

飛砂による後浜の地形変動と海岸植生の効果
に関する研究

工学研究科
筑波大学

2003年3月

有働 恵子

要 旨

後浜は、多角的利用の需要が高く、また、防災機能を持ちあわせた貴重な空間である。この空間を適切に管理していく上で、後浜の地形変動や飛砂の現状を把握することは重要であるが、これらに関する知見の蓄積は少ない。また、海岸植生は、飛砂を捕捉し、後浜地形を安定に保つ機能を持つことが報告されているが、定量的には不明な点が多い。

よって、本研究では、後浜の短期的および長期的な地形変動特性を調べるとともに、植生モデルを用いて植生領域の飛砂に関する風洞実験を行い、植生の効果に関する考察を行った。さらに、植生および斜面の効果を取り入れた飛砂シミュレーションにより、海岸砂丘の長期的な地形変動の再現を試みた。

茨城県角折海岸において現地調査を行い、後浜の短期的な地形変動特性を調べた結果、植生分布と地盤高変化の間には、植被率（植生が地面を覆う面積割合）が大きいほど堆砂を促進するという関係、すなわち植生の飛砂捕捉効果が見られた。

茨城県角折海岸、下津海岸および豊ヶ浜海岸において航空写真測量を行い、後浜の長期的な地形変動特性を調べた結果、卓越風向に対して垂直に存在する横列砂丘は不安定で、砂丘の規模にかかわらず砂丘列方向長さ約 100m の複数の小砂丘に分裂していた。横列砂丘は陸側への飛砂を抑制しており、砂丘に分裂が生じた後は後浜への飛砂が増大していた。植生が繁茂している領域において、植被率にかかわらず局所的に地形変動特性が異なっている部分があり、植生の飛砂捕捉効果は風向に依存すると見られる。

風洞実験を行い、植生領域の飛砂特性を調べた結果、植生層の遮蔽体積率が大きく、植生層高が小さい場合ほど、砂面付近の風速の減衰が大きくなり、植生領域では堆砂傾向であった。植生層で発生する乱れにより、植生層内の風速は大きく減衰し、これにより砂のサルテーションの水平速度は小さくなっていった。

平衡場の飛砂量公式である河村公式に、現地調査の結果より得られた植生と地盤高の関係を取り入れることで、航空写真測量で得られた角折海岸の中央砂丘の長期的な地形変動を定性的に再現することが可能であった。

ABSTRACT

Backshore is important space for prevention and mitigation of coastal disasters, and development of coastal amenities. For proper management of backshore, it is important to grasp the characteristics of morphological change and blown sand in backshore, however, the knowledge is limited. Though vegetation (beach grass) is reported to have functions of restraining the blown sand and stabilizing the backshore morphology, the quantitative effect is seldom investigated at the moment.

This study analyzed short- and long-term morphological change of backshore, and vegetation effect on blown sand. A 3D computation considering the vegetation and slope effect on blown sand was conducted to simulate the long-term morphological change.

Field survey had been conducted at Tsuno-ore beach facing the Kashima Sea, Japan, to investigate the short-term morphological change. Sand tended to settle in dense vegetation areas.

Aerial photograph survey had been conducted at Tsuno-ore, Oritsu and Toyogahama beaches facing the Kashima Sea over 15 years to investigate the long-term morphological change. Longshore dunes installed for prevention of landward blown sand were separated into smaller dunes by transverse winds, roughly 100m in length. One of these dunes at the Tsuno-ore beach was deformed into a crescent barchanoid dune. The diformation implied the vegetation effect on beach stabilization largely depends on the wind direction.

Wind tunnel experiment was conducted to investigate the vegetation effect on blown sand quantitatively. The vegetation layer with lower height, higher density and flexibility was effective in reducing the wind velocity above the sand surface. Accordingly, the horizontal saltation velocity of sand particles was reduced and then the sand tended to settle down.

The deformation of the crescent dune at the Tsuno-ore beach was successfully simulated through an FDM computation, where the Kawamura formula was employed with additional terms representing the effects of vegetation and sand surface slope.

目 次

要旨	i
ABSTRACT.....	ii
目次	iii
第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 飛砂および後浜地形に関する従来の研究.....	2
1.3 本研究の目的と特徴.....	3
参考文献.....	5
第2章 後浜の短期的な地形変動.....	8
2.1 概説.....	8
2.2 調査地の概要.....	8
2.3 調査項目と調査方法.....	9
2.3.1 海岸断面の形状.....	9
2.3.2 植生分布.....	9
2.3.3 砂の粒径分布.....	9
2.3.4 調査地における風況の推定.....	9
2.4 調査結果.....	11
2.4.1 海岸断面の形状.....	11
2.4.2 植生分布.....	12
2.4.3 砂の中央粒径分布.....	12
2.4.4 調査地における風況の推定結果.....	12
2.5 考察.....	13
2.5.1 海岸断面地形の変化の特徴.....	13
2.5.2 植生分布と地盤高変化の関係.....	14
参考文献.....	15
第3章 後浜の長期的な地形変動.....	30
3.1 概説.....	30

目 次

3.2	調査地の概要	30
3.3	調査項目と調査方法	30
3.3.1	後浜の地形変動	31
3.3.2	汀線変化と海岸林の関係	31
3.3.3	調査地における風況の推定	31
3.4	調査結果	31
3.4.1	砂丘列の変動過程	31
3.4.2	角折海岸中央砂丘の地形変動	32
3.4.3	汀線変化と海岸林の関係	32
3.4.4	調査地における風況の推定結果	33
3.5	考察	33
3.5.1	砂丘列分裂メカニズム	33
3.5.2	砂丘列変動の後浜における土砂移動への影響	33
3.5.3	汀線変化と海岸林面積の関係	34
3.5.4	植生の長期的な地形変動への影響	34
	参考文献	36
第4章	海岸植生が飛砂に及ぼす影響	46
4.1	概説	46
4.2	実験装置	46
4.2.1	風洞	46
4.2.2	植生層	46
4.3	実験方法	47
4.3.1	砂面高変化の測定	47
4.3.2	平均風速分布の測定	47
4.3.3	スモークワイヤ法を用いた植生領域の風場の可視化	47
4.3.4	砂粒子のサルテーション軌道の解析	47
4.4	実験結果	48
4.4.1	砂面高変化	48
4.4.2	平均風速分布	48
4.4.3	植生領域の風場	49
4.4.4	砂粒子のサルテーション軌道	49
4.5	考察	50
4.5.1	植生層の遮蔽体積率が飛砂に与える影響	50
4.5.2	植生の形状が飛砂に与える影響	51
4.5.3	植生層で発生する乱れが飛砂に与える影響	51

目 次

4.5.4	植生領域における粗度長と摩擦速度	52
	参考文献	54
第5章	数値計算による長期的な砂丘変動の再現	82
5.1	概説	82
5.2	数値計算の概要	82
5.2.1	数値計算の枠組	82
5.2.2	飛砂量公式	82
5.2.3	風場計算法	83
5.3	計算結果	83
5.3.1	風場	83
5.3.2	砂丘変動シミュレーション	83
5.4	考察	84
5.4.1	植生効果および斜面効果導入の重要性	84
5.4.2	本モデルの問題点	84
	参考文献	85
第6章	結論	93
	謝辞	95
	論文リスト	96

表目次

第 2 章	後浜の短期的な地形変動	
表 2-1	調査日	16
表 2-2	調査地で見られた植物.....	16
第 4 章	海岸植生が飛砂に与える影響	
表 4-1	植生層の諸元.....	55
第 5 章	数値計算による長期的な砂丘変動の再現	
表 5-1	α -FLOW による風場解析の計算.....	86

目次

第 1 章	序論	
図 1-1	研究の流れ.....	7
第 2 章	後浜の短期的な地形変動	
図 2-1	調査地の位置.....	17
図 2-2	調査地の概況.....	17
図 2-3	調査点の位置.....	18
図 2-4	調査地およびアメダス観測点における風場の概況.....	18
図 2-5	測線に沿った断面地形.....	19
図 2-6	測線に沿った 1998 年 10 月～2000 年 6 月の平均植被率と標準偏差.....	21
図 2-7	測線 , および に沿った 1999 年 3 月～2000 年 6 月の砂の平均中 央粒径	22
図 2-8(a)	角折海岸における 2～3 ヶ月間毎の推定風配.....	23
図 2-8(b)	角折海岸における半年間毎の推定風配.....	24
図 2-9	角折海岸における平均風速.....	25
図 2-10(a)	2～3 ヶ月間毎の地盤高変化の経時変化.....	26
図 2-10(b)	半年間毎の地盤高変化の経時変化.....	27
図 2-11	地盤高変化と推定風配の各風向成分の相関関係.....	28
図 2-12	1998 年 12 月～1999 年 12 月の植被率と地盤高変化の関係.....	28
第 3 章	後浜の長期的な地形変動	
図 3-1	現地調査と航空写真測量による角折海岸の断面の比較.....	37
図 3-2	1984～1999 年の下津海岸砂丘部の変動.....	38
図 3-3	1984～1999 年の角折海岸砂丘部の変動.....	38
図 3-4	1984～1999 年の豊ヶ浜海岸砂丘部の変動.....	38
図 3-5	角折海岸の中央砂丘の地形変動.....	39
図 3-6	角折海岸の中央砂丘断面の変化.....	40
図 3-7	1999 年 12 月を基準とした土砂量の経時変化.....	41
図 3-8	1984 年 12 月を基準とした汀線位置の経時変化.....	41
図 3-9	海岸林面積の経時変化.....	42

図目次

図 3-10	調査地における期間別の推定風配.....	43
図 3-11	砂丘列の変動と陸側への土砂移動の関係.....	44
図 3-12	砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の関係.....	45
第 4 章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響		
図 4-1	測定部内の植生モデル設置位置と風速の測点.....	56
図 4-2(a)	植生層なし () の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	57
図 4-2(b)	棒型 10・非変形植生層 (a) の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	58
図 4-2(c)	棒型 10・非変形植生層 (b) の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	59
図 4-2(d)	棒型 10・非変形植生層 (c) の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	60
図 4-2(e)	ハマヒルガオ型・変形植生層 () の場合の砂面高変化と平均風速 分布.....	61
図 4-2(f)	棒型 65・非変形植生層 (a) の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	62
図 4-2(g)	棒型 65・非変形植生層 (b) の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	63
図 4-2(h)	棒型 65・非変形植生層 (c) の場合の砂面高変化と平均風速分布.....	64
図 4-2(i)	コウボウムギ型・非変形植生層 (s) の場合の砂面高変化と平均風 速分布.....	65
図 4-2(j)	コウボウムギ型・変形植生層 (a) の場合の砂面高変化と平均風速 分布.....	66
図 4-2(k)	コウボウムギ型・変形植生層 (b) の場合の砂面高変化と平均風速 分布.....	67
図 4-3	コウボウムギ型・変形植生層 (b) の各時間帯の平均砂面高変化.....	68
図 4-4(a)	植生層なし () の場合の流脈線.....	69
図 4-4(b)	棒型 10・非変形植生層 (b) の場合の流脈線.....	70
図 4-4(c)	棒型 10・非変形植生層 (c) の場合の流脈線.....	71
図 4-4(d)	ハマヒルガオ型・変形植生層 () の場合の流脈線.....	72
図 4-5	植生層なし () の場合の $z = 45\text{mm}$ および 60mm 付近から発生する 流脈線の比較.....	73
図 4-6	植生領域風下側における砂粒子のサルテーション軌道.....	74
図 4-7	ハマヒルガオ型植生層 () の場合の流脈線と砂面高変化の比較.....	76
図 4-8	$x = -100\text{mm}$ における平均風速の対数分布.....	77
図 4-9	$x = -100\text{mm}$ における粗度長と遮蔽体積率の関係.....	77
図 4-10	摩擦速度の流下方向の変化.....	78
図 4-11	植生層風下側 ($x = 450\text{mm}$) における砂面付近と砂面上 40mm 付近の 風速減衰の関係.....	78

図目次

第 5 章	数値計算による長期的な砂丘変動の再現	
図 5-1	1990 年の角折海岸中央砂丘における植生分布 c_v	87
図 5-2	砂丘表面の摩擦速度の分布.....	88
図 5-3(a)	風向 NNE の場合の中央砂丘断面における風速分布.....	89
図 5-3(b)	風向 SE の場合の中央砂丘断面における風速分布.....	90
図 5-4	航空写真測量結果と計算結果の比較.....	91
図 5-5	シミュレーションによる中央砂丘断面の変化.....	92

写真目次

第2章 後浜の短期的な地形変動

写真 2-1	1984 年の角折海岸の航空写真	29
写真 2-2	中央砂丘頂部から見た北北東方向の眺望	29

第4章 海岸植生が飛砂に与える影響

写真 4-1	コウボウムギ型・変形モデル (a) の植生層	79
写真 4-2	スモークワイヤ法による風場の可視化	80
写真 4-3	砂粒子のサルテーション軌道の例	81

第1章 序論

1.1 研究の背景

海岸は、多様な生物が生息・生育する貴重な場であるとともに、美しい砂浜や荒々しい岩礁等の独特の自然景観を有している。また、漁場の場や港としての利用がなされ、干拓による農地の開発等も多く行われ、生産や輸送のための空間としての役割も果たしてきた。さらに近年は、レジャーやスポーツ、あるいは動植物と触れ合う場としての役割も担っている。

このような中で、防災面では海岸保全施設の整備は十分ではなく、津波や高潮等により依然として多くの被害が発生している。海岸に供給される土砂の減少や海岸部での土砂収支の不均衡等により海岸侵食が進んでいる。様々な海岸利用の要請がある一方、人為的影響を受けやすい空間であり、海岸の汚損や海浜への車の乗り入れ等の行為により海岸環境が損なわれている。また、地域によっては飛砂被害が深刻な問題となっている。

以上のことから、国民共有の財産として「美しく、安全で、いきいきとした海岸」を次世代に継承していくことを基本理念とし、海岸法の改正が策定された。この理念に基づき、従来の「海岸の防護」という法目的に加えて、「公衆の海岸の適正な利用の確保」および「海岸環境の適切な整備と保全」が追加され、防災だけではなく環境の面でも海岸管理のあり方が問われることになった。

海岸管理のあり方を考えていく上で、沿岸域全体の地形変動特性や砂収支、生態系等を明らかにすることは重要である。砂浜は、平均干潮汀線から平均満潮汀線付近までの前浜と、前浜の陸側で砂丘帯までの後浜から成っているが、前浜に比して後浜に関する研究成果の蓄積は少ない。しかし、海岸利用および環境を考えていく上で、後浜の地形変動や生態系等に関する知見は不可欠である。

後浜の地形変動は飛砂に因るものである。飛砂現象に関しては、物理学、地学、海岸工学等様々な分野の研究者により研究が進められてきたが、飛砂の発生機構や非平衡場における飛砂メカニズム等、不明な点が多く残されている。海岸工学の視点では、海岸には植生（砂草）が繁茂しており、植生の飛砂捕捉効果が多数報告されていることから、植生による飛砂制御は景観にも配慮した有効な海岸管理法であるが、定量的な情報は少なく、今後知見の蓄積が期待されている。

1.2 飛砂および後浜地形に関する従来の研究

砂の輸送現象に関する研究は、漂砂、飛砂ならびに流砂についてそれぞれ独立に発展してきた部分もあるが、多くの面では何らかの形で相互に関連しながら発展してきた。特に漂砂と流砂、および飛砂と流砂はそれぞれ密接に関連している部分が多い。前者における2つの現象は、水流中における砂の輸送現象としては同じであるが、流体の運動に非定常流と一方向流という相違がある。一方、一方向流中での砂の輸送現象としては同じである後者における2つの現象は、気流と水流中での砂の輸送現象という相違がある。土屋ら(1970, 1984)は、これらがそれぞれ流体の加速度および流体と砂粒の密度比の相違であると指摘している。(河田・柴山, 1990)

飛砂および流砂における砂粒の移動機構は、当初 Bagnold 流の力学的な取り扱いおよび Einstein 流の確率論的な取り扱いとしてそれぞれ独立に発展してきた。Bagnold 型 (power model) は、砂粒の移動によって生じる砂の剪断応力を評価し、流体と砂の運動量保存則として定義される混相流としての全剪断応力、流体の剪断応力および砂の剪断応力間の力の釣合いによって砂の移動量を定める方法である。一方、Einstein 型は、砂粒の初期移動開始と停止に注目し、離脱確率密度 (pick-up rate) と移動開始から停止までの移動距離 (step length) によって砂粒の移動開始量と停止量を表すことにより砂の移動量を求める方法である。(河田・柴山, 1990)

飛砂に関しては、確率論的な取り扱いを行う研究は少なく、力学的な取り扱いを行うものが多い。Bagnold (1941) や河村 (1951) は、力学的な取り扱いにより平衡場における飛砂量公式を提案している。現時点において、特に広域の飛砂量を推定する際には、主にこれらの式が用いられている (例えば U.S. Army Corps of Engineers, 2002)。Horikawa・Shen (1960) は、Bagnold 公式では限界摩擦速度が考慮されていないのに対して、河村公式ではこれが考慮されており、限界摩擦速度の近傍で飛砂量が実験値とよく一致することを示している。

風による砂の移動は、浮遊移動、跳躍移動ならびに掃流移動の3つに分けられるが、飛砂の大部分は跳躍によって移動し、掃流状態で移動する量は跳躍による移動量の1/3~1/4といわれていることから、跳躍移動 (saltation) に関するミクロな研究は多くの研究者によって為されてきた。Anderson (1991) は、砂粒子の砂面との反発機構について DBM (Discrete Block Method) を用いた数値解析を行い、跳躍粒子の衝突により衝突粒子が再び跳躍する rebound と、衝突により床面を構成している数個の砂粒が飛び出す splash について議論している。Rice (1991) は、砂粒の形状の影響について検討し、丸みのない形状の砂粒ほど rebound の確率が小さくなるため飛砂量が小さくなること、軌道が平坦で長くなることを示している。また、Rasmussen (1996) および Iversen (1999) は、斜面の影響について検討しており、Iversen は斜面の影響を取り入れた摩擦速度式を提案している。以上のように、saltation に影響を与える各要素について注目した研究が存在するが、現時点では飛砂量推定に実用でき

る段階にはない。

海岸植生が風場に与える影響に関して、例えば Olson (1958) は、海岸砂丘において植生領域では粗度長が大きくなることを示している。栗山・望月 (1997) は、茨城県波崎海岸の現地調査結果より、長さ 50m の測線上における植生の繁茂指数、すなわち植物の容積を調査面積で割った値と飛砂量の関係を調べ、植生により飛砂が捕捉されていたことを示している。加藤・佐藤 (1998) は、千葉県九十九里浜中央に位置する小松海岸において、植生群落の遷移と群落別の地盤高の変化について調べ、地形変化と海岸植生の植高や植被率（植生が地面を覆う面積の割合）との間に相関は見られなかったこと、飛砂は汀線～植生最前部の方がその背後より激しいことを示している。パッチ状の植生領域に形成されるピラミッド型の小砂丘 (shadow dune) について、Hesp (1981) は小砂丘の高さは植生の根元部分の幅と砂の安息角に依存し、shadow dune の流下方向長さは根元部分の幅と風速に依存することを示している。以上のように、植生に関する調査項目は各調査地で一致しておらず、現時点では一般性のある情報は少ないが、大部分は植生の飛砂捕捉効果を報告するものである。

飛砂量推定に植生の影響を考慮する試みも行われている。例えば、栗山・上堂園 (1999) は、風速の鉛直分布計算では葉面積密度をパラメータとして取り入れ、飛砂量計算では砂の舞い上がり量と跳躍距離を河村公式 (1951) に裸地の割合（植生で覆われていない面積の割合）を乗じた式で与えている。植生の影響を取り入れることでより精度良く飛砂量を推定することが可能であることを示している。

辻本・西澤 (1999) は、植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究として、変形を許容しない棒状植生モデルを用いた風洞実験を行っている。風速分布、砂面高変化ならびに飛砂量を測定し、密生度が大きく、植生層高が小さい場合に植生の飛砂捕捉効果が大きいことを示している。また、ここでは植生の効果を非平衡流砂量則 (Einstein 型) および風の解析に取り入れて、飛砂シミュレーションを行っている。

海岸砂丘周辺の長期的な地形変動に関する研究は少ないが、現地調査や航空写真測量等により、砂丘変形が飛砂や砂浜地形に与える影響等について議論されている。Bagnold (1941) は、卓越風向に対して垂直に存在する長い横列砂丘は不安定性で分裂しやすく、分裂後は分裂部分の風下側に砂が堆積し、新たな砂丘が形成されることを経験的に示している。西ら (2001) は、鹿児島県吹上浜海岸の航空写真測量により、砂丘風食孔の規模および発生位置を調べ、飛砂発生位置と比較した結果、風食および飛砂発生位置がほぼ一致し、風食孔の内陸側で飛砂が発生しやすいことを示している。

1.3 本研究の目的と特徴

本論文は全 5 章により構成される。各章の内容および相互関係を図 1-1 にまとめる。

第1章 序論

本研究では、茨城県鹿島灘沿岸における現地調査および航空写真測量により後浜の短期的および長期的な地形変動特性を明らかにするとともに、風洞実験により植生領域の飛砂への影響を定量的に明らかにし、植生の影響を考慮した広域かつ長期的な後浜地形変動推定法を開発することを目的とする。

植生は飛砂を捕捉する効果を有することから、この効果を定量的に明らかにすることができれば、これを利用して、対象とする地域のニーズに適した飛砂制御を行うことが可能になる。植生による飛砂制御の特徴としては、まず、環境に与えるインパクトが小さいこと、長期的に見ても景観を損なわないことが挙げられる。これまで、後浜では防砂対策として堆砂垣等が用いられてきたが、景観に配慮したものは少なかった。例えば堆砂垣は、自然素材で作られているため環境に与える影響は小さいものの、景観を著しく損なってしまふ欠点があった。次に、砂漠等においても盛んに緑化運動が進められており、適用範囲が広いことが挙げられる。したがって、植生の飛砂への影響を明らかにすることは、今後の海岸管理ひいては様々な地域で防砂対策を行っていく上で貴重な情報となる。

本研究の特徴は、柔軟性のある植生モデルを用いた風洞実験を行い、これまで定量的な情報がほとんど得られていない植生の影響について定量的かつ一般的な情報を取得し、さらにこれを用いて広域かつ長期的な後浜地形変動を推定する手法を開発する点にある。これまで実務レベルでは、広域かつ長期的な地形変動や飛砂量について、植生や斜面等の影響を考慮せずに推定されてきた。しかし、これらの影響を考慮することでその精度は飛躍的に向上し、沿岸域の土砂収支等を評価する際にも、より正確な情報を取得することが可能になる。

参考文献

- 加藤史訓・佐藤慎司 (1998): 砂浜海岸の植生群落と地形変化の現地調査, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 666-670 .
- 河田恵昭・柴山知也編 (1990): 漂砂環境の創造に向けて, 土木学会, 359p .
- 河村龍馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学 理工学研究所報告, 第5巻, pp. 95-112 .
- 栗山善昭・望月徳雄 (1997): 後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生の地形変化に及ぼす影響に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 681-685 .
- 栗山善昭・上堂藺孝一 (1999): 後浜から砂丘前面にかけての飛砂量の数値計算, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 501-505 .
- 国土交通省 (2002): 「中期的な展望に立った新しい海岸保全の進め方」についての検討資料 . <http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/kondankai/kaiganhozen/kaiganhozen-index.html> (2003年1月5日現在)
- 佐藤慎司・大谷靖郎・橋本新・堀口敬洋 (1999): 新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能, 第46巻, pp. 496-500 .
- 辻本哲郎・西澤謙二 (1999): 海浜植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 506-510 .
- 西隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・牟田神宗征・中村俊一 (2000): 砂丘風食地形に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 581-585 .
- 堀田新太郎 (1985): 飛砂, 本間仁監修/堀川清司編 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 191-209 .
- Anderson, R. S. (1991): Wind modification and bed response during saltation of sand in air, *Acta Mechanica*, Suppl. 1, pp. 21-51.
- Bagnold, R. A. (1941): *The physics of blown sand and desert dunes*, Methuen, London, 265p.
- Hesp, P. A. (1981): The formation of shadow dunes, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 51, pp. 101-112.
- Horikawa, K. and Shen, H. W. (1960): Sand movement by wind action –On the characteristics of sand traps, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board Technical Memo., No. 119, 51p.
- Iversen, J. D. and Rasmussen, K. R. (1999): The effect of wind speed and bed slope on sand transport, *Sedimentology*, Vol. 46, pp. 723-731.
- Olson, J. S. (1958): Lake Michigan dune development. 1 Wind-velocity profiles, *Journal of Geology*, Vol. 66, pp. 254-263.
- Rasmussen, K. R., Iversen, J. D. and Rautahemio, P. (1996): Saltation and wind-flow interaction in a variable slope wind tunnel, *Geomorphology*, Vol. 17, pp. 19-28.
- Rice, M. A. (1991): Grain shape effects on aeolian sediment transport, *Acta Mechanica*, Suppl. 1, pp. 159-166.

第 1 章 序論

U.S. Army Corps Engineers(2002): Wind blown sediment transport, Engineer Manual 1110-2-292,
Washington, DC.

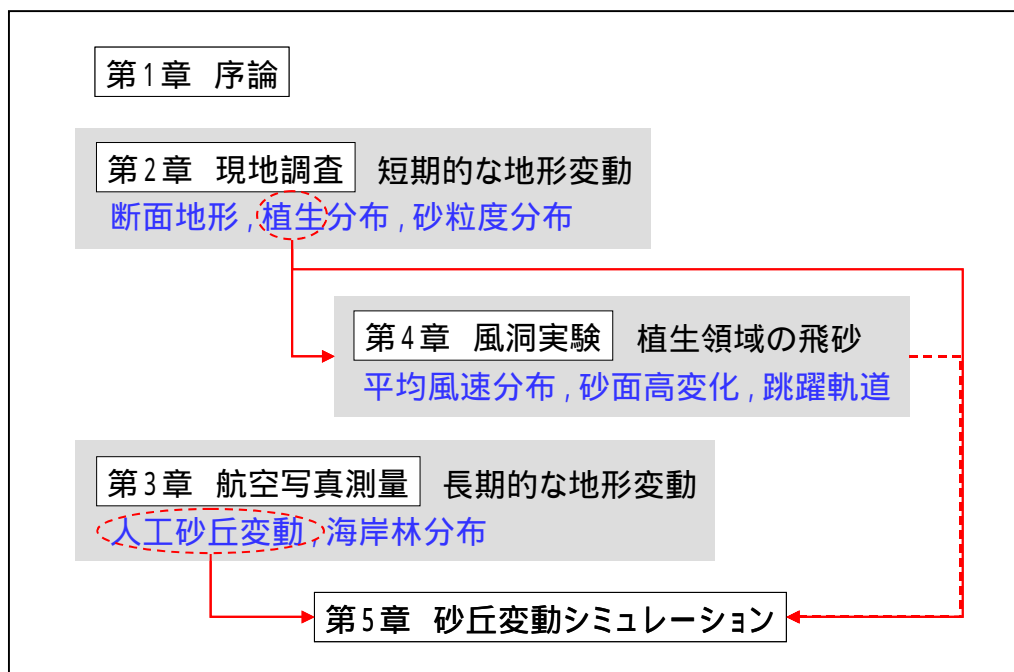


図 1-1 研究の流れ

第 2 章 後浜の短期的な地形変動

2.1 概説

本節では、1998 年 10 月から 2000 年 6 月まで、約 2～3 ヶ月に 1 回の割合で計 9 回行われた調査およびこれ以降 2002 年 6 月まで約半年に 1 回の割合で計 4 回行われた調査の結果について述べる。また、アメダスデータを用いて推定した調査地の風況と地形変動の関連性等について検討する。

2.2 調査地の概要

鹿島灘沿岸は、かつては利根川などからの土砂流出によって、砂浜幅が 100m を越える遠浅の海岸であったが、昭和 50 年代に入る頃から顕著に海岸が侵食されるようになった。自然の土砂供給が期待できないため、茨城県では全国に先駆けて自然の原理を応用したヘッドランド工法を採用し（1985 年～1993 年に設置）、海岸侵食問題に取り組んでいる。調査地は、鹿島灘に面し、ヘッドランド No.12 と No.13 の間に位置する鹿嶋市の角折海岸（鹿島港より北方約 13km の地点）である（図 2-1、写真 2-1）。

図 2-2 に調査地周辺の概況を示す。調査地の砂浜幅は約 85m で、前浜の背後には通常波が作用しない平坦な部分があり、これに比高約 7m の小砂丘が沿岸方向に複数直列に続いている。後浜にはブロックが沿岸方向に帯状に設置され、後浜の平坦な部分と小砂丘の間には堆砂垣が設置されている。砂丘部の陸側には防砂対策として海岸林（保安林）が植栽されているが、砂浜から陸側への飛砂が海岸林の海側部分に堆積することによって木々が砂に埋没し、海岸林の海側限界が局所的に後退している。ブロックや堆砂垣、ならびに海岸砂丘（土堤）は、海岸林を保護する目的で設置されたものである（宇多ら、2002）。

現時点におけるブロックの露出部分の高さは約 0.5m、形状は六角柱で、ブロック周辺には顕著に砂が堆積している。過去約 10 年間で 0.5m 程度堆砂したと推定される。

堆砂垣の高さは 0.5～1.0m、目合いの大きさは約 3cm であり、堆砂垣周辺では堆砂が進んでいる。しかし、堆砂垣周辺で局所的に侵食が大きい部分もあり、そのような部分では堆砂垣は崩壊している場合が多い。堆砂垣を挟んで陸側を砂丘部、海側を平坦部と定義する。

海岸植生は、後浜の平坦部ではパッチ状に、その背後の砂丘部では密にかつ連続的に繁茂している。調査域は、ブロック帯より海側に約 5m の位置から小砂丘頂部にかけてである。

写真 2-2 は、中央砂丘（図 2-2）頂部から見た北北東方向の眺望である。砂丘部の海側には複数列の堆砂垣が設置されており、その海側にはブロックが帯状に設置されている。ブロック帯、堆砂垣ならびに砂丘部周辺では、特に植生が繁茂している。

2.3 調査項目と調査方法

調査域に、ブロック帯と直交する 5 つの測線を設定し（図 2-2）、各測線に沿ってそれぞれ 10 点前後の調査点を設けた（図 2-3）。ここで、測線 上のブロックの位置と高さを調査結果表示の際の原点とした。これらの測線は砂丘列に対しておおよそ直交し、調査開始時点（1998 年 10 月）では、測線 および はそれぞれ中央および北側砂丘頂部を、測線 および はそれぞれ小砂丘間鞍部を、測線 は中央砂丘の北側を通っている。調査は表 2-1 に示す調査日に合計 13 回行った。2000 年 6 月以降の調査は、約半年に 1 回の割合で行った。

2.3.1 海岸断面の形状

トータルステーション（光波測距機）を用い、各調査点の地盤高を測量した。この測量は 1998 年 10 月から 2002 年 6 月まで合計 13 回行った。

2.3.2 植生分布

植生分布調査は、測線 ~ の平坦部にある調査点（35 点）と植生の繁茂が著しい測線の砂丘部に位置する調査点（4 点）において、1998 年 10 月から 2000 年 6 月まで合計 9 回行った。調査点に 1m² 四方のコドラートを設置して地表の写真を撮り、植被率（コドラート内の植物が地上投影で占める面積の割合）を調べた。この際、枯れた植生も含めてカウントした。植被率の定義を以下に示す。

1m×1m のコドラート内を 10×10 の柵に分割し、各柵内の植物が占める面積の割合を求め、これらを合計した値を調査点における植被率とする。各柵内の面積割合は、100, 75, 50, 25, 20, 13, 6, 5, 3, 2, 0%を用いて評価した。これは、100%を 1 とした場合の 1, 3/4, 2/4, 1/4, 3/16, 2/16, 1/16, 3/64, 2/64, 1/64, 0 に相当する。

2.3.3 砂の粒径分布

1999 年 3 月から 2000 年 6 月まで、測線 , ならびに 上の調査点について表面の砂を採取し粒度試験を行った。粒度試験は土質工学会基準「土の粒度試験方法」(JSF T 131-1990, 地盤工学会, 1990)に準拠する。ここでは、呼び寸法 74, 110, 250, 420, 840, 2000, 4760 μ m のふるいを用いてふるい分析を行った。粒径加積曲線から、通過質量百分率 50%に対する粒径 D_{50} を読み取った。

2.3.4 調査地における風況の推定

調査地から最も近いアメダス観測所「鹿島」(以下、アメダス観測点と記す)で取得され

第2章 後浜の短期的な地形変動

た1998年10月～2002年6月の風速・風向データを用い、1998年10月～2000年6月の2～3ヶ月間毎および1998年12月～2002年6月の半年間毎の風況を推定した。アメダス観測点で測定された風速データ u_A より、調査地における摩擦速度 u_{*f} を推定し、これが砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} 以上のとき、風速 u_A を風向別に積算した。調査が行われた間隔がそれぞれ異なるため、得られた積算値はそれぞれ1ヶ月分の値に換算した。これを推定風配と定義し、単位は [(m/s)・hour/month] である。

アメダス観測点で観測された風速値 u_A から境界層外の風速 U を推定する際、角折海岸とアメダス観測点は同じ風場内にあり、大気下層の風速分布は対数則で近似できる、と仮定した。対数則が成り立つとして、 U を用いて角折海岸における摩擦風速 u_{*f} を推定した(図2-4参照)。この u_{*f} が、砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} 以上のとき、 u_A を風向別に積算して推定風配を求めた。

砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} は次式で与えられる (Bagnold, 1941)。

$$u_{*c} = A\sqrt{gd(\rho_s - \rho_a)/\rho_a} \quad (2.1)$$

ここで、

A : 無次元係数 (= 0.1)

g : 重力加速度 (= 9.81m/s²)

d : 砂の粒径 [mm]

ρ_a : 空気の密度 (= 1.226 kg/m³)

ρ_s : 砂の密度 (= 2.65 × 10³ kg/m³)

であり、 d は、調査地で採取された砂サンプルの最小の D_{50} (0.19mm) とした。

アメダス観測地と調査地が同一の風場内にあり、対数則が適用可能であると仮定すると、アメダス観測点の風速 u_A 、調査点の摩擦風速 u_{*f} には、次の関係式が成立し、アメダス観測点においては、

$$U = \frac{u_{*a}}{\kappa} \log(z_a / z_{0a}) \quad (2.2)$$

$$u_{*a} = \kappa u_A / \log(z_A / z_{0a}) \quad (2.3)$$

調査地においては、

$$U = \frac{u_{*f}}{\kappa} \log((z_a - z_A + z_{af}) / z_{0f}) \quad (2.4)$$

という関係がある。ここで、

第2章 後浜の短期的な地形変動

- u_{*a} : アメダス観測点における摩擦速度 [m/s]
 u_{*f} : 調査地における摩擦速度 [m/s]
 z_a : アメダス観測点における境界層外縁の高さ [m]
 z_{af} : (アメダス観測点の標高) - (調査地の標高) [m]
 z_{0a} : アメダス観測点における地表面粗度長 [m]
 z_{0f} : 調査地における地表面粗度長 [m]
 z_A : アメダス観測点の地表面からの高さ [m] (= 6.5m)
 κ : カルマン係数 (= 0.41)

である。 z_a は、海洋上を吹送してきた風が陸に上陸し、その際発達する内部境界層が到達しないと考えられるアメダス観測点の地表面からの高さである。海風の場合には、 $z_a = (\text{アメダス観測点から風上方向の陸上吹送距離}) \times (1/7)$ 、陸風の場合には、 $z_a = z_A$ とした。 z_{0f} は d と同値とした。調査地の標高は、現地調査の結果より得られた平坦部における調査点の地盤高の平均 (-0.2m) を標高に換算し、4.8mとした(3.4.1節参照)。アメダス観測点の標高は37mであり、風向別の地表面粗度 z_{0a} は桑形・近藤(1990)の提案する値を用いた。式(2.2)~(2.4)より u_{*f} を求め、 $u_{*f} = u_{*c}$ を満たす最小の u_A を各風向別の移動開始風速 u_{Ac} とする。

以上の手順より、調査地において砂が移動を開始すると推定されるアメダス観測点の最小風速 u_{Ac} を求めたところ、N~SE方向すなわち海風の場合は $u_{Ac} = 3\text{m/s}$ 、SSE~NNW方向すなわち陸風の場合は $u_{Ac} = 7\text{m/s}$ となった。 $u_A = u_{Ac}$ のときに、各風向別に u_A を積算して推定風配を求めた。なお、アメダス観測点で、海側からの風速が 3m/s のときと陸側からの風速が 7m/s のときに、調査地における地表近傍の風速が同じになり、砂が移動を開始することから、陸風の場合には、 u_A の積算値に $3/7$ を乗じた。

降雨の取り扱いに関しては、栗山・望月(1997)と同様に、 10mm/hour 以上の降雨があった場合、その時点から24時間は砂の移動が起こらないものとし、アメダス観測所の風速を $u_A = 0\text{m/s}$ とした。

2.4 調査結果

2.4.1 海岸断面の形状

測線 ~ に沿った地盤の高さの測定結果を図2-5に示す。ここでは、変化を見やすくするため、1998年12月、2000年6月および2001年12月の時点の結果を示す。平坦部では特にブロック帯(岸沖方向距離0m地点)と堆砂垣付近で地盤が局所的に高くなっており、これらの構造物は少なくとも長期的には砂の堆積を促進している。1998年12月から2001年12月までの約3年間に、平坦部では、いずれの測線においてもわずかではあるが地盤高

が上昇していた。砂丘部では、測線 ， ならびに に沿った地盤高は上昇しているのに対して、測線 および に沿った地盤高は下降していた。

2.4.2 植生分布

調査地では、表 2-2 に示した 12 種の植物が見られた。平坦部では、ハマニガナやハマヒルガオ、コウボウムギ、ハマグルマ等が見られた。砂丘部では、チガヤやコウボウムギが多く見られ、シロヨモギも確認された。特にコウボウムギ、ケカモノハシ、およびハマグルマは群落をつくって繁茂し、砂を捕捉していた。これらの植物は冬期には枯れるものの、この間も地中で根を深く張っており、侵食を防ぐ効果があると考えられる。各測線に沿った 1998 年 10 月～2000 年 6 月の平均植被率と標準偏差を図 2-6 に示す。植被率は±5%程度の誤差を含んでおり、標準偏差は最大 18.6%、平均 7.2%である。植生は、特にブロック帯付近や砂丘部で多く見られたが、侵食が進んでいる小砂丘間鞍部ではほとんど見られなかった。

2.4.3 砂の中央粒径分布

測線 ， ならびに に沿った 1999 年 3 月～2000 年 6 月の砂の平均中央粒径 D_{50} の分布を図 2-7 に示す。これらの平坦部の平均値は約 0.49mm、砂丘部の平均値は測線 上では約 0.29mm、測線 上では約 0.19mm、測線 上では約 0.47mm であった。全般に、地盤高が高い地点では D_{50} が小さく、低い地点では D_{50} が大きくなる傾向にあり、ふるいわけの効果が見られた。しかし、顕著に侵食が進んでいる測線 の砂丘部では、測線 の砂丘部と比較して地盤高が低いにもかかわらず、 D_{50} が小さかった。これは、目視観察の結果、侵食によって中央砂丘の南側斜面の勾配が安息角を越え（図 2-2 参照）、砂丘頂部周辺の小粒径の砂が測線 の砂丘部に滑り落ちる現象が起こったためと説明される。

2.4.4 調査地における風況の推定結果

2～3 ヶ月間毎および半年間毎の角折海岸における推定風配を図 2-8 に示す。2～3 ヶ月毎の風配パターンは、主に N～ENE 方向成分が卓越している期間(A)、(B)、(C)、(F)、(G)ならびに(H)、N～ENE と ESE 方向が卓越している期間(D)、ESE～SE 方向が卓越している期間(E)の 3 つに大別される。全般には、主に N～ENE が卓越し、春から夏にかけて ESE～SE が卓越していた。なお、各期間の定義は図の説明に示した。半年間毎の風配パターンは、いずれの期間においても N～ENE が卓越していた。

図 2-9 に平均風速（推定風配の各風向成分をその発生回数で除した値）を示す。平均風速は、いずれの風向および期間においても約 3～4m/s であったが、期間(I)においては NNE～ENE および W で、(K)および(L)においては SE で 4m/s 以上とやや大きくなっていった。

2.5 考察

2.5.1 海岸断面地形の変化の特徴

平坦部では、いずれの測線においても地盤高は上昇する傾向にあった。全平坦部調査点における1998年10月から2000年6月にかけての地盤高変化の平均は0.03m/year(標準偏差: ±0.02m/year)であった。一方、砂丘部では測線によって地盤高変化の傾向が異なっていた。小砂丘上を通る測線、ならびに上では同期間で平均して約0.05m/year(標準偏差: ±0.04m/year)の割合で上昇傾向にあり、平坦部の地盤高変化と比較すると約2倍であった。この原因としては、砂丘部は植被率が大きく植生による飛砂の捕捉・抑制効果が大きいこと、小砂丘自身が障害物となって飛砂を捕捉していること等が考えられる。これに対して小砂丘間鞍部を通る測線および上では、地盤高が大きく変動する傾向にあった。特にその傾向が顕著にみられる測線では、平均して約0.41m/year(標準偏差: ±0.33m/year)の割合で地盤高が下降していた。この原因として、小砂丘間鞍部には植生がほとんど存在していないため飛砂が捕捉・抑制されず地形が不安定であること、小砂丘間鞍部では風速が局所的に大きくなるため地形変動量が大きいことが考えられる。

図2-10は、平坦部および砂丘部においてそれぞれ測線別に平均した2~3ヶ月間毎および半年間毎の地盤高変化の経時変化を示したものである。図中に記した(A)~(H)および(BC)~(L)は図2-8の説明にある期間(A)~(H)および(BC)~(L)と同一である。なお、ここでは各期間の地盤高変化を1ヶ月分の変化に換算して表示した。期間(A)~(H)における平坦部および砂丘部の地盤高変化(図2-10(a))と推定風配の各風向成分(図2-8(a))との相関分析結果を図2-11に示す。砂丘部については、侵食傾向にある測線および(以下、砂丘部と記す)とそれ以外の測線、ならびに(以下、砂丘部と記す)に分けて結果を表示した。図中の外側実線円は相関係数+1、円グラフの中心は相関係数-1である。推定風配のSSW~WSWおよびWNW~NW方向成分は調査期間中に発生しておらず、SSE~SおよびNNWは期間(H)のみの発生であったため表示していない。

図より、推定風配のN~ENEと地盤高変化の間には、平坦部、砂丘部ならびに砂丘部のいずれにおいても正の相関関係が認められ、N~ENEの風が卓越するとき地盤高は上昇する傾向にあった。一方ESE~SEについては、平坦部、砂丘部ならびに砂丘部のいずれにおいても地盤高変化との間に負の相関関係が認められ、ESE~SEの風が卓越するとき地盤高は下降する傾向にあった。これらはいずれも海風であるにもかかわらず、地盤高変化の傾向が異なっているが、これは目視観察より植生の方向性によるものと推察される。すなわち、植生は卓越風向の風下側に傾いて成長するため、その捕捉能力は卓越風向の飛砂に対しては大きい、それ以外の風向に対しては比較的小さいと考えられる。

図2-10(b)より、風配の合計値が大きい期間(BC)(J)(K)(L)のとき、特に各測線の地盤高変化にばらつきが見られた。期間(J)~(K)のときいずれの測線においても地盤高変化は増

加する傾向にあったが、増加時期にずれが生じていた。すなわち、期間(J)において平坦部～および砂丘部～の地盤高が増加した後、期間(K)において平坦部～および砂丘部の地盤高が増加していた。これについては、風配および平均風速等との相関も見られず、現時点では合理的に説明できない。砂丘部～については、期間(BC)のとき地盤高が顕著に減少していたが、これ以降急激な減少は見られない。これは砂丘部～付近に砂が堆積することにより小砂丘間鞍部が南側へ移動したためである。

2.5.2 植生分布と地盤高変化の関係

平坦部および測線～上の砂丘部の各調査点における、1998年12月～1999年12月の平均植被率と地盤高の変化の関係を図2-12に示す。約1年間の変化を調べることにより、風の季節変化の影響を排除した。植被率が小さい領域ではばらつきがやや大きいものの、全体としては正の相関関係、すなわち植生の植被率が大きいほど地盤高が上昇するという関係が見られる。

コウボウムギの地中の様子を調べたところ、飛砂による堆砂量が多い地点では、根と葉の間の地下茎が50cm程度の長さまで伸びているものがあった。矢野(1977)は、コウボウムギ群落は堆砂の多い地形によく成立し、堆砂量が大きいときは地下茎の分枝が行われず垂直移動が行われ、堆砂量が少ないときは分枝が行われることを示しており、地下断面を調べることで堆砂量を推定することができると考えられる。コウボウムギの平面拡大に関しては、田中ら(2002)がモデル化を試みている。また、2001年7月以降の現地調査では、係留気球に取り付けたデジタルビデオカメラにより約75m×100mの範囲の植生分布画像を取得している。今後、長期的な植生分布の遷移に関する検討を要する。

参考文献

- 宇多高明・清野聡子・吉田哲朗・酒井英次・三波俊郎(2002): 九十九里浜野手海岸の変遷と海岸人工化要因の検討, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 541-545 .
- 栗山善昭・望月徳雄(1997): 後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生の地形変化に及ぼす影響に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 681-685 .
- 桑形恒男・近藤純正(1990): 東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 日本気象学会, 天気, 第37巻3号, pp. 197-201 .
- 地盤工学会(1990): 粒度試験 地盤工学会編 土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp. 54-64 .
- 田中規夫・渡辺肇・谷本勝利・小松原肇(2002): 海浜植生コウボウムギの生長および平面拡大解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 506-510 .
- 矢野悟道(1977): 群落の地下構造と機能, 伊藤秀三編 群落の組成と構造(植物生態学講座 2), 朝倉書店, pp. 252-326 .
- Bagnold, R. A. (1941): The physics of blown sand and desert dunes, Methuen, London, 265p.

第2章 後浜の短期的な地形変動

表 2-1 調査日

期間	調査日	前調査日から調査日までの日数 他
	1998年10月27日	現地調査開始（後浜地形および植生分布の調査）
A	12月11日	45日
B	1999年3月11日	90日 粒径分布調査開始,測線 砂丘部地形の計測不可能*
C	5月18日	68日
D	7月22日	65日
E	9月7日	47日
F	12月8日	92日 この頃鹿島灘沿岸の航空写真撮影（3.2節参照）
G	2000年3月2日	85日
H	6月1日	91日
I	12月21日	203日 これ以降約半年毎に後浜地形調査のみ継続
J	2001年7月2日	193日
K	12月5日	156日
L	2002年6月11日	188日 測線 砂丘部地形の計測不可能*

*地形変動が大きく，プリズムの支柱長が不足したため

表 2-2 調査地で見られた植物

科名	種名
アカザ	オカヒジキ
アカバナ	アレチマツヨイグサ，コマツヨイグサ
イネ	オニシバ，ケカモノハシ，チガヤ
カヤツリグサ	コウボウムギ
キク	シロヨモギ，ハマグルマ，ハマニガナ
ゴマノハグサ	ウンラン
ツルナ	ツルナ

第2章 後浜の短期的な地形変動

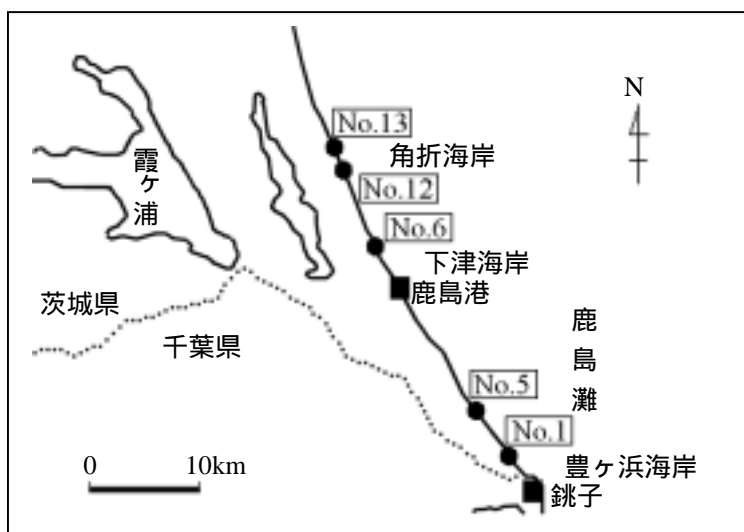


図 2-1 調査地の位置
：ヘッドランドの位置

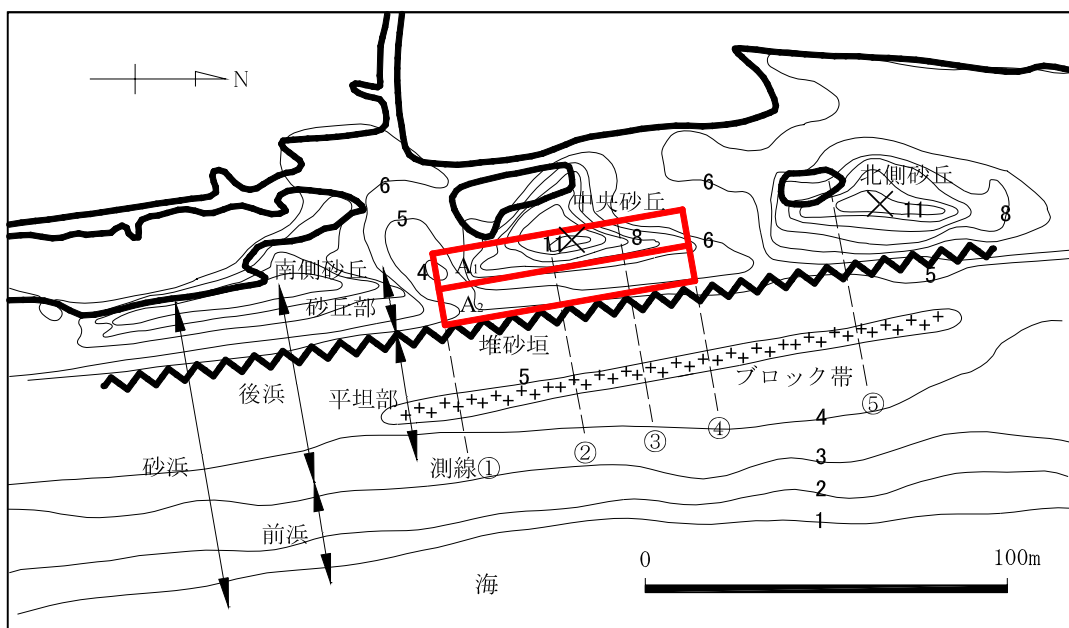


図 2-2 調査地の概況 (1996年航空写真測量結果を基に作成, 次章参照)

- 太線：海岸林輪郭
- 細線：等高線 (T. P. 0m 基準, 1m 間隔, 単位 [m])
- ×：1996年時点の小砂丘頂部位置
- ブロック帯の設置時期：1979年～1981年
- 堆砂垣の設置時期：1990年～1993年
- 領域 A_1 , A_2 ：3.3.1節で述べる土砂量算定領域 (図 2-3, 3-7 参照)

第2章 後浜の短期的な地形変動

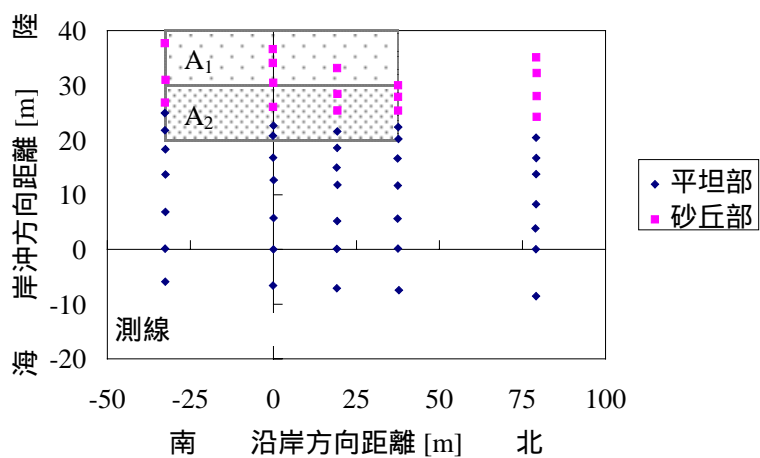


図 2-3 調査点の位置
領域 A_1 , A_2 : 3.3.1 節で述べる土砂量算定領域 (図 2-2 , 3-7 参照)

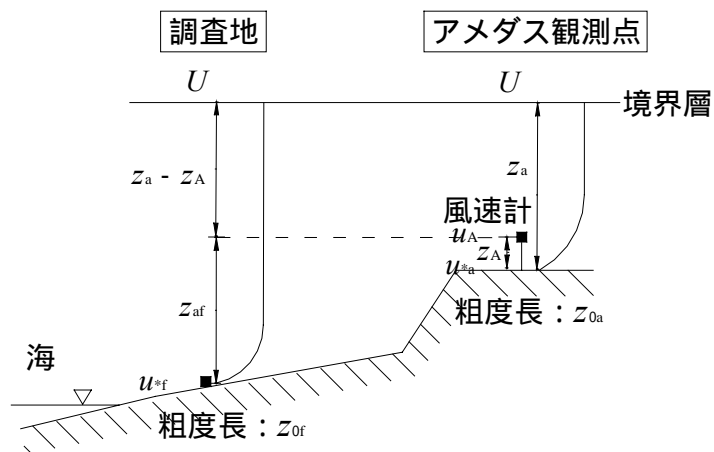


図 2-4 調査地およびアメダス観測点における風場の概況

第2章 後浜の短期的な地形変動

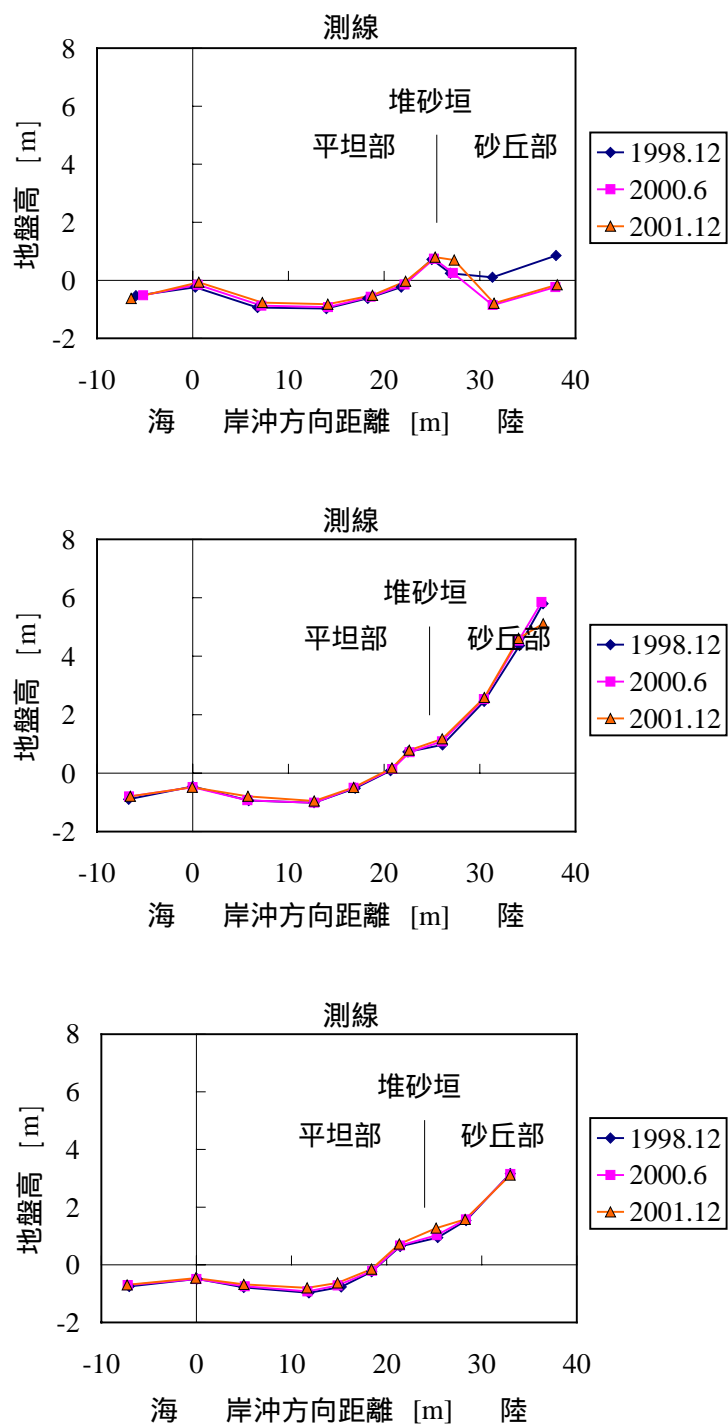


図 2-5 測線に沿った断面地形 (~)
位置と高さの基準：測線 上のブロック

第2章 後浜の短期的な地形変動

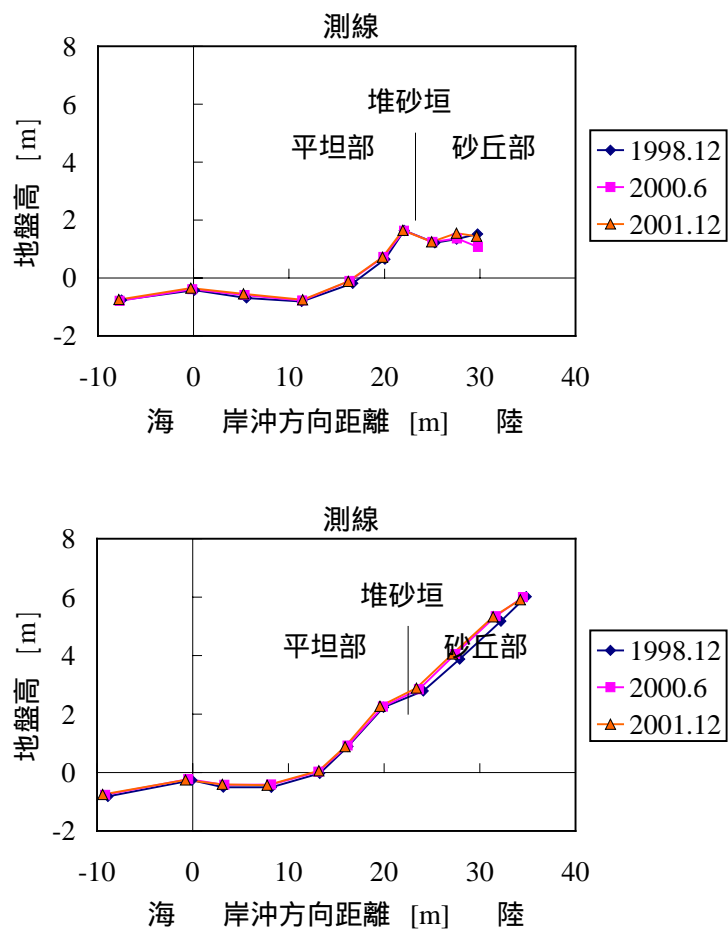


図 2-5(続き) 測線に沿った断面地形 (~)
位置と高さの基準：測線 上のブロック

第2章 後浜の短期的な地形変動

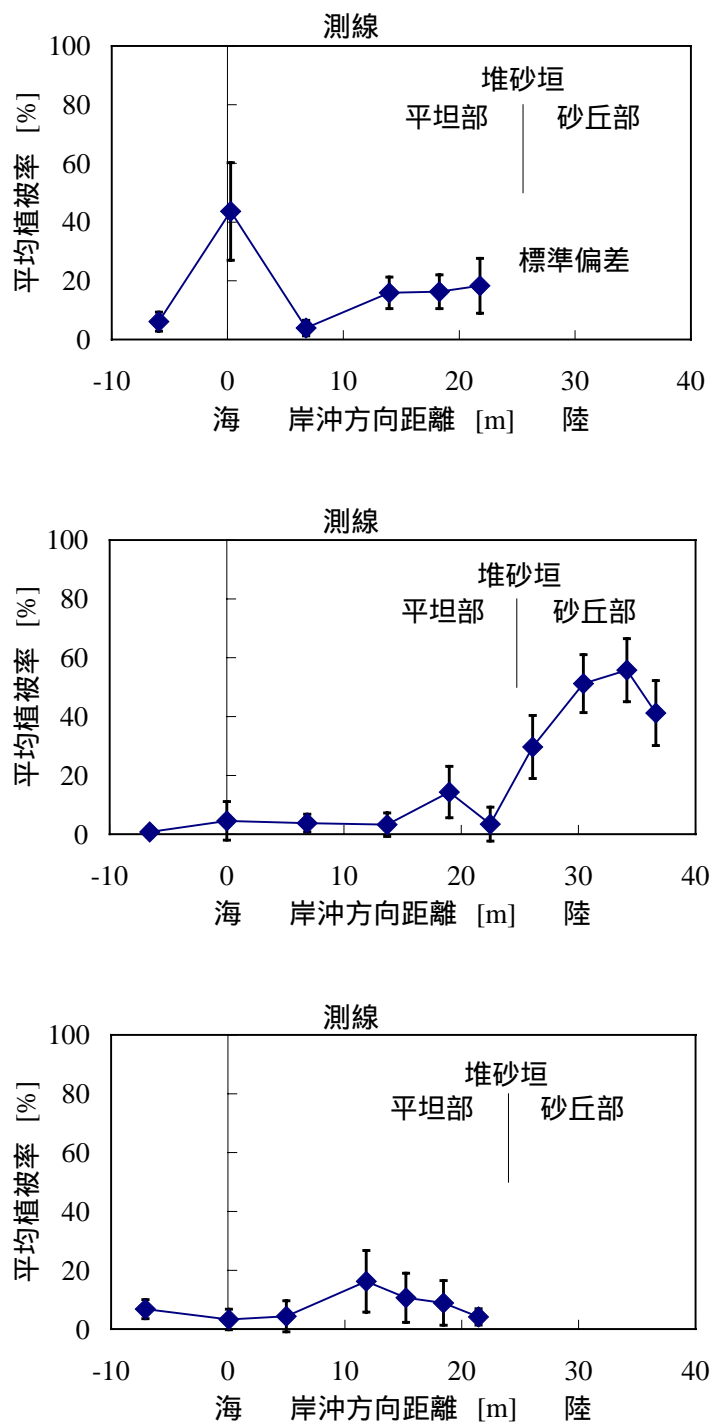


図 2-6 測線に沿った 1998 年 10 月 ~ 2000 年 6 月の平均植被率と標準偏差 (~)

第2章 後浜の短期的な地形変動

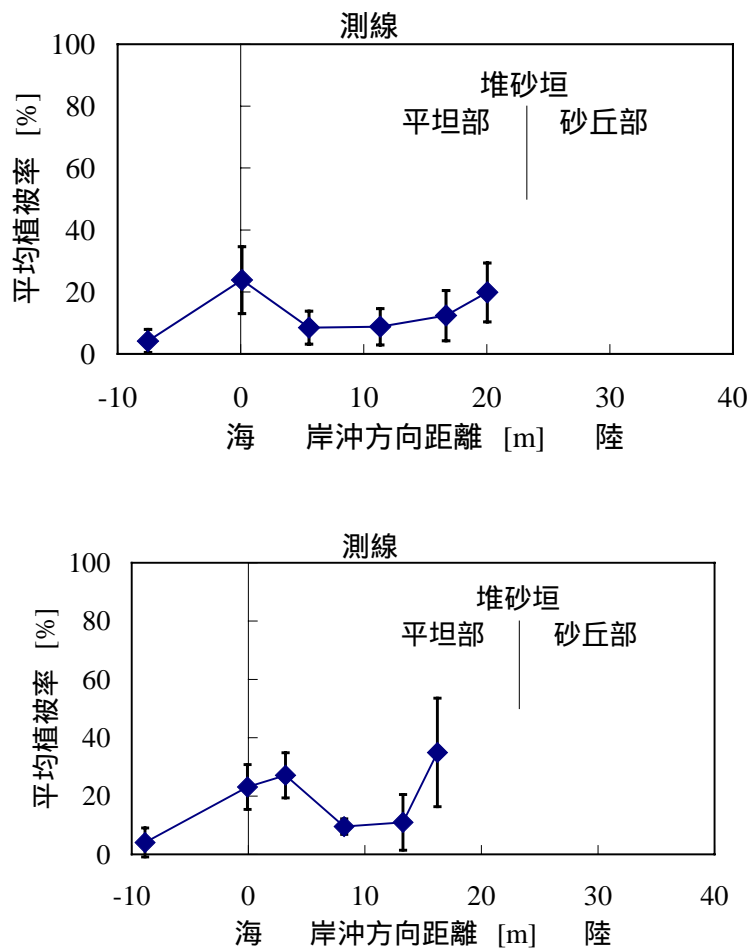


図 2-6(続き) 測線に沿った 1998 年 10 月～2000 年 6 月の平均植被率と標準偏差 (~)

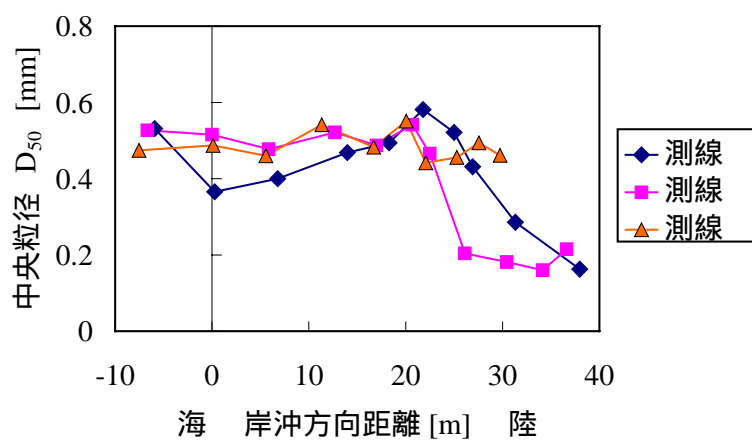


図 2-7 測線 , および に沿った 1999 年 3 月～2000 年 6 月の砂の平均中央粒径

第2章 後浜の短期的な地形変動

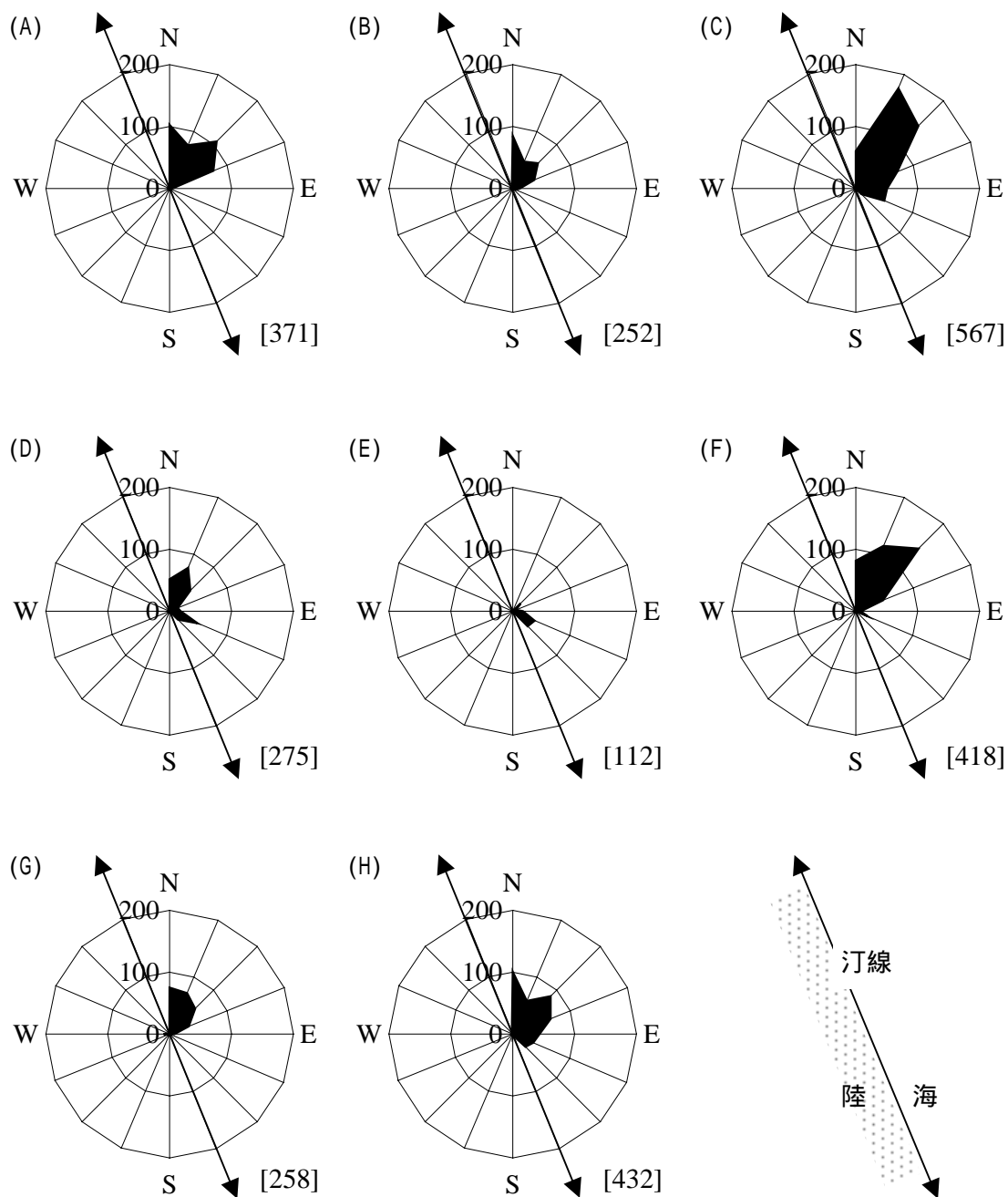


図 2-8(a) 角折海岸における 2~3 ヶ月間毎の推定風配
 []内数字： 推定風配の全風向別成分の合計値 [(m/s)・hour/month]

期間(A)：1998年10月~12月，期間(B)：1998年12月~1999年3月，
 期間(C)：1999年3月~5月，期間(D)：1999年5月~7月，
 期間(E)：1999年7月~9月，期間(F)：1999年9月~12月，
 期間(G)：1999年12月~2000年3月，期間(H)：2000年3月~6月
 (表 2-1 参照)

第2章 後浜の短期的な地形変動

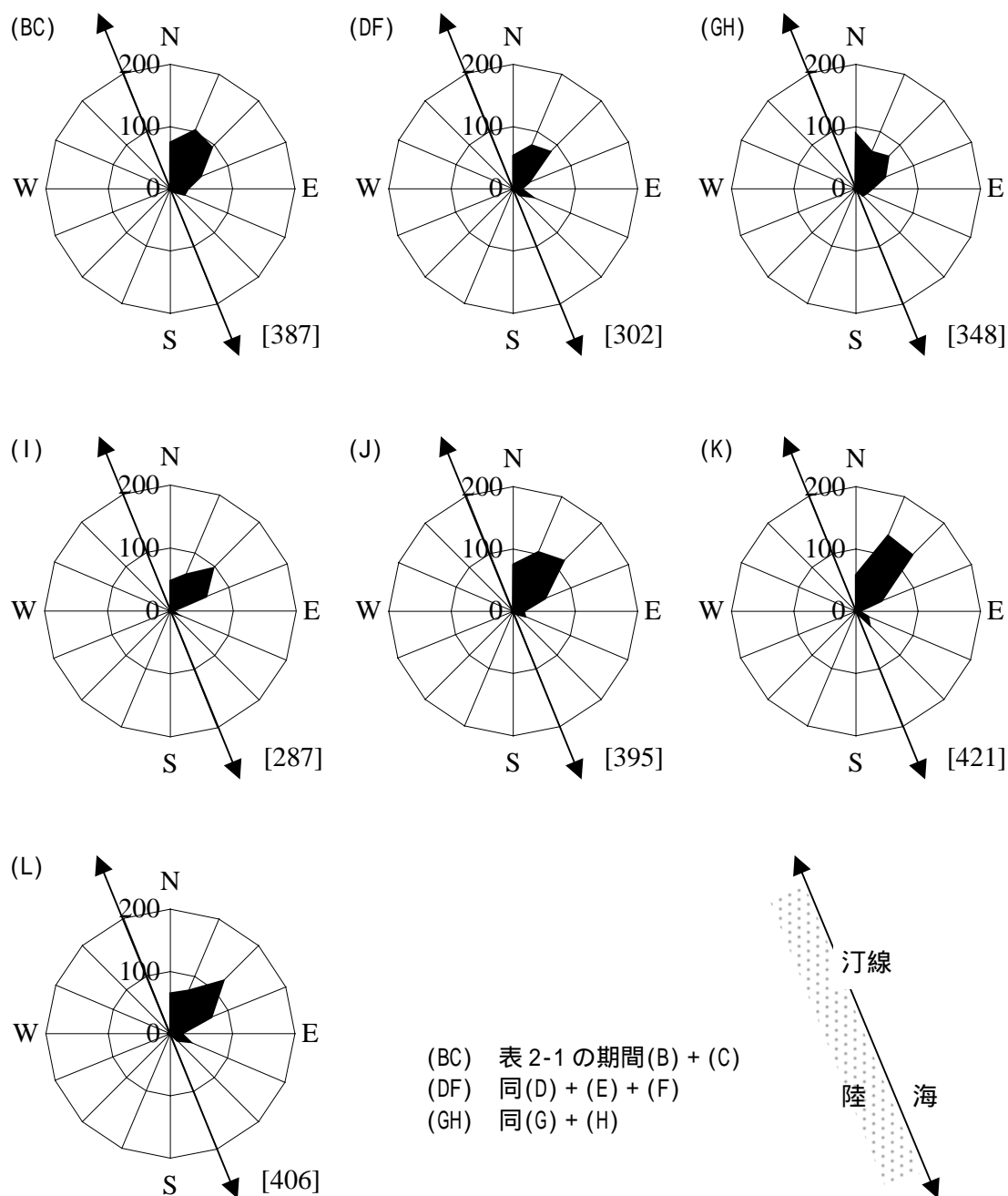
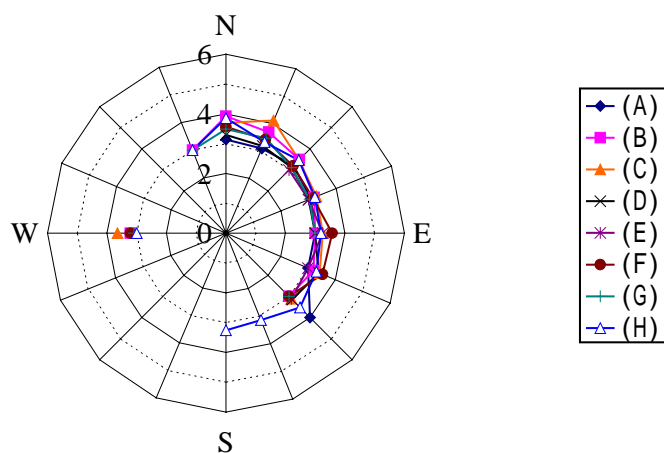


図 2-8(b) 角折海岸における半年間毎の推定風配
 []内数字： 推定風配の全風向別成分の合計値 [(m/s)・hour/month]

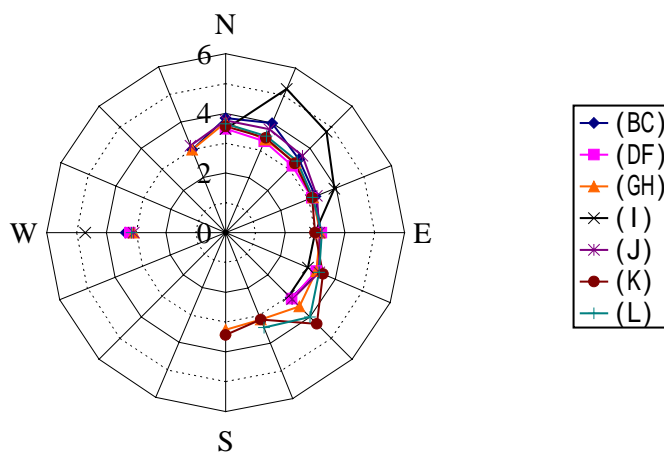
期間(BC)：1998年12月～1999年5月，期間(DF)：1999年5月～12月，
 期間(GH)：1999年12月～2000年6月，期間(I)：2000年6月～12月，
 期間(J)：2000年12月～2001年7月，期間(K)：2001年7月～12月，
 期間(L)：2001年12月～2002年6月 (表 2-1 および図 2-8(a)参照)

第2章 後浜の短期的な地形変動



(a) 2~3ヶ月間毎

期間(A) : 1998年10月~12月, 期間(B) : 1998年12月~1999年3月,
 期間(C) : 1999年3月~5月, 期間(D) : 1999年5月~7月,
 期間(E) : 1999年7月~9月, 期間(F) : 1999年9月~12月,
 期間(G) : 1999年12月~2000年3月, 期間(H) : 2000年3月~6月
 (表2-1および図2-8(a)参照)



(b) 半年間毎

期間(BC) : 1998年12月~1999年5月, 期間(DF) : 1999年5月~12月,
 期間(GH) : 1999年12月~2000年6月, 期間(I) : 2000年6月~12月,
 期間(J) : 2000年12月~2001年7月, 期間(K) : 2001年7月~12月,
 期間(L) : 2001年12月~2002年6月 (表2-1および図2-8(b)参照)

図2-9 角折海岸における平均風速 [m/s]

第2章 後浜の短期的な地形変動

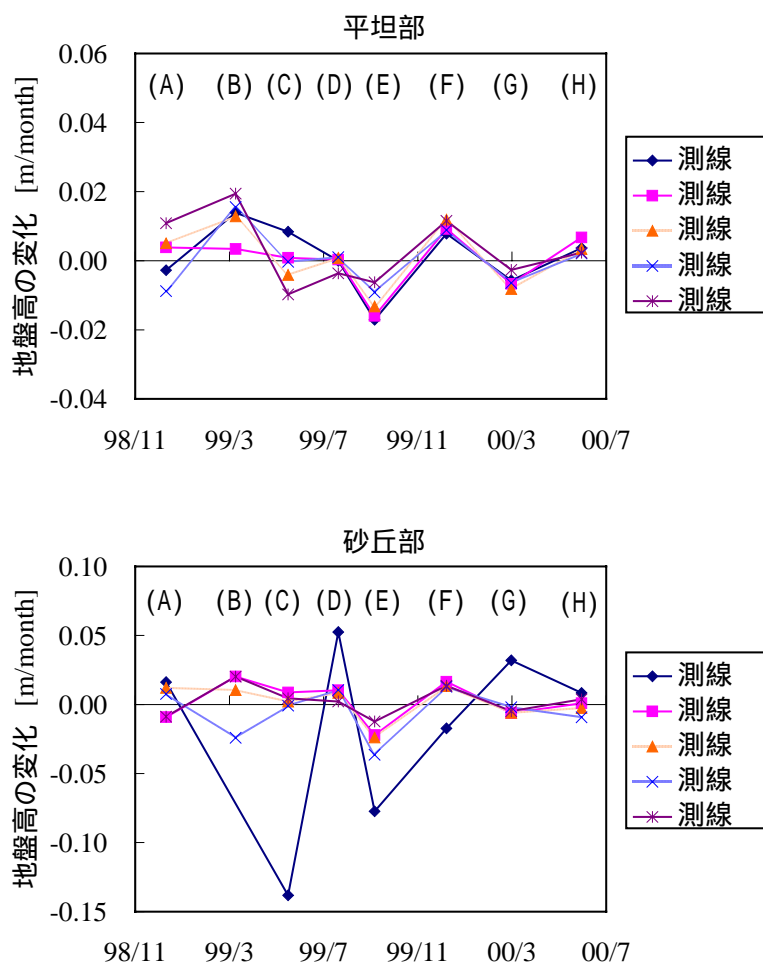


図 2-10(a) 2~3 ヶ月間毎の地盤高変化の経時変化

- 期間(A) : 1998 年 10 月 ~ 12 月
- 期間(B) : 1998 年 12 月 ~ 1999 年 3 月
- 期間(C) : 1999 年 3 月 ~ 5 月
- 期間(D) : 1999 年 5 月 ~ 7 月
- 期間(E) : 1999 年 7 月 ~ 9 月
- 期間(F) : 1999 年 9 月 ~ 12 月
- 期間(G) : 1999 年 12 月 ~ 2000 年 3 月
- 期間(H) : 2000 年 3 月 ~ 6 月

第2章 後浜の短期的な地形変動

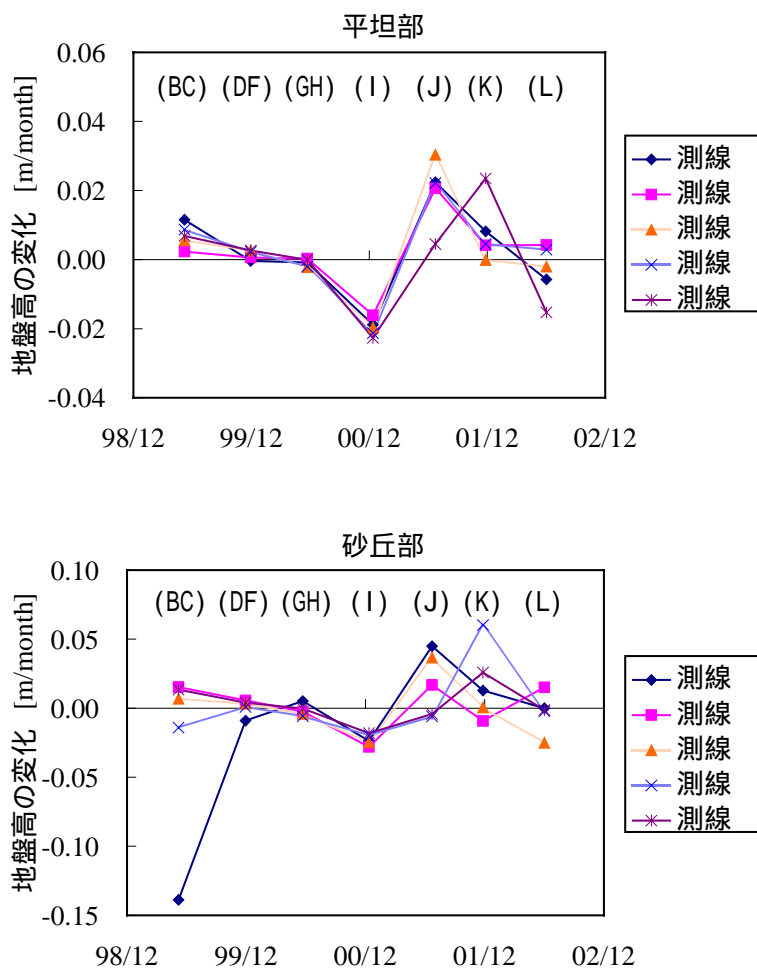


図 2-10(b) 半年間毎の地盤高変化の経時変化

- 期間(BC) : 1998年12月～1999年5月
- 期間(DF) : 1999年5月～12月
- 期間(GH) : 1999年12月～2000年6月
- 期間(I) : 2000年6月～12月
- 期間(J) : 2000年12月～2001年6月
- 期間(K) : 2001年6月～12月
- 期間(L) : 2001年12月～2002年6月

第2章 後浜の短期的な地形変動

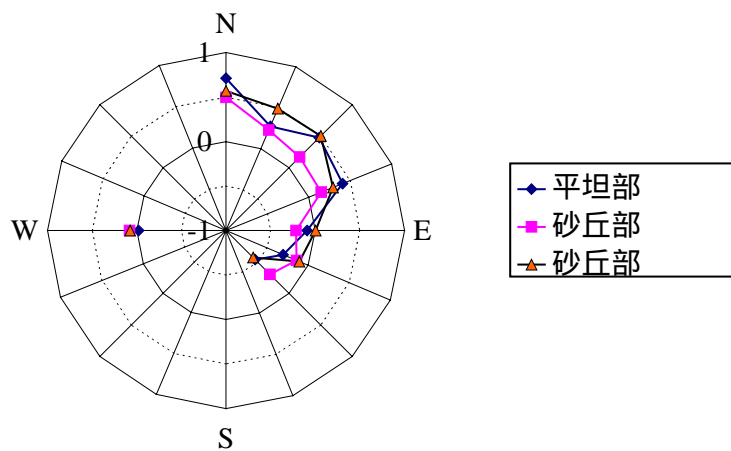


図 2-11 地盤高変化と推定風配の各風向成分の相関関係

内側実線円外：正の相関
内側実線円内：負の相関

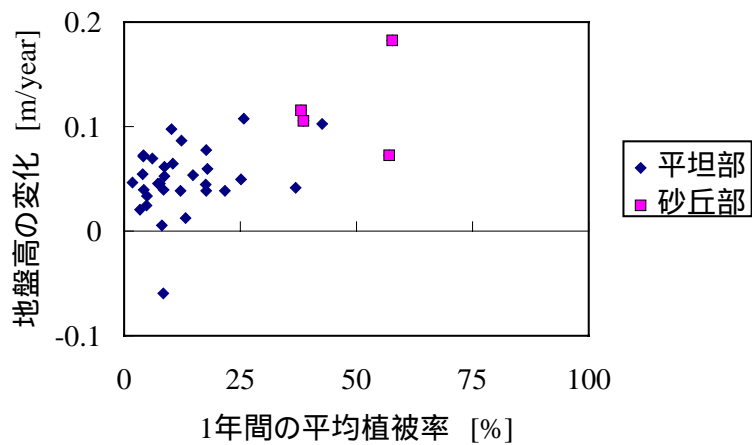


図 2-12 1998年12月～1999年12月の植被率と地盤高変化の関係

第2章 後浜の短期的な地形変動



写真 2-1 1984 年の角折海岸の航空写真
破線枠 (約 300m × 175m): 図 2-2 参照



写真 2-2 中央砂丘頂部から見た北北東方向の眺望

第3章 後浜の長期的な地形変動

3.1 概説

本節では、1984年～1999年の航空写真の判読および航空写真測量を行い、後浜の長期的な地形変動特性を調べる。長期的な地形変動特性と植生の関係を調べ、植生が地形変化に与える影響について検討する。また、砂丘列（土堤）の陸側にある海岸林（保安林）の面積を求め、汀線の前進および後退による砂浜面積の変化との関係を検討する。

3.2 調査地の概要

茨城県土木部河川課は、1984年12月以降、3年毎に茨城県の全沿岸の航空写真（縮尺約1/8000、写真2-1参照）を撮影している。ここでは、これに国土地理院が撮影した航空写真を加えて写真測量を行う。調査地は、鹿島灘沿岸に位置する角折海岸、鹿島港北側の下津海岸ならびに銚子北側の豊ヶ浜海岸である（図2-1）。これらの海岸では、飛砂防止のために沿岸方向に連続した砂丘が人為的に造成されたが、これらは造成後徐々に変形し、小砂丘に分裂している。一旦小砂丘に分裂すると、小砂丘間の鞍部を通じて砂丘の陸側と海側への砂の行き来が可能になる。2.4.4節で述べたように、鹿島灘沿岸ではN～ENEの海風が卓越しているため、この鞍部を通じて後浜から陸側へ砂が流出していた。

3.3 調査項目と調査方法

航空写真測量とは、2枚の航空写真より立体視の原理を利用して対象物の3次元的な空間位置を求めることである。ここでは、1984年～1999年の3年毎の航空写真（茨城県土木部河川課撮影、縮尺約1/8000）および都市計画図（鹿嶋市役所発行、縮尺1/2500）を用いて、図化機により写真測量を行った。標定誤差は、水平方向0.35m、鉛直方向0.7m程度である。現地調査を行っている角折海岸については、1974年（縮尺約1/3200）と1982年（縮尺約1/4000）の航空写真（国土地理院撮影）をも入手可能であったためこれらの写真判読を行っ

た。

3.3.1 後浜の地形変動

各調査地について写真判読および航空写真測量を行い、長期的な地形変動の特徴を調べた。また、現地調査を行っている角折海岸の1999年12月における測線の海岸断面形状と航空写真測量より得られた1999年12月の断面形状とを比較して、航空写真測量データの信頼性を確認した。

角折海岸については、前章で示した測線～を含む砂丘部領域に、2つの調査領域A₁(砂丘頂部付近)およびA₂(堆砂垣付近)をそれぞれ設定し(図2-2, 2-3参照)、長期的な土砂量の変化を調べた。堆砂垣は1990年～1993年の間に設置されている。なお、現地調査の調査点が多数存在する領域A₂については、短期的な土砂量の変化も求めた。

3.3.2 汀線変化と海岸林の関係

後浜から内陸への砂の流出メカニズムを調べるため、海側からの砂の供給能を示す指標として砂浜面積の変化、内陸側への砂の移動量を示す指標として海岸林面積の変化を用い、両者の関係を調べた。

砂浜面積の変化は、「平成8年度 茨城県海岸線変化量解析報告書(1997)」に記された1984年～1996年の各調査域の汀線変化量すなわち砂浜幅の変化量に調査域の沿岸方向長さを乗じて求めた。各調査域の沿岸方向の長さは約400～500mである。海岸林面積は、写真測量結果より求めた。

3.3.3 調査地における風況の推定

角折海岸、下津海岸ならびに豊ヶ浜海岸は、いずれも鹿島灘に面し、沿岸方向30km以内の範囲に含まれているため、これらを含む地域における風配はほぼ等しいと考えられる。航空写真が撮影された時期が1984年12月以降3年毎であることを考慮し、(a)1985年1月～1987年12月、(b)1988年1月～1990年12月、(c)1991年1月～1993年12月、(d)1994年1月～1996年12月、(e)1997年1月～1999年12月の各期間における調査地の風況を、2.3.4節で述べた方法により推定した。

3.4 調査結果

3.4.1 砂丘列の変動過程

角折海岸では1974年頃、下津海岸では1984年頃に連続した砂丘の造成工事が行われている。写真判読によれば、角折海岸および下津海岸では、連続的に整地された砂丘が造成された後、局所的な砂丘の侵食が顕著に進み、約10年間で長さおよそ100mの沿岸方向に並ぶ小砂丘に分裂していた。侵食域は卓越風向(N～ENE)の風下側に広がっていた。また、小砂丘間鞍部の植生は地形の侵食が進むにつれて減少していた。

角折海岸の1999年12月の現地調査および航空写真測量結果より得られた、測線の海

岸断面形状を図 3-1 に示す。現地調査結果を標高に換算する際、航空写真測量結果と比較し、現地調査で原点としている位置の標高を 5m とした。写真測量と実測による海岸断面の形状は測量誤差範囲内（水平方向：0.35m 程度、鉛直方向：0.7m 程度）でほぼ一致していた。

図 3-2、3-3 および 3-4 に、下津海岸、角折海岸および豊ヶ浜海岸の砂丘部の変動をそれぞれ示す。ここでは標高 6m 以上の等高線を表示した。図 3-2 には、1984 年頃に連続砂丘が造成された後、徐々に小砂丘へと分裂していく様子が捉えられている。1999 年には、砂丘の一部（北側）で連続した砂丘の再造成が行われた。

角折海岸では 1974 年以前に連続した砂丘が造成されたが、1982 年時点ではすでに小砂丘に分裂しており、図 3-3 には分裂後の変形過程が捉えられている。前章で示した現地調査は、中央砂丘から北側砂丘にかけて行われている。小砂丘間鞍部の背後では、後浜からの飛砂が海岸林に遮断されて海岸林の海側に堆積し、新たな砂丘を形成していた。

豊ヶ浜海岸においても、下津海岸および角折海岸と同様に複数の小砂丘が存在しており、1990 年および 1999 年頃に砂丘列北側で砂丘の造成が行われた。一方、砂丘列南側の小砂丘間鞍部では、背後に内陸側へ通じる道があり、海岸林が存在していないため、砂丘の再造成は行われていない。

3.4.2 角折海岸中央砂丘の地形変動

角折海岸の中央砂丘の 1990 年～1999 年における地形変動(図 3-3 参照)を図 3-5 に示す。地盤高は、標高 7m を基準面としたときの高さである。図より、角折海岸では連続砂丘が小砂丘に分裂した後、バルハン状(三日月型)の砂丘が形成されていた。図中の Line A、Line B および Line C に沿った砂丘断面の変化を図 3-6 に示す。図より、Line A に沿った断面地形の変化には、Area 部分は風向の風によって侵食傾向に、Area 部分は堆砂傾向にあることが捉えられている。Line B に沿っては、砂丘の後縁方向(B₂方向)への発達の様子が捉えられている。Line C に沿っては、他の Line と比較して地形は安定しているが、C₂側(Area および)はほとんど変化していないのに対して、C₁側(Area)の変化が目立つ。この侵食は、図 3-5 の 1999 年の地形より風向の方向に進んでいることから、この風向の風的作用によるものと考えられる。

1999 年 12 月を基準とした、砂丘頂部(A₁)および堆砂垣周辺(A₂)における土砂量の 3 年毎の相対的な変化を図 3-7 に示す。図中には、現地調査の結果から求めた領域 A₂の土砂量変化もあわせて表示する。領域 A₁の土砂量は、1984 年～1987 年にかけて減少しているが、それ以降は比較的变化が小さく、増減を繰り返しながら、長期的には一定値に収束していく傾向を示している。領域 A₂の土砂量は、1984 年～1990 年にかけて、砂丘部と同様に土砂量が減少しているが、1993 年以降は増加する傾向に転じている。これは 1990 年から 1993 年の間に堆砂垣が設置され、堆砂垣によって飛砂が捕捉されていたためと考えられる。

3.4.3 汀線変化と海岸林の関係

図 3-8 は、「平成 8 年度 茨城県海岸線変化量解析報告書」(1997)に記述された各調査地

の汀線の位置を、1984年12月を基準として示したものである。鹿島港の北側に位置する下津海岸および銚子港の北側に位置する豊ヶ浜海岸では、1987年12月以降汀線が海側に移動する傾向にあり、角折海岸では1990年12月以降汀線の位置はほとんど変化していなかった。これは、1985年から1993年にかけてのヘッドランド設置により海岸侵食が防止されていたためと考えられる（住谷ら、1988）。

海岸林面積の経時変化を図3-9に示す。海岸林の境界の読み取り誤差および標定誤差から判断すると、求められた海岸林面積には $\pm 1000\text{m}^2$ 程度の誤差が含まれている。現地観察結果から判断すると、海岸林面積の減少する原因は、主に小砂丘間鞍部の背後への堆砂、すなわち海岸林海側への局所的な堆砂によって海岸林の海側境界が陸側へ後退することに因るものである。下津海岸および豊ヶ浜海岸でそれぞれ連続した砂丘の造成が行われた1984年および1990年頃以降は、海岸林面積がほとんど変化していなかった。角折海岸では1987年頃まで海岸林面積は減少しているが、それ以降はほとんど変化していなかった。

3.4.4 調査地における風況の推定結果

1984年～1999年の調査地における推定風配を図3-10に示す。卓越風向（N～ENE）はやや東寄りに変化していた。

3.5 考察

3.5.1 砂丘列分裂メカニズム

写真測量の結果、連続していた砂丘が沿岸方向長さおおよそ100mの小砂丘に分裂している様子が認められた。このような砂丘の分裂に関して、Bagnold（1941）は卓越風向に対して垂直に存在する長い横列砂丘の不安定性を指摘している。連続した砂丘の頂部に小さな鞍部ができると、その鞍部を通過する風速は、局所的に増大する。その結果として鞍部が拡大し、砂丘は分裂するが、分裂した部分の風下側に砂が堆積し、新たな砂丘が作られる。前述したように、角折海岸においても同様の変動現象が起きていることから、連続した海岸砂丘の分裂のメカニズムは、横列砂丘の不安定性に類似したものである可能性が高い。また、西ら（2000）は鹿児島県吹上浜海岸における砂丘風食孔（鞍部）の発生間隔が113.4mであることを示しており、砂丘の比高や岸沖方向長さが異なるにもかかわらず、本研究の調査地における約100mという値とほぼ等しいオーダーになっている。このことより、風食孔の発生間隔すなわち分裂後の小砂丘の規模は、分裂前の砂丘の比高および岸沖方向長さには依存しないと推察される。

3.5.2 砂丘列変動の後浜における土砂移動への影響

図3-11は角折海岸を例として砂丘列地形と後浜における土砂移動の関係を示した模式図である。汀線変化、海岸林面積の変化ならびに砂丘部の土砂量変化より、砂丘列変動が後浜の土砂移動に与える影響を考察する。

図 3-9 より、下津海岸および豊ヶ浜海岸では、それぞれ連続した砂丘の造成が行われた 1984 年および 1990 年頃以降、海岸林面積がほとんど変化していない。これは、連続砂丘によって飛砂が捕捉・抑制されていたためと考えられ、角折海岸においても 1974 年～1982 年頃は同様に飛砂が捕捉・抑制されていたと考えられる。

図 3-7 に示したように、角折海岸の砂丘頂部周辺 (A_1) では 1984 年～1987 年にかけて、土砂量が著しく減少していた。また、図 3-9 より、同時期に海岸林面積も減少していた。よって、この期間における砂丘部から陸側への飛砂量は、他の期間と比較して最も大きかったと考えられる。一方、1987 年以降は、汀線は後退しており、海岸林面積および土砂量の変化は比較的小さいことから、後浜から陸側への飛砂量が減少しており、また、海岸林海側の堆砂域（新砂丘領域、3.4.1 節参照）により飛砂が捕捉されていた可能性がある。後浜から陸側への飛砂量が減少する原因としては、汀線が後退することにより、吹送距離が短くなるため、供給量が減少することが考えられる。砂丘部から陸側への飛砂が減少する原因としては、連続砂丘が分裂し、砂丘地形が安定したこと等が考えられる。

3.5.3 汀線変化と海岸林面積の関係

3 年毎の砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の関係を図 3-12 に示す。図 3-11 に示したように、各海岸の連続砂丘造成工事の時期および海岸林海側に新たに砂丘が形成された時期から判断すると、砂丘の分裂が生じてから海岸林の海側に新たな砂丘が形成されるまでの間、砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の間には正の相関関係が見られる。3.5.2 節より、この間、後浜から海岸林部への飛砂が増大していたことを考慮すると、風による後浜の飛砂現象と波による汀線変動現象は密接な関係にあると考えられる。吹上浜海岸（鹿児島県）においても類似の現象、すなわち、海岸林の海側境界位置の変動と汀線変動の間の相関関係が、西ら（1998）により報告されている。

3.5.4 植生の長期的な地形変動への影響

3.4.2 節で示したように、中央砂丘の地形変動の傾向が局所的に異なる原因については、海岸植生の影響もあわせて考慮する必要がある。植生繁茂状況を調べたところ、Area および 部分のように地形の変動が大きい部分にはほとんど植生が存在していなかった。連続した砂丘が小砂丘に分裂した後、小砂丘間鞍部で侵食が顕著に進み、植生が激減していた。2.5.2 節では植生によって砂が捕捉されていることを述べたが、植生の飛砂捕捉能力には限界があり、地形変化が著しく大きい領域では植生そのものが維持できないことがわかる。

Line A および B に沿った変動については、植生の繁茂量が少ない部分ほど地形変動が顕著になっていたが、Line C に沿った地形変動については、単純に植生の繁茂量だけでは説明できない。Area , ならびに 部分には植生が見られたが、Area および 部分は連続砂丘の切れ目付近に位置するため Area 部分と比較すると植生の繁茂量は少ない。Area は風向 の風に対して小砂丘の風上側に位置し、侵食域がこの方向に拡大していることから、主にこの風の影響を受けて地形が変動し、Area はその位置関係から風向 の風の影響を受けて地形が変動したと推定される。風向 および の風はともに海風で、年間では風

第3章 後浜の長期的な地形変動

向の風が風向の風より卓越しているにもかかわらず、Area部分の風向の風による地形変動量の方がArea部分の風向の風によるそれより大きい。このような結果を得た原因としては、2.5.1節で述べた植生の方向性が考えられ、植生の飛砂捕捉能力は卓越風向の風上からの飛砂に対しては大きい、それ以外の風向に対しては比較的小さいと推察される。

参考文献

茨城県高萩土木事務所・朝日航洋株式会社(1997): 平成8年度 茨城県海岸線変化量解析 報告書 .

住谷廸夫, 園部武正, 宇多高明, 伊藤隆, 猿田正則, 横田喜一郎 (1988): 鹿島灘沿岸におけるヘッドランドの建設による海浜の安定化, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp. 437-441 .

西隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・西原幸雄・井之上由人 (1998): 吹上浜海岸における汀線と海岸植生および砂丘林境界の長期変動特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 661-665 .

西隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・牟田神宗征・中村俊一 (2000): 砂丘風食地形に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 581-585 .

Bagnold, R. A. (1941): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co. Ltd., London, 265p.

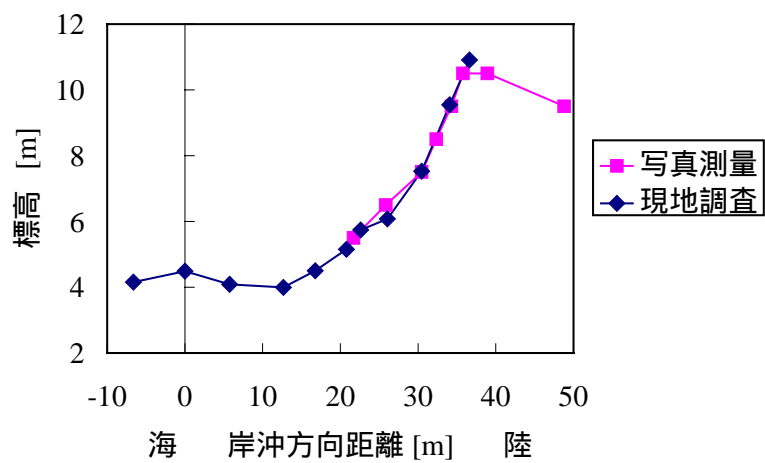


図 3-1 現地調査と航空写真測量による角折海岸の断面の比較 (1999 年 12 月)

第3章 後浜の長期的な地形変動

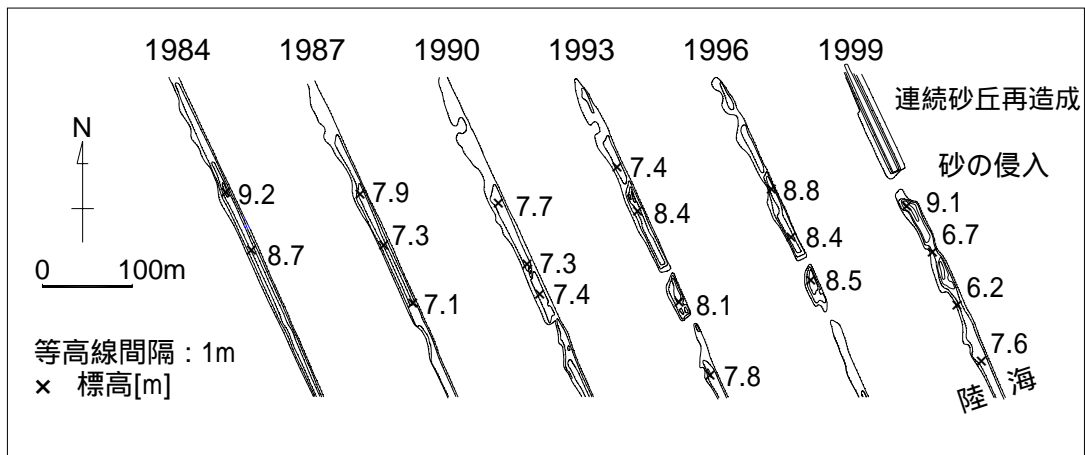


図 3-2 1984 年～1999 年の下津海岸砂丘部の変動

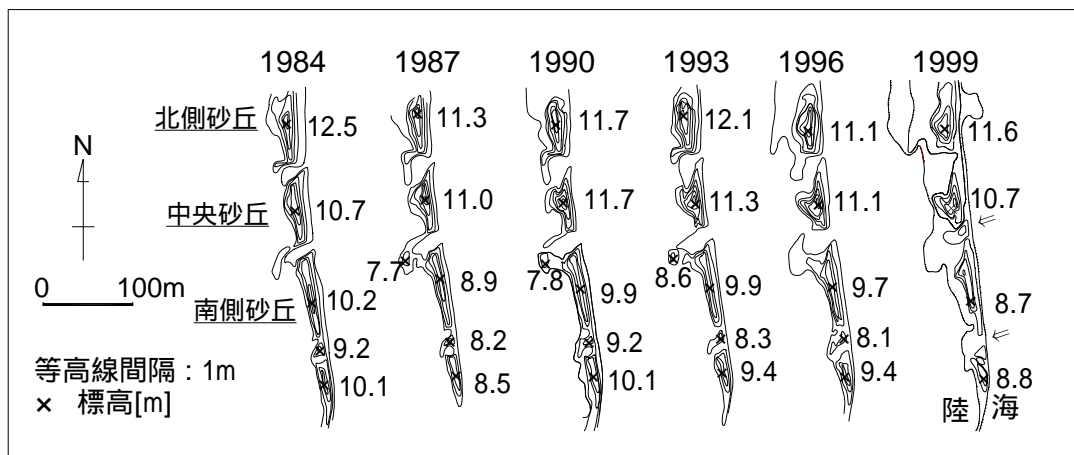


図 3-3 1984 年～1999 年の角折海岸砂丘部の変動

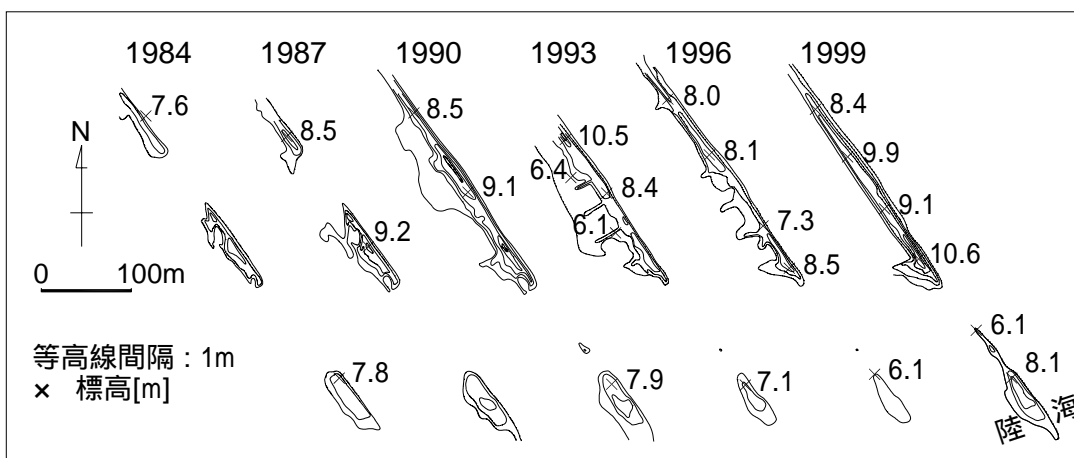


図 3-4 1984 年～1999 年の豊ヶ浜海岸砂丘部の変動

第3章 後浜の長期的な地形変動

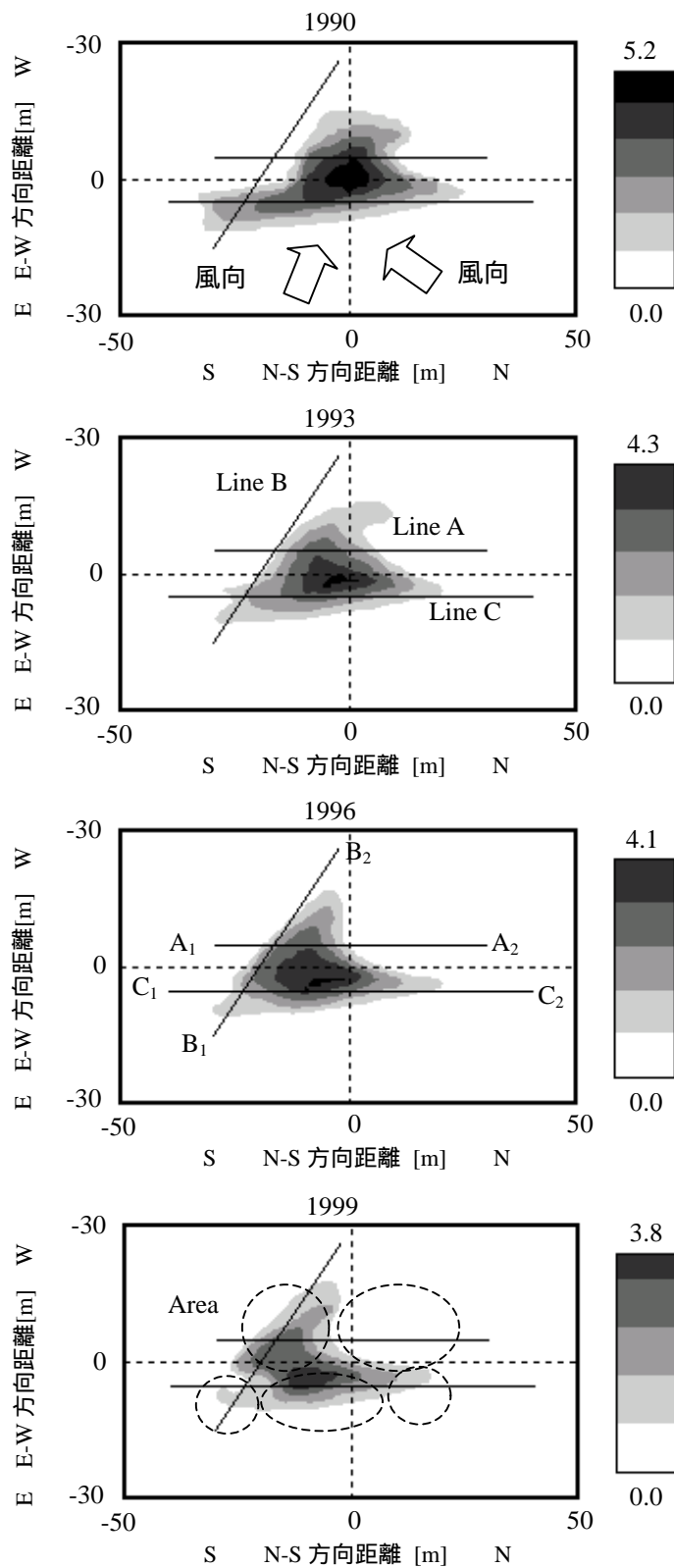
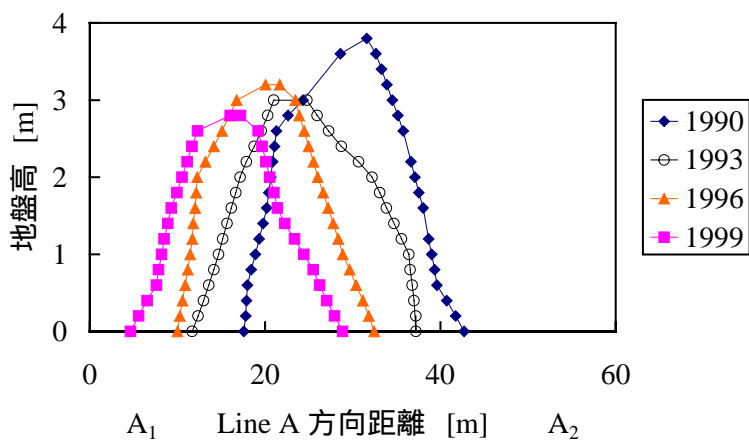
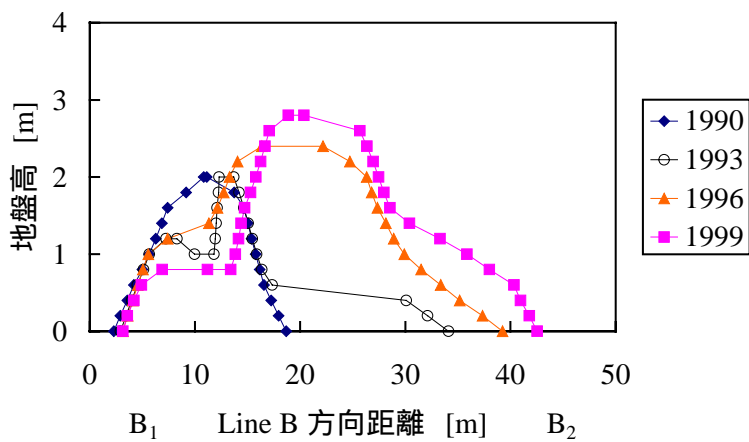


図 3-5 角折海岸の中央砂丘の地形変動
(標高 7m を基準面とした平面図, 図 3-3 参照)

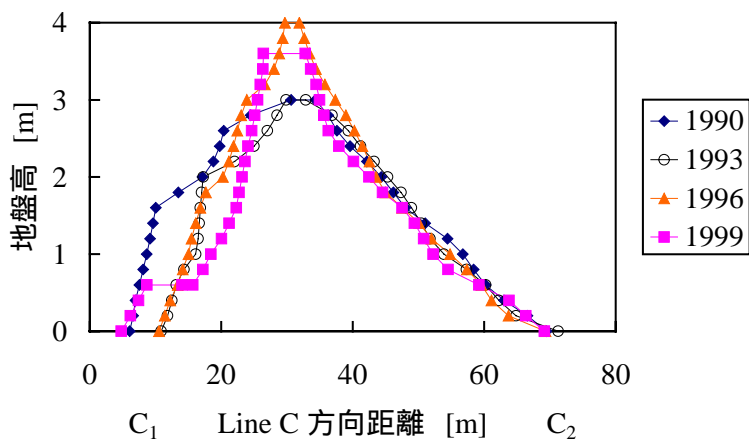
第3章 後浜の長期的な地形変動



(a) 砂丘頂部の風下方向への移動



(b) 砂丘の後縁方向への発達



(c) 砂丘海側断面の変動

図 3-6 角折海岸の中央砂丘断面の変化

第3章 後浜の長期的な地形変動

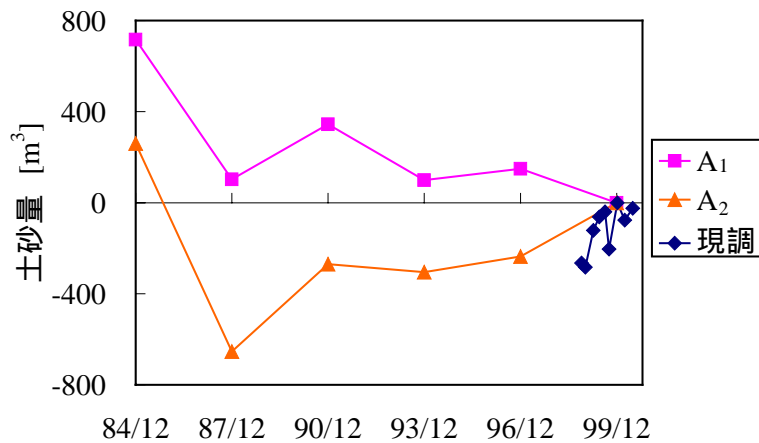


図 3-7 1999 年 12 月を基準とした土砂量の経時変化

A₁ : 砂丘頂部周辺領域の土砂量

A₂ : 堆砂垣周辺領域の土砂量

現調 : 1998 年 10 月 ~ 2000 年 6 月の現地調査結果
より得られた A₂ 領域の土砂量の経時変化

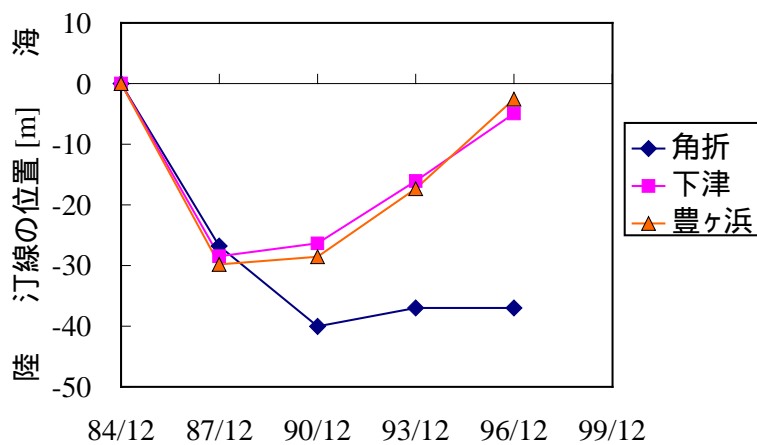


図 3-8 1984 年 12 月を基準とした汀線位置の経時変化

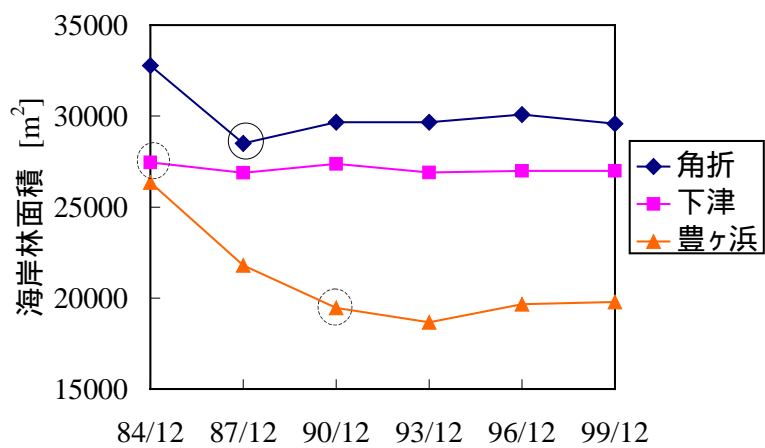


図 3-9 海岸林面積の経時変化

実線円：海岸林海側に新砂丘が形成された時期
 点線円：連続砂丘の造成工事が実施された時期
 （豊ヶ浜海岸においては一部のみ）

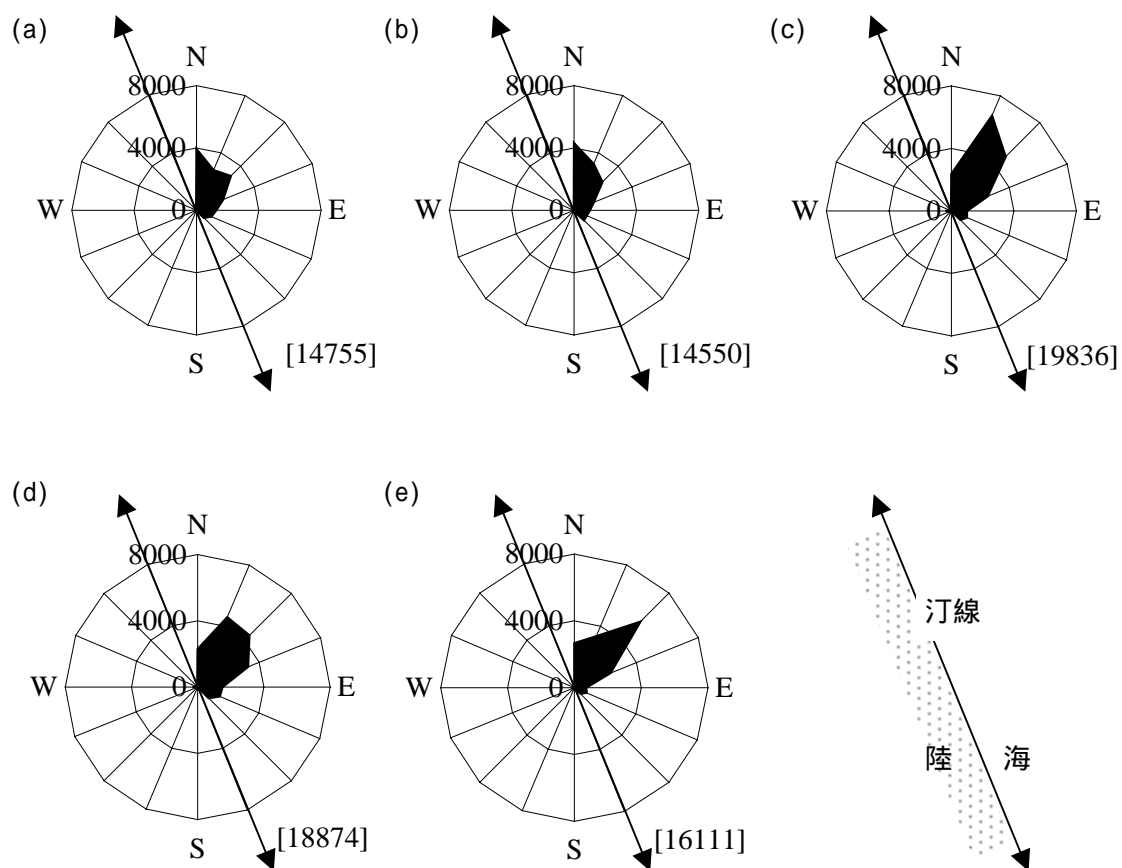


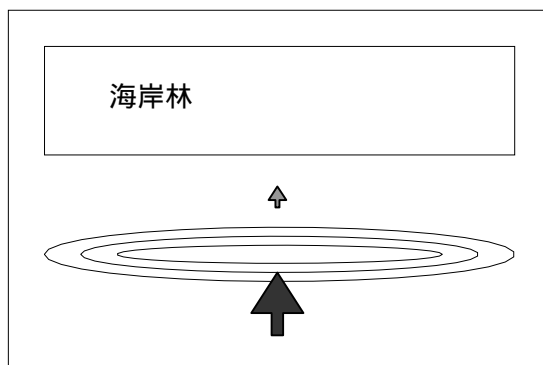
図 3-10 調査地における期間別の推定風配
 []内数値：推定風配の全風向成分の合計値 [(m/s)・hour/3year]

- 期間(a)：1984年12月～1987年12月
- 期間(b)：1987年12月～1990年12月
- 期間(c)：1990年12月～1993年12月
- 期間(d)：1993年12月～1996年12月
- 期間(e)：1996年12月～1999年12月

第3章 後浜の長期的な地形変動

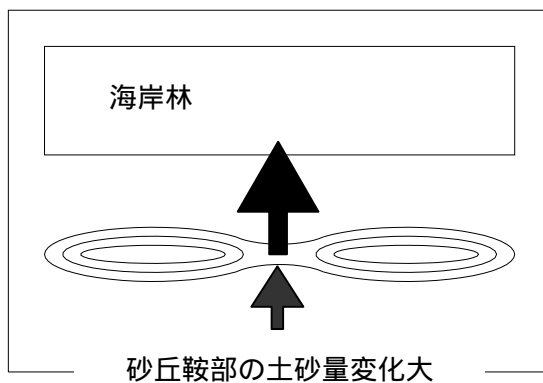
角折海岸

1974年～
1982年頃



角折海岸

1982年～
1987年頃



角折海岸

1987年頃～

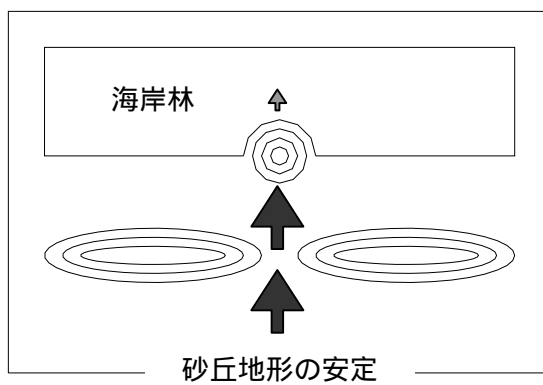


図3-11 砂丘列の変動と陸側への土砂移動の関係
(矢印の大小：飛砂量の大小)

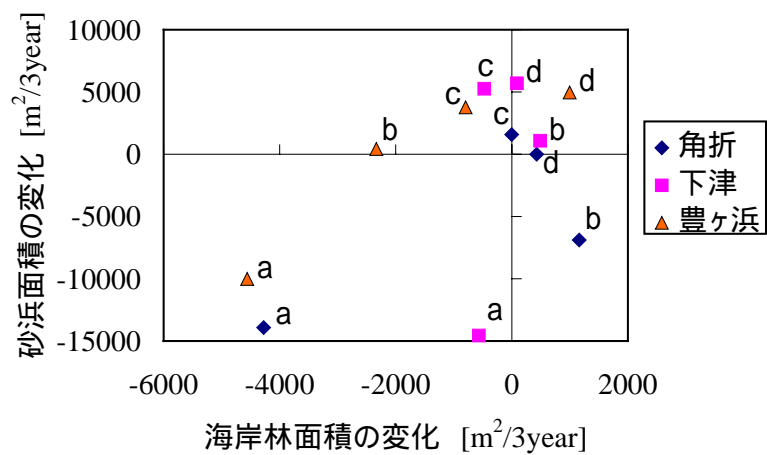


図 3-12 砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の関係

期間(a) : 1984 年 12 月 ~ 1987 年 12 月

期間(b) : 1987 年 12 月 ~ 1990 年 12 月

期間(c) : 1990 年 12 月 ~ 1993 年 12 月

期間(d) : 1993 年 12 月 ~ 1996 年 12 月

第 4 章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

4.1 概説

海岸植生に飛砂を捕捉・抑制する効果があることはこれまでも報告されているが、その素過程については不明な点が多い。ここでは、日本の砂浜で広く見られるコウボウムギおよびハマヒルガオを擬似した柔軟性のある植生モデルを用いて風洞実験を行い、植生形態が飛砂現象に及ぼす影響を調べる。

4.2 実験装置

4.2.1 風洞

実験に用いた風洞は吹出型で、測定部の寸法は断面 $0.35\text{m} \times 0.35\text{m}$ 、流下方向長さ 2.3m である。測定部底面に東北珪砂 6 号（平均粒径 0.23mm ）を 10mm の厚さで敷き詰め、その一部に植生層を設置した。測定部最上流断面中心における平均風速を流入風速 U と定義し、実験では測定部内に植生モデルを設置しないときの流入風速 U_0 が $5.95, 6.98, 7.90$ ならびに 8.82m/s となるようにファンの回転数を変化させた。

4.2.2 植生層

植生層を構成する植生モデルの形状および配置方法等を表 4-1 に示す。コウボウムギを擬似したモデルは、厚さ 0.1mm の PET フィルムを用いて作成した。コウボウムギ型モデルの葉は長さ 150mm 、幅 8mm の笹型で、内側 4 枚と外側 4 枚を 2 重にして 1 株とした。このモデルの砂面上高さは $50 \sim 70\text{mm}$ である（写真 4-1）。また、比較のために、変形しない棒型モデルとコウボウムギ型モデルを作成した。棒型モデルは直径 6mm のストローを用いて作成した。コウボウムギ型モデルは、厚さ 0.75mm の塩化ビニル板を用いて変形可能なコウボウムギ型モデルと類似の形状になるように作成し、葉の長さ 125mm 、幅 10mm の 4 枚を 1 重にして 1 株とした。これらのモデルの砂面上高さは $60 \sim 65\text{mm}$ である。

海浜でパッチ状に存在する植生層を想定し、植生領域の流下方向長さを 350mm とし、図 4-1 に示すように $24 \sim 83$ 株のモデルを $35 \sim 71\text{mm}$ 間隔で千鳥状または格子状に設置した。植生層上流端を $x = 0\text{mm}$ とする。

4.3 実験方法

4.3.1 砂面高変化の測定

表 4-1 に示す各植生層について、15 秒間風を作用させた後レーザー変位計を用いて地形の計測を行う、という操作を連続して 4 回行い、計 60 秒間風を作用させたときの地形変化を調べた。風を作用させた後の地形と初期地形の差を砂面高の変化とした。砂面高は、風洞の流下方向 $x = -100 \sim 450\text{mm}$ およびスパン方向 $y = -100 \sim 100\text{mm}$ の範囲を、それぞれ 5mm 間隔で計測した(図 4-1 参照)。計測点は、 x 方向 111 点および y 方向 41 点の総計 4551 点である。

4.3.2 平均風速分布の測定

平均風速の鉛直分布はピトー管を用いて測定した。測定位置は、風洞のスパン方向中央線 ($y = 0\text{mm}$) 上の $x = -100\text{mm}, 50\text{mm}, 100\text{mm}, 250\text{mm}$ ならびに 450mm の地点である(図 4-1)。ただし配置 c (83 株) のときには、ピトー管と植生モデルの接触を避けるためスパン方向 $y = 5\text{mm}$ の線上に計測点を設定した。鉛直方向については、砂面からの高さ $z = 5 \sim 300\text{mm}$ の範囲に設定した 19 点で計測した。風速分布測定時のファンの回転数は、飛砂による地形変化の影響を小さくするため、飛砂の発生が始まる $U_0 = 5.95\text{m/s}$ に設定した。

4.3.3 スモークワイヤ法を用いた植生領域の風場の可視化

灯油で割った流動パラフィンと金属線を用いて風場の可視化を行う。金属線には、合金の種類(ニクロム、タングステン、ステンレス)と直径(0.1mm, 0.2mm)が異なる線の中で、最も耐熱性が高く、結び目を作る細工がし易い、直径 0.2mm の Cr-Ni ステンレス鋼(SUS 304)線を用いた。ステンレス線には 10mm 毎に結び目を作り、これを $(x, y) = (-165\text{mm}, 0\text{mm})$ の位置に鉛直方向に張った。流動パラフィンの濃度が濃いとステンレス線が切れやすくなるため、流動パラフィン(試薬特級、密度 0.86~0.89g/ml)と灯油の比は 1 対 2 とした。

線の上から流動パラフィンを垂らして 35~40V の電圧を加えると、結び目から煙が発生する。高風速では拡散により煙の可視化が困難になるため、 U_0 は 5.95 および 6.98m/s に設定した。また、植生層高が大きいと砂面付近の可視化が困難であるため、ここでは植生層なし(), 棒型 10 (b および c) ならびにハマヒルガオ型() について可視化を行った(表 4-1)。照明には、岩崎電気製コンパクト HID ランプ(電力 150w, 全光束 8000lm, 色温度 6500K)を 4 つ使い、デジタルカメラで撮影した。このときのシャッタースピードは 1/2000s に設定した。

得られた画像から砂面に最も近い追跡可能な流脈線を抽出し、乱れの解析を行った。この流脈線の追跡開始位置は、流下方向距離 $x = -100\text{mm}$ および砂面からの高さ $z = 45\text{mm}$ 前後である。

4.3.4 砂粒子のサルテーション軌道の解析

Zou ら(2001)は、植生層が存在しないときの飛砂に関する風洞実験を行い、高速度ビデオ

カメラを用いて砂粒子のサルテーション軌道の解析を詳細に行っている．ここではデジタルビデオカメラを用い，表 4-1 に示す 7 ケースについて，Zou らと同様にサルテーション高さと水平速度を計測し，解析を行った．スライドプロジェクタを用いて $y = 0\text{mm}$ の断面に幅約 2mm のスリット光を照射し， $U_0 = 6.98\text{m/s}$ のときの砂粒子のサルテーション軌道をデジタルビデオカメラで撮影した．撮影範囲は， $x = 350 \sim 500\text{mm}$ （植生領域風下側）および $z = 0 \sim 100\text{mm}$ の領域が含まれるように設定した．10 秒間の記録から 1/30 秒の間隔で PC に画像を取り込み，総計 300 枚の画像からサルテーション軌道を追跡した．ただし，サルテーションの発生が少ない場合には 600 枚の画像を解析した．各画像の露出時間は約 1/30 秒である．

4.4 実験結果

4.4.1 砂面高変化

60 秒間風を作用させた時点での， y 方向に計測された 41 データを平均した x 方向の平均砂面高変化を図 4-2 に示す．植生層高が小さい場合について，(e) ハマヒルガオ型・非変形植生層（ ）では，流入風速 U が 6.66m/s 以上の場合に流下方向距離 $x = 75\text{mm}$ 付近より風上側で侵食傾向にあり，風下側で堆積する傾向にあった．棒型 10・非変形植生層（ ）の場合には，(c) b および(d) c で U がそれぞれ 6.95m/s および 6.93m/s 以上のときハマヒルガオ型・非変形植生層（ ）と類似の傾向が見られた．(b) a では侵食・堆積領域は見られなかったが，(a) 植生層なし（ ）の場合と比較して地形が安定していた．

植生層高が大きい場合について，(i) コウボウムギ型・非変形植生層（ s ）では， U が 7.50m/s 以上の場合に $x = 150\text{mm}$ 付近より風上側で侵食傾向にあり，風下側で堆積傾向にあった．コウボウムギ型・変形植生層の場合には，(j) a および(k) b で U がそれぞれ 6.65m/s および 6.30m/s 以上のときに，より顕著に s と同様の傾向が見られた．植生層高が小さい場合と比較すると，侵食および堆積領域の流下方向距離は大きかった．棒型 65・非変形植生層（ ）の場合には，(h) c のときにややその傾向が見られたものの，(f) a および(g) b のときには侵食および堆積領域が見られず，a のときにはむしろ(a) 植生層なし（ ）の場合と比較してやや侵食が促進される傾向にあった．

コウボウムギ型・変形植生層（ b ）で $U = 8.20\text{m/s}$ のときの各時間帯における平均砂面高の変化を図 4-3 に示す．0～15s の時間帯にやや変化が大きいものの，全般にはほぼ一定の割合で変化が進んでいた．他の実験ケースについても類似の変化が見られた．

4.4.2 平均風速分布

図 4-2 に平均風速の鉛直分布を示す．ここでは図を鮮明にするため流下方向距離 $x = 100\text{mm}$ 以外の計測点における結果を示した．図 4-2(a) 植生層なし（ ）の風速分布には，平板上の境界層の発達過程が見られる．棒型植生層（ ， ）およびコウボウムギ型・変

形植生層 (a, b) についての実験 ((b) ~ (d), (f) ~ (h), (j) (k)) では、いずれの植生層においても遮蔽体積率 R_V (表 4-1 参照) が大きいほど植生層内の風速が減衰していた。

植生層高が大きい場合について、 R_V がほぼ等しい (g) 棒型 65・非変形植生層 (b) と (i) コウボウムギ型・非変形植生層 (s) の風速分布を比較すると、コウボウムギ型の方が植生層内の風速の減衰は大きく、コウボウムギ型植生層が有する風速減衰効果は棒型と比べて相対的に大きいと考えられる。同様に R_V がほぼ等しい (i) コウボウムギ型・非変形植生層 (s) の風速分布と (k) コウボウムギ型・変形植生層 (b) の風速分布を比較すると、変形可能な植生層の場合の方が植生層内の風速の減衰は大きかった。植生層高が小さい場合についても、 R_V がほぼ等しい (c) 棒型 10・非変形植生層 (b) と (e) ハマヒルガオ型・変形植生層 () の風速分布を比較すると、変形可能なハマヒルガオ型植生層の場合の方が風速の減衰が大きかった。

コウボウムギ型・変形植生層 () の植生層内の風速分布 ((j), (k)) は植生層高が大きい場合の他のケース ((f) ~ (i)) と比較して、植生の葉が密集している砂面上 40mm 付近の風速が大きく減衰していた。

4.4.3 植生領域の風場

表 4-1 で示した 4 ケースにおける風場の可視化画像の例を写真 4-2 に示す。これらの画像から抽出した流脈線を図 4-4 に示す。抽出した流脈線の平均位置と標準偏差もあわせて示す。棒型 10・非変形植生層 (c) について 30 ~ 70 データの流脈線を解析したところ、データ数が 50 以上のとき解析結果がほぼ等しかったため、抽出データ数は 50 とした。図 4-4(a) 植生層なし () および (d) ハマヒルガオ型・変形植生層 () の流脈線の発生地点の鉛直方向位置にずれが生じているが、これはステンレス線交換および高熱によるステンレス線の延伸に起因するものである。植生層なし () および棒型 10・非変形植生層 (b, c) の結果 ((a) ~ (c)) には、流入風速 $U_0 = 5.95\text{m/s}$ および 6.98m/s のときの流脈線の平均位置および標準偏差に大きな差異は見られなかった。これに対し、(d) ハマヒルガオ型・変形植生層 () では流下方向距離 $x = 50\text{mm}$ 付近から風下側で標準偏差が増大しており、 U が大きいときその増大がより顕著であった。

図 4-4(a) より、植生層なし () の場合の流脈線は流下方向にやや低下する傾向にあった。図 4-5 に、植生層なし () の場合の $z = 45$ および 60mm 付近から発生する流脈線を概略的に示す。このときの U_0 は 5.95m/s で、それぞれ 15 データ取得した。図より、 $z = 45\text{mm}$ 付近から発生する流脈線の平均位置は流下方向にやや低下しているのに対し、 $z = 60\text{mm}$ 付近から発生する流脈線はやや上昇している。これは、 $z = 45\text{mm}$ 付近は境界層内にあり、乱れの影響を強く受けて下方に拡散していることを示している。

4.4.4 砂粒子のサルテーション軌道

植生領域風下側 ($x = 350 \sim 500\text{mm}$) で得られた 300 枚の画像 (写真 4-3) より、植生層なし () の場合について 28 個、棒型 10・非変形植生層 (b) について 25 個、ハマヒルガオ型・変形植生層 () について 33 個、棒型 65・非変形植生層 (a, c) についてそれ

ぞれ9個および172個, コウボウムギ型・非変形植生層(s)について29個, コウボウムギ型・変形植生層(a)について110個のサルテーション軌道を読み取り, サルテーションの高さ H および最高点付近の水平速度 V を調べた。 a についてはデータ数が少ないため, 300枚の画像を追加し, 合計31個の軌道を解析した。捉えられた軌跡の数と, 砂面高変化から求めた推定飛砂量の間に関連関係は見られなかった。これは, H が小さい跳躍移動や掃流移動を追跡できなかったためと考えられる。

図4-6に H と V の関係を示す。植生層なし() の場合には, V が大きいほど H も大きくなっていた。取得データ数が少ない棒型10・非変形植生層(b), ハマヒルガオ型・変形植生層(), 棒型65・非変形植生層(a) およびコウボウムギ型・非変形植生層(s) の4ケースについては, V によらず, 植生層高が大きい場合には H が約15mm以下に分布していたのに対し, 小さい場合には約30mm以下に分布しており, 比較的 H が大きかった。また, 非変形植生層の3ケースに注目すると, 植生層高が小さい場合には大きい場合と比較して V が大きかった。ハマヒルガオ型・変形植生層の場合には非変形植生層の場合と比較して V が小さかった。

取得データ数が多い棒型65・非変形植生層(c) とコウボウムギ型・変形植生層(a) の場合を比較すると, データ数が少ないときと同様に, 変形植生層の場合に比較的 V が小さくなっていた。

4.5 考察

4.5.1 植生層の遮蔽体積率が飛砂に与える影響

棒型植生層(,) の風速分布および砂面高変化には, 植生層の遮蔽体積率 R_v が大きく, 植生層高が小さい場合ほど砂面付近の風速の減衰が大きくなり, 砂面高は堆積傾向になることが捉えられている。これは, 密生度が大きく植生層高が小さいほど飛砂を堆積させやすいという, 辻本・西澤(1999)の報告と整合する。一方, 棒型65植生層で R_v が小さい場合(a) の砂面高変化は, 植生層が存在しない場合と比較して侵食が進んでいたのに対し, R_v が大きい場合(c) は, 植生層風上側でやや侵食されているものの, 風下側では堆砂傾向が見られた。これは, 植生層を設置することで砂面からの高さ $z=40\text{mm}$ 付近の風速が減衰すると, その反動で $z=5\sim 20\text{mm}$ の風速が増加し, 飛砂量は増加するが, R_v が大きい場合には流下方向にこの高さにおける風速が減衰するため, 飛砂量が減少していたと説明される。

サルテーション軌道の解析結果より, 植生層高が小さいときサルテーション高さ H が大きくなる傾向にあった。これは, 植生層高が大きいときには概して植生層の上下に分かれて風が流れるのに対し, 小さいときには植生層の上方に流れるためと考えられる。

4.5.2 植生の形状が飛砂に与える影響

図4-2より、植生層高が約65mmの場合には、約10mmの場合と比較して植生形状の差異により風速分布が大きく変化していた。植生層高が約65mmで遮蔽体積率 R_v がほぼ等しい、棒型65・非変形植生層(b)とコウボウムギ型・非変形植生層(s)の植生層内の風速分布は顕著に異なっており、コウボウムギ型では風速分布の鉛直方向変化および植生層内の風速の減衰が大きかった。風速分布の変化が大きい原因としては、植生モデルの体積が鉛直分布をもつことが挙げられる。また、植生層内の風速の減衰については、植生層上部と下部で相反する変化が見られた。すなわち、砂面からの高さ $z=40$ mm付近の風速の減衰が大きいほど、 $z=10\sim 20$ mm付近の風速は増加し、砂面付近($z=5$ mm)では再び風速が著しく減衰していた。図4-7に植生層風下側($x=450$ mm)における砂面付近と砂面上40mm付近の風速減衰の関係を示す。図より、砂面付近の風速は $z=40$ mm付近の風速減衰の大きさに比例して減衰していた。

棒型65植生層(b)の砂面高変化の結果には、コウボウムギ型植生層で見られる植生領域風上側の侵食および風下側の堆積傾向が見られなかった。両者の流入風速 U がほぼ等しいことを考慮して、植生領域より風上側における飛砂量はほぼ等しいと考え、コウボウムギ型の場合には、植生領域風上側では相対的に飛砂量が大きい、風下側では風速の減衰により飛砂量が減少していたと判断される。

以上より、 $z=40$ mm付近の風速を減衰させることで植生層風下側における飛砂の発生を抑制することが可能であるが、この風速減衰の反動によって植生層風上側における $z=5\sim 20$ mm付近の風速は顕著に増加し、飛砂量は増加すると考えられる。

$z=40$ mm付近の風速については、風洞測定部断面におけるこの高さの植生の投影面積が大きいほど減衰が大きいと考えられるが、変形植生層の場合には風によって投影面積が変化しその定義が困難であるため、ここではこれについて詳細に検討することができなかった。また、風速減衰域の高さ(40~50mm)は植生形状および植生層高に依存して変化する可能性が高く、検討を要する。

4.5.3 植生層で発生する乱れが飛砂に与える影響

コウボウムギ型・非変形(s)および変形植生層(Vb)の風速分布を比較すると、変形植生層の場合には葉が密集している砂面からの高さ $z=40$ mm付近の風速が大きく減衰していた。この高さにおける変形植生層の局所的な遮蔽体積率が非変形植生層より小さいにもかかわらず、風速の減衰が大きいことから、植生の揺動が風場に大きな影響を与えていたと考えられる。砂面高変化の結果には、非変形植生層と比べて変形植生層の場合により顕著に植生領域風上側の侵食および風下側の堆積傾向が見られたが、これは4.5.2節で述べたように $z=40$ mm付近の風速がより顕著に減衰していたためである。

植生の揺動により大きな乱れが発生していることは、図4-4に示したハマヒルガオ型植生層()の場合の結果より読み取れる。ハマヒルガオ型植生層()の場合には、流入風速 U が変化しても流脈線の平均位置はほとんど変化しないが、他の植生層の場合(,

b, c)と比較して植生層風上側で大きな乱れが発生しており,この乱れは U が大きいときほど大きかった. 図 4-8 にハマヒルガオ型・変形植生層()の場合の流脈線と砂面高変化を示す. 砂面高変化は, $x = -25\text{mm} \sim 75\text{mm}$ の領域では侵食傾向にあり, $x = 75\text{mm} \sim 200\text{mm}$ の領域では堆積傾向にあるが,この境界付近($x = 75\text{mm}$)で流脈線の平均位置からのずれ(標準偏差)は急激に大きくなっていった(図 4-4(d)参照).

コウボウムギ型・非変形および変形植生層のサルテーション軌道解析の結果(図 4-6)を比較すると,後者のサルテーション高さ H は相対的に大きかったにもかかわらず,サルテーション水平速度 V は相対的に小さかった. 植生層高が小さい場合についても,ハマヒルガオ型・変形植生層のとき V が小さかった. V が小さくなる原因としては, H が集中して分布している,砂面からの高さが $0 \sim 30\text{mm}$ の範囲の平均風速分布が小さくなっていることが考えられる.

現時点では,飛砂量に最も影響を与えている要素が,乱れによるサルテーション水平速度の変化なのか,あるいは砂面からの砂の離脱確率密度(pick-up rate)の変化なのか判断できないが,いずれにせよ,乱れは飛砂量変化の一因になっていると考えられる.

4.5.4 植生領域における粗度長と摩擦速度

植生層が風速の鉛直分布に与える影響を検討するため,各植生層における粗度長と摩擦速度を調べた. 流入風速 $U_0 = 5.95\text{m/s}$ のときの粗度長は,砂面からの高さ $z = 5 \sim 12\text{mm}$ (計測点:5点)の平均風速の対数分布が直線分布であると仮定して求めた. 全植生層の場合について求めることが可能だった流下方向距離 $x = -100\text{mm}$ における平均風速の対数分布の例および粗度長と遮蔽体積率の関係を,それぞれ図 4-9 および 4-10 に示す. ほぼ平坦な砂面上における粗度長は砂の粒径(ここでは 0.23mm)の $1/10$ のオーダーになるといわれているが(堀田,1985),植生層なし()の場合の粗度長は 0.026mm となっており妥当な値が得られた. 非変形植生層(, , s)の場合の結果には,ばらつきが大きいものの,遮蔽体積率と粗度長の間には正の相関関係,すなわち遮蔽体積率が大きいほど粗度長が大きくなる,という関係が見られる. これは,植生層高および密生度の 2 つの要因を含むパラメータである遮蔽体積率が,粗度長を推定する際に有効な指標となることを示している. また,変形植生層の場合には,非変形植生層と比較して粗度長が大きくなっていった. 植生が粗度長に与える影響に関する研究は少ないが,Olsen(1958)は,植生領域では粗度長が大きいことを,Bressolier・Thomas(1977)は,現地調査により植生の密生度が粗度長に与える影響は植生高のそれより大きいことを示している.

$U_0 = 5.95\text{m/s}$ のときの摩擦速度 u_* は,上記の方法で求めた $x = -100\text{mm}$ における粗度長と $z = 5\text{mm}$ における風速データより,対数則を適用して求めた. これの流下方向の変化を図 4-11 に示す. 図より, $x = -100\text{mm}$ においてはいずれの植生層においても $u_* = 0.35 \sim 0.45\text{m/s}$ に分布していた. 植生層なし()の場合には $u_* = 0.35\text{m/s}$ で流下方向にほぼ一定であったが, $U_0 = 5.95\text{m/s}$ のとき飛砂が発生し始め,Bagnold(1941)より砂の粒径が 0.2mm の限界摩擦速度が約 0.2m/s であることを考慮すると,得られた u_* はやや大きい値であると判断さ

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

れる．棒型植生層（ ， ）の場合には流下方向の変化が小さかったのに対し，植生層風上側および風下側でそれぞれ侵食および堆積傾向が見られた変形植生層（ ， a ， b）の場合には，植生層風上側で u_* は大きく，風下側で小さくなっていた．

参考文献

- 辻本哲郎・西澤謙二 (1999): 海岸植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 506-510 .
- 堀田新太郎 (1985): 飛砂, 本間仁監修 / 堀川清司編 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 191-209 .
- Bagnold, R. A. (1941): The physics of blown sand and desert dunes, Methuen, London, 265p.
- Bressolier, C. and Thomas, Y-F. (1977): Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 47, No. 1, pp. 331-338.
- Olson, J. S. (1958): Lake Michigan dune development. 1 Wind-velocity profiles, Journal of Geology, Vol. 66, pp. 254-263.
- Zou, X. Y., Wang, Z. L., Hao, Q. Z., Zhang, C. L., Liu, Y. Z. and Dong, G. R. (2001): The distribution of velocity and energy of saltating sand grains in a wind tunnel, Geomorphology, Vol. 36, pp. 155-165.

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

表 4-1 植生層の諸元

植生モデル形状	植生配置	植生層記号	変形	植生層高	R_V	U	風場	軌道
植生層なし					0.0	5.95		
棒型 10	a (24 株)	a	×	10mm	0.09	5.95	×	×
	b (48 株)	b			0.17	5.95		
	c (83 株)	c			0.35	5.93		×
ハマヒルガオ型	a (24 株)	a		10 ~ 15mm	0.17	5.77		
棒型 65	a (24 株)	a	×	65mm	0.57	5.79	×	
	b (48 株)	b			1.13	5.76	×	×
	c (83 株)	c			2.26	5.62	×	
コウボウムギ型	a (24 株)	s	×	60 ~ 65mm	1.08	5.62	×	
	a (24 株)	a		50 ~ 70mm	0.54	5.67	×	
	b (48 株)	b			1.09	5.35	×	×

変形：変形の有無，植生の配置：図 4-1 参照

遮蔽体積率 R_V ：植生層内の単位空間に占める植生の割合 [%]

流入風速 U ： $U_0 = 5.95\text{m/s}$ のときの流入風速 [m/s]

風場：風場解析の有無，軌道：サルテーション軌道解析の有無

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

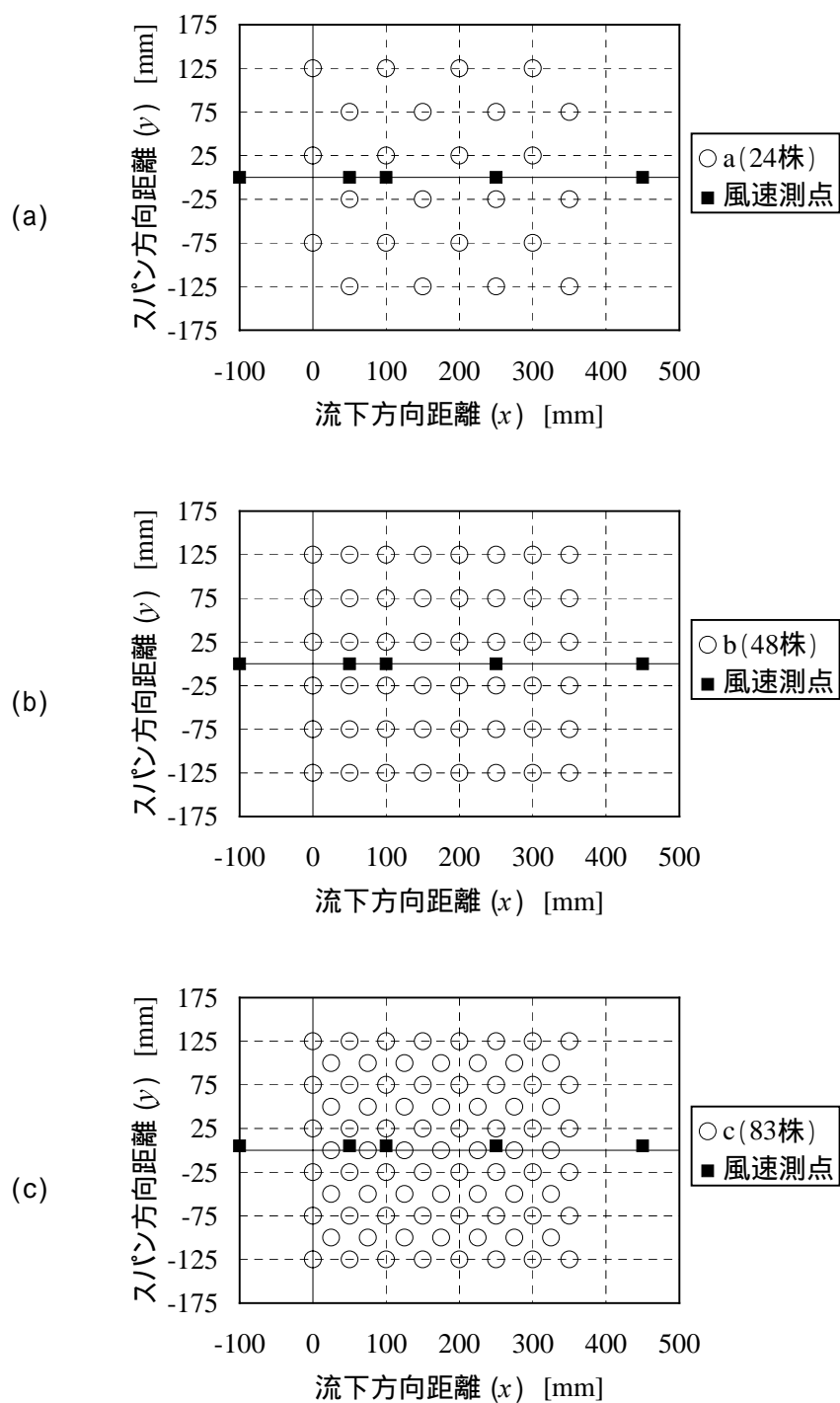


図 4-1 測定部内の植生モデル設置位置と風速の測点

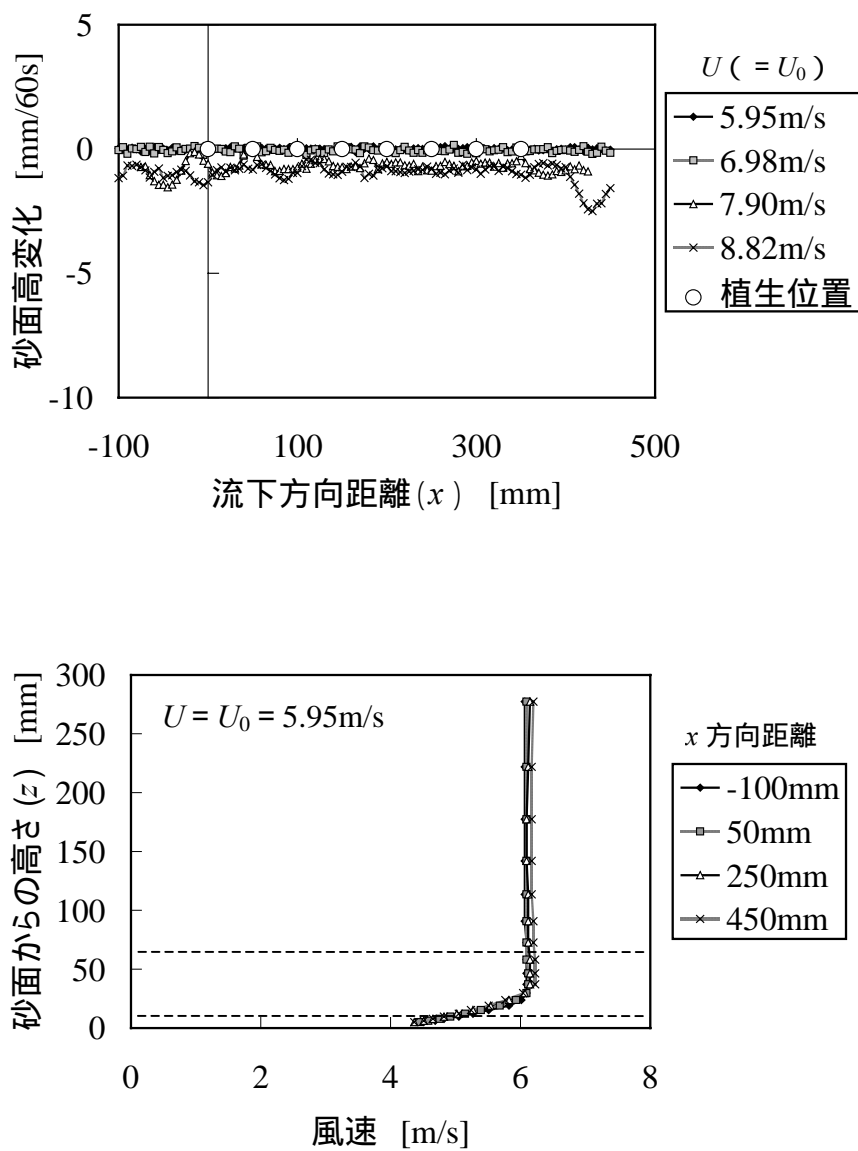


図 4-2(a) 植生層なし () の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 0.00$)

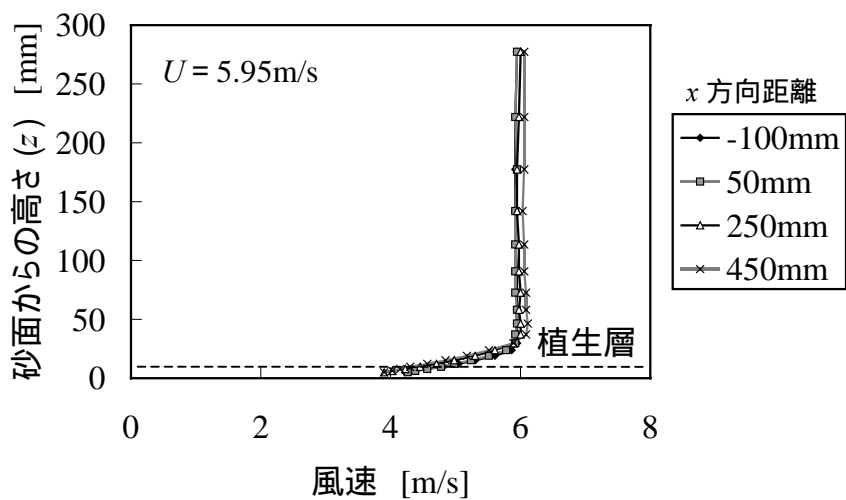
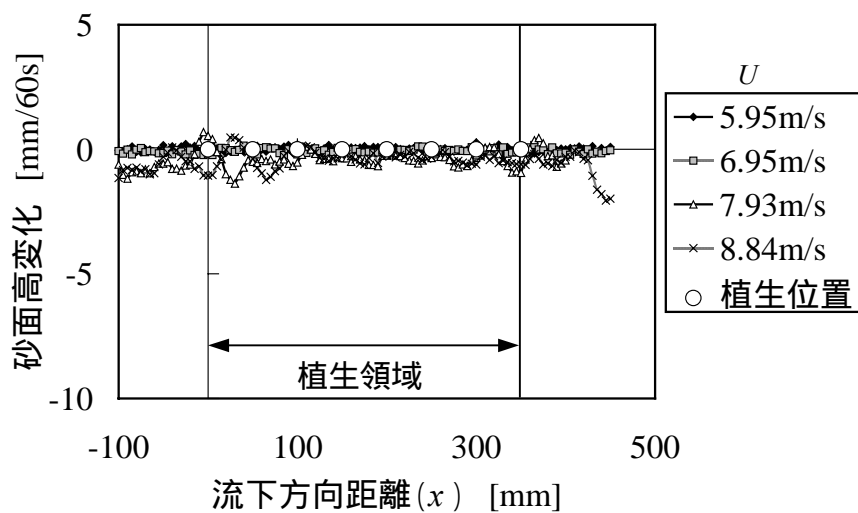


図 4-2(b) 棒型 10・非変形植生層 (a) の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 0.09$)

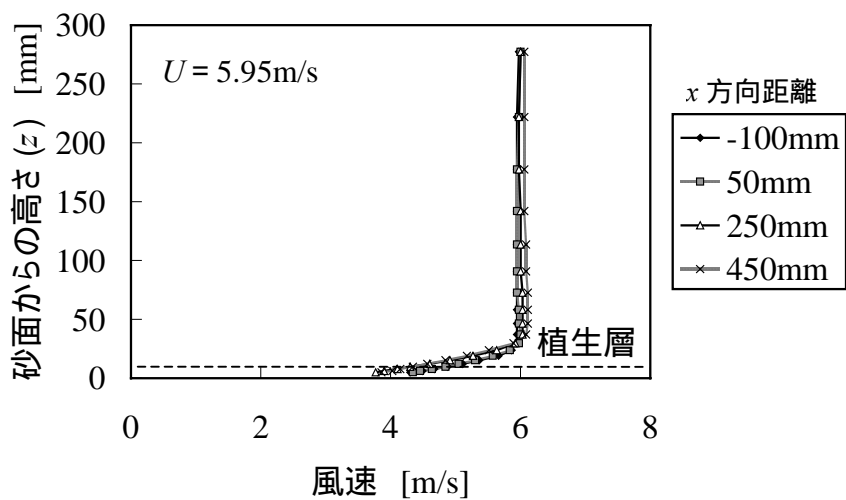
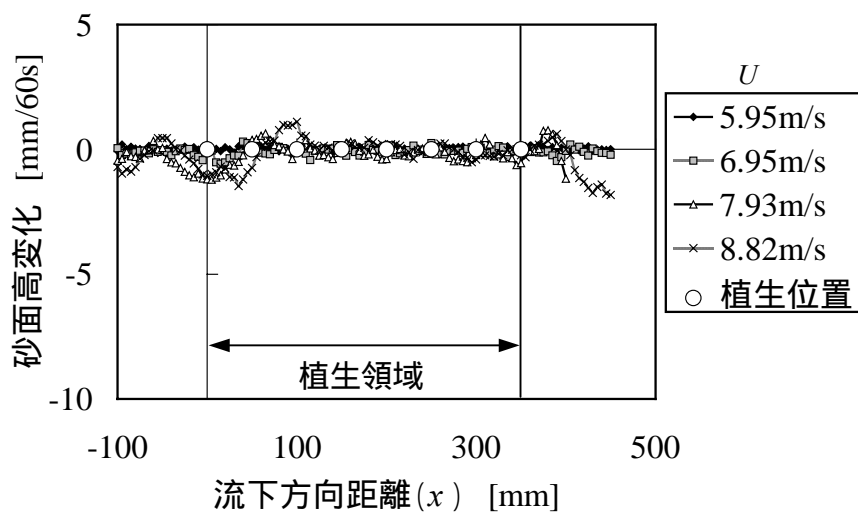


図 4-2(c) 棒型 10・非変形植生層 (b) の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 0.17$)

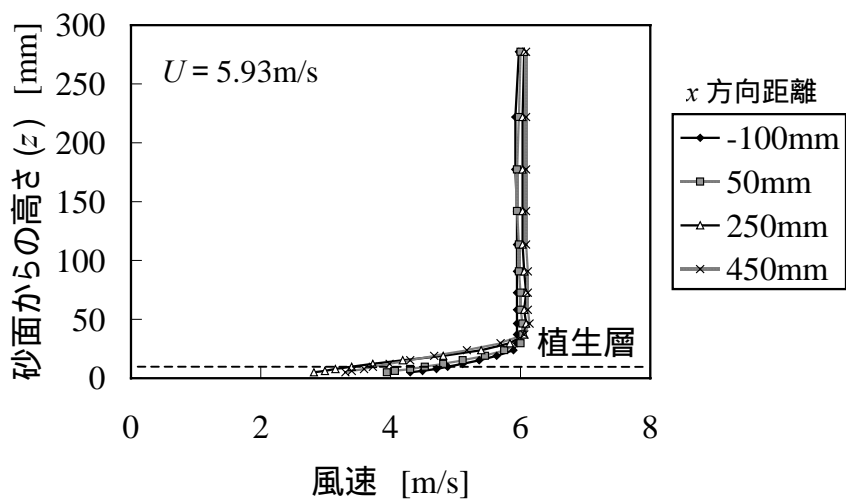
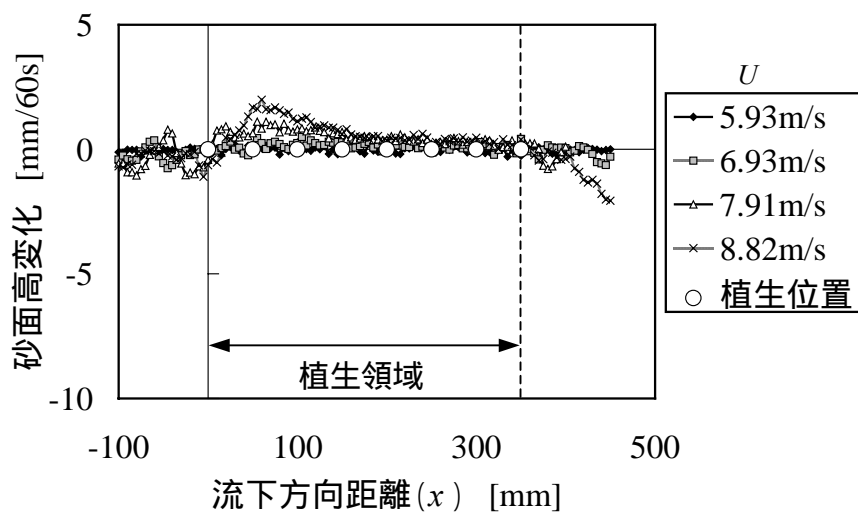


図 4-2(d) 棒型 10・非変形植生層 (c) の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 0.35$)

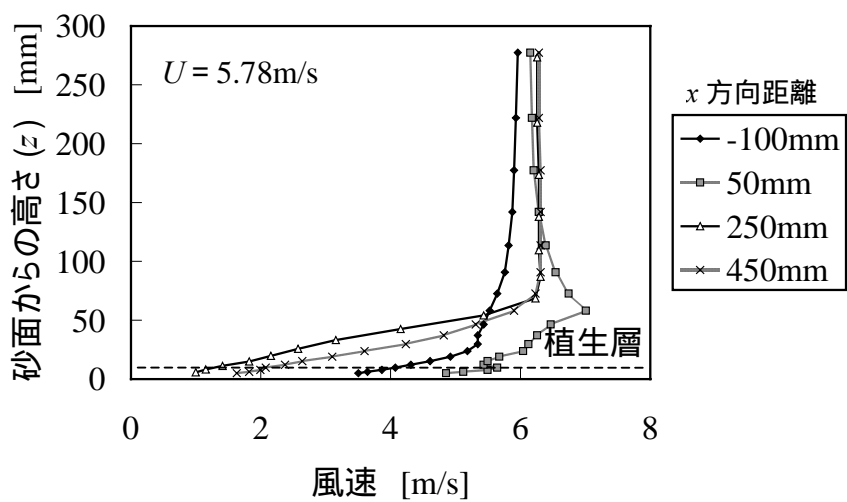
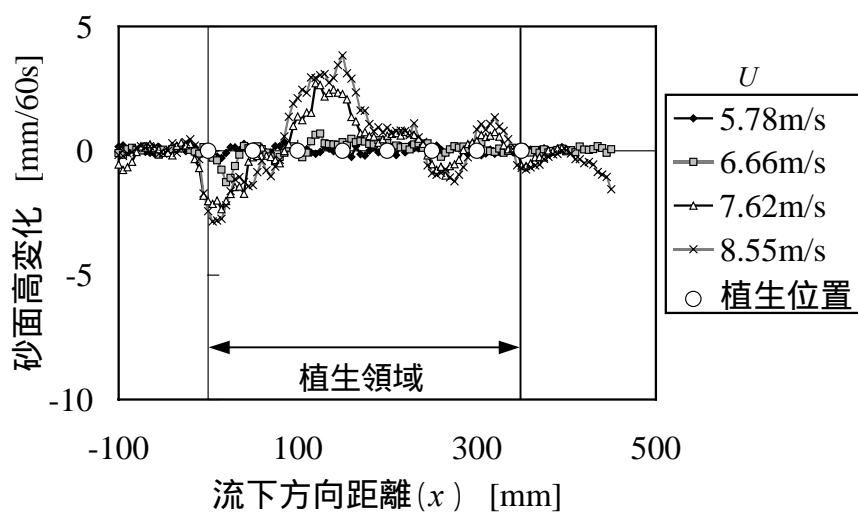


図 4-2(e) ハマヒルガオ型・変形植生層 () の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_V = 0.17$)

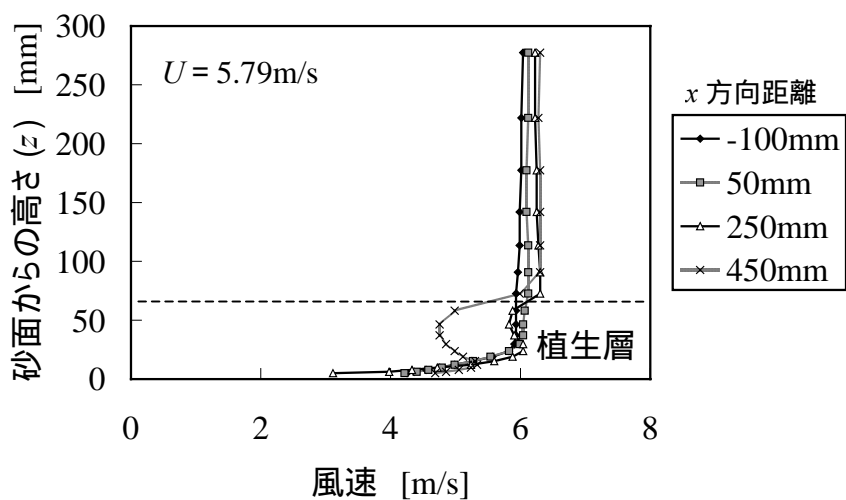
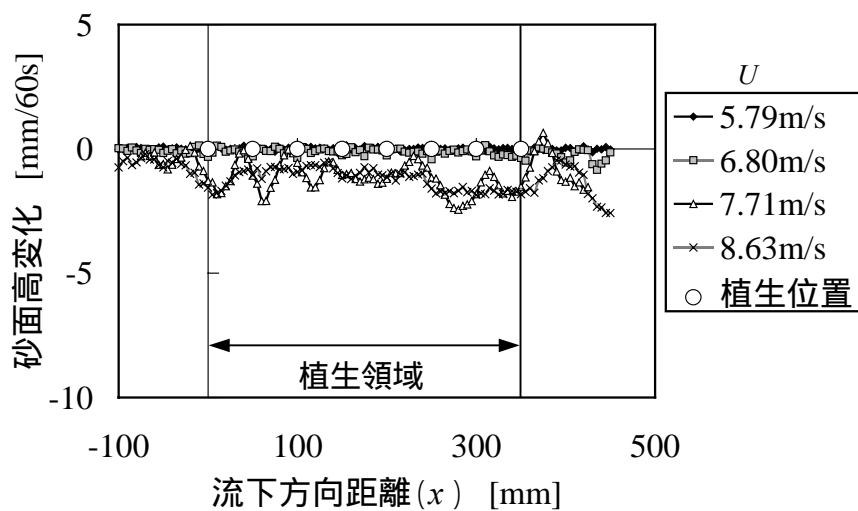


図 4-2(f) 棒型 65・非変形植生層 (a) の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 0.57$)

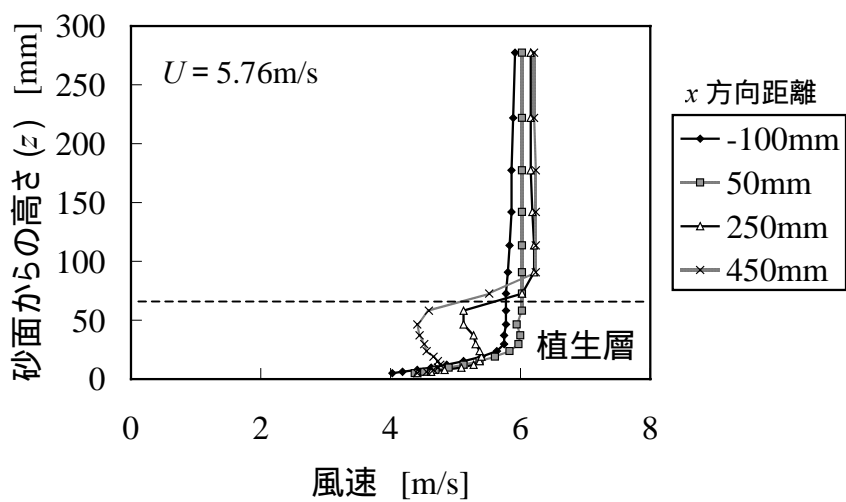
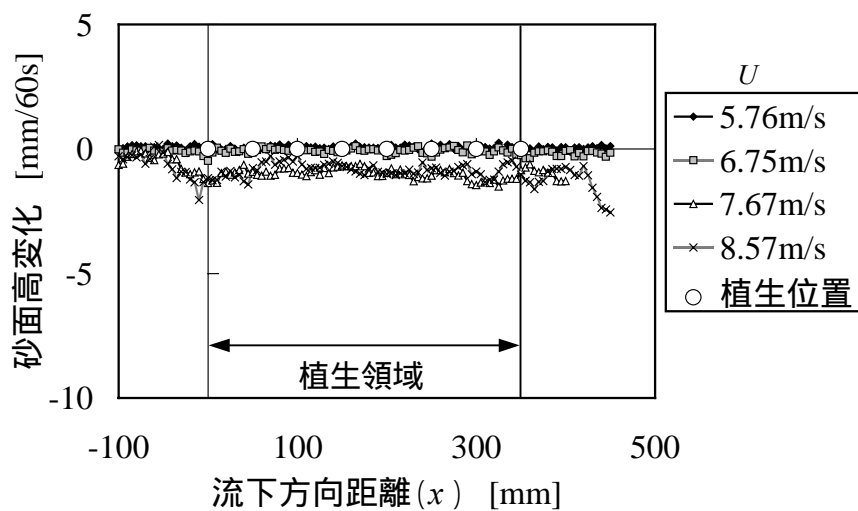


図 4-2(g) 棒型 65・非変形植生層 (b) の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 1.13$)

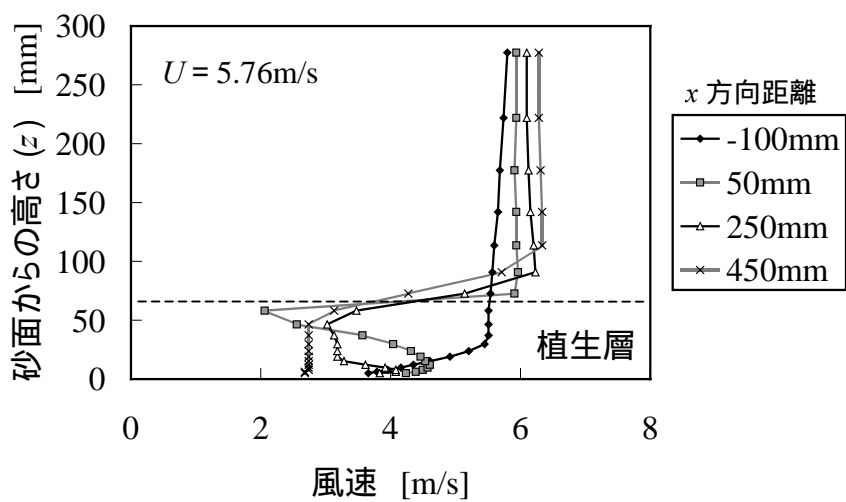
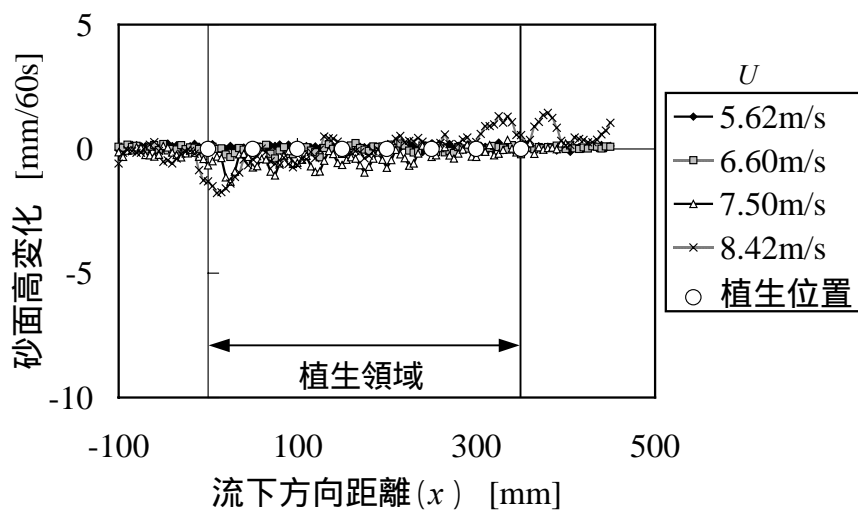


図 4-2(h) 棒型 65・非変形植生層 (c) の場合の砂面高変化と平均風速分布 ($R_v = 2.26$)

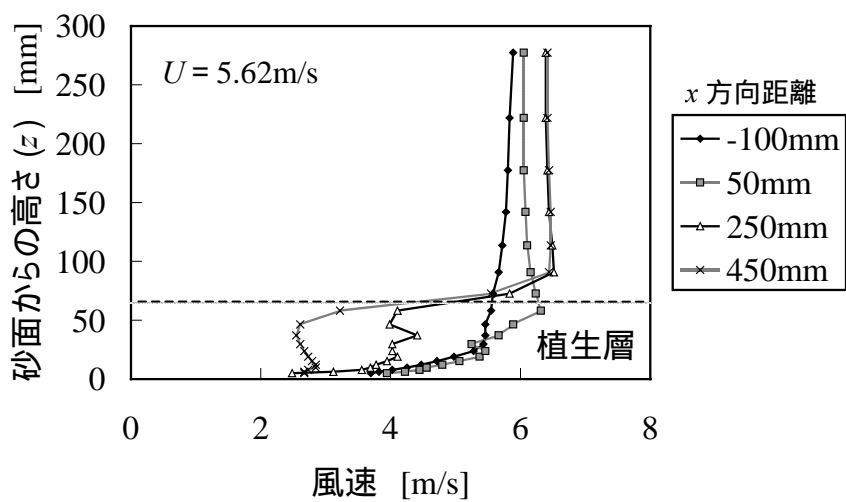
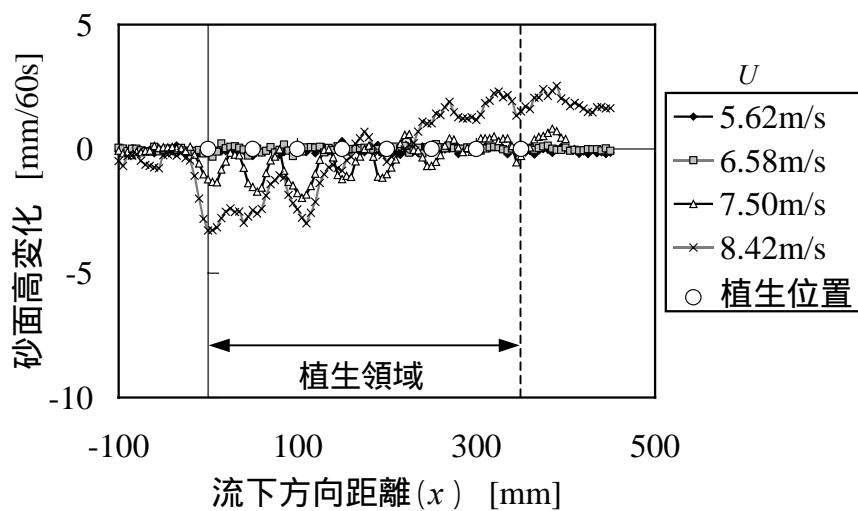


図 4-2(i) コウボウムギ型・非変形植生層 (s) の場合の砂面高変化と平均風速分布
($R_V = 1.08$)

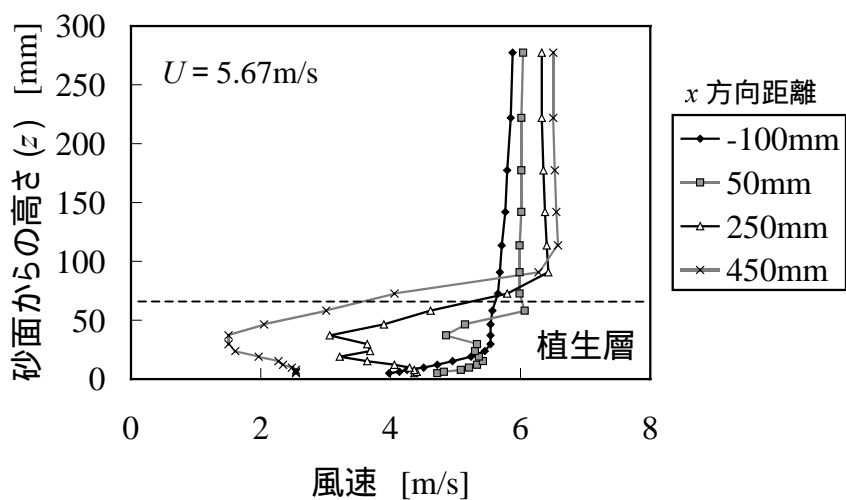
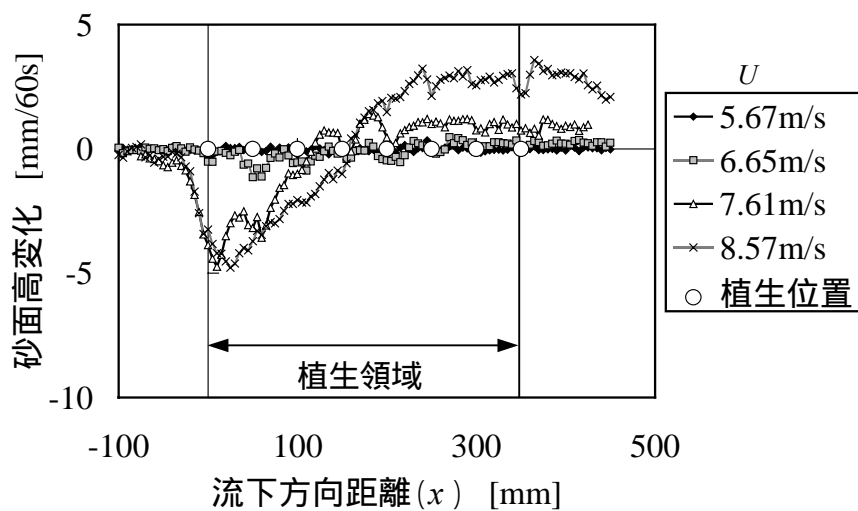


図 4-2(j) コウボウムギ型・変形植生層 (a) の場合の砂面高変化と平均風速分布
($R_V = 0.54$)

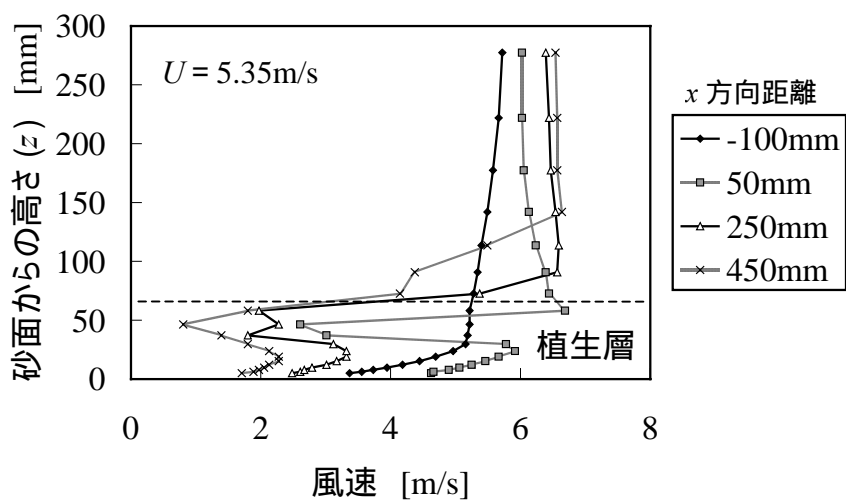
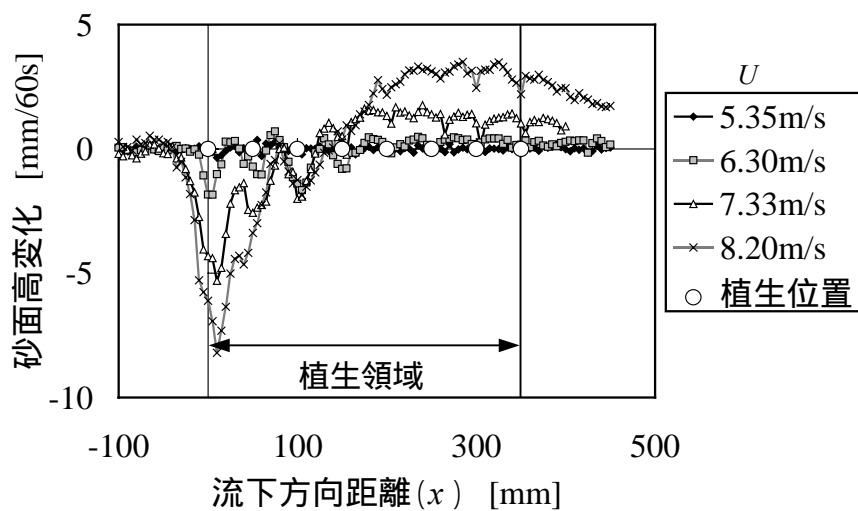


図 4-2(k) コウボウムギ型・変形植生層 (b) の場合の砂面高変化と平均風速分布
($R_V = 1.09$)

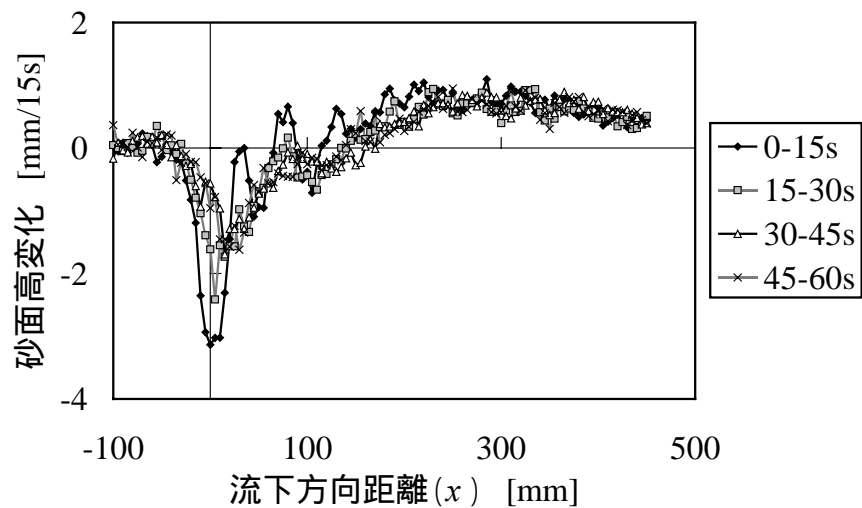


図4-3 コウボウムギ型・変形植生層 (b) の各時間帯の平均砂面高変化
 ($U = 8.20\text{m/s}$, $R_V = 1.09$)

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

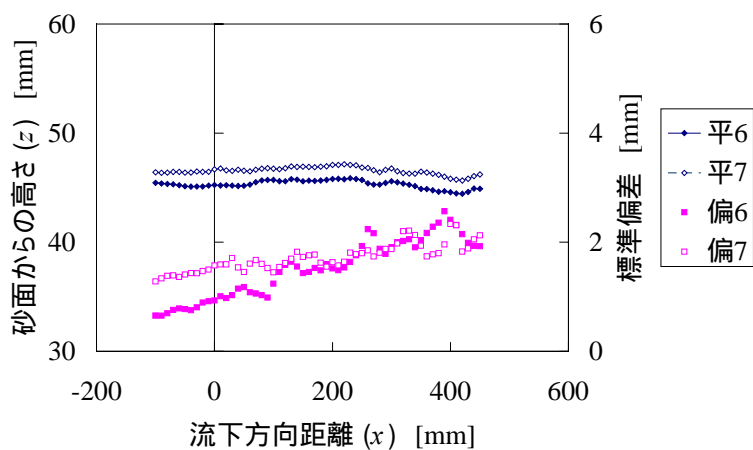
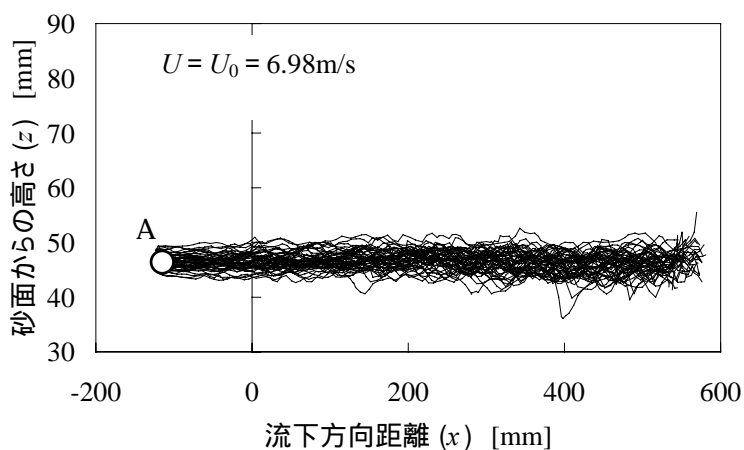
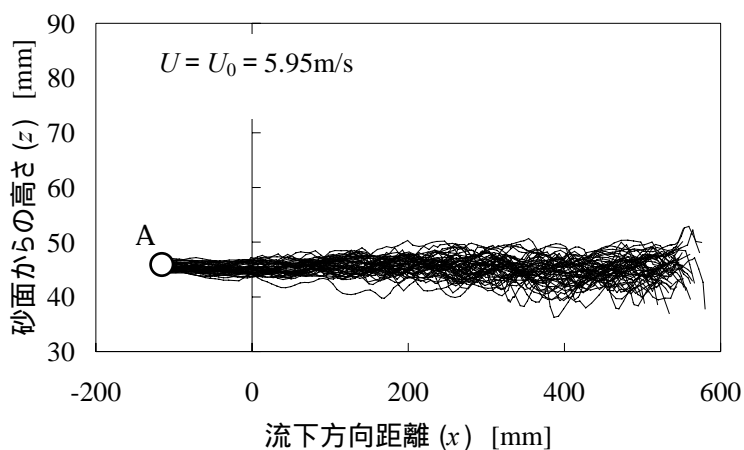


図4-4(a) 植生層なし () の場合の流脈線 ($R_v = 0.00$)

平6 および偏6 : $U = U_0 = 5.95\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 平7 および偏7 : $U = U_0 = 6.98\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 点 A : 写真 4-2(a) 参照

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

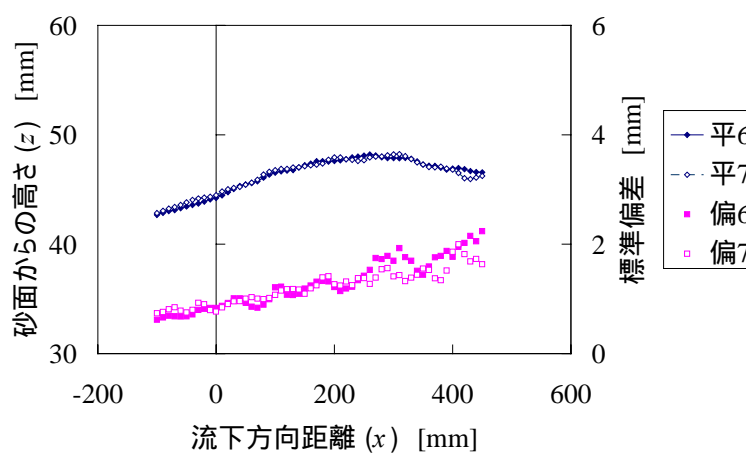
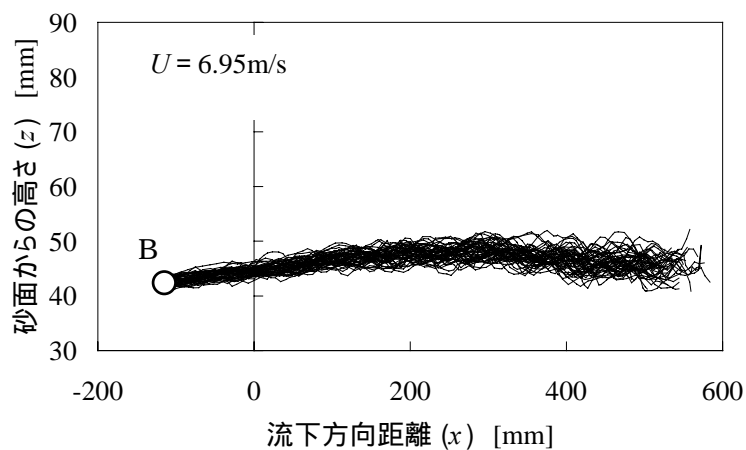
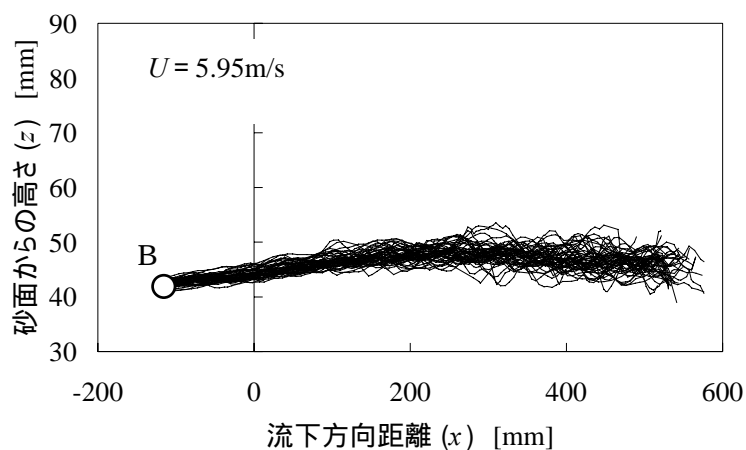


図 4-4(b) 棒型 10・非変形植生層 (b) の場合の流脈線 ($R_v = 0.17$)

平 6 および 偏 6 : $U = 5.95\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 平 7 および 偏 7 : $U = 6.95\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 点 B : 写真 4-2(b) 参照

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

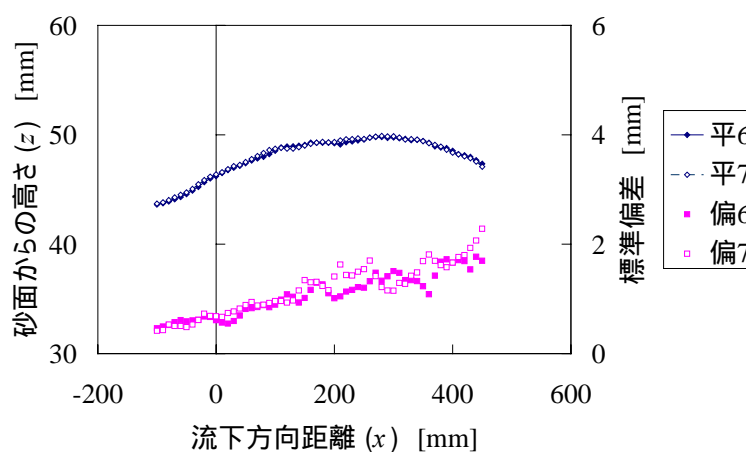
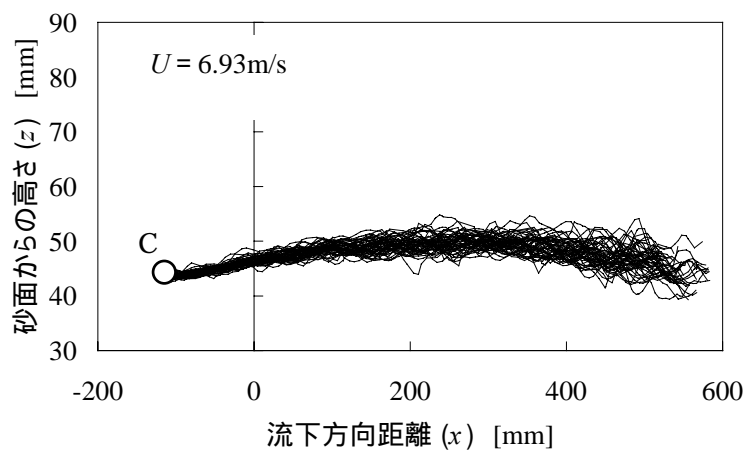
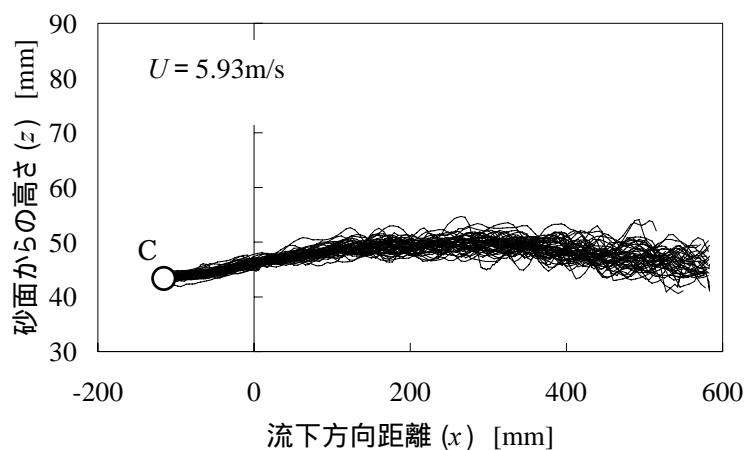


図 4-4(c) 棒型 10・非変形植生層 (c) の場合の流脈線 ($R_v = 0.35$)

平 6 および 偏 6 : $U = 5.93\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 平 7 および 偏 7 : $U = 6.93\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 点 C : 写真 4-2(c) 参照

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

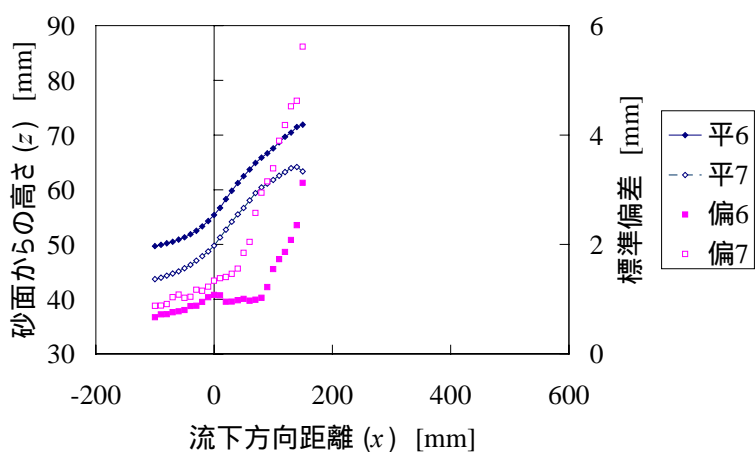
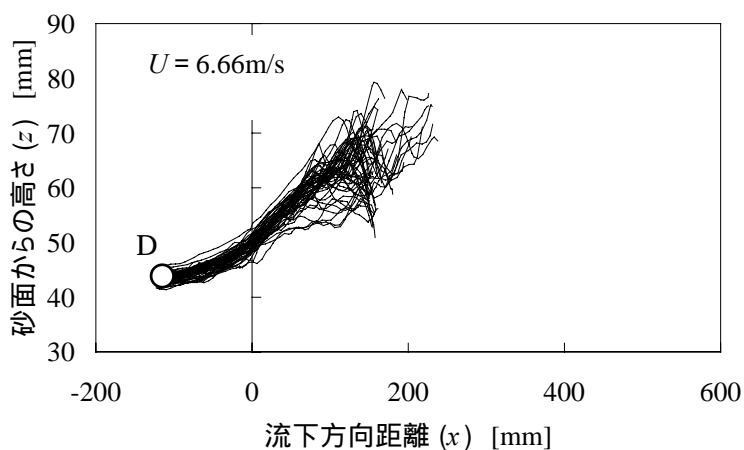
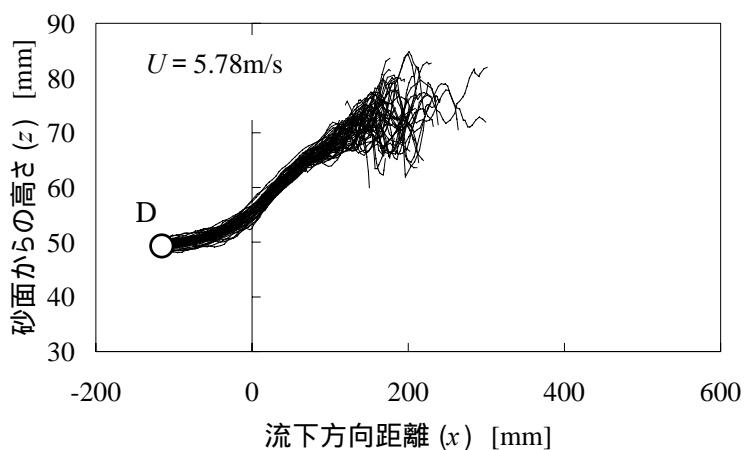


図 4-4(d) ハマヒルガオ型・変形植生層 () の場合の流脈線 ($R_V = 0.17$)

平 6 および 偏 6 : $U = 5.78\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 平 7 および 偏 7 : $U = 6.66\text{m/s}$ のときの流脈線の平均位置および標準偏差
 点 D : 写真 4-2(d) 参照

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

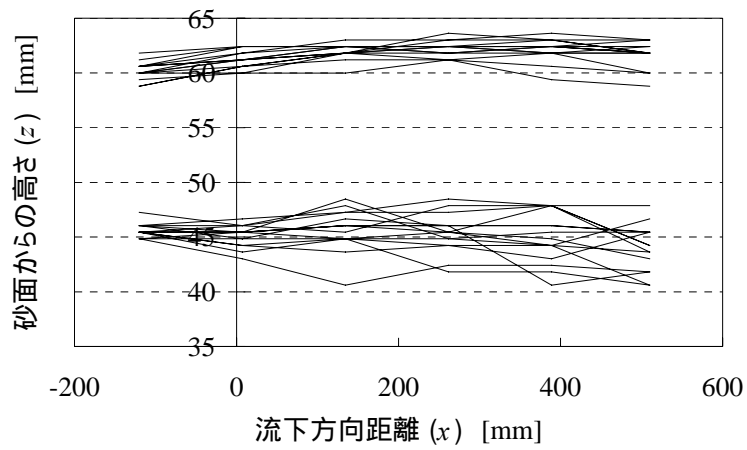
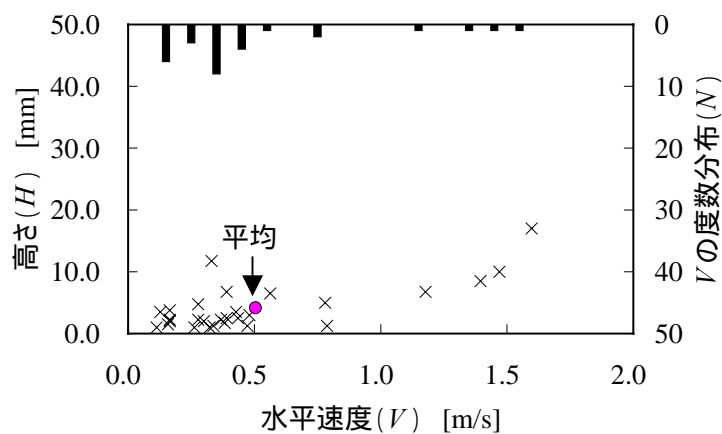
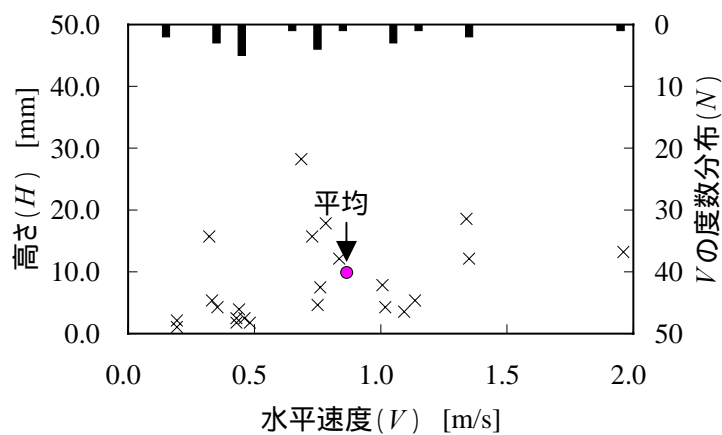


図 4-5 植生層なし () の場合の $z = 45\text{mm}$ および 60mm 付近から発生する流脈線の比較 ($U = U_0 = 5.95\text{m/s}$, 抽出データ数: 各 15)

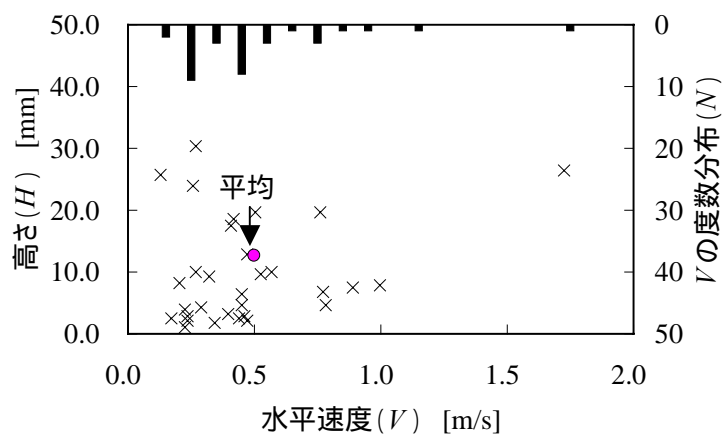
第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響



(a) 植生層なし (, 28 データ)



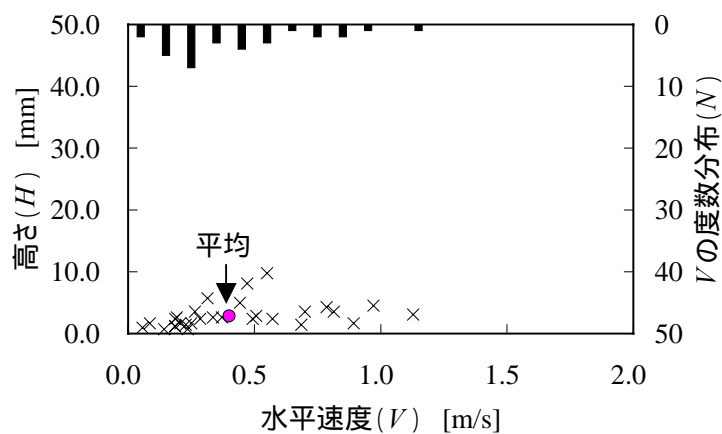
(b) 棒型 10・非変形植生層 (b , 25 データ)



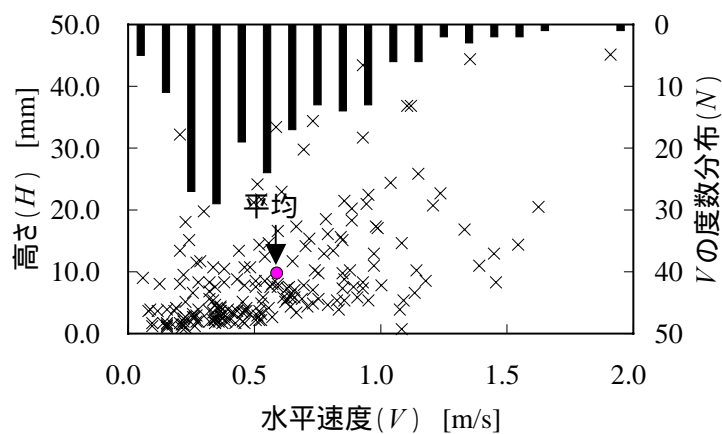
(c) ハマヒルガオ型・変形植生層 (, 33 データ)

図 4-6 植生領域風下側における砂粒子のサルテーション軌道 ($U_0 = 6.98\text{m/s}$)

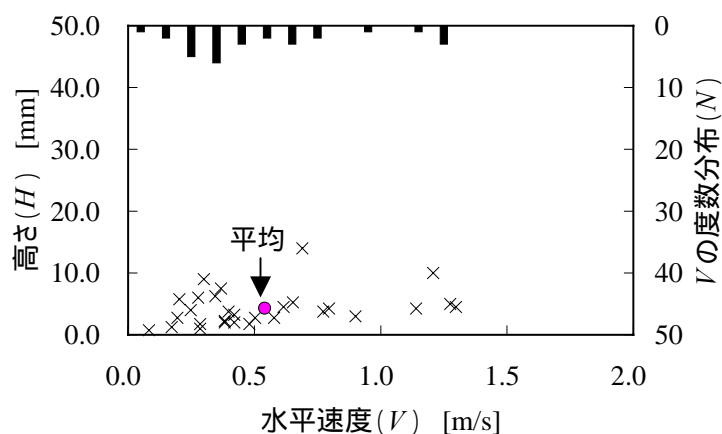
第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響



(d) 棒型 65・非変形植生層 (a , 31 データ)

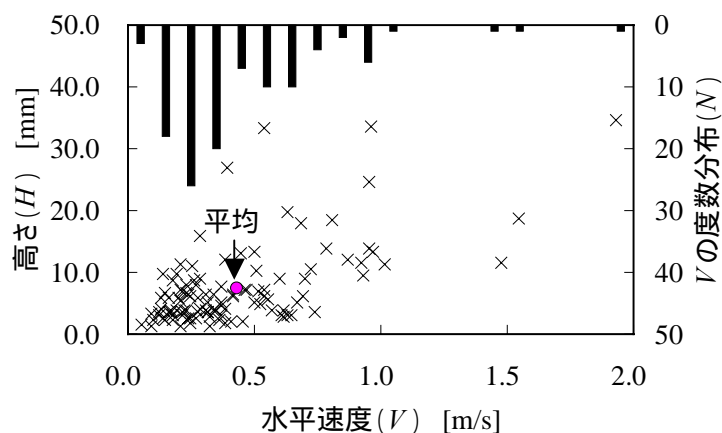


(e) 棒型 65・非変形植生層 (c , 172 データ)



(f) コウボウムギ型・非変形植生層 (s , 29 データ)

図 4-6 (続き) 植生領域風下側における砂粒子のサルテーション軌道 ($U_0 = 6.98\text{m/s}$)



(g) コウボウムギ型・変形植生層 (a , 110 データ)

図 4-6 (続き) 植生領域風下側における砂粒子のサルテーション軌道 ($U_0 = 6.98\text{m/s}$)

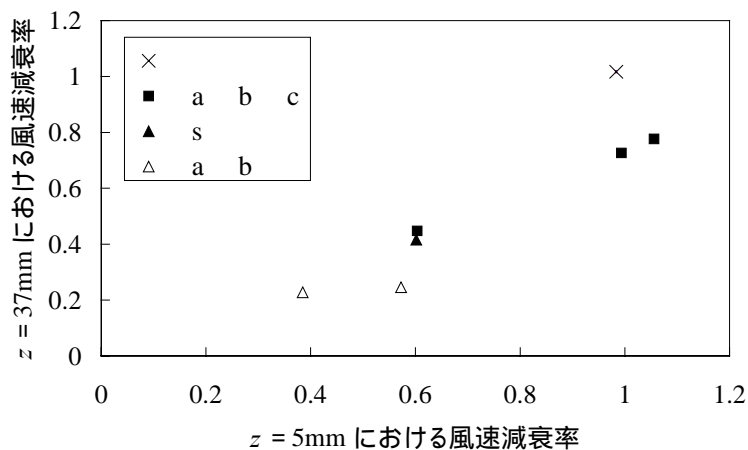


図 4-7 植生層風下側 ($x = 450\text{mm}$) における砂面付近と砂面上 40mm 付近の風速減衰の関係 ($U_0 = 5.95\text{m/s}$)

$$\text{風速減衰率} = \text{各植生層の風速} / \text{の風速}$$

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

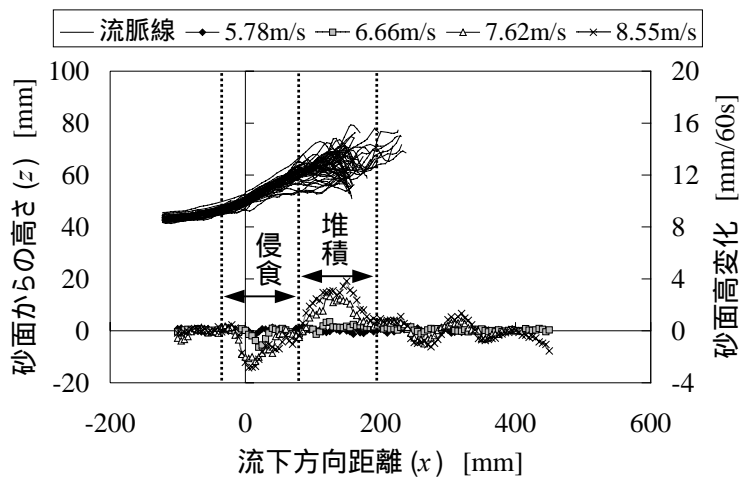


図 4-8 ハマヒルガオ型植生層 () の場合の流脈線と砂面高変化の比較 ($U = 6.66\text{m/s}$)

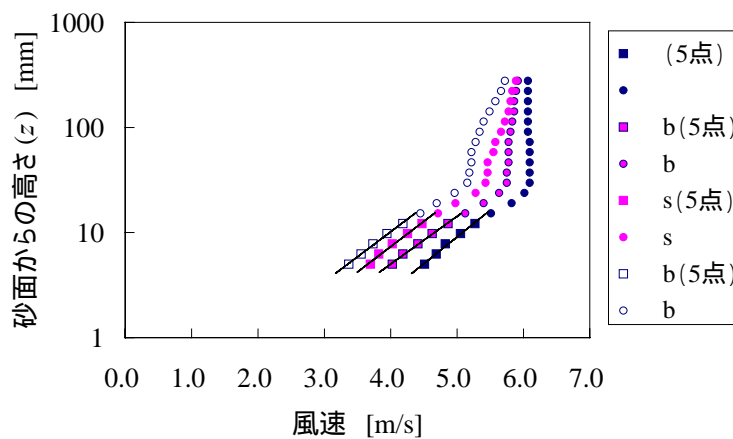


図 4-9 $x = -100\text{mm}$ における平均風速の対数分布 ($U_0 = 5.95\text{m/s}$, 5 点: 直線分布領域の計測点)

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

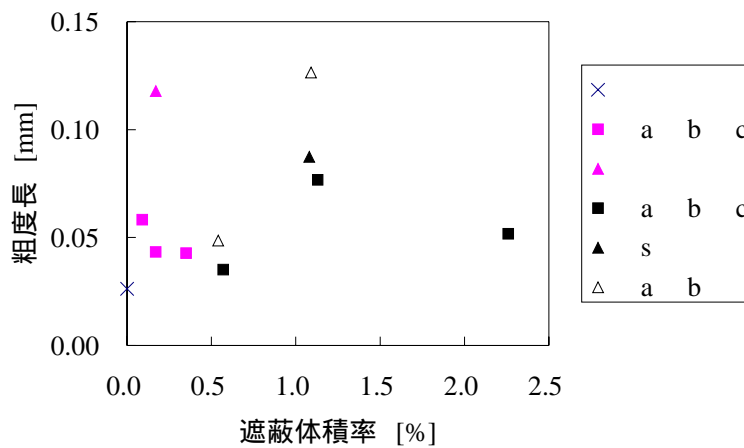


図 4-10 $x = -100\text{mm}$ における粗度長と遮蔽体積率の関係 ($U_0 = 5.95\text{m/s}$)

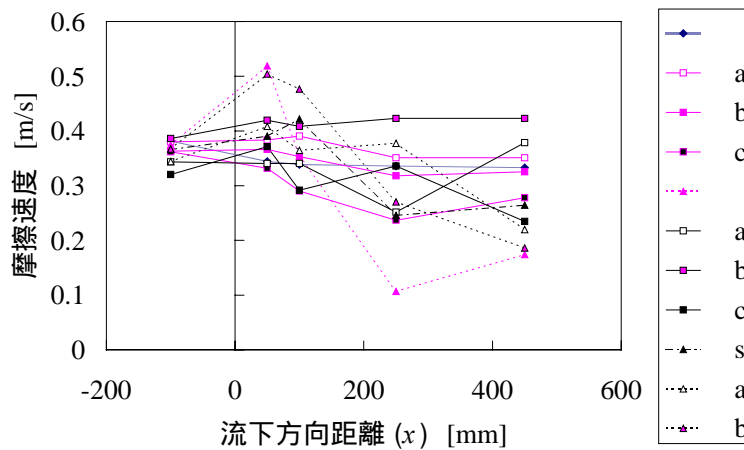


図 4-11 摩擦速度の流下方向の変化 ($U_0 = 5.95\text{m/s}$)

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

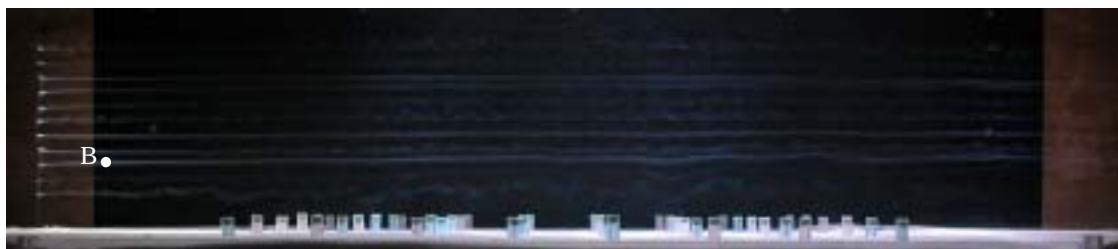


写真 4-1 コウボウムギ型・変形モデル (a) の植生層

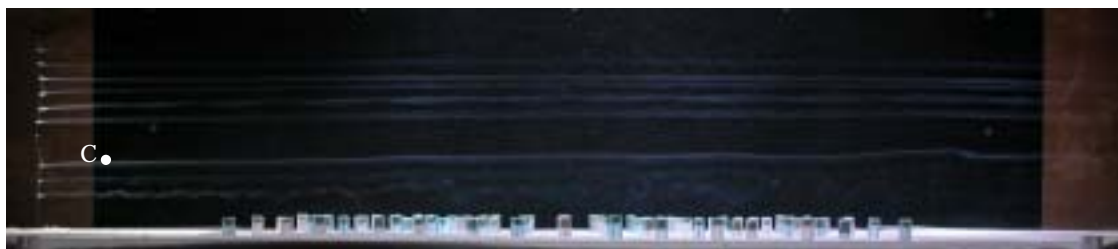
第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響



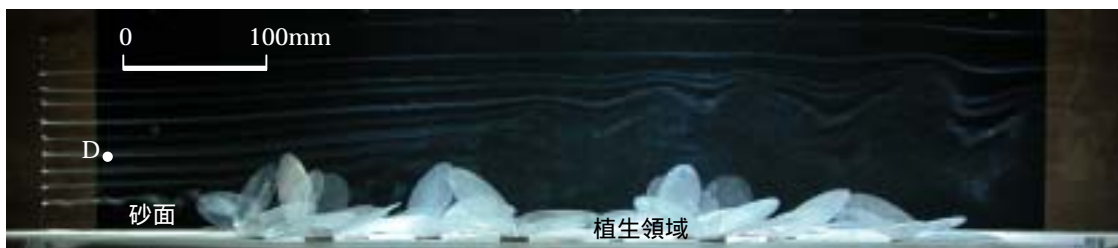
(a) 植生層なしの場合の風場 (, $U = U_0 = 5.95\text{m/s}$)



(b) 棒型10・非変形植生層の場合の風場 (b , $U = 5.95\text{m/s}$)



(c) 棒型10・非変形植生層の場合の風場 (c , $U = 5.93\text{m/s}$)



(d) ハマヒルガオ植生層の場合の風場 (, $U = 5.78\text{m/s}$)

写真4-2 スモークワイヤ法による風場の可視化(側面図)
点A, B, C, D: 流脈線追跡開始点, 図4-4 参照

第4章 海岸植生が飛砂に及ぼす影響

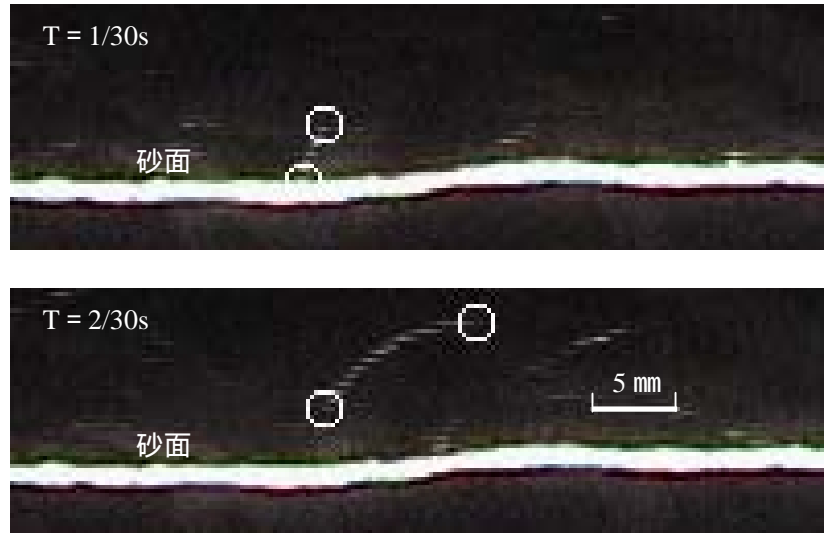


写真 4-3 砂粒子のサルテーション軌道の例（○：軌跡の始終端）

第 5 章 数値計算による長期的な砂丘変動の再現

5.1 概説

第 3 章の航空写真測量結果より，海岸砂丘（土堤）の変動に関する情報が得られた．ここでは，植生の飛砂捕捉効果を考慮した数値計算により，角折海岸中央砂丘の変動（図 3-5 および 3-6 参照）を再現することを試みる．

5.2 数値計算の概要

5.2.1 数値計算の枠組

初期地形として，航空写真測量より得られた角折海岸中央砂丘（1990 年）の地形データを与え，1990 年から 1993 年にかけての砂丘の変動を再現することを試みた．計算領域は，沿岸方向 90m × 岸沖方向 45m の領域である（図 5-4 参照）．計算領域に 1m × 1m の正方格子を設定し，各格子に地盤の高さを代表する変数 $h(i, j)$ を配置した．各格子について風を外力とする砂の移動を考え，斜面の傾斜が安息角を越えた場合には，斜面に沿って砂が滑り落ちるように砂を移動させた．風のデータとしては，地形変動の影響を考慮せず，初期地形上で求めた風向・風速別の風場を与えた．砂丘列方向（N-S 方向，図 2-2 参照）には周期境界条件を適用した．

5.2.2 飛砂量公式

砂粒子の飛行距離 L [m] および単位時間・単位面積に着地する砂の量 q [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$] は，地盤の局所的傾き $h(i, j)$ の影響を受けるものとして，次式のように与えた（Nishimori・Yamasaki, 1998）．

$$L(i, j) = L_0 (\tanh(\alpha h(i, j)) + 1) \quad [\text{m}] \quad (5.1)$$

$$q(i, j) = q_0 (\tanh(\alpha h(i, j)) + 1) \quad [\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}] \quad (5.2)$$

$h(i, j) = 0$ のときの $L = L_0$, $q = q_0$ は河村公式（1951）に植生の飛砂捕捉効果を考慮した次式で与えた．

$$L_0 = (1 - c_v) \times (k_\alpha / g) (u_* + u_{*c})^2 \quad [\text{m}] \quad (5.3)$$

$$q_0 = (1 - c_v) \times k_\beta (\rho_a / \rho_s) (u_* - u_{*c}) \quad [\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}] \quad (5.4)$$

ここで、 u_* は砂丘表面の摩擦速度 [m/s]、 u_{*c} は移動開始摩擦速度 [m/s]、 ρ_a は空気の密度 (= 1.226 kg/m³)、 ρ_s は砂の密度 (= 2.65 × 10³ kg/m³)、 g は重力加速度 (= 9.81m/s²) である。 k (= $k \cdot k$)、 k は、栗山・上堂園 (1999) を参考にしてそれぞれ 0.8、0.5 で与え、 $k = 1.6$ とした。植生の飛砂捕捉能力を示すパラメータ c_v は植被率 (植生が地面を覆う面積の割合) で与え、 c_v が風向により異なることおよび空間的に異なることを考慮し (3.5.2 節参照)、図 5-1 に示すように 0 c_v 1 の範囲で分布をもたせた。 $c_v = 0$ のときは裸地で、 $c_v = 1$ のとき地面は植生で密に覆われている。現地調査結果 (図 2-12) より、植被率と地盤高変化の間には正の相関が見られたことから、栗山・上堂園 (1999) での扱いと同様に、この L_0 および q_0 が $(1 - c_v)$ と比例関係にあるものとした。調査地の平均地盤高における摩擦風速 u_{*a} は 2.3.4 節と同様にアメダスデータを用いて対数則より求めた。この u_{*a} が砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} を超えたとき、初期地形周りの風場計算を行って砂丘表面の摩擦速度 u_* を求め、砂の移動を行った。

5.2.3 風場計算法

初期地形周りの風場は 3 次元流体解析ソフト α -FLOW (富士通株式会社) を用いて計算した。風場の計算領域は平面領域 90m × 45m × 高さ 14m の領域である。風場解析の際の計算方法について表 5-1 にまとめた。初期地形としては、1990 年の航空写真測量より得られた等高線間隔 1m のデータを 0.2m 間隔に線形補間したデータを与えた。計算領域境界の鉛直風速分布は、対数則を適用して与えた。なお、これに先立ち、土屋ら (1995) の実験結果の再現計算を行うことにより α -FLOW の精度を確認した。

5.3 計算結果

5.3.1 風場

砂丘表面における摩擦速度の計算結果および Line A ~ C に沿った砂丘断面における風速分布の例を図 5-2 および 5-3 に示す。計算結果には、砂丘頂部付近で風速が増加する等、風場の想定される特徴が再現されている。

5.3.2 砂丘変動シミュレーション

初期地形として 1990 年 12 月の地形 (図 5-4(a)) を与えたことを考慮し、風場を計算する際には 1991 年 1 月 ~ 1993 年 12 月の風向・風速データを与えた。1993 年時点の計算結果および 1993 年の航空写真測量の結果をそれぞれ図 5-4(b) および (c) に示す。航空写真測量結果より得られた 1990 年 ~ 1999 年にかけての地形変動の特徴である図中 Area P の堆砂傾向、Area R の侵食傾向ならびに砂丘の後縁方向への発達 (Area Q) が定性的に再現されていた。図 3-6 と同じ砂丘断面について、計算結果から得られた地形変化を図 5-5 に示す。

Line C に沿った断面の変化より， C_2 付近と比較して大きい C_1 付近の変動を再現することが可能であった．

5.4 考察

5.4.1 植生効果および斜面効果導入の重要性

式 (5.1) および (5.2) で示される地形勾配の効果を無視して計算したところ，ほぼ等しい結果が得られた．しかしながら，地形勾配の効果を考慮しない場合と考慮した場合を比較すると，考慮しない場合には砂丘風上側斜面の侵食傾向および風下側の堆砂傾向が大きく見積もられる傾向にあった．風場の計算を数値モデルに導入することで，砂丘頂部の移動，Area P の堆砂傾向ならびに Area Q の砂丘の後縁方向への発達等，砂丘全体の形状変化の再現が可能で，また，植生の効果を考慮することで Area R の侵食傾向等の局所の変動をより良好に再現することが可能であった．

5.4.2 本モデルの問題点

図 5-4(b) および 5-5 に示した地形変動計算の結果より，本モデルの計算では現実には観察されない凹凸が見られる．この主な原因は，計算の過程で地形が変化しているにもかかわらず，風場の変化を考慮していない点にあると考えている．本来ならば，地形の変化とともに風場の計算を行わなければならないが，計算格子の自動生成プロセスに制約があり，ステップ毎に地形変動を与えて風場計算を行うことは，現時点では困難である．また，本論の試みでは，地形変化に伴う植生繁茂状況の変化を考慮していないことや斜面上の飛砂の取り扱い等にも問題が残されている．

参考文献

- 栗山善昭・上堂園孝一 (1999): 後浜から砂丘前面にかけての飛砂量の数値計算, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 501-505 .
- 土屋学・近藤宏二・眞田早敏 (1999): 設計風速に及ぼす局所地形の影響 種々の形状の地形周りにおける風速増幅特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 119-122 .
- Nishimori, H. and Yamasaki, M. (1998): A Simple Model for the Various Pattern Dynamics of Dunes, International Journal of Modern Physics B, Vol.12, No.3, pp. 257-272 .

表 5-1 α -FLOW による風場解析の計算

基礎方程式	3次元非圧縮性流れのN-S方程式 連続の式
境界条件	砂丘表面で対数則を使用
乱流モデル	$k-\varepsilon$ モデル
座標系	デカルト座標系
対流項の扱い	3次精度の風上差分

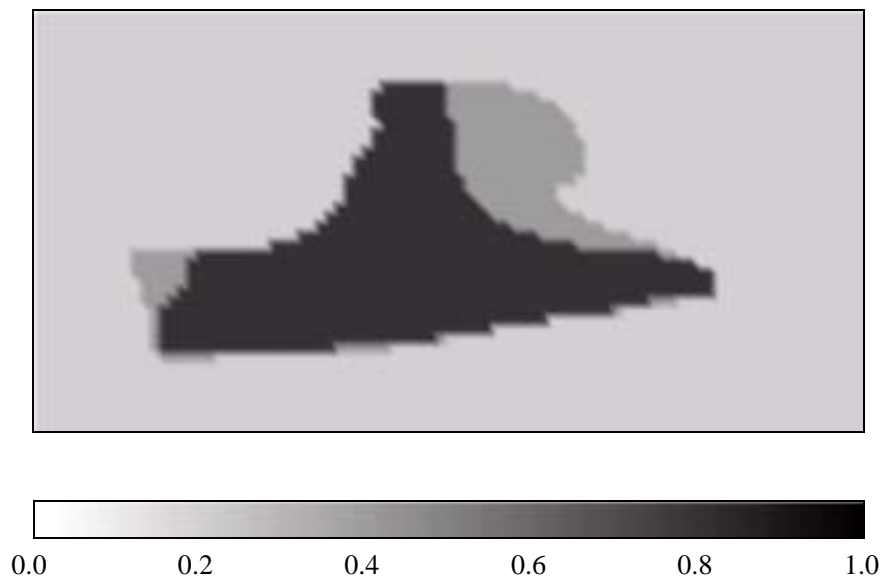


図 5-1 1990 年の角折海岸中央砂丘における植生分布 c_v (図 5-4(a)参照)

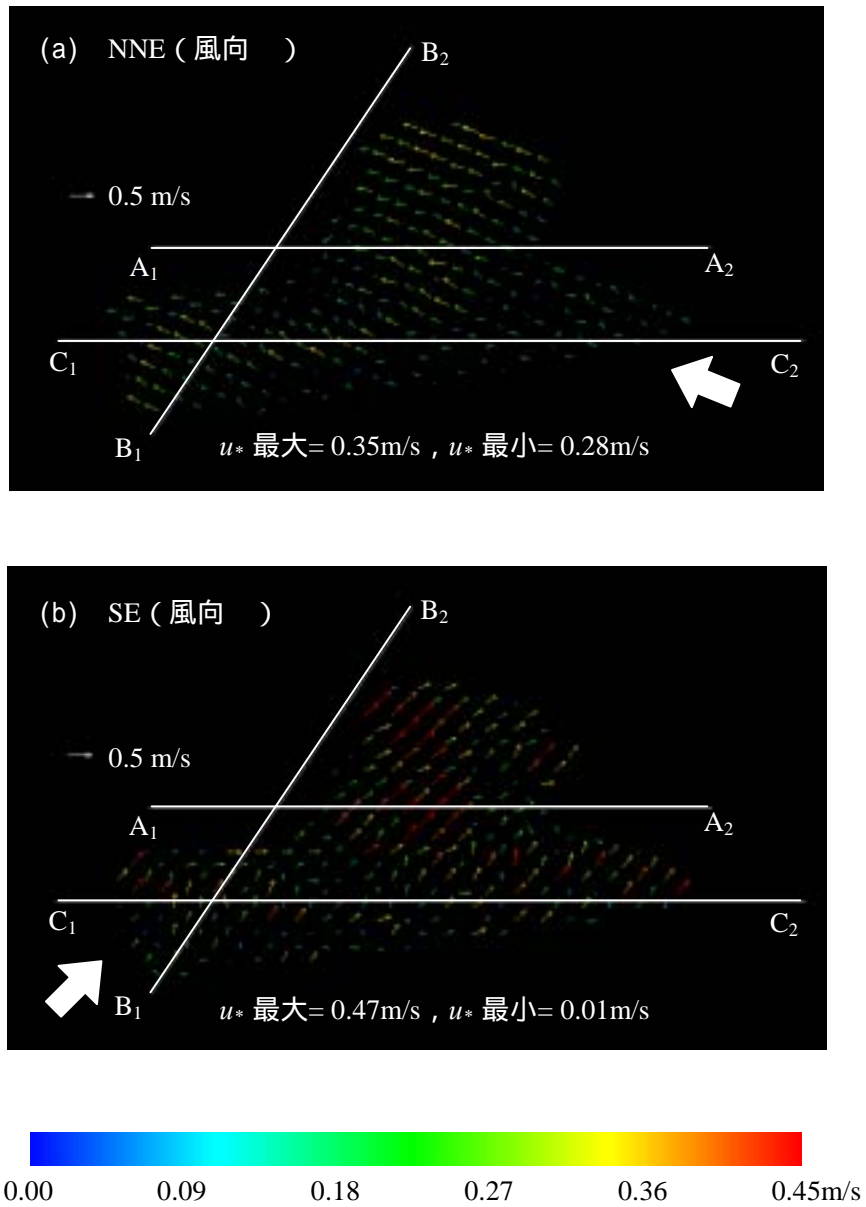


図 5-2 砂丘表面の摩擦速度の分布
 (地形：1990年の角折海岸中央砂丘，図 5-4(a)参照)

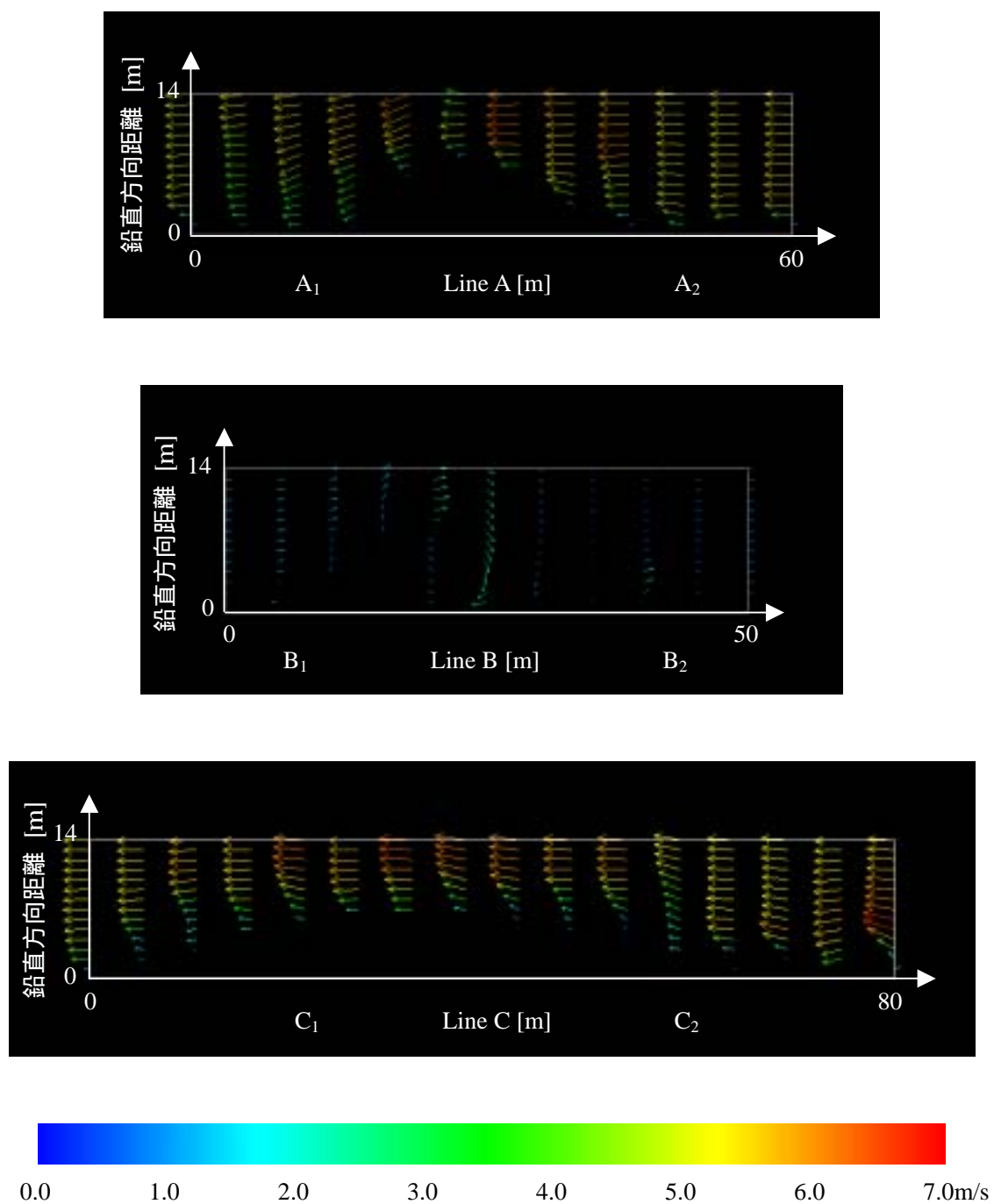


図 5-3(a) 風向 NNE の場合の中央砂丘断面における風速分布

Line A, B, C : 図 5-2(a) 参照

鉛直方向距離 : 標高 7.0m を基準面とした高さ

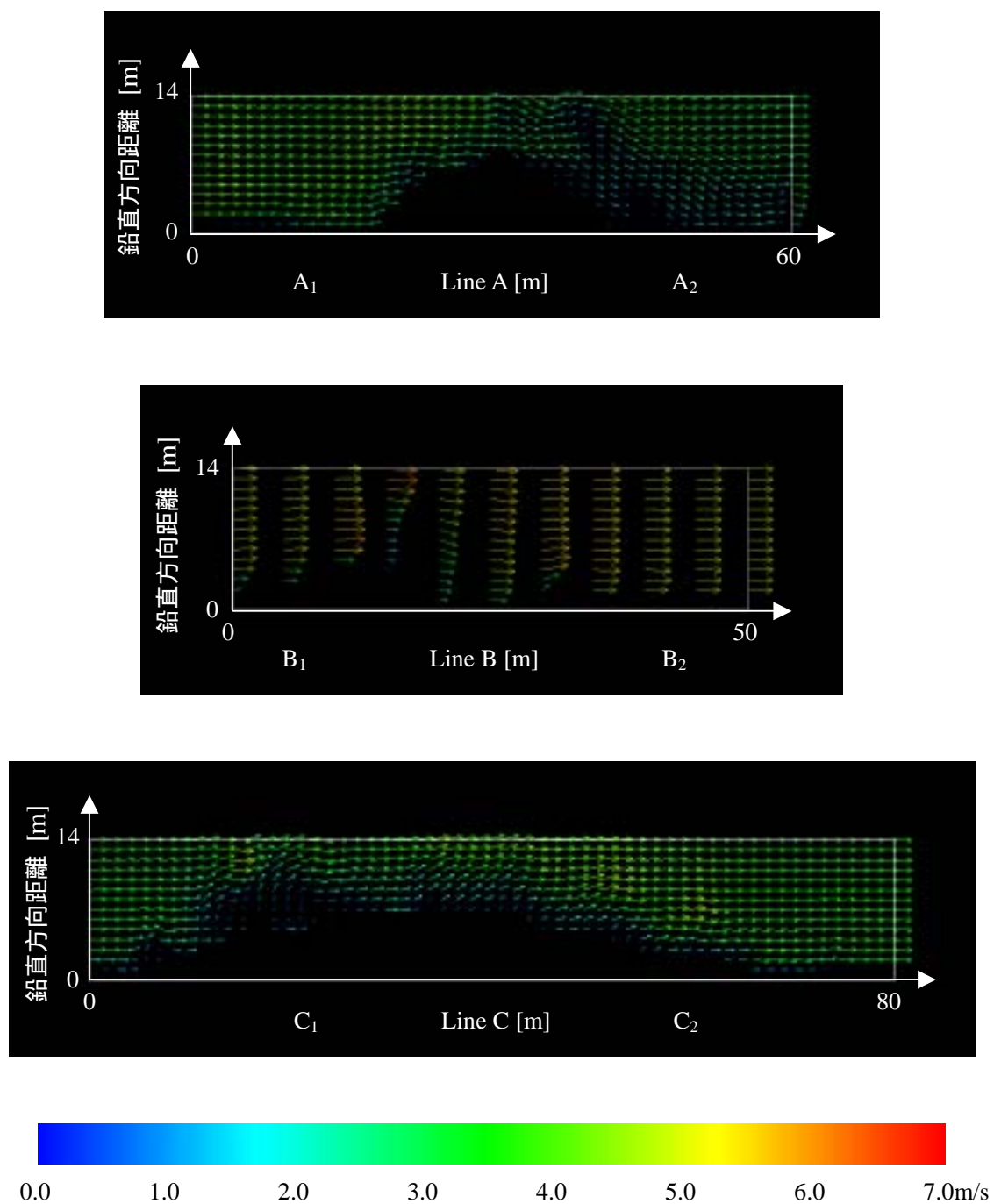
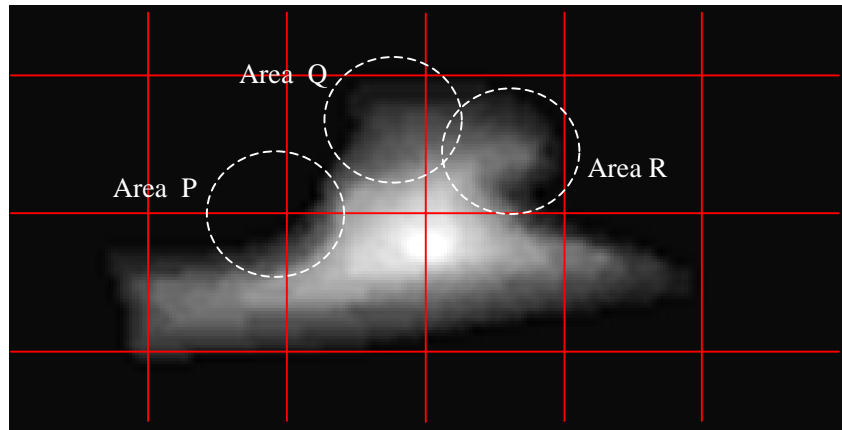


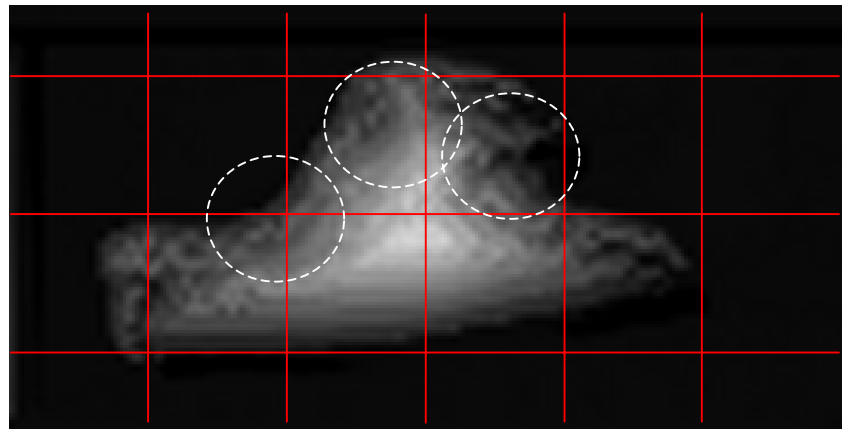
図 5-3(b) 風向 SE の場合の中央砂丘断面における風速分布

Line A, B, C : 図 5-2(b) 参照

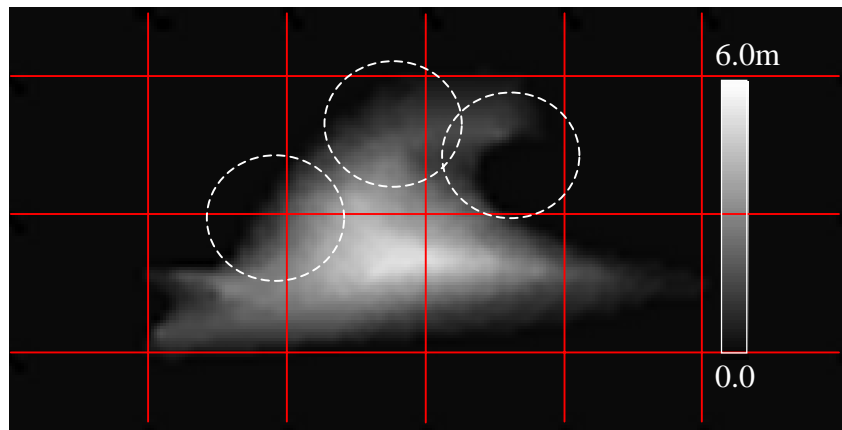
鉛直方向距離 : 標高 7.0m を基準面とした高さ



(a) 1990年，初期地形



(b) 1993年，計算結果

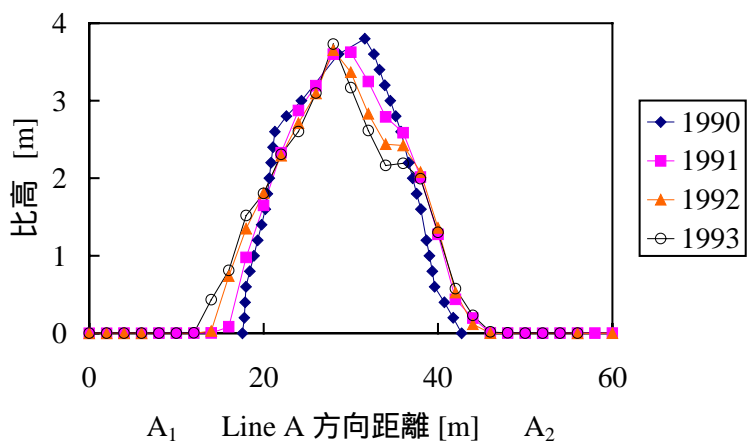


(c) 1993年，航空写真測量結果

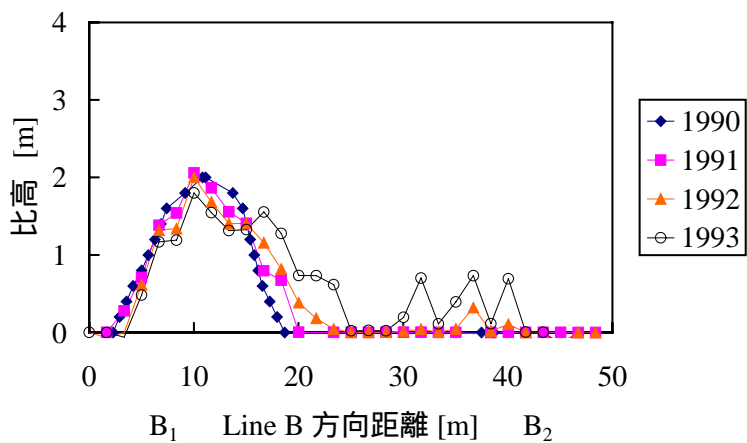
図5-4 航空写真測量結果と計算結果の比較

図中の格子間隔：15m

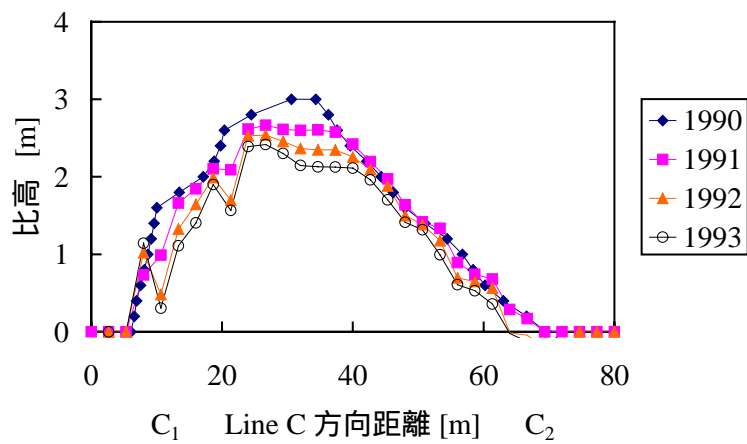
地盤高：標高7.0mを基準面とした高さ



(a) 砂丘頂部の風下方向への移動



(b) 砂丘の後縁方向への発達



(c) 砂丘海側断面の変動

図 5-5 シミュレーションによる中央砂丘断面の変化
(図 5-2 および 5-4 参照)

第6章 結論

本研究では、後浜の短期的および長期的な地形変動と海岸植生が飛砂に及ぼす影響を調べるため、現地調査、航空写真測量ならびに風洞実験を行った。また、航空写真測量より得られた長期的な地形変動を再現するため、植生の効果を考慮した数値計算を行った。以下に結論を示す。

茨城県角折海岸で行った現地調査結果より、

- 1) 植生分布と地盤高変化の間には、植被率が大きいほど堆砂を促進するという正の相関が見られた。

茨城県角折海岸、下津海岸および豊ヶ浜海岸で行った航空写真測量結果より、

- 2) 卓越風向に対して垂直に存在する横列砂丘は不安定で、砂丘の規模にかかわらず、砂丘列方向長さ約 100m の複数の小砂丘に分裂していた。
- 3) 連続砂丘を造成することにより、陸側への飛砂が抑制されていた。連続砂丘の分裂が生じてから海岸林の海側に新たな砂丘が形成されるまでの間、海岸林面積は減少していた。
- 4) 砂丘の地形変動量は風向により局所的に異なっており、植生の飛砂捕捉効果は風向により異なると考えられる。

植生領域の飛砂に関する風洞実験を行った結果より、

- 5) 植生層の遮蔽体積率が大きく、植生層高が小さい場合ほど、砂面付近の風速の減衰が大きくなり、植生領域では堆砂傾向になる。
- 6) 砂のサルテーション高さは、植生層高が小さいときには概して植生層の上方を風が流れるため大きくなるのに対し、植生層高が大きいときには植生層の上下に分かれて流れるため小さくなる。
- 7) 植生層で発生する乱れにより、植生層内の風速は大きく減衰する。また、これにより砂のサルテーションの水平速度は小さくなる。

植生の飛砂捕捉効果を考慮した数値計算による長期的な地形変動のシミュレーション結果より、

- 8) 平坦な地形上の平衡場における飛砂量公式である河村公式を用い、簡略化された形式で地盤の傾斜および植生の影響を考慮することで、長期的な砂丘の変形過程を定性的

第6章 結論

に再現することが可能であった。

本研究では、風洞実験の結果より、粗度長や摩擦速度への植生の影響に関する情報を定量的に取得し、その結果を用いて地形変動シミュレーションを行うことを目指したが、砂面付近や高風速時における風速の計測が困難であったため、数値計算に応用できる情報を取得することは不可能であった。よって、植生の影響を現地調査の結果を踏まえた簡略化された形式で取り入れたが、植生高や密生度等の各要因の粗度長および摩擦速度への影響をそれぞれ考慮することが可能になれば、より高精度に変形過程を再現することが可能であると考えられる。

謝 辞

私が大学院に所属していた 5 年間，指導教官として終始懇切な御指導および御助言を頂いた筑波大学機能工学系 西村仁嗣教授に深く感謝の意を表します。西村先生には，研究だけでなく，研究者としての姿勢や様々な社会問題等に関しても幅広く知識を与えて頂きました。

筑波大学機能工学系 武若聡助教授には，実質的に私の研究指導に最も時間を割いて頂き，細部に渡り御指導を頂きました。日本語が下手な私の論文に何度も目を通し，根気良く修正して頂いたこと等，厚く御礼申し上げます。私の研究に関する技術向上は先生の御指導の賜物です。就職に関しても大変参考になるアドバイスを頂きました。

筑波大学機能工学系 京藤敏達助教授には，特に乱流のことで御指導を頂きました。研究に関しても，貴重な御助言を頂きました。大変感謝しております。個性的で温和人柄にも楽しませていただきました。

本論文の審査をして頂いた，筑波大学機能工学系 河合達男教授および筑波大学機能工学系 羽田野祐子助教授には，審査等を通じて有益な御助言を頂き，謝意を表します。羽田野先生とは，一時気象研究所において共同研究をさせて頂きました。この経験が，本論文の風洞実験を行う上で大変役立ちました。

筑波大学機能工学系 飯高稔技官には，半年間かけて風洞を製作して頂きました。また，風洞実験を行った期間は約半年間しかありませんでしたが，実験全般に関して飯高技官に様々な御助言を頂いた御陰で，効率よく実験を行うことができました。また，中島孝技官には風洞の整流や風速計測に際して，御指導を頂きました。大変感謝しております。

卒業研究で私が初めて研究に取り組んだ際に指導して頂いたのは，当時の筑波大学機能工学系 椎貝博美教授（現 社団法人日本河川協会会長）でした。椎貝先生には研究の基礎を御教授いただき，私が大学院に進学し研究を続けていくきっかけを与えて頂きました。山梨大学の学長に就任された後も，私の発表論文に目を通して頂き，御助言下さいましたことを大変感謝しております。

最後に，現地調査や実験において，徒労を厭わず手を貸していただいた筑波大学機能工学系水工学研究室の皆様にご心より謝意を表します。

論文リスト

学術論文

- 1) 有働恵子, 武若聡: 後浜の地形変動に関する研究, 土木学会論文集, No.677, -55, pp.175-187, 2001年5月.
- 2) Keiko UDO, Satoshi TAKEWAKA, Hitoshi NISHIMURA: Morphological Change of Artificial Backshore Dunes, XXIX IAHR Congress Proceedings, Theme E, pp.250-255, Beijing, 2001.
- 3) 有働恵子, 武若聡: 海岸砂丘の長期的な地形変動特性とその再現, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.596-600, 2001年.
- 4) Keiko UDO, Satoshi TAKEWAKA, Hitoshi NISHIMURA: Numerical Model of Morphological Change of Backshore Dunes, 28th International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, 2002. (印刷中)
- 5) 有働恵子, 武若聡, 西村仁嗣: 植生領域の飛砂に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.636-640, 2002年.

学会発表

- 1) 有働恵子, 椎貝博美: 江戸時代末期の利根川下流域の復元, 第25回土木学会関東支部技術研究発表会, 足利, 1998年3月.
- 2) 有働恵子, 武若聡: 数値計算による後浜地形変動のシミュレーション, 第55回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2000年9月.
- 3) 有働恵子, 神田洋一, 武若聡, 羽田野祐子: 砂の飛散分布に関する実験的研究, 第56回土木学会年次学術講演会, 熊本, 2001年10月.