

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1280

March 2024

空港舗装の設計反復作用回数に関する考察

坪川将丈・河村直哉

Consideration on Design Coverage for Airport Pavement

TSUBOKAWA Yukitomo, KAWAMURA Naoya

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

空港舗装の設計反復作用回数に関する考察

坪川将丈*・河村直哉**

要 旨

滑走路等の空港舗装の設計において舗装厚を左右するのは、航空機交通量と航空機荷重である。我が国の空港舗装の設計で用いている交通量の指標である設計反復作用回数の算出方法については、文献に概要が記されているものの、換算係数の根拠がわかりにくい。

本研究では、設計反復作用回数の算出方法に関する文献を整理し、過去及び現行の設計要領に掲載されている換算係数の根拠を明確にすることを目的として研究を実施した。また、車輪位置の換算方法について、換算係数を用いない方法による設計反復作用回数を試算・分析した。

キーワード：設計反復作用回数，空港アスファルト舗装，空港コンクリート舗装

* 空港研究部 空港施設研究室 室長

** 空港研究部 主任研究官

Consideration on Design Coverage for Airport Pavement

TSUBOKAWA Yukitomo^{*}
KAWAMURA Naoya^{}**

Synopsis

In the design of airport pavements such as runway, aircraft traffic volume and aircraft load are the main factors influencing pavement thickness. The calculation method of design coverage, which is an indicator of aircraft traffic volume used in the design of airport pavement in Japan, is outlined in the literature, but the basis for the conversion coefficient is difficult to understand.

The purpose of this study was to summarize the literature on the calculation method of design coverage and to clarify the basis for the conversion coefficient published in past and current design guideline of airport pavement. In addition, the design coverage was estimated and analyzed with a method that does not use conversion coefficient for the wheel position conversion method.

Key Words: design coverage, airport flexible pavement, airport rigid pavement

^{*} Head, Airport Facilities Division, Airport Department

^{**} Senior Researcher, Airport Department

目 次

1. はじめに	1
2. 設計反復作用回数の算出方法の概要	3
2.1 車輪位置分布に関する既往の調査結果	3
2.1.1 1968 年の調査結果	5
2.1.2 1988 年の調査結果	6
2.2 車輪位置の換算方法	8
2.2.1 平均法	8
2.2.2 ピーク法	11
2.3 荷重の換算方法	13
3. 設計反復作用回数の算出方法の変遷	14
3.1 1970 年型の算出方法	14
3.2 1976 年型の算出方法	18
3.3 1990 年型の算出方法	22
4. 車輪位置の換算方法に関する考察	26
4.1 個別換算法の概要	26
4.2 個別換算法による試算及び分析	27
5. 結論	35
参考文献	35

1. はじめに

滑走路等の空港舗装の設計において舗装厚を左右するのは、航空機交通量と航空機荷重である。我が国の空港舗装の経験的設計法における航空機交通量の指標としては、滑走路等を使用する航空機別交通量と航空機荷重から計算される設計反復作用回数による区分（アスファルト舗装はa～eの5区分、コンクリート舗装はM, N, Oの3区分）が、航空機荷重の指標としては、LA-1, LA-12, LA-2などと呼称される設計航空機荷重区分が使用されている。例えば、アスファルト舗装の基準舗装厚（表基層厚と粒状路盤厚の合計厚）は、設計反復作用回数により式-1.1のように増減させる^{8),9)}。

$$t = \left\{ 0.23 \cdot \log_{10} \left(\frac{Coverage}{2} \right) + 0.15 \right\} \cdot t_{10000} \quad \dots \dots \dots \text{式-1.1}$$

ここで、

t : 基準舗装厚 (m)
 t_{10000} : 設計反復作用回数 10,000 回における基準舗装厚 (m)
 $Coverage$: 設計反復作用回数 (回)
 (a : 6,000 回, b : 10,000 回, c : 20,000 回, d : 40,000 回, e : 80,000 回)

設計反復作用回数は、1970年に制定された空港アスファルト舗装構造設計要領¹⁾で登場し、その後、1976年及び1990年に算出方法が改正されている。設計反復作用回数は、滑走路における航空機離着陸回数や誘導路における航空機走行回数ではなく、滑走路等を走行する航空機脚荷重の違い及び主脚車輪の走行位置の違いを換算することで算出する「設計荷重が同一位置を走行する回数」である。しかしながら、算出方法がやや難解であること、算出方法に関する文献が非常に古いこと、文献において換算係数の算出根拠の記述が不足していることに起因して、現行の設計要領に掲載されている換算係数の根拠がわかりにくくなっている。

以上の背景から、本研究は、設計反復作用回数の算出方法に関する文献を整理し、過去及び現行の設計要領に掲載されている設計反復作用回数の換算係数の根拠を明確にすることを目的として実施した。また、車輪位置の換算方法について、現行の方法とは異なる新たな方法として、換算係数を使用せずに車輪位置を換算した設計反復作用回数を試算・分析した。

本資料は、以下の方針により記述している。

- ・ 各年代の設計要領を表-1.1の略称を用いて記述している。
- ・ 引用文献で使用されている用語や記号は各年代で異なるが、算出方法の対比を容易にするため統一して記述している。また頻出する各種換算後の走行回数について、「車輪位置換算後の接地幅当りの走行回数」は車輪WheelのWを用いてNW, 「荷重換算後の接地幅当りの走行回数」は荷重LoadのLを用いてNL, 「車輪位置及び荷重換算後の接地幅当りの走行回数」はNWLとしている。
- ・ 設計反復作用回数は主脚車輪を対象とした指標であるから、特段の説明なく「車輪」と記述している場合は、前脚車輪ではなく主脚車輪を指す。
- ・ 正規分布で表される走行確率密度関数（単位幅当りの走行確率を表す関数）から走行確率を算出する際、本来は図-1.1左図のように積分を用いるが、設計反復作用回数の算出で用いる車輪幅や標準偏差の場合は差が大きいいため、図-1.1右図のように矩形面積を用いる方法で記述している。

表-1.1 本資料における設計要領の略称

名称及び発行年	略称
空港アスファルト舗装構造設計要領，1970 ¹⁾	As 設計要領 1970
空港コンクリート舗装構造設計要領，1971 ²⁾	Co 設計要領 1971
空港アスファルト舗装構造設計要領，1976 ³⁾	As 設計要領 1976
空港コンクリート舗装構造設計要領，1977 ⁴⁾	Co 設計要領 1977
空港アスファルト舗装構造設計要領，1990 ⁵⁾	As 設計要領 1990
空港コンクリート舗装構造設計要領，1990 ⁶⁾	Co 設計要領 1990
空港舗装構造設計要領，1999 ⁷⁾	設計要領 1999
空港舗装設計要領，2008 ⁸⁾	設計要領 2008
空港土木施設設計要領（舗装設計編），2019 ⁹⁾	設計要領 2019

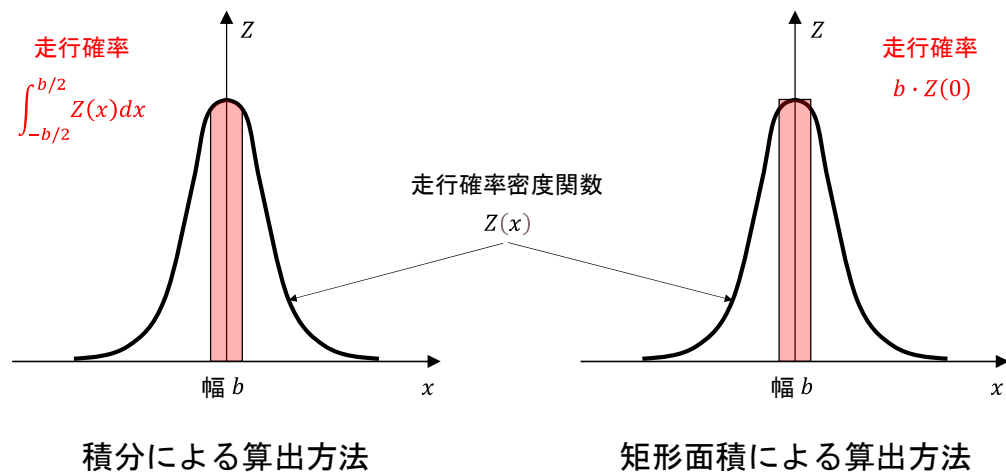


図-1.1 走行確率の算出方法

2. 設計反復作用回数の算出方法の概要

設計反復作用回数は、航空機重量の数%しか負担していない前脚車輪は無視し、航空機重量の大部分を負担している主脚車輪に着目し、航空機の走行回数に対して二種類の換算を行うことにより算出する指標である。一つは「車輪位置の換算」であり、もう一つは「荷重の換算」である。

2章では、各年代の車輪位置の換算方法の基礎となっている、車輪位置分布に関する既往の調査結果の概要を述べた後、車輪位置の換算方法及び荷重の換算方法の概要を述べる。

2.1 車輪位置分布に関する既往の調査結果

航空機は滑走路等の施設中心線に沿って走行するが、航空機中心（航空機前脚の位置）と施設中心が常に一致しているわけではなく、図-2.1のように航空機中心は施設中心から左右に偏差がある状態で走行している。また、航空機中心と施設中心が一致している場合でも、航空機中心から主脚中心までの距離、主脚車輪の横間隔、横断方向主脚車輪合計数は航空機により異なる。そのため、航空機中心の偏差や主脚車輪位置の違いを考慮し、滑走路等における航空機の走行回数を、航空機の主脚車輪が同一位置を走行する回数に換算するのが車輪位置の換算である。

この車輪位置の換算方法には、過去に行われた二つの調査結果が用いられている。一つは1968年に運輸省東京航空局が実施した調査結果、もう一つは1988年に運輸省港湾技術研究所が実施した調査結果である。以降ではこの二つの調査結果の概要を述べるが、以下の2種類の標準偏差を明確に区別する必要があるため、先に解説する。

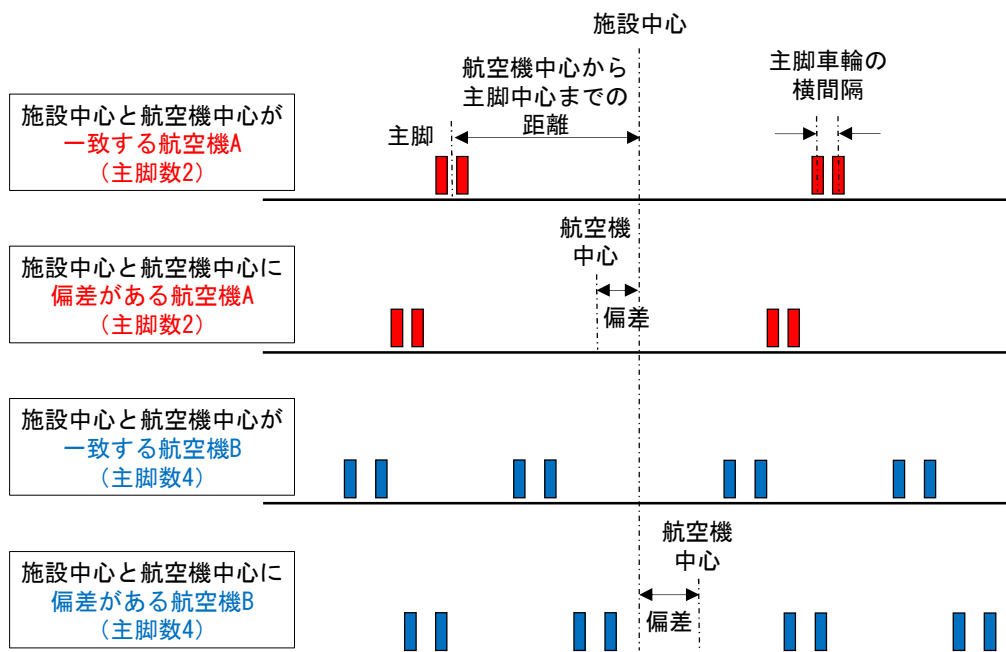


図-2.1 車輪位置分布の概念図

・航空機位置の標準偏差 σ_a

滑走路等を走行する航空機位置の分布形状が正規分布と仮定して算出した標準偏差である。本資料では σ_a と記載する。この航空機位置の標準偏差 σ_a は、航空機の主脚に関する情報（航空機中心から主脚中心までの距離、主脚車輪の横間隔、横断方向主脚車輪合計数）を含まない。

例えば、滑走路末端からカメラ等を使用し、滑走路を走行する航空機位置（主に前脚位置）を記録し、この航空機位置の分布から算出された標準偏差は、主脚の情報を全く含まないため、これに該当する。

航空機位置の標準偏差 σ_a は汎用性が高く、主脚車輪位置の分布も航空機位置と同じ標準偏差を有する正規分布と考えれば、図-2.2のように、既知である航空機中心から主脚中心までの距離、主脚車輪の横間隔及び横断方向主脚車輪合計数を用いて、それぞれの航空機の主脚車輪位置の分布を算出することが可能である。

・車輪位置の標準偏差 σ_w

滑走路等を走行する車輪位置の分布形状が正規分布と仮定して算出した標準偏差である。本資料では σ_w と記載する。この車輪位置の標準偏差 σ_w は、航空機の主脚に関する情報（航空機中心から主脚中心までの距離、主脚車輪の横間隔、横断方向主脚車輪合計数）が反映されている。

例えば、滑走路末端からカメラ等を使用し、滑走路を走行する航空機の主脚車輪位置を記録し、この主脚車輪位置の分布から算出された標準偏差は、主脚の情報を含むため、これに該当する。また前述のように、観測した航空機位置から、主脚に関する情報を用いて主脚車輪位置を逆算し、全ての航空機の手輪走行回数を合算した分布から算出された標準偏差も、これに該当する。

車輪位置の標準偏差 σ_w は、航空機位置の標準偏差 σ_a に比べて若干汎用性に欠ける。これは、車輪位置分布の調査対象とした複数の航空機の交通量と主脚の情報に左右されるためである。例えば、主脚が2脚の航空機の交通量に対し、主脚が4脚の航空機の交通量が多い空港での調査の場合、車輪位置分布は施設横断方向に広がるため、自ずと車輪位置の標準偏差 σ_w は大きくなる。また一般的には、車輪位置の標準偏差 σ_w は航空機位置の標準偏差 σ_a よりも大きくなる。仮に、航空機中心が施設中心と常に一致して走行すると仮定すると、航空機位置の標準偏差 σ_a は0となるが、車輪位置の標準偏差 σ_w は0とはならない（単一の航空機のみを想定した場合を除く）。これは、それぞれの航空機の手輪位置や車輪数が異なるためである。

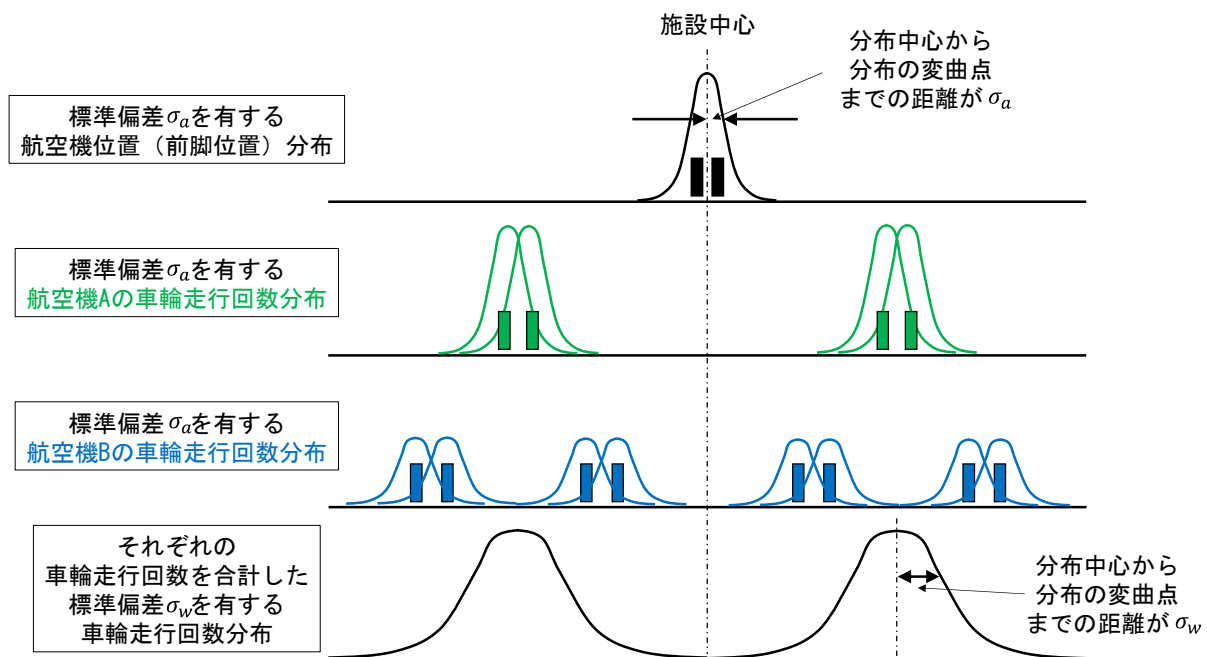


図-2.2 航空機位置の標準偏差 σ_a と車輪位置の標準偏差 σ_w の概念図

2.1.1 1968 年の調査結果

運輸省東京航空局が 1968 年に実施した調査については、著者は文献¹⁰⁾を確認できていないため詳細は不明であるが、As 設計要領 1976 には、当該調査結果として図-2.3 が掲載されている。この図に掲載されている標準偏差が、航空機位置の標準偏差 σ_a なのか、車輪位置の標準偏差 σ_w なのかの明記がないものの、当該調査について As 設計要領 1970 には「滑走路の中央 15m 幅に全交通量の 80~90%、10m 幅に 60~80%が集中していることを、車輪の跡から観測した。」との記載があり、Co 設計要領 1971 でも「タッチダウン付近でのタイヤの軌跡数を数えてまとめたものである。」との記載があることを考えれば、図-2.3 の標準偏差は、航空機位置の標準偏差 σ_a ではなく、車輪位置の標準偏差 σ_w と考えられる。

なお、図-2.3 のように、車輪位置の分布が施設中心付近の単峰分布の場合を、本資料では「単峰型」と呼称することとする。

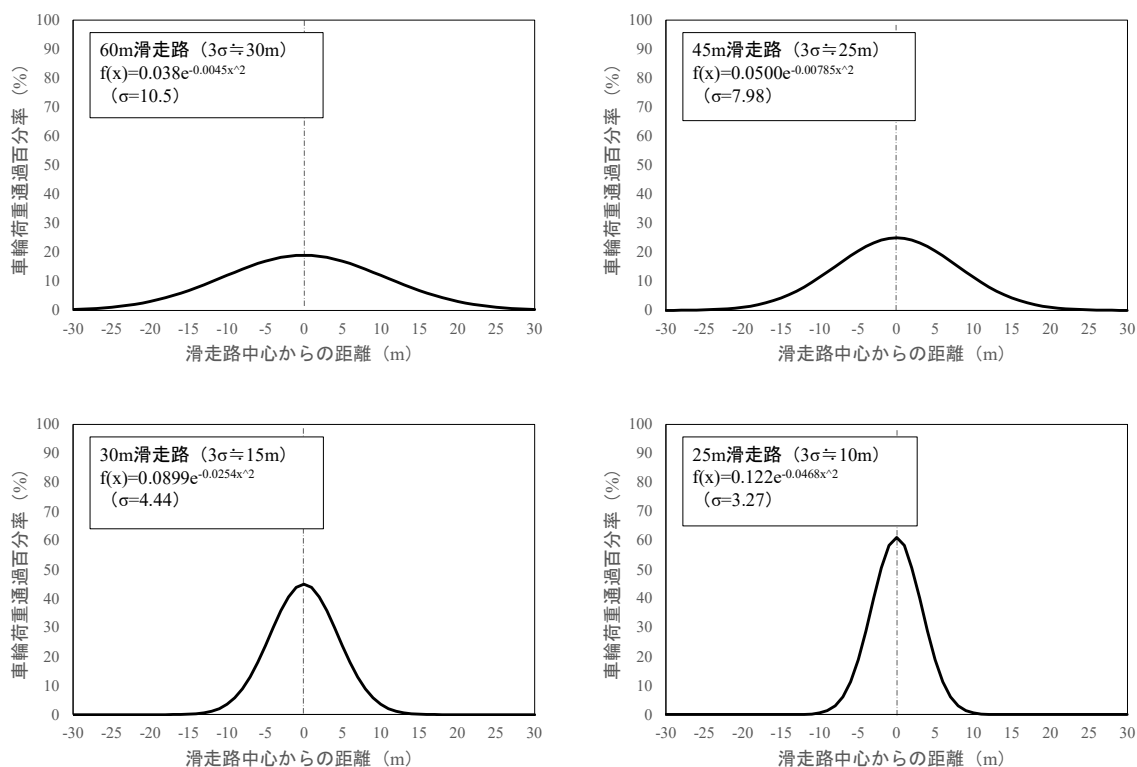


図-2.3 1968 年の調査結果¹⁰⁾における車輪位置の分布³⁾

(数式は確率密度関数と推測され、図の縦軸は幅 5m 当りの車輪走行確率と推測される)

2.1.2 1988 年の調査結果

運輸省港湾技術研究所が 1988 年に大阪国際空港及び松山空港で実施した調査結果の詳細は文献¹²⁾にまとめられている。

文献の前半には航空機位置（前脚位置）の分布図が掲載されており，一例を図-2.4 に示す。また航空機位置の標準偏差 σ_a として表-2.1 及び表-2.2 が掲載されている。

文献の後半には，航空機位置（前脚位置）の分布図から，それぞれの航空機の主脚位置を考慮して逆算した車輪位置の分布図が掲載されており，一例を図-2.5 に示す。なお，当該文献には車輪位置の標準偏差 σ_w が掲載されていないが，別の文献¹³⁾では，当該調査の車輪位置の標準偏差 σ_w として表-2.3 が示されている。

なお，図-2.5 のように，車輪位置の分布が施設左右の双峰分布の場合を，本資料では「双峰型」と呼称することとする。

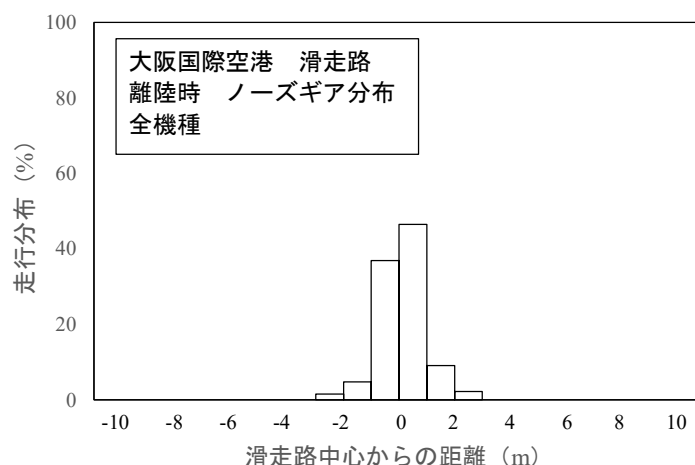


図-2.4 1988 年の調査結果における航空機位置（前脚位置）の分布（大阪国際空港）¹²⁾

表-2.1 1988 年の調査結果における航空機位置（前脚位置）の標準偏差（大阪国際空港）¹²⁾

荷重区分	機種	滑走路 離陸時		滑走路 着陸時		平行誘導路 離陸時		高速脱出誘導路 着陸時	
		σ_a (m)	便数	σ_a (m)	便数	σ_a (m)	便数	σ_a (m)	便数
LA-1	B-747 DC-10 L-1011	0.91	292	1.74	242	0.67	244	0.74	208
LA-12	A-300 B-767	0.74	140	1.10	140	0.57	112	0.63	126
LA-2	MD-81 B-727	0.42	26	1.45	46	0.54	24	0.65	40
LA-4	YS-11	-	-	1.31	30	-	-	0.60	20

表-2.2 1988年の調査結果における航空機位置（前脚位置）の標準偏差（松山空港）¹²⁾

荷重区分	機種	滑走路 離陸時		滑走路 着陸時		平行誘導路 離陸時		高速脱出誘導路 着陸時	
		σ_a (m)	便数	σ_a (m)	便数	σ_a (m)	便数	σ_a (m)	便数
LA-12	B-767	0.87	26	1.44	25	0.63	27	0.66	22
LA-2	B-727	1.28	10	0.75	10	0.39	11	0.47	6
LA-3	B-737 DC-9	0.49	7	0.80	12	0.33	8	0.76	7
LA-4	YS-11	0.87	8	0.66	8	0.19	8	0.94	3

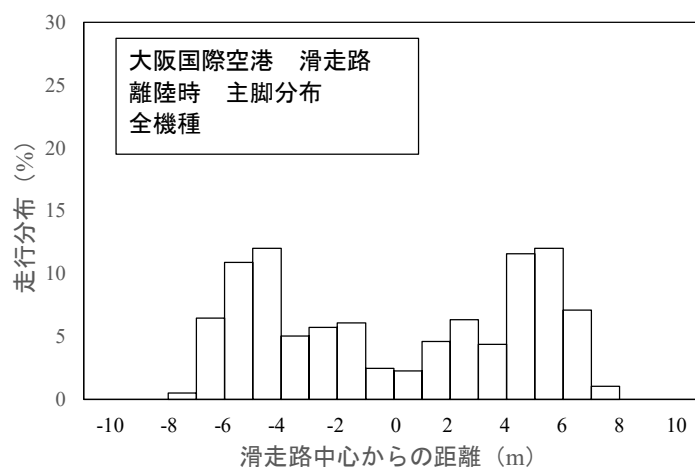


図-2.5 1988年の調査結果における車輪位置の分布（大阪国際空港）¹²⁾

表-2.3 1988年の調査結果における車輪位置の標準偏差¹³⁾

施設名	滑走路			誘導路		
舗装幅	60m	45m	30m	30m	23m	18m
調査位置	大阪空港 B-RWY	松山空港 RWY	松山空港 RWY	大阪空港 B-TWY	松山空港 TWY	松山空港 TWY
標準偏差 σ_w (m)	2.00	1.50	1.20	1.70	1.28	1.24
調査対象 航空機	B-747 DC-10 L-1011 B-767 A-300 MD-81 B-727 YS-11	B-767 B-727 B-737 DC-9	YS-11 BN-2 ENB	B-747 DC-10 L-1011 B-767 A-300 MD-81 B-727 YS-11	B-767 B-727 B-737 DC-9	YS-11 BN-2 ENB

2.2 車輪位置の換算方法

車輪位置の換算方法には「平均法」と「ピーク法」がある¹²⁾。平均法とは、施設横断方向に対し、ある幅の範囲を航空機の主脚車輪が平均的に走行すると仮定して算出した換算係数を用いる方法であり、ピーク法とは、施設横断方向に対し、航空機の主脚車輪位置の分布が正規分布であると仮定して算出した換算係数を用いる方法である。

主脚車輪位置の分布が、図-2.3のような単峰型であるか、図-2.5のような双峰型であるかにより計算方法が若干異なるため、本資料では、主脚車輪位置の単峰型分布を想定した換算方法を「単峰型平均法」「単峰型ピーク法」、主脚車輪位置の双峰型分布を想定した換算方法を「双峰型平均法」「双峰型ピーク法」と記載して区別することとした。

2.2.1 平均法

平均法とは、施設横断方向に対し、単峰型平均法であれば施設中心付近の一定の幅の範囲を、双峰型平均法であれば施設左右の一定の幅の範囲を主脚車輪が平均的に走行すると仮定した走行確率を用いて車輪位置の換算を行う方法である。以降では施設中心付近あるいは施設左右の一定の幅の範囲を「走行集中範囲」と呼ぶ。

(1) 単峰型平均法

単峰型平均法では、図-2.3のように車輪位置が施設中心付近に分布している場合を想定する。

図-2.6のように主脚2脚を有する航空機が施設を1回走行する（ $Pass = 1$ ）と、幅 B_a の走行集中範囲内を接地幅 b の車輪が w 輪走行することとなる。この時、走行集中範囲内を走行した車輪の合計数は $Pass \cdot w$ 、車輪が走行した範囲の合計幅は、車輪の合計数に接地幅 b を乗じた $Pass \cdot b \cdot w$ で表される。

航空機は施設中心から左右に偏差がある状態で走行すること、航空機中心から主脚中心までの距離、主脚車輪の横間隔、横断方向主脚車輪合計数は航空機により異なることから、走行集中範囲内における車輪位置が等分布になると仮定すると、車輪の走行確率密度 Z は位置 x に依らず一定であり式-2.1となる。この走行確率密度 Z とは、走行集中範囲内の任意の位置における施設横断方向の単位幅当りの車輪の走行確率であり、図-2.7のように走行確率密度 Z を $x = -B_a/2$ から $B_a/2$ まで積分すると1.0（走行確率100%）となる必要があるため、式-2.1は矩形面積 $Z \cdot B_a$ が1.0となるよう算出される。

次に、式-2.2により、この走行確率密度 Z に車輪1輪の接地幅 b を乗じた値が、接地幅当りの車輪走行確率 P となる。

最後に、式-2.3により、この接地幅当りの車輪走行確率 P を用いて、接地幅当りの車輪走行回数 N を算出する。ここで留意が必要であり、走行確率 P に乘じるのは、走行集中範囲内における航空機の走行回数 $Pass$ ではなく、走行集中範囲内における車輪の走行回数 $Pass \cdot w$ である。

具体的な数値を用いて解説する。例えば、車輪1輪の接地幅 b が0.3m、横断方向主脚車輪合計数 w が4輪、走行集中範囲の幅 B_a が30mとすれば、図-2.6のように航空機が1回走行する（ $Pass = 1$ ）と合計で $b \cdot w = 1.2m$ の幅を車輪が1回走行したこととなる。航空機の走行回数 $Pass$ が2回、3回、4回と増加すると、車輪が走行した幅の合計は2.4m、3.6m、4.8mと増加し、航空機の走行回数 $Pass$ が25回に達すると、車輪が走行した幅の合計は、走行集中範囲の幅 B_a と同じ30mとなり、走行集中範囲の全ての位置を車輪が1回走行したこととなる。これを $Pass$ が25回として式-2.3により確認すれば、 N は1回となる。

$$Z = \frac{1}{B_a} \quad \dots \dots \dots \text{式-2.1}$$

$$P = b \cdot Z = \frac{b}{B_a} \quad \dots \dots \dots \text{式-2.2}$$

$$N = P \cdot Pass \cdot w = Pass \cdot \frac{b \cdot w}{B_a} \quad \dots \dots \dots \text{式-2.3}$$

ここで、

Z : 走行集中範囲内の任意の位置における車輪の走行確率密度（1/m）
 B_a : 走行集中範囲の幅（m）

- P : 走行集中範囲内の任意の位置における接地幅当りの車輪走行確率
- b : 車輪1輪の接地幅 (m)
- N : 走行集中範囲内の任意の位置における接地幅当りの車輪走行回数 (回)
- $Pass$: 航空機が施設を走行する回数 (回)
- w : 横断方向主脚車輪合計数 (輪)
- この w は、航空機の前方向あるいは後方向から航空機を視認した場合の主脚車輪数の合計であるため、主脚が1脚4輪や1脚6輪の場合も1脚2輪と同様に考える
(詳細は 3.1 で解説する)

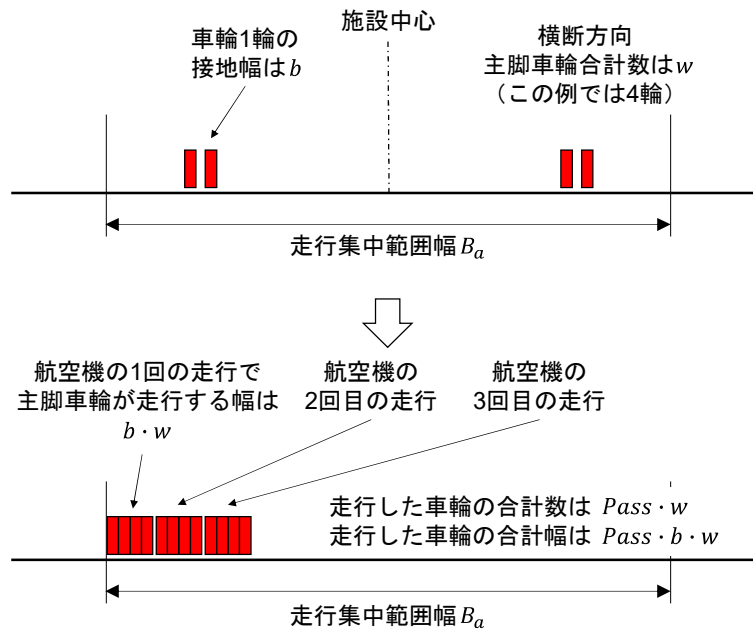


図-2.6 単峰型平均法の概念図

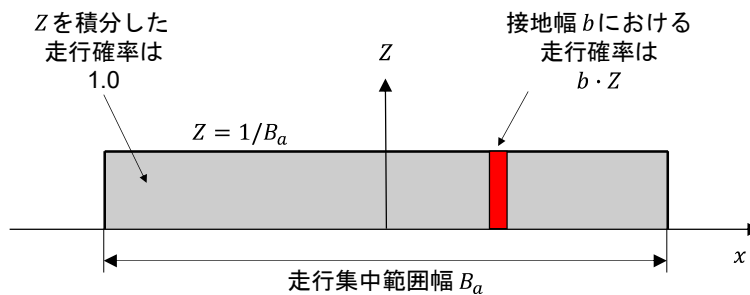


図-2.7 単峰型平均法の走行確率密度と走行確率

(2) 双峰型平均法

双峰型平均法では，図-2.5 のように車輪位置が施設左右に分布している場合を想定する。

双峰型平均法における走行確率密度 Z 及び走行確率 P の算出方法は単峰型平均法と同一である。ただし，図-2.8 及び図-2.9 のように，施設の左右のそれぞれで走行集中範囲を考えるため，接地幅当りの車輪走行回数 N を算出する際，走行確率 P に乘じるのは，単峰型平均法で用いた $Pass \cdot w$ ではなく，その半分の $Pass \cdot (w/2)$ となる。これは，施設の左右の走行集中範囲を走行した車輪の合計数は $Pass \cdot w$ となるものの，片側の走行集中範囲を走行した車輪の合計数は半分となるためである。そのため，単峰型平均法の式-2.3 は双峰型平均法では式-2.4 に改められる。

$$N = P \cdot Pass \cdot \frac{w}{2} = Pass \cdot \frac{b \cdot w}{2 \cdot B_a} \quad \dots \dots \dots \text{式-2.4}$$

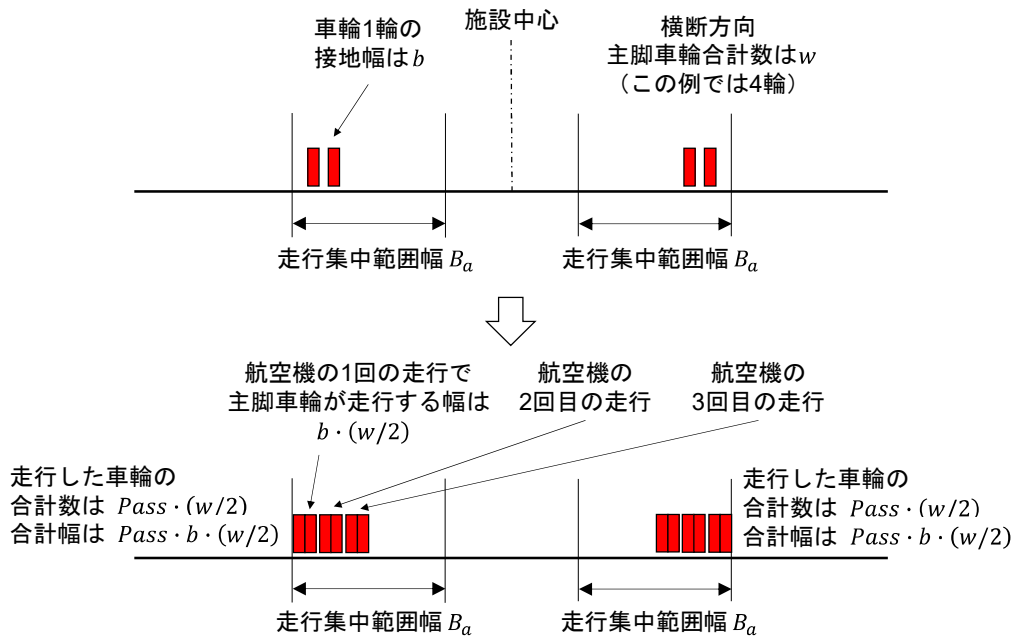


図-2.8 双峰型平均法の概念図

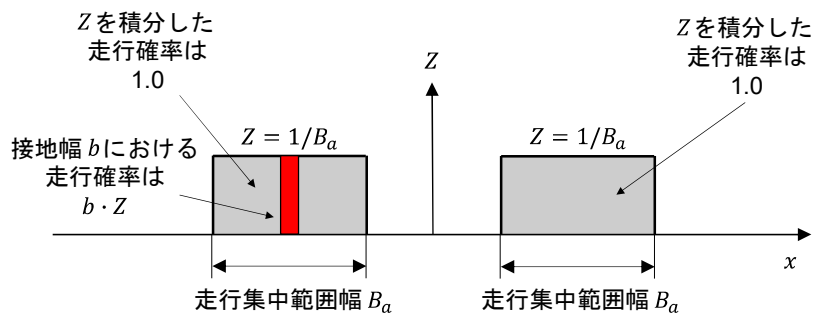


図-2.9 双峰型平均法の走行確率密度と走行確率

2.2.2 ピーク法

ピーク法とは、図-2.10のように、施設横断方向に対し、単峰型ピーク法であれば施設中心付近において、双峰型ピーク法であれば施設左右それぞれにおいて、航空機の車輪位置分布が正規分布であると仮定した走行確率を用いて車輪位置の換算を行う方法である。ここでは、2.1で述べた二種類の標準偏差のうち、車輪位置の標準偏差 σ_w を用いたピーク法について解説する。

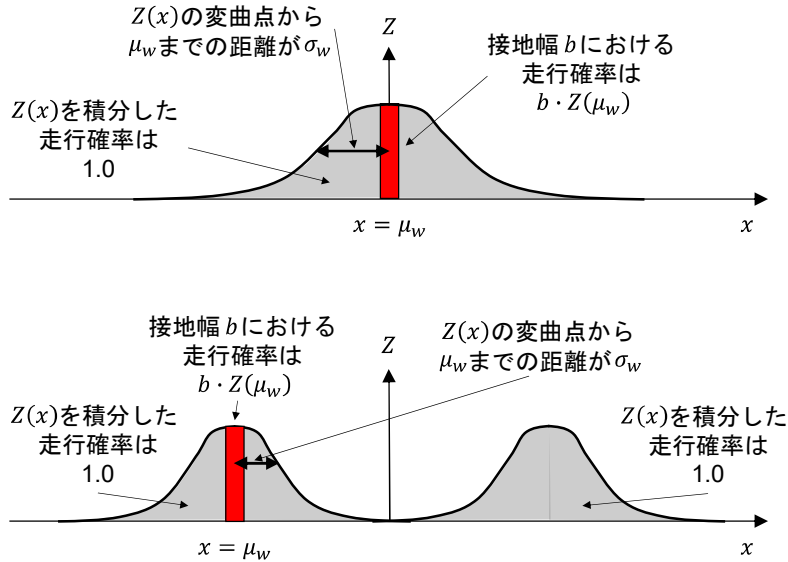


図-2.10 車輪位置の標準偏差を用いたピーク法の走行確率密度と走行確率（上が単峰型，下が双峰型）

(1) 単峰型ピーク法

車輪位置の分布が図-2.10 上図のような単峰型の正規分布とすれば、車輪位置の標準偏差 σ_w から車輪の走行確率密度 $Z(x)$ を式-2.5により算出し、これに車輪1輪の接地幅 b を乗じることで、位置 x における接地幅当りの車輪走行確率 $P(x)$ を式-2.6により算出できる。この走行確率 $P(x)$ を用いて、位置 x における接地幅当りの車輪走行回数 $N(x)$ を算出するためには、式-2.7に示すように、走行確率 $P(x)$ に航空機の走行回数 $Pass$ を乗じるのではなく、走行した車輪の合計数 $Pass \cdot w$ を乗じる。

$$Z(x) = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right) \quad \dots \dots \dots \text{式-2.5}$$

$$P(x) = b \cdot Z(x) = \frac{b}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right) \quad \dots \dots \dots \text{式-2.6}$$

$$N(x) = P(x) \cdot Pass \cdot w = \frac{Pass \cdot b \cdot w}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right) \quad \dots \dots \dots \text{式-2.7}$$

ここで、

- $Z(x)$: x の位置における車輪の走行確率密度 (1/m)
- σ_w : 車輪位置分布を正規分布とした場合の車輪位置の標準偏差 (m)
- μ_w : 施設中心から車輪位置分布の平均までの距離 (m)
- $\exp(t)$: e の t 乗 (e^t) を表す
- $P(x)$: x の位置における接地幅当りの車輪走行確率

b	: 車輪 1 輪の接地幅 (m)
$N(x)$	: x の位置における接地幅当りの車輪走行回数 (回)
$Pass$	: 航空機が施設を走行する回数 (回)
w	: 横断方向主脚車輪合計数 (輪) 航空機の前方あるいは後方から航空機を視認した場合の主脚車輪数の合計であるため、 主脚が 1 脚 4 輪や 1 脚 6 輪の場合も 1 脚 2 輪と同様に考える (詳細は 3.1 で解説する)
x	: 施設中心からの距離 (m)

(2) 双峰型ピーク法

車輪位置の分布が図-2.10 下図のような双峰型の正規分布とすれば，施設の左右どちらかの分布による車輪位置の標準偏差 σ_w から車輪の走行確率密度 $Z(x)$ を式-2.5 により算出し，位置 x における接地幅当りの車輪走行確率 $P(x)$ を式-2.6 により算出できる．この走行確率 $P(x)$ を用いて，位置 x における接地幅当りの車輪走行回数 $N(x)$ を算出するためには，走行確率 $P(x)$ に施設を走行した車輪の合計数 $Pass \cdot w$ を乗じるのではなく，施設の片側を走行した車輪の合計数 $Pass \cdot (w/2)$ を乗じる．そのため，単峰型ピーク法の式-2.7 は双峰型ピーク法では式-2.8 に改められる．

$$N(x) = P(x) \cdot Pass \cdot \frac{w}{2} = \frac{Pass \cdot b \cdot w}{2 \cdot \sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_w)^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right) \quad \dots \dots \dots \text{式-2.8}$$

2.3 荷重の換算方法

設計反復作用回数の算出では、滑走路等を走行する航空機を複数設定するが、脚荷重が航空機により大きく異なること、同一航空機であっても離陸時と着陸時の脚荷重は大きく異なることから、空港舗装設計が容易に行えるよう設計代表航空機を定め、設計で想定する各航空機の交通量を、設計材表航空機の交通量に換算するのが荷重の換算である。式-2.9及び式-2.10のように設計荷重による項と設計交通量による項の積を一定と仮定し、これを変形した式-2.11により、設計航空機の走行回数 N を、設計代表航空機の走行回数 N_0 に換算する。

この荷重の換算では、 F 及び F_0 として等価単車輪荷重 ESWL が用いられる。航空機の主脚は1脚2輪・4輪・6輪のように複数の車輪で構成されている航空機が多いことから、仮想の単車輪荷重が舗装に及ぼす影響と、複数の車輪で構成される脚荷重が舗装に及ぼす影響が等価となるよう算出された単車輪荷重が ESWL である。この場合の「舗装に及ぼす影響」とは、アスファルト舗装であれば路床上面に発生するたわみであり、コンクリート舗装であればコンクリート版下面に発生する荷重応力である。

この ESWL は、脚荷重の諸元（主脚荷重、主脚輪数、輪相互の間隔、タイヤ接地圧）が同一であっても、着目する深さに依存する。着目する深さとは、アスファルト舗装であれば舗装表面から路床上面までの深さ、コンクリート舗装であれば舗装表面からコンクリート版下面までの深さである。そのため、設計反復作用回数の算出に使用する ESWL は、アスファルト舗装の場合は路床の設計 CBR において設計反復作用回数区分を b として算出した基準舗装厚（表基層厚と粒状路盤厚の合計）に対応する ESWL、コンクリート舗装の場合は路盤の設計支持力係数を 70MN/m^3 、設計反復作用回数区分を N として算出したコンクリート版厚に対応する ESWL が用いられる。

$$\sqrt{\text{設計荷重} \cdot \log_{10}(\text{設計交通量})} = \text{一定} \quad \dots \dots \dots \text{式-2.9}$$

$$\sqrt{F_0} \cdot \log_{10}(N_0) = \sqrt{F} \cdot \log_{10}(N) \quad \dots \dots \dots \text{式-2.10}$$

$$N_0 = N^\beta \quad \dots \dots \dots \text{式-2.11}$$

ここで、

- β : ESWL の比の平方根 $= \sqrt{F/F_0}$
- F : 航空機の ESWL (kN)
- F_0 : 設計代表航空機の ESWL (kN)
- N : 航空機の走行回数 (回)
- N_0 : 設計代表航空機の走行回数 (回)

3. 設計反復作用回数の算出方法の変遷

1970 年に設計反復作用回数の算出方法が整備されて以降，1976 年と 1990 年に算出方法が改正されているため，それぞれの算出方法を「1970 年型」「1976 年型」「1990 年型」と記載し，各年代の算出方法を整理することとした．

3 章では，各年代の算出方法の詳細を述べるが，文献調査及び検証に基づく各年代の違いを表-3.1 に示す．荷重の換算については，車輪位置の換算よりも先に行うか後に行うかが異なるのみであり，換算方法は同一である．一方，車輪位置の換算は，2 章で述べたように「単峰型平均法」「双峰型平均法」「単峰型ピーク法」「双峰型ピーク法」があるが，各年代で異なる方法が採用されている．

表-3.1 設計反復作用回数の算出方法の違い

算出方法	荷重の換算	車輪位置の換算	
1970 年型	車輪位置の換算を行った交通量に対して荷重による換算を行う	単峰型平均法	施設幅に応じた換算係数により換算を行う
1976 年型	車輪位置の換算を行う前の交通量に対して設計荷重の換算を先に行う	単峰型ピーク法	
1990 年型		双峰型ピーク法と推測される	航空機の大きさに応じた換算係数により換算を行う

3.1 1970 年型の算出方法

As 設計要領 1970 及び Co 設計要領 1971 に掲載されている設計反復作用回数の算出方法では，最初に車輪位置の換算を行い，その後，荷重の換算を行う．設計反復作用回数の計算例を表-3.2 に示す．以降では算出方法の詳細を整理する．

表-3.2 1970 年型の設計反復作用回数の計算例

航空機			車輪位置の換算					荷重の換算				
			$Pass_i$ (回)	w_i (輪)	b_i (m)	B (m)	α_i	NW_i (回)	F_i (kN)	F_0 (kN)	β_i	NWL_i (回)
A	1	離陸	16,300	4	0.30	60	0.04	652	254.2	267.1	0.976	556
	2	着陸	16,300	4	0.30	60	0.04	652	214.8	267.1	0.897	334
B	3	離陸	25,000	4	0.30	60	0.04	1,000	267.1	267.1	1.000	1,000
	4	着陸	25,000	4	0.30	60	0.04	1,000	222.7	267.1	0.913	549
C	5	離陸	20,000	4	0.30	60	0.04	800	118.3	267.1	0.666	86
	6	着陸	20,000	4	0.30	60	0.04	800	113.2	267.1	0.651	78
Coverage =											2,602	

最初に、航空機の走行回数に対して、車輪位置の換算を式-3.1及び式-3.2により行う。

$$NW_i = Pass_i \cdot \alpha_i \quad \dots \dots \dots \text{式-3.1}$$

$$\alpha_i = \frac{b_i \cdot w_i}{0.5 \cdot B} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.2}$$

ここで、

- NW_i : 航空機*i*の車輪位置を換算した接地幅当りの走行回数 (回)
- $Pass_i$: 航空機*i*が施設を走行する回数 (回)
- α_i : 航空機*i*の車輪位置換算係数
- b_i : 航空機*i*の車輪 1 輪の接地幅 (m)
- w_i : 航空機*i*の横断方向主脚車輪合計数 (輪)
- B : 施設幅 (m)
- i : 航空機の通し番号 (1~*k*)

換算係数 α_i については、As 設計要領 1970 に以下の解説がある。原著の参考文献番号及び記号は、本資料の参考文献番号及び記号に変更して引用する。

設計荷重の反復作用回数とは、同一点に対する設計荷重の繰り返し作用回数であって、カバレッジとも称する。滑走路に離着陸する航空機の交通分布は、滑走路の中心帯 13m 幅に全交通量の約 80%が、また、中心帯 10m 幅に約 65%が集中している¹⁴⁾。この 13m 幅というのは、誘導路幅の約 1/2 に、また 10m 幅は約 3/8 にあたる。一方誘導路では、全交通量の 75%が、誘導路幅の 1/3 中心帯に集中するといわれている。わが国の例では、滑走路の中央 15m 幅に全交通量の 80~90%，10m 幅に 60~80%が集中していることを、車輪の跡から観測した¹⁰⁾。したがって 1 回の反復作用に要する交通量 NW_i を求める¹⁵⁾と次のようになる。

誘導路幅の 1/2 に、全交通量の 80~90%が集中する場合。

$$\frac{1}{\alpha_i} = \frac{B}{b_i \cdot w_i} \times \frac{1}{2} \div (0.8 \sim 0.9) = 0.63 \frac{B}{b_i \cdot w_i} \sim 0.56 \frac{B}{b_i \cdot w_i}$$

誘導路幅の 3/8 に、全交通量の 65~80%が集中する場合。

$$\frac{1}{\alpha_i} = \frac{B}{b_i \cdot w_i} \times \frac{3}{8} \div (0.65 \sim 0.80) = 0.58 \frac{B}{b_i \cdot w_i} \sim 0.47 \frac{B}{b_i \cdot w_i}$$

誘導路幅の 1/3 に全交通量の 75%が集中する場合。

$$\frac{1}{\alpha_i} = \frac{B}{b_i \cdot w_i} \times \frac{1}{3} \div 0.75 = 0.44 \frac{B}{b_i \cdot w_i}$$

本要領では、滑走路と誘導路とで別個に反復作用回数を求めることは煩雑になると考え、平均的な値として次式を採用した。

$$\frac{1}{\alpha_i} = 0.5 \frac{B}{b_i \cdot w_i}$$

なお、 w_i は航空機の前方あるいは後方から航空機を視認した場合の主脚車輪の合計数であるため、航空機走行方向に複数の軸を有する1脚4輪（複々車輪＝2軸4輪）や1脚6輪（3軸6輪）の場合であっても、1脚2輪（複車輪＝1軸2輪）の場合と同様に1脚当たり2輪と数える。これについてはAs設計要領1970に以下の解説がある。

着陸時と離陸時を較べた場合、輪荷重が変わるので、厳密に言えば接地幅は変化するが、その変化量は小さいので、輪荷重に関係なく接地幅は一定値としている。また接地幅の合計量 $b_i \cdot w_i$ が、二脚型の複車輪と複々車輪を較べた場合、同じ4ヶの車輪の接地幅の合計量となるのは不合理であるとの考え方もあろうが、本要領では、法線方向に連なった二つの車輪は、間隔^{著者注}がせまいので、1回の走行により、同一点に対し複車輪と同じ1回の最大変位を舗装に与えるものと考えた¹⁾。

著者注）横間隔（車輪間隔）ではなく縦間隔（軸間隔）のことである

これらの記述によれば、この換算係数 α_i は単峰型平均法によるものと考えられる。2章で整理した単峰型平均法の式を用いて整理すると、換算係数 α_i は以下のようになる。

- ・ 施設幅 B を有する施設を走行する全ての航空機は、施設中心付近の幅 $0.5 \cdot B$ の走行集中範囲を走行すると仮定する。
- ・ 車輪の走行確率密度 Z_i は、式-2.1において走行集中範囲の幅を $0.5 \cdot B$ とした式-3.3となる。
- ・ 接地幅当りの車輪走行確率 P_i は、式-2.2と同様に考え式-3.4となる。
- ・ 接地幅当りの車輪走行回数 NW_i は、式-2.3と同様に考え式-3.5となる。
- ・ 式-3.1と式-3.5から、換算係数 α_i は式-3.2となる。

$$Z_i = \frac{1}{0.5 \cdot B} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.3}$$

$$P_i = b_i \cdot Z_i = \frac{b_i}{0.5 \cdot B} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.4}$$

$$NW_i = P_i \cdot Pass_i \cdot w_i = Pass_i \cdot \frac{b_i \cdot w_i}{0.5 \cdot B} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.5}$$

ここで、

- Z_i : 航空機 i の車輪の走行確率密度（1/m）
- B : 施設幅（m）
- P_i : 航空機 i の接地幅当りの車輪走行確率
- b_i : 航空機 i の車輪1輪の接地幅（m）
- NW_i : 航空機 i の車輪位置を換算した接地幅当りの車輪走行回数（回）
- $Pass_i$: 航空機 i が施設を走行する回数（回）
- w_i : 航空機 i の横断方向主脚車輪合計数（輪）
- i : 航空機の通し番号（1～ k ）

次に、車輪位置を換算した接地幅当りの車輪走行回数 NW_i に対して、荷重の換算を式-3.6により行い、最後に、設計航空機ごとに車輪位置及び荷重を換算した接地幅当りの車輪走行回数 NWL_i を式-3.7により合計した値が設計反復作用回数となる。

$$NWL_i = NW_i^{\beta_i} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.6}$$

$$Coverage = \sum_{i=1}^k (NWL_i) \quad \dots \dots \dots \quad \text{式-3.7}$$

ここで,

- NWL_i : 航空機*i*の車輪位置及び荷重を換算した接地幅当りの車輪走行回数 (回)
- NW_i : 航空機*i*の車輪位置を換算した接地幅当りの車輪走行回数 (回)
- β_i : ESWL の比の平方根 $= \sqrt{F_i/F_0}$
- F_i : 航空機*i*の ESWL (kN)
- F_0 : 設計代表航空機の ESWL (kN)
- $Coverage$: 設計反復作用回数 (回)
- i : 航空機の通し番号 (1～*k*)

以上の結果から、1970 年型の設計反復作用回数は、走行集中範囲の幅を $0.5 \cdot B$ とした単峰型ピーク法による算出方法と考えられる。

3.2 1976 年型の算出方法

As 設計要領 1976 及び Co 設計要領 1977 に掲載されている設計反復作用回数の算出方法では，1970 年型とは逆に，最初に荷重の換算を行い，その後，車輪位置の換算を行う．設計反復作用回数の計算例を表-3.3 に示す．以降では算出方法の詳細を整理する．

表-3.3 1976 年型の設計反復作用回数の計算例

航空機			荷重の換算				車輪位置の換算		
			$Pass_i$ (回)	F_i (kN)	F_0 (kN)	β_i	NL_i (回)	w_i (輪)	$w_i \cdot NL_i$
A	1	離陸	16,300	254.2	267.1	0.976	12,859	4	51,437
	2	着陸	16,300	214.8	267.1	0.897	5,989	4	23,956
B	3	離陸	25,000	267.1	267.1	1.000	25,000	4	100,000
	4	着陸	25,000	222.7	267.1	0.913	10,371	4	41,482
C	5	離陸	20,000	118.3	267.1	0.666	728	4	2,914
	6	着陸	20,000	113.2	267.1	0.651	631	4	2,524
$w_i \cdot NL_i$ の合計 =									222,313
施設幅 60m ($\alpha = 0.01$) とした場合の Coverage =									2,223

最初に，航空機の走行回数に対して，荷重の換算を式-3.8 により行う．荷重の換算方法は 1970 年型と同じであるが，先に荷重の換算を行うので，1970 年型のように車輪位置の換算を行った後の走行回数 NW_i ではなく，航空機の走行回数 $Pass_i$ に対して換算を行う．

$$NL_i = Pass_i^{\beta_i} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.8}$$

ここで，

- NL_i : 航空機 i の荷重を換算した走行回数 (回)
- $Pass_i$: 航空機 i が施設を走行する回数 (回)
- β_i : ESWL の比の平方根 $= \sqrt{F_i/F_0}$
- F_i : 航空機 i の ESWL (kN)
- F_0 : 設計代表航空機の ESWL (kN)
- i : 航空機の通し番号 (1~ k)

次に，車輪位置の換算を式-3.9 により行い，設計反復作用回数を算出する．1970 年型と異なるのは，それぞれの設計航空機の換算走行回数に，設計航空機毎の換算係数を乗じてから合計するのではなく，それぞれの設計航空機の換算走行回数 NL_i に横断方向主脚車輪合計数 w_i を乗じてから合計し，最後に施設幅から選択する表-3.4 の換算係数 α を乗じる．

$$Coverage = \alpha \cdot \sum_{i=1}^k (w_i \cdot NL_i) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.9}$$

ここで，

- $Coverage$: 設計反復作用回数 (回)
- α : 車輪位置換算係数 (表-3.4)
- w_i : 航空機 i の横断方向主脚車輪合計数 (輪)
- NL_i : 航空機 i の荷重を換算した走行回数 (回)

i : 航空機の通し番号 (1~ k)

表-3.4 1976 年型の車輪位置換算係数

施設幅 (m)	車輪位置換算係数 α
20	0.05
25	0.04
30	0.03
45	0.02
60	0.01

換算係数 α については文献¹⁶⁾に以下の記述がある。原著の表番号及び記号は、本資料の表番号及び記号に変更して引用する。

このように舗装横断幅に対して交通分布が正規分布でパターン化できたので、次に設計荷重の交通量から反復作用回数への算定について考える。反復作用回数の定義にしたがい一点の交通量を考えると、それはゼロとなり合理的ではない。交通分布で最も交通が多い中心線で、設計荷重の一車輪の接地幅あたりの交通量を反復作用回数と考えるのが合理的である。いま接地幅を b とすれば、任意の正規分布交通パターンに対し、反復作用回数 $Coverage$ は次のようになる。

交通分布

$$Z(x) = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right)$$

に対し、

$$Coverage = P\left[-\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}\right] \cdot \sum (w \cdot NL)$$

ここに $P[-b/2 \leq x \leq b/2]$ は、正規分布で中心線の左右 $b/2$ の幅に入る確率で、 $\sum(w \cdot NL)$ は設計荷重に換算した全交通量である。

(中略)

一車輪の接地幅をみると、若干のばらつきはあるがほぼ 30cm 前後である。交通予測、設計荷重への換算、交通分布のパターン化、その他この反復作用回数の算定に関連するものの精度などを総合的に検討すると、一般的に接地幅として 30cm をとつても実用上、設計上問題はないと考えられた。表-3.4 は、車輪の接地幅を 30cm として、種々の舗装幅の交通分布に対して $P[-b/2 \leq x \leq b/2]$ を求めたもので、交通量から反復作用回数への換算のための係数の一覧表である。

この記述によれば、この換算係数 α は単峰型ピーク法によるものと考えられる。2 章で整理した単峰型ピーク法の式を用いて整理すると、換算係数 α は以下のようになる。

- ・ 車輪の走行確率密度 Z_i は、前述の文献の記載として「交通分布で最も交通が多い中心線で」とあるので、式-2.5 において $x = \mu_w = 0$ とした式-3.10 となる。
- ・ 接地幅当りの車輪走行確率 P_i は、式-2.6 と同様に考え式-3.11 となる。
- ・ 設計反復作用回数 $Coverage$ は、式-2.7 と同様に考え式-3.12 となる。ここで、 b_i を航空機によらない値と考えれば式-3.13 となる。
- ・ 式-3.13 から、換算係数 α は式-3.14 となる。

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.10}$$

$$P_i = b_i \cdot Z_i = \frac{b_i}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.11}$$

$$Coverage = \sum_{i=1}^k (P_i \cdot w_i \cdot NL_i) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{b_i}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot w_i \cdot NL_i \right) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.12}$$

$$Coverage = \left(\frac{b}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot \sum_{i=1}^k (w_i \cdot NL_i) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.13}$$

$$\alpha = \frac{b}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.14}$$

ここで，

- Z_i : 航空機*i*の車輪の走行確率密度 (1/m)
- σ_w : 車輪位置分布を正規分布とした場合の車輪位置の標準偏差 (m)
- P_i : 航空機*i*の接地幅当りの車輪走行確率
- b_i : 航空機*i*の車輪 1 輪の接地幅 (m)
- $Coverage$: 設計反復作用回数 (回)
- w_i : 航空機*i*の横断方向主脚車輪合計数 (輪)
- NL_i : 航空機*i*の荷重を換算した走行回数 (回)
- α : 車輪位置換算係数
- i : 航空機の通し番号 (1～*k*)

1976 年型の換算係数 α の試算を行い検証する．換算係数 α の算出に使用する車輪 1 輪の接地幅 b を 0.3m とし，車輪位置の標準偏差 σ_w は 1968 年の東京航空局の調査結果である図-2.3 を用いて式-3.14 により換算係数 α を試算することとした．ただし，図-2.3 には施設幅 20m の標準偏差 σ_w が掲載されていないため，図-2.3 の施設幅と車輪位置の標準偏差 σ_w の関係を整理したところ，図-3.1 に示す近似直線が得られた．この近似直線から算出した標準偏差 σ_w を用いて式-3.14 により換算係数 α を試算すると，表-3.5 に示すように，試算した換算係数 α と設計要領の換算係数 α は概ね一致した．

以上の結果から，1976 年型の設計反復作用回数の換算係数 α は，1968 年の調査結果で得られた車輪位置の標準偏差 σ_w を用いて，単峰型ピーク法により算出されたものと考えられる．

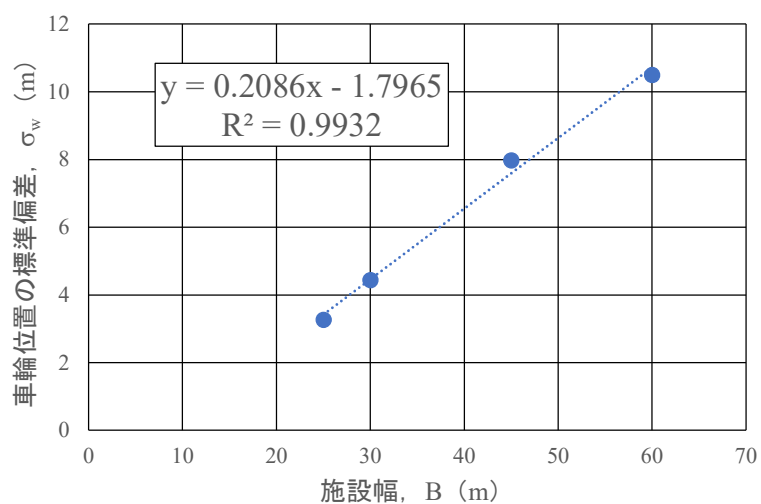


図-3.1 1968 年の調査結果¹⁰⁾における施設幅と車輪位置の標準偏差の関係

表-3.5 1976 年型の換算係数の検証結果

施設幅 (m)	図-3.1 の近似式による 車輪位置の標準偏差 σ_w (m)	標準偏差 σ_w と 式-3.14 による 換算係数 α 試算値	1976 年型の 換算係数 α (表-3.4 を再掲)
20	2.38	0.0503	0.05
25	3.42	0.0350	0.04
30	4.46	0.0268	0.03
45	7.59	0.0158	0.02
60	10.72	0.0111	0.01

3.3 1990 年型の算出方法

As 設計要領 1990 及び Co 設計要領 1990 に掲載されている設計反復作用回数の算出方法は，1976 年型と同一であるものの，車輪位置の換算に使用する換算係数 α のみが異なる．設計反復作用回数の計算例を表-3.6 に，1990 年型の換算係数 α を表-3.7 に示す．以降では換算係数 α の詳細を整理する．

表-3.6 1990 年型の設計反復作用回数の計算例

航空機			荷重の換算				車輪位置の換算		
			$Pass_i$ (回)	F_i (kN)	F_0 (kN)	β_i	NL_i (回)	w_i (輪)	$w_i \cdot NL_i$
A	1	離陸	16,300	254.2	267.1	0.976	12,859	4	51,437
	2	着陸	16,300	214.8	267.1	0.897	5,989	4	23,956
B	3	離陸	25,000	267.1	267.1	1.000	25,000	4	100,000
	4	着陸	25,000	222.7	267.1	0.913	10,371	4	41,482
C	5	離陸	20,000	118.3	267.1	0.666	728	4	2,914
	6	着陸	20,000	113.2	267.1	0.651	631	4	2,914
$w_i \cdot NL_i$ の合計=									222,313
大型ジェット機が就航する滑走路 ($\alpha = 0.03$) とした場合の $Coverage =$									6,669

表-3.7 1990 年型の車輪位置換算係数

区分	車輪位置換算係数 α	
	滑走路	誘導路
大型ジェット機が就航する空港	0.03	0.04
中小型ジェット機が就航する空港	0.04	0.05
プロペラ機及び小型機のみが就航する空港	0.05	0.05

換算係数 α については文献¹²⁾に以下の記述がある。原著の表番号、参考文献番号及び記号は、本資料の表番号、参考文献番号及び記号に変更して引用する。この記述によれば、この換算係数 α は平均法によるものと考えられる。また、1988年の調査結果における車輪位置分布図の図-2.5から考えると双峰型平均法と考えられる。

1990年に改訂された空港アスファルト舗装、空港コンクリート舗装の構造設計法では今回の調査結果が取り込まれている。

主脚の横断方向走行位置分布は5.1(原著のまま)で示したようにノーズギアの場合に比較すると分散の大きなものとなる。これは機体中心と主脚位置の関係が機種による異なること、LA-1に区分される主要な航空機であるB-747が左右2脚ずつの主脚を有しているからである。このことは舗装構造設計において使用される主脚の横断方向走行位置から設計反復作用回数を算定する時に、従来用いていたピーク法より平均法の方が適していることを意味していよう。

平均法では走行集中範囲の取り方が問題となるが、2.(原著のまま)で述べたアメリカ陸軍の方法も参考にして、走行位置分布を正規分布とみなして計算した標準偏差の3倍($3\sigma_w$)を取ることにした。そして、この部分を全航空機の主脚が一様に走行すると考えた。したがって交通量を反復作用回数へ換算するために空港舗装構造設計法で用いられる係数 α は次式で表される。

$$\alpha = \frac{b}{3 \cdot \sigma_w}$$

ここに、 b ：車輪接地幅 σ_w ：主脚走行位置分布の標準偏差

5.1(原著のまま)で述べたように走行位置分布は設計荷重区分別にまとめられることがわかったので、航空機の大きさによる区分ごとに求められた α が表-3.7である。

改訂前の舗装構造設計要領^{3),4)}(表-3.4)では滑走路の幅員によって α の値を区分していたが、今回の舗装構造設計要領では表-3.7に示すように航空機の種類によって区分している。

今回の調査結果により同一機種の航空機の横断方向走行位置分布は舗装の幅員によらないことが明らかとなった。これに基づいて2.(原著のまま)で述べた横断方向にみた舗装厚範囲にも関する規定が見直され、滑走路幅員が60m、45mと異なっている場合でも、中央帯幅員は20mと変更された。

一方、別の文献¹³⁾に以下の記述がある。原著の表番号、参考文献番号及び記号は、本資料の表番号、参考文献番号及び記号に変更して引用する。これらの記述によれば、この換算係数 α は双峰型ピーク法によるものと考えられる。

今回の設計要領改訂に際して行われた大阪国際空港と松山空港での航空機の交通分布調査の結果では、航行援助施設の整備等により、交通分布は更に舗装中央に集中する頻度が高まり、その結果として中心線上にはノーズギアのみが分布し、メインギアは中央線の両側に分かれて分布するようになっている。¹²⁾

表-2.3はメインギアの分布でパターン化できるので、交通分布で最も交通が多い位置で、設計荷重の一車輪の接地幅あたりの交通量を反復作用回数と考ええるのが合理的である。いま接地幅を b とすれば、任意の正規分布交通パターンに対し、反復作用回数Coverageは次のようになる。

交通分布

$$Z(x) = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2 \cdot \sigma_w^2}\right)$$

に対し、

$$Coverage = P\left[-\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}\right] \cdot \sum(w \cdot NL)$$

ここに、 $P[-b/2 \leq x \leq b/2]$ は正規分布で中心線の左右 $b/2$ の幅に入る確率で、 $\sum(w \cdot NL)$ は設計荷重に換算した全交通量である。

そのため，以降では，双峰型平均法及び双峰型ピーク法の両方で，1990 年型の換算係数 α の検証を行うこととした．

2 章で整理した双峰型平均法の式を用いて整理すると，双峰型平均法の換算係数 α は以下ようになる．

- ・ 車輪の走行確率密度 Z_i は，式-2.1 において走行集中範囲の幅を $3 \cdot \sigma_w$ とした式-3.15 となる．
- ・ 接地幅当りの車輪走行確率 P_i は，式-2.2 と同様に考え式-3.16 となる．
- ・ 設計反復作用回数 $Coverage$ は，式-2.4 と同様に考え式-3.17 となる．ここで， b_i を機材によらない値と考えれば式-3.18 となる．
- ・ 式-3.18 から，換算係数 α は式-3.19 となる．

$$Z_i = \frac{1}{3 \cdot \sigma_w} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.15}$$

$$P_i = b_i \cdot Z_i = \frac{b_i}{3 \cdot \sigma_w} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.16}$$

$$Coverage = \sum_{i=1}^k \left(P_i \cdot \frac{w_i \cdot NL_i}{2} \right) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{b_i}{3 \cdot \sigma_w} \cdot \frac{w_i \cdot NL_i}{2} \right) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.17}$$

$$Coverage = \frac{b}{6 \cdot \sigma_w} \cdot \sum_{i=1}^k (w_i \cdot NL_i) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.18}$$

$$\alpha = \frac{b}{6 \cdot \sigma_w} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.19}$$

ここで，

Z_i	: 航空機 i の車輪の走行確率密度 (1/m)
σ_w	: 車輪位置分布を正規分布とした場合の車輪位置の標準偏差 (m)
P_i	: 航空機 i の接地幅当りの車輪走行確率
b_i	: 航空機 i の車輪 1 輪の接地幅 (m)
$Coverage$	: 設計反復作用回数 (回)
w_i	: 航空機 i の横断方向主脚車輪合計数 (輪)
NL_i	: 航空機 i の荷重を換算した走行回数 (回)
α	: 車輪位置換算係数
i	: 航空機の通し番号 (1～ k)

2 章で整理した双峰型ピーク法の式を用いて整理すると，双峰型ピーク法の換算係数 α は以下ようになる．

- ・ 車輪の走行確率密度 Z_i は，式-2.5 と同様に考え， $x = \mu_w$ とした式-3.20 となる．
- ・ 接地幅当りの車輪走行確率 P_i は，式-2.6 と同様に考え式-3.21 となる．
- ・ 設計反復作用回数 $Coverage$ は，式-2.8 と同様に考え式-3.22 となる．ここで， b_i を航空機によらない値と考えれば式-3.23 となる．
- ・ 式-3.23 から，換算係数 α は式-3.24 となる．

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.20}$$

$$P_i = b_i \cdot Z_i = \frac{b_i}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.21}$$

$$Coverage = \sum_{i=1}^k \left(P_i \cdot \frac{w_i \cdot NL_i}{2} \right) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{b_i}{\sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{w_i \cdot NL_i}{2} \right) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.22}$$

$$Coverage = \left(\frac{b}{2 \cdot \sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot \sum_{i=1}^k (w_i \cdot NL_i) \quad \dots \dots \dots \text{式-3.23}$$

$$\alpha = \frac{b}{2 \cdot \sigma_w \cdot \sqrt{2\pi}} \quad \dots \dots \dots \text{式-3.24}$$

1990 年型の換算係数 α の試算を行い検証する。換算係数 α の算出に使用する車輪 1 輪の接地幅 b を 0.3m とし、車輪位置の標準偏差 σ_w は 1988 年の港湾技術研究所の調査結果である表-2.3 を用い、双峰型平均法の場合は式-3.19 により、双峰型ピーク法の場合は式-3.24 により換算係数 α を試算した。検証結果を表-3.8 及び表-3.9 に示す。1990 年型の換算係数 α は、滑走路・誘導路ともに双峰型ピーク法による試算値に近い結果となった。

以上の結果から、1990 年型の設計反復作用回数の換算係数 α は、1988 年の調査結果で得られた車輪位置の標準偏差 σ_w を用いて、双峰型ピーク法により算出されたと考えられる。

表-3.8 1990 年型の換算係数の検証結果（滑走路）

区分	滑走路			
	車輪位置の 標準偏差 σ_w (m) (表-2.3 を再掲)	双峰型平均法 による 換算係数 α 試算値	双峰型ピーク法 による 換算係数 α 試算値	1990 年型の 換算係数 α (表-3.7 を再掲)
大型ジェット機が 就航する空港	大阪空港 B-RWY 2.00	0.0250	0.0299	0.03
中小型ジェット機が 就航する空港	松山空港 RWY 1.50	0.0333	0.0399	0.04
プロペラ機及び 小型機のみが就航する空港	松山空港 RWY 1.20	0.0417	0.0499	0.05

表-3.9 1990 年型の換算係数の検証結果（誘導路）

区分	誘導路			
	車輪位置の 標準偏差 σ_w (m) (表-2.3 を再掲)	双峰型平均法 による 換算係数 α 試算値	双峰型ピーク法 による 換算係数 α 試算値	1990 年型の 換算係数 α (表-3.7 を再掲)
大型ジェット機が 就航する空港	大阪空港 B-TWY 1.70	0.0294	0.0352	0.04
中小型ジェット機が 就航する空港	松山空港 TWY 1.28	0.0391	0.0468	0.05
プロペラ機及び 小型機のみが就航する空港	松山空港 TWY 1.24	0.0403	0.0483	0.05

4. 車輪位置の換算方法に関する考察

2章及び3章で述べたように，設計反復作用回数は車輪位置の換算と荷重の換算を行い算出するが，4章では過去に二度改定されている車輪位置の換算方法について考察する。

4.1 個別換算法の概要

車輪位置の換算に使用している換算係数 α とは，荷重の換算を無視して考えれば，設計反復作用回数1回に必要なとなる航空機の全走行回数（1970年型：式-3.1）あるいは主脚車輪の全走行回数（1976年型：式-3.9，1990年型：式-3.23）の逆数に相当する係数である。例えば，1990年型の換算係数 α が0.05の場合，この逆数である20回（20輪）が，設計反復作用回数1回に必要なとなる主脚車輪の全走行回数 $Pass \cdot w$ となる。この場合，横断方向主脚車輪合計数 w が4輪の航空機を想定すれば，設計反復作用回数1回に必要なとなる航空機の全走行回数 $Pass$ は20輪/4輪である5回となる。

1970年型及び1976年型の車輪位置の換算で使用している換算係数 α は，3章で述べたように単峰型分布として算出されている。1968年の調査の時点では走行する航空機の偏差が大きく，航空機中心と施設中心が一致するとすれば施設の左右を走行するはずの主脚車輪が，施設中心付近を走行することにより，車輪位置の分布が単峰型となったためと考えられる。

一方，1990年型の車輪位置の換算で使用している換算係数 α は，3章で述べたように，1988年の調査結果で得られた車輪位置の標準偏差 σ_w を用いて双峰型ピーク法により算出されたと推測される。しかしながら2.1で述べたように，車輪位置の標準偏差 σ_w は，航空機位置の標準偏差 σ_a に比べて若干汎用性に欠ける。換算係数 α は車輪位置の標準偏差 σ_w の算出において調査対象とした航空機の交通量と主脚の情報に左右されるためである。例えば，主脚が2脚の航空機の交通量に対し，主脚が4脚の航空機の交通量が多い空港での調査の場合，分布が広がるため自ずと車輪位置の標準偏差 σ_w は大きくなり，換算係数 α は小さくなる。あるいは，交通量のほとんどを単一の航空機が占める空港での調査の場合，航空機毎の車輪位置の違いが無視できるほど小さくなり，分布が狭まるため車輪位置の標準偏差 σ_w は小さくなり，換算係数 α は大きくなる。そのため，1988年に大阪国際空港及び松山空港で調査対象とした航空機の交通量と主脚の情報とは大きく異なる空港では，算出される設計反復作用回数が実際の航空機の走行分布を十分に反映できていない可能性がある。

この点については，車輪位置の換算において，1976年型及び1990年型のように複数の航空機の車輪位置の標準偏差 σ_w を基にしたピーク法による換算係数 α ではなく，2.1で述べた航空機位置の標準偏差 σ_a を用いて各航空機の主脚車輪位置の分布を個別に算出し合算することで解消することができる。具体的には，それぞれの航空機の航空機中心から主脚車輪までの距離は既知であるため，想定する全ての航空機の中心及び主脚車輪位置が標準偏差 σ_a を有する正規分布と考えれば，図-4.1のように，施設横断方向に対して，各航空機の任意の位置の接地幅当りの車輪走行回数を簡単に計算することが可能である。そのため，想定する全ての航空機の位置別の接地幅当りの車輪走行回数（1990年型の場合，正確には，荷重の換算を行った後の接地幅当りの車輪走行回数）を合算した値が，施設横断方向のどの位置で最大となるかを確認し，その最大の回数を設計反復作用回数とする方法である。この方法は，ピーク法ではあるものの，換算係数 α を用いない換算方法であり，設計要領2008から空港舗装の性能照査方法として導入されている理論的設計法で用いられているパス／カバレッジ率 P/C の考え方と同様である。このパス／カバレッジ率 P/C とは，車輪位置分布を考慮した接地幅当りの車輪走行回数 $Coverage$ に対する，車輪位置分布を考慮していない航空機走行回数 $Pass$ の比である。言い換えれば，パス／カバレッジ率 P/C は接地幅当りの車輪走行回数1回に必要な航空機走行回数であり，接地幅当りの車輪走行確率の逆数に相当する。

以上の理由から，車輪位置の換算方法として，航空機位置の標準偏差 σ_a を用いて各航空機の主脚車輪位置の分布を個別に算出し合算することによる車輪位置の換算方法について試算及び分析を行うこととする。以降では1990年型の車輪位置の換算方法を換算係数法，前述の方法を個別換算法と称する。

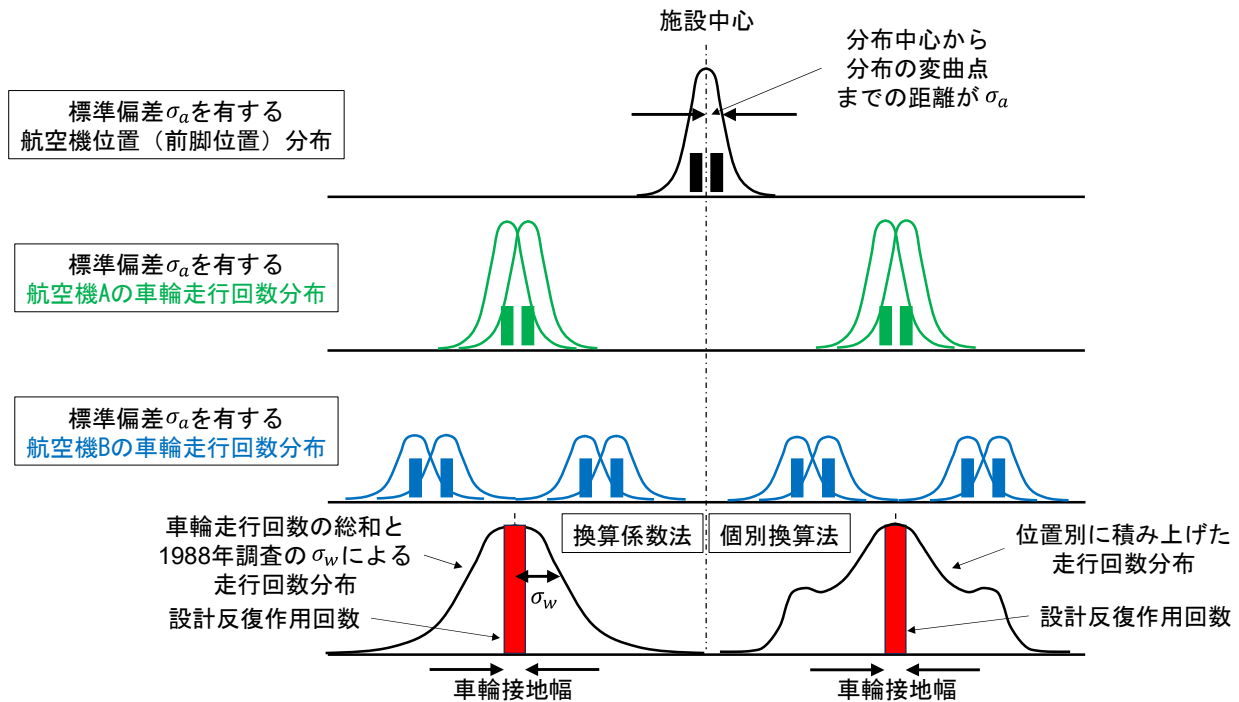


図-4.1 個別換算法における設計反復作用回数の概念図

4.2 個別換算法による試算及び分析

表-4.1 のモデル交通量を用いて、個別換算法により設計反復作用回数を試算することとした。この表の中で、基本ケースとは、設計航空機荷重区分を LA-12、アスファルト舗装の路床の設計 CBR を 10%、設計反復作用回数の区分を、アスファルト舗装の設計反復作用回数算出の統一条件である b (10,000 回/20 年) として算出した基準舗装厚 78cm に対する各航空機の ESWL を使用し、表-4.2 に示すように、中小型ジェット機が就航する平行誘導路を想定した換算係数法による設計反復作用回数が 10,000 回程度となるよう調整した交通量である。また A1 ケースは B767-300 の離着陸回数を基本ケースの 0.5 倍、A2 ケースは B767-300 の離着陸回数を基本ケースの 2 倍としたモデル交通量であり、B1 ケース及び B2 ケースは A320-200 の離着陸回数を、C1 ケース及び C2 ケースは B737-800 の離着陸回数を同様に变化させたモデル交通量である。

個別換算法による設計反復作用回数の荷重の換算は 1990 年型の設計反復作用回数と同じ方法とするため、表-4.2 に示す接地幅当りの荷重換算後の車輪走行回数 NL_i に対して、各航空機の主脚車輪位置を表-4.3、その他の計算条件を表-4.4 として式-4.1～式-4.5 により車輪位置の換算を行った。

基本ケースについて算出した任意の位置 x における車輪接地幅当りの車輪走行回数 $N(x)$ の分布は図-4.2 となった。図中に同じ航空機の線が 2 本掲載されているのは、主脚の内側車輪と外側車輪それぞれの走行回数を示しているためである。全ての航空機の主脚車輪の走行回数を合計すると、基本ケースでは施設中心から 3.6m の位置で車輪走行回数が最大となるため、この最大値である 10,300 回を個別換算法による設計反復作用回数とした。その他のケースの試算結果を表-4.5 及び図-4.3～図-4.5 に示す。

表-4.1 モデル交通量

航空機		基本	A1	A2	B1	B2	C1	C2
B767-300	離陸	10,000	5,000	20,000	10,000	10,000	10,000	10,000
	着陸	10,000	5,000	20,000	10,000	10,000	10,000	10,000
A320-200	離陸	16,300	16,300	16,300	8,150	32,600	16,300	16,300
	着陸	16,300	16,300	16,300	8,150	32,600	16,300	16,300
B737-800	離陸	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	12,500	50,000
	着陸	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	12,500	50,000
DHC8-400	離陸	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
	着陸	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
換算係数法による 設計反復作用回数		10,007	8,225	13,546	8,988	11,905	8,105	13,608

※網掛け部は基本ケースから変更した箇所を示す

表-4.2 基本ケースの設計反復作用回数（換算係数法）

航空機		荷重の換算				車輪位置の換算		
		$Pass_i$ (回)	F_i (kN)	F_0 (kN)	β_i	NL_i (回)	w_i (輪)	$w_i \cdot NL_i$
B767-300	離陸	10,000	321.8	321.8	1.000	10,000	4	40,000
	着陸	10,000	306.1	321.8	0.975	7,965	4	31,861
A320-200	離陸	16,300	272.2	321.8	0.920	7,482	4	29,926
	着陸	16,300	228.6	321.8	0.843	3,550	4	14,199
B737-800	離陸	25,000	286.6	321.8	0.944	14,140	4	56,559
	着陸	25,000	238.1	321.8	0.860	6,067	4	24,269
DHC8-400	離陸	20,000	122.1	321.8	0.616	446	4	1,784
	着陸	20,000	116.5	321.8	0.602	387	4	1,549
$w_i \cdot NL_i$ の合計=								200,148
中小型ジェット機が就航する誘導路 ($\alpha = 0.05$) とした場合の $Coverage =$								10,007

表-4.3 航空機の主脚車輪位置

航空機	航空機中心と施設中心が一致する場合において，施設中心から	
	内側車輪中心までの距離 (m)	外側車輪中心までの距離 (m)
B767-300	4.0785	5.2215
A320-200	3.3315	4.2585
B737-800	2.4280	3.2920
DHC8-400	4.1520	4.6480

表-4.4 個別換算法における車輪位置の換算条件

項目	設定値	備考
航空機位置の標準偏差 σ_a	0.57m	1988年の調査結果である 表-2.1のLA-12・平行誘導路の値
車輪1輪の接地幅 b	0.30m	
施設横断方向における 車輪接地幅当りの走行回数の計算間隔	0.10m	

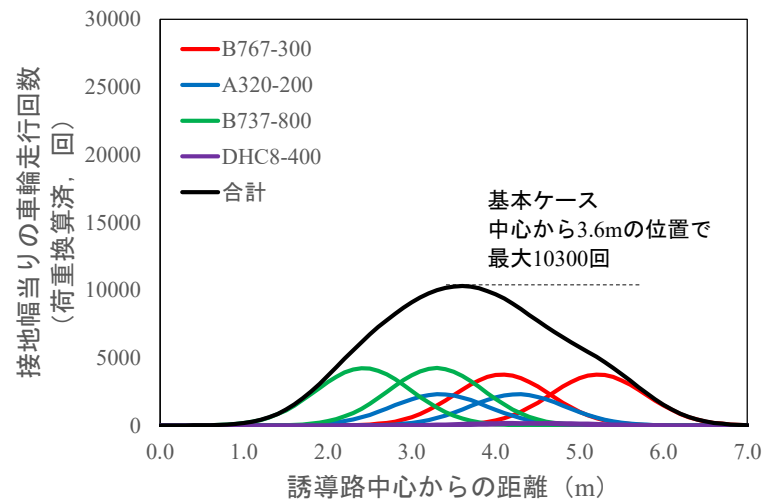


図-4.2 個別換算法による設計反復作用回数の算出結果（基本ケース）

$$Z_j(x) = \frac{1}{\sigma_a \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_j)^2}{2 \cdot \sigma_a^2}\right) \quad \dots \quad \text{式-4.1}$$

$$P_j(x) = b \cdot Z_j(x) = \frac{b}{\sigma_a \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_j)^2}{2 \cdot \sigma_a^2}\right) \quad \dots \quad \text{式-4.2}$$

$$N_j(x) = P_j(x) \cdot NL_i = \frac{NL_i \cdot b}{\sigma_a \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu_j)^2}{2 \cdot \sigma_a^2}\right) \quad \dots \quad \text{式-4.3}$$

$$N(x) = \sum_{j=1}^m (N_j(x)) \quad \dots \quad \text{式-4.4}$$

$$Coverage = N(x_{max}) \quad \dots \quad \text{式-4.5}$$

ここで、

$Z_j(x)$: x の位置における車輪 j の走行確率密度 (1/m)
 x : 施設中心からの距離 (m)

j	: 車輪の通し番号 (1～ m)
σ_a	: 航空機位置の標準偏差 (m)
μ_j	: 施設中心から車輪 j の位置分布の平均までの距離 (表-4.3 の車輪中心までの距離, m)
$P_j(x)$	: x の位置における接地幅当りの車輪 j の走行確率
b	: 車輪 1 輪の接地幅 (m)
$N_j(x)$	: x の位置における接地幅当りの車輪 j の走行回数 (荷重換算済, 回)
NL_i	: 車輪 j を有する航空機 i が施設を走行する回数 (荷重換算済, 回)
i	: 航空機の通し番号 (1～ k)
$N(x)$	: x の位置における接地幅当りの車輪の全走行回数 (荷重換算済, 回)
$Coverage$	: 個別換算法による設計反復作用回数 (回)
x_{max}	: 施設中心から $N(x)$ が最大となる位置までの距離 (m)

表-4.5 に示した換算係数法と個別換算法による設計反復作用回数の比率を見ると、個別換算法による設計反復作用回数は、換算係数法による設計反復作用回数を概ね上回る傾向があり、最大 12%程度の差がある。これは、今回のモデル交通量で設定した各航空機の走行回数及び主脚車輪位置の場合は、1990 年型の換算係数の根拠としている 1988 年の調査結果の場合よりも主脚車輪の走行位置分布が狭い範囲に集中していることを意味する。具体的には、今回の 7 ケースで設定した各航空機の (荷重換算済の NL_i ではなく) 荷重換算前の走行回数 $Pass_i$ 及び主脚車輪位置から車輪位置の標準偏差 σ_w を算出したところ、最小値 0.96m (C1 ケース)、最大値 1.04m (B1 ケース)、平均値 1.00m であったが、表-3.9 に示した換算係数の算出に使用されていると推測される車輪位置の標準偏差 σ_w は 1.28m であるため、個別換算法による設計反復作用回数には、この違いが反映されていると考えられる。

空港舗装の設計では、算出された設計反復作用回数をそのまま使用するのではなく、アスファルト舗装であれば 5 区分 ($a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e$)、コンクリート舗装であれば 3 区分 ($M \cdot N \cdot O$) として用いているため、今回確認された程度の変動であれば、個別換算法を用いたとしても設計反復作用回数の区分が変更となることは想定されないが、今後、個別換算法を適用するためには、実際の空港を利用する航空機の構成等を踏まえて、どの程度の変動が見込まれるかを確認する必要がある。また、文献¹²⁾において「この横断方向の航空機の走行分布形状、すなわち集中度は、近年の航行援助施設の整備によって高くなって来ているものと思われる」と記載があるように、航行援助施設の発達により航空機位置の標準偏差が 1988 年の調査よりも小さくなっていることも想定されるため、施設横断方向の航空機位置分布の再調査も併せて実施することが望ましい。

表-4.5 換算係数法と個別換算法による設計反復作用回数の算出結果

ケース	A	B	比率 B/A (%)	備考	
	換算係数法による 設計反復作用回数 (回)	個別換算法による 設計反復作用回数 (回)			
基本	10,007	10,300 ($x_{max} = 3.6 \text{ m}$)	102.9		
A1	8,225	9,257 ($x_{max} = 3.3 \text{ m}$)	112.6	B767-300 の 離着陸回数が 基本ケースの	0.5 倍
A2	13,546	13,742 ($x_{max} = 4.0 \text{ m}$)	101.4		2 倍
B1	8,988	8,807 ($x_{max} = 3.5 \text{ m}$)	98.0	A320-200 の 離着陸回数が 基本ケースの	0.5 倍
B2	11,905	13,105 ($x_{max} = 3.6 \text{ m}$)	110.1		2 倍
C1	8,105	8,741 ($x_{max} = 3.9 \text{ m}$)	107.9	B737-800 の 離着陸回数が 基本ケース	0.5 倍
C2	13,608	15,002 ($x_{max} = 3.2 \text{ m}$)	110.2		2 倍

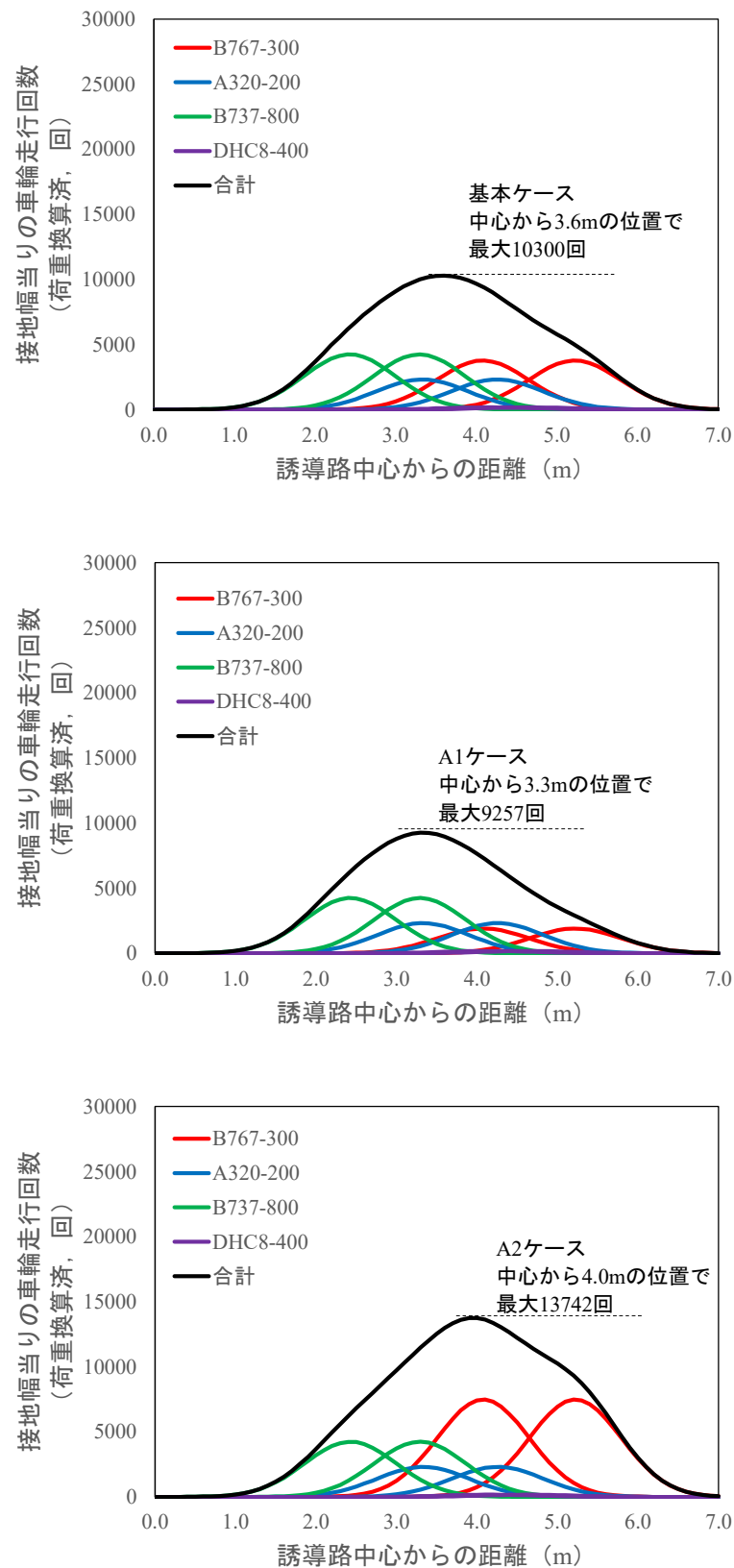


図-4.3 個別換算法による設計反復作用回数の算出結果（B767-300 の走行回数を増減させた基本，A1，A2）

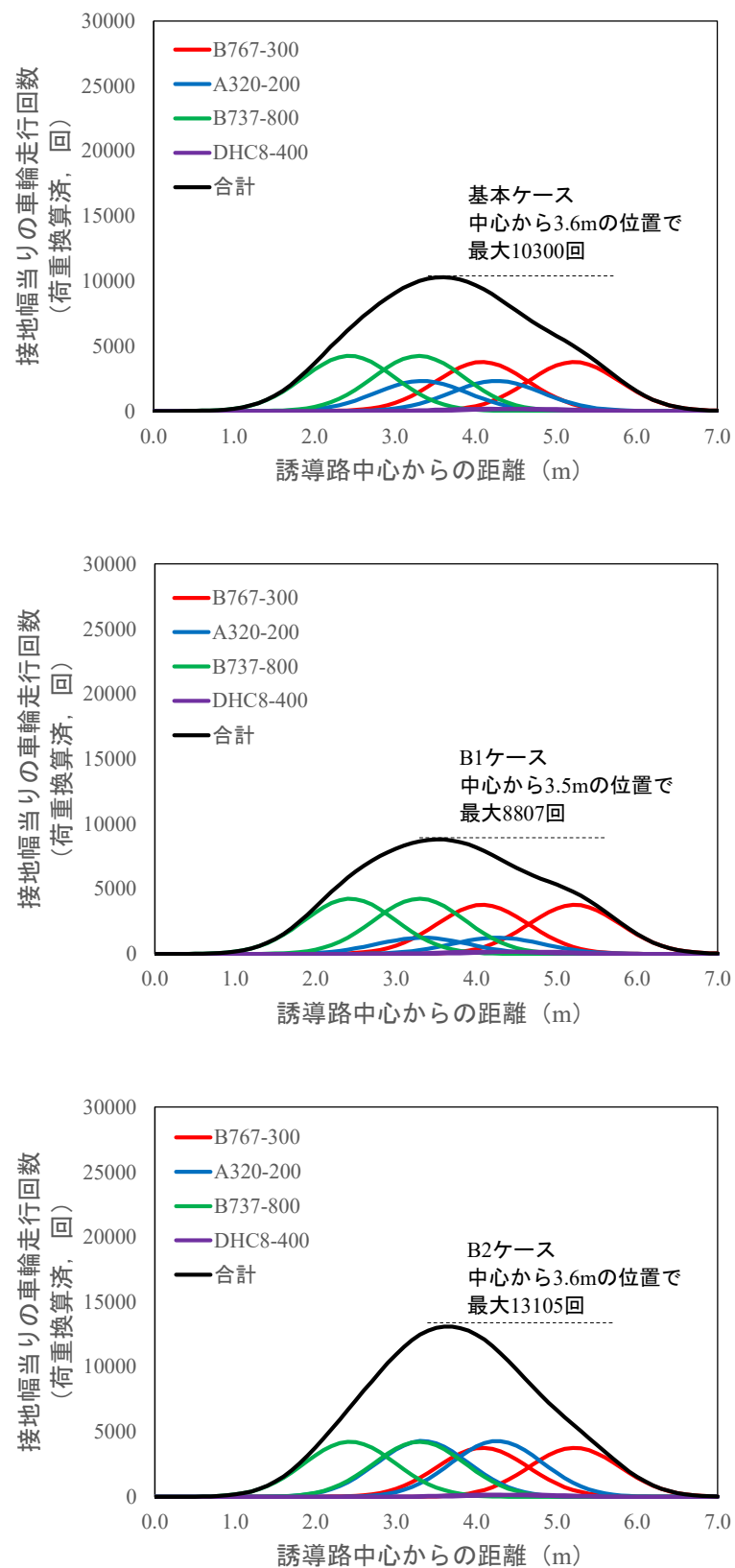


図-4.4 個別換算法による設計反復作用回数の算出結果 (A320-200 の走行回数を増減させた基本, B1, B2)

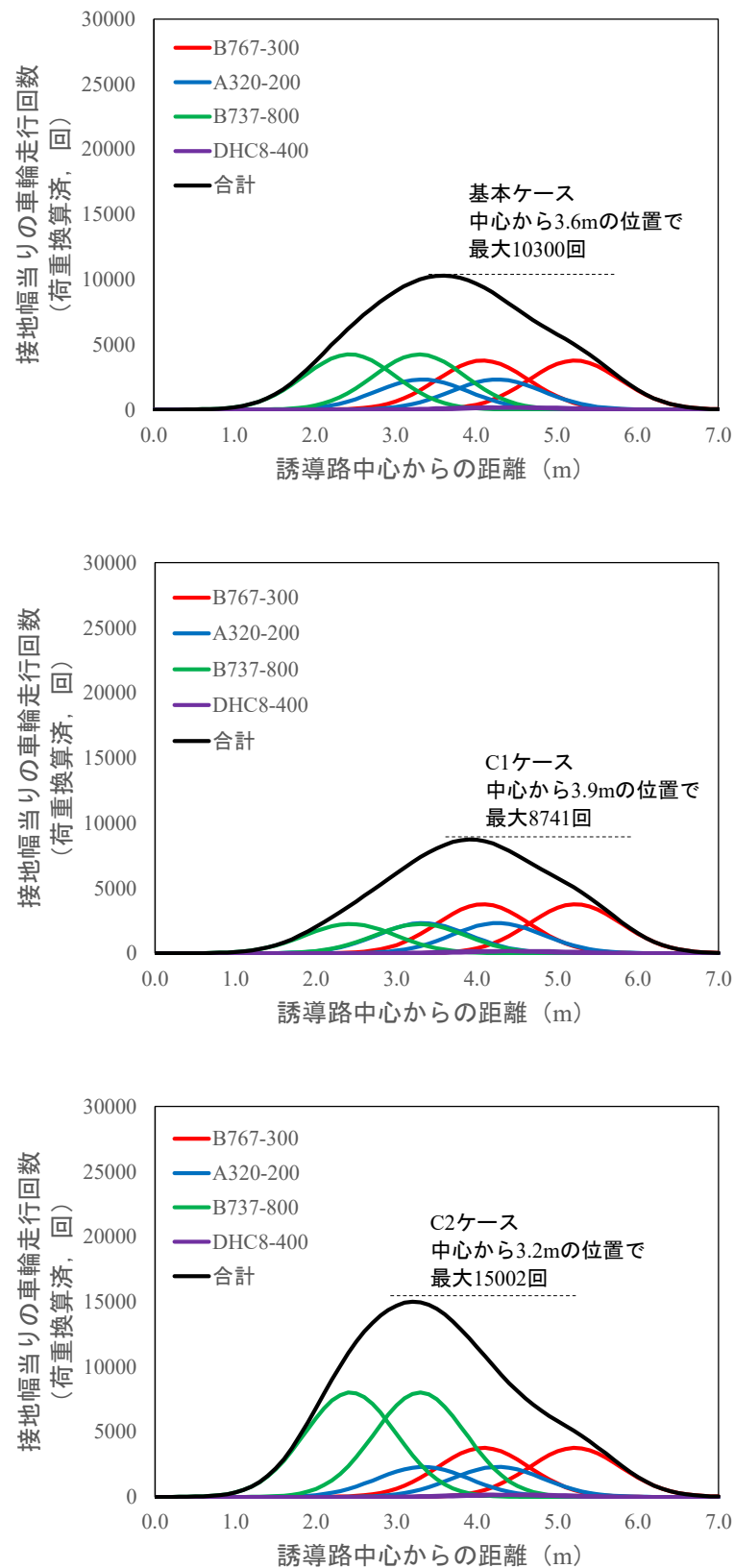


図-4.5 個別換算法による設計反復作用回数の算出結果（B737-800の走行回数を増減させた基本，C1，C2）

5. 結論

本資料の結論は以下のようにまとめられる。

- ・ 1970 年型、1976 年型及び 1990 年型の設計反復作用回数の算出方法の根拠を整理した。車輪位置の換算方法は、1970 年型は単峰型平均法、1976 年型は単峰型ピーク法、換算係数の算出には 1968 年の調査結果を用いている。また 1990 年型は双峰型ピーク法、換算係数の算出には 1988 年の調査結果を用いていると推測される。
- ・ 1990 年型の車輪位置の標準偏差に基づく換算係数を用いる換算係数法ではなく、航空機位置の標準偏差を用いる個別換算法を用いて設計反復作用回数の試算を行った結果、今回用いたモデル交通量では、個別換算法による設計反復作用回数は、換算係数法による設計反復作用回数よりも増加する傾向があるものの、設計反復作用回数の区分が変更になるほどの増加ではないことを確認した。

(2024 年 2 月 14 日受付)

参考文献

- 1) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，1970.
- 2) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，1971.
- 3) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，1976.
- 4) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，1977.
- 5) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，1990.
- 6) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，1990.
- 7) 運輸省航空局：空港舗装構造設計要領，1999.
- 8) 国土交通省航空局：空港舗装設計要領，2008.
- 9) 国土交通省航空局：空港土木施設設計要領（舗装設計編），2019.
- 10) 運輸省東京航空局：航空機の交通量分布調査，1968.
- 11) 須田：空港アスファルト舗装構造の設計法に関する一提案，港湾技研資料，No.54，1968.
- 12) 八谷，梅野：航空機走行位置分布の実態と舗装構造への影響，港湾技研資料，No.757，1993.
- 13) 運輸省航空局：空港舗装構造設計要領解説書，1994.
- 14) R. Horonjeff：Planning and Design of Airports，Mcgraw-Hill，1962.
- 15) R. G. Ahlvin：Flexible Pavement Design Criteria，Proc. of ASCE，Vol.88，No.AT1，1962.
- 16) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領解説書，1977.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1280

March 2024

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

