

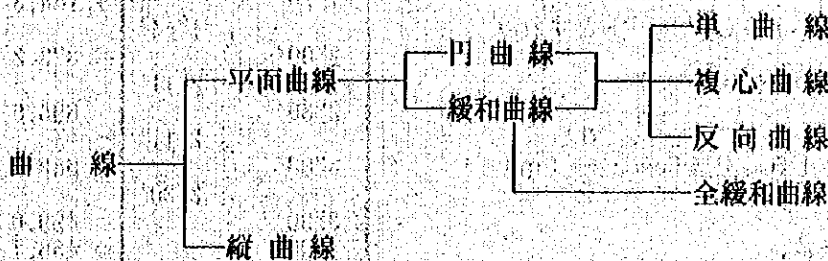
## 曲線と許容速度

### 1. 曲線

#### 1. 1 曲線の種類と名称

曲線は、大きく分けると平面曲線と縦曲線に分類される。そして平面曲線は、円曲線と緩和曲線に分けられ、また曲線の存在の形によって、さらに単曲線、複心曲線、反向曲線、全緩和曲線に区別される(表-1)。

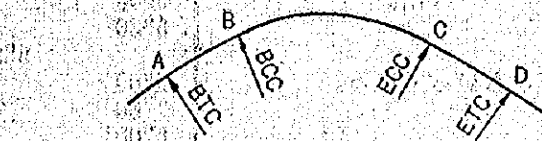
表-1 曲線の種類



また、分岐器に近 (a) 単曲線

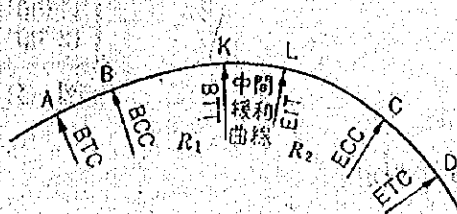
接した曲線の場合については、分岐内曲線および分岐のため特にその後方に生ずる曲線を、特に分岐付帯曲線とって区別している。

曲線各部の名称は、図-1の通りである。



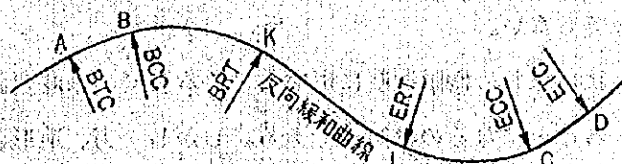
A = 緩和曲線始点=BTC  
B = 円曲線始点=BCC  
C = 円曲線終点=ECC  
D = 緩和曲線終点=ETC

(b) 複心曲線



A = 緩和曲線始点=BTC  
B = 円曲線始点=BCC  
K = 中間緩和曲線始点=BIT  
L = 中間緩和曲線終点=EIT  
C = 円曲線終点=ECC  
D = 緩和曲線終点=ETC

(c) 反向曲線



A = 緩和曲線始点=BTC  
B = 円曲線始点=BCC  
K = 反向緩和曲線始点=BRT  
L = 反向緩和曲線終点=ERT  
C = 円曲線終点=ECC  
D = 緩和曲線終点=ETC

(d) 全緩和曲線



A = 緩和曲線始点=BTC  
J = 緩和曲線始点=JIT  
D = 緩和曲線終点=ETC

図-1 曲線各部の名称

## 1.2 曲線の表し方

円曲線の曲率を示すには、軌道中心線における半径で表すのが一般的である。しかし、アメリカおよび一部の国では、一定長の弦（100フィート）に対する中心角で表す方式を用いている。両者の関係を示すと次のとおりである（図-2）。

$$R = \frac{L}{2} \operatorname{Cosec} \frac{\theta}{2}$$

ただし、R : 曲線半径

L : 弦長

$\theta^\circ$  : 中心角

いま、L = 100フィートとすれば

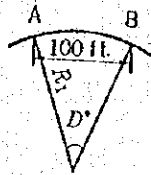
$\theta^\circ$  と R の関係は、

$$R = 15.24 \operatorname{Cosec} \frac{\theta^\circ}{2} \text{ (m)}$$

近似的には、

$$R = \frac{1746.38}{\theta^\circ} \text{ (m)}$$

この  $\theta^\circ$  を曲線度ともいっている。



曲線度 (D)	半径 (R)
0°30'	3,492.8m
0°35'	3,000m
0°52'	2,000
1°00'	1,746.4
1°10'	1,500
1°30'	1,164.3
1°44'	1,000
2°00'	873.2
2°11'	800
2°30'	698.6
2°44'	600
3°00'	582.2
3°30'	500
3°52'	499.0
4°00'	436.7
4°22'	400
4°30'	388.2
5°00'	349.4
5°30'	317.6
5°52'	300
6°00'	291.2
7°00'	249.7
8°00'	218.5
8°44'	200
9°00'	194.2
10°00'	174.9
11°00'	159.0
12°00'	146.8

図-2 曲線度と曲線半径

## 1.3 曲線半径

### 1.3.1 日本の規定

鉄道の線路の選定に当たっては、当然のことながら、曲線半径を大きく、また曲線が少なく、なるべく直線であるほうが、運転、営業および線路保守などの面から望ましいことはいうまでもない。

曲線半径の大小はただちに制限速度に影響を与えるので、速度要請の高いほど大曲線半径が要求されることになるのは当然である。しかし一方、地形、支障物等のためどうしても小曲線半径を用いざるを得ない場合もある。

いずれにしても曲線半径の大小は建設費、改良費に大きくはね返ってくるので、これ等を考慮して、線路等級別に、曲線半径を表-2のように規定している。

表-2 線路等級別曲線半径

	1級線	2級線	3級線	4級線
本線路の曲線	800 (400)	600 (300)	400 (250)	300 (200)
分岐付帯曲線	460 (240)	320 (160)	240 (160)	160 (100)
分岐器後方曲線	分岐器内曲線より大			
ホームに沿う曲線	800 (500)	600 (500)	500 (400)	400 (300)

(注) ( )内は、線路の状況、その他やむをえない場合にのみ縮小出来る限度である。

### 1. 3. 2 各国の基準

世界の主要鉄道における曲線半径の基準を示すと表-3のとおりである。

表-3 諸外国における最小曲線半径

ドイツ	フランス	イギリス	アメリカ
幹線：180m	160Km/h 線区：1,000m (パリ・リヨン、パリ・リルド等) 山間線区：250m	本線：805m (2,640ft)	主要幹線 10°(76m)
支線：180m	側線(停車場構内)：150m	側線：201m(660ft)	(AREA)*

\* 100ft(30.5m)の弦に対する角度でしめす。角度 $\theta$ (度)、曲線半径R(m)の間には次の関係がある。  $R \approx 1,746.38 / \theta$

### 1. 4 スラック

#### 1. 4. 1 スラックの必要性

車両が曲線を通過する状態を考えると、最小曲線を通るためにはおのおのの車輪が軌道と直角に、つまり車軸が曲線の中心に向いている必要がある。しかも、実際には車両の車軸は、少なくとも2軸が台わくに固定されているので、曲線通過の際はそのいずれか一方、または双方とも軌道と直角になることはできない。したがって、車輪はレールとある角度をもって当たりながら進むことになる。そして、車軸の間隔が大きいほど車輪がレールに当たる角度は大きくなる。このときの車軸間隔を固定軸距といっている。固定軸距あまり小さくても車両動揺が大きくなるが、反対に大きすぎると、いま述べたように曲線通過のとき車輪がレールに当たる角度が大きくなり、きしみ合って円滑に走ることができなくなる。このため曲線では、曲線の大小によって、直線より少し軸間を拡大している。この曲線における軌道の拡大をスラックという。

#### 1. 4. 2 スラックの算式

##### (1) 最大限のスラック

2軸車両が曲線を通過するとき、車軸の方向と曲線中心の方向との関係を見ると、一般に図-3に示すように、固定軸距の前軸から $3/4$ の距離にある点で車軸に平行に引いた直線が曲線中心と一致するとされている。いま前輪の外側フランジのみが、外軌レールに接触しながら走行する場合について考えてみる。

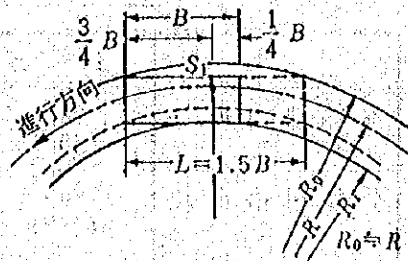


図-3 最大限のスラック

$$(L/2)^2 = R - (R - S_1)^2$$

ここで  $R_o = R$

$$\therefore (L/2)^2 = (2R - S_1) S_1$$

$$\approx 2R S_1$$

$$\therefore S_1 = \frac{(L/2)^2}{2R} = \frac{L^2}{8R}$$

狭軌線では、固定軸距  $l = 4.6$  mと規定されているから、

$$L = 4.6 \times \frac{3}{4} \times 2 = 6.9 \text{ m}$$

であるから、

$$S_1 = \frac{L^2}{8R} = \frac{6.9^2}{8R} \approx \frac{6}{R} \text{ (m)} = \frac{6000}{R} \text{ (mm)}$$

となる。

実際の軌道では、車輪とレールとの間には可動余裕があるので、その分だけは特に曲線でスラックを付けなくても差し支えない。この可動余裕値の値としては、車輪のフランジ外面間距離の最大1054 mmで考えても、正規の軌間1067 mmの場合で13 mm、最小軌間1063 mmの場合でも9 mmあることになる。したがって、通常10 mmの可動余裕があるので、その半分程度を差し引いて、次式の値を最大限のスラックとした。

$$S = \frac{6000}{R} - 5 \text{ (mm)}$$

つまり上式は、それ以上にスラックはつける必要がないという値を示している。

## (2) 最小限のスラック

2軸車両が曲線を通過するとき、前輪の外側フランジとともに後輪に内側フランジ



がそれぞれ外側、内軌レールに接触しながら走行する場合を考える。

前に述べたとおり、固定軸距の前輪から  $3/4$  の点で、車軸に平行に引いた直線が曲線の中心と一致するとして、後輪の外フランジと外軌レールとの間隔  $S$  を求める。図-4 によれば、

$$S_1 = \frac{\left(\frac{3}{4}B\right)^2}{2R}, \quad S_2 = \frac{\left(\frac{1}{4}B\right)^2}{2R}$$

ここに、 $R_0 \approx R$ ,

$$R_1 \approx R$$

$S = S_1 - S_2$  から

$$S = \frac{B^2}{4R}$$

狭軌線では、 $l = 4, 6$  であるから、

$$S = \frac{B^2}{4R} = \frac{4 \cdot 6^2}{4R} \approx \frac{5.3}{R} \text{ (m)} = \frac{5300}{R} \text{ (mm)}$$

前に述べた可動余裕の  $10 \text{ mm}$  を全部差し引くと、最小限のスラックとしては次式で与えられる。

$$S = \frac{5300}{R} - 10 \text{ (mm)}$$

### (3) スラックの実用値

スラックとしては、上に述べた(1)最大限の値と(2)最小限の値の中間の値で、切りのよい  $5 \text{ mm}$  単位で丸め、表-4のように決めている。

この場合、半径  $600 \text{ m}$  を越える円曲線でも必要な場合は、 $5 \text{ mm}$  のスラックをつけることができる。

### (4) 各国の例

各国のスラックの例(標準軌)を示すと表-5のとおりである。

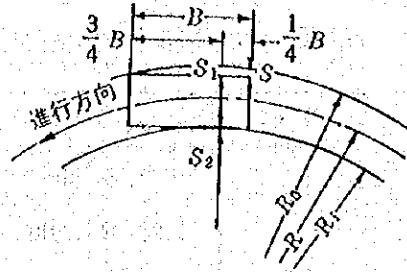


図-4 最小限のスラック

表-4 スラック

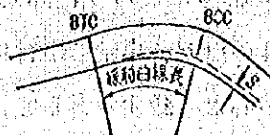
曲線半径 (m)	スラック (mm)
$R < 200$	25
$200 \leq R < 240$	20
$240 \leq R < 320$	15
$320 \leq R < 440$	10
$440 \leq R \leq 600$	5

表-5 各国鉄道のスラック

鉄道名		スラック	
国	ドイツ	$R \geq 300$	$S = 0\text{mm}$
		$300 > R \geq 200$	5
		$200 > R \geq 150$	10
		$150 > R \geq 120$	15
		$120 > R \geq 100$	20
鉄	フランス	$R \geq 600$	$S = 0\text{mm}$
		$600 > R \geq 400$	8
		$400 > R \geq 200$	18
		$200 > R$	28
イギリス	$R \geq 203$	$S = 0\text{mm}$	
	$203 > R \geq 150$	6.4	
	$150 > R \geq 110$	12.7	
都市地下鉄	トロント	$198 \geq R$	$S = 63\text{mm}$
	ロンドン	$S = \frac{3,472 \ell^2}{R}$	$\ell = \text{緩和曲線長}$
	パリ	$500 \geq R$	$S = 15\text{mm}$
	丸ノ内線	$S = 2,250/R$	

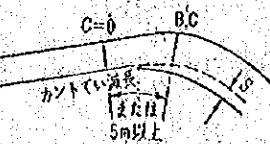
単曲線  
(緩和曲線のある場合)

S = スラック



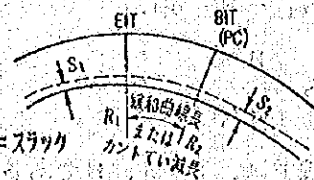
単曲線  
(緩和曲線のない場合)

S = スラック



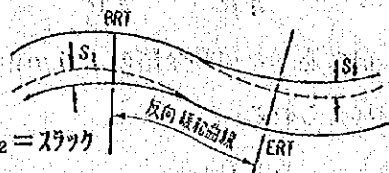
複心曲線

$S_1, S_2 = \text{スラック}$



反向曲線

$S_1, S_2 = \text{スラック}$



相対する分岐器間のスラック

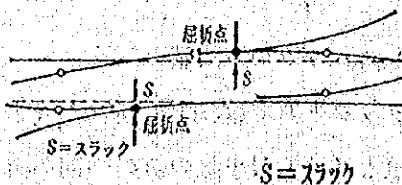
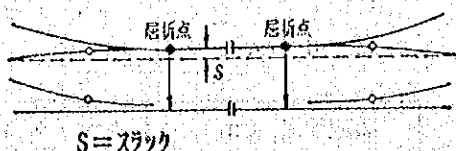


図-5 スラックのつけ方

1. 4. 3 スラックのつけ方

スラックのつけ方は、外側レールを基準として曲線内方に軌間を拡大してつける。スラックのてい減については、緩和曲線の全長で行い、緩和曲線のない場合はカントのてい減距離と同一とし、カントのない場合は5m以上でてい減することになっている。

各種の場合のスラックのてい減方法を図示すると図-5のとおりである。

## 2. カント

### 2.1 カントの必要性

列車が曲線のある速度で通過する場合には、遠心力が外側に働いて、そのままでは

(1) はなはだしいときには車両が外側へ転覆する。

(2) 乗客が外側に引かれ乗心地を害する。

(3) 軸重、横圧とも外側レールに負担が大きくなり、軌道保守量が増える。

というような悪影響をもたらす。これらを防ぐために、外側レールを内側レールより高くすることをカントをつけるといい、その量をカント量とっている。

日本では、習慣的に正規の軌間1067mmの軌間線における内外軌の高さの差をカント量と定義している。しかし、標準軌の場合は、世界的にみてカント量を、ほぼ内外レールの中心距離1500mmに対する高低差で定義している。

### 2.2 カントの理論

#### 2.2.1 均衡カント

車両が半径R (m) の曲線を速度V (km/h) で通過する場合を考えると、曲線外方へ遠心力が作用する。

その結果図-6に示すように車両重量と遠心力との合力が車両重心に作用すると考えればよい。そして、その方向は速度が高ければ軌道中心より外側で、速度が低ければ軌道中心より内側へ向くことになる。

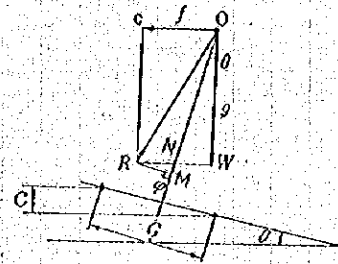


図-6 カント

いま、軌道面がカントC (mm) だけ傾いているとすると、その合力 $\overline{OR}$ によって生ずる軌道面に平行な横加速度成分 $\overline{MR} = p$ を求める。

$$\text{列車速度 } v = \frac{V}{3.6} \text{ (m/sec)}$$

$$\text{遠心加速度 } f = \frac{v^2}{R} = \frac{1}{R} \left( \frac{V}{3.6} \right)^2 = \frac{V^2}{13R} \text{ (m/sec)}$$

$$\text{重心加速度 } g = 9.80 \text{ (m/sec}^2\text{)}$$

$$\overline{WN} = g \tan \theta$$

$$\therefore \overline{NR} = f - \overline{WN} = \frac{V^2}{13R} - g \tan \theta$$

$$\overline{MR} = \overline{NR} \cos \theta = \left( \frac{V^2}{13R} - g \tan \theta \right) \cos \theta$$

表-6

カ

半径 (m) / 速度 (km/h)	100	110	110	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	320	340	360	380	400	420	440	
10	5	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3							
12	12	11	10	9	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
14	16	15	14	13	12	11	10	10	9	9	8	8	7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	
16	22	20	18	17	15	14	13	13	12	11	11	10	10	9	9	9	8	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	
18	29	25	23	21	19	18	17	16	15	14	14	13	12	12	11	11	10	10	10	9	9	9	8	8	7	7	6	6	
20	34	31	28	26	24	22	21	20	19	18	17	16	15	15	14	13	13	12	12	12	11	11	10	9	9	8	8	8	
22	41	37	34	31	29	27	25	24	23	21	20	19	18	18	17	16	16	15	15	14	14	13	12	11	11	10	10	9	
24	48	44	40	37	35	32	30	28	27	25	24	23	22	21	20	19	19	18	17	17	16	15	14	13	13	12	12	11	
26	57	52	47	44	41	38	35	33	32	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20	20	19	18	17	16	15	14	14	13	
28	66	60	55	51	47	44	41	39	37	35	33	31	30	29	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	16	15	
30	76	69	63	58	54	50	47	44	42	40	38	36	34	33	32	30	29	28	27	26	25	24	22	21	20	19	18	17	
32				66	61	57	54	51	48	45	43	41	39	37	36	34	33	32	31	30	29	27	25	24	23	22	20	20	
34				75	69	65	61	57	54	51	49	46	44	42	40	39	37	36	35	33	32	30	29	27	26	24	23	22	
35					79	74	69	64	61	57	54	52	47	45	42	41	40	38	37	35	34	32	30	29	27	26	25	23	
36				84	78	73	68	64	60	57	54	52	49	47	45	44	42	40	39	38	36	34	32	30	29	27	26	25	
38					81	76	71	67	64	61	58	55	53	51	49	47	45	43	42	40	38	36	34	32	30	29	27	26	
40					90	84	79	75	71	67	64	61	58	56	54	52	50	48	46	45	42	40	37	35	34	32	31	31	
42						82	78	74	71	67	64	62	59	57	55	53	51	49	46	44	41	39	37	35	34	32	31	31	
44						90	86	81	77	74	71	68	65	63	60	58	56	54	51	48	45	43	41	39	37	35	34	34	
45						95	90	85	81	78	74	71	68	66	63	61	59	57	53	50	47	45	43	41	39	37	35	35	
46							89	85	81	77	74	71	68	66	63	61	59	56	52	49	47	44	42	40	38	36	34	34	
48							97	92	88	84	81	77	74	72	69	67	65	60	57	54	51	48	46	44	42	40	38	37	
50							105	100	95	91	88	84	81	78	75	72	70	66	62	58	55	53	50	48	46	44	42	41	
52								99	95	91	87	84	81	78	76	71	67	63	60	57	54	51	48	46	44	42	40	40	
54											107	102	98	94	91	87	84	82	77	72	65	61	58	53	50	48	46	45	
55											111	106	102	98	94	91	88	85	80	75	71	67	64	61	58	53	50	49	
56																105	101	98	94	91	88	82	77	73	69	66	63	60	
58																113	109	105	101	97	94	88	83	79	74	71	67	64	
60																127	117	112	109	104	101	95	89	84	80	76	72	69	
62																				108	101	95	90	85	81	77	73	70	
64																				115	108	102	96	91	86	82	78	75	
65																					118	111	104	99	93	89	85	81	
66																					122	114	108	102	96	91	87	83	
68																					130	122	114	108	102	97	92	88	
70																					135	128	121	114	108	103	98	94	
72																							121	115	109	104	99	95	
74																							128	121	115	110	104	100	
75																							131	124	118	112	107	102	
76																									121	116	110	104	99
78																									123	122	116	110	104
80																										134	128	122	116
82																													
84																													
85																													
86																													
88																													
90																													
92																													
94																													
95																													
96																													
98																													
100																													
102																													
104																													
105																													
106																													
108																													
110																													
112																													
114																													
115																													
116																													
118																													
120																													

【備考】  
 1. 半径が本表に掲げるものの中間にある場合は、半径の小なる方のカントを用いること。  
 2. 速度が本表に掲げるものの中間にある場合は、速度の大なる方のカントを用いること。  
 3. カントの最大は 105 mm とし、かつこの数字は、最高速度の列車に対し、カント不足量を検算するために掲げてある。  
 4. 点線のわく内のカントは、運転取扱基準規程（昭和39年12月運達第33号）に定める速度より 5 km/H 高い速度に対するものである。

卜 表

460	480	500	520	540	560	580	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2000	2500	3000	4000	6000	10000	平均 速度 (km/h)	
																													10
																													12
																													14
																													16
																													18
																													20
																													22
																													24
																													26
																													28
																													30
																													32
																													34
																													35
																													36
																													38
																													40
																													42
																													44
																													45
																													46
																													48
																													50
																													52
																													54
																													55
																													56
																													58
																													60
																													62
																													64
																													65
																													66
																													68
																													70
																													72
																													74
																													75
																													76
																													78
																													80
																													82
																													84
																													85
																													86
																													88
																													90
																													92
																													94
																													95
																													96
																													98
																													100
																													102
																													104
																													105
																													108
																													110
																													112
																													114
																													115
																													116
																													118
																													120

$\theta$  は小さいので、 $\tan \theta \approx \sin \theta$ 、 $\cos \theta \approx 1$ 、 $\sin \theta = C/G$ であるから

$$\therefore p = \overline{MR} = \frac{V^2}{13R} - \frac{c}{G} \text{ (m/sec}^2\text{)}$$

これを加速度  $g$  の単位であらわすと、

$$\alpha = \frac{p}{g} = \frac{V^2}{127R} - \frac{C}{G} \text{ (g)}$$

この横方向加速度が0の場合 ( $p=0$ ) は、遠心加速度と重力加速度との合力が軌道中心に向いたときであり、いちばん望ましい状態ということで、このときのカントを均衡カントといっている。

すなわち、 $p=0$ とすれば、

$$\frac{V^2}{13R} = \frac{C}{G}$$

$$C = \frac{GV^2}{127R}$$

$G=1,067\text{mm}$ とすれば、

$$C = 8.4 \frac{V^2}{R}$$

$G=1,000\text{mm}$ とすれば、

$$C = 7.9 \frac{V^2}{R}$$

狭軌線( $G=1,067\text{mm}$ )における式の関係を表したものが、カント表で、表-6のとおりである。

また、この横方向加速度は不均衡遠心力ともいわれる。 $p$ が(+)の場合は、外側に加速度が働くわけで超過遠心力ともいわれて、これは通過速度に対してカントが不足しているのであり、 $p$ が(-)の場合は内側に加速度が働くわけで、これは通過速度に対してカントが過大であるのである。

実際には、種々の速度の列車が通ることが多いので、カントを設定する場合、どんな速度に均衡した値を考えるかが問題となる。速度の決め方については2.2.2で述べるが、いずれにしても、ある速度に均衡したカントを設定するとき、それより高い速度の列車に対して外方への横加速度、つまり超過遠心力がある限度内となるよう加速度を決めること、逆にそれより低い速度で通過する列車に対して、内方への横加速度がある限度内になるよう設定カントを決めることが条件となる。

## 2. 2. 2 速度の決め方

2. 2. 1で述べたように、カントは曲線半径と通過速度によって決まるが、その曲線を通る列車の速度は一般に各種各様であるので、カントを決めるに当たってはその平均速度をどのように決めるかが問題である。

現在、用いられている平均速度算定の式は、次の数種類があるが、どの算定式によっても大差はない。しかし、いずれにしても最高速度の場合に対するカント不足量のチェックが必要である。

主な平均速度算定式を示すと次のとおりである。

### (1) 自乗平均法

$$V_0 = \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{N}}$$

$V_0$  : 平均速度 (km/h)

$V_i$  : 列車速度 (km/h)

$N$  : 列車数

実際には、次のように計算するほうが簡単である。

$$V_0 = \sqrt{\frac{\sum n_i V_i^2}{\sum n_i}}$$

$V_0$  : 平均速度 (km/h)

$n_i$  : 列車種別々列車数

$V_i$  : 列車種別々速度 (km/h)

### (2) 高速列車にウェイトをつける法

$$V_0 = \sqrt{\frac{\sum w_i n_i V_i^2}{\sum w_i n_i}}$$

$V_0$  : 平均速度 (km/h)

$n_i$  : 列車種別々列車数

$V_i$  : 列車種別々速度 (km/h)

$w_i$  : 列車種別によるウェイト

### (3) 最高最低自乗平均法

$$V_0 = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2}{2}}$$

$V_0$  : 平均速度 (km/h)

$V_1$  : 最高列車速度 (km/h)

$V_2$  : 最低列車速度 (km/h)



以上のように、平均速度を求めるには各種の算定式があるが、基本は自乗平均法によるのが普通である。いずれにしても、運転保安、乗心地、軌道保守等を考慮して最適な設計速度というものは、現在確定的なものはない。

## 2. 3 カント

### 2. 3. 1 最大カント量

最大カント量は、車両がカントのついた曲線中で停止した場合、あるいは曲線中で低速で走行する場合、車両が曲線外側からの風により内側へ転倒しないため十分安全であることおよび停止または低速走行の場合における車体の傾斜により乗客に不快感を与えないことを考慮して決定されるものである。

車両の内側転倒について次のように簡単に検討している。

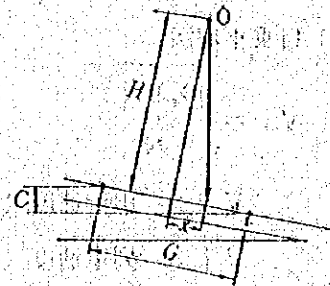


図-7 最大カント

図-7において、

H=車両重心高さ

C=カント

G=軌間

とすれば、

$$\frac{x}{H} \cong \frac{C}{G} \quad \therefore C = \frac{x}{H} G$$

車両の内側転倒に対する安全率を3としてxをG/6以内におさめるためには、

$$C \cong \frac{G^2}{6H}$$

が成り立つ必要がある。

いま、G=1067mm、H=1700mmとすれば、

$$C \cong \frac{1067^2}{6 \times 1700} = 112 \text{ mm}$$

となる。

G=1,000mm、H=1,700mmとすれば

$$C \cong \frac{1000^2}{6 \times 1700} = 98 \text{ mm}$$

これに種々の余裕をみて最大カント量は、C=105mm (C=90mm) としている。

## 2. 3. 2 カントのつけ方

### (1) つけ方の原則

カントは、通常内方レールはそのままで、外軌レールを与えられたカントの量だけ上げてつけるよう決めている。これは路盤高や道床厚に関係なく、作業しやすいことを考えてのことである。しかし、中間直線をなくした連続緩和曲線の場合など特別の場合、外方レールをカントの1/2上げ、内方レールをカントの1/2下げることも行っている。

### (2) 曲線分岐器および橋梁上のカントのつけ方

曲線分岐器のカントのつけ方は、基準線側に所要のカントをつけるのを原則としているが、外方分岐器の場合は所要のカントは40mm以下としている。これは、曲線分岐器の基準線側を通過する列車の乗心地を主体に考えたからである。特に外方分岐器の場合は、基準線側につけたカント量だけ分岐線側において逆カントになるので、おのずから基準線側につけるカントにも制限をつけざるを得ない(2. 4. 1参照)。

橋梁上のカントについては、トラスおよびこれに準ずる橋梁以外では、けた座面でその1/2をつけることができる。またトラスガーダーおよびアイビームにおいては、カントの全部をけた座面で行うことができる。

## 2. 4. カント不足

### 2. 4. 1 最大カント不足量

式(9)または(10)から、

$$Cd = \frac{b}{g}G = \frac{GV^2}{127R} - C$$

この式は不均衡遠心力とカント不足量との関係を示しており、カント不足量分のカントをつければ均衡カントとなり、不均衡遠心力がなくなることがわかる。このCdのことをカント不足量という。最大カント不足量の限度としては、車両が曲線を通過する場合、超過遠心力により乗心地を害さない限度と、それに加えて車両がその振動および曲線内側からの風により外側へ転倒しないために十分であることを考慮して決定されるものである。

車両の外側転倒について、次のように簡略に検討している。図-8において、

H: 車両の重心高さ

G: 軌間

C: カント

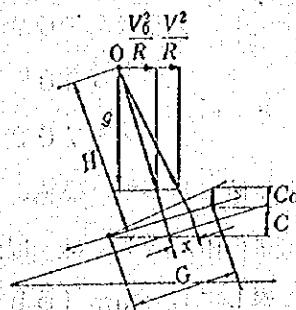


図-8 カント不足

とすれば、カントCに対する均衡速度を $V_0$ とすれば、

$$C = \frac{GV_0^2}{127R}$$

また、 $V$ なる速度で通過する場合は、同様に、

$$C + C_d = \frac{GV^2}{127R}$$

なる関係が成り立つ。したがって、

$$\frac{C_d}{G} = \frac{1}{127R} (V^2 - V_0^2)$$

そのときの遠心力と重量との合力の方向の軌道中心からの偏倚量を $x$ とすると、同図より、

$$\frac{C_d}{G} = \frac{x}{H}$$

が成り立つ。したがって、

$$x = \frac{1}{127R} (V^2 - V_0^2) H$$

種々の条件を考慮して、この偏倚量 $x$ を $(1/8)G$ 以内におさめるように決めている。

つまり、

$$\frac{1}{8}G \geq (V^2 - V_0^2) \frac{H}{127R}$$

カント不足量 $C_d$ であらわせば、

$$C_d \leq \frac{G^2}{8H}$$

$H=1700\text{mm}$ とすれば、

$$C_d \leq \frac{1067^2}{8 \times 1700} = 84\text{mm}$$

$$C_d \leq \frac{1000^2}{8 \times 1700} = 74\text{mm}$$

以上の値に対して、横風、車両のばねの影響、乗心地等を考慮して、実際にはカント不足量の限度としては一般列車に対して $50\text{mm}$  ( $45\text{mm}$ )、電車・ディーゼルカーに対して $60\text{mm}$  ( $55\text{mm}$ )としている。

### 3. 緩和曲線

#### 3. 1 緩和曲線の必要性

円曲線上を走行する列車には外方に遠心力が働き、これに平衡させるため、通常カントが付けられる。直線から円曲線に移るときこのカントは十分な長さで取り付けなければならない。

この取り付け区間ではカントは規則的に徐々に変化していくが、カントは曲率に比例するから、カントの変化に応じ曲率も同時に変化する特殊な曲線が必要になる。また、カント不足がある場合、これを徐々に変化させるためにカントと同様に曲率が規則的に徐々に変化する特殊な曲線が必要になる。

このように、直線と円曲線（2つの円曲線も同様）の間には緩和曲線という特殊な曲線を挿入する。したがって、緩和曲線は直線との接続点では、曲線半径は無量大、円曲線との接続点では曲線半径は等しくなければならない。なお、スラックについても、緩和曲線の間で同様にてい減することとしている。

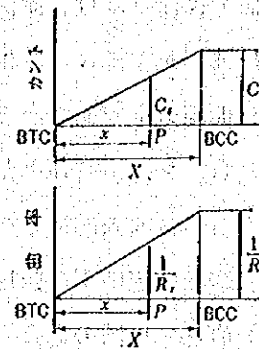
#### 3. 2 緩和曲線の形状

##### 3. 2. 1 カント、曲率のてい減方式

一般にある円曲線で曲線半径  $R$ 、カント  $C$ 、カント設定速度  $V$  とすると、遠心加速度と重力加速度の約合式により次の関係がある。

$$C = \frac{GV^2}{127R}$$

図-9 カント及び曲率のてい減



同様に、図-9において、緩和曲線中の任意の点  $P$  における曲率半径を  $R_x$ 、カントを  $C_x$  とすれば、速度  $V$  が一定であれば

$$C_x = \frac{GV^2}{127R_x}$$

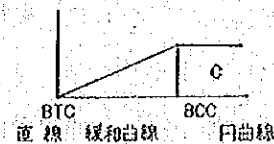
の関係が成り立つ。

したがって、

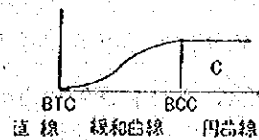
$$\frac{1}{R_x} = \frac{C_x}{C} \cdot \frac{1}{R}$$

となって、曲率はカントに比例することになる。

緩和曲線の中でカントおよび曲率のてい減方式として、従来から世界的に最も多く用いられている



(a) カントの直線てい減



(b) カントの曲線てい減

図-10 カントのてい減

るものは、カントおよび曲率を直線的にしてい減する方式である。

この方式によると、図-10(a)に示すとおり、緩和曲線の始終点において、カントの変化が不連続となる欠点があり、事実実測結果をみても曲線を通過する列車の振動の多くが、特に緩和曲線の入口・出口で起こっており、その傾向は速度とともに増大するようである。

この欠点を補うため図-10(b)のようにカントおよび曲率を曲線的にしてい減する方式も種々の式が古くから提案されている。

また、この欠点を補うための最も簡単な方法として緩和曲線の始終点付近の短小区間(約30~40m)においてカントおよび正矢に円みをつけるフランスの国鉄のやり方(doucine)も実用的である。

### 3. 2. 2. 緩和曲線の線形

緩和曲線は、3. 1でも述べたとおり、直線との接続点では曲率は0、曲線半径Rの円曲線との接続点では曲率が $1/R$ と変化するわけであるが、その間緩和曲線の中で曲率をどのように変化させるか、つまり3. 2. 1で述べたカントおよび曲率を直線的にあるいは曲線的にどのように変化させるかによって、緩和曲線の平面線形が決定される。

#### (1) 直線てい減の場合

曲率が直線側から距離に比例して増加する直線てい減の場合、その距離のとり方を緩和曲線の始点(BTC)の接線(直線方向)上にとる方法、緩和曲線上にとるもの、動径(長弦)にとる方法がある(図-11)。

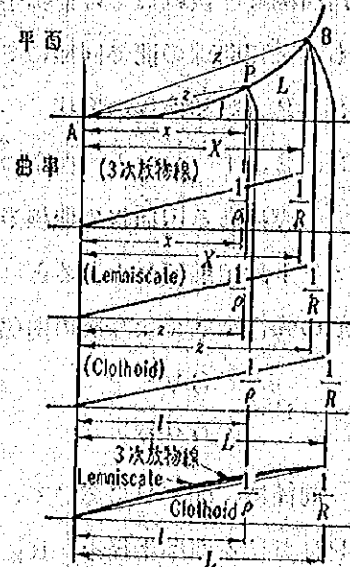


図-11 各種の直線てい減

#### (a) 曲率が緩和曲線の接線(横距)に比例して増加する方法

代表的には、3次放物線がある( Note. 2)

#### (b) 曲率が緩和曲線上の長さに比例して増加する方法

代表的には、クロソイド(Clothoid)曲線がある( Note. 3)

アメリカではクロソイド曲線を、実用的に簡便化して使いやすい形に変えてシールズ螺線、AREA螺線などが考案されている。( Note. 3)

クロソイド曲線は、理論的にはすぐれたものであるが、実用上はほとんど差がなく、計算がより簡単である3次放物線が多く使用されている。しかし、線路選定上急

曲線を多用する鉄道などでは、この緩和曲線が用いられている。

(c) 曲率が動弦(弦長)に比例して増加する場合

代表的には、レムニスケイト(Lemniscate)曲線がある。(Note. 4)

(2) 曲線てい減の場合

曲率およびカントを曲線的にてい減する方式の特長については3. 2. 1で述べた。この場合でも、てい減の基線のとり方を(1)における(a)、(b)、(c)のようにすることも考えられるが、鉄道曲線の場合、緩和曲線の接線(横距)に従って、てい減の基線を考えても他とほとんど差を生じないことでもあり、比較的簡単な式にまとめられ、この方式によることとしている。

曲線てい減による緩和曲線は、直線てい減による緩和曲線に比べシフトが小さくなるので、同一のシフトであれば緩和曲線が長くなることになる。このことは、従来の直線てい減の緩和曲線の入っている既設線において、円曲線部を移動させないでも、曲線てい減の緩和曲線におきかえる

ことにより緩和曲線長を長くできるという効果的な利用法としても曲線てい減が注目される所以である。

図-12からもわかるとおり、曲線てい減の場合、緩和曲線の始終点で1次の導関数が0になる必要がある。

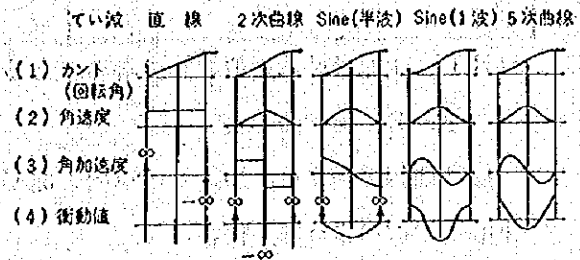


図-12 各種カントのてい減の比較

代表的には、サイン半波長曲線(Note 5)、西ドイツ方式(Note 6)、フランス方式(Note 7)がある。

(3) 3次放物線緩和曲線とサイン半波長てい減緩和曲線の比較

さきにも述べたとおり、3次放物線緩和曲線の入っている既設線で、大部分の円曲線部を移動させずにサイン半波長てい減緩和曲線を入れることにより、緩和曲線長を図-13のように延伸できることははなはだ有効である。(Note 8)

次に、3次放物線緩和曲線とサイン半波長てい減緩和曲線との線形の比較をまとめると表-7のとおりである。

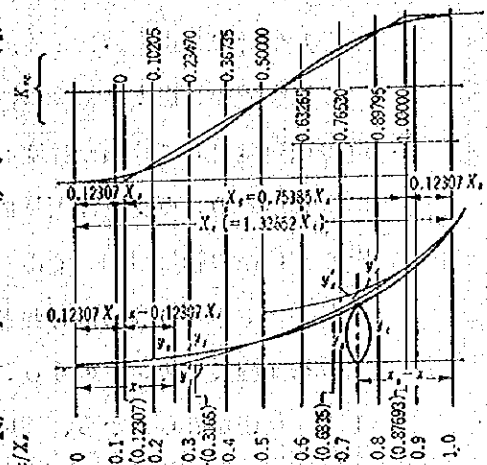


図-13 3次放物線緩和曲線とサイン半波長てい減緩和曲線の比較

表一七 サインてい減緩和曲線と3次放物線緩和曲線の比較

条 件	3次放物線 緩和曲線	サインてい減 緩和曲線	比 率
緩和曲線長同一の場合のシフト量	$\frac{1}{24} \cdot \frac{l^2}{R^2}$	$0.0236788 \frac{l^2}{R}$	0.56829
緩和曲線長同一の場合のBCC縦 距(d)	$\frac{l^2}{6R}$	$0.1486788 \frac{l^2}{R}$	0.89207
緩和曲線長同一の場合のカント変 化率の最大値	$\frac{C_0}{l}$ (一定)	$\frac{x}{2} \cdot \frac{C_0}{l}$	1.57080
シフト量同一の場合の緩和曲線長	$l$	1.3265221	1.326522
シフト量同一の場合のカント変化 率の最大値	$\frac{C_0}{l}$ (一定)	$\frac{x}{2} \cdot \frac{C_0}{1.3265221}$ $= 1.184146 \frac{C_0}{l}$	1.18414

(注) 上記の値は近似計算の場合である。

### 3. 2. 3 緩和曲線長

緩和曲線の長さは、通過する車両と曲率のてい減の程度との関係から、安全および乗心地上次のような条件、

- ① 車両の3点支持による脱線に対する安全の限度
- ② 超過遠心力の時間的变化割合に対する乗心地の限度
- ③ カント量の時間的变化割合に対する乗心地の限度

を考慮して、それらからきまる最大値を実際の緩和曲線長とする。

#### (1) 車両の3点支持による脱線に対する安全限度からみた緩和曲線長

これまでの3点支持による浮上り量は20mmに止めるべきであるとしている。軌道の狂い量として9mm程度を考えるものとすれば、 $20 - 9 = 11$ mmが緩和曲線による車両の3点支持浮上りに対してとり得る量となるが、これは車両の最大固定軸距4.6mの約1/400である。したがって、緩和曲線長としての運転保安上少なくともカントの400倍は必要と認められる。

緩和曲線長をカントの400倍とすれば、カントてい減による3点浮上り量は11.5mmとなるから、一応軌道狂いとして許される量は12.5mmとなる。実際にはばね状態のいく分悪い車両も考慮しなければならないので、車両の乗上り脱線を考慮して緩和曲線長としては少なくとも400倍は必要である。



## (2) 超過遠心力の時間的変化割合に対する乗心地の限度からきまる緩和曲線長

これは円曲線通過時働く超過遠心力により許容される乗心地と同じ程度までは、緩和曲線中で超過遠心力が変化することにより受ける乗心地の程度(悪さ)は許容してもよいという考え方から、緩和曲線長を求めようとするもので、アメリカのAARの研究により提案されヨーロッパでも採用している。式は次のとおりである。

超過遠心力とカント不足量との関係は式は、

$$C_d = \frac{p}{g} G$$

の関係があるから、

$$l = \frac{V}{3.6} \cdot \frac{p}{p_0} = \frac{V}{3.6} \cdot \frac{C_d \cdot g}{G \cdot P_0} \quad (\text{m})$$

または、

$$l = \frac{V}{3.6} \cdot \frac{C_d}{C_{d0}} \quad (\text{m})$$

ここに、 $p_0$  : 超過遠心力の時間的変化割合の限度 (g/sec)

$p$  : 最大超過遠心力 (g)

$C_d$  : 最大カント不足量 (mm)

$G$  : 左右車輪のレール接触点間距離 (mm)

$g$  : 重力加速度

$C_{d0}$  : カント不足量の時間的変化割合の限度 (mm/sec)

$V$  : 最高速度 (km/h)

日本では、狭軌線の場合、超過遠心力の時間的変化割合を 0.03 g/sec として緩和曲線長を求めている。

## (3) カント量の時間的変化割合に対する乗心地の限度からきまる緩和曲線長

緩和曲線中ではカントが変化するに従い、車両はその長軸の回りを回転することになる。そして、その回転速度が大きくなるとともに乗心地が悪くなるので、自らそれには限度が生ずる。したがって、その回転速度がある限度内におさまるように緩和曲線を決めるのがこの考え方で、次式により求められる。

$$l = \frac{V}{3.6} \cdot \frac{C_m}{C_{m0}} \quad (\text{m})$$

ここに、 $C_m$  : カント量 (mm)

カント量 \$C\_m\$ の時間的変化割合の限度 (mm/sec)

日本の狭軌線では、カントの時間的変化割合の限度を 1, 2 級線に対して 29 mm/sec、3 級線に対して 35 mm/sec、4 級線に対して 40 mm/sec として緩和曲線長を求めている。

各国主要鉄道における、カントの時間的変化割合の限度を示すと表-8 のとおりである。

表-8 外国の主要鉄道におけるカントの時間的変化割合

国名	カントの最大時間的割合 (mm/sec)
ドイツ	35
フランス	60 (列車) 70 (レールカー)
イギリス	57
スウェーデン	46
	35 (通常)
アメリカ C & O	29 (望ましい値) 32

以上のように緩和曲線長は、実カント不足量、最高速度によって算定されるが、緩和曲線はいったん挿入すると延伸することはなかなか困難となることが多いので、新設・改良の場合には将来の最高速度を予想して、将来スピードアップがあっても延伸の必要のないように十分な緩和曲線を確保しておくことが望まれる。将来の速度を予想して緩和曲線長を決める場合のカントは、あくまでその計算に用いるカントで、実際に現場に敷設するカントではないことに注意する必要がある。

### 3.2.4 敷設法

#### (1) 直線てい減緩和曲線 (Note 10)

- 近似計算法…曲線長  $l = x$  軸長とし、横距に対する縦距を求めて、緩和曲線上の各点を定める。
- 精密計算法…緩和曲線 (L) / 曲線半径 (R) 及び、緩和曲線長が大きい場合には、各種の誤差が大きくなるのでこの方法で行う。

#### (2) 曲線てい減緩和曲線 (Note 11)

- 近似計算法…曲線長  $l = x$  軸長とし、緩和曲線の終点では、緩和曲線長  $L = x$  軸長とし、 $\theta$  は小さいから  $\tan \theta \approx \theta$  と  $\sin \theta$ 、 $\cos \theta \approx 1 - \cos^2 \theta / 2$  として、緩和曲線上の各線を求める。

b) 精密計算法… $L^2/R$ がおおむね10程度以上の場合は各種誤差が大きくなるので、この方法でおこなう。

### 3. 2. 5 計算例

直線てい減緩和曲線の例をNote 12、曲線てい減緩和曲線(Sin曲線)の例をNote 13に示す。

#### 4 各種曲線の敷設条件

##### 4. 1 曲線間直線長

3次放物線緩和曲線では、車両が通過する際、その出入口では車両動揺を生じやすいことは前にも3. 2. 1で述べたとおりである。一方、実験によると車両の左右振動の周期はだいたい1. 5秒程度で通常1周期の間で減衰してしまう。したがって、曲線間の直線長や円曲線長は列車速度に応じて最初の緩和曲線で受けた振動が次の緩和曲線にはいるまでに減衰してしまうために、必要な一定長さを確保する必要がある。このための所要の曲線間の最小直線長あるいは円曲線の最小長 $l$ は、次の式で与えられる。

$$l = \frac{V \cdot T}{3.6} \text{ (m)}$$

ここに、 $V$ :列車速度(km/h)

$T$ :車両の左右の振動の減衰時間(sec)

この動揺が累積しないためには少なくとも1車両長がおさまる長さの曲線間直線長あるいは円曲線長を確保すべきである。したがって、それらの長さは少なくとも20m以上とる必要がある。狭軌線では「本線路における2つの近接した曲線においては、両緩和曲線間に20m以上の直線を挿入するものとする」と決めている。

また、線路の状況その他やむを得ず中間直線が確保できない場合は、両曲線を一つの連続したサインてい減緩和曲線で直接結ぶ方法も有効である。

ドイツ国鉄では、通過列車低速の場合には中間直線は挿入しなくてもよいとして、曲線半径との関係で下記の場合には中間直線を挿入することを規定している。

$$\frac{1000}{R_1} + \frac{1000}{R_2} > \frac{9000}{V_2}$$

または

$$\frac{1000}{R_1} + \frac{1000}{R_2} > 10$$

ここに、 $R_1$ 、 $R_2$ :2つの曲線半径(m)

式(4.1)中の $V$ ：列車速度(km/h)

その中間直線の長さ $L$ は $\geq V/1.0$ (m)としている。

#### 4.2 最小円曲線長

4.1と同様の趣旨で円曲線の始終点でも動揺を生じやすいので、この動揺が累積しないために、少なくとも1車両長以上の円曲線長を確保したい。したがって、狭軌線では円曲線長は少なくとも20m以上とることを規定している。

線路選定上どうしても円曲線の最小長のとれない場合は、サインで緩緩和曲線を用いて、場合によっては円曲線を設けず緩和曲線のみで接続することも行っている。

#### 4.3 特殊な線形

##### 4.3.1 反向曲線

反向曲線間には、車両の動揺を緩和するため、緩和曲線間に必要な直線長を挿入することは4.1で述べたが、このことは中間直線長をとるため逆に緩和曲線長が十分とれない場合も生ずる等の不都合もあり、むしろ直線をまったく除いて一続きの緩和曲線で連続することにより、単に車両運動を小さくするばかりでなく実質的に緩和曲線長を延伸するという効果もある。

##### 4.3.2 複心曲線

従来は複心曲線の円曲線間には緩和曲線を入れず、カントのみを大きい円曲線上で減ずるという不合理な方式しか用いられていなかったが、いまの狭軌線では、複心曲線における円曲線間相互の場合にも緩和曲線を挿入するときめている。

以上のように、既設線で緩和曲線の挿入されていないところで、正規の緩和曲線を挿入するには、円曲線全体を移動させなくてはならないので、実際上は困難な場合が多い。したがって、このような場合、便法として曲線修正計算器等を用いる方法が用いられている。

#### 5 こう配・縦曲線

##### 5.1 こう配

線路のこう配は、機関車のけん引重量や列車の速度を制約するなど輸送能率に直接大きな影響を及ぼすばかりでなく、線路の保守費や車両の運転費にも少なからぬ影響を及ぼすものであるから、線路の選定に当たっては、なるべくこれをゆるやかにするよう考慮すべきである。しかし、地形、工事費などの関係でどうしても制限せざるを得ないのが実情である。

こう配の表示法としては、水平距離に対する高低差をもってこれを千分率(%)で表すことが多い。列車が上りこう配を走行する際には、次式に示すこう配抵抗が働く。

$$R_g = W \sin \alpha$$

$\alpha$ は一般に小さいので、

$$R_g \approx W \tan \alpha = W \frac{h}{1000}$$

または、

$$r_g = \frac{R_g}{W} = h \text{ (kg)}$$

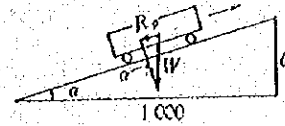


図-14 こう配抵抗

ここに、 $R_g$ ：こう配抵抗 (t)

$r_g$ ：こう配抵抗 (車両重量1トン当たり kg)

$W$ ：列車重量 (t)

$\alpha$ ：こう配の角度

$h/1000$ ：こう配

また、曲線は走行抵抗を増加させるから、曲線の代わりにその重量の抵抗を生ずる直線上りこう配が存在すると考えることもでき、これを換算こう配といっている。

曲線抵抗にたいする換算こう配は次式で与えられる。

$$N = \frac{600}{R} \text{ (\%)}$$

ここに、 $N$ ：換算こう配 (%)

$R$ ：曲線半径 (m)

この式は、アメリカ鉄道技術協会 (AREA) で定めた曲線抵抗に対するこう配補正の規則を参考とし、またモリソン氏の実験式により換算した結果決定したものである。

モリソン氏の実験式は次のとおりである。

$$R_o = \frac{1000 f (G+L)}{2R} \text{ (kg/t)}$$

ここに、 $R_o$ ：車両重量1トン当たり曲線抵抗 (kg/t)

$G$ ：軌間 (m)

$L$ ：固定軸距 (m)

$f$ ：レールと車輪の摩擦係数

$R$ ：曲線半径 (m)

この実験式に国鉄の値を入れて計算すると、 $G=1.067$  m、( $G=1.000$  m)、 $L=4.6$  m、

f=0.2 (通常0.1~0.27) であるから、

$$R_0 = \frac{1000 \times 0.2 (1.067 + 4.6)}{2R} = \frac{570}{R} \quad (\text{kg/t})$$

$$R_0 = \frac{1000 \times 0.2 (1.000 + 4.6)}{2R} = \frac{560}{R} \quad (\text{kg/t})$$

すなわち、車両重量1トン当たり  $\frac{570}{R}$  kg 程度の曲線抵抗となるが、これは直線

こう配に換算すると  $\frac{570\%}{R}$  のこう配に相当することになる。

曲線抵抗を加味した線級別のこう配の限度を求めると表-9のとおりとなる。

表-9 曲線を伴う場合のこう配の限度

線級	種別	1線級	2線級	3線級	4線級	電車専用線路
こう配の限度		10	10 (25)	20 (25)	25 (35)	35
曲線を伴う場合のこう配の限度	R=1800m	9.6	9.6 (24.6)	19.6 (24.6)	24.6 (34.6)	34.6
	R=1200	9.5	9.5 (24.5)	19.5 (24.5)	24.5 (34.5)	34.5
	R=1000	9.4	9.4 (24.4)	19.4 (24.4)	24.4 (34.4)	34.4
	R=800	9.2	9.2 (24.2)	19.2 (24.2)	24.2 (34.2)	34.2
	R=600	9.0	9.0 (24.0)	19.0 (24.0)	24.0 (34.0)	34.0
	R=400	8.5	8.5 (23.5)	18.5 (23.5)	23.5 (33.5)	33.5
	R=300		8.0 (23.0)	18.0 (23.0)	23.0 (33.0)	33.0
	R=250			17.6 (22.6)	22.6 (32.6)	32.6
	R=200				22.0 (32.0)	32.0

(備考) ( ) 内は、やむをえない場合に適する値を示す。

表-10 停車場外における最急こう配(%)

線路等級	1	2	3	4
本線路	10	10	20	25
線路の状況その他やむを得ない場合		25	25	35
電車専用線	35			

線路のこう配の限度については、狭軌線の場合、停車場外は表-10、停車場内は

表-11のように決めている。

表-11 停車場内における最急こう配(%)

本線路の両最端転てつ器の間(1) および列車の停止区域	3, 5(2)
側線で車両を留置する区域	3, 5

注) (1) 最端転てつ器の外方が、下りこう配の場合には、  
当該最端転てつ器から外方20mの個所までとする。

(2) 車両の解結または留置をしない本線路で、列車の  
着発に支障のない場合および通過列車だけを取り扱う  
本線路においては、停車場外。ただし、貨物列車が停車  
する場合は15%をこえてはならない。

停車場のこう配の限度については、列車の過大な出発抵抗、車両の手押移動作業、  
停車車両の逸走する危険など避けることを考慮したものである。さらに、停車場内の  
こう配を制限する区域を条件により指定したのは、列車の停止、車両の入れ換えなど  
に対する安全を考慮して決めたものである。

粘着式鉄道として、上記の限度を超えているものとして、日本ではJR東信越線横  
川~軽井沢間6.7%、箱根登山鉄道の8.8%があり、世界的にも7.0%を超える  
急こう配線があり、最も急な急こう配線としてはスイスのローザンヌの市街電車線で  
12.7%がある。

## 5.2.7 縦曲線

### 5.2.1 縦曲線の必要性

線路のこう配が変化する個所では、それが凸形の場合は、押された車両が、凹形  
の場合は引かれた車両がそれぞれ浮上がり脱線を招く危険あり、特に凸形の場合は遠心  
力による車両の浮上がりについてもチェックする必要がある。また、それが凹凸いず  
れの場合でも上下動揺加速度が大となり乗心地を悪くする。

これらの悪影響を緩和するため、こう配が変化する個所では縦曲線を挿入する。  
この縦曲線については、狭軌線の場合表-12のように規定している。

表-12 縦曲線(狭軌線)

本線路	半径800m以下の曲線の場合	縦曲線半径 4000m
	その他の場合	3000m
側線	相当の縦曲線を挿入	



### 5. 2. 2 算定式

縦曲線に関しては、曲線形として円曲線を考えて計算しているが、敷設に当たっては便宜上二次放物線を用いている。その半径は、以下に示すように、前後車両から受ける圧縮力または牽引力による車両の浮上りと凸形の場合の遠心力による車両の浮上りについての検討および縦曲線による建築限界、車両限界への影響、らの検討を行って決定する必要がある。

#### (1) 車両の浮上りに対する安全度

図-15において凸部において、車両が両隣接車両に押されると上向きの力Vを受ける。この上向きの力Vは、次のようにして求められる。車輪がVのために浮き上がるろうとするときの関係は、

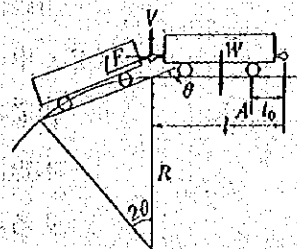


図-15

$$Vl - \frac{1}{2}Wl + Al_0 = 0, \quad A = W - V$$

$$V = F \sin \theta \approx F\theta, \quad l_0 = \frac{l}{4}$$

とすれば

$$W = 3F\theta$$

また

$$L = 2\theta R$$

$$\therefore \theta = \frac{L}{2R}$$

ここに、F：運動中における連結器にかかる長手方向の最大の力

W：車両の重量

V：Fの上方向への分力

A：一方の車輪が浮き上がるろうとするとき他方の車輪における反力

l：車両の長さ

l<sub>0</sub>：連結面から車輪までの距離

θ：2つの車両の軸方向のなす角度

軸重W/2に対する軸重減少率は、

$$\frac{V}{W/2} = \frac{2}{W} \cdot \frac{FL}{2R} = \frac{FL}{WR}$$

連結器にかかる長手方向の力Fは、電車の場合は機関車けん引の貨物列車の場合に比べて小さい。貨物列車の場合、機関車の最大牽引力は40t程度であり、制動時の

圧縮力は従来の狭軌線貨車の場合設計上最大80tを考えている。

つぎに遠心力による車両の浮上りについて検討する。

ある半径の縦曲線を通過する車両に加わる上下方向加速度（重力単位）は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{1}{r \cdot g} \left( \frac{V}{3.6} \right)^2$$

ここに、 $r$ ：縦曲線半径（m）

$V$ ：速度（km/h）

$g$ ：重力加速度（9/8m/sec<sup>2</sup>）

$\alpha$ ：上下方向加速度（重力単位）

これにより、

$$r = \frac{V^2}{127 \cdot \alpha}$$

車両の浮上りの見地から $\alpha$ の許容値は0.1以下に抑さえておけば十分であると考えられる。

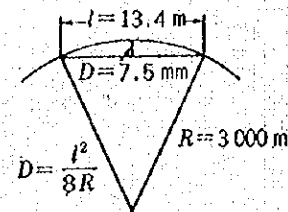
したがって

$$r = \frac{V^2}{12.7}$$

$V=120$  km/hとすると、 $r=1134$  mとなるので、規程で決められた縦曲線半径の大きさは十分である。

## (2) 建築限界・車両限界との関係

縦曲線のある場合には、車両の前後においてレール面上の建築限界は車両の下部に近づくことになるので、レール面上の建築限界と車両の下部の限界との間には、軌道の沈下などによる影響も考えて十分の余裕がなければならぬ。特に、この配変化が凸形で縦曲線半径が小さいとき、車両の中央下部がいちばん厳しくなる。



(図-16)

図-16

いま、これについて検討してみると、ボギー台車中心距離13.4mの車両について、半径3000mの縦曲線を考えると、車両下部とレール面との接近量は、

$$\frac{(13.4)^2}{8 \times 3000} \times 1000 \approx 7.5 \text{ mm}$$

となり、これに軌道狂いを加味しても、

レール面上の建築限界と車両のばね上部分の限界とすき間50mmに対しては十分安全であるとみられる。

### (3) 乗心地の面からの検討

半径 $r$ の縦曲線を速度 $V$ で通過する場合、その上下方向遠心力は、速度 $V$ の2乗に比例して増加する。この場合の上下方向遠心力を主要各国の規程などをみると0.02g~0.04gである。

なお、平面曲線に凸形縦曲線が競合した場合の車両走行を考えると、縦曲線による上下方向遠心力のため見掛け重力加速度が減少することになる。したがって、それと平面曲線による左右方向加速度との合力の方向が変わることになるので、その場合と単独に平面曲線のみある場合の曲線外側への転覆速度と同一とするためには、理論上単独の平面曲線のみの場合のカントに対して若干カントを増加させる必要がある。しかし、実際には、このカントをつけることは、その取り付け部分が保守上、乗心地上問題となるので行わず、カント不足量で考えるのが適当であるとしている。そのため、そのカント不足量を加えた全体のカント不足量の値が許容カント不足量以内におさまるよう縦曲線を大きくすることをやっている。

こう配変換箇所では平面曲線(半径800m以下)が競合する場合には、同様に縦曲線半径を直線の場合より大きくするようにしている。これはこう配の変化によって車両を浮き上がらせようとする力が働くと(特に凸形の場合に働く)、車輪の輪重抜けが大となり、これは曲線部の大きな横圧が競合すると脱線係数( $Q/P$ )が大となり、脱線の危険性が増すからである。

なお、参考までに外国の主要鉄道の縦曲線の規程をみると表-1-3のとおりである。

表-13 縦 曲 線

国 名	縦 曲 線 半 径	縦曲線挿入を要する 最小こう配差
ド イ ツ	$V \leq 160 \text{ km/h}, r \cong \begin{cases} 2000 \\ 0.4V^2 \\ 1000 \end{cases}$ $V > 160 \text{ km/h}, r \cong \begin{cases} 1000 \\ 0.25V^2 \end{cases}$	
フ ラ ン ス	$V < 100 \text{ (km/h)} \quad R: 5000 \text{ m}$ $100 \leq V < 120 \quad R: 10000 \text{ m}$ $120 \leq V \quad R: 20000 \text{ m}$	4%
オ ラ ン ダ	$12000 < R \leq 20000 \text{ m}$	
イ タ リ ア	3000 m	
ス イ ス	6000 m ~ 10000 m	
ス ウ ェー デ ン	$V \geq 100 \text{ km/h} \quad 15000 \text{ m}$	1%
ア メ リ カ	30.5m(100ft)桁によるこう配変化率が凸形で0.10%(31mm)以下、凹形で0.05%(15mm)となるように縦曲線挿入	凸形2.5%、凹形1.5%
ソ 連	10000 m (例外 5000 m)	3%

5. 2. 3 敷設法

(1) 敷設式

いま図-17において、こう配  $m/1000$  と  $n/1000$  の2つがP点で交わる場合の縦曲線の敷設法について述べる。

まず、PからAに至る切線長Tを算出してAの位置を決める。

$$T = R \cdot \tan \frac{1}{2} \theta = \frac{R}{2} \left| \frac{m-n}{1000} \right| = \frac{R}{2000} |m-n|$$

ここに、こう配は上りの場合 +、下りの場合 - 符号をつける。

次に、片方の接線方向をx軸として次によりAよりxの距離における縦距yを算出

して縦曲線の位置を決定する。

$$y = \frac{x^2}{2R}$$

(2) 計算例をNote 14に示す。

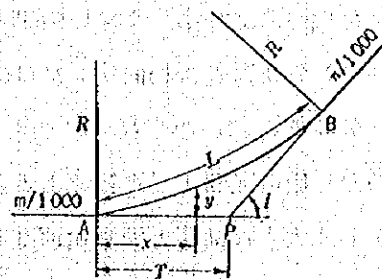


図-17

## 6. 各種線形等の競合条件

緩和曲線、円曲線、こう配、縦曲線、分岐器、伸縮継目、無道床橋りょう等、特殊な線形、構造物が互いに競合すると、列車の走行安全上、乗心地あるいは軌道保守上好ましくない影響がでることが多い。しかし、一般にこれらの競合を避けるためには線路選定上莫大な工事費を要する場合もあるので、種々の競合がなされる場合、なるべく走行安全、乗心地、保守に与える悪さの影響を同等にするよう、許容される緩和基準を検討したのが以下述べる内容である。

各種競合条件に対する考え方は表-14のとおりである。

表-14 各種競合条件（狭軌線）

	緩和曲線	円曲線	分岐器	伸縮継目
縦曲線	つとめて避ける	特に禁止していない	不可	可
緩和曲線	—	—	不可	不可
こう配	可	可 (ただし、脱線防止ガードが必要となる線形は避ける)	・3.5%以下 ・やむを得ず避ける場合は、つとめてよく運動上対策を講ずる	
無道床橋梁	・つとめて有道床とする ・やむを得ず競合させる場合は左右の幅けたの高さおよびまくらぎ受台の厚さを変化させる構造とする	可	不可	可

### (1) 緩和曲線と縦曲線の競合

緩和曲線は、カントのてい減を行っているため、軌道狂いを除外して考えても軌道の平面性は一般区間より悪い状態となっている。

一方、縦曲線区間は、前に述べたように凸形の場合は遠心力の作用によって車両を浮き上がらせようとする力が働いて輪重が抜け、また凹形の場合の垂直方向のモーメント変化により軌道並びに車両に大きな衝撃力が作用し、かつ列車の前部に走行抵抗が働くため中間の車両は浮上りの現象を生ずる。このような不利な条件を有する両者が競合すると、線路の保守はきわめて困難なものとなり、また車両の走行安定上および乗心地上好ましくない結果となるので、つとめて避けることにしている。

### (2) 分岐器と緩和曲線または縦曲線の競合

分岐器には、小半径のリード曲線やクロッシングの欠線部などがあり、線形や構造が一般の区間より複雑である。このため、車両がこの部分を通過する際には軌道に著しく大きな横圧と振動加速度を生ずる。このような区間に前述の欠点を有する緩和曲線や縦曲線が競合すると、運転保安上の危険が大となり、また線路の保守も困難と

なるため競合は禁止することとした。

### (3) 分岐器と無道床橋りょうとの競合

無道床橋りょう上に分岐器を敷設することは、橋げたの構造が著しく複雑となるので橋りょうの設計上問題が多いので禁止されている。また、橋台裏は一般に道床沈下量が大きいため、橋台裏に接近して分岐器を敷設すると、列車の乗心地がきわめて悪くなり、また保守も困難となる。この悪影響をさけるための離隔距離は、本線路においては橋台裏から分岐器まで少なくとも20m以上(1車両長以上)離すことが望ましい。

## 7 曲線の許容通過速度

### 7.1 曲線における速度制限

曲線であるために特に列車の速度を制限しなければならない理由には次の事項がある。

#### (1) 転覆の危険

車両に加わる遠心力が速度とともに大きくなり、重力との合力が外軌の外側を通るようになると転覆に至る。

#### (2) 脱線の危険

車両に加わる遠心力が大きくなるにつれレールに加わる横圧が垂直輪重に比べて増大し、脱線に至る。

#### (3) 乗心地の悪化

遠心力その他により速度とともに乗心地がしだいに悪くなる。

#### (4) 軌道破壊

横圧の垂直輪重に体する比が速度とともに大きくなり、軌道破壊が促される。また車輪フランジがレール頭部、側部に強く押しつけられその部分の摩耗、いわゆる偏摩耗が促進される。

列車の速度は以上の条件から許されるものでなければならないが、これらをおびやかす外力は速度とともに増大する。したがって、車両別にその傾向性がわかれば許容速度が求められ、あるいはまた所要の軌道条件、すなわち軌道強化、曲線諸元の改良などの必要量を求めることができる。

#### 7.1.1 転覆に対する安全速度

一般に曲線においてはその曲線半径に応じて高性能列車、その他列車について最高速度を制限している。この制限速度は半径の小さい曲線ほど低く抑さえてある。これは曲線における列車の転覆に対する安全性を考慮して定められたものであるが、その

理論的根拠の概要は次のとおりである。

いまカントを0とし、曲線の外方転覆に対する安全性をばねの変動を考慮しないで静的に理論計算すると、車両の重力と遠心力の作用点の軌間中心からの距離Dが安全率a以上である条件は、

$$D = \frac{GV^2}{127R} \times \frac{1}{G} \times H \leq \frac{1}{a} \times \frac{G}{2}$$

ただし、H：車両重心高さ (mm)

G：軌間 (mm)

R：曲線半径 (m)

a：安全率

これを变形して

$$V^2 \leq \frac{127GR}{2a \cdot H}$$

H=1850mm、G=1067mm (1000.0mm) とすれば

$$V \leq 6.4 \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{R} \quad \left[ V \leq 6.2 \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{R} \right]$$

となる。上式から、

a=3の場合  $V \leq 3.7\sqrt{R}$  (高性能列車) ( $V \leq 3.6\sqrt{R}$ )

a=3.5の場合  $V \leq 3.7\sqrt{R}$  (一般列車) ( $V \leq 3.3\sqrt{R}$ )

a=5.5の場合  $V \leq 2.75\sqrt{R}$  (分岐曲線) ( $V \leq 2.64\sqrt{R}$ )

をもとにして曲線半径別に5km/hのきざみで制限速度を図示すると図-18のとおりとなる。

また、遠心力による転覆限界速度 $V_c$ を求める。

すなわち、車両に働く重力と遠心力の合力のレール面における軌道中心よりの偏心量をb、軌間をGとすれば、偏心率Jは、

$$J = \frac{b}{G}$$

$$b = P \cdot H = H \left[ \frac{V^2}{127R} - \frac{C}{G} \right]$$

$$\therefore J = \frac{H}{G} \left[ \frac{V^2}{127R} - \frac{C}{G} \right]$$

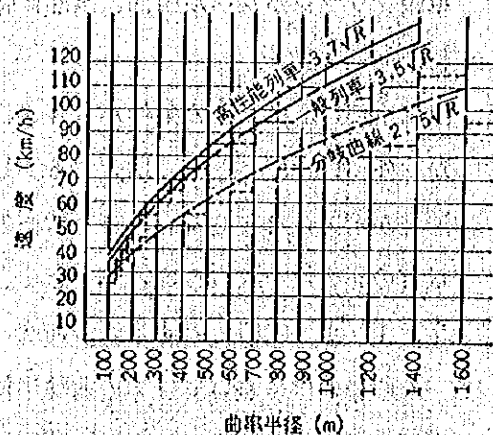


図-18 曲線半径別速度



式において、車両に加わる合力が外軌上を通る場合とは、偏心率Jが1/2 になった場合である。したがって、

$$\frac{1}{2} = \frac{H}{G} \left[ \frac{V_0^2}{127R} - \frac{C}{G} \right]$$

$$V_0 = \sqrt{127R \left[ \frac{G}{2H} + \frac{C}{G} \right]}$$

となり、この $V_0$ を限界速度という。

以上の考え方は、車両と軌道を剛体として考えたのであるが、実際にはこれらは剛体ではなく、また風の存在も無視できない。車両のばね系、風圧を考慮に入れて限界速度を決定する必要があるが、認めうるカント不足量に応じる限界風速は、

$$V_0 = \sqrt{\frac{WG_0}{\rho s h_{bc}' C_y}} \cdot \sqrt{1 - \frac{2h_{or}'}{G'} \left\{ \left[ 1 - \frac{u}{1+u} \cdot \frac{h_{or}}{h_{or}'} \right] \cdot \alpha_{II} + \frac{\Delta C}{G_0} \right\}}$$

なお式中、

$$h_{bc}' = h_{bc} + (C_y - C_y \phi) W_B$$

$$W = W_B + W_T$$

$$h_{bc} = h_{ob} + e$$

$$h_{or}' = h_{or} + \frac{1}{1+u} C_y W_B$$

$$h_{or} = \frac{h_{ob} + u h_{or}}{1+u}$$

$$u = \frac{W_T}{W_B}$$

ただし、 $W$ ：車両重量 (kg) の 1/2、 $\rho$ ：空気密度 (kg-sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)、

$s$ ：車体の横の投影面積 (m<sup>2</sup>) の 1/2、

$h_{bc}$ ：レール面上からの車体重心高さ (m)、

$e$ ：車体重心と横風に対する風圧中心の距離 (m)、

$C_y$ ：横風に対する車体の抵抗係数、

$C_y \phi$ ：車体の単位モーメント当りの横変位 (1/kg)、

$W_B$ ：車体重量 (kg) の 1/2、

$W_T$ ：台車重量、

$h_{or}$ ：レール面上の台車重心高さ、

$\alpha_{II}$ ：走行中の車体の横振動加速度 (g)、

次に、カント不足量と実カント量から許容最高速度を求める場合について述べる。

いま許容カント不足量を  $C_{da}$  とし、実カントを  $C_m$  とすれば、この場合の許容速度は、 $(C_m + C_{da})$  の均衡速度として得られる。

$$C_m + C_{da} = 8.4 (V^2/R) \text{ から、}$$

$$V = 0.345 \sqrt{R (C_m + C_{da})}$$

$C_{da} = 50 \sim 60$  とすれば、

$$V = 0.345 \sqrt{R (C_m + 50 \sim 60)}$$

$C_m$  を 0 とすれば、

$$V = 0.345 \sqrt{R (50 \sim 60)}$$

$$= 2.44 \sim 2.64 \sqrt{R}$$

$C_m$  を最高カントの 105 mm とすれば、

$$V = 0.345 \sqrt{R (155 \sim 165)}$$

$$= 4.30 \sim 4.43 \sqrt{R}$$

すなわち、実カントの小さいときには規程速度よりはるかに低い速度で押さえられるし、また実カントが大きいときには、この面からだけについていえば現行速度よりなおかなりの速度向上が可能となる。

$C_{da} = 60$  としたときのこれらの状況を 図-19 に示す。

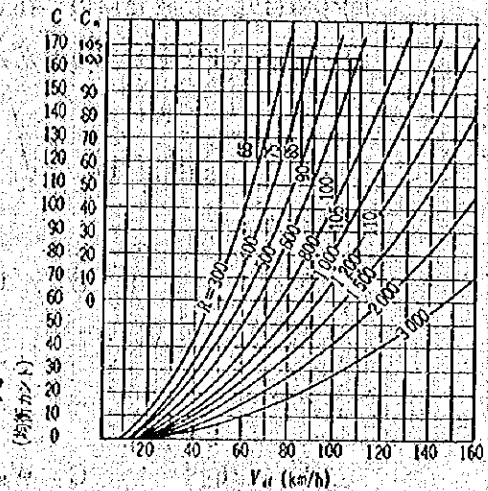


図-19 実カント別許容速度

( $C_{da} = 80$  の場合)

なお、参考までに各国の曲線許容通過速度を表に示すと表-1.5のとおりである。これからわかるとおり、常用する曲線許容通過速度は、必ずしもカント量とカント不足量のそれぞれ許容最大値を組み合わせ用いてはいない。

表-1.5 曲線半径と最高許容速度

国名	計算式	備考
ドイツ	$V = 4.33 \sqrt{R}$	
フランス	$V = 5.3 \sqrt{R-5}$	理論値
	$V = 4.9 \sqrt{R-5}$	実際値
オランダ	$V = 4.33 \sqrt{R}$	
イタリア	$V = 4.6 \sqrt{R}$	
スイス	$V = 4.33 \sqrt{R-5}$	
イギリス	$V = \sqrt{(7.5 + 0.064C) R}$	C: カント (mm)
スウェーデン	$V = \sqrt{\frac{C \cdot R}{8}}$	
	$V = \frac{1000 l}{8 \cdot C}$	l: 緩和曲線長 (m)
アメリカ	$V = 4.2 \sqrt{R}$	
ソ 連	$V = \sqrt{(0.08C + 1.3P) R}$	P: 超過遠心加速度 0.7 m/sec <sup>2</sup> まで許容

### 7. 1. 2 脱線に対する安全速度

脱線に対する安全性は、横圧Qと輪重Pの比すなわち脱線係数Q/Pによって判定される。直線部の横圧は同様によるもの、軌道の不整に原因する衝撃横圧などであり、いずれも速度とともに増大するもので、高速時には特に蛇行動によるものが重大な影響を及ぼすが、軌道の整備状態が良ければ現行速度程度ではあまり問題がない。

曲線部の横圧は上記のものほかに、固定軸が曲線に沿って転向する際に誘起される横圧、カントの不均衡によって生ずる定常的横圧などがある。前者は常に外軌のものが大きく急曲線ではこれが横圧の大部分を占める。カント不足によるものも、もちろん高速時には外軌に大きい。したがって曲線部における横圧は外軌のものが問題になる。転向横圧は速度に関係しないとされているが、これらの合計横圧は速度とともに増大し、そのばらつきも大きくなる。

横圧の値は理論的に求めるのはむずかしく、普通は実験によって測定しているが、曲線部でも現行速度程度では脱線係数が限度を越すことは少なく、この面からはなおいくぶんの速度向上は可能とみられる。ただし軌道に不整があれば不測の横

圧の発生や輪重の減少およびこれらの競合による脱線のおそれがあり、軌道整備はさらに入念に行わなければならない。

### 7. 1. 3 乗心地に対する許容速度

乗心地は人間の心理的、生理的な反応であって、感覚の個人差に大きく支配される要因も多いため、これを定量的に取り扱うのはむずかしい。しかし車両運動との関係はほぼ明らかにされており、そのおもなものは次のとおりである。

- (1) 振動加速度
- (2) 定常的加速度（不均衡加速度）
- (3) 不均衡加速度の時間的变化割合

#### (1) 振動加速度

走行中の継続する振動についての乗心地は、上下動に対してはアメリカの自動車協会で Janeway が提案した限界値によって判定されている。この限界は図-20の(a)に示すように区分されて、おのおのの区分に対して次のような評価がされている。

区分	乗心地係数	振動乗心地の評価
①	1以下	非常によい
②	1~1.5	よい
③	1.5~2	普通
④	2~3	悪い
⑤	3以上	非常に悪い

したがって常用するものとしては、乗心地係数 $<2$ 、左右加速度にして $0.1g$ 程度（振動数は普通 $1.5$ くらいが多い）が乗心地の良否の限界と考えられる。

振動加速度は車種により大きな差はあるが、実験結果からはいずれもほぼ列車速度に比例して増大する。したがって、この面から列車速度の許容限度が定められることになる。

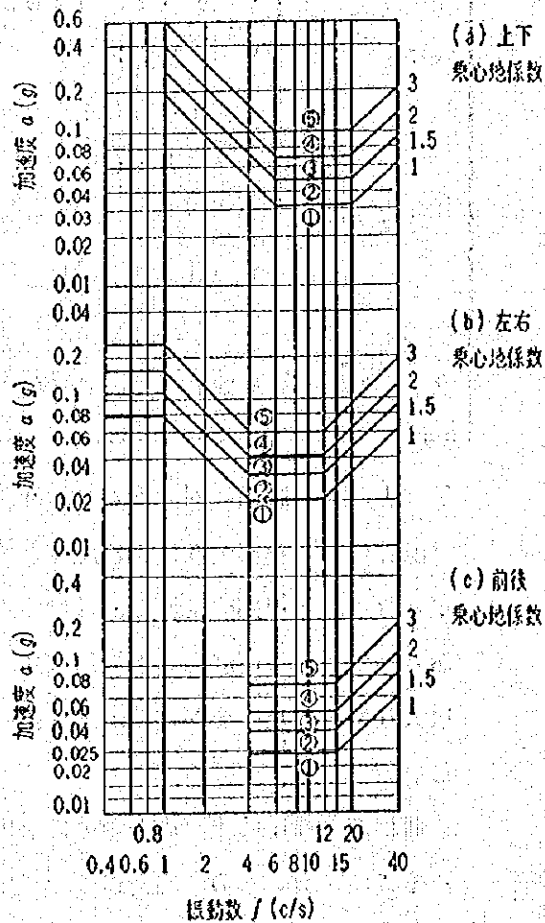


図-20 乗心地限度

## (2) 定常的加速度(不均衡加速度)

カントの過不足によって継続的に作用する定常的加速度が過大になると、乗心地を害するので、これをある程度以上に制限する必要がある。この限度はAREAの実験結果から0.1gとされていたが、その後の検討などにより、0.08gくらいが妥当と考えられている。この不均衡加速度は、カント過不足の問題として取り扱われ、前記の0.08gは車両のばねの作用を考えると、ほぼカント不足量70mm程度に相当する。したがって現在実施しているように、転覆に対する見地からカント不足量を50~60mmに押さえている限り乗心地のうえからは問題がない。

## (3) 不均衡加速度の時間的变化割合

これは、過去の試験から0.03g/sec以下が望ましく、0.04g/secが実用限度とされており、カント不足量の毎秒変化、約30mm/secおよび40mm/secに相当し、これから要求される緩和曲線長  $L_s = 0.009C_s V$  および  $0.007C_s V$  の根拠になっているものである。したがって各緩和曲線長に並び、少なくともこれから逆算された速度として、

$$V < \frac{L}{0.007C_s}$$

が必要である。また、これらと同様に実カントの毎秒変化についても適用し、

$$V < \frac{L}{0.007C}$$

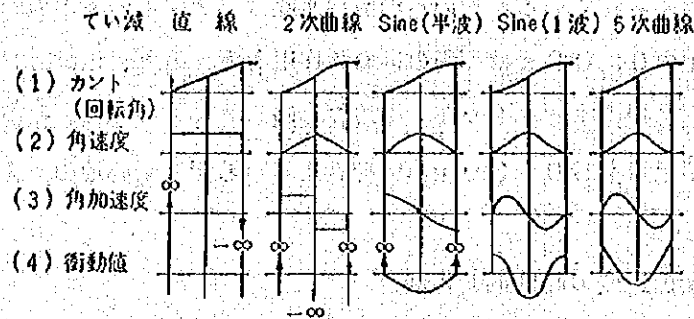
が必要となる。

### 7.1.4 軌道破壊

曲線部においては軌道破壊に及ぼす速度の影響が大きいが、曲線であるための輪重増加、全横圧、脱線係数の増加をその因子と考えてよい。それゆえ、これにある限度をさだめておき、実験によって得られた数値と比較することになる。

• Note 1: 直線てい減と曲線てい減の説明

カントおよび曲率のてい減方式を直線的とす場合と、種々の曲線形とする場合について、少し具体的に説明する。図N-1に2~3の例を示す。



図N-1 各種のカントてい減の比較

いま、車両を一定速度で走行する質点として考える。緩和曲線中のカントの変化が(1)であり、(2)がカントの変化速度(角速度)を、(3)がカントの変化加速度(角加速度)を示している。図によると、カントの変化加速度(角加速度)は、カントを直線的にてい減した場合、無限大となるのに対してカントを曲線的にてい減した場合は、たとえば2次放物線形(ドイツの方式)、サイン半波長形(新幹線の方式)いずれでもその値が有限な値となり乗心地が改善されることになる。

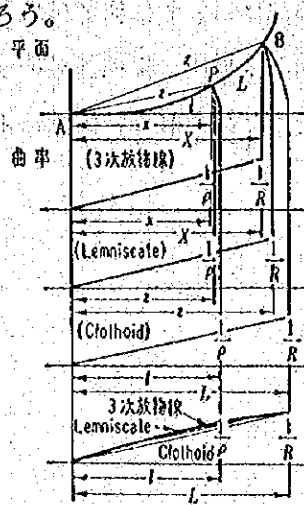
理論的には、この加速度変化まで連続的にすることが望ましく、したがってさらに高次の曲線てい減が必要となるが、実用上から敷設・保守のことを考えれば、その効果からみても図に示した程度の曲線てい減で十分満足できるものと見られる。このことは、東海道新幹線の開業以来の経験からみて、サイン半波長てい減の緩和曲線でなんら問題を生じていないことが何よりの立証であろう。

• Note 2: 3次放物線

図N-2より次の関係にある。

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{x}{X} \cdot \frac{1}{R}$$

これは最も一般的な緩和曲線で、平面線形は3次放物線となる(図N-3)。γが曲線半径であるから次式が成立する。



図N-2 各種の直線てい減

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left\{ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2}}$$

しかるに、

$$\left\{ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2} = (1 + \tan^2 \phi)^{3/2}$$

$\phi$  は B 点の切線が x 軸となす角で一般に小さいから  $\tan^2 \phi$  を 0 として近似的に

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{d^2 y}{dx^2}$$

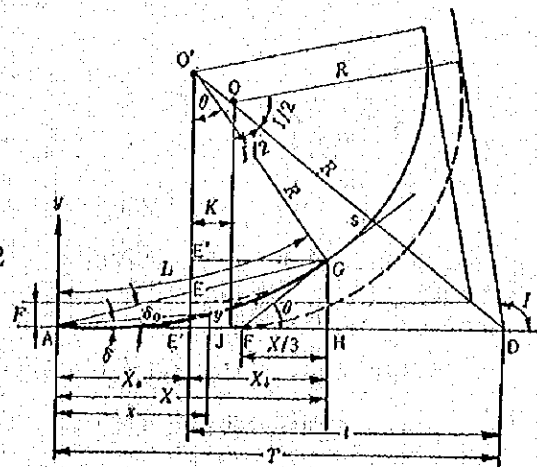
とみなせる。したがって、

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{x}{X} \cdot \frac{1}{R}$$

2度積分して、

$$y = \frac{x^3}{6RX}$$

これが 3 次放物線の基本である。



図N-3 3次放物線緩和曲線

• Note 3 クロソイド (Clothoid) 曲線

この場合 (図N-2) より次の関係にある。

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{l}{L} \cdot \frac{1}{R}$$

一方、曲率は、

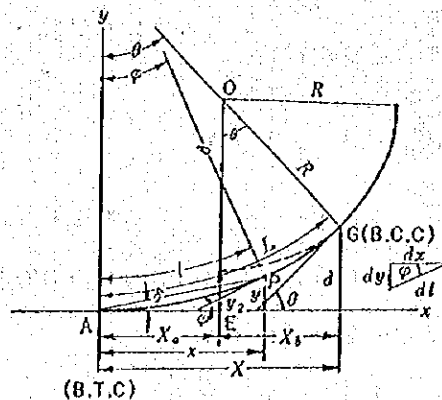
$$\frac{1}{\gamma} = \frac{d\phi}{dl}$$

であるから、

$$\frac{d\phi}{dl} = \frac{l}{RL}$$

これを積分して、

$$\phi = \frac{l^2}{2RL} = k l^2$$



図N-4 クロソイド

が得られる。

ここに

$$k = \frac{1}{2RL}$$

これは、いわゆるクロソイド (Clothoid) 曲線といわれる曲線である (図N-4)。

• Note 4: AREA螺旋

(1) AREA螺旋

この曲線は、クロソイド曲線に近いもので、アメリカで主に用いられている。

D: 円曲線の曲線度 (度)、  
d: 緩和曲線中の任意点の曲線度 (度)

S: 緩和曲線長 (100フィート 単位数)、  
s: 緩和曲線中の任意点までの曲線長

L: 緩和曲線長 (フィート)、  
l: 緩和曲線中の任意点までの曲線長

k: 100フィートごとの増加曲線度 (フィート)

Δ: 総螺旋角 (緩和曲線終点の接線角) δ: 緩和曲線中の任意点の接線角

とすれば、

$$d = k s = \frac{k l}{100}, \quad D = k S = \frac{k L}{100}$$

$$\delta = \frac{1}{2} k s^2 = \frac{d l}{200}, \quad \Delta = \frac{1}{2} k S^2 = \frac{D L}{200}$$

$$d = \frac{D l}{L} \text{ であるから、}$$

$$\delta = \frac{D l^2}{200} \quad (\delta \text{ は度})$$

$$\delta' = \frac{\gamma D l^2}{200 L} \quad (\delta' \text{ はラジアン、ただし } \gamma = \frac{\pi}{180} = 0.0174533)$$

$$dy = d l \sin \delta' = \left[ \delta' - \frac{\delta'^3}{6} \right] d l$$

$$y = \frac{\gamma D l^3}{600 L} - \frac{\gamma^3 D^3 l^7}{336000000 L^3}$$

D l = √200 δ から

$$y = \frac{\gamma l}{3} \delta - \frac{\gamma^3 l}{42} \delta^3$$

l = 100 s および γ = π / 180 を代入して、



$$y = 0.528\delta s - 0.00001264\delta^3 s$$

また、

$$dx = dl \cos \delta' = \left(1 - \frac{\delta'^2}{2}\right) dl$$

$$x = l - \frac{\gamma^2 D^2 l^3}{400000 L^2}$$

$Dl = \sqrt{200\delta}$  から

$$x = l - \frac{\gamma^2 l}{10} \delta$$

$l = 100s$  および  $\gamma = \pi/180$  を代入して、

$$x = l - 0.003048\delta^2 s$$

これらはいずれも曲線度およびフィートで形成されているが、曲線半径  $R$  およびメートルに換算すると、

$$y = \frac{l^3}{6RL} - \frac{l^7}{336R^3 L^3}$$

$$x = l - \frac{l^5}{40R^2 L^2}$$

となる。

## (II) AREA 螺旋 (簡略式)

AREA 螺旋を簡略にしたもので、3次螺旋に似ている。

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{\phi}{3} l = \frac{k l^3}{3} \quad \text{ただし} \quad k = \frac{1}{2RL} \\ x &= l \end{aligned} \right\}$$

緩和曲線長  $L$  を 10 等分して、始点から  $n = 1, 2, \dots, 10$  と番号をつけ、

$$l_n = \frac{n}{10} L$$

に分ける。これを上式に代入すると、

$$\left. \begin{aligned} y_n &= \frac{k}{3} \left(\frac{n}{10} L\right)^3 = \frac{k n^3 L^3}{3000} \\ x_n &= \frac{n}{10} L \end{aligned} \right\}$$

(Ⅲ) 3次螺旋

直角座標式で  $\sin \phi$  と  $\phi$  とすると、

$$dy = \phi dl$$

式(N-9)を代入すると、

$$dy = \frac{l^2}{6RL} dl$$

積分して、

$$y = \frac{l^3}{6RL}$$

これが3次放物線の式に相当するので、3次螺旋といっている。

• Note 4: レムニスケイト (Lemniscate) 曲線

図N-2より次の関係にある。

$$\frac{1}{r} = \frac{z}{Z} \cdot \frac{1}{R}$$

これはレムニスケイト (Lemniscate) 曲線といわれる。直角座標で表すと次のとおりである (図N-5参照)。

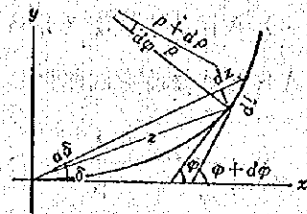
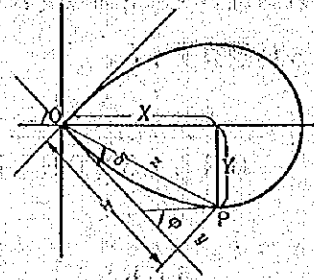
$$(x^2 + y^2) = a^2 (x^2 - y^2)$$

ただし、aは定数である。

また、極座標で表すと次のとおりである。

$$z^2 = a^2 \sin 2\alpha$$

この緩和曲線は、クロソイド曲線と同様に急曲線の多い道路や都市鉄道に有利とされ道路でかなり多く用いられているが、鉄道では少ないようである。



図N-5 レムニスケイト

• Note 5: サイン半波長てい減緩和曲線—日本の場合

この緩和曲線は、もともと新幹線用として考案されたもので図N-6のとおり、カントおよび曲率のてい減を正弦曲線の半波長の形状としたものである。

すなわち、曲率は、

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{2R} \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right]$$

カントは、

$$Cx = \frac{C}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right)$$

次に、

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d^2 y}{dx^2}$$

であるから、

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{2R} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right)$$

これを積分すると、

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{X}{2\pi} \sin \frac{\pi}{X} x \right)$$

ここに $\theta$ は接線角

もう一度積分すると、

$$y = \frac{x^2}{4R} - \frac{x^2}{2\pi^2 R} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right)$$

これがサイン半波長での減緩和曲線の線形を与える式である。

• Note 6: 西ドイツ方式

(1) 速度 $V \geq 100 \text{ km/h}$ の軌道では4次放物線緩和曲線が望ましいとしている。

これは曲線およびカントのてい減形状を2次放物線形としたものである。

図N-7において、KM間とML間に2つに分けて計算する。

曲率は、

K~M間

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{2x^2}{RX^2}$$

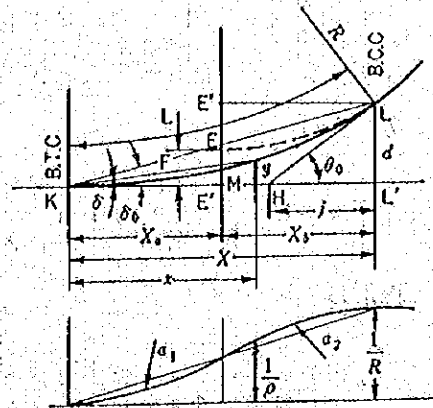
M~L間

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{R} \left\{ 1 - 2 \left( 1 - \frac{x}{X} \right)^2 \right\}$$

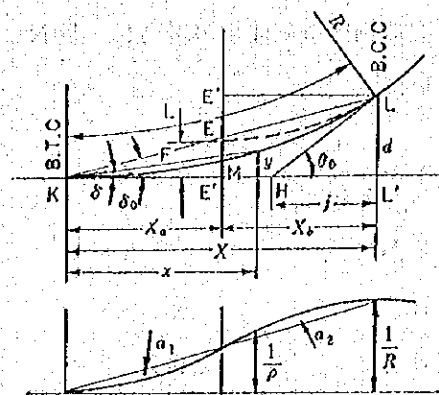
線形は、

K~M間

$$y = \frac{x^4}{6RX^2}$$



図N-6



図N-7 4次放物線緩和曲線

M~L間

$$y = \frac{1}{R} \left( \frac{x^4}{6X^2} + \frac{2x^3}{3X} - \frac{x^2}{2} + \frac{Xx}{6} - \frac{X^2}{48} \right)$$

(ii) 速度  $V \cong 200 \text{ km/h}$  の軌道は、正弦曲線のてい減形状とする。

曲率は、

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} \left( \frac{x}{X} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{X} \right)$$

カントは、

$$Cx = C \left( \frac{x}{X} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{X} \right)$$

線形は、

$$y = \frac{x^3}{6RX} - \frac{X}{4\pi^2 R} \left( x - \frac{X}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{X} \right)$$

Note 7: フランス方式

西ドイツ方式の(ii)の正弦曲線のてい減形状を理想としながらも、実用上は3次放物線緩和曲線で、その始終点付近に円みつけ(doucine)をつければ満足できる状態であるとして、パリ~南東新幹線もこの方式を採用するとしている。

• Note 8: 3次放物線とサイン半波長てい減緩和曲線の比較

3次放物線緩和曲線の人っている既設線で、大部分の円曲線部を移動させずにサイン半波長てい減緩和曲線を入れることにより、緩和曲線長を図N-8のように延伸出来ることは大変有効である。

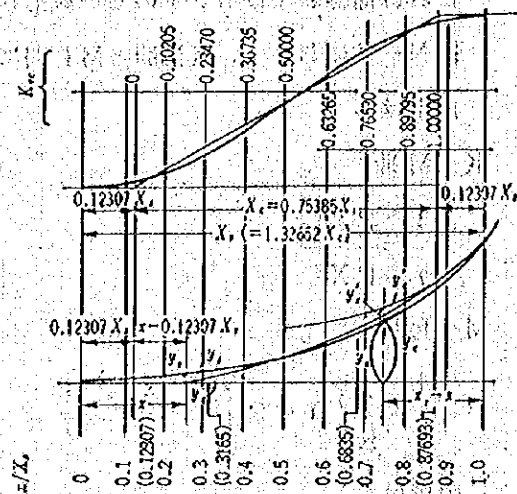
3次放物線緩和曲線の場合は、図N-3において、

$$y = \frac{1}{6R} x^3$$

であるから、

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \frac{x^2}{2RX}$$

G点では  $\theta = \theta_0$ 、 $x = X$  で、



図N-8 3次放物線緩和曲線とサイン半波長てい減緩和曲線の比較

$$\tan \theta_0 = \frac{X}{2R}$$

$\theta$  は小さいので、

$$E''G = R \sin \theta \approx R \tan \theta = R \times \frac{X}{2R} = \frac{X}{2}$$

$E'$  点は  $AH$  を 2 等分する。

移程 (シフト)  $F$  を求めると、

$$F = \overline{GH} - \overline{E''E}$$

$$\overline{E''E} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{X}{2}\right)^2} = R - R \left\{ 1 - \left(\frac{X}{2R}\right)^2 \right\}^{1/2}$$

$$\overline{E''E} = R - R \left[ 1 - \frac{X^2}{8R^2} \right]$$

$$= \frac{X^2}{8R}$$

$$\overline{GH} = \frac{X^2}{6R}$$

$$\therefore F = \frac{X^2}{6R} - \frac{X^2}{8R} = \frac{X^2}{24R}$$

また、中央点  $M$  の縦距、

$$y_{1/2} = \frac{X^2}{48R}$$

すなわち、 $M$  は  $E'E''$  を 2 等分する。

一方、サイン半波長での減緩和曲線の場合は、図  $N-6$  において、

$$y = \frac{x^2}{4R} - \frac{X^2}{2\pi^2 R} \left( 1 - \cos \frac{\pi x}{X} \right)$$

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \frac{x}{R} - \frac{X}{2\pi R} \sin \frac{\pi x}{X}$$

$G$  点では、

$$\theta = \theta_0, \quad x = X$$

で、

$$y = \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} \right) \frac{X^2}{R} = 0.14868 \frac{X^2}{R}$$

$$\tan \theta_0 = \frac{X}{2R}$$

移程Fを求めると

$$F = E' E'' - E E''$$

$$E E'' = \frac{X^2}{8R}$$

$$E' E'' = 0.14868 \frac{X^2}{R}$$

$$\therefore F = E' E'' - E E'' = \left( \frac{1}{8} - \frac{1}{\pi^2} \right) \frac{X^2}{R} = 0.023679 \frac{X^2}{R}$$

以上から、両緩和曲線と比較してみると、移程（シフト）Fは、3次放物線の場合、 $1/24 \cdot X^2 / R$ に対し、サイン半波長てい減緩和曲線の場合、 $0.023679 X^2 / R$ と小さくなる。したがって移程（シフト）Fを同一とした場合は、サイン半波長てい減緩和曲線長が

$$\sqrt{\frac{1}{24} \times \frac{1}{0.023679}} = 1.32652 \text{ 倍だけ長くなる。}$$

また、この場合カントの変化勾配は、

$$\frac{d}{dx} (Cx) = C \frac{\pi}{2X} \sin \pi \frac{x}{X}$$

この最大値は中央で、

$$\frac{d}{dx} (Cx) \Big|_{x/2} = \frac{\pi}{2} \frac{C}{X}$$

となり、3次放物線緩和曲線の場合カントの変化勾配は一定で、

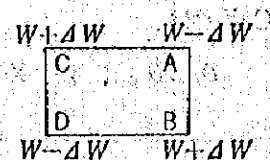
$$\frac{d(Cx)}{dx} = \frac{C}{X}$$

であるから、サイン半波長てい減緩和曲線の場合のカント変化の勾配の最大値は、その $\pi/2$ 倍、すなわち1.57080倍急になっている。

• Note 9: 緩和曲線と3点支持

最大固定軸距4.6mの車両（トラ6000形式）

について、空車の場合の車輪の浮上りについて考える。



図N-9

ばね（第6種基本ばね）の1 t 当たりたわみ量9.2 mm、空車重量9.1 t（内ばね上重量6.8 t、ばね下重量2.3 t）、図N-9において、A, B, C, Dをばねの位置とし、それぞれの受ける荷重をWとする。

いま、A点が3点支持の結果浮き上がるとすれば、D点のばねがA点を押し上げようとし、B, C点のばねの荷重は増大する。すなわち、A, Dの荷重は $W - \Delta W$ 、B, Cの荷重は $W + \Delta W$ となる。

いま、A点のばねが延び切って押し下げる力を失い、同時にD点のばねが押し上げる力を失ったときのA点の沈下量は、B, C点のばねの圧縮量が、

$$9.2 \times \frac{6.8}{2} = 31 \text{ mm}$$

であるから、

$$31 \times 2 = 62 \text{ mm}$$

となる。

ばね中心間隔を1.93 mとすれば、車輪部分の沈下は、

$$62 \times \frac{1.067}{1.93} = 34 \text{ mm} \quad 62 \times \frac{1.000}{1.93} = 32 \text{ mm}$$

実際車両運動中振動によるばねの伸縮量を30%とすれば（速度65 km/h 曲線部にて）、

$$34 \times 0.7 = 24 \text{ mm} \quad 32 \times 0.7 = 22 \text{ mm}$$

すなわち、この場合車輪を浮き上がらせようとする力が作用しないためには3点支持浮上り量は24 mm（22 mm）以内に止めなければならないことになる。

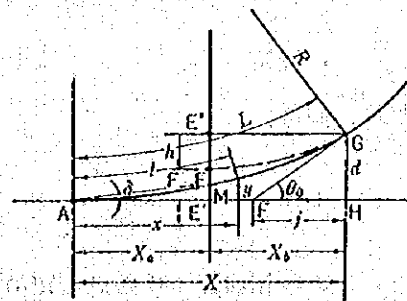
• Note 10: 直線てい減緩和曲線の敷設法

(a) 近似計算法

図N-10について、曲線長 $l$ と $x$ 軸長 $x$ とし、終点では $L$ と $X$ とする。

また、 $\theta$ は小さいから $\tan \theta \approx \theta$ と $\sin \theta$ および $\cos \theta \approx 1 - \theta^2 / 2$ とする。すなわち、終点では $\tan \theta_0 = X / 2R$ と $\theta_0 \approx \sin \theta_0$ 、 $\cos \theta_0 \approx 1 - X^2 / 8R^2$ となる。

以上の近似をもとにして、曲線の諸数値および関係位置を定める。



図N-10

$$Xb = R \sin \theta_0 = \frac{X^2}{2} \quad \therefore Xa = \frac{X^2}{2}$$

終点の縦距  $d = X^2 / 6R$  および  $EE'' = R(1 - \cos \theta_0) = X^2 / 8R$  から、

$$\text{シフト } F = d - EE'' = \frac{X^2}{24R}$$

$$\text{終点の接線影 } j = d \cos \theta_0 = \frac{X^2}{6R} \cdot \frac{2R}{X} = \frac{X}{3}$$

図N-11について、緩和曲線が起点側と終点側とで異なる場合があり、それぞれのシフトを  $F_1$  および  $F_2$  とすれば、

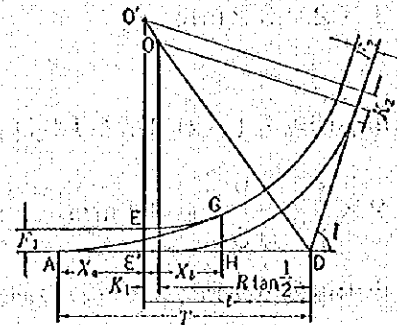
$$K_1 = F_1 \operatorname{cosec} I - F_2 \cot I$$

通常は両緩和曲線は等しく、

$$F_1 = F_2 = F$$

したがって、

$$\begin{aligned} K &= F (\operatorname{cosec} I + \cot I) \\ &= F \tan \frac{I}{2} \end{aligned}$$



図N-11

次に緩和曲線始点Aの位置は、

$$AD = T = R \tan \frac{I}{2} + K + \frac{X}{2}$$

通常は、 $K = F \tan I / 2$ 、したがって、

$$T = (R + F) \tan \frac{I}{2} + \frac{X}{2}$$

このように関係位置が定まったら、緩和曲線上の各点をつぎのように求める。A点から始接線上にそれぞれの距離  $x$  をとり、これに対する縦距、

$$y = \frac{x^3}{6RX}$$

または、偏角、

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x} = \frac{x^2}{6RX}$$

をとって、緩和曲線上の各点を定める。



(b) 精密計算法

$L/R$ や $L$ が大きい場合、概ね $L^2/R$ が10程度以上になると、各種の誤差が大きくなるので、精密計算法による必要が生じる。

(I) 緩和曲線長とx軸長の関係

緩和曲線長 $l$ の一般式は、

$$l = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \approx \int_0^x \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \right\} dx$$

また $dy/dx = x^2/2RX$ であるから、

$$l = \int_0^x \left\{ 1 + \frac{x^4}{8R^2 X^2} \right\} dx$$

$$= x + \frac{x^6}{40R^2 X^2}$$

終点では、

$$L = X + \frac{X^3}{40R^2}$$

これから近似的に次の式が導かれる。

$$x = l - \frac{l^6}{40R^2 L^2}$$

終点では、

$$X = L - \frac{L^3}{40R^2}$$

(II) 関係位置

図N-7について、

$$Xb = R \sin \theta_0 = R \sin \left( \tan^{-1} \frac{X}{2R} \right)$$

または、

$$Xb = R \frac{X}{2R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{2R}\right)^2}}$$

$$Xa = X - Xb$$

$$F = d - h = \frac{X^2}{6R} - R(1 - \cos \theta_0)$$

$$= \frac{X^2}{6R} - R \left\{ 1 - \cos \left[ \tan^{-1} \frac{X}{2R} \right] \right\}$$

または、

$$F = \frac{X^2}{6R} - R \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{2R} \right)^2}} \right\}$$

$$J = d \cot \theta_0 = \frac{X^2}{6R} \cdot \frac{2R}{X} = \frac{X}{3}$$

図N-8について、

$$K_1 = F_2 \operatorname{cosec} l - F_1 \cot l$$

通常は  $F_1 = F_2$ 、したがって、

$$K = F \tan \frac{l}{2}$$

緩和曲線始点Aと接線交点Dとの距離は、

$$AD = T = R \tan \frac{l}{2} + K + X a$$

通常は  $K = F \tan l / 2$

ゆえに、

$$T = (R + F) \tan \frac{l}{2} + X a$$

### (iii) 敷設法

緩和曲線の始点Aから緩和曲線上のそれぞれの測点までの曲線長  $l_1, l_2, \dots, l$  に  
対応する  $x$  軸上の横距  $x_1, x_2, \dots, X$  を求め、この横距  $x$  に対する縦距、

$$y = \frac{x^3}{6RX}$$

を計算して、緩和曲線上の各点を定める。

または、

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

により緩和曲線上のそれぞれの  $l$  について  $\delta$  を求め、偏角により曲線上の各点を定める。

• Note 11: Sine での減緩和曲線

(a) 近似計算法

図N-7について、曲線長  $l = x$  とし、終点では  $l = X$  とする。

また  $\theta$  は小さいから  $\tan \theta \approx \theta \approx \sin \theta$  および  $\cos \theta \approx 1 - \theta^2 / 2$  とする。  
すなわち、終点では  $\tan \theta_0 = X / 2R = \theta_0 = \sin \theta_0$ 、 $\cos \theta_0 = 1 - X^2 / 8R^2$  となる。

以上の近似をもとにして、曲線の諸数値および関係位置を定める。

$$X_b = R \sin \theta_0 = \frac{X}{2}$$

$$\therefore X_a = \frac{X}{2}$$

終点の縦距

$$d \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} \right) \frac{X^2}{R} = 0.14868 \frac{X^2}{R}$$

$$EE'' = R (1 - \cos \theta_0) \approx \frac{X^2}{8R}$$

$$\text{シフト } F = d - EE'' = \left( \frac{1}{8} - \frac{1}{\pi^2} \right) \frac{X^2}{R} = 0.023679 \frac{X^2}{R}$$

終点の接線影  $j$  は、

$$j = d \cot \theta_0 = \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} \right) \cdot 2X = 0.297358X$$

緩和曲線長が起点側と終点側とで異なる場合、それぞれのシフトを  $F_1$  および  $F_2$  とすれば、図N-11について

$$K_1 = F_2 \operatorname{cosec} l - F_1 \cot l$$

通常は  $F_1 = F_2$

したがって、

$$K = F (\operatorname{cosec} l + \cot l) = F \tan \frac{l}{2}$$

緩和曲線始点Aと接線交点Dとの距離

$$AD = T = R \tan \frac{l}{2} + K + X_a$$

通常は  $K = F \tan I / 2$

ゆえに

$$T = (R + F) \tan \frac{I}{2} + \frac{X}{2}$$

A点から始線上にそれぞれの横距  $x$  をとり、これに対する縦距

$$y = \frac{1}{R} \left\{ \frac{x^2}{4} - \frac{X^2}{2\pi^2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right) \right\}$$

あるいは偏角

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

または

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{x}{R} - \frac{X^2}{4 \cdot 2\pi^2 x} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right) \right\}$$

をとって緩和曲線の各点を定める。

#### (b) 精密計算法

$L^2 / R$  がおおむね 10 程度以上の場合は、各種の誤差が大きくなるので、精密計算による必要がある。

#### (1) 緩和曲線長と $x$ 軸長の関係

緩和曲線長  $l$  の一般式は、

$$l = \int_0^x \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx \approx \int_0^x \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} dx$$

また

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{2R} - \frac{X}{2\pi R} \sin \frac{\pi}{X} x$$

ゆえに

$$\begin{aligned} l &= \int_0^x \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{x}{2R} - \frac{X}{2\pi R} \sin \frac{\pi}{X} x \right]^2 \right\} dx \\ &= x + \frac{X^2 x}{16\pi^2 R^2} + \frac{x^3}{24R^2} - \frac{X^2}{4\pi^2 R^2} \left[ \frac{X}{\pi} \sin \frac{\pi}{X} x - x \cdot \cos \frac{\pi}{X} x \right] \\ &\quad - \frac{X^3}{16\pi^3 R^2} \sin \frac{\pi}{X} x \cdot \cos \frac{\pi}{X} x \end{aligned}$$

終点では

$$L = X + 0.0226685 \frac{X^3}{R^2}$$

これから近似的に次の式が導かれる。

$$x = l - \frac{L^2 l}{16 \pi^2 R^2} - \frac{l^3}{24 R^2} + \frac{L^2}{4 \pi^2 R^2} \left( \frac{L}{\pi} \sin \frac{\pi}{L} l - l \cdot \cos \frac{\pi}{L} l \right) + \frac{L^3}{16 \pi^3 R^2} \sin \frac{\pi}{L} l \cdot \cos \frac{\pi}{L} l$$

終点  $l = L$  では  $x = X$ 、このときは、

$$X = L - 0.0226685 \frac{L^3}{R^2}$$

## (II) 関係位置

図 N-11 について、

$$Xb = R \sin \theta_0 = R \sin \left( \tan^{-1} \frac{X}{2R} \right)$$

または

$$Xb = R \frac{X}{2R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{2R} \right)^2}}$$

$$Xa = X - Xb$$

$$\cos \theta_0 = \cos \left( \tan^{-1} \frac{X}{2R} \right)$$

または

$$\cos \theta_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{2R} \right)^2}}$$

$$\text{シフト } F = d - h = \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} \right] \frac{X^2}{R} - R (1 - \cos \theta_0)$$

$$= 0.14868 \frac{X^2}{R} - R \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{2R} \right)^2}} \right]$$

終点の接線影Jは、

$$J = d \cot \theta_0 = \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} \right] \frac{X^2}{R} \cdot \frac{2R}{X} = 0.29736X \quad (X \text{ in m})$$

図N-8について、

$$K_1 = F_2 \operatorname{cosec} l - F_1 \cot l$$

通常は  $F_1 = F_2 = F$ 、したがって、

$$K = F \tan \frac{l}{2}$$

緩和曲線始点Aと接線交点Dとの距離

$$AD = T = R \tan \frac{l}{2} + K + Xa$$

### (III) 敷設法

緩和曲線始点Aから緩和曲線上の各測点までの曲線長  $l_1, l_2, \dots, L$  に対応する  $x$  軸上の横距  $X_1, X_2, \dots, X$  を求め、この横距  $x$  に対する縦距

$$y = \frac{1}{R} \left\{ \frac{x^2}{4} - \frac{X^2}{2\pi^2} \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right] \right\}$$

を計算して緩和曲線上の各点を定める。あるいは偏角

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

または

$$\delta = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{R} \left\{ \frac{x}{4} - \frac{X^2}{2\pi^2 x} \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right] \right\} \right]$$

により緩和曲線上の各  $l$  について  $\delta$  を求め、偏角により曲線上の各点を定める。

### • Note 12: 直線てい減緩和曲線

#### (a) 近似計算法

$$R = 800 \text{ m}, L = 100 \text{ m}, l = 35^\circ 17' 00''$$

および緩和曲線長は起点側、終点側とも同じ場合とする。

$$L \approx X = 100 \text{ m} \text{ および } l = x \text{ とする。}$$

$$Xa \approx X/2 = 50 \text{ m}$$

$$\text{シフト } F = \frac{X^2}{24R} = \frac{100^2}{24 \times 800} = 0.521 \text{ m}$$

$$K = F \tan \frac{l}{2} = 0.521 \times \tan 16^\circ 08' 30'' = 0.151 \text{ m}$$

緩和曲線始点Aの位置は、

$$AD = R \tan \frac{I}{2} + K + \frac{X}{2}$$

$$= 800 \times \tan 16^\circ 08' 30'' + 0.151 + 50.000$$

$$= 231.538 + 0.151 + 50.000 = 281.689 \text{ m}$$

次に、緩和曲線上の各点を定める。

通常は起点から杆程を追ってくるので緩和曲線始点の杆程は端数を伴う。たとえば始点Aが168k372m465mmのようになる。したがって10mごとに測点を決めるとすれば、次の測点は168k380mでAから7m535mm、その次の測点は17m535mm以下10mmずつ増加することになる。したがって $x_1 = 7.535$ 、 $x_2 = 17.535$ 、 $x_3 = 27.535 \dots$ となる。ここではわかりやすいように始点を0とし、各10mごとに測点をとるものとして例を示す。

$$l = 0, 10, 20 \dots 100 \text{ m}$$

$$y = \frac{X^3}{6RX} = \frac{X^2}{6 \times 800 \times 100}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x} = \tan^{-1} \frac{X^2}{6RX} = \tan^{-1} \frac{X^2}{6 \times 800 \times x \times 100}$$

これを計算して次の各値を得る。

l = x	y	$\delta$
0m	0.000m	—
10	0.002	0° 00' 43"
20	0.017	0° 02' 52"
30	0.056	0° 06' 27"
40	0.133	0° 11' 28"
50	0.260	0° 17' 54"
60	0.450	0° 25' 47"
70	0.715	0° 35' 06"
80	1.067	0° 45' 50"
90	1.519	0° 58' 00"
100	2.083	1° 11' 37"

終点Gの接線影

$$J = \frac{X}{3} = \frac{100}{3} = 33.333\text{m}$$

(b) 精密計算法

$$R = 800\text{m}, L = 100\text{m}, I = 32^\circ 17' 00'' \times 0.01736$$

および緩和曲線長は起点側、終点側とも同じ場合とする。

$$X = L - \frac{L^3}{40R^2}$$

$$= 100 - \frac{100^3}{40 \times 800^2} = 99.961\text{m}$$

$$X_b = R \sin \left( \tan^{-1} \frac{X}{2R} \right)$$

$$= 800 \times \sin \left( \tan^{-1} \frac{99.961}{2 \times 800} \right) = 49.883\text{m}$$

または

$$X_b = \frac{X}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{2R} \right)^2}}$$

$$= \frac{99.961}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{99.961}{2 \times 800} \right)^2}} = 49.885\text{m}$$

$$X_a = X - X_b$$

$$= 99.961 - 49.883 = 50.078\text{m}$$

$$\text{シフト } F = \frac{X^2}{6R} - R \left\{ 1 - \cos \left( \tan^{-1} \frac{X}{2R} \right) \right\}$$

$$= \frac{99.961^2}{6 \times 800} - 800 \left\{ 1 - \cos \left( \tan^{-1} \frac{99.961}{2 \times 800} \right) \right\}$$

$$= 0.525\text{m}$$

または

$$F = \frac{X^2}{6R} - R \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{2R} \right)^2}} \right\}$$



$$= \frac{99.961}{6 \times 800} - 800 \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{99.961}{2 \times 800} \right)^2}} \right\} = 0.525 \text{ m}$$

$$K = F \tan \frac{1}{2} = 0.525 \times \tan 16^\circ 08' 30'' = 0.152 \text{ m}$$

緩和曲線始点Aの位置は、

$$\begin{aligned} AD &= R \tan \frac{1}{2} + K + X_a \\ &= 800 \times \tan 16^\circ 08' 30'' + 0.152 + 50.078 \\ &= 281.768 \text{ m} \end{aligned}$$

前に述べたように緩和曲線始点Aの杆程は半端な数字になるが、ここではわかりやすいようにA点から10mごとの各測点について計算例を示す。

$$x = l - \frac{l^3}{40R^2L^2} = l - \frac{l^3}{40 \times 800^2 \times 100^2}$$

$$y = \frac{x^3}{6RX} = \frac{x^3}{6 \times 800 \times 99.961}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{x^2}{6RX} = \tan^{-1} \frac{x^2}{6 \times 800 \times 99.961}$$

これらを  $l$  のおのおの値 10, 20...100m について計算し、次の値を得る。

$l$	$x$	$y$	$\delta$
0m	0.000m	—	—
10	10.000	0.002m	0° 00' 43"
20	20.000	0.017	0° 02' 52"
30	30.000	0.056	0° 06' 27"
40	40.000	0.133	0° 11' 28"
50	49.999	0.261	0° 17' 55"
60	59.997	0.450	0° 25' 48"
70	69.993	0.715	0° 35' 06"
80	79.987	1.067	0° 45' 51"
90	89.977	1.519	0° 58' 02"
100	99.961	2.084	1° 11' 38"

終点Gの接線影

$$j = \frac{X}{3} = \frac{99.961}{3} = 33.320\text{m}$$

• Note 13: sinでい減緩和曲線

(a) 近似計算法

$$R=800\text{m}, L=100\text{m}, I=32^\circ 17' 00''$$

および緩和曲線長は起点側、終点側とも同じ場合とする。

$L$ と $X=100\text{m}$ および $l$ と $x$ とする。

$$Xa = \frac{X}{2} = 50.000\text{m}$$

$$\text{シフト } F = 0.023679 \frac{X^2}{R}$$

$$= 0.023679 \times \frac{100^2}{800} = 0.296\text{m}$$

$$K = F \tan \frac{I}{2}$$

$$= 0.296 \times \tan 16^\circ 08' 30'' = 0.086\text{m}$$

緩和曲線始点Aの位置

$$AD = R \tan \frac{I}{2} + K + \frac{X}{2}$$

$$= 800 \times \tan 16^\circ 08' 30'' + 0.086 + 50.000$$

$$= 281.624\text{m}$$

前述と同様、緩和曲線始点Aから10mごとの各測点について計算例を示す。

$$l \text{ と } x = 0, 10, 20 \dots 100\text{m}$$

$$y = \frac{1}{R} \left\{ \frac{x^2}{4} - \frac{X^2}{2\pi^2} \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right] \right\}$$

$$= \frac{1}{800} \left\{ \frac{x^2}{4} - \frac{100^2}{2\pi^2} \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{100} x \right] \right\}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

これらを計算して次の値を得る。

$l=x$	$y$	$\delta$
0m	-	-
10	0.000m	0° 00' 00"
20	0.004	0° 00' 41"
30	0.020	0° 02' 18"
40	0.062	0° 05' 20"
50	0.148	0° 09' 50"
60	0.296	0° 16' 58"
70	0.526	0° 25' 50"
80	0.854	0° 36' 42"
90	1.296	0° 49' 30"
100	1.858	1° 03' 52"

終点の接線影  $j$  は、

$$j = 0.297358X = 0.297358 \times 100 = 29.736\text{m}$$

(b) 精密計算法

$$R = 800\text{m}, L = 100\text{m}, I = 32^\circ 17' 00''$$

および緩和曲線長は起点側、終点側とも同じ場合とする。

$$X = L - 0.0226685 \frac{L^3}{R^2}$$

$$= 100 - 0.0226685 \times \frac{100^3}{800^2} = 99.965\text{m}$$

$$X_b = R \cdot \frac{X}{2R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{2R}\right)^2}}$$

$$= \frac{99.965}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{99.965}{2 \times 800}\right)^2}} = 49.885\text{m}$$

$$X_a = X - X_b$$

$$= 99.965 - 49.885 = 50.080\text{m}$$

$$\text{ソフト } F = 0.14868 \frac{X^2}{R} - R \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{2R}\right)^2}} \right]$$

$$= 0.14868 \times \frac{99.965^2}{800} - 800 \times \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{99.965}{2 \times 800} \right)^2}} \right)$$

$$= 1.857 - 1.557 = 0.300 \text{ m}$$

$$K = F \tan \frac{1}{2}$$

$$= 0.300 \times \tan 16^\circ 08' 30'' = 0.087 \text{ m}$$

緩和曲線始点Aの位置

$$AD = R \tan \frac{1}{2} + K + X_a$$

$$= 800 \times \tan 16^\circ 08' 30'' + 0.087 + 50.080$$

$$= 281.539 + 0.087 + 50.080 = 281.706 \text{ m}$$

A点の軒程は一般に半端な数字になるが、ここではわかりやすいようにA点から10mごとの測点について計算例を示す。

$$x = l - \frac{L^2 l}{16 \pi^2 R^2} - \frac{l^3}{24 R^2} + \frac{L^2}{4 \pi^2 R^2} \left( \frac{L}{\pi} \sin \frac{\pi}{L} l - \cos \frac{\pi}{L} l \right)$$

$$+ \frac{L^3}{13 \pi^3 R^2} \sin \frac{\pi}{L} l \cdot \cos \frac{\pi}{L} l$$

$$= l - \frac{100^2 l}{16 \pi^2 800^2} - \frac{l^3}{24 \times 800^2} + \frac{100^2}{4 \pi^2 \times 800} \left( \frac{100}{\pi} \sin \frac{\pi}{100} l - l \cos \frac{\pi}{100} l \right)$$

$$+ \frac{100^3}{13 \pi^3 800^2} \sin \frac{\pi}{100} l \cdot \cos \frac{\pi}{100} l$$

$$y = \frac{1}{R} \left\{ \frac{x^2}{4} - \frac{X^2}{2 \pi^2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right) \right\}$$

$$= \frac{1}{800} \left\{ \frac{x^2}{4} - \frac{99.965^2}{2 \pi^2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{99.965} x \right) \right\}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

または

$$\delta = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{R} \left\{ \frac{x}{4} - \frac{X^2}{2 \pi^2 x} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{X} x \right) \right\} \right]$$

$$= \tan^{-1} \left[ \frac{1}{800} \left\{ \frac{x}{4} - \frac{99.965^2}{2\pi^2 x} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{99.965} x \right) \right\} \right]$$

これらを  $l$  のおのおのの値 10, 20...100m について計算し、次の値を得る。

$l$	$x$	$y$	$\delta$
0m	0.000m	0.000m	0° 00' 00"
10	10.000	0.000	0° 00' 05"
20	20.000	0.004	0° 00' 41"
30	30.000	0.020	0° 02' 18"
40	40.000	0.062	0° 05' 20"
50	50.000	0.148	0° 10' 11"
60	59.998	0.296	0° 16' 58"
70	69.995	0.526	0° 25' 50"
80	79.990	0.855	0° 36' 44"
90	89.980	1.295	0° 49' 28"
100	89.965	1.857	1° 03' 51"

終点の接線影

$$j = 0.29736X$$

$$= 0.29736 \times 99.965 = 29.726 \text{ m}$$

• Note 14: 縦曲線敷設計算例

半径600mの平面曲線中で、下り15/1000、上り10/1000の勾配が変更する場合の縦曲線形状を計算する。

縦曲線の半径を4000mとする。

$$\therefore T = \frac{4000}{2000} | -15 - 10 | = 50 \text{ m}$$

いま  $x = 10 \text{ m}$  単位の  $y$  を求めてみると、

$$y_{10} = \frac{(10)^2}{2 \times 4000} = 0.125 \text{ m} \approx 125 \text{ mm}$$

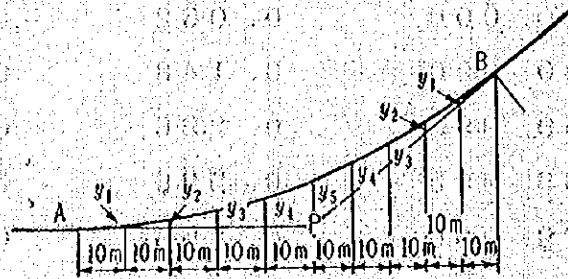
$$y_{20} = \frac{(20)^2}{2 \times 4000} = 0.500 \text{ m} = 500 \text{ mm}$$

$$y_{30} = \frac{(30)^2}{2 \times 4000} = 1.125 \text{ m} \approx 1125 \text{ mm}$$

$$y_{40} = \frac{(40)^2}{2 \times 4000} = 0.2000 \text{ m} = 200 \text{ mm}$$

$$y_{50} = \frac{(50)^2}{2 \times 4000} = 0.3125 \text{ m} = 313 \text{ mm}$$

となる。(図-13)



図N-13

## 軌道管理

### 1. 軌道狂いの管理

軌道は列車の繰返し荷重を受けて各部が変位・変形し、いわゆる「軌道狂い」を生ずる。この軌道狂いが大きくなると、列車の乗心地は悪くなり、さらにこれが著しく大きくなったり、通りと水準の連続複合狂いが生じたりすると、貨物列車の脱線事故を起こすことがある。

#### 1-1 軌道狂いの定義

##### 1. 軌間狂い

軌間狂いとは、軌間の基本寸法（狭軌線は1,000～1,067mm）に対する狂い量（曲線部では、基本寸法にスラックを加えた量に対する狂い量）をいい、基本寸法より大きい場合を（+）、小さい場合を（-）と表す。

##### 2. 水準狂い

水準狂いとは、軌間の基本寸法当たりの左右レールの高さの差をいい、曲線部でカントのある場合は、正規のカント量に対する増減量をいう。

水準狂いの符号は、直線部では起点を背にして左側レールを基準にし、右側レールが高い場合を（+）、低い場合を（-）、曲線部では正規のカント量より大きい場合を（+）、小さい場合を（-）と表す。

##### 3. 高低狂い

高低狂いとは、レール頂面の長さ方向の凹凸をいい、一般には長さ10mの糸をレール頂面に張り、その中央部におけるレールと糸との垂直距離によって表している。勾配変更点付近で縦曲線のある場合は、測定値からその正矢量を加減する（縦曲線が凸形の場合は、測定値から正矢量を差引き、凹形の場合は加える。）

高低狂い符号は、高むら（高低が凸形に狂っている状態）の場合を（+）、低むら（高低が凹形に狂っている状態）の場合を（-）と表す。

##### 4. 通り狂い

通り狂いとは、レール側面の長さ方向の凹凸をいい、一般には長さ10mの糸をレール内側面に張り、その中央部におけるレールと糸との水平距離によって表している。曲線部では、曲線半径による正矢量を測定値から差し引く。

正矢量は次式によって求める（縦曲線の場合も同じ）。

$$V = \frac{c^2}{8R}$$

ここで V : 正矢量

R : 曲線半径

c : 測定弦長 (一般には 1.0 m)

通り狂いの符号は、軌間外方に狂っている場合を (+)、軌間内方に狂っている場合を (-) と表す。

## 5. 平面性狂い

平面性とは、軌道の平面に対する「振れ」の状態を表すもので、平面性狂いは一定間隔を隔てた 2 点の水準狂いの代数差により求める。

なお、緩和曲線部ではカントを逡減しているため水準狂いがまったく 0 の場合でも、平面性は狂った状態となっている。たとえば、カントの逡減倍数が 400 倍の場合には軌道延長 5 m 間では  $\frac{5000}{400} = 12.5$  mm だけ平面性の狂いがある。平面性の良否を判断する場合は、このカント逡減によって生ずる必然的な狂いも含めて考えることにしている。

平面性の測定スパンは、狭軌線では車両の最大固定軸距が 4.6 m であることから、これに近い値の 5 m にしている。

## 1-2 軌道狂いの整備基準 (日本の場合)

### 1. 整備基準

整備基準は表-1 に示すとおりであり、その性格および取扱いは次のとおりである。

#### (1) 仕上り基準

仕上り基準は、軌道の修繕、工事および線路の新設の際に、特別の場合を除き、この値以下に仕上げるべきものとする基準である。

この基準は、従来の整備基準に定められていなかったが、これを定めることにより定期修繕方式における整備作業の質の向上と保守周期の延伸に効果があることから制定することとした。

仕上がり基準は、その値を小さくするほど保守周期は長くなるが、整正作業に多くの労力を要し、これを大きくすると整正作業は簡単な割に、保守周期は短いものとなる。

以上のように、仕上がり基準の決定に当たっては、技術的可能性と必要な保守周期の確保を考慮して決定した。

まず、整備作業上の技術的可能性については、過去の実績によると外注工事等における仕上がり基準値は整備基準値のおおむね 2 分の 1 程度であり、また軌道調査の結果で



表-1 整備基準値及び仕上がり基準値

項目	乙修繕整備基準値				丙修繕整備基準値				仕上がり基準値 各線別共通 (一般区間)
	甲線	乙線	丙線	簡易線	甲線	乙線	丙線	簡易線	
軌間	+10 +5		(+6) (-4)						(+1) (-3)
水準	11 (7)	12 (8)	13 (9)	16 (11)					(4)
高低	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)	(4)
通り	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)	(4)
平面性					23 (18) (カントの通減量を含む)				(4) カントの通減量 を含まず

- (備考) 1. 数値は、軌道検測車による動的値をしめす。( )内は、静的値を示す。  
 2. 平面性は、5m当りの水準変化量を示す。  
 3. 曲線部におけるスラック、カント及び正矢量(縦曲線を含む)は含まず。  
 4. 側線は、丙線に準ずる。

もこの程度以下に仕上げるのは比較的容易であることが確認されている。これらのことから水準、高低、通りおよび平面性の仕上がり基準値は±4mmとした。

軌間については、他の項目より整正が容易であることから若干厳しい値(+1, -3mm)とした。

## (2) 乙修繕整備基準

乙修繕とは、甲修繕(2~4年ごとに行う線路全体にわたる修繕)の施工時期までの間、線路の整備状態を良好に保つために計画的に行う軌道狂いの整正を主体とした整備である。従って、乙修繕整備基準は乙修繕の目的からいって、列車走行時の乗り心地を確保することおよび丙修繕の作業があまり多くなならないことを考慮して決定された。

まず、乗心地の確保については過去に行われた各種走行試験の結果から乗心地係数が2以下になるような値を求めた。

また、丙修繕作業量との関係については、乙修繕の主体となるむら直し関係作業について次の検討を行った。

すなわち、軌道の整備は、乙修繕を頻繁に行えば必然的に丙修繕の頻度は減少し、逆に乙修繕の頻度を少なくすれば丙修繕の頻度が増加する。一方、作業量からみた場合、丙修繕は局部的に行うものであるため、計画的に集団で行う乙修繕に比べ作業人工を多く要し不経済である。

一般に、丙修繕はなるべく少なくすることが望ましいが、これをまったくない状態に

するためには乙修繕の作業が膨大となり不経済である。

以上のことから、乙修繕と丙修繕の作業量の和が最小となるような値を求め、これを前述の乗心地係数2を確保する値と対比してみると大差のないことがわかった。

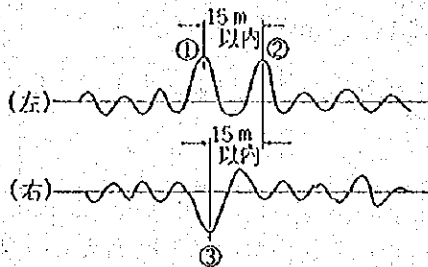
乙修繕整理基準は、以上の検討により決定されたものである。

乙修繕整理基準値の作業計画への適用方法は、次のとおりである。

(a) 軌道狂い測定図をおおむねキロ程500mごとに仕切り、各仕切りごとに各補修目的別に乙修繕整備基準値の超過数を求め、これが1仕切り当たり2～3個以上となる区間（軌間狂いについては、1仕切り内に基準値をこえる狂いが30m以上連続する場合を含む）について乙修繕を発動する。

(b) 軌道狂い測定図による乙修繕整備基準値の超過個数の求め方は、次による。

- ① 高低狂いおよび通り狂いの場合は、左右レールの合計とする。
- ② 乙修繕整備基準値をこえる2以上の狂いが、図-1に示すように15m（軌間狂いの場合は30m）以内に接近している場合は1個とみなす。高低狂いおよび通り狂いの場合、左右相互の狂いが15m以内に接近している場合も同様とする。



①と②との間が15m以内  
①または②と③が15m以内 } はいずれも  
1個とみなす

図-1

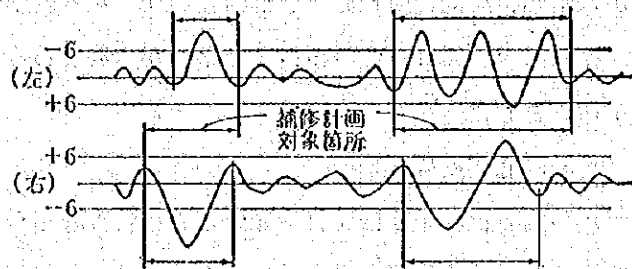


図-2

(c) 静的検測等による場合は、(1) および(2) に準ずる扱いとする。

(d) 乙修繕の施工を決定した1仕切り内における補修対象箇所は、図-2に示すとおり、軌道狂い測定図において狂い量が6mm（軌間の場合は+2，-4mm）以上の箇所とする。静的検測の場合は、仕上がり基準値以上の狂いの箇所を補修の対象とする。

### (3) 丙修繕整備基準

丙修繕とは、突発的に発生する作業で計画的に行うことが不可能かまたはかえって不経済となる小規模な作業である。すなわち、丙修繕は、計画的に行われる甲修繕、乙修繕の間に、やむを得ず発生する局所的な狂いの修正を対象としており、この整備基準値は列車の走行安全性を考慮して定めるのが妥当である。

軌道狂いの安全限度は、運転、車両、線路等の状況、軌道狂いの複合状況等によって異なるものであり、一率に決定することは困難であるが、走行安全上の判定目標として設定した値（高低40mm、通り36mm、平面性27mm）に、発見してから補修するまでの狂い進みを考慮して丙修繕整備基準値を決定した。

なお、丙修繕整備基準値は、高低、通り、平面性について設け、軌間と水準には設けない。これは、軌間については一般に狂い進みが遅く、乙修繕整備基準値で計画的に整備してゆけば安全は十分確保できること、水準については、狂い量そのものよりむしろ狂いの変化量が走行安全上問題となるものであり、変化量については平面性を規制することによって充足されること、などの理由による。

丙修繕整備基準値の適用方法は、次のとおりである。

- ① 軌道狂いが丙修繕整備基準値に達したものおよび基準値には達しないが狂い進みが特に急進性のものは、15日以内に補修する。ただし、発見した時点において軌道狂いが丙修繕整備基準値を著しく超過している場合は、補修の時期を早める。
- ② 丙修繕を行うべき軌道状態に達した後、15日（ただし、発見した軌道狂いが丙修繕整備基準値を著しく超過している場合は、その補修余裕日数）以内にやむを得ず補修できない場合は、列車の徐行の措置をとる。

#### （4）軌間の緊急整備値

表-2に示す緊急整備値が指導されている。

表-2 軌間の緊急整備値（mm）

スラック別	動的	静的
直線及びスラック20mm以下の箇所	20	14
スラック25mm以上の箇所	15	9

この値は、車輪とレールの関係寸法から、車輪が軌間内に落輪しないための軌間の最大寸法を求め、これにスラックおよび余裕を考慮して決定したものであり、丙修繕整備基準値に準じた扱いをすべきものである。

#### （5）通りと水準の複合狂いの整備標準

現行の整備基準は、単独に存在する既往狂いに対する規制値であるが、貨物列車の途中脱線事故を防止するために行われた軌道狂いの波形に関する研究の結果によると、狂いの値は小さくても連続複合した狂い、特に通りと水準の狂いが逆位相で連続複合している場合は貨物列車の走行安全性に好ましくない影響を与えることがわかった。

このため以下の整備標準によって整備を行っている。

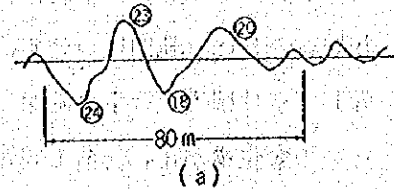
(a) 適用範囲

貨物列車を運転する線区(列車速度45 km/h以上)

(b) 整備の対象とする狂い波形

軌道狂い測定図の複合狂い波形が次に示す値以上となった場合は整備を行う(図-3)。

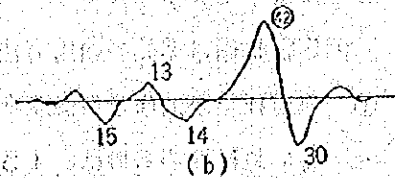
① 80 m区間に波高1.8 mm以上の複合狂いが4箇所以上存在する区間



② 3.5 mm以上の複合狂い

(c) 整備の時期

① 該当する狂いを発見してから1か月以内に整備を行う。



② (b)の①に該当する区間に第2号の狂いが存在する場合は、整備の時期を早めること。

図-3 整備の対象となる複合狂い

1-3 軌道狂いの検査

狭軌線における軌道狂いの検査は、次のように実施するよう定めている。

1. 本線路

本線路における一般軌道およびこれに付帯する分岐器については、軌間、水準、高低、通り、平面性の各項目について年4回以上検査する。ただし、平面性については高速軌道検測車運用線区に限る。

4級線であって急行以上の列車を運転しない線区における検査回数は、年2回以上とすることができる。

2. 側線

側線における一般軌道およびこれに付帯する分岐器については、軌間、水準、高低および通りについて、年1回以上検査する。

軌道狂いの検査は、本線路の一般軌道においては主として軌道検測車によっている。

また、軌道検測車による検査回数は現在概ね次のとおりとしている。

- 120 km/h 運転線区等重要幹線 年6回
- 一般線区 年4回
- 4級線中、特に簡易な線区 年2回

## 1-4 軌道狂いの線区管理

### 1. 軌道狂い指数P

軌道狂いは、個々の点の狂いについて管理するほか、ある長さの区間の軌道狂いの状態をまとめて表示し、これによって区間ごとの軌道狂いの管理をすることも必要である。

日本では、ある区間の軌道狂い状態の良否を表す指標として、軌道狂い指数Pが用いられており、その内容は以下に示すとおりである。

ある長さの区間において連続して存在する軌道狂いの中から無作為に抽出した軌道狂いの数値群の分布は、一般に正規分布とみなすことができる。

いま、狂いの階級  $x_i$  (mm) の頻度を  $f_i$  とすると、数値群の平均値  $m$  および標準偏差  $\sigma$  は

$$m = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (x_i - m)^2}{\sum f_i}} = \sqrt{\frac{\sum f_i x_i^2}{\sum f_i} - m^2} = \sqrt{\sigma_0^2 - m^2}$$

であり、また数値群の分布は次式により表される (図-4)。

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

このように、ある区間の軌道狂いの状態は、2つの指数  $m$ ,  $\sigma$  によって表すことができるが、この2つの指数を結びつけた1つの指数によって軌道狂い群の状態を表したほうがより便利である。

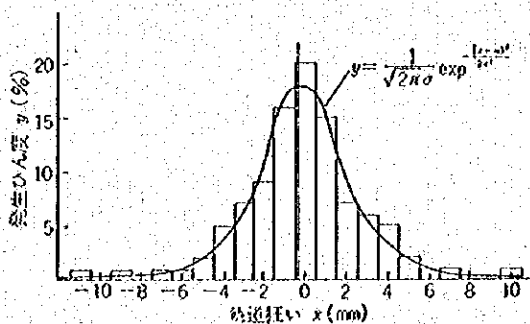


図-4

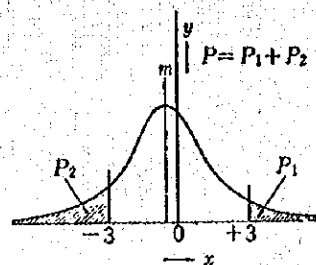


図-5

その方法として、図-5に示すように軌道狂いの分布曲線に一定の限界線  $\pm a$  mm を引き、これを超える狂いの割合%を求める。これが軌道狂い指数Pである。

$$P_1 = \int_{+a}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2} dx \times 100$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{-a} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2} dx \times 100$$

$$P = P_1 + P_2$$

限界値  $a$  は、現在 3 mm を採用しているが、その理由は 3 mm にした場合の  $P$  値は軌道狂いの良否に応じておおむね 20 から 60 くらいまでの広い範囲の値となり、軌道狂い状態の比較がしやすいからである。

$a$  の値をこれより大きくすると、この範囲が小さくなり良否の比較がしにくくなる。

## 2. 軌道狂い指数 $P$ の求め方

軌道狂い指数  $P$  を求める方法には、以下に示すように人力で求める方法として第 1 法または第 2 法、高速軌道検測車の自動計数装置によって求める第 3 法がある。JR では主として第 3 法によっている。

### (1) 第 1 法

担当区域をキロ程 1 km ごとに仕切り、各仕切りごとに 120 測点以上を均等に抽出し、各仕切りごとの  $\bar{m}$ 、 $\overline{\sigma_0^2}$  および  $\bar{\sigma}$  を前項に示す算式により求める。

次に、 $\bar{m}$  および  $\bar{\sigma}$  から表-3 により軌道狂い指数  $P$  を求める。

線路作業班別、保線区別、局別、あるいは線名別、線級別等の  $P$  を求める場合は、次式により  $\bar{m}$ 、 $\overline{\sigma_0^2}$ 、 $\bar{\sigma}$  を求め、この  $\bar{m}$  と  $\bar{\sigma}$  からそれぞれの  $P$  値を算出する。

$$\bar{m} = \frac{\sum m}{K}$$

$$\overline{\sigma_0^2} = \frac{\sum \sigma_0^2}{K}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\overline{\sigma_0^2} - \bar{m}^2}$$

ここで  $K$  : 仕切り数

### (2) 第 2 法

この方法は、第 1 法の簡略計算法であり、軌道検測車によって記録された軌道狂いのチャートに  $\pm 3$  mm の限度線を引き、一定間隔ごと (通常軌道延長 7 m ごと) にこの限度線を超過しているか否かを調べ、次式によって  $P$  値を算出する方法である。

$$P_1 = \frac{f_+}{n} \times 100$$

$$P_2 = \frac{f_-}{n} \times 100$$

$$P = P_1 + P_2$$

ここで、 $f_+$ および $f_-$ ：+3mmおよび-3mmを超える狂いの数

$n$ ：測点数

である。

### (3) 第3法

高速軌道検測車の自動計数装置によって出力された測点数 $n$ および±3mmを超える狂いの数 $f$ から、次式により $P$ 値を算出する方法である。

$$P = \frac{f}{n} \times 100$$

測点数 $n$ は、現状では軌道延長500m当たり1000測点としている。

なお、この出力は、検測車の検測走行中は保線支区単位に行う。また、検測車の走行中記録した軌道狂いの磁気テープ記録を地上処理することにより、キロ程500mごとの $P$ 値をタイプアウトする。

## 3. $P$ 値による線区管理

### (1) $P$ 値管理図

軌道の保守状態は、場所別にできるだけ均一な状態に維持されていることが望ましい。この目的のために、たとえば図-6に示すようにある時期における500mロットごとあるいは保線班ごとの $P$ 値を順次横に並べて比較しやすい形にした管理図を作成する。

この管理図には、各ロットごとの $P$ 値から計算される線区平均 $\bar{P}$ および管理限界値(たとえば $\bar{P} + 2\sigma_p$ )を記入する。そして管理限界値を超えるロットについては、その原因を詳細に調査し、対策を検討する。

この管理図は、500mロットごと、線路班ごとのほか、保線区ごとあるいは線名ごと、線級ごと等にも作成される。

### (2) $P$ 値推移図

$P$ 値の長期にわたる変化の状況を把握するため、 $P$ 値の推移図を作成する。

これは、図-7に示すように各保線区ごとあるいは各線名ごとに4半期別の $P$ 値の推移を図に示し、 $P$ 値が悪化、良化、横ばいのいずれの傾向にあるかを判定する。

$P$ 値が悪化の傾向にある場合は、その原因を調査し対策を検討する。

表-3

m,  $\sigma$  か ら P

$\sigma/m$	0.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3
0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.4	1.4
0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.5	2.3	3.3
0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.6	2.3	3.2	4.3
0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.3	3.0	4.0	5.2	6.7	8.5
0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.3	1.7	2.3	3.0	3.8	4.8	6.0	7.4	9.1	11.1
1.0	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.8	2.3	2.9	3.6	4.5	5.5	6.7	8.1	9.7	11.5	13.6
1.1	0.6	0.7	0.7	0.8	1.0	1.2	1.5	1.9	2.3	2.8	3.5	4.2	5.1	6.1	7.3	8.6	10.2	11.9	13.8	15.9
1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	2.0	2.4	2.9	3.4	4.1	4.8	5.7	6.7	7.8	9.1	10.6	12.2	14.0	15.9	18.0
1.3	2.1	2.1	2.3	2.5	2.7	3.1	3.6	4.1	4.7	5.5	6.3	7.3	8.4	9.6	11.0	12.5	14.1	15.9	17.8	19.9
1.4	3.2	3.3	3.4	3.6	3.9	4.3	4.8	5.4	6.1	6.9	7.9	8.9	10.1	11.3	12.7	14.3	15.9	17.4	19.6	21.6
1.5	4.6	4.6	4.7	5.0	5.3	5.8	6.3	7.0	7.7	8.5	9.6	10.6	11.8	13.1	14.6	16.0	17.7	18.4	21.3	23.2
1.6	6.1	6.1	6.3	6.5	6.9	7.3	7.9	8.6	9.3	10.2	11.2	12.3	13.5	14.8	16.2	17.7	19.3	21.0	22.8	24.7
1.7	7.8	7.8	8.0	8.2	8.6	9.1	9.6	10.3	11.1	11.9	12.9	14.0	15.2	16.4	17.8	19.1	20.8	22.5	24.3	26.1
1.8	9.8	9.6	9.8	10.0	10.4	10.9	11.4	12.1	12.8	13.7	14.6	15.7	16.9	18.1	19.4	20.9	22.4	24.0	25.6	27.3
1.9	11.4	11.5	11.6	11.9	12.2	12.7	13.2	13.9	14.6	15.5	16.4	17.4	18.5	19.7	21.0	22.1	23.6	25.4	27.0	28.8
2.0	13.4	13.4	13.6	13.8	14.1	14.6	15.1	15.7	16.4	17.3	18.1	19.1	20.2	21.4	22.6	23.9	25.3	26.7	28.3	29.8
2.1	15.3	15.4	15.5	15.7	16.1	16.5	17.0	17.6	18.3	19.0	19.9	20.8	21.9	22.9	24.1	25.4	26.7	28.1	29.5	31.0
2.2	17.3	17.3	17.4	17.7	18.0	18.4	18.9	19.4	20.1	20.8	21.6	22.5	23.5	24.5	25.6	26.8	28.1	29.4	30.7	32.2
2.3	19.2	19.2	19.4	19.6	19.9	20.3	20.7	21.3	21.9	22.6	23.3	24.2	25.0	26.1	27.1	28.2	29.4	30.7	31.9	33.3
2.4	21.1	21.2	21.3	21.5	21.8	22.1	22.6	23.1	23.6	24.3	25.0	25.8	26.7	27.6	28.6	29.6	30.8	31.9	33.1	34.4
2.5	23.0	23.1	23.2	23.4	23.6	23.9	24.3	24.8	25.4	26.0	26.7	27.4	28.2	29.1	30.0	31.0	32.1	33.2	34.3	35.5
2.6	24.9	24.9	25.0	25.2	25.4	25.7	26.1	26.6	27.1	27.6	28.3	29.0	29.8	30.6	31.5	32.4	33.4	34.4	35.5	36.6
2.7	26.7	26.7	26.8	26.9	27.2	27.5	27.8	28.2	28.7	29.3	29.9	30.5	31.2	32.0	32.8	33.7	34.6	35.6	36.6	37.7
2.8	28.4	28.4	28.5	28.7	28.9	29.2	29.5	29.9	30.3	30.8	31.4	32.0	32.7	33.4	34.2	35.0	35.9	36.8	37.7	38.7
2.9	30.1	30.1	30.2	30.3	30.6	30.8	31.1	31.5	31.9	32.4	32.9	33.5	34.1	34.8	35.5	36.3	37.1	38.0	38.8	39.3
3.0	31.7	31.8	31.8	32.0	32.2	32.4	32.7	33.0	33.4	33.9	34.4	34.9	35.5	36.1	36.8	37.5	38.3	39.1	39.9	40.8
3.1	33.3	33.4	33.4	33.5	33.7	34.0	34.2	34.5	34.9	35.3	35.8	36.3	36.8	37.5	38.1	38.7	39.5	40.2	41.0	41.8
3.2	34.8	35.0	35.0	35.1	35.2	35.4	35.7	36.0	36.3	36.7	37.2	37.6	38.1	38.7	39.3	40.0	40.6	41.3	42.1	42.8
3.3	36.3	36.4	36.4	36.5	36.7	36.9	37.1	37.4	37.7	38.1	38.5	38.9	39.4	40.0	40.4	41.1	41.8	42.4	43.1	43.8
3.4	37.8	37.8	37.8	37.9	38.1	38.3	38.5	38.8	39.1	39.4	39.8	40.2	40.7	41.1	41.7	42.2	42.8	43.5	44.1	44.8
3.5	39.1	39.1	39.2	39.3	39.5	39.6	39.8	40.1	40.3	40.7	41.1	41.4	41.9	42.4	42.8	43.3	43.9	44.5	45.1	45.8
3.6	40.5	40.5	40.5	40.6	40.8	40.9	41.1	41.3	41.6	41.9	42.2	42.6	43.0	43.5	43.9	44.4	44.9	45.5	46.1	46.7
3.7	41.7	41.8	41.8	41.9	42.1	42.2	42.3	42.6	42.8	43.1	43.4	43.8	44.1	44.6	45.0	45.5	46.0	46.5	47.0	47.6
3.8	43.0	43.0	43.0	43.1	43.2	43.4	43.6	43.8	44.1	44.3	44.6	44.9	45.2	45.6	46.0	46.5	46.9	47.4	47.9	48.5
3.9	44.2	44.2	44.2	44.3	44.4	44.6	44.7	44.9	45.1	45.4	45.7	46.0	46.3	46.6	47.1	47.4	47.9	48.4	48.8	49.3
4.0	45.3	45.4	45.4	45.5	45.6	45.7	45.8	46.0	46.2	46.5	46.7	47.0	47.3	47.7	48.0	48.4	48.8	49.3	49.7	50.2
4.1	46.4	46.5	46.5	46.5	46.7	46.8	46.9	47.1	47.3	47.5	47.7	48.0	48.3	48.6	49.0	49.3	50.0	50.2	50.8	51.0
4.2	47.5	47.5	47.5	47.6	47.7	47.7	48.0	48.1	48.4	48.5	48.8	49.0	49.3	49.6	49.9	50.3	50.6	51.0	51.4	51.8
4.3	48.5	48.6	48.6	48.7	48.7	48.9	49.0	49.1	49.3	49.5	49.7	49.9	50.2	50.5	50.8	51.1	51.5	51.9	52.2	52.6
4.4	49.5	49.5	49.6	49.6	49.7	49.8	50.0	50.1	50.2	50.5	50.6	50.9	51.1	51.4	51.7	52.0	52.3	52.7	53.0	53.4
4.5	50.5	50.5	50.6	50.6	50.7	50.7	50.9	51.0	51.2	51.3	51.6	51.8	52.0	52.2	52.5	52.8	53.1	53.5	53.8	54.2
4.6	51.4	51.5	51.5	51.5	51.6	51.7	51.7	51.9	52.1	52.2	52.4	52.6	52.9	53.0	53.3	53.6	53.9	54.2	54.6	54.9
4.7	52.3	52.3	52.4	52.4	52.5	52.6	52.7	52.9	52.9	53.1	53.2	53.5	53.7	53.9	54.2	54.4	54.7	55.0	55.3	55.6
4.8	53.2	53.2	53.2	53.2	53.3	53.4	53.5	53.6	53.8	53.9	54.1	54.3	54.6	54.7	54.9	55.1	55.4	55.7	56.0	56.3
4.9	54.0	54.0	54.1	54.1	54.2	54.3	54.3	54.5	54.6	54.7	54.9	55.0	55.3	55.4	55.6	55.9	56.1	56.5	56.7	57.0
5.0	54.9	54.9	54.9	54.9	55.0	55.1	55.1	55.2	55.4	55.5	55.6	55.8	56.0	56.2	56.4	56.6	56.9	57.1	57.4	57.6



を 求 め る 表

12.0	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.3	15.9	60.0	84.1	97.7	99.9	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	2.3	6.7	15.9	30.9	50.0	69.2	84.1	93.3	97.7	99.4	99.9	100.	100.	100.	100.
0.0	0.1	0.4	1.0	2.3	4.6	9.1	15.9	25.2	37.0	50.0	63.0	74.8	84.1	90.9	95.2	97.7	99.0	99.8	99.9	100.
0.6	1.2	2.3	4.0	6.7	10.6	15.9	22.7	30.9	40.1	50.0	59.9	69.2	77.3	84.1	89.4	93.3	96.0	97.7	98.8	99.4
2.3	3.6	5.5	8.1	11.5	15.9	21.2	27.4	34.5	42.1	50.0	57.9	65.5	72.6	78.8	84.1	88.5	91.9	94.5	96.4	97.7
4.8	6.7	9.1	12.2	15.9	20.3	25.2	30.9	37.0	43.4	50.0	56.6	63.0	69.2	74.8	79.8	84.1	87.8	90.9	93.3	95.2
7.7	9.9	12.7	16.9	19.6	22.8	26.4	33.4	38.7	44.3	50.0	55.7	61.3	66.6	71.6	77.2	80.4	84.1	87.4	90.1	92.4
10.6	13.0	15.9	19.1	22.7	26.6	30.9	35.4	40.1	45.0	50.0	55.0	59.9	64.6	69.2	73.4	77.3	80.9	84.1	87.0	89.4
13.3	15.9	18.7	21.8	25.2	28.9	32.9	37.0	41.2	45.6	50.0	54.4	58.8	63.0	67.1	71.1	74.8	78.2	81.3	84.1	86.7
15.9	18.4	21.2	24.2	27.4	30.9	34.5	38.2	42.1	46.1	50.0	53.9	57.9	61.8	65.5	69.2	72.6	75.8	78.8	81.6	84.1
18.2	20.7	23.4	26.2	29.3	32.5	35.8	39.2	42.8	46.4	50.0	53.6	57.2	60.8	64.2	67.5	70.7	73.8	76.6	79.3	81.8
20.3	22.7	25.2	28.0	30.9	33.8	37.0	40.1	43.4	46.7	50.0	53.3	56.6	59.9	63.0	66.2	69.2	72.0	74.8	77.3	79.8
22.1	24.6	26.9	29.5	32.2	35.0	37.9	40.9	43.9	46.9	50.0	53.1	56.1	59.1	62.1	65.0	67.8	70.5	73.1	75.6	77.9
22.8	26.0	28.4	30.9	33.4	36.1	38.7	41.5	44.3	47.2	50.0	52.8	55.7	58.5	61.3	64.0	66.6	69.2	71.6	74.0	77.2
25.3	27.6	29.7	32.1	34.5	37.0	39.5	42.1	44.7	47.3	50.0	52.7	55.3	57.9	60.5	63.0	65.5	68.0	70.3	72.6	74.8
26.7	28.7	30.9	33.1	35.4	37.8	40.2	42.6	45.0	47.5	50.0	52.5	55.0	57.5	59.9	62.3	64.6	66.9	69.2	71.3	73.4
28.0	30.0	32.0	34.1	36.3	38.5	40.8	43.1	45.3	47.7	50.0	52.4	54.7	57.0	59.3	61.6	63.8	66.0	68.1	70.2	72.2
29.2	31.1	33.1	35.0	37.1	39.2	41.3	43.6	45.6	47.8	50.0	52.3	54.5	56.7	58.8	61.0	63.1	65.1	67.2	69.2	71.1
30.4	32.1	34.0	35.9	37.8	39.8	41.8	43.9	45.9	48.0	50.1	52.2	54.2	56.3	58.4	60.4	62.4	64.4	66.3	68.2	70.1
31.5	33.2	34.9	36.7	38.6	40.4	42.3	44.3	46.3	48.2	50.1	52.1	54.0	56.0	58.0	59.9	61.8	63.7	65.6	67.4	69.2
32.6	34.2	35.8	37.5	39.3	41.0	42.9	44.6	46.5	48.3	50.2	52.1	53.9	55.8	57.7	59.5	61.3	63.1	64.9	66.7	68.3
33.6	35.2	36.7	38.3	40.0	41.6	43.3	45.1	46.8	48.6	50.3	52.1	53.9	55.6	57.4	59.1	60.9	62.6	64.3	66.0	67.6
34.7	36.1	37.6	39.1	40.8	42.3	43.8	45.5	47.1	48.8	50.6	52.2	53.8	55.5	57.2	58.8	60.5	62.1	63.8	65.4	66.9
35.7	37.1	38.5	39.9	41.4	42.9	44.4	45.9	47.5	49.0	50.6	52.2	53.8	55.4	57.0	58.6	60.2	61.8	63.3	64.8	66.4
36.7	38.0	39.3	40.7	42.1	43.5	44.9	46.4	47.8	49.3	50.8	52.3	53.9	55.4	56.9	58.4	59.9	61.4	62.9	64.4	65.8
37.7	39.0	40.2	41.4	42.8	44.1	45.4	46.8	48.2	49.6	51.1	52.5	53.9	55.4	56.8	58.2	59.7	61.2	62.5	63.9	65.4
38.8	39.9	41.1	42.2	43.5	44.8	46.0	47.3	48.6	50.0	51.3	52.7	54.0	55.4	56.8	58.2	59.5	61.0	62.2	63.6	64.9
40.0	40.8	41.9	43.1	44.2	45.4	46.6	47.8	49.1	50.3	51.6	52.9	54.2	55.5	56.8	58.1	59.4	60.7	62.0	63.3	64.6
40.7	41.8	42.8	43.9	44.9	46.1	47.2	48.3	49.5	50.7	51.9	53.1	54.4	55.6	56.9	58.1	59.3	60.6	61.8	63.0	64.3
41.7	42.7	43.6	44.7	45.7	46.7	47.8	48.9	50.0	51.1	52.3	53.4	54.6	55.8	56.9	58.1	59.3	60.5	61.7	62.9	64.0
42.7	43.6	44.5	45.4	46.4	47.4	48.4	49.4	50.5	51.6	52.7	53.7	54.9	56.0	57.1	58.2	59.4	60.5	61.6	62.7	63.9
43.6	44.5	45.3	46.2	47.1	48.1	49.0	50.0	51.0	52.0	53.0	54.1	55.1	56.2	57.3	58.3	59.4	60.5	61.6	62.6	63.7
44.6	45.4	46.2	47.0	47.9	48.7	49.7	50.6	51.5	52.5	53.5	54.4	55.5	56.5	57.5	58.5	59.6	60.5	61.6	62.6	63.6
45.5	46.2	47.0	47.8	48.6	49.4	50.3	51.2	52.1	53.0	53.9	54.8	55.8	56.7	57.7	58.6	59.6	60.6	61.6	62.6	63.5
46.4	47.1	47.8	48.6	49.4	50.1	50.9	51.7	52.6	53.4	54.3	55.2	56.1	57.0	57.9	58.9	59.8	60.7	61.7	62.6	63.5
47.3	48.0	48.6	49.4	50.1	50.8	51.6	52.4	53.1	53.9	54.8	55.6	56.6	57.3	58.2	59.1	60.0	60.8	61.7	62.6	63.6
48.2	48.8	49.5	50.0	50.8	51.5	52.2	52.9	53.7	54.5	55.2	56.0	56.8	57.7	58.4	59.3	60.2	61.1	61.9	62.7	63.6
49.0	49.6	50.2	50.9	51.5	52.1	52.8	53.5	54.2	55.0	55.7	56.5	57.3	58.0	58.8	59.6	60.4	61.2	62.0	62.8	63.7
49.9	50.4	51.0	51.6	52.2	52.8	53.5	54.1	54.8	55.5	56.2	56.9	57.6	58.4	59.1	59.9	60.7	61.4	62.2	63.0	63.7
50.7	51.2	51.8	52.3	52.9	53.5	54.1	54.7	55.4	56.0	56.7	57.4	58.1	58.8	59.5	60.2	60.9	61.7	62.4	63.1	63.9
51.5	52.0	52.5	53.0	53.6	54.1	54.7	55.3	55.9	56.6	57.2	57.8	58.5	59.1	59.8	60.5	61.2	61.9	62.6	63.3	64.0
52.3	52.8	53.3	53.7	54.2	54.8	55.3	55.9	56.5	57.0	57.7	58.3	58.9	59.5	60.2	60.8	61.5	62.2	62.8	63.5	64.2
53.0	53.6	54.0	54.4	54.9	55.4	55.9	56.5	57.0	57.6	58.2	58.7	59.3	59.9	60.6	61.2	61.8	62.4	63.1	63.7	64.4
53.8	54.2	54.6	55.1	55.6	56.0	56.5	57.1	57.6	58.1	58.6	59.1	59.7	60.3	60.9	61.5	62.1	62.7	63.3	64.0	64.6
54.5	54.9	55.3	55.7	56.2	56.7	57.1	57.6	58.1	58.6	59.1	59.6	60.2	60.8	61.3	61.9	62.4	63.0	63.6	64.2	64.8
55.3	55.6	56.0	56.4	56.9	57.2	57.7	58.2	58.6	59.0	59.6	60.1	60.6	61.1	61.7	62.2	62.7	63.3	63.9	64.5	65.0
55.9	56.3	56.7	57.0	57.4	57.9	58.3	58.7	59.1	59.6	60.1	60.6	61.1	61.6	62.1	62.6	63.1	63.6	64.1	64.7	65.3
56.6	56.9	57.3	57.7	58.1	58.5	58.9	59.2	59.7	60.1	60.6	61.0	61.5	62.0	62.4	62.9	63.4	63.9	64.5	65.0	65.5
57.3	57.6	58.0	58.3	58.7	59.0	59.4	59.8	60.2	60.6	61.0	61.5	61.9	62.4	62.9	63.3	63.8	64.3	64.7	65.3	65.7
57.9	58.3	58.6	58.9	59.2	59.6	60.0	60.3	60.7	61.1	61.5	61.9	62.4	62.8	63.0	63.7	64.1	64.6	65.1	65.5	66.0

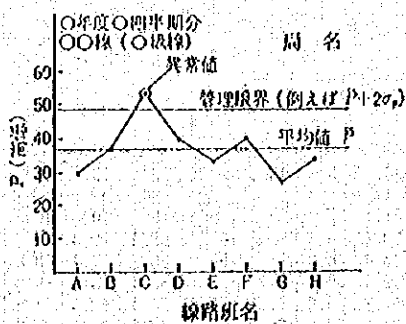


図-6 P値管理図の例

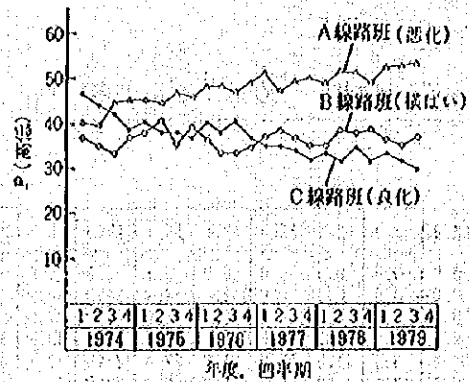


図-7 P値推移図の例

## 1-5 軌道検測車

### 1. 小形軌道検測車

この検測車の車体は、アングルと丸鋼で組み立てられており、全長約5.4m、自重約0.7tという小形なもので、モーターカーで牽引し検測速度は直線15km/h、曲線10km/h、分岐器5km/hである。

測定項目は、軌間、水準、高低(左右)、通り(左右)の4項目、6波形であり、これらの測定結果を幅25cmの記録紙に自動記録する。紙送り速度は、軌道延長1km当たり1mである。

各項目別の測定機構は、次のとおりである。

#### (1) 通りおよび軌間

通りについては、2.5m間隔に配置された3個の測定シュー(左右で計6個)により5m弦の狂い量を測定する。軌間については、中央部の左右一対の測定シューによりその間隔の変化を測定する。

#### (2) 水準

水準は、重さ約5kgの重錘が構成する鉛直線と車体の傾きの変化を測定して求める。この重錘は、車体の振動、曲線部の遠心力の影響を受けやすいので、高速検測はできない。

#### (3) 高低

高低は、2.5m間隔に配置された3個の走行車輪により5m弦の狂い量を測定する。これら測定値は、検測車の重量が軽量であるため静的測定値であり、浮まくらぎの影響等を含めた動的測定はできない。

## 2 列車動揺の管理

列車による鉄道輸送の商品としての価格は、「安全で、安くて、速い」ということのほか、「乗心地がよい」ということを欠かすことのできない重要な要素としている。

列車の動揺は、車両の状態や運転の仕方によっても影響を受けるが、線路状態の良否が大きく関与することは明らかであり、このため線路の保守に当たっては古くから、列車の動揺状態に常に関心をもってその管理が行われてきた。

### 2-1 列車動揺管理（日本の場合）

列車動揺の検査体制が明確に規定化されたのは、1953年に制定された。

すなわち、「列車の動揺については、本線路の高速列車について、毎年2回以上動揺加速度計を使用してその動揺度を測定しなければならない」と規定している。

また、その実施要領は、

- ① 列車動揺度は、上下加速度、左右加速度に分けて測定し、その結果を重力加速度（ $g$ ）で示す。
- ② 中間線路については、動揺の記録をキロ程500mごとに仕切り、各仕切りごとに最大加速度から大きい順に3個の加速度の平均を求め、これをもとにして線名別、保線区別、線路班別等の平均値を求める。
- ③ 分岐器については、分岐器通過時の最大加速度1個を抽出し、これをもとにして線名別、保線区別、線路班別等の平均値を求める。
- ④ 以上の集計は、年2回（第1、第3四半期）行う。

などのことが示され、列車動揺は「加速度」によって管理し、また単に「点の管理」だけでなく、これを集計して「線区としての管理」に活用することとなった。

ただし、この当時は動揺加速度に対し限界値的なものは設けてはおらず、従来の経験から、

- (1) 0.2  $g$  以上の場合を、保守対象の目安とする。
- (2) 0.1～0.2  $g$  の場合を、要注動揺として現場調査し、必要ある場合は保守する。

ことが指導されている。

### 2-2 列車動揺の検査

#### (1) 動揺加速度による検査

- ① 本線路の列車動揺は、高速軌道検測車運用線区では、これにより年4回以上

(ただし、4級線中、急行以上の列車を運転しない線区では年2回以上)、その他の線区では可搬式の動揺加速度計により年2回以上、動揺度(上下および左右の動揺加速度)を測定する。

- ② 110 km/h以上の高速運転線区については、高速軌道検測車による測定のほか年4回以上、可搬式の動揺加速度計を使用して、最高速度列車の動揺度(上下および左右の動揺加速度)を測定する。
- 可搬式の動揺加速度計は、機械式(表-4)で、通常列車の最前部前台車または最後部後台車の床上に据え付けて測定している。

表-4 機械式動揺加速度計

性能諸元	形式 108	形式 M-2
1. 固有振動数(Hz)	10	10
2. 測定可能範囲(g)	±0.5	±0.5
3. 減衰比	空気1/13	空気1/13
4. 記録感度(mm/g)	40	30
5. 記録方式	インク記録	熱ペン記録
6. 振子重量(kg)	1.2×3	1.0×2
7. 測定方向	上下・左右・前後	上下・左右
8. 基本倍率	16	12
9. 記録紙	グラミン紙 100mm×4.0m	感熱紙 100mm×20m
10. 紙送り(mm/s)	直流モータ(6V)-5, 10, 20	直流モータ(6V)-5
11. 寸法(mm)	220×70×220	160×210×115
12. 重量(kg)	1.2	6.4

(2) 列車巡回による検査

- ① 軌道検査長等が列車の前頭に添乗し、体感または動揺測定駒により動揺の状態を検査する。軌道検査長等が行う標準的な列車巡回の周期は、おおむね表-5に示すとおりである。
- ② 列車巡回の際、著大な動揺を感じた場合は、その位置、程度等を記録する。

2-2 列車動揺による軌道整備標準

列車動揺検査の結果に対しては、次のように措置するようになっている。

- ① 列車動揺加速度が表-6に示す整備標準値に達したもののうち、現場調査の結果緊急に整備を要する場合には、15日以内にこれを補修する。また、その値が表19の標準を著しく超過している場合は補修までの日数を短縮する。
- ② 緊急に整備する必要があるが、所定期日内にやむを得ず補修できない場合は、保守責任者の技術的判断により列車徐行の措置をとる。

表-5 徒歩巡回と列車巡回の標準的割合

線級別	徒歩巡回	列車巡回
1, 2級線	3日に1回	3日に2回
3 //	6日 //	6日 5回
4 //	10日 //	10日 9回

表-6 列車動揺加速度による軌道整備標準値

測定車種	動揺種別	上下動	左右動
	マヤ車または高性能優等車両	片振幅	0.13g
その他の旅客車両	//	0.20g	0.20g

2-3 列車動揺の線区管理

列車動揺の線区管理は、「平均g値」によって実施しているが、その後「代表線区g値度数分布表」による管理をさらに追加している。

まず、平均g値による管理は次のように実施している。

- ① 中間線路については、キロ程500mごとの500m区間を1ロットとし、このロットから上下、左右方向別に列車動揺加速度を最大値から大きい順に3個抽出する。
- ② 分岐器については、各分岐器通過時の上下、左右方向の最大列車動揺加速度1個を抽出する。
- ③ これらの値を用い、年2回（第1、第3四半期）、中間線路、分岐器別に、
  - 「局別、線名別、線級別、保線区別、線路班別、平均g値」
  - 「局別、線名別、線級別、保線区別、平均g値」
  - 「局別、線名別、線級別、平均g値」
  - 「線名別、線級別、平均g値」
  - 「線級別平均g値」
  - 「全国平均g値」

などを求め、平均g値の線区間の比較、年度別の傾向の判定等を行う。

以上の値は、列車動揺に関して線区単位の平均的な状態を示すものであり、「動揺の大きさ別の発生ひん度」はわからない。そこで、1976年度から代表線区について「g値度数分布表」

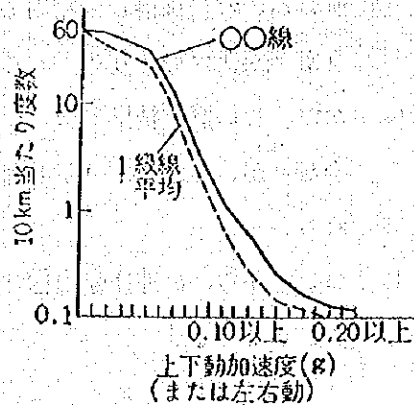


図-8 g値度数分布表

を追加して集計することとした(図-8)。

これは全国代表線区について、たとえば0.13g以上のg値が10km当り何個発生するか、そのひん度は全国線級別の平均状態と比べてどうか等を表すものである。

これらの「線区平均g値」および「g値度数分布表」から、他線区より劣る状態にある線区については、それぞれの線区の特情に見合う適切な対策を見出し、これを実施するようにしている。

#### 2-4 列車動揺防止対策

列車の動揺、特に高速列車の動揺の原因及び効果的な対策については、現在研究中であるが、その一環として1978年8月に東北本線上野～青森間上下線で列車動揺加速度を測定し、0.2g以上の著大動揺箇所を分析した結果を表-7に示す。

動揺加速度を測定した列車は、特急寝台用電車、測定位置は最後部、後台車センタピン床上、測定計器は吉田式動揺加速度計である。

表-7から次のことがわかる。

- ① 曲線部での発生が特に多い(約65%)
- ② 踏切、分岐器、橋梁等の前後でもよく発生する(約20%)
- ③ 軌道狂いとの関係については、上下動の場合、動揺加速度が0.2g以上を示した箇所のうち高低狂い20mm以上の箇所が半分以上あり、軌道狂いの大きい箇所はよく揺れるといえる。

一方、左右動の場合、軌間、水準、通りの各狂いが20mm以上の箇所はわずか10%強であり、単独の軌道狂いだけが動揺の原因であるとは判断しがたい。そこで、これらの動揺箇所のうち、たとえば通りと水準の複合狂いが20mm以上の箇所を調べてみると、全体の約半分(125箇所中、58箇所)がこれに該当し、左右の列車動揺下層度は通りと水準の複合狂いとかなり密接な関係のありそうなことが推定される。

- ④ なお、この測定結果では、噴泥箇所における大きい列車動揺加速度の発生が少ないが、これは1978年における雨量が比較的少なかったためと推定される。

以上のことから、高速運転線区における列車動揺防止対策としては、次の事項をあげることができる。

表7 東北本線の著大動揺箇所（片振幅 0.20g以上）と線路状態

発生箇所 項目	左 右 動								小 計
	緩和 曲線中	円曲線 中	踏切道	伸縮 目	分岐器	下水梁 橋 梁	ふん泥	その他	
両値の狂い があるもの	2	—	—	—	—	—	—	—	1.6% 2①
両値は超え ていないが比 較的大きいもの (20mm以上)	4	5	1	1	2	—	—	1	11.2% 14②
両値狂いが 20mm以上 あるもの	16	17	5	—	3	1	2	4	38.4% 48
その他	16	21	2	1	6	2	1	12	48.8% 61
計	30.4% 38	34.4% 43	6.4% 8	1.6% 2	8.8% 11	2.4% 3	2.4% 3	13.6% 17	100% 125

上 下 動								
緩和 曲線中	円曲線 中	踏切道	分岐器	下水梁 橋 梁	ふん泥	その他	小 計	計
1	3	—	1	1	—	—	28.6% 6	5.5% 8
1	1	—	1	1	1	—	23.8% 5	13% 19
—	—	—	—	—	—	—	—	32.9% 48
1	5	1	—	—	2	1	47.6% 10	48.6% 71
14.3%	42.9%	4.8%	9.5%	9.5%	14.3%	4.8%	100%	100%

(注) ①印の数字は20mm以上の複合狂い箇所再掲

(1) 抜本対策

(a) 線路改良

線路構造不良のため、著大列車動揺の常時発生箇所に対しては、線路構造を抜本的に改良する。

すなわち、

- ① 60kg レール化、道床厚増(250mm を350mm に増加)等の軌道強化を行う。



② 路盤土不良または排水不良のため、噴泥が多発し保守困難な箇所は、路盤改良を行う。

③ 軌道破壊が大きく改良を要する踏切の構造強化を行う。

④ カントまたは緩和曲線長が不足し、列車の乗心地を悪くしている曲線の改良を行う。

#### (b) 保守間合の確保

保線機械の稼働、軌道材料の更換等の保守作業を実施するために必要な保守間合が不足している線区に対しては、その確保を行う。

#### (2) 暫定対策

① 列車動揺の状態を適切な管理のもとで常によく把握し、著大動揺を認めた場合は、その原因をよく分析し、それぞれの箇所に適応した軌道整備作業あるいは暫定改良工事を行う。前述のように、著大動揺が発生する箇所は、曲線部や踏切、分岐器、橋梁の前後、大きな軌道狂い箇所、特に左右動については複合狂いの大きい箇所等であるから、これらの箇所を重点的に整備改良してゆく。

② 列車動揺の大きい箇所で改良（路盤改良、曲線改良等）が困難な場合は、列車の徐行または速度制限を行い、動揺を軽減する。

なお、列車動揺加速度に対しては、軌道狂いの大きさだけでなく、その波長が関係するので、列車速度に対応した共振波長の軌道狂いの整備に留意する必要がある。特に高速の場合には、現行軌道狂いの測定波長10mよりも長い波長の軌道狂いが列車動揺にきいてくるので、通常の高い軌道狂いを補修整備しても列車動揺が低減しない場合には、長波長の軌道狂いの存在をチェックしてみる必要がある。

#### 3 曲線管理

曲線部には、車両をできるだけ円滑に走行させ、かつ軌道の破壊をなるべく少なくするために、スラック、カント、緩和曲線部が設けられ、また曲線間の最小直線長の確保、緩和曲線と縦曲線の競合禁止など各種の制約条項がある。

これらが適切に設けられていないと、列車の乗心地を悪くしたり、また過大な横圧を生じてレールの摩耗、犬くぎの押出し、通り狂い等を促進したりする。

したがって、曲線の状態はこれを常にチェックし、必要に応じて計画的に改良を行うとともに、状態の特に悪い曲線については列車の徐行を行うなど適切に処置する必要がある。

以下、曲線管理上特に重要な事項について述べる。



### 3-4 曲線諸元のチェック

曲線諸元の中で、列車の乗心地確保上あるいは脱線防止上、特に注意すべき項目は次のとおりである。

#### (1) スラック

曲線部では、レールは車輪により横圧を受けて側面が摩耗し、また横圧が過大な場合は犬くぎ等が押し出されて、次第にスラックの大きな状態となる。

スラックが規定寸法より過大な場合は、車両の蛇行動を誘発して乗心地を悪くする。更に軌間が拡大してくると、軌間拡大による脱線を起こすおそれが出てくる。

したがって、常によくチェックし、軌間の乙修繕または緊急補修等を、機を逸することなく行うようにしなければならない。

#### (2) カント不足量

カント不足量が大きすぎる場合は、大きな超過遠心力が作用し、列車の乗心地が悪くなる。カント不足量は、次式に示すように線区の最高速度列車に対する均衡カントと現場の設定カントとの差によって求める。そして、この量が、狭軌線では電車、気動車の場合 60 mm (55 mm)、その他の列車の場合 50 mm (45 mm) を超えていないかをチェックしなければならない。

$$C_d = C_m - C$$

$C_d$  : カント不足量 (mm)

$C_m$  : 最高速度列車の均衡カント (mm)

$C$  : 現場の設定カント (mm)

この場合、最高速度はレンカーブ速度ではなく、最高速度列車の曲線半径別制限速度を適用する。これは、ランカーブの速度は列車の到着時分に若干の余裕をもたせるため、一般に制限速度より 3~4 km/h 程度低い速度で設定されており、列車が遅延した場合は、遅れ回復のため制限速度いっぱいの速度で走ることがあるからである。

ただし、次に示すような曲線で、最高速度列車が常に制限速度より低い速度で走行する場合は、必ずしも規定上の最高速度を適用する必要はない。

- ① 最高速度列車が「必ず」停車する駅の近傍に存在する曲線
- ② 最高速度列車の通過駅ではあるが、分岐器等の制約を受けて、規定速度を出せない曲線。
- ③ 小半径の曲線の間にはさまれた曲線で最高速度が制約される曲線
- ④ その他、建造物等による速度制限の影響を受ける曲線

これらの曲線の最高速度は、最高速度列車のランカーブ速度を読みとり、これに4 km/h程度プラスした速度とする。

### (3) 緩和曲線長

緩和曲線長は、狭軌線ではやむを得ない場合でも、次の3式によって算出した値のうち最大値以上の長さ(5 m単位に切り上げた長さ)でなければならない。

$$L_1 = \alpha C$$

$$L_2 = 0.007CV$$

$$L_3 = 0.007C_a V$$

ただし、 $\alpha$  : 甲線の場合0.6、乙線の場合0.45、丙線の場合0.4

V : 最高列車速度(km/h)

C : 現場の設定カント(mm)

$C_a$  : カント不足量(mm)

上式中の最高列車速度は、既設線における緩和曲線長不足の有無をチェックする場合は、カント不足量のチェックの場合とまったく同様でよい。ただし、線路を新設する場合は、最高速度列車の曲線半径別制限速度を適用するものとし、駅近傍等の曲線でもランカーブにより低い速度としてはならない。これは、カントの場合は必要以上に高くすると乗心地上あるいは線路保守上かえって支障する面がでてくるが、緩和曲線長の場合は長いほど有利であり、また将来の速度向上にも容易に対処できるからである。

### (4) 曲線間最小直線長

曲線間最小直線長については、反対方向の2つの曲線間には少なくとも10 m以上の直線を挿入していなければならない。なお、線路の状況その他により所要の直線を挿入できない場合は、反対方向の2つの曲線においては両曲線を曲線でい減により連続した緩和曲線で直接結ぶ(同方向の2つの曲線においては曲線でい減をする)ものとする。

曲線間の直線長が短い場合、特にそれが反対方向の2つの曲線の場合は、手前の曲線で受けた動揺が減衰しないうちに次の曲線にはいり、今後は逆方向の動揺を受けることになるので、列車の乗心地は著しく悪いものとなる。

なお、狭軌線の特に高速運転線区においては、列車動揺防止上、上述の10 mは20 m以上とすることが望ましい。

### (5) 緩和曲線と縦曲線の競合

緩和曲線部では、カントのてい減を行っているため軌道の平面性は一般区間より悪

い状態となっている。また、縦曲線部では、凸形の場合は遠心力による車両の軸重減少、凹形の場合は列車の前部に作用する走行抵抗によって中間車両の浮上り現象を生ずる。

このような不利な条件を有する両者が競合すると、線路の保守が困難となり、また列車の走行安定上あるいは乗心地上からも好ましくないので、つとめて避けることにしている。特に、カントで減倍数の小さい緩和曲線における競合は注意を要する。

#### (6) 最小円曲線長

本線路における同一半径の円曲線長は、分岐付帯曲線の場合を除き20m以上としている。これは、進入側と進出側の両緩和曲線の影響を1つの車両が受けることのないよう、少なくとも1車両長以上の円曲線長を設けることとしたものである。

特に、高速運転線区ではこのチェックが必要である。

#### (7) タイプレートまたはチロック

タイプレート敷設の最低条件は、機関車の形式別に表-8のように定められている。この表によってまずチェックし、もしタイプレートが敷設されていない場合は次により処置する。

すなわち、チロックの取り付けを行う。つまり、チロックは本線路および重要な側線の半径600m以下の曲線で、タイプレートを使用しない場合に付ける。

したがって、タイプレートのない場合は、チロックが規程どおり取り付けられていることが最低条件となるのである。

#### (8) その他

その他、分岐器とこれに近接する曲線との間の直線長、犬くぎ類の増打ち等に対するチェックも必要である。

### 3-2 要注曲線の指定

前項で述べた曲線諸元のチェックの結果、状態の悪い曲線は要注曲線に指定する。

要注曲線は、その要注度に応じ次の3ランク程度に分類しておくこと、さらにきめ細かな管理ができる。

第1ランク…列車の走行安定性に関係があり、改良または速度制限を行う必要のあるもの

第2ランク…列車の走行安定性に関係はあるが、第1ランクほどではないもの

第3ランク…列車の乗心地等に影響のあるもの

表-8 機関車形式別タイププレート敷設条件

機関車形式			タイププレート敷設を要する曲線半径
蒸気機関車	電気機関車	ディーゼル機関車	
D52 C59	EF18 EF56 EF57 EF58		600m以下
	EF30		500m以下
C82 (軽軸重) D60 D61	ED71 ED72 ED73 ED75 ED76 ED77 ED78 EF10 EF11 EF12 EF13 EF14 EF15 EF16 EF52 EF59 EF60 EF61 EF62 EF63 EF64 EF65 EF66 EF70 EF71 EF80 EF81 EH10	D E 50	400m以下
C11 C55 C57 C58 (ころ押さえ勾配 1/3.5) C61 9600 D50 D51	ED16 ED17 ED21 ED30 ED60 ED61 ED70 ED74	DD50 DD51 (軸重15t) DD53 DF91	300m以下
8620 C50 C58 (ころ押さえ勾配 1/4)		DD13 DD14 DD15 DD21 DD51 (軸重14t) DD54 DE11 DF60	250m以下
	ED18	DD16 DE10 DE15	200m以下
	ED19		150m以下
C12 C56			— (ただし、曲線半径150m 以下のものについては、犬 くまを増付する)

### 3-3 要注曲線の取扱い

要注曲線は、日常の線路検査および保守作業を特に慎重に行うとともに、改良の可能なものは、計画的に改良を進めなければならない。

状態の特に悪い曲線で、列車の乗心地も著しく劣っている場合は、保守責任者の判断により列車を徐行させる場合もありうる。

#### (1) 線路検査上の留意事項

要注曲線に対しては、日常の線路検査に際して、他の区間と違った目でデータを分析しなければならない。

たとえば、マヤチャートをみる場合、丙修値を超える軌道狂いや列車動揺のチェックはもちろん、複合狂いや軌間狂いについても詳細に調査し、それぞれの管理値も一

般区間よりいく分小さく設定して管理すべきである。また、その補修も他の区間より優先して早目の時期に行うようにするのがよい。

軌道材料の状態、たとえばレールの摩耗、まくらぎの不良、道床のふんでい等についても軌道狂いの場合と同様平素から詳細に把握しておき、早目に保守を行うようにすべきである。

#### (2) 保守作業実施上の留意事項

曲線部で作業を行う場合は、列車の脱線等を起こさないことに対して特に細心の注意が必要である。

たとえば、道床交換を行う場合、作業中道床がゆるむことによって起こる異常沈下、作業後の軌道狂いの急進等によく注意し、必要な補修時期を誤らないようにしなければならない。

また軌道をこう上する場合にも、作業中著しい水準狂いを作らぬように左右レールを同時にこう上して突き固め、さらに所定の取り付けを正しく行う、等細心の配慮が必要である。

これらの注意は、要注曲線においては特に重要である。

#### (3) 改良の促進

要注曲線のうち、改良の可能なものは極力改良を促進すべきであるが、この場合必要な工事予算の要求、また直轄作業で可能な事項の作業計画への盛り込み等については、周到な計画に基づいて総合的に進めなければならない。

### 4 遊間の管理

レール継目部の遊間は、その量が小さすぎるとレール張り出しの原因となり、逆に大きすぎると車両通過時の衝撃力が大きくなるので、乗客の乗心地を悪くするだけでなく、継目落ちの助長、レールの損傷、継目板ボルトの破断等の原因となる。

したがって、遊間を適切に管理することは鉄道の保守管理上きわめて重要であり、日本では遊間管理については次のような手法によっている。

#### 4-1 遊間の適否の判定法

##### (1) 平均遊間

ある区間の平均遊間の適否を判断するためには、まずレールの温度の上昇に伴い遊間が縮小しているときおよびレールの温度の下降に伴い遊間が拡大しているときの両測定値を求め、次式により上昇中のレール温度 $T_1$ に対する設定遊間 $E_1$ を計算する。

$$E_1 = \frac{1}{2} \{ \bar{e}_1 + \bar{e}_2 - 0.0114L(T_1 - T_2) \}$$

$\bar{e}_1$  : 上昇中のレール温度  $T_1$  に対する遊間の平均値 (mm)

$\bar{e}_2$  : 下降中のレール温度  $T_2$  に対する遊間の平均値 (mm)

L : レール長 (m)

この  $E_1$  は、図-9に示すように、上昇中のレール温度  $T_1$  に対する自由伸縮線上の遊間で、 $\bar{e}_1$ 、 $\bar{e}_2$  が見掛け上の遊間であるのに対し、 $E_1$  は現存する真の遊間である。

したがって、この  $E_1$  と図-10に示す継目遊間図における  $T_1$  に対する正規の設定遊間量  $E$  を比較し、その差が 2mm 程度以下ならば、その区間の遊間は適正であると判断される。

と判断される。

平均遊間をチェックする場合の区間長は、通常 10 継目程度とする。

### (2) 盲遊間の連続状態

盲遊間の連続状態については、連続 3 か所以上を不良と判断することとしている。遊間が連続して盲になると、レールの軸力が増大しレールが張り出すおそれが出てくるわけであるが、図-10で見られるように、遊間が正規に設定されている場合でもある温度以上になると遊間は必然的に盲になる。

したがって、盲遊間の連続状態の検査は、高温時は避け、少なくともレール温度が  $40^{\circ}\text{C}$  以下のときに行うべきである。

### (3) 過大遊間

過大遊間の標準的な寸法は、

50 kg N および 50 kg レール…… 10 mm

40 kg N 37 kg および 30 kg レール…… 14 mm

と示されているが、その後レール、継目板および継目板ボルトの製作上の許容誤差を考えた場合のレール継目の開口温度 (表-9) をもとにして、過大遊間の許容寸法

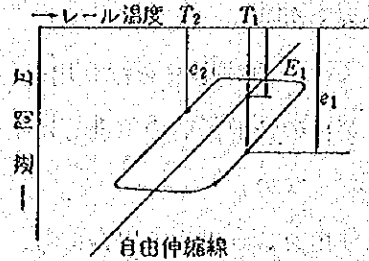


図-9

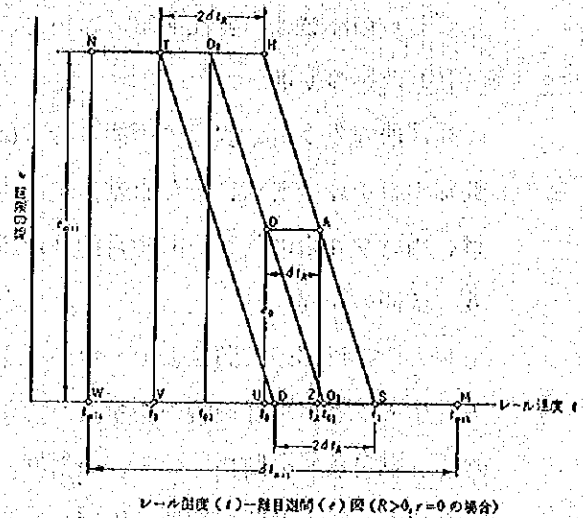


図-10

標準を表-10のように修正するよう暫定的に指導されている。

表-9 レール継目の開口限度 (mm)

レール種別	公差がすべて0の場合の開口限度	公差を考えた場合の開口限度		
		最大値	最小値	平均値
60 50N、40N 50PS 37	16.0	23.5	6.7	14
	15.9	21.0	7.7	14
	15.2	20.3	7.0	14
	15.3	20.4	7.1	14
30	22.3	27.4	14.1	21

(備考) 公差とは、レール、継目板、継目板ボルトの製作上の許容誤差をいう

表-10 過大遊間の許容寸法標準

レール種別	大きな遊間	特に著大な遊間
60、50N 50PS、40N 37	14 mm	20 mm
30	21 mm	27 mm

この取扱いは次による。

- ①「大きな遊間」が連続して発生している箇所に対しては、遊間の整正、締結装置の補修（ボルトの締直し等）、必要によりアンチクリーパの増設等適切な処置を講ずる。
- ②「特に著大な遊間箇所」では、継目板ボルトに大きな力が作用し、摩耗、屈曲、き裂等継目ボルトが変状しているのが通例であるので、遊間の簡易整理、継目ボルトの更換等を早急に行う。

#### 4-2 遊間整正の計算方法

##### (1) 小整理の場合

- ①遊間整正を行う区間の現在遊間を測定する。
- ②遊間測定と平行して、各レール端付近のレールとまくらぎに、図-11に示すように基準線を入れる。

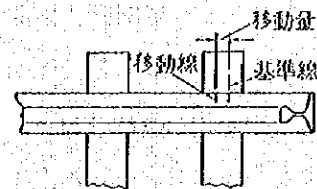


図-11 基準線、移動線の印付け

- ③遊間整正の計算は、表-11のように行う。計画遊間は、現在遊間の合計を継目数で割って平均を求め、この平均遊間を計画遊間とする。ただし、規定遊間との差があまり大きくないようにする。

移動量の(+)は、継目より終点方のレールが始点方に移動すること、(-)は終点方に移動することを意味する。

- ④表-30で計算された移動量を、②の基準線をもとにして各レールに記入する。  
 ⑥遊間修正作業としては、レール上の移動線とまくらぎ上の基準線が合致するまで、レールを移動すればよい。

表-11 小整理の場合の遊間修正計算

継目番号 N	現在遊間 E	計画遊間 F	差 E-F	移動量
1	$e_1$	$e$	$e_1 - e$	$e_1 - e$
2	$e_2$	$e$	$e_2 - e$	$e_1 + e_2 - 2e$
3	$e_3$	$e$	$e_3 - e$	$e_1 + e_2 + e_3 - 3e$
4	$e_4$	$e$	$e_4 - e$	$e_1 + e_2 + e_3 + e_4 - 4e$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	$e_n$	$e$	$e_n - e$	$e_1 + e_2 + \dots + e_n - ne$
合計	$\sum e_n$	$n \cdot e$	$\sum e_n - ne = 0$	

(2) 大整理の場合

- ①遊間修正を要する区間について、修正作業実施日に近い日に、レール温度上昇中で縮小しつつあるときの遊間  $e_1$  およびレール温度下降中で拡大しつつあるときの遊間  $e_2$  を測定する。  
 ②小整理の場合と同様に、レール温度上昇中の遊間測定の際、レール端付近に基準線を記入する。  
 ③計画遊間量を次式により決定する。

$$E_0 = \frac{\sum e_i}{n} + (E - E_1) = \overline{e_1} + (E + E_1)$$

$E_0$  : 計画遊間量

n : 遊間修正区間の継目数

$\sum e_i$  : 遊間修正区間のレール温度上昇中のレール温度  $T_1$  における現在遊間の合計量

$E_1$  : レール温度  $T_1$  における設定遊間

$E$  : レール温度  $T_1$  における規定遊間

この式の意味は、計画遊間量は現存する遊間に、規定遊間に対する過不足量を加算して求める、ということである。なお、一般に  $E$  と  $E_1$  は、遊間修正対象区間を拡大することにより近似させることができる。 $E$  と  $E_1$  が大差のない値となれば、 $\overline{e_1}$  を計画遊間として差支えない。区間を拡大しても近い値とならない場合は、レール長さを調節(更換または切断)する必要がある。

- ④遊間修正の計算は表-12の様式で行う。



⑥表-12で計算された移動量を現場の各レールに記入し、これをもとにして遊間  
 ① 修正作業を行う。

⑦ 遊間を測定してから、遊間修正作業を行うまでに遊間の状態が変わらないこと  
 が望ましいので、その間の日数はできるだけ短いほうがよい。

⑧遊間修正の計画に当たっては、左右レールの目違いが大きくなるよう配慮し  
 なければならない。

目違いの修正は、一般には目違い不良区間の片側レールでやりくりして行う。この  
 場合、直線部では左右どちら側のレールでもよいが、曲線部においては内側レールと  
 する。

表-12 遊 間 整 正 計 算 表

自 至	k	m	レール温度	$T_1 =$	° C	天候	昭和	年	月	日		
	k	m		$T_2 =$	° C							
継目 番号	左 側					右 側					目 違 い	
	測定遊間		計算 遊間 $E_0$	差 $e_1 - E_0$	移動量 (差の點)	測定遊間		計算 遊間 $E_0$	差 $e_1 - E_0$	移動量 (差の點)	測定 値	計算 値
	$e_1$	$e_2$				$e_1$	$e_2$					

- (注) 1. 移動量の+は、継目より終点方のレールが始点寄りに移動するもの  
 -は、継目より終点方のレールが始点寄りに移動するもの } とする。
2. 目違いの+は、左側継目が終点寄りにあるもの  
 -は、右側継目が終点寄りにあるもの } とする。
3. 目違いの計算値は、(右側移動量) - (左側移動量) + (目違い測定値)

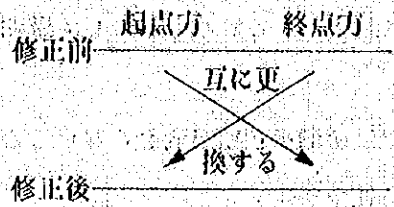


図-12 目違いの修正

すなわち、図-12に示すように修正しようとする箇所に、在来より長い（あるいは短い）レールを終点よりのレールの中からみつけだし、互いに交換すれば目違いはそれだけ修正される。

作業区域の始点から終点まで一様に大きく狂っている場合は、始点方に目違いの量だけ長い（あるいは短い）レールを用意し、また終点方に同じ量だけ短い（あるいは長い）レールを準備して、遊間整正時に交換すればよい。

【計算例】

50kg、25mレール区間で、上昇中のレール温度  $T_1 = 29^\circ\text{C}$  のときの遊間および下降中のレール温度  $T_2 = 15^\circ\text{C}$  のときの遊間が次のとおりであった。

この区間の遊間の適否の判定および遊間整正の計算をせよ。

継目番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_1 = 29^\circ\text{C}$ のときの遊間 $e_1$	0	0	0	0.5	0	2	0	0	2.5	3
$T_2 = 15^\circ\text{C}$ のときの遊間 $e_2$	0	0	0	2	1	3	2	4	4	5
継目番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$T_1 = 29^\circ\text{C}$ のときの遊間 $e_1$	4	8	12	5	10	13.5	8	5	12.5	10
$T_2 = 15^\circ\text{C}$ のときの遊間 $e_2$	10	10	12	10.5	12	14	10	15	20	10.5

(1) 遊間の適否の判定

遊間の適否の判定は、10継目程度ごとに行っているのので、この場合は継目番号1~10までと、11~20までの2つのブロックに分けて行う。

第1ブロック (No. 1~10)

$$\bar{e}_1 = \frac{\sum e_1}{n} = \frac{8}{10} = 0.8 \text{ mm}$$

$$\bar{e}_2 = \frac{\sum e_2}{n} = \frac{21}{10} = 2.1 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \{ \bar{e}_1 + \bar{e}_2 - 0.0114L(T_1 - T_2) \}$$

$$= \frac{1}{2} \{ 0.8 + 2.1 - 0.0114 \times 25 \times (29 - 15) \} = 0.6 \text{ mm}$$

$$E = 4.5 \text{ mm}$$

$$E_1 - E = 0.6 - 4.5 = -3.9 > -2$$

第2ブロック (No. 11~20)

$$\bar{e}_1 = \frac{88}{10} = 8.8 \text{ mm}$$

$$\bar{e}_2 = \frac{124}{10} = 12.4 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \{8.8 + 12.4 - 0.0114 \times 25 \times (29-15)\} = 8.6 \text{ mm}$$

$$E_1 - E = 8.6 - 4.5 = 4.1 > 2$$

この結果から、第1ブロックは遊間不足、第2ブロックは遊間が大き過ぎ、いずれも遊間整正が必要と判定される。

### (ii) 遊間整正計算

2ブロックをいっしょにした遊間整正計算を行う。

$$\bar{e}_1 = \frac{8 + 88}{20} = \frac{96}{20} = 4.8$$

$$\bar{e}_2 = \frac{21 + 124}{20} = 7.3 \text{ mm}$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \{4.8 + 7.3 - 0.0114 \times 25 \times (29-15)\} = 4.1$$

$$E - E_1 = 4.5 - 4.1 = 0.4 \text{ mm}$$

以上のように、2ブロックをいっしょにした場合の設定遊間は、規定遊間と大差がないので、 $\bar{e}_1$  を計画遊間とする。

この場合、単位を0.5mmとするため、

5mmを12継目、4.5mmを8継目(合計96mm)

として移動量を次のように計算する。

継目番号	e <sub>1</sub>	計画遊間 E <sub>0</sub>	差	移動量	
1	0	5	-5	-5	作業終点
2	0	5	-5	+10	
3	0	5	-5	-15	
4	0.5	5	-4.5	-19.5	5
5	0	5	-5	-24	5
6	2	5	-3	-27	5
7	0	5	-5	-32	5
8	0	5	-5	-37	5
9	2.5	5	-2.5	-40	
10	3	5	-2	-42	
11	4	5	-1	-43	
12	8	5	-3	-40	
13	12	4.5	-7.5	-32.5	5
14	5	4.5	-0.5	-32.5	5
15	10	4.5	-5.5	-26.5	5
16	13.5	4.5	-9	-17.5	5
17	8	4.5	-3.5	-14	5
18	5	4.5	-0.5	-13.5	5
19	12.5	4.5	-8	-5	5
20	10	4.5	-5.5	0	
計	96	96			

#### 4-3 遊間の検査および整正作業

本線路における一般軌道およびこれに付帯する分岐器については、夏期および冬期に先立って年2回以上、平均遊間の状態、盲遊間の連続状態、過大遊間の有無を検査しなければならない。なお、ふく進の著しい箇所等遊間管理上の要注区間については、検査回数を増加し、注意を怠らないようにする。

遊間検査の結果、遊間が不適と判定された箇所については、機を失することなく整正作業を実施する必要がある。

#### 4-4 その他レール張出し事故防止上の留意点

##### (1) 夏期を迎える場合の事前措置

夏期を迎えるに当たっては、前項までに述べたように遊間の管理を、適切に行うとともに、以下に示す事前対策を実施すべきである。

##### ① 道床バラストの補充

道床バラストの状態を精査し、不足している箇所は事前に補充しておく。

定尺レール区間の本線路においては、直線および半径600m以上の曲線では、30mm、半径600m未満の曲線では20mm以上、まくらぎを露出させないように道床バラストを補充すべきことにしている。ただし、目だまり区間とかレールふく進の著しい箇所などレール張り出し上の要注区間では、まくらぎ露出ができるだけでなく、また道床肩幅も十分確保しておくことが必要である。

##### ② 噴泥および浮まくらぎの除去

ロングレールの管理項でも述べたように、噴泥や浮まくらぎのある箇所では道

床の横抵抗力が小さくなるので、このような状態が連続するとレール張り出しの危険性が高くなる。

したがってこのような箇所に対しては、事前に道床交換、ふるい分け、道床つき固め等、その場所の状況に適応した処置を行っておくのがよい。

### ③ アンチクリーパの取り付け、レール締結装置の補修

レールふく進の著しい箇所は、アンチクリーパの整備を計画的に進めるべきである。このような箇所では、遊間の整正をいくら正しく、かつきめこまかく行ってもすぐに悪い状態に戻ってしまうからである。

アンチクリーパは取り付けられているがこれが弛緩して効力がない場合、あるいは犬くぎまたはレール締結装置のボルトがゆるんでいるためレールがふく進している場合には、それぞれの材料交換、補修作業等を行っておくべきである。

## (2) 酷暑期における留意事項

### ① 作業実施上の注意

酷暑期には、道床を連続してかき出すとか、あるいは軌道を連続してこう上、低下するなど道床を著しく弛緩させる作業は、つとめて避けなければならない。

しかし、たとえば軌道検測の結果、丙修繕整備基準値を超える大きな軌道狂いが発見された場合など、道床をある程度弛緩させる作業をどうしても行わなければならないことがある。このようなときには次の事項に留意し周到な注意のもとに作業を進めるようにする。

- I 作業を始める前に作業現場およびその付近のレールの状態、道床の状態を確かめる。
- II 遊間が各所に存在し、レール軸力もたまっていないと判断される場合は、作業を行っても差し支えない。ただし、作業中温度が急上昇し遊間がつかまっていくことがあるので、遊間の状態には常に注意しておく必要がある。
- III 遊間の量が少なく、作業中温度上昇によりレール軸力がかなり大きくなると予想される場合には、あらかじめ散水の準備をしておき、温度が上昇してきたときに作業現場の前後相当延長にわたってレールに散水する。
- IV 遊間がなく、レール軸力も相当たまっていると判断される箇所では、日中、炎暑時の作業は避け、曇天の日とか朝夕あるいは夜間の低温時を選んで作業を行う。
- V 作業現場付近で道床が不足している箇所には、あらかじめ道床を補完しておくが、急ぐ作業の場合には付近の道床の多い箇所からもってくるなど、作業の

実施により道床の不足が生じないようにする。

- vi 作業時は道床をよく整理し、タコづき等により弛緩した道床を締め固めておく。

## ②特別巡検の実施

酷暑期に気温またはレール温度が所定値以上になり、レール張り出しのおそれがある場合は、線路の特別巡検を実施しなければならない。

特別巡検の発令基準は地域によっても異なるが、気温28～30℃以上の場合に発令するのが一般的である。ただし、日だまり区間などでは、気温はさほど高くなくてもレール温度が高くなることがあるので、場所別に発令基準をきめ細かくきめておく必要もある。

発令者は、酷暑期には管内の気温またはレール温度を一定時間ごとに的確に把握し、発令基準に達した場合は機を失することなく特別巡検の発令を行うようにしなければならない。

また発令者は、事前に管内の張り出し要注箇所を指定するとともに、能率的な巡検が可能なダイヤを作成しておく。

なお、張り出しを起こしやすい主な要注箇所は次のとおりである。

- i こう配区間等でレールがふく進し、遊間が縮小しやすい箇所
- ii 切り取り区間等で温度の上昇しやすい箇所
- iii 急曲線およびその出入口、反向曲線の中間直線などレール軸力が外方に作用しやすい箇所
- iv 構造物の前後、噴泥箇所等で浮まくらぎの生じやすい箇所
- v レール交換後初めて夏を迎える箇所

## 5 レール管理

### 5-1 レール探傷

レール検査には、大別してレール一般検査とレール細密検査がある。

レール一般検査とはレールの損傷、減耗、腐食等の状態について年1回以上検査を行い、この結果をレール交換計画に反映させるものである。

レール細密検査とは、主としてレール継目部や溶接部のきずの有無、およびその程度について検査するもので、この検査の超音波探傷器が用いられている。

本線レールの細密検査は線級別に表-13に示す検査回数を下回らない頻度で実施されている。表中の特定区間とは腐食環境の悪いトンネル、電食のはなはだしい区間および疲労のため損傷の多発する恐れのある区間を指しており、こういった区間では

検査回数が増やされている。また、新品レールを敷設した区間では敷設後3年間に限り、検査回数を年1回に減らすことができるようになっている。

表-13 レール検査回数

検査回数			検査回数		
線級別	一般区間	特定区間	線級別	一般区間	特定区間
1級線区	年2回	年3回	3級線区	年1回	年2回
2級線区	年2回	年2回	4級線区	年1回	年1回

## 5-2 レール表面管理

破端損傷防止のためにもレール表面管理が必要である。破端はレール損傷総件数の50%を占めており、その原因は、

- ・トンネル内によくみられる腐食による疲れ破壊
- ・レール切断面や継目ボルト穴に面取りを施さなかったための応力集中
- ・継目板ボルトのゆるみなどによる継目ボルト穴付近の過大応力発生
- ・噴泥、継目板のガタ、著しい継目落ちの発生区間など、悪い応力条件の持続等である。

したがって、これらの状況を除去する方策を実施すれば破端の発生をかなり防止することができるが、このうちレール表面の管理によるものについては以下述べる。

### (1) 腐食環境

レール鋼は、その材料特性として耐食性能が一般構造用鋼材に比べ劣っている。したがって、敷設に先立ちレール端腹部を亜鉛などの金属被覆もしくはジンクリッチ塗装を施し、さらに防錆油を十分に含ませた布片を間に挿入するなどの処理(ZOF)を行うと、腐食は著しく抑制されて、レール更換周期の延伸を図ることができる。その際の浸油布は適当な周期で油の補給や更換が必要で、これを行わないと湿润化し、浸油布のない場合よりもさらに悪い結果を招く。単に継目板範囲の内面部分に、グリスなどを塗布しておいても相当な防錆効果を示し、腐食減耗や破端の防止に有効である。

### (2) レール切断面および継目ボルト穴の管理

現場でレールを切断し、継目穴をあける場合、継目穴周辺の熱処理、ショットピーニング、プレス加工などの冷間塑性加工による強化検討についてはいくつかの研究があるが、一般に採用されているのは皿もみ面取りである。これは、レール切断面全周のうち頭部から上首部までは2mm以上、その他の部分は1mm以上、継目穴部については、全周2mm以上の面取りを施して応力集中をさけるものである。特に継目穴

の面取りのため、図-13に示すような器具も開発使用されている。

新品レールについては、頭部縁端で腹部上端丸味部を含む頭部全周に1.5mm、継目穴で全周に1.5mmそれぞれ面取りが施されることになっているので問題ない。また穴あけに使用するドリルの管理も大切で、特に刃先が摩滅すると切削能力が低下し、穴あけに時間を要するばかりでなく、無理をすると穴の内面表面が局部加熱され、この部分が急冷効果の組織変化を起こしてもろくなる。こうなると損傷発生の原因になりやすいので十分な注意が必要である。

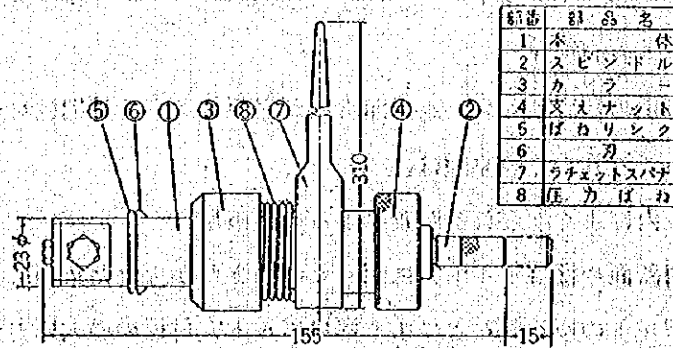


図-13 レール孔面取り器