

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7323964号

(P7323964)

(45)発行日 令和5年8月9日(2023.8.9)

(24)登録日 令和5年8月1日(2023.8.1)

(51)国際特許分類

F I

B 6 4 F 5/00 (2017.01)

B 6 4 F 5/00

B 6 4 C 23/04 (2006.01)

B 6 4 C 23/04

B 6 4 C 30/00 (2006.01)

B 6 4 C 30/00

請求項の数 11 (全25頁)

(21)出願番号 特願2022-508123(P2022-508123)
 (86)(22)出願日 令和3年2月5日(2021.2.5)
 (86)国際出願番号 PCT/JP2021/004341
 (87)国際公開番号 WO2021/186940
 (87)国際公開日 令和3年9月23日(2021.9.23)
 審査請求日 令和4年9月6日(2022.9.6)
 (31)優先権主張番号 特願2020-45245(P2020-45245)
 (32)優先日 令和2年3月16日(2020.3.16)
 (33)優先権主張国・地域又は機関
 日本国(JP)
 特許法第30条第2項適用 令和3年1月15日 A I
 A A S c i T e c h 2 0 2 1 フォーラム (11-15 &
 amp; 19-21 January 2021) V i r
 t u a l E v e n t にて公開
 特許法第30条第2項適用 令和3年1月4日 A I A A
 最終頁に続く

(73)特許権者 503361400
 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
 東京都調布市深大寺東町七丁目4番地
 1
 (74)代理人 110003339
 弁理士法人南青山国際特許事務所
 (72)発明者 上野 篤史
 東京都調布市深大寺東町七丁目4番地
 1 国立研究開発法人宇宙航空研究開発
 機構内
 審査官 志水 裕司

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 超音速機の機体形状の設計方法、超音速機の生産方法及び超音速機

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

機体のオフトラックでの初期形状の等価断面積分布を得て、
 前記等価断面積分布を基に低ソニックブーム化のための前記機体のオフトラックでの目
 標等価断面積分布を設定し、
 前記等価断面積分布と前記目標等価断面積分布との差である必要付加断面積分布を基に
 任意の気流方向の位置を通過する前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付
 加断面積を、前記オフトラックでのマッハ平面の近傍に位置するオントラックでのマッハ
 平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えて付加する
 超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項2】

請求項1に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、
 前記オフトラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布と前記オントラ
 ックを低ソニックブーム化するための第2の必要付加断面積分布とをブレンドした第3の
 分布のブレンド比率を変え、それぞれのブレンド比率に対して前記オントラックでのソニ
 ックブーム強度及び前記オフトラックでのソニックブーム強度を評価し、評価結果に基づ
 き前記ブレンド比率を設定する
 超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項3】

請求項1又は2に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、

前記機体は、ノーズ先端を有し、

前記機体のノーズ先端を起点とする軸であって、設計対象部位に近接するよう前記気流方向より任意の角度だけ傾けた軸を基準線とし、

前記オフトラックでのマッハ平面の近傍に位置する前記機体のオントラックでのマッハ平面を、前記オフトラックでのマッハ平面と前記基準線の交点を通る前記オントラックでのマッハ平面とする

超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、

前記基準線は、機体軸である

超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項 5】

請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、

前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えるステップは、

設計マッハ数における前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、設計マッハ数における前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替える

超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、

前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えるステップは、

非設計マッハ数における前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、設計マッハ数における前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替える

超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項 7】

請求項 6 に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、

前記機体は、ノーズ先端を有し、

前記機体のノーズ先端を起点とする軸であって、設計対象部位に近接するよう前記気流方向より任意の角度だけ傾けた軸を基準線とし、

前記非設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面と前記非設計マッハ数における基準線との交点を算出し、

前記交点を、前記ノーズ先端を中心として、前記設計マッハ数における基準線上に回転させ、

回転させた前記交点を通る前記設計マッハ数におけるオントラックでのマッハ平面を設定する

超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の超音速機の機体形状の設計方法であって、

前記気流方向を x 、前記非設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面の x 位置を X 、前記気流に垂直な方向を z 、前記気流方向と前記基準線方向とがなす角を α 、前記交点の回転角度を $d\alpha$ 、回転した前記交点を通る前記設計マッハ数におけるオントラックでのマッハ平面の x 位置を X' 、前記非設計マッハ数を M_{off} 、オフトラック角度を ϕ ($0 \text{ 度} \leq \phi \leq 50 \text{ 度}$)、 $\beta_{off} = \sqrt{(M_{off}^2 - 1)}$ としたとき、

$$X' = x + \beta_{off} \cdot z \cdot \cos \phi、$$

$$\beta_{off} = \sqrt{(M_{off}^2 - 1)}、$$

$$z = -\tan(\alpha + d\alpha) \cdot x$$

の関係を満たす

超音速機の機体形状の設計方法。

【請求項 9】

請求項 1 乃至 8 のうちいずれか 1 項に記載の超音速機の機体形状の設計方法を用いて超音速機を設計し、

設計結果に基づく機体形状の超音速機を製作する

超音速機の生産方法。

【請求項 10】

機体のオフトラックでの初期形状の等価断面積分布を得て、

前記等価断面積分布を基に低ソニックブーム化のための前記機体のオフトラックでの目標等価断面積分布を設定し、

前記等価断面積分布と前記目標等価断面積分布との差である必要付加断面積分布を基に任意の気流方向の位置を通過する前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オフトラックでのマッハ平面の近傍に位置するオントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えて付加した

機体の形状を有する超音速機。

【請求項 11】

請求項 10 に記載の超音速機であって、

前記オフトラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布と前記オントラックを低ソニックブーム化するための第 2 の必要付加断面積分布とをブレンドした第 3 の分布のブレンド比率を変え、それぞれのブレンド比率に対して前記オントラックでのソニックブーム強度及び前記オフトラックでのソニックブーム強度を評価し、評価結果に基づき前記ブレンド比率を設定した

機体の形状を有する超音速機。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ソニックブームを低減する超音速機の機体形状の設計方法、超音速機の実現方法及び超音速機に関する。

【背景技術】

【0002】

機体形状設計によりソニックブームを低減する技術はこれまでにいくつか提案されている。

【0003】

非特許文献 1 は航空機の設計条件（機体長、機体重量、飛行マッハ数、飛行高度、等）に対してソニックブームを低減するための機体の等価断面積分布（機体の断面積と揚力と等価な断面積の合計）を算出する技術であり、非特許文献 2 及び非特許文献 3 では非特許文献 1 の技術を用いて具体的な機体形状の設計を行っている。

【0004】

非特許文献 4 では機体の等価断面積分布に代わり、機体近傍の圧力波形から計算される逆算等価断面積分布を利用することで、より正確な低ソニックブーム機体形状設計が可能であることが示されている。

【0005】

特許文献 1 では非特許文献 1 の技術と非特許文献 4 の逆算等価断面積分布を用いて機体直下（以降、これを「オントラック」と呼ぶ。）の低ソニックブーム機体形状設計を効率的に実施している。

【0006】

特許文献 2 で提唱されたソニックブーム低減機体形状コンセプトは実験機に適用され飛行実証されている。

【0007】

非特許文献 5 ではオントラックのソニックブームと機体直下から周方向に外れた位置（

10

20

30

40

50

以降、これを「オフトラック」と呼ぶ。)のソニックブームを同時に低減する機体形状設計手法を検討している。オントラックのみを考慮して低ソニックブーム化するとオフトラックのソニックブーム強度が増加するため、周方向にロバストな低ブーム設計の重要性が指摘されている。

【0008】

非特許文献6ではFree form deformationを用いて周方向にロバストな低ソニックブーム機体形状設計を実施している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【文献】WO2019/187828号公報

特許第5057374号公報

【非特許文献】

【0010】

【文献】Christine M. Darden :Sonic-Boom Minimization With Nose-Bluntness Relaxation, NASA TP-1348, 1979.

Todd E. Magee, Peter A. Wilcox, Spencer R. Fugal, and Kurt E. Acheson, Eric E. Adamson, Alicia L. Bidwell, and Stephen G. Shaw : System-Level Experimental Validations for Supersonic Commercial Transport Aircraft Entering Service in the 2018-2020 Time Period Phase I Final Report, NASA/CR-2013-217797, 2013.

John Morgenstern, Nicole Norstrud, Jack Sokhey, Steve Martens, and Juan J. Alonso : Advanced Concept Studies for Supersonic Commercial Transports Entering Service in the 2018 to 2020 Period Phase I Final Report, NASA/CR-2013-217820, 2013.

Wu Li, Sriram K. Rallabhandi: Inverse Design of Low-Boom Supersonic Concepts Using Reversed Equivalent-Area Targets, Journal of Aircraft, Vol. 51, No. 1, 2014.

Irian Ordaz, Mathias Wintzer, Sriram K. Rallabhandi: Full-Carpet Design of a Low-Boom Demonstrator Concept, AIAA 2015-2261, 2015.

Atsushi Ueno, Masashi Kanamori, Yoshikazu Makino: Robust Low-Boom Design Based on Near-Field Pressure Signature in Whole Boom Carpet, Journal of Aircraft, Vol. 54, No. 3, 2017.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

非特許文献1の技術を適用し、オフトラックに対する機体の等価断面積分布を低ソニックブーム化が実現できる機体の等価断面積分布（以降、これを「目標等価断面積分布」と呼ぶ。）に一致させることでオフトラックの低ソニックブーム化が可能である。しかしオフトラックの場合、機体の等価断面積を計算するための断面形状（マッハ平面と機体との交線）が左右非対称となる。非特許文献6で示されたFree form deformationを用いて機体を任意に変形させることで目標等価断面積分布と合致する左右対称な機体形状を設計できる。しかし、このためには機体の変形対象部位を取り囲む制御BOXを構成する制御点の位置を最適設計手法により定める必要があり、効率的な機体形状設計に課題がある。

【0012】

周方向にロバストな低ソニックブーム機体形状を設計するためには、オントラックとオフトラックに対する複数の機体の等価断面積分布を同時にそれぞれに対する目標等価断面積分布と一致させなければならない。しかし、これを実現する機体形状の存在は保証されない。つまり、周方向にロバストで実現可能な目標等価断面積分布の設定に課題がある。

10

20

30

40

50

【0013】

以上のような事情に鑑み、本発明の目的は、最適設計手法を用いなくとも効率的に低ソニックブーム機体形状を設計可能な超音速機の機体形状の設計方法、超音速機の生産方法及び超音速機を提供することにある。

本発明の更なる目的は、効率的に周方向に口バストな低ソニックブーム機体形状を設計可能な超音速機の機体形状の設計方法、超音速機の生産方法及び超音速機を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0014】

上記目的を達成するため、本発明の一形態に係る超音速機の機体形状の設計方法は、機体のオフトラックでの初期形状の等価断面積分布を得て、前記等価断面積分布を基に低ソニックブーム化のための前記機体のオフトラックでの目標等価断面積分布を設定し、前記等価断面積分布と前記目標等価断面積分布との差である必要付加断面積分布を基に任意の気流方向の位置を通過する前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オフトラックでのマッハ平面の近傍に位置するオントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えて付加する。

本発明は、機体の等価断面積を計算するための断面形状が左右対称となるオントラックだけでオフトラックの低ソニックブーム性を考慮した機体形状設計が可能となり、左右非対称性に関する課題が解決される。これにより、最適設計手法を用いなくとも効率的に低ソニックブーム機体形状を設計可能となる。

【0015】

本発明の一形態に係る超音速機の機体形状の設計方法は、さらに、前記オフトラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布と前記オントラックを低ソニックブーム化するための第2の必要付加断面積分布とをブレンドした第3の分布のブレンド比率を変え、それぞれのブレンド比率に対して前記オントラックでのソニックブーム強度及び前記オフトラックでのソニックブーム強度を評価し、評価結果に基づき前記ブレンド比率を設定する。

本発明では、複数のオフトラックとオントラックに対する目標等価断面積分布が周方向の口バスト性を考慮しつつ単一の、従って実現可能なオントラックに対する目標等価断面積分布に置き換えられる。これにより、効率的に周方向に口バストな低ソニックブーム機体形状を設計可能となる。

【0016】

本発明の一形態に係る超音速機の機体形状の設計方法では、前記機体のノーズ先端を起点とする軸であって、設計対象部位に近接するよう前記気流方向より任意の角度だけ傾けた軸を基準線とし、前記オフトラックでのマッハ平面の近傍に位置する前記機体のオントラックでのマッハ平面を、前記オフトラックでのマッハ平面と基準線の交点を通る前記オントラックでのマッハ平面とする。

本発明の一形態に係る超音速機の機体形状の設計方法では、前記基準軸は、機体軸である。

本発明の一形態に係る超音速機の機体形状の設計方法では、前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えるステップは、

設計マッハ数における前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、設計マッハ数における前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替える。

【0017】

本発明の他の形態に係る超音速機の機体形状の設計方法では、前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えるステップは、

非設計マッハ数における前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積

10

20

30

40

50

積を、設計マッハ数における前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替える。

これにより、周方向に対するロバストな低ブーム設計に加え、マッハ数に対するロバストな低ブーム設計が可能となる。

【0018】

本発明の他の形態に係る超音速機の機体形状の設計方法では、

前記機体は、ノーズ先端を有し、

前記機体のノーズ先端を起点とする軸であって、設計対象部位に近接するよう前記気流方向より任意の角度だけ傾けた軸を基準線とし、

前記非設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面と前記非設計マッハ数における基準線との交点を算出し、

前記交点を、前記ノーズ先端を中心として、前記設計マッハ数における基準線上に回転させ、

回転させた前記交点を通る前記設計マッハ数におけるオントラックでのマッハ平面を設定する。

【0019】

本発明の他の形態に係る超音速機の機体形状の設計方法では、

前記気流方向を x 、前記非設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面の x 位置を X 、前記気流に垂直な方向を z 、前記気流方向と前記基準線方向とがなす角を α 、前記交点の回転角度を $d\alpha$ 、回転した前記交点を通る前記設計マッハ数におけるオントラックでのマッハ平面の x 位置を X' 、前記非設計マッハ数を M_{off} 、オフトラック角度を ϕ ($0 \text{ 度} \leq \phi \leq 50 \text{ 度}$)、 $\beta_{off} = \sqrt{(M_{off}^2 - 1)}$ としたとき、

$$X' = x + \beta_{off} \cdot z \cdot \cos \phi,$$

$$\beta_{off} = \sqrt{(M_{off}^2 - 1)},$$

$$z = -\tan(\alpha + d\alpha) \cdot x$$

の関係を満たす。

【0020】

本発明の一形態に係る超音速機の生産方法は、上記の超音速機の機体形状の設計方法を用いて超音速機を設計し、設計結果に基づく機体形状の超音速機を製作する。

【0021】

本発明の一形態に係る超音速機は、機体のオフトラックでの初期形状の等価断面積分布を得て、前記等価断面積分布を基に低ソニックブーム化のための前記機体のオフトラックでの目標等価断面積分布を設定し、前記等価断面積分布と前記目標等価断面積分布との差である必要付加断面積分布を基に任意の気流方向の位置を通過する前記オフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、前記オフトラックでのマッハ平面の近傍に位置する前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替えて付加した機体の形状を有する。

【0022】

本発明の一形態に係る超音速機は、さらに、前記オフトラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布と前記オントラックを低ソニックブーム化するための第2の必要付加断面積分布とをブレンドした第3の分布のブレンド比率を変え、それぞれのブレンド比率に対して前記オントラックでのソニックブーム強度及び前記オフトラックでのソニックブーム強度を評価し、評価結果に基づき前記ブレンド比率を設定した機体の形状を有する。

【発明の効果】

【0023】

本発明によれば、最適設計手法を用いなくとも効率的に低ソニックブーム機体形状を設計できる。さらに、効率的に周方向にロバストな低ソニックブーム機体形状を設計できる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

10

20

30

40

50

- 【図 1】本発明の一実施形態に係る超音速機の形状を示す平面図である。
- 【図 2】図 1 に示した超音速機の側面図である。
- 【図 3】図 1 に示した超音速機の正面図である。
- 【図 4】ソニックブームが発生する状況を説明するための図である。
- 【図 5】ソニックブームの伝搬のイメージを説明するための斜視図である。
- 【図 6】等価断面積の定義を説明するための図である。
- 【図 7】図 5 の正面図であり、ソニックブームの伝搬のイメージを説明するため図である。
- 【図 8】周方向にロバストな低ソニックブーム設計のイメージを説明するための図であって、各設計におけるオフトラック角度とソニックブーム強度との関係を示すグラフである。
- 【図 9】オフトラックでの初期形状の機体の等価断面積の計算方法を説明するための斜視図である。
- 【図 10】低ソニックブーム化のための目標等価断面積分布の設定及び必要付加断面積を求める過程を説明するための図であって、オフトラックでの気流方向と機体の等価断面積との関係を示すグラフである。
- 【図 11】必要付加断面積の読み替えを説明するための図であって、オフトラック及びオントラックでの気流方向と必要付加断面積との関係を示すグラフである。
- 【図 12】本発明の第 1 の実施形態に係る「読み替え」を詳細に説明するための図である。
- 【図 13】「読み替え」の一例を示す図であり、オフトラック及びオントラックでの気流方向と必要付加断面積との関係を示すグラフである。
- 【図 14】本発明において特許文献 1 の技術を適用して機体の形状設計する方法を説明するための斜視図である。
- 【図 15】本発明に係る実施例 1 において初期形状を示す図であって、オフトラック角度と先端ソニックブーム強度との関係を示すグラフである。
- 【図 16】先端ソニックブーム強度を評価するための圧力波形の修正方法を示すグラフである。
- 【図 17】本発明に係る実施例 1 においてオフトラックでの気流方向と機体の等価断面積との関係を示すグラフである。
- 【図 18】本発明に係る実施例 1 においてオフトラック及びオントラックでの気流方向と必要付加断面積との関係を示すグラフである。
- 【図 19】本発明に係る実施例 1 における必要付加断面積分布のブレンドにおいてその分布の修正を説明するための分布図である。
- 【図 20】本発明に係る実施例 1 においてロバスト性を考慮したブレンド比率の設定を説明するための分布図であり、ブレンド比率 0, 0.25, 0.5, 0.75 における気流方向の必要付加断面積をしたグラフである。
- 【図 21】本発明に係る実施例 1 において等価断面積分布によるソニックブーム強度予測を示す図であり、オントラックとオフトラック（オフトラック角度 = 40 度）でのブレンド比率に応じた先端ソニックブーム強度の値を示している。
- 【図 22】本発明に係る実施例 1 における機体形状を示す側面図であり、(a) は初期形状、(b) は初期形状に必要付加断面積を付加したロバスト低ブーム形状を示している。
- 【図 23】図 22 (a) の初期形状及び図 22 (b) のロバスト低ブーム形状のオフトラック角度に対する先端ソニックブーム強度を示すグラフである。
- 【図 24】オントラックの低ソニックブーム機体形状の設計方法を説明する図である。
- 【図 25】超音速機の飛行経路全体に対するソニックブーム強度（プライマリブームカーペット）の一例を示す図である。
- 【図 26】本発明の第 2 の実施形態に係る「読み替え」を説明するための図である。
- 【図 27】本発明の第 2 の実施形態に係る「読み替え」を詳細に説明するための図である。
- 【図 28】本発明に係る実施例 2 において機体形状と設計対象を示す平面図（上）および側面図（下）である。
- 【図 29】本発明に係る実施例 2 において説明する、複数のオフトラック角度における必要付加断面積部分分布（周方向ロバスト）を示すグラフである。

10

20

30

40

50

【図 3 0】本発明に係る実施例 2 において説明する、複数のオフトラック角度における必要付加断面積部分分布（マッハ数・周方向口バスト）を示すグラフである。

【図 3 1】本発明に係る実施例 2 においてマッハ数・周方向口バストを説明する図である。
【発明を実施するための形態】

【0025】

以下、図面を参照しながら、本発明の実施形態を説明する。

【0026】

<第 1 の実施形態>

図 1 は本発明の一実施形態に係る超音速機の外観を示す平面図、図 2 はその側面図、図 3 はその正面図である。

【0027】

これらの図に示すように、この実施形態に係る超音速機は、機体 10 の胴体 11 に一对の主翼 12 R、12 L、一对のエンジンナセル 13 R、13 L と、一对の水平尾翼 14 R、14 L が設けられている。一对の水平尾翼 14 R、14 L 上には、それぞれフィン 15 R、15 L が設けられている。

【0028】

このような超音速機では、超音速飛行時に、図 4 に示すように、機体 10 の各部から衝撃波 SW が発生する（ステップ 401）。大気中を伝播してゆく過程で圧力変動の大きな波はより速く大気中を伝播するという現象を伴い（ステップ 402）機首と機尾の 2 つの強い衝撃波 SW に統合され（ステップ 403）、地上において 2 度の大きな圧力上昇を伴う N 型の圧力波として観測される（ステップ 404）。超音速機によって発生伝播される衝撃波 SW は図 5 にも示すように円錐形態 CONE で伝播し地上に到達する。円錐形態 CONE をときにマッハコーンと呼ぶ。地上では到達した衝撃波 SW はソニックブームとして観測される。

【0029】

特許文献 1 に係る発明は、機体 10 の初期形状及び機体 10 の目標等価断面積を設定し、超音速機が巡航速度で飛行したと仮定したときの機体 10 の初期形状に対する近傍場圧力波形を推定する。次に、この近傍場圧力波形から等価断面積を評価し、巡航速度に応じたマッハ平面を設定し、等価断面積が目標等価断面積に近づくように、機体 10 の初期形状とマッハ平面とが交差する初期曲線に対応する設計曲線をマッハ平面上に設定する。そして、この設計曲線に基づき機体 10 の形状を設計する。

【0030】

ここで、超音速機の等価断面積とは、図 6 に示すように、機体 10 を超音速機の巡航マッハ数で決定されるマッハ平面 P_M で切断した断面積 S_M の機体軸方向への投影面積 S_P の分布のことである。マッハ平面 P_M とは、法線ベクトルを機体軸に対して角度 $\mu = \sin^{-1}(1/M)$ （ $1/M$ ）傾けた平面である。なお、幾何学的関係により、前記断面積 S_M は前記投影面積 S_P に巡航マッハ数 M を乗算した値と一致する。

角度 μ は、機体 10 の先端を頂点とするマッハコーン（円錐形態 CONE）の半頂角である。

マッハ平面 P_M は、図 5 に示すように、マッハコーン（円錐形態 CONE）における機体 10 の直下（以降、これを「オントラック」と呼ぶ。）沿って延びる母線 BL_{on} に接する平面をいう。

【0031】

機体 10 の目標等価断面積は、典型的には、初期形状の等価断面積をもとにしてソニックブームが低減できるように経験的に定めたものである。

【0032】

超音速機の巡航速度とは、例えば $Ma 1.6$ である。

【0033】

近傍場とは、図 5 及び図 7 に示すように、機体 10 の直下（オントラック）で機体 10 に近い位置であり、例えば機体 10 の長さを 1 としたとき、機体 10 より 0.3 だけ下に

10

20

30

40

50

ある位置である。

【0034】

初期形状に対する近傍場の圧力波形は、典型的には、風洞模型試験や数値計算モデルによって取得できる。

【0035】

特許文献1は、機体10の直下、すなわちオントラックの低ソニックブーム機体形状設計を効率的に実施するものであった。

特許文献1に記載の設計方法は、設計マッハ数においてオントラックのブーム強度を低減する手法であり、巡航速度に応じたオントラックのマッハ平面を設定し、等価断面積が目標等価断面積に近づくように、機体の初期形状とマッハ平面とが交差する初期曲線に対応する設計曲線をマッハ平面上に設定する。

10

例えば図24に示すように、機体の気流方向に沿った任意の位置($x = X$)での機体の下面側の形状を設計対象とした場合を例に挙げて説明すると、以下のとおりとなる。

まず、 $x = X$ における目標等価断面積と機体の初期形状の等価断面積との差分(dA_E)を図24上に示す等価断面積分布から算出する。続いて、算出した差分(dA_E)を基に、 $x = X$ の位置での機体の下面側の形状を、図24下に示すように、 $x = X$ を通るオントラックのマッハ平面上で修正する。修正後の断面形状は、機体の左右で対称な形状に設定される。

【0036】

本実施形態では、さらに進んで、オントラックのソニックブームと機体直下から周方向に外れた位置(以降、これを「オフトラック」と呼ぶ。)のソニックブームを同時に低減した周方向にロバストな低ソニックブーム機体形状設計を効率的に実施する。

20

【0037】

例えば、図8に、ソニックブーム強度とオフトラック角度との関係の一例を示す。オフトラック角度 ϕ は、図7に示すようにオントラックに対するオフトラックの角度 ϕ (°)を指す。

図8の点線aはオントラック低ソニックブーム設計の場合を示している。オントラックのみを考慮して低ソニックブーム化するとオフトラックのソニックブーム強度が増加する。これに対して、実線bは、周方向にロバストな低ソニックブーム設計(ロバスト低ソニックブーム設計)の場合を示している。なお、実線cは、オントラックおよび周方向のいずれにも低ソニックブーム設計を行っていない非低ソニックブーム設計の場合を示している。

30

【0038】

本実施形態では、オフトラックに対する目標等価断面積の気流方向の分布(以降、これを「目標等価断面積分布」と呼ぶ。)をオントラックに対する目標等価断面積分布に読み替える。より具体的に、本実施形態では、設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、設計マッハ数におけるオントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替える。

この「読み替え」により、機体10の等価断面積を計算するための断面形状(機体とマッハ平面との交線)が左右対称となるオントラックだけでオフトラックの低ソニックブーム性を考慮した機体形状設計が可能となり、左右非対称性に関する課題が解決される。

40

【0039】

次に、読み替えられたオフトラックに対する目標等価断面積分布とオントラックに対する目標等価断面積分布をブレンドし、オフトラック、オントラック双方で低ソニックブーム化が可能な単一の目標等価断面積分布を設定する。この「ブレンド」により複数のオフトラックとオントラックに対する目標等価断面積分布が周方向のロバスト性を考慮しつつ単一の、従って実現可能なオントラックに対する目標等価断面積に置き換えられる。

【0040】

特許文献1においてオントラックでの効率的な低ソニックブーム形状設計方法が示されており、特許文献1に係る発明と本実施形態に係る手法を用いることで、非特許文献6に

50

おける最適設計手法を用いなくとも効率的に周方向にロバストな低ソニックブーム機体形状が設計可能となる。

【0041】

具体的な「読み替え」と「ブレンド」の手法を以下に示す。なお、ここでは与えられた初期形状を低ソニックブーム化するものとしている。

【0042】

まず、「読み替え」は以下の流れとなる。

【0043】

図9に示すように、オフトラックにおける初期形状の機体10の等価断面積分布（以降、これを「等価断面積分布」と呼ぶ。）を計算する。ここで、オフトラック角度 ϕ は何度でも構わないが、初期形状でソニックブーム強度が大きい角度 ϕ を選択するのが良い。また、初期形状でソニックブーム強度が大きい角度 ϕ を選択した場合、その後形状修正しても選択した ϕ 以外のオフトラックでのソニックブーム強度が下がらないことが経験的にある。その場合には、適宜角度 ϕ を選択する。以下に示す実施形態では、初期形状でソニックブーム強度が大きい角度は30度であるが、上記の理由により角度 ϕ として40度を選択した。なお、角度 ϕ は複数選択しても構わない。

【0044】

機体10の等価断面積分布は気流方向位置（ x ）の関数となり、機体10と $x = X_1$, X_2 , $X_3 \dots$ を通るオフトラックのマッハ平面との断面形状を基に機体10の断面積が計算される。なお、正確な低ソニックブーム機体形状設計のためには逆算等価断面積分布を用いるのが好ましい。なお、オフトラックのマッハ平面とは、図5に示すように、マッハコーン（円錐形態 CONE）における機体10のオフトラックに沿って延びる母線 BL 。 f_f に接する平面をいう。

【0045】

次に、図10に示すように、得られた機体10のオフトラックの等価断面積分布（初期形状の分布）を基に低ソニックブーム化のためのオフトラックの目標等価断面積分布（目標分布）を設定する。

目標等価断面積分布として、ここでは多項式を用いて滑らかな分布を設定している。多項式の次数を6とし、端点A（図10における $x = 2.0\text{ m}$ の点）と端点B（図10における $x = 41.9\text{ m}$ の点）において初期形状の分布と0次、1次、2次の微係数が一致することに加え、端点Aにおける3次の微係数が0となるように係数を定めている。

得られた目標分布と初期形状の分布との差（以降、これを「必要付加断面積分布」と呼ぶ。）を基に機体10の形状が修正される。機体10の形状の修正としては、非特許文献1に従うと、 $x = X_1$ における必要付加断面積が正であれば、 $x = X_1$ を通るオフトラックのマッハ平面と機体10との断面形状を必要付加断面積と合致するように拡大させることとなる。ここには前述の通り左右非対称性の問題があるため、図11に示すように、オフトラックのマッハ平面上で付加すべき必要付加断面積分布111をオフトラックのマッハ平面上で付加すべき必要付加断面積分布112に読み替える。

【0046】

ここで、ソニックブームは地面に伝播する圧力波に由来するものであり、効果的に低ソニックブーム化するためには機体10の下面側の形状を設計対象とするのが好ましい。このため、図12に示すように、ここでは機体10の胴体11の下面を設計対象とする。

【0047】

任意の気流方向の位置（例えば $x = X$ ）を指定することで、この位置を通過するオフトラックのマッハ平面（マッハ平面A）が定まる。ここで図12ではマッハ平面Aと機体対称面の交線（これも交線Aとする。）を示している。マッハ平面Aと機体の断面（これも断面Aとする。）は交線Aの前後にまたがる。

【0048】

非特許文献1に従うと、断面Aにおいて $x = X$ における必要付加断面積を付加することとなるが、ここではこの断面Aの近傍に位置するオフトラックのマッハ平面と機体の断面

10

20

30

40

50

(断面 B) において付加する。

【0049】

この断面 B を定めるために基準線を導入する。断面 A と断面 B が近接していることが重要であるため、基準線は機体のノーズ先端を起点とする軸であって、設計対象部位に近接するよう気流方向より任意の角度 (角度 α) だけ傾けた軸とする。ここでは機体軸が設計対象部位近傍を通っているため、これを基準線とした (図 12 参照)。以下の説明では、角度 α を迎角ともいう。

【0050】

交線 A と基準線の交点を通るオントラックのマッハ平面 (マッハ平面 B) を定める。図 12 ではマッハ平面 B と機体対称面の交線 (これも交線 B とする。) が示されている。マッハ平面 B と機体 10 の断面 (これも断面 B とする。) に対して必要付加断面積を付加する。

【0051】

ここで、マッハ平面の位置は気流方向が基準となり、図 12 で示したようにオフトラックのマッハ平面 A は $x = X$ であり、オントラックのマッハ平面 B は $x = X'$ である。本来は $x = X$ のオフトラックのマッハ平面 A で付加すべき必要付加断面積を $x = X'$ のオントラックのマッハ平面 B で付加することとなるため、気流方向位置 x を $X - X'$ だけずらさなければならない。これが読み替えであり、具体的には図 13 に示すように、任意の X において必要付加断面積分布が $X - X'$ だけ前方にシフトされる。

【0052】

ここで、図 12 において、気流方向が x であり、気流に垂直な方向を z とし、気流方向と基準線方向とがなす角を α とし、気流マッハ数を M としたときに $\beta = \sqrt{M^2 - 1}$ とすると、

$$X = x + \beta \cdot z \cdot \cos \phi$$

$$X' = x + \beta \cdot z$$

$$z = -\tan \alpha \cdot x$$

である。従って、図 13 に示した、「読み替え」の際のオフトラックの必要付加断面積分布からオントラックの必要付加断面積分布への前方シフト $\Delta x = X - X'$ は、

$$\Delta x = (\beta \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \cos \phi) / (1 - \beta \cdot \cos \phi \cdot \tan \alpha)) X$$

となる。

【0053】

次に「ブレンド」は以下の流れとなる。

【0054】

オフトラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布に対して上記の読み替えを適用したものを分布 A とする (図 13 の点線 112 が分布 A に対応する)。また、オントラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布を分布 B とする (初期形状がオントラックに対して既に低ソニックブーム化されている場合、分布 B は全ての x に対して必要付加断面積がゼロとなる分布である)。

【0055】

ブレンド比率 f を導入し、分布 A と分布 B を下式のように単一の分布 C とする。

【0056】

$$\text{分布 C} = \text{分布 A} \times f_1 + \text{分布 B} \times f_2$$

$$\text{但し、} f_1 + f_2 = 1$$

なお、オフトラック角度 ϕ が複数設定された場合、分布 C は下式で定義すれば良い。

【0057】

$$\text{分布 C} = \text{分布 A}_1 \times f_{11} + \text{分布 A}_2 \times f_{12} + \text{分布 A}_3 \times f_{13} + \dots + \text{分布 B} \times f_2$$

$$\text{但し、} f_{11} + f_{12} + f_{13} + \dots + f_2 = 1$$

ここで、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 $\dots$ は複数のオフトラック角度での必要付加断面積分布である。

10

20

30

40

50

【0058】

周方向に口バストな低ソニックブーム性を実現するためにブレンド比率を以下により決定する。

【0059】

ブレンド比率を指定して分布Cを定めると、これを付加した場合のオントラックとオフトラックの機体10の等価断面積分布が得られる。これらの機体10の等価断面積分布から非特許文献1に記載された技術を利用してオントラックとオフトラックの機体近傍における圧力波形が得られる。非特許文献1に記載された技術は、航空機の設計条件（機体長、機体重量、飛行マッハ数、飛行高度等）に対してソニックブームを低減するための機体10の等価断面積分布（機体の断面積と揚力と等価な断面積の合計）を算出するものである。これらの圧力波形から地上のソニックブーム波形を計算し、オントラックとオフトラックのソニックブーム強度を評価することができる。

10

【0060】

複数のブレンド比率に対して上記のオントラックとオフトラックのソニックブーム強度の評価を繰り返すと、ブレンド比率 f_2 が高いほどオントラックが低ソニックブーム化され、ブレンド比率 f_1 が高いほどオフトラックが低ソニックブーム化される傾向が捉えられる。この結果を踏まえてオントラックとオフトラックのソニックブーム強度でバランスが取れるブレンド比率を設定する。

【0061】

分布Cはオントラックのマッハ平面で付加すべき単一の必要付加断面積分布であるため、これを満足する機体形状は必ず存在する。オントラックの断面積分布に見合った効率的な機体形状設計手法については既に特許文献1の技術で示されていることから、これを用いて例えば図14に示すように分布Cを実現する機体形状を設計する。すなわち、必要付加断面積に合うようにオントラックのマッハ平面内で断面形状を拡大又は縮小する。これにより、最適化は不要となる。

20

【0062】

以上のように本実施形態によれば、オフトラックに対する必要付加断面積分布をオントラックに対するものに読み替え、さらに複数の必要付加断面積分布をブレンドにより単一の分布とすることで、周方向に口バストな低ソニックブーム化が可能な単一の実現可能な分布が得られる。本分布はオントラックに対するものであり、特許文献1に記載の技術を適用することで、効率的に機体形状設計が可能である。この結果、オフトラックのみならず、オントラックに対しても低ソニックブーム化が達成される。

30

【0063】

<実施例1>

以下、本実施形態を50人乗りクラスの小型超音速旅客機の先端ソニックブーム低減設計に適用した実施例を示す。

【0064】

図15はオントラックのみを低ソニックブーム化した機体形状（初期形状と呼ぶ）に対する先端ソニックブーム強度を示している。ここで、先端ソニックブーム強度は図16に示すように、先端ソニックブーム波形を点対称に折り返して後端ソニックブーム波形とした波形に対するソニックブーム強度を表している。なお、ブーム強度は地面での反射係数を1.9とし、評価ツールとして、PL（Stevens Perceived Level Mark VII）を用いた。本手法は後端ソニックブーム低減にも適用可能であるが、代表的な例として先端ソニックブーム強度を対象とした。

40

【0065】

オントラック（ $\phi = 0$ 度）では81デシベルであるがオフトラックの $\phi = 30$ 度、40度では90デシベルを超えている。ここでは $\phi = 40$ 度を対象として先端ソニックブーム強度を周方向に口バスト化する。初期形状でソニックブーム強度が大きい角度 ϕ である30度を選択した場合、その後形状修正しても $\phi = 40$ 度でのソニックブーム強度が下がらないことが経験的に分かっていることから $\phi = 40$ 度を対象として先端ソニックブーム強度を周

50

方向にロバスト化した。

【0066】

図17の点線が $\phi = 40$ 度における初期形状の機体10の等価断面積分布であり、これを低ソニックブーム化するために実線で示した機体の目標等価断面積分布を設定した。実線と点線の差分が必要付加断面積分布であり、図18の線181に対応する。これを図13で説明した読み替え計算式において、オフトラック角度 $\phi = 40$ 度、迎角 $\alpha = 4$ 度、 $\beta = \sqrt{M^2 - 1}$ 、 $M = 1.6$ として読み替えた分布が図18の点線182で示された分布となる。

【0067】

図19は必要付加断面積分布のブレンドにおいてその分布の修正を説明するための分布図である。図19の破線192は図18の点線182の波形であり、点線191はそれを修正した波形である。具体的には、修正後の分布である点線191は破線192に縦軸方向のオフセットを与え（図19の線193）、必要付加断面積が、 x の所定の範囲において、0から始まり0で終わるように連続的な値を取り、滑らかな分布としたものである。なお、この修正を行わず、オフセット等がゼロであっても構わない。

【0068】

オントラックは既に低ソニックブーム化されているため、オントラックを低ソニックブーム化するための必要付加断面積分布はすべての x に対してゼロとなる分布である。従って、ブレンドは図19の線191の山の高さを変えることに相当する（図20の分布）。図21は各ブレンド比率に対して先端ソニックブーム強度を推算した結果であり、ブレンド比率を0.7とすることでオントラックとオフトラックの低ソニックブーム性がバランスすることがわかる。このため、ブレンド比率を0.7として機体形状を設計した。これをロバスト低ブーム形状と呼ぶ。

【0069】

図22は実施例における機体形状を示す側面図であり、図22(a)は初期形状、図22(b)は初期形状に必要付加断面積（図中斜線で示す。）を付加したロバスト低ブーム形状を示している。図23は、それぞれの先端ソニックブーム強度を示している。50度までのオフトラック領域におけるソニックブーム強度の最悪値を比較すると、初期形状では91.6デシベル（ $\phi = 30$ 度）であるのに対し、ロバスト低ブーム形状では85.1デシベル（ $\phi = 0$ 度）であり、6.5デシベルのソニックブーム低減効果が得られている。

【0070】

<第2の実施形態>

上述の第1の実施形態では、主に、超音速機の巡航条件（設計マッハ数）における周方向にロバストな低ブーム機体形状の設計方法を例に挙げて説明した。本実施形態では、周方向に対するロバストな低ブーム設計に加え、超音速機の巡航条件に到達するまでの上昇フェーズ（非設計マッハ数）に対してもロバストな低ブーム設計について説明する。

【0071】

図25は、巡航条件（設計マッハ数： $M 1.6$ ）においてオントラックに対する低ブーム設計を実施した超音速機の飛行経路全体に対するソニックブーム強度（プライマリブームカーペット）の一例を示している。同図上（図25(a)）は、上昇、巡航および降下にわたる飛行経路での高度と飛行距離の関係を示しており、同図下（図25(b)）は、機体の横方向におけるソニックブーム強度を示している。同図より、第1の実施形態で説明した方法で巡航条件において周方向にロバストな低ブーム機体形状を設計したとしても、巡航条件に到達するまでの上昇フェーズ（非設計マッハ数： $M 1.2 \sim 1.5$ ）で発生するソニックブーム強度は、依然として大きいことがわかる。

【0072】

そこで本実施形態では、周方向に対するロバストな低ブーム設計に加え、マッハ数に対するロバストな低ブーム設計が可能な超音速機の機体形状の設計方法を提供することを目的とする。以下、第1の実施形態と異なる構成について主に説明し、第1の実施形態と同様の構成については同様の符号を付しその説明を省略または簡略化する。

【0073】

本実施形態では、第1の実施形態と同様に、オフトラックに対する目標等価断面積の気流方向の分布（目標等価断面積分布）をオントラックに対する目標等価断面積分布に読み替える。この際、本実施形態では、マッハ数に対するロバストな低ブーム設計を実現するため、非設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積を、設計マッハ数における前記オントラックでのマッハ平面の機体の断面の必要付加断面積に読み替える点で、第1の実施形態と異なる。

【0074】

具体的な「読み替え」の手法を以下に示す。

【0075】

まず、第1の実施形態と同様に、オフトラックにおける初期形状の機体10の等価断面積分布を計算する。この等価断面積分布は、図9に示したように、気流方向位置（ x ）の関数となり、機体10と $x = X_1, X_2, X_3 \dots$ を通るオフトラックのマッハ平面との断面形状を基に機体10の断面積が計算される。なお、正確な低ソニックブーム機体形状設計のためには逆算等価断面積分布を用いるのが好ましい。

【0076】

次に、得られた機体10のオフトラックの等価断面積分布を基に、低ソニックブーム化のためのオフトラックの目標等価断面積分布を設定する（図10参照）。ここでも多項式を用いて滑らかな分布を設定する。

【0077】

続いて、得られた目標等価断面積分布と初期形状の等価断面積分布との差（必要付加断面積分布）は、本来であればオフトラックのマッハ平面上で付加すべきものであるが、これを第1の実施形態と同様に、オントラックのマッハ平面上で付加すべき必要付加断面積分布に読み替える（図11参照）。

【0078】

ソニックブームは地面に伝播する圧力波に由来するものであり、効果的に低ソニックブーム化するためには機体10の下面側の形状を設計対象とするのが好ましい。このため、本実施形態においても機体10の胴体11の下面を設計対象とする。

【0079】

図26に示すように、任意の気流方向の位置（例えば $x = X$ ）を指定することで、この位置を通過するオフトラックのマッハ平面（マッハ平面C）が定まる。図26ではマッハ平面Cと機体対称面の交線（交線C）を示している。マッハ平面Cと機体の断面（断面C）は交線Cの前後にまたがる。

【0080】

非特許文献1に従うと、断面Cにおいて $x = X$ における必要付加断面積を付加することとなるが、ここではこの断面Cの近傍に位置するオントラックのマッハ平面（マッハ平面B、交線B）と機体の断面（断面B）において付加する。

【0081】

この断面Bを定めるために基準線を導入する。断面Cと断面Bが近接していることが重要であるため、基準線は設計対象部位の近傍を通らなければならない。ここでは機体軸が設計対象部位近傍を通っているため、これを基準線とした。

【0082】

交線Cと基準線の交点を通るオントラックのマッハ平面（マッハ平面B）を定める。図26ではマッハ平面Bと機体対称面の交線（交線B）が示されている。マッハ平面Bと機体10の断面が断面Bとなり、ここで必要付加断面積を付加する。

【0083】

ここで、マッハ平面の位置は気流方向が基準となり、図26で示したようにオフトラックのマッハ平面Cは $x = X$ であり、オントラックのマッハ平面Bは $x = X'$ である。本来は $x = X$ のオフトラックマッハ平面Cで付加すべき必要付加断面積を $x = X'$ のオントラックマッハ平面Bで付加することとなるため、気流方向位置 x を $X - X'$ だけずらさなければな

10

20

30

40

50

らない。これが読み替えであり、具体的には図 13 で示したように、任意の X において必要付加断面積分布が $X - X'$ だけ前方にシフトされる。

【0084】

この際、マッハ平面 C が非設計マッハ数におけるオフトラックでのマッハ平面の場合では、非設計マッハ数が考慮できるように「オフトラックマッハ平面 C からオントラックマッハ平面 B への読み替え」を拡張する。ここで、非設計マッハ数を M_{off} とし、このときの迎角を $\alpha + d\alpha$ とする（設計マッハ数 M における迎角 α との差分が $d\alpha$ である）。拡張において注意すべき点は、設計マッハ数 M と非設計マッハ数 M_{off} で、マッハ数が異なり迎角も異なる場合がある点である。

【0085】

（マッハ数の違い）

マッハ数の違いは、オフトラックマッハ平面 C を表現する下記式（1）および（2）において、 β を非設計マッハ数 M_{off} により計算すれば良い（図 27 左参照）。

$$X = x + \beta_{off} \cdot z \cdot \cos \phi \cdots (1)$$

$$\beta_{off} = \sqrt{M_{off}^2 - 1} \cdots (2)$$

【0086】

したがって、この場合における「読み替え」の際の、非設計マッハ数におけるオフトラックの必要付加断面積分布から設計マッハ数におけるオントラックの必要付加断面積分布への前方シフト $\Delta x (= X - X')$ は、 $d\alpha$ を 0 とした場合には下記式（3）により算出される。

$$\Delta x = (\tan \alpha \cdot (\beta - \beta_{off} \cdot \cos \phi) / (1 - \beta_{off} \cdot \cos \phi \cdot \tan \alpha)) X \cdots (3)$$

この式（3）は、マッハ数だけが変化し、迎角は変化しない場合の Δx の算出式である。

【0087】

（迎角の違い）

迎角はマッハ数に応じて定まり、非設計マッハ数では、基準線が気流方向（x）に対して $\alpha + d\alpha$ だけ傾いている（図 27 左、式（4））。

$$z = -\tan(\alpha + d\alpha) \cdot x \cdots (4)$$

ここでは、交線 C と基準線との交点を $d\alpha$ だけ原点周りに回転させる（図 27 右、原点はノーズ先端）。このとき、回転された交点は設計マッハ数における基準線上に位置することとなる。オントラックマッハ平面 B は、回転された交点を通る設計マッハ数におけるオントラックマッハ平面として設定される。この時の X' とオフトラックマッハ平面 C の x 位置（X）を用い、必要付加断面積分布が $\Delta x (= X - X')$ だけ前方にシフトされる（図 13 参照、式（5））。

$$\Delta x = ((1 - \cos d\alpha - \beta \cdot \sin d\alpha - \tan(\alpha + d\alpha) \cdot B) / A) X \cdots (5)$$

$$A = 1 - \beta_{off} \cdot \cos \phi \cdot \tan(\alpha + d\alpha) \cdots (6)$$

$$B = \beta_{off} \cdot \cos \phi + \sin d\alpha - \beta \cdot \cos d\alpha \cdots (7)$$

【0088】

なお、交線 C と基準線との交点を $d\alpha$ だけ原点周りに回転させる際の回転方向は、 $d\alpha$ が正の場合は図 27 において反時計周りであり、 $d\alpha$ が負の場合は図 27 において時計周りである。

【0089】

以上により読み替えられた複数の必要付加断面積分布を適切にブレンドして単一の必要付加断面積分布とすることで、マッハ数に対してロバストであり周方向にもロバストな低ブーム設計を設計マッハ数におけるオントラックマッハ平面で実施可能となる。

【0090】

なお、上記式（1）において、 $\phi = 0$ は、オフトラック角度が 0、すなわち、オントラックを意味する。したがって、上記式（1）において $\phi = 0$ にすると、オントラックにおけるマッハ数に対してロバストな低ブーム設計が実施可能となる。

10

20

30

40

50

【0091】

<実施例2>

以下、本実施形態を50人乗りクラスの小型超音速旅客機の先端ソニックブーム低減設計に適用した実施例を示す。ここでは、図28上に示すように機首に一对のカナードが取り付けられた機体110を対象とし、カナードが発生するソニックブームをプライマリカーペット内でロバストに低ブーム化する手法について説明する。

【0092】

飛行条件は、設計点（設計マッハ数）においてマッハ1.6、迎角（ α ）4.0度、飛行高度49kftである。このとき、オフトラック角度を10度刻みとした場合、オフトラック角度60度ではブームが地上に届かないため、50度以下のオフトラック角度を考慮する。非設計マッハ数での条件として、図25ではマッハ1.2において最もブーム強度が強くなるため、マッハ数は1.2とし、この時の迎角（ $\alpha + d\alpha$ ）を4.4度、飛行高度を35kftとした。飛行高度が低いため、オフトラック角度30度ではブームが地上に届かない。このため、20度以下のオフトラック角度を考慮する。

10

【0093】

図28下は機体形状（初期形状）と設計対象部位を示している。先端ソニックブーム強度の評価方法は、第1の実施形態と同様に、図16に示すように、先端ソニックブーム波形を点対称に折り返して後端ソニックブーム波形とした波形でブーム強度を評価している。

【0094】

非設計マッハ数におけるオフトラックマッハ平面から設計マッハ数におけるオントラックマッハ平面への「読み替え」を適用した必要付加断面積分布を図29および図30に示す。これらの図に示す分布は一例であり、カナードの形状や大きさ、位置に応じて異なる分布をとり得る。

20

【0095】

図29は、設計マッハ数のみを考慮した場合の分布であり、これは第1の実施形態の手法を適用した分布に対応する。同図において、0度、10度、20度、30度および40度の5つのオフトラック角度の必要付加断面積分布は全て負の値をとっており、これにより機体（胴体）の断面積が縮小される。断面積縮小により膨張波が発生し、カナードで発生する衝撃波が弱められ、先端ソニックブーム強度が低減されることとなる。ここでは全てのオフトラック角度で必要となる膨張波が発生できるように、上記5つのオフトラック角度の必要付加断面積分布について各x位置において最小値をとった分布（白抜き四角のプロット）を設定した。この分布を周方向ロバストターゲット分布と呼び、これに従って設計された形状を周方向ロバスト形状と呼ぶ。

30

【0096】

これに対して図30は、非設計マッハ数を考慮して「読み替え」が適用された必要付加断面積分布を示す。ここでは、非設計マッハ数（マッハ1.2）および当該マッハ数に到達する高度（図25参照）を基に、ソニックブームが地表に伝播し得る0度、10度および20度の3つのオフトラック角度の必要付加断面積分布を検討した。そして、これら3つのオフトラック角度の分布に前述の周方向ロバストターゲット分布を加えた4つの分布に対して、各x位置において最小値をとった分布（黒色四角のプロット）を設定した。この分布をマッハ数・周方向ロバストターゲット分布と呼び、これに従って設計された形状をマッハ数・周方向ロバスト形状と呼ぶ。

40

【0097】

なお、マッハ数・周方向ロバストターゲット分布は、その後半部（ $x > 22\text{m}$ ）では周方向ロバストターゲット分布（白抜き四角のプロット）と同一である。

また、この例では、「読み替え」の適用に際して、上記4つの分布に対して各x位置において最小値となる必要断面積の分布を採用したが、これに限られず、要求されるブーム強度や設計の仕様等に応じて任意に設定することが可能である。

【0098】

これら形状の先端ソニックブーム強度を図31に示す。なお、ブーム強度は地面での反

50

射係数を1.9とし、評価ツールとして、P L (Stevens Perceived Level Mark VII)を用いた。

【0099】

図31に示すように、周方向口バスト形状では初期形状に対してマッハ1.6およびマッハ1.2の双方でブーム強度が低減されている。マッハ数・周方向口バスト形状では、マッハ1.6におけるブーム強度の最大値は周方向口バスト形状とほぼ同じである。マッハ1.2ではマッハ数・周方向口バスト形状は周方向口バスト形状よりも1デシベル程度ブーム強度が低減されている。つまり、第1の実施形態の手法と比べて本実施形態では、設計マッハ数におけるブーム強度を維持しつつ、非設計マッハ数でのブーム強度を低減することができる。

10

【0100】

<その他>

本発明は上記の実施形態には限定されずその技術思想の範囲内で様々な変形や応用による実施が可能である。その実施の範囲も本発明の技術的範囲に属する。

【0101】

また、本発明の設計方法に基づく超音速機の機体の形状はソニックブーム低減の効果が著しく、その点において従来の形状とは異なるものであり、区別できるものである。すなわち、機体の形状は、従来にない新規な形状であり、簡単な設計工程で形状が得られ、かつ、ソニックブーム低減化ができるという効果を奏するものである。

20

【符号の説明】

【0102】

10, 110 : 機体

111 : オフトラックの必要付加断面積分布

112 : オントラックの必要付加断面積分布

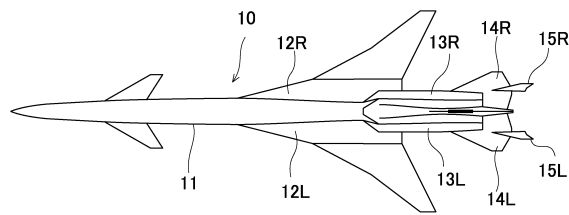
30

40

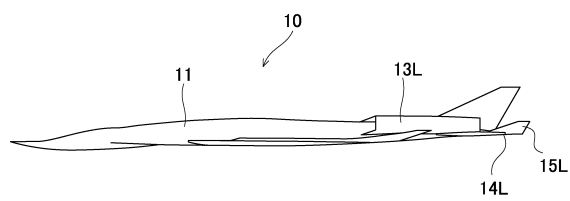
50

【図面】

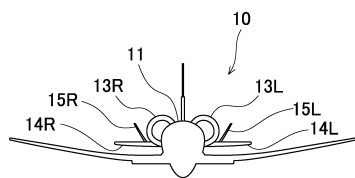
【図 1】



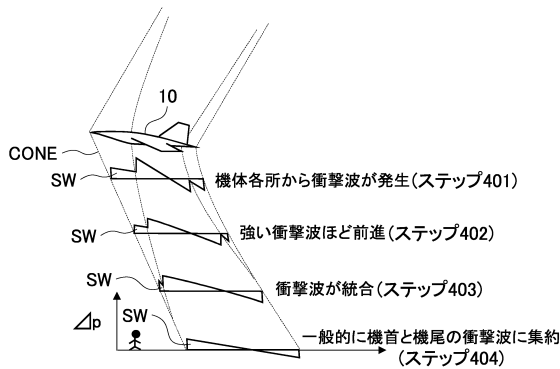
【図 2】



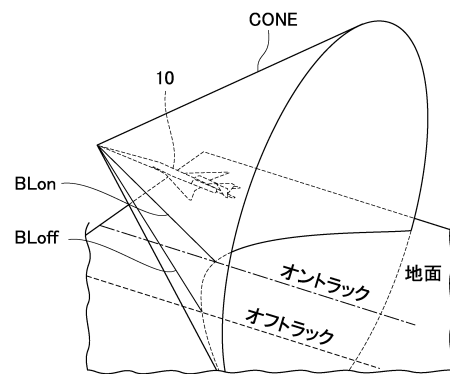
【図 3】



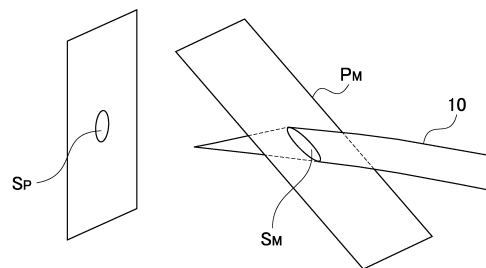
【図 4】



【図 5】



【図 6】



10

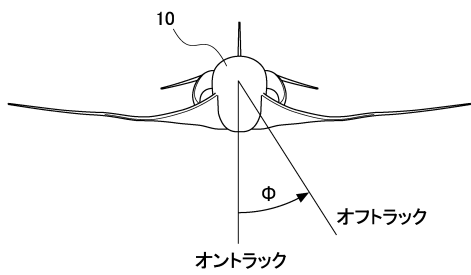
20

30

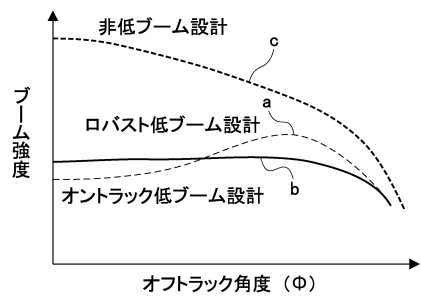
40

50

【図 7】

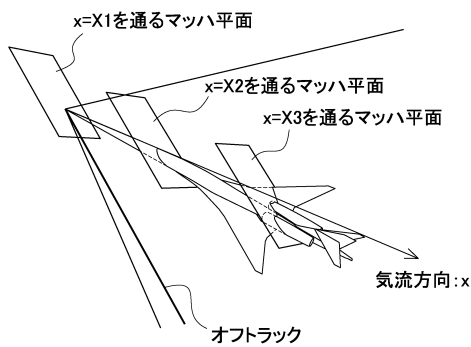


【図 8】

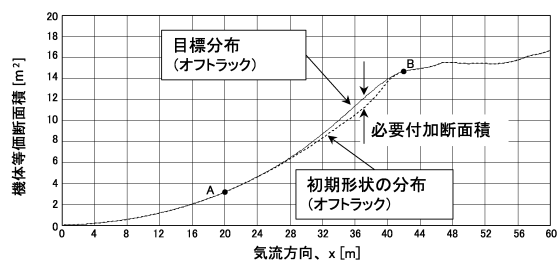


10

【図 9】



【図 10】



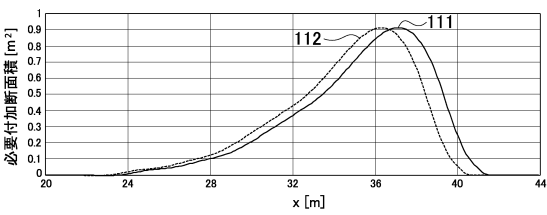
20

30

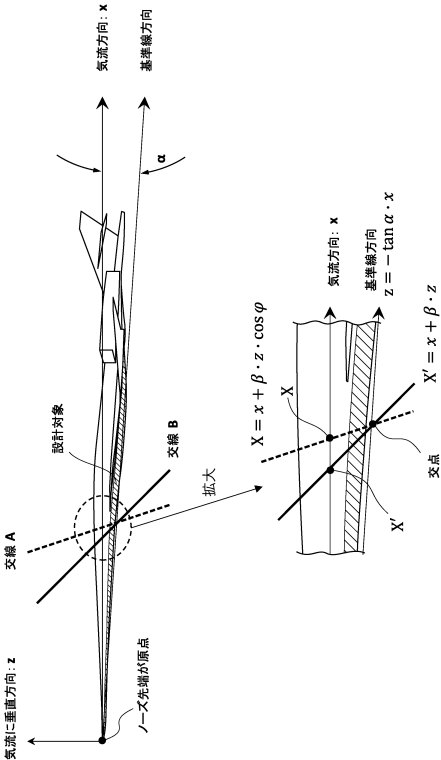
40

50

【図 1 1】



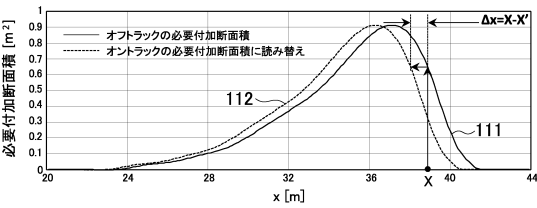
【図 1 2】



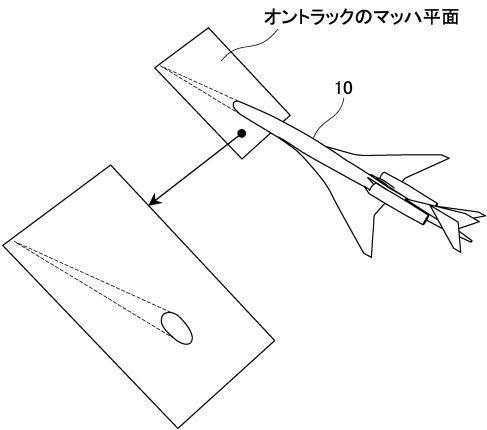
10

20

【図 1 3】



【図 1 4】

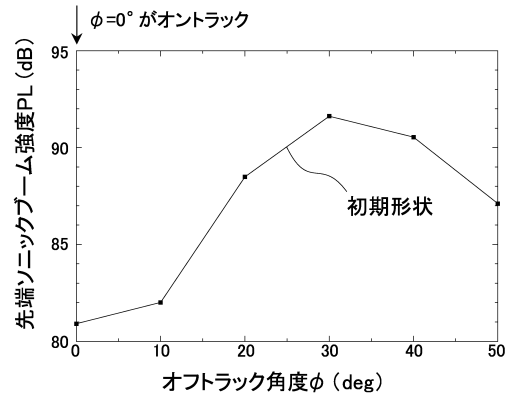


30

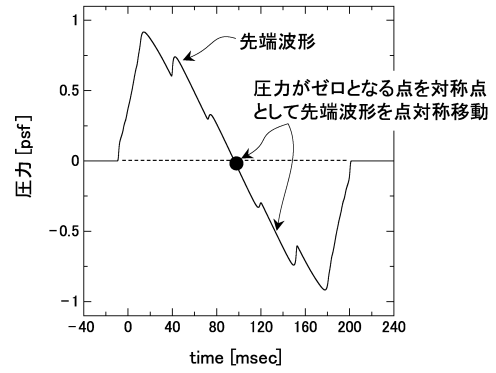
40

50

【図 15】

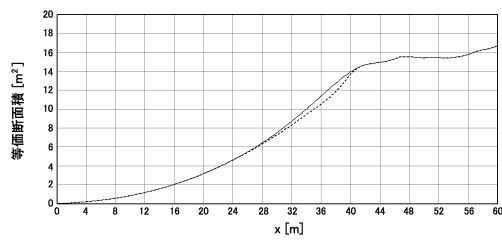


【図 16】

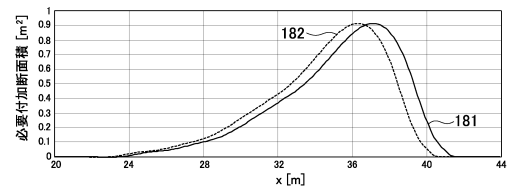


10

【図 17】

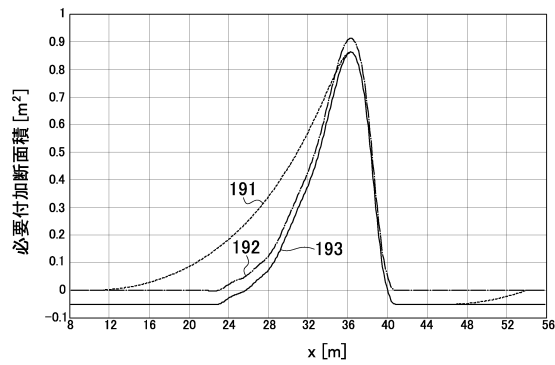


【図 18】

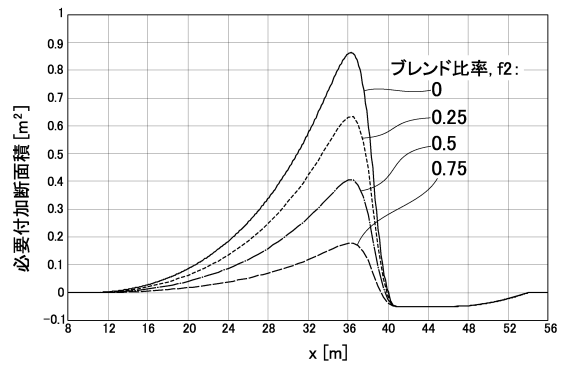


20

【図 19】



【図 20】

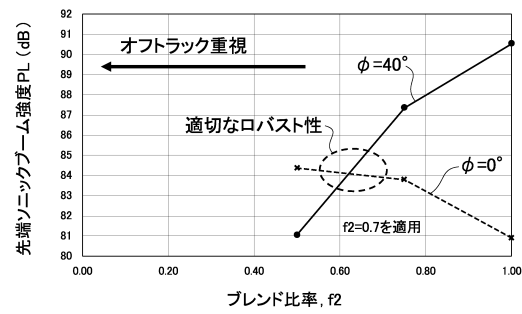


30

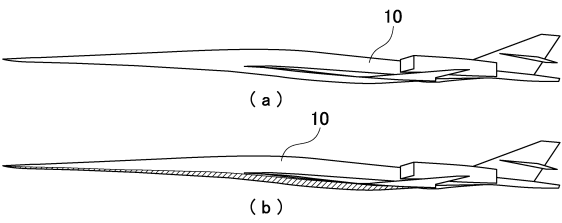
40

50

【図 2 1】

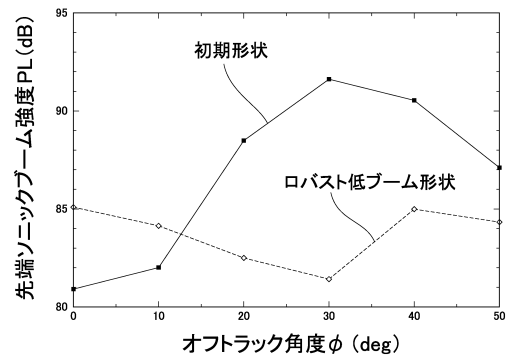


【図 2 2】

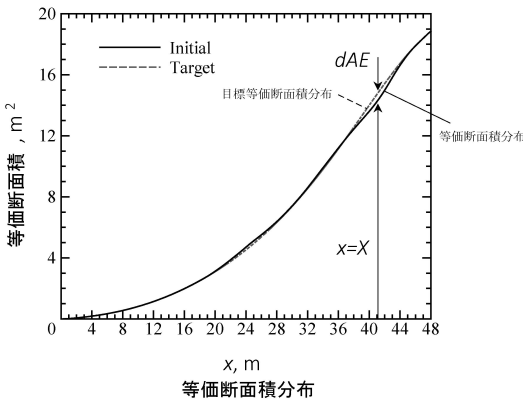


10

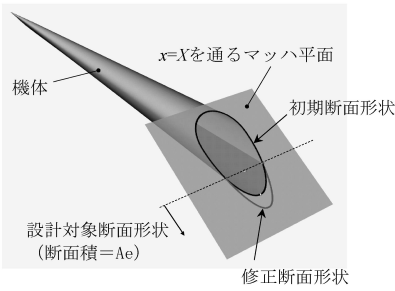
【図 2 3】



【図 2 4】



20

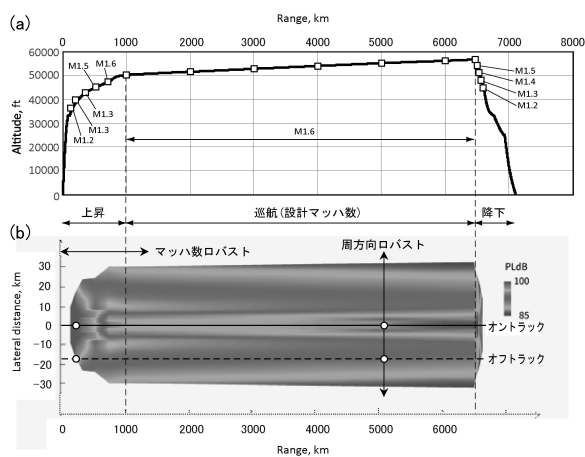


30

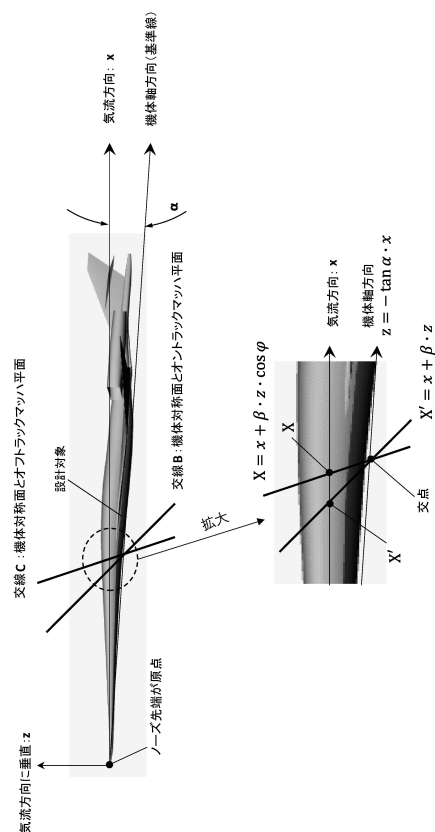
40

50

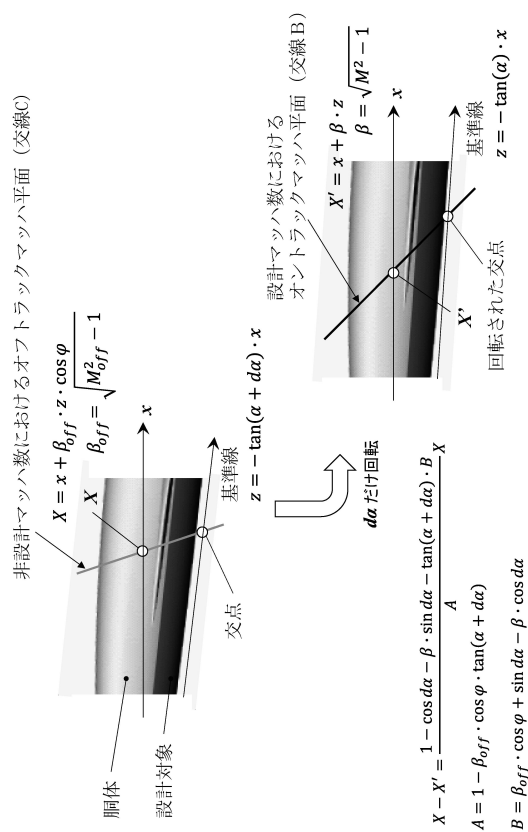
【図 25】



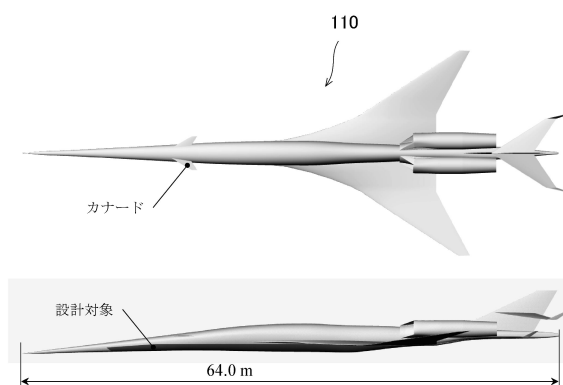
【圖 2 6】



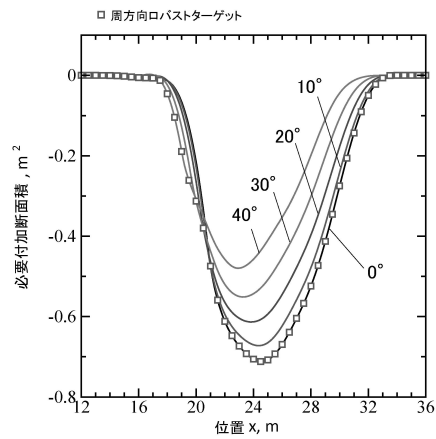
【図 27】



【図 28】

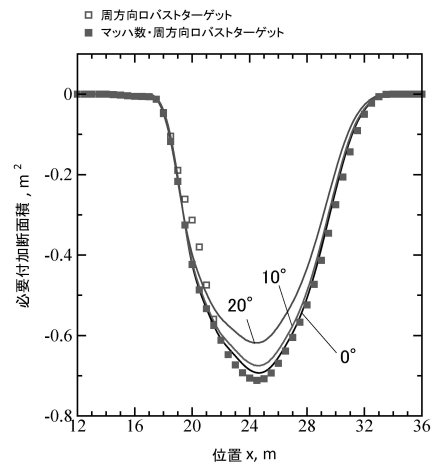


【図 29】



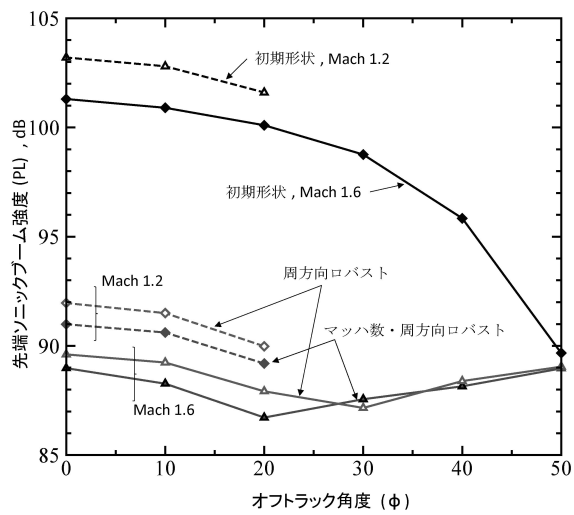
周方向ロバスト(第1の実施形態)

【図 30】



マッハ数・周方向ロバスト(第2の実施形態)

【図 31】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

SciTech2021フォーラム(11-15&19-21 January 2021) Virtual Eventの講演予稿集(<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-1270>)にて公開

(56)参考文献 国際公開第2019/187828(WO, A1)

特許第5057374(JP, B2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B64C 23/00

B64C 30/00

B64F 5/00

G06F 30/00