

メッシュ分割された水平捕砂器による風向・飛砂量の測定

辻本 哲郎*・渡辺 治久**・西澤 謙二***

1. ま え が き

近年砂浜に隣接したリゾート、コミュニティ施設の開発により、より精度の良いかつ優雅な飛砂制御が要請されている。著者らはこうした観点から、風と飛砂を合理的に扱った理論的な研究を進めている（辻本・赤城、1993, 1994, 1995）が、現地への応用的な展開を考えると、飛砂の空間分布や、現場での詳細な飛砂観測などが必要となってきた。比較的風速場を乱さない水平捕砂器は流下方向に十分な長さを要するが、現場では風向があらかじめ想定しにくくまた細長いほど設置方向の風向とのずれによる誤差が大きい。本研究では、飛砂の運動特性の研究に基づき、水平捕砂器をメッシュ分割し、捕砂器に堆積する砂の空間分布から、飛砂量、風向を同時に計測しようとするものである。

本研究ではサルテーション状態で運動する飛砂を対象とし、その運動特性を用いて風向を変化させた場合のメッシュ分割された水平捕砂器の各メッシュに堆積する飛砂の量を解析的に求め、風洞実験で検証する。次にあらかじめわからない風向に対してメッシュ分割された捕砂器を設置した場合の各メッシュへの堆積量を測定することから風向、飛砂量を推定する方法について検討する。推定精度については先の風洞実験結果を用いて検討する。

2. 風 洞 実 験

風洞実験を対象にメッシュ分割された水平捕砂器を作成、ほぼ飛砂の平衡と考えられる区間においてまず風向と方向を一致させて設置、流下方向の堆積率分布を検討した。

実験で用いる捕砂器は、風向と平行に砂層に埋め込み飛砂を捕捉する水平型を使用する。これは、飛砂の移動が主として跳躍運動によってなされ、砂粒子の1回の飛行距離は小さいという事実より考案されたものである。ここでは、飛砂の流下傾向や捕捉分布形を見るため、捕

砂器を4×4のメッシュに区切ることにした。これは幅10 cm、長さ10 cm、深さ4 cmの厚紙で作られた箱（各箱の厚さは約0.5 mm）を並べたものを用いる（図-1参照）。

風洞は金沢大学工学部に設置された回流型のゲッチングン型風洞（図-2参照）を用いた。計測区間は高さ80 cm、幅80 cmである。上流端にはアクリル版に粗度付けた厚さ4.0 cmの固定床を1.0 mに亘り設置した。その固定床に続けて下流側に充分乾いた砂を厚さ4.0 cm、長さ3.5 mに亘って敷いて移動床とした。この砂は、石川県松任海浜公園で採取されたものであり、ふるい分け試験により中央粒径が約0.35 mmであることが確認されている。移動床上流端より3.0 mの地点に、水平型捕砂器を設置し、飛砂を捕捉する（図-3参照）。

設置角度は風向と平行に設置した時を0度とし、角度を0, 15, 30, 45度と変えて観測する。また、上流端より3 mの地点の砂面からの高さ40 cmの風速を代表風速 u_{40} とし、8.3, 9.3, 10.3 m/sの3種類の風速を各角度

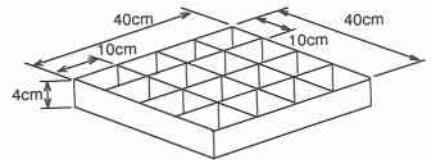


図-1 メッシュ分割された捕砂器

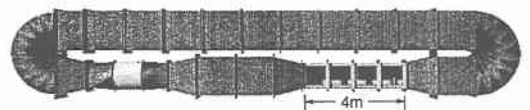


図-2 実験に用いたゲッチングン風洞

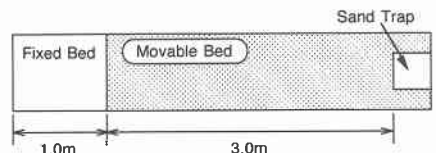


図-3 風洞内の砂面と捕砂器の設置

* 正 会 員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

** 正 会 員 工修 (株)バシフィックコンサルタンツ水工部

*** 学生会員 金沢大学大学院学生 環境基盤工学専攻

ごとに吹かせて観測した。計測時間は基本的に2分としたが代表風速が9 m以上になると飛砂現象が顕著となるため、捕砂器が溢れそうになった時点で終了した。風速の測定には熱線風速計（RION 社 Tr 式）を用いた。

水平型捕砂器は平行に設置したときの流下方向に i 列、横断方向に j 列とする。捕砂器を風向に沿わせて設置した ($\theta=0$) ときの各風速ごとの、単位時間・単位面積あたりの飛砂捕捉量の流下方向の変化を、各メッシュごとの捕捉量を横断方向に平均して示すと図-4 のようになり、飛砂の捕捉量は捕砂器上流端よりほぼ指数関数的に減少する。これは飛砂のサルテーション長が指数関数的分布に従う（辻本・赤城, 1993, 1994；平均サルテ

ション長が粒径の数 100 倍程度）ことに対応したものと見える。

次に、水平捕砂器と風向との角度 θ をいくつか変えて設置し、各メッシュに堆積した単位時間当たりの砂量（乾燥質量）を測定した。その結果を図-5 に示す。角度、風速ごとの飛砂の堆積量の空間分布形は、角度が増加するにつれて、新たに風に面することになる $j=4$ での飛砂捕捉量の増加で特徴付けられる。

3. 捕砂器への堆積現象の解析

水平捕砂器を風向と角度 θ を変えて設置した場合を想定し、水平捕砂器の上流端からの距離とともに指数関数的に減少しながら堆積する飛砂挙動をシミュレートして、各メッシュに堆積する砂量を計算、各メッシュの堆積率分布を算定することを考えた。

まず、飛砂のサルテーション長が指数関数分布をすることから、また、水平型捕砂器を角度 0 度設置したときの流下方向捕捉分布より、飛砂は水平型捕砂器の上流端から距離とともに指数関数的に減少しながら堆積すると仮定し、単位時間・単位面積当たりの飛砂量を次式で与える。

$$q_b(x) = \frac{q_{se}}{B} \exp\left(-\frac{x}{B}\right) \dots\dots\dots (1)$$

図-4 捕砂器への飛砂堆積量の縦断方向分布 ($\theta=0$ の場合)

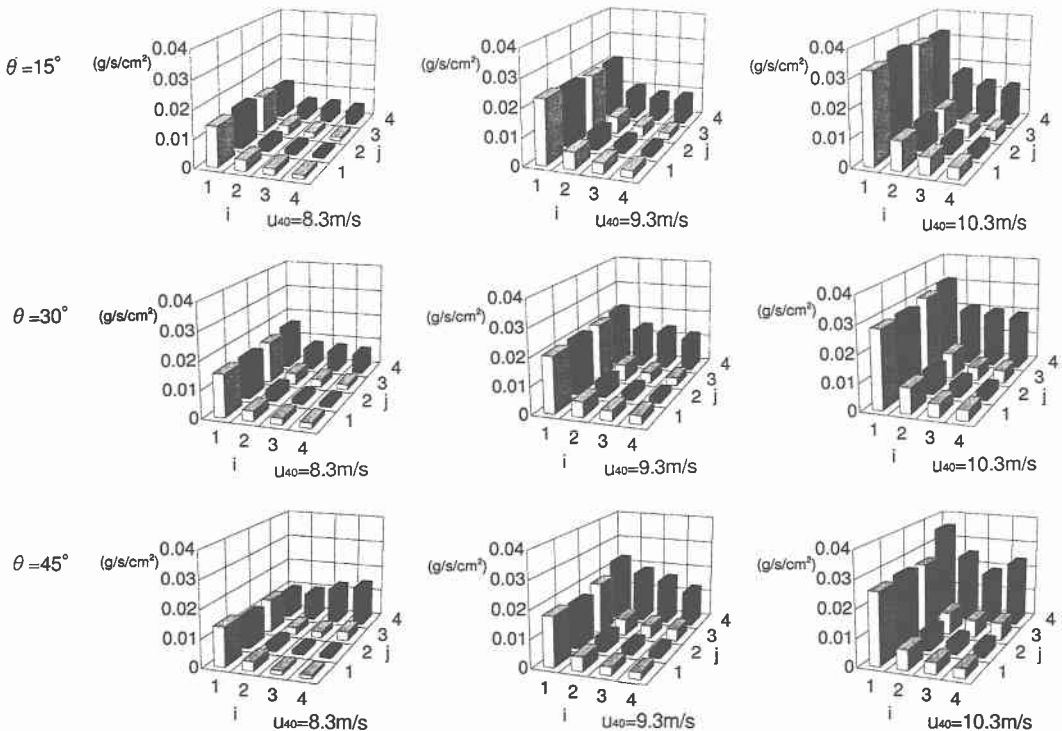
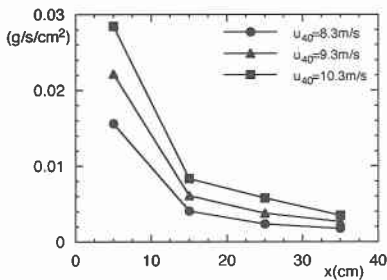


図-5 捕砂器への堆積量の空間分布

ここで, q_{se} : 平衡飛砂量 (乾燥質量で表示: g/s/cm),
 B : サルテーション長に基づく長さスケールで粒径の数
 100 倍程度である。

捕砂器全体に捕捉される飛砂の量 (g/s) の議論を進めるに当たり, 以下の条件を与える。

(i) 初期設定として, 捕砂器は辺長 l の正方形の箱を平行に設置し流下方向に n 個, 横断方向に m 個並べる。そして, 風向より徐々に傾いていき角度 θ の状態を想定する。

(ii) 捕砂器周辺は平衡状態とし, 捕砂器上流端から式 (1) で与えられたように飛砂が堆積していくものとする。

捕砂器上流端からの距離をそろえると, 水平捕砂器全体の飛砂の堆積量 Q_b (g/s) は, 以下の積分式で与えられる。

$$Q_b = \int_0^{nl/\cos\theta} \int_{\sin\theta \cos\theta x}^{-\sin\theta \cos\theta x + l(m \cos\theta + n \sin\theta)} q_b(x) dz dx \quad \cdots (2)$$

これを式 (1) を用いて整理すると,

$$\begin{aligned} f(\theta) &\equiv \frac{Q_b}{q_{se}} \\ &= 2nl \sin\theta + \{l(m \cos\theta - n \sin\theta) - B \sin 2\theta\} \\ &\quad \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{nl}{B \cos\theta}\right)\right\} \quad \cdots (3) \end{aligned}$$

となり, 捕砂器の大きさが既知であれば, 平衡飛砂量 q_{se} と角度 θ の関数で表される。

各メッシュに単位時間あたり捕捉される飛砂の量 Q_{bij} (g/s) を考える場合 (Q_{bij} の総和が Q_b), 格子状水平型捕砂器は風向から傾くにつれて各メッシュごとに捕砂器上流端からの距離が変わるので, 各メッシュごとの捕捉量を見積もるには, 5 つの場合分けが必要となる。それぞれの場合において各メッシュの飛砂の堆積量を見積る。先ほどと同様の条件を与え, 流下方向に i 番目, 横断方向に j 番目のメッシュについて議論を進める。ここで θ は 0 度から 45 度までの範囲で考える。

すなわち, (i) $0 \leq \theta \leq \angle PQA$ のとき, (ii) $\angle PQA < \theta \leq \angle PQB$ のとき, (iii) $\angle PQB < \theta \leq \angle PQD$ のとき, (iv)

$\angle PQD < \theta \leq \angle PQC$ のとき, (v) $\angle PQC < \theta$ の 5 つの場合分けに対して流下方向に i 番目, 横断方向に j 番目メッシュの飛砂の捕捉量は, 文末の付表に示すように求められる (図-6 を参考に計算)。ここで Q_{bij} と q_{se} の比を $g_k(\theta)$ で表現し, 添字 $k(k=1, \dots, 5)$ は上述の 5 ケースに対応している。

今回の実験では 0 度から 45 度までの範囲で考えているが, 測定された堆積量空間分布からの風向推定の際には, 誤差に配慮し, -45~0 度及び 45~90 度の領域についても検討する必要がある。-45~90 度の範囲で上述の 5 つのケースの出現をパターンで表示したのが図-7 で, -45~0 度及び 45~90 度の範囲での, ●, ▲, ■, ◆ における分布率の変化はそれぞれ 0~45 度の基本パターンの■, ◆, ●, ▲; ◆, ▲, ■, ●の分布率の変化と同じである。このような対応関係を用いて -45~90 度の範囲で堆積量空間分布を表現することができる。

4. 飛砂の堆積分布率

捕砂器全体の飛砂の堆積量に対する各メッシュごとの飛砂の堆積量を, 堆積分布率 p_{cij} とすると, これはパターン k 別に次式のように, 角度 θ のみの関数で表される。

$$p_{cij} = \frac{Q_{bij}}{Q_b} = \frac{q_{se} g_k(\theta)}{q_{se} f(\theta)} = \frac{g_k(\theta)}{f(\theta)} \equiv \xi_{ij}(\theta) \quad \cdots (4)$$

このことから, 堆積分布率より角度を推定することが可能であると考えられる。この堆積分布率は, 各メッシュごとに異なった曲線を示す。また, このようにして求められた堆積分布率の空間分布形は, 図-8 のようになり, 実験結果を整理した図-9 とよく一致している。

5. 飛砂量と風向の推定

捕砂器の各メッシュに堆積した砂量の総和 Q_b (単位時間あたり) が測定されると, 飛砂量 q_{se} (単位幅・単位時間あたりの通過量) は式 (3) で与えられる $f(\theta)$ を用いて次式で求められる。

$$q_{se} = Q_b \cdot f(\theta) \quad \cdots (5)$$

一方, 風向は捕砂器へ堆積した砂のメッシュへの分布率 p_{cij} の実測値から式 (4) を用いて次のように $m \times n$ 個の風向推定値 θ_{ij} が求められ, ここではその平均値を推定

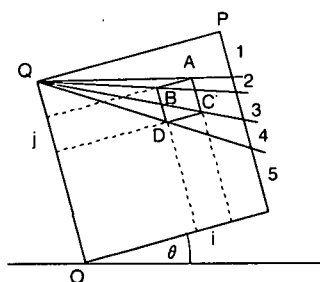


図-6 捕砂器内への堆積現象解析の説明図

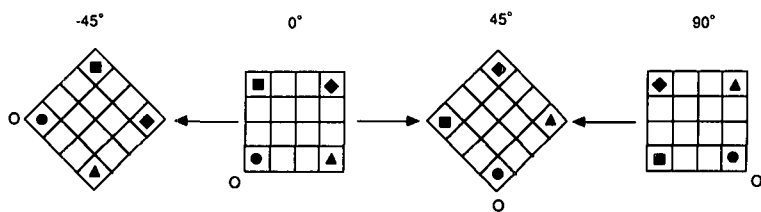


図-7 捕砂器メッシュへの堆積パターン説明図

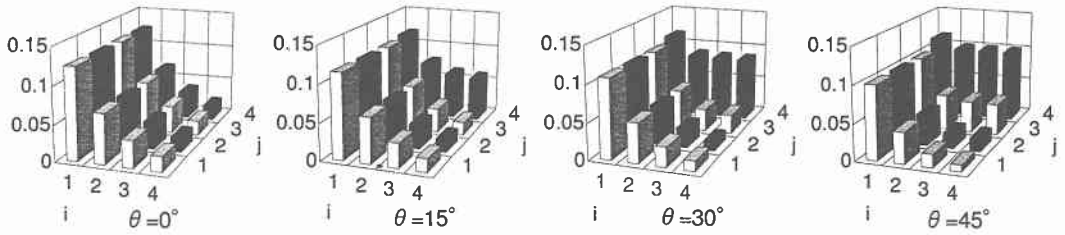
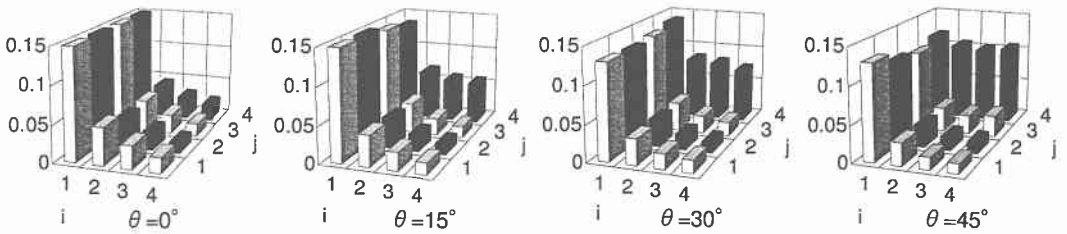
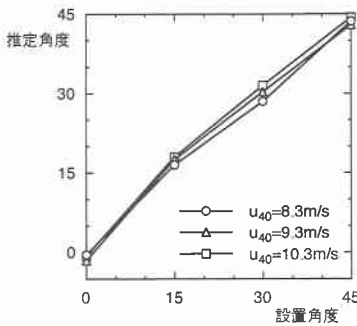
図-8 風向別堆積分布率の空間分布 p_{cij} の計算結果図-9 風向別堆積分布率の空間分布 p_{cij} の実験結果

図-10 風向推定精度

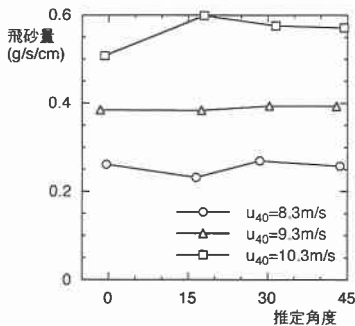


図-11 捕砂器設置角度と推定飛砂量

される風向 θ とした。

$$\theta_{ij} = \xi_{ij}^{-1}(p_{cij}) \dots\dots\dots (6)$$

関数 $\xi_{ij}(\theta)$ は式 (4) が示すように、式 (3) で与えられる $f(\theta)$ と付表で与えられるに $g_k(\theta)$ によって決まる。

図-10 は先述の風洞実験の各メッシュへの堆積飛砂

データ p_{cij} を用いて風向を推定した値と実験で設定された風向 (実際には捕砂器の設置角度) を比較することで、風向推定精度を検討したもので充分な信頼性があるものと判断される。また図-11 は本論文で示した方法での飛砂量推定値を設置角度 θ (風向) に対してプロットしたものである。実験は風洞で同じ飛砂条件の下で捕砂器の設置角度だけを変えて行ったものなので、図のように θ に対して推定飛砂量に変化しない (設置角度を変えても推定飛砂量は風向に合わせて設置した場合 ($\theta=0$) と変わらない) ことはここでの飛砂量推定法の信頼性を証明するものと言える。

6. 結 論

サルテーションから成り立っている飛砂では、捕砂器のようなトラップに上流端から指数分布で減衰するパターンで堆積すること、それがサルテーション長の分布に起因していることがわかった。したがって水平捕砂器を縦断方向に分割することによって、堆積分布を外挿してあるいはサルテーションについての知識から実際には捕捉しえなかった量も推定して、飛砂量の測定ができることがわかった。このことから、次に水平捕砂器を横断方向にも分割、結局メッシュ分割された捕砂器を試作した。捕砂器が風向に平衡に置かれていないと、横断方向に縦断方向堆積分布が異なることでチェックできる。

さらに、この堆積率の縦横断分布から風向と飛砂量を同時に測定する方法を提案した。サルテーション粒子の挙動をシミュレートして風向と捕砂器の設置角度ごとの堆積率のパターンと計算、風洞での実験により計算の再現性がすぐれていることを確認し、逆に任意の角度

で設置して得られた結果より風向、飛砂量を推定する方法を提案した。風洞実験結果を用いて推定精度を検証したところ、風向、飛砂量とも十分な精度で測定できることがわかった。今後、非平衡場において非平衡特性も含めた飛砂特性の把握のできる方法の開発に努めたい。

参 考 文 献

- 辻本哲郎・赤城里至 (1993): サルテーションモデルによる飛砂層の解析と飛砂量式, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 276-280.
 辻本哲郎・赤城里至 (1994): 不規則跳躍モデルと $k-e$ 乱流モデルを用いた飛砂の運動と風の解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 386-390.
 辻本哲郎・赤城里至 (1995): 非平衡状態の飛砂量分布と風速分布, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 466-470.

付表 パターン別のメッシュ堆積砂量空間分布

(i) $0 \leq \theta \leq \angle PQA$ のとき

$$\begin{aligned} Q_{bU} &= \int_{(i-1)l/\cos\theta}^{(i+1)l/\cos\theta} \int_{\sin\theta\cos\delta x + (j-1)l\cos\theta}^{\sin\theta\cos\delta x + jl\cos\theta} q_b(x) dz dx \\ &= q_{se} l \cos\theta \left\{ \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) - \exp\left(-\frac{il}{B\cos\theta}\right) \right\} \\ &\equiv q_{se} g_1(\theta) \dots\dots\dots (A1) \end{aligned}$$

(ii) $\angle PQA < \theta \leq \angle PQB$ のとき

$$\begin{aligned} Q_{bU} &= \int_{(i-1)l/\cos\theta}^{(m-j)l/\sin\theta} \int_{\sin\theta\cos\delta x + (j-1)l\cos\theta}^{\sin\theta\cos\delta x + jl\cos\theta} q_b(x) dz dx + \int_{(m-j)l/\sin\theta}^{(i+1)l/\cos\theta} \int_{\sin\theta\cos\delta x + (j-1)l\cos\theta}^{-\sin\theta\cos\delta x + il\sin\theta + ml\cos\theta} q_b(x) dz dx \\ &= q_{se} \left[\left\{ (m+1-j)l\cos\theta + il\sin\theta - B\sin 2\theta \right\} \exp\left(-\frac{(m-j)l}{B\sin\theta}\right) - \exp\left(-\frac{il}{B\cos\theta}\right) \right. \\ &\quad \left. - 2l\{(m-j)\cos\theta \exp\left(-\frac{(m-j)l}{B\sin\theta}\right) - i\sin\theta \exp\left(-\frac{il}{B\cos\theta}\right)\} + l\cos\theta \left\{ \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) - \exp\left(-\frac{(m-j)l}{B\sin\theta}\right) \right\} \right] \\ &\equiv q_{se} g_2(\theta) \dots\dots\dots (A2) \end{aligned}$$

(iii) $\angle PQB < \theta \leq \angle PQD$ のとき

$$\begin{aligned} Q_{bU} &= \int_{(m-j)l/\sin\theta}^{(i-1)l/\cos\theta} \int_{-\sin\theta\cos\delta x + (i-1)l\sin\theta + ml\cos\theta}^{-\sin\theta\cos\delta x + il\sin\theta + ml\cos\theta} q_b(x) dz dx + \int_{(i-1)l/\cos\theta}^{(i+1)l/\cos\theta} \int_{\sin\theta\cos\delta x + (j-1)l\cos\theta}^{-\sin\theta\cos\delta x + il\sin\theta + ml\cos\theta} q_b(x) dz dx \\ &= q_{se} \left[\left\{ (m+1-j)l\cos\theta - il\sin\theta - B\sin 2\theta \right\} \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) - \exp\left(-\frac{il}{B\cos\theta}\right) \right. \\ &\quad \left. + l\sin\theta \left\{ \exp\left(-\frac{(m-j)l}{B\sin\theta}\right) + \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) \right\} \right] \\ &\equiv q_{se} g_3(\theta) \dots\dots\dots (A3) \end{aligned}$$

(iv) $\angle PQD < \theta \leq \angle PQC$ のとき

$$\begin{aligned} Q_{bU} &= \int_{(m-j)l/\sin\theta}^{(i-1)l/\cos\theta} \int_{-\sin\theta\cos\delta x + (i-1)l\sin\theta + ml\cos\theta}^{-\sin\theta\cos\delta x + il\sin\theta + ml\cos\theta} q_b(x) dz dx + \int_{(i-1)l/\cos\theta}^{(m+1-j)l/\sin\theta} \int_{\sin\theta\cos\delta x + (j-1)l\cos\theta}^{-\sin\theta\cos\delta x + il\sin\theta + ml\cos\theta} q_b(x) dz dx \\ &= q_{se} \left[\left\{ (m+1-j)l\cos\theta + il\sin\theta - B\sin 2\theta \right\} \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) - \exp\left(-\frac{(m+1-j)l}{B\sin\theta}\right) \right. \\ &\quad \left. - 2l\left\{ (i-1)\sin\theta \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) - (m+1-j)\cos\theta \exp\left(-\frac{(m+1-j)l}{B\sin\theta}\right) \right\} + l\sin\theta \left\{ \exp\left(-\frac{(m-j)l}{B\sin\theta}\right) - \exp\left(-\frac{(i-1)l}{B\cos\theta}\right) \right\} \right] \\ &\equiv q_{se} g_4(\theta) \dots\dots\dots (A4) \end{aligned}$$

(v) $\angle PQC < \theta$ のとき

$$\begin{aligned} Q_{bU} &= \int_{(m-j)l/\sin\theta}^{(m+1-j)l/\sin\theta} \int_{-\sin\theta\cos\delta x + (i-1)l\sin\theta + ml\cos\theta}^{-\sin\theta\cos\delta x + il\sin\theta + ml\cos\theta} q_b(x) dz dx \\ &= q_{se} l \sin\theta \left\{ \exp\left(-\frac{(m-j)l}{B\sin\theta}\right) - \exp\left(-\frac{(m+1-j)l}{B\sin\theta}\right) \right\} \\ &\equiv q_{se} g_5(\theta) \dots\dots\dots (A5) \end{aligned}$$