

重量物の浮上移動装置に関する基礎研究

石本悠真* 塩崎由樹** 赤山優太*** 鈴木隆起**** 赤対秀明*****

Study on Floating-Device to Move Heavy Product

Yuma ISHIMOTO* Yuki SHIOZAKI** Yuta AKAYAMA**
Takaoki SUZUKI*** Hideaki SHAKUTUI****

ABSTRACT

In the present study, in order to develop a simple floating-device to move large-size furniture such as a chest of drawers, the experiments are carried out by two different devices. In the devices, there are two principles that is based on spout of air (spout type) and difference of inner and external pressure of floating device (air-room type), respectively. In the experiment the performance such as tension, pressure, stability is investigated and compared in different devices. (i) There is little difference about the material of a bottom board and the pattern distribution of air holes on the capability for floating of spout type. (ii) The tension and power of air-room type is very small as compared with the spout type and stability is also good. (iii) In this experiment, it is possible to move the floating device at the tension $T = 30 \sim 40$ N at the maximum on the load ($M = 50$ kg) at flow rate, $Q = 10$ m³/h.

Key words : room divider, floating-device, spout type, air-room type

1. 緒言

近年、一つの大きな室内空間を間仕切ること、家族構成や生活の変化に合わせて部屋の数や構成を自由に変更し、長期にわたって住宅を利用しようという新しい生活スタイルが提案されている。平成19年には日本政府によって提言された「200年住宅ビジョン」⁽¹⁾において、住宅の構造を、耐久性を有する構造躯体（スケルトン）と居住者の生活等に対応した可変性を有する内装設備（インフィル）に分離させることが重要と指摘されている。生活環境に合わせて容易に間取りを変更できる間仕切り家具は、インフィルに対応でき、この施策を発展させるには非常に有効である。

現在、この間仕切り家具の移動には、人による直接移動、キャスター移動方式が主である。しかし一般的に、タンスなどの間仕切り家具は非常に重く、それら

の家具を移動するために大きな労力を必要とする。また、キャスター移動方式は、構造が簡単で安価であるが、車輪に対して横方向の移動性が悪いことや床が凹む可能性がある等の欠点がある。そのため最近では、空気を利用した移動方式が研究されており、家具を浮上移動させることで移動に必要な力を軽減し、容易に移動できる装置も実用化されている⁽²⁾。しかし、その多くはコストが高く、また家具を移動する度に、家具を持ち上げて設置、取り外しする必要があるため、一般家庭には普及していない。したがって、一般家庭用に、家具と一体型の低コストな装置の開発が望まれている。

本一連の研究では、タンスを対象とした大型家具を移動させることを目的に、より簡便な重量物の浮上移動装置の開発が行われてきた。これまでの研究⁽³⁾では、装置への送風流量が高流量のときに、キャスター式移動方式と同程度の引張力で移動を可能にしているが、大きな振動が発生し安定した移動が困難となっている。そこで本研究では、浮上移動装置の浮上原理や形状および素材に関して検討し、浮上性能の改善を図ることを目的とする。

* 専攻科 機械システム工学専攻
** 本科 機械工学科
*** 本科 機械工学科 平成23年卒業
**** 機械工学科 講師
***** 機械工学科 教授

2. 浮上原理

地面と物体間には物体の質量に比例して摩擦力が発生し、それは移動時に抵抗となる。本研究では、次の二種類の原理を利用して装置を浮上させ摩擦低減を試みる。

(1) 噴出型

Fig.1(a)に噴出型浮上原理の概略図を示す。装置底板に設けられた多数の細孔から空気を噴出させることで、その反力と、底板と地面の間に生じた空気層によって、装置と地面との間の摩擦力を低減する方法である。本形式においては、空気室内の圧力エネルギーに比べて、噴出による速度エネルギーが浮上性能に対して支配的となる。以後、この方式を用いた装置を噴出型浮上移動装置 (Spout type) と呼ぶ。なお、これまでの研究⁽³⁾では本方法が用いられている。

(2) 空気室型

Fig.1(b)に空気室型浮上原理の概略図を示す。送風機から送られた空気が装置空気室内で圧縮されることで、空気室内の圧力が増加し、装置が浮上力を得る方法であり、ホバークラフトの原理^{(4),(5)}として広く知られている。このとき、空気室内外の圧力差により圧縮空気は空気室外へ排出されるため、地面との接地面に噴出型と同様に空気層が形成される。本形式においては、空気の噴出による速度エネルギーに比べ、空気室内の圧力エネルギーが浮上性能に対して支配的となる。以後、この方式を用いた装置を空気室型浮上移動装置 (Air-room type) と呼ぶ。

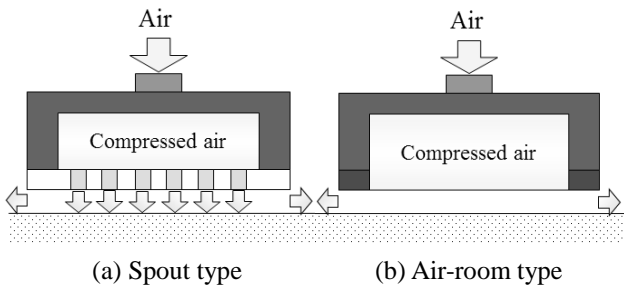


Fig.1 Principle of floating-devices

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置 本研究では、浮上移動装置の原理や底板の形状および材質による浮上性能の違いを調べるため、第2章で述べた原理に基づいた、二種類の浮上方法による装置を使用する。

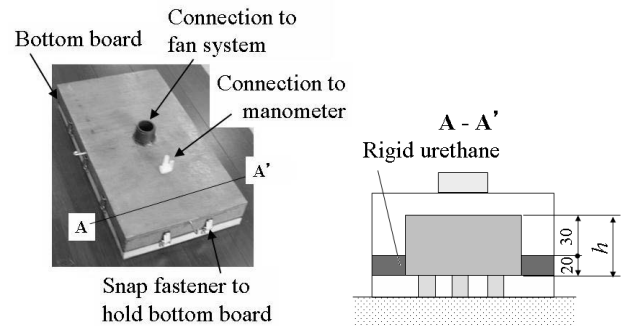
3.1.1 噴出型浮上移動装置 Fig.2(a)に製作した噴出型浮上移動装置の外観を示す。装置は長さ440 mm、幅250 mm、高さ58 mm、質量1.85 kgであり、装置の底面積は市販されている一般的なタンスの底面積の4分の1とした。底板には多数の空気排出用の細孔を設けており、空気孔配置パターンおよび材質を変えて実験を行うため、スナップ錠を取り付けて底板を取り外し可能な構造とした。また、空気漏れを防ぐため、シール材として硬質ウレタンを取り付けている。なお、

本装置において、空気室の高さ h は装置上部30 mm、下部20 mmの計50 mm (Fig.2(b)) で一定である。

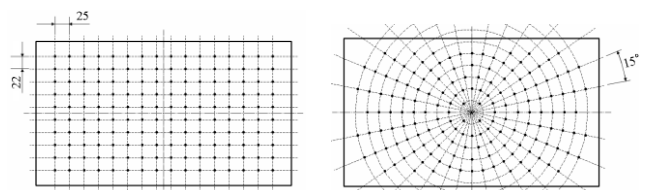
Fig.3に底板の空気孔配置パターンを示す。空気孔配置パターンは、装置の安定性に対して影響をもつことが考えられる。これまでの研究における底板の空気孔配置パターンである格子状 (Fig.3(a)) に加え、底板の中央部に空気孔が集中している放射状 (Fig.3(b)) の空気孔配置パターンも用意した。格子状において、空気孔の配置間隔は縦22 mm、横25 mm で $\phi 3$ の貫通穴を160個、放射状は高流量時の底板の反り対策として中央に多く穴を配置しており、底板の中心から半径20 mm ずつ増やした同心円上に 15° 間隔で $\phi 3$ の貫通穴を160個配置している。開口率 β は、これまでの研究⁽³⁾において $\beta = 1\%$ で最も良い浮上性能が得られていたため、本研究においても格子状、放射状ともに $\beta = 1\%$ としている。なお、開口率 β は次式によって求められる。

$$\beta = \frac{\text{空気孔の総面積}}{\text{底面積}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

底板の材質には、それぞれの空気孔配置パターンに対して、硬さの異なるポリエチレンテレフタレート: PET (曲げ強さ78~95 MPa) とポリプロピレン: PP (曲げ強さ43 MPa) の二種類を用いる。なお、PETおよびPPの板厚は3 mmとした。



(a) Geometry of spout type (b) Height of air-room
Fig.2 Floating-device of spout type



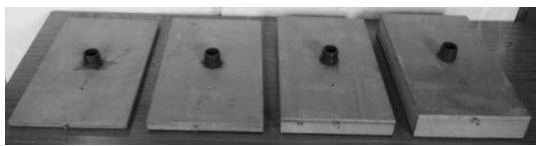
(a) Orthogonal pattern (b) Radial pattern
Fig.3 Distribution of air hole

3.1.2 空気室型浮上移動装置 本研究では、空気室高さ h (Fig.1(b)) が浮上性能に与える影響を調べるため、 h の異なる四種類 ($h = 0, 10, 30, 50$) の装置を製作した。Fig.4, Fig.5に製作した空気室型浮上移動装置

の外観を示す。装置は長さ 440 mm, 250 mm で空気室高さ h によらず同じであるが, 各空気室高さの装置の質量は $h = 0$ mm は 0.92 kg, $h = 10$ は 0.97 kg, $h = 30$ は 1.22 kg, $h = 50$ は 1.45 kg である。装置の外形寸法は噴出型と同じである。なお, 装置と地面との平滑度を向上させるため, 装置底部に硬質ウレタンを接着している。



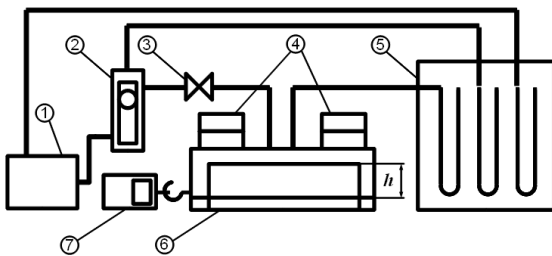
(a) Top view (b) Bottom view
Fig.4 Geometry of floating-device of air-room type



(a) $h = 0$ (b) $h = 10$ (c) $h = 30$ (d) $h = 50$
Fig.5 Height of floating-device of air-room type

3. 2 実験方法 Fig.6 に実験装置の概略を示す。浮上に必要な空気は, 送風機①から面積式流量計②を介してバルブ③によって調節され, 浮上移動装置⑥に送られる。Fig.7 に示すように, 送風機には家庭で使用されることを想定し, 容器内に密閉された汎用の家庭用掃除機の排気空気をを用いている。また, 床面の条件を同一にするために, 全ての実験は定盤 (金属加工時に用いられる平面の基準となる水平な台) 上で行う。

実験では各浮上移動装置において, 負荷質量④に対する, (1)引張力 T , (2)装置内圧力 P_u と送風機内圧力 P_f , および, (3)浮上の安定性を測定する。なお, 負荷質量にはレンガ (2.5kg/個) を用い, 本実験では, 荷重が偏らないように配置する。



①Fan system ②Flow meter ③Valve
④Load ⑤Manometer ⑥Floating-device
⑦Push-pull gage

Fig.6 Schematic of experimental equipments

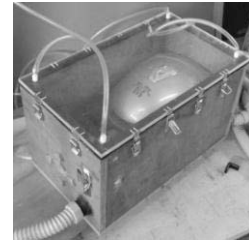


Fig.7 Photograph of fan system by vacuum cleaner

3. 3 実験条件 Table 1 に各浮上移動装置に対する実験条件を示す。噴出型は流量 $Q = 0 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ で $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 間隔であるが, 空気室型は噴出型に比べ少ない流量で浮上できたため, 低流量域を詳しく調べるために, 流量の測定間隔を $10 \text{ m}^3/\text{h}$ とした。また, 一般的なタンスの総質量は 200 kg 程度とされていることから, 本実験装置の底面積の割合より搭載する負荷質量は最大 50 kg とした。なお第 4 章で述べる比較実験および詳細実験の実験条件に関しては, 各実験結果において述べる。

Table 1 Experimental conditions

Hovering type	Spout type	Air-room type
Floor	surface plate	
Flow rate [m^3/h]	0 ~ 100	0 ~ 60
Mass [kg]	0, 10, 20, 30, 40, 50	

3. 4 測定項目 本実験では, 浮上性能を評価するため, 以下について調べる。

(1) 引張力 T

負荷質量に対する浮上移動装置の引張力 T は, 装置側面に取り付けられたフックにより, デジタルプッシュプルゲージ (アイコーエンジニアリング製, RX-50) (Fig.6 : ⑦) を用いて直接引っ張ることで測定する。引張力は装置が動き出した瞬間の値を用いており, 装置の長辺側および短辺側それぞれの方向から引っ張った値の間に大きな差は認められなかったため, 両者の平均値としている。なお本研究では, キャスター移動方式と同程度の引張力 40 N を目標引張力としている。

(2) 装置内圧力 P_u , 送風機内圧力 P_f

浮上移動装置, 送風機出口それぞれに静圧孔を設け, マノメータ (Fig.6 : ⑤) により圧力を測定する。マノメータにおける作動流体は, 水と空気であり, マノメータの一端は大気開放されている。それぞれの圧力はマノメータの液面差 Δh より, 次式により算出する。

$$P - P_0 = \rho_w g \Delta h \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

ここで, P は測定圧力, P_0 は大気圧, ρ_w は水の密度である。なお, 空気の密度は水の密度に比べ十分小さいとし, 無視している。

(3) 安定性

浮上させた際の浮上移動装置の振動および牽引時の

振動を目視観察および振動音を聴くことにより評価する。

4. 実験結果および考察

4.1 噴出型および空気室型の浮上性能と比較実験

空気の噴出力による浮上原理の噴出型浮上移動装置と、ホバークラフトの浮上原理を利用した空気室型浮上移動装置の浮上性能を調べ、両者の比較を行った。実験条件は Table 1 に示した通りであるが、浮上性能を比較するため、負荷質量に関しては $M = 50 \text{ kg}$ で一定とした。また、浮上性能は引張力、装置内圧力より求める動力、安定性で評価した。なお、噴出放射状型の実験結果は、大きな振動により $M = 30 \text{ kg}$ までしか測定できなかったため、参考として $M = 30 \text{ kg}$ の結果としている。

Fig.8に引張力 T - 流量 Q 特性を示す。流量 $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ のとき装置は浮上せず、引張力は質量および地面との床面の状態に依存する。本実験ではいずれの空気孔配置パターン・材質においても装置の仕様は同様であるため、負荷質量が同じ場合、引張力は同程度である。なお、噴出放射状型においては $M = 30 \text{ kg}$ であるため引張力は小さい。

噴出型装置において、流量の増加とともに引張力は二次関数的に減少することが確認できる。これは、流量が増加すると連続の式の関係から底板の空気孔から噴出される空気の数 v が増加し、空気の密度を ρ とすると動圧 $\rho v^2/2$ より摩擦低減効果が大きくなるためであると考えられる。空気孔配置パターンに対しては負荷質量が異なるため比較できないが、負荷質量を同じ ($M = 30 \text{ kg}$) とした場合、引張力はほぼ同じであることを確認している。また、材質に対してはほとんど影響はない。なお、噴出型装置においてはこれまでの研究と同様に、 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ の時でのみ目標引張力 40 N 付近での引張が可能であったが、いずれの場合も 40 N 以下にはならなかった。

空気室型装置においては、流量が $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ になると急激に引張力は低下し、それ以降はほぼ一定 ($T = 30 \sim 40 \text{ N}$) になることが分かる。これは、装置内圧力がある値に達したとき装置が浮上し、それ以降は装置底部に生じている隙間から圧力が逃げるため、ほぼ一定の引張力になるものと考えられる。

Fig.9に動力 W - 流量 Q 特性を示す。動力 W は負荷質量を浮上移動させるために必要な単位時間当たりのエネルギーであり、次式で定義した。

$$W = QP_u \quad [\text{W}] \quad P_u : \text{装置内圧力} \quad (3)$$

噴出型、空気室型ともに流量が増加すると、それに比例して動力が増加し、少ない流量で済む空気室型の方が省エネルギーであることがわかる。噴出型については、底板素材および空気孔配置パターンによる違いはあまり見られないが、空気室型については空気室の高

さが高いほど、動力すなわち送風機内圧力が低くなることがわかる。これは、断熱圧縮を仮定すると空気室の高さが高くなると空気室の体積が大きくなり、送風機内圧力が低くなるためであると考えられる。

Table 2, Table 3 に各装置の安定性を示す。Table 2, Table 3 中の○印は「振動なし」、△印は「振動あり」を示しており、○が多いほど安定性の範囲が広い。また、目視観察では定量的に表せないため、同じ△でも振動の度合いは異なり、基本的には負荷質量・流量が大きいきほど振動は激しい傾向にある。噴出型の場合、安定して浮上可能な範囲は底板素材および空気孔配置パターンの影響はほとんどなく、 $Q = 20 \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$ の範囲である。一方、空気室型の安定可能な範囲は $Q = 10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$ の間である。安定な浮上範囲は噴出型の方が広いものの、どの流量においても目標引張力には到達していない。一方、空気室型は低流量 ($Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$) で目標引張力に到達しており、その領域で安定的な浮上が可能であることが分かる。なお、安定性は空気室高さ h により変化することから、適切な空気室高さが存在することを示唆しており、詳細は 4.2 節にて述べる。

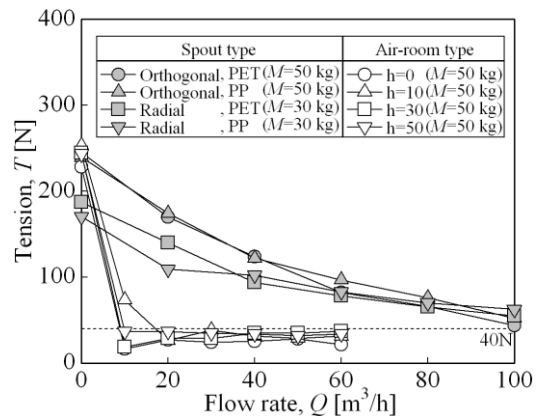


Fig.8 T-Q characteristic

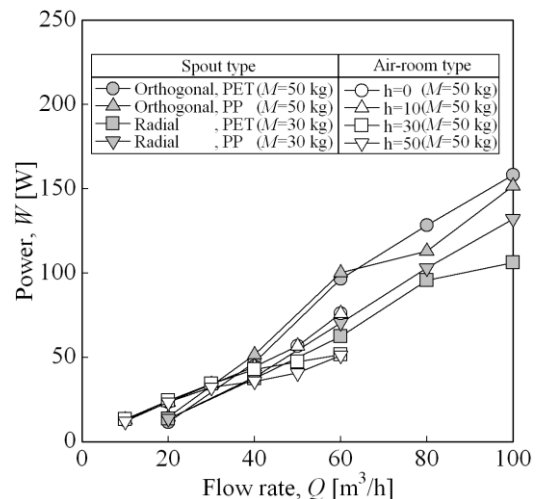


Fig.9 W-Q Characteristic

Table 2 Stability of spout type

Flow rate, Q [m ³ /h]		20	40	60	80	100
$M = 50$ kg	Orthogonal, PET	○	○	△	△	△
	Orthogonal, PP	○	○	○	△	△
$M = 30$ kg	Radial, PET	○	○	△	△	△
	Radial, PP	○	○	△	△	△

Table 3 Stability of air-room type ($M = 50$ kg)

Flow rate, Q [m ³ /h]	10	20	30	40	50	60
$h = 0$	△	△	△	△	△	△
$h = 10$	○	○	△	△	△	△
$h = 30$	○	△	△	△	△	△
$h = 50$	○	△	△	△	△	△

4. 2 空気室型の詳細実験 4. 1節で、引張力、動力、安定性の観点より、噴出型より空気室型の方が浮上性能が高いことを確認したため、本節では空気室型浮上移動装置の詳細な実験を行った。以下に各実験結果を示す。なお、実験条件は Table 1 と、評価項目は 3. 4節とそれぞれ同一である。

Fig.10 に引張力 T - 流量 Q 特性を示す。流量 $Q = 0$ m³/h の場合、負荷質量が大きいほど摩擦力により引張力は大きくなるが、空気室高さ h に関わらず流量 Q が増えると急激に引張力が低下し、 $Q = 20$ m³/h 以上でほぼ一定の引張力 $T = 30 \sim 40$ N となる。また、負荷質量が大きいほど引張力の一定値は大きくなることも確認できる。これは、流量の増加により内部の圧力が増加することで浮上力が発生するものの、同時に隙間からの流出量が増加し、ある流量以上では装置内部の圧力が大きく増加しない、もしくは一定になるためであると考えられる。なお、装置内部の圧力に関しては本節において後述する。また、どの空気室高さにおいても流量が増加すると振動が発生したが、目標引張力である $T = 40$ N 前後になったことから、振動が発生しても浮上力は維持されると考えられる。

Fig.11 に空気室高さ $h = 10$ mm の場合の、負荷質量 M に対する送風機圧力 P_f - 流量 Q 特性を示す。なお本実験装置においては、低流量の場合、過負荷により送風機が停止したため流量 $Q < 10$ m³/h における圧力測定できなかった。本結果はいわゆる送風機の性能曲線であり、流量の増加に伴い圧力は緩やかな右下がり傾向を示す。また送風機出力は負荷質量の影響を受けないことも確認でき、他の空気室高さの場合も同様であった。

Fig.12 に各空気室高さ h における負荷質量 M に対する装置内圧力 P_u - 流量 Q 特性を示す。圧力は空気室

高さによらず、比較的負荷質量が小さい場合、流量に対してほぼ一定あるいは緩やかに増加することが確認できる。そのため流量を増加させた場合でも、空気室内部の圧力はほぼ一定となり、引張力はほぼ一定になると考えられる。また、負荷質量の増加により装置内圧力は増加する。これは負荷質量の増加により、装置と定盤との隙間が狭くなり、空気の圧縮率が増加したためであると考えられる。

一方、負荷質量が比較的大きい場合、流量の増加によって圧力は急に減少することが確認できる。この領域においては装置が比較的大きな振動を伴うことを確認しており、流量の増加によって振動が増加することで、空気室内の空気の流出量が大幅に増加するためであると考えられる。なお、データを示していないが $h = 0$ mm の場合、高負荷時にはどの流量においても振動は発生したが、低流量域では振動による装置内圧力の低下は、ほとんど確認できなかった。

Table 4, Table 5 に安定性を示す。浮上の安定性は空気室高さが高いほど良いことが確認できる。これは空気室高さが高いほど重心位置が高くなり、振動による影響が大きくなるためであると考えられる。しかし $h = 0$ mm の時のように空気室高さが低すぎる場合にも、逆に振動は増加した。そのため、空気室高さには適切な高さが存在し、本実験範囲では $h = 10$ mm で最も安定性が良かった。なお、全ての空気室高さにおいて、高流量時には振動が増加することが確認できた。

以上より安定性、引張力より評価すると、本実験において $h = 10$ mm が最も浮上性能が良いと考えられる。

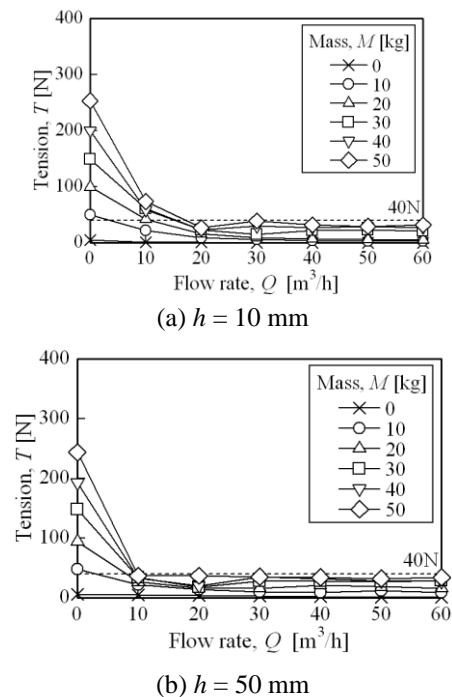


Fig.10 $T - Q$ Characteristic (Air-room type)

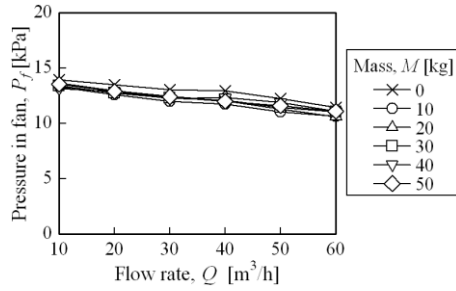


Fig. 11 $P_f - Q$ Characteristic (Air-room type, $h = 10$ mm)

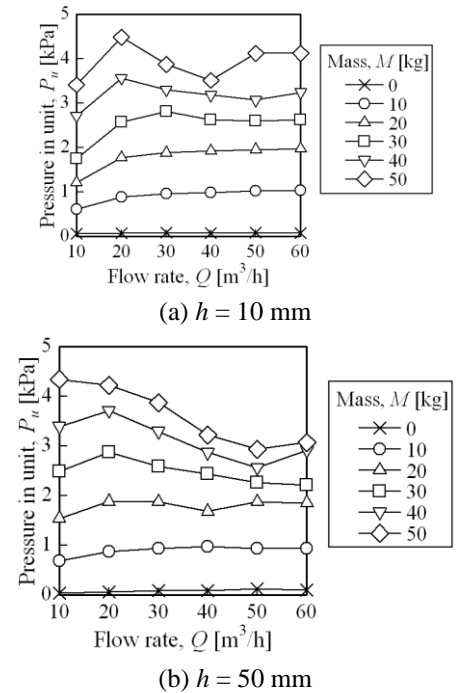


Fig. 12 $P_u - Q$ Characteristic (Air-room type)

Table 4 Stability of air-room type ($h = 10$ mm)

Mass M [kg]	Flow rate, Q [m ³ /h]					
	10	20	30	40	50	60
0	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	△	△	△
40	○	○	△	△	△	△
50	○	○	△	△	△	△

Table 5 Stability of air-room type ($h = 50$ mm)

Mass M [kg]	Flow rate, Q [m ³ /h]					
	10	20	30	40	50	60
0	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	△	△	△
20	○	○	△	△	△	△
30	○	○	△	△	△	△
40	○	○	△	△	△	△
50	○	△	△	△	△	△

5. 結言

本研究ではタンスなどの大型家具の浮上移動装置開発を目的に、噴出型と空気室型の浮上移動装置で実験し比較・評価した。また浮上性能の良かった空気室型でさらに実験を行い、詳細な浮上性能を調べた。その結果以下のことがわかった。

I. 噴出型および空気室型の浮上性能の比較実験

(1) 噴出型の浮上性能には底板素材・空気孔配置パターンによる違いはほとんどない。

(2) 噴出型の引張力は流量の増加に伴って低下するが、本研究では $T = 43.7$ N (噴出格子状型 PET) が最小であり、目標引張力 $T = 40$ N を達成できなかった。

以上の結果より、空気室型は噴出型より浮上性能が良いと判定した。

II. 空気室型の詳細実験

(1) 流量が増えると急激に引張力が低下し、 $Q = 20$ m³/h 以上ではほぼ一定の引張力 $T = 30 \sim 40$ N となる。

(2) 空気室型において、装置内圧力は流量が増加してもほぼ一定あるいはわずかに増加であり、負荷質量が大きいほど圧力は高くなる。また、振動を伴う浮上において圧力は減少する傾向にある。

(3) 空気室型においては安定性に関しては、どの条件においても高流量では振動が発生する。また空気室高さには適切な空気室高さが存在し、空気室高さが低過ぎる場合を除いて、高さが低い程、安定的となる。

(4) 本実験において、安定性、引張力を重視して比較すると、空気室型の浮上性能は $h = 10$ mm が最も良く、 $Q = 10$ m³/h で安定的な浮上移動が可能である。

参考文献

- (1) 国交省住宅局住宅生産課木造住宅振興室：「200 年住宅ビジョン」, pp.1 - 28, 2007.
- (2) 「株式会社コーテック エアスレッド」 < <http://www.cotech-inc.com/airthread.html> > (2011/09/19 アクセス)
- (3) 石本悠真, 赤山優太, 鈴木隆起, 赤対秀明：「重量物の浮上移動装置に関する基礎研究」, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会 講演論文集 No.114-1, pp.7 - 12, 2011.
- (4) P. R. Crewe, et al. : 「ホバークラフトの原理 (高木敬太郎・訳)」, 造船協会誌第 379 号, pp.165 - 171, 1959.
- (5) Qing Shan, et al. : 「Towards an Electric-Powered Air-Gliding Skateboard」, 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Mechatronics, pp.108 - 113, 2008.