

# 水蒸気吸脱着挙動解析による吸着材デシカントローターの最適化に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード: 作成者: 辻口, 拓也 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/26821">http://hdl.handle.net/2297/26821</a>

氏名	辻口 拓也
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第973号
学位授与の日付	平成20年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	水蒸気吸脱着挙動解析による吸着材デシカントローターの最適化に関する研究
論文審査委員(主査)	児玉 昭雄(自然科学研究科・准教授)
論文審査委員(副査)	瀧本 昭(自然科学研究科・教授), 迫田 章義(東京大学・教授), 汲田 幹夫(自然科学研究科・准教授), 広瀬 勉(熊本大学・名誉教授)

### Summary

Dehumidifying performance and adsorption/desorption behavior of water vapor for adsorbent desiccant wheel has been studied by means of computer simulation. Although the model we suggested has dealt with the mass transfer coefficient as a fitting parameter, reliable value of the overall mass transfer coefficient could be derived from a huge amount of experimental data. Moreover it was found that derived mass transfer coefficient could be related to cycle time by applying the penetration theory. Considering this relationship, influence of operating concept (rotation speed, air velocity, regeneration temperature and so on.) and design concept (adsorption area ratio, adsorption property and so on.) on the dehumidifying performance and adsorption/desorption behavior inside the desiccant wheel were investigated. As an example of results, it was found that appropriate shapes of adsorption isotherm existed at each regeneration temperature. Moreover, it was expected to reduce the length of desiccant rotor considerably by selecting appropriate shape of adsorption isotherm. Selecting appropriate adsorption area ratio and contact time, it was suggested to reduce the volume of desiccant wheel maintaining dehumidifying performance. These results were important to reduce the size of the desiccant cooling system.

#### 1. はじめに

深刻化する地球温暖化問題に加え、建築基準法の改正に伴う24時間換気の義務付けにより、空調機の変革が求められている。そこで近年、熱駆動、オープンサイクルといった特徴をもつ、吸着式デシカント空調プロセスが注目されている。本プロセスは一般的にデシカントローターと顕熱交換器、加熱器、オプションとして用いられる冷却器等から構成される。デシカントローターで外気の潜熱を処理し、顕熱交換器では室内からの還気または外気で除湿後空気を冷却し、同時に吸着熱を回収する。顕熱交換器で予熱された還気は低級排熱や太陽熱で所定の温度まで昇温され、デシカントローターを再生する。従って、本プロセスは少ない電力消費で、常に換気除湿を行なうことができる。その反面、夏季における冷房負荷の増大は、高い駆動温度や追加冷房装置を要求し、イニシャルコストや装置規模にも改善の余地がある。現在、高湿度対応化や低コスト化、小型化を目指した多くの実用化研究が行なわれているが、本空調機的主要構成機器であるデシカントローター内部の除湿挙動(物質移動)が明らかになっていないため、性能向上指針は半経験的なものに

留まっている。そこで、本研究ではデシカントローターの最適な設計、操作指針の構築に向けて数値解析を用いてデシカントローター内部の水蒸気吸脱着挙動解析を行なった。

#### 2. 数学モデル

計算対象としたシリカゲルローターの仕様をTable 1に示す。デシカントローターの要素断面はハニカム形状をとっており、そのハニカム要素個々において熱と物質の移動が生じている。吸着過程、および再生過程における熱と物質の移動を表す偏微分方程式を以下に示す。

Table 1 Specifications of a typical commercialized silica gel desiccant wheel.

Adsorbent species	Silica gel
Channel pitch of honeycomb matrix	2.3 mm×4.2 mm
Thickness of adsorbent wall	0.2 mm
Bulk density of adsorbent rotor	137 kg/m <sup>3</sup>
Specific surface area	2000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Adsorbent content in weight	50 wt %
Specific heat of dry desiccant	1007 J/(kg·K)
Diameter of desiccant wheel	0.32 m
Width of desiccant rotor	0.2 mm

空気流路の水蒸気収支

$$\rho_g u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho_d \frac{\partial q}{\partial t} \frac{a_d}{a_g} = 0 \quad (1)$$

吸着材層の水蒸気収支

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{k}{a_d} (q^* - q) \quad (2)$$

ここで平衡吸着量  $q^*$  はシリカゲルローターの吸着等温線に、Langmuir 式を適用し以下のようを与える。

$$q^* = \frac{0.733RH}{1+2.18RH} \quad (3)$$

空気流路の熱収支

$$\rho_g u C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial x} + \frac{h(T_g - T_d)}{a_g} = 0 \quad (4)$$

吸着材層の熱収支

$$\rho_d (C_{pdd} + qC_{pw}) \frac{\partial T_d}{\partial t} = \rho_d \frac{k}{a_d} (q^* - q) q_h + \frac{h(T_g - T_d)}{a_d} \quad (5)$$

境界条件は以下のようを与える。

$$H_p = H_{pi}, \quad T_{pg} = T_{pgi} \quad \text{at } Z = 0 \quad (6)$$

$$H_r = H_{ri}, \quad T_{rg} = T_{rgi} \quad \text{at } Z = 1$$

ここで  $Z$  は無次元軸方向距離であり、次式で与える。

$$Z = \frac{x}{L} \quad (7)$$

初期条件を以下に示す。

$$T_{pd}(\tau=0) = T_{rd}(\tau=2), \quad q_p(\tau=0) = q_r(\tau=2) \quad (8)$$

$$T_{pd} = T_{rd}, \quad q_p = q_r \quad \text{at } \tau = 2$$

ここで、 $\tau$  は無次元回転角度であり、吸着側、再生側それぞれ次式で与えられる。

$$\tau = \frac{\theta}{\theta_p} = \frac{Nt}{3600 \cdot b} \quad (0 \leq \tau \leq b), \quad (9)$$

$$\tau = 1 + \frac{\theta}{\theta_r} = \frac{Nt}{3600 \cdot b}, \quad (b < \tau \leq 2)$$

なお  $\theta_p$ ,  $\theta_r$  はそれぞれ吸着側、再生側領域の角度、である。回転方向位置  $\tau$  および空気流れ方向位置  $Z$  を Fig.1 で説明する。

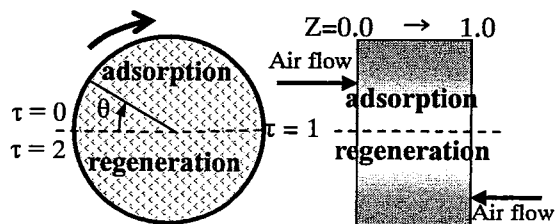


Fig.1 Position and rotational coordinates of desiccant rotor.( $b=0.5$ )

### 3. 数値解析結果

数値解析に際し、まず、操作・設計条件が物質移動係数  $k$  に与える影響を検討し、そのう

えで吸脱着挙動ならびに除湿性能に与える影響を検討する。

#### 3.1 空気条件の影響

総括物質移動係数  $k$  は実験値とのフィッティングによって決定した。Fig.1 に実験結果と良好な一致が得られた  $k$  の値を示す。これらよ

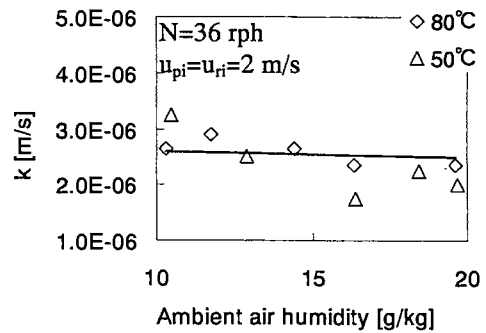


Fig.1 Influence of the regeneration air temperature on the overall mass transfer coefficient.

( $T_{pi}=35^\circ\text{C}$ ,  $H_{ri}=11.2\text{ g/kg}$ )

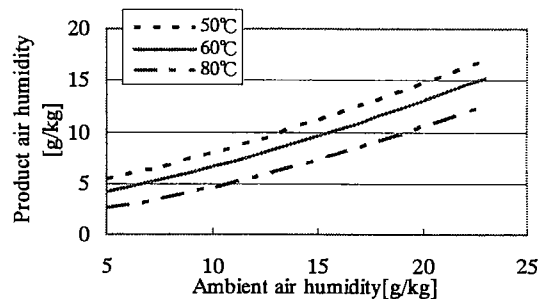


Fig.2 Influence of regeneration temperature and ambient humidity on product air humidity.

( $T_{pi}=35^\circ\text{C}$ ,  $H_{ri}=11.2\text{ g/kg}$ )

り、総括物質移動係数は図示した解析条件において、多少のばらつきは見うけられるが実験誤差を考慮し、同一の値  $2.7 \times 10^{-6}$  [m/s] とした。

Fig.2 に給気湿度・温度に及ぼす再生温度および外気湿度の影響を示す。再生温度を上昇させると給気湿度は低下し、外気湿度の上昇に伴い給気湿度は上昇する。通常、理想的な室内湿度である  $11\text{ g/kg}$  前後を保つために、空調機は  $10\text{ g/kg}$  以下の空気を室内に供給しなければならないが、 $50^\circ\text{C}$  再生では外気湿度が  $13\text{ g/kg}$ 、 $80^\circ\text{C}$  再生においても  $19\text{ g/kg}$  までしか対応できないことがわかる。

#### 3.2 ローター回転数および空気流速の影響

Fig.3 に吸着側と再生側の風速が等しい場合の物質移動係数に与える風速および回転数の影響を示す。ここで総括物質移動係数は吸着側出口空気湿度の計算値が実験値と一致したときの値である。これらの結果より、本解析の風速範囲 ( $1\text{--}3\text{ m/s}$ ) では物質移動係数の変化は小さいこと、一方で回転数の増加 (サイク

ル時間の減少)に従って、物質移動係数は

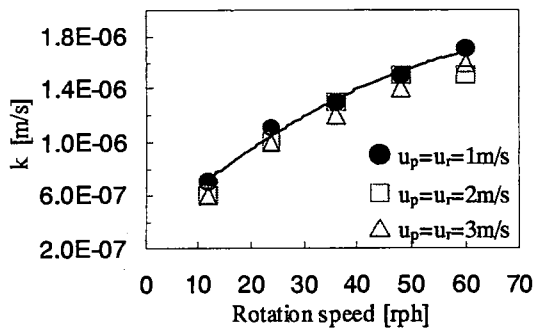


Fig.3 Influences of process/regeneration air velocity and rotation speed on the overall mass transfer coefficient at the same air velocity.

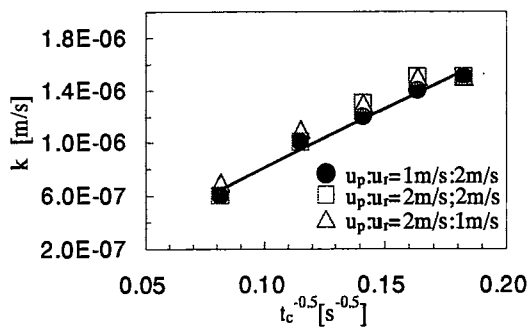


Fig.4 Influence of cycle time on the mass transfer coefficient at various process/regeneration air flow ratio.

増加すること、がわかる。すなわち、本解析条件ではデシカントローター内の物質移動に対して境膜拡散の寄与は小さく、粒子内拡散が支配的であると考えられる。

Fig.4 に異なる風速比におけるサイクル時間と物質移動係数の関係を示す。これより、物質移動係数はサイクル時間の平方根の逆数  $t_c^{-1/2}$  に比例していることが確認できる。すなわち、本解析のサイクル時間領域およびそれ以下のサイクル時間では浸透説が成り立ち、総括物質移動係数は式 (10) により推算できる。

$$k = \sqrt{\frac{D_p}{\pi \cdot t_c}} \quad (10)$$

なお、Fig.3-3 の直線の傾きから粒子内拡散係数を算出すると  $D_p = 2.0 \times 10^{-10} \text{ [m}^2/\text{s]}$  となる。

Fig.5 にローター出口空気を与える空気風速とローター回転数の影響を示す。ここで、吸着側と再生側の風速は等しく、再生温度は  $80^\circ\text{C}$ 、還気側空気湿度は  $11.2\text{g/kg}$  (還気再生) である。これより、風速が小さいほど吸着空気出口の湿度は低く、温度は高い。風速  $1\text{m/s}$  では乾燥限界である再生空気と等しい相対湿度線に近いが、風速  $2, 3\text{m/s}$  では限界値には程遠い。回転数については、風速  $1\text{m/s}$  において、 $30\text{rph}$  周辺で給気湿度は一定となり、その後は温度のみ上昇する。風速  $2\text{m/s}, 3\text{m/s}$  では明確

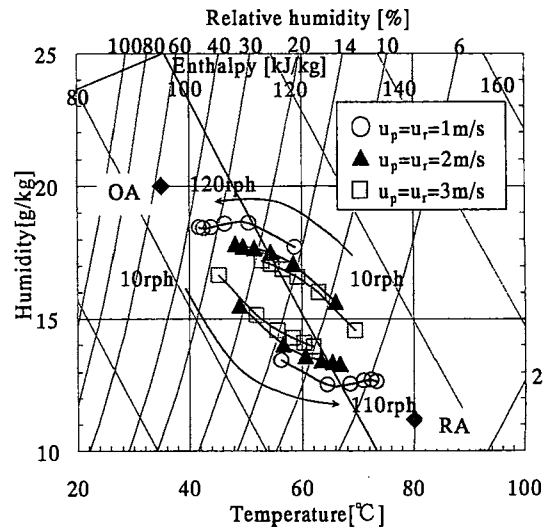


Fig.5 Influences of rotation speed of the rotor and process/regeneration air flow rate on the product air condition. ( $T_{ri}=80^\circ\text{C}$ )

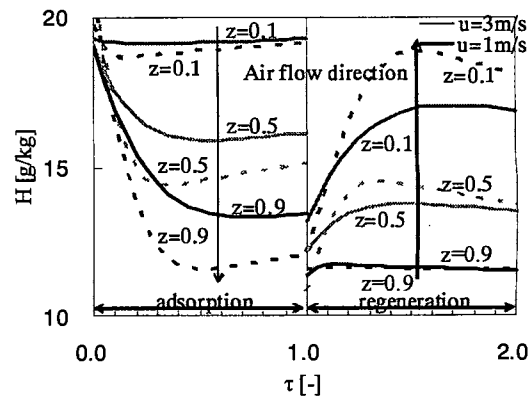


Fig.6 Angular distributions of air humidity under various air flow ratio at  $T_{ri}=80^\circ\text{C}$ ,  $N=30 \text{ rph}$  ( $u_{pi}=u_{ri}=3 \text{ m/s}$ ),  $100 \text{ rph}$  ( $u_{pi}=u_{ri}=1 \text{ m/s}$ ).

な最適回転数が存在しない。

異なる風速における空気湿度の回転方向分布を Fig.6 に示す。なお、吸着側と再生側の風速は等しく、再生温度  $80^\circ\text{C}$ 、回転数は風速  $1\text{m/s}$  では最適回転数である  $30\text{rph}$ 、風速  $3\text{m/s}$  では湿度の低下が緩やかになる  $100\text{rph}$  とした。風速が小さい場合は空気の滞留時間が長いため、空気湿度は大きく低下する。これは、再生時間も長く吸着材再生が進行し、ローター全体の吸着容量が増大することの一因がある。一方、風速が大きい場合には回転数が高いため、再生時間が減少し、吸着材再生が不完全となる傾向がある。また、滞留時間が短いこともあり吸着入口 ( $z=1$ ) での吸着量が減少し、吸着空気出口 ( $z=1$ ) に近い位置の空気湿度が低下しない一因となる。以上より、風速と回転数を比例して増加させた場合には再生時間の減少による吸着材再生の不完全化、滞留時間の減少による吸着量の低下によって除湿性能は大きく低下する。

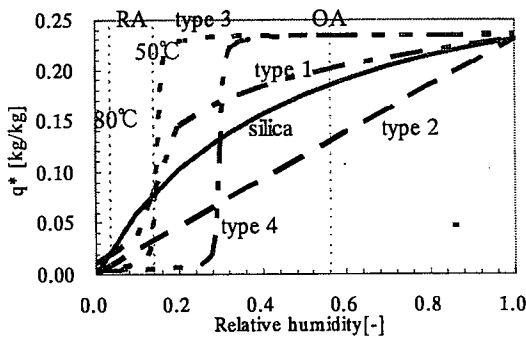


Fig.7 Assumed adsorption isotherm.

### 3.3 吸着等温線形状の影響

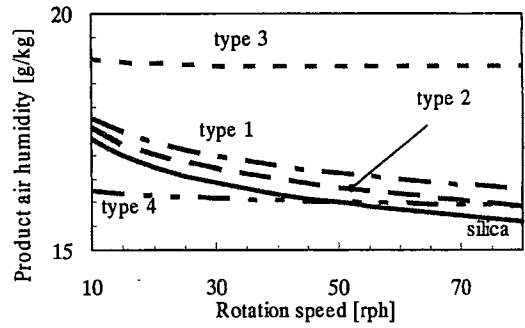
前項で得られた物質移動係数を用いて、デシカントローターに適した吸着特性を検討するため、Fig.7 に示す吸着等温特性を持つデシカントローターを仮定した。本解析では市販シリカゲルローター (silica) に加え、4 種類の形状の異なる吸着等温線を仮定し、Table 2 に示す解析条件の下、計算を行なった。なお、解析に用いる物質移動係数およびローター物性は市販シリカゲルローターと同一とした。

Fig.8 (a), (b) は再生温度 50°C および 80°C における 5 つの異なる吸着等温線形状での吸着側ローター出口空気湿度を示している。まず、再生温度 50°C の場合 (Fig.8 (a)) では、低い相対湿度で吸着等温線が立ち上がる type 3 ローターの出口空気湿度が高い。これは 50°C 再生では再生空気の相対湿度が 15% 程度であるため、相対湿度 15% で吸着等温線が立ち上がる type 3 のような形状では吸着材再生が進行しないことに起因する。また、type 4 および silica のような形状ではローター出口空気湿度が低い。一方、80°C 再生 (Fig.8 (b)) においては type 3 や type 1 のような低い相対湿度で立ち上がる等温線形状においてローター出口空気湿度が低い。

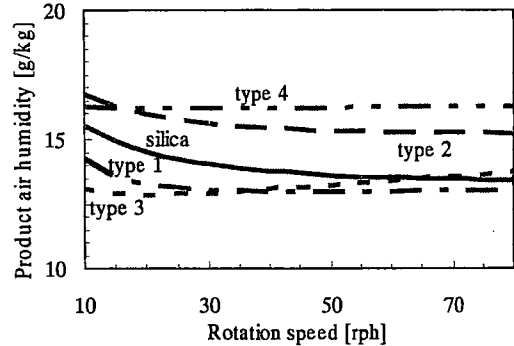
再生温度 80°C で高い除湿性能が期待される type 3 のローター内の空気湿度の空気流れ方向変化を Fig.9 に示す。なお、ローター回転数はいずれも 40rph である。空気湿度は吸着空気入

Table 2 Air and operating condition.  
(Analysis condition)

Air velocity (adsorption)	2m/s	Ambient air humidity	20g/kg
Air velocity (regeneration)	2m/s	Ambient air temperature	35°C
Regeneration air temperature	50,80°C	Regeneration air humidity.	11.2g/kg



(a) Regeneration air temperature 50°C



(b) Regeneration air temperature 80°C

Fig.8 Product air humidity at various shapes of adsorption isotherm.

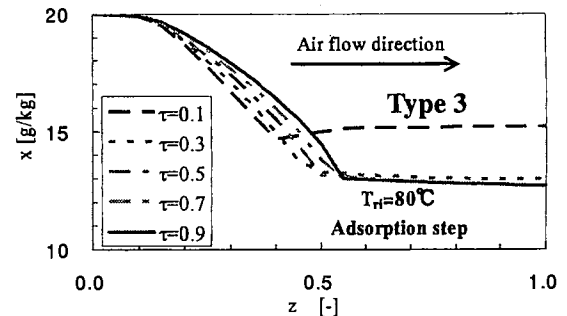


Fig.9 Axial trend of the air humidity.  
(type 3 at 40rph)

口 ( $z=0$ ) および吸着空気出口 ( $z=1$ ) に近い位置ではほとんど変化せず、 $z=0.2-0.5$  間で急激に低下する。これは、吸着空気入口 ( $z=0$ ) に近い位置では吸着材再生が進行せずに、水

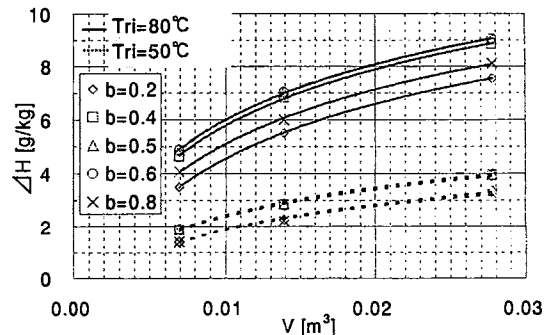


Fig.10 Influence of the volume of desiccant wheel on the amount of dehumidified water under various conditions.

( $m_p=m_r$ ,  $H_{ri}=11.2$  g/kg,  $H_{pi}=20$  g/kg)

蒸気が残ったまま吸着を開始すること、吸着空気出口 ( $z=1$ ) に近い位置では空気流れ上流域で発生する吸着熱および再生過程からの持ち込み顕熱によって相対湿度が著しく低下することに起因する。従って、再生温度により適切な吸着等温線形状を選択することで、除湿性能を維持したまま大幅なローター長さの削減が期待できる。

#### 4. デシカントローターの最適設計指針

前章までに得られた知見に加え、吸着・再生面積比およびローター長さを設計変数とし、デシカントローターの体積を最小化する操作・設計条件について検討した。

Fig.10 には異なる再生温度においてデシカントローター体積が除湿量に与える影響を示す。なお、吸着側と再生側の風量は等しいものとする。これをみると、還気再生、再生

温度  $80^{\circ}\text{C}$  の場合では、除湿量  $8\text{ g/kg}$  を満たす場合、 $b=0.6-0.5$  ( $b=0.55$ ) でローター体積が最小値 ( $0.019\text{ m}^3$ ) をとる。このとき滞留時間  $L/u$  を算出すると、 $L/u=0.0752$  となる。つまり、ローター長さ  $0.15\text{ m}$  の場合、およそ流速  $2\text{ m/s}$ 、吸着側面積比  $b=0.55$  で運転するとローター体積が最小となる。還気再生、再生温度  $50^{\circ}\text{C}$  の場合でも再生温度が  $80^{\circ}\text{C}$  の場合とほぼ同様の傾向を示すが、ローター体積に与える吸着側面積比の影響は小さく、 $b=0.4-0.6$  でほぼ同値をとる。除湿量  $3\text{ g/kg}$  を満たす場合、ローター体積は  $V=0.014\text{ m}^3$  で最小となり、滞留時間  $L/u=0.0504$  となるように設計すればよい。

この結果はデシカントローターの小型化に大きく貢献できるものである。

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成 20 年 1 月 29 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、平成 20 年 2 月 6 日に口頭発表ならびに第 2 回審査委員会を開催して審議した結果、以下のように判定した。

本論文は吸着式デシカント空調プロセスの性能向上の鍵となる吸着材デシカントローターの設計・運転指針を実験と数値計算により検討したものである。まず、数値計算の信頼性を左右する物質移動係数の操作・空気条件に対する依存性を、市販シリカゲルローターを用いた除湿実験と数値計算結果を比較検討することで明らかにした。その上で、本プロセスの操作・空気条件と吸着材内部の吸脱着挙動および除湿性能との関係を数値計算により検討し、市販デシカントローターの運転指針を提案している。次に、デシカントローターの水蒸気吸着特性に着目し、操作・空気条件に応じて除湿性能が最大となる吸着等温線形状が存在することを見出した。その吸着特性を実現することでデシカントローターの小型化が可能となることを示している。さらに数値計算の適用範囲を拡張するため、時間平均の物質移動係数に代えて局所物質移動係数を導入した。これにより主要な設計変数であるローター長さおよび吸着／再生面積比率を変えた性能予測が可能となり、除湿性能を維持しつつデシカントローター体積を最小とする操作・設計条件の存在が明らかになった。

以上、本論文は吸着材デシカントローターの最適化に関して有益な知見を与えるものであり、工学的価値は高い。したがって、その内容は博士(工学)論文に値するものと判定する。