

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

修士論文

EHL 自励振動を用いる平面型発電機の研究

2007年2月20日提出

指導教員 保坂 寛 教授



学生証番号 56789

田中 生馬

目次

第 1 章	序論	1
1.1	緒言	2
1.2	エネルギー供給技術の動向	3
1.2.1	エネルギー供給技術の分類	3
1.2.2	電磁誘導による発電	7
1.2.3	静電誘導による発電	8
1.2.4	熱起電力による発電	9
1.2.5	圧電効果による発電	10
1.2.6	超磁歪効果による発電	12
1.2.7	まとめ	13
1.3	EHL自励振動を用いる平面型発電機	13
1.3.1	流体を用いた発電機	13
1.3.2	発電メカニズム	15
1.3.3	扱う振動の特徴	19
1.3.4	アプリケーション	20
1.3.5	まとめ	21
1.4	本論文の目的と構成	22
第 2 章	実験系の構築	24
2.1	緒言	25
2.2	実験機	27
2.3	周辺機器	28
2.4	振動変位の導出法	33
2.5	振動波形の計測法	35
2.6	まとめ	37

第3章	シミュレータの構築	38
3.1	緒言	39
3.2	シミュレーションにおける近似	41
3.2.1	Navier-Stokes方程式で無視する慣性力	41
3.2.2	無限幅近似	41
3.2.3	電氣的ダンパの与え方	42
3.3	レイノルズ方程式	42
3.4	振動体形状を決定する方程式	45
3.5	陽解法	47
3.5.1	レイノルズ方程式の差分化	47
3.5.2	振動体形状を決定する方程式の差分化	48
3.6	陽解法の安定解析	49
3.7	陰解法	52
3.7.1	陰解法の安定解析	53
3.7.2	振動体形状を決定する方程式の差分化	56
3.8	シミュレーション結果	57
3.8.1	慣性力の評価について	57
3.8.2	自励振動のシミュレーション	58
3.9	結言	60
第4章	圧力分布理論	61
4.1	緒言	62
4.2	無限小幅近似による振動体の応答	62
4.3	モデルの簡易化	66
4.4	各近似手法による剛体板の応答	68
4.4.1	無限幅近似	68
4.4.2	無限小幅近似	70
4.4.3	有限幅近似	71
4.5	各近似手法の比較	74
4.5.1	幅方向圧力分布関数の決定	74
4.5.2	剛体板の変位速度の比較	79
4.6	結言	83

第5章	シミュレータの改良	84
5.1	緒言	85
5.2	有限幅近似の導入	85
5.2.1	シミュレータ構築に用いる近似	85
5.2.2	陰解法による差分化	88
5.2.3	シミュレーション結果	89
5.3	幅方向圧力分布関数の考察	95
5.3.1	流体の圧縮性の仮定	95
5.3.2	絞り効果の導入	97
5.4	幅方向圧力分布関数の改良	106
5.4.1	幅方向圧力分布関数の設定	106
5.4.2	シミュレーション結果	109
5.5	自励振動の発生メカニズム	114
5.6	結言	116
第6章	自励振動計測実験	117
6.1	緒言	118
6.2	自励振動の特徴	118
6.2.1	自励振動の撮影	118
6.2.2	自励振動の履歴	121
6.3	横漏れ・張力をパラメータとした実験	121
6.3.1	振動波形	123
6.3.2	入力圧力に対する周波数・波長・波の速さ	125
6.3.3	自励振動発生限界圧力	130
6.4	実験機の改良	132
6.4.1	流体流入部の改良	132
6.4.2	入力圧力に対する周波数・波長・波の速さ	134
6.4.3	自励振動発生限界圧力	141
6.5	結言	142
第7章	結論	143
7.1	結論	143
7.2	展望	144

謝辞	146
参考文献	147
Appendix1 整流用ダイオードの選定	149
Appendix2 自励振動の流動様式による分類	151
Appendix3 ラプラス方程式の解析解	154

第 1 章

序論

1.1 緒言

近年、ワイヤレスセンサネットワークの実現に向けて多くの研究がなされている。ワイヤレスセンサネットワークとは、移動体・建築物に通信機能をもつセンサを多数付帯・配置し、モノの流れの管理、設備管理、あるいは刻々変化する環境情報の取得といった面で人間の生活環境や産業環境に入り込み、世界を劇的に変革させるシステムである。

このようなネットワークを実現するにあたり、電源供給は非常に重要なファクターと言える。自然界及び人工物に存在する様々なエネルギー源の中で、電気エネルギー源となり得る主なものとしては、振動・圧力・光・熱などが挙げられる。

例えば人体の動作からエネルギーを得ることに着目する。実用化が進んでいる手首の姿勢変化を利用して電気エネルギーを得る腕時計用の回転型発電機^{[1]-[5]}では平均数 μW の発電を行い、時計の消費電力 $1\mu\text{W}$ を賄っている。他に進んでいる研究事例として、人体から放出される熱を使うと数百 mW 、歩行時の足裏の圧力利用で数 W 得られるといった報告もある^[6]。

以上のような多種多様な入力エネルギー形態の中でも、本研究では風で揺れる旗に注目し、旗のはためきを電力として取り出すことを考える。自然界にはいたるところに空気の流れが存在しており、例えば、建物の外壁・屋外保管コンテナ・トンネル道路は、風力を得やすい環境であると言え、それぞれに対して位置探査・防災・防犯に「長期間・メンテナンスなし」で使いたいというニーズがある(Fig1-1)。

本研究ではその実現化を目指し、微小領域中の流体により引き起こされる小型かつ簡易な構造の発電機を提案する。一般に、流体を用いた発電機として、タービン・風車に見られる回転型のもの、ピストンに見られる容積型のものが挙げられるが、いずれも構造が複雑なため小型化には向かない。そこで本研究では、単純な構造のシートによる自励振動、平面間微小距離に有利な静電誘導といった物理現象を利用した平面型風力発電機を提案し、その動作について理論・実験の両面から検証する。

この発電機によって、無線通信を行うのに必要な 10mW 程度、あるいは間欠的な通信を行うのに必要な $100\mu\text{W}$ の発電量を得ることを目標とする。また、本研究の位置付けをFig1-2に示す。

次節では、既存のエネルギー供給技術について詳しく述べる。



建物の外壁

屋外保管コンテナ

トンネル道路

Fig.1-1 風力を得やすい環境

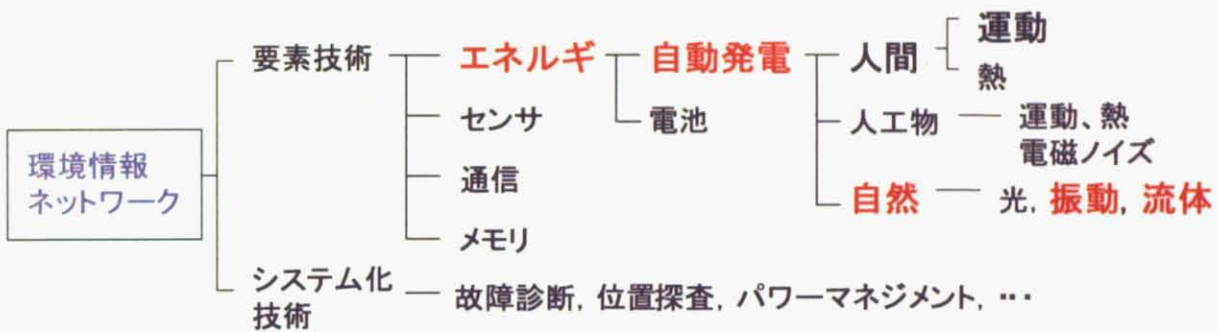


Fig.1-2 本研究の位置付け

1.2 エネルギー供給技術の動向

1.2.1 エネルギー供給技術の分類

近年、携帯用情報機器におけるエネルギー供給源の小型化は必須課題となってきた。そのため、リチウムイオン電池やニッケル水素電池といった化学反応を利用する高エネルギー密度小型二次電池の研究開発も盛んに行われ、実際に携帯電話やペースメーカなどの携帯用電子機器に内蔵されている。しかし電池を用いた場合、充電量には限りがあり、また電池自体の寿命も存在し、充電・交換といった作業が必要になってくる。また使用済み電池の処理といった環境問題も生じる。そのため、自然環境や人工物環境にあるエネルギーを電気エネルギーに変換し、微小情報機器の駆動エネルギーにすることでこれらの問題を解決することが考えられている。Table1-1～1-3では発電機に関する先行研究を年代順に示す。またTable1-4ではそれらを入力エネルギー・エネルギー変換方法で分類する。この表を見ると分かる通り、振動入力を電磁誘導・静電誘導により電力に変換する方法が多く研究されている。これらの中で実用化されているのは回転型発電機(AGS)のみで、構造が複雑なため小型化には工夫が必要である。次節以降ではエネルギー変換方法ごとにその現状を詳細に述べていく。

Table1-1 発電機の先行研究(2004～2006年度)

番号	タイトル	筆頭者	代役	年度	筆頭者の所属組織
1	配向した酸化亜鉛ナノワイヤーによる発電	Z.L.Wang		2006	ジョージア工科大学
2	高性能自転車発電機	安田 陽		2006	関西大学・マザーズ
3	マイクロ発電機	成宮 宏		2006	三菱電機(株)
4	超小型高速タービン駆動発電機	株式会社 ミスズ工業 光洋精工 株式会社		2005	地域新規産業創造技術開発費補助事業
5	自動巻きクォーツ・ウォッチの開発	武石 彰	金山 維史 水野 達哉	2005	セイコーエプソン
6	振動エネルギーからの発電システムの開発	大塚 哲哉	初見 典彦 大熊 政明	2004	東京工業大学
7	エレクトレット高分子膜を用いたマイクロ振動型発電機	荒川 康弘	笠木 伸英 鈴木 雄二	2004	東京大学大学院
8	風圧利用抗力可変型垂直軸風車の基礎研究	西 道弘	吉田 幸一 野田 秀樹 岡田 理恵	2004	九州工業大学
9	ジャイロ型マイクロ水車の研究開発	稲垣 晃	金元 敏明 米内山 弥生 丸山 直利	2004	電業社
10	表面集熱式ソーラーボンドを用いた温度差発電と温室暖房の複合システム解析	鈴木 貴之	越智 敏明 加藤 暢宏 渡辺 俊明	2004	近畿大学
11	声の振動による発電	武藤 佳恭	速水 浩平	2004	慶応義塾大学
12	建造物の微小振動を LSI の駆動電力に変換する回路	西野 壽一		2004	日立製作所
13	歩行運動による発電装置	保坂 寛		2004	東京大学

Table1-2 発電機の先行研究(2003～2001年度)

番号	タイトル	筆頭者	共著者	年度	筆頭者の所属組織
14	圧電発電機構による振動エネルギー回生	安達 和彦	野田 幸平 岩壺 卓三	2003	神戸大学
15	円弧状レールを用いた小型振動発電機的设计	滝井 大輔	中野 公彦 斉藤 俊 松永 全央	2003	山口大学
16	浸透圧を利用した水力発電システムの性能予測に関する研究	安々平 和一	塚田 享彦 庵原 昭夫	2003	宇都宮大学工学部
17	エレクトレットを用いた高出力静電モータ・発電機的设计	源田 敬史	田中 秀治 江刺 正喜	2003	東北大学
18	MEMS-Based Fuel Reformer with Suspended Membrane Structure	Kuei-Sung Chang	Shuji Tanaka Masayoshi Esashi	2003	東北大学
19	発電用マイクロレシプロエンジンの設計	杉山 進	鳥山 寿之	2003	立命館大学
20	振動利用型自動発電機の研究	岡崎 潤	柴 健二 保坂 寛 板生 清	2002	東京大学
21	温度差サイクル発電システム	池田 恭一		2002	科学技術振興機構
22	人の歩行と共振する質量ばね系を利用した携帯用動電型発電機	中野 公彦	中山 敦志 斉藤 俊 黒瀬 智広	2002	山口大学
23	生体振動の利用を目標とした静電発電システム	田代 良一	壁井 信之 小寺 広之 片山 國正	2001	埼玉県立循環器呼吸器病センター
24	複数のフラフープを用いた搭状構造物の渦励振の制振と発電	吉武 裕	末岡 淳男 杉村 泰司 山崎 正則	2001	長崎大学

Table1-3 発電機の先行研究(2000～1987年度)

番号	タイトル	筆頭者	共著者	年度	筆頭者の所属組織
25	ゼンマイ駆動高精度ウォッチの発電・調速制御システムの開発	小池 邦夫	茂木 正俊	2000	セイコーエプソン株式会社
26	フラフープを用いた自励振動の制振と発電	吉武 裕	末岡 淳男 森山 智樹 山崎 正則	2000	長崎大学
27	生体振動の利用を目標とした静電発電システム(ハニカム形可変容量コンデンサによる発電試験)	田代 良一	壁井 信之 柴 岳人 片山 國正	1999	埼玉県立循環器呼吸器病センター
28	熱発電ウォッチの開発	金坂 俊哉	小棚木 進 中林 靖 間嶋 彰弘	1999	セイコーインスツルメンツ株式会社
29	自動巻発電時計における携帯中の回転錘の運動	橋本 泰治	高橋 理 永坂 栄一	1998	セイコーエプソン株式会社
30	超磁歪発電機の創作	江田 弘	中村 浩 山本 佳男	1997	茨城大学
31	薄型 AGS(自動巻発電ウォッチ)の開発	北原 丈二		1996	セイコーエプソン株式会社
32	小型 AGS(自動巻発電ウォッチ)の開発	原 辰男		1996	セイコーエプソン株式会社
33	ウルトラマイクロガスタービンに関する研究			1995	米国 DARPA
35	自動巻発電ウォッチ用駆動回路の開発	早川 求	矢部 宏 吉野 雅士	1988	セイコーエプソン株式会社
36	発電機付腕時計	猿渡 朋澄	池田 仁志 野尻 和雄	1987	セイコー電子工業株式会社
37	ウォッチ用自動発電機構の開発	長尾 昭一	安川 尚昭 吉野 雅士	1987	セイコーエプソン株式会社

Table1-4 入力エネルギー・エネルギー変換方法による分類

		エネルギー変換方法				
		電磁誘導	静電発電	熱起電力	圧電効果	超磁歪効果
入力エネルギー	振動	15,20,22,24,26,29 31,32,34,35,37	7,23,25,27		14	
	風力	8				30
	水車	9,16			6	
	熱			10,28		
	手動	25,36				

1.2.2 電磁誘導による発電

(1) 回転型発電機 AGS (Automatic Generating System)

腕時計用を実現されているもので、人間の手首の姿勢変化を利用し発電を行う。AGSの一例としてSEIKO KINETICの構造をFig.1-3に示す。

作動原理は、姿勢変化によって①の回転錘が回ると、その回転は②の歯車を介して約100倍に増速され、③のAGロータを毎分約1万～10万回転という超高速で回転させる。その結果、発電コイルに誘導起電力が発生し、この交流電圧は整流された後、④のキャパシタに充電される。これによって⑤の水晶振動子やステップモータが駆動する仕組みである。

スペースの制約でコイルの占める体積が制限されてしまうが、輪列で増速することにより電氣的なダンパを相対的に大きくすることで補っている。限られた入力エネルギーから効率よく発電を行うため、輪列の機械的損失をベアリングの使用などにより極限まで下げている。位置エネルギー変化に対する変換効率率は30%で、平均数 μW の発電を行い、腕時計の消費電力 $1\mu\text{W}$ を賄っている。現在、完全に充電したときは3ヶ月以上の駆動可能なものが実用化されている。

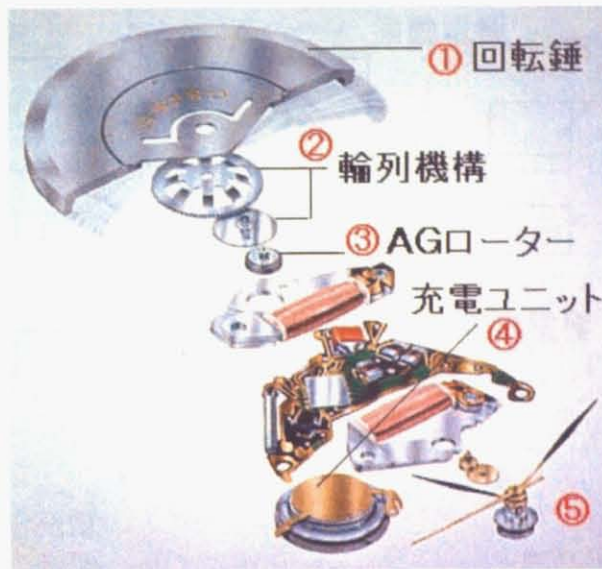


Fig.1-3 回転型発電機 AGS

1.2.3 静電誘導による発電

エレクトレット発電⁷⁾は、燃料電池に比べて高い発電密度が得られると考えられる超小型熱機関による発電を想定し、そこで用いられる振動型の発電素子の開発を目的としている。また、このような発電機は人体の動きなど微小な振動から発電する電力減としてユビキタス機器（スマートタグなど）への利用も期待できる。

マイクロスケールの発電機では主に電磁誘導型が用いられるが、スケールが小さくなると、実用的な出力を得るためには非常に高周波数で動作させる必要がある。また、多重巻きコイルなど複雑な構造が必要であることなどから、マイクロスケールの発電機に適しているといい難い。一方、静電誘導は、構造が比較的簡単であること、電磁誘導よりも低い相対速度で高い出力電圧を得られることからマイクロ発電機に適しているといえる。さらに、振動機構は構造が簡単であり、回転運動の場合の軸受けのような摩擦要素を持たない。また、低周波数の振動は環境に広く存在し、このエネルギーを電気エネルギーに変換できればマイクロ発電機として活用の幅が広がることなども静電誘導型発電機の利点としてあげることができる。

エレクトレット発電機はFig.1-4のようにモデル化できる。C₁にエレクトレットなどで予め電荷を蓄えておき、C₂の容量変化により電荷を移動する。従って外部抵抗に対して電流が行き来することで電力を取り出すことが可能となる。

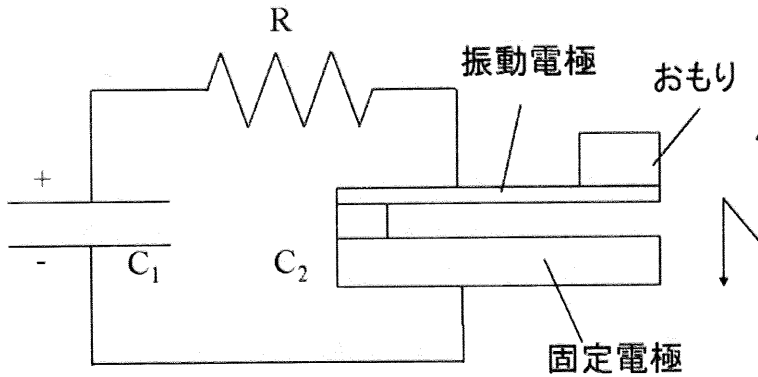


Fig.1-4 発電機の構造

1.2.4 熱起電力による発電

金属または半導体に温度差を与えると起電力が生じる。この現象はゼーベック効果と呼ばれ、極地や遠隔地の発電機、温度センサ等に応用されている。Fig.1-5のように金属もしくは半導体で作られた長さLの細線の両端に温度差 ΔT が与えられた時の両端の起電力Vは次式で与えられる¹⁸⁾。

$$V = a \cdot \Delta T = a(T_h - T_c) \quad (1-1)$$

この時、 a はゼーベック係数と呼ばれ、一般に金属材料に比べて半導体材料の方が大きく、金属材料でも遷移金属の方が典型金属よりも大きいという傾向がある。

エネルギーを使用すると大半は熱エネルギーとして外部に放出されるが、その排熱の再利用が可能となるためエネルギー資源の節約にもつながる。効率は一度差で0.04%程度である。可動部分がなく、小型・軽量という利点がある。また、老廃物がないので環境対策面でも優れている。さらに、耐久性にも優れ、メンテナンスも容易である。現在、このゼーベック効果を利用し、人間の体温と外気の温度差で発電しその電力で駆動する腕時計が市販されている。Fig.1-6に構造図を示す。装着時に生じる1~2°Cの温度差で発電し、温度差1°C当り0.2V、フル充電で約10ヶ月駆動可能との報告がある¹⁹⁾。

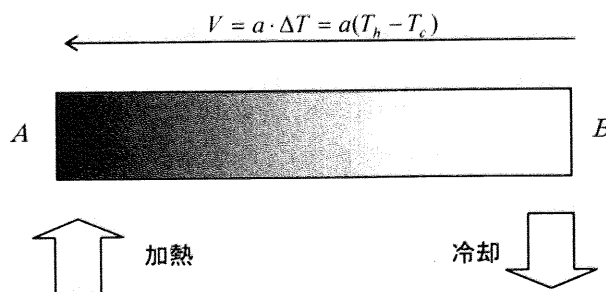


Fig.1-5 ゼーベック効果

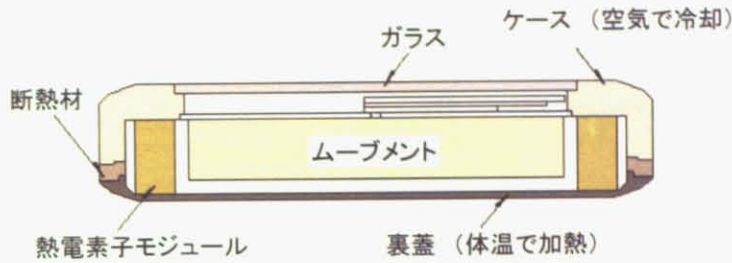


Fig.1-6 熱電発電腕時計構造図

1.2.5 圧電効果による発電

圧電素子に歪みを加えると圧電効果により電圧が発生する。この現象を利用した例としてレコードのピックアップカートリッジや血圧計、マイクロホンや超音波センサ等が挙げられる。圧電素子の圧電効果を利用したセンサは、変換効率が高く小型で高感度を得られるため、小型化・軽量化・簡素化でき低コストにできる。ここで、圧電素子を利用した場合の発電量を見積もる方法として衝撃センサを参考にする。Fig.1-7に衝撃センサの構造を示す。円板形の圧電素子と金属板を貼り合わせたユニモルフ素子を外装ケースに周辺支持状態で取付けた構造となっている。機械的衝撃がケースに加わると、素子の実効質量 m_0 、加速度 g が働き、 g に比例した電荷 Q が発生する。この関係を式(1-2)に示す^[10]。

$$Q = Ad_{31}m_0g \quad (1-2)$$

ここで、 A は圧電素子及び金属板の寸法と弾性定数により決まる定数で、 d_{31} は圧電定数である。発生電荷 Q は開放出力電圧 V として式(1-3)に示す。

$$V = \frac{Q}{C} \quad (1-3)$$

ここで、 C は圧電素子容量である。Fig.1-8にパルス状の衝撃を印加した時の出力電圧特性例を示す。また、共振周波数は式(1-4)で与えられる。

$$f_0 \approx \frac{0.233t}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (1-4)$$

ここで、 t は金属板厚み、 r は金属板半径、 E は金属板ヤング率、 ρ は金属板密度、 σ は金属板ポアソン比である。共振周波数以下の領域では、振動系は弾性制御となり、周波数に対して一定の出力電圧を発生する。周波数特性を Fig.1-9 に示す。

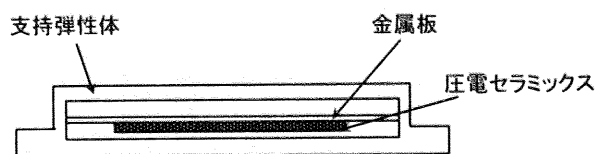


Fig.1-7 衝撃センサの構造

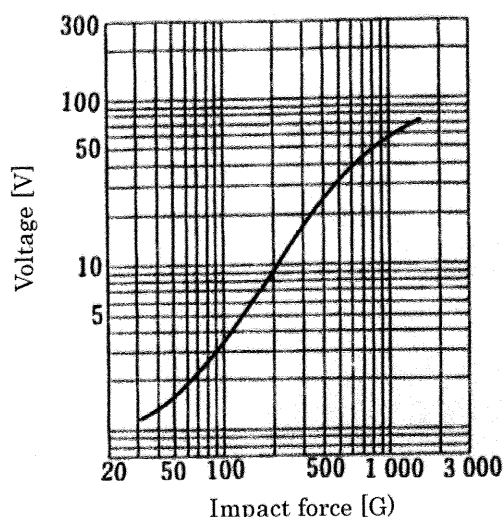


Fig.1-8 衝撃値対出力電圧特性例

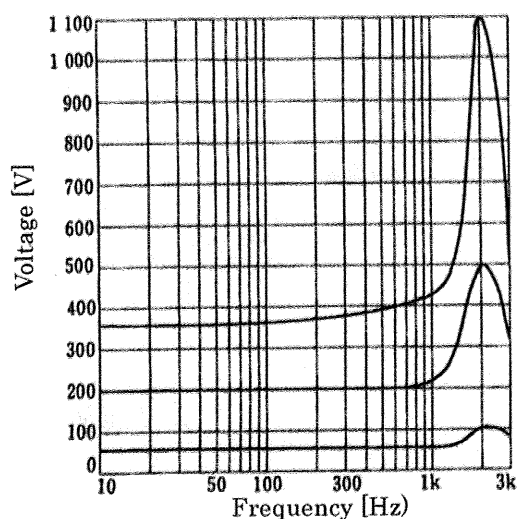


Fig.1-9 圧電素子の周波数特性例

圧電素子の応用例として以下のような圧電バイモルフが開発、実用化されている^[11]。圧電バイモルフは小型、軽量、安価で、一旦濡れても乾燥すれば元に戻る耐水性の特徴をもつ。圧電バイモルフの構造を Fig.1-10 に示す。厚み方向に分極された2枚の厚い圧電素子から構成されており、内部に電極が埋め込まれ貼り合わされている。圧電バイモルフの変位 ΔL を加えると一定方向の起電力が発生する。圧電バイモルフを使った発電方式として、Fig.1-11 のように衝突方式、衝撃自由振動方式、強制振動方式の3つが考えられる。図左の衝突方式は、衝突物としてパチンコ玉を用いた場合、瞬時ではあるが数10mW程度の電力が発電されるためLEDを点滅させることに向いている。次に、図真ん中の指で弾く程度の衝撃自由振動方式の場合、数100 μ Wの電力が発電される。最後に、図右の指で振動させる程度の強制振動方式の場合、数 μ Wの電力が発電される。

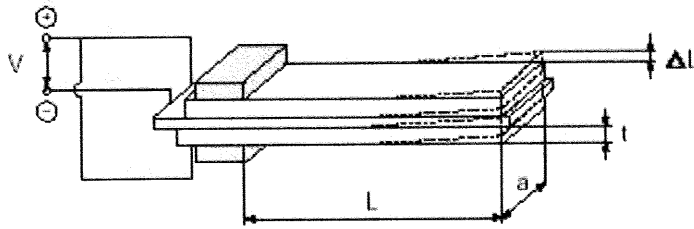


Fig.1-10 圧電バイモルフの構造

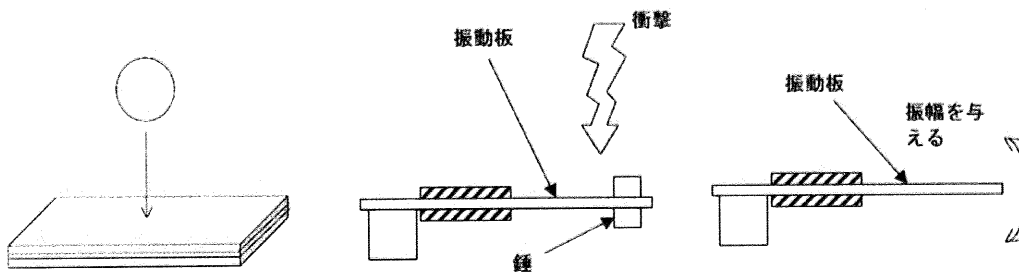


Fig.1-11 圧電バイモルフの発電方式

1.2.6 超磁歪効果による発電

超磁歪材料に強制的に変位を与えることにより、磁化量が増加する逆磁歪効果により、衝撃のエネルギーを電気エネルギーへ変換、蓄電することが可能である。

研究レベルでは、Fig.1-12 に示す磁歪発電機を用いバイアス磁界を 24kA/m かけた条件下で、質量 36g の硬球を高さ 15cm 自由落下させた場合、 300 巻のコイルで約 35V の出力が、また、落下高さ 10cm コイルの巻き数を $6,753$ 巻とすると約 700V の電圧が発生するとも報告されている^{[12][13]}。また、 900 巻のコイルを用いて発電を行い $2.2\ \mu\text{F}$ のコンデンサに蓄電した時、 2.2mJ の電気エネルギーが得られている。この場合の位置エネルギーから電気エネルギーへの変換効率は約 5% とも報告されている。

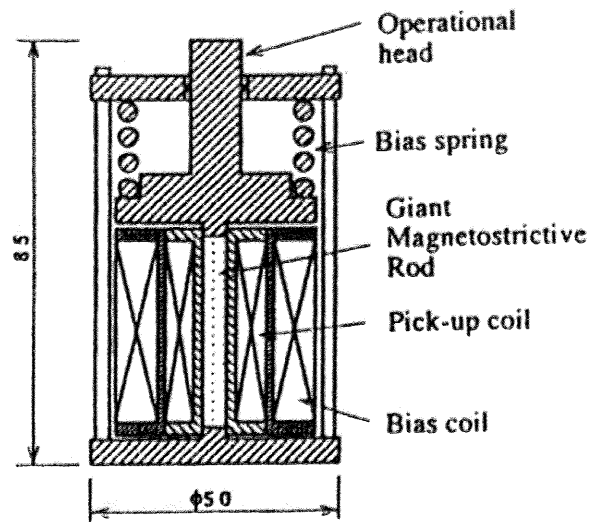


Fig.1-12 超磁歪発電機断面図

1.2.7 まとめ

以上のように、環境中の振動や熱を利用する発電機にはさまざまな種類のものが存在している。大別すれば、人の動きを利用する発電機、自然界に存在するエネルギーを利用する発電機、人工物から発するエネルギーを利用する発電機ということになるが、一般的にワイヤレスセンサネットワークの電力源として外部のエネルギーを電力に変換して利用することはエネルギー密度が低くなる反面、エネルギー供給量を無限大とみなすことができるという特徴を持つ。それゆえ、効率良く電力として利用することができれば電池不要で半永久的に動作を続けることが可能な情報機器の実現も原理的には可能となる。

本研究では情報機器用の電源デバイスとして、自然界や人工物環境に存在する流体エネルギーを用いた発電機を考えている。自然界にはあらゆるところで流れが存在しており、また、人工物についても工場の配管や構造物のすきまなど、利用できる流体エネルギーは少なくない。具体的には流体エネルギーを用いた発電機として、微小なすきま流れによって励起される自励振動という現象と静電誘導を用いた発電機を提案している（アプリケーションについては後述する）。次節以降、まず流体を用いた発電機について概説し、その後本研究で提案する「EHL自励振動を用いる平面型発電機」について具体的な提案を行っていく。

1.3 EHL自励振動を用いる平面型発電機

1.3.1 流体を用いた発電機

前節で述べたように、ワイヤレスセンサネットワークのエネルギー供給源の小型化は必須課題であり、本研究ではその解決策として自然界や人工物環境に存在する流体のエネルギーを利用することを提案する。

本研究で提案する発電機に求められる仕様として、微弱無線通信を行うのに必要な10mW程度、あるいは間欠的な通信に必要な100 μ W程度の電力を供給可能なことが挙げられる。発電機を小型化すると入力可能な流量、あるいは発電量に応じた必要流量が必然的に低くなる。流体の供給圧力は幅広い範囲が考えられるが、仮に100kPaの程度であれば、10mW、100 μ Wの電力に相当する流量は0.6l/min、0.006l/minである。これは一般的な流体発電機よりずっと小さな値であるため、微小領域における低流量の流体で効率的な発電が可能であることが要求される。さらに、発電機の構造が複雑であると小型化が困難であるため、発電機自体の構造がシンプルであることも必要である。本研究では以上の要求仕様を踏まえ、微小領域における低流量の流体を用いて10mW～100 μ W程度の発電が可能で簡素な構造の発電機を提案する。

そこで問題になるのがエネルギー変換方法である。本節では、現在普及している流体を用いた発電機について説明し、本研究で提案する発電機の要求仕様を満たすかどうかの評価を行う。

流体を用いた発電機は、主に回転型発電機（タービンなど）と容積型発電機（ピストンなど）に分類される。回転型発電機は、流体の慣性力を利用して発電を行う機構である。発電機に流入してくる流体の進路が曲がると、流体の慣性力が発電機に力を及ぼし、発電機の回転運動を引き起こされる。すなわち、回転型発電機は流体の運動エネルギーを発電機の回転エネルギーに変換する装置であるといえる。容積型発電機は、流体の圧力を利用する機構である。容器内に封入された流体の圧力を高めることで、流体はピストンに力を及ぼす。その力が原動力となり、ピストンが加速するためにエネルギーを取り出すことができる。

それぞれの例をFig.1-13, Fig.1-14に示す。Fig.1-13の左側の写真は現在MITが研究を進めているマイクロガスタービン^[4]を示す。この発電機は軍事・ロボット関連の用途のために研究されており、大きさは直径12mm、厚さ3mm、重さ1g、発電時の回転数は240万回転。流量40l/minで10~20Wの発電量を得ることができる。Fig.1-14はバーミンガム大学にて研究されているマイクロピストンエンジン^[5]である。この発電機はバッテリーに比べてエネルギー密度が高い点で優れている。現在開発されているものには、圧縮CO₂ガスを利用したものとプロパンガスの燃焼を利用したものの2種類があり、いずれも形状は類似しているが材質が異なっている。



Fig.1-13 回転型発電機

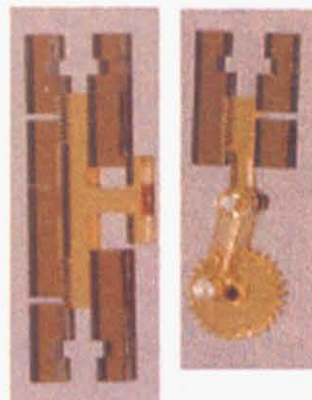


Fig.1-14 容積型発電機

ここで要求仕様の話に戻る。本研究で構想するアプリケーションに対して、構造が簡易な発電機が必要であることは既に述べた。回転型発電機は確かにエネルギー変換効率は良いが、小型化すると構造が複雑になるという問題を抱えている。容積型発電機もまた、密閉構造が複雑なため小型化が困難である。さらにピストンのような摺動する機構を小型化すると、摩擦や吸着といった問題が生じることも知られている。

以上より、回転型発電機・容積型発電機を微小領域に適用した場合、構造が複雑なために小型化の困難であり、要求仕様を満たさない。そこで本研究では、回転型にも容積型にも属さず、構造が簡易で小型化が容易な発電機を提案する。

1.3.2 発電メカニズム

前節で述べた要求仕様を満たす発電機として、本研究では先行研究で示した静電型発電機を対象とする。発電機の構成要素は自励振動部・電力変換部・充電部に大きく分けられる。流入端へ空気を送り込むと、自励振動部において、振動体は空気の流れに引き寄せられるようにして微小振動を起こす。すなわち、流体の運動エネルギーから振動体の振動エネルギーへの変換がなされる。発生した進行波は自励振動部から出て行き、電力変換部へ到達する。一方で、振動体はエレクトレットで帯電させた状態を保ち、Fig.1-15のような櫛歯状に配置された電極に進行波が達すると、振動体が電極Aに電荷を溜めることにより静電引力が働き、進行波はその引力に逆らって進む。また、電極Bとの間でも同様にして静電引力に逆らって進む。こうして電極A・Bに貯まる電荷が交互に変化する過程で、振動体は電極に対して仕事をし、Fig.1-16に示された回路の機能により充電部に電荷が貯まる仕組みとなっている。

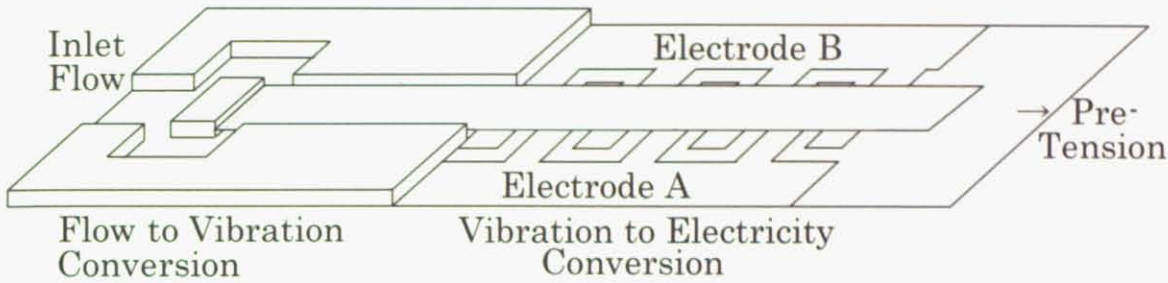


Fig.1-15 静電型発電機モデル

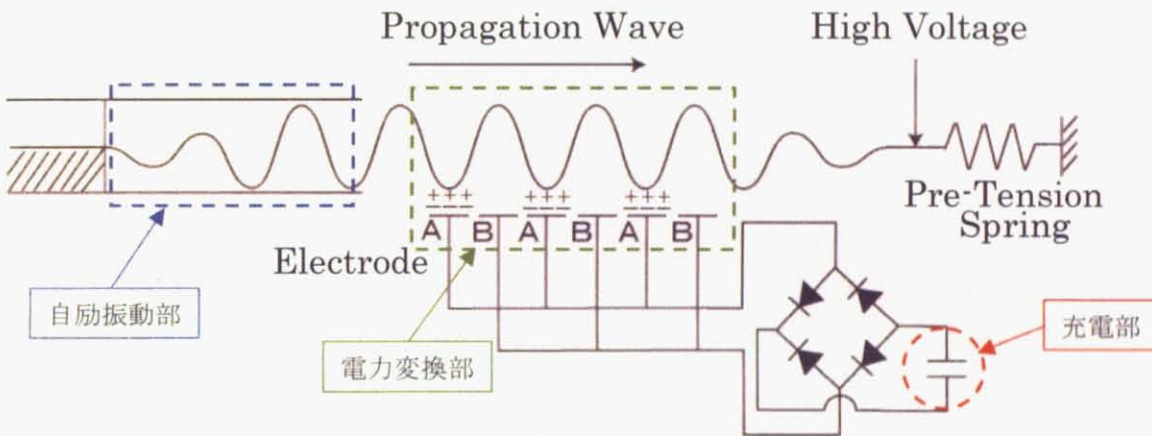


Fig.1-16 静電型発電メカニズム

本発電機において利用する特徴的な現象は主に二つある。自励振動と静電誘導である。自励振動とは、振動発生の原因である非振動的エネルギーが、その系の内部の因子により振動的な励起エネルギーに変換されて発生する振動のことである。例えばハーモニカや草笛は一種の自励振動で、流体からエネルギーを受け取って音が鳴る。本研究においては、流体が薄いシート状の振動体にエネルギーを与えることで、不安定な振動を起こす現象を指す。振動体は流体の運動エネルギーの一部を受け取り、振動エネルギーを得る。

次に振動体と電極の間で発生する静電気力を介して振動エネルギーを電力に変換する。静電気力は表面力であるので振動で得られる平面間距離の微小振動を利用するのに有利である。そのため、発電機の構造をシンプルにすることが可能であり、微細化が容易であるというメリットを持つ。以下、発電のメカニズムについて述べていく。

最初に電荷を貯めたコンデンサの一種であるエレクトレット^[16]をFig.1-17のように振動体および流路下端に装着した電極と繋ぐ。電極Aと電極Bの対は、振動体の振動により極板間距離が変わるため一種の変容コンデンサと見なすことができる。振動により電極Aと電極Bの距離が近づくと容量が大きくなるため、極板間電位 V が下がる。その

ためエレクトレットから電極に向かって電流が流れる。次に電極間距離が遠くなると容量が小さくなり、 V が上がる。そのため電極からエレクトレットへ向かって電流が流れる。以上を交互に繰り返すことで交流を取り出す仕組みである。

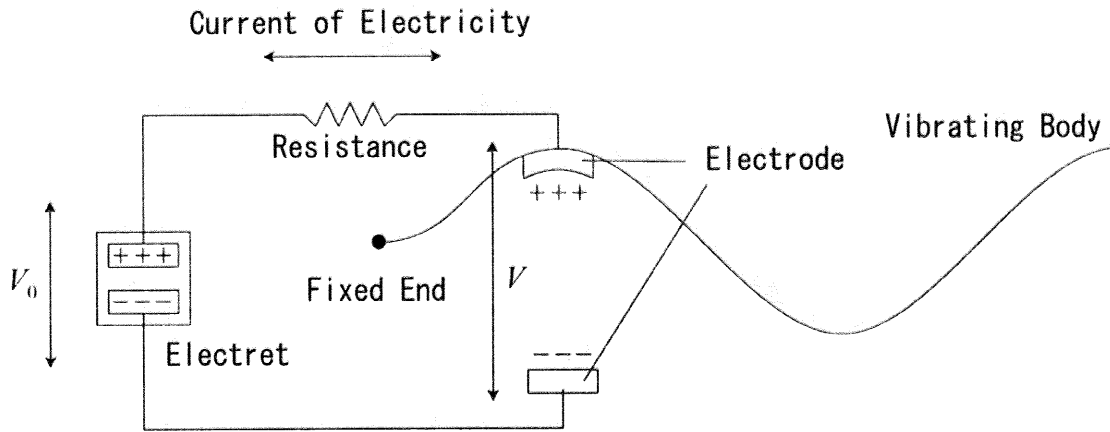


Fig.1-17 発電原理

以上のようにエレクトレットを電荷供給源として用いることで電力を得ると同時に振動体を帯電させることができる。次に帯電した振動体から電力を取り出す方法として Fig.1-18, 1-19で表現している2通りの原理を考える。まず Fig.1-18は振動体の上下に電極を配置する方法である。振動体が電極Aに近づくとき電極Aへマイナス電荷が引き寄せられる。すなわち電極Aから電極Bで電流が流れる。逆に振動体が電極Bに近づくとき今度は電極Aへ電流が流れる。こうして交流が取り出せる。

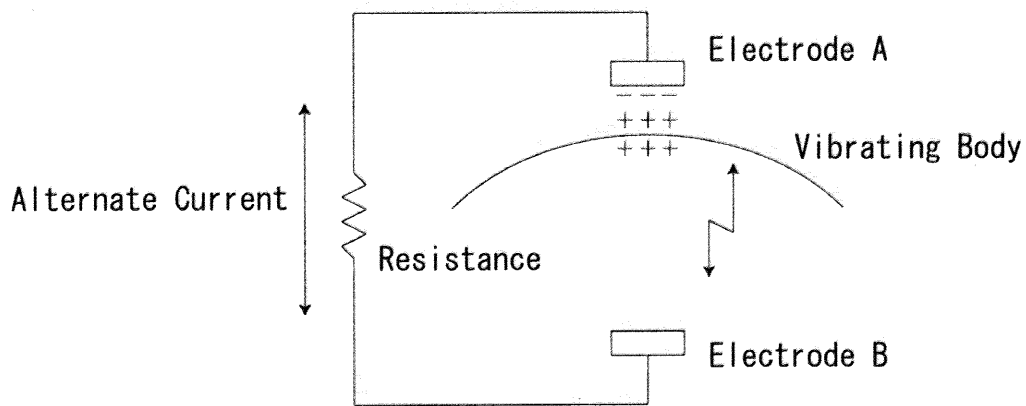


Fig.1-18 上下電極配置

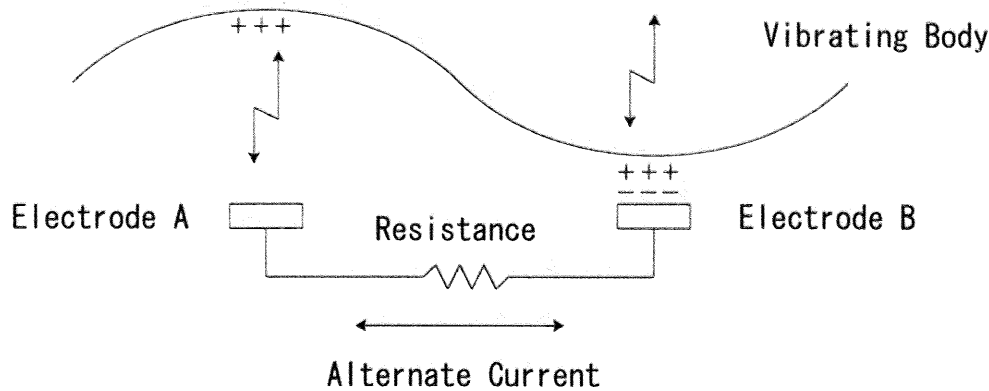


Fig.1-19 隣接電極配置

交流発電するためなら以上の方法で十分だが、電荷を別のコンデンサに蓄積させ、大きな電力を取り出すには次に述べる方法を取る必要がある。進行波の波長が一定の場合の概念図がFig.1-20である。電極を半波長ごとに配置し、1つおきに電極を短絡することで帯電した振動体から受け取る電荷をまとめて整流し充電用コンデンサに蓄えることができる。一度整流回路を通過した電荷は電極へ戻ることができないため、進行波が電極を横切るたびに充電される仕組みである。

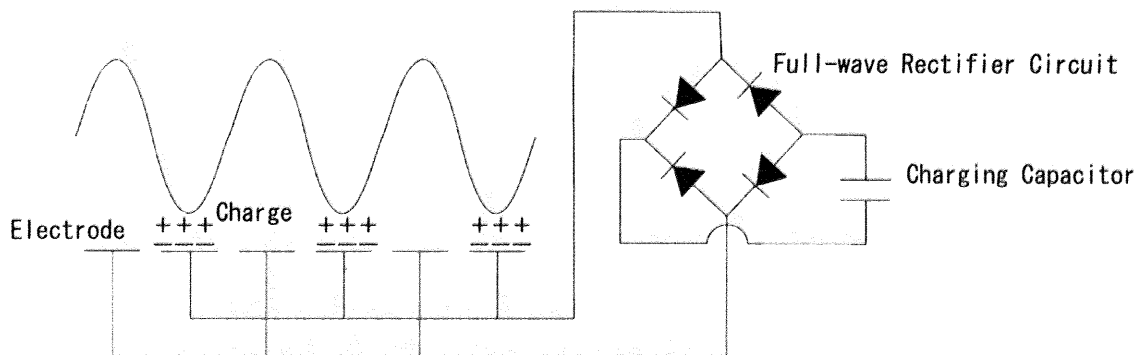


Fig.1-20 電極配置(波長一定)

波長が一定でない場合にFig.1-20の回路を用いると、例えば隣接した電極の上に波の谷が位置することでキャンセルし合い、効率良く電荷を吸収することができない。そこで電極を短絡することを止め、Fig.1-21の回路図のように、1つの電極ごとにダイオードで整流する必要性が生じる。この図では簡単のために2つの電極についてダイオードで個別に整流する回路を表現している。以下、回路のメカニズム^[17]を述べる。エレクトレットは既に充電されたコンデンサと見なし、その電位差を V_m とおく。SW1は振動体の変位に従い電極間距離が変化することによるエレクトレットからの電荷供給のオンとオフを意味する。今回は簡単のために、SW1がオンのときに電荷供給され、オフのときに電荷供給がストップするというモデルで表す。こうして振動体は自身の周期的な変位により帯電する。Cvは振動体のある位置とその下に位置する電極をコンデンサと

見なしたときの静電容量を表す. さらに振動により容量が周期的に変化するため, 可変コンデンサと見なせる. 進行波の谷が近づいたときにSW2が開き, 整流された電荷が C_{stor} に蓄えられる. 以上の充電過程が振動体の下部に配置された全ての電極で行われる.

エレクトレットに元々蓄えられていた電荷が C_v に移動することでエレクトレットの電荷は徐々に減少するため, C_{stor} に蓄えられた電荷を戻してやらないとエレクトレットに蓄えられた電荷が0になってしまう. そこで C_{stor} に蓄えられた電荷をエレクトレットに戻す必要があり, その際に電力を取り出すことが可能となる.

またSW3, SW4はそれぞれSW1, SW2と同じ役割を果たし, 2つ目の電極についてダイオードで整流することを表現している. 1つ目の電極の整流部分とメカニズム・回路構成要素は全く同じである.

以上説明したのが, 波長が不一定的の場合の整流原理であるが, ダイオードを多数使用すると発電機全体の小型化に支障をきたすため, できれば波長を一定にして電極間隔を固定したいところである.

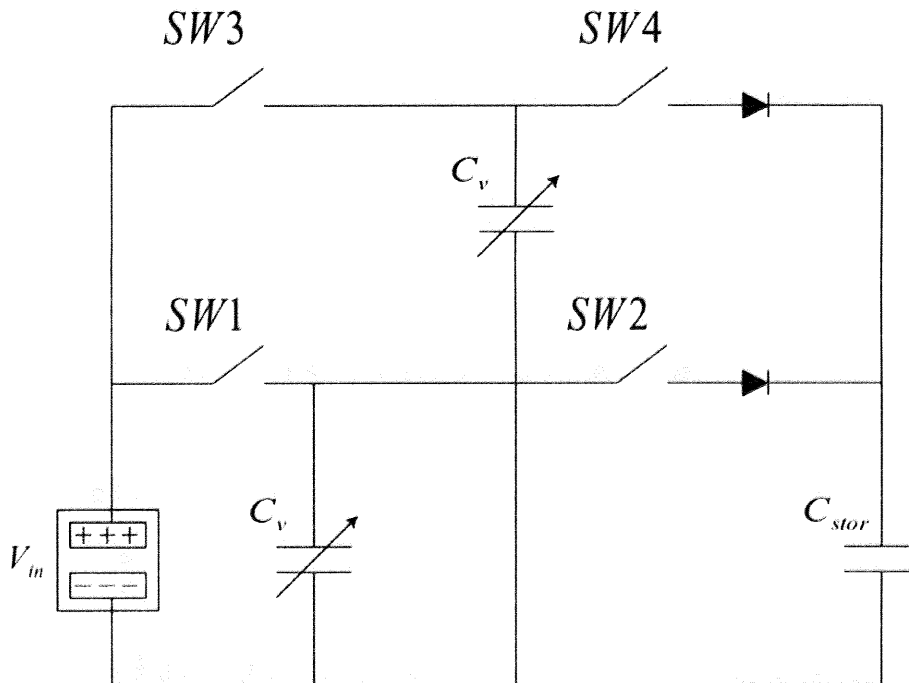


Fig.1-21 静電発電単純化回路

1.3.3 扱う振動の特徴

本節では自励振動の特殊性を理解するため, 流れによって物体に誘起される自励振動についての研究事例^{[18]-[31]}をまとめる. 自励振動を流動様式によって大きく分けたのがFig.1-22である. 本研究で扱う自励振動は弾性流体潤滑(EHL: Elasto-Hydrodynamic Lubrication)問題に属し, フレキシブルスライダや紙搬送機分野で取り扱われている問題と類似している. しかしこれらの問題は自励振動を抑制することが目的なのに対し

て、本研究では自励振動を発生させることが目的である点が特徴的である。また解析の対象としている弾性体の変形形状・流体の流れ方向が単純であり、2次元でシミュレーションを行っても解が容易に収束する。それに対して本研究で対象とする弾性体は細長い形状で長手方向に複雑変形をする。また流体の横漏れの影響が無視できない点でも特異であり、従来のシミュレーション方法では解の収束が期待されない。そこで本研究では従来の方法とは異なったアプローチで自励振動の解析を行う。

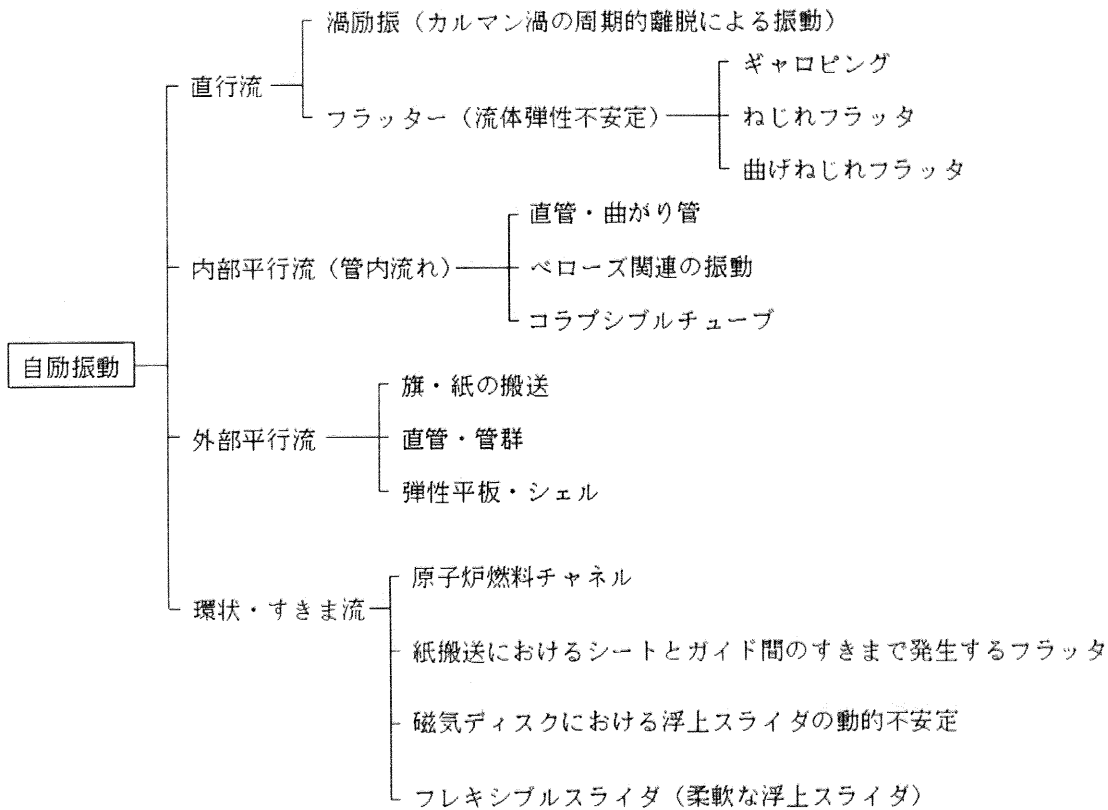


Fig.1-22 流れの形態による分類

また先行研究では、自励振動をいかに抑えるかが目的なのに対して、本研究では自励振動によっていかに振動体の振幅を最大化するかが目的である。この点が特徴的であり、先行研究とは異なったアプローチをせねばならない。

1.3.4 アプリケーション

本節では、本研究で対象とする発電機のアプリケーションについて考える。高エネルギーの流体が無駄に放出されている環境として挙げられるのがビルの隙間、トンネル、崖・樹木である。強風が頻繁に吹きつけるビルの横壁に本発電機を設置すればオフィスへの電力供給の補助となる。高速道路などのトンネルにおける強風も無駄にできず、本発電機を設置することでトンネル内の照明や振動センサへのエネルギー供給を自動で行

える。崖・樹木などの自然環境においても本発電機を設置することで環境センサへのエネルギー供給が可能である。

また産業環境におけるニーズも存在し、それは工場の配管に見られる空気式計装器 (Fig.1-23) による現場型指示調節計の電子化である。産業機器に通信端末を取り付け、遠隔的に機器の故障状態を把握することは重要な課題である。故障を含めた総合的な情報を外部とやり取りすることで危機管理の徹底化が可能である。こうした通信端末に必要なとなるのがバッテリーである。その交換を人為的に行うことは非効率的である。また仮に高効率で行えたとしても交換回数が増えることで資源問題へつながる。こうした問題を解決するために自動発電技術が有効であり、本研究で対象とする流体を用いた発電機の設置が望まれる。例えば株式会社山武においては、空気式計装器への供給圧力は約 140kPa であり、約 3l/min の流体が捨てられている。入力エネルギーに換算すると、約 7W のエネルギーが捨てられていることになり、そのうちの 1%でも利用できれば無線通信に必要な電力を十分に賄うことが可能である。

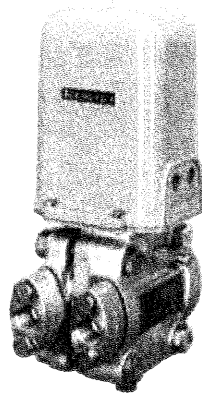


Fig.1-23 空気式計装器

1.3.5 まとめ

本節では、既存のエネルギー供給技術を踏まえた上で、自然界や人工物環境に存在する流体エネルギーを利用した発電機の提案を行った。発電には自励振動・静電誘導を利用し、平面型の発電機として構造を簡易にすることが可能である。また本研究は自励振動を発生させることが目的であり、複雑変形をする弾性体に対して従来のEHLシミュレーション方法とは異なったアプローチをせねばならない点が本研究の新規性かつ困難性である。

1.4 本論文の目的と構成

本論文では微小な領域での流体を用いた「EHL 自励振動を用いる平面型発電機」を提案する。最初は自励振動部についてのみ考えることとし、発電機の構想図を反映したマクロモデルを構築し自励振動を計測する。一方で自励振動効率に影響を与えるパラメータを発見するための補助的ツールとして、実験機の特徴を反映したシミュレータを構築する。以上、実験・シミュレーションの両面から自励振動の発生に影響を与えるパラメータを発見し自励振動部の最適設計理論を構築することが本研究の目的である。

本論文の構成は以下の通りである (Fig.1-24)。

第2章では、マクロモデルの実験系の構築について述べる。実験機の材質や寸法を記述するとともに、各種計測器についてもその概観と実験系での役割を示す、また、自励振動の振動波形の計測法についても述べ、自励振動を計測するための実験手法を確立する。

第3章では、自励振動のメカニズムを明らかにする際の補助的ツールとなるシミュレータの構築を行う。具体的には、本研究で扱う弾性流体潤滑問題において振動体形状から圧力を決定する方程式と圧力分布から振動体形状を決定する方程式を有限差分法により交互に解く方法を提案し、それぞれのアルゴリズムについて理論式を追いながら解説する。

第4章では、第3章で構築したシミュレータに実験機の特徴である流体の横漏れを反映させるため、流路内圧力分布に関する理論を構築する。流路幅方向についての圧力分布形状の近似手法として従来用いられている無限幅近似・無限小幅近似のそれぞれの特徴を融合した新たな近似手法を提案し、それが実際の実験機に応用可能であるという理論的根拠を探る。

第5章では、第4章で提案した有限幅近似を第3章で作成したシミュレータに組み込む。具体的には、流路内における流体の横漏れ量を調節することで自励振動の発生をコントロールできるようにする。完成したシミュレータを用いて実験機を再現し、自励振動の発生に影響を与えるパラメータを発見すると共に発電機の自励振動部の設計理論を構築する。

第6章では、自励振動の性質を明らかにし、第5章におけるシミュレーション結果を裏付けるため、各種パラメータを変えた実験を行う。またストロボを用いて自励振動を可視化して観察することにより本発電機に特有の近似を発見する。この近似は理論・シミュレータ構築に役立てられる。最後に、第5章における幅方向圧力理論から実験機を改良し、その自励振動効率について検証する。

第7章では、本論文を総括する。

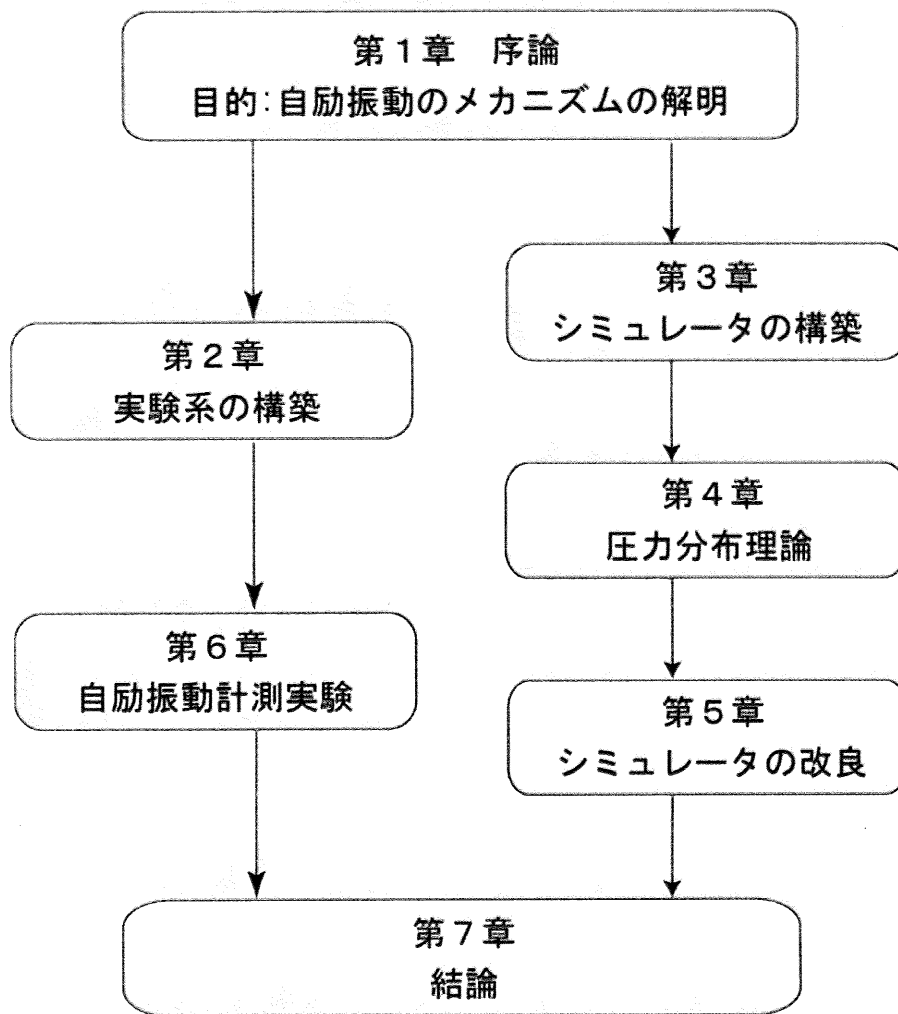


Fig.1-24 本論文の構成

第2章

実験系の構築

2.1 緒言

本研究では自励振動と静電誘導を用いたマイクロオーダの発電機を提案しているが、本章ではその前段階として作成したマクロモデルの実験系について概説する。実験を行う目的は本研究の提案する発電機の発電原理を検証することと、自励振動のメカニズムを解析するためのツールとすることである。

Fig.2-1に実験系の概観を、Fig.2-2に実験系の概略図を示す。コンプレッサで圧縮された空気はレギュレータにより制御され、実験機に供給される空気は流量計と圧力計によりその状態を確認することができる。実験機はマイクロオーダで制御可能なステージに乗せられており、その水平移動量はレーザ変位計にて計測される。また、振動は実験機の下部に取り付けられたレーザ変位計からのデータをトリガとして、レーザの反射光をPSDにより検出することで計測をしている。このようにして得られた各種データはPCに送られて処理される。振動波形の計測にはLabVIEWを使用した。

本章ではまず実験機について概説をした後、各周辺機器について説明をする。また、LabVIEWを用いた振動波形の計測法についてもページを割くことにする。

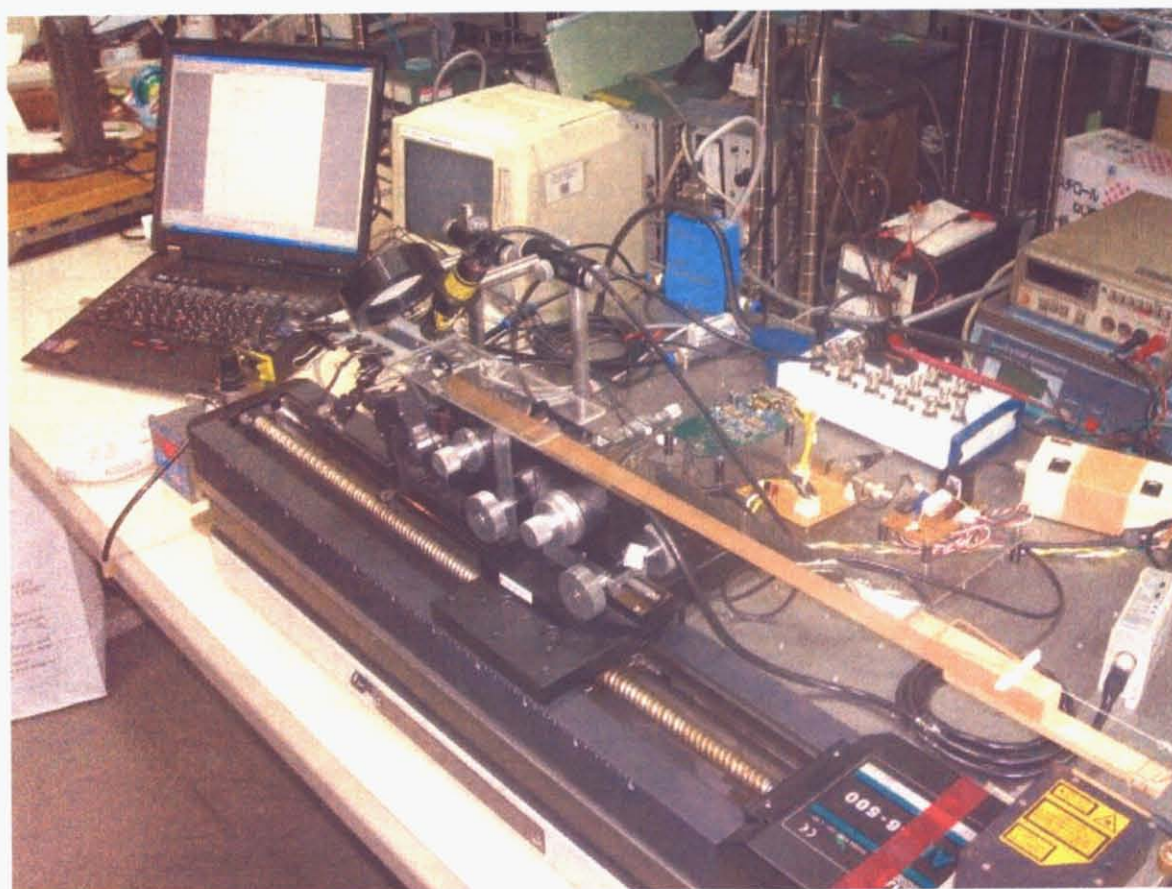


Fig.2-1 実験系概観

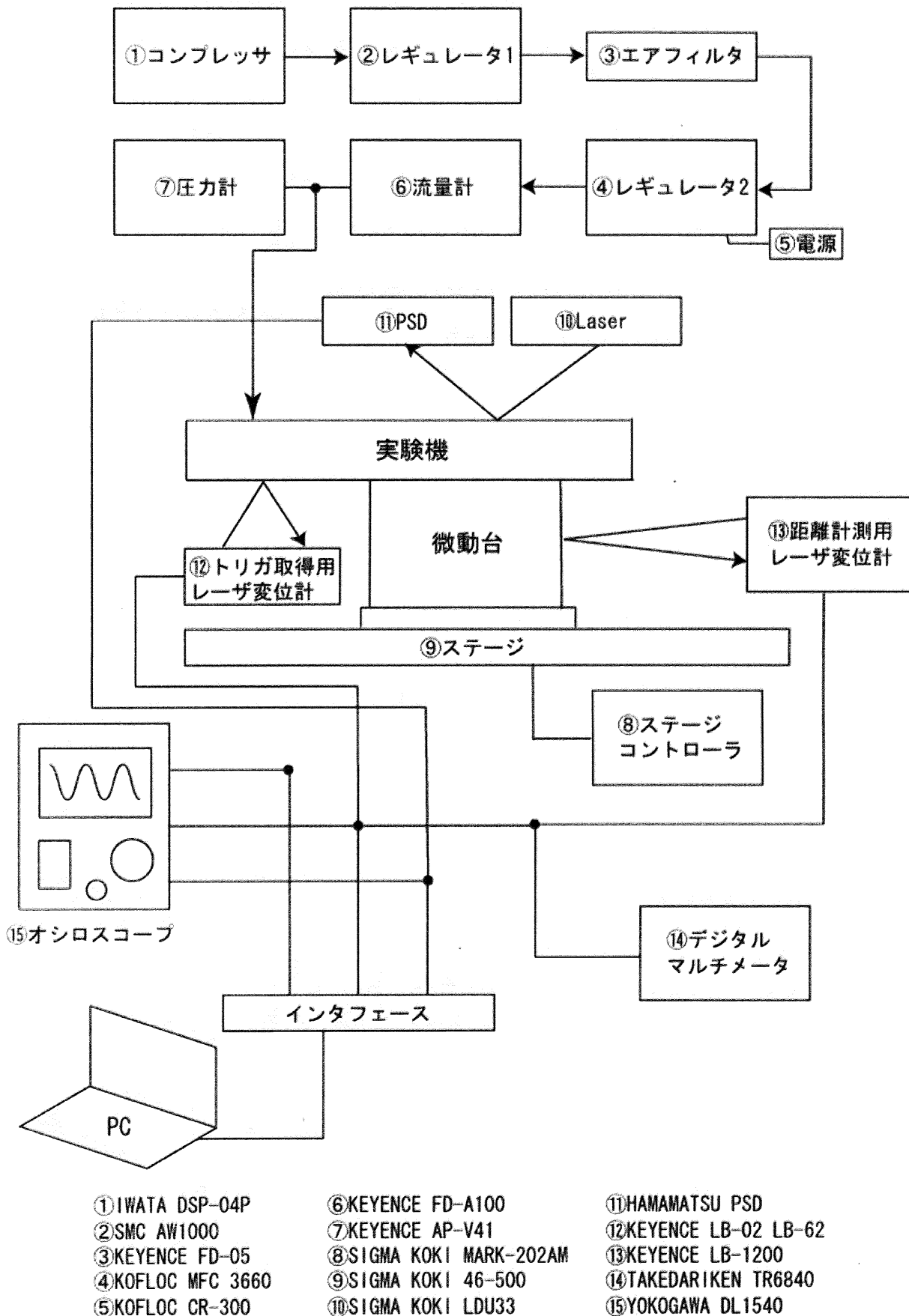


Fig.2-2 実験系概略図

2.2 実験機

本研究で試作した実験機をFig.2-3に、また実験機の寸法をFig.2-4に示す。流路は厚さ2mmの亚克力板2枚とパラフィルム数枚（1枚あたり120 μm ）によるスペーサーをクリップで挟むことにより構成されており、間に挟むパラフィルムの枚数を変えることで流路高さを変えることができる。振動体にはアルミニウムを蒸着した厚さ50 μm のポリエステルフィルムを使用した。図中央左にある穴に外径6mm、内径4mmのチューブが接続されており、ここから空気が供給される。本構成でクリップの力とパラフィルムの粘着力により空気漏れを起こすことはない。

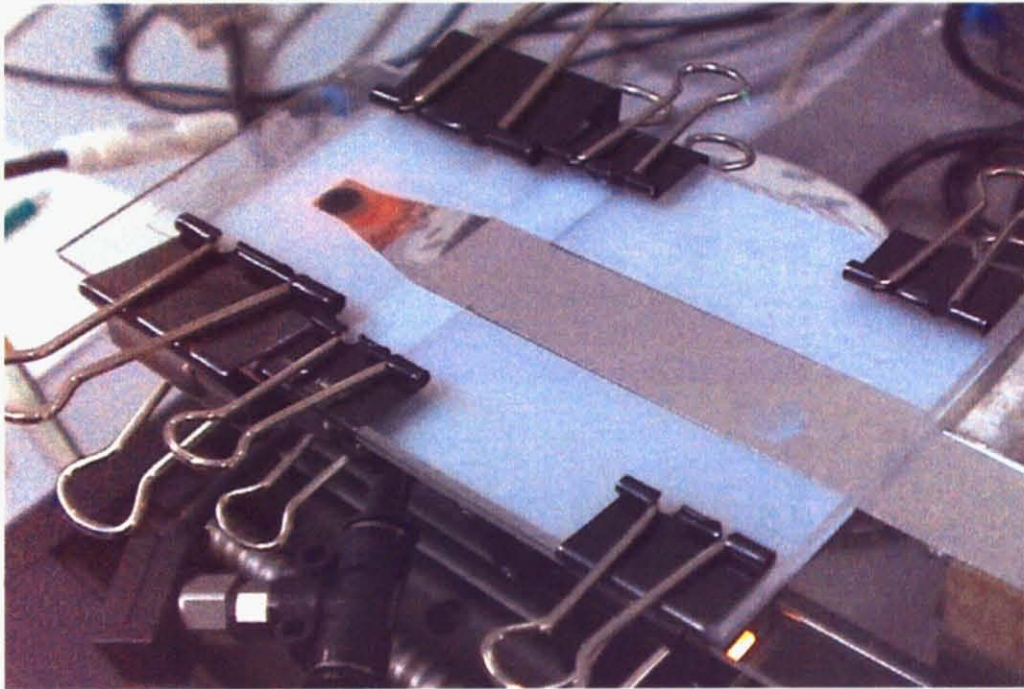


Fig.2-3 実験機の概観

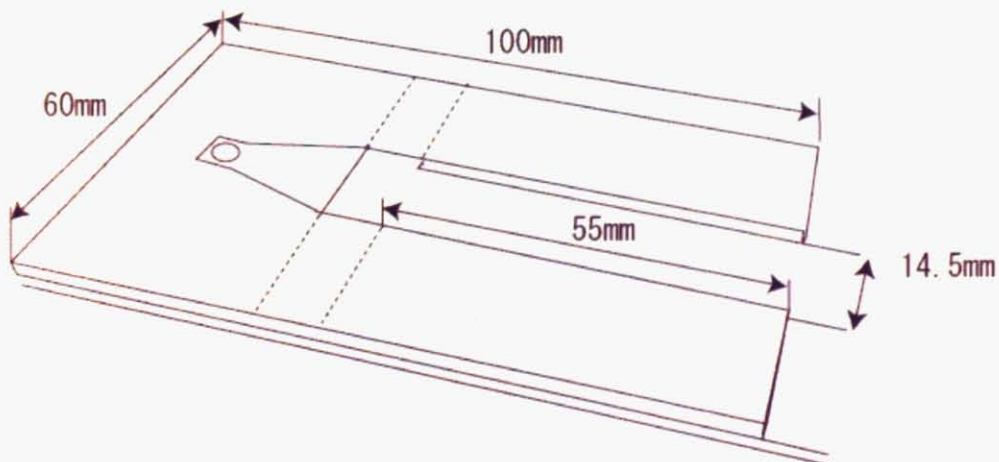


Fig.2-4 実験機の寸法

2.3 周辺機器

①コンプレッサ IWATA DSP-04P

空気を圧縮して実験機に供給する役割を果たす。コンプレッサ内の圧力は0.5～0.8[MPa]程で、空気を供給して内部の圧力が下がると自動で起動をするため、常に0.5[MPa]以上の空気を供給することができる。



Fig.2-5 ①コンプレッサ

②レギュレータ SMC AW1000

本来は圧力計だが、④のレギュレータへの過大入力を防ぐためのレギュレータとして使用している。④を開放したときの流量が④の使用範囲を超えないように調節する。



Fig.2-6 ②レギュレータ

③エアフィルタ KEYENCE FD-C5



Fig.2-7 ③エアフィルタ

④⑤レギュレータ&電源 KOFLOC MASS FLOW CONTROLLER 3660 & CR-300
メインレギュレータ。電源ユニット部から制御する。制御可能流量範囲は20[l/min]ま
まで、最大レンジで使用した場合の最小調節流量は0.1[l/min].



Fig.2-8 ④⑤レギュレータ&電源

⑥流量計 KEYENCE FD-A100

流量を計測する。単位は[l/min]で出力。



Fig.2-9 ⑥流量計

⑦圧力計 KEYENCE AP-V41

実験機に供給する直前の圧力を計測している。単位は[kPa]で出力。



Fig.2-10 ⑦圧力計

⑧ステージコントローラ SIGMA KOKI Mark- 202AM

⑨ステッピングモータ駆動ステージ SGSP46-500

10 μ mの精度で制御することが可能なステージ。実験機は本機器の上に設置されている。ステージの制御はステージコントローラを介してPCから行う。PCから指定するのはステージの移動解始点と終了点、その間の移動速度となっている。



Fig.2-11 ⑧ステージコントローラ

⑩レーザ SIGMA KOKI LDU33

⑪PSD HAMAMATSU

自励振動を計測するためのメインセンサ。レーザから射出された光は振動体で反射してPSDへと入射するが、このとき振動が起きていれば反射角が変わるためPSD上での焦点の位置が変わる。測定対象の上下変動に起因するPSDへの入射位置の変化に比べて、対象の角度変化に起因する入射位置の変化が支配的であるため、PSDで計測する値は対象の角度変化の大きさということになる。



Fig.2-12 ⑩⑪レーザ&PSD

Fig.2-12はPSD上でレーザを当てる位置を変更したときのPSDからの出力をプロットしたグラフである。グラフ中で線形性の高い土約6[V]のデータを抜き出すと、その傾きは -0.825 [V/m]となる。実験で得られたPSDの出力[V]をPSD上での変位[mm]に変換する際にはこの値を用いる。

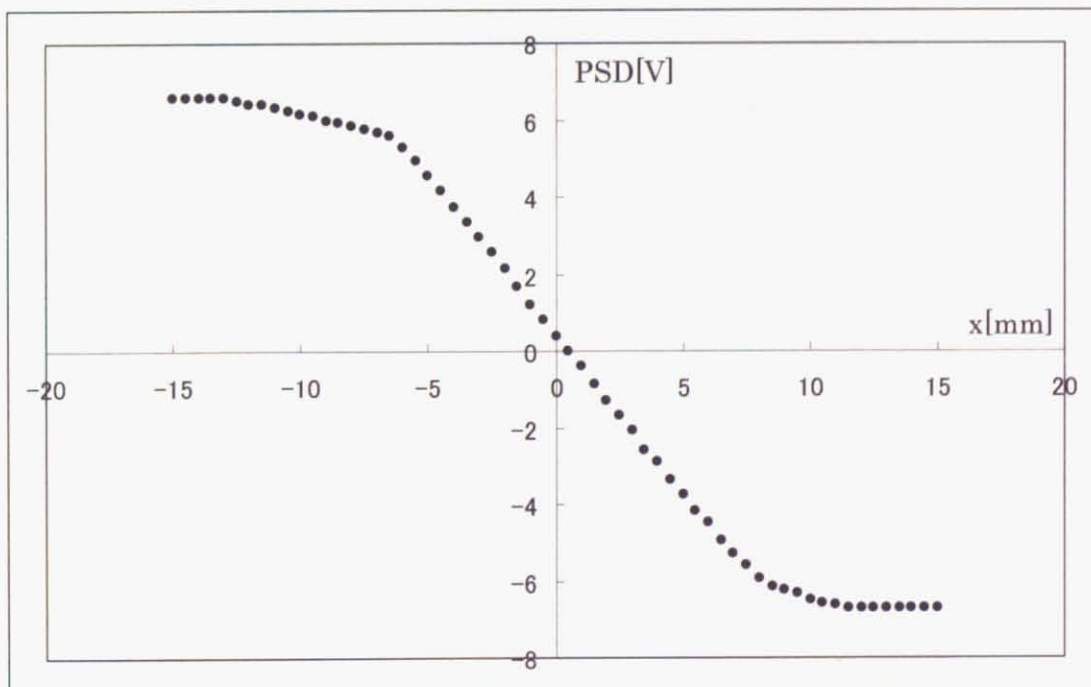


Fig.2-13 PSD 線形性

⑫レーザ変位計 KEYENCE LB-02 LB-62

トリガ取得用のレーザ変位形で固定端付近の振動を計測している。センサヘッドは実験機に固定されておりステージとともに動くため、常に同じ点を測定することができる。

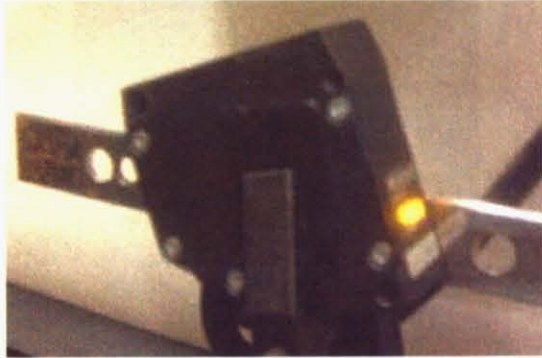


Fig.2-14 ⑫レーザ変位計

⑬レーザ変位計 KEYENCE LB-1200

ステージの移動量を計測する。測定範囲は 30 ± 10 [cm]で分解能は 50 [μm]。出力は⑭デジタルマルチメータに送られる。



Fig.2-15 ⑬レーザ変位計

⑭デジタルマルチメータ Takeda Riken TR6840



Fig.2-16 ⑭デジタルマルチメータ

⑮オシロスコープ YOKOGAWA DL1540



Fig.2-17 ⑮オシロスコープ

2.4 振動変位の導出法

前述のとおり，PSD では振動板の傾きを計測している．振動板の各点の傾きが分かれば，傾きとひとつ前の計測点との距離をかけることで相対的な変位が分かる．ここでは，PSD での出力電圧 V を振動板の傾きに変換するための式を導く．Fig.2-18 は振動板上のある一点 P に注目し，入射レーザ光が点 P で反射して PSD に到達するまでの道筋を表す．振動板の変位は微小であるため，反射光は振動板の変位にはほとんど影響されず，振動板の傾きに大きく影響される．そこで点 P における振動板の変位はゼロと見なし，点 P においては振動板の傾きの変化のみが生じていると見なす．

点 A は，点 P において振動板の傾きがゼロになったときの反射光（反射光 A と呼ぶ）と PSD 面との交点を指す．この点が上に現れる輝線の中心である．すなわち，PSD 上における変位ゼロの点である．一方で点 B は，点 P において振動板がある傾き（傾き角を θ とする）を持ったときの反射光（反射光 B と呼ぶ）と PSD 面との交点を指す． $\angle PAB$ が直角になるように PSD の位置を固定している．また， $AP = L$ とおく． L は実測によって求める．

z は PSD 上の変位である． B から A の向きが正の向きなので，Fig における z は負変位を表す．ここで，Fig より PSD 上の変位と出力電圧には線形性があるので， z は k を比例定数として次式のように表すことができる．

$$z = kV \quad (2-1)$$

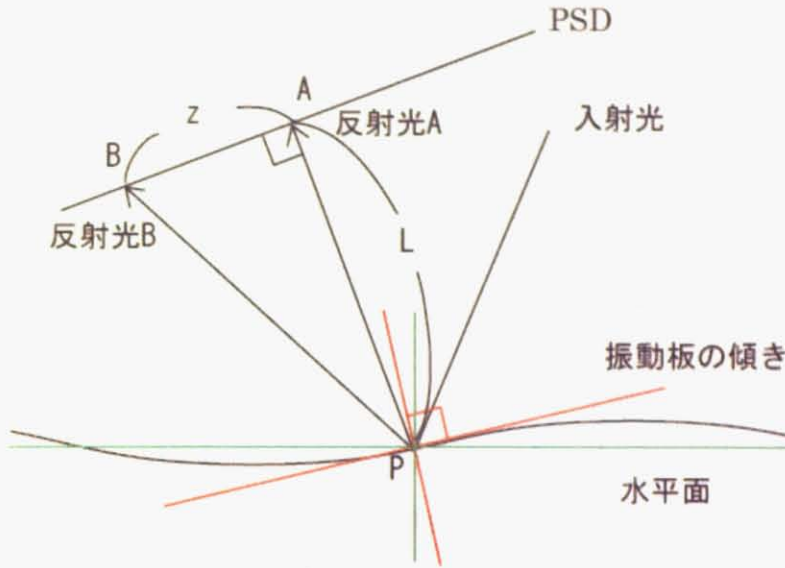


Fig.2-18 入射光が PSD に到達する経

次に Fig.2-19 について考える. 図では入射光が PSD を貫通しているが, それは説明の便宜のためである.

点 P における振動板の傾きを表す直線 (直線 α) を定義する. 従って, 直線 α と水平面とのなす角が θ とおける. また入射レーザー光と水平面のなす角を $\angle EPG = \varphi$ とおく. このとき, $\angle EPF = \varphi - \theta$ である. また $\angle DPG = 90^\circ$ より, $\angle DPE = \angle DPA = 90^\circ - \varphi$ である. さらに $\angle CPF = 90^\circ$ より, $\angle APC = 90^\circ - 2(90^\circ - \varphi) - (\varphi - \theta) = \varphi + \theta + 90^\circ$ であり, $\angle BPC = \angle EPC = 90^\circ - \varphi + \theta$ より,

$$\angle APB = (\varphi + \theta + 90^\circ) + (90^\circ - \varphi + \theta) = 2\theta \quad (2-2)$$

$AP = L$ より, 次の関係が得られる.

$$\tan 2\theta = -\frac{z}{L} \quad (2-3)$$

式(2-3)を θ について解き, 式(2-1)を代入すると, 次の式を得る.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{kV}{L} \right) \quad (2-4)$$

θ は点 P における振動板の傾き角を表しており, 点 P における傾きは次のようになる.

$$y' = \tan \theta = \tan \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{kV}{L} \right) \right) \quad (2-5)$$

式(2-5)を用いれば振動体の各点における傾きを求められる. 固定端の高さを基準として, その隣の計測点における傾きと計測点間距離をかけることで変位変化量を求めることができる. この作業を振動体上の全ての計測点において行うことで振動体の全ての計測点における変位を求めることが可能となる.

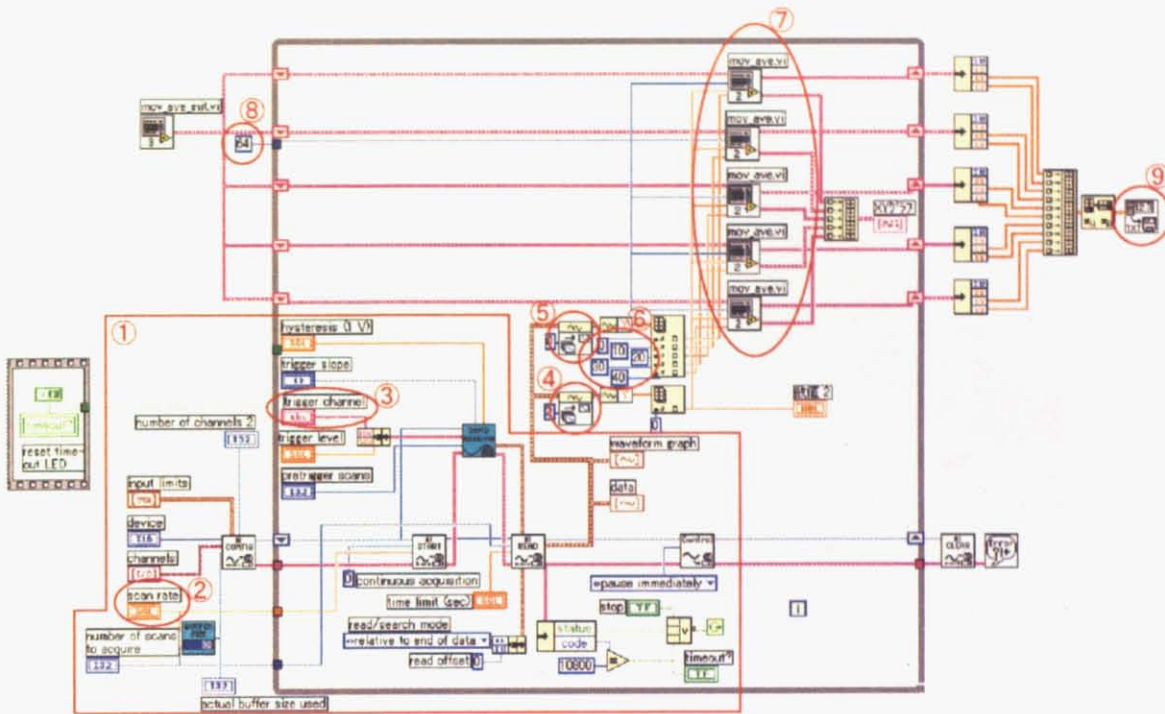


Fig.2-20 LabVIEW ダイアフラム

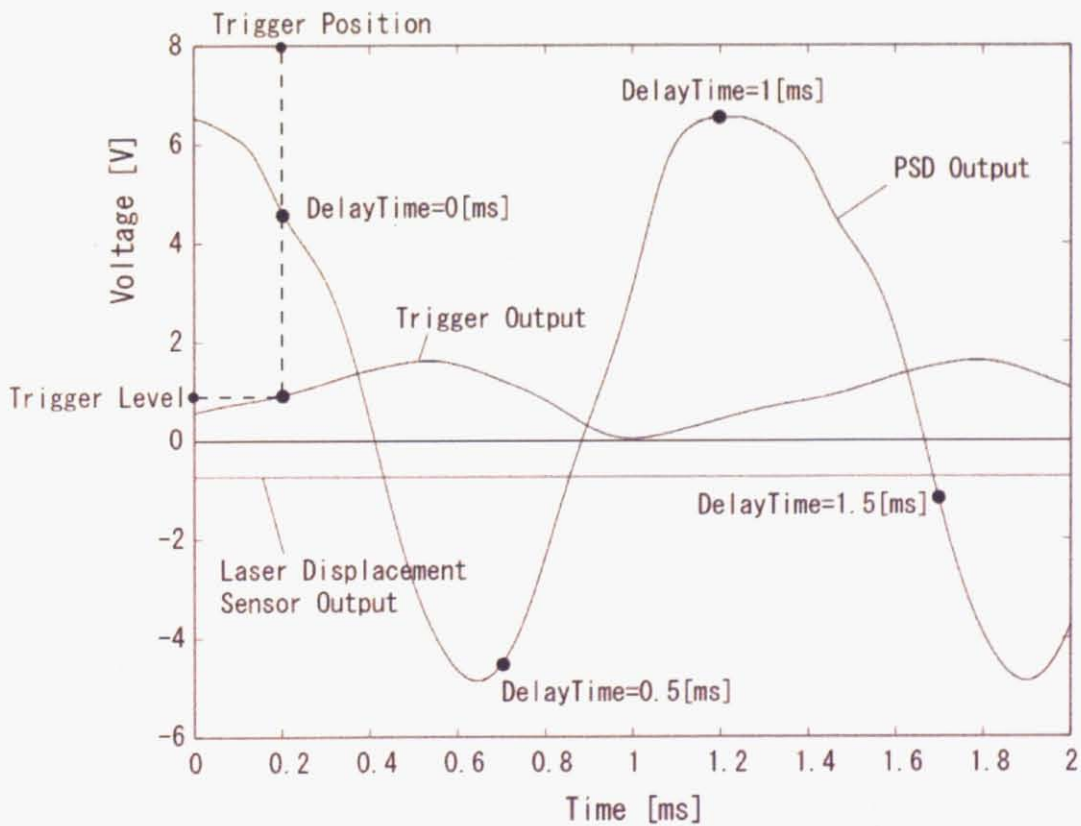


Fig.2-21 オシロスコープで測定した実験データ

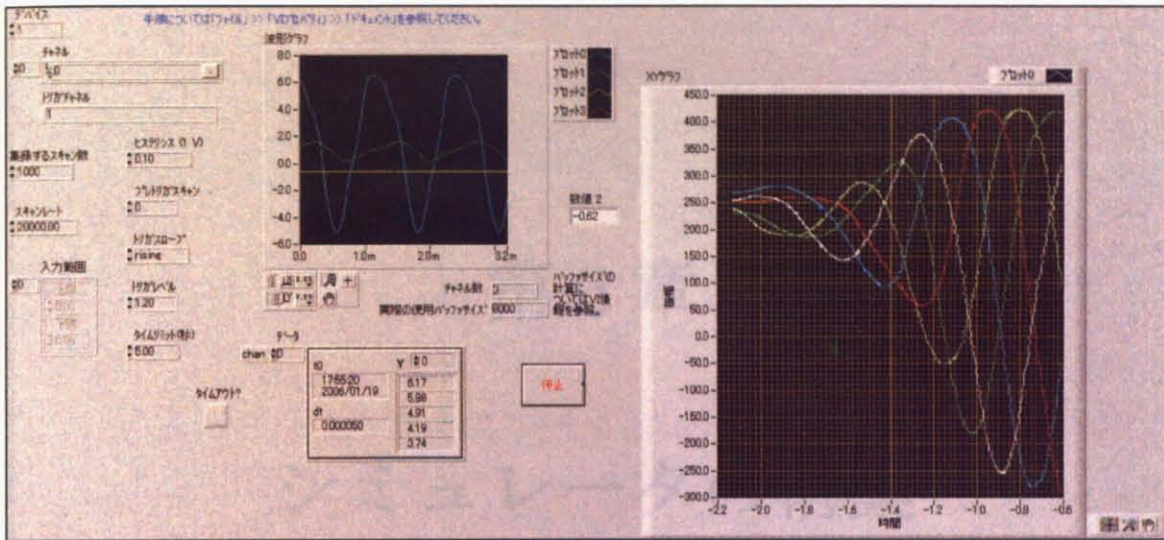


Fig.2-22 LabVIEW フロントパネル

2.6 まとめ

本章では、本研究で提案する発電機の振動原理を検証し、自励振動を解析するためのツールとなる実験系の構築を行った。実験機の材質や寸法などの構成と各測定機器についての略説を行うとともに、PSD からの出力を振動体の高さに変換する方法、LabVIEW を用いた振動波形の計測手法について概説した。