

ドップラーライダーによる水平運動量の鉛直フラックスの推定

Estimation of vertical flux of horizontal momentum by Doppler lidar

岩井宏徳¹、村山泰啓¹、小田僚子¹、石井昌憲¹、水谷耕平¹、板部敏和¹、常松展充²、山田泉³、又吉直樹⁴、松島大⁵、余偉明⁶、山崎剛⁶、岩崎俊樹⁶
 Hironori Iwai¹, Yasuhiro Murayama¹, Ryoko Oda¹, Shoken Ishii¹, Kohei Mizutani¹, Toshikazu Itabe¹,
 Tsunematsu Nobumitsu², Izumi Yamada³, Naoki Matayoshi⁴, Dai Matsushima⁵,
 Weiming Sha⁶, Takeshi Yamazaki⁶, Toshiki Iwasaki⁶

¹情報通信研究機構、²千葉大学、³電子航法研究所、⁴宇宙航空研究開発機構、⁵千葉工業大学、⁶東北大学

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Chiba University, ³Electronic Navigation Research Institute, ⁴Japan Aerospace Exploration Agency, ⁵Chiba Institute of Technology, ⁶Tohoku University

Abstract: The vertical flux of horizontal momentum is one of the key parameters to understand and model the dynamics of the atmosphere. Measurement of the vertical flux of horizontal momentum in the atmospheric boundary layer (ABL) has largely implemented with in situ turbulence instruments mounted on towers or on the tethering cable of a balloon. Such instruments are limited to point measurement and it is difficult to measure the vertical flux of horizontal momentum in the whole ABL by using such instruments. Since Doppler lidars can observe the wind fields from the surface to several kilometers above the surface, Doppler lidars are useful for measurement of the vertical flux of horizontal momentum over extended areas in the ABL. The NICT and ENRI lidars and the JAXA helicopter were used to investigate the three-dimensional structures of the sea breeze around Sendai Airport from 18 to 19 June 2007. The NICT lidar performed repeating Range Height Indicator (RHI) scans from 0° up to 60° at an azimuth of 95°, which was parallel to the sea-breeze flow. In presentation, we will discuss the algorithm that is used to retrieve the vertical flux of horizontal momentum from the NICT lidar data. The presentation will focus on the result of the comparison of the vertical flux of horizontal momentum derived from the NICT lidar data and from the JAXA helicopter data.

1. はじめに

水平運動量の鉛直フラックスは大気のダイナミクスを理解し、モデル化する上で重要なパラメータである。大気境界層中の水平運動量の鉛直フラックスはほとんどがタワーや係留気球に設置されたその場センサーにより観測されている。それらの観測方法は点での観測に限られ、境界層全体の水平運動量の鉛直フラックスを観測することは困難である。ドップラーライダーは地表面近くから上空数 km までの風の観測が可能であり、境界層全体の水平運動量の鉛直フラックスが計測可能であると考えられる。

1 台のドップラーライダーによる水平運動量の鉛直フラックスの推定方法は主に 2 つある。1 つは Eberhard et al. (1989)[1]が示した PPI (Plan Position Indicator) スキャンを繰り返す観測により得られたデータを利用する方法である。もう 1 つは Gal-Chen et al. (1992)[2] が示した RHI (Range Height Indicator) スキャンを繰り返す観測により得られたデータを利用する方法である。

本研究では 2007 年 6 月 18 日に仙台空港においてドップラーライダーで観測されたデータに Gal-Chen et al. (1992) の方法を適用して水平運動量の鉛直フラックスの推定を行った。

2. 観測概要および解析手法

2007 年 6 月 18 日から 19 日に仙台空港において情報通信研究機構 (NICT) と電子航法研究所 (ENRI) の 2 台のドップラーライダーと宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ヘリコプターによる海風の観測が実施された。Fig.1a に各ライダーの設置位置を示す。NICT ライダー[3]は波長 2.0125 μm のレーザ光を用い、繰り返し周波数 100Hz、レンジ分解能約 90m、最大観測距離は約 10km である。50 パルス分積算して、視

線方向速度と SN 比を計算した。視線方向速度の標準偏差は 0.1-0.2 m/s である[4]。JAXA ヘリコプターは 3 次元超音波風速計、温度計、露点計、気圧計などを搭載しており[5,6]、空港周辺の風向風速、気温、気圧を計測した。6 月 18 日 13 時から 14 時半まで、2 台のライダーにより鉛直断面が交差する RHI スキャンを繰り返す観測を実施し、NICT ライダーは方位角 95 度 (主風方向) で仰角 0 度から 60 度までの RHI スキャンを約 1 分ごとに行った。

本研究では、Gal-Chen et al. (1992) で示されている RHI スキャンデータから平均風速場および水平運動量の鉛直フラックスを推定する方法を NICT ライダーの観測データに適用した。ここで、RHI スキャンの方位角の方向を x 、鉛直方向を z と定義する (Fig. 1b)。観測された視線方向風速 α (ライダーから遠ざかる方向を正、ライダーに近づく方向を負とする) は (u, w) よび仰角 θ から、以下の式で表される。

$$\alpha = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (1)$$

高度 $z_i (= 50, 150, \dots, 1950 \text{ m} ; i = 0, 1, \dots, 19)$ の上下 50m の高度範囲内の (u_i, w_i) は水平一様であると仮定すると、その高度範囲に含まれる N_j 点の視線方向風速 α_{ij} ($j = 1, 2, \dots, N_i$) は以下の式で表される。

$$\alpha_{ij} = \bar{u}_i \cos \theta_j + \bar{w}_i \sin \theta_j \quad (2)$$

式(2)の最小 2 乗問題を解いて (\bar{u}_i, \bar{w}_i) 求める。ただし、ライダーからの距離が離れた地点では SN 比の低下によりエラーデータが増加するため、ライダーからの水平距離が 2.7km 以内の視線方向風速 α_{ij} のみを利用する。

u 、 w 、 α の各変数を平均値と摂動成分に分離すると以下の式で表される。

$$u = \bar{u} + u'; w = \bar{w} + w'; \alpha = \bar{\alpha} + \alpha' \quad (3)$$

高度 z_i での水平運動量の鉛直フラックス $\bar{u}' \bar{w}'$ や (u, w) の分散 \bar{u}'^2, \bar{w}'^2 は水平一様であると仮定すると、視線方向風速の分散 $\bar{\alpha}'^2$ は以下の式で表される。

$(\bar{\alpha}^2)_{ij} = \bar{u}'w'_i \sin 2\theta_j + \bar{w}'^2_i \sin^2 \theta_j + \bar{u}'^2_i \cos^2 \theta_j$ (4)
 本研究では 30 分の時間平均 (27 セットの RH1 スキャン) を行い、式(4)の最小 2 乗問題を解いて $\bar{u}'w'_i, \bar{w}'^2_i, \bar{u}'^2_i$ を求める。ただし、 $\bar{u}'w'_i$ および \bar{w}'^2_i はそれぞれ $1/\sin 2\theta_j$ および $1/\sin^2 \theta_j$ の依存性があるため、低仰角の視線方向風速 $\bar{\alpha}_{ij}$ を用いた $\bar{u}'w'_i$ および \bar{w}'^2_i の推定値は疑わしい。そのため、仰角 30 度から 60 度の視線方向風速 $\bar{\alpha}_{ij}$ のみを利用する。

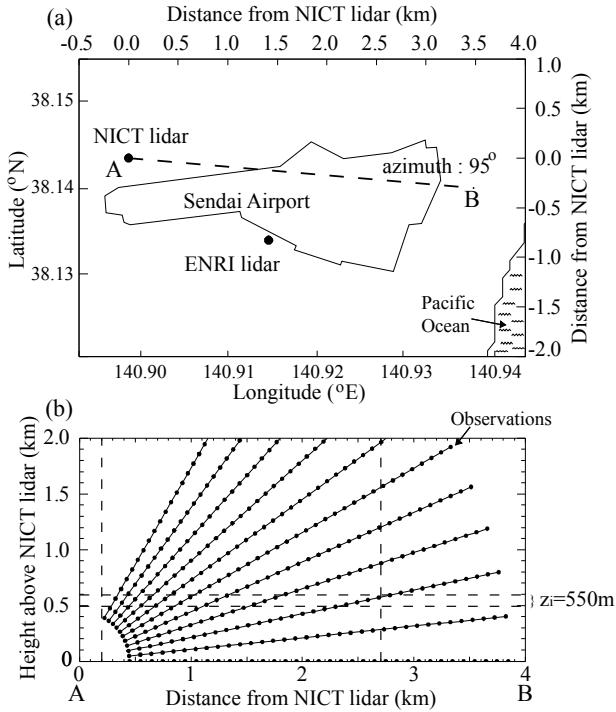


Figure 1. (a) Plan-view of the Doppler lidar observational areas. The dashed line shows the azimuth direction of RHI scan of NICT lidar. The solid line shows the borders of Sendai Airport. (b) The partitioning of the NICT lidar data points into height bins.

3. 観測結果

2007 年 6 月 18 日は仙台航空測候所の地上気象センサーによると、6 時半から 8 時にかけて北風から南風に徐々に変化し、16 時ごろまで東から南東よりの海風が継続した（図には示していない）。Fig. 2 に JAXA ヘリコプターの離陸（およそ 13 時ごろ）から高度約 1.3km まで上昇した時の飛行経路 (Fig. 2a)、飛行高度 (Fig. 2b) と計測された温位の鉛直プロファイル (Fig. 2c)、東西風 u 、南北風 v の鉛直プロファイル (Fig. 2d) を示す。高度 325m に強い逆転層が存在し (Fig. 2c)、その高度以下では東よりの風が卓越していた (Fig. 2d)。つまり、海風により仙台空港上空では高度 $z_i=325m$ までの内部境界層が発達していた。また、JAXA ヘリコプターの離陸時の観測データから、Monin-Obukhov の長さは $L=-42.3m$ であった。よって、内部境界層の大気の安定度 $-z_i/L$ は 7.68 であり、これは内部境界層の大気の状態はやや不安定であったことを示している。逆転層の上端から高度約 700m まで、水平風速は 2 m/s 程度と弱く、高度 700m より上空では徐々に水平風速が上昇し、西から北西よりの一般風が卓越していた。

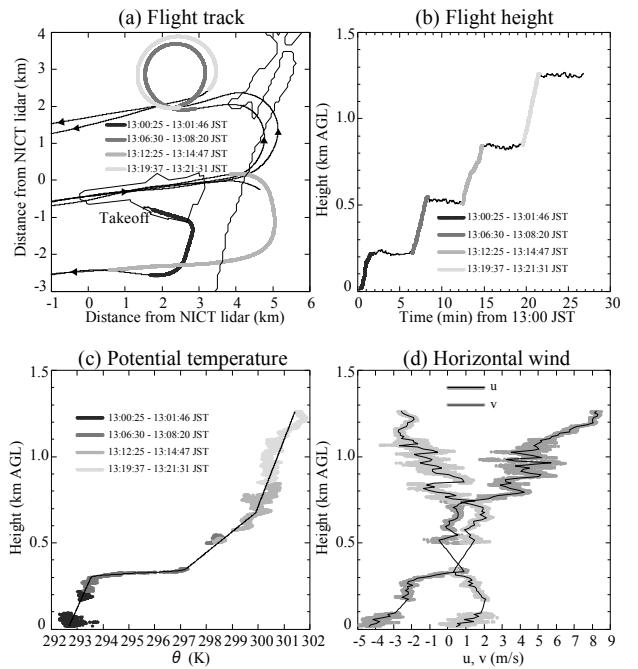


Figure 2. Results of the measurements of the JAXA heliborne sensors on 18 June 2007. (a) Flight track. (b) Flight height. (c) Vertical profile of the potential temperature. (d) Vertical profiles of u and v components.

Fig. 3 に 6 月 18 日 13 時から 13 時 30 分、13 時 30 分から 14 時、14 時から 14 時 30 分の主流方向の水平風速 \bar{u} および水平運動量の鉛直フラックス $\bar{u}'w'$ の鉛直プロファイルを示す。水平運動量の鉛直フラックス $\bar{u}'w'$ の高度 50m と 150m での推定値が無いのは、 $\bar{u}'w'$ の推定に仰角 30 度以上の視線方向風速を利用しているためである。Fig. 4 に主流方向の水平風速 \bar{u} および水平運動量の鉛直フラックス $\bar{u}'w'$ を推定するために利用した NICT ライダーの視線方向風速 $\bar{\alpha}$ および視線方向風速の分散 $\bar{\alpha}^2$ (それぞれ 30 分平均値) を示す。

Fig. 4 の視線方向風速 $\bar{\alpha}$ の図では明確ではないが、Fig. 3 の水平風速 \bar{u} の鉛直プロファイルから、海風層の厚さが時間とともにわずかに増加していることがわかる。各時間帯とも、高度 650m または 750m で水平風速 \bar{u} は 0m/s であり、高度 1350m または 1450m まで緩やかに増加し、それ以上の高度では 7~9m/s 程度であった。JAXA ヘリコプターにより観測された東西風 u (Fig. 2d) は逆転層付近の高度 300m から約 700m までほぼ 0m/s であり、NICT ライダーの観測データから推定された水平風速 \bar{u} とはやや異なる変化を示している。この相違は、NICT ライダーと JAXA ヘリコプターの観測データの時間・空間スケールの相違を反映したものとする。高度 300m から約 700m まで（海風と一般風との境界）の水平風は時間・空間的に変動が大きいことが示唆される。このことは、高度 300m から約 700m までの高度範囲の NICT ライダーの視線方向風速の分散 $\bar{\alpha}^2$ が比較的大きな値であることからも示唆される。

Fig. 3 に示す水平運動量の鉛直フラックス $\bar{u}'w'$ の推定には特異値分解を用いた解法を式 (4) に適用して $\bar{u}'w'_i, \bar{w}'^2_i, \bar{u}'^2_i$ を求めたが、 \bar{w}'^2_i または \bar{u}'^2_i が負である解が得られる場合がある。特に、NICT ライダーの視線方向風速の分散 $\bar{\alpha}^2$ が比較的大きな値を示

す高度で、 $\overline{w_i'^2}$ または $\overline{u_i'^2}$ が負である解が得られる場合が多い。その場合、適当な初期値を設定し、変分法により局所解を求めた。この解法により得られた解の妥当性については十分な検証を行っておらず、妥当性の検証は今後の課題である。

内部境界層内の高度 250m での水平運動量の鉛直フラックス $\overline{u'w'}$ のエラーが非常に大きいのは、低仰角のデータのみを利用して推定しているので、 $1/\sin 2\theta_j$ の依存性の影響が大きいためであると考えられる。それ以上の高度では、 $\overline{u'w'}$ のエラーは 0.2 ~ 0.3 m²/s² であり、Gal-Chen et al. (1992) が示した理論値 0.1 m²/s² より大きい。Gal-Chen et al. (1992) の理論値は、乱流は水平一様で、観測値の間の相関は無く、バイアスも無いという仮定を基にしているので、実際の観測値ではそのような仮定が必ずしも成り立っていないことが示唆される。

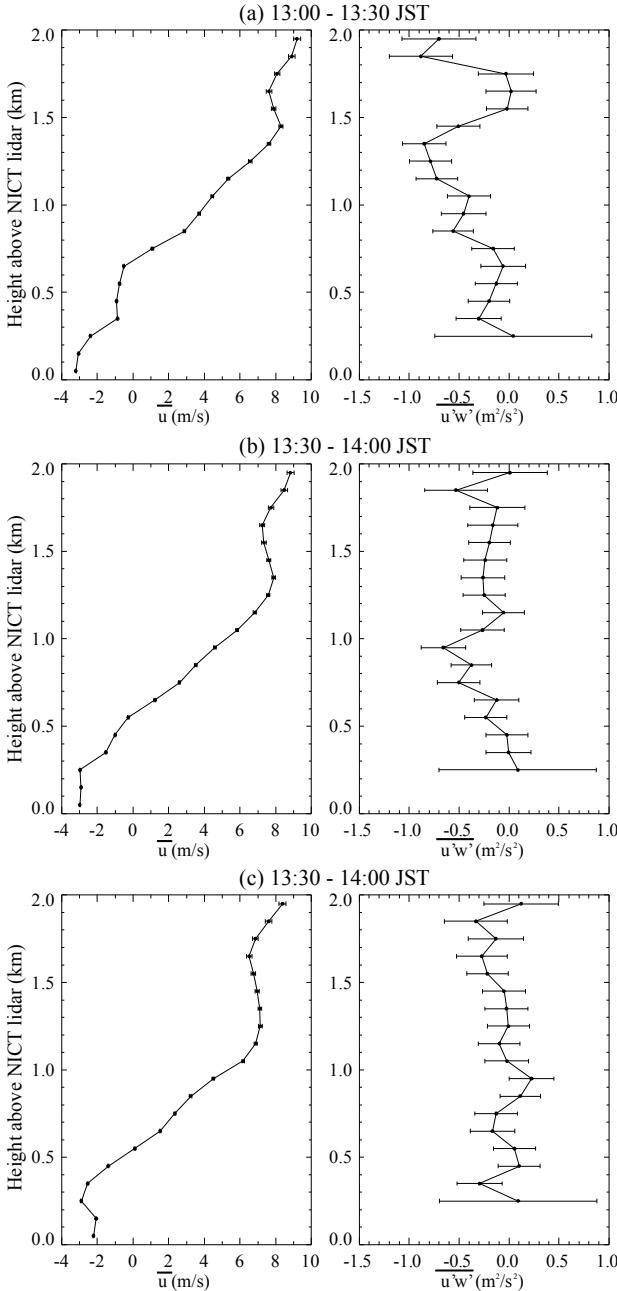


Figure 3. Vertical profiles of \bar{u} and $\overline{u'w'}$ (a) from 13:00 JST to 13:30 JST, (b) from 13:30 JST to 14:00 JST, and (c) from 14:00 JST to 14:30 JST.

13時から 13時30分では高度 850m から 1350m に、13時30分から 14時では高度 750m から 950m に大きな負の $\overline{u'w'}$ が推定されている。Gal-Chen et al. (1992) では混合層より上空で大きな負の $\overline{u'w'}$ が推定され、混合層中の対流と上空の安定層中の重力波が相互作用した結果であると推測している。本研究で推定された大きな負の $\overline{u'w'}$ の要因については、今後詳細な検討を行う。

4. まとめ

2007年6月18日に仙台空港において NICT ライダーで観測された RHI スキャンデータに Gal-Chen et al. (1992) の方法を適用して水平運動量の鉛直フラックスの推定を行った。推定に用いる視線方向風速データをどの程度で時間・空間平均するべきか、式(4)の最小2乗問題の解法、エラーの評価など、検証すべき課題は多い。

JAXA ヘリコプターは Fig. 2b に示すように、仙台空港上空を数分間、一定高度で飛行して 3 次元風速場を観測した。今後、JAXA ヘリコプターで観測された風のデータから水平運動量の鉛直フラックスの推定を行い、ドップラーライダーデータからの推定値との比較を行う予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号 19204046、代表者岩崎俊樹) の助成により実施された。また、地上気象データを提供していただいた仙台航空測候所の皆様、NICT ライダーの運用にご協力いただいた東北大学の大学院生の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] Eberhard, W. L., Cupp, R. E. and Healy, K. R., 1989: Doppler lidar measurement of profiles of turbulence and momentum flux. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 809–819.
- [2] Gal-Chen, T., Xu, M. and Eberhard, W. L., 1992: Estimations of atmospheric boundary layer fluxes and other turbulence parameters from Doppler lidar data. *J. Geophys. Res.*, **97**, 18409–18423.
- [3] Ishii, S., K. Sasaki, K. Mizutani, T. Aoki, T. Itabe, H. Kannno, D. Matsushima, W. Sha, A. Noda, M. Sawada, M. Ujiie, Y. Matsuura, and T. Iwasaki, 2007: Temporal evolution and spatial structure of the local easterly wind "Kiyokawa-dashi" in Japan PART I: coherent Doppler lidar observations, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **85**, pp. 797–813.
- [4] Ishii, S., K. Mizutani, T. Aoki, M. Sasano, Y. Murayama, T. Itabe, and K. Asai, 2005: Wind profiling with an eye-safe coherent Doppler lidar system: comparison with radiosondes and VHF radar, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **83**, pp. 1041–1056.
- [5] Okuno, Y., N. Matayoshi, Y. Terui, K. Wakairo, K. Hozumi, H. Inokuchi, and K. Funabiki, 2002: Development of a Research Helicopter MuPAL-ε, TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY, TM-764, in Japanese.
- [6] Matayoshi, N., H. Inokuchi, K. Yazawa, and Y. Okuno, 2005: Development of airborne ultrasonic

velocimeter and its application to helicopters, paper presented at AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, San Francisco, U.S.A., AIAA 2005-6118, 15–18 August.

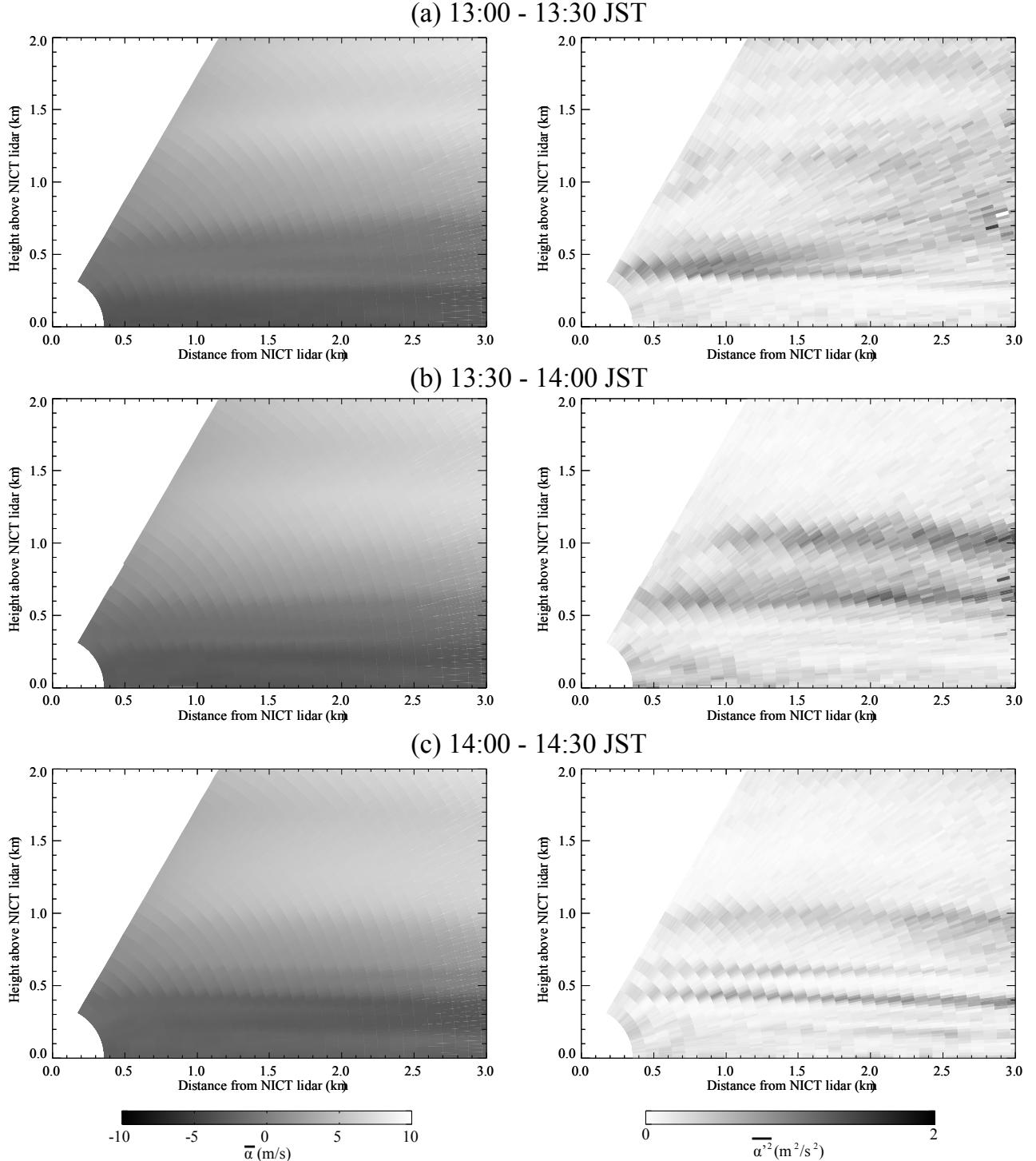


Figure 4. RHI displays of $\bar{\alpha}$ and $\bar{\alpha}'^2$ (a) from 13:00 JST to 13:30 JST, (b) from 13:30 JST to 14:00 JST, and (c) from 14:00 JST to 14:30 JST.