



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	牧草地凹凸に関する研究
Author(s)	近江谷, 和彦
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第3668号
Issue Date	1989-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/32778
Type	doctoral thesis
File Information	3668.pdf



牧草地の凹凸に関する研究

近江谷和彦

目 次

緒 論	-----	1
第 1 章 ほ場面凹凸生成の要因と凹凸が農作業に及ぼす影響	-----	5
第 1 節 凹凸について	-----	5
第 2 節 ほ場面凹凸生成の要因	-----	6
第 3 節 凹凸が農作業に及ぼす影響	-----	8
第 2 章 ほ場面凹凸の評価	-----	14
第 1 節 はじめに	-----	14
第 2 節 ほ場面凹凸の評価法	-----	14
1. 高低差の度数分布	-----	14
2. 分散, 標準偏差	-----	15
3. RR	-----	16
4. 折れ線長比による方法	-----	16
5. PrQ及びPN	-----	18
6. パワースペクトル密度	-----	19
第 3 節 路面凹凸の評価に関するISOの提案	-----	22
1. ISO/TC108で検討中の路面凹凸分級案	-----	22
2. ほ場面凹凸の評価への適用	-----	25
第 4 節 農地造成とほ場面凹凸の基準	-----	25
第 5 節 北海道の不陸均し基準	-----	29
1. 北海道の不陸均し基準	-----	29
2. 高低差の割合とPSDの関係	-----	35
第 6 節 要約	-----	38

第 3 章	ほ場面凹凸測定システムの試作	40
第 1 節	はじめに	40
第 2 節	ほ場面凹凸測定方法	40
第 3 節	測定方法	42
第 4 節	測定精度の予測	44
1.	測定精度予測方法	44
2.	結果及び考察	47
第 5 節	ほ場面傾斜角度測定装置の試作	51
1.	軸距の決定	51
2.	傾斜角度変換器の選定	52
3.	測定装置の概要	53
4.	試作装置の測定精度	55
第 6 節	ほ場面凹凸測定システム	59
1.	測定システム A	59
2.	測定システム B	61
第 7 節	要約	63
第 4 章	農地及び各種路面における凹凸の性質	65
第 1 節	牧草地の凹凸の性質	65
1.	はじめに	65
2.	供試ほ場及び測定方法	66
(1)	供試ほ場	66
(2)	測定方法	69
3.	結果及び考察	69
(1)	牧草地の凹凸の性質	69
(2)	測定箇所，測定方向の異なる凹凸の比較	75
(3)	トラクタの左右車輪が通過する凹凸の性質	78
4.	まとめ	83

第2節	水田及び普通畑の凹凸の性質	84
1.	はじめに	84
2.	水田及び普通畑の凹凸の性質	84
3.	まとめ	87
第3節	道路及び各種路面の凹凸の性質	88
1.	はじめに	88
2.	供試路面	88
3.	結果及び考察	91
第4節	牧草地の凹凸と各種路面凹凸の比較	97
第5節	要約	100
第5章	牧草地の凹凸の評価	103
第1節	はじめに	103
第2節	水準測量の簡略化	104
第3節	振動加速度による牧草地凹凸の評価	110
1.	走行路面の凹凸とトラクタの振動加速度	110
2.	振動加速度による牧草地凹凸の評価	112
2. 1	供試ほ場及び測定方法	112
2. 2	結果及び考察	114
第4節	要約	125
第6章	牧草地凹凸の基準に関する提案	127
第1節	凹凸の基準	127
第2節	均平作業の方法と精度	132
第3節	標高差の区間標準偏差の測定手順	134
第4節	要約	136
総括		137
論文中で使用している記号		144
参考文献		147

結 論

ほ場には様々な規模の凹凸が存在する。凹凸をその規模により大・中・小に分類すると、大規模なほ場の凹凸は距離で50m以上、標高差で50cm程度以上となり、中規模なほ場の凹凸は距離で0.1~50m、標高差で5~50cm程度となる。さらに小規模な凹凸は距離で0.1m以下、標高差で5cm以下と分類される。

これらのほ場に存在する様々な規模の凹凸について、多くの研究が行われている。大規模な凹凸に対してはPennockら¹⁾は傾斜角度と斜面の形状により地形の分類を行ったり、木材の集積に関連してTerlesk²⁾が地形の評価を行っている。農地造成において改良山成畑工での対象となるしゅう曲地形³⁾は大規模な凹凸であり、波状地あるいは起伏地⁴⁾と呼ばれる地形も大規模な凹凸である。

また、耕うん後の土塊によって形成される小規模な凹凸はZobeckら⁵⁾が総括しているように、ほ場表面における水の地下浸透、地表流出に影響し、その結果土壌流亡とも関係がある。

中規模の凹凸は営農、特に農業機械の運用上問題となる。例えば普通畑においては、トラクタがほ場面凹凸によりピッチング・ローリングを呈し⁶⁾、作業機の姿勢が不安定となる。輪距が150cmのトラクタに幅15mのブームスプレーヤを装着し防除作業を行った場合、トラクタ後車輪の左右高低差が5cmあると、ブームの左右先端での高低差は50cmにもなり、ブームノズルの高さは不均一になり散布精度が低下する。

水田においては、ほ場面の凹凸は水管理及び田植作業等に影響を及ぼす。田植を行うときには、落水後の水深が0~1cm程度を理想とする。しかし、田面仕上げの不良な場合には、凹の部分は苗の植え付け深さが浅くなったり、逆に田面が露出した凸の部分では植え付け時に根が露出したままなので、田植後に湛

水すると浮苗となることがある⁷⁾。一方、田植機の走行の際に田面の凹凸により田植機がピッチング、ローリングを呈し、苗の植え付け精度が低下する^{8,9)}。落水後の地表残留水は田面の傾斜、凹凸に原因している。排水の不良な水田では凹部に停滞水が生じたり¹⁰⁾、ほ場が軟弱となり、収穫時においてはコンバインによる収穫作業にとっても障害となる¹¹⁾。

牧草地の場合は、普通畑・水田に比べ高速で作業する場合が多いので凹凸による機械作業の障害が考えられる。普通畑における高速作業をとりあげると、プラウ耕の作業速度が最大3m/sであるのに対し、牧草地におけるロータリモアの作業速度の設計値は3~5m/sにもなっている。整地が十分でない牧草地の場合、播種から集草までのトラクタの作業効率が低くなり、牧草生産量が不均一となる¹²⁾。また、ほ場面凹凸のためにヘイテッダ、ヘイレーキの爪の破損、ヘイベーラやフォレージハーベスタのピックアップ装置の破損が発生し、折れたツースがウィンドロウと一緒に切り断刃のトラブルの原因となるので、このような機械作業を円滑化させる上で、ほ場整備の重要性が指摘されている¹³⁾。

以上のように、農作業に影響を及ぼす中規模の凹凸が機械化を中心とする営農上の問題となってきた。汎用トラクタが開発された後約60年を経過し、トラクタによる高能率化、高精度化が進められている^{14,15)}。農作業の高速化及び高精度化を妨げる要因の一つはほ場面の凹凸、特にトラクタ及び作業機の障害となる中規模の凹凸にある。前述したように、中規模の凹凸は作業速度・作業精度の低下、機械作業の円滑化を妨げる原因となるばかりではなく、トラクタ操縦者の乗心地あるいは健康面にも影響することが既に1960年頃から指摘されている¹⁶⁾。農作業の障害となるほ場の中規模の凹凸は、大規模及び小規模の凹凸に比べ農業機械の運用面の重要な因子である。そのため、トラクタの振動源としてのほ場面凹凸の性質を知ることを目的として、多くの研究成果が発表

されている。代表的な研究としては1969年に発表されたWendeborn¹⁷⁾、Matthews¹⁸⁾の研究がある。国内では並河による水田の凹凸に関する研究¹⁹⁾、笹尾らによるトラクタの振動シミュレーションを目的としたほ場面凹凸の合成²⁰⁾、鳥巢らによる畑の凹凸に関する研究²¹⁾等がみられる。しかしながら、これらの研究はほ場面凹凸の性質については述べているが、農作業の良否に与える影響という観点からほ場面凹凸の評価を行っておらず、ほ場面凹凸の適切な測定方法及び評価法については述べていない。ほ場面凹凸の基準は水田を除くほ場については確立されていないのが現状である。

ところで、凹凸が車両走行の障害となるのは道路、空港の滑走路等についても同様である。路面凹凸に関する研究は第2次世界大戦後多くの研究者によって行われた。空港の滑走路あるいは駐機場の路面管理を目的とした研究報告が1954年²²⁾及び1958年²³⁾にNACAより発表されており、車両が道路以外の路面、即ち不整地²⁴⁾を通過するために必要な資料を得る目的で不整地の凹凸調査結果が米国陸軍研究所により1963年²⁵⁾に発表された。自動車道路の路面凹凸については、Pevzner²⁶⁾、La Barreら²⁷⁾の研究結果が発表された。国内においては自動車用道路の凹凸に関する研究が兼重²⁸⁾、森田ら²⁹⁾、永井ら³⁰⁾によって発表された。このように各種路面凹凸に関する研究は第2次世界大戦後、アメリカを中心に発展したが、その原因としては車両の高速化や高速道路網の発達によって路面の凹凸が乗心地や車両の耐久性に重要な影響を及ぼすこと等があげられる。また、Blackmanらによって1958年に発表されたパワースペクトラム理論³¹⁾は不規則な現象の性質を表現するのに適しており、この理論の採用によって道路及び不整地の凹凸の性質が解析できるようになった。

ほ場面の凹凸の規模とそれらの意味、及びほ場以外の凹凸に関する研究について述べてきたが、筆者は、農業の機械化、即ち農作業の高速化、高精度化に伴いトラクタ及び作業機の走行に障害となる凹凸の良否が農作業に与える影響

は今後増加するものと考え、農業機械の運用面よりみたほ場面凹凸の評価方法の確立が必要と判断し、1979年から研究に着手した。特に、牧草地については、高速で作業を行う機械も多く、凹凸の良否が農作業に与える影響が他の水田・普通畑に比べ大きいものと考え、牧草地を中心に研究を実施した。

本研究は、農作業の難易度に影響を及ぼすほ場面凹凸を評価し、凹凸基準を確立することを目的として研究を行ったものである。その第1段階として連続的に測定可能なほ場面凹凸測定システムを試作し、牧草地の凹凸を測定・解析し、さらに水田・普通畑及び他の路面の凹凸の性質と比較検討することにより、牧草地の凹凸の性質を明らかにした。次いでその結果を基に、ほ場面凹凸の簡易な測定方法について検討するとともに、ほ場、特に牧草地の凹凸と農作業の難易との関係について検討し、農業機械の運用面からみた凹凸の評価を行い、牧草地の凹凸基準についての提案を試みた。

本研究の実施に当たり、ご指導いただくとともに、本論文の校閲の労を賜った農業原動機学講座主任寺尾日出男教授に心より感謝の意を表すとともに、本論文を校閲していただき御助言・御指導いただいた農業機械学講座主任南部悟教授、農地造成学の見地から本論文全般にわたって校閲の労をとられ御助言・御指導いただいた土質改善学講座主任前田隆教授に深く感謝する次第である。また、この間実験装置の製作及び実験に協力していただいた元農業原動機学講座助手松見高俊氏、元技官畑正義氏（現獣医学部事務官）、今野繁雄技官、若沢幸夫技官、以上の各位に心から御礼申し上げる。さらに、本論文に関係の深い研究を卒業論文のテーマとして選び、数多くの貴重な資料を残してくれた農業原動機学講座出身の卒業生各位に対しても感謝の意を表すものである。

第1章 ほ場面凹凸生成の要因と凹凸が農作業に及ぼす影響

第1節 凹凸について

凹凸は自然界のいたるところに存在する。山や谷も地球表面に存在する凹凸と考えることができるし、道路、水田、畑、牧草地、樹園地等の表面にも大なり小なり凹凸は存在する。海や川の波は時間とともに変動するが、ある時刻の状態に着目すれば、凹凸と考えることもできる。また、微小な凹凸に着目すれば、金属表面をはじめ各種の材料にも凹凸は存在する。

凹凸は英語ではRoughnessに該当し、Roughnessという用語がWallsら²²⁾、Thompson²³⁾、Kozinら²⁵⁾、Pevznerら²⁶⁾、La Barreら²⁷⁾、Hveem³²⁾、Currenceら³³⁾、Hunter³⁴⁾、Romkensら³⁵⁾の研究で使用されている。それに対し、日本語では表面の状態、即ち凹凸を表す用語にはいくつかあり、以下に主な用語について述べる。

金属表面の凹凸に関しては「JIS B0601 表面粗さの定義と表示」³⁶⁾があり、中心線平均粗さ、最大高さ、十点平均粗さにより評価を行っている。また、表面うねり³⁷⁾という用語で、長い波長の表面粗さの成分と短い波長の表面粗さの成分と区別して使用している。

道路に関しては非常に多くの研究者が凹凸という用語を使用している。例えば、兼重（短い波長の凹凸）³⁸⁾、狼（ランダムに凹凸が存在する）³⁹⁾、森田（路面凹凸の頻度）²⁹⁾、永光（路面凹凸の定量化）⁴⁰⁾、山川（路面凹凸）⁴¹⁾らの論文中に使用されている。

農業機械の分野では、並河（田面のおうとつ）¹⁹⁾、高井（地面の凹凸）⁴²⁾、中村（田面の凹凸）^{43,44)}、鳥巢（ほ場面おうとつ）²¹⁾らの論文中に使用されており、建設機械に関しては藤本（走行路面の凹凸）⁴⁵⁾が、特殊車両では竹内（地面の凹凸）⁴⁶⁾が凹凸を使用している。

農業土木の分野では長田（表面の凹凸）⁴⁷⁾、長利（圃場面凹凸）⁴⁸⁻⁵⁰⁾ら

が凹凸という用語を使用している。

ほ場の凹凸と同様な用語として、不陸及び起伏がある。不陸は普通畑及び牧草地の造成に際し使用される用語で、土地改良事業計画設計基準³⁾、草地開発事業計画設計基準⁵¹⁾で使用されており、農地造成（山成工）設計技術基準（案）⁵²⁾によれば「造成基盤に地形上自然に生じている部分的凹凸並びに排根後に残る凹凸」を不陸と説明している。また、頼政⁵³⁾のように凹凸の評価に不陸を使用している場合もある。起伏という用語は、凹凸を意味する用語として使用されることがあるが⁵⁴⁾、その出現頻度は低い。

多くの研究者の論文中にみられる用語の出現頻度と使用状況を考慮し、本論文ではほ場面の状態を表す用語として凹凸を使用することとした。なお、不陸、起伏という用語は使用される頻度は低いが、不陸均し、起伏修正のように文献中に表れた場合には本論文中で使用した。

また、均平及び均平度という用語があるが、これは主として水田の凹凸を評価する用語として定義されており⁵⁵⁾、ほ場、道路及びその他の路面の表面の状態を表す用語としては凹凸が適切であると考えた。

第2節 ほ場面凹凸生成の要因

ほ場面凹凸に大小の差はあるものの、規模にかかわらずほ場面に何らかの力が作用したために凹凸が生じたものと考えられる。地形は地殻変動のような大規模な力が作用して生じたものであり、ここでは大規模の凹凸については省略し、中規模の凹凸についてその生成要因について述べる。

ほ場の凹凸の生成に関与する力は人工的なものと自然によるものに分けられ、人工的な要因による凹凸の生成は機械作業によるものであるが、一例として造成工における抜根跡があげられる。抜根跡はそのままでは穴として残り、その大きさは根株の大きさ、土質、抜根方法によって異なるが、直径・深さとも1m

以上の穴が生じる。粗粒火山灰地でのレーキドーザによる抜根跡の調査結果を表 1 - 1 に示した。

表 1 - 1 抜根跡の大きさ⁵⁶⁾

	平均値 [cm]	標準偏差 [cm]
抜根深さ	133	41
抜根幅 (長径)	276	69
抜根幅 (短径)	181	58
根株径	25.5	5.53

また、粘土質土壌での調査結果では、立木の太さと抜根後の穴の深さは関係がなく、12～22cmの太さの時に20～50cmの深さの穴ができ、その多くは30～40cmの深さで、抜根によってできた穴の広さ（平均直径）は立木の太さ（平均直径）と関係が認められ、一般に13～20cmの太さの木に対して、穴表面の平均直径でみて100～180cm程度のものが大半を占めていた⁵⁷⁾、と報告されている。これらの穴は、抜根時、排根時にある程度埋め戻され、さらに耕うん整地作業により若干土壌が移動するので、このままの状態で穴が残ることはないが、抜根作業は凹凸を生じる原因になるものと考えられる。

耕うん作業は整地の要素を含んでいるが、耕うん方法によりその程度は異なるものの³⁵⁾、耕うんにより生じた土塊は地表面の凹凸を形成する。抜根あるいは耕うんによる場合は土壌に力を作用させることが目的で、その結果凹凸が生じるが、トラクタまたは自走式作業機械の駆動車輪によるすべり沈下の様に、ある現象に付随した結果として凹凸が生じる場合もある。軟弱なほ場を走行し

たり、けん引負荷が大きい場合には駆動車輪のすべり率は増加する。その結果、駆動車輪のラグにより土壌がせん断され駆動車輪が沈下する。この沈下量はすべり率と比例関係にあるので⁵⁸⁾、駆動車輪のすべり率が大きいほど沈下量は大きくなる。同一ほ場であっても局所的にほ場条件は異なり、その結果すべり率は局所的に異なるのですべり沈下により凹凸が生じることとなる。軟弱なほ場ではすべり沈下が生じない場合でも、トラクタあるいは自走式作業機械の自重により沈下が生じる。

上述した例では、機械作業によってほ場に凹凸が生じる場合について述べたが、自然現象によっても凹凸は生じる。例えば雨滴が土塊に衝突する際の衝撃によっても土壌は変形し^{59,60)}、水食・風食によっても凹凸は生成される^{61,62)}。

以上のように、様々な力がほ場に作用することによって、ほ場の凹凸は生じ、変化している。

第3節 凹凸が農作業に及ぼす影響

第2節で述べたように、ほ場に大小の力が作用し、その結果凹凸が生じ、また変化する。これら様々な規模の凹凸は農作業に様々な影響を及ぼしている。大規模な凹凸である地形はガリの形成、水食に影響を及ぼすとともに^{51,61,63)}、傾斜地として農作業の障害となる^{64,65,66)}。

小規模な凹凸は、表面水の流れに影響し一般に凹凸のある方が表面水の流出速度が遅くなるので水食に影響し⁶⁷⁻⁷³⁾、凹凸は地表面での太陽光の反射及び吸収にも影響を及ぼす⁷⁴⁾。

中規模の凹凸はトラクタの振動の原因となり、操縦者の乗心地、作業機を装着した場合のトラクタの振動、及び作業機の振動と凹凸とは関係があり^{8,9,19,20,21,75-83)}、この規模の凹凸は農作業の障害となっている。

例えば、水田での農作業では田植作業の障害となる^{7,8,9,19)}。普通畑におけるブームスプレーヤ・ブロードキャスタ等の施肥播種作業では凹凸によりトラクタの姿勢が変化し、作業精度は凹凸により影響される。しかし、水田においては毎年行われる耕うん整地により凹凸は修正され、普通畑におけるトラクタ車輪のすべり沈下、中耕作業及び収穫作業等によって生じた凹凸は耕うん整地によってある程度修正される。従って、水田及び普通畑におけるほ場面凹凸が農作業に及ぼす影響は比較的小さいものと考えられる。

水田、普通畑に比べ、牧草地ではほ場面凹凸が農作業の障害となることは多い。表1-2⁸⁴⁾に示したように、牧草地での機械作業はほとんどの作業速度が2m/s以上と比較的高速で、特にロータリモアの場合は理論的最高速度が4.2m/sに設計されている。

北海道開発局の調査によれば、目視観察によって判断した比較的凹凸の程度の良い草地と凹凸の程度の悪い草地の2区画の草地上でトラクタを走行させたところ、最高速度は前者の草地では7.5m/sであったのに対し後者の草地では4.2m/sで振動が激しく、トラクタの操縦が困難になり、走行速度が制限された⁸⁵⁾。この例では、2区画の走行速度比は1.8:1にもなっている。この試験ほ場における走行速度が約半分になったことから、凹凸の程度の悪いほ場では作業能率は著しく低下すると判定される。また、北海道農業試験場が実施した自走式ウィンドローアの性能試験結果では、作業精度からみた作業速度限界は凹凸の程度の良いほ場では2.5m/sであった。この試験で供試した作業機前輪の分担荷重が後輪分担荷重に比べて大きいので重心が車体の前方に位置し、少しの地面凹凸でもヘッドの上下動が大きくなり、ほ場の凹凸が著しい場合には1.5m/s程度が良好な作業速度を維持する速度の限界であった⁸⁶⁾と述べている。

表 1 - 2 草地作業における作業速度⁸⁴⁾

作業機	作業速度 [m/s]
レシプロモータ	1.4～2.2
ロータリモータ	～4.2
モータコンディショナ	～3.1
ヘイレーキ	2.2
ヘイテッダ	0.7～1.0
ヘイベーラ	1.7
フォレージハーベスタ	1.0～1.7

この場合、凹凸のために理論的作業限界速度の60%の速度で作業することになり、作業能率はそれだけ低下する。また、牧草地の凹凸に関して、「H-3速の走行でも最も強い傾斜面（9～11度）の等高線で危険を感じずることは少ないが、地表面凹凸のあるところでは振動が激しく、身体および心理的負担が大きい⁸⁷⁾」, 「圃場条件特に木の根株が残っていると平坦度が悪かったために故障がはげしかった⁸⁸⁾」, 「整地が十分でないため、播種から集草までのトラクターの作業効率が低い。又牧草生育にもムラが出来るため整地工の強化が必要である¹²⁾」, 「管理機械の大型化によって、傾斜や凹凸の影響を受ける場合が多くなっている。造成時の圃場均平には十分留意しなければならない⁸⁹⁾」等の報告があり、牧草地の凹凸が作業上大きな障害になっていることが認められる⁹⁰⁾。

次に、表1-3に示す自走式のモータコンディショナによる牧草刈り取り作業を例として、凹凸が作業精度に及ぼす影響について考えてみると、機体の前輪が深さ10cmの凹地に入った場合（図1-1）、機体は約3度傾斜する。その時、ヘ

ッダの先端は平坦地で作業する場合に比べ約18cm上昇しなければ刈り高さが一定とならない。また、前車輪が高さ5cmの凸部に乗り上げた場合、機体は約1.5度後傾する。その時、ヘッダの先端は平坦地で作業する場合に比べ水平面より約9cm下降しなければならない。この機種では、ヘッダがばねで支えられているので、上下方向に自由に動く機構であるが、この程度の凹凸がしばしば出現するようなほ場では、機体のピッチングに対しヘッダが十分追従しないため、刈り高さが変動する。

機体の進行方向に対する左右方向の凹凸について考えると、このモーアコンディショナの刈幅2.8m内に凸部がある場合、その上をヘッダ下部のスキッドシューが走行すれば、多少凸部側が高刈りになるものの、作業は可能である。しかし、スキッドシューが凹地に入ったり、ヘッダの中心付近に凸部がある場合には、牧草の根際を刈り取ったり、地中にヘッダがささり込むことも考えられる。従って、ほ場面の凹凸が多数あるような場合には、刈刃の刈り高さを高くしなければならず、収穫損失が多くなる。この様に牧草地の凹凸は、機械の作業能率ばかりではなく作業精度にも影響を与え、作業機的能力が十分発揮できないと共に収量も少なくなる。

その他にも、凹凸の多い牧草地では、ヘイテッダ及びヘイレーキ等の作業機械の故障の原因となり¹³⁾、トレーラを高速度でけん引する場合、凹凸が原因でトレーラが転倒することもある⁹⁰⁾。

表 1－3 自走式モ－アコンディショナの仕様例

機体全長	[m]	5.33
全幅	[m]	3.10
質量	[kg]	2,150
刈り取り幅	[m]	2.84
ヘッダの高さ調節範囲	[m]	-0.100～+0.432
輪距	[m]	2.90
轴距	[m]	2.60
前車輪（2輪）		7.5-18
後車輪（1輪）		6.0-12

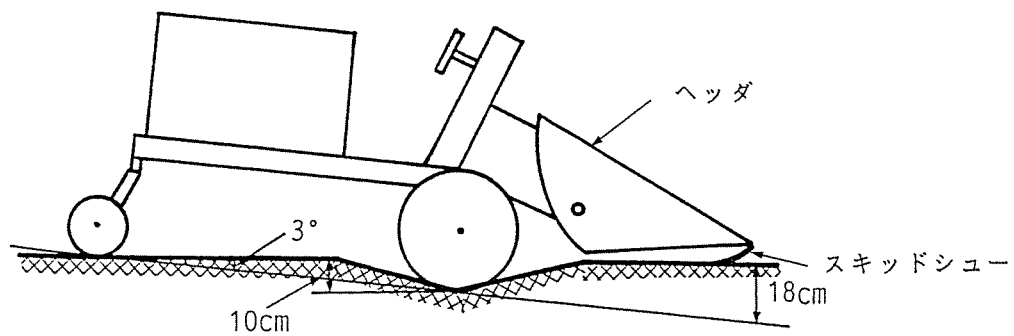


図 1－1 自走式モ－アコンディショナの前輪が凹地に入った場合

以上述べたように、ほ場には様々な規模の凹凸が存在し、様々な形で農作業に影響を及ぼしている。合理的な農作業を行うためには、高い作業精度及び作業能率が要求される。中規模の凹凸はトラクタ及び作業機の振動の原因となり、作業精度・作業速度低下の原因となる。また、凹凸による振動は乗心地の低下及び作業機械の故障の原因ともなる。しかし、どの位の規模でどの程度の凹凸であれば農作業の障害とならないかという点については明らかにされていない。水田を除くとは場面凹凸評価法は確立されておらず、ほ場面凹凸の基準は示されていない。本論文ではこれらほ場面凹凸のうち、機械による農作業の障害と考えられる中規模の凹凸に着目し、高速作業が多く、凹凸の良否が農作業に与える影響が大きいと考えられる牧草地を中心に研究を行った。従って、特に断わりがなければ、本論文中で取り扱われる凹凸は農作業の障害となる中規模の凹凸を意味している。

第2章 ほ場面凹凸の評価

第1節 はじめに

第1章で述べたように、凹凸はほ場だけではなくあらゆる所に存在し、そのため凹凸について各種の評価法が提案されている。本章では、ほ場面凹凸に関して既に提案されている評価法及び路面凹凸の評価法について述べる。また、現在採用されている農地造成に関する国の基準及び北海道で採用している不陸均し基準についても述べると共に、現状のほ場面凹凸評価法及びほ場面凹凸基準について検討する。

第2節 ほ場面凹凸の評価法

1. 高低差の度数分布

これは、ほ場内に方眼状の測点を設け、各測点の標高を測定し、その平均の標高からの高低差（高い方を＋，低い方を－で表示）の同一区分値の表れる度数によって凹凸の程度を表現する方法である。高低差の区分の幅を1cmとして水田について測定した例を図2-1に示す⁹¹⁾。

この方法では区分の幅が小さい場合には高低差の分布状態が理解しやすい。図2-1の場合、(a)に示したほ場が(b)，(c)に比べ凹凸の程度の良いことが知れる。しかし、区分の幅を大きくした場合は高低差の分布状態がわかりにくい点、及び凹凸の波長と高低差の関係、即ち、凹凸の周波数成分がわからないという欠点がある。

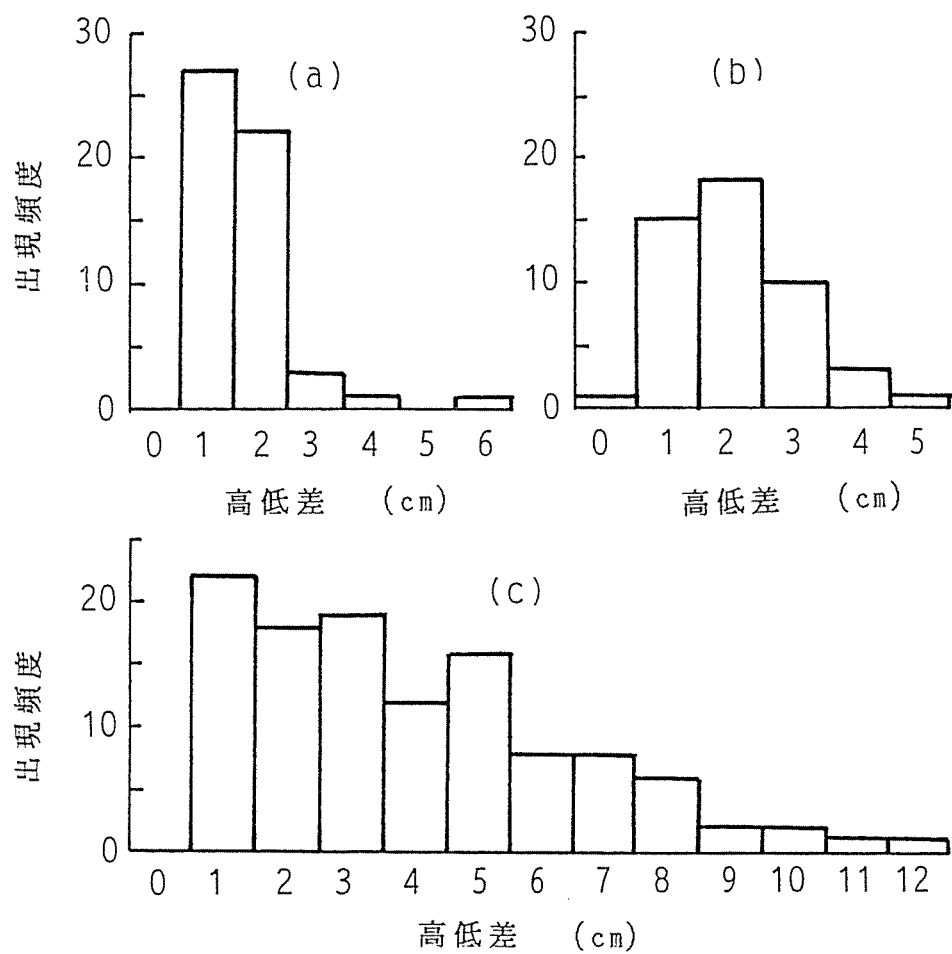


図 2 - 1 高低差の度数分布⁹¹⁾

2. 分散, 標準偏差

測定値の散らばりの程度を示す指標として分散及び標準偏差が一般に用いられているが、ほ場内の平均高さからの高低差について分散、または標準偏差を求めることにより凹凸を評価することができ、ほ場の高低差が小さいほど分散、標準偏差の値は小さくなる。しかし、度数分布と同様にこの方法ではほ場面凹凸の周波数成分までは表現できない。

3. RR

耕うんによって生じるほ場表面の凹凸を評価することを目的として各種の評価法が提案されている⁹²⁾。多数ある評価法の中でしばしば用いられているRR (Random Roughness)^{33,69,72,93)}は, Currence⁹²⁾によれば, 傾斜修正を行った基準面からの高低差の標準偏差と定義されている。従って, 一般に採用されている標準偏差とは基準面の求め方が異なるだけである。また, 多くの研究ではRRを求める際の凹凸測定の1区画は1m×1mから2m×4m程度となっている。RR以外の方法についても区画の大きさは同じ程度である^{5,68,71,73,74)}。従って, この方法を本研究で対象としているほ場面凹凸の評価に適用することは不適当と考えられる。

4. 折れ線長比による方法

田面の凹凸を評価する方法として長田⁴⁷⁾は折れ線長比を提案している。これはほ場面の凹凸が多いほど, ほ場面をトレースした距離が長くなるという考え方に基づいている。測点間が直線で結ばれていると仮定し, 田面の断面を示す折れ線長 Q_1 を式(2-1)より求める。等間隔にとった測点間の水平距離を x , 各測点の標高を $z_i (i=1, 2, \dots, K)$ とすれば,

$$Q_1 = \sum_{i=1}^K \sqrt{x^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad [\text{m}] \quad (2-1)$$

で表される。田面が全く水平で凹凸がなければ, その時の直線長 L は

$$L = (K-1) \cdot x \quad [\text{m}] \quad (2-2)$$

となる。そこで、表面の凹凸による増分 ($Q_1 - L$) と水平直線長 L の比をとって、折れ線長比 β として次式で表している。

$$\beta = (Q_1 - L) / L \quad [-] \quad (2-3)$$

田面が全く水平の時は $\beta = 0$ となり $\beta > 0$ ならば田面に凹凸が存在していることを意味している。しかし、図2-2に示したように、長い波長で高低差の大きい凹凸が少数ある場合と、短い波長で高低差の小さい凹凸が多数ある場合の β が同じ値となる欠点がある。そこで、標準偏差 σ と折れ線長比 β との比を求めて集団化指数 $G (= \sigma / \beta)$ と称し、この値と高低差の絶対値を検討し、田面凹凸の評価を行っている。しかし、この場合も凹凸の周波数成分に関する的確な情報を得ることはできない。

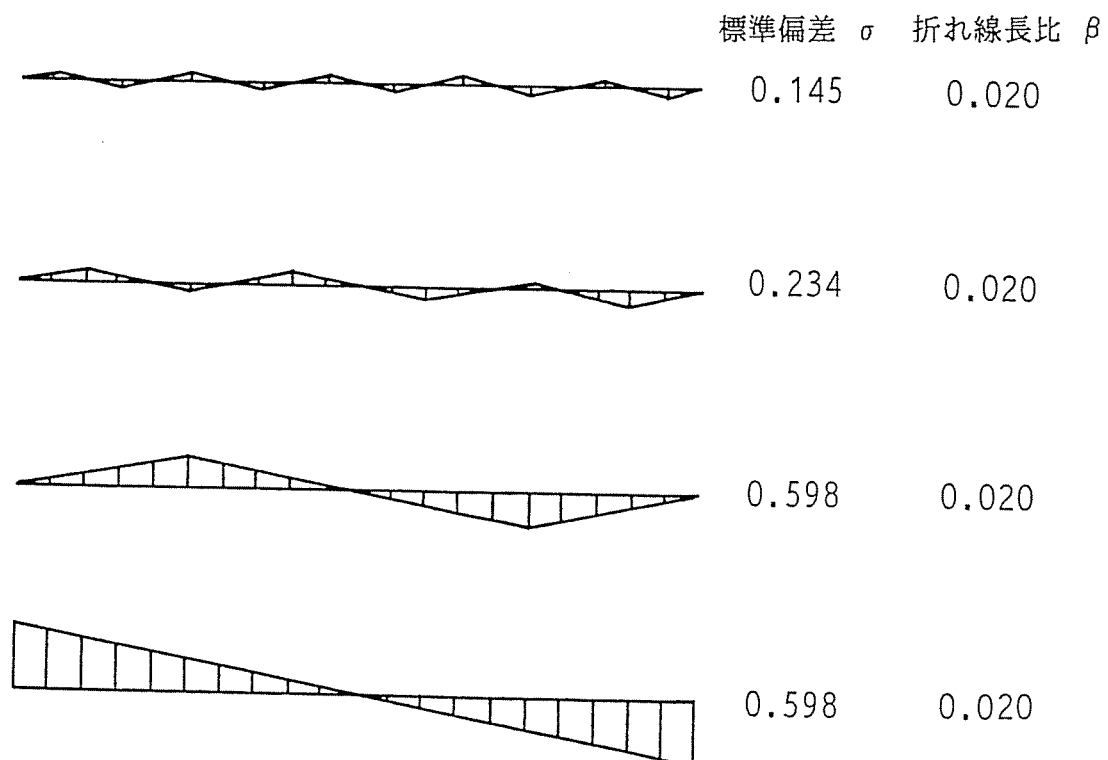


図 2 - 2 折れ線長比 β と標準偏差の関係⁴⁷⁾

5. PrQ及びPN

この指数は自動車用道路の凹凸を評価するために森田ら²⁹⁾が提案したもので、PrQはProfile Quality,PNはProfile Numberを意味しており、路面凹凸を図2-3に示したように、あるバンドを設定して、バンドの外側にあるピーク値を調べ次式により求める。測定区間の距離をS、バンド外側の高さを A_1 、及びバンド外側のピークの個数を n_0 とすると、

$$\text{PrQ} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{n_0} A_i \quad [-] \quad (2-4)$$

$$\text{PN} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_0}{S} \quad [1/\text{m}] \quad (2-5)$$

PrQは路面凹凸の分布の広がりを与える量である。この指数の値はバンド幅の大きさに左右されるが、水田代かきの状態を評価している中村⁴³⁾の例ではバンド幅を50mmとしている。

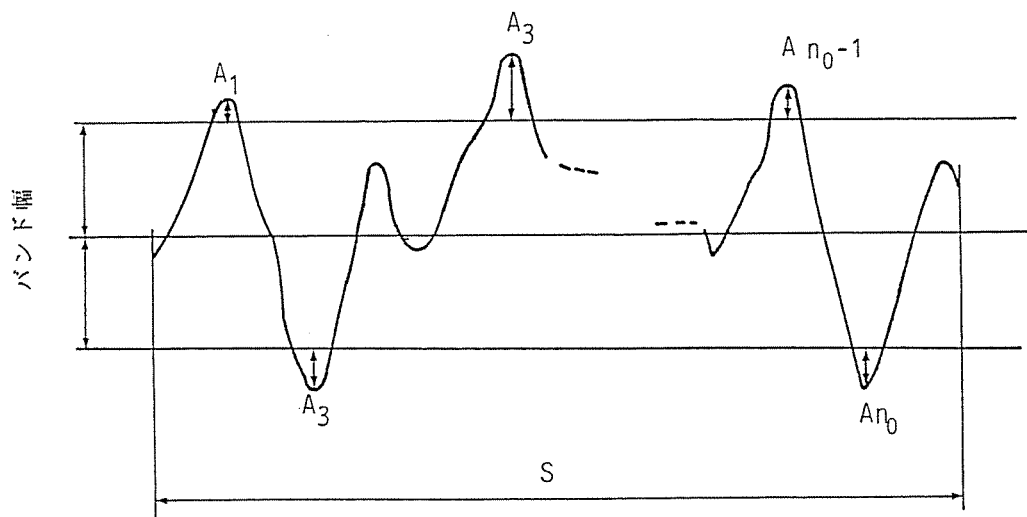


図2-3 PrQ,PNの算出方法²⁹⁾

6. パワースペクトル密度

ほ場面の凹凸の程度及び周波数成分を知る方法としてパワースペクトル密度（以下PSDと呼ぶ）を求める方法がしばしば適用されている^{3,17,19}。ほ場面の凹凸が規則的で周期的に変化していれば、正弦波として凹凸の振幅及び周期を知るか、フーリエ級数によりいくつかの正弦波に展開することにより凹凸の性質を知り、凹凸を記述することができる。しかし、凹凸が不規則である場合は凹凸の振幅、周期は一定ではなく、フーリエ級数に展開することはできない。PSDは、ある不規則に変動する定常な観測値が得られたとき、この変動を周期性の面から補えるもので、不規則データがどのような周期成分を含んでいるか、即ち、種々の周波数成分のパワー（2乗平均）がどのような分布をしているかを示す尺度である⁹⁴。

凹凸については、測定された標高 $Z(x)$ と自己相関関数 $C_{zz}(\tau)$ 及びPSD $P_{zz}(f)$ の間には次式の関係が成立する。

$$C_{zz}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} Z(x-\tau) \cdot Z(x) dt \quad [m^2] \quad (2-6)$$

$$P_{zz}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{zz}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad [m^2/c/m] \quad (2-7)$$

ほ場面の凹凸のPSDから得られる情報について述べると、例えば図2-4の実線で示した不規則な凹凸(a)に、波長1m、振幅0.05mの正弦波状の凹凸が重なった場合、破線で示した凹凸(b)となる。それぞれの凹凸のPSDを求め両対数グラフ上に表すと、図2-5の実線(a)及び破線(b)で示した結果が得られる。

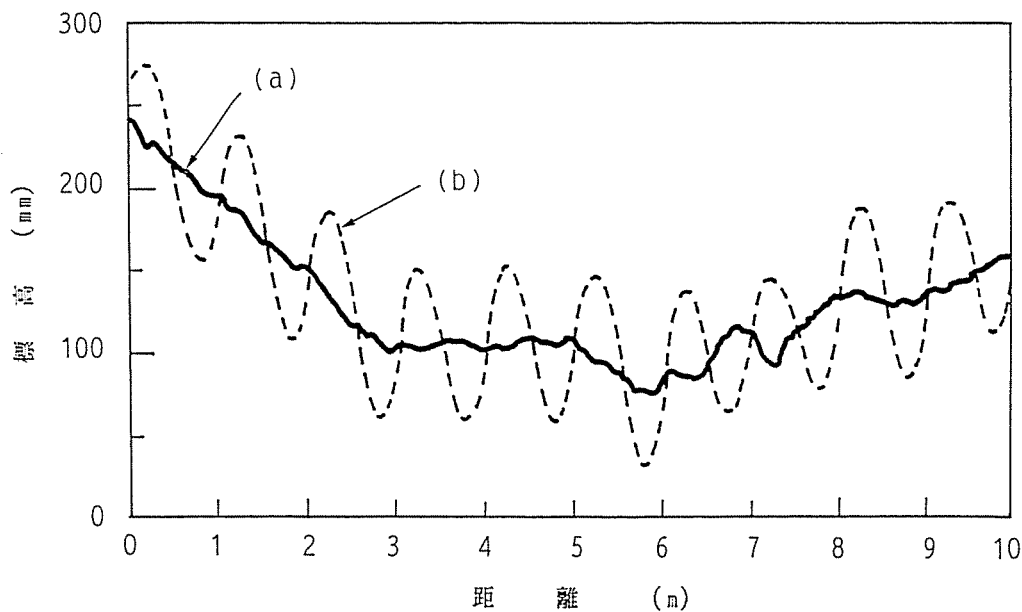


図 2 - 4 不規則な路面凹凸 (a) と周期的な成分のある路面凹凸 (b)

図2-5の破線で示したPSDには路面周波数 1c/m に大きなピークがみられ、これは重ね合わせた正弦波の路面周波数と一致する。このことは、PSDのグラフの特定の路面周波数にピークが認められる場合には、ほ場面凹凸に周期的な凹凸の成分が含まれていることを意味しているので、PSDを検討することにより凹凸の周波数成分を知ることができる。また、PSDより凹凸の程度を知ることができ、凹凸(a)の $1/2$ の高低差の凹凸のPSDを求めると図2-5に示す(c)の結果が得られ、各路面周波数毎のPSDの値を比較すると(c)は(a)の $1/4$ になり、PSDの大きさから凹凸を評価することができる。従って、ほ場面凹凸を評価し、その周波数成分を知る方法としてPSDを求める方法は優れていると判定される⁹⁵⁾。

PSDを求めるには測点が数多く必要であり、計算を行うには前述の1～5の方法に比べ複雑となる欠点があるが、迅速に凹凸を測定する方法を開発することにより測点を多くすることは可能であるし、パーソナルコンピュータの利用によ

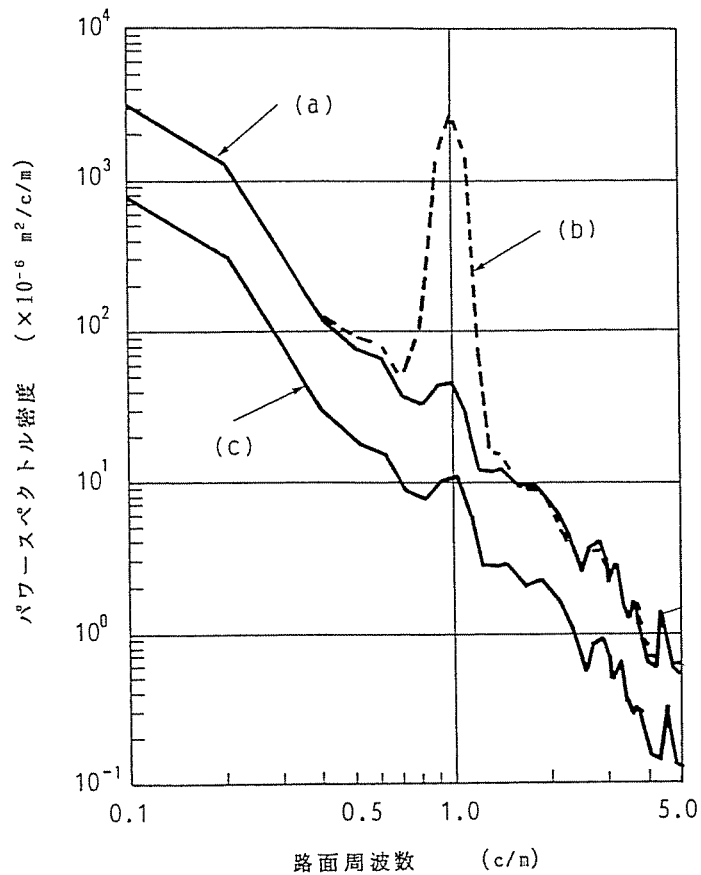


図 2 - 5 路面凹凸のパワースペクトル密度
 (a) 不規則な凹凸の路面
 (b) 周期的な凹凸のある路面
 (c) (a)に比べて凹凸の小さな路面

り，大型計算機を使用しなくてもPSDを計算することが十分可能となり，実用的に問題がない。

以上のように凹凸のPSDを求めることにより，凹凸の程度とその周波数成分を同時に知ることができるので，本論文では凹凸の評価方法としてPSDを採用しては場面凹凸，特に牧草地の凹凸の性質を検討することとした。

第3節 路面凹凸の評価に関するISOの提案

1. ISO/TC108で検討中の路面凹凸分級案

ISO (International Organization for Standardization - 国際標準化機構) の専門委員会の1つであるTC108 (Technical Committee - 機械的振動及び衝撃) において、路面走行車両に対する乗心地などに関連して路面入力規格を作ろうという動きがあり、WG9(現SC2/WG4-Measurement and Evaluation of Vibration and Shock in Land Vehicles)から1972年6月に第1次素案 (Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles) が公表された⁹⁶⁾。その後の検討で内容の一部が変更になり、表題も Reporting Vertical Road Surface Irregularities⁹⁷⁾に変わり、1988年現在引き続き審議中である。この規格は、種々の方法により測定された凹凸のデータを比較検討するためにデータの記述方法について述べることを目的とするとともに、路面凹凸の分級及び路面のデータを実験あるいはシミュレーションに利用する方法について述べている。

ISO/TC108/SC2で検討中の路面凹凸の分級案は、路面凹凸のPSDを式(2-8)で近似し、 $f_0=1/2\pi$ (c/m)におけるPSDの値 $P(f_0)$ により、路面の凹凸を8種類に分類している(表2-1)。Aは高低差のない非常に平らな路面で、B, C, ..., Hとなるにつれ路面凹凸の高低差が大きくなりHが最も高低差の大きな路面である。1972年の案では路面凹凸を折れ線で表していたが、1987年現在検討中の案では1本の線で表し、 W の値を2と規定している。

$$P(f) = P(f_0) (f/f_0)^{-W} \quad [m^2/c/m] \quad (2-8)$$

式(2-8)は両対数のグラフ上に表すと1本の直線となる。表2-1の分級案の各分類毎のPSDの比率はそれぞれ4倍で、これは路面凹凸の高低差の比率にすると

表 2 - 1 ISO/TC108/SC2で検討中の路面凹凸の分級案⁹⁷⁾

区 分	P(f _θ)の範囲	
	[×10 ⁻⁶ m ² /c/m]	
A	>	8
B	8	— 32
C	32	— 128
D	128	— 512
E	512	— 2048
F	2048	— 8192
G	8192	— 32768
H	32768	<

$$f_{\theta}=1/2\pi \text{ (c/m)}$$

2倍となる。従って、路面の凹凸を評価する場合、それぞれの路面凹凸のPSDがA, B, …, Hのどれに分類されるかを知れば良い。例えば、ある路面の凹凸のPSDがISO分級案のBの範囲で、他の路面の凹凸がDの範囲であるとすれば、この2種類の路面凹凸の高低差の比率は4であることが判る。

ISOの路面分級案と自動車用道路との関係について山川⁹⁶⁾が報告しているの
で、図2-6に示した。

図2-6では、各種道路凹凸のPSDを求め、ISOの分級案に当てはめた結果を示しているが、高速道路がA、非舗装道路がD、非舗装悪路がEの範囲で、山川は感覚的な路面凹凸の分類とISOの分級案とは非常によく一致していると述べている。

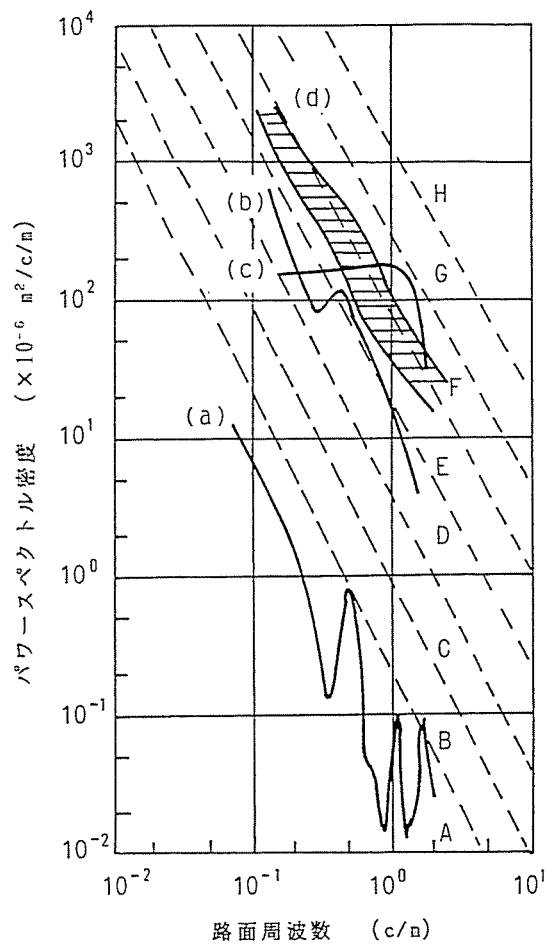


図 2-6 各種路面凹凸のPSD表示と
ISOによる路面凹凸の分級案⁹⁶⁾
(a) 高速道路 (b) 非舗装道路
(c) ベルギアン路 (d) 非舗装悪路

路面凹凸の分級案は単に測定した路面凹凸を分類する際の基準としてだけではなく、車両の耐久試験等に従試する路面の選定、シミュレーション用路面の選定、及び試験用路面の管理等の基準としても利用可能である。例えば、試験用悪路の凹凸のPSDが一定の範囲より大きくなったり、小さくなったりした場合に路面の改修を行うことができ、常に路面の凹凸が一定の状態になるよう管理ができる。

2. ほ場面凹凸の評価への適用

第2節で述べたように、数多く提案されているほ場面凹凸を評価する方法の中で、凹凸の程度とともに凹凸の周波数成分を知ることのできるPSDが、ほ場面の凹凸の評価法として優れていると考える。ほ場面凹凸は、距離とともに変化する垂直変位であり、この点については他の路面と同じであるので、ほ場面凹凸も他の路面の凹凸と同じ様に評価することが可能と考える。ほ場面凹凸のPSDを求め、ISO/TC108/SC2で検討中の路面凹凸の分級案によってほ場面凹凸を評価できるならば、農地の造成、整備等の際のほ場面凹凸の基準、トラクタの座席振動測定用路面の選定基準、及びトラクタ・各種農業機械の耐久試験用路面の選定基準として、この分級案を利用できるだけでなく、ほ場間の比較やほ場の凹凸と各種路面凹凸の比較が容易となる。本論文では、これらの点を考慮し、ほ場面凹凸の評価法としてISOの分級案の適用可能性についても検討する。

第4節 農地造成とほ場面凹凸の基準

農地は、その経営形態によって、水田、普通畑、樹園地、牧草地などに分けられる。各種ほ場の造成を行う場合、事業計画の主体である農林水産省、北海道開発局及び北海道では農地造成の設計基準を作成しているが、設計基準にはほ場面凹凸に関する項目も含まれている。本研究ではほ場面凹凸の基準を考える上で、現行の基準を検討する必要があるため、各種ほ場の造成時におけるほ場面凹凸の基準について述べる。

農地造成に関する設計基準のうち、ほ場面凹凸に関連している現行の基準として、農林水産省構造改善局より示されている「土地改良事業計画設計基準 計画 農地開発（開畑）」³⁾、「土地改良事業計画設計基準 計画 ほ場整備

（水田）」⁵⁵⁾あるいは農林水産省畜産局より示されている「草地開発事業計画設計基準」⁵¹⁾などがある。また、農地造成を設計、施工する立場からは北海道開発局の「農地造成（山成工）設計技術基準（案）」⁵²⁾などがある。造成の対象となる農地の経営形態によって、凹凸の基準が異なっており、農地のなかで凹凸の基準が最も厳しいのは水田である。以下に、文献を引用しながら水田、普通畑及び牧草地の凹凸の基準について述べる。なお、農林水産省などでは、水田の凹凸を評価する基準として均平度を採用し、普通畑及び牧草地の凹凸を不陸と呼称している。

「土地改良事業計画設計基準 計画 ほ場整備（水田）」⁵⁵⁾では、水田の凹凸の基準、即ち均平度について、以下のように示している。

(1) 整地後の田面均平度は平均標高の±5cm以内を目標とし、田面傾斜は水平か、又は排水路側をやや低くする。

(2) 整地における心土基盤表面はできる限り均平とし、切土部は盛土部よりやや低くすることが望ましい。

この基準を達成するために、

「均平精度は10m方眼レベリングによる平均標高からの高低差をもって表示する。全測点の高低差は、水稻栽培上の制約から少なくとも平均標高の±5cm以内にあることが望ましい。田面傾斜のある場合でも、±5cm以内の高低差であれば、用水路側、排水路側でのたん水深の差は10cm以内におさめられる。しかし、整地工事費や経年的な田面の不等沈下などを考慮して、全測点が±10cm以内にあり、そのうち80%以上が±5cm以内に収まればよいことにする。」

と解説しており、湛水状態で均平作業を行う水中均平について述べるなど、具体的な均平方法についても触れている。

それに対し、普通畑、樹園地及び牧草地の凹凸の基準を示している「土地改良事業計画設計基準 計画 農地開発（開畑）」³⁾では、

「整地は、畑面を均等に仕上げるための作業であり、均平の程度は作物の種類による栽培管理技術、造成形態等によって決める。」としている。

これは計画の文章であって、具体的に凹凸について記述していない。施工精度の項でやや詳しく解説しているので、関連ある部分を引用する。

造成方式と施工精度の関連で、改良山成畑工基盤整地について、

「改良山成畑工の造成こう配は特に均一に施工する必要はなく、多少の凹凸はあっても差し支えないが、ほ場全体としてみた場合に中だるみがない施工が必要となる。」

と解説しており、畑の種類と施工精度については、普通畑では、

「水田のように水平かつ一様な整地精度は必要としない。畑地は、ほ場面の排水のよいことが、作物の生育及び営農機械の効率的な運行を確保するための要件となるので、中だるみのないある程度傾斜をもったほ場面に整地することが望ましい。畑地かんがいの方法によってはそれに対応した整地精度が必要となる。」

としている。牧草地については、この点の他、不陸修正について、

「管理用機械の走行性、作業性の効率化、サイレージ飼料に土が混入しないこと等を目的として畑面の不陸を十分に修正しておく。特に抜根によって生じた穴のうめもどしは経年的な変化を見込んで余盛りし、履帯転圧を行う。牧草畑では更新期まで耕うん作業はできないので、造成段階で不陸修正を十分行うことが必要である。」

と解説している。

また、北海道開発局では、不陸均し工事設計施工要領について「農用地開発事業の設計積算要領」⁹⁸⁾で、

「施工対象範囲は1辺5m（管理用機械－牧草収穫機－の巾及び長さが現在大型のものでも5m以内である）以内に25cm以上の高さの凹凸がある範囲を施工する

ものである。」

とし、施工基準としては、

「凹凸の進入角は6度以内とし、1辺の長さ5m以上とし、凹凸の高さは25cm以内に均すこと、出来型測定法は5mの測定器（ポール等）を地表に置き凹凸の高さを測定し、また進入角はスランートルールで測定すること（図2-7）」

としていたが、現在の設計技術基準では採用されていない。

国の基準ではないが、北海道では草地整備改良事業における不陸均しを行う場合の基準として⁹⁹⁾、

「不陸均しの工事対象地は、1m毎に水準測量を行い、各測点間の高低差5cm以上のものが全体測定間隔のおおむね20%以上の区域とする。」

との考え方を採用している。

以上のように、水田では均平度を±5cmにするという具体的な基準があるが、その他の農地では牧草地に関する北海道の基準があるだけで、国の具体的な基準はない。水田の均平度が数値で示されており、他の農地に比べ凹凸の基準が厳しいのは、水管理を含む栽培上の理由によるものと考えられる¹⁰⁰⁾。それに

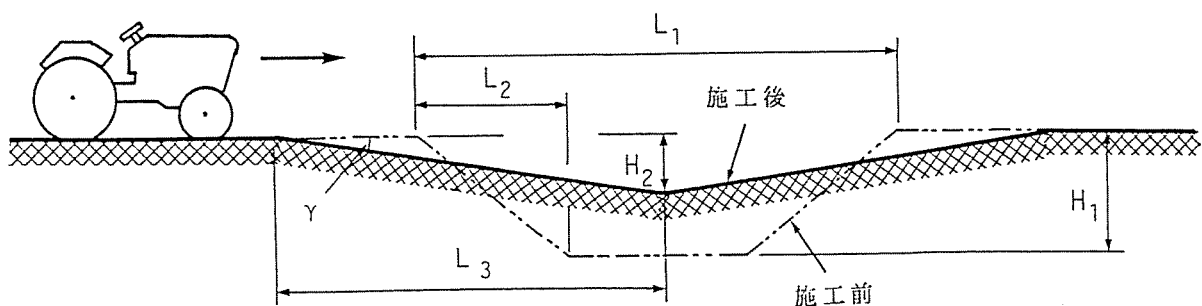


図 2 - 7 不陸均し工事施工設計要領⁹⁸⁾

$L_1 \leq 10\text{m}$	$H_1 > 25\text{cm}$
$L_2 \leq 3\text{m}$	$H_2 \leq 25\text{cm}$
$L_3 \geq 5\text{m}$	$\gamma \leq 6^\circ$

対し、普通畑及び牧草地では水田での水管理のように凹凸を評価する基準が確立されていないためと考えられる。

第5節 北海道の不陸均し基準

1. 北海道の不陸均し基準

第4節で述べたように、普通畑及び牧草地の凹凸に関して、具体的な数値で表した凹凸の基準は少ないが、北海道では草地改良事業の中で不陸均し工事を行う基準を定めている⁹⁹⁾。その基準では、「工事対象地について1m間隔で水準測量を行い、各測定間の高低差5cm以上の測定点が全体の測定点数のおおむね20%以上の区域について不陸均し工事を実施することとしている。凹凸の測定方法としては、図2-8に示したように対象地のほぼ中心のYを通り、直角に交わるAB及びCDの測定線を設定し、仮ベンチマーク(BM)をほ場外の点(工事施工に影響を受けない地点)に設け、AY, BY, CY, DYの各測定線について、そのほぼ中央部分を20m以上、かつ、延長の1/4以上に相当する区間を測定する」と

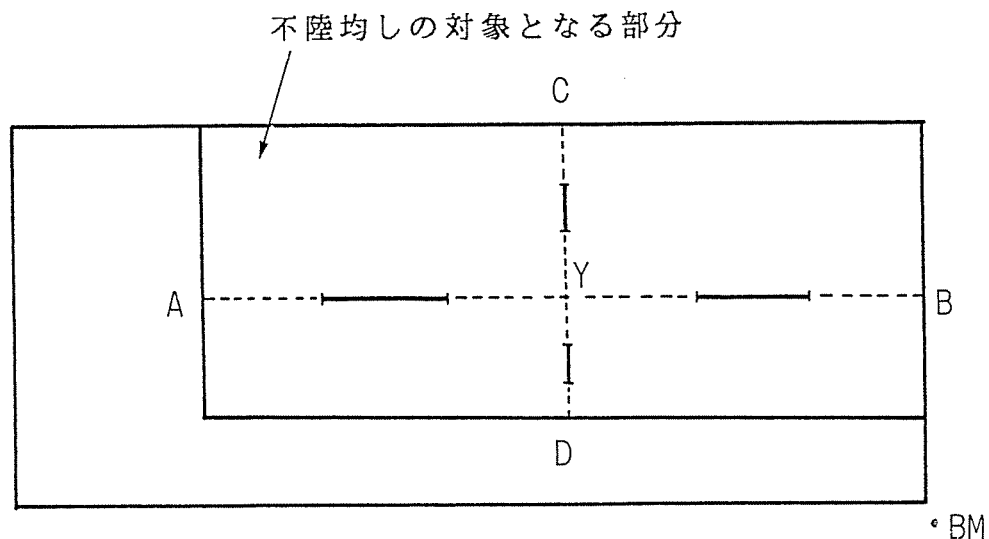


図2-8 ほぼ場面凹凸の測定の一例⁵⁴⁾
AY=100m, ——— =25m
CY= 40m, ——— =20m

している。また、「不陸均しの出来型の規格として、測定間の高低差5cm以上が全体の5%以内で、かつ、10cm以上が出現しない」としている。

北海道の基準に示されている高低差は、各測点間の高低差である。例えば、水準測量によって得られたある測点の標高が12cmで、その隣の点の標高が19cmであれば高低差は7cmとなる。1m間隔で測量を行うので、25m区間を測量すると全測点は26点となり、25点の高低差のデータが得られる。25点のデータ中に高低差が5cm以上のデータがもし5点あったとすれば、5cm以上の高低差の割合は20%となる。

この不陸均し工事の基準作成に際しては、凹凸の高低差と作業能率、収量の関係について調査し、その結果が北海道農務部酪農草地課より草地整備改良事業における起伏修正採択基準試験成績報告書（以下成績報告書という）⁵⁴⁾に述べられている。

第1章第3節で述べたように、ほ場面の凹凸により振動が生じたり姿勢が変化するために、トラクタ及び自走式機械の作業速度は制限され作業能率が低下するとともに、牧草の刈り取り作業では凹凸のために高刈りとなり、その結果収量が減少するが、試験成績報告書では、凹凸と作業能率、収量の関係について検討し、凹凸の程度と事業効果について述べている。凹凸の程度の異なる10種類のほ場を供試し、1m毎にほ場の水準測量を行い、傾斜修正を行った後、各測定間の高低差を分類し、5cm以上の高低差の測点の数と全測点数との割合を求めている。供試ほ場の測定結果を表2-2に示したが、5cm以上の高低差の割合は少ないほ場で5.6%、多いほ場で36.7%であった。

表2-2で5cm以上の高低差の割合が小さいほど、凹凸の状態が良いほ場を表しており、㊥、㊦、㊧のほ場は凹凸の程度が良いほ場と評価され、㊨のほ場は悪いほ場と評価される。

表 2 - 2 ほ場面の高低差の測定結果⁵⁴⁾

ほ場名	高 低 差 の 割 合 [%]					5cm以上 の割合
	0 ~ 4cm	5 ~ 9cm	10~19cm	20~29cm	30 ~ cm	
㉐	63.3	32.2	4.5			36.7
㉑	67.8	24.4	6.7	1.1		32.2
㉒	71.1	18.9	7.8	2.2		28.9
㉓	76.7	20.0	3.3			23.3
㉔	81.1	11.1	7.8			18.9
㉕	84.4	12.2	3.4			15.6
㉖	84.4	15.6				15.6
㉗	87.8	10.0	2.2			12.2
㉘	88.9	11.1				11.1
㉙	94.4	4.4	1.2			5.6

試験成績報告書では、作業能率及び収量について調べるため、自走式ウィンドローア、自走式ハーベスタ及びディスクモアを使用して試験を行っている。凹凸の程度の良い標準的なほ場での稼働時間を1.00として、5cm以上の高低差の割合との関係を求め（図2-9）、稼働時間の倍率が1.20以上となるのは5cm以上の高低差の割合が20%以上であることを示している。

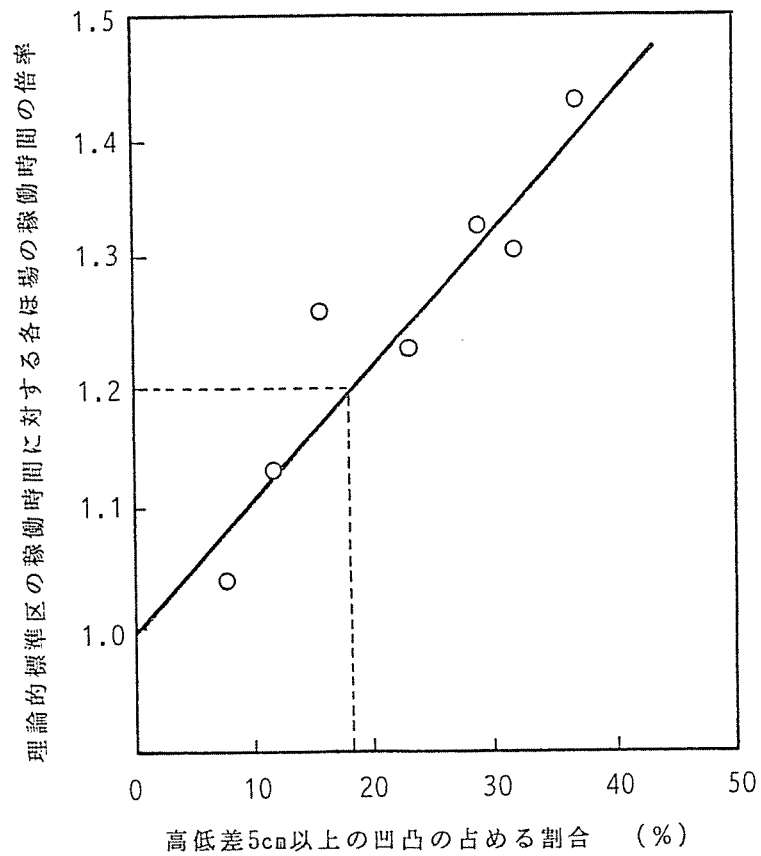


図 2 - 9 高低差5cm以上の割合と作業能率の関係⁵⁴⁾

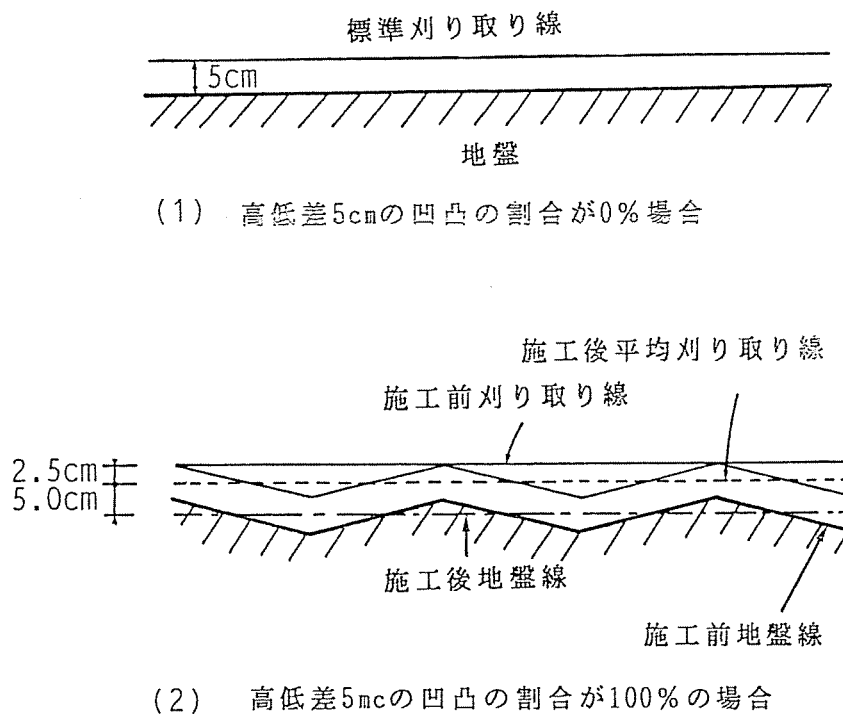


図 2 - 1 0 凹凸による刈り高さの影響⁵⁴⁾

牧草の標準刈り高さを図2-10(1)に示すように5cmとすると、図2-10(2)で凹凸の高低差が5cmである場合は、ほ場面の凸の部分より5cm高く刈り取らなければならない、ほ場に凹凸のない場合に比べ2.5cmの高刈りとなる。従って、凹凸の高低差が5cm以下の場合では、刈り高さ2.5cm相当の牧草の収量増とみることができる。

ほ場の凹凸を改善することによる作業機械の稼働時間の低減がもたらす機械経費節減額と刈り高さを低くすることによる牧草収益を考慮して、均平工事の事業効果が試験成績報告書に示されている（表2-3）。草地の中心を通る直角に交わる2方向の直線上に、連続して1m毎の水準測量を行い、これを傾斜補正して得た修正値の各測点間における高低差を求める。高低差5cm以上の出現割合が全測点の20%以上となった場合、不陸均し工事を実施し草地の均平化を行えば、妥当投資額法による事業効果は投資額に対して1.0以上と評価する、との結論が試験成績報告書で示されている。

以上の結果を基に、高低差5cm以上の頻度が20%以上の場合には不陸均し工事を必要する基準を北海道は採用している。

表 2 - 3 農作業におけるほ場均平の効果⁵⁴⁾

(1)機械経費節減額と牧草収益を見込んだ場合

高低差5cm以上の割合 [%]	年間便益 (a) [円]	妥当投資額 (b)=(a)/(0.06+1/100) [円]	投資額 (c) [円]	事業効果 (b)/(c) [-]
30	12,461	178,014	101,100	1.8
25	10,456	149,371	〃	1.5
20	8,285	118,357	〃	1.2
15	6,320	90,285	〃	0.9
10	4,109	58,700	〃	0.6

(2)機械経費節減額のための場合

高低差5cm以上の割合 [%]	年間便益 (a) [円]	妥当投資額 (b)=(a)/(0.06+1/100) [円]	投資額 (c) [円]	事業効果 (b)/(c) [-]
30	10,478	149,814	101,100	1.5
25	8,838	126,257	〃	1.3
20	6,983	99,757	〃	1.0
15	5,333	76,185	〃	0.8
10	3,478	49,685	〃	0.5

2. 高低差の割合とPSDの関係

北海道で採用している不陸均し基準⁵⁴⁾とISOで検討中のPSDによる路面粗さの分級案⁹⁷⁾との関係について検討した。供試凹凸として著者¹⁰¹⁾のデータを用い、合計32組の凹凸について1m毎の高低差を求めた。さらに、凹凸の程度の悪い場合について検討することを目的として、測定した標高に定数を乗じ高低差5cm以上の割合が20%を越える凹凸のデータを作成し、供試路面とした。

供試した凹凸のうち、高低差5cm以上の割合が2%の凹凸の例と、高低差5cm以上の割合が30%の凹凸の例を図2-11に示すとともに、それぞれのPSDを求め図2-12に示した。

図2-11～2-12についてみると、高低差5cm以上の割合が大きい凹凸はPSDの値が大きいことより、高低差5cm以上の割合が大きい場合は凹凸の程度の悪い場合であることが認められる。高低差5cm以上の割合とPSDの関係を定量的に把握するために、式(2-8)を用い供試凹凸のPSDの近似式を求め、高低差5cm以上の割合と路面周波数0.1c/mにおけるPSDの対数値との関係を図2-13に示した。

高低差5cm以上の割合とPSDの対数値との相関係数は0.916と高く、1m毎に測定した凹凸間の高低差を求めることによって凹凸の程度を評価することが可能であることが認められた。また、高低差5cm以上の割合が20%以上となる凹凸はISOで検討中の路面凹凸分級案でほぼF以上の範囲に相当する。

凹凸の高低差が小さい場合には、高低差5cm以上の割合は常にゼロとなってしまうので、高低差5cm以上の割合からISOの分級案を推定することは必ずしもできないが、高低差5cm以上の割合が12～40%ではF、40～65%ではG、65%以上ではHの範囲に相当した。

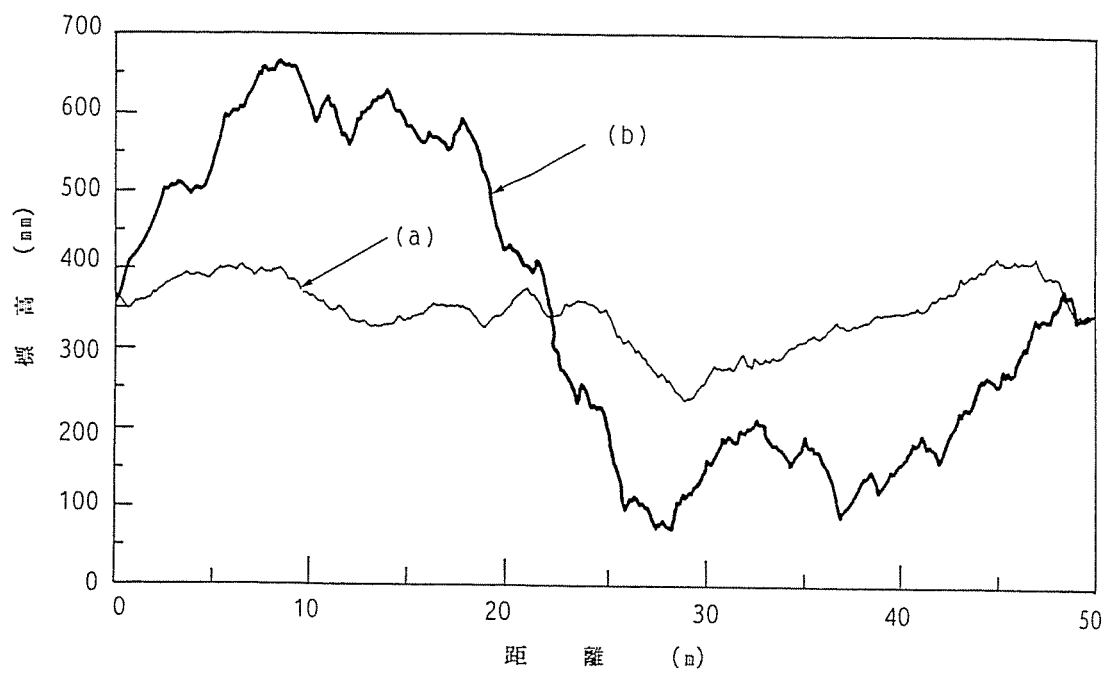


図 2 - 1 1 高低差 5cm 以上の割合が異なる凹凸の一例
 (a) 高低差 5cm 以上の割合 2%
 (b) 高低差 5cm 以上の割合 30%

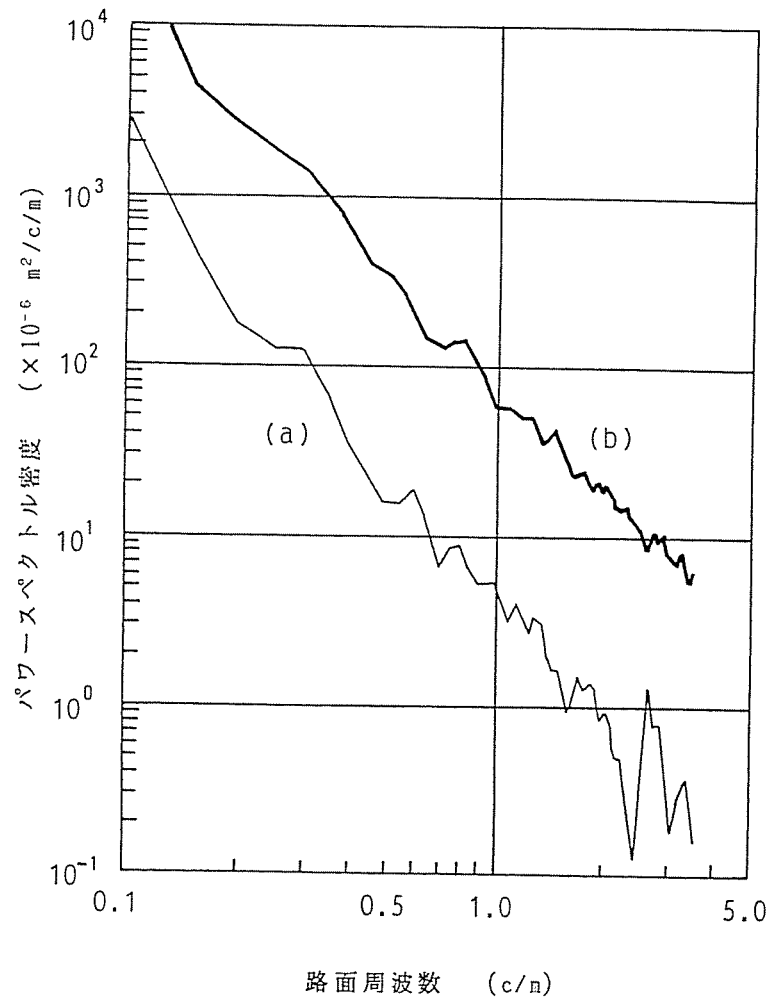


図 2 - 1 2 高低差 5cm 以上の割合が異なる凹凸の PSD
 (a) 高低差 5cm 以上の割合 2%
 (b) 高低差 5cm 以上の割合 30%

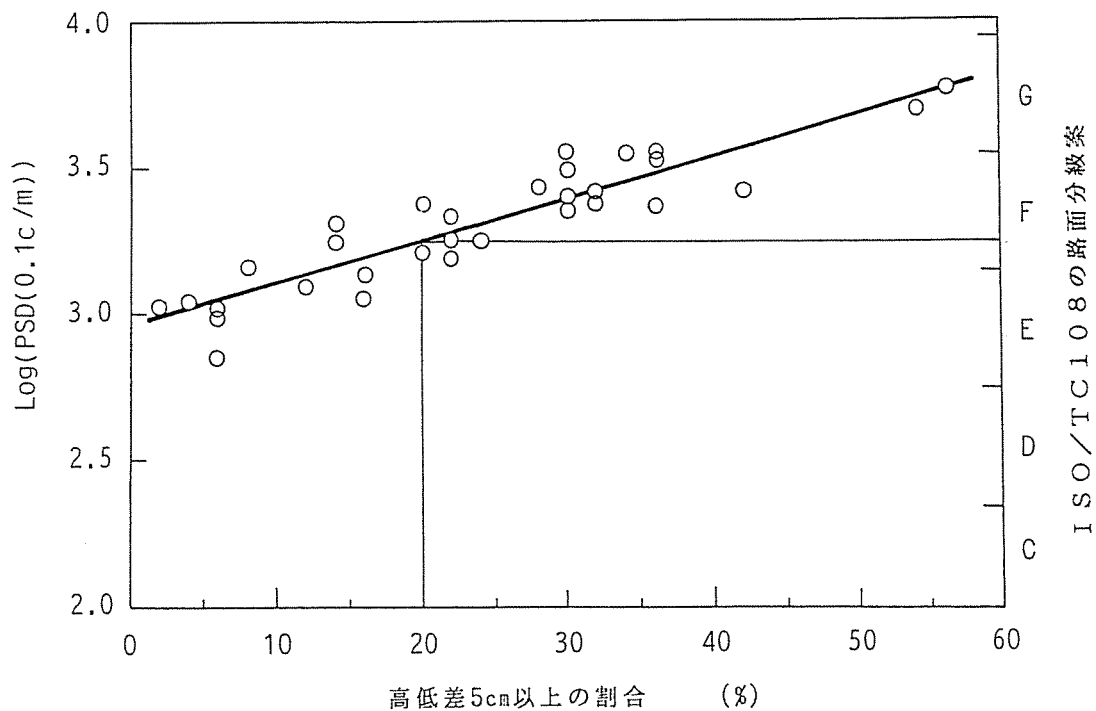


図 2 - 1 3 高低差 5cm 以上の凹凸の割合と PSD の関係

第 6 節 要約

ほ場面凹凸を中心に凹凸の評価法について検討するとともに，国及び北海道で採用しているほ場造成または改良時におけるほ場面凹凸の基準について検討した結果，以下に示す結論を得た。

(1) 高低差の度数分布，分散・標準偏差，折れ線長比・集団化指数，RR及びPrQ・PNによる凹凸の評価について検討した結果，これらの方法では凹凸の周波数成分について表現できないことが認められた。

(2) PSDはその値の大小により凹凸の評価が可能であり，ピークの有無及びPSDをべき乗の式で近似したときの係数(W)，即ちPSDを両対数のグラフで表現したときの傾きにより凹凸の周波数成分を知れることが認められたので，本論文

ではほ場面凹凸を解析する手段としてPSDを採用することとした。

(3) 北海道が採用している不陸均し基準とISOの路面粗さの分級案との関係について検討した結果、両者の間に相関が認められた。北海道の基準で不陸均しが必要とされる高低差5cm以上の凹凸の割合が全測点の20%以上のほ場は、ISOの路面分級案ではF以上の路面凹凸に相当する。

第3章 ほ場面凹凸測定システムの試作

第1節 はじめに

農業機械の運用面から考えたほ場面凹凸の基準を検討するには、先ずほ場面凹凸の性質を知ることが必要であり、そのためにはほ場面凹凸を迅速かつ十分な精度で測定するシステムが必要である。

本章では従来発表された凹凸測定装置について調査し、ほ場面凹凸測定装置としてどのような方法が適切であるかを検討した後、凹凸測定方法を決定した。さらに、予め凹凸測定装置の測定精度を予測し、測定装置の仕様を決定し、その実用性について検討した後、凹凸測定システムを考案した。

第2節 ほ場面凹凸測定方法

従来行われているほ場を含めた路面凹凸の測定方法として、レベルと標尺による水準測量は正確で一般に採用されているが、短い波長の凹凸を測定するために測定間隔を短くすると長時間の測定を要し、測定精度を高めるためには熟練を要する。そのため、様々な凹凸の測定方法が考案されてきた。

耕うんで生じた小規模な凹凸を測定する装置は主に定置式で、地表面に測定部が接触して凹凸を測定する接触式及び地表面と接触しない非接触式の方式がある。接触式の凹凸測定装置は図3-1に示したように、基準となる水平線と軸の先端の高低差によりほ場面凹凸を描写するものでBurrelら¹⁰²⁾、古池ら¹⁰³⁾、Radkeら¹⁰⁴⁾、Ouwerkerkら¹⁰⁵⁾の研究にみられる。また、接触式であるが水平に調節されたレールを基準とし、レールと地表の間の距離を変位計により測定する方式の凹凸測定装置が試作されており、今野らが試作した記録紙に凹凸を連続的に自記する方式の装置¹⁰⁶⁾、または回転式、直線式の変位変換器を使用して凹凸を連続的に測定し電気信号として凹凸を出力する方式の装置がCurrenceら¹⁰⁷⁾、Henryら¹⁰⁸⁾及びPodmoreら¹⁰⁹⁾等によって試作されている。

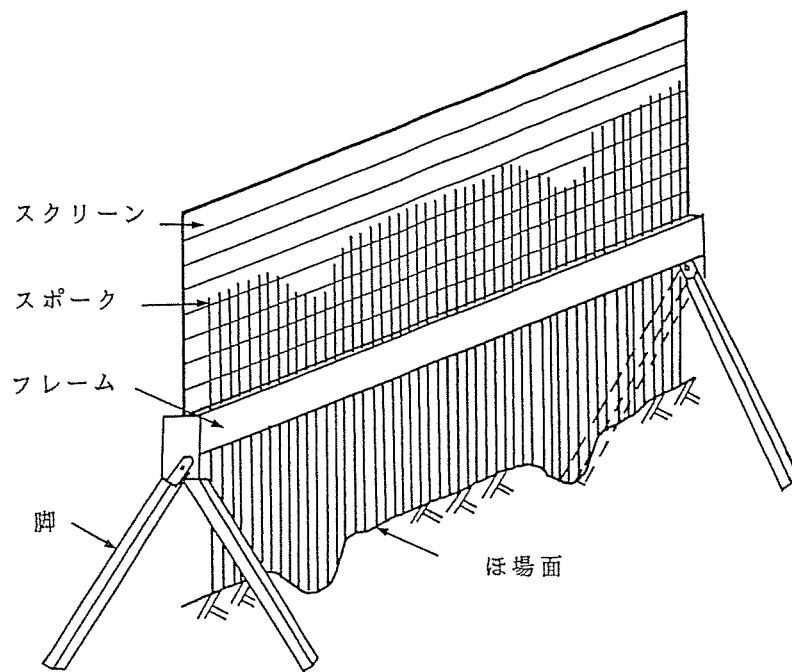


図 3 - 1 ほ場面凹凸測定装置（ほ場面凹凸描写器）¹⁰³⁾

接触式の凹凸測定装置に対し、近年は地表に接触することなく凹凸を測定する装置が試作されており、光学的な変換器を使用したHarralら¹¹⁰⁾、Romkensら¹¹¹⁾の装置、あるいはレーザを利用したDestainら¹¹²⁾およびHuangら¹¹³⁾の装置が発表されている。

これらの測定装置の測定精度は高く小規模な凹凸の測定が可能であるが、測定可能な凹凸の1区画は0.5m～2mと小さく、本論文で扱う中規模な凹凸の測定には適さない。

路面凹凸の測定方法に着目すると、水準測量の他に水系を水平に張り定規によって水系から路面までの高さを測定して凹凸を求める水系法²¹⁾があるが、この方法により測定精度を高めるためには、水系のたるみを防ぐ必要から1回の測定区間を長くすることはできない。また、水準測量及び水系法による一般

車両通行中の道路面の凹凸の測定は、車両通行の障害を招くため測定が困難である。道路面の凹凸を測定する装置としては、多車輪式²⁹⁾、静電容量式変位計¹¹⁴⁾、サーボサイズモ型の測定装置¹¹⁵⁾、加速度変換器と第5輪を組み合わせた装置等²⁷⁾があり、それらの装置の開発及び試作装置を使用しての測定結果が報告されている。しかし、これらの装置は主として一般道路面の凹凸を測定する目的で使用されているため、ほ場のような不整地での凹凸を測定するのに必ずしも適してはいない。

ほ場等の不整地の凹凸を測定する方法としては第5輪の振動加速度を測定して求めたり^{34,116,117)}、第5輪の変位を求める方法⁴⁶⁾がある。しかし、何れの方法も直接凹凸の標高を求めることはできない。

ほ場面凹凸、特に農作業の障害となる中規模の凹凸の性質を解析することを目的とした凹凸測定装置についてさらに検討した結果、路面の微小区間の傾斜角度を積分して標高を求める方法（以下本論文では傾斜角度法と呼ぶ）¹¹⁸⁾を採用することとし、測定装置の諸元と測定精度との関係について検討した後、測定装置の仕様を決定し、傾斜角度測定装置を核としてほ場面凹凸測定システムを考案し、その実用性について検討した。

第3節 測定方法

本研究で採用したほ場面凹凸測定方法は、ほ場面の微小区間の傾斜角度を測定してその正弦を求め、進行距離について積分して標高を求める方法である¹¹⁸⁾。いまほ場面の微小区間の傾斜角度を θ 、進行距離を l とし起点の標高を z_0 、 $l=s$ のときの標高を z とすると（図3-2）,

$$z - z_0 = \int_0^s \sin \theta \, dl \quad [\text{m}] \quad (3-1)$$

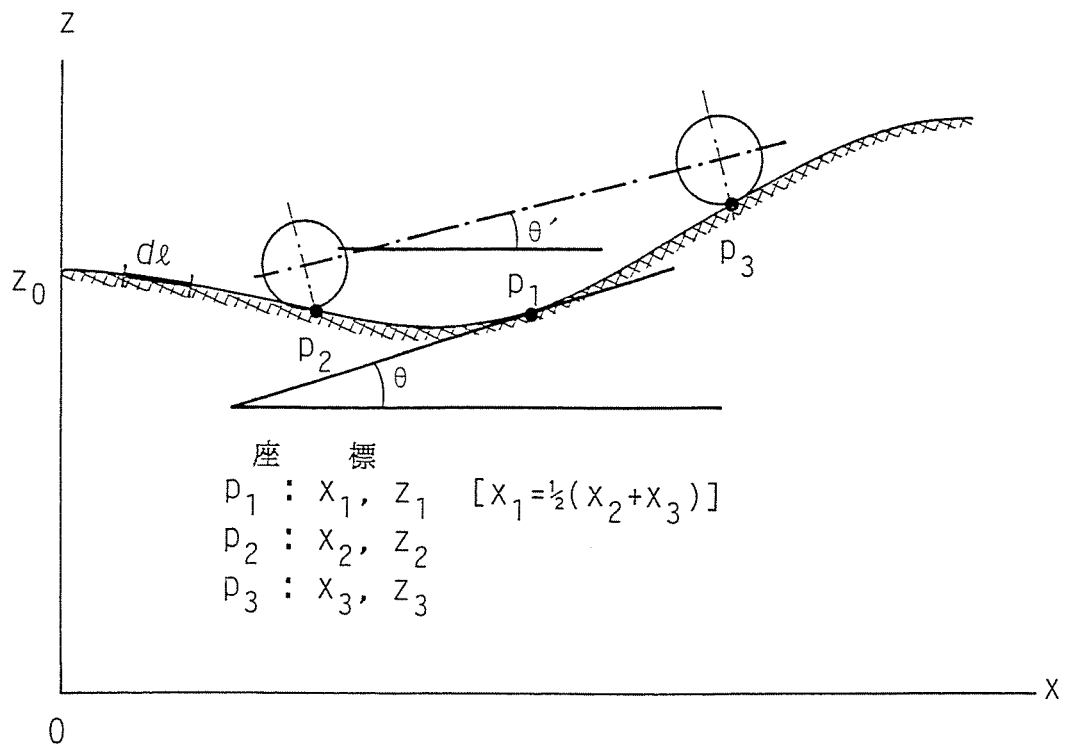


図 3 - 2 ほ場面傾斜角度の定義

となる。

従ってほ場面の傾斜角度を適切な装置で測定すれば，式(3-1)よりほ場面の標高を求めることが可能である。そこで図3-2に示すように2軸2輪の車両がほ場面を走行するとき，前後車輪の接地点を結んだ直線 p_2p_3 の傾斜角度 θ' を測定し，その値をほ場面の傾斜角度 θ であるとして，傾斜角度法によるほ場面凹凸測定の精度について検討することにした。

第4節 測定精度の予測

1. 測定精度予測方法

図3-2に示した測定方法を採用した場合、どの程度の測定精度が得られるかを計算により検討した。測定精度の予測を行う場合、ほ場面の傾斜角度の正接から標高を求めた方が計算上の都合がよいので、式(3-1)を以下のように修正した。進行距離 l の水平方向の成分を x とし、距離 s の時の x 座標を x_s とすると、

$$z - z_0 = \int_0^{x_s} \tan \theta \, dx \quad [\text{m}] \quad (3-2)$$

$$dx = \cos \theta \, dl \quad [\text{m}] \quad (3-3)$$

となり、さらに実際の測定では傾斜角度は一定進行距離毎に測定される点を考慮し、以下のように書きかえた。0番目（起点）の標高を z_0 、 K 番目（ $l=s$ ）の標高を z_K とすると、

$$z_K - z_0 = \sum_{i=1}^K \tan \theta_{i-1} \cdot \Delta x \quad [\text{m}] \quad (3-4)$$

$$\Delta x = \cos \theta_{i-1} \cdot \Delta l \quad [\text{m}] \quad (3-5)$$

$$x_s = K \Delta x \quad [\text{m}] \quad (3-6)$$

となる。

なお、傾斜角度測定装置の車輪径によってはほ場面凹凸に装置が十分追従しないことがあるので、車輪径を0とし、離散的に計算するため、傾斜角度 θ の測定間隔 Δx を0.05mとした。なお、 Δx が0.05mの場合、測定可能な凹凸の最小の波長はサンプリング定理より¹¹⁹⁾0.1mとなる。

傾斜角度法の測定精度を検討するために、供試路面の凹凸を決定する必要がある。正弦波または数個の正弦波を合成して供試路面の凹凸を作成することも可能であるが、ほ場面と同様な性質の路面凹凸を選定した方が測定時の状況を再現しているものと考え、英国規格BS4220¹²⁰⁾でトラクタ用座席振動測定試験用路面として規定されている人工路面Rougher-R, L及びSmoother-R, Lの4種類の路面凹凸を供試した。英国規格の試験路面の標高は0.08mまたは0.16mの間隔で与えられているので、その間の標高をスプライン関数¹²¹⁾を用いて内挿し、4種類の路面凹凸のデータより、それぞれ0.005m間隔で7000点余、長さ35mに相当する路面凹凸のデータを作成した。供試した路面凹凸のPSDを図3-3に示した。

計算により傾斜角度法によるほ場面凹凸の測定精度を評価するため、供試路面の凹凸を入力信号、計算結果を出力信号と考え、周波数伝達関数を求めそのゲインとコヒーレンシにより評価を行った。以下に周波数伝達関数について簡単に説明する。

ある定常なシステムが不規則変動を示す入力の下で動いているとき、その入力 U と出力 Y とを測定して、 $\{U(u), Y(u); u=1, 2, \dots, K\}$ のようなデータが得られた場合、一般に出力 Y は、入力 U と線形に対応する部分 V と、入力 U とは全く線形な関係を持たない部分 N との和

$$Y(u) = V(u) + N(u) \quad [m] \quad (3-7)$$

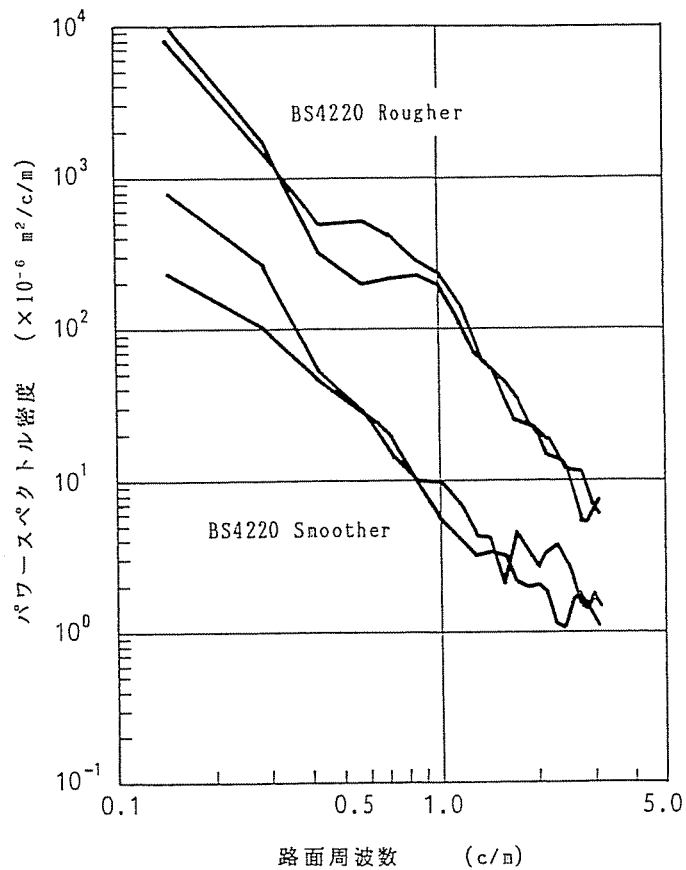


図 3 - 3 B S 4 2 2 0 に規定されている
試験路面凹凸のPSD

のように表すことができる。出力Yの自己相関関数を C_{yy} 及びV, Nに対応する自己相関関数を C_{vv} , C_{nn} とすれば,

$$C_{yy}(v) = C_{vv}(v) + C_{nn}(v) \quad [m^2] \quad (3-8)$$

が成立する。また周波数 f におけるパワースペクトル密度関数を P_{yy} , P_{nn} とすれば,

$$P_{yy}(f) = P_{vv}(f) + P_{nn}(f) \quad [m^2/c/m] \quad (3-9)$$

が成立する。また、入力と出力との間の周波数伝達関数 $A(f)$ の推定には、入出力間のクロススペクトル密度関数 P_{yu} と入力のパワースペクトル密度関数 P_{uu} の

比より求めることができ、式(3-10)が成立する。

$$A(f) = \frac{P_{yu}(f)}{P_{uu}(f)} \quad [-] \quad (3-10)$$

出力Yの中で入力Uと線形な関係のある部分の占める割合を各周波数毎に考えたコヒーレンシ $r^2(f)$ を式(3-11)より求めることができる¹²²⁾。

$$r^2(f) = \frac{|P_{yu}(f)|^2}{P_{yy}(f) \cdot P_{uu}(f)} \quad [-] \quad (3-11)$$

また、コヒーレンシの大きさによって周波数伝達関数の値（ゲイン）の信頼性を推測することが可能である。ゲインが1とは、周波数fにおける入出力の信号の大きさが等しいことを意味し、コヒーレンシの値が1に近ければ、入出力の信号間の相関が非常に高く、ゲインの値も信頼できることを意味している。なお、周波数伝達関数のゲイン、コヒーレンシ等の計算プログラムは文献122)を参考にして作成し、北海道大学大型計算機センター（FACOM 230-75）を利用してゲイン及びコヒーレンシの計算を実施した。

2. 結果及び考察

図3-2に示した方法では場面の傾斜角度を測定する場合、測定精度に影響を与える最も大きな要素は軸距であると考え、軸距WBを50, 150, 200, 300, 400,

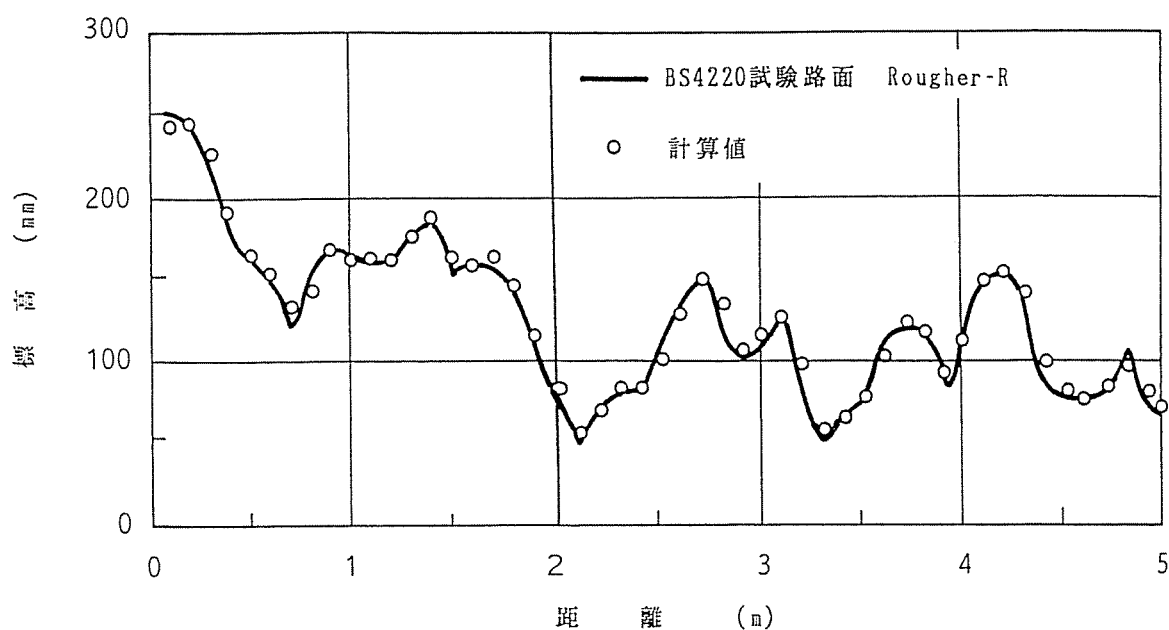


図 3 - 4 傾斜角度法を採用し，計算により求めた凹凸
(軸距 150mm, Rougher-R)

500mmの7種類とし， 前述した4種類の供試路面について測定精度の予測を行った。傾斜角度法を採用し， 計算により求めた凹凸の一例としてWB=150mm， 供試路面Rougher-Rについての計算結果の一部（0～5m区間）を図3-4に示した。

図3-4の例にみられるように， この計算値（○印）は供試路面の凹凸（実線）とよく一致しており， 傾斜角度法による凹凸測定の可能性を確認した。

軸距の大小と測定精度との関係について検討することを目的として， 供試路面の凹凸を入力信号， 数値計算により得た凹凸を出力信号として周波数伝達関数のゲイン及びコヒーレンシを求めた。7種類の軸距に対して， 供試路面 Rougher-Rについて求めたゲイン及びコヒーレンシを図3-5に示した。

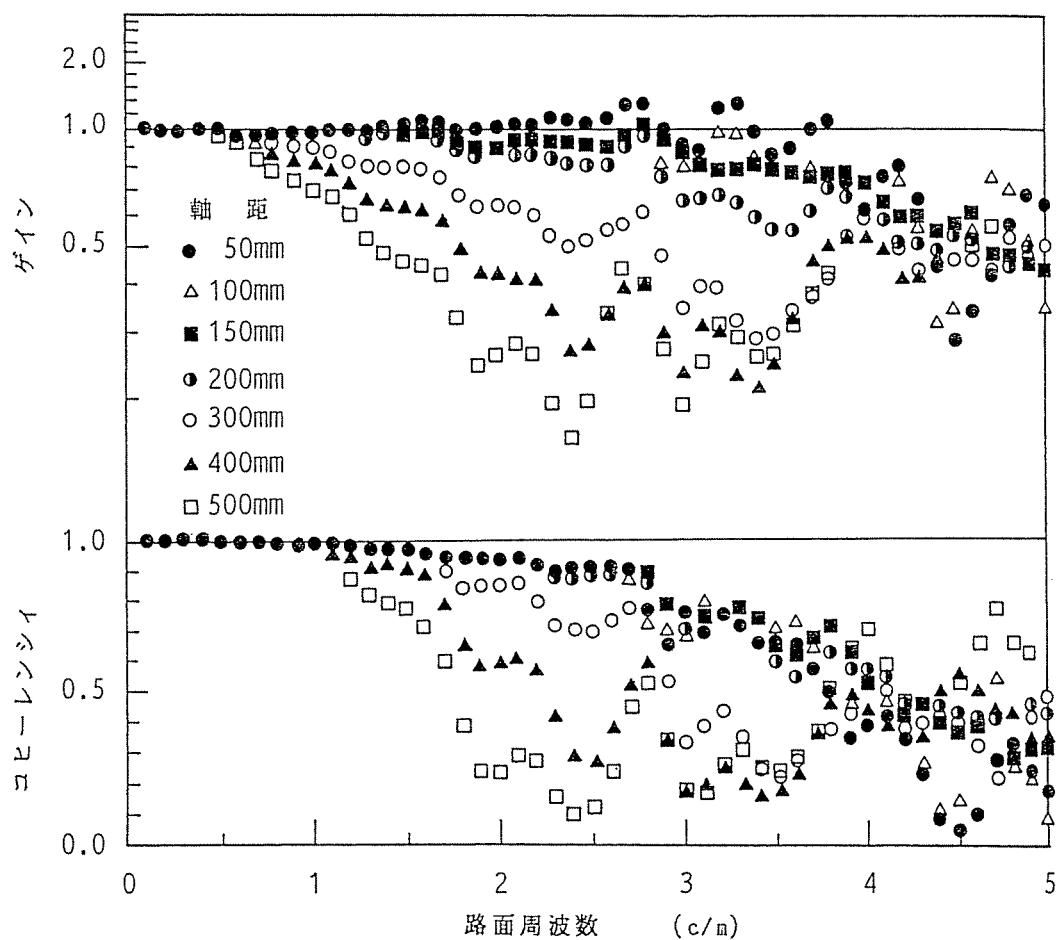


図 3 - 5 軸距の大小と測定精度

コヒーレンシ $r^2(f)$ はゲインの信頼性を推定する一つの目安となるが、赤池¹²²⁾はラグ数をデータ数の1/5にした場合は $r^2(f) \geq 0.75$ 、ラグ数をデータ数の1/10にした場合は $r^2(f) \geq 0.5$ であればゲインは信頼できるとしている。本研究ではラグ数をデータ数の1/7としたのでコヒーレンシが0.75あるいは0.5より大であればゲインを信頼して良いと考えた。

図3-5のコヒーレンシと路面周波数の関係についてみると $r^2(f) \geq 0.75$ となるのはWB=50～300mmでは3c/m前後、WB=400, 500mmでは1.5～1.8c/m、 $r^2(f) \geq 0.5$ となるのはWB=50～200mmでは約3.9c/m, 300mmでは2.9c/m, 400mmで

は2.2~2.3c/m, 500mmで1.7~1.8c/mとなり, その路面周波数以下ではゲインの値に信頼性があるといえる。

次に, コヒーレンシイと考え合わせてゲインが0.7~0.8 (2~3dB 減衰) までの路面周波数と軸距の関係についてみると, WB=150mmでは4c/m, 200mmでは2.3c/m, 300mmでは1.8c/m, 400mmでは1.3c/m, 500mmでは1c/mであった。即ち, 傾斜角度を測定する装置の軸距を短くすると, 当然のことながら路面周波数の高い, つまり短い波長の凹凸に対する追従性が良好になることが認められた。また, 軸距を150mm以下にした場合は路面周波数4c/m, 即ち25cmまでの凹凸を測定できることが予測できる。

供試路面の違いが測定精度にどう影響するかについて検討するため, 軸距150mmの場合について4種類の路面を供試して周波数伝達関数を求めたゲインを図3-6に示した。

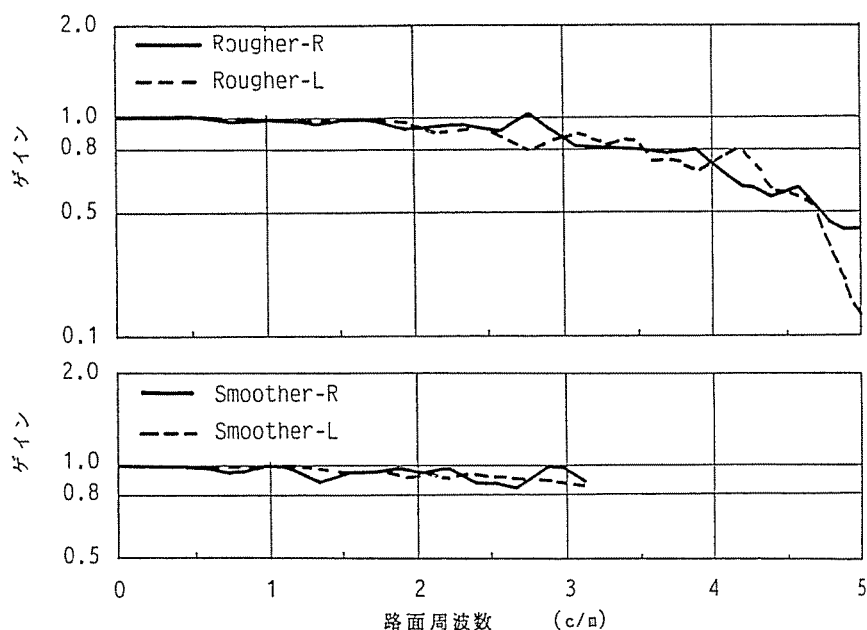


図 3 - 6 路面の違いと測定精度

図3-6より供試路面Rougherについては路面周波数4c/mまで、供試路面Smootherについては路面周波数3c/m（計算上の最大路面周波数）までのゲインは0.8以上であることが認められた。図3-3よりRougherの路面凹凸はSmootherの約8～12倍と考えるとよく、PSDの値の異なる路面を供試した場合のゲインの差は最大で1.11倍と小さく、また、Rougher-RとRougher-L、及びSmoother-RとSmoother-Lとの間のゲインの差も1.25倍と小さく、路面の相違が測定精度に及ぼす影響は小さかった。供試路面の粗さが異なっても傾斜角度法の測定精度はほとんど影響されないと考えられる。また、RougherおよびSmootherともに路面の違い、即ちRとLによるゲインの大小の差はほとんど認められなかった。RとLの路面凹凸の間の相関は小さいことから¹²³⁾、路面の凹凸の違いによって傾斜角度法の測定精度はほとんど影響されないと考えられる。従って、傾斜角度法は凹凸の程度の良い供試路面Smootherから凹凸の程度の悪い供試路面Rougherまでの広範囲な種類の凹凸の測定が可能であり、ほ場面凹凸の測定方法として適切であることが認められた。

第5節 ほ場面傾斜角度測定装置の試作

1. 軸距の決定

第4節の結果より、傾斜角度法はほ場面凹凸の測定方法として適していることが認められた。傾斜角度法では微小区間のほ場面傾斜角度を測定する必要があるため、十分な測定精度では場面傾斜角度を測定する装置が必要である。

ところで、正弦波状で波長1m（路面周波数1c/m）の凹凸上をトラクタが走行した場合、速度が1m/sのときはほ場面凹凸の周波数はトラクタに対し1Hzに相当し、2m/sでは2Hz、3m/sでは3Hzと、トラクタの走行速度と振動源としてのほ場面凹凸の周波数は比例関係にある。従って、トラクタの固有振動数を考慮した上で、測定に要求されるほ場面凹凸の路面周波数の上限を検討しなければな

らない。ほ場面の凹凸を振動の入力とするトラクタ車体の振動において、主要な振動数は8Hz以下と考えてよいので¹⁸⁾，路面周波数に換算すると走行速度が1m/s以下ならば8c/m以下，2m/sで4c/m以下，3m/sでは2.7c/m以下となる。また，ほ場面の凹凸を入力とするトラクタ車体の振動は一般に高速走行時になればなるほど二次関数的に大きくなるので⁸¹⁾，路面周波数3～4c/mの凹凸まで測定可能であれば十分実用に供試得ると判断し，計算による測定精度の予測結果及び製作上の難易度より軸距150mmのほ場面傾斜角度測定装置を試作することとした。なお，計算による予測では，軸距150mmの場合，測定可能な路面周波数は第4節で述べたように4c/m以下である。

2. 傾斜角度変換器の選定

傾斜角度変換器として第一に振子を利用したものが考えられる。これは静的な傾斜角度を測定する場合には問題ない。しかし，車両に搭載し連続的に車両の傾斜角度を測定する場合には，傾斜角度測定の周波数特性が振子の長さによって限定され，上下，左右，前後方向の振動加速度の影響やロール方向の傾きの影響を受け易いと考えられる。また，ひずみゲージ応用あるいはサーボ型加速度変換器により重力加速度を感知して傾斜角度を測定することも可能であるが，これらの変換器は測定装置の運動の加速度成分をも感知してしまうので，重力の加速度成分のみを分離する操作をしなければならない。これらの変換器に対し，航空機で使用されているバーチカルジャイロスコープは応答が早く，傾斜角度測定装置のローリングの影響を受けずにピッチ角のみを分離して測定でき，加速度の影響も受けにくいので，傾斜角度変換器としてバーチカルジャイロスコープを採用することとした。主要諸元を表3-1に示した。

表 3 - 1 バーチカルジャイロスコープの主要諸元

製造会社	東京航空計器（株）
型式	VG-23
消費電力	DC24V $\pm$ 2V 0.6A
測定範囲	ピッチ角 $\pm$ 55度 ロール角 $\pm$ 70度
測定周波数範囲	DC $\sim$ 10Hz
測定精度	0.4度以内

3. 測定装置の概要

計算による予測では、ほ場面傾斜角度測定装置を自転車のような2軸2輪の構造とし、車輪の径を0と仮定した。しかし、実際にはほ場のような不整地を走行して傾斜角度の測定を行う場合2軸2輪で軸距を150mmとすると走行が不安定になることが予測されるので、3輪車のような前1輪、後2輪の2軸3輪の構造とした。3輪であると左右車輪が走行するほ場面傾斜角度の平均値を測定することになるが、測定装置の輪距がトラクタ後車輪の幅と同じ程度であれば、3輪であっても測定精度上問題がないと判断された。車輪径が小さい程凹凸への追従性は良好であると考えられる¹²⁴⁾。しかしながら、車輪径が小さいと、転がり抵抗が大きくなるため不整地の走行に支障を来し、測定不能ともなる。軸距を150mmとしたことから、2軸3輪であることも考慮して直径150mmの車輪を採用することとした。

試作したほ場面傾斜角度測定装置の主要諸元を表3-2に、概要を図3-7に示し

た。

ほ場面の傾斜角度より標高を求めるには、一定進行距離毎に傾斜角度を測定する必要があるので、前車輪に近接スイッチと金属片を組み合わせた装置を取り付け、一定進行距離毎にパルスが発生させることとした。パルスは車輪1回転当たり12回発生し、10m区間を走行したときのパルスの総数より求めた1パルス当りの進行距離は約3.9cmである。なお、1回転当りのパルスの数は車輪の直径と近接スイッチが感知するに必要な検出物（金属片）の大きさより決定した。

表 3 - 2 ほ場面傾斜角度測定装置の主要諸元

長さ	[mm]	370
高さ	[mm]	380
幅	[mm]	300
質量	[kg]	40
輪距	[mm]	150
軸距	[mm]	150
車輪直径	[mm]	150
車輪幅	[mm]	65

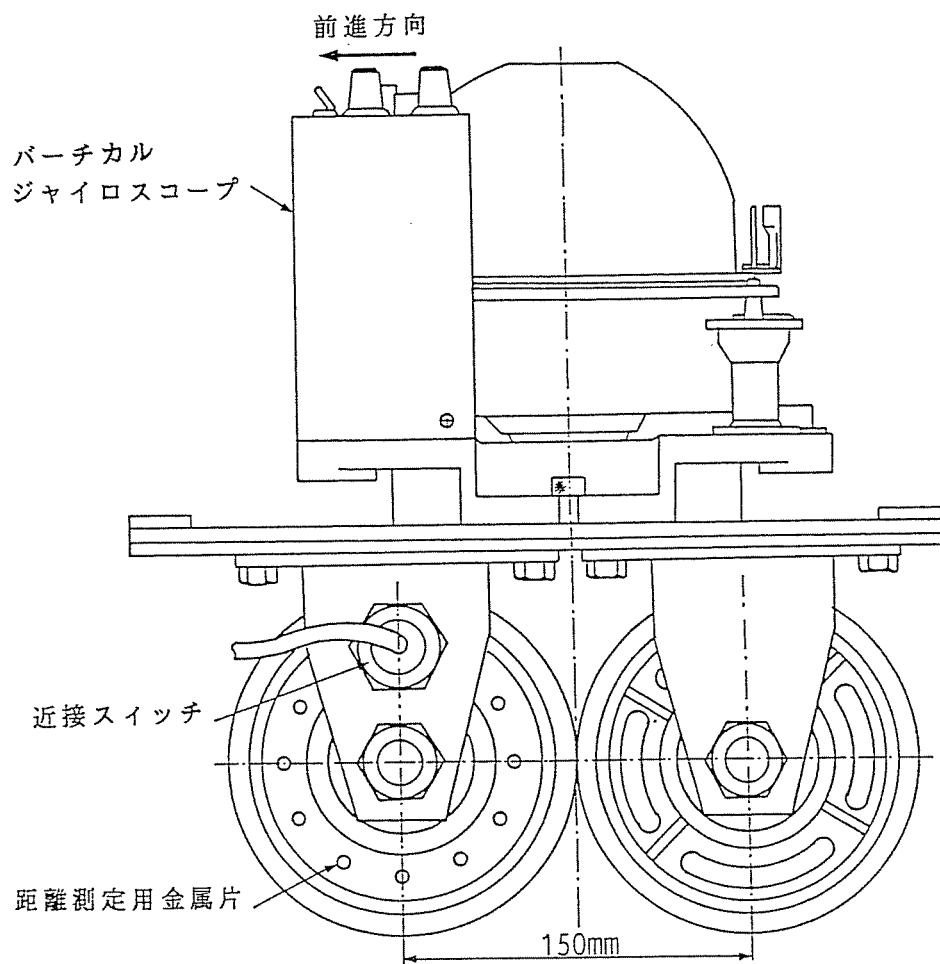


図 3 - 7 ほ場面傾斜角度測定装置の概略図

4. 試作装置の測定精度

(1) 測定精度検定方法

試作したほ場面傾斜角度測定装置の測定精度を検定するため、凹凸の標高が既知の路面を供試して傾斜角度法により凹凸を測定し、供試路面の凹凸と比較検討した。

北海道大学農学部農業機械特別実験室内の大型土壌槽内に幅1m、長さ10mにわたり人工的に凹凸を造成し供試路面とした。凹凸の造成にあたっては周期的な凹凸ができないように努めた。ほ場面傾斜角度測定装置を走行させ、路面の傾斜角度及び一定進行距離毎のパルスをペン書きオシログラフに記録した後、パルスの立ち上がり毎に傾斜角度を読み取った。この傾斜角度は式(3-5)の $\Delta \theta$ 毎の角度に相当するのでスプライン補間により Δx 毎の傾斜角度に変換し式(3-4)より標高を求めた。なお、測定結果の比較対象となる供試路面凹凸の標高は水系法により測定した。また、計算による測定精度の予測が妥当であったか否かについても併せて検討するため、造成した路面の凹凸を数値計算の入力とし、軸距を150mmとして数値計算を行い、試作装置により測定した凹凸の標高と比較検討した。

(2) 結果及び考察

試作したほ場面傾斜角度測定装置により測定した標高(○印)と供試路面の標高(●印)を距離5mについて図3-8に示した。

傾斜角度法により測定した凹凸は供試路面の凹凸に比べピーク値が小さい傾向にあるが、両者の凹凸は良く一定している。

次に測定結果の周波数成分と供試路面凹凸の周波数成分を比較検討し、また計算結果についても比較検討するため、それぞれのPSDを求め図3-9に示した。実測値のPSDは供試路面のPSDと路面周波数3c/m以下についてはほとんど同じ値である。3c/m以上のPSDで実測値が小さくなっているのは、3c/m以上の周波数成分の凹凸に対して測定精度が低下していることを示している。

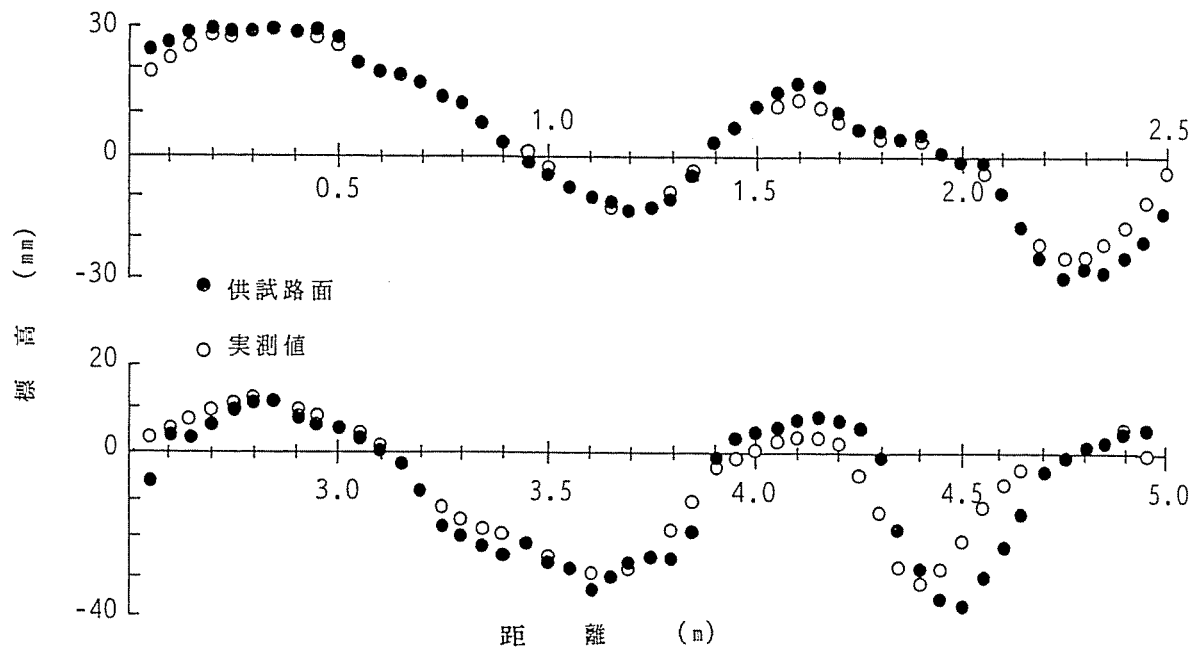


図 3 - 8 供試路面凹凸の測定結果

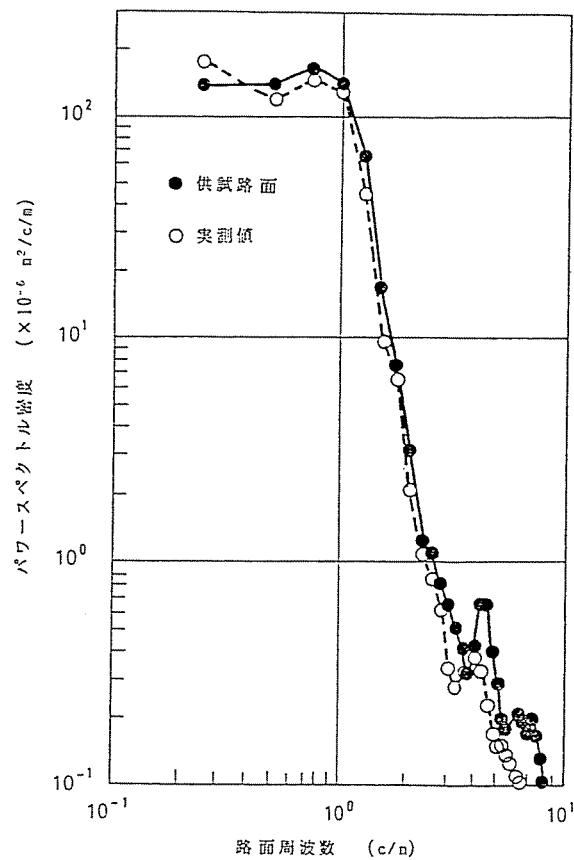


図 3 - 9 供試路面と実測値のPSDの比較

また、測定精度を判断する一つの指標として、供試路面の凹凸を入力信号、実測値を出力信号と考え、周波数伝達関数を求めゲインを図3-10に示した。実測値のゲインは路面周波数 2.2 c/m まで 0.8 と高く、計算値ともよく一致している。 $2.4\sim 3.2\text{ c/m}$ では実測値のゲインは $0.6\sim 0.7$ と計算値に比べ小さくなった。しかし、PSDおよびゲインから、試作した装置は路面周波数 3.2 c/m までの凹凸に対しては実用十分な測定精度であると判定された。実測値のゲインが計算値に比べ小さくなったのは、計算値では車輪径を 0 としたのに対し、試作装置の車輪径は 150 mm であるため、凹凸に対する車輪の追従性の差であると考えられる。

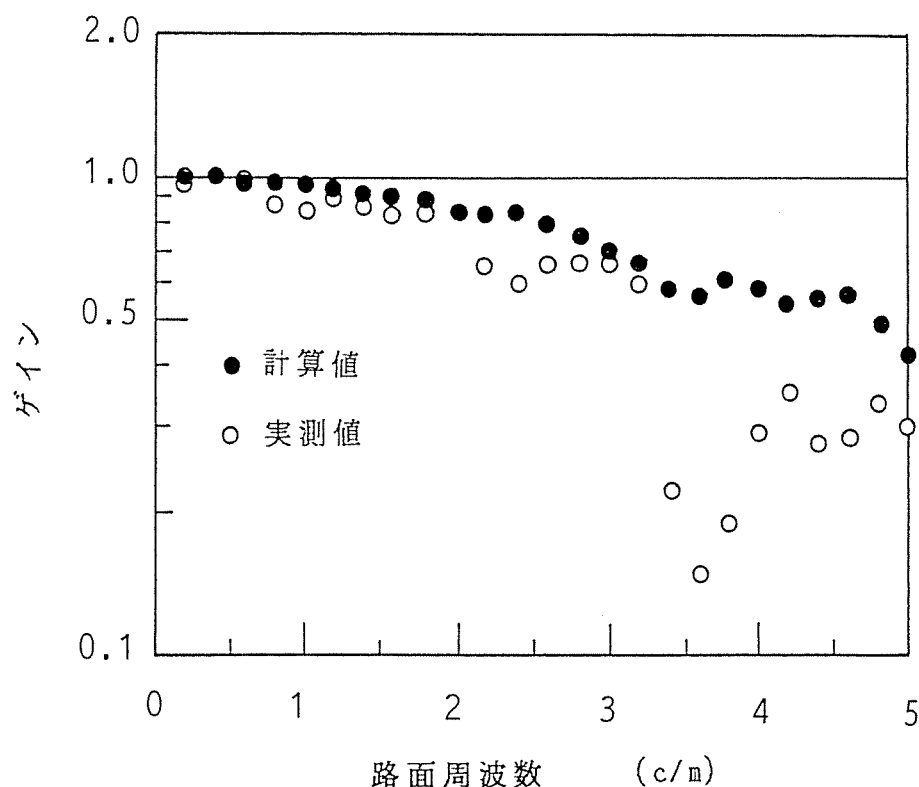


図 3 - 1 0 試作装置の測定精度

以上の結果から試作装置の測定精度は予測した結果よりやや劣るものの、周波数伝達関数より判断して路面周波数 3.2c/m までの凹凸を測定することが可能で、トラクタの振動源としてのほ場面凹凸を測定する装置として十分な性能と考える。さらに測定精度を向上させるには軸距を短くすること、及び車輪径を小さくすることが考えられる。しかし、第4節2で述べた測定精度の予測結果（図3-5）より考えて、軸距をさらに短くしても測定精度の向上はほとんど期待できず、また、車輪径を小さくすることはほ場での走行性能が不良となるので好ましいことではない。従って、試作したほ場面傾斜角度測定装置はほ場面凹凸を測定する装置として十分実用に供し得るとの結論を得た。

第6節 ほ場面凹凸測定システム

1. 測定システムA

本システムはパーソナルコンピュータが導入されるまで使用したシステムである。測定システムAのブロックダイアグラムを図3-11に示した。測定現場ではほ場面の傾斜角度及び進行距離のパルスをデータレコーダに記録し、室内にて測定結果を図3-12に示すようにペン書きオシログラフに出力し、パルスの立ち上がり毎に傾斜角度を読み取った。

得られた傾斜角度は一定進行距離 Δl 毎の値であるので式（3-5）により x 軸方向の距離 Δx に変換すると、測定した傾斜角度に対応する x 軸方向の距離が得られる。このとき、 Δx は傾斜角度の関数であるため、不等間隔に対応する傾斜角度が得られることになる。そこで、スプライン補間¹²¹⁾を行い、 0.05m 毎の傾斜角度に変換し、式（3-4）により標高を求めた。本論文では度々スプライン関数によりデータの補間を行っているが、スプライン関数は、部分区間毎に定義された多項式を何らかの連続条件を満たすように接続したものである。1つの多項式で全区間を近似すると、ある領域の少しの変化が全体に影響を及

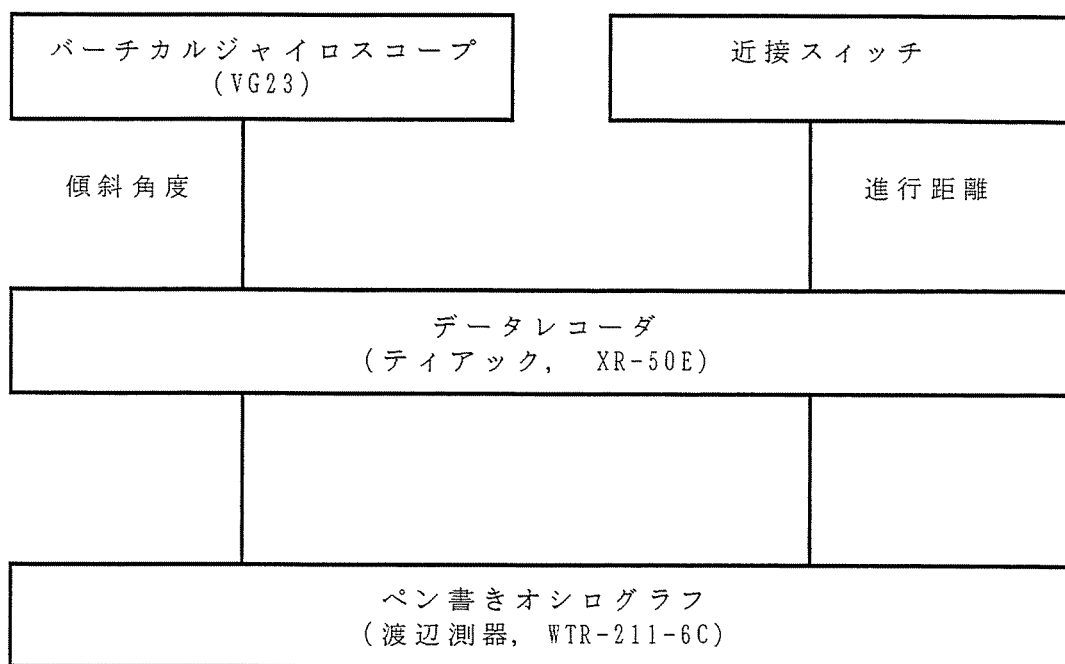


図 3 - 1 1 測定システムAのブロックダイヤグラム

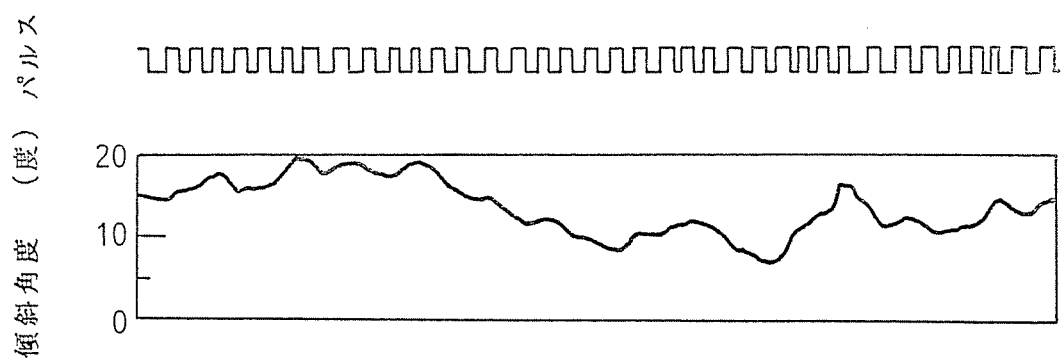


図 3 - 1 2 路面傾斜角度測定結果の一例

ぼすが，スプライン関数はその区分的な性質により余分な振動の少ない近似関数を与え，このため実験データの近似などに適している。なお，傾斜角度より凹凸を求める計算及び凹凸のPSDを求める計算は北海道大学大型計算機センター（FACOM230-75）を使用して行った。

2. 測定システムB

測定システムBのブロックダイアグラムを図3-13に示した。

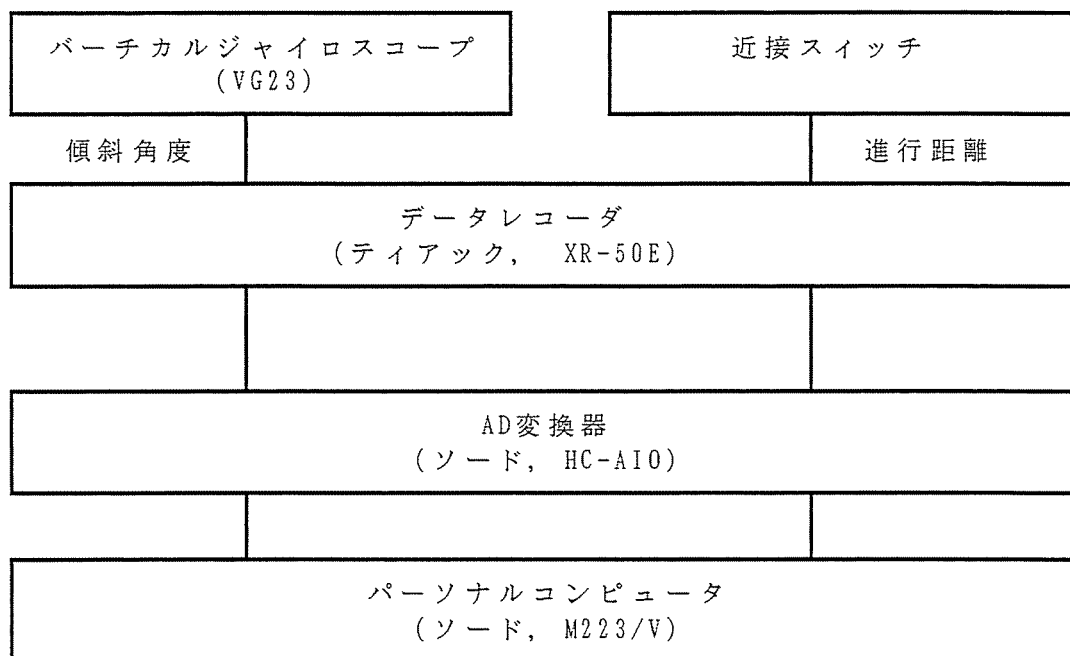


図 3 - 1 3 測定システムBのブロックダイアグラム

測定システムBは，測定現場で傾斜角度及び進行距離毎のパルスをデータレコーダに記録し，室内にてパーソナルコンピュータを使用してデータ処理を行う測定手順である。パーソナルコンピュータは8ビットのCPUを採用したもので，

内部記憶容量64kバイト， 外部記憶装置として8インチフロッピディスクが2台接続されているほか， プリンタ及びXYプロッタが接続されている。 また， AD変換時間 $33\mu\text{s}$ ， 分解能12ビットのAD変換器がパーソナルコンピュータに内蔵されている。

測定システムBでは現場で記録したデータを一貫してパーソナルコンピュータにより処理した。 データレコーダに記録されたデータは図3-12に示したように， 一定進行距離毎のパルスとほ場面傾斜角度であるので， 進行距離のパルスを外部タイマとして使用し， パルス毎に傾斜角度をAD変換し， フロッピディスクに記録した後演算処理を行った。 演算に際しては大型計算機センターで使ったプログラム（フォートランで記述）をパーソナルコンピュータ用のベシックに書き換えて標高の計算を行った。 パーソナルコンピュータは演算速度が遅く， データ数1000点， 長さ50mに相当するデータについて傾斜角度をAD変換し， 標高を求め， さらに凹凸のPSDを求めるのに50分程度の時間を要する。 しかし， この測定システムは外部タイマで作動可能なAD変換器が接続できるパーソナルコンピュータであれば機種を問わず採用可能である。

パーソナルコンピュータの演算精度は実数で6桁と大型計算機の演算精度（16桁）に比べ劣るが， パーソナルコンピュータにより求めたPSDと， 大型計算機により求めたPSDを比較すると， 図3-14に示したようにほとんど差がなく， 誤差は2～3%程度で実用上問題ない。

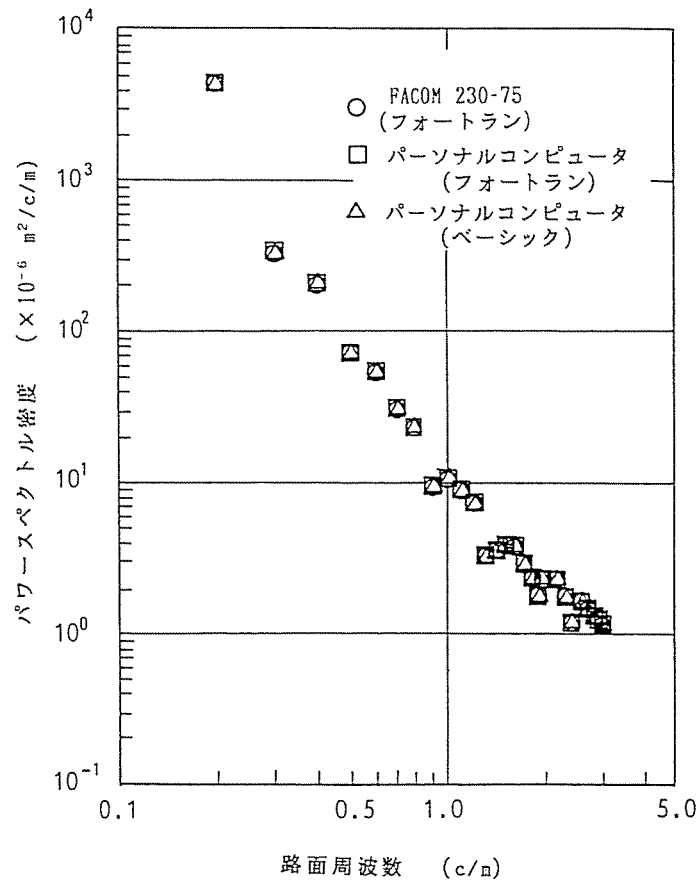


図 3 - 1 4 計算機の種類及びプログラム言語が計算精度に及ぼす影響

第 7 節 要約

本章はほ場面凹凸を迅速かつ十分な精度で測定可能なほ場面凹凸測定システムを試作し，その実用性について検討した結果を述べたもので，その結果を要約すると以下の通りである。

(1) ほ場面凹凸測定方法として，微小区間のほ場面傾斜角度を測定し，その傾斜角度を積分して凹凸の標高を求める方法（傾斜角度法）を採用した。

(2) 2軸2輪のほ場面傾斜角度測定装置を仮定し，傾斜角度法の測定精度を計算により予測したところ，軸距を150mmとした場合は路面周波数4c/m（波長0.25m）の凹凸まで測定可能であることが予測された。

(3) ほ場面凹凸の程度，凹凸の波形の違いが測定精度に及ぼす影響について検討するため，トラクタ用座席振動測定試験用路面として規定されているBS4220のRougher-R,L及びSmootehr-R,Lを供試路面として採用し，供試路面の凹凸を入力信号，計算値を出力信号と考えて周波数伝達関数を求めた。PSDの値が8~12倍異なる路面を供試した場合のゲインの差は最大で1.11倍と小さく，また，Rugher-RとRougher-L，及びSmoother-RとSmoother-Lとの間のゲインの差も1.25倍と小さく，路面の相違が測定精度に及ぼす影響は小さかった。

(4) 計算による測定精度の予測結果を参考にし，傾斜角度変換器としてバーチカルジャイロスコープを採用した軸距150mm，2軸3輪のほ場面傾斜角度測定装置を試作した。人工的に造成した路面を供試して路面凹凸を測定したところ，試作装置の測定精度は数値計算による予測とほぼ一致し，路面周波数3.2c/mまでの凹凸の測定が可能であるとの結論を得た。

(5) 以上の結果より，微小区間のほ場面傾斜角度を積分して凹凸を求める傾斜角度法及び試作したほ場面傾斜角度測定装置は，ほ場面凹凸を測定する手段として実用に供試得ると判断し，傾斜角度の読み取り方法としてペンレコーダを採用した測定システムAと，傾斜角度をAD変換しパーソナルコンピュータで処理する測定システムBを考案した。測定システムBは現場でほ場面傾斜角度をデータレコーダに記録すれば，それ以後の処理をパーソナルコンピュータで行うことが可能となり，実用的な凹凸測定システムであることが認められた。

第4章 農地及び各種路面における凹凸の性質

第1節 牧草地の凹凸の性質

1. はじめに

一般道路とほ場の利用状態を比較すると、一般道路では車両は走行路線の変更、左・右折を行うが、道路に沿って走行するので、道路は進行方向に展開する線と考えることができる。それに対しほ場では、プラウ耕や播種作業等ではトラクタは長辺方向に走行するが、整地作業では長辺方向及び短辺方向に走行し、牧草の収穫・調整作業ではほ場を渦巻き状に走行することもある。従って、ほ場面凹凸を一本の線としてではなく面として考え、ほ場の長辺方向及び短辺方向の凹凸についても同時に考える必要がある。

また、トラクタ車体の振動とほ場面凹凸の関係について考える場合は、トラクタ走行時に4車輪にどのような変位が入力されるかについて検討しなければならず、左右車輪に入力される変位、即ち左右車輪が通過する凹凸の相関に注目する必要がある。もし、左右車輪の通過する変位が同一であれば、トラクタ車体は上下振動及びピッチングを呈するが、ローリングは生じない。しかし、車輪の通過する凹凸が互いに独立していれば、トラクタ車体は上下振動、ピッチング及びローリングも呈する。

以上の点を考慮し、本章では農業機械の運用よりほ場特に牧草地の凹凸を評価するための資料とすることを目的とし、凹凸の程度の異なる牧草地を供試し、牧草地の凹凸を測定・解析し、以下に示す項目について検討した。

- ① ほ場面凹凸の三次元的表現
- ② ほ場面凹凸の程度と周波数成分
- ③ 測定方向、測定箇所の違いによる凹凸の性質の相違
- ④ トラクタの左右車輪が通過する凹凸の性質

2. 供試ほ場及び測定方法

(1) 供試ほ場

ほ場はその経営形態より水田、普通畑、樹園地及び牧草地に分けられる。維持管理が特別な樹園地は除外して考えると、水田及び普通畑では毎年耕起・碎土・整地作業を行うのに対し、牧草地では一度造成すると、更新時まで耕起・碎土・整地作業は行われず永年牧草地となる。路面の硬さについて考えると、水田、普通畑の表面は比較的軟らかく車両の走行によって変形するが、永年の度重なる牧草の管理・収穫・調整作業等による踏圧により、牧草地の表面は固く締まっており、車両の走行による変形が少ない。

以上の点を考慮し、比較的高速で作業する機会が多く、ほ場表面が硬く、トラクタの走行による路面の変形が少ないと考えられる牧草地を供試ほ場として選定し、北海道大学農学部附属農場内の永年牧草地4区画について凹凸の測定を行った（表4-1、図4-1）。

表 4 - 1 供試牧草地の概要

測定箇所	測定点数	測定距離 [m]	測定した凹凸の 距離 [m]
牧草地 a			
a ₁	19	45	2.5
a ₂	19	45	2.5
a ₃	2	64	-
牧草地 b	21	50	1.5
牧草地 c	11	50	1.5
牧草地 d	5	50	1.5

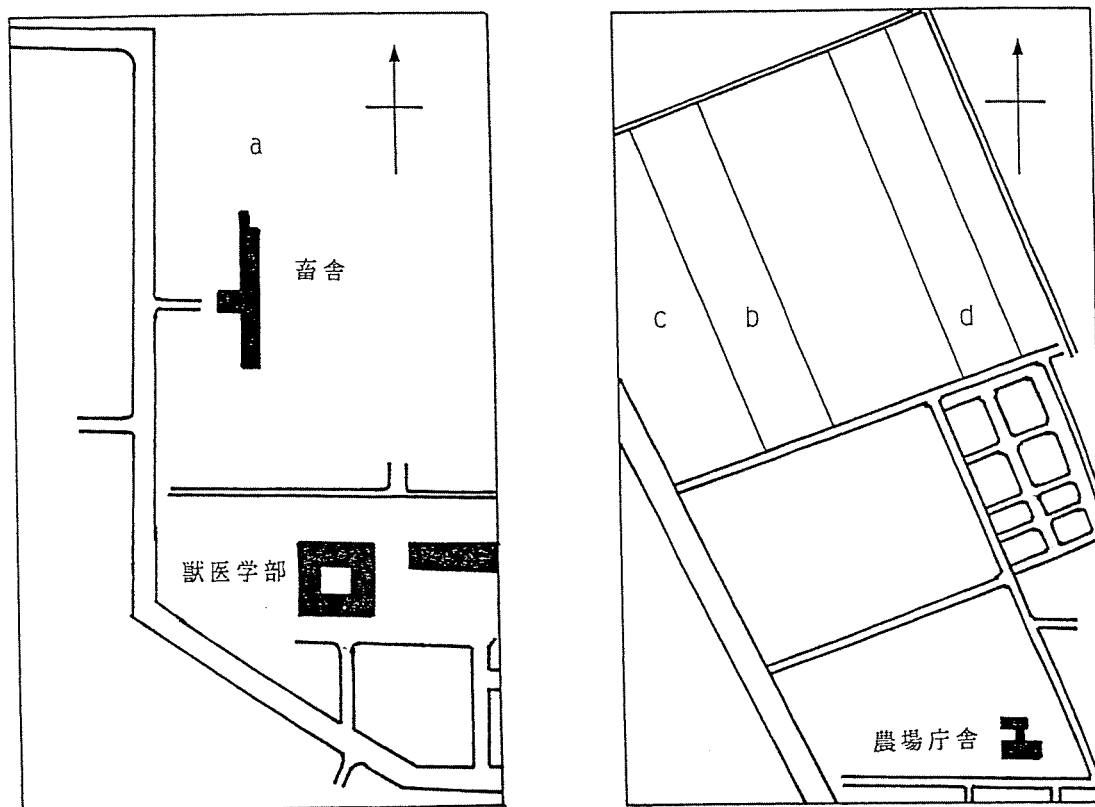


図 4 - 1 供試牧草地の測定箇所
(北海道大学農学部附属牧場, 札幌市)

a_1, a_2, a_3 は牧草地 a にあり、測定方向がそれぞれほ場の短辺方向、長辺方向及び対角線方向である。供試ほ場の選定にあたっては、牧草地 a は凹凸の程度が比較的悪いほ場、牧草地 d は凹凸の程度の良いほ場、牧草地 b, c はその中間のほ場として選定した。牧草地 a 及び d の状況を図 4-2, 3 に示した。

图 4 - 2 牧草地 a (1979年8月测定)

图 4 - 3 牧草地 d (1982年8月测定)

(2) 測定方法

供試牧草地の測定は、第3章で述べたほ場面傾斜角度測定装置を供試し、傾斜角度法により凹凸の標高を求め、さらにPSDを求めた。なお、牧草地aの測定は測定システムAにより、牧草地b, c, dの測定は測定システムBにより行った。

3. 結果及び考察

(1) 牧草地の凹凸の性質

牧草地b, cの凹凸を三次元的に表し、図4-4, 5に示した。各凹凸の間隔は1.5mである。牧草地bは造成後10年以上経過しており、年2, 3回採草しているが、牧草の根株が目だった。

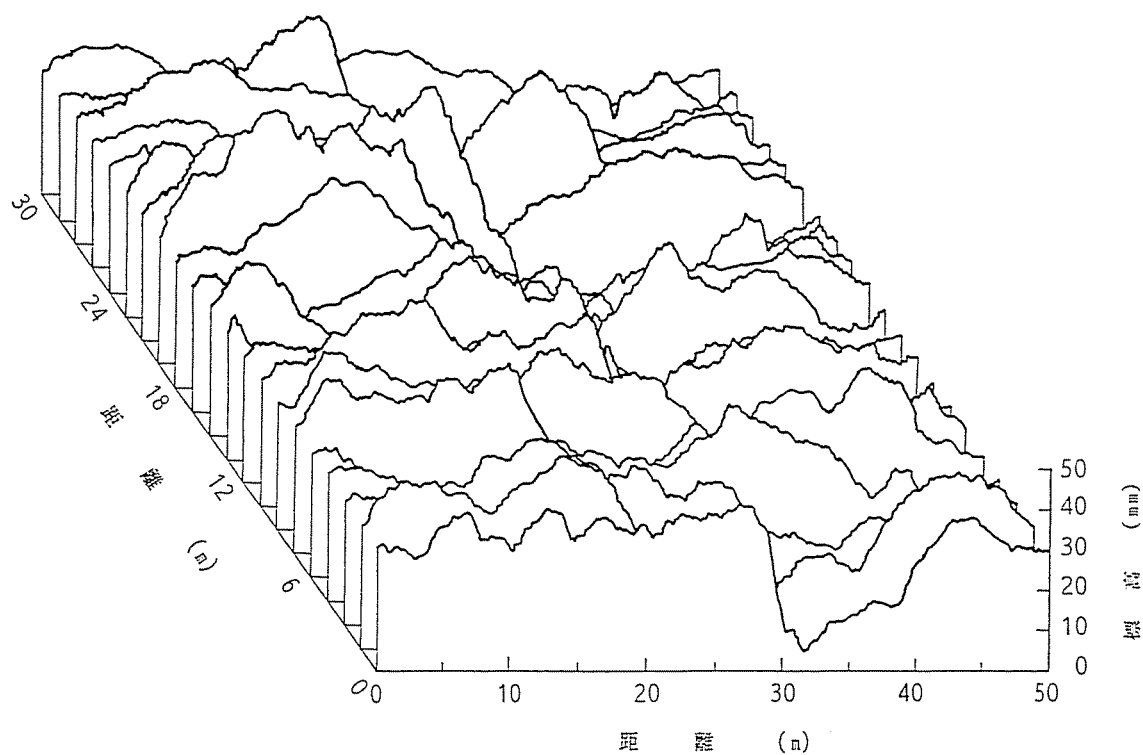


図4-4 牧草地bの凹凸測定結果

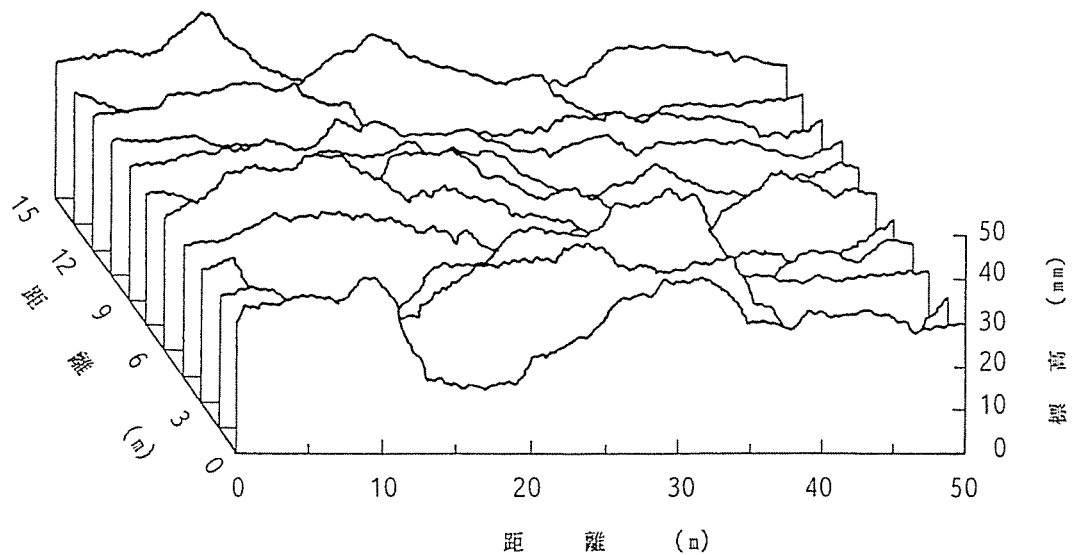


図 4 - 5 牧草地 c の凹凸測定結果

他の牧草地にも共通しているが、牧草地の凹凸は不規則で、周期的な畝状の凹凸はみられなかった。また、供試牧草地の凹凸の形状を観察すると、長い波長で振幅の大きい凹凸に、短い波長で振幅の小さな凹凸が重なりあった形状であることが認められた。図4-4にみられるように、全体としては同じ様な形の凹凸がなっている。さらに、隣接する凹凸の形状を比較してみると、目視では必ずしも同様な形と認められなかった。

図4-6に凹凸の状態の良い牧草地の例と凹凸の状態の悪い牧草地の例を示した。目視観察により2組の牧草地の凹凸を比較すると、程度の良い牧草地の凹凸は、長い波長の凹凸の振幅が小さいだけでなく、短い波長の凹凸の振幅も小さいことが認められた。

牧草地の凹凸の周波数成分について検討するため各凹凸のPSDを求め、牧草地 a, b, d の凹凸のPSDを図4-7～4-9に示した。図中の A ～ H の記号と破線は、表2-1に示したISO/TC108/SC2で検討中の路面凹凸の分級案の区分と境界線である。

牧草地 a～d の凹凸のPSDには第2章の図2-5に示したような顕著なピークはみ

られなかった。従って、供試牧草地の凹凸は周期性のある成分のほとんどない不規則な凹凸であることが認められる。供試ほ場のPSDを表2-1のISO分級案に当てはめると、牧草地aの a_1 、 a_2 がEからF、牧草地bがDの上限からF、牧草地cがCからDの上限、及び牧草地dがCからDの範囲に分類される。第2章、図2-6に示されている路面凹凸のPSDと比較すると、ISO分級案のDは管理の良い非舗装道路、Eは管理の悪い非舗装道路に相当する。

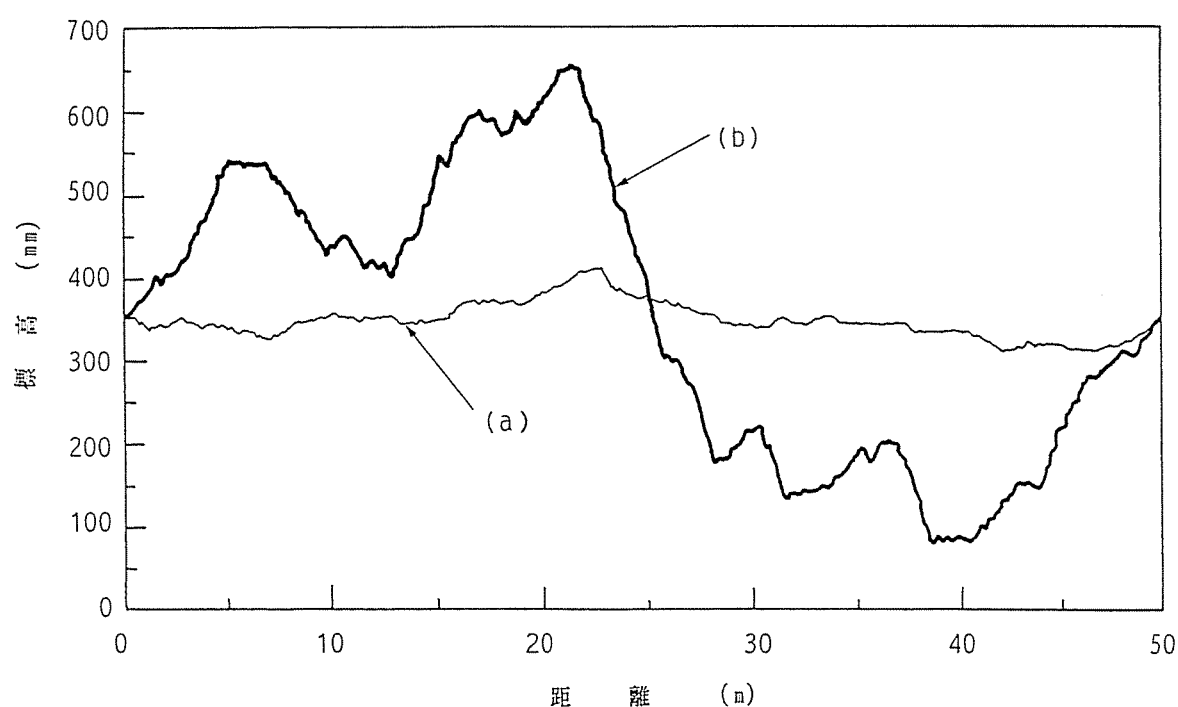


図 4 - 6 凹凸の程度の異なる牧草地
(a)凹凸の程度の良い牧草地
(b)凹凸の程度の悪い牧草地

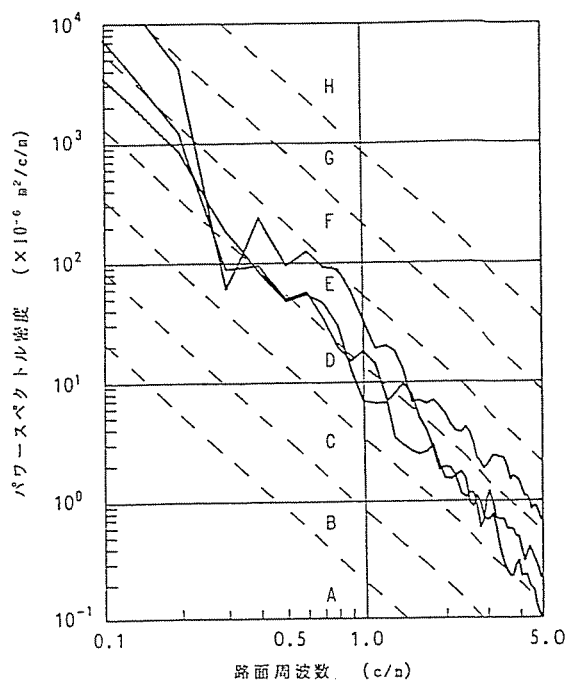


図4-7 ほ場面凹凸のPSD (牧草地a-a₁)

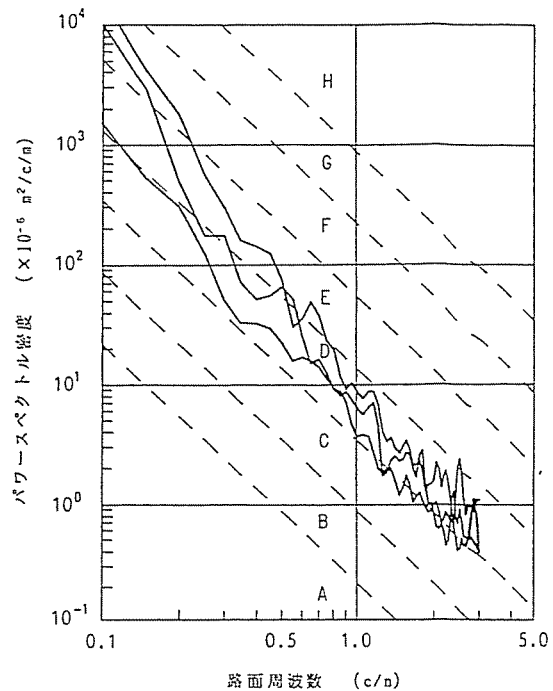


図4-8 ほ場面凹凸のPSD (牧草地b)

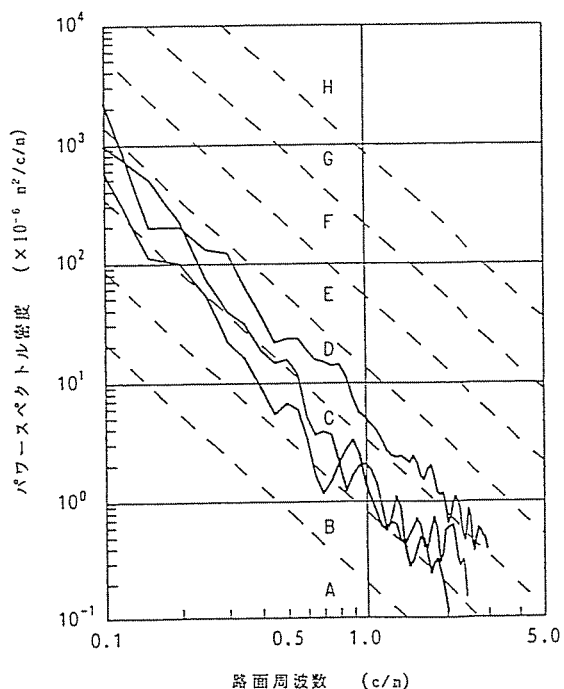


図4-9 ほ場面凹凸のPSD (牧草地d)

凹凸が不規則で、PSDを両対数のグラフに表したとき右下がりになるということの意味をさらに具体的に考えてみる。式(2-8)で示したように凹凸のPSDは路面周波数のべき乗で表すことができる。いま、式(2-8)における W の値をISOの提案と同じ2とすると、路面周波数が倍になる毎にPSDの値が $1/4$ 、即ち凹凸の振幅が $1/2$ になることを意味している。この考えに基づき、路面周波数 0.02 c/m の正弦波を基本とし、路面周波数が倍になると振幅が $1/2$

となる正弦波を合成して凹凸を計算により作成すると図4-10, 11に示した結果が得られる。図4-4, 5に示した牧草地の凹凸が不規則であるのに対し、合成した凹凸は規則的で周期的な成分で構成されているので、図4-11に示したPSDに周期的な周波数成分が含まれていることを意味するピークが顕著に表れている。しかし、牧草地の凹凸のPSDと合成した凹凸のPSDとの比較より、牧草地の凹凸は無限に小さな周波数毎の成分を合成したものと概念的に理解される。

供試牧草地の各凹凸のPSDについて第2章で示した式(2-8)の W 及び $P(f_0)$ を求め、各牧草地についての平均値を表4-2に示した。なお、計算した路面周波数の範囲は牧草地aの a_1, a_2 が $0.1 \sim 3.0 \text{ c/m}$ 、牧草地b, c, dは $0.05 \sim 3.00 \text{ c/m}$ であった。

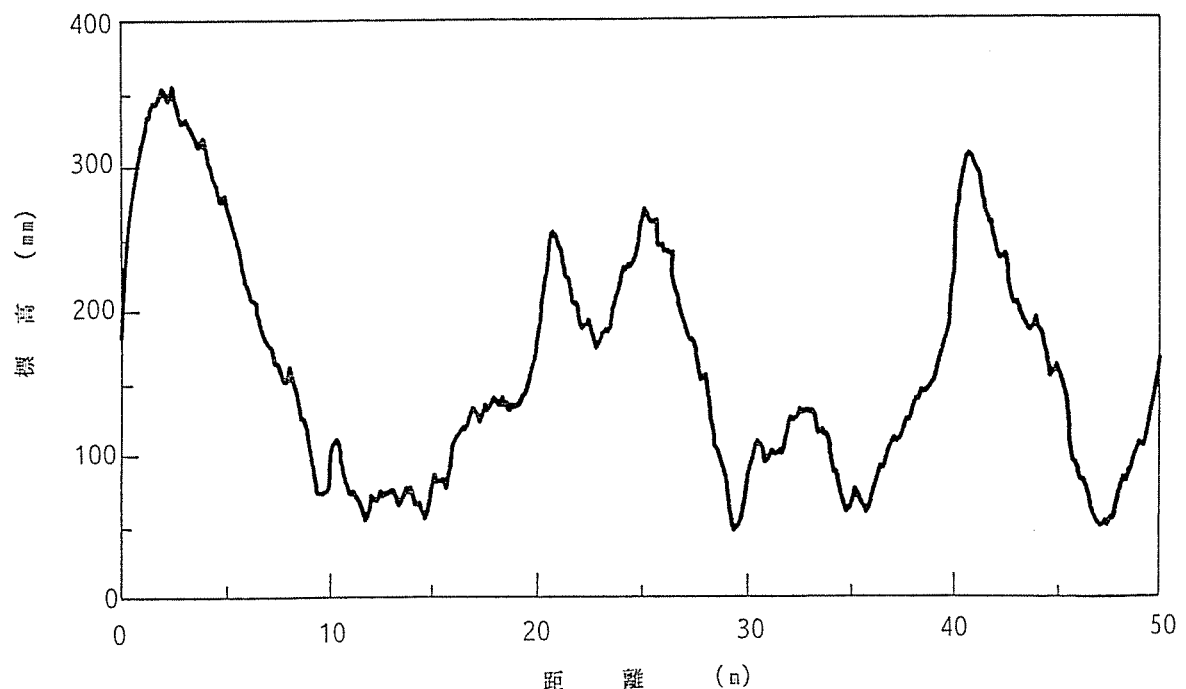


図4-10 正弦波の合成により作成した凹凸

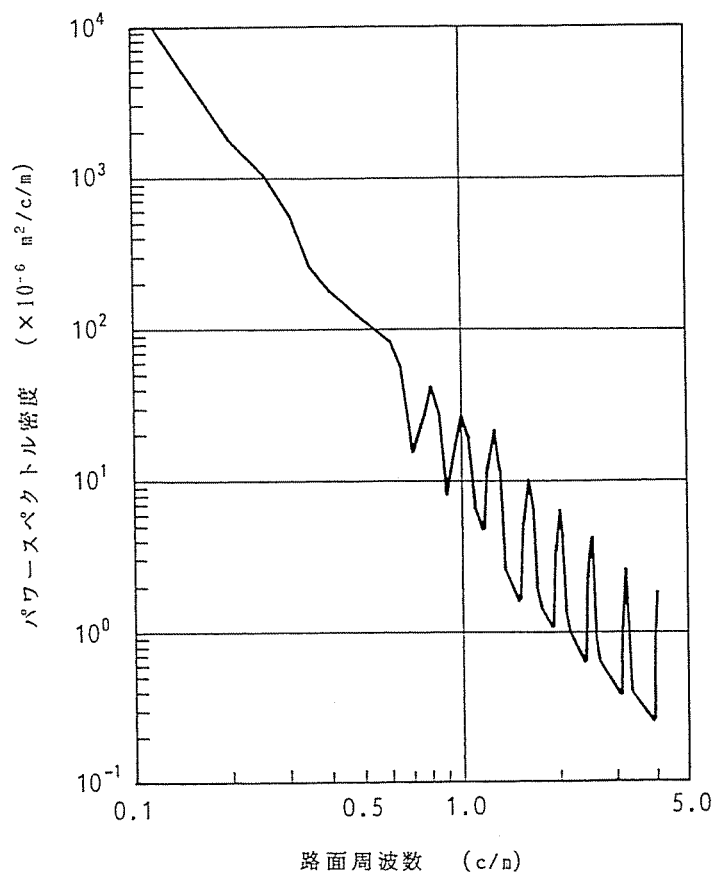


図 4 - 1 1 正弦波の合成により作成した凹凸のPSD

表4-2によれば供試牧草地の凹凸の W は2.27～2.44の範囲で、ISO/TC108で検討中の案($W=2$)に比べると大きく、PSDを両対数グラフで表した場合、傾きが大きく路面周波数の増加に対するPSDの値の減少割合が大きいことを意味している。鳥巢ら⁴⁾、西独のWendeborn¹⁷⁾及び英国のMatthews¹⁸⁾の研究結果をも考え合わせると、永年牧草地の凹凸には周期的な成分はほとんど含まれておらず不規則で、凹凸のPSDを両対数のグラフで表すと右下がりとなることが認められた。また、ISO/TC108の路面粗さの分級案に当てはめると、供試ほ場によって区分は異なり、目視観察によって凹凸の程度の悪いと認められるほ場ではE～F、凹凸の程度の良いと認められるほ場ではC～Dの範囲であった。

表 4 - 2 PSDの近似式の係数

測定箇所	W	P(f ₀)
		[×10 ⁻⁶ m ² /c/m]
牧草地 a(a ₁)	2.27	2043
牧草地 a(a ₂)	2.44	2067
牧草地 b	2.43	1406
牧草地 c	2.42	489
牧草地 d	2.39	185

$$f_0 = 1/2 \pi c/m$$

(2) 測定箇所，測定方向の異なる凹凸の比較

牧草地 a の短辺方向の凹凸 a₁，長辺方向の凹凸 a₂ 及び対角線方向の凹凸 a₃ の性質を比較し，同一の牧草地において測定箇所及び測定方向が異なる場合の凹凸の性質について検討した。目視観察により a₁ 及び a₂ を比較すると，長い波長の成分の形状，即ち，凹凸全体の波形の様子が異なっていることが認められる。しかし，a₁，a₂ とともに不規則な波形であるという点では性質が共通している。各々の凹凸の周波数成分の違いをみるために，短辺方向の凹凸 (a₁) のうち 2 組，長辺方向の凹凸 (a₂) のうち 2 組について，各々の PSD を図 4-12 に示した。

図 4-12 より，路面周波数 0.2 c/m (波長 5m) 以下の PSD の値は 4 組の凹凸の間に相違が認められるが，それ以上の路面周波数の PSD についてはいずれも ISO 分級案の E の範囲に含まれている。測定方向の違いと凹凸の程度の関係を見るため，短辺方向及び長辺方向の凹凸の PSD の最大値・最小値を結んだ包絡線を図 4-13，14 に示した。

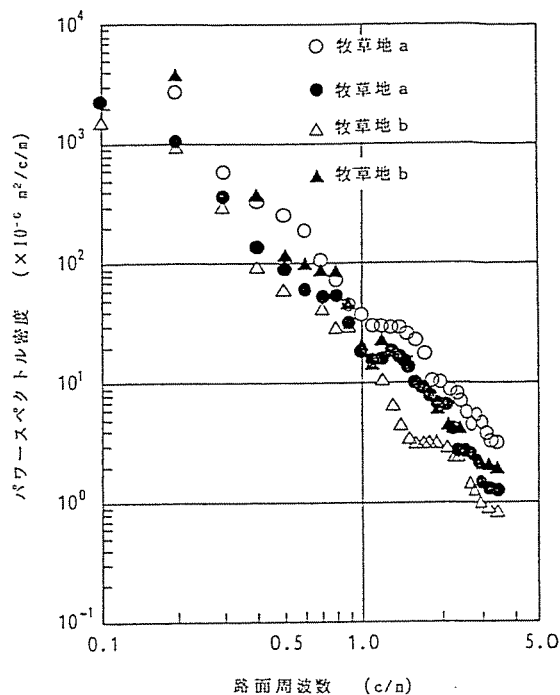


図4-12 代表的な凹凸のPSD

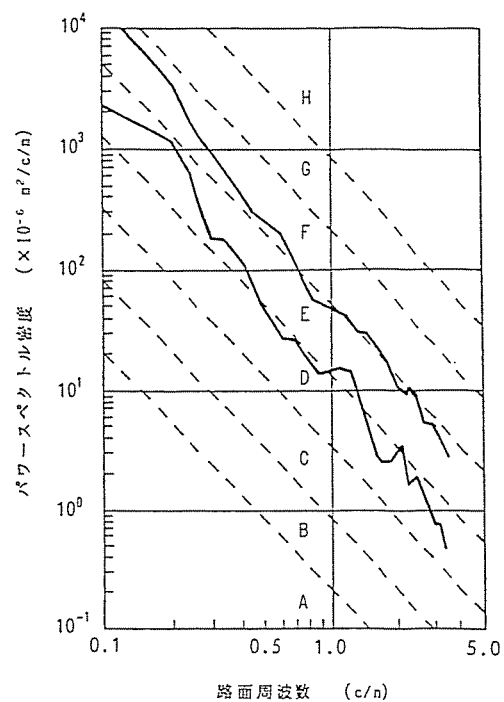


図4-13 PSDの最大値及び最小値
(牧草地a-a₁)

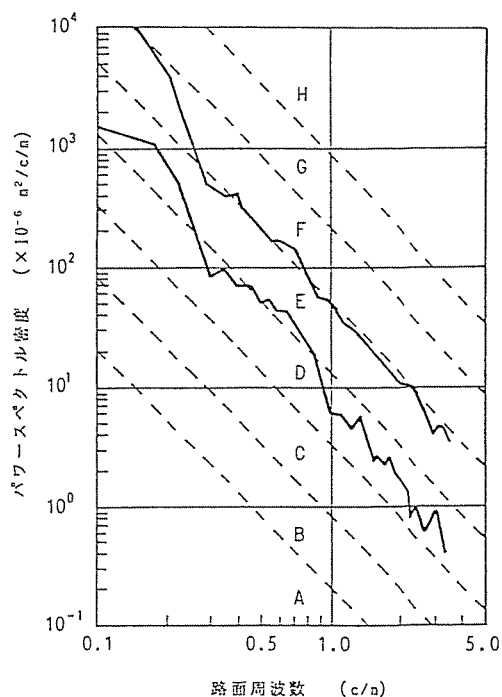


図4-14 PSDの最大値及び最小値
(牧草地a-a₂)

図4-13と4-14とを比較すると、短辺方向及び長辺方向の凹凸共にPSDの上側の包絡線はほぼEの上限からFの範囲、下側の包絡線はDの上限からEの範囲で、測定方向によるPSDの違いはほとんどなく、凹凸の程度が同じであることが認められた。

次に、一方向の凹凸の程度が測定箇所によって異なるかについて検討するために、短辺方向の凹凸a₁及び長辺方向の凹凸a₂をそれぞれ測定場所別に4つのブロックに区分し、各ブロック毎のPSDの平均値を求め図4-15,16に示し

た。短辺方向及び長辺方向の凹凸のいずれについても、ブロック間でのPSDの差のほとんど無いことが両図より認められる。また、対角線方向の凹凸のPSDと短辺方向凹凸のPSDの平均値及び長辺方向の凹凸のPSDの平均値を図4-17に示した。対角線方向凹凸のPSDと短辺方向、長辺方向凹凸のPSDとはほぼ同じ傾向を示し、3者の凹凸の程度及び周波数成分は同じと認められた。

以上の結果から、供試牧草地の凹凸はその測定方向及び測定箇所が異なっても、凹凸の程度及び周波数成分はほぼ同じであるといえる。牧草地の凹凸の発生原因については第1章で述べたように、造成時に生じた抜根跡、プラウ耕による凹凸が碎土・整地作業後も残った場合、あるいはトラクタ車輪のすべり沈下等によって生じた凹地及び牧草の根株等が考えられる。これらの凹凸はプラウ耕の跡に生じる凹凸を除くとその発生は不規則であり、従って、供試牧草地の凹凸が不規則で周期的な成分が含まれていないという性質は、他の牧草地の

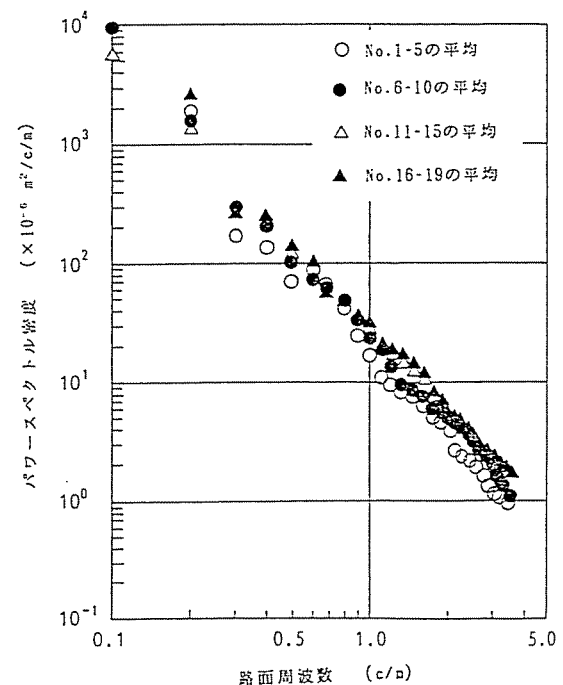
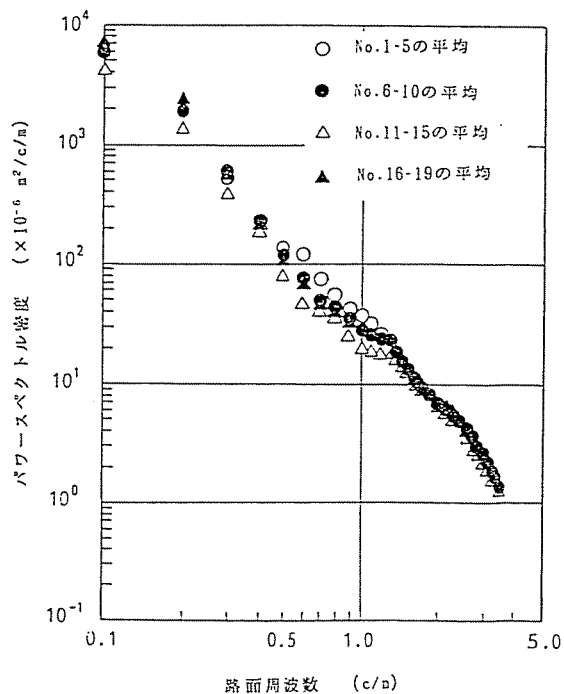


図4-15 PSDの平均値 (短辺方向の凹凸 a_1) 図4-16 PSDの平均値 (長辺方向の凹凸 a_2)

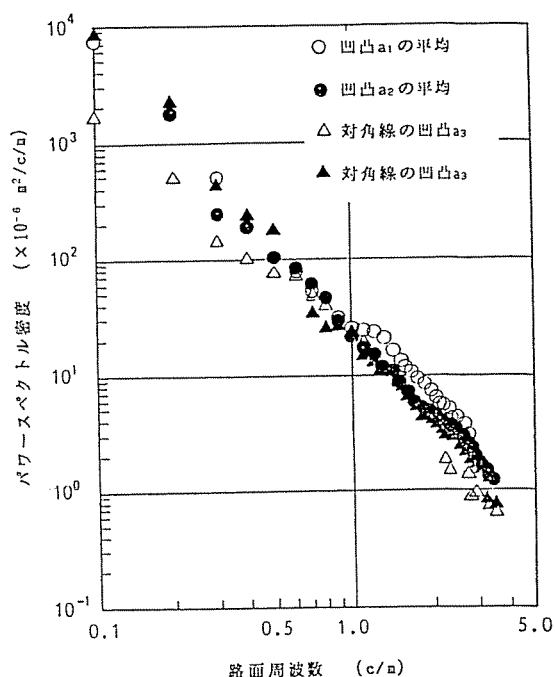


図4-17 短辺方向・長辺方向凹凸PSDの
平均値及び対角線凹凸のPSD

凹凸についても当てはまるものと考えられる。

供試牧草地の凹凸のPSDをみると、PSDの周波数成分即ちPSDをべき乗の近似式で表した場合の W の値は表4-2に示したように約2.4で、供試牧草地間の凹凸の周波数成分の差は小さかった。従って、凹凸の程度を推定するには路面周波数の低い成分、即ち長い波長の成分の大小を知ることによって可能である。

また、数カ所の凹凸を測定、解析することにより、供試牧草地の凹凸を評価することの可能性を見出した。

(3) トラクタの左右車輪が通過する凹凸の性質

標準的なトラクタの輪距を1.5mと考え、1.5m離れた平行な一対の凹凸を比較して左右車輪が通過するほ場面凹凸の性質を検討した。平行な一対の凹凸の例として、図4-18に牧草地b、図4-19に牧草地cの凹凸測定結果を示した。

図4-18,19では凹凸の測定結果に重なっている箇所があるため分かりにくい点もあるが、左右車輪が通過する平行な凹凸の高低差、即ち凹凸の程度はほとんど等しいと目視観察により認められた。また、左右車輪が通過する凹凸の波形を比較すると、20~50mの波長の成分については凸部と凹部が一致している場合が多い。しかし、図4-19のようにかなり異なっている場合もあった。

1.5m離れた凹凸のPSDとして図4-20~4-22に牧草地b, c, dの例を示した。

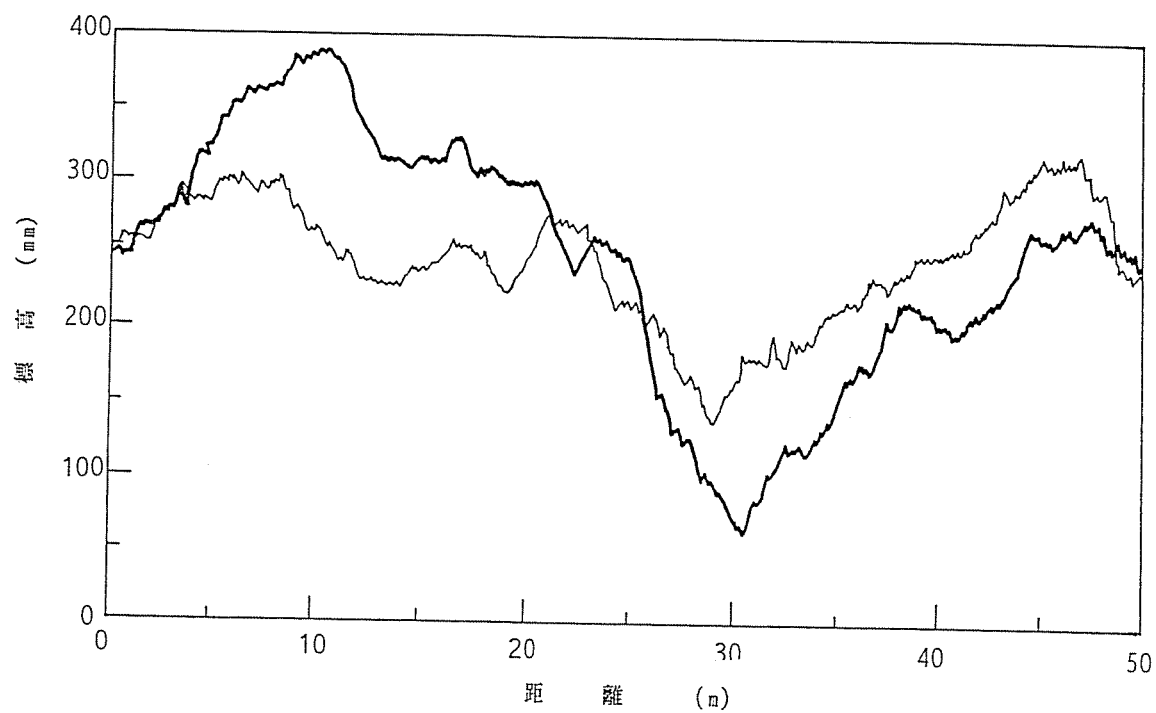


図 4 - 1 8 1.5m離れた一対の凹凸 (牧草地b)

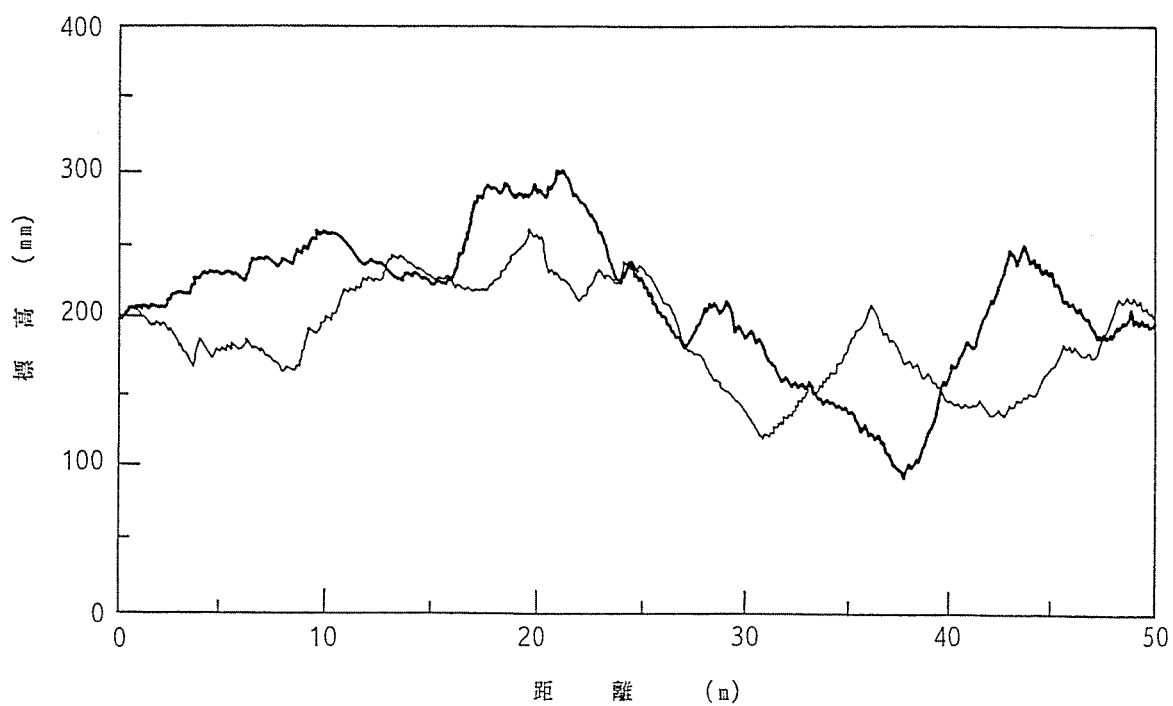


図 4 - 1 9 1.5m離れた一対の凹凸 (牧草地c)

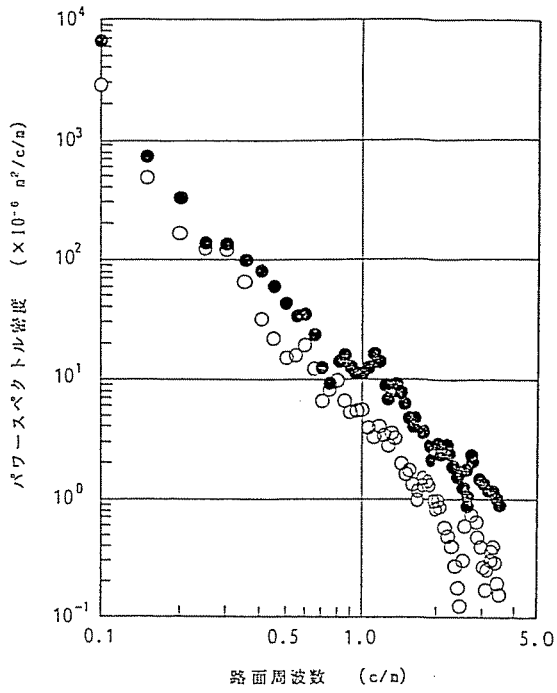


図4-20 1.5m離れた一対の凹凸のPSD
(牧草地b)

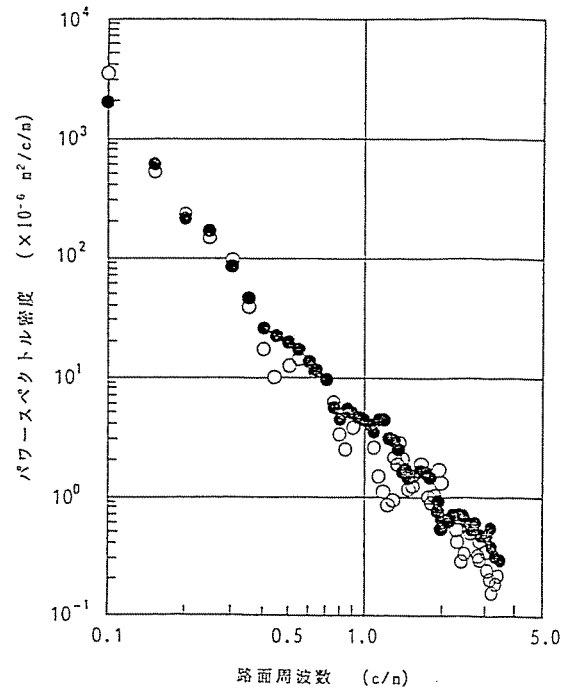


図4-21 1.5m離れた一対の凹凸のPSD
(牧草地c)

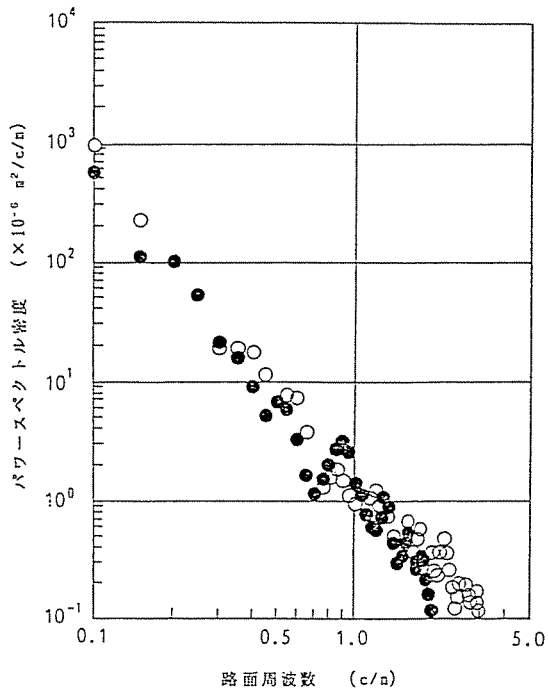


図4-22 1.5m離れた一対の凹凸のPSD
(牧草地d)

図4-20～4-22に示した例のように、トラクタの輪距に相当する1.5m離れた一対の凹凸のPSDはほぼ同様であることが認められた。従って、トラクタが牧草地を走行する場合は同じ程度の凹凸の上を走行していると考えることができる。1.5m離れた一対の凹凸の相関について検討するため、一対の凹凸を入出力の信号と考え凹凸間のコヒーレンシを求めた。第3章第4節1で述べたように、コヒーレンシの値が1であれば、一対の凹凸は全く同一と考え

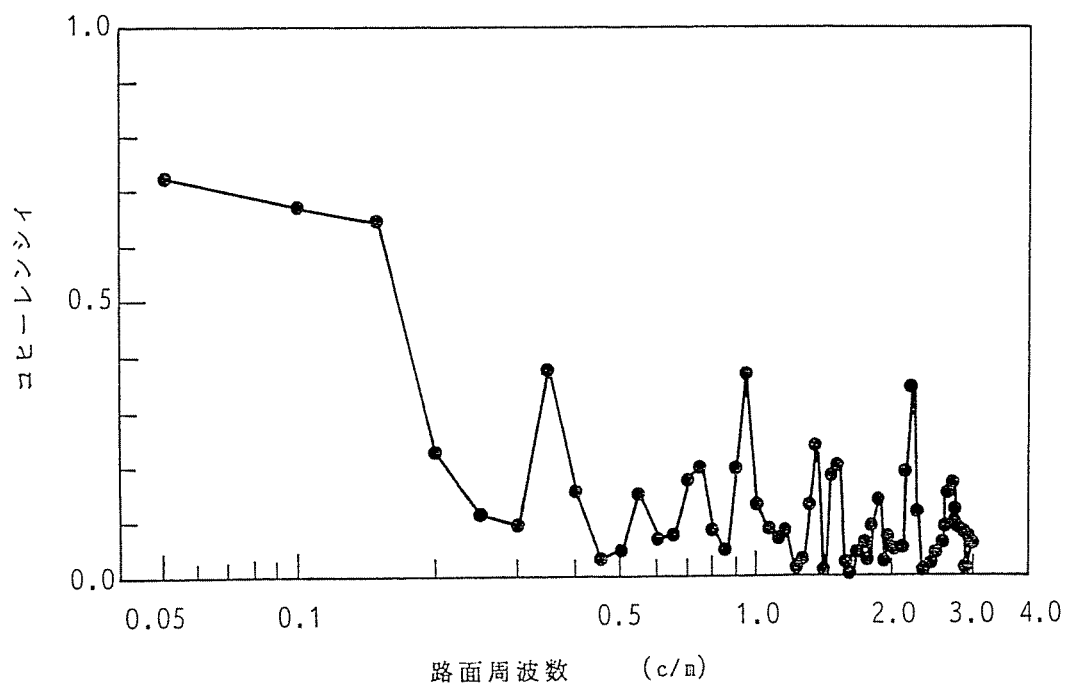


図 4 - 2 3 1.5m離れた一对の凹凸間のコヒーレンシ (牧草地b)

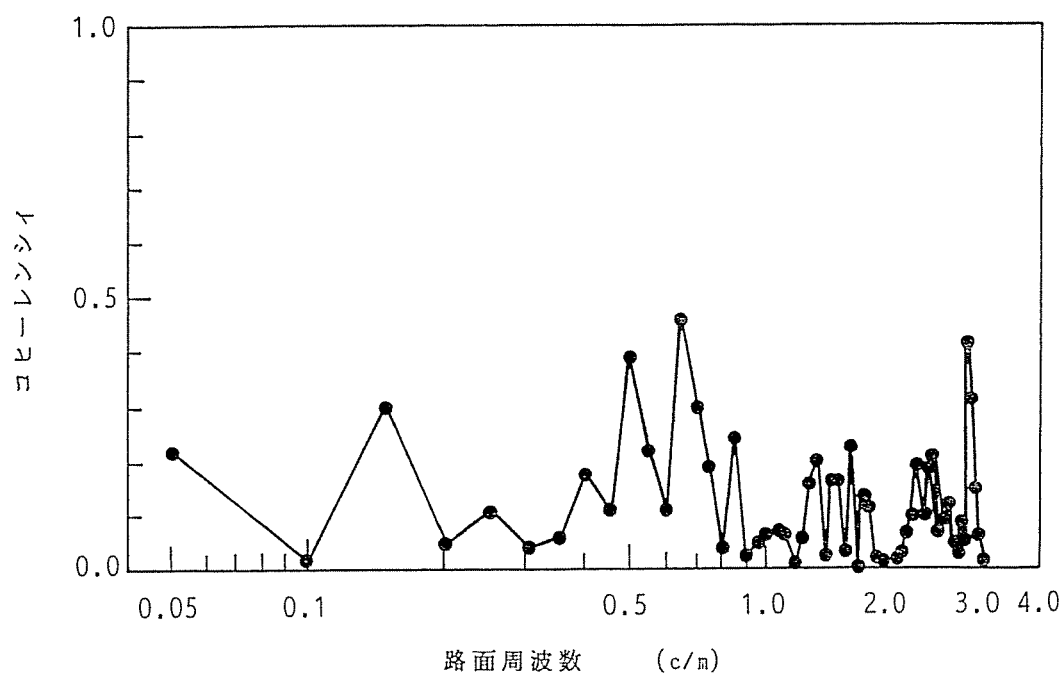


図 4 - 2 4 1.5m離れた一对の凹凸間のコヒーレンシ (牧草地c)

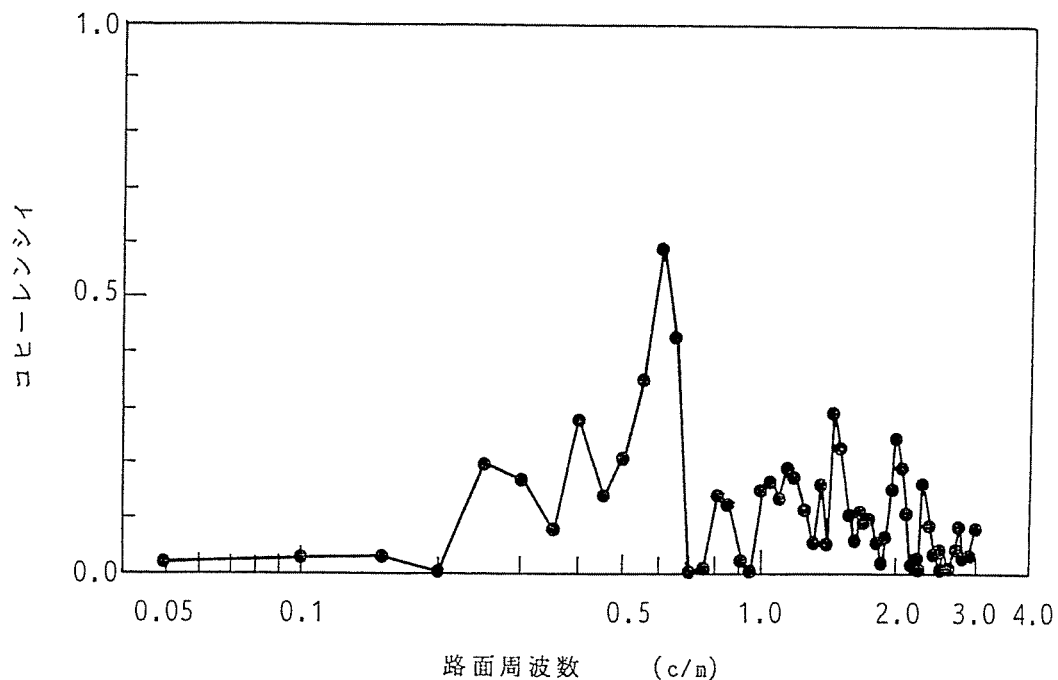


図 4 - 2 5 1.5m離れた一対の凹凸間のコヒーレンシ (牧草地d)

られ、全ての路面周波数について0であれば一対の凹凸の相関は全く無いと判断される。凹凸間のコヒーレンシ計算結果の例を図4-23～4-25に示した。

図4-23のように路面周波数0.2c/mまではコヒーレンシの値が0.6～0.8と大きい場合と、図4-25のように全ての路面周波数にわたってコヒーレンシの値が0付近である場合があった。トラクタの固有振動数が約3～4Hz程度であることを考えると、トラクタが2m/sの速度で走行した場合、固有振動数に相当する路面周波数は1.5～2c/m、3m/sで走行した場合1～1.3c/mとなる。一対の凹凸のコヒーレンシの値がトラクタの固有振動数付近では0に近かったことから、トラクタの左右車輪が通過する凹凸は互いに独立したものと考えてよい。

以上の結果より、トラクタの車輪は凹凸の程度が同じで、互いに独立した路面上を走行しているといえる。従って、トラクタの車輪に入力される凹凸は、後車輪に対しては前車輪の凹凸より軸距に相当する距離だけ遅れており、左右

車輪に対しては互いに異なった凹凸となる¹²⁵⁾。この様なほ場を走行するトラクタ車体は単に上下方向に振動するだけではなく、ピッチング及びローリングの回転振動も生じていると考えられる⁶⁾。

4. まとめ

本節は牧草地4区画を供試して凹凸を測定し、牧草地の凹凸の性質について検討した結果、以下に示す結論を得た。

(1) 供試牧草地の凹凸には周期性のある成分はみられず、不規則であった。

(2) 牧草地の凹凸のPSDを求め、両対数グラフに表すとPSDは右下がりとなり、顕著なピークはみられなかった。ピークの無いことは、凹凸測定結果の目視観察からも認められたように、供試ほ場の凹凸には周期性のある成分がほとんど含まれていないことを示し、PSDが右下がりであることは凹凸の波長が短くなるにしたがい振幅が小さくなることを示している。

(3) ISO/TC108での路面分級案に従って供試ほ場の凹凸のPSDを分類すると、目視観察により凹凸の比較的悪いと判断された牧草地はE～F、程度の良い牧草地はC～Dの範囲であった。分級案のDは管理の良い非舗装道路に相当し、分級案のEは管理の悪い、凹凸の多い非舗装道路に相当する。また、PSDをべき乗の関数で近似したときの $\mathbb{W}$ は2.3～2.4で、ISOで検討中の値2に比べ大きい値であった。

(4) 同一区画内で測定箇所異なる凹凸のPSDを比較したところ、供試ほ場の短辺方向、長辺方向及び対角線方向の凹凸のPSDはほとんど同じで、凹凸の程度及び周波数成分は測定箇所、測定方向によって変わらないものと考えられる。

(5) トラクタの輪距に相当する1.5m離れた一対の平行な凹凸のPSDを比較すると、PSDの値がほぼ同じであることから、同じ程度の凹凸であることが認め

られた。また、一対の凹凸間のコヒーレンシを比較すると、その傾向に多少のばらつきはあるものの、路面周波数が 0.2c/m 以上ではコヒーレンシの値が小さく、一対の凹凸間の相関の小さいことが認められた。従って、トラクタの左右車輪に入力される凹凸は互いに独立しており、トラクタがほ場を走行する場合、上下方向の振動だけではなくピッチ、ロール方向の回転振動も生じるものと考えられる。

第2節 水田及び普通畑の凹凸の性質

1. はじめに

第1節で牧草地の凹凸の性質について検討した結果、牧草地の凹凸には周期的な成分は含まれておらず、不規則であることが認められた。本節では既に発表されている水田及び普通畑の凹凸の性質について検討し、牧草地の凹凸の性質との比較検討を行った。

2. 水田及び普通畑の凹凸の性質

水田及び普通畑の凹凸の例として、水田の凹凸の性質について研究した並河¹⁹⁾の測定結果を図4-26に、普通畑のプラウ耕後の凹凸についてMatthews¹⁸⁾及び鳥巢ら²¹⁾が測定した結果を図4-27、28に示した。また、小麦畑・ライ麦畑で収穫後の凹凸の測定結果¹²⁶⁾を図4-29に示した。

図4-26～29に示した例はPSDの大きさ及び路面周波数の表示方法が異なっているため、これらの図から直接凹凸の程度の比較はできないが、何れの結果にも卓越したピークは認められない。鳥巢が測定したプラウ耕後の凹凸は 0.4c/m 以上の路面周波数では、路面周波数の増加に対してPSDの減少の割合が他の結果に比べて小さく、 0.4c/m 以上の凹凸の成分が他のほ場に比べて大きいことを意味しているが、これはれき条による凹凸の影響と考えられる。プラウ

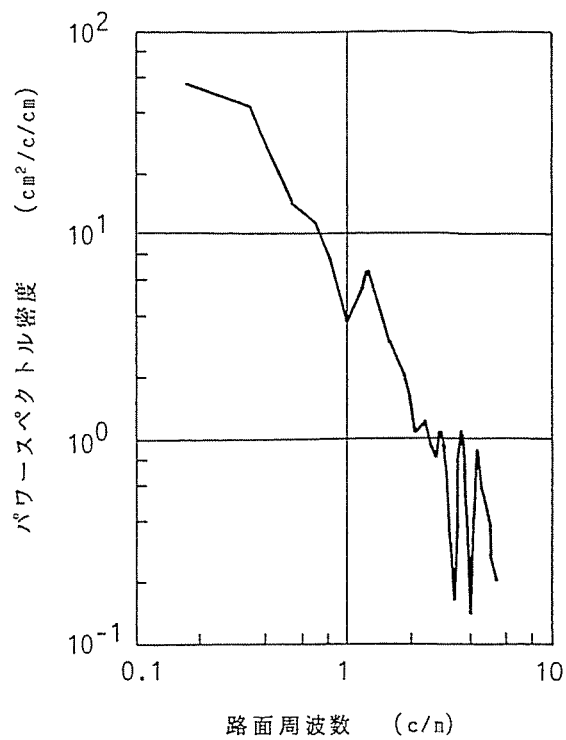


図4-26 水田凹凸のPSD¹⁹⁾

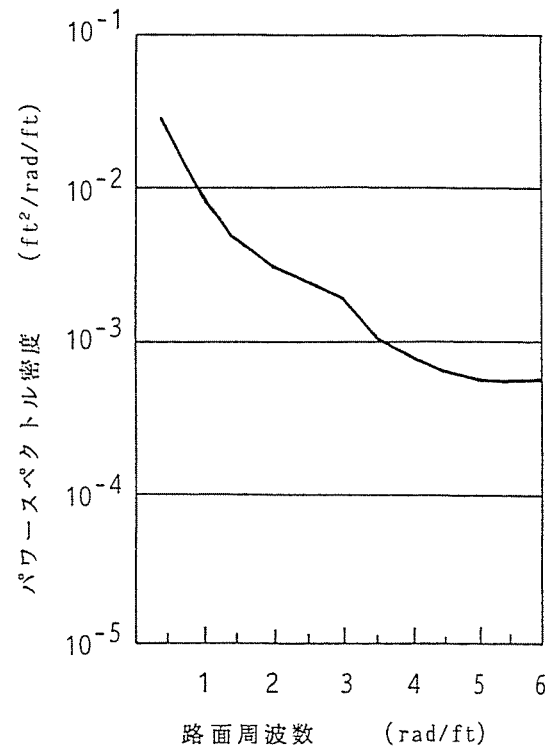


図4-27 プラウ耕後の凹凸のPSD¹⁸⁾

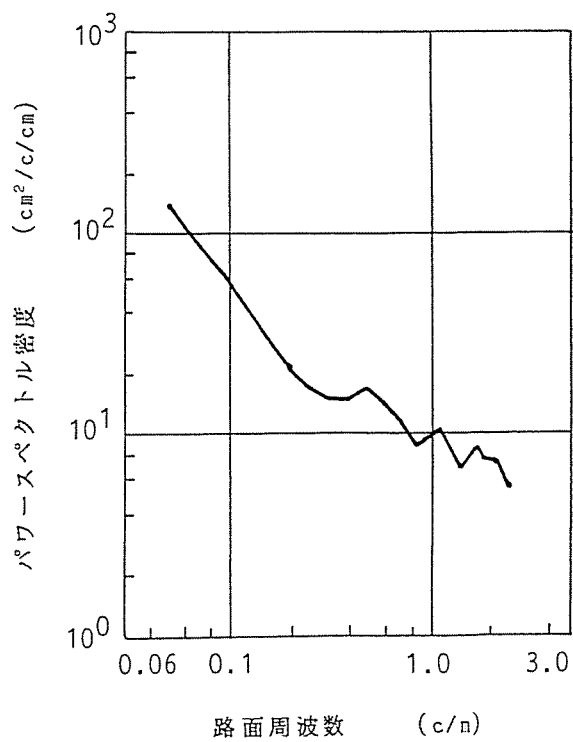


図4-28 プラウ耕後の凹凸のPSD²¹⁾

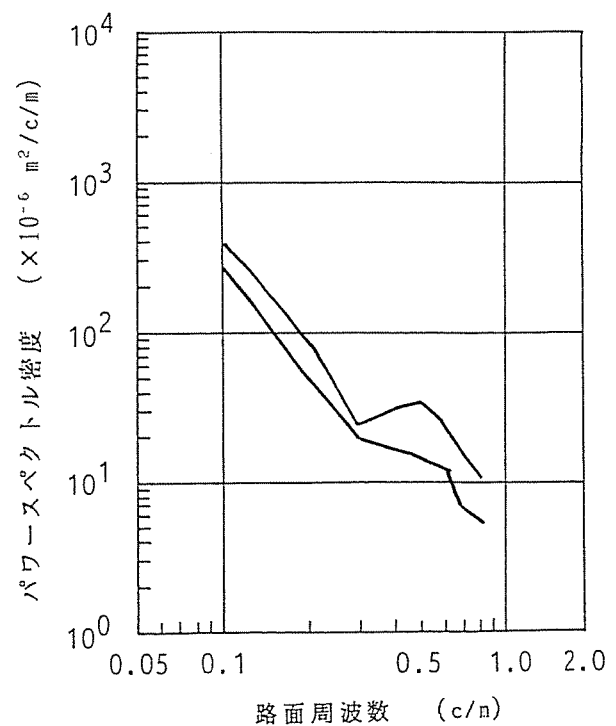


図4-29 小麦畑・ライ麦畑の凹凸のPSD¹²⁶⁾

耕後及び収穫後の小麦畑・ライ麦畑での凹凸の性質を比較すると、後者のPSDの値はプラウ耕後の凹凸のPSDの値に比べ小さいことが認められる。

各ほ場面凹凸の性質について比較検討するため第2章の式(2-8)の W 及び $P(f_0)$ の値を求め表4-3に示した。

表 4 - 3 水田及び普通畑のPSDの係数

測定条件	W	$P(f_0)$
		$[\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{c}/\text{m}]$
水田田面 (並河 ¹⁹⁾)	1.82	130
プラウ耕後 (Matthews ¹⁸⁾)	1.63	1020
プラウ耕後 (鳥巢ら ²¹⁾)	0.70	3400
小麦畑収穫後 (寺尾ら ¹²⁶⁾)	1.41	63
ライ麦畑収穫後 (寺尾ら ¹²⁶⁾)	1.32	95

$f_0 = 1/2\pi \quad [\text{c}/\text{m}]$

プラウ耕後の凹凸を比較すると、Matthewsの測定結果に比べ鳥巢らの測定結果の W の値は小さな値となっているが、これはれき条によるためか、あるいは鳥巢らの測定方法が「水系法」のため路面周波数の低い成分、即ち長い波長の成分が減衰されているためのいずれかによると考えられる。第2節に示した牧草地と水田・普通畑の凹凸のPSDを比較すると後者は前者に比べ W の値が小さく、短い波長の成分が前者より多く存在していることを意味している。ここに示したのは彼らの研究結果の一部であるが、他の測定結果についても水田及び普通畑の凹凸には顕著な周期的な成分は認められず、ほ場面凹凸は周期性の無い不規則な凹凸であることが判明した。

凹凸の程度について表4-3の $P(f_0)$ の値を比較すると、水田と収穫後の普通畑の凹凸はほとんど同じ程度であるが、プラウ耕後の凹凸の程度が非常に悪いことがわかる。これは、 W の値が小さいこと、即ち短い波長の凹凸の成分が大きいことから、前述したようにれき条によって生じた凹凸の影響であると考えられる。

ところで、本研究では農業機械の運用に支障となる路面周波数、即ち 10c/m 以下の中規模の凹凸を対象としているが、Podmore⁷⁰⁾は耕うん後のほ場面について小規模な凹凸のPSDを求めている。Podmoreが求めた路面周波数の範囲は $0.01\sim 2.00\text{c/mm}$ ($10\sim 2000\text{c/m}$)で、この範囲についての W は $1.4\sim 2.6$ 、平均すると 2.1 であった。これは路面周波数 $0.05\sim 3.0\text{c/m}$ の区間について求めた牧草地及び水田・普通畑のほ場面凹凸の W ($1.3\sim 2.4$)とほぼ同じ値である。このことは、凹凸が不規則で路面周波数が高い成分ほど小さくなるという性質は広い範囲の路面周波数にわたってみられ、ほ場の種類にかかわらずほ場面凹凸に共通した性質であることが認められる。

3. まとめ

水田及び普通畑の凹凸について既報の研究結果を整理して検討した結果、以下に示す結論を得た。

(1) 水田及び普通畑の凹凸はいずれも周期性の無い不規則な凹凸であることが認められた。

(2) 牧草地及び水田・普通畑の凹凸を比較すると、牧草地ではプラウ耕後の普通畑と水田田面の凹凸の間であり、普通畑の W は鳥巢ら²¹⁾の測定したプラウ耕後の値が 1.0 以下であった他は何れのほ場の凹凸も $1.3\sim 1.9$ であった。

(3) Podmore⁷⁰⁾が耕うん後の普通畑の凹凸の $0.01\sim 2.0\text{c/mm}$ ($10\sim 2000\text{c/m}$)の路面周波数の範囲について求めたPSDの W は $1.4\sim 2.6$ の範囲で平均すると 2.1

で、凹凸の周波数成分は、普通畑のプラウ耕後（鳥巢²¹⁾）以外のほ場の値とほとんど同じであった。

（４）以上の結果から、ほ場の種類や測定対象となる路面周波数の範囲にかかわらず、ほ場の凹凸は周期性がなく不規則で、路面周波数が高くなるほど凹凸成分の占める割合、即ち凹凸の振幅は小さくなることが認められた。

第３節 道路及び各種路面の凹凸の性質

１．はじめに

道路は車両の通過の目的で使用され、車両の通過により凹凸が生じている²⁸⁾。従って、車両の通過により凹凸が生じるという点では道路と牧草地等ほ場面凹凸とは共通性がある。それら路面凹凸を測定解析し、牧草地の凹凸の性質と道路等の他の路面凹凸の性質とを比較した。また、ISO規格の座席振動測定試験用路面¹²⁷⁾の凹凸の性質も併せて検討し、牧草地の凹凸と各種路面凹凸の性質を比較検討することにより、牧草地の凹凸の特徴を明らかにした。

２．供試路面

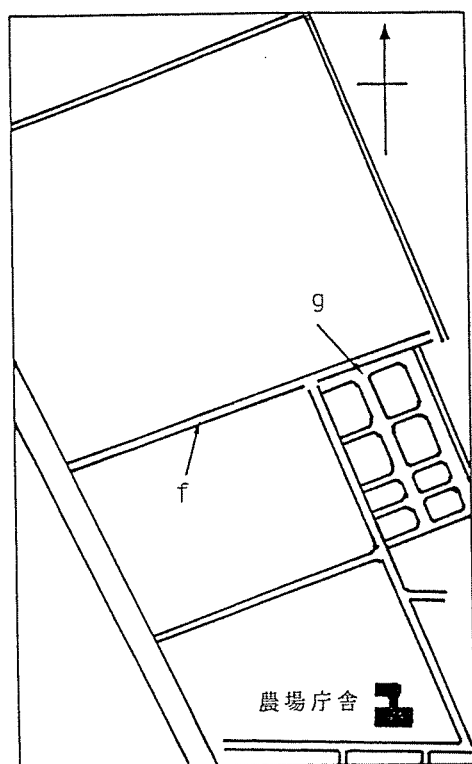
供試路面として表4-4、図4-30に示した不整地1種類、道路4種類、その他の路面2種類、合計7種類の路面を選定し、凹凸の測定を行った。

不整地eは北海道大学農学部農業機械特別実験室西側に位置し、野草地の状態である。道路fは北海道大学農学部附属農場内にある非舗装道路で、道路gは表面が雑草で覆われた畦道である。道路hは良く締め固められ、砂利が埋没した状態の非舗装道路で、道路iは平坦なアスファルト道路である。また、路面j、kは屋内実験室内にあり、路面jは大型の土壌槽（埴土）、路面kは平坦で非常に滑らかなコンクリート路面である。測定した路面凹凸間の間隔は第１節での測

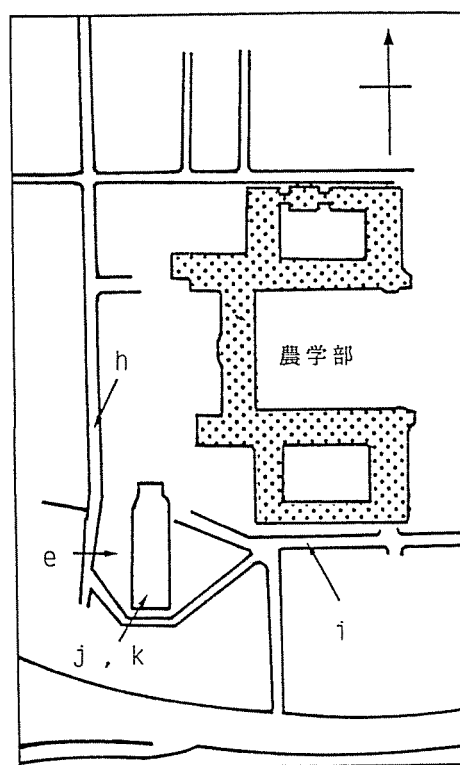
定と同様に1.5mとした。 供試路面のうち道路f及び道路hの概要を図4-31,32に示した。

表 4 - 4 供試路面の概要

測定箇所	測定点数	測定距離
		[m]
不整地 e	4	25
道路 f	2	50
道路 g	2	50
道路 h	2	50
道路 i	2	50
路面 j	2	37.5
路面 k	2	35



(1) 北海道大学農学部附属農場, 札幌市, 1982



(2) 北海道大学農学部, 札幌市, 1982

図 4 - 3 0 供試路面の位置

図 4 - 3 1 道路 f (1982年8月測定)

図 4 - 3 2 道路 h (1982年8月測定)

路面凹凸の測定はほ場面傾斜角度測定装置を供試し、測定システムBにより0.05m毎の標高を求めた。なお、不整地eのみはレベルと標尺により0.05m毎に水準測量を行い標高を測定した。

以上の供試路面の他にISOの農用トラクタ及び農業機械の座席振動測定試験用の人工路面Smoother及びRougher¹²⁷⁾（以下ISO試験路面という）の性質についても併せて検討した。

3. 結果及び考察

凹凸測定結果の例として不整地e（図4-33）、道路f（図4-34）及びISOの試験路面Smoother（図4-35）の凹凸を示した。

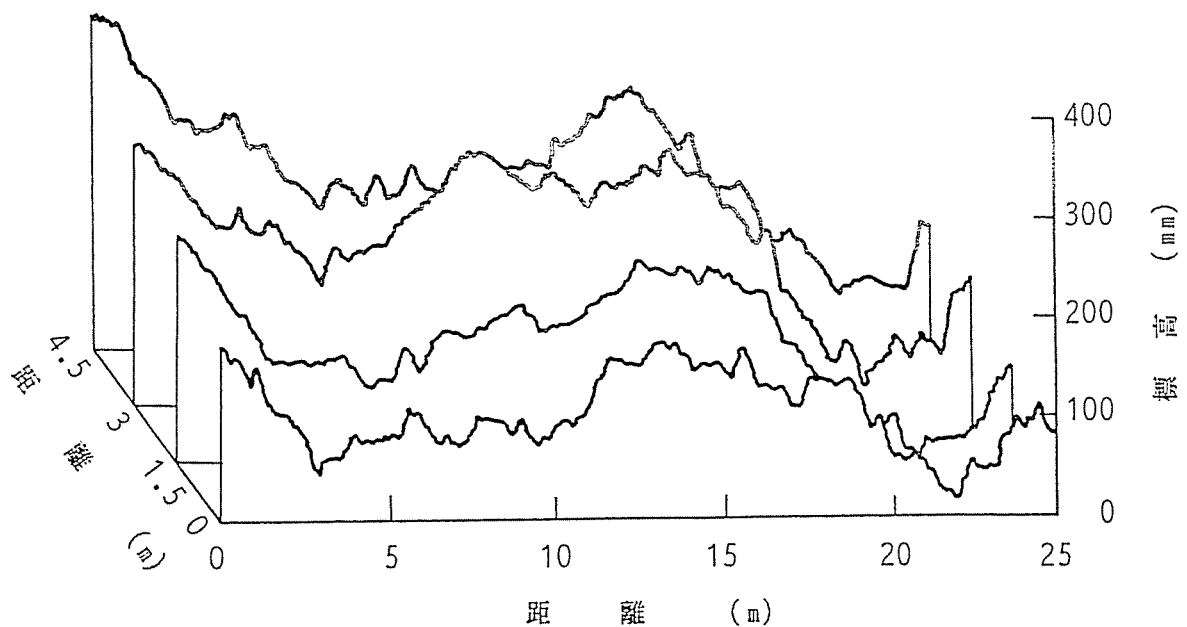


図 4 - 3 3 不整地eの凹凸測定結果

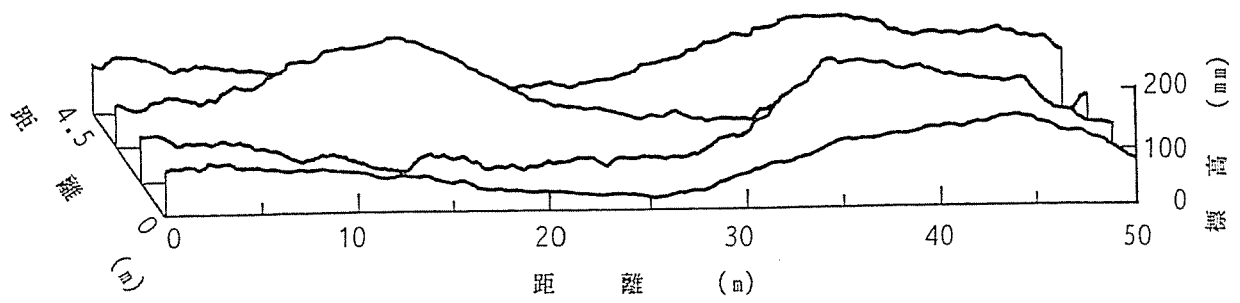


図 4 - 3 4 道路fの凹凸測定結果

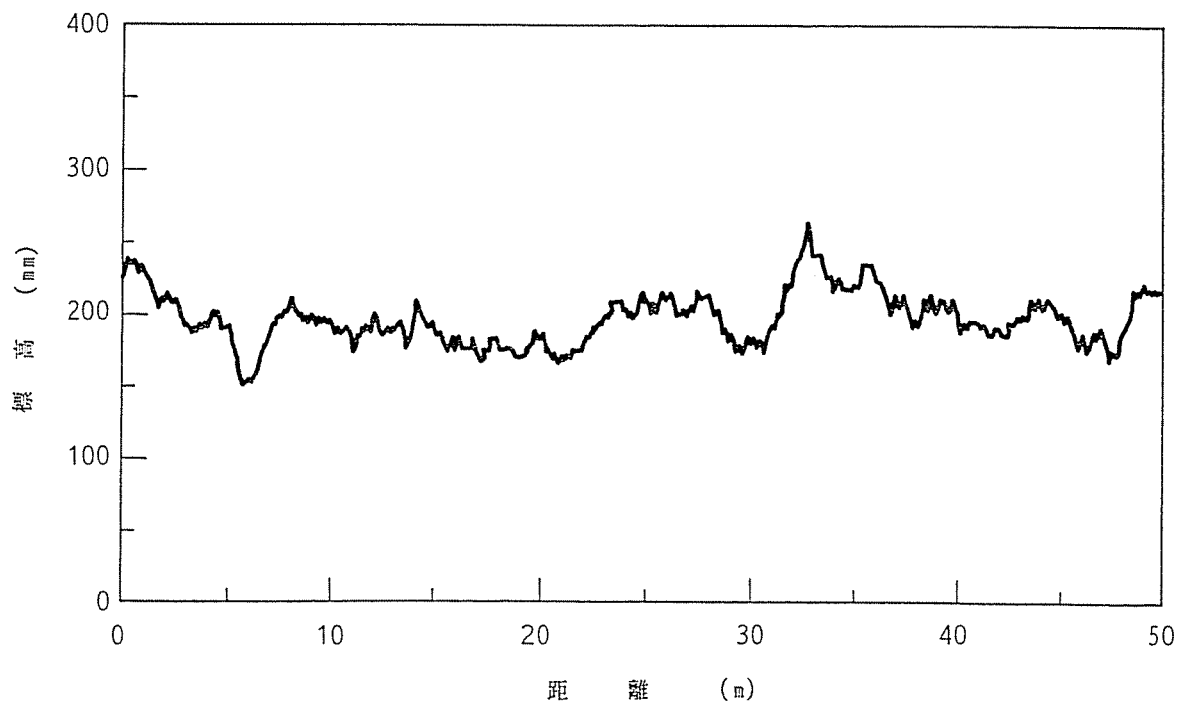


図 4 - 3 5 ISO5008試験路面の凹凸 (Smoother)

不整地eは、牧草地に比べ短い波長の凹凸の出現頻度は高いが、目視観察では総じて牧草地と同様な性質の凹凸といえる。道路fは十分管理されていない農道で雨が降ると水溜りが点在する状態であった。

他の路面については、道路gは畔道であるため車両の通過は頻繁ではなく比較的なめらかと観察された。道路hは良く締め固められており砂利が沈下し、表面に砂利の一部が露出している。道路iはアスファルト舗装道路で、舗装後1年程度で交通量が少ないため完成時の状態を維持していた。また、路面jは室内大型土壌槽で、目視観察によれば道路fと道路hの中間の凹凸の程度とみられ、jの凹凸は土壌調整後、トラクタの通過によって生じたものである。路面kはトラクタけん引試験に使用しているコンクリート路面で、表面をこて仕上げたもので非常になめらかで平坦な路面である。ISOの試験路面は英国のトラクタ用座席振動測定試験用路面¹²⁰⁾が基になっているが、この路面はMatthews¹⁸⁾がブラウ耕後のほ場面凹凸及び比較的凹凸の状態の良いほ場の凹凸に基づいて製作した人工路面により決定されたものである。供試路面及びISO試験路面のPSDを求め図4-36～4-39に示した。

供試路面e,g,jはそれぞれ不整地、道路及び室内土壌槽の路面で、造成方法、使用状況、管理方法が異なっており、PSDの値に大小の差、即ち凹凸の程度に差はあるものの、いずれの路面についてもPSDを両対数グラフに表すと右下がりでありで顕著なピークはみられなかった。また、他の供試路面についても同様の結果であった¹²⁸⁾。供試路面は周期的な成分のない不規則な凹凸で、供試路面の凹凸は路面の造成方法、使用状態及び管理状態が異なっても凹凸の周波数成分は同様であることが認められた。

ISOの試験路面についてもSmoother及びRougherの路面ともそのPSDは両対数グラフで表すと右下がりとなり、供試路面と同様に不規則な凹凸を選定していることが認められる。ISOの路面分級案⁹⁷⁾により各路面のPSDを分類すると、

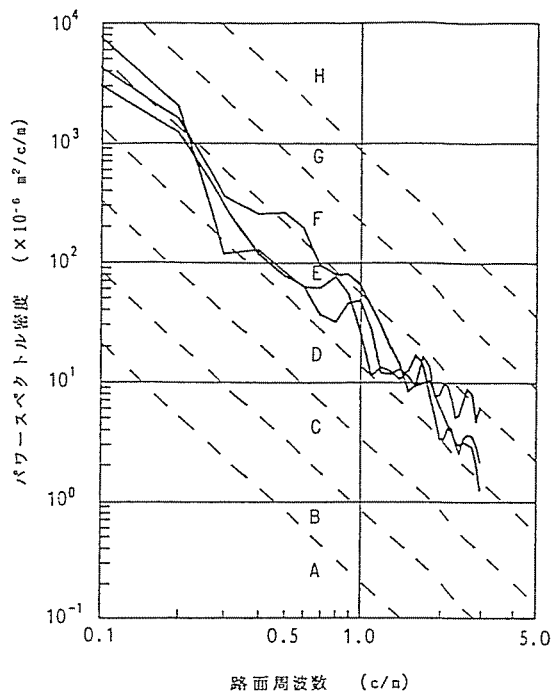


図4-36 不整地eの凹凸のPSD

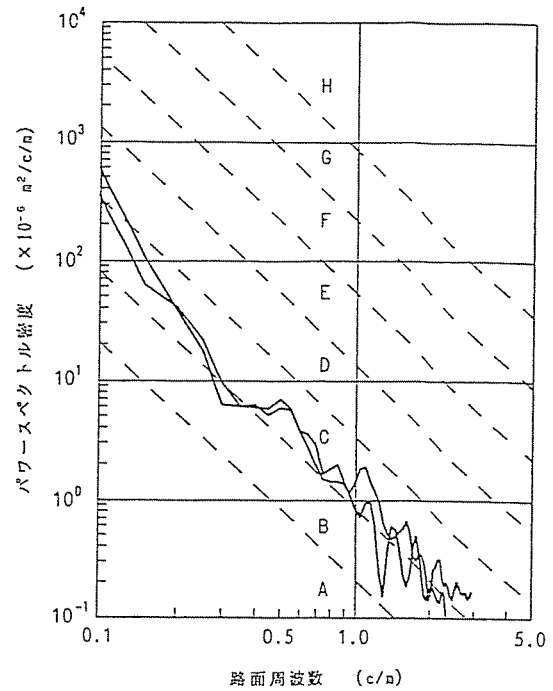


図4-37 道路gの凹凸のPSD

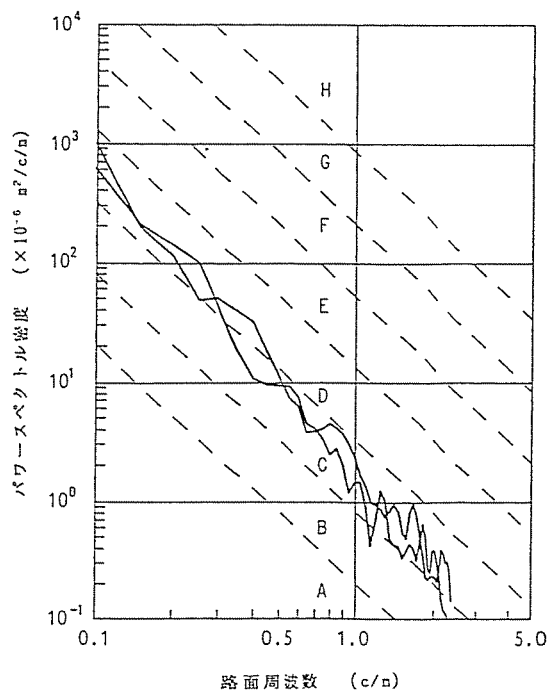


図4-38 路面jの凹凸のPSD

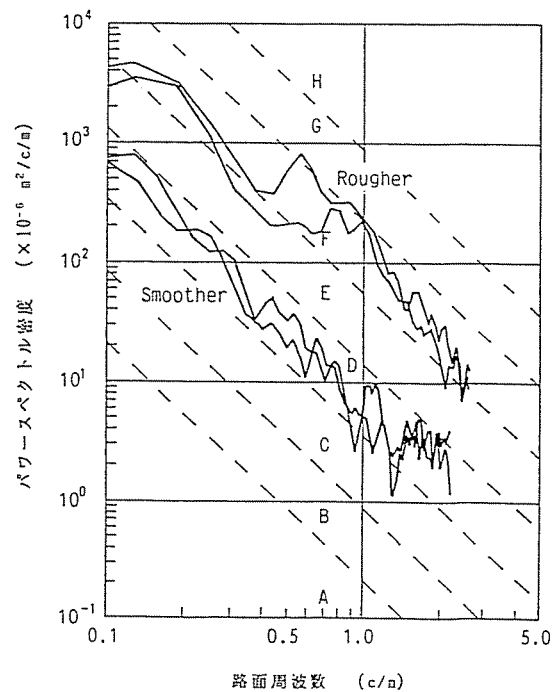


図4-39 ISO5008試験路面凹凸のPSD

ISOの試験路面のRougherがF，不整地eがE，ISO試験路面のSmoother及び道路fがD，道路g及び路面jがC，道路hがBからC，道路iがAからB，路面kがAの範囲であった。ISO分級案のA，Bは舗装道路のような非常に平坦で凹凸の少ない路面，C，Dは非舗装道路，Fは非常に凹凸の程度の悪い路面に相当すると判定された。

各種路面凹凸の周波数成分について検討するために，各凹凸毎のPSDの近似式(2-8)の W 及び $P(f_0)$ を求め表4-5に示した。

表 4 - 5 各種路面凹凸PSDの近似式の係数

路面の種類	W	$P(f_0)$
		$[\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{c}/\text{m}]$
不整地 e	2.30	1744
道路 f	2.40	256
道路 g	2.31	72
道路 h	2.51	50
道路 i	2.65	11
路面 j	2.54	205
路面 k	2.07	3
ISO Rougher	1.88	2820
ISO Smoother	1.82	204

$$f_0 = 1/2\pi \quad [\text{c}/\text{m}]$$

路面の違いによって W の値に大小の差が認められるが，凹凸の程度，即ち $P(f_0)$ の値との間に相関はみられない。ISOの試験路面の W の値は表4-5に示した

路面のなかではトラクタのけん引試験に使用されているコンクリート路面kの値と同様な値である。従って、供試路面によって多少周波数成分は異なっているものの、路面周波数の高くなる程凹凸の成分が小さくなるという性質はどの路面についても共通に認められる性質である¹²⁸⁾。

滑走路・月面等の凹凸についてPSD近似式を求めた結果¹²⁹⁾があるので表4-6に示した。

表 4 - 6 路面凹凸 P S D の近似式の係数¹²⁹⁾

番号	供試路面	W	C' [m ² /c/m]	出典
1	滑走路	3.8	4.3×10^{-11}	NASA-TND-510
2	滑走路3	2.0	7.0×10^{-8}	NACA-TN-4303
3	滑走路1	2.6	1.9×10^{-8}	NACA-TN-4303
4	滑走路3	2.1	2.7×10^{-7}	NACA-TN-3305
5	平坦な高速道路	2.1	4.8×10^{-7}	-----
6	滑走路	1.9	6.4×10^{-7}	NASA-TND-510
7	滑走路12	2.0	8.2×10^{-7}	NACA-TN-3305
8	滑走路4	4.1	2.1×10^{-8}	AGARD-REP 119
9	平坦な滑走路	2.1	2.4×10^{-6}	NACA-TN-3484
10	高速道路	2.1	4.4×10^{-6}	-----
11	粗い滑走路	2.1	8.1×10^{-6}	NACA-TN-3484
12	月面	2.0	3.6×10^{-4}	-----
13	Aberdeen	2.0	4.8×10^{-4}	-----

表4-6は主に滑走路の凹凸についての結果であるが、番号1, 8の結果を除くと、月面の凹凸を含め、何れの路面も $\mathbb{W}$ の値は約2となっており、路面の種類による周波数成分の差異はほとんど認められない。表4-5,6を比較すると、造成方法、使用状況及び管理状態によって供試路面の凹凸の程度は異なるものの、凹凸は不規則で周波数成分は同様であることが認められた。

第4節 牧草地の凹凸と各種路面凹凸の比較

牧草地及び各種路面凹凸のPSDの代表的な例を図4-40に示した。ISO試験路面RougherのPSDは0.2c/m付近の値がほとんど一定である他は、牧草地及び各種路面凹凸のPSDはともに右下がりで顕著なピークが認められない。このことは、既に述べたように、牧草地及びその他のほ場を含む各種路面の凹凸は、PSDの値に大小の差はあるものの主な周波数成分が同様であることを意味している。ISOの試験路面は人工路面で、0.1c/m付近の凹凸成分が小さいという点で他の路面とやや異なっている。しかし、ISOの試験路面もほ場面及び道路と同様に不規則な凹凸を選定している。

目視により牧草地の凹凸と他の路面凹凸の周波数成分を比較するため、牧草地c及び道路iの凹凸を図4-41,42に示した。この2種類の凹凸は造成方法、利用状況、管理状態は当然のことながら全く異なっている。しかし、図4-41, 42を比較すると、道路iには距離10mから20mの間に波長約3mの凹凸がみられるものの、長い波長で振幅の大きな凹凸に、短い波長で振幅の小さな凹凸が重なっており、牧草地cと道路iの凹凸には同じ特徴がみられる。縦軸の値、即ち凹凸の標高をみなければ、凹凸だけからでは図41,42のどちらが舗装道路の凹凸であるかを判断することはできない。

さらに、表4-2,4-3,4-5, 4-6を比較すると、鳥巣ら²¹⁾の測定したブラウ耕後の結果を除くいずれの凹凸も $\mathbb{W}$ の値が1.3~2.7の範囲である。牧草地の $\mathbb{W}$ の値

は2.3～2.4で道路の W (2.0～2.7) とほとんど同じ値で、不整地及び滑走路等の各種路面凹凸と同様な周波数成分である。また、表4-3に示されている普通畑の W は1.3～1.9と牧草地に比べ小さな値であった。Podmore⁷⁰⁾の研究結果では路面周波数の高い範囲の凹凸についても W は2.0前後で牧草地・不整地・道路等の値と同じ範囲である。表4-6によれば滑走路の凹凸や月面の凹凸も牧草地の凹凸と同じ性質であることが認められる。

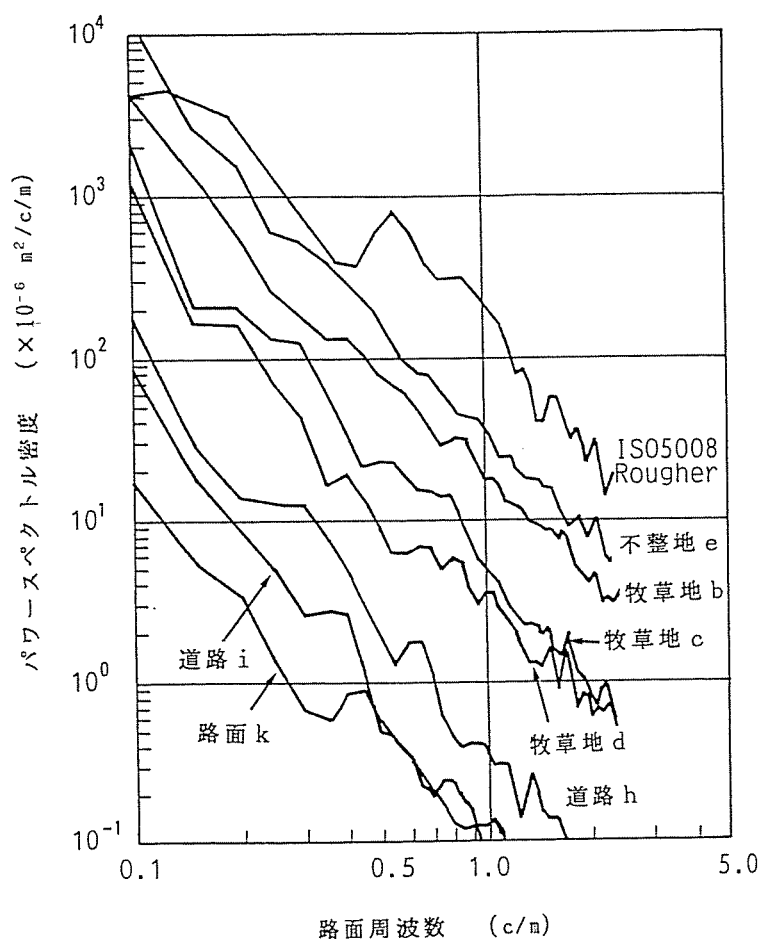


図 4 - 4 0 各種路面凹凸の PSD

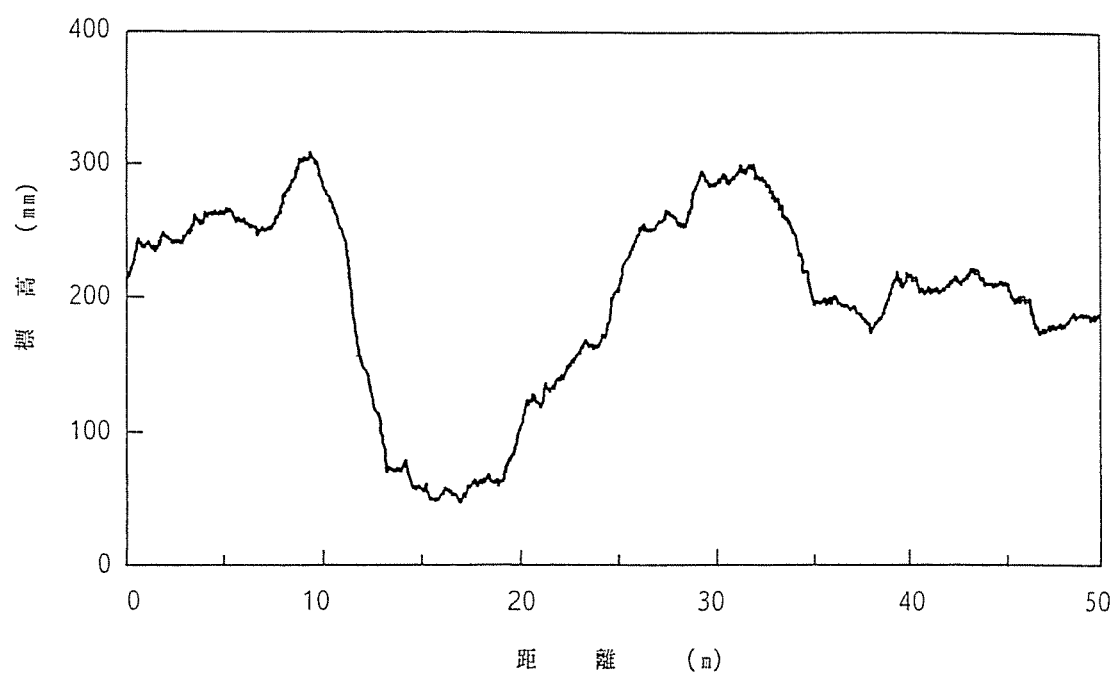


図 4 - 4 1 牧草地cの凹凸

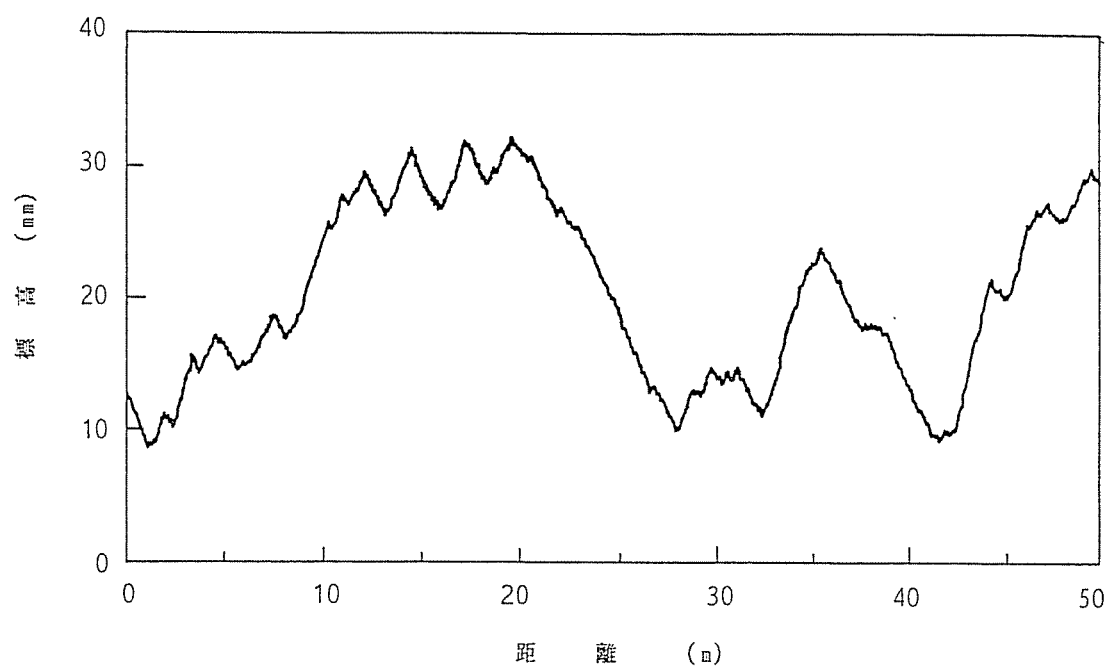


図 4 - 4 2 道路iの凹凸

以上の結果より、牧草地、水田、普通畑、道路、不整地及びその他の路面の凹凸の性質についてまとめると、凹凸の生成原因、ほ場及び路面の利用状態・管理状態等の条件が異なっても、各種路面の凹凸は周期性の無い不規則な性質である。凹凸の周波数成分をPSDにより表すと、路面周波数とPSDの関係は式(2-8)に示したように路面周波数のべき乗で近似することができる。このことは、Podmoreの結果⁷⁰⁾にもみられるように、ほ場面凹凸が0.1~2000c/mの広い周波数範囲にわたり、一定の関係にしたがって存在していることを示している。牧草地を含む各種路面の凹凸を評価する場合、ある範囲の路面周波数の凹凸について測定し、その凹凸のPSDより求めた W 及び $P(f_0)$ により凹凸の評価が可能である。即ち、牧草地の凹凸を測定する場合、本章で採用した0.05mより長い測定間隔で凹凸を測定することが可能なことを示唆している。この測定間隔と凹凸の性質については次章で更に検討する。

第5節 要約

本章は牧草地、水田、普通畑、道路、不整地及びその他の路面凹凸を解析し、牧草地の凹凸と他の凹凸とを比較検討することにより、牧草地の凹凸の性質を検討した。以下に主な結論を示す。

(1) 牧草地の凹凸を測定解析した結果、牧草地の凹凸に周期性のある成分は認められず不規則であった。

(2) 牧草地の凹凸のPSDを求め、両対数グラフに表すとPSDは右下がりとなり、路面周波数が高くなるに従い、即ち波長が短くなるに従い凹凸の振幅が小さくなっていることを示している。

(3) ISO/TC108の路面分級案にしたがって供試ほ場の凹凸のPSDを分類すると、目視観察により凹凸の比較的悪いと判断された牧草地はE~F、程度の良い牧草地はC~Dの範囲であった。ISO分級案のDは管理の良い非舗装道路に相当

し、ISO分級案のEは管理の悪い、凹凸の多い非舗装道路に相当する。また、PSDをべき乗の関数で近似したときの W は2.3~2.4となり、ISOで検討中の値2に比べ大きい値であった。

(4) 測定した区画内では凹凸の程度は測定の方向、測定箇所の如何にかかわらずほとんど同じであった。また、トラクタの左右車輪が通過する一対の凹凸の性質を検討したところ、PSDの値がほぼ同じであることから、同じ程度の凹凸であることが認められた。一対の凹凸間のコヒーレンシを比較すると、その傾向に多少のばらつきはあるものの、路面周波数が0.2c/m以上ではコヒーレンシの値は小さく、一対の凹凸間の相関の小さいことが認められた。従って、トラクタの左右車輪に入力される凹凸は互いに独立しており、トラクタがほ場を走行する場合、上下方向の振動だけではなくピッチ、ロール方向の回転振動も生じる。

(5) 水田及び普通畑の凹凸について既報の結果を基に検討したところ、牧草地の凹凸と同様周期性の無い不規則な凹凸であった。牧草地の凹凸と水田・普通畑の凹凸を比較すると、牧草地の凹凸はプラウ耕後の普通畑の凹凸と水田田面の凹凸の間であり、凹凸PSDの近似式の W は1.3~1.9であった。

(6) 道路、不整地及び各種路面の凹凸を測定解析し、さらに文献から滑走路及び月面の凹凸についての研究成果とも対比して検討したところ、月面の凹凸を含め、何れの路面も W の値は約2となっていて、路面の種類による周波数成分の差異はほとんど認められなかった。

(7) 凹凸の生成原因、ほ場及び路面の利用状態・管理状態等の様々な条件が異なっても、各種路面の凹凸は周期性の無い不規則な性質であり、凹凸の周波数成分をPSDにより表すと、路面周波数とPSDの関係は式(2-8)に示したように路面周波数のべき乗で近似することができる。このことは、ほ場面凹凸が0.1~2000c/mの広い周波数範囲にわたり、一定の関係にしたがって存在してい

ることを示している。牧草地を含む各種路面の凹凸を評価する場合、ある範囲の路面周波数の凹凸について測定し、その凹凸のPSDより求めた W 及び $P(f_a)$ により凹凸の評価が可能である。即ち、牧草地の凹凸を測定する場合、本章で採用した0.05mより長い測定間隔で凹凸を測定することが可能なことを示唆している。

第5章 牧草地の凹凸の評価

第1節 はじめに

牧草地の凹凸を測定解析し、水田・普通畑、道路及びその他の路面凹凸と比較検討した結果、牧草地の凹凸を含む各種路面凹凸は不規則であることが認められた。また、凹凸のPSDを求め、両対数グラフに表すと右下がりであり、べき乗の関数で近似可能であった。このことは、ほ場面凹凸が広い周波数範囲にわたり、一定の係数にしたがって存在していることを示している。従って、牧草地を含む各種路面の凹凸を評価する場合、ある範囲の路面周波数の凹凸について測定し、そのPSDより求めた W 及び $P(f_0)$ により凹凸の評価が可能である。即ち、牧草地の凹凸を測定する場合、第4章で採用した測定間隔（0.05m）より長い測定間隔で凹凸を測定可能なことを示唆している。

ところで、試作したほ場面傾斜角度測定装置により凹凸を測定した場合、波長30cmの凹凸まで測定可能である。しかし、試作装置の傾斜角度変換器が精密な構造を有するバーチカルジャイロスコープであるためその扱いに注意を要し、測定の際には過度の振動・衝撃を加えないようにしなければならない。そのため、草地造成の現場での凹凸測定には適さない。

以上の点を考慮し、本章では草地造成あるいはほ場整備の現場にて採用可能な牧草地凹凸の測定方法について検討した。次いで、トラクタの走行の難易による牧草地凹凸の評価方法について検討した。牧草地の凹凸を評価する場合、トラクタを使用した各種の管理作業の難易が牧草地の良否を判断する大きな要因であり、トラクタ車体の振動が大きい場合には作業能率及び作業精度の低下を招くと考え、走行の難易を振動加速度の大小で判断し、牧草地の凹凸とトラクタ車体の振動加速度の関係を解析し、凹凸の評価を行った。

第2節 水準測量の簡略化

水準測量は第3章で述べたように測定に時間を要し、測定精度を高めるには熟練を要するという点は短所であるが、水準測量に必要なレベル及び標尺については入手が容易であるという利点がある。測定後のデータ処理についてはパーソナルコンピュータを利用すれば短時間で処理できるので、標高の測定間隔を長くし、測定点数を少なくして路面凹凸の性質を表すことが可能であれば、水準測量の実用性は高まるものと考えられる。

測定間隔を大きくすることは、短い波長の凹凸の測定が正確にできないことになる。そこで、第4章の供試ほ場の一つである牧草地cの凹凸を例として測定間隔と測定精度との関係及びトラクタ車体の振動源としての凹凸の測定について検討した。

傾斜角度法により0.05m間隔で測定した牧草地cの凹凸を図5-1に、凹凸のPSDを図5-2に示した。

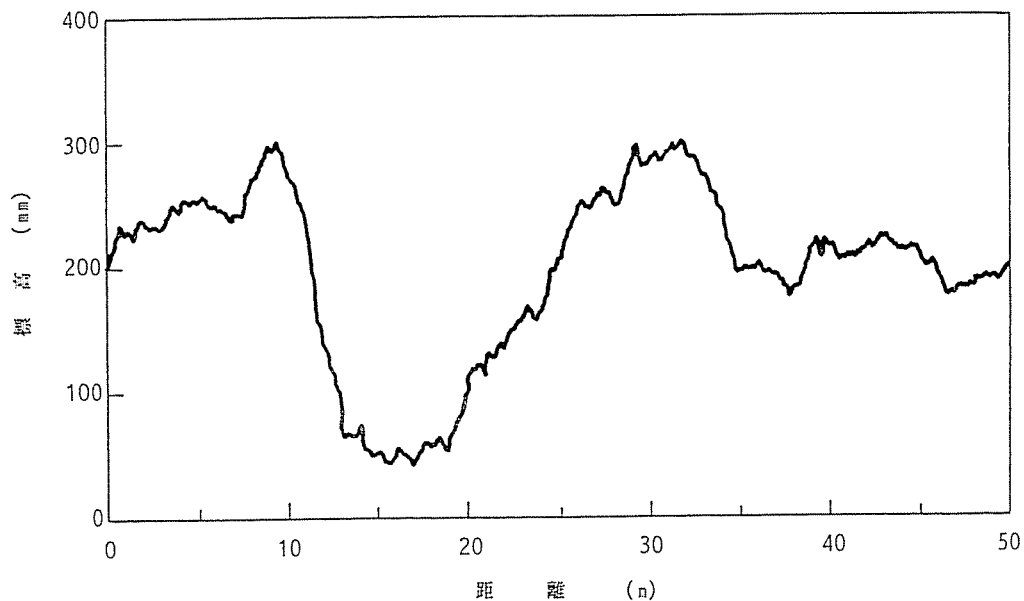


図5-1 牧草地cの凹凸（測定間隔0.05m）

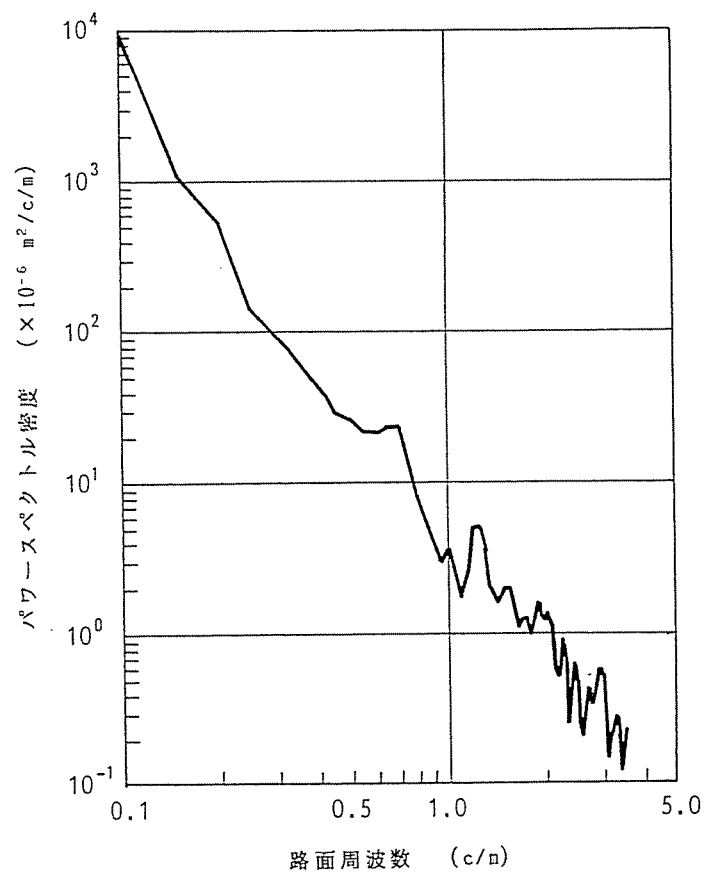


図 5 - 2 牧草地 c の凹凸の PSD (測定間隔 0.05m)

図 5-2 に顕著なピークがみられないことから、凹凸は不規則で周期的な成分の無いことが認められる。図 5-1 の凹凸は測定間隔を 0.05m として得られた結果であるが、測定間隔を 0.1, 0.2, 0.25, 0.5, 1.0m とした場合に得られる凹凸を図 5-1 より求めた。測定間隔を 0.25, 0.5, 1.0m とした場合の凹凸を図 5-3 に示した。

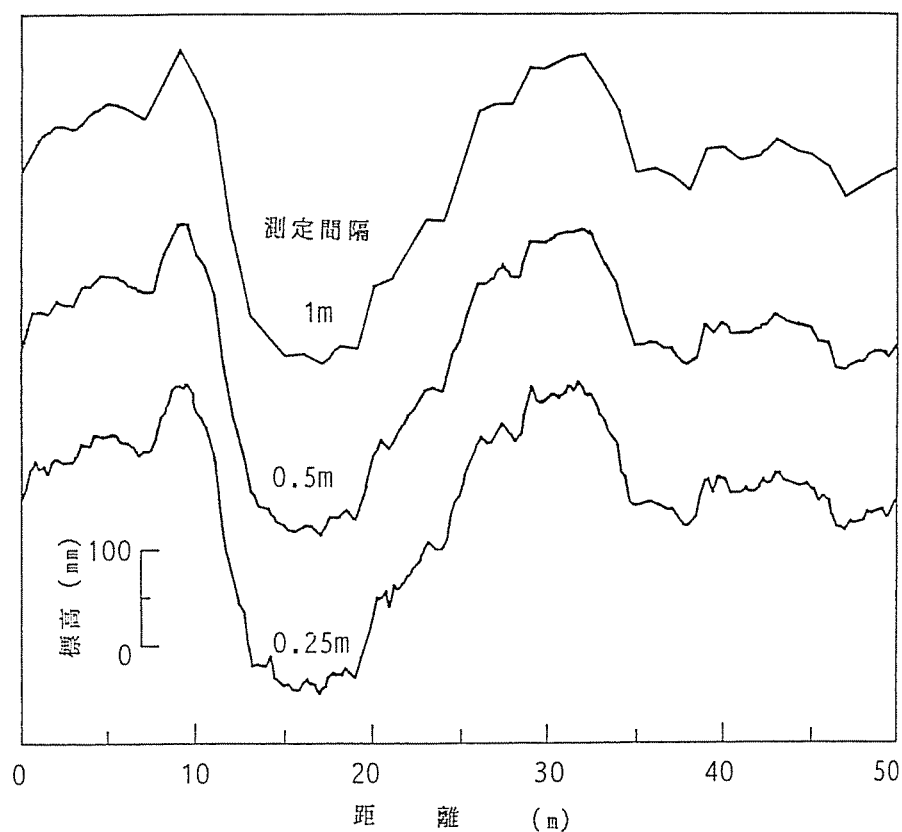


図 5 - 3 3種の測定間隔と凹凸測定結果

図5-3より測定間隔が大きくなるに従い路面周波数の高い成分が減衰し，短い波長の凹凸が現れないことが認められる。図5-1と図5-3の関係は標高の測定間隔（ Δx ）が変化した場合の測定可能な凹凸を示しているが，測定間隔と測定可能な凹凸の最大路面周波数（ナイキスト周波数： f_c ）⁹⁴⁾との間には，

$$f_c = 1/2 \Delta x \quad [\text{c/m}] \quad (5-1)$$

の関係がある。従って，測定間隔が0.05mでは10c/m，0.25mでは2c/m，1.0mでは0.5c/mが測定可能な最大路面周波数であるので，路面周波数の高い成分，即

ち短い波長の凹凸まで測定しようとするならば測定間隔を小さくする必要がある。第4章で述べたように牧草地の凹凸は不規則で、凹凸のPSDを求め、両対数グラフに表すと右下がり、べき乗の近似式を採用してPSDを近似することの妥当性が認められた。このことは、ある範囲の路面周波数の凹凸について測定し、その凹凸のPSDを求め、さらにPSDの近似式を求めれば凹凸の周波数成分を推定することが可能なことを意味している。

牧草地の凹凸にナイキスト周波数より高い路面周波数の成分が多く存在する場合には、ナイキスト周波数で測定誤差が生じるだけでなく、これより低い成分も誤った値を与えることになる⁹⁴⁾。もし測定間隔を大きくすることによって測定結果の周波数成分に誤差が生じることになれば、測定上問題となる。そこで、この点について検討するため、測定間隔を0.05, 0.1, 0.2, 0.25, 0.5, 1.0mとした場合の凹凸のPSDを求め図5-4に示した。

測定間隔0.05mと0.1mの場合ではほとんど同じ結果であるが、他の場合はナイキスト周波数付近、例えば測定間隔0.5mの場合1c/mでPSDの値が測定間隔0.25m以下の結果と異なっている。0.2m, 0.25mの場合もそれぞれ2.5c/m, 2c/m 付近の値が測定間隔0.1mの場合と異なっており、ナイキスト周波数付近のPSDには誤差が認められる。

しかし、牧草地の凹凸を評価する観点からみるならば、凹凸の程度と周波数成分が求められれば十分である。そこで、それぞれの測定間隔より得た凹凸のPSDの近似式を式(2-8)より求め、 W 及び $P(f_0)$ を求めた(表5-1)。図5-4からもわかるように、測定間隔が大きくなるとナイキスト周波数付近でPSDの値に誤差が認められるので、測定間隔0.05mについては3.25c/mまで、測定間隔0.1~1.0mについてはナイキスト周波数より10%低い路面周波数までのPSDについて近似式を求めた。

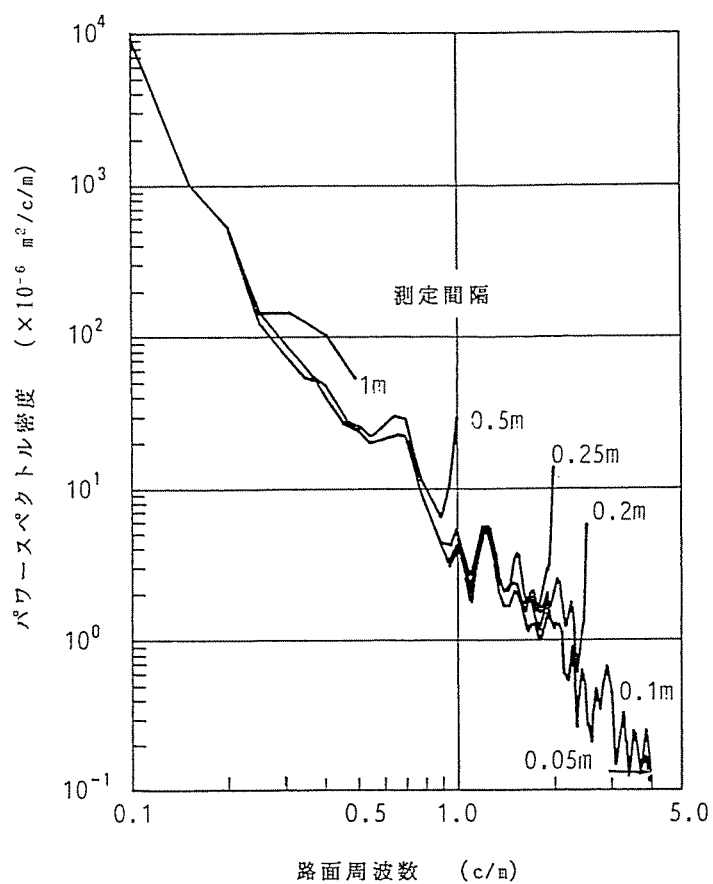


図5-4 測定間隔の違いがPSDに及ぼす影響

表5-1 測定間隔とPSDの関係

測定間隔 [m]	W	P(f ₀) [×10 ⁻⁶ m ² /c/m]
0.05	2.70	748
0.10	2.67	721
0.20	2.54	670
0.25	2.67	766
0.50	2.84	876
1.00	2.87	106

$$f_0 = 1/2 \pi \quad [c/m]$$

測定間隔0.05mのPSDの値を基準に考えると、図5-4に示したように測定間隔0.5mまでのPSDはほとんど同じ範囲であり、 W 及び $P(f_0)$ （表5-1）についても大差無い。しかし、測定間隔1.0mの $P(f_0)$ の値は測定間隔0.05mの $P(f_0)$ の約14%と非常に小さい。測定間隔1.0mで水準測量を行うと、測定可能な路面周波数が0.5c/mとなるばかりではなく測定誤差も大きくなる。従って、凹凸の評価を行うには、測定間隔を1.0mとした凹凸の測定は測定精度の点から適切ではない。

以上図5-4及び表5-1に示した結果から、測定間隔が0.05mから0.5mの場合はナイキスト周波数、即ち測定間隔の2倍の波長の路面周波数成分までの凹凸の測定が可能であり、得られたPSDは凹凸の周波数成分を正確に表していることが認められた。トラクタの走行速度が3m/sの場合路面周波数1c/mの凹凸は3Hzの振動数に相当する。トラクタ車体の上下振動の主たる振動数についてみると、質量1,580kgのトラクタで約3.5Hz¹³⁰⁾、質量3,320kgのトラクタで約3.0Hz⁷⁷⁾、質量4,750kgのトラクタで約2.6Hz¹³¹⁾である。測定間隔を0.5mとすると1c/mの凹凸まで測定可能であるから、トラクタが3m/sで走行した場合、トラクタ車体の上下振動の主たる振動源となる凹凸まで測定可能である。測定間隔を0.5mにすると、距離50mについて水準測量を行う場合、101点の水準測量を行えばよいので、水準測量を採用することは実用上可能である。

ところで、農作業に影響を及ぼす場面凹凸の生成要因としては第1章で述べたように、造成工における抜根、耕うん、トラクタ車輪のすべり沈下、水食・風食、家畜の蹄の跡等があり、これらの凹凸の大きさは小さいものでは数cmと考えられる。Hunterらの結果¹³²⁾によれば、トラクタ後車輪の半径を0.7mとした場合、凹凸の程度の悪い路面でトラクタ後車輪が追従可能な凹凸の路面周波数は5.5c/mである。また、トラクタ車輪は一般にゴム車輪であるから、車輪が変形して小さな凹凸を包み込んでしまう性質がある¹³³⁾。トラクタ車輪の半径及びゴム車輪の変形特性を考慮すれば短い波長の凹凸がトラクタ車体の振動

に与える影響は小さいものと考えられる。波長が短くなる程凹凸はその振幅も小さくなることを考え併せると、トラクタの車輪の大きさとその変形特性からも測定間隔を0.5mとしてもトラクタ車体の振動源としての凹凸の評価が可能との結論を得た。

第3節 振動加速度による牧草地凹凸の評価

1. 走行路面の凹凸とトラクタの振動加速度

トラクタの走行の難易より牧草地の凹凸を評価することの適否について検討することを目的として、凹凸の程度の異なる2種類の路面を供試し、トラクタ車体の振動加速度を測定、解析した。

供試トラクタは搭載機関出力29kW、質量1,550kgで、供試路面として非舗装道路と雑草で覆われた不整地の2種類を供試し、トラクタ車体の振動加速度を測定した。供試路面の長さは約30mで、3m/sの速度で走行した場合の測定時間は10秒間となる。供試路面凹凸のPSDを図5-5に示した。図5-5によれば、不整地の凹凸は非舗装路面の約3倍と判断される。なお、振動加速度の測定はひずみゲージ式振動加速度変換器を座席直下の車体に取り付けて行った。トラクタ車体の振動加速度は上下方向について測定し、振動加速度の大きさは実効値とした。

走行速度0.5～3m/sの範囲で、0.5m/s毎にトラクタ車体の振動加速度を測定した。走行速度と振動加速度の関係を図5-6に示した。一般に、走行路面の凹凸の程度が悪い程振動加速度は大きくなること^{82,134)}が認められている。

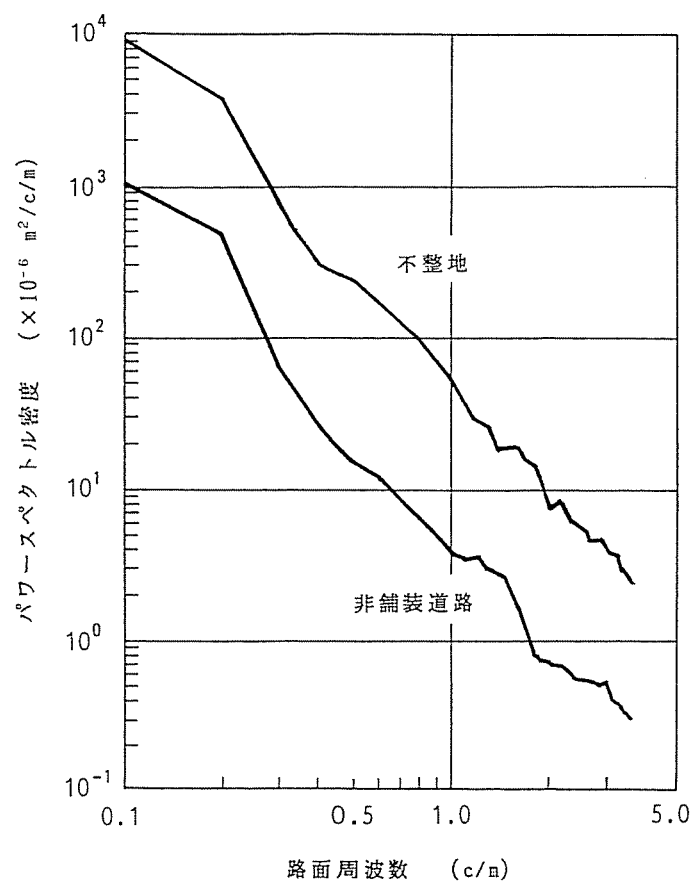


図 5 - 5 供試路面凹凸の PSD

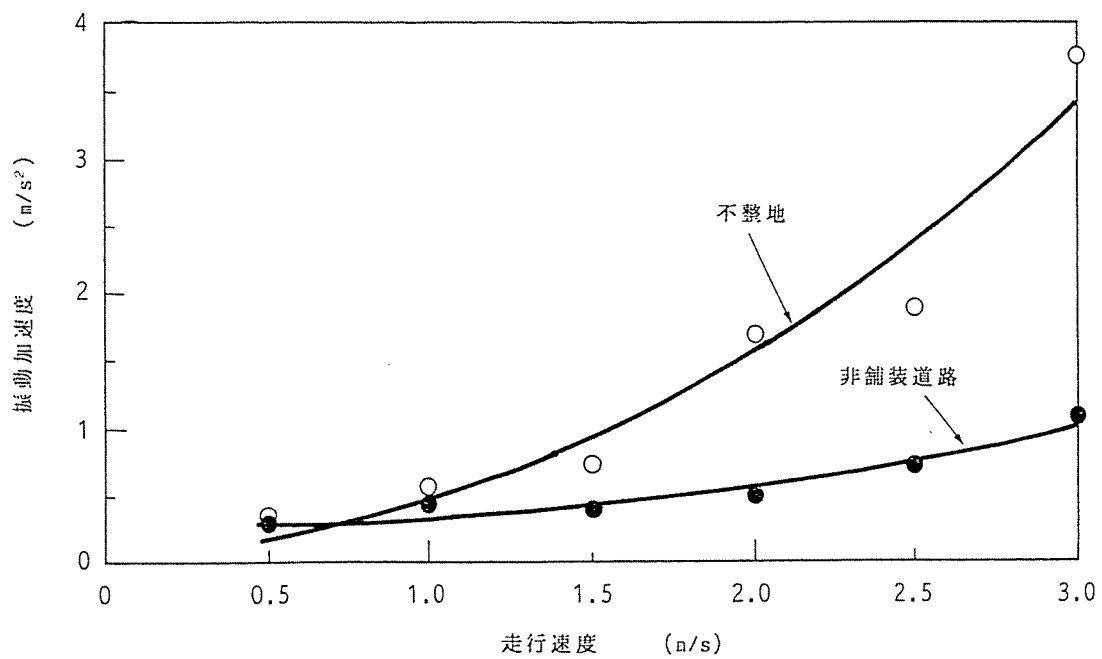


図 5 - 6 走行速度とトラクタ車体の振動加速度の関係

走行速度が0.5, 1m/sでは路面凹凸の程度の違いによる振動加速度の差はほとんどなかった。しかし、走行速度が2m/s以上になるとその差は大きくなり、走行速度3m/sにおける不整地走行時の振動加速度は非舗装道路走行時の振動加速度の約3.5倍で、走行速度が3m/sであれば走行路面の凹凸の程度によって振動加速度に差の生じることが認められる。この結果より、凹凸の程度の異なる路面を走行したときの振動加速度を測定し、振動加速度の大きさによって凹凸の評価を行うことの可能性を見出すことができた。

供試トラクタの質量、軸距、輪距等の違いによって、同一路面を同一速度で走行した場合でも振動加速度の値が異なる⁶⁾。従って、振動加速度の大小より凹凸の程度を評価する方法を採用する場合には、振動加速度を測定するための標準トラクタを選定しなければならないという制約がある。しかしトラクタ車体の振動加速度の測定は時間を多く要することなく、データの処理方法も容易なので実用的な方法と考えられる。

2. 振動加速度による牧草地凹凸の評価

前項で走行路面凹凸とトラクタ車体の振動加速度について検討した結果、凹凸を評価する基準としてトラクタ車体の振動加速度採用の可能性が見出せたので、数種類の牧草地を供試し、凹凸と振動加速度の関係を解析し、振動加速度の大小による凹凸の評価について検討した。

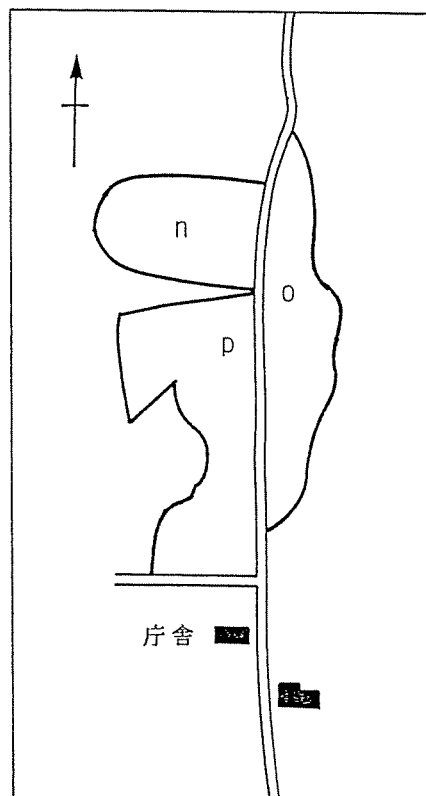
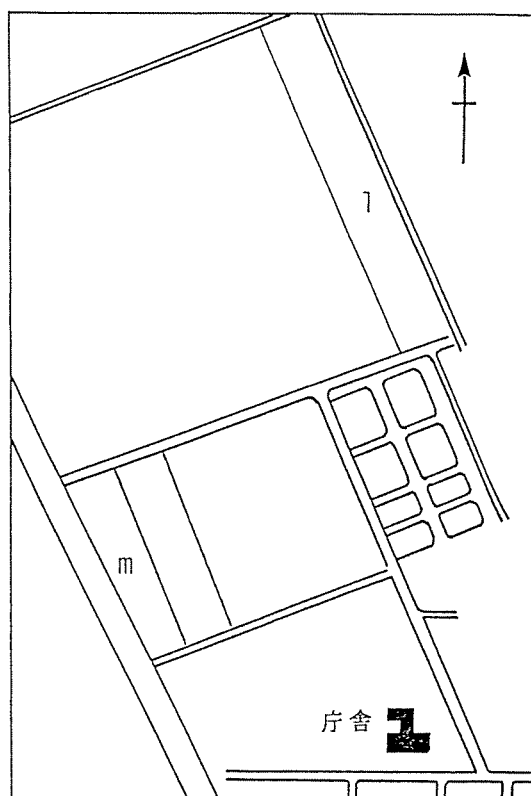
2.1 供試ほ場及び測定方法

(1) 供試ほ場

供試ほ場として、北海道大学農学部附属農場の牧草地2種類及び農学部附属牧場の牧草地3種類の合計5種類のほ場を採用した。供試ほ場の概要を表5-2に、測定箇所を図5-7に示した。

表 5 - 2 供試牧草地の概要

測定箇所	測定点数	測定距離 [m]	場所
牧草地 q	2	50	札幌
牧草地 m	3	50	札幌
牧草地 n	2	50	静内
牧草地 o	2	50	静内
牧草地 p	2	50	静内



(1) 北海道大学農学部附属農場，札幌市，1982 (2) 北海道大学農学部附属牧場，静内町，1987

図 5 - 7 供試ほ場の位置

牧草地 ②, ③は目視観察によれば凹凸の程度が悪く、牧草地 ④は以前普通畑であったものを草地に変更したもので、比較的凹凸の状態が良いと判断された。また、牧草地 ⑤はここ10年以内に草地更新を行っている。

(2)測定方法

牧草地の凹凸測定方法は実行が容易である水準測量を採用した。前述したように水準測量は、測定間隔を短くした場合測定時間が長くなり実用的ではないという欠点があるので、第2節での結果より測定間隔を0.5mとした。なお、この場合波長1mの凹凸まで測定可能である。

牧草地の凹凸の良否をトラクタ走行の難易により評価するため、供試ほ場走行時におけるトラクタ車体の振動加速度を測定解析し、振動加速度の大小をトラクタ走行の難易の基準と考えた。供試トラクタとして搭載機関出力29kW、質量1,510kg、軸距1,884mm、輪距1,340mmの車輪トラクタを採用した。振動加速度の測定はひずみゲージ式加速度変換器（ミネビア BA-5L、定格加速度5G、DC～80Hz）で行い、データレコーダ（ティアック XR-50）に記録した後、凹凸によって生じる振動加速度についてのみ解析するためにローパスフィルタ（NF回路設計ブロック LP-4A、遮断周波数20Hz）を使用し、AD変換器（ソード電算機 HC-A10）にてAD変換した後、パーソナルコンピュータ（ソード電算機 M223/V）を用いてデータ処理を行った。なお、トラクタ車体の振動加速度の評価には前節と同様トラクタ車体の上下振動加速度の実効値を採用した。

2.2結果及び考察

(1)測定結果

測定した牧草地凹凸のPSDの一例を図5-8に示した。供試ほ場の凹凸は第4章での供試ほ場の凹凸と同様に顕著なピークはみられず不規則であることが認め

られる。また、ISOの分級案⁹⁷⁾によって供試ほ場の凹凸の程度を分類すると、牧草地nがD～E、牧草地m、oがE、牧草地pがE～F、牧草地qがFの範囲であった。ISOの分級案でのFは、乗用車が20km/hで走行した場合振動が激しい冬道に相当し、Dは乗用車で40km/hで走行する限界の道路に相当する¹³⁵⁾。従って、牧草地nの凹凸は程度の良い非舗装道路と同程度の凹凸と評価される。

トラクタ車体での上下方向振動加速度のパワースペクトル密度の一例を図5-9に示した。

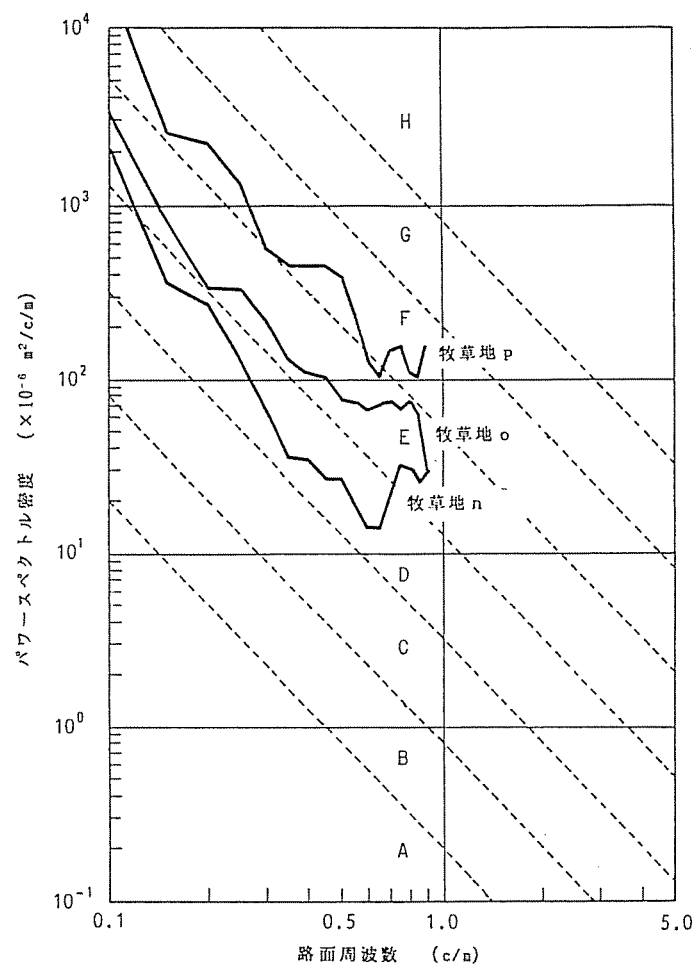


図5-8 供試ほ場凹凸のPSD

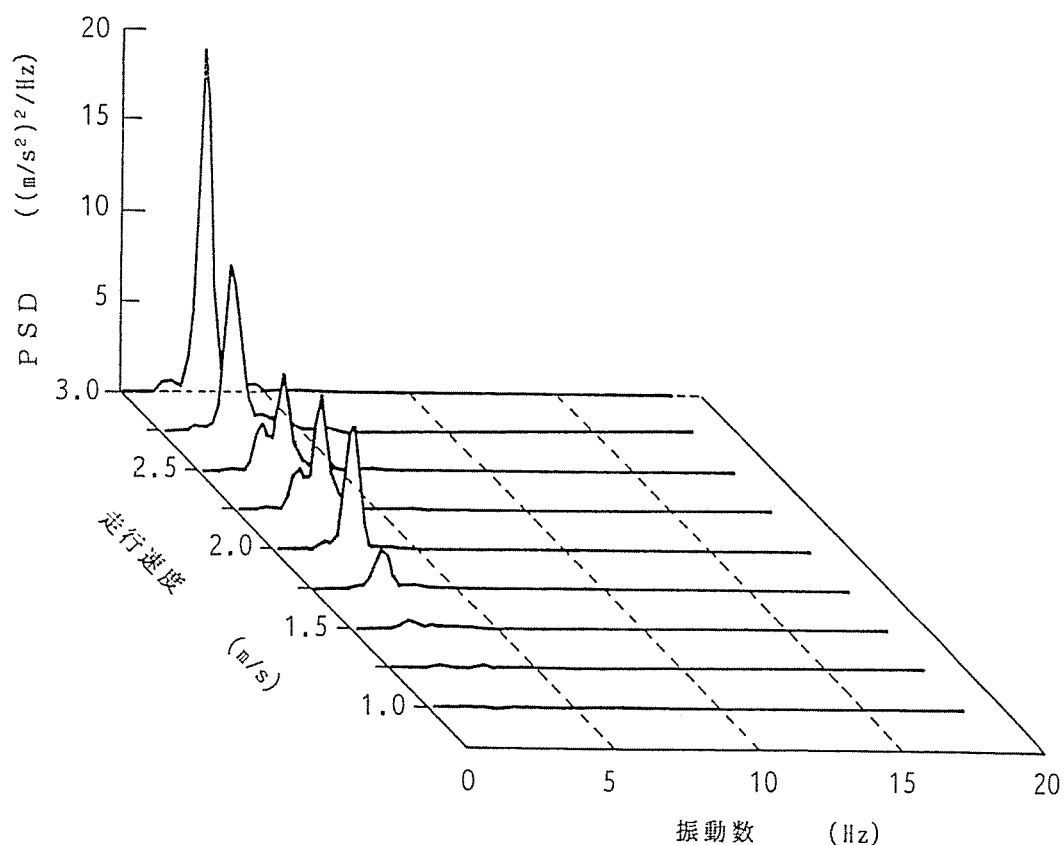


図 5 - 9 トラクタ車体の振動加速度のPSD (牧草地m)

供試ほ場を走行するトラクタ車体の振動は図5-9に示されているように、走行速度の大小にかかわらず特定の振動数にピークが認められ、このピークの振動数は走行するほ場が変わってもほとんど変化しなかった。これは、供試ほ場の凹凸が不規則で周期的な成分が含まれておらず、図5-8に示したような特性をしているため、トラクタ車体の固有振動数付近に振動のピークが現れるためである¹³⁶⁾。

また、走行速度と振動加速度の関係は図5-10に示したように走行速度とともに振動加速度が増加する傾向が認められた。ほ場によってトラクタ車体の振動加速度に大小の差はあるものの、その傾向はどのほ場を走行した場合も変わらなかった。トラクタの走行速度が増加することは、視点を変えると凹凸のPSD

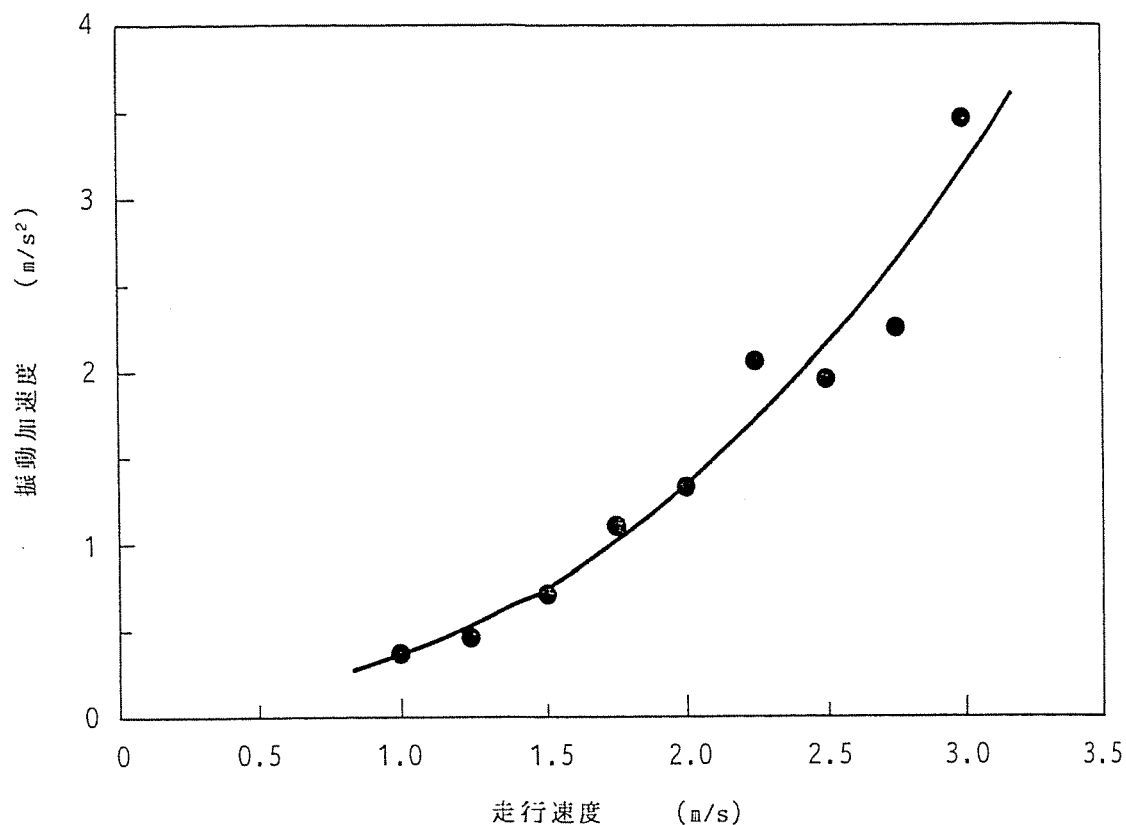


図5-10 走行速度とトラクタ車体の振動加速度との関係

の値が大きくなることと等価である⁸²⁾ ためトラクタ車体の振動加速度が増加したものである。

(2) 牧草地の凹凸と振動加速度の関係

牧草地の凹凸を評価する物理量として、計算の容易な水準測量結果の標準偏差の採用を試みた。図5-6に示されているように、走行速度が速いほど、走行路面の凹凸の程度による振動加速度の影響が顕著に現れるので、走行速度3m/sにおけるトラクタ車体の振動加速度を求め、振動加速度と供試ほ場凹凸の標高の標準偏差の関係（図5-11）について検討した。

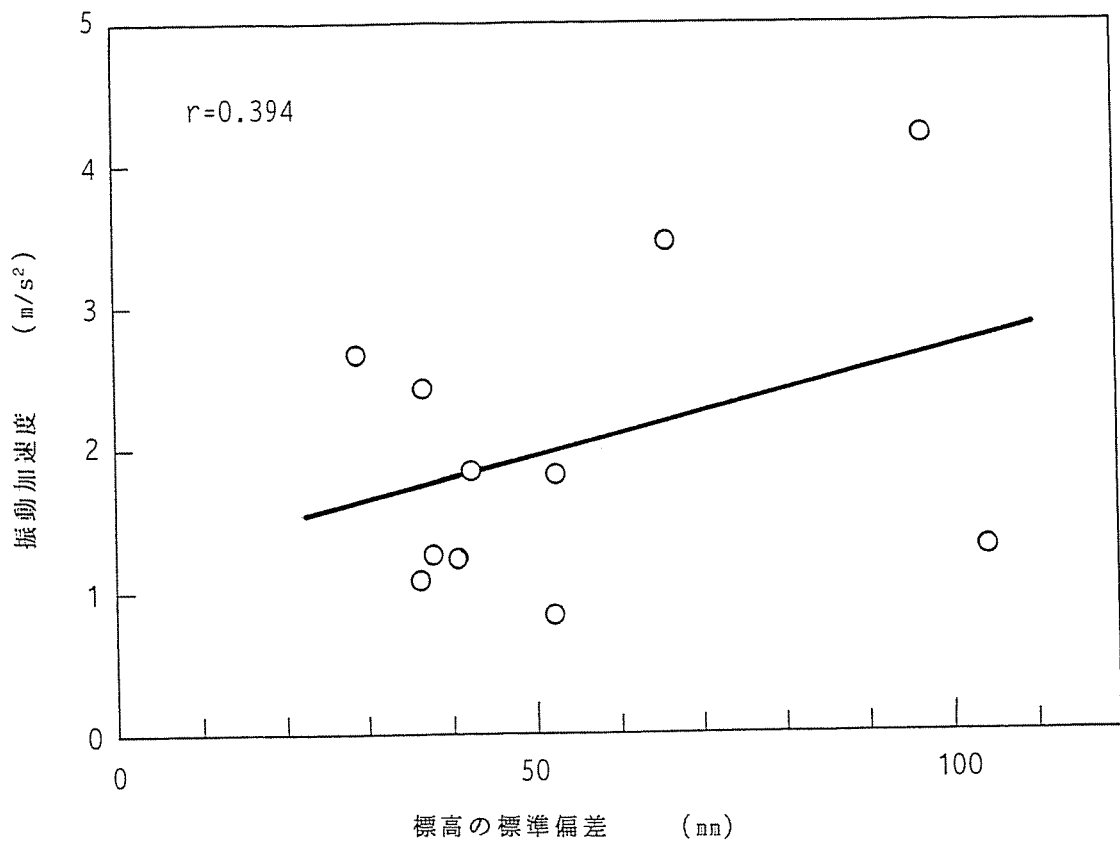


図5 - 1 1 ほ場面凹凸の標高の標準偏差と振動加速度の関係

しかし、測定点は散在しており、両者の間の相関係数を求めたところ0.394と小さく、相関は認められなかった。

ほ場面凹凸の標高の標準偏差と振動加速度の間の相関係数が小さかったのは、第2章第2節で述べたように標準偏差では凹凸の周波数成分を表せないためであると考えられる。図5-12に測定箇所の異なる2箇所の水準測量測定結果を示したが、実線で示した凹凸(a)の標準偏差は52.2mm、トラクタ車体の振動加速度0.83m/s²であった。それに対し、破線で示した凹凸(b)の標準偏差は31.9mm、トラクタ車体の振動加速度は4.91m/s²で、凹凸の標高の標準偏差の大小と振動加速度の大小の関係が逆転している。

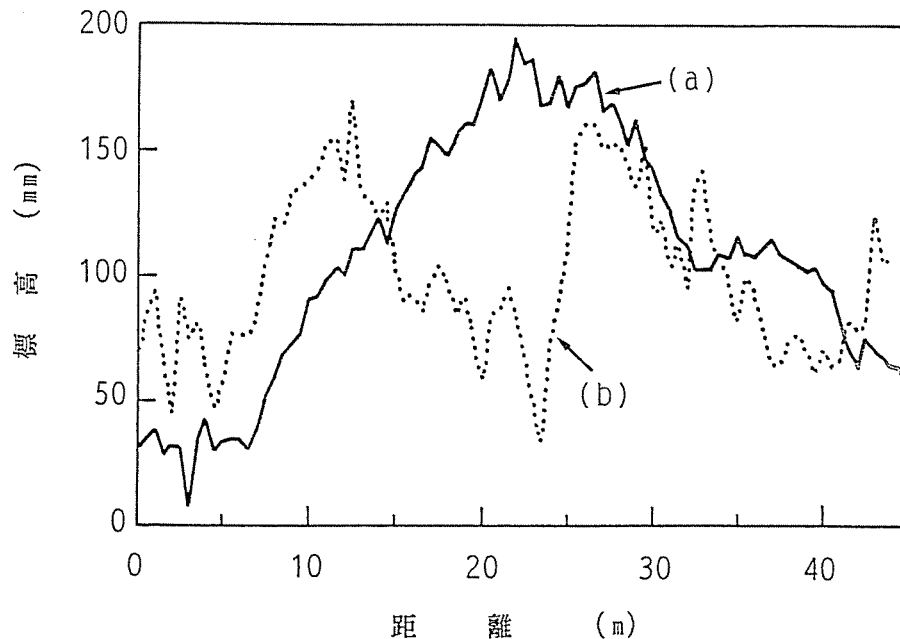


図 5 - 1 2 典型的な凹凸の例
 (a) 標高の標準偏差：52.2mm，振動加速度： 0.83m/s^2
 (b) 標高の標準偏差：31.9mm，振動加速度： 4.91m/s^2

実線で示した凹凸(a)は距離20m付近で山形の形状をしており，その結果標高の標準偏差が大きくなっているのに対し，破線で示した凹凸(b)は短い波長の凹凸の高低差が大きいことが認められた。トラクタの質量・輪距・タイヤのばね定数の大小によって値は異なるが，上下方向の振動加速度についてのトラクタ車体の固有振動数は本章第2節で述べたように，3Hz前後と考えられる。トラクタが3m/sで走行した場合，波長10mの凹凸は0.33Hz，波長5mの凹凸は0.6Hz，波長1mの凹凸は3.3Hzの振動数に相当するので，トラクタ車体の固有振動数を考慮すれば，実線で示したような長い波長の凹凸がトラクタ車体の振動源として大きな影響を及ぼす可能性は小さいと考えられる。この点が凹凸の標高の標準偏差の大小と振動加速度の大小の関係が逆転した原因と考えられる。

以上の結果を考慮して，長い波長の凹凸の影響が除去でき，振動加速度と凹

凸の程度の関係がよく対応するように、全体の測定区間を n 区間に分割し、各々の区間毎に標高差の標準偏差を求め、式(5-2)より求めた区間毎の標高差の標準偏差($SD_1, SD_2, \dots, SD_n$)の平均値を供試ほ場の区間標準偏差(SD_s)とし、振動加速度との関係について検討した。

$$SD_s = (SD_1 + SD_2 + \dots + SD_n) / n \quad [\text{mm}] \quad (5-2)$$

例えば、区間長を5mとした場合、1区間のデータ数は10点、全体の区間数は全長が50mであれば10区間となる。各区間毎に10点のデータについて標準偏差を求め、10区間について求めた標高差の標準偏差を平均し、その値を区間標準偏差とする。従って、区間長が短ければ区間の数は増加するが1区間のデータ数は少なくなる。

なお、標高差の標準偏差を求める場合、ほ場面の傾斜を考慮した基準線を求めその基準線からの偏差を求めた。ほ場面の傾斜を考慮して標準偏差を求める方法は長利⁴⁸⁾が水田の均平度を求める方法としても提案している。長利が述べているように基準線を水平線とした場合には基準線はA-A'となり、ほ場面の傾斜を考慮した場合には基準線はB-B'となる(図5-13)。その結果、基準線を水平とした場合にはほ場面傾斜の分もほ場面凹凸に含んでいることになり⁴⁸⁾、ほ場面に傾斜の存在する牧草地及び普通畑では、高低差の標準偏差は大きな値となる。

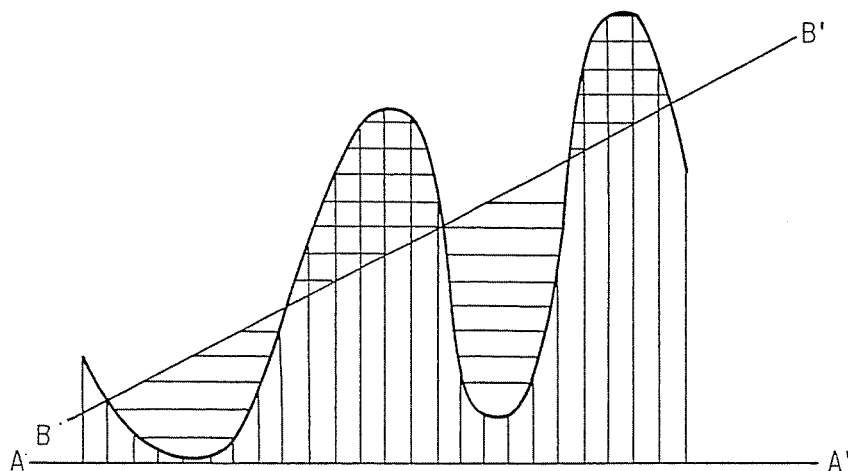


図 5 - 1 3 標高差の標準偏差を求める基準線⁴⁸⁾

また、前述のようにトラクタ車体の固有振動数を考慮すれば、図5-12(a)にみられるような長い波長の凹凸がトラクタ車体の振動に関与することは少ないと考えられる。ほ場面の傾斜を考慮した基準線を設定することは、長い波長の凹凸に沿って基準線を決めることになる。この方法ではトラクタ車体の振動源となる短い波長の凹凸の影響のみを取り出すことになる。従って、トラクタ車体の振動との関係で凹凸を評価するには傾斜を考慮した基準線を設定することが適切であると考えられる。

全区間長を50mとしたので、分割する区間の長さを10m, 5m, 2.5mとし、区間毎には場面の傾斜を考慮した基準線を求め、供試ほ場の区間毎の基準線からの標高差の標準偏差を求めた。標高差の区間標準偏差とトラクタ車体の振動加速度との関係をそれぞれ図5-14, 5-15, 5-16 に示した。

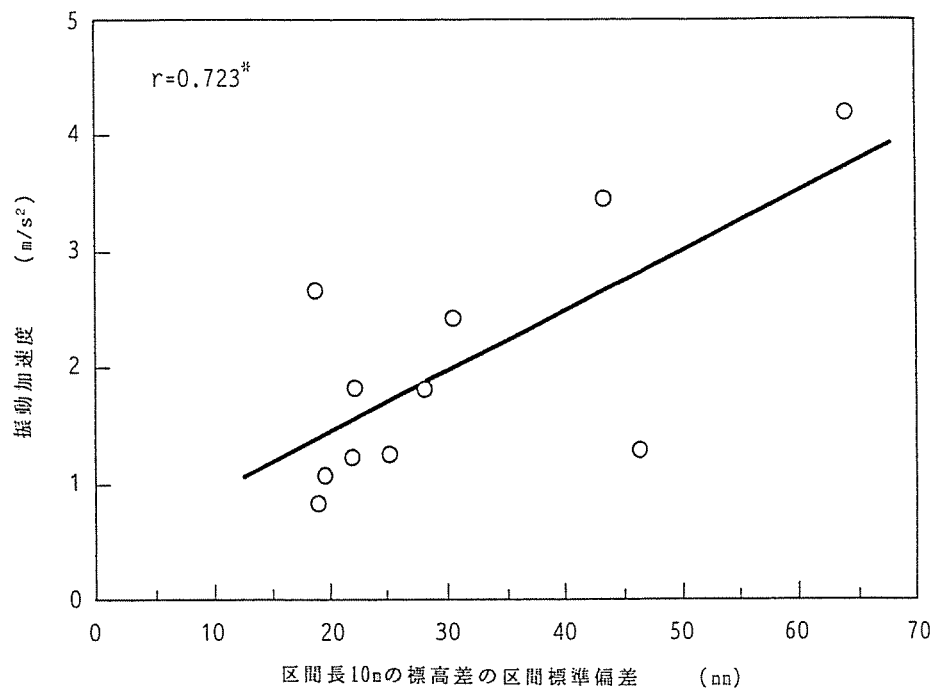


図 5 - 1 4 区間長10mの標高差の標準偏差と振動加速度の関係

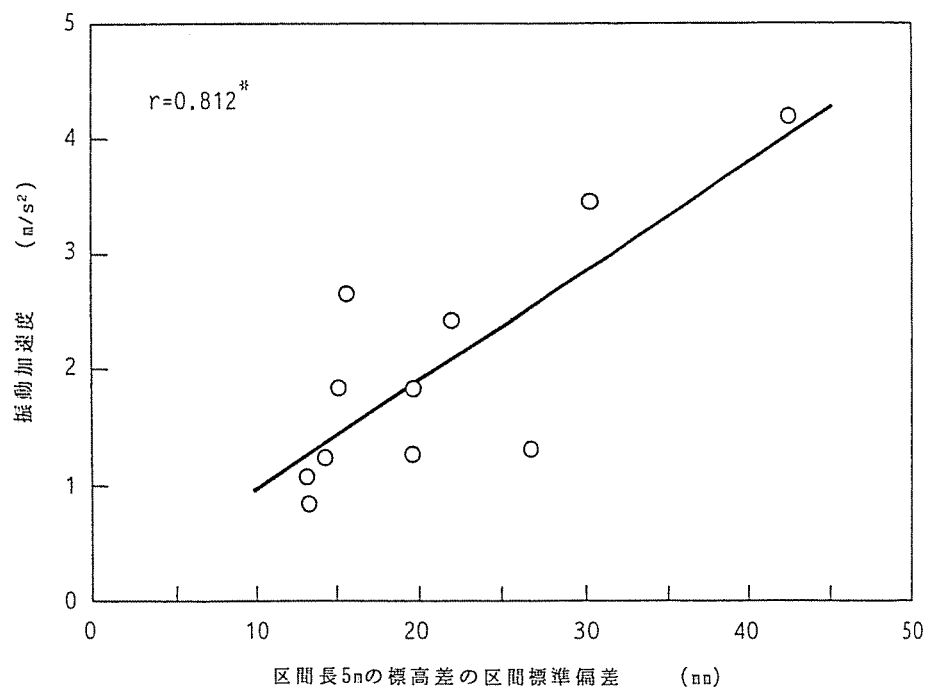


図 5 - 1 5 区間長5mの標高差の標準偏差と振動加速度の関係

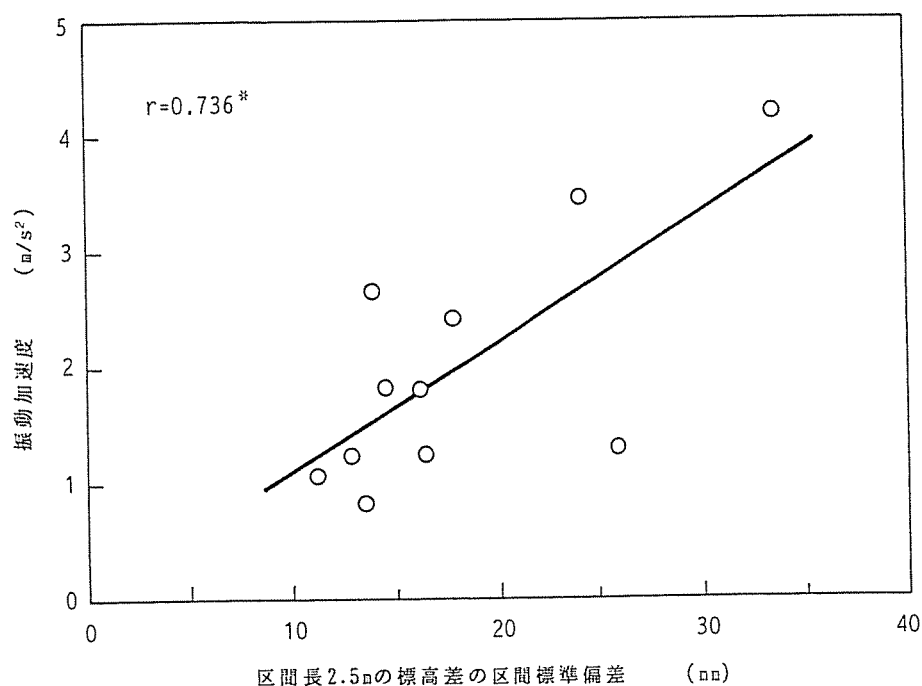


図 5 - 1 6 区間長2.5mの標高差の標準偏差と振動加速度の関係

標高差の区間標準偏差と振動加速度の相関係数は10mの場合0.723*, 5mの場合0.812*, 2.5mでは0.736*であった。凹凸を測定した箇所は合計11で自由度は9となり, 5%の危険率での相関係数の有意限界(*)は0.602¹³⁷⁾であるからいずれの区間長についても相関は認められ, 図5-11に示した結果に比べ高い相関のあることを示している。また, 区間長を5mとした場合, 牧草地凹凸の区間標準偏差とトラクタ車体の上下方向振動加速度との相関が他の区間長の場合に比べやや高いことが認められた。

図5-14～5-16で示した加速度は, 前述したようにトラクタ車体の座席直下での上下方向の振動加速度である。他の位置, 方向の振動加速度と凹凸の程度との相関について検討したところ, 左右方向の振動加速度と標高差の区間標準偏差との相関は小さかった。また測定位置については, トラクタの座席上での振動加速度と標高差の区間標準偏差の相関は, 座席直下での車体の振動加速度と

標高差の区間標準偏差との相関と大差無い¹³⁸⁾。従って、上下方向の振動加速度であれば、測定箇所にはほとんど関係なくほ場面凹凸の程度との相関が高いと判断される。

ISOで検討中の路面粗さの分級案とトラクタ車体の振動加速度の関係について、区間長5mの標高差の区間標準偏差と走行速度3m/sにおけるトラクタ車体の上下方向振動加速度の関係より検討した（図5-17）。

ISOの分級案では路面粗さをAからHまでに分類しており、Aがもっとも平坦で凹凸のない路面で、Hはもっとも凹凸の程度の悪い路面であるが、図5-17中の●はDの範囲、▲はEの範囲、■はFの範囲に相当したほ場面を走行したときの振動加速度を示している。分級案と振動加速度の大小はよく一致し、ほ

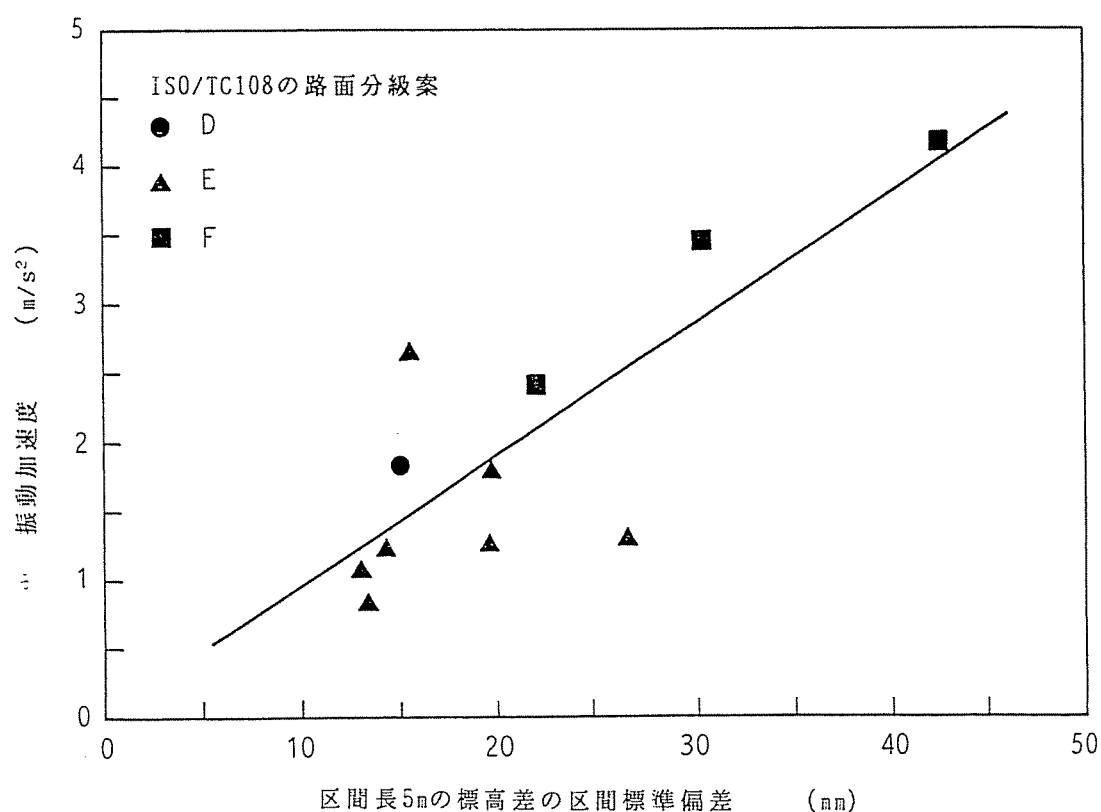


図 5 - 1 7 ISO/TC108の分級案と振動加速度の関係

場面凹凸がFの範囲にある場合は振動加速度が大きくなることが認められた。

また、トラクタ車体の振動加速度が大きく、標高差の区間標準偏差の大きい牧草地はISO分級案のFに相当し、区間標準偏差の大小はISOの分級案による路面粗さの良否ともよく一致している。

以上の結果より、トラクタ車体の振動加速度と区間長5mの標高差の区間標準偏差との相関は高く、標高差の区間標準偏差の大きい牧草地ほど、トラクタ車体の振動加速度が大きくなることが認められ、区間長5mの標高差の区間標準偏差を求めると、ほ場面凹凸の評価が可能になると考えられる。供試牧草地のうち、区間長5mの標高差の標準偏差が20mmを越える牧草地では、トラクタ車体の振動加速度が 2.5m/s^2 以上となって運転に支障を来し、このような牧草地では作業能率、作業精度は低下する。

第4節 要約

ほ場面凹凸の周波数成分を考慮し、凹凸の標高を測定するときの測定間隔と精度の関係について検討し、実用上十分な測定間隔を決定した。次いで、トラクタ走行の難易より牧草地の凹凸を評価することを目的として、5種類の牧草地を供試し、測定間隔を0.5mとした水準測量により牧草地の凹凸を測定すると同時に、供試ほ場を走行した時のトラクタ車体の上下方向振動加速度を測定解析した結果、以下に示す結論を得た。

(1) 測定間隔が0.05mから0.5mの場合はナイキスト周波数、即ち測定間隔の2倍の波長の周波数成分までの凹凸の測定が可能であると認められた。トラクタ車体の振動特性を考慮し牧草地の凹凸の評価を行うには測定間隔0.5mで十分な測定精度が期待できる。測定間隔を0.5mにすると、距離50mについて水準測量を行う場合、101点の水準測量を行えばよいので、水準測量を採用することは実用上可能である。

(2) ほ場面凹凸標高の標準偏差とトラクタ車体の上下方向振動加速度との相関係数は0.394と小さく、両者の間の相関は認められなかった。これは、長い波長の凹凸はトラクタ車体の振動に関与する割合が小さいためと考えられる。

(3) 測定区間を区分し、各区間毎の標高差の標準偏差を求めその平均値を区間標準偏差と定義し、区間標準偏差とトラクタ車体の振動加速度との相関について検討したところ、区間長によって相関係数は異なったが、区間長5mとした場合の相関係数は0.812*で、高い相関が認められた。

(4) ISOで検討中の分級案の分類と振動加速度とはよく一致し、路面粗さの分類で悪い路面に分類される牧草地（分級案－F）を走行した場合、振動加速度が大きくトラクタの走行に支障を来した。

(5) 以上の結果より、トラクタ車体の振動加速度と区間長5mの標高差の区間標準偏差との相関は高く、標高差の区間標準偏差の大きい牧草地ほど、トラクタ車体の振動加速度の大きくなることが認められ、区間長5mの標高差の区間標準偏差を求めると、ほ場面凹凸の評価が可能になる。

第6章 牧草地凹凸の基準に関する提案

第1節 凹凸の基準

第2章で述べたように、牧草地凹凸の評価方法として各種の方法が提案されているが、本論文では凹凸のパワースペクトル密度を求めることにより凹凸の性質を検討し、その結果を基に現場での凹凸の評価方法として標高差の区間標準偏差の採用について第5章で検討した。

本章では第5章で得られた結果に基づいて、農業機械の運用面、即ちトラクタ走行の難易をトラクタ車体の振動加速度の大小より判断し、牧草地凹凸の評価基準について検討した。

トラクタ車体の振動についての優劣を決める基準はないが、ここではオペレータの乗心地の良否を判断する基準としてISO2631¹³⁹⁾の全身振動に対する基準を適用して検討した。図6-1にISO2631の垂直振動に対する基準を示した。ISOの基準では振動加速度の1/3オクターブ分析を行い、各々の中心周波数について求めた実効値の中で最大値を採用し、その値と許容される暴露時間の関係を求めている。1/3オクターブ分析は音及び振動の周波数分析法の一つである。2^{1/3}の周波数比を中心周波数とするバンドパスフィルタより構成された1/3オクターブ分析器を使用し、バンドパスフィルタを切り換えながら音及び騒音の実効値を測定する。測定した周波数と実効値の関係より、音及び振動の周波数分析を行う。

図6-1に示した基準は作業の能率が低下する「疲労－能率減退時間」を意味する振動加速度である。第5章の供試ほ場を3m/sで走行したときのトラクタ座席上の上下方向振動加速度について1/3オクターブ分析を行い、図6-1にあてはめた結果と、供試ほ場凹凸のPSDとISO分級案、及び区間長5mの標高差の区間標準偏差を表6-1に示した。

供試トラクタの座席はサスペンション付きシートであったので、サスペンシ

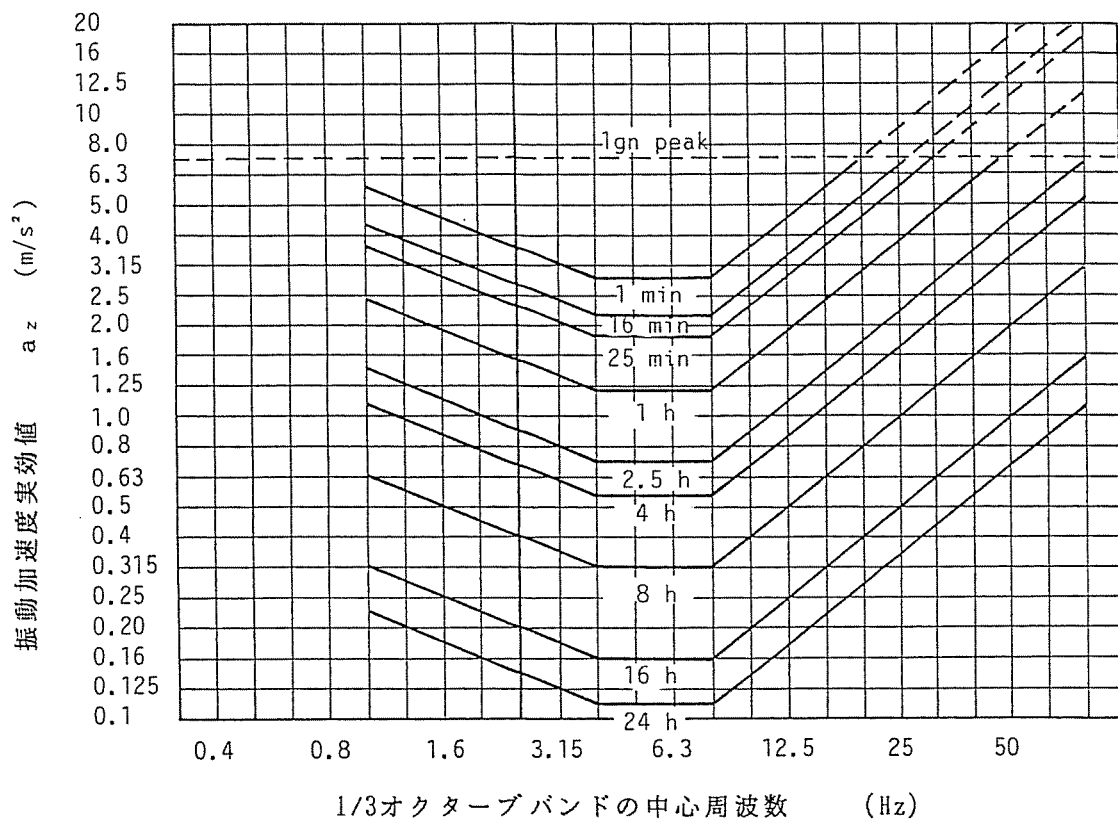


図 6 - 1 上下方向の振動加速度に対する疲労－能率減退時間¹³⁹⁾

表 6 - 1 供試ほ場における疲労－能率減退時間と牧草地の凹凸

供試ほ場	疲労－能率減退時間 [時間. 分]	ISO分級案	区間長5mの標高差の 区間標準偏差 [mm]
牧草地 q	0. 25	F	19.2
牧草地 m	4. 0	D	13.2
牧草地 n	2.5. 0	D ~ E	15.1
牧草地 o	4. 0	E	26.7
牧草地 p	1. 0	F	42.6

ヨンの無い詰物シートに比べ振動加速度が小さいことを考慮しなければならないが、凹凸のPSDがISO分級案のFの範囲にある場合には疲労一能率減退時間が1時間以下となった。

ISO分級案でFに分類されるほ場で実際にトラクタを運転してみると、振動が大きく、3m/sの速度で連続作業を行うことは乗心地の点から耐えられないと感じられた。実作業では更に走行速度が遅くなるので、モータ、ヘイテッダ、ヘイコンディショナ等による管理作業を中心としたトラクタ作業の高能率化及び高精度化を考えると、振動のためトラクタが3m/sの速度で走行不可能な牧草地は作業能率、作業精度の点から不良な牧草地であると考えられる。表6-1を参考にすると、少なくともISO分級案でFの範囲に分類される牧草地は、ほ場の凹凸が障害となり能率的に作業ができない。Fの範囲に分類されるほ場は、図5-16で示した区間長5mの標高差の区間標準偏差20mmに相当し、また図2-13で示したように北海道が提案している草地改良事業での凹凸の高低差5cmの割合が全測点の20%以上となるほ場とも一致している。

区間長を5mとした標高差の区間標準偏差が20mmということは、水準測量を行いほ場面の傾斜を考慮した基準線を求め、各測点と基準線との標高差を求めたとき、標高差が正規分布していれば、標高差20mm以上が出現する確率は約32%、標高差40mm以上が出現する確率が約5%を意味する¹⁴⁰⁾。従って、測定間隔が0.5mであれば、1区間の測定点11点の中に20mm以上の標高差が3点程度存在することになる。

ところで、水田の均平度は平均標高の±5cm以内を目標とし、全測点が±10cm以内でそのうち80%以上が±5cm以内に収めればよい⁵⁵⁾としている。測点の標高の分布が正規分布であるとすれば、この場合の標準偏差は約38mmとなる¹⁴⁰⁾。この標準偏差の値は標高差の区間標準偏差20mmに比べると大きいですが、水準測量の測定間隔について考慮しなければ大小の判断はできない。水田の均

平度は10m方眼について水準測量を行い、ほ場全体の測定結果より均平度を計算しているの、測定区間は長い場合には100m以上にもなる。それに対し、本論文の区間標準偏差は0.5mごとに水準測量した結果に基づいており、測定区間は5mである。ほ場面の標高は、区間長を長くすると一般にその標準偏差が大きくなる（図6-2）。これは、第4章で述べたように、ほ場面凹凸は長い波長の凹凸ほどその振幅、即ち標高の高低差が大きいため区間長を長くするとその影響が現れるためである。従って、区間長5mとしたときの標高差の区間標準偏差が20mmのほ場は水田に比べて凹凸の程度が良いとは限らない。標高差の区間標準偏差の異なる牧草地および普通畑¹³⁸⁾の凹凸を図6-3に示したが、標高差の区間標準偏差が15.1mmの牧草地は測定区間全体に凹凸の存在、即ち標高の高低

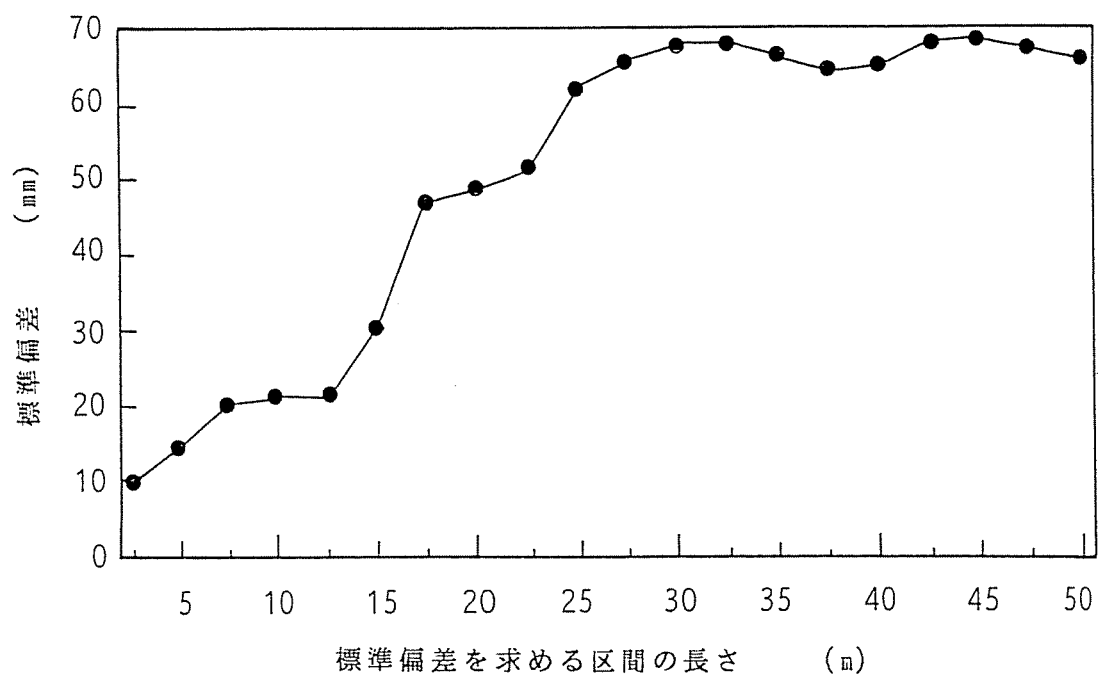


図6-2 測定区間の長さ と 標高の標準偏差

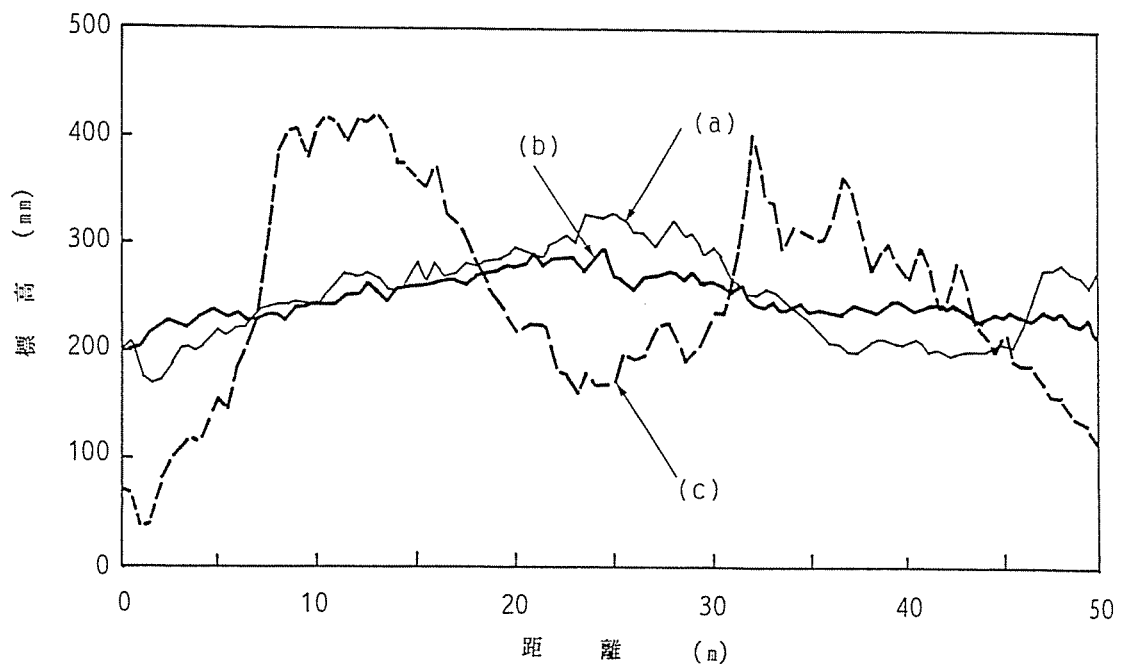


図 6 - 3 標高差の区間標準偏差の異なるほ場の凹凸
 (a) 普通畑 : 区間長 5m の標高差の区間標準偏差 = 8.0mm¹³⁸⁾
 (b) 牧草地 n : 区間長 5m の標高差の区間標準偏差 = 15.1mm
 (c) 牧草地 p : 区間長 5m の標高差の区間標準偏差 = 42.6mm

差が認められる。また、図6-3に示した普通畑の凹凸(a)は収穫作業が行われた後に測定した結果であるが、標高差の区間標準偏差は8.0mmであった。従って、区間長を5mとした標高差の区間標準偏差が20mmのほ場は水田の均平度を満足するほ場に比べて凹凸の程度の悪いことが認められる。

以上の結果をまとめると、ISO分級案でのF以上に分類されるほ場、即ち区

間長5mの標高差の区間標準偏差20mm, 5cm以上の凹凸高低差の割合が全測点の20%以上のほ場では, トラクタ車体の振動のため3m/sでのトラクタ作業は困難であると考えられる。従って, 農業機械の運用面から牧草地の凹凸を考えると, ISO分級案ではE以下, 区間長を5mとした標高差の区間標準偏差が20mm以下となるようにほ場を整備することが望まれる¹²⁶⁾。

第2節 均平作業の方法と精度

第5章及び前節の結果から, 農業機械の運用面よりほ場を評価した場合, 区間長を5mとした標高差の区間標準偏差が20mm以下となるようなほ場に整備することが望ましいとの結論を得た。しかし, そのような凹凸のほ場に整備することが不可能であればこの評価基準は意味を持たないので, 既に発表されている結果を基に均平作業とその精度について検討した。第1節でも述べたように, 一般に標高の標準偏差は求める区間の長さが長くなるほどその値は大きくなる。従って, 各種均平作業の精度について考える場合, 測定区間の長さについて留意する必要がある。

1.52m×2.03mと小さな実験区画であるが, 耕うん方法による均平精度について調査したCurrence⁹²⁾の結果では, 標高の標準偏差がロータリティラーでは23.8mm, プラウ・ディスクハローの組合せでは23.6mm, プラウ・ディスクハロー2回・ハローの組合せで21.0mmである。同じ様に0.9m×3.6mの土壌槽を使用して行った中村ら⁴⁴⁾の水田代かき均平装置の均平精度を測定した結果では, 代かき後の標準偏差は1.06~1.51cmと報告されている。

各種の均平用の作業機の均平精度について調査したBurasら¹⁴⁰⁾の結果を表6-2に示した。

表 6 - 2 均平用作業機と均平精度¹⁴⁰⁾

供試機械	作業回数と凹凸の標準偏差 [mm]			
	1回	2回	3回	4回
GP 50-油圧式均平機	26.2	32.9	17.7	14.3
ランドプレーナ	34.2	25.8	17.8	18.9
リアエクステンション付き ランドプレーナ	39.5	11.2	11.1	13.6
直装式ランドプレーナ	42.2	26.3	18.0	34.2
アジャスタブルフロート	40.6	24.9	21.4	14.3

Burasらが実験に供試したほ場の大きさは区画によって異なるが0.15～0.35haで、1m毎に水準測量を行い、標高の標準偏差を求めている。均平作業を行う前の標高の標準偏差は3～6cmであるので、表6-2によれば均平作業を2回を行うことにより標高の標準偏差が作業前の1/2に減じていることが認められ、均平作業を4回行った場合は標高の標準偏差が2cm以下となる場合もある。ランドプレーナは八郎潟で行われた試験でもその効果が認められている¹⁴¹⁾。

また、近年レーザを利用した均平作業機¹⁴²⁾が実用化されつつあるが、Foussらのシミュレーション結果¹⁴³⁾では±1in.(25mm)以内に作業機の高さを制御することが可能であるとしている。また、50m×125mのほ場を供試して行ったレーザ光を用いた代かき作業の性能¹⁴⁴⁾では、代かき作業後の標高を5m方眼で測定した結果、2回がけで標高の標準偏差が1.7cm、高低差5cm以内の部分が95%を占めるような均平が可能であると報告されている。

これらの結果より、耕うん整地作業を十分に行ったり、ランドプレーナ等の

均平用作業機を使用することにより牧草地の凹凸の基準を満たす均平作業が可能である。

第3節 標高差の区間標準偏差の測定手順

第1節では牧草地の凹凸の基準案、第2節ではその基準案を満たす均平作業の方法について検討した。その結果、区間長を5mとした標高差の区間標準偏差20mm以下の牧草地を造成することが可能であると認められた。ここでは、牧草地の凹凸の基準として標高差の区間標準偏差を採用する場合について、区間標準偏差の測定方法について検討する。水準測量を0.5m毎に行うこととし、mm単位まで標高を測定しようとするれば、本研究で実施したように50m間について測量を行うことが適切と考える¹⁴⁵⁾。

次に、ある牧草地の凹凸を評価しようとする場合、50m間の水準測量を何組行うかについて検討する必要がある。牧草地の区画は土地条件によって大小あるが、抜排根を行う方向については、レーキドーザによる抜排根の能率より考え最大150m程度となる⁵¹⁾。梅田らの調査¹⁴⁶⁾によれば、北海道の普通畑の長辺は180～540m、短辺は90～180mで、大きなほ場は540m×180mである。測定箇所を多くすれば得られた結果の信頼性は増すが、測定に長時間を要することになる。適正な測定箇所の数を決定することは、母集団から抽出する標本の数を決定することになるので、「無制限任意抽出における必要標本抽出数の決定¹⁴⁷⁾」の考えを導入した。大きさが1以上の母集団であれば次式により必要標本数Mを決定することができる。信頼係数を2a、母集団の標準偏差を σ_m 、母平均を X_m 、誤差率を ϵ とすると、

$$M \geq \frac{\{2a(\sigma_m/X_m)\}^2}{\epsilon^2} \quad [-] \quad (6-1)$$

となる。

標本数 M の決定には母集団の平均と標準偏差を知る必要がある。母集団の統計的性質は未知であるが、測定結果から推定することにする。ここでは、供試ほ場として採用した牧草地のうち、 a , b , c , d , Q について、 σ_m/X_m を求めたところ、その平均は0.250であった。危険率を5% ($Z_a=1.96$)、誤差率を15%とし、それぞれの値を式(6-1)に代入すると必要標本数は10.7となり、供試ほ場につき11箇所水準測量を行い、区間長を5mとし、式(5-2)より標高差の区間標準偏差を求め、その平均値を供試ほ場の標高差の区間標準偏差とすれば、牧草地の凹凸の評価が可能である。

以上の考えに基づいて180m×90mの牧草地を例として標高差の区間標準偏差を求める方法を整理すると以下のようになる。

(1) 供試ほ場を8区画(90m×22.5m)に区分する。

(2) 水準測量を実施する場所は任意に設定すればよいが、例えば各区画毎に区画の中心付近で長辺方向について1箇所とし計8箇所、及びほ場の短辺方向について3箇所の測定箇所を選定し、合計11箇所について、0.5m間隔で50m区間の水準測量を行う。短辺方向については供試ほ場の短辺より45m、90m(ほ場の中心)及び135mの計3箇所で水準測量を行えばよい。

(3) 水準測量より得た50m間の標高より5mを1区間とし、各区間毎に基準線からの標高差の標準偏差を求める。各区間の標高差の標準偏差を求める場合、測定方向のほ場面の傾斜を考慮して基準線を求める。次に式(5-2)より標高差の区間標準偏差を求め、この値を各測定箇所の標高差の区間標準偏差とする。

(4) 各測定箇所、即ち供試ほ場の11箇所について求めた標高差の区間標準偏差の平均値を求め、これを供試ほ場の標高差の区間標準偏差とする。

この様な方法で求めた標高差の区間標準偏差が20mm以下であれば機械作業に

支障の無いほ場と評価できる。

第4節 要約

牧草地の凹凸の性質を考慮したほ場面凹凸の評価法に基づき、トラクタ座席上での振動加速度により牧草地の凹凸の基準を提案した。また、統計学的な観点より、標高差の区間標準偏差の求め方について検討した。

(1) トラクタの車体振動を農作業の難易の判断基準とし、ISOの全身振動に対する許容基準を参考にして牧草地の凹凸を評価すると、区間長を5mとした標高差の標準偏差が20mm以下、標高のPSDがISOの路面分級案のA～Eの範囲となるようにほ場を整備することが望まれる。

(2) 各種均平作業と均平精度の関係について検討した結果、耕うん整地作業により標高の区間標準偏差20mmを満たすことが可能であり、ランドプレーナまたはレーザ光応用の均平作業機械により高い均平精度が得られることの可能性が認められた。

(3) 以上の結果より、区間長を5mとした標高差の区間標準偏差を求めることにより、牧草地の凹凸の評価が可能である。牧草地の標高差の区間標準偏差を求める場合、0.5m毎の水準測量による凹凸の測定距離を50mとし、供試ほ場について11箇所の水準測量を実施し、供試ほ場の標高差の区間標準偏差の平均値を求めれば、供試ほ場の凹凸の評価が可能である。

総 括

ほ場面凹凸の良否はほ場の種類にかかわらず営農上の重要な問題であり、機械化農業の発展、特に農作業の高速化、高精度化にともないほ場面凹凸は農作業に大きな影響を及ぼすようになった。牧草地で耕うん整地作業が行われるのは造成時及び更新時に限られるので、凹凸の修正の機会は少なく、また、普通畑、水田に比べ高速で作業する機会が多いので凹凸による障害は著しい。しかしながら、ほ場面凹凸の的確な測定方法及び評価方法がいまだ確立されていない。水田を除くほ場については、凹凸に関する基準は確立されていないのが現状である。これらの状況を考え、農業機械の運用面、即ち、農作業の難易という観点からほ場面凹凸の評価方法の確立が必要と判断し、作業上凹凸が特に障害となる牧草地を対象として本研究を実施した。研究の第一段階として連続的に測定可能なほ場面凹凸測定装置を試作し、各種牧草地の凹凸を測定解析した。さらに、普通畑、水田及び道路・各種路面凹凸の性質についても検討し、牧草地の凹凸と各種路面凹凸とを比較することにより牧草地の凹凸の性質を明らかにした。次いで解析結果を基にほ場面凹凸と農作業の難易度との関係について検討し、農業機械の運用面からみた牧草地の凹凸の評価を行い、牧草地の凹凸基準の提案を試みた。

I ほ場面凹凸が農作業に及ぼす影響 （第1章、第2章の要旨）

ほ場面凹凸が農作業に及ぼす影響及び農用地の凹凸に関する基準について検討するとともに、従来行われてきたほ場面凹凸の評価方法について検討した結果以下に示す結論を得た。

（1）水田、普通畑及び牧草地の造成に関しては、農林水産省構造改善局及び同省畜産局などにより設計基準は示されているが、水田以外の農用地に関して

は具体的なほ場面凹凸の基準は示されていない。

(2) ほ場面凹凸によるトラクタ車体の振動のため、作業速度が制限されたり、作業精度の低下を招き作業機の故障の原因ともなる。また、牧草地では更新時まで耕うん整地作業を行わないので、造成時に抜根作業等で生じた凹凸やトラクタ車輪のすべり沈下によって生じた凹地の修正される機会がなく、従ってほ場面凹凸の農作業に及ぼす影響は大きい。

(3) 高低差の度数分布、分散・標準偏差、RR、折れ線長比・集団化指数及びPrQ・PNによる凹凸の評価方法について検討した結果、これらの方法では凹凸の周波数成分の表現はできないことが認められた。

(4) PSDはその値の大小により路面凹凸の程度が判定可能であり、ピークの有無及びPSDをべき関数で近似したときの係数から凹凸の周波数成分を知り得ることが認められたので、本研究ではほ場面凹凸を解析する手段としてPSDを採用しすることとした。

(5) 北海道が採用している不陸均し基準とISOの路面粗さの分級案との関係について検討した結果、両者の間に相関が認められ、北海道の基準で不陸均しが必要とされる高低差5cm以上の割合が全測点の20%以上のほ場は、ISOの路面分級案ではF以上の路面凹凸に相当する。

II ほ場面凹凸測定システムの試作 (第3章の要旨)

ほ場面凹凸を迅速かつ十分な精度で測定できるほ場面凹凸測定システムを試作し、その実用性について検討した結果、以下に示す結論を得た。

(1) ほ場面凹凸測定方法として、微小区間のほ場面傾斜角度を測定し、その傾斜角を積分して凹凸の標高を求める方法を採用した。

(2) 2軸2輪のほ場面傾斜角度測定装置を仮定し、傾斜角度法の測定精度を計算により予測した。軸距を150mmとした場合、測定可能な凹凸の路面周波数の

予測値は $4c/m$ （波長 $0.25m$ ）であった。

（３）ほ場面凹凸の程度，凹凸の波形の違いが測定精度に及ぼす影響について検討するため，供試路面の凹凸を入力信号，計算結果を出力信号と考えて周波数伝達関数を求めた。路面の種類が異なっても，同一路面周波数におけるゲインの大きさはほとんど等しく，路面の相違が測定精度に及ぼす影響は小さかった。

（４）計算による測定精度の予測結果を参考にし，傾斜角度変換器としてバーチカルジャイロスコープを採用した軸距 $150mm$ ，２軸３輪のほ場面傾斜角度測定装置を試作した。人工的に造成した路面を供試して路面凹凸を測定したところ，試作装置の測定精度は数値計算による予測とほぼ一致した。

（５）以上の結果より，微小区間のほ場面傾斜角度を積分して凹凸を求める傾斜角度法及び試作したほ場面傾斜角度測定装置は，ほ場面凹凸を測定する手段として実用に供試得ると判断し，傾斜角度の読み取り方法としてペン書きオシログラフを採用した測定システムAと，傾斜角度をAD変換しパーソナルコンピュータで処理する測定システムBを考案した。測定システムBは現場では場面傾斜角度をデータレコーダに記録すれば，それ以後の処理をパーソナルコンピュータで行うことが可能となるので，実用的な凹凸測定システムである。

Ⅲ 牧草地の凹凸の性質（第４章の要旨）

本章は牧草地，水田，普通畑，道路，不整地及びその他の路面凹凸を解析し，牧草地の凹凸と他の凹凸とを比較検討することにより，牧草地の凹凸の性質を検討したところ，以下に示す結論を得た。

（１）牧草地の凹凸を測定解析した結果，牧草地の凹凸に周期性のある成分は認められず不規則であった。

（２）牧草地の凹凸のPSDを求め，両対数グラフに表すとPSDは右下がりとなり，

路面周波数が高くなるに従い、即ち波長が短くなるに従い凹凸の振幅が小さくなっている。

(3) ISO/TC108での分級案にしたがって供試ほ場の凹凸のPSDを分類すると、目視観察により凹凸の程度の比較的悪いと判断された牧草地はE～F、程度の良い牧草地はC～Dの範囲であった。ISO分級案のDは管理の良い非舗装道路に相当し、ISO分級案のEは管理の悪い、凹凸の多い非舗装道路に相当する。また、PSDをべき乗の関数で近似したときの係数 W はISOで検討中の値2に比べ大きい値であった。

(4) 測定した区画内では凹凸の程度は測定の方向、測定箇所にかかわらずほとんど同じであった。また、トラクタの左右車輪が通過する一対の凹凸の性質を検討したところ、PSDの値がほぼ同じであることから、同じ程度の凹凸であることが認められた。一対の凹凸間のコヒーレンシを比較すると、その傾向に多少のばらつきはあるものの、路面周波数が 0.2c/m 以上ではコヒーレンシの値が小さく、一対の凹凸間の相関の小さいことが認められた。従って、トラクタの左右車輪に入力される凹凸は互いに独立しており、トラクタがほ場を走行する場合、上下方向の振動だけではなくピッチ、ロール方向の回転振動も生じるものと推察される。

(5) 水田及び普通畑の凹凸について既報の結果を基に検討したところ、牧草地の凹凸と同様周期性の無い不規則な凹凸であることが認められた。牧草地の凹凸と水田・普通畑の凹凸を比較すると、牧草地の凹凸はプラウ耕後の普通畑の凹凸と水田田面の凹凸の間であり、凹凸PSDの近似式の W は1.3～1.9であった。

(6) 道路、不整地及び各種路面の凹凸を測定解析し、さらに文献により滑走路及び月面の凹凸についての研究成果についても検討したところ、月面の凹凸を含め、何れの路面もPSDの近似式の W は約2となっていて、路面の種類による

周波数成分の差異はほとんど認められなかった。

(7) 凹凸の生成原因、ほ場及び路面の利用状態・管理状態等の様々な条件が異なっても、各種路面の凹凸は周期性の無い不規則な性質を有しており、凹凸の周波数成分をPSDにより表すと、路面周波数とPSDの関係は式(2-8)に示したように路面周波数のべき乗で近似することができる。このことより、ほ場面凹凸が広い周波数範囲にわたり、一定の関係にしたがって存在していることを示している。牧草地を含む各種路面の凹凸を評価する場合、ある範囲の路面周波数の凹凸について測定し、その凹凸のPSDより求めた W 及び $P(f_0)$ により凹凸の評価が可能である。即ち、牧草地の凹凸の程度を評価するには必ずしも高い路面周波数まで測定・解析する必要が無い。

IV トラクタ走行の難易よりみた牧草地の凹凸の評価 (第5章の要旨)

ほ場面凹凸の周波数成分を考慮し、凹凸の標高を測定するときの測定間隔と測定精度の関係について検討し、実用十分な測定間隔を決定した。次いで、トラクタ走行の難易より牧草地の凹凸を評価することを目的として、5種類の牧草地を供試し、測定間隔を0.5mとした水準測量により牧草地の凹凸を測定するとともに、供試ほ場を走行した時のトラクタ車体の上下方向振動加速度を測定解析した結果、以下に示す結論を得た。

(1) 測定間隔が0.05mから0.5mの場合はナイキスト周波数、即ち測定間隔の2倍の波長の周波数成分までの凹凸の測定が可能であると認められた。トラクタ車体の振動特性を考慮し牧草地の凹凸の評価を行うには測定間隔0.5mで十分な測定精度が期待できる。測定間隔を0.5mにすると、距離50mについて水準測量を行う場合、101点の水準測量を行えばよいので、水準測量を採用することは実用上可能である。

(2) ほ場面の凹凸標高の標準偏差とトラクタ車体の振動加速度との相関係数

は0.394と小さく、両者の間の相関は認められなかった。これは、長い波長の凹凸はトラクタ車体の振動に関与する割合が小さいためと考えられる。

(3) 測定区間を区分し、各区間毎の標高差の標準偏差をもとめその平均値を区間標準偏差と定義し、区間標準偏差とトラクタ車体の上下方向振動加速度との相関について検討したところ、区間長によって相関係数は異なったが、区間長5mの標高差の区間標準偏差とトラクタ車体の振動加速度との相関係数は0.812*となり危険率5%で有意であり、両者の相関が認められた。

(4) ISOで検討中の路面分級案の分類と振動加速度の実効値とはよく一致し、路面粗さの分類で悪い路面に分類される牧草地（分級案－F）を走行した場合、トラクタ車体の振動加速度が大きくトラクタの走行に支障を来した。

(5) 以上の結果より、トラクタ車体の振動加速度と区間長5mの標高差の区間標準偏差との相関は高く、標高差の区間標準偏差の大きい牧草地ほど、トラクタ車体の振動加速度の大きくなることが認められ、区間長5mの場合の標高差の区間標準偏差を求めると、ほ場面凹凸の評価が可能になる。

V 牧草地の凹凸の基準の提案（第6章の要旨）

牧草地の凹凸の性質を考慮したほ場面凹凸の評価法に基づき、トラクタ座席上での振動加速度により牧草地の凹凸の基準を提案した。また、統計的な観点より、標高差の区間標準偏差の求め方について検討し、以下に示す結論を得た。

(1) トラクタ座席上での振動を農作業の難易の判断基準とし、ISOの全身振動に対する許容基準を参考にして牧草地の凹凸を評価すると、区間長を5mとした標高差の区間標準偏差が20mm以下、標高のPSDがISOの分級案のA～Eの範囲となるようにほ場を整備することが望ましい。

(2) 各種均平作業と均平精度の関係について検討した結果、耕うん整地作業により標高差の区間標準偏差20mmを満たすことが可能であり、ランドプレーナ

あるいはレーザ光応用の均平作業機械により高い均平精度が得られることが認められた。

(3) 以上の結果より、区間長を5mとした標高差の区間標準偏差を求めることにより、牧草地の凹凸の評価は可能となる。牧草地の標高差の区間標準偏差を求める場合、0.5m毎の水準測量による凹凸の測定距離を50mとし、供試ほ場について11箇所の水準測量を実施し、供試ほ場の標高差の区間標準偏差の平均値を求めれば、供試ほ場の凹凸の程度が評価できる。

論文中で使用している記号

A_I	:	バンド外側のピークの高さ ($I=1, 2, \dots, n_0$)	[mm]
$A(f)$	:	周波数伝達関数	[-]
AB, CD	:	測定線	
AY, BY, CY, DY	:	測定線	
BM	:	仮ベンチマーク	
C'	:	凹凸のPSD近似式 $P_d(\Omega)=C' \Omega^{-W}$ における係数 (文献129)	$[m^2/c/m]$
C_{nn}	:	N の自己相関関数	$[m^2]$
C_{vv}	:	V の自己相関関数	$[m^2]$
C_{yy}	:	Y の自己相関関数	$[m^2]$
C_{zz}	:	$Z(x)$ の自己相関関数	$[m^2]$
f	:	路面周波数	$[c/m]$
f_0	:	$1/2 \pi$	$[c/m]$
f_c	:	ナイキスト周波数	$[c/m]$
G	:	集団化指数	[mm]
K	:	データ数	[-]
L	:	直線長	[m]
l	:	進行距離	[m]
l_1	:	折れ線長	[m]
M	:	必要標本数	[-]
N	:	出力 Y のうち, 入力信号 U とは無関係な部分	[m]
n	:	区間数	[-]
n_0	:	バンド外側のピークの個数	[-]

P_1	:	P_2, P_3 の中点
P_2, P_3	:	傾斜角度測定装置の車輪の接地点
PrQ	:	Profile Quality [-]
PN	:	Profile Number [1/m]
$P(f)$	:	路面周波数 f における PSD [$m^2/c/m$]
$P(f_0)$	:	PSD 近似式の係数 (路面周波数 f_0 における PSD) [$m^2/c/m$]
P_{nn}	:	N の PSD [$m^2/c/m$]
P_{vv}	:	V の PSD [$m^2/c/m$]
P_{yy}	:	Y の PSD [$m^2/c/m$]
P_{yu}	:	Y と U とのクロススペクトル密度関数 [$m^2/c/m$]
P_{zz}	:	Z の PSD [$m^2/c/m$]
$r^2(f)$	:	コヒーレンシ [-]
s	:	距離 [m]
S	:	測定区間の距離 [m]
SD_s	:	標高差の区間標準偏差 [mm]
SD_I	:	区間 I ($I=1, 2, \dots, n$) の標高差の標準偏差 [mm]
T	:	測定距離 [m]
U	:	入力 [m]
V	:	入力 U と線形に対応する部分 [m]
W	:	PSD 近似式の係数 [-]
WB	:	軸距 [mm]
x	:	測点間の距離 [m]
x_s	:	距離 s の時の x 座標 [m]
X_m	:	母平均 [mm]
Y	:	ほ場の中心

Y	:	出力 [m]
$Z(x)$	:	距離 x において測定された標高 [m]
z	:	標高 [m]
z_0	:	起点の標高 [m]
$z(0)$	:	0番目 (起点) の標高 [m]
$z(K)$	:	K 番目 ($0=s$) の標高 [m]
z_I	:	標高 ($I=1, \dots, K$) [m]
z_a	:	信頼係数 [-]
β	:	折れ線長比 [-]
$\triangle 0$	:	進行距離 [m]
$\triangle x$	:	測定間隔 [m]
ε	:	誤差率 [-]
θ	:	微小区間の傾斜角度 [rad]
θ'	:	前後車輪の接地点を結んだ直線 ($p_2 p_3$) 傾斜角度 [rad]
σ	:	標準偏差 [mm]
σ_m	:	母集団の標準偏差 [mm]
τ	:	遅れ [m]

参考文献

緒論

- 1) Pennock, D.J., Zebrath, B.J. and Dejong, E.: Landform Classification and Soil Distribution in Hammock Terrain, Saskatchewan, Canada, Geoderma, 40(3,4), 297-315, 1987
- 2) Terlesk, C.J. : A Proposed Terrain Classification for Harvesting in New Zealand, New Zealand Journal of Forestry, 28(1), 43-57, 1983
- 3) 農林省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 計画 農地開発(開畑) 70, 1976
- 4) 北海道農業試験場農業物理部：機械利用からみた波状地区分, 1971
- 5) Zobeck, T.M. and Onstad, C.A.: Tillage and Rainfall Effects on Random Roughness : A Review, Soil & Tillage Research, 9, 1-20, 1984
- 6) 近江谷和彦：農用トラクタの回転振動に関する研究（第1報），農機誌，47(3)，321-327，1985
- 7) 川村 登，他：農作業機械学，文永堂，114-118，1980
- 8) 市川真祐：田植機のローリングに関する理論的一考察，農機誌，44(2)，307-316，1980
- 9) 市川真祐，他：田植機のピッチングに関する研究（第2報），農機誌，46(3)，339-346，1984
- 10) 田淵俊雄，中野政詩，鈴木誠治：粘土質の水田の排水に関する研究(3)，農土論集，18，18-24，1966
- 11) 松井幹夫：田面の均平と栽培管理，圃場と土壌，70，13-16，1975
- 12) 北海道開発局農業水産部：昭和48年度農地開発事業計画基準作成調査報告書（造成工法，防災施設），1974
- 13) 北海道大学農学部農業機械学教室：農業機械の保守管理について，1981
- 14) 川村 登，他：農業動力学，文永堂，1980
- 15) 北海道農業機械工業会：北海道農業機械発達史，1988

- 16) Rossenger, R. and Rossenger, S.: Helth Effects of Tractor Driving, J. of agric. Engng. Res., 5, 241-274, 1960
- 17) Wendeborn, J.G.: The Irreguralities of Farm fields as Sources of Farm Vehicle Vibration, J. of Terramechanics, 3(3), 9-40, 1966
- 18) Matthews, J.: Ride Comfort for Tractor Operators IV, J. of agric. Engng. Res., 11(1), 44-57, 1966
- 19) 並河 清: 水田おうとつと田植機の上下振動, 農機誌, 32(3), 186-192, 1970
- 20) 笹尾 彰: トラクタの振動源としてのほ場面プロフィルのシミュレーション, 岡山大学農学部学術報告, 47, 67-73, 1976
- 21) 鳥巢 諒, 他: トラクタ振動源としてのほ場面おうとつ特性, 九大農芸誌, 34, 7-17, 1979
- 22) Walls, J.H., et al: Some Measurement and Power Spectra of Runway Roughness, N.A.C.A. TN3305, 1954
- 23) Thompson, W.E.: Measurement and Power Spectra of Runway Roughness at Airports in Countries of North Atlantic Treaty Organization, N.A.C.A. TN 4303, 1958
- 24) Yong, R.N. 他著, 北野昌則訳: オフロード車両の走行力学, 技術教育研究会, 1986
- 25) Kozin, F., et al: Statistical Studies of Ground Roughness, Land Locomotion Laboratory Reports, No.8931 LL95, 1963
- 26) Pevzner, Ya.M. and Tikhonov, A.A.: Statistical Discription of the Micro Profile of Automotive Roads, J. of Terramechanics, 1(4), 5-14, 1964
- 27) La Barre, R.P., et al: The Measurement and Analysis of Road Surface Roughness, MIRA Report, No.1970/5, 1970
- 28) 兼重一郎: 自動車の不規則振動と道路面の特性, 自動車技術, 21(4), 334-339, 1967
- 29) 森田 敬, 他: 路面プロフィルの研究, 自動車技術, 24(4), 362-367, 1970

- 30) 永井哲二郎, 他: 走行路面のプロファイルについて, 自動車技術, 27(8), 919-927, 1973
- 31) Blackman, J.W., et al: The Measurement of Power Spectra, Dover, 1958
- 32) Hveem, F.N.: Devices for Recording and Evaluation Pavement Roughness, Highway Research Bulletin, 264, 1-23, 1962
- 33) Currence, H.D., et al.: The Analysis of Soil Roughness, Trans. ASAE, 13(6), 710-714, 1970
- 34) Hunter, A.G.M.: Characteristics of Rough Ground Using an Accelerometer for Measurement, J. of Terramechanics, 16(1), 33-34, 1979
- 35) Romkens, M.J. and Wang, J.Y.: The Effect of Tillage on Surface Roughness, ASAE Paper, 84-2026, pp17, 1984
- 36) 日本規格協会: JIS B0601-1982 表面粗さの定義と表示, JIS ハンドブック機械要素, 427-431, 1985
- 37) 日本規格協会: JIS B0610-1976 表面うねり, 432-433, 1985
- 38) 兼重一郎: パワースペクトル解析の自動車への応用, いすゞ技報, 33, 1-9, 1960
- 39) 狼 嘉郎, 兼重一郎: 車体の耐久性に関連した各種計測の問題, 自動車技術, 17(3), 176-181, 1963
- 40) 永光哲次郎, 中矢祐介: 走行路面のプロファイルについて, 自動車技術, 27(8), 919-927, 1973
- 41) 山川新二 他: 路面凹凸の表示方法について, 自動車技術会学術講演論文前刷集, 731, 261-266, 1973
- 42) 高井宗宏 他: 田植機の性能について, 農機北支報, 12, 14-22, 1972
- 43) 中村喜影, 増田正三: 水田代かき均平装置の性能に関する研究 (第1報) 農機関西支部報, 31, 4-12, 1972
- 44) 中村喜影, 増田正三: 水田代かき均平装置の性能に関する研究 (第2報) 農機関西支部報, 33, 41-44, 1973

- 45) 藤本義二：中距離土工用建設機械の走行路面の凹凸について，テラメカニックス，1，27-30，1981
- 46) 竹内正臣 他：装軌車走行地形のプロファイルの研究（その1），技術研究本部技報，技-204，pp13，1977
- 47) 長田 昇：田面均平度の評価に関する一考察，農土論文集，21，55-59，1967
- 48) 長利 洋：傾斜面を基準とする方丈面均平の評価法，農土誌，53(12)，1039-1044，1985
- 49) 長利 洋：圃場面傾斜の測定精度と測定市の関係，農土論文集，132，89-96，1987
- 50) 長利 洋：圃場面排水溝による残留水の排除効果，農土誌，55(4)，303-308，1987
- 51) 農林水産省畜産局：草地開発事業計画設計基準，1978
- 52) 北海道開発局：農地造成（山成畑工）設計基準（案），1983
- 53) 頼政 尚：小域地区鉋害復旧事業における機械歩掛りについて，農土誌，36(12)，799-804，1969
- 54) 北海道：草地整備改良事業における起伏修正採択基準試験成績報告書，1978
- 55) 農林省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 計画 ほ場整備（水田）1977
- 56) 北海道開発局農業水産部：昭和49年度農用地造成改良工法調査報告書，p.29，1975
- 57) 北海道開発局農業水産部：昭和47年度農用地造成改良工法調査報告書，p.19，1972
- 58) 伊藤信孝：トラクタのすべり沈下について（第2報），農機誌，35(4)，335-344，1974
- 59) Romkens, M. J. M. and Wang, J.Y.: Soil Roughness Changes from Rainfall, Trans. A.S.A.E., 30(1), 101-107, 1987
- 60) Ghadiri, H.: The Risk of Leaving the Soil Surface Unprotected against Falling Rain, Soil & Tillage Research, 8, 119-130, 1986

- 61) 長沢徹明：寒冷地の草地造成に伴う水食発生機構に関する研究，
昭和57年度科学研究費補助金（一般研究C）研究成果報告書，1983
- 62) 山崎不二夫：農地工学，東京大学出版会，464-497，1972
- 63) 農業土木学会：土地改良事業計画設計基準（案） 第2部計画 第3編
農地開発（開畑編），1975
- 64) 佐藤清美：機械化作業からみた畑地の起伏について，北海道農業試験場
農業物理部，1970
- 65) 佐藤清美：傾斜草地における機械化作業の現況と今後の研究課題，
農機誌，37(4),666-669，1976
- 66) 佐野文彦：急傾斜地用機械の必要性について，農機誌，37(4),630-634，
1976
- 67) Heermann, D.F., et al.: Prediction of Flow Resistance in Furrows
from Soil Roughness, Trans. ASAE, 12, 482-489, 1969
- 68) Johnson, C.B., et al.: Influence of Surface Roughness and Clod
Size and Stability on Soil and Water Losses, Soil Sci. Soc. Am.
J., 43, 772-777, 1979
- 69) Voorhees, W.B., et al.: Wheel Traffic Consideration in Erosion
Research, Trans. ASAE, 22, 789-790, 1979
- 70) Podmore, T.H. and Huggins, L.H.: Surface Roughness Effects on
Overland Flow, Trans. ASAE, 23, 1434-1439, 1455, 1980
- 71) Cogo, N.P., et al.: Effect of Crop Residue, Tillage-Induced
Roughness and Runoff Velocity on Size Distribution of Eroded
Soil Aggregates, Soil Sci. Soc. Am. J.: 47, 1005-1008, 1983
- 72) Steichen, J.M.: Infiltration and Random Roughness of a Tilled
and Untilled Claypan Soil, Soil & Tillage Research, 4, 251-262,
1984
- 73) Lehrs, G.A., et al.: Soil Surface Roughness as Influenced by
Selected Soil Physical Properties, Soil & Tillage Research, 10,
197-212, 1987

- 74) Potter, K.N., et al.: Soil Surface Roughness Effects on Radiation Reflectance and Soil Heat Flux, Soil Sci. Soc. Am. J., 51, 855-860, 1987
- 75) Matthews, J.: Ride Comfort for Tractors II, J. agric. Engng. Res. 9(2), 147-158, 1964
- 76) Young, R.E. and Suggs, C.W.: Roll and Pitch Investigations of Off-Road Vehicles, Trans. ASAE, 18, 841-844, 1975
- 77) Crolla, D.A. and Dale, A.K.: Ride Vibration Measurements of Agricultural Tractor and Trailer Combinations, Veh. Syst. Dyn., 5, 261-279, 1976
- 78) 三浦恭志郎 他: 車両振動計測用人工悪路について, 農業機械の安全性に関する研究(中間報告), 農業機械化研究所, 5-15, 1978
- 79) Crolla, D.A.: Theoretical Analysis of the Ride Vibration of Agricultural Tractor and Trailer Combinations, Veh. Syst. Dyn., 9, 237-260, 1980
- 80) Gerke, F.G. and Hoang, D.L.: Tractor Vibrations at the Operator's Station, Trans. ASAE, 24, 1131-1134, 1981
- 81) 近江谷和彦, 松居 勝広: サスペンションシートによる農用トラクタの座席振動低減効果(第1報), 農機北支報, 24, 29-34, 1983
- 82) 近江谷和彦: 農用トラクタの回転振動に関する研究(第3報), 農機誌, 50(3), 21-26, 1988
- 83) Line, J.A.: Ride Vibrations of Agricultural Tractors: Transfer Functions between the Ground and the Tractor Body, J. agric. Engng. Res., 37, 81-91, 1987
- 84) 農業機械学会: 農業機械ハンドブック, コロナ社, 709-747, 932, 1983
- 85) 北海道開発局農業水産部: 昭和49年度農地開発事業計画基準作成調査報告書(造成工法, 防災施設), 8-13, 1975
- 86) 北海道農業試験場機械化第1研究室: 草地・飼料作の機械化, 30, 1971
- 87) 北海道農業試験場農業物理部: 機械利用からみた波状地区分, 38, 1971
- 88) 北海道農業開発機械化研究会: 大型機会の修理に関する報告書, 72, 1975

- 89) 北海道開発局農業水産部：昭和48年度農地開発事業計画基準作成報告書
(造成工法・防災施設)，6-7，1975
- 90) 北海道開発局農業水産部：昭和47年度農地開発事業計画基準作成報告書
(造成工法・防災施設)，13，1973
- 91) 山口英太郎，他：九州地方平坦水田における均平度の実態について，
農土誌，35(2)，58-66，1967
- 92) Currence, H.D.: Developement of a Method for Measuring and
Describing Soil Surface Roughness, Unpublished Doctors Thesis,
Iowa State University, 1969
- 93) Moore, I.D. and Larson, C.L.: Estimating Micro-Relief Surface
Storage from Point Data, Trans ASAE, 22, 1073-1077, 1979
- 94) 得丸英勝，他：計数・測定 ランダムデータ処理の理論と応用，培風館，
44，1982
- 95) 近江谷和彦，松居勝広：ほ場面プロファイルに関する研究（第2報），農
機誌，44(2)，293-297，1982
- 96) 山川新二：車両テスト路面について，自動車技術，30(8)，655-661，1976
- 97) ISO: Reporting Vertical Road Surface Irreguralities(TC180/SC2/
WG4)，1982
- 98) 北海道開発局：農用地開発事業の設計積算要領，1974
- 99) 北海道農務部酪農草地課：草地開発関係事業実施の手引，1980
- 100) 鈴木 正：土壌均平と栽培管理，圃場と土壌，70，17-20，1975
- 101) 近江谷和彦：ほ場面凹凸のプロファイルに関する研究（第3報），農機誌，
47(4)，469-474，1986
- 102) Burrel, R.E., et al.: A Field Measurement of Total Porosity and
Surface Microrelief of Soils, Soil Sci. Soc. Pr., 21, 697-700,
1963
- 103) 古池寿夫，永田雅輝：試作した圃場面描写器と圃場面形状の測定方法に
ついて，農機誌，30(3)，164-168，1968
- 104) Radke J.K., et al.: A Microprocessor Automated Rillmeter, Trans.
ASAE, 24, 401-404, 408, 1981

- 105) VAN Ouwerkerk, et al.: Electronic Microreliefmeter for Seedbed Characterization, Soil & Tillage Research, 2, 81-90, 1982
- 106) 今野繁雄, 他: 圃場面縮尺描写器 (プロフィログラフ) の製作, 農機北支報, 13, 129-131, 1972
- 107) Currence, H.D. and Lovely, W.G.: An Automatic Soil Surface Profilometer, Trans. ASAE, 14, 69-71, 1971
- 108) Henry, J.E., et al.: A Device for Measuring Soil Surface Profiles, Trans. ASAE, 23, 1457-1459, 1980
- 109) Podmore, T.H. and Huggins, L.F.: An Automated Profile Meter for Surface Roughness Measurements, Trans. ASAE, 24, 663-665, 669, 1981
- 110) Harral, J.E. and Cove, C.A.: Development of an Optical Displacement Transducer for Measurement of Soil Surface Profiles, J. agric. Engng. Res., 27, 421-429, 1982
- 111) Romkens, M.J.M., et al.: An Automated Non-Contact Surface Profile Meter, Soil & Tillage Res., 6, 193-202, 1986
- 112) Destain, M.F. and Verbrugge, J.C.: Measurement of Soil Surface Profiles with an Optical Displacement Transducer, Proceedings of 9th International Conference of ISTVS, Barcelona (Spain), 152-159, 1987
- 113) Huang, C., et al.: A Noncontact Laser System for Measuring Soil Surface Topography, Soil Sci. Soc. Am. J., 52, 350-355, 1988
- 114) 林 暎雄, 松本 薫: 路面形状による乗心地の比較, トヨタ技術, 10, 124-139, 1957
- 115) Spagler, E.B. and Kelly, W.J.: Servo-seismic Method of Measuring Road Profile, Highway Research Board Bulletin, 328, 33-51, 1962
- 116) Laib, L.: Measurement and Mathematical Analysis of Agricultural Terrain and Road Profiles, J. of Terramechanics, 14, 83-97, 1977
- 117) Fujimoto, Y.: Spectrum Analysis of Road Roughness for Earthmoving Machinery, J. of Terramechanics, 20, 43-60, 1983

- 118) Sattinger, I.J. and Therkelsen, E.B.: An Instrumentation System for the Measurement of Terrain Geometry, Land Locomotion Research Laboratory, RR4, 13-19, 1956
- 119) 森下 巖, 小畑秀文: 信号処理, (社) 計測自動制御学会, 23-26, 1982
- 120) BSI: BS4220 Part1 Methods of Test for Seats on Agricultural Wheeled Tractors, 1974
- 121) Forsch, G.E., 他, 森 正武訳: 計算機のための数値計算法, 科学技術出版社, 82-87, 1978
- 122) 赤池弘次, 中川東一郎: ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 40-42, 1972
- 123) 近江谷和彦: ほ場面のプロフィールに関する研究 (第4報), 農機誌, 48(1), 9-14, 1986
- 124) Hunter, A.G.M. and Smith, E.A.: Measurement of Surface Roughness, Wear, 59, 383-386, 1980
- 125) 近江谷和彦, 他: ほ場面プロフィールに関する一考察, 農機北支報, 23, 51-55, 1982
- 126) 寺尾日出男, 他: 牧草地の凹凸に関する研究, 北海道大学農学部牧場研究報告, 13, 33-44, 1987
- 127) ISO : ISO5008 Agricultural Wheeled Tractors and Field Machinery - Measurement of Whole-body Vibrations of Operator, pp.11, 1979
- 128) Ohmiya, K. : Characteristics of Farm Field Profiles as Sources of Tractor Vibration, J. of Terramechanics, 23(1), 23-36, 1986
- 129) 野和田清吉 (防衛庁技術研究本部第4研究所) の資料による
- 130) Ohmiya, K.: Seat Suspension System for Improving Ride Comfort, J. Fac. Agr. Hokkaido University, 62(3), 302-311, 1985
- 131) Weigelt, von H., et al.: Untersuchung des Schwingungsverhältnis von Ackerschleppern mit einer Leermesse über fünf Tonnen, Grndl. Landtechnik, 34, 143-150, 1984

- 132) Hunter, A.G.M. and Smith, E.A.: Filtering Errors When a Rigid Wheel Is Used to Measure Ground Roughness, J. of Terramechanics, 17(1), 1-12, 1980
- 133) Beres, W.: Modeling of Tyre Enveloping against Terrain Roughness Proceedings of 9th International Conference of ISTVS (Barcelona) 441-448, 1987
- 134) Matthews, J.: Ride Comfort for Tractor Operators I, J. agric. Engng. Res., 9(1), 3-31, 1964
- 135) Kawamura, A. and Kaku, T.: An Evaluation of Road Roughness and the Effects of Riding Comfort and Vehicle Dynamics, Proc. of JSCE No.359/IV-2, 137-147, 1985
- 136) 山川新二: 実データの処理技術, 日本機械学会関西支部第60回講習回教材, 48-60, 1974
- 137) 中村慶一: 技術者のための統計解析, 山海堂, 66-69, 1965
- 138) 近江谷和彦, 寺尾日出男: ほ場面凹凸の評価法について, 農業機械学会第46回講演会講演要旨, 45, 1987
- 139) ISO:ISO2631 Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration, 1974
- 140) Buras, N. and Manor, G.: Field Comparison of Land Smoothers, Trans. ASAE, 13, 639-640, 643, 1970
- 141) 農業土木学会: 八郎潟干拓地耕地整備委員会報告書, 146-147, 1972
- 142) Lasers and Irrigation, Power Farming, 93, 36-49, 1984
- 143) Fouss, J.L., et al.: Simulation of Laser Beam Automatic Depth Control, Trans, ASAE, 15, 692-695, 1972
- 144) 木村勝一, 他: レーザ光利用による水田の自動均平化技術の開発(第2報), 農機東北支部会報, 35, 9-12, 1988
- 145) 米谷栄二, 山田善一: 新版測量学, 丸善, 226-228, 1973
- 146) 梅田安治, 他: 大型畑地圃場の地形について, 農土誌, 53(6), 487-492, 1985
- 147) 岸根卓郎: 理論・応用統計学, 養賢堂, 553-557, 1975