

膜構造物の張力簡易測定装置の開発

名古屋大学図書



20106744

課題番号 13555156-00

平成13年度～平成14年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）研究成果報告書

平成15年3月

大森博司
(名古屋大学大学院環境学研究科)

はしがき

この報告書は平成13年度、同14年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）の研究成果を報告することを目的としてまとめられたものである。研究組織、研究発表ならびに研究成果による工業所有権の出願状況は下記のとおりである。

○研究組織

研究代表者： 大森博司（名古屋大学大学院環境学研究科助教授）
研究分担者： 呉明児（名古屋大学大学院環境学研究科助手）
研究分担者： 南宏和（（株）太陽工業空間技術研究所研究員）
研究分担者： 小田憲史（（株）太陽工業空間技術研究所所長・研究員）

○交付決定額（配分額）（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成13年度	11,900,000	0	11,900,000
平成14年度	1,900,000	0	1,900,000
総計	13,800,000	0	13,800,000

○研究発表

1. 学会誌等

- (a) 加藤寛規、大森博司、呉明児、膜張力の非接触測定法の開発に関する実験的研究、東海支部研究報告集、第40号、pp. 317-320、2002
- (b) 石井一夫、加藤史郎、大森博司ほか、骨組膜構造物の耐震性能評価のための地震応答解析、膜構造研究論文集、第15巻、pp. 1-12、2002
- (c) 呉明児、大森博司、佐々木睦朗、テンション材により補剛されたシステムの構造挙動(その1) 補剛された柱の解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊、pp. 849-850、2002
- (d) 長田宗平、喬鋒、廣澤秀友、大森博司、松井徹哉、サスペンション膜構造の自由振動特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp. 837-838、2002
- (e) 大森博司、呉明児、膜張力の非接触測定法の開発に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、2002、pp. 847-848
- (f) 呉明児、佐々木睦朗、大森博司 テンション材により補剛された圧縮材の座屈性状に関する研究—幾何学的非線形解析及び座屈実験—、日本建築学会構造系論文集、第556号、2002、pp. 93-99

名古屋大学図書



20106744

2. 出版物

- (a) 大森博司（分担執筆）、建築画報出版社、空間構造の形態創生—理論的デザインへの挑戦—、2002、p. 145

○研究成果による工業所有権の出願・取得状況

1. 有用特許、発明者：大森博司、発明の名称：膜張力測定装置およびその方法、出願番号：特願2000-281136、出願日：2000/9/18、出願人：科学技術振興事業団・川崎雅弘

目次

第1章 序	1
1.1 はじめに	1
1.2 膜構造のあゆみ	1
1.2.1 世界の膜構造の系譜	1
1.2.2 日本の膜構造の系譜	7
1.3 膜構造物の構造上の種類	10
1.3.1 サスペンション膜構造	12
1.3.2 空気膜構造	13
1.3.3 骨組膜構造	13
1.4 膜材料	16
1.4.1 膜材料の開発経過	16
1.4.2 膜材料の構成及び種類	19
1.5 膜構造物の施工および維持管理	22
1.5.1 膜構造物の設計のポイント	22
1.5.2 膜構造物の事故	23
1.6 研究の背景と目的	24
第2章 既往の研究	27
2.1 既往の膜張力測定技術	27
2.2 既存技術のまとめ及び問題点	33
第3章 基礎理論	43
3.1 膜の運動方程式	43
3.2 長方形膜の自由振動	43
3.3 長方形膜の定常振動	46
3.4 直交二方向張力の推定	47
第4章 装置開発	51
4.1 測定装置の概要	51
4.2 試験装置の製作	52
4.2.1 境界形状の決定	52
4.2.2 レーザ変位計測部	52

4.2.3	スピーカ部	52
4.2.4	箱形境界部	54
4.2.5	試験装置の全容	54
第5章	膜張力測定実験	57
5.1	閉鎖型境界ボックスを用いた実験	57
5.1.1	実験の概要	57
5.1.2	考察	60
5.2	開放型境界ボックスを用いた実験	61
5.2.1	実験の概要	61
5.2.2	実験結果・解析	61
5.2.3	考察	61
第6章	結	73
6.1	結論及び今後の課題	73
附録 A	ランニング・スペクトル	77
A.1	概要	77
	参考文献	76
附録 B	FFT による解析データ	79
B.1	概要	79
B.2	第一段階実験データの解析	79
B.3	第二段階実験データの解析	89

第1章 序

1.1 はじめに

1950年代のはじめ頃から、あらゆる種類の膜構造を用いた数えきれないほどのプロジェクトが、世界中、大小さまざまな規模で計画され、実施されてきた。テントや空気膜は、ケーブルネットやグリッドシェル、スペースフレーム、そのほかのさまざまな構造と複合された膜構造と同様に、創造的・構造的・機能的な可能性を広くした。これは、従来の構造では十分になしえなかったことでもある。そして膜構造が、明らかに現代建築の一部門にすぎないにしても、その特殊性は明白で、利点もおおむね認められている。すなわち、形状のバリエーションに無限の可能性があり、驚くほど広範な要求や必要性に応えられること、設置しやすく、柔軟性があり、そのうえ移動も可能であること、またほかの構造のように耐久性があり、恒久建築として使用できるが、期間の限られた一時的な使用にも適していること、材料と労力の消費が非常に少なく、高度な技術を用いても、低いコストで簡単な技術を使っても建てられること、必要がなくなれば、簡単にすばやく取り壊すことができること、等々、膜構造建築は、現代建築を豊かにし改良するために不可欠なものとして、徐々に確立されてきている。

1.2 膜構造のあゆみ

1.2.1 世界の膜構造の系譜

1961年、アメリカの『AIA ジャーナル』2, 4月号に掲載されたフライ・オッター教授による「テント」と題する論文は、世界に対して膜構造の位置付けをしたものである。そこには、「建築は、われわれがその中に詰め込まれる固い構造物であってはならず、われわれとともにあり、ときおり取り替えられる生きた大きな包容物でなければならない」と書かれている。また、最小化された構造材料の形態は探求の結果であり、われわれは次第に、それが有機世界にとって必然的な形態であることがわかった、とも述べている。そして彼は、この有機世界の形態を膜に与えようとした。

さらに、次のように述べる。「テントといわれる建築は、知られているところではすでに3万年以前に存在していた。この古い伝統にもかかわらず、テント建築は建築の継子であった。取るに足らないものと見放されている。その簡単な構造原理と危険性が少ないことによって、不正確につくられやすい。しかしテントの構造は非常に難しく、事実すべての建築分野のうちでもっとも困難なものである」と。

オッター教授による各国での講演・指導を通して、膜構造が急速に広がることとなる。膜構造を建築的次元で考えて近代膜構造を確立していったオッター教授とそのグループは、1965年に『シュパンバイテン』を出版して膜構造の全容を示し、世界的な注目を浴びる。そしてシュトゥットガルト大学軽構造研究所(IL)を根拠地とし、数多くの作品を残している。膜構造の原点がここにあり、これらの技術と思

想は「モンリオール博西ドイツ館」(図 1.1)に帰着する。IL によるこの建物は、膜構造の世界に大きな影響を与え、膜構造発展の中でまさしくエポックとなった。

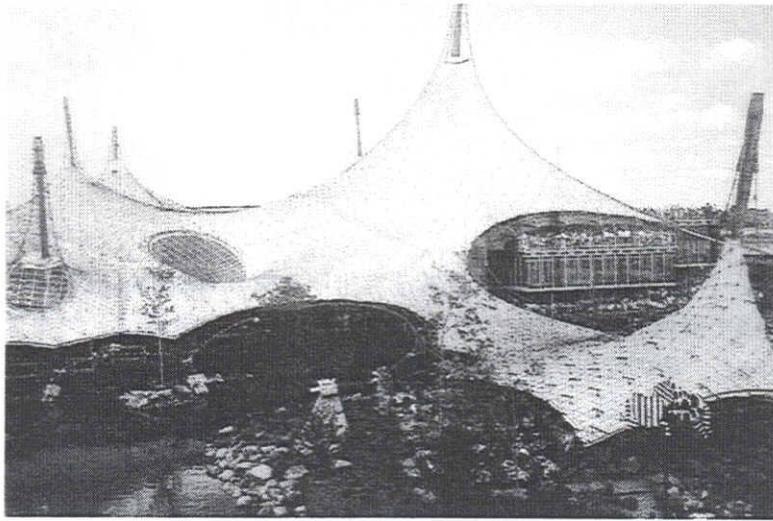


図 1.1: モンリオール博・西ドイツ館 (カナダ、1962 年)

日本では、1970 年に大阪で開催された日本万国博覧会 EXPO'70 を機に膜構造が求められるようになり、国内の多くの建築家が膜構造の設計に挑戦した。膜という新鮮な材料を使うことへの挑戦と、それが生み出す新しい空間の創造。大阪万博は、積極的に膜構造の可能性が試された博覧会となった。しかし、日本での膜構造の定着は、さらに十数年の歳月を必要とする。

また、このときの「アメリカ館」(図 1.2)には、設計競技で提案されたいくつかの膜構造の中から、実現可能な構造としてデヴィット・ガイガー提案の低ライズ空気膜構造が採用された。この低ライズ空気膜構造とは、エアードームのデフレート問題に対する安全策として、デフレートしても屋根面が観客席やフィールドに接触しないというシステムをもった構造であり、この考えは膜構造にひとつの転機を与えた。それは大規模空間としてのエアードームの可能性であり、そのプロトタイプがこの「アメリカ館」で示された。

1970 年代、新しい膜材料である四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) コーティッドガラス繊維膜材の開発と相まって、この低ライズ空気膜構造は、ガイガー・バーガー事務所によって進められ、アメリカで膜構造の恒久化と巨大化が一挙に進められる。「ミリガン大学屋内運動場」(図 1.3)、「サンタクララ大学アクティビティーズセンター」(図 1.4)を経て、大規模なエアードームの建設が起こる。多目的スタジアムとして使われる全天候型ドームは、大観衆を収容するイベント会場としても位置付けられ、流行となってアメリカに受け入れられた。1975 年にはポンティアック市に 80,000 席を擁する巨大低ライズドーム「シルバードーム」(図 1.5)が建設される。

これら膜構造による大規模空間の実現は、膜構造の利点のひとつを世界に示した。大空間ゆえに、重くて暗い空間からはじめて解放されたのである。

建築的な次元を離れた土木的スケールのこれらのドームは、世界に大空間構造の経済的な建設を可能



図 1.2: 日本万国博・アメリカ館（大阪、1970年）

とした。この意味で大阪万博の「アメリカ館」は、膜構造発展の中でひとつのエポックとなっている。

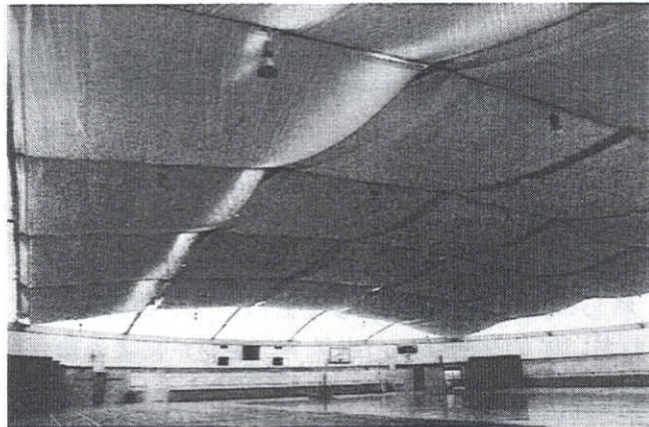


図 1.3: ミリガン大学屋内運動場（アメリカ、1974年、内部）

1980年代にかけて、アメリカでのエアードームは7棟に達した。しかし、1983年のインディアナポリスの「フィッシャー・ドーム」を最後に姿を消す。たび重なる構造事故、常時送風に伴う高い維持費、内圧管理の煩雑さ、閉鎖空間性などの理由により、これらを乗り越える次の新しい構造法へと移行していく。

北米での膜構造は、恒久建築として新しい用途開発がなされるようになる。「フロリダ大学オッコナー・センター」(図 1.6)、「リンゼイ・パーク・スポーツセンター」(図 1.7)「サンディエゴ・コンベンションセンター屋外展示場」(図 1.8)、「シェーン・パーク野外劇場」(図 1.9)などが美しい造形と斬新な構造を見せ、単に巨大化というにとどまらず、膜構造の建築としての展開が始まった。また、明る

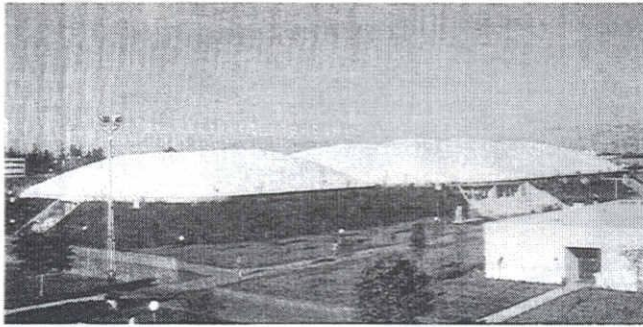


図 1.4: サンタクララ大学アクティビティーズセンター（アメリカ、1976年）

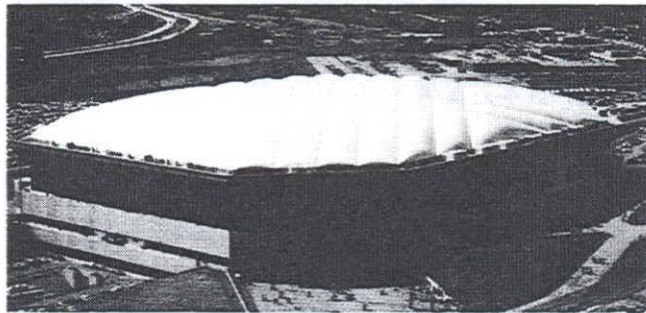


図 1.5: シルバードーム（アメリカ、1975年）

い緑のある空間を求めて、ガラスとの競合の中、いくつかのショッピングモールが実現する。

1980年代後半になると、新しい大空間架構法として、バックミンスター・フラーの案から出発したテンセグリティ構造が提案された。このケーブルとポスト（束材）による複合構造は、それまでのエアードームに取って代わるようになる。ガイガー・アソシエイツによるソウルの「ナショナル・スポーツ・コンプレックス体操競技場・フェンシング競技場」（図 1.10）に始まり、「イリノイ州立大学レッドバード・アリーナ」（図 1.11）、「サンダー・ドーム」が完成する。さらにこの構造方式では、ワイドリンガー・アソシエイツによって「ジョージア・ドーム」（図 1.12）がつくられており、大空間架構にアメリカ独自の途が切り開かれていく。

1980年代のヨーロッパ各国では、世界的に著名な建築家が膜構造デザインに取り組み始め、膜構造のデザイン密度はより高くなる。そこではアメリカと異なり、画一的な構造ではなくひとつひとつ個性のある作品が競い合っていた。

ヨーロッパではじめて膜構造を用いた研究所として建てられた「シュルンベルジェ・ケンブリッジ研究所」（図 1.13）は、“新鮮な光空間”という位置付けで、ケーブルと膜の複合構造としてデザインされた。ともすれば、鉄骨骨組の安易な設計に走りがちな膜構造のデザインに対して、ここではケーブルとの組合せの中でデザインが追求されている。パリの新凱旋門のモニュメント「グラン・アルシェ”雲”」（図 1.14）は、世界の注目を浴びる中、膜構造による雲のイメージでオブジェとして見せ、世界の檜舞

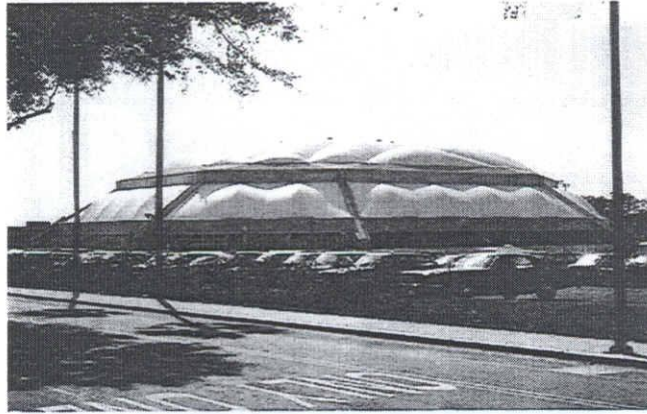


図 1.6: フロリダ大学オクコーネル・センター (アメリカ、1980年)

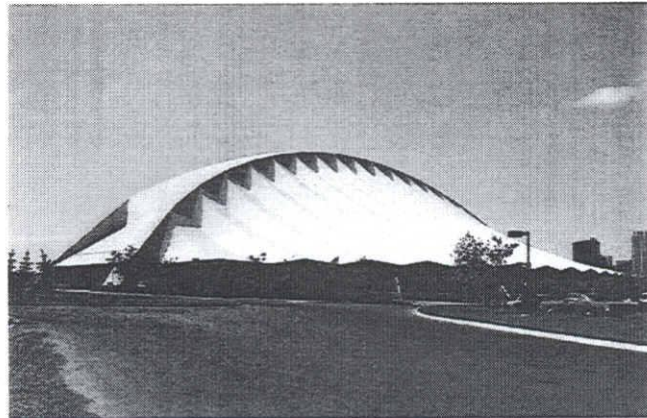


図 1.7: リンゼイ・パーク・スポーツセンター (カナダ、1985年)

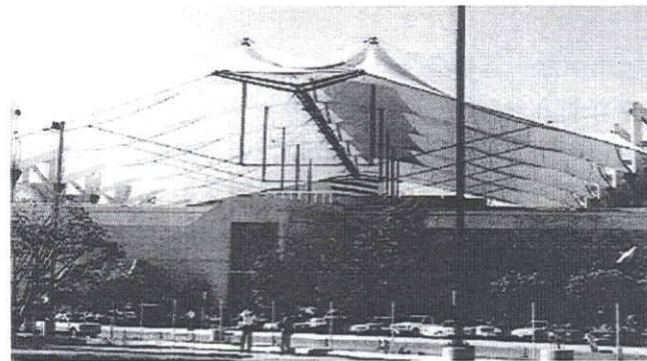


図 1.8: サンディエゴ・コンベンションセンター屋外展示場 (アメリカ、1989年)



図 1.9: シェーン・パーク野外劇場（アメリカ、1990年、内部）

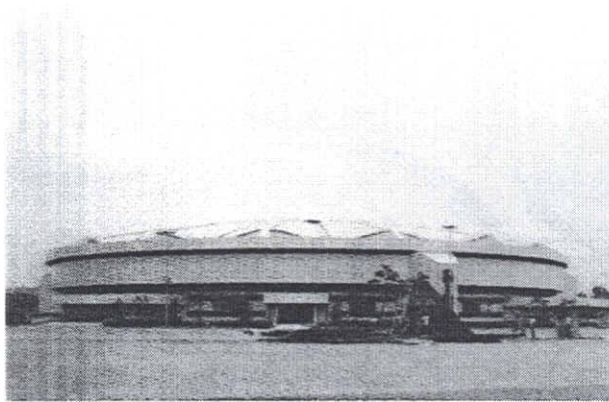


図 1.10: オリンピック・フェンシング競技場（韓国、1986年）

台に膜構造を示した。

ヨーロッパで使われ始めたサッカー場のスタンド屋根は、暗くなりがちなスタンド下を明るくする。「ローマ・オリンピック・スタジアム」（図 1.15）は立体トラスをコンプレッションリングとし、そこから膜構造屋根を吊る。ケーブル構造との複合によるこの明るい屋根は、軽快な構造美を見せており、以後のスタンド屋根の規範となる。レンゾ・ピアノによる「サンニコラ・スタジアム」（図 1.16）は、コンクリートとの組合せの中で膜を使い、「ゴットリーブ・ダイムラー・スタジアム」（図 1.17）は、より構造の合理性と経済性を追求し、軽快な美しいスタジアムとして見せている。

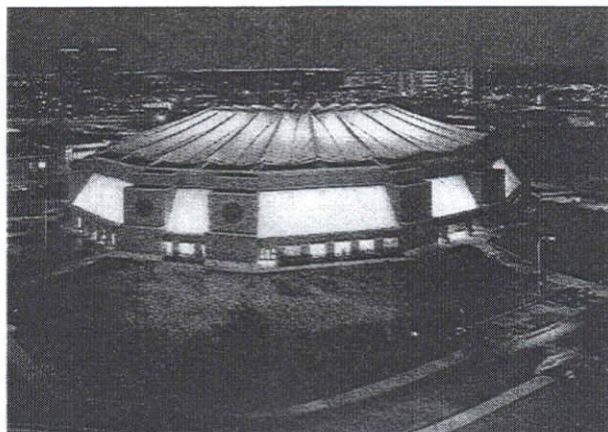


図 1.11: イリノイ州立大学レッドバード・アリーナ (アメリカ、1988 年)

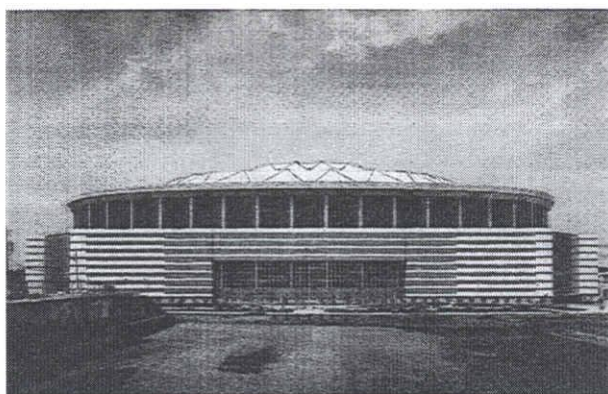


図 1.12: ジョージア・ドーム (アメリカ、1992 年)

1.2.2 日本の膜構造の系譜

日本では、1970 年の大阪万博以後、膜構造は低迷を続けた。1980 年代半ばアメリカですでにスタジアムとしてのエアードームが 7 棟建設され、十分に機能していた時代、日本では他の伝統的な建築と同様の恒久建築として膜構造、東京ドーム (図 1.18) の建設の許可が監督官庁より下りるまで、申請より 3 年の歳月を要している。延べ 160 名におよぶ各分野での専門家による委員会が構成され、膜構造の安全性に関する検討が行われ、実験棟による実験が行われ、やっと建設の途が開かれた。日本ではじめて公に膜構造が恒久建築と認められたのは 1984 年であった。このときすでにアメリカではエアードーム建設は終焉に向かっていていたが、日本ではこれを機に、膜構造が一般に知られるようになり、大空間架構としての屋根材料に膜材料が注目を集め、この新しい空間をもつ膜構造建築は一気に広がることとなった。

しかし、これ以後、日本では多くの大空間架構としての膜構造は固い骨組に支えられたものとなった。台風は設計荷重の 60 m/sec を超し、設計積雪荷重は日本海側では 450 kgf/m² 以上となる。このよう

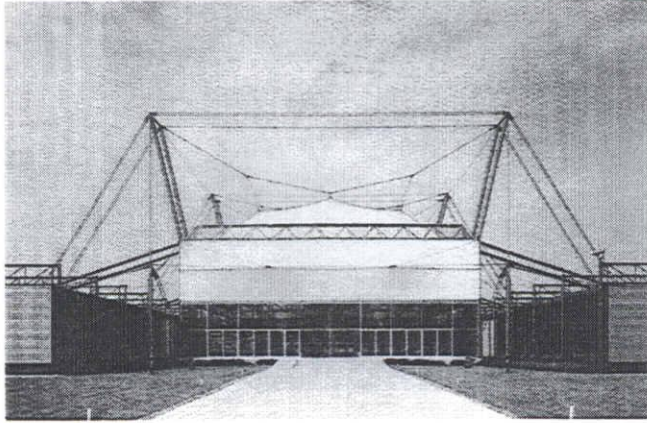


図 1.13: シュルンベルジェ・ケンブリッジ研究所 (イギリス、1985年)

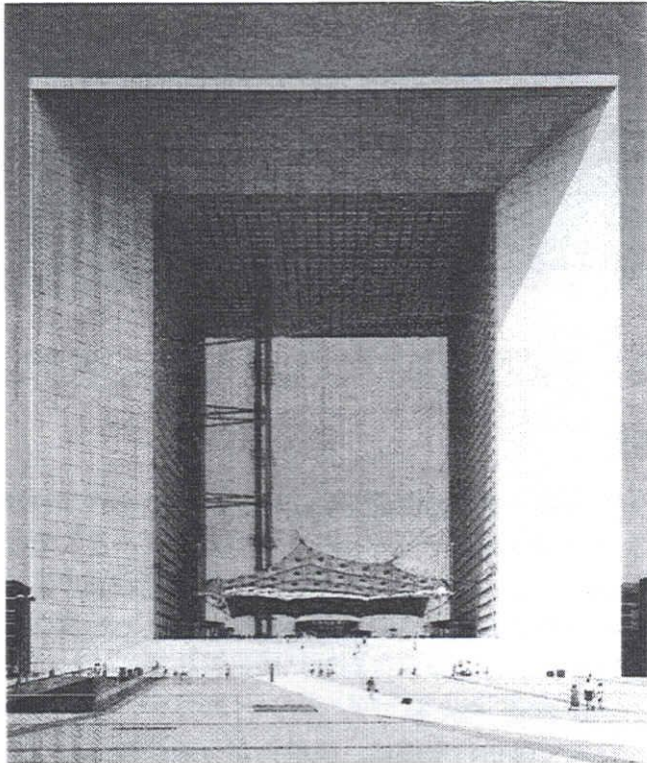


図 1.14: グラン・アルシェ”雲” (フランス、1989年)

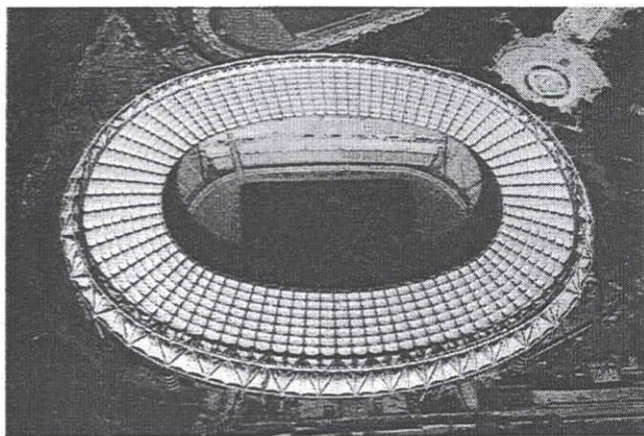


図 1.15: ローマ・オリンピック・スタジアム (イタリア、1990年)

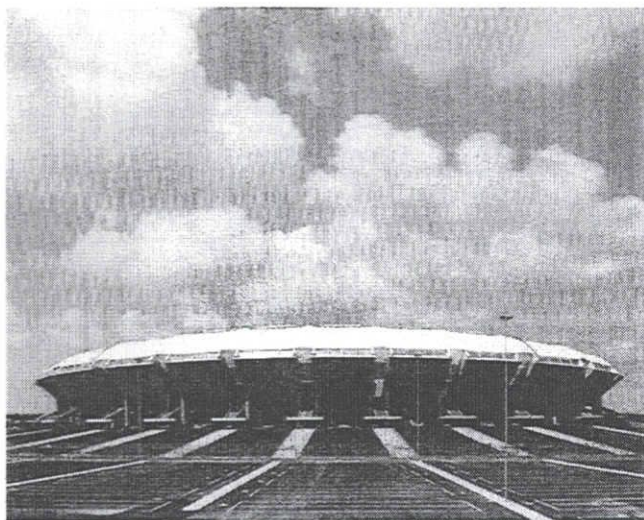


図 1.16: サンニコラ・スタジアム (イタリア、1990年)



図 1.17: ゴットリーブ・ダイムラー・スタジアム (ドイツ、1993 年)

な条件での日本の膜構造の歴史は、同時にサスペンション構造への設計への不慣れさもあり、日常化した鉄骨骨組構造との組合せによる発想へと向かった。

そのうちに骨組構造大空間架構に大断面集成木材が日本で認められるようになる。木質と膜の組合せは、障子にも、唐傘にも例えられ日本独自の構造のようにも取られた。出雲ドーム (図 1.19) 長野オリンピック記念アリーナ・エムウェブ、大館樹海ドーム (図 1.20) を経て、大空間架構のひとつの分野となった。

そして現在、ドームに 2 種類の方向が日本では示されている。ひとつは大都市型のドームで、大観衆を擁し見せるイベントを行う場合に、内の騒音を外に出さず、内部は照明空間としてイベントに重点を置くもの。スポーツも照明空間の中でのショーとする。もうひとつのドームは、地方自治体を中心となり、市民のスポーツの場と位置付け、自ら行うスポーツの空間となる。そこには明るい内部空間が求められ、スポーツを行うことが重点となり、屋根膜面が積極的に使われ中心的な存在となる。これらのドームは特に雪国での場合、積雪期にも広く明るい空間として市民の使用状況は満杯となる。各地域に図書館があると同じように、各地域にとって必要な施設となっている。

1.3 膜構造物の構造上の種類

1950 年、膜の形態決定や構造解析を手探りで模索し始めた時代から、多くの試行錯誤を繰り返し膜構造建築もその構造領域において、大別すると 3 つの基本システムを持つに至った。すなわち、膜面そのものが主体構造をなし、外部、内部仕上げ材をも兼ねる、在来構法的に説明すれば、梁+母屋+内部仕上げ材+野地材+インシュレーション材+外部仕上げ材のすべてを兼ね備えた存在のサスペンション膜構造形式と空気膜構造形式、そして膜面が 2 次的な構造要素として考えられている骨組膜構造形式である。そして今日の社会的ニーズの多様性から可動システムの導入が注目を集めているところであるが、軽量構造建築の特性を生かしたかたちの膜建築分野への可動システム概念導入の歴史は、さして新しいものではなく、人類にとっては古くからのつきあいである。



図 1.18: 東京ドーム (東京、1988年)



図 1.19: 出雲ドーム (島根、1992年)

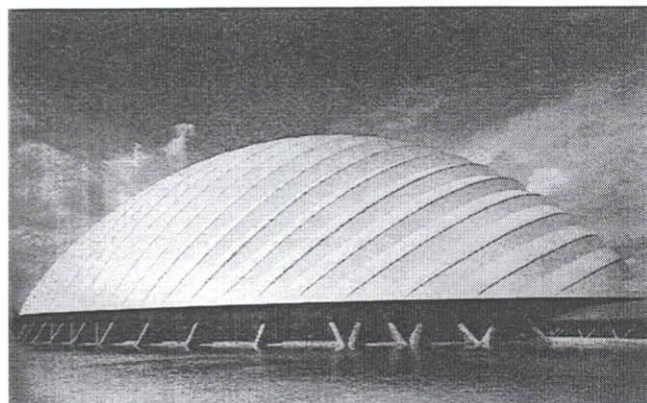


図 1.20: 大館樹海ドーム (秋田、1997年)

1.3.1 サスペンション膜構造

膜材料自体が主体材を形成しており、基本的形態は吊り構造形式をとっている膜構造の原点ともいべき構造システムであり、古くはアラブの遊牧民達の間にも広く普及した構造形式である。

1964年、ローザンヌのスイス国内博会場において初めて数々の異なる基本形態のバリエーションが試された。そして何と云っても記念碑的、象徴的存在としては1967年モントリオール博の西ドイツ館(図1.1)であり、その清々しさのために世界の人々の注目を一身に浴びたといえる。そして近年に至っても1981年のサウジアラビアのジェット空港のハッジターミナル(図1.21)や1985年のカナダのカルガリーのリンゼーパーク・スポーツセンター(図1.7)、そしてケンブリッジのシュルムバーガー・リサーチセンター(図1.22)、1986年のサウジアラビアのリヤド国際スタジアム(図1.23)と、その自然を連想させる優美で有機的形態は我々の目にたいへんやさしく、その存在が一般の人々にも広く受け入れられ始めている。



図 1.21: ハッジターミナル (サウジアラビア、1981年)

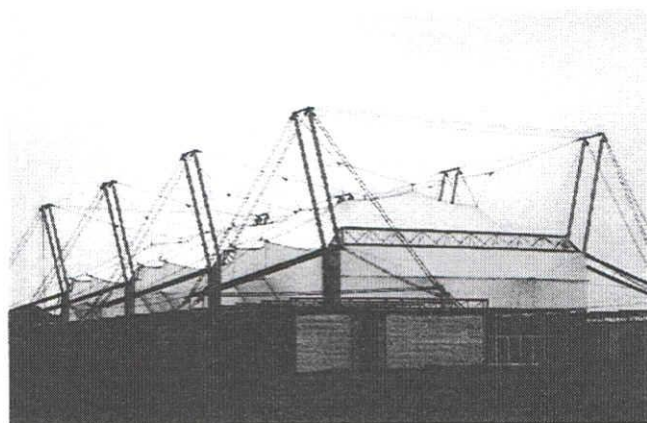


図 1.22: シュルムバーガー・リサーチセンター (イギリス、1984年)

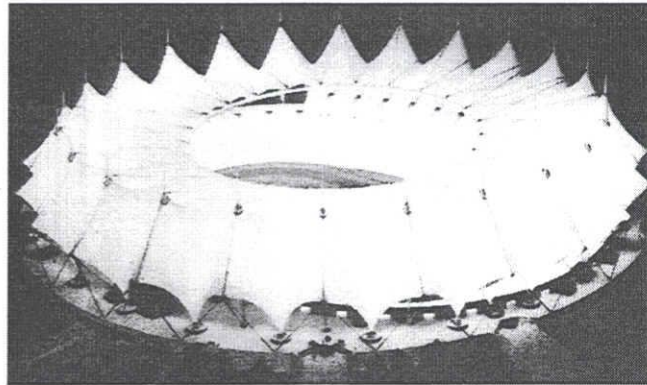


図 1.23: リヤド国際スタジアム (サウジアラビア、1986 年)

1.3.2 空気膜構造

膜材料によりカバーされた空間に空気を送入し、外部気圧より高く内部気圧を保つことによって膜を押し上げて形状を保持する形式。

世界にその未知なる可能性を大いに知らしめたのは、1970 年の日本万国博覧会におけるアメリカ館 (図 1.2) である。低ライズで膜材とケーブル材を組み合わせた構造システムの確立は、10,000 m² にもなる無柱の大空間を覆ってみせ、以後、建設される 40,000 m² を超える大ドームの原形になったことはいうまでもない。

1975 年のポンティアック・シルバードーム (図 1.5)、1980 年のフロリダ大学アリーナ (図 1.6)、1982 年のメトロドーム (図 1.24)、1988 年の東京ドーム (図 1.18) など、数々の大ドームが恒久建築として実現化された。また、特殊なバリエーションの研究開発も活発である。例えば、日本万博博覧会の富士パビリオン (図 1.25) も、チューブ型の空気膜を連ねて大空間を創出したユニークな構造形式であり、興味深い試みである。また、1989 年の海と島の博覧会のテーマ館であるビッグウェーブ (図 1.26) の単膜ニューマティックも、そのあまりに左右上下に非対称で自由な形状形態を安定させるために、内部構造として逆さ B. S. S. 張弦梁構造がサブシステムとして内包されており、世界に類を見ない構造システムの実現化が試みられている。

1.3.3 骨組膜構造

サスペンション膜構造、空気膜構造においては膜材が主体構造体として使用されたわけであるが、この方式においては 2 次的な構造材として、また仕上げ材を兼ねて、屋根材、壁材として膜材を使用している。

1975 年の西ドイツのガーデンショウ・マンハイムの多目的ホール (木造格子シェル構造+膜材) (図 1.27) が大規模プロジェクトとして最初の代表作であり、1988 年のなら・シルクロード博のテーマ館 (図 1.28) も同様の構造形式である。また、1983 年のミュンヘン・オリンピック公園のアイススケート・ホール (ケーブルネット構造+膜材) (図 1.29) も、1981 年の神戸ポートピア国際広場 (図 1.30) と大阪イン



図 1.24: メトロドーム (アメリカ、1982年)

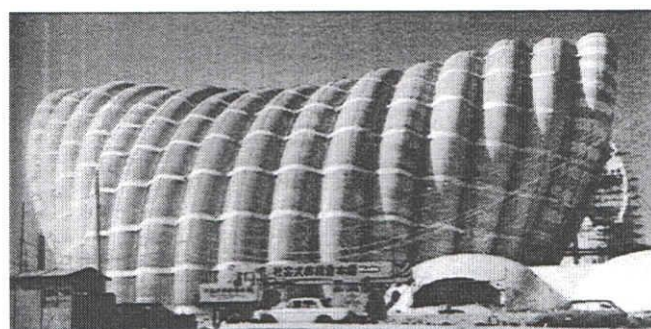


図 1.25: 日本万国博・富士パビリオン (大阪、1970年)

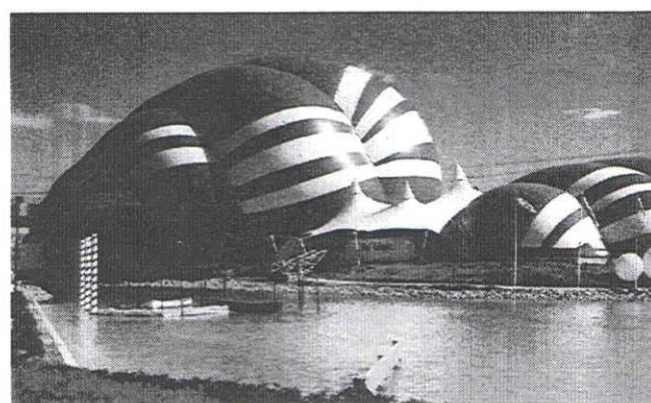


図 1.26: 海と島の博覧会・ビッグウェーブ (広島、1989年)

テックス・プラザ（TM トラス構造+膜材）（図 1.31）が代表作である。そして、1985 年のつくばの国際科学技術博のサントリー館（図 1.32）における 64 本の放射状に連続した（B. B. S. 張弦梁構造+膜材）からなる構造システムも、起伏に富んだ滑らかな自由曲面を自在に生み出してみせている。骨組膜構造は、唯一膜材料が 2 次的な構造目的にしか使用されておらず、自由な造形が主眼に置かれたシステムとも理解できるが、主体構造と膜材料の整合性が重要である。つまり、膜の立体裁断技術と溶接加工技術の精度が併せて要求される形式であるといえるだろう。

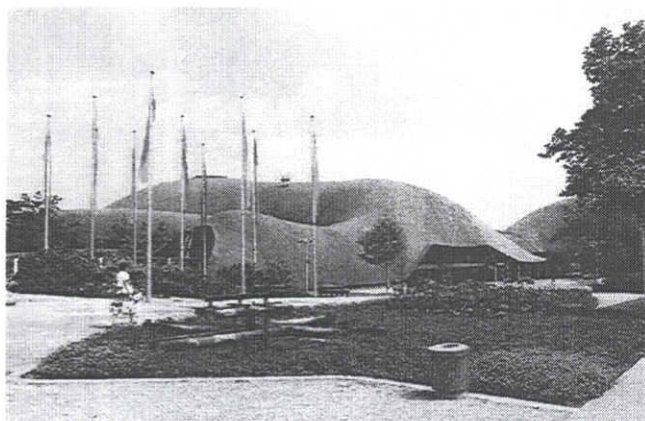


図 1.27: マンハイム多目的ホール（ドイツ、1975 年）



図 1.28: なら・シルクロード博・テーマ館（奈良、1988 年）

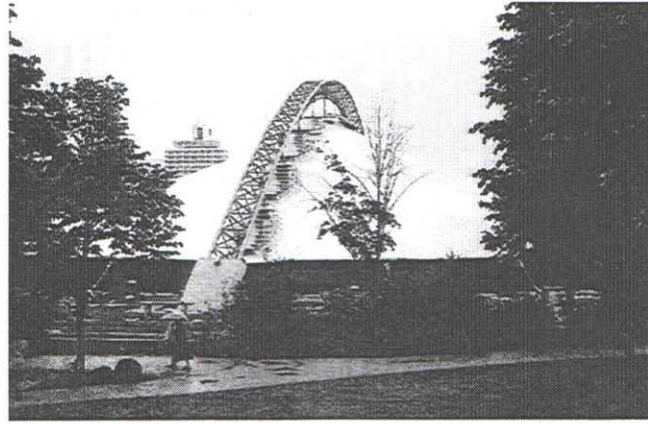


図 1.29: ミュンヘン・オリンピック公園・アイススケートホール (ドイツ、1983年)

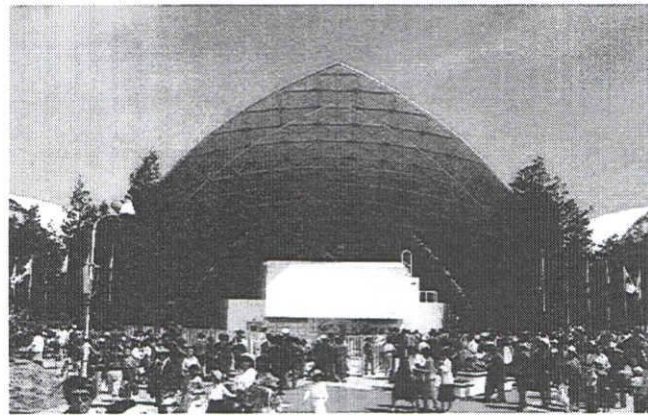


図 1.30: 神戸ポートピア博覧会・国際広場 (兵庫、1981年)

1.4 膜材料

1.4.1 膜材料の開発経過

これまでに紹介した膜構造物が誕生した背景は構造技術だけの発展によるものではない。膜構造物とは、材料に膜材料を用いたものであるという定義があり、そこには当然、膜材料の発展が関係してくる。ここでは、その膜材料の発展の歴史を紹介する。

先史の時代に遊牧民達がテントに用いた材料は、身近に手に入った動物の毛皮や皮革であったであろう。その後、人類が植物繊維等を紡ぎそこから布を造ることができるようになると、その後しばらくは、絹や麻や綿そして羊毛等の織布が膜材料として使用されるようになる。中世ヨーロッパの宮中テントには絹が使われたし、1893年、北極探検にナンセンは絹のテントを装備していた。また、1920年代にアメリカにおいて、日除け、装飾として一般家庭やビジネスビルに普及した軒出しテントには綿布が用い



図 1.31: 大阪インデックスプラザ (大阪、1985 年)

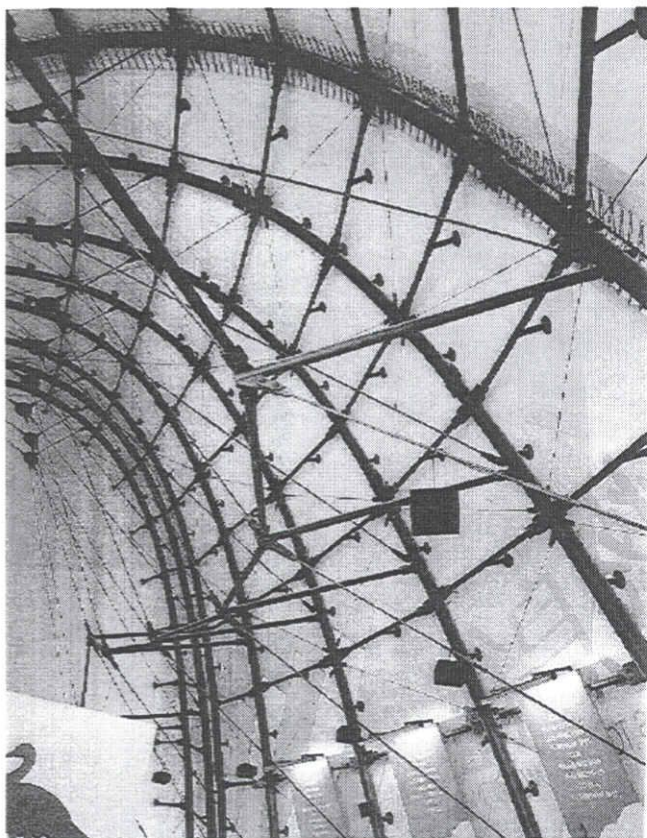


図 1.32: 日本万国博・サントリー館 (大阪、1970 年、内部)

られていた。この頃までの時代は、織布の耐久性の向上とともに衣服から帆船の帆に至るまでどういった用途に膜材料を用いられることができるのかが開発された時代であった。

1938年になるとナイロンを代表とする合成繊維の登場とともに、それまでの自然界に存在する材料から人工的に造り出された材料に膜材料の使用が変化していくことになる。合成繊維の建築材料への研究応用は第二次世界大戦後の1950年を境に活発化された。

アメリカでの開発経過

アメリカでは1946年に空気膜構造によるレーダードームの構想が持ち上がり、2年後の1948年にプロトタイプของレーダードームが建設された。実験室での材料実験の結果、被覆材としてクロロプレンが選ばれたが、繊維素材は、ガラス繊維、フォーティザン・レーヨンおよびナイロンの3種が用いられた。このフィールドテストで、フォーティザン・レーヨンは多湿環境での耐候性に問題があった。ガラス繊維は何箇所かの破損はあったものの補修することで使用でき、それほど大きな問題とはならなかった。ナイロン布は、被覆材との接着に若干の難点があったものの、当初懸念された荷重時の変形もそれほど大きくなく、特に大きな問題はなかった。これらの結果から、1950年にニューヨーク州に建設されたレーダードームの膜材料は、クロロプレンを被覆したガラス繊維布が用いられた。この時の被覆材クロロプレンは、耐候劣化が激しく、1年使用後に基布がむき出しになったため、クロロプレンの表面にさらにハイパロンがコーティングされるようになった。

その後、クロロプレンーガラス繊維布のレーダードームは、折たたみ保管中に、鋭角に折り曲がった部分に数多くの破損が生じることが明らかになり、レーダードームには使用されなくなった。それに代わり、初期においては、被覆材との接着に難点のあったナイロン布が改良され、レーダードームの膜材として公認され使用された。一方、民需用としては、1959年頃からエア・ドームが普及してきた。当時はPVCーナイロン布が主流であり、被覆材のクロロプレン、クロロスルフォル化ポリエチレンは特殊用途として用いられていた。繊維布としてのポリエステルは、1960年代初期から研究が行われていたが、本格的に実用化されたのは1970年代初期であった。ポリエステル布の実用化が遅れた理由としては、被覆材との接着に問題があったこともその一つである。その後、ポリエステル布は、ナイロン布に比べて耐候性が良いことなどから、徐々にナイロン布を凌駕し、補強材としての主流となる。一方、ガラス繊維布は、量的には少ないとしてもPVCーガラス繊維布として、特に大型膜構造物に継続的に使われており、1966年のニューヨーク世界博の空気の花、1970年日本万国博のアメリカ館（膜材がアメリカ製）の膜材はその代表的な例である。

ヨーロッパにおける開発経過

ヨーロッパにおける膜構造物の発展は、1950年代の中期からサスペンション膜構造物を数多く発表したFrei Ottoによるところが多い。彼は綿を好んで用いたといわれているが、1950年後期には彼の手によって種々の膜材の使用が試みられている。1957年に建設されたケルン市のラインパークの二つのテントの中の一つは綿布が使用され、他のゲートのテントはガラス繊維布が用いられていたし、同年に行われたモントリオール博の西ドイツ館ではポリエステル布が用いられた。

日本における開発経過

一般的用途として 1960 年代初期において空気膜構造物が注目を集めはじめてきたが、当時補強材は、天然繊維から合成繊維への転換期にあたり、被覆材としてクロロプレンあるいは PVC が主流であり、一方、補強材としてはナイロン布が主流であった。また特殊な用途としてポリエステル布、ガラス布が用いられていた。

日本における近代建築として、膜構造への出発は、欧米に比べて遅れていた。しかし、1970 年の日本万国博において数多くの大型膜構造物の施行実績により、確実に世界の仲間入りをはたすことができた。それ以前では、1951 年の八尾飛行場の飛行機格納庫を初めとし、1950 年代には大型サーカステントがいくつか建設されている。当時の膜材料には、織布のパラフィン防水を施したものが用いられていた。

1965 年に建設された東京スタジアム・アイススケート場の上屋は、PVC-ナイロン布であったが、1966 年に建設されたジャイアントフラワーと呼ばれる野外宴会場には PVC-ビニロン布が使用され、以後この PVC-ビニロン布が膜材料としての主流を占めるようになる。しかし、狐ヶ崎ヤングランドや姉ヶ崎噴水公園などのアイススケート場上屋、日本万国博の富士パビリオンや自動車工業館などの大型膜構造物には、クロロスルホン化ポリエチレン-ビニロン布の膜材料が用いられた

次いで 1973 年日本海博におけるゲート・休息所の膜材料は PVC-ポリエステルの布が用いられ、以後この膜材料が主流となった。

PTFE コーティッドガラス繊維布の登場

膜材料は耐力の向上や耐候性の向上、さらに防火性の向上を目的に研究開発が行われてきたが、1972 年に不燃性で耐久性の優れた新しい膜材料がアメリカのデュポン社により開発された。PTFE コーティッドガラス繊維布の登場である。

この膜材料は基布としては不燃性となるガラス繊維布を用い、コーティング材として新たに四フッ化エチレン樹脂（テフロン）をはじめで使用した。この膜材料は、これまでの膜材料と比べると、防火性、耐久性、防汚性において格段に優れていた。これにより、これまでは万博等の期間限定の建築物に用いられることが多かった膜構造物が、恒久的な建築物にも使用されるようになった。この膜材料を用いた最初の膜構造物は、1973 年のラバーン大学体育館（図 1.33）である。以来、数多くの恒久膜構造物が建設されるようになり、以後、恒久的な膜構造物にはこの膜材料が主に使用されるようになった。

1.4.2 膜材料の構成及び種類

膜構造建築物に用いられる膜材料は、化学でいう膜とはかなり異なった分野・材料であり、使用目的も異なっている。化学では分離膜、透過膜など、ごく薄い材料で、種々の機能を盛り込んだものであるが、建築構造材料としての膜材料は、建築屋根面を構成し、建築に要求される数々の性能を満足するもので、強度、耐久性、耐火性などが特に要求される。

膜材料は、「特定膜構造建築物基準」において次の三種に分類される。

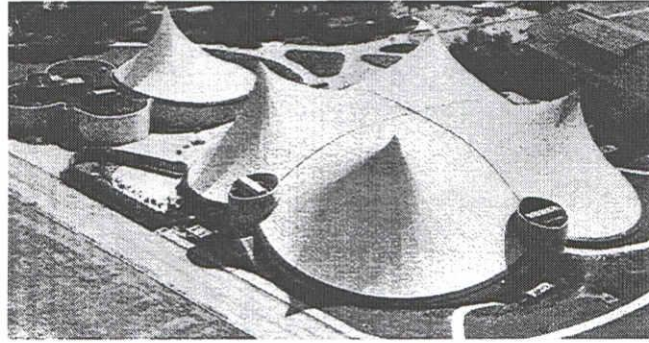


図 1.33: ラバーン大学体育館（アメリカ、1973年）

膜材料の特徴

強度	1 cm 幅で、約 150 kg。これ以上の強度が必要となる場合は、ワイヤロープ補強を行う。
耐久性	素材やメーカーによって異なるが、ケムファブ社のテフロン膜「シィヤフィル 2」の耐用年数は 20 年以上と言われている。この材料は耐熱、対候、耐薬品、強度そして不燃など総合的な優れた性質を持っている。
透光性	膜材料に主に使われる四フッ化エチレン樹脂（テフロン樹脂膜）は、透光率 10 ~ 13 % でグレア（キラキラした光）も発生せず、透光性の良い拡散光が得られる。内部はかなり明るく、日中の照明はほとんど必要ない。
防汚性	膜材のコーティング材として開発されたテフロン樹脂は、撥水性があり非粘着性に優れている。
熱特性	太陽光エネルギーの反射率は 73 % で太陽熱を 3/4 ほどカットする材料で、熱吸収も少なく、夏の強い日射の影響も受け難い。-73 °C から 232 °C までの温度変化にも変性しない。
不燃性	膜材はガラス繊維とテフロン樹脂から構成されて、燃えることがないので、不燃材の認定を受けている。また、(社)日本膜構造協会が認定する A 種膜材は、建築基準法の不燃同等とみなされている。
音響特性	屋根形状により、ある程度のエコーが生じるが、スポーツ施設や商業施設などに利用する場合は支障はない。音響特性を良くする場合は、二重膜構造にすると吸音率が上がる。
経済性	薄い布材が屋根葺材と構造を兼ねていること、軽く耐候性のあること、透光性が良く日中の照明が必要ないこと、などから複合新素材「A 種膜材」を使用したとしても総合的に経済的といえる。
施工性	膜屋根は大きな布面に加工しやすく、膜材を定着する場所に作業用の足場（高所作業車でもよい）があれば施工できるので、仮設費用の低減が計れる。また、膜の取付けはクランプベースに膜周囲の定着部を固定し、カバーするだけなので、在来の屋根工法に比べ工期の短縮ができる。
デザイン性	他に類を見ない透光性のある軽くやわらかい素材から、自由な造形の可能性が期待できる。とりわけ意匠と構造の両面の調和が、かつて歴史になかった新しい空間を創造する。

膜材料 A 種	<p>ガラス繊維織物に四フッ化エチレン樹脂を主成分とする樹脂（四フッ化エチレン樹脂の含有率が 90% 以上であるものに限る）をコーティングしたもので次の 1 から 3 までに適合するもの。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ガラス繊維織物の重量が 150 g/m^2 以上であること。 2. コーティング材の重量が 400 g/m^2 以上 1100 g/m^2 以下であること。 3. 膜材料の厚さが 0.5 mm 以上であること。
膜材料 B 種	<p>ガラス繊維織物に塩化ビニル樹脂、クロロプレンゴム、クロロスルホン化ポリエチレンゴム、その他これらに類するものをコーティングしたもの（表面にフッ素樹脂フィルムを貼り合わせたものを含む。）で次の 1 から 4 までに適合するもの。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ガラス繊維織物の重量が 150 g/m^2 以上であること。 2. コーティング材の重量が 400 g/m^2 以上 1100 g/m^2 以下であること。 3. 膜材料の厚さが 0.5 mm 以上であること。 4. 難燃処理をほどこしたものであること。
膜材料 C 種	<p>ポリアミド系、ポリアラミド系、ポリエステル系またはポリビニルアルコール系繊維織物に塩化ビニル樹脂、クロロプレンゴム、クロロスルホン化ポリエチレンゴム、その他これらに類するものをコーティングしたもの（表面にフッ素樹脂フィルムを貼り合わせたものを含む。）で次の 1 から 4 までに適合するもの。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ガラス繊維織物の重量が 100 g/m^2 以上であること。 2. コーティング材の重量が 400 g/m^2 以上 1100 g/m^2 以下であること。 3. 膜材料の厚さが 0.5 mm 以上であること。 4. 日本工業規格 JIS A 1322（建築用薄物材の難燃性試験方法）に規定する防火二級試験に合格するものであること。

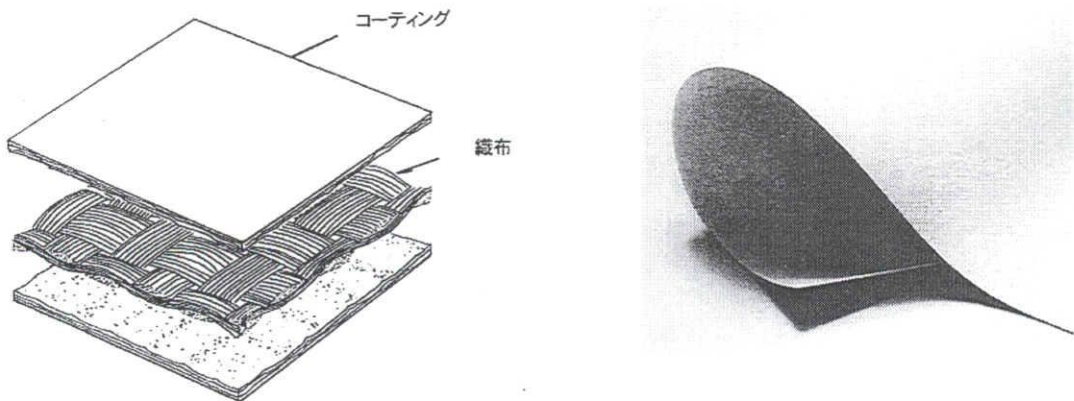


図 1.34: A 種膜材料とその構成

その他、設計上、特に構造解析を行う上で問題となる特徴として次のようなものがある。

直交異方性	膜材料を縦糸方向に引張した際と横糸方向に引張した際の材料の力学的挙動が異なる。
材料非線形性	材料の応力-ひずみ曲線が非線形性を示す。
粘弾性	時間と共に応力が減少する応力緩和、ひずみが増大するクリープが起こる。

1.5 膜構造物の施工および維持管理

1.5.1 膜構造物の設計のポイント

これまで述べてきた膜材料の特性をふまえた上で、膜構造物の設計におけるポイントとして次のようなものがあげられる。

内部環境制御

膜材は通常 1 mm 未満で、この薄さゆえに軽量性や透光性などのメリットが生み出されているが、反面これによって犠牲となる性能も少なくない。そのひとつが断熱性であり、内部が空調されていたり、用途が温水プール、土のグラウンドなどの場合は、ほぼ確実に膜面への結露が発生すると考えなければならない。対策としては、ダクトから空調空気を吹き付けたり、二重膜とし内部に空気を通すなどの方法が取られている。鉄骨造の骨組膜構造とする場合には、膜面だけでなく鉄骨にも結露が発生するから、結露水の処理と錆の防止に対策を打ちたい。また吸音性、遮音性ともに低く、環境上は課題の多い素材である。内張りの材質や形状によりある程度まで制御が可能になっているが、コンサートホールなど、音環境上シビアな条件への使用には、今後の創意工夫が必要である。

外力

厳しい風、積雪条件下に置かれるわが国で、安全性を確保しながら、なおかつ膜構造本来の魅力である軽快性をたたえた建物を実現するのは容易ではない。サスペンション膜構造の事例が多い諸外国に比べ、構造解析が容易で安全を確かめやすい骨組膜構造が広く用いられている現状にも、わが国の設計者が置かれた困難な状況が表れている。技術の粋とも呼べる膜屋根が、一面では気候風土と根強く結びついたある種の土着的な存在であることがわかって興味深い。

多雪地帯に建設される膜屋根の場合、四フッ化エチレン樹脂膜の滑雪性や設備的な融雪システムによって根拠付けを行い、積雪荷重の減免を図った事例も多い。設計者のアイデアとポリシーによって結果が劇的に変化するところが、膜屋根設計の醍醐味とも言えよう。

メンテナンス性

膜材自身の耐候性や強度は、新素材の開発などにより恒久建築への使用にもほぼ耐えうるのところまで進歩して来ている。ただ、飛来物等による裂けやピンホールの発生など、材の薄さゆえの不安感はぬぐい去れない。また膜は、基本的に面内への張力の導入によって初めて安定した形態を保っており、経年変化による膜の伸びは張力を再導入することによって解消する必要がある。

このため、メンテナンスを考慮したディテールと寄付きルートの確保が求められるが、支持架構の軽微さが他の構法と比較したときの膜構造最大のメリットでもあり、キャットウォーク等の恒設的施設の設置は実際のところ困難が多い。恒久、仮設いずれの形態を取るにせよ、設計当初からメンテナンシビリティの検討が必要である。

ディテール

屋根の膜材は、輸送可能なサイズのピースとして分割された形で工場生産される。この際、膜材同士の間接合は、樹脂の熱溶解性を生かして熱溶着とするのが一般的である。ピースは施工現場で屋根として統合されるが、端部、ジョイントなど取合いのディテールには、止水と張力伝達という二つの機能の巧みな融合が求められる。特に膜端部の固定ディテールの場合、張力導入のシステムと、止水ディテールが一所に共存するため複雑な機構となりがちだが、軒先の人の目が止まる場所であることが多いだけにスマートな処理としたい。

ジョイント部の止水処理には成形ゴムガスケットを用いる場合が多いが、やや無骨な表情となりがちで、これを嫌って屋根と同材の膜テープを溶着して止水し、一体感を損なわないように配慮した事例も見られる。

1.5.2 膜構造物の事故

多くの膜構造が建設される中、膜構造はいくつかの事故を経験している。

強風による膜構造開閉システムの事故	風荷重の過小評価、膜材料の安全率の設定の低さ、膜の適正な裁断縫製加工がなされなかったなどの理由により、強風によって膜面が破断し、大きな引裂で屋根面が壊れる。
集中豪雨によるケーブル複合構造の事故	平面勾配の低い膜パネルを使ったため、集中豪雨によるボンディングで膜面を大きく破損。
強風によるエアードームの事故	強風時に膜面が大きく揺れて剛体と接触、膜面が破損して内圧を維持できなくなり、屋根面は大きくばたつき多くのパネルを破損。
積雪によるエアードームの事故	積雪時の内圧管理の失敗により、頂部にボンディングを起こし、回復できずそのまま崩壊。

その他にも、小規模な構造においての事故はさらに多く発生している。これらの事故の中で、特にエアードームにおける事故は内圧管理の失敗による場合が多い。その具体的な事例として、1999年のパー

クドーム熊本の屋根破損事故がある。

パークドーム熊本の構造形式は、ケーブル補強二重空気膜構造で、二重空気膜による明るい内部空間が特徴の市民型ドームである。1999年9月の台風18号では、その二重空気膜の屋根が破損した。台風による窓の開放や停電などで、内圧が適正に維持されなかったことが原因とされている。ドーム周囲に沿った風の負圧と、二重空気膜の振動による室内側の圧力の変動などが複雑に作用して、窓に異常な振動が加わったために鍵が外れ大型回転窓が開き、室内に風が入り込んだ。そのため、膜は室内外の両方から風圧を受け、さらに停電によって二重膜内に空気を送り込むためのファンが止まり、膜の内圧は下がっていった。二重膜内と外との差圧がなくなると、膜は安定性を失って風でばたつき、破損はさらに広がった。

空気膜構造は、内圧管理が十分に行われてはじめて成立する構造である。そのため、常に適正な内圧を保持するためには、高度な維持管理体制が不可欠である。サスペンション膜構造や骨組膜構造においては、膜面への張力導入とその再導入システムが不可欠である。このように、管理が構造の安全に大きくかわるような構造はこれまでなかった。

これまでの伝統的な構造に比べ、膜構造はまだあらゆる事故ケースに遭遇していない。このため設計上、十分な配慮を必要としている。経済性を優先した過小な荷重評価、材料安全率の過小評価、不十分な構造特性の認識、膜材料の無理な使い方、膜面の接合・定着の不適正さなどがまだ目立つ。そして、膜材料を構造的に安易に使うことが、事故原因につながる。膜構造を社会の中で定着させていくためには、伝統的なほかの構造に比べても劣らない、信頼性のある建築としていかなければならない。

1.6 研究の背景と目的

膜構造は現在世界的に使われるようになった。アメリカでの大規模スタジアム屋根、ショッピングモール屋根、空港施設ホール全体を覆う屋根、ヨーロッパでのサッカー場のスタンド屋根、ロンドンの多目的施設は10万 m^2 にも及ぶ。香港スタジアム、上海スタジアム、KLスタジアムなど、アジア各国でもこの膜構造は大規模スポーツ施設に積極的に用いられている。小規模空間では、これに準じた使用用途で、既に数え切れない物件が建設されるようになっている。

これを支える膜材料は現在、四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布（膜材料A種）である。膜材料A種の力学的特性として、直交異方性、材料非線形性、粘弾性があるが、これはガラス繊維布が縦糸と横糸を織って織布としたものであること、また織布にコーティングを施していることから引き起こされていると考えられている。そのために膜材料は複雑な力学性状を示す。

膜構造が施工される際、膜面には初期張力が導入されるが、この段階では膜の巻き取り器具などの反力により、実際に導入している張力の大きさがある程度把握することはできる。しかし膜材料は粘弾性の特性から時間の経過とともにクリープや応力緩和が起こり、初期に導入された張力を次第に失う性質を持っているため、ひとたび竣工してしまうとこれを定量的につかむことは非常に困難である。膜構造の維持管理という観点から、竣工後の膜構造物において、現在のその膜に生じている膜張力の大きさを知ることは大変重要であり、膜構造の設計や施工の現場ではこれを可能とする技術に大きな期待が寄せられている。

膜張力の測定に関する技術は、これまでにいくつか試みが成されてきており、実際に現場で利用され

ているものもある。しかし、膜張力の定量的な把握を行うにはほど遠い精度であり、ほとんど役にたっていないのが現状である。さらに、膜材料の直交異方性の特性より、膜面の縦糸方向と横糸方向には別々の張力が導入されるが、これを別々に測定することは従来の技術では不可能であった。

そこで本研究では、音波を用いた膜張力測定技術を提案する。その原理は膜面を可聴域の振動数を持つ音波で加振し、膜面の持つ固有振動数近傍で起こる共振時の振動数と波長を測定することで、間接的に膜面に作用している張力を測定するものである。理論的には、直交二方向の張力を別々に測定できる可能性があり、これが実現できれば膜構造物の設計施工の技術分野に対する貢献は非常に大きい。本論では、上述の膜張力測定の理論および装置の開発を目的とした実験からその可能性を検討する。

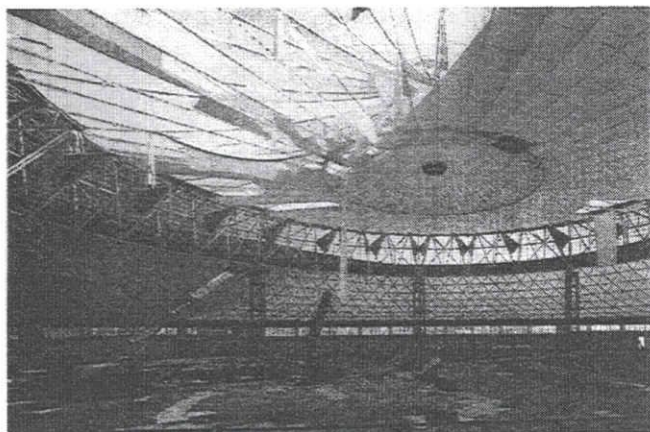


図 1.35: 台風で被災したパークドーム熊本

第2章 既往の研究

2.1 既往の膜張力測定技術

その 1

出願番号 実願昭 61-92648

考案者 谷沢一雄

出願人 三菱電機株式会社

膜面を吸引することで固定し、固定された膜面に衝撃力を加えて膜面を振動させ、その時の膜面の振動加速度及び衝撃力の大きさから膜張力を推定することを特徴とする膜張力測定装置。その構成として、膜面の保持装置、インパクトハンマーによる打撃装置、ロードセル及び加速度計の測定部、解析装置並びに出力表示装置からなる。

図 2.1 が装置の概要図である。保持装置は、一端に矩形開口部を有し、この矩形開口部を膜の一部に押しあて吸引する事により膜の一部を矩形に保持する。インパクトハンマーは、矩形に保持された膜に振動衝撃を与え、ロードセルによりその時膜に負荷された衝撃力を測定し、加速度計により膜の振動加速度を測定する。ロードセル及び加速度計からの電気信号は、解析装置により処理され膜の張力を算出する。解析装置による出力は表示装置により表示される。

その 2

出願番号 特願昭 62-66487

考案者 渡辺博司、田原文章、岡村 潔、真柄栄毅

出願人 株式会社竹中工務店

単位長さ当たりの密度が一定の弦を横波が伝播する速度と、密度並びに弦の張力との相関関係から、直交する糸の方向を各々 x 方向、 y 方向とすると膜材料は x, y 方向に直交異方性を持つ平面とみなし、かつ、膜面張力によって生ずる歪みについての式から導いた x, y 方向の横波の伝播速度と膜面張力との関係より、 x, y 方向の横波の伝播速度を測定することによって x, y 方向の張力を求める膜面二軸張力測定方法。

図 2.2 は装置の概要図である。フレームは筒状のセンターボディを貫通立設のジョイントブロックに直交アームを螺着して構成されている。ジョイントブロックの偏芯箇所より立設のマグネットスタンド

の上端からセンターに向けて突き出した持ち出し腕にはマグネットが取り付けられている。マグネット下面にはセンターボディに挿通のロッドの上端の吸着円板がマグネットに装備の押鉛の操作で離着する。ロッドの下端には加速度計が取り付けられている。

膜面に加速度計を押当てながら押鉛の操作にてマグネットに吸着のロッドを離反落下させ、ロッドにより膜面を加撃し、横波を生じさせる。記録部については、加速度計からの電気的信号を増幅するアンプとそれを記録するレコーダからなる。

その 3

出願番号 特願平 1-233575

考案者 柚場 進、石津信彦、多賀 正

出願人 太陽工業株式会社

膜体を所定の寸法加圧したときの膜体からの反力を検出し、その検出信号から膜体の張力を算出する張力測定装置である。膜体の加圧は圧接体で行う。この圧接体を複数個用いてそれぞれの圧接体で加圧を行う、および圧接体を膜面上で 90° 回転させてそれぞれの姿勢で加圧を行うことにより、直交二方向の張力を各々測定することを目的とする

図 2.3 は平面図、図 2.4 は断面図である。測定装置は膜体上に載置可能な平面視長方形の基台を有し、この基台の各隅部にはそれぞれ接触スイッチが設けられている。また、これら接触スイッチで囲まれた中央に上下摺動自在に支持棒が設けられ、この支持棒は軸心回りに回転できないようになっている。支持棒の下端には、圧接体取り付けられている。この圧接体を膜体の厚さ方向に向かって所定寸法押し込んだとき、各接触スイッチが膜体の外面に接触して、これが表示部に表示されるようになっている。このとき膜体から圧接体を介し支持棒に与えられる反力がロードセルにより検出され、その検出信号が演算手段に入力される。この圧接体を別の形状のものに取り替えて、同様の手順で反力を検出し、それぞれの反力から x, y それぞれの方向の張力を算出する。また、1 種類の圧接体を 90° 回転させ、それぞれの方向で反力の検出を行うことで、張力を算出することも可能である。

その 4

出願番号 特願平 3-316223

考案者 坪田張二、佐々木直也

出願人 鹿島建設株式会社

減圧に伴う膜面の変位を計測することにより膜張力を測定する簡易膜張力測定装置。その構成は、剛性の高い筒状体、筒状体内部を減圧する減圧装置および膜変位計測装置を備える。

図 2.5 はこの装置の断面図である。筒状体の側壁及び底部は、好ましくは気密な剛性の高い材料から構成される。筒状体の底部及びそれに平行な平面での断面は、一般には円形であるが、楕円や多角形をとることもできる。筒状体の先端部は、その側面から見た形状が一般には直線であるが、膜パネル表面

の形態に応じた曲線であることもできる。また、好ましくはパッキングを先端部に取り付けて膜材料表面との当接時の気密性を確保することが望ましい。減圧装置は一般に筒状体内の空気を排気できる真空ポンプからなる。減圧装置による減圧により膜材料の筒状体内部と膜材料の反対側との圧力差が生じ、その結果膜材料の筒状体内の部分が筒状体底部に向かって突出することによる変位を計測する。図 2.6 が減圧に伴う膜面の変位状態を示す図である。膜変位計測装置は、筒状体内の減圧に伴う膜面の変位を好ましくは無接触的に計測する。例えば、レーザ変位計のようなものを設置することが好ましい。膜変位の計測は膜面の少なくとも 1 箇所以上で行うが、計測点を膜材料の縦糸方向及び横糸方向に適當数設けることにより、膜材料のたて方向と横方向との張力を個別に測定することもできる。膜変位計測装置の膜張力計算器は、膜変位計測器からの膜面変位データをうけ、それをマイクロコンピュータ等により膜張力に変換する。

その 5

出願番号 特願平 4-9222

考案者 佐々木直也、坪田張二

出願人 鹿島建設株式会社

膜面の押込み力、押込み長さおよび膜変位から膜張力を測定する簡易膜張力装置。その構成として、二重壁筒状体、筒状体の二重壁内を減圧する減圧装置、筒状体内壁内に位置する膜面をそれに対して直角に押し込んだときの押込み力と押込み長さを計測する装置（以下、押込み力計測装置）および膜面に対して直角な膜変位を計測する装置（以下、膜変位計測装置）を備えるとともに、押込み力、押込み長さおよび膜変位から膜張力を計算する膜張力計算装置を備える。

図 2.7 はこの装置の概要図、図 2.8 は断面図である。二重壁筒状体は側壁部および天板部からなり、側壁部の少なくとも膜面と当接する領域は二重壁となっており、減圧装置に接続されている。二重壁筒状体はその内部を減圧することにより膜張力測定時に、筒状体を膜材料に対して固定する作用をする。押込み力計測装置は、駆動部および膜面押込み具を備えている。駆動部は膜面押込み具を介して膜面をそれに対して直角に押し込む作用を行うものであり、筒状体の天板部上に配置され、一般に電動動力計を構成して押込み力を計測する。膜変位計測装置は、膜面押込み具による押し込みによって、二重壁筒状体内壁内に位置する膜面のそれに直角な変位を計測する。例えば、レーザ変位計のように無接触的に計測するものを設置することが好ましい。一般に計測点を、膜材料の縦糸方向、横糸方向それぞれに 2ヶ所以上設置することが好ましく、これにより膜材料の縦糸方向と横糸方向との膜張力それぞれを測定することが可能となる。膜張力計算装置は、少なくとも膜変位計測装置に電氣的に接続されて膜変位計測装置からの膜面変位データをうけ、さらに押込み力および押込み長さのデータをうけて、マイクロコンピュータ等により膜張力を計算する。

その 6

出願番号 特願平 4-9223

考案者 佐々木直也、坪田張二

出願人 鹿島建設株式会社

膜面の引込み力、引込み長さおよび膜変位から膜張力を測定する簡易膜張力装置。その構成として、枠体、枠体内の膜面をそれに対して直角に引き込んだときの引込み力と引込み長さを計測する装置（以下、引込み力計測装置）および膜面に対して直角な膜変位を計測する装置（以下、膜変位計測装置）を備えるとともに、引込み力、引込み長さおよび膜変位から膜張力を計算する膜張力計算装置を備える。

図 2.9 はこの装置の概要図である。枠体は側部および天板からなり、側部先端部は対照的配置をなし膜張力測定がより簡便になる点で、一般には円形をなしているのが好ましい。また側部先端部は、パッキング材を取り付けて先端部全体が膜材料表面と均一に当接し、膜面引込み時にこの位置においての膜面と枠体がすべらないようにすることが好ましい。引込み力計測装置は、駆動部、膜面係止部および駆動部と膜面係止部との連結具を備えている。駆動部は連結具を介して膜面をその係止部において引込む作用を行うものであり、枠体の天板部上に配置され、一般に電動動力計により膜面を引込み、その引込み力を計測できるようになっている。膜変位計測装置は、枠体内の膜面のそれに直角な変位を好ましくは無接触的に計測する。例えば、レーザ変位計のようなものを設置することが好ましい。一般に計測点を、膜材料の縦糸方向、横糸方向それぞれに 2ヶ所以上設置することが好ましく、これにより膜材料の縦糸方向と横糸方向との膜張力それぞれを測定することが可能となる。膜張力計算装置は、少なくとも膜変位計測装置に電氣的に接続されて膜変位計測装置からの膜面変位データをうけ、さらに引込み力および引込み長さのデータをうけて、マイクロコンピュータ等により膜張力を計算する。

その 7

出願番号 実願平 4-15935

考案者 谷沢一雄

出願人 三菱電機株式会社

膜を円形状に拘束し、膜の中心に取り付けたパッドを振動させ、その振動変位を計測し、周波数解析により共振周波数を求め、この値から膜張力を求める装置。膜を主要構造物として使う立体膜構造物、例えば宇宙用メッシュ展開アンテナ、フレキシブルパドル等の膜張力を正確かつ簡便に測定する。

図 2.10 はこの装置の概要図である。装置の構成として、内部に複数個の円孔を有す磁性体より成る上部円環と、内部に埋設された磁石を有し、上部円環と同じ内径を有す下部円環と、下部円環の下面に取り付けられた保持プレートと、回転ジョイントを内部に有し一端を保持プレート下部に取り付けられた保持ロッドと、保持ロッドの他の一端に取り付けられたマグネットと、上部円環及び下部円環に挟まれる膜の上面に取り付けられた円板上のパッドと、パッドを加振する加振装置と、パッドの位置を計測するレーザ変位計と周波数解析装置を備える。

その 8

出願番号 特願平 4-109379

考案者 板根 武、田中耕太郎

出願人 小川テント株式会社

タッピング部材に圧力センサを設けて、膜面にタッピング部材を衝突させる。このときタッピング部材に生じる衝撃荷重の動的変化から膜張力を推定する、装置規模の小さな膜張力測定装置。

図 2.11 は概要図である。この装置で用いるタッピング式剥離検出装置は従来周知の装置であって、片手で持ち運べる程度に軽量かつ小型である。このタッピング部材を膜から所定の距離だけ離間した初期位置に停止させて保持し、タッピング部材を膜面に向けて出射し膜に衝突させる。圧力センサの出力は、タッピング部材が膜に接触すると立ち上がり、タッピング部材が最大圧縮負荷状態となるまで増加する。そして圧力センサの出力は最大圧縮負荷状態ののち減少してゆき、やがて零となる。圧力センサの出力波形から、タッピング部材に生じた衝撃荷重の動的変化（時間的変化）を知ることができる。このタッピング部材を、大きさが既知の張力を導入してある予備試験膜に衝突させ、衝撃荷重の動的変化を特徴付ける物理的な特徴量を検出し、既知の張力の大きさと特徴量との相関を予め調べておく。測定対象膜に導入されている未知の大きさの張力を測定する場合には、測定対象膜にタッピング部材を衝突させて特徴量を検出し、相関に基づいて、この特徴量に対応する既知の張力の大きさを測定対象膜の張力の大きさとして検出する。

その 9

出願番号 特願平 4-182331

考案者 佐々木直也

出願人 鹿島建設株式会社

膜面を打撃することによる膜振動またはそれにより発生する音を計測することにより、膜張力を算出する簡易膜張力測定装置。その構成は、杵体、膜面への打撃装置、膜振動検出装置または集音装置、並びに演算器からなる。

図 2.12 がこの装置の断面図である。杵体は少なくとも側部を有するとともに、好ましくは頂部を有し、その側部先端部で膜面に接触して打撃装置による膜振動の節を形成するものである。杵体側部先端部は、一般には連続した円形をなしているのが好ましいが、楕円や四角形、六角形等の多角形等とすることもできる。杵体側部先端部は、その側面から見た形状が一般には直線であるが、膜パネル表面の曲率に応じた曲線であることもでき、その先端部には弾性パッキング材を取り付けて、膜面との密着性を保つことが望ましい。打撃装置は杵体内の膜面を叩くことにより、膜に振動を生起させるものである。その打撃方式としては、ハンマー式、スプリング式等の方法を採用し、その駆動方式は、機械式、電気式等の方法を採用する。この打撃装置により、膜は杵体側部先端部との接触点を節とする振動を生じ、またそれにより杵体内部の空気が振動して音を発する。発生した膜振動および音は、膜振動検出装置または集音器により検出される。膜振動検出装置としては、振動ピックアップ方式のほか、光学方式等の無接触式を使用することができ、集音装置としてはマイクロフォン等を使用することができる。膜振動検出装置または集音器により検出され、取り込まれた膜振動データは、演算器により分析され、膜張力が算出される。膜張力の算出には、膜振動数（即ち音の周波数）のほか、膜材料の振動数との相関、杵体先端部の内径または幅等も変数となる。

その 10

出願番号 特願平 6-149932

考案者 安藤和秀、三次 仁

出願人 日本電信電話株式会社

膜面の少なくとも1箇所既知の「静止集中質量」を設けた状態で膜面を振動させ、その単位時間当たりの振動数を測定してその最小固有振動数から膜面の張られている張力を演算に求めるものである。この測定方法では特に、通信用などの衛星に搭載される高精度を要求される大型アンテナの反射鏡面の測定に利用するに適するとされている。

図 2.13 は具体的な測定方法の図である。この測定方法では、剛性を有する支持部材として4個のスライダを用い、この4個のスライダにより膜面を4辺で挟み込み、スライダにプーリを通して重りを吊すことにより膜面に一定の張力を加える。スライダと対応するプーリとの間にはロードセルが設けられ、スライダに加わる引っ張り張力をモニタする。すなわち、ロードセルは張力に対応する電圧を出力するので、その出力を増幅器により増幅し、電圧計によりその電圧値を読み取る。

膜面の振動数は、レーザ光源およびセンサ、レーザバイプロメータおよび FFT アナライザからなるレーザドップラ振動計により計測する。すなわち、レーザ光源およびセンサからレーザ光を出力し、それをミラーを経由して膜面に貼り付けられたターゲットシールに入射する。このとき、このターゲットシールで反射した光が、再びミラーを経由してレーザ光源およびセンサに戻る。レーザ光源およびセンサでは、自分の出力した光と戻ってきた光とを干渉させてビート信号を検出する。この検出信号をレーザバイプロメータにより処理することで、ターゲットシールの加速度などの運動データを知ることができる。さらに、この運動データを FFT アナライザで高速フーリエ変換することにより、膜面の振動数が求められる。

2.2 既存技術のまとめ及び問題点

これまでに説明してきた膜張力測定技術を表にまとめると次のようになる。

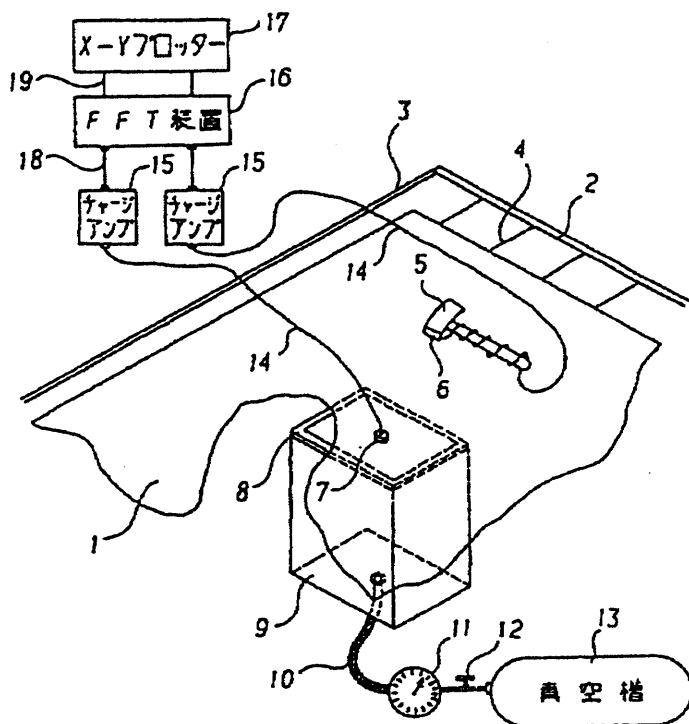
	出願番号	考案者	測定方法
1	実願昭 61-92648	谷沢一雄	膜面を吸引して固定し、膜面に衝撃力を加えて膜面を振動させ、その時の膜面の振動加速度及び衝撃力の大きさから膜張力を求める。
2	実願昭 62-66487	渡辺博司 田原文章 岡村 潔 真柄栄毅	膜面を伝播する横波の速度を加速時計で測定し、膜材料の密度並びに張力との関係より張力を求める。
3	特願平 1-233575	柚場 進 石津信彦 多賀 正	圧接体を膜面に所定寸法加圧したときの膜面から圧接体に与えられる反力を検出し、その結果から張力を求める。
4	特願平 3-316223	坪田張二 佐々木直也	膜面に密着した筒状体内を減圧して、そのときの減圧にともなう膜面の変位の大きさから膜張力を求める。
5	特願平 4-9222	佐々木直也 坪田張二	二重壁円状体の二重壁内を減圧して、装置を膜面に固定して膜面を押込み、その押込み力、押込み長さ及び膜面の変位から張力を求める。
6	特願平 4-9223	佐々木直也 坪田張二	枠体内の膜面を垂直に引込み、その引込み力、引込み長さおよび膜面の変位から膜張力を求める。
7	実願平 4-15935	谷沢一雄	磁石を用いて膜面を2つの円環で固定し、その中心にパッドを取付け、加振装置で膜面を振動させ、その振動変位を計測し、共振周波数を求め、膜張力を求める。
8	特願平 4-109379	板根 武 田中耕太郎	圧力センサを設けたタッピング部材を膜面に衝突させ、そのときのタッピング部材に生じる衝撃荷重の動的変化から膜張力を求める。
9	特願平 4-182331	佐々木直也	膜面を打撃装置で打撃し、そのときの膜振動数または音の周波数を計測することにより膜張力を求める。
10	特願平 6-149932	安藤和秀 三次 仁	膜面に「静止集中質量」を設けた状態で振動させ、その単位時間当たりの振動数をレーザドップラ振動計で測定し、その最小固有振動数から張力を求める。

これらが膜測定技術で、特許化されているものであるが、その測定方法については大きく2種類に分けられる。一つは、膜面に何らかの外力を加えるなどにより膜面を変形させ、その時の膜面の反力や変

位を計測することから膜張力を測定するもので、3, 4, 5, 6, 8の技術がこれにあたる。もう一つは、膜面を打撃することで振動させ、その振動数や振動変位、振動波の速度などを計測することから膜張力を測定するもので、1, 2, 7, 9, 10の技術がこれにあたる。

これら種々の技術が考案され特許化されているが、実際に現場で利用されているものは少なく、また製品化されているものでも精度は低く実用的なものではないというのが現状である。考えられる問題点として、一つ目の膜面を変形させて膜面の反力や変位を測定する方法においては、膜面に変位を与えるために、膜面の張力が本来の値から変動する可能性がある。二つ目の膜面を打撃により振動させる方法は、膜面を微小振動させ、その振動モードが正しくとらえられれば、膜面に実際に導入されている張力の推定は可能であるとされるが、膜面の減衰が大きいため、打撃による自由振動では膜の振動モードを正しくとらえることが困難である。中には、膜面に付加質量を加えて膜面の減衰を低減した方法もあるが、膜張力の算定の際に付加質量の影響の補正をしなければならず、さらに精度を低くする可能性がある。また、全般に言えることだが、装置が大きくなり測定の際に面倒であったり、測定器具が実際の膜面に取り付けられないなど、現場で簡易に測定できるものではないことがわかる。

本研究で提案する方法は、膜面を振動させるという点では、二つ目の方法と同じであると言える。しかし、従来の方法と大きく違う点は、音波による膜面の定常振動により測定を行うことである。従来の方法では、正しくとらえられなかった振動モードを容易に特定することができ、高精度な膜張力測定を行える可能性を秘めている。また、装置の大きさも片手で持ち運びできるほどの大きさにすることができ、現場での利用においても労力を必要としない簡易な測定が可能である。



1. 膜
2. 主フレーム
3. 桁フレーム
4. 張力調整索
5. インパクトハンマー
6. ロードセル
7. 加速度計
8. シリコンラバー
9. 中空ボックス
10. ホース
11. 圧力計
12. 調整弁
13. 真空槽
14. ローノイズケーブル
15. チャージアンプ
16. FFT 装置
17. X-Y プロッター
18. 接続ケーブル
19. 接続ケーブル

図 2.1: 概要図

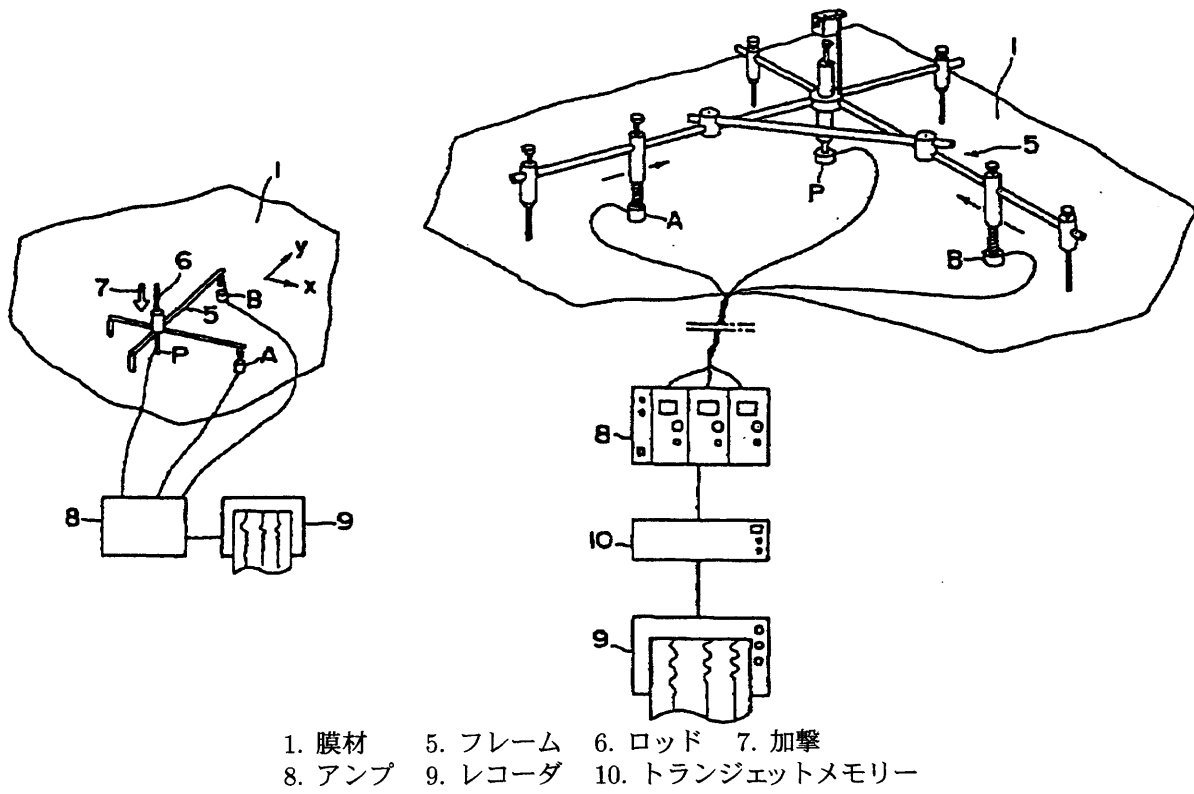
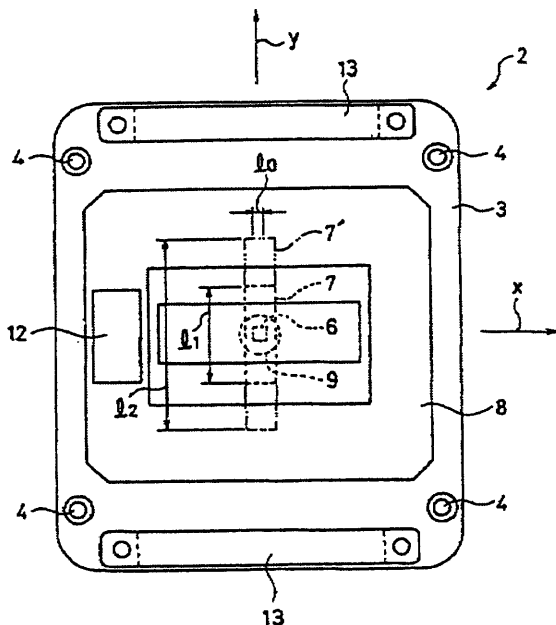


図 2.2: 概要図



- | | | | |
|--------------|---------|----------|-----------|
| 1. 膜体 | 2. 測定装置 | 3. 基台 | 4. 接触スイッチ |
| 6. 支持棒 | 7. 圧接体 | 8. ケーシング | 9. ロードセル |
| 12. デジタル式表示部 | 13. 把手 | | |

図 2.3: 平面図

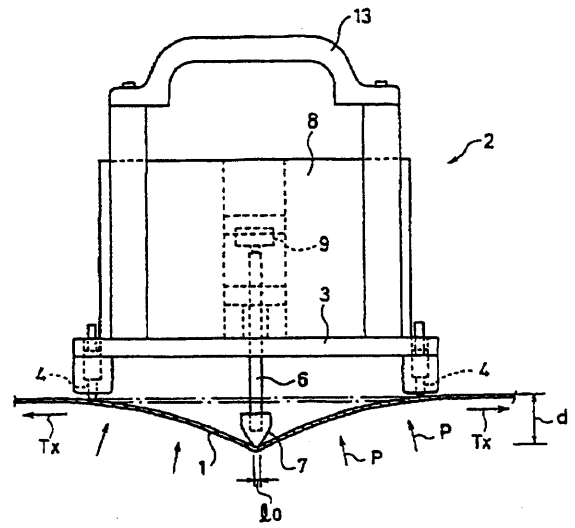
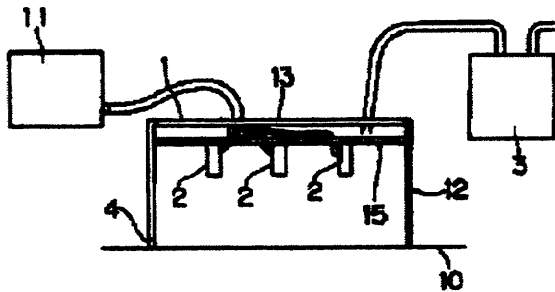


図 2.4: 断面図



- | | |
|---------------|------------|
| 1. 筒状体 | 2. レーザ変位計 |
| 3. 真空ポンプ | 4. パッキング材 |
| 10. 膜材料 | 11. 膜張力計算器 |
| 12. 筒状体側壁 | 13. 筒状体底部 |
| 15. レーザ変位計設置部 | |

図 2.5: 断面図

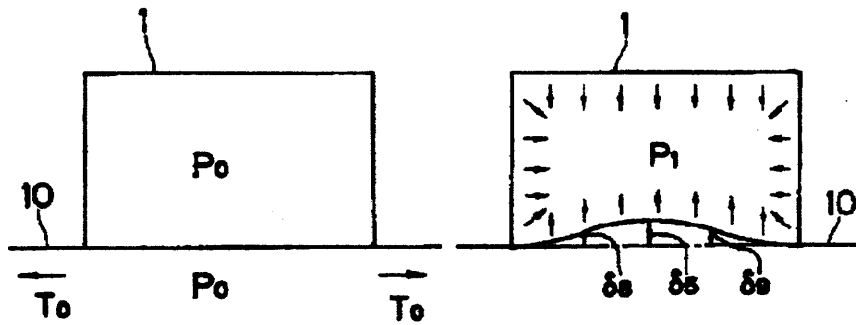
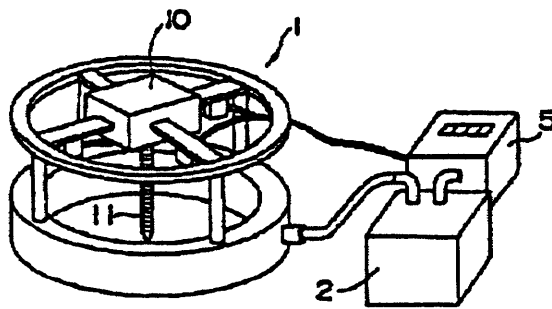
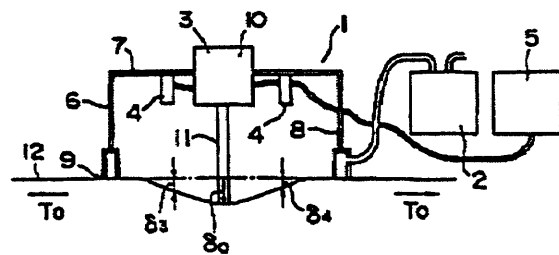


図 2.6: 減圧に伴う膜面の変位状態



- | | |
|--------------|------------|
| 1. 二重壁筒状体 | 2. 減圧装置 |
| 4. レーザ変位計 | 5. 膜張力計算装置 |
| 7. 二重壁筒状体天板部 | 8. 二重壁部 |
| 10. 駆動部 | 11. 押し込み具 |

図 2.7: 概要図



- | |
|------------------|
| 3. 押し込み力測定装置 |
| 6. 二重壁筒状体側壁部 |
| 9. 二重壁筒状体側壁部の先端部 |
| 12. 膜材料 |

図 2.8: 断面図

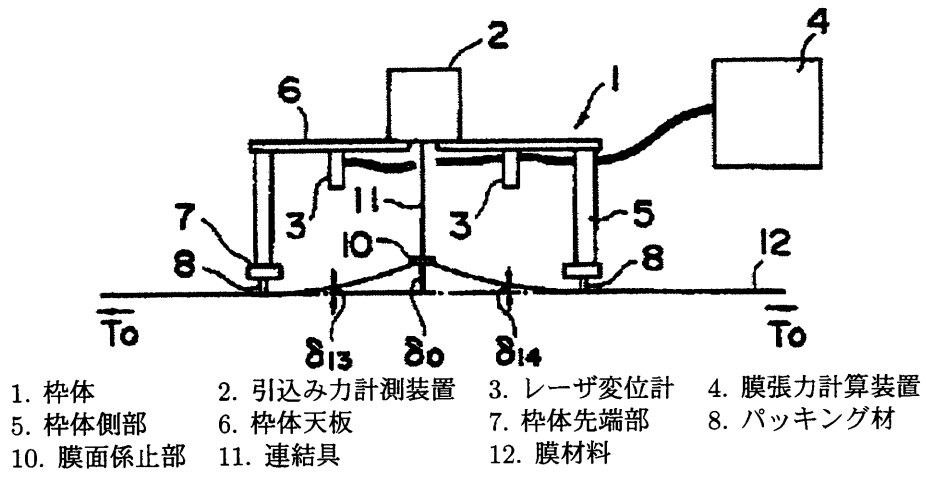


図 2.9: 概要図

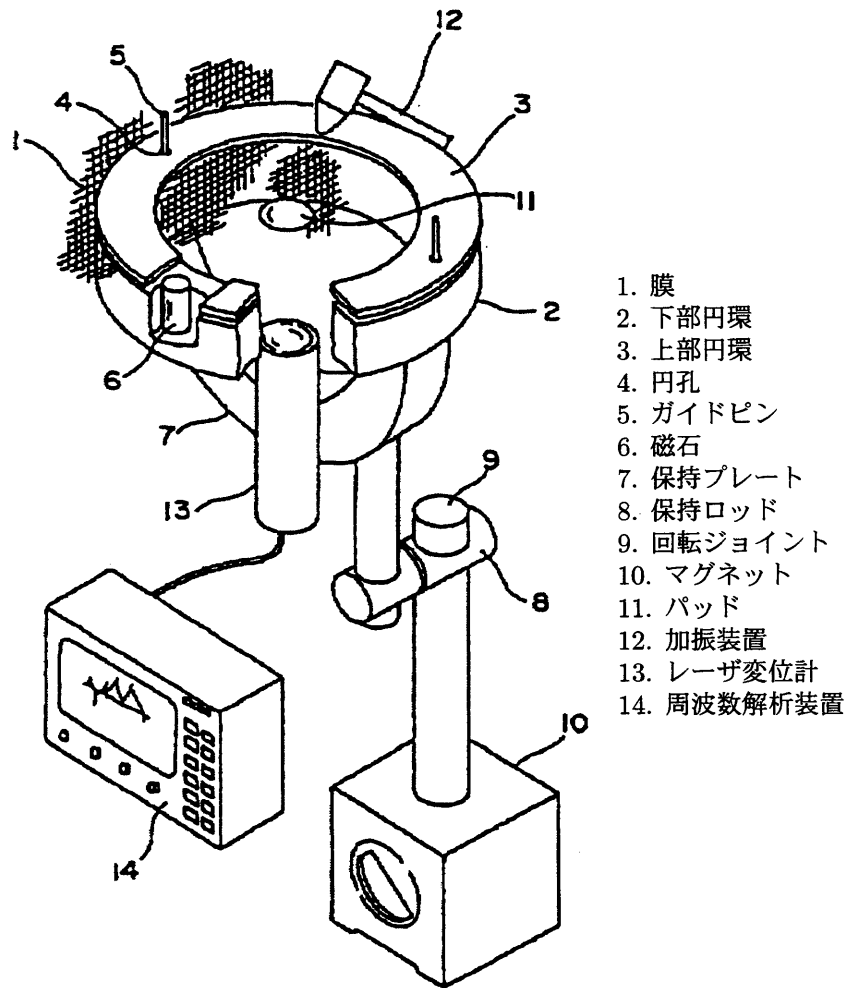


図 2.10: 概要図

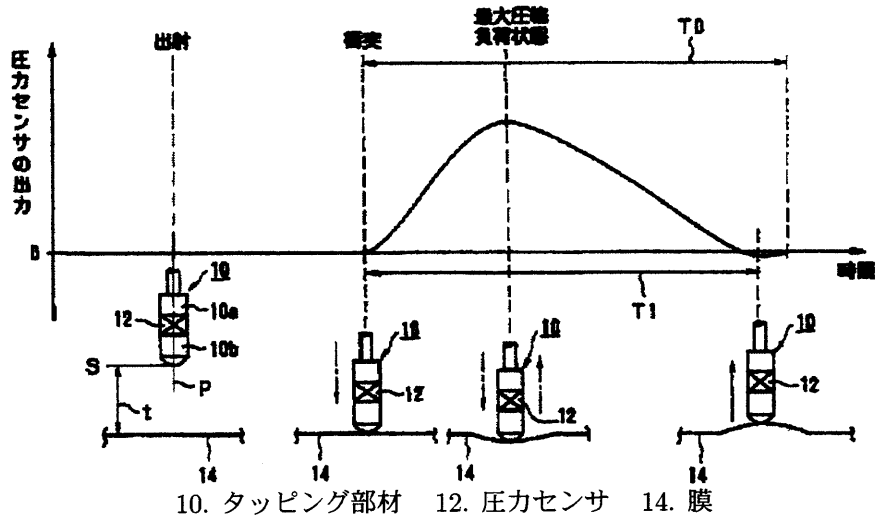


図 2.11: 概要図

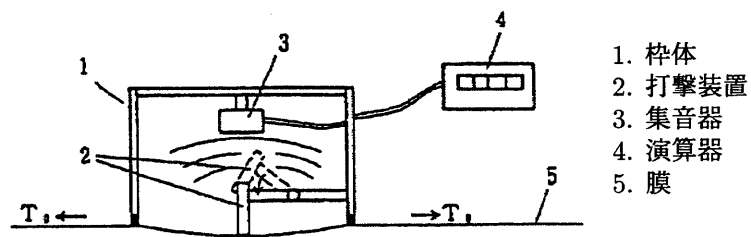


図 2.12: 断面図

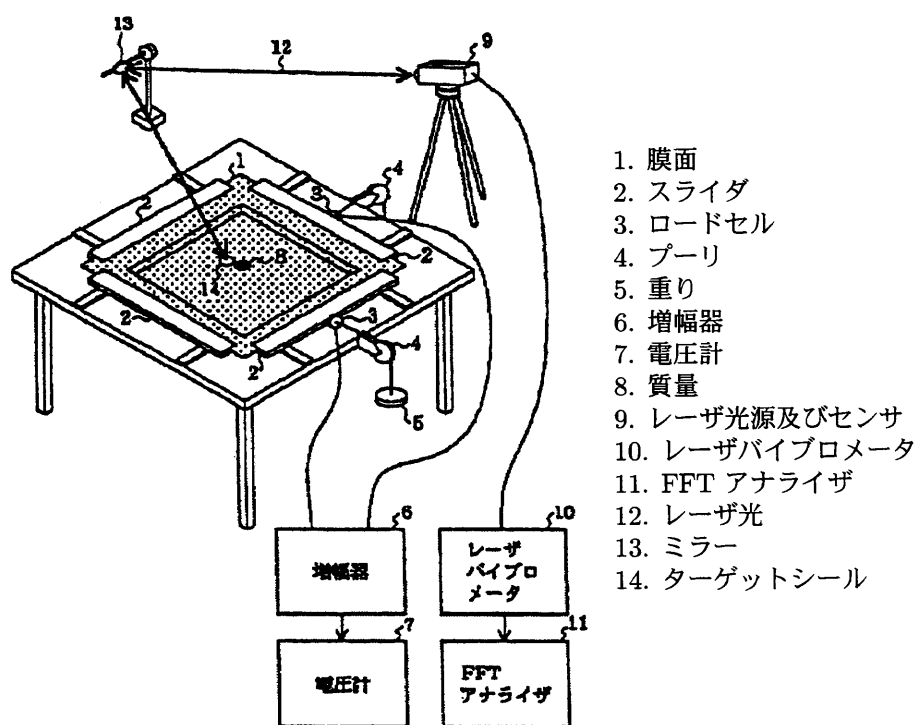


図 2.13: 概要図

第3章 基礎理論

3.1 膜の運動方程式

図 3.1 のように x, y の直交方向に異なった張力 T_x, T_y が作用している膜の振動を考えてみる。膜面上に微小要素をとり、膜が微小変形したときにこの微小要素に働く力を求める。図 3.2 に示すような微小要素の辺において、微小要素の $x = \text{一定}$ の端における z 方向分力は

$$-T_x dy \sin \frac{\partial w}{\partial x} \approx -T_x dy \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.1)$$

とすることができる。次に微小要素の $x + dx$ の端における z 方向分力は次のようになる。

$$T_x dy \frac{\partial w}{\partial x} + T_x dy \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) dx = T_x dy \frac{\partial w}{\partial x} + T_x dy \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \quad (3.2)$$

したがって、差し引きこの微小要素に働く力は次のようになる。

$$T_x dy \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx = T_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx dy \quad (3.3)$$

同様にして、辺 dy における z 方向の力は

$$T_y dy \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dx = T_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dx dy \quad (3.4)$$

となる。微小要素にはこれらの合力が働くと考えられるから、膜の単位面積当りの質量を ρ 、外圧を p とすると、膜の運動方程式は次のようになる。

$$-\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + T_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = p \quad (3.5)$$

3.2 長方形膜の自由振動

式 (3.5) の一般解は、定常振動を表す特解と、自由振動を表す余解との和で与えられる。ここでは、膜の振動の概要を把握するために、等張力状態を想定し、自由振動の解を求める。

式 (3.5) において、 $T_x = T_y = T, p = 0$ とすると運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad c^2 = \frac{T}{\rho} \quad (3.6)$$

式 (3.6) を満足する w として次のような変数分離形の関数を考える。

$$w = W(x, y)e^{i\omega t} = X(x)Y(y)e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

ここで、 $X(x)$, $Y(y)$ はそれぞれ x のみおよび y のみの関数である。これを式 (3.6) に代入すると

$$-\omega^2 XY e^{i\omega t} = c^2 \left(\frac{d^2 X}{dx^2} Y + \frac{d^2 Y}{dy^2} X \right) e^{i\omega t} \quad (3.8)$$

この両辺を $XY e^{i\omega t}$ で割り

$$-\omega^2 = c^2 \left(\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \right) \quad (3.9)$$

書き直して

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \quad (3.10)$$

この式の左辺は x のみの関数、右辺は y のみの関数であるから、等号が成立するためには両辺とも定数に等しくなければならない。この定数を $-\alpha^2$ とすると

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -\alpha^2 \quad (3.11)$$

および

$$-\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -\alpha^2 \quad (3.12)$$

あるいは整頓して

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 X}{dx^2} + \alpha^2 X &= 0 \\ \frac{d^2 Y}{dy^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \alpha^2 \right) Y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

式 (3.13) は、 X , Y に関する常微分方程式で、解は次の形で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X &= C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x \\ Y &= C_3 \cos \beta y + C_4 \sin \beta y \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

ここに

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \alpha^2} \quad (3.15)$$

すなわち

$$\omega^2 = c^2(\alpha^2 + \beta^2) \quad (3.16)$$

いま矩形の周辺で固定されている膜を考える。2 辺の長さをそれぞれ a, b とすると、境界条件は次のように書ける。

$$\left. \begin{array}{l} x = 0, a; \quad w = 0 \\ y = 0, b; \quad w = 0 \end{array} \right\} \quad (3.17)$$

まず、 $x = 0$ のときおよび $y = 0$ のとき、 $w = 0$ となるためには、式 (3.14) において $\cos \alpha x$ の項および $\cos \alpha y$ の項はなくなる必要がある。すなわち

$$C_1 = 0, \quad C_2 = 0 \quad (3.18)$$

次に $x = a$ のとき $w = 0$ となるべきことから

$$\alpha a = m\pi \quad (3.19)$$

あるいは

$$\alpha = \frac{m}{a}\pi, \quad m = 1, 2, \dots \quad (3.20)$$

でなければならず、また $y = b$ のとき $w = 0$ となるためには

$$\beta b = n\pi \quad (3.21)$$

あるいは

$$\beta = \frac{n}{b}\pi, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.22)$$

でなければならない。これらを式 (3.16) に代入すると、固有円振動数 ω_{mn} は次のようになる。

$$\begin{aligned} \omega_{mn}^2 &= c^2 \pi^2 \left\{ \left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right\} \\ \omega_{mn} &= \pi \sqrt{\frac{T}{\rho}} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad m, n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (3.23)$$

振動形 $W_{mn}(x, y)$ は次のようになる。

$$W_{mn} = C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad m, n = 1, 2, \dots \quad (3.24)$$

また、変位 $w(x, y, t)$ は次の形で得られる。

$$w = \sum_{m=1} \sum_{n=1} \{A_{mn} \cos \omega_{mn} t + B_{mn} \sin \omega_{mn} t\} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3.25)$$

A_{mn}, B_{mn} は任意定数で初期条件から決定される。

ここで、 $a = b$ とした正方形膜の固有振動モードのいくつかを図 3.3 に示す。これらのモードは式 (3.24) から求めることができ、 $(m = 2, n = 1)$ としたものと $(m = 1, n = 2)$ としたものは、どちらかを z 軸まわりに 90° 回転させると他のものと同じになる。

3.3 長方形膜の定常振動

これまで、膜の張力は等張力であるとしてきたが、 x, y それぞれの張力が異なる場合においても同様にして解を求めることができる。

外圧 p が加わる膜の運動方程式を改めて書くと次のようになる。

$$-\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} T_x + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} T_y \right) = p \quad (3.26)$$

式 (3.26) を満足する w, p として次のような変数分離形の関数を考える。

$$w = W(x, y) e^{i\omega t} \quad (3.27)$$

$$p = P(x, y) e^{i\omega t}$$

式 (3.27) を式 (3.26) に代入すると

$$\left\{ \rho \omega^2 W + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} T_x + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} T_y \right) - P \right\} e^{i\omega t} = 0 \quad (3.28)$$

式 (3.28) は任意の t に対して恒等的に満足される必要があり、次のようになる。

$$\rho \omega^2 W + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} T_x + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} T_y \right) = P \quad (3.29)$$

周辺固定の矩形膜を考えると、自由振動の場合と同様に振動形 $W_{mn}(x, y)$ は

$$W_{mn} = C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad m, n = 1, 2, \dots \quad (3.30)$$

となり、これを式 (3.29) に代入すると

$$\left\{ \rho \omega^2 - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} T_x + \frac{n^2}{b^2} T_y \right) \right\} C_{mn} W_{mn}(x, y) = P(x, y) \quad (3.31)$$

式 (3.31) は、外力 p により膜面を振動させたとき、左辺で示される振動をすることを表している。今、膜面が固有振動をすると、左辺の係数がゼロとなるので、

$$\rho \omega^2 - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} T_x + \frac{n^2}{b^2} T_y \right) = 0 \quad (3.32)$$

となる。すなわち、固有円振動数 ω_{mn} は次のようになる。

$$\omega_{mn} = \pi \sqrt{\frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} T_x + \frac{n^2}{b^2} T_y}} \quad m, n = 1, 2, \dots \quad (3.33)$$

3.4 直交二方向張力の推定

x, y の直交二方向の張力が異なる場合の固有円振動数 ω_{mn} は式 (3.33) で与えられる。この膜面の固有円振動数から直交二方向の張力を推定することを考える。 $2\pi f = \omega$ の関係式を用いると、固有振動数 f_{mn} は次のようになる。

$$f_{mn} = \pi \sqrt{\frac{1}{4\rho} \sqrt{T_x \frac{m^2}{a^2} + T_y \frac{n^2}{b^2}}} \quad (3.34)$$

いま 2 種類の異なった加振音源の振動数 f_1, f_2 に対して膜面が共振したとき、式 (3.34) より次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} T_x \frac{m^2}{a_1^2} + T_y \frac{n^2}{b_1^2} &= 4\rho f_1^2 \\ T_x \frac{m^2}{a_2^2} + T_y \frac{n^2}{b_2^2} &= 4\rho f_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

式 (3.35) は T_x, T_y に関する連立二次方程式であり、すなわち共振時における膜面の固有モードとそのときの固有振動数が測定できれば、 T_x, T_y 直交二方向の膜張力を別々に求めることが可能である。

式 (3.35) を T_x, T_y について解くと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \frac{4\rho a_1^2 a_2^2 (b_1^2 f_1^2 - b_2^2 f_2^2)}{m^2 (a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)} \\ T_y &= \frac{4\rho b_1^2 b_2^2 (a_2^2 f_1^2 - a_1^2 f_2^2)}{n^2 (a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)} \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

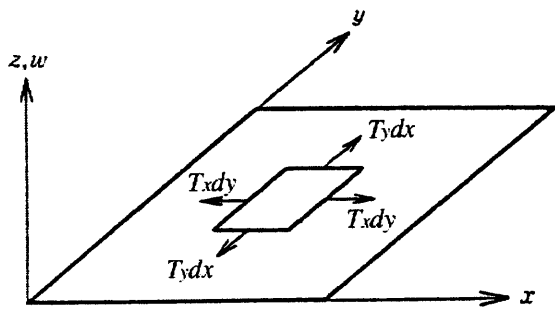


圖 3.1: 膜要素

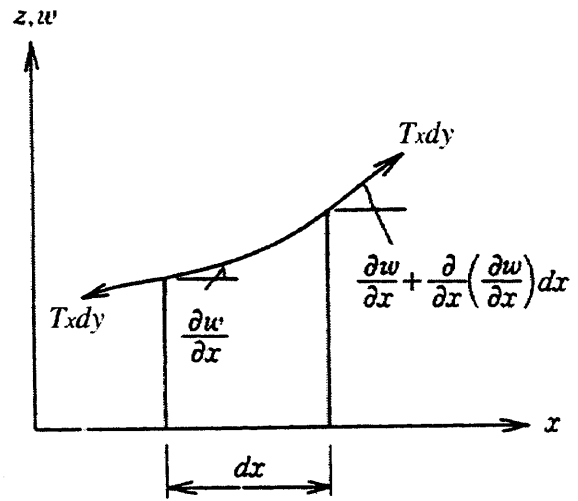


圖 3.2: 微小要素

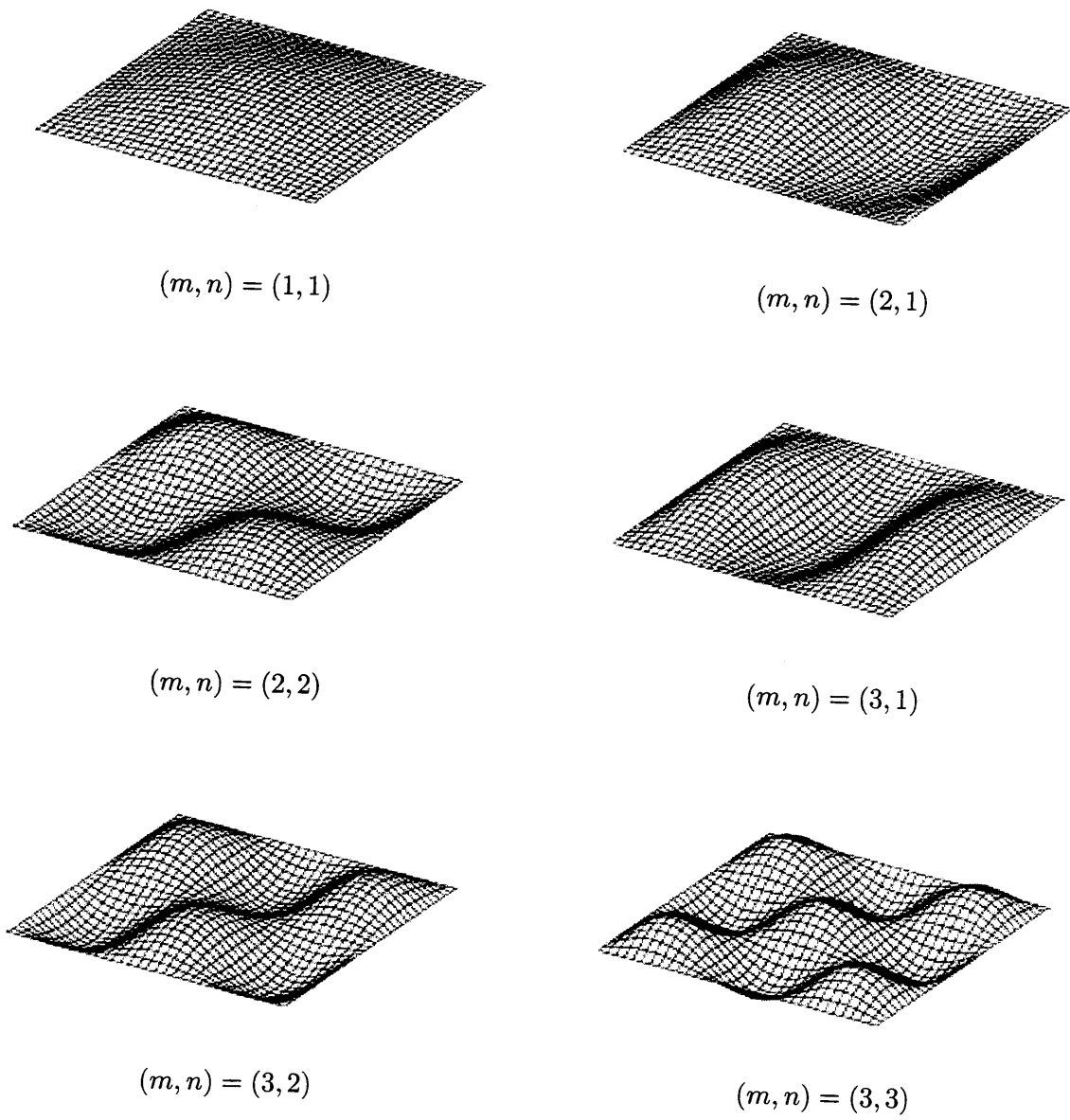


図 3.3: 膜の振動モード

第4章 装置開発

4.1 測定装置の概要

本研究で提案する膜張力測定装置は、音波加振により非接触かつ高精度に測定するものである。開発しようとする製品は、可聴領域の振動数を持つ音波を膜材に照射することにより生ずる膜面の共振振動をとらえて、直交二方向に導入されている張力の大きさを間接的に把握することのできる簡易軽量可搬型計測装置である。図 4.1 は、本研究で提案する膜張力測定装置の概念図である。

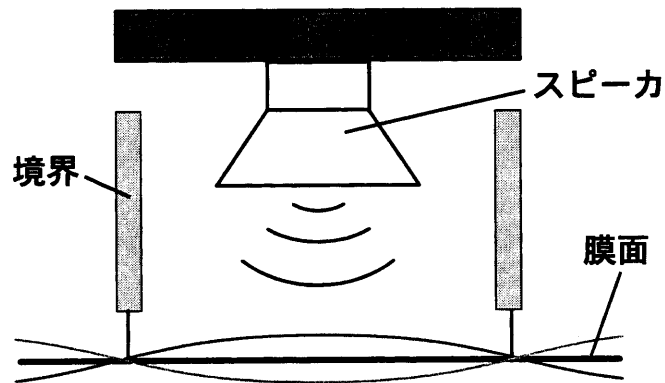


図 4.1: 装置の概念図

装置はスピーカー、音源部、レーザ変位計測部、箱形境界部ならびに記録部からなる。スピーカーは音源部からの電圧を受け適量の大きさで振動数を持つ音波を発信する。その結果、膜面は共振振動数付近の振動数を持つ音波による共振現象を呈する。レーザ変位計測部は共振振動数を持つ音波を受けて共振する膜面の変位を非接触で計測する。箱形境界部はその端部を膜面に軽く接触することにより膜面に振動境界を作る役割を果たす。

4.2 試験装置の製作

4.2.1 境界形状の決定

前章において示した膜張力測定理論に基づく試験装置の製作を行う。直交二方向の膜張力を求める連立方程式をあらためて書くと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \frac{4\rho a_1^2 a_2^2 (b_1^2 f_1^2 - b_2^2 f_2^2)}{m^2 (a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)} \\ T_y &= \frac{4\rho b_1^2 b_2^2 (a_2^2 f_1^2 - a_1^2 f_2^2)}{n^2 (a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2)} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

式(4.1)に基づいて直交二方向の膜張力の測定を行うためには、異なる2種類の共振振動モードにおける振動数を測定しなければならない。そこで、膜面に振動境界をつくるための箱形計測部の境界形状を長方形とし、さらに90°回転させて測定を行うことで2種類の境界形状を設定することができる。そして、測定する膜面の振動モードは、共振振幅が最大であり共振振動数が最小である $(m, n) = (1, 1)$ の共振振動モードをとらえるとする。

以上の点を考慮すると、式(4.1)において $m = n = 1$, $a_1 = b_2 = a$, $a_2 = b_1 = b$, ($a < b$) となり次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_x &= C(b^2 f_1^2 - a^2 f_2^2) \\ T_y &= C(b^2 f_1^2 - a^2 f_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

ここで

$$C = \frac{4\rho a^2 b^2}{b^4 - a^4} \quad (4.3)$$

4.2.2 レーザ変位計測部

共振振動モードにおける膜面の変位を計測する非接触レーザ変位計は、膜面の共振振動モードを正確に把握するために、測定膜面の境界内に複数個設置することが望ましいが、装置の軽量化や測定の簡便さなどを考慮して、試験装置においてはレーザ変位計の数は1個とする。その設置箇所は、共振振幅が最大となる中央部に設置するものとする。

試験装置に用いたレーザ変位計は(株)キーエンス社製のCCDレーザ変位センサで、主な仕様は次の通りである。

4.2.3 スピーカ部

スピーカは(株)フォステクス社製の8cmコーン型フルレンジスピーカを用いた。これは、オーディオ用に市販されている一般的なスピーカの中でも比較的小径のものである。主な仕様を次に示す。

基準距離	500 mm
測定範囲	±250 mm
光源	赤色半導体レーザー
スポット径	約 ϕ 0.3 mm
直線性	±0.1% of F. S.
分解能	50 μ m
電圧出力	±5V (50 mm/mV)
インピーダンス	100 Ω
電流出力	4-20 mA (適用負荷 0~350 Ω)
サンプリング周期	1024 μ s
重量	約 700 g

センサヘッド
LK-500

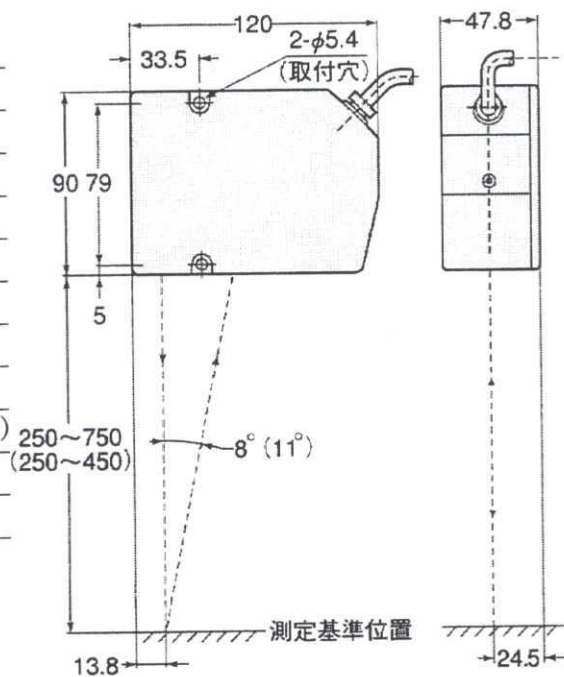


図 4.2: レーザ変位計仕様

インピーダンス	8 Ω
最低共振周波数 (f_0)	140 Hz
再生周波数帯域	$f_0 \sim 21$ kHz
出力音圧レベル	89 dB/w (1m)
入力	10 w (Mus.)
等価質量 (m_0)	1.4 g
共振鋭度 (Q_0)	1.08
実効振動半径 (a)	3.0 cm
マグネット重量	76.4 g
総重量	0.288 kg

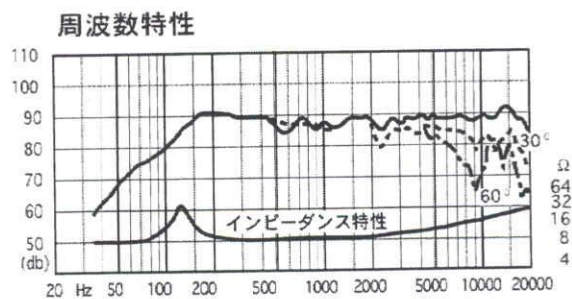
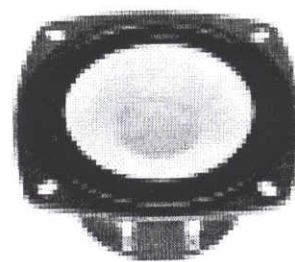


図 4.3: スピーカ仕様

4.2.4 箱形境界部

境界部は、その端部を膜面に軽く接触させることで膜面に振動境界をつくる役割を持つ。膜面に接触させる形状が長方形であることが必要だが、それ以外の形状は任意の形状とすることができる。今回の試験装置においては、箱形の形状を採用した。境界箱の材料も任意であるが、測定時の膜面の様子を観察するためにアクリルを用い、透明にして中を観察できるものとした。境界箱は、境界形状のアスペクト比がそれぞれ異なるものを3種類用意した。平面形状の寸法は、20 cm × 30 cm、10 cm × 30 cm、10 cm × 20 cm で、高さはいずれも 20 cm である。境界箱の平面図を図 4.4 に示す。

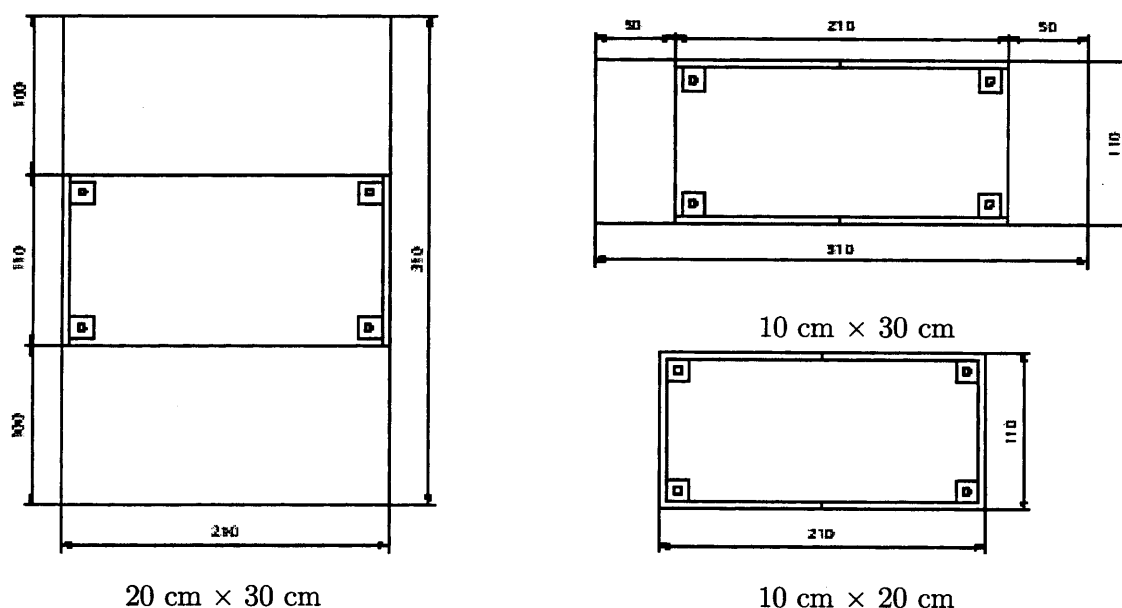


図 4.4: 境界箱平面図

4.2.5 試験装置の全容

試験装置の測定部は、レーザ変位計、スピーカ、境界箱からなるが、境界条件を変えながら実験を行うために、3種類の境界箱をその都度取り替えて実験が行えるような形状にしなければならない。そのために、10 cm × 20 cm のアルミ板の中央にスピーカを取り付け、さらに測定点が膜面の中央になるようレーザ変位計をアルミ板に取り付けたユニットを製作し、このアルミ板を境界箱の天板として取り付ける形状を採用した。図 4.5 はスピーカ・レーザ変位計ユニットのイメージ図、図 4.6 はスピーカ・レーザ変位計ユニットの境界箱への取り付けイメージ図、図 4.7 は試験装置全体の断面図を示す。

試験装置は前述の測定部と音源部、および記録部からなる。図 4.8 は音源部に用いたファンクションジェネレーターで、数 Hz から数 MHz までの直流電圧を発生することができる。測定部のスピーカはスピーカアンプを介してファンクションジェネレータに接続され、ファンクションジェネレータからの

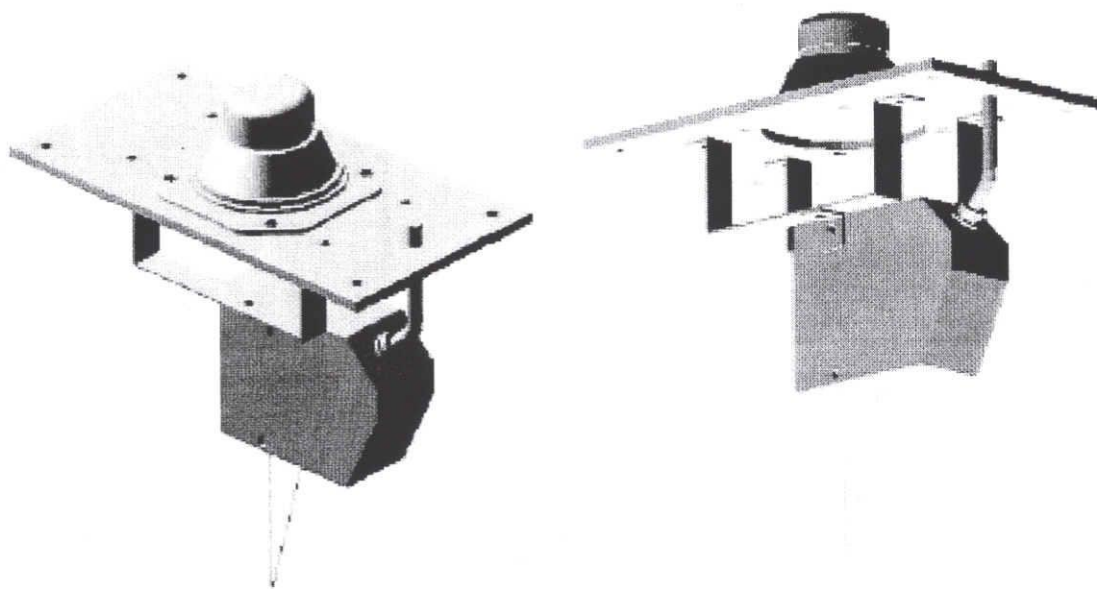


図 4.5: スピーカ・レーザ変位計ユニット

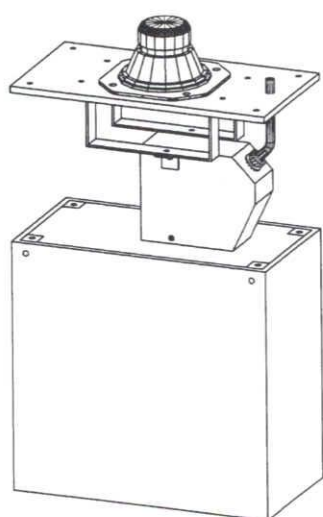


図 4.6: ユニットの取り付けイメージ

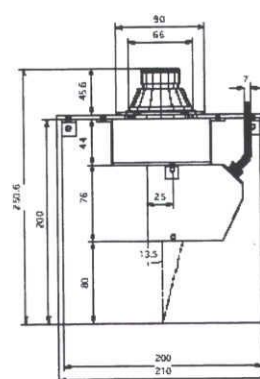


図 4.7: 装置断面図

直流電圧を受けて指定された振動数の音波を発生する。また図 4.9 はデータレコーダで、レーザ変位計で得られた電圧値を受け取り、内部メモリーに記録する。データレコーダは、測定時の振幅値をモニタリングしながら記録することができるが、試験装置においては膜変位の微小変位データを受け取るため、モニタリング上では振幅値の変化が確認できない。そのため、レーザ変位計を増幅器を介して接続することにより、モニタリング可能な電圧値まで増幅させてデータを受け渡すことで、共振現象の把握を確認する。今回の試験装置の各機器の回路図を図 4.10 に示す。



図 4.8: ファンクションジェネレータ

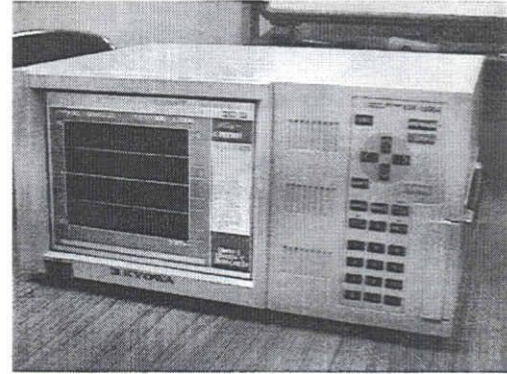


図 4.9: データレコーダ

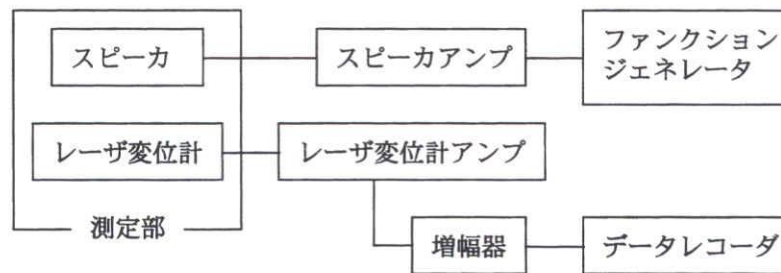


図 4.10: 回路図

第5章 膜張力測定実験

5.1 閉鎖型境界ボックスを用いた実験

4章で設計した膜張力測定装置の測定部の完成形を図 5.1 に示す。図 5.1 はスピーカ・レーザ変位計ユニットを 10 cm × 20 cm の境界ボックスに取り付けた状態のものである。図 5.2 が今回用意した 3 種類の亚克力製境界ボックスで、以後 20 cm × 30 cm のものを A タイプ、10 cm × 30 cm のものを B タイプ、10 cm × 20 cm のものを C タイプと呼ぶことにする。C タイプの平面形状は、スピーカ・レーザ変位計ユニットのアルミ板の平面形状と一致しており、また A タイプ・B タイプのものは、スピーカ・レーザ変位計ユニット取り付け部以外の部分に亚克力板にて天板を設けている。すなわち、3 種類の境界ボックスはすべて閉鎖型の形状をしている。

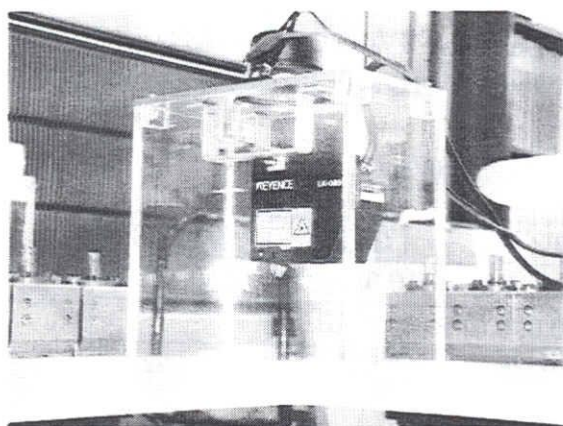


図 5.1: 試験装置測定部

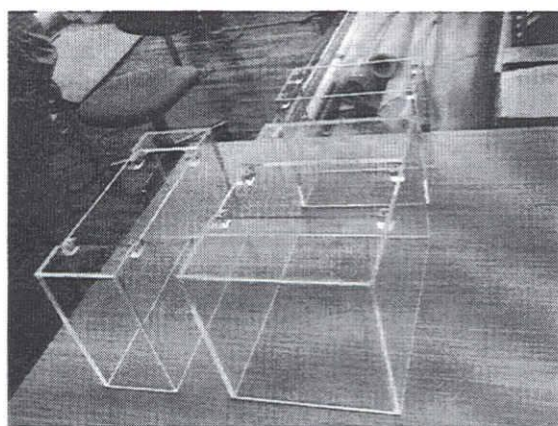


図 5.2: 3 種類の亚克力製境界ボックス

5.1.1 実験の概要

(株) 太陽工業空間技術研究所の二軸引張試験装置を借用して、第一段階の実験を行った。図 5.3 は、今回の実験の全景である。写真後方に見えるものが二軸引張試験装置である。二軸引張試験装置は制御装置により、一軸引張を始め、指定した二軸方向の軸力比を保持したまま加力する応力比一定の二軸引張試験を行うことができるほか、予めプログラムされた引張試験のスケジュールに従って自動的な試験を行うことができる。

図 5.4 は二軸引張試験装置に試験用膜材を取り付ける様子を示している。また、図 5.5 は試験用膜材がセットされた状態を示している。試験用膜材はこの図からもわかるように、中央部の正方形部分で、これを取り囲む数本のスリットの入っている部分は加力と垂直方向の応力を逃がすためのものであり、指定された二軸方向の張力が膜面に正確に導入されることを目的としている。図 5.6 は二軸引張状態での膜材の様子を示している。上述のスリット部分にわずかながらも隙間が生じ、加力方向と垂直方向の応力が逃がされている様子が確認できる。

実験の諸条件

今回の実験において利用した膜材は膜材料 A 種で、スリット部分以外の膜面大きさは $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 、面密度は約 1.3 kg/m^2 である。膜面に導入する直交二方向の張力パターンを表 5.1 に示す。等張力として 1.0, 3.0, 5.0, 10.0, 20.0 kgf/cm の 5 パターン、異張力として 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 kgf/cm に対して 2:1, 1:2 の値をもつ 8 パターンの計 13 パターンに対して実験を行う。図 5.7 が測定方法の模式図で、アクリル製境界ボックスの短辺、長辺方向を膜面の二軸方向に合わせ、レーザ変位計の計測点が膜面の中央部になるよう測定装置を設置する。

加振は通常のスweep加振を行い、ファンクションジェネレータの切替スイッチにより、0 Hz～約 200 Hz と 0 Hz～約 1000 Hz の 2 種類の振動数域で加振を行う。一連の測定が終了した後、境界ボックスを 90° 回転して短辺、長辺を入れ替えて同様の測定を行う。すなわち 1 つの張力パターンに対して境界ボックスの設置方向は 2 種類で、すべての張力パターンに対し、以上の実験を行った。

表 5.1: 張力パターン (kgf/cm)

	(T_x, T_y)	(T_x, T_y)	(T_x, T_y)	(T_x, T_y)	(T_x, T_y)
等張力	(1.0, 1.0)	(3.0, 3.0)	(5.0, 5.0)	(10.0, 10.0)	(20.0, 20.0)
異張力	(2.0, 1.0)	(6.0, 3.0)	(10.0, 5.0)	(20.0, 10.0)	
	(1.0, 2.0)	(3.0, 6.0)	(5.0, 10.0)	(10.0, 20.0)	

実験結果・解析

図 5.8, 5.9 は、膜面に試験装置測定部を置いた状態での音波加振実験の様子を示している。増幅器で電圧値が増幅されているため、音波加振の振動数変化に伴う膜面の振幅の変化を確認することができた。図 5.10 はモニタリングされたデータレコーダの測定データである。

レーザ変位計の測定値においては膜面の共振と思われるデータが測定されているが、実際に膜面が共振状態に達しているかどうか断定することはできない。そのため、膜面に色つきの細粒を置いて加振を行うことで、膜面の振動の様子を観察した。図 5.11 は色つき細粒を膜面に置いた様子を示している。この状態で音波加振を行うと、加振音源の振動数変化に伴い色つき細粒が膜面を移動する様子が観察できる。これによりある周波数において、膜面が共振状態であることが確認でき、また境界ボックスの設置

部分に共振振動の節目が形成されていることが確認できた。

以上の実験より得られたデータの一例を境界ボックスの種類別に図 5.12～ 5.14 に示す。

共振振動数の特定

共振振動数の特定は、測定時において膜面の振幅値と入力音源の振動数値を同期測定し、膜面の振幅値が最大値をとるときの時刻を特定すれば、その時に膜面に入力している音波の振動数が共振振動数となる。しかし、本研究においては膜面の振動の挙動を把握するために、二軸引張試験装置による実験により得られたデータから、FFT 解析により共振振動数を特定することとする。

実験においては、0 Hz ～約 1000 Hz におけるスイープ加振を行っているため、膜面に入力する音波の振動数は時刻歴において刻々と変化している。そのため、膜面の振動挙動の経時的変化をみるためにランニング・スペクトル（付録 A 参照）を求め、その変化を把握する。

いま測定時間 T に対して微小な時間 Δt において FFT 解析を行い、最大振幅 A_p と卓越振動数 f_p を求めて、この微小時間 Δt における代表値とすると、この微小時間 Δt に含まれる波形データを振幅 A_p と振動数 f_p を持つ正弦波に近似することができる。微小時間 Δt を少しずつずらしながら測定時間 T に対してこれをすべて求めると、膜面の A_p と f_p の時刻歴を求めることができる。図 5.15 は、0 Hz ～約 200 Hz のスイープ加振を行ったものを、上記の FFT 解析により求めたグラフであり、棒グラフは A_p の時刻歴、折れ線グラフは f_p の時刻歴である。これにより膜面が音波加振により加振振動数と同じ振動数で、経時的に振動していることがわかる。 A_p と f_p の時刻歴から f_p - A_p グラフを求めることができ、これをグラフにしたものが図 5.16 である。これにより、膜面の共振振動数を特定することができる。（付録 B 参照）

測定式への適用

FFT 解析により特定された共振周波数を式 (4.2) の膜張力測定式に代入して、実際の膜張力値との比較検討を行う。実験を行ったすべてのデータにおいて、FFT 解析により共振周波数を一つ特定することができるが、ナイキスト振動数 (512 Hz) を超えるものについては値が正しくないため、測定式への適用は除外する。3 種類の境界ボックスの中で、A タイプについては今回の測定条件ではすべて 512 Hz 以下に共振振動数が存在するが、B タイプ・C タイプの高張力で実験を行ったものは 512 Hz を超えるものがあるため、これらは除外する。

測定式により求められた膜張力の値を T_e 、実際の膜張力値を T_t として、グラフに表し比較検討を行う。なお図 5.17 のグラフの横軸は T_t 、縦軸は T_e であり、図 5.18 のグラフの横軸は T_t 、縦軸は T_e/T_t である。

また、測定振動数 f_e と測定条件下における共振振動数の理論値 f_t の比較検討も行う。図 5.19 のグラフにおいて、横軸は f_t 、縦軸は f_e/f_t である。

5.1.2 考察

第一段階の実験として、3種類の閉鎖型境界ボックスを用いて膜張力測定実験を行った。膜面の共振そのものが全く起こらない可能性もあったが、図5.11で示した色つき細粒を用いた実験においては、膜面の共振現象ははっきり確認された。そのため、共振振幅の大きさも非接触レーザー変位計で十分測定できるほどの大きさを持ち、モニタリング上においても、おおよその共振振動数は特定することができる。ただ、膜張力が高張力になるほど共振振幅は小さくなり、モニタリング上での特定も困難であったが、FFT解析においては特定することができた。

実験によって得られた共振振動数を用いて膜張力の推定を行ったところ、それなりの精度で膜張力が測定されている。境界ボックスの大きさによる違いも、測定張力そのものにはそれほど大きな違いはない。しかし、膜張力が小さくなると実際の値より大きく測定される傾向があり、誤差も100%以上と大きな問題点である。この原因として考えられたのが、空気の影響である。実験の際に見られた現象だが、特に低張力で共振振幅が大きいときに、境界ボックスの中に閉じこめられた空気が配線用の小さな穴から漏れるという現象が観察され、この空気の漏れは、手で確認してもはっきりとわかるほど顕著に見られた。これは、膜面の共振とともに境界ボックス内の空気も振動していることを表しており、この空気の振動が膜面の振動に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

5.2 開放型境界ボックスを用いた実験

5.2.1 実験の概要

前項の実験において、境界ボックスの形状は音波の拡散防止を目的として閉鎖型としたが、閉じこめられた空気が膜面の共振時に空気バネの役割を果たして、膜面に何らかの影響を与えている可能性が考えられた。そこで、境界ボックスを開放型形状として、閉鎖型を用いた場合と比べて精度が改善されるか、実験を通して検討を行う。

今回の実験では、境界ボックスの寸法は前項の実験で最も安定してデータを得られた A タイプの形状を用い、境界ボックスの天板部分において、スピーカ・レーザ変位計ユニットの取り付け部以外のアクリル板を取り外し、開放型形状とした。実験時の諸条件は、張力パターンは前項の実験時と同様の組み合わせで行ったが、出力音波は 0 Hz ～約 200 Hz の周波数域のみで実験を行った。これは、前項の実験において特に低張力時に空気の振動が顕著に見られたことから、低周波数域に重点をおいたためである。また、第一段階では出力音波の音量に関しては特に考慮しなかったが、今回の実験においては音量が大きな場合と小さな場合それぞれに対して実験を行った。

5.2.2 実験結果・解析

開放型境界ボックスを用いて得られた波形データから共振振動数の特定を行う。前節と同様にランニングスペクトルの経時変化から最大振幅 A_p と卓越振動数 f_p を求め、膜面の A_p と f_p の時刻歴を求める。さらに、 A_p と f_p の時刻歴から f_p-A_p グラフを求め、膜面の共振振動数の特定を行った。張力パターンは第一段階の実験時と同様のパターンを用いて低張力から高張力まで実験を行ったが、加振音波の周波数域が 0 Hz ～約 200 Hz の低周波数域でのみ実験を行ったため、高張力時の共振モードがとらえられていない可能性がある。そのため、高張力時の波形データに対しては解析対象から除いた。図 5.21 は T_t-T_e グラフ、図 5.22 は T_t-T_e/T_t グラフ、図 5.23 は f_t-f_e/f_t グラフである。また、それぞれのグラフは音量の大きなものと小さなものの 2 種類の実験から得られた測定値による解析値を示している。

5.2.3 考察

第二段階の実験として開放型の境界ボックスを用いて、特に低張力における測定値に重点をおいて実験・解析を行った。第一段階の実験の際に確認された空気振動が、周囲が全て閉じられている境界ボックスの形状により引き起こされていると考え、境界ボックスの天板部のみを取り外して開放型の境界ボックスとし、他の条件は同じにして実験を行った。その結果、特に低張力時において共振振動数が大幅に変化したことが、実験時のモニタリング上においても確認できた。実験時の装置の挙動も、天板の有無による違いのみで明確な違いが確認された。解析結果を見ても、第一段階で顕著に見られた低張力時の共振振動数のずれは大きく改善された結果となり、理論値とほぼ一致する結果が得られた。開放型境界ボックスによって空気振動が取り除かれ、より理想的な膜振動を引き起こしたと考えられる。2 種類の音量の違いについては、音量の小さい場合の方が高い場合に比べて共振振動数が高くなる傾向が確認できるが、その差は数 Hz 程度であり精度を大きく損なっているとは言えない。しかし、双方とも張力が

大きくなるにつれ少しずつ共振振動数が理論値より低くなる傾向が見られ、その結果膜張力の推定値 T_e も張力が大きくなる程誤差が大きくなっている。その誤差は、振動数の値で最大約 20%、推定張力の値で最大約 40% 程度である。



図 5.3: 試験装置全景

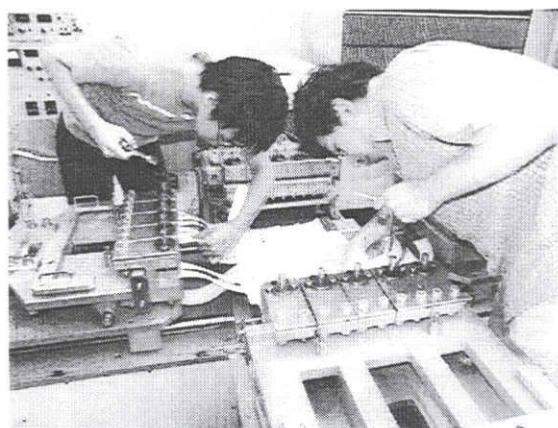


図 5.4: 膜材の取り付け

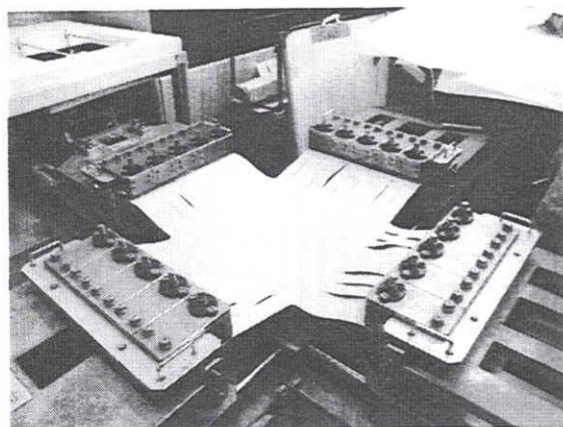


図 5.5: 二軸引張試験装置にセットされた膜材

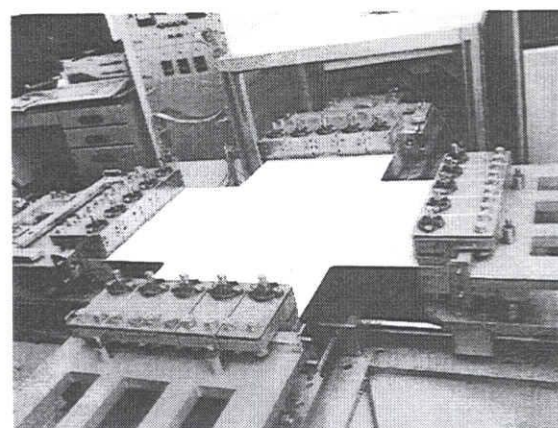


図 5.6: 張力導入時の膜材

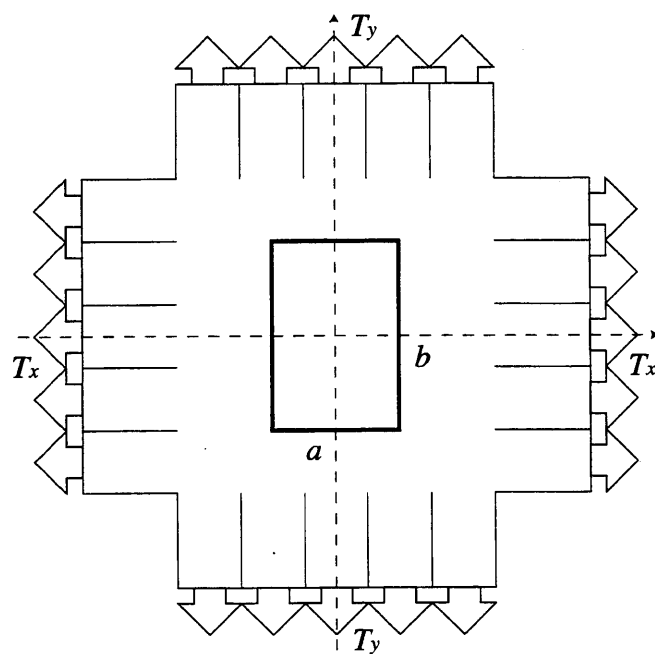


図 5.7: 測定方法の模式図

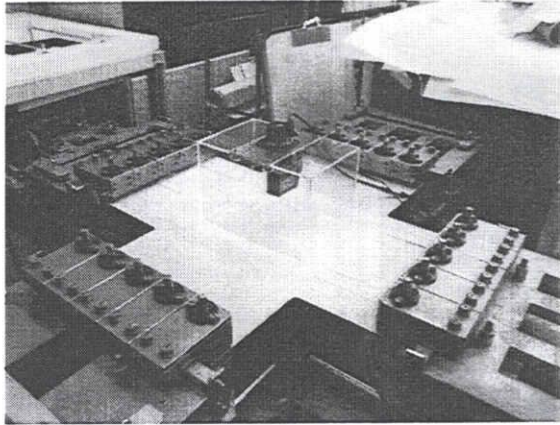


図 5.8: 音波加振実験の様子 (A タイプ)

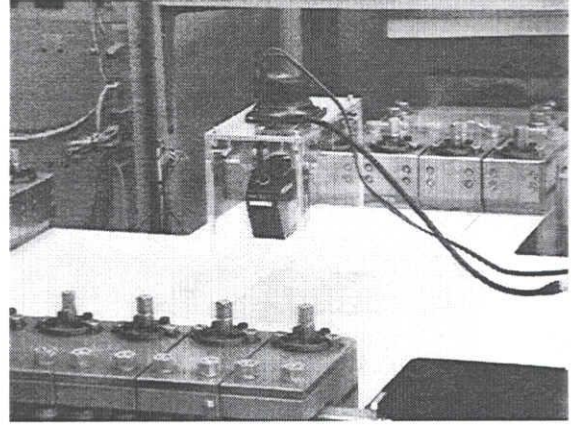


図 5.9: 音波加振実験の様子 (C タイプ)

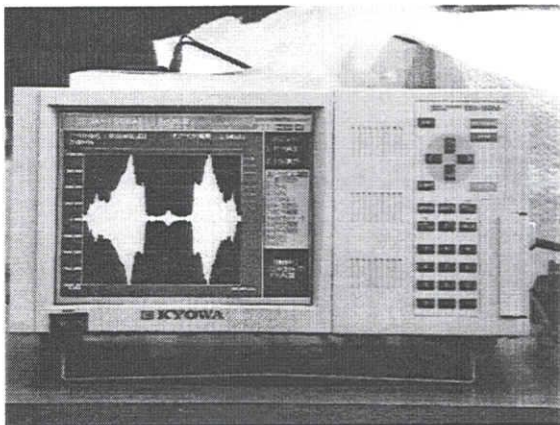


図 5.10: 膜面の波形データ

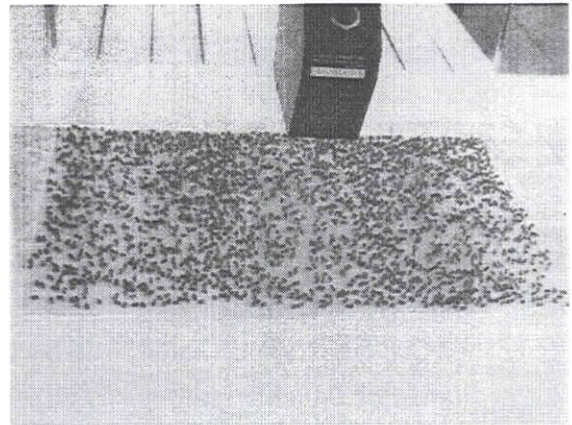


図 5.11: 色つき細粒によるモード確認

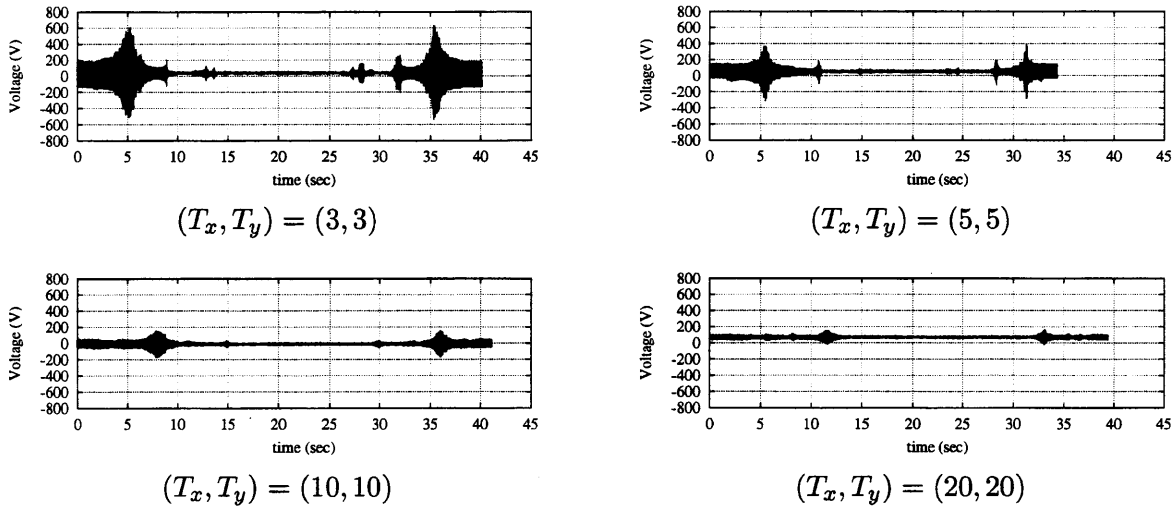


図 5.12: 波形データ (タイプ A)

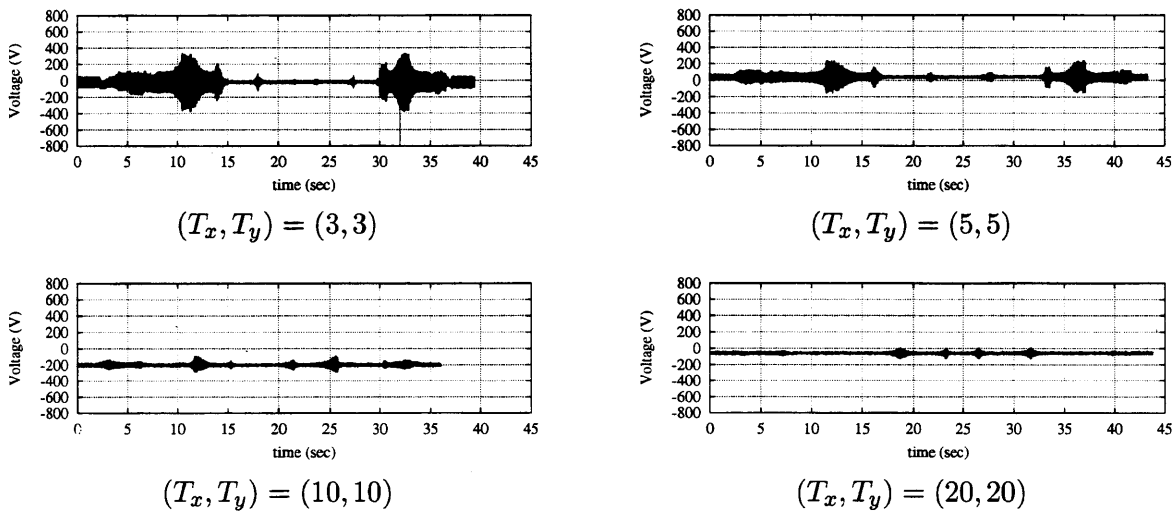


図 5.13: 波形データ (タイプ B)

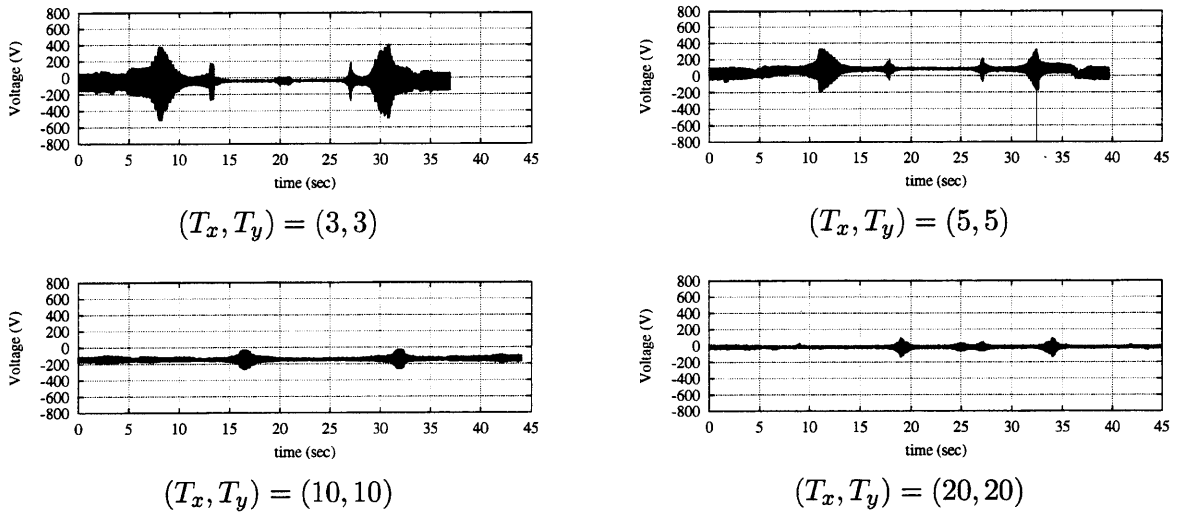


図 5.14: 波形データ (タイプ C)

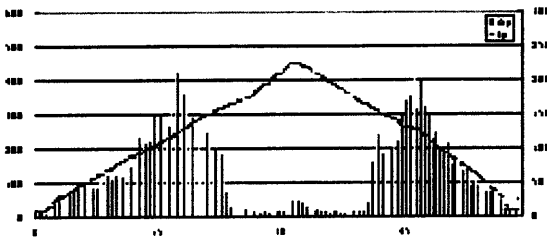


図 5.15: A_p, f_p の時刻歴グラフ

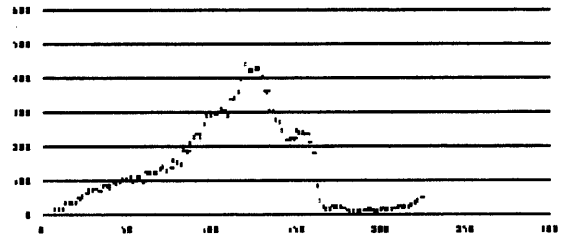


図 5.16: A_p-f_p グラフ

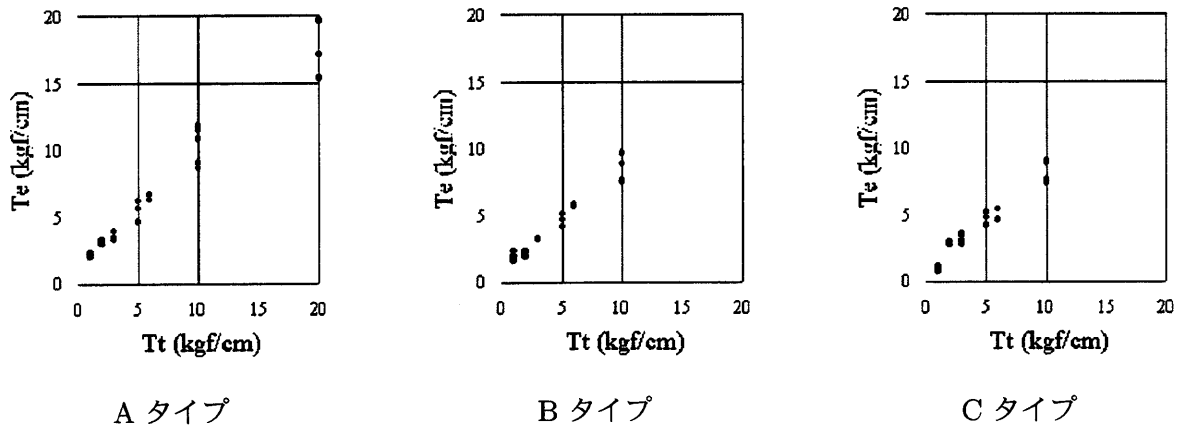
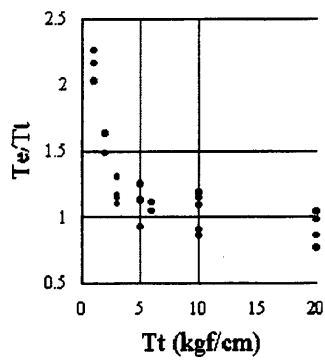
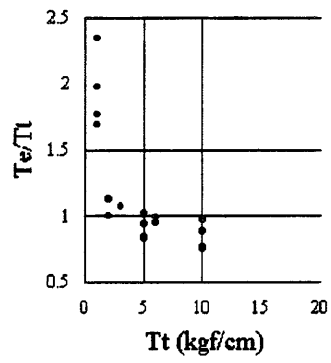


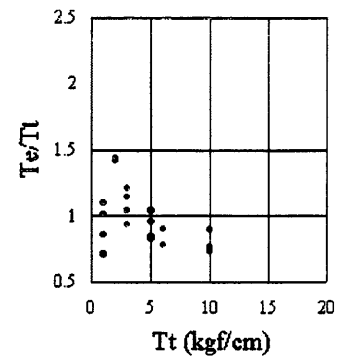
図 5.17: $T - t - T_e$ グラフ



A タイプ

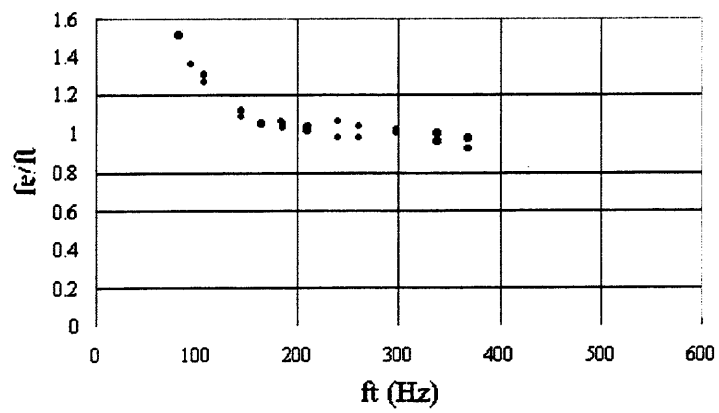


B タイプ

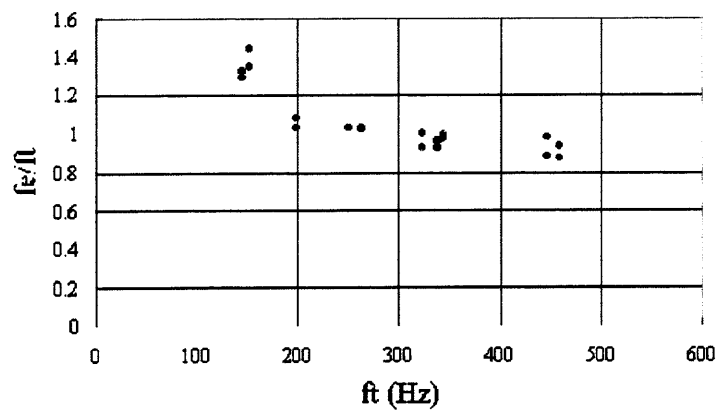


C タイプ

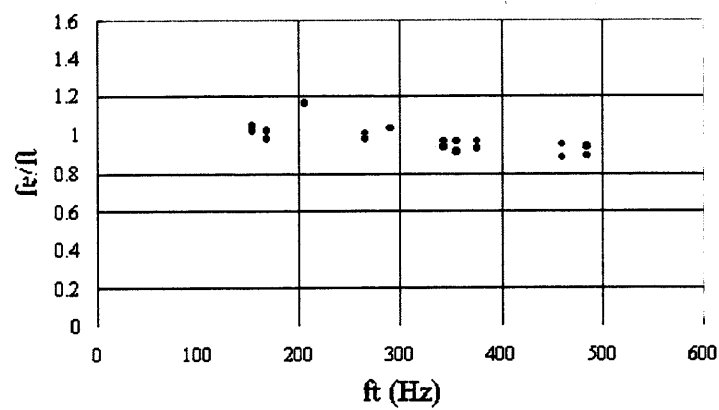
図 5.18: $T_t - T_e / T_t$ グラフ



A タイプ



B タイプ



C タイプ

図 5.19: $f_t - f_e / f_t$ グラフ

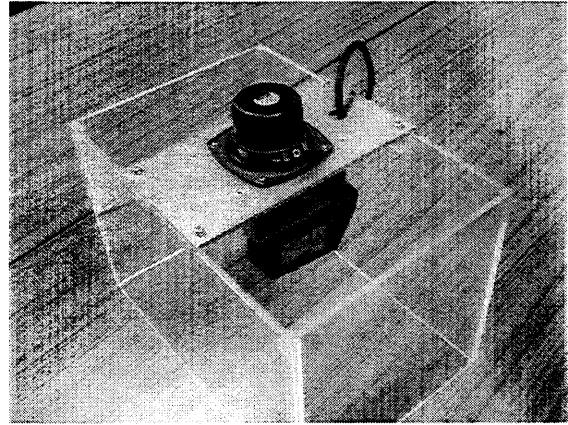
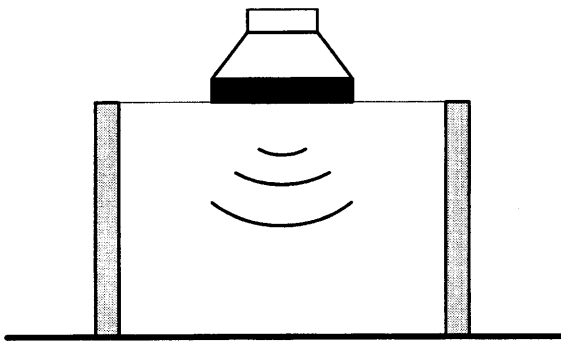


図 5.20: 開放型境界ボックス

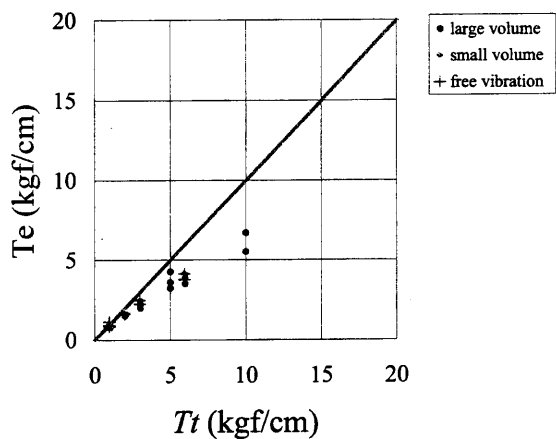


図 5.21: T_t - T_e グラフ

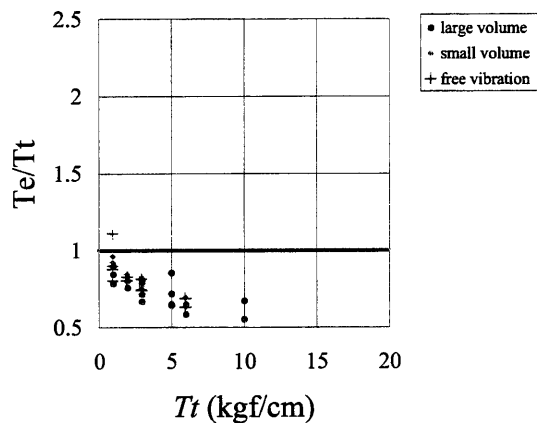


図 5.22: T_t - T_e/T_t グラフ

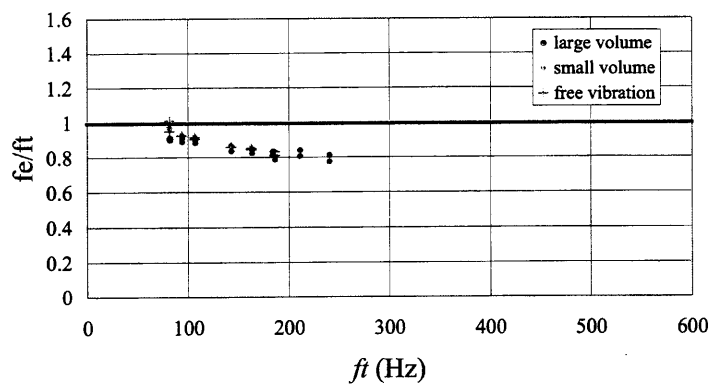


図 5.23: f_t - f_e/f_t グラフ

第6章 結

6.1 結論及び今後の課題

本論では、膜面の直交二方向張力の簡易測定法を提案し、試験装置を製作して実験を行った。音波加振により膜面を強制振動させて共振モードを特定するという手法は他に類例がない斬新な手法であるが、膜面の振動そのものが全く起こらない可能性もあった。そこで第一段階の実験において、膜面に色つき細粒を置き可視化して観察したところ、共振時の振幅は十分な大きさを持ち振動の節も形成されていることが確認できた。第一段階の実験では、閉鎖型境界ボックスを備えた試験装置を用いて実験を行った。境界ボックスを閉鎖型とした理由として当初は音波の拡散防止を目的としていたが、中に閉じこめられた空気がバネの役割を果たして膜面に作用し、その結果振幅が大きい低張力時の精度が悪化する原因となった。また、境界ボックスを3種類用意し、境界の大きさによる精度の違いについて検討を行ったが、測定結果から境界の大きさによって精度に大きな違いはなかった。ただし、実験時の装置及び膜面の挙動の様子からは、境界はある程度の大きさを持つ方が安定した計測ができると思われる。さらに、境界が小さくなると共振振動数は大きくなるため、特に高張力時の測定が困難になる。今回の実験においても、非接触レーザ変位計のサンプリング周期の関係から、共振振動数がナイキスト振動数を超えるものがあった。さらに、現場での利用を考えると、装置の大きさを必要以上に大きくすることは好ましくないため、境界の大きさとレーザ変位計の性能の的確な組み合わせが必要となるだろう。

第二段階の実験では、境界ボックスの形状を開放型とした。第一段階において確認された空気バネの影響を取り除くために、寸法は変えず天板部のアクリル板のみを取り除き境界ボックス内部の空気が閉じこめられない形状とした。その効果は歴然としていて、特にその影響が目立っていた低張力時の際の効果は大きく、測定値も第一段階と比較して精度は飛躍的に改善された。ただし、高張力になるほど共振振動数が低下していく傾向が確認された。その原因として、空気の付加質量の影響が考えられる。自重が小さい膜構造の振動では周辺の空気の影響によって固有振動数が変化し、振動性状が変化する。この周辺空気による影響を、等価な質量で表わしたものを空気の付加質量という。空気の付加質量の性質について、南 [20] は境界に水平に固定された平面膜が半波長の正弦波モードで有限振動を生じる場合を2次元解析によって検討している。解析の結果、付加質量は振動数および振幅には依存せず、膜と空気の質量比に依存し、矩形膜上部の高さの0.68倍に相当する分の空気の質量に一致することが示されている。また、宋ら [21] は上下のケーブルネット間を束材で接続した二重ケーブルネット膜構造の振動解析を行い、空気の付加質量の影響について検討している。解析結果から、空気の影響は膜自重とほぼ同等の付加質量として影響しているが、振幅への依存性も指摘されている。このように空気の付加質量は、一般的には振幅や振動数とは無関係であり膜と空気の質量比によって決まるものとされているが、振幅や振動数への依存性も否定できない。空気の付加質量の影響については、今後の課題の一つである。

第二段階の実験では、出力音波の音量の大きさについても検討を行った。第一段階の実験では、音波

の出力音量すなわち音波の振幅の大きさについては、モニタリングで共振状態が確認できる振幅が得られるようある程度の音量を持った音波を出力して実験を行ってきた。しかし、実際にはそれよりも小さな音量で実験を行っても共振状態の特定は可能であることがわかり、さらに音量の大きさの違いにより共振振動数に若干の変化が確認された。そのため音量の大きさが大きな場合と小さな場合それぞれで実験を行い、共振振動数の測定を行った。測定結果から、音量の大きな場合に比べ小さい場合の方が、数 Hz 高い共振振動数となっている。原因として考えられる点として、膜面における共振時の境界が境界ボックスにより正しく定まっていなかったことが考えられる。本研究の実験においては、第一段階、第二段階を通して、測定装置は膜面に対して固定せず置いただけの状態で行った。そのため、共振時の振幅が大きい時には図 6.1 に示すように膜面の振動とともに装置が浮き上がるような状態となり、装置の境界部よりも外側で振動の節が形成されている可能性がある。出力音波の音量を大きくするほど共振時の振幅も大きくなり、装置の浮き上がりによる境界のずれが大きくなるため、誤差も大きくなる。精度の高い測定を行うためには、境界ボックスで定めた境界上に振動の節が正しく形成されるよう測定を行わなければならない。そのため、境界部にパッキング材などを取り付けて膜面との接着性をもたせ、測定の際には装置が膜面に固定されることが望ましい。

第二段階の結果から見られる高張力に伴う共振振動数の低下の傾向は、上述した空気の付加質量と装置の浮き上がりの 2 点が大きく影響していると考えられる。実際にはそれ以外の要素が影響している可能性もあるが、実験及び解析を通して測定式を見直し、実用的な精度の確保が今後の大きな課題である。さらに装置の形状も改善が必要であろう。本研究で用いた試験装置の境界ボックスはアクリル製として膜面の様子を観察できるものとした。また、当初は音波の拡散防止のため閉鎖型とし、形状も最も単純な箱形とした。しかし、境界ボックスに用いたアクリル板の固有振動数が膜面の共振振動数の測定域に存在する可能性があり、測定に悪影響を及ぼす可能性は否定できない。さらに実験の結果から出力音波の音量を必要以上に大きくする必要はなく、境界部は膜面に振動の境界を形成することが目的であるため、周囲を板状にして囲う必要もない。装置の重量もアクリルやアルミを材料に用いたために比較的軽量になり、その結果装置の浮き上がりを引き起こしたとも考えられる。そのため、図 6.2 に示すように、材料は比重の大きい材料を用い、境界部も測定に必要な最低限な形状とするものが望ましいと考えられる。

膜材は恒久建築構造用材料として今後もますます利用されるようになっていくと考えられる。この膜構造物の維持管理作業は他の建築構造形式である鉄筋コンクリート構造や鉄骨構造とは比較にならないほどに頻繁に行われる必要があり、その際には膜に作用している張力の大きさを知ることが最も重要な点検項目となる。降雨に際してはポンディングへの対策として、強風に対しては膜張力の健全な維持対策として、また時間の経過とともに進む膜のクリープやリラクセーションによる応力弛緩に伴うリンクリングへの対策として、膜構造物の張力を知ることが膜を健全に維持するためにはなくてはならない重要なものである。既述のように、従来にも方法がなかったわけではないが、その精度は誤差 100% 以上とも言われ決して実用的なものとは言えない。その点で、本論で提案した測定装置は実用的な精度を持つ可能性を秘めており、簡易性・可搬性を含めて、「使いものになる」膜張力測定装置への現場の要望に対して確実に応えるものになるであろう。

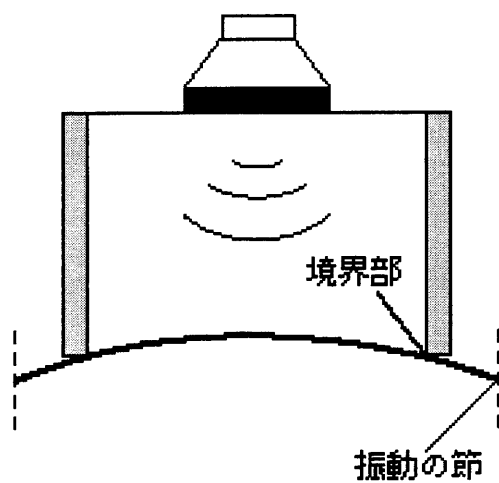


図 6.1: 装置の浮き上がりによる境界のずれ

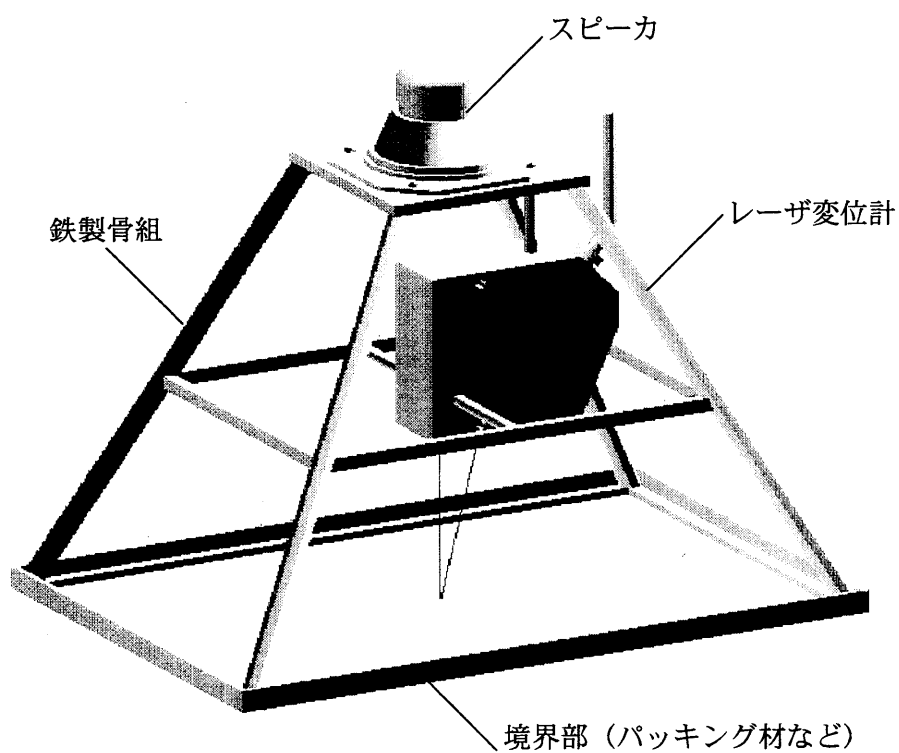


図 6.2: 装置改善案

附録 A ランニング・スペクトル

A.1 概要

関数 $f(t)$ で表される振動のフーリエ変換 $F(\omega)$ は次式で表される。

$$F(\omega) = \int_{t=0}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{A.1})$$

振動の継続時間を T_0 とすれば、 $T_0 < t$ の範囲では $f(t) = 0$ であるため、式 (A.1) は次のように書き直すことができる。

$$F(\omega) = \int_0^{T_0} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{A.2})$$

さらに積分の上限を任意の時間 t ($t \leq T_0$) とすれば

$$F(\omega) = \int_0^t f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{A.3})$$

$F(\omega, t)$ は $f(t)$ について $0 \leq t \leq t$ なる時間内にある部分の周波数特性を表わすスペクトルであり、 $0 < t \leq T_0$ なる範囲で t を順次変化させたスペクトルを描くと、周波数特性の経時的変化がわかる。式 (A.3) の関数 $F(\omega, t)$ あるいはそのスペクトル図をランニング・スペクトル (running spectra) と呼ぶ。

図 A.1 は新潟地震 (1964 年) の際に観測された加速度記録で、約 $t = 10$ sec 以後は地盤が液状化したため、振動の様子が一変している。この記録のランニング・スペクトルを描くと、図 A.2 のようになる。このように途中で性格の変わった波が接続している記録について、それぞれの波の性質を分離して求めたいとき、あるいは途中で波の性格が著しく変化しているかどうかを検証したいときなどに、ランニング・スペクトルがしばしば利用される。

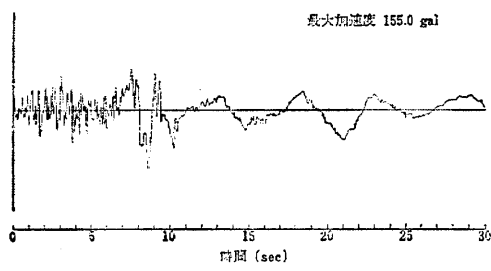


図 A.1: 新潟地震の強震計記録

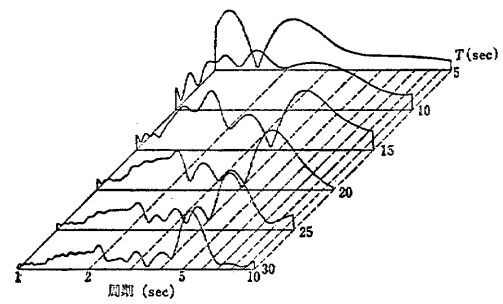


図 A.2: ランニング・スペクトル

附録 B FFT による解析データ

B.1 概要

本論の解析には高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform、以下 FFT) を用い、ランニング・スペクトルを求めた。測定時間 T_0 の波形データに対して $0 < t \leq T_0$ なる範囲の任意の時間 t をとり FFT 解析を行った。FFT 解析により得られるフーリエ・スペクトルの基本振動数 f_1 は

$$f_1 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{N_0 \Delta t} \quad (\text{B.1})$$

である。 N_0 は波形データの総数、 Δt はサンプリング周期である。一方、FFT 解析で得られる最も高次の振動数 (ナイキスト振動数) $f_{N/2}$ は

$$f_{N/2} = \frac{(N_0/2)}{N_0 \Delta t} = \frac{1}{2 \Delta t} \quad (\text{B.2})$$

である。時間 t に含まれるデータ数 N は

$$N = t \Delta t \quad (\text{B.3})$$

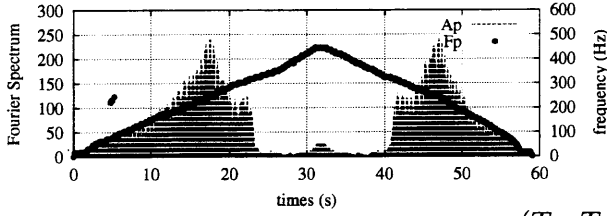
である。すなわち、FFT 解析の時間 t を短くすればランニング・スペクトルの周波数特性の経時的変化をより詳しく見ることができ、その結果膜面の振動数変化が詳細なものになるが、基本振動数が大きくなるため共振振動数の値の誤差は大きくなる。ナイキスト振動数は測定のサンプリング周期のみで決定されるため、FFT 解析の時間 t とは無関係である。

B.2 第一段階実験データの解析

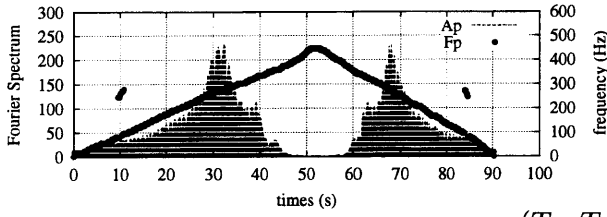
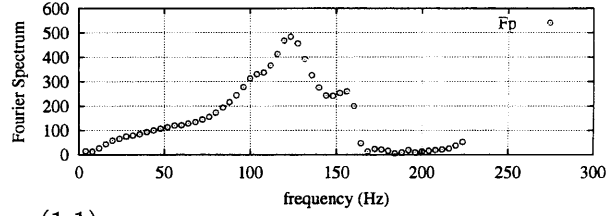
第一段階の実験として行った 3 種類の閉鎖型境界ボックスを用いた実験 (H13.7.30~31 実施) の測定データに対する解析結果のグラフを示す。

FFT 解析において、基本振動数は 2 Hz、ナイキスト振動数は 512 Hz とする。また、グラフは 3 種類の境界ボックス (A タイプ: 20 cm × 30 cm、B タイプ: 10 cm × 30 cm、C タイプ: 10 cm × 20 cm) および加振音波の周波数域 (0 Hz ~ 約 200 Hz、0 Hz ~ 約 1000 Hz) で区別して示している。それぞれの張力条件に対し、左側が A_p, f_p の時刻歴グラフ、右側が $f_p - A_p$ グラフである。

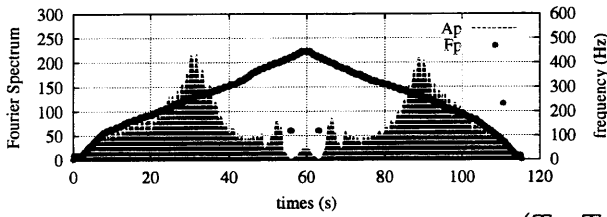
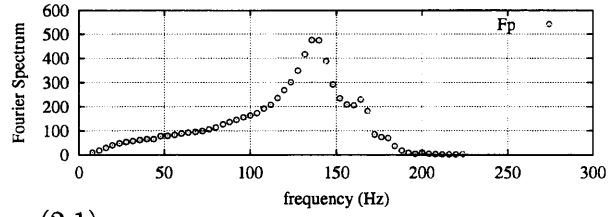
A タイプ 周波数域 (0 Hz ~約 200 Hz)



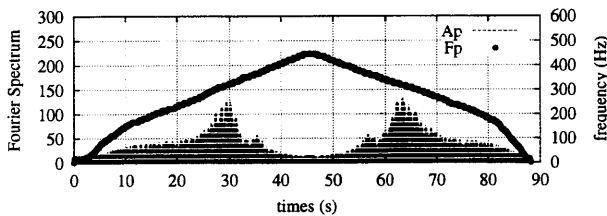
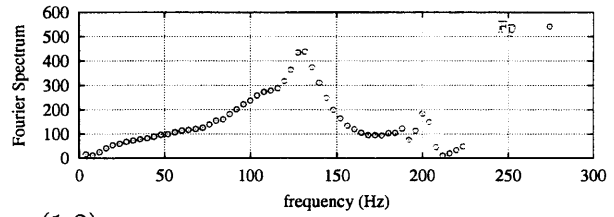
$(T_x, T_y) = (1,1)$



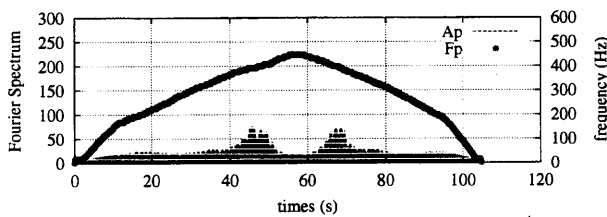
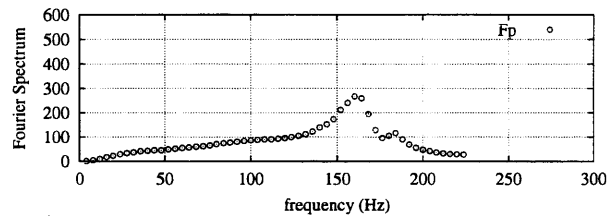
$(T_x, T_y) = (2,1)$



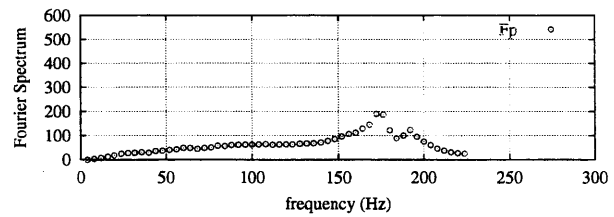
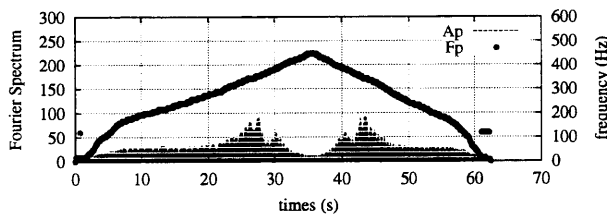
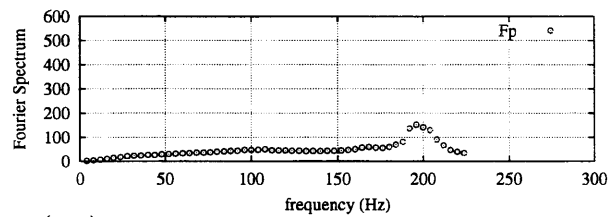
$(T_x, T_y) = (1,2)$



$(T_x, T_y) = (3,3)$

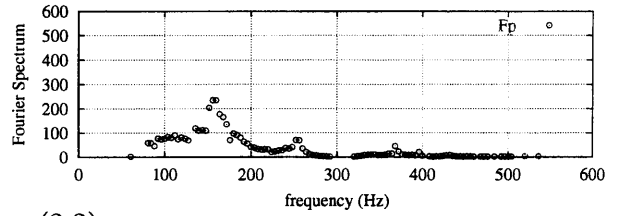
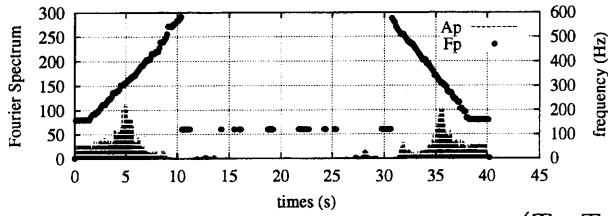


$(T_x, T_y) = (6,3)$

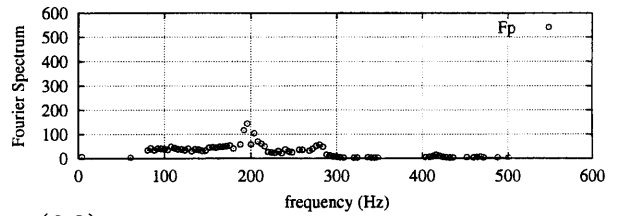
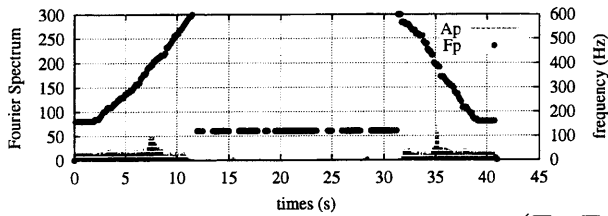


$$(T_x, T_y) = (3,6)$$

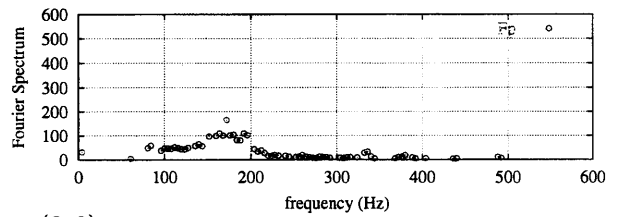
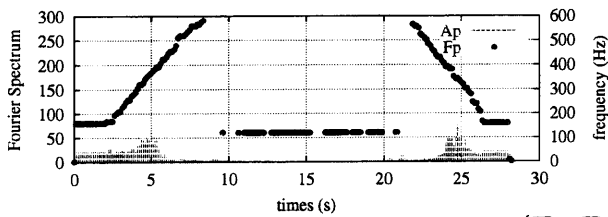
A タイプ 周波数域 (0 Hz ~約 1000 Hz)



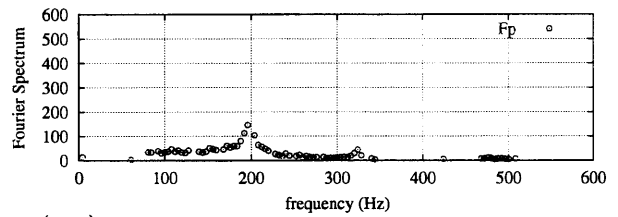
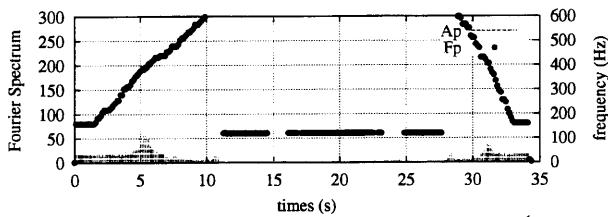
$$(T_x, T_y) = (3,3)$$



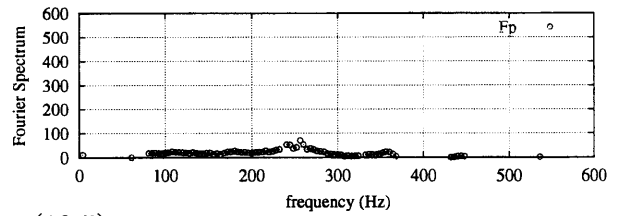
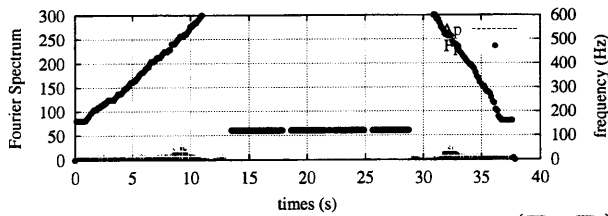
$$(T_x, T_y) = (6,3)$$



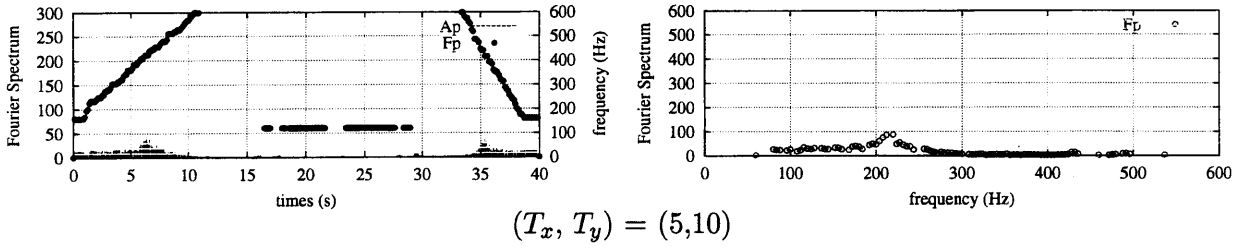
$$(T_x, T_y) = (3,6)$$



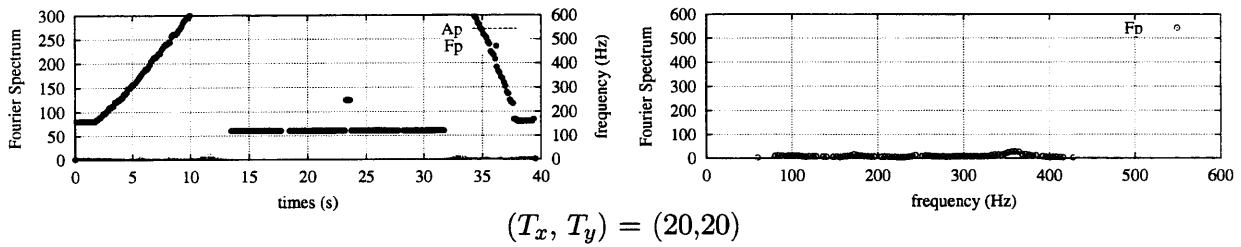
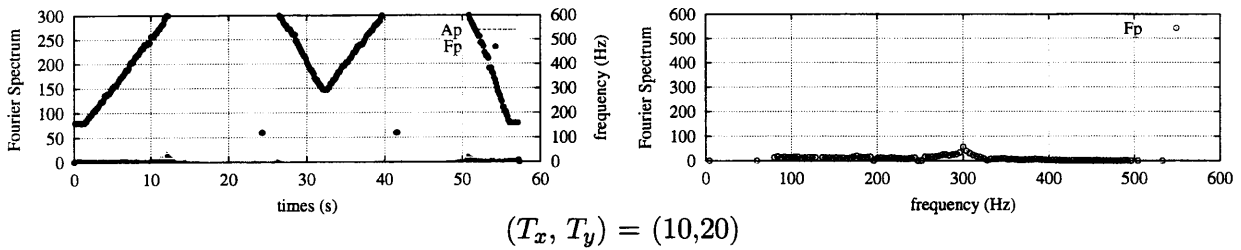
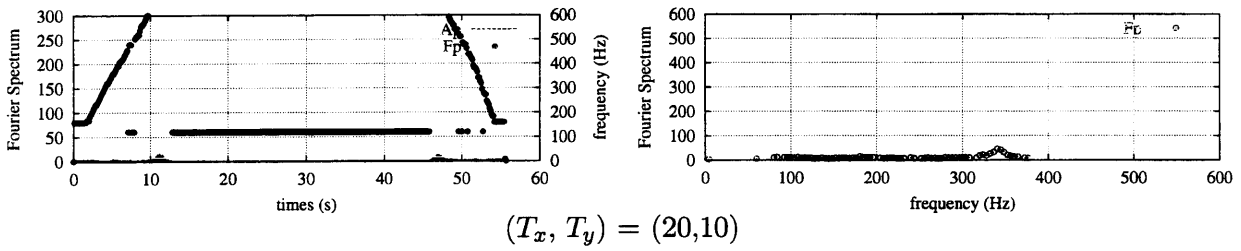
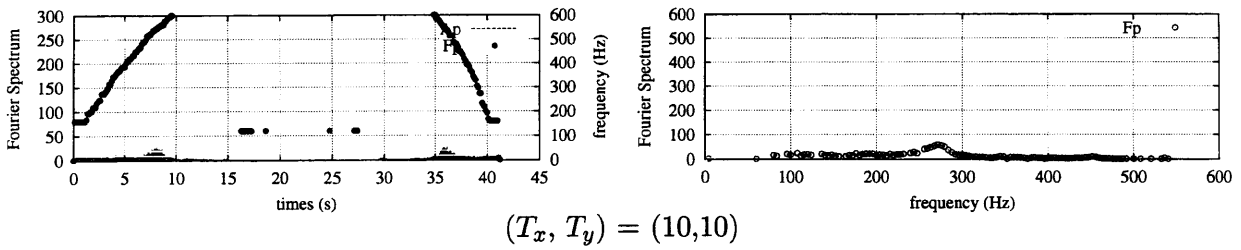
$$(T_x, T_y) = (5,5)$$



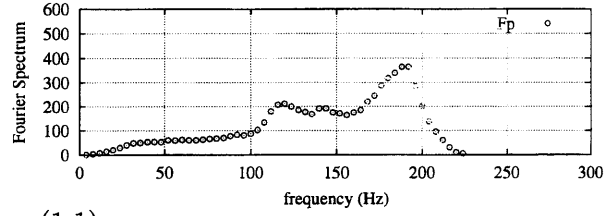
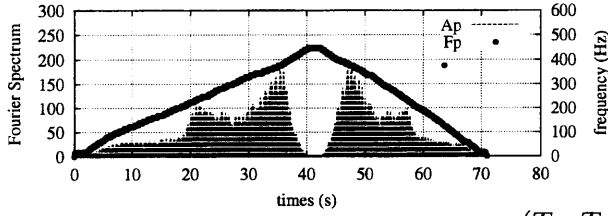
$$(T_x, T_y) = (10,5)$$



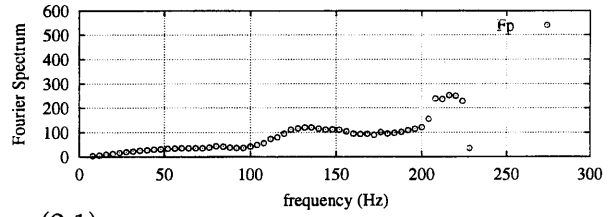
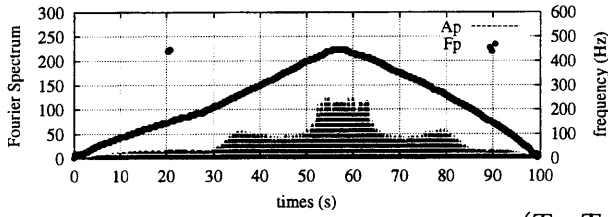
A タイプ 周波数域 (0 Hz ~ 約 1000 Hz)



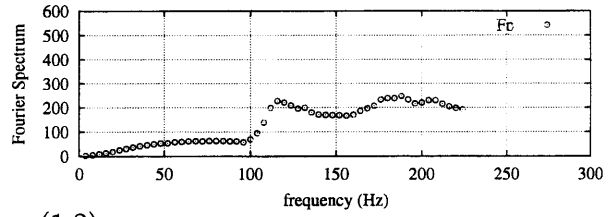
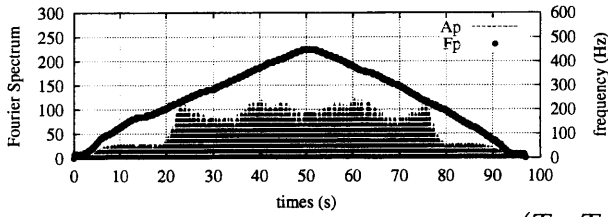
B タイプ 周波数域 (0 Hz ~約 200 Hz)



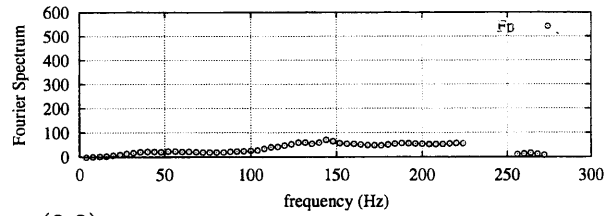
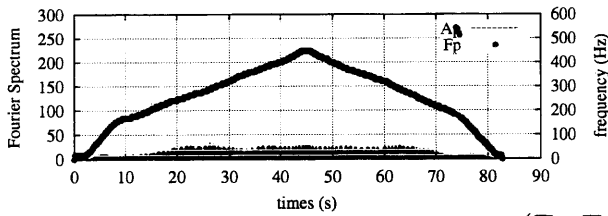
$$(T_x, T_y) = (1,1)$$



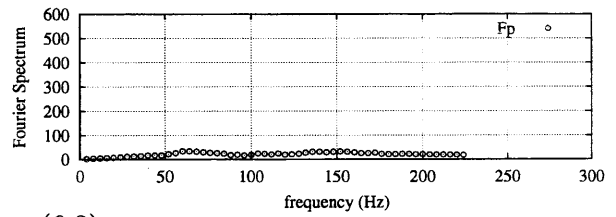
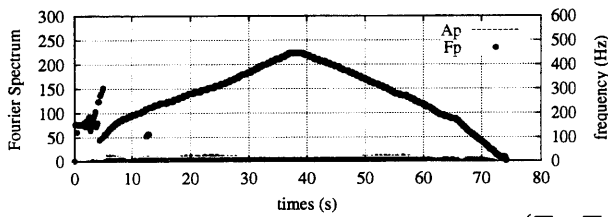
$$(T_x, T_y) = (2,1)$$



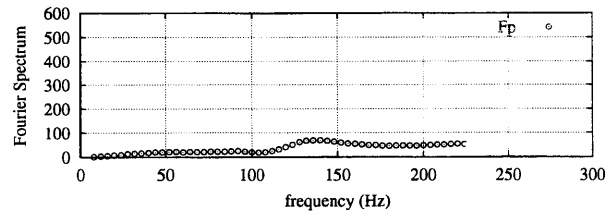
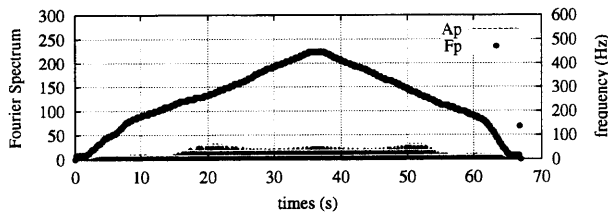
$$(T_x, T_y) = (1,2)$$



$$(T_x, T_y) = (3,3)$$



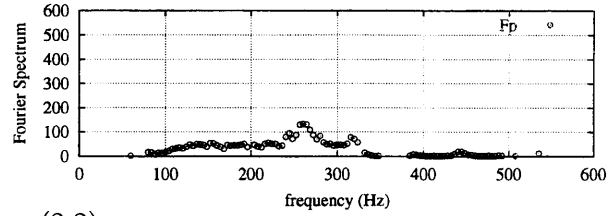
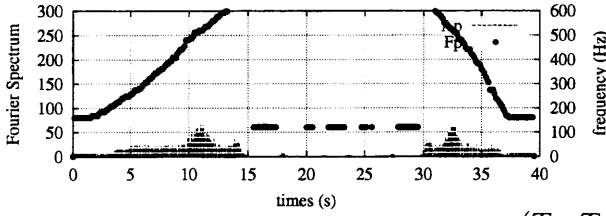
$$(T_x, T_y) = (6,3)$$



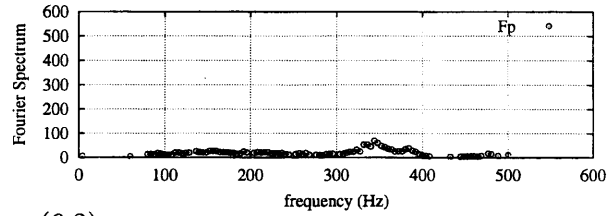
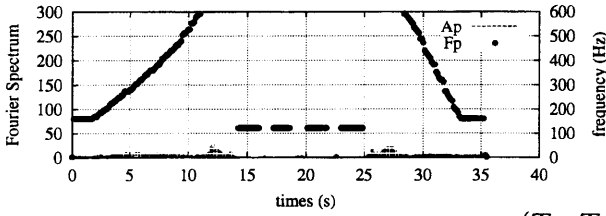
$$(T_x, T_y) = (6,3)$$

$$(T_x, T_y) = (3,6)$$

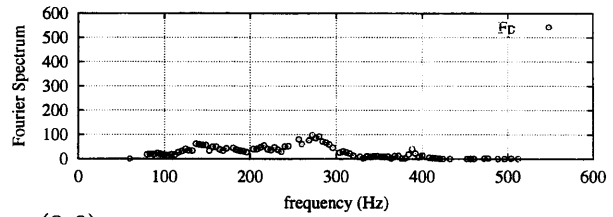
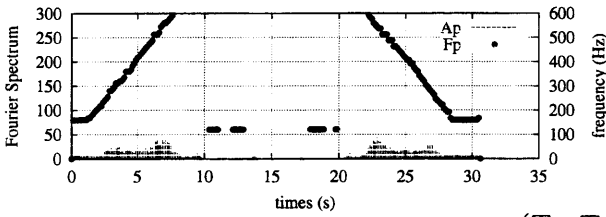
Bタイプ 周波数域(0 Hz ~約 1000 Hz)



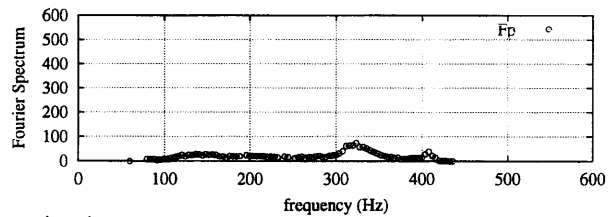
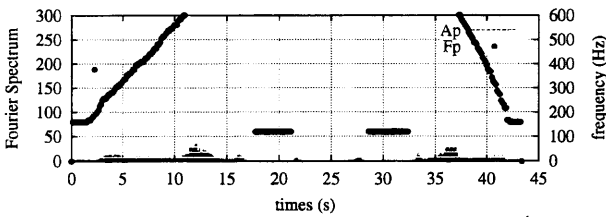
$$(T_x, T_y) = (3,3)$$



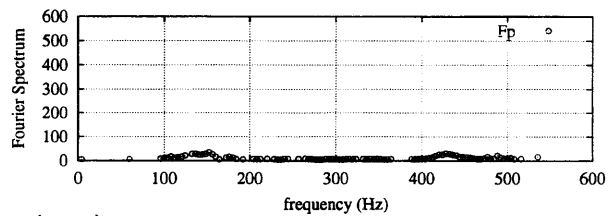
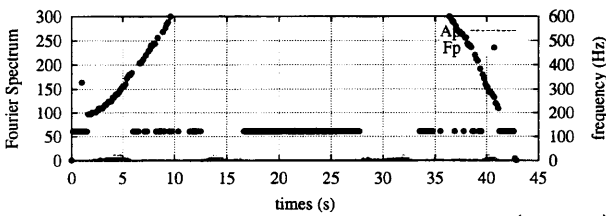
$$(T_x, T_y) = (6,3)$$



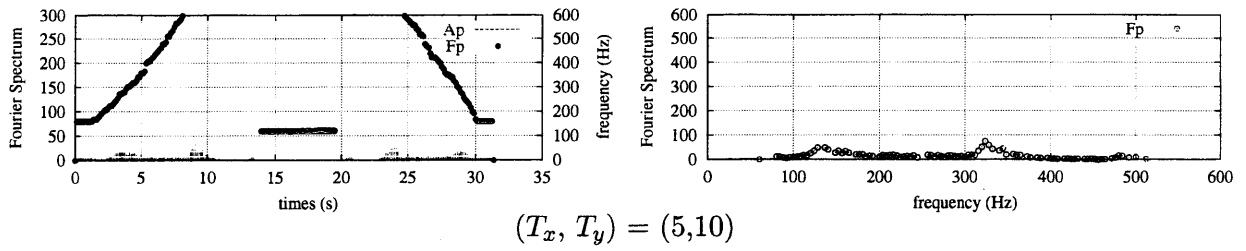
$$(T_x, T_y) = (3,6)$$



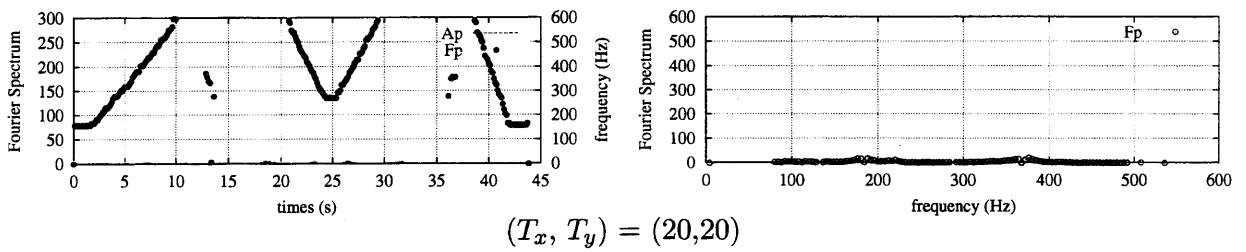
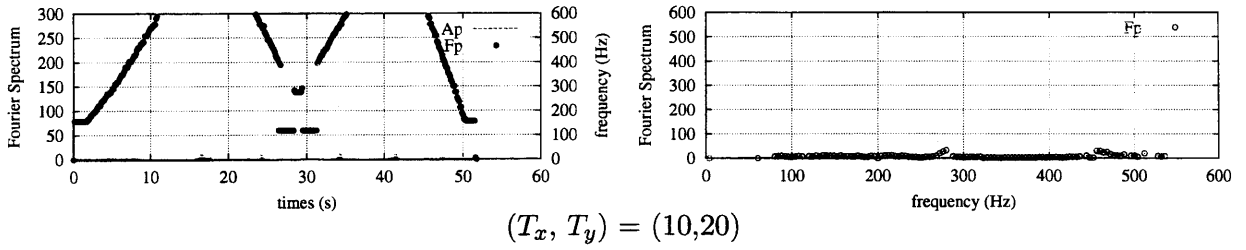
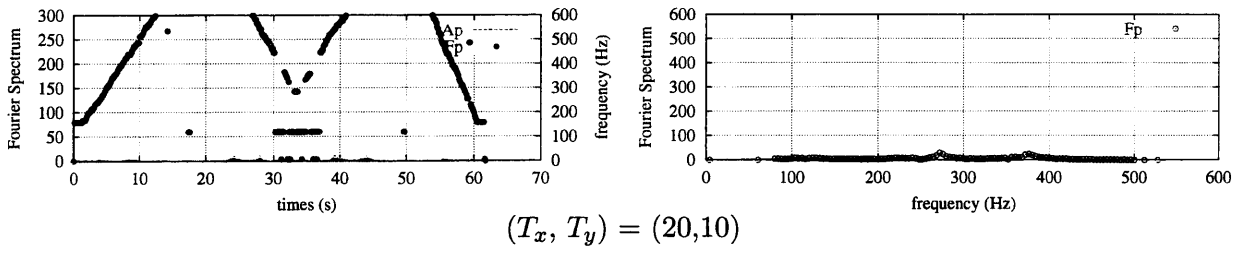
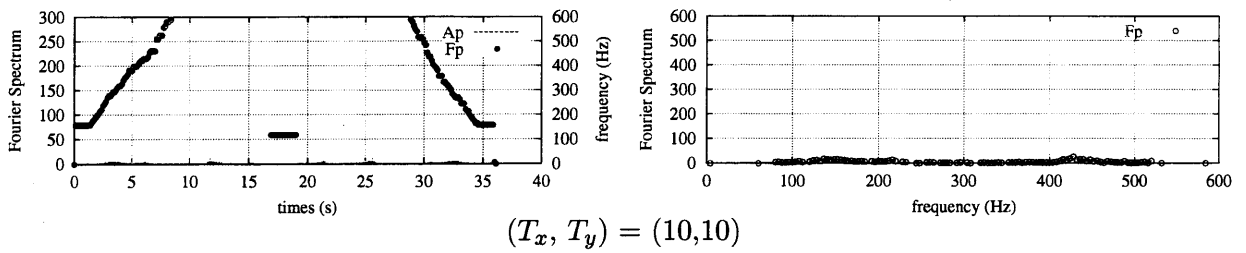
$$(T_x, T_y) = (5,5)$$



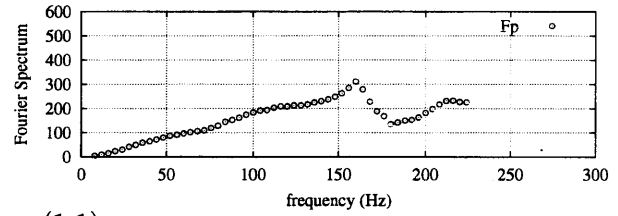
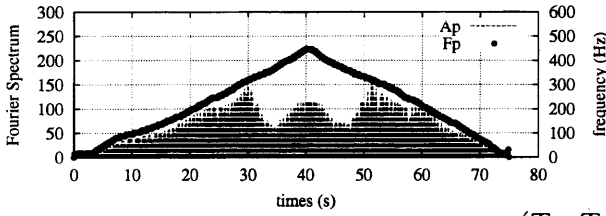
$$(T_x, T_y) = (10,5)$$



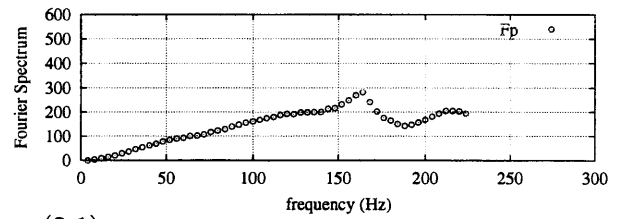
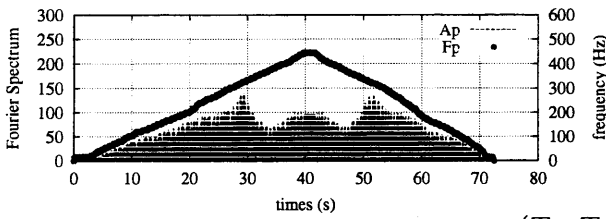
B タイプ 周波数域 (0 Hz ~約 1000 Hz)



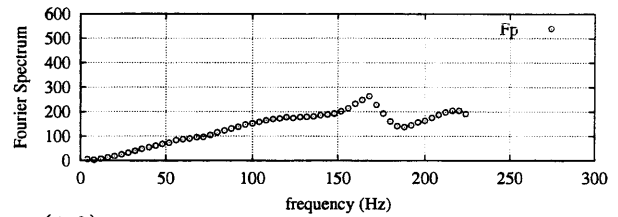
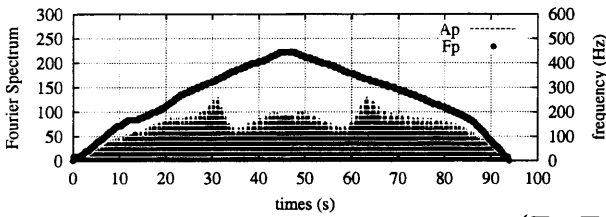
C タイプ 周波数域 (0 Hz ~約 200 Hz)



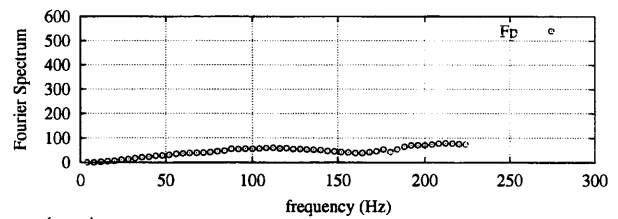
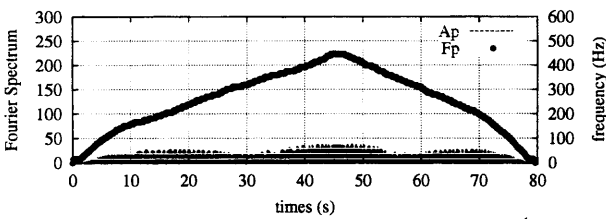
$(T_x, T_y) = (1,1)$



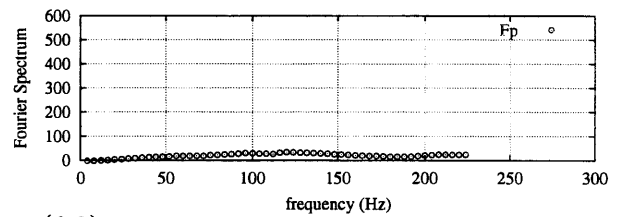
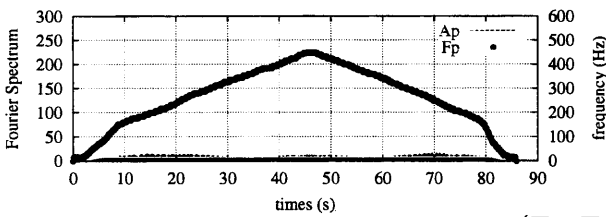
$(T_x, T_y) = (2,1)$



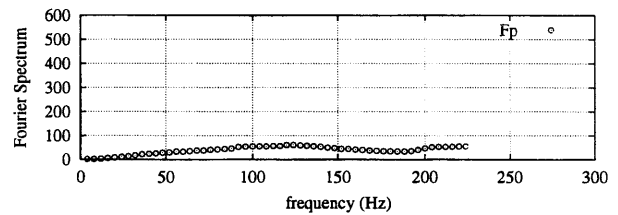
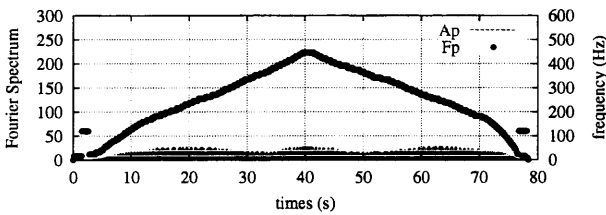
$(T_x, T_y) = (1,2)$



$(T_x, T_y) = (3,3)$

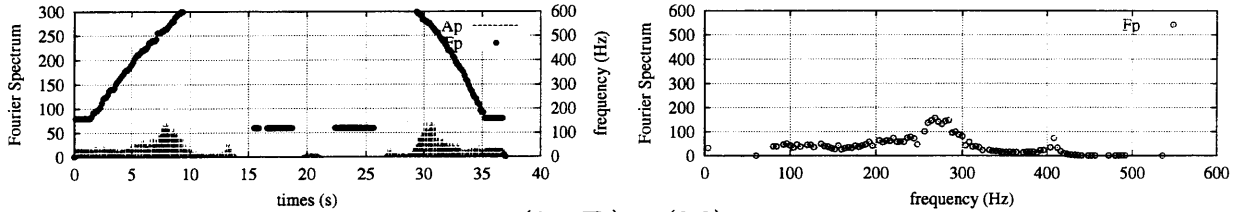


$(T_x, T_y) = (6,3)$

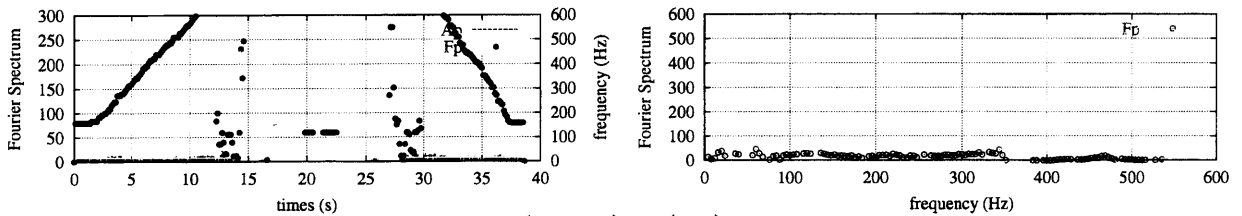


$$(T_x, T_y) = (3,6)$$

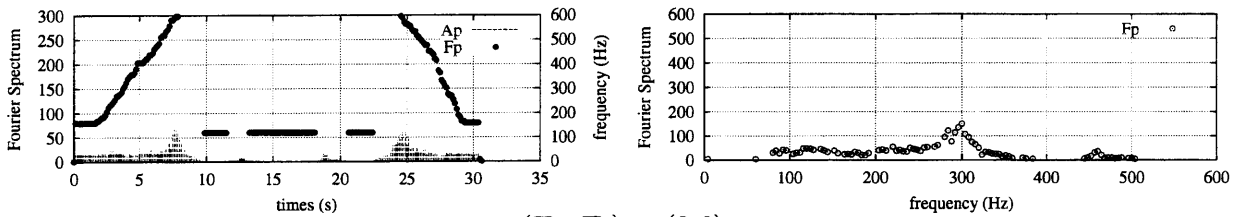
C タイプ 周波数域 (0 Hz ~約 1000 Hz)



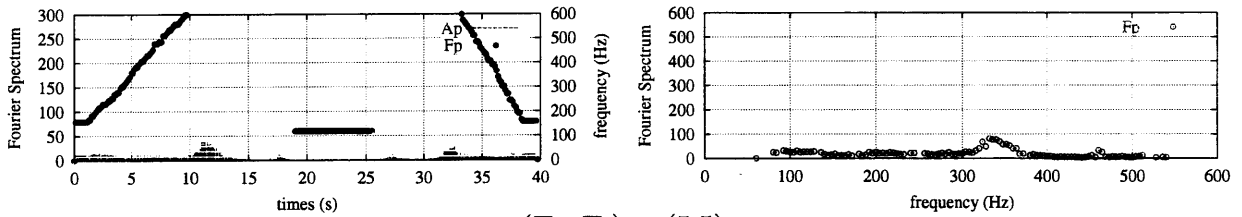
$$(T_x, T_y) = (3,3)$$



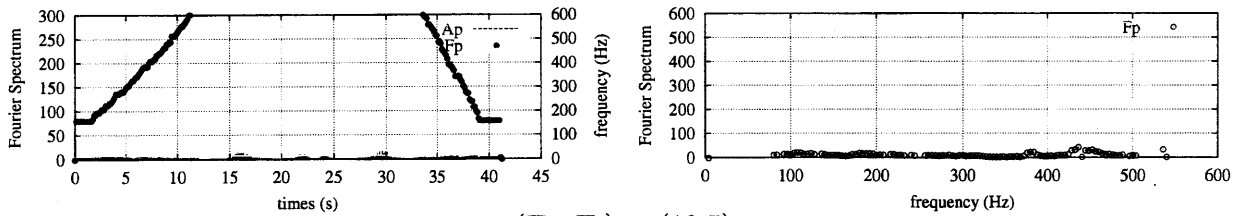
$$(T_x, T_y) = (6,3)$$



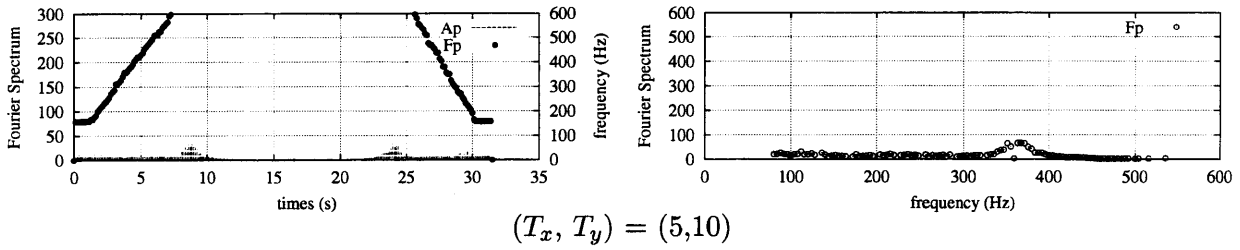
$$(T_x, T_y) = (3,6)$$



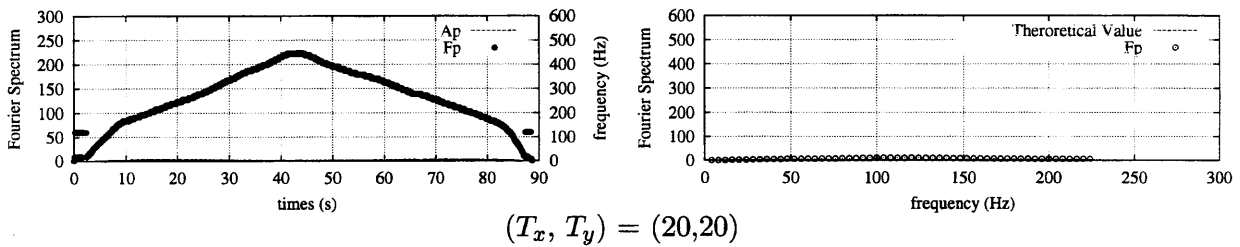
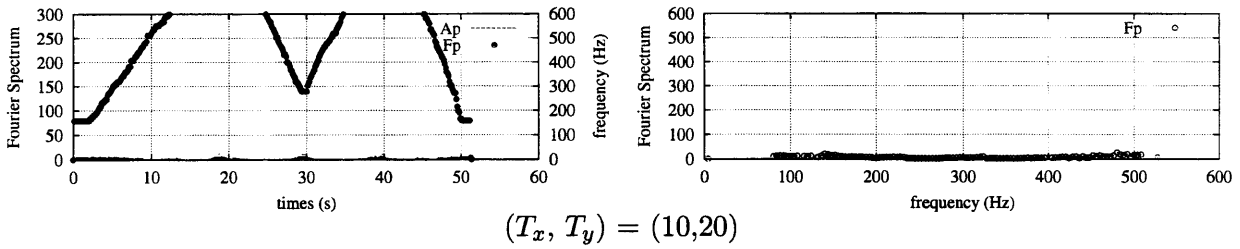
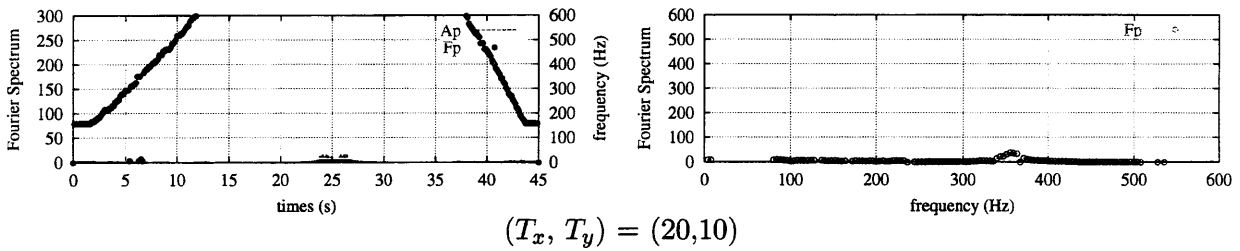
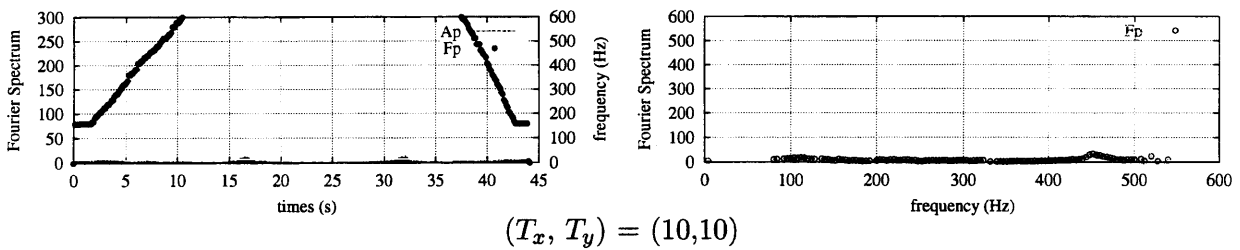
$$(T_x, T_y) = (5,5)$$



$$(T_x, T_y) = (10,5)$$



C タイプ 周波数域 (0 Hz ~ 約 1000 Hz)

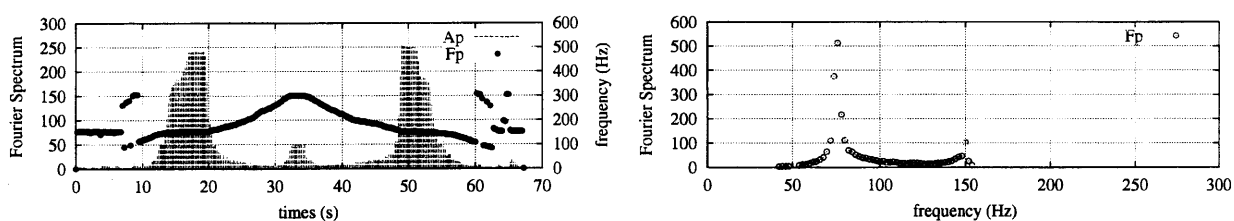


B.3 第二段階実験データの解析

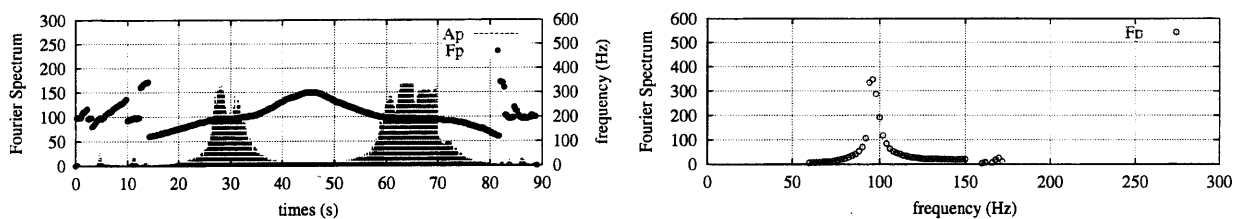
第二段階の実験として行った開放型境界ボックスを用いた実験（H13.12.14 実施）の測定データに対する解析結果のグラフを示す。

FFT 解析において、基本振動数は 2 Hz、ナイキスト振動数は 512 Hz とする。第二段階の実験では、音量の大きさを大小 2 種類で行ったため、グラフは 2 種類の音量の大きさを区別して示した。左側が A_p , f_p の時刻歴グラフ、右側が f_p - A_p グラフである。

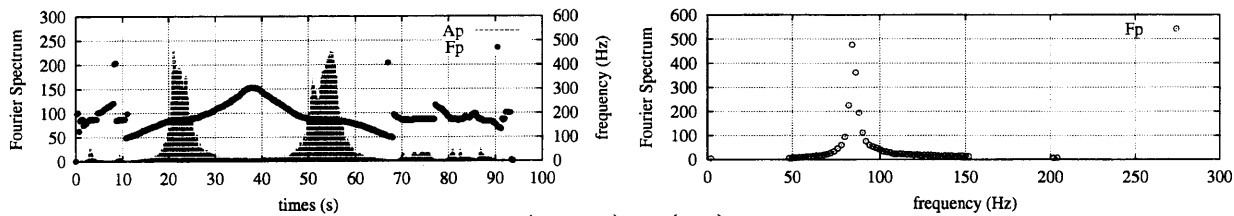
音量（大） 周波数域 (0 Hz ~約 200 Hz)



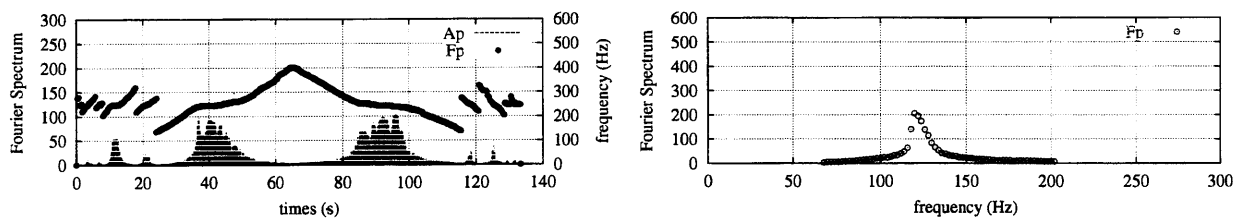
$$(T_x, T_y) = (1,1)$$



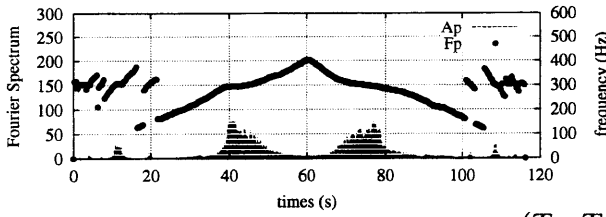
$$(T_x, T_y) = (2,1)$$



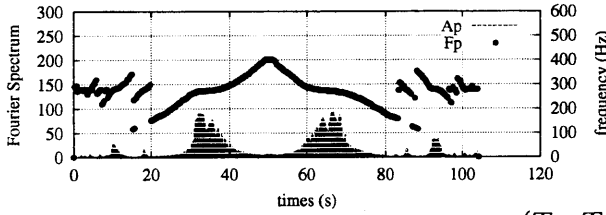
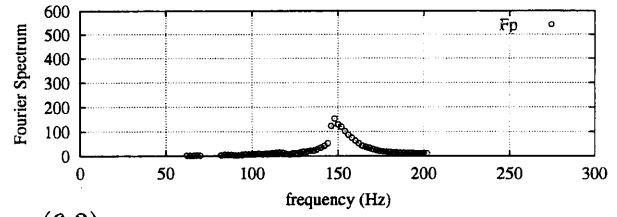
$$(T_x, T_y) = (1,2)$$



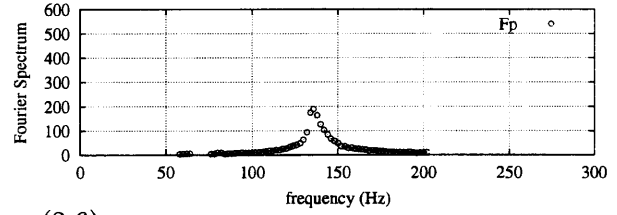
$$(T_x, T_y) = (3,3)$$



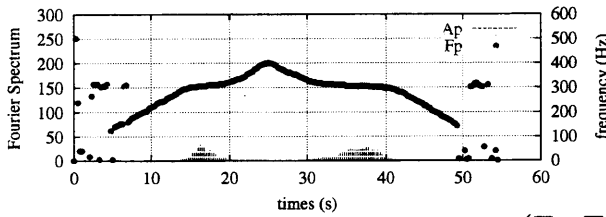
$(T_x, T_y) = (6,3)$



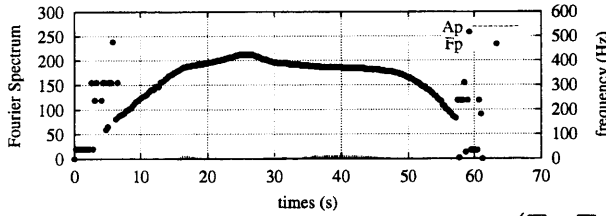
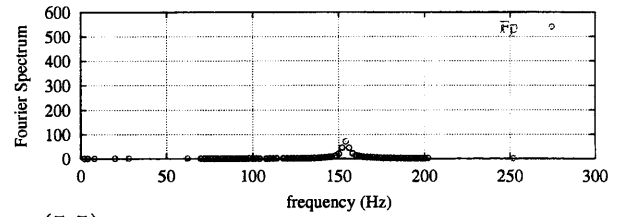
$(T_x, T_y) = (3,6)$



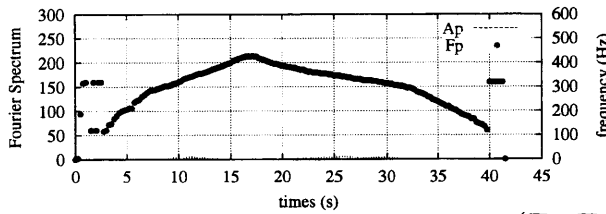
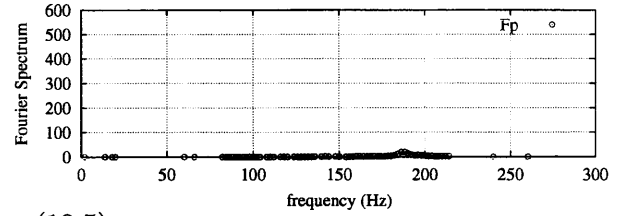
音量 (大) 周波数域 (0 Hz ~約 200 Hz)



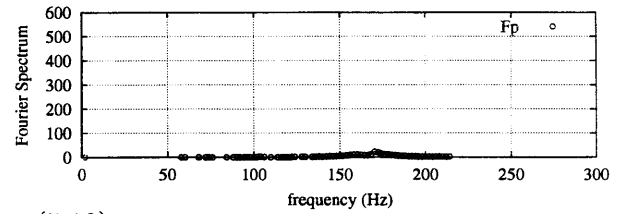
$(T_x, T_y) = (5,5)$



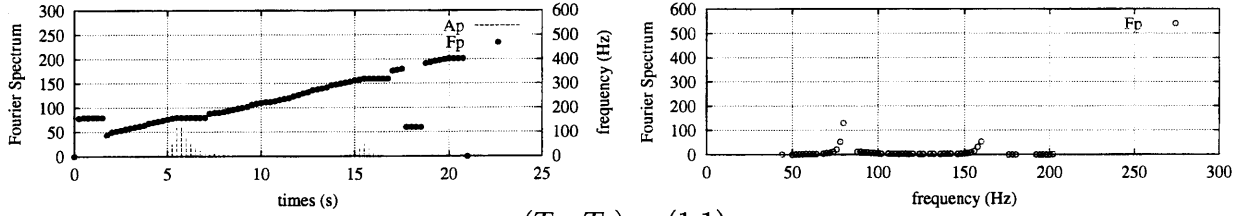
$(T_x, T_y) = (10,5)$



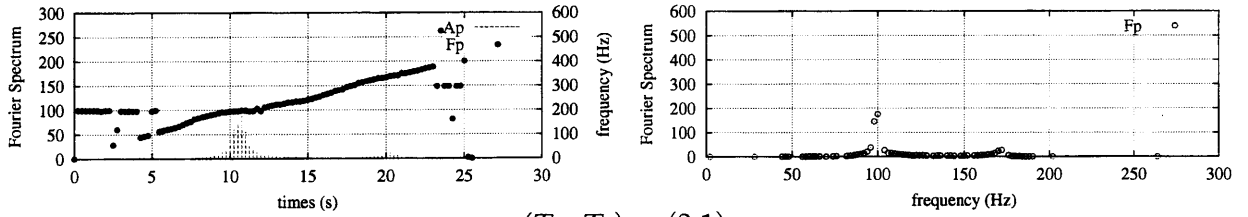
$(T_x, T_y) = (5,10)$



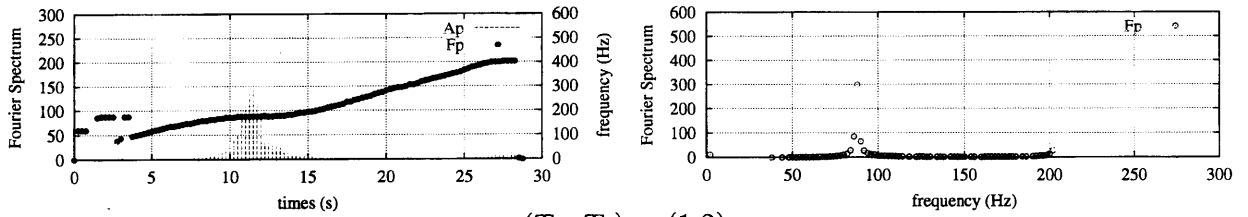
音量 (小) 周波数域 (0 Hz ~ 約 200 Hz)



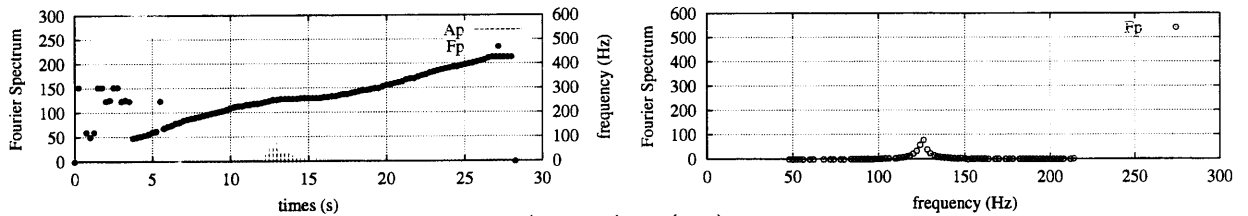
$$(T_x, T_y) = (1,1)$$



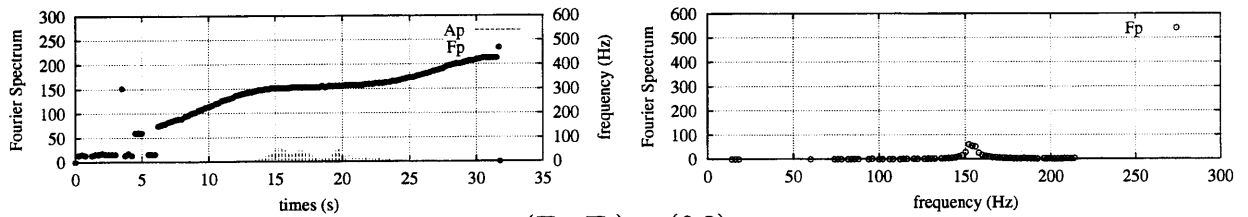
$$(T_x, T_y) = (2,1)$$



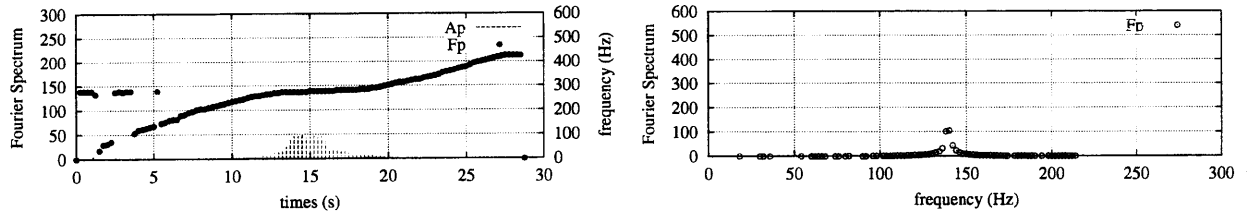
$$(T_x, T_y) = (1,2)$$



$$(T_x, T_y) = (3,3)$$



$$(T_x, T_y) = (6,3)$$



$$(T_x, T_y) = (3, 6)$$