

第4章 S-R 整合性が異なる運動肢の選択反応時間に及ぼす影響 (研究課題1)

第1節 S-R 整合性が Premotor time, Motor time に及ぼす影響

—単純反応課題と選択反応課題における比較— (実験1)

1. 目的

選択反応課題における反応時間は、刺激だけの特徴や反応だけの特徴に影響されるのではなく、刺激の位置と反応を行う位置との間にある空間的な関係に起因する。この現象は、Fitts and Seeger (1953) が提唱して以来、S-R 整合性として知られている。基本的な実験パラダイムは、身体正中面を基準として右または左視野に位置する2つの光刺激に対して、右または左手での反応を選択する課題である。この時、反応する手に関係なく、刺激と反応動作を行う空間的な位置関係が一致するときを整合 (compatible)、一致しないときを不整合 (incompatible) といい、刺激と反応が整合な関係であるときの方が反応時間は速くなる (Nicoletti et al., 1982; Umiltà & Nicoletti, 1990)。

S-R 整合性の効果は、中枢の情報処理過程における S-R 変換段階の符号の変換処理によって引き起こされると報告されている (Hasbroucq et al., 1989; Reeve & Proctor, 1984)。しかし、単純反応課題では、刺激と反応の解剖学的経路の繋がりが重要であると報告され (Anzola et al., 1977; Bashore, 1990; Berlucchi et al., 1977; Berlucchi et al., 1971; Jeeves, 1969, 1972; Poffenberger, 1912)、刺激の呈示前に1つの反応動作の運動プログラムを準備しておくことができる。これに対し、選択反応課題では、S-R 変換段階において反応符号を選択しなければならず、刺激が呈示されるまで、どちらの側で反応を開始するか準備できないため、刺激の呈示前に運動プログラムを選択的に準備しておくことができない。もし、S-R の空間的な組み合わせが同じ条件における単純反応課題と整合反応課題を比較したならば、中枢の情報処理過程と運動プログラムの構築についての基本的特性が明らかにされるであろう。

一方、四肢の運動系である上肢と下肢とでは、それぞれの筋を支配する脊髄 α 運動ニューロンの支配比 (Buchthal & Schmalbruch, 1980) や運動単位の動員のされ方 (Basmajian & DeLuca, 1985)、脳の1次運動野支配領域が異なっている (Ghez, 1991)。このことより、上肢は微細な運動制御 (fine motor control) が可能であるが、下肢は粗大な運動制御 (gross

motor control) がなされている。もし、S-R 整合性が情報処理過程の S-R 変換段階だけでなく、反応プログラミング段階にも影響しているのであれば、上肢と下肢とでは運動単位の活動様式に対する S-R 整合性の効果に差異が生じると考えられる。

そこで本節では、単純反応課題と選択反応課題における半視野からの光刺激に対する反応時間を筋電図 (EMG) 計測により Premotor time, Motor time に分け、上肢と下肢の差異を検討することにより、S-R 整合性が中枢の情報処理時間に対して基本的にどのような効果を持っているのか、さらに反応プログラミング段階で構築される運動プログラムに対しても関与しているのかどうかを明らかにすることを目的とする。

2. 方法

A. 被験者

眼疾患のない右手利き、右機能足の男子大学生 16 名 (身長, 173.7 ± 6.4 cm; 視力左, 0.9 ± 0.3 ; 視力右, 1.0 ± 0.3) が、被験者として実験に参加した。利き手、機能足の判定には、浅見ほか (1981) と Oldfield (1971) の方法を参考にアンケート調査を行った。

B. 実験装置とその配置

被験者の眼の位置から前方 1 m の距離に光刺激装置を設置し、注視点として緑色高輝度 LED (light-emitting diode; Stanley 社製: EBG-5504s, 160 mcd) を常に弱発光させて用い、そこから左右各 10° (注視点から 175 mm の距離) の位置に赤色高輝度 LED (Stanley 社製: EBR-5504s, 160 mcd) を光刺激として用いた (図 8)。また、被験者の注視状態を確認するため、時定数 1.5 秒、高周波遮断域 300 Hz 以上で EOG (electro-oculogram) を導出し、オシロスコープ (日本光電社製: HANDY MONITOR VC-2) で眼球運動をモニターした。

反応キーは、身体中心線 (body midline) を基準として、左または右側に設置され、左のキーは左体側肢、右のキーは右体側肢で操作された。手で操作される 2 つの反応キーは、身体中心線より左右各 20 cm の距離に設置され、足で操作される 2 つの反応キーは、身体中心線より左右各 15 cm の距離に設置された。このとき手関節角度が 0° 、足関節角度が 120° になるようにし、手関節または足関節の背屈動作ができるようにした。

C. 実験手順

実験は、室内を暗くし光刺激がはっきりと見える環境において行った。被験者には、椅

子に座り、予告を促してから反応が完了するまで、前方で弱発光している緑色高輝度LEDを注視するよう指示した。

(1) 単純反応課題 (simple RT task)

被験者は、どちらか一方の手で反応キーを押し、光刺激が呈示されるのを待機した。「いきます」という予告を促してから約0.5~1.5秒後に左右どちらか一方の光刺激がランダムに呈示された(呈示時間は約200ms)。被験者には、2つの光刺激の内どちらが呈示されても、できるだけ素早く反応キーを離すように指示した。反応課題は、上肢と下肢の両方で行われ、試行回数は、1つの光刺激に対して10試行ずつであり、合計80試行を行った。試行間隔は約10~15秒であり、各条件間において約2~3分の休息をとった。

(2) 選択反応課題 (choice RT task)

被験者は、2つの反応キーを押した状態で待機した。「いきます」という予告を促してから約0.5~1.5秒後に左右どちらか一方の光刺激がランダムに呈示された(呈示時間は約200ms)。整合課題 (compatible task) は、左視野の光刺激に対して左のキー、右視野の光刺激に対して右のキーを離すもので、不整合課題 (incompatible task) は、左視野の光刺激に対して右のキー、右視野の光刺激に対して左のキーを離すものであった(図8)。被験者には、光刺激が呈示され次第、課題にあった反応をできるだけ素早く正確に開始するよう指示した。被験者は、この2つの課題を上肢または下肢で行った。試行回数は、それぞれの課題につき20試行ずつ行われ(1つの光刺激に対して10試行)、合計80試行を行った。試行間隔は約10~15秒であり、各課題間において約2~3分の休息をとった。また、測定開始順序の影響を取り除くため、どの条件から実験を開始するかは、被験者間で均等にした。

D. データの収集と分析方法

橈側手根伸筋、前脛骨筋上から表面筋電図(EMG: electromyogram)を時定数0.03秒、高周波遮断域1kHz以上で導出した。電極の貼付位置は、Delagi and Perotto (1985)の記述に従いモーターポイント上付近とした。EMG、反応キーのon-off信号、光刺激のトリガー信号をサンプリング周波数2kHzでA/D変換し、パーソナルコンピュータ(Apple社製: Macintosh IIfx; アプリケーション: SuperScope, GW instruments)に記録した。光刺激呈示から筋放電が開始されるまでの時間(PMT: premotor time)、筋放電が開始されてからキーが離れるまでの時間(MT: motor time)、刺激呈示から反応キーが離れるまでの時間(RT:

reaction time) を1ミリ秒単位で測定した(図9)。1つの光刺激に対する10試行のPMT, MT, RTから平均値を算出し、それを個人の代表値とした。誤反応率については、反応しなければならない肢の対側肢において筋放電が認められた場合、その試行を誤反応とし、全試行数から誤反応数の比率を算出した。

3. 結果

A. 単純反応課題

上肢および下肢の単純反応課題におけるPMT, MT, RTの平均値と標準偏差は表1に示す通りであった。

上肢におけるPMT, MT, RTについて刺激位置(左・右)、反応する側(左・右)の違いによる2要因分散分析を行った。その結果、PMTについては、刺激位置と反応する側の要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意($p < 0.05$)な交互作用が認められた。つまり、刺激を受容する側と反応を行う側とが一致するとき(left/left, 123.9 ms; right/right, 127.2 ms)の方が、一致しないとき(left/right, 131.7 ms; right/left, 128.2 ms)よりも中枢での情報処理時間が短いことが認められた。MTについては、有意なF値が認められず、どの条件においても約75 msであった。また、RTについては、刺激位置と反応する側の要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意($p < 0.05$)な交互作用が認められた。つまり、刺激を受容する側と反応を行う側とが一致するとき(left/left, 200.2 ms; right/right, 202.3 ms)の方が、一致しないとき(left/right, 208.9 ms; right/left, 201.6 ms)よりも反応時間は速かった。

下肢におけるPMT, MT, RTについて刺激位置(左・右)、反応する側(左・右)の違いによる2要因分散分析を行った。その結果、PMT, MT, RTの全ての変数に有意なF値は認められなかった。つまり、どの条件においてもPMTは約137 ms, MTは約73 msであった。

B. 選択反応課題

上肢および下肢の選択反応課題におけるPMT, MT, RTの平均値と標準偏差は表1に示す通りであった。

上肢におけるPMT, MT, RTについて刺激位置(左・右)、反応する側(左・右)の違いによる2要因分散分析を行った。その結果、PMTについては、刺激位置と反応する側の

要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意 ($p < 0.01$) な交互作用が認められた。つまり、左視野の刺激に対する PMT は、左手 (183.0 ms) の方が右手 (224.6 ms) よりも速く、右視野の刺激に対する PMT は、右手 (183.0 ms) の方が左手 (309.5 ms) よりも速かった (図 10)。MT については、2つの要因に交互作用は認められず、反応する側の要因に有意 ($p < 0.05$) な主効果が認められた (図 10; 左手, 78.3 ms; 右手, 75.3 ms)。RT については、刺激位置と反応する側の要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意 ($p < 0.01$) な交互作用が認められた (図 10)。つまり、左視野の刺激に対する RT は、左手 (260.5 ms) の方が右手 (297.8 ms) よりも速く、右視野の刺激に対する RT は、右手 (256.1 ms) の方が左手 (309.5 ms) よりも速かった。したがって、上肢の選択反応時間は、S-R の配列が同側にあるとき (258.3 ms) の方が、対側にあるとき (303.7 ms) よりも速くなるという S-R 整合性の効果が確認された。

下肢における PMT, MT, RT について刺激位置 (左・右), 反応する側 (左・右) の違いによる 2 要因分散分析を行った。その結果、PMT については、刺激位置と反応する側の要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意 ($p < 0.01$) な交互作用が認められた。つまり、左視野の刺激に対する PMT は、左足 (183.2 ms) の方が右足 (237.5 ms) よりも速く、右視野の刺激に対する PMT は、右足 (192.8 ms) の方が左足 (235.4 ms) よりも速かった (図 11)。MT については、刺激位置と反応する側の要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意 ($p < 0.05$) な交互作用が認められた。つまり、左視野の刺激に対する MT は、左足 (84.4 ms) の方が右足 (91.2 ms) よりも速く、右視野の刺激に対する MT は、右足 (82.6 ms) の方が左足 (91.6 ms) よりも速かった (図 11)。RT については、刺激位置と反応する側の要因に主効果は認められなかったが、2つの要因に有意 ($p < 0.01$) な交互作用が認められた (図 11)。つまり、左視野の刺激に対する RT は、左足 (267.6 ms) の方が右足 (328.7 ms) よりも速く、右視野の刺激に対する RT は、右足 (275.4 ms) の方が左足 (327.0 ms) よりも速かった。したがって、下肢の選択反応時間についても、S-R の配列が同側にあるとき (271.5 ms) の方が、対側にあるとき (327.9 ms) よりも速くなるという S-R 整合性の効果が確認された。

C. 整合性の効果

整合課題と不整合課題の間にある遅延時間 (整合性の効果) の平均値と標準偏差は、PMT, MT, RT の順に上肢が 44.4 ± 11.8 , 0.7 ± 5.0 , 45.3 ± 14.0 ms であり、下肢が $48.4 \pm$

16.2, 7.9 ± 8.0 , 56.3 ± 18.5 msであった。PMT, MT, RTに対する整合性の効果について、上肢と下肢に差異があるかどうかを検討するため対応のあるt検定を行った結果、PMT, RTについては有意差が認められなかったが、MTについては上肢(0.7 ms)よりも下肢(7.9 ms)の方が有意($p < 0.05$)に大きいことが認められた(図12)。

D. 選択反応課題における誤反応率

整合課題と不整合課題における誤反応率の平均値と標準偏差は、上肢が 2.3 ± 3.7 , 6.6 ± 6.2 %であり、下肢が 5.4 ± 4.7 , 11.3 ± 6.9 %であった。誤反応率について効果器(上肢・下肢)、課題(整合・不整合)の違いによる2要因分散分析を行った結果、効果器の要因と課題の要因に有意な主効果($p < 0.01$)が認められた(図13)。

4. 考察

A. 中枢の情報処理時間

一般的に側方からの光刺激に対する反応時間は、刺激を受容する半網膜と反応を起こす肢との間の神経解剖学的繋がりが重要である(Anzola et al., 1977; Bashore, 1990; Berlucchi et al., 1977; Berlucchi et al., 1971; Jeeves, 1969, 1972; 加藤ほか, 1995; Poffenberger, 1912)。視覚系による空間情報は、半網膜で受容され、対側の脳半球にある1次視覚野に送られ、視覚野から背側経路を通過して頭頂連合野に送られる(安西ほか, 1994)。また運動系の情報は、頭頂連合野から1次運動野に送られ、1次運動野から運動プログラムが効果器へ出力される(川人ほか, 1994)。このとき、刺激と同側にある肢は、刺激を受容する脳半球と同じ脳半球で処理されるが、刺激と対側にある肢は、刺激を受容する脳半球と異なる脳半球で処理されるため、情報が脳半球間経路をアクセスする必要がある。S-R整合性についても、この神経解剖学的要因からの影響を完全に排除することはできない。

単純反応課題において、上肢のPremotor timeは、刺激を受容する側と反応を行う側が一致するとき(125.6 ms)の方が、一致しないとき(130.0 ms)よりも4.4 ms有意に短くなることが認められた。また、下肢のPremotor timeについては、有意な差ではなかったが、刺激を受容する側と反応を行う側が一致するとき(136.0 ms)の方が、一致しないとき(139.0 ms)よりも速かった。これらのことから、刺激を受容する半網膜と反応を起こす肢との間の神経解剖学的繋がりに起因する中枢での情報処理時間は、約3~4 msであると考えられる。

選択反応課題において、上肢の Premotor time は、S-R の配列が一致するとき (183.0 ms) の方が、一致しないとき (227.5 ms) よりも 44.4 ms 有意に短くなることが認められた (図 9)。下肢の Premotor time についても、S-R の配列が一致するとき (188.0 ms) の方が、一致しないとき (236.5 ms) よりも 48.4 ms 有意に短くなることが認められた (図 10)。つまり、S-R 配列が空間的に同側であるか対側であるかによる中枢での情報処理時間の差異は、単純反応課題と比較して約 10 倍あることが確認された。このことは、中枢での情報処理時間に対する S-R 整合性の効果が、単純に神経解剖学的な要因によっていないことを十分に示唆し、それは運動制御様式の異なる上肢と下肢による反応動作でも関係ないことを意味している。さらに、上肢と下肢の整合性の効果に有意差は認められなかったことから、S-R 整合性の効果は、1 次運動野支配領域の脳半球間距離の差異は関係せず、刺激符号から反応符号への変換、反応符号の照合といった情報処理過程の差異によって現われると推察される。

中枢の情報処理過程における S-R 整合性の効果は約 44~48 ms であることから、同じ 2 者選択の反応課題にもかかわらず、S-R の配列が不整合のときには、より多くの情報処理時間を要することが認められた。Premotor time について整合課題と単純反応課題の同側反応 (左の刺激に対する左の反応、右の刺激に対する右の反応) を比較すると、上肢で 57.4 ms、下肢で 52.0 ms であった。つまり、S-R 整合性の効果は、選択反応課題と単純反応課題との差異と同程度の時間的遅延を引き起こすと考えられる。さらに、タイミング動作における誤反応のキャンセルング時間に約 50 ms 費やされる (河辺・大築, 1982) ことから、S-R の配列が整合であるときと不整合であるときの間には、2 つの反応からどちらか一方の反応を選択する以外に、S-R 変換段階において 1 bit 余分に符号の変換処理が必要であることを示唆している (cf., Hick, 1952)。したがって、S-R 整合性の効果は、符号化モデルで説明されるように (Hasbroucq et al., 1989; Nicoletti et al., 1982; Nicoletti & Umiltà, 1990; Reeve & Proctor, 1984; Umiltà & Nicoletti, 1985)、2 つの刺激位置が刺激符号 (stimulus code) として符号化され、2 つの反応位置が反応符号 (response code) として符号化されると考えられる。そして、刺激符号と反応符号は、S-R 変換段階において符号の照合が行われ、このとき符号が一致しなければ (i.e., left/right, right/left)、正しい反応を引き起こす反応符号へ変換する必要があるため、その分の処理時間が費やされることになり、S-R 整合性の効果が出現すると推察される。

B. 末梢の運動制御

単純反応課題における Motor time は、上肢、下肢にかかわらず刺激位置の要因や反応する側の要因から影響されなかった。しかし、上肢、下肢ともに、有意な差ではないが、利き側の Motor time が短縮する傾向にあった（利き側, 73.1 ms; 非利き側, 76.2 ms）。このことはたとえ、反応時間課題であったとしても、利き側での運動単位を動員する方が有利であることを意味している。また、単純反応課題のように中枢での反応選択を要求されないときは、S-R 配列の一致、不一致にかかわらず、反応準備状態を高めておくことが容易であり、刺激の呈示前に中枢性の指令によって脊髄レベルの興奮性を高めておくことが可能であると示唆される（小宮山・笠井, 1993）。

一方、選択反応課題における Motor time は、上肢と下肢で異なる結果を示した。上肢の Motor time については、S-R 整合性からの影響は受けず、右手の方が左手よりも 3.0 ms 有意に短いことが認められた。つまり、利き手で反応動作の方が、末梢での運動制御が有利であるという、単純反応課題でも観察された一側優位性の効果が出現した（図 10）。しかし、下肢の Motor time については、刺激位置と反応する側の要因からの交互作用が認められたことから、下肢反応における運動単位の動員様式に対して S-R 整合性が有意に影響していると考えられる（図 11）。つまり、整合反応、不整合反応ともに足関節の背屈動作であり、同じ運動プログラムによる指令によって運動制御がなされていると考えられる（Keele, 1968; Schmidt, 1988, 1991）。それにもかかわらず、不整合反応における Motor time が、整合反応よりも延長することより、運動プログラムのパラメーターが、S-R 整合性によって影響されている可能性が推察される。しかし、下肢の Motor time は、単純反応課題で約 73 ms であったのに対し、選択反応課題においては整合反応で約 83 ms、不整合で約 92 ms であった。これらの反応課題では Premotor time が異なることから、反応準備状態の善し悪しが Motor time に影響している可能性も考えられる（Rosenbaum & Kornblum, 1982）。

以上のことから、上肢における選択反応時間に S-R 整合性が及ぼす影響は、中枢での情報処理時間に対してのみであり、末梢の運動制御に関しては影響しないことが示唆された。下肢の選択反応時間に S-R 整合性が及ぼす影響は、中枢での情報処理時間だけでなく、反応プログラミング段階で構築される運動プログラムのパラメーターに対しても影響を及ぼしている可能性が示唆された。つまり、Kornblum et al. (1990) が提案しているように、刺激の同定段階において刺激を符号化（e.g., Ls）したときに、刺激に関連する反応符号（e.g., Lr）が自動的に賦活されると考えられる（図 14）。次に、反応プログラミング段階

において整合反応では、自動的に賦活した反応符号 (e.g., Lr) と反応実行のための反応符号 (e.g., Lr) が同じであるため運動プログラムのパラメーターに影響しないが、不整合反応では、自動的に賦活した反応符号 (e.g., Lr) と反応実行のための反応符号 (e.g., Rr) が異なるため運動プログラムのパラメーターに影響するという情報処理モデルが提案できた (図14)。

C. 反応の正確性

反応の正確性については、上肢、下肢ともに有意に S-R 整合性から影響され、不整合反応を行うときの方が約 4~7% エラーを起こしやすいことが認められた。効果器の要因に主効果が認められなかったことから、上肢と下肢のように末梢の運動制御が異なったとしても、反応の正確性に及ぼす S-R 整合性の効果には、差異がないと考えられる。また、下肢 (8.4%) の方が上肢 (4.5%) よりも有意に誤反応を起こし易いということは、下肢の筋群を支配している脊髄 α 運動ニューロンの支配比が上肢より少なく (Buchthal & Schmalbruch, 1980)、運動単位の動員様式が大きな張力制御しかできないため (Basmajian & De Luca, 1985)、反応の抑制がきかなかったことが1つの原因であると推察される。

さらに、本節での誤反応が、反応しなければならぬ肢の対側肢に筋放電が認められた場合であったことから、不整合課題においては、刺激と同側に位置する肢への運動指令が、頻繁に送られていることを意味している。このことは、たとえ S-R の配列が対側関係にあったとしても、刺激位置に関連する反応符号が、刺激の呈示前に自動的に賦活されているという次元の重複モデル (Kornblum et al., 1990) を支持する結果であると考えられる。

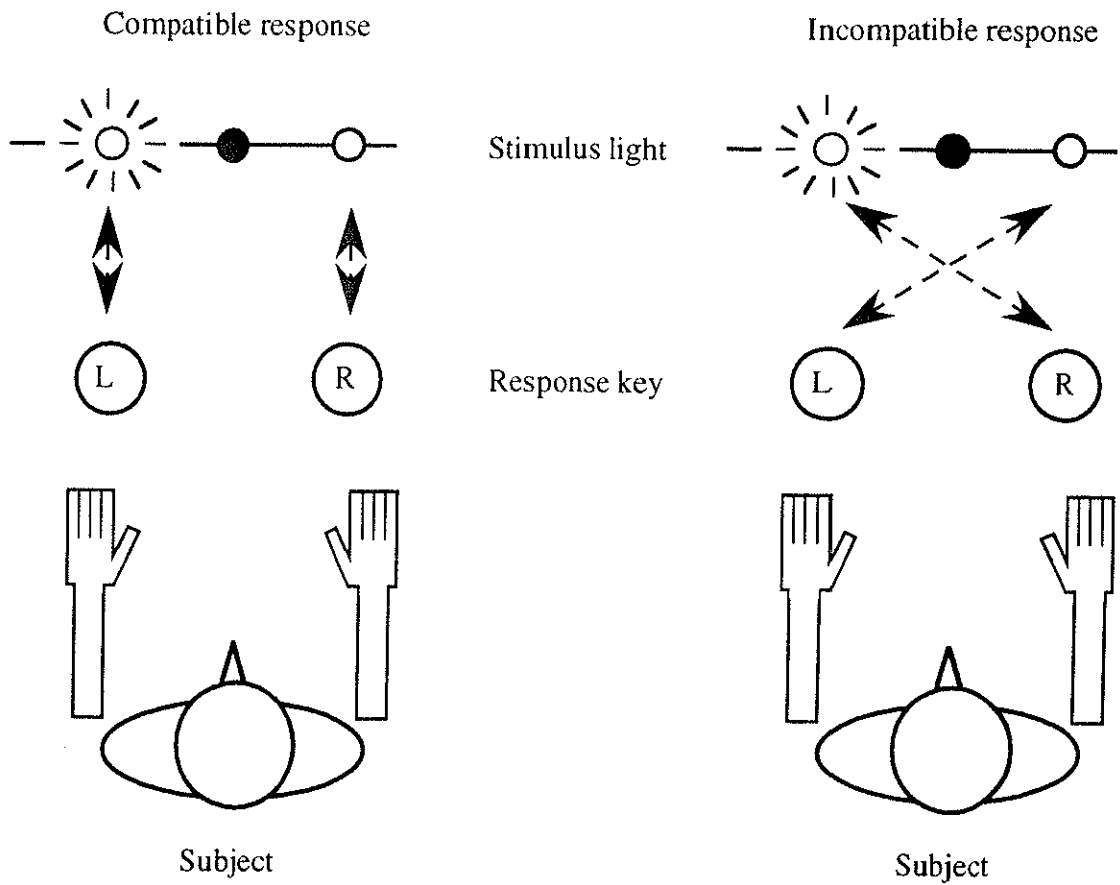


Fig. 8 Scheme showing compatible and incompatible response tasks.

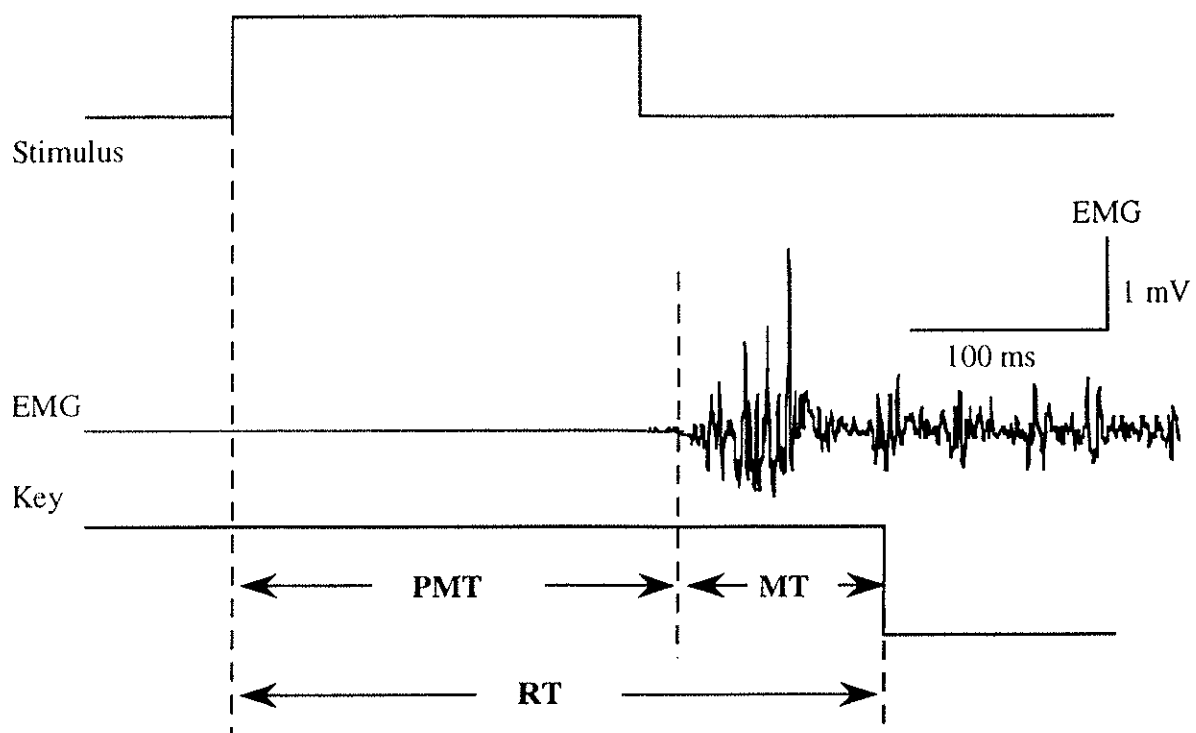


Fig. 9 Schematic showing of EMG measurement in reaction time paradigm. PMT: premotor time, MT: motor time, RT: reaction time.

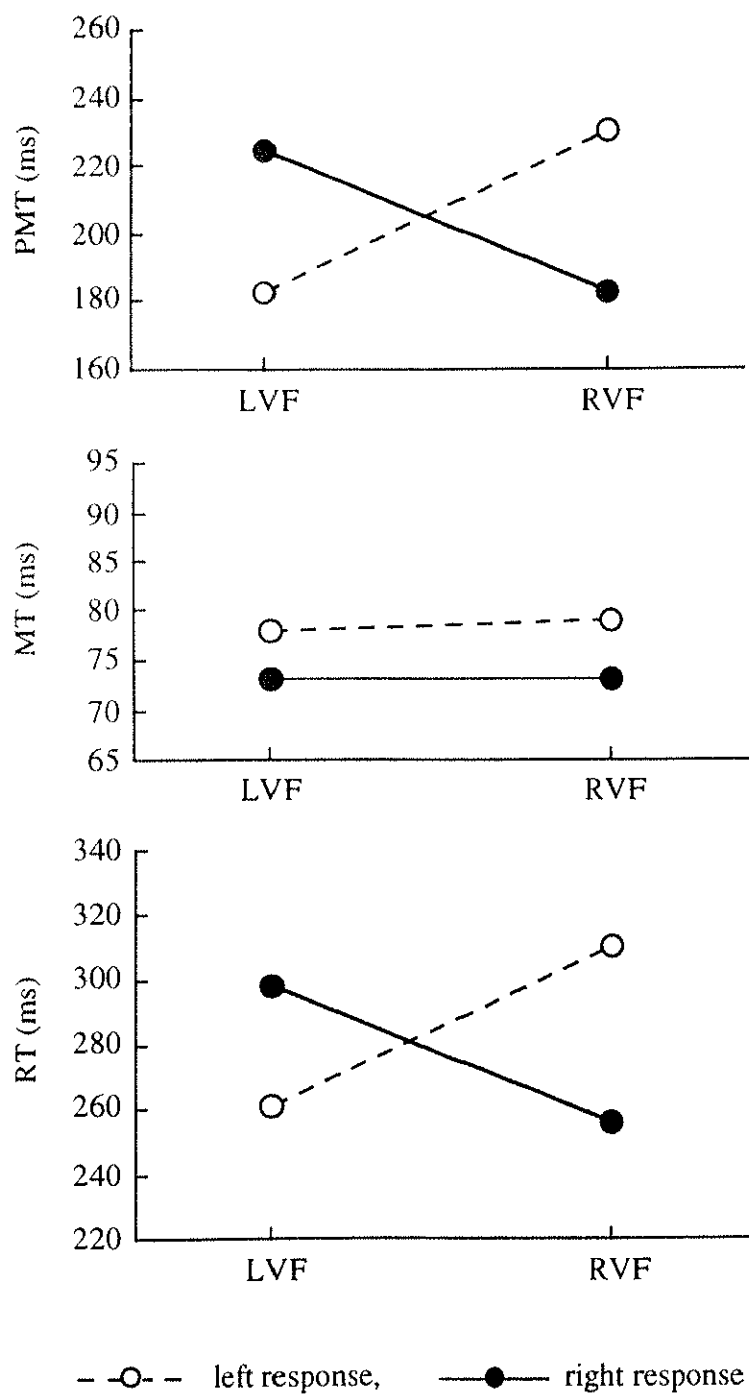


Fig. 10 Mean PMT, MT and RT (ms) of hand response as a function of stimulus side and response side in Experiment 1. LVF: left visual field, RVF: right visual field.

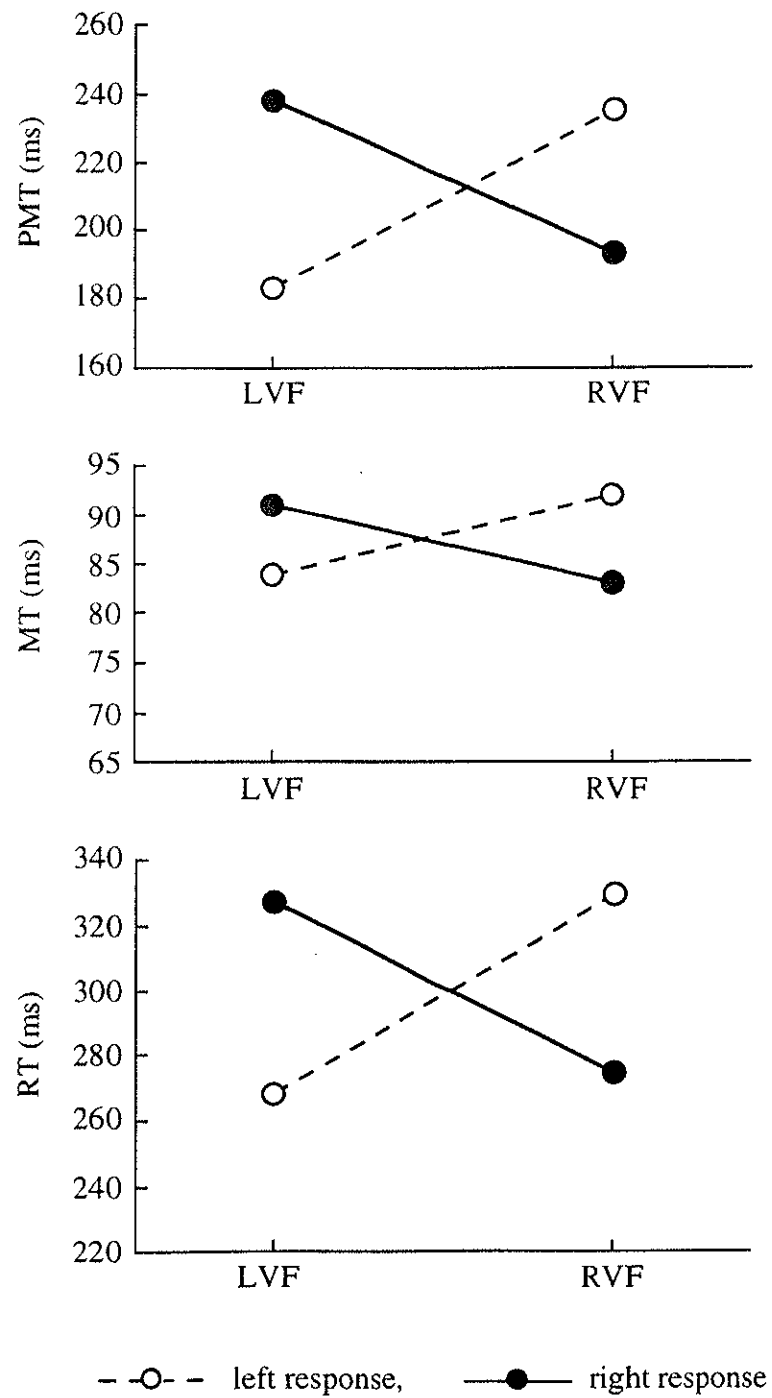


Fig. 11 Mean PMT, MT and RT (ms) of foot response as a function of stimulus side and response side. LVF: left visual field, RVF: right visual field.

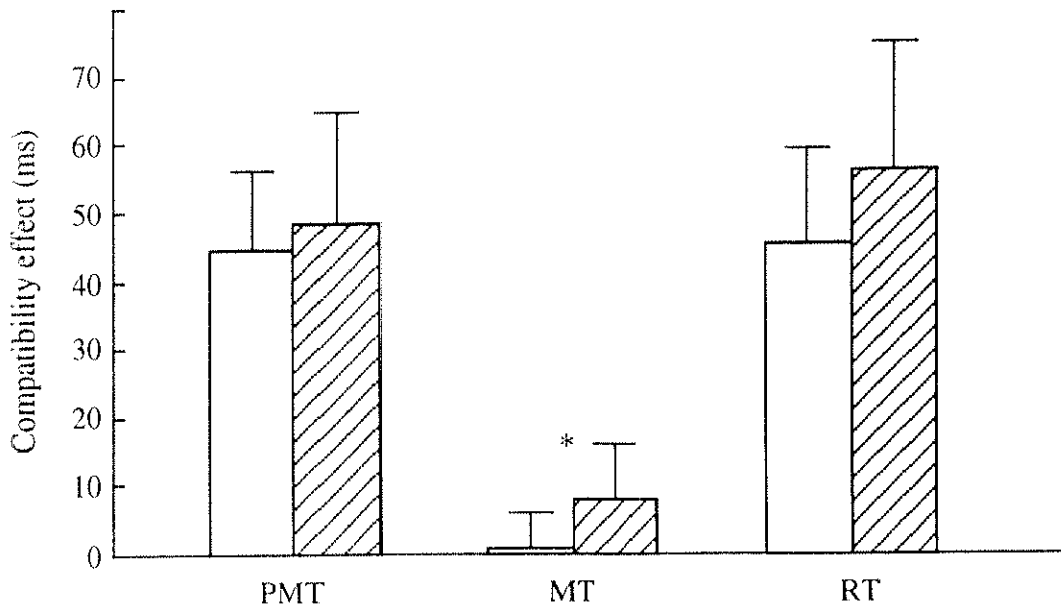


Fig. 12 Difference of S-R compatibility effect between hands (□) and feet (▨) response in Experiment 1.
 PMT: premotor time, MT: motor time, RT: reaction time, * $p < 0.05$

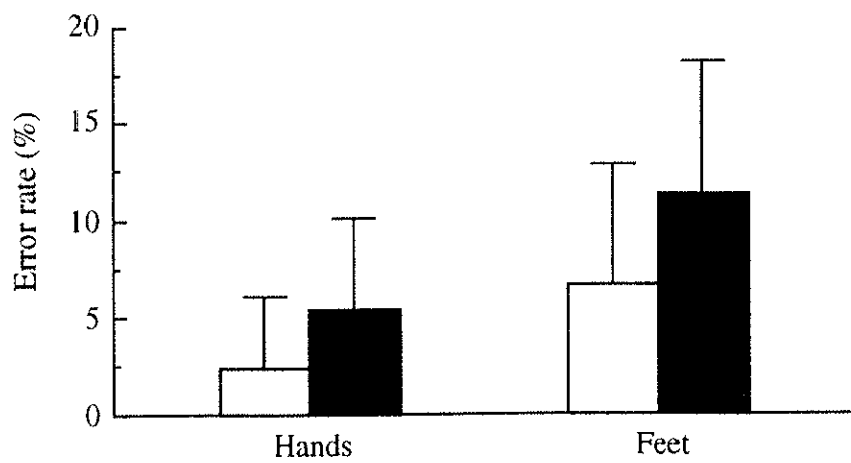
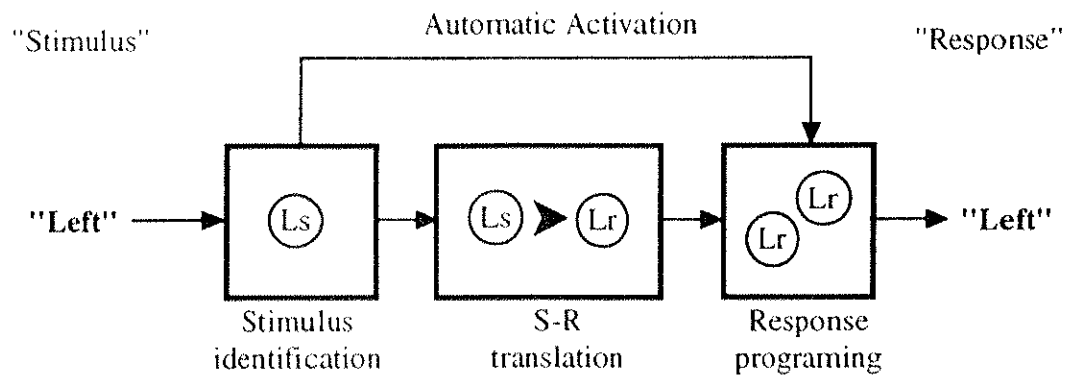
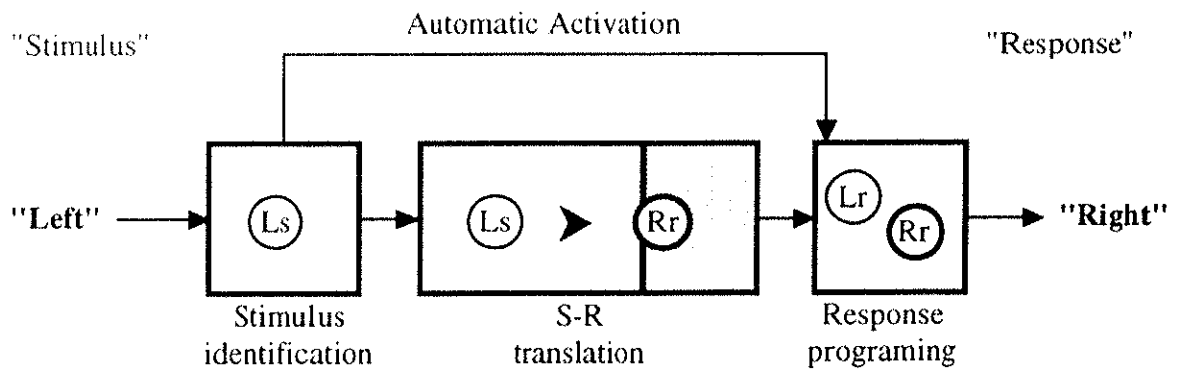


Fig. 13 Error rate (%) of compatible (□) and incompatible (■) tasks in Experiment 1.



(a) Compatible



(b) Incompatible

Fig. 14 Diagram showing of dual information process in compatible (a) and incompatible (b) responses. Ls: left stimulus code, Lr: left response code, Rr: right response code.

Table 1 Means and standard deviations (ms) for PMT, MT, RT of left and right hands or feet to lateralized visual stimuli in simple and choice RT tasks in Experiment 1.

| Responding Side | Simple RT task | | | | | | Choice RT task | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | LVF | | | RVF | | | LVF | | | RVF | | | |
| | PMT | MT | RT | PMT | MT | RT | PMT | MT | RT | PMT | MT | RT | |
| Hand | Left | 123.9 (13.6) | 76.3 (9.3) | 200.2 (16.0) | 131.7 (10.1) | 77.1 (10.4) | 208.9 (12.0) | 183.0 (23.0) | 77.5 (9.6) | 260.5 (22.5) | 230.4 (24.1) | 79.1 (8.0) | 309.5 (22.8) |
| | Right | 128.2 (12.1) | 73.5 (10.3) | 201.6 (13.6) | 127.2 (12.4) | 75.1 (11.3) | 202.3 (15.2) | 224.6 (26.9) | 72.8 (8.5) | 297.8 (28.5) | 183.0 (26.6) | 73.1 (9.7) | 256.1 (28.5) |
| Foot | Left | 136.6 (16.1) | 75.7 (12.6) | 212.3 (22.2) | 139.7 (14.7) | 75.6 (11.3) | 214.7 (19.5) | 183.2 (22.1) | 84.4 (12.8) | 267.6 (29.4) | 235.4 (25.2) | 91.6 (17.1) | 327.0 (32.5) |
| | Right | 138.2 (15.1) | 71.5 (10.6) | 209.7 (16.9) | 135.4 (14.1) | 72.2 (10.6) | 207.6 (16.7) | 237.5 (21.3) | 91.2 (12.5) | 328.7 (22.8) | 192.8 (20.5) | 82.6 (13.0) | 275.4 (20.3) |

Mean (SD), PMT: premotor time, MT: motor time, RT: reaction time, LVF: left visual field, RVF: right visual field, bold values are compatible response.

第2節 反応動作空間の違いと S-R 整合性が Premotor time, Motor time に及ぼす影響 (実験2)

1. 目的

前節(実験1)において、上肢、下肢にかかわらず、S-R 整合性が中枢での情報処理時間に及ぼす影響は、同じであることが明らかになった。先行研究において、この S-R 整合性の効果を説明するために、代表的な2つのモデルが提案されている。1つは、一方の脳半球が対側の半側空間へ注意を向け、その半側空間内での事象を処理するため、刺激と反応が同一の半側空間に位置するとき、反応時間が速くなるという注意モデルである(Bowers et al., 1981; Heilman et al., 1987; Verfaellia et al., 1988)。もう1つは、刺激セットと反応セットがその空間的位置に関して符号化され、刺激符号と反応符号が同じであるとき、符号の変換処理が短くなるため、反応時間が速くなるという符号化モデルが提案されている(Nicoletti et al., 1982; Umiltà & Nicoletti, 1985; Wallace, 1971, 1972)。近年、S-R 整合性の効果を説明するのに符号化モデルが包括的であることを示唆する報告が、数多く提出されている(Eimer et al., 1995; Kornblum, 1995; Kornblum et al., 1990; Proctor & Reeve, 1990; Umiltà & Nicoletti, 1990)。しかし、これらの研究は、上肢による反応動作を用いており、下肢の反応動作に及ぼす S-R 整合性の効果が、注意モデルによって説明できるのか、符号化モデルによって説明できるのかは報告されていない。

一方、一側優位性の効果と脳半球の機能的特殊化に関する研究は、空間認知課題における右脳半球の優位性を報告している(Bradshaw et al., 1988; Bradshaw et al., 1987; Imanaka et al., 1995; Pierson et al., 1991)。このような脳半球機能の非対称性に起因する半側空間の効果は、反応時間パラダイムでも認められている(Bowers et al., 1981; Bradshaw et al., 1983; Nicoletti et al., 1982)。したがって、反応効果器の動作空間が異なるならば、半視野からの光刺激に対する反応時間は、半側空間の効果からも影響を受けると考えられる。

そこで、本節では、頭部を90°回旋させる実験パラダイムを用いることによって、どちらか一方の刺激と左右の反応効果器が同一の半側空間に位置する状態をつくり、反応動作空間の違いと S-R 整合性が、上肢および下肢における Premotor time, Motor time にどのように影響するのかを検討することを目的とする。もし、注意モデルによる半側空間の効果が、Premotor time に影響するのであれば、2つの反応効果器の反応時間は、同一半側空間に位置する刺激に対して速くなると予測され、もし、符号化モデルによる空間的符号の変

換が Premotor time に影響するのであれば、反応動作空間の位置に関わらず、右の刺激に対して右のキー、左の刺激に対して左のキーの反応時間が速くなると予測される。

2. 方法

A. 被験者

眼疾患のない右手利き、右機能足の男子大学生 12 名（身長、 173.5 ± 5.6 cm; 視力左、 0.9 ± 0.4 ; 視力右、 1.0 ± 0.4 ）が、被験者として実験に参加した。利き手、機能足の判定には、浅見ほか（1981）と Oldfield（1971）の方法を参考にアンケート調査を行った。

B. 実験装置とその配置

光刺激装置および反応キーは、前節（実験 1）と同様のものを使用した。また、被験者の注視状態を確認するため、時定数 1.5 秒、高周波遮断域 300 Hz 以上で EOG を導出し、オシロスコープ（日本光電社製: HANDY MONITOR VC-2）で眼球運動をモニターした。

C. 実験手順

実験は、室内を暗くし光刺激がはっきりと見える環境において行った。被験者は、頭部を左右どちらか一方に 90° 回旋させて椅子に座ることにより、2つの反応効果器をどちらか一方の半側空間に位置させた（図 15）。つまり、右に頭部回旋した場合、2つの反応効果器は左半側空間に位置することになり、左に頭部回旋した場合、右半側空間に位置することになる。この頭部回旋を保ちながら注視点をみつめ、2つの反応キーを押した状態で待機した。「いきます」という予告を促してから約 0.5~1.5 秒後に左右どちらか一方の光刺激がランダムに呈示された。整合課題は、左視野の光刺激に対して左のキー、右視野の光刺激に対して右のキーを離すもので、不整合課題は、左視野の光刺激に対して右のキー、右視野の光刺激に対して左のキーを離すものであった。被験者には、光刺激が呈示され次第、課題にあった反応をできるだけ素早く正確に開始するよう指示した。被験者は、この2つの課題を上肢または下肢で行った。試行回数は、それぞれの課題につき 20 試行ずつ行われ、合計 160 試行であった。試行間隔は約 10~15 秒であり、各課題間において約 2~3 分の休息をとった。また、測定開始順序の影響を取り除くため、被験者の半数が左半側空間条件から、残りの半数が右半側空間条件から実験を開始し、さらに、どの課題から開始するかは、被験者間で均等にした。

D. データの収集と分析方法

橈側手根伸筋、前脛骨筋上から表面筋電図（EMG）を時定数 0.03 秒，高周波遮断域 1 kHz 以上で導出した。EMG，反応キーの on-off 信号，光刺激のトリガー信号をサンプリング周波数 2 kHz で A/D 変換し，パーソナルコンピュータ（Apple 社製: Macintosh IIci; アプリケーション: SuperScope, GW instruments）に記録した。光刺激呈示から筋放電が開始されるまでの時間（PMT: premotor time），筋放電が開始されてからキーが離れるまでの時間（MT: motor time），刺激呈示から反応キーが離れるまでの時間（RT: reaction time）を 1 ミリ秒単位で測定した。1 つの光刺激に対する 10 試行の PMT, MT, RT から平均値を算出し，それを個人の代表値とした。誤反応率については，反応しなければならない肢の対側肢において筋放電が認められた場合，その試行を誤反応とし，全試行数から誤反応数の比率を算出した。

3. 結果

A. 反応時間

左右の半側空間条件における上肢および下肢の半視野刺激に対する PMT, MT, RT の平均値と標準偏差は表 2 に示す通りであった。

上肢における PMT, MT, RT について刺激位置（左・右），反応する側（左・右），半側空間（左・右）の違いの 3 要因分散分析を行った。その結果，PMT, RT については刺激位置，反応する側，半側空間の違いによる要因に主効果は認められなかったが，刺激位置と反応する側の 2 つの要因に有意（ $p < 0.01$ ）な交互作用が認められた。しかし，半側空間の違いによる要因と他の要因との間には，有意な交互作用が認められなかった（図 16, 18）。また，MT については，有意な F 値が認められなかった（図 17）。

下肢における PMT, MT, RT について刺激位置（左・右），反応する側（左・右），半側空間（左・右）の違いの 3 要因分散分析を行った。その結果，上肢と同様に PMT, RT については，刺激位置，反応する側，半側空間の違いによる要因に主効果は認められず，刺激位置と反応する側の 2 つの要因に有意（ $p < 0.01$ ）な交互作用が認められた。しかし，半側空間の違いによる要因と他の要因との間には，有意な交互作用は認められなかった（図 16, 18）。また，MT については，有意な F 値が認められなかった（図 17）。

つまり，反応動作を行う効果器の位置が半側空間に関して異なるにもかかわらず，上肢

および下肢における反応時間は、左の刺激に対しては、左体側肢の方が右体側肢よりも速く、右の刺激に対しては、右体側肢の方が左体側肢よりも速いことが認められた。

B. 整合性の効果

反応時間が半側空間の要因に影響されなかったことから、全ての条件における整合反応と不整合反応との間にある遅延時間を算出し、それを整合性の効果とした。整合性の効果の平均値と標準偏差は、PMT, MT, RTの順に上肢が 41.0 ± 13.4 , 0.4 ± 4.6 , 41.4 ± 14.3 msであり、下肢が 35.7 ± 15.3 , 4.8 ± 5.8 , 40.5 ± 18.7 msであった。PMT, MT, RTに対する整合性の効果について、上肢と下肢において差異があるかどうかを検討するため対応のあるt検定を行った結果、PMT, RTについては有意差が認められなかったが、MTについては、上肢(0.4 ms)よりも下肢(4.8 ms)の方が有意($p < 0.05$)に大きいことが認められた(図19)。したがって、本章の前節(実験1)で観察されたことと同様にPMT, RTについては、有意差が認められなかったが、MTには下肢の方が上肢よりも有意に整合性の効果を受けることが認められた。

C. 誤反応率

上肢における誤反応率の平均値と標準偏差は、左半側空間条件において整合課題が $4.9 \pm 4.9\%$ 、不整合課題が $13.4 \pm 10.3\%$ であり、右半側空間条件において整合課題が $2.9 \pm 5.6\%$ 、不整合課題が $17.0 \pm 10.1\%$ であった。半側空間(左・右)、課題(整合・不整合)の違いによる2要因分散分析を行った結果、課題の要因に有意($p < 0.01$)な主効果が認められたが(整合, 3.9%; 不整合, 15.1%)、半側空間の要因に主効果は認められず、2つの要因による交互作用は認められなかった(図20)。

下肢における誤反応率の平均値と標準偏差は、左半側空間条件において整合課題が $7.4 \pm 5.2\%$ 、不整合課題が $18.6 \pm 11.8\%$ であり、右半側空間条件において整合課題が $3.3 \pm 3.3\%$ 、不整合課題が $17.5 \pm 8.8\%$ であった。半側空間(左・右)、課題(整合・不整合)の違いによる2要因分散分析を行った結果、課題の要因に有意($p < 0.01$)な主効果が認められたが(整合, 5.3%; 不整合, 18.0%)、半側空間の要因に主効果は認められず、2つの要因による交互作用は認められなかった(図20)。つまり、誤反応率については、上肢、下肢ともに半側空間の要因から影響されず、S-R整合性から影響されることが認められた。

4. 考察

A. 半側空間の効果

前節(実験1)において、上肢、下肢にかかわらず、S-R 整合性における中枢の情報処理過程は、符号化モデルによる説明が可能であると考えられた。しかし、前節におけるS-Rの配列は、通常のポジションに関して行われたものであり、半側空間の効果が選択反応時間に影響したのかどうかは明らかにできなかった。そこで、本節では、頭部90°回旋パラダイム(Imanaka et al., 1994, 1995)を用いることによって、一方の刺激が位置している空間内に2つの反応効果器を位置させた。もし、半側空間の効果によってPremotor timeが影響されるならば、S-R整合性の中枢における情報処理過程は、注意モデルによって説明でき、もし、半側空間の効果による影響が認められなければ、符号化モデルによる説明が適切であると仮定できる(Nicoletti et al., 1982)。さらに、半側空間における空間認知機能は対側の脳半球が制御するという注意処理メカニズム(Heilman & Bowers, 1985; Heilman et al., 1987; Heilman & Valenstein, 1979)は、刺激と同じ半側空間内にある効果器での反応時間の優位性を報告している。脳半球の機能的特殊化に関する研究では(Bradshaw et al., 1983, 1987, 1988)、右脳半球が両側の空間へ注意を向け、左脳半球が対側の半側空間へ注意を向けるため、注意機能の重なる右半側空間の認知的優位性を報告している。したがって、空間知覚に関して考えたならば、刺激と効果器が同じ半側空間内に位置する方が、異なる半側空間に位置するときよりも反応時間が速くなるという半側空間の効果が期待された。

上肢のPremotor timeについて分散分析した結果、左視野の刺激に対しては左手の方が右手よりも速く、右視野の刺激に対しては右手の方が左手よりも速くなるという典型的なS-R整合性の効果が認められた。しかし、半側空間条件の違いによってPremotor timeの遅速は認められなかった。つまり、上肢のS-R整合性の効果は、半側空間の効果から影響されないことが示唆された。下肢のPremotor timeについて分散分析した結果、上肢と同様にS-R整合性の効果は、半側空間の効果を受けないことが認められた。したがって、本研究の結果からは、上肢と下肢における選択反応時間は、半側空間の効果といった注意の側面から影響されず、刺激と反応の符号変換処理によるS-R整合性からのみ影響されることが認められた。これらのことより、中枢の情報処理過程において選択反応を要求される場合、右半側空間において注意機能が優位であるという空間認知特性よりも、刺激情報と反応情報の符号化による情報処理の方が頑強であることが示唆される。つまり、本研究で用いた

キーを離すといった空間移動のない反応動作では、刺激の位置情報と反応開始の位置情報が、それぞれの空間的な相対位置によって符号化され、刺激符号と意図している反応符号を照合し、2つの符号が一致しているときの方が（e.g., 左の刺激に対して左の反応）、一致していないとき（e.g., 左の刺激に対して右の反応）よりもS-R変換段階において符号の変換処理にかかる時間が短くなるということである。

B. 運動肢の違いによるS-R整合性効果の差異

上肢と下肢のPremotor timeに対するS-R整合性の効果は、どちらも約40msであり有意差が認められなかった（図19）。つまり、運動制御が異なる効果器による反応であっても、中枢での情報処理過程に与えるS-R整合性の効果は同じであることが示唆された。また、整合課題と不整合課題との間にある約40msの情報処理時間は、運動指令のキャンセル時間（河辺・大築, 1982）や1bitの情報処理時間（Hick, 1952）と同程度である。したがって、この遅延時間は、不整合課題が整合課題に比べて1つ余分な情報処理を行わなければならないことを示唆し、それは刺激符号（e.g., left）から逆の反応符号（e.g., right）へ変換するための処理時間であると考えられる。

次に末梢の運動制御について考えると下肢のMotor timeについては、刺激位置と反応する側の相対的位置関係が一致するとき速くなる傾向を示し（図17）、さらに下肢のMotor timeに対するS-R整合性の効果の方が、上肢よりも有意に大きいことが認められた（図19）。つまり、S-R整合性の効果は、上肢の運動制御に対してほとんど影響しないが、下肢に対しては影響することが示唆される。S-Rの次元の重複する予告合図反応課題を用いたKornblum（1995）や偏側性準備電位（LRP: lateralized readiness potential）を用いたEimer et al.（1995）の研究は、刺激符号（e.g., Ls）に関連する反応符号（e.g., Lr）が、中枢の情報処理過程における反応プログラミング段階で自動的に賦活されると報告している。つまり、整合課題では、刺激が呈示されたときに、すでに運動プログラミング段階において刺激符号（Ls）に関連した反応符号（Lr）が賦活されているため、運動プログラム（Keele, 1968）の産出がうまく行われていると考えられる。しかし、不整合課題では、刺激符号（Ls）と異なる反応符号（Rr）をプログラミングしなければならないため、自動的に賦活された反応符号（Lr）と正しい反応を起こすための反応符号（Rr）との間で衝突（conflict）が生じ、末梢に送られる運動プログラムに影響したと考えられる（図21）。このことは、本研究における誤反応率が、上肢、下肢ともに整合課題よりも不整合課題の方で有意にエ

ラーを起こしやすいことから推測される。つまり、不整合課題では、刺激と逆の符号の反応を行わなければならないにもかかわらず、整合課題よりも約11~13%の確率で刺激と同じ符号の反応 (i.e., left/left, right/right) を行う効果器に筋放電が出現したことになり、刺激と同じ符号を持つ運動プログラムが反応開始前に準備されていたと推察される。このとき不整合課題において反応符号の衝突によって、運動プログラムが情報損失を引き起こしたと推測することができる。このとき、上肢は運動単位における張力発揮を細かく制御できるため (Basmajian & De Luca, 1985)、Motor timeの有意な遅延が生じなかったと考えられる。一方、下肢は運動単位における張力発揮を粗くしか制御できないため (Basmajian & De Luca, 1985)、不整合反応において情報損失した運動プログラムが、運動単位の動員をうまく行えず、Motor timeの遅延を引き起こしたと推測される。

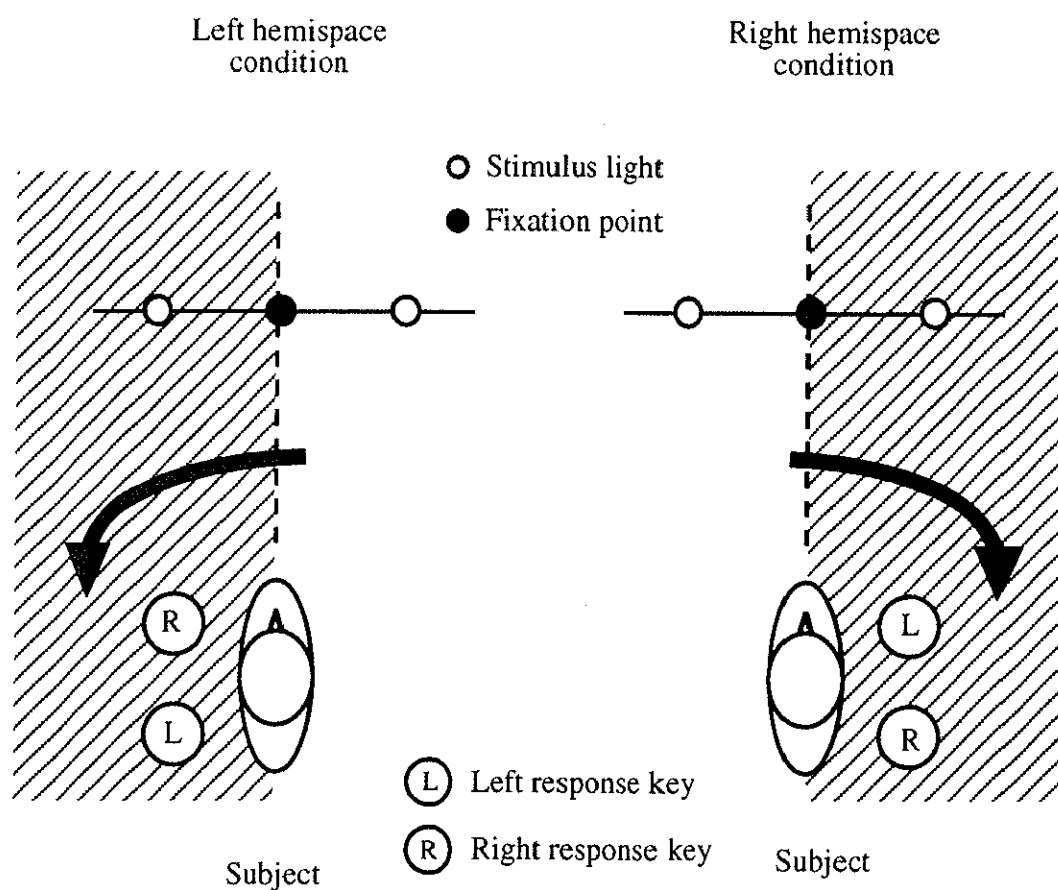


Fig. 15 Scheme showing left and right hemisphere conditions in Experiment 2.

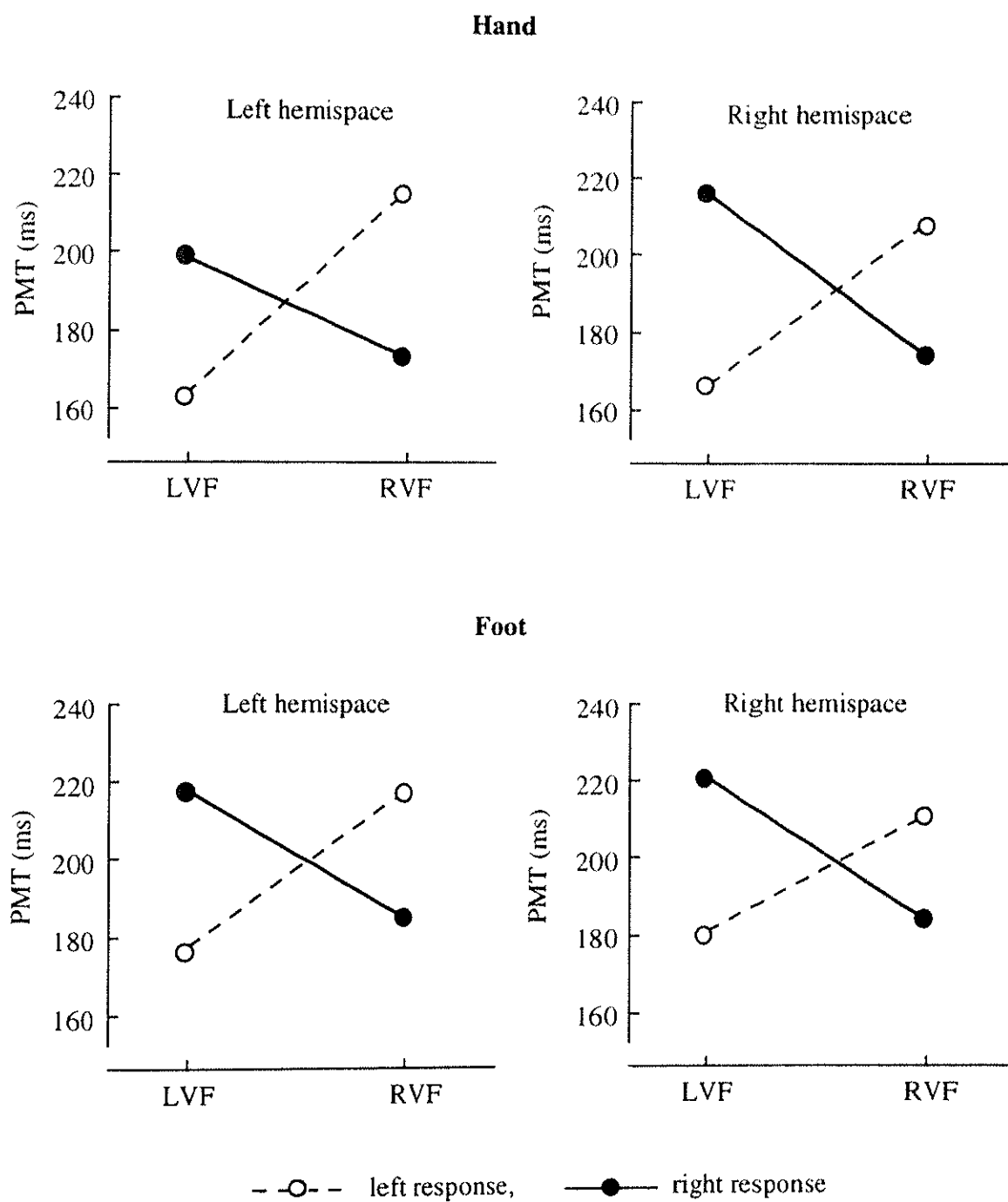


Fig. 16 Mean premotor time (ms) as a function of stimulus side and response side at both hemispacial conditions in Experiment 2. LVF: left visual field, RVF: right visual field.

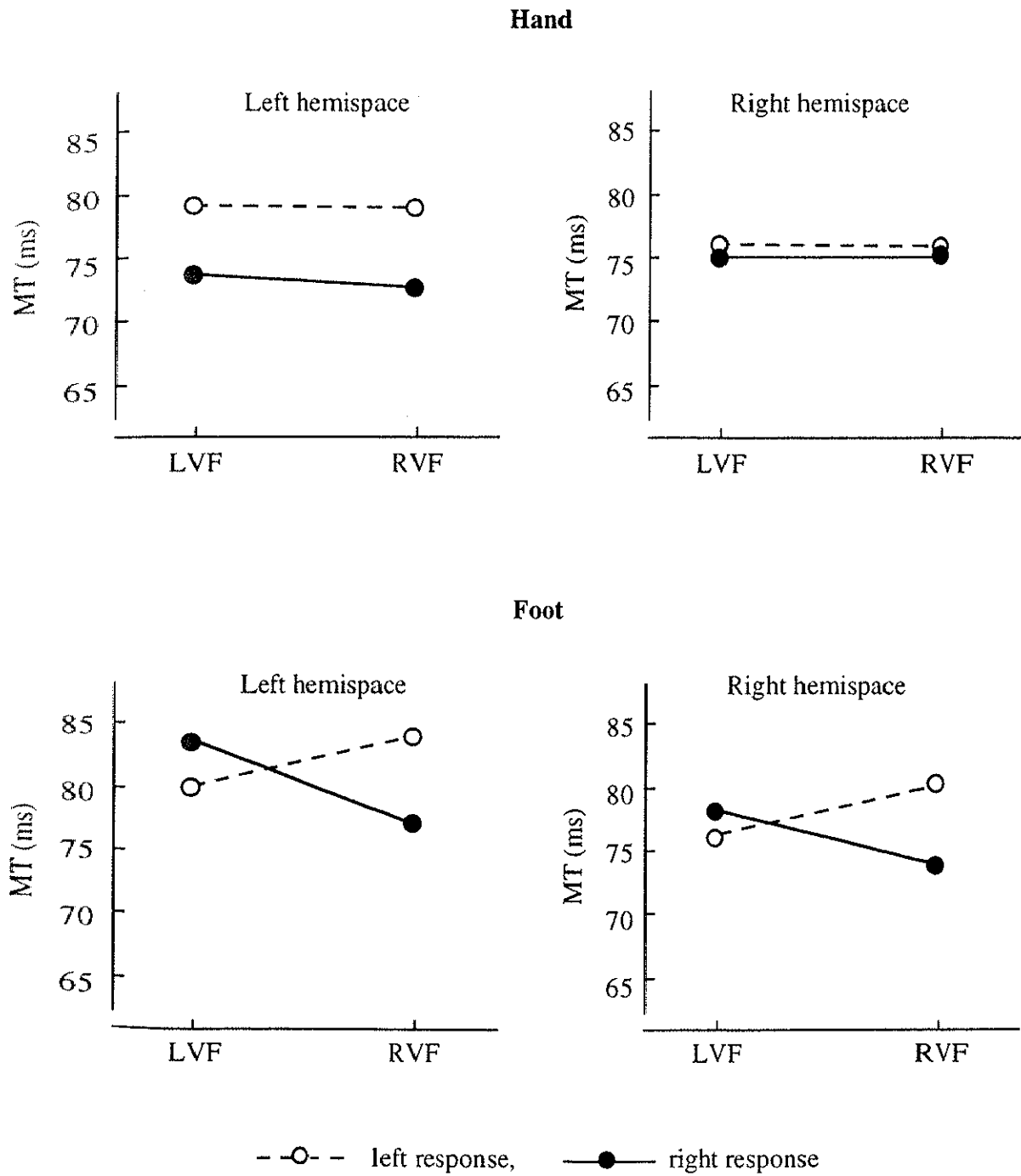


Fig. 17 Mean Motor time (ms) as a function of stimulus side and response side at both hemispacial conditions in Experiment 2.
LVF: left visual field, RVF: right visual field.

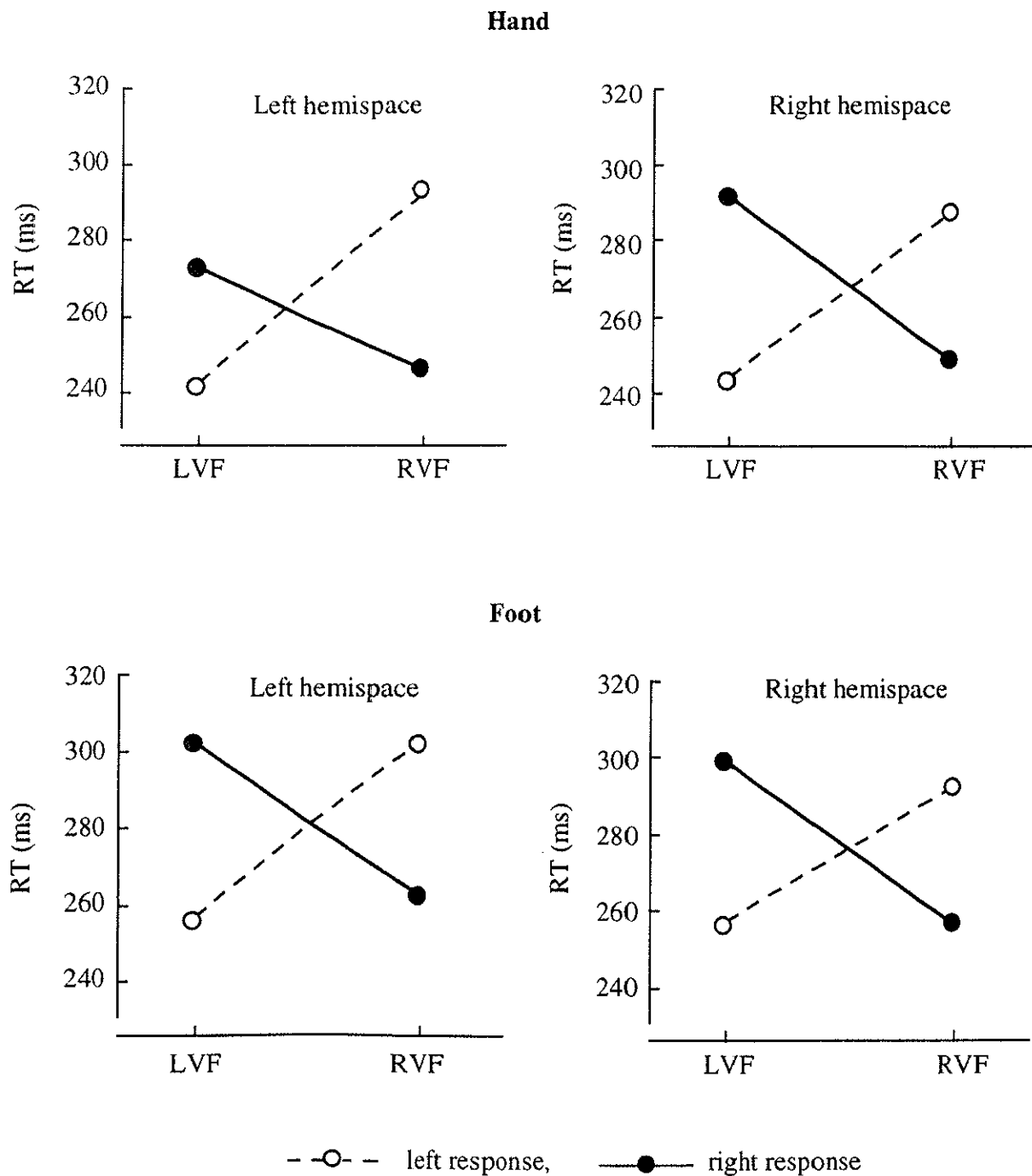


Fig. 18 Mean Reaction time (ms) as a function of stimulus side and response side at both hemispacial conditions in Experiment 2.
LVF: left visual field, RVF: right visual field.

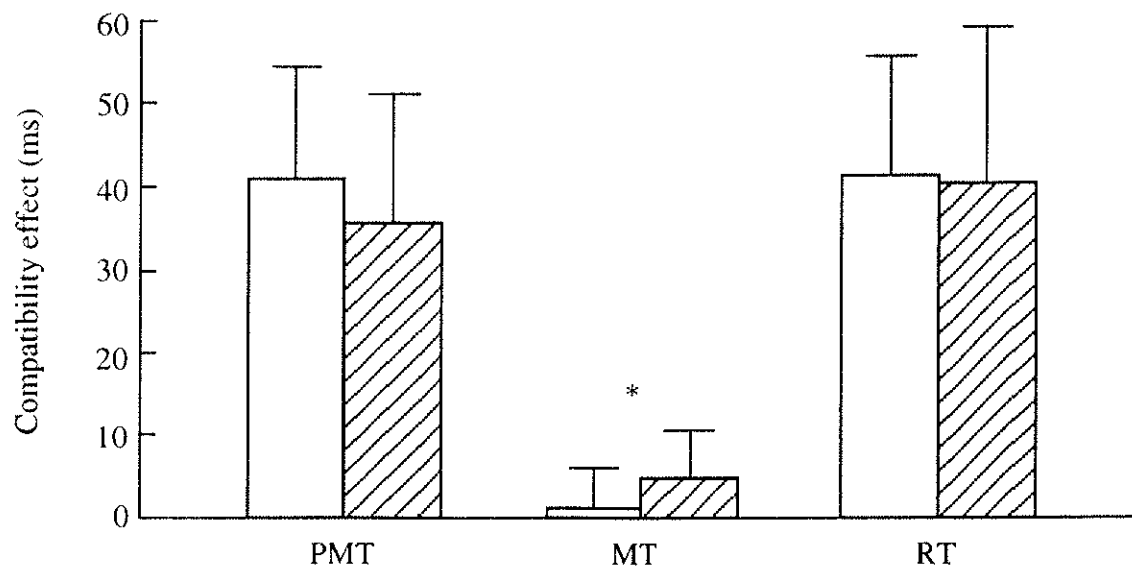


Fig. 19 Difference of S-R compatibility effect between hands (□) and feet (▨) response in Experiment 2.

PMT: premotor time, MT: motor time, RT: reaction time, * $p < 0.05$

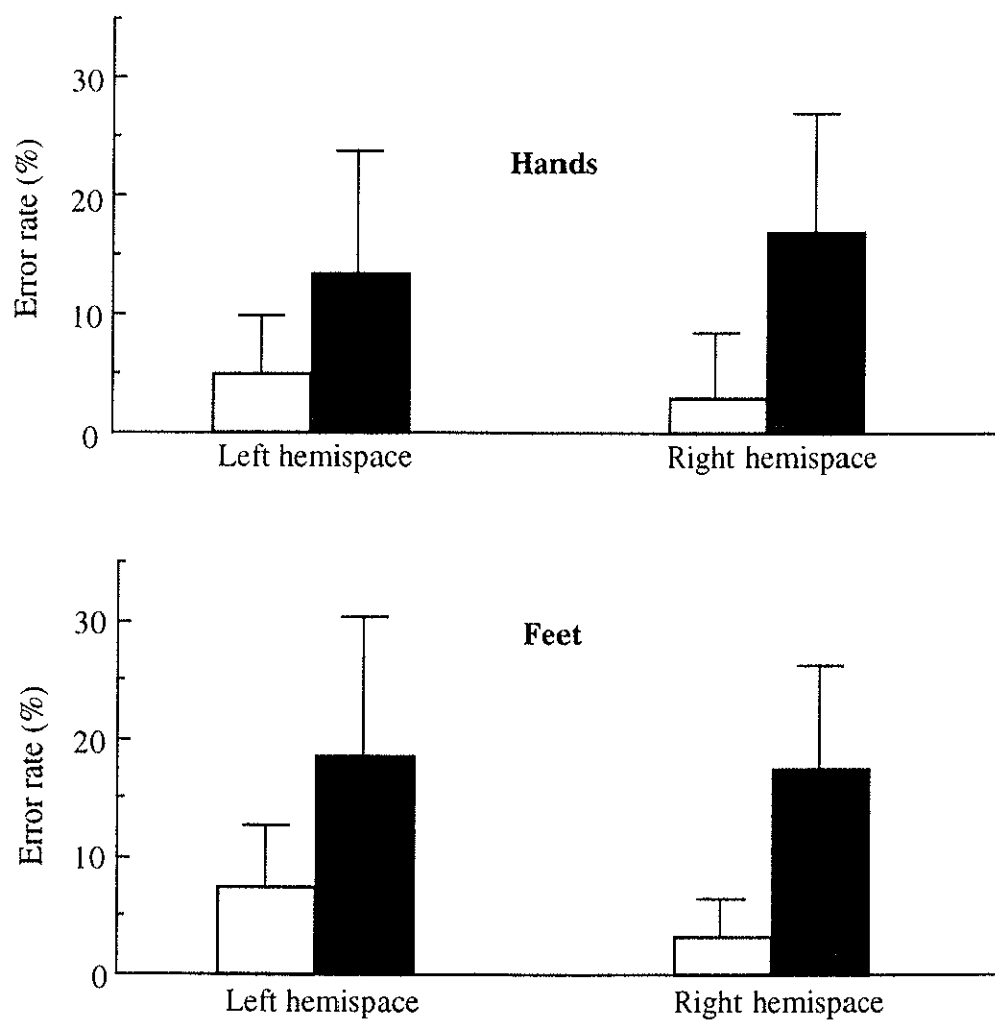


Fig. 20 Error rate (%) of compatible (□) and incompatible (■) tasks at both hemispacial conditions in Experiment 2.

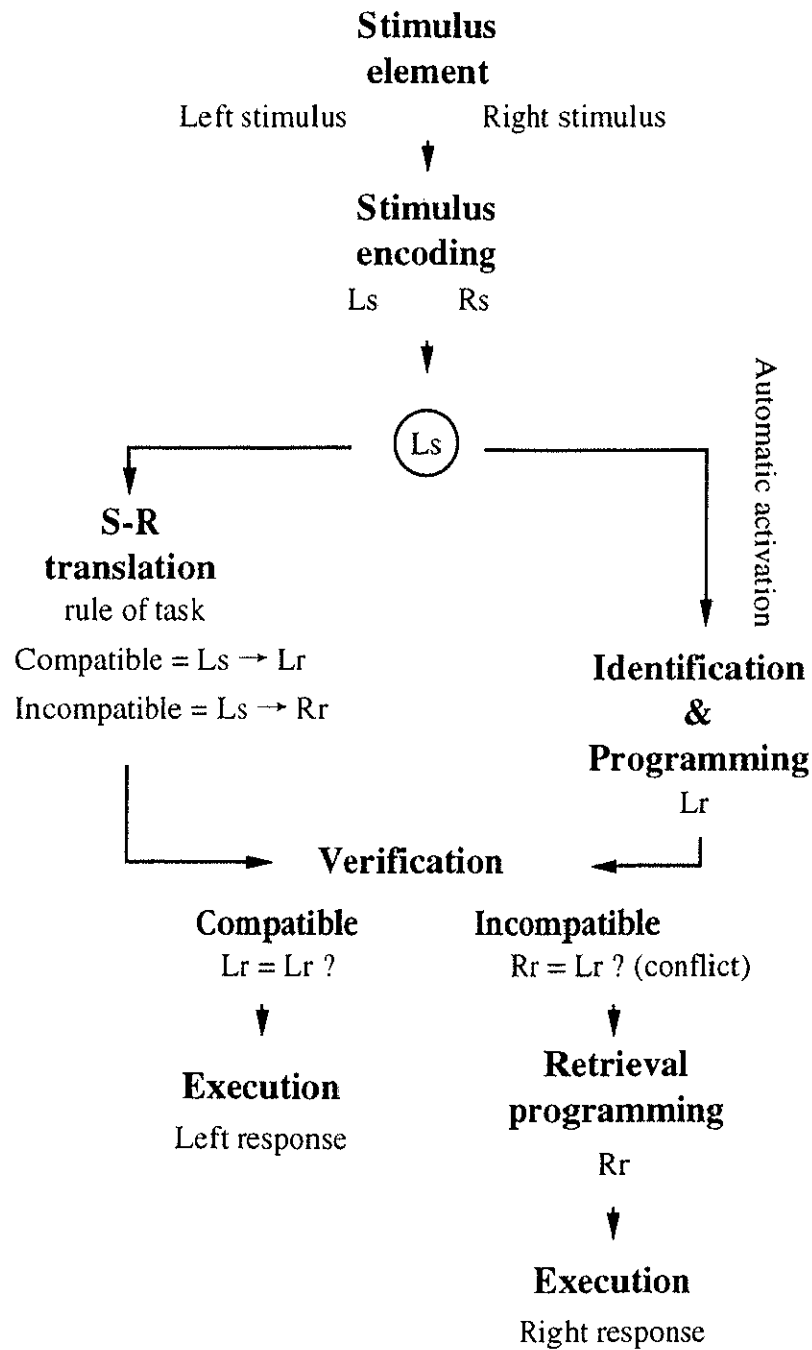


Fig. 21 Diagram of the information-processing operations in S-R compatibility task in the present study.

Table 2 Means and standard deviations (ms) for PMT, MT, RT of left and right hands or feet to lateralized visual stimuli at each hemispatial conditions in Experiment 2.

| Responding Side | Left hemisphere | | | | | | Right hemisphere | | | | | | |
|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | LVF | | | RVF | | | LVF | | | RVF | | | |
| | PMT | MT | RT | PMT | MT | RT | PMT | MT | RT | PMT | MT | RT | |
| Hand | Left | 163.8 (22.3) | 78.3 (9.6) | 242.2 (24.9) | 217.0 (25.3) | 77.7 (9.1) | 294.8 (23.2) | 168.4 (21.0) | 75.8 (8.2) | 244.2 (19.8) | 211.5 (27.6) | 76.9 (6.5) | 288.3 (26.4) |
| | Right | 200.6 (21.9) | 73.7 (9.5) | 274.3 (21.3) | 175.0 (20.0) | 72.7 (8.7) | 247.7 (20.2) | 217.5 (24.4) | 75.3 (6.6) | 292.8 (25.5) | 175.5 (18.2) | 75.3 (6.8) | 250.8 (17.0) |
| Foot | Left | 177.3 (20.8) | 79.7 (13.3) | 257.0 (24.2) | 218.7 (28.7) | 84.2 (13.7) | 302.9 (34.1) | 180.8 (26.2) | 76.3 (12.7) | 257.1 (32.9) | 213.1 (30.1) | 80.6 (15.1) | 293.7 (36.6) |
| | Right | 218.9 (34.4) | 83.5 (15.0) | 302.4 (34.4) | 186.4 (23.0) | 77.5 (15.3) | 263.9 (26.6) | 221.5 (24.7) | 78.5 (14.5) | 300.1 (28.4) | 185.1 (26.7) | 74.1 (13.0) | 259.2 (26.1) |

Mean (SD), PMT: premotor time, MT: motor time, RT: reaction time, LVF: left visual field, RVF: right visual field, bold values are compatible response.

第3節 小括

研究課題1では、筋電図（EMG）計測によって反応時間を Premotor time と Motor time に分け、S-R 整合性が異なる運動肢の選択反応時間に及ぼす影響を検討した。

実験1では、上肢と下肢の違いによって、S-R 整合性の Premotor time, Motor time に対する効果を検討した。その結果、Premotor time に対する S-R 整合性の効果は、上肢、下肢にかかわらず約 40~50 ms であった。Motor time に対する S-R 整合性の効果は、上肢には認められず、下肢において約 10 ms であった。また、単純反応課題での Motor time と比較すると、上肢に差異は認められなかったが、下肢では整合反応でさえ約 10 ms 遅延することが認められた。

実験2では、異なる反応動作空間におけるS-R 整合性の Premotor time, Motor time に対する効果を検討した。その結果、上肢、下肢ともに Premotor time に対する S-R 整合性の効果は、反応動作空間の違いに影響されなかった。また、下肢においては反応動作空間の違いには関係なく、Motor time に対する S-R 整合性の効果が認められた。

これらの結果より、中枢での情報処理時間は、運動肢が異なっても同じであり、情報処理時間に対する S-R 整合性の効果は、S-R 変換段階における刺激符号から反応符号への変換処理の差異によるという符号化モデルが適切であることが確認された。また、下肢の反応動作を制御する運動プログラムのパラメーターが S-R 整合性の効果を受けていると示唆された。これらのことより、反応プログラミング段階において自動的に賦活される反応符号と実行すべき反応動作に関する反応符号の間に競合が生じているという情報処理モデルが考案できた。