

神経伝導速度測定における誘導電
極と神経との間の距離の意義

落合直之

神経伝導速度測定における誘導電極と神経との間の距離の意義

落合直之

要 旨

末梢神経伝導速度測定は日常よく行われる検査であるが、伝導性神経活動電位の伝導距離を伝導時間（潜時の差）で割って求めている。本研究は、その潜時が伝導速度と伝導距離のみで決まるのではなく、神経と誘導電極との間の距離によっても無視できないほど左右されることを、臨床例で示している。

正中神経の順行性知覚神経活動電位（SNAP）を年齢23-40歳の健康な志願者11人の手関節部で測定した。8対の表面電極を手関節周囲に環状に貼付しSNAPを同時に測定し、その第1陰性頂点潜時を求めた。同部のCT像より正中神経と各遠位誘導電極までの距離を計測した。この距離と潜時の間に、負の直線関係があった。また、年齢25-40歳の健康な志願者9人の手関節部で4対の針電極を用い尺骨神経の順行性SNAPを同時誘導した。第1対は神経直上より神経近傍へ刺入した。他の3対はそれより橈側へ1cmずつ離し第1対と平行に刺入した。誘導電極が神経より遠ざかるほど第1陽性頂点潜時も第1陰性頂点潜時も短縮した。その程度は陽性頂点潜時の方が大きく、また、近位誘導電極の位置よりも遠位誘導電極の位置の方が潜時に大きく影響した。

表面電極と針電極で導出したときの潜時を比較すると、前者の方が第1陽性頂点潜時、第1陰性頂点潜時ともに短かった。

Woodburyの説を前提とし、神経と誘導電極との間の距離と潜時の間に負の直線関係があるという観察結果から表面電極を多数用いることによって理論的に神経と誘導電極との間の距離が0のときの潜時を推定できることを示している。

緒 言

神経伝導速度は、伝導性神経活動電位の伝導距離を伝導時間（潜時の差）で割って求めるのが普通である。すなわち、潜時が伝導距離に比例し、伝導速度に反比例するという前提に立って神経伝導速度を計算している。しかし、神経活動電位の潜時は伝導距離と伝導速度のみで決まるのではなく、神経と誘導電極との間の距離（以下、神経電極間距離）によっても左右される^{8) 14) 17)}。このことは、これまで臨床における神経伝導速度測定において考慮されていない。

本研究の目的は、実際の潜時測定に当たりこの要因がいかに関与しているかに測定値に影響するかを人体で観察し、より正確な潜時の実証的な求め方を明らかにすることである。

方 法

対象は、神経と誘導電極の相対的位置関係を確認できると共に、この位置関係の変化に伴う潜時の変化を観察し易い部位が適している。すなわち、神経の解剖的位置を同定し易いこと、神経の位置の確認にコンピューター断層像（CT）を用いることができること、伝導距離が比較的短く、潜時が小さく、潜時の小さい違いを顕在化させることができることが望ましい。そこで、手関節部で測定した正中神経と尺骨神経の順行性知覚神経活動電位（SNAP）を研究の対象とした。

測定 I、表面電極による観察

1、対象

年齢 23 - 40 歳の健康な志願者 11 人の手関節部で誘導した正

中神経のSNAPを用いた。

2、電極とその配置

誘導電極として8対の直径7mmの表面電極(DISA13L20)を前腕遠位部に環状に電極糊で貼付した(図1)。これら誘導電極は前腕長軸にそって2.5cm離れた遠位、近位2つの電極をもって1対とし、遠位の電極を手関節遠位皮膚皺壁より近位3cmの位置に、近位の電極をその2.5cm近位にそれぞれ配置した。第1対の誘導電極は長掌筋腱上の皮膚表面に貼付した。他の電極は第1対の電極から橈側方向へ2cm間隔で第1対誘導電極に平行に配列した(図1)。その結果、第8対誘導電極と第1対誘導電極間距離は被検者の手関節周囲長により異なることとなった。刺激電極として1対の環状電極(DISA13L69)を中指のDIP関節と、PIP関節とに巻き付けた。従って、順行性SNAPは末梢より中枢へ、すなわち、遠位電極ついで近位電極と到達することになる。

3、測定装置と測定条件

測定にはEvomatic 8000 システム(DANTEC Co.)を用い、上記8対の電極より同時誘導した。刺激の条件は刺激電流を閾値の3倍とし、持続時間0.1ms、刺激頻度2Hzの矩形波とした。通過周波数帯域は1Hz-2KHzとし100回加算平均した波形を記録した。

4、神経と誘導電極との距離

8個の遠位誘導電極と正中神経との幾何学的位置関係を知る目的で、手関節部遠位皮膚皺壁より3cm近位で前腕の長軸に直交する面のCTを撮影した。CT撮影には東芝TCT60A-60CTシステムを用いた。CT写真上(拡大率3.4-3.9)で遠位誘導電極の位置を同定した。それには、先ず写真上の前腕周囲長をDigitizer(Graphtec KD 3030L)



図1 正中神経順行性SNAP測定のための電極配置

前腕遠位部に8対の表面電極 (DISA13L20) を電極糊で貼付した。1対の電極は前腕長軸に沿って2.5cm間隔で置いた遠位と近位電極よりなる。第1対の電極は、長掌筋腱上で手関節遠位皮膚縦壁より3cm近位の皮膚表面上に遠位の電極の中心が来るように設置した。残りの7対の電極は第1対より桡側回りに2cm間隔で順次設置した。この図では第3対から第7対までの電極は背側にあるため見えない。刺激のための環状電極 (DISA13L69) は近位が陰極、遠位が陽極となるように中指に設置してある。

を用い計測し、その値を、巻尺で実測した撮影高位の前腕周囲長で除すことによりCT写真の拡大率を算出した。次に、体表から触知可能な長掌筋腱の像をCT写真上で同定し、その腱の直上の皮膚を第1対の電極の中心の位置とし、この点を基点として桡側へ写真の拡大

率を考慮して2 cm間隔ごとに他の7個の電極位置を図2のようにCT写真上に求めた。このCT写真上で解剖図譜を参考に正中神経を同定し¹³⁾¹⁵⁾、その中心から8個の電極中心までの距離をDigitizer (Graphtec KD 3030L) を用い計測した。

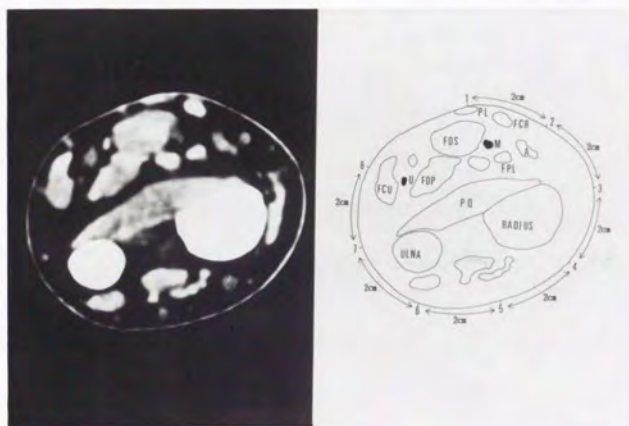


図2 正中神経と表面電極の位置関係

左は前腕の長軸に垂直なコンピューター断層写真で、手関節遠位皮膚離壁より3cm近位すなわち遠位の電極の高位の横断画像である。右はその模式図。M:正中神経、U:尺骨神経、PL:長掌筋腱、FCR:橈側手根屈筋腱、FDS:浅指屈筋腱、FDP:深指屈筋腱、FPL:長母指屈筋腱、FCU:尺側手根屈筋腱、PQ:方形回内筋、A:橈骨動脈、数字は皮膚上の電極の位置を示している。1は長掌筋腱上に置いた第1対の電極の位置で、2から8は橈側回りに2 cm間隔で配列した電極の位置に当たる。

測定II、針電極による観察

一般に第1陽性頂点潜時は末梢神経の最大伝導速度を有する線維の活動電位の潜時とされ、末梢神経の伝導速度測定の際に潜時の代表値として用いられることが多い^{2) 4) 5)}。しかし、上述の8対の表面電極で同時誘導した場合、SNAPの陰性頂点は明瞭であるが、誘導電極が長掌筋腱より遠ざかると第1陽性頂点は不明瞭になり潜時の測定が難しかった。

そこで、第1陰性頂点潜時だけでなく第1陽性頂点潜時も観察する目的で以下の測定をした。

1、対象

年齢25-40歳の健康な志願者9名の手関節部で誘導した尺骨神経のSNAPを用いた。

2、電極とその配置

4対の直径0.2mm、長さ13mmのステンレス針電極を電極間距離2.5cmで図3のように手関節部掌側に刺入し尺骨神経の順行性SNAPを同時誘導した。第1対の電極は尺骨神経にそって設置した。第1対の電極の先端が尺骨神経に極めて近くに設置されていることは、この電極に持続時間0.1ms、2-3mAの弱い刺激電流を流すと小指外転筋がよく収縮することによって確認した。他の3対の電極は、尺骨神経の桡側へ1cmの間隔で第1対と平行に刺入した。刺激電極には測定Iと同じ電極を小指に巻き付けた。

3、測定装置と測定条件

測定機器と測定条件は測定Iと同じものを用いた。

また、この観察では遠位電極と近位電極のどちらが直接潜時に影響するかを調べる目的で以下の測定をした。

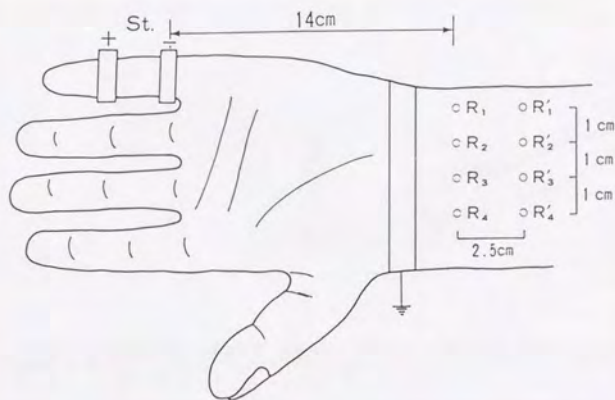


図3 針電極による尺骨神経の順行性SNAP測定

St:小指に設置した刺激用環状電極 (DISA13L69)、 R_n および R'_n ($n=1\sim 4$):前腕遠位部掌側に刺入した4対の針電極の位置。近位と遠位の電極の間の距離は2.5cmに、隣合う電極との距離は1cmに、第1対 ($R_1-R'_1$) は尺骨神経の走行に極めて近く刺入した。

上述の神経から最も離れた第4対の電極の近位電極を共通の不関電極とし、上記4対の遠位電極間とで新たな4対の誘導電極を構成し尺骨神経の順行性SNAPを同時誘導した。

測定III、表面電極と針電極の比較

表面電極と針電極で誘導するときの潜時の違いを見るために、同じ高位で同時に表面電極と針電極とで測定できるように、表面電極

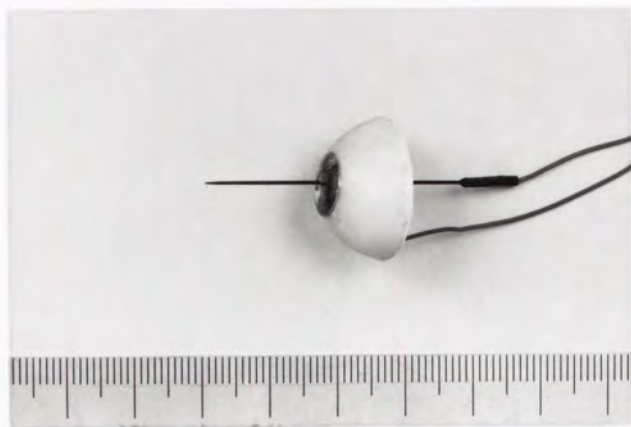


図4 著者考案の表面電極と針電極とを組み合わせた電極。
直径9 mmの表面電極の中心に径2 mmの孔がある。先端部
1 mmを除いて絶縁された直径0.5 mmのステンレス針電極が
この孔を自由に通過できるようになっている。

の中心を針電極が貫通する電極を作製した(図4)。測定IIの第1
対の電極の遠位電極に代えてこの電極を刺入し、その2.5 cm近位に刺
入した針電極との間で2対の誘導電極を構成し、尺骨神経の順行性
SNAPを同時に導出した。この観察は作製した針電極が太く侵襲的な
ので1例のみにとどめた。

結果

測定I

8対の表面電極で誘導した正中神経のSNAPは図5のようであった。

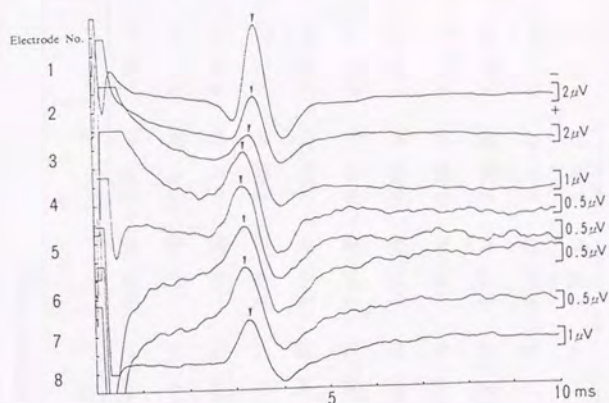


図5 8対の電極で同時記録した正中神経のSNAP

志願者N.O、男性、40歳

上から順にみて行くと誘導電極が掌側の第1対から橈背側の第4、5対へ移行するにつれ第1陰性頂点潜時は短縮し、第6、7、8対と電極が背尺側を経て再び掌側に戻ると潜時も第1対の値へと近づいてくる。陰性電位の立ち上がり潜時も陰性頂点潜時と同様の傾向を示しているが、第1陽性電位は第1対及び第2対の電極による誘導以外は明瞭でない。刺激は7.2mAの強さ。較正值は各記録で異なる。

陰性頂点潜時は、誘導電極が神経より遠ざかると短縮した。11名の被検者の潜時及び距離の測定値は表1のようであった。また、神経電極間距離に対する陰性頂点潜時の回帰式、相関係数及び確率(P値)は表2のようであった。

表1 脱生点法時および神経電極間距離の測定値

Subject	Age	Conduction Distance(mm)	Leading Points															
			1	2	3	4	5	6	7	8								
			L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D
N.I	23	170	4.22,	8	4.20,	13	4.08,	28	3.96,	34	4.00,	37	3.98,	43	3.92,	34	4.08,	21
H.K	25	170	3.52,	8	3.46,	14	3.36,	30	3.24,	38	3.22,	40	3.24,	44	3.24,	41	3.32,	32
M.Y	25	160	4.60,	8	4.57,	13	4.44,	29	4.28,	33	4.25,	35	4.32,	42	4.44,	40	4.53,	25
K.I	27	165	3.82,	8	3.75,	12	3.67,	28	3.65,	35	3.57,	37	3.64,	43	3.54,	42	3.64,	27
H.B	28	175	3.81,	8	3.77,	11	3.72,	28	3.70,	33	3.60,	37	3.52,	43	3.66,	44	3.64,	32
S.K	31	165	3.82,	11	3.82,	15	3.72,	28	3.60,	35	3.46,	39	3.54,	43	3.58,	40	3.56,	30
T.Y	32	165	4.18,	8	4.14,	13	4.02,	30	3.86,	40	3.92,	42	3.84,	46	3.88,	45	4.04,	36
K.H	35	180	3.90,	12	3.89,	14	3.80,	28	3.75,	36	3.67,	40	3.59,	44	3.63,	43	3.61,	38
H.O	36	155	3.56,	7	3.55,	13	3.42,	30	3.38,	37	3.19,	36	3.28,	39	3.24,	38	3.36,	24
H.I	36	180	4.28,	8	4.24,	13	4.24,	29	4.11,	36	4.04,	37	4.12,	42	4.08,	41	4.12,	29
N.O	40	170	3.60,	12	3.64,	9	3.60,	27	3.44,	37	3.36,	42	3.34,	46	3.36,	44	3.39,	36

L: latency(ms), D: distance(mm)

表2 陰性頂点潜時と神経電極間距離との相関。

Subject	Regression Equation	r	P-Value	Revised Latency*	△ Latency/cm	△ Latency/cm/Revised Latency
N.I	$Y=4.28-0.00828X$	-0.915	$P<0.01$	4.28 ± 0.16 ms	0.08ms/cm	2.0%/cm
H.K	$Y=3.59-0.00846X$	-0.984	$P<0.001$	3.59 ± 0.07 ms	0.08ms/cm	2.4%/cm
M.Y	$Y=4.88-0.00879X$	-0.803	$P<0.05$	4.88 ± 0.29 ms	0.09ms/cm	1.9%/cm
K.I	$Y=3.84-0.00823X$	-0.903	$P<0.01$	3.84 ± 0.14 ms	0.06ms/cm	1.6%/cm
H.B	$Y=3.85-0.00597X$	-0.862	$P<0.01$	3.85 ± 0.17 ms	0.06ms/cm	1.6%/cm
S.K	$Y=3.95-0.0104X$	-0.910	$P<0.01$	3.95 ± 0.21 ms	0.10ms/cm	2.6%/cm
T.Y	$Y=4.26-0.00844X$	-0.945	$P<0.001$	4.26 ± 0.15 ms	0.08ms/cm	2.0%/cm
K.H	$Y=4.03-0.00933X$	-0.953	$P<0.001$	4.03 ± 0.14 ms	0.09ms/cm	2.3%/cm
H.O	$Y=3.64-0.00969X$	-0.876	$P<0.01$	3.64 ± 0.24 ms	0.10ms/cm	2.7%/cm
H.I	$Y=4.33-0.00586X$	-0.849	$P<0.01$	4.33 ± 0.17 ms	0.06ms/cm	1.4%/cm
N.O	$Y=3.73-0.00832X$	-0.938	$P<0.001$	3.73 ± 0.16 ms	0.08ms/cm	2.2%/cm
Mean±SD					0.08±0.02ms/cm	Mean±SD 2.1±0.4%/cm

X: Distance(mm), Y: Latency(ms), * : 95% Confidence Limit

△ Latency/cm : 遠位誘発電極が神経より1cm遠ざかるときの潜時の短縮量。 Revised Latency : 神経電極間距離を0にしたときの潜時。

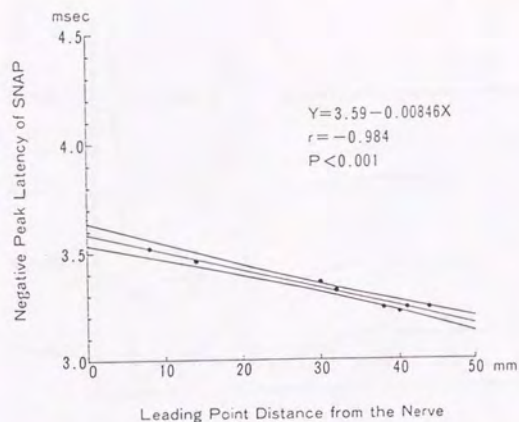


図 6 神経電極間距離と第 1 陰性頂点潜時との関係

志願者 H.K、男性、25 歳

両者の間に強い負の直線関係がある。中央の細い直線は回帰直線を、上下の太い曲線は 95% 信頼限界を示す。

図 6 の相関図の回帰直線上で神経電極間距離を 0 mm へ外挿して神経と電極との間の距離が 0 の時の潜時（仮に修正潜時と呼ぶ）を求めると、11 名の被検者の修正潜時は 95% の信頼限界で表 2 のようになった。この修正潜時に対して陰性頂点潜時は誘導電極が 1 cm 神経より遠ざかると平均 0.08 ms あるいは 2.1% 短縮していた。

測定 II

4 対の針電極で誘導した尺骨神経の SNAP は図 7、及び図 8 のようであった。第 1 陰性頂点潜時は誘導電極が神経より遠ざかるとともに短縮したが、第 1 陽性頂点潜時はそれよりもさらに著明に短縮し

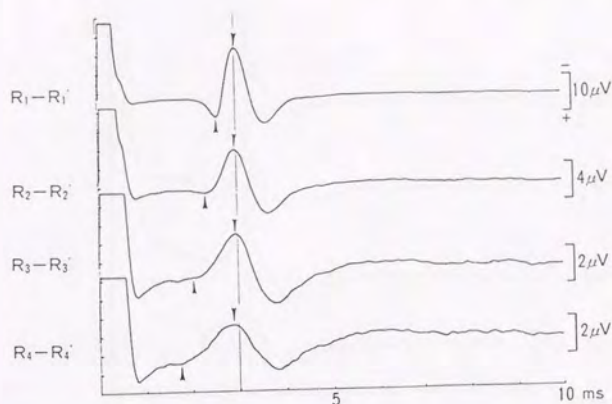


図7 針電極で導出した尺骨神経SNAP（誘導電極が $R_n-R'_n$ の場合） 志願者Y.O、男性、28歳

4つの記録波形はそれぞれ図3の $R_1-R'_1$ から $R_4-R'_4$ までの4対の誘導電極で記録している。誘導電極が神経より遠ざかるとSNAPの第1陽性頂点潜時（上向き矢印）も第1陰性頂点潜時（下向き矢印）も短縮するが陽性頂点潜時の方が短縮の程度が大きい。刺激は6.7mAの強さ。較正值は各記録波形で異なる。

た。近位の誘導電極を遠位の誘導電極と共に神経より遠ざけても（図7）、一定の位置に固定していても（図8）、これら潜時の短縮傾向は同じであった。このことは潜時に強く影響するのは遠位の誘導電極の位置であることを示唆している。針電極で誘導した9例の各潜時は表3Aと3Bのようであった。図9A、9B、9C、9Dに示すように、

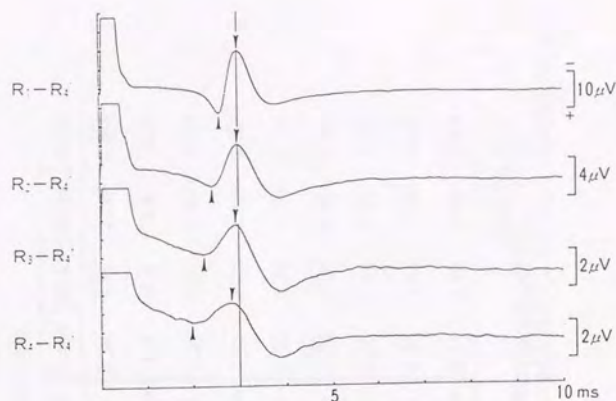


図8 針電極で導出した尺骨神経SNAP（誘導電極が $R_n-R'_4$ の場合） 図7と同一例

図7と同じ4つの遠位電極（ R_1, R_2, R_3, R_4 ）を用い、近位電極（ R'_4 ）を共通にして誘導した。電極が神経より遠ざかると頂点潜時が短縮する傾向は図7と同様である。刺激は6.7mA。較正值は各記録波形で異なる。

これらの潜時は神経電極間距離と直線関係にあった。表4A、4B、4C、4Dに誘導電極の異なる組合せごとの神経電極間距離に対する陽性ならびに陰性頂点潜時の回帰式、相関係数及び確率（P値）を示す。第1陽性頂点潜時は近位電極と遠位電極がともに1cmずつ神経から遠ざかるごとに0.32ms短縮または修正潜時に対して10.1%短縮した（表4A）。近位電極の位置は一定で、遠位電極のみが遠ざかる場合は1cmあたりそれぞれ0.26msあるいは8.7%短縮した（表4B）。第1陰

表3A 針電極で測定したSNAPの第1陽性頂点潜時

Subject	Age	Conduction Distance(mm)	Leading Points							
			R1-R1'	R2-R2'	R3-R3'	R4-R4'	R1-R4'	R2-R4'	R3-R4'	R4-R4'
M.Y	25	130	3.44	3.20	2.96*	2.68*	3.59	3.46	3.24*	2.56*
K.I	27	135	3.56	3.39	2.84**	2.30**	N.R	N.R	N.R	N.R
H.B	28	140	3.08	2.95	2.32**	2.12*	3.08	2.97	2.69**	2.23*
K.H	35	145	3.33	3.08	2.77**	1.78**	3.28	3.02	2.70**	2.40**
H.O	36	125	2.52	2.33	1.96*	1.64*	2.55	2.36	1.76*	1.53*
H.I	36	150	3.04	2.78	2.60	2.29*	3.04	2.94	2.68*	2.40*
N.O	40	135	2.98	2.89	2.74	2.50*	2.88	2.76	2.64	2.12
Y.O	28	140	2.60	2.38	2.08*	1.74*	2.60	2.44	2.28*	2.04*
T.G	30	145	2.88	2.68	2.32**	1.95**	2.88	2.68	2.53	2.32*

Measured in ms

*: 基線の傾きのため陽性成分の立ち上がりが見えなかった陽性成分変曲点を陽性頂点としている。

**: 基線より直接陰性成分が始まり初期陽性成分が不明瞭。この場合は陰性成分の立ち上がりを陽性頂点とした。
NR: not recorded

表3B 針電極で測定したSNAPの第1陰性頂点潜時。

Subject	Age	Conduction Distance(mm)	Leading Points							
			R1-R1'	R2-R2'	R3-R3'	R4-R4'	R1-R4'	R2-R4'	R3-R4'	R4-R4'
M.Y	25	130	4.04	4.00	3.96	3.82	4.24	4.22	4.12	3.98
K.I	27	135	4.28	4.16	4.12	3.98	N.R	N.R	N.R	N.R
H.B	28	140	3.52	3.48	3.34	3.28	3.52	3.50	3.38	3.28
K.H	35	145	3.74	3.66	3.59	3.40	3.70	3.60	3.56	3.28
H.O	36	125	3.00	2.96	2.93	2.78	3.00	2.99	2.93	2.80
H.I	36	150	3.71	3.64	3.59	3.44	3.72	3.68	3.56	3.36
N.O	40	135	3.48	3.44	3.30	3.20	3.32	3.28	3.20	3.00
Y.O	28	140	2.98	2.94	2.92	2.88	3.00	2.98	2.94	2.86
T.G	30	145	3.36	3.28	3.22	3.10	3.40	3.32	3.24	3.11

Measured in ms

NR: not recorded

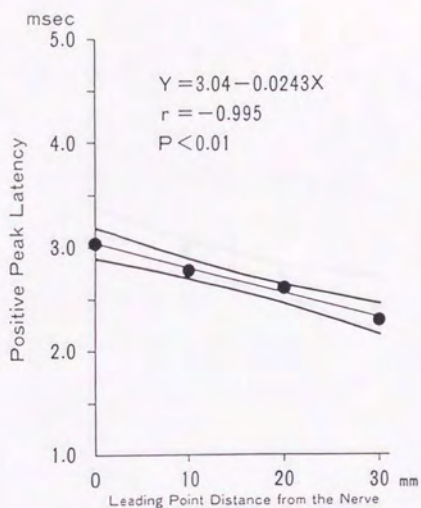


図9A

図9A, 9B, 9C, 9D 神経電極間距離と各頂点潜時との関係

志願者H.I、男性、36歳 中央の細い直線は回帰直線を、
上下の太い曲線は95%信頼限界を示す。

図9A、誘導電極がRn-R'nの場合の陽性頂点潜時について

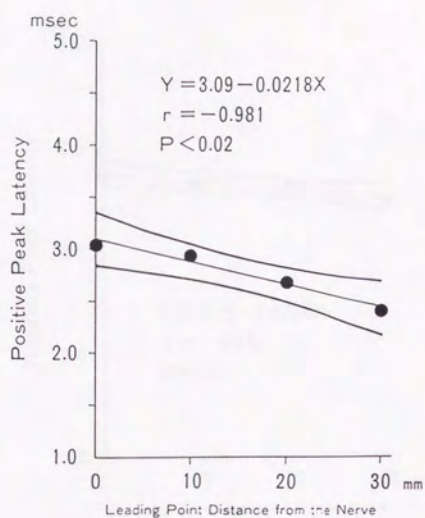


図9B

図9B、誘導電極がRn-R'4の場合の陽性頂点潜時について

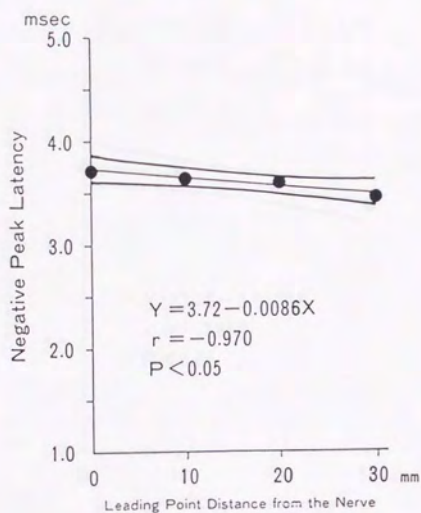


図9C

図9C、誘導電極がRn-R'nの場合の陰性頂点潜時について

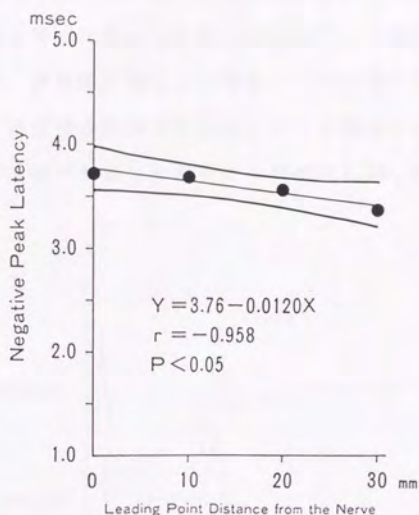


図9D

図9D、誘導電極がRn-R'4の場合の陰性頂点潜時について

性頂点潜時は近位電極と遠位電極とがともに1 cm神経から遠ざかると0.08msまたは修正潜時に対して2.2%短縮し(表4C)、近位電極の位置を一定として遠位電極のみが遠ざかる場合は1 cmあたり0.09msあるいは2.6%短縮した(表4D)。すなわち、同じ測定法では第1陽性頂点潜時は第1陰性頂点潜時よりも3.3から4.6倍多く神経電極間距離の影響を受けていた。

測定III

図4の著者考案の電極による尺骨神経SNAPの測定結果は図10のよ

うであった。この例では、表面電極から針電極先端までの距離すなわち尺骨神経の体表からの深さは8mmであった。表面電極で測定した電位は、針電極で測定した電位に比べて第1陰性頂点潜時が0.04ms、第1陽性頂点潜時が0.22msそれぞれ短縮した。これらの潜時短縮は、針電極で測定した潜時のそれぞれ1.3%、8.5%に当たった。

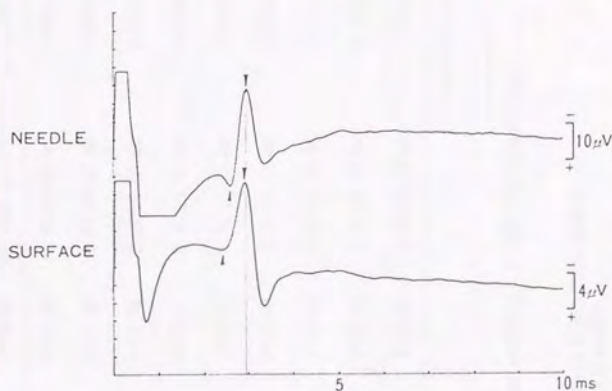


図10 針電極と表面電極の比較 志願者O.A、男性、28歳

図3のR1の代わりに図4に示した電極を遠位電極として用い、R'1を共通の近位電極として誘導した尺骨神経のSNAP。上段は針電極を用いたもので第1陽性頂点潜時は2.50ms、第1陰性頂点潜時は2.98msである。下段は表面電極を用いたもので第1陽性頂点潜時は2.38ms、第1陰性頂点潜時は2.94msである。針電極より表面電極を用いた方が両頂点潜時も短縮している。刺激強度は7.0mA。

表4A 第1陽性頂点潜時と神経電極間距離との相関 電極n-R'nを用いた場合

Subject	Regression Equation	r	P-Value	Revised Latency*	Δ Latency/cm	Δ Latency/cm/Revised Latency
M.Y	$Y=3.45-0.0252X$	-0.999	$P<0.001$	3.45 ± 0.06 ms	0.25ms/cm	7.2 %/cm
K.I	$Y=3.67-0.0433X$	-0.978	$P<0.05$	3.67 ± 0.52 ms	0.43ms/cm	11.7 %/cm
H.B	$Y=3.14-0.0351X$	-0.966	$P<0.05$	3.14 ± 0.54 ms	0.35ms/cm	11.1 %/cm
K.H	$Y=3.48-0.0496X$	-0.942	$P<0.1$	3.48 ± 1.01 ms	0.50ms/cm	14.4 %/cm
H.O	$Y=2.56-0.0301X$	-0.993	$P<0.01$	2.56 ± 0.21 ms	0.30ms/cm	11.7 %/cm
H.I	$Y=3.04-0.0243X$	-0.995	$P<0.01$	3.04 ± 0.14 ms	0.24ms/cm	7.9 %/cm
N.O	$Y=3.02-0.0159X$	-0.978	$P<0.05$	3.02 ± 0.19 ms	0.16ms/cm	5.3 %/cm
Y.O	$Y=2.63-0.0288X$	-0.996	$P<0.01$	2.63 ± 0.15 ms	0.29ms/cm	11.0 %/cm
T.G	$Y=2.93-0.0315X$	-0.992	$P<0.01$	2.93 ± 0.23 ms	0.32ms/cm	10.9 %/cm
Mean \pm SD					0.32 ± 0.10 ms/cm	Mean \pm SD 10.1 ± 2.6 %/cm

X: Distance(mm), Y: Latency(ms), *: 95% Confidence Limit

表4A, 4B, 4C, 4D 頂点潜時と神経電極間距離との相関

Δ Latency/cmは、迅位誘導電極が神経より1cm退ざかるときの潜時の短縮量。
 Revised Latencyは、神経電極間距離を0に外挿したときの潜時。

表4B 第1陽性頂点潜時と神経電極間距離との相関 電極n-R'4を用いた場合

Subject	Regression Equation	r	P-Value	Revised Latency*	Δ Latency/cm	Δ Latency/cm/Revised Latency
M.Y	$Y=3.71-0.0331X$	-0.932	$P<0.1$	3.71 ± 0.73 ms	0.33ms/cm	8.9 %/cm
H.B	$Y=3.17-0.0283X$	-0.964	$P<0.05$	3.17 ± 0.45 ms	0.28ms/cm	8.9 %/cm
K.H	$Y=3.29-0.0296X$	-0.999	$P<0.001$	3.29 ± 0.07 ms	0.30ms/cm	9.1 %/cm
H.O	$Y=2.60-0.0366X$	-0.978	$P<0.05$	2.60 ± 0.45 ms	0.37ms/cm	14.2 %/cm
H.I	$Y=3.09-0.0218X$	-0.981	$P<0.02$	3.09 ± 0.24 ms	0.22ms/cm	7.1 %/cm
N.O	$Y=2.96-0.0240X$	-0.926	$P<0.1$	2.96 ± 0.56 ms	0.24ms/cm	8.1 %/cm
Y.O	$Y=2.62-0.0184X$	-0.994	$P<0.01$	2.62 ± 0.11 ms	0.18ms/cm	6.9 %/cm
T.G	$Y=2.88-0.0183X$	-0.998	$P<0.01$	2.88 ± 0.06 ms	0.18ms/cm	6.3 %/cm
Mean \pm SD					0.26 ± 0.08 ms/cm	Mean \pm SD 8.7 ± 2.3 %/cm

X: Distance(mm), Y: Latency(ms), * : 95% Confidence Limit

表4C 第1陰性頂点潜時と神経電極間距離との相関 電極Rn-R'nを用いた場合

Subject	Regression Equation	r	P-Value	Revised Latency*	Δ Latency/cm	Δ Latency/cm/Revised Latency
M.Y	$Y=4.06-0.0070X$	-0.944	$P<0.1$	4.06 ± 0.14 ms	0.07ms/cm	1.7%/cm
K.I	$Y=4.28-0.0034X$	-0.981	$P<0.02$	4.28 ± 0.11 ms	0.09ms/cm	2.1%/cm
H.B	$Y=3.53-0.0086X$	-0.978	$P<0.05$	3.53 ± 0.11 ms	0.09ms/cm	2.5%/cm
K.H	$Y=3.76-0.0109X$	-0.969	$P<0.05$	3.76 ± 0.16 ms	0.11ms/cm	2.9%/cm
H.O	$Y=3.02-0.0069X$	-0.927	$P<0.1$	3.02 ± 0.16 ms	0.07ms/cm	2.3%/cm
H.I	$Y=3.72-0.0086X$	-0.970	$P<0.05$	3.72 ± 0.12 ms	0.09ms/cm	2.4%/cm
N.O	$Y=3.50-0.0088X$	-0.981	$P<0.02$	3.50 ± 0.11 ms	0.10ms/cm	2.9%/cm
Y.O	$Y=2.98-0.0032X$	-0.992	$P<0.01$	2.98 ± 0.02 ms	0.03ms/cm	1.0%/cm
T.G	$Y=3.37-0.0084X$	-0.990	$P<0.02$	3.37 ± 0.07 ms	0.08ms/cm	2.4%/cm
Mean \pm SD 0.08 \pm 0.02ms/cm					Mean \pm SD 2.2 \pm 0.6%/cm	

X:Distance(mm), Y:Latency(ms), *:95% Confidence Limit

表4D 第1陰性頂点潜時と神経電極間距離との相関 電極n-R' 4を用いた場合

Subject	Regression Equation	r	P-Value	Revised Latency*	Δ Latency/cm	Δ Latency/cm/Revised Latency
H.Y	$Y=4.27-0.0088X$	-0.956	$P<0.05$	4.27 ± 0.15 ms	0.09ms/cm	2.1 %/cm
H.B	$Y=3.55-0.0084X$	-0.969	$P<0.05$	3.55 ± 0.12 ms	0.06ms/cm	2.3 %/cm
K.H	$Y=3.73-0.0130X$	-0.933	$P<0.1$	3.73 ± 0.23 ms	0.13ms/cm	3.5 %/cm
H.O	$Y=3.03-0.0066X$	-0.926	$P<0.1$	3.03 ± 0.15 ms	0.07ms/cm	2.3 %/cm
H.I	$Y=3.76-0.0120X$	-0.956	$P<0.05$	3.76 ± 0.20 ms	0.12ms/cm	3.2 %/cm
N.O	$Y=3.36-0.0104X$	-0.943	$P<0.1$	3.36 ± 0.21 ms	0.10ms/cm	3.0 %/cm
Y.O	$Y=3.01-0.0046X$	-0.959	$P<0.05$	3.01 ± 0.08 ms	0.05ms/cm	1.7 %/cm
T.G	$Y=3.41-0.0085X$	-0.992	$P<0.01$	3.41 ± 0.07 ms	0.10ms/cm	2.9 %/cm
Mean \pm SD 0.09 \pm 0.03 ms/cm					Mean \pm SD 2.6 \pm 0.6 %/cm	

X:Distance(mm), Y:Latency(ms), *:95% Confidence limit

考察

以上の観察結果は次のように要約できる。1)誘導電極が神経より遠ざかると、SNAPの第1陽性頂点潜時と第1陰性頂点潜時が短縮する。2)その程度は、第1陽性頂点潜時の方が第1陰性頂点潜時よりも大きい。3)頂点潜時に大きく影響するのは、近位電極ではなく遠位電極の位置である。4)同じ部位の表面電極と針電極とを比較すると前者の方が潜時の値は小さい。これらの現象及び理論的な推定値である修正潜時の臨床的意義について考察する。

神経伝導速度の測定精度は潜時と伝導距離の測定精度によって決まると考えられてきた。⁷⁾⁹⁾¹²⁾¹⁶⁾ これら2つの値の測定誤差の原因として、3点がこれまでに指摘されている。1)必要以上に強い刺激を用いること。過大な刺激をもちいると、刺激電流密度が神経活動を誘発するに足る値以上になる範囲が組織内で拡大し、有効刺激点が誘導電極側に前進し、潜時が見かけ上短縮する。⁷⁾¹⁶⁾ 2)体表表面よりの伝導距離の測定。末梢神経は必ずしも体表から同一の深度で走行しておらず、また関節をこえると方向も変わるので、神経を展開して直接に距離を測定しない限り測定精度に限界がある。⁹⁾ 3)遠隔電位の影響。近位電極を通して入り込む遠隔電位のため神経活動電位の波形が歪み基線からの立ち上がりが不鮮明になる。¹²⁾ 本研究の観察結果はこれらに加えて、神経電極間距離がもう一つの考慮すべき重要な因子であることを示した。

容積導体内で神経活動電位を誘導すると、誘導電極の位置によりその波形、振幅が影響されることはこれまでに指摘されている。¹⁾ しかし、潜時についての詳細な言及はない。本研究の結果によれば、神経から誘導電極が遠ざかるほど常に第1陽性

頂点潜時も第1陰性頂点潜時も短縮し、その短縮の程度は第1陽性頂点潜時の方が第1陰性頂点潜時よりも3.3から4.6倍大きかった。日常検査では、SNAPの潜時として第1陽性頂点潜時または第1陰性頂点潜時が使用されているが、一般には前者が用いられている。²⁾
^{4) 5)} その理由は、前者が最大伝導速度を有する神経線維の潜時を示すと考えられているからである。本研究の結果を考慮すると、第1陽性頂点潜時よりも神経電極間距離の影響がより少ない第1陰性頂点潜時を潜時の代表値として採用する方が合理的である。

頂点潜時に影響するのは遠位誘導電極と神経との間の距離であって、近位誘導電極と神経との間の距離の影響は少なかった(図7、8)。この現象はWoodburyの説¹⁷⁾を用いて説明しうる。この説を用いると、図11に示したようにx-y平面上の点P(X,Y)が神経活動電位から受ける電位E_pは、

$$E_p = K \times (\Omega_1 - \Omega_2)$$

と表される。この式を用いると、図12のように、神経の長軸をx軸、相対する双極子の中点を通り神経の長軸に直交する直線をy軸とし、不関電極を無限遠点に置いた場合、誘導電極をx座標が同一の異なる2点P₁、P₂に置いて誘導するとき観測される神経活動電位は理論的に図示できる。すなわち、理想的な等方性の容積導体中で不関電極を無限遠点に置くと、神経活動電位の分布は図12のごとく左右対称になるはずである。したがって、この理想状態では第1陽性頂点潜時は神経電極間距離の増大と共に短縮するが、第1陰性頂点潜時は神経電極間距離によらず一定値をとることがわかる。しかし、実際には、不関電極は無限遠点には設置不能であり、不関電極に代わる近位電極自体も神経活動電位からの電場の影響を受けざるを得

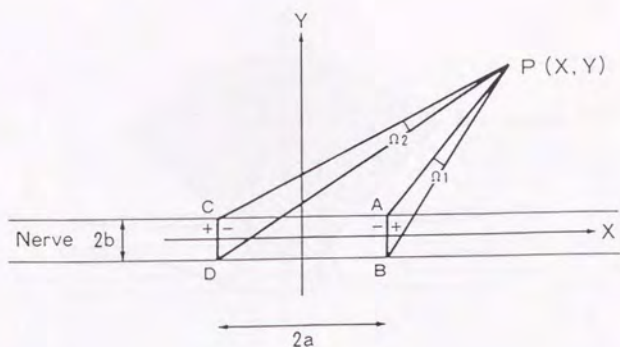


図11 神経活動電流による点Pの電位

Woodburyの説を使うと容積導体中の神経活動電流によって作られる電場の分布を計算することができる。単純化のため3次元でなく2次元で表したのがこの図で、立体角の代わりに平面角を用いている。x軸を神経の長軸と一致させ、y軸を一对の双極子(線分AB、CD)間の中央に置く。角 Ω_1 は点P(x,y)から線分ABを見込む角、角 Ω_2 は線分CDを見込む角とする。相対する2つの双極子より及ぼされる点P(x,y)の電位(E_p)は、

$E_p = K \times (\Omega_1 - \Omega_2)$ と表せる。Kは比例定数。

ない。その場合、近位電極は遠位電極よりもある時間遅れて神経活動電位を捉えたと見なせる。その遅延時間は遠位電極と近位電極のx座標値の差に当たる距離を神経活動が伝導するのに必要な時間のはずである。それ故、実際に記録される神経活動電位は、近位、遠

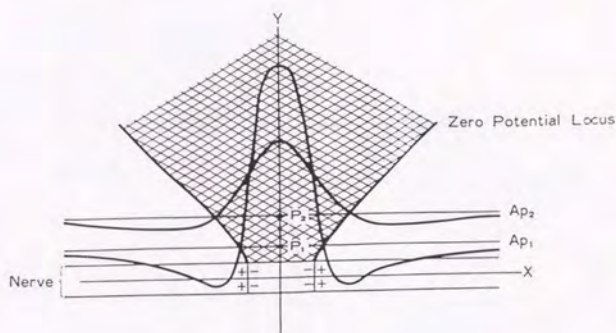


図12 異なる2点の神経活動電位

x座標が同じでy座標が異なる2点P1, P2で記録される神経活動電位Ap1, Ap2を、式 $E_p = K \times (\Omega_1 - \Omega_2)$ を用い理論的に作図して表した図である。斜線部は一对の双極子で作られる電場が負である領域を示す。

位電極がそれぞれ捉えた二つの活動電位の合成とみなせる。すなわち、図12に示した神経活動電位と前述の遅延時間だけ位相を遅らせた同じ神経活動電位との差として合成しうる。

図12の活動電位Ap1, Ap2を用いて、このような方法で作図した合成活動電位の波形は図13-1, 2のようになる。図13-1は近位と遠位の誘導電極が神経より等距離にある場合の合成活動電位である。図13-2は近位誘導電極は一定の位置に固定し遠位誘導電極のみ神経より遠ざけた場合の合成活動電位である。これらの模式図は以下の事象を示している。1) 誘導電極を神経から遠ざけると第1陽性頂点潜時と

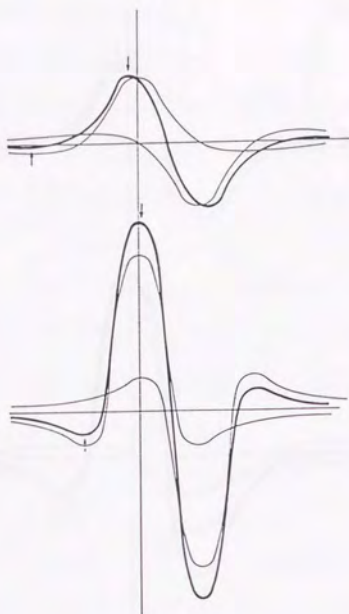


図13-1

図13-1,2 図上で合成した活動電位にみられる潜時の短縮

図12に示した活動電位（この図では細い線で示されている）を用い、誘導電極の組合せの違いに応じた3種類の合成活動電位を太線で示してある。

図13-1 図7の測定のような誘導電極の組合せ、すなわち、遠位と近位の誘導電極がともに移動するときの合成活動電位である。従って、上段の波形は図12の活動電位 Ap_2 のみを用いて合成してあり、下段の波形は活動電位 Ap_1 のみを用いて合成してある。

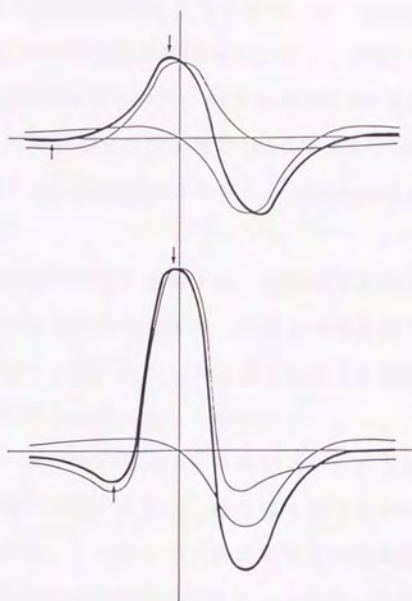


図13-2

図13-2 図8の測定のような誘導電極の組合せ、すなわち、近位電極は固定し遠位電極のみ移動するときの合成活動電位である。従って、上段の波形は図13-1の上段と同じものであるが、下段の波形は図12の活動電位 Ap_1 と Ap_2 の2つから合成してある。図13-1と13-2とも上段の合成波形の第1陽性頂点潜時と第1陰性頂点潜時は下段の合成波形のものより短縮する。すなわち、遠位誘導電極が神経より遠ざかると第1陽性頂点潜時と第1陰性頂点潜時は短縮することが明らかである。またその程度は第1陽性頂点潜時の

方が第1陰性頂点潜時より大きい。注：位相の遅延は、活動電位Ap1の伝導速度が50 m/sと仮定し遠位、近位電極間距離2.5cmを伝導するのに必要な時間0.5msを当てはめた。

また、x軸の縮尺は活動電位Ap1の電位0で挟まれた持続時間が図7の上段のSNAPのそれと一致するようにした。

第1陰性頂点潜時が常に短縮する。2)短縮の程度は陰性頂点潜時よりも陽性頂点潜時の方が大きい。3)この潜時短縮は主として遠位誘導電極の位置による。このシミュレーションは本研究で観察した臨床における事象とよく一致している。

日常検査では、表面電極と針電極が用いられている。神経は四肢の様々な深層に位置するから、針電極でなくては神経のごく近くには設置できない。したがって、表面電極より針電極の方がより正確な神経活動電位の潜時を観測できる。しかし、針を身体に刺入する侵襲は看過し得ない欠点であり、もし表面電極だけを用いて神経のごく近くで測定したのと同様の潜時を得ることができれば、臨床的に有意義である。

本研究の結果を応用すれば、表面電極を多数用いることによって理論上神経近傍で誘導するときの潜時を推測することが可能である。すなわち、神経電極間距離と陰性頂点潜時との間の負の直線関係を利用し、図6のような相関図において距離を0に外挿するとき得られる潜時が求めるものすなわち修正潜時である(表2)。神経までの距離の影響を補正したこの潜時は、神経の直径を無視した理想状態のとき神経の中心で観測されるはずの潜時である。

臨床における検査では、誘導電極を神経の近傍へ設置することは

たとえ侵襲を無視できる場合でも必ずしも可能ではない。この制約を越える方法の一つとして、多チャンネル表面電極記録法を示したが、現在通常行われているように1対の誘導電極によって測定する限り神経活動電位の潜時の測定や比較には神経電極間距離を考慮しなくてはならない。このことは末梢神経活動電位測定に限らず脊髄誘発電位測定や体性感覚誘発電位測定でも同じである。

糸吉 言吾

- 1、知覚神経活動電位の第1陽性頂点潜時と第1陰性頂点潜時は誘導電極を神経から遠ざけると短縮する。
- 2、その短縮程度は第1陰性頂点潜時より第1陽性頂点潜時の方が大きい。
- 3、潜時の短縮に直接影響するのは近位誘導電極よりも遠位誘導電極の移動である。
- 4、同一部位で誘導すると、表面電極の方が針電極より潜時は短縮して記録される。
- 5、神経電極間距離と第1陽性頂点潜時と第1陰性頂点潜時との間には何れも負の直線関係がある。
- 6、この直線関係を利用すれば、非侵襲的な多チャンネル表面電極誘導によって、侵襲的な針電極で神経近傍から誘導するのと等しい、すなわち、距離の影響を補正した潜時を推定しうる。

参考文献

1. Brazier, M.A.B.: The electrical field around the action potential in a conducting medium. In: M.A.B. Brazier (Ed.), The Electrical activity of the nervous system. 3rd. ed., Pitman Medical Publishing Co. Ltd, London, pp. 69-78. 1968.
2. Buchthal, F., and Rosenfalck, A.: Evoked action potentials and conduction velocity in human sensory nerves, Brain research, 3, 1-122. 1966
3. Daube, J.R., Nerve conduction studies. In Aminoff, M.J. Electrodiagnosis in clinical neurology. 2nd. ed. Churchill Livingstone New York, Edinburgh, London, Melbourne, pp. 265-306. 1986.
4. Dawson, G.D., The relative excitability and conduction velocity of sensory and motor nerve fibers in man. J. Physiol. (Lond.), 131, 436-451. 1956.
5. de Weerd, J.P.C.: Volume conduction and electromyography. In S.L.H. Notermans (Ed.), Current Practice of Clinical Electromyography, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, New York, Oxford, pp. 9-28. 1984.
6. Gilliatt, R.W., and Sears, T.A.: Sensory nerve action potentials in patients with peripheral nerve lesions. J. Neurol. Neurosurg. Psychiat., 21, 109-118. 1958.
7. Gilliatt, R.W., Melville, I.D., Velate, A.S., Willison, R.G.: A study of normal nerve action potentials using an averaging technique (barrier grid storage tube). J. Neurol. Neurosurg.

- Psychiat., 28.191-200, 1965.
8. Happel, L.T. LeBlanc, H.J. and Kline, D.G.: Spinal cord potentials evoked by peripheral nerve stimulation. *Electroencephalo. Clini. Neurophysi.* 38. 349-354. 1975
9. Kincaid J.C., Phillips II L.H., Daube J.R.: The evaluation of suspected ulnar neuropathy at the elbow. *Arch. Neurol.* 43: 44-47, 1986
10. Lin, J.T., Phillips, L.H. II and Daube, J.R.: Far field potentials recorded from peripheral nerves, *Electroencephalo. Clini. Neurophysi.* 50, 174P. 1980.
11. Lorente de No', R. : Analysis of the distribution of the action currents of nerve in volume conductors. *Stud. Rockefeller Inst. Med. Res.*, 132(2)384-482, 1947.
12. Maynard F.M., Stolov W.C.: Experimental error in determination of nerve conduction velocity. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 53:362-372. 1972.
13. Netter, F.H.: The ciba collection of medical illustrations Vol. 8 Musculoskeletal system part 1 anatomy, physiology and metabolic disorders p. 49 Ciba-Geigy Corporation. 1987.
14. Sarnowski, R.J., Cracco, R.Q., Vogel, H.B., Mount, F. : Spinal evoked response in the cat., *J. Neurosurg.* 43, 329-336, 1975.
15. von Lanz, T., and Wachsmuth, W., *Praktische Anatomie Ein Lehr- und Hilfsbuch der anatomischen Grundlagen Aerztlichen Handelns. Erster band arm* Springer-Verlag Berlin. Goettingen. Heidelberg. P175. 1959.

16. Wiederholt, W.C.: Stimulus intensity and site of excitation in human median nerve sensory fibres., J. Neurol. Neurosurg. Psychiat. 33, 438-441, 1970.
17. Woodbury, J.W., 1961, Special properties of nerve trunks and tracts. In: Ruch, T.C. Patton, H.D. Woodbury, J.W. and Towe. A.L. (eds.) Neurophysiology. W.B. Saunders Co. Philadelphia & London, pp. 66-95. 1961

