



LCN方式による滑走路強度の評価について

【東京国際空港】

林 鋼 太 郎*
武 田 昭**

1. まえがき

民間航空機の発達には常に戦時における軍用機の発達の後を追って進んできたが、特にタービンエンジンが軍用機から民間航空機にとり入れられたことにより飛躍的となった。すなわち、速度においてはマッハ0.5以下から一挙に0.9程度となり、重量においては60t級から140t級に飛躍した。しかも軍用機では現在マッハ2を越えるものがあり、7~10年後にはマッハ2~3、重量200tを越える超音速旅客機の開発が確実と考えられている。このような航空機の進歩にともない、空港の滑走路はより長くより強くとも常に拡張、改良を余儀なくされている。

滑走路強度に関しては、大型ジェット機が旅客機として使用されることがわかって以来、世界各国の問題となり、滑走路の強度をどのように評価し、表示するかについて国際民間航空機構(ICAO)を中心として検討されてきた。その結果、現在では二種類の方法が用いられている。一つは米国から提案されたもので、滑走路舗装設計法であるCAA法を用いて滑走路強度を単車輪荷重(SIW)で表わす方法であり、ほかの一つは英国から提案されたLCN方式である。なお、ICAOではそのほかに各車輪配置型式(単輪、複輪、四輪ボギー)ごとの脚荷重で表示する方法もあげている。

上述のごとく滑走路強度の評価法は種々あるが、その中で有力な方法の一つであるLCN方式、およびこれにしたがって東京国際空港で実施した載荷試験について述べることにした。

2. LCN (Load Classification Number) System の概要

LCN System は第二次大戦後英国において研究され、

* 正員 運輸省航空局飛行場課

** 正員 同 上

航空機の荷重および舗装強度の評価方法の一つとして、ICAOに提案されたもので、国際民間航空条約の第14技術付属書に滑走路の強度を表示する一つの方法として採用されている。

第二次大戦の直後は英国においても空港舗装を大ざっぱな等級にわけていたにすぎなかったが、航空機の重量が急激に増大し、高圧タイヤや車輪数の多い脚が使用されたために従来の舗装等級が不適当なものとなってしまった。そこで、タイヤ圧の高低や車輪配置の型式が舗装におよぼす影響をも考慮した航空機の荷重および舗装強度をあらわす簡単な尺度を作るためにLCN Systemが研究された。

まず載荷面積と舗装の破壊荷重との関係を見出すために既存の剛性舗装およびたわみ性舗装の両方について数多くの載荷試験が行なわれ、載荷面積が200in²から700in²の範囲で次式が近似的に成立することがわかった。

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.44}$$

ただし、 W_1 、 W_2 は載荷面積がそれぞれ A_1 、 A_2 の場合の破壊荷重である。

この関係式を図表で示すと図-1のごとくなる。ほとんどの航空機のタイヤ接地面積は200in²から700in²

図-1 載荷面積-破壊荷重曲線

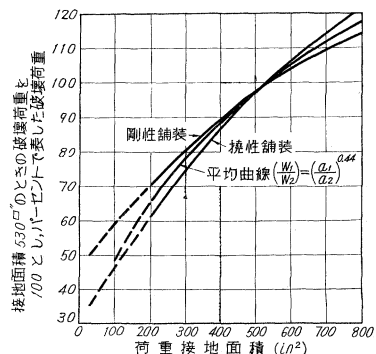


表-1 標準 LCN 値

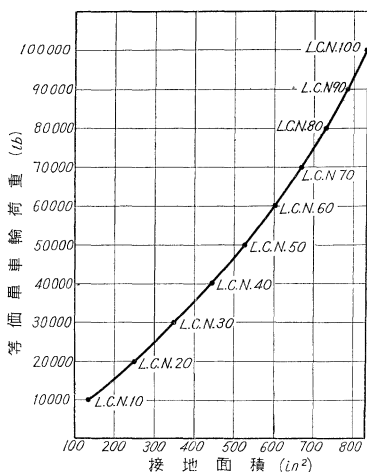
単車輪荷重	タイヤ圧	LCN
100 000 lbs	120 psi	100
90 000	115	90
80 000	110	80
70 000	105	70
60 000	100	60
50 000	95	50
40 000	90	40
30 000	85	30
20 000	80	20
10 000	75	10

の範囲内にあるが、最近の軍用機には、接地面積が 200 in² 以下の特別な高压タイヤを用いたものがあり、前式は適用できない。このような場合に対してはまだ研究が十分でないが図-1 では一応これを推定して点線で表わしている。

つぎに舗装の強度を表わす基準として、標準の Load Classification Curve が定められた。この曲線は LCN System が考案された当時のおも航空機の車輪荷重と接地面積の関係を考慮にいれて適当に選んだ 10 個の点(表-1)を結んだものである。

Load Classification Curve (図-2) と関係式 $W_1/W_2 = (A_1/A_2)^{0.44}$ から図-3 が作られた。これは LCN System で最も重要な図表であり、つぎのようにして描かれたものである。

図-2 標準 LCN 曲線



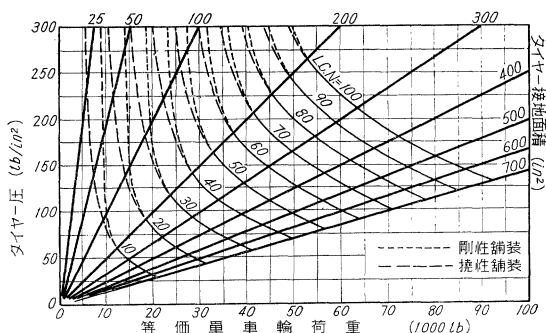
(1) タイヤ接地面積の線は (接地面積) = (車輪荷重) ÷ (タイヤ圧) の関係から描かれる。

(2) 各 LCN 線上の一点は Load Classification Curve からただちに得られる。

(3) 各 LCN 線は (2) で得られた点をとおり、関係式 $W_1/W_2 = (A_1/A_2)^{0.44}$ を満足するように描かれる。

接地面積 200 in² 以下の場合については図-1 と同様

図-3 単車輪荷重・タイヤ圧-LCN 曲線



に点線で描いてある。

図-2 および図-3 から舗装の LCN がどのようなものであるかが容易に理解できる。たとえば LCN-40 の舗装とは図-2 によれば接地面積 444 in² の 40 000 lbs の単車輪荷重に耐え得る舗装であり、また図-3 における LCN-40 の線上にある荷重とタイヤ圧の任意の組合わせに耐え得るものである。

3. 航空機の LCN

一脚に一つの車輪を持った航空機の LCN は脚荷重とタイヤ圧が与えられれば図-3 からただちに求めることができる。

一脚に多数の車輪を有する航空機の場合は脚荷重が多く車輪に分散して舗装面に伝えられるため問題が複雑となり、等価単車輪荷重 (Equivalent Single Wheel Load) の考え方をいなければならぬ。

等価単車輪荷重が求められたならば、LCN は単車輪の脚を有する航空機の場合と同様に図-3 により決定できる。等価単車輪荷重はつぎのようにして求められる。

(1) 剛性舗装の場合

多車輪荷重の剛性舗装に対する等価単車輪荷重とは、その多車輪荷重がコンクリートに生ぜしめる最大応力と

図-4 剛性舗装の複車輪の ESL 算出曲線

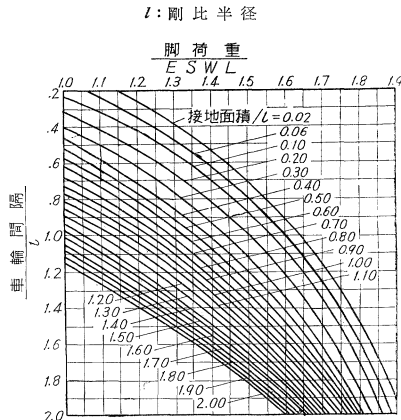
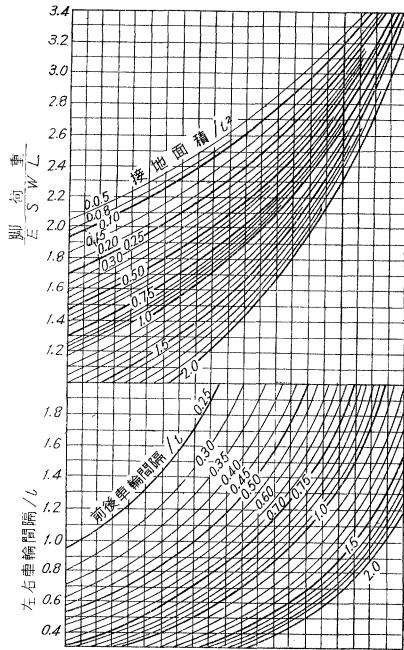


図-5 剛性舗装の複々車輪の ESWL 算出曲線



等しい最大応力をコンクリートに生ぜしめるような単車輪荷重で、多車輪荷重と等しいタイヤ圧を有するものである。その計算は中央載荷の場合の Westergaard 公式にもとづいて行なわれるが、実際には 図-4 および 図-5 の計算図表が作られており、つぎのようにして簡単に等価単車輪荷重 (ESWL) が求められる。

a) 複車輪の場合は、剛比半径 l 、脚荷重、全車輪の接地面積、車輪間隔、および等価単車輪荷重の 5 個の factor があり、これからつぎの 3 個の nondimensional factor が得られる。

車輪間隔 l 、接地面積 l^2 、脚荷重/ESWL、はじめの二つは脚および舗装についてのデータから計算され、最後の一つは 図-4 から読み取られる。

b) 複々車輪の場合も上と同様にして計算されるが、この場合は車輪間隔が左右および前後の二つとなるので、図-5 には、前後車輪間隔 l がもう一つの要素として入れられている。

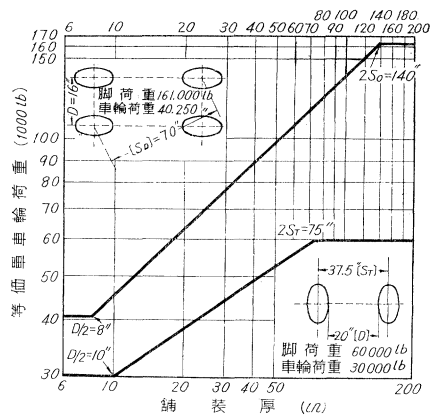
(2) たわみ性舗装

たわみ性舗装は何層かの異なった材料できているので、剛性舗装の場合より複雑であり、舗装の各層に対して正確に多車輪荷重と同じ影響をおよぼすような単車輪荷重が存在するとは考えられない。したがって、たわみ性舗装では舗装と路床の接する面について考え、多車輪荷重により路床面に生ずる応力と等しい応力を生ぜしめる単車輪荷重を ESWL とする。

ESWL の計算はつぎの仮定にもとづいて行なう。

① 舗装厚が $D/2$ より小さい間は ESWL は 1 個の

図-6 たわみ性舗装の ESWL 計算図



車輪の荷重に等しい。

② 舗装厚が S_T (あるいは S_D) の 2 倍より大きになると ESWL は全車輪の荷重 (すなわち脚荷重) に等しい。

③ 舗装厚が $D/2$ と $2S_T$ (あるいは $2S_D$) の間にある場合は ESWL の対数が舗装厚の対数に比例する。

図-6 は複車輪および複々車輪について ESWL を求めた例を示している。

以上に述べたところから、つぎのことがわかる。

すなわち、舗装の LCN および単車輪脚の航空機の LCN は一定した値をとるが多車輪脚の航空機の LCN は、たわみ性舗装では舗装厚、剛性舗装では剛比半径により変化する。

種々の航空機の LCN が 表-2 に示すごとくいくつかの舗装厚および剛比半径に対して計算されており、実際の舗装に対する LCN はその舗装厚あるいは剛比半径がわかればこの計算された値から内そう法により簡単に求められる。

4. 舗装の LCN

舗装の LCN は平板載荷試験により許容荷重を求め、図-3 により計算する。

載荷板の大きさは航空機の手輪接地面積に近いものが望ましく、直径 18 in の円板が適当である。

許容荷重は剛性舗装では破壊荷重に適当な安全率を考えて決定する。たわみ性舗装の場合は東京国際空港での実例について説明する。

5. 東京国際空港における載荷試験

東京国際空港の滑走路、誘導路などの大部分は第二次大戦後に米軍により建設されたもので、当初基礎 15 in 表面 3 in のたわみ性舗装であった。昭和 34 年以前は全備重量 60 t 級の航空機が同空港に発着する最大のもので、舗装も 10 数年の間よく耐えてきたが、昭和 35

表-2 航空機の L C N

機種	全備重量 (lbs)	タイヤ圧 lbs/s q.in	L C N								
			剛性舗装			たわみ性舗装					
			I=30	I=35	I=40	h=10	h=15	h=20	h=25	h=30	h=40
ボーイング 707/320	298 000	160	60	67	73	59	65	70	76	81	92
	253 000		51	57	62	49	55	60	66	71	81
	208 000		41	47	52	38	44	50	55	60	69
	163 000		32	36	40	30	35	40	44	48	56
	118 000		22	25	28	21	25	29	32	35	42
ブリタニア 300	180 000	140	42	46	49	37	44	51	55	59	67
	160 000		38	41	44	33	39	46	50	53	60
	140 000		33	36	38	28	34	40	44	47	53
	120 000		29	31	32	23	29	34	38	41	47
	100 000		24	25	26	18	23	28	31	34	40
コンペアー 880	185 000	148	51	54	56	51	60	69	75	81	92
	165 000		45	48	51	45	54	62	68	73	84
	145 000		39	43	46	39	47	54	60	65	76
	125 000		33	37	40	32	40	47	53	58	68
	105 000		26	30	33	25	33	40	45	50	59
DC-8 インターナショナル	310 000	157	66	74	88	62	71	80	86	91	102
	260 000		57	63	68	52	61	69	75	80	90
	210 000		48	52	55	42	50	57	63	68	78
	160 000		39	41	43	32	39	46	51	55	64
	110 000		29	30	30	22	29	35	39	42	49
			剛性舗装			たわみ性舗装					
						h=10	h=20	h=40			
DC-4	73 000	75	27			19	24	30			
	63 000		23			17	20	25			
	53 000		19			15	18	22			
DC-6B	107 000	108	45			34	39	47			
	97 000		43			32	36	43			
	87 000		38			29	31	39			
DC-7C	143 000	127	63			47	55	66			
	133 000		59			44	51	62			
	123 000		55			40	47	57			
	113 000		50			37	44	53			
	103 000		46			34	40	48			

年からは 140 t 級の大型ジェット機時代に急速に移行したため大型ジェット機の本格的就航にさきだち、滑走路そのほかの既設舗装強度を判定するために、昭和 34 年 9 月に LCN System による載荷試験を実施した。

その結果、大型ジェット機に対し舗装強度不足と判定されたので、これにもとづいて滑走路の補強を行ない、昭和 36 年 3 月にふたたび載荷試験を実施して補強後の強度を求めた。

載荷試験の概要ならびに結果はつぎのとおりである。

(1) 試験装置

- a) 荷重 レールおよびインゴット 85 t
- b) 100 t オイル ジャッキ

c) 載荷板 $\phi 45$ cm の鉄板の上に $\phi 30$ cm のものを重ねた。

d) ダイアルゲージおよび同支持桁

試験装置の準備で困難であったのは、現場で簡単に移動できる 80~90 t の荷重を作ることであった。

種々のものを検討した結果、重量物運搬用の台車 1 組とレール 43 t でトレーラーのような形に組み立て、その上にインゴット 42 t を積んで図-7 に示す装置をこしらえた。写真-1 は第 2 回の載荷装置である。

(2) 試験経過

第 1 回試験は荷重の準備期間をふくめて、昭和 34 年 9 月 18 日より 10 月 5 日までの 18 日間に行なった。

図-7 第1回 載荷試験装置

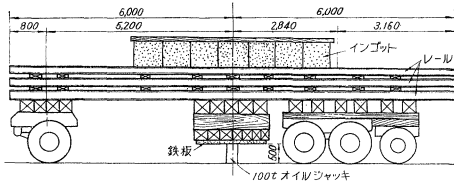


写真-1 載荷装置 (第2回)

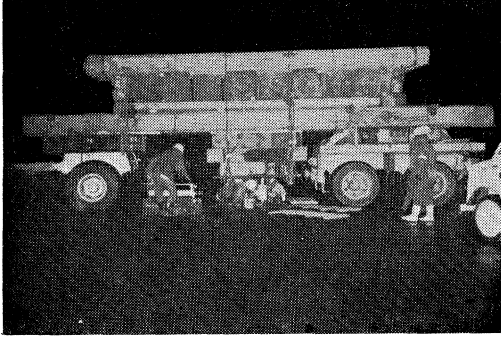
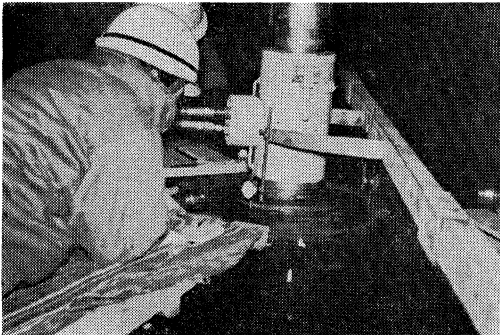


写真-2 試験状況



当初の予定では、主滑走路(長さ 2550 m) および副滑走路(1676 m)のうち使用されていない方を適宜に選んで、昼間に試験を行なう方針であったが、両滑走路とも昼間はひんぱんに使用されており、走行速度 4 km/h 以下の巨大な載荷装置を滑走路に持ち込むことは不可能であったので、試験はすべて午前0時から午前6時までの深夜に実施した。

試験は1カ所につき2~3時間を必要とし、1日に大体2カ所、全部で32カ所の試験を行なった。

(3) 試験方法

滑走路および誘導路の大部分はすでに述べたように、基礎 15 in, 表層 3 in のアスファルト舗装であるので、LCN System のたわみ性舗装に対する試験方法にしたがって実施した。これは、いくつかの荷重段階ごとに5回ずつのくり返し載荷を行ない、沈下量を記録する方法で、概略つきのごとく行なう。

載荷板上にダイヤルゲージを120°間隔に3個設置する、沈下量が1 mm 程度になるまで荷重をかける、荷

図-8

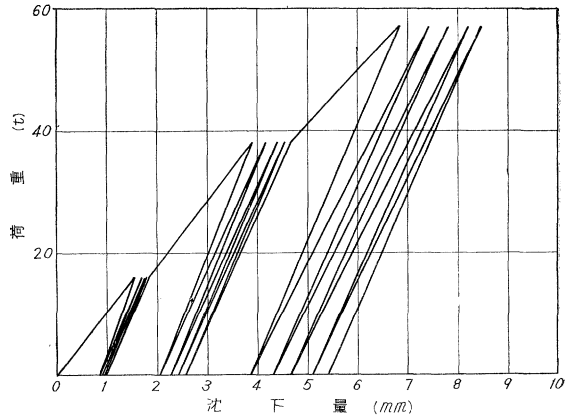


図-9

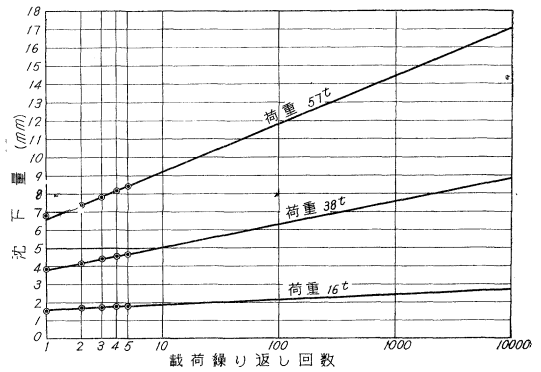
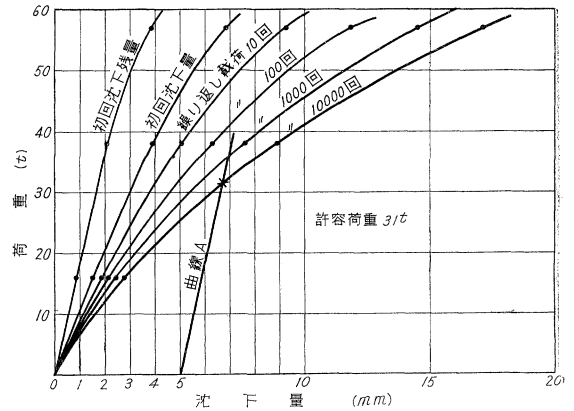


図-10



重を0にもどし、同じ荷重を4回くり返してかける、この間、荷重をかけた時およびもどした時の沈下量を記録する。つぎに、沈下が4 mm 程度になるまで荷重を増加させて前と同様に5回のくり返し載荷を行なう。

以後、順次荷重段階をあげて、沈下量が10 mm 程度となるか、あるいは舗装が降伏状態になれば試験を終了する。

荷重と沈下量の記録をグラフに表わすと図-8のごと

くなる。つぎに、半対数目盛の方眼紙で、荷重のくり返し回数を対数目盛に、沈下量を普通目盛にとると、図-9 が得られる。ここで、沈下量が荷重のくり返し回数の対数に比例すると仮定すれば、図-9 上の点を結ぶ直線を延長して、くり返し回数それぞれ 10, 100, 1000, 10000 回に対する沈下量が得られる。

図-9 で得られた沈下量にもとづいて、図-10 に示すようにくり返し回数 10, 100, 1000, 10000 に対しそれぞれ1本の荷重沈下量曲線が得られる。

ここで、許容荷重を、10000回のくり返し载荷により初回の载荷をとり除いた時の沈下残量からさらに、0.2 in (5 mm) の沈下を生ぜしめる荷重と定めると、図-10 において、初回沈下残量曲線を 0.2 in だけ水平に移動させた曲線 A とくり返し回数 10000 の曲線の交点から許容荷重が得られる。

(4) 試験結果

以上述べた方法で測定値を整理し、表-3 の結果を得た。現在使用されている大型ジェット機ダグラス DC-8 の LCN は 18 in のたわみ性舗装に対して 77 であるから、この試験で得られた舗装の LCN は相当の強度不足を示している。

滑走路補強後、昭和 36 年 3 月 5 日から 3 月 15 日までの 11 日間に第 2 回の载荷試験を行なった。その試験結果を表-4 に示す。

各測定値は表-2、表-3 でわかるように相当のばら

表-3 第 1 回载荷試験結果

番号	許容荷重	番号	許容荷重	番号	許容荷重
1	28 t	12	23 t	23	21 t
2	22	13	22	24	19
3	21	14	—	25	26
4	25	15	19	26	18
5	17	16	21	27	17
6	20	17	21	28	21
7	15	18	19	29	21
8	23	19	24	30	16
9	21	20	19	31	23
10	18	21	22	32	17
11	—	22	20		

平均値 20.6 t 標準偏差 2.9
20.6-2.9=17.7 t LCN=56

表-4 第 2 回载荷試験結果

番号	許容荷重	番号	許容荷重	番号	許容荷重
1	31 t	7	24 t	13	29 t
2	32	8	24	14	22
3	28	9	—	15	21
4	32	10	34	16	—
5	32	11	35	17	28
6	28	12	30		

平均値 28.6 t 標準偏差 4.2
28.6-4.2=24.4 t LCN=87

つきがあるが、一応英国での慣例にしたがって、全体の平均値から標準偏差を差し引いた許容荷重から LCN を決定した。

6. むすび

第 1 回の測定値 LCN 56 が 3 in の舗装嵩上げにより第 2 回の測定値 LCN 87 に増加したのであるが、嵩上げされた 3 in のアスコンの中を荷重が 45° の角度で抜けられると仮定して計算すると LCN は 56 から 82 に増加することになる。第 2 回の測定値はこの予想値を若干上まわる値を示しているが、英国でも LCN 値 10% 程度の変動は舗装そのものの不均一性から考えて避け難く、それ以上の精度を求めても意味がないとしているから、今回の载荷試験での予想と実測の差も許容されるのではないかと考えている。

LCN System は荷重とタイヤ圧を結びつけて一つの数字で表わしている点に特徴があり、舗装強度の評価法として一つのすぐれた方法である。しかし、LCN を求めるための载荷試験は東京国際空港での経験から考えて、かなり高価で面倒なものであり、どこでも気軽に実施できるような試験ではない。また、現在では LCN System そのものがわが国で航空機の運航にあたっている方々によく知られていない。

舗装強度の表現方法として LCN System を採用するとすれば、まず LCN System について十分な理解を航空従事者の間に行きわたらせる必要がある。また、わが国の数多い民間空港の LCN をすべて载荷試験により求めることはとてもできないので、主要空港以外はそれぞれの舗装に関するデータにより推定することになる。

(原稿受付: 1961. 10. 21)

日本とアメリカの民間空港および民間航空機の数

日本で現在民間航空に使用されている空港は 39 (防衛庁、または米軍と供用のものをふくむ) で、そのほか 9 空港が建設中である。

これに対してアメリカの民間空港はわが国の約 92 倍強の 3324 である。

また民間航空機はわが国では 470 機、アメリカでは少し古い資料であるが 1957 年にわが国の 172 倍強の約 81000 機であった。