

資料

大和製衡における風洞天秤の歴史*

中山和夫** 見方義孝***

1. はじめに

風洞天秤は風洞設備の測定洞に設置され対象物に働く空力3分力(抗力・横力・揚力)、3モーメント(ローリングモーメント・ピッチングモーメント・ヨーイングモーメント)を測定する装置である。測定洞の上部または下部に設置しワイヤまたはストラットで対象物を支持する外装式天秤と、対象物の内部に取り付け測定洞の外部から支持する内装式天秤に大別できる。以下断りのない限り風洞天秤とは外装式天秤を指す。

ライト兄弟による人類初の動力飛行が行われたのは1903年である。その後1930年代になると世界中で飛行機用の風洞が製作され始め、我が国でも多くの飛行機用の風洞が製作された。

我が国では、戦後は飛行機の製作が出来なかったこともあり、風洞の主流が飛行機用から自動車用になり、多くの実車用風洞が製作され、その数では世界一である。

戦前の川西機械製作所および戦後に川西機械製作所から分離独立した大和製衡株式会社が製作した風洞天秤について以下に述べる。

2. 風洞天秤

2.1 風洞とは

風洞とは巨大な扇風機で風を起こし対象物に

風を当て、対象物が飛行機の模型であれば飛行機が空を飛んでいるのと、対象物が自動車であれば道路を走行しているのと同じ状態を作り、対象物に発生する空気力を測定する設備である。

風を流す方法に回流型(ゲッチンゲン型)と開放型(エッフェル型)の2種類がある。回流型風洞を図1に、開放型を図2に示す¹⁾。

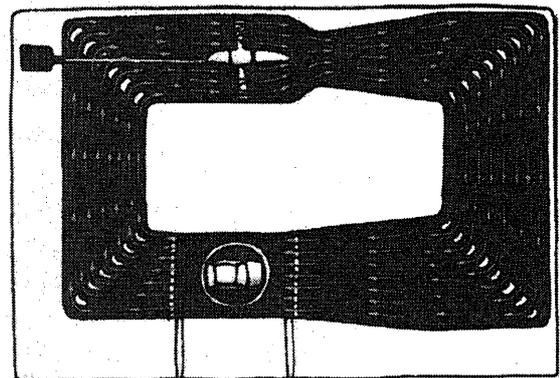


図1 回流型風洞

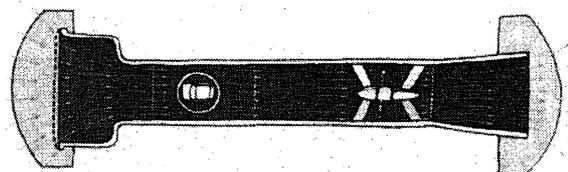


図2 開放型風洞

また風速により、低速風洞と遷音速・超音速風洞に、対象物により、飛行機用、自動車用、建築構造物用、環境・気象用などに分類される。

* 原稿受付 2003年7月17日 ** 〒673-8688 兵庫県明石市茶園場町5-22 大和製衡株式会社

*** 会員 〒670-0805 兵庫県姫路市西中島319-5、〒673-8688 兵庫県明石市茶園場町5-22 大和製衡株式会社

自動車用では対象物の大きさで実車用と模型用(1/2~1/5)がある。

風洞天秤が設置されるのは主に飛行機用、自動車用および一部の建築構造物用である。

2.2 空気力について

風洞天秤は空力 6 分力を測定する装置である。対象物に働く空力 6 分力を図 3 に示す。

- F_x : 抗力
- F_y : 横力
- F_z : 揚力
- M_x : ローリングモーメント
- M_y : ピッチングモーメント
- M_z : ヨーイングモーメント

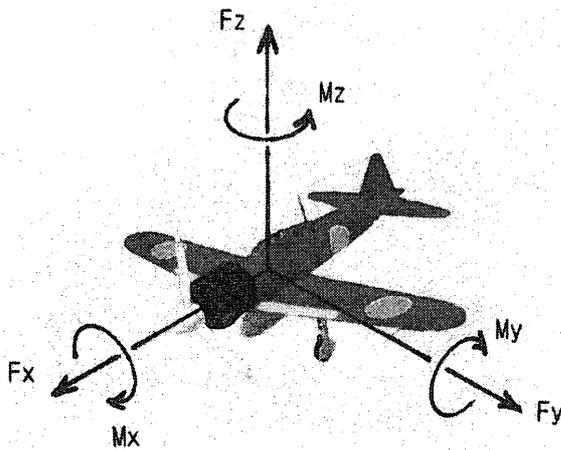


図 3 空力 6 分力

2.3 風洞天秤

風洞天秤を大きく分類すると図 4 となる。

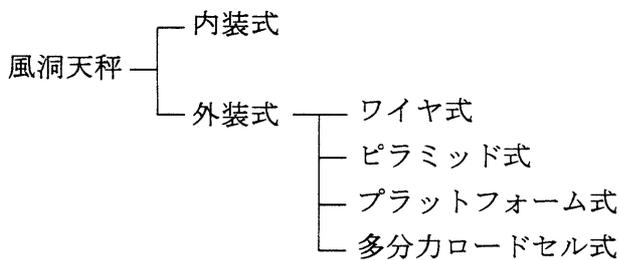


図 4 風洞天秤の分類

2.3.1 内装式風洞天秤

図 5 に示す内装式風洞天秤²⁾は模型専用の $\phi 25\text{mm} \times 250\text{mm}$ 程度の大きさのインナーバラ

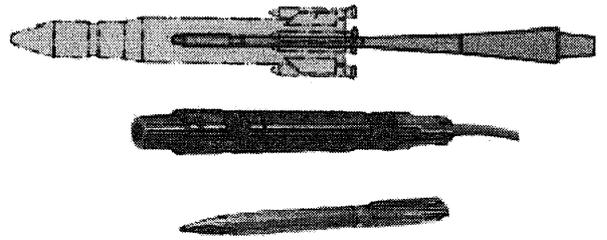


図 5 内装式天秤

ンス式 6 分力ロードセルで風洞の外から対象物を支持する。精度は外装式に比べ劣る。

2.3.2 ワイヤ式風洞天秤

ワイヤ式風洞天秤は、戦前飛行機用として多く製作された。図 6 に示すように対象物をワイヤで支持し、増し錘で天秤を平衡させワイヤに働く力を測定する。迎角は付与できるがヨーイング角は付与できない。

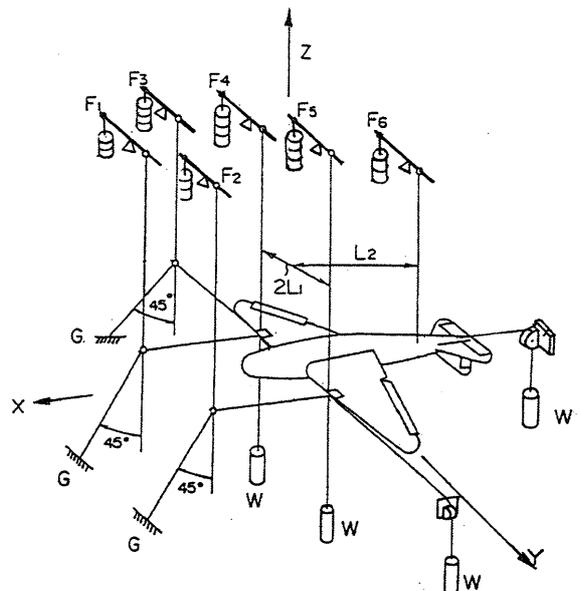


図 6 ワイヤ式風洞天秤

対象物を取り付けるワイヤのアライメントが精度に影響し、天秤を平衡させるのに時間がかかる上、ピッチングモーメントは計算する必要がある。しかし、構造が簡単で、天秤で力を釣り合わせるので空力が理解しやすく、大学などで現在も稼働中の設備も多い。

2.3.3 ピラミッド式風洞天秤

ピラミッド式風洞天秤は、ピラミッド形状を持つ内部浮枠、その外側に配置された外部浮枠、さらにその外側の固定枠からなる3重枠構造である。内部浮枠は外部浮枠からモーメント測定用ロードセルとピラミッド連結棒で支持され、外部浮き枠は固定枠から力計測用ロードセルで支持され、ピラミッドの頂点(ヴァーチャルセンタ)に作用する6分力をそれぞれ単独で天秤で測定する機構となっている。

ターンテーブルに取り付けヨーイング角を付加することが可能である。また、迎角付与装置を取り付けることも出来る。

飛行機の模型をピラミッドの頂点に当たるストラットの先端に取り付け風洞の中央で測定できる、各分力がそれぞれ単独に演算することなく測定出来るなどの長所がある。構造が複雑でメンテナンスが困難、ピラミッド平衡機構のアライメント誤差が干渉になり直接精度に影響するなどの短所がある。

図7にピラミッド式風洞天秤の構造を示す。

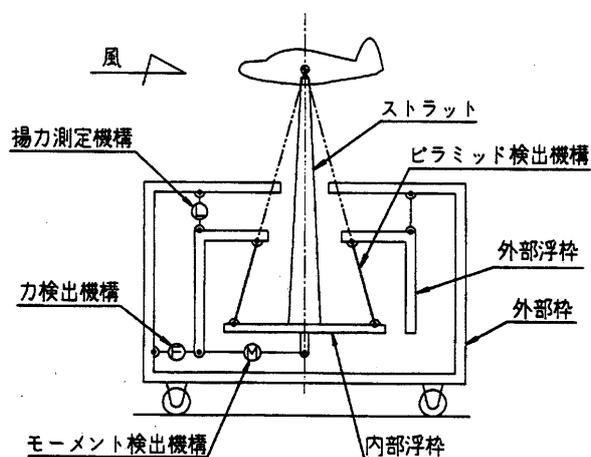


図7 ピラミッド式風洞天秤

2.3.4 プラットフォーム式風洞天秤

浮枠(プラットフォーム)を固定枠上の3本のレバーで支持する2重枠構造で、レバーに揚力測定用ロードセル、浮き枠と固定枠の間に抗力、横力測定用ロードセルを設置する機構である。

各ロードセルの出力をコンピュータで演算し、6分力を出力する。コンピュータを使用することにより各分力間の干渉補正が容易となり、精度が向上した。剛性が高く地震等の影響を受けにくいなどの長所がある。高い位置で測定する場合、ピッチングモーメント成分が大きくなり転倒に注意する必要がある。

ターンテーブルに取り付け、ヨーイング角を付加することが可能である。

ロードセルの高分解能化、A/D変換器の高速、高精度化、コンピュータの高速、低価格化により、演算することのマイナス要素が無くなったことで風洞天秤の主流となってきた。

図8にプラットフォーム式風洞天秤の構造を示す。

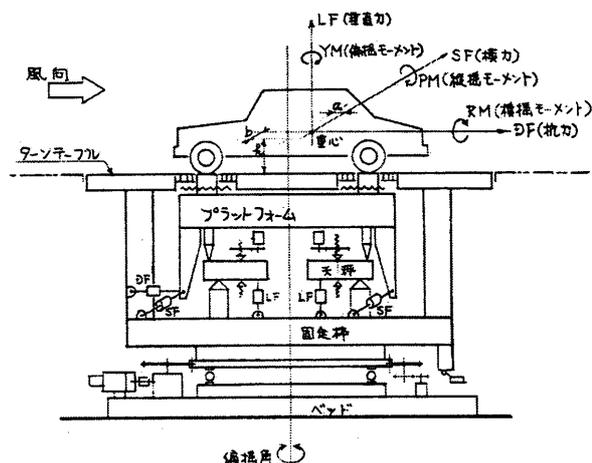


図8 プラットフォーム式風洞天秤

2.3.5 多分力ロードセル式天秤

(1) 実車自動車用

実車自動車用は、各車輪の下に4個の3分力ロードセルを配置して3分力3モーメントを演算し、出力する。構造は非常に簡単である。

ターンテーブルに取り付け、ヨーイング角を付加することが可能である。

ロードセルで直接対象物を支持するため揚力成分の負荷が大きくなり、抗力、横力の分解能を上げにくい。モーメントは演算で求めるためトレッド、ホイールベースの測定誤差がモーメント誤差となる。

(2) 模型自動車用

模型自動車用は、測定洞の下部に設置した 6 分力ロードセルに模型を取り付けて空気力を測定する。構造が簡単で精度の安定性も良く模型自動車用の主流となっている。

3. 大和製衡と風洞天秤

3.1 大和製衡と風洞天秤との関わり

1903 年のライト兄弟の初飛行以来、飛行機の発達に伴い、風洞天秤は発展した。大和製衡株式会社の前進である川西機械製作所は、1927 年にカルマン渦や航空学の父として有名なフォン・カルマン博士を日本に招き、同所の飛行機部のために風洞設備の設計を依頼した。博士はアーヘン大学の彼の助手の一人であるエルリッヒ・カイゼルを日本へ呼び設計に当たらせ、1928 年に我が国最初の風洞設備が完成した³⁾。このときの風洞天秤はドイツ製である。1928 年に飛行機部は分離独立し川西飛行機製作所となった。

飛行機の風洞試験方法に関し陸海軍、大学、公的機関および航空機製造会社の代表からなる航空評議会風洞試験統一主査委員会が 1932 年に「標準風洞試験法」、1938 年に「風洞試験規定」、1942 年に「風洞試験規定覚書」を答申しており、我が国の風洞試験方法の基準となった。

川西機械製作所は 1935 年頃から風洞天秤の製作を開始し、1944 年の第二次世界大戦の終わりまで多くの風洞天秤を製作した。1940 年に風洞天秤の技術向上を目指し東京帝国大学航空研究所の河田三次教授を顧問として招いている。

戦後の 1945 年川西機械製作所から衡器部門が分離独立した大和製衡は 1952 年に図 9 に示す戦後 1 号機のワイヤ式風洞天秤を完成した。

1956 年にロードセル式風洞天秤を完成し、測定の高精度化、省力化を図った。また、1964 年には航空宇宙技術研究所の大型低速風洞用に図 10 に示す東洋一のピラミッド式風洞天秤を納入した。ターンテーブル径は 3m で、迎角が $-30 \sim 40$ 度、偏揺角が $-100 \sim 45$ 度変角出来る。前部

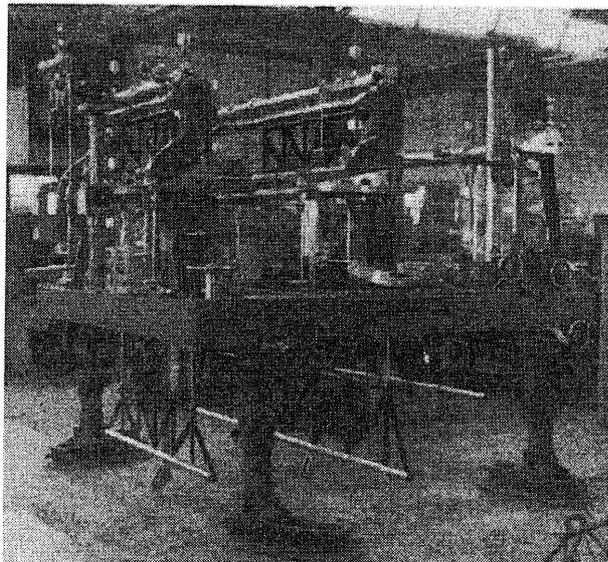


図 9 戦後 1 号風洞天秤

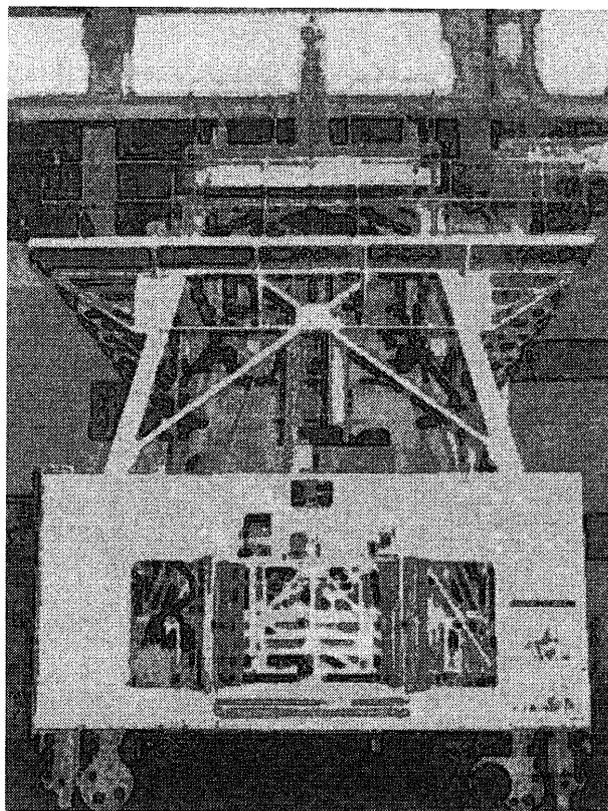


図 10 大型低速風洞用の天秤

2 本と後部の迎角変角用のストラットで模型を支持する。ボーイング 767 の開発や STOL 飛鳥の研究に使用された。

1970 年代に入り自動車の高速化、低燃費化のため自動車メーカーが独自に風洞を製作しだした。実車用風洞の数では世界一であり、現在、

日本国内で稼働している実車用の風洞天秤はすべて大和製衡製である。

1981年に川崎重工に納めた風洞天秤は橋梁模型用で、明石海峡大橋の設計に使用された。

3.2 川西機械製作所の納入実績

川西機械製作所の風洞天秤の納入実績を表1に示す。すべてワイヤ式である。参考として第1揚力のみを表に記載した（(D)は抗力のみ測定、(T)はプロペラトルク用 kgf）。

表1 川西機械納入実績表

製造年	納入先	第1揚力 kgf
1937	横須賀海軍	3000
1937	川崎造船	280
1938	東京帝国大学航空研究所	300
1938	立川陸軍航空研究所	275
1938	九州帝国大学	280
1938	逓信省航空局航空試験所	180
1938	立川陸軍航空研究所	100
1939	災害科学研究所	800
1939	舞鶴海軍	100(D)
1939	東京帝国大学航空学科	50
1939	大阪金属工業	20
1939	陸軍科学所	1
1940	陸軍航空研究所	2400
1940	逓信省航空局航空試験所	180
1940	逓信省航空局航空試験所	50(T)
1940	東京工業大学	170
1940	陸軍航空研究所	280
1940	日本飛行機	170
1940	三菱重工業名古屋	35
1940	名古屋高等工業専門学校	50
1941	川崎航空機	40
1941	川西航空機製作所	170
1941	住金プロペラ製造所	800
1941	中央航空研究所	350
1941	中央航空研究所	60
1941	中央航空研究所	60
1941	中央航空研究所	170
1942	愛知時計	800

製造年	納入先	第1揚力 kgf
1942	海軍航空技術廠	40
1942	三菱重工業名古屋	56
1942	陸軍航空研究所	300
1942	陸軍航空研究所	30(T)
1942	東京帝国大学第2工学部	100
1942	陸軍技術本部	280
1942	川西航空機製作所	1100
1942	京都帝国大学工学部	50
1943	逓信省航空局航空試験所	300
1943	海軍航空技術廠	1600
1943	海軍航空技術廠	160(T)
1943	東京帝国大学航空研究所	900
1944	中央航空研究所	100(D)
1944	日立航空機	180
1944	中央气象台	30
1944	三菱名古屋航空機	900

3.3 大和製衡の納入実績

3.3.1 ワイヤ式

大和製衡になってから納入したワイヤ式風洞天秤の納入実績を表2に示す。

表2 ワイヤ式納入実績

製造年	納入先	第1揚力 kgf
1952	京都大学	10
1954	金沢大学	10
1954	住友金属	800
1955	工業技術院	10
1956	東京大学	60
1957	機械試験所尼崎	400
1957	防衛大学	10
1957	新明和工業	100
1959	航空宇宙技術研究所	400
1959	川崎重工業	1000
1961	新明和工業	150
1962	三菱造船所長崎	240
1963	広島大学	5
1964	名古屋工業大学	100
1964	東京都立航空短期大学	60
1980	三菱重工業長崎	300

3.3.2 他の型式の風洞天秤の納入実績

ワイヤ式以外の風洞天秤の納入実績を表3に示す。

表3 ワイヤ式以外の納入実績

製造年	納入先	揚力 kgf	型式
1956	三菱重工業	440	ピラミッド式
1962	京都大学	400	スティング式
1964	航空宇宙技術研究所	1500	ピラミッド式
1967	九州大学	15	ピラミッド式
1981	川崎重工業	50	ピラミッド式

3.3.3 自動車用風洞天秤の納入実績

1961年に自動車模型用の第1号機であるワイヤ式の風洞天秤を日産自動車に納入した。その後、自動車用として納入した風洞天秤の納入実績を表4に示す。ターンテーブル径が3.5m以上は実車用である。1982年にマツダに納入した模型用は実車用風洞天秤のターンテーブルに設置してある。

表4 自動車用の納入実績

製造年	納入先	ターンテーブル 径	型式
1961	日産自動車横浜	—	W
1969	トヨタ自動車	φ3.8	Py
1970	トヨタ自動車	φ1.0	Py
1971	日本自動車研究所	φ1.2	Py
1979	日本自動車部品総研	φ3.8	M
1980	三菱自動車	φ5.0	Pf
1980	三菱自動車	φ1.0	M
1982	マツダ	φ5.0	Pf
1982	マツダ	φ1.0	M
1983	日産自動車	φ5.0	Pf
1986	日本自動車研究所	φ3.5	Pf
1989	本田技術研究所	φ5.0	Pf
1989	マツダ	φ1.1	M
1989	トヨタ自動車	φ1.2	Pf
1989	トヨタ自動車	φ1.2	Pf
1996	本田技術研究所	φ1.2	M

W:ワイヤ式、Py:ピラミッド式、Pf:プラットフォーム式、M:多分力ロードセル式

1961年に日産自動車に納入した模型用風洞天秤は現在撤去されているが、他の設備は稼働中である。

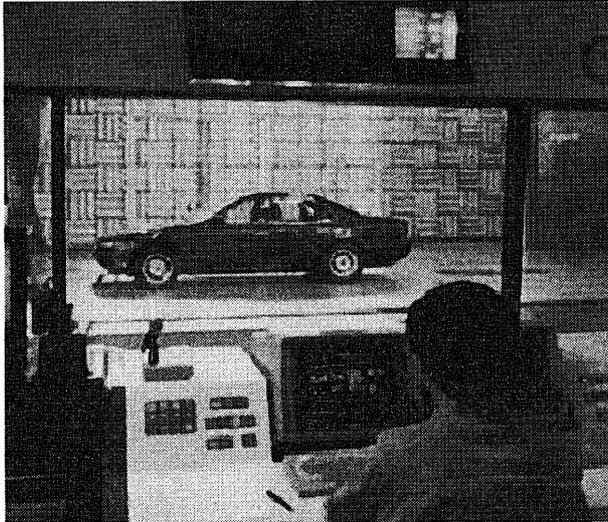
4. 自動車用風洞天秤

戦後、飛行機が製作できなかつたこともあり風洞の主流が飛行機から自動車に遷ってきた。実車用の我が国第一号機は島津製作所が1967年に日産自動車に納入したものであるが現在は稼働していない。また1970年に島津製作所が日本自動車研究所に納入したものは1986年に当社製に置き換わった。

世界の実車用風洞の数は、日本とドイツが7、スウェーデン、イタリア、フランスとアメリカが2、イギリスとロシアが1である⁴⁾。

実車自動車用の一例とし日産自動車の風洞天秤の写真を図11に示す。図11(a)は空力測定中の写真である。風洞内に見えるのはターンテーブル表面だけであるが、図11(b)はその下であり、あまり見ることの出来ない天秤部の写真である。

自動車用風洞天秤について最近の動向について述べる。自動車が走行しているとき道路も風と同じ速度で移動しているが、風洞設備では道路に相当する床は停止している。また走行時にタイヤは回転しているが風洞設備では停止している。より実走行に近づけるために高速コンベヤベルトを地面として使用するムービングベルト式が模型用では実用されていたが、実車の外装式風洞天秤にムービングベルトを取り付けるのは装置が大がかりになるため内装式天秤用しかなかった。最近、イタリアのピニンファリーナがムービングベルトと車輪回転機構を備えた外装式天秤に改造し、アウディもムービングベルトと車輪回転機構を備えた外装式天秤を新設した。今後国内でもより実走行に近いムービングベルト式の需要が高まってくると思われる。



(a) 空力測定中の写真



(b) 計測天秤部

図 11 実車用風洞天秤

5. まとめ

川西機械製作所は戦前の海軍、東京帝国大学航空研究所、中央航空研究所、通信省航空局航空試験所など、公的機関の風洞天秤の半分以上を製作している⁵⁾。また、大和製衡は国内の実車用の風洞天秤の全てを製作している。

飛行機が空を飛んでから 100 年、風洞天秤の技術はほぼ完成しているが実車自動車用にムービングベルト式の付加など技術向上に勤めたい。

自動車用の天秤部の写真は日産自動車株式会社から提供して頂きました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 武藤真理、中村安弘:「おもしろ自動車空力学」 三栄書房、2001
- 2) 日章電機(株) ホームページ
- 3) フォン・カルマン、野村安正訳:「大空への挑戦」 森北出版、1995
- 4) 高木通俊:自動車用風洞の現状、可視化情報 Vol.14 No.3 1994 12/17
- 5) 日本航空学術史編集委員会:「日本航空学術史」 丸善株式会社、1990