

駐車場のレイアウト

福田 有・小沢 正典

1. はじめに

駐車場には普通、地面に線が引かれ、その区画のおおのに自動車を駐車させるようになっている。これは、秩序正しい配置によって、駐車場内の安全を守るとともに、駐車場の限られたスペースを有効に使いたいという目的によるものである。しかし現実には合理的というよりは感覚的な判断による線引きが行なわれており、そのためスペース利用の有効性を欠く場合も見うけられる。

本稿の研究は、駐車時における自動車の運動の軌跡を調べ、これを図上で積み重ねることによって、実施可能なレイアウトの作成を可能にするものである。

用地の大きさや形状は多様であり、これらを数式で表現して数計画法によって最適なレイアウトを求めることは、実用上の点から困難であると考えてこれを避け、レイアウトの作成は図上での試行錯誤から求めることにした。さらに、これを計算機のディスプレイによって行なうことが望ましいのではあるが、費用も要することなので需要を待って今後の課題とすることにした。

本研究は、現実の駐車場の合理的な線引き法を問われたことに端を発するものであり、本研究の結果、現状では駐車台数が34台のところを、36台とする新しいレイアウトを見いだすことに成功し

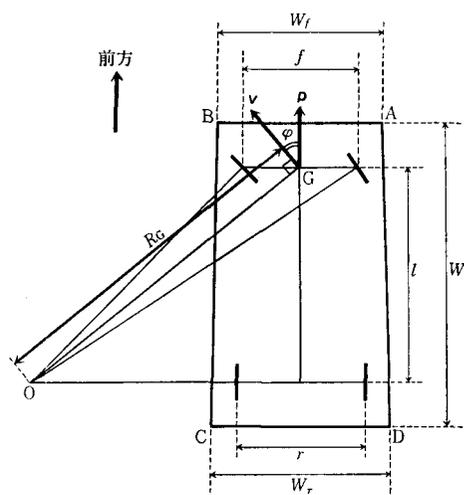


図1 模式化された自動車

た。一般的な応用の可能性があるものと考えて、ここに発表する次第である。

2. 駐車時における自動車の運動

本節では、自動車の運動を微分方程式によって記述し、その軌跡を平面上に設定した斜交座標によって示す。斜交軸を用いるのは、駐車場内の道路部分の方向と駐車方向を座標軸としてとりたいという理由にもとづくものである。

(a) 自動車の位置と方向

図1のように、自動車の平面的形状を模式化して、諸元を表わす記号を定める。表1に記号の意味の一覧表を与える。

これらのうちで、最も重要なのは自動車に固定

ふくだ まこと, おざわ まさのり
慶応義塾大学 理工学部 横浜市港北区日吉3-14-1

表 1 記号一覧

W_f	前車幅	f	フロントトレッド
W_r	後車幅	r	リアトレッド
W_l	側車幅 (車長)	l	ホイールベース
G	車体上の基準点	φ	ハンドル角度
p	車体の方向ベクトル	v	進行方向と速度
O	回転の中心	v	速さ ($= \ v\ $)
R_G	基準点 G の回転半径	A-D	車体の四隅

された基準点 G および車体の方向を示すベクトル p である。ある時刻 t における自動車のおかれている位置は、この 2 つの要素で完全に定まるからである。車幅などが定まっているならば、自動車の四隅の点 A, B, C, D も G と p から計算によって求めることができる。

ハンドルを回して、自動車を前進させれば自動車は後車軸の延長線上の一点 O を回転の中心として回転し、方向を変える。つまり、多くの自動車では、左右の前輪軸の各延長線が、常に後車軸の延長線上の 1 点で交わり、左右の前輪が異なる角度で曲がるようになっている。この方式を、アッカーマン・ジャントウ方式という。

さて、自動車は点 O を中心に回転するから O と基準点 G を結ぶ直線と直交し、自動車の速度をその大きさとするベクトル v をとれば、これが自動車の進行方向および速度を表わすベクトルとなる。ベクトル v と車体の方向を示すベクトル p のなす角度 φ は、ハンドルの操作によって定まるものであるから、ハンドル角度と呼ぶことにする。

(b) 斜交座標上での運動方程式

上のような自動車を図 2 に示すような斜交座標を設定した平面上におく。いま自動車が一定速度 $v = \|v\|$ で進むものとするれば、基準点 G の斜交座標 (x, y) に関して次の運動方程式が成立する。ここで、座標軸同士のなす角を θ 、自動車の進む方向 v と y 軸がなす角を θ とおく。

$$\frac{dx}{dt} = v \cos(\theta - \theta) - \frac{dy}{dt} \cos \theta$$

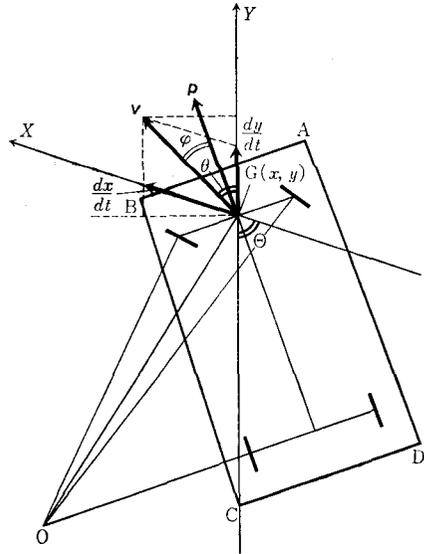


図 2 斜交座標軸での自動車運動

$$\frac{dy}{dt} = v \cos \theta - \frac{dx}{dt} \cos \theta$$

これらを整理すれば、自動車の速度ベクトル v の x, y 成分 v_x, v_y に関して、

$$v_x = \frac{dx}{dt} = v \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = v \cdot (\cos \theta - \sin \theta \cot \theta)$$

また、車体の向きに関しては、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v \sin \theta}{\varphi}$$

という微分方程式が成立する。

さまざまなハンドル操作 φ に対して、自動車が作る軌跡は、これらの微分方程式を解いて求められる。図 3 に 2 ~ 3 の例を示す。

(c) ハンドル操作

いま、図 4 に示すように、進行方向の角度 θ 、仕切り幅 X 、道路幅 Y 、間口 Z 、駐車帯幅 H に設定された区画に自動車を駐車する場合を考えよう。このとき、運転手はどのような速度を選び、どのようなハンドル操作をするのであろうか？ 詳しく見れば、人により、時により千差万別であ

る。しかし、種々検討の結果、まずハンドル角度 φ を一定に決め、それから一定の速度 $v=|v|$ で曲がり、駐車角度 θ だけ曲がり終わったら、区画内に車が入りきるまで直進して駐車するものと仮定してさしつかえないという結論に達した。根拠の主要は次のとおりである。

まず、速度についていえば、われわれにとって問題になるのは軌跡の形状であって、駐車するときの速度ではない。また、駐車方法が自動車の速度を制限することがあるとしても、どのみち駐車時には大概の人がゆっくりと慎重に運転する。これらのことから、今後、駐車するときの速度は一定として考えることにする。

次に、ハンドル操作であるが、まずわれわれは駐車角度 θ だけ曲がり終わるまでの自動車の運動について、図5に示すようなタイプのものを想定してこれにもとづいて検討した。考えられるハン

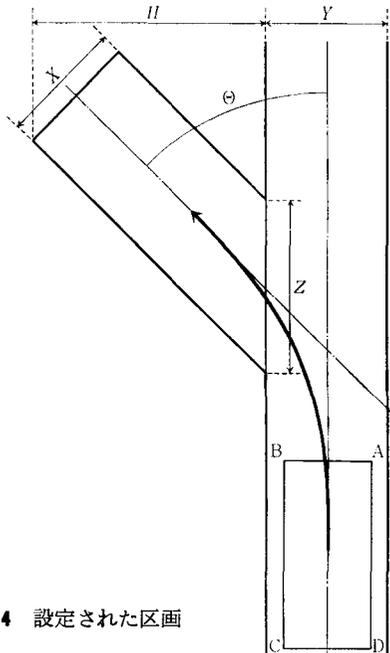


図4 設定された区画

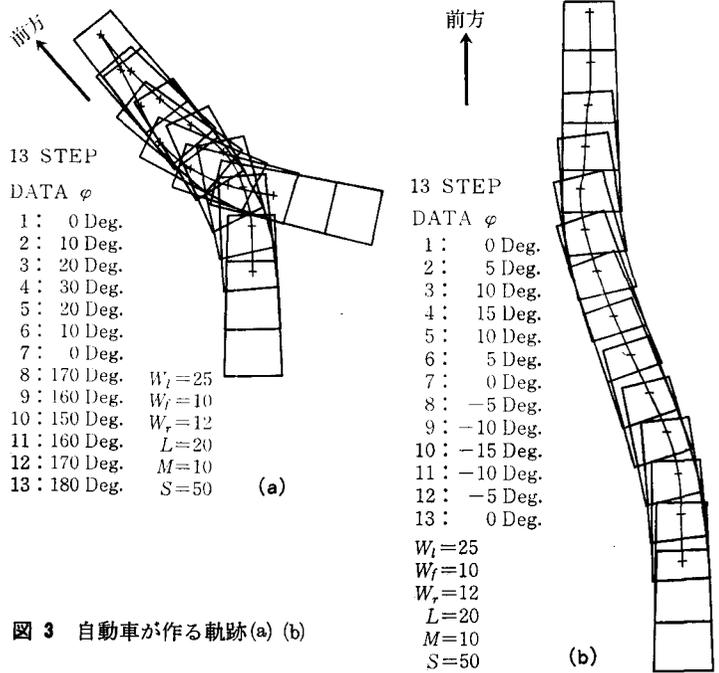


図3 自動車を作る軌跡(a) (b)

ドル操作は基本的にはこれらのパターンのどれかにあてはまるし、これらと若干の違いがあっても、軌跡を大きく変化させることはない。これは、軌跡がハンドル操作を微分方程式(1)(2)に代入してこれを“積分”して得られることによる。

これらの3つの型のハンドル操作を微分方程式に代入して軌跡を調べた結果、次のようなことがわかった。

まず、(i)三角型は自動車の実際の軌跡と比較して不自然である。ハンドルを切れる角度には上限がある。そのため、(i)では曲がりはじめ、および

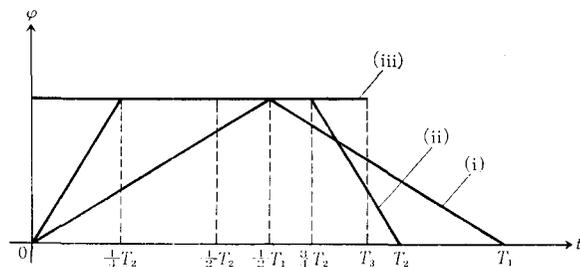


図5 曲がる時のハンドル操作
(i) 三角型, (ii) 台形型, (iii) 矩形型

曲がり終わりでのハンドル角度が小さい時間が長いので、駐車区画のずいぶん手前から曲がりはじめなければならない。また、曲がり終わったときに駐車区画内に車を入れるためには、かなり広い道路幅を必要とする。多くの運転者は、車が曲るときに小さいハンドル操作を長時間行なうことはせず、もっと短時間にハンドルを動かすであろう。結果として、三角型は行なわないことになる。

(ii)台形型と(iii)矩形型の軌跡はほとんど変わらない。ハンドルを回転させるのに有限の時間を要することを考えれば、台形型のほうが妥当のようにも思われるが、駐車時における自動車の速度がゆっくりであることを考えれば、実質上の大差はない。矩形型であれば、軌跡の形も円弧として解析的に求められるから、詳しい議論が容易である。これらのことから、ハンドル操作は矩形型で行なわれるものと想定する。

ついでに、矩形型のハンドル操作に対応する自動車の軌跡の式の形で与えておこう。いま、時刻 $t=0$ においてハンドルの角度を 0 から φ に変えて一定に保つと、時刻 t において自動車の進行方向と y 軸がなす角は、

$$\theta = \frac{v \sin \varphi}{l} t + \varphi$$

また、斜交軸上の位置は、

$$x(t) = -\frac{l}{\sin \theta \sin \varphi} \left\{ \cos \left(\frac{v \sin \varphi}{l} t + \varphi \right) - \cos \varphi \right\}$$

$$y(t) = \frac{l}{\sin \varphi} \left[\sin \left(\frac{v \sin \varphi}{l} t + \varphi \right) - \sin(\theta + \varphi) \right. \\ \left. + \cot \theta \left\{ \cos \left(\frac{v \sin \varphi}{l} t + \varphi \right) - \cos(\theta + \varphi) \right\} \right]$$

で与えられる。そして時刻

$$T = \frac{l\theta}{v \sin \varphi}$$

において $y(T) = 0$ となり、曲がり終わる。

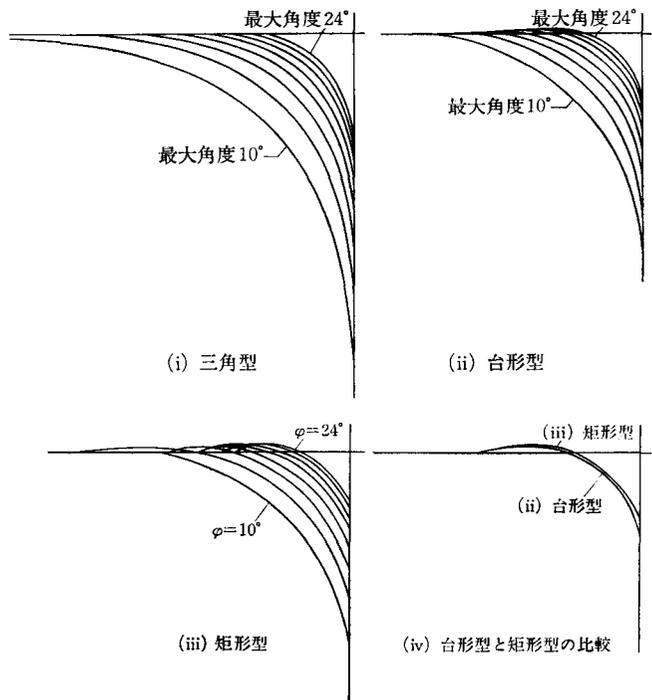


図8 各型のハンドル操作に対応する自動車の軌跡(i)(ii)(iii)(iv)

ここで、矩形型のハンドル操作で駐車角度 θ だけ曲がり終わった後の自動車の運動について考えてみた。曲がり終わったときに、すでに自動車が区画に入っていれば、そこで停止すればよいのであるから問題はない。ところが、駐車角度 θ が小さくハンドル角度 φ が大きい場合には、図7に示すように、駐車角度 θ だけが曲がったときに、車の後側が道路側にはみ出してしまって、曲がるだけの運転操作ではどうしても区画内に自動車を入れることができないという問題が生ずる。そこで、このようなときは、曲がり終わった後に車を直進させて区画に入れるものとする。

(d) 自動車の長さや幅の影響

以上に求められたのは、自動車の基準点 G の軌跡である。しかし、自動車には大きさがあり、そのどの部分が他と接触しても事故になるから、自動車を作る“幅をもった軌跡”を把握しておかなければならない。

いま、自動車が左へ曲がろうとするとき、諸元を図8のように定める。ここで、簡単のため一般

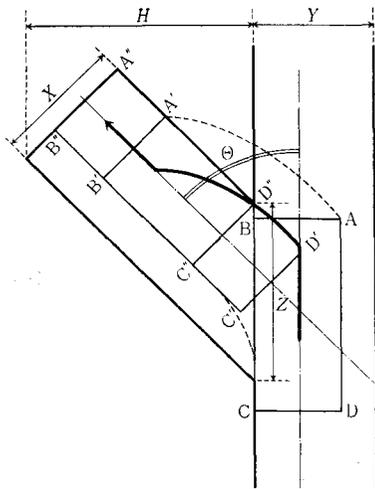


図 7 曲がるだけでは区画に入れることのできない例

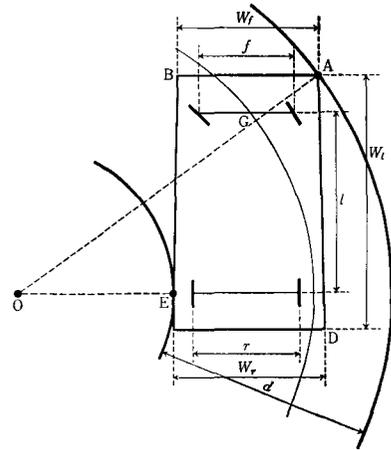


図 8 幅をもった自動車の軌跡

の車に多く見られるような $W_f = W_r$ (前と後の車幅がほぼ等しい) という仮定を与える。ここで、車体を作る軌跡のへりにくるのは左後輪の横 E と右前端 A であるから、軌跡の幅は $d = \overline{AO} - \overline{EO}$ である。このとき、この幅 d について次のような近似式が与えられる。

$$d = \overline{AO} - \overline{EO}$$

$$\doteq \left(\sqrt{\left(\frac{l}{\tan \varphi} + \frac{W_f}{2} \right)^2 + \left(\frac{W_l + l}{2} \right)^2} - \left(\frac{l}{\tan \varphi} - \frac{\max(W_f, W_r)}{2} \right) \right)$$

この近似式における精度について、図9のような作図によって確かめた結果、その誤差は表2のように実用上問題にならないことがわかった。

駐車問題への応用に際しては、幅 d をもつリン

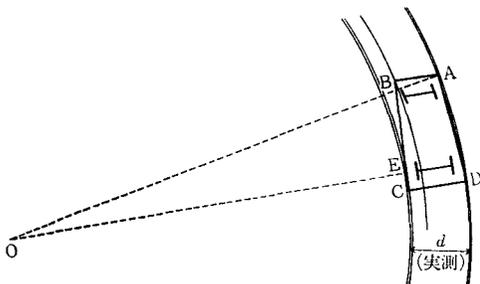


図 9 実測のための作図

グの切断部分の長さなどが問題となるが (図10参照)、多岐にわたるので、個々の応用に即してそのつど考えることにする。

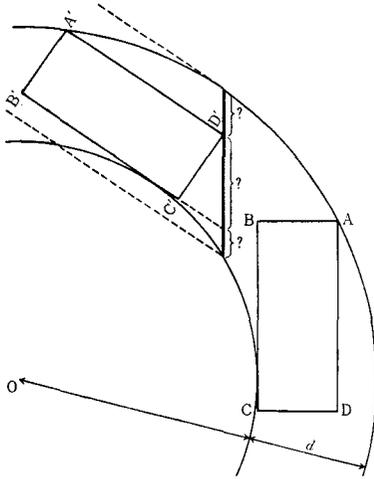
3. レイアウトにおける基本的モデル

現実の駐車場に線引きをして区画を定めるには、利用できる土地の形、そのうち車の出入口として利用可能な部分、その他さまざまな条件を考慮しなければならない。これらについては、個々の事例において現実的に対処せざるをえないが、そのような条件を考慮しなくてもよい平坦な土地に、図11のように道路を設けて、これに角度 θ で駐車区画を設けるときに、いかなる駐車角度と道路幅が有利になるのかを調べておこう。これは、現実の事例を研究する際にも、基本的知識として参考になる。なお、話を具体的にするために、ここでは車幅 $W_f = W_r = 1.50\text{m}$ 、車長 $W_l = 3.70\text{m}$ 、

表 2 実測結果

φ (deg.)	W_f	W_r	W_l	l	dの値 (単位:m)	
					計算値	実測値
(1) 35	1.44	1.45	3.50	2.11	2.38	2.37
(2) 25	1.48	1.50	3.80	2.55	2.25	2.22
(3) 20	1.52	1.52	4.04	2.35	2.19	2.17

図 10 リンクの切断部分



ホイールベース $l=2.50\text{m}$ の寸法の自動車を考えることにする。ちなみに、現実の自動車の2~3の例を表3に示した。

いま、自動車が図11のように左折して駐車区画に進入して、自動車の右側を区画にそろえて駐車するものとしよう。駐車時のハンドル操作は、2節で述べたように、矩形型の操作で曲がった後、区画に入るまで直進する操作とする。この際注意すべきことは、隣接して駐車する車両の左右の後端にぶつからないようにすることと、仕切り幅 X に、扉を開けて人の乗降ができるだけの最低限の余裕をとることである。いくつかの車における実測結果から、車の片側に 50cm の余裕があればギリギリ乗降が可能であると考えて、曲がる角度 θ を与えたときの可能な最小限の諸元を表にしたものが表4である。

一方において、土地利用の効率という点を考えると、この方法で線引きをした場合に、1台の自動車のために用意されるべき土地の面積が問題になる。しかし、1台の自動車が用いる土地は、道路部分もあるし、扉の開閉には隣接の区画も使うことになる、だから必ずしも明確に定義できるわけではないが、1つの目安として、図11の斜線部分の面積を自動車1台当りの所要面積 S と定めてこれを評価基準とする。この値は、

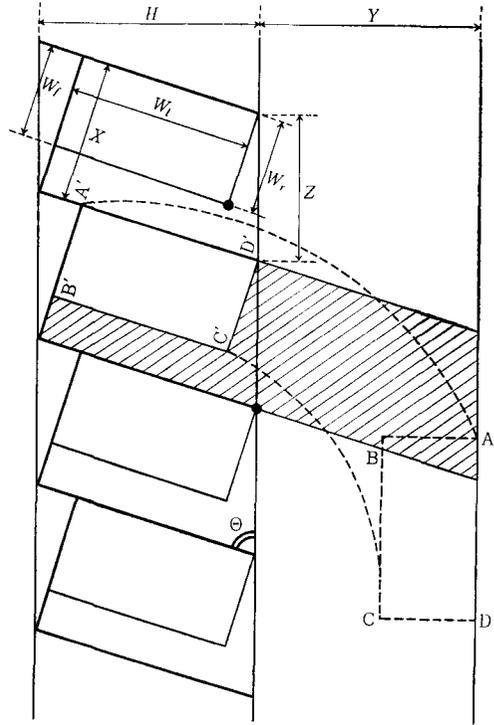


図 11 区画の設定の仕方

表 3 自動車の寸法

	W_l	W_t	W_r	l
(1)	1.44	1.45	3.50	2.11
(2)	1.48	1.50	3.80	2.55
(3)	1.52	1.52	4.04	2.35
本稿での標準車体(a)	1.50	1.50	3.70	2.50
本稿での標準車体(b)	2.00	2.00	4.50	2.50

$$S = W_l \left(X - \frac{W_l + W_r}{2} \right) + \frac{X^2}{2 \tan \theta} + \frac{XY}{\sin \theta}$$

という式で与えられる。

さて、いろいろな駐車角度や道路幅に対して、表をもとにこの面積を計算比較したものが図12のグラフである。

これを見ると、所要面積は駐車角度 θ が $45^\circ \sim 75^\circ$ のあたりで小さくなっている。ただ、曲線の一部で段差ができてるのは注目に値する。この段差ができるのは、次のような理由による。

所要面積 S の式は、仕切り幅 X や道路幅 Y の関数として見れば増加関数であり、駐車角度 θ の

表 4 曲がる角度 θ に対する区画の大きさ

$\theta=15^\circ$				$\theta=30^\circ$			
$\varphi(r)$	$X(m)$	$Z(m)$	$Y(m)$	$\varphi(r)$	$X(m)$	$Z(m)$	$Y(m)$
5	2.44	9.46	1.50	5	2.00	4.00	3.62
10	2.00	7.73	1.50	10	2.31	4.64	1.70
15	2.00	7.73	1.50	15	2.64	5.30	1.50
20	2.00	7.73	1.50	20	2.31	4.64	1.50
25	2.00	7.73	1.50	25	2.11	4.24	1.50
30	2.00	7.73	1.50	30	2.00	4.00	1.50
35	2.00	7.73	1.50	35	2.00	4.00	1.50

$\theta=45^\circ$				$\theta=60^\circ$			
$\varphi(r)$	$X(m)$	$Z(m)$	$Y(m)$	$\varphi(r)$	$X(m)$	$Z(m)$	$Y(m)$
5	2.00	2.83	8.16	5	2.00	2.31	14.14
10	2.00	2.83	3.94	10	2.00	2.31	6.94
15	2.00	2.83	2.52	15	2.00	2.31	4.52
20	2.15	3.05	1.80	20	2.08	2.41	3.28
25	2.85	4.03	1.50	25	2.20	2.55	2.53
30	2.54	3.60	1.50	30	2.32	2.68	2.02
35	2.32	3.29	1.50	35	2.43	2.81	1.64

$\theta=75^\circ$				$\theta=90^\circ$			
$\varphi(r)$	$X(m)$	$Z(m)$	$Y(m)$	$\varphi(r)$	$X(m)$	$Z(m)$	$Y(m)$
5	2.00	2.07	21.15	5	2.00	2.00	28.72
10	2.00	2.07	10.48	10	2.00	2.00	14.32
15	2.00	2.07	6.89	15	2.00	2.00	9.48
20	2.10	2.18	5.06	20	2.10	2.10	7.01
25	2.24	2.32	3.94	25	2.24	2.24	5.51
30	2.37	2.45	3.18	30	2.37	2.37	4.48
35	2.49	2.58	2.62	35	2.49	2.49	3.72

$W_f = W_r = 1.50m, W_l = 3.70m, l = 2.50m$

関数として見れば減少関数である。しかし、 θ が変化すれば、車体の大きさの影響で仕切り幅 X 、道路幅 Y を変えなければならない。細かく見てみよう。

まず、道路幅 Y に注目して考える。図13の(i)や(ii)の場合のように、駐車角度が小さいため最終的には直進して区画に自動車を入れる場合には、道路幅 Y の値は車幅と同じで十分である。しかし、駐車角度 θ がある一定値を越えると、以後 θ の増加につれて道路幅を少しずつ大きくとる必要が出てくる。

次に、仕切り幅 X に注目して考える。図13に示すように、車の右および左に必要な長さをそれぞれ Z_1, Z_2 とすると、仕切り幅 X の値はこの Z_1 と

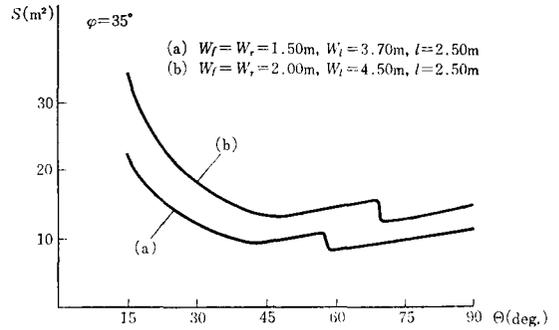


図 12 駐車角度と動車 1 台当りの所要面積

Z_2 の値に依存して、

$$X = W_r + \max(Z_1, Z_2)$$

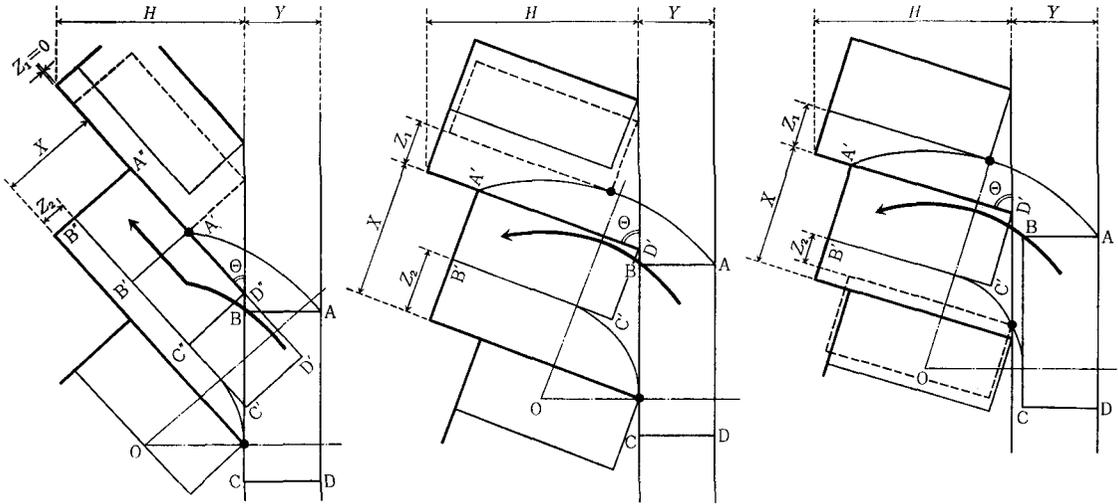
という式で与えられる。ここで、駐車角度 θ に対して、 Z_1 および Z_2 の値をグラフに示すと、図14のようになる。

車の右側の Z_1 は、駐車角度 θ が小さいときには図13(i)に示すようにゼロであり、 θ がある一定値より大きくなると立ち上がり、やがて一定の値に落ち着く。

一方、左側の Z_2 は、駐車角度 θ の関数として見るとき、ある角度を中心として両側に向かって減少するような、鋭い山型をなしている。この中心をなす角度は、駐車に際しての直進部分が生ずる臨界角である(図13(ii)参照)。

したがって、これらの Z_1 および Z_2 の最大値の関数である仕切り幅 X は、図14のグラフのような関数になる。仕切り幅 X および道路幅 Y の以上のような性質から、結果として所要面積 S のグラフが図12のように、中央部に段差と最小点をもつグラフになるのである。

さて、図12の(a)の曲線を見ると、駐車角度 θ が 58.5° 、道路幅 Y が $1.55m$ の場合が、所要面積を最小にできることがわかる。これは、車幅 $W_f = W_r = 1.50m$ 、車長 $W_l = 3.70m$ の車に対応する最小限ギリギリの線引きであるから、安全のためには、車の大きさを $20 \sim 30\%$ ぐらい増加させた、車幅 $W_f = W_r = 2.00m$ 、車長 $W_l = 4.50m$ の場合を調べてみる必要がある。図12の(b)の曲線を見れば、



(i) 駐車角度が小さい場合 (ii) 直進して進入せず、道路幅が最小の場合 (iii) 駐車角度が大きい場合

図 13 自動車と区画の位置関係

最適な駐車角度はこれによって 10° 程度変化することがわかるであろう。

4. 実際例

以上のような考察を基礎として、最良の線引き法を求めることを依頼された実際の土地についてレイアウトを試みた。

与えられた土地の形状およびその使用条件は、

図15に示すとおりである。

- (i) 土地は、縦47.10m、横19.20mの長方形の領域とする。
- (ii) 駐車場内に他の施設、たとえば料金徴収所等の必要はない。
- (iii) 場内の道路は一方通行とする。
- (iv) 出入口は、図15の辺RSに設置する。
- (v) 駐車に用いる車は、車幅 $W_f = W_r = 2.00\text{m}$

車長 $W_l = 4.50\text{m}$ 、ホイールベース $l = 2.50\text{m}$ の自動車を考える。(ちなみに、最近の車においては、車幅 $W_f = 1.50\text{m}$ 、車長 $W_l = 3.70\text{m}$ ぐらいの車が多いので、軌跡に20~30%の余裕をとったことになる)

そこで、区画の設定パターンとして、図16(a)(b)のような2通りのものを考えてみた。(a)は縦3列、(b)は縦4列に配置する方法である。駐車角度は図12を参照して、それぞれ最適なものを

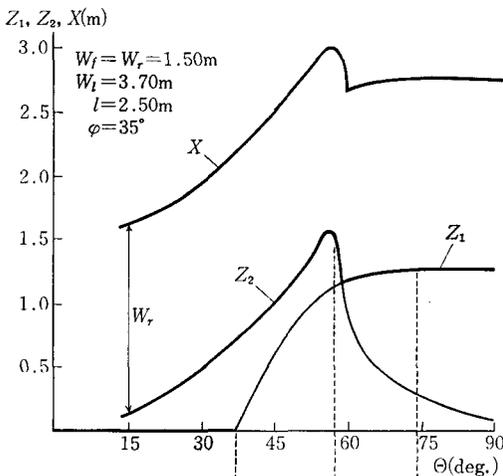


図13 (i) 図13 (ii) 図13 (iii)

図 14 車の左右に必要な大きさ

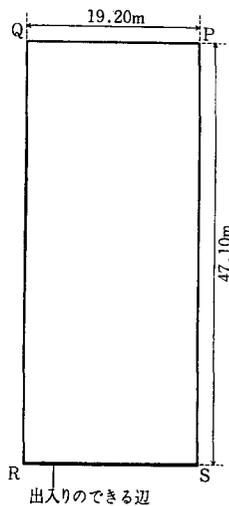


図 15 土地の形状

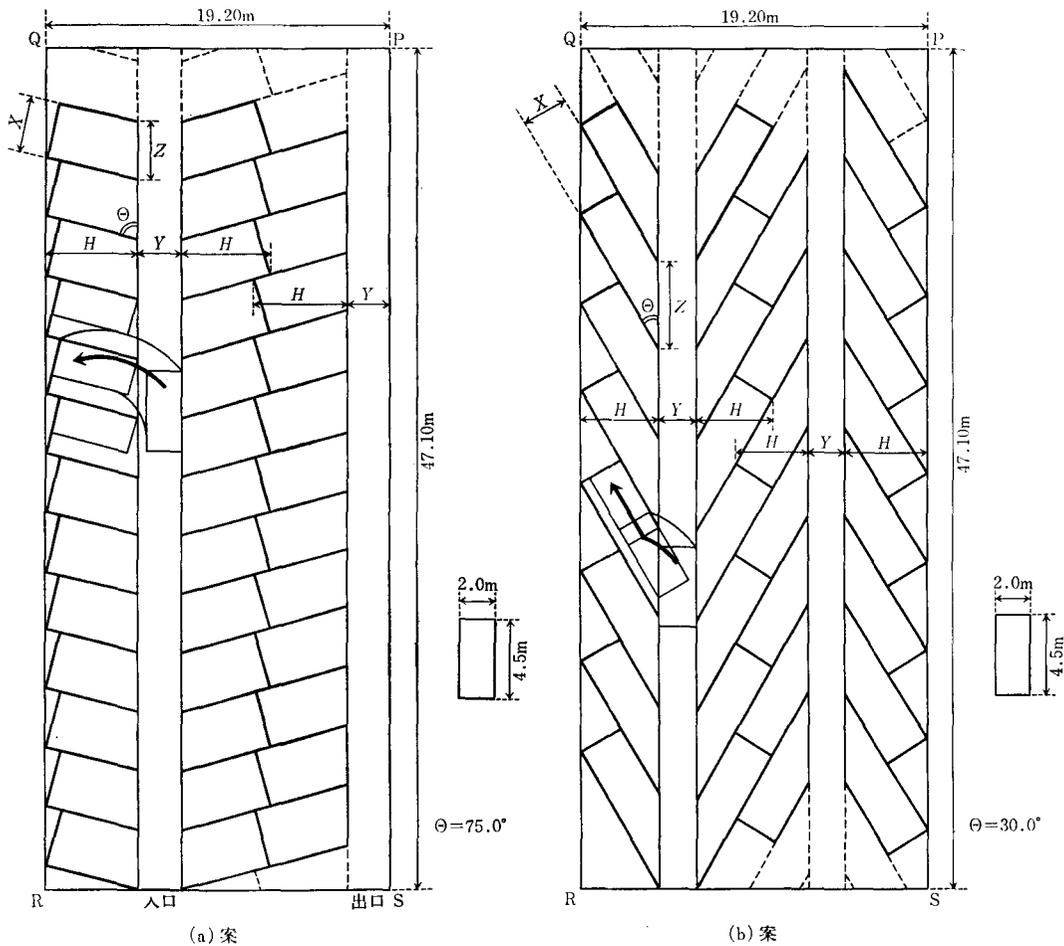


図 16 区画設定のパターン

図上で調べた。

しかし、図でわかるとおり、(a)(b)の2者を比較すると、(a)のほうが多くの車を収容できるので、

(a)のパターンに絞って考えることにする。

さて、このパターンに対して問題となるのは、長方形のへりに近い部分、特に図15の点Pの付近の線引きである。自動車が道路を曲がる際や駐車場への出入りの際に、軌跡が場外にはみ出さないように配慮しなければならない。そのためには、厳密な作図や数値計算によって調べたり、あるいは、実際の車を用いて実測したりする方法があるが、ここでは、簡単に調べるために、図17のような、幅をもった軌跡をもとにして作った定規をあてて調べることを試みた。

この定規を実際に作って使用してみ

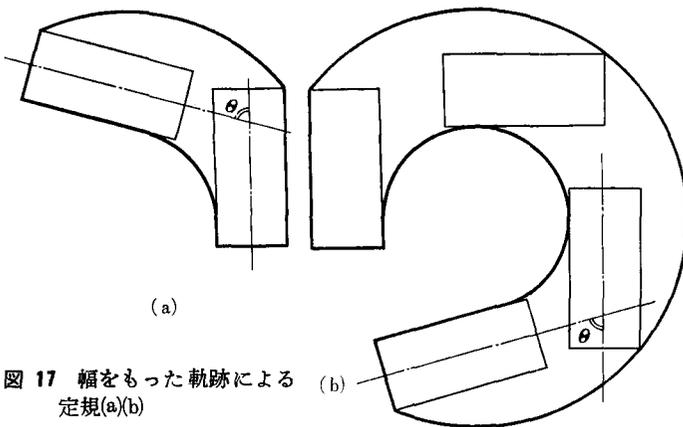


図 17 幅をもった軌跡による定規(a)(b)

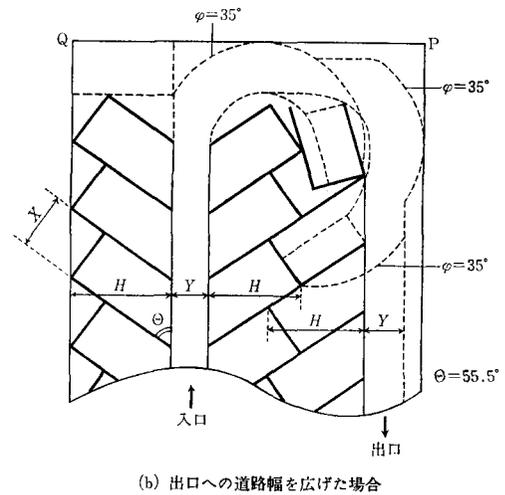
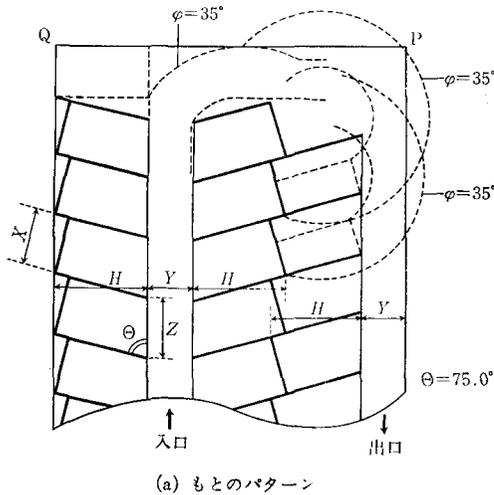
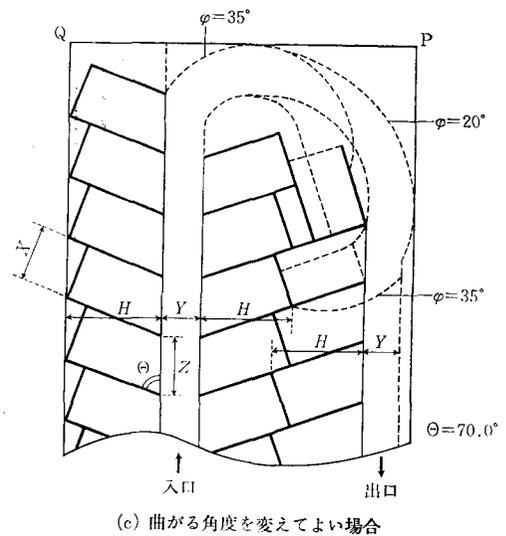


図 18 最終レイアウト

たところ、図18(a)のような、単にパターンの区画の一部をとり去っただけのレイアウトでは、明らかに軌跡が場外にはみ出してしまっていて駐車できないことがわかる。そこで、たとえば図18(b)のような、出口に通じる側の道路幅を広げたレイアウトを考える。こうすると、軌跡は場外にはみ出さず駐車が可能となる。曲がるときには常に決まった角度で曲がるという制約をなくせば、図18(c)のように、出口に通じる通路幅をやや狭めることができ、若干収容台数を増やすことができる。



5. おわりに

以上のようにして合理的な線引きを行なうことによって、限られたスペースを有効利用することが可能となる。4節では、制約条件が与えられた下でのレイアウトを扱ったが、これをもとにして逆に、レイアウトがうまくいくような条件とはどんなものかを考えることができよう。そうすると駐車場の最適なレイアウトを、すでに用地取得の段階から入念に検討するといった、柔軟な応用が可能となる。

また、きわめて大きな駐車場ならば、駐車区画の仕切り幅や道路幅をほんの少し変えるだけで、

駐車可能な台数が大きく変動する。そこで、あと1台車を詰め込むことによって、どの程度の不都合が生じるか、どのくらい安全性が低下するかを調べておくといよいであろう。本稿では1台当りの所要面積を最小にすることを中心に考えたが、土地全体に何台駐車できるかを直接考えるのも、レイアウトの1つの方法であろう。

参考文献

- [1] 下田茂著、「自動車工学」, 共立出版, 1975
- [2] 樋口健治著、「自動車工学」, 朝倉書店, 1980