有限な斜面上でロータ回転面の一部が地面効果を受ける ロータのホバリング性能^{*1}

Hovering Performance of a Rotor in an Inclined and Partial Ground Effect

井 星 正 氣^{*2}・糸 賀 紀 晶^{*2}・早 田 泰 隆^{*2}・J. V. R. PRASAD^{*3}

Naohiro IBOSHI, Noriaki ITOGA, Yasutaka HAYATA and J. V. R. PRASAD

Key Words : Helicopters, Blade Flapping Motion, Ground Effect

Abstract : To clarify the hovering performance of the rotor whose disk is partly outside the edge of a finite inclined ground plane, a hovering test was conducted with a model rotor and a ground effect plate. At a chain of the flight environment from out-of-ground effect to full ground effect cases, the thrust, torque, and blade flap angle of the rotor hovering above the inclined ground plane were measured. Such flight environment was simulated altering the horizontal distance from the rotor hub center to the ground edge, i.e., center-to-edge distance, at a constant rotor height and ground inclination angle. As a result, it is shown that the hovering performance of the rotor in the inclined and partial ground effect remarkably depends on the combinations of the center-to-edge distance, the ground inclination angle, and the rotor height, and that the hovering performance of the rotor in the partial ground effect on the mountain side of the inclined ground plane is very different from that on the valley side.

1. は じ め に

本研究では、ヘリコプタが建物の屋上や艦船甲板上等へ離着陸する際に遭遇する飛行環境の一例として、ロータ回転面の一部が地面境界の外側にある場合 (Partial Ground Effect) のロータのホバリング性能を実験的に明らかにする。

ロータのホバリング性能に対する非一様な地面の干渉効果として、地面傾角やロータ高さの影響はロータ回転面の全面が地面境界の内側にある場合 (Full Ground Effect) について文献 1) から 5) で論じられている。

一方、ロータハブ中心から地面境界までの水平距離の影響を論じた研究として、長島ら¹⁾は遠隔操縦による模型ヘリコプタと大寸法の地面効果板を用いて、斜面上で Full Ground Effect と Partial Ground Effect を受ける場合のフリーフライト実験を行い、ロータの空力性能が飛行環境に著しく影響されることを示した。Xin²⁾は Generalized Ground Effect Model を構築し、数値解析的に平坦な地面上でホバリングするロータの誘導速度分布を水平距離やロータ高さに対して表した。さらに、Xin ら³⁾はロータ回転面の半分が地面境界の外側にある場合についてロータ高さに対するロータの誘導トルクを算出し、文献 1) と比較して Gener-

alized Ground Effect Model の妥当性を検証した。また、前報⁵⁾ではロータのホバリング性能に対する有限な地面境界の影響が Full Ground Effect 時においても顕著であることを実験的に示した。しかし、これらはおもにロータ高さに対するロータの空力的、動力学的特性を論じたもので、地面効果外から Full Ground Effect 時までの一連の飛行環境におけるホバリング性能については、Xin²⁾が誘導速度分布を数値解析的に示しているに過ぎない。

そこで、本研究では地面効果外から Full Ground Effect 時までの一連の飛行環境に対して、有限で平坦な地面や斜面の山側と谷側においてロータのホバリング実験を行い、水平距離や斜面の谷側と山側の地面境界に対するホバリング性能の特異な依存性を示す。

お も な 記 号

$|\beta_1|$: 1 次のフラッピング振幅

δ : 地面傾角

θ_0 : コレクティブピッチ角

ϕ : 位相遅れ角

無次元量

C_T/σ : ブレード面積を基準にした推力係数

C_Q/σ : ブレード面積を基準にしたトルク係数

d : 水平距離

h : ロータ高さ

λ : ロータ回転面上での誘導速度

σ : ロータソリディティ

ψ : ブレード方位角

*1 © 2003 日本航空宇宙学会

平成 14 年 10 月 11 日、日本航空宇宙学会第 40 回飛行機シンポジウムにて発表。平成 15 年 1 月 17 日原稿受理

*2 防衛大学校システム工学群航空宇宙工学科

*3 School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology

第 1 図 実験装置の概要図

第 1 表 模型ロータの寸法諸元と実験パラメータ

ロータ直径	1.138 m
ブレード弦長	0.06 m
翼型	NACA0015
ねじり下げ角	なし
ロータソリディティ比	0.0671
ロータ回転角速度	94.2 rad/s
ルートカットアウト	0.2
フラッピングヒンジオフセット	0.03
揚力傾斜	5.73
ロック数	4.72
コレクティブピッチ角	8°, 12°
地面傾角	0°, 30°
ロータ高さ	0.3, 0.5, 0.6, 1.0
水平距離	-1.1 ~ 1.2

ただし、本文中では C_T/σ と C_Q/σ は単に推力係数、トルク係数という。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を第 1 図に示す。模型ロータは直径約 1 m の関節型 2 枚ブレードロータで、模型支持部がロータ後流中に入らないように天井からつり下げた。ブレードピッチ角はコレクティブピッチ角を一定とし、サイクリック入力を与えていない。模型ロータはロータ推力とトルクを測定するための荷重検出器を内蔵し、さらにブレードフラップ角を測定するためのポテンショメータをフラッピング軸に取付けている。ロータの回転方向は上方から見て時計回りである。模型ロータの寸法諸元と実験パラメータを第 1 表に示す。地面効果板は面積が約 3.3 m^2 のような表面を有する正方形板で、支持装置の 6 台のサーボモータにより地面効果板に任意の運動や傾斜角を与えることができる。

本実験では、地面効果板の上面をシャフト軸に垂直なロータ回転面と水平またはそれと傾斜させることによって、それぞれ平坦な地面上や斜面上で地面効果を受けるロータの飛行環境を模擬した。支持装置は昇降装置上に固定されており、地面効果板とロータハブ中心間の距離（以下、ロータ高さといい、ロータ半径で除した無次元量で表す）を変更できる。

ロータ座標系と地面効果パラメータを第 2 図に示す。ロータ座標系はハブ中心を原点とし、 xy 平面はロータ回転面内であって、 x 軸は地面境界端の一边に垂直で谷側向きにと

第 2 図 ロータ座標系と地面効果パラメータ

る。 y 軸は左方向に、 z 軸は座標系が右手系となるように鉛直下向きに定める。ブレード方位角 ψ は x 軸から測り時計まわりを正とする。第 2 図では、ロータが斜面の谷側に位置する場合を表しているが、ロータが斜面の山側に位置する場合にも、 x 軸は谷側、すなわち地面の内側向きにとる。

本研究で考慮する地面効果パラメータは、水平距離 d 、ロータ高さ h 、地面傾角 δ である。Partial Ground Effect を決定するパラメータのひとつとしてロータ回転面と地面のオーバーラップ量を取り上げ、これをロータハブ中心と地面効果板端との水平距離 d で表し、ロータ半径で除した無次元量とする²⁾。水平距離を変更する場合には、ロータ高さ h が一定となるように地面効果板を支持装置と昇降装置により移動した。ロータハブ中心が地面境界の真上にある場合を $d = 0$ 、地面境界の外側にある場合を $d > 0$ 、内側にある場合を $d < 0$ とした。よって、 $d = 1$ の場合には、ロータ回転面の左端（前縁）が地面境界と接しているが、幾何学的には地面効果外と言える。一方、 $d = -1$ の場合には、ロータ回転面の全面が地面境界の内側にあり、幾何学的には Full Ground Effect 時である。

本研究では、ロータハブ中心が $-1 < d < 1$ の範囲にある場合がおもな実験対象であるが、地面効果外と Full Ground Effect 時についても 2, 3 点ずつ測定した。

参考までに、供試ロータの地面効果外でのホバリング性能を第 3 図に示す。第 3 図 (a) は $C_Q/\sigma - C_T/\sigma$ 曲線を、第 3 図 (b) はコレクティブピッチ角 θ_0 に対するコーニング角 a_0 を示す。この結果から、単純運動量理論と単純翼素理論により推定した揚力傾斜は $a = 5.73$ 、ロック数は $\gamma = 4.72$ である。

3. 従来の研究

本研究では、斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのホバリング性能を明らかにすることを目的とするが、その理解を容易にするために Full Ground Effect 時のロータの空力的、動力学的特性を今までの筆者らの成果にもとづいて紹介する。ただし、コレクティブピッチ角 θ_0 を一定 ($\theta_0 = 8^\circ$) としていることに注意されたい。

(a) C_T - C_Q 曲線

(b) コーニング角

第3図 供試ロータの地面効果外でのホバリング性能

(a) 推力係数

(b) トルク係数

第4図 有限な斜面上でホバリングするロータの空力性能

有限な斜面上でホバリングするロータの空力性能を第4図に示す。第4図(a), (b)はそれぞれ、ロータ高さ h に対する推力係数 C_T/σ とトルク係数 C_Q/σ である。 $\delta = 0^\circ$ の場合、 h が小さくなると C_T/σ は増大し、 C_Q/σ は減少する。この傾向は地面効果にもとづく平均誘導速度の減少に依存している。地面傾角 δ の影響としては、 h が比較的大きい ($h > 1.0$) 場合には h が小さくなるとともに C_T/σ は緩やかに増大し、さらに h が小さくなるとその増加率は大きくなる。また、 h が比較的大きい $h = 1.0$ のとき、斜面上での C_T/σ は $\delta = 0^\circ$ の場合のそれよりも小さい。一

(a) フラッピング振幅

(b) 位相遅れ角

第5図 有限な斜面上でホバリングするロータのブレードフラッピング運動

第6図 ロータ回転面上での誘導速度分布

方、 C_Q/σ は h が小さくなると初め多少増加した後減少する。これらの傾向は h と δ の組合せに依存し、 δ が大きくなると顕著になる。また、 δ や h に対する空力性能の挙動は第5図のブレードフラッピング運動の結果から計算した誘導速度分布⁴⁾によって説明できる。

ブレードフラッピング運動に対するロータ高さ h と地面傾角 δ の影響を第5図に示す。第5図(a), (b)はそれぞれ、 h に対する1次のフラッピング振幅 $|\beta_1|$ と位相遅れ角 ϕ を表す。ここで、 ϕ はブレードがフラップアップするブレード方位角 ψ を表す(ただし、文献4)と5)では ϕ をブレードがフラップダウンするときの ψ として表していることに注意されたい)。 $\delta = 30^\circ$ の場合、 $|\beta_1|$ は h を小さくすると $h \approx 1.0$ 近傍で極大値を、 $h \approx 0.6$ 近傍で極小値をとった後、再び増大する。 ϕ は $|\beta_1|$ が極小値をとる h 近傍で $+90^\circ$ から -90° に変化する。すなわち、ロータ回転面はブレード方位角 ψ が $0 \leq \psi \leq \pi$ の領域でフラップアップからフラップダウンに変化する。

$h \approx 0.6$ 近傍と $h \approx 1.0$ 近傍におけるロータ回転面上での誘導速度分布 λ の数値計算結果を第6図に示す⁴⁾。横軸 $\bar{x}$ は斜面の最大傾斜線を含む断面内におけるロータ回転面

(a) フラッピング振幅

(b) 位相遅れ角

第 7 図 ブレードフラッピング運動に対する地面境界の影響

上の無次元半径方向座標である．計算では，Xin が構築した Generalized Ground Effect Model²⁾ を用い，斜面上ではロータ後流が傾斜すると仮定した．誘導速度分布は h が小さい ($h = 0.52$) 場合には山側で小さく，比較的大きな h ($h = 0.92$) では山側で大きくなる．これより，ブレードフラッピング運動の挙動は h にもとづいた誘導速度分布の変化に依存していることが分かる． δ が小さくなるとこの傾向はより小さい h で生じる (第 5 図)．一方， $\delta = 0^\circ$ の場合にも $h \approx 0.5$ 近傍で $|\beta_1|$ が多少大きくなるが， ϕ にはこの付近の h で何ら変化が見られないため前述の挙動とは異なる要因によるものと思われる．

ブレードフラッピング運動に対する地面境界の影響を第 7 図に示す．図中の $d = -1.4$ は模型ロータのハブ中心が地面効果板中央の真上にある場合である．第 7 図 (a) から， $h \approx 1.0$ 近傍ではロータハブ中心が谷側よりも山側の地面境界端に近づくほど $|\beta_1|$ が大きくなる事が分かる．一方，第 7 図 (b) から，この範囲の d における位相遅れ角 ϕ は $d = -1.4$ の場合とほとんど同じ挙動を示している．これは h が比較的大きい場合には地面境界端からの離流がロータ回転面に戻る recirculation の影響により山側のロータ回転面で誘導速度が大きくなっているためと考えられる．この結果は斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのブレードフラッピング運動の挙動が同じ地面傾角であっても山側と谷側では異なることを示唆している．

4. 実験結果と考察

斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのホバリング性能には地面効果パラメータの δ, h, d の影響が含まれるためその挙動が複雑になると考えられる．そこで，まず平坦な地面上 ($\delta = 0^\circ$) で Partial Ground Effect を受けるロータのホバリング性能を検討した．ロータの空力性

(a) 推力係数

(b) トルク係数

第 8 図 平坦な地面上で Partial Ground Effect を受けるロータの空力性能

能を第 8 図に，ブレードフラッピング運動を第 9 図に示す．第 8 図 (a), (b) はそれぞれ水平距離 d に対する推力係数 C_T/σ とトルク係数 C_Q/σ である．図中の $\circ, \Delta, \square$ はそれぞれロータ高さ h が 0.3, 0.5, 1.0 の場合の実験値である．コレクティブピッチ角は $\theta_0 = 8^\circ$ と 12° である． $\theta_0 = 8^\circ$ の場合，推力係数 C_T/σ は d が小さくなる (地面境界の外側にあるロータ回転面の部分が減る) とともに単調に増大し，地面効果外から Full Ground Effect 時 ($d \leq -1$) の値に近づくことが分かる．地面効果外 ($d \geq 1$) では，第 3 図の C_T/σ の値を示しており，地面境界に近接しているものの C_T/σ に対する地面の干渉効果はほとんど見られない． C_T/σ が大きくなり始めるときの水平距離 d はロータ高さ h に依存し， $h = 1.0$ の場合に $d \approx 0.4$ 近傍， $h \approx 0.3$ で $d \approx 0.8$ 近傍となり，ロータ回転面が地面境界と幾何学的にかなりオーバーラップしてから C_T/σ に地面の干渉効果が現れることは興味深い．また， d に対する C_T/σ の増加率は $d < -0.7$ で小さくなり，ほぼ Full Ground Effect 時の値となっている． $\theta_0 = 12^\circ$ の場合， d に対する C_T/σ の挙動は $\theta_0 = 8^\circ$ の場合と比べて C_T/σ の増加率が多少小さくなっているが d に対する全般的な傾向に大きな相違は見られない．

$\theta_0 = 8^\circ$ の場合，トルク係数 C_Q/σ は水平距離 d が $-1 < d < 1$ の範囲で極大値をとった後，Full Ground Effect 時の値に近づく．極大値をとる d の値は $h = 1.0$ のとき $d \approx -0.4$ ， $h = 0.3$ のとき $d \approx 0.3$ で， h が小さくなるとともに $d = 1$ に近づく傾向を示す． C_Q/σ の挙動は C_T/σ と同様に h に依存しているため Partial Ground Effect 時に C_Q/σ が極大値をとる理由はおもに d に対する誘導トルクの挙動によると考えられる． d が小さくなると， C_T/σ は増大する一方，誘導速度は小さくなるので， $d > 0$ の領域

第9図 平坦な地面上で Partial Ground Effect を受けるロータのブレードフラッピング運動

では C_T/σ の増大が、 $d < 0$ の領域では誘導速度の減少が誘導トルクに対して支配的な影響を及ぼしていると思われる。また、 $h = 0.3$ の場合には、 $d < -0.7$ で C_Q/σ の減少が著しく、 $d \approx -1.0$ 近傍では地面効果外での C_Q/σ に比べておよそ 10% ほど小さくなっている。一方、 $\theta_0 = 12^\circ$ の場合には、 $d < -0.7$ になると $\theta_0 = 8^\circ$ のときとは逆に C_Q/σ が増大傾向を示している。これは大きなアップウォッシュにもとづくブレード翼根部近傍における失速域の増大の影響と考えられる。

$\theta_0 = 8^\circ$ におけるブレードフラッピング運動を第9図に示す。第9図(a)から第9図(c)はそれぞれ、水平距離 d に対する1次のフラッピング振幅 $|\beta_1|$ 、位相遅れ角 ϕ 、コーニング角 a_0 である。 $h = 0.3$ の場合、ブレードフラッピング運動に対する地面の干渉効果は明瞭である。フラッピング振幅 $|\beta_1|$ は水平距離 d を地面効果外から小さくすると、 C_T/σ が増大する $d \approx 0.8$ 近傍から大きくなり、 $-0.5 < d < 0.5$ で $|\beta_1| \approx 0.4^\circ$ となる。この d の範囲では $\phi \approx -90^\circ$ であり、ブレードは地面境界の内側にあるロータ回転面上の誘導速度の減少にもとづいてブレード方位角 ψ が $\pi \leq \psi \leq 2\pi$ の領域でフラップアップしていることが分かる。その後、Full Ground Effect 時に近い $d \approx -0.7$ 近傍からフラッピング

振幅は $|\beta_1| \approx 0.1^\circ$ となる。この d の値は C_Q/σ が減少する d の値とほぼ一致している。これらの挙動は $d < -0.7$ での飛行環境が空力、動学的にも Full Ground Effect 時に近いことを表している。なお、この d の領域で位相遅れ角は $\phi \approx +90^\circ$ に近づく。サイクリック入力(入力の最小値は 0.1°)は 0° としているが $|\beta_1| \approx 0.1^\circ$ であるため、これは本装置での調整不能な誤差の範囲と考える。ただし、この誤差が本結果の本質を変更するとは思われない。一方、地面効果外近傍の $d \approx 0.8$ では ϕ が正の値をとる。これはロータ回転面が地面に近接することによりロータ後流のうず構造が変更され、ブレード翼端でのアップウォッシュの減少や誘導速度の最大値の減少およびその位置の翼端側への移動が生じているためと思われる。さらに、このような空力的な挙動によって C_T/σ に対する地面の干渉効果が $d \approx 0.8$ 近傍まで現れなかったものと考えられる。 $h = 0.5$ と 1.0 の場合にも同様な挙動が見られるが $h = 0.3$ の場合と比べると明瞭でない。 $h = 0.5$ のとき、 $|\beta_1|$ は $d \approx -1.0$ 近傍において $|\beta_1| \approx 0.3^\circ$ で、ほぼ Full Ground Effect 時(第5図(a))の値を示す。さらに、 d が大きくなると、 $d \approx -0.6$ 近傍で極大値をとった後、 $d \geq 1.0$ で $|\beta_1| \approx 0.1^\circ$ となる。一方、位相遅れ角は $0 < d < 0.6$ で $\phi \approx -90^\circ$ であるためこの範囲の β の挙動は地面境界内側の誘導速度の減少にもとづいている。地面傾角が $\delta = 0^\circ$ の場合には、 $h = 0.5$ と $h = 1.0$ での d に対する $|\beta_1|$ は小さく、ブレードフラッピング運動に対する地面境界の影響は斜面上での Full Ground Effect 時に比べて小さいことが分かる。

水平距離 d とロータ高さ h に対するコーニング角 a_0 の挙動(第9図(c))は C_T/σ と同様の傾向を示し、 C_T/σ の挙動の妥当性を表す結果となっている。

山側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのブレードフラッピング運動に対するロータ高さ h の影響を第10図に示す。第10図(a)、(b)はそれぞれフラッピング振幅 $|\beta_1|$ と位相遅れ角 ϕ である。図中に $d = -1.4$ の結果(第7図)を参考として重ね書きした。 $d = -0.9$ の場合、 $h \geq 1.1$ では $|\beta_1|$ が小さく、模型ロータの取付け精度の影響が位相遅れ角 ϕ に現れるため、 $|\beta_1|$ が 0.15° 以下のデータは省略した。 $d = -0.9$ のとき、 h が小さくなると $|\beta_1|$ は $h \approx 0.8$ 近傍で極大値を、 $h \approx 0.6$ 近傍で極小値をとる。また、極小値をとる h 近傍では ϕ が $+60^\circ$ から -90° に急変し、第7図と同じ傾向を示す。しかし、 d が大きくなるとともに極大値は小さくなり、 $d = -0.7$ では消滅している。これらは h が比較的大きな場合のフラッピング振幅 $|\beta_1|$ の増大(第7図)が地面境界にもとづいた空力的な影響であることを裏付ける結果と言える。

第11図は谷側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータの空力性能を示す。第11図(a)、(b)はそれぞれ、水平距離 d に対する推力係数 C_T/σ とトルク係数 C_Q/σ である。地面傾角は $\delta = 30^\circ$ で、図中の○印と▽印はそれぞれ、 $h = 0.6$ と $h = 1.0$ における実験値である。参考のために図中に $\delta = 0^\circ$ の結果(第8図)を重ね書きした。 $h = 0.6$ の場合、水平距離 d を小さくすると、 C_T/σ は多少減少し

(a) フラッピング振幅

(b) 位相遅れ角

(a) フラッピング振幅

(b) 位相遅れ角

第 10 図 ロータ回転面の一部が山側の地面境界の外側にある場合のブレードフラッピング運動に対するロータ高さの影響

(a) 推力係数

(b) トルク係数

(c) コーニング角

第 12 図 谷側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのブレードフラッピング運動

第 11 図 谷側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータの空力性能

た後 $d \approx 0.8$ 近傍から増大し始め, Full Ground Effect 時の値に近づく. $d < 0.8$ のとき, d に対する C_T/σ の変化は $\delta = 0^\circ$ の場合に比べて, $d > 0$ で大きく, $d < 0$ では小さくなっている. $h = 1.0$ の場合には, d に対する C_T/σ の増加率は $h = 0.6$ の場合に比べて小さい. d を小さくすると C_T/σ は $d \approx 0.7$ 近傍から増大し始め, $d \approx -0.1$ 近傍で極大値をとった後, 緩やかに減少する. ロータ高さ h に対する C_T/σ の挙動の相違はロータ回転面上の誘導速度分布に起因していると考えられる. h が小さい場合, 斜面上では

山側で小さく, 谷側で大きい誘導速度分布になる. $h = 0.6$ ではこの傾向が山側である地面境界内側の誘導速度を一層減少させ, $d > 0$ では C_T/σ が $\delta = 0^\circ$ の場合より大きくなったものと思われる. $d < 0$ では斜面上での Full Ground Effect 時の C_T/σ の挙動(第 4 図(a))に近づくため C_T/σ が $\delta = 0^\circ$ の場合より多少小さくなる. 一方, $h = 1.0$ の場合, 斜面上では誘導速度分布が山側で大きくなる傾向がある. そこで, $d > 0$ では斜面にもとづく山側で大きい誘導速度分布が地面境界の内側での誘導速度の減少傾向を弱め, C_T/σ の増加がわずかになったと考えられる. $d < 0$ では山側で大きい分布が卓越するため C_T/σ が減少する.

トルク係数 C_Q/σ に対する d と h の影響は C_T/σ に対するほど明瞭には現れていない. C_Q/σ の挙動は第 8 図(b)の平坦な地面上での挙動に類似しているが, 平坦な地面上に比べ $d = 1$ よりで極大値をとっている. これは C_T/σ の挙動に対応している.

ブレードフラッピング運動を第 12 図に示す. 第 12 図(a), (b), (c) はそれぞれ, フラッピング振幅 $|\beta_1|$, 位相遅れ角 ϕ , コーニング角 α_0 を表す. 図から, 斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのブレードフラッピング運動は水平距離 d とロータ高さ h に対する依存性が顕著であることが

第13図 山側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータの空力性能

分かる． $h = 0.6$ の場合， $|\beta_1|$ は d が小さくなるとともに大きくなり $d \approx 0$ 近傍で極大値を， $d \approx -0.5$ 近傍で極小値をとった後 Full Ground Effect 時の値に近づく． $|\beta_1|$ が $d \approx 0$ 近傍で極大値をとるのは地面境界の内側と外側における誘導速度差にもとづいている．一方， $d = -1.0$ に近づくと地面境界の内側と外側による誘導速度差は小さくなるが，誘導速度分布が Full Ground Effect 時の斜面上における山側で小さく，谷側で大きい分布に移行するため $|\beta_1|$ は再び増大するものと思われる．位相遅れ角 ϕ は $d \leq 0.6$ で -90° であり，誘導速度分布が谷側で大きく，山側で小さい分布になっていることが分かる．一方， $d \geq 0.8$ では ϕ が $\delta = 0^\circ$ の場合と同様に正となる．これもロータ回転面が地面に近接することにより翼端近傍のロータ後流のうず構造が変更され，翼端近傍のアップウォッシュが低減されたためと考えられる．一方， $h = 1.0$ の場合， $|\beta_1|$ は d を小さくするとほぼ直線的に増大する．また， ϕ は Full Ground Effect 時の $\phi \approx +90^\circ$ に比べて若干進んでいて $\phi \approx +40^\circ \sim +60^\circ$ である． $h = 1.0$ の場合，斜面上では地面傾角の影響として誘導速度分布が山側で大きく，谷側で小さい分布となる．一方，Partial Ground Effect 時には山側のロータ回転面は地面境界の内側にあるため誘導速度分布は山側で小さく，谷側で大きい分布をもつ傾向にある．したがって， $|\beta_1|$ と ϕ の挙動から，斜面上におけるロータ回転面上の誘導速度は山側で大きく，谷側で小さい分布が Partial Ground Effect によって修正され，その影響が軽減されて現れているものと思われる．

コーニング角 a_0 は斜面上でも C_T/σ の挙動と同様の傾向を示している (第12図(c))．ただし，平坦な地面上での実験時よりもコレクティブピッチ角は 0.5° ほど大きいいため，地面効果外での a_0 の値は第9図(c)よりも若干大きい．

第14図 山側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのブレードフラッピング運動

第13図に山側の斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータの空力性能を示す．第13図(a)，(b)はそれぞれ，水平距離 d に対する推力係数 C_T/σ とトルク係数 C_Q/σ である．印と▽印はそれぞれ $h = 0.6$ と $h = 1.0$ における実験値である．第10図から推測されるように，山側の斜面上では $d \approx -1.0$ 近傍でホバリング性能に特異な挙動が現れている． d に対する C_T/σ の増加率は $d > 0$ では $\delta = 0^\circ$ の場合と同程度であるが， $d < 0$ になると小さくなる． $d > 0$ の領域では，地面境界の内側であっても地面境界内にあるブレード翼端は設定された h よりも斜面からさらに約 0.6 だけ離れており，谷側ほど誘導速度の減少が得られないためと思われる．一方， $h = 1.0$ の場合には， C_T/σ が $d \approx -1$ 近傍で急激に減少し，地面効果外 ($d \geq 1$) の値よりも小さくなる．これは山側の斜面上では誘導速度分布が山側で大きくなっているためで， $d < -0.7$ の領域では Full Ground Effect 時とほとんど同様の挙動を示している．第13図(b)の C_Q/σ にも C_T/σ の減少にもとづく誘導トルクの減少傾向が現れている．

このときのブレードフラッピング運動を第14図に示す．第14図(a)，(b)，(c)はそれぞれフラッピング振幅 $|\beta_1|$ ，位相遅れ角 ϕ ，コーニング角 a_0 である．コーニング角 a_0 は斜

面上の山側においても C_T/σ の挙動と同様な傾向を示している．フラッピング振幅 $|\beta_1|$ は d を小さくすると $d \approx -1$ 近傍で急激に増大する．このとき、 ϕ は $h = 0.6$ のとき $\phi \approx -90^\circ$ に、 $h = 1.0$ のとき $\phi \approx +90^\circ$ に近づく．これは第 7 図や第 10 図で示された Full Ground Effect 時の斜面上での h に対するブレードフラッピング運動の挙動と良く一致している． $d > -0.5$ では $|\beta_1|$ は 0.2° 以下で、 ϕ も h によらずほぼ同じ挙動を示しており、この領域ではフラップ角に対する斜面の影響が空力性能ほど明瞭には現れていない．

5. 結 論

本研究では、Partial Ground Effect を受けるロータのホバリング性能を明らかにするために、地面効果外から Full Ground Effect 時までの一連の飛行環境に対して、有限で平坦な地面や斜面の山側と谷側においてロータのホバリング実験を行った．本研究により得られた知見はつぎのとおりである．

- (1) 水平距離は地面傾角やロータ高さと同様、有限な斜面上で Partial Ground Effect を受けるロータのホバリング性能に対して著しい影響を及ぼし、重要な地面効果パラメータである．
- (2) ロータ回転面の一部分が地面境界の外側にある場合でも、水平距離が $d < -0.7$ であるならばロータのホバリング性能は地面の干渉効果が小さくなるものの Full Ground Effect 時とほとんど同様な傾向を示す．
- (3) ロータが有限な地面境界に近づく場合、ロータ回転面

と地面境界がかなりオーバーラップした後に推力係数やトルク係数に対して地面の干渉効果が現れる．一方、ブレードフラッピング運動は $d \approx 0.8$ 近傍で、位相遅れ角が $+90^\circ$ から -90° に変化する．これらはロータ回転面が地面境界に近接することによりロータ後流のうず構造が変更されて、ブレード翼端でのアップウォッシュの減少および誘導速度の最大値の減少やその位置の翼端側への移動が起きているためと思われる．

- (4) 有限な斜面の山側と谷側では、水平距離、ロータ高さ、地面傾角が同じであってもロータのホバリング性能は著しく異なる．

参 考 文 献

- 1) Nagashima, T., Iboshi, N., Schrage, D. P., Prasad, J. V. R., Sugimoto, M. and Suzuki, H.: Experimental Study on Ground Effect of a Lifting Rotor Hovering at Close Proximity to Finite Inclined Flat Surface (Part 1), Proc. of JSASS International Sessions in 36th Aircraft Symp., 1998, pp. 635–638.
- 2) Xin, H.: Development and Validation of a Generalized Ground Effect Model for Lifting Rotors, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.
- 3) Xin, H., Prasad, J. V. R., Peters, D. A., Iboshi, N. and Nagashima, T.: Correlation of Experimental Measurements with a Finite-State Ground Effect Model, Proc. AHS 56th Annual Forum, 2000, pp. 421–430.
- 4) Iboshi, N., Nagashima, T. and Prasad, J. V. R.: Experimental Validation of an Inclined Ground Effect Model, Proc. AHS 57th Annual Forum, 2001, pp. 1201–1210.
- 5) 井星正氣, 糸賀紀晶, 長島知有, Schrage, D. P., Prasad, J. V. R.: 有限な斜面上でホバリングするロータの地面効果とブレードフラッピング運動, 日本航空宇宙学会論文集, 50 (2002), pp. 264–271.