T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

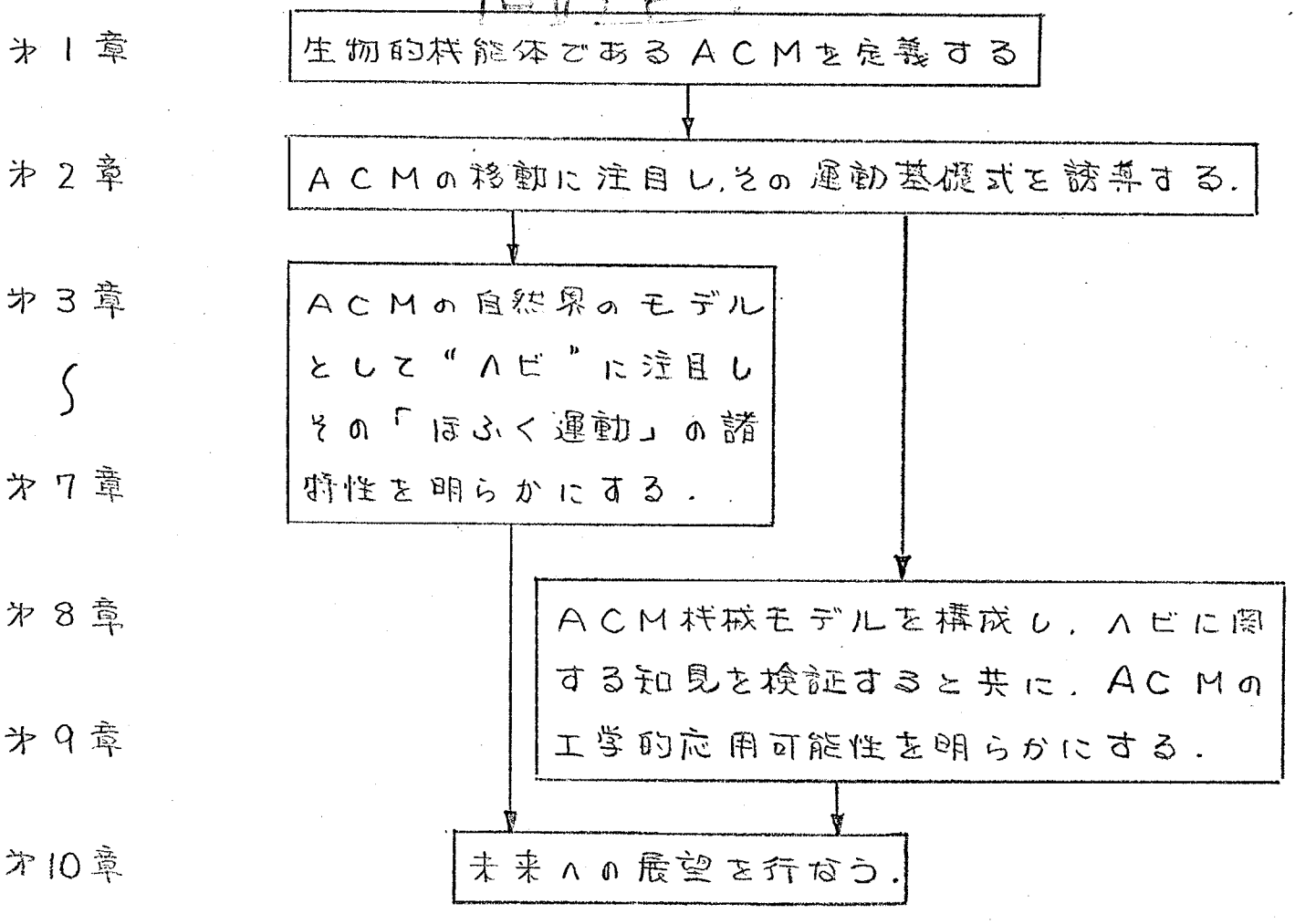
論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	索状能動体に関する生物力学的研究
Title(English)	
著者(和文)	広瀬茂男
Author(English)	SHIGEO HIROSE
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第834号, 授与年月日:1976年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:梅谷陽二
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第834号, Conferred date:1976/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

本論文の骨組み

本論文では,ＡＣＭに関する工学的考察と，ヘビに関する生物力学的考察という２つの流れがつぎに示すように構成されている．



東京工業大学 388429

業　績　表

印刷論文

1) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 定常直進滑走のモデル解と動物実験 —，計測自動制御学会論文集，8－6，724／731（1973）

2) Umetani, Hirose : Biomechanical Study of Serpentine Locomotion, Proceeding of Romansy Symposium., Udine, Italy. Springer-Verlag (1973)

3) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 移動様式としての評価 —，バイオメカニズム2，289／297，東京大学出版会，（1973）

4) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 定常直進滑走時の体形曲線 —，計測自動制御学会論文集，10-4，513／518（1974）

5) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 滑走面に対する体形の適応 —，計測自動制御学会論文集，10-6，682／686，（1974）

6) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — ほふく推進体の操縦性と制御実験 —，計測自動制御学会論文集，11-1，20／24（1975）

7) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 迷路内ほふく推進の解析と実験 —，計測自動制御学会論文集，12-1，（1976）

8) Umetani, Hirose : Biomechanical Study of Active Cord-Mechanism with Tactile Sensors, 6-th International Symposium on Industrial Robots, England (1976) (accepted)

9) 広瀬・梅谷：触覚を有する索状能動体の運動制御，計測自動制御学会論文集（1975，投稿中）

口頭発表

1) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究，その3 滑走運動のモデル解と動物実験，第2回バイオメカニズムシンポジウム，63/65（1971）

2) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その5 滑走面に対する体形の適応，第11回SICE学術講演会，491/492（1972）

3) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その6 ほふく推進体の操縦性と制御実験，日本自動制御協会学術講演会招待講演，7/12（1973）

4) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その7 移動様式としての評価，第3回バイオメカニズムシンポジウム前刷（1973）

5) 梅谷・広瀬：ほふく運動の生物力学的研究（定常直進滑走時の体形曲線），第12回SICE学術講演会，481/488（1973）

6) 梅谷・広瀬：索状能動体の推進力学基礎式の誘導，第13回SICE学術講演会，385/386（1974）

7) 梅谷・広瀬：触覚を有する索状能動体の側抑制型運動制御 第13回SICE学術講演会，383/384（1974）

8) 梅谷・広瀬：索状能動体の迷路内推進力学，第17回自動制御連合講演会，415/416（1974）

9) 梅谷・広瀬：周回接触法による断面求積計，第17回自動制御連合講演会，571/572（1974）

10) 梅谷・広瀬：触覚を有する索状能動体の推進運動制御，第4回バイオメカニズムシンポジウム前刷，360/361（1975）

11) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の機構と制御の研究．その8　滑走体形の外気温による変化，第4回バイオメカニズムシンポジウム前刷 358/359 (1975)

12) 広瀬・梅谷：パターン生成法による図形の特徴空間評価，第14回 SICE 学術講演会，273/274 (1975)

関連特許

梅谷，広瀬：不特定形状の求積方式，出願番号 49-122149

目　　次

第1章　緒　論

1-1　本論文の意図およびその工学的意義　6

1-1-1　索状能動体（ＡＣＭ）の定義　6

1-1-2　本研究着手の動機　6

1-1-3　本研究の意図およびその工学的意義　7

1-2　本研究における生物力学的研究手段の意義　11

1-3　索状能動体の移動機能の考察　14

1-3-1　移動体としてのＡＣＭの特徴　14

1-3-2　ヘビの移動運動に関する従来の研究　16

1-3-3　ヘビの移動運動の分類　19

1-4　本論文の構成とその概要　22

1-5　記　号　表　25

第2章　索状能動体の移動力学基礎（ほふく力学）　28

2-1　まえがき　28

2-2　索状能動体の運動を支配するパラメータ　28

2-3　索状能動体の移動力学基礎式の誘導　29

2-3-1　接線力基礎式の誘導　31

2-3-2　法線力基礎式の誘導　32

2-3-3　パワー基礎式の誘導　33

第3章　ほふく運動の形態学　35

3-1　まえがき　35

3-2　ほふく滑走体形曲線の運動生理学的検討　35

3-3　ほふく滑走体形曲線の定式化　38

3-3-1　Clothoid spiral を用いた表現　40

3-3-2　Serpenoid curve を用いた表現　41

3-4　実測滑走体形との比較・吟味　45

3-5　本章の結論　47

第4章　定常ほふく運動の移動力学　50
4-1　まえがき　50
4-2　解析のための準備　50
4-3　筋力分布の設定　52
4-4　定常ほふく運動時に体幹に生ずる力　54
4-4-1　推進力　55
4-4-2　法線力　58
4-4-3　パワー　58
4-4-4　体幹に生ずる力と滑走効率の関係　60
4-5　Clothoid型体形近似曲線に基ずく解析　64
4-6　シマヘビを用いた定常ほふく滑走実験　66
4-6-1　実験方法　66
4-6-2　EMGの測定　69
4-6-3　法線力の測定　69
4-6-4　測定器位置座標の測定　69
4-6-5　実験結果　69
4-7　実験結果と理論との比較・吟味　73
4-7-1　筋力分布形状の推定　73
4-7-2　推進力の吟味　77
4-8　本章の結論　78
第5章　ほふく運動の適応機能　80
5-1　まえがき　80
5-2　Sinus-lifting 滑走　81
5-3　α-適応則　85
5-3-1　α-適応則の誘導　85
5-3-2　等価摩擦係数比 μ_t^*/μ_n^* の導入　87
5-3-3　ヘビ傾斜面滑走時のくねり角αの測定　91
5-3-4　ヘビの滑走面摩擦に関する測定と考察　93

5-3-5 実験結果と理論の比較・吟味 97
5-3-6 Clothoid 型体形近似に基づく解析との比較 99
5-3-7 α-適応則と Sinus-lifting 滑走との関係 104
5-4 ℓ-適応則 106
5-4-1 ℓの上限値および下限値 106
5-4-2 運動筋の特性を考慮したℓの決定 107
5-4-3 外気温を変動した時のヘビ滑走体形の観察 109
5-4-4 ℓ-適応則の推定 110
5-5 本章の結論 114
第6章 荒地環境におけるほふく運動 116
6-1 まえがき 116
6-2 迷路の定義と問題の設定 117
6-3 迷路内ほふく推進の力学的特徴 117
6-4 迷路内における推進力と抗力の関係 119
6-5 力学的に妥当な迷路内ほふく推進体形の選択 123
6-6 動物実験とその吟味 124
6-7 本章の結論 128
第7章 ほふく運動の移動様式としての評価 129
7-1 まえがき 129
7-2 移動様式の評価基準 129
7-3 ほふく運動の移動仕事率 ε_{snake} の諸善 132
7-4 2足歩行の移動仕事率 ε_{walk} の諸善 138
7-4-1 2足歩行時のエネルギ消費に関する従来の研究 138
7-4-2 新しく提案する2足歩行の移動仕事率 ε_{walk} 140

7-5　ほふく運動と他の移動様式（２足歩行）との移動仕事率Eによる比較　146
7-6　本章の結論　149
第８章　索状能動体機械モデルによる人工ほふく運動　151
8-1　まえがき　151
8-2　人工ほふく推進機械の機構　151
8-3　ほふく推進運動の制御法　154
8-4　滑走方向の操舵　157
8-5　試作機機械系の設計と仕様　162
8-6　試作機制御系の設計と仕様　166
8-6-1　中枢部　168
8-6-2　信号遅延伝幡部　168
8-6-3　働作器サーボ系　173
8-7　試作機の滑走特性　173
8-8　試作機による滑走・操縦実験　175
8-9　本章の結論　175
第９章　触覚を持つ索状能動体の運動と制御　176
9-1　まえがき　176
9-2　触覚を持つＡＣＭ（索状能動体）の制御方式　176
9-2-1　側抑制型の触覚情報処理　177
9-2-2　屈曲信号の１次型シフト制御　182
9-3　触覚を持つ試作機の機構と触覚情報処理　183
9-4　触覚を持つ試作機の１次型シフト制御　188
9-4-1　ＦＥＴを用いた１次型シフト回路　188
9-4-2　逆関数回路　191
9-4-3　駆動シフト信号生成回路　194
9-5　試作機全制御系の構成　196
9-5-1　中枢部　196

9-5-2　神経系　196
9-5-3　効果器　198
9-6　試作機による制御実験　198
9-6-1　物体へのからみ付き実験　198
9-6-2　迷路内侵入および迷路内自走実験　201
9-6-3　杭押し推進実験　202
9-7　本章の結論　206
第10章　結論および未来への展望　212
10-1　本論文の結論　212
10-2　ＡＣＭの生物力学的研究に残された課題　216
10-3　ＡＣＭのマニピュレータとしての未来　219
10-4　ＡＣＭの人工知能機械としての未来　221
10-5　謝辞　223
引用文献　224
付録 1　滑走軌跡の観察　230
付録 2　ヘビ体幹の解剖学的形態　235
付録 3　周回接触による断面求積法　241
付録 4　パターン生成法による図形の特徴空間評価　244

第1章　緒　論

1-1　本論文の意図およびその工学的意義

1-1-1　索状能動体（ＡＣＭ）の定義

本論文において索状能動体（active cord mechanism，ＡＣＭと略称する）と称するものはつぎのように定義する．

「細長く柔軟な体幹を有し，それ自身に装着されている感覚器群とアクチュエータ群とによって外部環境の情報を収集し，与えられた機能目標と自己保全に適合した屈曲運動と屈曲姿勢を，自律的に行ないうるような移動形知能機械」

1-1-2　本研究着手の動機

人類は，自然界の諸現象を観察し，その原理を思考することにより自然科学の体系を構成してきた．自然界のうちでも，生物はその有機体全体を“生きる状態の維持”という目的のために，すべての側面を自然淘汰を通して洗練してゆき，美しい形態と効率的な機能を有するにいたったと考えられる．自然の中において，このように統一された秩序にエントロピーの低い状態が維持されているということ自体大きな驚異であるといわなければならない．

このような生物の諸原理を明らかにし，その知識を人類のために利用しようとする試みは最も古くからなされている．特に既成の工学知識がある一定の水準に達し，工学技術の中にシステムとしての統一性を求められている現在，生体系の示す有機的な機能と形態の調和についての知識はますます重要な意味を持つと考えられるであろう．

本研究を着手した動機は，このような立場から生物界を改めて観

察した結果，ヘビの一見単純な体幹が行なう多様で在来の工学材構では見られないような独特の材能性に注目したからにほかならない。

たとえば，Fig.1-1はキノボリヘビが枝から枝へ移動する一連の動作を示しているが，この中でヘビはまず枝に胴体をからませて自重をささえるという「脚」に相当する材能をはたしながら，「体幹」を梁のように伸ばし，前の枝に頭部体幹をあたかも「腕」で握るようにしてひっかけると移動していく．つまり一本のひも状のヘビ体幹は臨材応変に「脚」「体幹」「腕」という材能を次々にはたしていくことがわかる．

そして，このようなヘビ体幹の行なう運動について考察を行なっていった結果，筆者はその研究の対象は単にヘビのみに限定されるものでなく，同様の形態を有する動物一般に拡張可能であること．そして，そのような形態を有する動物の生物力学的研究が工学的にはいわゆる新しい型の柔軟材械の設計に使立ち，その柔軟材械によって従来考えられなかったような独特の材能を実現してゆくことが可能であるということに気付いたのである．そのため，本論文では，改めて索状能動体（ＡＣＭ）という材能体の概念を前節のように設定し，それに関する研究をつぎに述べるような意図のもとに行なった．

1-1-3 本研究の意図およびその工学的意義

本研究の意図とその工学的意義はつぎの３つに大別できると考えている．

i) 生物の移動様式の工学的応用

現在，地上の移動様式として工学的に最も利用されているものは“車輪”である．車輪は人類が独自に開発した画期的な材械要素であり，それを利用した車輪走行車はすでに人類文明の中に根付いている．しかし，この車輪走行車にもそれなりの欠点があり，特に荒地環境の移動には適さない場合が多い．キャタピラを使用する方法

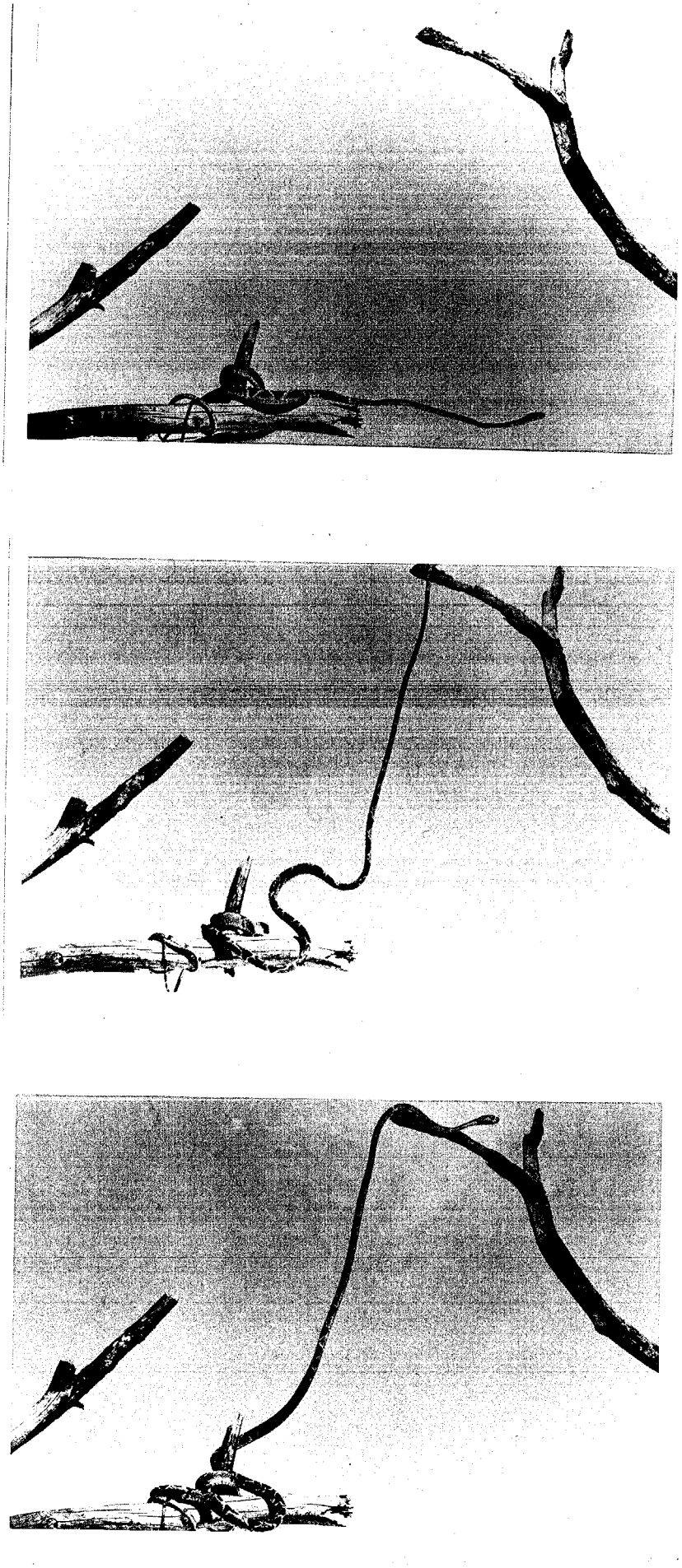


Fig. 1-1　キノボリヘビの適応的動作[25]

など荒地走行のための改良は続けられているが[45,46]，それらの開発が一定の限度に到達したと考えられる現在，車輪という要素から離れた新しい原理に基ずく移動様式の開発が望まれていると考えられる．

そのために生物の移動様式が改めて注目を浴び始めている．たとえば，外肢による移動様式については，すでに我々自身の行なっている2足歩行，あるいは馬，犬などの4足歩行，さらに昆虫の6足歩行などに関してかなり高度の研究が行なわれている[65]．

しかし，本研究においては荒地を泳ぎ進むようなヘビ等の行なうほふく運動に注目した．ヘビはその索状の体幹を巧みに操ることにより密生したブッシュ，凹凸のはげしい荒地，樹上，足がかりの悪い砂漠など，在来の人工移動機械や歩行動物でも移動困難な環境を踏破していくことができる．この特性については後節において詳論するが，このような特性のため人工のほふく推進機械は新しい型の荒地走行車としての可能性を有していると言ってよいであろう．

本研究の第1の意図はACMが持っているこの独特の移動機能を工学分野へ導入することにあるといってよいであろう．

ii) 索状マニピュレータの開発

ACMには，移動機能以外に従来になかったような柔軟索状のマニピュレータとしての機能も考えることができる．Fig.1-1のヘビ体幹の動作もその1つの例と考えられよう．また，たとえばゾウの鼻も材木を巧みにハンドリングするなど一種の索状マニピュレータと考えることができる．

このように，ACM型のマニピュレータによれば侵入し難い物体内部への侵入，物体へのからみ付き動作などの従来の人間型のマニピュレータ等では不可能だったいわゆるやわらかい動作が可能になると思われる．つまり，ACM型のマニピュレータにはその柔軟な形態に依存した独自のマニピュレーション機能があるというべきであろう．

本研究の第2の目的は，このようなACMの柔状マニピュレータとしての特性を明らかにすることにある．

iii) 最も単純かつ根元的な形態の柔軟材械

そして，本研究においては上記2つのような直接的な応用を目的とする立場以外に，工学一般論の立場から，i) 諸形態の中で最も単純かつ根元的と考えられる1次元的な線状の形態が内含している原理的材能を明らかにすると共に，ii) 今後ますます必要とされるいわゆる“やわらかい材械”の原形として，素材的には固いユニットの集合によってやわらかさを発揮するためにはいかなる原理を必要とするか等の基本的問題点を探る意図を持っている．

以上のような立場によってACMの諸特性を明らかにすることにより，ACMは今後新しい型の荒地環境に適する移動材械として利用可能となっていくだけでなく，たとえば小型化すれば能動的で嚥下しやすい胃カメラ，体内手術用の器具，関節鏡，心臓カテーテル等の医療器具，複雑な材械の内部に挿入して作業を行なわせる新しい型のマニピュレータ，火災現場に自ら接近していく能動消火ホースなど，いままで思いもつかなかった工学的な応用の可能性が広がってゆくであろう．

さらに，これらのACMに関する基本的な原理は，たとえば2次元的ひろがりを持つ柔軟材能体等のより多様な種類の“やわらかい材械”の今後の構成にも使立ってゆくものと思われる．

1-2 本研究における生物力学的研究手段の意義

生き物の科学と工学の接点の学問分野として生物工学（Bio-engineering）と呼ばれる境界領域が現在広がりつつある．生物力学（Biomechanics）とはそのなかで特に力学的な色彩の強い分野を示すと考えて良い．生物力学の学問的展開の方向は大きく分けてつぎの2つに分類できるであろう．

(1) 工学的知識およびその解析手段をもって生物界の力学的諸現象を把握すること

(2) 生物界の力学的諸現象の工学分野への応用

このうち，(1)は生物界の理解に強力な解析手段として確立している工学的解析法という立場を導入するものであり，現在すでに広範囲にわたる研究がなされている．本研究は(2)の立場に立ちヘビ等の索状かつ能動的体幹を持つ生物形態の工学的応用の可能性を明らかにしていくことを目的としている．ただし，(2)の立場は，(1)の生物界の力学的諸現象に関する十分な知識を前提としている．そのため本研究では，ヘビ等の未だ解析が十分なされていない生物の力学的現象を利用するために，それ自体の解析も行なっている．つまり，本研究は(2)の立場に立ちながら，(1)から(2)にわたる生物力学全般の研究手法を駆使するものであると言えるであろう．本研究のテーマで使用した「生物力学的研究」とはこのような意味を持っている．

この立場に立つ研究は決して新しいものではない．あるいは最も根源的な立場と言えるかもしれない．今日のように機械文明が高度の発展をとげる以前から，生き物のすばらしさを人工の機械に役立てようという努力は続けられてきている．レオナルド・ダ・ビンチが鳥の飛行を観察し，飛行機の製作を夢みたのは周知である．しかし，従来生物力学という立場をはっきりと打ち出した研究はほとん

ど無かったと思われる．なぜであろうか．

工学者の発想は何ものにも囚われてはならない．たとえ生物の中に材能の夢を見い出したとしても，その材能を実現するために生物と同様の形態を使用しなければならない必然性は存在しない．レオナルド・ダ・ビンチの夢みた飛行という材能も，実際には固定翼とプロペラという純工学的な形態によって実現されている．生物が発生的材料的に有している諸々の特性そしてその拘束条件は，工学的に利用可能な諸要素と根本的に異質のものであり，生物界の観測結果についてその原理の思考を欠いた性急な工学的適用はほとんどの場合不満足な結果しか生み出さなかったことがその最も大きな原因と言えるであろう．また，現在の技術水準では生物の中に工学的応用可能な原理を認めたとしても，それをそのまま工学的に実現できず，より低い次元のしかし実現可能な材構によらざるを得ないという状況も，前記(2)の立場に立つ生物力学的研究の少なかった理由の1つに挙げられよう．

このように，生き物の力学的諸現象の原理を観察，解析し工学的に応用しようという方法論である生物力学的研究手段とは必ずしも万能ではない．かえって，生物力学という立場に拘泥し，それに振り回されることこそ回避すべきであろう．

このような制約を考慮しつつも，本研究においてあえて「生物力学的研究」手段を選択した理由はつぎのとうりである．

最も根本的な理由としては，ＡＣＭの示す多くの材能がその“形態”そのものに依存するものであるという点にある．鳥のように空を飛ぶという材能は“ハバタキ”という形態を必ずしも必要としなかったことはすでに述べた所りである．ある材能（仕様）を与えられたエンジニアはそれを実現するためにはあらゆる形態（デザイン）を選択することが許される．しかし，もしもその研究がハバタキ材構という形態そのものの特異性に注目しそれの諸々の原理を明らかに

するという立場からはされ，しかもその特性を知ることによってその形態独特の工学的応用の可能性を探るものであれば，その研究は鳥の飛翔そのものの観察から出発すべきであろう．

本研究も，ヘビの索状の能動柔軟体という形態に注目し，それに付随する諸材能を明らかにしようとする立場に立つものであり，しかも，少なくとも現状ではそのような形態が生物界にのみしか観察されない以上，生物の観察を基にした生物工学的な立場の研究手段が最も効率的であると言ってよいであろう．また，ACMのモデル生物としてのヘビが，その内部の筋骨格系の複雑さにもかかわらず総体としては体幹各部がユニット化された単純さを有し，工学的な機構と直接的対応がつけやすいという点も生物力学的アプローチの妥当性を示す1つの理由であると言うこともできよう．さらに，ACMに関する研究が，その一部の力学的現象のみに関する解析だけを目的とするのでなく，全体としての運動制御のための神経系さらに高度の知能的分野までも包括したいわゆるシステムとしての研究を最終目的とするものであるという点においても，生物有機体としての統一性を示す生き物についての研究は，単なる一現象的自然現象を観察する立場より，より積極的な意義を持つものと言えるであろう．

本研究において生物力学的研究手段を採用する理由は以上の通りである．

1-3 索状能動体の移動機能の考察

本論文においては，ＡＣＭ（索状能動体）の諸々の機能のうち特に移動機能に注目し，移動機能を中心に議論を進める．そのため，本節ではまずＡＣＭの移動機能の定性的特徴を明らかにすると共に，ＡＣＭのモデル動物としてのヘビについて，その移動様式の基本的な考察を行なうことにする．

1-3-1 移動体としてのＡＣＭの特徴

移動体としてのＡＣＭの特徴を明らかにするために，まず形態的に類似している生物を観察してみる．

工学的には未だ利用されたことのないＡＣＭ型の移動様式も，生物界においては最も古く，一般的に観察することができる．本論文では扱わないが，水中においては微小な繊毛，鞭毛運動による移動様式[66]から魚等の屈曲推進運動[41,42]にいたるまでＡＣＭ型の移動様式は広く観察され，水中生物の中ではＡＣＭ型推進運動こそ最も基本的な移動様式であると言えよう。

一方，本論文で解析の対象とする陸上移動を行なう生物についてはどうであろうか．生物の進化そしてその生息圏の観察からもＡＣＭ型の移動様式は必ずしも最上のものであったと言うことはできない．地上の移動様式の中では「外肢」による方式こそ最も成功していると言ってよかろう．節足動物だけに限ってみても他の全動物の６倍もの種類があるといわれている[64]．この理由としては，外肢を用いることにより筋肉運動がより効率的に推進運動に変換され，高い移動スピードが発生できること．また体の大部分を動かさずに肢の部分だけの振動運動で移動できること．さらに，地表に胴体を引きずるような摩擦運動が無くせることから移動時のエネルギ消費が減少できることなどを挙げることができる．ワニが陸上を移動するとき四肢による移動を行なうが，水中においては全体幹によるＡＣＭ

型の屈曲運動を行なうのも，それぞれの環境における移動様式の適性を示すものと考えてよいだろう．

しかし，ＡＣＭ型の陸上運動は完全に不利なのであろうか？　有肢移動様式とＡＣＭ型の移動様式を厳密に比較するのは本論文第６章において行なうが，定性的に考えても環境によってはＡＣＭ型の移動様式が望ましい場合も生ずると考えるべきであろう．それはヘビ類，つまり２２３０種のヘビ（爬虫類ヘビ亜目），160種の蛇形類（caecilians），130種の無足トカゲ（amphisbaenians）[40]などの地上環境への巧みな適応を考慮すれば明らかであろう．

ヘビ類の移動体としての特徴としては[22]，細長く能動的かつ柔軟な屈曲運動可能な体幹形状を生かすことにより，

(1) 凹凸のはげしい不規則な荒地あるいは体の大きさの割に狭隘で曲りくねった通路を推進できる，

(2) 自重を体幹全体に分散できるため，沼地あるいは砂地のような軟弱な所を移動するのに適している，

(3) 常に力学的に安定な姿勢で推進を行なえるため，クレバスでの谷渡りあるいは樹上での移動などに適している，などを挙げることができる．

以上のようなヘビの移動体としての特徴から，それをモデルとしたＡＣＭによる移動様式は，いわゆる「荒地」に良く適応するものであり，比較的平坦な草原等に適応した有肢動物や，さらに高い平坦度を必要とする人工の車輪走行車では踏破できないような環境を移動できる独自の特徴があると考えられる．

つまり，ＡＣＭの移動特能の研究により，あたかもヘビが荒地を難なく水の流れのように推進するように，地球上のあらゆる環境を縦横に滑り回る新しい型の「荒地用走行車」の開発も期待することができるであろう．

I-3-2 ヘビの移動運動に関する従来の研究

ヘビは足もないのになぜ前進できるか？　古くから多くの人々にこの素朴な疑問が抱かれつづけてきたようである．旧約聖書の中にもヘビの運動を4つの不思議な現象の1つであると言及している。[67] そして，この疑問と共にヘビの移動運動の原理を明らかにしようという試みも古くからなされている．アリストテレスはその動物運動論の中でヘビの前進運動の原理を論じている[68]．

しかし，W. Mosauer が指摘しているように[26]，20世紀前半にいたるまで，ヘビの移動原理についての研究は実際のヘビの観察も乏しく，ほとんど発展らしいものが見られなかったのが実状である．たとえば，17世紀以降の研究に限っても1682年 Tyson の "Vipera caudisona"[31]，1789年 La Cépède による "Histoire Naturelle des serpents"[32]，1812年 Home の "Observation intended to show that the progressive motion of snake is partly performed by means of the ribs,"[33] 1843年 Dumeril による研究[34]，さらに1866年の Omen による解剖学的研究[35] などヘビの移動運動に言及した研究はいくつかある．しかし，これらの研究は概して生きたヘビの移動運動そのものについての正確な観察に欠く所があり，たとえば，ヘビはウロコや肋骨の先端部を用いて歩くように前進するとか，水平な面の波動運動でなくイモムシのごとく垂直に波動して進むなどの誤った説が大部分であった．19世紀後半になってからも1879年 H.F. Hutchinson によって "Nature" 誌に書かれた "How do snakes progress?"[36] の中にはいくつかのヘビの移動様式を分類しており，いわゆるほふく運動についての記述もあるが，推進力を発生する原理についての説明はなされていない．また，樹木を移動する際にはウロコを立てるとか腹部を吸盤状にして前進するなどの誤った記述も見られる．3年後，Stradling も "Nature" 誌にヘビの移動運動についての観察結果を載せている[37]．この中にはヘビの移動時の習性

について正確な記述が見られる．この習性については本論文中5-2節に詳論する．HutchinsonとStradlingの原稿文の後，ヘビの移動の問題は忘れられたか，あるいはすでに解決されたものとして全然研究されなくなっている．

1904年になってイタリアのBuffaは解剖学的な立場からヘビの運動の問題を真剣に取り上げている[38]．彼は解剖学的に十分正確な観察と記述を行なっているが，その結果得られたヘビの移動原理についての説明はあいかわらず17世紀以来の肋骨を使用して移動するというBoaなどの特殊なヘビが行なう移動様式の説明にとどまり，最も一般的な蛇動推進は完全に無視されている．このような誤りがあるにもかかわらずBuffaの理論は，その十分正確に見える記述のため広く受け入れられ，動物学の教課書の中にも採用されることとなった．その結果，1930年のNowikoff[39]の記述の中にも同様の17世紀的誤りが引き継がれる結果となっている．

ヘビの運動を物理学的な立場で解析することを始めて提唱したのは1902年のA.D.Fokker[40]である．彼はヘビの移動原理を明らかにするために次のようなアナロジーを用いている，つまり，平板に刻まれた曲率の変化する屈曲した溝と，その中に押し込められた細長い弾性体を考える．この弾性体は溝に沿って屈曲させられているため内面が十分なめらかであるならば弾性エネルギを減少する方向に運動する．このことから，

" The locomotion of snakes is explained after an analysis of a mechanical analogy, by assuming muscular action which tends to stretch the body where the curvature of the path decreases and which tends to bend the body where the curvature of the path increases in the direction of motion". [40]

との記述を残している．ヘビの移動原理について本質的に正しい記述がなされたのはこれが初めてであると言えよう

1931年に M. D. Mosauer[27] は，解剖学的な立場に立ちながら生きたヘビの移動運動についても十分正確な観察を行ない，ヘビの移動様式を合理的に分類すると共に，従来からのうロコや肋骨を用いるという説を実験的に反証している．ただし，移動原理についての説明は未だ定性的な段階にとどまっている．

1938年 Rashevsky[28] は数理生理学的立場からヘビ移動中の運動解析を行なっている．しかし，これは滑走体形を三角波状に仮定するなど実際のヘビの滑走運動と異なる点が多く，実際のヘビを用いた検証も行なっていない．しかし，数理生物学の立場で始めてヘビの移動力学が扱われたという点で注目すべきであろう．

ヘビの陸上でのほふく運動が実験的かつ定量的に取り扱われるようになったのは1946年の J. Gray の研究[30]が初めてであると考えられる．彼はヘビを多数の杭を立てたような人工的環境で推進運動させ，外部に働く力の大きさや向きなどについて定量的な測定を行なっている．J. Gray のヘビに関する研究は1968年に出版された "Animal Locomotion"[29] にまとめられているが，実験動物学的な立場に立った正確な記述と生物力学的考察は，十分の説得力を有しており，ヘビの運動解析の基礎として重要な意味を持つものである．ただし，Gray の研究においては，ヘビの移動運動の結果として外部に働く力は定量的に測定されているが，運動筋の活動状態や体形形状と推進力の関係などについては未だ定性的な段階にとどまっている．

1962年 C. Gans[41] はバイオメカニクスの立場からヘビのみならず無足動物 (limbless animals) 一般の運動力学の解説を，Gray の研究等をもとに行なっている．

以上概観したように，ヘビのほふく運動に関しては20世紀前半まではほとんど研究らしい研究はなされておらず，真に定量的な研究は1946年の J. Gray による実験生物学的な研究のみであると極

言しても良いような状態にある（ただし，水中でのヘビ等のslender body fishが行なう遊泳運動については流体力学的な興味からかなり解析的な研究がなされている[42,43,44]．本研究は陸上でのほふく運動に対象を限定しているのであり，その運動に関する解析的研究はほとんど無いと言ってよい）．これは，ヘビがsnaky（陰険な）動物として忌み嫌われたという背景もあると思われるが，他にヘビのほふく運動を理解するには解剖学的な知識等だけでなく，工学的な解析手段も必要であるという原因も大きいと思われる。

本研究はあくまでＡＣＭの移動機能に関する知識を得るという立場に立ってヘビのほふく運動を解析するものであるが，同時にこのような工学的立場に立つヘビのほふく運動の研究は，J. Gray らの研究をより押し進めるものであり，ヘビに関する動物学的分野にも貢する所が大きいと考えている．

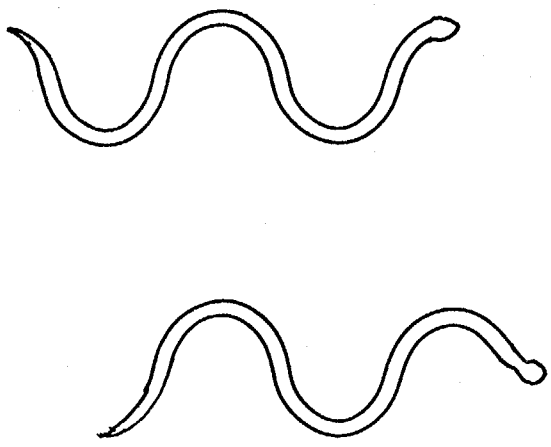
1-3-3 ヘビ移動様式の分類

ヘビは，環境に適応した数々の移動運動を行なうが，そのうちでも大きく分類するとつぎの４つの滑走モードが存在する[29]

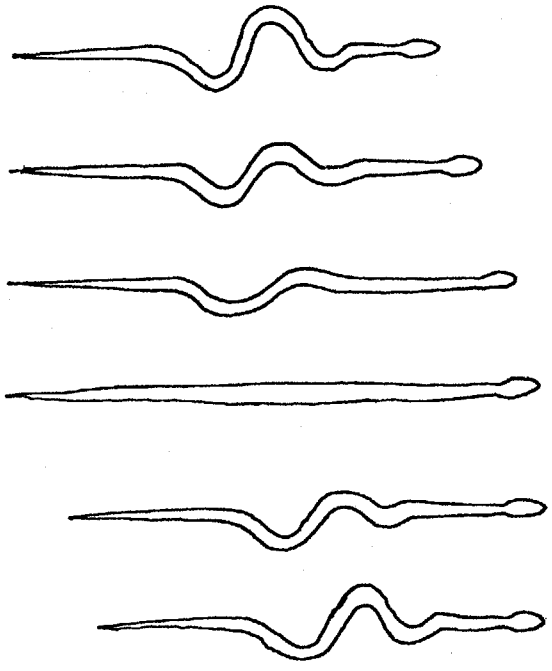
(1) ヘビ式滑走 (Serpentine movement)
(2) 直線式滑走 (Rectilinear movement)
(3) アコーディオン式滑走 (Concertina movement)
(4) サイドワインダ滑走 (Sidewinding movement)

それぞれの滑走体形はFig. 1-2 に示す．

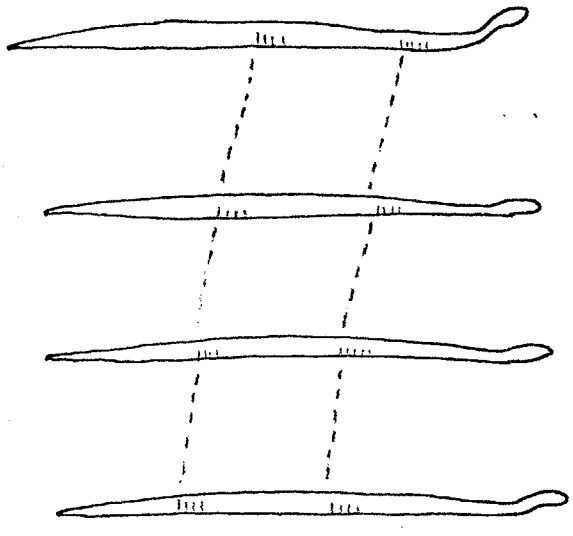
ここで (1) は，ヘビのほとんど全種類に典型的に見られる移動様式であり，体幹の各部分が同一の軌跡をたどることを特徴とする滑走モードである．昔から岩の間などを水の流れのようによどみなく推進し人々を驚かせた滑走モードがこれであり，４つの種類の中で最も効率の良い滑走モードであると考えられる．本論文において「ほふく運動」とは主としてこの滑走様式を示し，「定常ほふく運動」とは平坦で一様な滑走面上を (1) の滑走様式で移動する場合の運



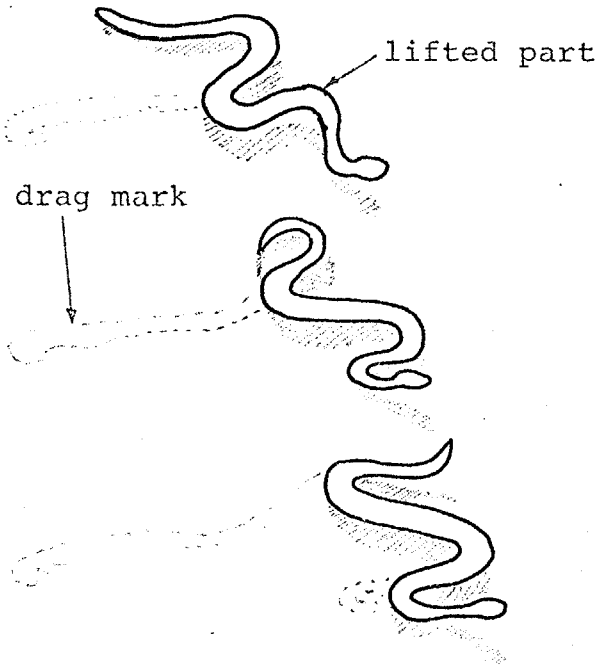
(1) Serpentine movement



(2) Concertina movement



(3) Rectilinear movement



(4) Sidewinding movement

Fig. 1-2 ヘビの示す4種類の滑走モード[29)]

動を示すことにする．

(2)は，Boas とか Vipers とかの限られた種類の特別の体幹部を有するヘビが，獲物に近づくときとか，なめらかな表面を滑走するときなどの特殊な状態で行なう滑走法である．本論文では扱わない．

(3)は，幅の せまい直線状の通路にとじこめられたヘビや，非常にすべりやすい床面などに置かれたヘビが行なう滑走法である．特にすべりやすい床面で行なうこの滑走体形は，原理的には静止摩擦係数が動摩擦係数よりも大きいという現象を利用しているため，この滑走様式によればいかにすべりやすくとも推進は可能である．しかし，その推進効率は非常に低い．

(4)は，砂漠に住むがラガラヘビなどが行なう滑走法であり，滑走中に体幹の一部を浮き上げ，あたかもスパイラルコイルが転がるように推進する．この移動様式には体幹と滑走面とのすべり運動がなく体幹は常に上から押えるように地面を捉える．そのため砂地面での移動効率は高いと考えられる．

1-4 本論文の構成とその概要

本論文の構成およびその概要はつぎのとおりである．

第1章 においては，本論文で提唱する新しい移能体の総称概念である索状能動体（ＡＣＭ）についてその定義と研究の工学的意義を明らかにする．そしてその研究手段に生物力学的方法論を用いた理由とその背景を述べる．

第2章 においては，ＡＣＭの移動運動を解析するための基礎方程式を誘導し，以降の議論の基礎とする．

以降の第3章～第7章においてはＡＣＭの典型的なモデル生物としてヘビに注目し，その運動解析を行なっている．これらの解析は，(i) ヘビそのものに関する動物学的な知見を求めることを目的とすると共に，(ii) その生物工学的な知識をＡＣＭの工学的応用のための予備知識とする目的の２つの意図のもとに行なっている．つまり，各章中において，生体としてのヘビそのものの解析という印象を与える記述あるいは論理の展開も，実はその根本に常に(ii)のＡＣＭとしての工学的応用を念頭になされていることを強調しておきたい．章別に述べれば各章ではつぎのことを論じている．

第3章 まえの第2章と共に本章の知見はヘビの定常ほふく運動を論ずる際の基礎となるものであり，ほふく運動の基本的な滑走形状について生理学的，実験的に検討を行なっている．

第4章 本章は定常ほふく運動の運動解析の主幹であり，体幹に沿って運動前の行なう筋運動がいかにして推進力，あるいはスリップ力等に変換されるかを解析的に論じ動物実験によって妥当性を検討する．

第5章 生物の移動様式独自の適応機能がヘビの定常ほふく運動

にも観察されることを明らかにし，特にその滑走体形の適応過程を力学解析的および実験動物学的に検討している．

第6章　第3～5章においてはヘビの平坦地で行なう定常ほふく運動の解析を行なったが，ほふく運動の特異性が十分発揮されるのはいわゆる「荒地」環境においてである．本章では荒地のモデルとして迷路を想定し，その内部での適応的な滑走体形について解析的実験動物学的に検討をかえる．

第7章　ほふく運動の移動様式としての評価を特に移動に要するエネルギー量の立場から論じ，2足歩行様式あるいは人工移動機械と比較・検討する．

後半の第8章，第9章においては，前半のヘビを中心とする立場から離れ，人工的に構成したACMの機械モデルによりその移動運動機能あるいは感覚機能はいかにあるべきか論じている．これは，(i) 第3～7章の知見をanalysis by synthesisの立場で改めて総合的に検討するものである．とともに，(ii) 生物モデルとしてのヘビに関する知見を基にその特性を有したACMの原形となる機械システムを工学的に実現するものであり，第3～7章での生物モデルに依存した立場から発展しより工学的な立場でACMの機能を追求するものであるということができる．章別に述べればそれぞれつぎのような内容を論じている．

第8章　平坦地においてほふく推進を行なうACM機械モデルについてその機構，運動制御方式，操縦方法等を明らかにし，試作機の滑走・操縦実験を行なっている．

第9章　ACMが知能的作業を遂行してゆくためには，外部環境を知覚する何らかの感覚受容器が不可欠である．本章では触覚を付加したACMについて，その感覚情報の処理はいかに行なうべきか

論するとともに，求心性および遠心性神経情報に相当するＡＣＭ全体としての運動信号処理系の構成について論じている．そして，その妥当性は物体へのからみつき，迷路への侵入および迷路内自走，抗を押しての推進などの械械モデルを用いた実験により検討する．

第10章　以上の結論をまとめるとともに，ＡＣＭのモデル生物であるヘビの生物力学的研究に残された課題，またさらにマニピュレータおよび知能械械としてのＡＣＭの未来を展望している．

1-5 記号表

本論文で使用する主な記号とその定義を示す．

a	脊椎層から運動筋までの平均距離（Fig. 4-1, 4-2 に示す）
i	体幹上の節番号
l	ほふく体形（Fig. 4-3 参照）の 1/4 周期の体幹長さ
L	ACM あるいはヘビ全長
L_i	第 i 節目のリンク
s	ACM あるいはヘビの体軸座標上の長さ
v	ACM（ヘビ）の体幹方向移動速度．
V	移動体の移動方向速度
w	単位節当りの重量
W_{OP}	OP 間の体幹重量
W	全重量
$x(s)$	体幹上の O 点からの長さをほふく体形中心線（x 軸）に投影した長さ
$y(s)$	体幹上の O 点からの長さを x 軸と直交する y 軸に投影した長さ
$f_t(s)$	接線力密度関数
$f_n(s)$	法線力密度関数
$P(s)$	パワー密度関数
$T(s)$	トルク分布
J_i	体幹上 i 番目のジョイント
T_i	第 i 節のアクチュエータによって生ずるトルク
f_i	トルク T_i によってジョイントに働く力

f_{ti}　ジョイント J_i に働く接線方向の力

f_{ni}　ジョイント J_i に働く法線方向の力

P_i　第 i 節のアクチュエータの消費パワー

F_t　接線力（推進力）

F_n　法線力

O, P　ACMあるいはヘビのはふく体形座標（Fig. 4-3 参照）

f_{mo}　最大発生筋力

$F_m(s)$　筋力分布関数

$J_n(\alpha)$　第1種 Bessel 関数

$S(s)$, $C(s)$　} Fresnel 積分

$Serp(\theta)$　本論文で (4-10) 式のごと定義する関数

α　くねり角（Fig. 4-3 参照）

α_s　任意点におけるくねり角（Fig. 5-3 参照）

ε　移動仕事率（(7-1) 式と定義する）

θ　滑走面傾斜角度

Θ　迷路屈折角度

θ_i　ジョイント J_i における偏角

$\theta(s)$　体軸距離 s のジョイント部の偏角（Fig. 3-5 参照）

δs　単位節長さ（Fig. 3-5 参照）

ρ_i　ジョイント J_i における曲率

$\rho(s)$　体軸距離 s の体幹部曲率

σ　筋力分布関数 (4-3) 式のパラメータ

Ψ　体形曲線の近似度評価量（Fig. 3-7 参照）

μ_t　接線方向摩擦係数

μ_t^*　等価的な接線方向摩擦係数

μ_t^0　滑走面の傾斜度 $\theta=0$ の時の接線方向摩擦係数

μ_n　法線方向摩擦係数

μ_n^*　等価的な法線方向摩擦係数

μ_n^0　滑走面の傾斜角 $\theta = 0$ の時の法線方向摩擦係数

第2章　索状能動体の移動力学基礎（ほふく力学）[1,7,15]

2-1　まえがき

すでに述べたように，索状能動体（ＡＣＭ）が示すいくつかの特徴的特徴は，その細長くて能動的な柔軟体という形態に由来する所が大きい．そのため，ＡＣＭの移動運動を解析する場合にも，そのような形態が示す独自の運動力学を明らかにしておく必要があると思われる．

そこで，本章ではＡＣＭの運動中に考慮すべき諸パラメータについて考察した後，ＡＣＭの特に移動運動を考える際に必要となるいくつかの基礎的力学関係を誘導しておく．

2-2　索状能動体の運動を支配するパラメータ

索状能動体（ＡＣＭ）はその体幹に沿って配備されたアクチュエータ群で屈曲運動を行なう．よって，その屈曲運動によって生ずる力学的現象は体幹に対する相対的な関係として記述できる場合が多い．そのためＡＣＭの運動を考える場合の基本座標系としては，ＡＣＭ体軸にとった動標構（moving frame）をとり，体軸距離ｓの関数として力学的諸関係を記述していくことにする．

まず，ＡＣＭの空間内における姿勢は，体軸距離ｓごの曲率分布$\rho(s)$と捩率分布$\tau(s)$の２つのパラメータを決定すれば一意に決まる．*

また，ある姿勢からＡＣＭが屈曲運動を始めるためには，ＡＣＭのアクチュエータ群が駆動トルクを生じなければならない．この考慮すべきトルク分布としては，ＡＣＭ体幹上に定義された体軸と垂直な平面上の直交する二方向回りのトルク$T_x(s)$，$T_y(s)$，さらに体軸

* 〔定理〕[70] 空間曲線の曲率半径および捩率半径が曲線の長さｓの関数として与えられるときは曲線の形は完全に決定される．

回りのトルク $T_\theta(s)$ の3つである．そして，これらの駆動トルクによって体幹に生ずる力はつぎの4成分であると考えられる．つまり，体軸接線方向の力 $f_t(s)$，法線方向に生ずる力 $f_n(s)$，従法線方向の力 $f_n'(s)$ そして体軸回りの回転トルク $f_\theta(s)$ である．

ＡＣＭの運動は結局，ＡＣＭの外部から働く力（これも動標構の接線方向，法線方向，従法線方向，軸回り方向の4成分から成る）に応じて内部力 $T_x(s)$, $T_y(s)$, $T_\theta(s)$ を発生し，外部に $f_t(s)$, $f_n(s)$, $f_n'(s)$, $f_\theta(s)$ の4成分の力を生ずる．その結果ＡＣＭの姿勢 $\rho(s)$, $\gamma(s)$ を変えてゆくものであると言えよう．

ただし，以上の考察はＡＣＭが空間内で3次元的運動を行なう時考慮すべきパラメータを示したものである．すでに第1章で述べたように本論文はＡＣＭの推進運動を中心に論ずるのであり，ＡＣＭの動作としては二次元平面内の運動に限定して考えることにしている．よって考えるべきパラメータは当然限定される．つまり，姿勢のパラメータとして曲率分布 $\rho(s)$，発生トルク $T(s)$，外部に生ずる接線方向および法線方向の力 $f_t(s)$, $f_n(s)$ そして外部からＡＣＭに働く接線方向および法線方向の力などである．次節において，これらのパラメータの間の関係を求めることにする．

2-3 索状能動体の移動力学基礎式の誘導

索状能動体（ＡＣＭ）を微小長さ δs の単位節からなる Fig. 2-1 のようなリンク系としてモデル化する．ＡＣＭが平面内に任意の形状をとり，しかもそこで2次元的運動を行なうとすればつぎのような力学関係が成り立つ．

任意のジョイント J_i に配備されたアクチュエータが屈曲トルク T_i を生ずる時，ジョイント J_i およびその両隣のジョイント J_{i-1}, J_{i+1} に

$$f_i \triangleq \frac{T_i}{\delta s} \qquad (2\text{-}1)$$

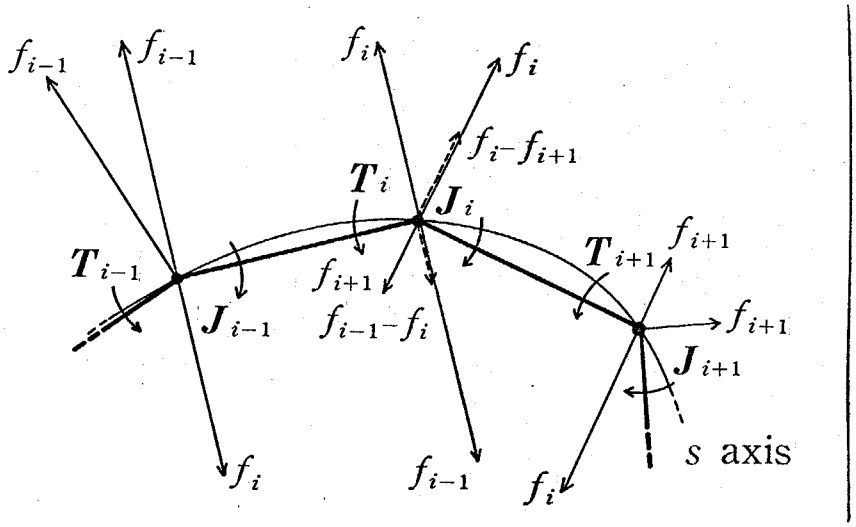


Fig. 2-1　ＡＣＭ体幹に働く力

Table 2-1　ＡＣＭの移動力学基礎式

Description	Fundamental equations
Tangential force density function	$f_t(s) = \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)$ (1^0)
Tangential force (driving force)	$F_t = \int_0^L \frac{dT(s)}{ds} \rho(s) ds$ (2^0)
Normal force density function	$f_n(s) = \frac{d^2T(s)}{ds^2}$ (3^0)
Normal force	$F_n = \int_0^L \left\| \frac{d^2T(s)}{ds^2} \right\| ds$ (4^0)
Power density func.	$P(s) = v\, T(s) \frac{d\rho(s)}{ds}$ (5^0)

と定義される力がFig. 2-1のように生ずる．トルクT_{i-1}，T_{i+1}についても同様の関係が成り立ち，それらのベクトル和を考慮することにより次節の諸関係式が誘導される．なお，ジョイントJ_iでの体軸接線方向とは，J_iでの偏角θ_iの$1/2$を通過する連続曲線（S axis）の向きと定義しておく．

2-3-1 接線力基礎式の誘導

体幹距離s（$\equiv i\delta s$）にあるジョイントJ_iに生ずる接線方向への力f_{ti}はFig. 2-1よりつぎのように示される．

$$f_{ti}=\left\{(f_i-f_{i+1})+(f_{i-1}-f_i)\right\}\sin\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \tag{2-2}$$

ここで，リンク長さδsが微小と考えれば，リンク系は連続曲線とみなすことができ，つぎの関係が成り立つ．

$$\rho_i \simeq \frac{\theta_i}{\delta s} \tag{2-3}$$

$$\sin\left(\frac{\theta_i}{2}\right)\simeq \frac{\theta_i}{2} \tag{2-4}$$

ただし，ρ_iはi番節部の体幹曲線の曲率に相当している．(2-1)，(2-3)，(2-4)式を(2-2)式に代入すればf_{ti}はつぎのように示される．

$$f_{ti}=-\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2\delta s}\rho_i \tag{2-5}$$

ここで，リンク長さδsは微小と考えているので，トルク分布，曲率分布とも$T(s)$，$\rho(s)$と連続化表現する．さらに，(2-5)式の左辺をACMの体幹単位長さ当りに生ずる接線力という意味で接線力密度関数$f_t(s)$と定義すればつぎのような関係が成り立つ．

$$f_t(s)=\frac{dT(s)}{ds}\rho(s) \tag{2-6}$$

ただし，上式(2-6)の符号はつぎのように決める．体軸距離sの増加と共に左回り方向に屈曲する曲率$\rho(s)$を正，また同様に左回りの屈曲を生ずるトルク$T(s)$を正とする．また$f_t(s)$は体軸原点方向，

つまり体軸距離sの減少する方向を正にとっている．

結局，上式（2-6）は，ＡＣＭのアクチュエータが駆動トルクを生ずるとき，体幹の曲率が大きいほど，またトルク分布の変化率が大きいほど駆動力が接線力に変換されやすいということを示している．

なお，接線力密度関数 $f_t(s)$ をＡＣＭ全体幹（長さＬ）について積分したものは，ＡＣＭの推進力にほかならない．これを接線力（推進力）と呼び F_t と表記すれば，つぎのように示すことができる．

$$F_t = \int_0^L \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds \qquad (2\text{-}7)$$

推進力は上式（2-7）から求めることができる．

2-3-2 法線力基礎式の誘導

ＡＣＭ体軸と垂直方向に生ずる力を法線力と呼ぶ．ジョイント J_i に働く法線力 f_{ni} は，Fig. 2-1 よりつぎのように示される．

$$f_{ni} = \left\{ (f_i - f_{i+1}) - (f_{i-1} - f_i) \right\} \cos\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \qquad (2\text{-}8)$$

ここで，前節と同じく節長さ δs を微小と考えれば

$$\cos(\theta_i/2) \simeq 1 \qquad (2\text{-}9)$$

が成り立つ．そして，ＡＣＭ体幹の単位長さに生ずる法線力を法線力密度関数 $f_n(s)$ と定義すれば，これは（2-8）式に（2-9），（2-1）式を代入することにより次のように定式化できる．

$$f_n(s) = \frac{d^2T(s)}{ds^2} \qquad (2\text{-}10)$$

ただし，$f_n(s)$ の符号は，体軸距離sの増加方向に対して右手方向を正にとっている．上式（2-10）から，ＡＣＭ運動時に法線方向に生ずる力は，曲率分布 $\rho(s)$ とは無関係でありトルク分布 $T(s)$ の２階微分にほかならないことが明らかになった．

さて，ＡＣＭの移動運動を考える際の法線力は，外部からの抗力に抵抗する力となる．そしてその体幹に対する力の絶対値の和は，

ＡＣＭでの移動運動の効率を考える上で重要である．そこで，これを法線力 F_n と定義しつぎのように定式化する．

$$F_n = \int_0^L \left| \frac{d^2 T(s)}{ds^2} \right| ds \qquad (2\text{-}11)$$

上式(2-11)によってＡＣＭ体幹に働くすべての力を求めることができる．

2-3-3 パワー基礎式の誘導

ＡＣＭの運動は，体幹に配備されたアクチュエータ群の発生できるパワーの限界のためその姿勢，運動速度等に規制がある場合が多い．そのため本節ではＡＣＭが体幹方向に一定の速度 v で移動する場合に発生するパワーを定式化する．

ジョイント J_i における偏角を θ_i，発生するトルクを T_i とするとパワー P_i は

$$P_i = T_i \frac{d\theta_i}{dt} = T_i \frac{d\theta_i}{ds} \frac{ds}{dt} \qquad (2\text{-}12)$$

と示せる．ここで，リンク長さ δs を微小と考えれば，ＡＣＭの体軸方向移動速度 v は

$$v \cong \frac{ds}{dt} \qquad (2\text{-}13)$$

である．よって(2-3)，(2-13)式を(2-12)式に代入すれば

$$\frac{P_i}{\delta s} \cong T_i \frac{d\theta_i}{ds} \cdot v \qquad (2\text{-}14)$$

となる．上式(2-14)でトルク分布，曲率分布を連続関数 $T(s)$，$\theta(s)$ で示し，体幹の単位長さで発生するパワー $P_i/\delta s$ をパワー密度関数と名付け $P(s)$ で表記すれば，つぎの関係を導くことができる．

$$P(s) = T(s) \frac{d\theta(s)}{ds} v \qquad (2\text{-}15)$$

上式(2-15)がＡＣＭ移動運動中に必要とするパワーを示す式であり，移動運動中にはこの値 $P(s)$ は常にアクチュエータの性能によって決まる上限より低くなる必要があるといえる．

以上でＡＣＭの移動力学の基礎式が誘導されたが，これらをまとめてTable 2-1 に示す．本章で誘導した基礎式は，本論文の４～７章のほふく運動の解析，さらに８～９章のＡＣＭの機械モデルの設計のための基礎となるものである．

第3章　ほふく運動の形態学[4,14]

3-1　まえがき

動物は外部の環境や生理的な欲求などに従って行動し種々の運動様式をみせる。したがって，その運動に際しての体形は決して一定ではない．しかし，ある一定の条件のもとに一様な整った環境を運動するときにはおのずからある標準的な運動様式によって規則的なリズムと体形を示すことが多い．このような運動，とくにその運動体形は生物力学的な運動解析の基礎となる重要な要因であり，また同時にその動物の移動原理を応用した人工的な移動機械を研究する上でも看過できない．

本章では，ヘビ（爬虫類ヘビ亜目）などのほふく運動に関する上述の標準的な運動体形を追求するものであり，serpenoid curve と筆者が名付ける周期関数が実験的にもヘビのほふく体形にふさわしいことを述べる．

3-2　ほふく滑走体形曲線の運動生理学的検討

従来からほふく運動時の滑走体形曲線について種々の議論がなされてきた．すなわち N. Rashevsky は三角波によって近似し[28]，J. Gray や Taylor らは正弦曲線によって近似し地上と水中のほふく運動について論じている[29)42)]．また，H. Hertel は滑走曲線を x 軸方向と y 軸方向の正弦関数を合成した Meander と称する曲線で近似できるとしている[44]．しかし，これらの仮定曲線は主としてほふく運動の力学解析のための一つの前提として提示されたものであり，実際のヘビの滑走体形をある程度近似してはいるが，それらの曲線を想定した生理学的な根拠は考慮されていない．そこで，ここでは，主としてほふく運動時の抵抗前の収縮機構に注目して運動生理学的に妥

当な体形曲線を求めることにした．

ヘビ体幹は200～400節からなる脊椎骨とその左右の屈曲を生ずる拮抗筋からなる筋－骨格系であり，この体幹のなす曲線の曲率は，一節単位の可動範囲が微小な場合（実際にはせいぜい±4°程度）筋肉の収縮量に比例すると考えられる．そこでFig. 3-1のように，滑走時の体形曲線（a）は体軸 s に沿った筋収縮量（b）に対応して考察できる．まず，Fig. 3-1の（1），（2）のように，滑走体形を三角波あるいは円弧と考える場合には，筋肉は半周期ごとにインパルス状あるいはステップ状の収縮・弛緩運動を行なうことより，また，滑走体形を正弦波と考える場合には，滑走時の筋肉の収縮運動はFig. 3-1，（3）の（b）に示すようなOP（あるいはPO）間で変曲点のある複雑な変化を示すことなどがわかる．以上のことから，従来提唱された3つの仮定曲線はともに筋肉の運動機構の面から見ると不自然であると考えられる．

つまり，三角波，円弧では筋収縮が不連続となり，また正弦波形をとるためにはかなり複雑な筋収縮運動が必要となるが，このような筋収縮運動は運動神経系の面からもなめらかな動きを示すほふく運動には想定し難い．

これらの従来の説の欠点を補なうものとして，梅谷はすでに次のような近似曲線を提唱している[23]．つまり，定常滑走時において拮抗筋が1/2周期（POP間）ごとに交互にしかも等速度で収縮弛緩運動を繰返したときに体幹が形成すると考えられる曲線である．Fig. 3-2（1）にそのときの筋肉収縮運動を示す．この曲線の1/2周期，つまり曲線に沿った曲率の変化率が一定であるような曲線は，近年高速自動車道路のカーブ形状などにも応用され周知の clothoid spiral に相当する．Clothoid spiral の x 座標 $C(s)$，y 座標 $S(s)$ は曲線長さ s を助変数として次のようにFresnel積分により表示できる．（その曲線形状はFig. 3-3に示す）

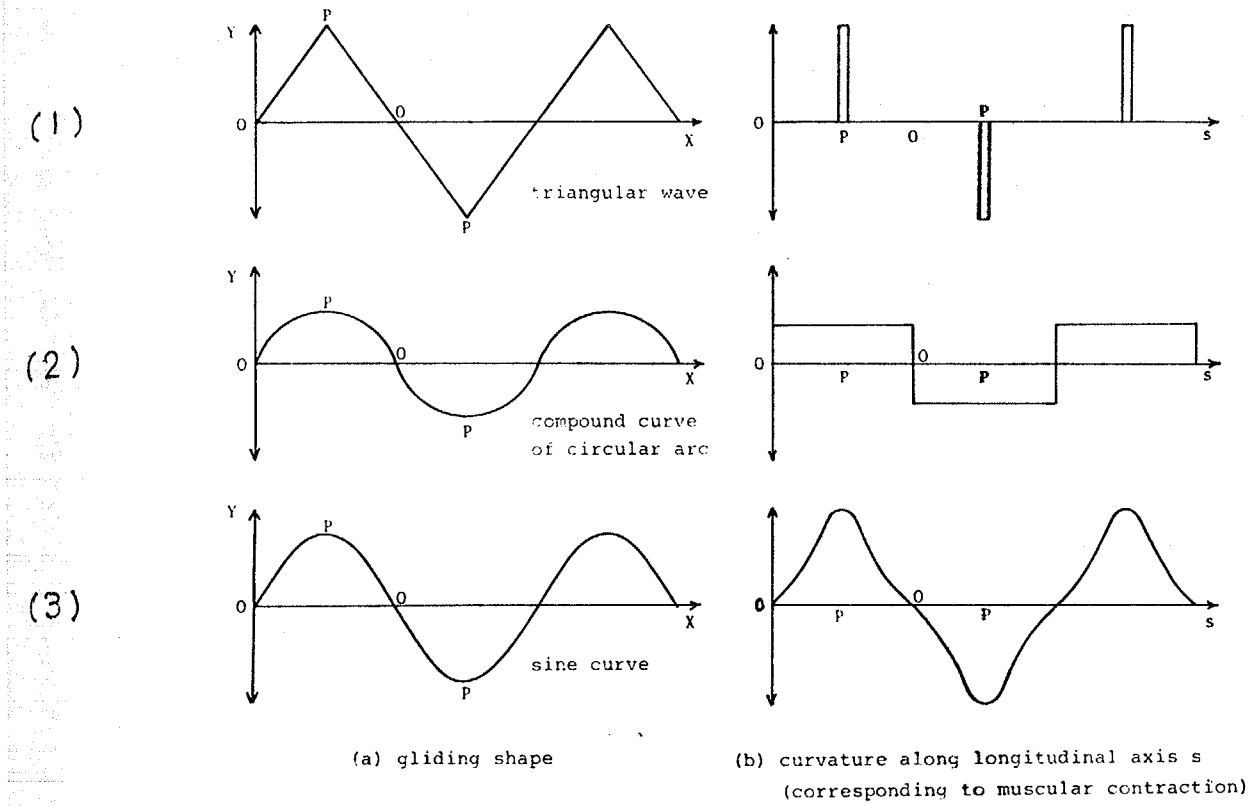


Fig. 3-1　滑走体形曲線（a）と体軸に沿った曲率分布（b）の関係

$$\left.\begin{aligned} S(s) &= \int_0^s \sin\left(\frac{\pi}{2}\cdot t^2\right) dt \\ C(s) &= \int_0^s \cos\left(\frac{\pi}{2}\cdot t^2\right) dt \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}1)$$

つまり，この仮定体形曲線は（3-1）式で示される clothoid spiral を 1/2 周期ごとに結合した合成曲線であるといえる．このような仮定体形曲線は筋肉が等速度の収縮・弛緩運動を行なうという点で自然であり，また 3-4 節に述べるようにかなり実測体形を近似する．しかし，この仮定では 1/2 周期ごとの clothoid spiral の接続部である P 点で筋肉の収縮速度（曲率の変化率）が不連続となる．この点が筋肉の運動としてやや不自然であると考えられる．そこで，筆者は筋肉の収縮速度までも全体的に滑ってなめらかな曲線として

“曲率が曲線に沿って正弦波状に変化する曲線”

をほふく滑走時の近似体形曲線として新たに提唱する．

このように定義された曲線は筆者の知る限りではいままで通称されていないようである．よって筆者はこの曲線を“serpenoid curve”と称することにする．ヘビ（serpent）の曲線という意味で名付けたこの serpenoid curve は Fig. 3-2（2）に示すように曲率の変化率も正弦波となり，体幹に沿ってあらゆる部分でなめらかである．つまり典型的なめらかな周期運動である調和振動を滑走時の筋肉の収縮機構について想定しているという点で serpenoid curve はいままでの仮定曲線のうちで最も運動生理学的に自然な仮定であると考えられる．

以上述べた2つの仮定曲線の関数形を次節で定式化した後，3-4 節で実測体形との比較検討を行なう．

3-3　ほふく滑走体形曲線の定式化

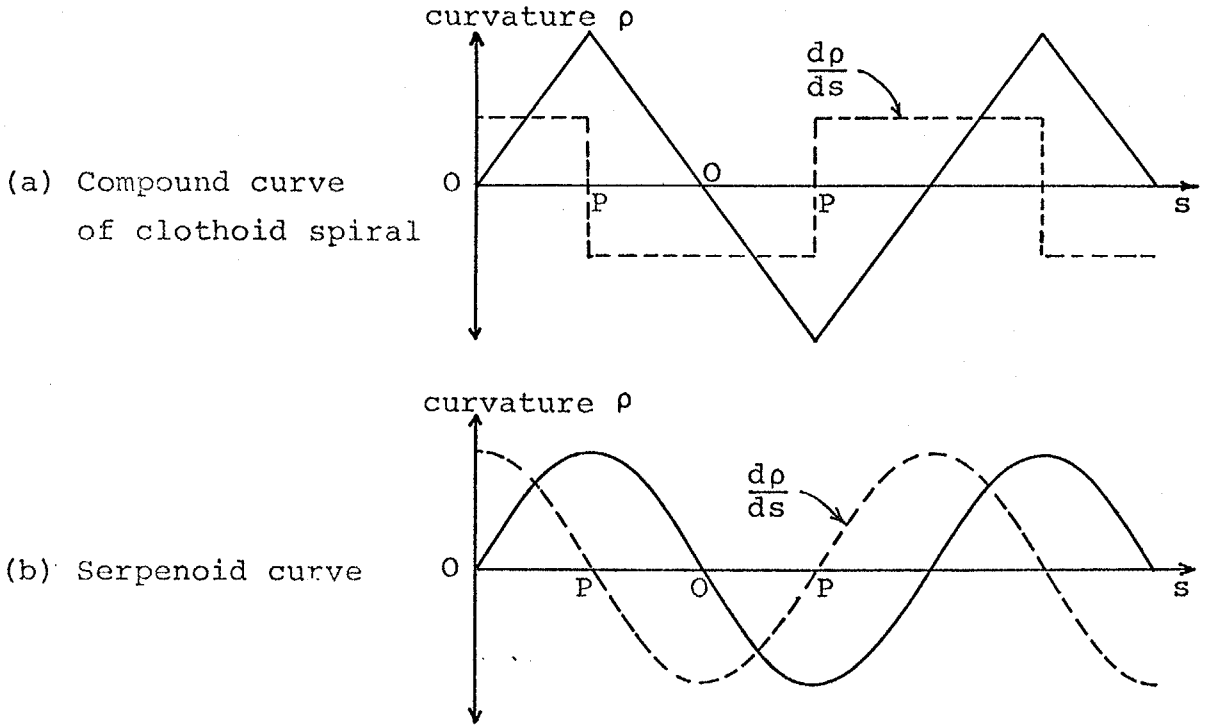


Fig. 3-2　2つの体形近似曲線の曲率分布 $P(s)$ および
その1階微分 $dP(s)/ds$ の分布

本節では，梅谷によって提唱された clothoid 型の体形曲線（（3-8）式），および，新たに提唱する serpenoid curve の体形曲線（（3-17）式）をそれぞれ定式化する．

3-3-1 Clothoid spiral を用いた表現

ヘビの定常滑走時に拮抗筋が交互に等速度の収縮・弛緩運動と繰返すという仮定に基づく仮定曲線を定式化する．まず，このような曲線の 1/4 周期を Fig. 3-4 のように座標系に設定する．体形曲線が Fig. 3-5 に示すような微小長さ δs の線素（ヘビ体節長に相当する）からなるとすると，体軸に沿った曲率の変化が一定であることから Fig. 4-5 に示す偏角 $\theta(s)$ は O 点でゼロ，P 点で最大となり，体軸上の任意の点 Q では $\theta(s)=A\cdot(s/\ell)$ といえる．ここで，定数 A は OP 間の偏角 $\theta(s)$ の総和がくねり角 α と等しい．つまり，

$$\alpha=\frac{1}{\delta s}\int_0^{\ell}\theta(s)\,ds \tag{3-2}$$

の関係が成り立つことから求まり，結局偏角 $\theta(s)$ は

$$\theta(s)=2\alpha\left(\frac{\delta s}{\ell}\right)\left(\frac{s}{\ell}\right) \tag{3-3}$$

と示される．一方，OQ 間においては

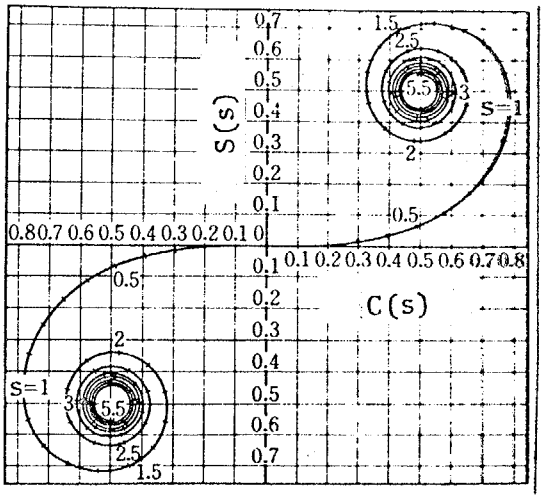
$$\alpha-\alpha_s=\frac{1}{\delta s}\int_0^{s}\theta(s)\,ds \tag{3-4}$$

が成り立つから (3-4) 式に（3-3）式を代入すると，体軸上の任意の点 Q でのくねり角度 α_s はつぎのように示される．

$$\alpha_s=\left\{1-\left(\frac{s}{\ell}\right)^2\right\}\alpha \tag{3-5}$$

曲線上の任意の点 Q の x, y 座標 $x(s)$, $y(s)$ は，OQ 間の線素の x 軸および y 軸への投影長さの積分と考えられるので

$$\left.\begin{aligned}x(s)&=\int_0^{s}\cos\alpha_s\,ds\\ \end{aligned}\right\} \tag{3-6}$$



60)

Fig. 3-3 Clothoid spiral

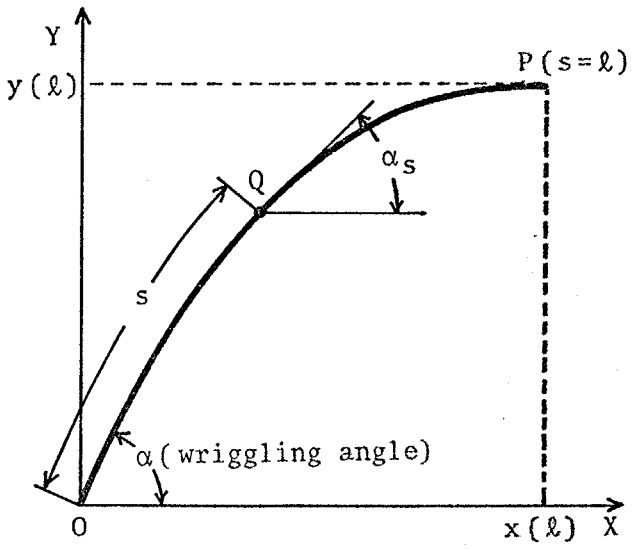


Fig. 3-4 OP 間滑走体形各部の記号

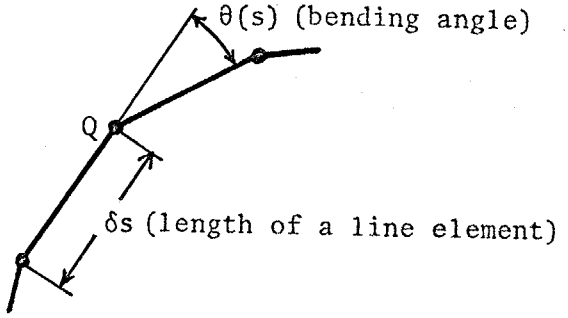


Fig. 3-5　単位体形部分の記号

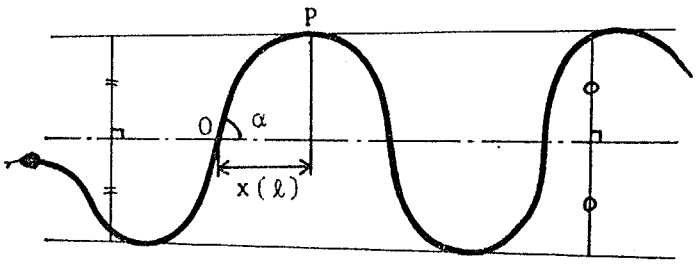


Fig. 3-6　滑走体形の中心線および
くねり角αの決定法.

$$y(s)=\int_0^s \sin\alpha_s \, ds \quad \Big)$$

のように示すことができる．(3-6)式に(3-5)式を代入して展開すると次のように示せる．

$$\begin{Bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \int_0^s \cos\left\{\left(\frac{u}{l}\right)^2\alpha\right\} du \\ \int_0^s \sin\left\{\left(\frac{u}{l}\right)^2\alpha\right\} du \end{Bmatrix} \qquad (3\text{-}7)$$

ここで，$(u/l)^2\alpha=(\pi/2)t^2$ と変数変換を行ない，上式右3項を(3-1)式のFresnel積分の標準形を用いて表示すれば

$$\begin{Bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{Bmatrix} = l\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C\left(\frac{1}{l}\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\,s\right) \\ S\left(\frac{1}{l}\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\,s\right) \end{Bmatrix} \qquad (3\text{-}8)$$

のように定式化される．

(3-8)式は，Fig. 3-3 で示したclothoid spiralの原点から曲線長 l までの部分を，Fig. 3-4 に示すような体形曲線に変換するために，まず大きさの正規化を行ない，つぎに x-y 座標系を α だけ回転し，最後に x 軸について折り返すという操作を行なったものであることを示している．

3-3-2 Serpenoid curve を用いた表現

3-2節において新しく定義した曲線，つまり曲率が曲線に沿って正弦波状に変化する曲線について，その定式化を行なう．

Serpenoid curve においては Fig. 3-5 に示す偏角 $\theta(s)$ が0点で0，P点で最大振幅となるような正弦波的変化を示すことから $\theta(s)=A\sin\{(\pi/2)\cdot(s/l)\}$ と表わせる．ここで定数Aはこの $\theta(s)$ を(3-2)式に代入することにより求まり，結局 serpenoid curve の偏角 $\theta(s)$ は次のように示される．

$$\theta(s)=\left(\frac{\pi}{2}\right)\alpha\left(\frac{\delta s}{\ell}\right)\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{\ell}\right) \tag{3-9}$$

上式(3-9)を(3-4)式に代入すればserpenoid curveの体軸上の任意の点Qにおけるくねり角α_sは次のように示される．

$$\alpha_s=\alpha\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{\ell}\right) \tag{3-10}$$

上式(3-10)を(3-6)式に代入すれば$x(s)$, $y(s)$が定式化できる。ここでは簡単のため$x(s)$についてまず論ずる．(3-10)式を(3-6)式に代入して

$$x(s)=\int_0^s\cos\left\{\alpha\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{\ell}\right)\right\}du \tag{3-11}$$

積分変数を$\vartheta=(\pi/2)\cdot(u/\ell)+(\pi/2)$と変換し変形すると

$$x(s)=\frac{2}{\pi}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}\frac{s}{\ell}+\frac{\pi}{2}}\cos(\alpha\sin\vartheta)\,d\vartheta \tag{3-12}$$

ここでつぎのような展開が可能である．

$$\cos(\alpha\sin\vartheta)=J_0(\alpha)+2J_2(\alpha)\cos2\vartheta+\cdots$$
$$\cdots+2J_{2m}(\alpha)\cos2m\vartheta+\cdots \tag{3-13}$$

ただし，ここで$J_n(\alpha)$ $(n=0,1,2,\cdots)$は第1種Bessel関数であり

$$J_m(\alpha)=\left(\frac{\alpha}{2}\right)^m\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(-1)^m}{m!\Gamma(n+m+1)}\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2m} \tag{3-14}$$

と表わされる．よって，(3-13)式を(3-11)式に代入すれば，

$$x(s)=sJ_0(\alpha)+\frac{4\ell}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}J_{2m}(\alpha)\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}\frac{s}{\ell}+\frac{\pi}{2}}\cos2m\vartheta\,d\vartheta \tag{3-15}$$

となり，上式(3-15)の右辺第2項を計算することにより$x(s)$のBessel関数表示が求まる．同様にして(3-10)式を(3-6)式の$y(s)$に代入し，上記の変数変換と

$$\sin(\alpha\sin\vartheta)=2J_1(\alpha)\sin\vartheta+\cdots$$
$$\cdots+2J_{2m-1}(\alpha)\sin(2m-1)\vartheta+\cdots \tag{3-16}$$

の関係を用いれば $y(s)$ も定式化できる．つまり $x(s)$, $y(s)$ はそれぞれ曲線の長さ s を助変数として次のように示される．

$$\left.\begin{aligned} x(s) &= s J_0(\alpha) + \frac{4\ell}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{2m} J_{2m}(\alpha) \sin\left(m\pi \frac{s}{\ell}\right) \\ y(s) &= \frac{4\ell}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \frac{J_{2m-1}(\alpha)}{2m-1} \sin\left(\frac{2m-1}{2}\pi \frac{s}{\ell}\right) \end{aligned}\right\} \quad (3\text{-}17)$$

上式が serpenoid curve の関数形であり，前節 (3-8) 式と異なり，ほぼ全体を示す周期関数となっている．(3-17) 式中の第1種 Bessel 関数 $J_n(\alpha)$ は (3-14) 式を用いて数値的に求めることができる．

3-4 実測滑走体形との比較・吟味

前節で導いた2種類の体形曲線，(3-8) 式および (3-17) 式とヘビの実測体形とを比較・吟味する．実測体形曲線としてはシマヘビ (*Elaphe Quadrivirgata*) をいろいろな摩擦条件の人工芝生上で滑走させ，その滑走体形を垂直上方から撮影した連続写真を用いた．これらの写真からまず定常かつ一定方向の滑走を行なっているデータを選び，つぎに同じ摩擦条件ではなるべく早く滑走中のデータを選択した．選択されたデータの数は42件であった．滑走体形の中心線と座標軸の決定は連続写真データと引き伸し Fig. 3-6 のように行なった．データは滑走曲線の1/4周期を $x(\ell)=1$ として正規化している．

まず，1/4周期全体として，仮定曲線の実測体形曲線との一致具合いを計るために Fig. 3-7 のような面積比 Φ を評価値とし，すべてのデータについて計算した．その結果を Table 3-1 に示す．Table 3-1 から serpenoid curve が最も実測曲線に近いこと，そして，clothoid spiral がつぎに良く実測曲線を近似すること，従来の仮定曲線である円弧・正弦曲線などはかなり近似度が劣ることなどが示

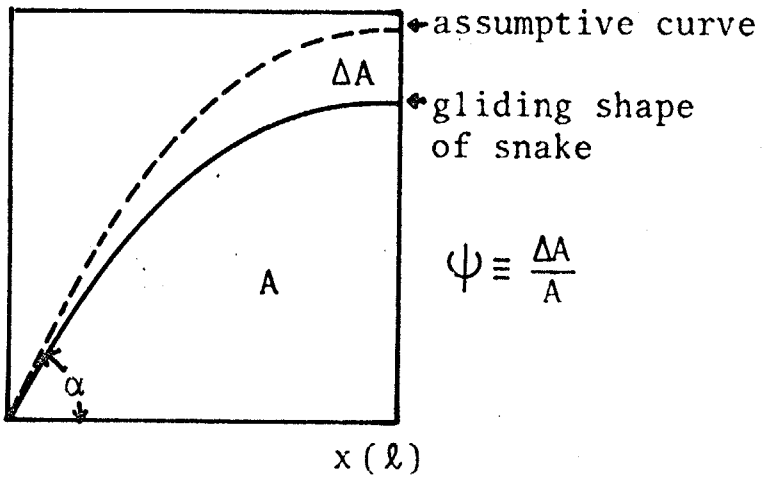


Fig. 3-7　体形曲線の近似度評価量 ψ の定義

Table 3-1　各体形近似曲線の ψ の比較

curve / error	serpenoid curve	clothoid spiral	circular arc	sine curve
ψ	0.102	0.126	0.246	0.478

されている．

つぎにくねり角αが異なる場合の近似の違いを知るために，個別的なくねり角αでの比較を行なった．その結果をFig. 3-8に示す．Fig. 3-8は$\alpha=56°$, $\alpha=64°$, $\alpha=75°$の3例について比較を行なっている．Fig. 3-8から，serpenoid curveのみが3例を通じて実測体形の標準偏差内に含まれ，良く実際のヘビ滑走体形を近似することがわかった．

以上のことから，結局3-2節で新たに提唱したserpenoid curveはいままでの他の仮定体形曲線と比べると最も良く実際のヘビの定常ほふく滑走体形を近似しており，clothoid spiralがそれに次ぐことがわかった．

3-5 本章の結論

ヘビが定常ほふく滑走を行なうときの体形曲線についての研究が生物形態学的にも，またほふく運動の力学解析を行なう上での基礎としても重要であることを示した．そして，従来ヘビのほふく体形曲線については見るべき提案がなされていないことを指摘した後，2種類の体形曲線を提起し，それらが運動生理学的にも自然で無理のないものであることを論じた．なかでも，ほふく滑走体形曲線としては「曲率が曲線にそって正弦波状に変化する曲線」と仮定した曲線が運動筋の収縮様式的にも容易にできるものであり，また実際のヘビの滑走体形とも良く一致することがわかった．この新しく提唱し定式化した体形曲線は，筆者の知る限りでは従来からの通称がないため，この曲線を"serpenoid curve"と名付けた．なお，このserpenoid curveはその運動生理学的な根拠によって，ヘビ以外のほふく運動を行なう動物の運動形態をも特徴づける可能性があり，形態学的にも重要な意味をもつと推察している．また，すでに梅谷[23]によって提唱されており，本章において定式化した所のclothoid

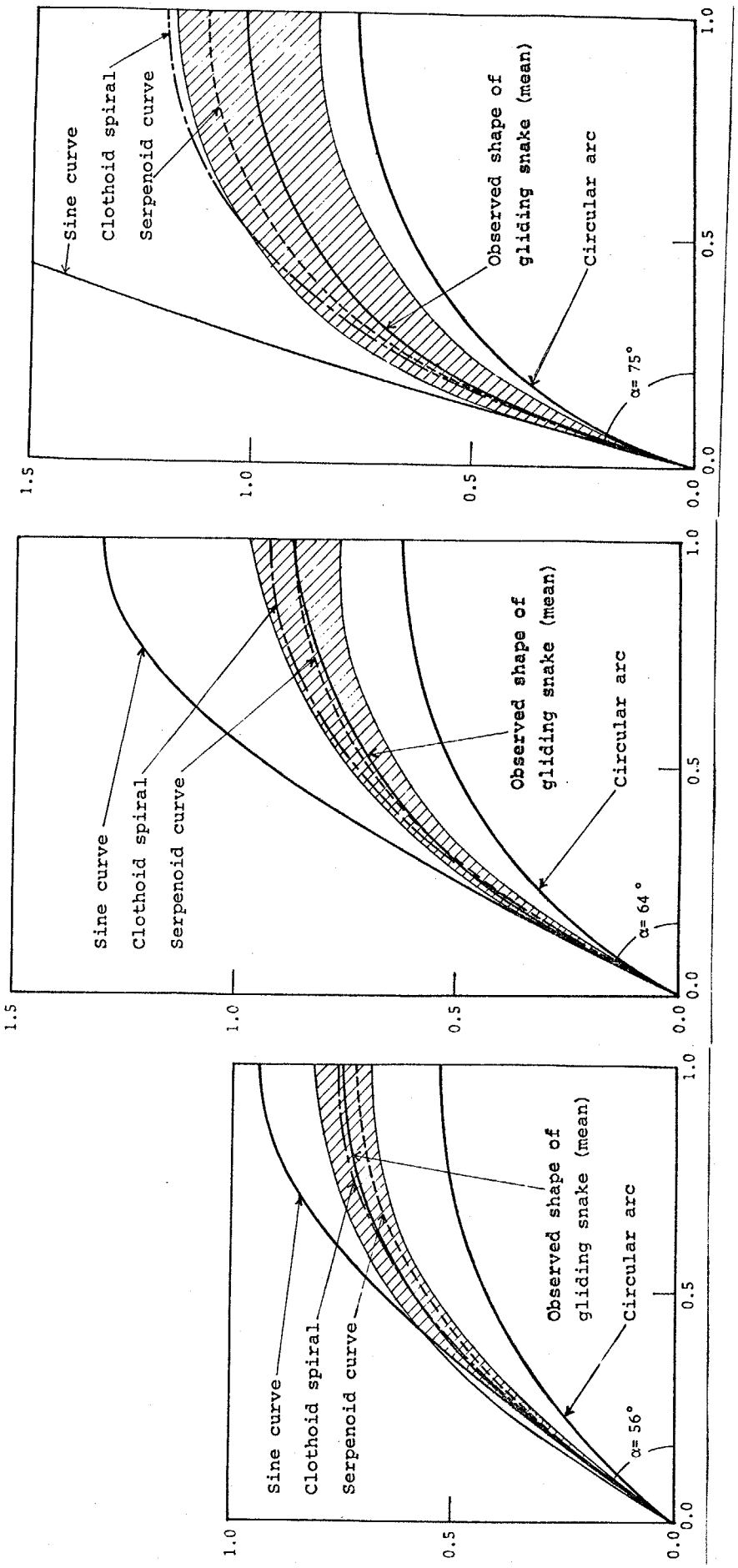


Fig. 3-8　体形近似曲線と実測体形曲線の比較
（斜線部は実測値の標準偏差を示す）

第4章　定常ほふく運動の移動力学[1,10)]

4-1　まえがき

前章では，ヘビ等が平坦で一様な滑走面を移動するとき示す定常ほふく運動の体形決定要因を検討している．

本章では，この定常ほふく運動の形態学的知識を基に移動体幹に働く力学的諸関係を誘導する．そして，シマヘビ(*Elaphe Quadrivirgata*)を用いた動物実験によって解析結果の妥当性を検討する．以上の知見から定常ほふく運動のいくつかの力学的特性を定量的に明らかにする．

4-2　解析のための準備

ヘビの体側筋はFig. 4-1に示すように脊椎骨と肋骨からなる骨格系の左右に肋骨から肋骨，あるいは肋骨から脊椎骨などに張られており，その屈曲運動を生ずる筋骨格系のメカニズムは必ずしも単純ではない．しかし第2章のACMの基礎式を適用した力学解析を行なうためにヘビ体幹についてつぎのような仮定を設定しモデル化することにする．

(1) 脊椎骨1つを単位長さδs(実際のシマヘビではほぼ5mm)のリンクと仮定し，ヘビ体幹はそれらが屈曲自在なジョイント部で連結された直列リンク機構とする．このリンク機構は肋骨に相当するレバーの先端に張られた左右の単位拮抗筋(以降，運動筋と呼ぶ)によりジョイント部を中心とする能動的な屈曲運動を行なうと考えてFig. 4-2のようなモデル化を行なう．

(2) 運動筋の一方が収縮すると，その収縮力f_{mi}により，ジョイントJ_iには回転モーメントT_iが生ずる．このときジョイント部での偏角θ_iが微小である(シマヘビのほふく運動では高々$\pm 4°$)の

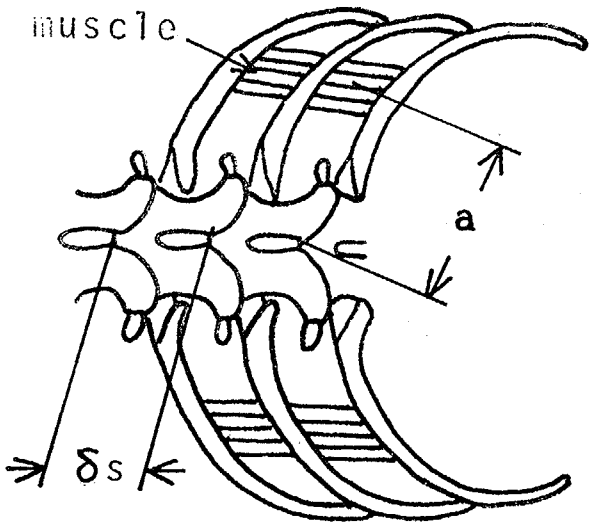


Fig. 4-1　ヘビの筋骨格系

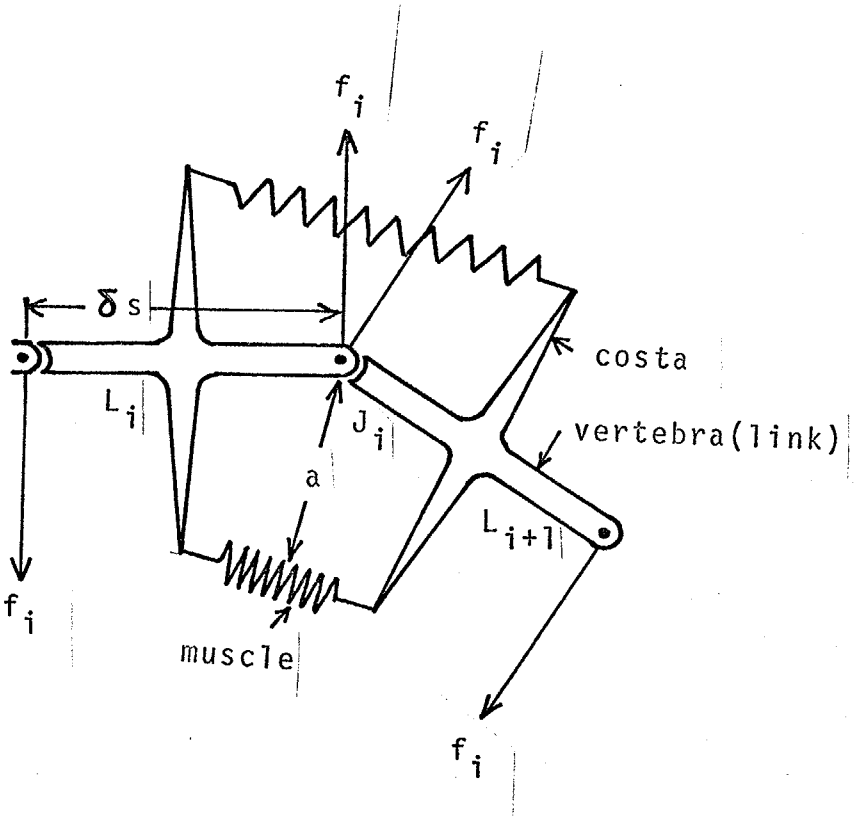


Fig. 4-2　モデル化した筋骨格系の諸元

で，ジョイントから運動筋までの距離 a は常に一定として

$$T_i = a f_{mi} \qquad (4\text{-}1)$$

の関係が成り立つとする．

(3) リンク長さ δs は十分小さいと仮定して $\delta s \to 0$ の場合の体形曲線は隣接するリンクの傾角 θ_i を2等分する連続曲線（s-axis）に収束するものとする．

(4) リンクモデルは各ジョイント部においてのみで接地しており外力はすべてジョイント部に働くと考える．

(5) 定常ほふく滑走体形としては serpenoid curve を仮定する．すでに第3章でほふく滑走体形について考察を加え clothoid 型あるいは serpenoid curve が筋肉生理学的にも妥当であり実際のヘビ滑走体形とも良く近似することを示した．ここでは近似度の高い serpenoid curve を使用してまず解析を行ない，clothoid 型の体形曲線仮定に基づく力学解析は第4-5節で行なう．

滑走体形を serpenoid curve と仮定したときの曲率分布 $\rho(s)$ は(3-9)式および $\rho(s) = \theta(s)/\delta s$ の関係から次のように求まる．

$$\rho(s) = \frac{\pi \alpha}{2l} \sin\left(\frac{\pi s}{2l}\right) \qquad (4\text{-}2)$$

(6) 定常ほふく滑走体形は完全な周期波形と考え，解析は 1/4 周期（Fig. 4-3 の OP 間）についてのみ行なう．

4-3 筋力分布の設定

定常ほふく運動時の運動筋の作動状態について検討を行ない，ほふく体形の OP 間の筋力分布を想定する．

OP 間の筋力分布について推定される条件としては，

(1) O点においては，運動筋が生体長（body length，筋が付着している関節を可動範囲の中位にしたときの筋の長さ）になっているから，生理学的に考えて，O点で，OP 間のうちの最大の筋力が発生

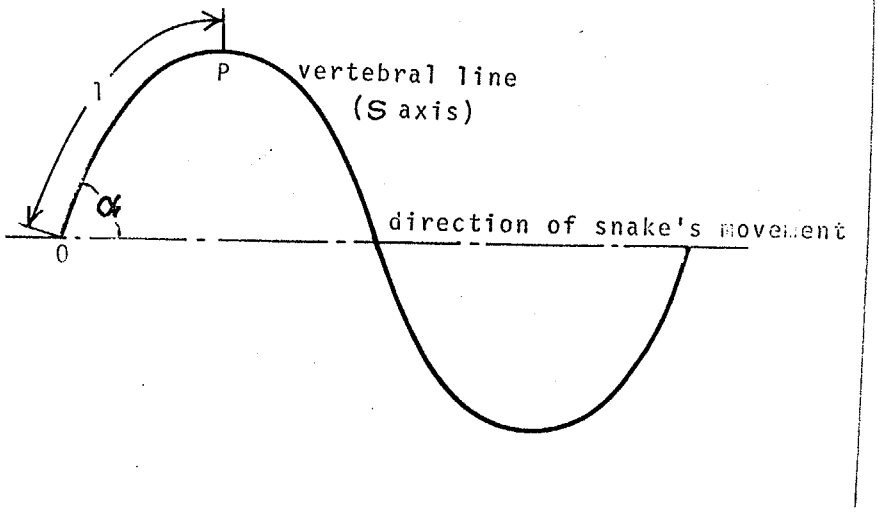


Fig. 4-3　定常ほふく体形の各部の記号

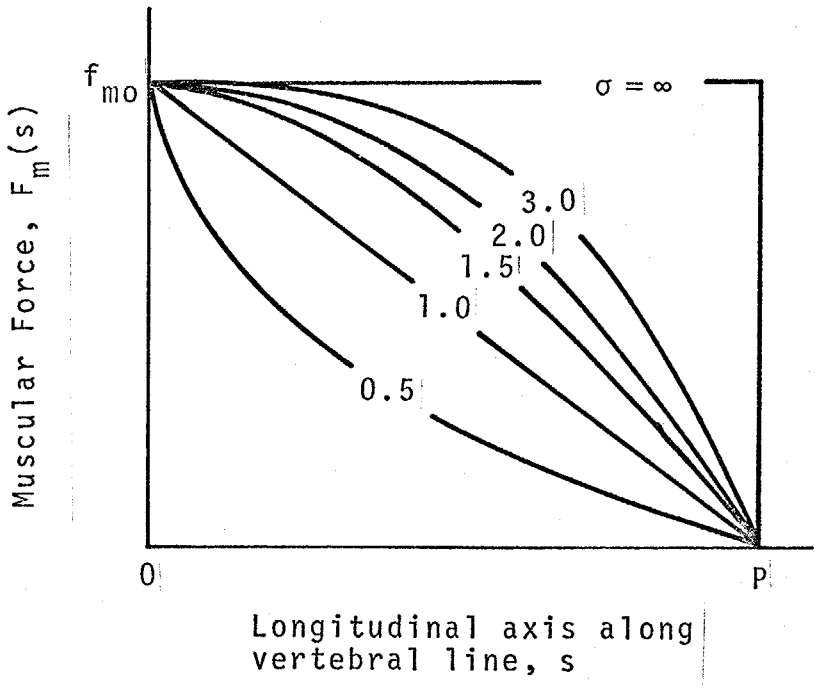


Fig. 4-4　想定する筋力分布形状

し，P点に向って筋力は単調に減少してゆくと考えられること，

(2) P点を境にして，運動筋は収縮状態から弛緩状態（あるいはその逆）に変化するから，P点での筋力は0と考えられること，

(3) 定常はふく運動時の筋力の変化は周期的であるから，境界点である0，P点においても（特に大きな筋力を示す0点では），筋力変化はなめらかであると考えられること，などである．

以上の推定ができることから，まず(1),(2)の条件を満足しながら筋力の分布形状を1つのパラメータσで変えられるように，筋力分布関数 $F_m(s)$ をつぎのように仮定する．

$$F_m(s) = f_{mo}\left\{1-\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}\right\} \tag{4-3}$$

ただし，ℓ はOP間の体軸長さ，f_{mo} は0点での筋力を示す．上式(4-3)の筋力分布形状をFig.4-4に示す．Fig.4-4から，$\sigma \leq 1$ では0点前後の筋力分布がなめらかでないことがわかる．よって(3)の条件から $\sigma > 1$ を(4-3)式の適用範囲とする．

なお，(4-1)式の関係を用いて体幹と生ずるトルク分布 $T(s)$ を(4-3)式より求めておく．

$$T(s) = a f_{mo}\left\{1-\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}\right\} \tag{4-4}$$

また，Table 2-1を用いた以後の力学解析の便のために，トルク分布の1階および2階微分をそれぞれ求めておく．

$$\frac{dT(s)}{ds} = -\frac{\sigma a}{\ell} f_{mo}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma-1}, \tag{4-5}$$

$$\frac{d^2T(s)}{ds^2} = -\frac{\sigma(\sigma-1)a}{\ell^2} f_{mo}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma-2}. \tag{4-6}$$

結局，定常はふく推進時のOP間のトルク分布は(4-4)式で与えられ，その分布形状の特徴を示すパラメータσの範囲は $\sigma > 1$ である．

4-4 定常はふく運動時に体幹に生ずる力

以上の前提条件を設定すれば，定常はふく運動時の体幹に生ずる

力の解析に第2章で誘導したACMの移動力学基礎式の適用が可能となる．

4-4-1 推進力

定常ほふく運動中の体幹に働く接線力は Table 2-1 (1^0) にトルク分布の1階微分 (4-5) 式と曲率分布 (4-2) 式を代入すれば求まる．つまり，接線力密度関数 $f_t(s)$ は

$$f_t(s) = \frac{\sigma a \alpha}{\ell^2}\left(\frac{\pi}{2}\right) f_{m0}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma-1} \sin\left(\frac{\pi s}{2\ell}\right) \tag{4-7}$$

と定式化できる．OP間について上式 (4-7) で示される接線力密度分布形状を Fig. 4-5 に示す．Fig. 4-5 から接線力は主として P 点附近で大きく生じていることがわかる．

また，OP間で生ずる接線力の総和である推進力 F_{top} は Table 2-1 (2^0) よりつぎのように求まる．

$$F_{top} = \sigma \frac{a\alpha}{\ell^2}\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\sigma-1} f_{m0} \int_0^{\ell} \left(\frac{\pi s}{2\ell}\right)^{\sigma-1} \sin\left(\frac{\pi s}{2\ell}\right) ds \tag{4-8}$$

ここで，$\pi s/2\ell = x$ なる変数変換を行なえば，上式 (4-8) は

$$F_{top} = \sigma\left\{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\sigma} \int_0^{\frac{\pi}{2}} x^{\sigma-1} \sin x \, dx\right\} \frac{a\alpha}{\ell} f_{m0} \tag{4-9}$$

と示される．ここで，筋力分布についての考察から σ は $\sigma > 1$ の実数であるが，このとき上式 (4-9) の右辺の定積分は一般には解くことができない．そのため，新たにつぎのような関数を定義する．

$$Serp(\sigma) \equiv \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\sigma} \int_0^{\frac{\pi}{2}} x^{\sigma-1} \sin x \, dx \tag{4-10}$$

ただし，変数 σ は $\sigma > 1$ の実数である．ヘビ (Serpent) の移動運動中に生ずるという意味で名付けた $Serp(\sigma)$ は，変数 σ が整数の場合のみ解析的に解ける．つまり，$Serp(1) = 2/\pi = 0.637$，$Serp(2) = 4/\pi^2 = 0.405$ などである．変数 σ が実数の場合の $Serp(\sigma)$ は数値的に求めたがその結果 Fig. 4-6 のような傾向を示す関数であることがわかっ

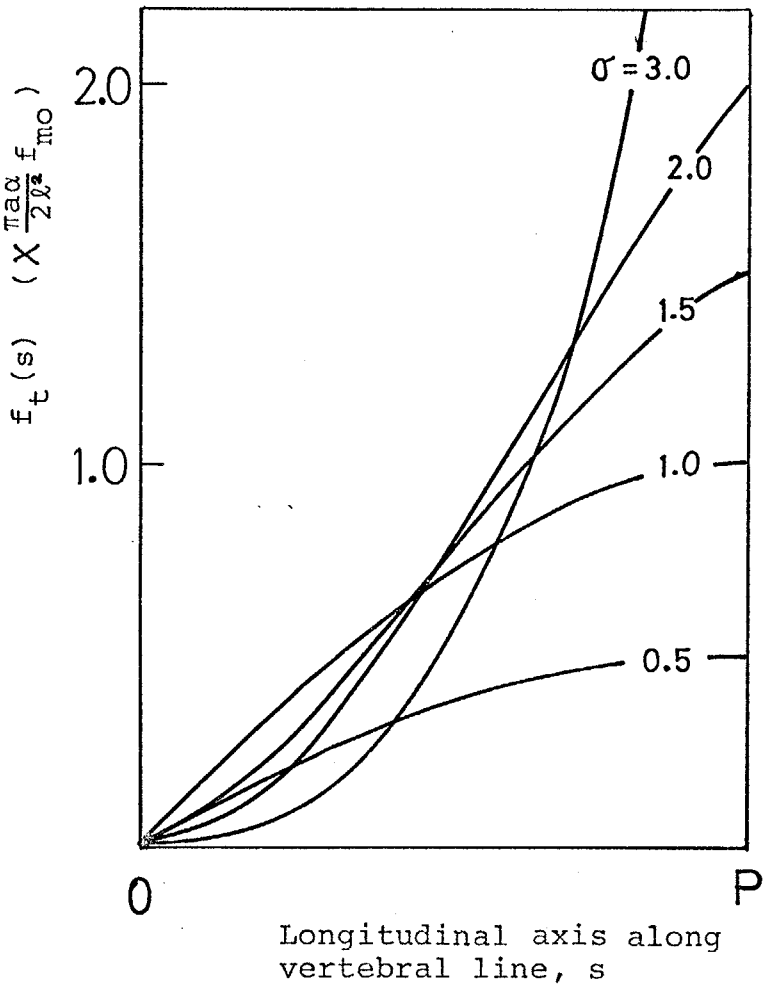


Fig. 4-5　　接線力密度分布

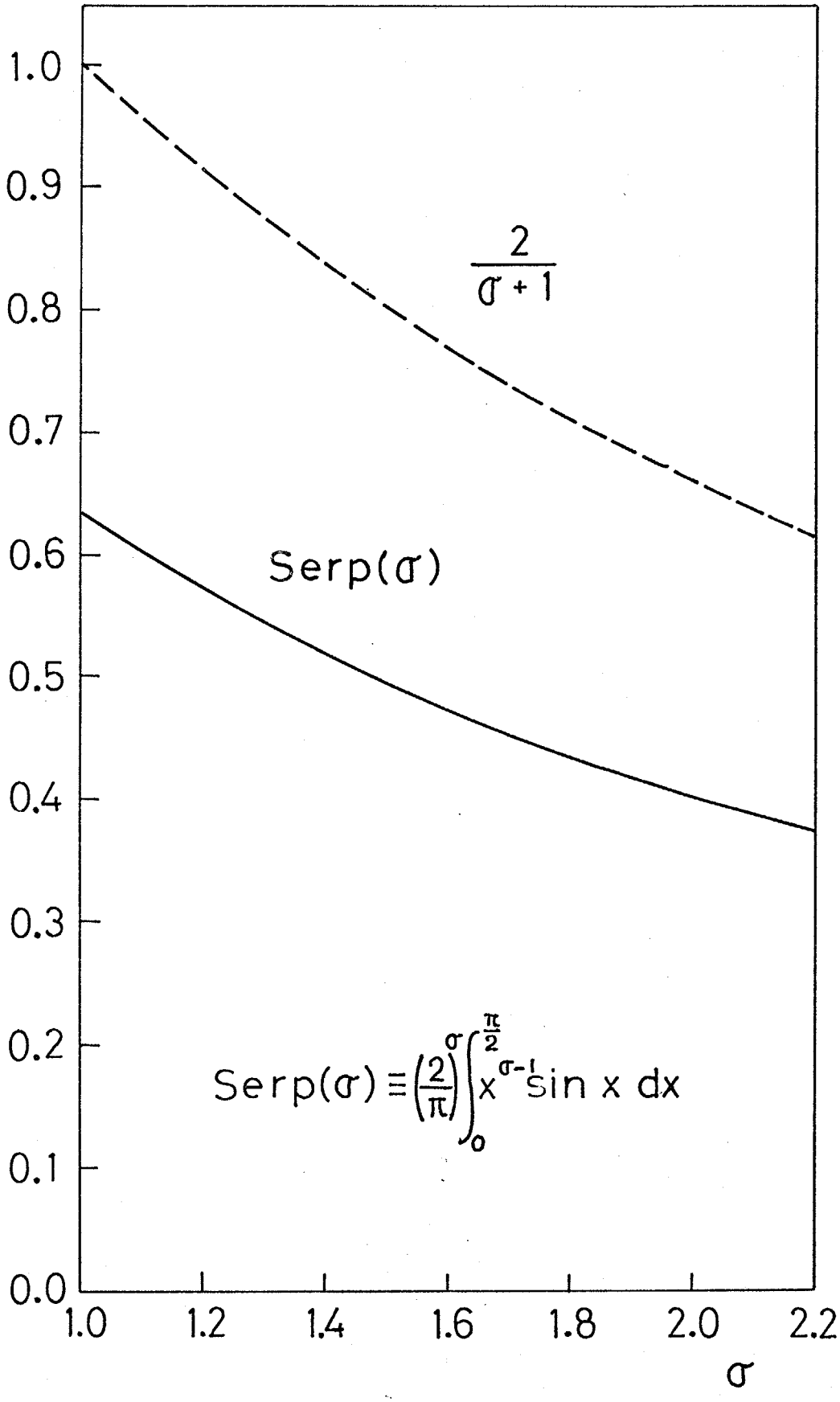


Fig. 4-6　関数 Serp(σ) とパラメータ σ の関係
(Clothoid 近似の場合の 2/(σ+1) を破線で示す)

ている．つまり変数σについての減少関数であるといえる．以後，このSerp(σ)関数を用いて解析を続けていく．

Serp(σ)を使用すれば(4-9)式はつぎのように表記される．

$$F_{top} = \sigma\, Serp(\sigma) \frac{a\alpha}{l} f_{mo} \tag{4-11}$$

上式(4-11)が定常ほふく運動中の推進力を示す式である．

4-4-2 法線力

ＡＣＭの移動基礎式（Table 2-1 (3°)）から法線力はトルク分布のみの関数であり，曲線形状には依存しないことがわかっている．よって(4-6)式から法線力密度関数$f_n(s)$を求めると

$$f_n(s) = \frac{\sigma(\sigma-1)a}{l^2} f_{mo} \left(\frac{s}{l}\right)^{\sigma-2} \tag{4-12}$$

となる。ただし上式(4-12)で法線力の体幹に対する向きはこの際考慮する必要がないので符号は正としておく．上式(4-12)の法線力密度の分布形状をFig. 4-7に示す．Fig.4-7から法線力密度の分布においてσ=2が一種の特異点であり，法線力分布の傾向はσ=2を境にして大きく変ること．1<σ<2の範囲ではσが小さいほど法線力は0点に集中して働くことなどがわかる．

また，ＯＰ間で生ずる法線力の総和F_{nop}はTable 2-1 (4°)のように(4-12)式の積分で示されつぎのように求まる．

$$F_{nop} = \sigma \frac{a}{l} f_{mo} \tag{4-13}$$

上式(4-13)は，ＯＰ間の総合法線力F_{nop}が筋力分布関数のパラメータσの一次関数であることを示している．

4-4-3 パワー

定常ほふく運動中に体幹が生ずるアクチュエータの発生するパワーを求める．パワー密度関数はすでに求めてあり，Table 2-1 (5°)に示すごとくトルク分布$T(s)$と曲率分布の1階微分$dP(s)/ds$の関数

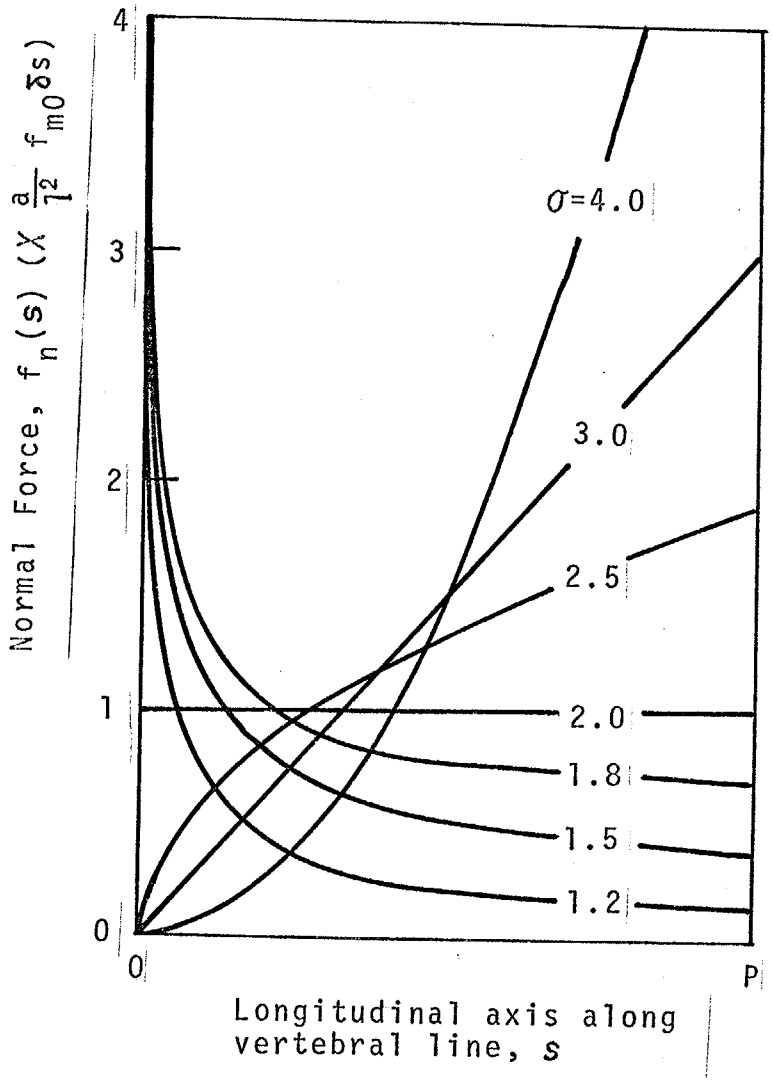


Fig. 4-7　法線密度分布形状

としてもえられる．このうち $d\rho(s)/ds$ は (4-2) 式の1階微分より

$$\frac{d\rho(s)}{ds} = \frac{\pi^2 \alpha}{4\ell^2} \cos\left(\frac{\pi s}{2\ell}\right) \tag{4-14}$$

である．よって (4-4), (4-14) 式を Table 2-1 (5°) に代入することにより，体幹方向に一定速度ひで滑走中のヘビ体幹で生ずべきパワー密度分布 $P(s)$ はつぎのように求めることができる．

$$P(s) = \frac{a\pi^2}{4\ell^2} \alpha f_{mo} \left\{1 - \left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}\right\} \cos\left(\frac{\pi s}{2\ell}\right) \tag{4-15}$$

上式 (4-15) のパワー発生状態を Fig. 4-8 に示す．Fig. 4-8 から筋力分布関数のパラメータ σ の値にかかわらず定常ほふく運動中には0点附近の体幹が最も大きなパワーを発生していることが明らかになった．以上の誘導された諸関係式はまとめて Table 4-1 に示す．Fig. 4-9 には体幹の P 間の各力分布形状を $\sigma=1.5$ の典型例について示す．

4-4-4 体幹に生ずる力と滑走効率の関係

ほふく推進を実現するための力学的条件はまず滑走面との摩擦に打ち勝って体幹接線方向に十分の推進力を生ずることであるといえる．同時に，ほふく運動独特の全体幹が同一の軌跡をたどる推進様式をとるために，滑走中の法線方向へのスリップ運動を防がなければならない．この2つの条件を基に，ほふく運動中の推進力と法線力について吟味すると推進力は大きいほど，そして法線力は小さいほど良い，つまり（推進力／法線力）の比が大きいほどほふく運動の滑走効率は大きくなるということがわかる．そこで推進力の式 (4-11) と法線力の式 (4-13) がそれぞれ第4-2節の前提条件 (6) から全体幹について拡張適用可能であることからつぎのような関係式を誘導する．

$$\frac{F_t}{F_n} = S_{erp}(\sigma) \cdot \alpha \tag{4-16}$$

上式 (4-16) からつぎの知見を得る．まず，ほふく運動の力学的滑走効率を支配するパラメータはくねり角 α と筋力分布関数のパラメー

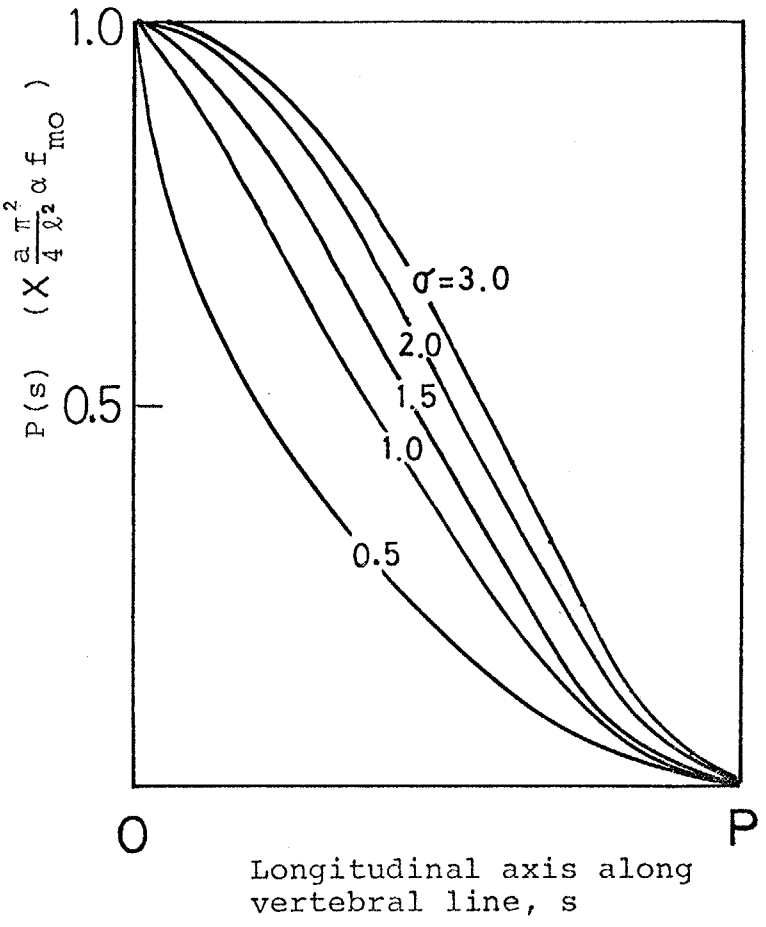


Fig. 4-8　パワー密度分布

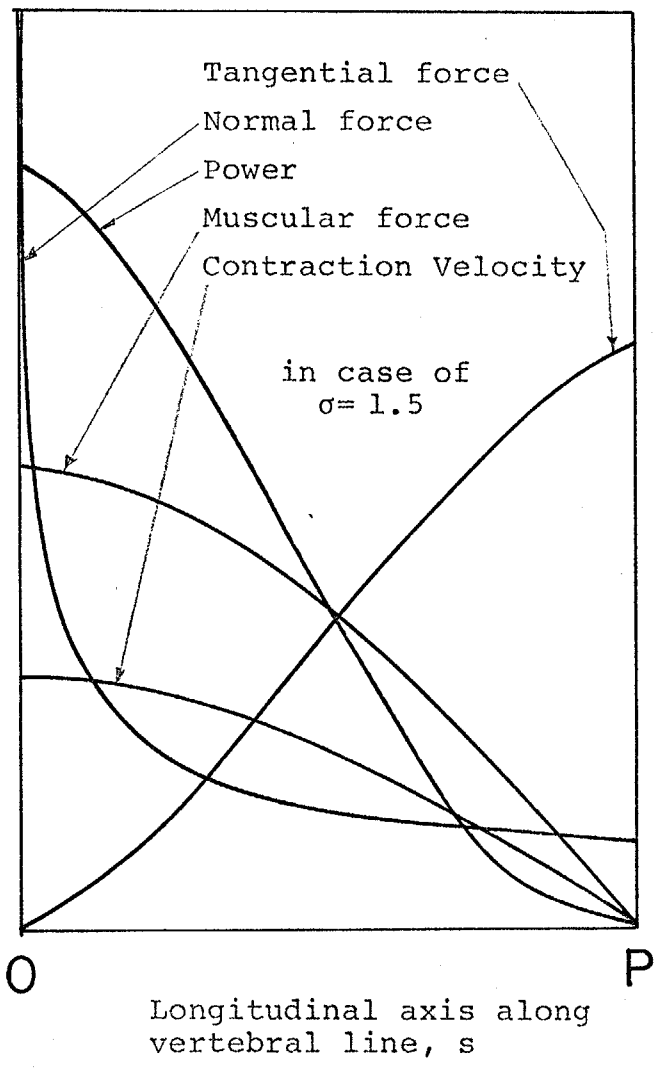


Fig. 4-9　体幹OPに働く諸力分布形状
（σ=1.5 の場合の例）

Table 4-1　本章で誘導した式のまとめ

近似曲線	Serpenoid Curve	Clothoid 合成曲線
接線力密度関数 $f_t(s)$	$\frac{\sigma a\alpha}{\ell^2}\left(\frac{\pi}{2}\right) f_{mo}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma-1}\sin\left(\frac{\pi s}{2\ell}\right)$	$2\frac{\sigma a\alpha}{\ell^2} f_{mo}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}$
推進力 (OP間) F_{top}	$\sigma\, Serp(\sigma)\, \frac{a\alpha}{\ell} f_{mo}$	$\frac{2\sigma}{\sigma+1}\frac{a\alpha}{\ell} f_{mo}$
法線力密度関数 $f_n(s)$	$\frac{\sigma(\sigma-1)}{\ell^2} a f_{mo}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma-2}$	左に同じ
法線力 (OP間) F_{nop}	$\sigma\ \frac{a}{\ell} f_{mo}$	左に同じ
パワー密度関数 $P(s)$	$\frac{a\pi^2}{4\ell^2}\alpha f_{mo}\left\{1-\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}\right\}\cos\left(\frac{\pi s}{2\ell}\right)$	$\frac{2a\alpha}{\ell^2} f_{mo}\left\{1-\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}\right\}$
$\frac{\text{接線力}}{\text{法線力}}$ $\frac{F_t}{F_n}$	$Serp(\sigma)\cdot\alpha$	$\frac{2}{\sigma+1}\cdot\alpha$

α であり，α は大きいほどよい．また σ は $S_{erp}(\sigma)$ が減少関数であるので $\sigma>1$ の許容範囲内では小さいほど (F_t/F_n) が大きく力学的滑走効率が高い．それに対し，F_t, F_n それぞれに影響を与えるくねりの大きさ ℓ や最大発生筋力 f_{mo} などのパラメータは滑走効率とは無関係であり，それぞれ別の要因に依存するものであると思われる．

これらの力学的滑走効率と体形パラメータの関係は以降の議論によって実験的・解析的により明確化していくことにする．

4-5 Clothoid型体形近似曲線に基ずく解析

以上の力学解析は，定常ほふく運動体形として serpenoid curve を前提条件として想定している．しかし，第3章において述べたように clothoid spiral の合成曲線も serpenoid curve について実際のヘビの滑走体形を良く近似している．そして，この clothoid 型の体形近似による解析は，若干の精度の低下が不可避ではあるが serpenoid curve による場合よりもより簡単な関数形で定式化できるため，定常ほふく運動の滑走力学を直観的に理解するためには使立つものと思われる．そこで以下に clothoid 型体形曲線をほふく滑走体形と想定した場合の力学解析を行なう．

Clothoid 型体形曲線の OP 間の曲率変化 $\rho(s)$ は (3-3) 式と $\delta s \to 0$ のとき $\rho(s)=\theta(s)/\delta s$ の関係が成り立つことから

$$\rho(s)=2\alpha\frac{s}{\ell^2} \tag{4-17}$$

のように示される．なお，後の解析の便のために曲率分布の1階微分 $d\rho(s)/ds$ をあらかじめ求めておくとつぎのように示される．

$$\frac{d\rho(s)}{ds}=\frac{2\alpha}{\ell^2} \tag{4-18}$$

筋力分布形状は，clothoid 型の体形曲線を想定する場合も前節と

同様の想定を行なうことができるのでトルク分布 $T(s)$ は (4-4) 式の関係をそのまま使用する．これらの前提から力学関係式を導いてゆくことができる．

接線力密度関数 $f_t(s)$ は (4-5), (4-17) 式を Table 2-1 (1°) に代入してつぎのように求まる．

$$f_t(s) = 2\frac{\sigma a\alpha}{\ell^2} f_{mo}\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma} \tag{4-20}$$

OP 間に働く接線力の総和 F_{tOP} は上式 (4-20) の積分から

$$F_{tOP} = \frac{2\sigma}{\sigma+1}\frac{a\alpha}{\ell} f_{mo} \tag{4-21}$$

のように示される．上式 (4-21) を (4-11) 式と比較すれば serpenoid curve を基に解析したとき誘導された関数 $Serp(\sigma)$ は clothoid 型の体形曲線近似の場合の $2/(\sigma+1)$ に対応することがわかる．$2/(\sigma+1)$ を Fig. 4-6 に $Serp(\sigma)$ と共に示す．Fig. 4-6 から $2/(\sigma+1)$ は $\sigma=1$ のとき $Serp(\sigma)$ の $\pi/2$ 倍であり $\sigma>1$ の範囲でほぼ 1.6 倍程度であるが，その変化の傾向は両者とも同様に変数 σ に対して減少関数になっている．

法線力は体形形状に依存せずに決定する．よって clothoid 型の体形曲線近似の場合も serpenoid curve 近似と同じく法線力密度関数 $f_n(s)$ は (4-12) 式，OP 間に働く総合法線力 F_{nOP} は (4-13) 式で示される．

ほふく運動時の消費パワー密度 $P(s)$ は，曲率分布の 1 階微分 $dP(s)/ds$ が (4-18) 式のごとく const. なのでトルク分布形状と比例する．つまり (4-18), (4-4) 式を Table 2-1 (5°) に代入すれば

$$P(s) = \frac{2a\alpha}{\ell^2} f_{mo}\left\{1-\left(\frac{s}{\ell}\right)^{\sigma}\right\} \tag{4-22}$$

と求まる．

接線力と法線力の関係は，(4-13) 式と (4-21) 式を全体幹に拡張して考えることによりつぎのように求まる．

$$\frac{F_t}{F_n} = \frac{2}{\sigma+1}\ \alpha \qquad (4\text{-}23)$$

上式(4-23)から得られる知見は第4-4-4節のそれとまったく同じである．ただし，2/(σ+1)の絶対値がSerp(σ)の約1.6倍程度あることから，clothoid型の体形でほふく運動を行なう方がserpenoid curveの場合より有意に推進効率が良いと云えだろう．しかし，それにもかかわらずヘビの定常ほふく推進体形が常にserpenoid curveの滑走体形近似曲線に良く一致したということは，ほふく体形を決定する要因としては4-4-4節で定義したような推進効率などよりはやはり第3章で述べたように，ほふく運動中の筋肉運動のなめらかさという因子の影響が大きいという推論を下せるのではないだろうか．

以上の，clothoid型体形曲線近似に基ずく力学的諸関係式をまとめ，serpenoid curveを使用して誘導した式と対比してTable 4-1に示すことになる．

4-6 シマヘビを用いた定常ほふく滑走実験

定常ほふく運動についての前節までの力学解析結果が実験のヘビの滑走運動に適用可能であるかを知るためにつぎのような実験を行なった．

4-6-1 実験方法

本実験には，主としてTable 4-2に示した本邦産の標準的かつ大きさの揃った2匹のシマヘビを選んで試験体とし，EMG（筋電図 electromyogram）電極，および試作した法線力測定器をTable 4-2に示す位置にFig. 4-10のように取り付けた．実験は，測定器を取り付けたシマヘビを人工芝生を敷いた平坦かつ一様な床面に一定方向に滑走させた．この滑走体形を上方から連続的に撮映することにより，EMG，法線力および測定点の体軸位置座標sを同時に測定した．

Table 4-2　実験用シマヘビの諸元

specification \ snake	snake NO 1	snake NO 2
Weight	220 g	180 g
Length-craniocaudal (anterior tip to anus)	128 cm (100 cm)	120 cm (93 cm)
Width of the ventral surface	1.8 cm	1.5 cm
Length of a vertebra	5 mm	4.9 mm
Detectors' position from anterior tip (indifferent electrode)	50 cm (78cm)	40 cm (63 cm)

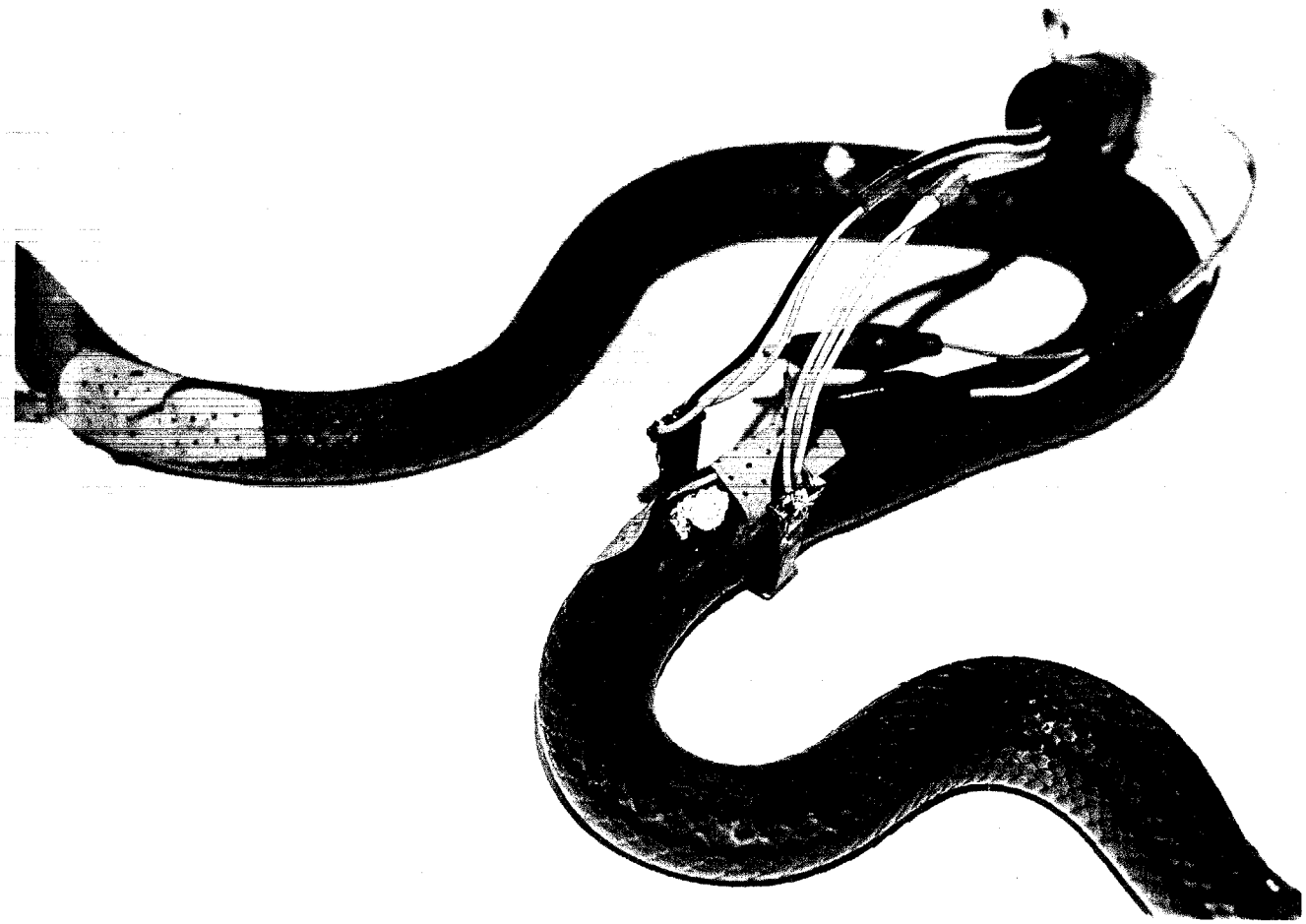


Fig. 4-10　シマヘビ（*Elaphe Quadrivirgata*）
への EMG 電極・法線力計の取り付け

4-6-2 EMGの測定

ほふく滑走時にヘビが発生している筋力を知るために筋力とかなり良い相関を示すといわれているEMG（筋電図）の測定を行なった．筋電流の誘導法としては通常，表面電極誘導法と針電極誘導法とが行なわれているが，ヘビ試験体の場合，前者では電極と生体との接触電気抵抗が大きいのでEMGを検出しがたく，また，後者では誘導される電位が低く測定点付近の全体的筋活動状態を知りがたかった．そのため，本実験では銅板により6φほどの埋め込み形電極端を試作し，測定部で20～30mmの間隔に一対，無関電極として後部に1つをそれぞれ皮膚と筋肉の間に埋め込んだ．このような誘導法により取り出した筋電流は，差動形直流増幅器を通しペン書き記録計に書かせた．

4-6-3 法線力の測定

ほふく推進時にヘビ体幹の法線方向に働く力を測定するために，Fig.4-11のような測定器を試作しヘビ体幹に体軸と垂直になるように挟み固定した．滑走中にヘビ体幹が法線方向の力を出すと，Fig.4-11のようにバネ板がたわみ，左右1対づつ貼付してあるストレイン・ゲージによって法線力が測定できる．なお，滑走板は幅25mm，長さ10mmであり，本測定器を取り付けることによるヘビ腹部の浮き上がりを減らすためにベース板上面から滑走板下面までの間隔は1.5mmまで狭くした．

4-6-4 測定器位置座標の測定

ほふく運動中のEMGおよび法線力の測定値と，その測定点の体軸に沿った位置座標Sとを対応させるために，モータードライブのカメラでヘビのほふく運動を測定時に同期して連続撮影した．撮影の速度はほぼ4 frame/sec.であった．

4-6-5 実験結果

Fig.4-12に実験結果の代表的な一例を示す．Fig.4-13のデータ番

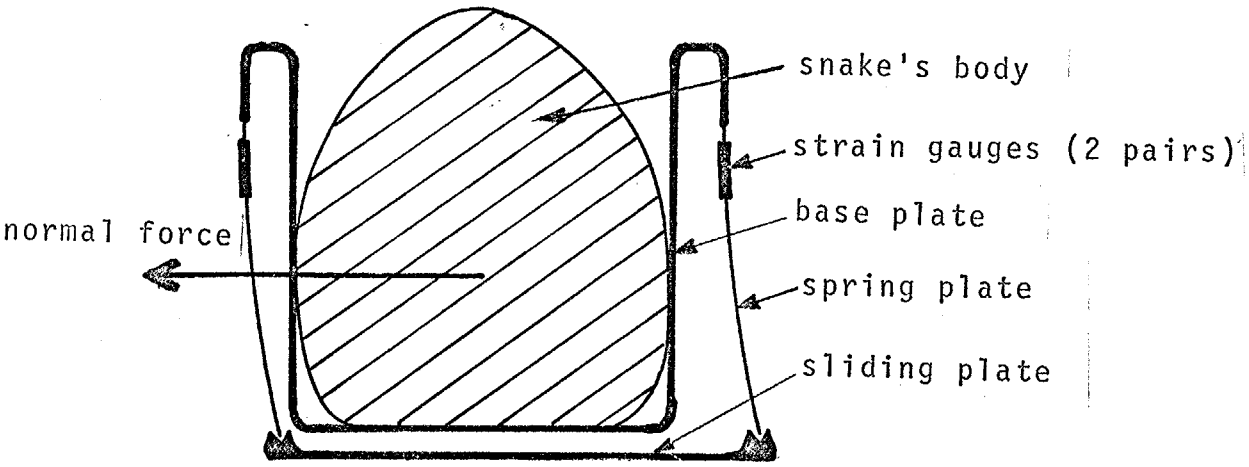


Fig. 4-11　法線力検出器の構造と動作原理

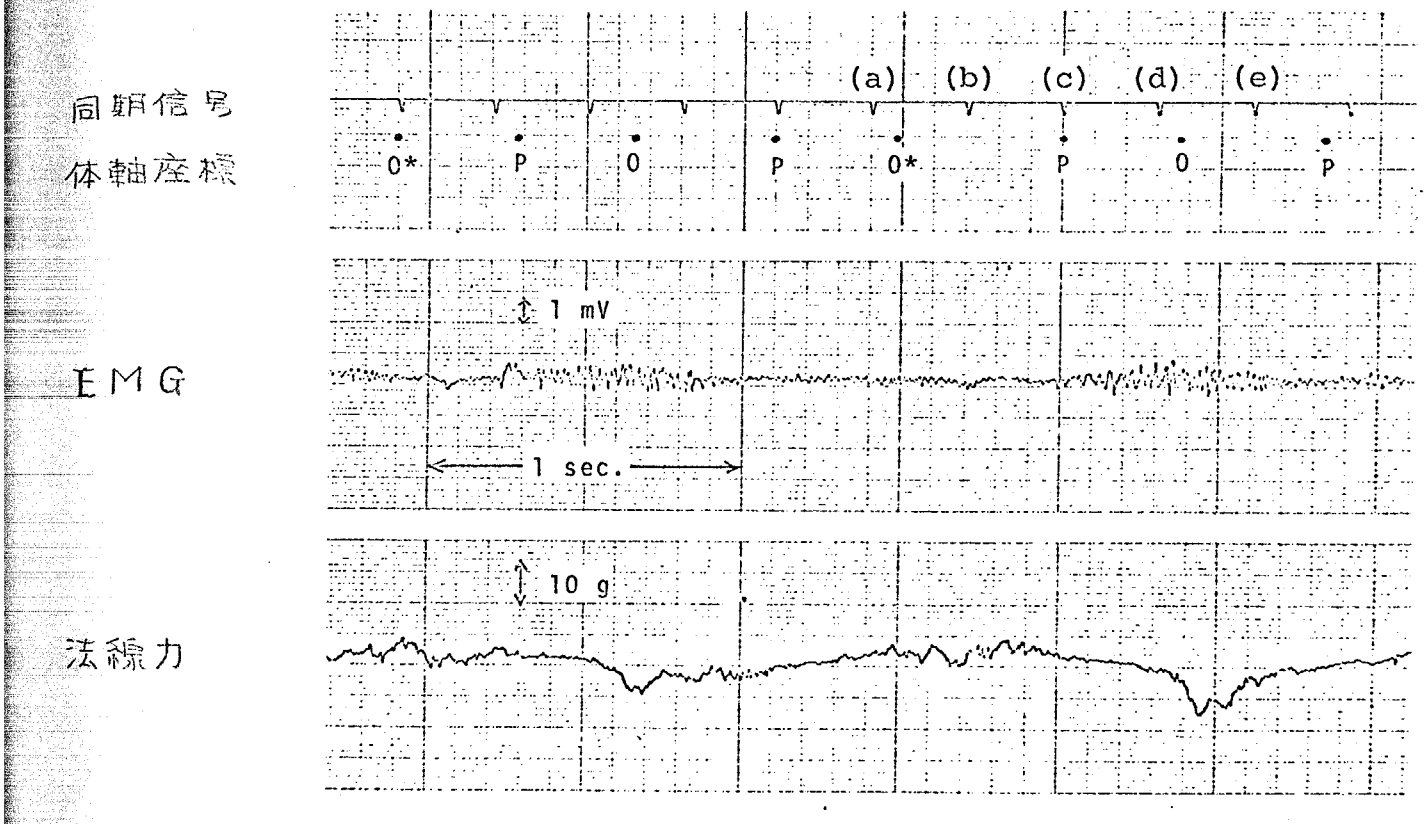


Fig. 4-12 同時測定を行なった実験データ例
((a)～(e) は Fig. 4-13 に同期する)

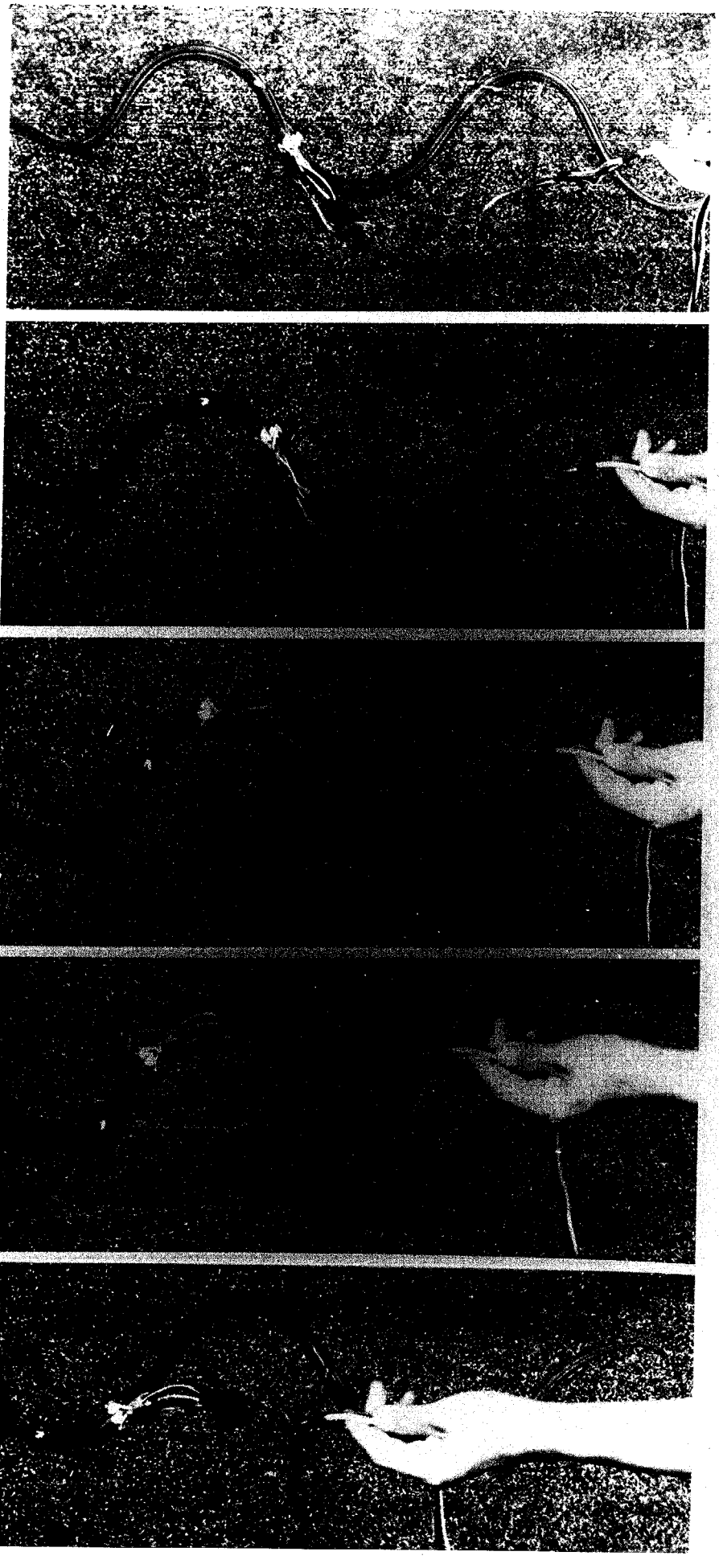


Fig. 4-13　滑走体形の連続写真（(a)～(e)はFig.4-12と同期）

号(a)~(e)はFig.4-12の連続撮映時同期信号(a)~(e)と対応している．Fig.4-12のうちO点とP点の位置は，実験中の連続写真によって推定して示している．O点のうち，O*点は，EMG電極を埋め込んだ側の運動筋と拮抗する運動筋が活動状態にある点を示す．Fig.4-12の，筋力を示すと考えられているEMGの振幅から，O点では運動筋が最大に活動しており，P点では運動筋が弛緩していることがわかる．またO*点とP点とを比較するとO*点では電極側の運動筋は弛緩しているにもかかわらず拮抗筋が活動しているので，その筋電流が電極に漏えいし，拮抗筋の両側とも弛緩状態にあるP点よりもEMGの振れが多少大きく観察されている．

活動力については，Fig.4-12からO点，O*点で絶対値が最大であり，P点でゼロになることがわかる．

Fig.4-14にはEMGの傾向が比較的良く示されているデータを示し，Fig.4-15には滑走速度の異なる2つの場合の測定データ例を示す．実験中の観察によると，測定器の取り付けによるほぶく滑走モードの変化は認められなかった．

4-7 実験結果と理論との比較・吟味

実験結果と力学解析結果を比較吟味することにより，まず(4-3)式の筋力分布関数の最も妥当な形状を求め，それを特徴づけるパラメータσの値についての条件を明らかにする．つぎに，ほぶく運動時に生ずる推進力について実験的に求めた値と理論値とを比較し，力学解析の妥当性を検討する．

4-7-1 筋力分布形状の推定

Fig.4-12でEMGの振幅がO点で最大でありP点で最小となることから，(4-3)式のように筋力分布を設定しても不自然でなかったといえるであろう．そして，さらにEMGの傾向がより明確に示されているFig.4-14から，(4-3)式の筋力分布関数$F_m(s)$のパラメータσ

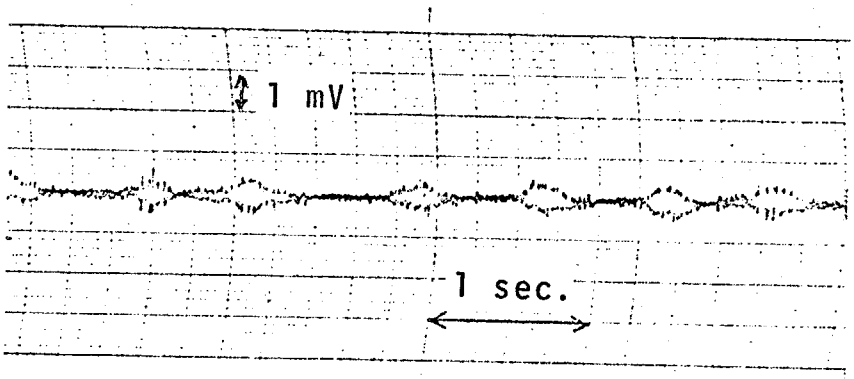
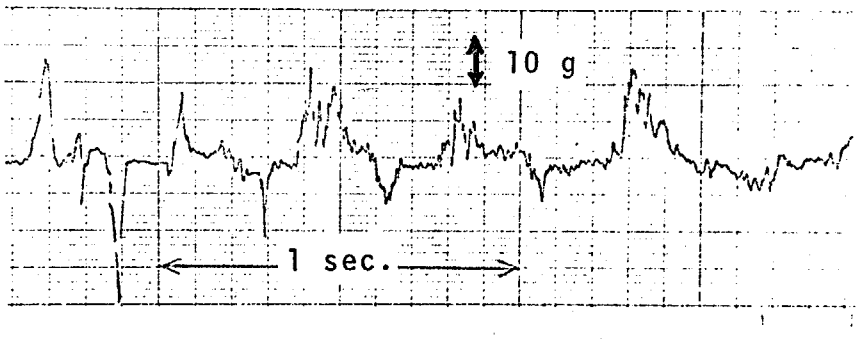
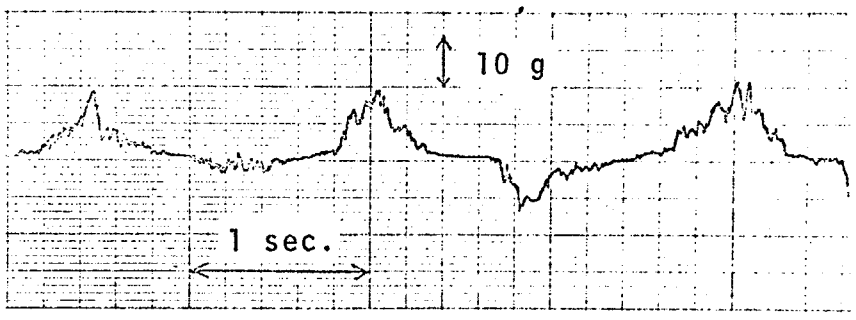


Fig. 4-14　EMGの測定データ例
(snake 1 の場合)



(a)　早い滑走の場合



(b)　遅い滑走の場合

Fig. 4-15　法線力分布の測定例

がFig.4-4と対応させれば1より大きいということが十分に推定される.

一方，法線力分布形状は筋力分布の変化に鋭く影響されるが，この観察からも同様の推定ができる．つまり，Fig.4-12あるいはFig.4-15などのOP面の法線力分布の測定結果と，Fig.4-7の解析的に推定される法線力分布形状とを比較すると，パラメータσは1<σ<2の範囲の値であるといえる．もちろん，実測値ではP点で理論値の場合のように∞の法線力をとらない，あるいはO点での理論値が実測データのように法線力0とはならないなどの不一致点はある．しかし，これらは,前者については理論が実際と異なり無限小長さのリンクからなる連続体で誘導したことに起因し，後者は(4-3)式の仮定筋力分布形状がなめらかさの条件をP点付近で満足しこないなどの理由によったものであり全体としての法線力分布形状は1<σ<2の範囲の(4-3)式と良く一致するものであるといえよう.

以上の実験から推定される結果，つまり筋力分布関数(4-3)式のパラメータσは1<σ<2の範囲である，という知見を再び力学解析的に検討する.

すでに，4-3節で筋力分布関数(4-3)式を設定する際に,パラメータσは筋力運動のなめらかさという点からσ>1の範囲をその定義域としてとると定めてある．そして，4-4-4節で誘導した(4-16)式からはパラメータσの値は,σ>1の範囲では小さいほど良いということが読みとれている．よって，パラメータσは滑走力学的には1よりも大きくしかもなるべく1に近いσ≒1(>1)の値が適当であるといえる．そして，このことは実験から推定される結果とも良く一致することはすでに示した．つまり，つぎのことを結論的に述べて良いであろう.

“(4-3)式のように仮定した筋力分布関数$F_m(s)$のパラメータσの範囲は1<σ<2であり，大きい推進力を出そうとす

ほど σ は 1 に近づく。

なお，この結論は Fig. 4-15 のデータ (a) がデータ (b) よりも滑走速度が早く，しかも (a) の法線力分布パターンを特徴づけている筋力分布関数のパラメータ σ が (b) よりも 1 に近い値をとるということが Fig. 4-7 との比較により推定されるという事実と良く一致している。

4-7-2 推進力の吟味

Fig. 4-12 のほふく運動時の代表的なデータ例について推進力を推定する。Fig. 4-12 から OP 間の総合法線力の平均値は $F_{nop} = 16$ g，Fig. 4-13 から OP 間の体幹長さ 12.5cm，よって全身（主として力を出している頭部から肛門部まで 100 cm）で出している総合の法線力 F_n は $F_n = (100/12.5)\cdot 16 = 128$ g となる。また，Fig. 4-13 から $\alpha = 60°$，4-7-1 節の結論から仮に $\sigma = 1.2$ とすると，ヘビのほふく運動時の推進力 F_t はもしも (4-16) 式が成り立つとすれば

$$F_t = S_{erp}(\sigma)\cdot\alpha F_n = 0.57\cdot(\pi/3)\cdot 128$$

$$\therefore F_t = 76.4 \quad [g] \qquad (4\text{-}24)$$

であるといえる。

一方，動力学的には，定常滑走を行なうために必要なヘビの推進力はヘビ本体の滑走面に対する動摩擦係数と体重との積に等しい。ヘビ腹部の人工皮生に対する体軸方向の動摩擦係数は 5-3-4 節で述べるようにほぼ 0.46 であり，ヘビの体重は Table 4-2 から 220 g である。よって，動力学的に求められたヘビの推進力 F_t は

$$F_t = 0.46 \times 220 = 101 \quad [g] \qquad (4\text{-}25)$$

と求まる。(4-24) 式の滑走力学関係から誘導した推進力の値と，(4-25) 式の抗力としての摩擦力とを比較すると，両者の値がある程度一致していることが明らかになった。なお，この一致度はパラメータ σ がより 1 に近づくほど高くなっていく。このことは 4-7-1 節で誘導した結論とも良く対応することを示していると解釈することも

できよう

4-8 本章の結論

本章の結論は次のとうりである.

(1) まず, ヘビの定常ほふく運動の解析を行うためにいくつかの前提条件をうえ, 第2章で誘導してある ACM の移動力学基礎式を適用可能にした

(2) 滑走中の筋力分布形状についても, 生理学的および力学的な面からの基本的考察を加え, (4-4)式で示される パラメータ σ によって特徴づけられる分布形状を設定した.

(3) 滑走体形として serpenoid curve, 筋力分布形状を (4-4) 式と想定して定常ほふく推進時の接線力・法線力・パワーなどを誘導した. その結果は Table 4-1 に示す.

(4) Table 4-1 の結果から定常ほふく運動中の接線力と法線力の関係を (4-16) 式のように求め, 滑走体形と滑走効率との基本的な関係を明らかにした.

(5) 滑走体形として clothoid spiral の合成曲線を想定した場合の力学解析も同時に行ない, その結果は Serpenoid curve のそれと対比しながら Table 4-1 に示した.

(6) シマヘビを用いた動物実験, つまりシマヘビの体幹に EMG 電極および法線力検出器を取り付けその定常ほふく滑走体形を同時観測する実験を行ない, 定常ほふく運動中の筋力分布, 法線力分布などのデータを得た.

(7) 力学解析結果と動物実験のデータを比較することにより, 筋力分布関数 (4-4) 式のパラメータ σ は $1 < \sigma < 2$ の範囲の値であり, 大きな推進力を発生しようとするほど σ は 1 に近づく, ということが推定された.

(8) 同時に推進力についても吟味を行ない, 実際に計算した推進

力の値からも力学解析の妥当性を明らかにすることができた．

以上のように，本章における研究によりヘビの定常ほふく推進の基本的な特徴が明らかになったと考えられる．次章においては，本章の知見を基にほふく運動のより多様な側面を明らかにしていくことにする．

第5章　ほふく運動の適応機能[1,5,10,11,20]

5-1　まえがき

本章では，ヘビ等の行なう定常ほふく運動の種々の適応特性を明らかにする．

一般に生物による移動様式は，その移動体形を滑走環境に応じて変化させる高い適応性を有していると考えられる．ヘビの定常ほふく運動も一見する限りでは単純に見える移動様式であるが，その滑走体形は外的な滑走環境あるいは内的なアクチュエータとしての筋肉運動系の運動効率等に深く関係するものであり，それぞれに適応した移動形態を示すものと考えられる．本章ではこのような生体独特の適応機能に注目し，特に定常ほふく運動の滑走体形を決定するいくつかの要因を明らかにしていくことにする．

波動形状を考える．たとえば正弦波ではその波形状は

$$y = A\sin(\omega t + \delta) \qquad (5\text{-}1)$$

と示される．つまり，正弦波形状を特徴づけるパラメータとしては正弦波であることを示すsine，そして体形についての振巾A，角速度ω，位相δの3つであり，それらが決まれば正弦波形状は一意に決定される．ヘビによる定常ほふく体形も波動体形である以上(5-1)式と同様の数のパラメータの決定が定常ほふく推進体形を一意に決めるためには必要であるといえる．このうち，波形形状については，すでに第3章において運動筋の収縮・弛緩運動のなめらかさという立場から提唱したserpenoid curveが定常ほふく体形曲線として想定されている．体形を示す3つのパラメータのうちでは，まず位相のパラメータは，無限長さの波動運動を想定しているほふく運動の場合には考慮する必要はない．そこで本章では，残る2つのパラメータとして，くねりの深さを示すパラメータとしてくねり角α(

Fig. 4-3 参照）とくぬりの大きさを示すパラメータとして 1/4 周期の体軸長さ ℓ（Fig. 4-3 参照）の2つに注目し，それらの決定原理を明らかにする．これら2つのパラメータの決定原理が明らかになれば定常ほふく運動の滑走体形決定要因がほぼ全般的に理解できたことになり，今後の人工ほふく推進機械の設計にも役立つものと考えられる．

本章では，まず始めに動物実験中に観測されたヘビのほふく滑走体形に関するある習性が力学的に理解できることを示した後，すでに述べた2つのパラメータ α, ℓ の決定則について検討を加える．

5-2 Sinus-lifting 滑走

Fig. 5-1 はシマヘビが人工芝生上を全力疾走している時の滑走体形を示している．この写真を良く観測するとヘビは全力疾走中に滑走体形の曲げピーク部分（Fig. 4-3 の P 点附近）をそり上げ，滑走面より浮き上げていることがわかる．これまでヘビの定常ほふく運動は二次元平面内でのみ行なわれるとし解析してきた．しかし，必ずしも完全な平面運動でなく若干のねじりがかわり，3次元的な運動と考えるべき部分があるということがわかる．このような，ヘビの定常ほふく運動中にくぬりの P 点附近をそり上げ疾走するという習性はすでに 1882年 A. Stradling が "Nature" に寄稿した論文にもその観察が報告されている．そして 1931年 W. Mosauer はこのヘビの習性について解剖学的な立場からの説明を試みている．

" Moreover, the border on the vertices of the curves is distinctly lifted. ···· This is the expression of the abducted and cranial flexed position of the ribs in this section".

つまり，P 点での体軸屈曲が肋骨の外転と脊椎の脳屈曲を生じ，その結果 P 点部の外側（凸部）が浮き上がると記述している．本節で

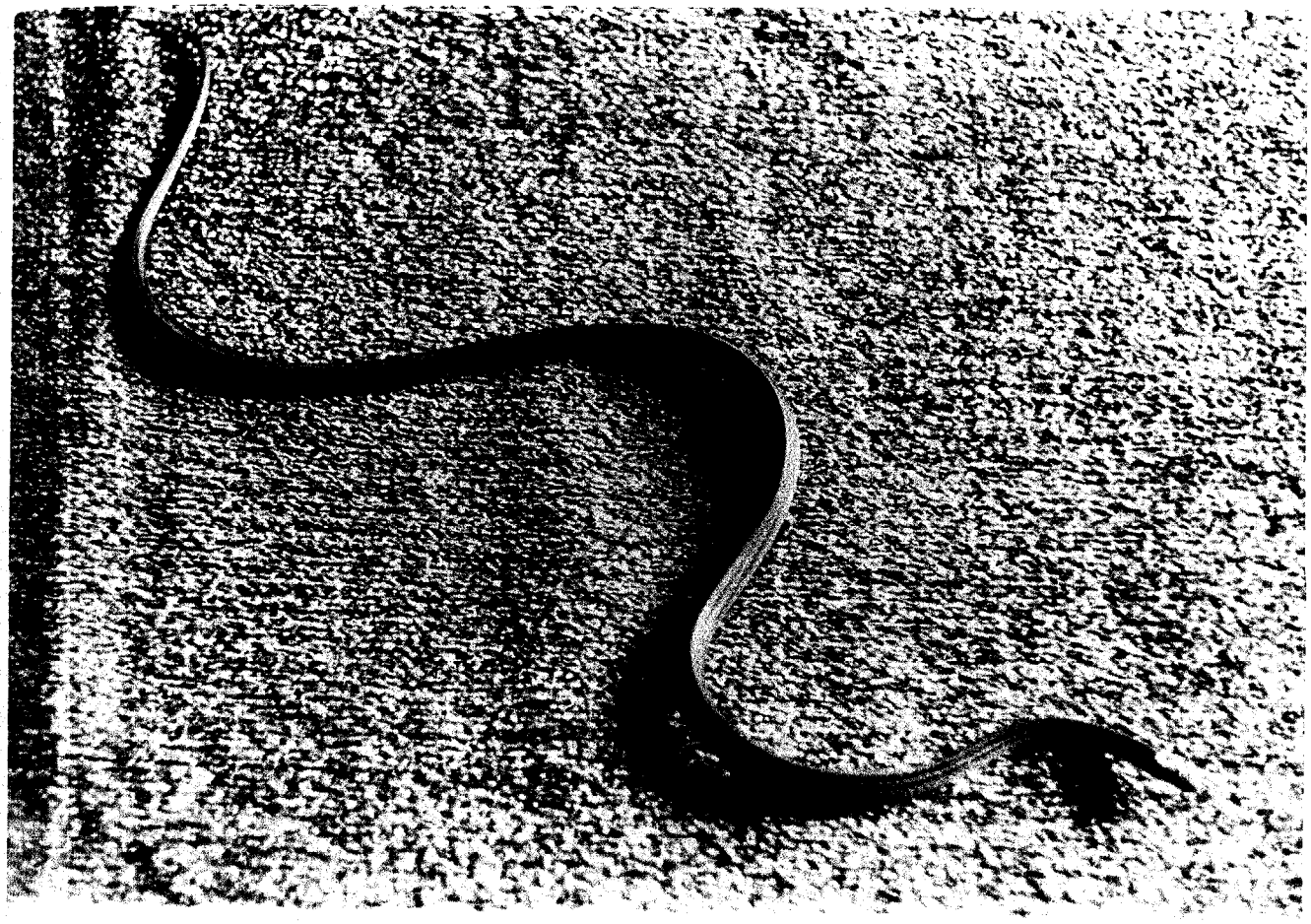


Fig. 5-1　シマハビの定常ほふく運動
（体幹の曲げピーク部分が浮いている）

はこの習性を力学的立場から解釈する．

第3章の解析結果からつぎの結論が得られている．定常ほふく滑走時には運動前のなめらかな収縮・弛緩運動を行ないながら，できるだけ効率の良い（つまり，スリップが少なく大きな推進力を出す）滑走体形をとるためには(4-16)式より，くぬり面αが一定であると考えれば，筋力分布関数(4-3)式のパラメータσは1以上で1に近い値$\sigma \simeq 1\ (>1)$をとるべきである．$\sigma \simeq 1\ (>1)$のときヘビ体軸に沿った法線力分布は，Fig. 4-7に示すように0点付近に法線力が集中する．このことは，Fig 4-15に示した実験結果例とも一致している．よって，スリップのない能率の良いほふく推進を行なうには，法線力によって最もスリップを生じやすい0点付近に体重を集中して加えてスリップを防げばよいといえ，そのためにヘビはP点付近の体幹をそり上げる体形をとって体重を0点附近に集中させ，スリップを防ぎながらしかも大きな推進力で滑走していると考えられる．Fig. 5-2にこのsinus-lifting滑走体形と法線力の関係を表示しておく．つまり，sinus-lifting滑走とは体幹のそり上げという動作によるほふく運動の一種の適応滑走形態であるといえるであろう．

なお，このsinus-lifting滑走は，i) Fig. 5-1からも明らかなようにP点附近で体幹の外側（凸部）のみを浮き上げるのでなく，全体幹を浮き上げていること，ii) 早く疾走する場合に観測される習性であり同じ体形で滑走していても遅い滑走速度の場合には体幹の浮き上りが観測できない，などの点からやはり力学的要因に起因するものであり，W. Mosauerの解剖学的説明は必ずしも当を得ているとはいい難いであろう．

以上のことから，本節による力学解析を基にした考察によって，ヘビ滑走中の一つの習性が合理的に解釈できることが明らかになったと思われる．そして，この知見はACMの移動運動制御を考える

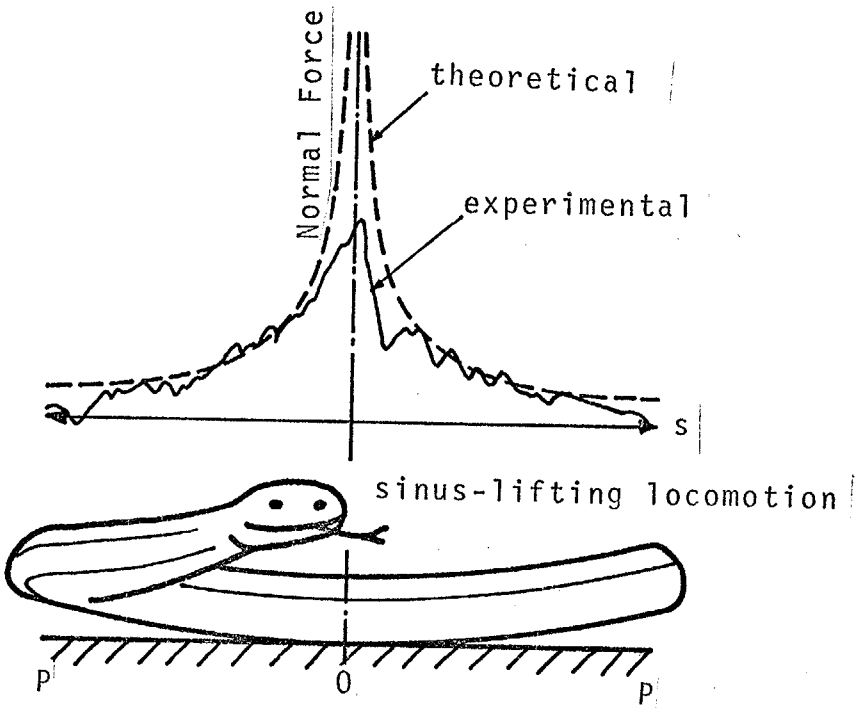


Fig. 5-2　法線力分布と sinus-lifting 滑走の関係

際に重要な意味を持つと共に，動物学の分野にも一つの見解を与えるものと考えている．

5-3 α-適応則

定常ほふく運動の体形パラメータの1つであるくねり角αの決定原理を明らかにする．そのために，まず力学解析からα-適応則を誘導する．つぎにその関係を評価するための1つの手段として，等価摩擦係数比 μ_t^*/μ_n^* を導入し，シマヘビを用いた動物実験によって解析結果の妥当性を吟味することにする．

5-3-1 α-適応則の誘導

本節では4-4-4節での考察をより精細に行なっていく．すでに，4-4-4節において定常ほふく運動時の接線方向の力（推進力）F_t と法線方向の力 F_n について次の関係が成り立つことを示した．

$$\frac{F_t}{F_n} = S_{erp}(\sigma)\cdot\alpha \qquad (5-2)$$

ここで，σは(4-3)式の筋力分布関数の拡散パラメータであり，その値は $\sigma \simeq 1\ (>1)$ であることがわかっている．$S_{erp}(\sigma)$ は(4-10)式のように定義した関数であり Fig.4-6 のような傾向を持っている．そして，αはくねり角を示している．

さてここで，Wをヘビ体重，μ_t, μ_n をそれぞれヘビ腹部の接線方向および法線方向の摩擦係数としたとき，スリップをせずにほふく推進を行なうためにはつぎの条件が必要である．つまり，

i) 体軸方向の摩擦に抗して推進力が生ずる条件

$$F_t \geq \mu_t W \qquad (5-3)$$

ii) 法線方向にスリップが生じない条件

$$F_n \leq \mu_n W \qquad (5-4)$$

よって，(5-3)，(5-4)式を(5-2)式に代入すれば，つぎの関係が求まる．

$$\alpha \geq \frac{1}{Serp(\sigma)} \cdot \frac{\mu_t}{\mu_n} \equiv \alpha_0 \qquad (5\text{-}5)$$

ここで，α_0はくねり角αの下限値を与えるものとして定義した．つまり，(5-5)式はつぎのことを示している．定常はふく運動中のくねり角αは，筋力分布のパラメータσが一定ならば滑走面の力学的パラメータμ_t/μ_n（以後これを摩擦係数比と呼ぶ）によって決まるくねり角の下限値α_0よりも小さくすることはできない．このことから，はふく運動を支配する滑走面条件は，単なる滑走面の摩擦係数ではなく，ヘビ体幹軸に対し接線方向および法線方向の2方向の摩擦係数の比であるといえる．

ところで，はふく運動の運動時の滑走体形を決定する運動学的な基準としてはつぎの2つが考えられる．すなわち，

i)　滑走時のエネルギ消費の最小化

ii)　滑走速度の最大化．

である．このうち，i)のケースについては第7章において検討する．ii)は動物が捕食もしくは逃走などのように目的点または目的方向に疾走する場合に見られる．本節ではこのii)の基準に基づくはふく運動と考える．

さて，このように速く推進しようとするときには，体幹のくねり運動の速さに生理的な限界がある以上，なるべくくねり角αの小さい直線的な体形をとって運動波形縮弛線運動の1周期間の有効推進速度を大きくすることが望ましい．しかし，はふく推進中に取り得るくねり角αには(5-5)式の下限値α_0が存在し，α_0以下ではスリップを生じてかえって推進速度が低下すると考えられる．そして，この(5-5)式が滑走面の摩擦係数比μ_t/μ_nに依存することから，結論として，上述のii)に基づいてはふく運動を行なうときには，滑走体形としてのくねり角αは滑走面状態を示す摩擦係数比μ_t/μ_nに対し，つぎのような適応則を満たさなければならないことがわかる．

α－適応則

“ほふく運動を効率良く行なうためには，くねり角αは常に滑走面摩擦係数 μ_t/μ_n に適応させ，(5-5)式に示されるくねり角の下限値 α_0 に近く，しかも α_0 より大きく保持しなければならない”．

上記のα－適応則を実験的に検証するためにつぎのような検討を行なった．

5-3-2 等価摩擦係数比 μ_t^*/μ_n^* の導入

α－適応則を検証するには，いろいろな摩擦係数比の条件のもとでヘビを滑走させ，そのほふく体形のくねり角αが(5-5)式の範囲内にあり，疾走時に下限値 α_0 に近づくかを調べればよい．しかし，摩擦係数比 μ_t/μ_n を滑走床面の材質を変えることにより任意に変化させることは実際には容易ではない．そこで，ここでは等価的に摩擦係数比を変える方法の1つとして，滑走面傾斜角度θと，そのときの摩擦係数比（以後，等価摩擦係数比 μ_t^*/μ_n^* と呼ぶ）の関係を誘導しておく．

Fig. 5-3のように斜面を上下するヘビにおいて，O点からの距離がsの体幹部Qの微小部分 δs に働く接線方向および法線方向の外力 $f_t^*(s)$, $f_n^*(s)$ を考える．この微小部分にはFig. 5-4のように摩擦力のほかに重力の影響が作用する．よってつぎの式が成り立つ

$$f_t^*(s) = (\mu_t^0 \cos\theta + \sin\theta \cos\alpha_s) w \delta s \qquad (5\text{-}6)$$

$$f_n^*(s) = (\mu_n^0 \cos\theta - \sin\theta \cos\alpha_s) w \delta s \qquad (5\text{-}7)$$

ただし，θは滑走面傾斜角であり昇りを正，降りを負とする．wはヘビ体幹の単位長さ当りの重量であり，α_s は体幹部Qの体軸が推進方向となす角度（Fig. 5-3参照）を示す．μ_t^0, μ_n^0 は水平（θ=0）状態滑走面でのヘビ体幹の接線方向および法線方向の摩擦係数を示す．

(5-6)，(5-7)両式をOP間（$0 \le s \le \ell$ の範囲），つまりほふく体形の1/4周期について積分しOP間の自重（$=\ell w$）で割ると，体幹に作

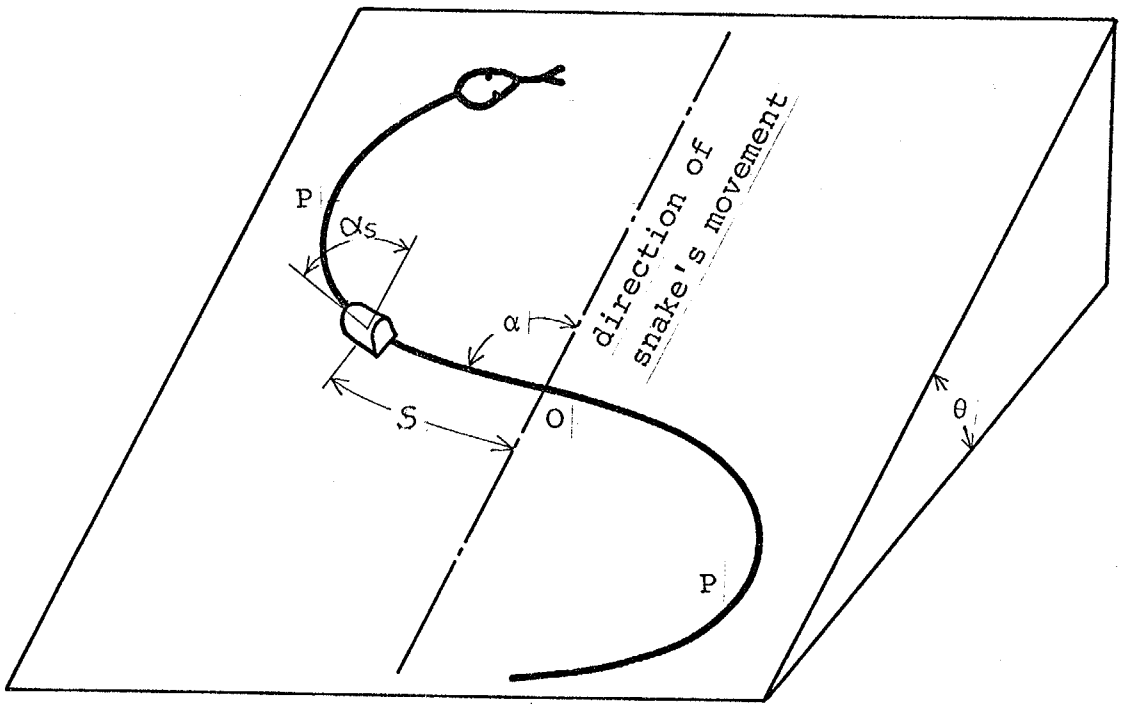


Fig. 5-3　傾斜面を滑走するヘビ

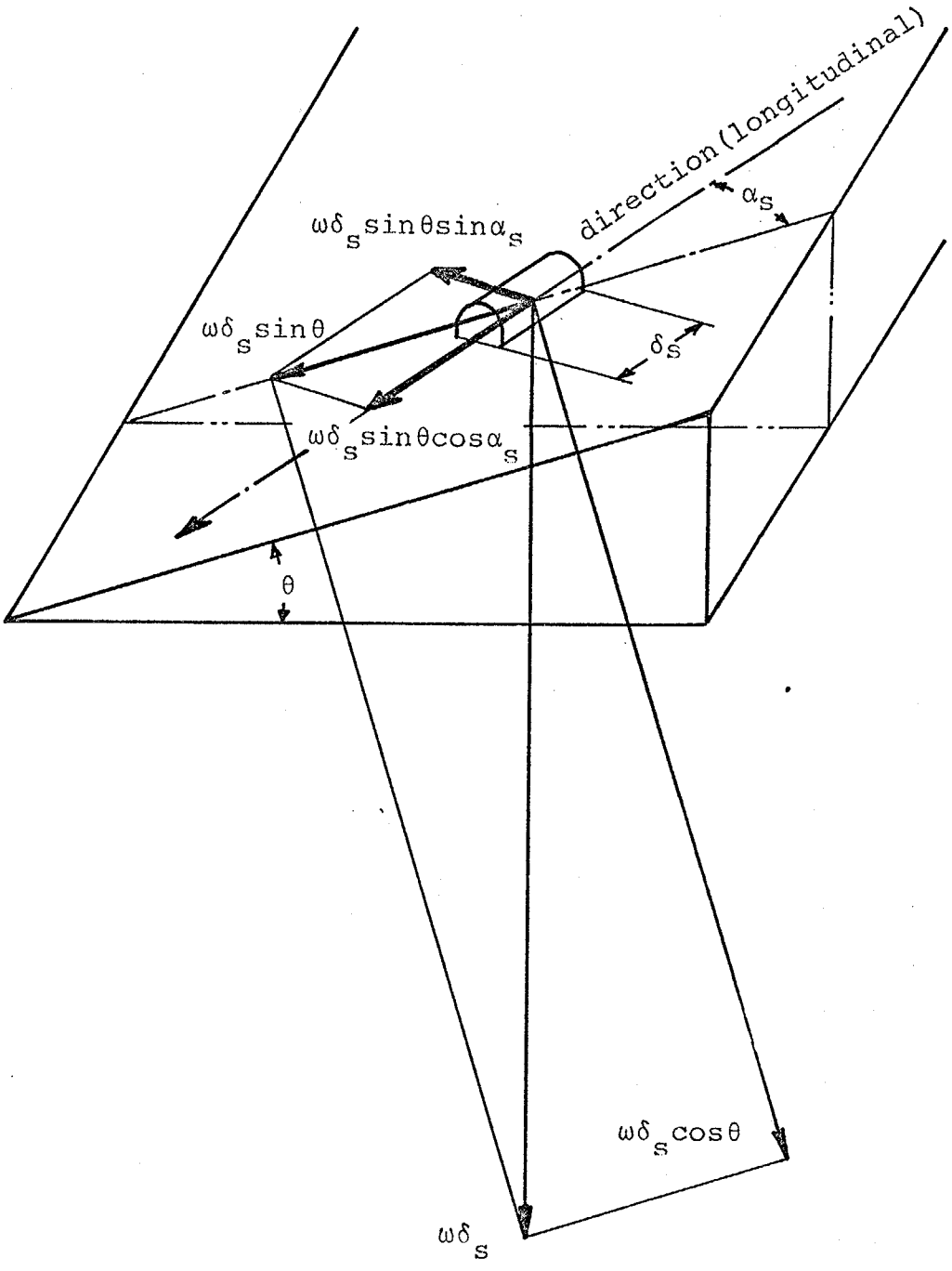


Fig. 5-4　体幹の単位部分に働く重力の影響

用する，重力の影響も重畳した等価的な摩擦係数が求まる．つまり，

$$\mu_x^* = \mu_x^0 \cos\theta + \sin\theta \frac{1}{\ell}\int_0^\ell \cos\alpha_s \, ds \tag{5-8}$$

$$\mu_n^* = \mu_n^0 \cos\theta - \sin\theta \frac{1}{\ell}\int_0^\ell \sin\alpha_s \, ds \tag{5-9}$$

となる．ここで(5-8),(5-9)両式の右辺第2項の積分

$$I_c \equiv \frac{1}{\ell}\int_0^\ell \cos\alpha_s \, ds \tag{5-10}$$

$$I_s \equiv \frac{1}{\ell}\int_0^\ell \sin\alpha_s \, ds \tag{5-11}$$

についてその意味を考える．$\cos\alpha_s \delta s$, $\sin\alpha_s \cdot \delta s$ はQ点における微小長さ δs の体軸部をx軸およびy軸方向へ投影した長さである．よって，そのOP間での積分値 I_c, I_s は $I_c = x(\ell)/\ell$, $I_s = y(\ell)/\ell$ であるといえる．ただし，$x(\ell)$, $y(\ell)$ はOP間の体幹のx軸およびy軸への投影長さである．このうち I_c は定常ほふく運動時に体軸方向への移動速度が推進方向に有効に利用される比率を示しており特に「行程比」と名付ける．

I_c, I_s の値はヘビ滑走時の曲線形状により決定される．すでに第3章で述べたように，ヘビの滑走体形曲線は serpenoid curve と名付けた周期関数によって表現でき，実際とよく一致する．この曲線によって I_c, I_s を求める．(3-17)式に $s=\ell$ を代入して

$$I_c = J_0(\alpha) \tag{5-12}$$

$$I_s = \frac{4}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_{2m-1}(\alpha)}{2m-1} \tag{5-13}$$

ただし，$J_n(\alpha)$ $(n=1,2,3\cdots)$ は第1種Bessel関数である．

よって，(5-12),(5-13)両式を(5-8),(5-9)両式に代入すれば等価摩擦係数 μ_t^*, μ_n^* が滑走面傾斜度 θ の関数として求まる．この μ_t^*, μ_n^* が μ_t, μ_n と等価であると考え(5-5)式を書き換えれば

$$\alpha \geq \left(\frac{1}{Serp(\alpha)}\right)\frac{\mu_t^0\cos\theta + J_0(\alpha)\sin\theta}{\mu_n^0\cos\theta - \frac{4}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_{2m-1}(\alpha)}{2m-1}\sin\theta} \equiv \alpha_0 \tag{5-14}$$

となる．上式(5-14)は(5-5)式を実験的に検証しやすいように書き直したものといえる．つまり，水平面での摩擦係数がμ_x^0, μ_n^0である滑走面の推進方向(x軸)を角度θだけ傾斜させたときのくぬり角αの下限値α_0を示す式である．まず滑走面傾斜度θとくぬり角αとの関係が(5-14)式によることが主張できればμ_x^*/μ_n^*とμ_x/μ_nとの等価性が主張でき，結局(5-14)式によって滑走面摩擦係数比μ_x/μ_nとくぬり角αとの関係を導くことが可能になる．そこで，つぎのような実験を行ない検証を行なった．

5-3-3 ヘビ傾斜面滑走時のくぬり角αの測定

幅1.8m，長さ2.5m程度の人工芝を敷いた滑走面にシマヘビ(*Elaphe Quadrivirgata*)を滑走させた．この滑走面はシーソーのように最大±10°の傾斜をとれるようにしてある．実験はシマヘビをこの傾斜した滑走面の一端から，他端にある暗い逃避口の方に追いたて，同時に滑走面の垂直上方にあるモータードライブのカメラでその滑走体形を連続撮映するという方法をとった．シマヘビは，滑走面側部に沿って設置した反射板から反射する照明の光をきらってほぼ真すぐに暗い逃避口に疾走していく．しかし必ずしも最大傾斜線方向に滑走するとは限らないのでつぎのような補正を行なった．つまり滑走面最大傾斜線の傾斜度をθ_0，最大傾斜線とヘビ推進方向のなす角度をξとFig. 5-5のようにとったときヘビに対する実際の傾斜度θはつぎのようにとる．

$$\theta = \sin^{-1}(\cos\xi \sin\theta_0) \qquad (5\text{-}14)$$

得られたデータの滑走面傾斜度θはすべて上式(5-15)に従った補正を行なっている．

くぬり角αの計測はつぎのように行なった．撮映されたヘビの滑走体形写真のうち定常かつ一様な滑走体形を示しているものを選択した．これをプロジェクタで拡大することにより，ヘビ推骨上部にあった十分正確な滑走体形曲線を得た．それぞれのデータについて

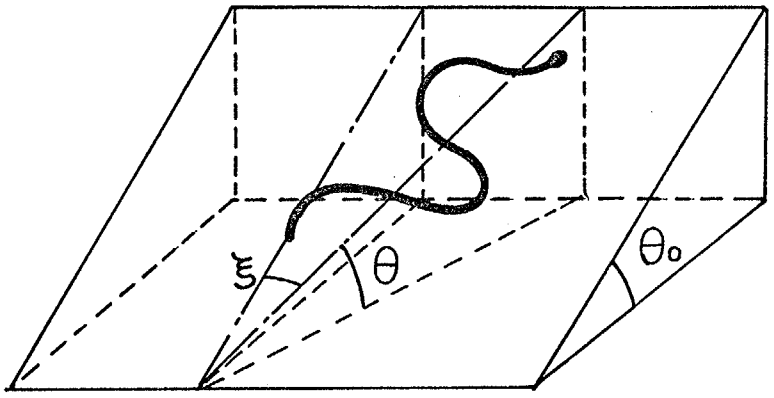


Fig. 5-5　ヘビに対する滑走面の傾斜度の補正

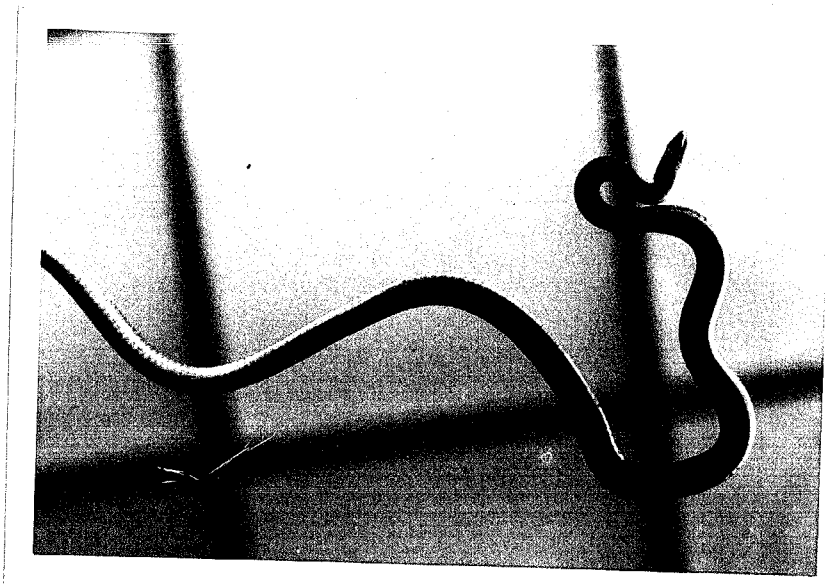


Fig. 5-7　ヘビ腹部の形状

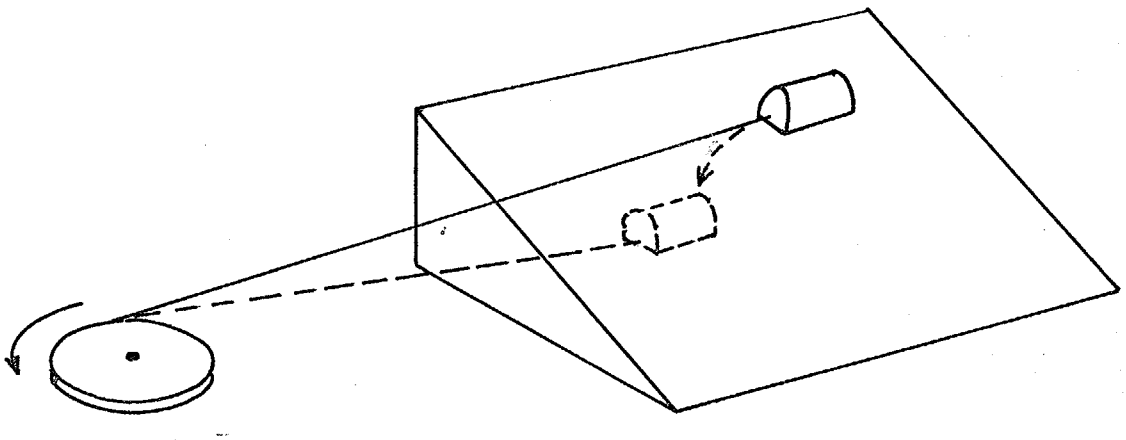


Fig. 5-8　法線方向摩擦係数 μ_n の測定実験

面の傾斜度が物体の動摩擦係数に相当する角度より小さければ，物体はそのまま同一等高線上を移動するはずである．しかし，実験によれば十分小さな傾斜度でも，その軌跡はFig. 5-8 の破線のごとく下方に向い，この傾向は試みた材質すべてについて生じている．* この現象の原因としては，たとえば一定方向の運動が物体に微小振動を生じて物体を一時的に浮き上らせその結果直角方向への摩擦が少なくなったように観測されるという説明も考えられるが，その定量的解析には摩擦現象の本質的な理解が必要であり精細については未だ明らかではない．

ii)についても，まず体側エッジ部のエッジ角の鋭さを滑走中にいかに調整しているか，そして，そのエッジ部がめり込みやすい人工芝生の芝の1つ1つをいかに取らえているか等の微視的現象が含まれより精密な測定が行はれなければならない．

以上のように，法線方向の摩擦係数 μ_n を決定する要因には，現段階では解明不可能な面が大きい．そこで本研究では，接線方向の摩擦係数 μ_t についてはFig. 5-9 のごとく実際のヘビと同様の大きさと重さをもち，しかも腹板にヘビの脱皮したヘビ皮を貼ったモデルを人工芝生上で一定速度で牽引することによって測定した動摩擦係数を用いる．しかし，法線方向の摩擦係数は直接的に測定することは不可能であるので未知にしておき，ヘビの運動学的測定結果から推定することにする．その推定の妥当性については後節で検討する．

なお，Fig. 5-9 の牽引実験はヘビ腹部モデルを牽引するワイヤーの張力をストレインゲージによって検出するものであり，定荷重物体の牽引データによってキャリブレーションした結果，接線方向の摩擦係数は $\mu_t = 0.46$ であると求まっている．

---

* 自動車が高速走行中横風によって容易に横ぶれが生じやすいという現象も，現象的には同様の原因によるものと思われる．

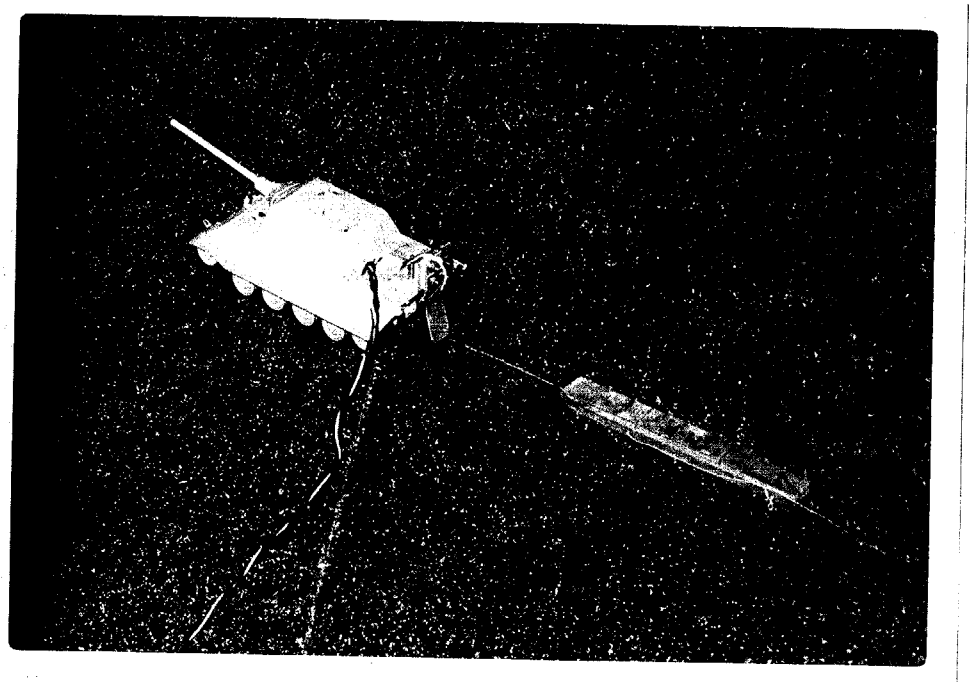


Fig. 5-9　ヘビ腹部モデル牽引実験による
接線方向動摩擦係数 μ_t の測定

5-3-5 実験結果と理論の比較・吟味

第5-3-3節で述べた方法で測定した滑走面傾斜度θと定常ほふく運動のくねり角αの関係を示す75のデータ例をFig.5-10に示す。

一方，力学解析的に誘導した傾斜度θとくねり角αの関係は(5-14)式のように誘導されている。しかし，(5-14)式中の$\mu_t^0=0.46$はすでに求まっているが法線方向摩擦係数μ_n^0，筋力分布のパラメータσはまだ未知であり，このままでは理論的立場のθ-α関係曲線を誘導することはできない。そこで，Fig.5-10のデータのうちヘビが最もスピードを出し，しかもくねり角αが許容される範囲で最小である典型的なデータ例として，傾斜度$\theta=0^\circ$のときのデータ＊に注目する。このときのくねり角$\alpha=50^\circ$がαの下限値α_0と等しくなっていると仮定し，しかも筋力分布のパラメータσが最適滑走条件（第4章参照）から$\sigma=1$であると仮定すれば未知であったパラメータμ_n^0を(5-14)式から逆に誘導できる。つまり$Serp(1)=\pi/2$，$\mu_t^0=0.46$，$\theta=0^\circ$を(5-14)式に代入すれば法線方向摩擦係数μ_n^0は

$$\mu_n^0=0.83 \tag{5-16}$$

と求まる。これらの数値を用いれば(5-14)式のθ-α関係曲線をσの各値に対して求めることができる。それをFig.5-10に実測データと対比しながら示す。

Fig.5-10の実測データと理論解析曲線を比較する。理論解析曲線はその誘導の過程に上述したような絶対値を実測データに合わせるという操作を含んでおり，必ずしも実測データ絶対値が理論領域内に含まれているという主張を行なうことはできない。しかし，滑走面の傾斜度θに対するくねり角αの変化の傾向は理論解析曲線と実測データが良く一致していることが認められる。また各データについては全力疾走時のデータほどσの小さい領域境界線に近づく傾向があることも確認ができている。これらのことから，前節で誘導した傾斜面での等価摩擦係数比μ_t^*/μ_n^*は実際の摩擦係数に等価である。

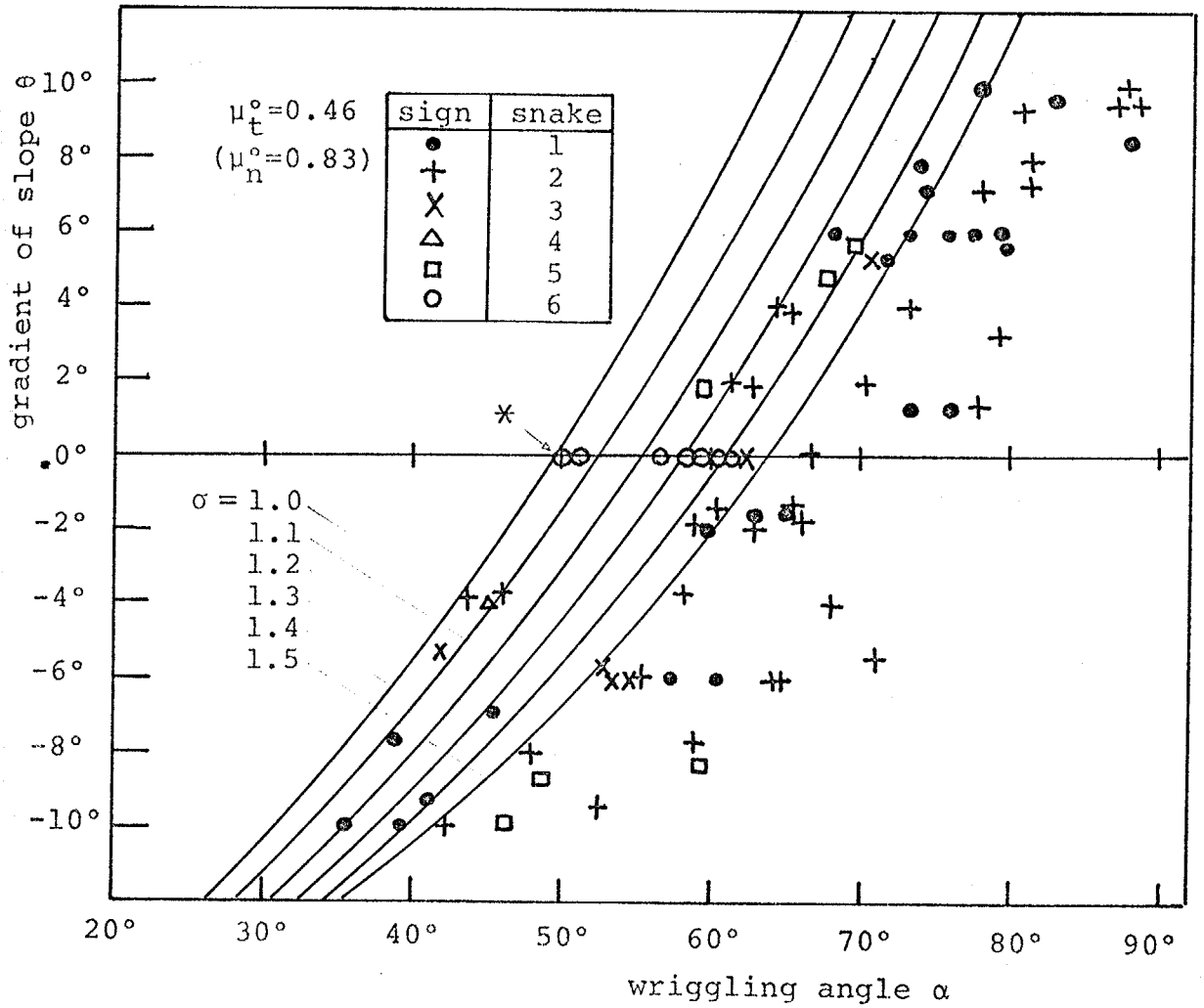


Fig. 5-10　滑走面傾斜角θとくねり角αの関係

つまり，$\mu_t^*/\mu_n^* = \mu_t/\mu_n$ が成り立つと考えても良いと思われる．そこで，Fig. 5-10 に示した測定データを (5-14)式の関係を用いて，くねり角 α と摩擦係数比 μ_t/μ_n の関係を示す空間に写像することにする．

Fig. 5-11 に写像された α-μ_t/μ_n 平面での実測データを示す．また Fig. 5-12 には実測データと (5-5)式の理論曲線を対比して示している．理論的には (5-5)式からくねり角 α は滑走面の摩擦係数比 μ_t/μ_n の1次関数であり，μ_t/μ_n に対する α の変化は線形的になされることが想定されるが，Fig. 5-11 の結果は実測データにおいても α-μ_t/μ_n の関係が線形的であることを良く示していると思われる．そして，その変化の傾向も Fig. 5-12 から理論曲線と実測データが良く一致しており，全力疾走時のデータが σ の小さい領域境界線に近づく傾向も同じく言うことができる．

これらのことから，結局，力学解析の結果を基に誘導したくねり角 α の滑走面摩擦状態に対する適応の関係を示す"α-適応則"が，実験的にも妥当であることが検証されたといえるであろう．

5-3-6 Clothoid型体形近似に基づく解析との比較

以上の考察はヘビの定常ほふく運動体形として serpenoid curve を想定した力学解析結果によって α-適応則を検討したものである．本節では，第3章で述べたように serpenoid curve についでほふく体形を良く近似する clothoid spiral の合成曲線を滑走体形の前提と想定した場合の解析を行ない前節までの結果との比較を行なうことにする．

Clothoid 型体形近似の場合の α-適応則は (4-23)式に (5-3), (5-4)式の条件を代入すれば求まり，つぎのように示される．

$$\alpha \geq \left(\frac{\sigma+1}{2}\right)\frac{\mu_t}{\mu_n} \equiv \alpha_0 \qquad (5\text{-}17)$$

上式(5-17)では，σ が1より大きくなるほどくねり角の下限値 α_0 が大

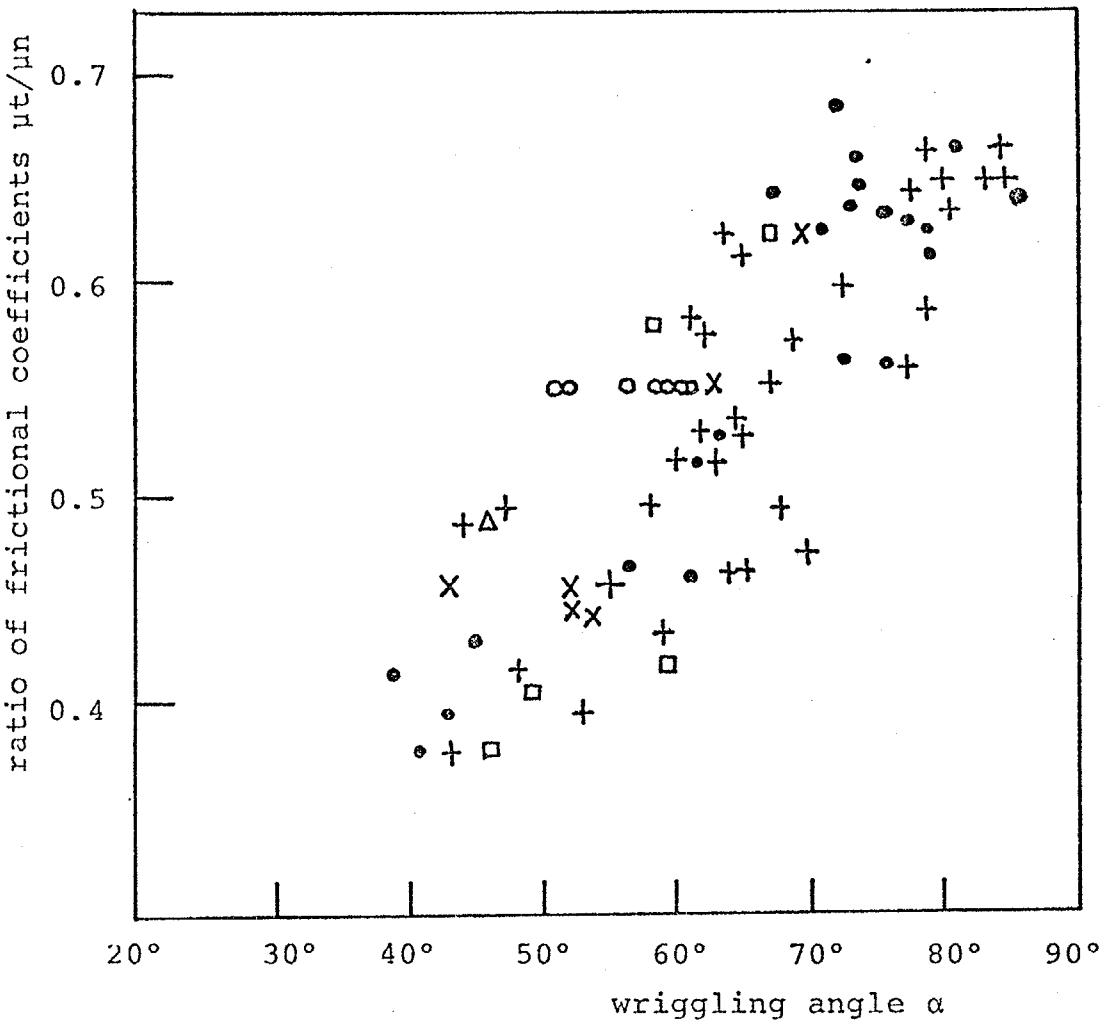


Fig. 5-11　摩擦係数比 μ_t/μ_n とくねり角 α の関係
（Fig. 5-10 を (5-14) 式により写像）

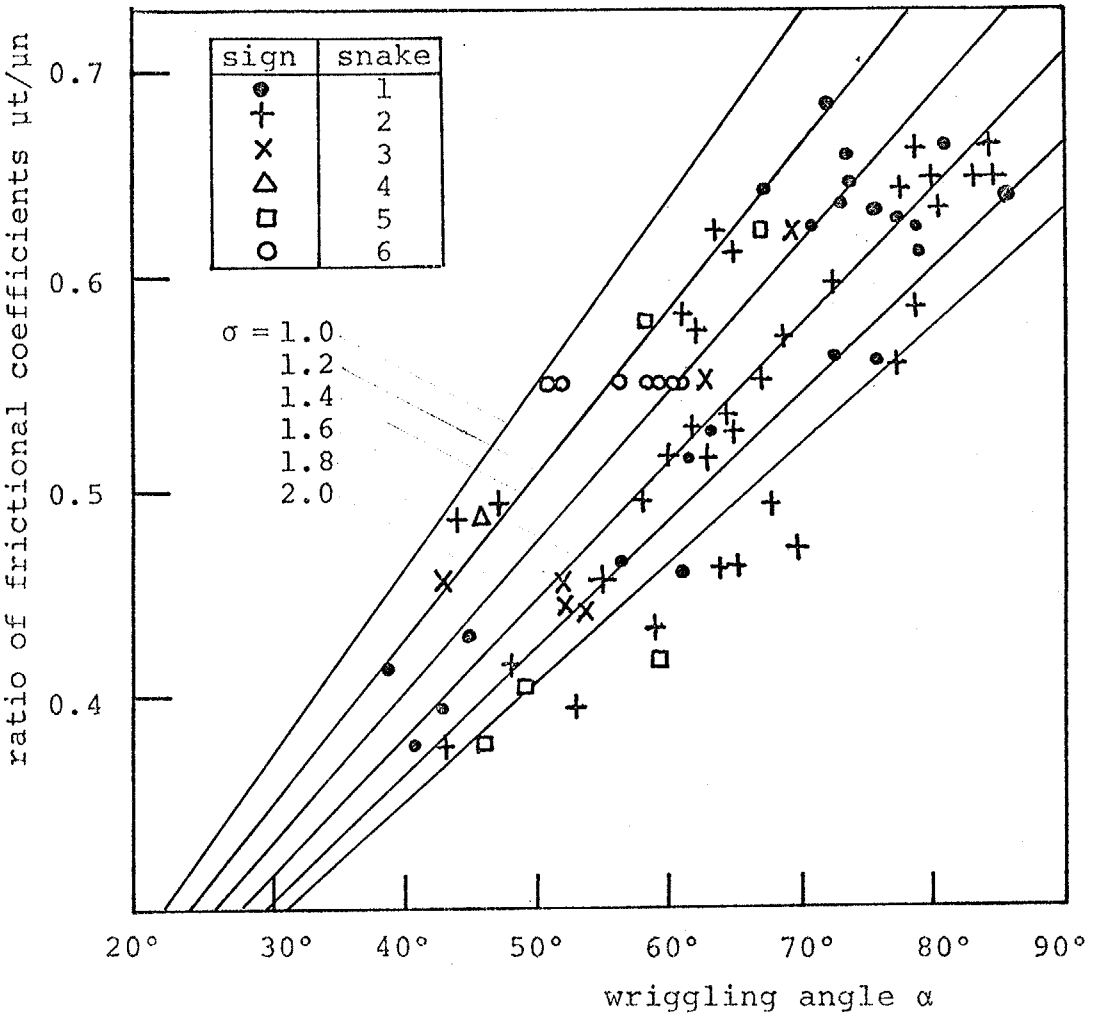


Fig. 5-12　摩擦係数比 μ_t/μ_n vs. くねり角 α
（実測データと理論直線の比較）

きくなり(5-5)式と同様の傾向を示すが，Serp(σ)と 2/(σ+1)の絶対値のちがいから α_0 は(5-5)式の7割程度となっている．

等価摩擦係数比 μ_t^*/μ_n^* を計算する際にも想定するはふく体形の違いが影響する．(5-8),(5-9)両式の Ic, Is は clothoid型の場合には，(3-8)式に S=l を代入すれば求まりつぎのように表わされる．

$$I_c = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}\left\{\cos\alpha\, C\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right) + \sin\alpha\, S\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right)\right\} \quad (5\text{-}18)^*$$

$$I_s = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}\left\{\sin\alpha\, C\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right) - \sin\alpha\, S\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right)\right\} \quad (5\text{-}19)$$

ただし，C(*)，S(*)はFresnel積分を示す．

(5-18),(5-19)式を(5-8),(5-9)式に代入して等価摩擦係数を求め(5-5)式を書き換えれば

$$\alpha \geqq \left(\frac{\sigma+1}{2}\right)\frac{\mu_t^0\cos\theta + \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}\left\{\cos\alpha\, C\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right) + \sin\alpha\, S\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right)\right\}}{\mu_n^0\cos\theta - \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}\left\{\sin\alpha\, C\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right) - \sin\alpha\, S\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right)\right\}} \equiv \alpha_0 \quad (5\text{-}20)$$

となる．上式(5-20)に基づき，前節での誘導と同様に $\mu_t^0=0.46$ として μ_n^0 を測定データ*から推定すれば $\mu_n^0=0.53$ となる．

以上の結果を用いればclothoid型体形近似を行なったときの理論解を求めることができる．Fig. 5-13には滑走面傾斜度θに対するくぬり角αの実測データと，serpenoid curve に基ずいて(5-14)式から導いた理論領域境界曲線(破線)，およびclothoid型体形近似による(5-20)式から導いた理論領域境界曲線(実線)を示す．Fig.5-13の2つの理論曲線を比較すれば両者とも良く実測データの傾向と一致していることがわかる．しかし，滑走面傾斜度 $\theta=10^\circ$ の場合の実測データの1つが(5-20)式に示されるα_0の許容範囲(Fig.5-13では領域境界線の左側)内に含まれていない．また $\theta=-10^\circ$ 附近でも(5-20)式の

---

* (5-18),(5-19)両式の数値解を得るため級数展開の形で示しておく

$$I_c = \sum_{m=0}^{\infty}(-1)^m \frac{(4m)!!\ \alpha^{2m}}{(4m+1)!!\ (2m)!}$$

$$I_s = \sum_{m=0}^{\infty}(-1)^m \frac{(4m+2)!!\ \alpha^{2m+1}}{(4m+3)!!\ (2m+1)!}$$

ただし

$$m!! \begin{cases} m(m-2)\cdots 4\cdot 2 & \text{偶数} \\ m(m-2)\cdots 3\cdot 1 & \text{奇数} \end{cases}$$

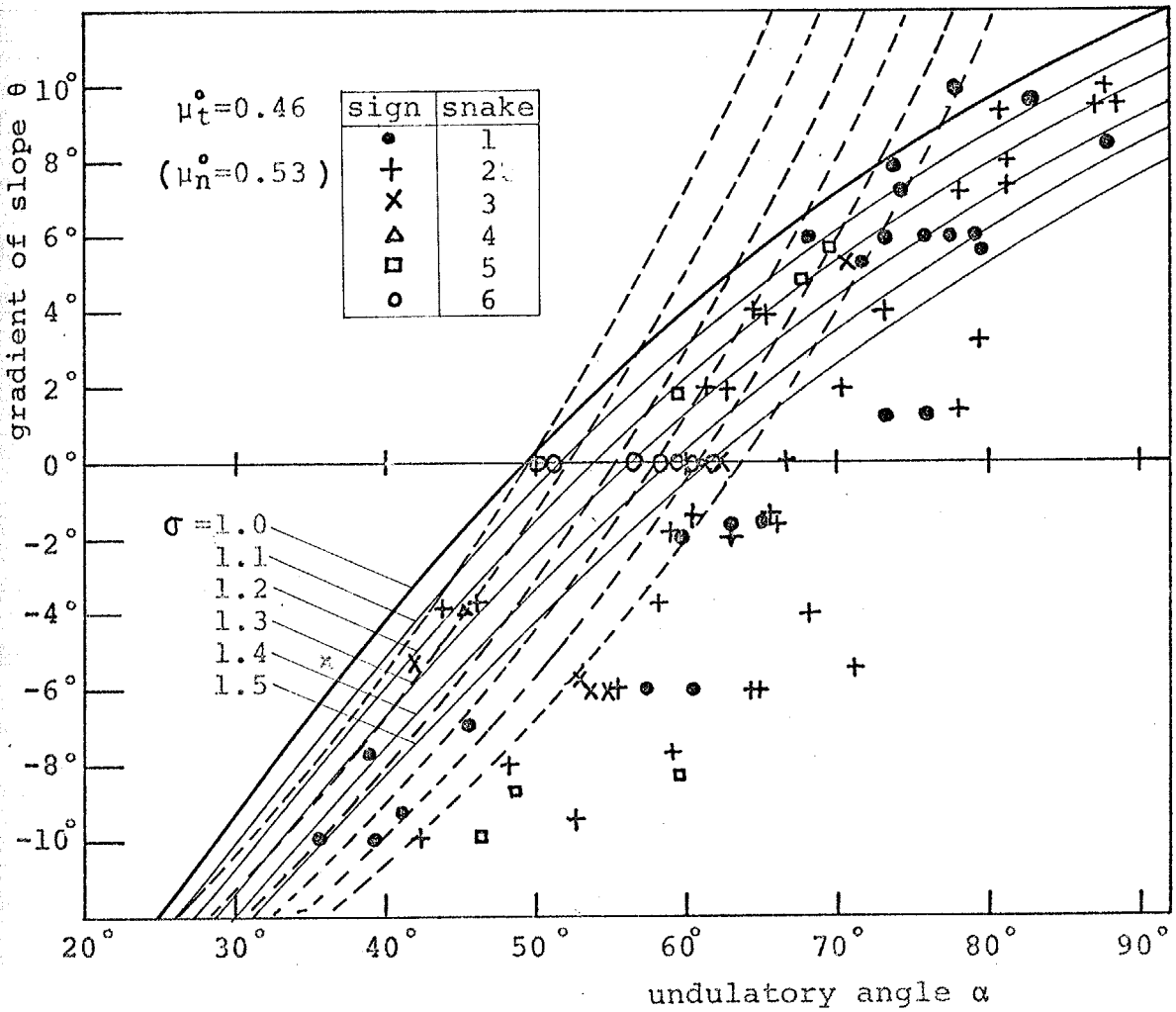


Fig. 5-13　滑走面傾斜度 θ vs. くねり角 α

（実線 …… Clothoid 型体形近似による理論曲線
破線 …… Serpenoid curve による理論曲線）

理論曲線と実測データとの傾向の差が大きいと思われる．そのため，clothoid 型の体形近似による解析よりは serpenoid curve を用いた解析の方がより実測データに近いと言うことができるであろう．なおこの結論は，実測データを(5-20)式に基づいて $\alpha - \mu^*/\mu_n$ の関係を示す空間に写像した Fig.5-14 のデータの変化が Fig. 5-11 と比較して若干線形性の劣ることからも推定される．

第3章におけるヘビのほふく体形曲線についての考察は，アクチュエータとしての運動筋の収縮・弛緩運動のなめらかさという立場から serpenoid curve をヘビの滑走体形曲線として提唱したものであり，その妥当性は直接的にその滑走形状を比較することによって行なっていた．しかし serpenoid curve と clothoid 型体形曲線は Fig.3-9 からもわかるように外形状的にはそれほど大差なく clothoid 型体形曲線も実測データの測定偏差内に含まれる場合もあって，また serpenoid curve をヘビのほふく形状であると主張するには若干の不安があった．しかし，α-適応則をそれぞれの前提に立って導き，実測データと比較した本節の結論からも serpenoid curve を想定した時の理論解がより実測データに近かったことから，serpenoid curve をヘビの定常ほふく体形として想定することの妥当性が改めて確証できたと言って良いであろう．

5-3-7 α-適応則と Sinus-lifting 滑走との関係

本節 5-3 で考察した α-適応則は，前節 5-2 の Sinus-lifting 滑走とは独立に誘導したが，実は密接な関係を持っていることを示す．

α-適応則においては，ほふく滑走体形のくねり角 α に(5-5)式で定義される下限値 α_0 が存在し，ヘビはその範囲内で滑走面状態に体形を適応させて α を小さく保持しているという事を述べた．

さて，ここで α_0 は筋力分布関数のパラメータ σ の関数であるが σ は $\sigma > 1$ という生理学的な制約の中で小さいほどくねり角の下限値 α_0 を低くする効果がある．つまり，滑走速度の最大化などの滑走効

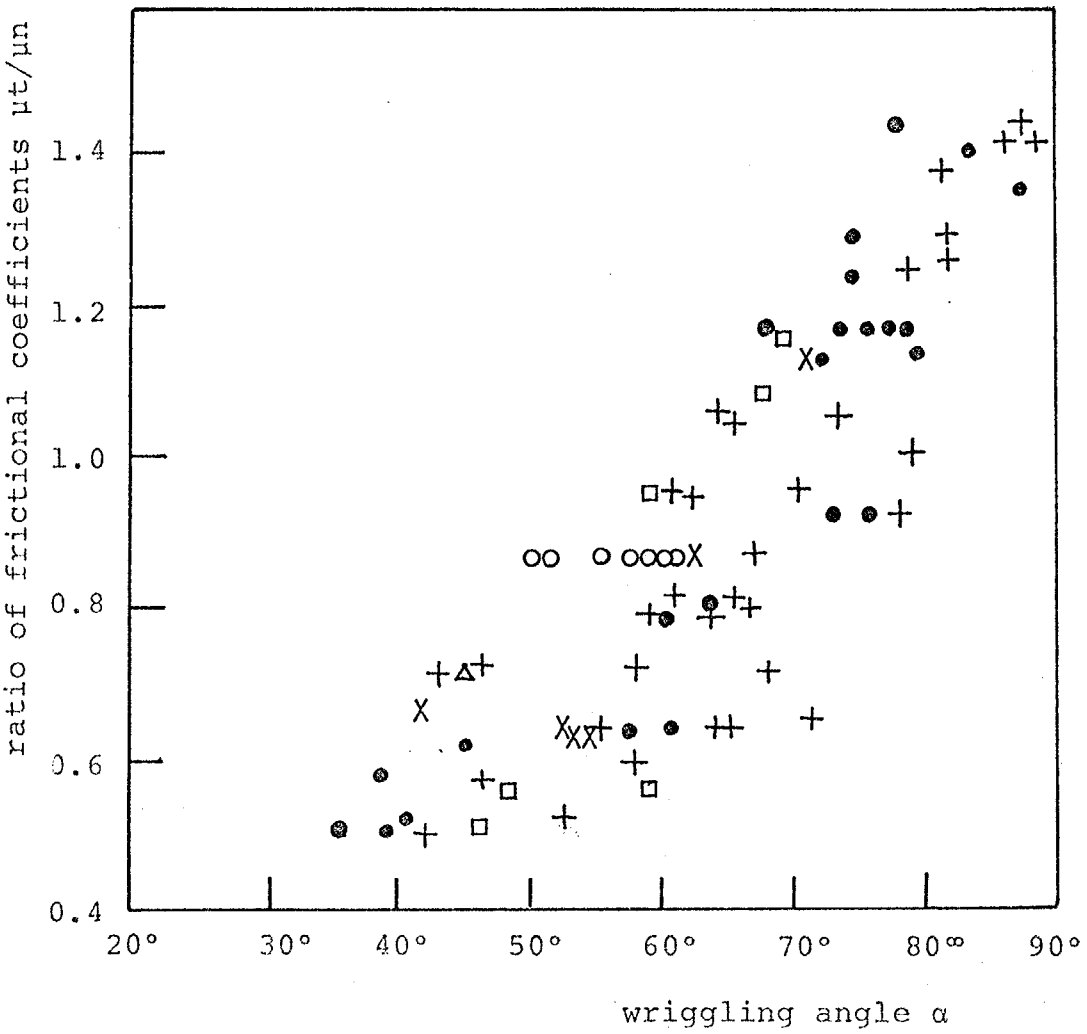


Fig. 5-14　摩擦係数比 μ_t/μ_n vs. くねり角 α

(Fig. 5-10 を Clothoid 型近似に基ずく
(5-20) 式によって字像したもの)

率の面からくねり角αは小さいほど望ましかったが，節力分布関数のパラメータσもαの下限値αminを低くさせるという意味で同じく小さいほど望ましいと言うことができる．そして，sinus-lifting 滑走とはσが1以上で1に近い値をとるとき，滑走面に及ぼす法線力分布の偏りに適応して体幹をそらし体重量を適当に分散させる特性であると言えることは5-2節の考察で明らかにされている．

これらのことから，結局ヘビは定常ほふく運動中に滑走面状態に適応したくねり角αをとるが，その適応をより効率よく行なうためにsinus-liftingという滑走体形をとると言えるであろう．

5-4 ℓ-適応則

くねり角αとともに，定常ほふく運動の滑走体形を規定するパラメータであるくねりの大きさℓ（Fig.4-3の1/4周期のP間の距離）の決定原理について考察する．

くねりの大きさℓの決定原理は第2章の移動力学基礎関係からは求めることは不可能である．なぜならば，前記の力学解析は前提として無限小の単位節からなる無限長さの連続曲線を体幹として想定しているために，曲線形状の絶対的な大きさには無関係な力学関係が誘導されているためである．しかし，実験のヘビの定常ほふく運動を観察すると，そのくねりの大きさℓは同一滑走面環境，そして同一種のヘビの場合には個体差があまりなく常にほぼ一定であることが観察される．やはり，くねりの大きさℓも何かの原理に従って決定されていると考えるべきであろう．そこで本節ではいくつかの立場からℓの決定原理を探り，特にアクチュエータとしての筋肉の特性に注目してℓ-適応則を推定する．この知見はシマヘビを用いた動物実験により検証する．

5-4-1 ℓの上限値および下限値

ヘビ体幹を有限長さしであることに注目すればくねりの大きさℓ

の上限値が求まるものと思われる．つまり，ヘビ体幹の最大発生筋力に上限がある以上，ほふく運動によって推進するためには全体幹で十分な数のくねり波形をとり，単位体幹当りの発生推進力を摩擦抗力以上にする必要がある．ここで，定常ほふく運動中に有効に推進力を生ずることのできる体幹部は0点から0点までの1/2周期であり，それ前後の頭部あるいは尾部では推進力を生ずることができないこと．そして，シマヘビの筋肉断面積（付録2参照）から推定される発生可能最大筋力f_{mo}の値を(4-11)式，(4-25)式に代入すれば有効全長（頭部から肛門まで）100cmのヘビの場合にはℓは25cm以下であることが計算できる．

また，脊椎骨の屈曲可動範囲からℓの下限値が決定されると思われる．ヘビの解剖によって求めたヘビ脊椎骨の屈曲可動範囲はほぼ$\pm 18°$であった（付録2参照）．また，脊椎骨の厚さを$\delta s \fallingdotseq 0.5$cmであるから，たとえば，くねり角$\alpha = 60°$で滑走する場合にとり得るくねり角$\ell$の最小値は(3-9)式から3cmであると言える．

以上のように，一般のシマヘビではくねりの大きさℓは$3 < \ell < 25$[cm]程度の値であることが推進力学的に，また解剖学的に推定できる．しかし，もとよりくねりの大きさℓの値はこのような広い範囲の任意性のあるパラメータではない．そこで次節においてさらに別の立場からくねりの大きさℓの決定原理を探る．

5-4-2 運動筋の特性を考慮したℓの決定

A.V. Hillによって示された筋肉特性方程式

$$(f_m + c)(v_m + b) = b(f_{mo} + c) \qquad (5\text{-}21)$$

は筋肉活動時の収縮力f_mと収縮速度v_mの関係を示す著名な式である．ただし，f_{mo}は対象とする筋の発生可能な最大筋力である．また，cは筋の1cm収縮時の発熱量を示す常数であり筋の横断面積のみの関数となっている．なお，f_{mo}も筋の横断面積のみの関数であるので，f_{mo}/cは筋によらずに一定となり

$$f_{m0}/c = \zeta \qquad (5\text{-}22)$$

のように示すことができる．ここで，定数ζは測定によれば，たとえば$\zeta=4$でありこれは速度，仕事，温度に依存しない．また，定数bは筋長l_mにのみ関係した常数であり，$b=\beta l_m$となる．そしてこの比例定数βは測定によると0°Cで0.33[/sec]であり，$Q_{10}=2.05$であるからTを温度[°C]とすれば$\beta=0.33(2.05)^{T/10}$であり

$$b=\beta l_m = 0.33(2.05)^{T/10} l_m \qquad (5\text{-}23)$$

と表記できる．なお以上の関係はAbottとWilkie[71]（1953）の研究によりカエル筋のみならず，ガマ，ネコ，カメ，カタツムリ，イガイ，魚などの筋についても成り立つとしている．よってここでは同じくヘビの筋肉にも同様の傾向が見られると仮定しておくことにする．

さて，以上のように筋肉の一般的特性が明らかになったが，この特性から筋肉が発生できるパワー（$=f_m v_m$）を最大に保つための筋の収縮速度には最適値$\bar{v}_m$が存在するといえる．そして，ほふく運動についてもほふく体形を調整することにより滑走時の筋肉収縮・弛緩速度を上記の最適値$\bar{v}_m$に一致させる適応動作が想定される．くねりの大きさlの決定則をこのような立場から論ずるため以下の検討を行なってゆくことにする．

筋肉が最大のパワーを発生できる筋収縮速度$\bar{v}_m$は（5-21）式から$d(f_m v_m)/dv_m=0$の計算を行なうことにより求まり

$$\bar{v}_m=(\sqrt{\zeta+1}-1)b \qquad (5\text{-}24)$$

となる．上式に$\zeta=4$，と(5-23)式を代入すれば

$$\bar{v}_m = 0.41(2.05)^{T/10} l_m \qquad (5\text{-}25)$$

と示される．上式(5-25)にはf_{m0}は含まれない．従って筋肉がどのような力を出す場合にも出力パワーを最大にする収縮速度$\bar{v}_m$は一定であるということができる

一方，定常ほふく運動がserpenoid curveによってなされているとすれば，体軸座標0点での筋肉収縮速度$v_m(0)$は（3-9）式の1階微

分によりつぎのように求まる

$$v_m(0) = \frac{\pi^2}{4}\frac{a\alpha}{l^2}\delta s\, v \qquad (5\text{-}26)$$

ただし，a は脊椎骨から運動筋までの距離，δs は1節のもさ，v はほふく推進中の体軸方向への移動速度を示している．

もしも，定常ほふく運動中に，最もパワーを消費する0点附近(Fig. 4-8 参照)で運動筋の収縮速度が上記の最適収縮速度 $\bar{v}$ に一致するように調整されているとすれば，ヘビの滑走体形のうち，くねりの大きさ l は (5-25) 式と (5-26) 式で $l_m = \delta s$ であることから

$$l = 2.45\,(2.05)^{-T/20}\sqrt{a\alpha v} \qquad (5\text{-}27)$$

となるように適応的に決定されているといえる．上式 (5-27) から，くねりの大きさ l は運動筋の出力を最適にするために，くねり角 α 滑走速度 v，そして外気温 T に依存しながら滑走中一定値に保持されているといってよかろう．このうち，くねり角 α はすでに述べた α-適応則によって決定される．そこで，本節では (5-27) 式の関係が実際に成立し，くねりの大きさ l は本当に運動筋の出力最適化という考え方で説明可能か否かを検証するために，外気温 T が l に及ぼす影響に注目する．一見する限りでは，ほふく体形の決定と外気温は無関係に感ぜられるが，筋肉の収縮機構が一種の化学反応系でありその反応速度が温度に依存することを考慮すれば外気温 T とくねりの大きさ l の間に何らかの関係を見い出すことも可能であると思われる．そこで，次節において外気温を変化させた時のほふく滑走体形の変化を観察し (5-27) 式の関係を考察することにする．

5-4-3 外気温を変動した時のヘビ滑走体形の観察

人工気生を敷いた実験室の室温をエアー・コンディショナーによってあらかじめ設定した一定の値に保てるようにした．この実験室内にシマヘビ6検体を4～5時間一定の室温に保った状態で放置した．このようにして一定の室温に慣れたシマヘビを人工気生上で全力疾

走させ，その滑走体形を垂直上方のモータードライブのカメラで撮映した．Fig.5-15には，3種類の実験室温，22℃，28℃，33℃ のそれぞれの条件で観察された同一個体による典型的な滑走体形例を示している．またFig.5-16には，すべての測定データからくぬりの大きさ ℓ を計測し，外気温と対比して示している．ここで外気温とは滑走面近くの室温を示している．測定データにおいて滑走速度 v はほぼ 20～40 cm/sec，くぬり角 α は若干のばらつきがあったがほぼ 50°～80° 程度であった．

以上の実験観察結果から，ほふく運動のくぬりの大きさ ℓ は外気温に対し予想外に鋭く影響されており，外気温が高くなるほどくぬりの大きさ ℓ が小さくなるという傾向が明らかに認められると思われる．この感度の鋭さはヘビが変温動物であることにも関係するかもしれない．なお ほふく運動の滑走体形に及ぼす温度の影響をより精密に明らかにするためには，ヘビの直腸温度等のより運動筋に近い部分で温度を測定すべきである．しかし，本実験によっても，温度下とくぬりの大きさ ℓ のだいたいの傾向はつかめたものと思われる．

5-4-4 ℓ - 適応則の推定

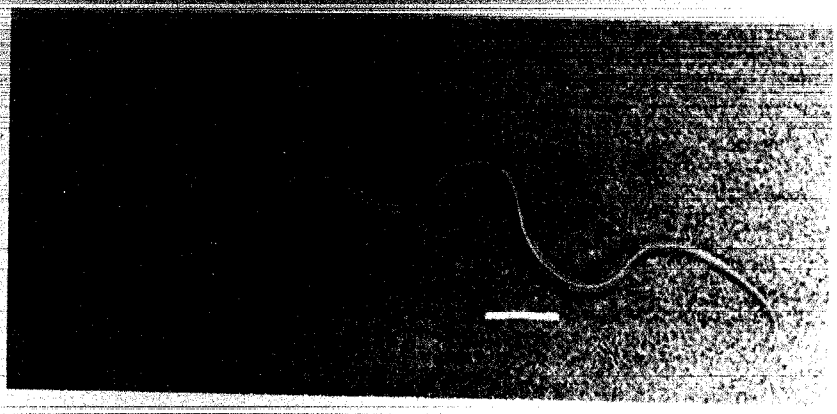
(5-27)式の数値に含まれる筋肉特性の生理学的パラメータ ε，β は対象とするヘビ生体の in vivo な実測値ではなく，他種の筋肉の in vitro な測定値である．よって，その絶対値は必ずしもヘビ運動筋の活動特性に対応していると言うことはできない．しかし，ε, β の温度依存性などの定性的特性は筋肉の違い，実験状態等にかかわらず同じであると思われる．そこで，くぬり角 α，滑走速度 v を一定と考えて(5-27)式を比例定数 K を用いて

$$\ell = K(2.05)^{-T/20} \qquad (5\text{-}27)$$

と示していく．そして，この比例定数 K を Fig.5-16 のデータのうち最もデータ数の揃った個体番号1の測定平均値と28℃で一致するよ

(1) T=22°C snake 1 v=34cm/sec.

(2) T=28°C snake 1 v=37cm/sec.



(3) T=33°C snake 1 v=24cm/sec.

Fig. 5-15 気温条件を変えた時の滑走体形例

うに K=33.8 と定め全温度範囲について拡張する．Fig. 5-16 にそのときの理論曲線を破線で示す．この理論曲線と 22°C，33°C の実測データを比較すると良く一致していることがわかる．

つまり，滑走中にヘビがその運動筋で最大のパワーを発生するように体形を適応させているという立場でくねりの大きさ ℓ を考察した所，その適応過程に温度が大きく影響していることが明らかになった．そして，その温度依存性を動物実験によって検討した結果，理論と実測が良く一致することが明らかになった．このことから，ほふく体形を決定する1つの重要なパラメータであるくねりの大きさ ℓ は，アクチュエータとしての運動筋の出力を常に最適に保つための一種のトルクコンバータの役割を持っていることが推定できるであろう．よって，つぎのような ℓ-適応則を提唱する．

ℓ-適応則

"くねりの大きさ ℓ は，ほふく推進体のアクチュエータ効率に適応しその出力パワーが最適になるように保持されている．"

ただし，上記の ℓ-適応則は (5-27) 式から誘導した値とは一致しない．たとえばカエル筋の in vitro な測定値から誘導した (5-27) 式で，くねり角 $\alpha = 60°$，滑走速度 $v = 40\ cm/sec.$，脊椎骨から運動筋までの平均距離 a を典型的なサイズのシマヘビの解剖から $a = 1\ cm$ とすれば $\ell = 15.8(2.05)^{T/30}$ となり，28°C では $\ell = 5.8\ cm$ であってヘビのこの温度における実測平均値 $\ell = 12\ cm$ のほぼ半分になっている．この不一致は生理学実験データの条件の違いに依存することは明らかだが，一方，第7章で述べるほふく運動の移動仕事率の考察から ℓ が大きいほど移動時のエネルギー効率が高いということも言える．そのため，筋肉の効率と移動様式としての効率の2つに対し，ヘビはそのくねりの大きさ ℓ を適応させると考えるなら実測データ ℓ が運動筋の発生パワーだけを考察した場合より大きくなっていることは力

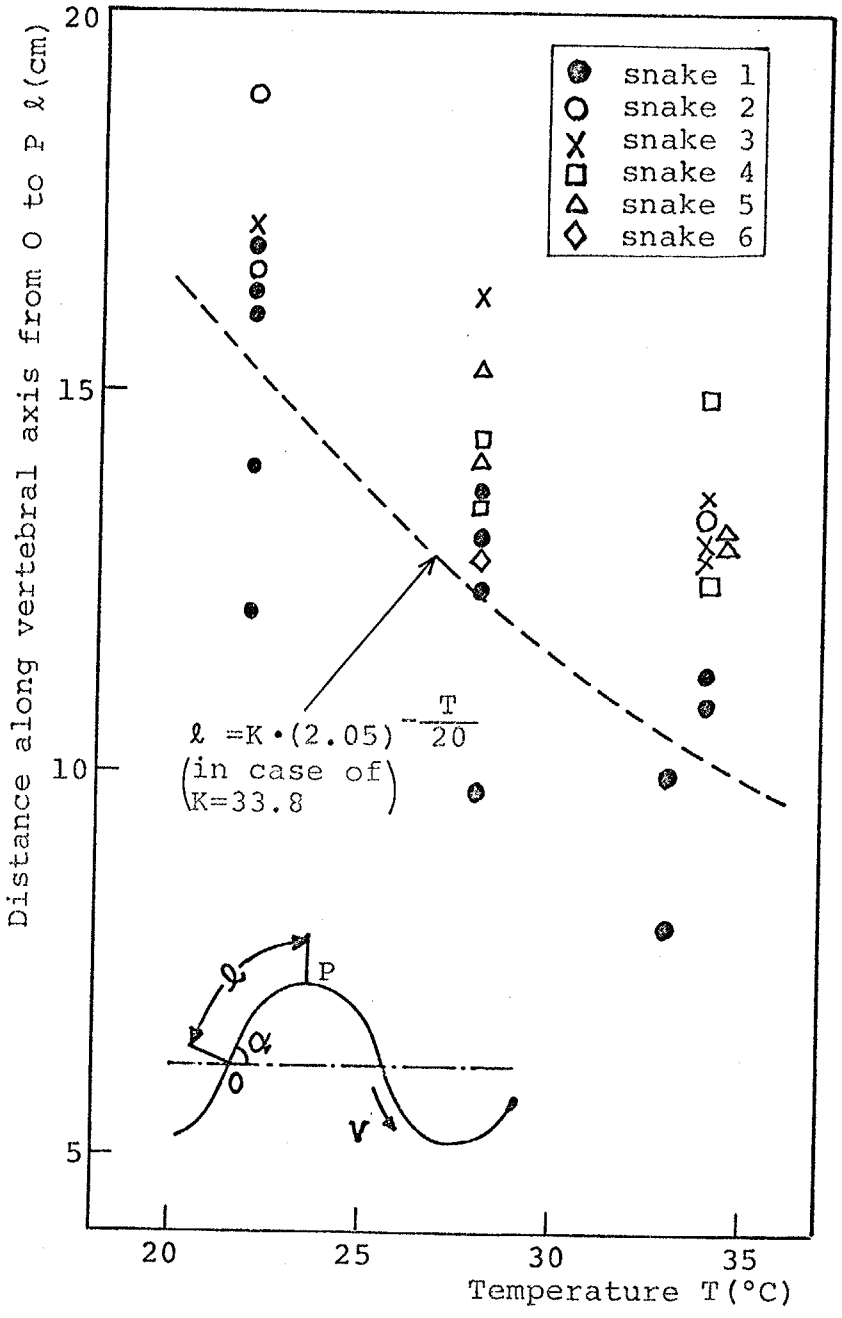


Fig. 5-16　気温Tとくねりの大きさℓの関係

学的にも不自然ではないといえる可能性もある．この点については，総合的なかつより詳細な検討が必要であると考えている．また，温度に依存する生理学的パラメータは単に筋肉収縮速度だけではなく，神経刺激の伝幡速度等も考えられる．これらの影響も考慮した理論解析を行なうことが今後の課題である．

5-5 本章の結論

本章においては，定常ほふく運動の適応特性について考察を加え特にその滑走体形がいかなる原理に基づいて決定されているかを論じた．得られた結論はつぎのとうりである．

(1) Sinus lifting 滑走

Fig. 5-1のような，ヘビの定常ほふく推進中に観察された体幹の曲げピーク部分（Fig. 4-3のP点附近）をそり上げて疾走する習性が，力学的には，全力疾走するヘビ体幹に部分的に生ずるスリップ力を打ち消すことを目的とした体幹重量の適正分配動作の結果であることが明らかになった．そして，このような滑走様式をsinus-lifting滑走と名付けた．

(2) α - 適応則

i) ほふく運動に関する力学的考察から，ほふく体形を規定するパラメータの1つであるくぬり角α（Fig. 4-3参照）についてつぎのようなα - 適応則が成り立つことを示した．「ほふく運動を効率良く行なうためには，くぬり角αは常に滑走面摩擦係数μ_t/μ_nに適応させ，(5-5)式に示されるくぬり角の下限値α_0に近く，しかもα_0より大きく保持しなければならない」

ii) 上記のα - 適応則を検証するためにその滑走面摩擦係数μ_t/μ_nを滑走面を傾斜させることにより等価的に変える方式について考察し，等価摩擦係数比μ_t^*/μ_n^*を誘導した．

iii) μ_t^*/μ_n^*を用いたシマヘビによる動物実験からα-適応則の妥当

性を明らかにした．

iv) α-適応則をclothoid型の体形近似によっても解析し，serpenoid curveのそれと比較することにより，改めてserpenoid curveを定常ほふく滑走体形の近似曲線として想定することの妥当性を確認した．

v) α-適応則とsinus-lifting滑走が密接に関係していることを明らかにし，sinus-lifting滑走は滑走中のくねり角許容下限値α_0を低くする効果のあることを示した．

(3) ℓ－適応則

i) αと共に定常ほふく体形を規定するパラメータであるくねりの大きさℓ（Fig. 4-3 参照）の上限値および下限値がそれぞれ全体幹で発生できる推進力の大きさおよび脊椎骨の可動屈曲角によってそれぞれ求まり有効全長（鼻から肛門まで）100 cmのヘビの場合には $3\text{cm} < \ell < 25\text{cm}$ と表されることを示した．

ii) ほふく運動中にℓがほぼ一定に保たれる，より直接的な要因としてアクチュエータとしての筋肉の特性に注目しつぎのようなℓ－適応則を誘導した「くねりの大きさℓは，ほふく推進体のアクチュエータ効率に適応し，その出力パワーが最適になるように保持されている」

iii) 上記のℓ-適応則は，外気温を変えることによりアクチュエータとしての筋肉の特性を変えた動物実験により，その妥当性を明らかにした．

第6章　荒地環境におけるほふく運動[7,17]

6-1　まえがき

ヘビ等の行なうほふく運動のうち平坦で一様な環境を滑走する際の定常ほふく運動の滑走形態，推進力等として滑走面に対する適応特性等については既に明らかにした．

本章では，これらの知見を基に，さらに多様な滑走環境，つまり，凹凸のはげしい岩地，かん木の間等の荒地をヘビが移動する際の力学について考察する．ヘビ等のほふく運動の有望性が発揮されるのもこのような他の人工移動機械，あるいは有脚動物でも踏破し難い環境下での適応であり，柔状能動体（ＡＣＭ）の移動特性を開発していくためにも是非とも検討すべき問題点であろう．

「荒地（terrain）」の定義は必ずしも確定していない．M.G. Bekkerにより荒地とそこを移動する機械に関する研究がなされており[46,47]，いくつかの荒地を特徴づけるパラメータが示されているが，その中でも荒地は２つに大きく分類できるであろう．つまり凹凸の度合とやわらかさ（あるいは滑りやすさ）である．岩地，かん木の間等は前者に属し，沼地・砂地は後者に属している．

筆者は後者に属する荒地でのほふく運動を所析するには水中でのほふく推進力等が基礎として必要であり，本研究は体系とは別の基礎的知識を必要とすると考えている．

よって，本章では荒地というとき，それは凹凸のはげしい岩地等を示すものと考える．この中でも特に，均一な剛体の壁にかこまれた屈曲迷路を凹凸のある移動環境の最も基本的なモデルと考え，そこにおける推進運動を考察していくことにする．

6-2 迷路の定義と問題の設定

本章で述べる迷路とは其他の一つの基本モデルである。この迷路の定義はFig.6-1に示すように等価摩擦係数μの壁にかこまれ床の摩擦係数がゼロであるような屈折した通路のことをいう。岩場のクレバスの内側あるいは配管路の内壁等で体幹を押かせ壁面からの反力により推進を行なう場合の推進運動は上述の迷路内での推進運動に対応させることができるであろう。

このような迷路内での推進の特徴は迷路内屈折部において、ヘビが迷路形状に応じて体幹を壁面に押しつけることによって推進力を生ずるという点にあると思われる。迷路内でのヘビ等の示す体幹動作は単に迷路形状に沿い、障害物を消極的に避けるためのものではなく、より積極的にその移動環境としての迷路形状を推進のために利用するためのものであるという点に注目すべきであろう。

そこで、本章では迷路形状と推進力を生ずるためにヘビ体幹のとる滑走体形との関係をより明確に示すために、Fig.6-2に示す4つの滑走体形例を示す。そして次節以降の力学解析および動物実験等から4つの滑走体形の比較検討を行ない、迷路内のほふく推進を支配する諸因子を明らかにしていくことにする。

6-3 迷路内ほふく推進の力学的特徴

迷路内で生ずる推進力はヘビ体幹が壁面に加える法線力の反力を変換することにより生ずるものである。そのため迷路内でのほふく推進可能条件は、ヘビ体幹と壁面の間で生ずる摩擦力F_nよりも、ヘビの体幹方向に働く推進力F_tの方が大きくなる、つまり

$$F_t > \mu F_n \qquad (6-1)$$

が成り立つことである。ここでμは迷路壁面の摩擦係数であり、F_t, F_nはすでに第2章においてほふく運動の移動運動基礎式として誘導した式と等しい。つまり、それぞれTable 2-1の(2°)式および

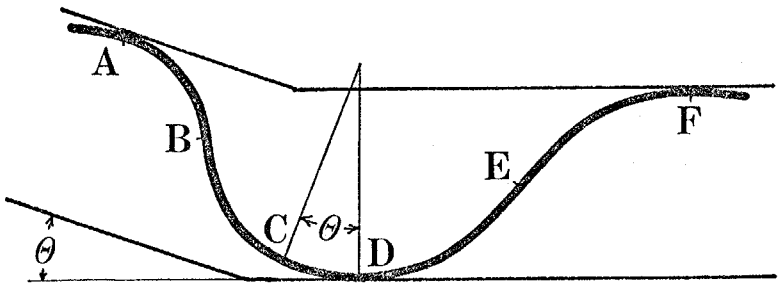


Fig. 6-1　屈曲角Ⓗの迷路を推進するヘビとその体幹座標記号

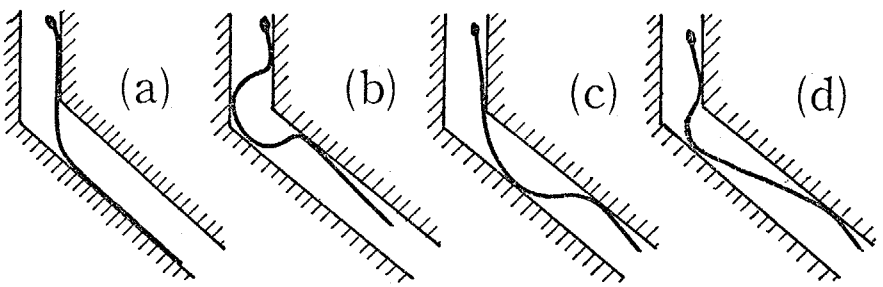


Fig. 6-2　迷路内屈曲部で想定される4種類の滑走体形

(4°)式のように定式化されている。

迷路内における法線力分布の特徴は次の通りである。迷路内の床の摩擦係数はゼロと考えている。よってヘビ体幹が法線力を生ずることのできるのは定常状態では体幹が壁に接している所のみであり，それ以外の体幹では法線力はゼロである。よって，たとえばFig.6-1の区間ADおよび区間DFではTable 2-1の(3°)式から法線力分布$f_n(s)$には次の関係が成り立たなければならない。

$$f_n(s) = -\frac{d^2T(s)}{ds^2} = 0 \qquad (6\text{-}2)$$

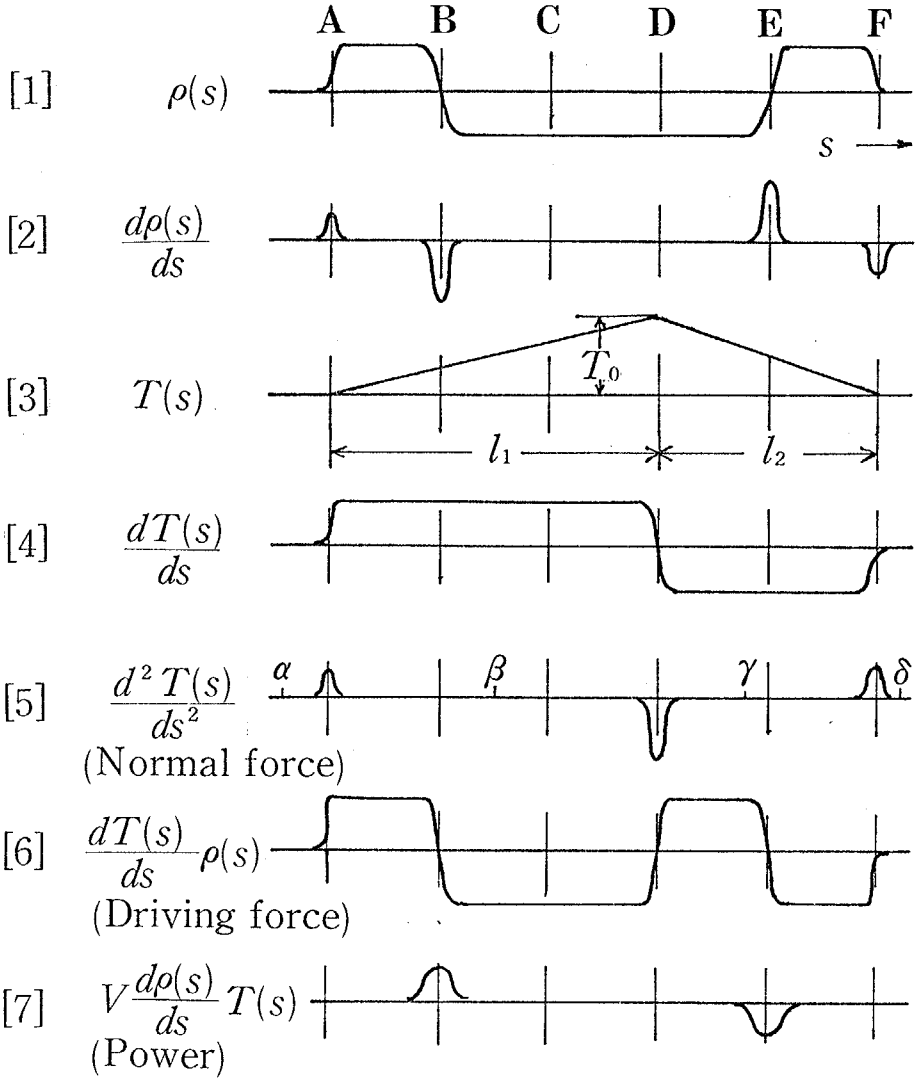
一方，(6-2)式から迷路内ほふく推進を行なうヘビ体幹に生ずべきトルク分布$T(s)$の特徴も同時に明らかになる。つまり(6-2)式の体幹距離sについての二階積分より，迷路内の壁面に接していない体幹部（Fig.6-1の区間ADおよび区間DF）のトルク分布$T(s)$は，その体形曲線形状にかかわらず体幹距離sの1次関数となることがわかる。

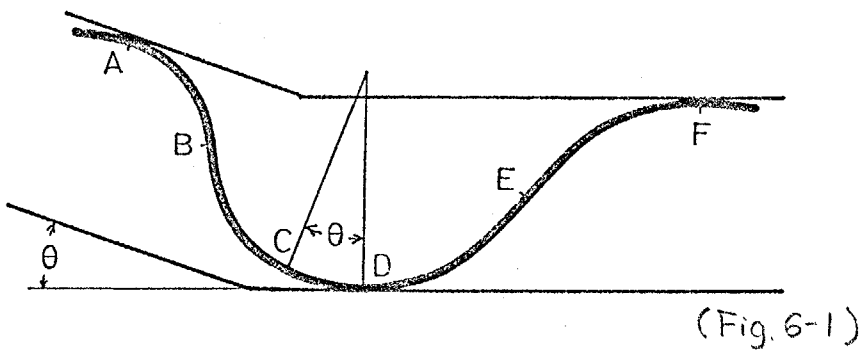
Fig.6-3はFig.6-1に対応しており，迷路屈折部をほふく推進するヘビ体幹に働く力学的諸関係を示している。Fig.6-3の[5]は体幹座標A，D，Fの近傍のみで法線力が生じ，それ以外の体幹では(6-2)式のごとく法線力ゼロとなる傾向を示している。Fig.6-3の[4]，[3]は[5]の一階および二階積分を示し，特に[3]のトルク分布$T(s)$は体幹座標Dで最大トルクT_0をとる1次の増減を行うことを示している。

以上が迷路という移動環境に起因し，しかも平坦な一様な滑走面を推進する定常ほふく運動と異なる迷路内ほふく推進独特の力学的関係である。

6-4 迷路内における推進力と抗力の関係

迷路内屈折部でヘビが生ずる推進力を誘導する。Fig.6-1に示す





(Fig. 6-1)

Fig. 6-3　迷路内でのヘビ体幹に働く諸力学量
（記号 A～F は Fig. 6-1 と対応する）

迷路屈折部を滑走するヘビに生ずる推進力 F_t は Table 2-1 の (2°) に示す摺線力を区間 A～F について考慮したものに等しい．つまり，

$$F_t = \int_A^F \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds \tag{6-3}$$

と表わすことができる．このうち区間 AC，DF においては，その間の体幹曲線形状にかかわらず次の関係が成り立つ．

i) 点 A と点 C における体幹摺線方向および点 D と点 F の体幹摺線方向がそれぞれ等しい．よって区間 AC，DF とも区間内の曲率の積分がゼロになる．つまり，$\int_A^C \rho(s) = 0$，$\int_D^F \rho(s) = 0$ である．

ii) Fig. 6-3 [4] に示すように，両区間とも $dT(s)/ds = const.$ が成り立つ．つまり，Fig. 6-3 のように $\overline{AD} \equiv l_1$，$\overline{DF} \equiv l_2$ と定義すれば区間 AC では $dT(s)/ds = T_0/l_1$，区間 DF では $dT(s)/ds = -T_0/l_2$ という一定値をとる．

以上の関係が成り立つことから，(6-3) 式は

$$F_t = \int_A^C \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds + \int_C^D \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds + \int_D^F \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds$$

$$= \frac{T_0}{l_1} \int_A^C \rho(s)\, ds + \int_C^D \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds - \frac{T_0}{l_2} \int_D^F \rho(s)\, ds$$

$$\therefore F_t = \int_C^D \frac{dT(s)}{ds} \rho(s)\, ds \tag{6-4}$$

と表わすことができる．つまり，有効な推進力を生ずることのできる区間は A～F のうちで CD の区間のみであるといえる．

区間 CD において考察する．区間 CD における曲率には

$$\int_C^D \rho(s)\, ds = ㊍ \tag{6-5}$$

の関係が成り立つ．ただし，㊍は迷路の屈折角である．また区間 CD におけるトルク分布の一階微分は他の区間と同様に const. であり，Fig. 6-3 から T_0/l_1 となる．よって $dT(s)/ds = T_0/l_1$ の関係と (6-5)

式の関係を（6-4）式に代入すれば

$$F_t = \frac{\Theta}{\ell_1} T_0 \tag{6-6}$$

と求まる。上式（6-6）が迷路内ほふく推進時に迷路内屈折部でヘビ体幹が発生する推進力を示している。

迷路内屈折部でヘビが生ずる法線力を誘導する。すでに前節で述べたように法線力は壁に接している体幹部のみに生じ，それ以外の体幹ではゼロである。よって体幹座標 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ とそれぞれに Fig.6-3 [5] に示すように A，D，F 点の法線力がゼロである任意の位置に定義すれば，法線力の絶対値の総和 F_n は Table 2-1 (4°) 式から

$$F_n = \int_\alpha^\beta \left| \frac{d^2T(s)}{ds^2} \right| ds + \int_\beta^\gamma \left| \frac{d^2T(s)}{ds^2} \right| ds + \int_\gamma^\delta \left| \frac{d^2T(s)}{ds^2} \right| ds \tag{6-7}$$

（6-7）式において正負を考えれば，

$$F_n = 2\left(\left| \frac{dT(\beta)}{ds} \right| + \left| \frac{dT(\gamma)}{ds} \right| \right) - \left| \frac{dT(\alpha)}{ds} \right| - \left| \frac{dT(\delta)}{ds} \right| . \tag{6-8}$$

ここで，Fig.6-3 [4] に示すように $dT(s)/ds$ の値は α，δ でゼロ，β，γ でそれぞれ T_0/ℓ_1 および $-T_0/\ell_2$ となる。よって（6-8）式は次のように定式化できる。

$$F_n = 2\left(\frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_2} \right) T_0 \tag{6-9}$$

上式（6-9）が迷路内ほふく推進時に発生する法線力の総和を示している。

以上の考察から迷路内ほふく推進時の推進力および法線力が定式化された。これらの関係を用いて迷路形状と消失体形の条件式を求めることができる。つまり，推進力と法線力の関係を示す（6-1）式に誘導した（6-6）式および（6-9）式を代入すれば，次の条件式が誘導

される．

$$\frac{l_2}{l_1} > \frac{2\mu}{\Theta - 2\mu} \qquad (6\text{-}10)$$

上式（6-10）は，与えられた迷路環境 Θ, μ において滑走体形 l_2/l_1 の取り得る限界を示している．この式から迷路内推進を支配する環境パラメータは迷路屈折角 Θ と壁面摩擦係数 μ であり，滑走体形としては壁面接触方向の体幹長さ l_1, l_2 の比率が重要な因子となることが明らかになった．また，(6-10)式が成り立つ範囲内での滑走体形は l_2/l_1 が大きいほど推進効率（推進力／抗力）が大きく望ましいといえる．

6-5 力学的に妥当な迷路内はふく推進体形の選択

以上の力学解析結果を使用することにより，Fig. 6-2 に示した4つの滑走体形のうち最適な体形を選択することができる．

Fig. 6-2 (a) の滑走体形は壁からの反力でヘビ体幹には屈折部分回りの回転モーメントが働く．床の摩擦をゼロと考えているので，この回転モーメントは打ち消されず，結局このままの体形では滑走不可能である．

Fig. 6-2 (b) の滑走体形を考える．この滑走体形は Fig. 6-1 に示す滑走体形のうち点A, D, F 以外に点Cにおいても迷路壁面に接し，法線力を生じている場合に相当する．この場合の法線力は点Cで新たに生ずる換わりに点Dにおける値が減小し全体としての絶対値の和は変わらない．しかし，推進力は減小する．それは，有効な推進力を発生する体幹区間CDにおけるトルク勾配 $dT(s)/ds$ が，点Cにおいて法線力を生ずる以上減小せざるを得ないからである．よってこのような滑走体形は推進効率が低くなり望ましくない．

Fig. 6-2 の (c) と (d) の滑走体形のうちでは，体幹区間ADの長さ l_1 が小さく区間DFの長さ l_2 の大きな (d) の方が（6-10）式から

推進効率（推進力／抗力）が大きく望ましい．

以上の考察からFig.6-2に示す滑走体形のうちでは(d)が最も推進効率が高く，力学的にも妥当であるとの結論が得られた．この力学解析に基ずく結論は次節における動物実験によって検証することにする．

なお，前節において述べたように，推進効率（推進力／抗力）に注目する限りにおいては，壁面に接する点から点までの体幹距離について論ずることはできるが，その間の体幹曲率分布P(s)は不定であり一意に決定することはできない．この迷路壁面に接していない部分の体幹形状P(s)は他の要因，たとえば体幹で発生できるパワーP(s)の上限等によって決定されるものであると思われる．Fig.6-1の滑走例では，Fig.6-3の[1]でわかるようにその体形曲線として円弧の一部を想定している．よって曲率の一階微分の関数である発生パワーはFig.6-3の[7]に示すように体軸曲線の変曲点部に集中する．アクチュエータとしての筋肉の発生可能なパワーには上限があるため，実際にはよりなめらかで迷路内推進中に体幹全体で一様にパワーを発生するような第3章で述べたようなSerpenoid curve的な曲率分布P(s)をとっていると考えるべきであろう．

6-6 動物実験とその吟味

シマヘビ（Elaphe Quadrivirgata）を迷路内で推進させ，その時の滑走体形を観測して力学解析結果と比較するために次のような実験を行なった．迷路としては，迷路内壁面の摩擦係数のレベルを低く押え典型的な迷路内ほふく運動を行なわすために，Fig.6-4に示すような，直径10mmのローラー群を壁面とした迷路を試作した．この結果，迷路壁面の摩擦係数 $\mu=0.13$ となった．なお，このローラーは図に示すように，ヘビ体軸に押された場合，その上端が押す力に応じて変位するようにしてあるため，写真解析によってヘビ推進時の着力

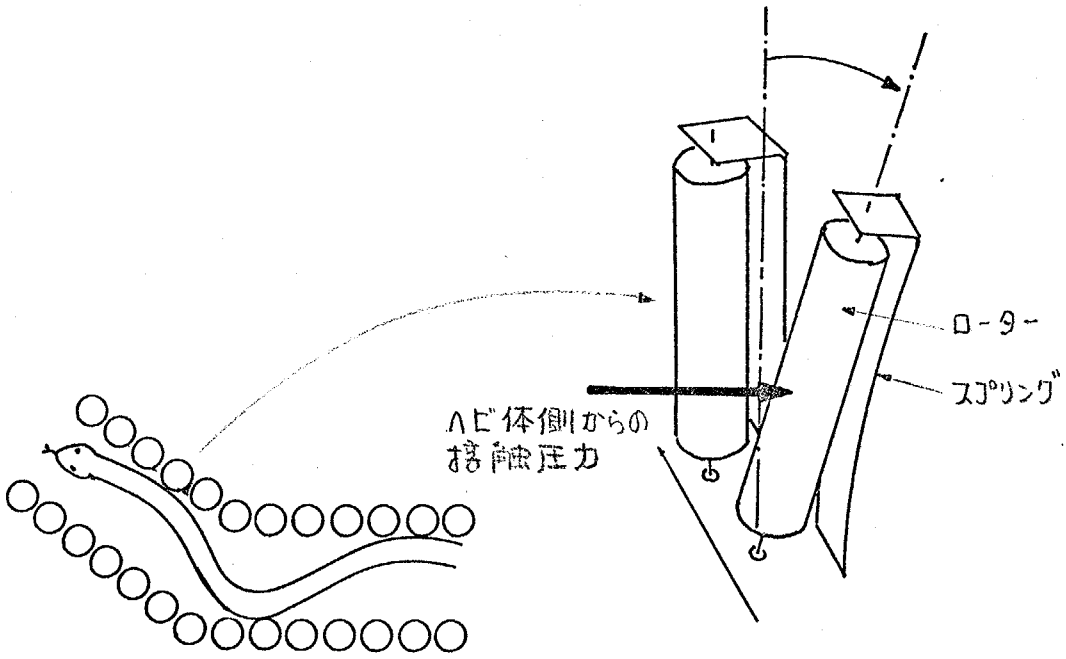


Fig. 6-4　試作した迷路実験装置の説明

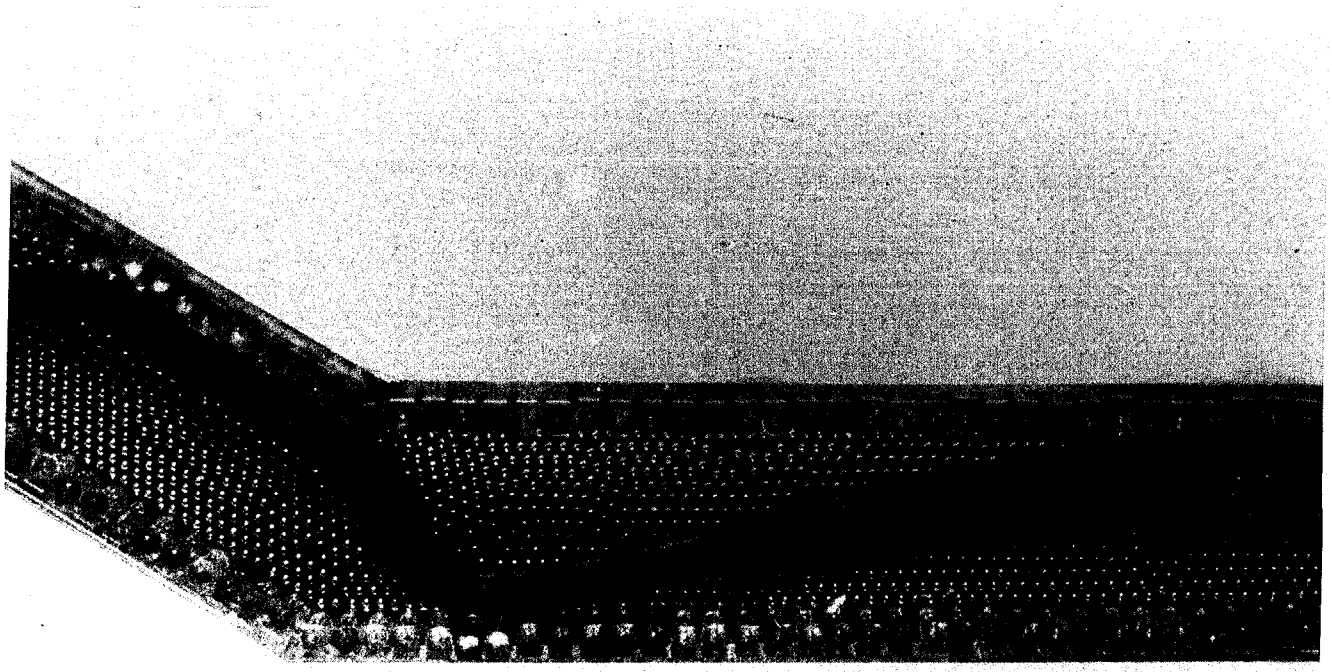


Fig. 6-5　迷路内推進実験の1例

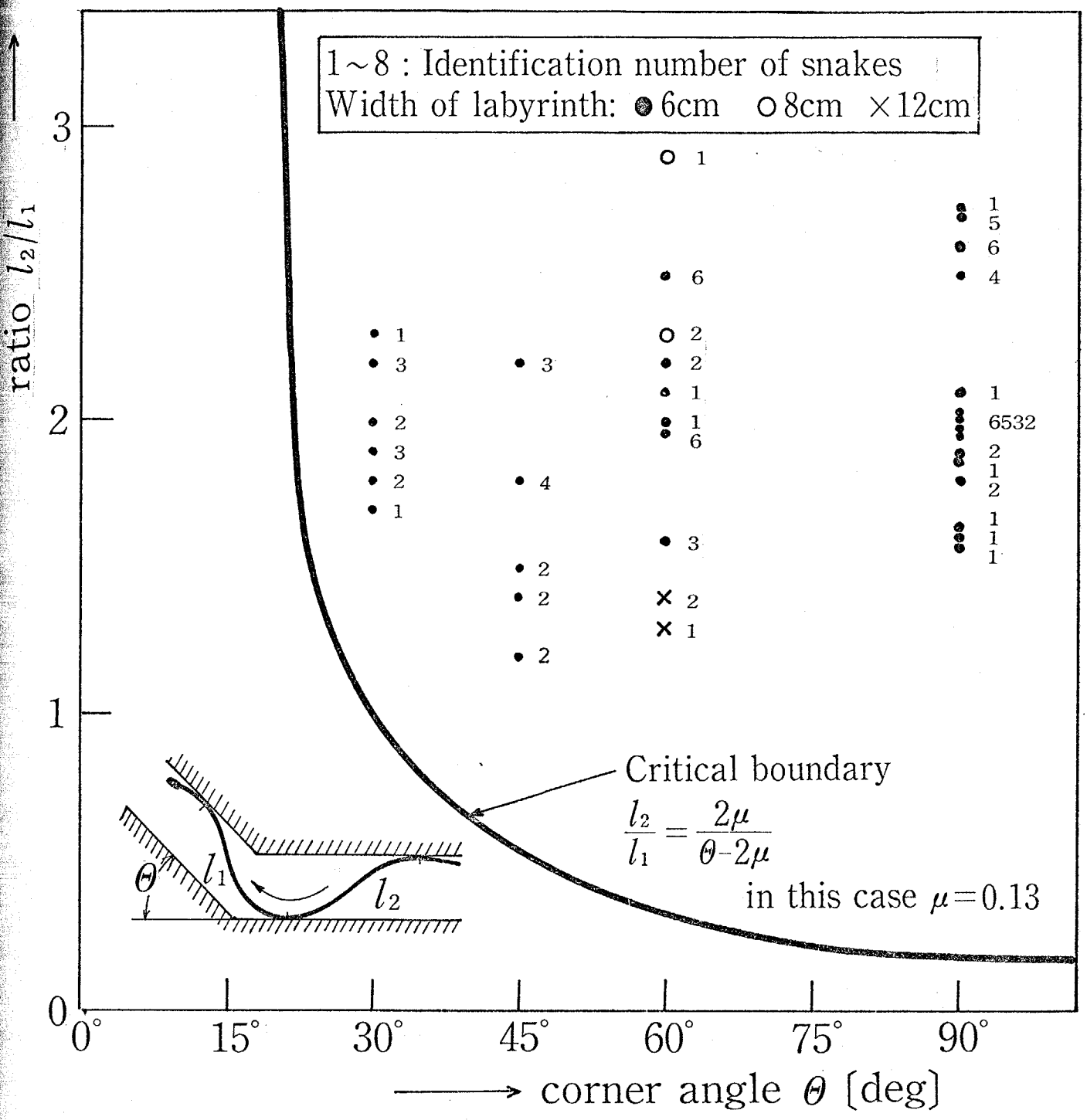


Fig. 6-6　迷路屈曲角 θ と体形 l_2/l_1 の関係

点およびその力の大きさが計測可能となっている．また床面には鋼球を敷きならべて，摩擦が十分小さくなるようにしてある．

実験は，このような迷路の屈折角度Ⓗを設定した後，迷路内にシマヘビを追い込み，その滑走体形を垂直上方に設置したモータードライブのカメラにより連続撮映した．Ⓗ＝45°のデータ例をFig.6-5に示す．データとして得られた8個体420フレームの滑走体形のうち，迷路への進入運動が定常状態になったと認められる36例について写真解析を行ない，迷路の屈折角Ⓗと滑走体形のパラメータ l_2/l_1 との関係を求めた．結果をまとめてFig.6-6に示す．Fig.6-6には壁面摩擦係数 $\mu=0.13$ である場合の(6-10)式に示す理論体形形状の領域境界線も示している．

以上の実験の結果，次のような知見が得られた．まず，Fig.6-6において迷路の屈折角Ⓗを変えて行なった滑走実験のすべての測定データが(6-10)式によって示される領域内にあり，また(6-10)式の領域内では早いほうく運動的ほど，その滑走体形（l_2/l_1）が領域限界線よりも大き目になる傾向が見られた．さらに，(6-10)式の領域限界線に近い屈折角Ⓗ＝25°の迷路での滑走実験では正常な迷路内ほふく推進を行なわなかった．以上のことから，結論として迷路内ほふく推進時には常に(6-10)式が満足されると考えてよいであろう．そして，このことからFig.6-2に示す4つの滑走体形のうちでは，(d)が最も妥当であるという力学的推論が動物実験的にも明らかにされたと思われる．

なお，本動物実験においては，迷路の幅を8 cmに固定しており迷路幅が滑走体形におよぼす影響は排除している．力学解析においては，ヘビ体幹の太さはゼロと仮定しており，迷路の幅が滑走力学に影響を及ぼすことはない．しかし，実際には体幹の太さ，脊椎骨の可能範囲等から当然迷路幅も滑走体形に影響を及ぼすものと考えるべきであろう．また，力学解析でゼロと仮定した床面摩擦係数も

動物実験では鋼球を用いることにより小さくはなっているが必ずしもゼロとはなっていない．以上のように本動物実験の力学的解析には，いくつかの今後に残された問題も存在するが，少なくとも迷路内ほふく推進の基本的な原理に関しては十分な検討がなされたと思われる．

6-7 本章の結論

ヘビ等のほふく運動の利点は，従来の人工移動機械や有脚動物でも踏破できなかったようざまな荒地環境を移動できるという点にある．本章では，荒地を代表する基本的な移動環境と考えられる等間隔の壁に囲まれた迷路での推進力等の解析を行ない次のような結論を得た．

迷路内ほふく推進において，その滑走効率を支配する因子は迷路内屈折部の内壁に接する3点間の体幹長さの比 l_2/l_1 であり，壁面に接していない体幹部の曲率分布等には影響されない．またこの因子 l_2/l_1 は迷路の環境パラメータ，つまり迷路屈折角 ㊥ と迷路壁面摩擦係数 μ に依存し，(6-10)式のような関係を有する．

この推論結果は，シマヘビを用いた動物実験によりその妥当性を確認した．以上の結果，始めに提起した Fig. 6-2 の4つの迷路内ほふく滑走体形のうちでは (d) の滑走体形が力学的にも最も望ましく，また実際のヘビの滑走体形としても良く観察されることが明らかになった．

本章における研究から，多様な環境内でのほふく推進の中でも，一つの基本的な移動環境である迷路内での基本的な滑走原理が明らかになったと考えられる．この知見は，ヘビ等のほふく動物に関する生物力学的知識を提供するものであると共に，索状能動体 (ACM) によって，効率よく荒地移動を行なわせるための重要な制御方針を与えるものであると考えている．

3,13)

第7章 ほふく運動の移動様式としての評価

7-1 まえがき

ほふく運動の移動様式としての有望性については第1章において定性的ながら述べた．そして第3章から第7章にわたってほふく運動の力学的諸特性も明らかにした．しかし，ほふく運動のより全般的な理解には，移動エネルギ的な立場からの検討も必要であると思われる．また，ほふく運動の移動様式としての評価を行ない，その原理に準拠しつつ人工ほふく推進機械を設計していくためにも，移動エネルギは客観的かつ定量的な評価基準となり得るであろう．

そこで本章では，移動様式の評価基準として「移動仕事率」を導入する．そして，この評価基準を基にほふく運動の移動様式を他の人工移動機械そして生物の移動様式，特に2足歩行などと比較・吟味し，その移動様式としての有望性を定量的に明らかにする．

7-2 移動様式の評価基準

生物界にみられる移動様式は実に多様であり，水中，水上，地上，空中などのほとんどすべての地球上の環境に適応した種々の移動様式が観察される．一方，人工の移動機械も，今日では潜水艇，船，自動車，飛行機などの，水中，水上，地上，空中などを移動する移動様式のほかに，生物界の移動環境としては使用されたことのなかった near surface を移動するホーバークラフトまでもが開発され実用化されている．

これらの移動様式の相互の比較を行ない一般的かつ矛盾のない優劣の評価を行なうことは興味あることであり，また今後の移動機械の開発にも示唆する所が大きいと考えられる．しかし，それらの移動様式としての多様性のために評価の基準の決定が困難であり，定

全な比較検討を行なうのは不可能であろう。そこで，ここではその評価基準として移動時のエネルギ消費のみを考慮することによって簡単化し比較可能にする。この単純化のために確かに評価は一面的になるが，移動という問題に対するエネルギ消費の重要性を考えればこのような評価基準によってもいくつかの本質的な知見が得られるものと考えられる。

このような意味での移動様式の評価関数としては，すでに B. G. Gobrielle と von Karman とによって提唱された評価関数 ε[45,48] がある。これは specific power* (以後，移動仕事率と呼ぶことにする) と呼ばれ

$$\varepsilon \equiv \frac{E}{W\ell} = \frac{P}{W\bar{V}} \qquad (7\text{-}1)$$

と定義される。ただし，E：移動時に消費するエネルギ，W：移動体の重量，ℓ：移動距離，P：移動時の消費パワー，$\bar{V}$：移動速度である。つまり，この ε の物理的意味は

“単位重量のものを単位の距離移動させるために必要なエネルギ”

ということができる。ここで移動仕事率 ε は無次元量である。

なお，移動仕事率以外の移動様式の評価基準としては M. G. Bekker[46] によって使用された移動パワー率がある。これは $P/W\ (=E/W\ell)$ と定義されるものであり物理的には“単位重量のものを単位時間移動させるためのエネルギ”という意味になる。しかし，移動というものは空間的に物体の存在位置が変化するものでなくてはその意味がない。位置を変えずにエネルギを消費している物体と，位置を変えながらエネルギ消費を行なう移動体の評価が同じになる場合がある。この移動パワー率という評価基準は移動運動を評価するには不適当であるというべきだろう。よって本研究では今後 (7-1) 式で示す

---

* 文献 48) では specific resistance，specific tractive force はともに呼ばれている。

移動仕事率 ε を評価基準として用いる。

この移動仕事率 ε は，移動体としての重量をいかに重めるかという点に大きなあいまいさを有するが，移動体のエネルギ的移動能力を単純な形ながらよく示す評価関数であると考えられる。

この移動仕事率 ε の意味を明らかにするために，つぎにいくつかの移動様式について簡単な考察を行ない，それらの ε を求めておく。

i) 跳躍（たとえば，ノミ，カエル，バッタなど）

1回の跳躍ではじめの全運動エネルギーが消費されると考えると，ε は次のように示される。

$$\varepsilon = \frac{1}{2\sin 2\theta} \tag{7-2}$$

つまり，跳躍角 $\theta = 45^\circ$ のとき $\varepsilon = 0.5$ の最小エネルギで移動できることがわかる。

ii) 疾走（たとえば，カンガルーなどの草原動物）

1回の跳躍と垂直方向のみの運動エネルギが消費され，水平方向運動エネルギは保存されると考えると，ε はつぎのように示される。

$$\varepsilon = \frac{\tan\theta}{4} \tag{7-3}$$

つまり，跳躍角 θ は小さいほどエネルギ消費が小さいこと，またたとえば $\theta = 45^\circ$ だと $\varepsilon = 0.25$ であることなどがわかる。

以上の，i)，ii)においては簡単のため下肢系の往復運動エネルギ消費，筋肉内部のエネルギ消費，空気との摩擦エネルギ消費などは考慮していないが，それでそれぞれの移動様式の基本的な特徴が示されていると思われる。なお，摩擦係数 μ の平面上で物体を牽引するときの移動仕事率 ε は，移動エネルギ E が $E = \mu W l$ であることから

$$\varepsilon = \mu \tag{7-4}$$

と簡単に示されることも付記する。

このような，移動仕事率εは，いままで主として人工の移動機械の性能比較に用いられてきた．Fig.7-1は1950年にGabrielleとvon Karman[45]がいくつかの種類の移動機械（たとえばSUBS：潜水艇，JETS：ジェット機など）についての大量の公称値から移動速度に対する移動仕事率εの最小値をもとめ，その下限境界線を引いて作った図を，さらに1962年Park[48]が改善したものである*．ここでGabrielle－von Karman Lineは1950年に調査された段階での人工移動機械の全体としてのε下限であり，これはまとして移動機械の材料強度によって決まる一種の性能限界線である．また，この1962年での状態はstate of the art in 1962に示されており，技術革新を反映して低くなっている．このFig.7-1からたとえばホーバークラフトの移動機械としての位置づけなど，いくつかの興味ある知見がえられる[48]．

本研究では，このGabrielle－von Karman Diagramをはふく運動を他の移動様式と比較吟味するための一種の既知座標系として利用することにする．

7-3 はふく運動の移動仕事率ε_{snake}の誘導

Gabrielle－von Karman Diagram上ではふく運動の特徴を示すために，はふく運動の移動仕事率ε_{snake}を誘導する．

はふく運動時に消費されるエネルギとしては

i) 腹板と地面との摩擦によるエネルギ消費 E_f

ii) 体幹のくねり往復運動に消費されるエネルギ E_k

iii) 筋肉内部での粘性抵抗により消費されるエネルギ

iv) 空気抵抗による消費エネルギ

---

* ここでanimal locomotionとoff-road vehicleの下限包絡境界線は後にBekker[46]が付記したものである．

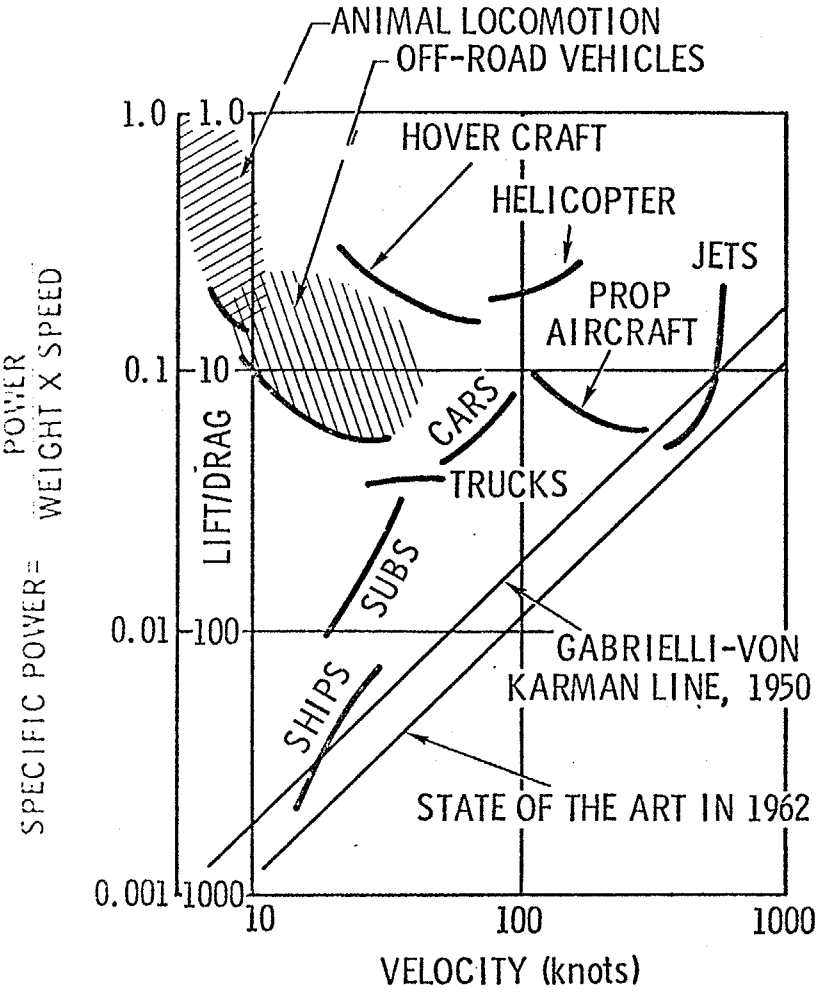


Fig. 7-1 Gabrielli-von Karman Diagram[48]

などであろう．以下，これらのエネルギ消費についてそれぞれ考察を加える．

i)の摩擦エネルギ消費 E_f を求める．定常ほふく滑走の力学解析は，すでに第4章で述べたように定常滑走体形の対称性から，1/4周期（OP間，Fig. 7-2 参照）について行なえば十分であり，全体幹に拡張できる．よってOP間での E_f を求めること

$$E_f = \mu_t l \int_0^l w\, ds = \mu_t W_{OP} \tag{7-5}$$

となる．ただし，l：OP間の体幹距離，W_{OP}：OP間の体重，μ_t：接線方向摩擦係数，w：単位長さ当りの体重である．

ii)の運動エネルギ消費 E_k は，Fig. 7-2 のように0点で体幹が有していた x, y 方向の速度がP点まで変化することから，E_{kx}, E_{ky} をそれぞれ x 方向および y 方向のOP間でのエネルギ消費とすると

$$\begin{aligned} E_k &= E_{kx} + E_{ky} \\ &= \frac{1}{2}\int_0^l \left(\frac{w}{g}\right) ds \left| v^2 - v^2\cos^2\alpha \right| + \frac{1}{2}\int_0^l \left(\frac{w}{g}\right) ds \left| v^2 \sin^2\alpha \right| \end{aligned}$$

$$\therefore E_k = \frac{W_{OP}}{g} \sin^2\alpha\, v^2 \tag{7-6}$$

である．ただし，g は重力加速度，v は体軸方向の移動速度である．

iii)の筋肉内部でのエネルギ消費は，移動様式自体よりはアクチュエータとして筋肉の特性に起因すると考えられるため，移動様式の特徴を議論する本研究においては無視することにする．

iv)の空気摩擦エネルギ消費は，ほふく運動が比較的低速領域の移動様式であり，しかも進行方向への移動体投影断面積が非常に小さいという特性があることから無視する．

以上のことから，ほふく運動時のOP間でのエネルギ消費は $E_f + E_k$ であると言える．一方，体幹距離OP（長さ l）の推進を行なったとき全体としての移動方向（x 軸方向）への移動距離は

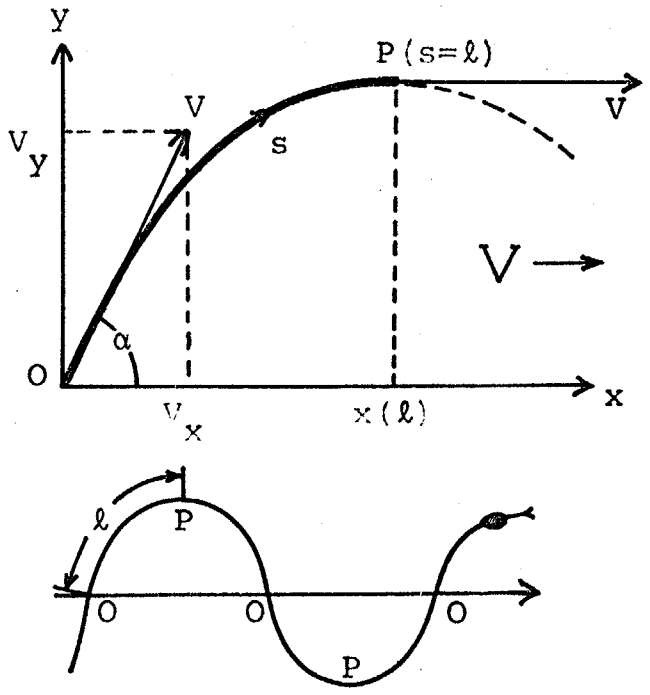


Fig. 7-2　定常ほふく運動中の体軸速度

$x(l)$であり，OP間の体重がW_{op}であることから(7-1)式より，ほふく運動の移動仕事率ε_{snake}は

$$\varepsilon_{snake}=\frac{E_f+E_k}{x(l)W_{op}}=\frac{l}{x(l)}\left\{\mu_t+\frac{\sin^2\alpha}{gl}v^2\right\} \tag{7-7}$$

である．ここで，$l/x(l)$は第5章において定義した「行程比」の逆数であり，滑走体形曲線をserpenoid curveで近似した場合には，(5-12)式のように第1種Bessel関数で示される．よって(7-7)式は推進方向の速度V $(=J_0(\alpha)v)$によってつぎのように示される．

$$\varepsilon_{snake}=\frac{1}{J_0(\alpha)}\left(\mu_t+\frac{\sin^2\alpha\, V^2}{lg\,J_0^2(\alpha)}\right) \tag{7-8}$$

上式(7-8)がほふく運動の移動仕事率ε_{snake}を示す式である．

(7-8)式から，ほふく滑走体形が移動時のエネルギ消費におよぼす影響をいくつか抽出することができる．つまり，くねり角αは小さいほど，またくねりの大きさlは大きいほどエネルギ消費は小さくなる．これらのα，l等の体形パラメータの適応原理についてはすでに第5章において論じているため改めてそれらと比較検討を行なう。まずαについては，滑走方向への滑走速度の最大化という立場から，αは滑走面の摩擦条件内に許容される範囲で小さくとるべきことというα適応則が誘導されている．これは(7-8)式からのエネルギ消費最小化の立場とも一致している。一方，くねりの大きさlについては，ほふく運動中にアクチュエータとしての筋肉が最大パワー発生状態を維持するという立場ではある最適値が存在し，常にその最適値を保持しながらほふく運動を続けるというl適応則を得ている。このl適応則は(7-8)式からのエネルギ消費最小化の立場から求まった結論，つまりlは大きいほど望ましいという傾向と異なる．しかし，実は第5-4-4節において述べているように，筋肉の一般的特性値を使用して計算した最大パワー発生時のlの推定値は，シマヘビの滑走体形から得られた実測値より全般的に小さくな

っている．このことからℓの決定には筋肉の最大パワー発生という評価基準とエネルギ消費最小化という評価基準の両者への適応が同時に行なわれているという考え方も可能であろう．

最大速度の移動条件，エネルギ消費最小化条件，そしてアクチュエータとしての筋肉の特性とほふく運動という移動様式の特性等すべてを考慮した総合的な滑走体形の適応原理を求めることは今後に残された重要な問題である．

以下（7-8）式によって求まる ε_{snake} をGabrielle-von Karman Diagram上に書き込むために，i）実際のヘビ，およびii）第8章において論ずる試作移動機械モデルの具体的なデータを使用して ε_{snake} の数値解を求める．

i）シマヘビ（*Elaphe Quadrivirgata*）の場合

人工芝生上では $\mu_t = 0.46$ であり serpenoid curve で滑走している場合には $\mu_n = 0.83$ と考えるのが妥当である（第5-3-4節参照）．ただし，この場合くねり角 $\alpha = 50°$ としている．またくねりの大きさ $\ell = 12.5$ cm の典型的な例を考える場合には

$$\varepsilon_{snake} = 0.554 + 2.71\left(\frac{V}{10}\right)^2 \qquad (7\text{-}9)$$

となる．ただし速度Vの単位は km/hr である．

ii）人工ほふく推進機械モデルの場合

試作した機械モデルの場合，第8章で述べるようにキャスターを用いているため μ_t/μ_n が小さい．上述のヘビと同じ人工芝生上では $\mu_t = 0.16$，$\mu_n = 0.79$ である．* よってこのときの許容最適くねり角は $\alpha = 12°$，また $\ell = 50$ cm とすると

$$\varepsilon_{snake} = 0.160 + 3.4\left(\frac{V}{100}\right)^2 \qquad (7\text{-}10)$$

---

* リノリューム板上では $\mu_t = 0.034$，$\mu_n = 0.561$ である．

となる．ただし速度 V の単位は km/h である．

7-4 2足歩行の移動仕事率 ε_{walk} の誘導

ほふく運動の移動仕事率 ε_{snake} の特徴をより明らかにするために，ほふく運動と同じく生物界に観察され，対地適応性のある2足歩行についてその移動仕事率 ε_{walk} を誘導し，比較検討の対象とすることにする．

7-4-1 2足歩行時のエネルギ消費に関する従来の研究

人間の歩行時のエネルギ消費については，すでに多くの研究者によって実測あるいは理論的な考察がなされている．主としてRalstonの論文[49]にしたがってそれらの論文を以下年代順に示す．

1) Passmore & Durnin (1955)[50]

歩行の速度範囲 50～100 meter/min の間につぎの関係が成り立つとしている．

$$P = b + mV^2 \qquad (7\text{-}11)$$

ただし，P は dE/dt でパワーを示す．b, m は定数，V は歩行速度である．

2) Bresler, Radcliffe & Berry (1957)[51]

彼らは(7-11)式について，歩行者のエネルギ消費という問題に運動エネルギによる V^2 の項が入るのは力学的に正しいとして(7-11)式を支持している．

しかし，V^2 の関数であるものはエネルギ E であり，パワー dE/dt は V^2 の関数であるとはいえない．筆者は，足の運動によるパワーの消費については後に示すRashevsky のごとく V^3 の関数であるという考え方が力学的にも正しいと考えている．よって(7-11)式を支持する考え方は再検討を要するという見解をとっている．

3) Cotes, Meade & Wise (1957, 1960)[52]

歩行時の酸素消費量の測定値から彼も(7-11)式の形の実験式を

支持し，その力学的説明を歩行時の重心の上下動に求めている．しかし，筆者は重心の上下動によるエネルギ消費量は後にRashevskyが主張しているごとくVの関数であると考えており，重心の上下動だけで(7-11)式のようなV^2の項が生ずるという主張は正しくないと考えている．

4) Ralston (1958)[49]

19人の被験者により広い測定範囲にわたって組織的にエネルギ消費と歩行速度との関係を調べている．本論文においてはその実験データはそのまま使用したが，その実験式はそれまでの考え方と踏襲してつぎのように示している．

$$P = 29 + 0.0053 V^2 \ \mathrm{cal/min\,kg} \qquad (7\text{-}12)$$

しかし，この式はすでに2)で述べた理由により妥当でないと思われる．

5) Rashevsky (1962)[53]

実験的な検証は行なっていないが，数理生物学の立場から歩行を解析し，まず歩行時の重心の上下動による消費パワーP_PはFig. 7-4において$\sin\theta \simeq u/2r$，よって$\Delta r = r(1-\cos\theta) \simeq u^2/8r$であることを使用すると

$$P_P = \frac{Mg\Delta r}{(u/r)} = Mg\left(\frac{u}{8r}\right)V \qquad (7\text{-}13)$$

であること（M：体重，m：下肢重量），また定の往復運動による消費パワーを考慮することにより歩行時の消費パワーPは結局

$$P = Mg\left(\frac{u}{r}\right)V + \left(\frac{m}{8u}\right)V^3 \qquad (7\text{-}14)$$

と示されるとしている．この理論式においては静止時の基礎代謝，脚の往復運動時の共振現象，筋肉の粘性抵抗などについての考察が含まれていないが，理論体系としては妥当であり，次節の筆者の考える歩行エネルギ解析と基本的に一致するものである．

6) Beckett & Kurng Chang (1967)[54]

Nabor & Contini[55]が示した手法を用いて下肢系のかなり実際的なモデルを作り，歩行時1ステップに必要とするエネルギを数値的に示した．この結果はその手法の複雑さのために消費パワーPと歩行速度Vの関数関係は簡単な形では示されていないが，数値解から明らかに$P \propto V^3$を示唆していることが認められる．

7) 品川ら (1967; 1968)[58]

50～150 m/min ほどの歩行速度範囲において歩行時消費パワーに相当するエネルギ代謝率（EMR）を測定し，そのデータから最小自乗法によって

$$P(\propto EMR) = K_1 V^2 + K_2 V^3 + K_3 V^4 + \cdots \qquad (7\text{-}15)$$

の形の実験式を導いている．しかし，この理論的根拠としてHillによる筋肉の特性方程式を使用している点に根本的な再検討が必要であると思われる．

以上，2足歩行時のエネルギ消費についてのいくつかの論文を示したが，実測したデータとよく合い，しかも実測できない高速度の歩行などにも拡張可能な実験式として使用できる関係式はいまだなかったと考えられる．そこで，次節では力学的に妥当な見解に基づいて解析を行ない，その結果を使用して2足歩行の移動仕事率ε_{walk}をもめる．

7-4-2 新しく提案する2足歩行の移動仕事率 ε_{walk}

まず，歩行時のパワー消費の原因となる主要な因子を掲げてみる．それらは

i) 起立姿勢での基本代謝および歩行に必要な重心制御に消費するパワー P_s，

ii) 歩行時の重心の上下動によって消費するパワー P_p，

iii) 脚の前進方向の往復運動により消費するパワー P_k，

iv) 筋肉内部での粘性摩擦により消費されるパワー

iv) 空気抵抗による消費パワー

などであろう．以下，これらの因子についてそれぞれ考察を加える．

i)の消費パワーは実験的に求める以外にない．Ralston[49]の実験によると，この値は単に起立姿勢を保つのに必要とするパワー 21.2 cal/min kg よりは大きく，平衡を保ちながらできるだけゆっくり前進するときの消費パワーに近い 29 cal/min kg であるとしている．ここでは仮に $P_s \equiv a = 29$ cal/min kg としておく．

ii)の重心上下動消費パワーは Rashevsky のモデルに準拠して(7-13)式を使用する．

iii)の往復運動消費パワーは下肢系を簡単に Fig. 7-3 のように Hip で強制振動を行なう振動系にモデル化して解析を行なう．この下肢系モデルの運動方程式をたてると，

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = M \sin \omega t \qquad (7\text{-}16)$$

となる．ただし，I：脚の慣性モーメント，Fig. 7-4 のモデルは棒状のため $(1/3)ml^2$ である．C：脚の筋肉粘性抵抗，ここでは $C=0$ と考える．K：重力および筋肉弾性による復元力，ここでは重力の影響のみを考える．M：脚の筋肉が発生するトルクの最大値，ω：Hip まわりの強制振動の円振数である．この(7-16)式の下肢強制振動系において，下肢が 1 cycle の動きをする間の必要エネルギ E_K を

$$E_K = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} |\text{回転トルク}| \cdot |\text{角速度}| \, dt \qquad (7\text{-}17)$$

であると考え，また定常の振幅角 θ と歩幅 u との間に $\sin\theta = u/2\gamma$ の関係があることから

$$P_k = \frac{1}{4} mg \left(\frac{u}{\gamma}\right) \left| 1 - \frac{8\pi^2}{3} \left(\frac{u}{u_0}\right) V^2 \right| V \qquad (7\text{-}18)$$

と求まる．なお(7-18)式から歩行時共振速度 V_0 は

$$V_0 = \sqrt{\frac{3}{8\pi^2} \frac{u^2 g}{\gamma}} \qquad (7\text{-}19)$$

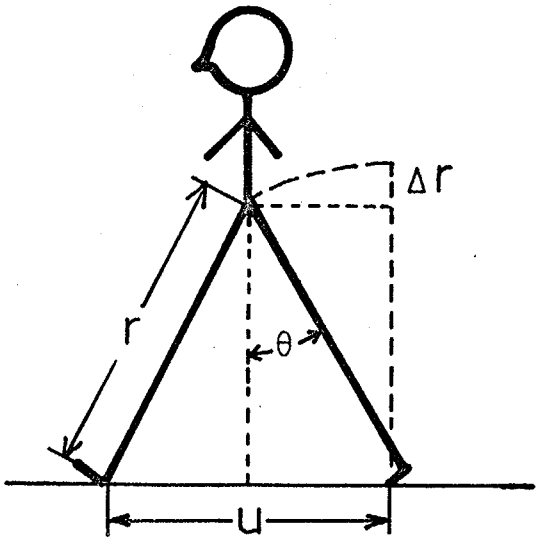


Fig. 7-3　2足歩行体形のモデル

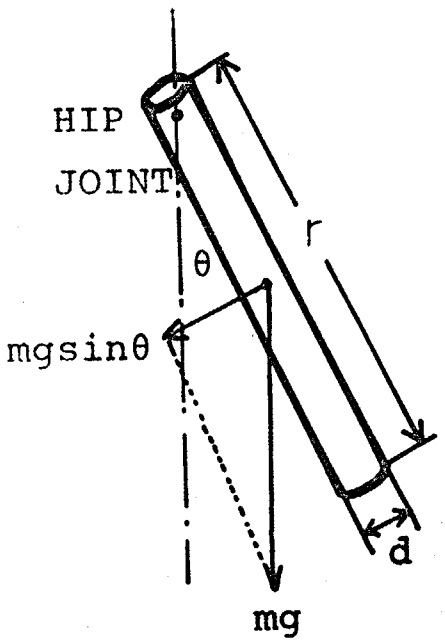


Fig. 7-4　歩行下肢系の剛体モデル

であることもわかる．

iv) および v) については 7-3 節と同様に無視する．

以上の考察から歩行時の主要な消費パワーがすべて定式化された．よって歩行時の移動仕事率 ε_{walk} は $\varepsilon_{walk} = (P_s + P_p + P_k)/Mg \cdot V$，から求まりつぎのように示される．

$$\varepsilon_{walk} = \left(\frac{a}{Mg}\right)\frac{1}{V} + \left(\frac{S}{80}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{m}{M}\right)\left(\frac{S}{l}\right)\left|1 - \frac{8\pi^2}{3}\left(\frac{l}{s^2 g}\right)V^2\right| \qquad (7\text{-}20)$$

つぎに，(7-20)式のように定式化された ε_{walk} の数値解を具体的に求める．使用するモデル数値は，文献 59) において使用している値と同じとする．つまり，円筒形と仮定した下肢の長さ $l = 90\,cm$，直径 $d = 12\,cm$ としその単一密度 $\rho = 1.1\,g/cm^3$ とする．よって，下肢重量 $mg = 11.5\,kg$ である．また体重 $Mg = 70\,kg$ とし，歩幅は歩行速度の関数であるが，ここでは簡単に $S = 75\,cm$ に固定しておく．以上の数値を (7-20) 式に代入し，速度 V の単位を km/hr とすると，ε_{walk} はつぎのように示される．

$$\varepsilon_{walk} = \frac{0.743}{V} + 0.1041 + 0.0113\left|V^2 - 3.02\right| \qquad (7\text{-}21)$$

この (7-21) 式で示される ε_{walk} が実際の歩行時の実測値と一致するかを次に調べる．

Fig. 7-5 は Ralston が示した P/W (つまり $\varepsilon \cdot V$) と V の関係図を単位系を変えて P/W [km/hr] と V [km/hr] との関係に書き直したものである．この Fig. 7-5 に (7-21) 式を書き込むと一点鎖線で示すような曲線になる．実測データと (7-21) 式の曲線とを比較すると低速での歩行時には (7-21) 式で求めた理論式は実測値によく一致するが，歩行速度が早くなるに従って，その誤差が大きくなっている．*

---

* Fig. 7-6 で理論曲線 (実線) が $V = 1.7\,km/hr$ 程度で折れて滑らかでないが，これは脚の共振点に相当し (7-18) 式で絶対値内の符号が変わるためである．

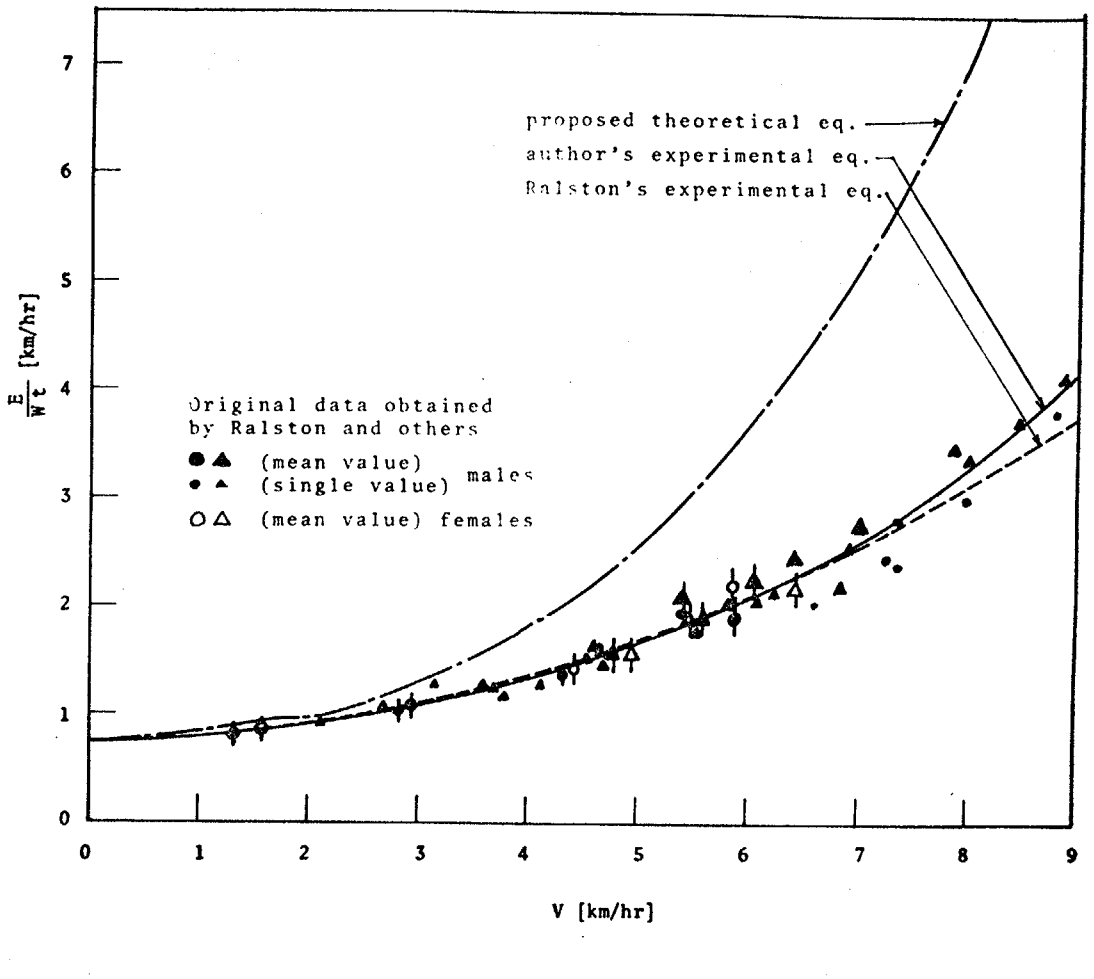


Fig. 7-5　歩行時エネルギ消費データと理論曲線

この誤差の最大の原因は下肢系をFig. 7-4のような簡単な剛体円柱によるモデル化を行なったことにあると思われる．つまり，実際の下肢ではひざ関節をもち，遊脚相にあるときは，ひざを折り曲げて膝まわりの慣性モーメントを減らして脚を前に出すという一種の"早もとし機構"を有しているという点ではるかに往往運動エネルギ消費を $V > V_0$（歩行時下肢共振歩行速度）の範囲で減少させていると考えられる．このことは同時に歩行の経済速度にも影響を与えている．(7-21)式で歩行経済速度は ε_{walk} の最小値，つまり $d\varepsilon_{walk}/dV=0$ から求まり，$V \simeq 3.2$ km/hr であるが，これはモデル化の単純さのために実際の経済歩行速度と考えられている4 km/hrよりも小さくなっている（なお，下肢共振歩行速度 V_0 は $V_0=1.7$ km/hr であり，歩行経済速度とは必ずしも一致しない．つまり，歩行経済速度は下肢の共振現象よりはむしろ P_s つまり足首等での基本代謝および歩行に必要な筋代謝以外に消費するパワーの影響が大きいということがわかった）．よって，今後実際の下肢系により近いモデルを使用して力学解析を行ないより実測データに近い理論式を誘導する必要があるが本研究では行なわない．ただし，そのような精密な力学解析によって求めた ε_{walk} の理論式も原理的には(7-21)式の係数値のみが変ったものであると考えられる．よって，(7-21)式において $V > V_0$ の範囲を考え第1項（これはモデルに関係なく一定）以外の係数を未定係数として Fig. 7-5 の実測データから最小二乗法によって実験式を誘導すると歩行の移動仕事率 ε_{walk} はつぎのように求まる．

$$\varepsilon_{walk} = \frac{0.743}{V} + 0.094 + 0.0035\,V^2 \qquad (7\text{-}22)$$

つまり，この(7-22)式は今後より実際的な下肢系モデルによって力学解析を行なったときに期待される理論式であるが，現在の段階ではいまだ予備式である．しかし，いずれにしろ(7-22)式が2足歩行についてその移動仕事率 ε_{walk} を示す式の中では一番信頼できる式

であると考えられるので次節のほふく運動との比較にはこの(7-22)式を使用する。Fig. 7-5には(7-22)式を実線で示す。なお(7-22)式においては ε_{walk} が最小の歩行速度，つまり経済歩行速度は 4.7 km/hr となる。

7-5 ほふく運動と他の移動様式（2足歩行）との移動仕事率 ε による比較

Fig. 7-6 に Fig. 7-1 の速度単位を [km/hr] に変え，ヘビと2足歩行の移動仕事率を示す曲線を書き込んだものを示す。この Fig. 7-6 より，まずほふく運動自体についてはつぎのようなものがわかる。

i) 材械モデルおよび実際のヘビの ε_{snake} を比較してみると，ε の値は全速度範囲にわたって材械モデルの方が小さくなっていることがわかる。この原因は材械モデルでは接線方向の摩擦係数 μ_t が回転摩擦のために大変小さく，法線方向摩擦係数 μ_n の大きなキャスタ（車輪）を滑走部に使用しているためである。実際のヘビではこの点，μ_n を腹部体側のエッジング効果で大きく保ち，μ_t は腹板を滑らかな鱗でおおうことにより小さくするようにしているが，この μ_t の減少化はすべり摩擦である以上限度がある。

よって，ほふく運動においては，腹板を滑走面に摩擦させながら引きずって前進するという点が，滑走時の力学的安定性などをもたらしている最大の原因である半面，エネルギ的側面での本質的な欠陥となり，実際のヘビの移動仕事率 ε_{snake} を大きくしている最大の原因と考えられること，そして，この点は材械モデルではキャスタを使用したことにより改善されたことがわかった。

なお，さらに能率のよいほふく推進材械は，μ_t が非常に小さく μ_n を大きくすることのできる雪上でのスキーあるいは氷上でのソリ等の滑走面を利用することにより実現できるのではないだろうか。変温動物にはヘビは極地には適応できていない。しかしこのよう

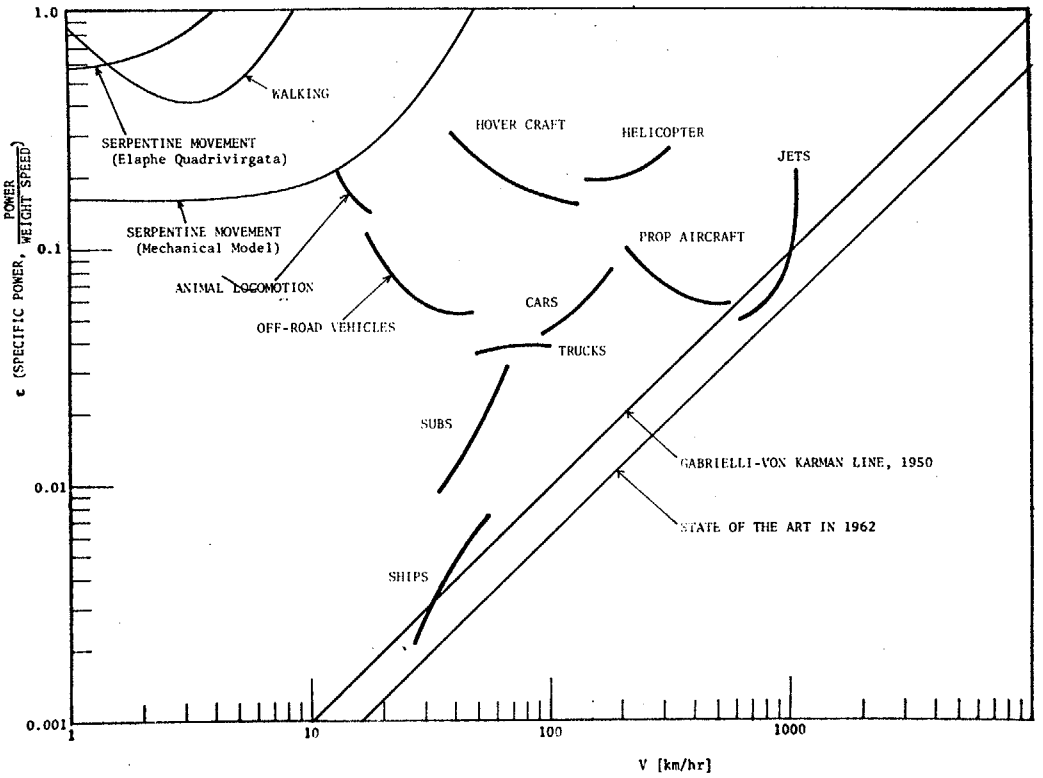


Fig. 7-6 Gabrielli-von Karman Diagram[45]

(ほふく運動および2足歩行の性能曲線も同時に示す)

な生理学的な制約を持たない人工ほふく推進機械にとっては冷寒地こそその特性を発揮できる望ましい環境といえるだろう．

また，ほふく運動と2足歩行とを比較すると，つぎのようなことがわかる．

ii) 2足歩行にはEを最小にする速度つまり経済速度が存在するのに対して，ほふく運動には存在しない．これは2足歩行では，起立姿勢での基本代謝および歩行に必要な重心制御に消費するパワー P_s を必要とするのに対し，ほふく運動では微小であるということが主な原因である．また高速度領域において実際のヘビの ε_{snake} が2足歩行の ε_{walk} よりはるかに大きい．つまりエネルギ効率が悪いが，これはヘビ類の中での実測最高速度が6km/hr程度であり，普通は緩慢にしか動く必要がないことを裏書きすることになるであろう．

最後にほふく運動を他の人工移動機械と比較すると，つぎのようなことがわかる．

iii) ほふく推進様式と同様に，人工移動機械の中で荒地などの移動に適し，いわゆるoff-road vehiclesの一つと考えられるホーバークラフトと，試作したほふく推進機械とを比較すると，このほふく推進機械はホーバークラフトが経済的に運航できない低速領域を満たす位置にあることがわかる．つまり，ほふく推進様式はホーバークラフトのように常に地面から浮き上ることによって対地適応性の高さを生じているのではなく，この点が低速度領域でのほふく推進様式の経済性につながるものと思われる．

以上，ほふく推進様式を2足歩行およびその他の移動機械と比較することにより，ほふく運動の移動エネルギ的側面からの特徴を明らかにした．なお，本研究ではほふく運動，2足歩行とも平坦地でのデータを基にしているが，実はこれらの生物形の移動様式の特徴はいわゆる荒地において真に発揮される．荒地における移動性能の高さを評価するには移動エネルギ的側面以外の評価基準を導入する

必要があり，その客観的評価は必ずしも容易でない．しかし，その総合的な他基準による比較により人工ほふく推進装置の移動様式としての特異性はさらに明瞭に浮び上ると思われる．このような総合的評価を行なうことは今後に残された問題点であり，本章はそのための第1歩を示すものであるといえよう．

7-6 本章の結論

本章において得られた結論はつぎのようである．

i) ほふく運動，2足歩行，車輪走行などの移動様式の，移動に要するエネルギという観点からの評価基準としては(7-1)式で定義される移動仕事率εが妥当である．

ii) ほふく運動の移動仕事率ε_{snake}は(7-8)式のように示される．そして(7-8)式から滑走体形，つまりくねり角α，くねりの大きさℓ，滑走速度V，さらに対地接触面の接線方向および法線方向の摩擦係数μ_t，μ_nなどが滑走時エネルギ効率に及ぼす影響が定量的に明らかになった．

iii) 2足歩行のエネルギ的解析は従来かなりなされているが2足歩行の移動仕事率ε_{walk}を導くには不十分であった．そのため新たに2足歩行の解析を行ない，移動仕事率ε_{walk}を(7-20)式のように誘導した．なお，(7-20)式に具体的に数値を代入して解析を行なうことにより，歩行経済速度というものは，脚の振動の共振現象に依存するのではないこと．起立姿勢での基本代謝および歩行時重心制御に必要なエネルギと脚の往復運動による動的エネルギ消費の両者の相対関係に主として影響されるものである．ということがわかった．

iv) Fig. 7-6に示すGabrielle-von Karman Diagram上でほふく運動の移動仕事率ε_{snake}を他の移動様式のそれと比較を行なった所，まず，ほふく運動の特異性を生ずる主因である腹部を滑走中地表に常

に接して推進を行なうという点が同時にほふく運動のエネルギ効率を低下させる原因になっていること．しかし，この点は人工ほふく推進機械の場合には，キャスター，ソリ等の滑走手段を用いることによって改善できること．また，定歩行には経済速度があるのに対し，ほふく運動では起立姿勢保持，重心制御などのエネルギ消費がないため低速領域になるほどエネルギ効率がよいこと．ほふく型移動機械に近い応用面に位置すると思われるホーバークラフトと比較すると，ほふく推進機械がホーバークラフトでは経済的に運航できない低速度領域において有利なoff-road vehicleになりうるなどの特徴を抽出することができた．

本章における考察からACMをほふく推進機械として使用する際のエネルギ効率，そして他の移動様式の中における位置付けなどを行なうことが可能になったと思われる．

第8章　索状能動体機械モデルによる人工ほふく運動[6,12]

8-1　まえがき

本章においては，いよいよほふく運動に関する前章までの生物力学的な知識を基に，人工ほふく推進機械を構成するためのいくつかの問題点を論ずる．

本章においては，人工ほふく推進機械の i) 運動機構，ii) 駆動力学，iii) 運動制御法，iv) 操縦法などの基本的な項目を論じ，ついで試作した人工ほふく推進機械の性能について述べている．これらの知見から，

i)　ほふく運動に関する前章までの解析結果は，動物実験によりそのつど検証を行なってきたが，本章ではさらにそれらを総合して人工ほふく運動を実現することによりanalysis by synthesisの立場での再確認を行なう．合わせて，ほふく運動に関するより深い理解を得る，

ii)　人工ほふく推進機械の実現可能性，工学的応用の際の特性，長所，短所などを実証的に明らかにする，

iii)　索状能動体（ACM）の工学的応用を開拓していくためのプロトタイプを示すと共に，今後の発展のための橋頭堡を確保する，

等の位置づけを行なえると考えている．

8-2　人工ほふく推進機械の機構

ほふく運動を実現する上で，推進体腹部と地面とのすべり摩擦特性は重要な意味を持っている．つまり，推進方向にはすべりやすく（体幹接線方向の摩擦係数 μ_t が小），横すべりしにくい（法線方向摩擦係数 μ_n が大），つまり摩擦係数比 μ_t/μ_n が小さいという性質が必要なことはすでに第4章において理論的に明らかにしている．

ヘビの場合には，なめらかな腹板とスキーのエッジのごとき体側部形状を用いて地表の凹凸をとらうることにより，この特性を得ている．このようなスキー形もしくはソリ形の対地接触面は，人工ほふ推進機械に利用するには，湿地・雪原などの柔軟地もしくは氷上での滑走を目的とする場合には有効である．しかし，硬平地においては車輪型のころがり対偶によって摩擦係数比 μ_t/μ_n を小さく保つのがエネルギ効率もたく妥当であると思われる．

人工ほふく推進機械の体幹は索状能動機構である．索状能動機構を実際に構成するには，屈曲運動を行なう働作単位と索状直列に結合した機構が妥当である．これは，ヘビ体幹が200~400節の脊椎骨とそれに付属する拮抗筋群からなる筋骨格系であることと対応している．なお，自然界にはこのほかに無脊動物，たとえばタコの足などのように骨格がなく連続的に屈曲運動を行なう索状能動体も存在している．しかし，これらもいわゆる水力的骨格[64]を有していると考えられることから，脊椎動物の筋骨格系と等価と考うることができ，上述の索状能動機構は最も直截な生物機構のモデルであるということができるであろう．

体幹部をこのような機構としたときの問題点の一つは，一つの働作器（リンクーアクチュエータ系）の小型化には限度があるため，なめらかな滑走を行なわせようとするとき，離散的機構に起因する一種のサンプリング誤差が避けられない点である．この誤差による滑走効率の低下を防ぐには，機構的には，たとえば働作器ごとの対地接触部の進行方向を連続的な滑走曲線にできるだけ一致させるようなメカニズムの導入などを行う必要がある．

働作器単位のアクチュエータが必要とする出力パワーは以下のようにもめうる．ほふく推進時の推進力と働作器単位のアクチュエータ最大出力 T_{max} の関係をまず求める．(4-11)式から，ほふく体形の1/4周期（OP間）の体幹に働く推進力 F_{top} は0点部のアクチュエ

ータが生ずる最大トルク T_0 によって次のように示される．

$$F_{top} = \sigma\, Serp(\sigma)\, \frac{\alpha}{\ell}\, T_0 \qquad (8\text{-}1)$$

ここで，σ はアクチュエータの発生トルク分布を特徴づけるパラメータであり，定常ほふく運動時には $\sigma \simeq 1 (>1)$ なる値をとる．α はほふく体形のうちのくねり角，ℓ は OP 間の体幹長さを示している．$Serp(\sigma)$ は (4-10) 式のように新たに定義した関数であり，Fig.3- のような傾向を示している．

(8-1) 式を全体幹に拡張し，ほふく運動中にアクチュエータが発生すべき最大トルク（つまり，アクチュエータが O 点にあるときの発生トルク）T_0 を求めればつぎのように示される．

$$T_0 = \left(\frac{1}{\sigma\, Serp(\sigma)}\right)\frac{1}{\alpha}\left(\frac{\ell^2}{L}\right)\left(\frac{L}{\ell} F_{top}\right) = \left(\frac{1}{\sigma\, Serp(\sigma)}\right)\frac{1}{\alpha}\left(\frac{\ell^2}{L}\right) F_t \qquad (8\text{-}2)$$

ここで，F_t は全体幹が生ずる推進力である．推進力 F_t は，ほふく推進するためには体幹の対地接触部と滑走面との体軸方向への摩擦力に打ち勝たなければならない．よって，(8-2) 式は

$$T_0 \geq \left(\frac{1}{\sigma\, Serp(\sigma)}\right)\frac{1}{\alpha}\left(\frac{\ell^2}{L}\right)\mu_t W \qquad (8\text{-}3)$$

と示される．ここで，W は全重量，μ_t は接線方向摩擦係数である．

一方，アクチュエータの回転角速度を考える．Serpenoid curve で滑走しているとすれば，屈曲運動を起こしているアクチュエータの回転角速度が最大になるのは，やはり働作器が O 点を通過したときである．その最大角速度 ω_0 はつぎのように求まる．(3-9) 式から，serpenoid curve でほふく推進中の体幹座標 s における偏角 $\theta(s)$ が求まり．(3-9) 式から，体軸方向に速度 v で滑走しているときのアクチュエータの角速度 $\omega(s)$ は

$$\omega(s) = \frac{d\theta(s)}{dt} = \frac{d\theta(s)}{ds}\frac{ds}{dt} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\delta s}{\ell^2}\, \alpha v \cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{\ell}\right) \qquad (8\text{-}4)$$

となる．(8-4)式に $s=0$ と代入すれば最大角速度 ω_0 は

$$\omega_0 = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\delta s}{l^2} \alpha v \tag{8-5}$$

と求まる．v は体幹方向の滑走速度，δs は働作器単位の長さである．

結局，(8-3)式および(8-5)式より，ほふく運動中には働作器が0点を通過するときアクチュエータは最大のトルク T_0 と最大回転角速度 ω_0 を必要とする．よって，アクチュエータが発生すべきパワ P は $P \geq \omega_0 T_0$ から求まり，結局つぎのように示される．

$$P \geq \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{\sigma S_{exp}(\sigma)}\right) \mu_t w v \tag{8-6}$$

ただし，w は働作器単位の重量である．(8-6)式から，ほふく推進中にアクチュエータが発生すべきパワーは，くねり角 α やくねりの大きさ l などの滑走体形パラメータとは無関係であることがわかる．

最後に，人工ほふく推進機械に適するアクチュエータについて考察する．ほふく運動時には，全体としてのくねり形状が大きくても，多数節から成るため一働作器単位のアクチュエータの屈曲駆動範囲はかなり小さい．よって，人工ほふく推進機械には，筋肉のように駆動ストロークは小さくても，出力の大きな特性を持つアクチュエータが適する．ほふく推進機械の実際的な応用には，このような特性を有する小型・軽量のアクチュエータの開発が是非必要となるであろう．

8-3 ほふく滑走運動の制御法

平坦地での定常ほふく運動のみを実現するのであれば，各働作器の間に一定の位相差を保ちながら，振動的な屈曲運動を持続すればくねり形形を生ずることができる．しかし，このような運動制御方式では滑走方向の自由な操縦や，滑走環境に適応した滑走などを実現することはできない．

そのため，各働作器単位はそれぞれ独立のサーボ系とし，与えられる指令に追従するような制御要素を人工ほふく推進機械の制御系に用いる．そして，中枢部の発信器からの指令を一定の時間間隔でまず第1働作器（先頭節）に送り，さらにつぎの指令が一定時間後第1働作器に送られるのと同期して第2節以後の働作器につぎつぎにシフトしていくような運動制御法をとることにする．このような運動制御法により，頭部から尾部にくねり形状を送ることができるが，これはヘビの運動神経系のメカニズムにも一致するものであると考えられる．

各働作器単位に与える指令には i) トルク指令および ii) 角度指令が考えられる．i)の各働作器にトルク指令を与える方式は地形形状が不均一，あるいは凹凸のある荒地走行のときでもよく地形形状に適応できる滑走方式であるが，滑走方向は地形等に影響されその操縦には複雑な要素が含まれるものと考えられる．ii) の各働作器に角度指令を与える場合には，滑走体形は地形形状によらず常に一定である．よって，この方式は操縦性のよさなどから，均一平坦な滑走面においては望ましい制御方式であると思われる．また，触覚等からの感覚フィードバックを付加することにより，ii)の方式でも地形に適応した滑走が実現できると考えられる．よって，本研究では以後 ii) の角度指令方式について論ずることにする．

中枢部の発信器が発生する角度指令波形状は，滑走時の体形曲線を決定する．すなわち，すでに第3章において述べたように，角度目標値が正弦波の場合には滑走体形は serpenoid curve，三角波の場合には clothoid spiral の合成曲線となる．このうち，人工ほふく推進機械には滑走中アクチュエータがなめらかに動作し，実際のヘビ体形曲線ともよく一致する正弦波角度指令による serpenoid curve が滑走体形として適当であると思われる．

つぎに，ほふく推進時の滑走状態変数とその制御変数の関係につ

いて吟味を加える．第5章で述べたように，滑走的の状態変数としては，滑走体形のくねり角α，くねりの大きさℓおよび体軸方向速度vを考えれば十分である．これら3つの滑走状態変数は，中枢からの正弦波角度信号の振動数f，振幅A，そして角度指令を後部側作器にシフトするときの時間間隔Δtの3つの制御変数に依存すると考えられる．つぎに，これらの3つの状態変数と3つの制御変数の関係を明らかにする．

i) 体軸方向滑走速度vは，ほふく推進中，角度信号の頭部節から後部節へのシフト伝幅に従って，体幹がスリップなく前進するものであることから，側作器単位長さδsを用いて次のように示される．

$$v = \delta s \frac{1}{\Delta t} \tag{8-7}$$

ii) くねりの大きさℓは，ほふく推進中の一周期にかかる時間$1/f$が$(4\ell/\delta s)\cdot\Delta t$と表記されることからつぎのように示される．

$$\ell = \left(\frac{\delta s}{4}\right)\frac{1}{f\cdot\Delta t} \tag{8-8}$$

iii) くねり角αの制御を考察する．正弦波角度信号が最大振幅Aをとる場合，側作器の偏角$\theta(s)$も最大となる．ほふく体形で偏角が最大であるのはP点である．このとき体幹座標$s=\ell$であるから，最大偏角は$\theta(\ell)$であるという，serpenoid curveの滑走体形では

$$\theta(\ell) = \left(\frac{\pi}{2}\right)\alpha\left(\frac{\delta s}{\ell}\right) \tag{8-9}$$

と表わすことができる．ここでもしもξをサーボ系ポテンショメータの一種の感度として

$$\xi = \frac{\theta(\ell)}{A} \tag{8-10}$$

と定義すれば，くねり角αは，(8-8)式，(8-9)式，(8-10)式より

$$\alpha = \left(\frac{\xi}{2\pi}\right)\frac{A}{f\cdot\Delta t} \tag{8-11}$$

と示される。

(8-7), (8-8), (8-11) 式がそれぞれ3つの滑走状態変数 l, α と3つの制御変数 $f, A, \Delta t$ との関係を示す。これらの関係をまとめれば Fig. 8-1 に示すような演算回路となっている。なお，運動制御の目安として，それらの関係の対応表を Fig. 8-2 および Fig. 8-3 のごとく示す。Fig. 8-2 は制御変数 $\Delta t, f$ から状態変数 l, V を計算するための表である。Fig. 8-3 は制御変数 A とすでに計算した l とから状態変数 α を計算するための表である。(ただし，δs, などのパラメータの数値は実際の試作機の諸元と一致させてある)。

以上の関係式を用いると，たとえば滑走中に滑走体形を変えずに速度 V を変化させるためには，シフト時間 Δt を変化させるだけでなく，同時に正弦波発信器の振動数 f を $f \cdot \Delta t = \text{const.}$ となるような制御がなされなければならないことがわかる。これは，ほふく推進体の制御における一つの特異性を示すものと考えられる。

8-4 滑走方向の操縦法

本節では，人工ほふく推進機械操縦の基礎となると考えられる，平坦で均一な滑走面上での操縦について論ずる。

人工ほふく推進機械の各制作器への角度目標値が正弦波のときには，すでに述べたごとく serpenoid curve の滑走体形をとるが，このとき，その推進運動は左右へのくねり角がバランスしているため一定方向に前進する。ここで，その目標値のバランスを Fig. 8-4 のごとく B だけ変化させるとそのバランスがくずれ，全体としての滑走方向は屈曲を始める。このとき滑走方向の回転曲率 ρ_B は，曲率 ρ が $\rho \equiv \lim_{\Delta s \to 0}(\Delta\theta/\Delta s)$ (Δs: 曲線の長さ，$\Delta\theta$: 接線のなす角) であること，および (8-10) 式からつぎのように示せる。

$$\rho_B \simeq \left(\frac{\xi}{\delta s}\right) B \qquad (8\text{-}12)$$

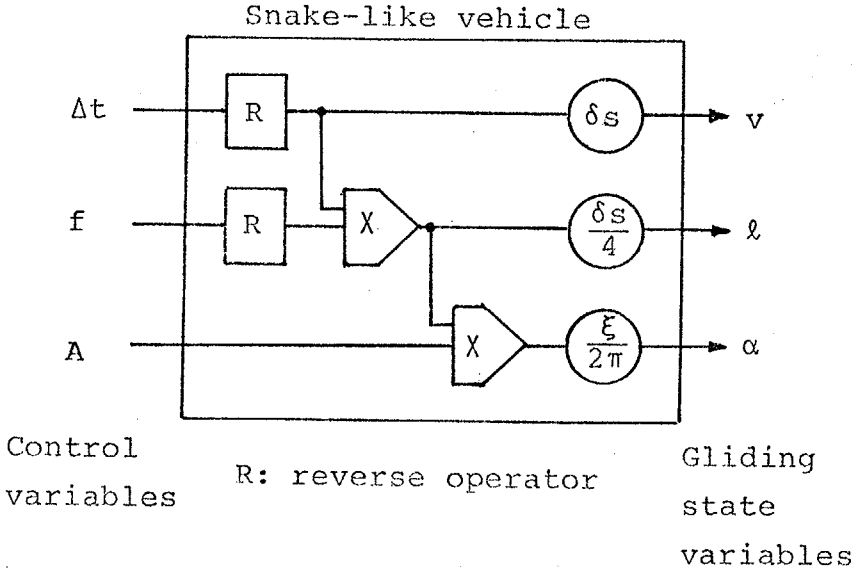


Fig. 8-1　ＡＣＭの滑走状態変数と制御変数の関係

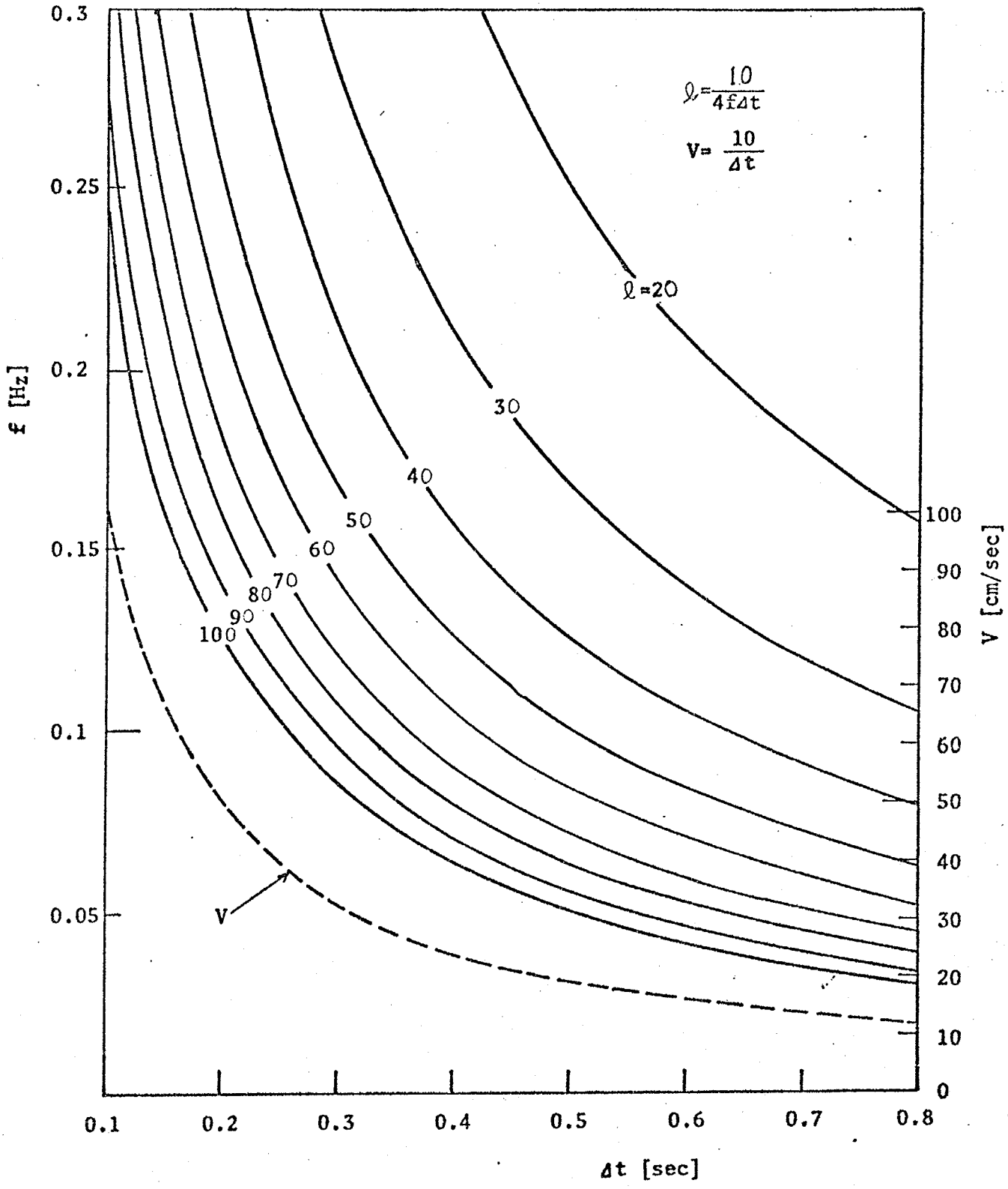


Fig. 8-2　制御変数 Δt, f と状態変数 ℓ, V の関係

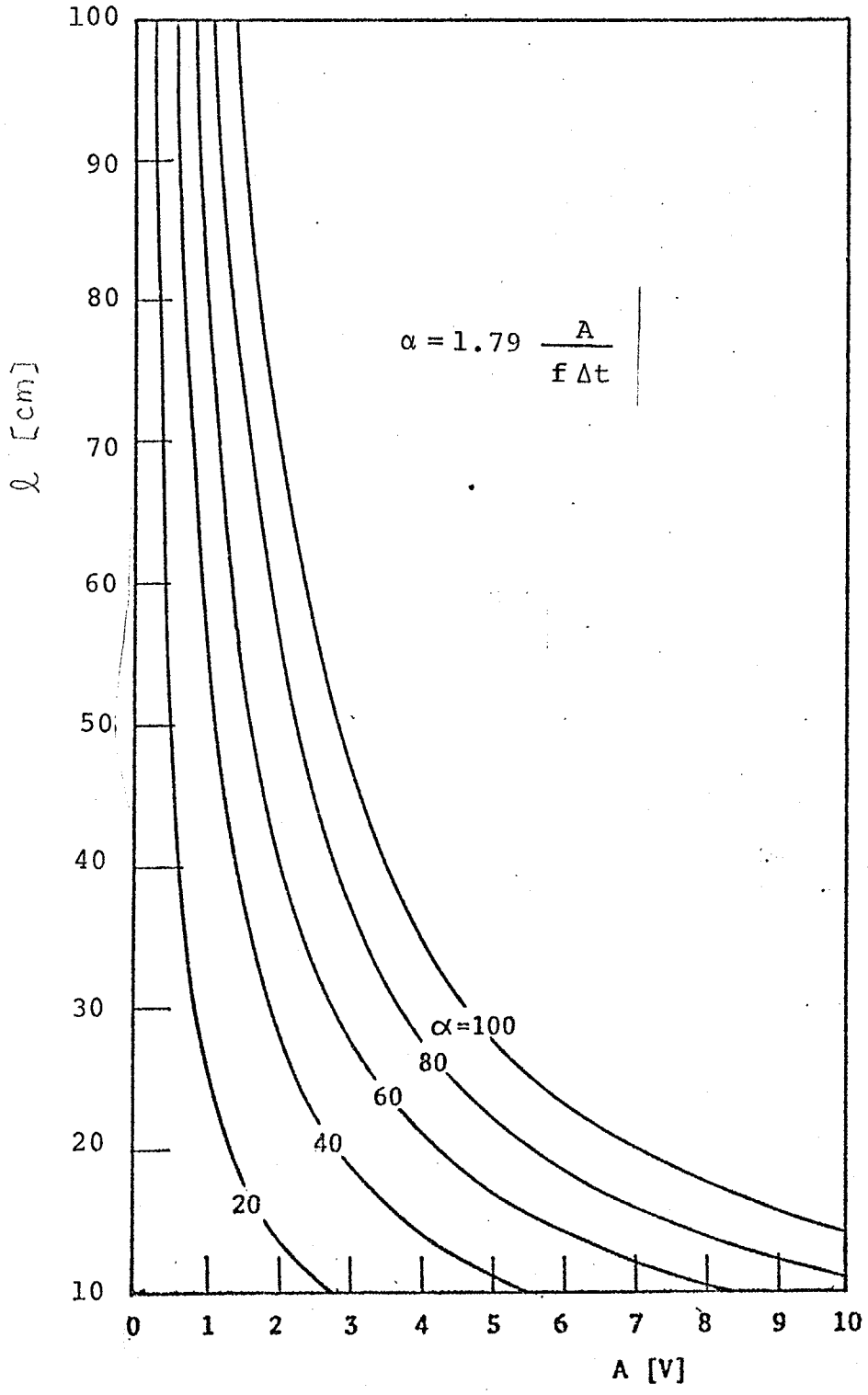


Fig. 8-3 変数 ℓ, A に対する くぬり角 α の関係

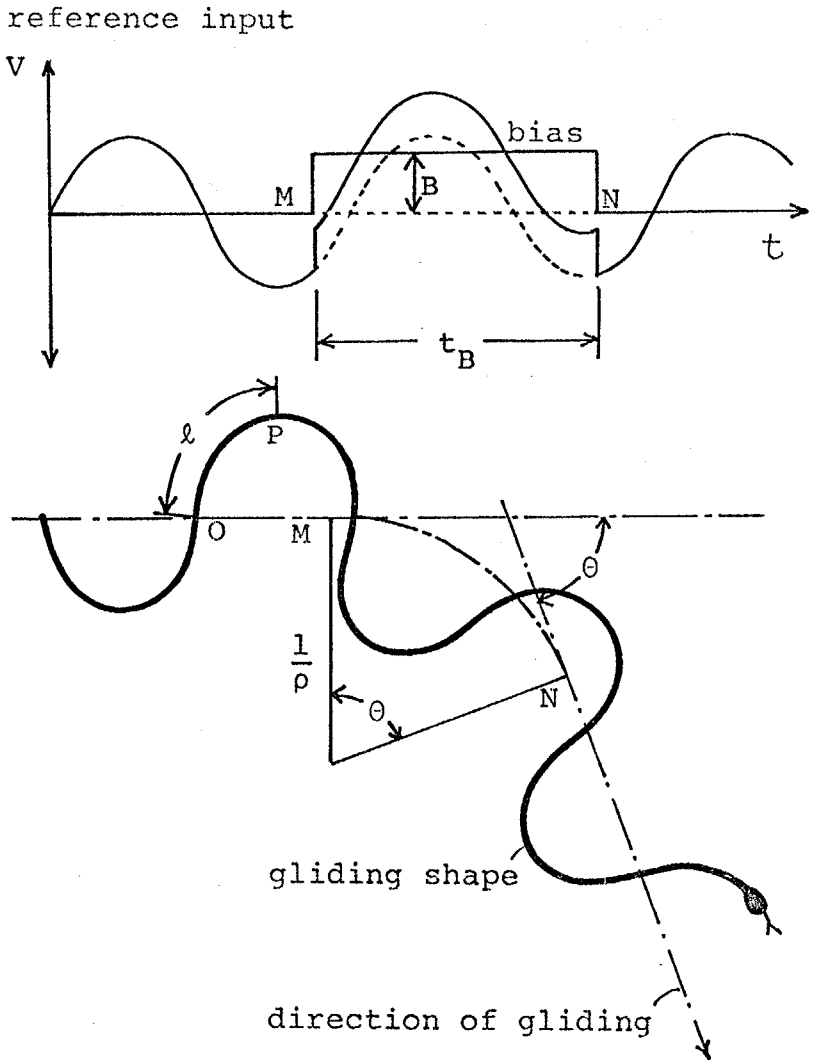


Fig. 8-4　ほふく推進方向の操縦原理

バイアスをB変化させたまま滑走させれば，滑走方向は曲率半径が $1/\rho_B$ の円周上を周回しつづける．また，t_B 後にバイアスをゼロレベルにもどせば，滑走方向はその間に角度 ψ だけ変化させることができる．角度 ψ は Fig.8-4 の区間MNでの方向変換角度の総和であり $\overline{MN} = v t_B$（ただし，v は体軸方向速度）および(8-12)式から次のように求まる．

$$\psi = \int_M^N \rho_B \, ds = \rho_B \, v \, t_B = \left(\frac{\xi}{\delta s}\right) v B t_B \qquad (8\text{-}13)$$

上式が滑走方向を角度 ψ 変える時必要な制御パラメータのとり方を示す関係式である．

つまり，速度 v でほふく滑走中に角度 ψ だけ方向転換するには，(8-13)式を満すようにB，t_B を決めればよく，(8-12)式からBが大きいほど回転曲率半径の小さい急激な方向転換を行なえることがわかった．この操縦法は自動車と似ており，一見複雑と思われるほふく推進体の操縦も，少なくとも平坦地滑走ならば，バイアス変化法を用いることにより容易に行なえることが明らかになった．

8-5 試作機機械系の設計と仕様

本節では，実際に試作した機械モデルの設計仕様について述べる．試作機本体の全景を Fig.8-5 に示し，一節を拡大したものを Fig.8-6 に示す．本体は20節の直列リンクから成り，全長 2m，全重量 28 kg，また働作器はDCモータをアクチュエータとし，ポテンショメータとによりサーボ系を構成している．

各働作器の屈曲運動機構を Fig.8-8 と Fig.8-9 の単位働作器組立図に沿って説明する．中枢部からの角度指令はアンプを通過した後①のDCモーターを駆動する．この回転運動は②の減速機を伝播した後，フランジ⑤に固定されたコネクション・ボード④に伝わり，DCモーターが固定されたベースボード③とコネクション・

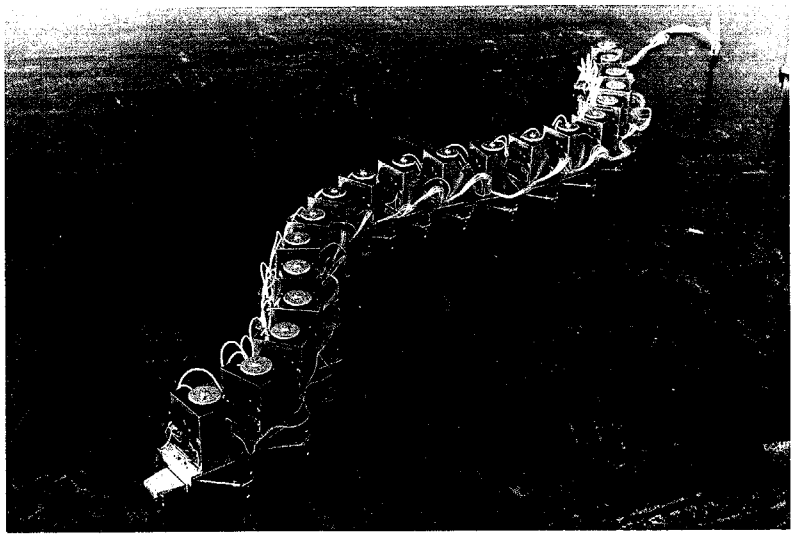


Fig. 8-5　試作桟本体の全景

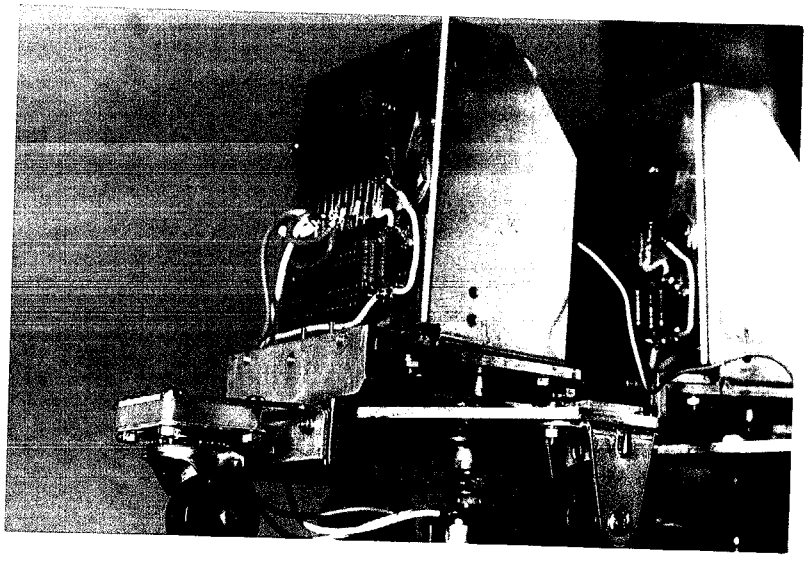


Fig. 8-6　試作桟単位節の外見

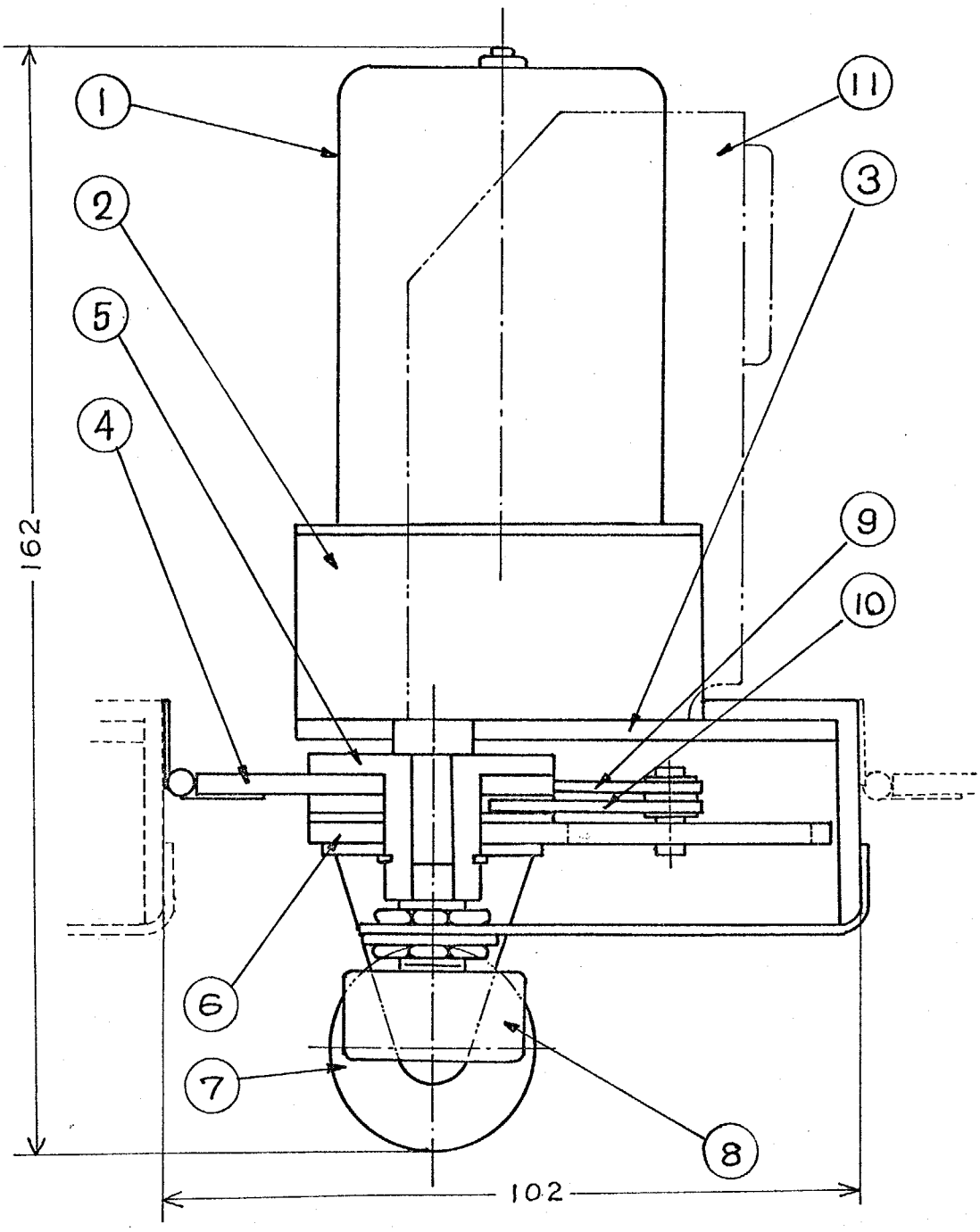


Fig. 8-8　　機械モデル　側面図

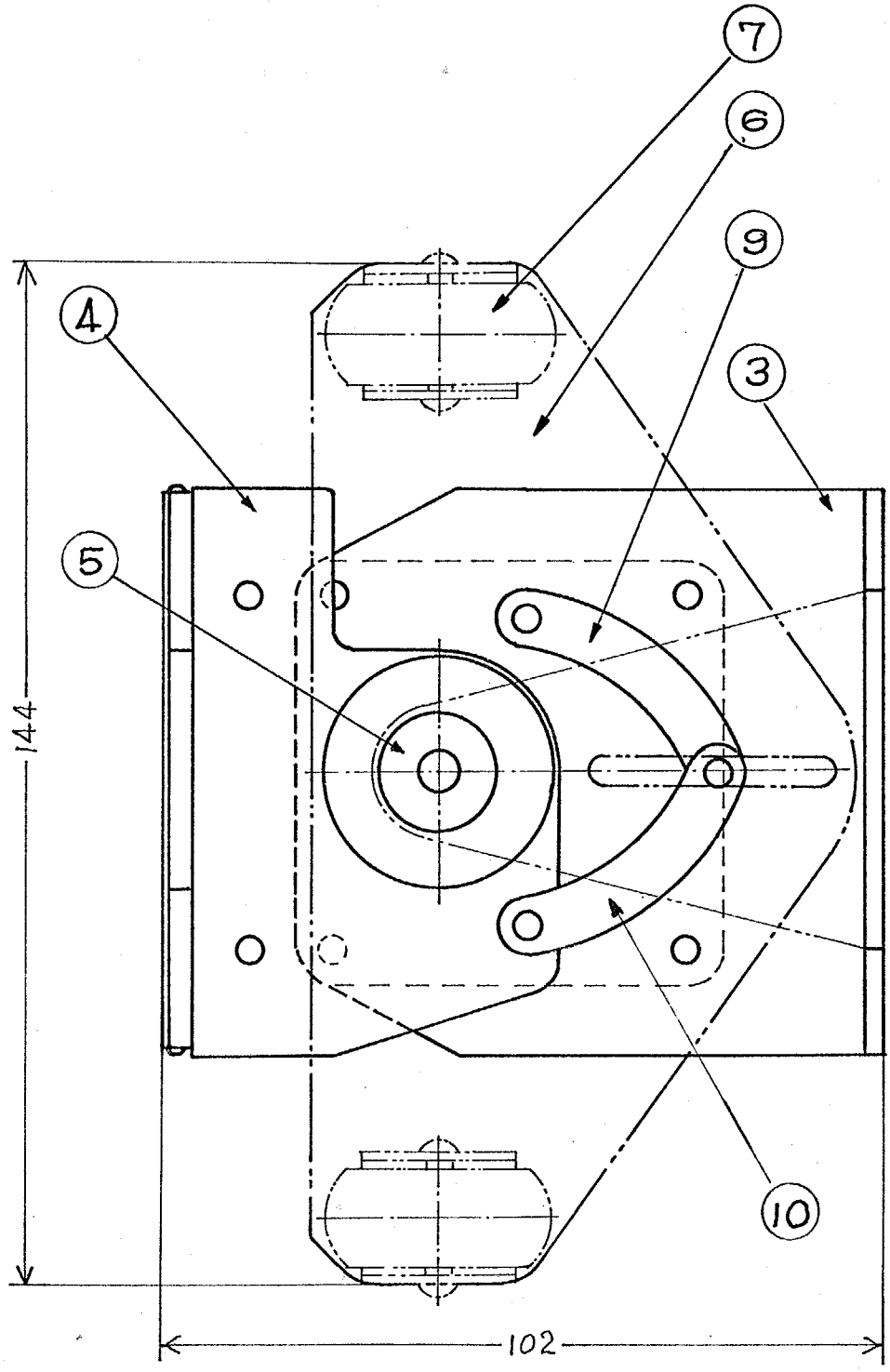


Fig. 8-9　機械モデル　平面図

ボードとが屈曲運動を始める．この屈曲回転角はポテンショメータ⑧によって検出され，フィードバック信号として増幅器放熱板⑪に支持されたアンプに送られる．

一方，1組のキャスター⑦を取り付けたキャスターボード⑥はフランジを中心に回転自在に取り付けられているが，これはベースボードからのリンク⑨とコネクションボードからの等長のリンク⑩とのジョイント部スタッドがキャスターボードに刻まれたスロット内を摺動することにより駆動される．このようなリンク機構を用いることによりキャスターは常にリンク間のなす角の1/2外角方向を向き連続的な滑走曲線に近似した滑走軌跡を通過するようになっている．

なお，本体の対地接触部には $\mu_k = 0.034$（回転摩擦係数），$\mu_n = 0.56$（ただし，リノリューム板上）のキャスターを用いている．

最後にアクチュエータのパワー仕様を検討する．ほぼく推進中にアクチュエータが発生すべき出力パワーは(8-6)式のごとく示される．ここで，リノリューム板上の移動では $\mu_k = 0.034$ であり，一部重量 $w = 1.4$ kg，滑走速度 $v = 40$ cm/sec.，トルク分布関数のパラメータ $m = 1.0$ とすれば，

$$P \geq 0.074 \text{ kg m/sec} \qquad (8\text{-}14)$$

つまり，高々1W程度の出力があれば十分である．本試作機で採用したDCモータサーボ系の出力は最大10Wであり，十分の余裕がある．

8-6 試作機制御系の設計と仕様

Fig. 8-10 のように制御系は3つに分ける．i) 脚作器に加える角度指令信号を生成する中枢部，ii) 中枢部からの信号を前部脚作器から後部脚作器に伝播していく信号遅延伝播部，そして iii) 角度指令に追従する各脚のサーボ系，の3つである．以後，それぞれにつ

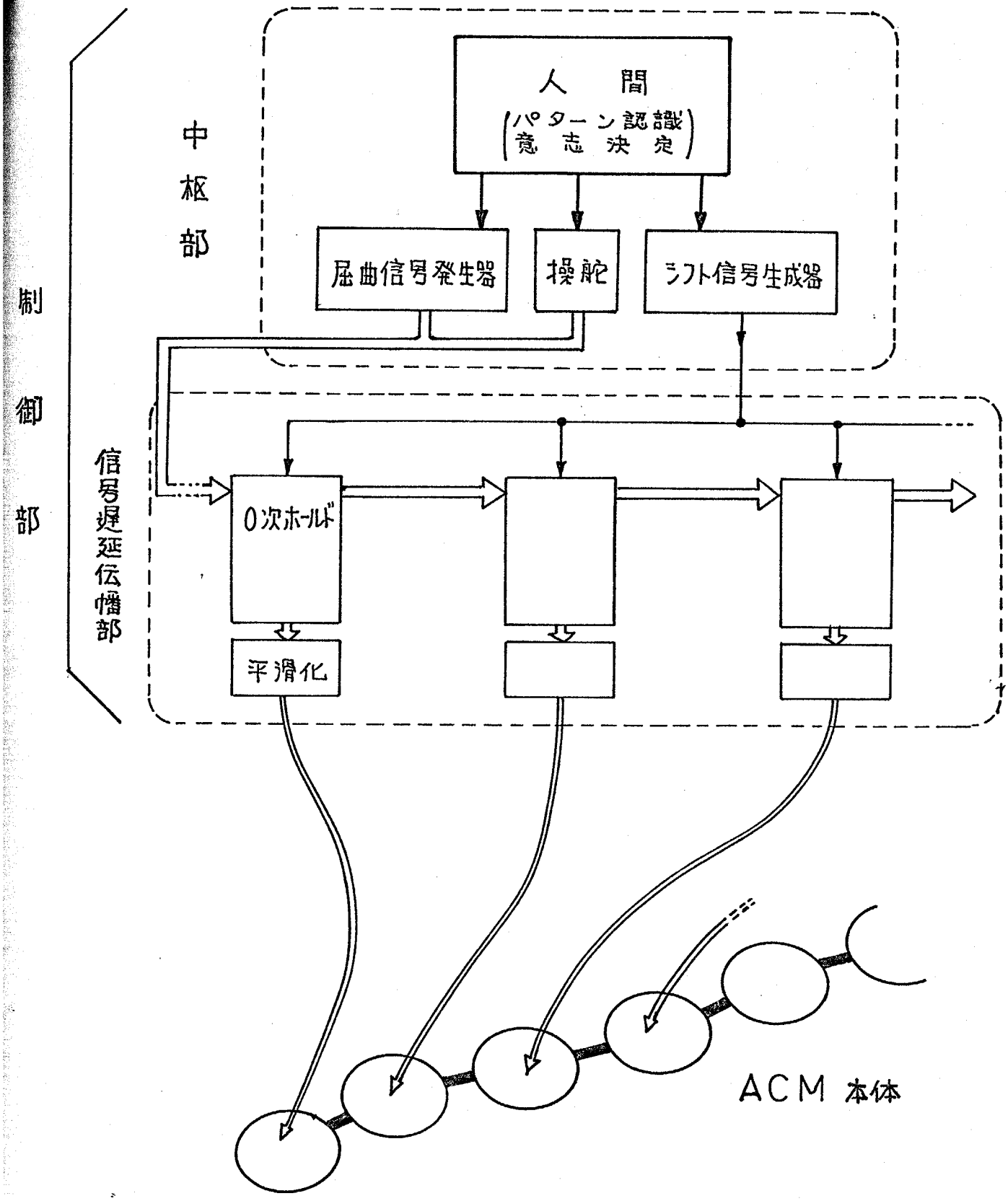


Fig. 8-10 人工ほふく推進のための
試作材制御系の構成

いて論じていくことにする．

8-6-1 中枢部

中枢部は，基本正弦波発生器と，その出力パイアスを変化させるマニュアル操縦のための操作部，さらに信号のシフトを行なうパルス発生器から成り立っている．つまり，平坦な滑走面での一定方向への滑走には正弦波発生器出力のみであるが，方向転換を行なう場合あるいは，触覚等の感覚器からのフィードバック信号によってその滑走体形を変化させる場合には，基本正弦波信号に，さらにそれを修正するような信号を重ね合わせるための操舵部を有する一種のハイアラーキーな制御系を構成している．

今後，より自律的な運動を可能にするためには，上位の制御系における視覚，触覚等からの情報の処理と，それらを用いた環境パターンの認識，そして移動様式および方向などの適応的決定等を行なう決定機構などを必要とすると思われる．このような中枢を装備することにより，本試作機は人工知能機械としての多様な機能を持つ柔軟能動体（ＡＣＭ）に発展させていくことができると考えられる．

人工ほふく推進とその運動制御の可能性を検証することを目的とする現段階では，滑走体形及び方向の転換は手動操作であり感覚器なども組込まれていない．しかし，触覚を含む制御系の中枢部制御機構については第９章において論ずる．また，人工知能機械としての発展性については第10章において展望することにする．

8-6-2 信号遅延伝幡部

中枢からの角度信号を頭部から後部の動作器に伝幡していく運動制御によってほふく運動独特の波送り動作が生ずる．ほふく動物の中でも，このような動作を機構にはいくつかのタイプが観測されている．たとえば，ミミズ等では機械的刺激の連鎖によって収縮波信号が頭部から尾部に伝幡されると言われている．また中枢から各動作器へ順次整然たる信号が発せられ動作器がその通りに作動するタ

イプもある．実際にヒルや魚では運動中枢神経においてこの信号に相当するインパルスが周期的に起っていることが知られている[63]．人工ほふく推進機械のための信号遅延伝幡部にも，これらの生物に見られると同様にいくつかの方式を考えることができる．代表的な方式は，i) 機械的変位利用 ii) 磁気テープによる方式 iii) Padéの近似式による方式，iv) デジタル化信号を用いる方式，v) コンデンサメモリを用いる方式 などであろう．ここで i) は一定速度で回転する円板上のピンの高低などで信号を遅延伝幡しようとするものであるが，機械的可動部を持つという点に欠点がある．ii) はエンドレステープを節の数だけのヘッドを配備した周に回転させる方式である．この方式は連続的な信号を各節に伝幡できる長所はあるが，装置に可動部があって高価となり，また節中途からの角度信号の重畳が困難である．iii) は遅小要素 e^{-sT} を近似的に演算回路で構成する方式である．可動部のない比較的簡便な方式であるが Fig. 8-11 の実験例のように多段信号伝幡時の信号波形のくずれが大きい欠点がある．iv) は現段階では未だ複雑で高価な装置を必要とするが今後の発展が期待できる方式である．v) はコンデンサに角度信号をホールドする方式である．簡便で信号の重畳も容易な最も望ましい方式であると思われる．これら5つの方式の優劣を Table 8-1 にまとめて示す．これらの比較から信号遅延伝幡にはコンデンサメモリー方式を本試作機には採用することにする．

実際に試作機に用いたコンデンサメモリー回路は Fig. 8-12 に示すようなシフトパルスによってホールド，伝幡を交互にくり返す1組の0次ホールド回路からなっている．なお，この方式で伝幡される角度指令は段階状の0次ホールド波形であるため働作器への角度目標値として取り出す信号は1次おくれ要素を通すことにより平滑化している．より根本的な平滑化対策については，ほふく推進よりもさらになめらかな運動を必要とする迷路内推進運動等について論じ

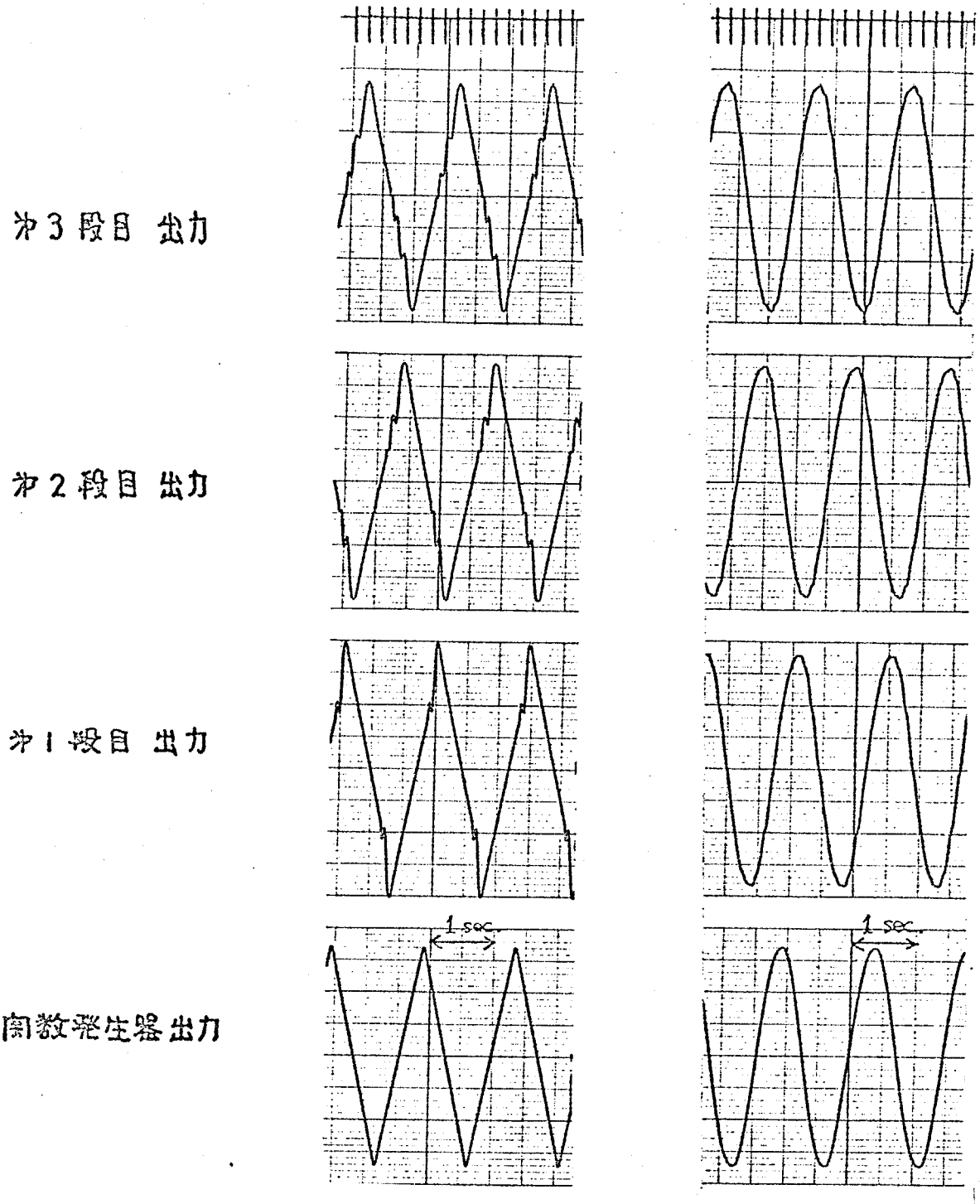


Fig. 8-11 アナコンによる Padé の遅延波 データ例

Table 8-1　信号遅延伝幡方式の比較

項目 / 方式	機械的可動部が少ないか	装置を安価，簡便に構成可能か	信号の重畳可能か	伝幡信号の正確さ
機械的	×	○	○	○
磁気テープ	×	×	△	○
Padéの近似	○	△	×	×
デジタル化	○	×	△	○
アナログ(コンデンサ)	○	○	○	△

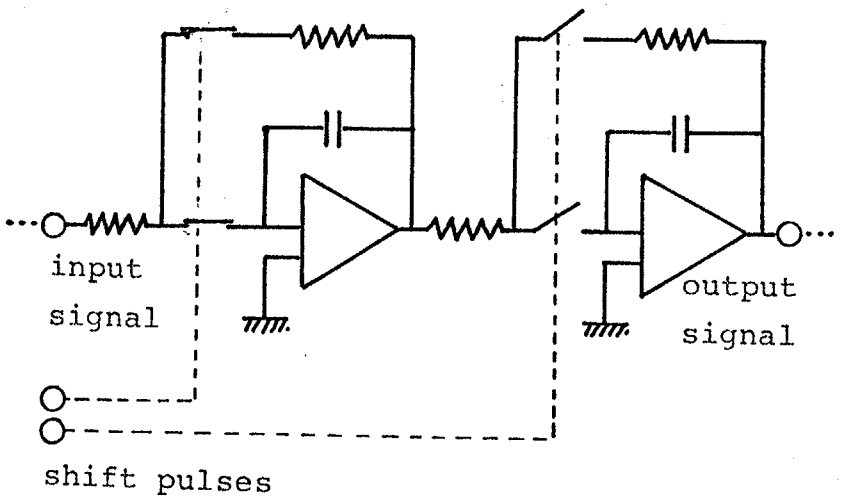


Fig. 8-12　本試作材で用いた0次ホールド方式

ている第9章で考察する．

8-6-3 働作器サーボ系

中枢からの角度信号目標値とポテンショメータからのフィードバック信号の偏差をとり動作信号を生ずる加算器としては，全働作器に必要となるため簡単な抵抗分圧による方法を用いた(Fig. 8-13 参照)．ポテンショメータの抵抗値変化によるローディングイフェクトは本試作機の回路定数では±0.2%程度の誤差である．増幅器としては最大出力 10W のパワーIC STK-020(三洋)を±12Vの2電源で駆動している．

以上で，試作機制御系の設計と仕様について述べたが，それらの考察から Fig. 8-13 に示すような人工ほふく推進のための全制御系が構成されている．なお，本機の制御装置の中枢部および電源等は未だ小型化に難度があるため滑走体とは別の台車(Fig. 8-7 参照)に設置し，電気ケーブルによって本体の各働作器に連絡されている．

8-7 試作機の滑走特性

滑走形状と制御変数との関係を示す(8-7)，(8-8)，(8-11)式は，本試作機においては，一節働作器単位の長さが $\delta s = 10$ cm であり，ポテンショメータのパラメータ $\xi = 11.25$ deg/V であることからそれぞれ，

$$v = \frac{10}{\Delta t} \text{ [cm/sec]}, \quad l = \frac{2.5}{f \cdot \Delta t} \text{ [cm]}, \quad \alpha = 1.79 \frac{A}{f \cdot \Delta t} \text{ [deg]}, \qquad (8\text{-}15)$$

と示される．これらの関係は Fig. 8-2 および Fig. 8-3 に示してある．これらの特性表からあるほふく滑走形状をとるための制御変数のとり方はつぎのように行なう．まず Fig. 8-2 から滑走速度 v によってシフト周期 Δt の値が決まる．そして，Δt と求めるくねりの大きさ l の値から基本正弦波の振動数 f が決定される．基本正弦波の振幅 A は Fig. 8-3 から l と求めるくねり角 α とによって求めることができる．

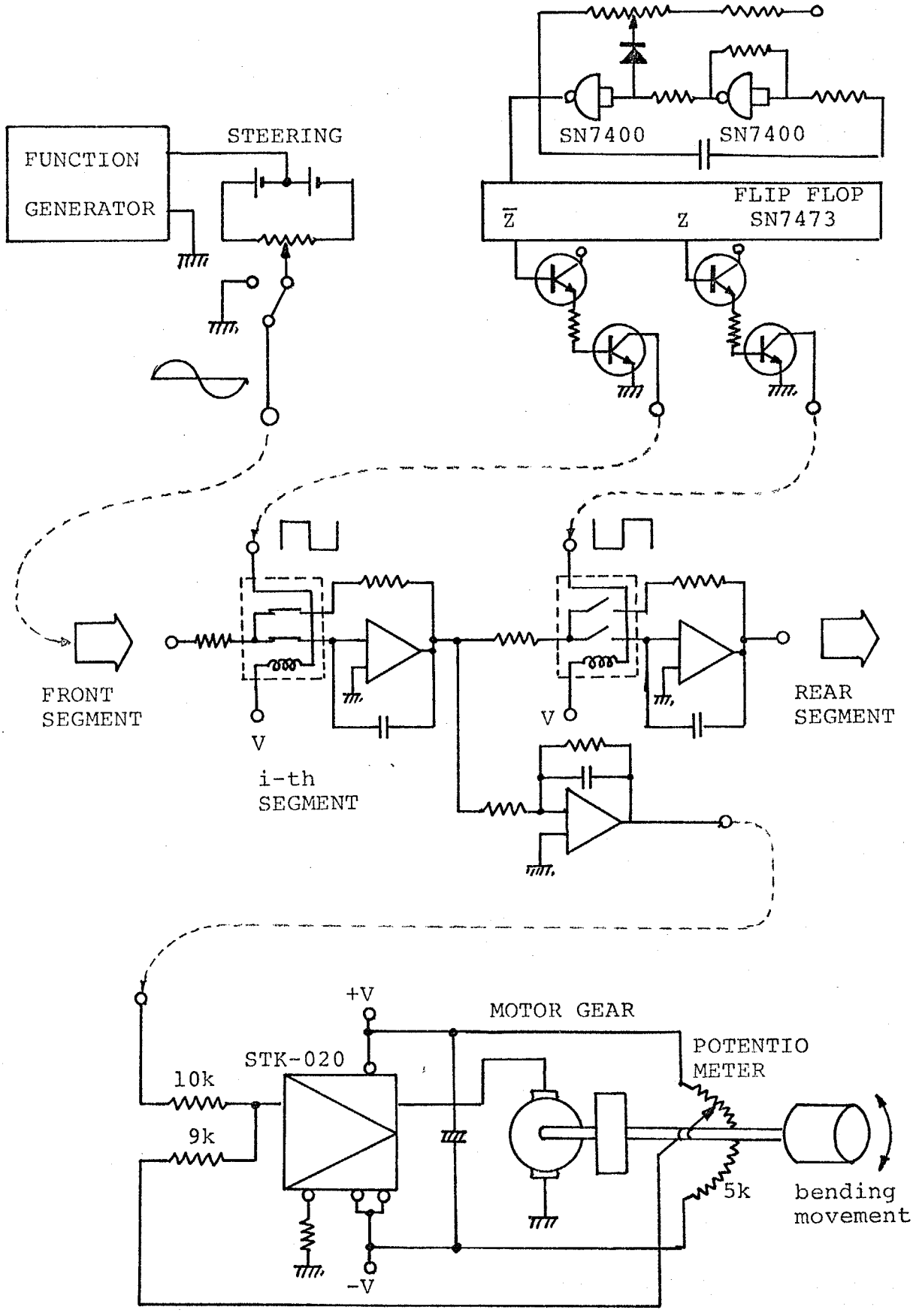


Fig. 8-13　人工ほふく推進のための
試作材制御系の全回路図

8-8 試作機による滑走・操縦実験

試作機により，平坦な床面で滑走実験を行なった結果，所期の設計仕様通りの滑走体形と速度でほふく推進を行なうことを確認した．滑走実験の手動制御変数の一例は $\Delta t = 0.6$ sec, $f = 0.12$ Hz, $A = 1.5$ V であり，そのときの滑走状態変数は $v = 17$ cm/sec, $\ell = 35$ cm, $\alpha = 40°$ であったが，これは (8-15) 式の関係とよく一致している．なお，滑走速度 v を 50 cm/sec 程度まで上げた滑走実験もその後行ない，十分安定な推進も可能であることを確認している．さらに，バイアスを手動で操縦することにより，あらかじめ定めた曲折コースに沿ってほふく推進を行なわせる操縦実験にも成功した．(8-13) 式より，たとえば滑走方向を直角に変化させるには，$B \cdot t_B = 4.7$ [V·sec]，つまり，バイアス変化が 1 V の場合には 4.7 sec のバイアス変化の持続がなされればよいといえるが，このことはかなり実験結果とも一致している．

8-9 本章の結論

本章の結論はつぎの通りである．

i) 人工ほふく推進機械システム構成のために必要な基本的諸問題についての吟味を行ない，人工ほふく推進機械の機構とその制御のための設計法を求めた．

ii) 人工ほふく推進の実現に成功し，滑走体形と滑走速度の制御および滑走方向の操縦が所期の設計仕様通りに行なえることを確認した．

以上の結論より，本章において人工ほふく推進機械の実現可能性を具体的に明らかにすることができたと考えている．

なお，今後は触覚あるいは障害物探知器などのセンサとそれらによる認識システムを有する知能機械としての柔構能動体（ACM）への発展が重要であると考えている．第9章にこれらの問題を論ずる．

第9章　触覚を持つ索状能動体の運動と制御 (9.19)

9-1　まえがき

人工はふく推進材械としての索状能動体（ＡＣＭ）については，すでに第８章において論じた．移動体としてのＡＣＭだけでなく，その材能をさらに拡大し，知能材械としての汎用性のあるＡＣＭを開発していくためには，いままで装備していなかった外部環境を知覚するなんらかの感覚器が是非とも必要となる．

感覚器の中にもいくつかのものが考えられるが，三次元空間において力学運動を行はうＡＣＭにとってはこれらの中でも視覚と触覚が重要な外部情報となる．このうち，視覚はリモートセンシングが可能であり，予測的な情報収集が容易であるという点で情報的価値が大きい．しかし，特にＡＣＭがその特徴を発揮するような狭隘な場所での作業や，凹凸のはげしい荒地移動などの場合には，見通しがきかないため，視覚よりは体幹全体に配備される「触覚」からの情報がＡＣＭの運動制御のために有効であると思われる．

本章では，以上の観点からＡＣＭのための知覚器としてまず始めに触覚を取り上げ，触覚を持つＡＣＭの制御はいかに行なうべきかを論ずる．有効と考えられる２－３の情報処理方式も提唱する．最後に，触覚を新たに付加した材械モデルによる運動制御実験を行ないその妥当性を検討する．

9-2　触覚を持つＡＣＭ（索状能動体）の制御方式

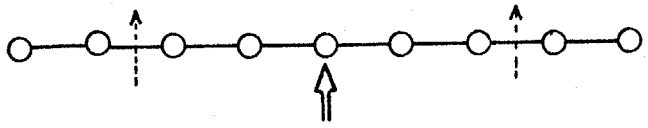
ＡＣＭ（索状能動体）が，単に固定された仕事を繰り返し行なうだけでなく，さまざまの環境下でいろいろな種類の作業を，多くの同様の形態を持つ動物のごとく実行していくためには，その運動制御の面においても生体系の内部形態つまり運動神経材構の観察が示唆的であると思われる．

本節においては，２つの生体独特の情報処理過程をＡＣＭの制御に適用すべきであることを論ずる．さらにそれを工学的に実現する際に生ずる工学的諸問題について検討を加える．

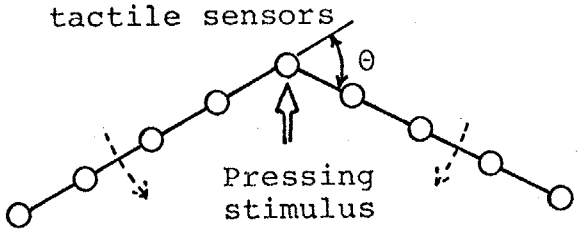
9-2-1 側抑制型の触覚情報処理

ＡＣＭの運動制御には体幹に沿って配備された触覚群が是非必要である．しかし，単に触覚を付加するだけでは不十分である．体幹に沿った触覚群からの情報は膨大であり，その合理的処理がなされば有効かつ適応的なＡＣＭの運動制御を行なうことは不可能である．つまり，体幹に沿った触覚からの多量の接触信号を運動制御に変換していくという情報処理過程にこそ十分の吟味がなされるべきであろう．そこで，まず局部的な接触回避現象に注目して原理的な触覚情報処理法について考察していくことにする．

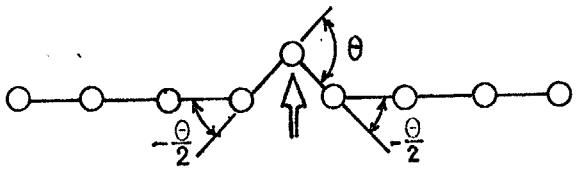
たとえば，Fig. 9-1 (a) のように触覚がない場合，ＡＣＭの体形は変らず，接触圧は全体幹に剛体的に伝播されて，何らの「やわらかさ」を持つことができない．Fig. 9-1 (b) は触覚を付加し接触した節のみを物体から回避する方向に屈折させる直接的な制御をした場合である．この場合たしかにＡＣＭは回避動作を起こし，若干のやわらかさを与えることができたとはいえる．しかし，接触節以外の節はやはり剛体的であり大きく振れてしまう．他節の動きが拘束されている場合には，このような直接的な触覚信号処理でもまだやわらかい運動を行なうのは無理であろう．つまり，やわらかい回避動作には，物体に接触した節附近でローカルに回避動作がなされ，その他の体幹部への影響が微小に保たれているような運動制御が必要である．体幹各部においてそのような運動制御がなされなければ互いの相互作用による誤動作蓄積のため，全体幹での統率された運動を実現することは不可能であろう．Fig. 9-1 (c) は以上のような条件を満足する触覚情報処理の一例である．これは，接触節だけでなく，同時にその両隣節も回避動作を行なうものである．ただしこの場合，両



(a) Receding without tactile sensors



(b) Primitive receding



(c) Lateral inhibitory receding

Fig. 9-1 触覚を持つACMの運動制御方式と接触回避動作の関係

隣節の回避動作は，接触節とは逆のかたって接触圧が加わった方向に行なわれていることに注目していただきたい．つまり，接触節を接触回避方向（興奮的と呼び正にとる）に作動させると同時に，その両隣節をそれぞれ半分づつ接触促進方向（抑制的と呼び負にとる）に作動しているわけである．このような運動制御を行なうことによって始めて接触回避動作が局部的になり，なめらかに接触圧力に順応していくことができると思われる．

このようなことから，ＡＣＭに望ましい触覚情報の処理法は，生体神経系に見られるいわゆる「側抑制」的な結合によってなされるべきであるという結論を得ることができる．

生体における情報処理の特徴はいくつかあるが，その中でもこの側抑制情報処理は著名である．並列に配置された感覚群の一つの感覚器に入った刺激が，その受容器に対して興奮的に働くとともに，そのまわりの受容器に対しては同時に抑制的に働くというこの側抑制結合回路網は，視覚系のみならず聴覚・触覚系にもみられる．さらに生体の運動をつかさどる小脳においても，プルキニエ細胞等5種類の神経細胞が側抑制的に結合された構造を有しているという点から，低位の反射的な運動の制御においても側抑制型の制御系が想定できるのではないかと考えられている．たとえば，すでに鈴木[69]はヒトデを裏返しにしたときに行なう起きなおり運動が，ヒトデの足を制御する5つの末梢神経間の相互抑制を仮定することにより説明できるとしている．このことから，ヘビなどの生体特有の形態を模しているＡＣＭにおいても，その触覚情報処理系に側抑制型構造の存在を想定することは必ずしも不自然だとはいえないであろう．

つまり，ＡＣＭの触覚情報処理系に「側抑制」を想定することが機能的にも，また生体神経系の知見からも妥当であるということがわかった．このことは，側抑制に限らず他のより多彩な生体神経系についての研究がＡＣＭの運動制御に大きく示唆する可能性が有

り得ることを示していると考えられる．生物工学的な研究を必要とするゆえんである．

さて，この側抑制型の触覚情報の処理法をより精細に検討しよう．ＡＣＭの任意節iに加わる接触圧力を$P(s)$，その両隣節に加える接触圧力を$P(s+\delta s)$，$P(s-\delta s)$とすると，側抑制型の触覚情報処理とは，これらの接触信号を使用して対象とする節iの偏角$\theta(s)$を回転角速度$d\theta(s)/dt$で修正していくことである．

$$\frac{d\theta(s)}{dt} = K\left(P(s) - \frac{1}{2}P(s+\delta s) - \frac{1}{2}P(s-\delta s)\right) \qquad (9\text{-}1)$$

ここで，Kは比例定数，δsは一節の長さである．Fig. 9-1 (c)は，上式(9-1)で$P(s)$のみが加った場合であり，このとき単位時間後に$\theta(s)=\theta$となったとすれば$\theta(s+\delta s)=\theta(s-\delta s)=-\frac{1}{2}\theta$となることは上式から誘導できる．(9-1)式で節の長さδsを微小と考え連続曲線と仮定すればつぎのような連続化表現ができる．

$$\frac{d\theta(s)}{dt} \propto \frac{d^2P(s)}{ds^2} \qquad (9\text{-}2)$$

つまり，ＡＣＭの側抑制型触覚情報処理とは実はその体形形状を接触圧力分布$P(s)$の体軸長さｓについての２階微分に従って変形していくことにほかならないということが明らかになった．そして，このような側抑制型触覚情報処理が全体幹に施されて後，Fig. 9-2のごとくＡＣＭがある物体に接触して(a)のような接触圧分布をとるならば，触覚信号によるＡＣＭ体幹の姿勢修正運動は(b)のようにその接触境界部に起こる．そして，すべての節の接触圧が等しくなる安定状態に向ってＡＣＭ体幹形状が物体形状にやわらかくなじんでゆくと予想される．つまり，ＡＣＭの側抑制型触覚情報処理とはＡＣＭの材構的なやわらかさを触覚を含む情報処理系で実現しているという見方もできるであろう．

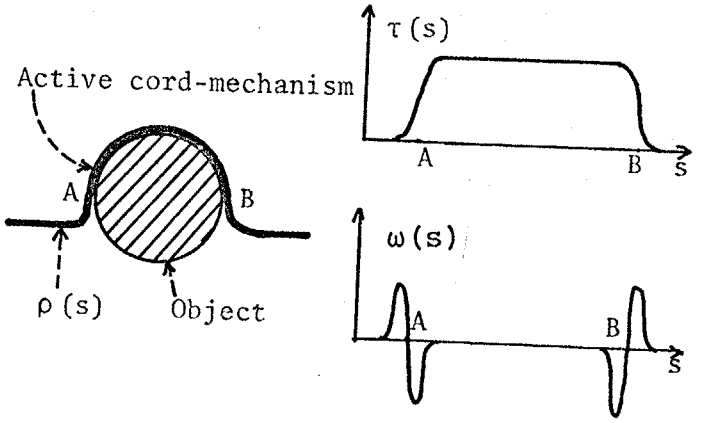
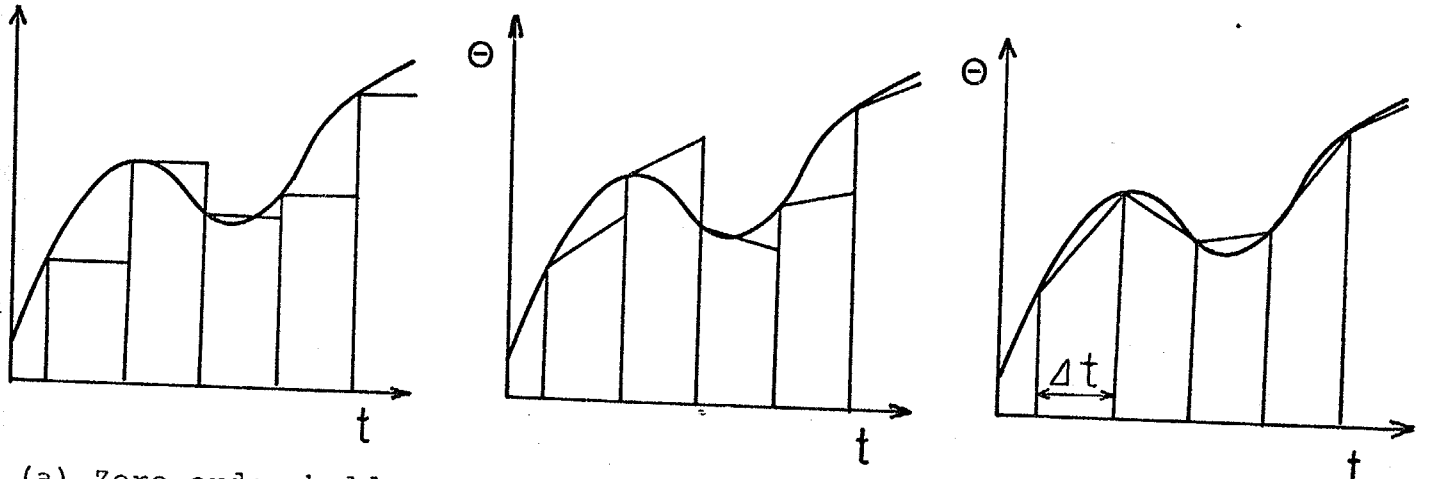


Fig. 9-2　ＡＣＭの物体に対する姿勢，接触圧力分布τ(s)，姿勢修正運動ω(s)の間の関係



(a) Zero-order hold　(b) First-order hold　(c) First-order hold for ACM

Fig. 9-3　３種類の信号ホールド方式の比較

9-2-2 屈曲信号の1次型シフト制御

ACMのような細長い体幹を有する生物においては，その体幹方向に体幹屈曲波を伝幡していく動作は基本的な運動形態と考えられる．第8章において実現した人工ほふく運動においても；このような屈曲波の伝幡をシフト制御によって実現している．その際シフト制御の構成にはいくかの方式を比較検討し，これらのうちコンデンサ・メモリーを使用して角度信号をいわゆるバケツリレー式に伝幡する方式がACMのシフト制御に最も適するということを示した．しかし，コンデンサメモリー方式にも問題点がある．それはシフト伝幡される角度信号がサンプリングされ0次ホールドされるため，Fig 9-3 (a)に示すような階段状信号となり，原信号と誤差を生ずることである．第8章におけるような平坦地でのほふく運動を行なう場合にはこのサンプリング誤差はそれほど問題にはならず，一次遅れ要素の導入等で十分平滑化可能であった．しかし，障害物に囲まれた環境で障害物に接触しながらしかもそれに沿ってなめらかな推進運動を行なおうとするためにはこのサンプリング誤差がACMの運動に与える脈動的誤差の影響は重大である．コンデンサメモリーによるシフト制御方式をとる限り，この問題点の解決が触覚を持つACMの運動制御の実現性を決定する要件であるといっても過言ではないであろう．本節ではこの問題点を解決するため，ACM独自の特徴を生かして開発した新たな方式について述べることにする．

ACMでは，その角度信号は頭部第1節から後方に一定のシフト間隔 Δt で次々に伝幡されていく．そのためある時刻における第 i 節の信号 θ_i^* は，その前節 $i-1$ にホールドされている信号 θ_{i-1}^* にシフト時間 Δt ごとに変化していく．つまり，任意節 i の未来値はACMの場合，常にその前節 $i-1$ に保存されているといえるであろう．よって，任意の節 i のアクチュエータへ加える角度目標値 θ_i は従来のようにホールドされている信号 θ_i^* そのまま，あるいは θ_i^* を

一次遅れを通した信号を用いるのでなく，その未来値 θ°_{i+1} を考慮することによりつぎのように求めるべきであろう．

$$\theta_i = \theta^{\circ}_i + k(\theta^{\circ}_{i+1} - \theta^{\circ}_i) \qquad (9\text{-}3)$$

ただし，ここでパラメータ k は $0 \leq k \leq 1$ であり，シフト時間 Δt の間一定の割合で 0～1 に増加してゆき，Δt 時間後にシフトパルスに同期して 0 にリセットされるようなパラメータとする．(9-3) 式のようにして得られる角度目標値 θ_i は Fig. 9-3 (c) に示すようにサンプリングホールドされた角度信号を次々に折線で近似するような波形となっており，その近似精度は高い．

つまり，本方式は (9-3) 式に示すように測定可能な未来値 θ°_{i+1} を用いて現在値 θ°_i を未来値の方向へ 1 次関数的に変化・修正させ，アクチュエータへの角度目標値 θ_i とする方式であるといえる．そして，この方式では測定可能な未来値を利用しているという点で，現在値しか用いない Fig. 9-3 (a) の 0 次ホールド方式，あるいは一般に用いられている現在値と過去の値から未来値を予測する Fig. 9-3 (b) のようないわゆる一次ホールド方式などより原理的に精度の高い角度信号を復元できる方式であるといえよう．ＡＣＭによる障害物に接触しながらのなめらかな動作等もこの方式により可能になると思われる．なお，さらに前節の θ°_{i+2}，θ°_{i+3} などの信号が利用できればさらに精度の高い高次の 2 次曲線的あるいは 3 次曲線的な近似が可能である．

9-3 触覚を持つ試作機の機構と触覚情報処理

触覚を付加したＡＣＭ林機モデルを Fig. 9-4 に示す．Fig. 9-5 にはその裏部を拡大して示す．この林械モデルは第 8 章で人工ほふく推進を実現するために使用した試作林を改造したものである．触覚の付加以外の改造点はＤＣモータの軽量化である．前試作林に使用したＤＣモータと減速器の重量が重かったため，今回は軽量高性能

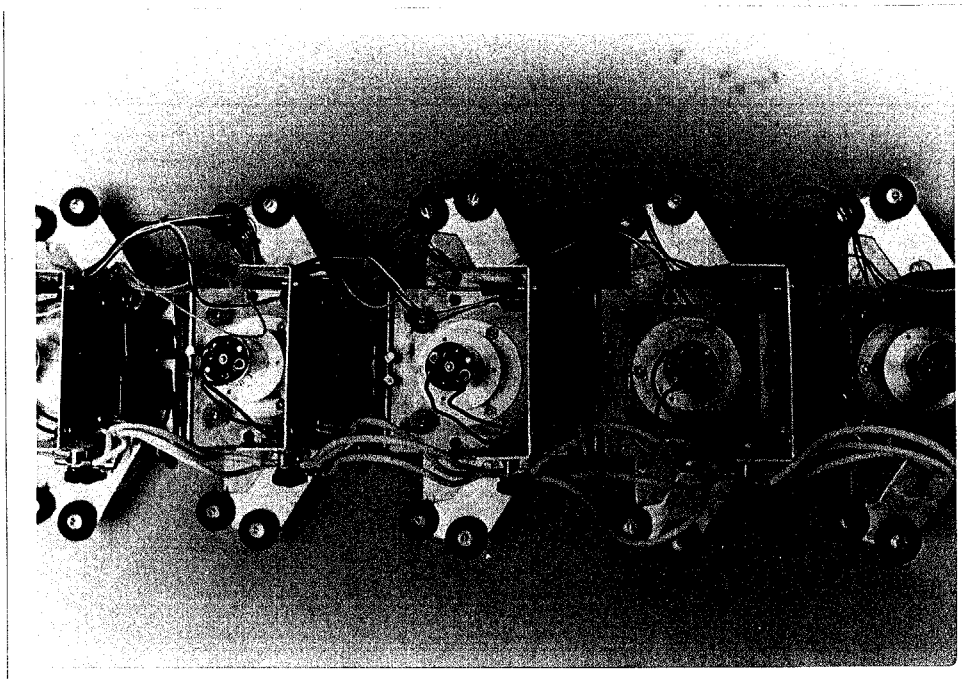


Fig. 9-4　触覚を付加したＡＣＭ装械モデル

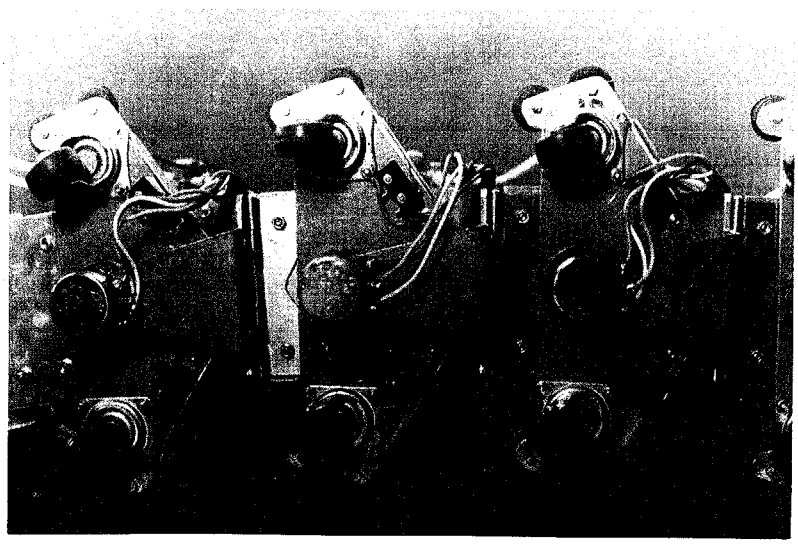


Fig. 9-5　触覚を付加したＡＣＭ装械モデル
裏面

のギャードモータ（コパルLC108G）を使用することにより，出力パワーをほとんど変えずに試作材全重量を15kgまで減重量している．

さて，外部環境を知覚するための触覚としての使用したのは小型ON-OFFスイッチであり，各節ジョイント部の左右に計40個装備している．前節での考察では触覚として，接触圧力に応じてアナログ信号を生ずる場合を考えている．しかし，前節の(9-1)式，(9-2)式等は接触信号P(S)として2値のデジタル信号を考えても成り立つ関係である．よって，本試作材ではいくつかの技術的問題点を含むアナログ触覚のかわりに，実現しやすい1bitのON-OFF型触覚を用いることにした．次節で述べる実験で示すように若干の特殊な動作を除いて，ON-OFF型触覚によってもアナログ触覚に期待される性能とほとんど同等の動作が行なわれると思われる．つまり，単純ながら触覚としての基本的な性能を有している点がON-OFF型触覚を選択した理由である．なお，アナログ触覚と同等の性能を得るためには，触覚信号として最低3値のデジタル信号を必要と考えている．本節では扱わないが，このような触覚性能の向上によるACM性能の拡大も今後行なってゆくべきであろう．

ACMの単位節（働作器）の可動屈曲範囲は±50°に制限されている．よって，ACMには外部環境知覚のための触覚以外に，ACM自身の過屈曲を検出し防止するためのリミッターを必要とする．ACMの屈曲運動制御は中枢部からの指令角度信号に追従するようになっているため，角度指令自体に制限を与える方式も考えられるが，リミッタ・スイッチにより過屈曲を防止する方式の方がより直截で確実であろう．またつぎに述べるようにリミッタの作動信号は，本幹に機構的な屈曲角度の制限があることを考慮した場合の側抑制型運動制御にも使立つ．よって，本試作材は触覚以外に各節間に計38個のリミッタスイッチを装備している．

試作材に用いた側抑制型の触覚信号処理は，次のような特性を持っている．

i) リミッタの作動しない±50°以内の体形では，接触信号はその接触した節および両隣節に(9-1)式の通りに伝幡される．

ii) 節がリミッタが作動する±50°まで過屈曲したとき，それ以上の屈曲運動が停止し，同時に屈曲内側の触覚は無感動となる．

iii) 過屈曲状態の節に隣節から伝わる(抑制)屈曲信号のうち，過屈曲状態を解除する以外の信号はさらに次節にスキップされる．

以上のような動作論理により，ACM材械モデルは側抑制的な屈曲運動を行ない，過屈曲が生じた場合でもその接触回避動作は十分ローカルに行なわれ他の体幹への影響は小さくなっている．

上記 i)～iii)の触覚信号処理はFig.9-6 に示すデジタル・アナログ回路によって実現している．Fig.9-6(a)の1節14コのNAND 素子からなる論理回路は，体幹左右の触覚からの信号を前後節に伝幡していく4つの対称的回路から構成されている．Fig.9-6(a)中に記入した(1,0)はセンサ・リミッタとも無接触のときの状態を示しており，1はhigh level (0 V)，0はlow level (2.8 V)である．ゲートICの出力はhigh, low level ともほぼ一定の電圧を示すので，本触覚回路では簡単のためそのままFig.9-6(b)のアナログ回路への入力としている．無接触状態でのアナログ回路への入力はすべて1である．Fig.9-6(b)のアナログ回路では，まず第1段階で各デジタル出力に符号および重み付けを行なっている．これによって(9-1)式に示すような興奮信号および抑制信号の配分が行なわれる．第2段階でその信号を積分してゆく．この結果ACM体幹は一定の速度で側抑制的屈曲運動を接触状態が変らない限り持続する．なおこの触覚回路の最終出力は，中枢部からの角度信号と重畳された後アクチュエータに加わるためほぼく推進しつつ触覚により軌道を修正するような複合動作も可能である．

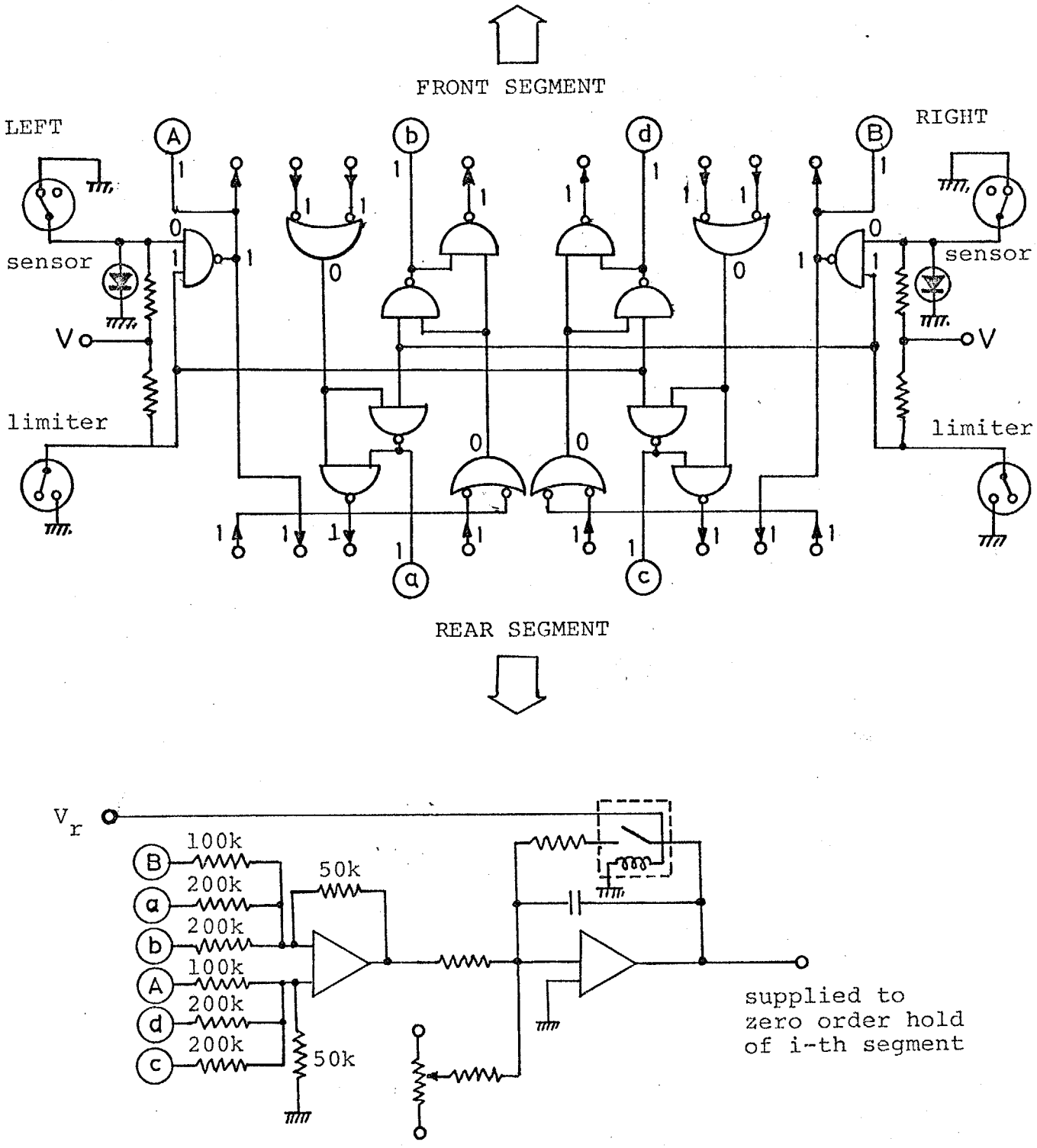


Fig. 9-6　側抑制型触覚信号処理のための
デジタル・アナログ回路
（デジタル出力のⒶⒷⓐⓑⓒⓓは
アナログ回路の入力となる）

9-4 触覚を持つ試作機の1次型シフト制御

9-2-2節で述べたACM装置の1次型シフト制御を実現する最も基本的かつ単純な方法は，Fig.9-7に示す方式であろう．Fig.9-7に示す方式は，ある節iの0次ホールドされた角度信号θ_i^0とその前節の角度信号θ_{i-1}^0を可変抵抗で分圧することを示している．この1次化回路に相当する可変抵抗器の摺動端子を0次ホールド信号のシフト時間Δtに同期して，Fig.9-7では反時計回りに定速度回転することにより，(9-3)式に従う角度目標値θ_iが得られる．この結果，Fig.9-3(c)に示すような精度の高い折線近似された角度信号θ_iがアクチュエータへの角度目標値として与えられることになる．

しかし，このような可変抵抗を用いる方式は，i)可動部分があり耐久性，信頼性が低い．ii)エンドレス型の可変抵抗を用いたとして機構的な制約のために両端子間隔を適当にとることができず，正確なシフトパルスとの同期ができない，等の問題点がある．そこで，本試作機では，電圧制御の可能な可変抵抗として使用できる電子素子であるFETトランジスタを用いて同等の機能を実現した．

9-4-1 FETを用いた1次型シフト回路

FETの特性をまず述べる．Fig.9-8のごとくFETを接続し，V_{GS}を変化させると，V_{DS}はFig.9-9のような電圧変化を示す（ただし，Fig.9-9のデータは2SK19 GRの場合である）．この変化はR_Dが十分大きくドレイン電流I_Dが微小のときには電圧V_{DD}にかかわらず常に成り立つ．つまりV_{GS}によってV_{DD}の分圧出力V_{DS}を制御できるということはすでに周知である．

このFET特性を利用してFig.9-10のような回路を構成した．この回路は，2つの制御入力V_{01},V_{02}によって，2つの入力信号θ_i^0,θ_{i-1}^0と出力信号θ_iとの間に(9-3)式に示す1次ホールド関係を成り立たせるものである．その原理は，シフトパルスから次のシフトパルスの間のΔt時間にθ_i^0の出力がθ_i^0から0へ減小し，同時にθ_{i-1}^0の

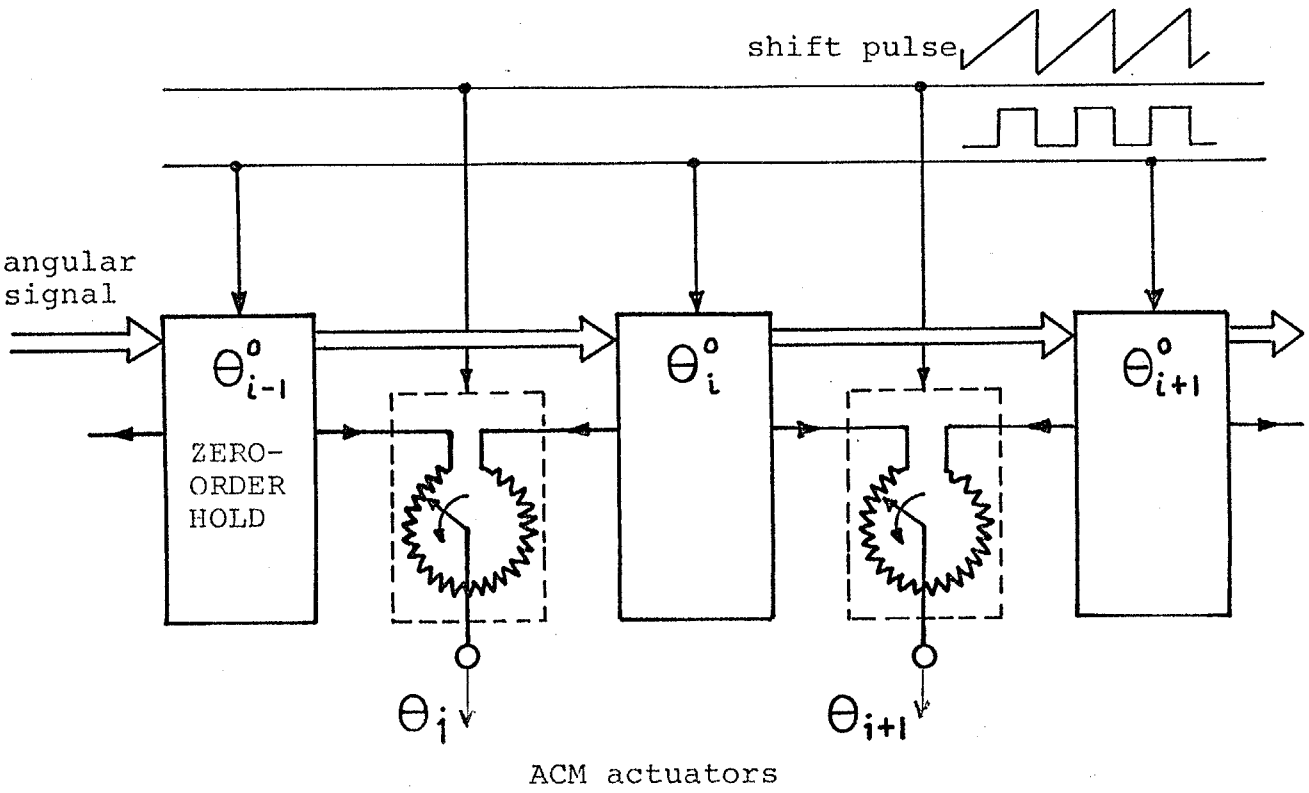
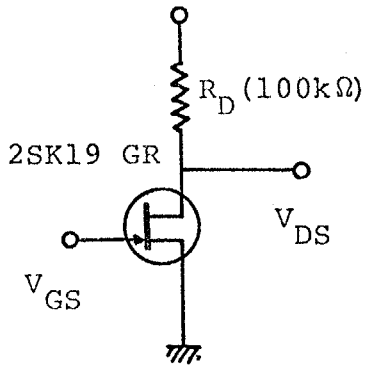


Fig. 9-7　1次型シフト制御を実現するための基本構成



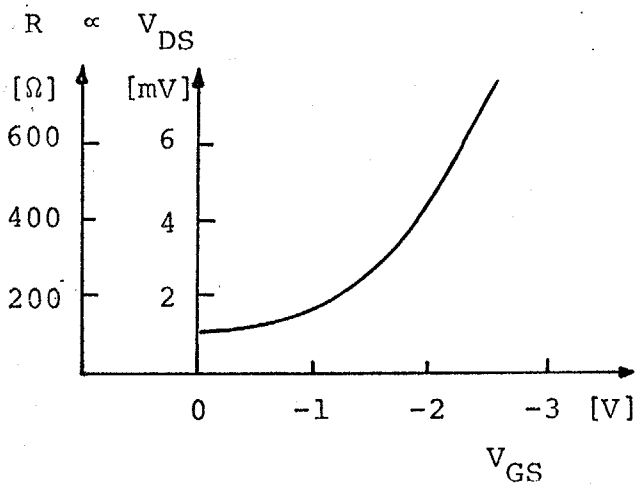


Fig.9-8 アクティブ・ボリューム　Fig.9-9　FET特性曲線

としてのFET特性測定

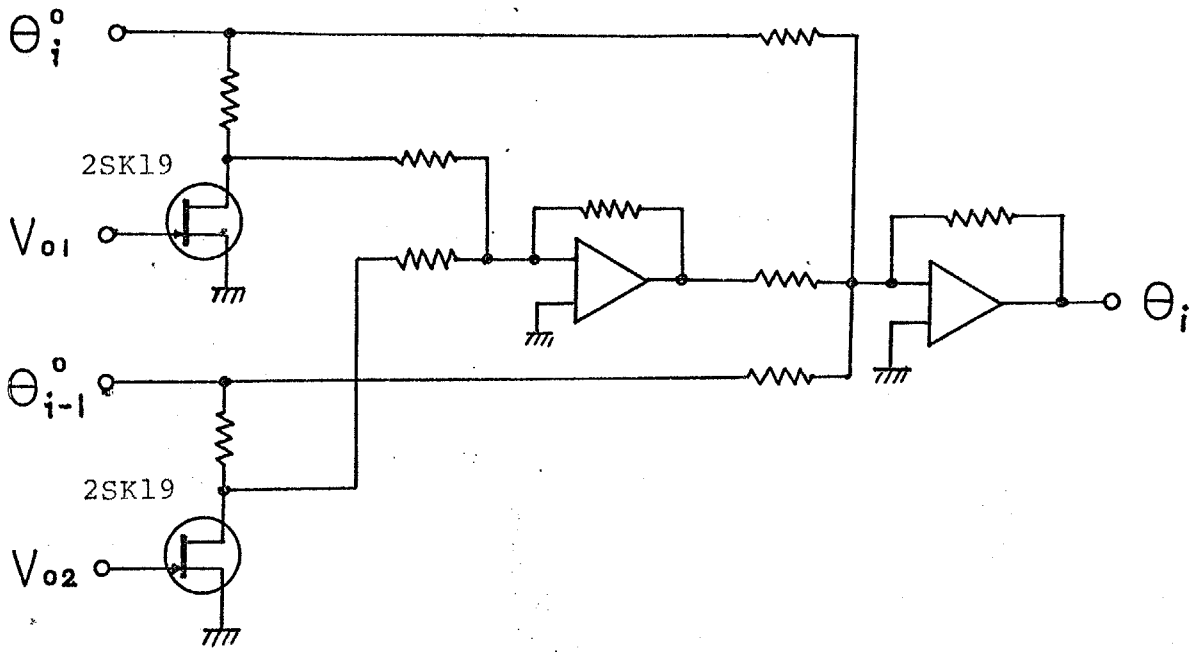


Fig.9-10　FETを用いた1次型シフト回路

出力が0からθ_{i-1}^{o}に増加するようになっているため，それらが加算された出力θ_iが$\theta_i^{o} \sim \theta_{i-1}^{o}$の変化を示すというものである。Fig.9-10の回路の第1段演算増幅器は，低くなったθ_oの信号レベルを適当な大きさに拡大し，第2段演算増幅器ではその絶対値を補正して正しく$\theta_i^{o} \sim \theta_{i-1}^{o}$のシフト変化がなされるようになっている．

この回路では，θ_{i-1}^{o}，θ_i^{o}の増減は当然線形的に行なわいなければならない．しかし，FETのV_{GS}とV_{DS}特性はFig.9-9に示すように非線形である．そこで，このFETを用いた1次型シフト回路を正しく作動させるためには制御入力V_{o1}，V_{o2}をその特性に合わせて非線形に与えなければならない．そのため，次に示すような逆関数回路を開発した．

9-4-2 逆関数回路

FETのFig.9-8に示すようなゲート電圧V_{GS}とドレイン電圧V_{DS}の非線形特性を補正し，線形的な制御入力に対し線形的な出力変化が得られるような入出力関係を得るには，ゲート入力の前段にFETの入出力関係の丁度逆関数となるような要素を挿入すればよい．

一般に非線形特性を得る回路にはいくつかのものがあるが，まず初めに代表的な方式であるダイオード特性を用いる方法を試みてみた．その回路をFig.9-11に示す．Fig.9-12はその入出力関係を示す．この関係はFET特性のほぼ逆関数的変化を示すことがわかる．しかし，Fig.9-10の入力信号θ_i^{o}，θ_{i-1}^{o}を一定にした後，FETゲート電圧をFig.9-11の回路を通した線形制御入力で駆動した出力信号θ_iはFig.9-13のような波形になる．このデータから，ダイオードの近似誤差が定常状態でもかなり大きいことがわかった。このダイオードによる近似法はさらにダイオード要素を増し屈折の細かい近似を行なってゆけばより精度を上げることができる．しかし，その正確な設計と調整がなかなか困難であるので，本試作機ではFET自体の非線形特性を利用する，より簡潔な方式を採用した．

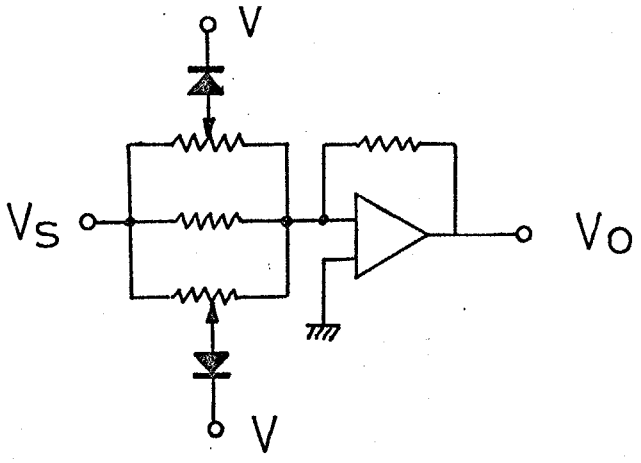


Fig. 9-11　ダイオード方式逆関数回路

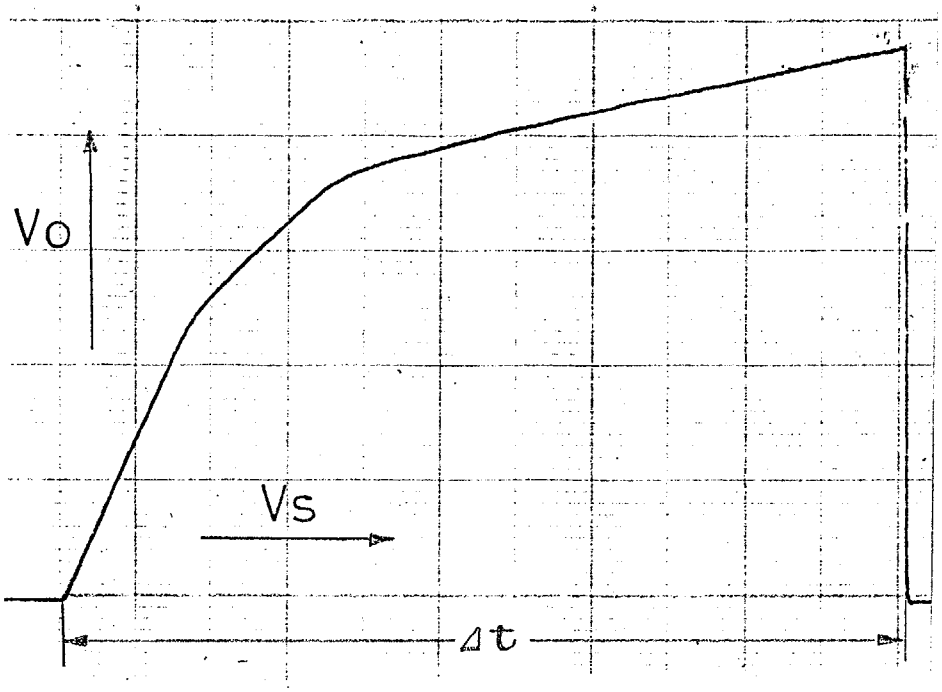


Fig. 9-12　ダイオード方式逆関数回路出力例

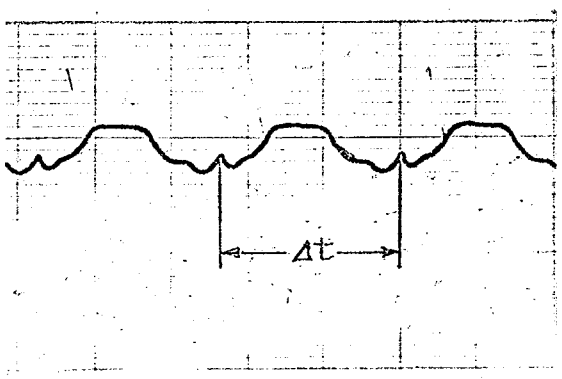


Fig. 9-13　$\theta_i^\circ = \theta_{i-1}^\circ$ の場合に Fig. 9-10 の回路を上記回路で駆動したときの出力

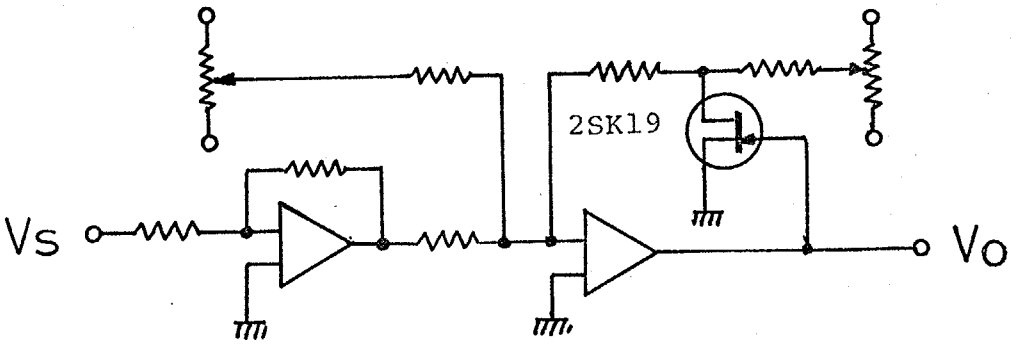


Fig. 9-14　ＦＥＴを用いた逆関数回路

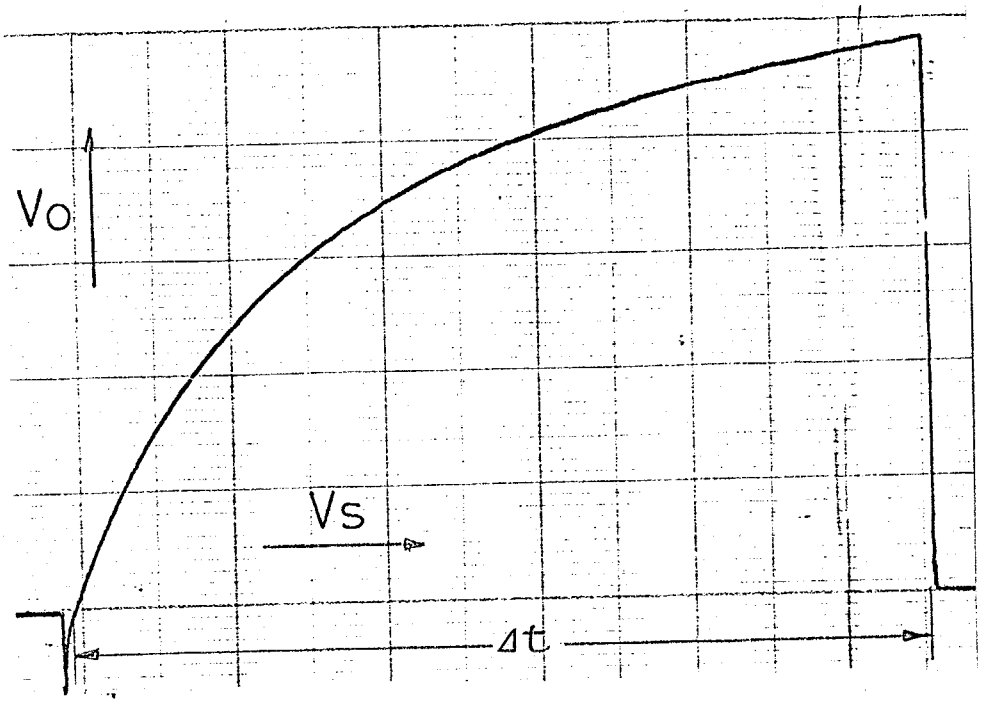


Fig. 9-15　上記回路の出力例

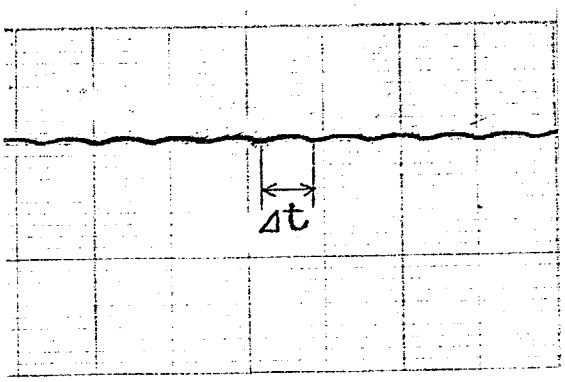


Fig. 9-16　$\theta_i^0 = \theta_{i-1}^0$ の場合にFig. 9-10の回路を上記回路で駆動したときの出力例

この方式は，演算増幅器の電圧フィードバック部にFETの非線形要素を挿入し全体としてその逆関数的な入出力関係を得るものである．Fig.9-14にその回路を示しFig.9-15には入出力関係示す．Fig.9-16はダイオード方式の場合と同様の条件で定常出力波を得たものである．Fig.9-13と比較してはるかに精度のよい逆関数回路となっていることがわかった。

9-4-3 駆動シフト信号生成回路

いままで述べてきた1次型シフト制御系を駆動するために必要な信号としては，i) 0次ホールドされた角度信号をバケツリレー式に伝幡していくための矩形波シフト信号と，ii) それに同期して作動すべき1次近似化回路を駆動するのこぎり波信号，そしてiii) シフト時間ごとのリセットなどを行なうシフトパルス信号などがある．これらの駆動信号はFig.9-17に示す回路で生成した．積分要素Aでランプ状に増加する信号電圧は，コンパレータBで一定電圧になったかが判定されGの回路によって再びゼロ電位までリセットされる．この動作の繰り返しでのこぎり波V_{S2}が生成される．V_{S2}は反転器Cを通ってのこぎり波V_{S1}となる．これらのV_{S1}, V_{S2}出力がFig.9-14の逆関数回路を通してFig.9-10の1次近似化回路の制御信号となる．コンパレータDによってシフト時間Δt間の中間時期が判定され，レベル調整器Eおよび反転レベル調整器FによってΔt間の前半および後半に一定電圧の矩形波が生ずる．この矩形波V_{P1}およびV_{P2}が1段の1対の0次ホールダーを交互に駆動し，0次ホールドされた角度信号をバケツリレー式に伝幡していく．なお，シフト時間ΔtごとのパルスV_rは，シフト動作ごとにFig.9-6の触角出力をリセットするためのトリガとして用いられている．

以上のような構成になっているため，0次ホールドに角度信号がシフトされるに同期して1次近似化回路が駆動され，高い精度のアクチュエータへの角度目標値θ_iを得ることができる．

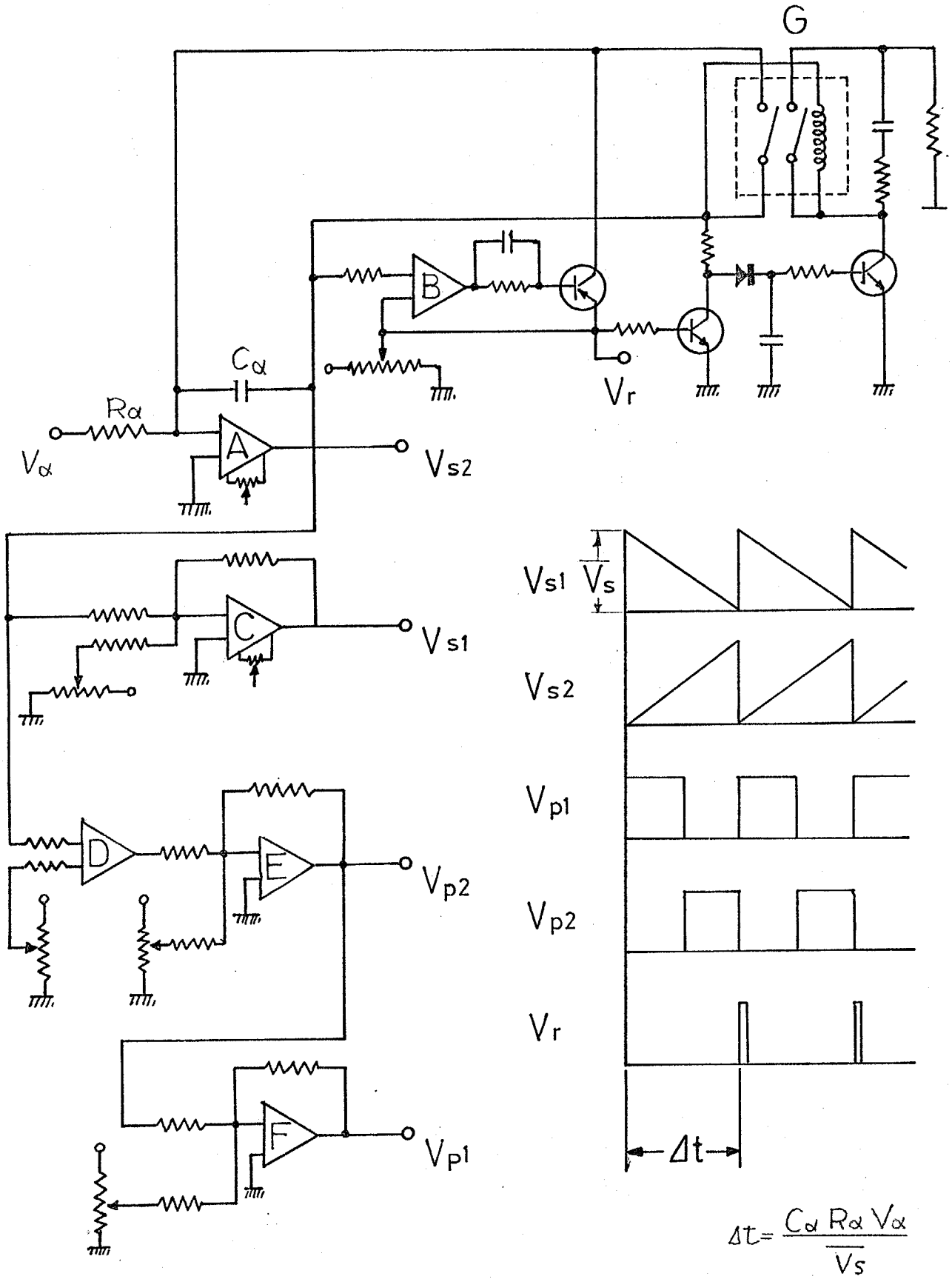


Fig. 9-17　駆動シフト信号生成回路

9-5 試作機全制御系の構成

試作機の全制御系はFig.9-18に示すような構成になっている．触覚を持つACM試作機の場合もその基本的構成は第8-6節で述べた構成と同じであり，それぞれi) 中枢部，ii) 神経系，iii) 効果器の3つの部分に分類できると思われる．第8章の場合と比較しながらFig.9-18に沿って検討していく．

9-5-1 中枢部

中枢部上位は，触覚からの感覚フィードバックがあるため，パターン認識・意志決定等が人間によって行なわれている現段階においてもはるかに適応的になされている．つまり試作機制御装置のコンソールパネル（Fig.9-19に示す）のランプに表示される接触状態をモニターすることにより，ACMの運動制御が容易になっている．このことからも今後さらに人間を介さない人工知能機械としてACMを発展させる場合にも触覚情報の役割は重大であろう．

中枢部のうち，基本体形波発生器およびステアリングはFig.8-13と同じである．駆動シフト信号生成器は，Fig.9-17の矩形波とのこぎり波の発生回路とFig.9-14の逆関数回路とから成る．つまり，Fig.9-17の回路によって生成されるV_{p1}，V_{p2}は0次ホールド回路へのシフト信号となり，V_{s1}，V_{s2}はFig.9-14の逆関数回路を通して1次近似化回路への制御入力となっている．

9-5-2 神経系

本試作機においては，角度信号のシフト機構，触覚情報の処理機構等が第8章の場合よりも拡張・充実している．これらの機構を生体系と対応させて神経系と呼ぶ．神経系は，ACM各個作動単位と対応する単位制御要素の集合である．各単位制御要素はi)角度信号をシフトしていくFig.8-12の0次ホールダ，ii) シフト信号を整形してACM本体へ角度目標値を与えるFig.9-10の1次近似回路，そしてiii) 触覚情報を処理するFig.9-6の側抑制型触覚信号処理回

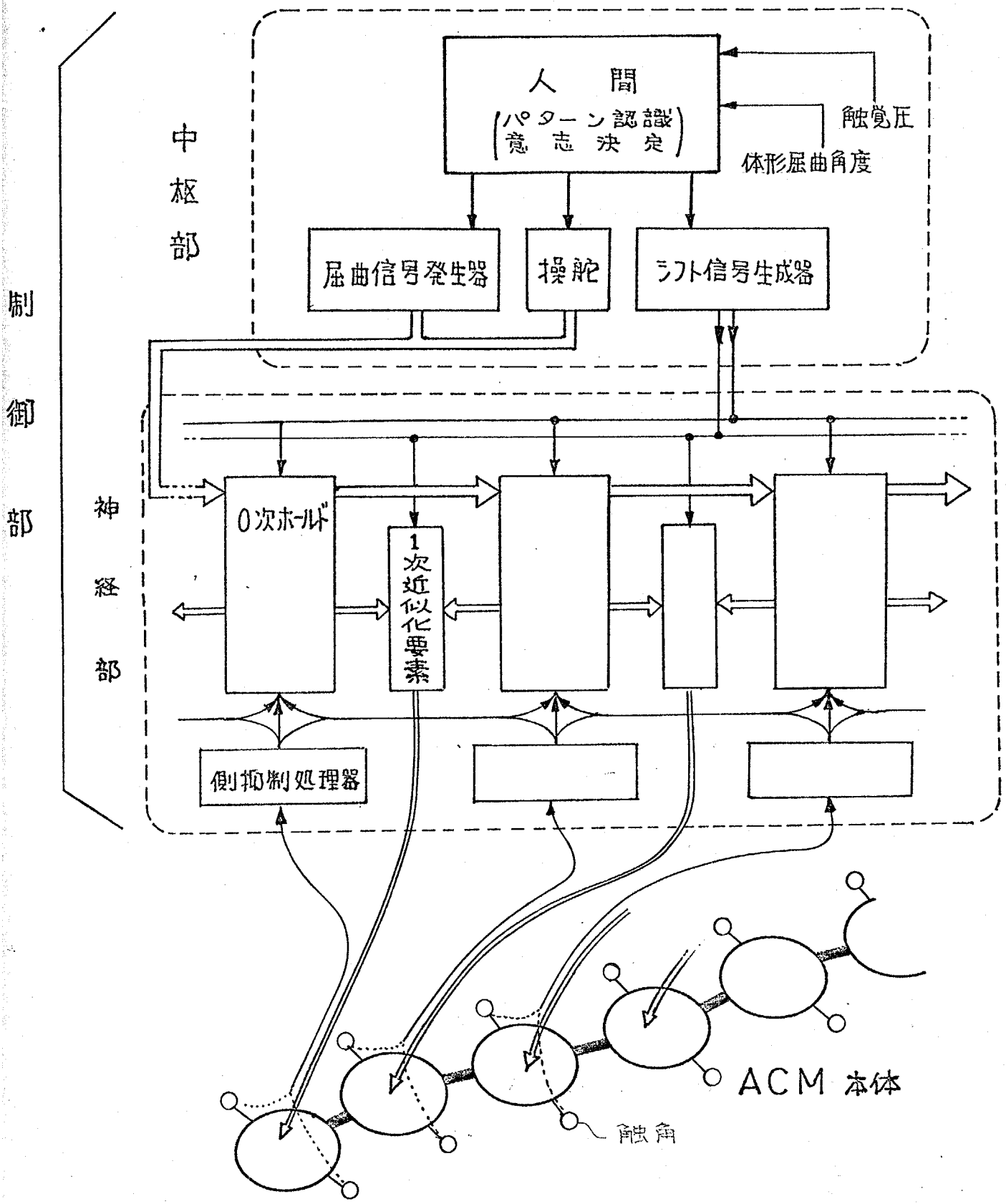


Fig. 9-18　触覚を持つACMの制御系構成

路からなっている．このような単位制御要素がFig. 9-18のように結合されることにより，角度信号をシフトしながら，触覚情報を側抑制的に処理し，シフトしていく角度信号に重畳させることができる．その結果，中枢から与えられた運動が触覚によって修正していくような動作を実現することができる．

9-5-3 効果器

試作材本体を示す．アクチュエータと触覚を有するため，生体系と対応させて効果器と呼ぶ．アクチュエータとしてのDCモータサーボ系はFig. 8-8に示す．触覚はON-OFFスイッチを用いている．

本試作材制御系は以上のような構成になっている．実際には中枢部と神経系を電源と共にFig. 9-19のごとく，ACM試作材本体と電気ケーブルで結合されている台車上に装備している．

9-6 試作機による制御実験

本章における以上の考察の妥当性を明らかにするために，次のような試作材による制御実験を行なった．人工ほふく推進の場合には滑走面の摩擦係数比 μ_t/μ_n が重要であり，そのために材械モデルでは体軸方向に固定したキャスターを対地接触部に用いていた．しかし触覚を用いる本試作材では床の摩擦およびその方向性は無関係であるので，対地接触部には摩擦の小さい自在キャスターを用いてすべての実験を行なっている．

9-6-1 物体へのからみ付き実験

まず，側抑制型の触覚情報処理によってFig. 9-2のような制御運動が可能であるかを明らかにするために，物体へのからみ付き実験を行なった．その結果例をFig. 9-20 (1)~(3)に示す．任意の形状の物体をACMに押しつけていくと，ACMの各動作器は側抑制的接触回避運動をなめ，それが重なり合うことによりACM体軸形状

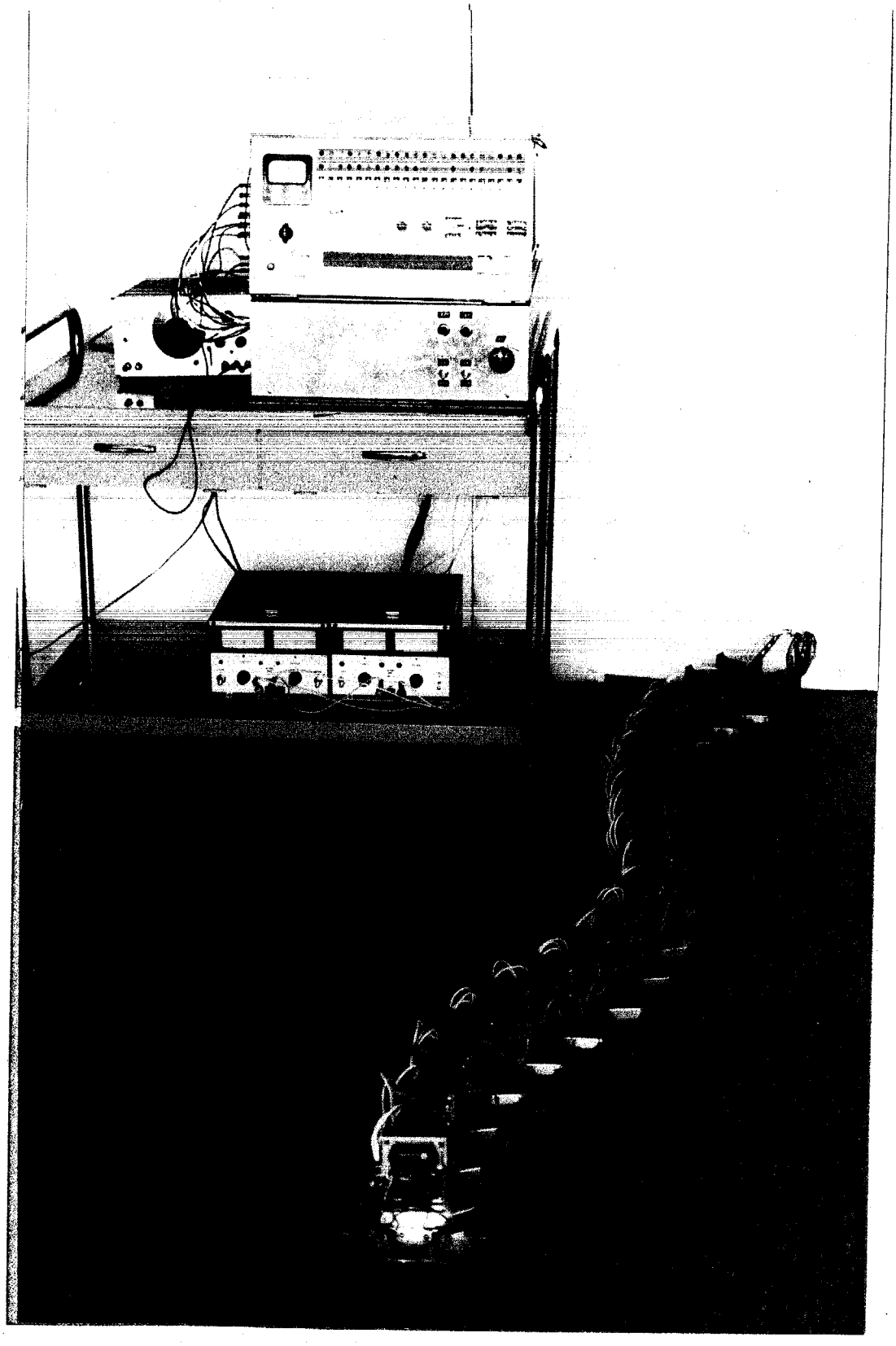


Fig. 9-19　　本試作枠　全景

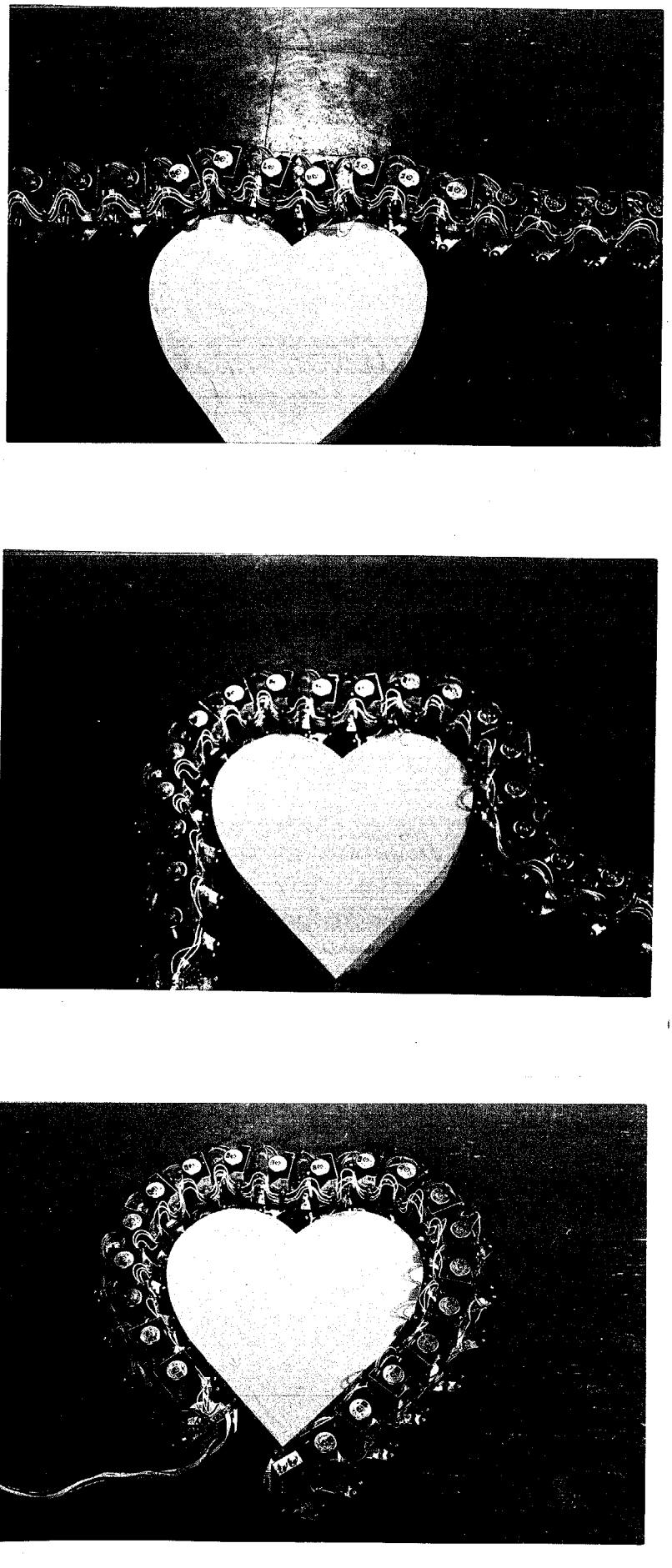


Fig. 9-20　ＡＣＭによる物体へのからみ付き実験

が物体形状に倣いつつ変形していく．ＡＣＭが十分物体をつつみ込むと，物体を外から押しつけなくてもからみ付き動作を続け完全に物体を包み込む．Fig. 9-20 の実験例以外に円，半円，三角形，四角形等の形状物体へのからみ付き実験を行ない，すべてほぼ１分間程度でからみ付きを完了することを確認している．以上の実験から側抑制の触覚情報処理によって理論通りのなめらかなやわらかい運動を行なうことが可能であることがわかった．

なお，深い凹部のある形状へのからみ付き運動を側抑制型の触覚情報処理のみで行なうためには，１bitのON-OFF触覚のみでは不十分であり，アナログ的あるいは少なくとも３値以上の接触圧段階を検出する触覚とそのアナログ的情報処理が必要であると推定されているが未だ実験的な検討は行なっていない．

9-6-2 迷路内侵入および迷路内自走実験

ＡＣＭに触覚を付加すれば，荒地の基本的なモデルである迷路内に侵入し，自走していくことが可能であることを次に示した．

まず，側抑制型の情報処理を行なう触覚のみでＡＣＭを迷路内に押し込む実験を行なった．前節のからみ付き実験ではＡＣＭの片側の触覚のみを用いたのに対し，本実験では両側面の触覚による側抑制的運動制御を用いている．側抑制の働きにより，ＡＣＭ体幹はアクティブに，常に体形形状を迷路壁面と平行になるように修正してゆき，かなりなめらかに迷路内への侵入を行なうことを確認した．

つぎに，触覚の側抑制型運動制御と共に，押し込み速度と同期した体幹屈曲角信号のシフト制御を同時に行なった．このような，２つの運動制御の併用によりＡＣＭの迷路形状への適応性は著しく向上し，迷路内への圧入はほとんど抵抗なくなめらかに行なえるように改善された．

上記の，側抑制型運動制御とシフト制御の併用により，迷路内での自力推進も可能である．この自力推進の原理は次の通りである．

まず，ＡＣＭが迷路内に侵入していくとＡＣＭ先頭節が迷路壁面に接触してその形状が知覚される．その結果ＡＣＭ先頭節の方向が迷路方向に修正される．先頭節の修正角度信号はシフトされて後部節に伝播され後部節は先頭節と同じ形状をとろうとする．このとき，第２節以降の触覚感度Ｋ（(9-1)式 参照）が低ければ，ＡＣＭ後部節はそのままの迷路内位置では迷路形状に適合することができず，先頭節のあった迷路内位置まで移動しようとする．このような動作が全体幹について重畳される結果，ＡＣＭは角度信号のシフト速度に同期して迷路内を推進していく．なお，この際先頭節の触覚感度Ｋのみは敏感にする必要があり試作機の制御実験では約2.5倍にとってある．その実験例をFig. 9-22に示す．角度信号のシフトが遅い時には推進しないが，シフト速度を早くするに従って迷路内壁を押しながら推進を始める．Fig. 9-23およびFig. 9-24には，先頭節にランプ（２個）を取り付けＡＣＭの迷路内自走の様子を示したものである．迷路屈曲の大きい所では数回の迷路形状探査を行なっているが直行路ではほとんどなめらかに自走していることがわかる．なお，迷路内自走速度は平均4 cm/sec程度であった．

なお，この迷路内自走時の推進力は第６章で述べたように原理的に壁面からの垂直反力のみから生ずるものであり，これは試作した機械モデルにおいても同じである．つまり，自在キャスタを対地接触部としているため，推進力はすべて壁面からの垂直反力によって生じている．このように移動環境を知覚しながら，その不規則な形状を積極的に利用して推進力を生じ，しかも推進のために障害をまったく必要としない推進形態は，従来人工的に実現されたことがなく，本ＡＣＭ試作機によって始めて実現されたものである．

9-6-3 杭押し推進実験

迷路以外の環境のモデルとして，杭が並ぶ環境を考えることができる．これは森林の中や樹木上などの移動環境のモデルと考えられ

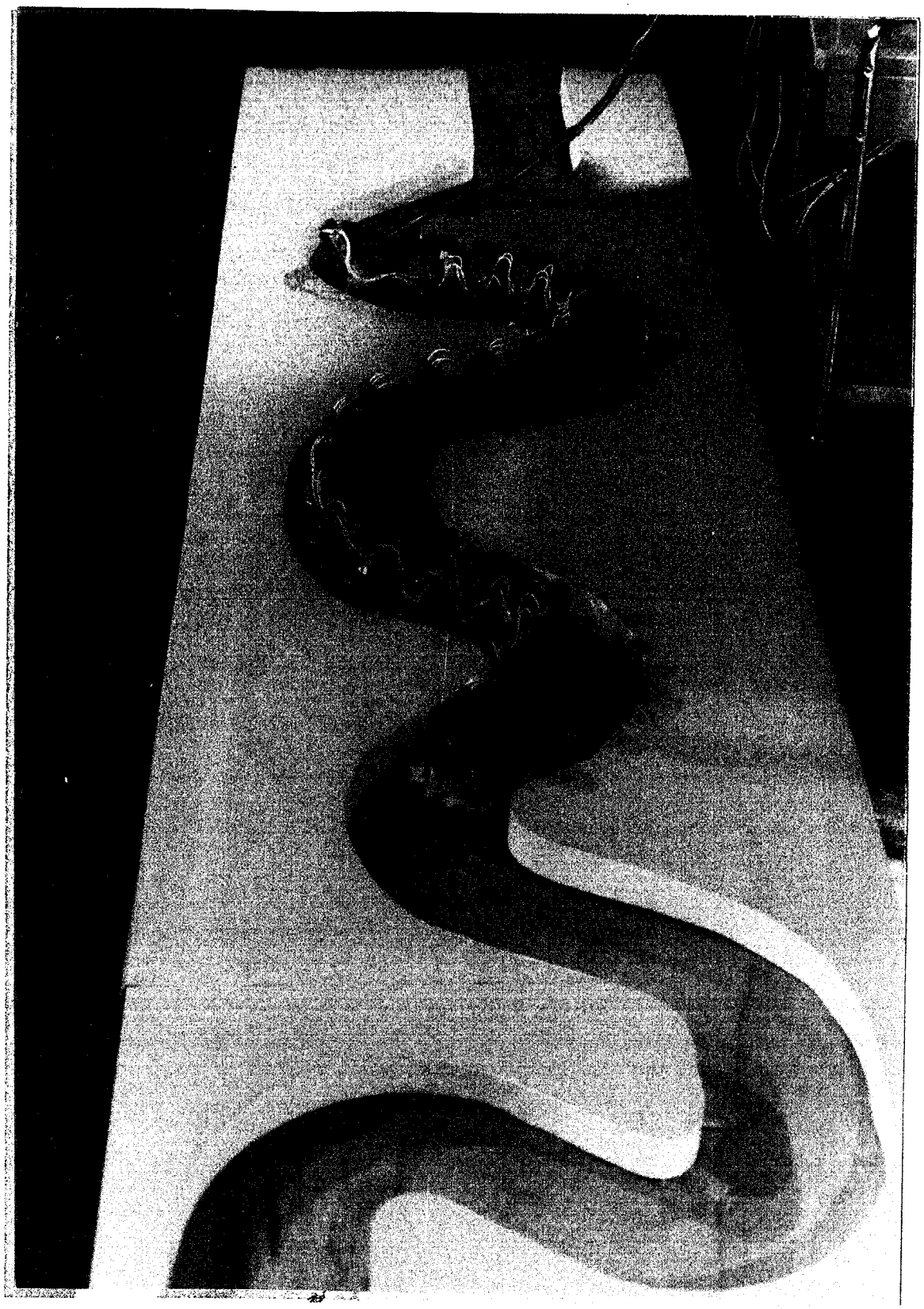


Fig. 9-21　　ＡＣＭによる迷路内自力推進

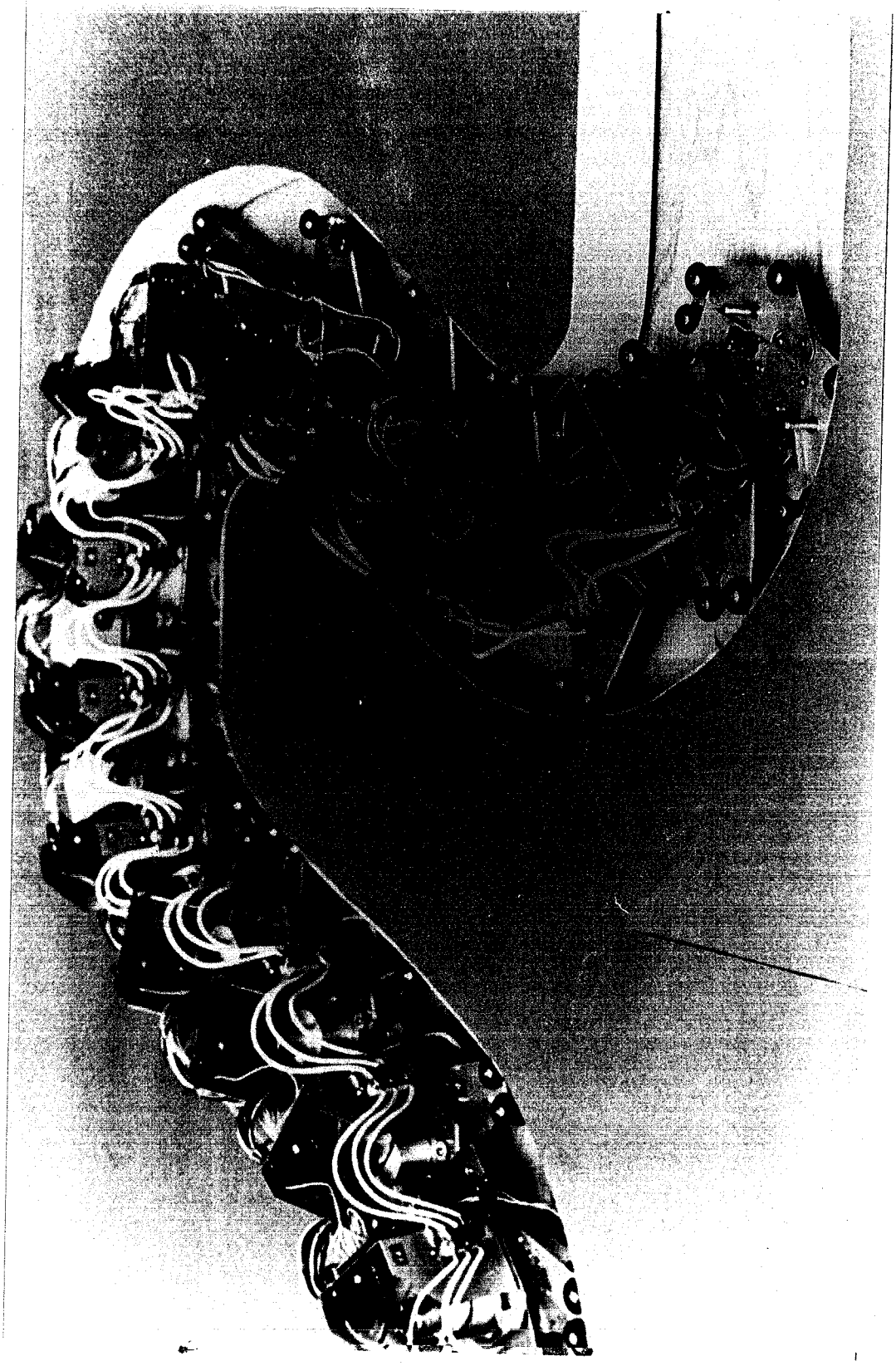


Fig. 9-22　迷路内推進　部分拡大写真
(朝日新聞出版写真部撮映)

Fig. 9-23　迷路内推進

（ＡＣＭ頭部に強弱２つのランプを持つ）

（朝日新聞出版写真部撮映）

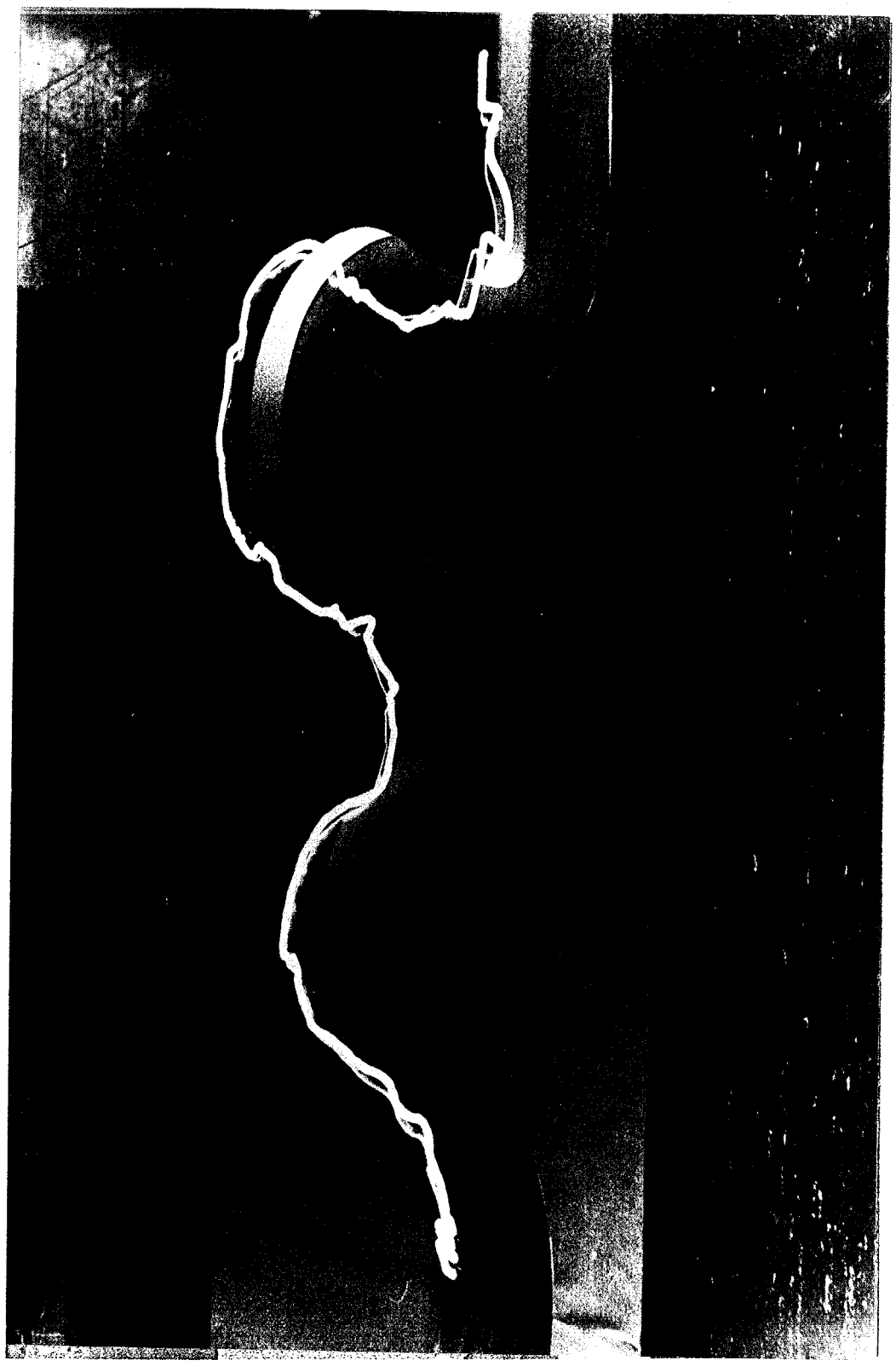


Fig. 9-24　迷路内推進
(頭部に強弱2つのランプを持つ)
(朝日新聞出版写真部撮映)

よう、そのうちここでは1つの杭を押しての推進運動の実験を行なった。杭にACMをからみ付かせた後、頭部を移動すべき方向に制御しながらシフト制御を行なうと、Fig. 9-25 (1)～(3)のごとく杭押し推進を始める。Fig. 9-26, Fig. 9-27 には前述と同じく頭部節にランプを取り付けてその移動軌跡を示している。

なお、現在では頭部節に与える角度指令は人間により操縦されている。しかし、今後触覚と次の杭を観測する視覚などの知覚器を備えることにより、杭の並んだ環境をさらに押しながら推進するような移動様式も実現可能であると思われる。

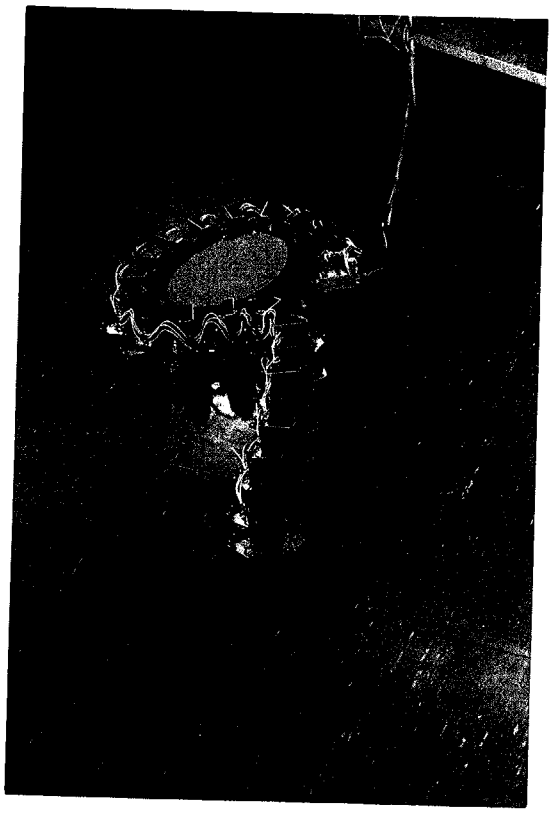
9-7 本章の結論

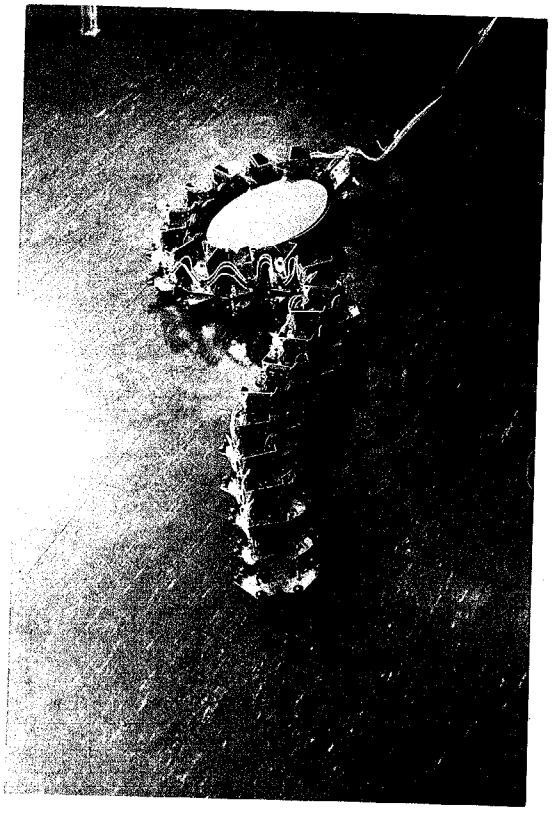
本章においては、

i) ACMの触覚情報を処理するには、生体神経系特有の「側抑制」の原理に沿った方式が有効であること

ii) ACM体幹の屈曲角度信号を体幹に沿って伝播するシフト制御は重要であり、それを精度良く比較的簡便に行なうには、ACMでは未使用角度信号を利用できるという特徴を生かした1次ホールド型シフト方式が望ましい、などの特徴を明らかにした。そして、これらの原理を実現する際の工学的諸問題を論じた後試作した制御回路を示した。最後に、試作した触覚を持つACM機械モデルにより、i) 物体からの回避あるいはからみ付き運動、ii) 迷路内への侵入と迷路内での自力推進、そしてiii) 杭を押しての推進などの運動機能をACMが有することを実験的に明らかにした。

これらの結果、側抑制型触覚情報処理や1次ホールド型角度信号シフト制御は、未だかなり低次の情報処理方式であるにもかかわらずACMの柔軟的特徴をうまく生かす運動制御方式であり、これらの制御原理によって従来からある人工的諸機構には見られなかった新しい機能がACMによって実現できるということが確認できた。





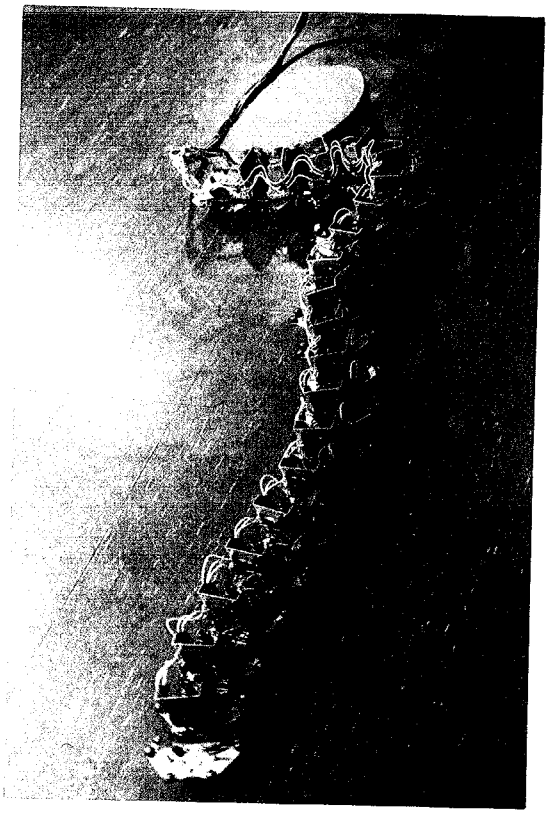


Fig. 9-25　杭押し推進　1

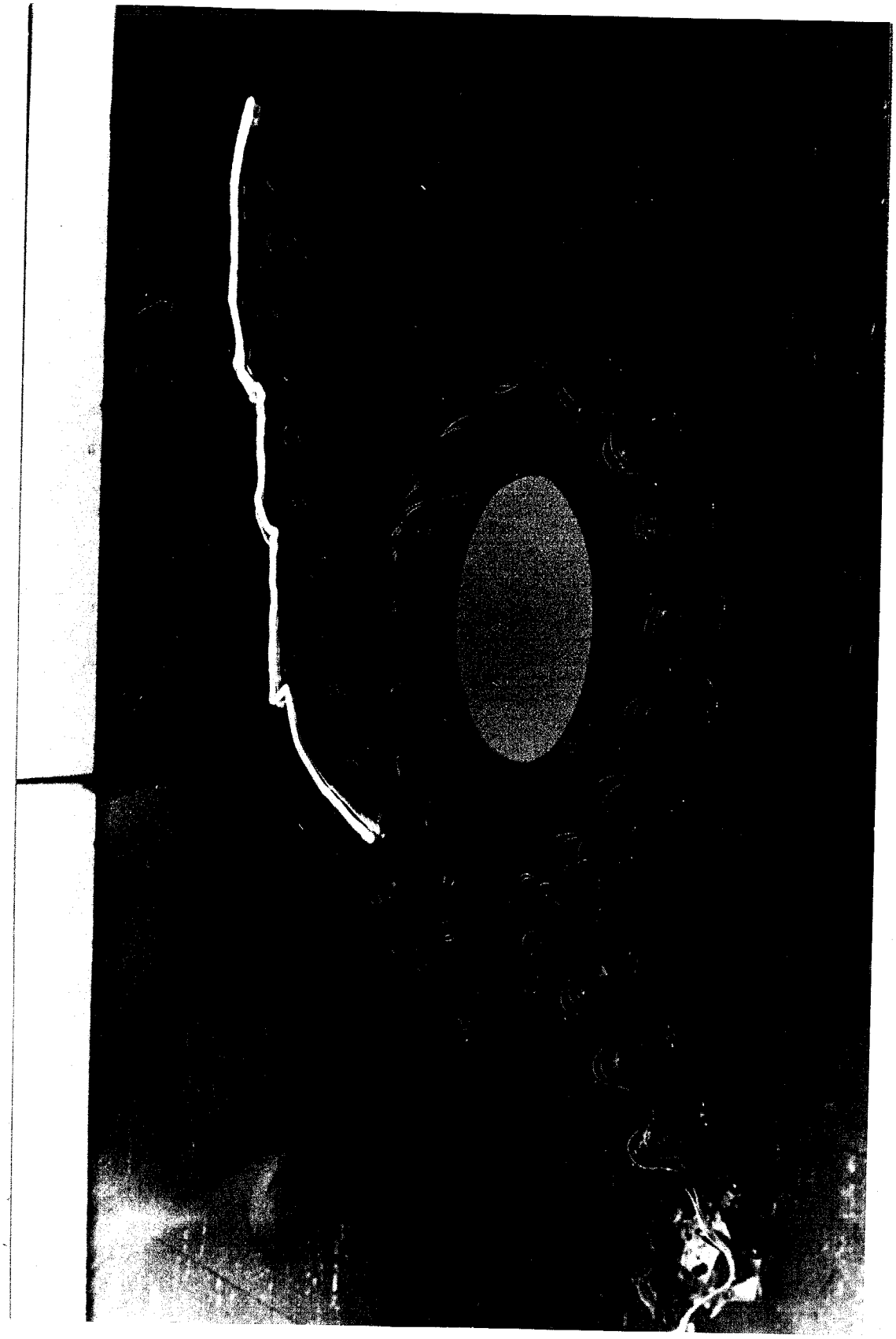


Fig. 9-26　杭押し推進　2
（頭部に強弱2つのランプを持つ）
（朝日新聞出版写真部撮影）

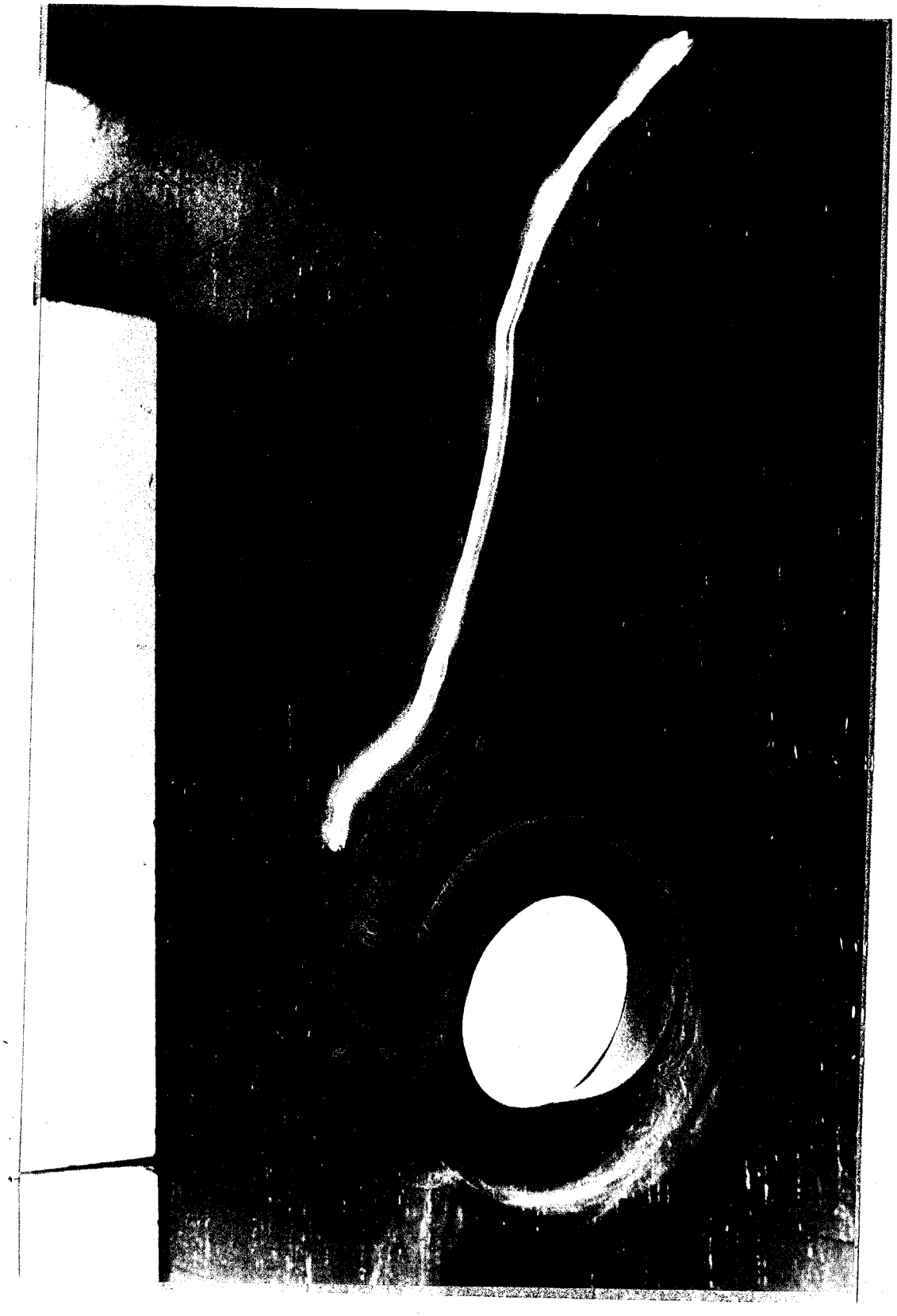


Fig. 9-27　杭押し推進　3
（頭部に強弱2つのランプをおっ）
（朝日新聞出版撮映部撮映）

思われる．特に，本章における迷路内推進および旋押し推進実験で実現した推進様式は，移動環境を知覚することによってその不規則な形状を積極的に推進力発生のために利用しており，しかも推進のために摩擦をまったく必要としていない。このような推進原理による移動様式は従来の人工移動機械には存在しなかったものであり，本章における実験で始めて実現されたものである．

第10章　結論および未来への展望

10-1　本論文の結論

本論文によって得られた結論はつぎのとおりである．

第1章　「細長く柔軟な体幹を有し，それ自身に装着されている感覚器群とアクチュエータ群とによって外部環境の情報を収集し，与えられた性能目標と自己保全に適合した屈曲運動と屈曲姿勢を，自律的に行ないうるような移動形知能機械」と定義される新たな機能体概念である「索状能動体」（active cord mechanism，ACMと略称する）はいくつかの機能的特徴を有しており，その生物力学的立場からの研究により工学的に有益な応用の可能性が開けることを示した．そして，本論文で主として扱うACMの移動機能についの特徴を明らかにするために，その生物界におけるモデル動物として「ヘビ」に注目する立場でその移動様式の特徴，従来の研究状況を考察した所，ヘビは歩行動物や人工の移動機械では踏破できないような荒地環境を推進することができる．また，生物力学的立場からのその移動運動の解析はほとんどなされていないことを示した．

第2章　ACM（索状能動体）の移動運動の基礎として，任意の体幹形状でアクチュエータ群が任意のトルクを発生したときに体幹に生ずる体幹接線方向および法線方向に生ずる力　パワーなどをTable 2-1のごとく誘導した．

第3章　ヘビが定常ほふく運動を行なうときの体形曲線についての研究は生物形態学的にも，またほふく運動の力学解析を行なう上での基礎としても重要であるにもかかわらず，従来ほふく体形曲線についてはほとんど研究がなされていない．本章では「曲率が曲線に沿って正弦波状に変化する曲線」と仮定した曲線が運動筋の収縮様

構的にも容認できるものであり，また実際のヘビの滑走体形とも良く一致することを示し，serpenoid curve と名付けた．また，clothoid spiral を半周期ごと合成した曲線も serpenoid curve についでほふく滑走体形を良く近似することを示した．

第4章　定常ほふく運動解析のための合理的な前提条件を示した後，滑走中の筋力分布形状は(4-4)式で示されるパラメータσによって特徴づけられる仮定を行なった．そして，(4-4)式と serpenoid curve 体形曲線近似から，定常ほふく運動時の接線力・法線力・パワーなどを Table 4-1 のごとく誘導した．これらの力学関係はシマヘビを使用した動物実験によって検討し，その妥当性を明らかにすると共に(4-4)式のパラメータσは $1<\sigma<2$ の範囲の値であり，大きな推進力を発生しようとするほどσは1に近づくということを示した．ほふく運動中の推進力も解析的に求まることを実験的に検証した．

第5章　本章においては大別すると3種類の定常ほふく運動時の適応特性を考察しており，それぞれ次のような結論を得ている．

(1) Fig. 5-1のような，ヘビの定常ほふく推進中に観察される体幹の曲げピーク部をそり上げて疾走する習性が力学的には，全力疾走するヘビ体幹に部分的に集中して働くスリップ力を打ち消すことを目的とした体幹重量の適正分配のための動作であることを示した．

(2) Fig. 4-3 に示すような，ほふく滑走体形のパラメータの1つであるくねり角αにはつぎのようなα-適応則が成り立つことを解析的に導き動物実験により検証した．「ほふく運動を効率良く行なうためには，くねり角αは常に滑走面摩擦係数比 μ_t/μ_n に適応させ，(5-5)式に示されるくねり角の下限値 α_0 に近く，しかも α_0 よりも大きく保持しなければならない。」

(3) Fig. 4-3 に示すほふく滑走体形のパラメータであるくねりの大きさλにはつぎのようなλ-適応則が成り立つことを解析的および生理学的知見から誘導し，動物実験によって検証した．「くねりの大

きさ l は，ほふく推進体のアクチュエータとしての筋肉効率に適応し，その出力パワーがほふく推進中に最適になるように保持されている。」

第6章　ほふく運動の特徴が良く発揮されるいわゆる荒地環境の基本的かつ代表的なモデルとして，等間隔の壁面に囲まれた迷路を想定し，そこでの推進力等を解析した．その結果迷路内推進効率を支配する因子は迷路内屈折部の内壁に接する3点の体幹座標間の距離の比 l_2/l_1 であり，壁面に接していない体幹部の曲率分布等には影響されない．また，この因子 l_2/l_1 は迷路の環境パラメータ，つまり迷路屈折角㊀と迷路壁面摩擦係数 μ に依存し(6-10)式のような関係を有することが求まった．この推論結果はシマヘビを用いた動物実験により検証した．以上の結果，Fig. 6-2 の4つの迷路内ほふく滑走体形のうちでは(d)の滑走体形が力学的に最も効率が良く，実際のヘビによっても良く観察されることが明らかになった．

第7章　多様な移動様式のエネルギ効率に関する評価基準としては(7-1)式で定義する移動仕事率 ε が妥当であることを示し，ほふく運動の移動仕事率 ε_{snake} ((7-8)式)および，それとの比較対照のための2足歩行の移動仕事率 ε_{walk} ((7-20)式)を誘導した．それらを Fig. 7-6 に示す Gabrielle - von Karman Diagram 上で論ずることにより，ほふく運動の特異性は，その主因である体幹部腹面を滑走中常に地表に接しているという点が同時にほふく運動のエネルギ効率を低下させる原因になっていること．しかし，この点は人工ほふく推進機械ではキャスター，ソリ等の滑走手段を用いることにより改善できること．また2足歩行には経済速度があるのに対しほふく運動には起立姿勢保持，重心制御などのエネルギ消費がないため低速度領域ほどエネルギ効率の良いことなどの特徴を抽出することができた．

第8章　人工的にほふく推進を実現するために必要な基本的諸問題を論じ，人工ほふく推進機械の試構とその制御のための設計法を

を示した．そして，人工ほふく推進の実現に成功し，滑走体形と滑走速度の制御および滑走方向の操縦が所期の設計仕様通りに行なえることを確認した．

第9章　移動体としてのＡＣＭだけでなく，その機能をさらに拡大し，知能機械としての汎用性のあるＡＣＭを開発してゆくためには外部環境を知覚する触覚の存在が重要であり，その触覚情報の処理には，生体神経系特有の「側抑制」の原理に沿った方式が有効であることを示した．また，ＡＣＭ体幹に沿って屈曲角度信号を伝播するシフト制御を比較的簡便に精度良く行なうには Fig.9-7 に示すようなｌ次ホールド型方式が有効であることを示した．そして，これらの原理を実現する際の工学的諸問題を論じた後，試作した試作機によって i) 物体からの接触回避とからみ付き運動 ii) 迷路内への侵入と迷路内での自力推進，そして iii) 杭を押しての推進などの動作がなめらかに行なえることを検証した．

第10章　ＡＣＭに関する研究の未来への展望を行ない，近い将来には胃カメラの幹部として使用するようなマニピュレータ的応用の可能性があるとともに，人工知能機械として特異な発展の可能性をＡＣＭは有していることを示す．

10-2 ＡＣＭの生物工学的研究に残された課題

ＡＣＭのモデル動物であるヘビに関する動物運動学的な知識と，それから得られるであろうＡＣＭ設計の基礎となる工学的知見は，本研究では十分に探求され尽したと言うことはできない．本論文で得られた知識以外に今後ＡＣＭ型の動物の生物工学的研究によって明らかにすべき問題点としてはつぎのようなものを挙げることができる．

i) 頭部および尾部の体幹形状についての考察

本論文で行なった力学解析は主として移動体としてのＡＣＭ体幹を無限長さと想定していた．しかし，実際のヘビは当然有限長さの体幹からなり，尾部にかけての体幹の太さは特有の変化率で減少している．また，ほふく推進時の頭部姿勢はほぼ推進方向に向けられ体幹部のくねり運動とは独立した直線的な動きを行なう．つまり，ほふく体形の境界部の頭部および尾部には，それぞれ独自の機能が存在しており，人工のほふく推進機械の設計の際にもそれらの知見を導入した頭部から尾部までの体幹形状の選択と，それに適した運動制御方式をとるべきであると考われる．

筆者はすでにヘビの滑走体形の観察およびその体幹の解剖学的観察を行なっている（付録１には滑走軌跡の観測結果，そして付録２には解剖学的な形態の測定データを示す）．今後，これらのデータを基にすることによってより広範な側面からＡＣＭの移動運動の解析を行ってゆくべきであると考えている．

ii) 腹部側面のエッジ角調整機能

すでに§5-3-4節において述べたように，ヘビ体幹腹部の表面状態とその側部にあるFig. 5-7のごとき鋭角部形状はほふく推進を行なうための摩擦条件を保持する重要な因子となっている．そして，この体側部エッジ角度はほふく滑走中に適応的な調整がなされてい

ることが本研究の観察によって推察されているが，微視的現象のためその間のメカニズムは未だ定量的に把握できていなかった．そこで本論文ではこの点を未知とした解析手段をとっているが，ほふく運動の力学解析をより厳密化してゆくためには，この現象について滑走運動中にしかも十分細部にわたって観察と吟味がなされる必要があると思われる．

(iii) 神経生理学的立場からの検討

本研究においては，ほふく運動の神経系および感覚器系の秩序について，第8章，第9章での機械システム構成時の所見からいくつかの基本的原理の存在を推定している。しかし，これらの所見は，未だ実際のヘビを用いた神経生理学的な立場からの実験的な比較・吟味は行なわれていない．今後，この点の吟味を実施してゆくとともに，さらに高度の運動制御原理を明らかにしてゆくために，ほふく動物そのものについての組織的な神経生理学的研究を行なうべきであろう。ほふく運動時の効果器への遠心制御，体性感覚器からの求心性フィードバック制御，そしてそれらの情報の中枢神経系における情報処理系等についての神経生理学的研究により多くの有益な知見が得られるものと思われる．

(iv) ヘビ以外のＡＣＭ型動物の考察

本研究ではＡＣＭ型の動物のサンプルとしてヘビを使用したが，すでに述べているようにＡＣＭ型の動物としてはヘビ以外に水中の多くの魚類から鞭毛，繊毛，回虫，ミミズ，タコの足，ゾウの鼻というように多数存在すると考えられる．そして，たとえばその駆動方式もタコの足の場合には骨格を持たないためにいわゆる水力的骨格を用いており[64]，また，鞭毛や繊毛では基本的には体幹円周部に沿った9本と中央2本の微小管要素の適当な拮抗力により屈曲運動を行なうといわれている[66]．今後これらの他種のＡＣＭ型動物の駆動方式あるいはその運動の適応性について観察を行ない実験解析的に検

討することによりＡＣＭに関する知識は飛躍的に増大するであろう

ほふく運動についてはその他視覚系とほふく運動の関係，流体中でのほふく運動などまだ多くの未解決の問題が残されているというべきであろう．

10-3 ACMのマニピュレータとしての未来

従来からACMのような形態のマニピュレータを実現する試みはほとんど行なわれていない．わずかに水中での使用を目的とした直列マニピュレータ[56]やミンスキーの腕[62]と呼ばれる筋数が比較的多い関節型マニピュレータなどが試作されたにすぎない．ACM型のマニピュレータが第1章に述べたような多くの特徴を有しながらその開発の遅れた最も大きな原因はi) 非常に大きな自由度の運動制御の複雑さと，ii) アクチュエータ群の超小型化の困難さにあったと言えよう．しかし，筆者は，i)は従来の数節からなるマニピュレータ等の制御方式の単なる拡張として取り扱うことに起因するものであり，本研究で扱ったごとく微小節からなる連続体と考えるような新たな運動解析手段と制御方式により新たな問題解決の糸口がつかめる．また，ii)の問題も超小型のアクチュエータの開発を待たずとも，たとえば腱による遠隔駆動などにより同等の機能を実現できると考えている．よって，マニピュレータとしてのACMの研究は近い将来の実用化を見ざして行なわれるべきであり，期待される成果も大きいと言って良いであろう．

現在，マニピュレータとしてのACMの運動制御を検討するための基礎として，物体のマニピュレーションに3次元空間内の運動が不可欠であることから，本論文のACMによる2次元運動の基礎関係式を3次元的に拡張しつつあり，またその駆動方式として腱を用いたメカニズムを検討中である．

このような特性を有するACMは小型化が可能であり，分解作業修理の不可能な複雑な機械内部への侵入作業や，また同様にin vivoの状態での作業を不可欠とする生体のための医療用器具，たとえば胃カメラ，心臓カテーテル，関節鏡などの用途も開拓できると考えている．さらに，ACMに適した駆動方式は腱を用いる遠隔駆動方

式以外にたとえば流体圧を用いる方式も考えることができると思われる．ＡＣＭの中央に貫通して導かれている高圧作動流体をＡＣＭに沿って配備されたシリンダに弁操作で適当に加えることによりかなり簡便で高出力の屈曲運動が実現できるであろう．そのため，たとえば内部に高圧流体を有する消火ホースを能動的に移動可能にし，火災現場に近づくような応用も可能であるかもしれない．

10-4 ＡＣＭの人工知能材械としての未来

ＡＣＭを人工知能材械として発展させ高度の知能的作業を遂行してゆくためには，ＡＣＭ本体の感覚受容器群からの情報を適当に処理し作業環境および移動環境を認識する能力，さらにそれに基ずく意志決定を行なう能力を持つ中枢部の存在が必要である．(本研究で試作したＡＣＭ材械モデルではFig.9-18 に示すようにこの部分を人間が代行しており，未だ完全な知能材械とは言えない)．現在までいわゆる人工知能ロボットに知的能力を与える問題については，多くの研究の蓄積がなされており，ＡＣＭの知的材能を考える場合にもこれらの研究が参考になると思われる．

しかし，特にＡＣＭの認識能力については，ＡＣＭ独自の形態に依存した，従来の知能ロボットとは異質の特異性が存在しているものと思われる．つまり，その認識のための観測情報としては，i) ＡＣＭの柔軟な体幹を外部環境に適応させることによって得られる，外部環境形状と対応したＡＣＭ体幹の屈曲姿勢情報，および ii) その体幹の触覚から得られる接触情報が主である．このような観測情報を基として遂行すべき認識作業こそ，ＡＣＭ独自のパターン認識問題と捉えることができるであろう．

このようなＡＣＭ独自の認識問題について，すでに筆者はＡＣＭがFig.9-20のごとくある形状の物体を包み込んだとき，その物体形状の特徴をいかに抽出するかという基本的問題を取り上げ検討を行なっている．具体的には i) 任意形状の外周曲率分布から囲まれた部分の面積を求めるための原理を明らかにし，その原理をアナログ演算回路で実現し妥当性を検証した(付録3にその求積基礎式と具体的な実施例を示す)．そして ii) 物体形状の特徴を示すと考えられる任意の特徴パラメータの妥当性を評価する新しい手段としてパターン生成法という方法論を提唱し，それを用いてＡＣＭからの観測

情報の処理方式を検討した（付録4にはその方法論の概要と，1)で誘導した方式によって求めた面積などの測定量を含む特徴パラメータを示し，コンピュータ・シミュレーションによるパターン生成結果例を示す）

今後，これらのパターン認識能力について検討を深め，意志決定過程と結び付いた中枢処理系を開発してゆくことにより真に知能的な機能を有するＡＣＭ型の人工知能機械が実現できるであろう．

10-5 謝 辞

ヘビという一見非工学的対象に対し，その生物工学的研究の意義を逸早く洞察され，いくつかの先駆的研究[22~24]により，筆者に本研究テーマへの興味を喚起されるとともに，その研究の遂行過程で常に研究環境の整備に腐心いただき，逐一御指導賜わった梅谷陽二教授に心からの謝意を表します．

また，有益な御助力をいただいた石田明允助教授（現在医科歯科大），実験の遂行に協力いただいた大内英俊氏，高岡得郎氏，北田誠氏，西山友章氏らの方々に感謝の意を表します．

最後に，本実験の験体として，不本意ながらも心良く協力をいただき，人類の科学技術の向上のために多大の貢献をいただいた本邦産シマヘビ（Elaphe Quadrivirgata）に対して深く感謝すると共に，末永きよう御冥福を祈ります．

引　用　文　献

筆者による印刷論文

1) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 定常直進滑走のモデル解と動物実験 —，計測自動制御学会論文集，8－6，724／731（1973）

2) Umetani, Hirose : Biomechanical Study of Serpentine Locomotion, Proceeding of Romansy Symposium., Udine, Italy. Springer-Verlag (1973)

3) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 移動様式としての評価 —，バイオメカニズム2，289／297，東京大学出版会，（1973）

4) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 定常直進滑走時の体形曲線 —，計測自動制御学会論文集，10-4，513／518（1974）

5) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 滑走面に対する体形の適応 —，計測自動制御学会論文集，10-6，682／686，（1974）

6) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — ほふく推進体の操縦性と制御実験 —，計測自動制御学会論文集，11-1，20／24（1975）

7) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の生物力学的研究 — 迷路内ほふく推進の解析と実験 —，計測自動制御学会論文集，12-1，（1976）

8) Umetani, Hirose : Biomechanical Study of Active Cord-Mechanism with Tactile Sensors, 6-th International Symposium on Industrial Robots, England (1976) (accepted)

9) 広瀬・梅谷 ： 触覚を有する索状能動体の運動制御，計測自動制御学会論文集（1975，投稿中）

筆者による口頭発表

10) 梅谷・広瀬 ： ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究，その3 滑走運動のモデル解と動物実験，第2回バイオメカニズムシンポジウム，63/65（1971）

11) 梅谷・広瀬 ： ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その5 滑走面に対する体形の適応，第11回SICE学術講演会，491/492（1972）

12) 梅谷・広瀬 ： ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その6 ほふく推進体の操縦性と制御実験，日本自動制御協会学術講演会招待講演，7/12（1973）

13) 梅谷・広瀬 ： ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その7 移動様式としての評価，第3回バイオメカニズムシンポジウム前刷（1973）

14) 梅谷・広瀬 ： ほふく運動の生物力学的研究（定常直進滑走時の体形曲線），第12回SICE学術講演会，481/488（1973）

15) 梅谷・広瀬 ： 索状能動体の推進力学基礎式の誘導，第13回SICE学術講演会，385/386（1974）

16) 梅谷・広瀬 ： 触覚を有する索状能動体の側抑制型運動制御，第13回SICE学術講演会，383/384（1974）

17) 梅谷・広瀬 ： 索状能動体の迷路内推進力学，第17回自動制御連合講演会，415/416（1974）

18) 梅谷・広瀬 ： 周回接触法による断面求積計，第17回自動制御連合講演会，571/572（1974）

19) 梅谷・広瀬 ： 触覚を有する索状能動体の推進運動制御，第4回バイオメカニズムシンポジウム前刷，360/361（1975）

20) 梅谷・広瀬：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その8 滑走体形の外気温による変化，第4回バイオメカニズムシンポジウム前刷 358/359 (1975)

21) 広瀬・梅谷：パターン生成法による図形の特徴空間評価，第14回 SICE 学術講演会，273/274 (1975)

本論文に先行する関係論文

22) 梅谷：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その1，滑走のメカニズム，生体工学と制御工学シンポジウム講演会論文集，125/130 (1970)

23) 梅谷：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その2，滑走の力学とモデル実験，第1回バイオメカニズムシンポジウム前刷，253/260 (1970)

24) 梅谷：ほふく（匍匐）運動の材構と制御の研究 その4，滑走運動の力学的要因と実験，第14回自動制御連合講演会予稿集，291/292 (1971)

その他の引用文献

25) アルチー・カー：爬虫類，140，タイム・ライフインターナショナル

26) W.Mosauer : Locomotion of Snakes and its Anatomical Basis, Ph. D. Thesis, University of Michigan, 117/130 (1931)

27) W.Mosauer : , 131/147

28) N.Rashevsky : Mathematical Biophysics, Vol.II ,256/261, Dover Publication, Inc. (1960)

29) J.Gray : Animal Locomotion, 166/193, Norton (1968)

30) J.Gray : The Mechanism of Locomotion in Snakes, J. exp.Biol. 23,101/120 (1946)

31) E.L.Tyson : On the Anatomy of the Rattlesnake(Vipera Caudisona), Philosoph. Transact. Royal Soc. London,No.144 (1682.3)

32) B.G.La Cépède : Histoire Naturelle des Serpents. 2nd ed.1845 Paris (1789)

33) E.Home : Observations Intended to Show that the Progressive Motion of Snakes is Partly Performed by Means of the Ribs. Philos. Transact. Royal Soc. London (1812)

34) A.M.C.Dumeril et G.Bibron : Erpetologie Generale ou Histoire Naturelle Complete des Paptiles. Vol. VI . Paris (1843)

35) R.Owen : On the Anatomy of Vertebrates. London (1866)

36) H.F.Hutchinson : About Snakes."How do snakes progress?" Nature XX (1879)

37) A.Stradling : On the Movements of Snakes in Flight."Nature" (1882)

38) P.Buffs : Ricerehe sulla muscolatura cutanea dei serpenti e considerazioni sulla locomosione di questi animali. Padova (1904)

39) M.Nowikoff : Das Prinzip der Analogie und die vergleichende Anatomie. Jera (1930)

40) A.D.Fokker : De Voortbeweging der Slangen, Physica, Nederl. Tijdschr. voor Nat. No.3. (1927)

41) C.Gans : Terrestrial Locomotion without Limbs. Amer. Zool., 2-2 167/182 (1962)

42) G.Taylor : Analysis of the swimming of long and narrow animals, Proc. Royal Society of London Vol.214, 158/183 (1952)

43) M.J. Lighthill : Note on the swimming of slender fish Fluid Mech.9 305/317 (1960)

44) H. Hertel : Structure-Form-Movement, 182/184, Reinhold Publishing Corp., (1966)

45) G. Gabrielle, Th. von Karman : What price speed, Mechanical Engineering. Vol. 72, No.10 (1950)

46) M.G. Bekker : Off-The Road Locomotion, R&D in Terramechanics-, Univ. of Michigan Press. (1960)

47) M.G. Bekker : Introduction to Terrain-Vehicle Systems, Univ. of Michigan Press. (1969)

48) F. Park : Near Surface Vehicle, International Science and Technology, February issue (1962)

49) H.J. Ralston : Energy speed relation and optimal speed during level walking. Int.z. angew physiol, einschl. Arbeitsphysiol. 17, 277/283 (1958)

50) R. Passmore, J.V.G.A. Durnin : Human energy expenditure. Physiol. Rev. 35, 801/840 (1955)

51) B. Bresler, C.W. Radcliffe, F.R. Berry Jr : Energy and Power in the Legs of Above-Knee Amptees During Normal Level Walking. Berkeley, Univ. of California, Lower-Extremity Amputee Research Project (1957)

52) J.E. Cotes, M.E. Wise : Standardisation of text exercise. Feb. Proc.16/25 (1957)

53) N. Rashevsky : A Note on Energy Expenditure in Walking on Level Ground and Hill, Bull. of Mathematical Biophysics 24 (1962)

54) R. Beckett, K. Chang : An Evaluation of the Kinematics of Gait by Minimum Energy. Biomechanics, Proc. of the First Island Arsenal Biomechanics Symposium, 15/26 (1967)

55) Y. Nabar, R. Contini : A minimal principle in biomechanics, Bull. of Mathematical Biophysics 23, (1961)

56) V.C. Anderson, R.C. Horn : Tensor Arm Manipulator Design, ASME paper 67-DE_57 (1967)

57) J.W. Clark : Telechirics-For Operations in Hostile Environments Battelle Technical Review, Vol.12, No.10. 3/8 (1963)

58) 品川嘉也・品川泰子・井上章 : 筋収縮の運動方程式に基づく人体の運動方程式の一考察, 日本生理学会誌 29. 533/538 (1967)

59) J.H. Milsum ; 柔原道義, 相馬敬司訳 : 生体調節系の解析, コロナ社 202/205 (1970)

60) 日本数学会編 : 岩波数学辞典, 175 (1968)

61) 藤森聞一編 : 生理学大系 III 運動系の生理学 109 (1966)

62) 佐藤考平 : ロボット, オートメーション, 16-6, 48/52 (1971)

63) 玉重三男 : 動物の運動制御機構, 数理科学 14/19, (1968)

64) M. ウェルズ (羽田節子訳) : 動くしくみ, 平凡社, 86 (1972)

65) 加藤一郎 : 歩行機械, 機械学会誌, 78-676, 234/240 (1975)

66) 日本動物学会編 : 現代動物学の課題 1 細胞運動, 東京大学出版会 88/94 (1974)

67) 旧約聖書 Chapter 30 verses 19/20

68) 島崎三郎訳 : アリストテレス全集9, 岩波書店, 49/51

69) 鈴木良次 : ヒトデの行動のシュミレーション, 応用電子と生体工学, 10-2, 164/170 (1972)

70) 窪田忠彦 : 微分幾何学, 岩波全書, 17, (1957)

71) B.C.Abbott, and D.R.Wilkie : The relation between velocity of shortening and the tension-length curve of skeletal muscle, J. Physial., 120, 214/223 (1953)

72) 梅谷 : バイオメカニクス — 生物と機械との境界領域 日本機械学会誌, 73, 620, 1254/1263 (1970)

付録 1　滑走軌跡の観察

定常ほふく運動中の滑走軌跡を観察した．その観測例を Fig.A1-1 ~ Fig.A1-3 に示す．Fig.A1-1 は全長約130cmのシマヘビのうち頭部から50cmまでの滑走軌跡，Fig.A1-2 は 50~80cmの胴体部，そして Fig.A1-3 は 80cm ~ 尾部までの滑走軌跡を示している．図中の番号 a-b のうち a は 3 frame/sec で撮映したデータの frame 番号を示している．また b はヘビ体幹に頭部から 20cm 間隔に付けたマークの番号である．

このデータ例について滑走体形の振巾 $y(\ell)$ と体長 L との関係を求めると Fig.A1-4 のごとくなる．このことからつぎのことが言える．

i) 胴体部分の $y(\ell)/L$（振巾／体長）= 0.07~0.08 でほぼ一定

ii) 頭部の振巾は胴体部分の約 1/2 ~ 1/3

iii) ほふく運動始動時には図中破線のごとく尾部の振巾が増大することがある．

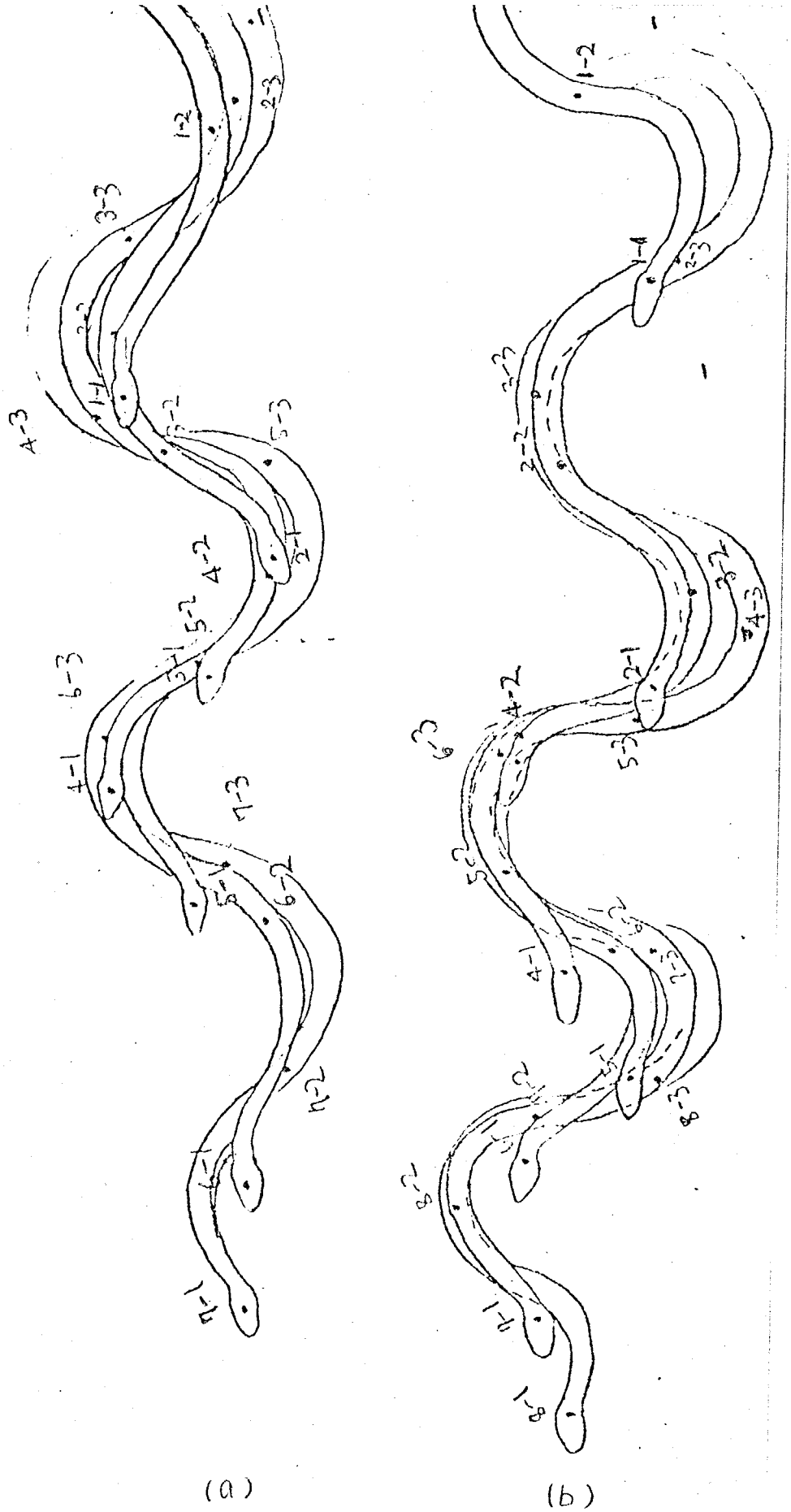


Fig. A I-1　滑走軌跡（頭部）の例

（図中の記号 a-b は a：撮影データのframe番号
b：ヘビ体幹上のマーク番号）

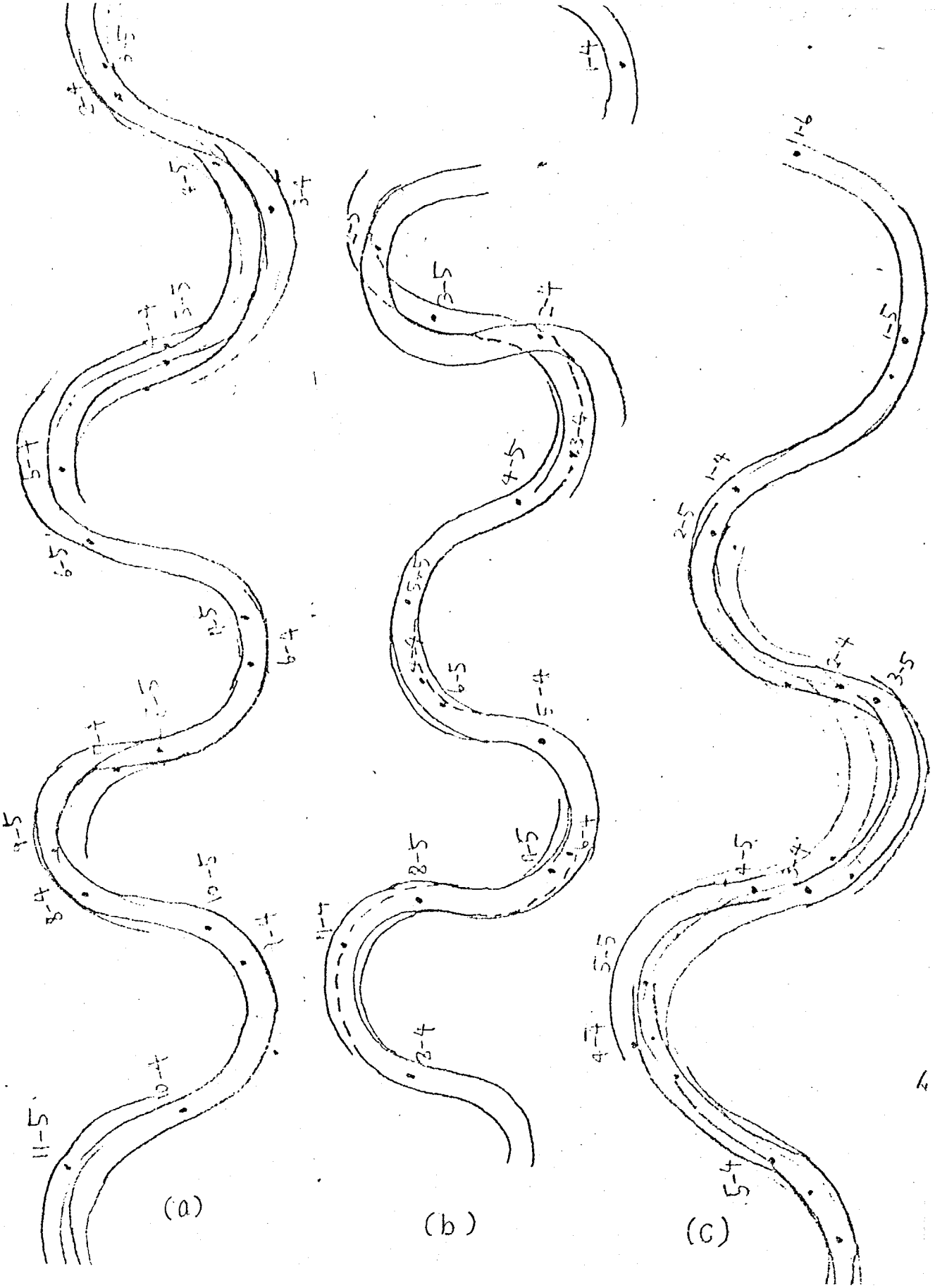


Fig. A1-2　軌走軌跡（胴体）の例

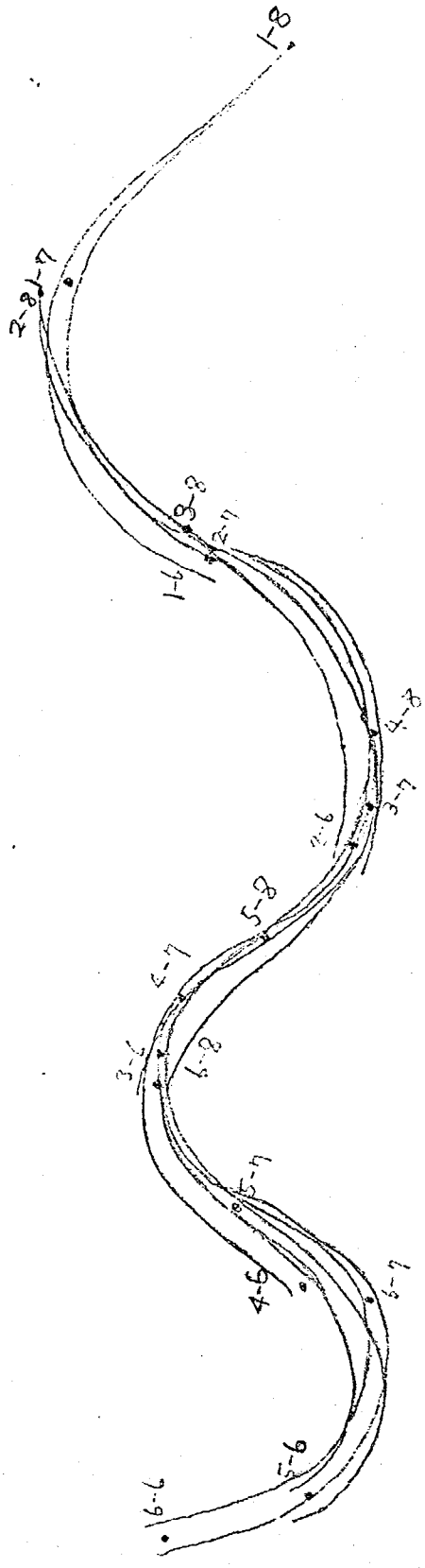
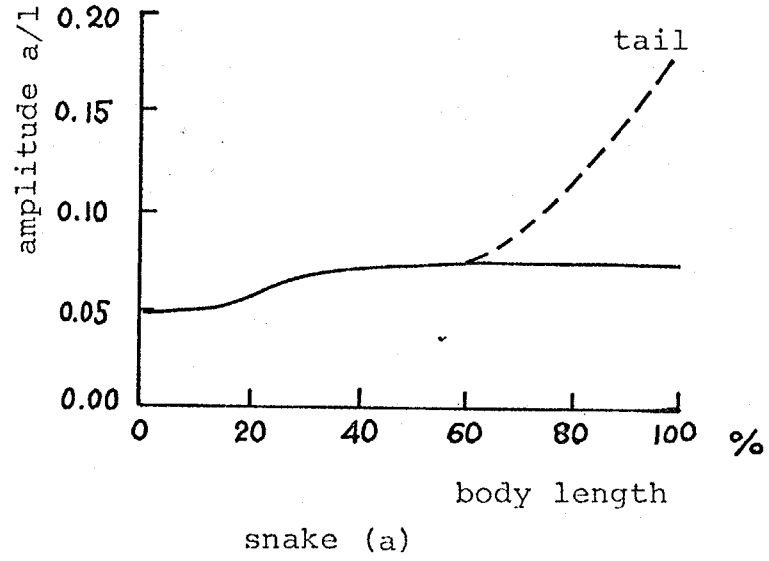
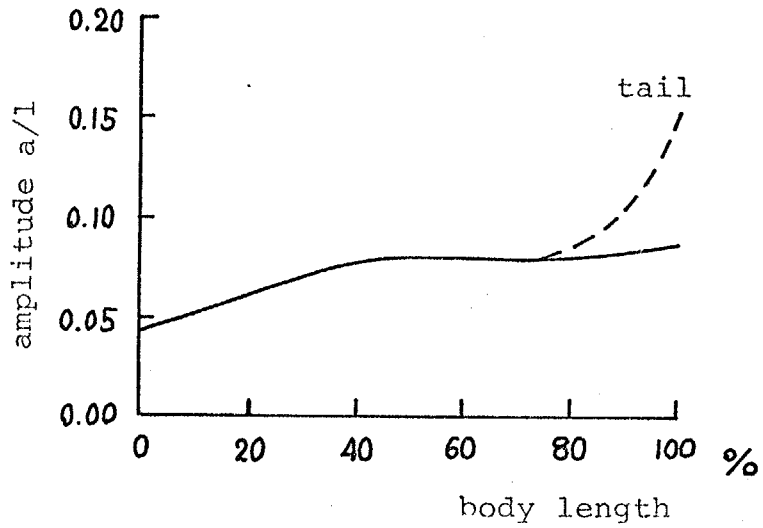


Fig. A1-3　滑走軌跡（尾部）の例



snake (a)



snake (b)

{ ℓ : 体長
{ a : 振幅

Fig. A1-4　体軸に沿う振幅 a の変化

付録 2 ヘビ体幹の解剖学的形態

ヘビ体幹の特に胴体から尾にかけての体幹形状の変化を次のように求めた．

シマヘビを麻酔し，ドライアイスにより凍結させた．その体幹を44の部分に切断し，それぞれについてつぎの項目を測定した．使用したシマヘビは全長124.8cm，体重200g，頭から心臓まで15.2cm，肛門まで95.8cmであった．

測定結果をFig. A2-1 ～ Fig. A2-4 に示す．またFig. A2-5 には胴体断面の例を示し，Fig. A2-6には椎骨形状を示している．測定データ例で心臓付近のバラツキは麻酔のために心臓に行なった注射の影響が含まれている．これらの測定からつぎのことがいえる．

(i) 体幅，単位長さ当りの重量，筋肉断面積はほぼ同様の変化を示す．つまり，頭部から胴へ向って増加し，胴部でほぼ一定，そして尾の先端に向ってなめらかに減少する．

(ii) 椎骨長さについてもほぼ同様であるが，肛門付近で一度減少し，尾の先端に向っての減少は，上記のものより急激である．

なお，以上の結果から特に尾部における変化の傾向を調べるために，尾の先端が $X=0$，頭に向う方向を正とする体幹座標 X に対する諸量の変化をまとめた．その結果をFig. A2-7 ～ Fig. A2-10 に示す．つまり，つぎのように示される．

胴巾	d	$\propto X^{0.82}$
筋肉断面積	S	$\propto X^{1.48}$
単位長さの重量	w	$\propto X^{1.48}$
椎骨長さ	δs	$\propto X^{0.3}$

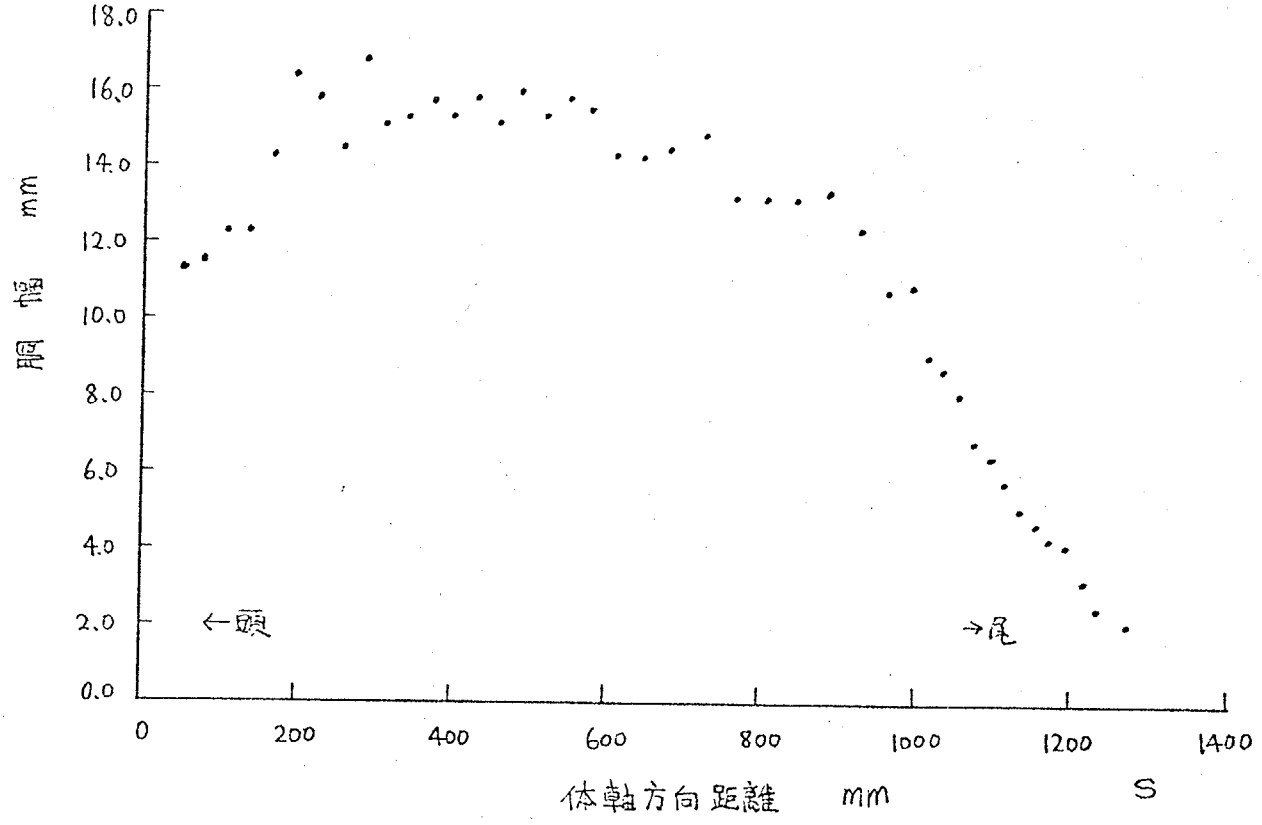


Fig. A2-1　　胴　幅

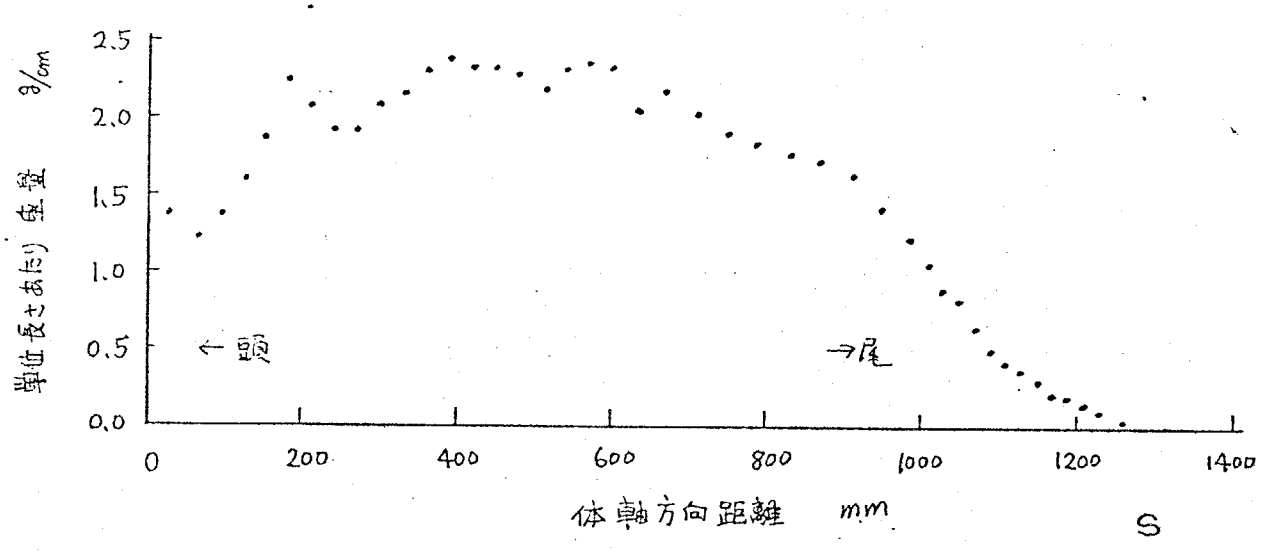


Fig. A2-2　　単位長さ当りの重量

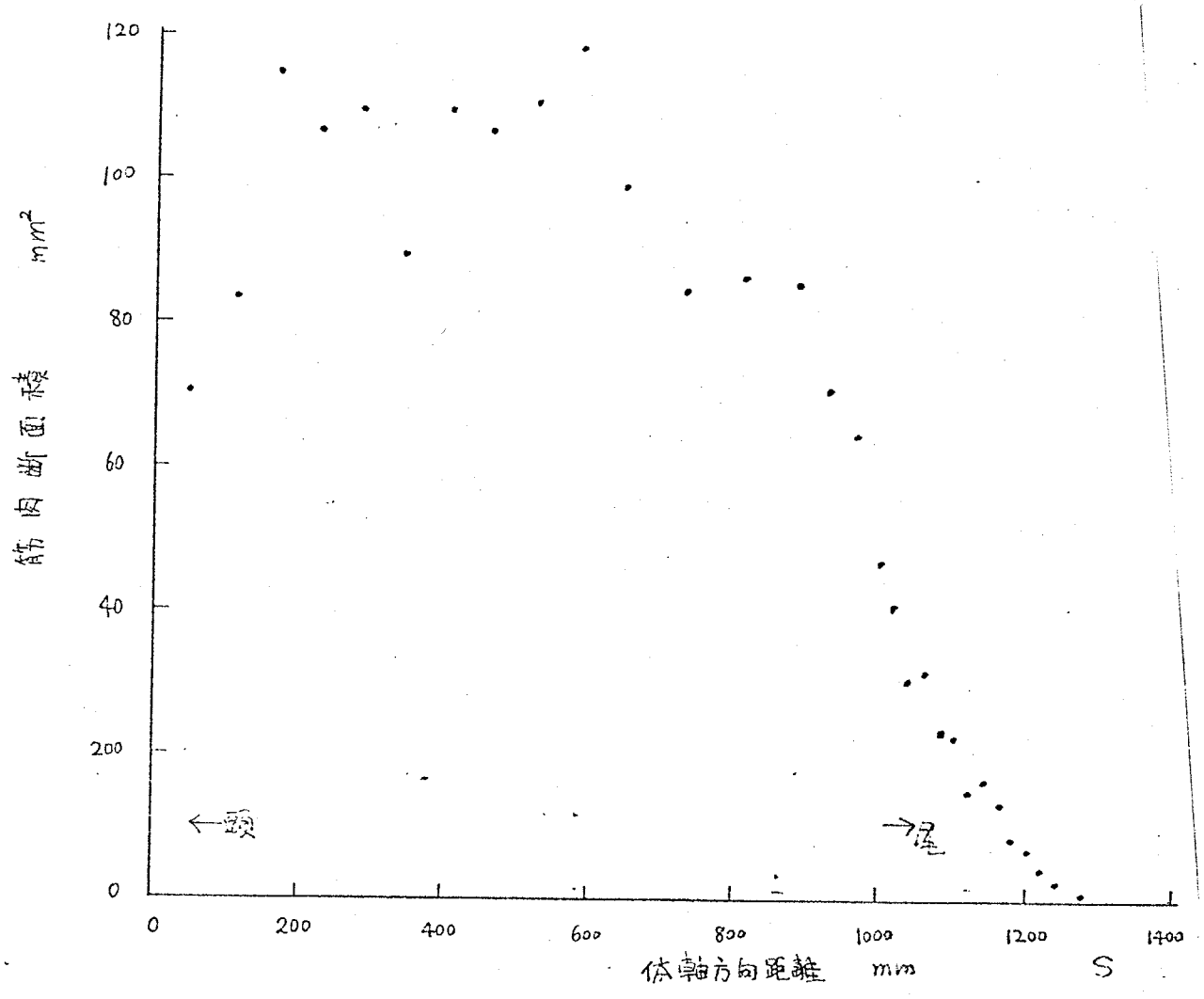


Fig. A2-3　筋肉断面積

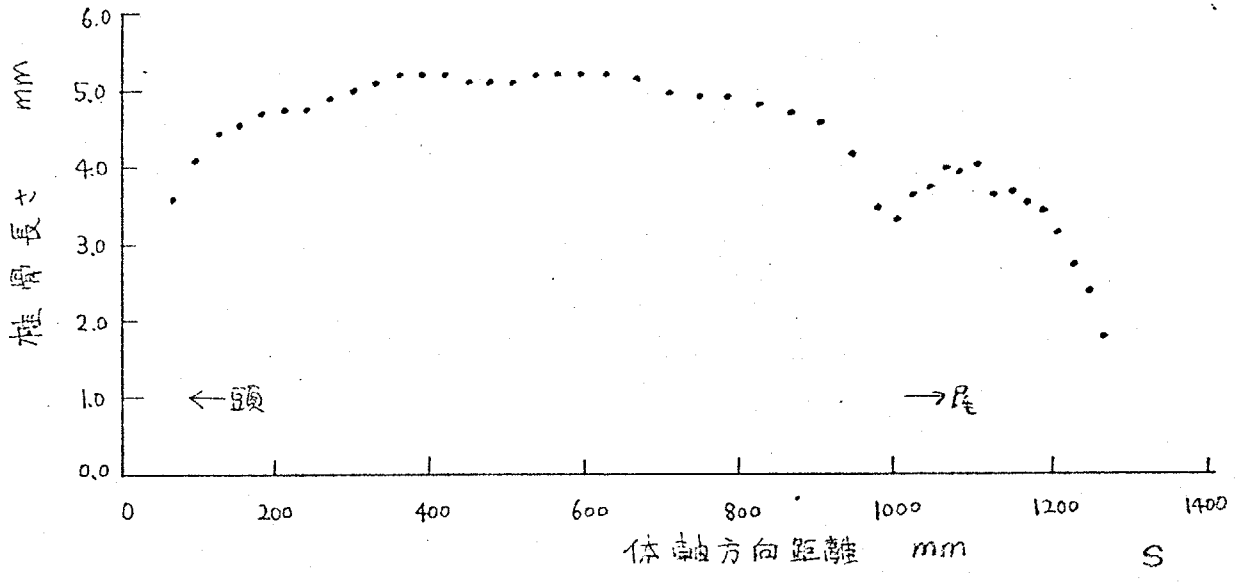


Fig. A2-4　椎骨長さ (δs)

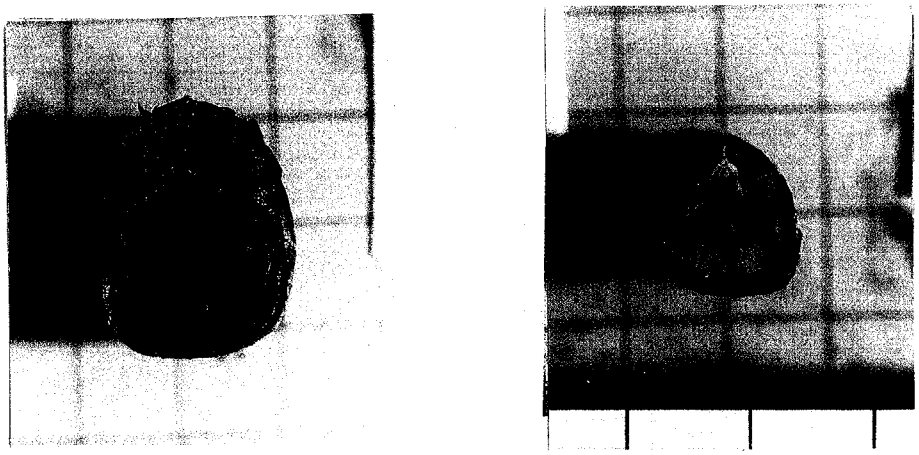


Fig. A 2-5　　シマヘビ体幹の断面形状

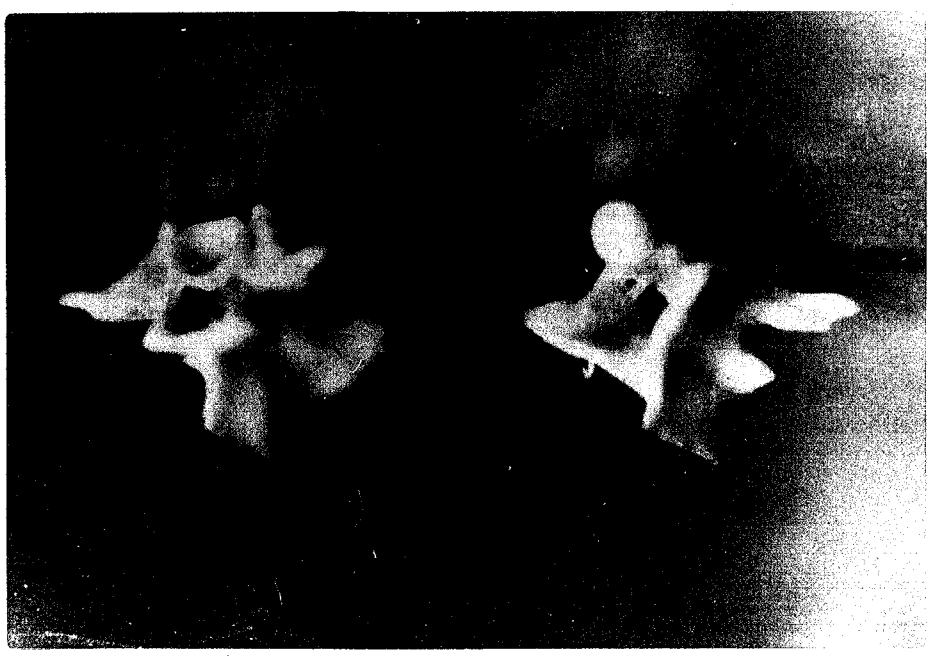


Fig. A 2-6　　シマヘビ脊椎骨の形状

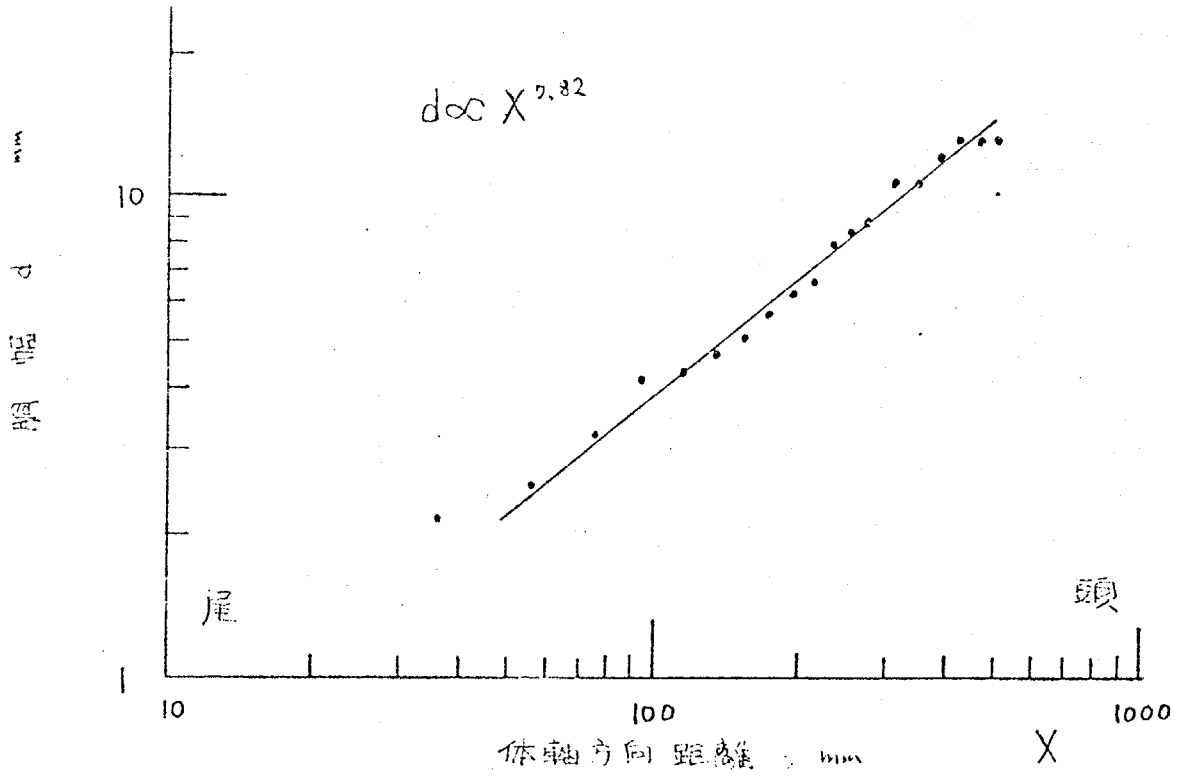


Fig. A2-7　胴　幅

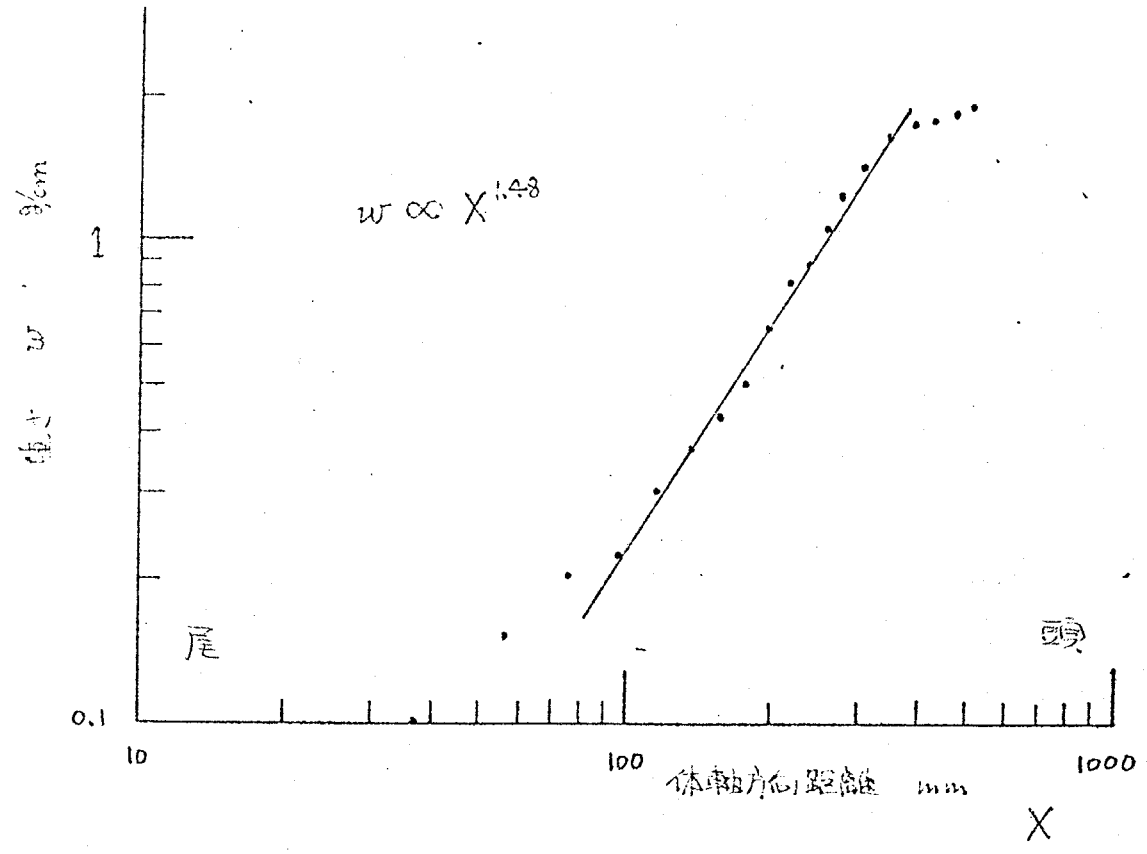


Fig. A2-8　単位長さ当りの重量

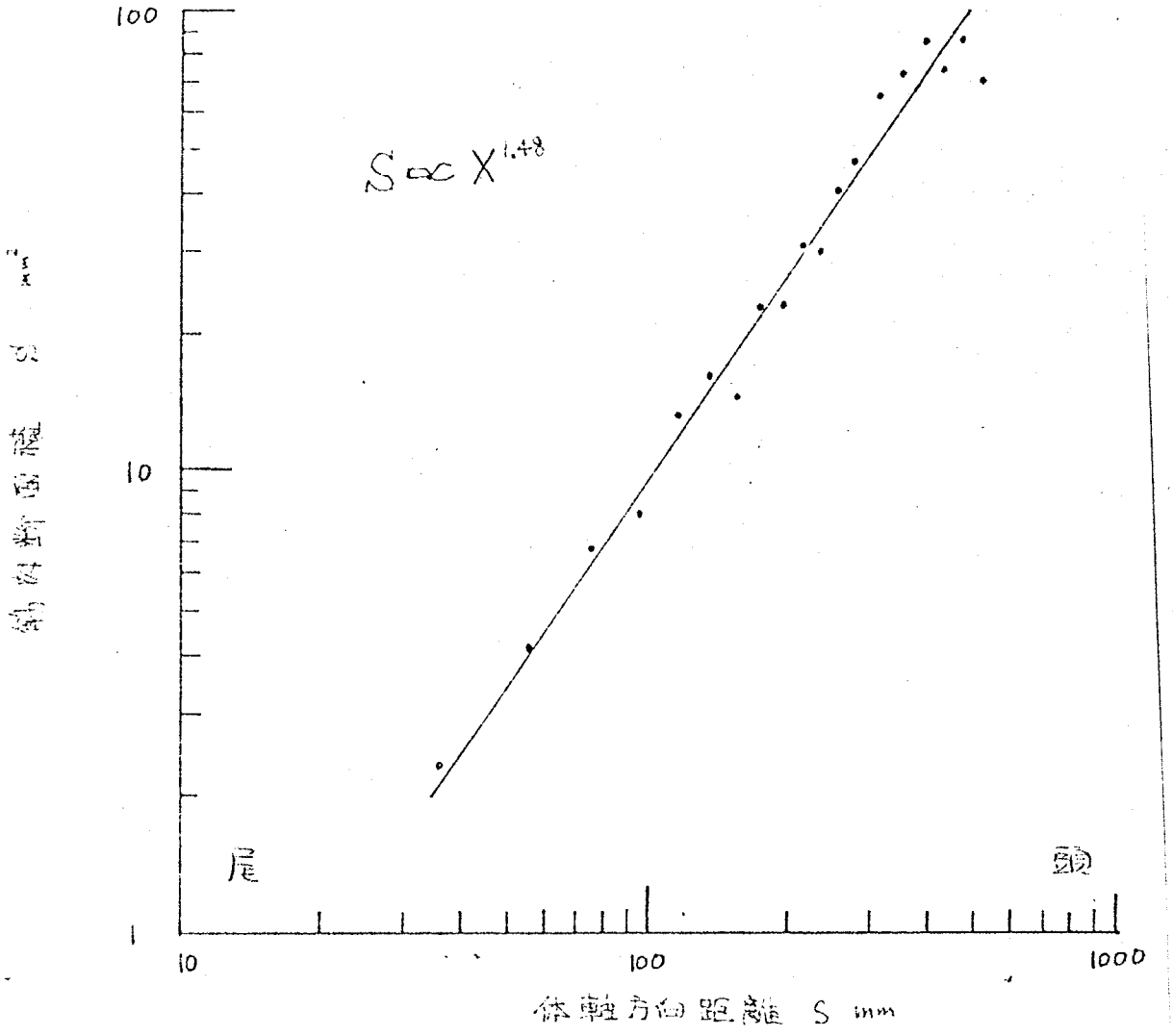


Fig. A2-9　筋肉断面積

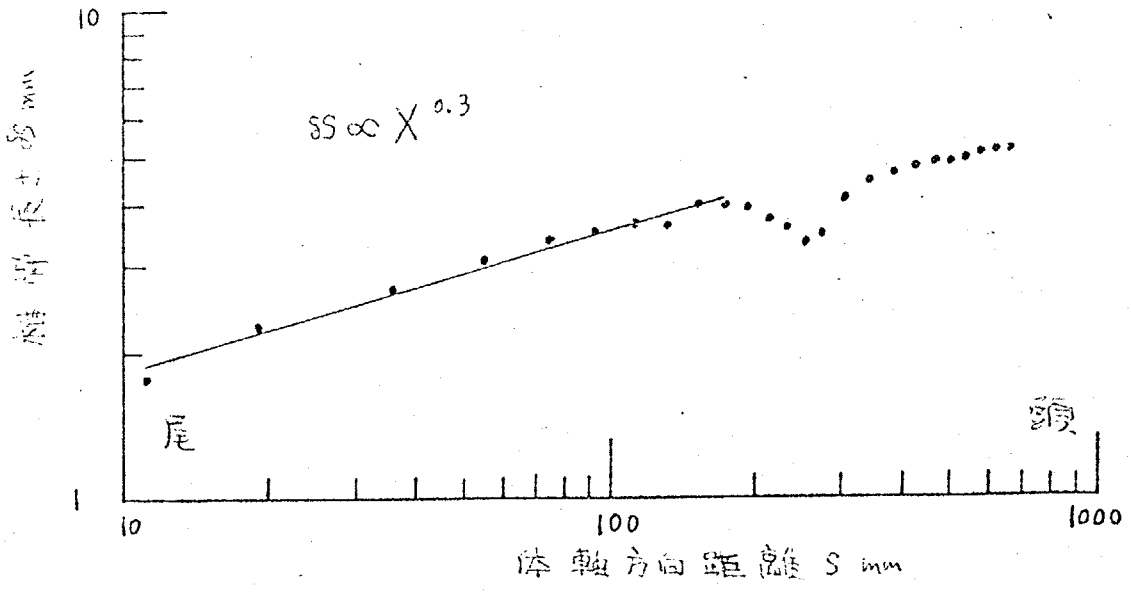


Fig. A2-10　椎骨長さ

付録 3　周回接触による断面求積法[18)]

現在，プラニメータ，皮革製面積計，光電式面積計などいくつかの面積測定装置が実用化されている．しかしながら，これら在来の面積計では，その測定原理から二次元平面に描かれた比較的小さな閉曲線の面積しか求めることができなかった．そのため，たとえば立木の断面積を切り倒さずに求める場合であるとか，入り組んだ広い敷地の面積を求める場合などでは近似的な手法や，大がかりな測量を必要としている．しかし，もし求積すべき対象の外周を一周するだけでその面積が求まれば，従来の求積法では不可能であった対象でも求積が可能になると思われる．ここでは，その一つの手法を提案するものである．

○　原理および求積基礎式の誘導

求積対象のまわりを周回するとき，移動距離と曲率の変化は容易に計測できる．よって，周回中の単位の距離移動するとき（ACMによって組んだ場合には1節ごとの動作毎を考える）Fig. A3-1 のような，計測開始点Oの接線方向を固定座標系と設定した微小な帯状面積 ΔA を求めることができる．つまり

$$\left.\begin{aligned}\Delta A_1 &= \delta s \cos\theta_1 \; \delta s \sin\theta_1 = \delta s \cos\theta_1 \sin\theta_1 \\ \Delta A_2 &= \delta s^2 \cos\theta_2 \{\sin\theta_1 + \sin\theta_2\} \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \Delta A_n &= \delta s^2 \cos\theta_n \{\sin\theta_1 + \sin\theta_2 + \cdots + \sin\theta_n\}\end{aligned}\right\} \quad (A3-1)$$

である．ただし，ここで δs はサンプリング区間の長さ（ACHでは節の単位長さ）であり，P_i における θ_i は $\delta s \to 0$ と考えれば

$$\theta_i = \int_0^{P_i} \rho(s)\, ds \quad (A3-2)$$

ただし，$\rho(s)$ は外周距離 s の曲率である．よって閉曲線の面積 A は全周長が $N\cdot\delta s$ であるとすれば（A3-1）式からつぎのように求められる．

$$A = -\sum_{i=1}^{N} \Delta A_i = -\delta s \sum_{i=1}^{N} \left(\cos\theta_i \sum_{j=1}^{i} \sin\theta_i \right) \qquad (A3\text{-}3)$$

さらに，$\delta s \to 0$ とすることで連続化表現すれば

$$A = -\oint \left(\cos\theta \int_0^S \sin\theta \, ds \right) ds \qquad (A3\text{-}4)$$

あるいは

$$A = -\oint \left\{ \cos\left(\int_0^S \rho(s)\, ds \right) \int_0^S \sin\left(\int_0^S \rho(s) ds \right) ds \right\} ds \qquad (A3\text{-}5)$$

となる．すなわち，(A3-3)式および(A3-4),(A3-5)式が離散化および連続化した求積のための基礎式である．要約すると上式は，求積すべき断面の外周に沿って，周回距離 s と曲率 $\rho(s)$ を測定しつつ一巡すれば，断面積 A が求めうるという原理を示している．

○ 求積計の構成

前節の原理に基ずく求積計は，比較的簡単に構成することができる．つまり，周回中に得られた曲率 $\rho(s)$ に Fig. A3-2 のような演算を施せばよい．これにはデジタル式とアナログ式が考えられる．デジタル式は一定距離ごとにサンプリングを行ない(A3-3)式の演算を行なわせる．最近発達しつつある LSI 等を組み合わせることにより，この程度の演算は容易であり，しかも精度を上げることもできる有望な方法であろう．ACM の場合には物体を包み込んだとき，その各部の偏角情報を Fig. A3-3 のごとく処理しさえすれば求積できると思われる．アナログ演算器によればより簡便な求積が可能であろう．

このような求積原理に基ずく面積計は，正弦型ポテンショメータを用いた測定器を物体外周に一巡させて，それをアナログ回路で処理してみた結果，数%の誤差で一致することが実証できた．

なお，本方式は特許出願中である（出願番号 49-122149）

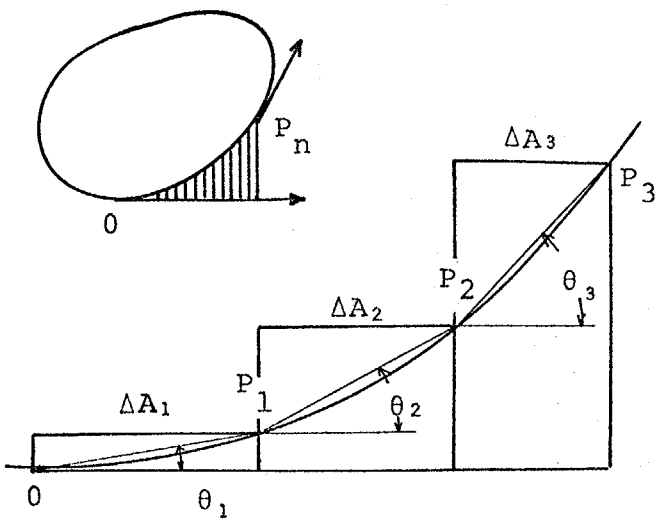


Fig. A 3-1　微小部分面積の測定

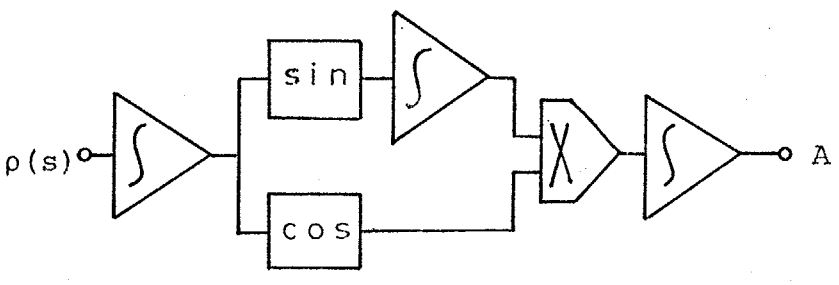


Fig. A 3-2　本求積原理に基づいた
演算回路の基本型

付録 4　パターン生成法による図形の特徴空間評価[21]

本研究は，対象パターンとして平面図形をとりあげ，その一般的な認識を行なう際に必要となる特徴空間の要素と構成を，新たに提唱するパターン生成法によって合理的に評価しようとするものである．従来，図形の特徴については多くの研究がなされ，たとえば図形の頂点の数とか対称軸の本数，さらに各研究者独創の多くの特徴パラメータが提唱されている．しかしながら，これらの特徴がどの程度図形の本質を表わすかについては未だはっきりした理論がないのが現状である．ACMによって外部環境としての図形形状を知覚しようとする場合においても，どのような図形特徴を求めればよいかを知ることは最も基本的な問題であると考えられる．そこで，もしも得られた特徴パラメータにより構成された特徴空間内に図形を生成・再構成し，その相似性を元図形と比較するというパターン生成法という方法論が確立されれば，それぞれの特徴パラメータの有意性について客観的評価が可能になるであろう．またこのことは，同時に認識主体としての人間の知覚特性についての知見を深め，従来 Gestalt 心理学において扱われていたような分野にも適用することにはると期待される．

○ 凸閉曲線の特徴パラメータ

平面図形のうちの例として，ここでは凸閉曲線をおうことにする．観測手段として Fig. A 4-1(a)に示すような外周周回法を用いると，元の図形と1対1対応する Fig A4-1 (b)のような曲率分布関数 $P(s)$ が得られる．この周回観測により得られるいくつかの特徴パラメータを示す．

(1) 周面積比 RLA ((周長)^2／4π×(面積)で示し，円の場合に最小値1をとる．なお，このときの面積は付録3で示した手法によって求められる)．

(2) 外角極大点の数 NPEAK (Fig. A4-1 の例では P_1, P_2, P_3)
(3) 外角極大点の分布 PEVAR (Fig. A4-1 の例では l_1, l_2, l_3 の距離の分散を示す．正n角形で0になる)

これら以外にも多くの特徴パラメータを考えることができる．

- 特徴評価のための図形パターン生成アルゴリズム

図形のいくつかの抽出された特徴パラメータをもとに，その特徴量が保存された任意図形を生成する演算アルゴリズムを Fig. A4-2 に示す．実際の計算は凸閉曲線を20節の等辺多角形で近似して行なっている．まず全節の初期角度をその総和が 2π となるようにランダムに定める．次に得られた図形を閉じながら，特徴パラメータの値を設定された値に収束する方向に各節角度を微小変動させてゆき，十分収束した後生成された図形をプロットするという計算手順をとっている．

- 図形生成実験の吟味と結論

Fig. A4-2 のアルゴリズムにより，いくつかの特徴パラメータを与えた場合の図形の生成を試みた．

その結果，たとえば Fig. A4-3 に示すように，上記した3つの特徴パラメータによって構成される特徴空間はかなり良い近似度の生成図形を生ずることがわかった．また，特徴パラメータを減らした生成図形の元図形との比較から，各特徴パラメータの特性が具体的に明らかになった．本手法によって，さらにより多くの特徴パラメータについて検討を加えれば，ACM等によって物体認識を行なう際の効率的方法が明らかになると共に，一般図形の認識論的内部構造が解明されると思われる．

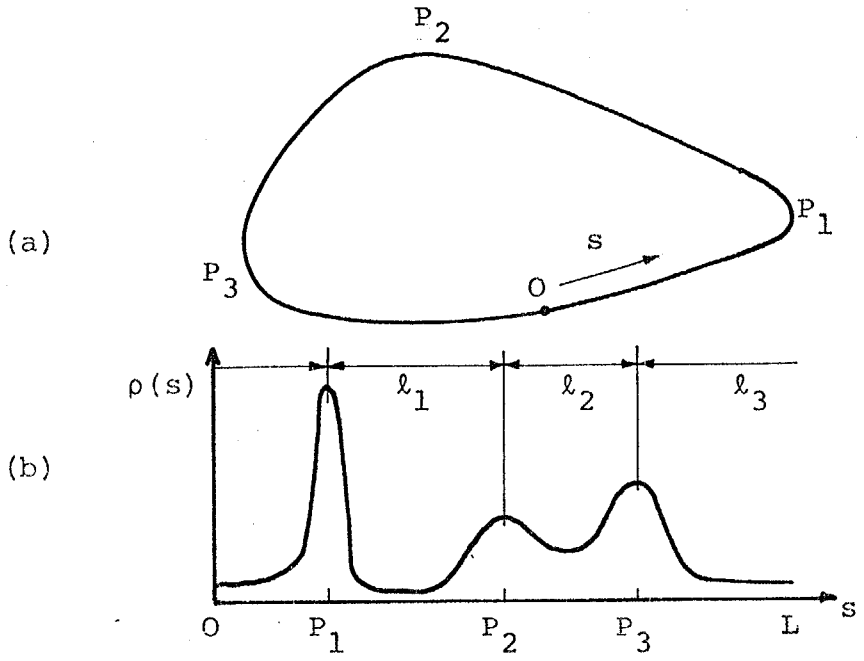


Fig. A4-2　物体とその曲率分布形状

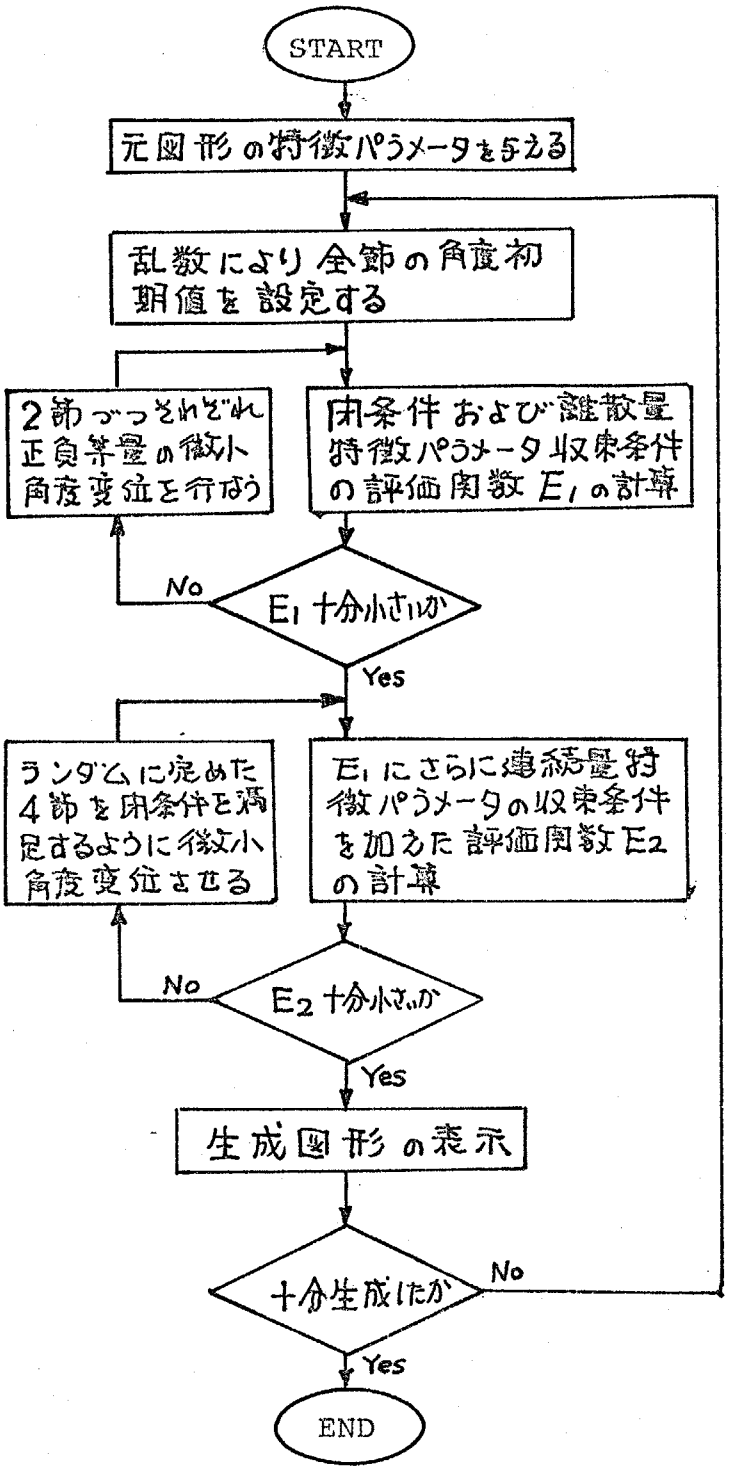


Fig. A4-2　本パターン生成法の計算アルゴリズム

Fig. A4-3 本パターン生成法の結果例