避航動作を考慮した場合の航路交差部の 交通容量についての一考察

平 野 新太郎*

A Consideration on the Traffic Capacity at the Crossing of a Sea Route
When Collision-avoiding Maneuvers Are Taken into Account

Shintaro HIRANO

Abstract

When a vessel tries to cross a route, she seeks a gap in the queue of the vessels in the main route by means of collision-avoiding maneuver. As the result of this operation, that vessel turns her position to the right. In the narrow sea, the magnitude of this shift (T_d) is the most important factor in determining the traffic capacity at the crossing. A certain equation can be established between T_d and T_w , i.e., the relative waiting time, which is represented by the same formula as is used for the waiting time in crossing a road on land. Therefore, in case T_w is given, T_d can be obtained.

However, when the traffic is congested, the vessels in the main route form a number of queues and also the collision-avoiding maneuver of the crossing vessel varies according to the mutual relation among the vessels in the several queues formed in the main route. Therefore, in such a case, it is difficult to obtain T_w by the theoretical formula.

In this paper, the solution is sought by means of Monte Carlo Method; the probability curve of T_w is presented; and the nature of this solution is discussed. Besides, T_d is calculated from the result of this solution; the value thus obtained is ascertained to be very close to the value actually observed at the crossing; and examinations are made on the traffic capacity at this crossing.

1. ま え が き

陸上の道路では、横断すべき道路に到達した歩行者は、その道路を通交する車両群の中に横断可能な時間的なすき間を見出したときその道路を横断し、もしそのようなすき間がないときはすき間がやってくるまで待つ。このことは多くの人により研究され、待ち時間の分布、平均値などの式として与えられている。一方船舶が航路交差部を横断する場合には、避航動作により優先航路の通航船のすき間を積極的にとらえて横断する。それゆえ船舶の横断動作の解析は陸上の場合に比してより複雑となることが予想され、かつ、停止しての待ちは存在しないけれども、筆者はさきに⁽⁷⁾、優先航路（以下主航路という）の船Aと、これを避航しつつ横断する従航路の船Bにおいて、避航しなかったとしたときのBとAの時間関係と、避航したときのBとAの時間関係の変化分を待ち時間と考え、陸上における待ち時間の式がそのまま適用されることを見出し、これを特に「相対待ち時間」と名付け、さらに、交差にあたっての船舶の時間閉塞領域 T が 500～1,000 トンのいわゆる 小型船については 前方1.5分、後方1.0分、計2.5分であることを示したが（1,000～3,000トンでは3.0分）、今回は 交差容量を求めるためこの結果をもとにして、多数船舶航行時の待ち時間について考察を加え、横断時の航跡の時間偏位量 T_d を求めた。そしてその検証として宇高東航路の船舶の主航路横断時の T_d の分布と比較してみたが、良好な近似が得られたので報告する。

* 海上保安大学校（呉市若葉町1—1）

2. 変位時間 Td について

図1は主航路を従航路の船Bが避航しつつ横断する状況を示す。図示の如く、避航の結果船舶は本来のコースから偏位する。避航動作の可能な海域は有限であるから、この偏位量と通航船舶量との関係を知ることが必要となる。ところで避航しなかったとすればBは主航路の船Aの前方 t_a 分のところを通過することになるが、避航の結果、Aの (t_b+t_c) 分あとを通過している。すなわちこのときの相対待ち時間、つまり避航しなかったときにくらべてのB船のAに対するおくれ時間の増加分 Tw は、

$$Tw = t_a + t_b + t_c$$

となる。ここに

$$Td = t_a + t_b$$

$$t_c = t_2 - t_1$$

ただし Td は偏位時間であって、単位を分とすれば、これに1分あたりの速度 v (12ノット/hとすれば370 m/分) をかければ偏位量となる。すなわち偏位時間とは偏位量を時間で表わしたものにほかならない。さてこれらの式より

$$Td = Tw - (t_2 - t_1)$$

すなわち Tw と $t_2 - t_1$ が与えられれば Td は定まることになる。

ところで Tw の式としてこれまで用いたのは主航路の船が1列の場合についてである。通常の通航状態では通航量が比較的少ないので1列とみなして計算してもさしつかえないが、交差容量を対象とするためには、主航路の極限に近い状態での通航状況、及び、そのような状態のときの横断船の動作を考慮した Tw を用いる必要がある。また t_2 は、船の操縦性能、操船方法のちがいなどにより異なってくるが、ここでは一応標準的な曲線を与えて、これを用いることにする。以下順を追ってのべる。

3. 時空平面による表現

解析の便宜上、以下にのべるような特別な時空平面を考える。これは運動体の位置関係を明らかにすることを目的としたものであるため、運動体に対しては2次元の動きを許容する。それゆえ通常の時空平面とは使い方が多少異なるので若干の説明を加える。これは第2図に示すように縦軸に時間、横軸に位置 x をとったものでこれだけならば通常の時空平面と何等異ならない。

いま D, D_1, D_2 の如く単位時間に2単位長だけ x 軸方向に移動する点 D を考えると、この点は D, D_1, D_2 の如き軌跡をえがく。さらに、 A, B, C の如く時空平面で静止している点は、実際の平面では単位時間に単位時間長ずつ上方に移動している点である。ところでいま、実際の平面では斜め上方に、単位時間ごとに $E, E_1, E_2, \dots$ と動いている点 E を考える。ただし E と E_1, E_1 と $E_2, \dots$ の縦距離は実際の縦距離 Δy を速度 v で割った時間換算距離である。これを時空平面で示すと、 $E, E_1, E_2, \dots$ なる軌跡が得られ

図1 Tw と Td の関係

図2 時空平面の記入法

る。ここに $\overline{E_1 E_1}$ は1単位時間長, $\overline{E_2 E_2}$ は2単位時間長, $\overline{E_3 E_3}$ は3単位時間長である。この場合 E_1 は時間座標軸では 7.6 の位置にあるが, 実際の時間は 8 なのでその数字を記入する。このように斜めまたは上下方向の移動を記入すると, そのままでは x 方向の移動点, または静止点の時空平面軌跡と区別できないので, 軌跡の各点にはすべて時間の数値を記入する。このような使いかたをした時空平面の特長は, 各時間々々における各点の位置関係が明確に表現されるということである (ただし縦方向は時間距離)。たとえば B と D の関係は時刻 4 においては (B, D) となり, 時刻 5 においては (B, D_1) となる。 E と F の関係は時刻 7 においては (E, F) であるが, 時刻 8 においては (E_1, F_1) となる。なお D 点は時刻 4 において 3 の位置に存在するが, 時刻 3 において 3 の位置に B 点より 1 単位時間距離だけ後方に存在すると考えてもよい。このような換算の手段は, 実平面の図形を時空平面にうつすとき便利である。

さてこの時空平面を用いて, 備讃瀬戸宇野, 高松間における, 東西方向に走る主航路の中の, 東航船, 及び, この主航路を横断する宇高西航路の各船舶について, もっとも交通の輻そうする午前 2 時の通航状況を示したのが第 3 図である。ところでこのような多数の船舶を時空平面で表現するときまず問題となるのは主航路各船の速力及び進路方向に多少の差異があることで, このため主航路各船の位置関係は次第に変化する。しかし必要なのは, 横断時の横断船と主航路各船との位置関係であって, 横断に必要な時間は 3 乃至 4 分であるから, この間は主航路各船の位置関係はほぼ一定とみてよい。また横断箇所も時間距離にして約 4 分の上下幅があるが, その中央を基準位置として使用すれば, その前後 ±2 分時間幅の間では, 主航路各船の位置関係は固定されているとみてよい。そこで, まずレーダ像の図面上に基準線 XY を, 横断船の航路分布のほぼ中央にあたる場所に, 主航路に対して直角に引く。つぎに時空平面をつくり, その時間軸の単位長は, 主航路の各船の平均速度 (m/分) とし, 1 分きざみで XY 線を水平に入れる。そして, それぞれの時間にレーダ像の画面上の XY 線上またはその前後で接近した位置に主航路の船があらわれたら, それらの関係位置を保ちつつ時空平面上の対応する時間の XY 線上またはその近辺に, 主航路の船を記入する。このようにして得られた時空平面上の主航路の各船間の関係は, その位置の時間軸で示される時間の前後数分の範囲内では正しい。

つぎにこの図に横断船を記入する。必要なのは横断部における主航路各船との位置関係であるから, 黒くぬりつぶしてあるところを基礎にして描いて行く。 $P_1 P P_2, Q_1' Q Q_2'$ は通常の平面における P 船及び Q 船の航跡であり, $P_1 P P_2, Q_1 Q Q_2$ は時空平面における P 船及び Q 船の軌跡である。 P 船の P_1 位置における主航路の XY 線付近の船舶は A, B, C

図3 通航船の実態例

図4 通航船の実態例

であって、この近辺の主航路の船舶と P_1 との位置関係は正しいが、 P_1 と F との位置関係はかなりずれているものと思われる。しかし P と F の関係、また P_2 と F の関係は正しい。さて P 船は F の 0.7 分後方を避航しつつ通過したのであるが、その状況は時空平面では明確に表現されている。また Q 船は G と H の間を割りこむ形で通過していることがわかる。

この図より明かな如く、混雑時には主航路の船は 2 列、3 列または 4 列にもなり（5 列になることもある）、横断する船は主航路内に入りこんで後、さらに後方避航、割りこみ、前方避航を行なって通過する。ところで割りこみ動作は前方避航と後方避航の組み合わせと考えられるので、結局、避航動作としては前方避航と後方避航の 2 種を考えればよいことになる。

なお第 4 図は、49.8.1. 1611~14 に主航路と宇高西航路の交差点で発生したものであるが、時空平面では A、B の 2 船が全く同じ軌跡を描いている特異な例である。この場合両船とも、 Q 船の後方 0.6 分、 R 船の前方 1.2 分のところを通過している。交差時刻が 1612 となっていて時間座標軸と約 1 分ずれているが、これは交差位置が基準位置より 300~400m ほど上方であったことをあらわしている。

4. 交差船列の時空面モデル

第 5 図は第 3 図に示した実際の状態を考慮して作成したモデルの時空平面の状況、及び、横断船の通常の空間における運動状況を示したもので、図の一番右側に示した 3 列の船列が上方に向かって一定の速度で進行する主航路の船舶をあらわしている。これらの船は前方に 1.5 分、後方に 1 分の閉塞領域をもつものとする。横断船は左から右に向かって進行してくる。横断船が発生した位置に通行可能なギャップがなければギャップを求めて下方に移動してくる。ギャップがあればそこから主航路に入りこむ。たとえば A の位置に発生した横断船は B まで下って、ここに僅かなギャップがあるので主航路に入りこむ。 A と B の間の時間距離が「相対待ち時間」 T_w である。時空平面のハッチングを施した部分は横断船の通航可能領域を示す。横断船が $B' C'$ 、 $B' D'$ 、 $B' E'$ の各線上を走れば、これに対応する通常平面における横断船の航跡はそれぞれ BC 、 BD 、 BE の如くなる（ただし 2 本の一点鎖線ではさまれた部分）。ただいまの場合主航路の船も横断船もすべて等速とする。このため航跡 BD は時空平面では（ -45° ）の傾きの直線 $B' D'$ となっているが、これより僅かに傾きの小さい $B' C'$ に対応する通常平面の航跡は大幅に上方に変針しているのに対し、 $B' D'$ より著しく傾きの大きい $B' E'$ に対する通常平面の航跡 BE の下方への変針度合はそれほど大きくないことに注意されたい。また $C' D'$ の大きさ、 $D' E'$ の大きさをどのように与えるかにより避航の強さを定めることができる。 KL 、 LM 、 NQ 、 PQ 、 RS は主航路の閉塞区間を示す。また $\times \times$ 印の列は主航路が一列となっていたときの状態を示す。 TU 、 UV 、 WX 、 YZ はこのときの主航路の閉塞区間を示す。3 列のときの方がギャップの発生量が多いことがわかる。しかしこれは避航動作を許容したからであって、避航動作がなければギャップの生じる位置などに若干の差ができるけれど

図5 モデルにおける横断状況

も全体としては1列の場合と全く同一となる。これは時空平面で各列の船を45°の角で第1列に投影することにより直ちに理解されよう。なおここでは、相対待ち時間を、第1列にはいりこむ時としている。この点についても注意しておく。

さて、前方避航、後方避航を行なう結果第2列、第3列の船舶の、第1列換算時間閉塞領域は第6図の $\overline{A_1A_2}$, $\overline{A_3A_4}$ の如く短くなる。したがってこのことだけを考えれば、複数レーンで、かつ各レーンごとに車頭間隔の異なる場合に相当し理論解も可能であるが、ただいまの場合各船が独立に存在しているときはこのようになるが船と船の組み合わせを考えると、条件によって各船の時間閉塞領域は短くなったり長くなったりする。このため理論式による解は困難と考えられるのでモンテカルロ法により解を求めた。つぎにその手法の概要を示す。

5. T_w の計算手法

計算は次の場合について行なった。第7図に示すように航路幅を750 m, 12ノットとすると2.025分の時間長となる。そして図示のように第1列、第2列、第3列を定める。この場合各列の間隔は0.675分となる。図で ΔT_1 は第1列の位置から第2列の船に対する、または第2列の位置から第3列の船に対する前方避航の限界を、 ΔT_2 は後方避航の限界を示す。ただいまの場合、それぞれ0.225分時間長、0.450分時間長つまり列間隔の $\frac{1}{3}$ 及び $\frac{2}{3}$ とした。なお $2\Delta T_1$, $2\Delta T_2$ は第1列の位置から第3列の船に対する避航限界を与えるものである。図で QBE は避航せず直進したときの横断船の航跡、 QAD はいっばいの前方避航を行なったとき、 QCE はいっばいの後方避航を行なったときの軌跡である。

主航路の船は次のようにして与える。まず一様乱数をつくり、これを指数乱数に変換し加算して行く。つぎに配分すべき列をランダムに定め、その列の船にさきの結果を配分して行く。一方横断船は間隔をできるだけせまくして、かつ一様間隔として、次から次へと発生させる。本計算では0.1分間隔とした。横断の可否は次のように調べる。なお時間閉塞領域は発生時間からその前方 T までの間として計算した。

- (1) まず横断船を0.1分間隔で発生させる。ついでその横断船が第1列の船の時間閉塞領域につきあたるかどうかを調べ、つきあたれば待ち時間を0.1分増やし、かつ、その値の待ち時間発生度数を1増やして、(1)にもどる。時間閉塞領域につきあたらなければ(2)に行く。
- (2) 第2列の船については前方避航、または後方避航の範囲内で横断できるか否かを調べる。もし通れるようであれば、前後の船との間に T 以上のすきまがあるかを調べ、Yesであれば第3列のチェックにうつる。つまり(3)に行く。Noであれば待ち時間を0.1分増やし、かつ、その値の待ち時間の発生度数

図6 避航による閉塞領域変化

図7 計算条件の設定図

を1増やして(1)にもどる。

- (3) 第3列の船に対する避航限界は第2列の船の位置で異なってくる。そこで第2列の船との関連で避航限界を与えて通れるか否かを調べ、もし通れるようであれば前後の船との間に T 以上のすきまがあるかを調べ、Yes であればフリーパスの回数を1増やし、待ち時間を0にして(1)にうつる。No であれば待ち時間を0.1分増やし、その値の待ち時間発生度数を1増やして(1)にうつる。

入力データとしては計算を終了させるときの主航路船発生回数, T , λ , ΔT_1 , ΔT_2 を与える。一様乱数は乗積合同法により、周期は50000である。演算時間が比較的長くなるので主航路の消費数が10000となるところで計算を打ち切った。なお各列の前後のつながりのチェックのためあらかじめ各列に80以上の船を発生させておき、その1隻を消費すれば新たに1隻を発生させ、ランダムに定めたいずれかの列に追加する。1回の計算時間は約3hである。

6. Tw の計算値について

第8図はこのようにして求めた相対待ち時間密度曲線 ($T=2.5$ 分) である。ただし待ち時間零つまりフリーパスの密度は別に第10図において示してある。さて第9図はこの曲線を1列の場合と比較して描いたもので、図で $\overline{QA}$ はすき間のできる確率である。 $\overline{QL}$ が1列の場合のすき間のできる確率であるから、避航動作により $\overline{LA}$ だけ割りこむ機会が増えたことになる。 $\overline{AB}$ は $T-2(\Delta T_1+\Delta T_2)$ に等しい。同様に $\overline{VD}$ は $T-(\Delta T_1+\Delta T_2)$ に等しく、 $\overline{WF}$ は T に等しい。さらに $\overline{XH}$ は $2T-2(\Delta T_1+\Delta T_2)$ に等しい。また $\overline{BC}$ は第3列の船のみが単独に存在している確率を示し、 $\overline{DE}$ は第2列の船のみまたは第2列に船が存在しても避航効果を考慮した閉塞領域 $T-(\Delta T_1+\Delta T_2)$ の第2列への投影がすべて第2列の船でかくされてしまう場合の確率である。同様に $\overline{FG}$ は第1列の船のみ、または第2列または第3列に船が存在しても、避航効果を考慮した閉塞領域の第1列への投影がすべて第1列の船でかくされてしまう場合の確率である。そして、 CD , EF , GH の部分はすべて直線となり、区間 CD は第3列の船のみの組み合わせで閉塞領域が構成されているところ、区間 EF は第3列及び第2列の船のみの組み合わせで閉塞領域が構成されているところ、区間 GH は第3列、第2列及び第1列の船の組み合

図8 相対待ち時間 Tw と変位時間 Td の確率密度曲線

図9 T_w の確率密度曲線の説明図

図10 主航路が3列の場合及び1列の場合の横切り船のフリーパスの確率の比較

図11 主航路船舶が1列の場合及び3列の場合の横切り船の平均待ち時間の比較

わせて閉塞領域が構成されているところである。 H から右側は同様に第3列、第2列、第1列の船の組み合わせで閉塞領域が構成されているが、はじめとおわりの2船のみで連続した閉塞領域が得られず、中間に他の船の閉塞領域が重なって、はじめて連続した閉塞領域が得られる部分である。1列の場合の密度曲線 $LMNQR$ にくらべて非常に複雑となるが、その原因は避航動作により各列の実効閉塞領域が変化することにある。

次に第10図はフリーパスの確率を示す。この場合フリーパスという事は主航路内に待たずつまり避航せず入りこめたことをあらわし、航路内での避航は待ったとは考えない。当然のことではあるが、 λ が小さいときは1列の場合と殆どかわらないが、 λ が大になると差異が大になる。なお、この値と第8図の曲線の積分の和は1となる。さらに第11図は相対待ち時間の平均値を示したものである。1列のときに比べて3列のときは λ に無関係に、ただいまの場合66%という一定の比率を示している。この数値自身は $4T_1$, $4T_2$ の設定の仕方でもどのようにもかわるのであまり意味がないが、一定の比率であるという事は理論式を導くとき、一つの手がかりになると思われる。

7. t_1-t_2 による補正

t_2 を決定するためには避航時の標準航跡を与えねばならない。このためレーダ像より得られた避航々跡を参照しつつ、次の如き条件のもとに標準航跡を設定した。

- (1) 船速はかわらないものとする。
- (2) 避航による船体の回転角は、はじめの $\frac{1}{4}$ 分は4度以下、次の $\frac{1}{4}$ 分からは8度以下とする。
- (3) 相手船の後部に船首方向が一致すれば、以後は後部につけて変針する。
- (4) 避船完了後、相手船の航跡と交差するときは、相手船より1.0分の時間距離があるようにする。
- (5) 避航開始時は、直進した場合の交差位置の4.5分前を原則とするが、微小避航、小避航のときは、その度

図12 標準避航航跡曲線

$$t_2 - t_1 = 0.17 T_d^{1.73}$$

が得られる。これより T_d と T_w の関係式として

$$T_d = T_w - 0.17 T_d^{1.73}$$

が得られるので、これより T_w に対応して T_d を定めることができる。

8. T_d の計算値と実測値との対比

第9図の破線はこのようにして求めた T_d の密度曲線である。なお第8図の T_w の曲線に対しては T_d の目盛を付しておいた。これより主航路の船舶の到着率に対して T_d がどのようにかわるかが明らかになる。次に実測値との対比を示す。

第14図は宇高東航路の北航路の航跡図を示したものでb図は横断すべき主航路が比較的閑散なとき、a図は主航路がラッシュ状態となっているときを示す。いまこの図に図示の如く座標軸を設ける。この座標の1単位は1分間における走行距離であって、標準速力を12ノットとしているので370 mの長さに対応する。座標の縦軸は主航路西航部の中央よりずらして、航路分離線に近いところにとっている。これは待ち時間の式が航路の入り口を基準として求められていることに対応させたものである。

第15図は、この基準線上における横断船すなわち北航船の航跡密度を0.25分間長ごとに示したものである。(数字は隻数で示している)。計測対象としてとりあげた時間帯における主航路の平均到着率は0.28隻/分(主航路の東航または西航船の平均到着率は0.23

図13 T_d と $t_1 - t_2$ の関係

合に応じて、3.0分前、3.5分前、または4.0分前とする。

避航開始時刻はできるだけ早いことが望ましいのであるが、微小避航の場合、早く開始すると相手船に対する時間おくれが大きくなりすぎるので(5)の条件を入れた。第12図はこのようにして求めた各種の避航々跡で、第13図はこれより求めた T_d と $t_1 - t_2$ の関係を示す曲線である。なおこの曲線より次の実験式

図14 横断船の航路例

隻/分であるが、この場合の計測対象はいくつかの時間帯をつなぎ合わせたものであるため、このような数字となった)である。なお破線で示したものは第8図より求めた、 $\lambda=0.23$ 隻/分、 $T=2.5$ 分のときの Td の確率密度の理論値(隻数換算)である。この場合理論値と実測値は全く一致していないように見えるが、実測値で Td の小さい部分はフリーパスつまり $Tw=0$ の場合の航跡が多数含まれているので一致しないのが当然である。問題は Td の大きいところで、このあたりになると両者はよい近似を示し、この手法の妥当性を示していると思われる。

9. 容量の推定

本計算は特に混雑時(主航路の)を考慮して求めたものである。で、 Td の最大値を決定するのに都合がよい。第8図によれば $\lambda=0.20$ の時 Td が4分時間長をこえる確率は0.05%しかない。 Td を5分時間長とすると、これ以上の偏位をする確率つまり $Td=5.0$ より右側の面積は第16図の如くなる。ただいまの解析では Tw としては航路入口に入るまでの値をとっているから、航路内の後方避航を考えると、 Tw は0.5分の増加が見込まれるので航路内偏位を考慮

した最大実効偏位は5.5分に達し得る。よって、 Td のmaxを5分とすることは一応の限界設定とみてよい。この場合1日に1回(200回に1回)このmaxに達する状態を以て最大容量としてみると、第16図よりわかるように $\lambda=0.34$ となり、これは現在の主航路通航量の1.5倍弱となる。もっとも1日1回が限度か、2回が限度かは明確な理由づけがないので、ただこのようになるとしか言えないが、第16図を見ると λ が0.33をこえると Td が5分以上になる確率が急激に増大し、 $\lambda=0.39$ になると2倍になる。この増加ぶりから見ると0.3から0.4の間に限界があると考えるのが妥当ではなかろうか。

10. あとがき

本論文ではせまい海域での容量を制限する主要な要素は Td であるという立場から、主航路通航量の関数として Td を求め、実測値とかなり近似する結果を得たので、この Td の分布から交差容量の大まかな推定を行なったが、この中では潮流、漁船などの効果については全くふれていないし、また容量については Td 以外に、幅そう時の危険の増大についての考慮がなされるべきであろう。したがって本計算から直接容量を決定することはできないが、容量を定め、あるいは比較する指標としては有効であると考えられる。

図15 横断船の航路例の偏位分布

図16 Td が5分をこえる確率

なお本論文作成にあたっては、日本海難防止協会及び海上保安庁航行安全企画課が合同で記録した、備讃瀬戸東部の48年及び49年の通航船レーダ写真を資料として全面的に使用させていただいた。ここに厚く謝意を表する。

参考文献

- (1) 待ち行列研究会：応用待ち行列事典（広川書店），昭和46年
- (2) 井上広胤：交差点（技術書院），昭和46年
- (3) F. Garwood：An application of the theory of probability to the operation of vehicular-controlled traffic signals, J. Roy. statist. Soc. Suppl., Vol. 7, 1940
- (4) 藤井弥平他：船舶の閉塞領域について，日本航海学会論文集35号，昭和41年
- (5) 大島良三他：横切りの避航直径と避航領域，日本航海学会論文集47号，昭和47年
- (6) 長畑 司：船舶の航路横断における待ち合せ問題について，日本航海学会論文集55号，昭和51年
- (7) 平野新太郎：船舶の直交交差における待ち時間分布及び交差容量について，日本航海学会論文集57号，昭和52年

質疑応答

久々宮 久（東京商船大）：時空平面とはどのような平面でしょうか。

平野：ここで用いました時空平面は，通常の時空平面と多少異っており，特殊な使いかたをしておりますので，本文中にその相違点について説明を加えておきました。