

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

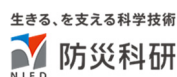
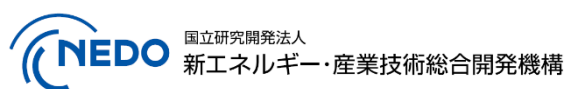
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023 年版

技術資料：

実在地形における風速増加に関する数値流体解析

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。

2023 年 4 月 28 日



実在地形における風速増加に関する数値流体解析

1. 概要

静岡県伊東市の太陽光発電設備において、2019年台風19号にともなう強風により、太陽電池モジュールの飛散被害が生じた。ここでは、当時の施設周辺の気流性状を知るため、変動風速場を再現することのできる、ラージエディシミュレーション(以下ではLESと表記)を用いた数値解析による周辺気流の再現計算を行った。解析に際しては、当該地域が林を切り開いた山の斜面にあり、接近流も山地を越えてくる場合があるため、周辺の地形の凹凸の影響、および、植生の気流に及ぼす影響を取り込む必要がある。そのため、解析領域は発電施設付近だけでなく、周辺の山の起伏の影響が敷地に吹き付ける風に及ぶ程度、遠方まで広げて設定した解析を行った。さらに、地面上の植生の影響も取り込めるようにするため、植物による抵抗を取り込むことのできるキャノピーモデルをLESに用いた解析を行った。また、それらの結果をもとに数値流体解析手法の要点について整理した。

2. 計算方法

2.1 解析対象

2019年19号台風により被害(図2-1)を被った伊東市の太陽光発電設備周辺の風況を再現するため、付近の地形および植生を取り込んだ解析領域を設定し、植生による抵抗の影響を取り込むことのできるキャノピーモデルを用いたLESによる数値計算による解析を行った。



2019年10月(被害直後の状況) 田久保氏提供 *1



図 2-3 太陽光発電設備に接する道路から写したパノラマ写真
正面（南東方向）に大島が見える

発電設備の背面は南から西方向に山地が続いているので、周囲の地形は接近風の気流性状に影響を与え、その影響は方角によって異なると考えられる。そこで今回の解析では、周囲の地形の気流性状に対する影響を取り込むために、解析対象周囲の 6km 四方の領域の地形を再現した。計算は初めに、地表面の粗度の影響を無視した地表面条件（滑面条件）で周囲の地形の影響を取り込むための計算を行った。その後、太陽光発電設備周辺の詳細な解析を行うために、2km 四方の領域を地形だけでなく地表面の植物粗度の影響をキャノピーモデルで取り込んだ計算を行った。

2.3 計算格子

数値流体解析に用いた計算格子は、図 2-4, 2-5, 2-6 に示すような 6km 四方の大領域と 4km 四方の小領域を対象に作成された。大領域における水平方向の計算格子幅は 20m、小領域における水平方向の計算格子幅は 5m としている。高さ方向の計算格子は、大領域および小領域で同じものを用いており、地面付近で最小 1m、上空 2132m まで、高くなるにつれて格子幅が大きくなる不等間隔格子を用いている。なお、座標原点は太陽光発電設備に接する道路からの入り口の地表面（高さ 0m）の地点とした。

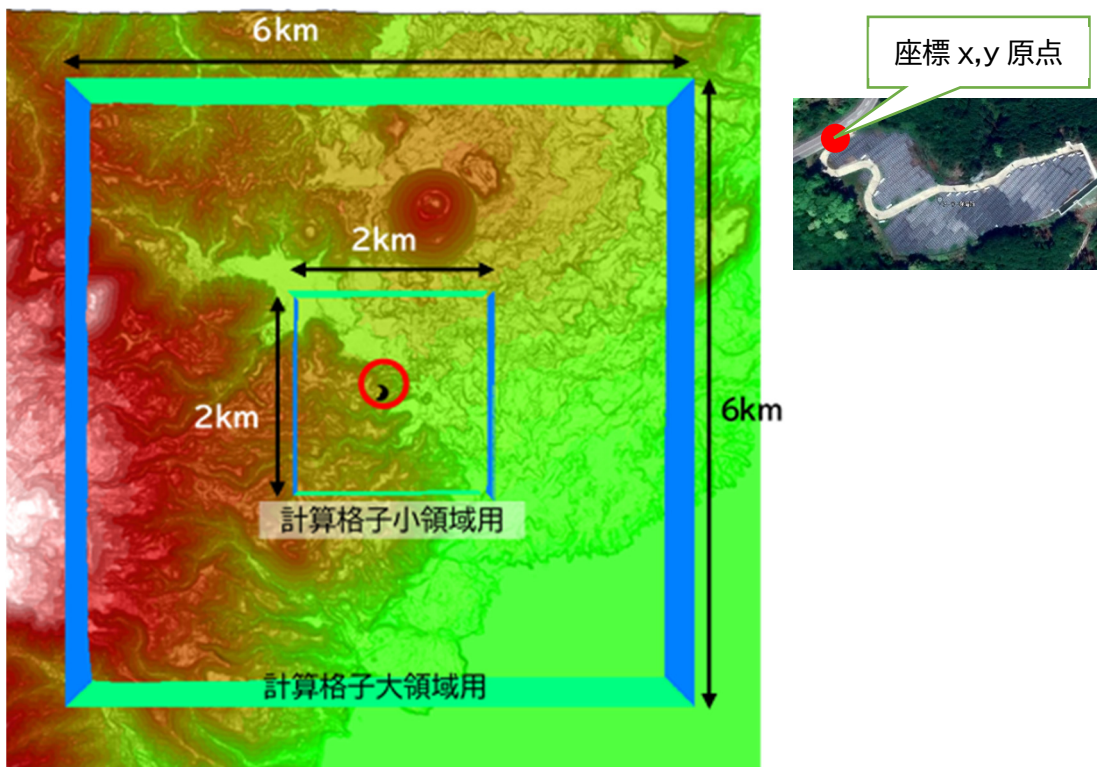


図 2-4 計算領域

太陽光発電設備の位置は図中赤丸、座標原点は黒点で示す

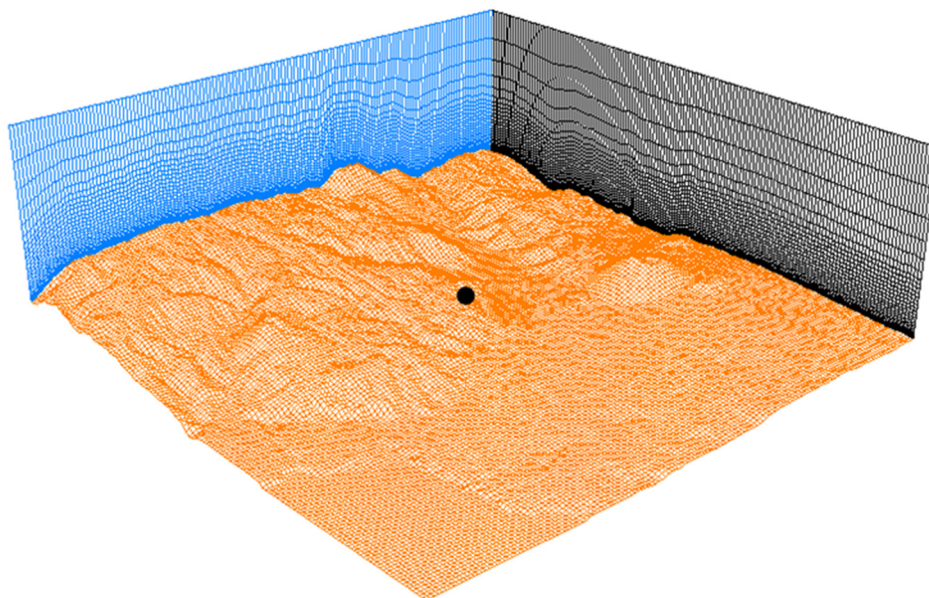


図 2-5 計算格子大領域（南東上空から北西を望む、黒点は座標原点上の地上点）

水平方向 20m 格子、格子数 x 方向

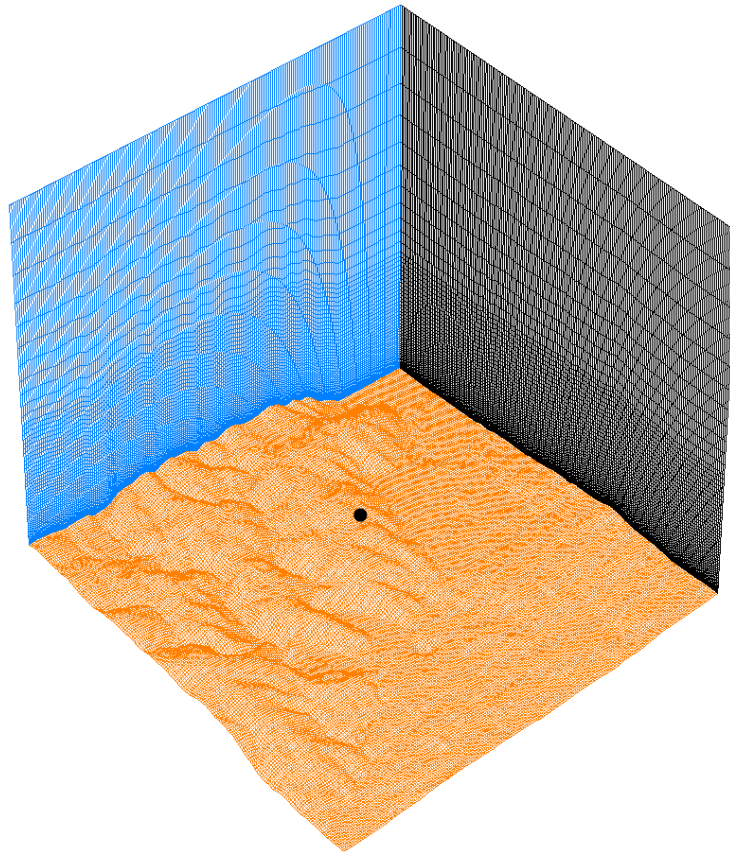


図 2-6 計算格子小領域（南東上空から北西を望む、黒点は座標原点上の地上点）
 水平方向 5m 格子、格子数 x 方向 × y 方向 × z 方向 = 400 × 400 × 60 点

2.4 流体計算法

流体計算には株式会社リアムコンパクト社製の流体解析コード RIAM-COMPACT®を用い、運動方程式に空間平均操作を行って得られた空間平均風速場に関する基礎方程式を差分により離散化して数値的に積分を行って流れ場の時刻歴を求めた。基礎方程式に用いられた乱流モデルにはスマゴリンスキーモデルを用いた 0 方程式系のラージエディシミュレーション（以下では LES と記述する）を用い、一般座標系上にコロケート配置された風速 3 成分と圧力の変数配置を用いて、斜面に沿った計算点における変数の値を求めた。解析コードに関する概要は <http://www.riam-compact.com/index.php> を参照されたい。

2.5 解析風向

被害発生時の風向は、最寄りの AMeDAS 観測点（網代、稲取）によると北北東から西南西におよんでいる。一方、太陽光発電設備の南東から西にかけては山側となっており、その方向から風が吹く場合は、山陰となつて強い風を再現できない可能性がある。また、今回用いた計算手法は強風中立状態の気流を解析するためのもので、温度場の計算ができないため、山の斜面を吹き降ろす安定状態の気流場の解析ができない。さらに、大気の状態（安定度）も不明なため、被害発生時の風向は被害の状況から判断するしかない。図 2-1 に示す被

害状況から判断すると、東側の太陽電池モジュールがめくられ北側に飛散しているように見えるので、被害発生時には東方向～南方向の風が吹いていたと考えられる。太陽電池モジュールが設置されている斜面は傾斜がきつく、斜面の下から風が吹きあがってきた場合、太陽電池モジュールの下面から上方に押し上げる力がかかる可能性がある判断できる。そこで、本解析では、周囲の地形の影響を再現するための大領域の計算において、東～南西方向の風を用いて、発電施設周辺の風況を確認したうえで、小領域用の計算格子を用いた詳細な計算を行うこととした。

2.6 植物キャノピーモデルの与え方

現地調査により、発電設備周辺の代表的な植物の葉面積密度を調べた、その結果は表 2-1 に示す通りで、該当する植生区分に対する葉面積密度に関しては表の値を解析に用いた。ただし、解析領域内には、表 2-1 以外の植生区分が存在する。それらに関しては実測値がないので、表 2-2 に示す推定値を用いた。DCMデータから求めた高さまで植物があるとして、キャノピーモデルによる運動方程式中の付加項を、表 2-1、2-2 の葉面積密度と抗力パラメータ、およびその地点の風速により求めた。今回の計算では抗力パラメータの値は一律に 1.0 とし、植生区分によって変化させていない。さらに、植物群落中にはすべて葉が茂っているわけではないので、枝や幹だけがある部分が 2/3 とし、残りの 1/3 に葉が茂っているとして上記の葉面積密度を 1/3 倍して与えた。すなわち運動方程式中の付加項に現れる AC_d は、

$$AC_d = (\text{表 2-1、2-2 中の葉面積密度}) \times 1.0/3.0$$

として与えた。ここで、 A は葉面積密度[1/m]、 C_d は抗力パラメータである。

表 2-1 葉面積密度

| | クヌギ | スダジイ | コナラ | ヒノキ |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| 1枚あたりの片側投影面積[cm ²] | 46.7 | 31.3 | 41.3 | 72.9 |
| 計測箱内の枚数[-] | 12 | 15 | 27 | 5(枝) |
| 計測箱(立方体)の1辺の長さ[cm] | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 葉面積密度[1/m] | 7.0 | 5.9 | 13.9 | 4.6 |

表 2-2 抗力パラメータ

| 植生区分 | 葉面積密度[1/m] |
|---------|------------|
| 常緑果樹園 | 7.0 |
| 緑の多い住宅地 | 8.0 |
| 市街地 | 5.0 |
| 竹林 | 3.0 |

| | |
|---------------|-----|
| ススキ群団 | 3.0 |
| 水田雑草群落 | 7.0 |
| 畑雑草群落 | 3.0 |
| 造成地 | 5.0 |
| アカメガシワーカラスザンシ | 3.0 |

現地調査で採取した樹木の葉および葉面積密度を求める際のサンプルを以下の写真 2-1 から写真 2-4 に示す。葉面積密度は写真に示すように 20cm 立方の格子の中に入る葉の枚数を数えて求めた。

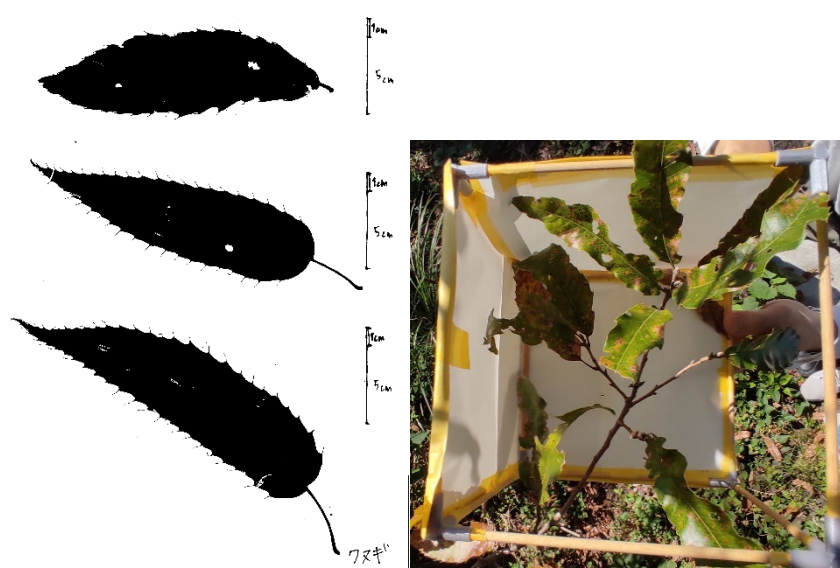


写真 2-1 クヌギ ; 20 cm立方の格子内の葉 12 枚



写真 2-2 スダジイ ; 20 cm立方の格子内の葉 15 枚

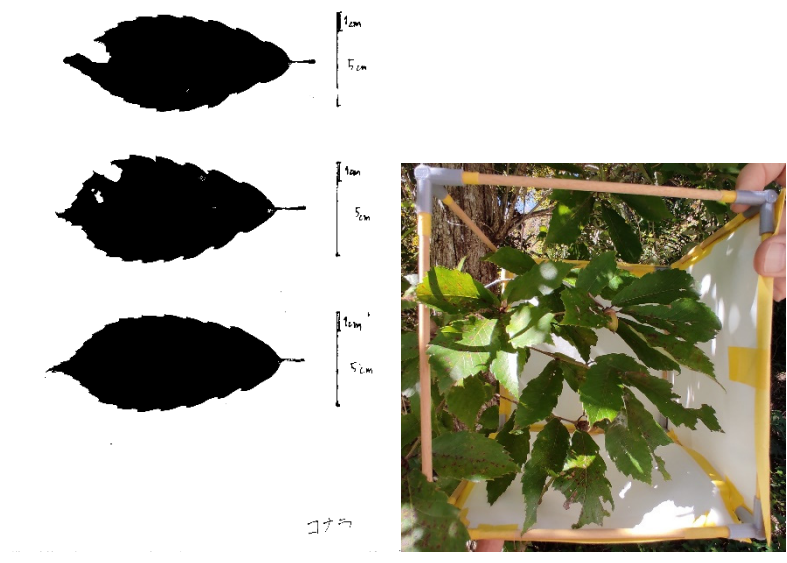


写真 2-3 コナラ ; 20 cm立方の格子内の葉 27 枚



写真 2-4 ヒノキ ; 20 cm立方の格子内の葉 5 枝

ヒノキの場合、一枚一枚の葉が小さいので、写真にあるような枝を1つの塊として全体の面積を求めた。

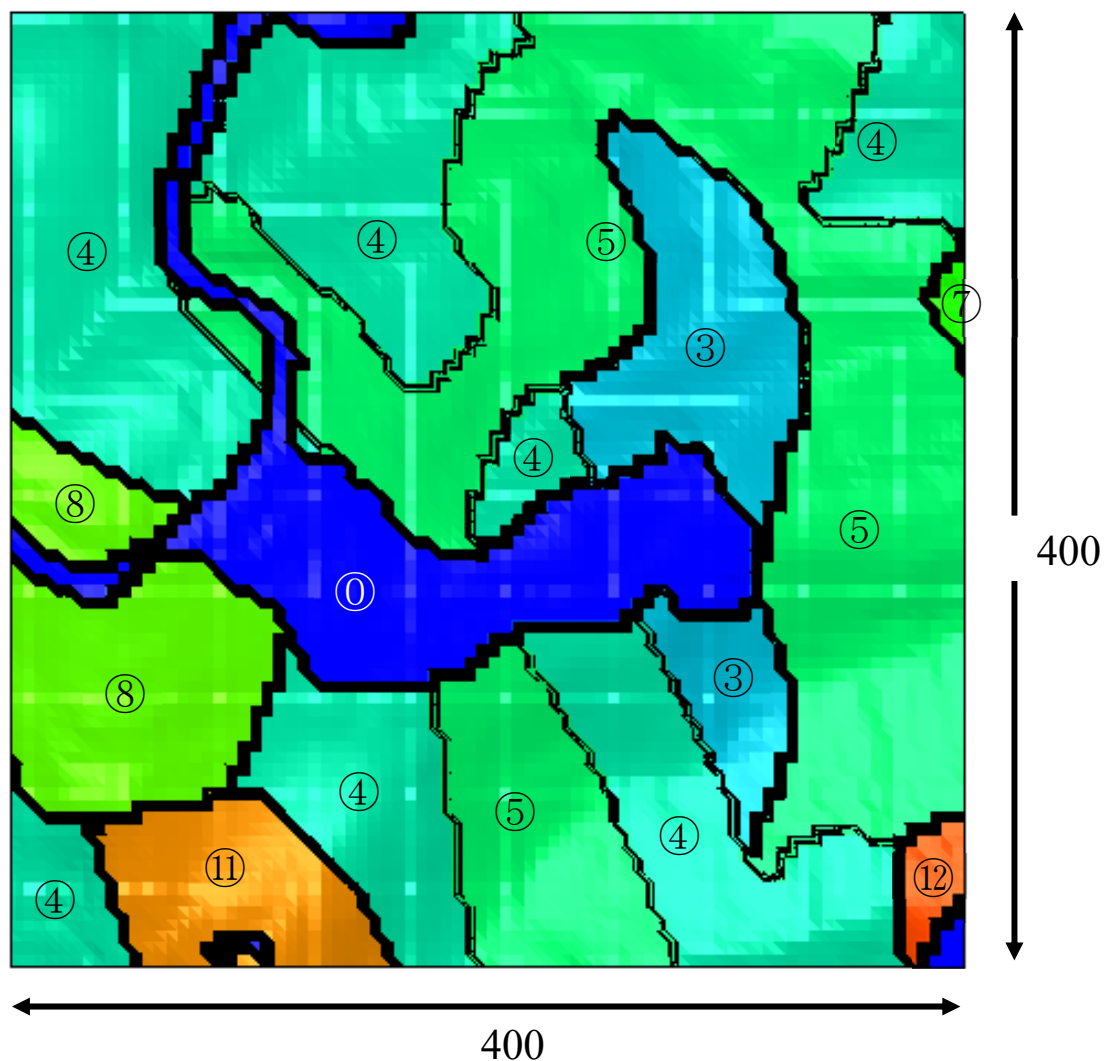


図 2-7 発電所周囲の植生

①裸地、③コナラ、④ヒノキ、⑤常緑果樹園、⑦市街地、⑧竹林、⑪水田雑草群落、⑫畑雑草群落

発電設備付近の植生を図 2-7 に示す。また、小領域で用いた植物キャノピーの範囲を図 2-8 に示す。なお、付近の“造成地”に関しては、樹木が茂っている場合があり、航空写真および現地での目視により確認出来たものに関しては、表 2-2 の値を用いている。さらに、DSMデータとDSMデータに差がない（キャノピー層の厚さが 0m）場合は、裸地（植物がない）として扱っている。

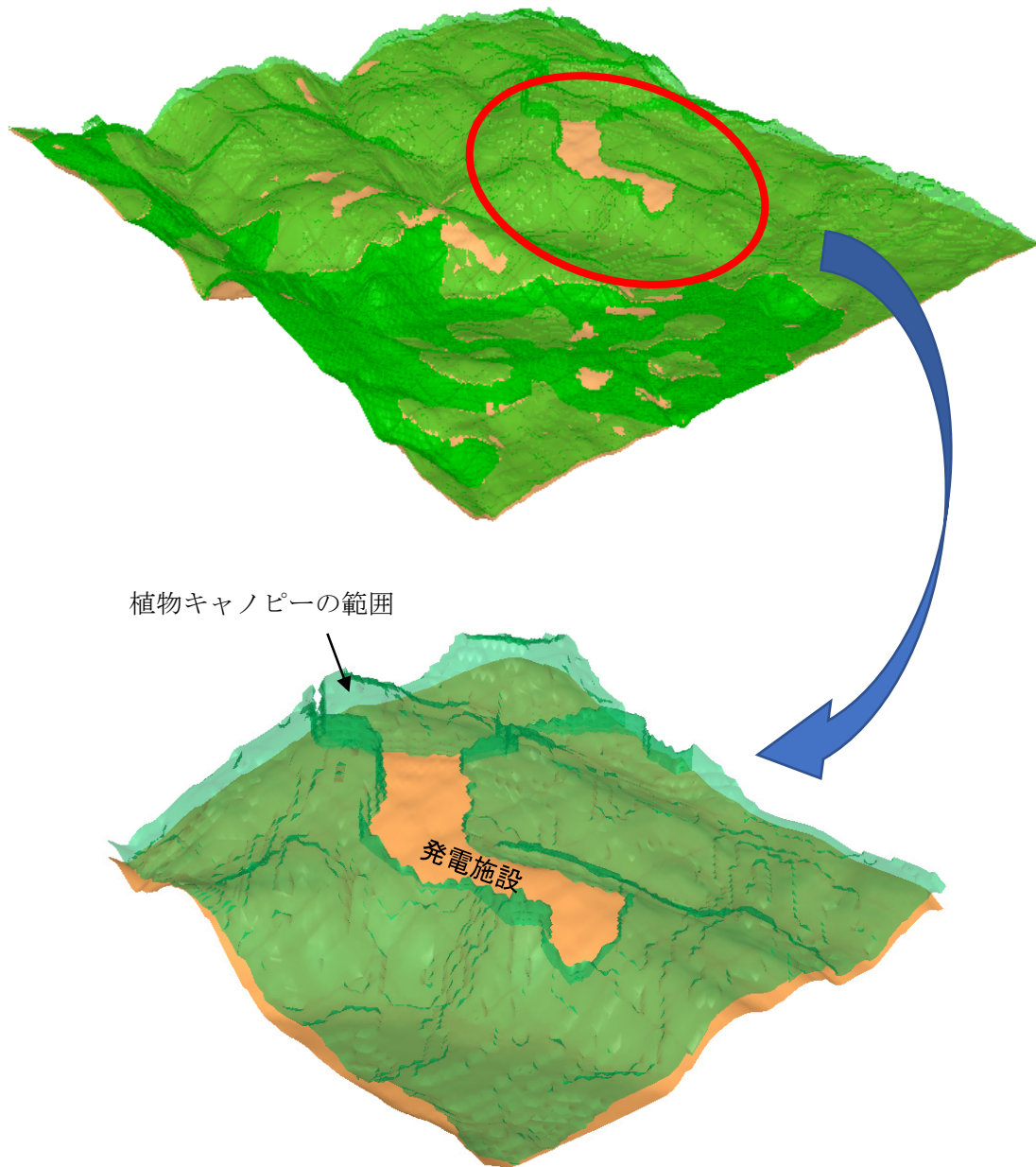


図 2-8 発電施設周辺の地形と植物キャノピーの範囲（緑の半透明面で囲まれた範囲）
南東から北西方向を眺める

2.7 評価時間

解析結果から種々の統計量を抽出する際のデータは、上空の主流風速で計算領域の 2 倍以上の距離を吹送する時間が経過した後の値を用いた。実際の上空風の分布は不明であるが大領域で流入風として与えた風速をもとに換算を行うと、上空風の風速 U_0 、評価時間 T_0 として、吹送距離 L_0 との関係

$$L_0 = U_0 T_0, T_0 = L_0 / U_0 \dots\dots\dots(2.1)$$

から、評価時間を求めると、上空風の風速 $U_0=20\text{m/s}$ とした場合 $T_0=2400$ 秒 (40 分)、風速 $U_0=40\text{m/s}$ とした場合 $T_0=1200$ 秒 (20 分) と計算され、これらの吹送時間の平均値として求めた。すなわち、上空の主流風速で、実スケールの吹送距離 $20\text{m/s} \times 2400\text{s} = 48\text{km}$ 、 $40\text{m/s} \times 1200\text{s} = 48\text{km}$ 、だけ吹送するのに必要な時間の計算結果を用いて統計量を求めた。

3. 計算結果

3.1 大領域の気流性状

周辺の地形の影響を確認し、発電所周辺のキャノピーモデルを用いた詳細な解析に用いる流入変動風を再現するために行った、大領域の計算結果を確認する。計算を行った 4 風向、南東、南南東、南、南西の 4 風向について結果を以下に示す。

3.1.1 風向南東の結果

原点における平均風速のプロフィールと地面近くの平均風速の水平面内の分布を図 3-1 に示す。風は海に向かって開かれた方向から吹き込んでくるため、計算を行った風向のうちで最も大きな風速を示す。原点では、地面付近で流入風の 0.5 倍程度の風速が生じている。

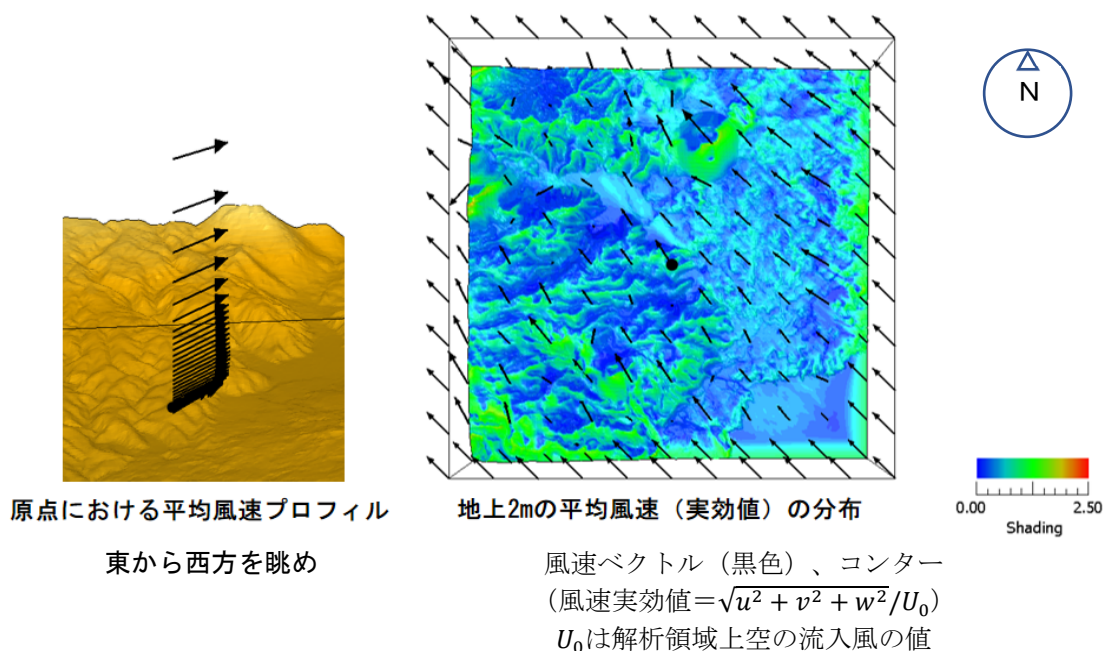


図 3-1 平均風速の分布

3.1.2 風向南南東の結果

風は南側の尾根部を乗り越えて吹き込んでくるため、風速は南東風よりも乱れたものとなっている。原点では、地面付近で流入風の0.5倍程度の風速が生じている。

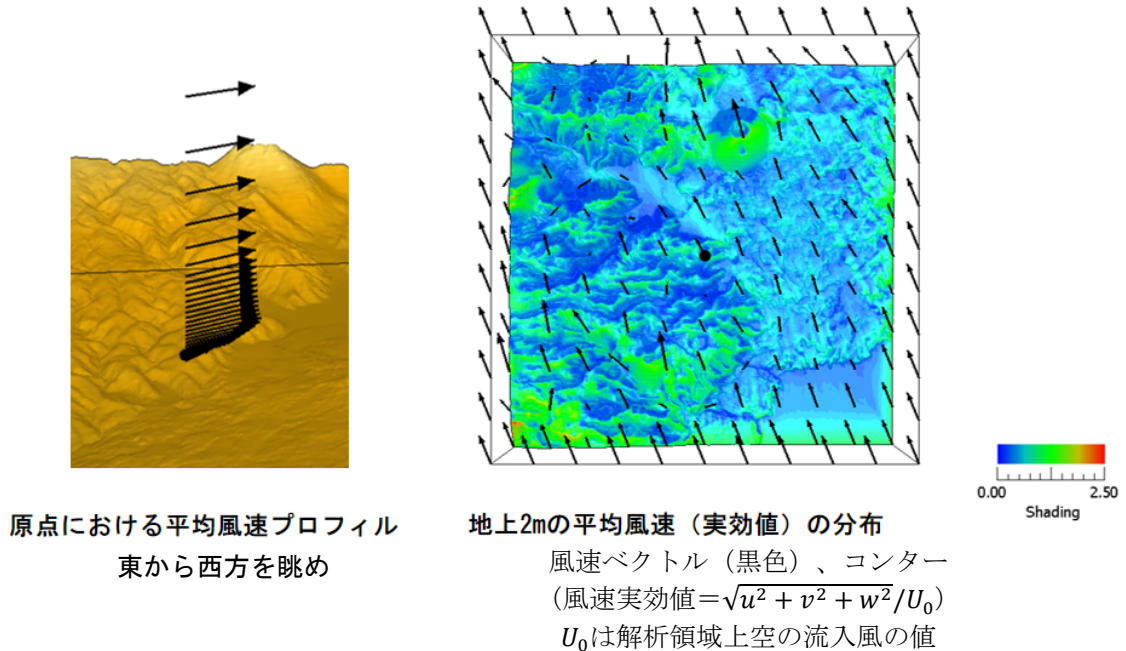


図 3-2 平均風速の分布

3.1.3 風向南の結果

風上側の山地の吹送距離がさらに長くなるため、地面付近の風速は南風よりも小さくなり乱れたものとなる。原点では地面付近で流入風の0.2~0.3倍程度の風速が生じている。

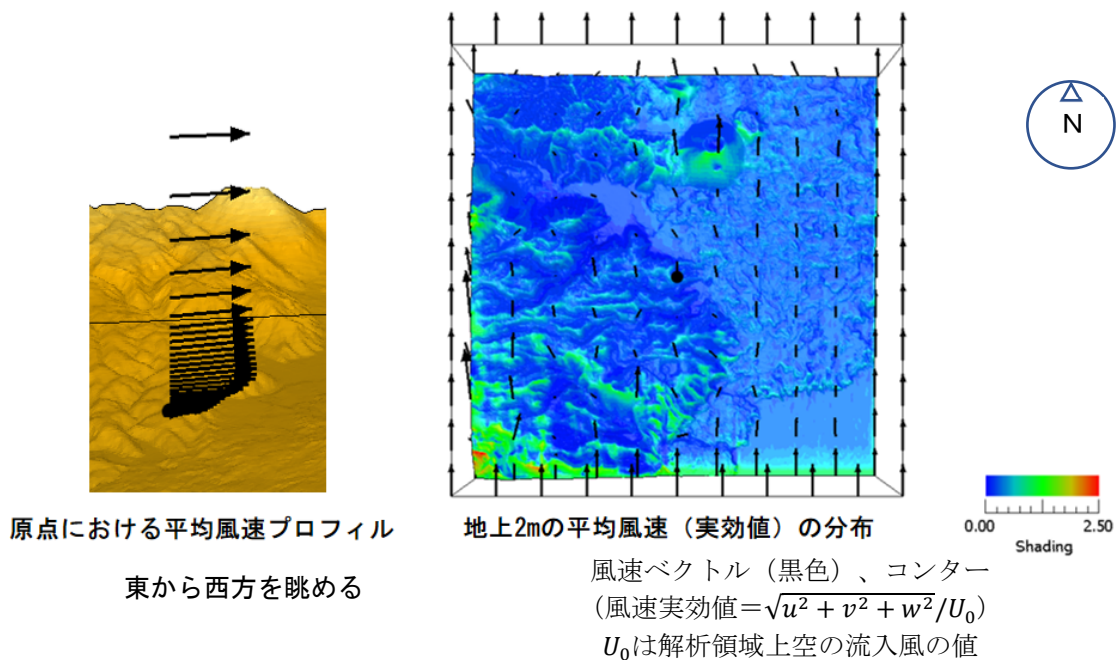
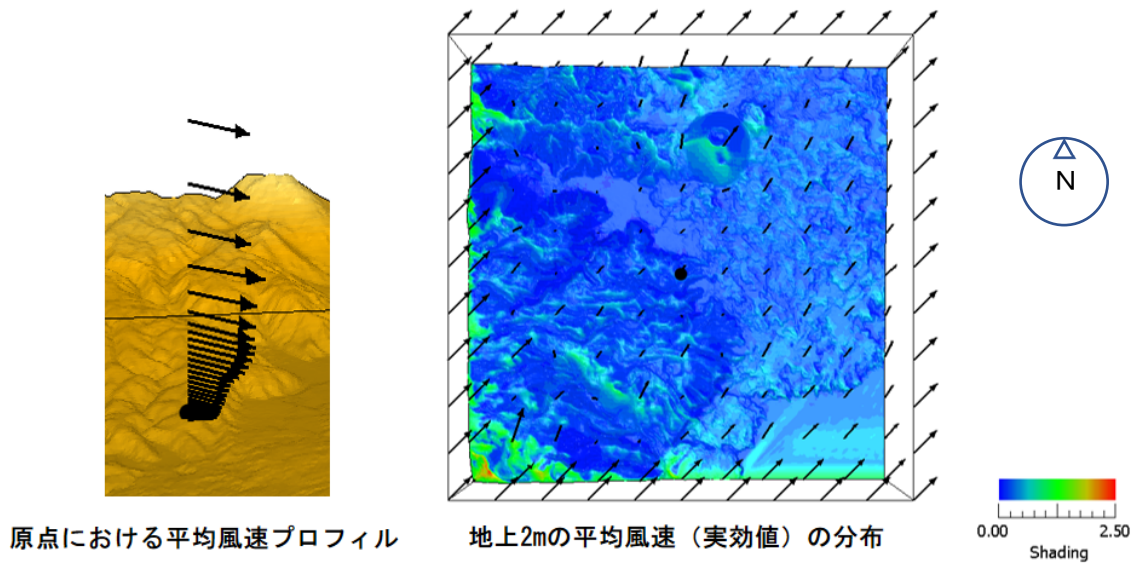


図 3-3 平均風速の分布

3.1.4 風向南西の結果

風は南西側の山から吹き降りてくるため、地面付近で風速はほかの風向よりも風速は小さくなっている。



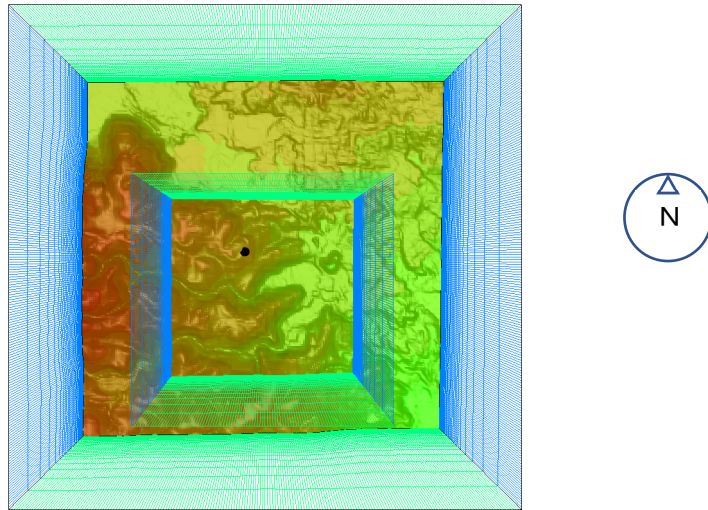
風速ベクトル（黒色）、コンター
(風速実効値 $=\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}/U_0$)
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

図 3-4 平均風速の分布

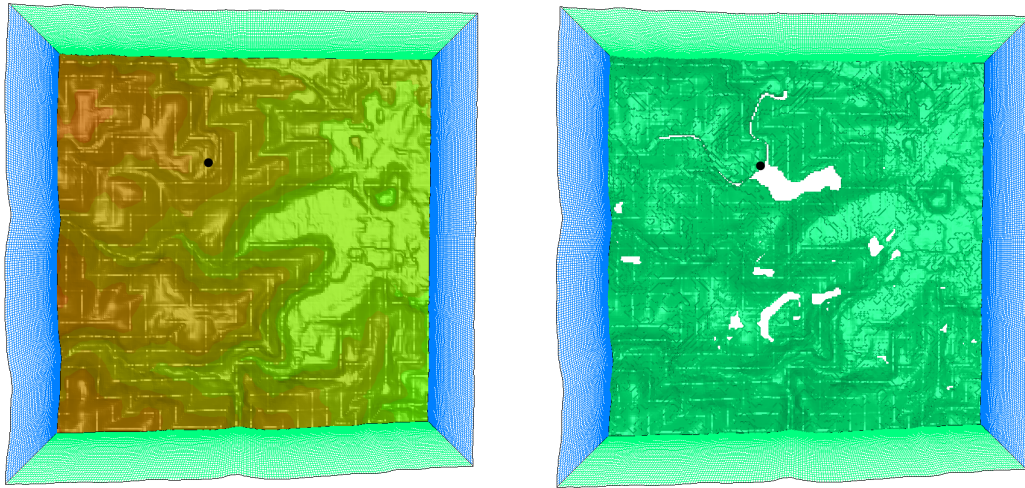
3.2 小領域における解析結果

3.2.1 解析に用いた計算格子とダウンスケーリング

小領域の計算では、地面付近の植物による抵抗の影響をキャノピーモデルを用いて取り込み、計算を行った。計算に際して、境界面上の風速変化は大領域による計算結果を与えた。初めに 2km 四方、水平方向 10m 格子で計算し、最終的に発電設備付近の 1km 四方の範囲で、水平方向 5m 格子で計算を行った。このダウンスケーリングに関しては、周囲の大スケールの計算結果を境界条件として風速値の時間変化として与えた。



a. 2km×2km、水平方向 10m 格子



地形

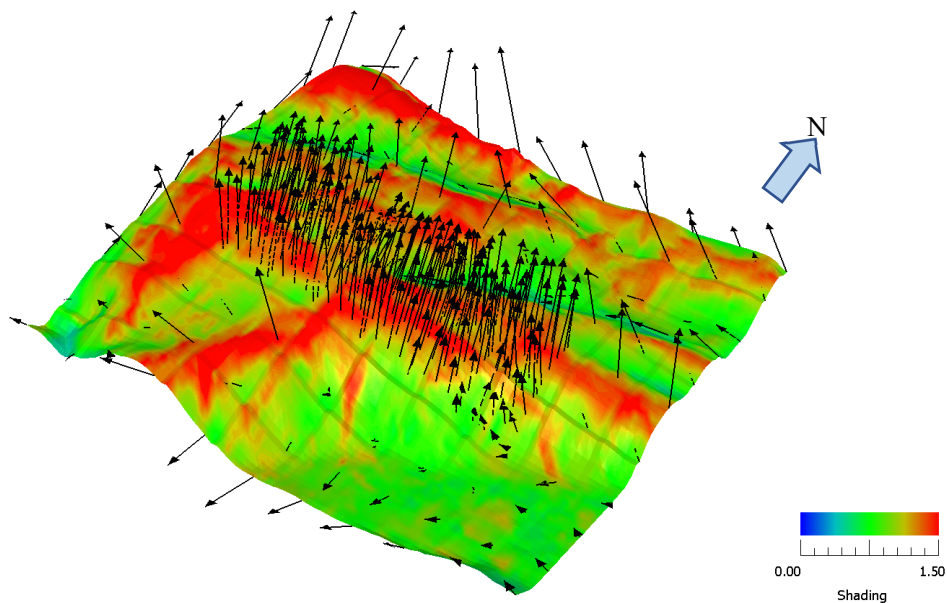
キャノピーモデルを用いる範囲

b. 1km×1 km、水平方向 5m 格子

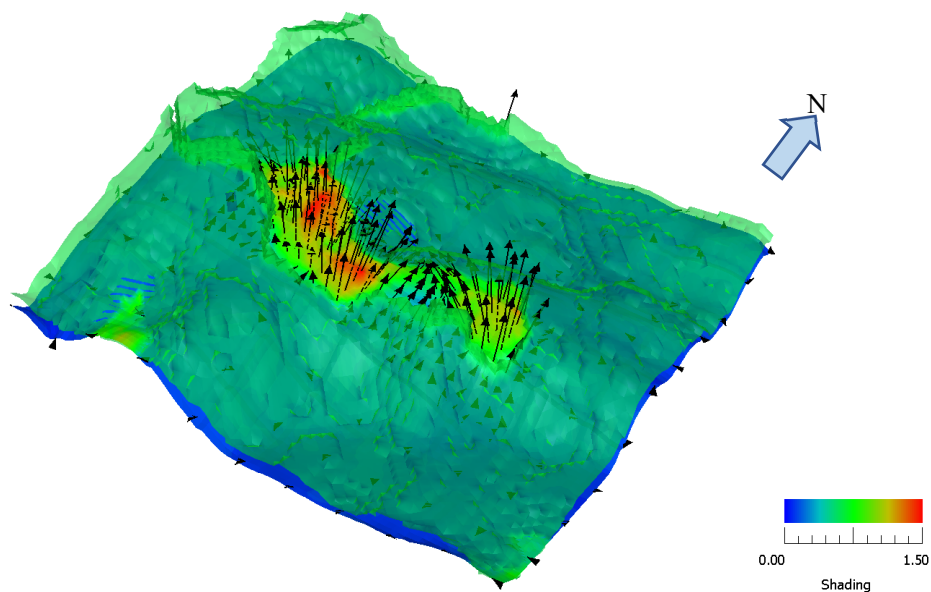
図 3-5 詳細な解析を行った小領域

3.2.2 キャノピーモデルによる影響

小領域の計算ではキャノピーモデルを用いて計算を行っているが、初めにキャノピーモデルを用いない場合との違いを比較する。キャノピーモデルを用いないと、植物による抵抗が地面付近で考慮されないため地面付近の風速が大きくなる（図 3-6～3-9）。

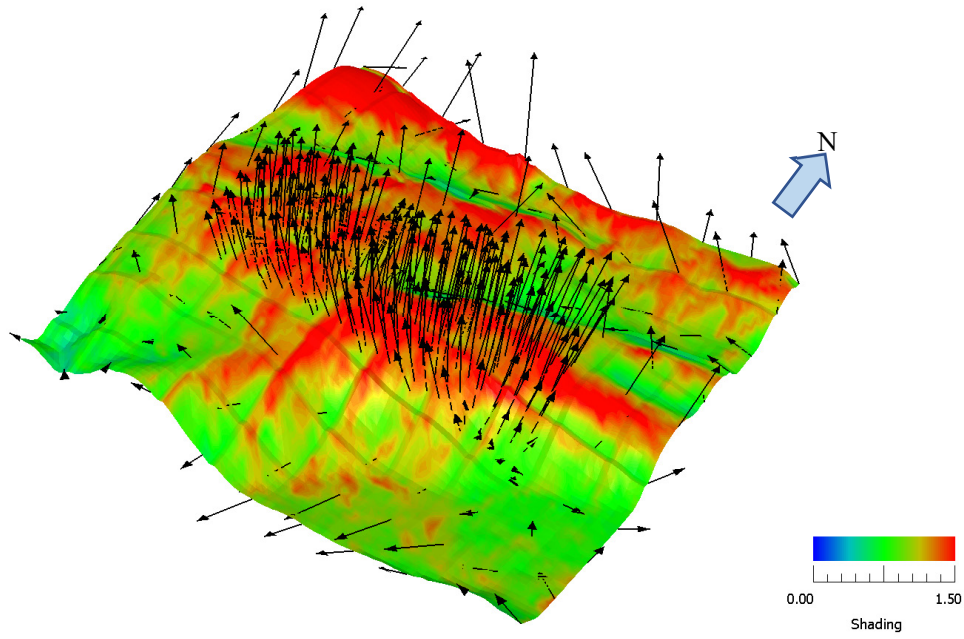


a. キャンピーモデルを用いない計算

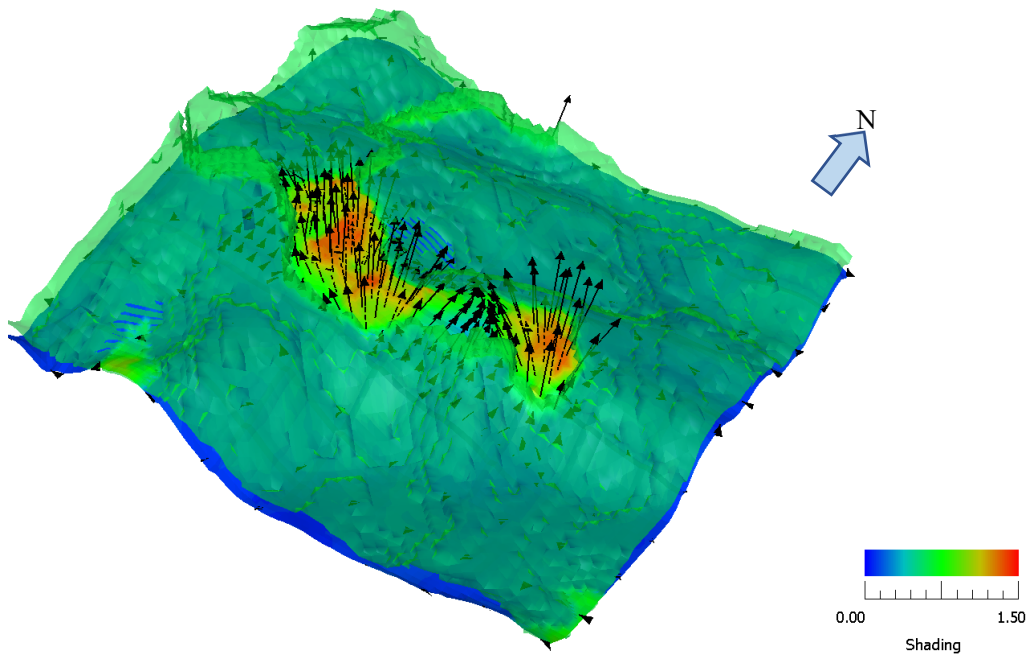


b. キャンピーモデルを用いた計算

図 3-6 風向南東、地面付近の風速の分布、地上 2m における値
 風速ベクトル（黒色）、等値面は風速実効値 $=\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}/U_0$ の最大値の分布、
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

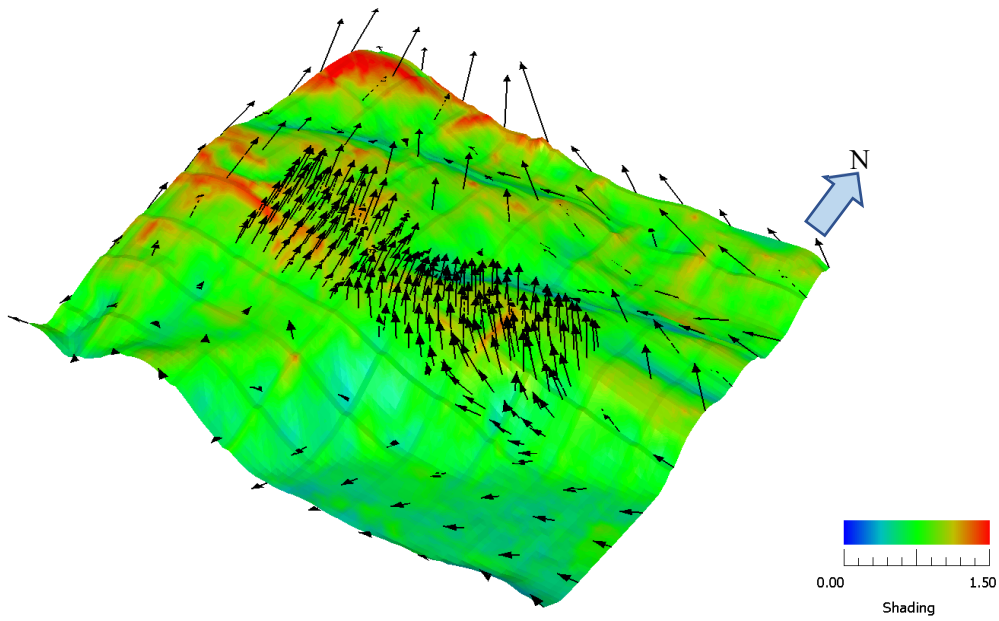


c. キャンピモデルを用いない計算

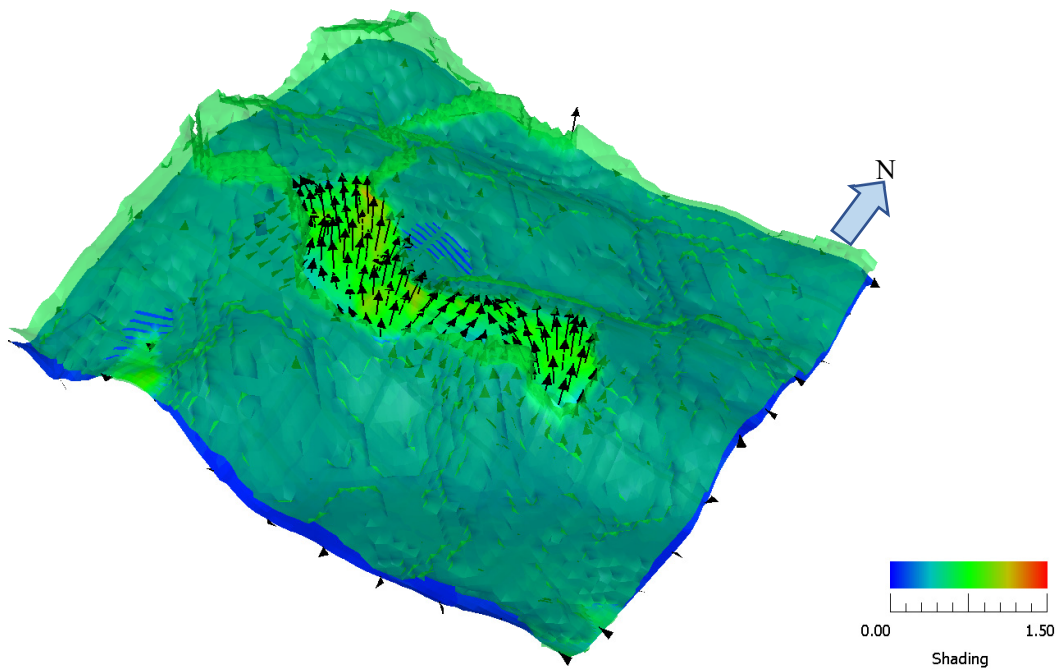


d. キャンピモデルを用いた計算

図 3-7 風向南南東、地面付近の風速の分布、地上 2m における値
 風速ベクトル（黒色）、等値面は風速実効値 $=\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}/U_0$ の最大値の分布、
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

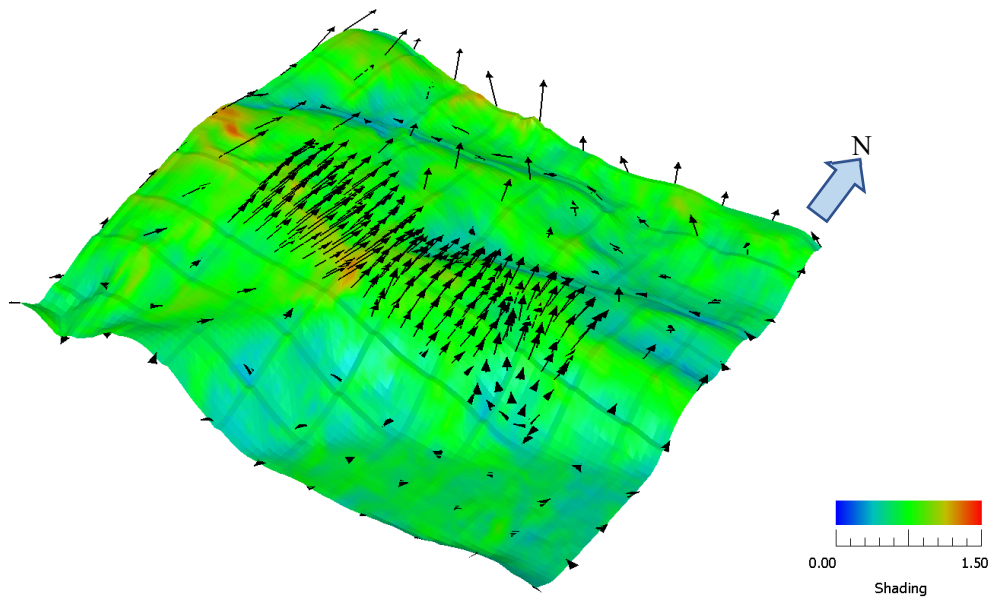


e. キャノピーモデルを用いない計算

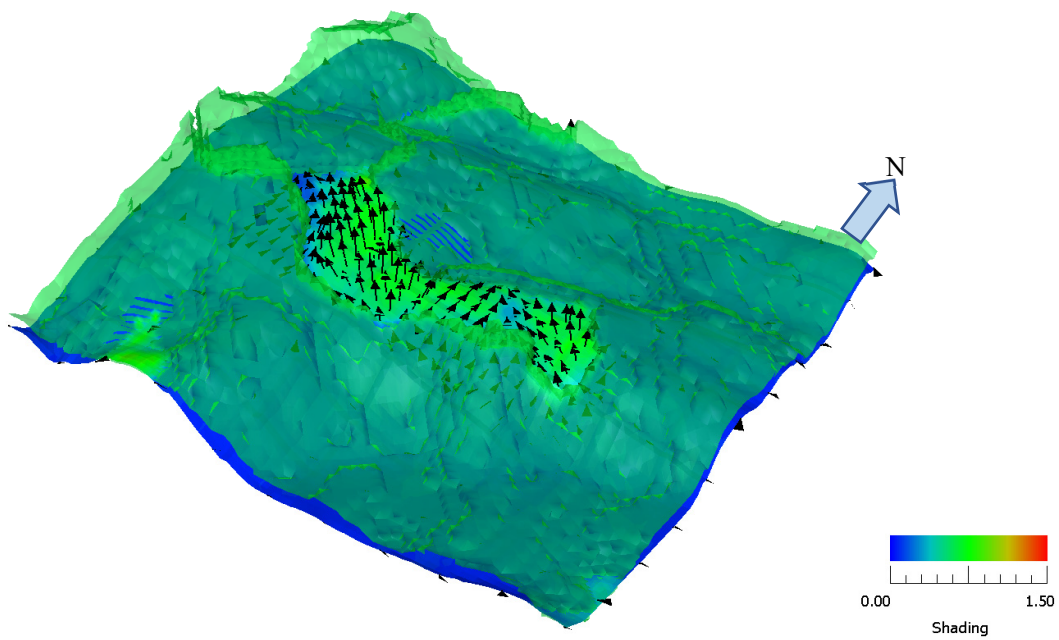


f. キャノピーモデルを用いた計算

図 3-8 風向南、地面付近の風速の分布、地上 2m における値
 風速ベクトル（黒色）、等値面は風速実効値 $=\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}/U_0$ の最大値の分布、
 U_0 は解析領域上空の流入風の値



g. キャノピーモデルを用いない計算



h. キャノピーモデルを用いた計算

図 3-9 風向南西、地面付近の風速の分布、地上 2m における値
 風速ベクトル（黒色）、等値面は風速実効値 $=\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}/U_0$ の最大値の分布、
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

原点における平均実効風速の鉛直分布をみると、図 3-10 に示すように風向により風上側の地形が変化するために、風速分布は変化する。それぞれの風向においては、地上 50m 以上でキャノピーモデルの有無によらず風速分布はほとんど同じ分布を示している。しかし、地面付近ではキャノピーモデルによる植物からの抵抗により、風速が低減されている。

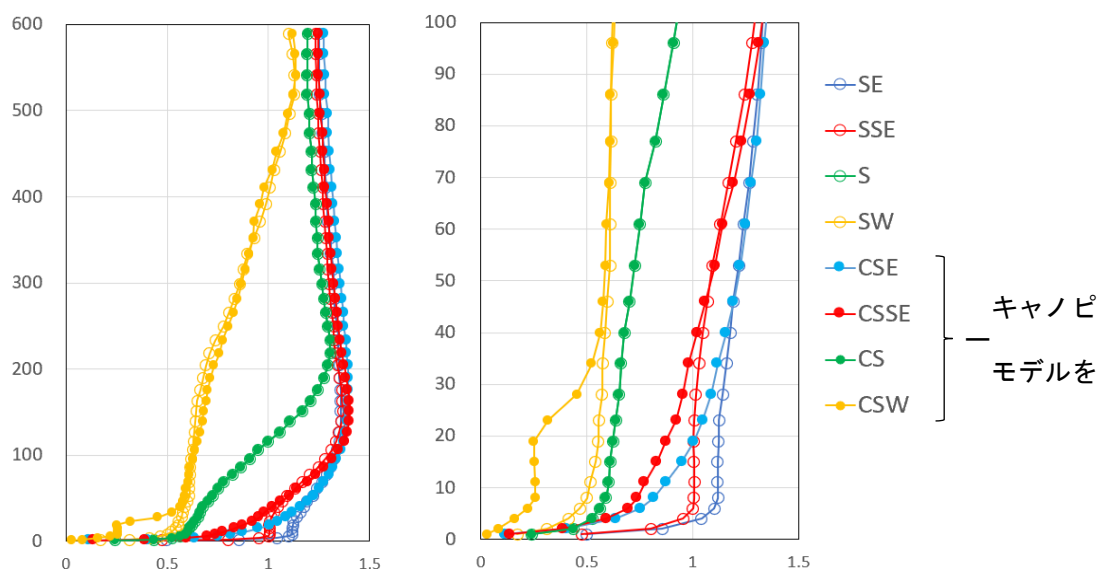
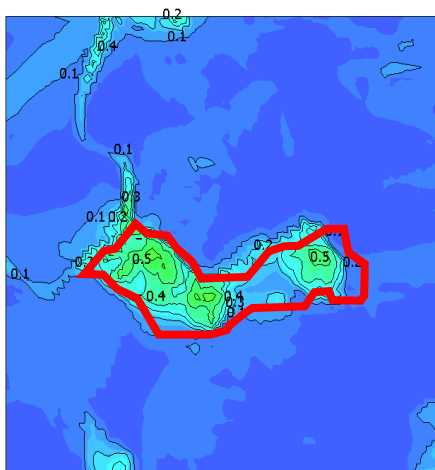
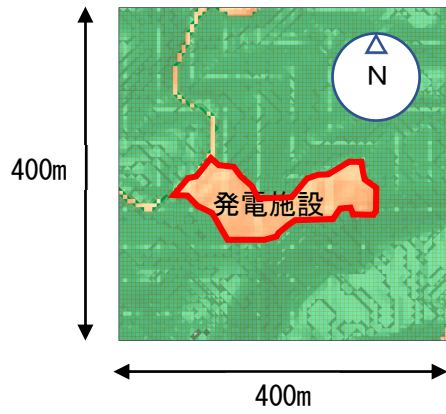
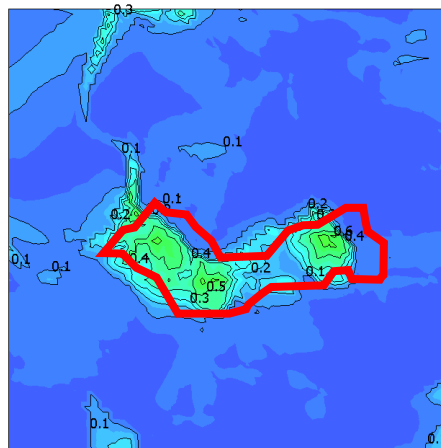


図 3-10 原点における平均実効風速プロファイルの風向およびキャノピーモデルの有無による変化

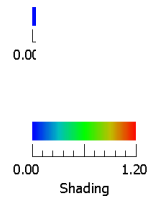
地上高さ 2m における風速は、図 3-11、3-12 に示すように、被害が発生した敷地の西側の側道近く、および、中央部および東側で大きくなり、風向南東および南南東で計算で用いた上空風の 0.5~0.6 倍程度に達している。最大値も、同様に敷地の西側の側道近く、および、中央部および東側で大きくなり、風向南東および南南東で計算で用いた上空風の 1.25 倍に達している。乱れの強さに関しては、風向によらず同じような分布形状を示し、敷地南側、中央部東側で強くなる。値は、平均風速が小さくなる南風、南西風で全般的に大きくなる。鉛直方向の平均風向角は上向きに 10 度から 20 度程度の値を持ち、敷地南側で大きい傾向がある。



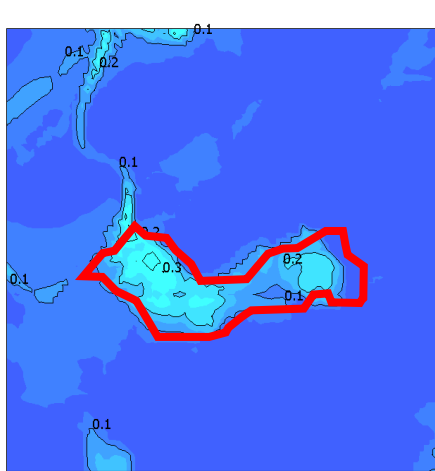
南南東風



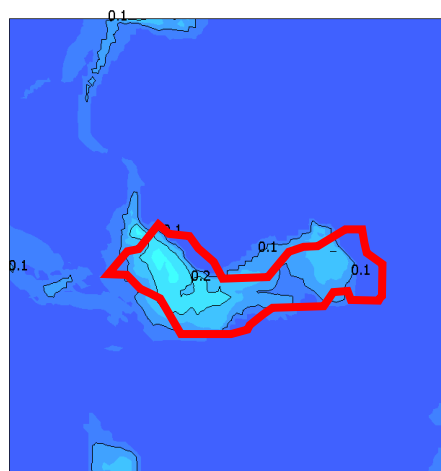
南風



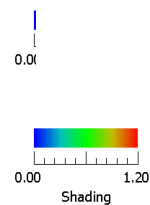
風速実効値 = $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} / U_0$
 U_0 は解析領域上空の流入風の値



南南西風

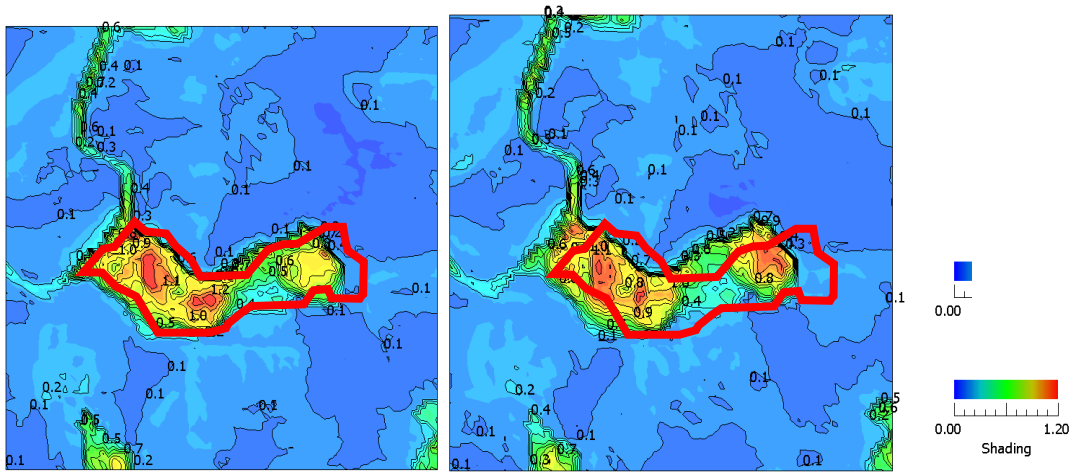
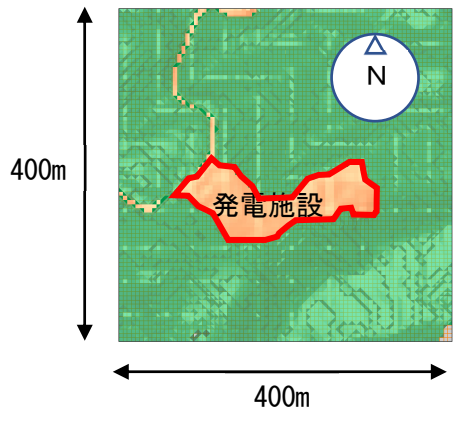


西南風



風速実効値 = $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} / U_0$
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

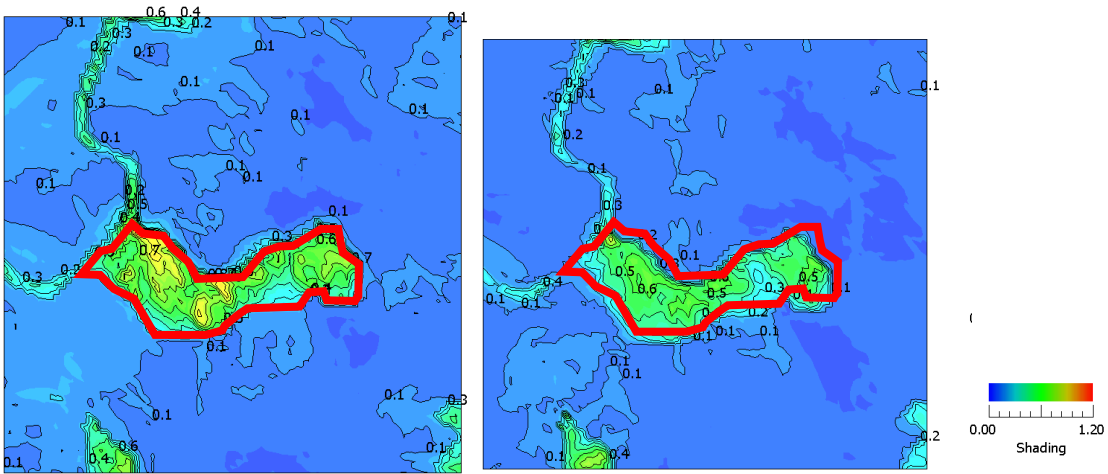
図 3-11 風向による平均実効風速分布の変化 地上 2m
 キャンピーモデルを用いた計算結果



南東風

南南東風

風速実効値 = $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} / U_0$
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

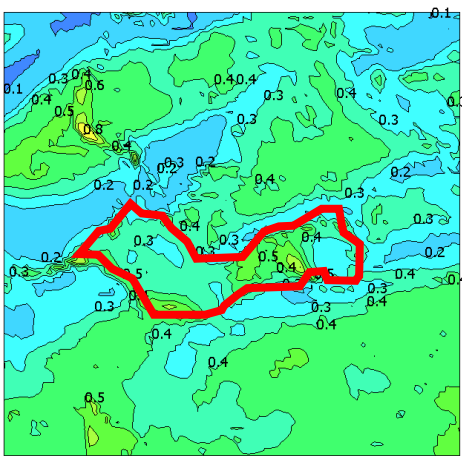
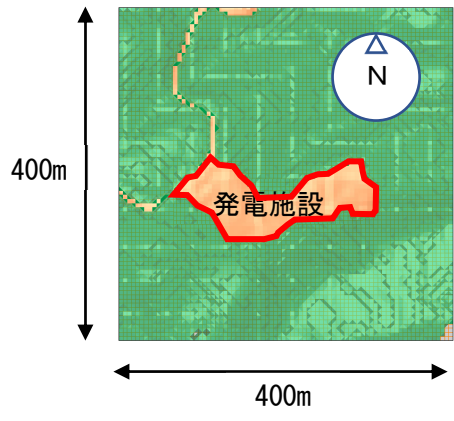


南風

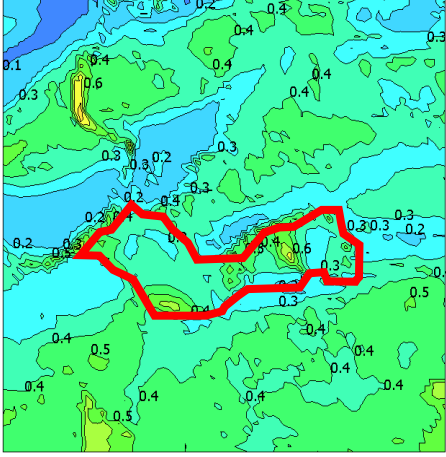
南西風

風速実効値 = $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} / U_0$
 U_0 は解析領域上空の流入風の値

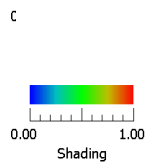
図 3-12 風向による最大実効風速分布の変化 地上 2m
 キャンピーモデルを用いた計算結果



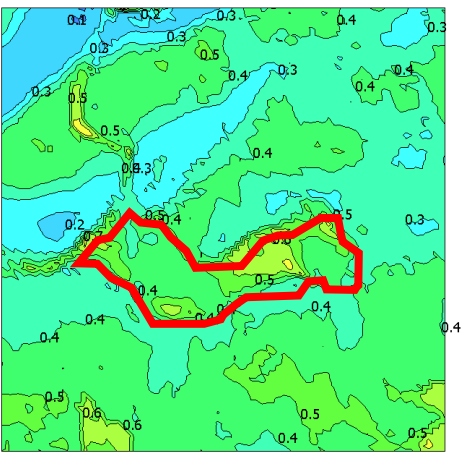
南東風



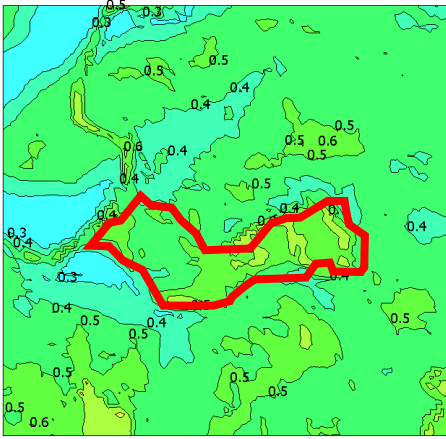
南南東風



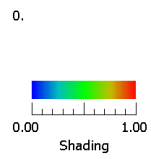
風速実効値の標準偏差



南風

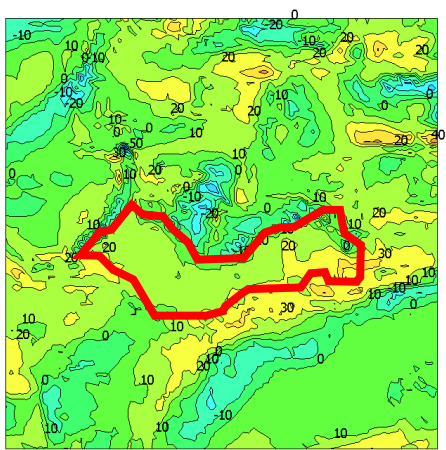
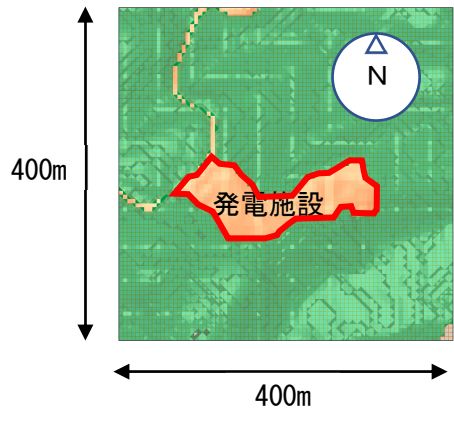


南西風

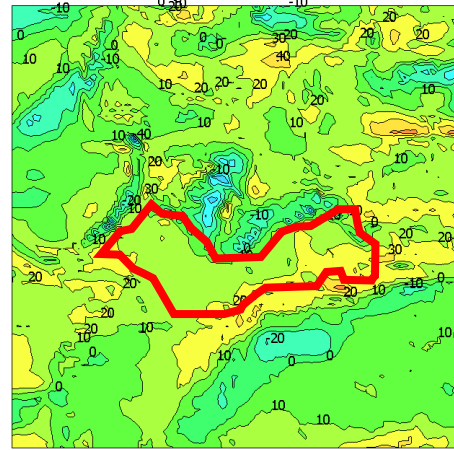


風速実効値の標準偏差

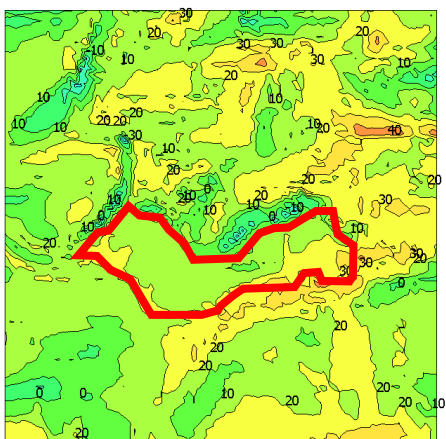
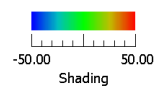
図 3-13 風向による平均実効風速の乱れの強さの変化 地上 2m
キャンピーモデルを用いた計算結果



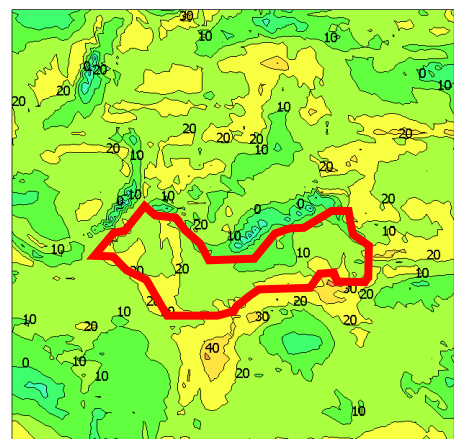
南東風



南南東風



南風



南西風

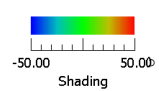


図 3-14 風向による平均鉛直方向風向角の変化 地上 2m
 キャンピーモデルを用いた計算結果

4. 気流性状

図 4-1 に示す敷地内および周辺の代表的な地点①～⑳における平均実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角のプロファイル（図 4-2～4-9）と、地上 2m 地点における時間変化（図 4-10～図 4-37）を示す。

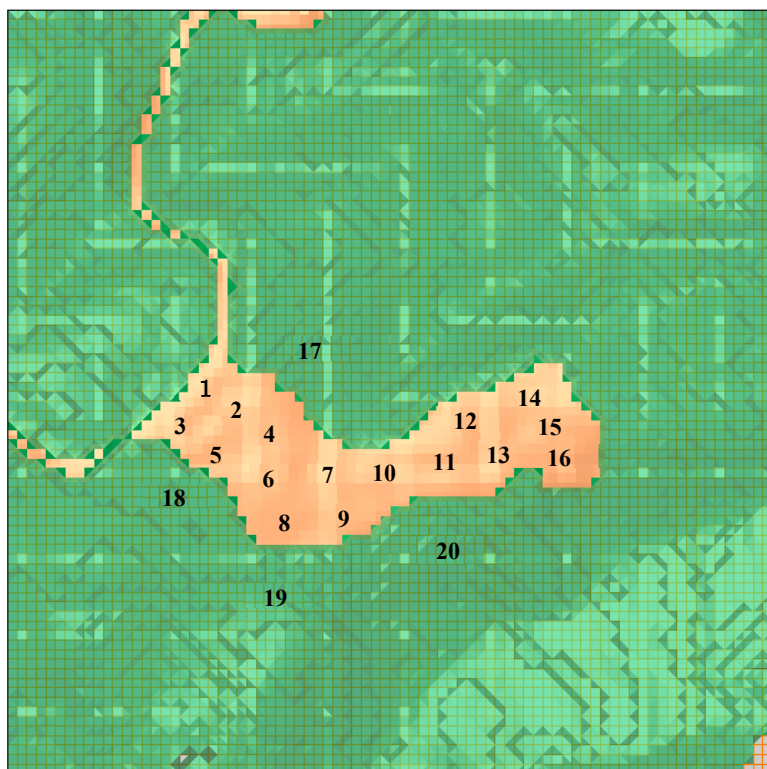


図 4-1 鉛直プロファイルと時系列データを抽出した、代表地点 1～20

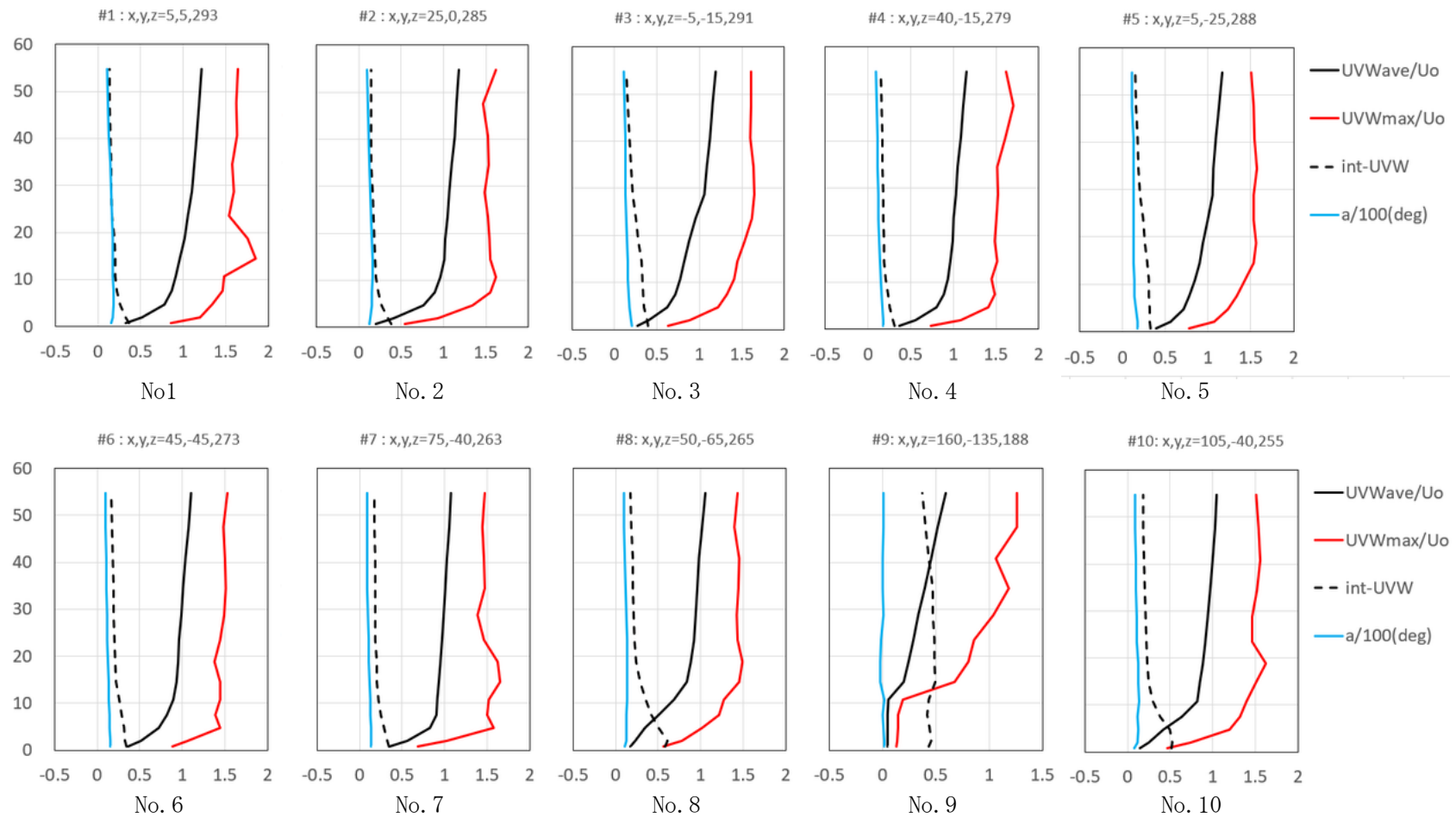


図 4-2 風向南東、地点 1~10 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール

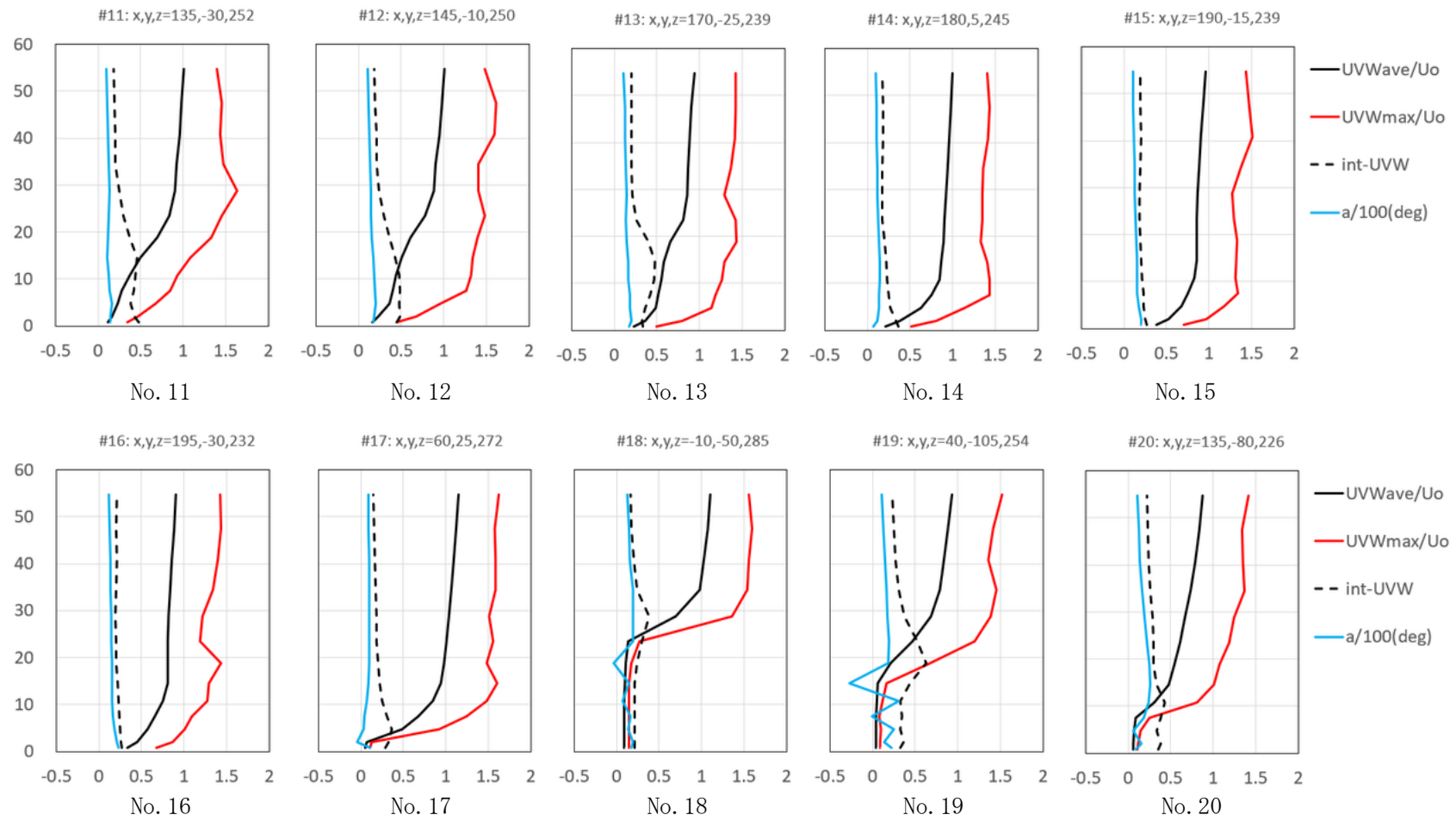


図 4-3 風向南東、地点 11~20 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール

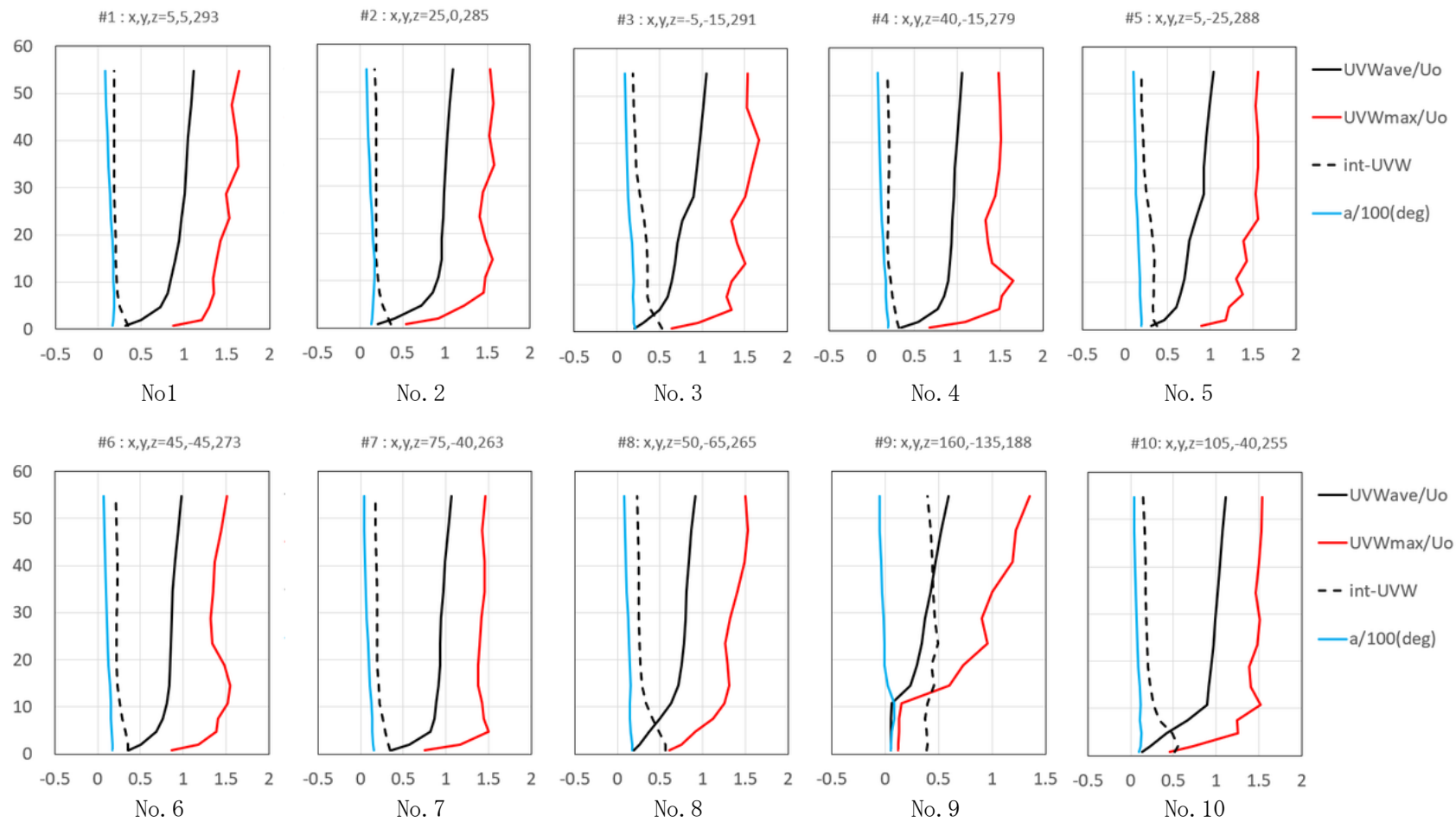


図 4-4 風向南南東、地点 1~10 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール

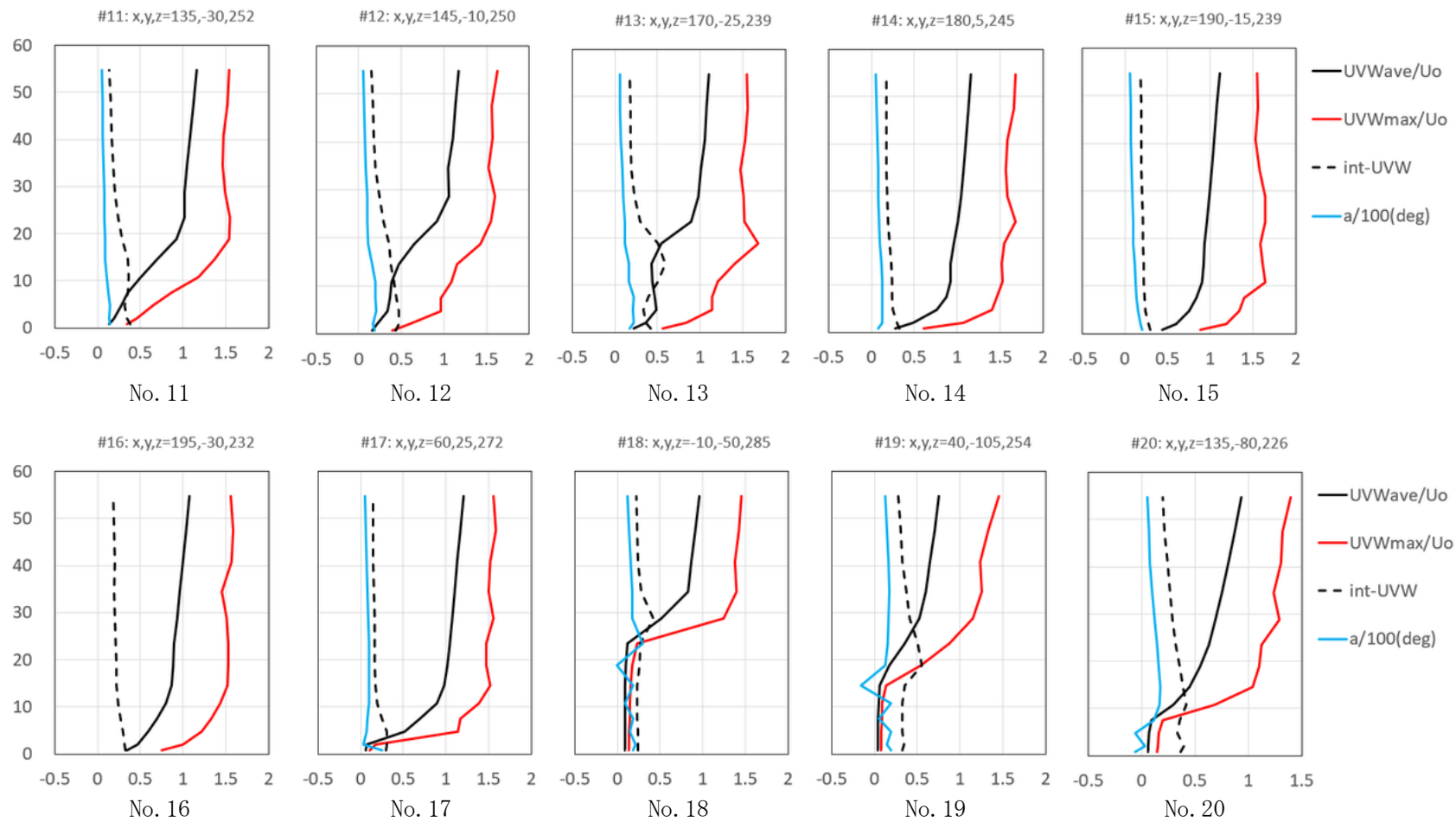


図 4-5 風向南南東、地点 11~20 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール

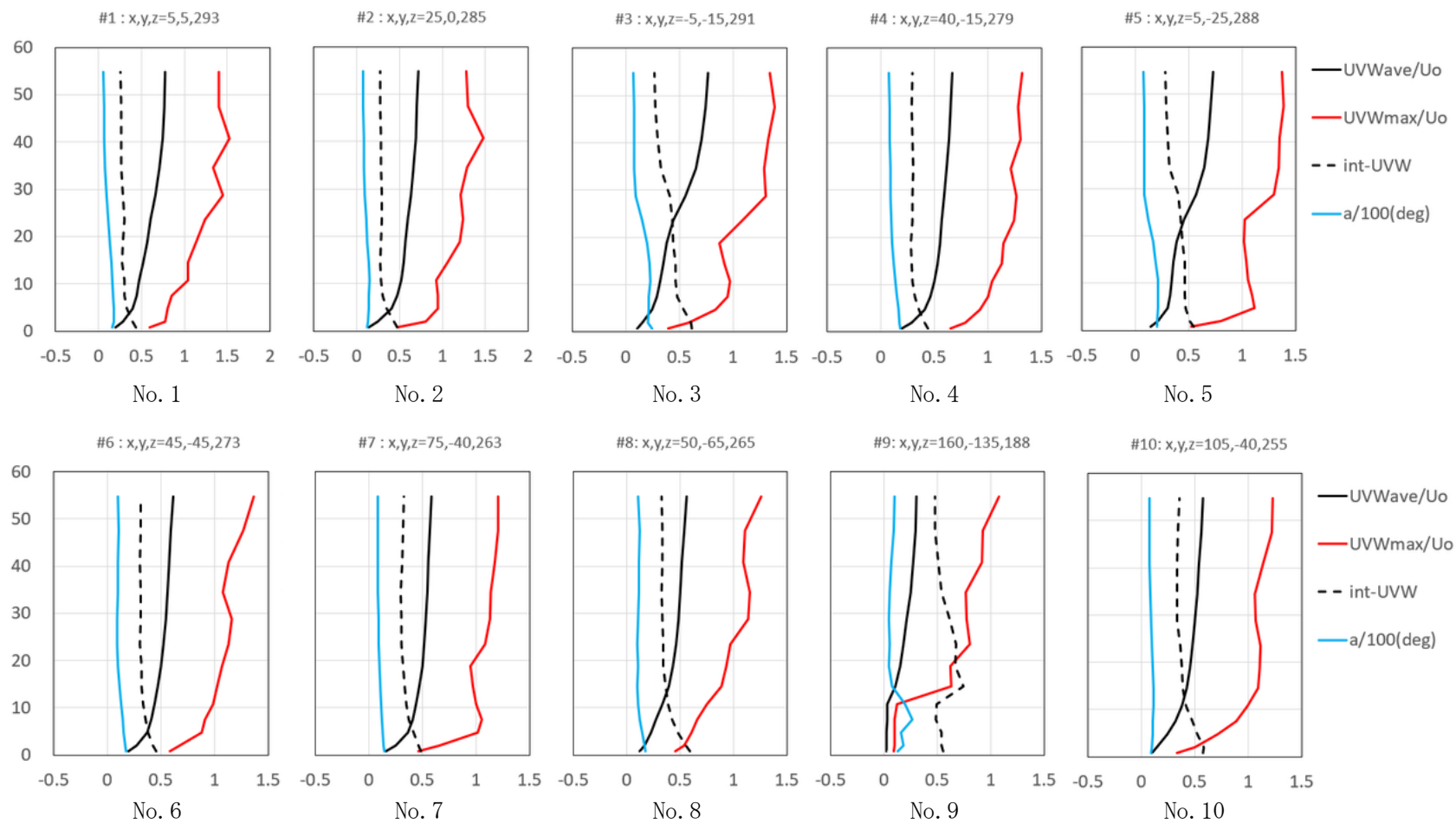


図 4-6 風向南、地点 1~10 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール

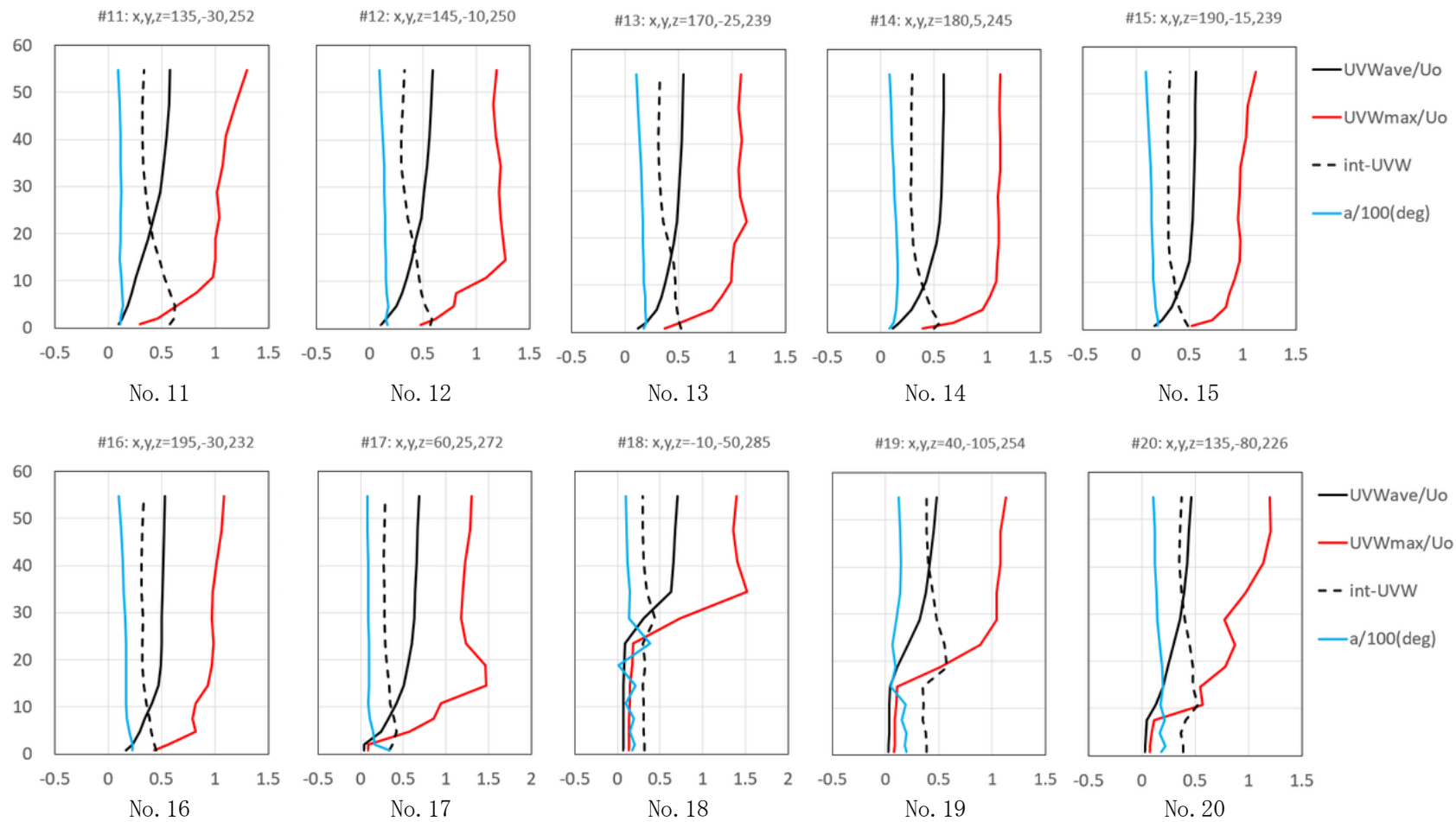


図 4-7 風向南、地点 11~20 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール

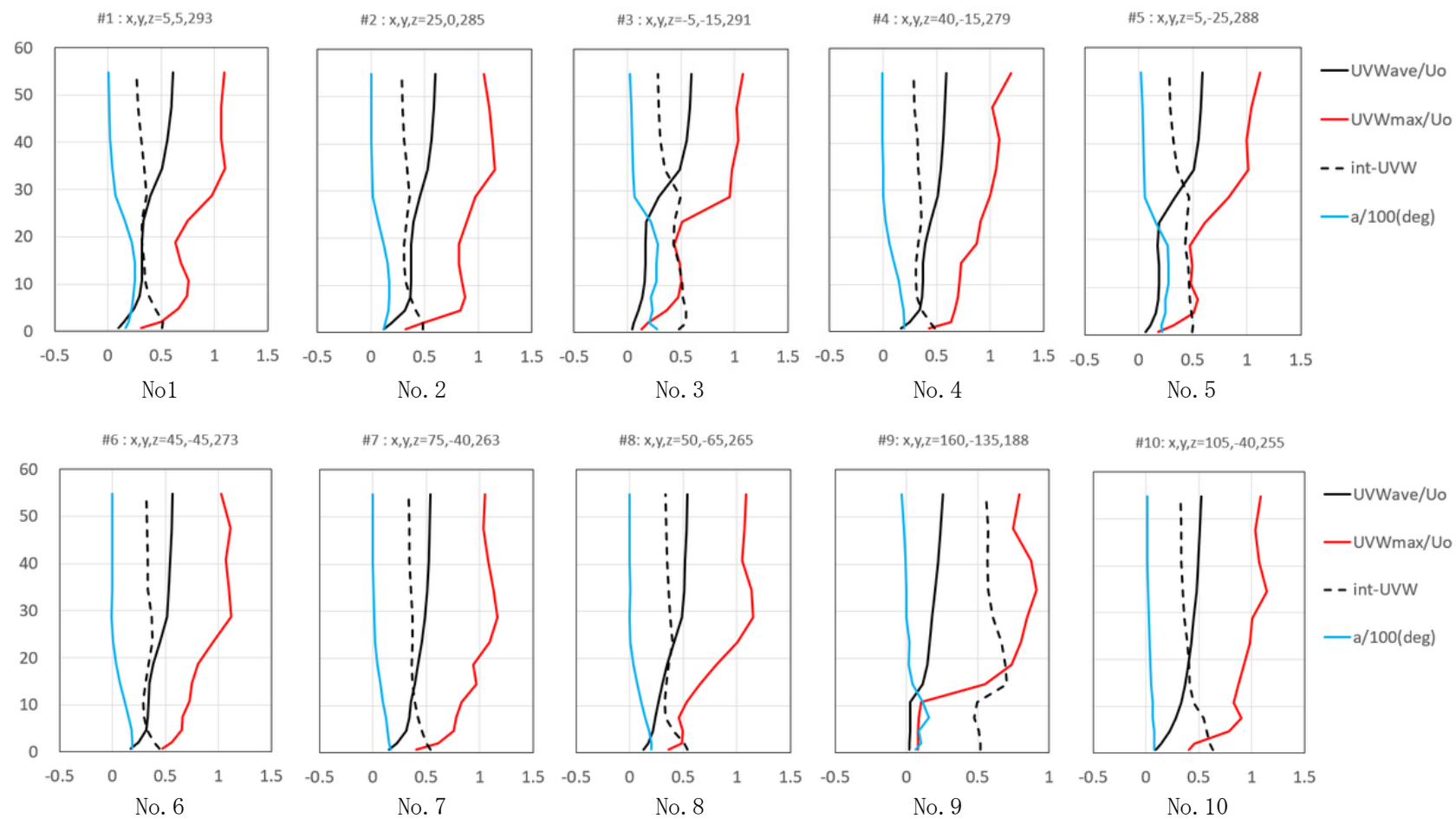


図 4-8 風向南西、地点 1~10 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロファイル

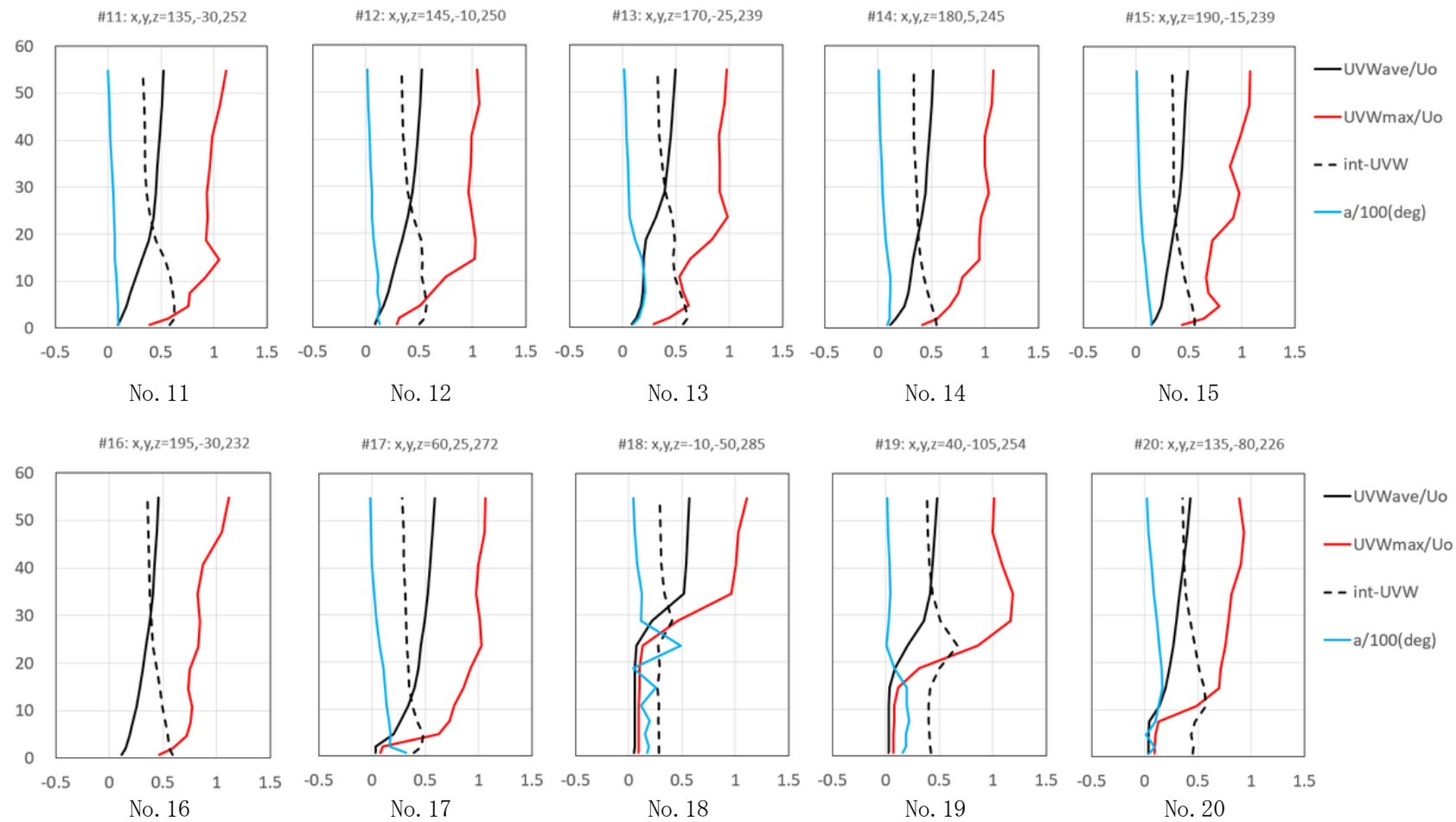
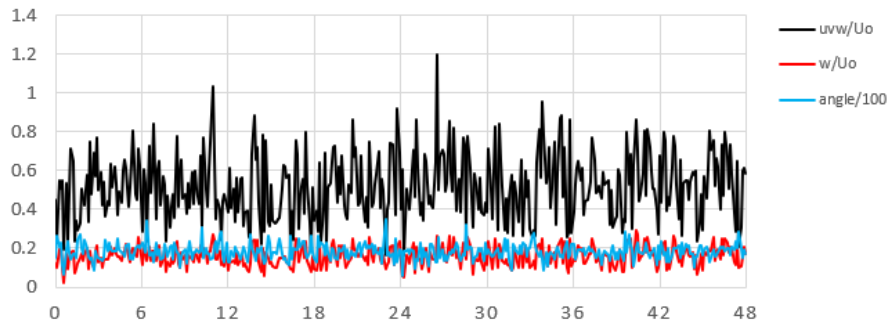
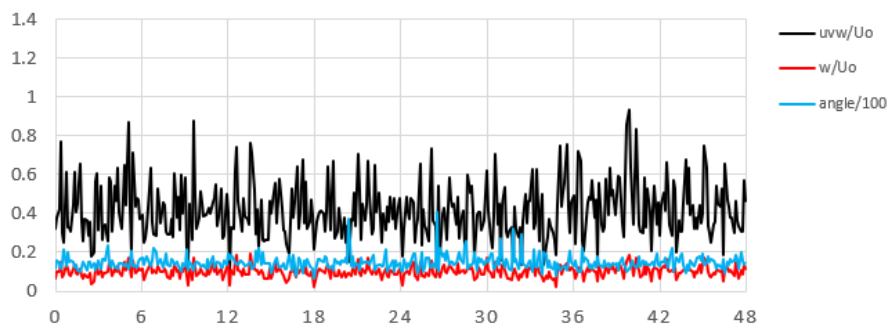


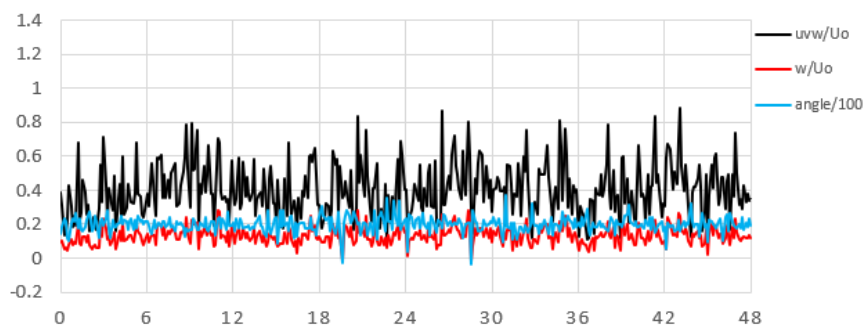
図 4-9 風向南西、地点 11~20 における平均・最大実効風速および乱れ強さ、鉛直方向風向角の鉛直プロフィール



Point 1 : X, Y, Z = 5, 5, 293 (m)

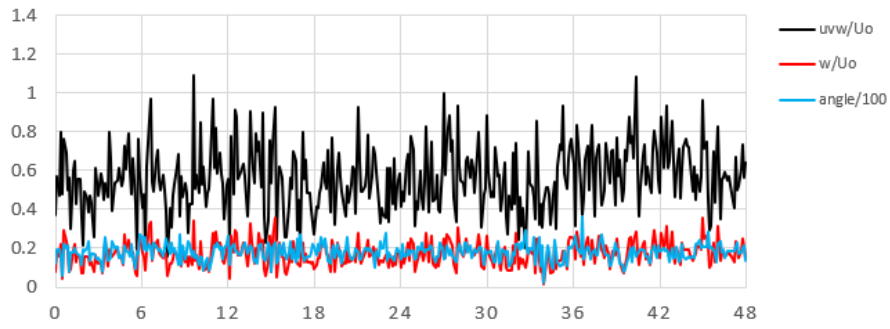


Point 2 : X, Y, Z = 25, 0, 285 (m)

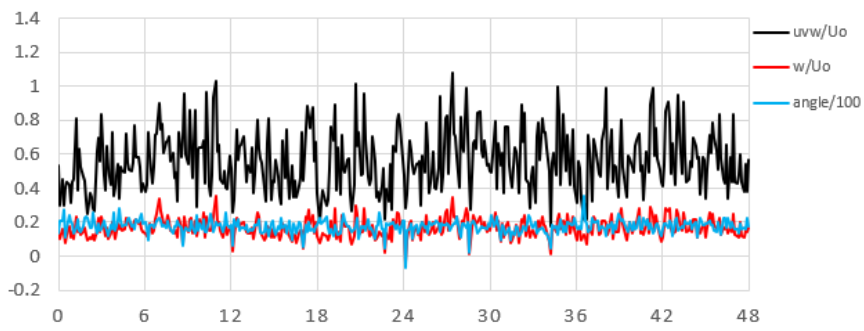


Point 3 : X, Y, Z = -5, -15, 291 (m)

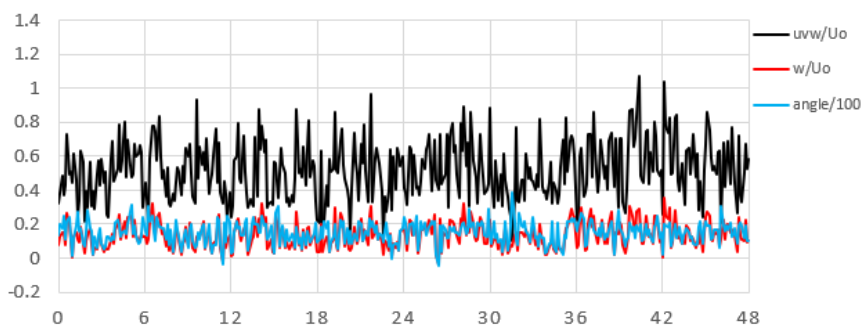
図 4-10 風向南東、地点 1~3 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 4 : X, Y, Z = 40, -15, 279 (m)

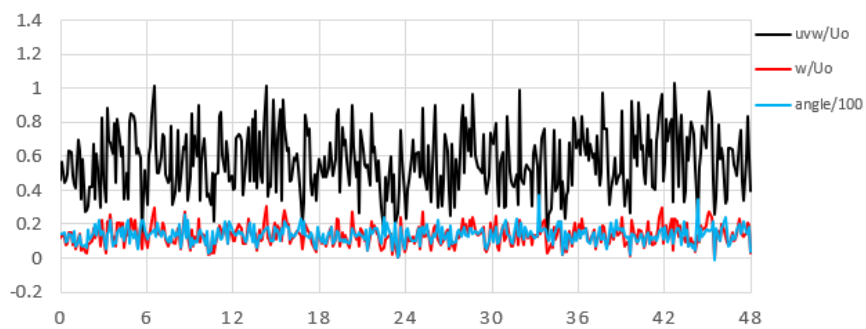


Point 5 : X, Y, Z = 5, -25, 288 (m)

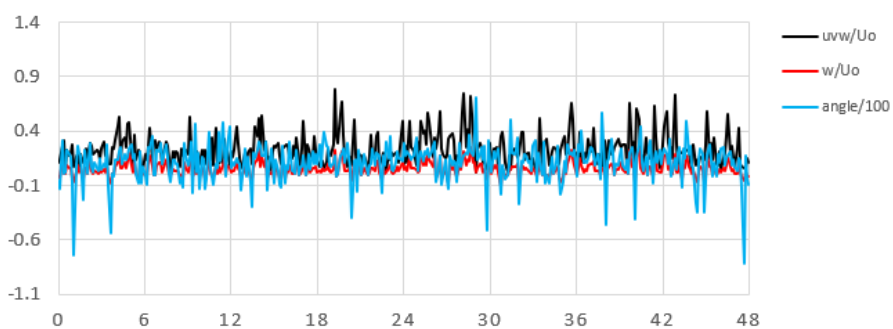


Point 6 : X, Y, Z = 45, -45, 273 (m)

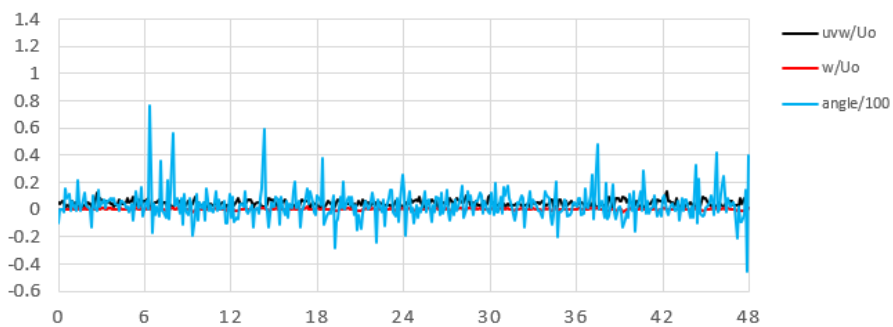
図 4-11 風向南東、地点 4~6 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 7 : X, Y, Z = 75, -40, 263 (m)

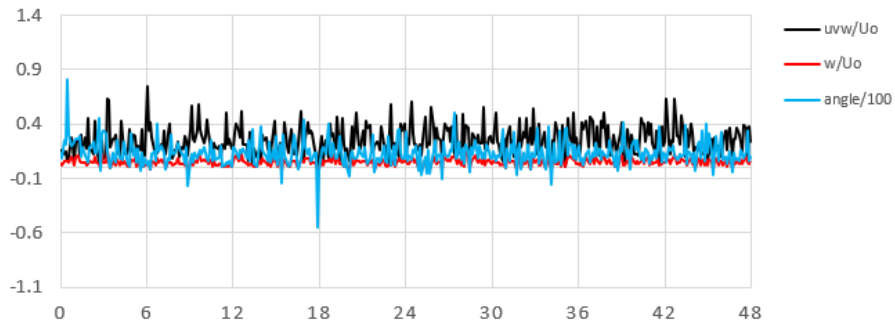


Point 8 : X, Y, Z = 50, -65, 265 (m)

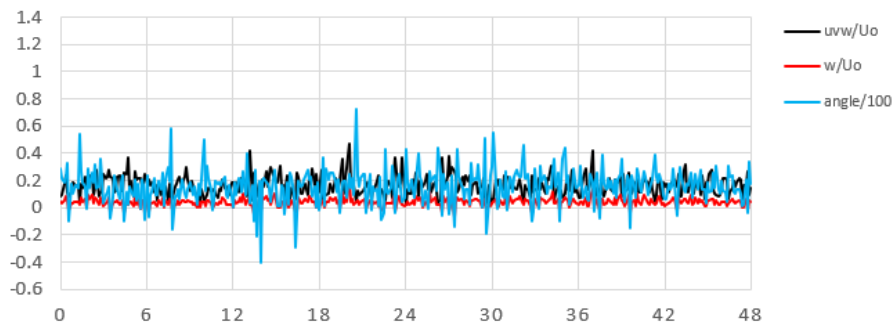


Point 9 : X, Y, Z = 160, -135, 188 (m)

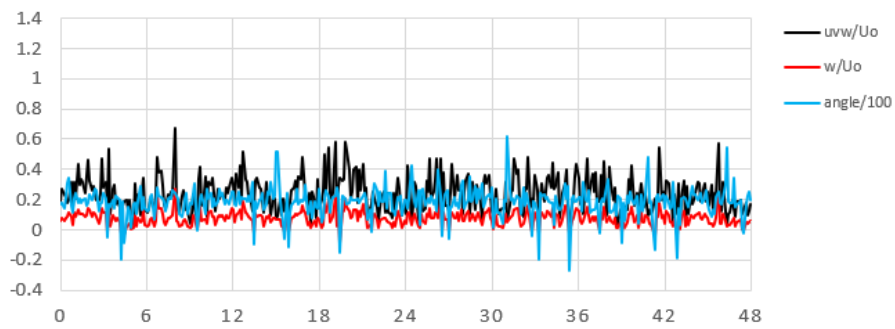
図 4-12 風向南東、地点 7~9 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 10 : X, Y, Z = 105, -40, 255 (m)

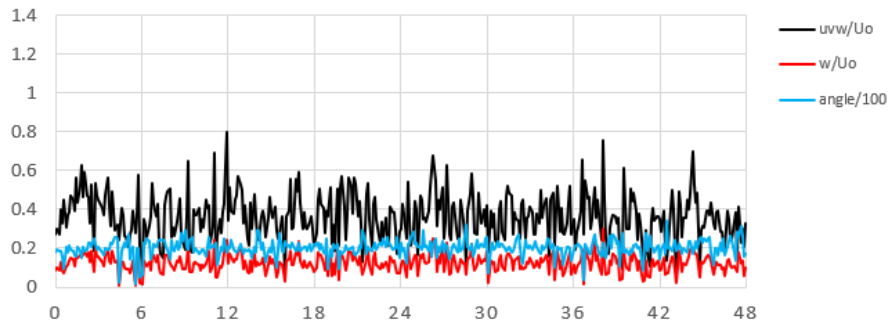


Point 11 : X, Y, Z = 135, -30, 252 (m)

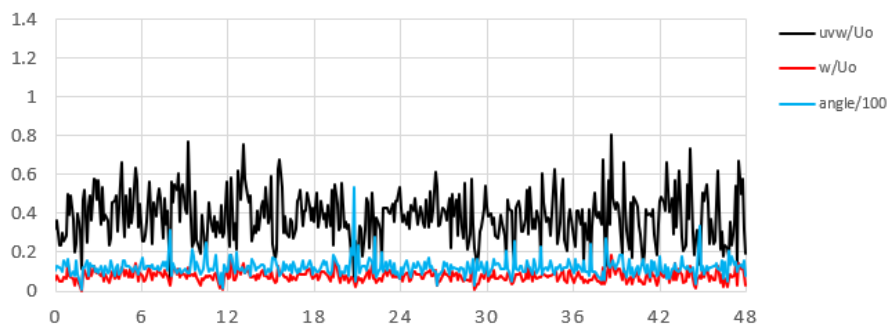


Point 12 : X, Y, Z = 145, -10, 250 (m)

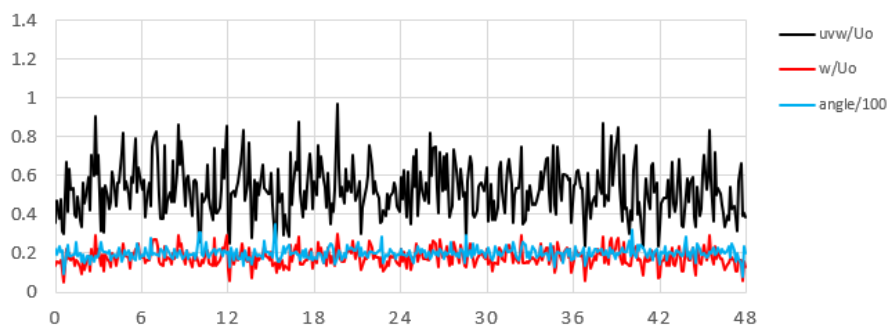
図 4-13 風向南東、地点 10~12 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 13 : X, Y, Z = 170, -25, 239 (m)

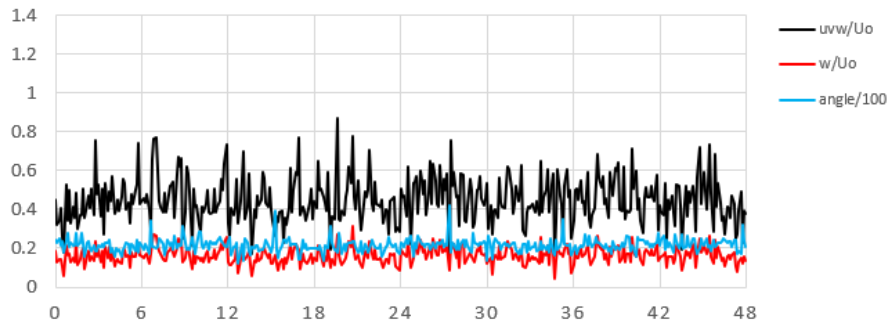


Point 14 : X, Y, Z = 180, 5, 245 (m)

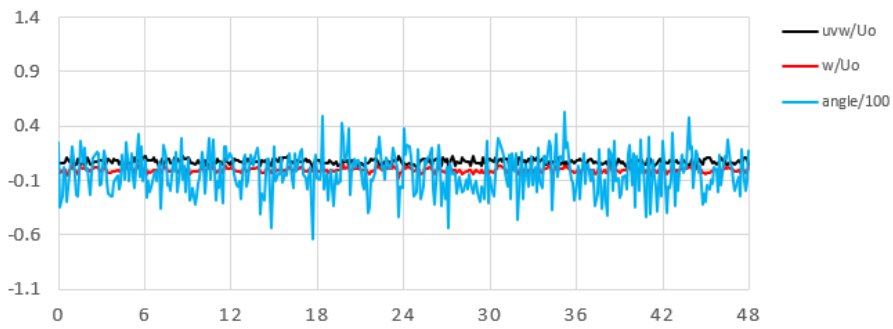


Point 15 : X, Y, Z = 190, -15, 239 (m)

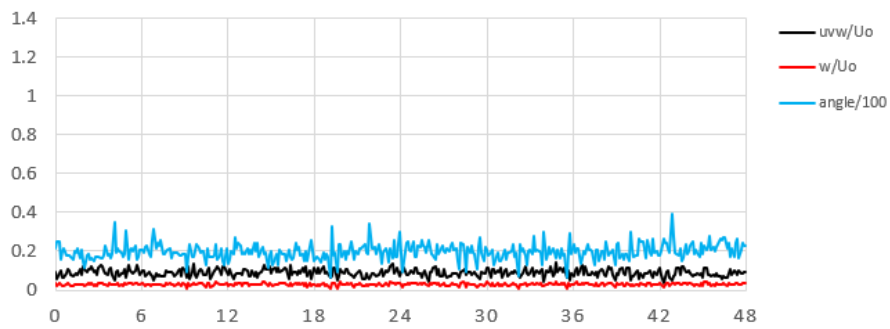
図 4-14 風向南東、地点 13~15 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 16 : X, Y, Z = 195, -30, 232 (m)

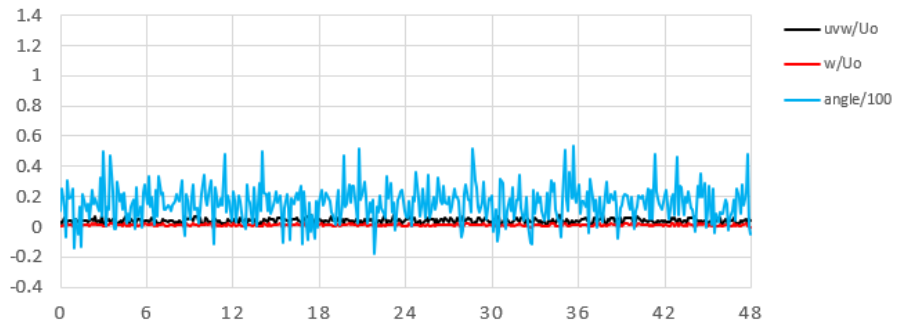


Point 17 : X, Y, Z = 60, 25, 272 (m)

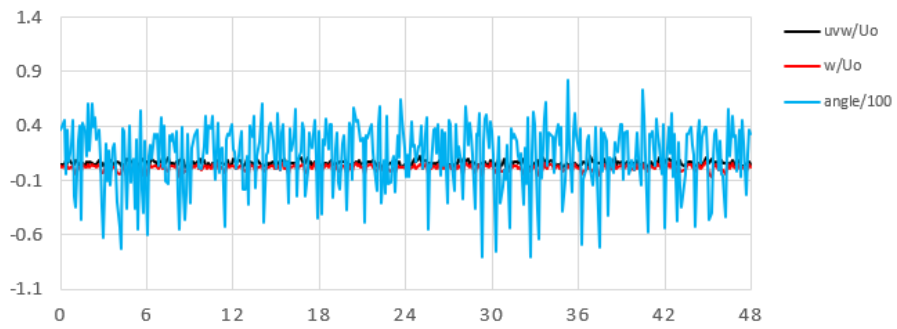


Point 18 : X, Y, Z = -10, -50, 285 (m)

図 4-15 風向南東、地点 16~18 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化

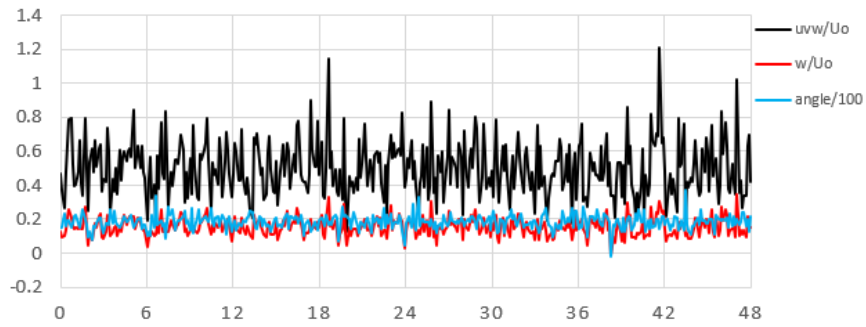


Point 19 : X, Y, Z = 40, -105, 254 (m)

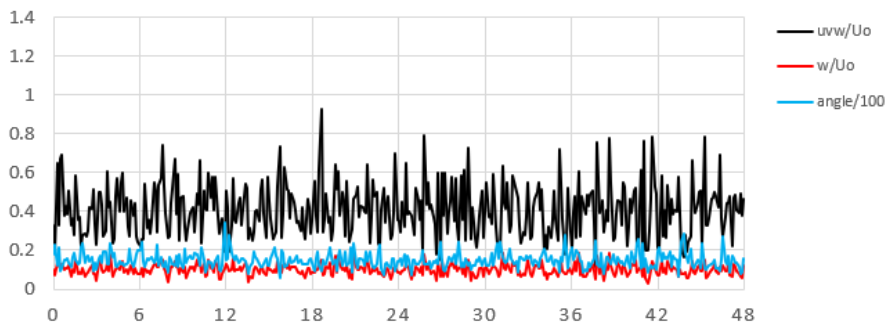


Point 20 : X, Y, Z = 135, -80, 226 (m)

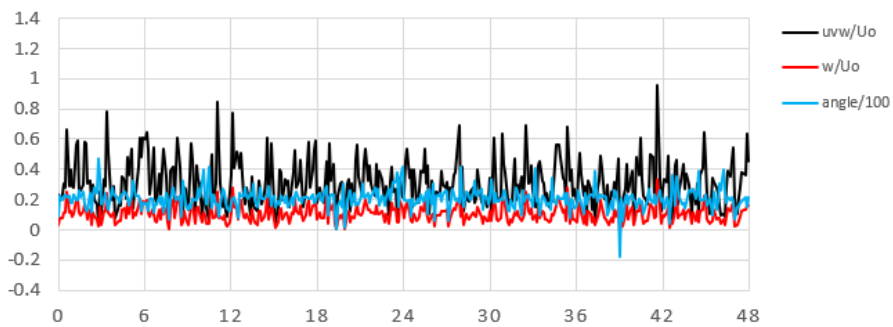
図 4-16 風向南東、地点 19~20 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 1 : X, Y, Z = 5, 5, 293 (m)

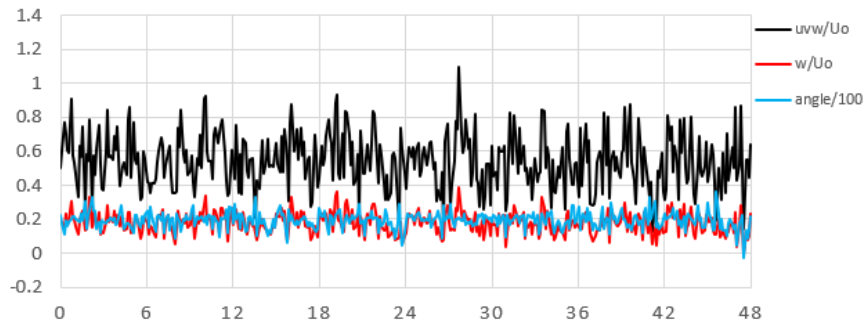


Point 2 : X, Y, Z = 25, 0, 285 (m)

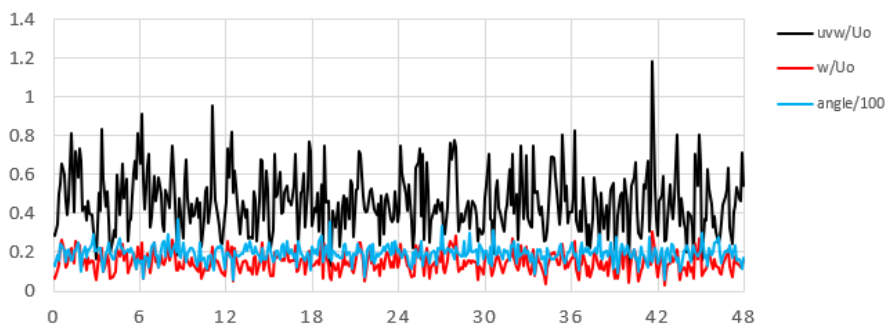


Point 3 : X, Y, Z = -5, -15, 291 (m)

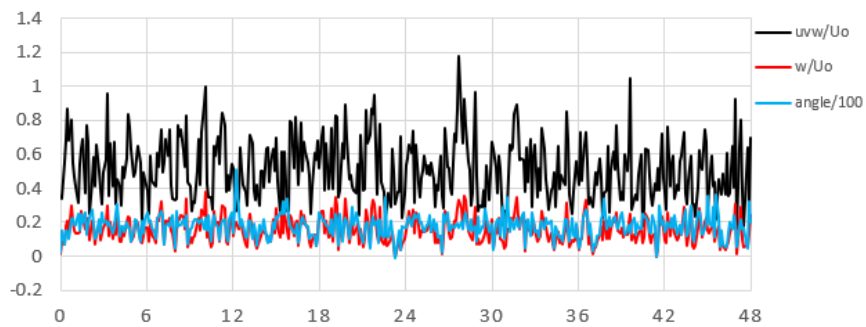
図 4-17 風向南南東、地点 1~3 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 4 : X, Y, Z = 40, -15, 279 (m)

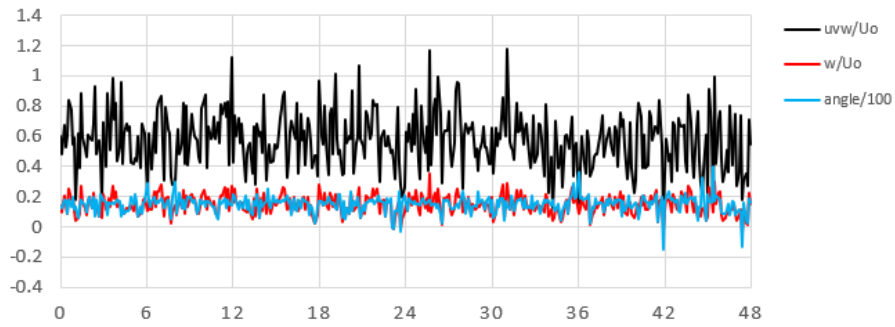


Point 5 : X, Y, Z = 5, -25, 288 (m)

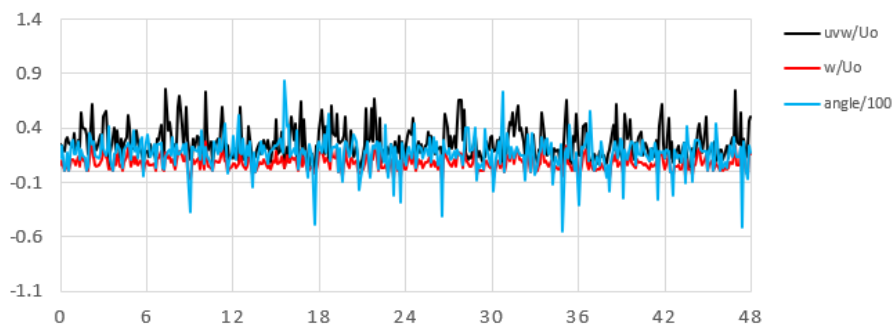


Point 6 : X, Y, Z = 45, -45, 273 (m)

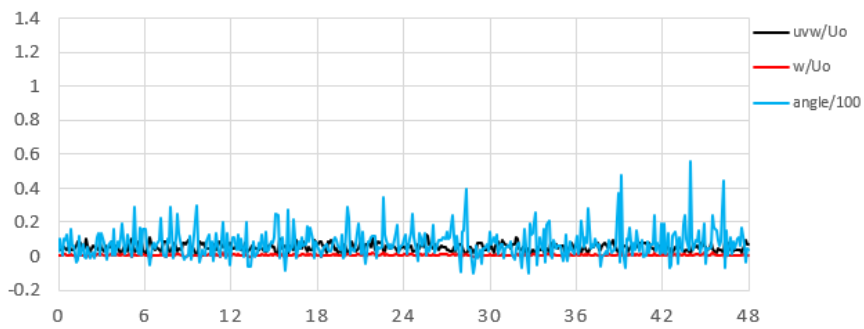
図 4-18 風向南南東、地点 4~6 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 7 : X, Y, Z = 75, -40, 263 (m)

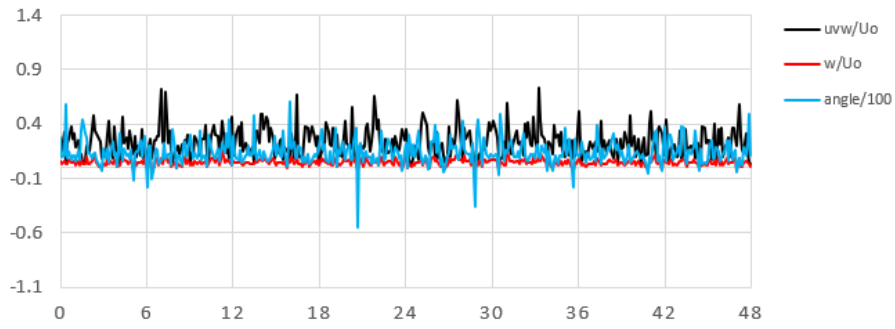


Point 8 : X, Y, Z = 50, -65, 265 (m)

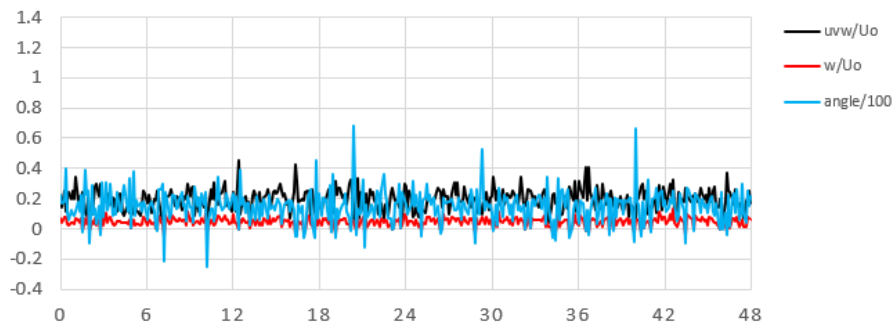


Point 9 : X, Y, Z = 160, -135, 188 (m)

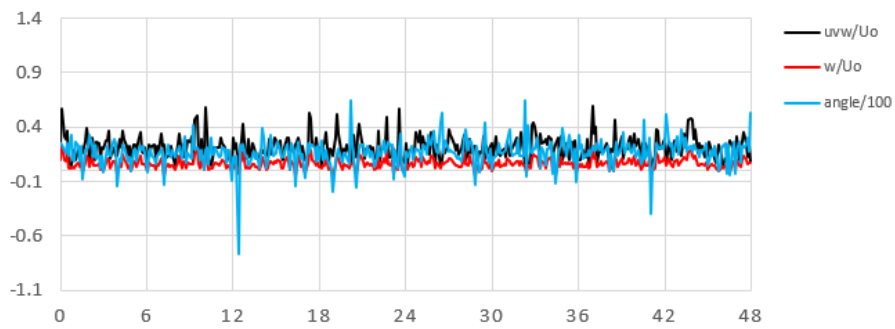
図 4-19 風向南南東、地点 7~9 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 10 : X, Y, Z = 105, -40, 255 (m)

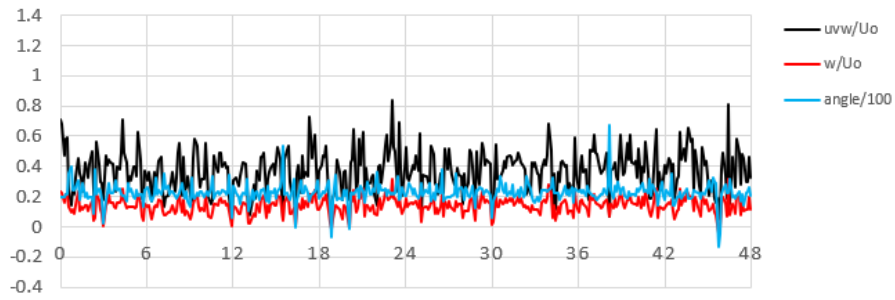


Point 11 : X, Y, Z = 135, -30, 252 (m)

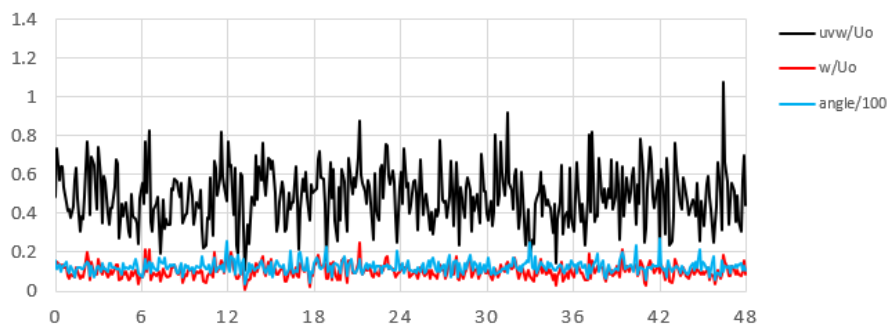


Point 12 : X, Y, Z = 145, -10, 250 (m)

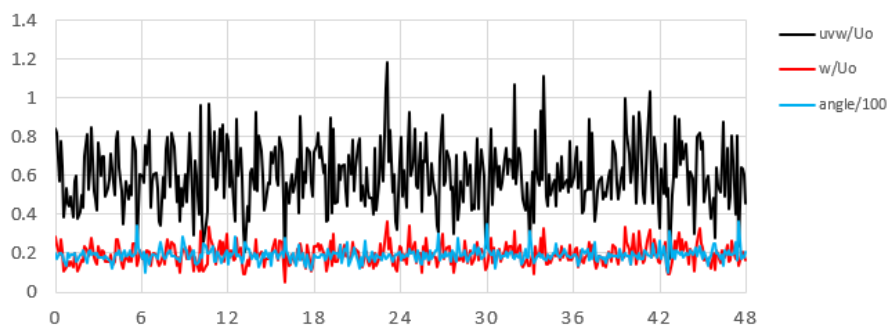
図 4-20 風向南南東、地点 10~12 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 13 : X, Y, Z = 170, -25, 239 (m)

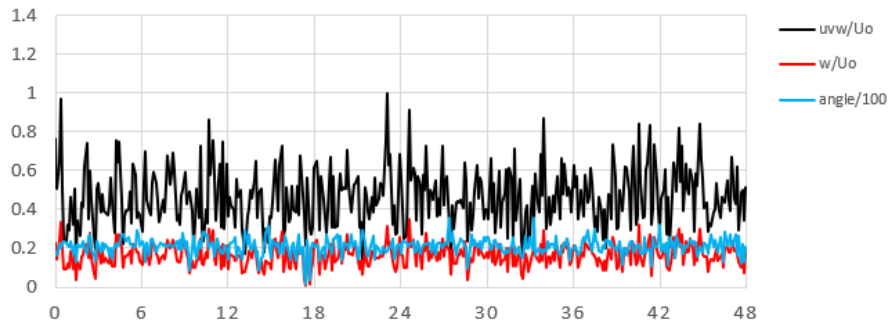


Point 14 : X, Y, Z = 180, 5, 245 (m)

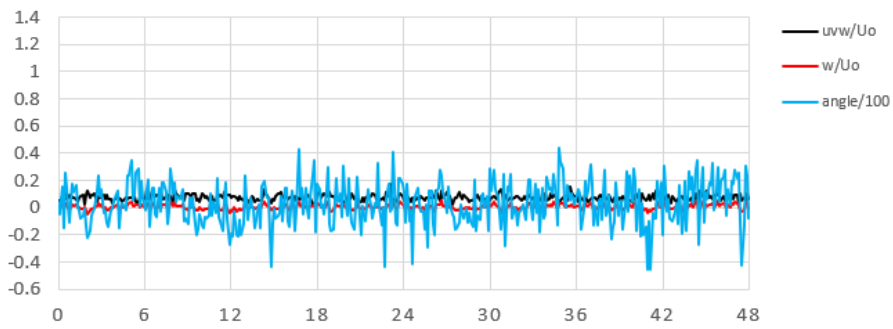


Point 15 : X, Y, Z = 190, -15, 239 (m)

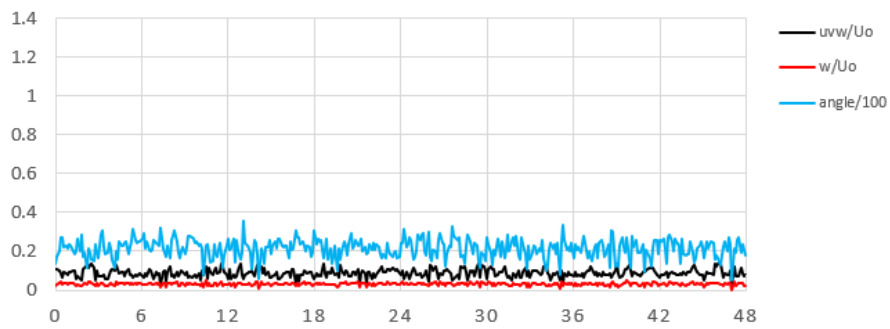
図 4-21 風向南南東、地点 13~15 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 16 : X, Y, Z = 195, -30, 232 (m)

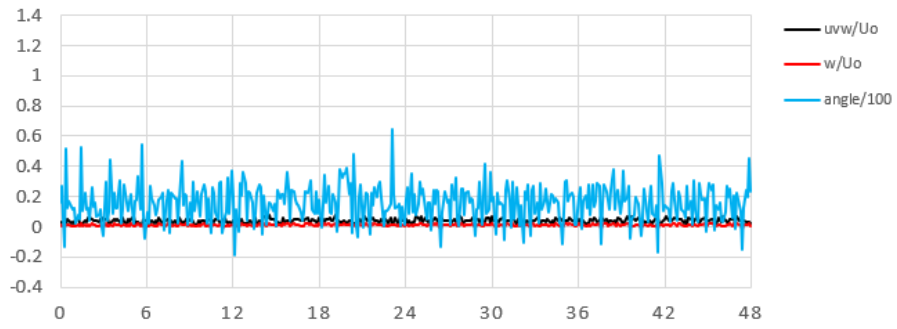


Point 17 : X, Y, Z = 60, 25, 272 (m)

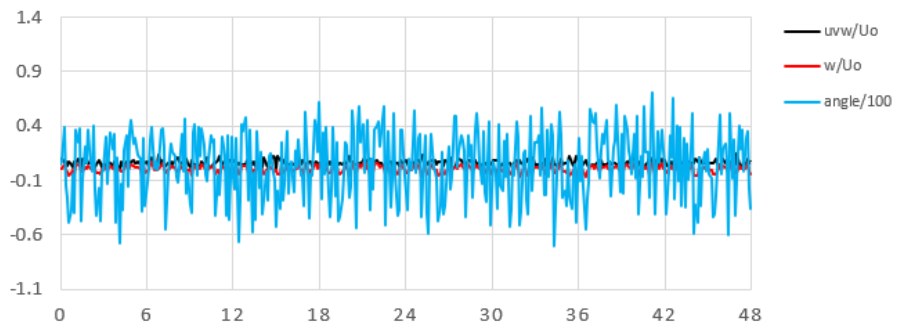


Point 18 : X, Y, Z = -10, -50, 285 (m)

図 4-22 風向南南東、地点 16~18 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化

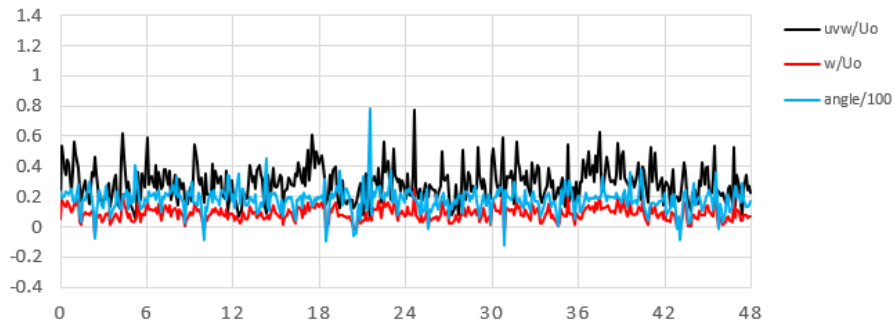


Point 19 : X, Y, Z = 40, -105, 254 (m)

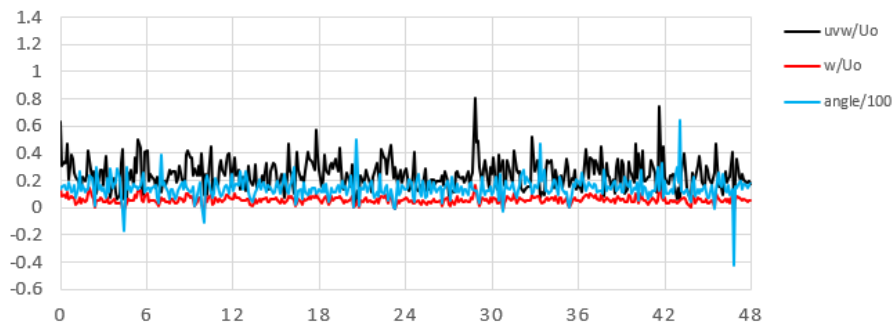


Point 20 : X, Y, Z = 135, -80, 226 (m)

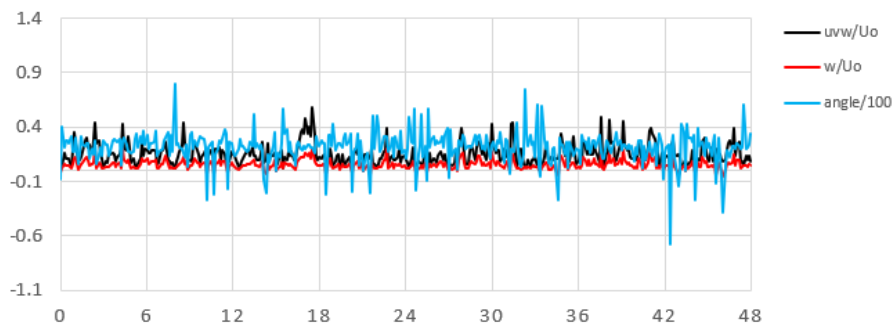
図 4-23 風向南南東、地点 19~20 の地上 2mにおける実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 1 : X, Y, Z = 5, 5, 293 (m)

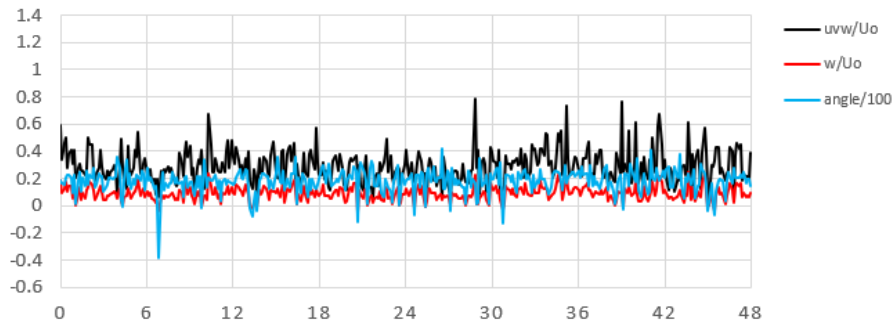


Point 2 : X, Y, Z = 25, 0, 285 (m)

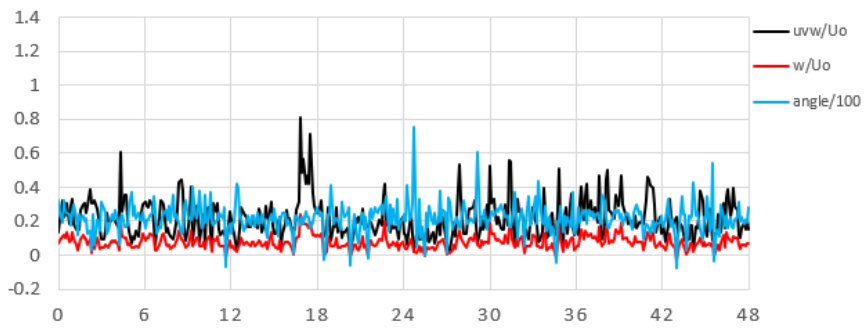


Point 3 : X, Y, Z = -5, -15, 291 (m)

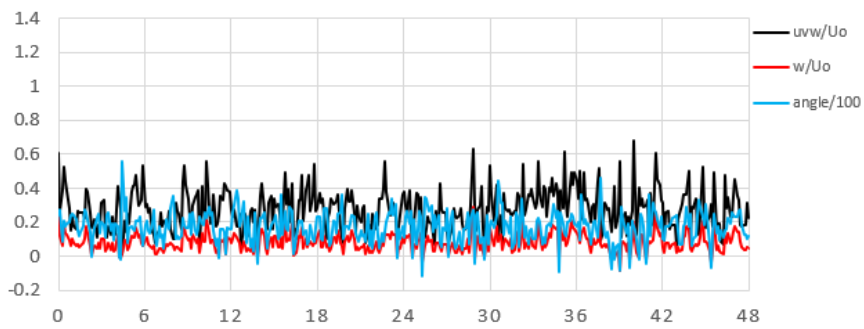
図 4-24 風向南、地点 1~3 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 4 : X, Y, Z = 40, -15, 279 (m)

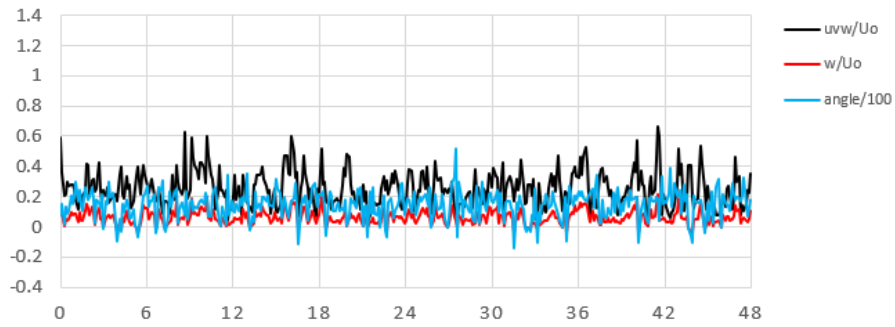


Point 5 : X, Y, Z = 5, -25, 288 (m)

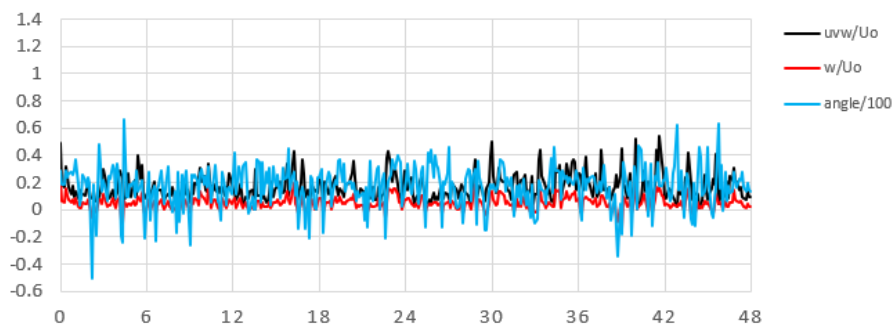


Point 6 : X, Y, Z = 45, -45, 273 (m)

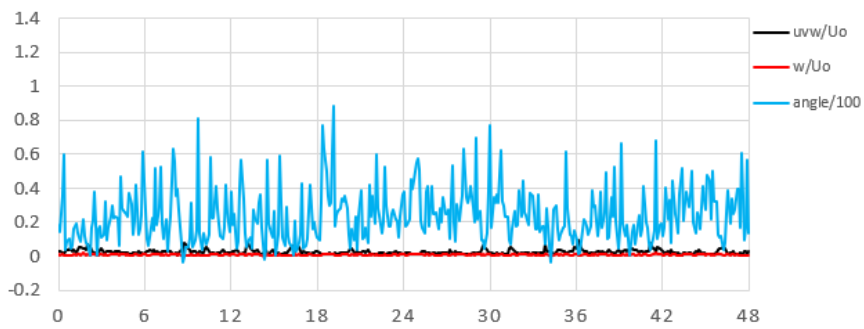
図 4-25 風向南、地点 4~6 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 7 : X, Y, Z = 75, -40, 263 (m)

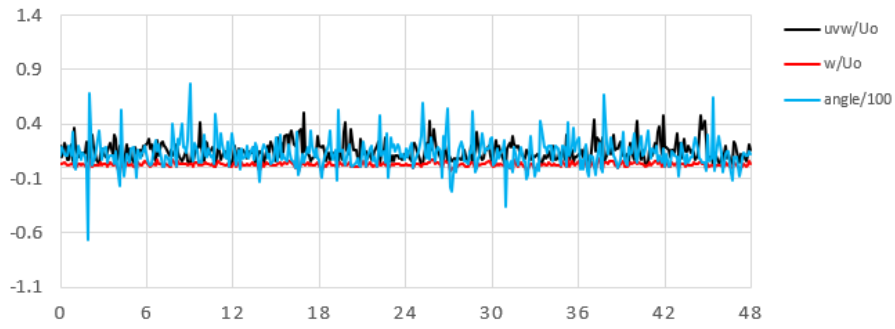


Point 8 : X, Y, Z = 50, -65, 265 (m)

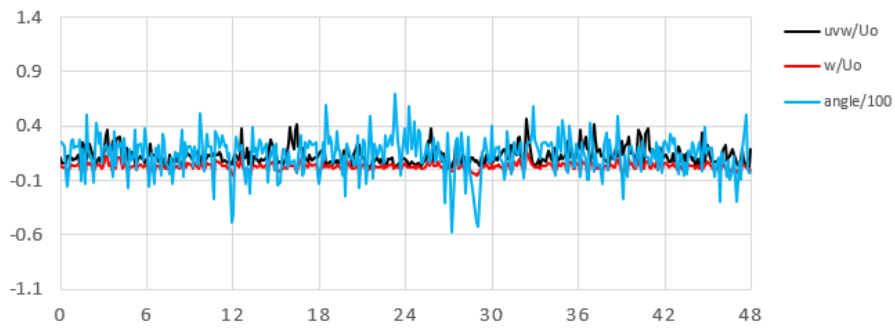


Point 9 : X, Y, Z = 160, -135, 188 (m)

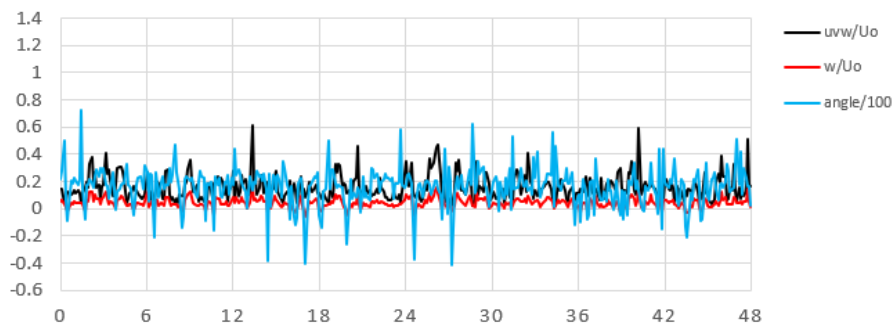
図 4-26 風向南、地点 7~9 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 10 : X, Y, Z = 105, -40, 255 (m)

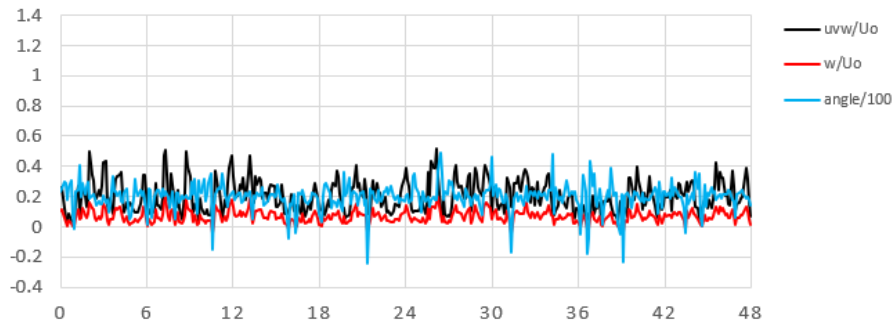


Point 11 : X, Y, Z = 135, -30, 252 (m)

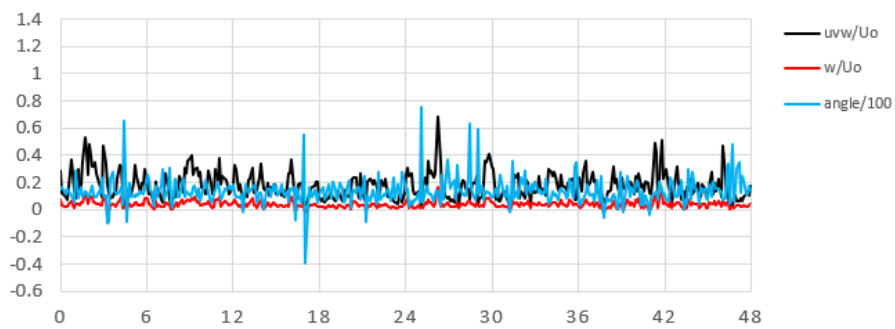


Point 12 : X, Y, Z = 145, -10, 250 (m)

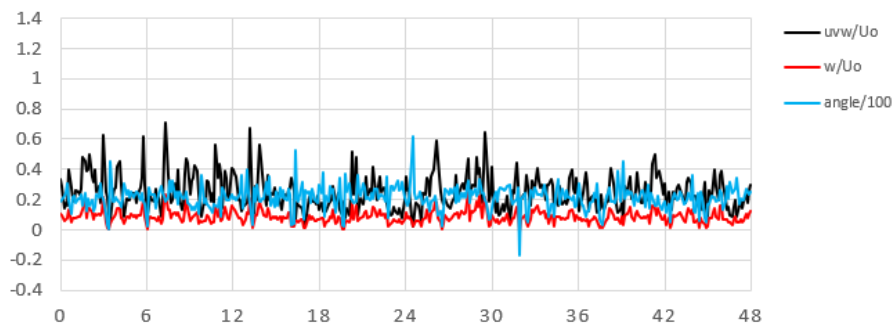
図 4-27 風向南、地点 10~12 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 13 : X, Y, Z = 170, -25, 239 (m)

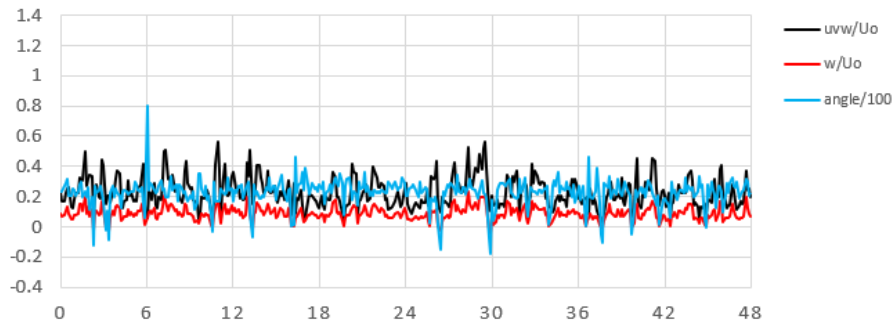


Point 14 : X, Y, Z = 180, 5, 245 (m)

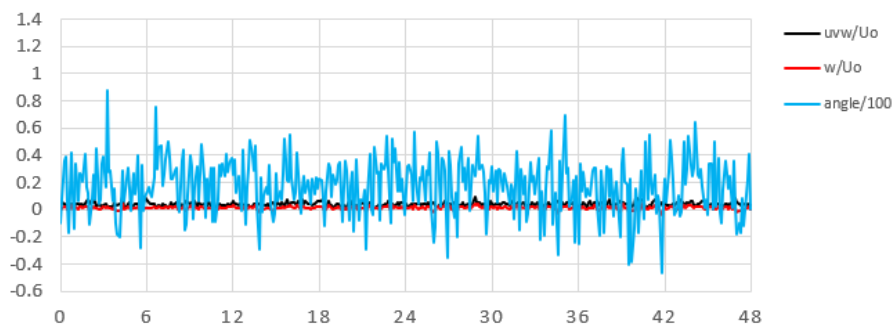


Point 15 : X, Y, Z = 190, -15, 239 (m)

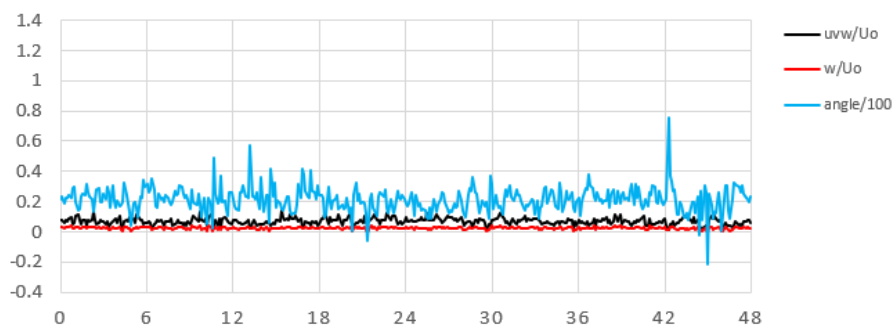
図 4-28 風向南、地点 13~15 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 16 : X, Y, Z = 195, -30, 232 (m)



Point 17 : X, Y, Z = 60, 25, 272 (m)



Point 18 : X, Y, Z = -10, -50, 285 (m)

図 4-29 風向南、地点 16~18 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化

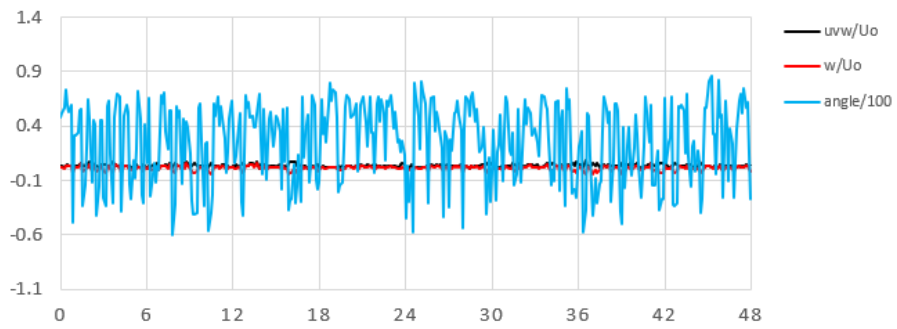
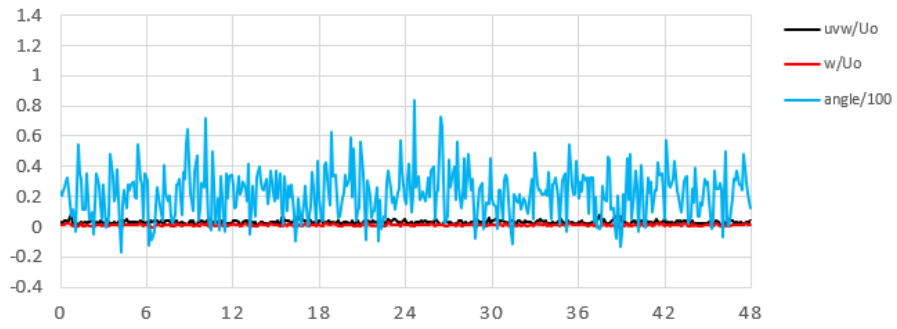
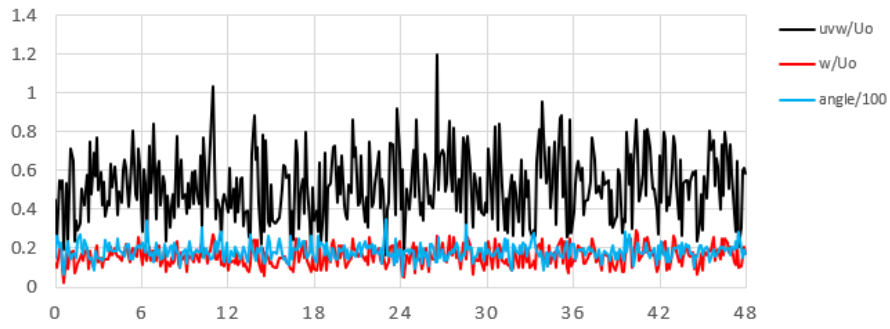
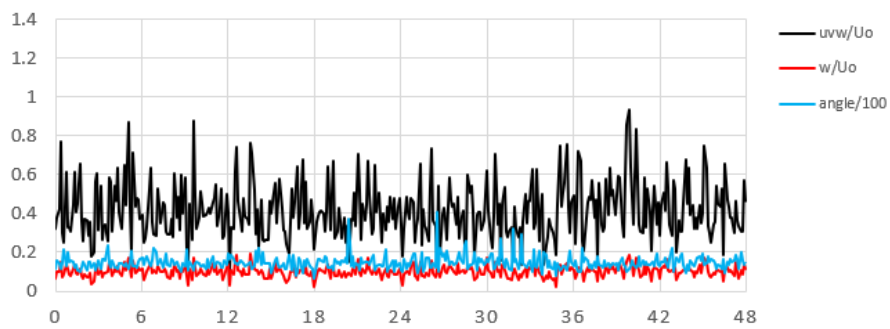


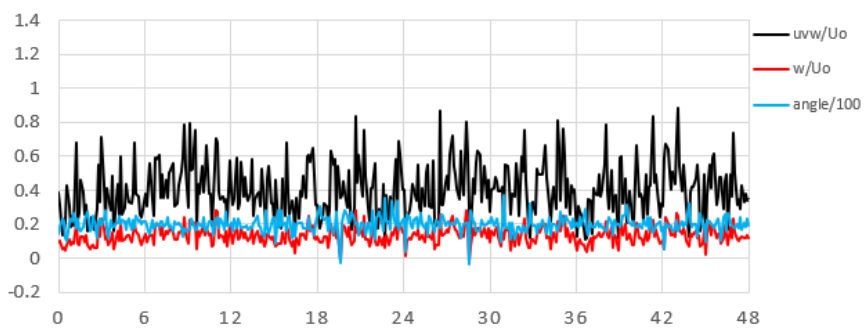
図 4-30 風向南、地点 19~20 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 1 : X, Y, Z = 5, 5, 293 (m)

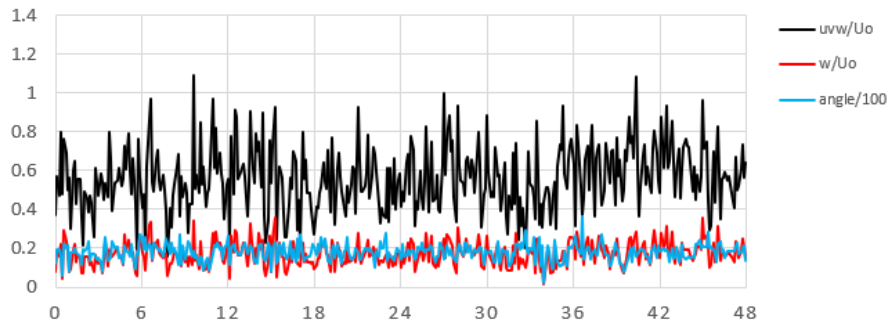


Point 2 : X, Y, Z = 25, 0, 285 (m)

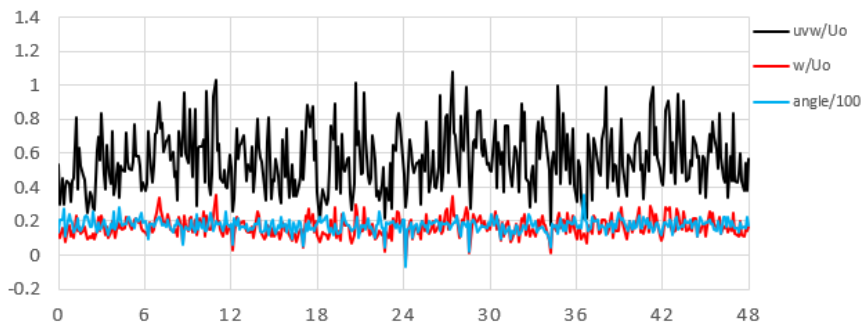


Point 3 : X, Y, Z = -5, -15, 291 (m)

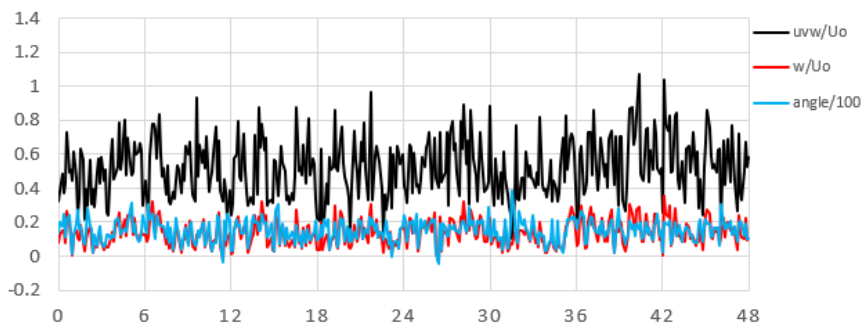
図 4-31 風向南西、地点 1~3 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 4 : X, Y, Z = 40, -15, 279 (m)

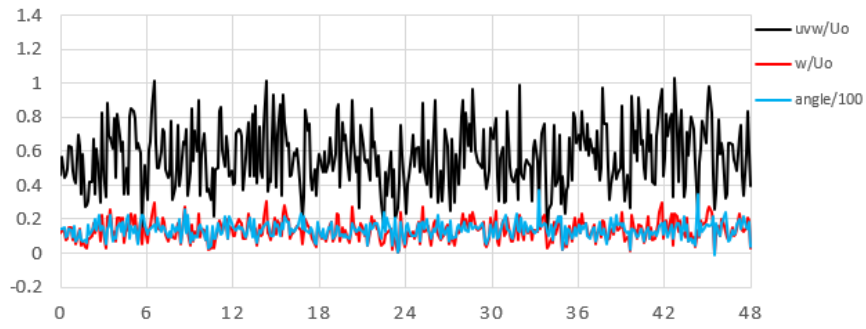


Point 5 : X, Y, Z = 5, -25, 288 (m)

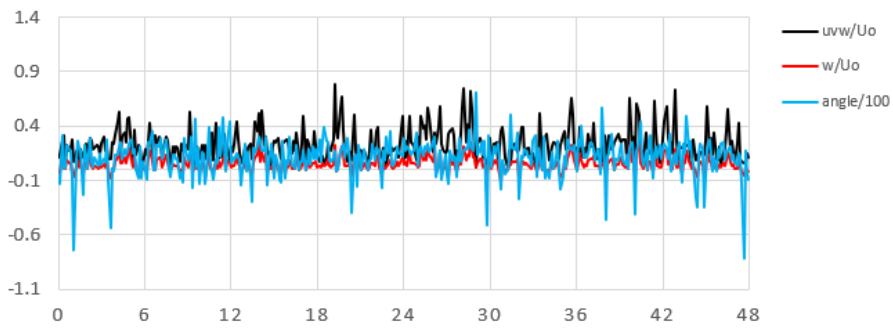


Point 6 : X, Y, Z = 45, -45, 273 (m)

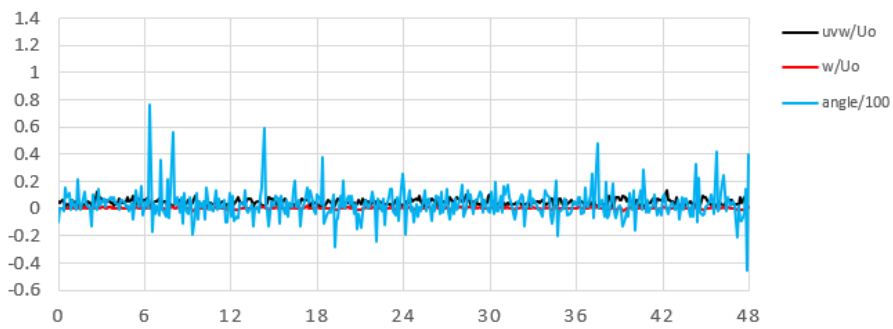
図 4-32 風向南西、地点 4~6 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 7 : X, Y, Z = 75, -40, 263 (m)

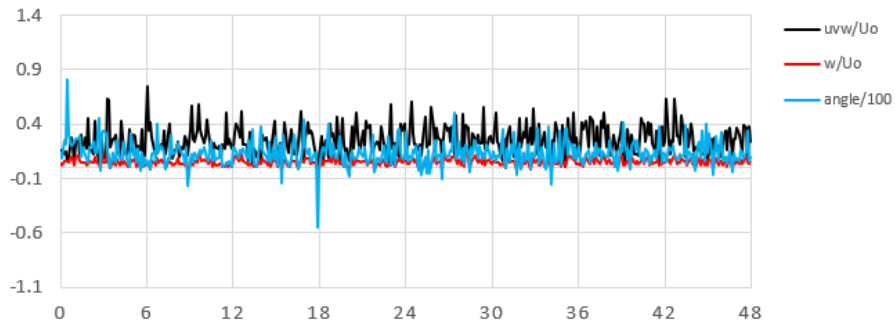


Point 8 : X, Y, Z = 50, -65, 265 (m)

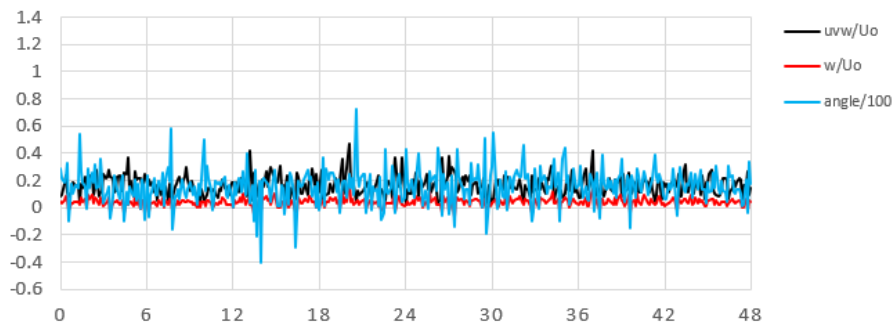


Point 9 : X, Y, Z = 160, -135, 188 (m)

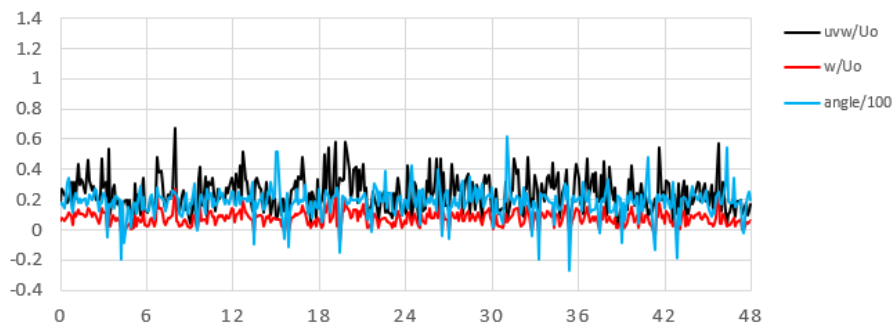
図 4-33 風向南西、地点 7~9 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 10 : X, Y, Z = 105, -40, 255 (m)

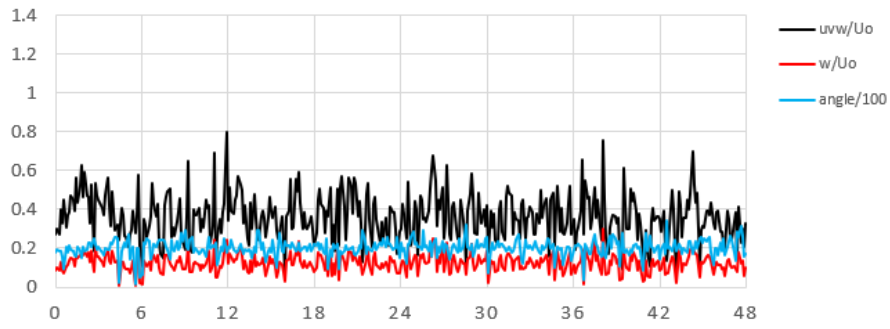


Point 11 : X, Y, Z = 135, -30, 252 (m)

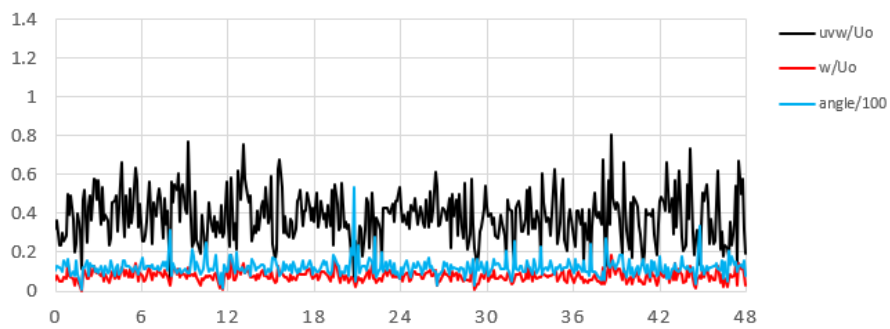


Point 12 : X, Y, Z = 145, -10, 250 (m)

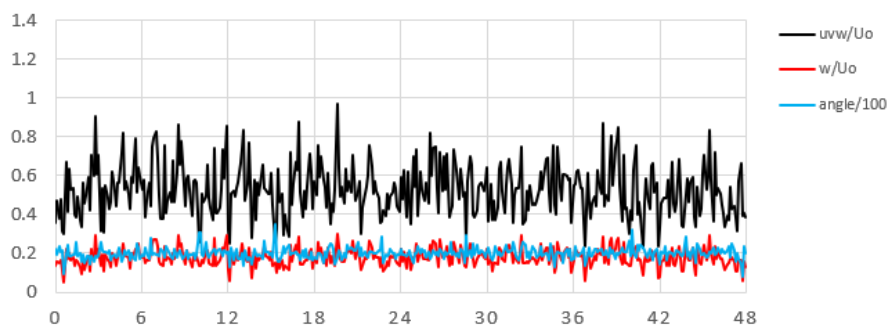
図 4-34 風向南西、地点 10~12 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 13 : X, Y, Z = 170, -25, 239 (m)

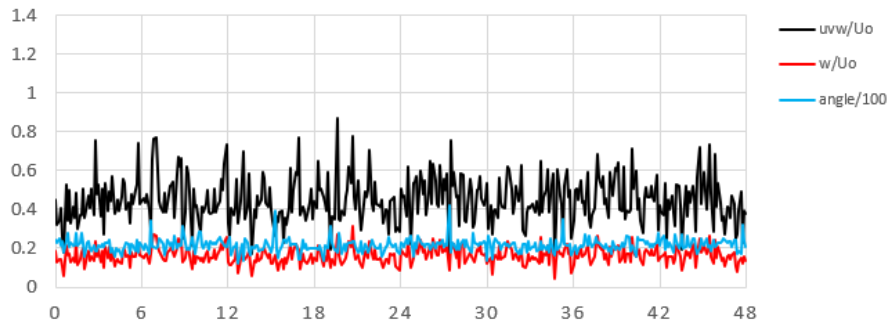


Point 14 : X, Y, Z = 180, 5, 245 (m)

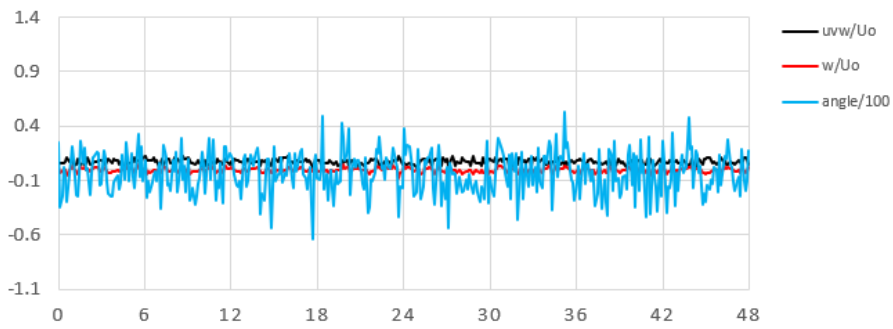


Point 15 : X, Y, Z = 190, -15, 239 (m)

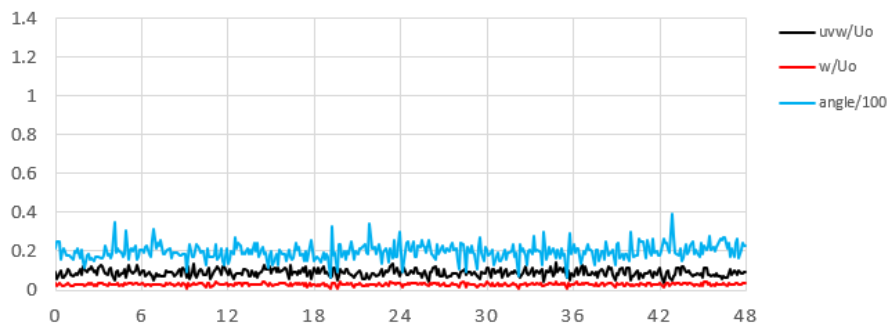
図 4-35 風向南西、地点 13~15 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 16 : X, Y, Z = 195, -30, 232 (m)

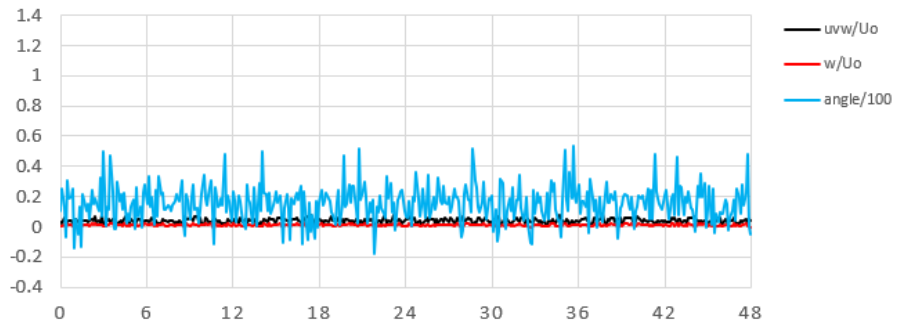


Point 17 : X, Y, Z = 60, 25, 272 (m)

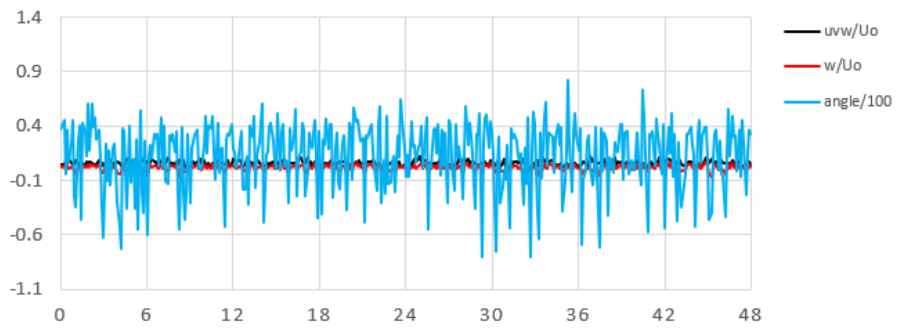


Point 18 : X, Y, Z = -10, -50, 285 (m)

図 4-36 風向南西、地点 16~18 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化



Point 19 : X, Y, Z = 40, -105, 254 (m)



Point 20 : X, Y, Z = 135, -80, 226 (m)

図 4-37 風向南西、地点 19~20 の地上 2m における実効風速、鉛直方向風速
および、鉛直方向風向角の時間変化

5. おわりに

本資料では、2019年台風19号にともなう強風により被害が発生した、静岡県伊東市の太陽光発電設備における被害発生当時の気流性状を検討するため、変動風速場を再現することのできる、ラージエディシミュレーションを用いた数値解析によって周辺気流の再現計算を行った。解析に際しては、周辺の地形の起伏の影響を取り込むために、遠方3km（敷地を中心として、6km四方）まで解析領域を広げて計算を行った。さらに、周辺の植生の気流に及ぼす影響を取り込むため、植物による抵抗を取り込むことのできるキャノピーモデルを用いた解析を行った。

計算結果を見ると、山の斜面を切り開いて作られた発電設備のなかで、被害が生じた敷地北西部分で、風速（平均値および最大値）が大きくなることが分かった。また、周辺の樹木が生えている部分では、風速が減少する様子も再現された。風速の時間変化を見ると、長い周期で大きな風速が発生する地点・場合が見られ、これは周囲の地形の起伏に起因する接近流の大きな乱れが原因と考えられる。また、敷地が斜面の林を切り開いた場所で、林の中に開けた部分であるため、窪地に風が吹き込む状況となっていることも、乱れが大きくなる原因と考えられる。このような周辺の樹木の影響は、キャノピーモデルを用いた解析を行わなければ再現できないものである。周辺の樹木の影響を取り込むことができない（キャノピーモデルを用いない）解析では、平均風速は樹木の影響を取り入れた場合よりも大きくなるが、周辺の樹木の影響による乱れは再現することができないので、敷地内の風速の増減など、詳細な予測精度は低くなると考えられる。また、風速変動が大きくなるため、レイノルズ応力モデルのような変動風速場を解析することが出来ない乱流モデルでは、被害予測に重要な最大瞬間風速の予測も難しいと考えられる。

以上まとめると、斜面上の太陽光発電設備のように、山地の林を切り開いた場所の気流解析を行う場合、変動風速の予測を行いたい場合の数値解析手法としては、

- ・ 解析手法としては、変動風速場の解析が可能なラージエディシミュレーションを用いた解析を推奨する
- ・ 解析範囲に関しては、評価対象部分への変動流入風の状況が再現できるように十分に広い範囲まで地形をモデル化する。
- ・ キャノピーモデルによって樹木による効果を考慮する

などが、妥当な解析結果を得るために重要な項目であると考えられる。

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。