

空港アスファルト舗装のわだち掘れ及び平坦性の調査方法について

国土交通省 国土技術政策総合研究所
 空港研究部 空港施設研究室 研究官 増田達

1. はじめに

平成 29 年 4 月、「空港舗装補修要領」（航空局）における空港アスファルト舗装のわだち掘れ調査及び平坦性調査について改訂が行われた。本報告では、改訂に至った検討内容について報告する。

「空港舗装補修要領」（航空局）では、空港アスファルト舗装は、航空機の走行安全性能を確保するために、空港管理者が路面性状調査及びすべり摩擦係数調査を実施することとなっている。空港アスファルト舗装の路面性状調査では、ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性を調査するが、従来のわだち掘れ及び平坦性評価は評価手法に課題を抱えていたため、新たな評価手法の導入を検討することとした。本報告では、新たな評価手法の選定及び新たな評価手法を導入する上での課題について検討を行った。

本報告では、第 2 章でわだち掘れ調査について示す。第 3 章で平坦性調査について述べ、第 4 章で結論を示す。

2. わだち掘れ調査について

2.1 わだち掘れ評価手法

わだち掘れ評価手法について、まず、評価のためのデータとしては、空港の就航機材サイズに応じて、「空港舗装補修要領」（航空局）に示される表-1 に従い、調査ユニットサイズが設定されており、ユニット縦断方向中央の横断面のデータ（横断プロファイルデータ）を使用する。

表-1 調査ユニットサイズ（わだち掘れ）

就航機材	調査ユニットサイズ
大型ジェット機が就航する空港	幅21m×長さ30m
中型ジェット機が就航する空港	幅14m×長さ45m
プロペラ機及び小型機のみが就航する空港	幅7m×長さ90m

従来のわだち掘れ評価手法（従来法）は以下のとおりである。図-1 のように評価範囲はユニット幅とし、横断プ

ロファイルデータの中心に中心線を引き、中心線と横断プロファイルデータの交点からユニット断面の左右の端部へ 2 本の基準線を引く。

左右の基準線を垂直上下に、横断プロファイルデータに接する最高点と最低点まで動かす。最高点と最低点の高低差を求め、左右それぞれ求めた高低差の大きい方の値を、そのユニット断面のわだち掘れ量とする。

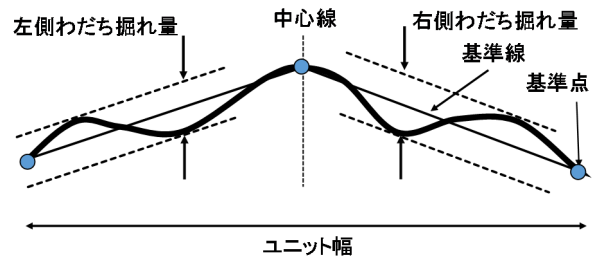


図-1 わだち掘れ評価手法（従来法）

従来法の課題としては、航空機の走行による塑性変形でない形状をわだち掘れとして評価してしまう点である。

例えば、図-2 のような横断プロファイルデータについて、従来法ではわだち掘れとして評価している左右の凸形状は、航空機の走行による塑性変形とは言えず、従来法による誤った評価と言える。

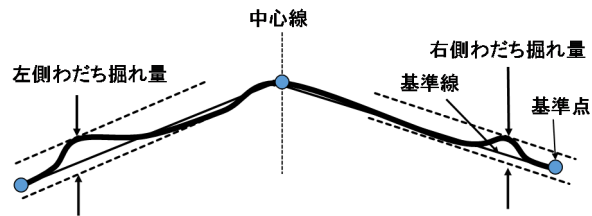


図-2 従来法がわだち掘れを正しく評価できていない例

以上の従来法の課題を解決するわだち掘れ評価手法として逐次法及び水深法の 2 種類の手法を検討する。以下、2 種類の評価手法を示す。

まず、逐次法の評価手法は以下のとおりである。図-3 の

ように、従来法とは異なり、複数本の基準線を用いることで、わだち掘れを評価する。各基準線から凹形状の最低点へ垂直に下ろした直線の長さの最大値をわだち掘れ量と定義する。基準線の引き方等、評価手法の詳細については、「空港舗装補修要領」(航空局)の付録-9を参照されたい。

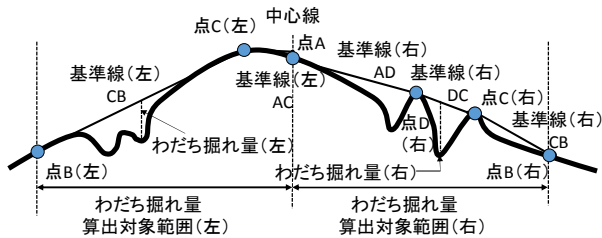


図-3 わだち掘れ評価手法 (逐次法)

次に、水深法の評価手法は以下のとおりである。図-4のように凹形状がある場合、まず、凹形状に対して水平線を引く。次に、水平線から各凹形状の最低点まで鉛直に線を引き、線の長さの最大値をわだち掘れ量と定義する。

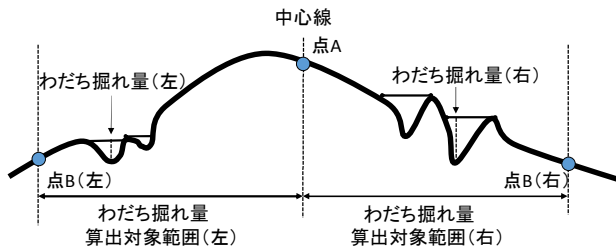


図-4 わだち掘れ評価手法 (水深法)

2.2 新たなわだち掘れ評価手法の選定

以上の逐次法、水深法から新たなわだち掘れ評価手法を選定する。

はじめに、従来法による評価結果と逐次法、水深法による評価結果の比較を行う。

評価結果の比較のために使用するデータは、平成27年度に東京航空局及び大阪航空局が実施した路面性状調査の横断プロフィールデータである。表-2に概要を示す。施設(滑走路、誘導路、エプロン)、ユニット幅(21m、14m、7m)別に分析を実施したが、それぞれの従来法と逐次法、水深法の比較結果に大きな差異は見られなかったため、代表的な結果として、滑走路、ユニット幅21mの比較結果を図-5に示す。図-5より、逐次法は従来法の約0.5倍～

1.0倍程度。水深法は、従来法の約0.5倍以下であることが分かった。水深法の評価結果が非常に小さい場合、航空機荷重による塑性変形が小さく、横断勾配の影響を受け、わだち掘れを評価できていないと思われる。

表-2 使用データの概要

空港	調査時期	就航機コード	滑走路		誘導路		エプロン	
			ユニット幅(m)	ユニット数	ユニット幅(m)	ユニット数	ユニット幅(m)	ユニット数
稚内空港	H27.11	D	14	44	14	4	14	4
釧路空港	H27.11	D・C	14	48	14	62	-	-
丘珠空港	H27.10	C	7	16	7	7	14	4
函館空港	H27.11	E・D・C	21	63	21	112	-	-
新千歳空港	H27.10	E・D・C・B	21	187	21	440	-	-
三沢飛行場	H27.7	C	-	-	14	3	-	-
仙台空港	H27.11	D・C・B	21	103	21	107	21	10
			7	12	7	20		
新潟空港	H27.11	D・C・B	14	48	14	53	-	-
			7	15	7	7		
百里飛行場	H27.11	C	-	-	14	2	-	-
広島空港	H27.11	E・D・C・B	21	100	21	85	-	-
					7	2		
高松空港	H28.2	E・D・C	21	73	21	87	7	2
					14	40		
宮崎空港	H28.1	E・D・C・B	21	83	21	60	-	-
美保飛行場	H27.11	D・C	-	-	21	6	-	-
					21	94		
高知空港	H28.1	D・C	21	83	21	94	-	-

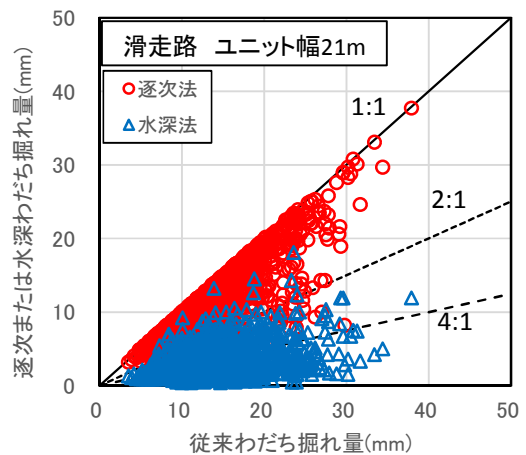


図-5 従来法と逐次法または水深法の評価結果比較 (滑走路、ユニット幅21m)

水深法は、水溜りが航空機の走行安全性能に影響を与えることを考慮した手法であり、有用性がある。しかしながら、わだち掘れ形状や横断勾配によっては、航空機荷重による塑性変形が大きいにも関わらず、わだち掘れがほとんど評価されない場合も想定されるため、わだち掘れ評価手法としては選定し難い。

よって、水深法は、わだち掘れ評価手法として不相当と判断した。わだち掘れ評価結果及び評価手法の妥当性を考慮し、新たなわだち掘れ評価手法には、逐次法を採用することとした。

2.3 逐次法の管理目標値の閾値の設定

新たに選定した逐次法について、管理目標値の閾値を設定する。逐次法と従来法の相関分析を実施し、相関関係から従来法の閾値を変換することにより、逐次法の閾値を設定する。本報告では、滑走路の閾値の設定について具体的に示すが、誘導路、エプロンについても滑走路と同様の手順により閾値の設定を行うことが出来る。

相関分析の実施に当たって、相関分析に支障を来す横断プロファイルデータについては棄却を行った。棄却したのは、従来法が航空機荷重による塑性変形を捉えられていない横断プロファイルデータである。棄却を行わない場合、従来法と逐次法の評価結果が大きく乖離し、閾値の設定が難しくなる。

相関分析は、説明変数を従来法の評価結果、目的変数を逐次法の評価結果として、線形回帰分析（y切片は0とした）を行った。代表的な結果として、滑走路、ユニット幅21mの分析結果を図-6に示す。

相関分析結果に基づく逐次法の閾値の設定を以下の手順で行った。

はじめに、相関分析結果における95%信頼区間に基づき、閾値の仮設定を行った。具体的には、施設別・ユニット幅別・信頼区間別の回帰直線より、従来法の閾値に対応する逐次法の評価結果を求め、ユニット幅毎の平均値を仮閾値とした。滑走路の仮閾値の設定結果を表-3に示す。

次に、同一の横断プロファイルデータにおいて、従来法と逐次法による評価ランク（A、B1、B2、B3、C）が大幅

に相違することを避けるため、表-3に示した仮閾値を用いて、表-4に従来法と逐次法による評価ランクの一致率を整理した。表-4より、従来法と逐次法による評価ランク一致率が高いのは、ランクB1、B2については信頼区間中央、ランクA、B3については信頼区間95%上限である。

ただし、信頼区間95%上限のランクAの逐次法の閾値は従来法の閾値と等しく、ランクAが100%一致することは明らかであること、ランクB3についてはサンプル数が少ないこと、また、ランクAからB3までの総合的な評価ランク一致率を考慮し、信頼区間中央の仮閾値が最適と判断した。

以上より、信頼区間中央の仮閾値を逐次法の閾値に採用することとした。逐次法の閾値は従来法の閾値の約8割となった。相関分析の結果について、施設、ユニット幅によらず、回帰直線の傾きは概ね0.8であり、従来法と逐次法の評価結果を比較する際には、従来法の評価結果を0.8倍し、逐次法と比較してよいことが分かった。

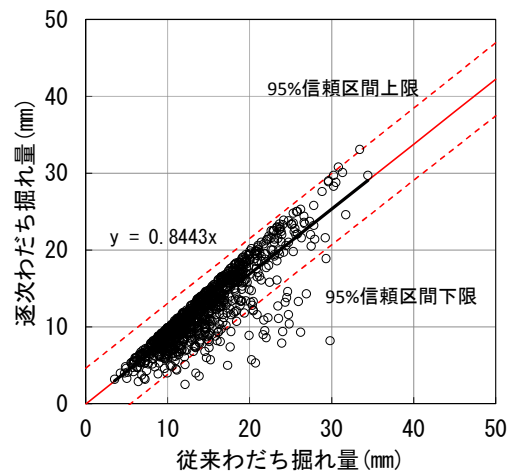


図-6 相関分析結果（滑走路、ユニット幅21m）

表-4 評価ランク一致率（滑走路）

		逐次法-95%下限					逐次法-中央					逐次法-95%上限				
		A	B1	B2	B3	C	A	B1	B2	B3	C	A	B1	B2	B3	C
従来法	A	57	373	0	0	0	326	104	0	0	0	430	0	0	0	0
	10mm	13%	87%	0%	0%	0%	76%	24%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
	B1	11	344	418	0	0	90	570	113	0	0	245	528	0	0	0
	19mm	1%	45%	54%	0%	0%	12%	74%	15%	0%	0%	32%	68%	0%	0%	0%
	B2	0	11	67	77	5	3	30	107	20	0	9	69	82	0	0
	29mm	0%	7%	42%	48%	3%	2%	19%	67%	13%	0%	6%	43%	51%	0%	0%
B3	0	1	1	2	9	0	1	2	7	3	1	1	2	9	0	
38mm	0%	8%	8%	15%	69%	0%	8%	15%	54%	23%	8%	8%	15%	69%	0%	
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

※上段は一致データ数、下段は一致率

表-3 仮閾値の設定（滑走路）

従来法の 閾値	95% 信頼区間	従来法の閾値に対する逐次わだち掘れ量 ユニット幅			仮閾値
		21m	14m	7m	
A 10mm	下限	3.8	3.3	5.2	4
	中央	8.4	7.6	7.9	8
	上限	10.0	10.0	10.0	10
B1 19mm	下限	11.4	10.0	11.9	11
	中央	16.0	14.4	15.1	15
	上限	19.0	18.9	18.3	19
B2 29mm	下限	19.8	17.4	19.0	19
	中央	24.5	22.0	23.0	23
	上限	29.0	26.7	27.1	28
B3 38mm	下限	27.4	23.9	25.2	25
	中央	32.1	28.9	30.2	30
	上限	36.8	33.9	35.2	35

※単位はmm

3. 平坦性調査について

3.1 平坦性評価手法

以下では、平坦性調査について述べる。平坦性評価手法について、従来の評価手法（平坦性）は、はじめに、表-5に示す就航機材サイズに応じた横断方向の測定位置において、路面性状測定車等により縦断プロファイルを測定する。なお、測定間隔は250mm以下が標準とされる。

次に、図-7 のとおり、凹凸を検出するための始点と終点を結ぶ基準線の水平方向の長さを3mとし、基準線の中心点から路面の評価点までの鉛直方向の長さ（以下、3m凹凸高さ）を求める。図-7は、評価点 $x=3m$ における3m凹凸高さの算出例である。評価点を1.5m間隔で移動させ、表-5に示す評価ユニット内の3m凹凸高さの標準偏差を算出する。標準偏差の大きさが平坦性 σ となる。

しかしながら、3mという一定かつ短い基準線長を用いて検出した凹凸により平坦性を評価していることから、約20m~30mのホイールベースを有する航空機の走行に支障をきたす凹凸を検知できていない可能性があった。空港舗装の平坦性指標としては、比較的的水平距離の短い凹凸（短い凹凸）だけでなく、比較的的水平距離の長い凹凸（長い凹凸）についても評価する必要がある、平坦性 σ の使用は見直す必要があると考えられる。

表-5 調査ユニット

就航機材	横断方向の測定位置	評価ユニットサイズ
大型ジェット機	センターから5.5m	幅21m×長さ30m
中型ジェット機	センターから4.8m	幅14m×長さ45m
小型ジェット機	センターから2.6m	幅14m×長さ45m
プロペラ機または小型機のみ	センターから主要航空機の主脚間距離の約1/2の距離	幅7m×長さ90m

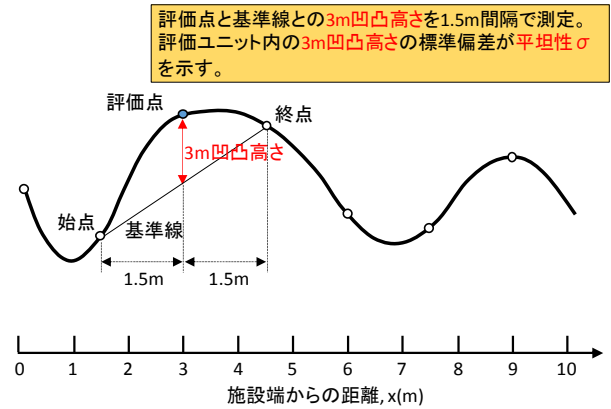


図-7 平坦性 σ の評価手法

導入を検討する新たな平坦性評価手法である BBI（Boeing Bump Index）は、航空機のホイールベースに対して十分な長さの基準線を用いることから評価手法として有用と考えられる。

BBIによる平坦性評価手法は、以下のとおりである。まず、評価点に対して、間隔 Δx で設けられた始点/終点を利用して、複数本の基準線を引く。基準線長は120mまで取ることができるため、長い凹凸についても評価可能である。基準線の詳細な引き方については、「空港舗装補修要領」（航空局）付録-9を参照して頂きたい。図-8は基準線のうちの一本を引いた例であるが、始点と終点から評価点までの水平距離の短い方を凹凸長さ、評価点から基準線へ引く垂線の長さを、凹凸高さとして定義する。

複数の基準線に対して、凹凸長さと凹凸高さの組み合わせが算出される。FAAのAC150/5380-9では、基準凹凸高さ曲線が図-9のように定められている。「空港舗装補修要領」（航空局）では、基準凹凸高さは、AcceptableとExcessiveの境界値を採用している。BBIは、凹凸高さを基準凹凸高さで除した値の最大値である。

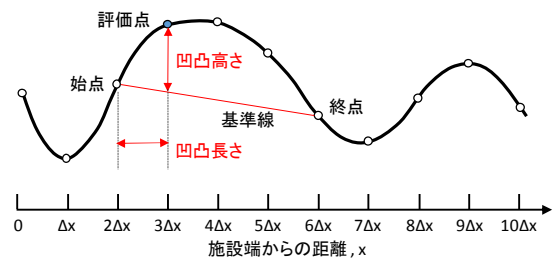


図-8 凹凸長さと凹凸高さの定義

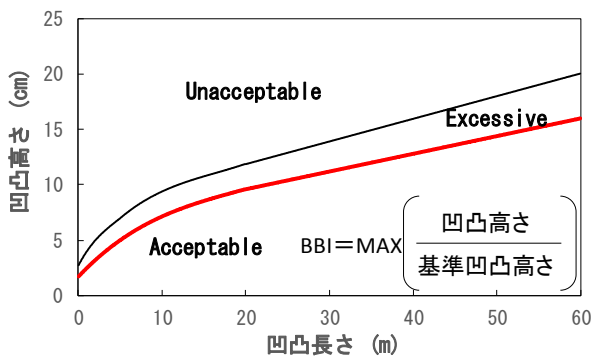


図-9 FAA による基準凹凸高さ曲線

3.2 BBI の評価間隔 Δx の感度分析

本節では、間隔 Δx の違いが BBI に及ぼす影響を確認することを目的とした感度分析を行う。BBI の評価点、基準線の始点/終点及び基準線長に影響する Δx を、1.0m または 0.1m に設定し、同一縦断プロファイルに対する BBI を比較する。感度分析に使用する縦断プロファイル 5 事例を、表-6 に整理した。以下では、 Δx を 1.0m で評価した BBI を「BBI ($\Delta x=1.0m$)」、また、 Δx を 0.1m で評価した BBI を「BBI ($\Delta x=0.1m$)」と定義した。

表-6 縦断プロファイルの概要

事例名	施設名	種類	測定延長	測定位置	測定年月
A空港_H18		海上埋立	3,000m	センターから5.5m	H18.2
A空港_H23					H23.3
B空港	滑走路	陸上	3,000m	センターから5.5m	H27.11
C空港			2,500m		H28.1
D空港			2,500m		H28.1

BBI ($\Delta x=1.0m$) と BBI ($\Delta x=0.1m$) を比較した結果を図-10 に示す。なお、同一箇所にて BBI を比較するため BBI ($\Delta x=0.1m$) は滑走路端より 1.0m 間隔で抽出した。同一箇所の BBI ($\Delta x=1.0m$) と BBI ($\Delta x=0.1m$) は概ね同程度の値をとることが分かる。紙面の都合上 A 空港_H23 の事例についてのみ示すが、他事例についてもほとんど同様の結果が得られている。よって、BBI ($\Delta x=1.0m$) と BBI ($\Delta x=0.1m$) には、大きな差がないといえる。

また、本分析において、計算プログラムによる BBI の評価には、BBI ($\Delta x=1.0m$) で数秒、BBI ($\Delta x=0.1m$) で数時間を要した。計算環境によるものの、BBI ($\Delta x=1.0m$) と BBI ($\Delta x=0.1m$) では、計算時間に大幅な差があると考えられる。そこで、計算時間を短縮するため、 Δx は 1.0m と設定することとした。

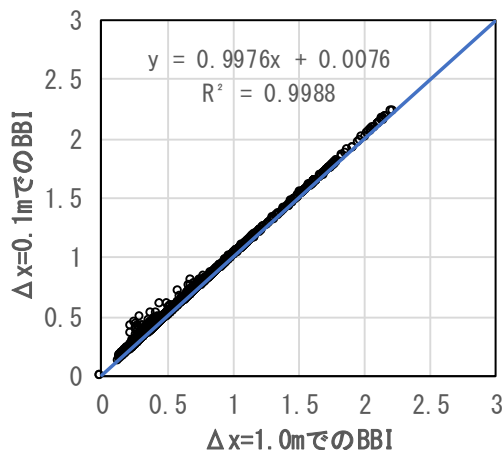


図-10 Δx の異なる BBI の比較 (A 空港_H23)

3.3 BBI と平坦性 σ の評価の比較

BBI の特徴である長い凹凸の評価について確認をするため、同一の縦断プロファイルデータに対して BBI と平坦性 σ の評価結果を比較する。図-11 は、B 空港の凹凸長さの頻度分布を整理した結果である。B 空港では、比較的短い凹凸の頻度が多いことが分かる。

同一ユニットにて、BBI と平坦性 σ を比較した結果を図-12 に示す。BBI は、評価ユニット長 30m 間の平均値を取っている。決定係数 R^2 を参照すると、BBI と平坦性 σ は中程度の相関があることが分かった。

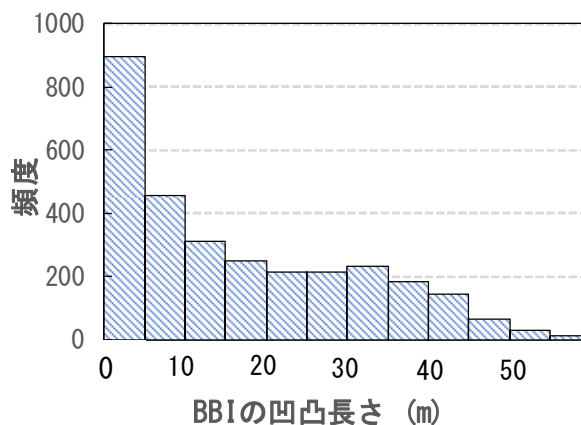


図-11 凹凸長さの頻度分布 (B 空港)

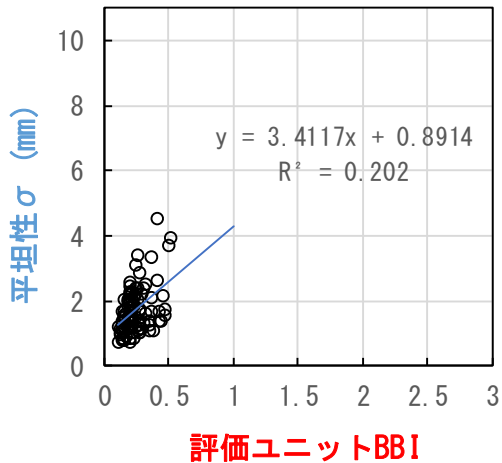


図-12 BBIと平坦性σの比較 (B空港)

一方、A空港_H23のデータについても、凹凸長さの頻度分布を整理した結果を図-13に示す。図-13より、A空港_H23は海上埋立空港であることから、不同沈下等の影響を受け、比較的長い凹凸の頻度が多かったことが分かる。

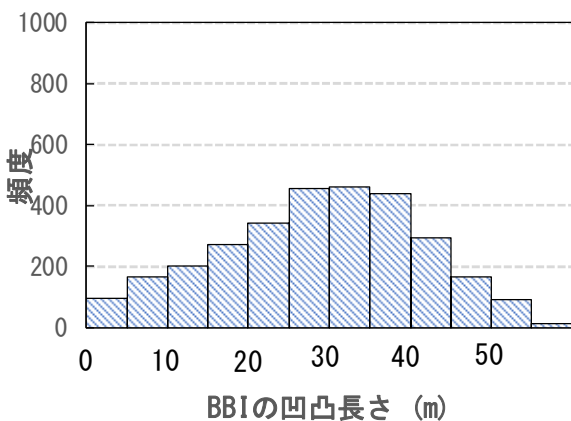


図-13 凹凸長さの頻度分布 (A空港_H23)

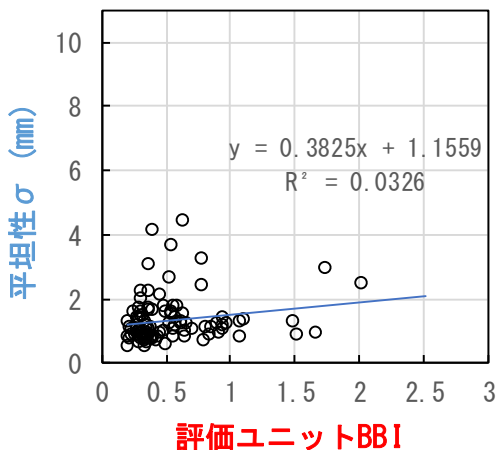


図-14 BBIと平坦性σの比較 (A空港_H23)

長い凹凸の多いA空港_H23のデータに対して、平坦性σとBBIを同一ユニットにて比較した結果を図-14に示す。決定係数R²より、BBIと平坦性σの相関はほとんどないことが分かる。これは、BBIが長い凹凸を評価した一方、平坦性σは長い凹凸を評価できないことから生じた差異と考えられ、長い凹凸を評価することができるBBIの有用性が確認できる。

4. 結論

以上より、本検討で得られた結論は以下のとおりである。

○わだち掘れ調査について

1. 航空機荷重によるアスファルト舗装の塑性変形を正しく評価できない可能性がある従来法に代わり、逐次法、水深法の二種類の新たなわだち掘れ評価手法の導入を検討した。検討の結果、形状によっては、水深法では、わだち掘れをほとんど評価出来ないことも想定されるため、逐次法を採用した。
2. 逐次法の管理目標値を下記のとおり設定した。逐次法の閾値は、従来法の閾値の約8割となった。

施設	評価ランク				
	A	B1	B2	B3	C
滑走路	8未満	15未満	23未満	30未満	30以上
誘導路	14未満	24未満	36未満	46未満	46以上
エプロン	17未満	29未満	41未満	53未満	53以上

※単位はmm

○平坦性調査について

1. BBIの評価間隔Δxが1.0mと0.1mの場合を比較した際に、二つの評価に有意な差はなく、計算プログラムの実行に要す時間を短縮するため、Δxは1.0mとすることとした。
2. BBIと平坦性σにより、複数の縦断プロファイルから平坦性を評価した結果、BBIは、主に海上埋立空港での地盤の圧密等による不同沈下の影響で生ずる水平距離の長い凹凸についても検知可能であるため、空港アスファルト舗装の平坦性指標として有用性が高いことが確認できた。

参考文献

福手勤, 佐藤勝久, 八谷好高, 山崎英男: 路面性状による空港舗装の供用性評価, 港湾技研資料, No. 414, 1982.