

空気軸受け型ロードセルの開発と風洞実験

Development of air suspension method load cell and a wind tunnel experiment

○ 長嶺 輝 (福岡工大大学院) 瀧上 章 (福岡工大) 野田 隆 (福岡工大)
正 鳴尾 丈司 (ミズノ(株)) 正 荻野 毅 (ミズノ(株)) 正 田中 克敏 (東芝機械(株))
正 溝田 武人 (福岡工大)

Hikaru NAGAMINE, Fukuoka Institute of Technology, Wajiro-Higashi 3-30-1 Higashi-ku Fukuoka 811-0295
Akira FUTIGAMI, Fukuoka Institute of Technology
Takashi NADA, Fukuoka Institute of Technology
Takeshi NARUO, Mizuno Corporation, Nankou-Kita 1-12-35 Suminoe-ku Osaka 559-8510
Tsuyoshi OGINO, Mizuno Corporation, Nankou-Kita 1-12-35 Suminoe-ku Osaka 559-8510
Katsutoshi TANAKA, Toshiba Machine corporation, Ouoka 2068-3 Numazu-shi Shizuoka 410-8510
Taketo MIZOTA, Fukuoka Institute of Technology

Abstract

Four components load cell by air suspension method is developed. 20 time's sensitive sensor and mirror for reflection of sensor infrared rays made good improvements for linearity and resolution. Calibration result with this interference toward another direction was obtained. Performance check of this load cell was conducted for aerodynamic characteristics of high speed spinning golf ball in the wind tunnel flow.

Key Words: Resolution, Mirror surface reflection, Calibration, Wind tunnel experiment, Aerodynamic characteristics

1. 緒言

近年、若手ゴルファーのめざましい活躍もあってゴルフに対する人気が高まっている。ゴルフプレーで重要な代表的物理量の一つが飛距離である。1打目に飛距離が出れば、2打目以降のプレーを優位に進めることが出来る。ゴルフボールのディンプルの形状はボールの飛距離に大きく影響している。そこで、ゴルフボールのディンプル形状を変えて変化する空気力を精密に測定するためにこれまで、3分力ロードセルを用いてきたが、測定中の温度ドリフトの問題や測定荷重の大きさなど細心の注意を払うが必要であった。

そのため本研究室では、2007年度から空気軸受け型の4分力ロードセルを用いて精密な測定が行えるように開発を行ってきた²⁾。実際にゴルフボールに加わる空気力は1[N]のオーダーであり、これまで用いてきたレーザー変位計の分解能では満足な精度が得られないことが分かっていた。

そこで、本研究ではそれらの諸問題を解決するために以下のような改良を加えた。

- (1)高性能のレーザー変位計により荷重測定分解能を上げた。
- (2)測定部の反射板をガラスビーズ型から鏡面型に変更した。
- (3)揚力方向の引張りばねを1本から3本に増加させ、バランスを向上させた。
- (4)キャリブレーション装置を改良した。

2. 実験装置と実験方法

2.1 空気軸受け型4分力ロードセル

空気軸受け型4分力ロードセルは、圧縮空気を壁面と底面に送り込みスライド部の摩擦をほぼ0に保つことのできる軸受けである。また、各方向の空気圧の制御はレギュレータで行い、安定して一定量の圧縮空気を送ることができる。

さらに、空気軸受けにはX(抗力), Y(揚力)方向及びZ(横力)方向のスライド部とY軸周りの M_y (空力トルク)方向にそれぞればねを取り付けることで、動作域の制御を行っている。また、各方向には変位を測定するためのレーザー変位計を取り付けている。空気軸受け型4分力ロードセルと引張りばね、レーザー変位計の取り付け位置を Photo.1, Photo.2 及び Photo.3 に示す。

2.2 ばねの取り付け位置

作用した力に比例して空気軸受けを移動させるためにX(抗力), Y(揚力)方向及びZ(横力)方向のスライド部にはばねを取り付けている。また、ばねは予めある程度分かっている作用力の範囲に応じて変えることが出来る。移動量はレーザー変位計で測定する。

2.3 レーザー変位計

レーザー変位計の測定中心距離は30[mm]、測定レンジは、 ± 2 [mm]、最小分解能は0.25[μ m]である。このレーザー変位計は、X(抗力), Y(揚力)及びZ(横力)方向にそれぞれ取り付けられている。変位は、レーザー光の反射位置が移動すると受光部の位置が変わるのでそれを電圧として出力させ変位を求める方式である。

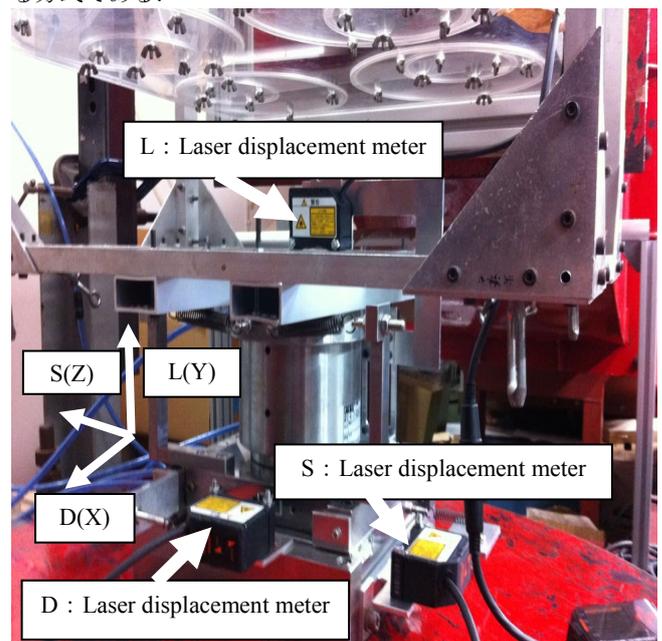


Photo.1 Four components load cell by air suspension method

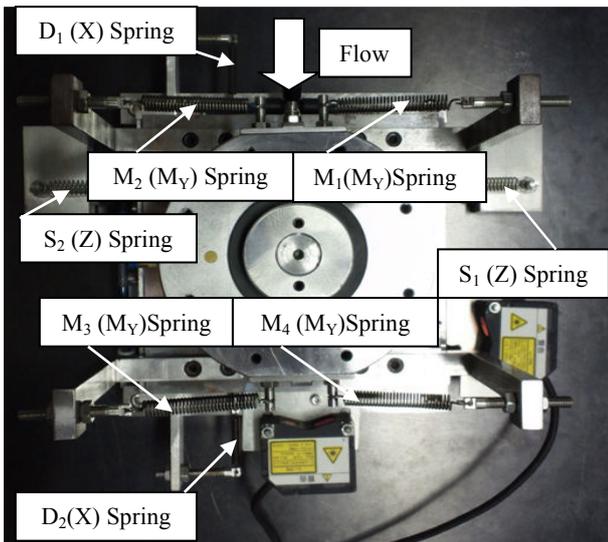


Photo.2 Top view of four components load cell



Photo.3 Side view of spring supported part Y-direction

2.4 キャリブレーション方法の改良

- (1) 荷重と出力電圧の関係を知るためにキャリブレーションを行う。各方向に荷重を掛けると空気軸受けのスライド部がスライドする。変位量を知れば荷重を求めることができる。今回行ったキャリブレーションはX(抗力)方向、Y(揚力)方向、Z(横力)方向の3方向である。Photo.4にキャリブレーション実験の様子を示す。
- (2) 空気軸受けにフレームを取り付け、X(抗力)方向、Y(揚力)方向、Z(横力)方向の3軸を同時稼働させ、3方向のキャリブレーション実験を行った。Photo.5にキャリブレーション実験の様子を示す。
- (3) (2)のような方法では、プーリーが傾いてしまいキャリブレーションに影響してしまう事から、Photo.5に示すようなキャリブレーション用の装置を製作し、プーリーが傾くことを防ぎ、またY(揚力)方向のばねの本数を1本から3本に増やしバランスを向上させる工夫を行うなどの改良を行い、3軸稼働によるキャリブレーション実験を行った。Photo.6にキャリブレーション実験の様子を示す。

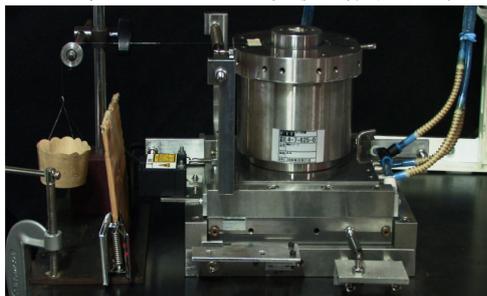


Photo.4 The situation of the calibration experiment by 1 axis operation



Photo.5 Old the calibration and interference effect by 3 axis operation

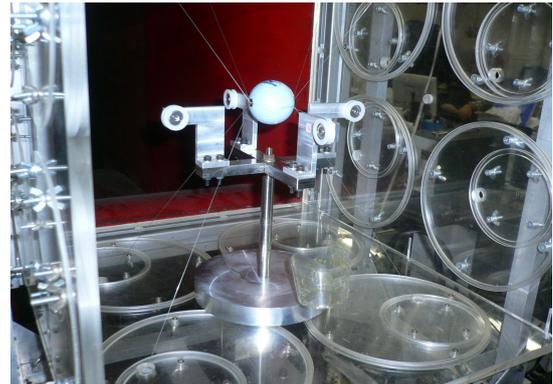


Photo.6 New the calibration and interference effect by 3 axis operation

3. 空気力測定方法

測定は風洞気流中 25, 28, 30, 35, 40, 44m/s の各流速で行い、ゴルフボールにはジェットエアーで回転を加え 200rps から 10rps まで回転減衰させ、その過程でのゴルフボールに加わる空気力の測定を行った。空気力の測定システムの概要を Fig.1, Fig.2 及び Fig.3 に示す。

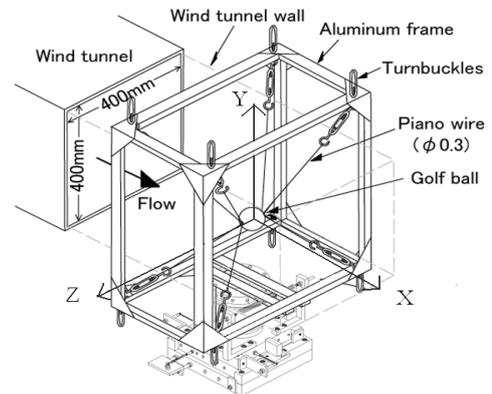


Fig.1 The outline of air force measurement system

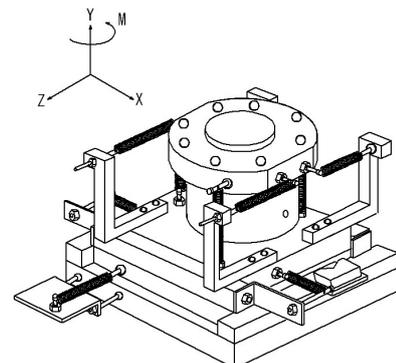


Fig.2 Four components load cell by air suspension type

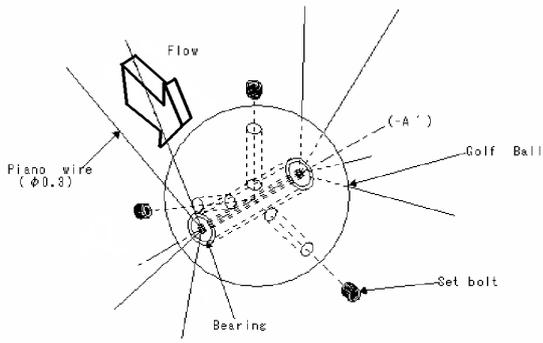


Fig.3 The situation of the rotation balance of a golf ball

3.1 使用記号及び計算式

U : 流速 [m/s] ρ : 空気密度 [kg/m³] d : ボール直径 [m]

A : ボール直径断面積[m²] N : ボールの回転数 [rps]

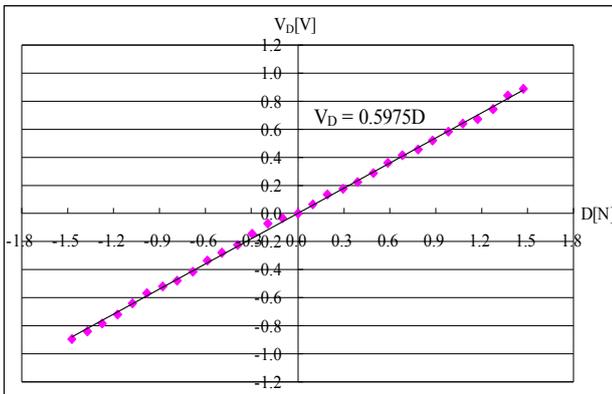
C_D : 抗力係数 S_p : スピンパラメータ

$$C_D = \frac{2D}{\rho U^2 A} \quad S_p = \frac{\pi d N}{U}$$

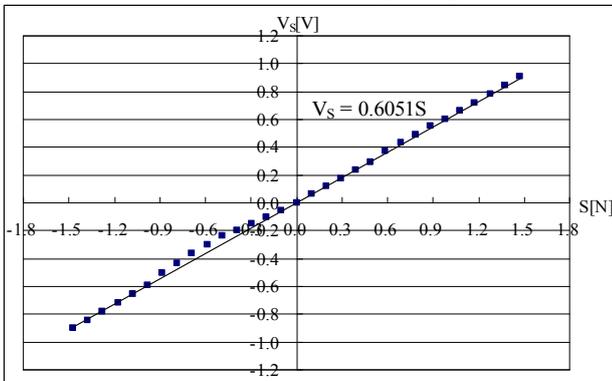
4. 実験結果

4.1 ガラスビーズ反射板を用いたキャリブレーション結果

変位センサーの反射をガラスビーズによって行わせるために、基盤部にこれを貼ってキャリブレーション実験を行った。結果を Fig.4(a), Fig.4(b)に示す。X(抗力), Z(横力)どちらの方向も直線性を得ることは出来なかった。



(a) X-direction (k=1.57[N/mm])



(b) Z-direction (k=1.57[N/mm])

Fig.4 Calibration results of the X and Y-direction by glass beads

4.2 鏡面反射板を用いたキャリブレーション結果

測定部基盤を観察して見るとガラスビーズを貼った測定部の表面粗さが影響していることが分かった。そのため、表面粗さの影響を除く目的で、測定部に鏡を取り付け鏡面で反射させるようにした。改良前後の測定部を Photo.7 及び Photo.8 に、改良後の実験結果を Fig.5(a), Fig.5(b)に示す。どちらの方向も良い直線性が得られた。この結果から測定部基盤の表面粗さがキャリブレーションに影響していたが明確となった。

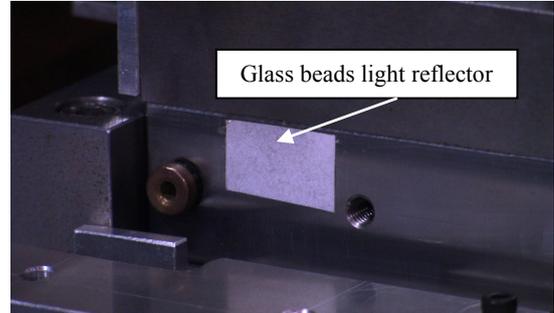


Photo.7 Glass beads surface

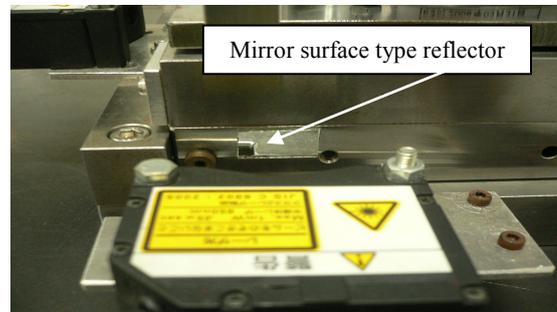
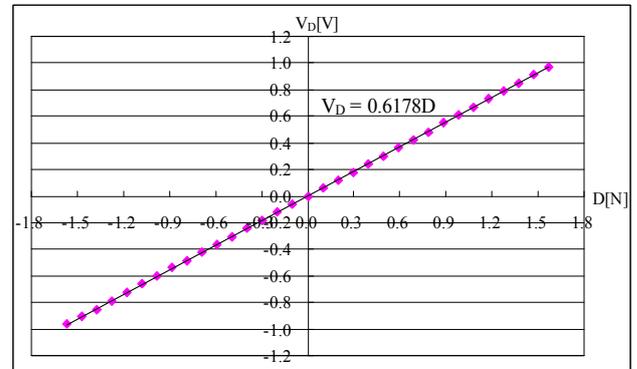
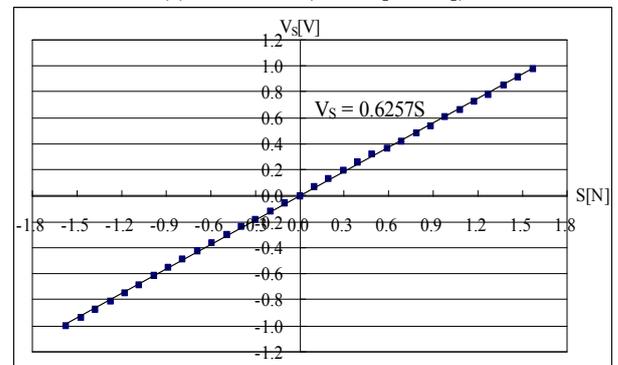


Photo.8 The mirror surface



(a) X-direction (k=1.57[N/mm])

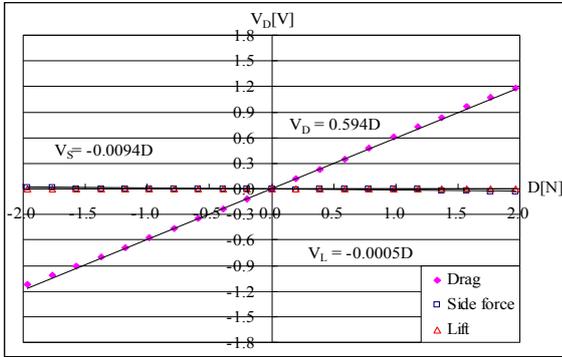


(b) Z-direction (k=1.57[N/mm])

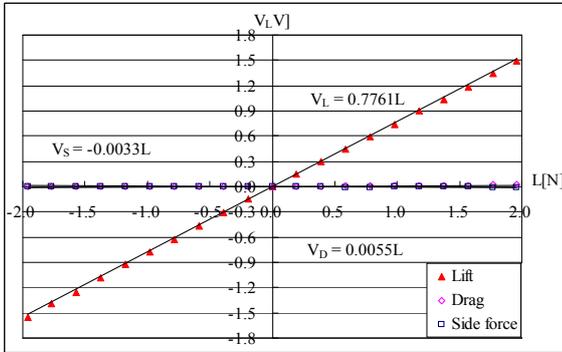
Fig.5 Calibration results of the X and Z-direction by mirror surface

4.3 全軸稼動によるキャリブレーション結果と干渉性

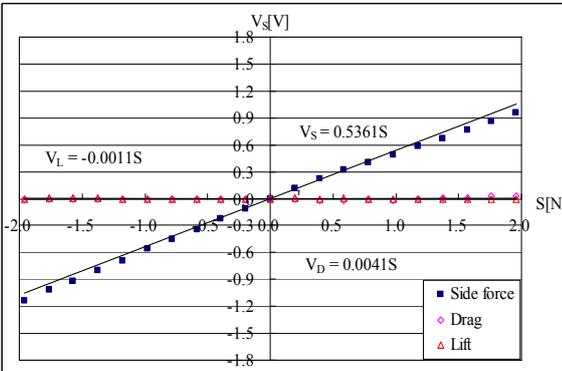
Z(横力)方向キャリブレーション結果で、良い直線性を得ることが出来なかった。また、3方向ともに高荷重になるにつれて他方向への干渉が確認された。この原因としては、プーリーが微小に傾いていたことによりキャリブレーションに影響したと考えられる。各方向のキャリブレーション結果を Fig.6(a), Fig.6(b), Fig.6(c)及び Table.1 に示す。



(a) X-direction ($k=1.57$ [N/mm])



(b) Y-direction ($k=1.32$ [N/mm])



(c) Z-direction ($k=1.57$ [N/mm])

Fig.6 Calibration results of X, Y and Z direction interference effect

Table.1 Linearity and coherence of calibration

	Linearity	All directions-oriented coherence
Variance of drag	1.80%	L : -0.94%
		S : -0.05%
Variance of lift	1.78%	D : 0.55%
		S : -0.33%
Variance of side force	6.59%	D : 0.41%
		L : -0.11%

4.4 キャリブレーション用の装置の製作及びキャリブレーション結果と干渉性

従来では、プーリーが傾いてしまい荷重—出力の直線性が悪くなってしまい、他方向に干渉してしまうなどの影響があった。このような悪影響をなくすために Photo.8 のようなキャリブレーション用の装置の製作を行った。キャリブレーション用の装置を用いたキャリブレーションの様子を Photo.9 に示す。さらに、Y(揚力)方向に取り付けているばねを1方向から3方向に増やし、横転することを防ぐための改良も加え、再度キャリブレーションを行った。Y(揚力)方向に用いたばねを Photo.10 に示す。

また、キャリブレーション用の装置を用いた実験結果を Fig.7(a), Fig.7(b), Fig.7(c)及び Table.2 に示す。各方向とも他方向からの干渉も少なく、非常に良い直線性が得られた。また、Table.1 と Table.2 を見てみると、Z(横力)方向の直線性が向上していた。また、干渉については特に Y(揚力)方向で他方向への干渉性が改善された。



Photo.9 The calibration equipment

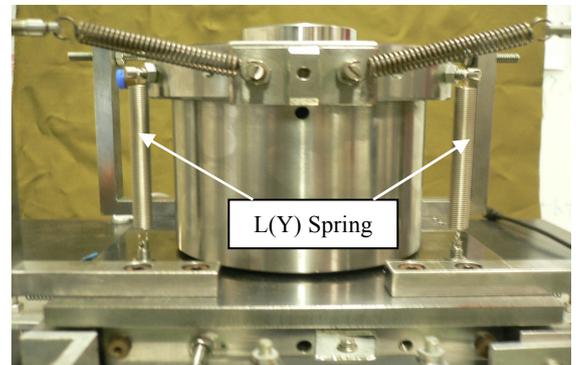
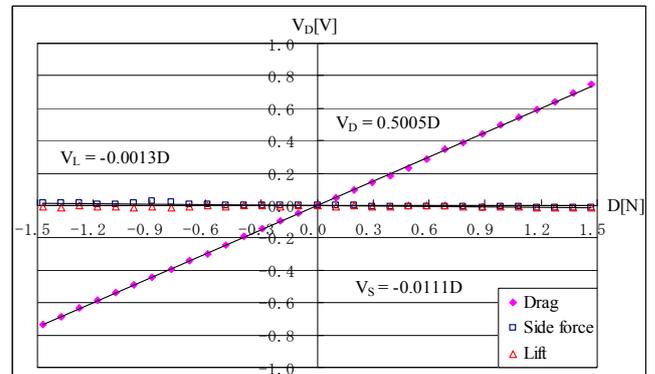
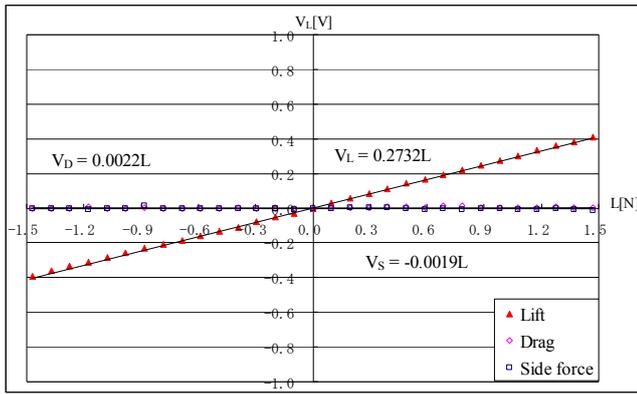


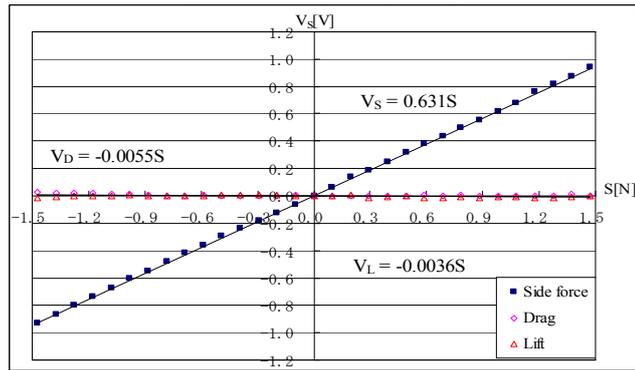
Photo.10 Side view of spring supported part Y-direction



(a) X-direction ($k=2.06$ [N/mm])



(b)Y-direction ($k=0.6$ [N/mm])



(c)Z-direction ($k=1.57$ [N/mm])

Fig.7 Calibration results of X, Y and Z direction interference effect

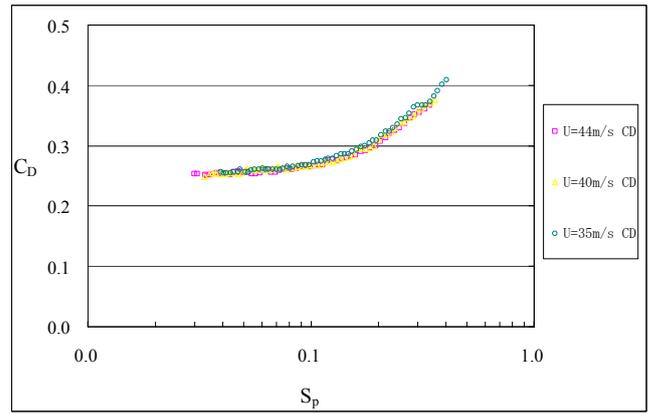
Table.2 Linearity and coherence of calibration

	Linearity	All directions-oriented coherence
Variance of drag	0.40%	L : -0.13%
		S : -1.10%
Variance of lift	0.57%	D : 0.22%
		S : -0.19%
Variance of side force	0.77%	D : -0.55%
		L : -0.36%

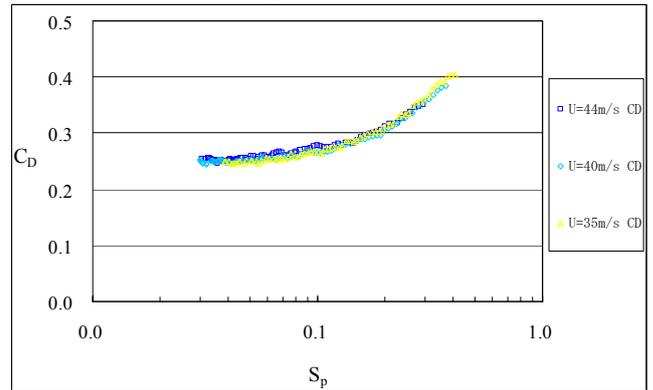
4.5 空気力測定結果

高速で回転するゴルフボールに加わる空気力の測定結果を Fig.8(a), Fig.8(b)及び Fig.8(c)に示す。X(抗力)方向のみ稼動による抗力の測定結果は、レイノズル数に対する依存性は確認されなかった。しかし、流速 25[m/s]時での抗力係数が $S_p=0.1$ を境に増加することが確認された。この原因については現在検討中である。次に3軸同時稼動による抗力の測定結果については、流速 30, 28, 25[m/s]についてレイノズル数に対する依存性が確認された。この原因として考えられるのはゴルフボールが高速で回転し、共振を起こしたために不安定な回転が生じたことやベアリングの不具合などが考えられる。

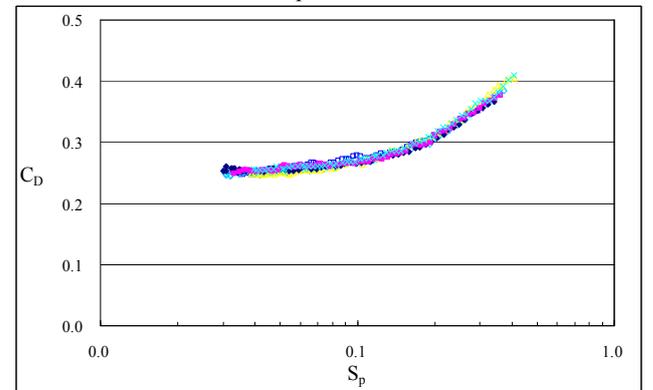
さらに、X(抗力)方向のみ稼動による抗力の測定結果と3軸同時稼動による抗力の測定結果の高流速時における抗力係数を比較すると、レイノズル数に対する依存性もなく再現性のある結果となった。このことから、高速で回転するゴルフボールに加わる空気力の測定が行える見通しが立った。



(a) The drag coefficient C_D measurement result by the direction operation of X



(b) The drag coefficient C_D measurement result by all the axial operation



(c) The direction of X, and the drag coefficient C_D measurement result by all the axial operation ($U=35, 40, 44$ [m/s])

Fig.8 The drag coefficient C_D measurement result of a golf ball

5. 結言

この研究のここまでの結論は以下の通りである。

- 1)変位センサーの分解能を上げ、細かい力の変化を見ることが出来た。
- 2)鏡反射板を用いて荷重一出力に十分な直線性が得られた。
- 3)全軸同時稼動によるキャリブレーションでは、他方向の干渉もなく良い直線性が得られた。
- 4)空気軸受け型4分力ロードセルを用いたゴルフボールに加わる抗力の精密測定が可能であることが分かった。

6. 今後の課題

- 1) ゴルフボールのディンプル形状を変えて変化する空気力の精密測定を行う。

- 2) 野球ボールに加わる空気力の測定を行う。
- 3) ゴルフボールに加わる空力トルクの測定を行う。

7. 参考文献

- 1) 鳴尾 丈司：ゴルフボールの3次元飛翔軌道解析における空気力学的研究，平成16年度博士論文，福岡工業大学
- 2) 小牧 武史：空気軸受け方式による風洞実験用4分力ロードセルの開発，平成21年度修士論文，福岡工業大学
- 3) 小牧 武史：空気軸受け方式による風洞実験用4分力ロードセルの開発：風洞気流中で高速に回転するゴルフボールの空気力測定，日本機械学会，ジョイント・シンポジウム2009 スポーツ工学シンポジウム/シンポジウム：ヒューマン・ダイナミクス，2009-12. 2-3，福岡工業大学