

大型航空機の誘導路における走行特性

MOVING BEHAVIOR OF LARGE TYPE AIRCRAFT ON TAXIWAY IN NEW TOKYO INTERNATIONAL AIRPORT

笠原 篤*・阿部洋一**・片岡孝三***・荻島 徹****

By Atsushi KASAHARA, Yoichi ABE, Kouzo KATAOKA and Toru OGISHIMA

A moving speed and a wheel load of an aircraft are important factors of airport pavement structural design. The wheel load is a combination of the type of the aircraft, gross weight and tire pressure. The moving speed and wheel path distribution pattern varies by the type of the airport pavement. An equipment was developed to measure the speed and the wheel path distribution of large type aircraft on the taxiway in New Tokyo International Airport. The equipment consists of three sets of laser beams. Two sets of the laser beams are installed in parallel crossing the taxiway. One laser beam is installed at 45 degree angle to the center line of the taxiway.

The observed mean speed of aircraft was about 40 km/h. The Two-parameter logarithm normal distribution can be used to plot the speed distribution.

The distribution of offsets of the aircraft from the center line of the taxiway can be expressed as the normal distribution. It was observed that the wheel path maximum offset of the main gear was 10 m from the center line of the taxiway.

Keywords: aircraft, distribution, moving speed, taxiway, wheel path

1. ま え が き

空港の基本施設の舗装は、エプロン、誘導路、滑走路に大別され、これらを総称して空港舗装とよんでいる。航空機荷重の大きさおよび走行速度（載荷時間）がおのおのの舗装において異なることから、空港舗装に要求される機能も異なる。

航空機荷重が最も大きくなるのは、燃料を満載した離陸時である。一般には滑走路に着陸するときの衝撃荷重が最も大きいように受け取られるが、着陸機は燃料を消費していること、接線着陸を行っていることから揚力がゼロになっていないことなどにより、離陸時よりも小さいとされている。このように航空機の走行経路を、総重量と走行速度を考慮すると、荷重条件が厳しいのは、エプロン、誘導路、滑走路の順となる。

エプロンには静止荷重が作用し、主として舗装のクリープ変形が問題となることから、ほとんどの場合コン

クリート舗装が施される。

誘導路の走行時の速度は各航空会社の内規で規定されている。たとえば日本航空においては、乾燥路面の直線部では46.3 km/h (25 kt) とされていることから¹⁾、道路交通と大差ないといえる。このことから、誘導路には、アスファルト舗装またはコンクリート舗装が施されており、アスファルト舗装の場合には走行軌跡が集中することによるわだち掘れ、脱出誘導路では、ずりやねじりのせん断による変形やひびわれが問題となっている。

航空機が離陸するとき、滑走路端部でブレーキをかけたままエンジンの出力を上げフルパワーの後、ブレーキを開放し加速し離陸する。このようなことから、アスファルト舗装では、クリープによる変形、グルーピングの目潰れなどが問題となる。なお、滑走路端部（一般に滑走路延長の1/5）と誘導路では荷重が同一であることから、舗装構造が同一となっている。滑走路中間部では、離陸の場合、航空機の速度が高くなるにつれて揚力が作用し荷重は小さくなることから、滑走路端部より中間部の舗装厚を薄くしている。また航空機が離着陸する場合、滑走路の中心線（幅900 mm）上に前脚が載るように操縦すること、さらに中心線灯の普及および精密進入のための機器の誘導精度が高まったことなどにより、航空機の走行位置は、滑走路の中央部に集中している。このこと

* 正会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科

(〒006 札幌市手稲区手稲前田419-2)

** 正会員 工博 新東京国際空港公団調査役 空港計画室

(〒103 中央区日本橋2-4)

*** 正会員 新東京国際空港公団次長 工務部

**** 新東京国際空港公団課長代理 工務部舗装課

(〒282 成田市三里塚御料牧場1-2)

から、滑走路の舗装は、航空機荷重の大きさと荷重の集中度を勘案して、図—1 に示されているように、横断的には中央帯と縁端帯で、縦断的には端部と中間部で舗装構造を変えて設計している。なお、タッチダウンポイントは滑走路端から 300～350 m の地点であることから、滑走路の端部の舗装構造内にある。しかしながら、誘導路舗装においては、滑走路に比較して幅員が狭いこともあって、横断方向に舗装厚を変えてはいない。

舗装の設計は、路床強度および設計荷重の大きさと繰り返し載荷回数によることから、道路舗装と空港舗装においては、その基本的設計思想を異にするものではない。しかし、空港舗装と道路舗装との相違点をあげれば次のようになるであろう。

- 1) 設計輪荷重および接地圧が大きい。
- 2) 設計期間における繰り返し載荷回数が少ない。
- 3) 舗装は面的広がりをもつ。
- 4) 走行位置が集中する。
- 5) 走行速度が高い滑走路では、縦断方向の平坦性が厳しく要求される。

道路舗装のひびわれおよびわだち掘れについては、載荷回数は当然のことながら、走行する車両の輪荷重と走行軌跡分布が支配要因となる。このような観点から、車両の載荷重分布^{2),3)}および走行軌跡分布⁴⁾⁻⁶⁾についての研究はかなり進められている。しかし、空港においては、舗装幅員が広いことと航空機が速く、測定法が難しいことなどから、わが国では航空機の走行軌跡の測定例⁷⁾は多くない。なお、近年ビデオカメラを用いて走行軌跡分布を測定した報告⁸⁾がみられるのみである。

本報告では、新東京国際空港（以下成田空港と称する）の誘導路の直線部（幅員 30 m、ショルダ 7.5 m+7.5 m）において、誘導路を走行する大型航空機の走行速度および走行位置の測定法を開発し、速度特性および走行位置

分布を把握することにより、誘導路舗装の設計外力を明らかにし、誘導路の合理的設計法の確立に資することを目的としている。

2. 航空機の走行速度・走行位置測定システム

運行に供している大型航空機の誘導路における走行速度分布と走行位置分布の測定を行った箇所は、図—1 に示したような成田空港の滑走路に平行な直線誘導路である。この箇所を走行する航空機は、南風の場合には着陸機、北風の場合には離陸機となり、無風時には両者が混在する場合もある。

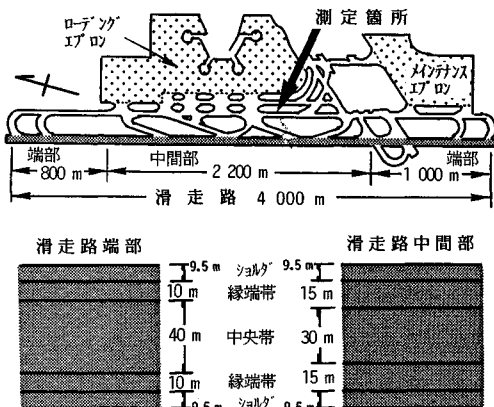
航空機の走行速度と走行位置を測定するシステムは、今回新たに開発されたものであり、それを用いてそれらの測定を行った。その装置の基本原理は次のとおりである。なお、道路橋上での車両速度と走行位置の測定において、豊福らは同様の原理を適用している⁹⁾。

実際の大型航空機の誘導路における走行速度および走行位置を測定するために、誘導路の両端に三組のレーザ発光器と受光器を設置する。ある間隔 (d) で二組のレーザ光線 (①-①', ②-②') を誘導路の横断方向に放射し、誘導路に対して角度 (α) で一組 (③-③') のレーザ発光器と受光器を設置した。

レーザ発光器にはヘリウムネオンレーザを用い、出力は 5 mW、ビーム径は 0.81 mm、ビーム広がり角は 0.1 mm rad 以下のもの (3225 H 型) を用いた。またレーザ受光器は、フィルタとフォトダイオードから構成されており、今回の測定目的に合致するように製作されたものである。なお受光部でのレーザビーム径は、距離 45 m にて 10 mm 未満であった。大型航空機の代表である B-747 の前脚のタイヤの半径 (580 mm 程度) にはほぼ合致するように、レーザ光線を誘導路の中心線上で、0.5 m の高さにレベル調整した。

航空機が誘導路上を走行すると、前脚のタイヤがレーザ光線を最初に遮ることになる。航空機の走行速度・走行位置検出システムは、この三組のレーザ光線にスイッチの役割をもたせ、2つのカウンタをスタート・ストップさせ、その間カウンタはパルス発振器 (周波数 1 kHz) よりのパルス数を読み取り、おのおのの時間を計測する方式である。設置状況と測定系統を図—2 に示した。

航空機が走行すると、①, ③, ②の順にタイヤがレーザ光線を遮ることにより、パルスカウンタ 1 をスタート・ストップさせカウンタ数から時間 T_1 (s) が得られ、次にカウンタ 2 をスタート・ストップさせることにより同様に時間 T_2 (s) が得られる。 $T_1 = T_2$ であれば航空機が誘導路の中心線上を、 $T_1 > T_2$ であるならば航空機は誘導路中心線の右側を通行していることになる。3本の



図—1 新東京国際空港(成田空港)の誘導路における走行速度・走行位置測定箇所と滑走路舗装構造の縦断断面区分

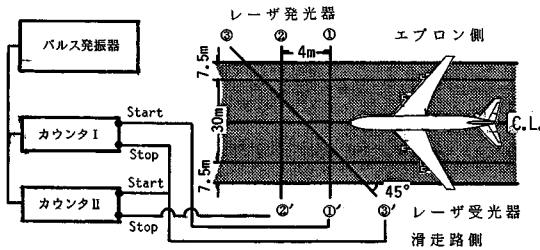


図-2 走行速度・走行位置測定法

レーザー光線は、 $d=4\text{ m}$ 、 $\alpha=45^\circ$ となるように配置した。このことから、走行速度 V (m/s)とオフセット量 D (m)は次式で得られる。ここでの D は、前脚の左側タイヤの中心までの距離である。

$$V = d / (T_1 + T_2) \dots\dots\dots (1)$$

$$D = (T_1 \cdot V - d/2) \tan \alpha \dots\dots\dots (2)$$

走行速度の測定誤差は、レーザー光線のビーム径、レーザー光線①と②の間隔 (d) の設置精度、レーザー光線①と②のレベル設置の精度、航空機が誘導路中心線に対して平行に走行しているか否か、などに影響されると思われる。しかし、これらの影響について検討した結果、本調査の目的からして測定誤差は無視されると判断した。オフセット量の測定誤差は、走行速度の測定精度、前脚のタイヤ幅 (B-747 の場合 431.8 mm 程度)、トレッド曲率半径の大きさなどに依存するものと思われるが、最大で 150 mm 程度であり、誘導路の幅員からして大きな問題とはならないとした。

3. データ収集

誘導路ショルダの外に一時的に設置したパーソナルコンピュータにストアされたデータを解析するためのソフトウェアを作成し、航空機の走行速度、走行位置のデータを整理した。さらに、以下の項目をも追加し、総合的にデータを結合した。

- ① 測定年月日
- ② 測定時刻
- ③ 航空会社名
- ④ 航空機の機種
- ⑤ 航空機の機体番号
- ⑥ 脚配置と車輪配置
- ⑦ 離陸着陸の区分

測定は、1987年10月から1988年8月の間で、おのおの約10日間ずつ3回行った。なお、路面状況は概して乾燥状態であった。表-1は、測定日、計測対象となった航空機数の一覧である。走行速度測定に対して通過位置測定航空機数が少ないのは、測定データの欠如と脚配置と車輪配置が不明なものがあることによる。航空機の種類は成田空港がわが国の空の玄関であることを反映

表-1 計測対象航空数

測定日	速度		走行位置	
	離陸機	着陸機	離陸機	着陸機
1987年 10/29~11/9	49	56	46	56
1988年 2/24~3/3	83	14	80	11
1988年 7/26~8/4	31	65	30	60
全測定	163	135	156	127

表-2 測定対象航空機種の一覧

機種	測定日					
	1987年 10/29~11/09		1988年 2/24~3/03		1988年 7/26~8/04	
	離陸	着陸	離陸	着陸	離陸	着陸
B-747	32	39	49	20	20	43
B-747SP	1	3	-	1	4	3
B-767	3	1	7	-	2	2
B-727	1	-	1	-	-	-
B-737	1	-	2	-	-	-
B-707	-	-	-	-	-	2
DC10-10	2	1	2	1	-	-
DC10-30	5	3	2	1	-	4
DC9-51	1	-	-	-	-	-
DC8-61	-	2	-	-	-	-
A-300	-	-	3	-	1	3
A-310	-	-	2	-	1	4
L1011	2	7	13	1	1	2
エアバス	1	-	1	-	-	1
合計	49	56	83	14	31	65

し、大型航空機がそのほとんどを占めており、表-2には、測定対象となった航空機種と機数の一覧を示してある。

4. 航空機の走行速度分布

誘導路における走行速度は、日本航空のパイロットフライトトレーニングガイド¹⁾によれば、誘導路の幅員、カーブ、地表面の状況、視程、パイロットの技量などによって誘導路走行速度は異なるが、適切な速度でいつでも軽いブレーキによりスムーズに止まれるものでなくてはならないとされている。誘導路走行速度の目安としては、走行状態と路面状況により次の値 (kt (km/h)) が示されている。

路面状況	乾燥	湿潤	雪氷
直線	25(46.30)	15(27.780)	10(18.520)
旋回	10(18.52)	7(12.962)	3(5.556)

しかし、成田空港においては世界各国の航空会社の航空機が乗り入れており、すべてこのような速度で走行していないと推測されることから、乾燥路面における誘導路直線部の航空機の走行速度分布を求めた。

頻度分布を示すときの刻みの個数は、測定数の平方根程度を採用するのが通常であるとされていることから、誘導路を走行する航空機の走行速度を、10 km/h ごとの頻度分布として、離陸機 (総数 163 機) および着陸機 (総数 135 機) に分けて、図-3、図-4 に示した。また表

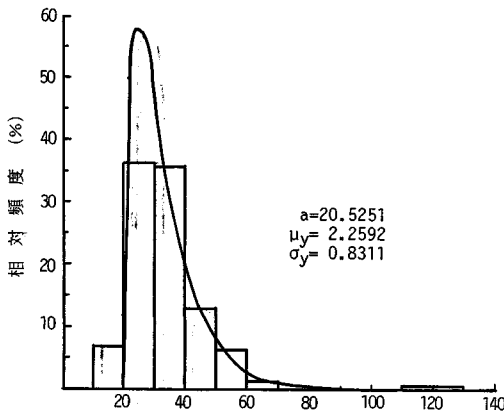


図-3 誘導路における離陸機の走行速度分布

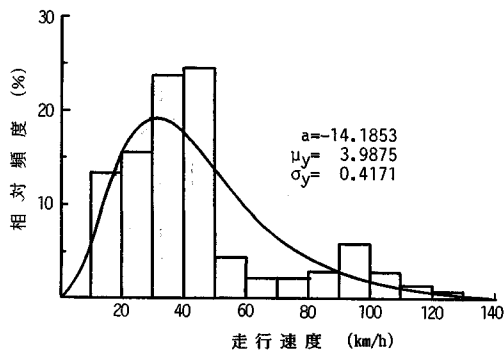


図-4 誘導路における着陸機の走行速度分布

表-3 平均走行速度 (km/h)

測定日	離陸機	着陸機
1987年 10/29~11/09	35.4	62.3
1988年 2/24~3/03	34.1	37.6
1988年 7/26~8/04	31.8	31.0
全 測 定	34.1	44.6

—3は、離陸機、着陸機の走行速度の平均を示したものである。

航空機の走行速度分布は、正規分布とならないことが図から容易に推測されることから、二変数の対数正規分布曲線で近似した。

二変数の対数正規分布の密度関数 ($f(x)$) は、式 (3) で与えられる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y (x-a)} \exp \left[-\frac{(\ln(x-a) - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a ：位置のパラメーター
 μ_y ：母平均
 σ_y^2 ：母分散

離陸機に比して、着陸機の走行速度は相対的に速く、かつその変動も大きいことがわかる。走行速度の平均は

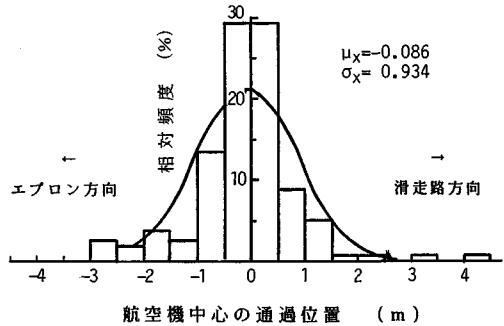


図-5 誘導路における離陸機の通過位置分布

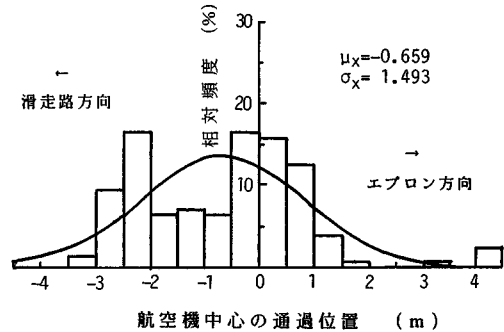


図-6 誘導路における着陸機の通過位置分布

離陸機で 35 km/h、着陸機で 45 km/h であることが明らかにされた。また、80 パーセントイル速度は、離陸機で 35 km/h、着陸機で 50 km/h 程度であり、両者の走行速度に明らかな違いがみられる。

5. 航空機の走行位置分布

誘導路に斜角放射されているレーザ光線を最初に遮るのは前脚の左側車輪の中心であるとし、おのおのの航空機の前脚の車輪中心間距離のデータから、誘導路中心と航空機中心との距離をオフセット量とし、それを計算した。

誘導路を走行する航空機の誘導路中心からのオフセット量を、0.5 m ごとの頻度分布として、離陸機 (総数 156 機)、着陸機 (総数 127 機) 別に示したものが、図-5、図-6 である。航空機のオフセット量は、正規分布となることが推測されることから、正規分布で近似した。表-4 はオフセット量の平均値および標準偏差を示したものである。

表-4 より、オフセット量の平均値がすべての場合負であることは、進行方向において航空機の中心線が誘導路中心線の左側 (離陸機の場合はエプロン側、着陸機の場合は滑走路側) にずれていることを意味している。また、オフセットの平均値と標準偏差をみれば、離陸機に比し、着陸機の方が、誘導路の中心線からのずれが大きいたことがわかる。さらに、誘導路の中心線からのずれの

表一 誘導路中心からのオフセット量 (m)

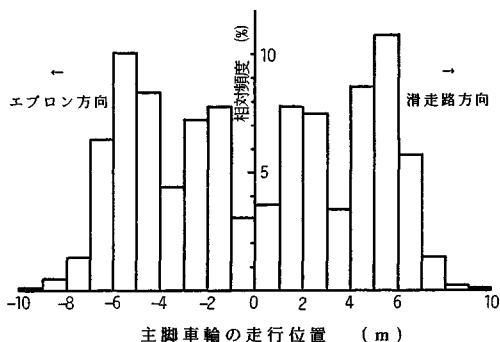
測定日		平均	標準偏差
1987年 10/29~11/9	離陸機	-0.23	1.06
	着陸機	-0.97	1.86
1988年 2/24~3/3	離陸機	-0.05	0.86
	着陸機	-0.27	0.50
1988年 7/26~8/4	離陸機	-0.04	0.93
	着陸機	-0.54	1.11
全測定	離陸機	-0.09	0.93
	着陸機	-0.66	1.49

最大も 4.5 m 程度であることが明らかとなった。

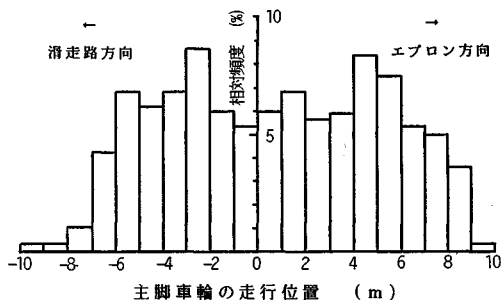
6. 主脚車輪の通過位置分布

航空機の総重量の約 95 % は主脚が受け持っており、空港舗装の設計外力としての主脚車輪の走行位置の把握はきわめて重要である。しかし、離着陸別の主脚車輪の走行軌跡分布の実測データはほとんどないことから、ここでは、個々の航空機に対して、オフセット量と主脚車輪配置のデータから、主脚車輪中心の走行位置を算出し、走行軌跡分布を求めた。なお、B-747 の場合前脚と最後尾主脚の距離が 27.14 m あり、航空機が誘導路中心線に対して平行に走行していない場合には、主脚車輪中心の走行位置の算出に誤差が含まれると考えられる。しかし、パイロットフライトトレーニングガイドに厳しく規定されているように、操縦士は中心線に沿って走行させているものとは判断した。主脚車輪の通過位置を 1 m ごとの頻度分布として、全着陸機と全離陸機のおおのの場合について、図一七、図一八に示した。着陸機に比し離陸機の方が誘導路中心線に集中して走行することから、主脚車輪の走行軌跡も集中していることがわかる。誘導路横断方向 1 m ごとの最大頻度は、離陸機で約 11 %、着陸機で約 9 % である。さらに、その最大頻度は、誘導路中央線の左右約 5 m の地点である。また、主脚車輪が走行する誘導路中央線から最遠地点は 10 m であることも明らかになった。

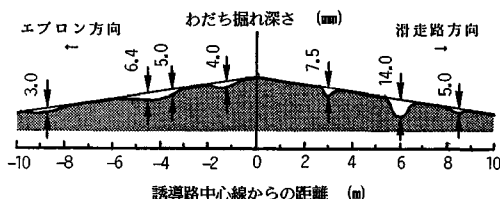
図一九は、測定地点近傍でのオーバーレイ工事前の誘



図一七 誘導路における離陸機の主脚車輪の走行位置分布



図一八 誘導路における着陸機の主脚車輪の走行位置分布



図一九 誘導路の横断プロファイル

導路の横断プロファイルを示したものである。わだち掘れ状況から、主脚車輪の走行位置は滑走路側に若干偏差しているものの、いくつかの地点に集中していることがわかる。わだち掘れは、誘導路中心からおのおの 2~3 m、4~6 m、8~9 m の位置に発生している。わだち掘れ深さの最大値は、誘導路中心から滑走路側に約 6 m の地点で 14 mm であった。また誘導路中心から 10 m の位置には、ほとんどわだち掘れが生じていないこともわかる。すなわち、主脚車輪の走行位置分布とわだち掘れとは、当然のことではあるが強い相関があるといえる。

7. まとめ

本報告で明らかとなった事項を要約すればおよそ次のようになるであろう。

(1) 誘導路に三組のレーザ光線を Z 形に配置することにより、航空機の走行速度、走行位置を容易に測定することが可能である。

(2) 誘導路の直線部分における航空機の走行速度分布は対数正規分布に従い、走行速度の平均は、離陸機で 34.1 km/h、着陸機で 44.6 km/h であり、80 パーセントイル速度は、離陸機で 35 km/h、着陸機で 50 km/h 程度である。また、離陸機より着陸機の方が、走行速度が速かつ走行速度の変動も大きいことが明らかとなった。

(3) 誘導路を走行する航空機中心と誘導路中心との偏差、すなわち通過位置分布は正規分布に従い、その平均値と標準偏差は、離陸機で -0.09 m、0.9 m、着陸機で -0.66 m、1.5 m 程度であることが明らかとされた。また、離陸機より着陸機の方が、走行位置の変動が大き

いが、誘導路中心から4 m以上も離れて走行する航空機は、ほとんどないといえる。さらに、通過位置の平均値が負であることは、進行方向に対して誘導路中心より左側にずれていることを意味し、副操縦士が右側の席に座っていることから、誘導路を走行する場合には副操縦士の体が誘導路中心に位置するような形で操縦しているものと推測される。

(4) 航空機の主脚車輪の走行頻度が高い位置は、離陸機の場合、誘導路中心から約2 mと5 mである。これは、測定対象航空機数に占めるB-747の割合が65%であることと、B-747の主脚の配置が航空機中心からおのおの1.92 mおよび5.5 mであること、離陸機は着陸機に比し誘導路中心に集中していることなどによる。また、誘導路横断方向1 mごとの最大頻度は離陸着陸を問わず10%程度であることと、主脚車輪が走行する最遠地点は誘導路中心から10 m程度であることが明らかとなった。これらのことは、誘導路のオーバーレイ工事前の横断プロファイルの実測結果が物語っているといえる。

(5) わだち掘れは、誘導路中心線に対称には生じておらず滑走路方向に偏っており、誘導路中心より滑走路方向に3 mおよび6 m近傍で大きい。離陸機主脚車輪の走行相対頻度は、3 m近傍で約7.5%、6 m近傍で約10.8%、また着陸機主脚車輪の走行相対頻度は、3 m近傍で約8.6%、6 m近傍で約6.8%であった。それゆえ、離陸機と着陸機の合計は、3 m近傍で約16%、6 m近傍で約18%と、他の地点に比し、大きい。この地点を走行する航空機は、南風の場合(主に夏季)には着陸機が、北風の場合(秋から春)には総重量の大きい離陸機が多い。また、誘導路には横断勾配があることから、滑走路側の主脚車輪の輪荷重の方が大きくなる。アスファルト舗装のわだち掘れの要因は、アスファルト混合物層の温度、輪荷重の集中度、輪荷重の大きさであることから、主脚車輪の走行とわだち掘れの関係が説明される。

(6) 離陸機に比し着陸機の走行速度が高いことは、離着陸後、滑走路を比較的速度で走行した後に誘導路を走行することから、操縦士の速度感覚が高速走行に慣れていることと、一刻も早く国際線の長距離飛行した乗客に搭降してもらうという心理が働いているものと推測される。また、着陸機に比し離陸機の走行位置が誘導路の中央線に集中していることは、これからの離陸に際してより慎重に走行しているものと推測されよう。

以上のことから、成田空港における誘導路幅員が30 mあることを踏まえると、誘導路の直線部の舗装構造を、誘導路中心から左右10 mの地点から外側に5 mの区間で、シヨルダの舗装構造にすり付ける工法を、経済性、施工性との関連性を比較検討したうえで、採用することも考えられよう。さらに、誘導路の他のいくつかの地点および誘導路の曲線部などにおいても、ここで述べた測定法を用い、航空機の走行速度・通過位置分布を把握することにより、誘導路の舗装構造の合理的な決定が可能となろう。

また、誘導路より幅員の広い滑走路においても同様な手法を用い、航空機の走行速度・通過位置特性を求めることができよう。

謝 辞：航空機の走行速度・通過位置測定システムの開発にあたっては、(株)インテスコの平 賢治氏に尽力を戴いた。またデータ解析においては菊池敏明君(当時北海道工業大学学生)の協力を得た。ここに付記し両氏に厚く感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) JAL : Pilot Flight Training Guide, Taxiing, (9) Taxi speed, 1 Apr. 1988.
- 2) 飯島 尚・今井 博・猪股和義：車両重量調査結果による大型車重量の実態と舗装設計への適用，土木技術資料，第24巻，第2号，pp.34~39, 1982.
- 3) Kim Ok-Kee, Bell Chris A. and Wilson James E. : Effect of increased truck tire pressure on asphalt concrete pavement, ASCE, Vol.115, No.4, July 1989.
- 4) Taragin, A. : Lateral placements of trucks on two-lane highways and four-lane divided highways, Public Roads, Vol.30, No.3, pp.71~75, Aug. 1958.
- 5) Kasahara, A. : Wheel path distribution of vehicles on highway, Proc. of International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol.1, pp.413~420, The Norwegian Institute of Technology, June 1982.
- 6) 梶川康男・西沢辰男・枝本正信：可搬式自動車交通流自動観測システムの開発，土木学会論文集，第391号/VI-8, pp.107~114, 1988年3月.
- 7) 運輸省東京航空局：航空機の交通量分布調査，航空局業務資料，昭和43年9月.
- 8) 運輸省航空局：設計基準体系基礎調査報告，平成元年1月.
- 9) 豊福俊泰・米田利博・吉村洋司：道路橋における車両重量推定法について，第17回日本道路会議論文集，pp.704~705, 昭和62年10月.

(1990.2.27・受付)