益分岐点について

図5-1等及び表5-1に示すように、回転数が5000rpmで40Nm sになる場合があるが、基本的には50~60Nm sがそれぞれのロータ半径の分岐点になっていることが確認できた。つまり、ロータ半径13cmとロータ半径16.5cmのホイールの角運動量の範囲は、50Nm sを分岐点とし、それぞれ20~50Nm s及び50~140Nm sと出来ることが確認できた。

- (3) ロータの大きさについて

内径16.5cmロータホイールのローテーティングマスの大きさは、解析では2cm幅としている。ロータが最も軽くなるモデル1のケースでは角運動量50Nm sの時、ローテーティングマスの高さは1.5cmとなるが(図3-1)、実現可能なサイズであると考えられる。

また、16.5cmロータは6000rpmで回転した場合、80Nm sから100Nm sで最適化されていると考えられるが、100Nm s以上にするには材質を変更する等(Ti合金からSUS)で相当な範囲がカバーできると考えられる。一方、ロータ半径13cmのホイールは20Nm s~50Nm sではローテーティングマスの大きさに制約は発生しないことが確認できた。

- (4) 各モデルの評価

- ① 角角運動量でそれ質量を最小とするモデルは、モデル1であるが、モデル1では最小構成の時、磁石等を支持出来なくなる恐れがある(4節②項参照)。また、モータロストルクはモータ系に比例すると考えられるが、モータ系とロータ半径が同等になるモデル1, 1aでは最大回転数でロストルクが許容できない値になる恐れがある。
- ② 従って、ロストルクを考慮すると、モデル2, 3から選択せざると得ない。しかしながら、モデル2はモデル3より、ホイール質量が100g~300g重くなるので(角運動量小さいホイールで質量増が大きい)、ホイール質量の点からはモデル3または3aが準最適なモデルということになる。モデル2, 3ではモータの軽量化も課題である。
- ③ ハウジング質量のモデルとしては、ロータ半径の3乗に比例するモデルが有利である(小型のホイールで顕著に有利で、2乗に比例するモデルより700g~800g軽量)。ハウジングはシェル構造になっているので、大きさに比例して薄膜化は出来ないと考えられるが、可能な限り軽量化し、ロータ半径の2乗から~3乗の間にをねらう必要がある。これにより、20Nm sホイールを8kg以下、又、50Nm sホイールを12kg以下とすることが可能と考えられる。

- (5) 一方、ハウジングがロータ半径の2乗に比例するモデルは、回転数5000rpmで13cmは約20Nm sで最適となるので、この径のロータを5000rpmで使用すると6000rpmの最適質量から800gの質量増になる。つまり、ハウジングを軽量化出来ないモデルではホイールの高速化は必須であることが分かる。
- (6) 高トルク低擾乱ホイールとして開発されたホイールは回転数を6000rpmとすると、50Nm s以上で最適化されたホイールとして系列化出来ることが分かった。従って、もっとも必要の大きいと考えられる20Nm s~50Nm sに関しては新たにロータ半径を設定した方が、全体的に国際競争力のあるホイールになると考えられる。

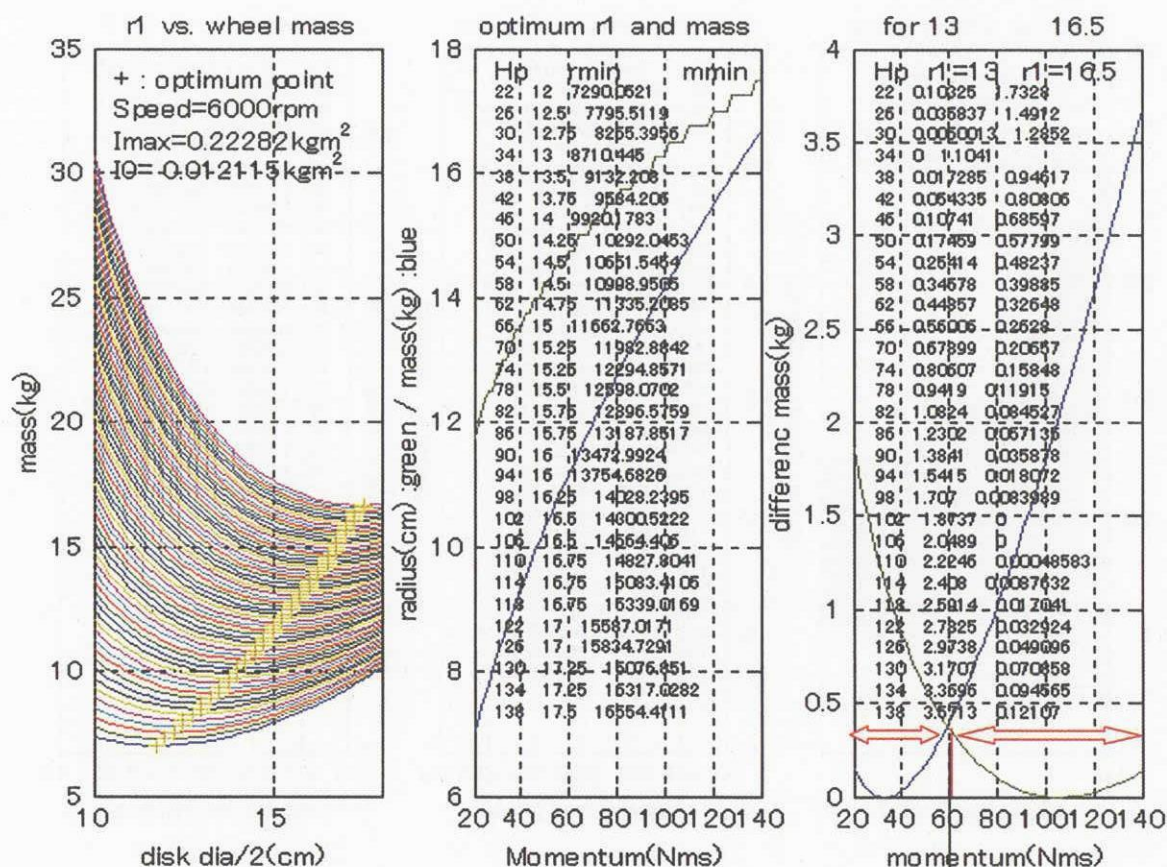


図 5-1 モデル1 6000rpm(roptimize.m)

モデル1 6000rpm の場合は 60Nms が分岐点

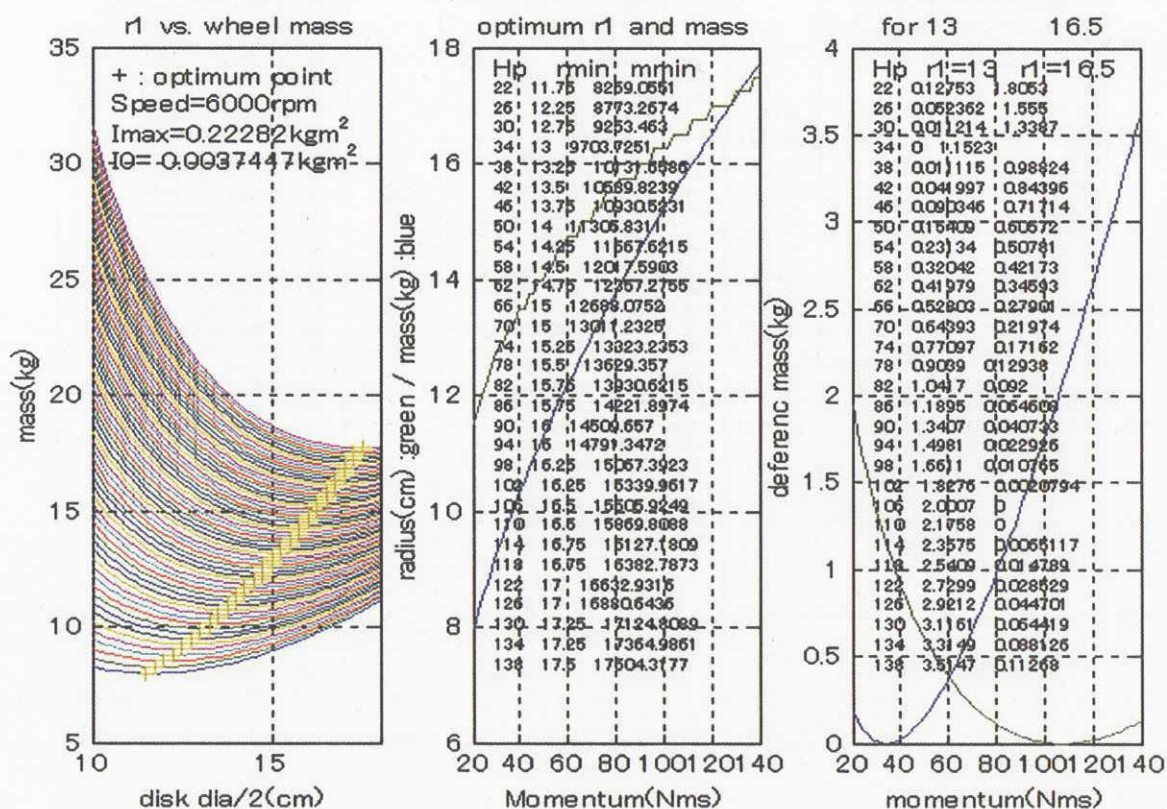


図 5-2 モデル2 6000rpm(roptimize.m)

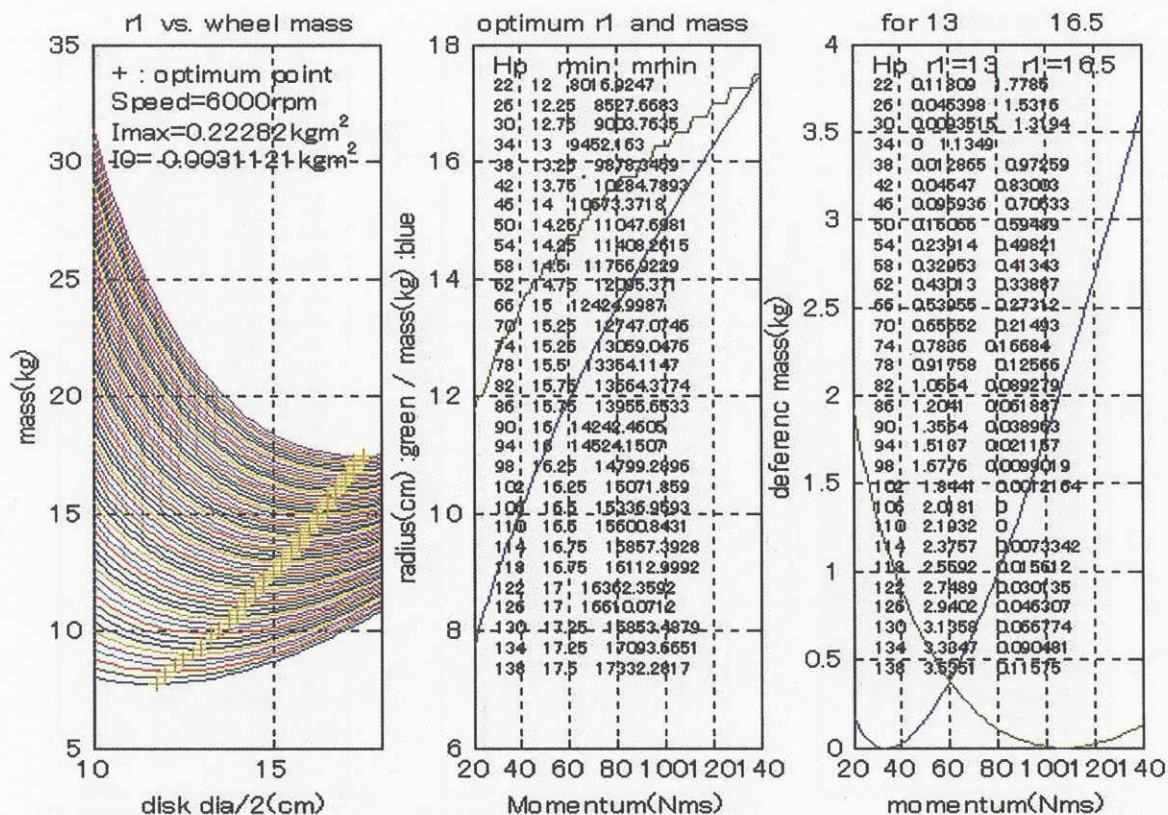


図 5-3 モデル 3 6000rpm

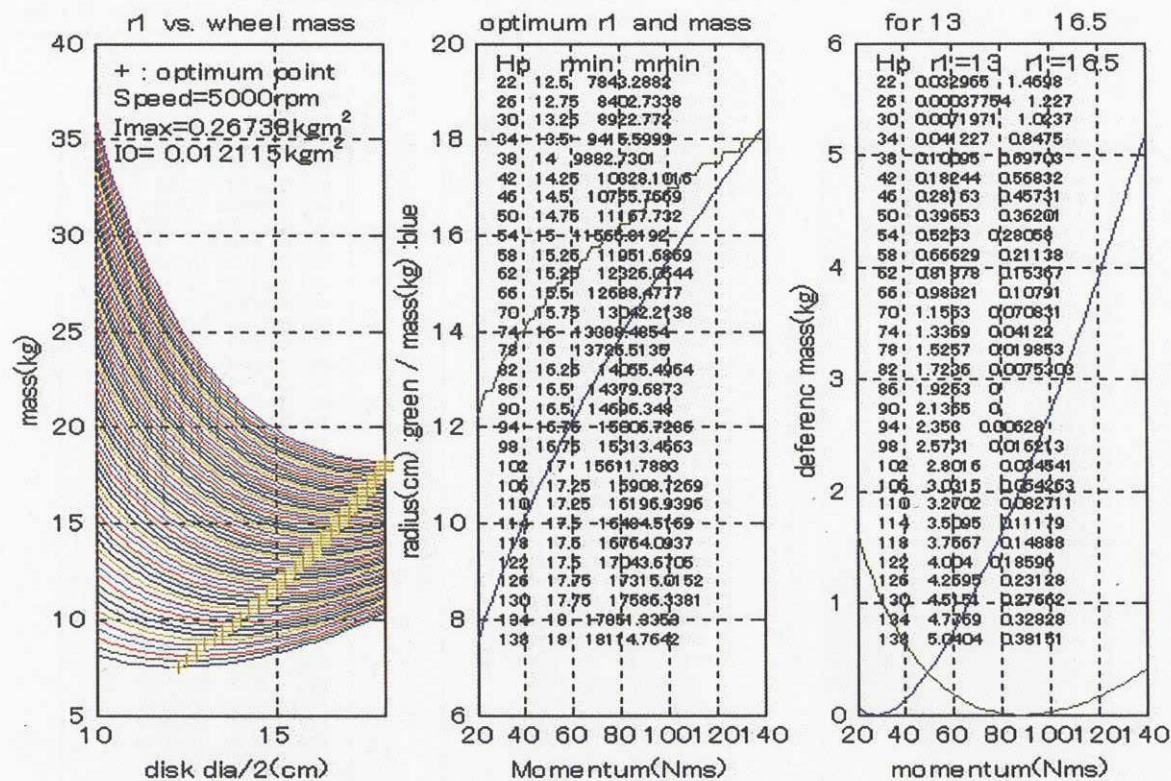


図 5-4 モデル 1 5000rpm

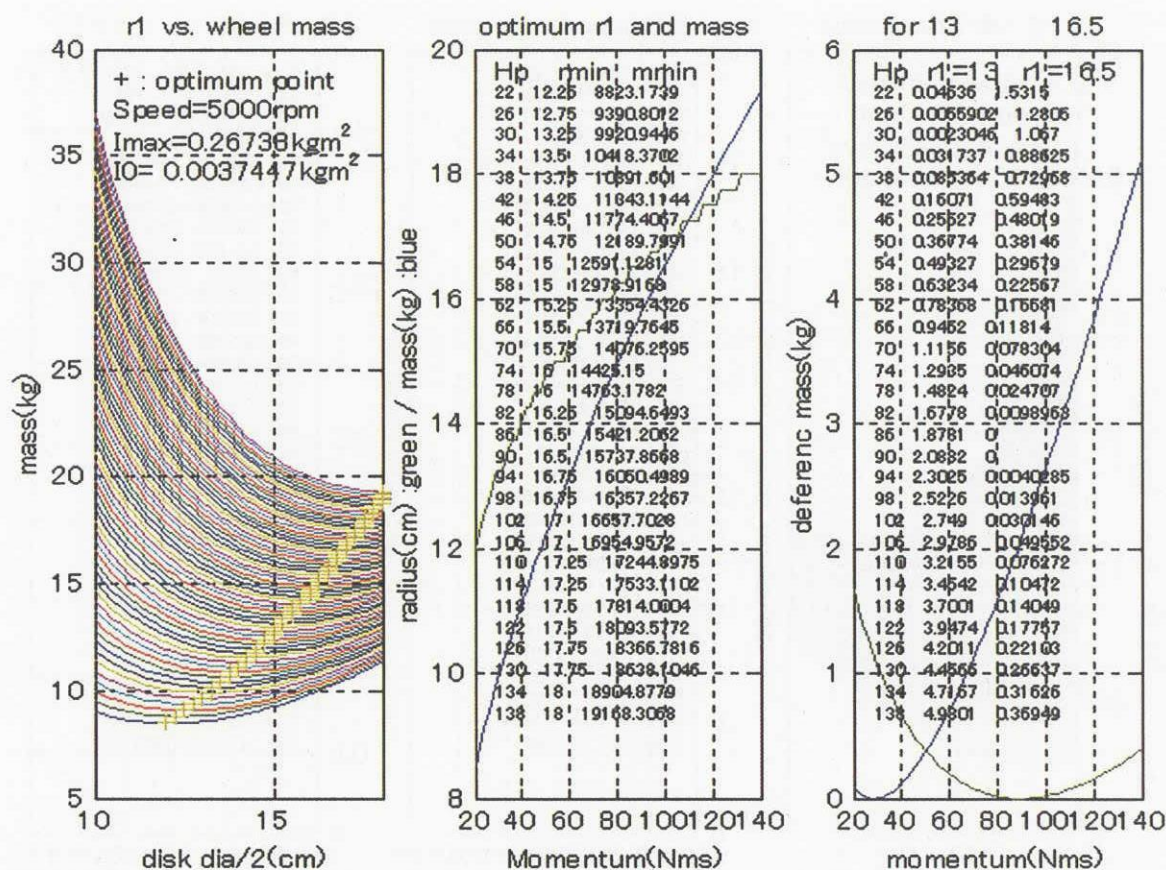


図 5-5 モデル 2 5000rpm

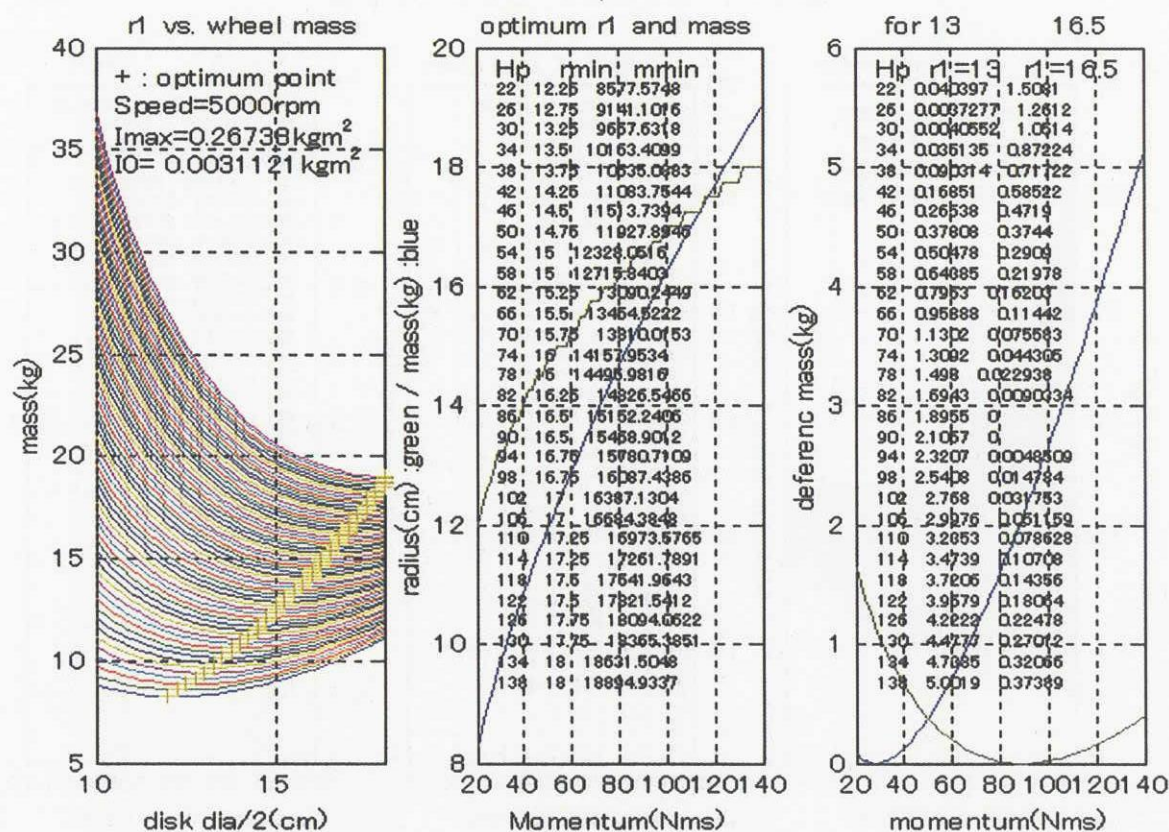


図 5-6 モデル 3 5000rpm

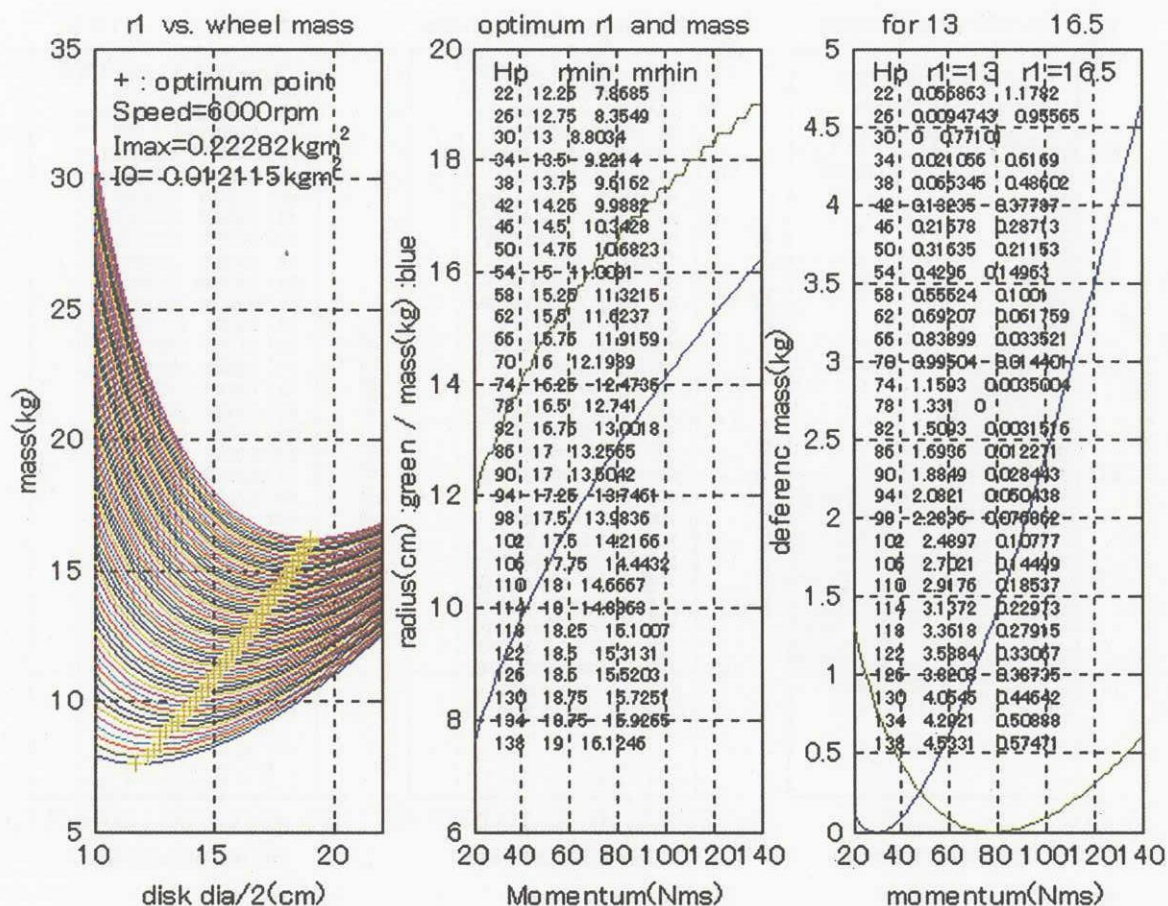


図5-7 モデル1a 6000rpm

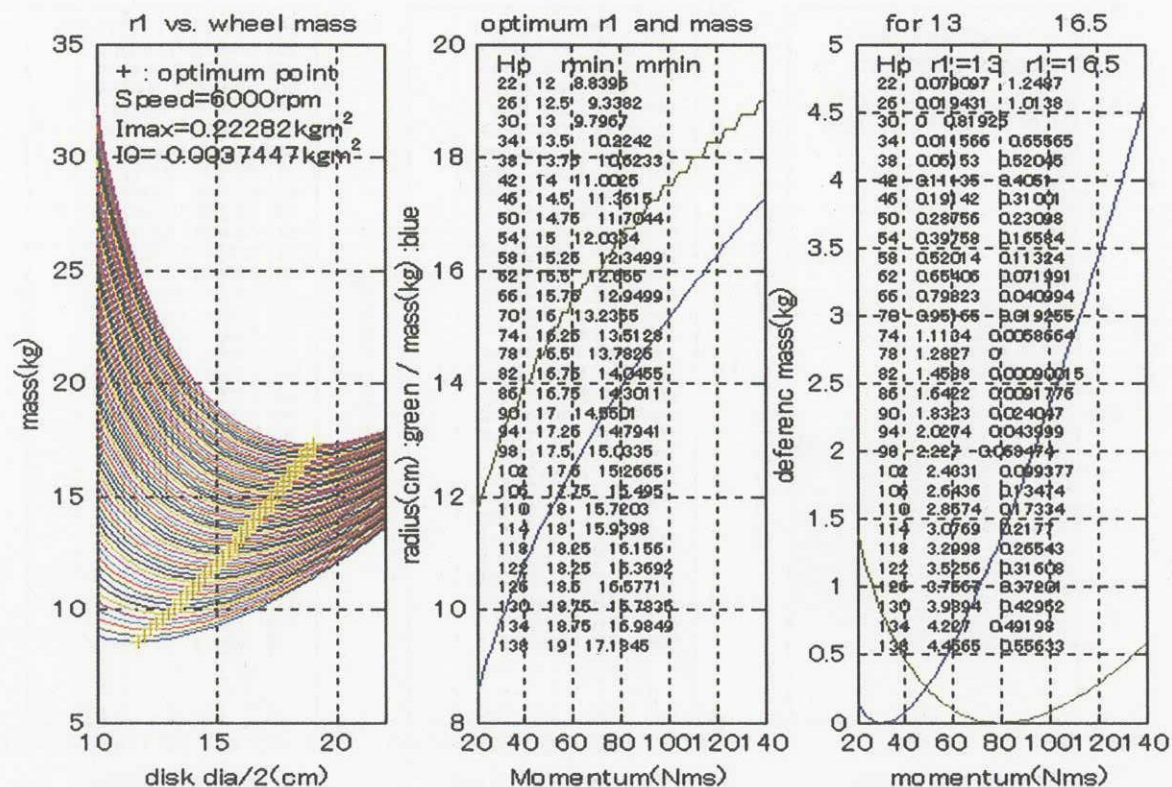


図5-8 モデル2a 6000rpm

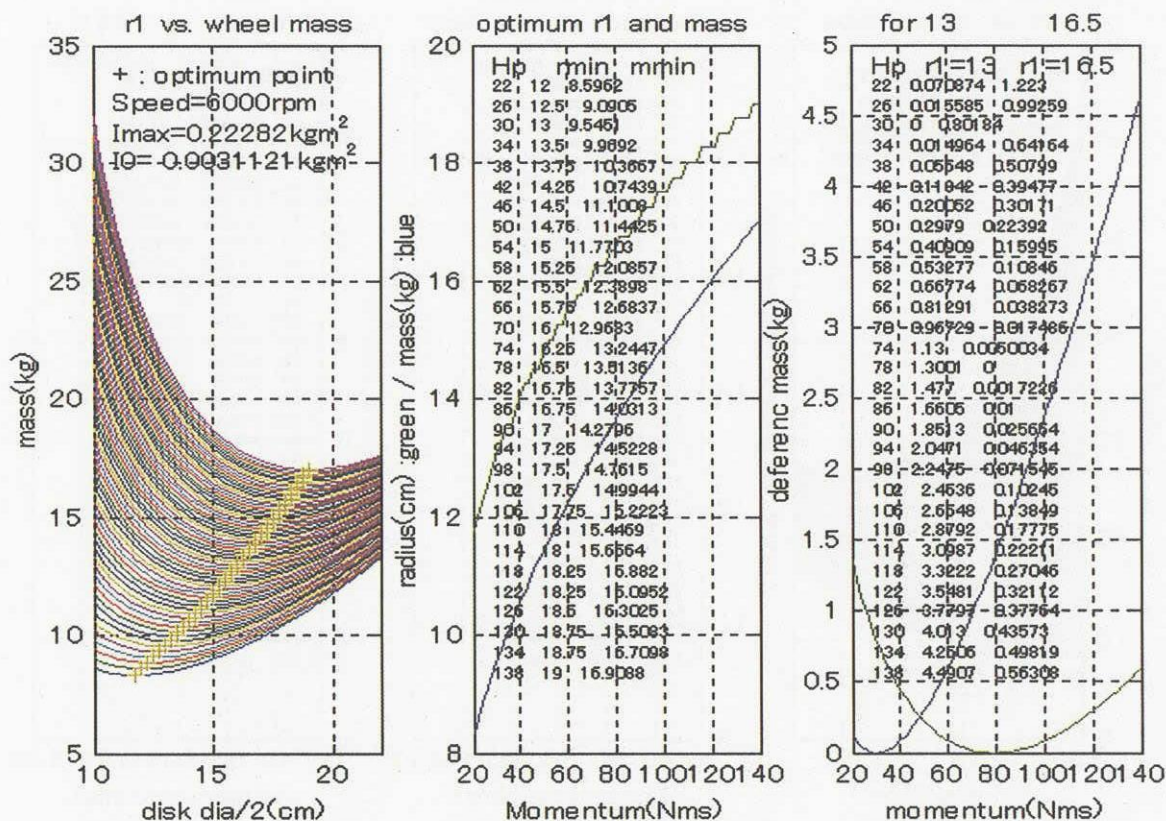


図5-9 モデル3a 6000rpm

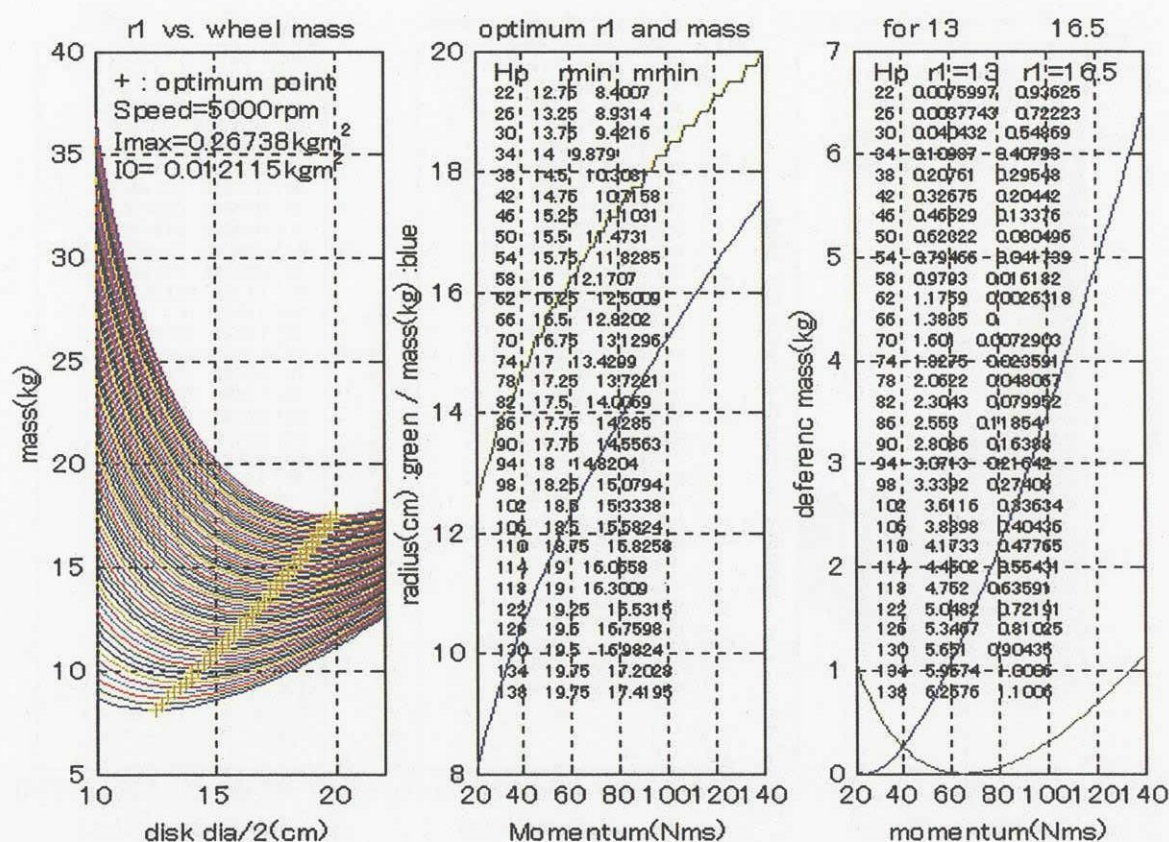


図5-10 モデル1a 5000rpm

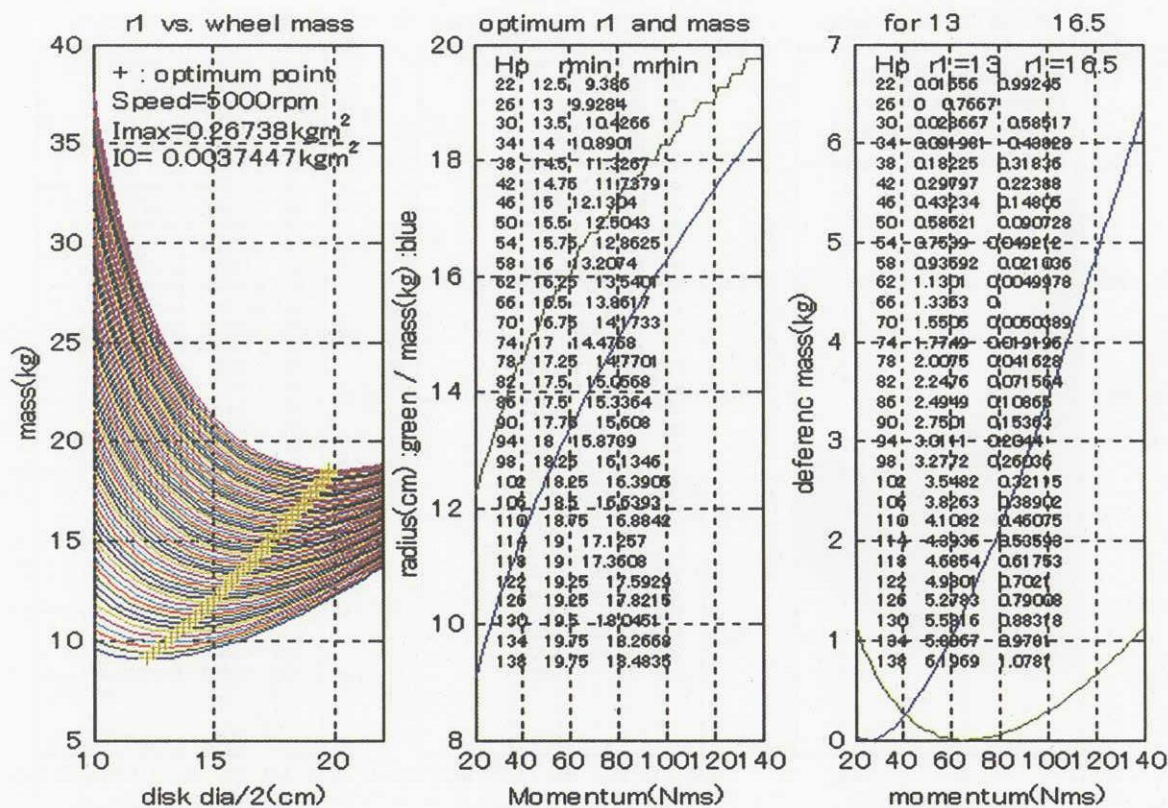


図5-11 モデル2a 5000rpm

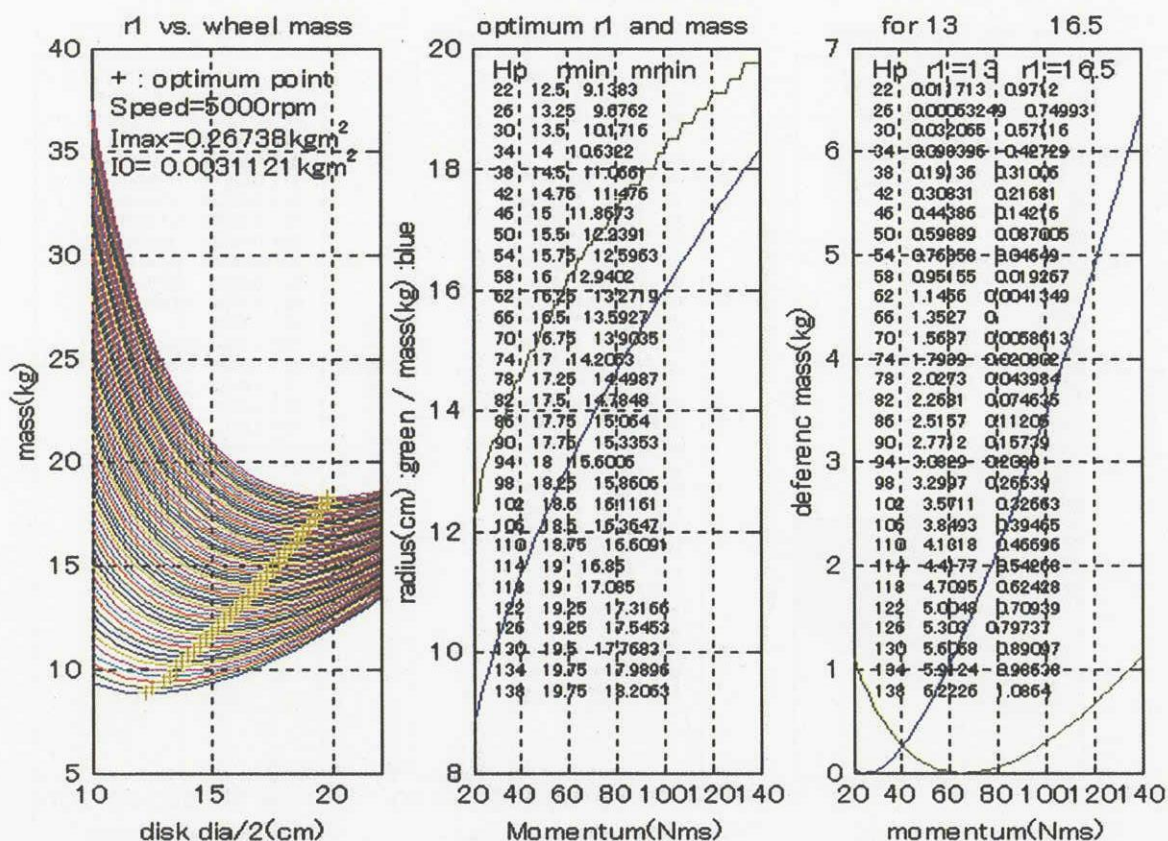


図5-12 モデル3a 5000rpm

6. まとめ

高トルク低擾乱ホイールとして開発されたホイール（ロータ半径16.5cm）は回転数を6000rpmとすると、50Nms以上で最適化されたホイールとして系列化出来ることが分かった。従って、もっとも需要の大きいと考えられる20Nms～50Nmsに関しては新たにロータ半径を設定した方が、総合的に国際競争力のあるホイールになることが分かった。

また角運動量範囲20Nms～50Nmsではロータ半径13cmが最適であることが分かった。

図6-1に13cmと16.5cmロータホイールの系列の概念を示す。表6-1に質量に着目したホイールの性能比較を示す。表に示すように、モデル2、3及びハウジング質量がロータ半径の2乗に比例するモデルで、従来ホイールのモータ配置の場合、H社のホイール等に比較して1.5～2kg程度質量が重くなる傾向にあるが、ハウジングの軽量化、ロータの軽量化（モデル1ではH社と同等の性能を実現できる）、駆動電子回路の軽量化、一体化が出来れば、国際的にも競争力のあるホイールの系列を確立できると考えられる。

以上

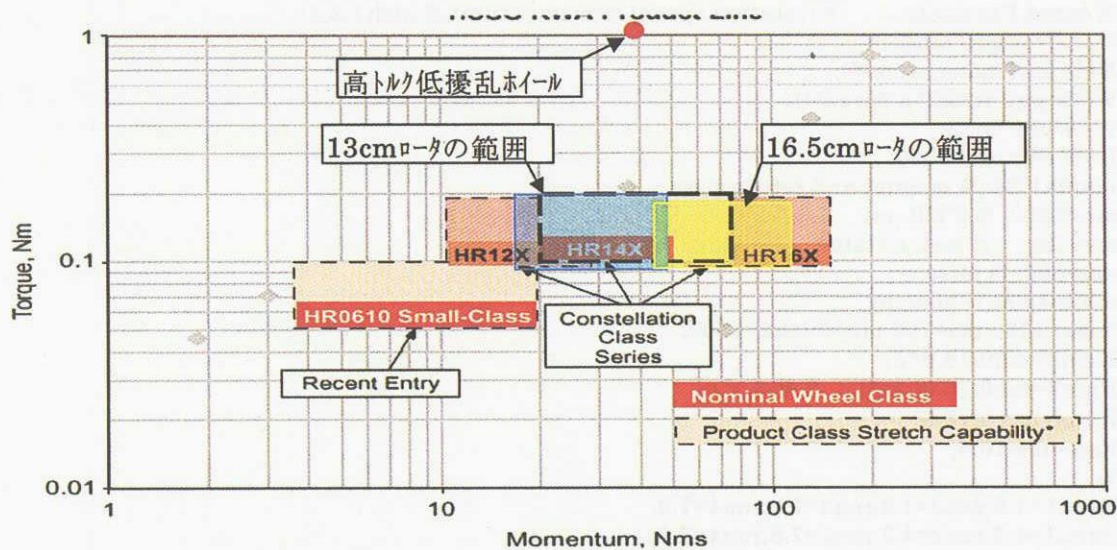


図6-1 13cmロータと Constellation シリーズの比較

表6-1 ロータ半径13cmホイール各案と諸外国のホイールの比較

| ホイール案 諸元 | モデル3a 16.5cmロータ | モデル1 13cmロータ | モデル2a 13cmロータ | モデル3a 13cmロータ | I社 Type-E | H社 HR-14 |
|-------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 特徴 | 駆動電子回路は1kgとして一体化 | | | | ALOSで採用 | H社 constellation series |
| 角運動量 | 50 ~ 140Nms | 20～50Nms | 20～50Nms | 20～50Nms | 20～50Nms | 25,50,75Nms |
| 最大制御トルク | 0.2 Nm | 0.2 Nm | 0.2Nm | 0.2Nm | 0.3Nm | 0.1(up to 0.2) |
| 最大回転速度 | 6000rpm | 6000rpm | 6000rpm | 6000rpm | 3850rpm | 6000rpm |
| 制御回路 | 一体化 | 一体化 | 一体化 | 一体化 | 分離型 | 一体化(分離) |
| 質量(制御回路含む) | 12.6 kg (50Nms) 14.7 kg (80Nms) | 8.2 kg (20Nm) 12.5 kg (60Nm) | 9.9k (20Nm) 13.0 kg (50Nm) | 9.5 kg (20Nm) 12.6(50Nm) | 10.6 kg + 3 kg | 8～11 kg (7～10 kg) |
| ランダム環境条件 | | 0.2 ~ 0.4g ² /Hz | 0.2 ~ 0.4g ² /Hz | 0.2 ~ 0.4g ² /Hz | 0.2 ~ 0.4g ² /Hz | 0.2 ~ 0.4g ² /Hz |
| 擾乱 | 0.05～0.2gcm、 0.5～g cm ² | | | | 0.716gcm 30 g cm ² | 0.14 g cm 1.4 g cm ² |
| 課題 | ①ロータ、ハウジング等の小型軽量化 ②WDE一体化と軽量化 | | | | | |

付録 Matlab プログラム

```
(1) massa.m
角運動量 H, 回転数 W, モデルを指定して、ロータ半径 r1 とホイール質量 mt の関係を計算する。
figure(1) にハウジング質量が r1 の 3 乗のモデルを figure(2) に 2 乗のモデルの結果を出力。
% Rotor Mass Property
% massa.m
% mass property computation program
% model 1,1a,2,2a,3,3a
% S.Ichikawa,2001/12/29
% (1)Disk1 mass m1=pi*(r1^2-r2^2)*h1*rou1;
% MOI I1=m1*(r1^2+r2^2)/2;
% (2)Disk2 mass m2=pi*(r2^2-r3^3)*h2*rou2;
% MOI I2=m2*(r2^2+r3^3)/2;
% (3)Shaft1 mass m3=pi*(r3^2-r4^3)*h3*rou3;
% MOI I3=m3*(r3^2+r4^3)/2;
% (4)Shaft2 mass m4=pi*r4^2*h4*rou4;
% MOI I4=m4*r4^2/2;
% (5)Total mass mt=m1+m2+m3+m4;
% MOI It=I1+I2+I3+I4;
% fixed parameter
% input Paramete W(rotation speed),H(momentum),Model(1,2,3)
Model=input('model=');
H=input('momentum=');
Wi=input('rotation speed=');
W=Wi/60*pi*2;
It=H./W*10000000;
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB ,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2;% 2 乗モデル
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=7.9;rou2=7.9;rou3=7.9;rou4=7.9;
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% model 1
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;% model 1
%for r1=17.5:1:19.5
r1s=10;
r1p=[r1s:.5:18];
for mode=1:2;
for r1=r1s:.5:18
r2=r1-2;% rotor width is 2 cm
if Model==1
rm=r1;d=0;hm=4;roum=rou1;% Model1 motor rotor parameter
elseif Model==2
rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8;% Model2 motor rotor parameter
else
rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3;% Modell2a motor rotor parameter
end
% mass property computation
if mode==1
Kmh=Kmh3;massw;% 3 乗モデル
else
Kmh=Kmh2;massw2;% 2 乗モデル
end
% save
if r1==r1s
I0=I2+I3+I4+mm*r1*r1;
mtt=mt;Itt=It;h1s=h1;mrr=mr;m1r=mt-mr;
else
mtt=[mtt,mt];Itt=[Itt,It];h1s=[h1s,h1];mrr=[mrr,mr];m1r=[m1r,mt-mr];
```



```

end
end;
figure(mode);
subplot(121);plot(r1p,[mtt/1000,mrr/1000,m1r/1000]);grid;title(['r1 vs. rotor mass,mode='
num2str(mode)])
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass(k g)')
ax=axis;
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*1,['W=' num2str(W*60/2/pi) 'rpm,H=' num2str(H) 'Nms']);
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*2,'blue:total');
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*3,'Green:rotor');
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*4,'red:housing mass');
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*5,['Imax' num2str(It/10000000) 'k g ^2 ']);
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*6,['Inertia0=' num2str(I0/10000000) 'k g m^2']);
subplot(122);plot(r1p,h1s);
grid;title(['r1 vs. rotor hight,Model=' num2str(Model)])
xlabel('disk dia(cm)');ylabel('hight(cm)')
ax=axis;
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
[nn mmm]=size(r1p);
text(ax(1)+1,ax(4)-stp,['r1(cm) mass(k g) h1(cm)']);
for j=1:nn
text(ax(1)+1,ax(4)-stp*(j+1),num2str([r1p(j),mtt(j)/1000,h1s(j)]));
end
end
figure(1);

```

(2) massr.m

角運動量Hを指定して、ロータ半径r1が12.5cm～17.5cmでのホイール質量mtと角運動量の関係を計算する。
figure(1)にハウジング質量がr1の3乗のモデルをfigure(2)に2乗のモデルの結果を出力。

```

% Rotor Mass Property
% massr.m
% for rotor dia=12.5....17.5 cm
% S.Ichikawa, 2001/12/29
% (1)Disk1 mass m1=pi*(r1^2-r2^2)*h1*rou1;
% MOI I1=m1*(r1^2+r2^2)/2;
% (2)Disk2 mass m2=pi*(r2^2-r3^2)*h2*rou2;
% MOI I2=m2*(r2^2+r3^2)/2;
% (3)Shaft1 mass m3=pi*(r3^2-r4^2)*h3*rou3;
% MOI I3=m3*(r3^2+r4^2)/2;
% (4)Shaft2 mass m4=pi*r4^2*h4*rou4;
% MOI I4=m4*r4^2/2;
% (5)Total mass mt=m1+m2+m3+m4;
% MOI It=I1+I2+I3+I4;
% input parameter H(momentum)
%H=40 ;% fig.2-1
H=input('momentum=');
Molel=input('model=');
W=(2500:500:6000);
W=W/60*pi*2;
It=H./W*10000000;
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000; % PWB ,etc
ms=750; % motor stator
m0=500; % misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2; % 2 乗モデル
%Kmh=4000/16.6^2;
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=7.8;rou2=7.8;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;
%for r1=17.5:1:19.5

```

```

r1p=(12.5:1:17.5);
for mode=1:2
for r1=12.5:1:17.5
    r2=r1-2; % rotor width is 2 cm
    if Model==1
        rm=r1;d=0;hm=4;roum=rou1; % Model1 motor rotor parameter
    elseif Model==2
        rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8; % Model2 motor rotor parameter
    else
        rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3; % Model2a motor rotor parameter
    end
% mass property computation
    if mode==1
        Kmh=Kmh3;massw; % 3 乗モデル
    else
        Kmh=Kmh2;massw2; % 2 乗モデル
    end
% save
    if r1==12.5
        mtt=mt';Itt=It';h1s=h1;
    else
        mtt=[mtt;mt'];Itt=[Itt;It'];h1s=[h1s;h1];
    end
end;
figure(mode);
% plot
%plot(W*60/2/pi,[mt/1000;h1]);grid;title(' roter mass property trade off/ rotation speed vs. rotor mass')
subplot(121);plot(W*60/2/pi,[mtt/1000]);grid;title(' roter mass property trade off/ rotation speed vs. rotor mass')
xlabel('rotation speed(rpm)');ylabel('mass(k g)');
legend(num2str(r1p),0);
ax=axis;ax(1)=2500;ax(2)=6000;AXIS(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1)+10,ax(4)-stp,['H=' num2str(H) ',model=' num2str(Model),',mode=' num2str(mode)']);
text(ax(1)+10,ax(4)-stp*2, 'LEGEND(r1:cm)');
subplot(122);plot(W*60/2/pi,[Itt/1000000]);
grid;title(' roter mass property trade off/ rotation speed vs. rotor MOI')
xlabel('rotation speed(rpm)');ylabel('MOI(k g m^2)')
ax=axis;ax(1)=2500;ax(2)=6000;AXIS(ax);
end;
figure(1);

```

(3) masspro.m

角運動量 H の範囲と回転数 W を指定して、ロータ半径 r1 とホイール質量 mt の関係を計算する。磁石の半径とロータ半径が同じとする。

モデル 1, 2, 3 に対応。

```

% Wheel Mass Property
% masspro.m
% wheel mass property comutation program
% S.Ichikawa,2003/4/04
% input Paramete flg(numerical output flag)=1(mass),2(mass and mean)
% fixed parameter
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000; % PWB ,etc
ms=750; % motor stator
m0=500; % misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh=mh0/16.6^3;
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4; % (2) model
% model data input

```



```

flg=input('output mode(1:save,2:save 2');
Model=input(' Model( 1=1,2=2,3=3 ) =');
if Model==1
    rm=(r1+r2)/2;d=0;hm=4;roum=rou1; % Model1 motor rotor parameter
elseif Model==2
    rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8; % Model2 motor rotor parameter
else
    rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3; % Modell2a motor rotor parameter
end
%for r1=17.5:1:19.5
r1s=10;r1e=20;
r1p=[r1s:5:r1e];
% momentum and rotating speed input
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');
Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
Hp=(Hi:10:Hf);
strHp=num2str(Hp);
[nn mm]=size(Hp);
Wi=input(' Rotating speed(rpm)=');
W=Wi/60*pi*2;
for H=Hi:10:Hf
    It=H./W*10000000;
    for r1=r1s:5:r1e
        % mass property computation
        massw
        if r1==r1s
            I0=I2+I3+I4+mm*(rm*rm+d*d)+mmx*rm*rm;
            mtt=mt;Itt=It;h1s=h1;mrr=mr;mlr=mt-mr;
        else
            mtt=[mtt,mt];Itt=[Itt,It];h1s=[h1s,h1];mrr=[mrr,mr];mlr=[mlr,mt-mr];
        end
    end
end;
if H==Hi
    Mtt=mtt;Ittt=Itt;Mrr=mrr;Mlr=mlr;H1s=h1s;
else
    Mtt=[Mtt,mtt];Ittt=[Ittt,Itt];Mrr=[Mrr,mrr];Mlr=[Mlr,mlr];H1s=[H1s,h1s];
end
end
% Mean mass
Mmean=sum(Mtt)/nn;
% plot
figure(1);
subplot(141);plot(r1p,[Mtt Mmean]/1000);grid;title(' r1 vs. wheel mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass( k g )')
HH=[strHp;'mn'];
legend(HH);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*9,['nm:mean (Nm)']);
text(ax(1),ax(4)-stp*10,['Speed=' num2str(Wi) 'rpm']);
text(ax(1),ax(4)-stp*11,['Imax=' num2str(It/10000000) 'k g m^2']);
text(ax(1),ax(4)-stp*12,['I0=' num2str(I0/10000000) 'k g m^2']);
% rotating mass
subplot(142);plot(r1p,[Mrr/1000]);grid;title(' r1 vs. rotor mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass( k g )')
legend(strHp);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*9,[' (Nm)']);
% housing mass
subplot(143);plot(r1p,[Mlr/1000]);grid;title(' r1 vs. housing mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass( k g )')
legend('housing');
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
% rotating mass weight
subplot(144);plot(r1p,H1s);
grid;title(' r1 vs. rotor hight')

```

```

xlabel('disk dia(cm)');ylabel('hight(cm)')
legend(strHp);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*9,['          (Nm)']);
%
if flg==1
    [r1p,[Mtt]/1000]
    figure(2);
    [nn mmm]=size(r1p);
    plot([0 80],[0 0],'.',[0 0],[0 30],'.');axis off;
    text(-5,30,['r1          ' num2str(Hp) ],'FontSize',7);
    for j=1:nn
        text(-5,30-j, num2str([r1p(j),Mtt(j,:)/1000]),'FontSize',7);
    end
elseif flg==2
    [r1p,[Mtt Mmean]/1000]
    figure(2);
    [nn mmm]=size(r1p);
    plot([0 80],[0 0],'.',[0 0],[0 30],'.');axis off;
    text(-5,30,['r1          ' num2str(Hp) '   meam'],'FontSize',7);
    for j=1:nn
        text(-5,30-j, num2str([r1p(j),Mtt(j,:)/1000,Mmean(j)/1000]),'FontSize',7);
    end
end
end

```

- (4) masspro2.m
角運動量 H の範囲と回転数 W を指定して、ロータ半径 r1 とホイール質量 mt の関係を計算する。磁石の半径とロータ半径が同じとする。

モデル 1 a, 2 a, 3 a に対応。

```

%   Wheel Mass Property
%
%               masspro2.m
%               wheel mass property comutation program
%               S.Ichikawa ,2003/4/04
% input Paramete   flg(numerical output flag)=1(mass),2(mass and mean)
% fixed parameter
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB ,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh=mh0/16.6^2;%   2 乗モデル
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;          % (2) model
% model data input
flg=input('output 1(mass),2(mass and mean)=');
Model=input(' Model( 1a=1,2a=2,3a=3 ) =');
if Model==1
    rm=(r1+r2)/2;d=0;hm=4;roum=rou1;%   Modell1 motor rotor parameter
elseif Model==2
    rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8;%   Model2 motor rotor parameter
else
    rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3;%   Modell2a motor rotor parameter
end
%for r1=17.5:1:19.5
r1s=10;r1e=20;
r1p=[r1s:.5:r1e];
% momentum and rotating speed input
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');
Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
Hp=(Hi:10:Hf);

```



```

strHp=num2str(Hp);
[nn mm]=size(Hp);
Wi=input(' Rotating speed(rpm)=');
W=Wi/60*pi*2;
for H=Hi:10:Hf
It=H./W*1000000;
for r1=r1s:5:r1e
% mass property computation
massw2; % 2 乗モデル
if r1==r1s
I0=I2+I3+I4+mm*(rm*rm+d*d)+mmx*rm*rm;
mtt=mt;Itt=It;h1s=h1;mrr=mr;m1r=mt-mr;
else
mtt=[mtt,mt];Itt=[Itt,It];h1s=[h1s,h1];mrr=[mrr,mr];m1r=[m1r,mt-mr];
end
end;
if H==Hi
Mtt=mtt;Ittt=Itt;Mrr=mrr;M1r=m1r;H1s=h1s;
else
Mtt=[Mtt,mtt];Ittt=[Ittt,Itt];Mrr=[Mrr,mrr];M1r=[M1r,m1r];H1s=[H1s,h1s];
end
end
% Mean mass
Mmean=sum(Mtt)/nn;
% plot
figure(1);
subplot(141);plot(r1p,[Mtt Mmean]/1000);grid;title(' r1 vs. wheel mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass(k g)')
HH=[strHp;'mn'];
legend(HH);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*9,['nm:mean (Nm)']);
text(ax(1),ax(4)-stp*10,['Speed=' num2str(Wi) 'rpm']);
text(ax(1),ax(4)-stp*11,['Imax=' num2str(It/1000000) 'k g m^2']);
text(ax(1),ax(4)-stp*12,['I0=' num2str(I0/1000000) 'k g m^2']);
% rotating mass
subplot(142);plot(r1p,[Mrr/1000]);grid;title(' r1 vs. rotor mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass(k g)')
legend(strHp);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*9,[' (Nm)']);
% housing mass
subplot(143);plot(r1p,[M1r/1000]);grid;title(' r1 vs. housing mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass(k g)')
legend('housing');
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
% rotating mass weight
subplot(144);plot(r1p,H1s);
grid;title(' r1 vs. rotor hight')
xlabel('disk dia(cm)');ylabel('hight(cm)')
legend(strHp);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*9,[' (Nm)']);
%
if flg==1
[r1p,[Mtt]/1000]
figure(2);
[nn mmm]=size(r1p);
plot([0 80],[0 0],'.',[0 0],[0 30],'.');axis off;
text(-5,30,['r1 ' num2str(Hp) ],'FontSize',7);
for j=1:nn
text(-5,30-j, num2str([r1p(j),Mtt(j,)/1000]),'FontSize',7);
end
elseif flg==2

```

```

[r1p,[Mtt Mmean]/1000]
figure(2);
[nn mmm]=size(r1p);
plot([0 80],[0 0],',',[0 0],[0 30],',');axis off;
text(-5,30,['r1' num2str(Hp)' ' meam'],'FontSize',7);
for j=1:nn
    text(-5,30-j, num2str([r1p(j),Mtt(j,:)/1000,Mmean(j)/1000]),'FontSize',7);
end
end
(5) roptk.m
角運動量 H の範囲と回転数 W を指定して、Kdx を 0.6～1 に対応する最適なロータ半径 r1min を計算する。
モデル 1, 2, 3 a に対応。
% Wheel Mass Property
% roptk.m
% Optimum rotor radius
% S.Ichikawa ,2003/4/13
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB ,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2;
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4; % (2) model
% momentum and rotating speed input
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');
Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
Hp=(Hi:10:Hf);
strHp=num2str(Hp);
[nn mm]=size(Hp);
Wi=input(' Rotating speed(rpm)=');
W=Wi/60*pi*2;
H=(Hi:1:Hf);
It=H./W*10000000;
% Optimized rotor radius
Kdx=0.8;
for Kdx=0.6:.05:1
    m2=pi*(r2^2-r3^2)*h2*rou2;
    I2=m2*(r2^2+r3^2)/2;
    m3=pi*(r3^2-r4^2)*h3*rou3;
    I3=m3*(r3^2+r4^2)/2;
    m4=pi*r4^2*h4*rou4;
    I4=m4*r4^2/2;
% rotating mass proroperty
r13=4*Kdx*(It-I2-I3-I4)/3/Kmh3;% 3 乗モデル
r13=r13.^0.2;
r12=2*Kdx*(It-I2-I3-I4)/Kmh2;% 2 乗モデル
r12=r12.^0.25;
if Kdx==0.6
    r13s=r13';r12s=r12';
else
    r13s=[r13s,r13'];r12s=[r12s,r12'];
end
end
Kdxp=(0.6:.05:1);
subplot(121);plot(H,r13s);grid;
xlabel('momentum(Nm)');ylabel('rotor radius(cm) for r1^3 model');
title([' Optimum rotor raduis for Kdx,at ' num2str(Wi) 'rpm'])
legend(num2str(Kdxp),0);

```



```

subplot(122);plot(H,r12s);grid;
xlabel('momentum(Nm)');ylabel('rotor radius(cm) for r1^2 model');
title([' Optimum rotor raduis for Kdx,at ' num2str(Wi) 'rpm'])
legend(num2str(Kdxp),0);
(6) roptw.m
角運動量 H の範囲、回転数 W、Kdx を指定して、角運動量 H にたいする最適なロータ半径 r1min を計算する。
モデル 1, 2, 3 a に対応。
Wheel Mass Property
%
% roptW.m
% Optimum rotor radius
% S.Ichikawa ,2003/4/13
% fixed parameter
col=['blue'; 'green'; 'red'; 'sky'; 'vio'; 'Y.G.'; 'black'];
%
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB ,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2;
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;% (2) model
% momentum and rotating speed input
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');
Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
H=(Hi:1:Hf);
Kdx=0.75;
Kdx=input('Kdx=');
for Wi=3000:500:6000
W=Wi/60*pi^2;
It=H./W*1000000;
% Optimized rotor radius
m2=pi*(r2^2-r3^2)*h2*rou2;
I2=m2*(r2^2+r3^2)/2;
m3=pi*(r3^2-r4^2)*h3*rou3;
I3=m3*(r3^2+r4^2)/2;
m4=pi*r4^2*h4*rou4;
I4=m4*r4^2/2;
% rotating mass prroperty
r13=4*Kdx*(It-I2-I3-I4)/3/Kmh3;% 3 乗モデル
r13=r13.^0.2;
r12=2*Kdx*(It-I2-I3-I4)/Kmh2;% 2 乗モデル
r12=r12.^0.25;
if Wi==3000
r13s=r13';r12s=r12';
else
r13s=[r13s,r13'];r12s=[r12s,r12'];
end
end
Wip=(3000:500:6000);
subplot(121);plot(H,r13s);grid;
xlabel('momentum(Nm)');ylabel('rotor radius(cm) for r1^3 model');
title([' Optimum rotor raduis for Speed, Kdx= ' num2str(Kdx)])
legend(num2str(Wip),0);
subplot(122);plot(H,r12s);grid;
xlabel('momentum(Nm)');ylabel('rotor radius(cm) for r1^2 model');
title([' Optimum rotor raduis for Speed, Kdx= ' num2str(Kdx)])
legend(num2str(Wip),0);
(7) roptimizes.m

```

角運動量 H の範囲、回転数 W を指定して、角運動量 H にたいする最適なロータ半径 $r1$ 、最適ホイール質量を計算する。また、ロータ半径の範囲を指定して、最適値からの質量の差を計算する。

モデル 1, 2, 3, 1 a, 2 b, 3 c に対応。

```
% Wheel Mass Property
% Roptimizes.m
% r1^3 model wheel mass property comutation program
% S.Ichikawa,2003/4/04
% (1)Disk1 mass m1=pi*(r1^2-r2^2)*h1*rou1;
% MOI I1=m1*(r1^2+r2^2)/2;
% (2)Disk2 mass m2=pi*(r2^2-r3^2)*h2*rou2;
% MOI I2=m2*(r2^2+r3^2)/2;
% (3)Shaft1 mass m3=pi*(r3^2-r4^2)*h3*rou3;
% MOI I3=m3*(r3^2+r4^2)/2;
% (4)Shaft2 mass m4=pi*r4^2*h4*rou4;
% MOI I4=m4*r4^2/2;
% (5)motor mass mm=pi*rm*d*hm*roum;
% MOI Im=mm*(rm^2+d^2);
% (6)Total mass mt=m1+m2+m3+m4+mm;
% MOI It=I1+I2+I3+I4+Im;
% fixed parameter
% input Paramete flg(numerical output flag)=1(mass),2(mass and mean)
%
moder1=['r1^3','r1^2'];
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB ,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2;% 2 乗モデル
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model1
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;
% (2) model
Model=input(' model=');
% momentum and rotating speed input
Ntask=input(' task name=');
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');
Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
%
Wi=input(' Rotating speed(rpm)=');
W=Wi/60*pi*2;
% input rotor radius
rli=input(' Intitial R1=');
rlf=input(' finalal R1=');
% computation start
Hp=(Hi:2:Hf);
[nn mm]=size(Hp);
strHp=num2str(Hp);
% -----
% mode
for mode=1:2
% model data input
%for Model=1:3
if Model==1
rm=r1;d=0;hm=4;roum=rou1;% Model1 motor rotor parameter
elseif Model==2
rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8;% Model2 motor rotor parameter
else
rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3;% Modell2a motor rotor parameter
end
```



```

%
for H=Hi:2:Hf
It=H./W*10000000;
%
r1p=[rli:.1:r1f+4]';
%dr1=r1f-rli;
for r1=rli:.1:r1f+4
%   mass property computation
    if mode==1
        Kmh=Kmh3;massw ; %   3 乗モデル
    else
        Kmh=Kmh2;massw2; %   2 乗モデル
    end
    if r1==rli
        I0=I2+I3+I4+mm*(rm*rm+d*d)+mmx*rm*rm;
        mtt=mt;Itt=It';h1s=h1;mrr=mr;m1r=mt-mr;
    else
        mtt=[mtt;mt];Itt=[Itt,It'];h1s=[h1s,h1];mrr=[mrr,mr];m1r=[m1r;mt-mr];
    end
end;
if H==Hi
    Mtt=mtt;Itt=Itt;Mrr=mrr;M1r=m1r;H1s=h1s;
else
    Mtt=[Mtt,mtt];Itt=[Itt,Itt];Mrr=[Mrr,mrr];M1r=[M1r,m1r];H1s=[H1s,h1s];
end
end
% Mean mass
Mmean=sum(Mtt)/nn;
% optimum radius
[mm mmm]=size(Mtt);
for j=1:mmm
    [mmin(j),ix]=min(Mtt(:,j));
    rmin(j)=r1p(ix);
end
% deference from optimum
It=Hp/W*10000000;
%for r1= rli:dr1:r1f
r1pp=(rli:0.5:r1f)';
for r1= rli:0.5:r1f
%   mass pro.
    if mode==1
        Kmh=Kmh3;massw ; %   3 乗モデル
    else
        Kmh=Kmh2;massw2; %   2 乗モデル
    end
    if r1==rli
        mttx=(mt-mmin');mts=mt;
    else
        mttx=[mttx,(mt-mmin')];mts=[mts,mt];
    end
end;
% mean
[nn mm]=size(mttx);
dmean=sum(mttx)/nn;
mmean=sum(mts)/nn;
% plot
figure(mode);
% optimum r1 and minimum mass
subplot(121);plot(Hp,rmin,Hp,[mmin' mts]/1000);grid;title('optimum r1 and mass')
xlabel('Momentum(Nms)');ylabel('radius(cm) :green / mass( k g ) :blue')
b=['rmin';'mmin';num2str(r1pp)];
legend(b,4);
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp,' Hp   rmin   mmin');
for j=1:mmm/2
    text(ax(1)+1,ax(4)-stp*(j+1),[num2str(Hp(j*2-1)),
        ' ,          num2str(rmin(j*2-1)),

```

```

',num2str(mmin(j*2-1)/1000)],'FontSize',6);
end
% rotating mass weight
subplot(122);plot(Hp,mttx/1000);
grid;title(['for ' num2str(rli) ' rlf']);
xlabel('momentum(Nms)');ylabel('deferenc mass(k g)')
legend(num2str(r1pp));
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp,[' Hp r1=' num2str(rli) ' r1=' num2str(rlf)]);
for j=1:mmm/2
    text(ax(1)+10,ax(4)-stp*(j+1),[num2str(Hp(j*2-1)) ' ' num2str(mtx(j*2-1,1:4)/1000)],'FontSize',6);
end
if flgp==1
    wk=[Hp mmin'/1000 mts/1000 mtttx/1000]
    eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'ma.txt wk -ASCII']);
    wk=[rmin' mmin'/1000]
    eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'rm.txt wk -ASCII']);
    wk=[dmean/1000 mmean/1000]
    eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'dm.txt wk -ASCII']);
end;
%end;% model
end;% mode

```

(8) roptimize.m

角運動量 H の範囲、回転数 W を指定して、角運動量 H にたいする最適なロータ半径 r1min、最適ホイール質量を数値的に計算する。また、指定したロータ半径（2 個）を固定した場合、最適値からの質量の差を計算する。

モデル 1, 2, 3, 1 a, 2 a, 3 a に対応。

```

% Wheel Mass Property
% Roptimize.m
% r1^3 model wheel mass property comutation program
% S.Ichikawa,2003/4/04
% (1)Disk1 mass m1=pi*(r1^2-r2^2)*h1*rou1;
% MOI I1=m1*(r1^2+r2^2)/2;
% (2)Disk2 mass m2=pi*(r2^2-r3^2)*h2*rou2;
% MOI I2=m2*(r2^2+r3^2)/2;
% (3)Shaft1 mass m3=pi*(r3^2-r4^2)*h3*rou3;
% MOI I3=m3*(r3^2+r4^2)/2;
% (4)Shaft2 mass m4=pi*r4^2*h4*rou4;
% MOI I4=m4*r4^2/2;
% (5)motor mass mm=pi*rm*d*hm*roum;
% MOI Im=mm*(rm^2+d^2)/2;
% (6)Total mass mt=m1+m2+m3+m4+mm;
% MOI It=I1+I2+I3+I4+Im;
% fixed parameter
% input Paramete flg(numerical output flag)=1(mass),2(mass and mean)
%
moder1=['r1^3';r1^2];
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2;% 2 乗モデル
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;% (2) model
% momentum and rotating speed input
Ntask=input(' task name=');
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');

```



```

Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
%
Wi=input(' Rotating speed(rpm)=');
W=Wi/60*pi*2;
% input rotor radius
rli=input(' Intitial R1=');
r1f=input(' finalal R1=');
% computation start
Hp=(Hi:2:Hf);
[nn mm]=size(Hp);
strHp=num2str(Hp);
% -----
% mode
for mode=1:2
% model data input
for Model=1:3
if Model==1
rm=r1;d=0;hm=4;roum=rou1; % Model1 motor rotor parameter
elseif Model==2
rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8; % Model2 motor rotor parameter
else
rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3; % Modell2a motor rotor parameter
end
%
for H=Hi:2:Hf
It=H./W*10000000;
%
r1s=10;r1e=18;
r1p=[r1s:.25:r1e];
drl=r1f-rli;
for r1=r1s:.25:r1e
% mass property computation
if mode==1
Kmh=Kmh3;massw; % 3 乗モデル
else
Kmh=Kmh2;massw2; % 2 乗モデル
end
if r1==r1s
I0=I2+I3+I4+mm*(rm*rm+d*d)+mmx*rm*rm;
mtt=mt;Itt=It';h1s=h1;mrr=mr;m1r=mt-mr;
else
mtt=[mtt,mt];Itt=[Itt,It'];h1s=[h1s,h1];mrr=[mrr,mr];m1r=[m1r,mt-mr];
end
end;
if H==Hi
Mtt=mtt;Ittt=Itt;Mrr=mrr;M1r=m1r;H1s=h1s;
else
Mtt=[Mtt,mtt];Ittt=[Ittt,Itt];Mrr=[Mrr,mrr];M1r=[M1r,m1r];H1s=[H1s,h1s];
end
end
% Mean mass
Mmean=sum(Mtt)/nn;
% optimum radius
[mm mmm]=size(Mtt);
for j=1:mmm
[mmin(j),ix]=min(Mtt(:,j));
rmin(j)=r1p(ix);
end
% deference from optimum
It=Hp/W*10000000;
for r1= r1i:drl:r1f
% mass pro.
if mode==1
Kmh=Kmh3;massw; % 3 乗モデル
else
Kmh=Kmh2;massw2; % 2 乗モデル
end

```

```

        if r1==r1i
            mttx=(mt-mmin');mts=mt;
        else
            mttx=[mttx,(mt-mmin')];mts=[mts,mt];
        end
    end;
% mean
[nn mm]=size(mttx);
dmean=sum(mttx)/nn;
mmean=sum(mts)/nn;
% plot
figure(3*(mode-1)+Model);
subplot(131);plot(r1p,[Mtt]/1000,rmin,mmin/1000,'+');grid;title(' r1 vs. wheel mass')
xlabel('disk dia/2(cm)');ylabel('mass(k g)')
%legend(strHp);
ax=axis;ax(1)=r1s;ax(2)=r1e;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/25;
text(ax(1),ax(4)-stp*1,[' + : optimum point']);
text(ax(1),ax(4)-stp*2,[' Speed=' num2str(Wi) 'rpm']);
text(ax(1),ax(4)-stp*3,[' Imax=' num2str(It(mmm)/10000000) 'k g m^2 I');
text(ax(1),ax(4)-stp*4,[' I0=' num2str(I0/10000000) 'k g m^2 I');
text(ax(1),ax(4)-stp*5,[' moder1(mode,:) ' ,model=' num2str(Model)']);
% optimum r1 and minimum mass
subplot(132);plot(Hp,[mmin' mts]/1000,Hp,rmin);grid;title('optimum r1 and mass')
xlabel('Momentum(Nms)');ylabel('radius(cm) :green / mass(k g) :blue')
legend('mmin',num2str(r1i),num2str(r1f),'rmin',4);
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp,' Hp rmin mmin');
for j=1:mmm/2
    text(ax(1)+10,ax(4)-stp*(j+1),[num2str(Hp(j*2-1)) ' num2str(rmin(j*2-1)),',
    'num2str(mmin(j*2-1)/1000)', ' num2str(mts(j*2-1,)/1000)],'FontSize',6);
end
% rotating mass weight
subplot(133);plot(Hp,mttx/1000);
grid;title(['for ' num2str([r1i r1f])]);
xlabel('momentum(Nms)');ylabel('deferenc mass(k g)')
%legend(strHp);
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp,[' Hp r1=' num2str(r1i) ' r1=' num2str(r1f)];
for j=1:mmm/2
    text(ax(1)+10,ax(4)-stp*(j+1),[num2str(Hp(j*2-1)) ' num2str(mttx(j*2-1,1)/1000)',
    'num2str(mttx(j*2,2)/1000)],'FontSize',6);
end
wk=[Hp mmin'/1000 mts/1000 mttx/1000]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'ma.txt wk -ASCII']);
wk=[rmin' mmin'/1000]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'rm.txt wk -ASCII']);
wk=[dmean/1000 mmean/1000]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'dm.txt wk -ASCII']);
end;% model
end;% mode
(9) roptimize0.m
角運動量 H の範囲、回転数 W を指定して、角運動量 H にたいする最適なロータ半径 r1min、最適ホイール質
量を数値的に計算する。また、ロータ半径を指定、各モデル (モデル 1, 2, 3, 1 a, 2 a, 3 a) の最適
値からの質量の差を計算する。各モデルで最適値からの隔たりを評価するのに使用。
% Wheel Mass Property
% roptimize0.m
% r1^3 model wheel mass property comutation program
% S.Ichikawa ,2003/4/04
% (1)Disk1 mass m1=pi*(r1^2-r2^2)*h1*rou1;
% MOI I1=m1*(r1^2+r2^2)/2;
% (2)Disk2 mass m2=pi*(r2^2-r3^2)*h2*rou2;
% MOI I2=m2*(r2^2+r3^2)/2;
% (3)Shaft1 mass m3=pi*(r3^2-r4^2)*h3*rou3;
% MOI I3=m3*(r3^2+r4^2)/2;

```



```

% (4)Shaft2 mass m4=pi*r4^2*h4*rou4;
% MOI I4=m4*r4^2/2;
% (5)motor mass mm=pi*rm*d*hm*roum;
% MOI Im=mm*(rm^2+d^2);
% (6)Total mass mt=m1+m2+m3+m4+mm;
% MOI It=I1+I2+I3+I4+Im;
% fixed parameter
% input Paramete flg(numerical output flag)=1(mass),2(mass and mean)
%
moder1=['r1^3';r1^2];
% original wheel mass property data
mm0=1700;% magnet and return pass
me=1000;% PWB ,etc
ms=750;% motor stator
m0=500;% misc
mh0=4000;% housing
%me=1000;ms=750;m0=0;mh0=4500;
Kmh3=mh0/16.6^3;
Kmh2=mh0/16.6^2;% 2 乗モデル
Kmm=mm0/16.6;
Kms=ms/16.6;
%
%rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=7.8;rou4=7.8;
rou1=4.3;rou2=4.3;rou3=4.3;rou4=7.8;% (2) model
r4=1.3;r3=2;r2=13.5;r1=16.5;
h4=11;h3=5;h2=.65;h1=4;% (2) model
% momentum and rotating speed input
Ntask=input(' task name=');
Hi=input(' Initial Momentum(Nms) =');
Hf=input(' Final Momentum(Nms) =');
%
Wi=input(' Rotating speed(rpm)=');
W=Wi/60*pi*2;
% input rotor radius
rli=input(' Intitial R1=');
% computation start
Hp=(Hi:2:Hf);
[nn mm]=size(Hp);
strHp=num2str(Hp);
% -----
flgs=1;
% mode
for mode=1:2
% model data input
for Model=1:3
if Model==1
rm=r1;d=0;hm=4;roum=rou1;% Modell1 motor rotor parameter
elseif Model==2
rm=4.5;d=1;hm=4;roum=7.8;% Model2 motor rotor parameter
else
rm=4.5;d=.8;hm=3;roum=4.3;% Modell2a motor rotor parameter
end
%
for H=Hi:2:Hf
It=H./W*10000000;
%
r1s=10;r1e=18;
r1p=[r1s:25:r1e];
for r1=r1s:25:r1e
% mass property computation
if mode==1
Kmh=Kmh3;massw;% 3 乗モデル
else
Kmh=Kmh2;massw2;% 2 乗モデル
end
if r1==r1s
I0=I2+I3+I4+mm*(rm*rm+d*d)+mmx*rm*rm;

```

```

        mtt=mt;Itt=It';hls=h1;mrr=mr;mlr=mt-mr;
    else
        mtt=[mtt;mt];Itt=[Itt,It'];hls=[hls,h1];mrr=[mrr;mr];mlr=[mlr;mt-mr];
    end
end;
if H==Hi
    Mtt=mtt;Ittt=Itt;Mrr=mrr;Mlr=mlr;Hls=hls;
else
    Mtt=[Mtt,mtt];Ittt=[Ittt,Itt];Mrr=[Mrr,mrr];Mlr=[Mlr,mlr];Hls=[Hls,hls];
end
end
% Mean mass
Mmean=sum(Mtt)/nn;
% optimum radius
[mm mmm]=size(Mtt);
for j=1:mmm
    [mmin(j),ix]=min(Mtt(:,j));
    rmin(j)=r1p(ix);
end
% deference from optimum
It=Hp/W*10000000;
% for r1
r1=r1i;
% mass pro.
if mode==1
    Kmh=Kmh3;massw ; % 3 乗モデル
else
    Kmh=Kmh2;massw2; % 2 乗モデル
end
if r1==r1i
    mttx=(mt-mmin');mts=mt;mpm=mt./Hp;
else
    mttx=[mttx,(mt-mmin')];mts=[mts,mt];mpm=[mpm,mt./Hp];
end
%end of r1 loop;
% mean
[nn mm]=size(mttx);
dmean=sum(mttx)/nn;
mmean=sum(mts)/nn;
mpmmean=sum(mpm)/nn;
if flgs==1
    dmeans=dmean;mmeans=mmean;mmins=mmin';mttxs=mttx;rmins=rmin';mtss=mts;
    mpms=mpm;mpmmeans=mpmmean;
    flgs=0;
else
    dmeans=[dmeans,dmean];mmeans=[mmeans,mmean];
    mmins=[mmins,mmin'];rmins=[rmins,rmin'];mtss=[mtss,mts];
    mttxs=[mttxs,mttx];mpms=[mpms,mpm];mpmmeans=[mpmmeans,mpmmean];
end
end;% model
end;% mode
% plot
figure(1);
subplot(131);plot(Hp,rmins);grid;title('optimum r1')
xlabel('Momentum(Nms)');ylabel('radius(cm)')
legend('mdl1','mdl2','mdl3','mdl1a','mdl2a','mdl3a',4);
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp*1,['task:' Ntask 'r1=' num2str(r1i) ]);
text(ax(1),ax(4)-stp*2,['W=' num2str(Wi) 'rpm']);
text(ax(1),ax(4)-stp*3,' Hp rmin1 rmin5');
if flgp==1
    for j=1:mmm/2
        text(ax(1)+10,ax(4)-stp*(j+3),[num2str(Hp(j*2-1)) ' num2str(rmins(j*2-1,1))
num2str(rmins(j*2-1,5))], 'FontSize',6);
    end
end
end

```



```

%
subplot(132);plot(Hp,[mmins mtss]/1000);grid;title(['optimum mass,for ' num2str(r1i)]);
xlabel('Momentum(Nms)');ylabel('radius(cm) :green / mass( k g ) :blue')
legend('m1mn','m2mn','m3mn','m1amn','m2amn','m3amn','m1r1','m2r1','m3r1','m1ar1','m2ar1','m3ar1',4);
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp,' Hp mmin1 mmin5');
if flgp==1
    for j=1:mmm/2
        text(ax(1)+10,ax(4)-stp*(j+1),[num2str(Hp(j*2-1)) num2str(mmins(j*2-1,1)),
        ',num2str(mmins(j*2-1,5)/1000)],'FontSize',6);
    end
end
%
subplot(133);plot(Hp,mttxs/1000,Hp,mpms/1000);
grid;title([' mass deference for ' num2str(r1i)]);
xlabel('momentum(Nms)');ylabel('deferenc mass( k g )')
legend('mdl1','mdl2','mdl3','mdl1a','mdl2a','mdl3a','m1m/H','m2m/H','m3m/H','m1am/H','m2am/H','m3am/H');
ax=axis;ax(1)=Hi;ax(2)=Hf;axis(ax);
stp=(ax(4)-ax(3))/35;
text(ax(1),ax(4)-stp,'');
text(ax(1),ax(4)-stp,' Hp dm1 dm5');
if flgp==1
    for j=1:mmm/2
        text(ax(1)+10,ax(4)-stp*(j+1),[num2str(Hp(j*2-1)) num2str(mttxs(j*2-1,1)/1000),
        ',num2str(mttxs(j*2,5)/1000)],'FontSize',6);
    end
end
% save data
wk=[Hp mmins/1000]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'mmin.txt wk -ASCII']);
wk=[Hp mtss/1000]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'mts.txt wk -ASCII']);
wk=[Hp mttxs/1000]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'mttx.txt wk -ASCII']);
wk=[Hp rmins]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'rmin.txt wk -ASCII']);
wk=[Hp mpms]
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'mpm.txt wk -ASCII']);
wk=[dmeans; mmeans; mpmmeans]/1000
eval(['save ' Ntask num2str(mode) num2str(Model) 'mean.txt wk -ASCII']);
(10)massw.m 及び massw2.m
roptt,ropt,roptf,masspro 等で共通に使用する質量特性計算用サブルーチン
% massw.m
% common subroutine
r2=r1-2;
if Model==1
% rm=(r1+r2)/2;
rm=r1;
end
m2=pi*(r2.^2-r3.^2)*h2*rou2;
I2=m2.*(r2.^2+r3.^2)/2;
m3=pi*(r3.^2-r4.^2)*h3*rou3;
I3=m3.*(r3.^2+r4.^2)/2;
m4=pi*r4.^2*h4*rou4;
I4=m4*r4.^2/2;
% rotating mass proroperty
mm=pi*rm*d*hm*roum;% motor rotor
mmx=Kmm*rm;% magnet and return pass
I1=I2-I3-I4-mm.*(rm.*rm+d*d)-mmx.*rm.*rm;
m1=2*I1./(r1.^2+r2.^2);
h1=m1/pi./(r1.^2-r2.^2)/rou1;% [I1,I1,m1,h1*100]
mr=m1+m2+m3+m4+mm+mmx;
mt=m1+m2+m3+m4+mm+mmx+Kmh*r1.^3+me+Kms*r1+m0;
% massw2.m
% common subroutine

```

```

r2=r1-2;
if Model==1
%      rm=(r1+r2)/2;
      rm=r1;
end
m2=pi*(r2.^2-r3.^2)*h2*rou2;
I2=m2.*(r2.^2+r3.^2)/2;
m3=pi*(r3.^2-r4.^2)*h3*rou3;
I3=m3.*(r3.^2+r4.^2)/2;
m4=pi*r4.^2*h4*rou4;
I4=m4*r4.^2/2;
%  rotating mass proroperty
mm=pi*rm*d*hm*roum;%  motor rotor
mmx=Kmm*rm;%  magnet and return pass
I1=It-I2-I3-I4-mm.*(rm.*rm+d*d)-mmx.*rm.*rm;
m1=2*I1./(r1.^2+r2.^2);
h1=m1/pi./(r1.^2-r2.^2)/rou1;% [It,I1,m1,h1*100]
mr=m1+m2+m3+m4+mm+mmx;
mt=m1+m2+m3+m4+mm+mmx+Kmh*r1.^2+me+Kms*r1+m0;%  2 乗モデル

```

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-013

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

