

粒度分布を考慮した沿岸住宅域飛砂輸送シミュレーション

羽多, 正吾
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/1938002>

出版情報：九州大学, 2017, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



平成 29 年度

九州大学大学院総合理工学府

大気海洋環境システム学専攻修士論文

粒度分布を考慮した

沿岸住宅域飛砂輸送シミュレーション

氏名 羽多 正吾

指導教員 松永 信博教授

Eljamal Osama 准教授

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	4
1.3 本論文の構成.....	5
第2章 混合粒径解析の概要.....	9
2.1 混合粒径解析について.....	9
2.2 各パラメータ・環境条件について.....	10
2.2.1 風向と風速.....	10
2.2.2 解析対象代表粒径とその存在割合.....	11
2.2.3 沈降速度.....	12
2.2.4 飛砂発生量.....	13
第3章 数値モデルの概要.....	16
3.1 解析ソフトについて.....	16
3.2 乱流の計算について.....	16
3.3 LES について.....	18
3.4 本解析について.....	22
3.4.1 基礎方程式.....	22
3.4.2 差分法.....	23
3.4.3 初期条件・境界条件.....	24
第4章 新宮町における飛砂輸送シミュレーション.....	27
4.1 飛砂輸送モデルの構築.....	27
4.2 解析結果.....	28
第5章 対策工の検討.....	33
5.1 対策工について.....	33
5.2 解析結果（対策工）.....	34
5.3 対策工の効果の検証.....	35
第6章 結論.....	50
参考文献.....	51
謝辞.....	52

第1章 序論

1.1 研究背景

1960年代後半より、我が国は高度経済成長期を迎えインフラの整備が加速された。川砂が河川管理や乱掘等により採取が規制される中、大量に採取が可能であるという点から、海砂がコンクリート骨材として利用され始めた。同時に河川においては、治水・利水・エネルギーを総合的に確保することを目的として多くのダムが建設されたため、沿岸地域への土砂の供給量は激減した。このような海砂の無制限の採取と、河川からの土砂の供給量の激減により、沿岸地域の土砂の収支バランスは大きく崩され、至る所で著しい海浜浸食を引き起こし、海岸が消失の危機にさらされた。1980年代からは海砂の採取規制と養浜や離岸堤の設置といった様々な環境保全が図られたこともあり、豊かな砂浜海岸が蘇る事例も見られた。しかし、最近ではこの豊かな砂浜海岸の砂が風によって運ばれ、住宅街に輸送されるという飛砂問題に直面している。

鹿児島県指宿市の指宿沿岸地域は砂風呂が有名であるが、海岸浸食による海岸線の後退という問題に直面している。この状況に対し国土交通省は養浜による海岸保全事業を検討しているが、養浜による海岸保全を行うことによって後背地における深刻な飛砂問題の発生が懸念されており、海岸保全と飛砂問題の両立が課題となっている⁽¹⁾。また、飛砂問題は沿岸地域だけではなく、内陸部でも発生している。福岡県北九州市若松区向洋町のひびきコスモス公園では、広大な砂地のグラウンドが飛砂の供給源となり、周辺の道路や住宅街に砂が溜まるという被害が発生しており、対策工の検討が求められている⁽²⁾。これらの事例のように、飛砂問題は至る所で発生しうるうえ、身近な環境問題となっている。

図-1.1 に示す福岡県の北西部に位置する糟屋郡新宮町新宮海岸（新宮地区）もこのような事例の一つであり、一度は海岸が消失の危機にさらされた。しかし、この社会問題に対し福岡県が海砂採取基準を定めるとともに、1982年から1990年にかけて新宮海岸に7基の離岸堤と1基の潜堤を設置するなどの環境保全を図った結果、図-1.2 に示すように豊かな砂浜海岸が蘇った。ゆるやかな弓なりのカーブを描いていることから通称「パラソルのふち」とも呼ばれる新宮海岸は、夏季には町民はもちろん福岡市や近郊からの海水浴客でにぎわいをみせている。近年では「しんぐう砂の芸術祭」として、一般参加型の砂像コンテストが開催されるなど、自然を満喫することのできる親水空間となっている。また、砂浜や松林などの美しい景観を楽しめるということから、1年を通して散策コースとしても親しまれている。海岸線には江戸時代に当時の福岡藩が植林した松が、幅およそ300メートル、長さ2キロ以上にわたって植えられており、海風や砂から作物を守るという目的から「楯の松原」と呼ばれ、今も守り継が

れている。白い砂浜と青い松原が特徴のこの景色は、県内屈指の白砂青松と言われており、新宮海岸の景観を飾るだけでなく、海辺の美しさを一層際立たせている。ゆえに新宮海岸は憩いの場として多くの住民に愛されている。

しかし、最近では海側から吹く風によって海岸の砂が舞い上がり住宅街に輸送される飛砂問題という、新たな環境問題に直面している。住民からは飛砂に対する不満の声も寄せられており、新宮町では飛砂防止対策の実施が求められている。このような背景から、豊かな自然海浜の創生と飛砂問題というトレードオフの関係にある 2 つの環境問題をどのように両立させていくかは、沿岸地域の環境保全において重要な課題であるとともに、住民の生活環境を快適なものにする上では緊急性のある問題である。

図-1.3 と図-1.4 は、新宮町において風によって運ばれた砂が後浜まで堆積した様子と、重機による堆積した砂の押し戻し作業を行っている様子の写真である。これらの写真から、大量の砂が後浜まで堆積していることがわかる。また、飛砂の影響は海浜部のみにとどまらず、新宮海岸周辺の住宅地にまで及んでいる。図-1.5 は新宮海岸と住宅街を結ぶ道であり、大量の砂が堆積している様子が分かる。周辺住宅でも飛砂の影響により道路や玄関に砂が溜まったり(図-1.6)、車や窓、洗濯物が汚れる等の被害が発生しており、住民から不満の声や飛砂防止対策の実施を求む声も寄せられている。

このような状況に対し、新宮町は飛砂発生状況の把握や、飛砂の輸送のメカニズムを解明するために砂の捕捉量調査や、風向・風速調査等を行ったり、近隣住宅への被害状況の把握のため住民を対象としたアンケート調査を実施してきた。また、これらの調査結果をふまえて植栽や防砂ネットの設置、堆砂垣の設置など様々な飛砂対策を検討している。しかし、効果的な対策工を講ずるには対策を実行する前にまず、飛砂の発生、輸送、堆積のプロセスを詳細に理解する必要がある。この問題の解決方法として有効な手法の一つとして考えられるのが数値シミュレーションによる解析である。

数値シミュレーション手法を用いた飛砂輸送特性解明の先行研究としては、太田らや篠原の研究がある。太田ら九州大学、日本文理大学、(株)三洋コンサルタントは、まず鹿児島県指宿市の指宿港海岸のから採取した砂を対象に風洞実験を行い、風速と飛砂の発生量の関係を明らかにした。また、風洞実験から得られた結果を風況解析が可能なソフトである Windperfect ((株)環境シミュレーション社製)を使用した数値シミュレーションにより再現し、指宿海岸の砂の終末沈降速度を求めた。この Windperfect は住宅地形を組み込むことも可能であるため、その後 WindPerfect に指宿地区の住宅地形を組み込んだ飛砂輸送モデルを構築し、風洞実験と数値シミュレーションから得られた飛砂発生量と沈降速度を設定することで、養浜による砂の増加に伴う飛砂問題が懸念され

ている鹿児島県指宿市の指宿港海岸（湯の浜地区）を対象とした飛砂濃度分布を解析した．篠原は太田らと同様に **Windperfect** を用いて鹿児島県指宿市の沿岸地域において，飛砂の被害が懸念される砂風呂周辺地域，住宅や施設が密集している JR 指宿駅周辺地域の 2 か所を解析対象として，より詳細な飛砂輸送シミュレーションを行った．これらの解析結果と対象地域の特性から植生による飛砂低減工法が現実的な飛砂対策工であるとし，モデルに植生による効果を加え対策工による飛砂低減効果を定量的に評価した．

これらの既往の研究では 50%粒径の砂の終端速度を飛砂全体の沈降速度と定めている．しかしながら，実際に飛砂が発生する場合は海岸の構成砂粒子のうち比較的軽い砂粒子が飛ばされており，重い砂粒子は舞い上がらないことが考えられる．また，飛んでいる砂粒子も様々な粒径の砂粒子が存在しており，それぞれ異なる沈降速度を有していることが考えられる．したがって，より精度良く実際の飛砂現象を再現するには，大小様々な砂粒子を含んだ混合粒径の影響を加味する必要があるが，この粒度分布を考慮した飛砂のシミュレーションはほとんど行われていない．

そこで本研究では福岡県糟屋郡新宮町新宮海岸（新宮地区）の砂を分析し，いくつかの代表粒径とその粒径の砂の存在割合を決定する．沈降速度は砂粒子の粒径に依存することから，代表粒径を定めるとその粒径における沈降速度が得られる．**WindPerfect** を用いてそれぞれ異なる沈降速度を与えて計算を行った後に存在割合に応じて重ね合わせをすることで，より詳細に新宮町の飛砂現象を再現する．

1.2 研究目的

福岡県糟屋郡新宮町新宮海岸（新宮地区）は、1960 年代後半に海砂の無制限の採取と河川からの土砂の供給量の激減により、一度海岸が消失の危機にさらされた。この危機に対して 1980 年代から環境保全が図られたことで、新宮海岸は豊かな砂浜海岸を取り戻し、現在では県内屈指の白砂青松といわれ、憩いの場として多くの住民、海水浴客から愛される親水空間となっている。しかしながら、最近では海側から吹く風によって海岸の砂が舞い上がり、住宅街に輸送される飛砂問題という新たな環境問題に直面しており、飛砂防止対策の実施が求められている。

この豊かな自然海浜の創生と、飛砂問題という 2 つのトレードオフの関係にある環境問題をどのように両立させていくかは、環境保全において重要な課題であり、また、住民の生活環境を快適なものにする上では緊急性のある問題であるが、効果的な対策工を講ずる上ではまず飛砂の輸送過程を把握することが先決である。

そこで本研究では新宮海岸の砂を分析した後、風環境解析が可能である（株）環境シミュレーション社製の流体解析ソフトウェア Windperfect に現地の住宅地形を組み込み、粒度分布を考慮した数値シミュレーション手法を用いることで、福岡県糟屋郡新宮町新宮海岸（新宮地区）における飛砂輸送特性を解明し、効果的な対策工の検討・評価を行うことを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文の以下の構成は次のようになっている。

まず第 2 章では新宮海岸の砂の粒度解析と粒度分布を考慮した飛砂シミュレーションの概要について述べる。

第 3 章では本研究で使用する数値モデルの概要について述べる。

第 4 章では飛砂輸送モデルを構築し、実際に数値計算を行う。

第 5 章では第 4 章の解析結果から効果的な対策工の検討・検証を行い、対策工による効果を評価する。

最後に第 6 章で本論文での結論を述べ、その後に参考文献と謝辞を加えた。

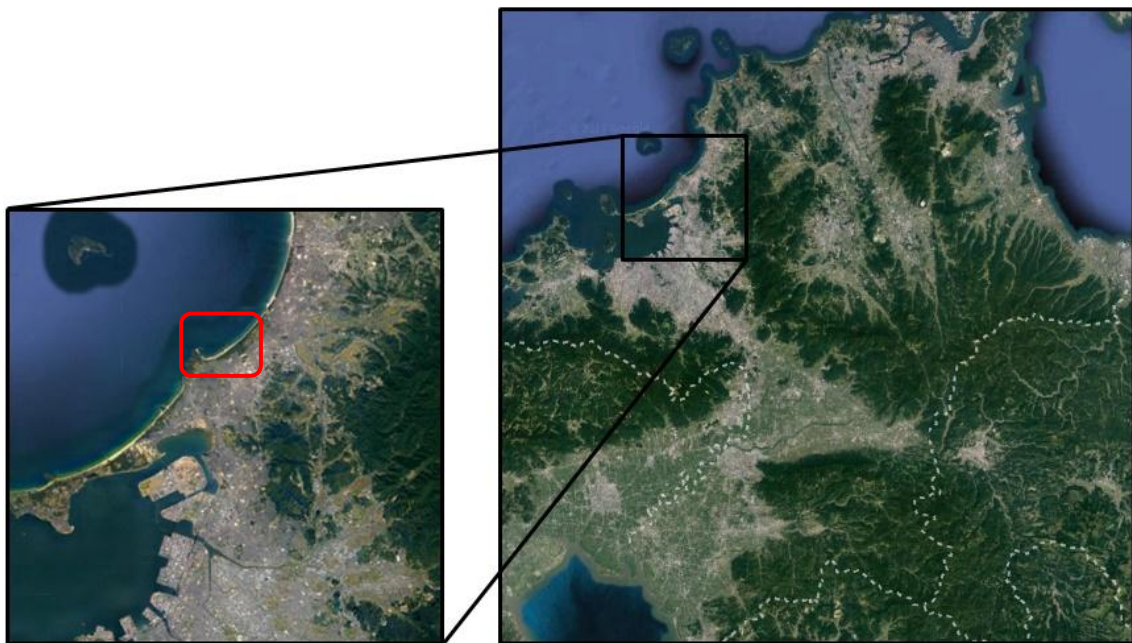


図-1.1 福岡県粕屋郡新宮町新宮海岸

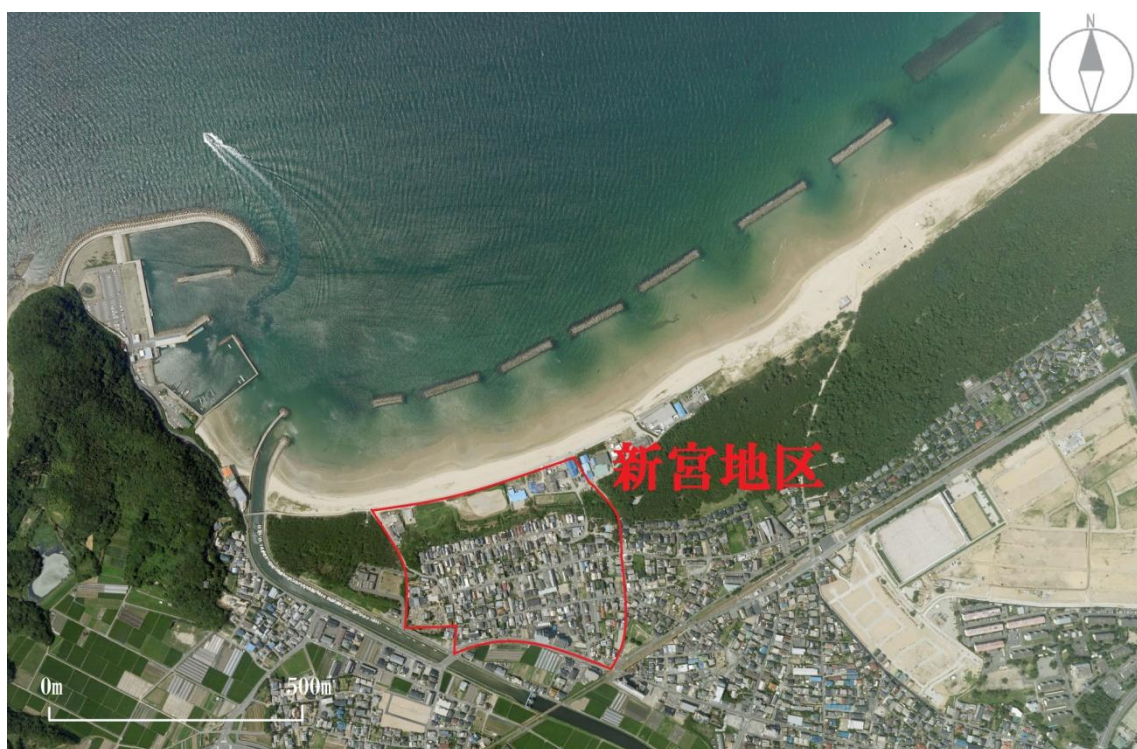


図-1.2 新宮海岸周辺の航空写真



図-1.3 風によって運ばれ後浜に堆積した砂



図-1.4 重機による堆積した砂の押し戻し作業



図-1.5 海岸と住宅地を結ぶ道に堆積した砂



図-1.6 住宅地の道路に溜まっている砂

第 2 章 混合粒径解析の概要

2.1 混合粒径解析について

飛砂が発生する場合は海岸の構成砂粒子のうち比較的軽い砂粒子が飛ばされており，重い砂粒子は舞い上がらないことが考えられる．また，飛んでいる砂粒子も様々な粒径の砂粒子が存在しており，それぞれ異なる沈降速度を有していることが考えられる．したがって，より精度良く実際の飛砂現象を再現するには大小様々な砂粒子を含んだ混合粒径の影響を加味する必要がある．本研究では福岡県糟屋郡新宮町新宮海岸（新宮地区）の砂を分析し，いくつかの代表粒径とその粒径の砂の存在割合を決定する．沈降速度は砂粒子の粒径に依存することから，代表粒径を定めるとその粒径における沈降速度が得られる．その後得られた沈降速度を与えて計算を行った後に，それぞれの計算結果を存在割合に応じて重ね合わせをすることにより混合砂による飛砂輸送を再現する．

図-2.1 に混合粒径解析のフローチャートを示す．計算を行う際には対象地域の平均風速が必要であるため，まず新宮海岸における高度 10m の平均風速 U_{10} を決定する．次に新宮海岸の砂の粒度解析を行い，5 つの解析対象代表粒径 D_N ($N=1\sim5$) とその存在割合 a_N ($N=1\sim5$) を決定する．砂粒子の沈降速度は粒径に依存するため，代表粒径からそれぞれの沈降速度 w_N ($N=1\sim5$) を決定する．定めた沈降速度を与え，飛砂の発生量を $1(\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$ として計算を行う．それぞれの計算を終えた後に重量比に応じて重ね合わせを行う．最終的な飛砂の濃度を相対量で評価する場合は以上の手順で済むが，絶対量で評価する必要がある場合は摩擦速度 u_* と飛砂発生限界摩擦速度 u_{*c} を求め，飛砂発生量算定式から飛砂発生量 $Q(\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$ を算出し，重ね合わせた後の結果を Q 倍することで飛砂の濃度を絶対量で見積もることができる．

次節でこの解析に必要なパラメータ・環境条件について述べる．

2.2 各パラメータ・環境条件について

2.2.1 風向と風速

飛砂は海岸の砂が風によって舞い上がることで発生する。また、舞い上がった砂も風向きや風の強さによって様々な方向、距離へと運ばれる。飛砂の影響を解明するには新宮町の風環境を把握したうえで数値シミュレーションを行う必要がある。新宮町はこれまで飛砂の発生や輸送のメカニズムを解明するために風向・風速調査を行ったり、新宮海岸の周辺住宅への飛砂の被害状況を把握するために新宮町の住民を対象としたアンケート調査やヒアリング調査を実施してきた。

新宮海岸飛砂防止対策調査業務報告書⁽³⁾によると、風向・風速調査が平成 24 年 4 月 1 日から平成 25 年 3 月 11 日の間に実施された。調査方法は新宮海岸の海岸線中央部の 1 地点に設置した風向風速計による連続観測(記録間隔 10 分間)である。調査結果によると年間を通した新宮町の風況は、西北西から北、南南東の風が吹く頻度が高いことが分かった。また、年間の平均風速はおおむね西から北にかけては 4.0m/s 程度、東から南にかけては 2.0m/s 以下であった。新宮町は北側が海に面しているため、この結果から新宮町は海岸線特有の強い海風にさらされやすい立地であるということが言える。月別の風況は 4 月から 9 月においては、北 7 方位(西北西から東北東)の頻度が 33.1%~65.0%であり、平均風速は 2.1m/s~3.5m/s であった。10 月から 3 月においては北 7 方位の風向頻度が 31.2%~55.4%であり、平均風速は 4.1m/s~5.0m/s と、4 月~9 月に比べ高くなっている。北 7 方位の風向頻度は年間を通して大きな差はみられないが、風速に関しては夏季より冬季のほうが強いことが分かる。夏季は風速が小さいことに加え梅雨などの影響で空気が湿っていることが予想されるため、飛砂の被害は小さいことが予想できる。一方で、冬季は風速が大きいことに加え、空気が乾燥していることが予想されるため、飛砂被害が起こりやすい環境となっていることが予想できる。風向・風速調査に加え、新宮町は飛砂被害状況の把握のため、住民を対象としたアンケート調査を行った。飛砂被害の時期を問うアンケートでは、年中を通して被害感があることが伺える結果であったが、特に冬に飛砂の被害を受ける、との回答が多かった。

これらの風向・風速調査とアンケート結果から、新宮町においては冬に飛砂の被害が大きくなることが予想できるため、計算時に設定する風向と風速は新宮町の冬季における風向・風速を設定することにした。風向は悪条件での飛砂被害も見積もるために、もっとも飛砂被害が大きくなるであろうと予想される北寄りの風を選定した。また、風速は冬季における最大風速を想定し 10.3m/s とした。

2.2.2 解析対象代表粒径とその存在割合

新宮海岸の砂の粒度解析を行うために、平成 29 年 8 月 8 日に新宮海岸にて砂を採取した。その日の天候は晴れであり、風が吹くと砂浜の砂が砂面を転がる様子が確認できた。採取した砂を持ち帰り、レーザ回折式粒子径分布測定装置 SALD-3100 を用いて粒度解析を行った。この SALD-3100 は粒子群にレーザ光を照射し、そこから発せられる回折・散乱光のパターンから粒度分布を求める装置である。測定範囲は $0.05\mu\text{m}\sim 3000\mu\text{m}$ である。

粒度解析の結果を図-2.2 に示す。横軸が粒径、縦軸の右軸が頻度分布、左軸が積算分布である。新宮海岸の砂の粒径の約 90% は $0.17\text{mm}\sim 0.4\text{mm}$ の間にあり、出現比率が最も大きい粒子径を示すモード径は 0.29mm 、50% 粒径は 0.26mm であった。

この粒径分布を図-2.3 で示すように 5 つの区切りで分け、解析対象代表粒径 D_N とその存在割合 a_N を決定した。粒径が小さい方から $D_1\sim D_5$ 、その存在を $a_1\sim a_5$ とした。それぞれの粒径は

$D_1=0.19\text{mm}$ $D_2=0.24\text{mm}$ $D_3=0.30\text{mm}$ $D_4=0.37\text{mm}$ $D_5=0.46\text{mm}$
であり、その粒径の砂の存在割合はそれぞれ

$a_1=10.00\%$ $a_2=27.16\%$ $a_3=31.42\%$ $a_4=20.15\%$ $a_5=4.31\%$
であった。

計算結果を重ね合わせする際は重量比に応じて重ね合わせを行う。砂粒子の重量比は砂粒子の密度を ρ_s とすると以下のように示される。

$$\rho_s \frac{\pi}{6} a_N D_N^3 \quad (N = 1\sim 5) \quad (1)$$

ここで $\rho_s \frac{\pi}{6}$ は一定であると仮定するとそれぞれの重量比 m_N ($N=1\sim 5$) は以下のように示される

$$m_N = \frac{a_N D_N^3}{a_1 D_1^3 + a_2 D_2^3 + a_3 D_3^3 + a_4 D_4^3 + a_5 D_5^3} \quad (2)$$

上式で算出すると各代表粒径の砂の重量比はそれぞれ

$$m_1=0.03 \quad m_2=0.14 \quad m_3=0.31 \quad m_4=0.37 \quad m_5=0.15$$

であった。計算結果を重ね合わせする際はそれぞれの計算結果にこの重量比を乗じて足し合わせる事となる。

2.2.3 沈降速度

静止流体中における浮遊砂は、重力の作用を受け徐々に加速しながら沈降していくが、沈降に伴う抵抗力が反対方向に働くため、次第に一定の速度で沈降するようになる。このときの速度を終末沈降速度という。この沈降速度は数値計算において重要なパラメータのひとつである。

静止流体中を質量 m の砂粒子が重力により速度 v_t で沈降する時、砂粒子の運動方程式は以下の式で表される。

$$m \frac{dv_t}{dt} = mg - mg \frac{\rho_a}{\rho_s} - F \quad (3)$$

m ：砂粒子の質量， v_t ：沈降速度， g ：重力加速度($=9.81\text{m/s}^2$)， ρ_a ：空気の密度($=1.226\text{kg/m}^3$)， ρ_s ：砂粒子の密度($=2.65 \times 10^3\text{kg/m}^3$)， F ：砂粒子が空気から受ける抵抗，であり，右辺はそれぞれ重力，浮力，抵抗力を表している。

$$m = \frac{\pi D^3}{6} \rho_s \quad (4)$$

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_a v_t^2 A \quad (A = \frac{\pi D^2}{4}) \quad (5)$$

を用いて整理すると以下の式となる。

$$\frac{dv_t}{dt} = g \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} \right) - \left(\frac{3\rho_a}{4\rho_s D} \right) C_D v_t^2 \quad (6)$$

C_D は抵抗係数である。上式の右辺第1項は重力と浮力の差，第2項は抵抗を表しているが、沈降速度はこの2項がつり合い、等速運動をするときの速度であるため、 $dv_t/dt = 0$ とすると以下で示す沈降速度の式が得られる。

$$v_t = \sqrt{\frac{4gD(\rho_s - \rho_a)}{3\rho_a C_D}} \quad (7)$$

なお、本研究では抵抗係数 C_D はYamamoto ら(2011)の論文⁽⁴⁾を参考にして

$$C_D = (0.55 + 4.8/\sqrt{\text{Re}_s})^2 \quad (1 < \text{Re}_s < 10^4) \quad (8)$$

砂粒子に関するレイノルズ数は空気の粘性係数を $\mu(=1.8 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s})$ として

$$\text{Re}_s \equiv \frac{v_t D \rho_a}{\mu} \quad (9)$$

と定義している。この式(7)，(8)，(9)を用いて各代表粒径における沈降速度 w_N ($N=1\sim 5$)を算出したところ、それぞれ

$w_1=1.38\text{m/s}$ $w_2=1.83\text{m/s}$ $w_3=2.36\text{m/s}$ $w_4=2.93\text{m/s}$ $w_5=3.62\text{m/s}$ であった。

2.2.4 飛砂発生量

乾燥した平坦な砂面上における飛砂現象のついてはかなり研究されており、これまでも多くの飛砂発生量算定式が発表されてきた。そのなかでも代表的な式が以下に示す Bagnold(1973)⁽⁵⁾の式と河村(1951)⁽⁶⁾の式である。

$$Q = B \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3 \quad (10)$$

$$Q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \quad (11)$$

Q ：単位幅，単位時間に通過する砂の質量(kg/m・s)， B ：実験係数(=1.5)， ρ_a ：空気の密度(=1.226kg/m³)， g ：重力加速度(=9.81m/s²)， d ：砂の粒径(mm)， D ：標準粒径(=0.25mm)， u_* ：摩擦速度(m/s)， K ：実験係数(=2.78)， u_{*c} ：飛砂発生限界摩擦速度(m/s)

本研究ではこれらの式を参考に以下の式を用いて飛砂発生量を算定する。

$$Q = K \frac{\rho_a}{g} u_*^2 (u_* - u_{*c}) \quad (12)$$

ここでの摩擦速度は以下の関係式を用いて算出する。

$$U_{10} = 25u_* \quad (13)$$

また，ここでの飛砂発生限界摩擦速度とは砂面上の砂粒子が移動を始め，飛砂が発生するときの摩擦速度であり以下の Bagnold の式を用いて算出される。

$$u_{*c} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} \quad (14)$$

A ：実験係数(=0.1)， ρ_s ：砂の密度， ρ_a ：空気の密度(=1.226kg/m³)， g ：重力加速度(=9.81m/s²)， d ：砂の粒径(mm)

以上の式に新宮町の U_{10} (=10.3m/s)，粒径として新宮海岸の砂の 50%粒径(=0.26mm)，砂の密度(=2.65 × 10³kg/m³)を当てはめると摩擦速度 u_* は 0.41m/s，飛砂発生限界摩擦速度 u_{*c} は 0.23m/s，飛砂発生量 Q は 0.11kg/m・s であった。

本研究においては計算結果の重ね合わせ容易にするため，飛砂発生量を 1kg/m²s として計算を行うが，最終的な飛砂の濃度を絶対量で評価する場合は重ね合わせ後の結果に以上の飛砂発生量を乗じることとなる。

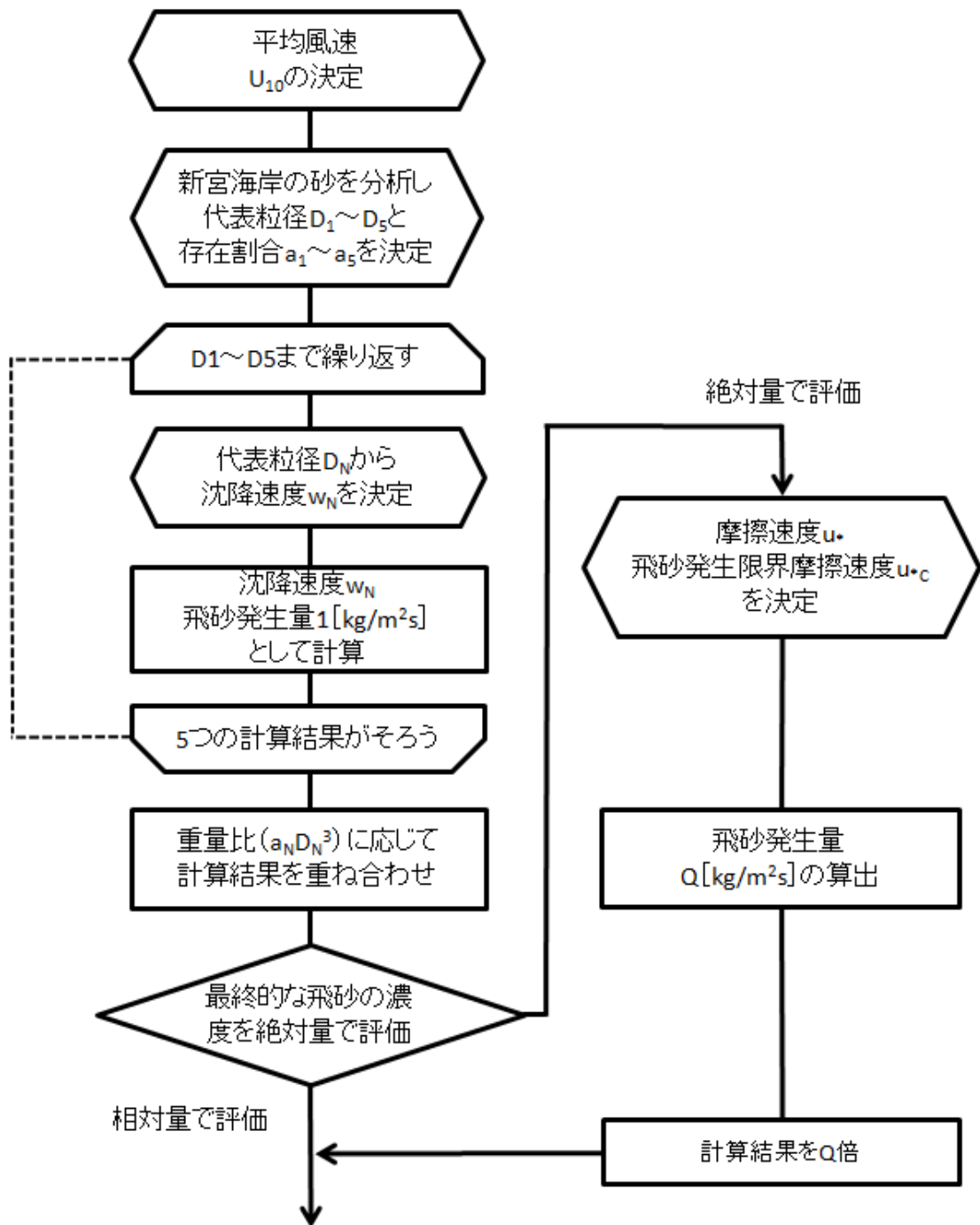


図-2.1 混合粒径解析のフローチャート

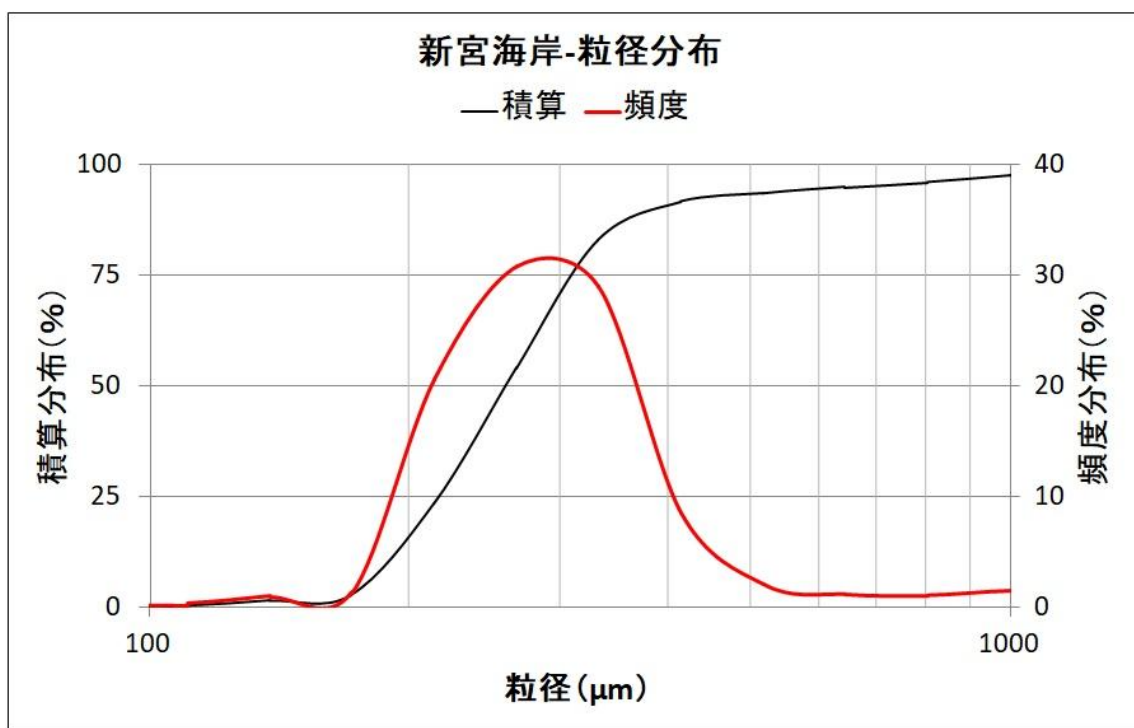


図-2.2 新宮海岸の砂の粒径分布

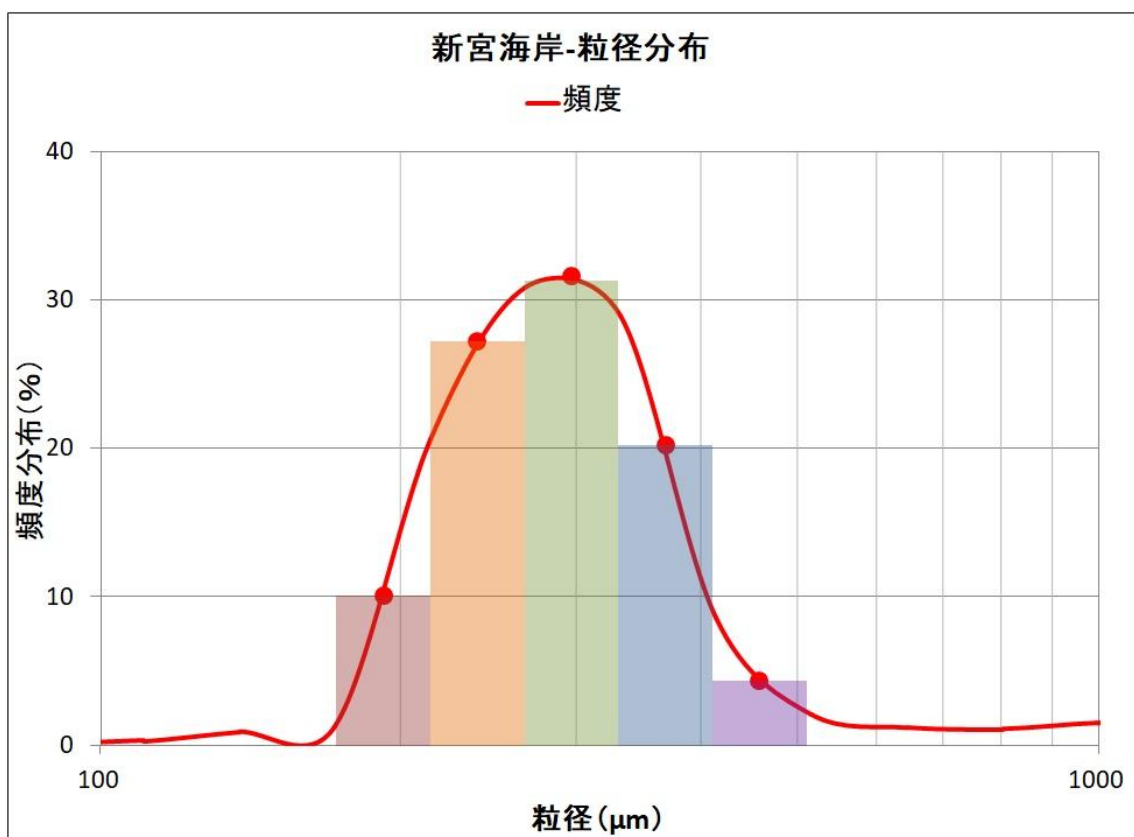


図-2.3 解析対象代表粒径

第3章 数値モデルの概要

3.1 解析ソフトについて

本研究では数値モデルとして(株)環境シミュレーション社製の建築・土木業界向けに設計・開発された3次元熱流体解析ソフトウェアであるWindPerfectを使用する。WindPerfectは風環境解析，ヒートアイランド解析，空調解析，換気解析，風荷重解析，非定常解析などの建築物内外で生じる熱流体問題を広い範囲でカバーしており，モデルの作成，解析，結果の可視化までを簡単な操作で行うことができる。また風環境解析においての乱流の取り扱いは，層流，0方程式，標準k- ϵ ，LES(標準Smagorinsky)，DNS(直接計算法)を選択することができる。

3.2 乱流の計算について

本解析における風の流れは乱流である。乱流は時間・空間的に不規則な流れであり解析が難しい。

乱流における流体解析では流体の運動方程式であるナビエ-ストークス方程式を直接解く必要がある。このナビエ-ストークス方程式を直接解き，乱流の現象を再現しようとする方法はDNS(Direct Numerical Simulation)と呼ばれる。一般的にDNSは乱流の渦の最小サイズ(コルモゴロフスケール)を捉えることができるように十分細かい計算格子を用意する必要があるため，計算は大規模なものとなる。また，乱流は本質的に非定常な現象であり，計算は非定常解析となるため膨大な計算時間がかかる。そのためDNSを実用的に活用するのは困難な場合が多いが，計算精度は高いため乱流の性質を調べる研究にはDNSが大いに活用される。このように研究分野では活用されているDNSであるが，高レイノルズ数の流れにおいてはコルモゴロフスケールがさらに微小となるため計算格子数が著しく増加するという課題もある。

乱流は複雑な性質を持ち，数値計算には非常に細かな計算格子を用意する必要があるため，膨大な計算時間がかかる。このため，現在のコンピュータの処理能力をもってしても現実的な時間で高レイノルズ数の流れにおける解析を行うことは困難である。この対策として考えられたのが乱流モデルの導入である。乱流モデルは格子で捉えることができる大きな渦の変動を解析対象とし，格子で捉えることができない小さな渦が及ぼす影響は物理モデルにより表現するというものである。これにより大幅に計算時間を短縮することができる。

代表的な乱流モデルとしてはレイノルズ平均モデル(RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes)と格子平均モデル(LES : Large Eddy Simulation)の2つが挙げられる。

RANS は現在最も広く使用されている乱流の計算方法で、方程式を時間的に平均することで時間平均の乱流特性を得るモデルである。乱流は大小様々な渦の非定常的な生成・消滅が生じる複雑な流れであるが、時間で平均するとそれらはならされて見えなくなる。そのため時間の平均場であれば粗い計算格子でも捉えられるであろうと期待され、小さい渦ひとつひとつを捉えるような細かい計算格子は必要ないので DNS に比べて計算時間を大幅に減らすことができる。しかし、時間平均を施しているため乱流の平均時間スケール以下の不規則性、現象は再現されない。

一方、LES は方程式を空間的に平均するモデルである。計算格子で捉えられる大きいサイズの渦は直接計算し、計算格子で捉えることができない小さいサイズの渦に関しては、モデル化を行うことによってその影響を加味し計算する。モデル化を行うことによって全てを計算する必要が無くなるので、DNS よりも計算負荷を減らすことができる。また乱流の不規則性もある程度再現でき、非定常解析も可能であるため、RANS に比べると非常に高精度で実験に近い値などを得ることができるが、計算負荷は RANS より大きい。

本研究では予測精度が高く現象の理解により適していると考えられる LES(Smagorinsky モデル)を採用し、解析を行う。

3.3 LES について

本研究では非定常の解析を取り扱うことが可能で、モデルとしての普遍性が高い LES を乱流モデルとして選定した。

LES は大きなスケールの乱流渦のみを直接計算し、小さな渦はモデルによってその影響を加味し計算を行う乱流モデルである。図-3.1 は様々なレイノルズ数の乱流場についてエネルギースペクトルを集めたグラフであり、数値はコロモゴロフスケールで整理されている。なお、グラフの縦軸はエネルギースペクトル、横軸は波数を表している。

図-2.2 を見ると低周波の大きな渦は流れ場によって異なるが、高周波の小さな渦は流れ場によらず普遍性を持っていることが分かる。高周波の渦は等方的でエネルギーを散逸する役割を担っている。このことから普遍性の期待できる小さな渦をモデル化し、流れ場によってそれぞれ異なる影響が及ぼされる大きな渦を直接計算することは合理的であるといえる。

しかし、乱流は大小様々なスケールの渦が相互作用を及ぼしあっている流れであるため、粗い計算格子で計算を行っても大規模な渦のシミュレーションとは言い難い。そのため LES では計算格子を細かく設定する必要がある。また、LES の基礎方程式は格子でとらえることができない小スケールの渦の作用を組み込んだものでなければならない。

乱流の数値シミュレーション⁽⁷⁾によると、LES の基礎方程式にはふつう **filtered Navier-Stokes equation** と呼ばれるナビエ-ストークス方程式に空間的なフィルターをかけて粗視化した式が用いられる。フィルターの幅は格子幅程度とされ、直接計算されるスケールを **GS** (グリッドスケール)、直接計算されない小スケール成分を **SGS** (サブグリッドスケール) という。

フィルターをかけた非圧縮流れの連続の式と運動方程式は

$$\overline{\frac{\partial f}{\partial t}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial t}, \quad \overline{\frac{\partial f}{\partial x}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \quad (15)$$

の平均操作と微分操作に関する交換が成立する仮定のもとで次のように示される。

フィルターをかけた連続の式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

フィルターをかけた運動方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (17)$$

解こうとしているのは GS 流れ場 $(\bar{u}_i, \bar{p})$ であるが、式(17)にはこれらでは表すことができない $\bar{u}_i \bar{u}_j$ が含まれている．そこで式(17)を GS 流れ場におけるナビエ-ストークス方程式の形に書き換えると

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[-\tau_{ij} + \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (18)$$

となる．上式を用いれば格子スケール以下の渦を解かなくてもよいが、代わりにその効果を表す

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (19)$$

を与える必要がある．これはフィルターによって粗視化された流れにおける残余の応力であり SGS 応力と呼ばれる．

この SGS 応力はさらに次のように分解される．

$$\tau_{ij} = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \quad (20)$$

$$L_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (21)$$

$$C_{ij} = \overline{u_i u'_j} + \overline{u'_i u_j} \quad (22)$$

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j} \quad (23)$$

式(6)中の L_{ij} , C_{ij} , R_{ij} はそれぞれレナード項, クロス項, レイノルズ応力項と呼ばれる．

レナード項は GS 渦と GS 渦同士の干渉を表しており計算可能である．しかしクロス項とレイノルズ応力項はそれぞれ GS 渦と SGS 渦との間，または SGS 渦と SGS 渦同士での干渉を表しており，一般的には何らかの物理的考察に基づいたモデル化が必要である．

このモデルとして代表的であり，かつ，本解析でも使用しているのが Smagorinsky モデルである．この Smagorinsky モデルでは SGS 応力 τ_{ij} を構成するレナード項 L_{ij} ，クロス項 C_{ij} ，レイノルズ応力項 R_{ij} のうち，レナード項 L_{ij} とクロス項 C_{ij} は互いに打ち消しあう効果があり，両者を合わせると無視できる($L_{ij} + C_{ij} \cong 0$)と考え， τ_{ij} は R_{ij} のみで代表されると仮定する．

さらに SGS 応力 τ_{ij} に対して渦粘性近似を導入し，フィルターをかけた運動方程式のひずみ速度テンソル S_{ij} に比例するものとする．

$$\tau_{ij}^a = -2\nu_{SGS}\bar{S}_{ij} \quad (24)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (25)$$

この ν_{SGS} を渦粘性係数という．また，便宜上 $\tau_{ij}^a = \tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}\tau_{kk}}{3}$ のように非等方部分を上付き添え字 **a** で表している．

ひずみ速度テンソルのトレースレス条件 ($\bar{S}_{ii} = 0$) より，あるテンソルと $\bar{S}_{ij}$ との積はその非等方部分と $\bar{S}_{ij}$ との積と変わらない．したがって SGS 応力についても $\tau_{ij}^a \bar{S}_{ij} = \tau_{ij} \bar{S}_{ij}$ である．

運動方程式(18)に式(24)を用いれば次のようになる．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_{SGS}) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (26)$$

つまり，式(26)中の渦粘性係数 ν_{SGS} を与えれば，連続の式(2)と連立させることによりフィルターをかけた流れ場 $\bar{u}_i$ および $\bar{P}(= \bar{p} + \rho \tau_{kk}/3)$ を求めることができる．

渦粘性係数は次元解析により次のように導かれる．

$$\nu_{SGS} = C_s^2 \Delta^2 |\bar{S}| \quad (27)$$

$$|\bar{S}| = (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

C_s は Smagorinsky 定数と呼ばれ，このモデルにおいて与えるべき唯一の定数であるが，一般的には 0.10 程度である．また， Δ はフィルタ幅であり，一般に

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

である．ここでの Δ_i は i 方向の計算格子幅である．

乱流粘性は分子粘性に比べ非常に大きいことを考慮すると最終的に以下の基礎方程式(30)が得られる．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (30)$$

3.4 本解析について

3.4.1 基礎方程式

基礎方程式系は質量保存式である連続の式，運動方程式である Navier-Stokes 方程式，飛砂濃度を支配する式からなる．

本解析で使用する基礎方程式を以下に示す．

連続の式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

飛砂輸送方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + (\bar{w} - w_0) \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right)$$

$$\nu_{SGS} = C_s^2 \Delta^2 |\bar{S}| \quad \Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{\frac{1}{3}} \quad |\bar{S}| = (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad D_t = \nu_{SGS}$$

x_i : 座標軸, u_i : i 軸方向速度, ρ : 密度, $\bar{P}$: 圧力

ν_{SGS} : サブグリットスケールの渦粘性係数, $\bar{C}$: 飛砂濃度

$\bar{u}$: x 方向の速度, $\bar{v}$: y 方向の速度 $\bar{w}$: z 方向(鉛直方向)の速度

w_0 : 砂粒子の沈降速度 D_t : 乱流拡散係数

3.4.2 差分化

3.4.1 で示した基礎方程式系を数値的に解析するためには方程式を差分化して積分する必要がある。質量保存の式である連続の式と運動方程式を解析することで速度場を決定することができる。運動方程式において時間微分には 1 次精度の前進差分が、空間微分に関しては 1 次精度の中心差分が採用されている。また、非線形項の差分については 3 次精度風上差分である QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)法が用いられている。速度場の積分に関しては SMAC (Simplified Marker And Cell)法を用いることにより速度場を陽的に解いた後、次の時間ステップで連続の式を満たすように圧力場を求めている。

速度場が解析された後に飛砂輸送方程式を用いて飛砂の濃度分布を解析する。飛砂輸送方程式において時間微分には 1 次精度の前進差分が、空間微分に関しては 1 次精度の中心差分が採用されている。なお、飛砂輸送方程式の乱流拡散係数については運動方程式の渦粘性係数と等価であると仮定した。

3.4.3 初期条件・境界条件

計算時における初期条件と境界条件を以下に示す.

- 流れ場の解析における初期条件・境界条件

初期条件

$$\bar{u}_i = 0 \quad \text{at} \quad t = 0$$

側面流入境界条件

$$\bar{u}_i = \bar{u}_{i0}$$

側面流出境界条件

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_2} = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

上面流出境界条件

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_3} = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

底面境界条件

$$\bar{u}_i = 0$$

ここで, x_1, x_2 は水平座標軸であり, x_3 は鉛直座標軸である

● 濃度場の解析における初期条件・境界条件

初期条件

$$\bar{C} = 0 \quad \text{at} \quad t = 0$$

側面流入境界条件

$$\bar{C} = 0$$

側面流出境界条件

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_2} = 0$$

上面流出境界条件

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_3} = 0$$

底面境界条件 濃度発生域

$$q = q_0 \text{ (kg/m}^2\text{s)}$$

濃度非発生域

$$q = 0 \text{ (kg/m}^2\text{s)}$$

ここで, x_1 , x_2 は水平座標軸であり, x_3 は鉛直座標軸である.

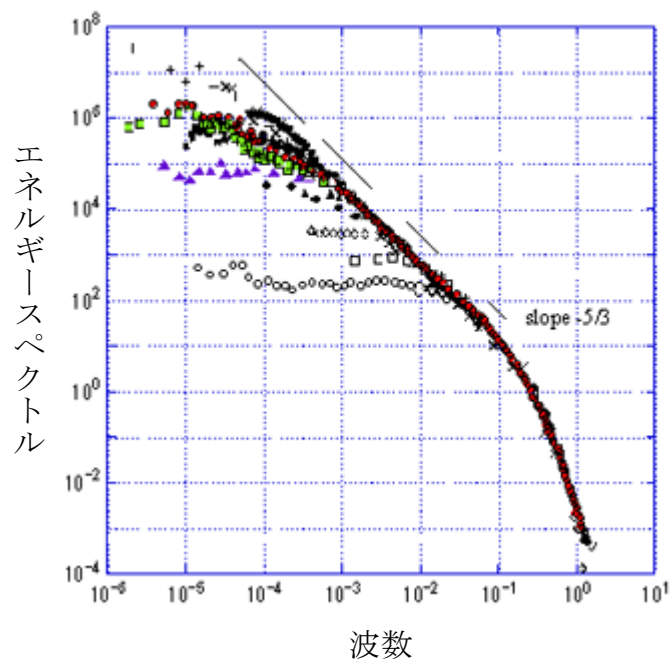


図-3.1 乱流のエネルギーースペクトルの普遍則

(一般社団法人日本機械学会流体力学部門ホームページ

http://www.jsme-fed.org/newsletters/2006_9/no2.html の図より転載)

第4章 新宮町における飛砂輸送シミュレーション

4.1 飛砂輸送モデルの構築

新宮町の飛砂輸送特性を解明するには、新宮町の地形や建物を再現した地形モデルを作成する必要がある。作成範囲は図-4.1 に示す範囲であり、東西方向が 480m、南北方向が 720m の領域である。

地形モデルの作成はまず国土地理院のホームページにて公開されている 5m メッシュ間隔の基盤地図情報をダウンロードし、より詳細な地形データとするために GMT(Generic Mapping Tools)を使用して、メッシュ間隔を 5m から 1m へと補間した。この地形データを WindPerfect で読み込んだ後、海岸付近の建物を建物とみなしたブロックを配置することで再現した。また、砂浜部分には砂を発生させる領域を定め、樹林帯部分には開口率と抵抗係数を設定できる領域を定めることで樹林帯の効果を再現している。ここでの開口率は流量を減らす役割、抵抗係数は流速を小さくする、つまりエネルギーロスの役割を果たしている。本研究において開口率は 0.5、抵抗係数は Mayhead(1973)⁽⁸⁾の論文を参考に 0.4 としている。

作成した地形モデルを図-4.2 に示す。図中の四角い図形が建物と見立て配置したブロックであり、黒線は地形の等高線を表している。

4.2 解析結果

本章から実際に新宮町を対象とした飛砂輸送シミュレーションを行う。

まず前節で作成した地形モデルに計算格子を設定した。解析領域は東西方向である x 方向は 480m, 南北方向である y 方向は 720m, 鉛直方向である z 方向は 100m であり, 東西南北にそれぞれ助走領域を 100m 定めている。格子間隔は x 方向, および y 方向は 1.5m 間隔 (助走領域は 5m 間隔) に設定し, z 方向の格子間隔は地表付近を詳細に解析するために 0~20m は 0.5m 間隔, 20~40m は 1m 間隔, 40~100m は 3m 間隔の不等間隔とした。格子数は助走領域も含め x 方向, y 方向, z 方向それぞれ 360, 520, 80 であり, 全体で 1497.6 万格子である。

その他の計算条件は 2.2 節で定めたとおりであるが, まとめたものを表-4.3 に示す。これらの計算条件のもとに計算を行った。

重量比に応じて重ね合わせした結果を図-4.4(a), 図-4.4(b), 図-4.4(c)に示す。これらは飛砂の濃度の水平分布を示しており, それぞれ地表面から 0.5m, 5.5m, 10.5m の高さにおける濃度分布である。

地表面から 0.5m の高さにおける濃度の水平分布である図-4.4(a)では, 砂が住宅街までは輸送されずに海岸付近で滞留している。これは新宮海岸と住宅街の間は小高い丘陵となっていることに加え, 樹林帯が広がっているため, 砂が住宅街へとあまり輸送されなかったと考えられる。しかしながら, 図-4.4(b)で示す地表面から 5.5m の高さにおける濃度の水平分布では, 新宮町の東側と西側から住宅街へと砂が進入している様子がわかる。図-4.4(c)で示す地表面から 10.5m における濃度の水平分布では, 東側と西側から進入した砂がさらに広範囲に分布している様子がわかる。これは新宮町の東側と西側には海岸と住宅街を結ぶ道路が敷設されており, この道路から砂が住宅街へと進入し広がったためだと考えられる。また, この二本の道路はおおむね南北方向に走っているため, 新宮町では北寄りの風が吹いた場合に砂が住宅街へ輸送されやすい環境となっていると考えられる。



図-4.1 地形モデルの作成範囲

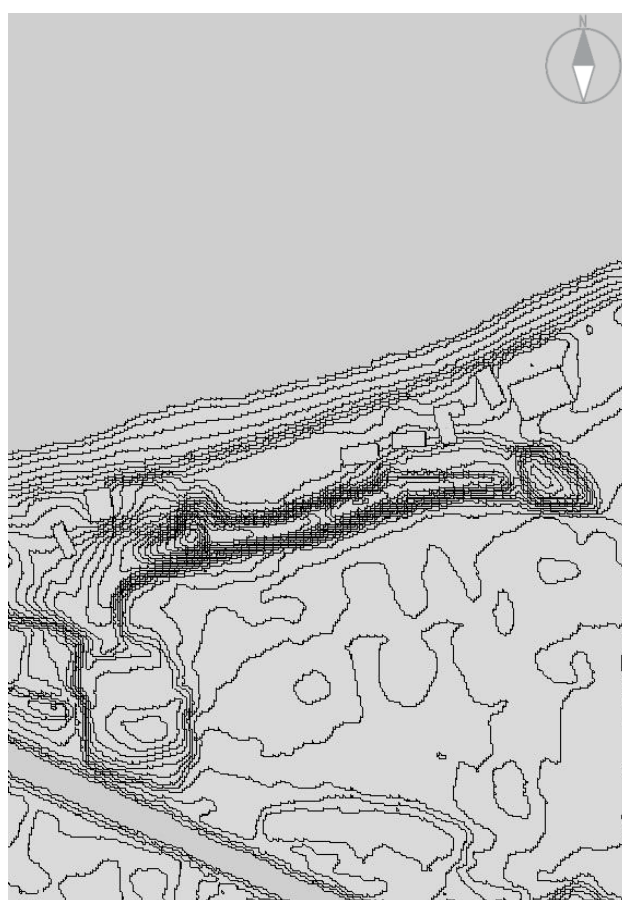


図-4.2 作成した地形モデル

表-4.3 計算条件まとめ

	代表粒径 D_1	代表粒径 D_2	代表粒径 D_3	代表粒径 D_4	代表粒径 D_5
風向	北寄りの風				
風速	10.3m/s				
沈降速度	1.38m/s	1.83m/s	2.36m/s	2.93m/s	3.62m/s
飛砂発生量	1kg/m ² s				
計算時間	1000秒				
時間刻み	0.1秒				

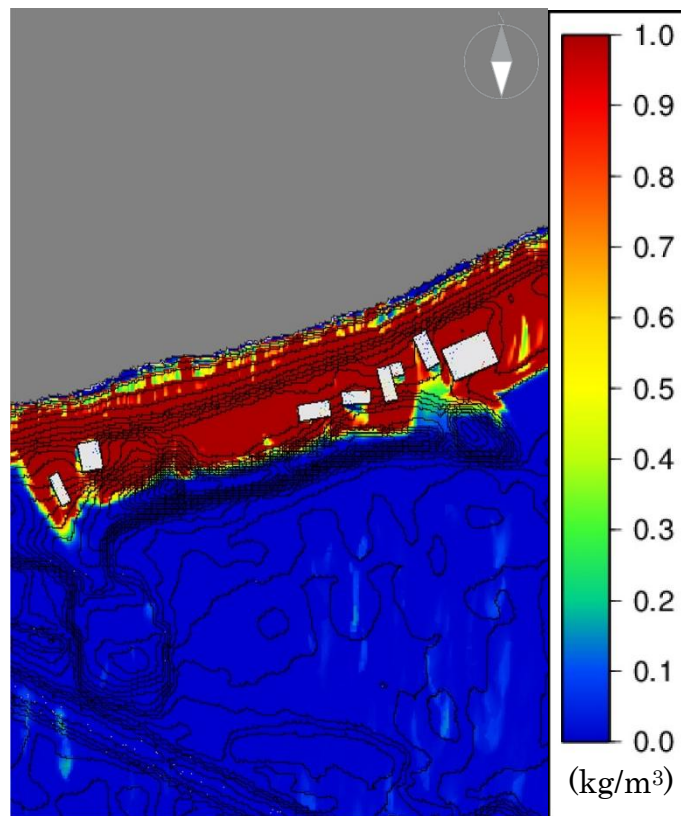


図-4.4(a) 地表面から 0.5m の高さにおける濃度の水平分布

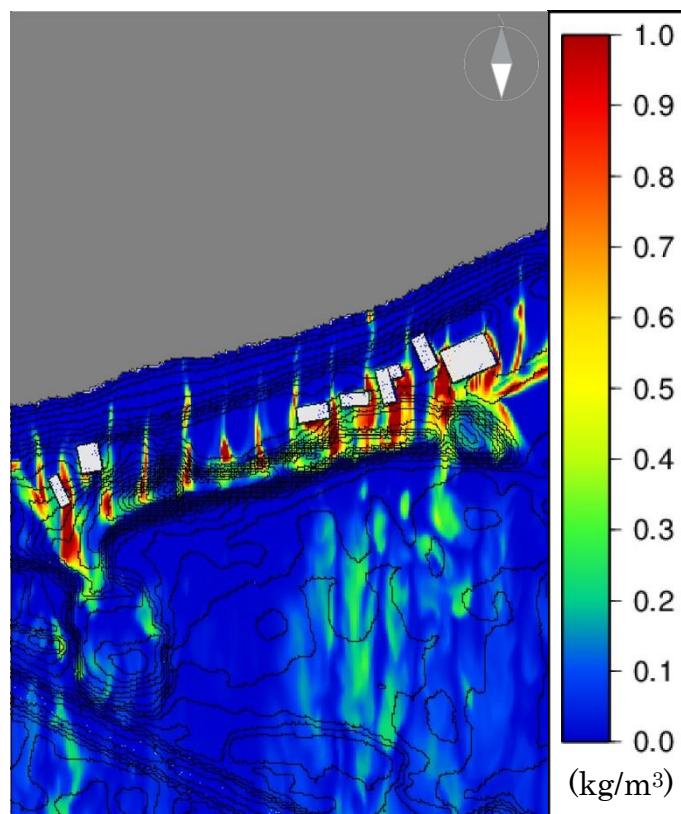


図-4.4(b) 地表面から 5.5m の高さにおける濃度の水平分布

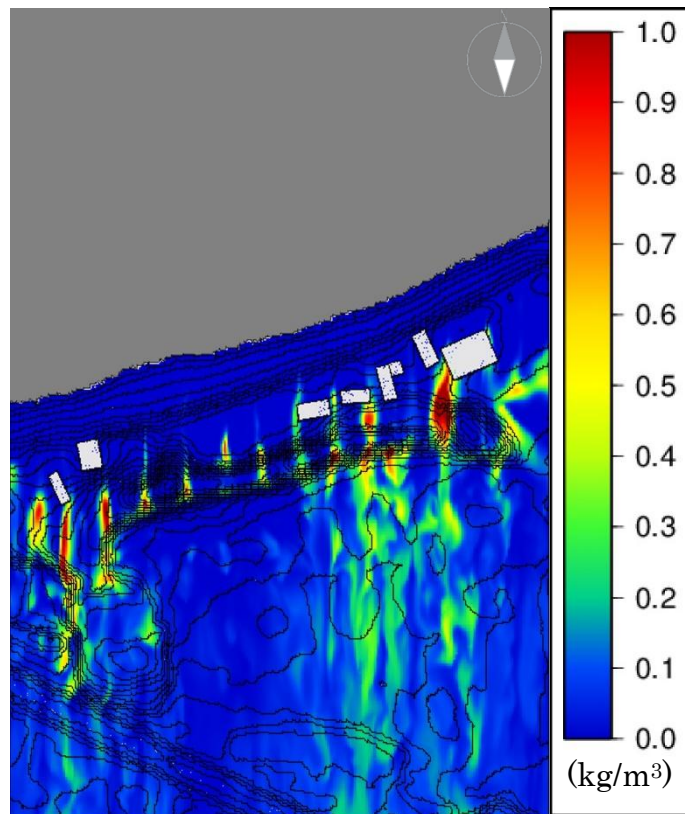


図-4.4(c) 地表面から 10.5m の高さにおける濃度の水平分布

第 5 章 対策工の検討

5.1 対策工について

新宮町の東側と西側には図-5.1, 図-5.2 で示すように海岸と住宅街を結ぶ道路が敷設されており, 第 4 章での計算結果から, 新宮町ではこの 2 本の道路から砂が住宅街へと進入していることが明らかとなった. 新宮町は北側が海に面しており北寄りの海風にさらされやすい立地であるが, この 2 本の道路はおおむね南北方向に走っているため, 砂が住宅街へ輸送されやすい環境にあると考えられる. 新宮町の立地と道路の向きが飛砂の被害を大きくしていると言える.

砂浜海岸からの飛砂の対策工としてはよく防砂ネットの設置や堆砂垣といった工法があげられる. しかしながら, これらの対策工は局所的であるうえ, メンテナンス等を考慮すると恒久的な対策工であるとは言い難い. そこで本研究では恒久的な飛砂被害の低減を見込んで海岸と住宅街を結ぶ道路の向きを変えた場合の検証を行う.

新宮町の現況の道路の向きを図-5.3 に示す. 図中の赤線が道路を表している. この道路の向きが飛砂の被害を大きくしていると考えられるため, 図-5.4 に示すように水色の領域に新たに樹林帯を設置し, 道路の向きをできるだけ風向きと平行にならないように変えた場合(対策工①とする)の飛砂輸送シミュレーションを行う. また, 新宮海岸の後方中央部には空地があり, この空地に樹木を植えることで住宅街へ飛ぶ砂の絶対量をさらに減らすことができると予想される. そこで図-5.5 に示すように黄色の領域に新たに樹林帯を配置した場合(対策工②とする)についてもシミュレーションを行う.

5.2 解析結果（対策工）

対策工①を施した場合の結果を図-5.6(a), 図-5.6(b), 図-5.6(c)に示す。これらは飛砂の濃度の水平分布を示しており, それぞれ地表面から 0.5m, 5.5m, 10.5m の高さにおける濃度分布である。

地表面から 0.5m の高さにおける濃度の水平分布である図-5.6(a)では, 現況の場合と同様に砂が住宅街までは輸送されずに海岸付近で滞留している。現況の場合は地表面から 5.5m, 10.5m の高さになると砂が道路から住宅街へと進入していたが, 対策工①を施した場合の結果である図-5.6(b), 図-5.6(c)をみると, 道路付近の濃度が大幅に低くなったことがわかる。これは道路の向きを変えたことで住宅街へと吹き抜けていた風が吹き抜けにくくなったことと, 道路脇の樹林帯に砂がトラップされたためだと考えられる。

道路の向きを変えることに加え空地に新たに樹林帯を設置した対策工②の場合の結果を図-5.7(a), 図-5.7(b), 図-5.7(c)に示す。これらも飛砂の濃度の水平分布を示しており, それぞれ地表面から 0.5m, 5.5m, 10.5m の高さにおける濃度分布である。

地表面から 0.5m の高さにおける濃度の水平分布である図-5.7(a)では, 現況の場合や対策工①を施した場合と同様に砂が住宅街までは輸送されずに海岸付近で滞留しているが, 新たに樹林帯を設置した空地付近の濃度が減る結果となった。これは空地に設置した樹林帯によって砂がトラップされたためである。図-5.7(b), 図-5.7(c)で示す地表面から 5.5m, 10.5m の高さにおいては現況の場合と比べると大幅に濃度が低くなっているが, 対策工①を施した場合とさほど変わらない結果となった。これは空地の風下にはすでに樹林帯があり, 元々ほとんど砂が住宅街へ進入していなかったためだと考えられる。現況の場合の濃度の水平分布をみても, 空地の風下にはほとんど砂が飛んでいないため, 新たに空地に樹林帯を追加しても防砂効果は薄いことが考えられる。

5.3 対策工の効果の検証

図-5.8 で示すように東側の道路付近に断面①を設け、この断面における飛砂の濃度の鉛直分布を示した。現況の場合と対策工①を施した場合を比較することで、道路の向きを変えろという対策工の効果について検証を行った。前節までの計算結果は重量比に応じて重ね合わせをした結果だけであったが、この節では対策工の効果と砂粒の大きさとの関係性も明らかにするために、各代表粒径における計算結果も比較対象とした。

現況の場合の断面①における濃度の鉛直分布を図-5.9(a)～図-5.9(f)に、対策工①を施した場合の断面①における濃度の鉛直分布を図-5.10(a)～図-5.10(f)に示す。なお、図-5.9(a)と図-5.10(a)が重量比に応じて重ね合わせをした結果であり、図-5.9(b)と図-5.10(b)が粒径の小さい D_1 の結果、図-5.9(f)と図-5.10(f)が粒径の大きい D_5 の結果という順番になっている。また、これらの鉛直分布の領域は高さが 100m、幅が約 500m である。

重ね合わせた結果である図-5.9(a)と図-5.10(a)を比べると、現況の場合である図-5.9(a)では砂が住宅街の奥部まで輸送されている。一方、道路の向きを変えた対策工①の場合である図-5.10(a)では、砂がほとんど住宅街に輸送されなくなり対策工による効果が発揮されていると言える。また、各代表粒径ごとの結果を比較すると、粒径が小さい図-5.10(b)よりも粒径が大きい図-5.10(f)に向かうほど、砂が輸送されにくくなっていることがわかる。これは粒径が大きいほど沈降速度が大きくなり、砂が巻き上がりにくくなるためだと考えられる。粒径が小さいと砂が舞い上がりやすくなり、樹林帯の上を超えて住宅街に進入してしまうが、粒径が大きいとさほど砂が舞い上がらずに、樹林帯で砂がトラップされるため、粒径が大きいほど対策工による効果が発揮されろと考えられる。

続いて現況の場合と対策工を施した場合で、どの程度飛砂の濃度が低減するかを明らかにするために以下の式を用いて低減率を算出し、平面分布で示した。

$$\text{低減率(\%)} = \left\{ 1 - \left(\frac{\text{対策工を施した場合の濃度}}{\text{現況の場合の濃度}} \right) \right\} \times 100 \quad (31)$$

その結果を図-5.11 と図-5.12 に示す。図-5.11 が対策工①での低減率を平面分布で示した図、図-5.12 が対策工②での低減率を平面分布で示した図であり、値が大きいほど対策工により砂の濃度が低減するということを表している。これらは地表面から 10.5m の高さにおける濃度を対象として低減率を計算している。

対策工①、対策工②ともに道路の背後の飛砂濃度が大幅に低減する結果となった。これは道路の向きを変えたことで住宅街へと吹き抜けていた風が吹き抜けにくくなったことと、道路脇の樹林帯に砂がトラップされたためだと考えられる。対策工②ではさらに空地に樹林帯を設置したため、空地後方の濃度が対

策工①よりも低減することが予想されたが、図-5.12 をみる限りでは大きな低減がみられなかった。これは空地の風下にはすでに樹林帯があり、元からほとんど砂が住宅街へ進入していなかったためだと考えられる。

道路の向きを変えるという対策工を施すことにより、道路背後の飛砂の濃度が大幅に低減することが明らかとなったが、住宅街全体でどの程度低減したかを明らかにするため、住宅街全体での平均の低減率を求めた。その結果対策工①では住宅街での飛砂の濃度が約 69%低減され、対策工②では約 72%低減することが明らかとなった。対策工②では道路の向きを変えることに加えて、さらに空地に樹林帯を設置したため、更なる飛砂濃度の低減が期待されたが、住宅街全体での平均の低減率は対策工①とさほど変わらない結果となった。空地に新たに樹林帯を設置したが、空地の後方に元からある樹林帯がすでに砂の住宅街への進入をある程度阻止しているため、それほど低減率が大きくならなかったと考えられる。



図-5.1 海岸と住宅街を結ぶ道（東側）



図-5.2 海岸と住宅街を結ぶ道（西側）

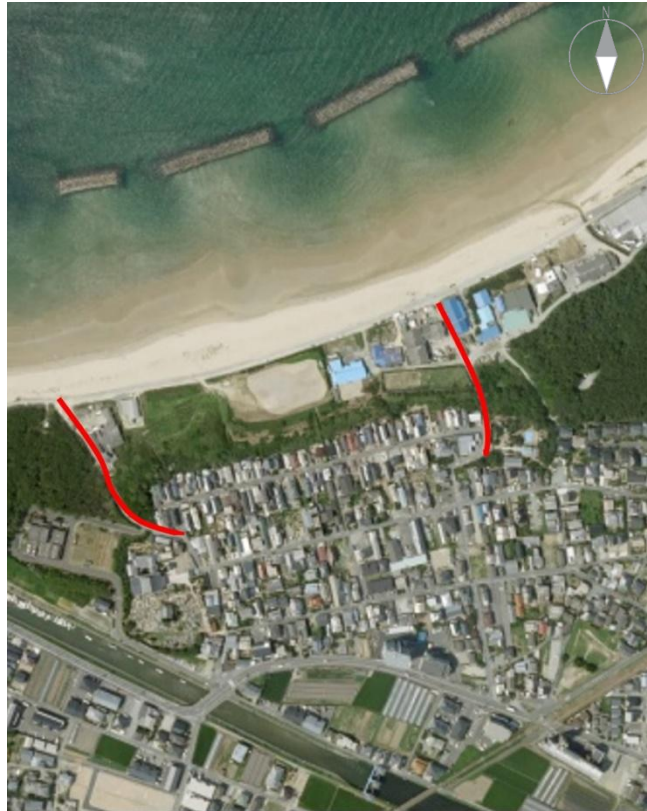


図-5.3 新宮町の現況の道路の向き

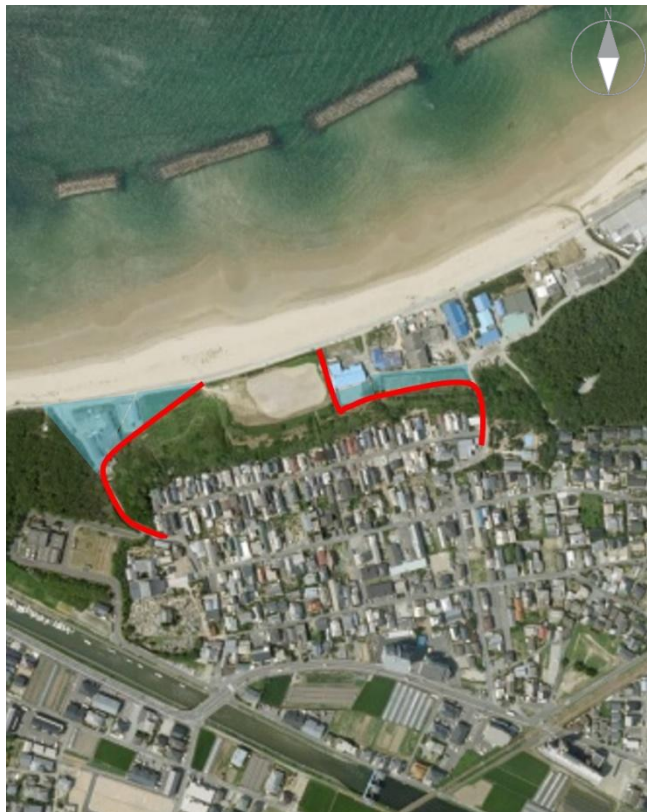


図-5.4 対策工①施工後の道路の向き

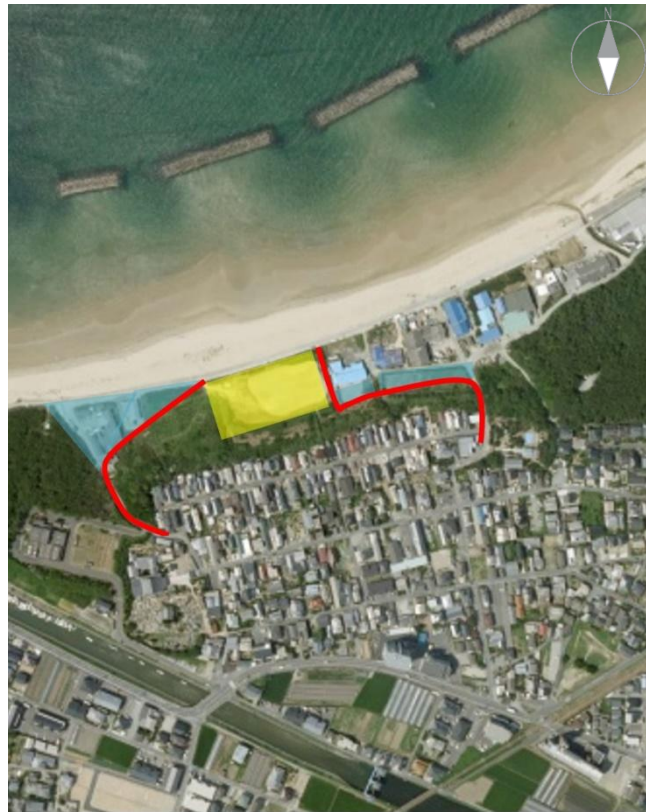


図-5.5 対策工②施工後の道路の向きと新たに設置した樹林帯

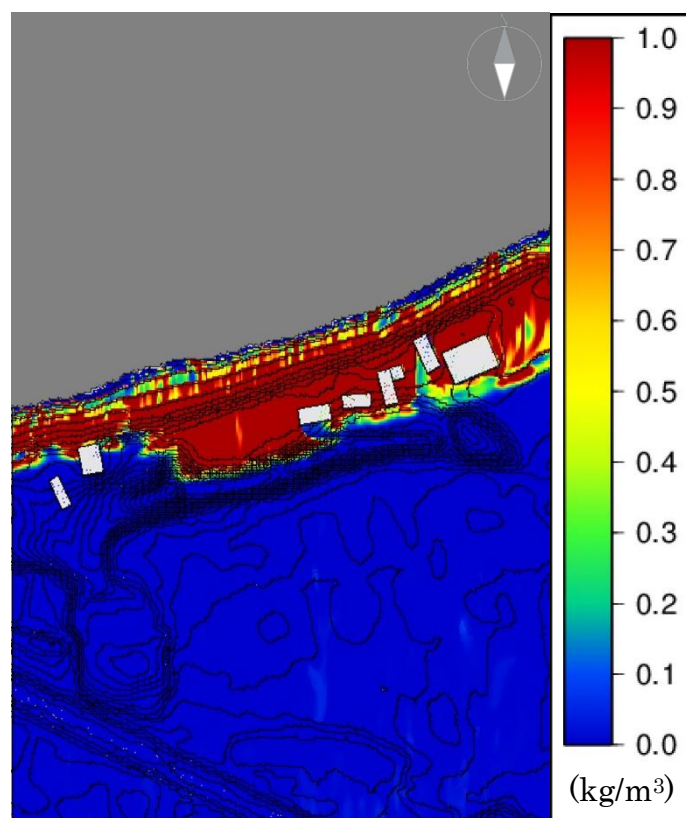


図-5.6(a) 地表面から 0.5m の高さにおける濃度の水平分布 (対策工①)

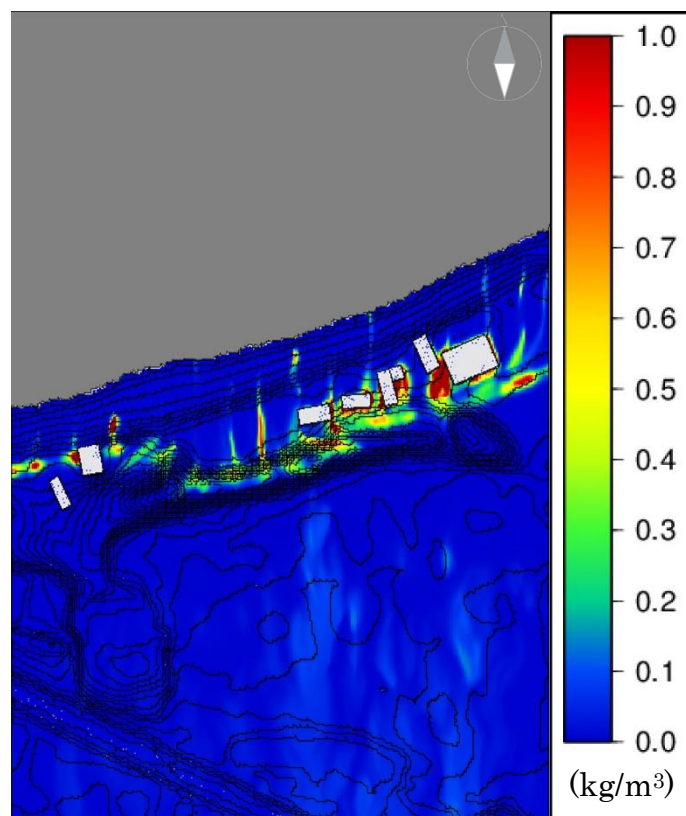


図-5.6(b) 地表面から 5.5m の高さにおける濃度の水平分布 (対策工①)

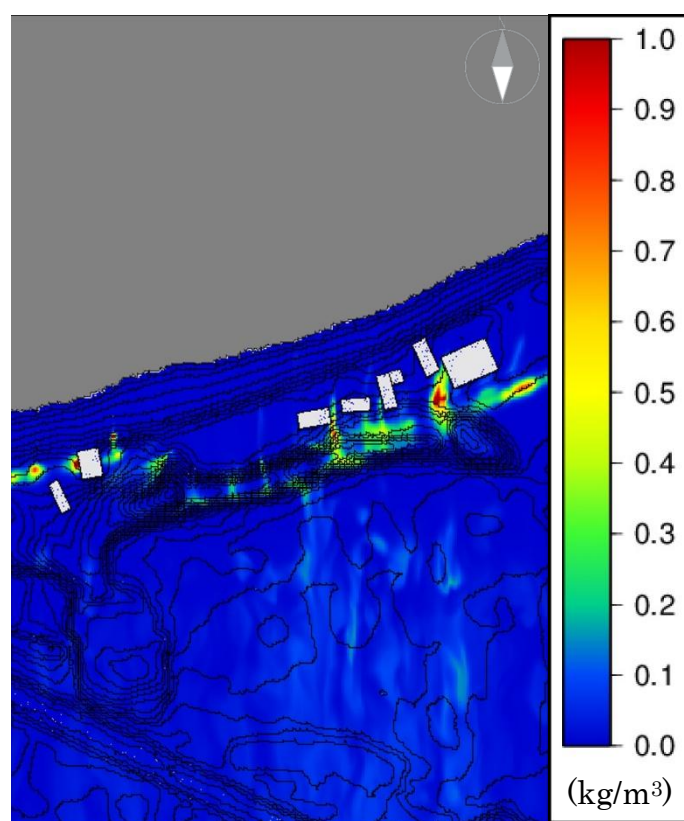


図-5.6(c) 地表面から 10.5m の高さにおける濃度の水平分布 (対策工①)

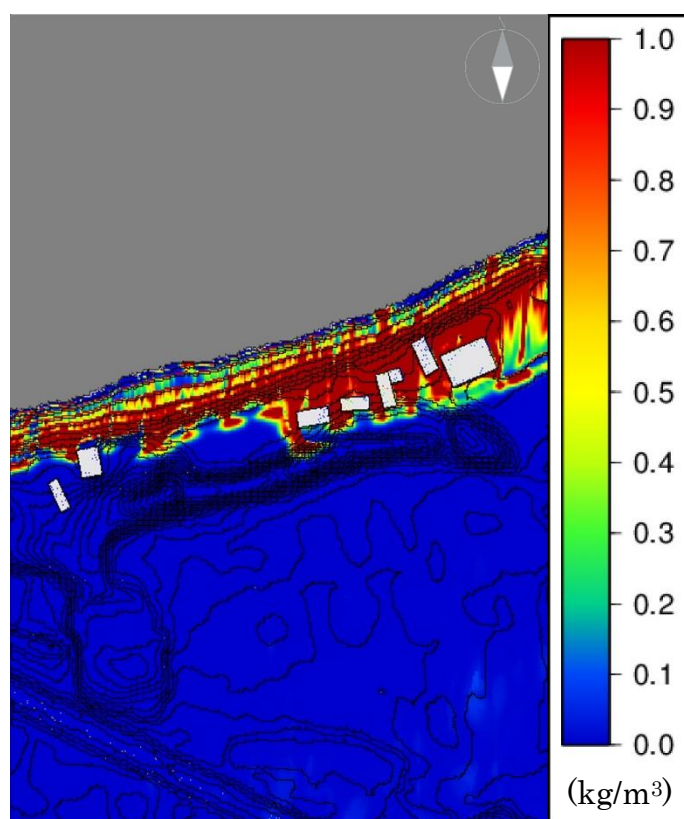


図-5.7(a) 地表面から 0.5m の高さにおける濃度の水平分布 (対策工②)

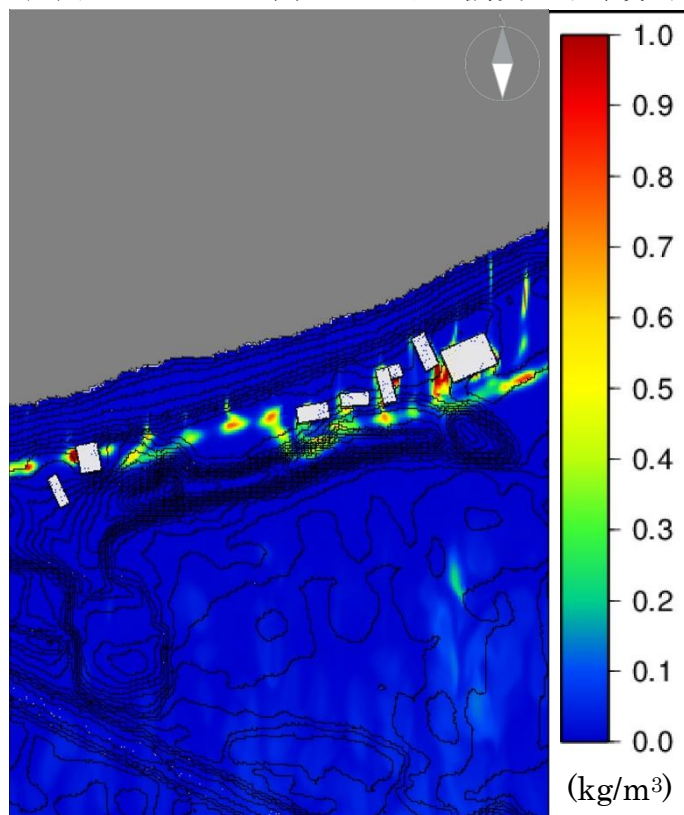


図-5.7(b) 地表面から 5.5m の高さにおける濃度の水平分布 (対策工②)

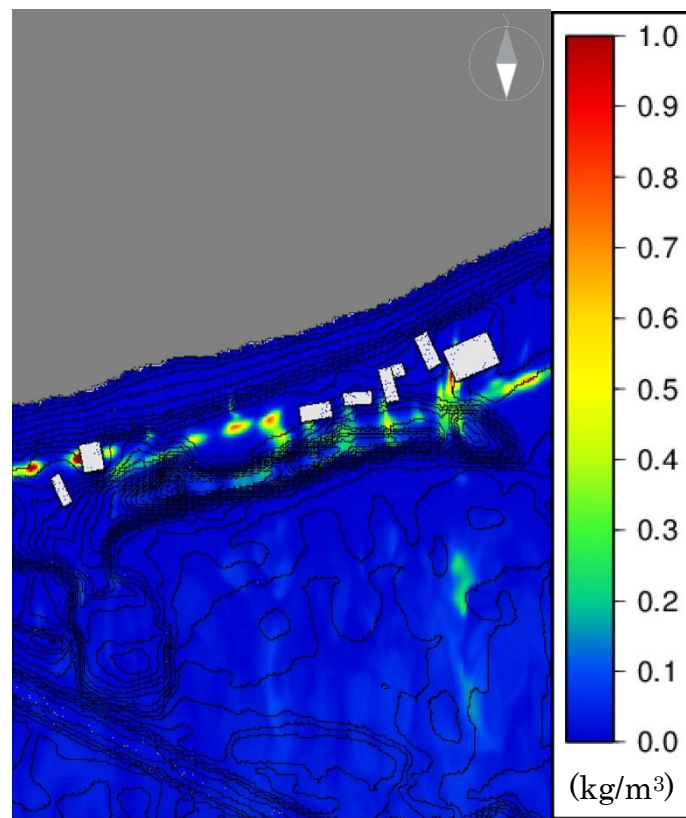


図-5.7(c) 地表面から 10.5m の高さにおける濃度の水平分布 (対策工②)



図-5.8 検証断面①

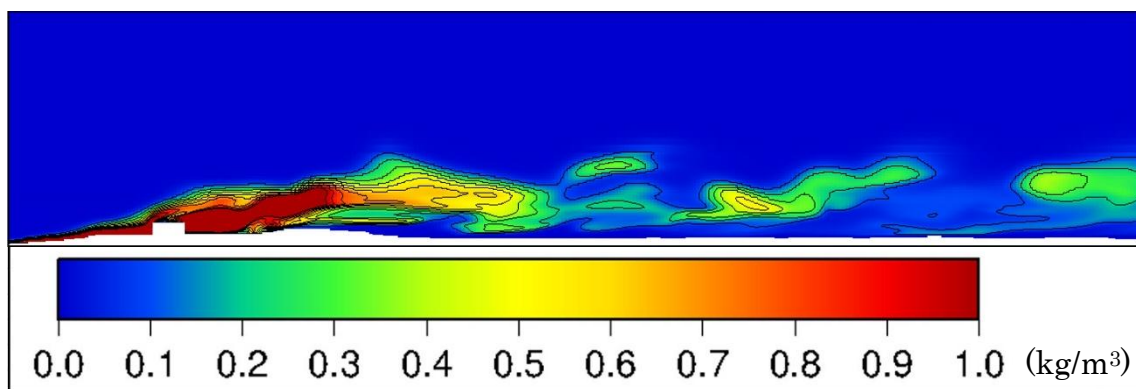


図-5.9(a) 断面①における濃度の鉛直分布（現況：重ね合わせ）

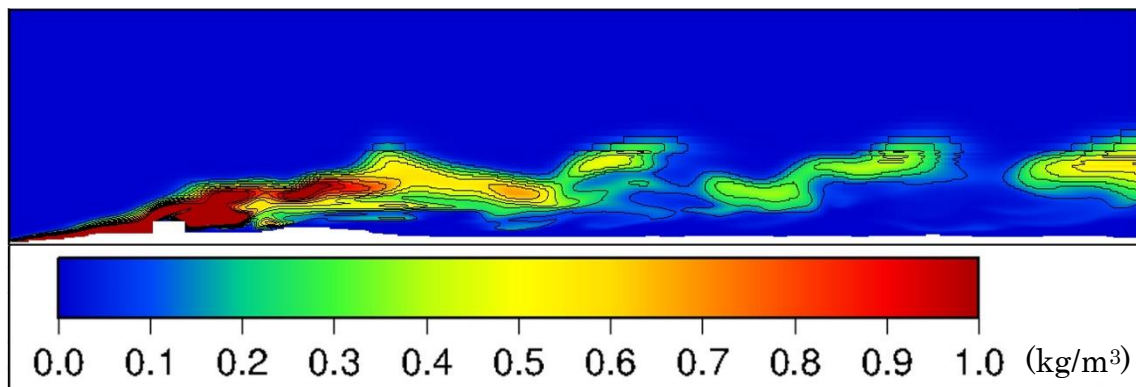


図-5.9(b) 断面①における濃度の鉛直分布（現況：粒径 D_1 ）

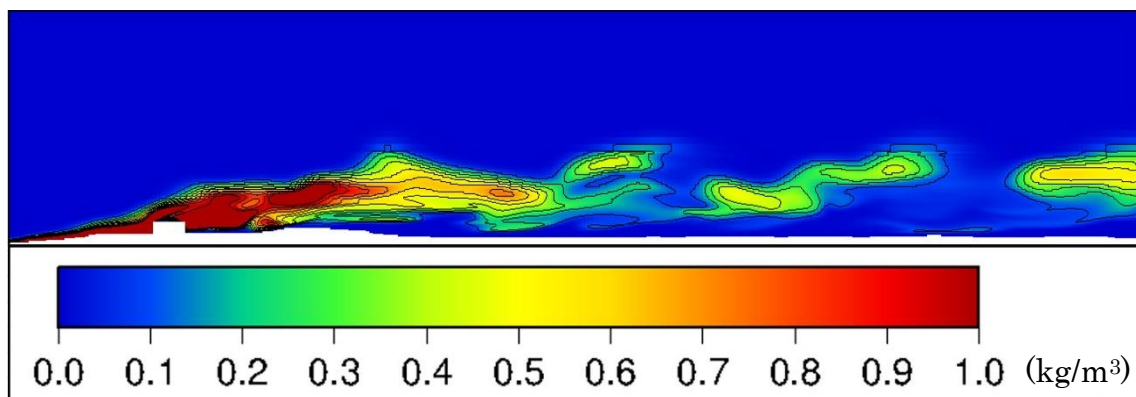


図-5.9(c) 断面①における濃度の鉛直分布（現況：粒径 D_2 ）

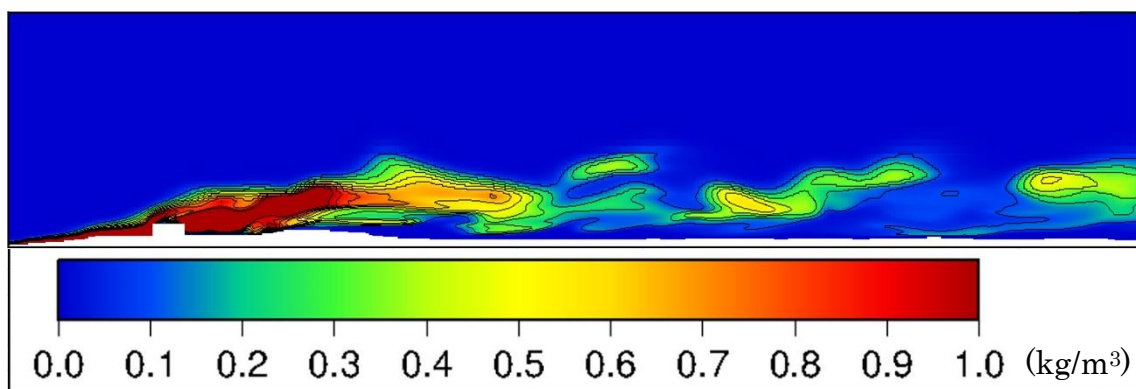


図-5.9(d) 断面①における濃度の鉛直分布（現況：粒径 D_3 ）

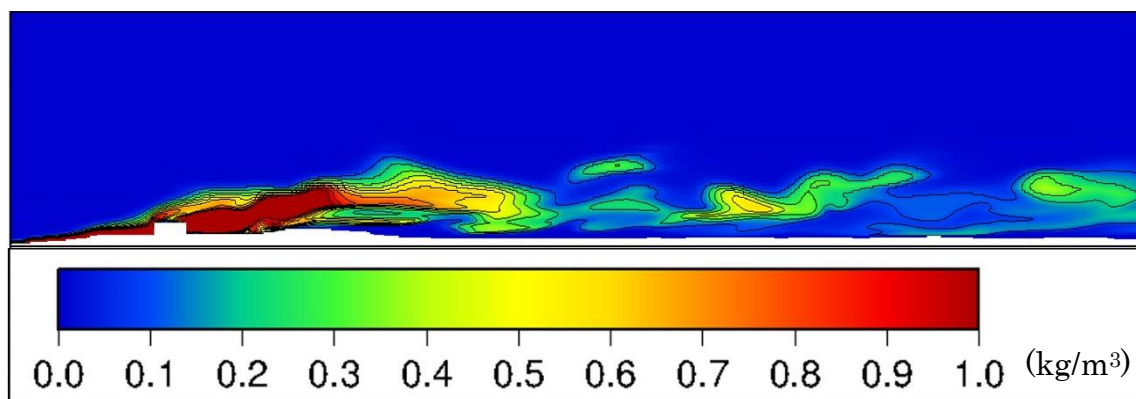


図-5.9(e) 断面①における濃度の鉛直分布（現況：粒径 D_4 ）

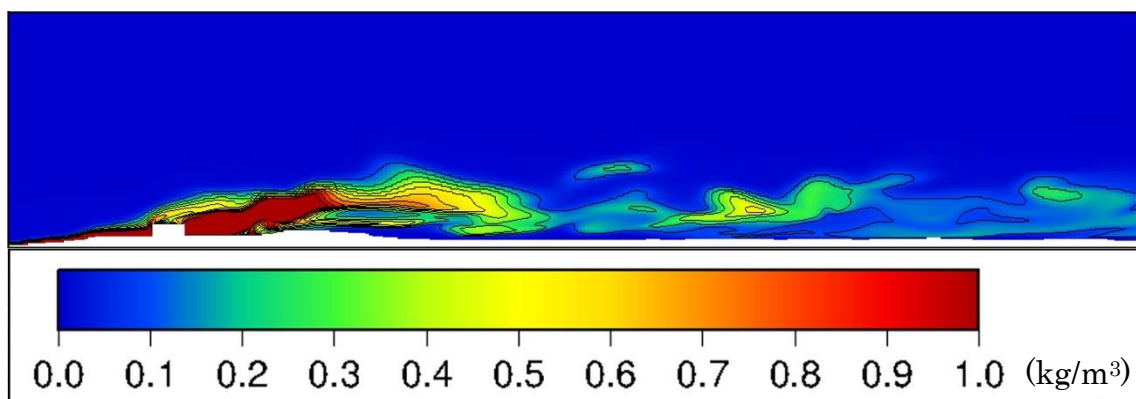


図-5.9(f) 断面①における濃度の鉛直分布（現況：粒径 D_5 ）

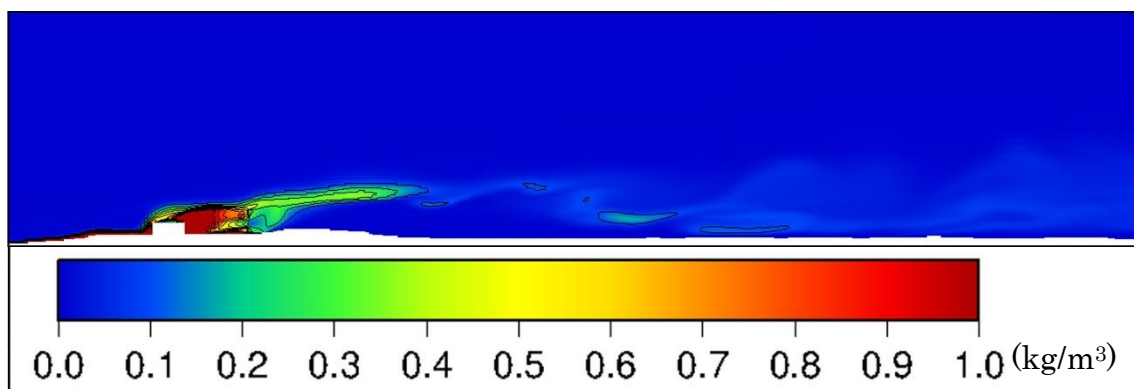


図-5.10(a) 断面①における濃度の鉛直分布 (対策工①：重ね合わせ)

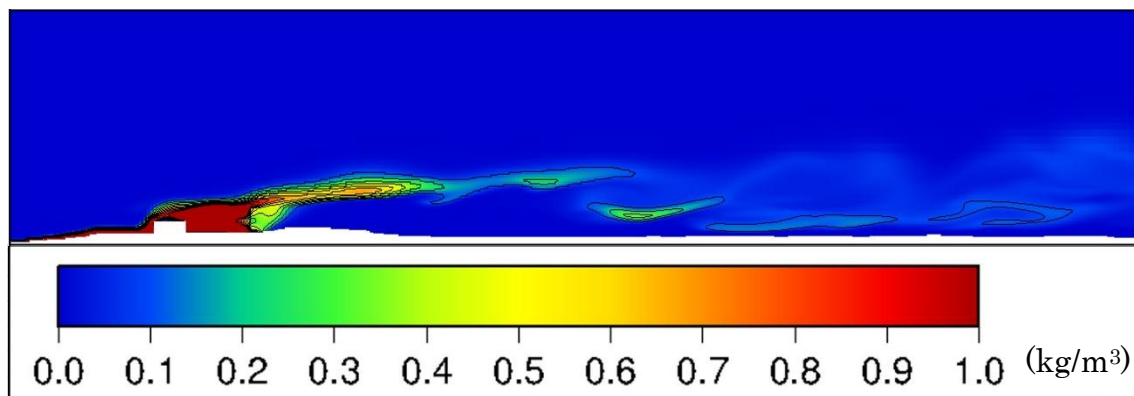


図-5.9(b) 断面①における濃度の鉛直分布 (対策工①：粒径 D_1)

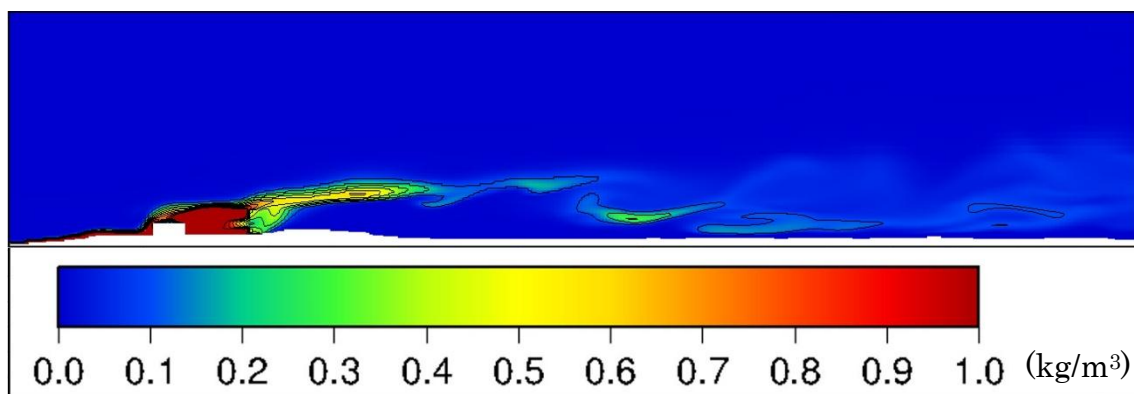


図-5.9(c) 断面①における濃度の鉛直分布 (対策工①：粒径 D_2)

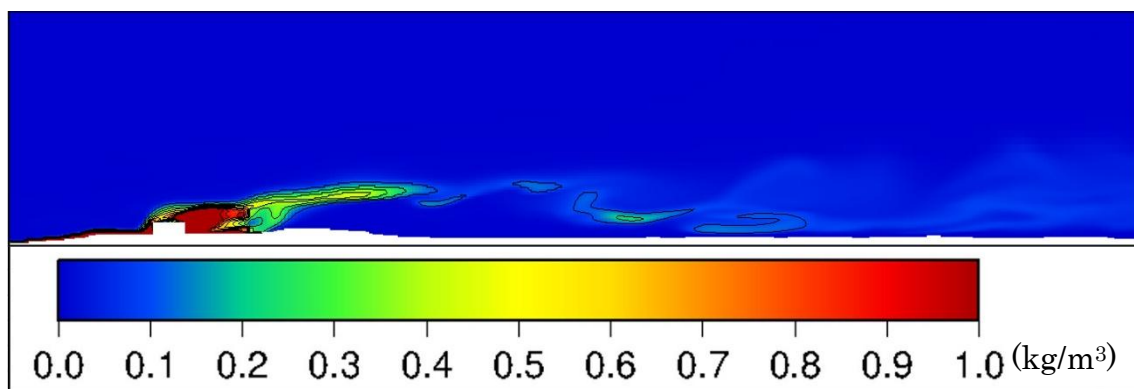


図-5.9(d) 断面①における濃度の鉛直分布 (対策工①：粒径 D_3)

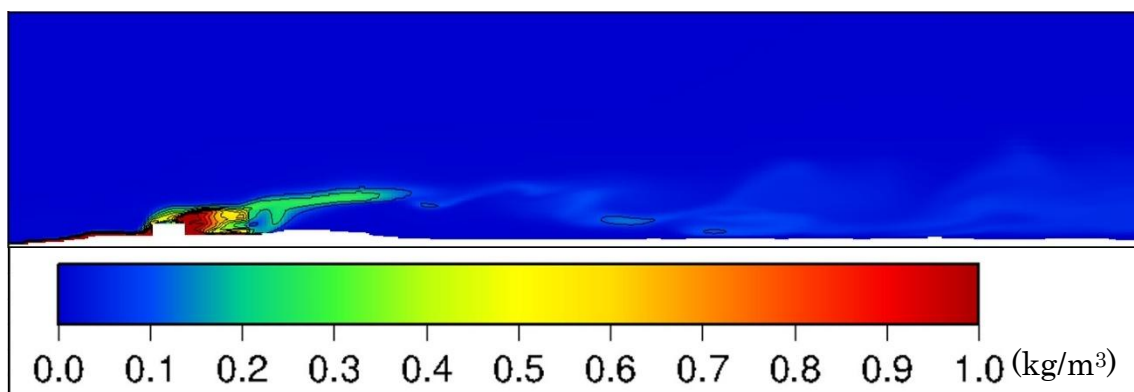


図-5.9(e) 断面①における濃度の鉛直分布 (対策工①：粒径 D_4)

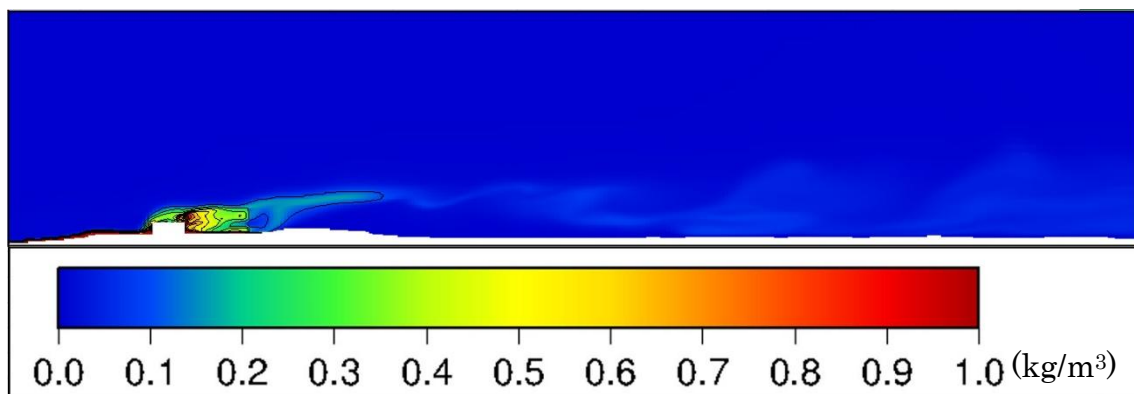


図-5.9(f) 断面①における濃度の鉛直分布 (対策工①：粒径 D_5)

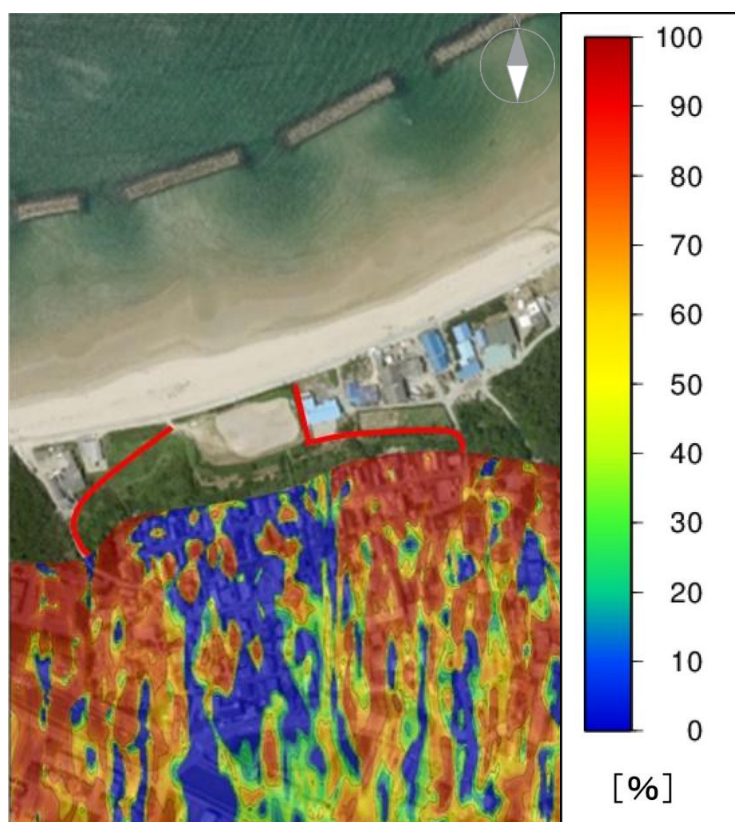


図-5.11 対策工①による低減率

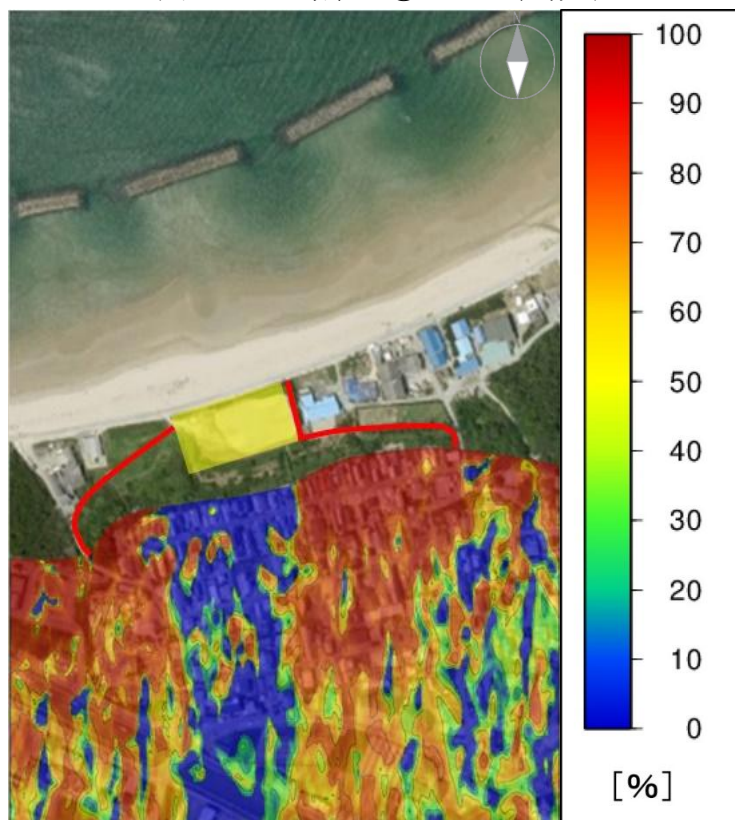


図-5.12 対策工②による低減率

第 6 章 結論

本研究では新宮海岸の砂を分析し粒度分布を明らかにしたのち、流体解析ソフトウェアを用いて粒度分布を考慮した飛砂輸送シミュレーションを行った。その結果、新宮町では新宮町の東側と西側に敷かれている海岸と住宅街を結ぶ道路から砂が進入し、住宅街へと広がっていることが明らかとなった。

飛砂の対策工としてはよく防砂ネットや堆砂垣といった案が挙げられるが、これらは局所的な対策に過ぎないうえ、メンテナンス等を考えると恒久的な対策工であるとは言い難い。そこで本研究では海岸と住宅街を結ぶ道路の向きを変える、道路の向きを変えつつ空地にさらに樹林帯を設置するという 2 つの対策工を提案し、その効果の検証を行った。その結果、どちらの対策工も道路後方の飛砂の濃度が大幅に低減する結果となった。住宅街全体の平均の低減率を計算したところ、道路の向きを変えると対策工を施す前よりも約 69%低減し、さらに空地に樹林帯を設置すると約 72%低減することが分かった。この結果から、海岸と住宅街を結ぶ道路の向きを変えるだけで大幅に飛砂による被害を小さくできることが分かった。

新宮海岸は白い砂浜と青い松原が特徴的で県内屈指の白砂青松と言われるほど美しい海岸である。同時に飛砂の被害が発生しており、住民から有効な対策工の実施が求められているが、対策工によって新宮海岸の美しい景観を損なうようなことがあってはならない。この状況に対して、本研究で提案した道路の向きを変えるという対策工は、新宮海岸の景観を損なうことがないうえ、即効性があり、かつ恒久的な飛砂対策となりうる。また、空地に新たに樹林帯を設置するという対策工は、防砂目的だけではなく、白砂青松をより一層際立たせ、ますます美しい海岸を創生する効果がある。したがって新宮町においては、道路の向きを変えると同時に、時間をかけて新たな樹林帯を整備し育てていくことが、自然海浜の創生と飛砂問題との両立を可能にする効果的な対策工である。

参考文献

- (1) 株式会社三洋コンサルタント: “指宿港海岸（湯の浜地区）飛砂対策検討調査報告書”(2016)
- (2) 北九州市建設局公園緑地部みどり・公園整備課 株式会社三洋コンサルタント: “ひびきコスモス公園防塵対策検討業務委託報告書”(2017)
- (3) 一般財団法人九州環境管理協会: “新宮海岸飛砂防止対策調査業務報告書”(2013),9-11
- (4)Yoshinobu Yamamoto and Tomoaki Kunugi: “*Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Deformed Bubbles*”, PROGRESS IN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY,2(2011),548
- (5)Bagnold.R.A: “*The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*”,(1973),67
- (6)河村竜馬: “飛砂の研究”,東京大学理工学研究所報告,5(1951),103
- (7)梶島岳夫: “乱流の数値シミュレーション”,養賢堂,(2014)207-217.
- (8)G.J.Mayhead: “*Some drag coefficients for british forest trees derived from wind tunnel studies*” Agricultural Meteorology,12(1973),126.

謝辞

本研究を遂行し論文の作成するに当たり、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました指導教員の松永信博教授, Eljamal Osama 准教授に心から感謝申し上げます。

松永信博教授には研究の進め方やまとめ方に方向性を与えてくださったことに加え、研究に対する心構えや取り組み方のご指導頂きました。また、学生生活面においても数多くの有益なご指導を頂き、今後の人生の大きな糧となりました。ここに心から感謝の意を表します。Eljamal Osama 准教授にはゼミ等を通して、新たな観点から物事を考えることや、あらゆる人に分かりやすく伝えることの大切さをご指導いただきました。ここに心から感謝の意を表します。

久田由紀子学術研究員には研究のサポートをして頂きました。ここに感謝の意を表します。有墨康子秘書には研究室での生活をサポートして頂きました。ここに感謝の意を表します。

環境流体科学研究室の修士課程 2 年の井上裕己、上枝健人氏、能塚寛紀氏、修士課程 1 年の大塚崇寛氏、新宅祐貴氏、高見誠也氏、平川裕基氏らにも研究や学生生活に関して様々なアドバイスを頂きました。ここに感謝の意を表します。

最後にこれまでの学生生活を温かく見守り支援してくださった両親に深い感謝の意を表して謝辞と致します。