

原題	Investigation of turbulence measurements with a continuous wave, conically scanning LiDAR		
邦題	連続光コニカルスキャン式LiDARの乱流計測	国籍	デンマーク
発表者	Rozenn Wagner, Torben Mikkelsen, Michael Courtney, Rosoe DTU		
キーワード	Lidar, turbulence, conical scan		

## 概要

LiDARは正確で信頼できる観測ができるようになってきた。平坦地での平均風速の観測ではカップ風速計と同等の観測ができるということは何度も明らかにされてきた。はたして乱流の計測はできるのか。

連続光コニカルスキャン式LiDARのZephIRで調べてみた。まず第1にLiDARで計測する風速の標準偏差はカップ風速計で計測する場合の約80%である。この差異は連続光コニカルスキャン式では必然となる領域平均化に由来する。領域平均化は次の2ステップで行なわれる。1) レーザービームのプロープ空間にある風速の加重平均化  
2) スキャン円周上の風速の平均化。

従い、LiDARで計測される標準偏差は、スキャンする円の直径と平均風速に依存する、ある長さのスケールより大きな乱流構造しか表現できない(100mの次元)。しかしZephIRはそれとは異なる別の乱流要素=乱流パラメータ(TP)を与え、より微小な長さスケールの乱流構造も表現できる。

この研究ではまずLiDARが風速を観測する際に行なう領域平均化の影響を表現するための「乱流の空間フィルタリング(volumetric filtering)」を提唱する。次に理論値を、何台かのZephIRで観測した実測データと比較して、両方の乱流要素(大きなスケールの乱流構造と小さなスケールの乱流構造?)についてそのモデルを評価する。

## 1. 序文

LiDARは高層までカップ風速計と同様の精度で10分平均風速の観測はできるようになったが乱流計測ではどうだろうか。風速の標準偏差はリモートセンシング機器でvolume計測される場合と、風速計でpoint計測する場合とは、本質的に異なる。CW-LiDARのZephIRで得られる空間平均(volume averaging)効果を考えてみる。

まず、ある高度の計測は、レーザービームを必要な距離に焦点を合わせて計測する。レーザービーム方向の風速radial speedはプロープ空間の荷重平均値から算出される。「乱流の空間フィルター」を使って、このプロープ空間の平均化の影響を表現できることがZephIRについてわかっている。

次に、ZephIRは1秒1回転の速さで空間を1回もしくは3回円錐スキャンし、円周上のラジアル風速から水平平均風速を得ている。したがってLiDAR鉛直上方の円周に沿って平均化が行なわれる。円錐スキャンLiDARが風速を出すための領域平均化をここで記述し、円錐スキャンの影響について詳しく調べる。前人が作ったモデルを改良し、理論値と実測地を比較して検証する。

この比較を実施するため、ZephIRから出てくる2つの観測値を使う。1つは風速の標準偏差、もう1つは乱流パラメータturbulence parameterである。これら2つのパラメータは乱流の異なるスケールについて情報を与えてくれる。風速の標準偏差は珍しくないがLiDARで計測される場合は領域平均化のため、カップ風速計の標準偏差とは異なる。一方乱流パラメータは単純なものではなく、乱流の共分散の中でどのような意味を持つのか、さらに説明が必要となる。

よって2つの主な研究対象:

- ・ 円錐スキャンの領域平均化のフィルター影響を表現するモデルを定義し検証する。
- ・ ZephIRで観測される標準偏差と乱流パラメータの意味を把握する。

## 2. 空間平均の理論

### 2.1 静止ビーム上のプロープ空間平均化

ZephIRは同軸の連続光レーザーと受光システムから成る。機能を説明するためにまず1つの固定した向きしか見ていないLiDARを想定する。LiDARは連続光レーザーを照射して、空中の微小物からはね返ってきたドップラー

変位を観測する。ドップラー変位はビーム方向の風速  $V_r = \text{風速ベクトル}u$ のビーム方向への投影に比例する。

連続光 LiDAR は与えられた距離  $r$  に焦点を合わせビーム方向に投影された風速を測る。レーザーのパワーは焦点を極大値としてビーム方向に、ある分布をなす。ビーム風速  $V_r$  は一般的に、場の風速  $u$  のビーム方向への投影をビーム方向に積分することにより観測される。

$$\text{式(1)} \quad V_r(r)$$

$n$  はビーム方向の単位ベクトル、 $(s)$  は領域平均化関数で、フォーカス式連続光コヒーレントドップラー LiDAR の場合、ローレンツ関数(分布)で近似できる。

$$\text{式(2)} \quad (s)$$

$s$  は焦点からビームに沿う距離、 $Z_R$  はレーザー長さといひ、ZephIR 特有の値として  $Z_R = 0.0013r^2$  と推定されている。

ビーム方向での風速平均化では、風速のパワースペクトルに対してローパスフィルターの効果が現れ、プローブ空間の長さ(通常  $2Z_R$  で定義される)より小さなスケールの乱流構造を排除する。ビームが風速と同一方向とするとの wave-number domain 中の counterpart は次のようになる。

$$\text{式(3)} \quad L_{\text{Lorentzian}}$$

$k_1$  は風向の方向での wave number。実際の LiDAR と超音波風速計との比較で、このフィルター効果が検証されている。

一方 LiDAR の視線が風向と同一方向とはならないとすると、LiDAR で空間平均化されて観測される風速のスペクトルと、超音波風速計で同時に計測される風速 component のスペクトルの比率は、乱流の三次元構造全体に依存することになる。この研究で検討しているのは風速の標準偏差、すなわちスペクトルの integral であり、スペクトルの形状には依存しない。レーザーで計測されるスペクトルは、風向と同一でない場合、分布形状は違っていても integral は同じと考える。

## 2.2 円錐スキンの円周上の領域平均化

ある高さで三次元の風ベクトルを得るためには、異なった角度でのラジアル風速が必要となる。ZephIR の場合鉛直軸から  $30^\circ$  の円錐形で 1 秒 1 回転空中スキャンし、ドップラースペクトルを 200,000Hz で取得する。連続する 4000 個のドップラースペクトルを s/n 比改善のため 1 つのグループ(20 ミリ秒・角度で  $7.2^\circ \approx 100\text{m}$  で 7.26m)にして平均すると、平らな Shot-noise floor の上に明確なドップラーピークが現れる。平均した各スペクトルから centroid 法によりピーク周波数  $f_{\text{peak}}$  を求めラジアル風速が決まる。ラジアル風速  $V_r$  とピーク周波数は次の正比例の関係にある。

$$f_{\text{peak}} = 2V_r / \lambda \quad \lambda \text{ はレーザー波長}$$

1 回転あたり通常 50 個のラジアル風速が得られる。

図 1 円錐スキンの様子。グレーはレーザービームのパワー分布。赤い点はドップラースペクトルが平均される角度  $7.2^\circ$  の中心。

反射光の信号は照射光と混合されるので、この LiDAR システムはドップラーシフトの符号(風が向かってくるのか遠ざかるのか)を判別できない。したがって 50 もしくは 150 のラジアル風速は、スキャン方位角の関数として、平滑したコサインカーブを描く。

$$V_r(\theta) =$$

これと円錐角  $\theta$  により風向  $\text{wind}$ 、水平風速  $u$ 、垂直風速  $w$  が算出される。

図 2 3 秒スキャンの例。黒点は実測ラジアルスピード、赤線は図の上に示す近似曲線。

2008 年春までスキャン時間は 3 秒(ひとつの風速ベクトルを決定するために 3 回転)に固定されていたが、その後 1 秒か 3 秒かを選択できるようになった(ラジアル風速を 50 個か 150 個か)。この研究では両方の設定を調べた。

最初のステップとして、スキャンすることで生じる領域平均化の影響を表現する単純なフィルター定義することにある。ごく短時間の有効的な水平面内平均化長さスケールは、タイムラグと円形 coverage 相互の複合的な結果によ

るものと推測される。ZephIR の場合、平均風速  $U$  で流れる直径  $D$  の円がカバーする距離を意味する。図3に風の場合すなわち  $X$  軸の方向に平均風速  $U$  で移動する、風の場合に張り付いた座標系内に描かれたレーザーの軌跡を示す。この図から、有効的な水平長さスケール  $laz$  すなわち  $n$  秒間 ( $n=1$  or  $3$ ) の円錐スキャンから生ずる有効的なフィルター平均化の長さスケールは、第1次近似として次のように表わされる。 $z$  は観測の鉛直高さ。

式(4)  $laz$

図3 高さ50mの風速10m/sの風に乗って流れるスキャン軌跡。1秒緑、3秒青。この図により風の流れと円錐スキャンの複合的な影響を代表する長さスケールを推測できる。

円錐スキャンには風速スペクトルに対してやはりローパスフィルターの影響を及ぼす。長さスケール  $laz$  より小さな乱流構造は、円錐スキャンの LiDAR に効率的に観測されない。ラジアル風速の大きさは方位角によって、平滑したコサインカーブに沿って変化する(図2)ので、乱流の水平成分は長さスケール  $laz$  に対して一様にはフィルターをかけられない。図4参照。

図4 上半分はラジアル風速のそれぞれ風向方向、直交方向の分布(円錐の上から見た平面図)。下半分は乱流のそれぞれ風向方向、直交方向の成分。

係数の関数は流れの方向で、平滑化したサインカーブ(5)となり、直角の方向では(6)となる。これらに対応するパワースペクトル変換関数は、フーリエ変換を波数の帯域で無次元化と矩形化(normalizing and squaring)することにより得られる。

式(5)(6)  $f(x)$

鉛直成分に関しては、すべての偏差が一様となるので、この効果の表現は単純な矩形フィルター関数となる(図5)。対応するパワースペクトル変換関数は、この波数の帯域で sine cardinal function ( $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ ) である。

式(7)  $f(x)$

図5 ラジアル風速の鉛直方向の分布。乱流の鉛直方向の成分。

### 3. LiDAR の乱流計測

#### 3.1 連続光コニカルスキャン式 LiDAR の乱流観測は我々に何を語るか

ZephIR は乱流に関して二つの異なる計測をもたらす。一つは1秒か3秒間の水平風速の10分間の標準偏差である。計測結果からこれはカップ風速計の場合の約80%である。図6参照。理由は第2章に述べた主に空間平均化による。円錐スキャン式の LiDAR で計測できる風速の標準偏差は、乱流の一部 = 先に定義した  $laz$  より小さな乱流に対して効果的な分解能を持たない。

二つ目は、走査する円周に沿ったラジアル風速の乱流強度で「乱流パラメータ(TP)」と呼ばれる。

式(8)  $TP_{1\text{sec}}$

$\langle \rangle$  は1周2すなわち1秒間のラジアル風速の分散である。3秒スキャンの場合3周分の平均値  $TP_{3\text{sec}}$  が定義される。TPとは、近似平均したコサイン曲線の、円周に沿って計測された計測値への乗り方である。この値は、 $laz$  より小さいがレーザービームのプロープ空間の長さよりは大きい乱流構造の情報を含んでいる。

図6 ZephIR(3秒スキャン)とカップ風速計で同時に計測した10分風速標準偏差の回帰図。

#### 3.2 Kaimal スペクトル

空間フィルターの影響を評価するため、波数空間へ変換した Kaimal スペクトルを使う。観測される周波数と波数の変換は Taylor の frozen-wave 仮説(乱流が形を変えずに移流する)に基づく。波数空間における、風向に沿った Kaimal スペクトルは次のようになる。

$$\text{式(9)} \quad F_u(k_i)$$

図7 黒 = 風向方向の Kaimal スペクトル(参照)。左図紫 = Lorentzian フィルター適用。緑 = スキャンフィルター適用。右図赤 = LiDAR で得られた風向方向の 10 分乱流スペクトル。青 = 円錐スキャンが検知できない乱流を表わすハイパスフィルターをかけて得られる乱流スペクトル(式 17 参照)。例示条件略。

図7左が示すのは Kaimal スペクトルの風向に沿った成分上の2つのフィルター $L_{\text{Lorentzian}}$ と $L_{\text{SCAN}}$ それぞれの効果である。いずれも領域平均化(プローブ空間とスキャン空域)の過程でローパスフィルターのように振る舞い、小さな乱流構造(高い波数)をはじき出してしまふ。円錐スキャンの効果はプローブ空間の平均化よりずっと強いので、両方の効果の組み合わせ(図7右図の赤スペクトル)はスキャンフィルター $L_{\text{SCAN}}$ (図7左図の緑スペクトル)に非常に近いローパスフィルターと結果的に同じである。

最初に図7右に参考として Kaimal スペクトルの第1 component を示す。その積分は風速の分散である。

$$\text{式(10)} \quad u^2$$

2番目に図7右に両フィルターの組み合わせを適用した結果得られるスペクトル(赤)を示す。水平面のみ乱流があり鉛直に乱れない理想的な風速の場合において、このスペクトルの積分は連続光コニカルスキャン式 LiDAR で計測される風速の分散に対応する。

$$\text{式(11)} \quad \langle u^2 \rangle$$

大きな構造(lazより長いスケール)の乱流が残る。現実にはラジアル風速に水平風速も鉛直風速も関係してくるから、LiDAR で計測される風速の標準偏差は風向に沿った乱流のスペクトルのみから得られるものではない。しかしこの研究の対象は、連続光コニカルスキャン式 LiDAR が行なう領域平均化を表わす簡易的なモデルを作ることにある。したがって、ここでは LiDAR で計測される標準偏差は風向に沿った乱流のみに起因するというラフな前提とする。すなわち式(11)は三次元乱流についても適用されるものと仮定する。

3番目に図7右に Lorentzian 関数に該当するローパスフィルターとスキャンフィルターを補完するハイパスフィルターを適用した結果得られるスペクトル(青)を示す。

$$\text{式(12)} \quad \langle u^2 \rangle_{10\text{min}}$$

この式は、乱流の風向方向のコンポーネントに由来する、ラジアル風速の分散に該当するものである。それは1秒間(もしくは3秒間)の平均値であるため、lazの長さスケールより小さく、プローブ長さ(2z)スケールより大きな乱流構造に該当する。TP乱流パラメータは小さな浮遊物の乱流の性質なので、TPは3次元すべてのスペクトルの高周波成分帯を組み合わせたものとなる。

$$\text{式(13)} \quad \langle (TP_{1\text{sec}} \times u_{1\text{sec}})^2 \rangle$$

## 4. 実験

### 4.1 実験の方法(要約)

デンマーク西岸での RisoeDTU タワー vs LiDAR 計測結果の比較を実施。

- ・ タワーの観測高度は 100, 80, 60, 40m でカップと 3D 超音波風速計両方。マストの影響風向帯は除外。
- ・ ZephIR は3台使用。1台は3秒スキャンの標準型。2台は1秒スキャンができる改造型。いずれもタワーから50m離して配置。
- ・ 降雨時のデータ除外。ZephIR 計測値に低雲の影響が出るため雲底が 1600mより低いときのデータ除外。
- ・ 実験1)2007年秋に3秒スキャンで実施。LiDAR と超音波風速計で 40, 80, 100m 計測・比較
- ・ 実験2)2008年春に1秒スキャンで実施。LiDAR と超音波風速計で 60, 100m 計測・比較(80m 超音波故障)
- ・ 実験3)2009年2月に1秒スキャンで実施。LiDAR と超音波風速計で 80mのみ計測・比較
- ・ 乱流計測はノイズの影響を受けやすいので、10分間の計測可能な標本数の65%以上を有効に使える10分間データのみを採用

### 4.2 結果

領域平均化の効果を観察するため両データについて比較する。風速の標準偏差とラジアル風速の分散につい

てモデルと計測値を各観測高度で比較し、これにより領域平均化の影響の変化を高度とともに観察ができる。また長さスケール  $l_{az}$  はスキャンの観測回転数に依存するため、1 回転と 3 回転の結果を別に示す。

#### 1) 標準偏差

図8 3 回スキャンの ZephIR で観測された風速標準偏差とカップ風速計で観測された風速標準偏差の比と、3 章で提示したモデルの比較

図9 1 回スキャンの場合

図10 異なる 8 つの地形で観測された ZephIR とカップ風速計の標準偏差の比を比較した図

#### 2) ラジアル風速の分散

次の式で比較。

$$\langle v_r^2 \rangle_{\text{ZephIR}} \text{ と } \langle v_r^2 \rangle_{\text{sonic}}$$

図11 3 回スキャンの ZephIR で観測されたラジアル風速と 3D 超音波風速計で観測されたラジアル風速の比と、3 章で提示したモデルの比較

図12 1 回スキャンの場合

### 5. 検討

#### 5.1 標準偏差

平坦地における LiDAR で計測される標準偏差はカップ風速計の約 80%であることが確かめられる。領域平均化に起因する乱流フィルターを使ったモデルは実験結果良好。空間平均化が LiDAR とカップの風速標準偏差値の相違の原因であることがわかる。

この二つの装置で計測される標準偏差の比は高さとともに減少することがわかる。実際、平均化を行なう空間は高さとともに大きくなる。最後に LiDAR の場合 1 秒間のスキャンで観測する方が 3 秒間のスキャンに比べてこの比は高くなる。1 秒間のスキャンで平均化を行なう空間が 3 秒間のスキャンに比べて小さいことが直接の原因となる。

#### 5.2 ラジアル風速の分散 ( $TP \times U$ )<sup>2</sup>

高さとともに減少する。平均化の領域空間の増大と、小さな乱流構造の量の減少などの直接要因が複合的に働いているためである。

1 秒、3 秒スキャンのどちらのケースにおいても低高度 (40m, 80m) でのモデルと観測値の合致を見たが高高度では合わなかった。一因として TP は平滑したコサインカーブへのラジアル風速の乗り方 (TP は乱流だけでなくノイズのような観測誤差も孕む) に依存する。小さな乱流構造の量は高さとともに減少するため、高高度で  $\langle v_r^2 \rangle$  が乱流よりも誤差やノイズに影響されるためではないかと考えられる。

### 6. 総括

LiDAR による領域平均化の影響を表現するために乱流の空間フィルターを定義した。領域平均化の本質部分を理解するという目的のために、モデルは極力シンプルなものとした。これは大雑把な近似を意味する。にもかかわらず、実験で得られた結果の平均はモデルによく乗った。ということは LiDAR とカップ風速計で観測する風速の標準偏差値の違いは、主に領域の平均化によるものであるということがわかる。

連続光コンカルスキャン式 LiDAR は平均的に、風速計で計測する風速標準偏差の約 80%を計測する。走査する円領域より小さな長さスケールの乱流を検出できないためである。また ZephIR が計測する乱流パラメータ TP は、より小さな動きの情報を記録することができる。一方 TP は風速ベクトルを計算する際の、計算へのラジアル風速の乗り方の度合いを示すものなので、TP はノイズの影響を受け易く、高周波乱流の平均的なインジケータとしてのみ見るべきである。

以上