

送電線ギャロッピングシミュレーション計算で発生する振動モード

山岡 勝*

Oscillatory Mode Obtained from Simulation on Galloping of Transmission Line

Masaru YAMAOKA

Abstract —Galloping of transmission line is a large amplitude oscillation that occurs when ice sticks to electric wire and aerodynamic instability appears. I had ever developed a galloping simulation method, when I worked in Hokkaido Electric Power. This is useful for a qualitative consideration, but is not for a quantitative usage. So, I compared our simulation with the work of Yamaguchi, that of Irvine and that of Matubayashi in cable dynamics or so. In this paper, I make clear that same tendency can be obtained also in our simulation.

Key words: Galloping, Simulation, Oscillation wave form, Oscillation period

1. はじめに

送電線のギャロッピングとは、電線に雪氷が付着して空気力学的に不安定な状態になった時、低周波で大振幅の電線振動が発生することを言う。ギャロッピングが発生すると、送電線の線間短絡を起こし、電力系統全体に瞬時電圧低下をもたらすこともある。この振動の発生頻度は高くないが、地形条件と気象条件が満足すると繰り返し発生することから、問題を抱えている電力会社では苦慮している。これを解決するため長年実験的研究と理論的研究が行われてきたが、抜本的な事故防止には至っていない。

筆者は、簡易に検討を行う目的でギャロッピング計算法を開発した(1)、(2)。この計算法は、不安定性など定性的考察には有力なものであるが、結果を実際の観測例と整合性を取るのは困難なことが多い。このため、土木・構造分野(橋梁)の山口の研究(3)、ケーブル振動のIrvineの研究(4)、および、試験線観測に基づいた松林の研究(住友電気工業社内資料)と比較することで、シミュレーション計算の有効性について検討した。

なお、本報告は筆者が北海道電力に勤務中に行った研究の一部を要約、加筆したものである。

2. シミュレーション条件と結果

シミュレーションする送電線の座標系を図1と2に示す。主要なシミュレーション条件を表1に示す。

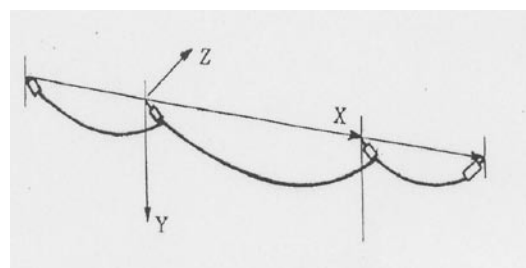


図1 送電線の座標系

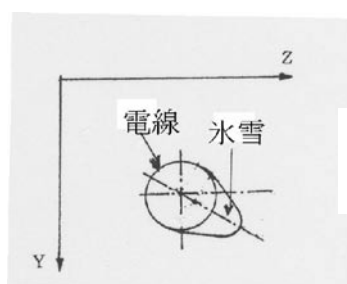


図2 電線の座標系

* 釧路高専電気工学科

表1に示したシミュレーション条件の中の、代表的なパラメータである電線張力を種々変えながら合計12のケースのシミュレーションを実施した。シミュレーション手法は筆者が開発した2導体法を用いた。結果を表2と表3にまとめ、振動波形などは図3～32に示した。その中の図3～15は各運動成分の時間的变化を示し、図16～25は径間中央の電線軌跡を示し、図26～33は径間内の電線波形を示している。なお、表2と表3の中のシミュレーション周期は図化した後、平均を取って求めた。表の T_0 は基本周期の計算値で、 T_1 は疑似基本周期の計算値である。

表1 シミュレーション条件

電線種類	1160mm ² ACSR、330mm ² ACSR
導体数	2
電線支持方式	耐張
径間長	160m、300m
初期電線張力	各径間長に対し3種類
風圧係数	1種類(文献)
風速	初期トリガーの後、10m/s一定

表2 1160mm²ACSRのシミュレーション結果

ケース	径間長S	初期電線張力	シミュレーション結果周期(秒)				弛度(m)	γ	M	T_0 (秒)	T_1 (秒)	図面番号		
			Y方向	Z方向	Θ 方向	張力						位相	軌跡	波形
1	300	5.0 ton	2.37	6.6	1.64	1.64	10.76	0.0359	6.44	5.9	1.58	図3	図15	
2		7.5	2.54	5.12	2.56	1.58	7.17	0.0239	1.91	4.84	2.2	図4	図16	
3		10.0	2.9	4.8	2.9	2.9	5.38	0.0179	0.805	4.19	2.59	図5	図17	図24
4	160	3.0	1.72	4.73	1.52	1.16	5.11	0.0319	8.43	4.08	0.963	図6	図18	
5		5.0	1.81	3.90	1.75	1.75	3.06	0.0191	1.83	3.16	1.46	図7	図19	
6		7.5	2.1	2.54			2.04	0.0128	0.543	2.24	1.55	図8	図20	図25

表3 330mm²ACRのシミュレーション結果

ケース	径間長S	初期電線張力	シミュレーション結果周期(秒)				弛度(m)	γ	M	T_0 (秒)	T_1 (秒)	図面番号		
			Y方向	Z方向	Θ 方向	張力						位相	軌跡	波形
7	300	1.0 ton	3.04				14.85	0.0495	20.7	6.96	1.07	図9		図26
8		2.5	2.7	5.3	2.7	2.75	5.94	0.0198	1.32	4.40	2.31	図10		図27
9		5.0	3.04	3.1	3.08	3.03	2.97	0.0099	0.166	3.11	2.69	図11		
10	160	1.0	1.64	4.3			4.22	0.0264	5.89	3.71	1.04	図12	図21	図28
11		1.6	1.98	4.0	1.9	1.95	2.64	0.0165	1.44	2.93	1.49	図13	図22	図29
12		2.5	2.2	2.32	2.24	2.2	2.35	0.0147	0.377	2.35	1.77	図14	図23	図30

3. シミュレーション結果と他の研究との比較

3-1 振動波形

土木構造(橋梁)分野の山口の研究では、2次元平面内振動と面外振動に分けて非線形偏微分方程式で定式化して、固有振動解析、および正弦波形外力を受けたときの解析をしている。その中で、サグ比(弛度/径間長： γ)をパラメータにして、それが0.005～0.08の

範囲では、奇数次面内モードが1次上のモードに遷移することを報告している。特に、対称1次固有振動数と逆対称1次固有振動数が一致する $\gamma=0.026$ の付近を中心に、固有モードが大きく変化することを報告している。これによると、張力が弱くて γ が大きい場合は、横方向成分が多く、振幅も小さいことになる。そして、 $\gamma=0.026$ 付近では“蝶のような形”の振動波形で、振幅も大きくなる。さらに γ が小さくなると、再び、横

振れ振動で、振幅も小さくなる。

次にシミュレーションによる振動波形を考察する。

1160mm2ACSR、径間長300mのケース1 ($\gamma=0.0359$ 、図3)、ケース2 ($\gamma=0.0239$ 、図4)、ケース3 ($\gamma=0.0179$ 、図5)の3つのケースの比較、および、同じ電線サイズで径間長が160mになった場合の、ケース4 ($\gamma=0.0319$ 、図6)、ケース5 ($\gamma=0.0191$ 、図7)、ケース6 ($\gamma=0.0128$ 、図8)の3つのケース、合計6ケースの比較をすると、 γ が大きいケースから小さいケースになるに従い、横振れから“蝶のような形”、そして縦型の振動に推移することが分かる。

また、電線サイズを330mm2ACSRに変えてシミュレーションをした場合である、ケース7、8、9の比較、および、ケース10、11、12の比較においても、同様な傾向が得られた。

以上より、筆者のシミュレーションの結果と山口の研究の振動波形は、同じ傾向の波形になることが分かった。

3. 2 振動周期

試験線や実線路の観測例では、電線が鉄塔に懸垂支持か耐張支持かで振動周期が異なることが確認されており、筆者は、シミュレーションでは耐張支持方式の振動周期が、松林の研究で明確化された疑似基本周期と同じ周期になることを報告した。

表2と表3に、シミュレーション結果から得られた、各運動成分の振動周期と計算で求めた基本周期と疑似基本周期などをまとめている。これを概括すると、張力を強くして γ を小さくするに従い、横方向(Z方向)の周期は基本周期と同じ傾向になり、縦方向(Y方向)と捻回方向(θ 方向)の周期は疑似基本周期と同じ傾向になることが分かる。

シミュレーションで得られる振動周期と他の研究の振動周期を比較する前に、Irvineの研究と松林の研究の関連性について記述する。

Irvineは、参考文献で山口の研究と同様に奇数次面内モードが遷移すること、および、パラメータ λ が 2π に等しくなる時には、奇数次面内1次モードが逆対称1次モードに等しくなることを記述している。松林は、住友電気工業の社内資料で、耐張径間の振動周期が疑似基本周期になることを報告している。この二つの研究は全く異なるものであるが、松林の線路定数MとIrvineの定数 λ の間には(3)式が成立する。

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + 2M}, M = EAW^2 S^2 / (24H^3) \quad \dots\dots (1)$$

$$\lambda^2 = (wS/H)^2 S / (HL_e/EA) \quad \dots\dots (2)$$

$$\text{よって} \quad \lambda^2 \approx 24M \quad \dots\dots (3)$$

然るに、 $L_e = S$ 、 (L_e : 電線実長、 S : 径間長)

従って、Mが1.64に近づくと、 $\lambda = 2\pi$ の時、即ち、 $\gamma=0.026$ の時と同様に、奇数次1次モードが逆対称1次モードになることが予測できる。このことは、Y方向振動周期がZ方向振動周期の約0.5倍になることと等価である。

ここで、シミュレーションでこの予測がどのようになるかを考察する。

(3)式が成り立ち、 $M=1.64$ に近いシミュレーションである、ケース2、ケース5、ケース8、および、ケース11から、Yと θ の周期はZの周期の約半分になっていることが分かる。また、これらのケースでは、Yと θ の周期は疑似基本周期にほぼ等しくなっていることが分かる。

このように、他の研究から予測されることが、シミュレーションでも実現できることが分かった。

4. あとがき

2001年7月に電気学会調査専門委員会「架空送電線のギャロッピング現象・解析技術」が電気と土木技術者などの共同で報告書を作成した(5)。筆者は委員会スタート時に、委員会と幹事会の委員、および、作業会副主査として関係したが、今後も各分野の研究者の共同で研究が活発になることを期待する。

参考文献

1. 山岡勝：「多導体送電線のギャロッピング振動の数値計算」, 電気学会論文誌B, 69巻B, 9号, PP569～576, 1979年9月.
2. 山岡勝、長谷川淳：「2導体法による架空送電線のギャロッピング計算」, 電気学会論文誌B, 116巻B, 5号, PP539～546, 1996年5月.
3. 山口宏樹、伊藤学：「単一ケーブルの三次元線形振動」, 土木学会論文報告集、第286号, PP29, 1979年6月.
4. M. Irvine：「Cable Structure」, Dover Publications, 1992 (原版はMIT Press, 1981, Cambridge, Mass.).
5. 電気学会調査専門委員会：技術報告「架空送電線のギャロッピング現象・解析技術」, N0.844号, 2001年7月.

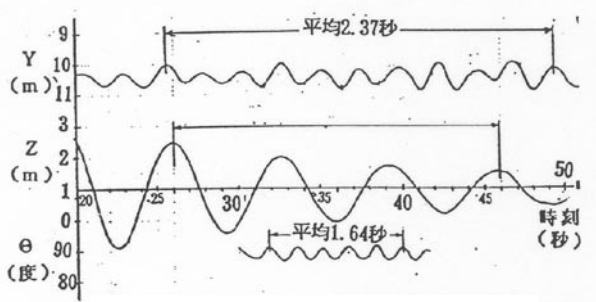


図3 ケース1の運動成分の時間変化

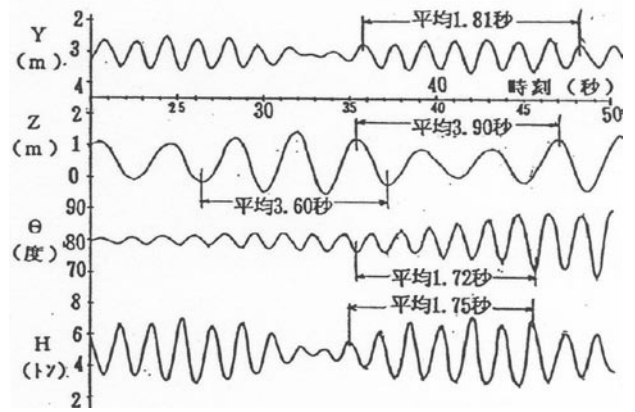


図7 ケース5の運動成分の時間変化

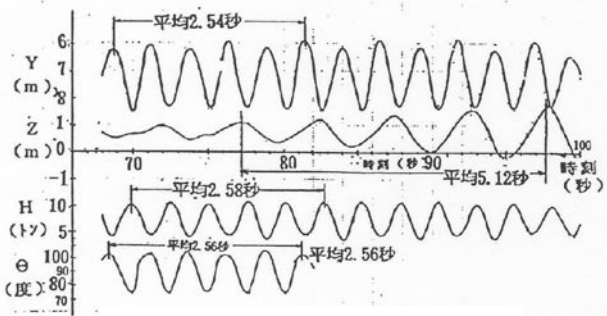


図4 ケース2の運動成分の時間変化

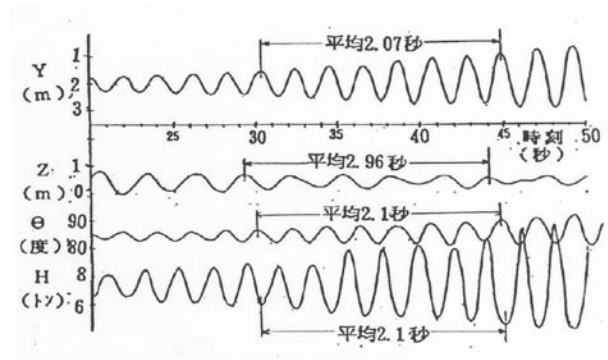


図8 ケース6の運動成分の時間変化

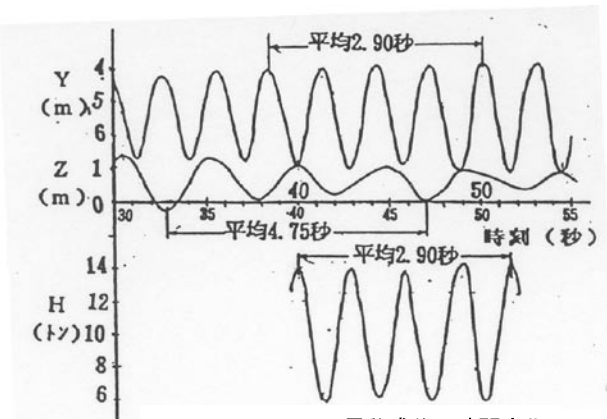


図5 ケース3の運動成分の時間変化

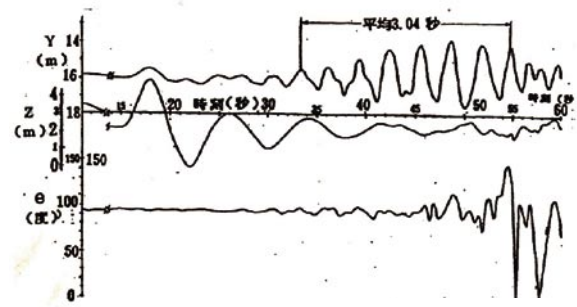


図9 ケース7の運動成分の時間変化

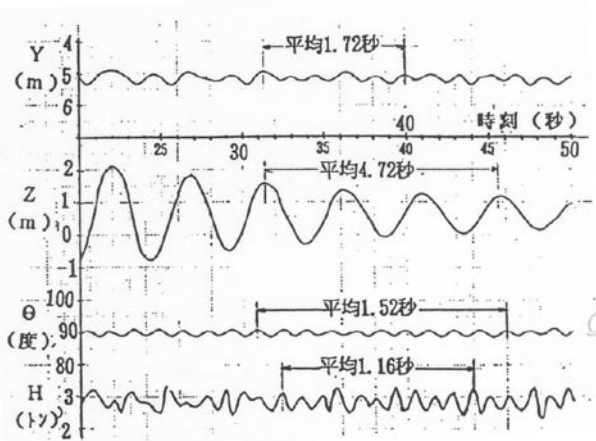


図6 ケース4の運動成分の時間変化

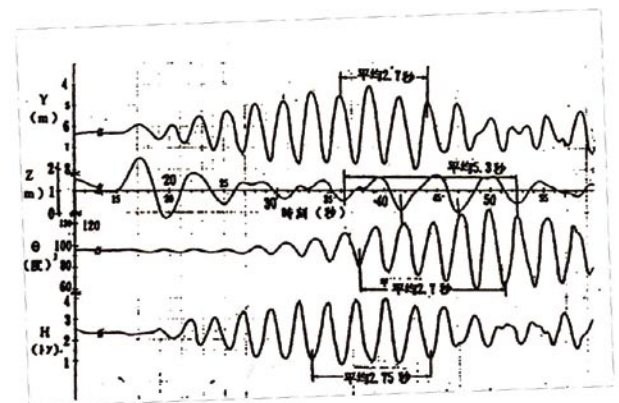


図10 ケース8の運動成分の時間変化

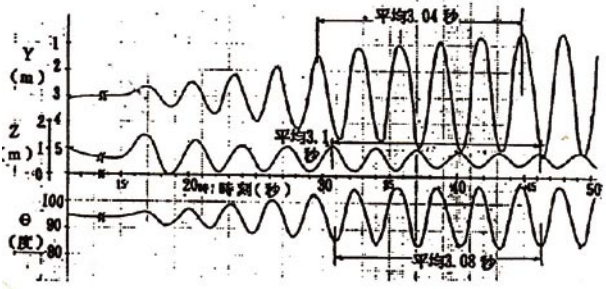


図 11 ケース 9 の運動成分の時間変化

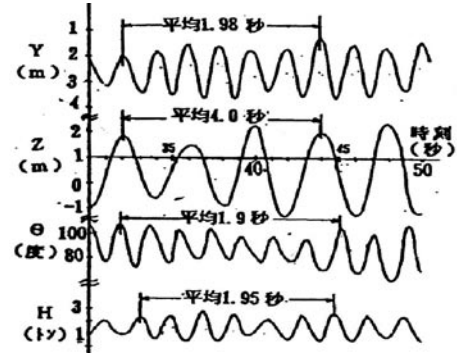


図 13 ケース 11 の運動成分の時間変化

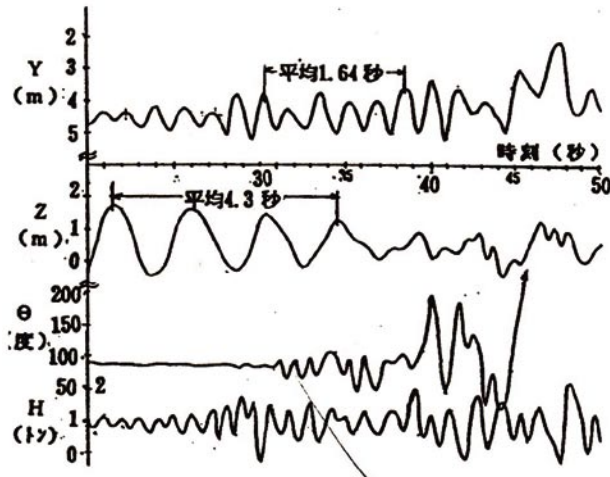


図 12 ケース 10 の運動成分の時間変化

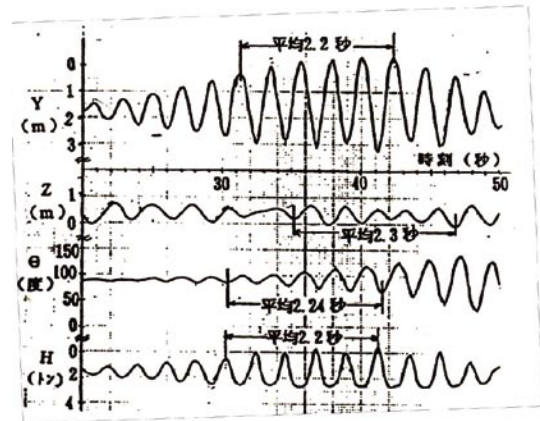


図 14 ケース 12 の運動成分の時間変化

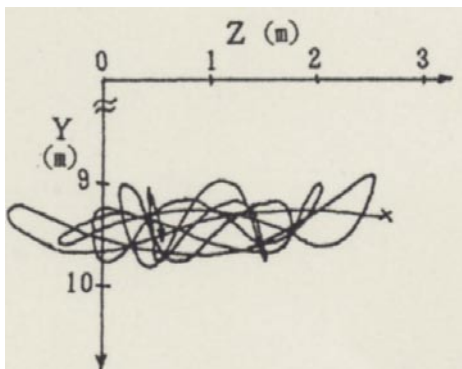


図 15 ケース 1 の軌跡 (径間中央)



図 16 ケース 2 の軌跡 (径間中央)

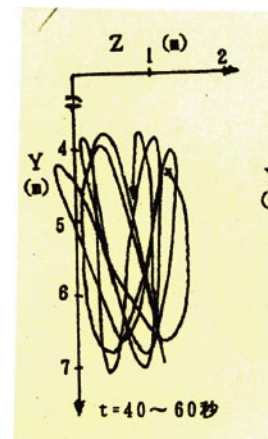


図 17 ケース 3 の軌跡 (径間中央)

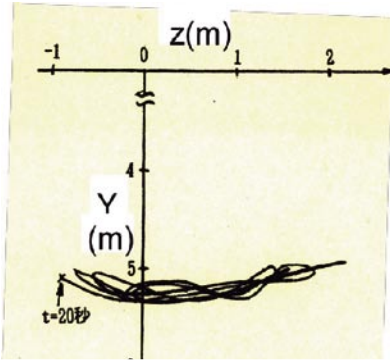


図 18 ケース 4 の軌跡
(径間中央)

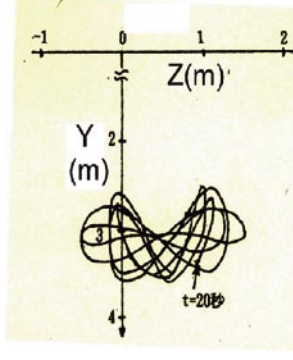


図 19 ケース 5 の軌跡
(径間中央)

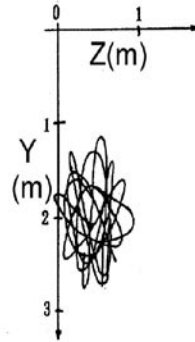


図 20 ケース 6 の軌跡
(径間中央)

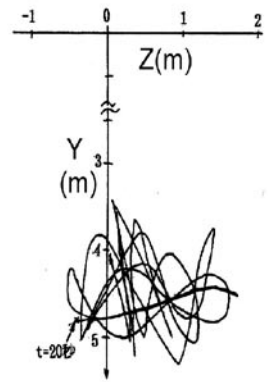


図 21 ケース 10 の軌跡
(径間中央)

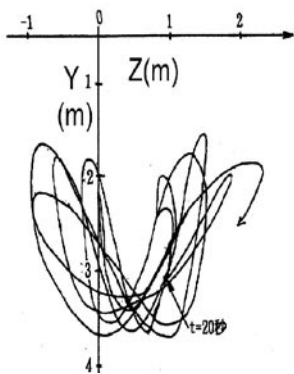


図 22 ケース 11 の軌跡
(径間中央)

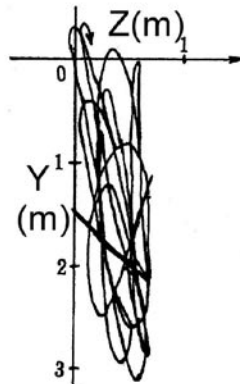


図 23 ケース 12 の軌跡(径間中央)

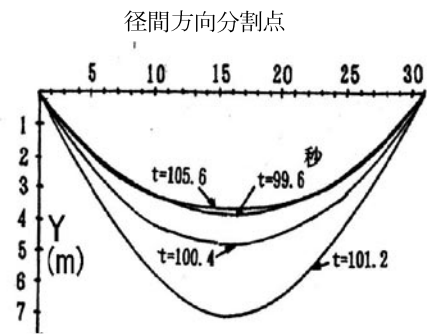


図 24 ケース 3 径間方向波形

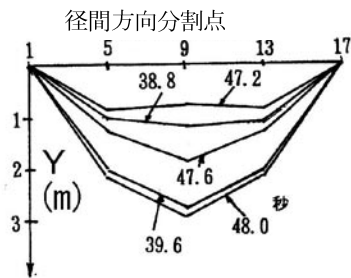


図 25 ケース 6 の径間方向波形

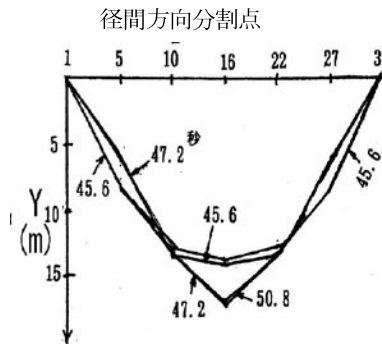


図 26 ケース 7 の径間方向波形

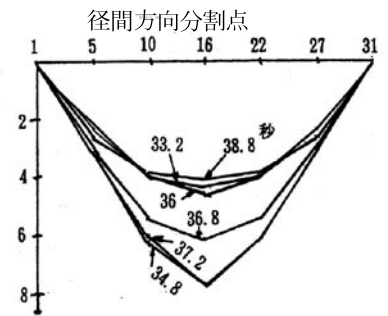


図 27 ケース 8 の径間方向波形

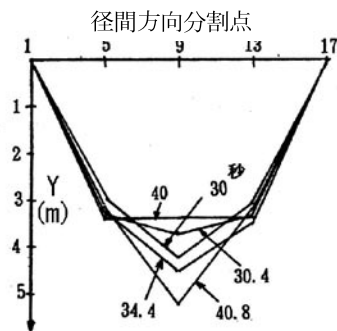


図 28 ケース 10 の径間方向波形

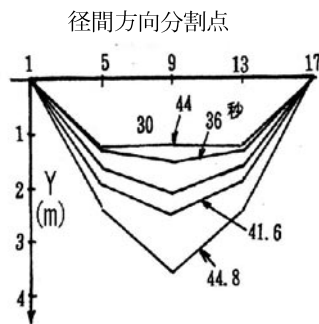


図 29 ケース 11 の径間方向波形

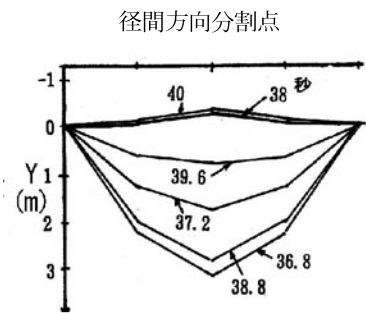


図 30 ケース 12 の径間方向波形