

氏名（本籍） ^{いのくち} ^{はま} ^き 井之口 浜 木（東京都）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 乙第 1111 号
学位授与の日付 2021 年 9 月 30 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 航空機搭載を可能とした光アンブ式ドップ
ラーライダーの実用化研究

論文審査委員 （主査）嘱託教授 米本 浩一
教授 竹村 裕 教授 野口 昭治
教授 溝口 博 教授 木村 真一
教授 前田 譲治

論文内容の要旨

本論文では、航空安全に寄与すると期待される航空機搭載用ドップラーライダーの研究開発とその応用について述べる。

大気中を飛行する航空機は、常に風の影響を受けており、予期しない風の変化は航空事故の主要因のひとつとなっている。このため飛行経路上の風の傾向や変化、擾乱の程度を知ることは飛行安全上重要である。ところが現在は飛行経路上の遠方の風を実時間で測ることが出来ないため、地上の気象観測結果や先行機からの情報等をもとに、風の予測を行っている。しかしながら、予測通りにならないことがしばしばあり、事故が発生したり、事故を回避するための過剰な対応により運航効率が低下するなどの弊害が生じている。

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、このような状況を打破するために機上で遠方の気流を観測するドップラーライダーの研究開発を行っている。2001 年には飛行中の遠隔観測原理を確認するための機能モデルを試作し、2002 年の飛行実験で遠方の気流が確かに観測できることを確認した。2006 年には乱気流検知機能を確認するための実証モデルを試作し、2007 年の飛行実験で遠方の乱気流検知を実証した。2007 年には実用上必要とされる観測距離として設定した 5NM（9 km）の最大観測距離を確認するための長距離モデルを試作し、2008 年の飛行実験で約 8.7 km の最大観測距離を実証した。以上の飛行実験は、低高度で実施されたものであるが、観測距離は大気中のエアロゾル濃度に左右され、高度依存性が大きいことが分かった。このため、2008 年には高高度で 5NM（9 km）の最大観測距離を確認するための高高度モデルを試作し、2009 年から飛行実験を開始した

が、目標が達成できなかったため、改良を進めて2013年の飛行実験で高度約12,000 mの高高度において約9 kmの最大観測距離を実証した。

以上は、大気条件が良い時の結果であって、条件が悪い場合には全く観測できなかったり極端に観測距離が短かったりすることもあった。安定的に観測距離を長くするには、送信出力を増大させたり、受信系の開口径を大きくしたりすることが考えられるが、いずれも航空機への搭載性の低下とコストの増加が避けられず、乱気流を事前検知して飛行経路を変更することにより事故を回避するという使用法では実用化が困難であることが分かってきた。それに対して低高度での着陸進入中の復行判断に使用するには十分な観測距離があると考えられる。

このため、高高度では近距離の気流を観測して突風応答軽減制御により機体の動揺を低減し、低高度ではパイロットに乱気流の事前情報を提供するというシステム開発を行うこととした。JAXAでは、SafeAvio (Safety Avionics) プロジェクトを2016年に立ち上げ、突風応答軽減制御を除く技術について飛行実験を実施した。高高度での巡航中や高度変更中は、飛行方向の乱気流を検知して、その情報に基づき突風軽減制御を行う。低高度での着陸進入中は、乱気流を検知して、その情報をパイロットに伝達する。高高度の遠距離観測については、もともとプロジェクトのスコープ外であったが、エアラインからの要望が強く、システムの小型化よりも優先された。使用したドップラーライダーは、高高度モデルの技術を用いたもので、耐環境性を高め、高機能化、小型化、省電力化を進めた。2017年に実施した飛行実験の結果、高度600~12000mで平均17.5 kmの最大観測距離を実証した。2018年には、SafeAvioプロジェクトで開発したドップラーライダーを大型ジェット機（ボーイング777型機）に搭載して、観測データの補充を行った。

しかしながら、早期の実用化を目指すには、機能を限定してでも小型化を達成する必要がある。SafeAvioプロジェクトで開発したドップラーライダーは、レーザ光送信用の光学望遠鏡を2式装備し、重量は83.7 kgであった。口径150 mmの大望遠鏡で遠方の気流を観測し、口径50 mmの小望遠鏡は光軸を20度ずらすことにより、2次元の気流ベクトルを計測するものであった。小望遠鏡のみの場合でも、高高度で900 m以上の観測距離があり、低高度でも着陸復行判断に利用する目的であれば十分な観測距離があると推定される。すなわち、高高度におけるパイロットへの乱気流情報提供と2次元の気流ベクトルに基づく突風応答軽減制御を実施しなければ、大望遠鏡が不要となり小型化が可能となる。装置全体の小型化も重要であるが、前方の開口径が小さくなることでの搭載性の向上は極めて大きな利点である。

本研究開発により、以下の事項が明らかとなった。

- 1) アイセーフ波長である $1.5\mu\text{m}$ 帯のレーザ光を用いたドップラーライダーは、航空機の搭載に適した方式であり、航空機が飛行中に遠方の気流を観測することが実証できた。
- 2) 送信するレーザ光の出力を増大するための開発を行った結果、着陸進入時の復行判断に使用する目的では十分な観測距離を達成することができた。
- 3) 高高度ではエアロゾルの密度が低く、乱気流を回避する目的でのパイロットへの情報提供には適さない。シートベルトサインの点灯による事故防止効果は、時間が短いため限

定的である。

4) ドップラーライダーは、位置誤差のない真対気速度センサとして利用可能であり、風洞試験や飛行試験で較正する必要がなく、ピトー管と同等以上の計測精度が期待できる。

5) 高高度での乱気流事故防止については、ドップラーライダーに基づく突風応答軽減制御が考えられるが、実装にはまだ課題が残っている。ただし、前方に乱気流を検知した場合に減速するだけでも若干の事故防止効果がある可能性がある。

論文審査の結果の要旨

本論文は、航空事故の主要因のひとつである飛行経路上の予期しない風の傾向や変化、擾乱の程度を検知することを目的とする航空機搭載用ドップラーライダーについて、発案した新しい光アンプ方式により実用化の研究を行ったものである。

従来の気象レーダでは、雨雲を伴うような乱気流しか検出することができない。一方でドップラーライダーの場合は、雨雲を伴わない気流の乱れも大気のアエロゾル粒子の動きとして捉えることができる。しかし、ドップラーライダーは、一般的に高出力化が容易な固体レーザー発振器を用いており、地上設備としては実用化されているものの、装置の規模は大きくなってしまふ。欧米の先行研究において、小型化の見通しが立たないために、航空機内に搭載する目的での実用化には至っていないのが実情である。

学位申請者は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)において、以上の課題を打破するために、観測可能距離が低高度で 3NM (5.6 km)、低高度以外で 500 m ~ 5NM (9.3 km)を目標とする航空機搭載型のドップラーライダーの研究開発を行ってきた。

一連の研究成果として、出力が低いという欠点があった光通信用の光アンプについて、導波路型光アンプ(WGA)の採用により、送信レーザーパルスエネルギー3.3 mJ、送信レーザー平均出力 3.3 W という世界最高出力のドップラーライダーを開発することに成功し、航空機搭載を可能とする見通しが初めて得られた。また、送信するレーザー光を2軸化することにより、アエロゾル粒子を飛行方向のみならず、その直角方向の動きとしての乱気流を検出することができるようになった。従来のドップラーライダーは、固体レーザー発振器による波長 $2\mu\text{m}$ 帯が主であったが、研究した光アンプではアイセーフ波長とよばれる $1.5\mu\text{m}$ 帯のレーザーとしたことにより、目にとって最も安全性が高いシステムを実現することができたということも新規性のひとつである。

このように高出力で安全性の高い光アンプを用いたドップラーライダーの研究開発に加えて、従来は平均出力やパルスエネルギーだけで表現されていた性能評価において、

信号対雑音比(SNR)の改善のためのインコヒーレント積分の考え方に基づくFOM(Figure Of Merit)を新たに提案し、ドップラーライダーの性能指標の一つに加えたことも研究としての独自性がある。

この光アンプ式ドップラーライダーは、低高度から高高度までの乱気事故低減を目指した航空機搭載可能なシステムとして実用化の道を切り開いたことになり、その成果は世界初と言える。

本来の目的である乱気流の検出に加えて、実際に約 20 年間にわたって実施した研究目的の飛行試験と実用性を評価するための飛行試験の結果から、航空機の飛行速度を計測するピトー管機能としても十分な精度があることも実証することができた。また、航空機事故の要因となりえる火山灰や氷晶のエンジンへの吸い込みを予知する付加機能があることも研究成果の一つである。

以上に述べた研究内容の独自性および新規性に鑑み、審査委員会および公聴会での論文審査の結果、本論文「航空機搭載を可能とした光アンプ式ドップラーライダーの実用化研究」が博士（工学）の学位論文として十分に価値があると認められる。