風洞試驗に使用せらるゝ電氣裝置に就て

On the Electrical Equipment for wind Tunnel Testing

吉田喜久次
（設計課）

內容梗概

本文に於ては、風洞に依る航空機部分品の試驗を爲すに當りて使用さるゝ「レオナード」(Leonard) 方式に依る電氣調整裝置に就て記述してある。

1. 緒言

近時に於ける航空機の發達は誠に目まぐるしき有樣であつて、既に數年前の航空機は今日最早其性能は元より、其形狀をすら變じ、吾人をして之を追從するに遑なきの感を抱かしめつゝ、其軍事上の重要性と交通機關の重要性の爲めに、尙各國は巨額を投じて、孜々として航空機器の研究を進めてゐるのである。而して風洞試驗はこの研究に必要缺く可からざるものである。

風洞試驗は彼の Wright 兄弟に依り大なる直徑を有するパイプの中に、「ブロアー」を以て空氣を吹込み二三の初步試驗の行はれたのを以て嚆矢とする事が出來るであらう。然し乍ら風洞裝置を使用する科學的な實驗研究は、今世紀の初め Eiffel に依つて初めて爲されたのであつた。彼は航空力學上遭遇する種々の力を決定する爲めには、綿密なる而も連續した實驗の必要である事を認め、今日所謂小風洞と稱ばれてゐるものを作つた。こゝに於て風洞內の空氣の流れ、或は試驗さるべき模型プロペラの回轉數等の制御が必要となつて來たのである。

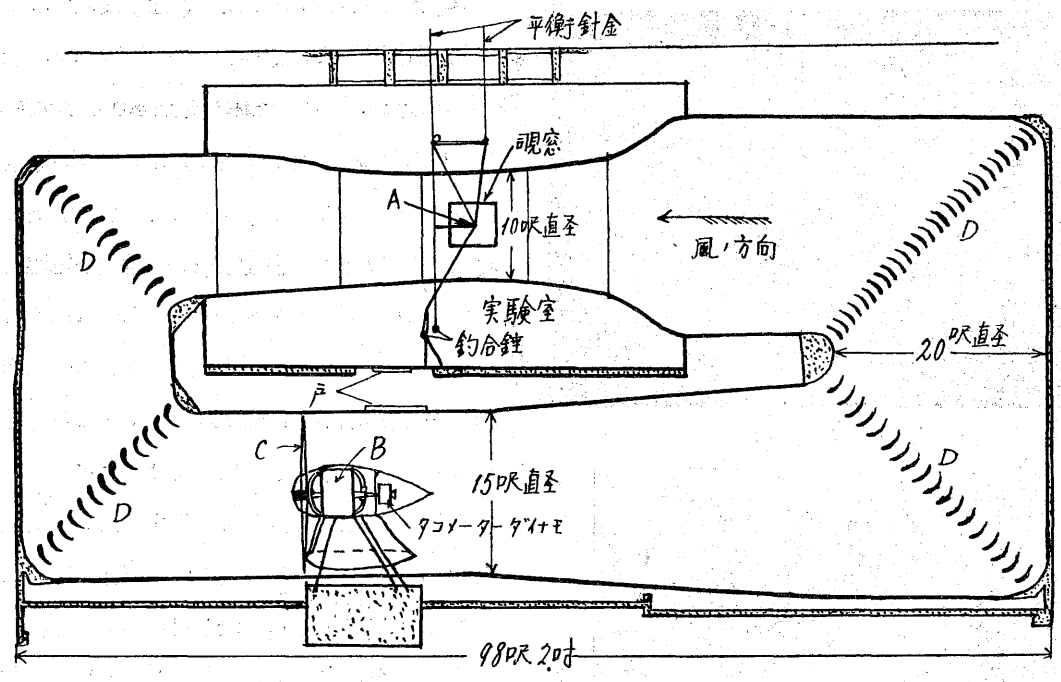
Eiffel に前後して、Riabouchinsky (露)、Prandtl (獨)、Zahm (米) 等の人々に依り種々の研究がなされ、之等の前唱的研究の後遂に今日の夥しい風洞を生ずるに至つた。

然るに之等多くの試驗の結果、所謂レイノルヅ數なる言葉を以て稱えられてゐるものゝ影響と、空氣の風洞內を流れる際に生ずる渦流卽ち動亂の影響との二つの重なる原因に依り、模型に於て得たる實驗の結果を滿足し得べき正確度を以て、實際のものに換算する際に非常な困難を生ずる事が解つた。現今の風洞に於ては之等の影響を避ける爲め模型は次第に大となり、風速は益々增加し、從つて大なる風洞に大なる力量が必要となつて來たのである。例へば風源として使用さるゝ電動機は 400 乃至 1,000 馬力或は更に大ならんとし、プロペラ模型用電動機は 20 乃至 50 馬力を要する樣になつたのである。

2. 風洞

電氣裝置に進む前に先づ簡單に風洞に就て述べて置く必要がある。

現在作られてゐる風洞には種々あれ共、之を大

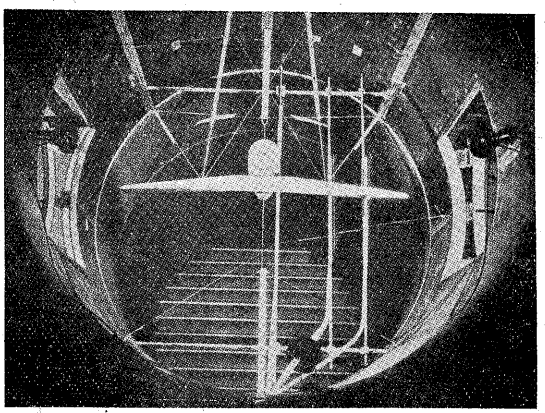


第一圖　閉回路風洞の縦斷面圖一例

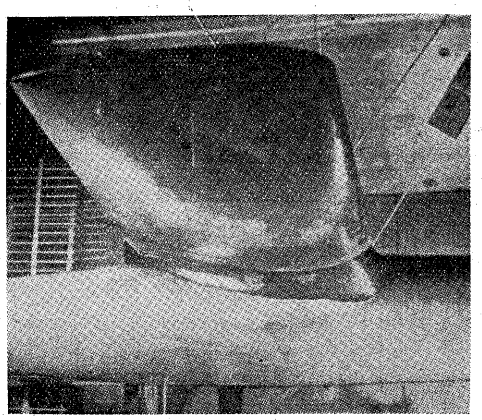
別してベンチユリ型（Venturi Type）と閉回路型（Closedcircuit Type）との二つとする事が出來るであらう。

ベンチユリ型とは單にベンチユリ管の形をせる風洞の出口にプロペラ卽ち通風機の設置せられたるものであつて、模型は風速の最大なる最小直徑の部分に支持される。又閉回路型とは風洞の出口に來た空氣が再び入口に導入せられ、空氣の一閉回路を形成する樣に作られたものである。而して一般に前者は後者に比して風洞の能率は良好であるが非常に大なる規模を必要とし、又動亂の現象は後者に比して多いと云はれてゐる。第一圖は所謂ゲツチンゲン型（Göttingen Type）と稱えられてゐる處の閉回路型風洞の一例を示す。圖中Aは試驗さるべき模型であつてBは所定の風速を與ふる直流電動機である。この直流電動機の回轉を制御し、之に直結せられたるプロペラCに依つて任意の風速を生ぜしむるのである。Dは風の方向を轉換せしむるベーン（Vane）を示す。斯の如く電動機を風洞內に設置せるものと、單にプロペラのみ風洞內に置き電動機は風洞の外部に設置せられ長い軸を以て之等を直結したものと二種類ある。我國に於ては中島飛行機製作所には前の方法が採られ、陸軍航空本部、東京帝大航空研究所等には後の方法が採用せられてゐる。

第二圖は風洞內に針金に依つて支持せられた模型を示し、第三圖は其模型の一例を示してゐる。第二圖の模型の後方に見える多くの橫條はベーン



第二圖



第三圖

浮揚力を測定する爲め模型は反對に釣られてゐる

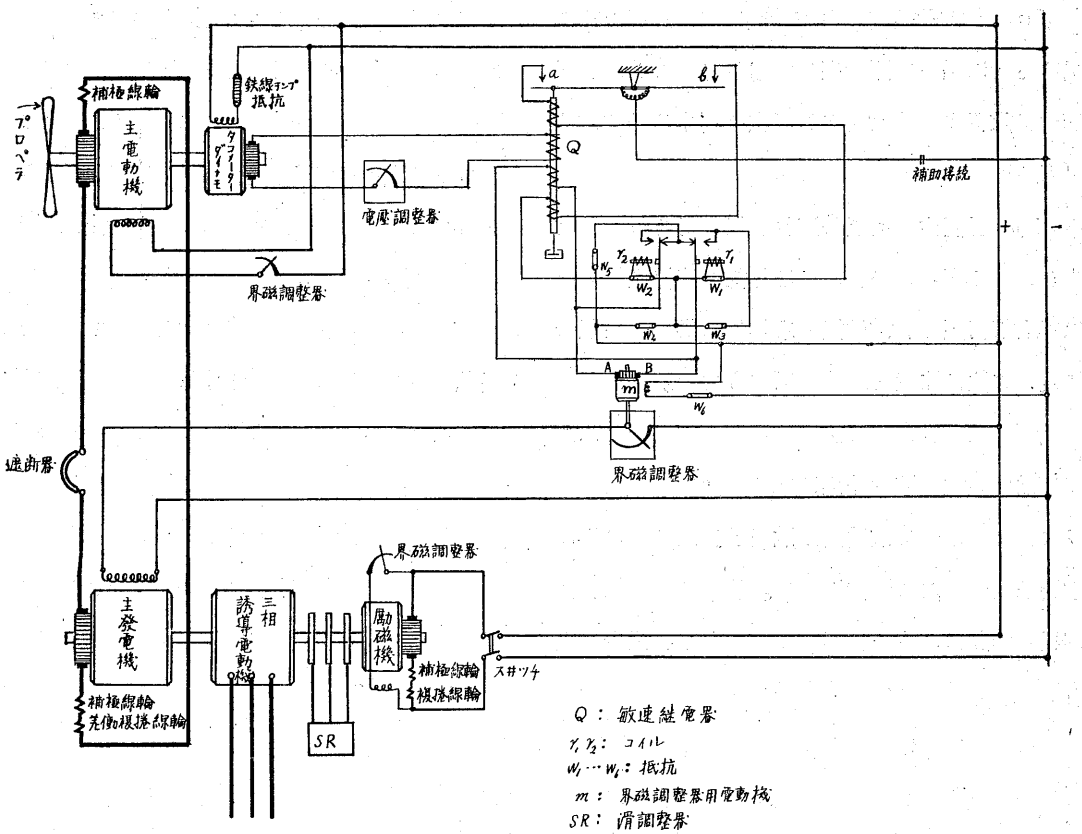
の一部分である。

斯の如くして模型に或る風速を加え、恰も飛行機の空中に飛揚せると同じ狀態にして、機體、翼或は器具の試驗がなされる。又模型プロペラの試驗は一の流線形外殼に依つて包まれたる電動機に之を直結し、風洞内に或る風速を與えつゝ、その中に於て、この電動機に依つて模型プロペラの回轉を變化して行はれるのである。

3. 制御の方法

上に述べた如く、風洞試驗に於ては綿密な連續せる實驗を必要とするが故に、電動機に要求される回轉數の變化は、例へば 30—600 r.p.m. 或は 10—450r.p.m. と謂つた様な廣範圍のものであり、且つ其回轉數の正確度は ±0.25% 以下と謂ふ如き極めて大なるものでなければならない。斯の如き廣範圍の變化には直流電動機の電機子電壓を制御するレオナード制御方式(Ward Leonard Controlling System) が最も適當であり、斯の如き正確度は一に繼電器の正確度に依つて定まる。然も直流機に取つて幸な事には負荷はプロペラである爲め回轉の三乘に比例して變化する故、主電動機或はレオナード制御發電機等の整流作用等の困難な問題は割合に簡單に解決し得るのである。

第四圖は當社に於て採用しつゝある自働的制御方式の圖形接續を示す。圖中タコメーターダイナモ (Tachometer Dynamo) とは回轉數と發生電壓とを完全に比例せしむる特殊の構造を有する發電機にして、Qは敏速繼電器である。先づ三相誘導電動機を回轉し勵磁機のスヰツチを入れ、次に界磁調整器を加減して勵磁機を規定の電壓にする。然る時は主電動機及タコメーターダイナモ、界磁調整器用電動機(m)の界磁は各々規定の値に勵磁せられ、又遮斷器が這入る。遮斷器が這入れば補助接續が働き (+)—W_4—r_1 を經て敏速繼電器(Q)の a 接點を通じて電流が流れ、r_1 に依つて (+)—W_5—A—B—W_3—r_1—a—(−) の回路を作つてmは回轉し、mに直結せられた界磁調整器の抵抗を減じて主發電機の勵磁を初める。主發電機の電壓の上昇に從ひ主電動機或はプロペラ電動



第四圖　自働制御方式の一例

機は回轉するのである。今電壓調整器を或る任意の回轉數Nを與ふる位置に採つて置けば、其回轉數より僅か大となればQは敏速に働き a 接點は離れ、b 接點が接續する。然る時は又(+)—W_4—r_2—b—(−)の方向に電流が流れ、r_2 に依り(+)—W_5—B—A—W_3—r_2—b—(−)の回路を作つて m は逆回轉を初める。斯の如くして敏速繼電器に依り、a 或は b の接點を常に働作せしめ欲する回轉數Nを保つのである。圖は簡單なる說明の爲めの接續を示したものであるが實際は主發電機用界磁調整器にも粗抵抗器と精密抵抗器の二種類を用ひ、電壓調整器も電動機に依つて働作せしめる等全てを押釦一個でなさしむるのである。之等は自働的調整の方法であるが、更にこの外別に手働的に調整せしむる方法をも併用し、切換スヰツチに依つて何れをも使用し得る如く製作されてゐるのである。

勵磁機を複捲とせるは、負荷の增減に依る電壓の變化を小ならしむる目的の爲めであつて、主發電機を差働複捲とせるは後に述ぶるが如く主電動機の回轉を安全にせむとする爲めである。

4. プロペラ電動機

プロペラ電動機或は主電動機は之を風洞外に設置する時は通常の開放型を使用し得るも、之を風洞内に設置する時は大なる考慮を要するのである

即ち

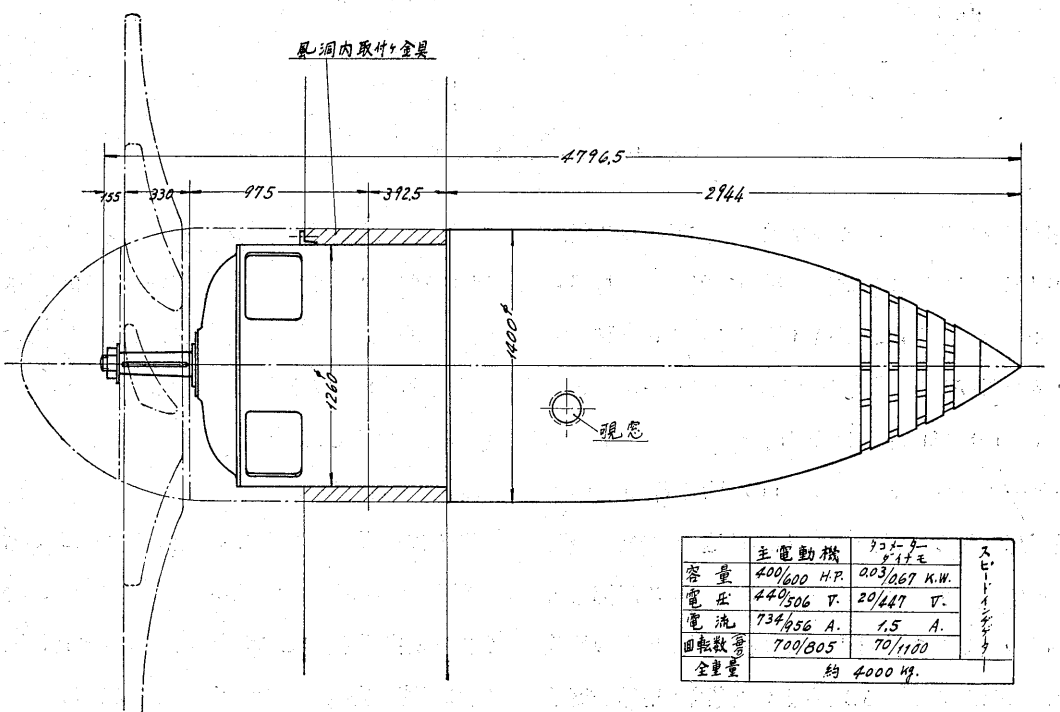
（1） 風洞内の空氣の流れを出來得る限り變化せしめざる事。この爲めには外部を流線型外殻を以て全部密閉し、電動機の冷却用に供する空氣の出入の方法に注意せなければならない。

（2） 限られたる風洞内の空間に電動機を設置する爲め、電動機の外徑は或る程度以上に大とし得ない事。從つて電動機は電機子直徑の小なる、電機子長の大なる機械となる。然るに設計上直徑と長さの間には或る範圍の比例を有し、電機子長を餘りに大とする時は整流作用は困難となり又械械的にも軸撓み等の問題を生ずる。

（3） プロペラ負荷なる爲め、非常に大なるスラスト（Thrust）を軸承は受ける。風源用電動機にあつてはこの値は10或は15噸と謂つた様な數字となる事がある。

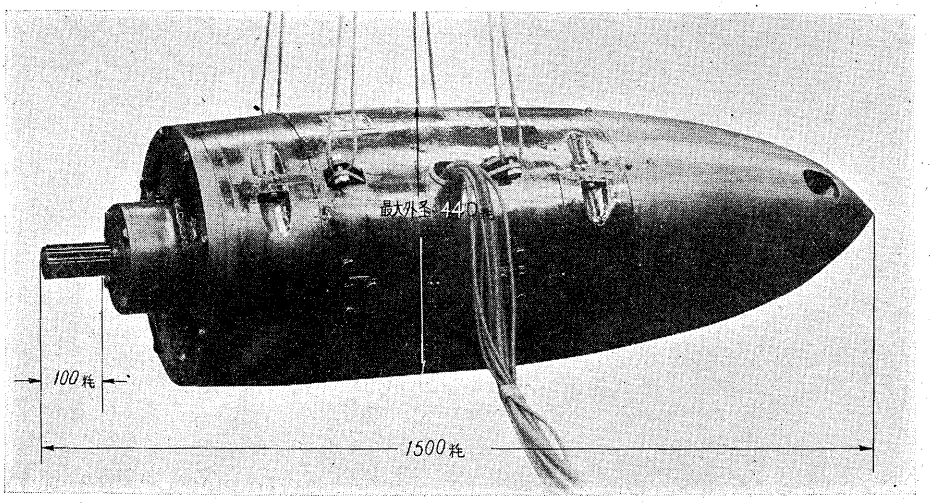
（4） 電動機はプロペラに依つて生ずる全ての振動に對し、遙に大な自由振動數を有する様に頑丈に設計せられなければならない。何故なれば振動數の一致は總ての點に於て悪しく殊に回轉數に誤謬を與ふるが爲めである。

（5） 高壓空氣の循還する爲め風洞内の溫度は可成り高くなり濕度も大きい。故に電動機は自身



	主電動機	タコメーター ダイナモ	スピードインヂケーター
容量	400/600 H.P.	0.03/0.67 K.W.	
電圧	440/506 V.	20/447 V.	
電流	734/956 A.	1.5 A.	
回転數 毎分	700/805	70/1100	
全重量	約 4000 kg.		

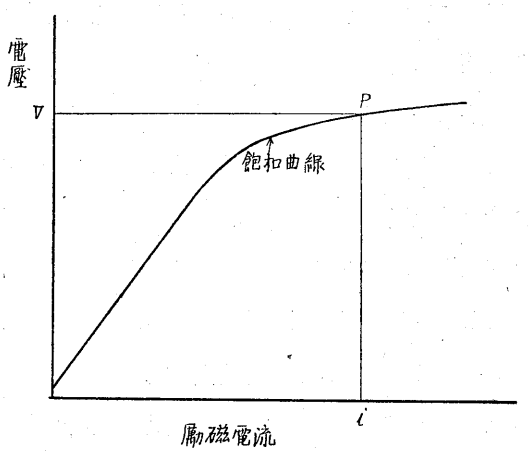
第 五 圖



第　六　圖

の溫度上昇を能ふる限り低からしめ絕緣物或は絕緣塗料等に特殊の考慮を要する。

等の諸點である。之等の諸條件は潛水艦用の諸電動機に依り生ずる諸條件と甚だ類似してゐるのである。當社の永き潛水艦用諸電動機に對する經驗を基礎とし、上の諸條件を考慮に入れて作られたるものが第五圖及第六圖である。第五圖は中島飛行機製作所風洞內に設置せられたる 400/600 H.P. 440/506 V 700/805–1,100 r.p.m. の電動機の外徑寸法であり、第六圖は海軍航空廠風洞內に設置せられたる模型プロペラ試驗用 50 H.P. 440 V 6,000 r.p.m. 電動機である。之等二つは最近當社に於て製作せる風源用プロペラ電動機及模型プロペラ試驗用電動機の各々一例であるが、之等の電動機には何れも前に述べたレオナード自働制限方式を採用してゐる事は勿論である。尙斯の如き目的に使用せらるゝ電動機の今一つの特徵とする所は負荷の變化に對する回轉數變化の小なる樣に設計せられてゐる事である。

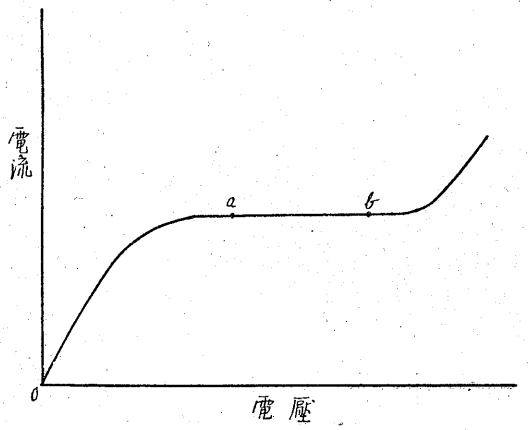


第　七　圖

5. タコメーターダイナモ

(Tachometer Dynamo)

タコメーターダイナモは通常主電動機に直結せられてゐる。場合に依つてはギヤー (Gear にて聯結せられる事もある。この發電機の特徵とする所は電壓と回轉數を完全に比例せしむる爲め、發電機に使用せる銅線抵抗の變化による誤差を與ふ



第八圖

る限り除いてゐる點である。例へば刷子には特に接觸抵抗の大なる物を使用し、又發電機は飽和曲線第七圖に見る如く非常に飽和度の高い點Pに於て使用されてゐる。勵磁電流 i の僅かの變化に對し電壓Vの變化を小ならしめんが爲めである。而もその界磁線輪に直列に第四圖に示す如く鐵線ランプ抵抗（Iron Lamp Resistance）を入れて更に勵磁電流 i の變化を防いでゐるのである。鐵線ランプ抵抗とは第八圖に見る如き特性を有し、本裝置には特性曲線中の a—b の部分を使用する。即ち加えられたる電壓の可成りの變化に對して電流の變化の殆ど零なる部分を利用してゐるのである。故にタコメーターダイナモとしては、先づ勵磁機を複捲とする事に依り電壓の變化を小ならしめ、次の鐵線ランプ抵抗に依り一定の電流値をその界磁線輪回路に保ち、更にダイナモ自身にては飽和度の高き點を使用する三段の方法を合して、タコメーターダイナモに依る誤差を實驗上零の正確度に置ゐてゐるのである。

6. 電動發電裝置

この電動發電裝置は通常風洞室とは別の室に設置せられる。故に普通の開放型が用ひられる。特に主發電機を差働複捲發電機とし僅かの電動機安定用差働複捲を附加してあるのは、前に述べた如く負荷は回轉數の三乘に比例して變化するものなる故、何等かの原因に依りプロペラ電動機が急に回轉數を增加したとすれば主發電機の差働複捲を流れる電流は急激に增し、從つて主發電機の電壓は下り、プロペラ電動機の回轉は下るのである。

又主發電機が遮斷器の這入ると同時に、其殘留磁氣に依り電壓を生じプロペラ電動機の起動を初むるが如き事を防ぐ爲め、主磁極間に殘留橋（Remanenzbügel）を作つて殘留磁氣を防いで居る。

勵磁機、三相誘導電動機は通常のものであるが過負荷容量の大なるものであり又誘導電動機は負荷の性質上特に滑り（Slip）の小なる樣設計せられてゐる事は謂ふ迄もない。

7. 結　　言

以上に於て、風洞試驗に供せらるゝ電氣裝置に就て簡單に其制御方法及主要部分を述べ來つた。

過去に於て幾多の之等の裝置を製作し尙現在製作しつゝある富士電機は、常に航空機の發達に伴ふ諸試驗裝置の要求に從ひ、嘗て ±0.5% の回轉數正確度は現在± 0.2—0.25% にせられ、更に縮少せしむべく研究を續けてゐるのである。今迄述べ來つたものはプロペラ電動機一基を運轉し、之を制御する場合であるが、之が二基或は四基となつた場合然も之等が完全に同一の回轉數を保ち、

一の主發電機に依つて同時に制御せんとするが如き場合、制御方法は今迄述べたものと同一とし得るも、横の聯繋とも謂ふべき全電動機の同期化なる問題を如何にして實現するやの興味ある問題に對しても研究を進めて居るのである。

球人軸受ころ入軸受を採用して得た利點の數々

Electrical World, Dec. 9. 1933 Vol. 102. に次の様な興味ある記事が載つて居る。

第一例　The Eberhead Faber Pencil Co. は其 Broocklyn 工場を直流より交流に變更するに當つて、從來のバビツト合金を用ひし油環式軸受を廢し球入軸受附モーターを採用した處、同程度の使用狀態に對する兩種軸受の比較が判然とした。

從來の油環式軸受の欠點は

（i）　木屑、塵埃の浸入を防ぐ事が出來なかつた。又油滴が外部に滴れて木屑等に附着し、火災の危險が多かつた。

（ii）　軸受は略毎週一回油を注き又は取換へをなし年に少くとも 35 回は必要であつて、モーターの休轉時に行ふ爲運轉手は時間外勤務の必要があつた。此の様に點檢に時間を費しても尙燒けたり、磨滅の爲に休轉を餘儀なくされて工程に支障を來し、間接の損害が相當にあつた。

球入軸受を採用した處上記の欠點が全く無くなり、取換へ油、人手間等の費用丈でも 125臺のモーターに對し年に約 500 $ の節約となつた。

第二例　The Star Box & Lumber Co. New York にはグラインダーモーターが常に鋸屑の中に埋れて居り、而も連續で運轉して居るが其球軸受は二年に一回のグリース塡換へで完全に運轉し、殆んど點檢の要がないと云ふ。

然るに同工場の油環式軸受モーターは常に點檢を必要とし、而も尙時折は燒損、磨滅等の故障で大きな直接間接の損害を與へて居る。

第三例　The Sloss-Sheffield Steel & Iron Co. Birmingam の例である。此工場は廣範圍の運轉系統に對して球人軸受を採用した。移動沈水ポンプ、遠心ポンプ、鑛山機關車用トロリーのスウイベル、ベース及び鑛山用機關車電動機の軸受等である。從來は油漏れで整流子面を汚して整流作用を害し、刷子、バーの磨滅が激しかつたが之等の欠點が無くなり同時に捲線の絕緣低下も除外し得たのである。

第四例　The Consolidated Gas Electric Light & Power Co. Baltimore の West port 發電所ではストーカー、廻轉スクリーン、遠心ポンプ、溫水ポンプ、フイードポンプ、循環水ポンプ等の軸受を球入軸受に變更した。種々比較された內時々面白く思はれる點は

（i）　起動電流が 50% 少くなつた。從つてストーカーモーターは⅓丈小さい容量のもので間々合ふ事になつた。

（ii）　舊軸受モーター故障の中 85% は軸受であつた。

（iii）　床面積が少くなつた。

以上の興味ある例を見てもボール、ローラー軸受附モーターの優秀な性能が裏書され、近き將來は汎ゆる方面に亙つてボール、ローラー軸受附モーターが在來の油環式式軸受モーターに置換らる事と思はれます。ボール、ローラー軸受を使用になつた各方面の方々から各々に就て欠點、特點を比較御報告下さらば記者のみならず各方面に於て利する處は甚大であらうと思ひ、御願ひする次第であります。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。