

飛行船形状模型の風洞試験について

—計測における模型支持の影響—

奥山政広、高橋侔（航空宇宙技術研究所）

Influences of Support on Measurements with Wind Tunnel Airship Models

Masahiro OKUYAMA and Hitoshi TAKAHASHI (NAL)

概要

成層圏プラットフォーム飛行船システム研究開発において、空力推進技術に関わる模型試験が1999年度より要素技術試験として実施されてきた。飛行船は流線形であるため空気力が非常に小さく、風洞試験では模型の支持部分の影響を大きく受けた結果が示された。

ここでは、航空宇宙技術研究所 6.5m×5.5m 低速風洞で実施された船体模型による空力特性の取得試験結果を中心に静水槽試験結果も加えて、計測における模型支持の影響を報告する。

1. はじめに

飛行船形状模型の風洞試験では、模型が流線形であるためそれに働く空気力は小さい。それゆえ、飛行船形状模型に働く力計測では、模型を支持する部分からの空力的影響が相対的に大きくなる。ここで言う支持の影響とは、支柱風袋および支持干渉を示し、さらに支持干渉は遠場および近場として仕分けられる[1]。支柱風袋は、模型の力計測と一緒に計測される支持支柱露出部に働く風袋量を示す。また、遠場の支持干渉は、支柱風防や支柱などの支持装置やその後流が風洞測定部の体積を占めることからくる流れ変化による模型との干渉であり、近場の支持干渉は、支持支柱の模型接続部近傍流れにより模型表面流れが乱される干渉を指している。

ピラミッド天秤のような外部天秤による計測の場合、支柱風袋と支持干渉の両方が支持の影響として現れ、風洞固有なストラット支持装置に対する風袋量補正式は、データ処理方法として風洞

に備わっている。これに対し、たとえばスティング支持された模型の内部天秤による計測では、支柱風袋はなく支持干渉だけの影響を受ける。吊線で模型を支持し外部天秤により計測する吊線方式は、吊線が細いため支持干渉量が小さくなり、古くから飛行船模型の風洞試験で使われている[2]。最近、磁力支持装置による飛行船形状模型の風洞試験が行われている。模型を磁力で支持するため測定部を占有する支持装置がないので支持の空力的影響がなく、ダミーの支持装置を使って支持干渉の試験が進められている[3]。

ここでは、航空宇宙技術研究所 6.5m×5.5m 低速風洞で実施した飛行船形状模型の試験の内、模型を下から支える2本ストラット支持でピラミッド天秤による計測、模型の後ろから支えるスティング支持で内部天秤による計測、および1本ストラット支持で内部天秤とピラミッド天秤を使った計測の結果を取り上げ、支持の影響を示す。ストラット支持などは、吊線や磁力支持に比べると

支持の影響が大きく、飛行船形状模型の支持方法にはあまり適さない。しかし吊線支持天秤装置のない6.5m×5.5m低速風洞におけるストラット支持などには、試験レイノルズ数を大きく取れる、模型を安定して支持できる、および模型姿勢角を変えやすい利点がある。さらに、飛行船形状模型において、支持の影響がどの程度かを調べることは、試験技術の確立につながる。したがって、使える設備の利便性と支持方法の利点および今後の試験技術の確立を考え、6.5m×5.5m 低速風洞で試験が実施された。

静水槽試験は通信放送機構三鷹成層圏プラットフォームリサーチセンターと共同研究の基で防衛庁技術研究本部第1研究所に委託され、試験結果の内、速度変化による抵抗データだけを取り上げた。飛行船形状の水槽模型は、2本の細い6角形状の連結ロッド（ストラット）により吊るされ、水槽水中を曳航されて内部天秤で力が計測される。

結果の一部を今回の報告に使用した風洞および静水槽試験は、成層圏プラットフォーム飛行船システム研究開発において、空力推進技術に関わる要素技術試験として、1999年度より実施され、特性の差分値による効果の取得を含めてシミュレーションや設計のデータに利用されている。供試体の飛行船形状模型の形は、1999年度の風洞試験が成層圏プラットフォーム飛行船システムのフィジビリティ・スタディ結果の船体（便宜的にSPA1と記す）であり、2000年度の風洞および静水槽試験が、定点滞空試験機概念設計結果としてSPA1を少し変形した船体（便宜的にSPA2と記す）である。SPA1およびSPA2は、共に細長比（長さ l /最大直径 d ）4を持つ。

2.2 本ストラット支持

2.1 SPA1 模型

長さが3mの飛行船形状模型SPA1を2本ストラット支持により、風洞内に設置した様子を図1に表す。2本ストラットは前方の太い方がメイン（平均直径0.1m）、後ろが迎角を取るためのピッチング・ストラット（直径0.04m）と称している。このストラット支持装置を含むピラミッド天秤系により力を計測した。船体模型は回転体の形状をしていて、支持された模型状態で座標は、船頭を原点に回転体軸方向に $+x$ 、真横右（後ろから見て）方向に $+y$ 、上方に $+z$ を取る。 y - z 面で $+y$ 軸となす角を θ として $+z$ 軸が $\theta=90^\circ$ になる。船体模型には表面圧力の経線（縦断面）分布と円周（横断面）分布を得られる圧力孔が開いている。

2.2 圧力係数分布

圧力試験結果の比較検討のために、理想流体として船体圧力係数の計算を付録の方法で行った。軸流に対する船体経線の圧力分布計算にはカルマンの方法を使い、迎角により生じる交差流に対する船体円周の圧力分布計算は、細長回転体の理論によった（付録参照）。

迎角 $\alpha=0^\circ$ における、 $\theta=90^\circ$ の船体経線での圧力係数 C_p の結果を、計算値も加えて図2に表す。グラフは一樣流速度 U を変えた結果であり、それに対するレイノルズ数 Re の基準長は模型長さ l としている。 U による C_p の違いがほとんどないため、 $Re=4\times 10^6$ 以上では、船体の境界層は層流から乱流への遷移領域が終わっていて、ほとんど乱流境界層と考えられる。理想流体の計算 C_p は、 $x/l=0.1$ まで試験結果と良く一致している。それ以降は、いくらか差があるものの計算と試験の C_p 分布の傾向は合っている。だが、 $x/l=0.95$ あたりから試験の C_p 曲線が急変して完全に計算の C_p と違ってくるので、このあたりから境界層の乱流剥離が生じていると判断できる。図3に α

を変えた試験による $\theta=0^\circ$ での経線 C_p 分布結果を示す。 $\alpha=10^\circ$ で $x/l=0.9$ より少し前方の C_p 分布が歪み始め、 α の増加に従い歪みが大きくなりかつ前進している。これは、船体背面渦巻（縦渦巻）の影響と考えられ、船体後方で上面中央の左右に生じた1対の背面渦巻による吹き下ろし効果が現れている。

船体横断面4ヶ所における船体円周 C_p 分布の結果を理想流体の計算（船体経線および円周の C_p 分布計算を足した）と一緒に図4に表す。 $\theta=-90^\circ$ は下面中央位置になる。断面 $x/l=0.05$ において、円周 C_p 分布結果は下面から上面に向かって分布に勾配が付いている。これに対し、 $\alpha=0^\circ$ の計算は一定値を示す。そこで、 $\alpha=0.4^\circ$ の計算を行うと図のように、良く一致した分布を得る。以前に、この試験と同じストラット支持装置を使い、較正模型による装着模型周りの偏流角を求める試験が実施され、そこでのゼロ揚力迎角から得た偏流角が $\alpha=0.4^\circ$ （ $U=60\text{m/s}$ ）であり、ストラットの干渉遠場による支持干渉として本試験に現れていることが分かる。さらに、船体 $\theta=-90^\circ$ の $x/l=0.4$ および 0.73 位置には、それぞれメインおよびピッチング・ストラットが接続されている。そのストラットの影響が前方 $x/l=0.05$ および 0.1 の断面、ならびにストラットの後流が $x/l=0.8$ および 0.9 の断面の $\theta=-90^\circ\sim0^\circ$ 付近の C_p 分布に、試験結果と $\alpha=0.4^\circ$ の計算との大きな差で示され、近場の支持干渉として現れていると思われる。

α を変えての船体円周 C_p 分布を計算との比較で、図5に4断面示す。 α が大きくなるに従い計算の C_p 値は試験結果とかけ離れてくる。しかし、 C_p 分布の特徴は良く表している。 $x/l=0.8$ および 0.9 断面では負の α の $\theta=-90^\circ\sim-15^\circ$ において、試験結果の C_p 分布が計算の分布傾向と違ってきている。支持支柱の後流の影響により、負の迎角

で船体後部の下面の境界層は剥離していると予想される。そのうえ、 $x/l=0.8$ 断面で試験結果の大きい α には、 $\theta=60^\circ$ でピークを持つ C_p 分布が得られている。これは先に示した船体背面渦巻の影響と考えられ、 $\theta=60^\circ$ 位置上方に $\alpha=10^\circ$ あたりから背面渦巻が船体に影響を及ぼし始め、 α の増加につれて渦巻の影響が大きくなっている。

2.3 力計測

この試験のような、ストラット模型支持でピラミッド天秤による力計測には、支柱上部の風防から露出する部に働く力の支柱風袋量を補正する必要がある。試験で使われたストラット支持装置に対して $6.5\text{m}\times5.5\text{m}$ 低速風洞では、風袋量補正式として、いわゆるオーソドックス補正および最新補正が備わっている。最新補正は、ストラットの模型回転中心から模型までの支柱露出部分を考慮に入れるなど、新たな支柱風袋試験を実施してオーソドックス補正からの改善が行われている。最新支柱風袋補正を施した支持干渉込みの試験結果を、揚力係数 CL 、抗力（抵抗）係数 CD 、および縦揺れモーメント係数（船体模型の体積中心回り） C_m の特性として図6に、その中で補正量大きい CD の支柱風袋の補正比較を図7に表す。ここで、各係数化の基準面積は船体体積の $2/3$ 乗で、さらにモーメント係数化の基準長さは船体長 l である。図6にはピラミッド天秤精度のエラーバーが示されていて、3つの特性共にデータの印内部にある。図の特性は、支持干渉が取り除かれていないにも関わらず、予想される程度の結果になっていて、船体の空力係数はかなり小さいことが分かる。図7の結果だけで評価する限り、 $U=60\text{m/s}$ 、 $\alpha=0^\circ$ での CD で、支柱風袋量は船体抵抗係数の1.4倍程度にもなり、船体抵抗係数が支柱風袋量に埋もれている。

図8は、 U の変化に対する風袋補正結果の CD

特性になる。風袋補正無しの $Re=8.0 \times 10^6$ に対応する $U=40\text{m/s}$ で特性に落ち込みがあり、風袋補正した特性でもこの落ち込みは残っている。当初、船体境界層の遷移による現象と思われたけれども、 Re の基準長を $l=3\text{m}$ からメイン・ストラットの平均直径 0.1m に変えてみると、 CD 特性の落ち込みが一般的な円柱の臨界レイノルズ数に対応していた。

3. スティング支持

SPA1 模型の支持方法は 2 本ストラット支持だけでなく、模型後部からのスティング支持が可能で、内部天秤を介して力計測ができる。図 9 は模型をスティング支持している状態で、船体に取り付けた 2 本のダミーストラットとそれらに非接触な風防が設置されている。これらの装置を使い、スティング支持された船体模型へダミーストラットを取り付けた特性からそれがない状態での特性を差し引くことにより、ダミーストラットに働く支柱風袋の効果を調べ、 Re に対する CD 特性として図 10 に示した。ダミー 2 本ストラット付き船体模型の特性は前節で説明した 2 本ストラット支持と同じように急激な落ち込みがある。これに対して、船体模型だけの特性には急変がなく、むしろ Re が大きくなるに従っていくらか CD が減少している。そこで、ダミーのメインおよびピッチングストラットの代表直径を基準長にした Re 対してそれぞれの効果の特性を同じ図にプロットすると、ダミーメインストラット効果の特性に落ち込みが現れた。落ち込む Re が一般的円柱における臨界レイノルズ数と同程度なため、2 本ストラット支持での CD 特性の落ち込み現象は、メインストラットの臨界レイノルズ数の効果によるものと言える。ダミー 2 本ストラット付船体模型の特性で、落ち込む Re が前節の 2 本ストラ

ット支持のそれより大きくなるのは、ストラットの表面粗さが実物に比べ、ダミーの方が滑らかになっているからである。

メインストラットの効果が支柱風袋に現れていることが分かったので、前節の支柱風袋の新補正でも、支柱の臨界レイノルズ数辺りの急変する風袋量を補正しきれていないことになる。

図 10 に表されている船体模型の CD 値は、図 6 や予想される抵抗係数よりかなり小さい。スティング支持された船体模型は、図 11 のように測定部に配置されている。模型の後方にはスティング支持装置のポッド部分が模型と同程度の大きさで配置されている ($\phi 0.09\text{m}$ のスティングは描かれていない)。それゆえ、支持装置のポッド部分の船体模型に与える影響が大きそうなので、およそその影響量を見積るために、先の船体経線の圧力分布計算を使用した。支持装置の形状を船体と同様に見立て、前後に同じ船体が並んだタンデム形状として計算を簡略化した。タンデム形状の間隔は、後方船体の船頭位置を表す $(x/l)_R$ がおよそ 1.25 で、実際の位置関係になる。後方船体により干渉を受けた前方船体における、 C_p 分布と干渉量 C_p を総和した CD の計算結果を図 12 に示す。後方船体を近づけていくと前方船体の後部の圧力が上がり、増加分が推力（負の抵抗）として働いて、船体単体なら当然 $CD=0$ （この計算では $CD=0.000$ ）である抵抗係数に負の値を生じさせる。図中に表されているように $(x/l)_R=1.25$ で前方船体は $CD=-0.01$ 程度を得る。それゆえ、スティング支持の船体 CD 値がかなり小さい理由は、支持ポッドの支持干渉である遠場の影響を、船体模型が大きく受けているためと言える。

4. 1 本ストラット支持

高および逆迎角に対する空力特性を得るため

に、1 本ストラット支持で内部天秤と外部天秤であるピラミッド天秤による力計測の風洞試験が、6.5m×5.5m 低速風洞で実施された。1 本ストラットの上部だけは細い支柱を新設し、 $l=2.4\text{m}$ の SPA2 模型を使用した。新設の支柱は直径 0.045m であり、使用する最大風速でも同等直径円柱の臨界レイノルズ数に達しないようにして、支持干渉をなるべく減少させるために SPA1 で使用したメイン・ストラットの半分以上細くしている。図 13 に 1 本ストラット支持された SPA2 模型の様子を示す。模型は $x/l=0.61$ の下面左右中央の位置で支持されている。模型を横に振り、偏揺れ角（負の横滑り角）を与えることによって迎角 α を得ている。図 14 は低迎角での縦 3 分力特性であり、内部天秤による力計測を行ったので、支柱風袋は関係なく、1 本ストラット支持の支持干渉が含まれている。図において、CL と C_m 特性は座標原点をほぼ通っているけれども、CD 特性を含めて非対称になっている。図には内部天秤精度のエラーバーが示されていて、特に CD 特性のエラーバーが大きく天秤精度が悪い。CL 特性の $\alpha=5^\circ$ 以上では、背面渦巻の影響が加えられて非線形特性になると考えられる。図 15 には高迎角と逆迎角の試験結果を合わせ、 $\alpha=0^\circ \sim 180^\circ$ に対する特性として表している。この逆迎角試験では、内部天秤容量の制限からピラミッド天秤しか使えなかったため、高迎角試験でのピラミッド天秤と内部天秤の差による支柱風袋量の多項式近似を使い、高および逆迎角試験結果の支柱風袋補正を行った。図 15 の CL 特性において、 $\alpha=90^\circ$ での CL 値は船頭に働く吸引力成分と思われる。CD 特性では $\alpha=90^\circ$ の 30° 前後にそれぞれピークがあり、背面渦巻の崩壊と関連しているかも知れない。なお、図 15 のデータは模型が真横になる $\alpha=90^\circ$ 前後に、壁干渉による閉塞効果が顕在化するので、

進藤の方法[4]によって閉塞修正を施している。

大きな迎角では、模型下方の片方にしか支柱が付いていない上下の非対称形状のために、図 16 のグラフのように支柱が付いている側と反対向きに横力係数 C_Y （測定から見れば揚力係数に相当する）が発生する。図 16 下の模型後部背面のオイルフロー・パターンは、支柱周りの模型表面に現れている首飾り渦巻の痕跡を始め、支柱があることによる上下非対称の複雑な表面流れの限界流線とオイルだまりを示している。例えば、支柱の反対側にダミー支柱を取り付け試験したところ、 C_Y がかなり減少したとの報告がされている[5]。これは 1 本ストラット支持の近場による支持干渉であり、縦 3 分力にも影響を及ぼしているだろう。

5. 静水槽試験結果との比較

第 1 研究所の水槽で、 $l=2.5\text{m}$ の水槽試験用 SPA2 模型を前後 2 本の横幅 0.02m、縦幅 0.05m の六角形状連結ロッドで吊るし内部天秤により力計測する静水槽試験が実施された。速度変化による抵抗試験の結果を、前節風洞試験の 1 本ストラット支持の内部天秤による計測結果と合わせてレイノルズ数に対し図 17 に描く。

特性の処理は船舶工学で行われている方法を使い、乱流境界層状態における相当平板の摩擦抵抗係数 CF をシェーンヘルの式から求め、摩擦抵抗と形状抵抗からなる全抵抗は、形状影響係数 k を導入することにより、 $CF(1+k)$ として表される。ただし、相当平板の摩擦抵抗係数の基準面積を体積の $2/3$ 乗にするため、面積基準を表面積から変換し CF_v として

$$CD=CF_v(1+k)$$

で表す。図 17 において船体単体形状の場合、静水槽および風洞試験結果はそれぞれ $k=0.39$ およ

び 0.78 を示し、静水槽試験が風洞試験に比べ支持干渉量がかなり少ないことが分かる。また、乱流境界層特性に入る Re は、静水槽試験の方が大きく、静止した水中で模型を動かすので周囲流体の乱れが小さく、境界層の遷移が遅れるためと思われる。

半経験式で細長比の逆数 d/l に対するヘルナーの式を使って、摩擦抵抗係数に CF_v を用い $l/d=4$ における $k=0.30$ の線を、図中に描いた。SPA2 形状における CFD 解析が実施されていて、船舶に関する CFD 解析結果と水槽試験結果の比較より求められた補正係数を、この形状の CFD 解析結果へ適応すると、 k が 0.29~0.30 程度になり、ヘルナーの式の結果とほぼ一致した。それゆえ、 $k=0.30$ の CD 線は実際にはまだ分からない船体単体の抵抗係数の参考値となる。それぞれの試験の支持干渉は、それぞれの k と $k=0.30$ の差程度として推測でき、風洞試験が 0.48、静水槽試験が 0.09 である。したがって、今回の風洞試験の支持干渉は、静水槽試験に比べ 5 倍以上になる。

6. まとめ

計測における模型支持の影響量は、試験する支持装置および模型そのものを使って見積ることが、本来である。しかし、6.5m×5.5m 低速風洞では風洞が大型なので、たやすく支持の影響試験ができない。さらに、飛行船形状模型では、模型に働く空気力が小さいため、計測結果に占める支持による割合が相対的に大きく、影響量の見積りがより困難になる。内部天秤は、設備の既存品を使わざるを得なかったので抵抗容量が大きく、不十分な計測精度だった。

今回の試験結果により、飛行船形状模型におけるストラットおよびスティング支持の影響量が程度として確認された。飛行船形状模型のストラ

ット支持方式において、支持の影響を減らす等対策が可能である。支柱風袋では、測定に内部天秤を使うことで無関係となる。ただし、内部天秤の精度と模型重量の考慮が必要である。遠場の支持干渉は、比較的一般化して見積られるため、対策は立てやすい。近場の支持干渉では、模型への制約が加わるけれども、支柱をなるべく細くあるいは前縁を鈍くしないように、または板状にして干渉を減少させる。また、支柱部分だけのダミー支柱を反対側に付け非対称性の干渉を減少させる対策が必要となるだろう。

謝礼

6.5m×5.5m 低速風洞試験における技術作業は、低速風洞研究室および川崎重工業空力技術グループの方々による支援を受けて行った。

文献

1. Eckert, D, Correction of Support Influences on Measurements with Sting Mounted Wind Tunnel Models, AGARD-CP-535, 1993.
2. Freeman, H. B., Force Measurements on a 1/40-Scale Model of the U. S. Airship "Akron", NACA 432, 1932.
3. 原田賢哉, 澤田秀夫, 高橋伴: 飛行船風洞試験における支柱干渉の影響, 日本航空宇宙学会第 32 期年会講演会講演集, PP.211-214, 2001.
4. 進藤章二郎: 高精度風洞境界新修正法について, 日本航空宇宙学会誌 第 46 巻 第 528 号, pp.56-62, 1998.
5. Shindo, S., Analysis and Discussion of Aerodynamic Characteristics of Balloons Tested in a Wind Tunnel, University of

Washington Aeronautical Laboratory

Report No.957 F, 1970.

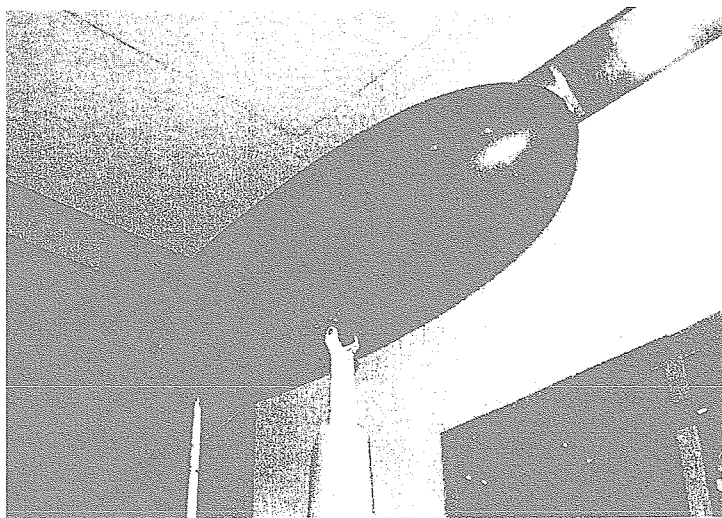


図1 2本ストラット支持による風洞模型(SPA1)
(メイン支柱の平均直径:0.1m, ピッチング支柱の直径:0.04m)

2本ストラット支持, 尾翼なし, $\alpha=0^\circ$, $\theta=90^\circ$
Calculation: Karman's method

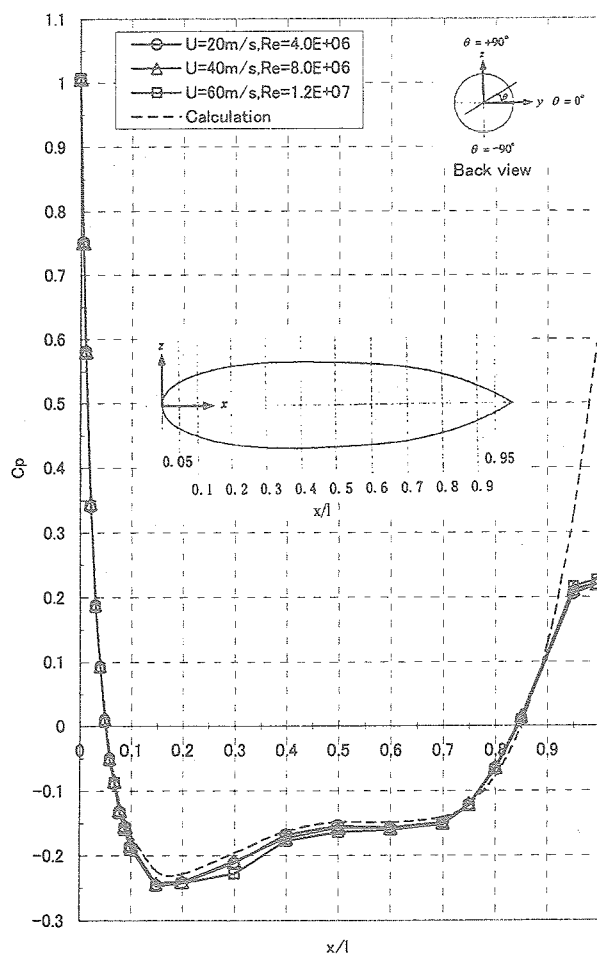


図2 船体経線の圧力係数 C_p 分布

2本ストラット支持, 尾翼なし, $U=60\text{m/s}$, $\theta=90^\circ$

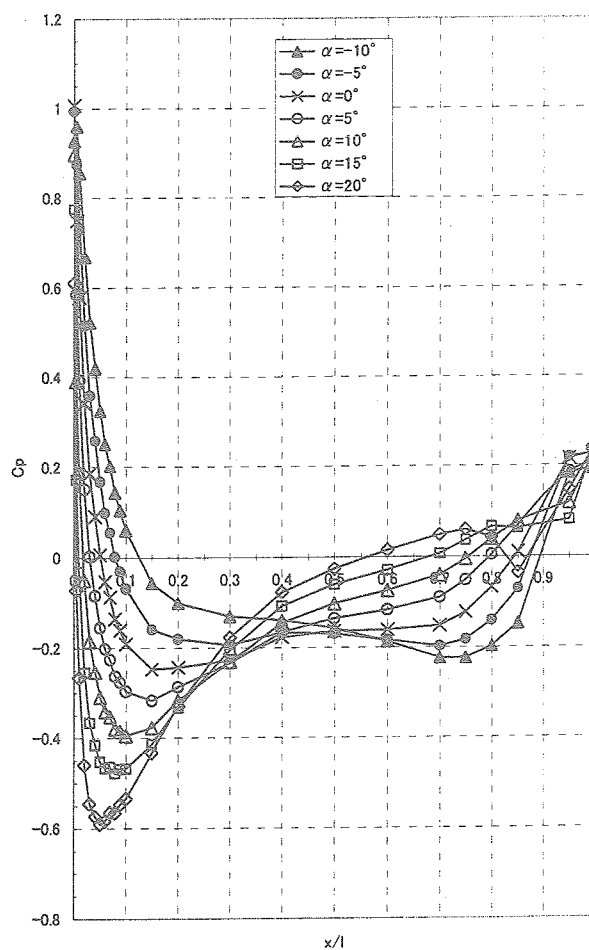


図3 迎角 α 変化による経線 C_p 分布

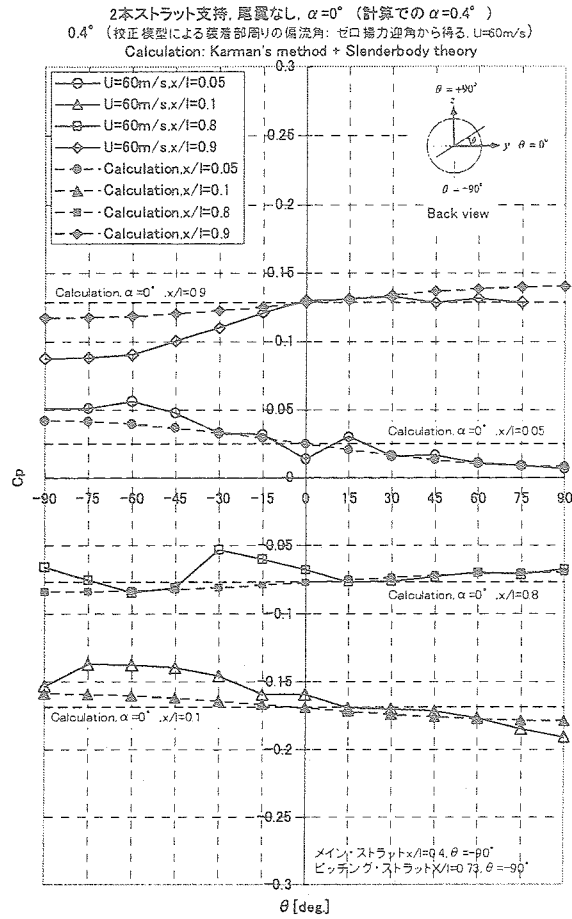
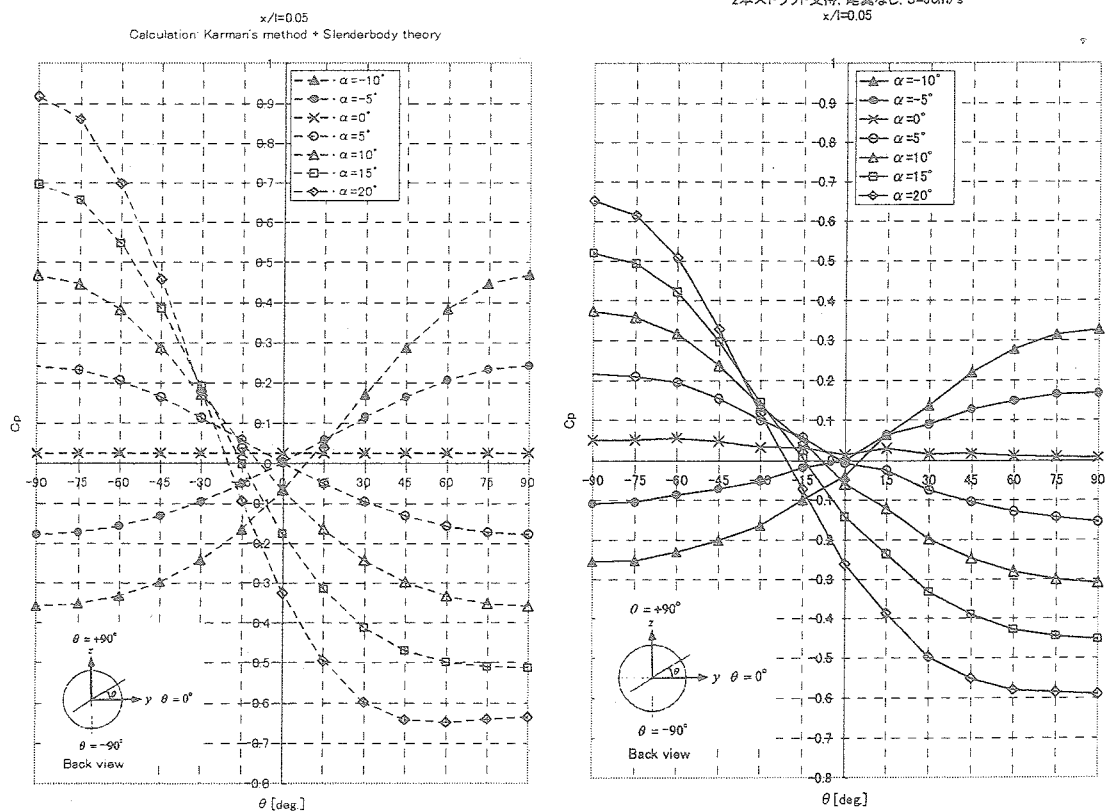
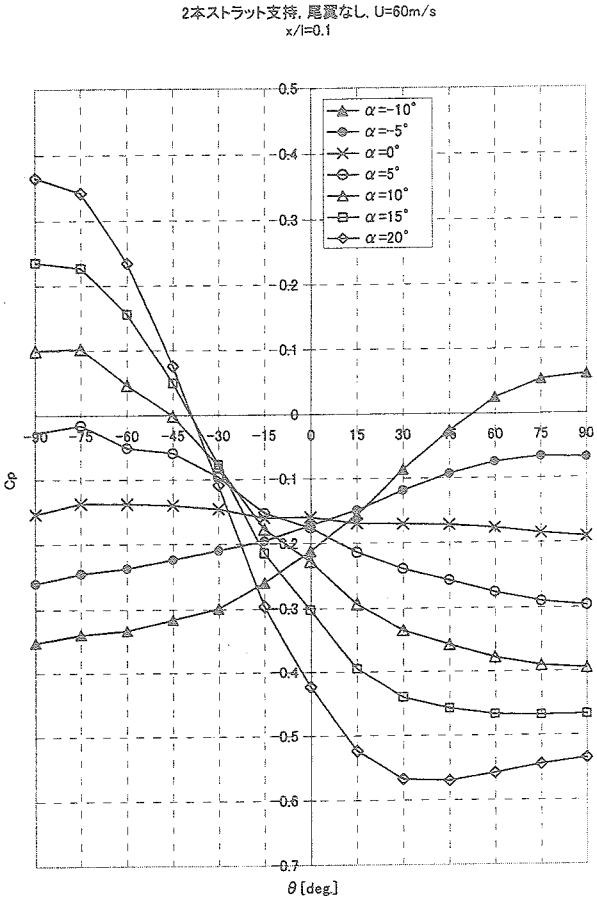
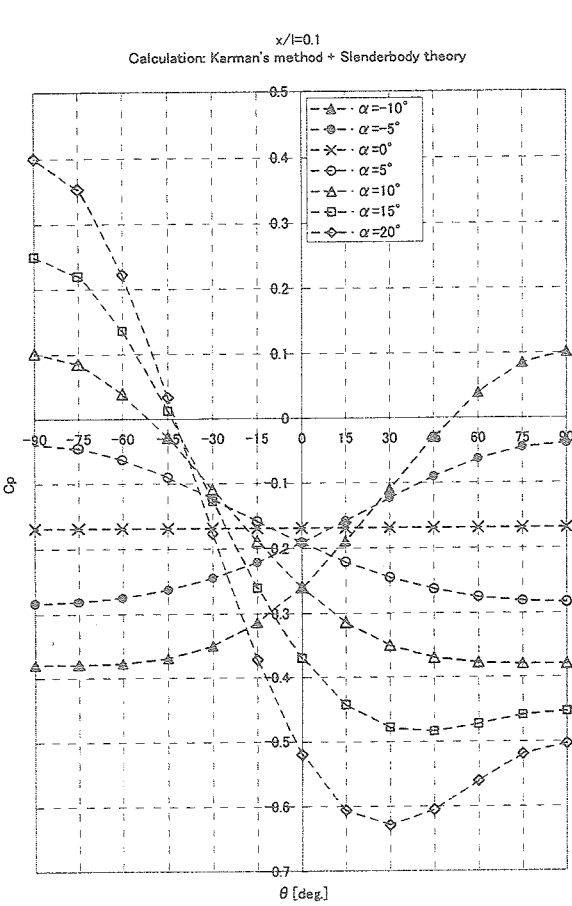


図4 船体円周 C_p 分布

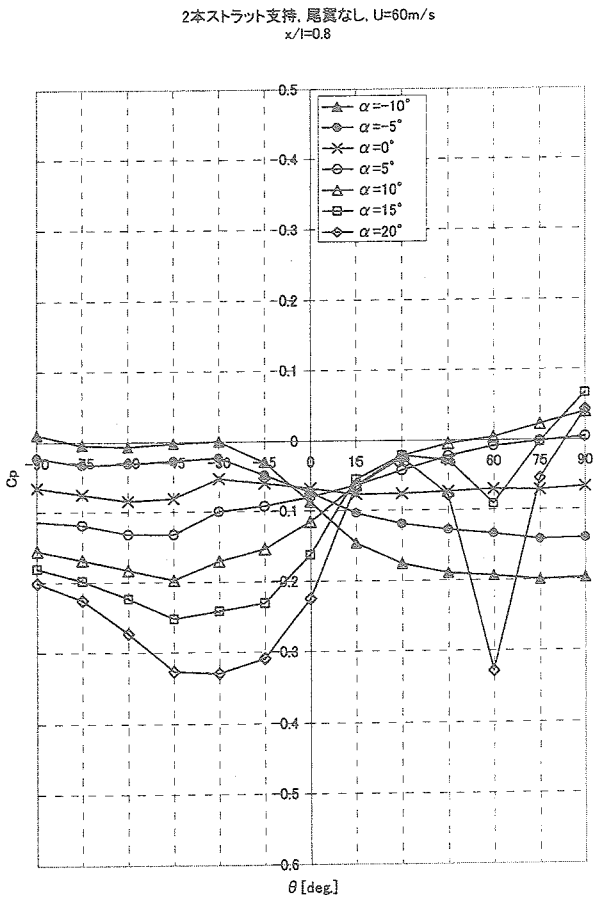
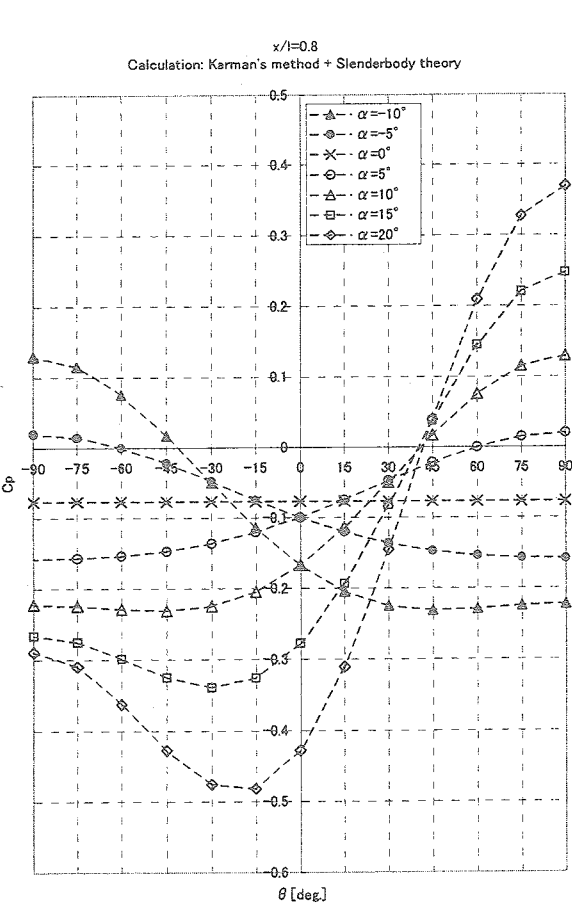


(a) $x/l=0.05$ 断面

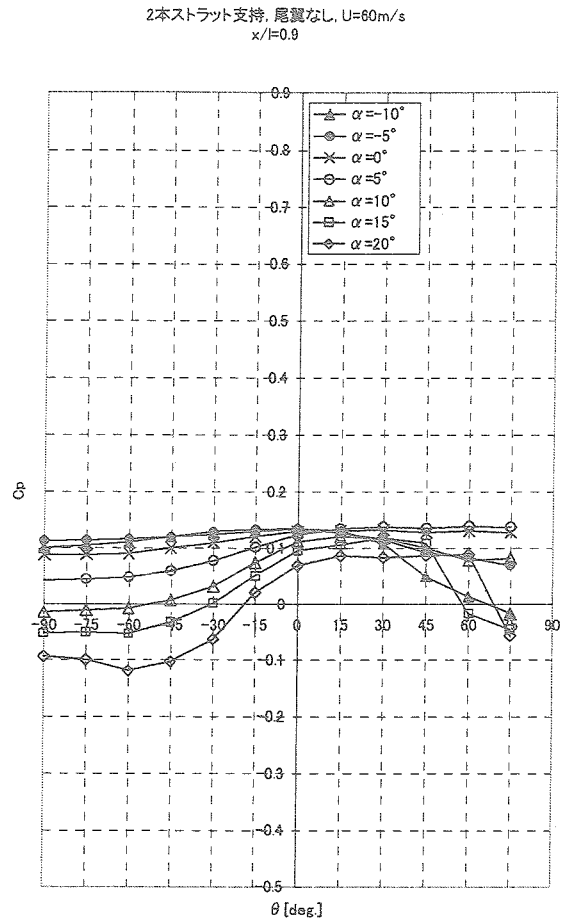
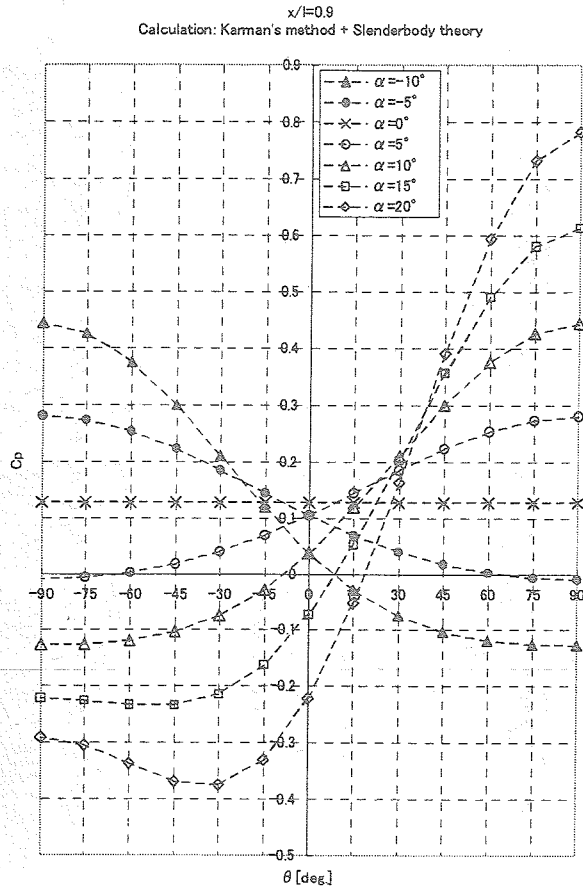
図5 α 変化による円周 C_p 分布(左側試験結果、右側計算)



(b) $x/l=0.1$ 断面



(c) $x/l=0.8$ 断面



(d) $x/l=0.9$ 断面

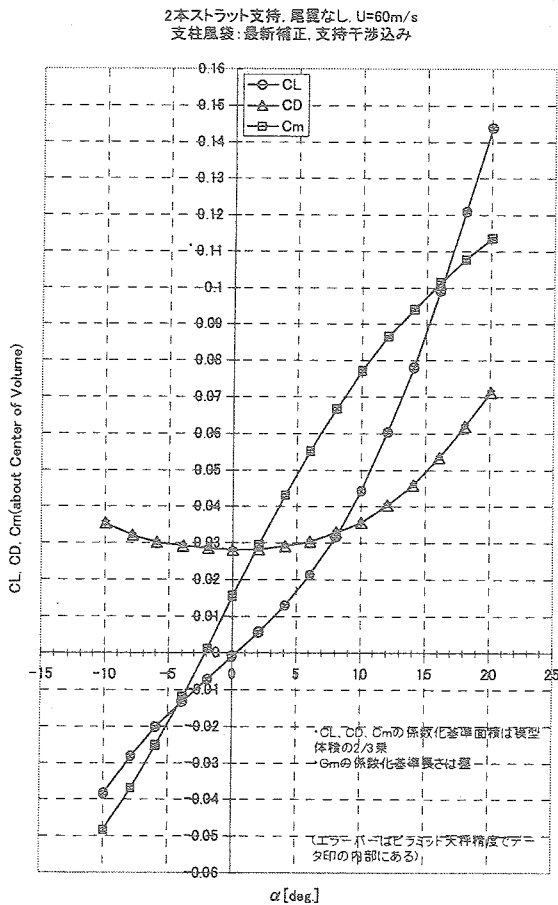


図6 支柱風袋の最新補正を施した3分力特性
(CL:揚力係数, CD:抗力係数, Cm:縦揺れモーメント係数)

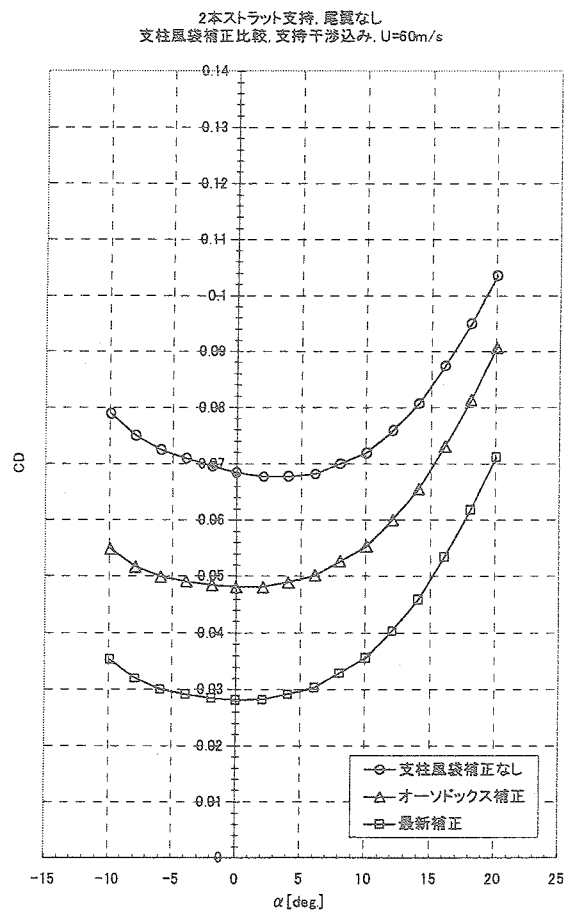


図7 支柱風袋補正と風袋量

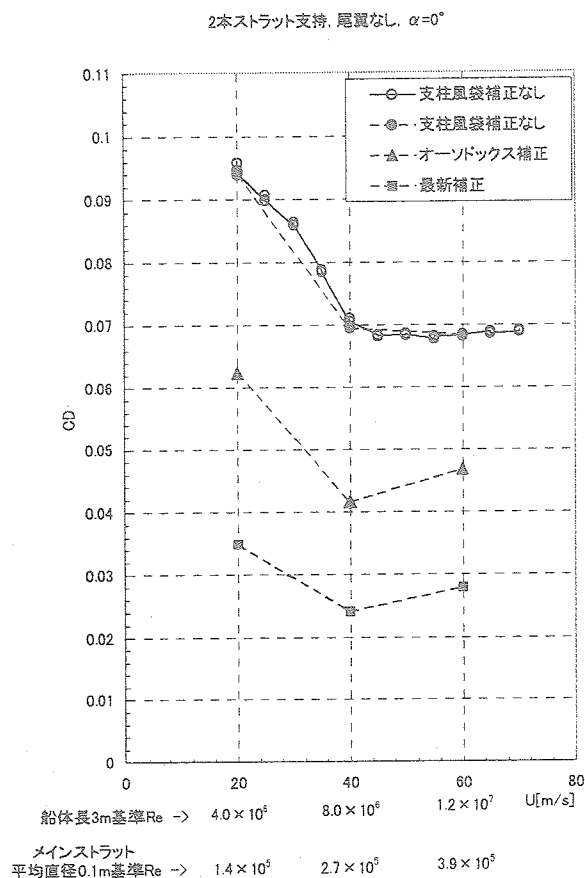


図8 一様流Uの変化に対するCD
(Re:レイノルズ数, 通常基準長は船体長1)

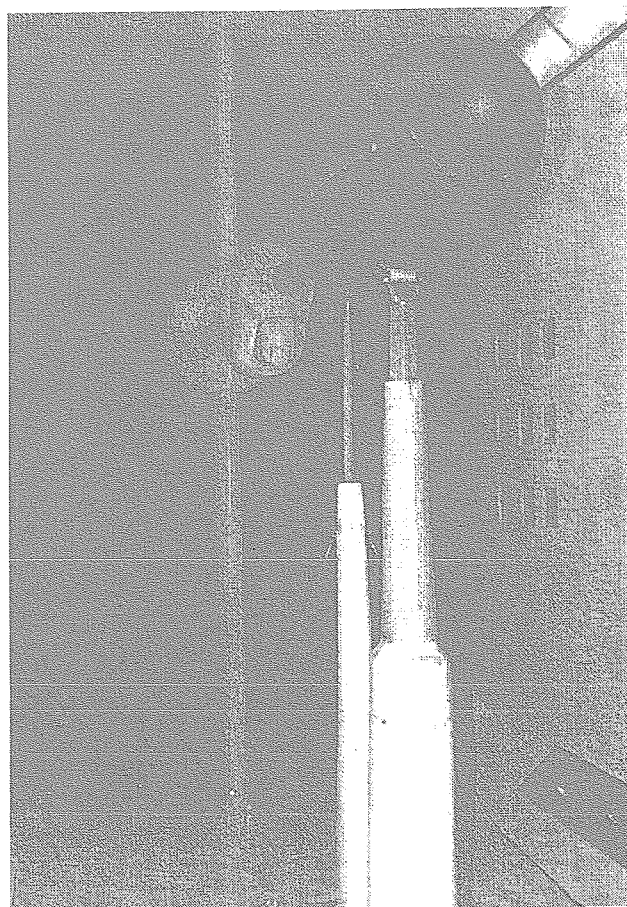


図9 スティング支持でダミーストラット付き模型

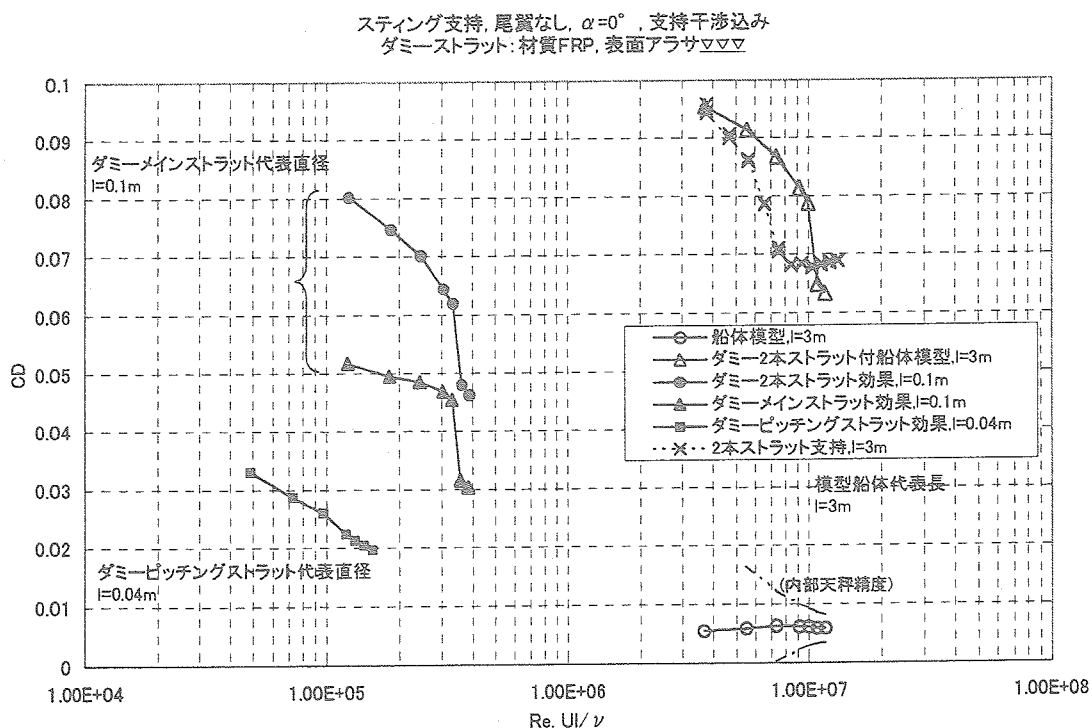


図10 スティング支持で内部天秤計測によるストラットの効果

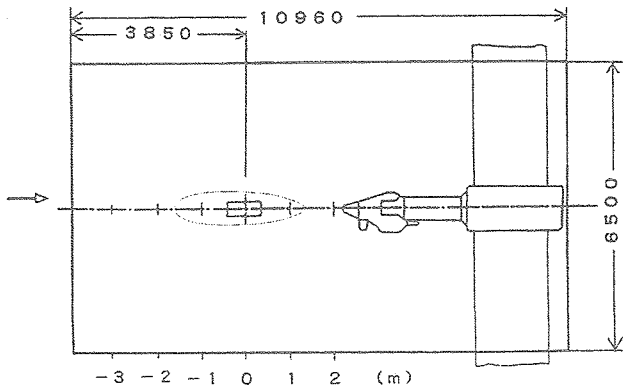


図11 船体模型とスティング支持装置の
形状と位置関係

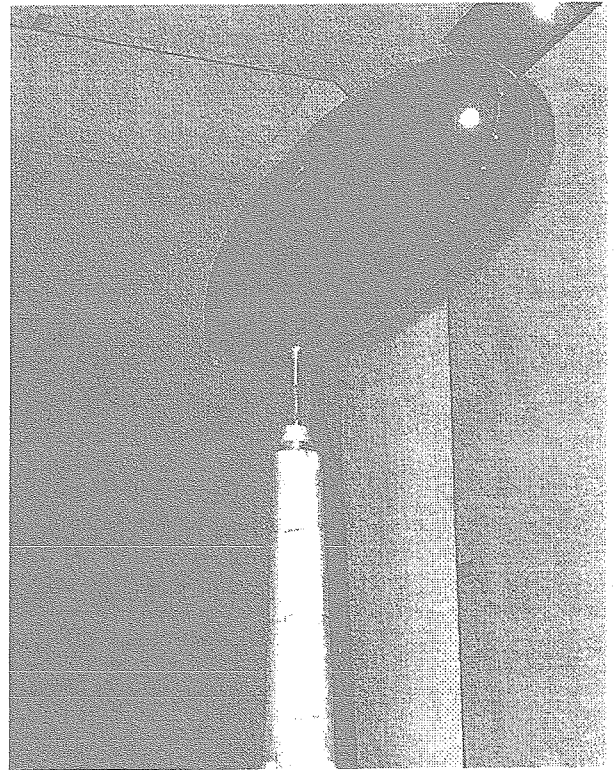


図13 1本ストラット支持模型(SPA2)
(支柱直径:0.045m)

同一船体タンデム干渉, 前方船体 C_p 分布計算
(x/l_R : 後方船体先端位置)

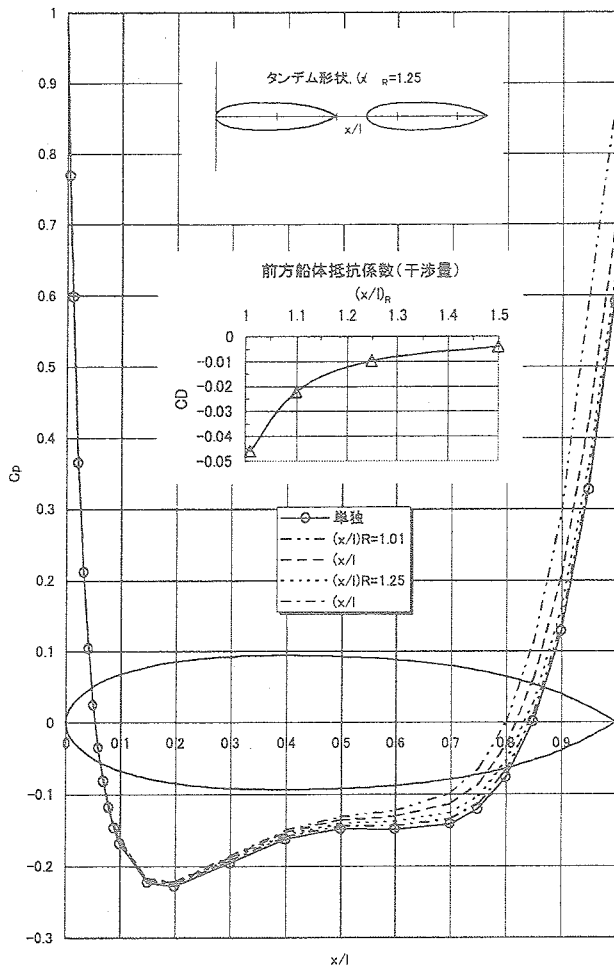


図12 スティング支持装置を後方船体と想定し
た干渉計算(計算はカルマンの方法)

SPA2模型, 偏揺れ角を与えて迎角 α とする
1本ストラット支持, 船体単体, $U=50\text{m/s}$, 内部天秤, 支持干渉込み

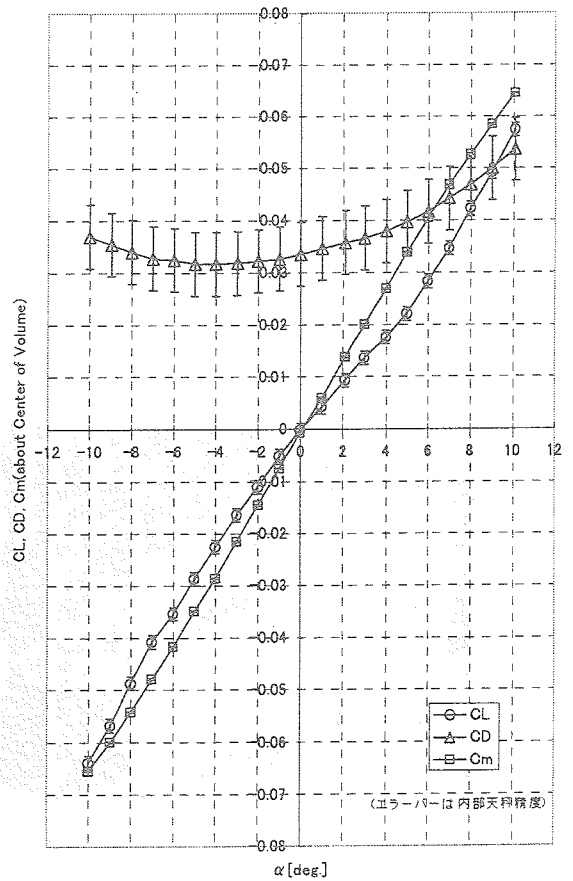


図14 低迎角3分力特性

SPA2模型, 1本ストラット支持, ピラミッド天稜
高・逆迎角, 船体単体, $U=50\text{m/s}$, 支柱風袋補正あり, 支持干渉込み

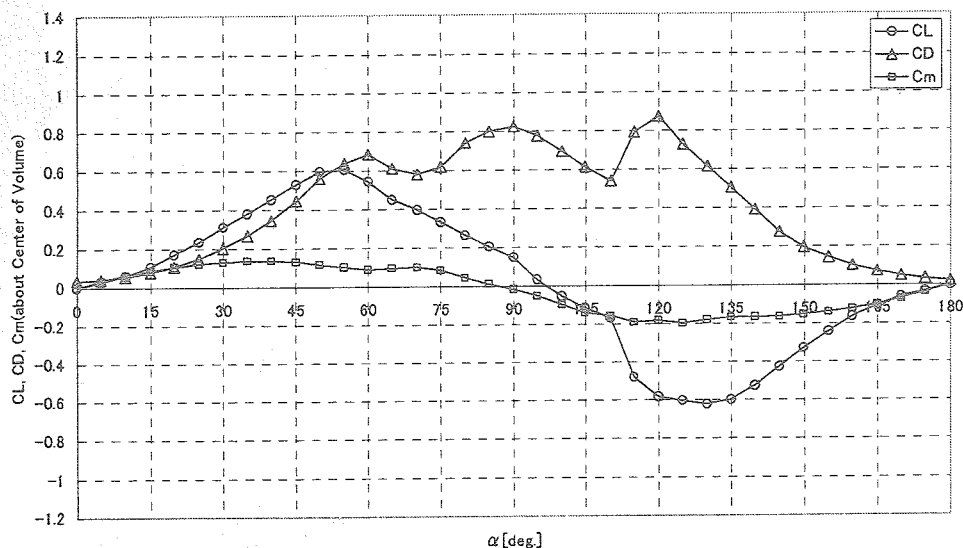


図 15 高・逆迎角 3 分力特性

SPA2模型
1本ストラット支持, 船体単体, $U=30\text{m/s}$

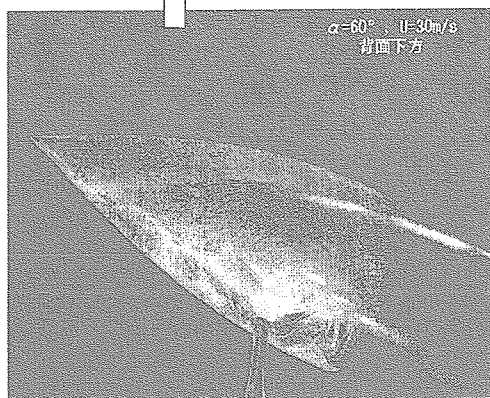
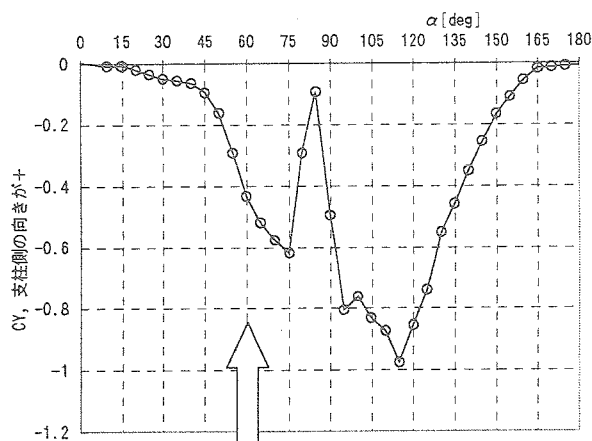


図 16 上下非対称による横力係数 C_Y の発生

静水槽および風洞試験結果の比較
(水槽試験SPA2模型長さ1=2.5m, H:船体単体)

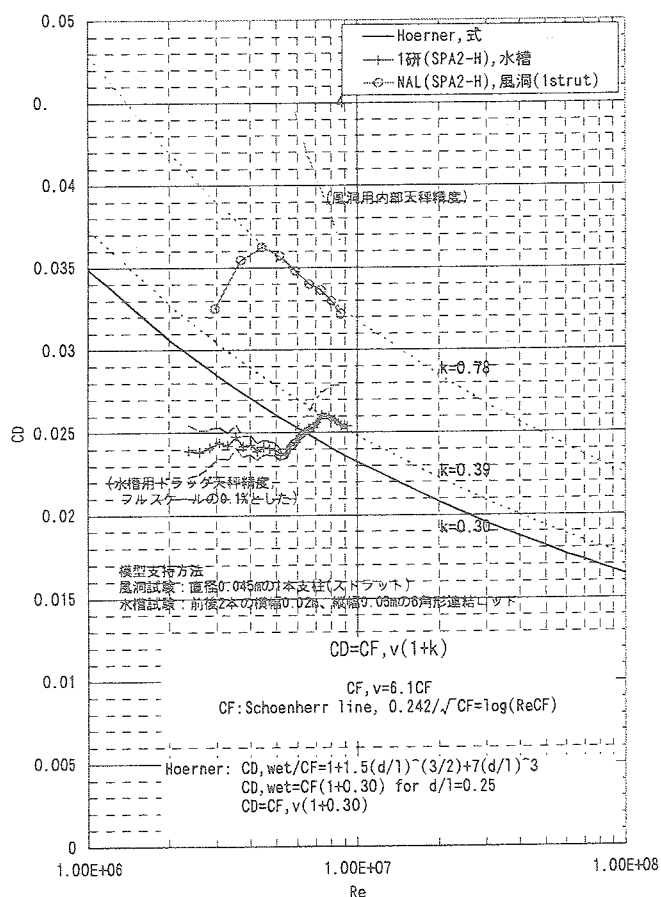


図 17 静水槽試験結果との比較

付録

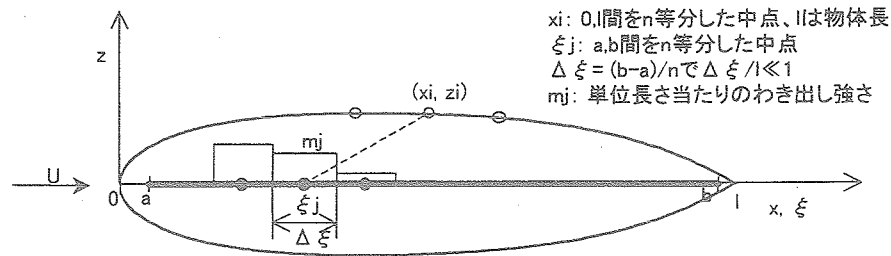
船体の圧力係数計算

1. カルマンの方法(軸流に対する縦断面圧力分布)[A1],[A2]
回転体の経線の流れ関数 ψ で表し圧力係数 C_p 分布を計算する

$$\psi(x, z) = 0$$

$$\psi = \frac{1}{2}Uz^2 - \int_a^b m(\xi) \left[1 + \frac{x - \xi}{\sqrt{(x - \xi)^2 + z^2}} \right] d\xi = 0$$

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} m_j = \frac{1}{2} U z_i^2, \quad c_{ij} = \frac{x_i - \xi_j}{\sqrt{(x_i - \xi_j)^2 + z_i^2}} \Delta \xi$$



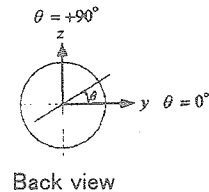
$$v_x(x, z) = \frac{1}{z} \frac{\partial \psi}{\partial z} = U + \sum_{j=1}^n \frac{(x - \xi_j) \Delta \xi}{[(x - \xi_j)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} m_j$$

$$v_z(x, z) = -\frac{1}{z} \frac{\partial \psi}{\partial x} = \sum_{j=1}^n \frac{z \Delta \xi}{[(x - \xi_j)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} m_j$$

$$C_p = 1 - \left(\frac{v_x}{U} \right)^2 - \left(\frac{v_z}{U} \right)^2$$

2. 細長回転体の理論(交差流に対する横断面圧力分布)[A3]
迎角 α により生じる交差流に対して円周圧力係数 C_p 分布を計算する

$$C_p = -2 \sin 2\alpha \frac{dz}{dx} \sin \theta + (1 - 4 \cos^2 \theta) \sin^2 \alpha$$



付録文献

A1. Karman, T. V., Calculation of Pressure Distribution on Airship Hulls, NACA TM 574, 1930.

A2. 牧野光雄, 流体抵抗と流線形, 産業図書, pp.183-184, 1991.

A3. Allen, H. J., Pressure Distribution and Some Effects of Viscosity on Slender Inclined Bodies of Revolution, NACA TN 2044, 1950.