HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	モンテカルロ法による電子スオームのドリフト速度に関する研究 ： 実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度の対応
Author(s)	佐藤，孝紀
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第2912号
Issue Date	1991-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3052796
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49653
Type	doctoral thesis
File Information	000000237928.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

モンテカルロ法による
電子スオームのドリフト速度に関する研究

—実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度の対応—

1991年

佐藤孝紀

題　目

モンテカルロ法による
電子スオームのドリフト速度に関する研究

－実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度の対応－

1991年

佐藤孝紀

目　次

第1章　序論 …… 1
1－1　緒言 …… 1
1－2　電子スオームの観測方法 …… 2
1－2－1　定常タウンゼント法 …… 2
1－2－2　パルスタウンゼント法 …… 3
1－2－3　タイムオブフライト法 …… 4
1－3　電子ドリフト速度に関する在来の研究 …… 6
1－4　本論文の主旨および構成 …… 10
参考文献 …… 13

第2章　シミュレーション方法 …… 15
2－1　緒言 …… 15
2－2　モンテカルロ法による電子の運動の追跡 …… 16
2－2－1　電子の飛行時間の決定 …… 16
2－2－2　電子の飛行軌道の計算 …… 22
2－2－3　衝突の種類の判定 …… 23
2－2－4　衝突後の散乱方向の決定 …… 25
2－2－5　衝突後の電子の速度およびエネルギーの決定 …… 27
2－3　SchlumbohmおよびFrommholdの実験方法と電子ドリフト速度の算出方法 …… 30
2－3－1　Schlumbohmの実験 …… 31
2－3－2　Frommholdの実験 …… 31
2－3－3　シミュレーション方法および条件 …… 33
2－4　理論電子ドリフト速度の算出方法 …… 36
2－4－1　拡散を考慮したドリフト速度Vd …… 36
2－4－2　全電子の平均ドリフト速度Wv …… 38
2－4－3　重心のドリフト速度Wr …… 39
2－4－4　平均到着時間ドリフト速度Wm …… 41

参考文献 …… 43

第3章　モデルガスに対する解析 …… 44

3－1　緒言 …… 44

3－2　シミュレーション条件 …… 45

3－3　解析結果 …… 49

3－3－1　計算結果 …… 49

3－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 59

3－3－3　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 65

3－3－4　電子ドリフト速度の比較 …… 70

3－3－5　電極における電子反射の考慮 …… 75

3－4　結言 …… 89

参考文献 …… 92

第4章　CH_4ガスに対する解析 …… 93

4－1　緒言 …… 93

4－2　シミュレーション条件 …… 94

4－3　解析結果 …… 98

4－3－1　計算結果 …… 98

4－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 107

4－3－3　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 113

4－3－4　電子ドリフト速度の比較 …… 117

4－3－5　実測値との比較 …… 119

4－4　結言 …… 122

参考文献 …… 124

第5章　Arガスに対する解析 …… 125

5－1　緒言 …… 125

5－2　シミュレーション条件 …… 126

5－3　解析結果 …… 129

5－3－1　計算結果 …… 129
5－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 141
5－3－3　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 145
5－3－4　電子ドリフト速度の比較 …… 150
5－3－5　実測値との比較 …… 150
5－4　結言 …… 154
参考文献 …… 156

第6章　SF_6ガスに対する解析 …… 157
6－1　緒言 …… 157
6－2　シミュレーション条件 …… 158
6－3　解析結果 …… 161
6－3－1　計算結果 …… 161
6－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 172
6－3－3　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度 …… 176
6－3－4　電子ドリフト速度の比較 …… 181
6－3－5　実測値との比較 …… 181
6－4　結言 …… 185
参考文献 …… 187

第7章　連続の式による解析 …… 188
7－1　緒言 …… 188
7－2　解析方法 …… 189
7－3　解析結果 …… 190
7－3－1　モデルガスに対する解析 …… 190
7－3－2　CH_4ガスに対する解析 …… 197
7－3－3　Arガスに対する解析 …… 203
7－3－4　SF_6ガスに対する解析 …… 209
7－4　結言 …… 215
参考文献 …… 217

第８章　結論 …… 218
　参考文献 …… 224

謝辞 …… 225

筆者の文献 …… 226

付録 …… 229

第１章　序論

１－１　緒言

今日、気体放電は、半導体デバイス等の製作に用いられるプラズマプロセス炉や、ガスレーザ、プラズマディスプレイ、蛍光灯などの各種の放電灯、オゾナイザなどに広く応用されており、現代の産業に深くかかわっている。

気体放電の産業応用において、放電の性質が、作成される素子や機器の性質に大きな影響を及ぼすため、放電の性質を予測し、最適の放電を発生させ、それを制御することが極めて重要である。このため、放電中に存在する各粒子の振舞いおよびそれらの相互関係を明らかにし、気体放電の性質を把握することが必要である。

気体放電を微視的見ると、相互に衝突を繰り返す多数の電子、中性気体分子(原子)、イオン、励起種、光子などで成り立っている。なかでも電子は、移動度が大きく電荷輸送の主体であるとともに、電界によって加速されて高エネルギーになり、気体分子(原子)と衝突することによって、放電の産業応用で重要な役割を担う励起種、解離種、イオンなどを生成する主役を演じている。したがって、気体放電の性質を明らかにするうえで、電界が印加された気体中の電子スオーム(電子群)の特性を理解しておくことが極めて重要である。

電子スオームの特性は、電子ドリフト速度などの電子スオームパラメータ(電子輸送係数)によって記述される。また、これを用いて、放電の予測および解析が可能となるとともに、電界、気体分子数密度と並んで放電中の電子の振舞いを決定する要素の一つである電子衝突断面積の導出[1]も可能となる。ことに電子ドリフト速度は、スオームの性質

を記述するもっとも重要なパラメータの一つであり、原理的には、定常タウンゼント、パルスタウンゼントおよびタイムオブフライト実験において、定義にしたがった観測からそれぞれ求められる。これらは、理論電子ドリフト速度と呼ばれ、電離衝突による電子増倍がある場合には、一般的に異なる値を持つことが知られている[2]。また、従来の現実の実験は、原理的に、上述した3種類の実験とは必ずしも一致せず、理論電子ドリフト速度の値と現実の実験から得られるドリフト速度の値との対応関係は、いまだに十分に解明されていない。気体放電の性質を定量的に把握する上で、これを明らかにすることは極めて重要である。

1－2　電子スオームの観測方法

電子スオームの特徴を表すスオームパラメータは、観測すべき対象となる物理量がたとえ同じであっても、スオームの観測(実験)方法によってその値が異なることがある。特に、電子ドリフト速度は、電離あるいは電子付着によって電子数が非保存となる場合に、観測方法の違いによって一般に異なる値となるため、電子スオームの観測方法をしっかりと把握しておく必要がある。ここでは、電子スオームの代表的な3種類の観測方法について述べるとともに、各観測から得られる理論電子ドリフト速度について述べる。

1－2－1　定常タウンゼント法(Steady-State Townsend : SST)

平行平板ギャップのカソードに連続的に紫外線照射などを行なって一定な初期電子を与え、電子の定常流をつくる。E/p(電界/気圧)を一定に保ったまま、ギャップ長xを変えながらギャップ電流などを測定する方法である。このとき、ギャップ間の電離電流I(x)は次のように

表わされる。

$$I(x) = I_0 \exp(\alpha x) \qquad (1-1)$$

ここで、I_0はカソードに供給される初期電子電流、αはタウンゼントの第一電離係数である。

また、$I(x)$は、SSTのドリフト速度Wsと拡散係数Dsを用いて、次式のように書くことができる。

$$I(x) = e\left\{Ws \cdot n(x) - Ds \frac{\partial n(x)}{\partial x}\right\} \qquad (1-2)$$

ここで、$n(x)$は電子数密度である。平衡状態において電子数密度は、$\exp(\alpha x)$に比例することを考慮すると、(1－2)式は次のように書くことができる。

$$I(x) = e(Ws - \alpha Ds) \cdot n(x) \qquad (1-3)$$

(1－3)式右辺において、$(Ws - \alpha Ds)$が、SSTにおける拡散を考慮した電子ドリフト速度Vdである。またVdは、αと次のような関係がある。

$$\alpha = \frac{R_{is}}{Vd} \qquad (1-4)$$

ここで、R_{is}はSSTの電離周波数である。

1－2－2　パルスタウンゼント法(Pulsed Townsend：PT)

平行平板ギャップのカソードに紫外線フラッシュなどを照射して初期電子を発生させ、それが形成する孤立した電子スオームの情報を位

置で積分し、時間の関数として観測する方法である。この方法は、ギャップ間の電子スオームの発達を電流のオシログラムで観測することに相当し、このときの電離電流I(t)は次のように表わされる。

$$I(t) = I_0 \exp(R_i \cdot t) \qquad (1-5)$$

ここで、R_iは電離周波数である。また、PT実験における全電子の平均速度として定義されるドリフト速度Wvは、ギャップ電流と次のように関係している。

$$I(t) = \frac{e \cdot N(t) \cdot Wv}{d} \qquad (1-6)$$

ここで、eは電子の電荷、N(t)は時刻tにおける全電子数、dはギャップ長である。

1－2－3　タイムオブフライト法(Time of Flight : TOF)

PT法と同様に、平行平板ギャップのカソードに紫外線フラッシュなどを照射して初期電子を発生させ、それが形成する孤立した電子スオームの電子数密度n(x, t)を、電極間の位置と時刻の両方の関数として観測する方法である。SSTやPT法と異なるのは、電子数密度を観測する点である。この観測法から、スオームの重心の位置のドリフト速度Wrが(1－7)式から求められる。

$$Wr = \frac{d\langle x \rangle}{dt} \qquad (1-7)$$

ここで、電界の方向は－x方向である。また、スオームの重心の位置$\langle x \rangle$は次のように定義される。

$$\langle x \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \cdot n(x, t)\, dx}{N(t)} \qquad (1-8)$$

$$N(t) = \int_{-\infty}^{\infty} n(x, t)\, dx \qquad (1-9)$$

また、平均到着時間ドリフト速度Wmは、(1－10)式から求められる。

$$W_m = \frac{dx}{d\overline{t}} \qquad (1-10)$$

ここで、平均到着時間$\overline{t}$は、次のように定義される。

$$\overline{t} = \frac{\int_{0}^{\infty} t \cdot n(x, t)\, dt}{N(x)} \qquad (1-11)$$

$$N(x) = \int_{0}^{\infty} n(x, t)\, dt \qquad (1-12)$$

タイムオブフライトの定義では、空間における位置(スタートとゴール)を定めて、その空間を電子スオームが移動する時間を指していると考えられ、Wmがこれに対応するパラメータである。一方、Wrは、2つの時間の間に電子スオームが移動する距離をもとに定義されたパラメータであり、ディスタンスオブフライト(Distance of Flight:DOF)と呼ぶ方が適切であると考えられる。

1－3　電子ドリフト速度に関する在来の研究

電子ドリフト速度は、電子拡散係数などとともに、電子スオームの特性を記述する重要なパラメータであり、これに関する研究が理論的および実験的に行なわれてきている。理論的に、電子ドリフト速度は、定常タウンゼント法、パルスタウンゼント法およびタイムオブフライト法による実験を想定し、それぞれの定義にしたがって算出される。このような実験から得られるドリフト速度は、理論電子ドリフト速度と呼ばれる。

理論電子ドリフト速度は、一般にボルツマン方程式解析やモンテカルロシミュレーションによって求められる。現在用いられているようなボルツマン方程式の原形は、1969年にThomas[3]によって提案されたものであり、ここではＳＳＴおよびＰＴの観測方法に対する解法が導入されている。また、Parker and Lowke(1996)[4]は、ＴＯＦの観測方法に対する解析法を提案している。しかし、これらの解析方法には、電子と気体分子(原子)の衝突による電離あるいは電子付着により、スオーム中の電子数が非保存となる場合の効果が考慮されていなかった。Tagashira et al.(1977)[2]は、電離による電子数非保存の効果を考慮したボルツマン方程式を提案し、それを用いてＡｒガス中の理論電子ドリフト速度を計算している。その結果として、理論電子ドリフト速度は、電離がなく電子スオーム中の電子数が保存される場合には全て一致するが、電離によってスオーム中の電子数が非保存となる場合には、観測方法の違いによって、異なる値となることを報告している。また、Itoh et al.(1988)[5]は、Tagashira et al.[2]と同様なボルツマン方程式を用いて、電離および電子付着があるＳＦ$_6$ガスに対して解析を行ない、実効電離係数$\bar{\alpha}$($=\alpha-\eta$、α：タウンゼントの第一電離係数、η：電子付着係数)が負の値から正の値へ変化するとき、ＶｄとＷｖ、ＷｒとＷｍの

大小関係がそれぞれ変化することを報告している。

モンテカルロ法を用いた解析では、Yarnold (1945)[6]の研究が嚆矢とされている。ここでは、電界下にある完全剛体球モデルガス中を移動する電子に対して乱数表を用いて計算を行ない、速度分布がドリュベスティン分布[7]とならないことを指摘している。電界下の電子運動をディジタル計算機を用いて計算したのは、Itoh and Musha (1960)[8]が初めてであり、Heガス中の電子の運動を1個の電子の運動によって代表し、その時間平均から電子ドリフト速度などを算出している。Thomas and Thomas (1969)[9]は、電離衝突により電子増倍を伴う場合には、電子スオーム中の全電子を追跡する必要があることを示した。また、Sakai et al.(1977)[10]は、これに続いて研究を進めて、電離による電子増倍がある場合には、スオームの観測方法の違いによって電子ドリフト速度の値が異なることを示している。最近では、Satoh et al. (1988)[11]は、SF_6ガスに対して解析を行ない、電子付着によって電子数が非保存となる場合に、観測方法の違いによって理論電子ドリフト速度の値が異なることを報告している。

実験的研究では、代表的なものとして、Bradbury and Nielsen (1936)[12]、Frommhold (1959)[13]、Phelps et al.(1960)[14]、Schlumbohm (1965)[15][16]の報告がある。Bradbury and Nielsen[12]は、2つの電気的シャッターを用いて、H_2ガス中で電極間を移動する電子のドリフト速度を測定している。この方法を発展させたものが、Double shutter法であり、Nakamura(1988)[17]はSF_6ガス中の電子ドリフト速度を、Nakamura and Kurachi(1988)[18]はArガス中の電子ドリフト速度を、この方法を用いて求めている。この実験方法は、一般に電界が低く電離による電子増倍が小さい領域で用いられている。Frommhold[13]は、CH_4ガス中で、平行平板ギャップのカソードにパルス状の紫外線を照射して電子スオームを発生させ、電圧の時間変化を測

定し、電子ドリフト速度を算出している。Phelps et al.[14]は、Heガス低気圧放電の陽光柱の電子密度、電流密度および電界強度を測定し、電子ドリフト速度を算出している。Schlumbohm[16]は、O_2、N_2、H_2などのガス中で、平行平板ギャップ間にパルス的に電子スオームを発生させて、ギャップ電流を測定し、その時間変化から電子ドリフト速度を算出している。また、O_2、N_2、アセトン、ベンゼン、CO_2、CH_4などのガス中の電子ドリフト速度をE/pの関数として表現している。Frommhold[13]、Phelps et al.[14]およびSchlumbohm[15][16]の実験方法は、E/Nが高く、電離衝突による電子増倍が顕著となる領域まで用いられている。

最近の実験的研究では、Al-Amim et al.(1985)[19]およびDavies et al.(1989)が[20]、Schlumbohm[15]と同様の実験から、CH_4ガス中の電子ドリフト速度を求めている。Davies et al.[20]は、実験から得られた電子ドリフト速度を、モンテカルロシミュレーションによって得られた理論電子ドリフト速度Wrに相当するドリフト速度Wzと比較しているが、高E/Nでは一致していない。また、実験から得られた電子ドリフト速度がWzに相当することは証明されていない。さらに、Wzと2項近似のボルツマン方程式解析から求めたWvに相当する電子ドリフト速度WΔzの比較を行ない、その違いを2項近似によるエラーとしている。しかし、本質的な問題点は、理論電子ドリフト速度が電離による電子増倍を伴う場合、一般に異なる値を持つことを考慮していない点にあると考えられる。Hunter et al.[21](1986)は、基本的には、Frommhold[13]の実験方法を用いながら、また、それによる測定が不可能な場合には、Schlumbohmの[15]実験方法を用いて、電子ドリフト速度を算出している。しかし、Schlumbohmの実験とFrommholdの実験から得られる電子ドリフト速度が同一であるとは限らない。Kucukarpaci and Lucas(1981)[22]は、Schlumbohm[15]と同様の実験から、広い範囲のE/NにわたってAr

ガス中の電子ドリフト速度を算出している。また、Kücükarpaci and Lucas[22]も、実験から得られた電子ドリフト速度を理論電子ドリフト速度と比較しているが、比較に用いた電子ドリフト速度の定義が明確ではない。

上述した現実の実験は、原理的に、1－2で述べた実験とは必ずしも一致せず、Davies et al.[20]やKücükarpaci and Lucas[22]のように、現実の実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度を直ちに比較することは、適切ではないと考えられる。また、現実の実験で得られる電子ドリフト速度と、ボルツマン方程式解析あるいはモンテカルロシミュレーションによって得られる理論電子ドリフト速度とを比較する場合には、計算に使用されるガスの電子衝突断面積の妥当性を考慮する必要もある。

理論電子ドリフト速度と実験から得られる電子ドリフト速度の対応関係を明らかにするためには、現実の実験を正確にシミュレートし、得られる電子ドリフト速度と同一の電子衝突断面積を用いて求められた理論電子ドリフト速度との比較、検討を行なうことが最も効果的な方法の一つであると考えられる。

Lucas and Saelee(1975)[23]は、モンテカルロ法を用いて現実の実験を正確にシミュレートし、その結果として得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度との関係を示しているが、電離衝突を考慮しているにもかかわらず、比較に用いられた理論電子ドリフト速度が、どのような実験から求められる電子ドリフト速度であるのかが明確でない点に問題がある。

以上のように、電子ドリフト速度は、理論的および実験的にそれぞれ求められてきているが、実験方法あるいは定義によって一般に異なることを考慮し、両者の対応関係を検討した報告はないようである。

1－4　本論文の主旨および構成

本論文は、電離衝突による電子増倍を伴う場合において、実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度との対応関係について論じたものである。特に、電離衝突による電子増倍がある場合には、観測方法によって電子ドリフト速度が一般的に異なる値を持つので、このような条件下で比較を行なうことにより、両者の対応をより一層明確にできるものと考えられる。

従来、実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度の比較を行なっている報告では、どのような実験からも同一の電子ドリフト速度が得られるという立場に立っており、理論電子ドリフト速度が、電離衝突による電子増倍を伴う場合に、スオームの観測方法によって異なることを考慮し、理論と実験の対応関係を検討したものはないようである。

本論文では、電離衝突による電子増倍が顕著である場合に用いられる典型的な実験であるSchlumbohmおよびFrommholdの実験を対象とし、これらをモンテカルロ法を用いて正確にシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出している。さらに、W_{SC}およびW_{FD}を、同一の電子衝突断面積を用いて、電極を考慮しない自由空間を仮定したモンテカルロシミュレーションによって得られた理論電子ドリフト速度、すなわち、拡散を考慮したドリフト速度Vd(SST)、全電子の平均ドリフト速度Wv(PT)、重心の位置のドリフト速度Wr(TOF)、平均到着時間ドリフト速度Wm(TOF)と比較し、対応関係を検討している。この解析を、電子衝突断面積に特徴を持つ4種類のガス、一定周波数モデルガス、CH_4ガス、ArガスおよびSF_6ガスに対して行ない、電子ドリフト速度の対応関係をそれぞれ検討している。

本論文は、全8章で構成されている。第1章である本章は序論で

あり、本研究の工学的背景を述べるとともに、電子スオームの観測法、電子ドリフト速度に関する報告例を示し、さらに本論文の主旨および構成を述べている。

第２章ではモンテカルロ法を用いて、電界が印加された気体中の電子を追跡する方法について述べるとともに、本解析で対象としたSchlumbohm[15]、Frommhold[13]の実験方法および電子ドリフトの算出方法について述べている。また、理論電子ドリフト速度の定義、物理的意義および算出方法についても述べている。

第３章では、モデルガスに対する解析の結果を述べている。このモデルガスは、全衝突周波数が一定値であり、計算時間を短縮できるとともに電子の飛行時間の計算の精度を上げることができる。このガスに対して、電子ドリフト速度の関係の一般的傾向を定性的に知ることを目的として、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、理論電子ドリフト速度との対応関係を検討している。また、電極における電子の反射を考慮したシミュレーションの結果についても述べている。

第４章では、CH_4ガスに対する解析の結果を述べている。CH_4ガスは、プラズマＣＶＤによるカーボン膜、ダイアモンド薄膜の堆積に用いられる気体材料として注目されているガスである。電子衝突断面積では、弾性衝突に対し、低エネルギー部にタウンゼント－ラムザウア極小を持つとともに、その付近で、弾性衝突よりも大きな非弾性衝突の確率を持つのが特徴である。このようなガスに対して、SchlumbohmおよびFrommholdの実験のシミュレーションを行ない、電子ドリフト速度を算出している。また、得られた電子ドリフト速度を理論電子ドリフト速度と比較し、対応関係を検討するとともに、実測値との比較も行なっている。

第５章では、Ａｒガスに対する解析の結果を述べている。Ａｒガス

は、プラズマエッチングのバッファガスあるいはエキシマレーザのバッファガスなどに用いられているガスである。電子衝突断面積では、運動量移行断面積において、低エネルギー部にタウンゼントーラムザウア極小を持つのが特徴である。このガスに対して、Schlumbohmおよび Frommholdの実験のシミュレーションを行ない、電子ドリフト速度を求めるとともに、それらを理論電子ドリフト速度と比較、検討した結果を述べている。また、実測値との比較も行なっている。

第6章では、SF_6ガスに対する解析の結果を述べている。SF_6ガスは電子付着性が強く、ガス絶縁材料として用いられている。また、最近ではプラズマエッチング、ガスレーザなどにも用いられている。電子衝突断面積では、低エネルギー部に非常に大きな電子付着衝突断面積があるとともに、高エネルギー部に大きな電離衝突断面積を持つのが特徴であり、E/Nの上昇にともなって、電子付着性の強いガスから電離の著しいガスへと変化する。このような特徴を持つガスに対して、SchlumbohmおよびFrommholdの実験のシミュレーションを行ない、電子ドリフト速度を算出するとともに、それらを理論電子ドリフト速度と比較し、対応関係を検討している。

第7章では、連続の式を用いた解析の結果を述べている。モンテカルロシミュレーションによって求められた電子スオームパラメータを用いて、一定衝突周波数モデルガス、CH_4ガス、Arガス、SF_6ガスに対して、SchlumbohmおよびFrommholdの実験を連続の式を用いてシミュレートし、電子ドリフト速度を算出している。また、得られた結果を、第3章から6章までの解析で得られた結果と比較し、連続の式による解析の評価を行なっている。

第8章は結論であり、本研究の成果を要約するとともに、今後の課題について述べている。

参考文献

[1] M.Suzuki, T.Taniguchi and H.Tagashira
1989 J.Phys.D: Appl.Phys. 22 pp.1848-55

[2] H.Tagashira, Y.Sakai and S.Sakamoto
1977 J.Phys.D: Appl.Phys. 10 pp.1051-63

[3] W.R.L.Thomas 1969 J.Phys.B: 2 pp.551-61

[4] J.H.Parker and J.J.Lowke 1969 Phys.Rev. 181 pp.290-301

[5] H.Itoh, Y.Miura, N.Ikuta, Y.Nakao and H.Tagashira
1988 J.Phys.D: Appl.Phys. 21 pp.922-30

[6] G.D.Yarnold 1945 Phil.Mag. 36 185

[7] L.G.Huxley and R.W.Crompton :
"Diffusion and Drift of Electrons in Gases"
Wiley, New York 1974

[8] T.Itoh and T.Musha 1960 J.Phys.Soc.Japan 15 pp.1675-80

[9] R.W.L.Thomas and W.R.L.Thomas 1969 J.Phys.B: 2 pp.562-70

[10] Y.Sakai, H.Tagashira and S.Sakamoto
1977 J.Phys.D: Appl.Phys. 10 pp.1035-49

[11] K.Satoh, H.Itoh, Y.Nakao and H.Tagashira
1988 J.Phys.D: Appl.Phys. 21 pp.931-6

[12] N.E.Bradbury and R.A.Nielsen 1936 Phys.Rev. 49 pp.388-93

[13] L.Frommhold 1959 Z.Phys. 156 pp.144-58

[14] A.V.Phelps, J.L.Pack and L.S.Frost
1960 Phys.Rev. 117 pp.470-474

[15] H.Schlumbohm 1965 Z.Phys. 182 pp.306-16

[16] H.Schlumbohm 1965 Z.Phys. 182 pp.317-27

[17] Y.Nakamura 1988 J.Phys.D: Appl.Phys. 21 pp.67-72

[18] Y.Nakamura and M.Kurachi

1988 J.Phys.D: Appl.Phys. 21 pp.718-23

[19] S.A.J.Al-Amin, H.N.Kucukarpaci and J.Lucas

1985 J.Phys.D: Appl.Phys. 18 pp.1781-94

[20] D.K.Davies, L.E.Kline and W.E.Bies

1989 J.Appl.Phys. 65 pp.3311-23

[21] S.R.Hunter, J.G.Carter and L.G.Cristophorou

1986 J.Appl.Phys. 60 pp.24-35

[22] H.N.Kücükarpaci and J.Lucas

1981 J.Phys.D: Appl.Phys. 14 pp.2001-14

[23] J.Lucas and H.T.Saelee

1975 J.Phys.D: Appl.Phys. 8 pp.L123-5

第2章　シミュレーション方法

2－1　緒言

モンテカルロ法は、現象の素過程が確率現象であるものに対して、その素過程を乱数を用いて計算機内で表現し、現象をシミュレートできる方法である。電界が印加されている気体中に電子群が注入されると、その中の個々の電子は電界からエネルギーを得て電界と逆方向に加速されるとともに、気体分子あるいは原子との衝突によってエネルギーを失うという過程を繰り返し、電子群（スオーム）全体としては、拡散しながら電界と逆方向にドリフトしていく。このような電子スオーム中において、個々の電子の気体分子(原子)との衝突および散乱という過程は、全くランダムな現象であり、確率的に取り扱うことが可能でありモンテカルロ法を適用することができる。

モンテカルロ法を用いた電子スオームの解析では、

- ミクロな尺度から個々の電子を追跡しているので、その運動を容易に知ることができる。
- 電子の飛行する放電空間内の環境を自由に設定することが可能であるので、電極等の境界条件の設定が容易である。
- ボルツマン方程式を用いた解析では、一般に速度分布関数をルジャンドル展開したときの2項目（2項近似）あるいは3項目（3項近似）で打ち切って計算を行っているが、モンテカルロシミュレーションではそのような近似を含まない。
- ボルツマン方程式解析では解析が困難である非平衡領域にも容易に適用できる。
- 実験では測定が困難である量あるいは直接測定できない量も容易に知ることができる。

などの長所があり、電極等の境界を含む条件下での解析も含め、電子スオームの解析では、現段階で定量的に最も正確な方法である。しかし、その反面

・計算に乱数を使用しているために結果に統計変動が含まれることは避けられない。

・また、それを少なく抑えるためには電子数を多くする必要があり、計算時間が非常に長くなるため計算費用の点で不利である。

といった欠点も持っている。

本章では、電子スオームを形成する個々の電子の運動を、計算機上に再現しながら追跡を行なう方法、本解析で対象としたSchlumbohmおよびFrommholdの実験方法とこれらの実験をシミュレートする方法および理論電子ドリフト速度の算出方法について述べる。

2－2　モンテカルロ法による電子の運動の追跡

電界が印加された気体中を飛行する個々の電子の運動は、

（1）飛行時間の決定（衝突の判定）

（2）飛行軌道の計算

（3）衝突の種類の判定

（4）衝突後の散乱方向の決定

（5）衝突後のエネルギーおよび速度の決定

によって記述できる。

2－2－1　電子の飛行時間の決定

電子が気体分子あるいは原子と衝突してから、次の衝突を起こす

までの時間を飛行時間または自由時間τという。飛行時間の決定すなわち衝突の判定は、電子の追跡を正確に行なう上で最も重要である。飛行時間を決定する方法としては、Δt法、free flight time（FFT）法およびnull collision法がなどがある[1]が、ここでは、本解析で採用したFFT法について以下に詳述する。

時刻$t=0$で運動を開始した電子が、時刻$t=t$までに気体分子（原子）と衝突する確率を$P(t)$とすると、$t=t+\Delta t$までに衝突する確率$P(t+\Delta t)$は、次のように表わされる。

$$P(t+\Delta t)=P(t)+\{1-P(t)\}\cdot\nu(t)\cdot\Delta t \qquad (2-1)$$

ここで、$\nu(t)$は、電子が1秒間に気体分子（原子）と衝突する回数を示す全衝突周波数であり、$\nu(t)=N\cdot\sigma_T(v)\cdot v(t)$と表わされる。Nは気体分子（原子）数密度、$\sigma_T(v)$は速度$v$の電子に対する全衝突断面積である。またNは、0℃、1 Torrでは$3.5355\times10^{16}\mathrm{cm}^{-3}$である。

(2－1)式の右辺第2項目は、$t=t$までは衝突せずに飛行し、次のΔtで衝突する確率を示しており

$$\{1-P(t)\}\cdot\nu(t)=\frac{P(t+\Delta t)-P(t)}{\Delta t} \qquad (2-2)$$

と書くことができる。ここで、$\Delta t\to0$とすると

$$\{1-P(t)\}\cdot\nu(t)=\frac{dP(t)}{dt} \qquad (2-3)$$

となる。(2－3)式を積分して$t=t$までに電子が気体分子（原子）と衝突する確率$P(t)$を求めると、（2－4）式のようになる。

$$P(t) = 1 - \exp\{-\int_0^t \nu(t')dt'\} \qquad (2-4)$$

次に確率密度関数$\hat{P}(t)$を用いると、$t \sim (t + \Delta t)$間で電子が衝突する確率は$\hat{P}(t)$とΔtの積で表さる。また、これは$t = t + \Delta t$までに衝突する確率$P(t + \Delta t)$と、$t = t$までに衝突する確率$P(t)$の差に等しいので

$$\hat{P}(t)\cdot\Delta t = P(t + \Delta t) - P(t) \qquad (2-5)$$

と表わされる。(2－5)式の右辺に(2－1)および(2－4)式を代入すると、

$$\hat{P}(t)\cdot\Delta t = \nu(t)\cdot\Delta t\cdot\exp\{-\int_0^t \nu(t')dt'\} \qquad (2-6)$$

となり、(2－6)式の両辺をΔtで割ると

$$\hat{P}(t) = \nu(t)\cdot\exp\{-\int_0^t \nu(t')dt'\} \qquad (2-7)$$

となる。したがって$t = 0 \sim t$の間で電子が衝突する確率は、(2－8)式で表わされる。

$$\int_0^t \hat{P}(t)dt = 1 - \exp\{-\int_0^t \nu(t')dt'\} \qquad (2-8)$$

(2－8)式より、$\int \hat{P}(t)dt$は、$t \to \infty$のときに1で規格化されていることがわかる。ここで、$\hat{P}(t)dt$に比例するように［0，1］間で一様に発生する乱数の区間の幅$d\xi_1$とを(2－9)式のように対応させる。(図2．1)

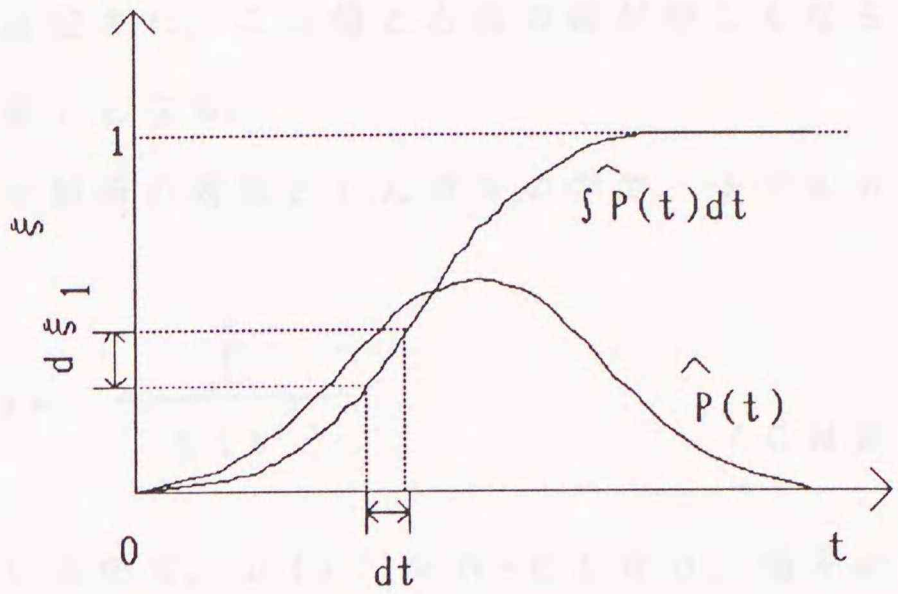


図２．１　確率密度関数と乱数の対応

$$\hat{P}(t)dt = d\xi_1 \qquad (2-9)$$

(２－９)式の両辺を積分すると

$$\int \hat{P}(t)dt = \xi_1 \qquad (2-10)$$

となる。ここで、(２－10)式の左辺は、(２－８)式の左辺と等しく、(２－８)式の左辺を一様乱数ξ_1で置き換えることができる。したがって、(２－８)式は次のように書くことができる。

$$\xi_1 = 1 - \exp\{-\int_0^t \nu(t')dt'\} \qquad (2-11)$$

となる。上式の両辺の対数をとると、(２－12)式となる。

$$-\ln(1-\xi_1) = \int_0^t \nu(t')dt' \qquad (2-12)$$

したがって、(2－12)式において一様乱数ξ_1を発生させることによって左辺の値が決定され、この値と右辺の値が等しくなるようなtの値が電子の飛行時間τとなる。

本論文で解析の対象としたガスの中で、モデルガスは、全衝突断面積が

$$\delta_T(v) = \frac{C}{v(t')} \qquad (\text{Cは定数}) \qquad (2-13)$$

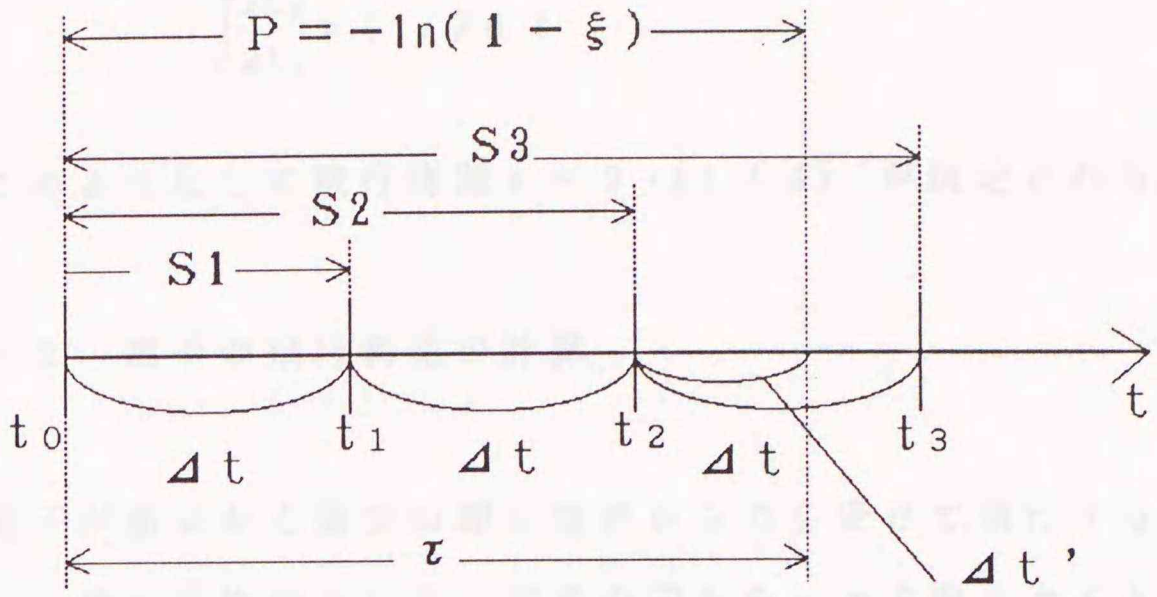
で与えられているので、$\nu(t') = N \cdot C$となり、電子の飛行時間は、

$$\tau = \frac{-\ln(1-\xi)}{N \cdot C} \qquad (2-14)$$

で決定される。しかし、その他のCH_4ガス、ArガスおよびSF_6ガスにおいては、$\delta_T(v)$を簡単な数式で表すことができないので、$\nu(t')$を(2－15)式以外の形で書くことができない。

$$\nu(t') = N \cdot \delta_T(v) \cdot v(t') \qquad (2-15)$$

したがって、(2－12)式の右辺の積分を解いて、τを直接求めることは不可能である。そこで、図2.2に示すように、適当な微小時間Δtごとに$\nu(t')$を計算して右辺の積分を台形公式などを使用して数値的に求めて、左辺の値と比較しながらτを決定する方法がとられている。その方法を以下に示す。



$$S_1 = \int_{\Delta t_0}^{\Delta t_1} \nu(t)\,dt$$

$$S_2 = S_1 + \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_2} \nu(t)\,dt$$

$$S_3 = S_2 + \int_{\Delta t_2}^{\Delta t_3} \nu(t)\,dt$$

図２．２　飛行時間τの決定

① t_0～t_1でS_1を計算してＰと比較する。ここではS_1＜Ｐであり、"衝突なし"である。

② t_0～t_2でS_2を計算してＰと比較する。ここでもS_2＜Ｐであり、"衝突なし"である。

③ t_0～t_3でS_3を計算すると、S_3＞Ｐであり"衝突あり"となる。しかし、これでは"t_2～t_3間のどこで衝突が起こったのか"は不明である。そこでt_2から衝突までの時間$\Delta t'$を（２－16）式によって決定する。

$$\Delta t' = \frac{P - S_2}{\int_{\Delta t_2}^{\Delta t_3} \nu(t')\,dt'} \cdot \Delta t \qquad (2-16)$$

このようにして飛行時間 $\tau = 2 \cdot \Delta t + \Delta t'$ が決定される。

2－2－2　電子の飛行軌道の計算

電子が衝突から衝突の間に電界から力を受けて飛行するとき、その軌道は一般に放物線となる。電界の向きを $-x$ 方向とすると、電荷 e、質量 m を持つ電子の運動方程式は(2－17)、(2－18)および(2－19)式で表わされる。

$$m\ddot{x} = eE \qquad (2-17)$$

$$m\ddot{y} = 0 \qquad (2-18)$$

$$m\ddot{z} = 0 \qquad (2-19)$$

いま、衝突直後に速度 $\boldsymbol{v}'(v_x', v_y', v_z')$、位置 $\boldsymbol{r}'(x', y', z')$ の電子が τ 秒間飛行して、次の衝突直前に、速度 $\boldsymbol{v}(v_x, v_y, v_z)$ および位置 $\boldsymbol{r}(x, y, z)$ であるとするならば、速度及び位置の各成分は(2－17)～(2－19)式より、それぞれ(2－20)～(2－22)式および(2－23)～(2－25)式のように表わされる。

$$v_x = v_x' + \frac{eE}{m} \cdot \tau \qquad (2-20)$$

$$v_y = v_y' \qquad (2-21)$$

$$v_z = v_z' \qquad (2-22)$$

$$x = x' + v_x' \cdot \tau + \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \cdot \tau^2 \qquad (2-23)$$

$$y = y' + v_y' \cdot \tau \qquad (2-24)$$

$$z = z' + v_z' \cdot \tau \qquad (2-25)$$

2－2－3　衝突の種類の判定

電子と気体分子（原子）との衝突は、衝突の前後で両者の運動エネルギーの総和が変化しない弾性衝突と、電子の運動エネルギーの一部が気体分子（原子）の内部状態の変化（励起、電離、電子付着など）に使われる非弾性衝突に分類できる。それぞれの衝突の起こり易やすさは、衝突時の電子のエネルギーによって変化し、衝突断面積 $\mathfrak{s}$ によって記述される。ここでは、電子と気体分子（原子）との衝突が起こったとき、それがどの様な種類の衝突であるのかを判定する方法について述べる。

いま、衝突直前の電子の運動エネルギーが ε であり、弾性衝突、励起衝突および電離衝突が起こる場合を考える。このときの全衝突断面積 $\mathfrak{s}_T(\varepsilon)$ は、

$$\mathfrak{s}_T(\varepsilon) = \mathfrak{s}_m(\varepsilon) + \mathfrak{s}_{ex}(\varepsilon) + \mathfrak{s}_i(\varepsilon) \qquad (2-26)$$

となる。ここで

$\mathfrak{s}_m(\varepsilon)$ ：運動量移行断面積

$\mathfrak{s}_{ex}(\varepsilon)$：励起衝突断面積

$\mathfrak{s}_i(\varepsilon)$ ：電離衝突断面積

である。また、それぞれの衝突が起こる確率は、(2－27)、(2－28)および(2－27)式によって決定される。

弾性衝突

$$\frac{\sigma_m(\varepsilon)}{\sigma_T(\varepsilon)} \qquad (2-27)$$

励起衝突

$$\frac{\sigma_{ex}(\varepsilon)}{\sigma_T(\varepsilon)} \qquad (2-28)$$

電離衝突

$$\frac{\sigma_i(\varepsilon)}{\sigma_T(\varepsilon)} \qquad (2-29)$$

図２．３に示すように、（２－27）、（２－28）および（２－29）式によって決定された各衝突確率と、［０，１］間の一様乱数ξ_2の値を対応させることによって、衝突の種類を決定することができる。なお図２．３は、励起衝突が起こった例を示している。

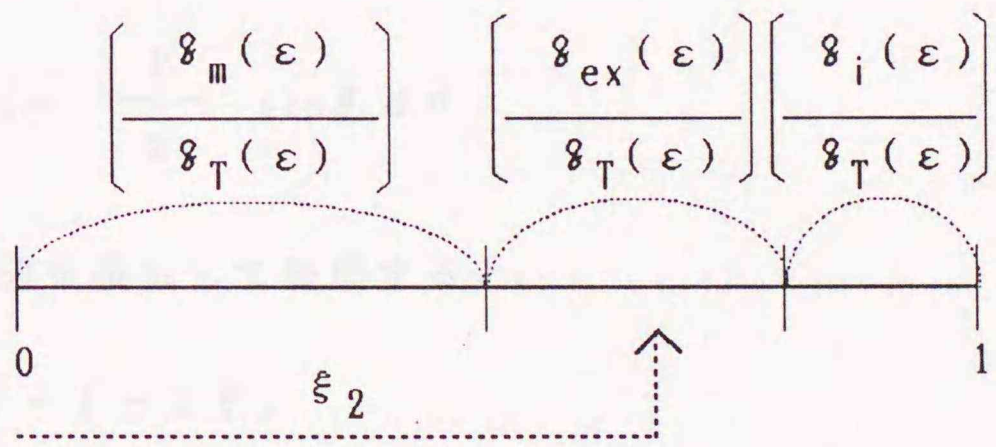


図２．３　　衝突の種類の判定

2－2－4　衝突後の散乱方向の決定

本解析では、気体分子（原子）との衝突後の電子の散乱方向は、入射方向に依存せず、等方的であると仮定している。ここでは、図2．4に示す散乱角θとϕの決定方法について述べる。ここで、θは電子の速度ベクトル$\boldsymbol{v}$と電界$\boldsymbol{E}$のなす角、ϕは$\boldsymbol{v}$の$x-y$平面への正射影とx軸のなす角である。

（1）θ方向

電子が衝突後に［θ，$\theta+d\theta$］に散乱される確率は、その方向の立体角の大きさに比例する。図2．5に示すようなOを中心とする半径1の球において、［θ，$\theta+d\theta$］で決定される面積をdS、球の表面積をSとすると、［θ，$\theta+d\theta$］に散乱される確率は、

$$P(\theta)d\theta = \frac{dS}{S} = \frac{1}{2}\sin\theta\, d\theta \qquad (2-30)$$

と表わされる。ここで、$P(\theta)d\theta$の大きさと比例するように、［0，1］間に一様に分布する乱数ξ_3の微小区間を対応させる。

$$d\xi_3 = \frac{1}{2}\sin\theta\, d\theta \qquad (2-31)$$

さらに、両辺を積分して整理すると、

$$\cos\theta = 1 - 2\xi_3 \qquad (2-32)$$

となる。したがって、θは(2－32)式から決定される。

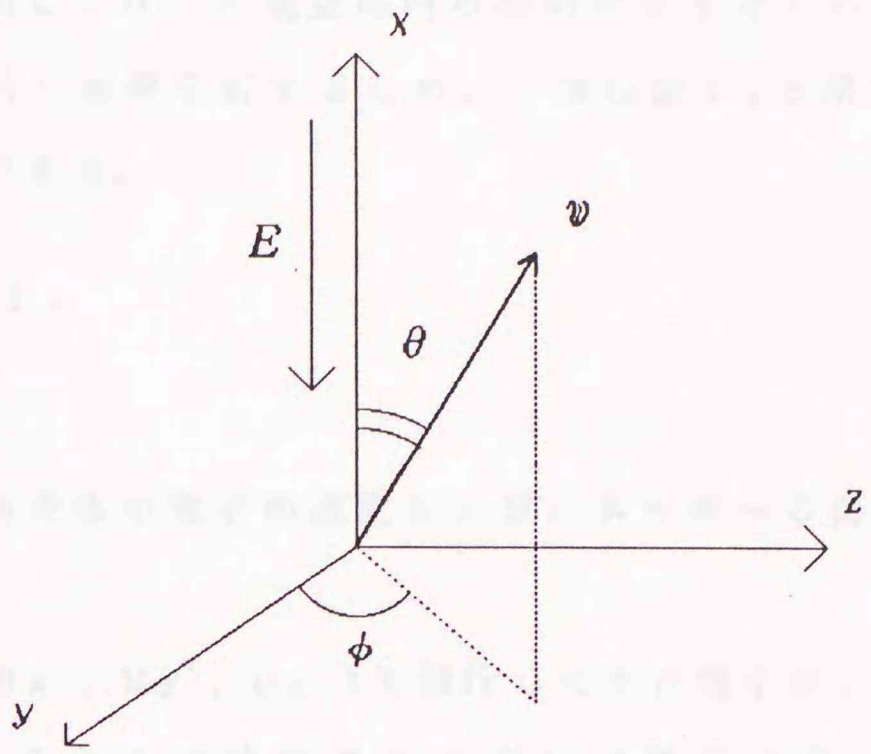


図２．４　電子の散乱角のとり方

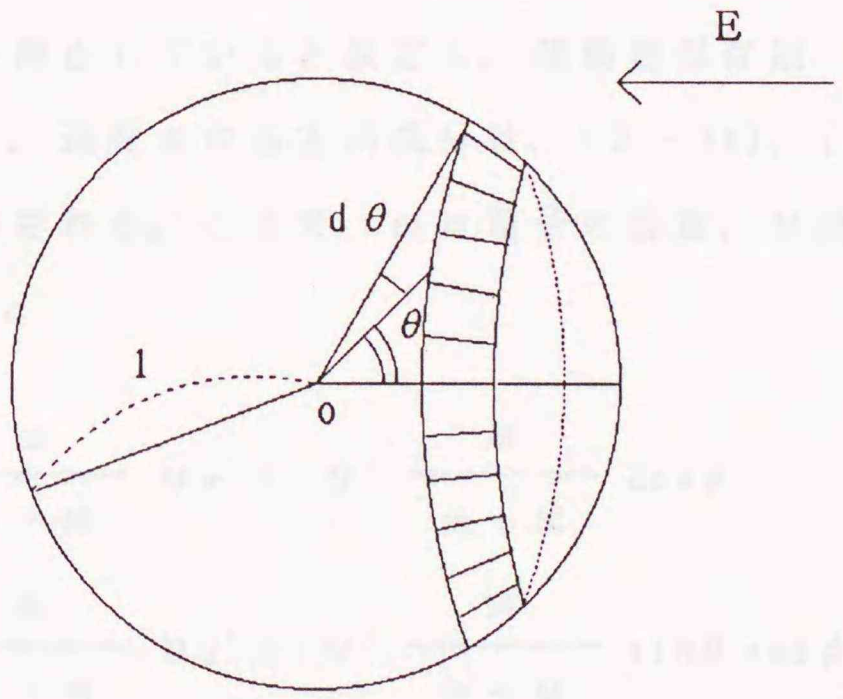


図２．５　立体角

（2）ϕ 方向

ϕ 方向に関しては、放電空間内の軸対象性を考えれば、いずれの方向に対しても同じ確率を有するため、一様乱数 ξ_4 を用いて（2－33）式によって決定できる。

$$\phi = 2\pi \cdot \xi_4 \qquad (2-33)$$

2－2－5　衝突後の電子の速度およびエネルギーの決定

速度 $\boldsymbol{v}'$（v_x', v_y', v_z'）で飛行してきた電子が、気体分子（原子）と衝突し、θ と ϕ で決定される方向に散乱され、新しい速度 $\boldsymbol{v}$（v_x, v_y, v_z）で飛行を続ける。ここでは、衝突後の電子の速度およびエネルギーの決定法について述べる。

（1）弾性衝突

気体分子が静止していると仮定し、運動量保存則、エネルギー保存則を考慮すると、速度 $\boldsymbol{v}$ の各方向成分は、（2－34）、（2－35）および（2－36）式で表わされる。ここで、m は電子の質量、M は気体分子（原子）の質量である。

$$v_x = \frac{m}{m+M} v_x' + v' \frac{M}{m+M} \cos\phi \qquad (2-34)$$

$$v_y = \frac{m}{m+M} v_y' + v' \frac{M}{m+M} \sin\theta \cos\phi \qquad (2-35)$$

$$v_z = \frac{m}{m+M} v_z' + v' \frac{M}{m+M} \sin\theta \sin\phi \qquad (2-36)$$

ここで

$$v'^2 = v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2 \qquad (2-37)$$

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \qquad (2-38)$$

である。

しかし、気体分子（原子）の質量Mは、電子の質量mに比べると非常に大きく（例えば、水素原子でも約1800倍である）、衝突のときに移行する運動量は、ほとんど無視しうるものと考えられる。したがって、質量Mが大きいガスでは、弾性衝突おける運動量の移行を無視している。この場合のvの各方向成分は、(2－34)、(2－35)および(2－36)式において、

$$\frac{m}{m+M} = 0 \qquad (2-39)$$

$$\frac{M}{m+M} = 1 \qquad (2-40)$$

として計算される。

なお、衝突後の電子のエネルギーεは、(2－41)式によって決定される。

$$\varepsilon = \frac{1}{2} m v^2$$

$$= \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \qquad (2-41)$$

(2)非弾性衝突

非弾性衝突では、電子は持っていた運動エネルギーε'から気体分子の内部状態を変化させるため（励起、電離など）に必要なしきい値のエネルギーε^*を失い、残存エネルギーεで新しい飛行を開始する。このとき次式が成り立つ。

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon^* \qquad (2-42)$$

さらに、衝突後の電子の速度v(=$|\boldsymbol{v}|$)およびその各方向成分は次式から求められる。

$$v = \sqrt{\varepsilon} \cdot V_1 \qquad (2-43)$$

$$v_x = v \sin\theta \cos\theta \qquad (2-44)$$

$$v_y = v \sin\theta \sin\phi \qquad (2-45)$$

$$v_z = v \cos\phi \qquad (2-46)$$

ここで、V_1は1 eVの電子の速さ(=59.31cm/μs)である。なお、本論文では、非弾性衝突時の気体分子（原子）への運動量の移行は考慮していない。

電離衝突の場合には、衝突を引き起こした電子(親電子: scattered electron)と、電離によって発生した電子(子電子: ejected electron)に残存エネルギーεを分配する。親電子と子電子へのエネルギー分配については、

①乱数ξを用いてξ:(1−ξ)に分配する。

②一定比で分配する。(0.2:0.8)

③分配密度関数を用いる。

方法が用いられているが、いずれの方法を用いても結果に大きな相違を生じることはないと報告されている[1]。

本論文では、衝突後のエネルギー分配が一様に行なわれると仮定

して、親電子と子電子のエネルギーをそれぞれε_1、ε_2とするとき、［0、1］間の一様乱数ξ_5を使用して次式によって分配している。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon \cdot \xi_5 \qquad (2-47)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon \cdot (1 - \xi_5) \qquad (2-48)$$

なお、衝突後の速度は、(2-44)、(2－45)および(2-46)式を使用して決定される。。

電子付着衝突の場合には、電子付着が起こった時点で電子が消滅するので、衝突後の追跡を行なう必要がない。

2－3　SchlumbohmおよびFrommholdの実験方法と電子ドリフト速度の算出方法

ガス中における電子スオームのドリフト速度を観測する方法として、Cloud chamber methode、Optical method、Electrical method、Double shutter methodなどが用いられている[2]。本論文で対象にしているFrommholdの実験[3]は、Electrical methodを用いており、また、Schlumbohmの実験[4]もElectrical methodにほとんど一致する方法を用いている。これらの方法はE/Nが比較的高く、電離増倍が顕著な場合に用いられる典型的な手法である。

Frommhold実験では、電子スオームがギャップ間を移動することによって流れる電流を、外部回路のキャパシタと並列に接続された抵抗の両端における電圧として観測する。このときの電圧の時間変化から電子ドリフト速度が算出される。この実験方法は、Pulsed discharge法あるいは、Pulsed Townsend法と呼ばれることもあるが、第1章で述べたpulsed Townsend法とは、一致しない点があることに注意する必要があ

る。

また、Schlumbohmの実験は、電子スオームによるギャップ電流を直接測定する方法であり、電流の時間変化から電子ドリフト速度が算出される。最近の研究では、Daviesら[5]がSchlumbohmの方法を用いてCH_4ガス中の電子ドリフト速度を求めている。Hunter[6]らはSchlumbohmの実験とFrommholdの実験の両方を用いてCH_4ガス中の電子ドリフト速度を算出している。

2－3－1　Schlumbohmの実験

平行平板ギャップのカソードに、短いパルス状の紫外線を照射して、時刻t＝0で、ギャップ間に初期電子群を放出させ、そのとき外部回路に流れるギャップ電流I(t)の時間変化を測定する。図2.6は、ギャップ電流I(t)の測定結果の一例[4]を示す。電子群がスタートしてからギャップ電流がピークになるまでの経過時間T_{sc}を求めることにより、電子ドリフト速度W_{sc}は、(2－49)式によって算出される。

$$W_{sc} = \frac{d}{T_{sc}} \qquad (2-49)$$

ここで、dはギャップ長である。

2－3－2　Frommholdの実験

Schlumbohmの実験と同様に、平行平板ギャップのカソードに短いパルス状の紫外線を照射して、時刻t＝0で電子群を放出させ、このとき外部回路を流れるギャップ電流を積分した電圧V(t)の時間変化を測定する。図2.7は、Frommholdの電圧の測定結果[3]の一例を示す。

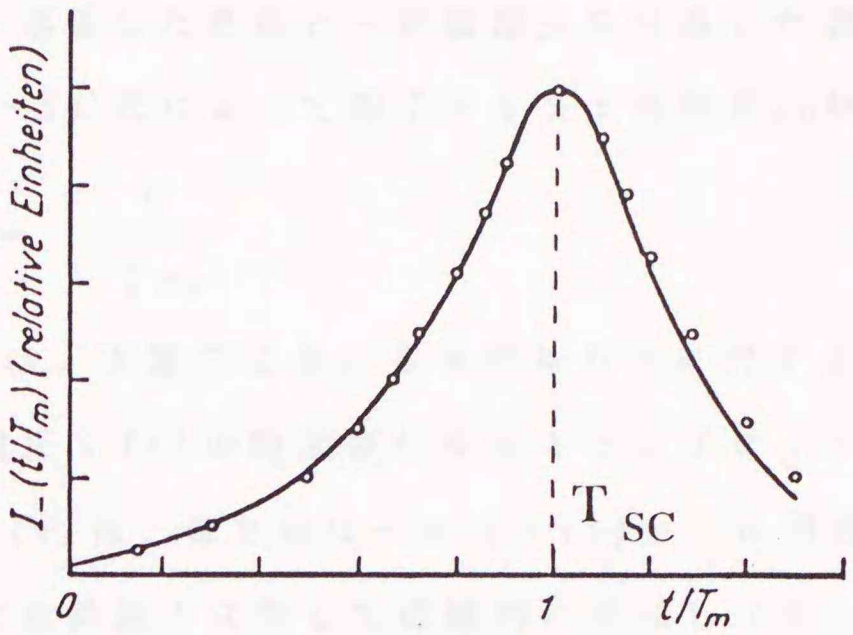


図２．６　ギャップ電流の時間変化（Schlumbohmの実験）

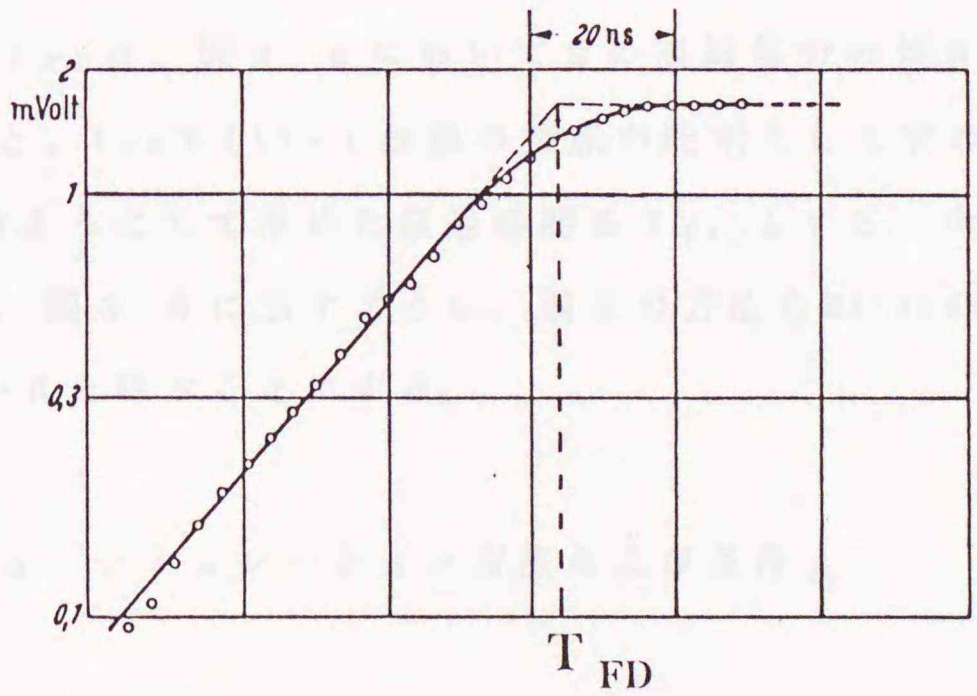


図２．７　電圧の時間変化（Frommholdの実験）

V(t)をセミログプロットで表わすと、logV(t)は、はじめは直線的に上昇するが、電子が全てアノードに到着すると一定値となる。直線的に上昇する部分を延長した直線と一定値部分を延長した直線の交点の時刻T_{FD}から、(2－50)式によって電子ドリフト速度W_{FD}が算出される。

$$W_{FD} = \frac{d}{T_{FD}} \qquad (2-50)$$

図2.8は、本論文におけるモデルガスに対するシミュレーションで得られた電圧V(t)の時間変化をセミログプロットした結果の一例である。logV(t)は、はじめは－∞（V(t)＝0に相当）から急速に増加し（Ⅰ）、次に時間tに対して直線的に増加し（Ⅱ）、最後に、電子がアノードに到着すると、logV(t)は一定値になる（Ⅲ）傾向を持っている。Frommholdの報告では、Ⅰの部分は明確に示されていないが、時刻tが小さいときの1～3点のデータが図2.8のⅠの部分に相当すると考えられる。本論文では、logV(t)-t曲線のⅡの直線部分の延長とⅢにおける一定値の延長の交点の時刻を経過時間T_{FD1}とした。

またT_{FD}は、図2.8においてⅡの直線部分の傾きの$\frac{1}{2}$の大きさを持つ直線と、logV(t)-t曲線の接点の時刻として求めることもできる[7]。このようにして求めた経過時間をT_{FD2}とする。今後、T_{FD}の決定において、図2.8に示すように、前者の方法をMethod-Ⅰ、後者の方法をMethod-Ⅱと呼ぶことにする。

2－3－3　シミュレーション方法および条件

本論文では、十分に幅の広い平行平板ギャップ間に与えられた初期電子と電離衝突によって生じる子電子が、電極（カソード、アノード）での吸収あるいは、電子付着衝突（CH_4ガスおよびSF_6ガスの場合）によってギャップ間から全て消失するまでを、モンテカルロ法を用いて

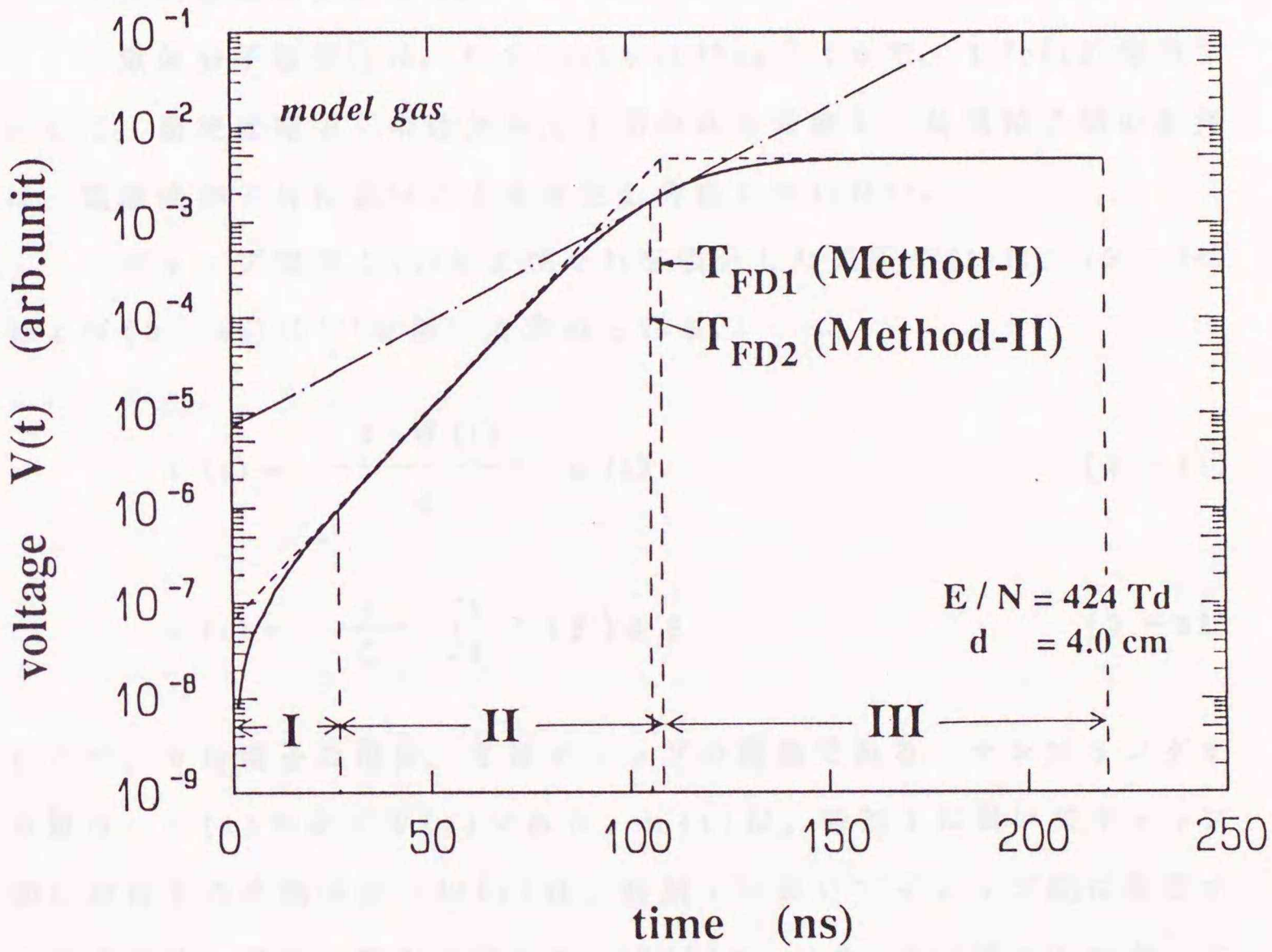

model gas
voltage V(t) (arb.unit)
time (ns)
T_{FD1} (Method-I)
T_{FD2} (Method-II)
E / N = 424 Td
d = 4.0 cm
I
II
III
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
10^{-8}
10^{-9}
0
50
100
150
200
250

図２．８　電圧の時間変化

追跡した。なお、電子の飛行時間の計算には、ＦＦＴ法を用いている。初期電子は、時刻ｔ＝０でカソード表面の一点（$x=y=z=0$）に与えられ、そのエネルギー分布は、金属電極から放出される光電子のエネルギーが一般に低い値であることを考慮し、平均値が１eVのマクスウェル分布とした。また、初期電子はカソードから等方的に放出されるものとし、電極は、一部の解析を除いて、カソードおよびアノードともに電子の完全吸収壁と仮定した。

気体分子数密度は、$N=3.5355\times10^{16}cm^{-3}$（０℃、１Torrに相当）とした。衝突は電子－中性気体分子間のみを考慮し、荷電粒子間の衝突は、電離度が十分に低いことを仮定し考慮していない。

ギャップ電流Ｉ(t)およびそれを積分した電圧Ｖ(t)は、(２－51)および(２－52)式[8]を用いて求められる。

$$I(t)=\frac{e\cdot W(t)}{d}\,n(t) \qquad (2-51)$$

$$V(t)=\frac{1}{C}\int_0^t I(\xi)\,d\xi \qquad (2-52)$$

ここで、ｅは電子の電荷、Ｃはギャップの容量である。サンプリングする量は、ｎ(t)およびＷ(t)であり、ｎ(t)は、時刻ｔにおいてギャップ間に存在する全電子数、Ｗ(t)は、時刻ｔにおいてギャップ間に存在する電子の持つ速度の平均値である。Ｗ(t)は、(２－51)式にしたがってサンプリングされる。

$$W(t)=\frac{1}{n(t)}\sum_{i=1}^{n(t)} v_{xi}(t) \qquad (2-53)$$

ここで、$v_{xi}(t)$は、時刻ｔでｉ番目の電子の持つx方向（電界：$-x$

方向）の速度である。電圧V(t)は、(2－52)式の積分を台形公式を用いて数値的に求めている。

2－4　理論電子ドリフト速度の算出方法

理論電子ドリフト速度は、1－3で述べたように、電離あるいは電子付着によってスオーム中の電子数が変化する場合には、観測方法の違いによって異なる値を持つ[9]。モンテカルロシミュレーションを用いて電子スオームのドリフト速度を求める場合にも、それぞれの観測方法に対応したデータのサンプリングを適切に行うことが必要である。本節では、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmについて、それぞれの物理的意義およびサンプリング方法について述べる。

2－4－1　拡散を考慮したドリフト速度 Vd

Vdは、SST実験によって得られる電子ドリフト速度であり、(2－54)式のように電子の平均速度として定義される。

$$\mathrm{Vd}(x) = \frac{\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} v_x f(v, x, t)\, dv\, dt}{\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(v, x, t)\, dv\, dt} \qquad (2-54)$$

ここで$f(v, x, t)$は電子の速度分布関数、v_xは電子の速度の電界と逆方向成分であり、$v\cos\theta$で表わされる。

モンテカルロ法でSST実験の観測を行なうためには、電子の定常流を計算機内で表現しなければならないが、一般に、定常流をそのま

まシミュレートすることは、アルゴリズム、計算時間および計算機の記憶容量の点において不可能に近い。しかし、電子の定常流が、陰極からパルス状に連続的に放出され進展する電子スオームを重ね合わせた形であるとすれば、カソードから十分に離れた点において、一つのスオームを先端部から後尾部まで観測することによってＳＳＴ実験の観測方法と等価な観測を実現できることになり、単一のスオームでＳＳＴ実験のシミュレーションが可能となる。

Ｖdを求めるためには、放電空間の電界方向を微小区間に分割し、各区間$x_i \sim x_i + \Delta x$（以後Δx_iと記す）に存在する電子の速度の電界方向成分$v\cos\theta$をサンプリングする。これにより、各区間における平均の速度$Vd(\Delta x_i)$が、(２－55)式から求められる。

$$Vd(\Delta x_i) = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \{ v_j(\Delta x_i) \cdot \cos\theta_j \} \qquad (2-55)$$

ここで、N_iは区間Δx_i内でサンプリングされる総電子数であり、通過電子数とは異なる。また、電子の区間Δx_i内の滞在時間Δt_{x_i}も考慮する場合、$Vd(\Delta x_i)$は(２－56)式によって求められる。

$$Vd(\Delta x_i) = \frac{1}{N_i} \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \{ v_j(\Delta x_i) \cdot \cos\theta_j \} \cdot (\Delta t_{x_i})}{\sum_{j=1}^{N_i} (\Delta t_{x_i})} \qquad (2-56)$$

(２－55)および(２－56)式から得られる$Vd(\Delta x_i)$は、Δx_iの関数であり、$Vd(\Delta x_i)$がΔx_iに依存しない部分における平均値をもって、ドリフト速度Ｖdの値としている。

2－4－2　全電子の平均ドリフト速度 Wv

Wvは(2－57)式のようにスオームを構成する電子の電界と逆方向の速度成分の平均値として定義されおり、PT実験において求められる電子ドリフト速度である。

$$Wv(t)=\frac{\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} v_x f(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x},t)\,d\boldsymbol{v}\,dt}{N(t)} \qquad (2-57)$$

ここで、N(t)は、時刻tにおける全電子数であり(2－58)式で表わされる。

$$N(t)=\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x},t)\,d\boldsymbol{v}\,dt \qquad (2-58)$$

Wvを求めるために、(2－59)式にしたがって、各時刻における電子のx方向成分$v\cos\theta$の平均値をサンプリングする。これによって各時刻における平均速度$Wv(t_k)$が得られる。

$$Wv(t_k)=\frac{1}{N_k}\sum_{j=1}^{N_k}\{v_j(t_k)\cdot\cos\theta_j\} \qquad (2-59)$$

ここで、N_kは時刻t_kに存在する全電子数、v_jおよびθ_jは、j番目にサンプリングされる電子の速さvおよび速度ベクトルとx軸のなす角である。サンプリングされた$Wv(t_k)$は時刻t_kの関数であり、$Wv(t_k)$がt_kに依存せず一定になるところが平衡状態であり、その部分での平均値をもって、電子ドリフト速度Wvの値としている。

2－4－3　重心のドリフト速度 Wr

Wrは、1－2で述べた表現を用いると、DOF実験において得られるドリフト速度であり、(2－60)式のようにスオームの重心の位置$\bar{x}$の移動速度として定義されている。

$$Wr(t) = \frac{d\,\bar{x}(t)}{d\,t} \qquad (2\text{-}60)$$

ここで$\bar{x}(t)$はスオームの重心の位置であり、(2－61)式で表わされる。

$$\bar{x}(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \cdot n(x, t)\,dx}{\int_{-\infty}^{\infty} n(x, t)\,dx} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \cdot n(x, t)\,dx}{N(t)} \qquad (2-61)$$

$n(x, t)$は電子数密度、$N(t)$は時刻tにおける全電子数である。各時刻における重心の位置$\bar{x}(t_k)$のサンプリングは、(2－62)式にしたがって行なわれる。

$$\bar{x}(t_k) = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} x_j(t_k) \qquad (2-62)$$

このサンプリングは図2.9(a)に示されるような電子数密度$n(x, t)$を求め、そこから重心の位置$\bar{x}(t_k)$（図中破線）を求めることに相当する。

図2.9(b)は、$\bar{x}(t_k)$を時刻t_kに対してプロットしたものであり、(2－60)式に示される定義より、破線の直線の傾きからWrが決定される。

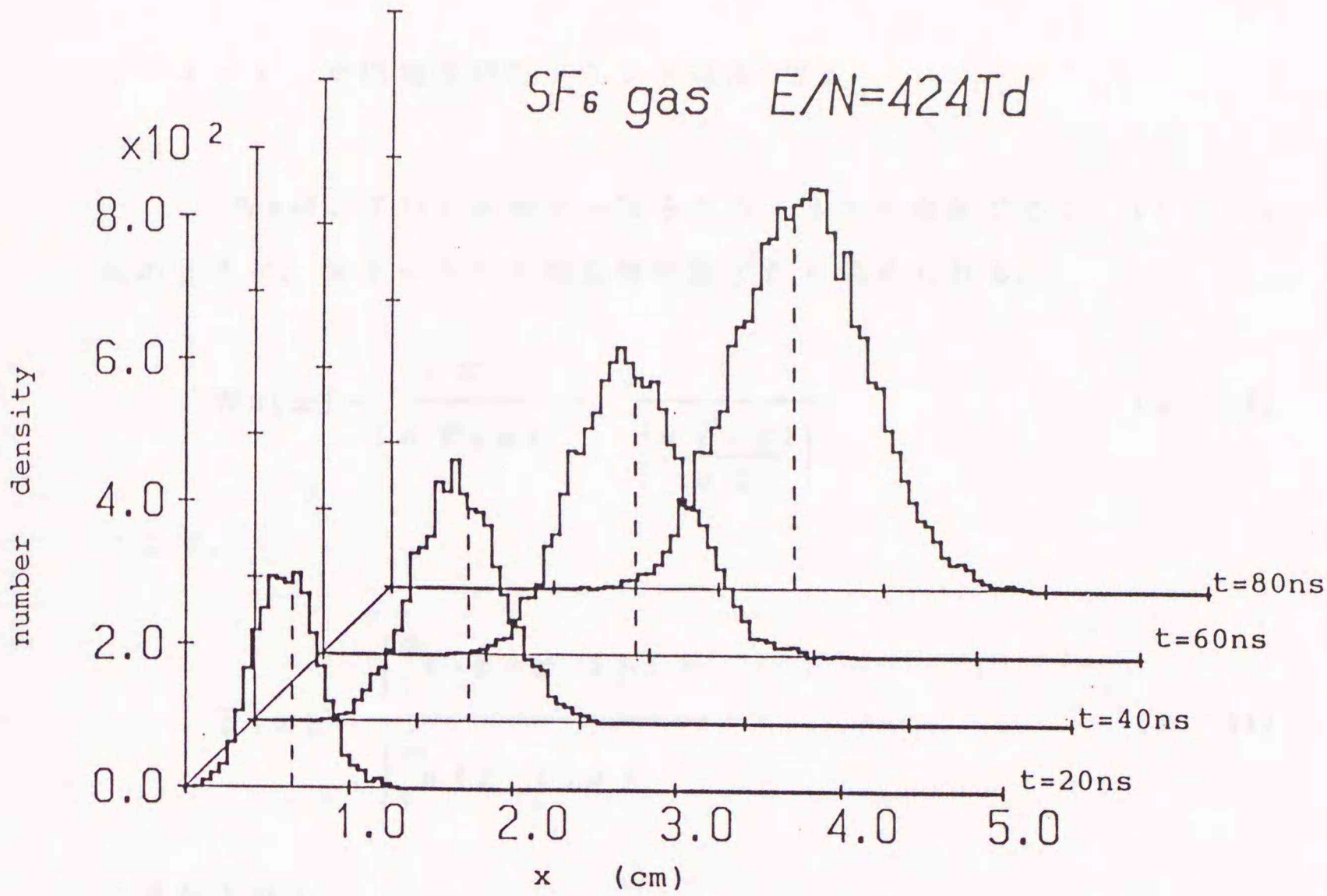


図2.9(a) 電子数密度の空間分布

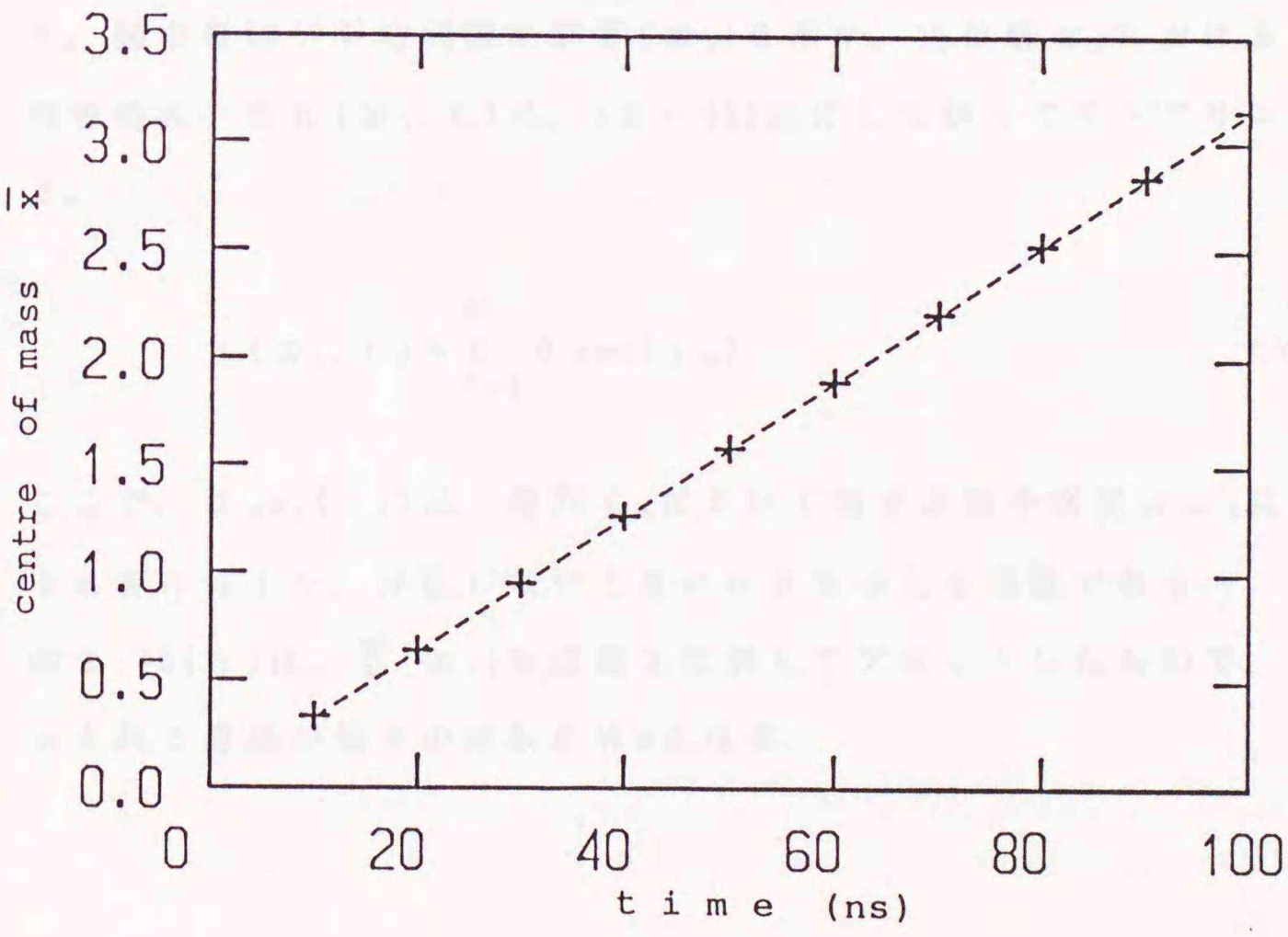


図2.9(b) 重心の位置の時間変化

2－4－4　平均到着時間ドリフト速度 Wm

Wmは、TOF実験から得られるドリフト速度であり、(2－63)式のように、スオームの平均到着時間$\overline{t}$から求められる。

$$W_m(x) = \frac{dx}{d\overline{t}(x)} = \frac{1}{\left[\dfrac{d\overline{t}(x)}{dx}\right]} \qquad (2-63)$$

ここで、

$$\overline{t}(x) = \frac{\int_0^\infty t \cdot n(x, t)\,dt}{\int_0^\infty n(x, t)\,dt} \qquad (2-64)$$

で表わされる。

図2.10(a)は、電子の到着時間分布のサンプル結果の一例を示す。図中●印が平均到着時刻$\overline{t}(x_i)$を示す。各位値x_iにおける電子の到着時間分布$n(x_i, t)$は、(2－65)式にしたがってサンプリングされる。

$$n(x_i, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{\Delta x_i}(t_k) \qquad (2-65)$$

ここで、$\delta_{\Delta x_i}(t_k)$は、時刻t_kにおいて電子が微小区間Δx_iに存在するときには1を、存在しないときには0を与える関数である。

図2.10(b)は、$\overline{t}(x_i)$を位置xに対してプロットしたもので、破線で示される直線の傾きの逆数がWmとなる。

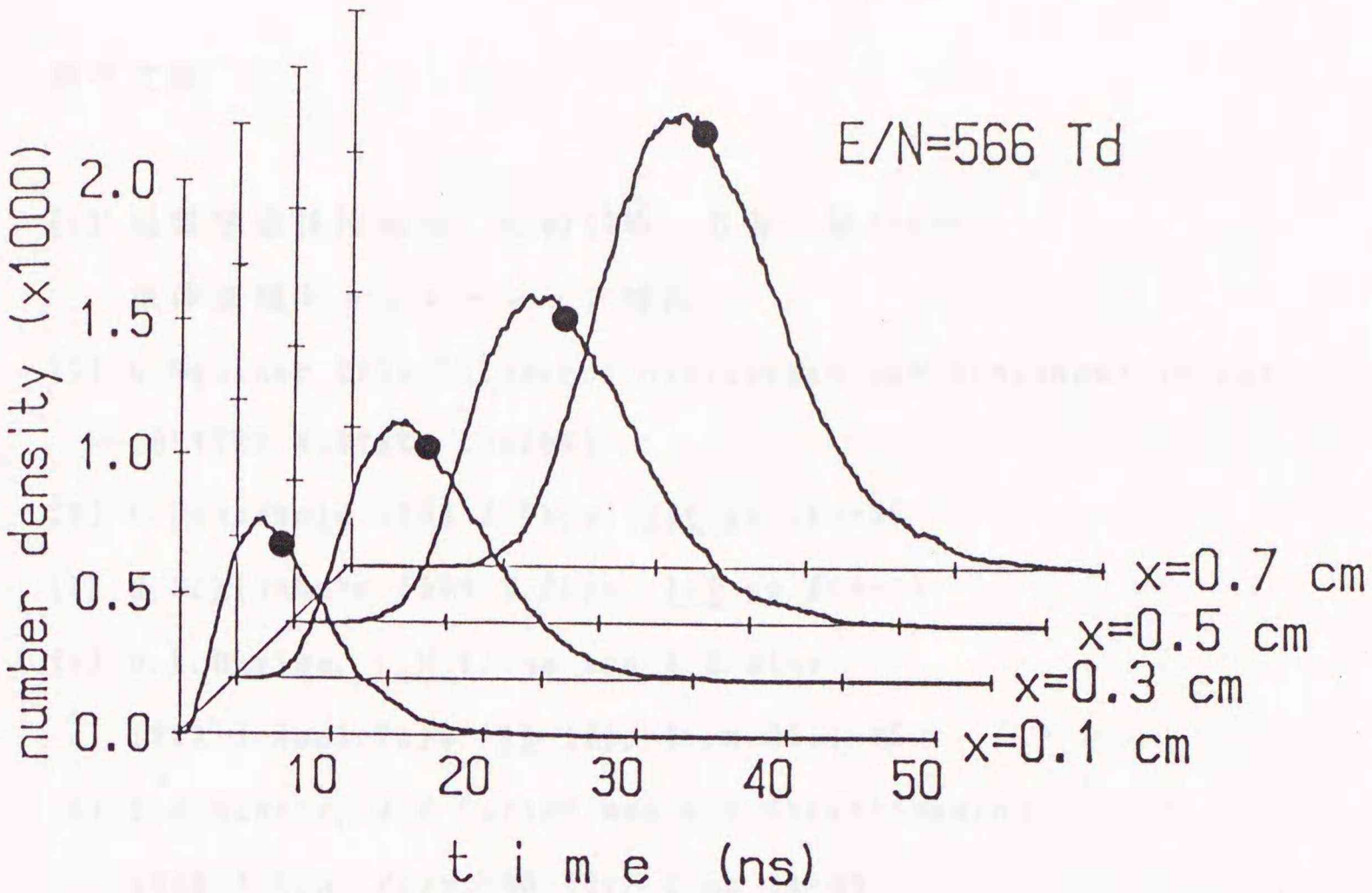


図2.10(a) 到着時間分布

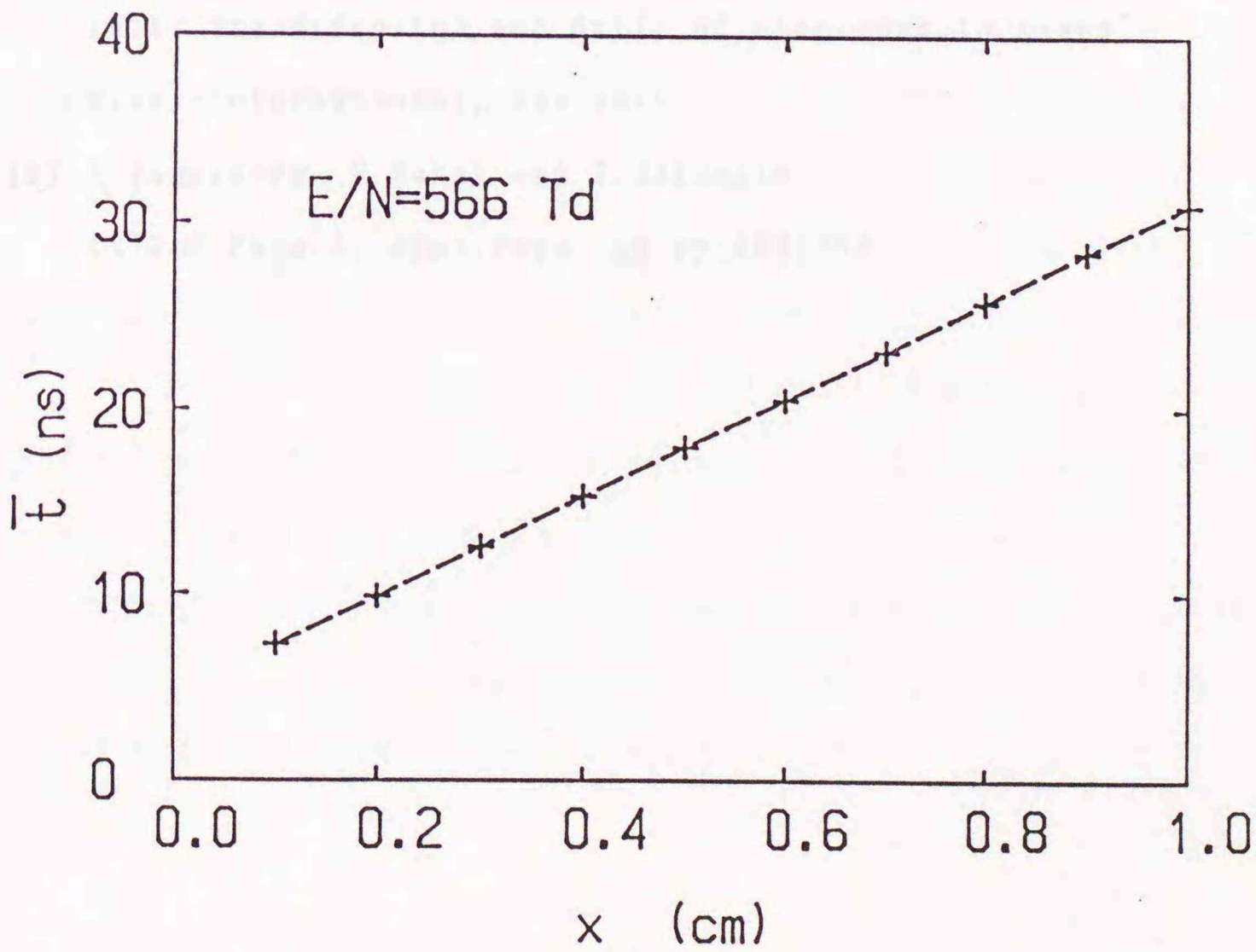


図2.10(b) 平均到着時間

参考文献

[1] 電気学会技術報告　昭和57年　II部　第140号
気体放電シミュレーション技法

[2] H.Raether 1964 "Electron Avalanches and Breakdown in Gas"
(BUTTER WORTHS: LONDON)

[3] L.Frommhold 1959 Z.Phys. 156 pp.144-58

[4] H.Schlumbohm 1965 Z.Phys. 182 pp.306-16

[5] D.K.Davies, L.E.Kline and W.E.Bies
1989 J.Appl.Phys. 65 (9), 1 pp.3311-23

[6] S.R.Hunter, J.G.Carter and L.G.Christophorou
1986 J.Appl.Phys. 60 (6), 1 pp.24-35

[7] Y.Nakamura Private Communication

[8] L.G.Huxley and R.W.Cromptom
1974 "The diffusion and drift of electrons in gases"
Wiley-International, New york

[9] H.Tagashira, Y.Sakai and S.Sakamoto
1977 J.Phys.D: Appl.Phys. 10 pp.1051-63

第３章　モデルガスに対する解析

３－１　諸言

実験から得られる電子ドリフト速度と理論ドリフト速度との対応を明らかにするためには、現実の実験を正確にシミュレートし、得られるドリフト速度と同一の電子衝突断面積を用いて得られた理論ドリフト速度との比較および検討を行なうことが最も有効な方法の一つであると考えられる。

本論文では、第一に、電子ドリフト速度の一般的傾向を定性的に把握することを目的に、全衝突周波数が一定値であるモデルガスに対して解析を行なった。このモデルガスは、全衝突断面積 $\mathcal{S}_T$ が C/v（Cは定数）で与えられているので、全衝突周波数が一定となり(２－12)式の右辺の積分を解いて、電子の飛行時間 τ を(２－14)式のように直接求めることが可能である。これによって、計算時間を短縮できるとともに、数値積分の誤差を含まないという点で、飛行時間の計算の精度を向上させることができる。

本章では、上述のモデルガスの電子衝突断面積を用いて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカル法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から得られる電子ドリフト速度 W_{SC} および W_{FD} を算出とともに、W_{SC} と W_{FD} を、同一の電子衝突断面積を用いて、電極を考慮しない自由空間を仮定したモンテカルロシミュレーションから得られた理論電子ドリフト速度Ｖd、Ｗv、Ｗrおよび Ｗm と比較し対応関係を検討している。また、電極における電子の反射を考慮した場合、電子ドリフト速度に及ぼされる影響について述べている。

3－2　シミュレーション条件

図3．1に計算に使用したモデルガスの電子衝突断面積を示す。運動量移行断面積σ_m、励起衝突断面積σ_{ex}および電離衝突断面積σ_iで構成されている。励起衝突および電離衝突のしきい値は、それぞれ10eVおよび15eVであり、Arガスに近い値である。また、各衝突断面積は、以下に示す数式で表現される。ここで、εは電子の運動エネルギーである。

（1）全衝突断面積σ_T

$$\sigma_T = \frac{4.0\times10^{-15}}{\sqrt{\varepsilon}} \qquad (3-1)$$

（2）電離衝突断面積σ_i

$$\sigma_i = 0 \qquad (0 \leqq \varepsilon < 15.0\mathrm{eV}) \qquad (3-2)$$

$$\sigma_i = 2.0\times10^{-16}\times\{1-\exp(-\varepsilon/10)\}^6 \times\exp\{-1.5\times10^{-3}\times(\varepsilon-15.0)\} \qquad (15.0\leqq\varepsilon<500\mathrm{eV}) \qquad (3-3)$$

$$\sigma_i = 2.0\times10^{-16}\times\exp\{-1.5\times10^{-3}\times(\varepsilon-15.0)\} \qquad (500\mathrm{eV}\leqq\varepsilon) \qquad (3-4)$$

（3）励起衝突断面積σ_{ex}

$$\sigma_{ex} = 0 \qquad (0\leqq\varepsilon<10.0\mathrm{eV}) \qquad (3-5)$$

$$\wp_{ex} = 1.5\times 10^{-16}\times\{1-\exp(-\varepsilon/4.0)\}^{10}$$
$$\times\exp\{-1.712\times 10^{-2}\times(\varepsilon-10)\} \qquad (10\leqq\varepsilon<300\mathrm{eV})$$
$$(3-6)$$

$$\wp_{ex} = 1.5\times 10^{-16}\times\exp\{-1.712\times 10^{-2}\times(\varepsilon-10)\} \qquad (300\mathrm{eV}\leqq\varepsilon)$$
$$(3-7)$$

(4)運動量移行断面積 $\wp_m$

$$\wp_m = \wp_T-(\wp_i+\wp_{ex}) \qquad (3-8)$$

本解析では、ガス圧pを1Torr一定として、ギャップ長dを変化させて、電離による電子増倍を伴う領域であるE/N=283、424および566Tdにおいてシミュレーションを行なった。表3.1に計算条件を示す。妥当な計算時間のシミュレーションで、統計変動の少ない結果を得るために、電離による電子増倍が大きい条件（高E/N、あるいはギャップ長dが大）では、初期電子数を少なく設定している。

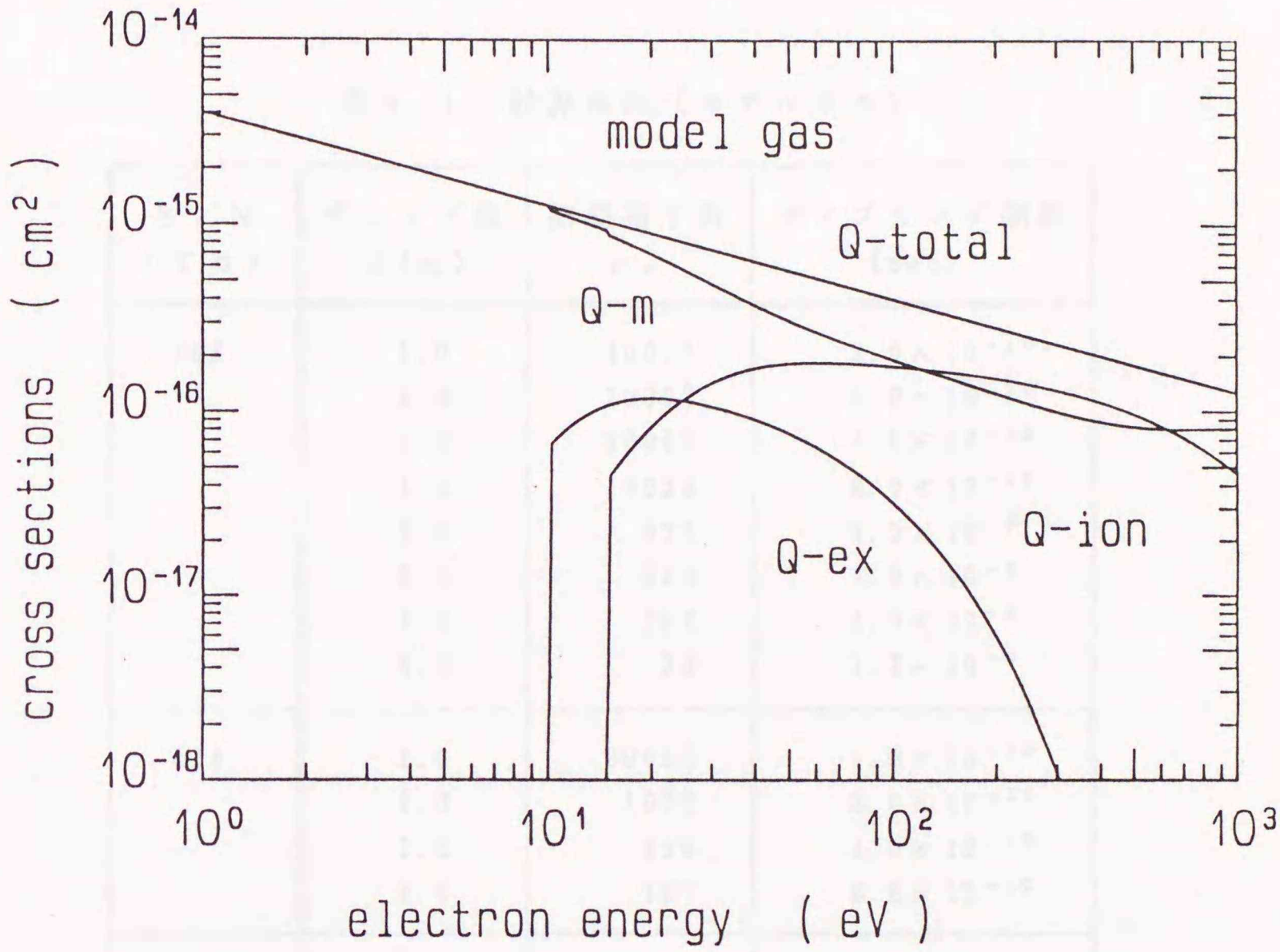


図3．1　モデルガスの電子衝突断面積

表３．１　計算条件（モデルガス）

E／N (Td)	ギャップ長 d (cm)	初期電子数 n_0	サンプリング間隔 (sec)
283	1.0	40007	2.0×10^{-10}
	2.0	20007	3.0×10^{-10}
	3.0	10008	4.0×10^{-10}
	4.0	2024	8.0×10^{-10}
	5.0	975	1.0×10^{-9}
	6.0	228	1.0×10^{-9}
	7.0	102	1.0×10^{-9}
	8.0	23	1.2×10^{-9}
424	1.0	80002	1.0×10^{-10}
	2.0	1002	2.0×10^{-10}
	3.0	206	4.0×10^{-10}
	4.0	107	8.0×10^{-10}
566	1.0	20020	1.0×10^{-10}
	2.0	206	1.8×10^{-10}
	2.5	228	2.0×10^{-10}
	3.0	18	2.0×10^{-10}

3－3　解析結果

3－3－1　計算結果

図3.2、3.3および3.4に、E/N=283、424および566Tdにおけるギャップ電流I(t)およびそれを積分した電圧V(t)の時間変化を競れぞれ示す。図中○印は、ギャップ電流I(t)のピークを示しており、t=0からピークまでの経過時間がT_{sc}となる。電圧V(t)のセミログプロットは、3つの部分(Ⅰ～Ⅲ)に大別できることを2－3－2で述べたが、図3.2(a)～(d)、3.3(a)、(b)および3.4(a)においては、logV(t)がtに対して直線的に上昇する部分(Ⅱ)がほとんど見られない。これは、Nd（N：気体分子密度）が小さく、カソードを離れた電子スオームが十分に電離による電子増倍をする前に、アノードに到達し吸収されたためと考えられる。これに対して、図3.2(e)～(g)、3.3(c)、(d)および3.4(b)～(d)では、logV(t)がtに対して直線的に上昇する部分(Ⅱ)が見られることから、電離による電子増倍が十分に起こっていると考えられる。

電極における電子の吸収の影響を受けずに、スオームが進展する場合を考えると、電子数n(t)は、(3－9)式のように書くことができる。

$$n(t)=n_0\cdot\exp(R_i\cdot t) \qquad (3-9)$$

ここで、n_0は初期電子数、R_iは電離周波数（PT実験で求められる）である。また、初期電子数供給直後の電子エネルギーの非平衡性は無視している。(3－9)式を(2－51)式に代入してI(t)を求め、さらにI(t)を(2－52)式に代入すると、V(t)は次式のようになる。

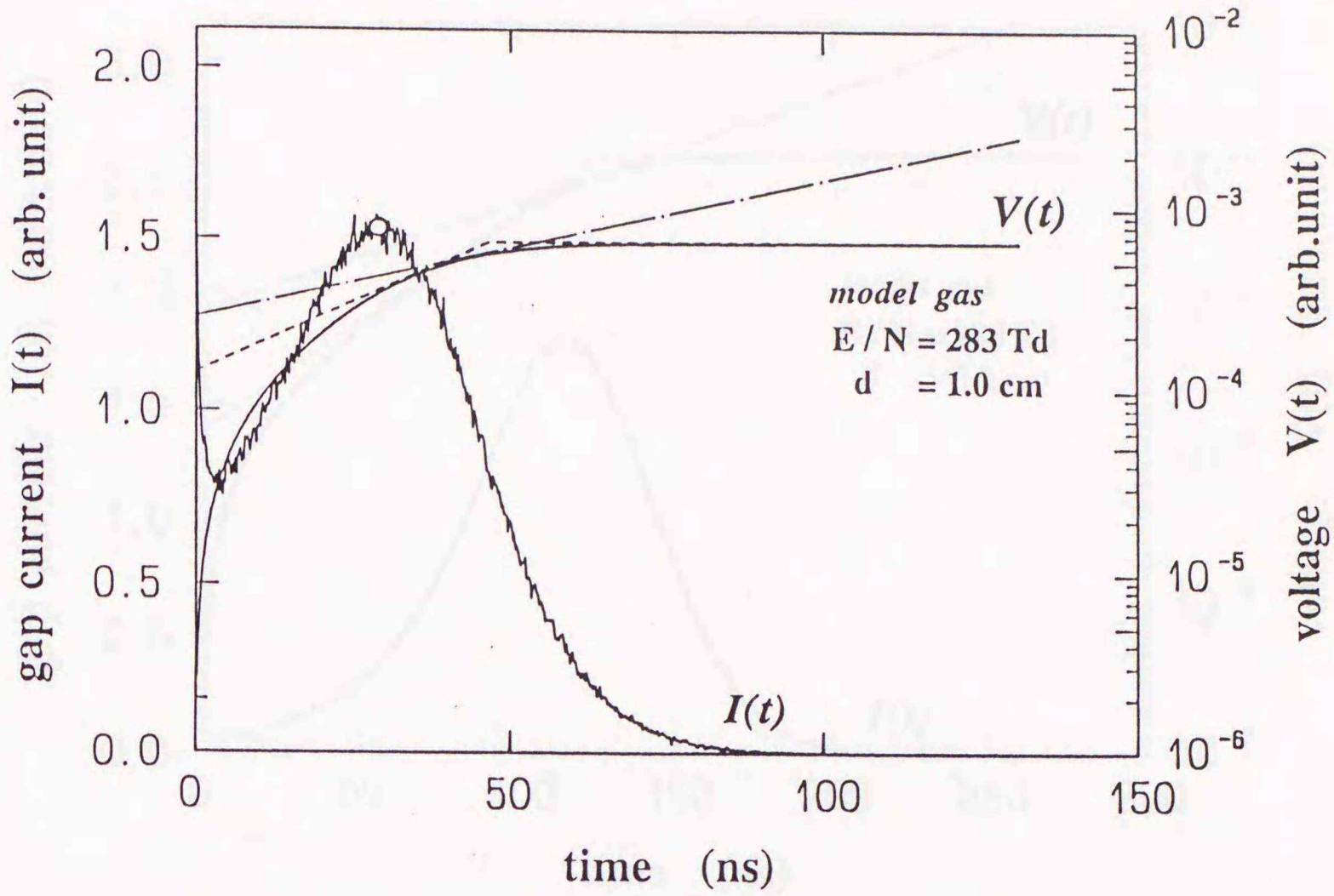


図３．２（ａ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=1.0cm

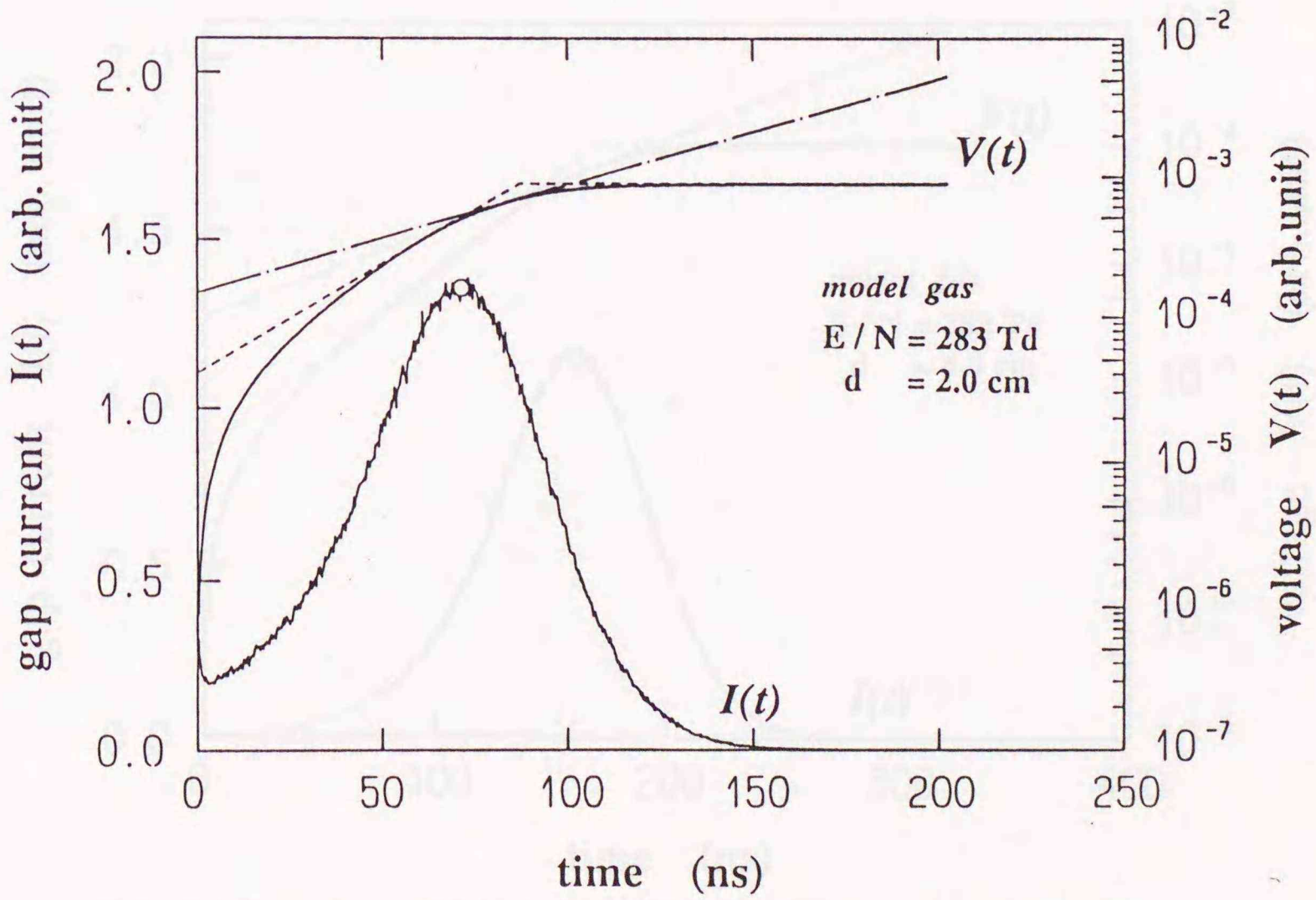


図３．２（ｂ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=2.0cm

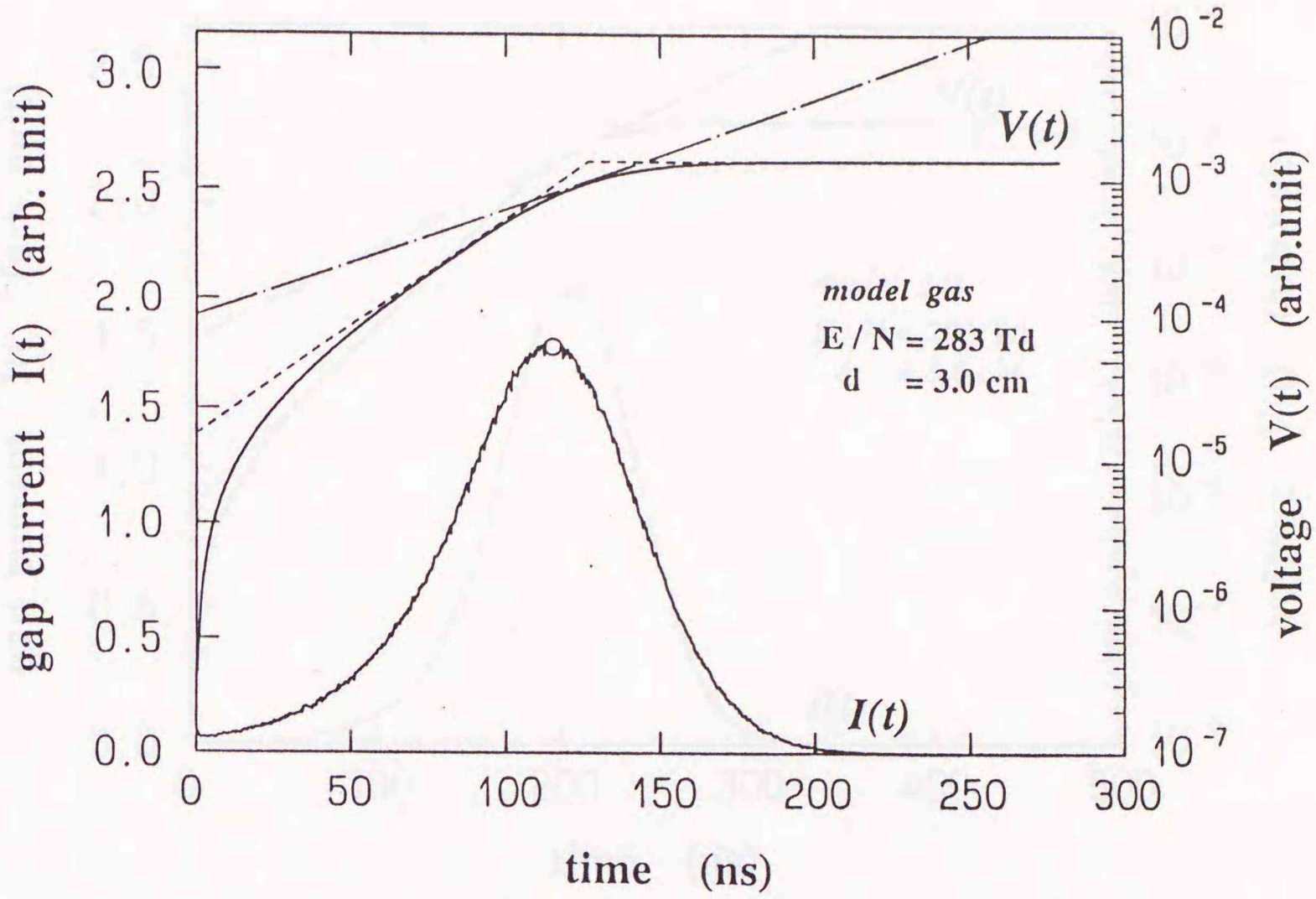


図３．２（ｃ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=3.0cm

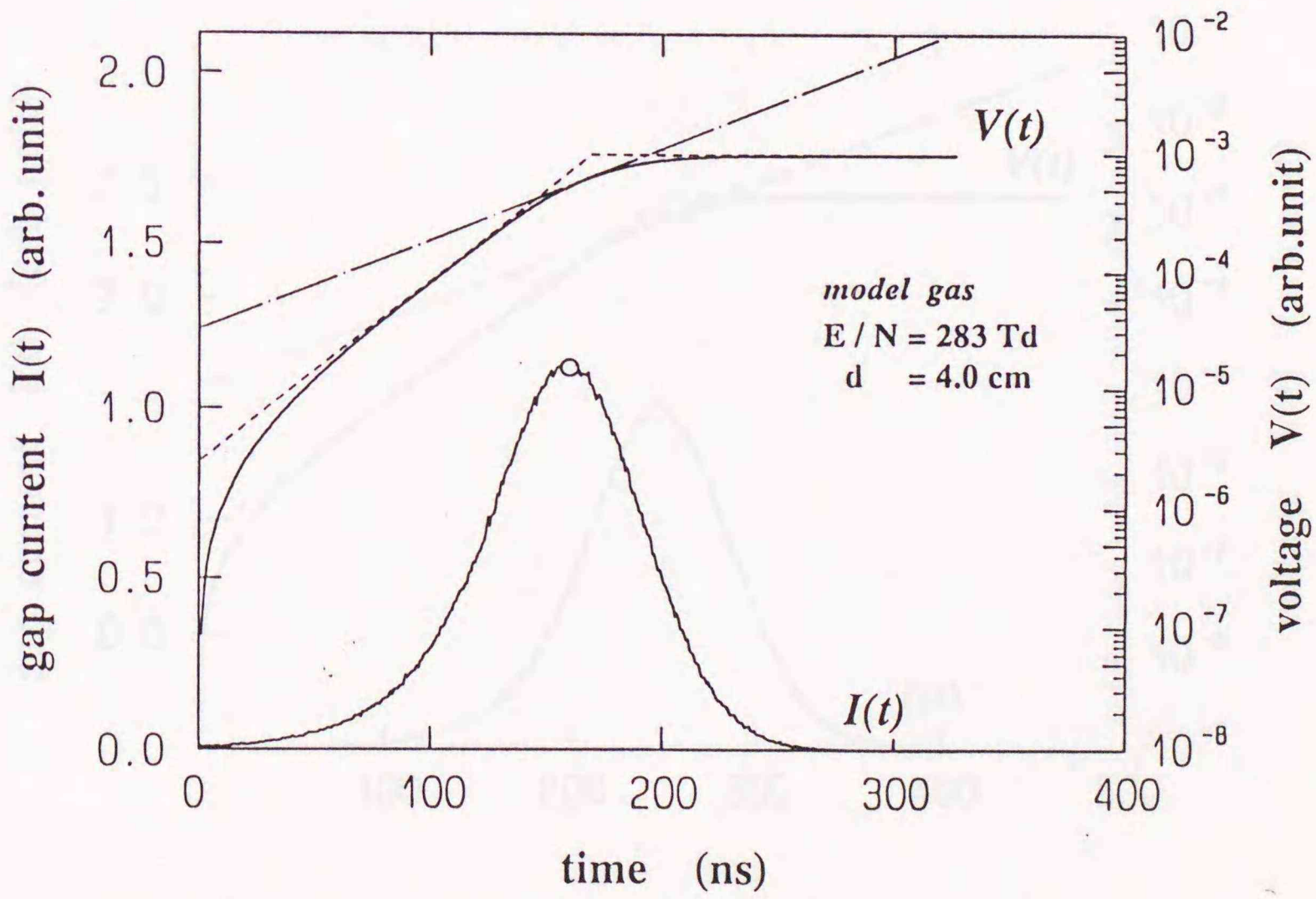


図３．２（ｄ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

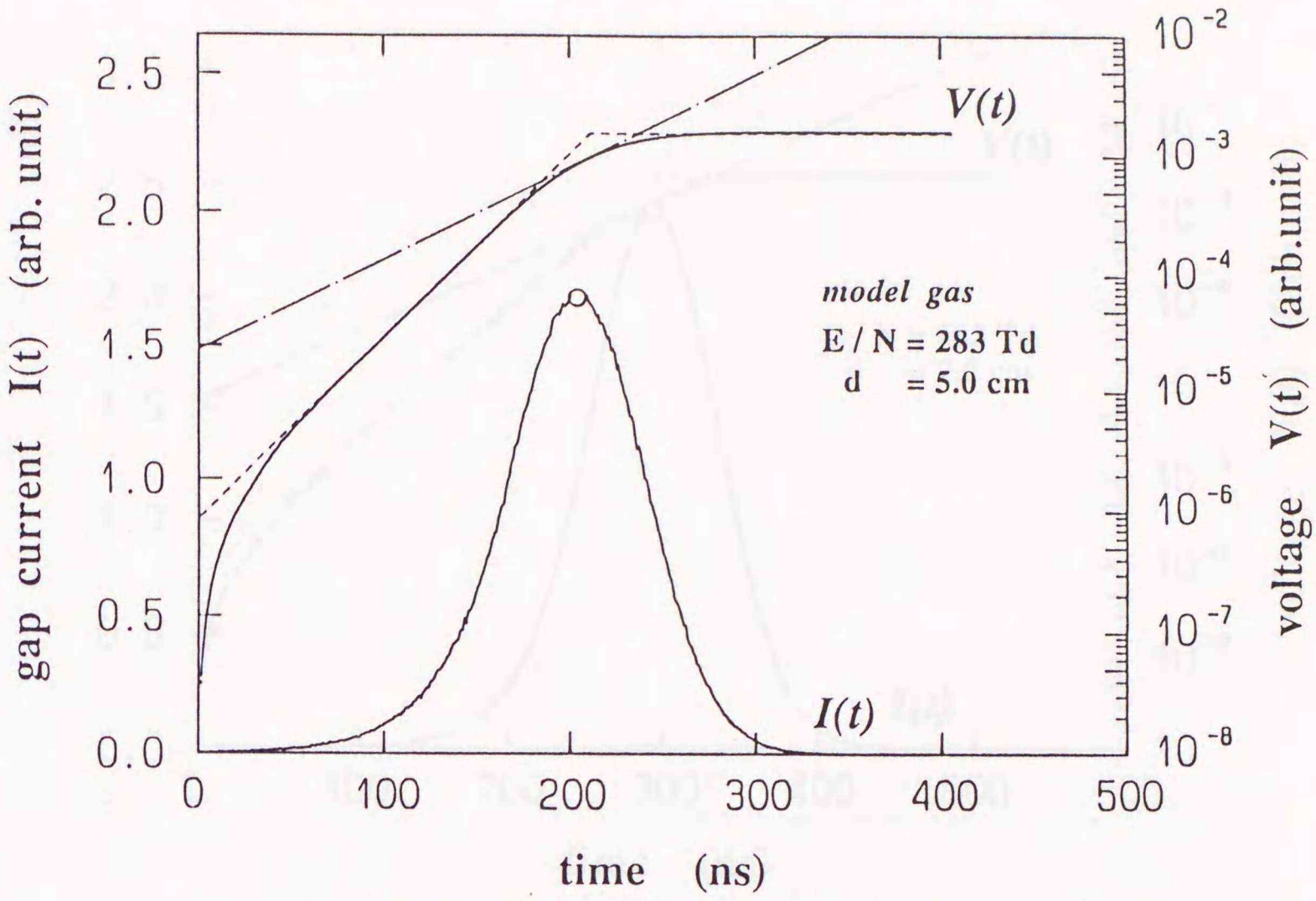


図３．２（ｅ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=5.0cm

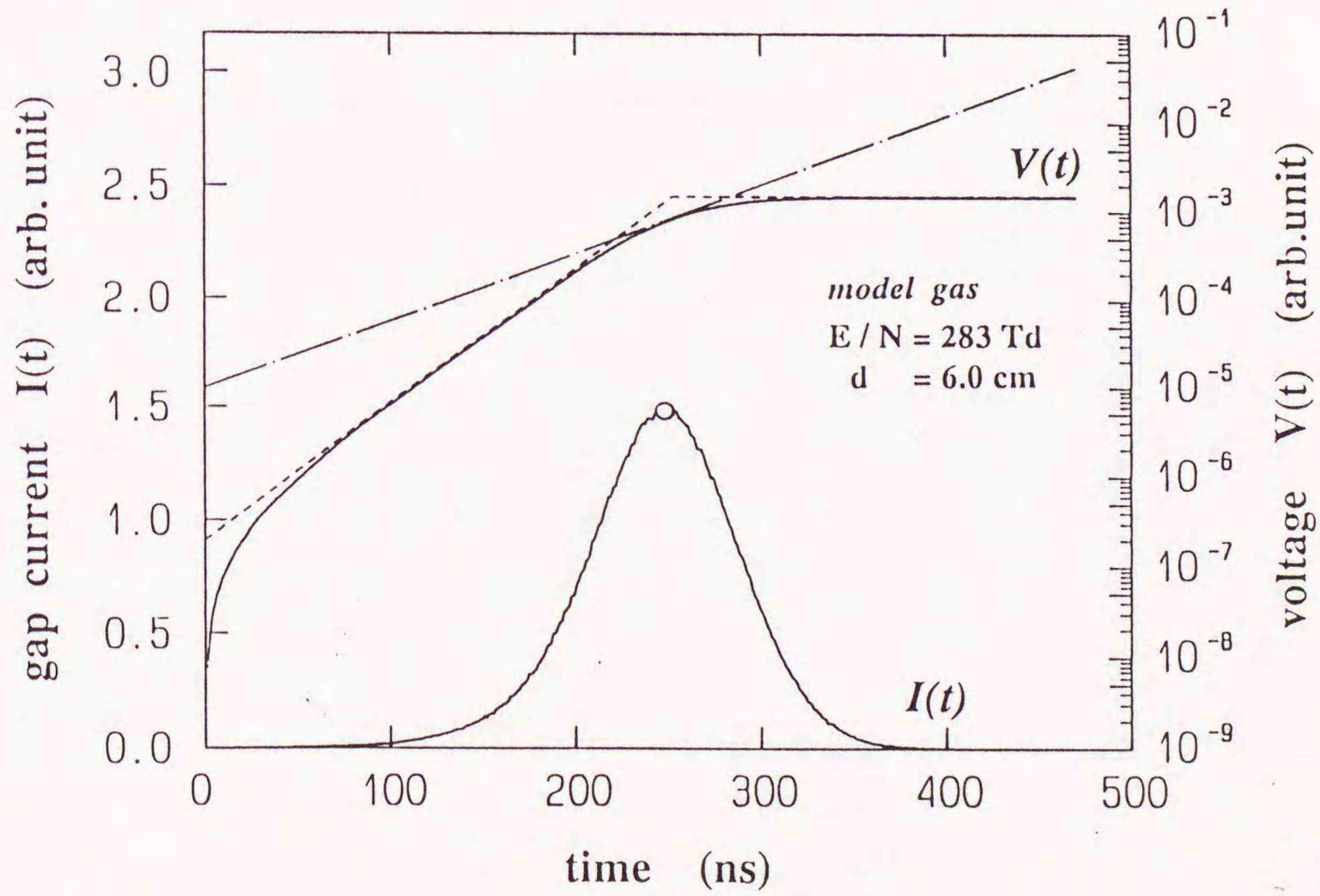


図３．２（ｆ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=6.0cm

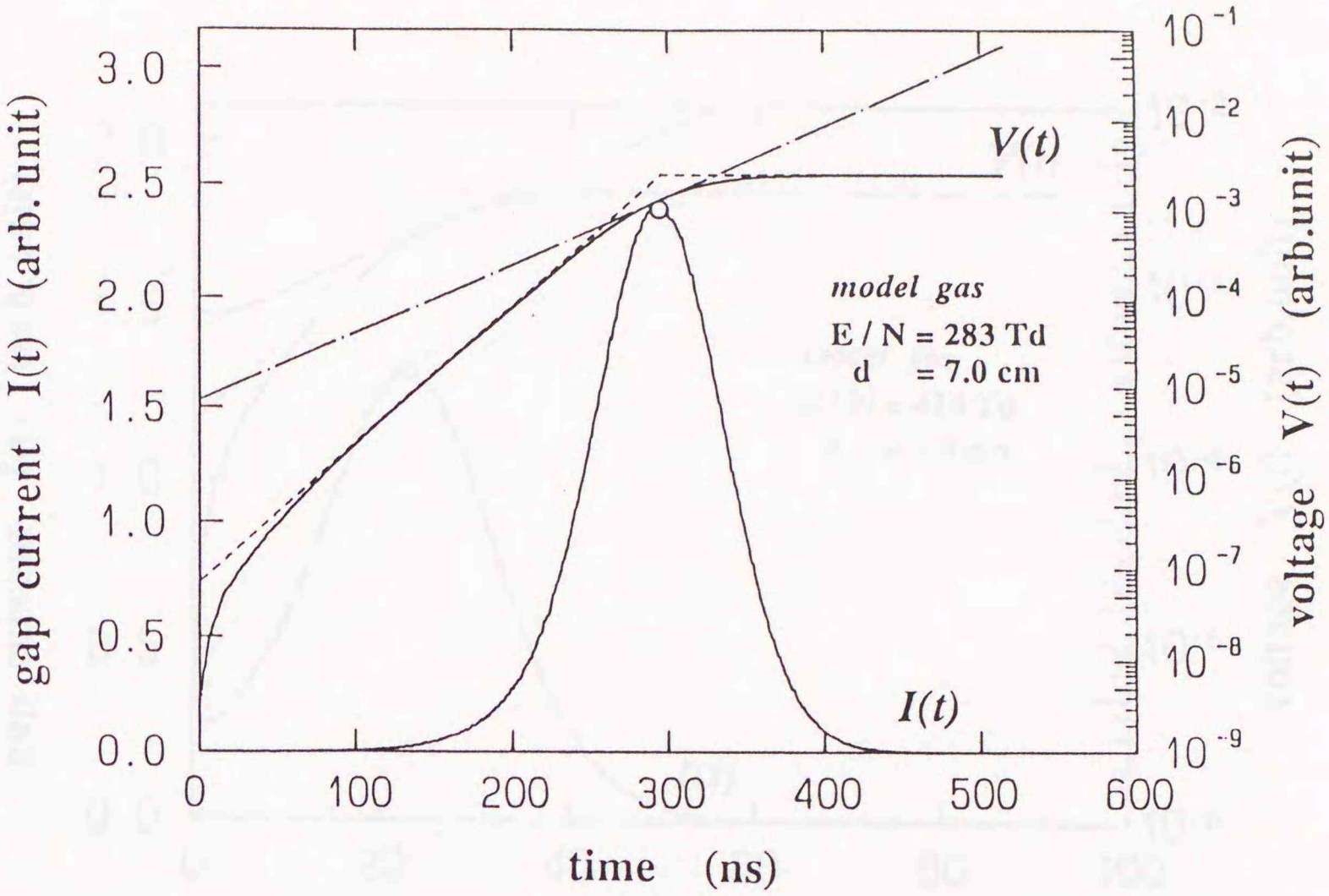


図３．２（ｇ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=7.0cm

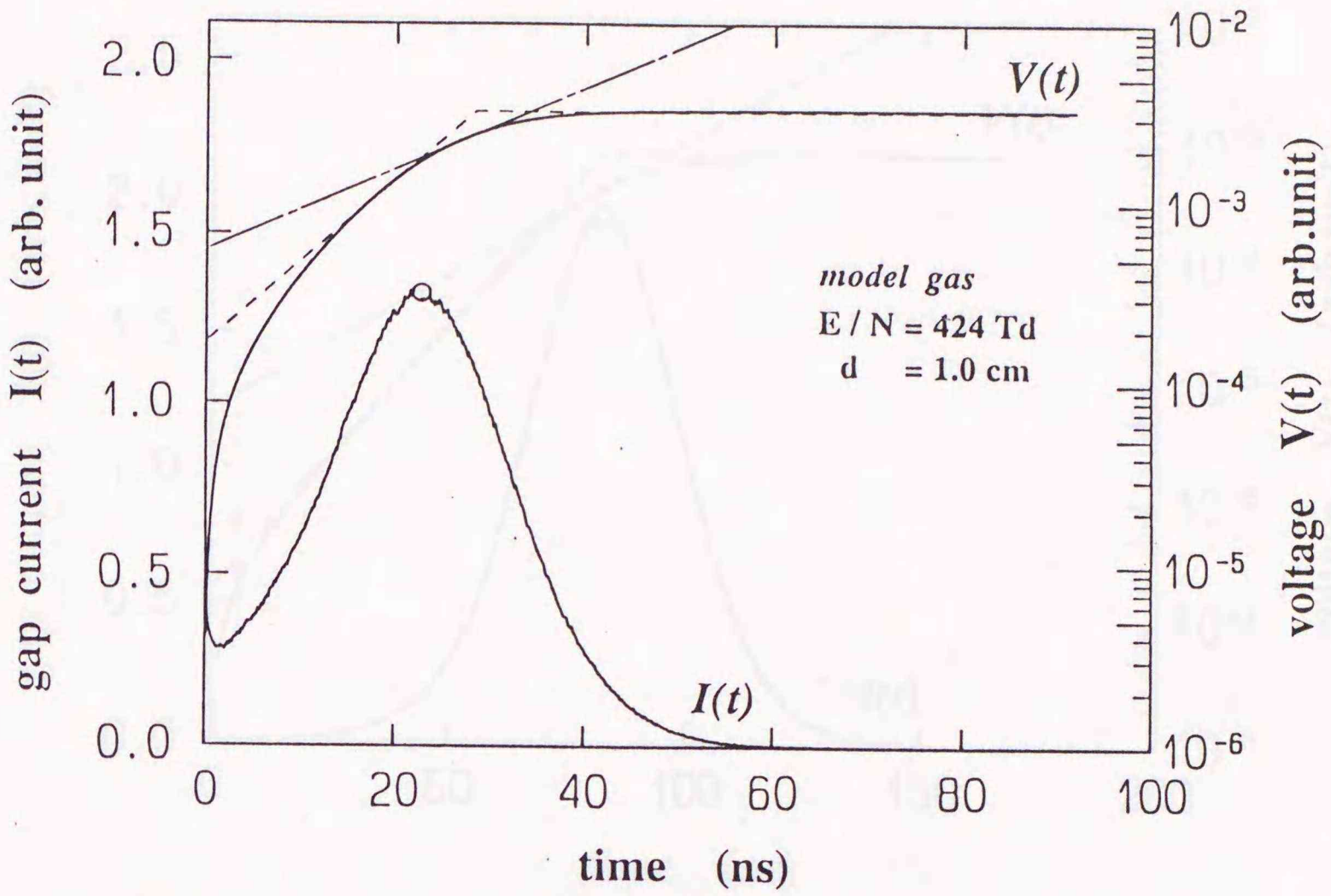


図３．３（ａ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=1.0cm

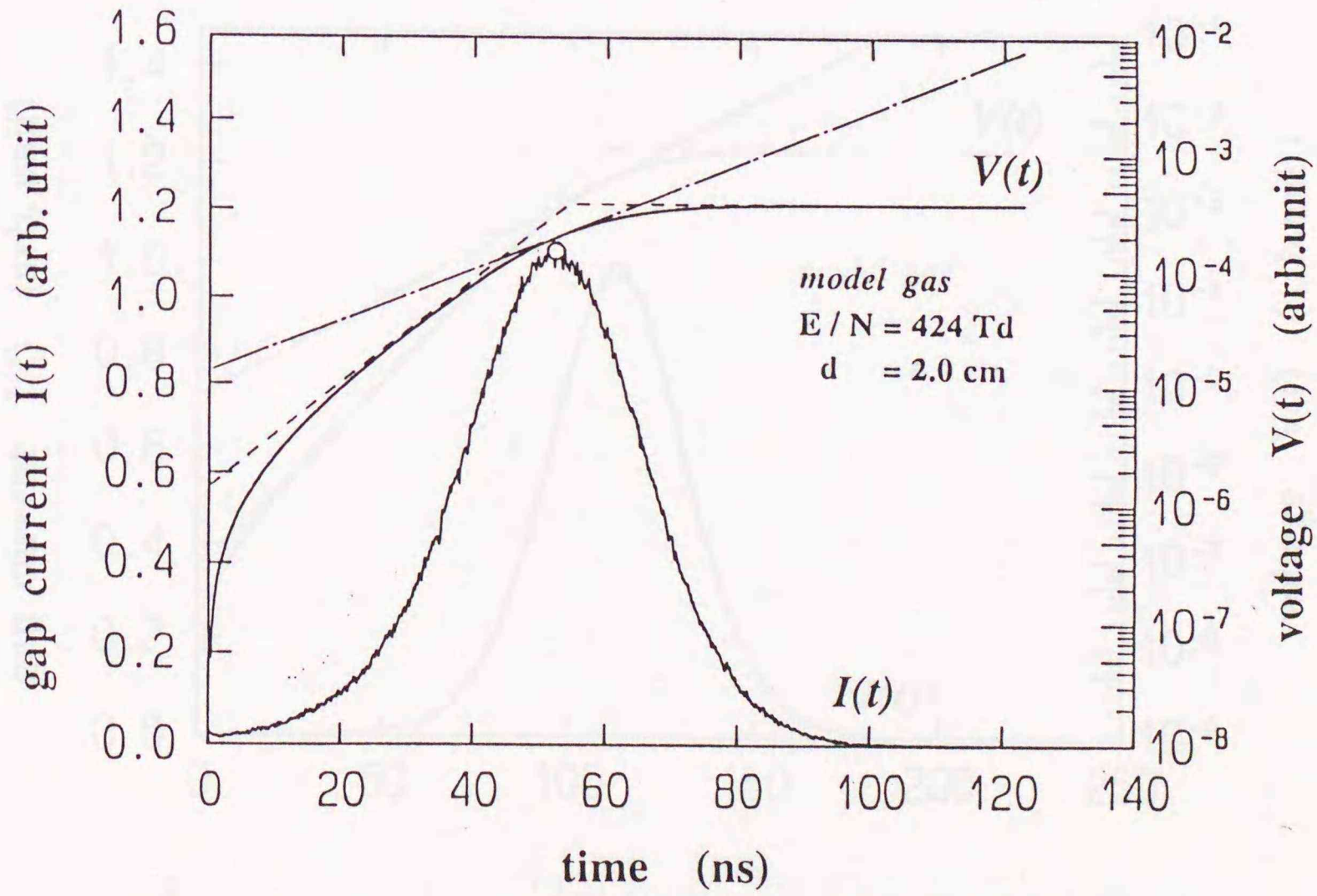


図３．３（ｂ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=2.0cm

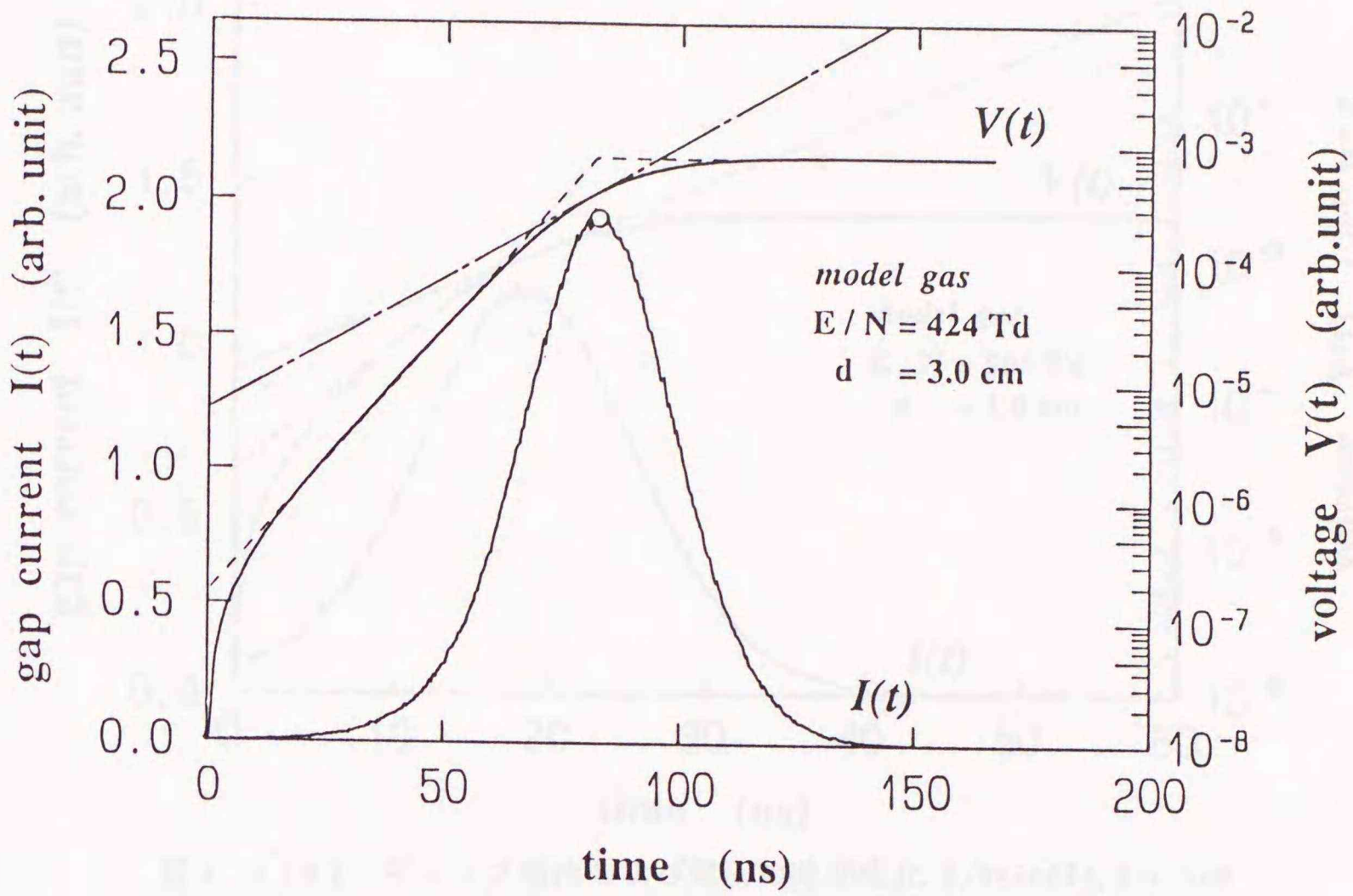


図３．３（ｃ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

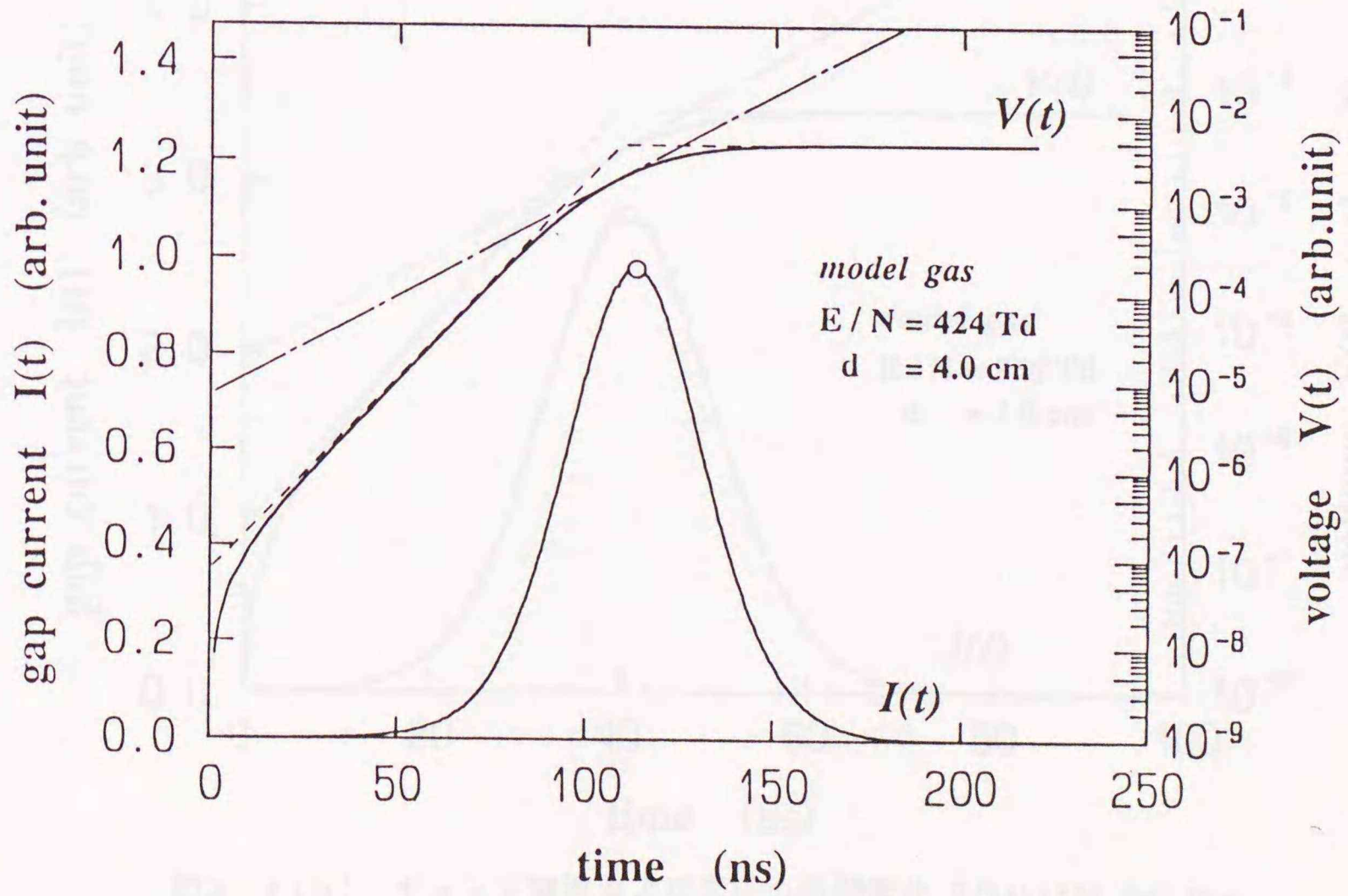


図３．３（ｄ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=4.0cm

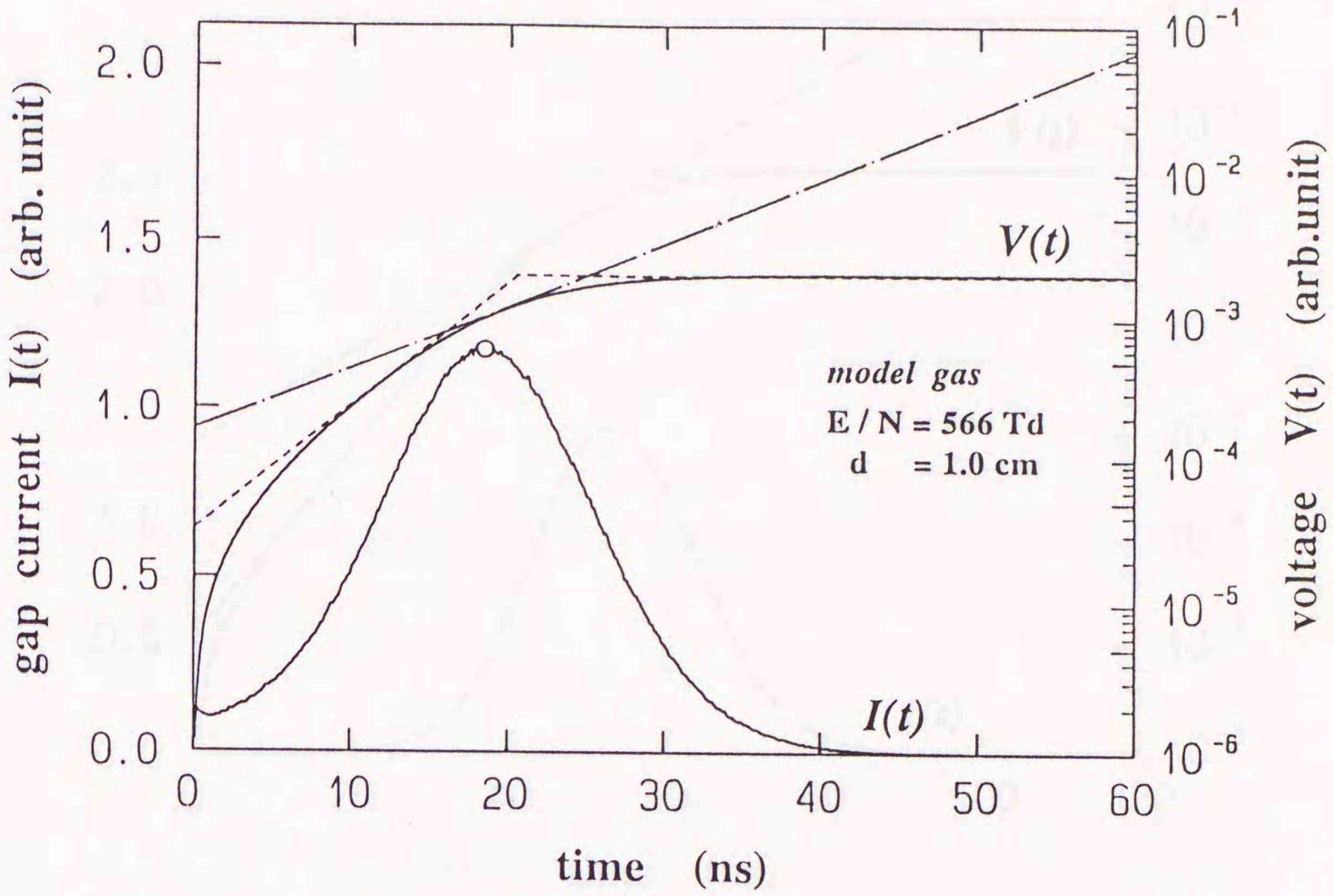


図３．４（ａ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=1.0cm

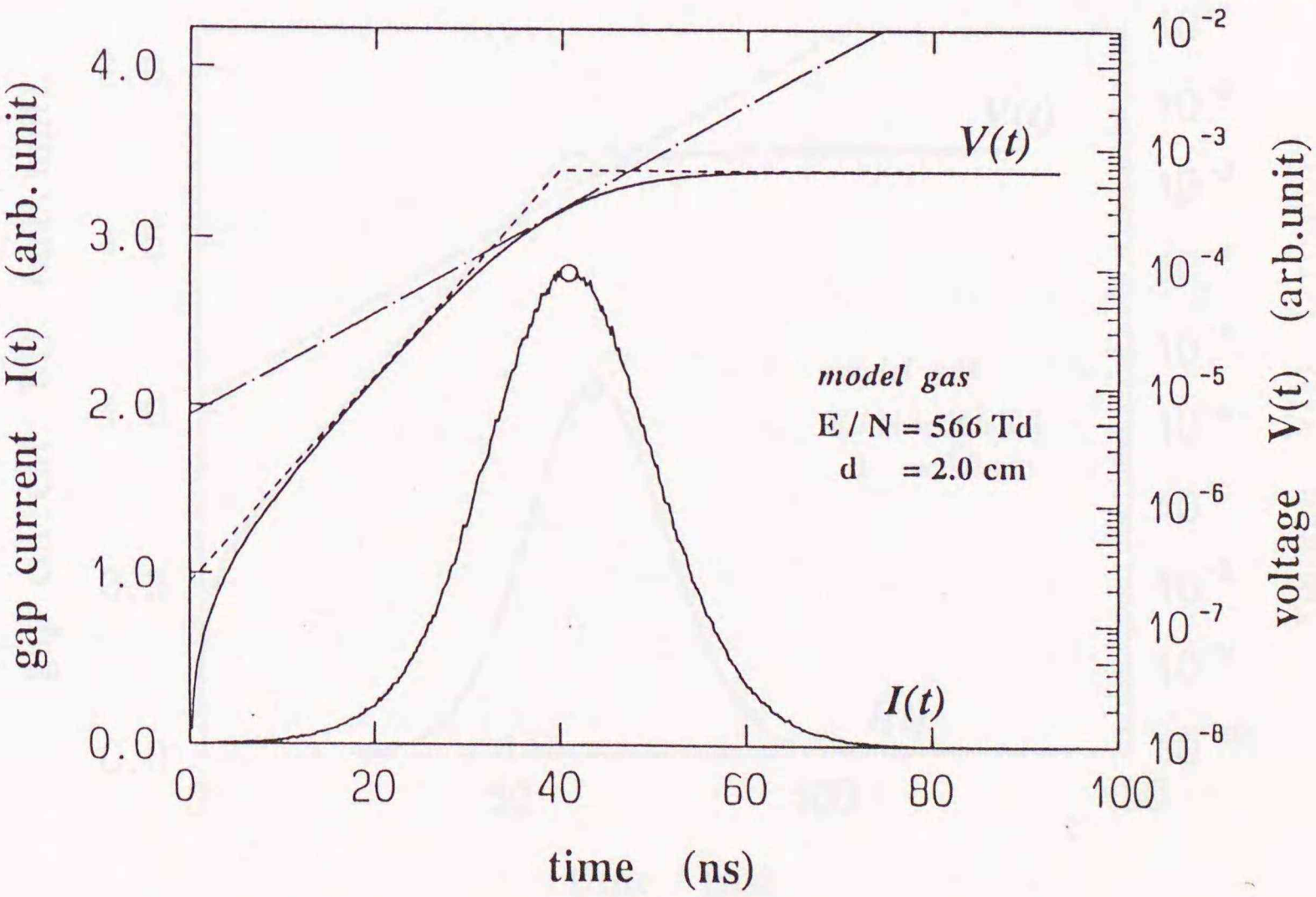


図３．４（ｂ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

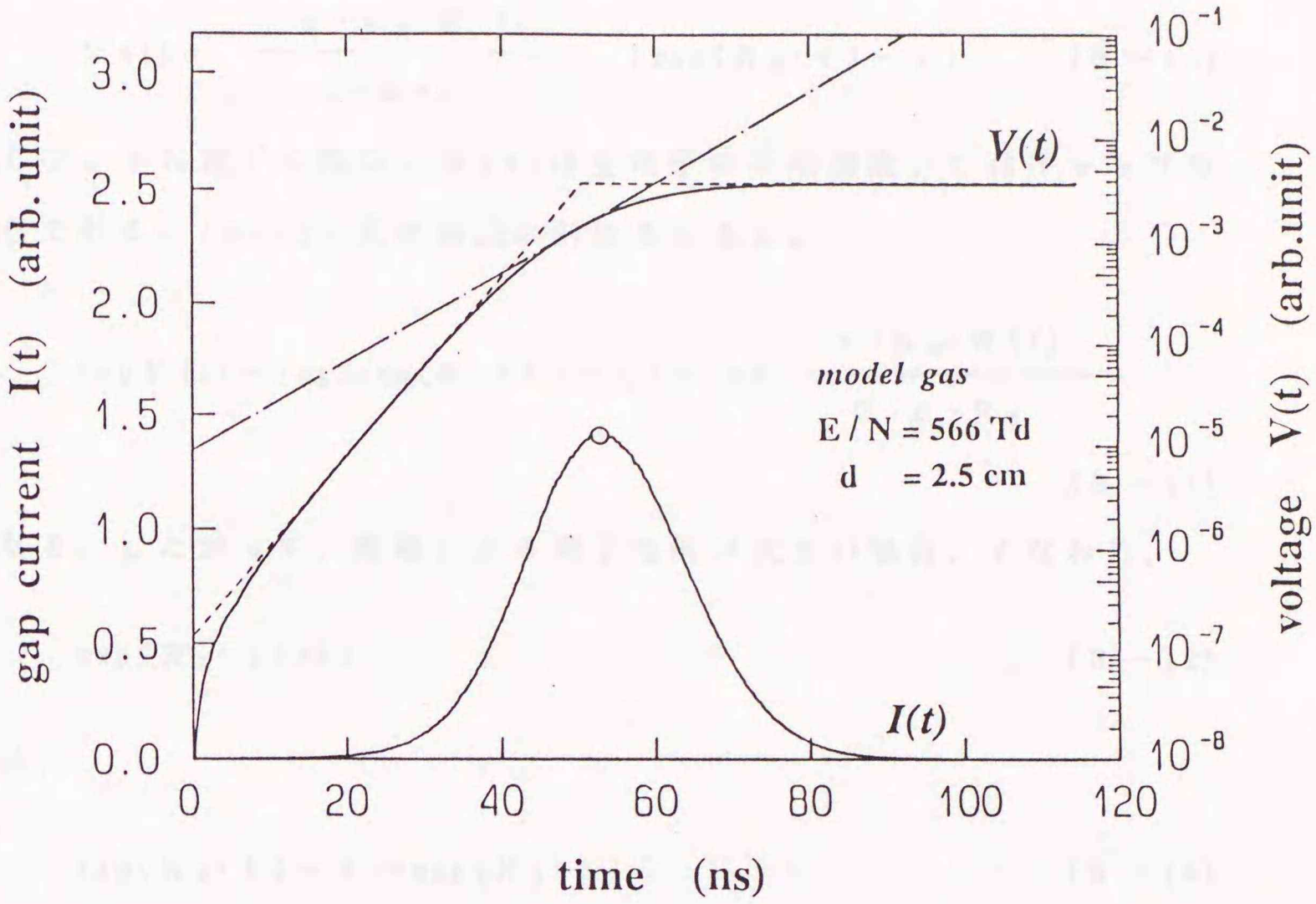


図３．４（ｃ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.5cm

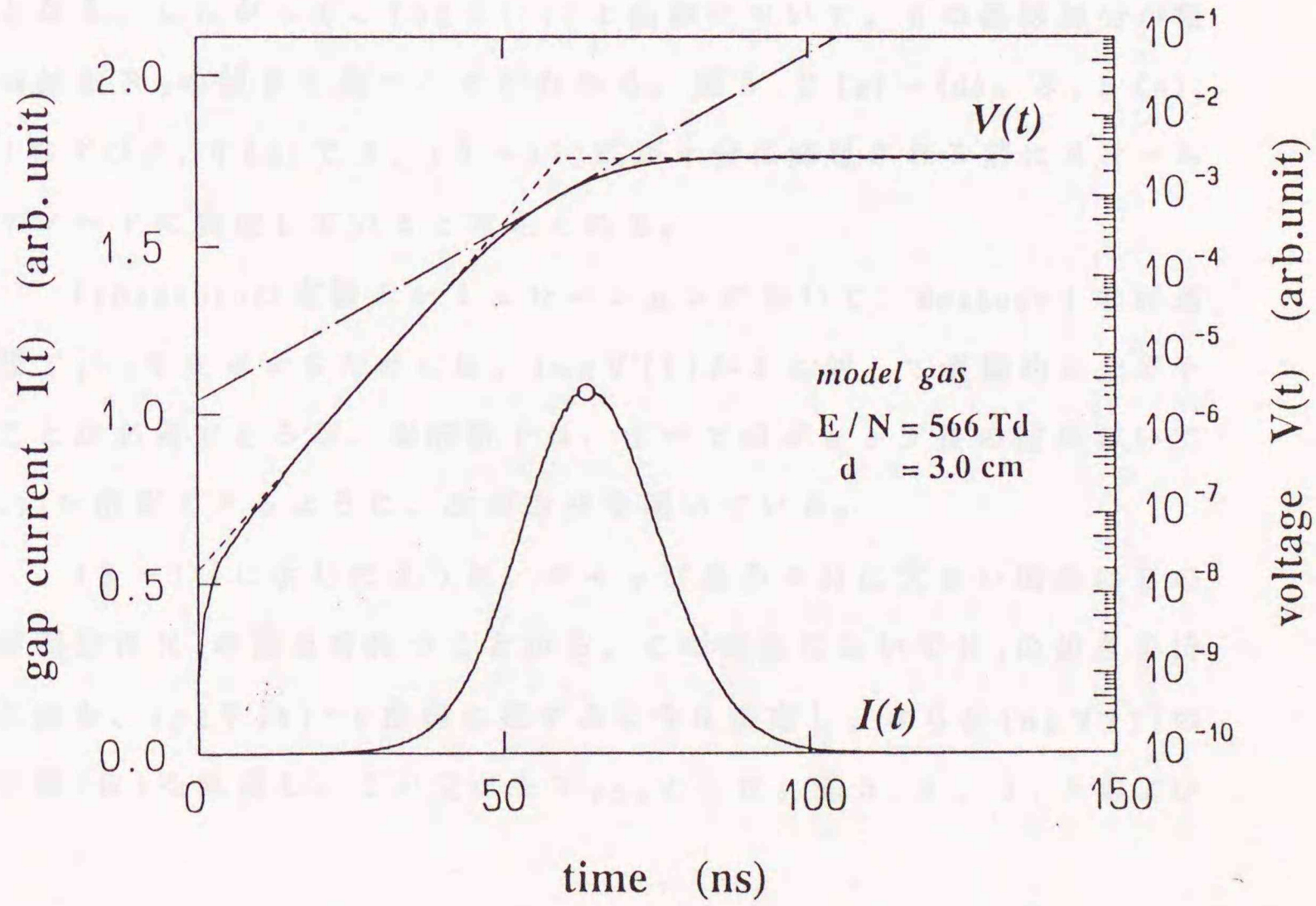


図３．４（ｄ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=3.0cm

$$V(t)=\frac{e\cdot n_0\cdot W(t)}{C\cdot d\cdot R_i}\{\exp(R_i\cdot t)-1\} \qquad (3-10)$$

ここで、eは電子の電荷、W(t)は全電子の平均速度、Cはギャップの容量である。(3－10)式の両辺の対数をとると、

$$\log V(t)=\log\{\exp(R_i\cdot t)-1\}+\log\frac{e\cdot n_0\cdot W(t)}{C\cdot d\cdot R_i} \qquad (3-11)$$

となる。したがって、電離による電子増倍が大きい場合、すなわち、

$$\exp(R_i\cdot t)>>1 \qquad (3-12)$$

では、

$$\exp(R_i\cdot t)-1\simeq\exp(R_i\cdot t) \qquad (3-13)$$

とすることが可能であり、(3－11)式のlogV(t)がR_iの傾きを持つ直線となる。したがって、logV(t)-t曲線において、Ⅱの直線部分が電離周波数R_iの傾きを持つことがわかる。図3.2(a)～(d)、3.3(a)、(b)および3.4(a)では、(3－12)式が十分に満足される前にスオームがアノードに到達していると考えられる。

Frommholdの実験のシミュレーションにおいて、Method-Iで経過時間T_{FD1}を決定するためには、logV(t)がtに対して直線的に上昇することが必要であるが、本解析では、すべてのギャップ長の結果おいてT_{FD1}を決定できるように、次の方法を用いている。

(3－13)に示したように、ギャップ長が十分に大きい場合にⅡの直線部分はR_iの傾きを持つことから、この部分においてR_iの傾きを持つ直線を、logV(t)-t曲線に接するように決定し、さらにlogV(t)の一定値(Ⅲ)を延長し、その交点をT_{FD1}とした。図3.2、3.3および

3．4において、破線は電圧V(t)をR_iの傾き（図3．2、3．3および3．4においては、常用対数でプロットしているので、$R_i/\log_e 10$の傾きとなっている）を持つ直線と、logV(t)の一定値部分を延長した直線を示している。ここで、R_iの値には、電極を考慮しない自由空間を仮定したモンテカルロシミュレーションによって求めたられ値を用いている。表3．2にモデルガス中の電離周波数R_iおよびその他のスオームパラメータの値を示す。

図3．2、3．3および3．4において、一点鎖線は、$\frac{1}{2}R_i$の傾きを持った直線である。この直線とlogV(t)-t曲線の接点の時刻が、経過時間T_{FD2}(Method-Ⅱ)となる。ここで用いたR_iの値も、表3．2に示す値である。

3－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度

図3．5(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424および566TdにおけるT_{sc}のギャップ長dに対するプロットをそれぞれ示す。この結果から、(2－49)式を用いて電子ドリフト速度W_{sc}を求めると図3．6となり、W_{sc}がギャップ長に対して依存性を持つことがわかる。しかし、この依存性は、ギャップ長が増加するにしたがって徐々に減少する傾向を持っており、各E/Nにおいて、ギャップ長をさらに大きくすることにより、一定値に収束したW_{sc}が得られると考えられる。そこで、各E/Nにおいて最大のギャップ長における値をW_{sc}とすると、表3．3(a)に示す値となる。

(2－49)式から求められたW_{sc}のギャップ長依存性は、図3．5に示したT_{sc}-dプロットの延長が、いずれのE/Nにおいても原点を通らないことに起因する。したがって、ギャップ長が小さいときには、T_{sc}-dプロットが原点を通らないことによる影響が、W_{sc}の値に大き

表３．２　モデルガス中の電子スオームパラメータ

換算電界 E／N (Td)		電離周波数 R_i (μsec^{-1})	理論電子ドリフト速度 (cm/μsec) Vd	Wv	Wr	Wm	縦方向拡散係数 D_L ($cm^2/\mu sec$)	横方向拡散係数 D_T ($cm^2/\mu sec$)	平均エネルギー $\bar{\varepsilon}$ (eV)	電離係数 α (cm^{-1})
283	A	35.00	19.7	20.84	25.02	22.2	1.13	0.889	6.143	1.49
	B	34.51	—	21.04	24.96	21.78	1.075	0.9215	6.243	—
424	A	101.1	28.2	31.14	40.32	32.6	1.58	1.16	7.764	2.81
	B	101.5	—	31.60	40.45	32.08	1.495	1.196	7.984	—
566	A	195.1	36.4	40.92	55.67	38.6	2.12	1.46	9.571	3.95
	B	199.7	—	44.20	57.17	40.42	2.047	1.153	9.944	—

A : Monte Carlo Simulation

B : 2-Term Boltzmann Equation analysis

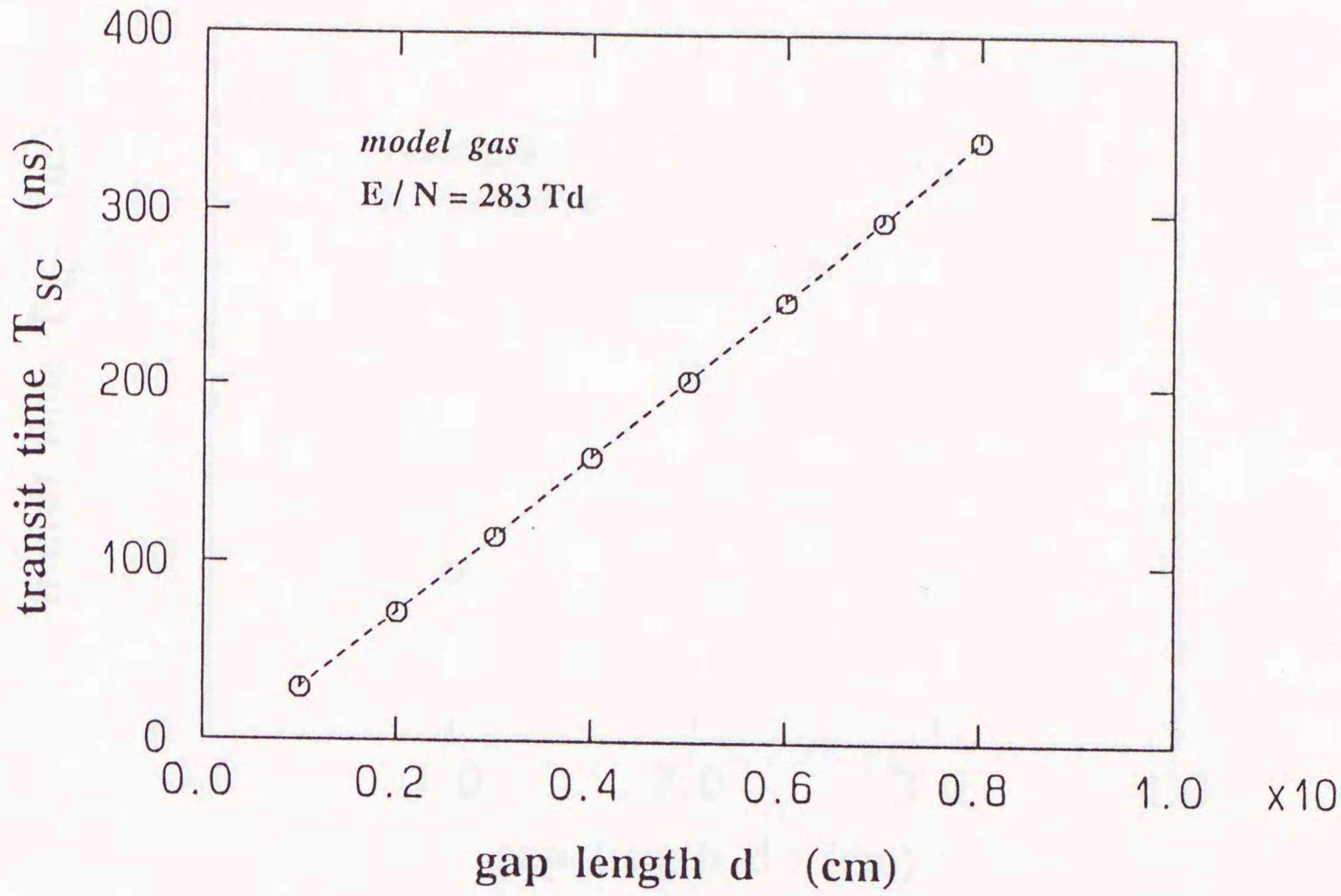


図3.5(a) 経過時間T_{sc} E/N=283Td

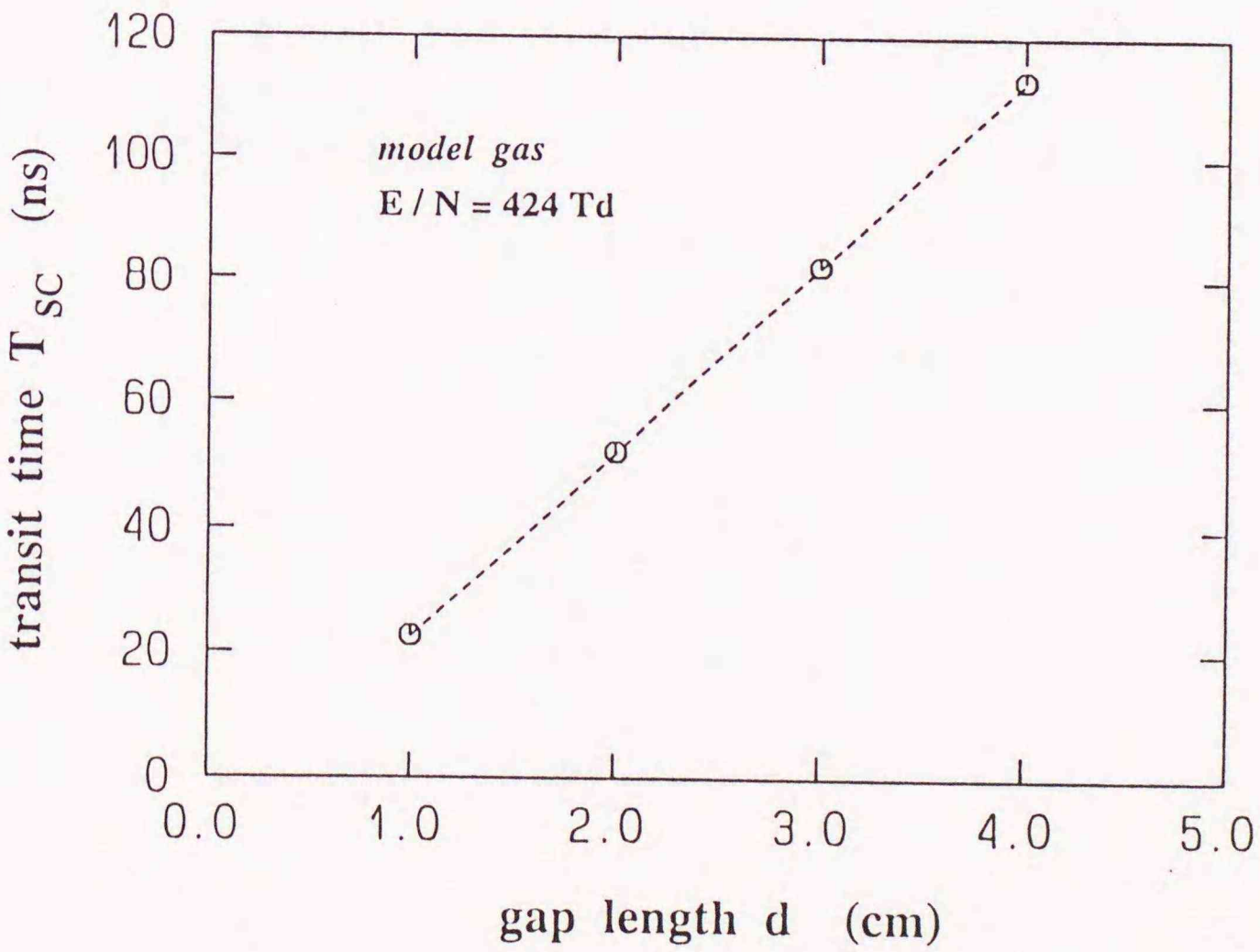


図3.5(b) 経過時間T_{sc} E/N=424Td

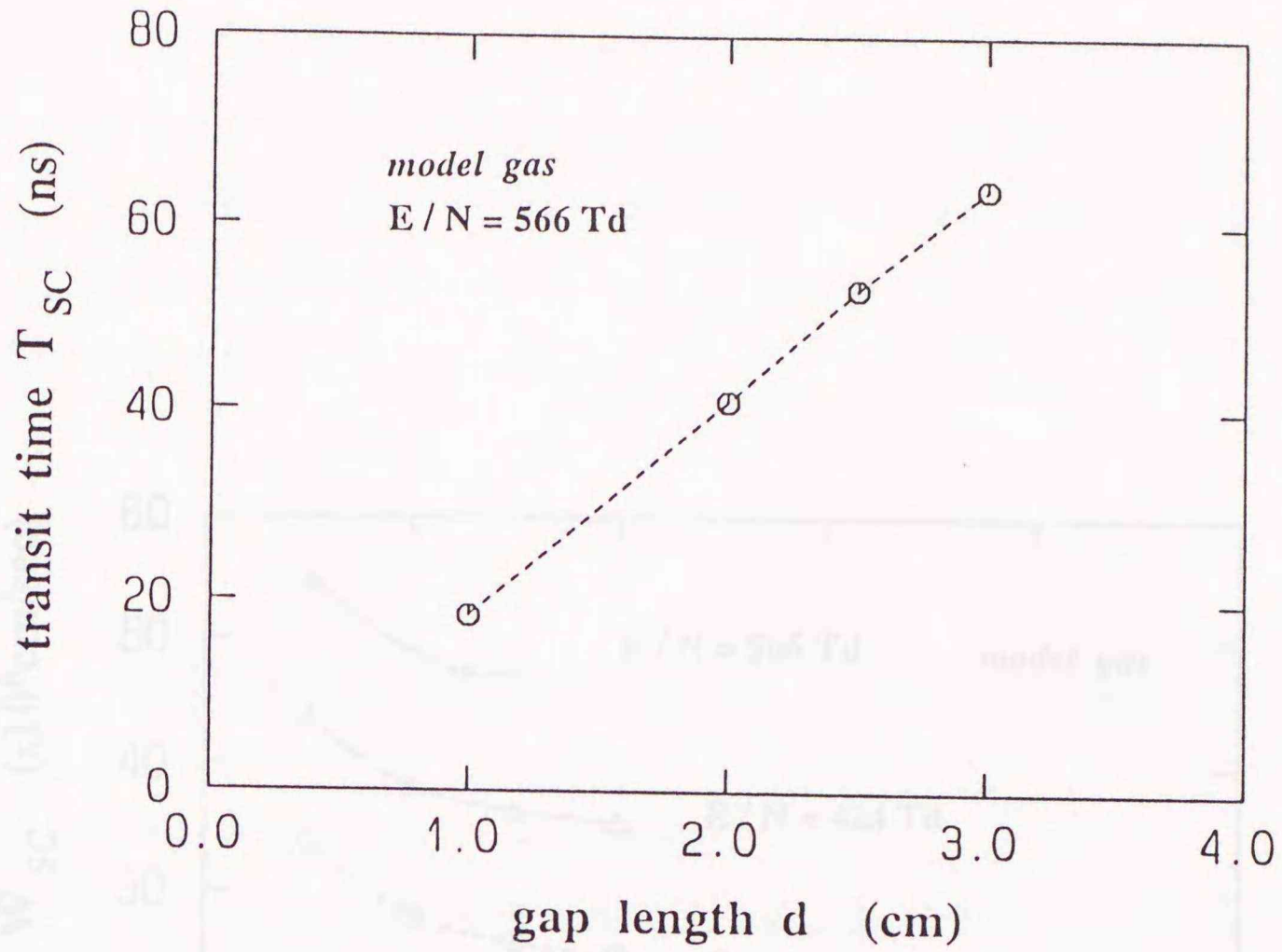


図３．５（ｃ） 経過時間T_{sc} E/N=566Td

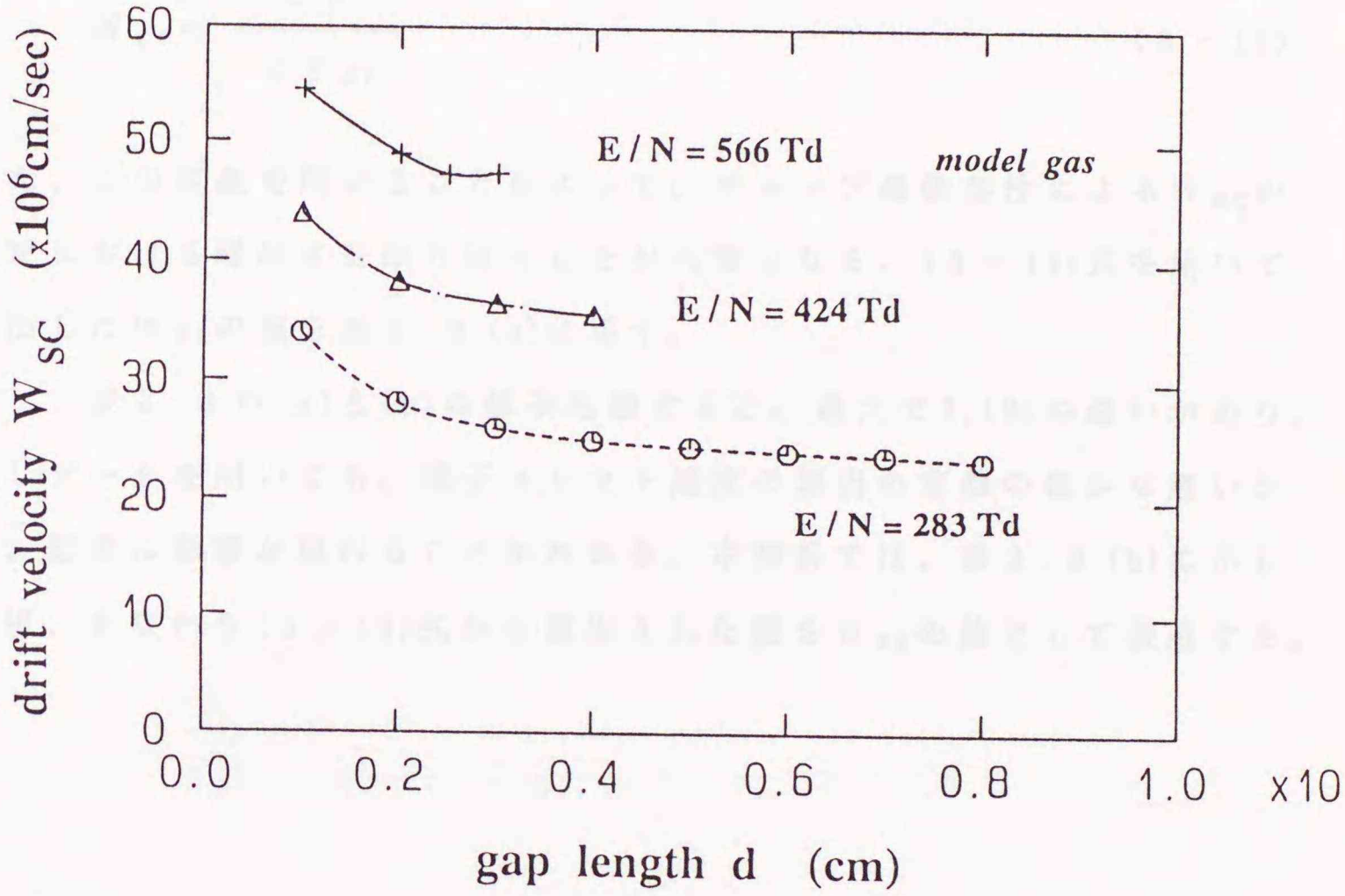


図3．6　電子ドリフト速度 W_{SC}

く現われている。図3.5のT_{sc}-dプロットが、計算を行なった全てのE/Nにおいてよい直線性を示していること、図3.6のW_{sc}がdを増加させるにしたがって一定値に近づくことを考慮すると、W_{sc}はT_{sc}-dプロットの勾配から算出する方がよいと考えられる。したがって、W_{sc}は、Schlumbohmの定義である(2－49)式ではなく、(3－13)式によって定義すべきであると考えられる。

$$W_{sc} = \frac{\Delta d}{\Delta T_{sc}} \qquad (3-13)$$

また、この定義を用いることによって、ギャップ長依存性によるW_{sc}の決定における曖昧さを取り除くことが可能となる。(3－13)式を用いて算出したW_{sc}の値を表3.3(b)に示す。

表3.3の(a)と(b)の値を比較すると、最大で7.1%の違いがあり、同じデータを用いても、電子ドリフト速度の算出の定義の僅かな違いから、結果に影響が現れることがわかる。本解析では、表3.3(b)に示した値、すなわち(3－13)式から算出された値をW_{sc}の値として採用する。

表３．３　モデルガス中の電子ドリフト速度W_{sc}

E／N (Td)	W_{sc} ($\times 10^6$cm/sec)	
	(a)	(b)
283	23.4	22.3
424	35.5	33.2
566	47.0	43.9

(a)：(2－49)式から

(b)：(3－13)式から

3－3－3　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度

図３．７(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424および566TdにおけるT_{FD1}およびT_{FD2}のギャップ長dに対するプロットをそれぞれ示す。図中○印はT_{FD1}(method-Ⅰ)、＋印はT_{FD2}(method-Ⅱ)を示す。図３．７のT_{FD1}およびT_{FD2}から、(2－50)式を用いてそれぞれ算出した電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}を図３．８に示す。W_{FD1}およびW_{FD2}には、ギャップ長が小さい部分で依存性が見られる。しかし、この依存性は、図３．５に示したW_{sc}の場合と比較すると小さいことがわかる。これは、図３．７に示すT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの延長

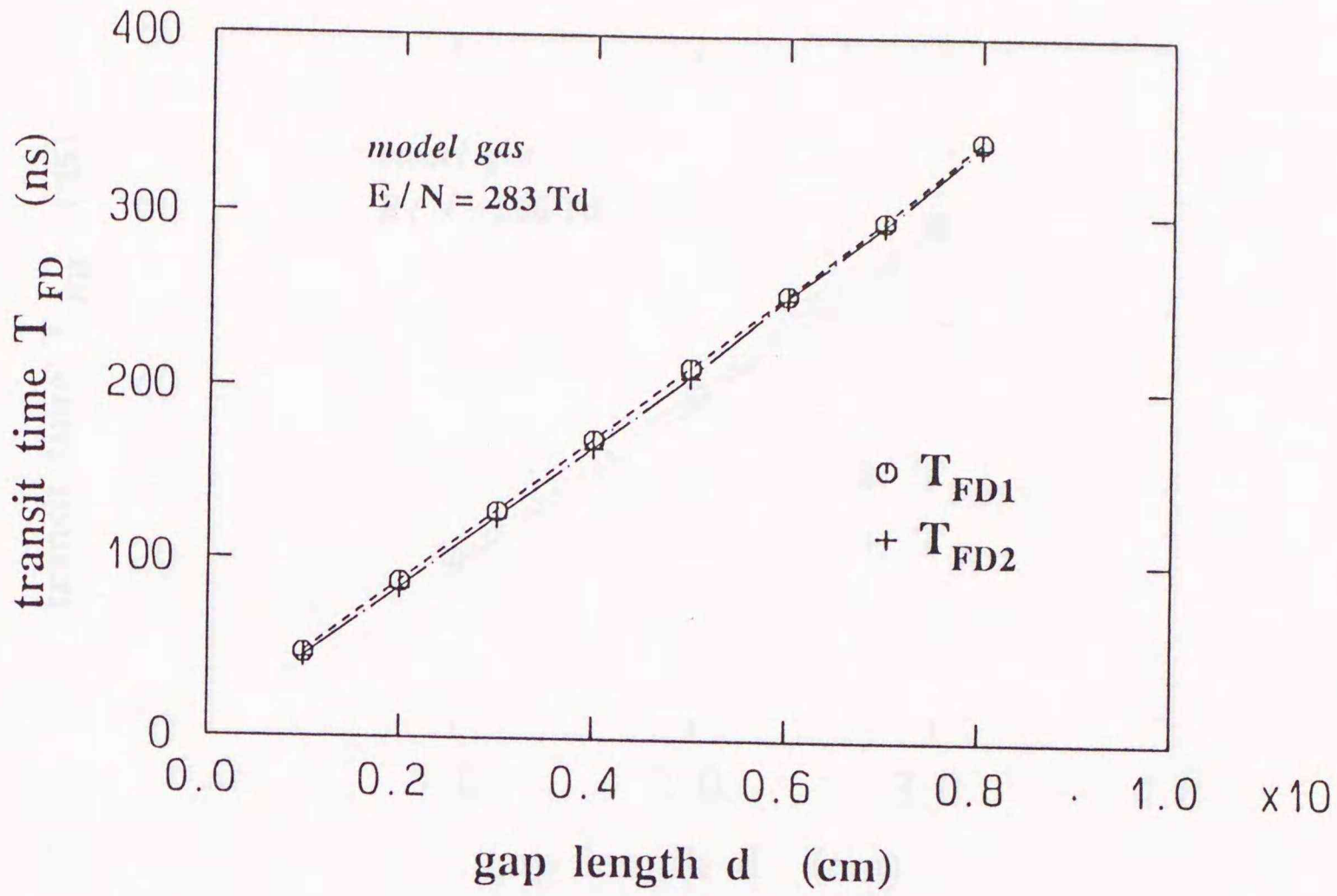


図３．７（ａ） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=283Td

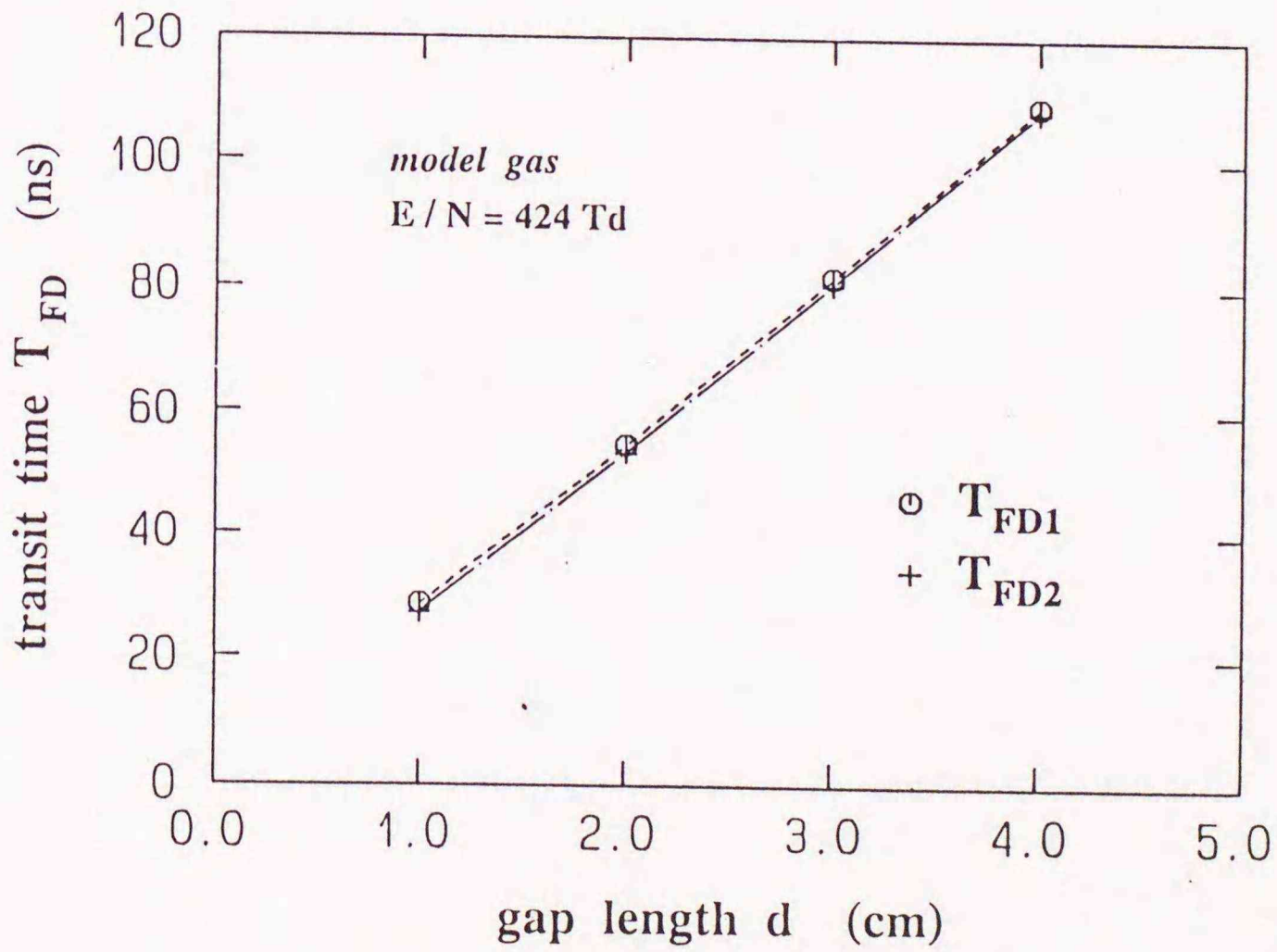


図３．７（ｂ） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=424Td

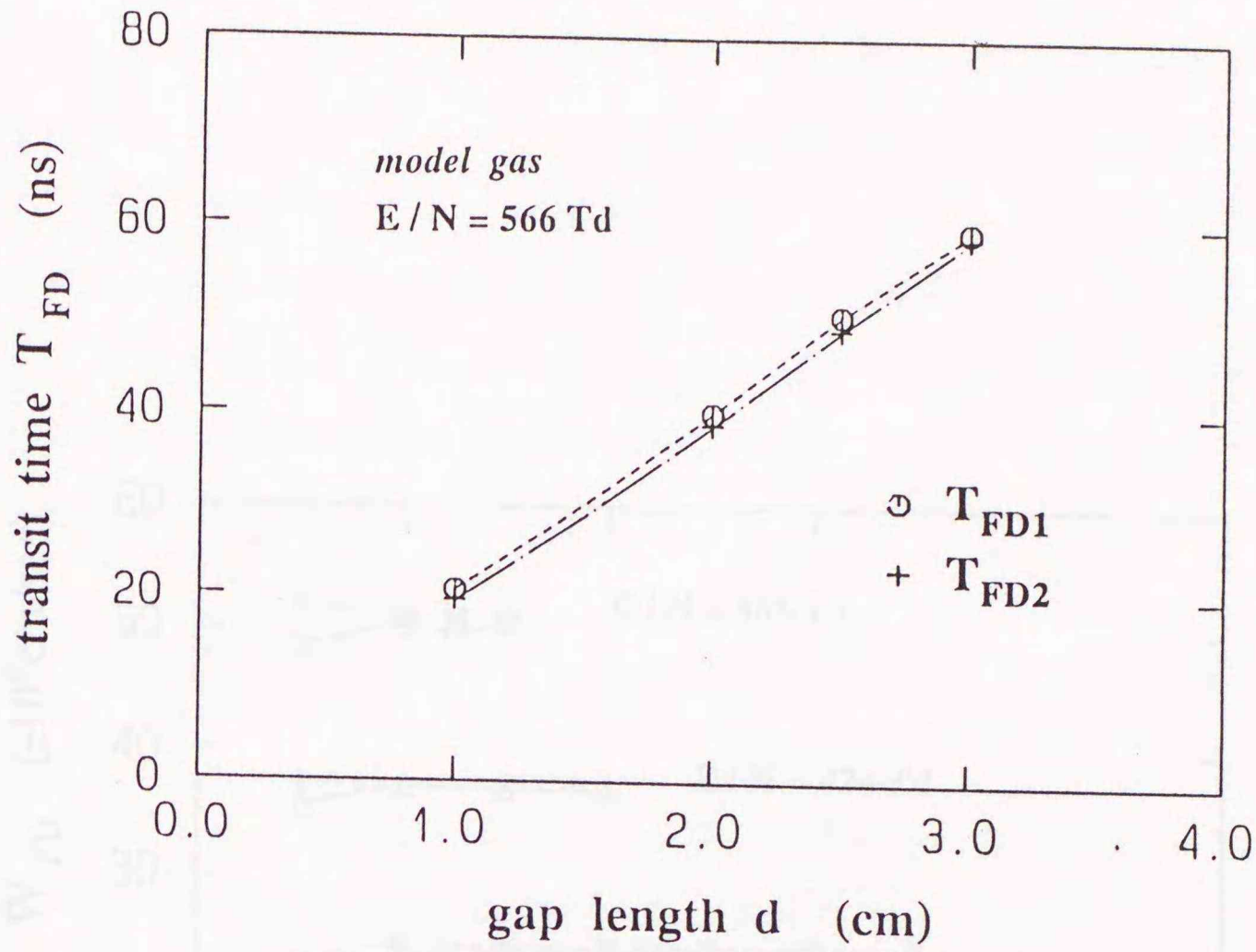


図３．７（ｃ） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=566Td

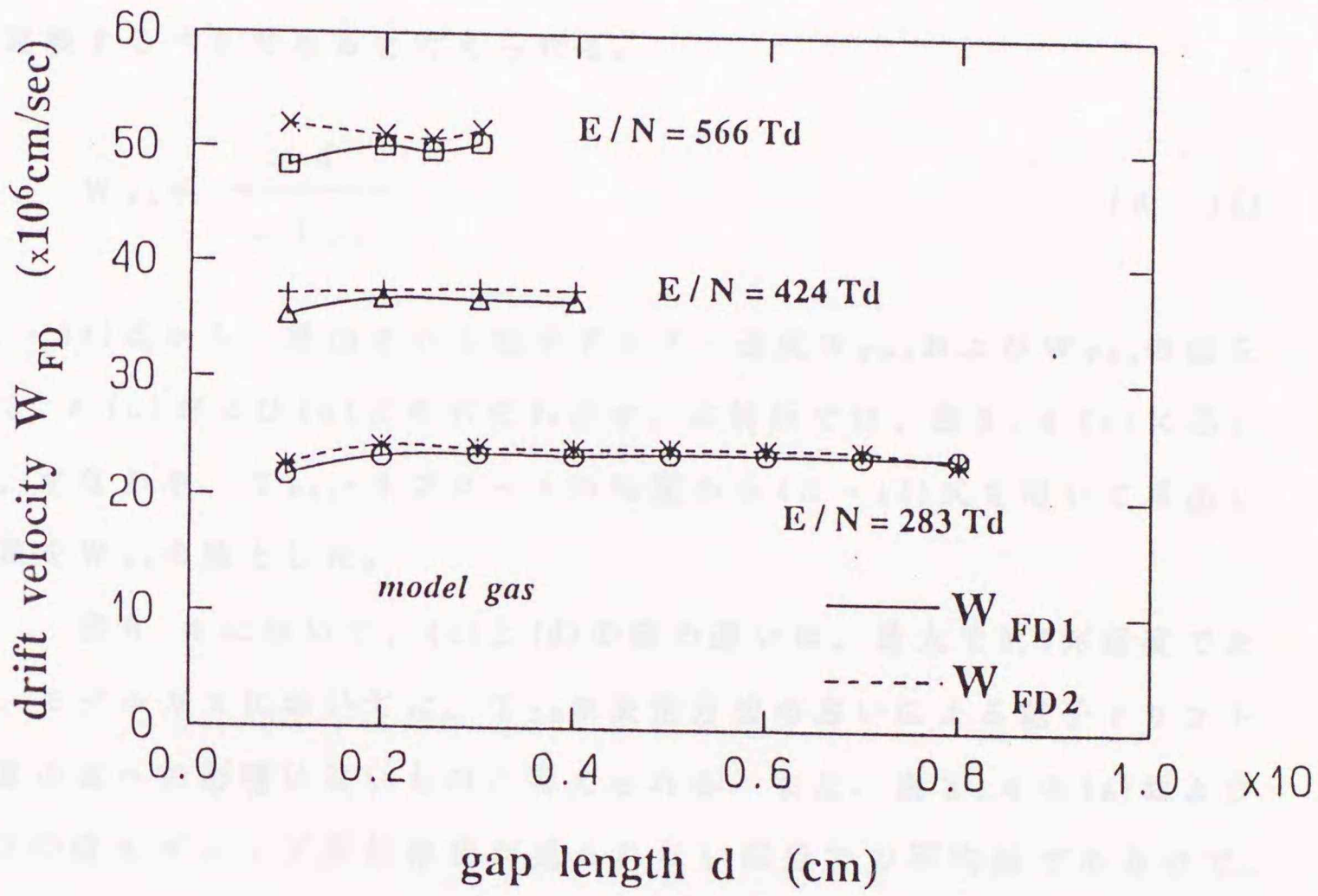


図3．8　電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}

が、原点近傍を僅かに逸れて通過するためである。表３．３(a)および(b)は、それぞれギャップ長がない部分での、W_{FD1}およびW_{FD2}の平均値である。

図３．７に示したT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットは、それぞれ非常によい直線性を示しており、Schlumbohmの実験の場合と同様に、ギャップ長依存性によるW_{FD}の決定における曖昧さを排除するために、Frommholdの定義である(２－50)式ではなく、(３－14)式によってW_{FD}を定義するべきであると考えられる。

$$W_{FD} = \frac{\Delta d}{\Delta T_{FD}} \qquad (3-14)$$

(３－14)式から、算出される電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}の値を、表３．４(c)および(d)にそれぞれ示す。本解析では、表３．４(c)に示す値、すなわち、T_{FD1}-dプロットの勾配から(３－14)式を用いて算出した値をW_{FD}の値とした。

表３．４において、(c)と(d)の値の違いは、最大で0.5％程度であり、モデルガスにおいては、T_{FD}の決定方法の違いによる電子ドリフト速度の値への影響はないものと考えられる。また、表３．４の(a)および(b)の値もギャップ長依存性が見られない部分での平均値であるので、(c)および(d)の値にほとんど一致する。

表３．４　モデルガス中の電子ドリフト速度W_{FD}（×10^6cm/sec）

E／N	(a)	(b)	(c)	(d)
(Td)	W_{FD1}	W_{FD2}	W_{FD1}	W_{FD2}
283	23.6	24.0	23.6	23.5
424	36.7	37.3	37.3	37.1
566	50.0	51.2	51.3	51.0

(a)、(b)：(2－50)式から

(c)、(d)：(3－14)式から

３－３－４　電子ドリフト速度の比較

本解析で得られたW_{SC}とW_{FD}の値を比較すると、E/N=283Tdにおいて5.83%、424Tdにおいて12.3%、566Tdにおいて16.9%の違いがある。電離による電子増倍が著しくなるにしたがって、両者の違いが顕著になる傾向を持っていることがわかる。したがって、W_{SC}とW_{FD}は、本質的に異なる電子ドリフト速度であると考えられる。

図３．９は、W_{SC}およびW_{FD}と理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmとの比較を示す。これらの理論電子ドリフト速度は、図３．１に示した電子衝突断面積を用いて、電極を考慮しない自由空間

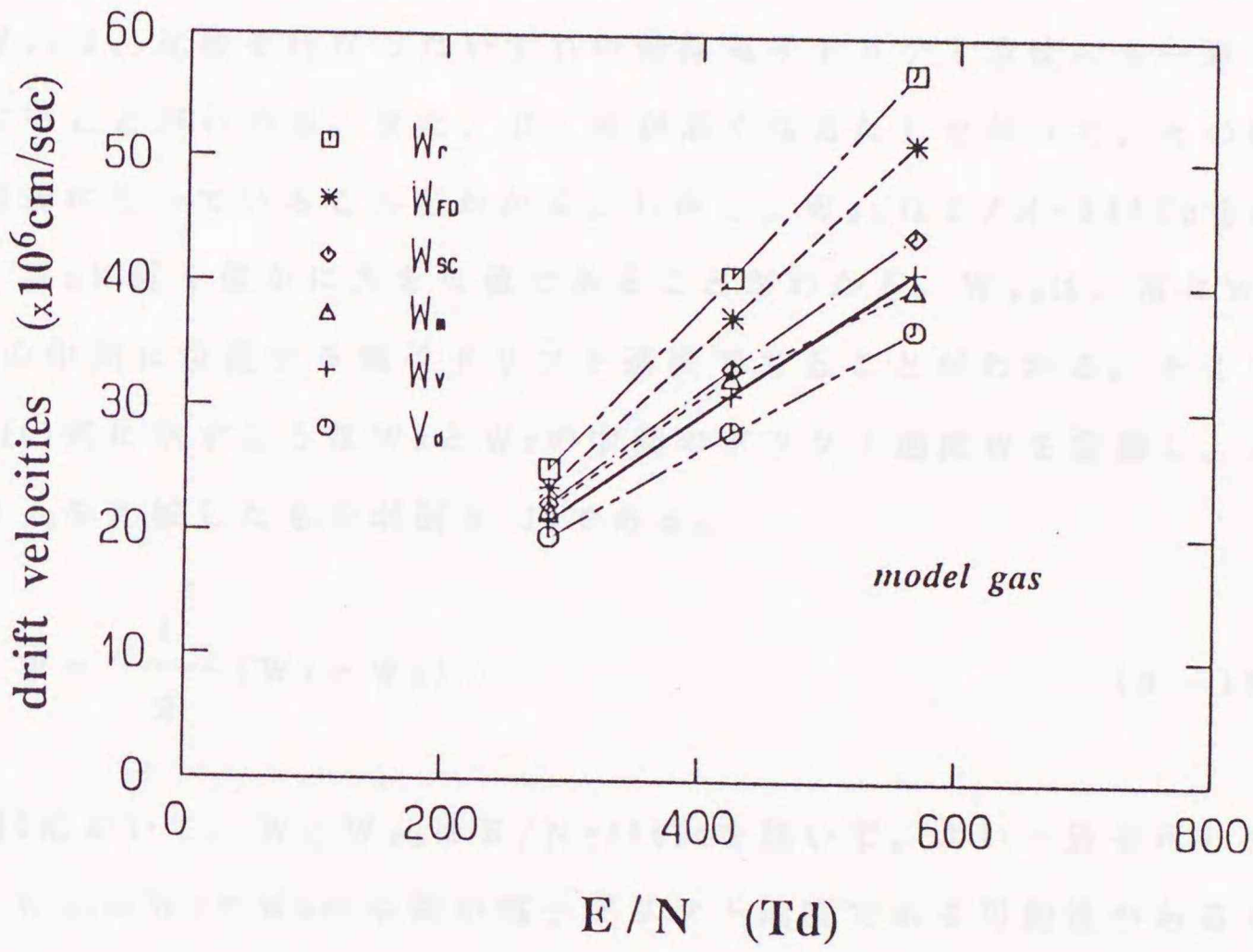


図３．９　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}と理論電子ドリフト速度の比較

を仮定したモンテカルロシミュレーションにより得られた値である。これらの値は、当研究室の2項近似のボルツマン方程式解析の結果とよく一致しており、妥当な値であると思われる。ただし、表3.2において、E/N=566Tdにおける解析方法AとBの間に見られる違いは、E/Nが高く電離衝突が多くなり、2項近似によるボルツマン方程式では、スオームを十分に表現できないためであると考えられる。

図3.9より、計算を行なった全てのE/Nの値において、W_{sc}およびW_{FD}は、比較を行なったいずれの理論電子ドリフト速度にも一致していないことがわかる。また、E/Nが高くなるにしたがって、その傾向が顕著になっていることがわかる。しかし、W_{sc}はE/N=566Tdを除くと、Wmに近く僅かに大きな値であることがわかる。W_{FD}は、常にWrとWmの中間に位置する電子ドリフト速度であることがわかる。そこで、(3－15)式に示すようなWmとWrの中間のドリフト速度Wを定義し、これとW_{FD}を比較したものが図3.10である。

$$W = \frac{1}{2}(Wr + Wm) \qquad (3-15)$$

図3.10において、WとW_{FD}はE/N=566Tdを除いて、よい一致を示しており、W_{FD}はWrとWmの中間の電子ドリフト速度である可能性があることがわかる。W_{sc}も比較を行なっているが、Wとは全く異なる電子ドリフト速度であることは明らかである。

ここで、電子ドリフト速度Wが、どのような理論的背景を持ち得るかについて考察を行なう。

(3－15)式右辺の理論ドリフト速度WrとWmの関係は、田頭[1]によって、(3－16)式で表わされることが報告されている。

$$Wm = Wr - 2\alpha D_L + 3\alpha^2 D_3 + \cdots \qquad (3-16)$$

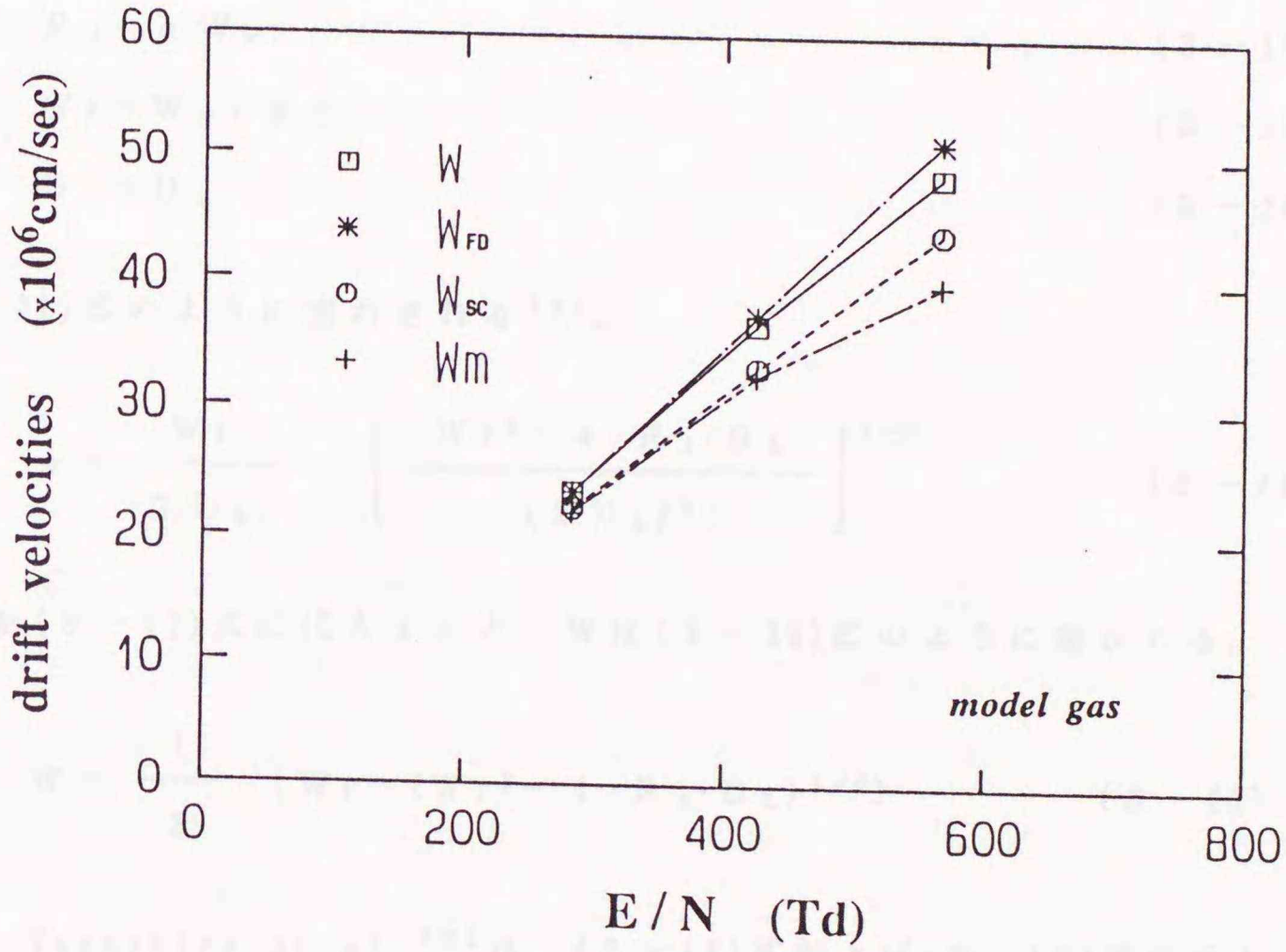


図3.10　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}、WおよびWm

ここで、αはタウンゼントの第一電離係数、D_Lは縦方向拡散係数、D_3は連続の式における3次の係数である。(3－16)式において、D_n ($n \geqq 3$)を無視し、2項目までを(3－15)式に代入すると次式が得られる。

$$W = Wr - \alpha D_L \qquad (3-17)$$

ここで、αは、(3－18)、(3－19)および(3－20)式から、

$$R_i = \alpha W_w \qquad (3-18)$$

$$Wr = W_w + \alpha D \qquad (3-19)$$

$$D = D_L \qquad (3-20)$$

(3－21)式のように表わされる[2]。

$$\alpha = \frac{Wr}{2D_L} - \left[\frac{Wr^2 - 4 \cdot R_i \cdot D_L}{(2D_L)^2}\right]^{1/2} \qquad (3-21)$$

これを(3－17)式に代入すると、Wは(3－22)式のように書かれる。

$$W = \frac{1}{2}\{Wr - (Wr^2 - 4 \cdot R_i \cdot D_L)^{1/2}\} \qquad (3-22)$$

Tagashira et al.[2]は、(3－18)式および(3－19)式に示される電子ドリフト速度W_wが、(3－22)式の右辺に等しく、また(3－23)式に示される形で書いた高次の項を無視したときの連続の式を満足する電子ドリフト速度であることを報告している。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \alpha\left(W_w - \frac{1}{n} D \frac{\partial n}{\partial x}\right) n - W_w \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \qquad (3-23)$$

これらのことから、Frommholdの実験のシミュレーションから得られる電子ドリフト速度W_{FD}は、理論電子ドリフト速度W_wに近い値をとる、あるいは等しい値である可能性があるものと考えられる。

3－3－5　電極における電子反射の考慮

3-3-1から3-3-4においては、電極を電子の完全吸収壁と仮定してシミュレーションを行ない、電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出し、その結果と理論電子ドリフト速度の対応について述べてきた。ここでは、電極における電子反射を考慮した場合、得られる電子ドリフト速度に現われる影響について述べる。

シミュレーションは、E/N=283、424および566Tdにおいてギャップ長をそれぞれd=4cm、3cmおよび2cmとして、電極での電子の反射率を0、50、90、95%に変化させて行なった。

図3.11(a)、(b)および(c)は、E/N=283、424および566Tdにおける、各反射率に対するギャップ電流I(t)の時間変化をそれぞれ示す。反射率が大きくなるにしたがって、電極で反射された電子がギャップ間に長い時間存在するようになるために、全電子数N(t)が大きくなり、電流のピークの値が大きくなっている。しかし、ピークの時刻はほとんど同じであることがわかる。図3.12は、ギャップ電流の時間変化を、それぞれの最大値I_{max}で割り規格化して表わしている。反射率が大きくなるにしたがって、I(t)のピークがわずかに右へシフトしている。E/N=283および566Tdの結果では、反射率が大きいほど、右へのシフトが大きい。E/N=424Tdの結果では、必ずしも反射率に比例してシフトしていない。しかし、$I(t)/I_{max}$のプロファイルに現われる反射率の影響は、計算を行なった全てのE/Nにおいてわずかであり、ほとんどないものとして取り扱うことが可能であると思われる。I(t)の時間変

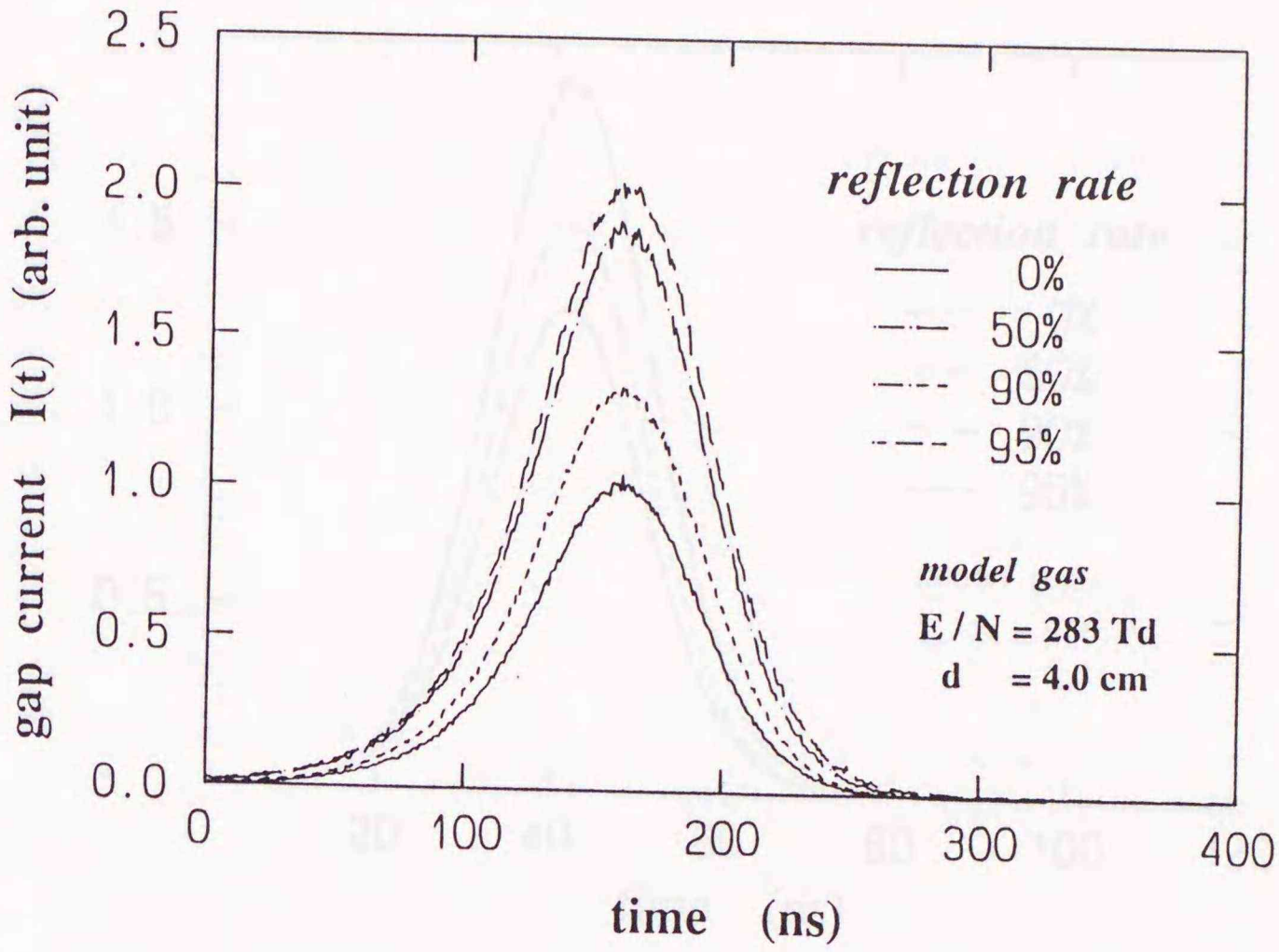


図３．11（ａ） ギャップ電流の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

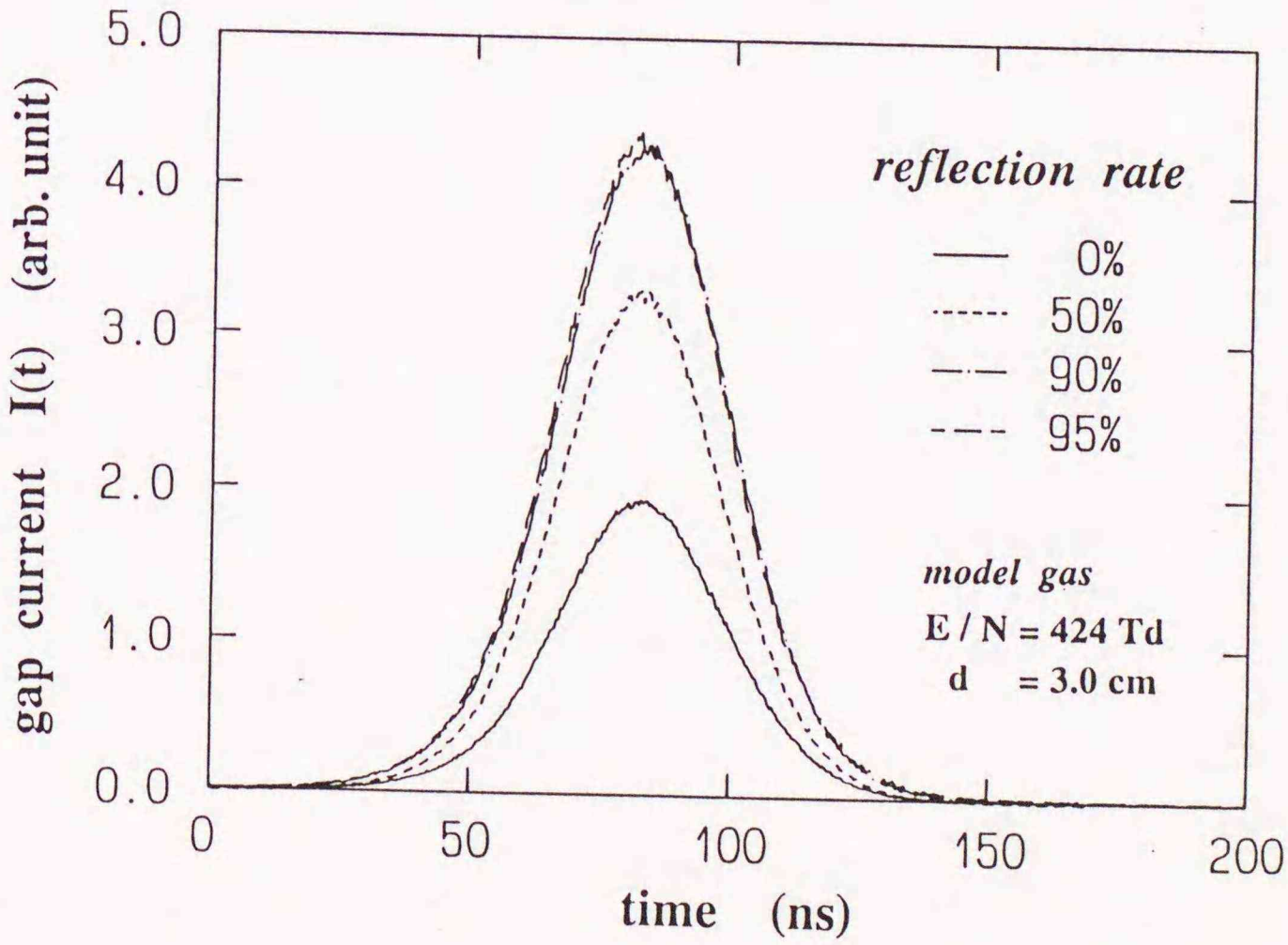


図３．11（ｂ） ギャップ電流の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

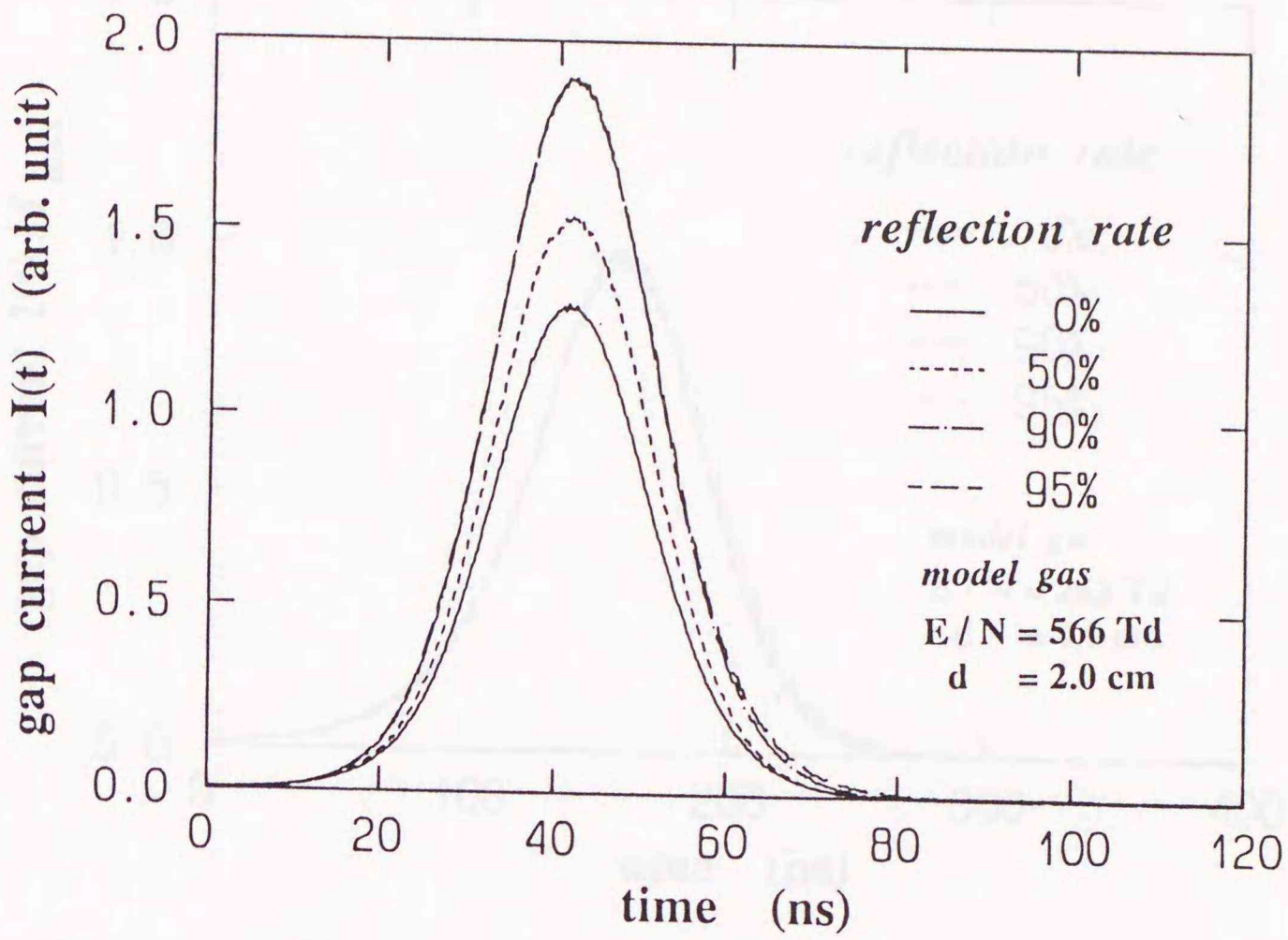


図３．11（ｃ） ギャップ電流の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

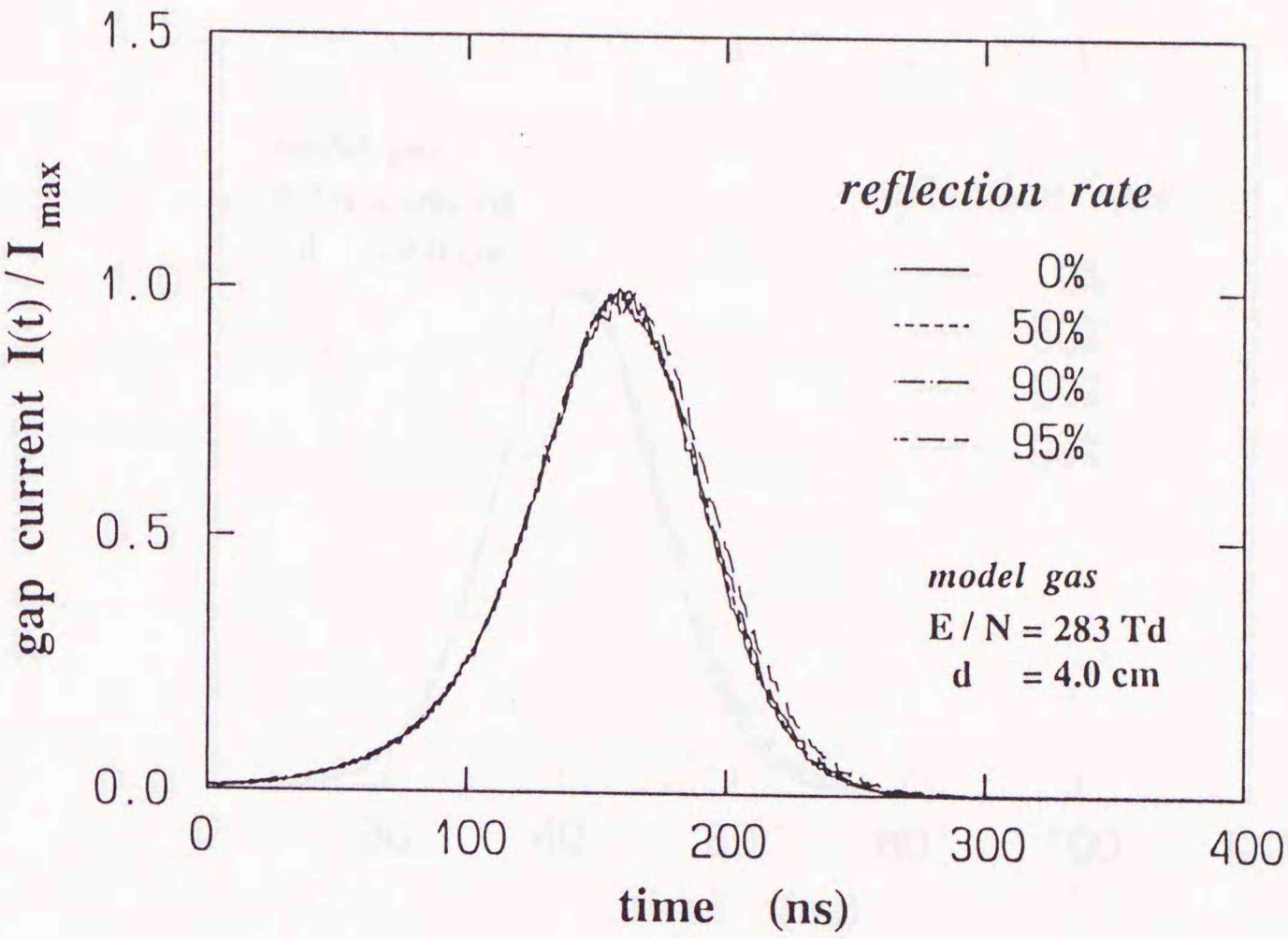


図3.12(a) 規格化したギャップ電流の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

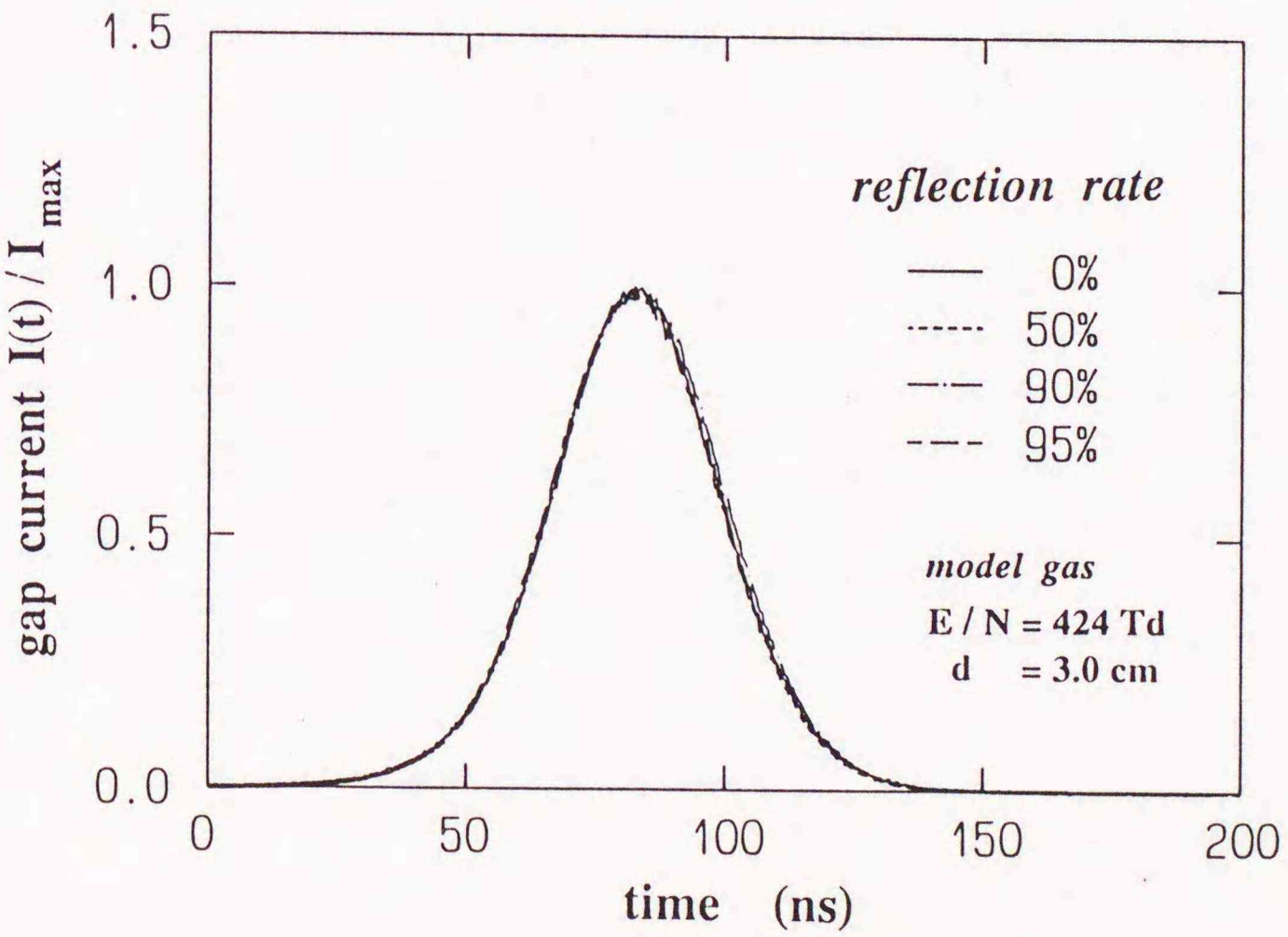


図3.12(b) 規格化したギャップ電流の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

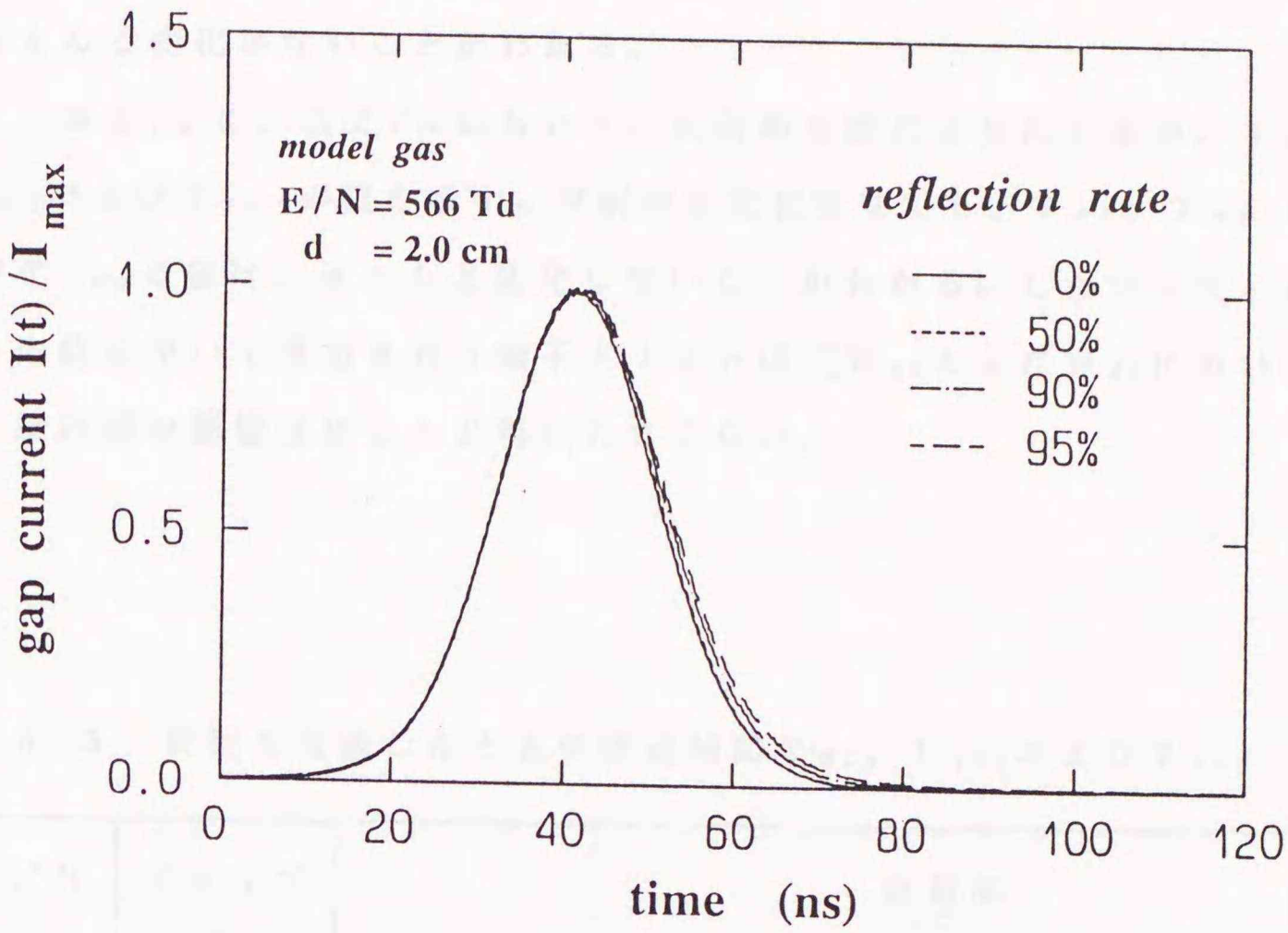


図3.12(c) 規格化したギャップ電流の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

化がほとんど一致しているので、それを積分して得られる電圧V(t)にもほとんど変化がないことがわかる。

表3.5に、各E/Nにおいて、反射率を変化させたときの、T_{SC}、T_{FD1}およびT_{FD2}の値を示す。反射率を変化させても、T_{SC}、T_{FD1}およびT_{FD2}の値は、ほとんど変化しないことがわかる。したがって、これらの値を用いて算出される電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}においても、反射率の影響はほとんど現われてこない。

表3.5　反射を考慮したときの経過時間T_{SC}、T_{FD1}およびT_{FD2}

E／N (Td)	ギャップ長 d (cm)		反射率			
			0 %	50%	90%	95%
283	4.0	T_{SC} (ns)	160	159	160	160
		T_{FD1}(ns)	170	170	170	170
		T_{FD2}(ns)	166	167	167	168
424	3.0	T_{SC} (ns)	82.0	82.3	82.8	81.6
		T_{FD1}(ns)	81.9	82.5	82.8	82.2
		T_{FD2}(ns)	80.6	81.4	81.0	81.1
566	2.0	T_{SC} (ns)	41.5	41.4	41.7	41.7
		T_{FD1}(ns)	40.5	40.8	40.8	40.8
		T_{FD2}(ns)	38.8	39.2	39.7	39.4

反射率を変化させているにもかかわらず、得られる電子ドリフト速度に影響が現われない理由について考察する。電子ドリフト速度が変化しないということは、前述したように、その算出に用いられるギャップ電流および電圧の時間変化から求められるT_{SC}およびT_{FD}にそれぞれ変化がないということである。そこで、(2－51)式のギャップ電流の計算に含まれている全電子数N(t)および平均速度W(t)について、反射率に対する変化を見る。

図3.13は、電子数N(t)の時間変化を最大値N_{max}で割り規格化したものである。反射率が大きくなるにしたがって、$N(t)/N_{max}$が全体として右へシフトしていることがわかる。

図3.14は、電子の平均速度W(t)の時間変化を示す。50%の反射率では、わずかな変化しか見られないが、反射率が90%および95%では、0%の結果との違いが明確になっている。また、反射率を90%から95%へ変化させるときに、$N(t)/N_{max}$の変化が大きいことがわかる。なお、シミュレーション開始直後および最後の部分の変動は、おもに電子数が少ないことによる統計変動である。全てのE/Nにおいて、$N(t)/N_{max}$の増加が、指数関数的でなくなる付近、すなわち、スオームの先頭の電子がアノードに到着する頃から、W(t)は減少を開始し、反射率が大きいほど、W(t)の減少の割合も大きい。これは、アノードにおいて反射された電子の影響と考えられる。反射された電子は、アノードからカソードへ向けて散乱されるため、負の速度を持ち、反射率が高ければ、このような電子が多く存在することになり、結果としてW(t)を減少させていると考えられる。

電極における電子の反射を考慮することにより、電子数の時間変化は右へシフトし、平均速度は後半部分で減少しており、電子スオームの振舞いは大きな影響を受けているが、ギャップ電流は[3]、

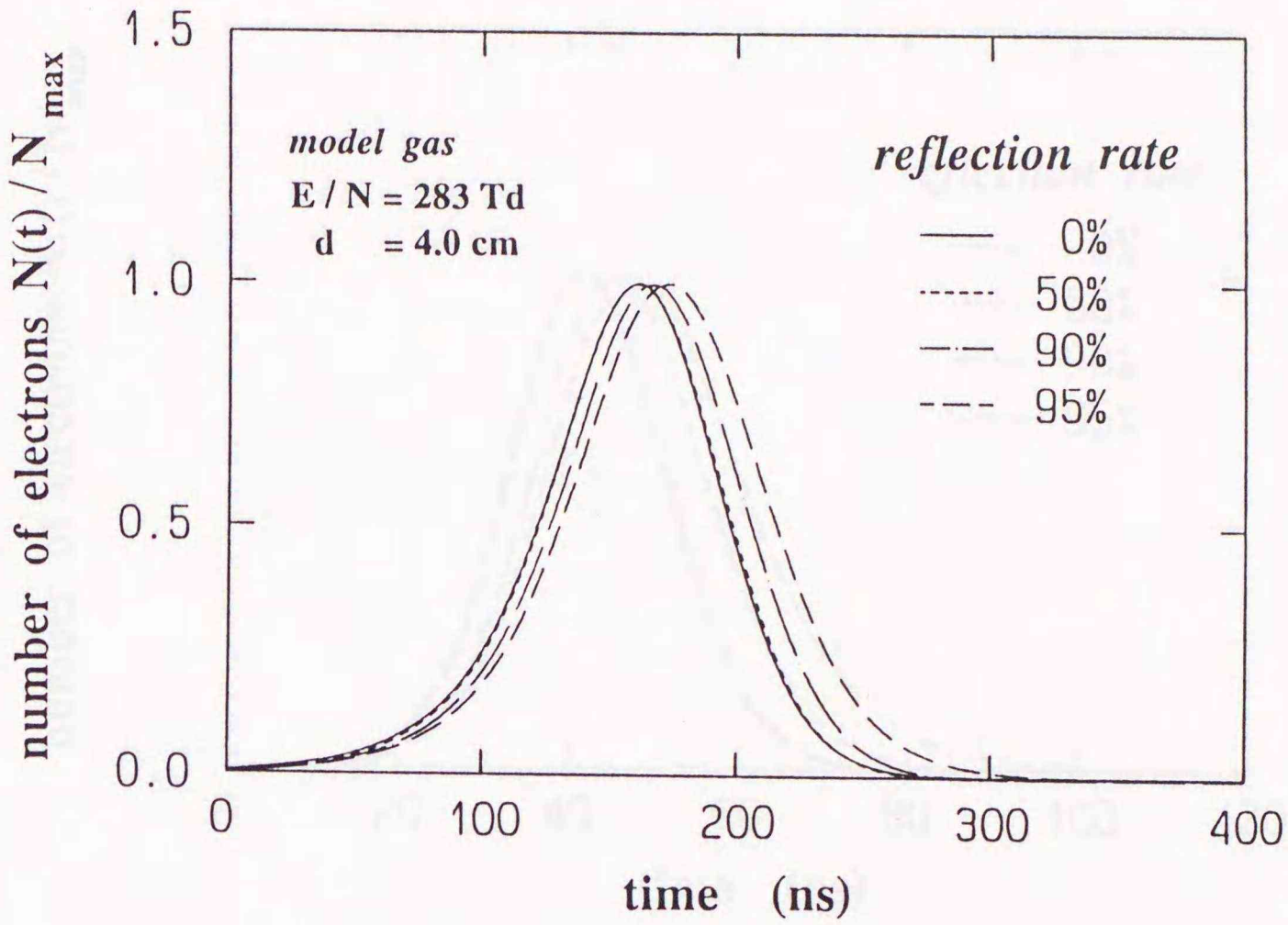


図３．13（ａ） 規格化した電子数の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

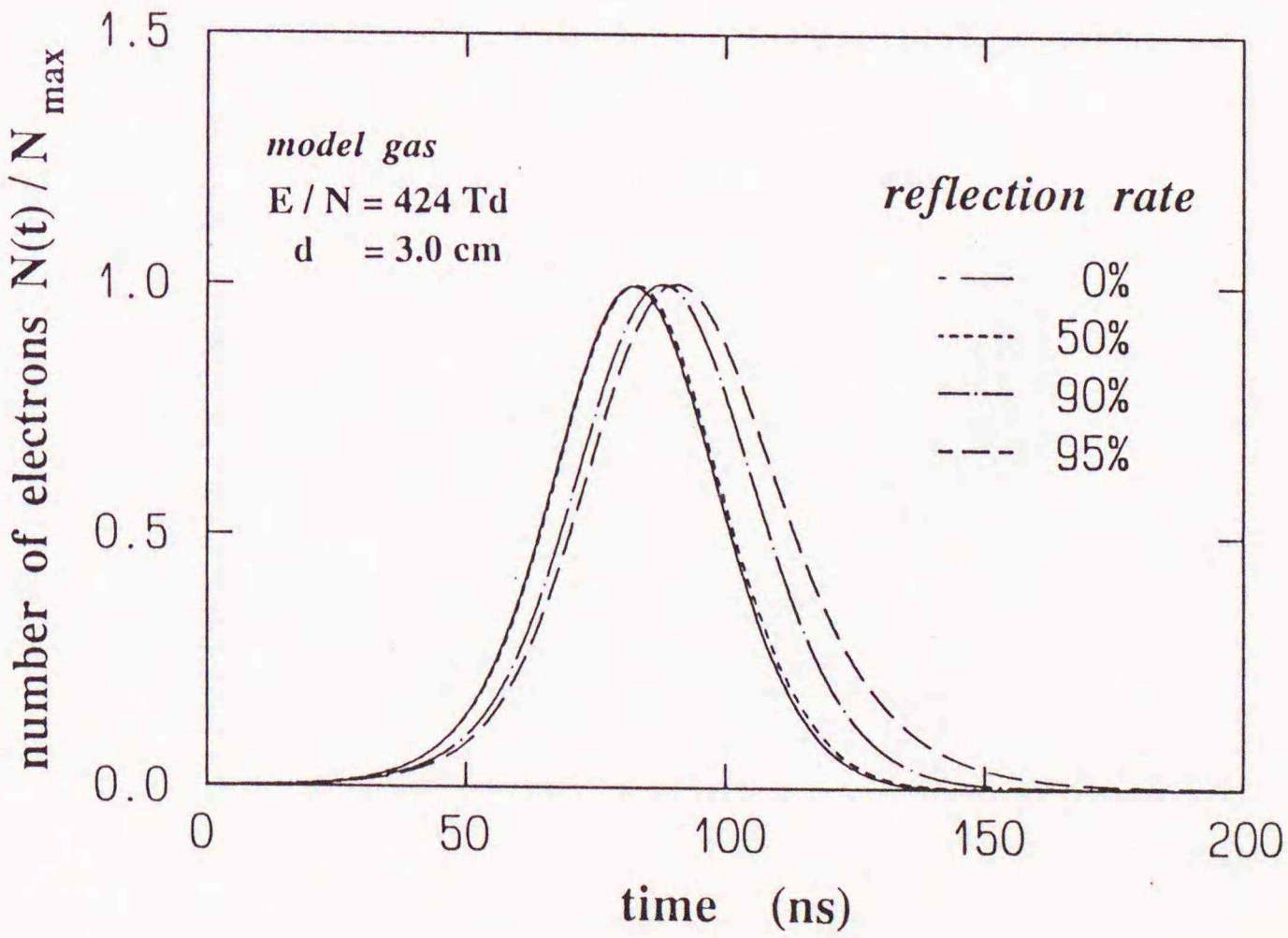


図３．13（ｂ） 規格化した電子数の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

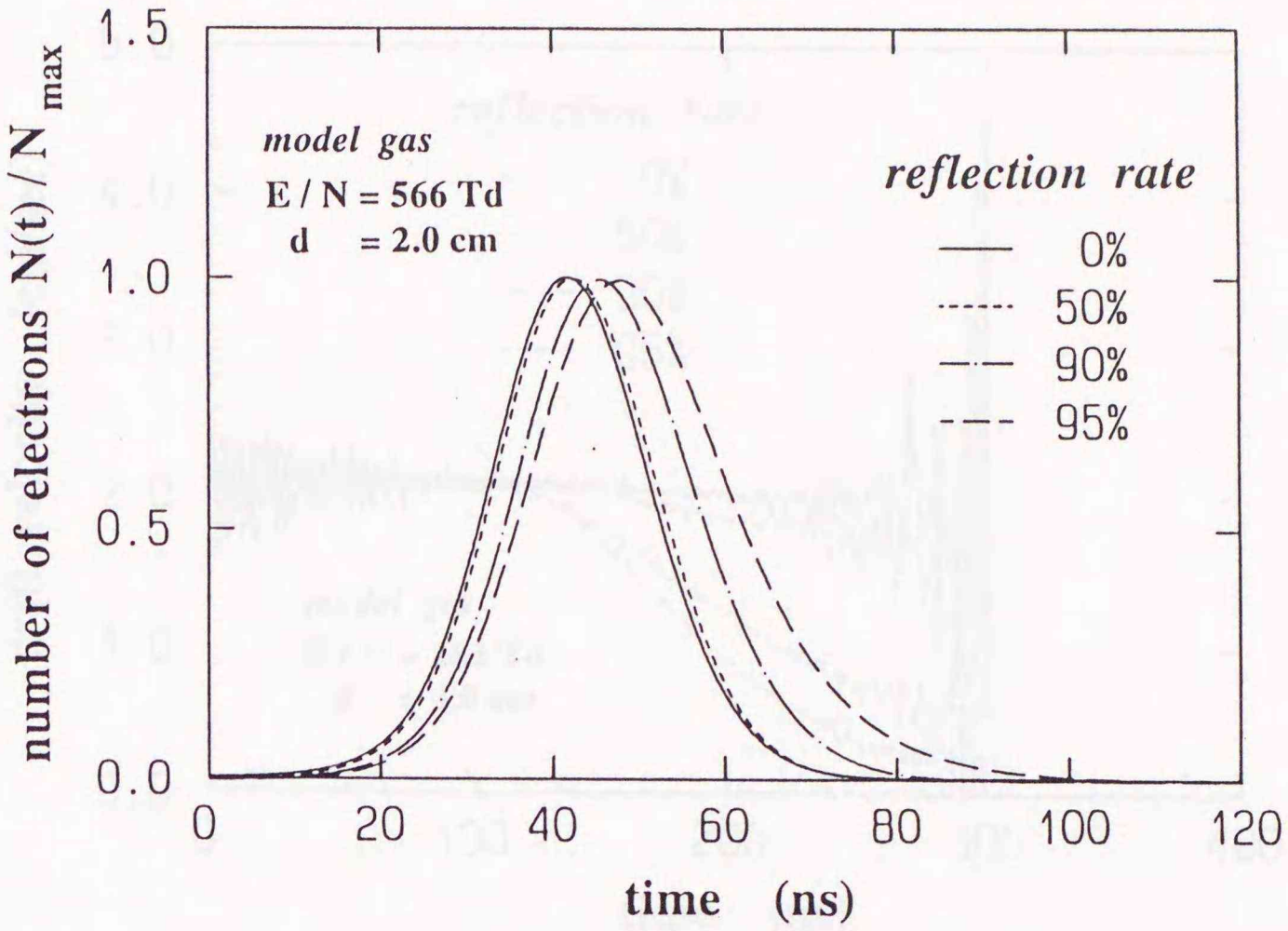


図３.13(ｃ)　規格化した電子数の時間変化　E/N=566Td,d=2.0cm

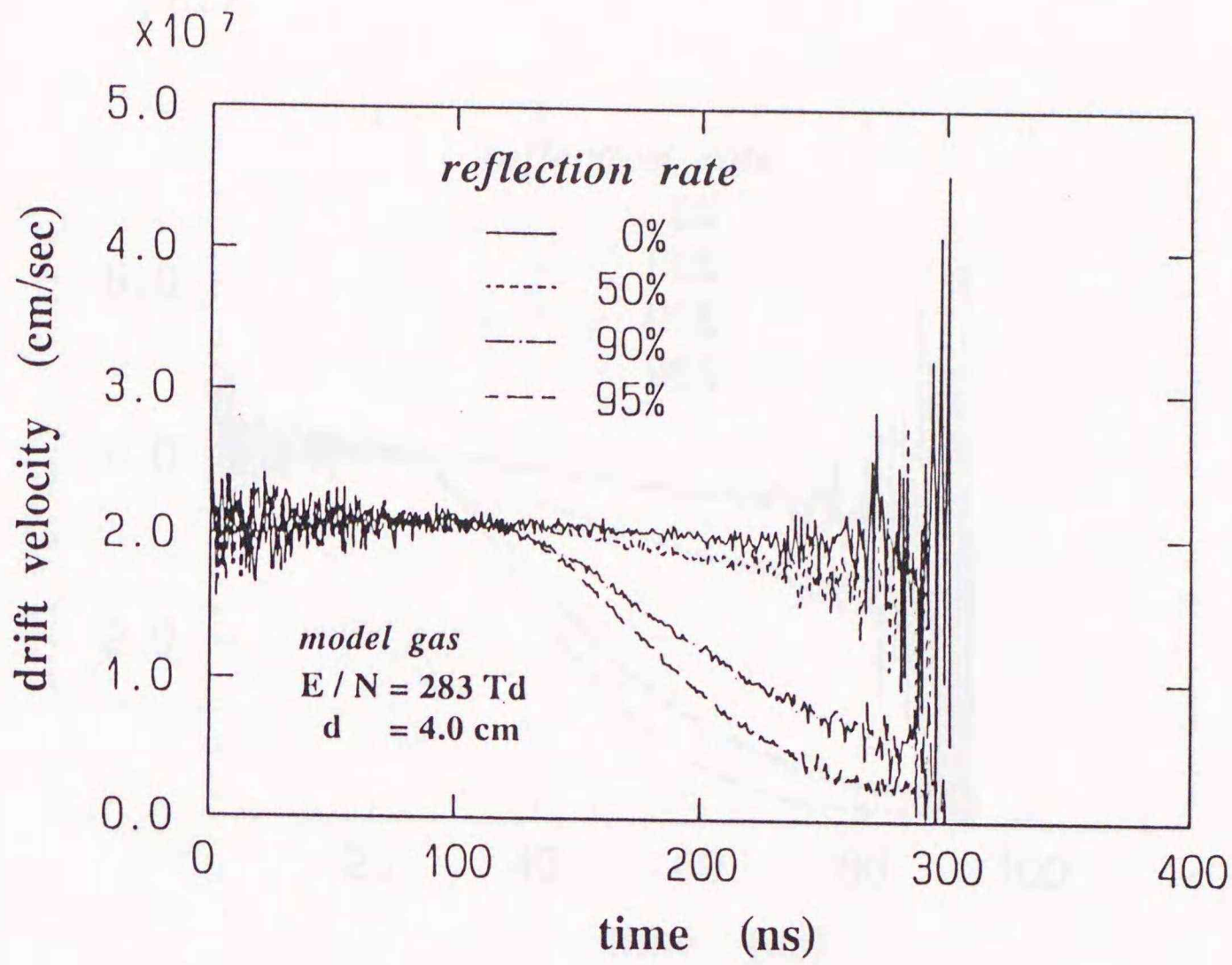


図３．14（ａ） 電子の平均速度の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

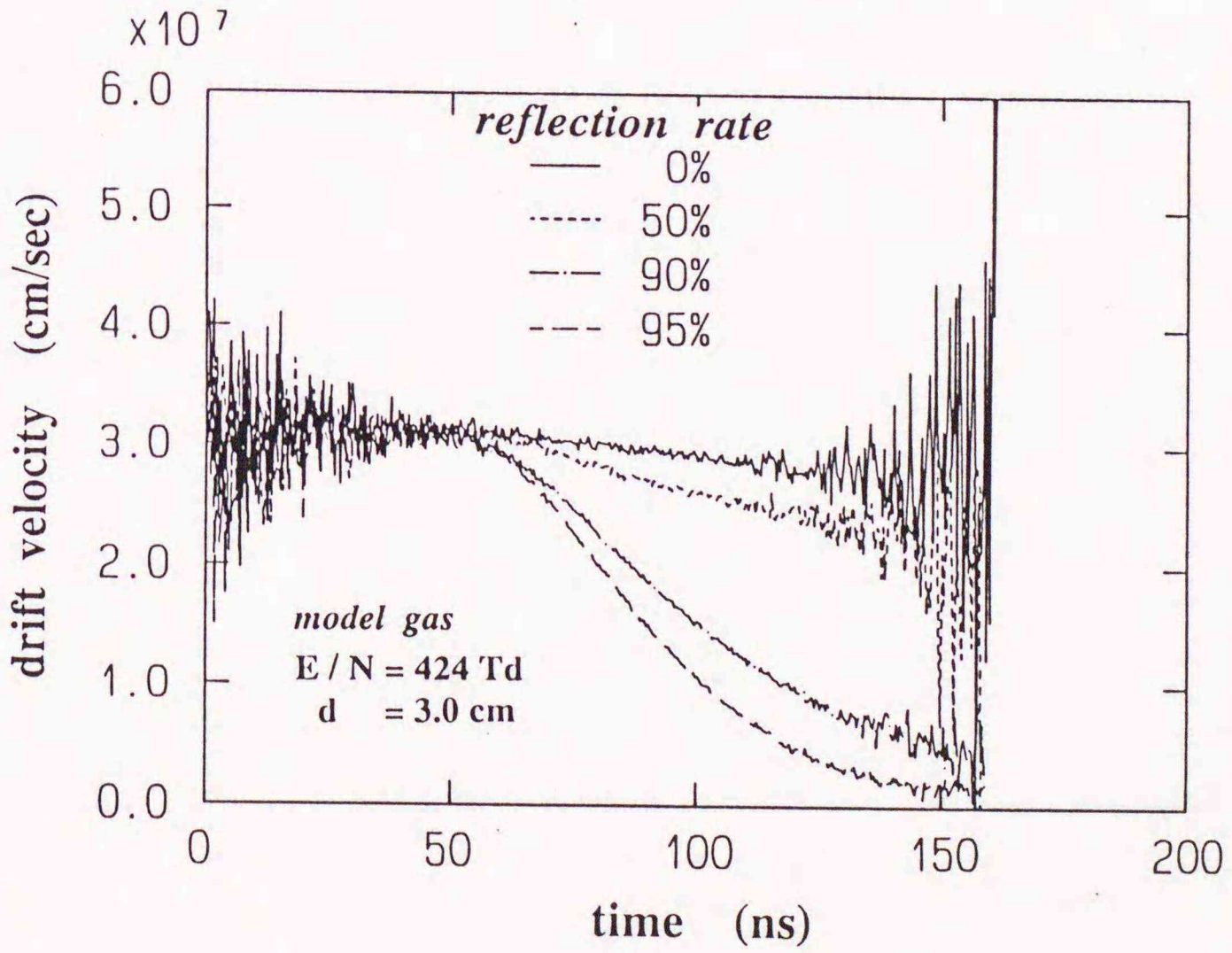


図３．14（ｂ） 電子の平均速度の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

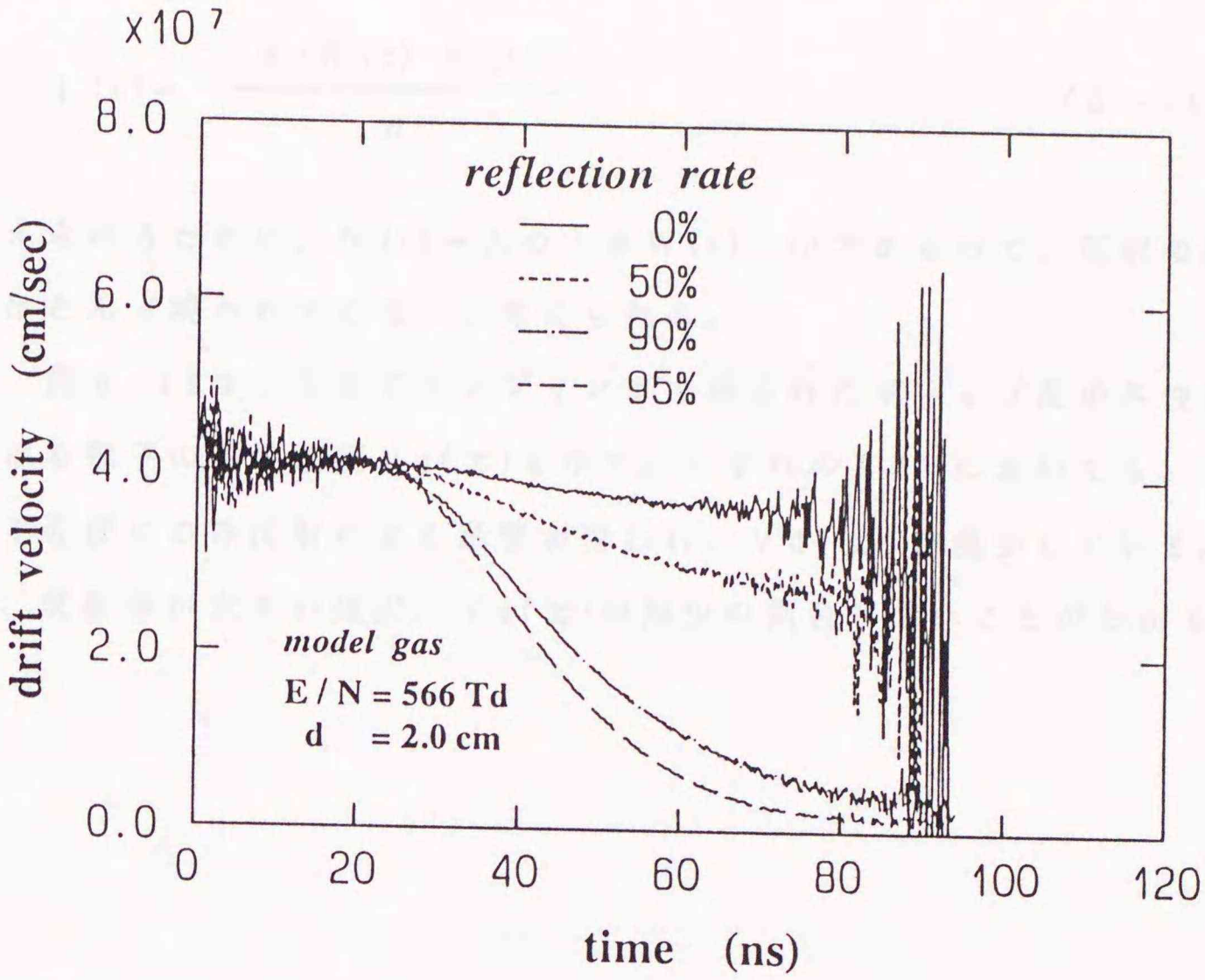


図３．14（ｃ） 電子の平均速度の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

$$I(t) = \frac{e \cdot W(t) \cdot N(t)}{d} \qquad (3-24)$$

で与えられるために、N(t)→大のときW(t)→小であるので、反射の影響がほとんど現われてこないと考えられる。

図3.15は、SSTサンプリングで得られたギャップ間の各位置における電子の平均速度Vd(x)を示す。いずれのE/Nにおいても、アノード近傍にのみ反射による影響が現われ、Vd(x)が減少している。また、反射率が大きいほど、Vd(x)の減少の割合が高いことがわかる。

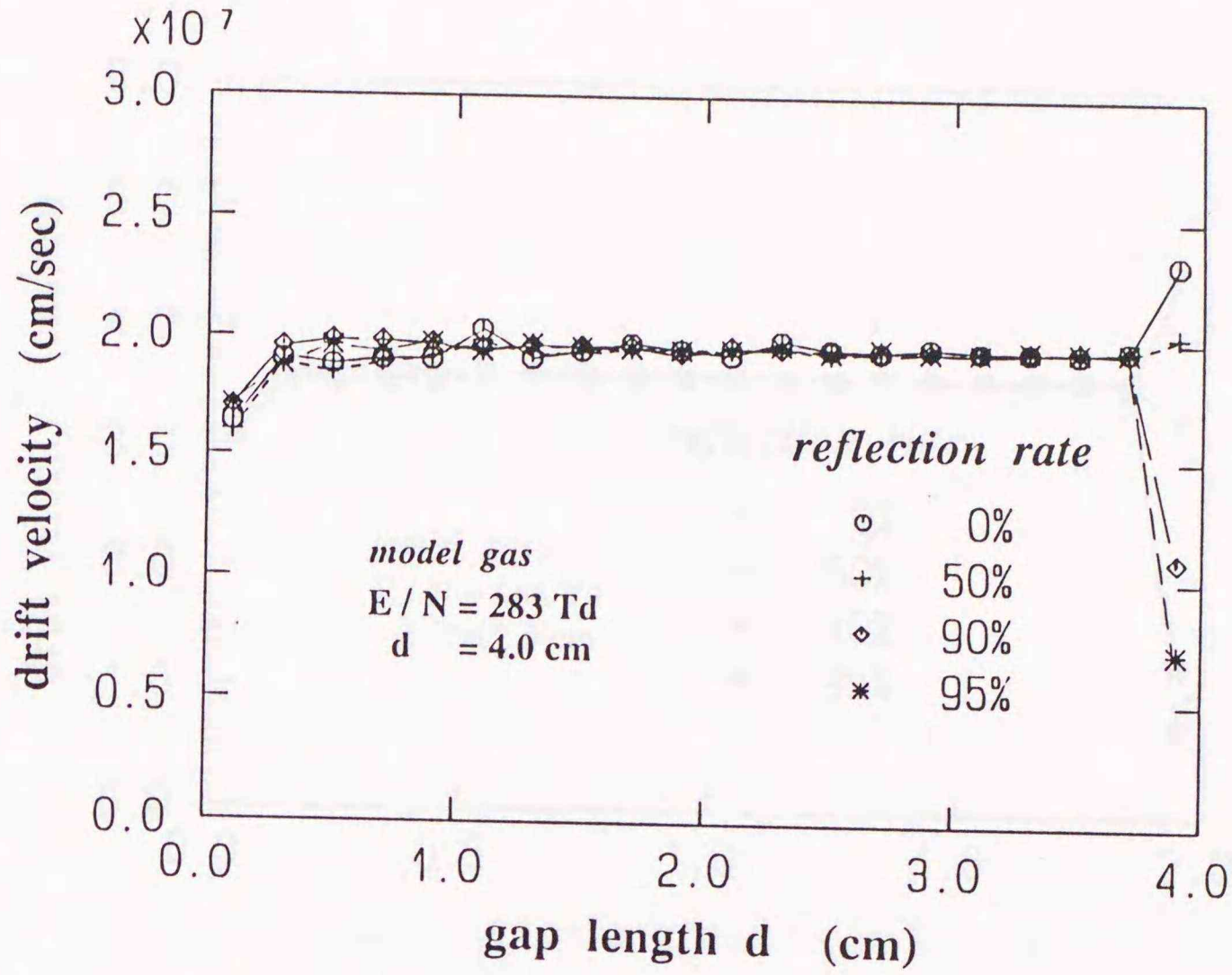


図3.15(a) ギャップ間における電子の平均速度 E/N=283Td, d=4.0cm

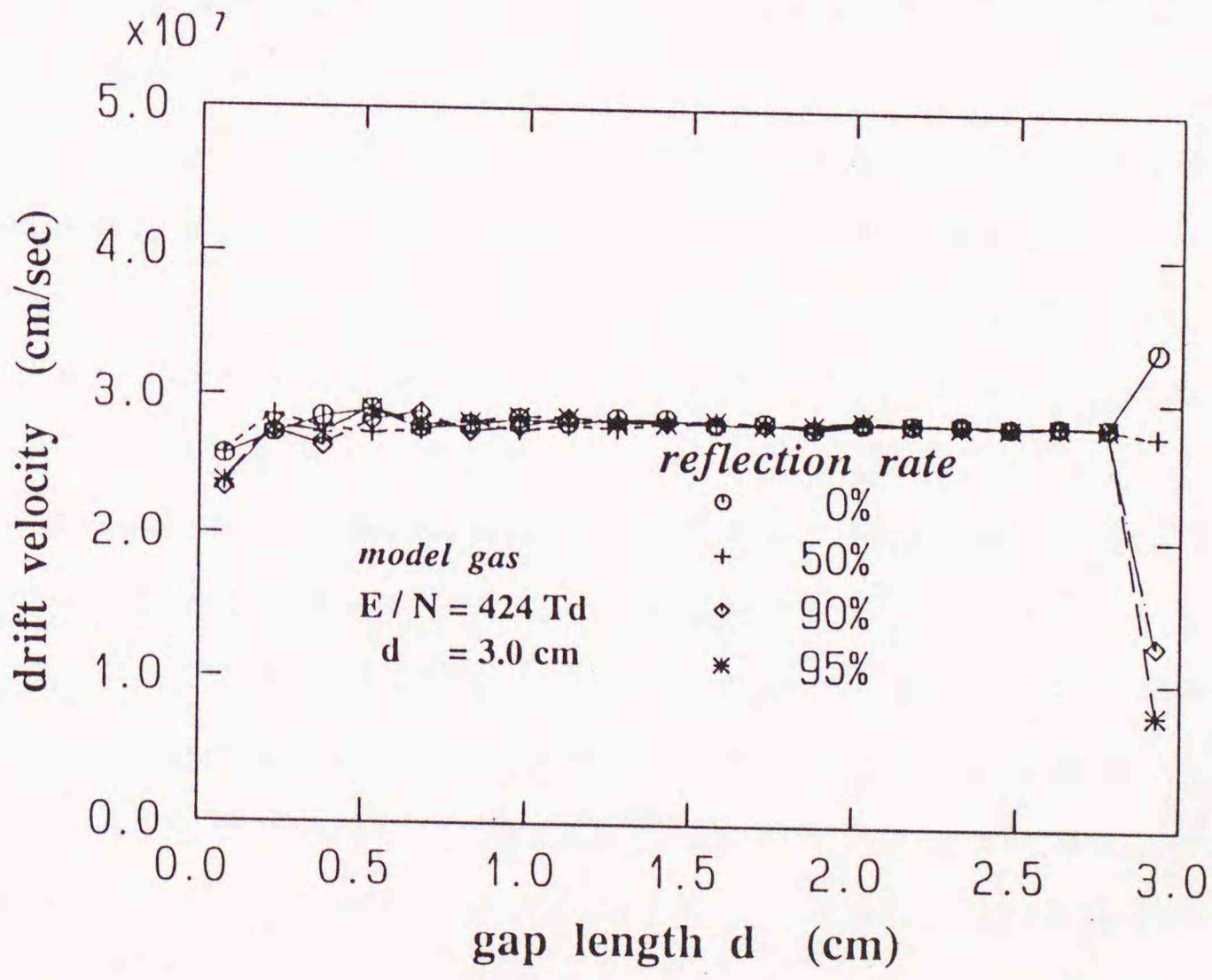


図3.15(b) ギャップ間における電子の平均速度 E/N=424Td, d=3.0cm

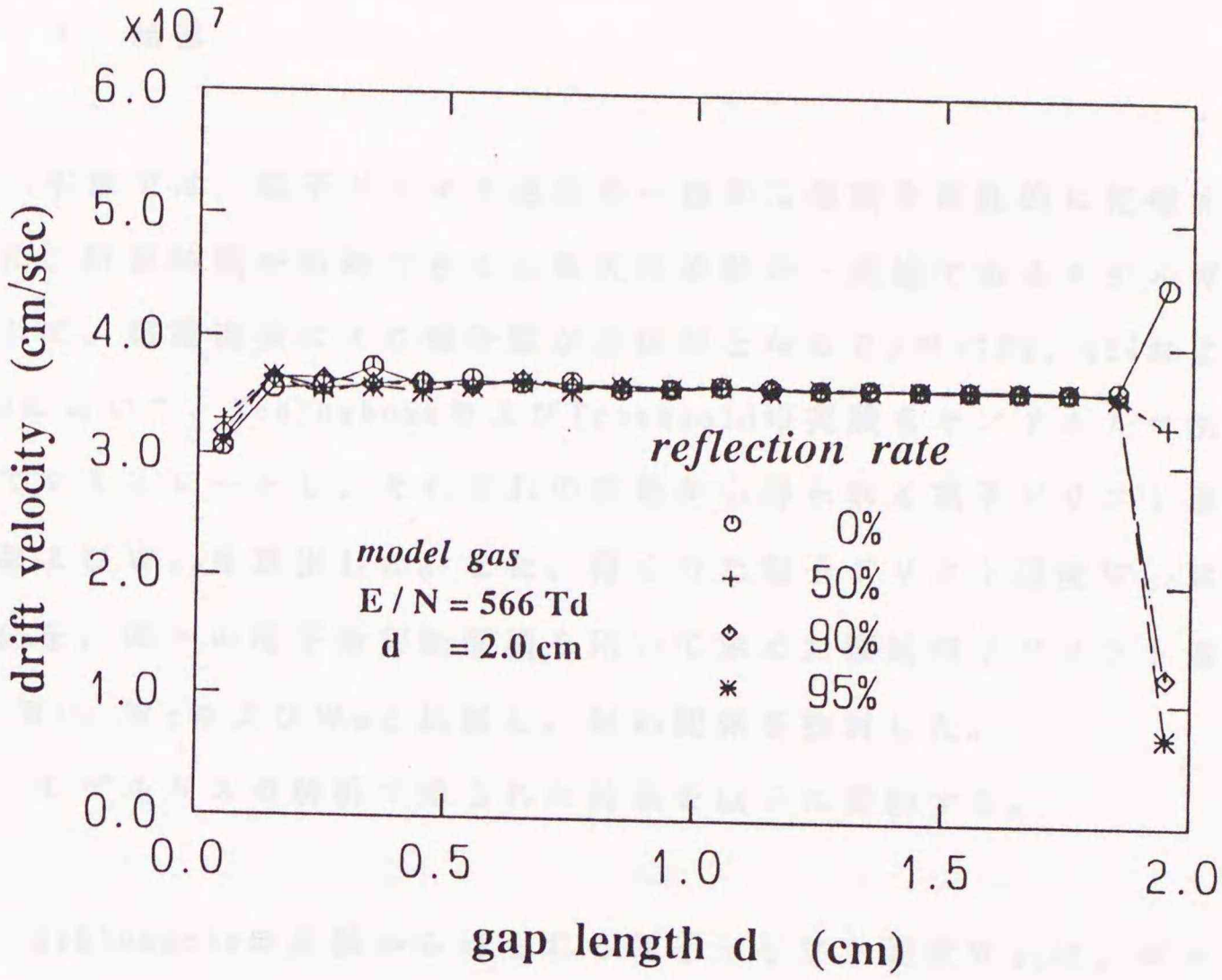


図3.15(c) ギャップ間における電子の平均速度 E/N=566Td, d=2.0cm

3－4　結言

本章では、電子ドリフト速度の一般的な傾向を定性的に把握するために、計算時間が短縮できる全衝突周波数が一定値であるモデルガスに対して、電離衝突により電子数が非保存となるE/N=283、424および566Tdにおいて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から得られる電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出した。また、得られた電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を、同一の電子衝突断面積を用いて求めた理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較し、対応関係を検討した。

モデルガスの解析で得られた結果を以下に要約する。

(1) Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度W_{SC}は、ギャップ長dに対する依存性が見られた。これは、T_{SC}-dプロットの延長が原点を通らないにもかかわらず、(2－49)式に示すSchlumbohmの定義からW_{SC}を算出したためである。T_{SC}-dプロットは、よい直線性を示しており、ギャップ長依存性によるW_{SC}の決定における曖昧さを排除するために、W_{SC}は、(3－13)式のようにT_{SC}-dプロットの勾配から求めるべきであると考えられる。本解析では、この方法で算出された値をW_{SC}の値として採用している。

(2) Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度W_{FD}においても、ギャップ長依存性が見られた。この原因はT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの延長が原点を通らないにもかかわらず、(2－50)式に示すFrommholdの定義からW_{FD}を算出したためである。T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットは、よい直線性を示しているので、ギャップ長依存性によるW_{FD}決定の曖昧さを排除するために、(3－14)式のよ

うにT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの勾配からW_{FD1}およびW_{FD2}を求めるべきであると考えられる。また、T_{FD}を2種類の方法(Method-IおよびII)を用いて決定したが、どちらの方法を用いても得られるW_{FD}の値は、ほとんど一致した。本解析では、T_{FD1}-dプロットの勾配から求められた値をW_{FD}の値として採用した。

(3) 計算を行なったE/Nの範囲では、W_{SC}とW_{FD}は、全て異なる値であり、また、E/Nが高くなるにしたがって、不一致の傾向が顕著となった。したがって、W_{SC}とW_{FD}は、本質的に異なる電子ドリフト速度であると考えられる。

(4) W_{SC}とW_{FD}を理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較した結果、W_{SC}およびW_{FD}は、いずれの理論電子ドリフト速度にも一致しないことがわかった。しかし、W_{SC}は、E/N=566Tdの値を除いて、Wmに近く僅かに大きな値であることがわかった。また、W_{FD}は、WmとWrのほぼ中間に位置しており、$W=\frac{1}{2}(Wr+Wm)$を定義しこれと比較すると、W_{FD}とWは高E/Nを除いてよく一致することがわかった。ここで、電子ドリフト速度Wは、(3-18)式に示される理論電子ドリフト速度W_wに等しい速度である。

(5) 電極における電子反射を考慮し、それが電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}に与える影響を調べた。反射率を0、50、90および95%に変化させても、規格化したギャップ電流I(t)/Imaxのプロファイルには、ほとんど変化が見られなかった。したがって、それを積分した電圧のプロファイルにもほとんど変化がない。その結果、W_{SC}およびW_{FD}も、反射率の変化による影響を事実上受けないことがわかった。しかし、電子スオームの振る舞いにおいては、電子数およ

び平均速度において反射の影響が現われており、その影響は、反射率が大きいほど大であることがわかった。

参考文献

[1] 田頭 1985年 電気学会放電研究会資料 ED-85-115

[2] H.Tagashira, Y.Sakai and S.Sakamoto
1977 J.Phys.D: Appl.Phys. 10 pp.1051-63

[3] L.G.H.Huxley and R.W.Crompton 1974
"The diffusion and drift of electrons in gases"
Wiley-International, New York

第４章　CH_4ガスに対する解析

４－１　緒言

CH_4ガスは、電子ビーム制御スイッチの媒質などの気体絶縁材料として用いられてきたが、最近では、プラズマＣＶＤによるカーボン薄膜、ダイアモンド薄膜製造に用いられる気体材料として注目されている。CH_4ガスの電子衝突断面積は、弾性衝突に対し、低エネルギー部にラムザウアータウンゼント極小を持つとともに、その付近で、非弾性衝突の衝突断面積が弾性衝突の衝突断面積よりも大きくなっているのが特徴である。

CH_4ガス中における電子ドリフト速度に関する実験的研究として、古くはFrommhold(1959)[1]あるいは、Schlumbohm(1965)[2]の研究がある。Frommholdは、Electrical methodを用いた測定から、E/p=30～50V/cm・Torrにおいて、電子ドリフト速度を算出している。また、Schlumbohmは、CH_4ガス中の電子ドリフト速度が、E/p=120～1000 V/cm・Torrの範囲では、$5.85\times10^5(E/p)^{0.758}$の近似式に従うことを報告している。

最近の実験的研究としては、Al-Amim et al.(1985)[3]、Hunter et al.(1986)[4]およびDavies et al.(1989)[5]の報告がある。Al-Amin et al.は、Saelee et al.(1977)[6]、Kücükarpaci(1979)[7]が用いた手法（アノードで観測される電流の時間変化のピークの時刻から電子ドリフト速度を求める）すなわち、Schlumbohmの実験と同様の方法を用いて、E/N=0.28～848Tdにおいて、電子ドリフト速度を求めている。また、モンテカルロシミュレーションによって得られた電子ドリフト速度と実験結果の比較を行なっているが、必ずしもよい一致ではない。Hunter et al.は、基本的には、Frommholdの実験方法を使用し、この方法から

の電子ドリフト速度の算出が不可能な場合には、Schlumbohmの実験方法を用いて、E/N=0.012～300Tdにおいてドリフト速度を求めている。Davieset al.は、Schlumbohmの実験と同様の方法を用いて、E/N=10～1000Tdの間で、電子ドリフト速度を求めている。また、この結果を、モンテカルロシミュレーションから得られたWrに相当する電子ドリフト速度Wzと比較しているが、高E/Nでは一致していない。さらに、Wrと2項近似のボルツマン方程式解析で得られたWvに相当する電子ドリフト速度WΔzの比較も行ない、高E/Nにおける両者の違いを、2項近似のエラーとしている。

Al-Amin et al.やDavies et al.のように、実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度の対応を行なった報告では、電離衝突による電子増倍を伴う場合には、理論電子ドリフト速度が、観測方法の違いによって一般に異なる値となることを考慮していないようである。

本章では、電離による電子増倍を伴うE/Nにおいて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、W_{SC}およびW_{FD}を同一の電子衝突断面積を用いて計算された理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較し、その対応を検討する。

4－2　シミュレーション条件

図4.1に、計算に使用したCH_4ガスの電子衝突断面積のセットを示す。この電子衝突断面積のセットは、Ohmori et al.(1986)[8]によって決定されたものであり、運動量移行q_m、2つのモードの振動励起衝突q_{v24}、q_{v13}、電子付着衝突q_a、解離衝突q_dおよび電離衝突q_i

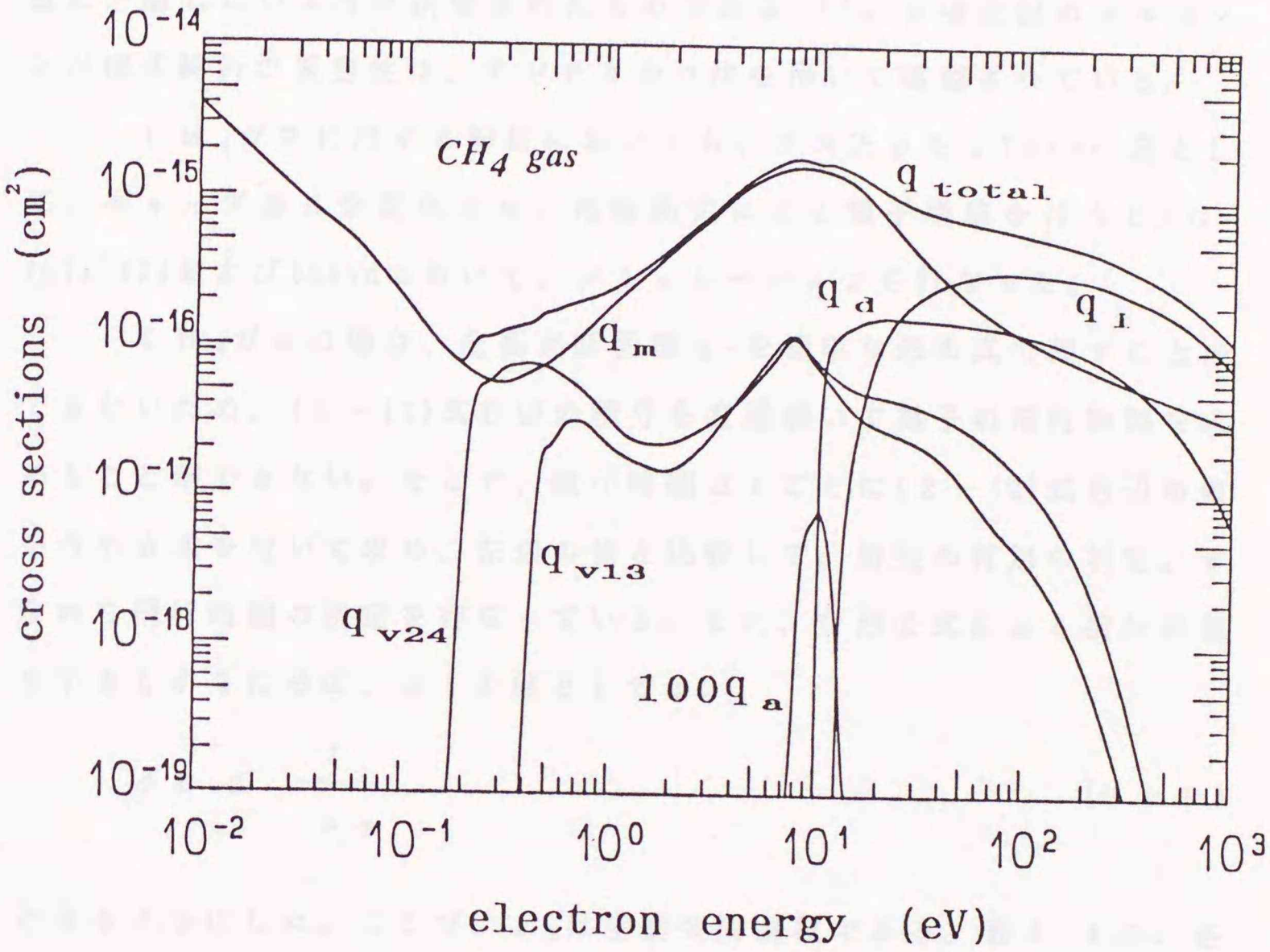


図4.1　CH_4ガスの電子衝突断面積

の合計6種類の断面積によって構成されている。q_{v24}、q_{v13}、q_dおよびq_iのしきい値のエネルギーは、それぞれ0.162、0.362、10.0および12.7eVである。この電子衝突断面積のセットは、最新のデータを用い、電子スオームの観測方法の相違を考慮して、2項近似のボルツマン方程式により計算された電離係数、電子移動度、特性エネルギーの値が実測値に矛盾しないように決定されたものである[8]。2項近似のボルツマン方程式解析の妥当性は、モンテカルロ法を用いて確認されている。

CH_4ガスに対する解析においても、ガス圧pを1Torr一定として、ギャップ長dを変化させ、電離衝突による電子増倍を伴うE/N=283、424および566Tdにおいて、シミュレーションを行なった。

CH_4ガスの場合、全衝突断面積q_Tを簡単な形の式で表すことができないため、(2－12)式右辺の積分を直接解いて電子の飛行時間を求めることができない。そこで、微小時間⊿tごとに(2－12)式右辺の値を台形公式を用いて求め、左辺の値と比較して、衝突の有無の判定、すなわち飛行時間の決定を行なっている。また、台形公式による積分誤差を小さくするために、⊿tの値としては、

$$\Delta t \leqq \frac{1}{\nu_T} \qquad (4-1)$$

となるようにした。ここで、ν_Tは全衝突周波数である。表4.1に、各E/Nおよびギャップ長における初期電子数、微小時間⊿tおよびサンプリング間隔の値を示す。

表4.1　計算条件（CH_4ガス）

E／N (Td)	ギャップ長 d (cm)	初期電子数 n_0	⊿t (sec)	サンプリング間隔 (sec)
283	1.0	50016	1.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}
	2.0	15017	〃	3.0×10^{-10}
	3.0	12017	〃	4.0×10^{-10}
	4.0	2024	〃	6.0×10^{-10}
	5.0	1023	〃	7.0×10^{-10}
	6.0	725	〃	8.0×10^{-10}
	7.0	324	〃	1.0×10^{-9}
	8.0	170	〃	1.2×10^{-9}
424	1.0	30012	7.5×10^{-11}	1.5×10^{-10}
	2.0	7022	1.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}
	3.0	324	1.0×10^{-10}	3.0×10^{-10}
	4.0	39	4.0×10^{-11}	4.0×10^{-10}
566	1.0	10018	1.25×10^{-11}	1.0×10^{-10}
	1.5	1023	7.5×10^{-11}	1.5×10^{-10}
	2.0	475	2.5×10^{-11}	2.0×10^{-10}
	2.5	324	1.0×10^{-10}	3.0×10^{-10}

4－3　解析結果

4－3－1　計算結果

図4.2、4.3および4.4に、E/N=283、424および566Tdにおけるギャップ電流および電圧の時間変化をそれぞれ示す。ギャップ電流I(t)において、○印がピークを示しており、t=0からピークまでの経過時間がT_{sc}となる。電圧V(t)のセミログプロットでは、3-3-1で述べたように、電極における電子の吸収の影響を受けずにスオームが進展するとき、logV(t)-t曲線は、R_iの傾きを持って上昇する直線となる。CH_4ガス中の場合は、電子付着断面積があるため、電圧V(t)は、

$$V(t) = \frac{e \cdot n_0 \cdot W(t)}{c \cdot d \cdot \overline{R_i}} \{\exp(\overline{R_i} \cdot t) - 1\} \qquad (4-2)$$

となる。ここで、$\overline{R_i}$は実効電離周波数であり、$\overline{R_i} = R_i - R_a$である。$R_a$は、電子付着周波数である。(4－2)式の両辺の対数をとると、

$$\log V(t) = \log\{\exp(\overline{R_i} \cdot t) - 1\} + \log \frac{e \cdot n_0 \cdot W(t)}{c \cdot d \cdot \overline{R_i}} \qquad (4-3)$$

となり、logV(t)-t曲線は、$\exp(\overline{R_i} \cdot t) >> 1$において$\overline{R_i}$の傾きをもつ直線となる。

図4.2、4.3および4.4において、破線は、logV(t)-t曲線と接する傾きが$\overline{R_i}$の直線と、logV(t)の一定値の延長を示している。t=0からこれらの2本の直線の交点までの経過時間がT_{FD1}となる(Method-I)。また、一点鎖線は、$\frac{1}{2}\overline{R_i}$の傾きをもつ直線であり、これとlogV(t)-t曲線の接点の時刻がT_{FD2}(Method-II)である。Ohmori et

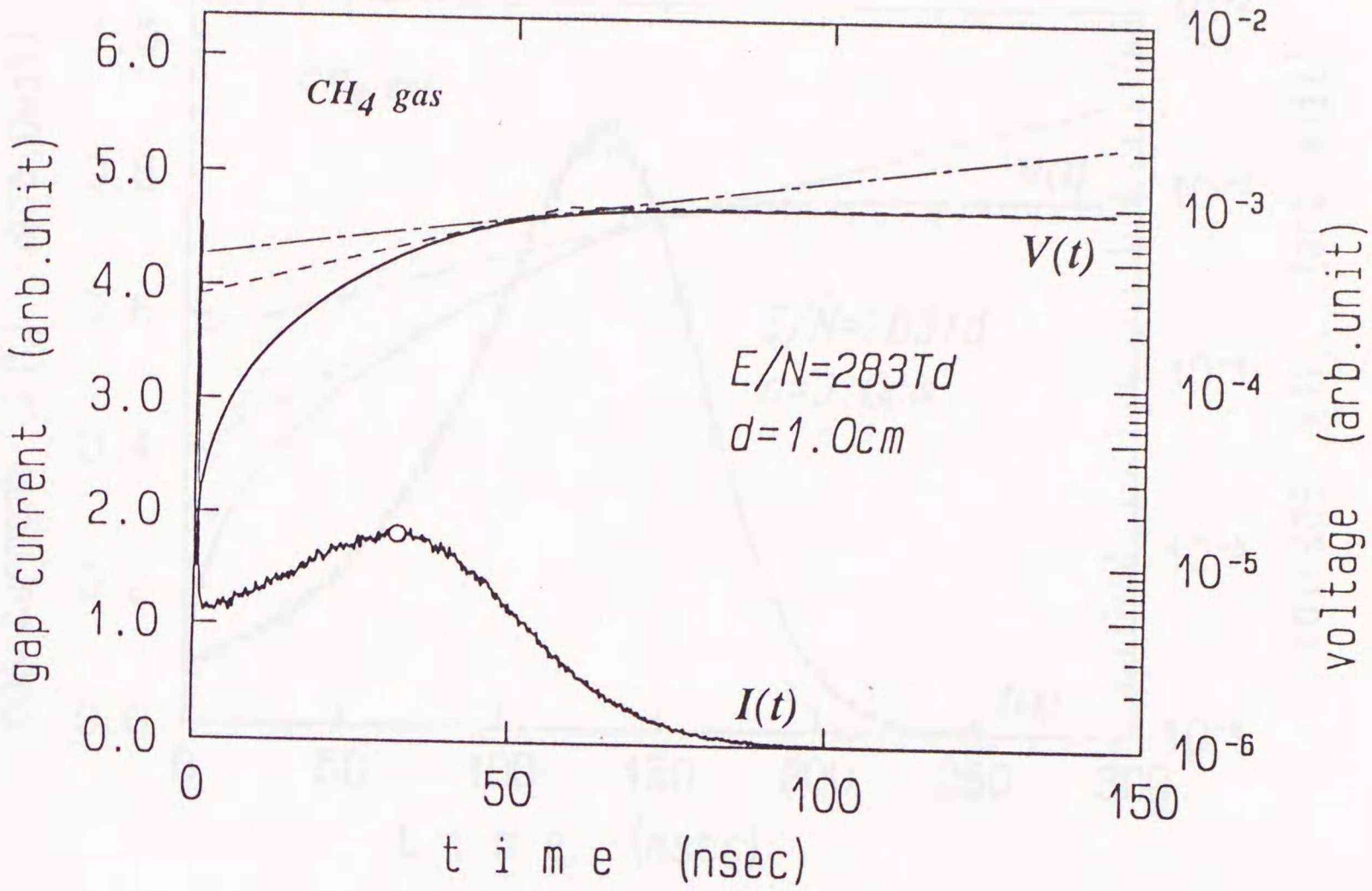


図4.2(a) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=1.0cm

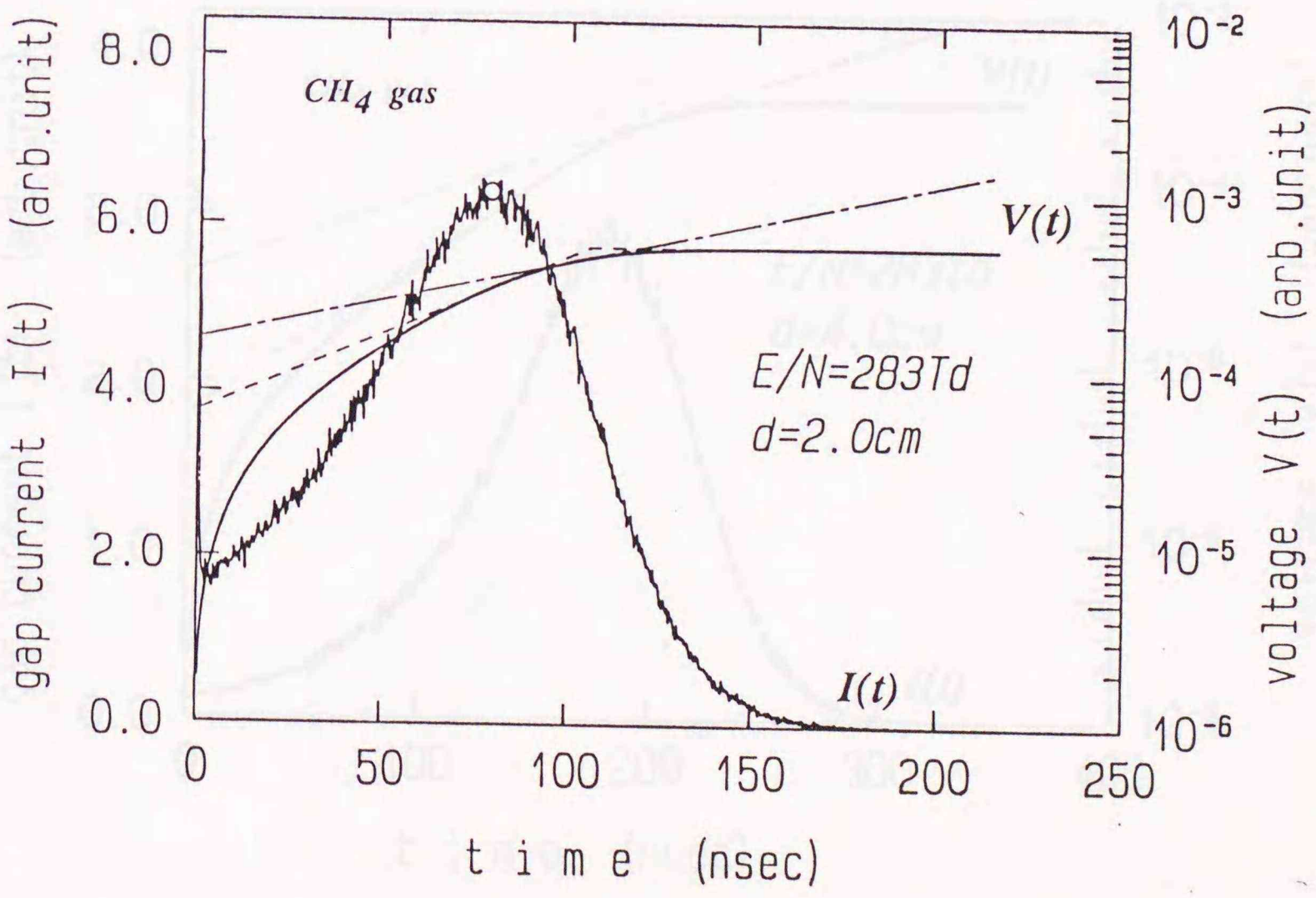


図4.2(b) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=2.0cm

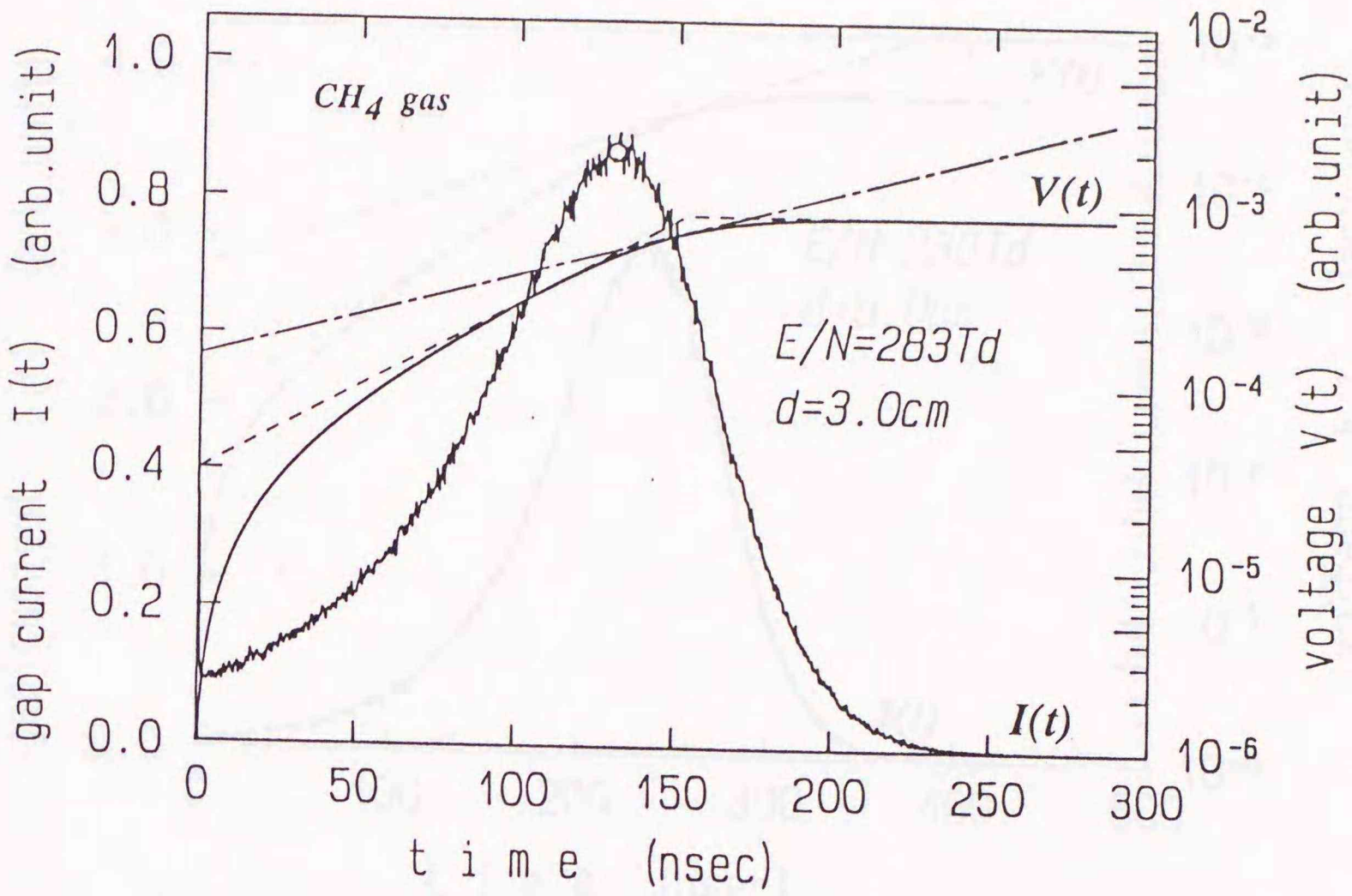


図4.2(c) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=3.0cm

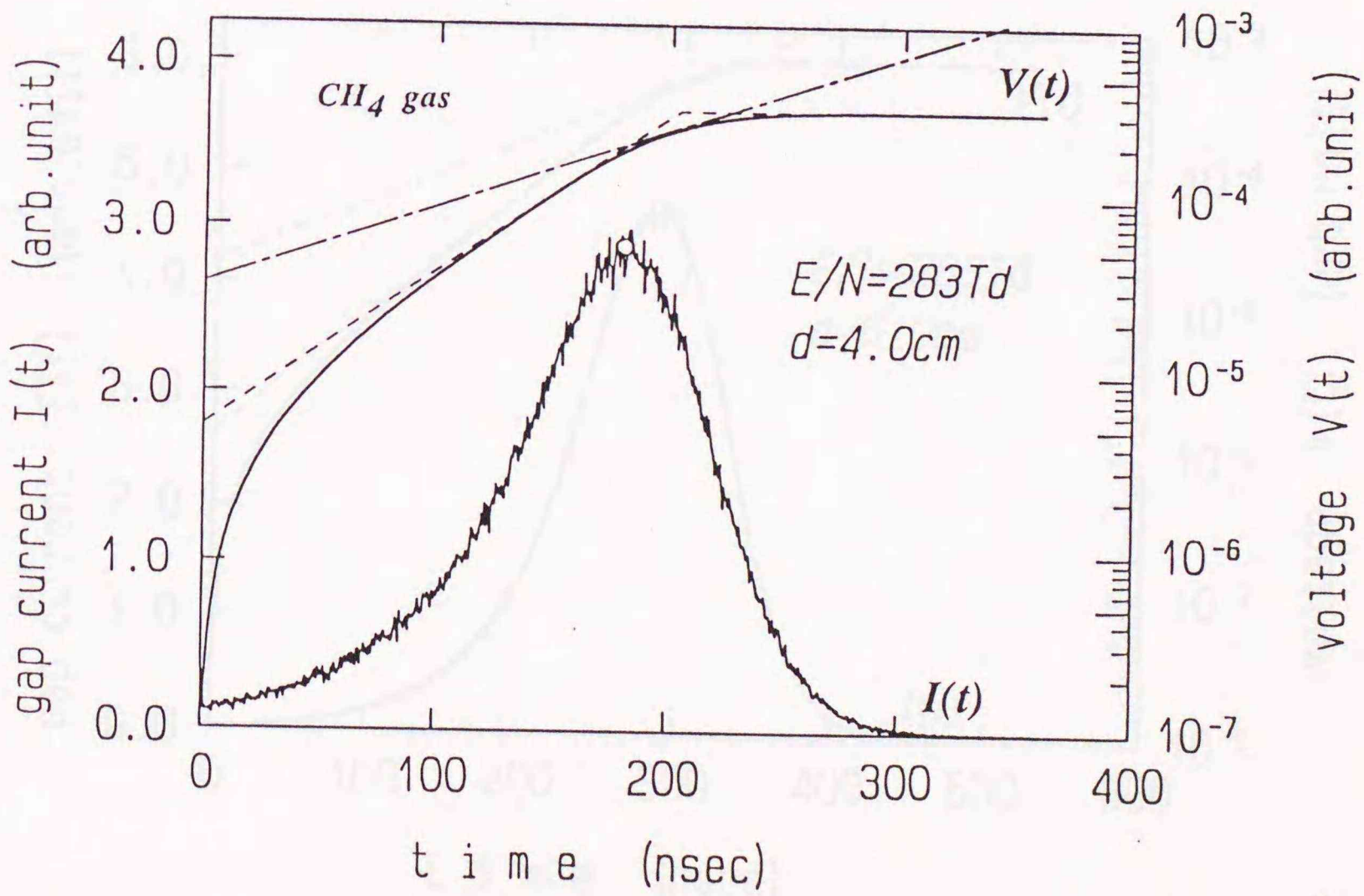


図4.2(d) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

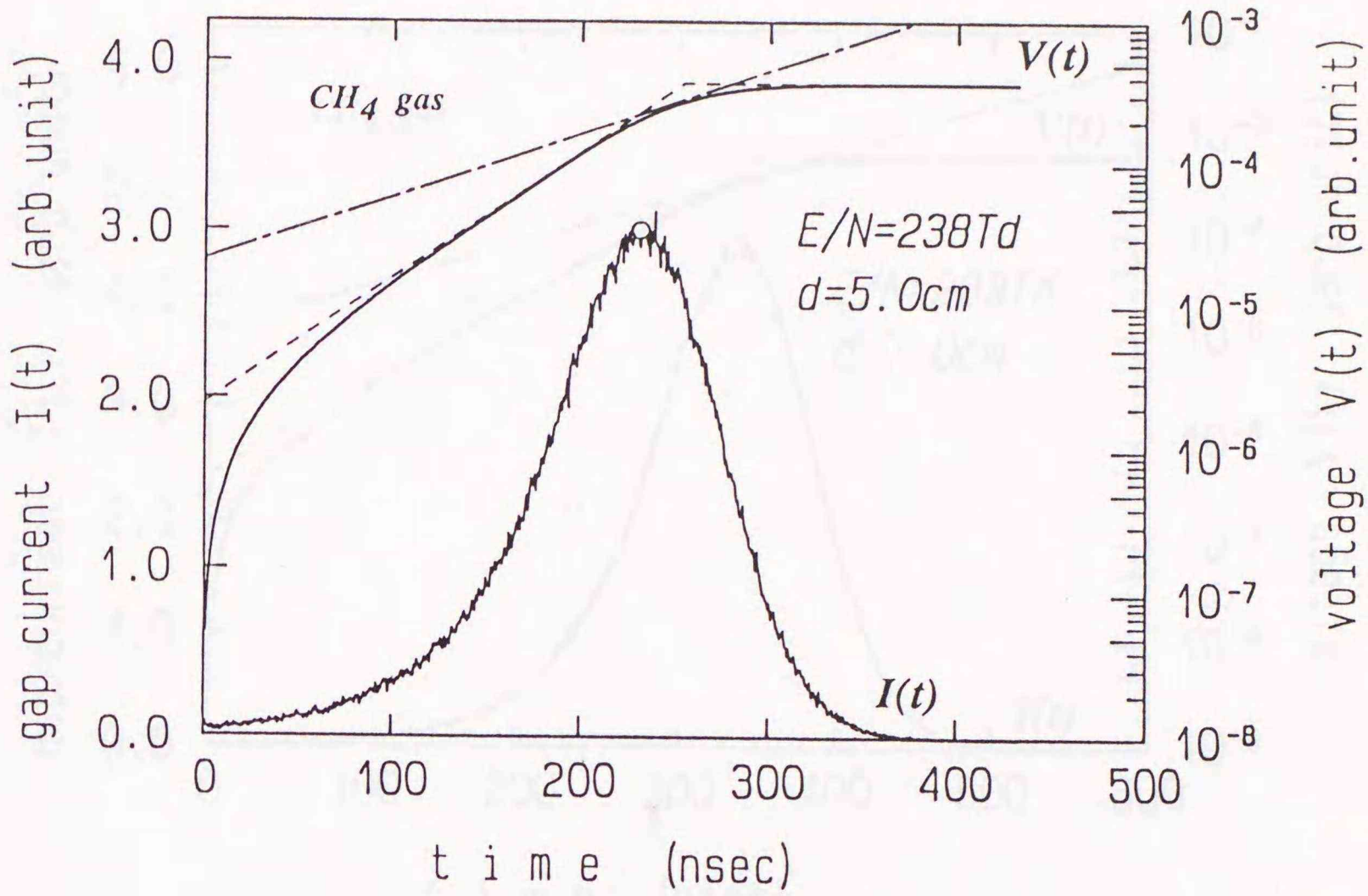


図4.2(e) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=5.0cm

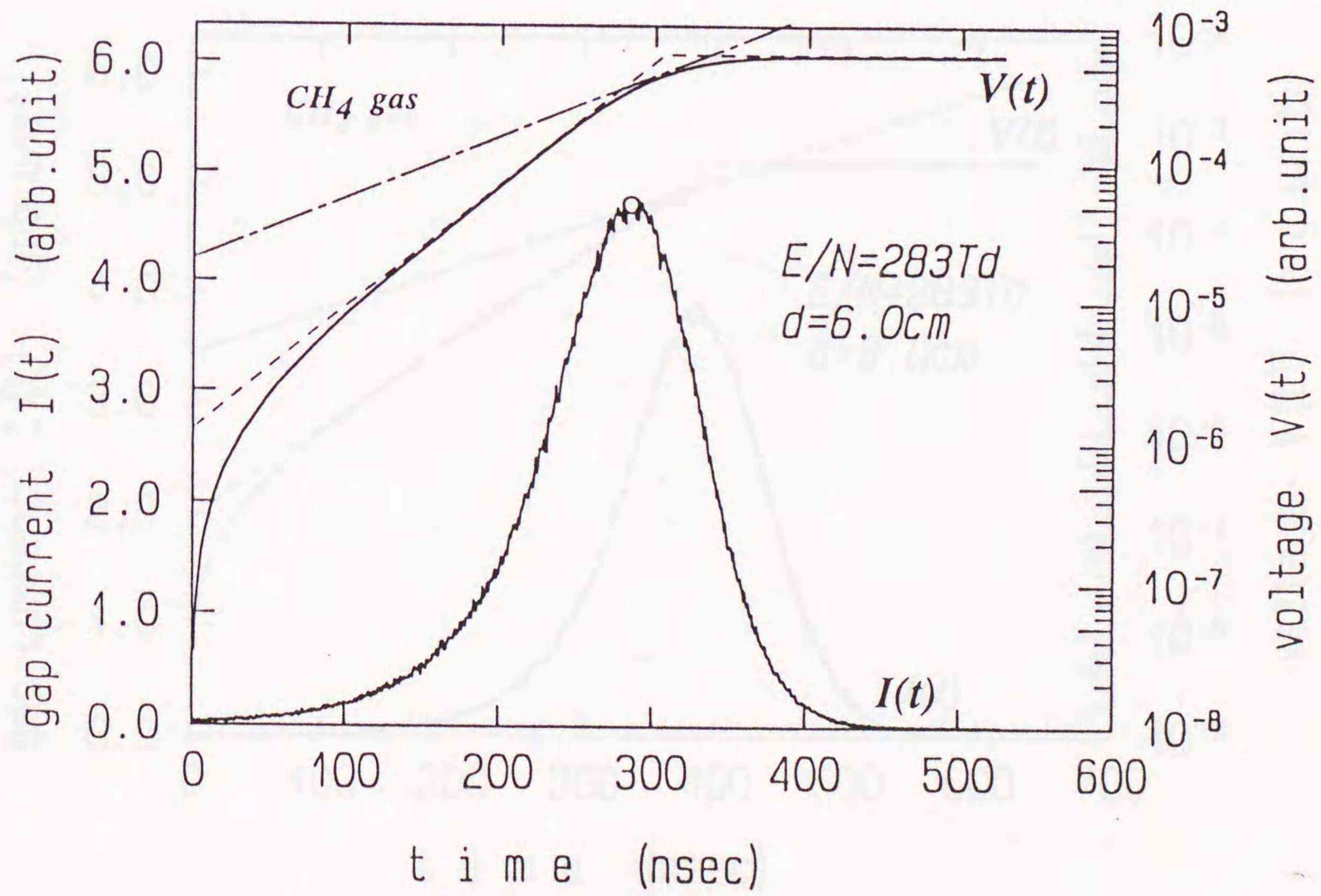


図4.2(f) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=6.0cm

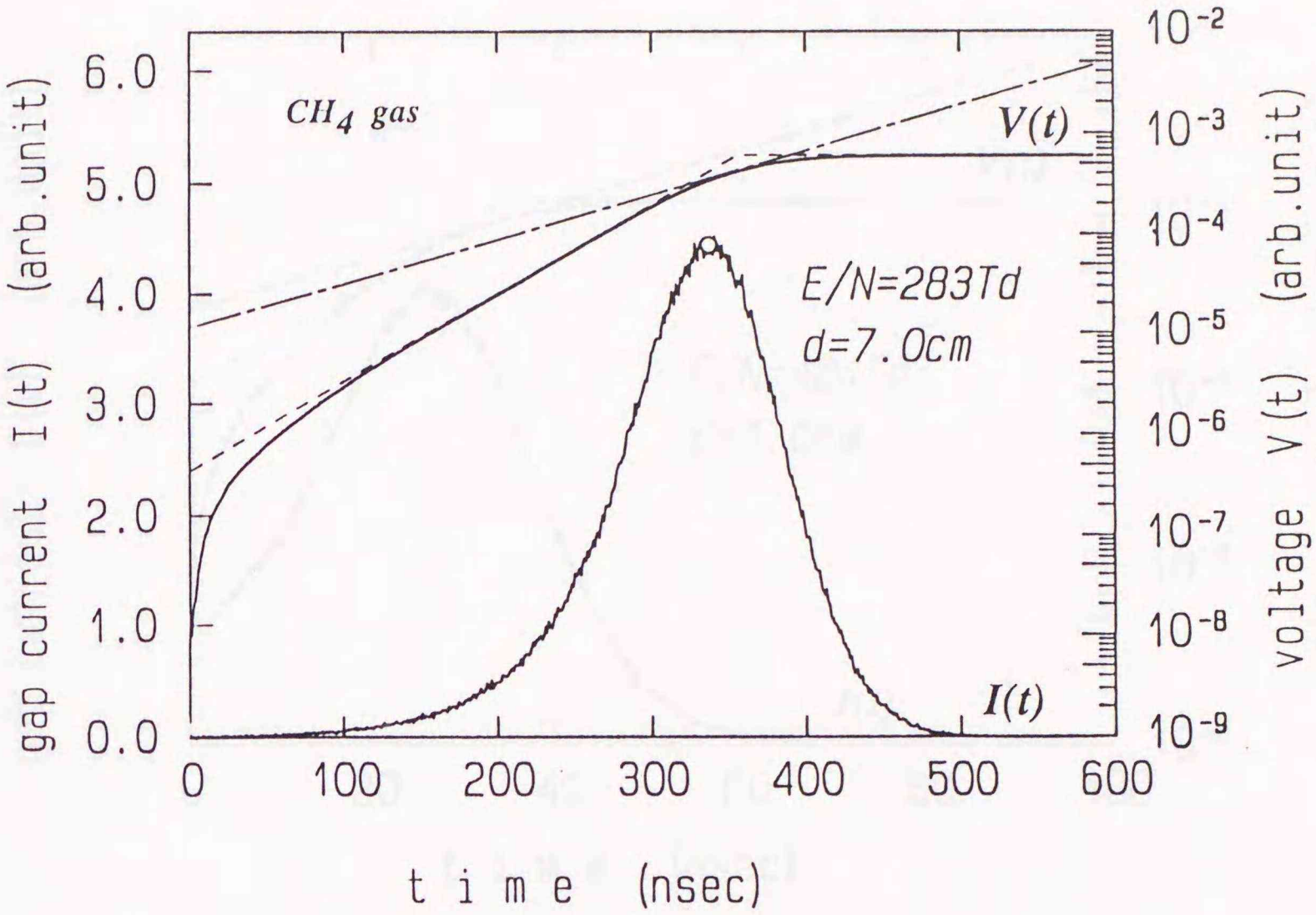


図4.2(g) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=7.0cm

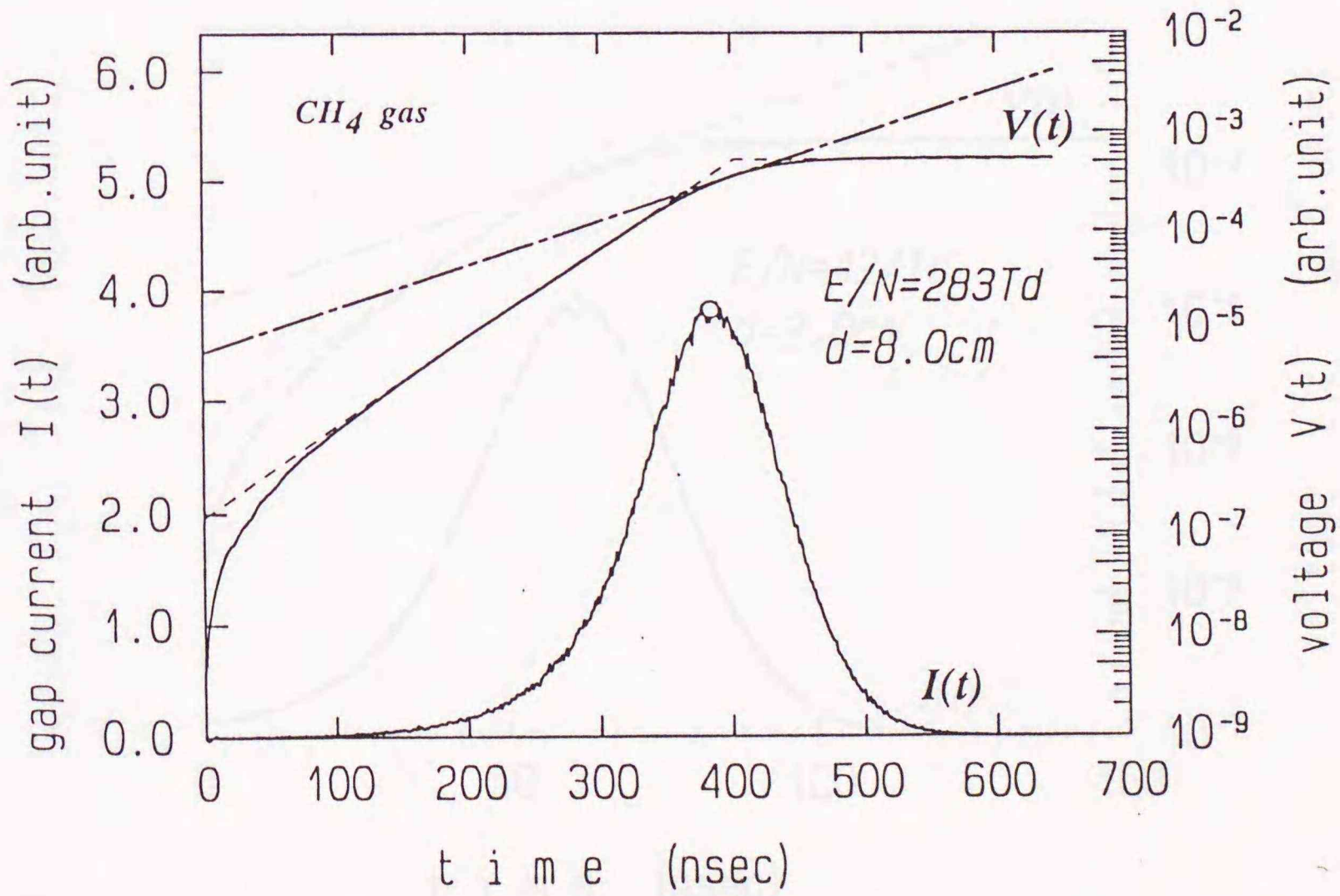


図4.2(h) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=8.0cm

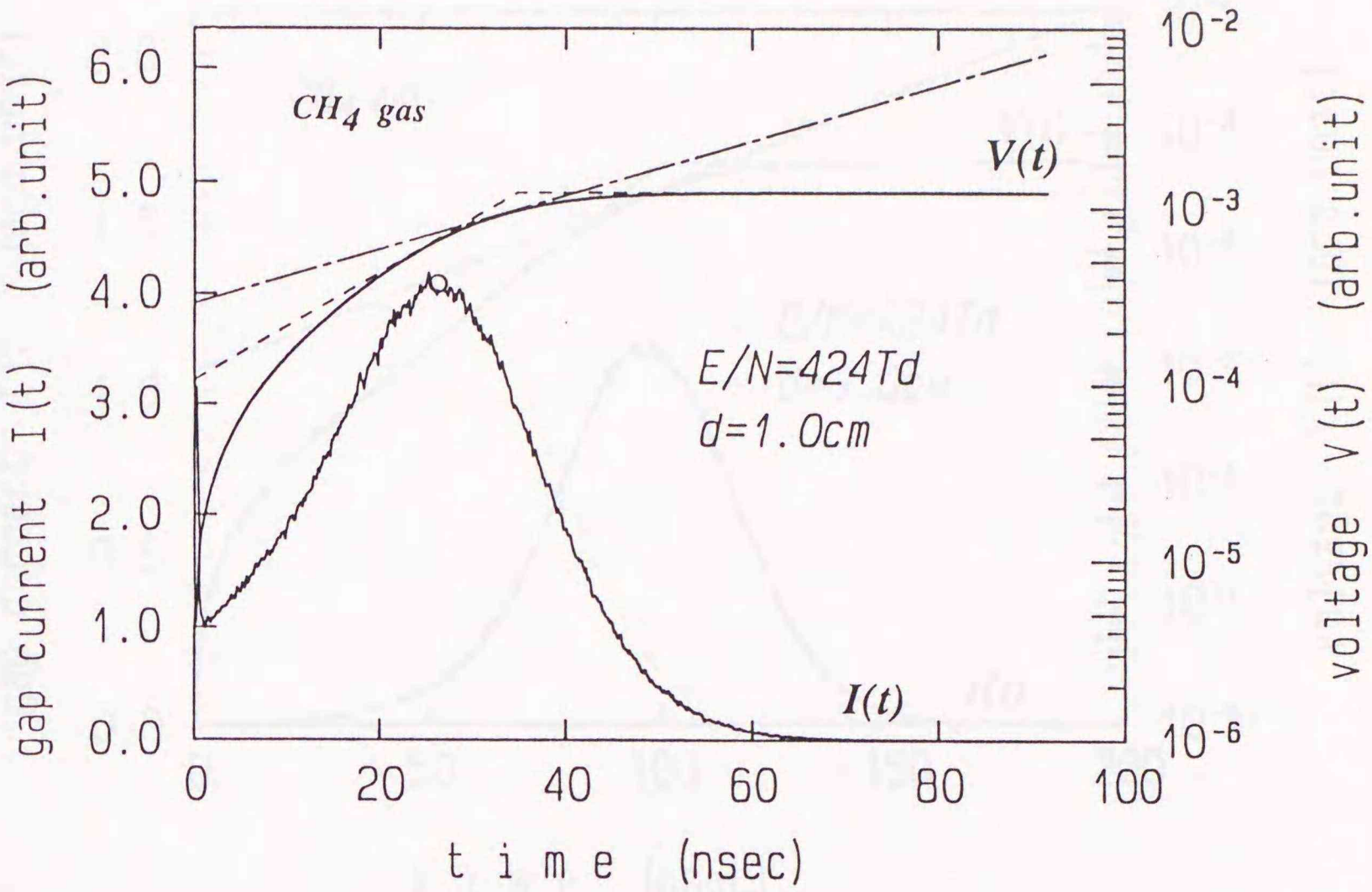


図4.3(a) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=1.0cm

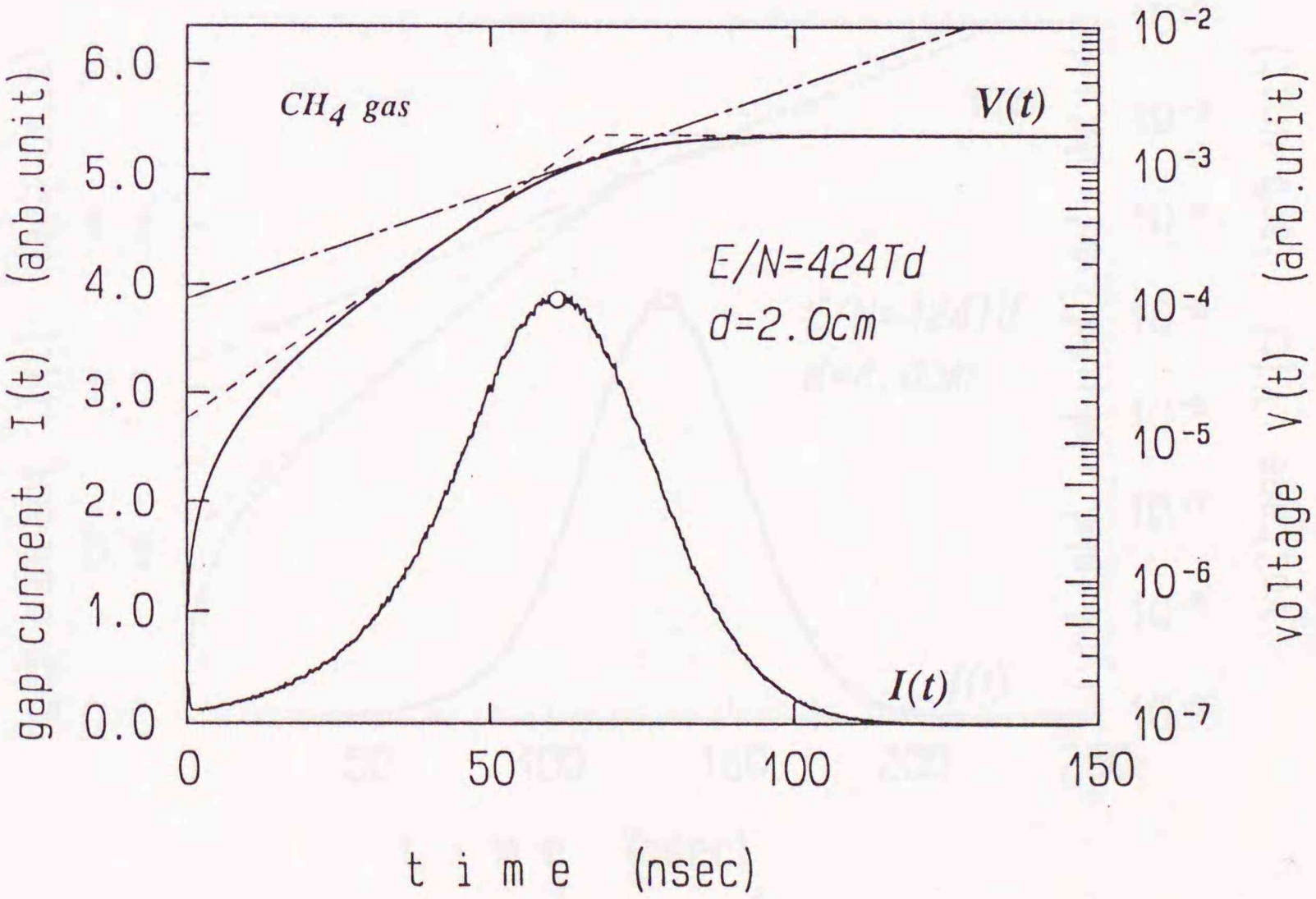


図4.3(b) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=2.0cm

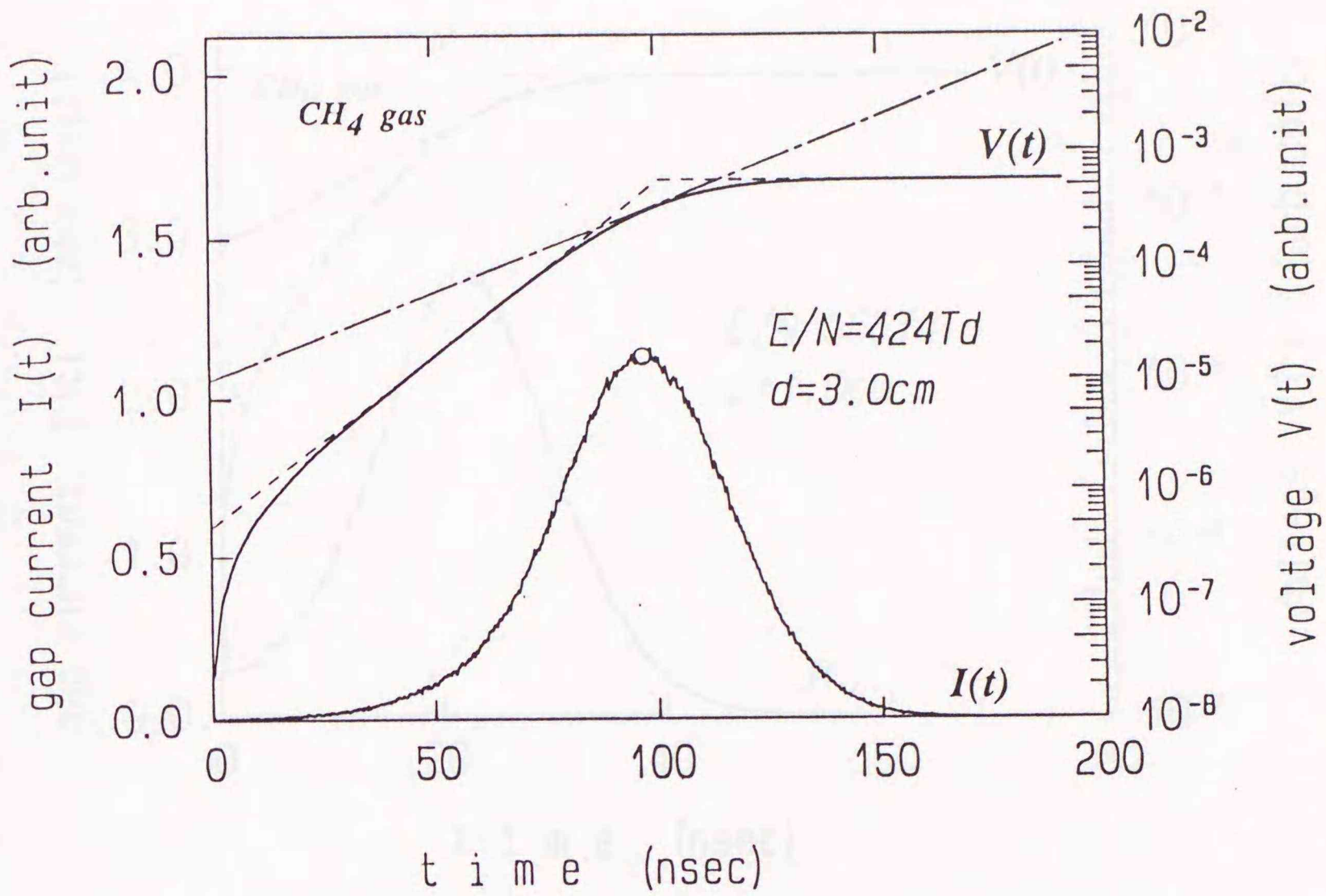


図4.3(c) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

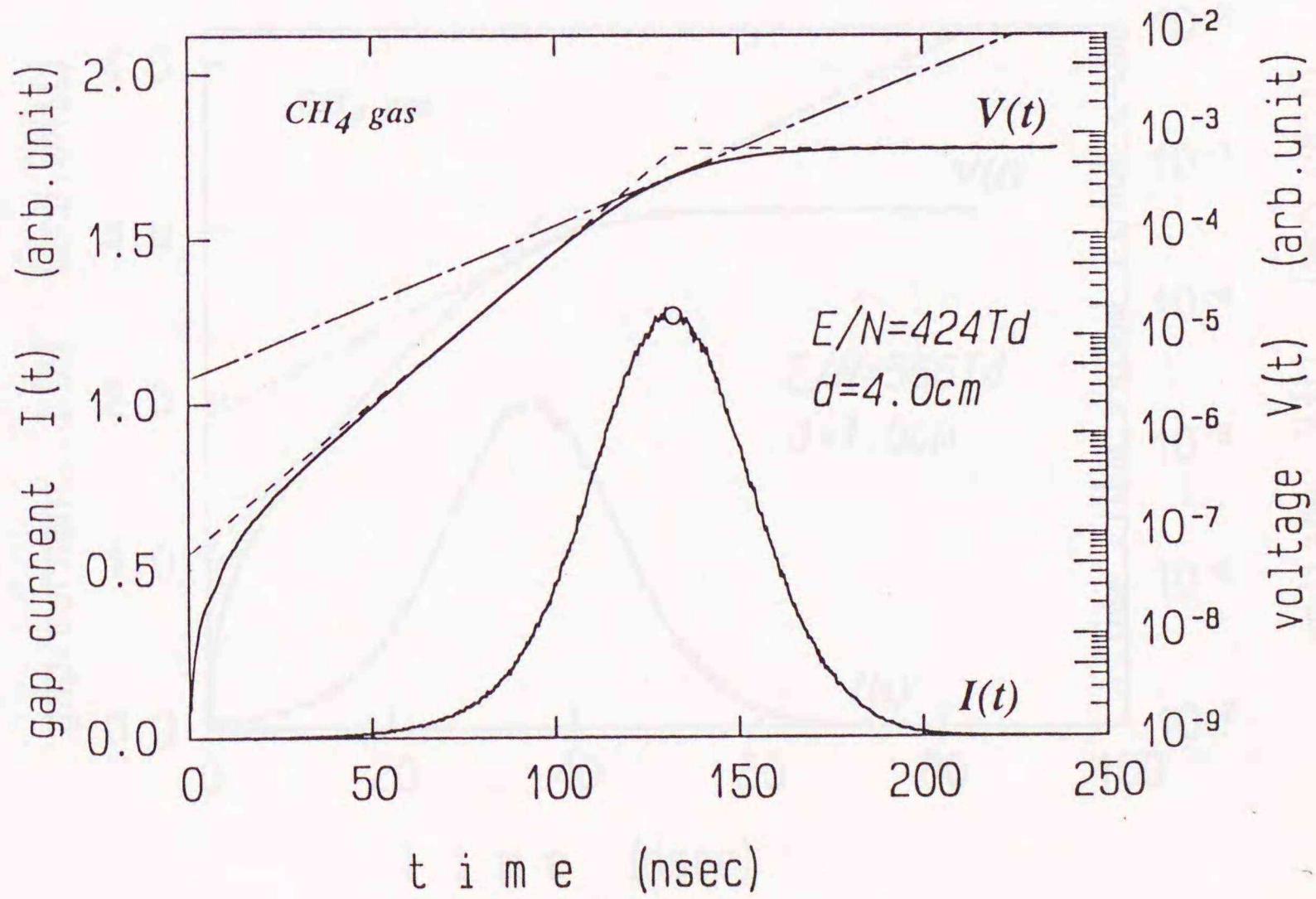


図4.3(d) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=4.0cm

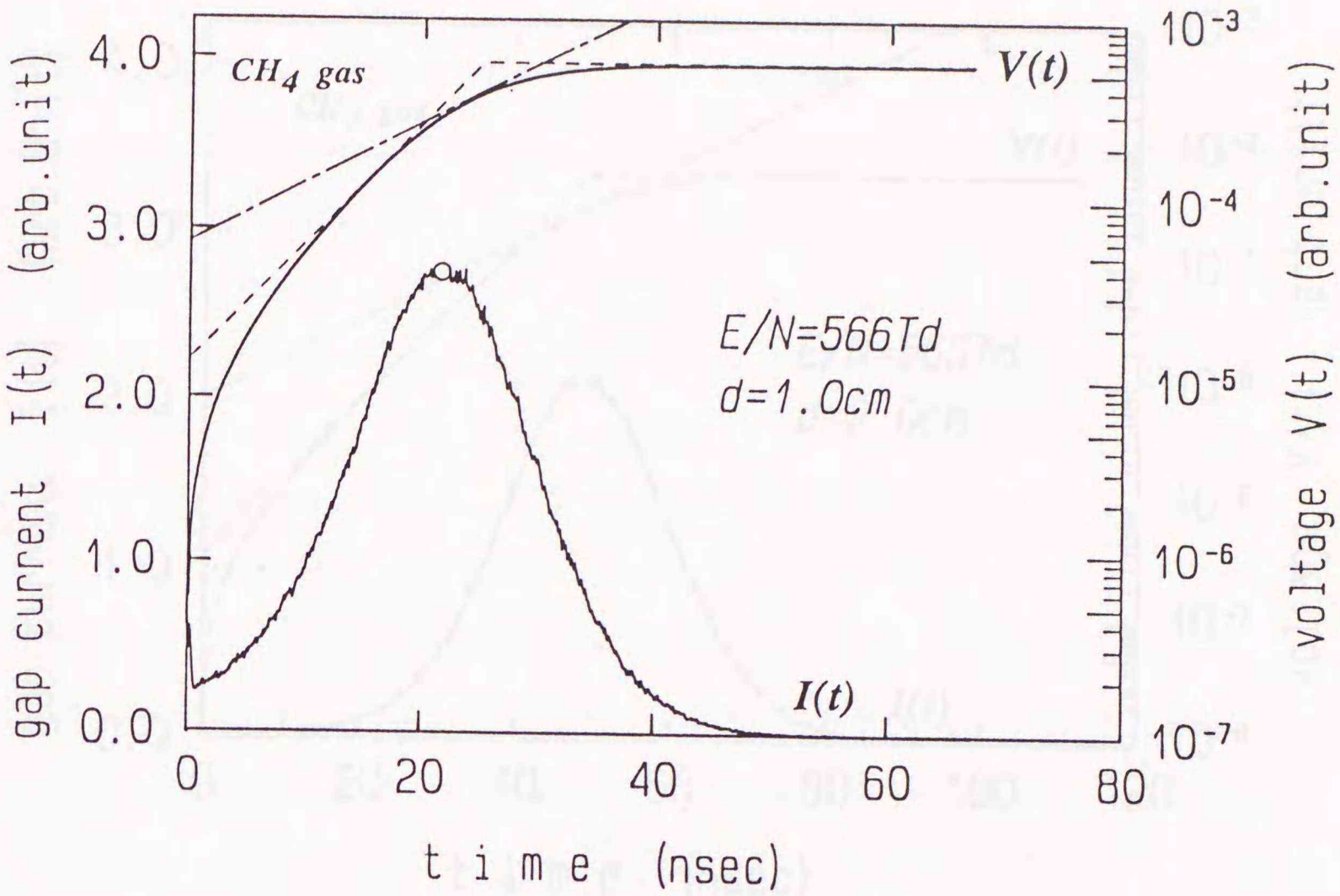


図4.4(a) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=1.0cm

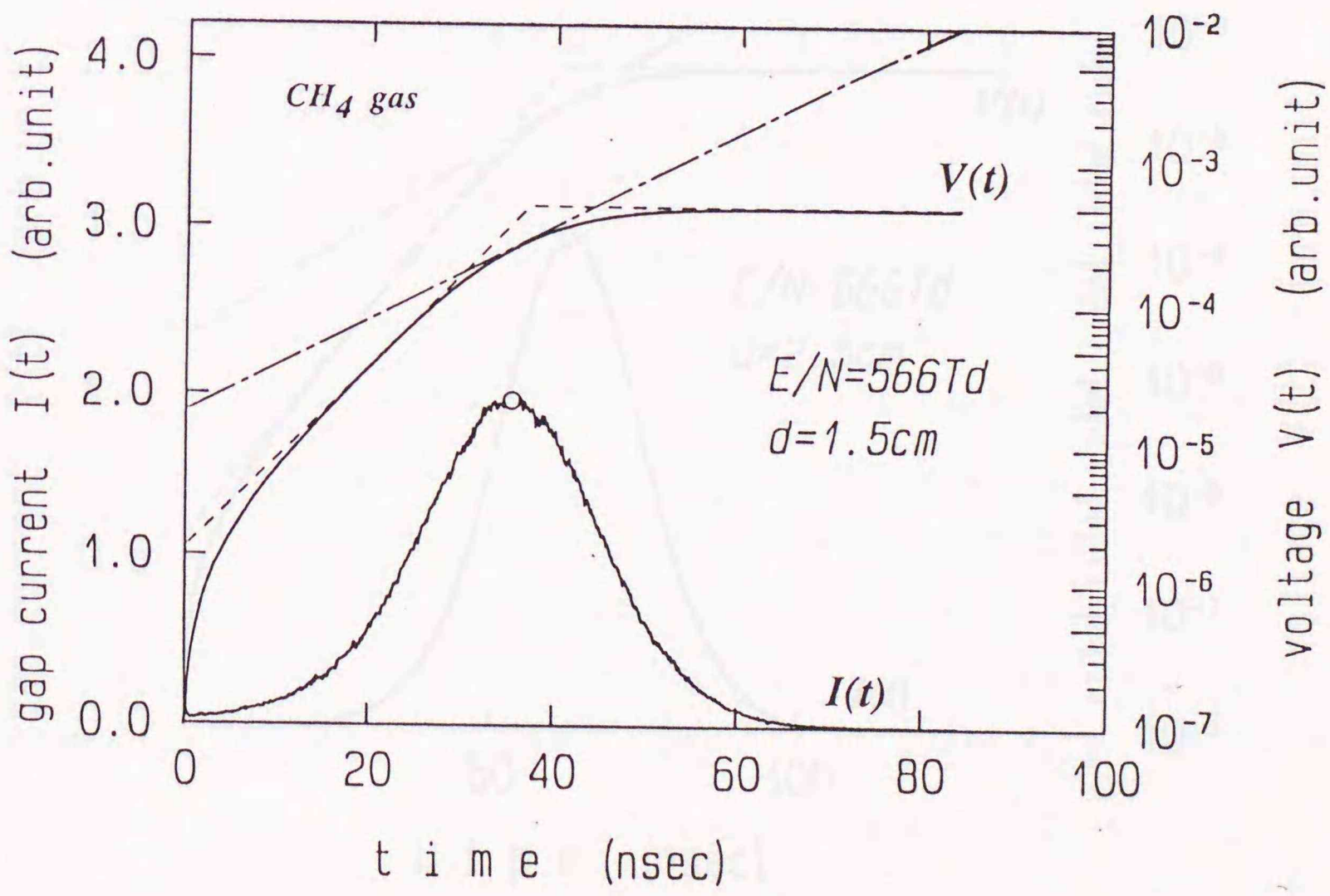


図4.4(b) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=1.5cm

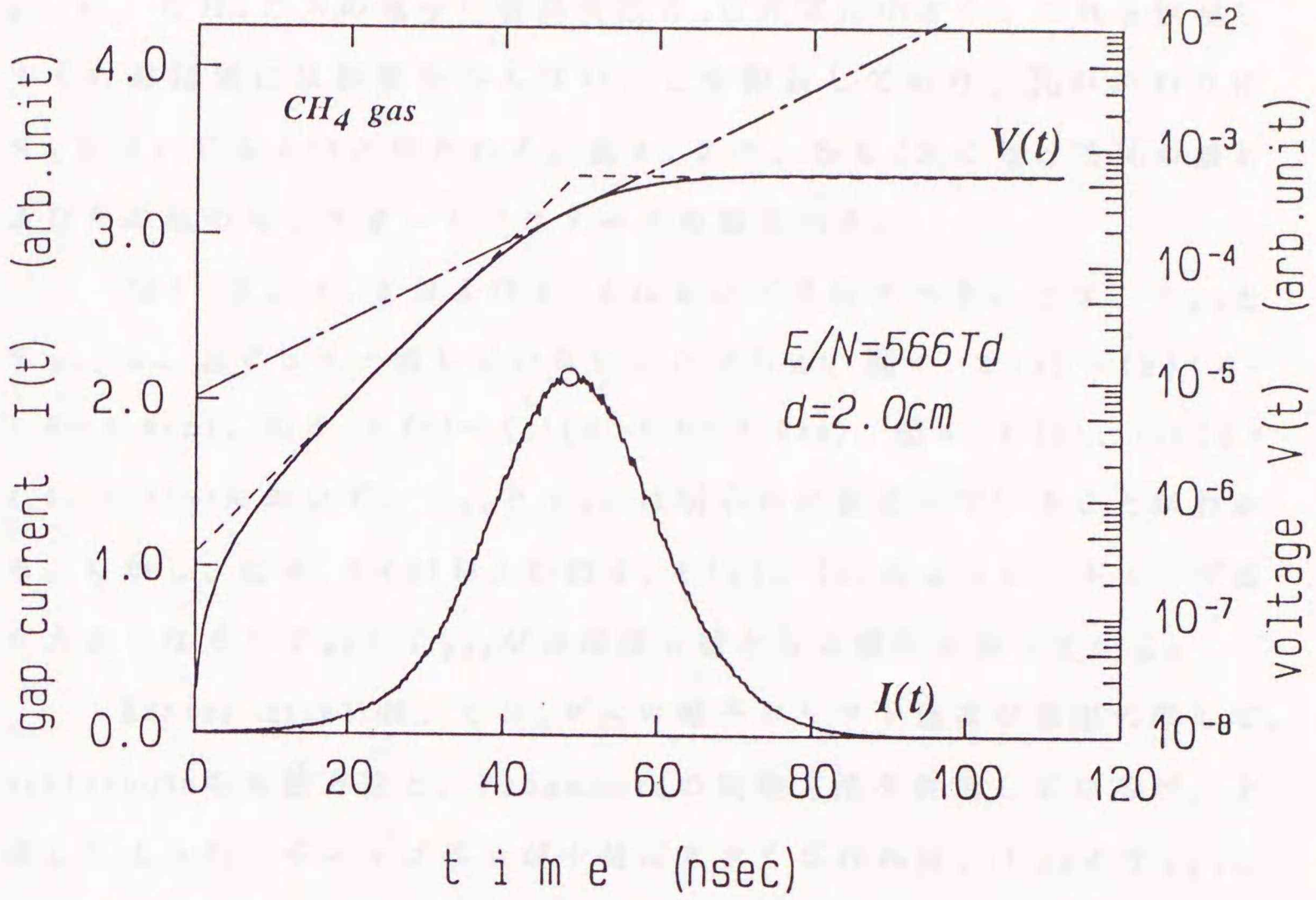


図4.4(c) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

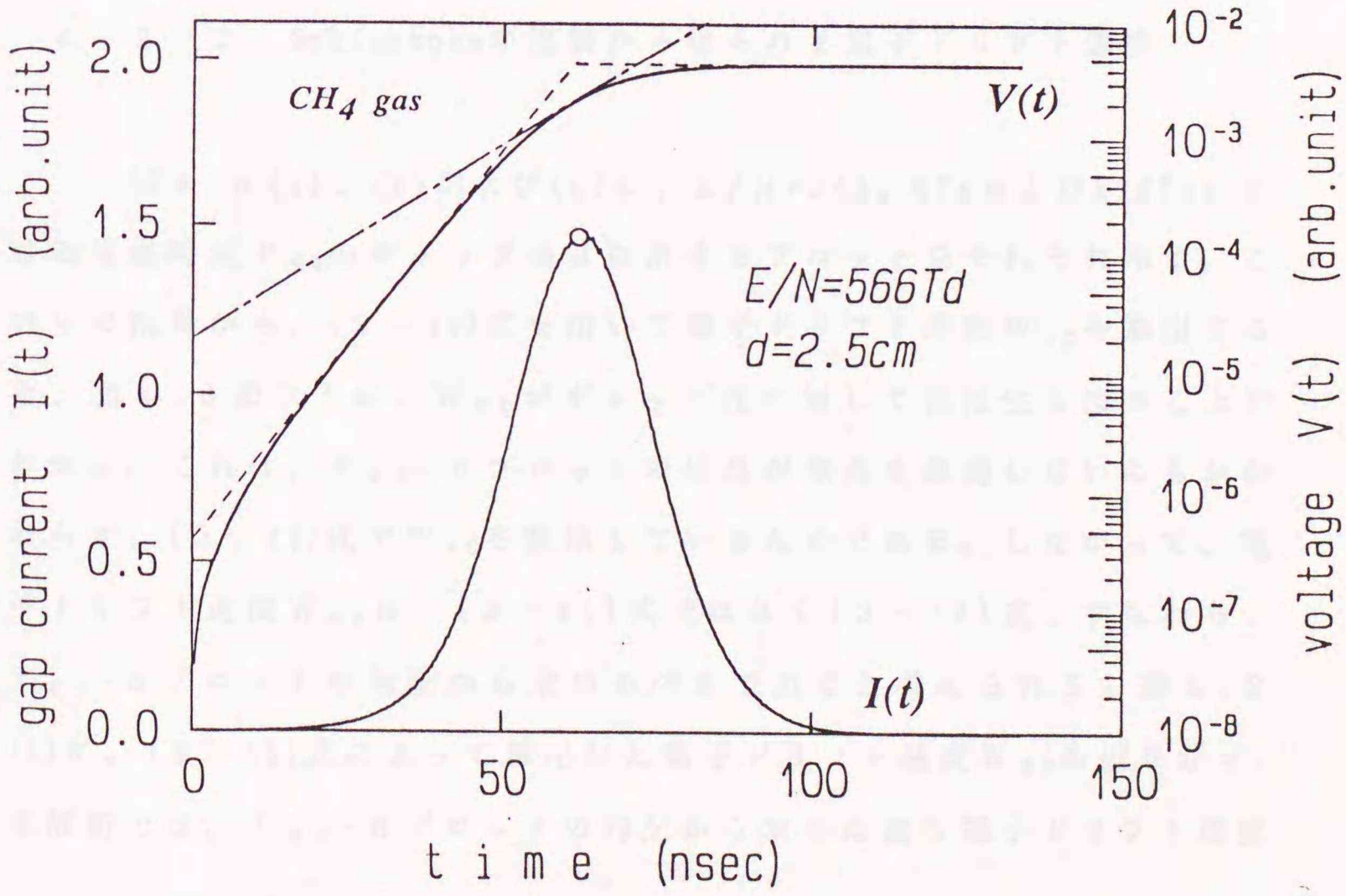


図4.4(d) ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.5cm

al.は、CH_4ガスの電子付着周波数R_aは非常に小さく、これを無視しても計算結果には影響を与えないことを報告しており、$\overline{R_i}$のかわりにR_iを用いてもよいと思われる。表4.2に、各E/Nにおける$\overline{R_i}$の値およびその他の電子スオームパラメータの値を示す。

図4.2、4.3および4.4において注目すべきことは、T_{sc}とT_{FD1}は、必ずしも一致していないことである。図4.2(a)～(h)(d=1.0～8.0cm)、図4.3(a)～(c)(d=1.0～3.0cm)、図4.4(a)、(b)(d=1.0、1.5cm)において、T_{sc}とT_{FD1}は明らかに異なっていることがわかる。しかし、図4.3(d)および図4.4(c)、(d)のように、ギャップ長が大きくなるとT_{sc}とT_{FD1}がほぼ同じ値となる傾向を持っている。

Hunter et al.は、CH_4ガスの電子ドリフト速度の算出に際して、Schlumbohmの実験方法と、Frommholdの実験方法を併用しているが、上述したように、ギャップ長dが十分に大きくなければ、T_{sc}とT_{FD1}とは一致せず、正しい電子ドリフト速度を算出できない可能性がある。

4－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度

図4.5(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424および566Tdにおける経過時間T_{sc}のギャップ長dに対するプロットをそれぞれ示す。これらの結果から、(2－49)式を用いて電子ドリフト速度W_{sc}を算出すると、図4.6のように、W_{sc}がギャップ長に対して依存性を持つことがわかる。これは、T_{sc}-dプロットの延長が原点を通過しないにもかかわらず、(2－49)式でW_{sc}を算出しているためである。したがって、電子ドリフト速度W_{sc}は、(2－49)式ではなく(3－13)式、すなわち、T_{sc}-dプロットの勾配から求めるべきであると考えられる。表4.3(a)に、(3－13)式によって算出した電子ドリフト速度W_{sc}の値を示す。本解析では、T_{sc}-dプロットの勾配から求めた値を電子ドリフト速度

表4.2　CH_4ガス中の電子スオームパラメータ

換算電界 E／N (Td)	実効電離周波数 $\overline{R_i}$ (μsec^{-1})	理論電子ドリフト速度 (cm/μsec)				縦方向拡散係数 D_L ($cm^2/\mu sec$)	横方向拡散係数 D_T ($cm^2/\mu sec$)	平均エネルギー $\overline{\varepsilon}$ (eV)	実効電離係数 $\overline{\alpha}$ (cm^{-1})
		Vd	Wv	Wr	Wm				
283	20.50	17.7	18.34	20.6	18.8	0.823	0.945	6.246	1.02
424	70.09	24.4	26.24	32.3	27.3	1.10	0.991	7.442	2.35
566	151.7	31.1	34.21	45.4	35.7	1.42	1.11	8.721	3.69

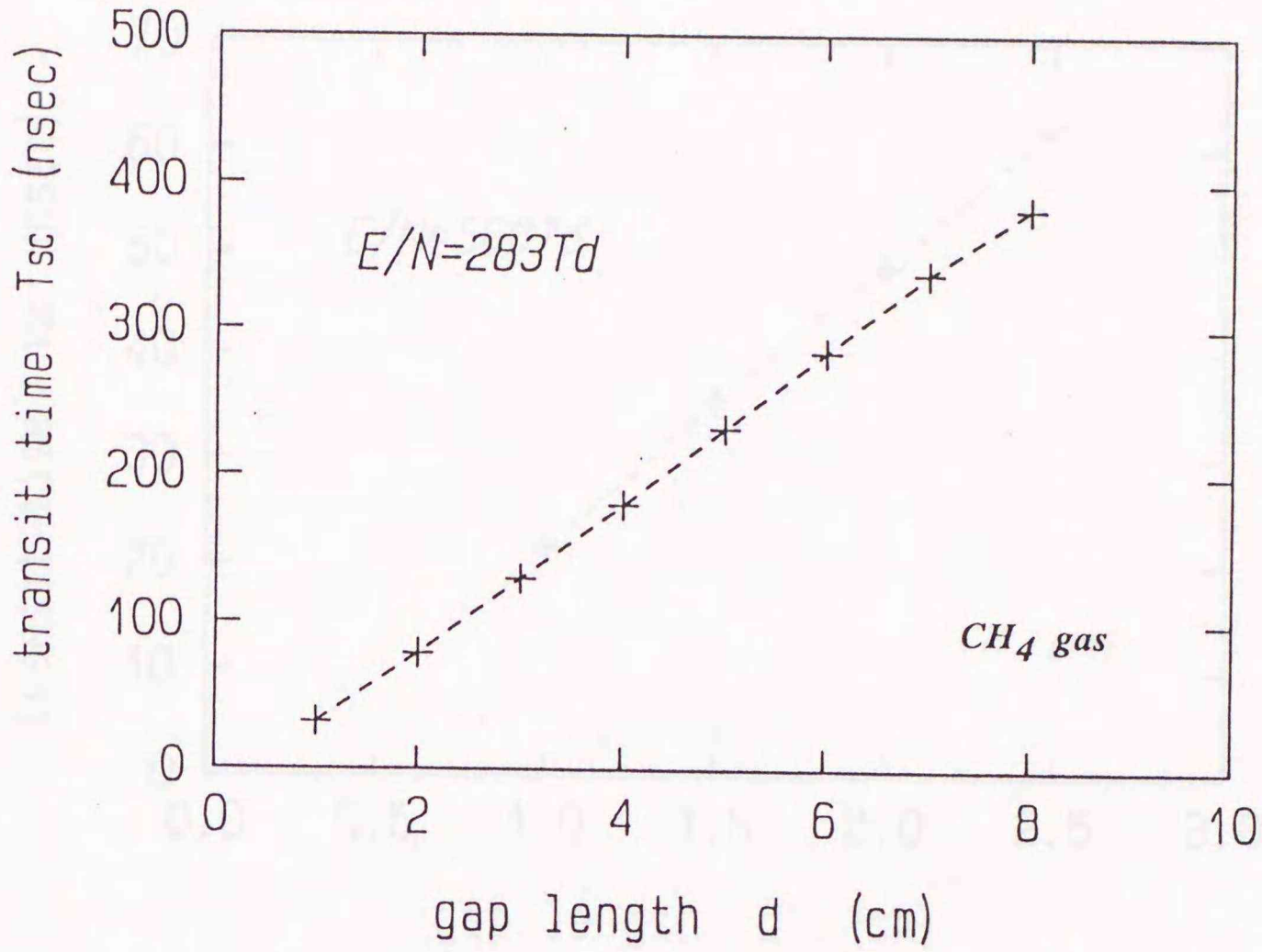


図4.5(a) 経過時間T_{sc} E/N=283Td

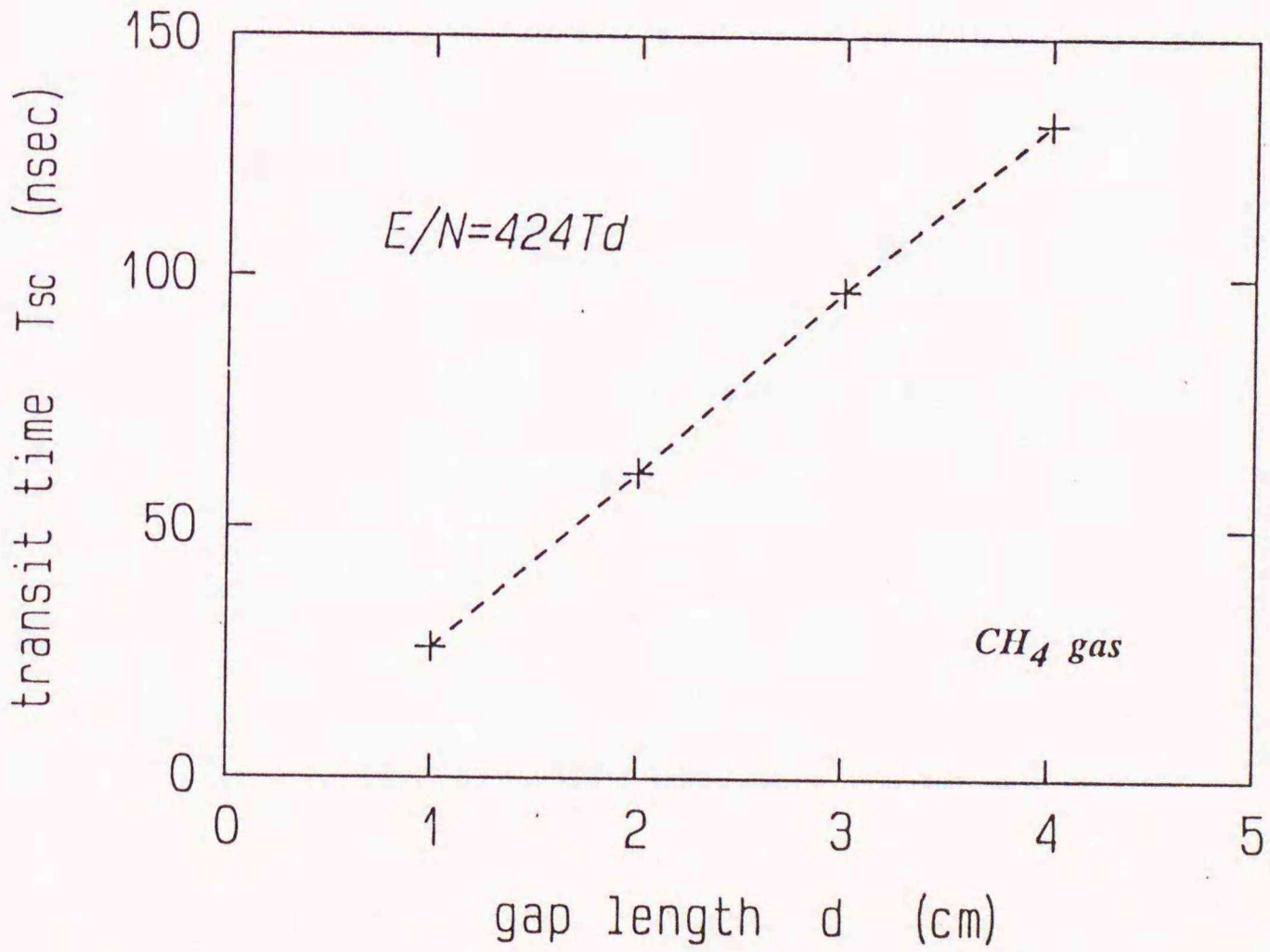


図4.5(b) 経過時間T_{sc} E/N=424Td

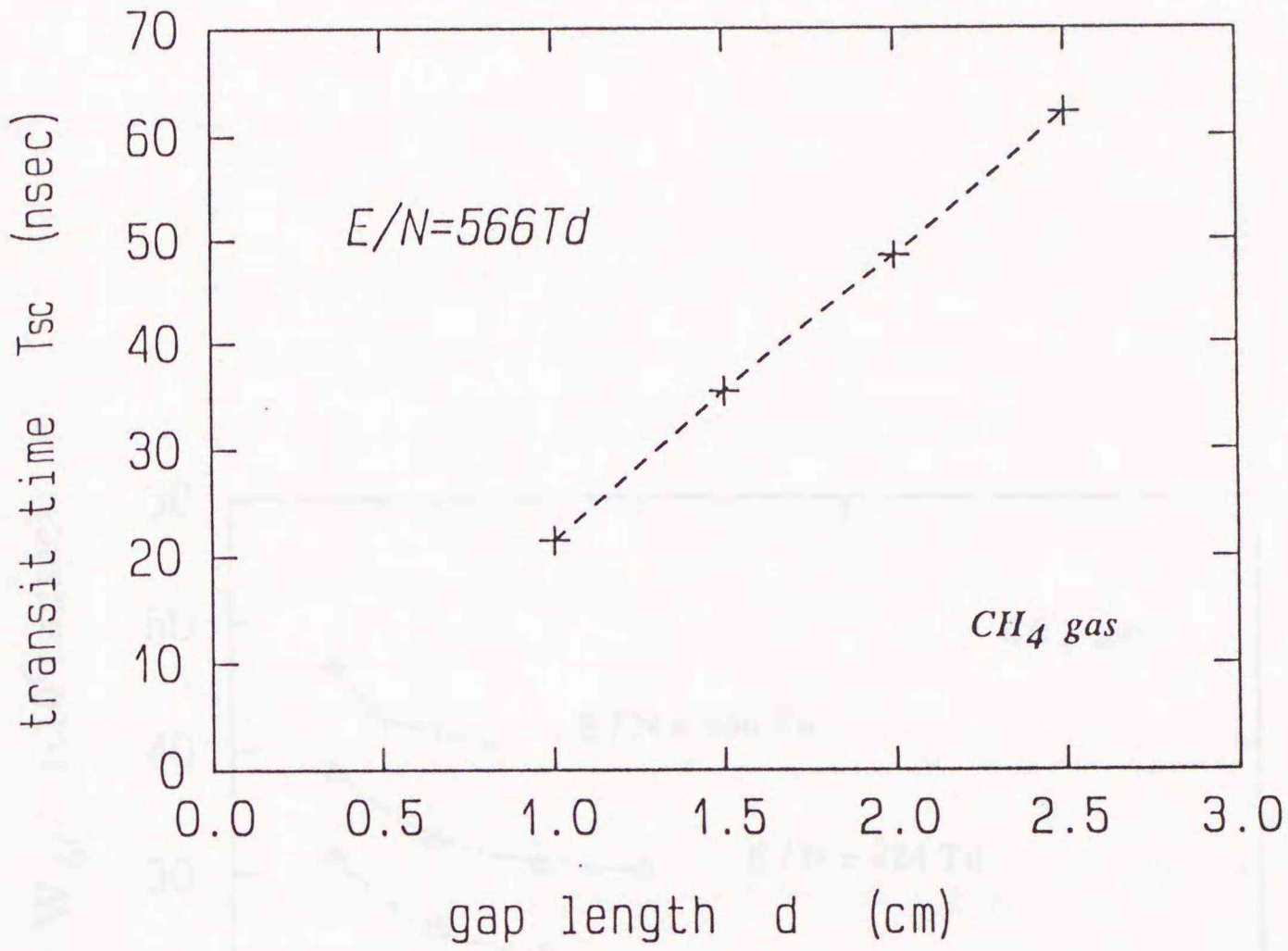


図４．５（ｃ） 経過時間Ｔ$_{sc}$ E/N=566Td

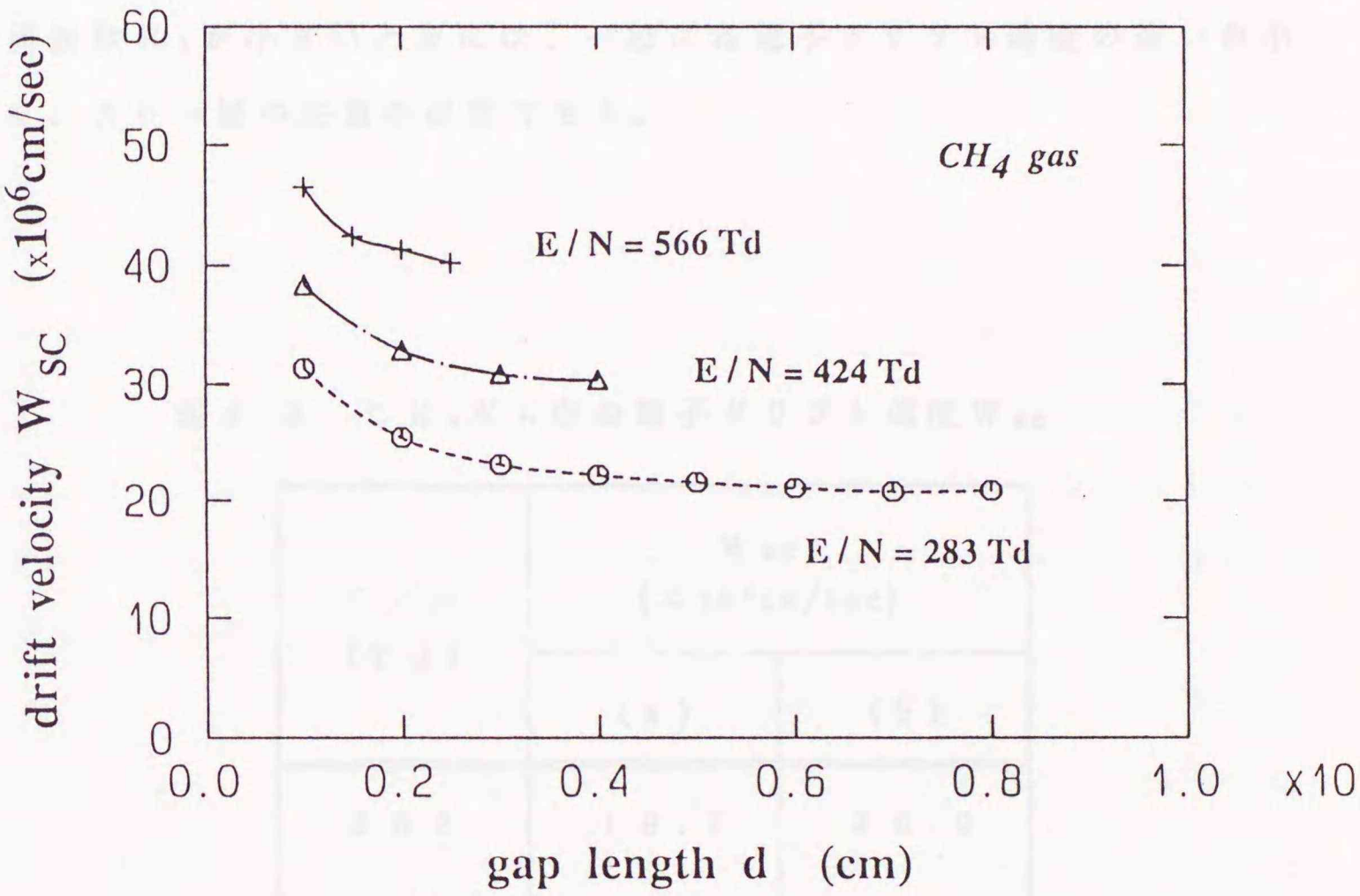


図4．6　電子ドリフト速度 W_{SC}

W_{sc}として採用する。

表4.3(b)は、図4.6でギャップ長依存性が小さくなっている各E/Nにおける最大のギャップ長のときのW_{sc}の値である。表4.3において、(a)と(b)を比較すると、E/N=566Tdにおいて最大で8.6%の違いがある。(a)と(b)が近い値であるE/N=283Tdにおいても、6.1%の違いがある。同じ電子ドリフト速度でも、算出法の僅かな違いにより結果が異なるので、解析を行なう上では十分な注意が必要である。特に、電離周波数R_iが小さいときには、一般に各電子ドリフト速度の違いが小さく、より一層の注意が必要である。

表4.3　CH_4ガス中の電子ドリフト速度W_{sc}

E/N (Td)	W_{sc} ($\times 10^6$cm/sec)	
	(a)	(b)
283	19.7	20.9
424	28.3	30.4
566	37.0	40.2

(a):(3-13)式から

(b):(2-49)式から

4－3－3　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度

図4.7(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424および566Tdにおける経過時間T_{FD1}およびT_{FD2}のギャップ長dに対するプロットをそれぞれ示す。＊印はT_{FD1}(Method-Ⅰ)、＋印はT_{FD2}(Method-Ⅱ)を示している。(2－50)式を用いて、T_{FD1}およびT_{FD2}からW_{FD1}およびW_{FD2}をそれぞれ求めると図4.8となる。図4.6に示したW_{SC}に比べると小さいが、W_{FD1}およびW_{FD2}においてもギャップ長に対する依存性が見られる。また、W_{FD1}とW_{FD2}は、ギャップ長が極めて小さい時を除くとほぼ一致することがわかる。

W_{SC}の場合と同様に、W_{FD1}およびW_{FD2}においてギャップ長依存性が見られるのは、T_{FD1}-dあるいはT_{FD2}-dプロットの延長が、原点を通らないためであり、ギャップ長依存性がW_{SC}の場合と比べて小さいのは、T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの延長が原点から近い点を通るためである。したがって、ギャップ長依存性によるW_{FD}の決定の曖昧さを排除するために、(2－50)式ではなく、(3－14)式のようにT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの勾配からW_{FD1}をW_{FD2}を決定するべきであると考えられる。(3－14)式を用いて算出したW_{FD1}およびW_{FD2}の値をを表4.4(a)および(b)にそれぞれ示す。(a)と(b)の値はよく一致しており、T_{FD}の決定法の違いよる電子ドリフト速度への影響はないと考えられる。また、表4.4(c)および(d)は、それぞれ図4.8において、一定値部分を平均して求めたW_{FD1}およびW_{FD2}の値である。(c)および(d)の値も、ギャップ長依存性の見られない部分での平均値であるので、(a)および(b)の値と比較しても、大きな違いは見られない。本解析では、T_{FD1}-dプロットの勾配から算出した値を、電子ドリフト速度W_{FD}の値として採用した。

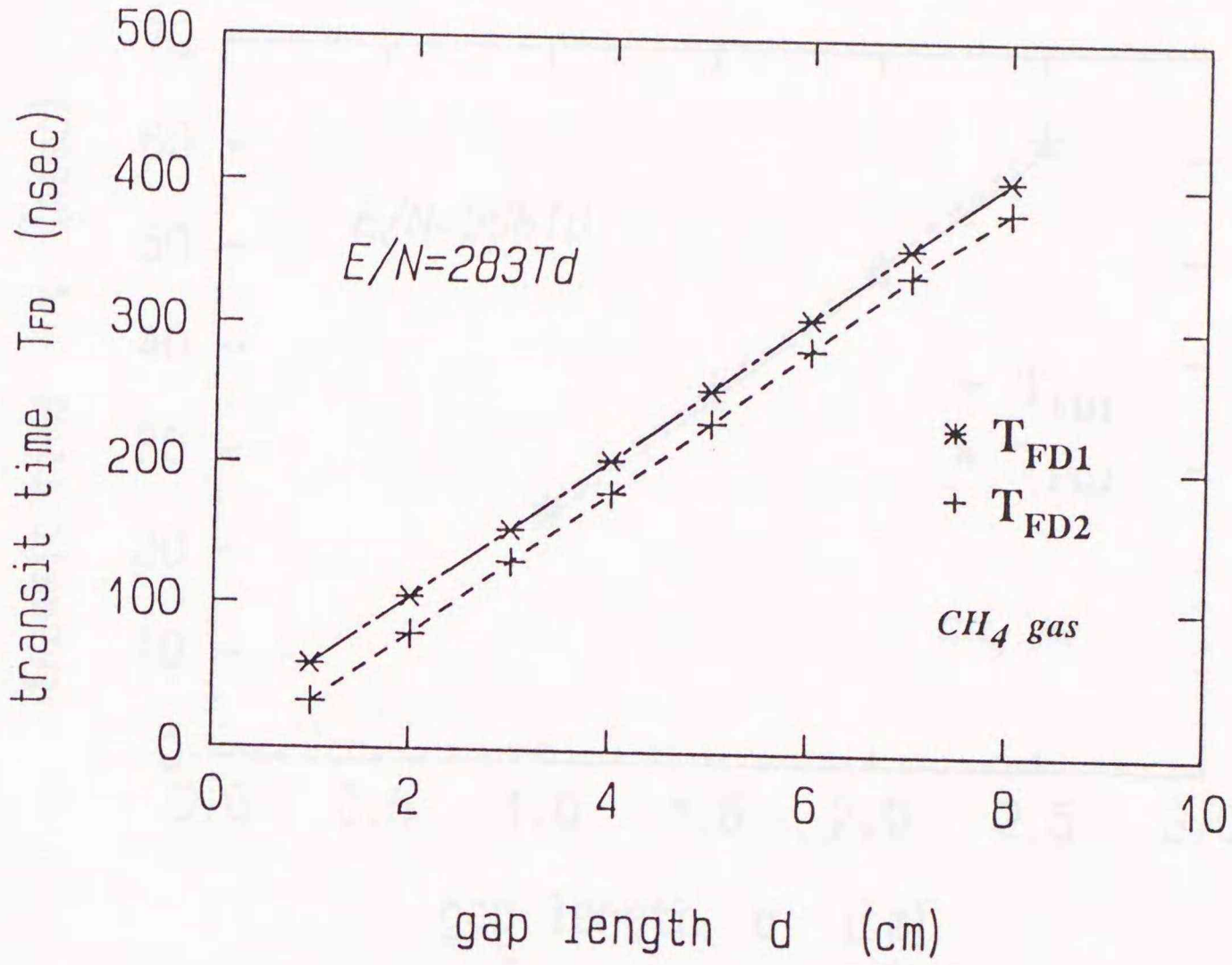


図4.7(a) 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=283Td

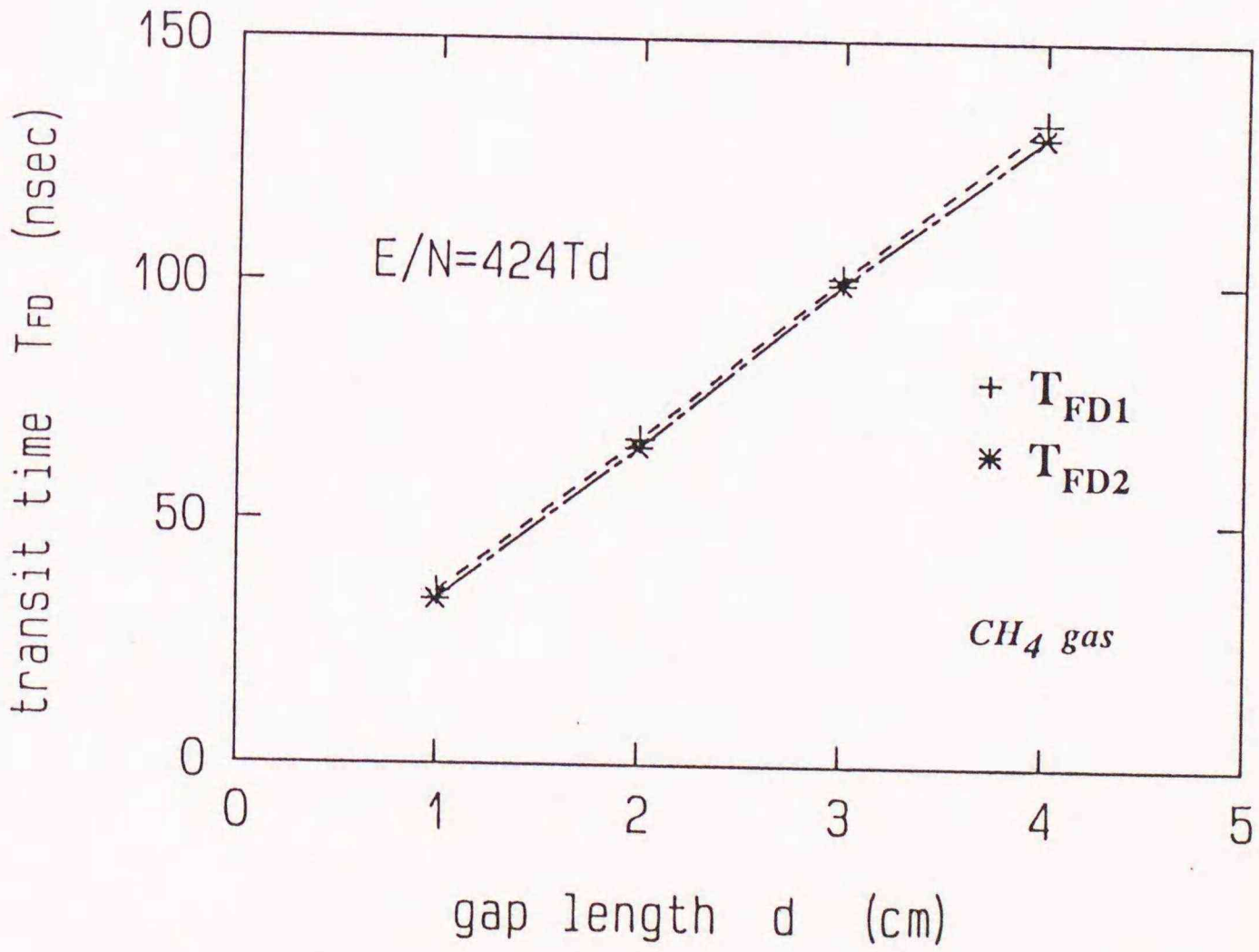


図4.7(b) 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=424Td

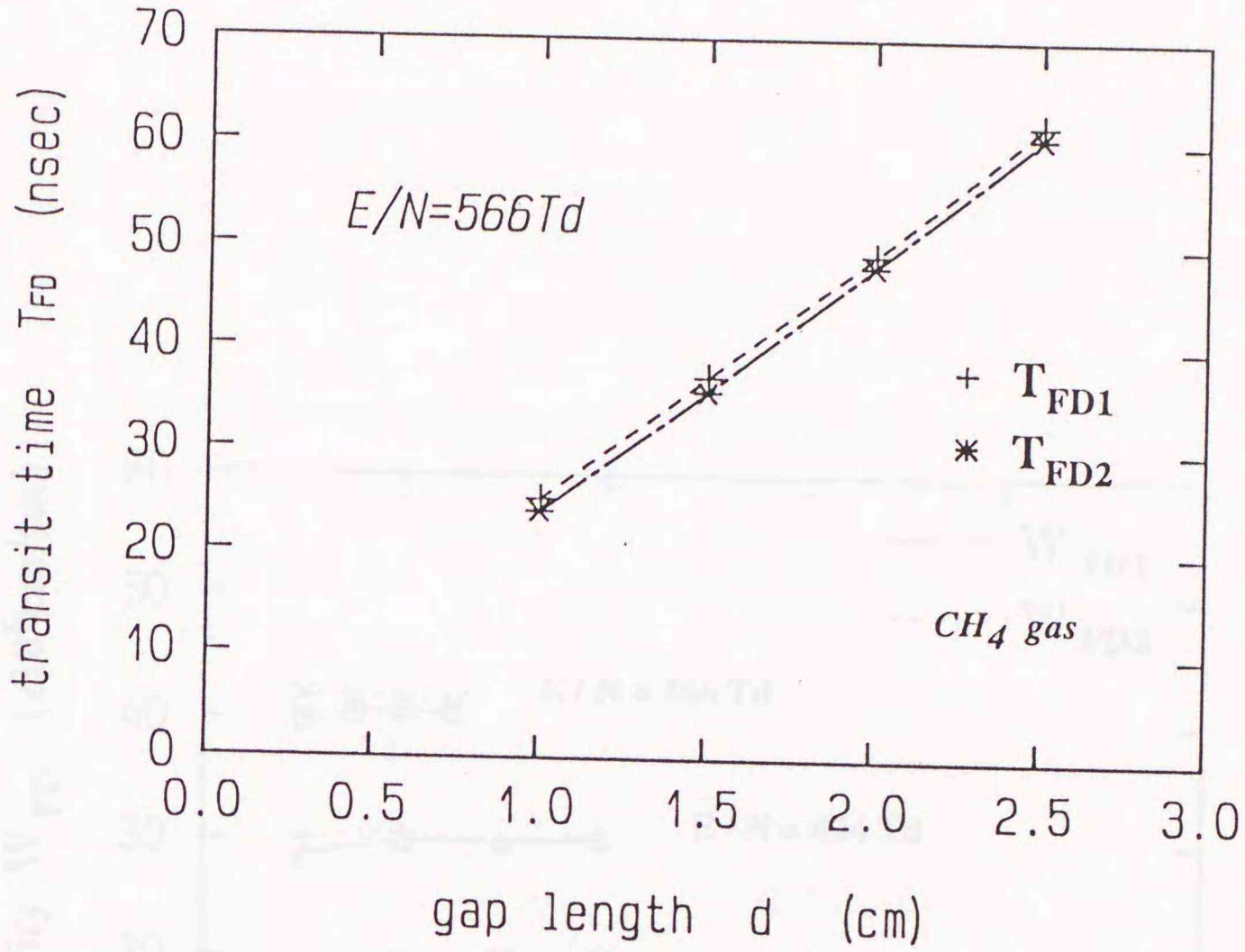


図４．７（ｃ） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=566Td

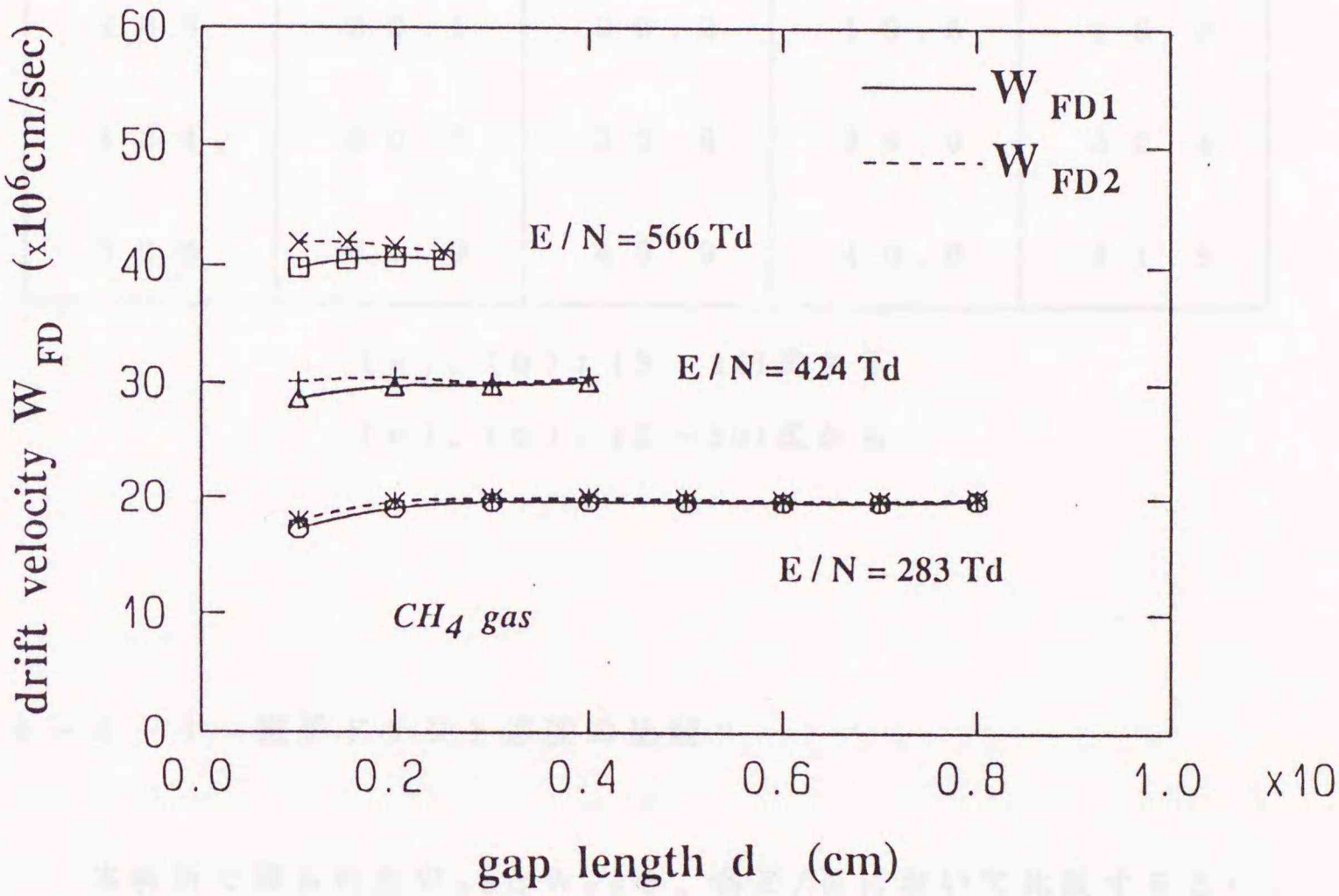


図4．8　電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}

表４．４　CH_4ガス中の電子ドリフト速度W_{FD}（×10^6cm/sec）

E／N	(a)	(b)	(c)	(d)
(Td)	W_{FD1}	W_{FD2}	W_{FD1}	W_{FD2}
283	20.1	20.2	19.6	19.9
424	30.5	30.8	29.9	30.4
566	41.0	40.9	40.6	41.6

(a)、(b)：(3－14)式から

(c)、(d)：(2－50)式から

4－3－4　電子ドリフト速度の比較

本解析で得られたW_{SC}とW_{FD}を、各E/Nにおいて比較すると・、E/N=283Tdにおいて2.0%、424Tdにおいて7.2%、566Tdにおいて9.8%の違いがあり、E/Nが高くなり電離衝突による電子増倍が大きくなるにしたがって、違いが顕著になる傾向をもっている。これらの点から、W_{SC}とW_{FD}は、本質的に異なる電子ドリフト速度であると考えられる。

図４．９は、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmとW_{SC}およびW_{FD}の比較を示す。理論電子ドリフト速度は、図４．１に示した電子衝突断面積を用い、電極を考慮しない自由空間を仮定したモン

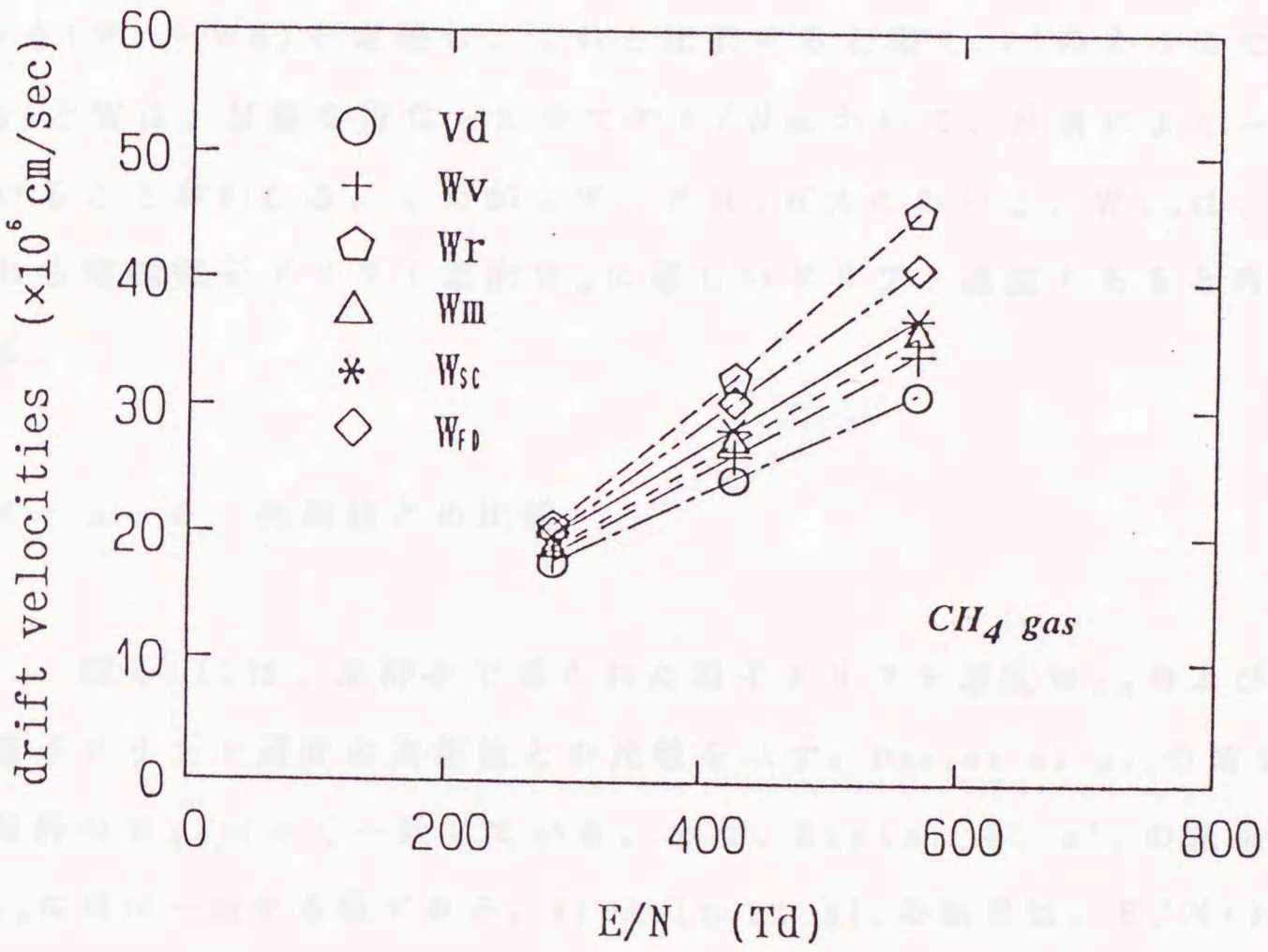


図4．9　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}と理論電子ドリフト速度の比較

テカルロシミュレーションによって得られた値である。計算を行なった全てのE/Nにおいて、W_{sc}とW_{FD}は、いずれの理論電子ドリフト速度にも一致していないことがわかる。また、不一致の傾向は、E/Nが高くなるにしたがって、一層顕著になっている。しかし、図4.10に示すように、W_{sc}はW_mに比較的近い値をもち、約9.6%大きな値であり、E/Nが増加しても、W_{sc}とW_mの差はほとんど一定である。また、W_{FD}は、W_rとW_mのほぼ中間に位置しており、(3-15)式のように、$W=\frac{1}{2}(W_r+W_m)$を定義し、これと比較すると図4.11のようになる。W_{FD}とWは、計算を行なった全てのE/Nにおいて、非常によく一致していることがわかる。したがって、CH_4ガスにおいて、W_{FD}は、Wすなわち理論電子ドリフト速度W_wに等しいドリフト速度であると考えられる。

4-3-5 実測値との比較

図4.12は、本解析で得られた電子ドリフト速度W_{sc}およびW_{FD}と電子ドリフト速度の実測値との比較を示す。Davies et al.の結果が、本解析のW_{sc}によく一致している。また、Hunter et al.の結果は、W_{FD}にほぼ一致する値である。Al-Amin et al.の結果は、E/N=283付近ではW_{sc}と一致しているが、E/Nが高くなるにしたがって、W_{sc}よりも僅かに大きな値となっていることがわかる。Schlumbohmが報告した近似から求めた電子ドリフト速度は、W_{sc}よりも小さい値である。また、他の実測値との間にも大きな違いが見られる。

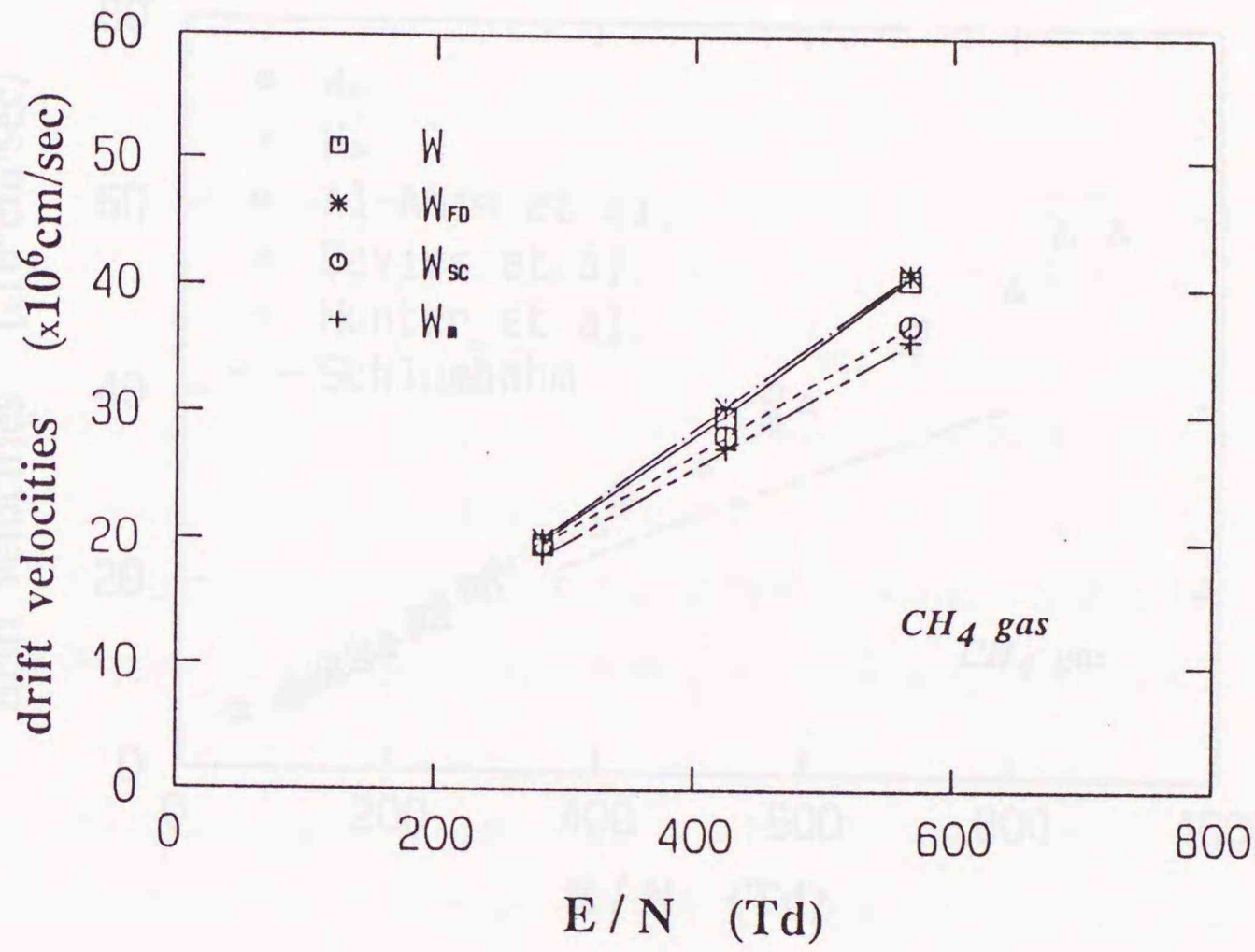


図4.10　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}、WおよびWm

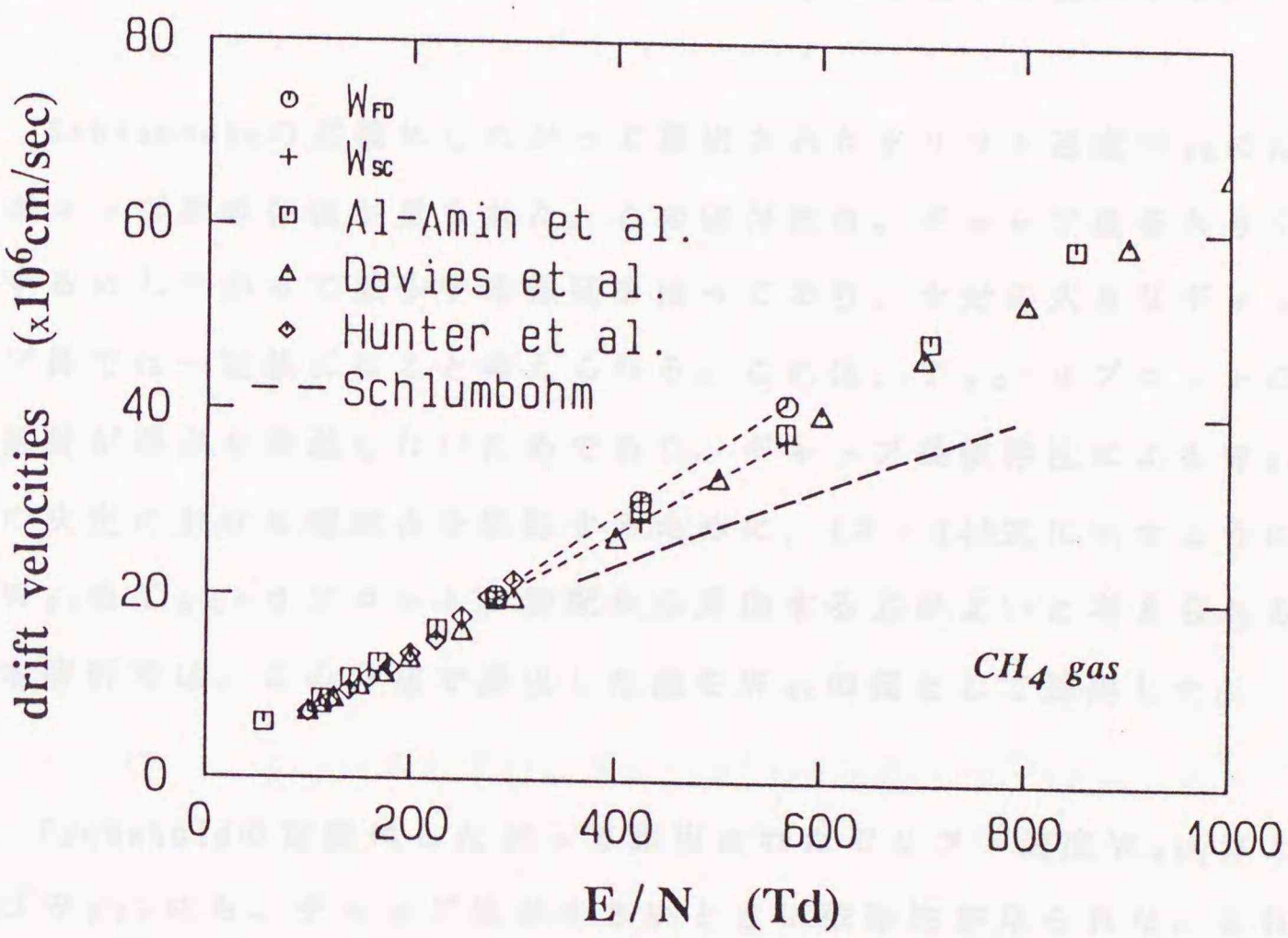


図4.11 実測値との比較

4－4　結言

CH_4ガスに対して、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を計算した。また、W_{SC}およびW_{FD}を、同一の電子衝突断面積を用いて求めた理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較し、対応関係の検討を行なった。その結果を以下に要約する。

（1）Schlumbohmの定義にしたがって算出されたドリフト速度W_{SC}には、ギャップ長依存性が見られた。この依存性は、ギャップ長を大きくするにしたがって減少する傾向を持っており、十分に大きなギャップ長では一定値になると考えられる。これは、T_{SC}-dプロットの延長が原点を通過しないためであり、ギャップ長依存性によるW_{SC}の決定における曖昧さを排除するために、(3－14)式に示すようにW_{SC}をT_{SC}-dプロットの勾配から算出する方がよいと考えられる。本解析では、この方法で算出した値をW_{SC}の値として採用した。

（2）Frommholdの定義にしたがって算出されたドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}にも、ギャップ長が小さいときに依存性が見られた。これは、T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの延長が原点をわずかにずれて通過するためである。この依存性によるW_{FD1}およびW_{FD2}の決定における曖昧さを排除するために、(3－14)式によりW_{FD1}およびW_{FD2}をT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの勾配からそれぞれ算出した。また、W_{FD1}とW_{FD2}は、非常によく一致しており、Method-IおよびIIのいずれの方法でT_{FD}を求めても、ほとんど同じ結果が得られることがわかった。本解析では、T_{FD1}-dプロットの勾配から算出した値をW_{FD}の値として採用した。

（3） 本解析で得られたW_{SC}とW_{FD}は、計算を行なった全てのE/Nにおいて異なる値であり、不一致の傾向はE/Nが高くなるほど顕著になっている。したがって、W_{SC}とW_{FD}は、本質的に異なる電子ドリフト速度であると考えられる。

（4） W_{SC}とW_{FD}を、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較すると計算を行なった全てのE/Nにおいて、いずれにも一致しないことがわかった。しかし、W_{FD}は$W=\frac{1}{2}(Wr+Wm)$と非常によく一致した。またW_{SC}は、Wmに近いが僅かに大きな値を持つ電子ドリフト速度であることがわかった。

（5） W_{SC}およびW_{FD}と、Al-Amin et al.、Hunter et al.、Davies et al.の実測値およびSchlumbohmの報告している近似式から求めた値の比較を行なった。その結果、W_{SC}は、Davies et al.の実測値とよく一致し、W_{FD}は、Hunter et al.の実測値とほぼ一致した。Al-Amin et al.の実測値は、E/N=283Td付近ではW_{SC}と一致しているが、E/Nが高くなるにしたがって、W_{SC}よりも僅かに大きな値となっている。また、Schlumbohmの近似式から求めた電子ドリフト速度は、W_{SC}、W_{FD}および実測値のいずれにも一致しないことがわかった。

参考文献

[1] L.Frommhold 1959 Z.Phys. 156 pp.144-58

[2] H.Schlumbohm 1965 Z.Phys. 182 pp.317-27

[3] S.A.J.Al-Amin, H.N.Kucukapci and J.Lucas
1985 J.Phys.D: Appl.Phys. 18 pp.1781-94

[4] S.R.Hunter, J.G.Carter and L.G.Christophorou
1986 J.Appl.Appl.Phys. 60 pp.24-35

[5] D.K.Davies, L.E.Kline and W.E.Bies
1989 J.Appl.Phys. 65 pp.3311-23

[6] H.T.Saelee, J.Lucas and J.W.Limbeek
1977 Solid State and Electron Devices 4 pp.111-6

[7] H.N.Kücükarpci and J.Lucas
1979 J.Phys.D: Appl.Phys. 12 pp.2123-38

[8] Y.Ohmori, K.Kitamori, M.Shimozuma and H.Tagashira
1986 J.Phys.D: Appl.phys. 19 pp.437-455

第５章　Ａｒガスに対する解析

５－１　緒言

Ａｒガスは、蛍光灯に代表される放電灯の封入ガスとして用いられてきたが、最近では、プラズマを用いたＣＶＤ、エッチング、スパッタリング、放電励起エキシマレーザなどのバッファガスとして注目されている。電子衝突断面積では、運動量移行断面積の低エネルギー部にラムザウアータウンゼント極小を持つことが特徴である。

Ａｒガス中の電子ドリフト速度を現実の実験から求めて報告した例としては、Herreng et al.(1943)[1]、Errett et al.(1951)[2]、Jager and Otto (1962)[3]、Brambring et al.(1964)[4]、Nielsen et al.(1969)[5]、Kücükarpaci et al.(1981)[6]、Hunter et al.(1988)[7]、などがある。これらの中で報告されている電子ドリフト速度は、Brambring et al.とKücükarpaci et al.の結果を除くと、低Ｅ/Ｎ領域における測定である。最も高いＥ/Ｎまで測定を行なっているのは、Kucukarpaci et al.で、600Td付近までの電子ドリフト速度が報告されている。

本章では、電離増倍が顕著であるＥ/Ｎ=283、424Tdおよび566Tdにおいて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{sc}およびW_{FD}を算出するとともに、W_{sc}およびW_{FD}を、同一の電子衝突断面積を用いて求めた理論電子ドリフト速度Ｖd、Ｗv、ＷrおよびＷmと比較し、対応関係を検討する。

5－2　シミュレーション条件

図5.1に計算に使用したArガスの電子衝突断面積のセットを示す。このセットは、運動量移行σ_m、励起衝突σ_{ex}、準安定励起状態への励起σ_{met}および電離衝突σ_iの合計4種類の断面積で構成されている。また、σ_mはSuzuki et al.(1990)[8]、σ_{ex}はSawada et al.(1989)[9]、σ_{met}はMason et al.(1987)[10]、σ_iはSakai et al.(1972)[11]の報告から引用して用いている。

Arガスのシミュレーションにおいて、ガス圧pを1Torr一定として、電離衝突による電子増倍が存在するE/N=283、424および566Tdにおいて、ギャップ長を変化させて計算を行なった。また、Arガスの全衝突断面積σ_Tも、CH_4ガスと同様に、簡単な形の式で表わすことができないので、微小時間⊿tごとに、(2－12)式右辺の積分を台形公式を用いて計算し、乱数から決定される左辺の値と比較することによって、電子の飛行時間を決定した。表5.1に、初期電子数、微小時間⊿tおよびサンプリング間隔の値を示す。

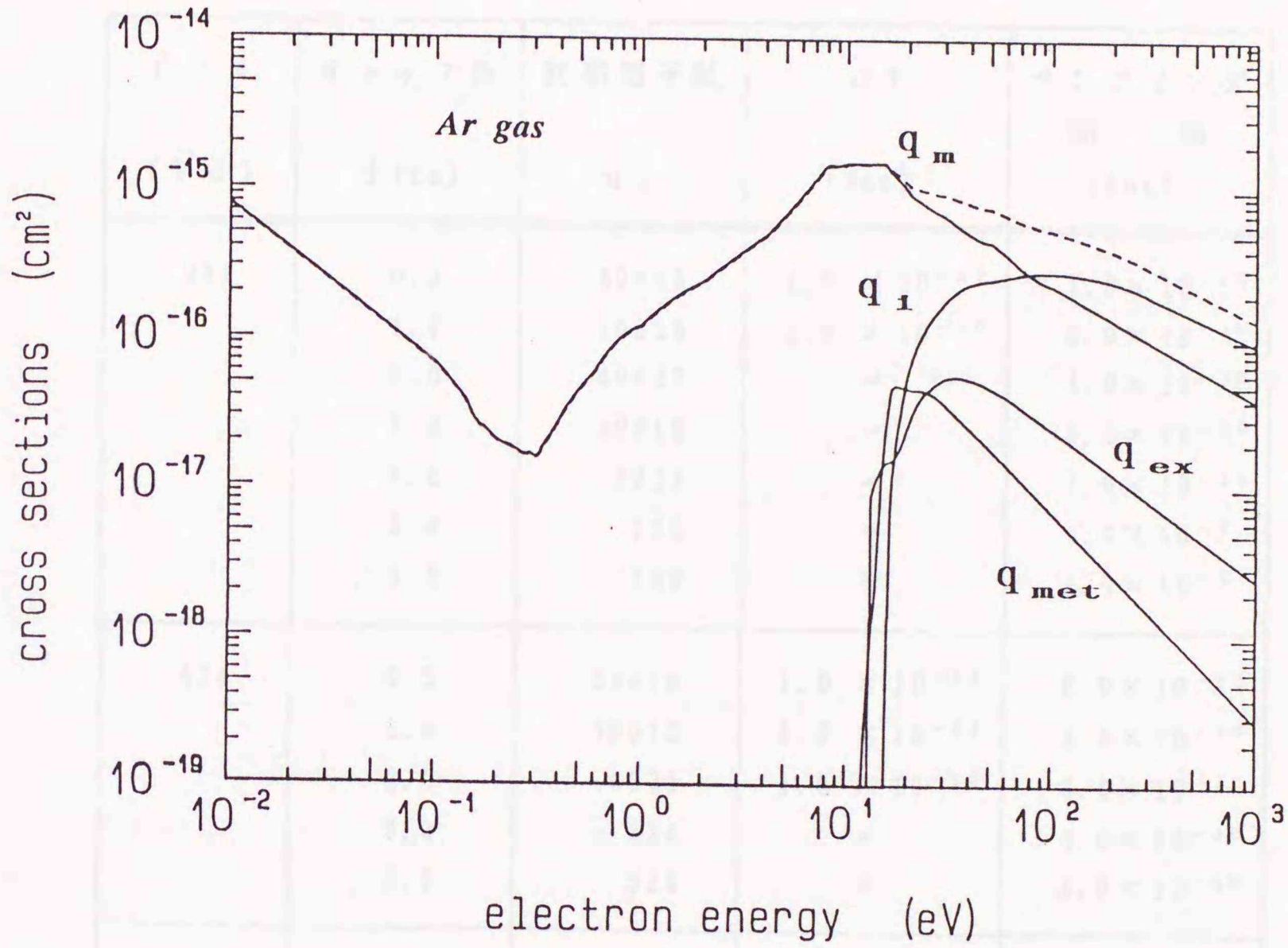


図５．１　Ａｒガスの電子衝突断面積

表５．１　計算条件（Ａｒガス）

Ｅ／Ｎ (Ｔｄ)	ギャップ長 d (cm)	初期電子数 n_0	⊿ｔ (sec)	サンプリング間隔 (sec)
283	0.5	50016	1.0×10^{-11}	1.0×10^{-10}
	1.0	50016	1.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}
	2.0	40020	〃	4.0×10^{-10}
	3.0	10018	〃	5.0×10^{-10}
	4.0	2024	〃	7.0×10^{-10}
	5.0	150	〃	1.0×10^{-9}
	5.5	150	〃	1.0×10^{-9}
424	0.5	50016	1.0×10^{-11}	8.0×10^{-11}
	1.0	30012	5.0×10^{-11}	1.5×10^{-10}
	2.0	6021	1.0×10^{-10}	3.0×10^{-10}
	3.0	324	〃	4.0×10^{-10}
	3.5	324	〃	4.0×10^{-10}
566	0.5	50016	1.0×10^{-11}	6.0×10^{-11}
	1.0	30012	5.0×10^{-11}	1.5×10^{-10}
	1.5	6021	1.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}
	2.0	5017	〃	〃
	2.5	98	1.25×10^{-10}	2.5×10^{-10}

5－3　解析結果

5－3－1　計算結果

図5.2、5.3および5.4にE/N=283、424および566Tdにおけるギャップ電流I(t)および電圧V(t)の時間変化をそれぞれ示す。ギャップ電流I(t)の時間変化において、○印がピークを示している。t=0から電流のピークまでが経過時間T_{sc}となる。電圧V(t)のセミログプロットにおいて、破線はR_iの傾きを持つ直線と、logV(t)=const.の延長を示している。t=0からこれら2つの直線の交点までの時間がT_{FD1}(Method-I)となる。また、一点鎖線は、$\frac{1}{2}R_i$の傾きを持つ直線であり、これとlogV(t)-t曲線の交点の時刻からT_{FD2}(Method-II)が求まる。ここで用いたR_iは、電極を考慮しない自由空間を仮定したモンテカルロシミュレーションによって得られた値である。表5.2に、Arガスの電子スオームパラメータを示す。

図5.2(a)～(d)(d=0.5～3.0cm)、図5.3(a)～(c)(d=0.5～2.0cm)および図5.4(a)～(c)(d=0.5～1.5cm)において、logV(t)-t曲線のIIの部分において、破線とlogV(t)-t曲線の接している部分は少なく、電離による電子増倍が十分に行なわれる前、すなわち、$\exp(R_i \cdot t) \gg t$が満足される前に、電子スオームの先頭の電子が電極に到達し、吸収されていることが考えられる。また、T_{sc}とT_{FD1}($\simeq T_{FD2}$)の関係について見ると、ギャップ長を大きくするにしたがって、T_{sc}はT_{FD1}($\simeq T_{FD2}$)に近づく傾向があり、この傾向はモデルガスおよびCH_4ガスにおいても見られた。Arガスでは、さらにギャップ長を大きくすると、図5.2(g)、図5.3(d)および図5.4(e)のように、$T_{sc} > T_{FD1}$($\simeq T_{FD2}$)となっている。

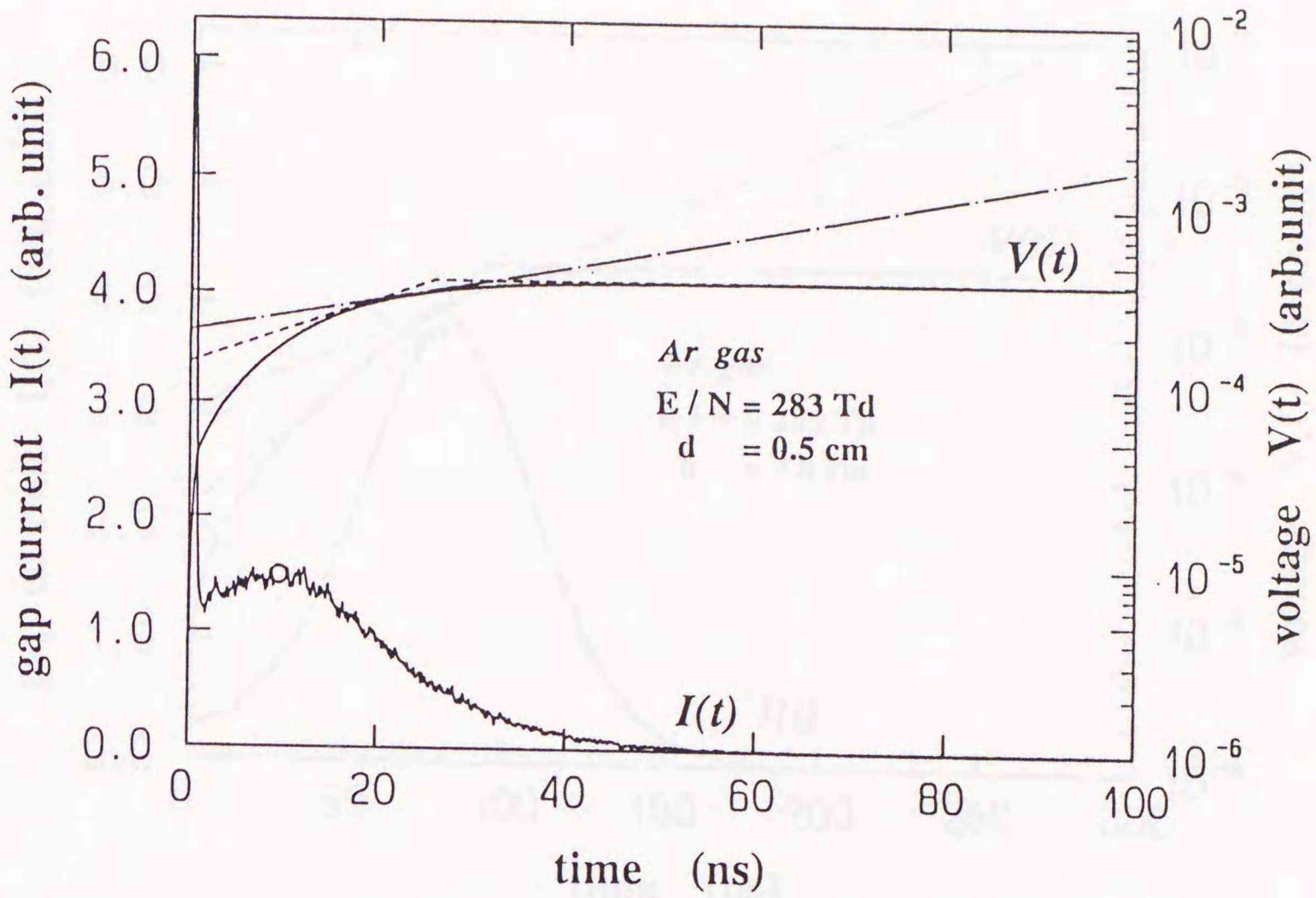


図５．２（ａ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=0.5cm

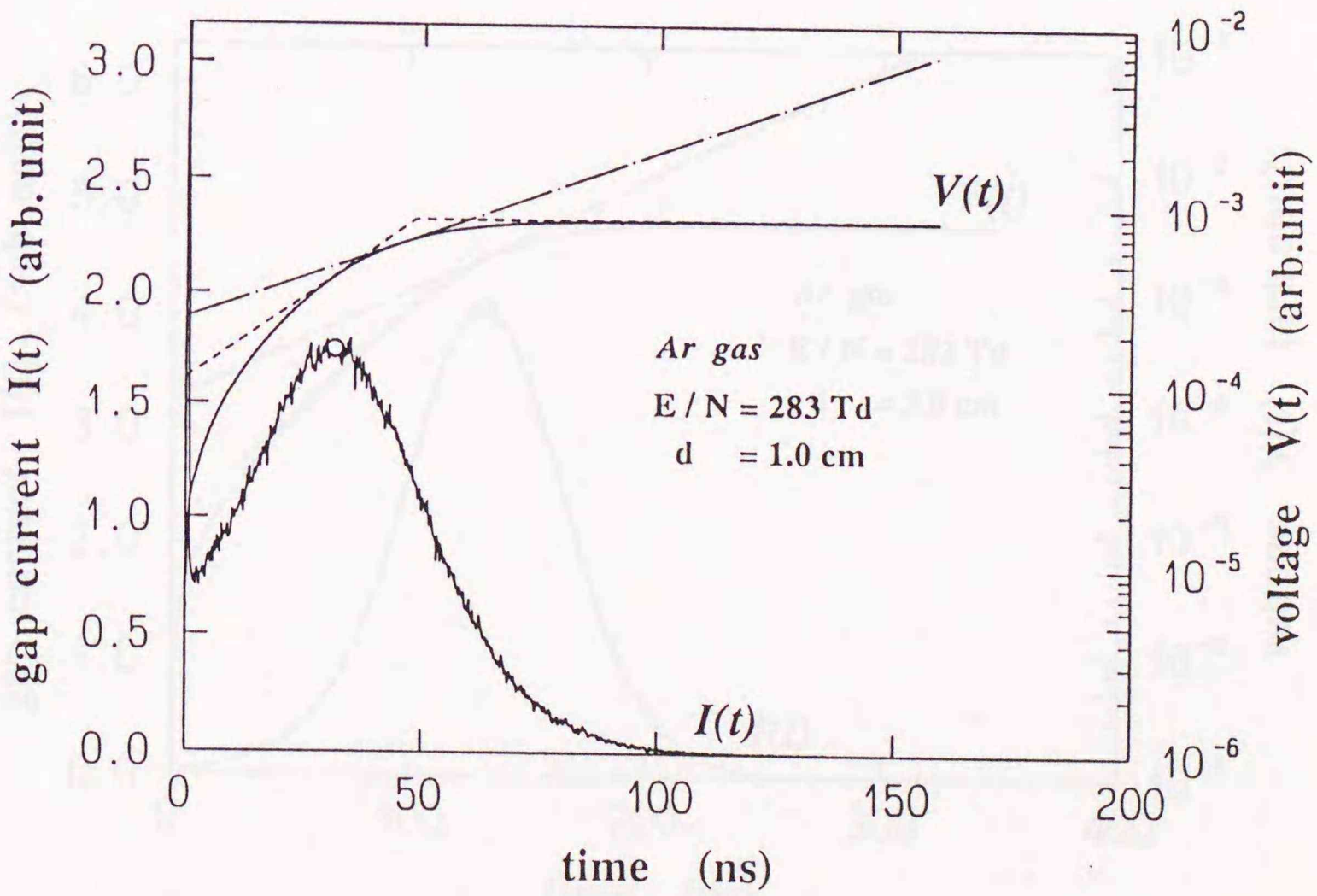


図５．２（ｂ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=1.0cm

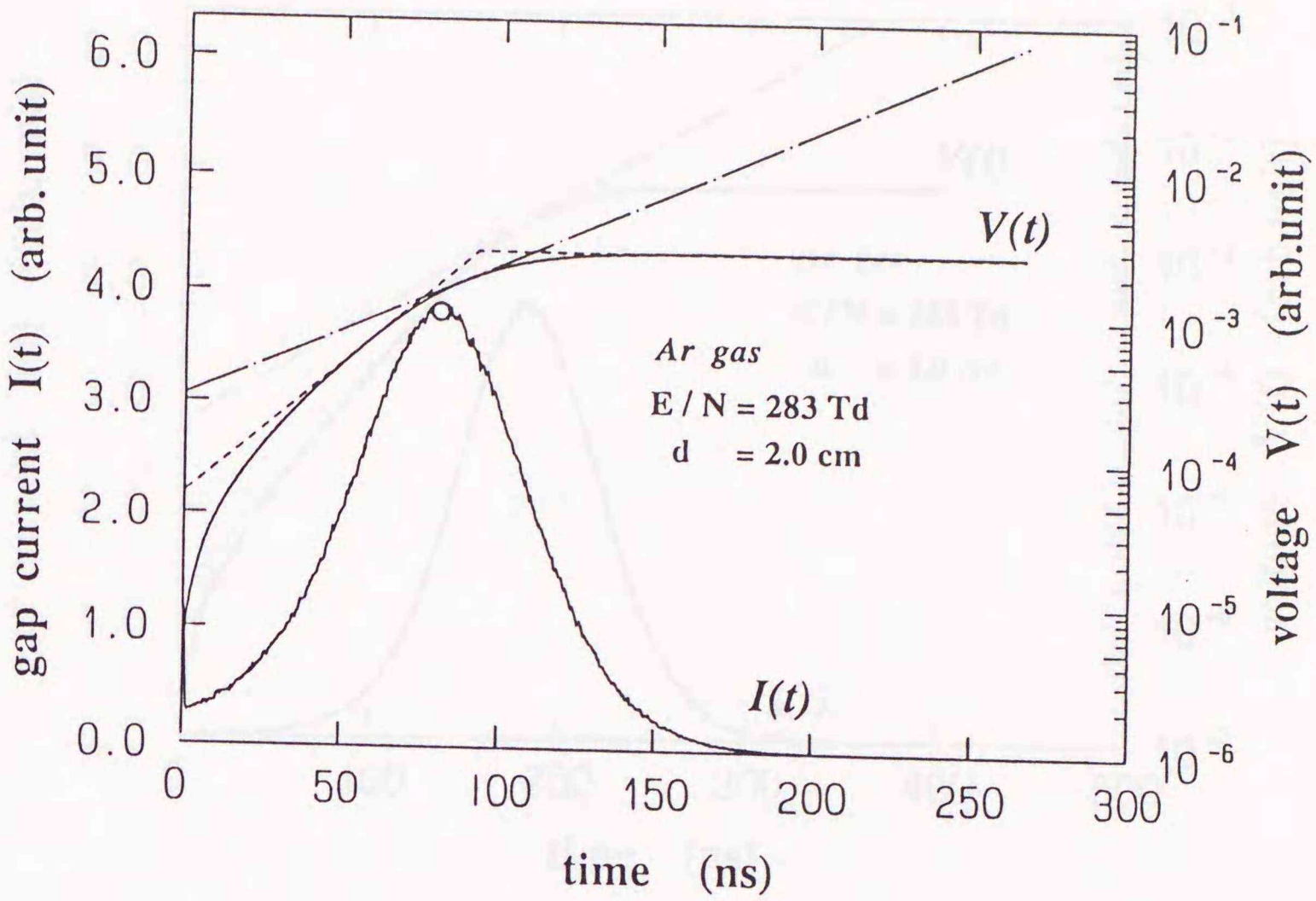


図５．２（ｃ）　ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=2.0cm

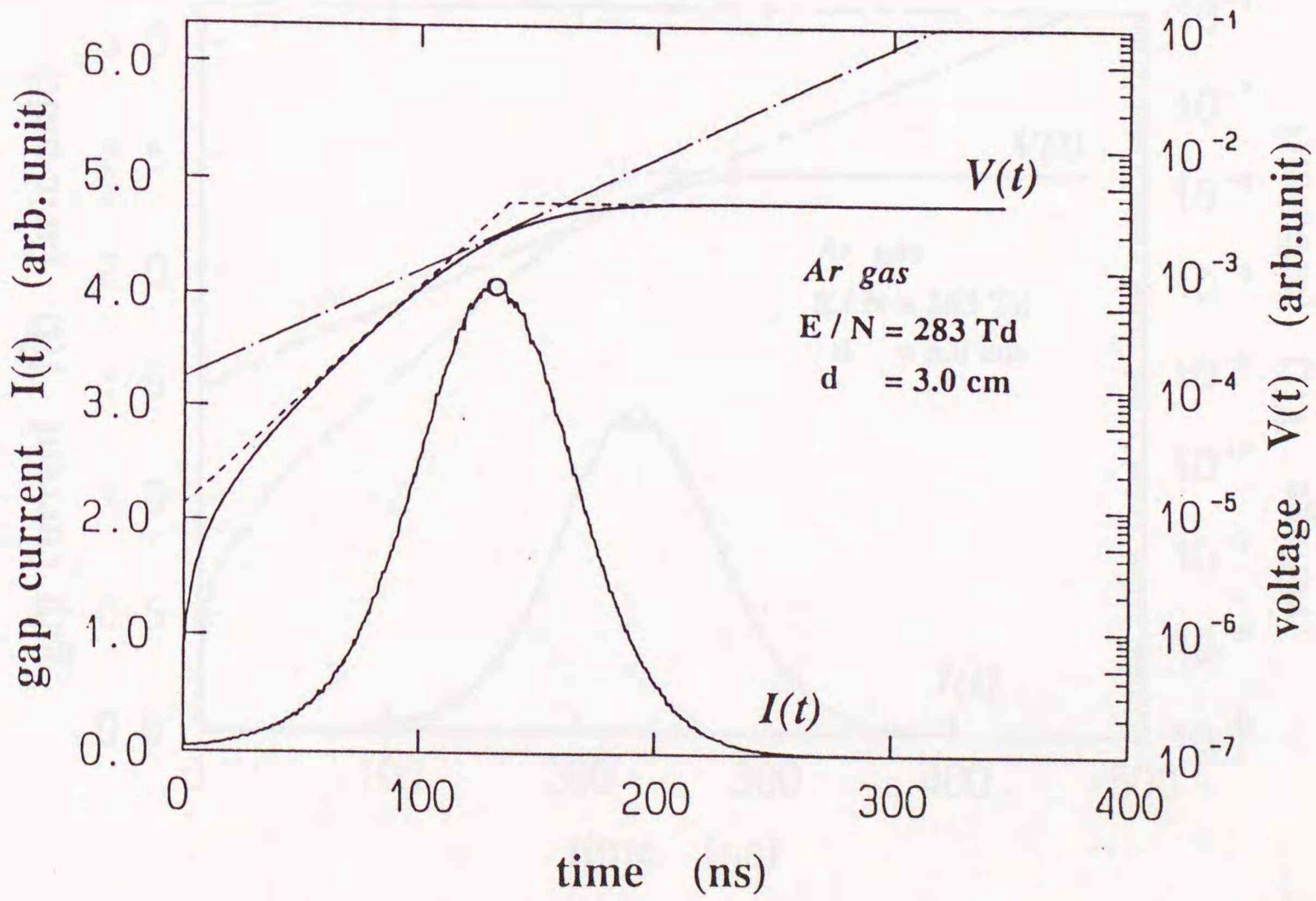


図５．２（ｄ）　ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=3.0cm

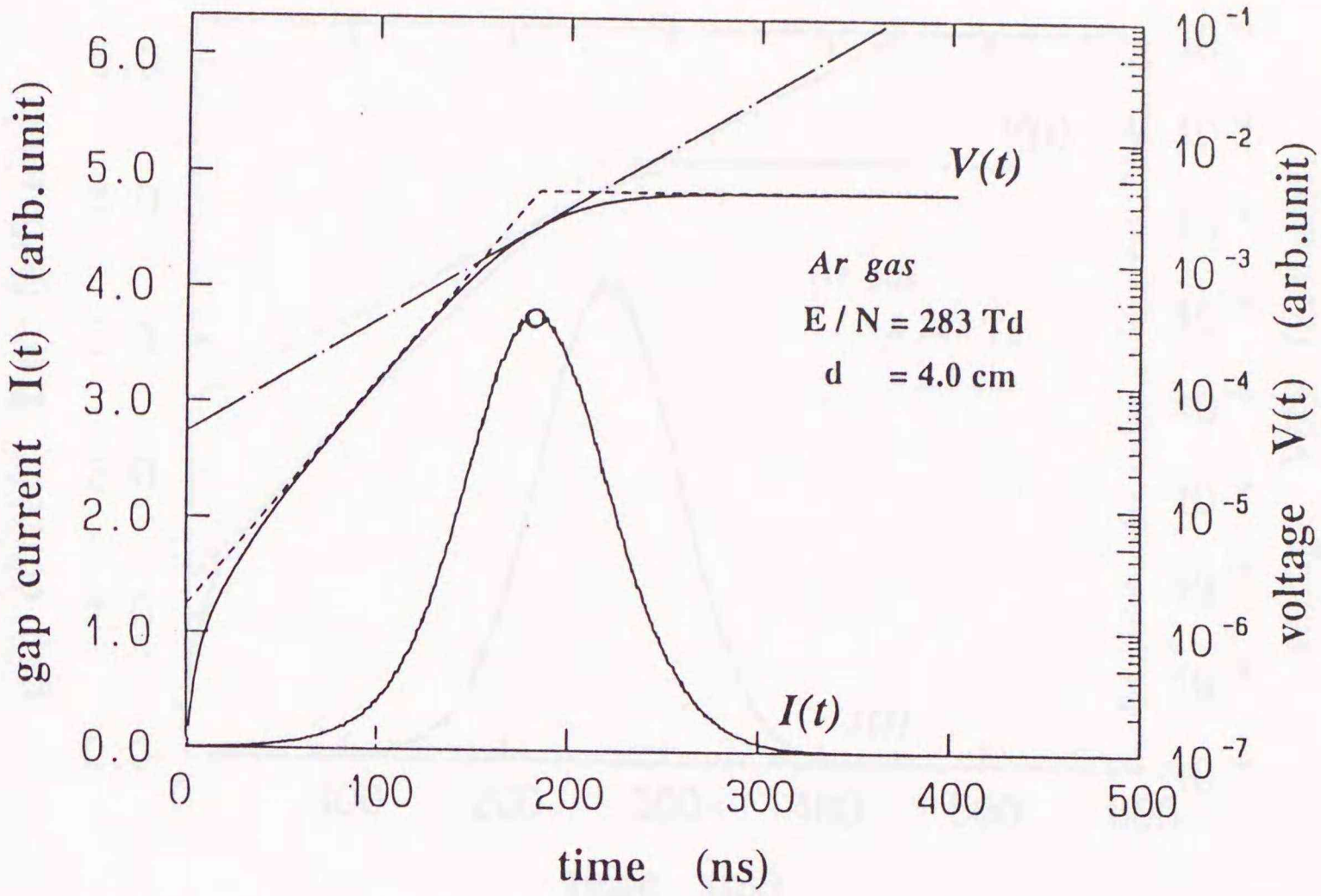


図５．２（ｅ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=4.0cm

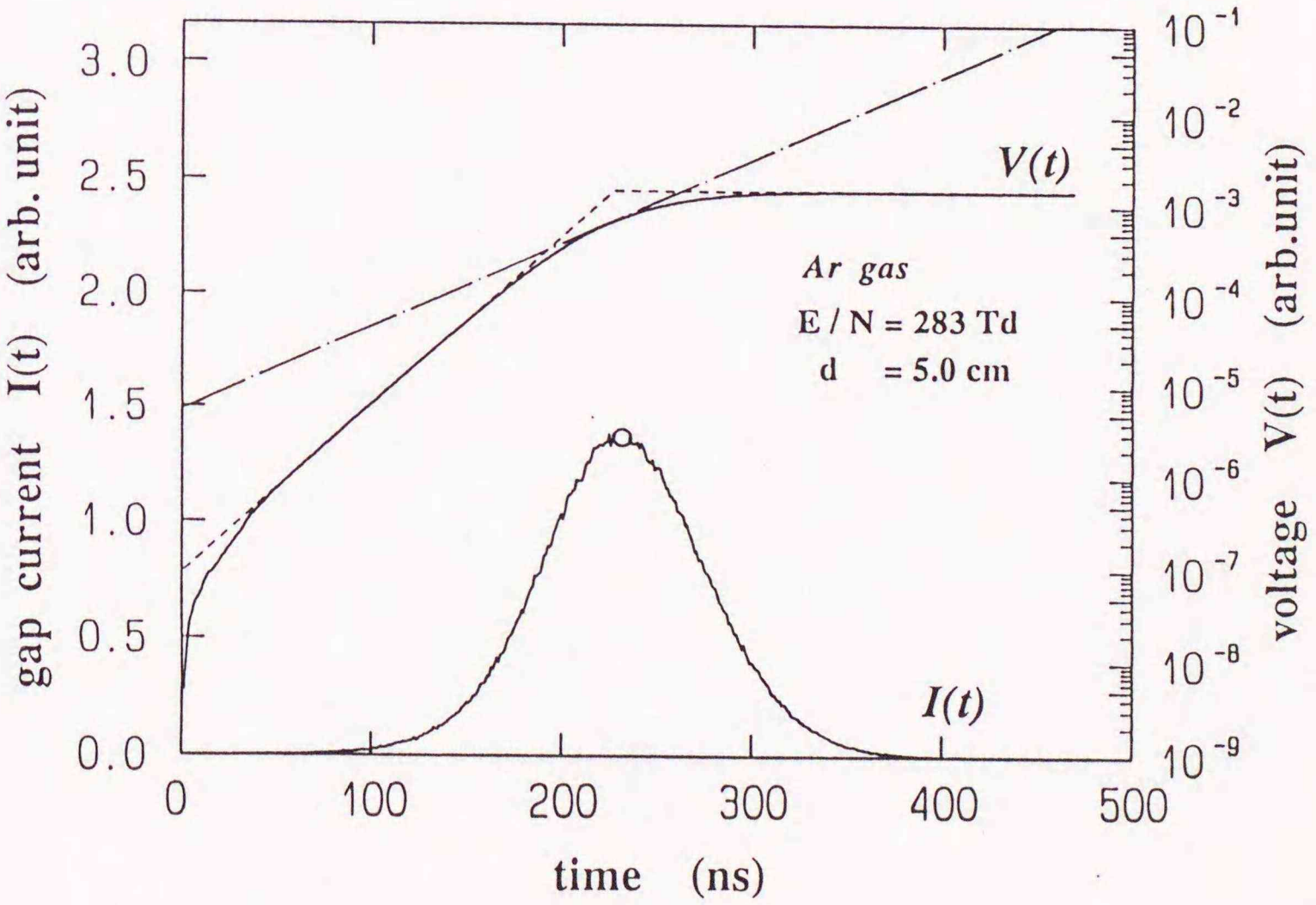


図５．２（ｆ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=5.0cm

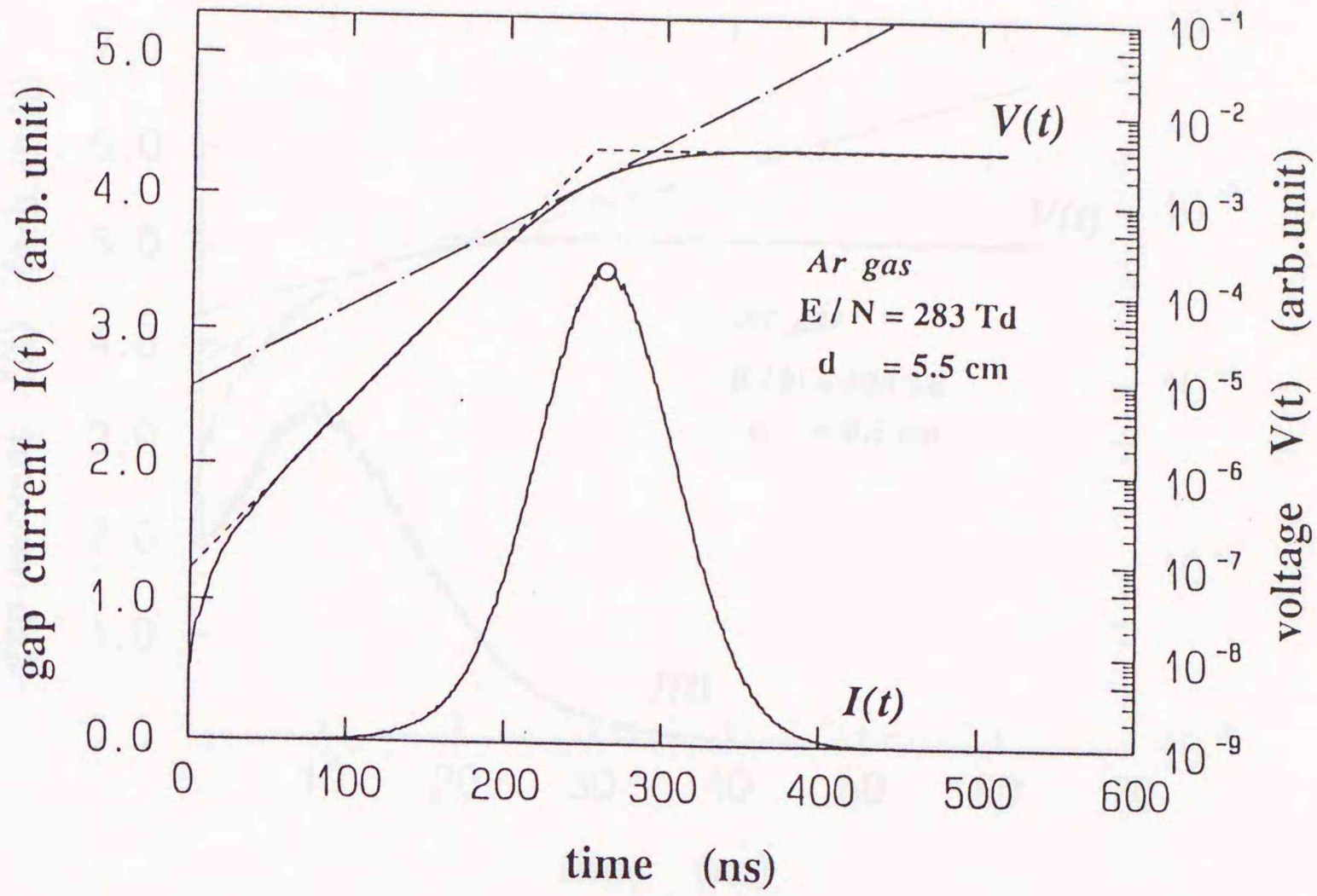


図５．２（ｇ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=283Td, d=5.5cm

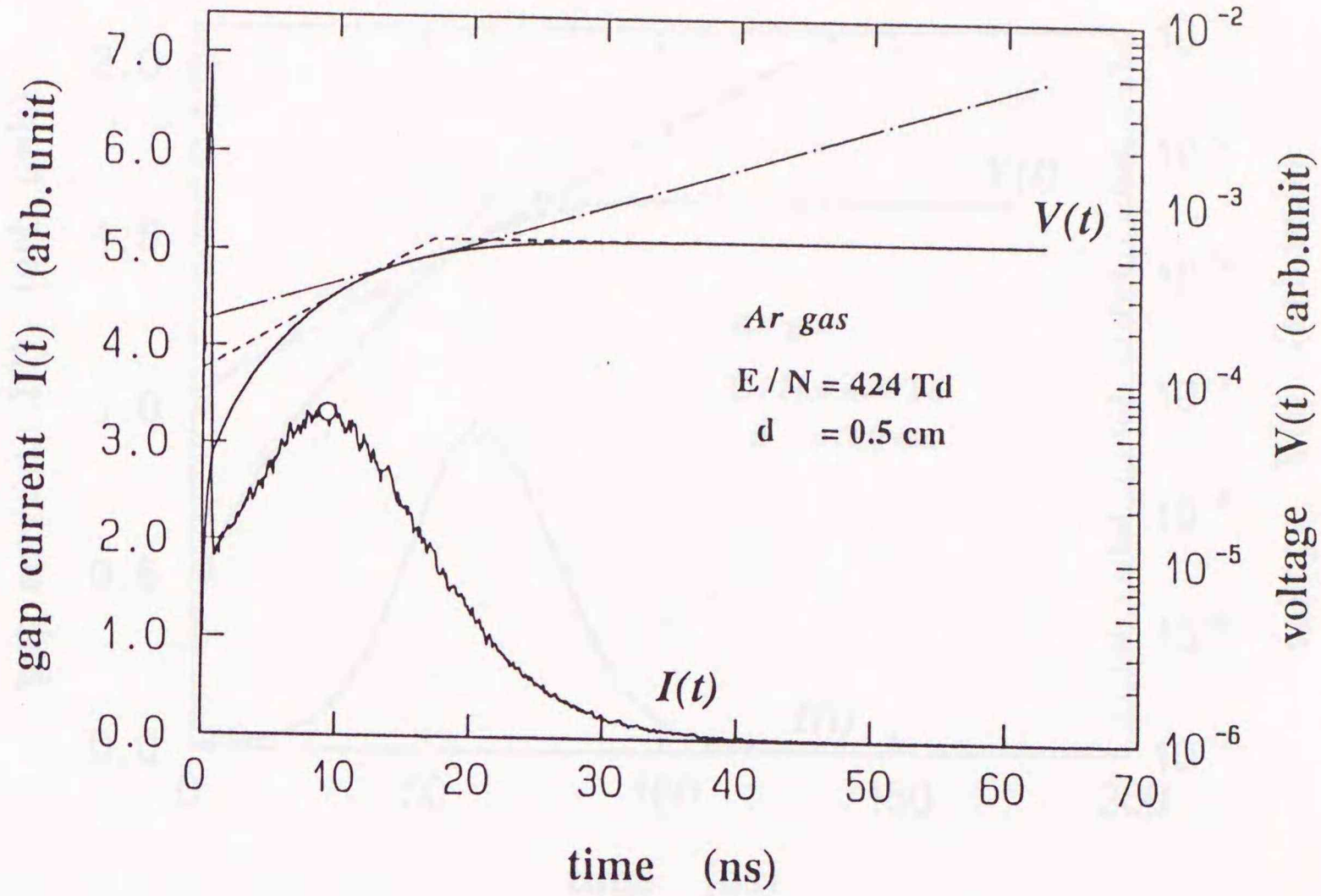


図５．３（ａ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=0.5cm

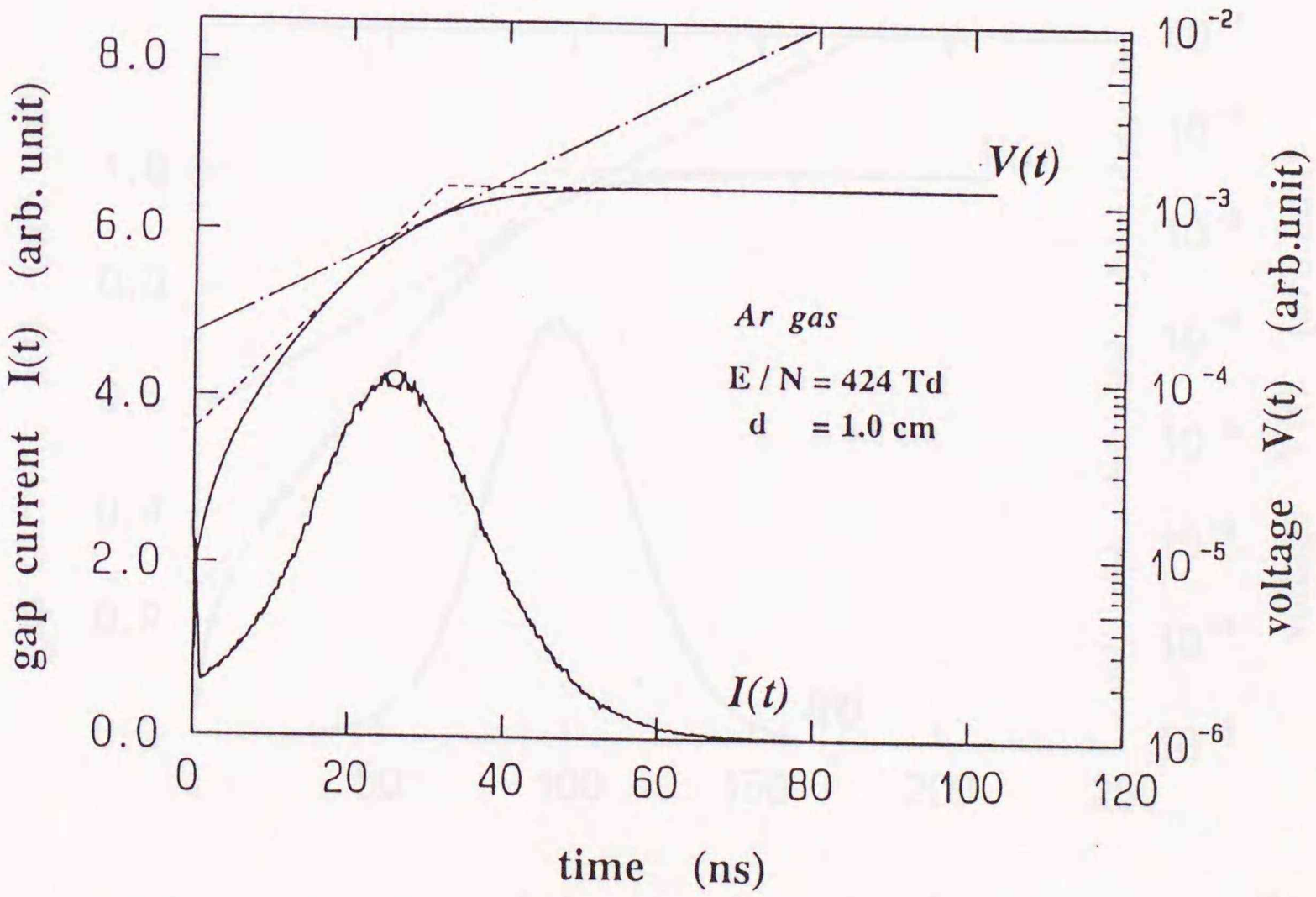


図５．３（ｂ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=1.0cm

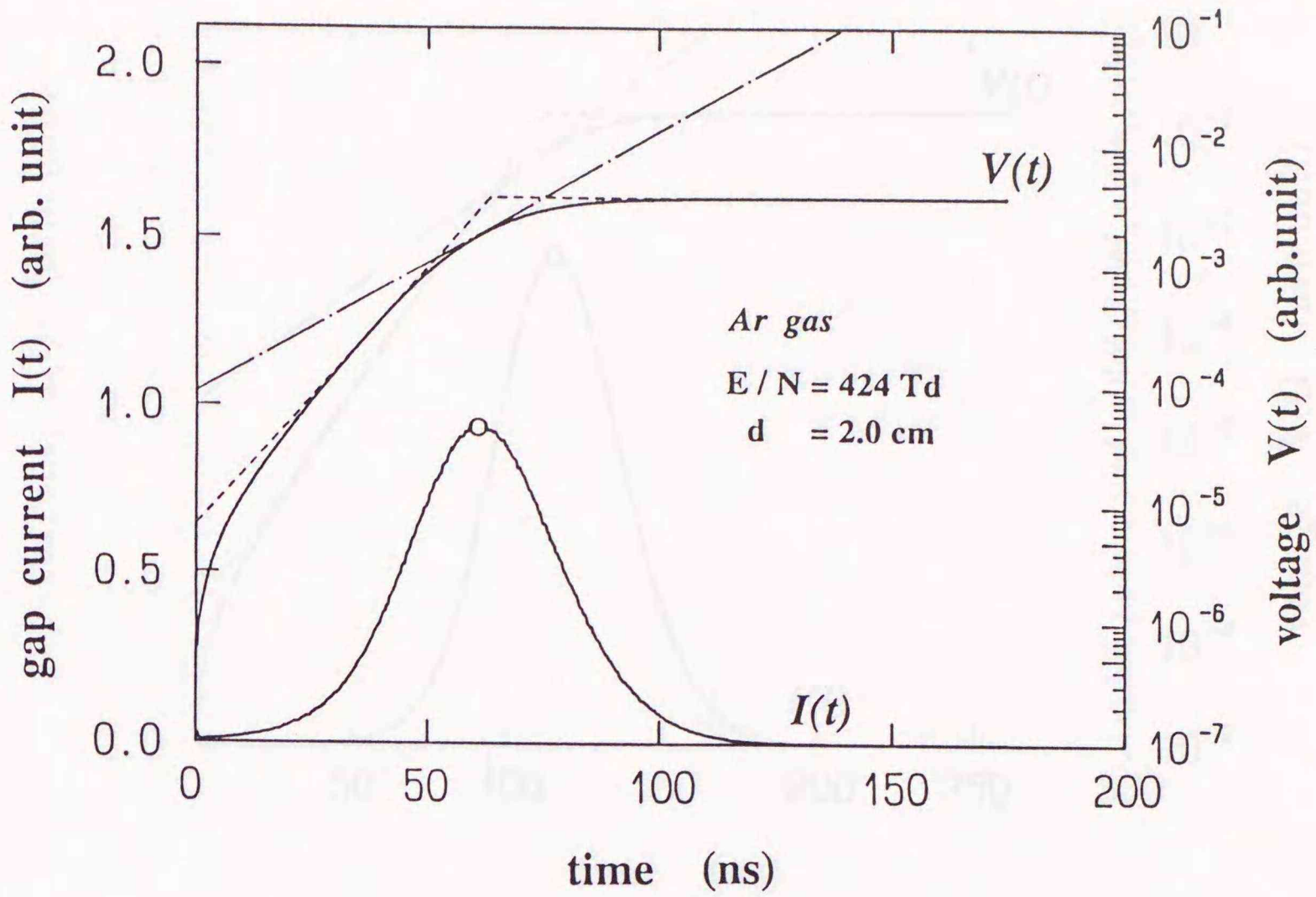


図５．３（ｃ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=2.0cm

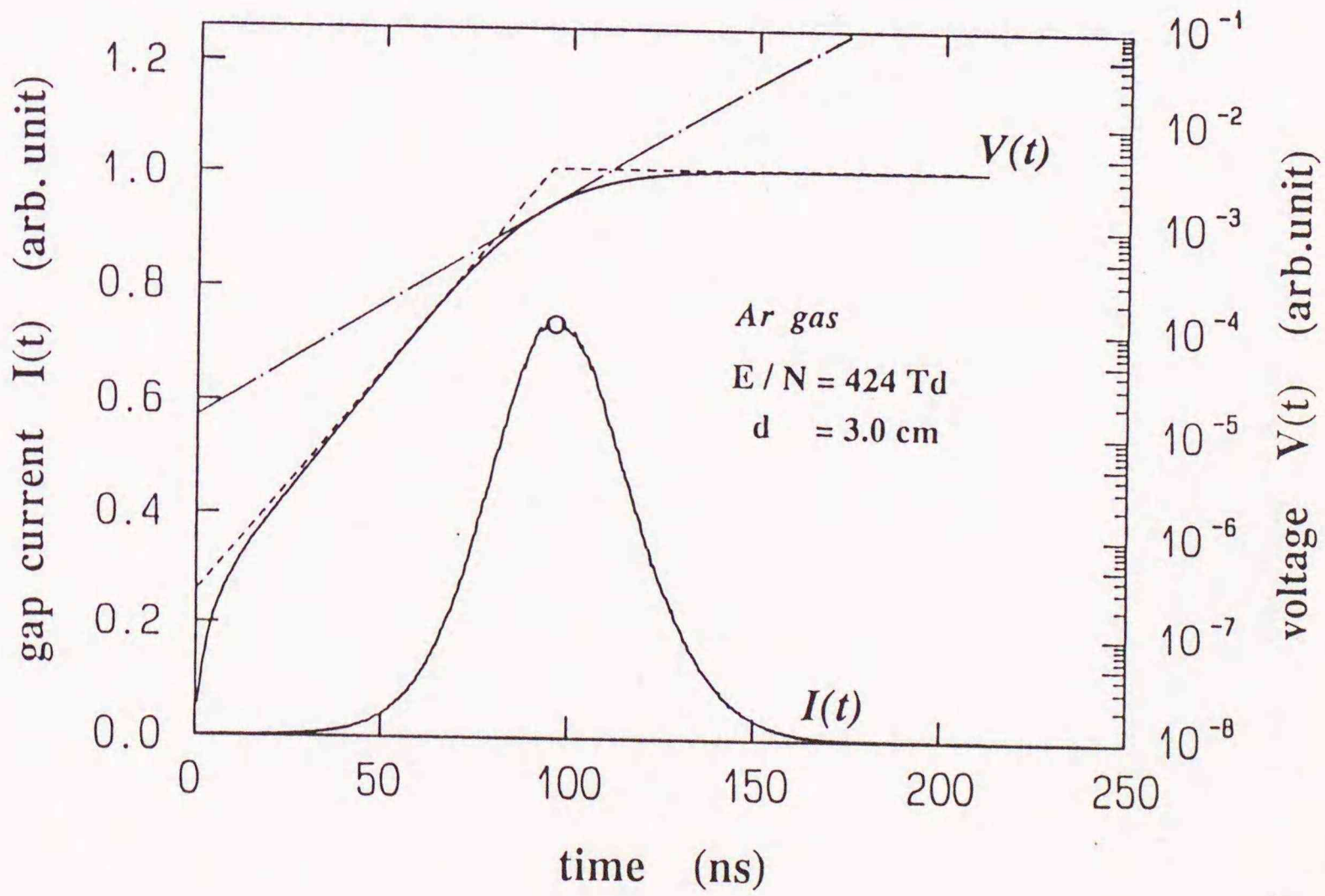


図５．３（ｄ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

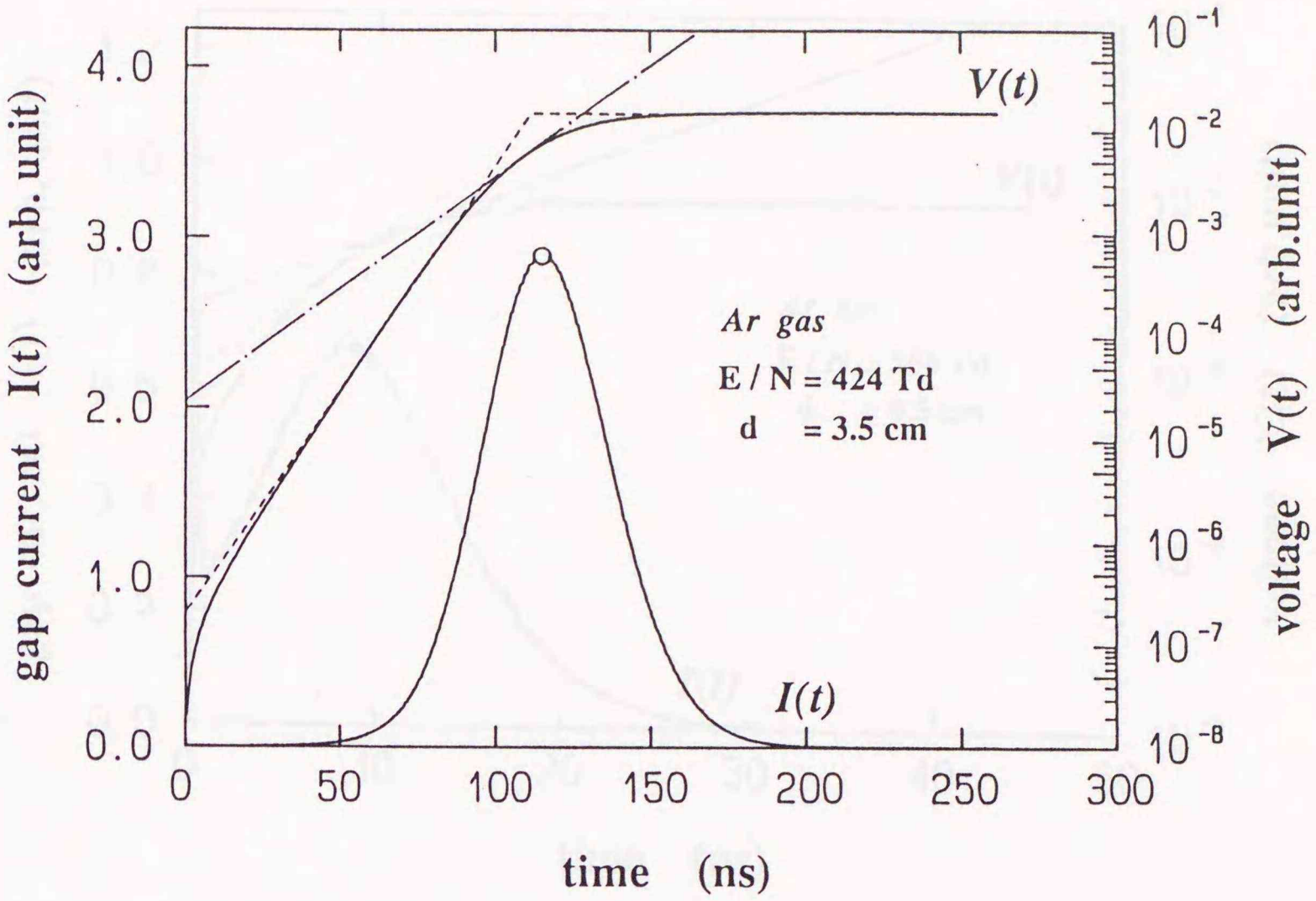


図５．３（ｅ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=3.5cm

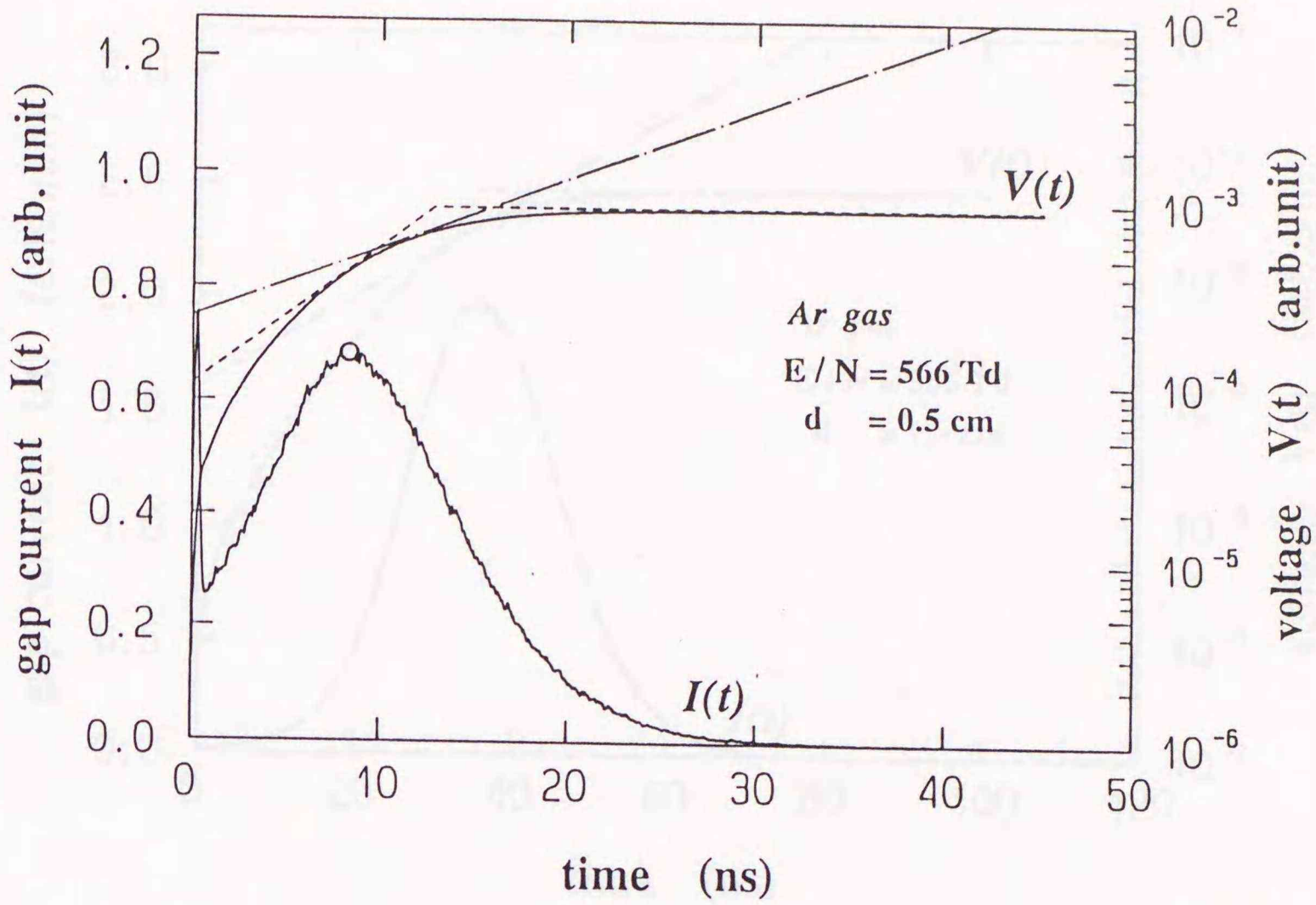


図５．４（ａ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=0.5cm

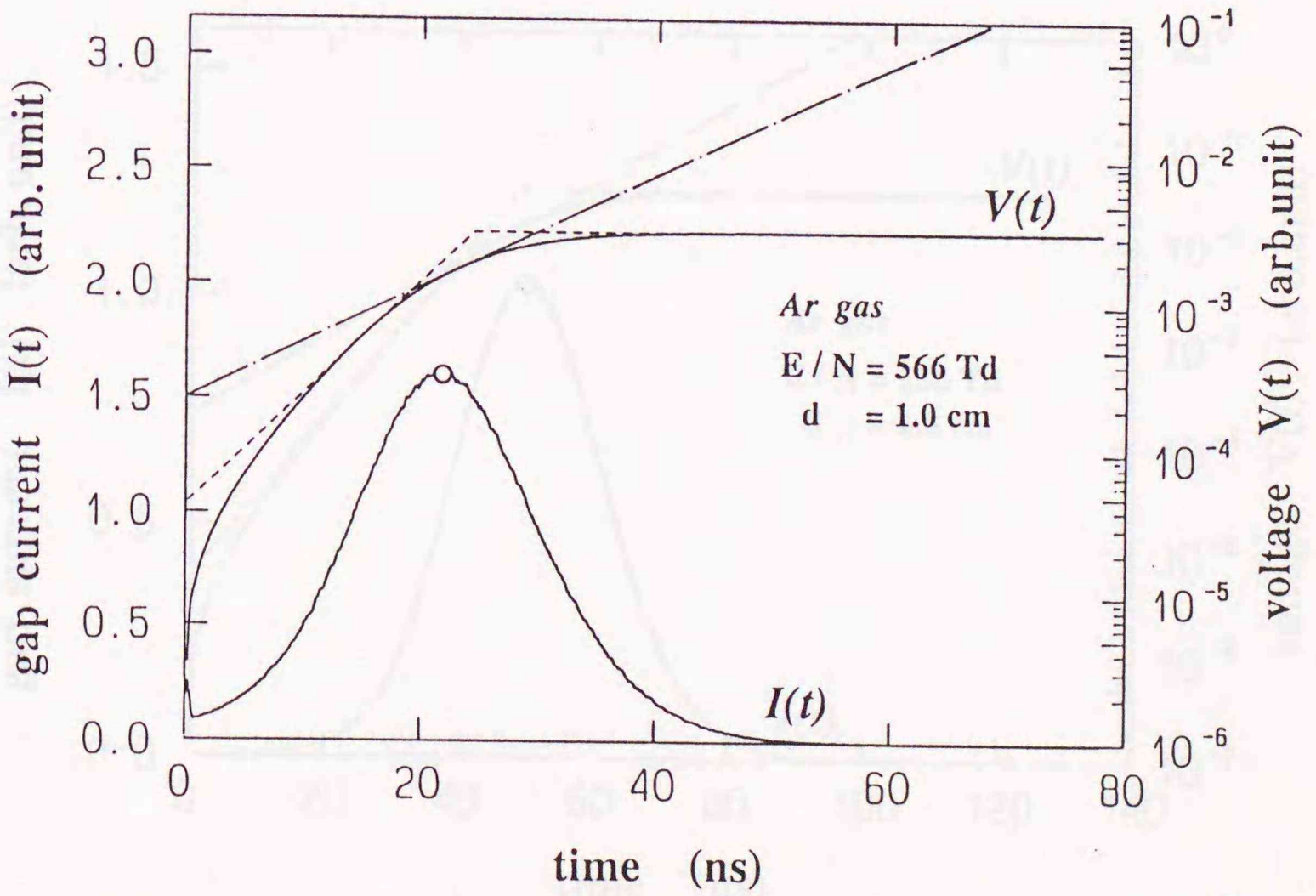


図５．４（ｂ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=1.0cm

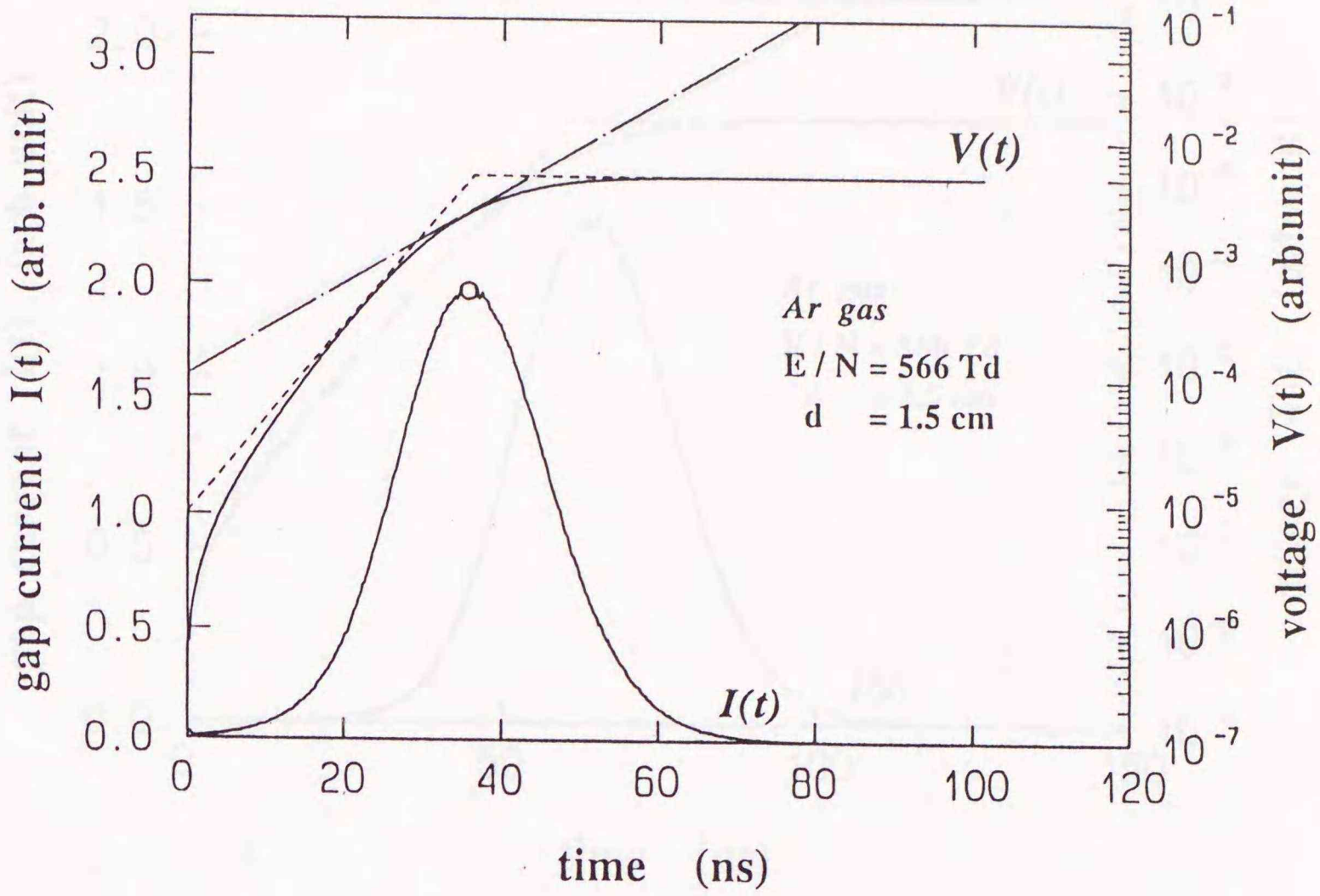


図５．４（ｃ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=1.5cm

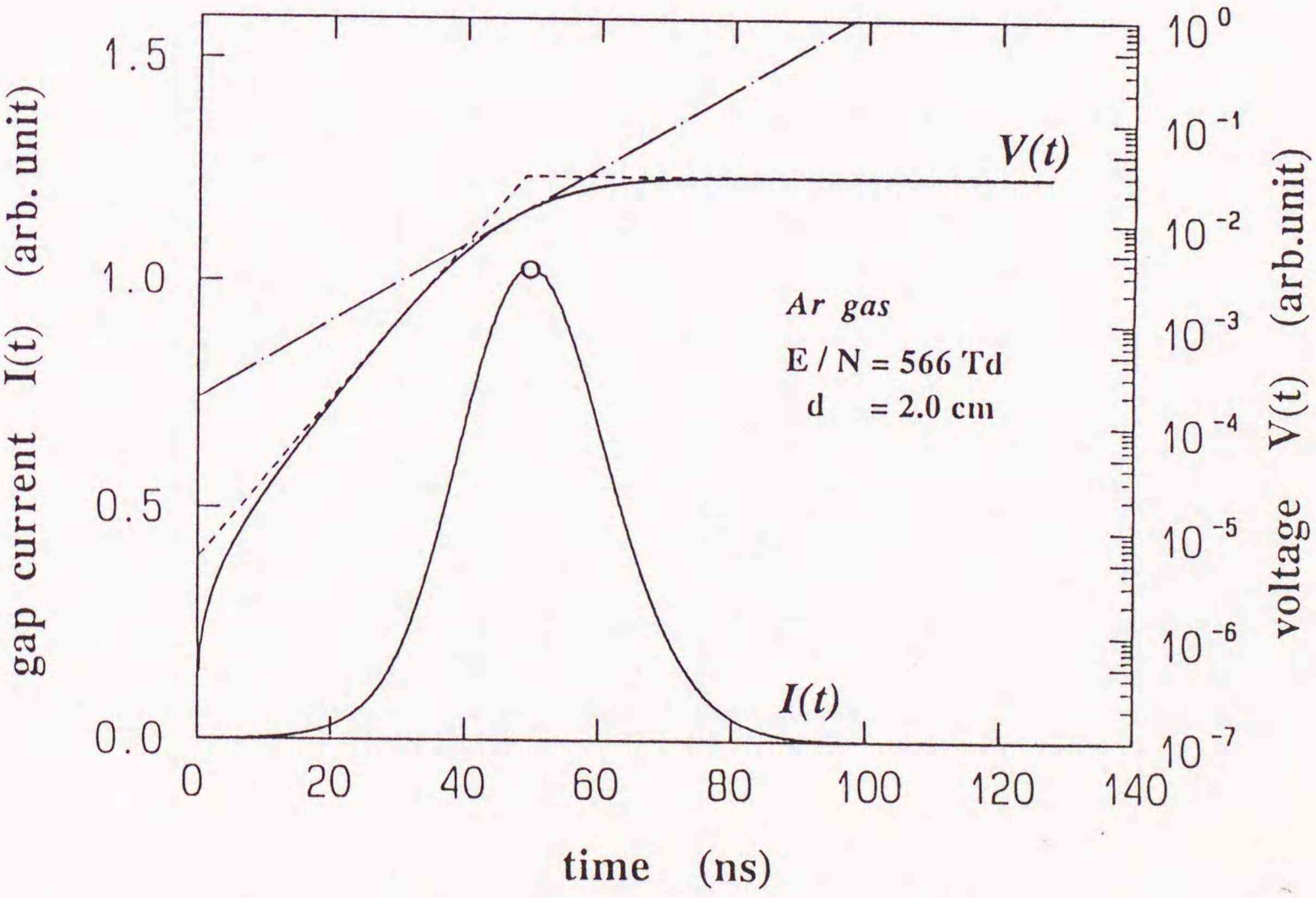


図５．４（ｄ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

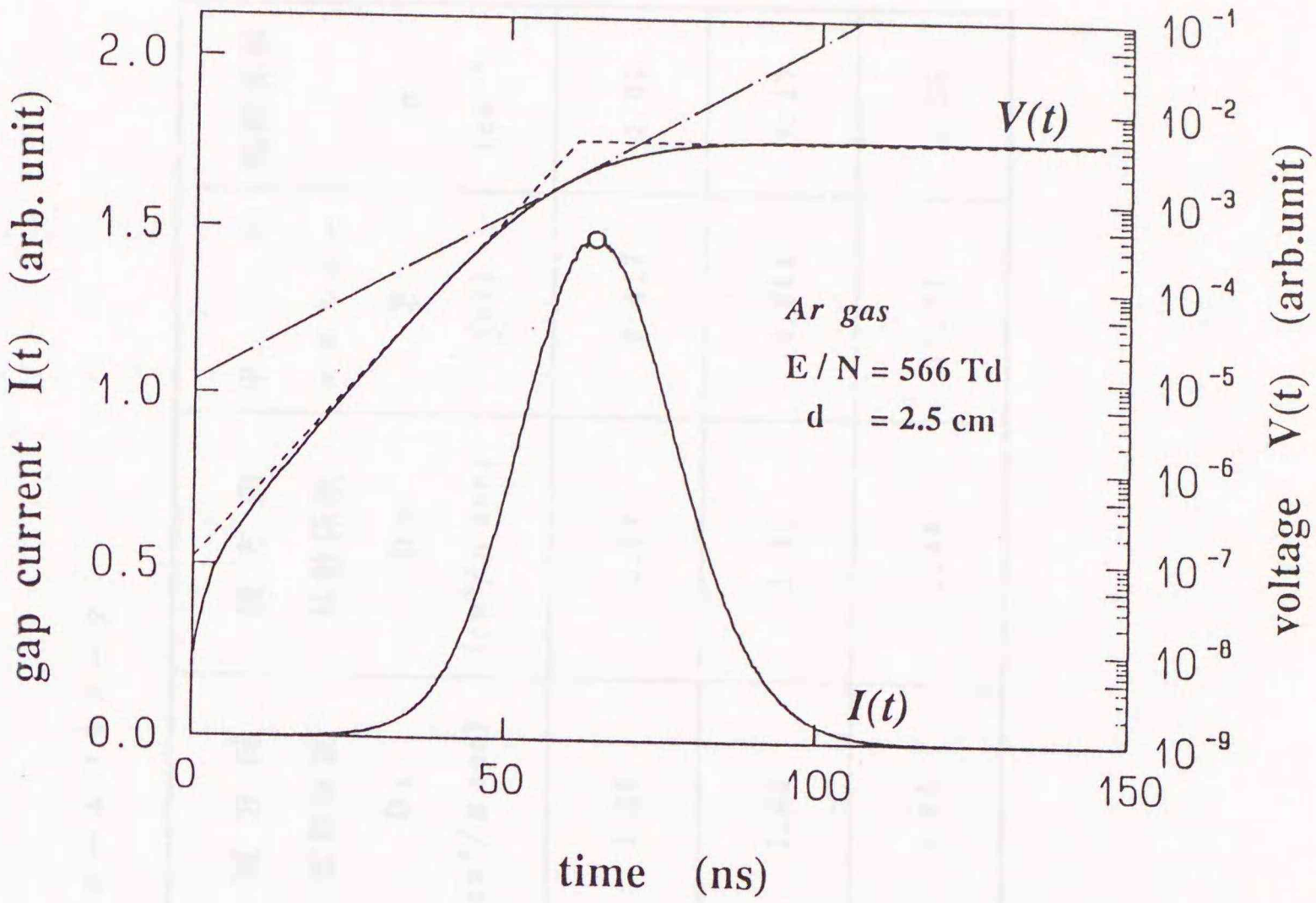


図５．４（ｅ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.5cm

表５．２　Ａｒガス中の電子スオームパラメータ

換算電界 E／N (Td)	電離周波数 Ri (μsec^{-1})	理論電子ドリフト速度 (cm/μ sec)				縦方向拡散係数 D_L ($cm^2/\mu sec$)	横方向拡散係数 D_T ($cm^2/\mu sec$)	平均エネルギー $\bar{\varepsilon}$ (eV)	電離係数 α (cm^{-1})
		Vd	Wv	Wr	Wm				
283	42.72	17.5	19.30	23.9	19.5	1.25	1.37	8.417	2.02
424	104.1	24.1	27.65	36.1	27.6	1.42	1.41	9.564	3.27
566	187.5	31.1	35.60	48.6	36.2	1.64	1.48	10.77	4.55

5－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度

図5.5(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424および566Tdにおける経過時間T_{sc}のギャップ長に対するプロットを示す。各E/NにおけるT_{sc}-dプロットから、(2－49)式にしたがって電子ドリフト速度W_{sc}を算出すると、図5.6となる。算出されたW_{sc}は、ギャップ長に対して依存性を持っていることがわかる。しかし、図5.5(a)、(b)および(c)のT_{sc}-dプロットは、(a)に示すE/N=283Tdでギャップ長が小さい時を除いて、よい直線性を示しており、W_{sc}のギャップ長依存性の原因は、T_{sc}-dプロットの延長が原点を通過していないにもかかわらず、(2－44)式からW_{sc}を決定しているためであると考えられる。したがって、W_{sc}決定におけるギャップ長依存性の影響を排除するためには、(3－31)式を用いて、T_{sc}-dプロットの勾配からW_{sc}を決定するべきである。(3－13)式から求めたW_{sc}を表5.3(a)に示す。また、表5.3(b)は、(2－49)式から求めたW_{sc}のなかで、各E/Nで最大のギャップ長における値である。表5.3(a)と(b)を比較すると、E/Nが高くなるにしたがって、両者の差が大きくなっていることがわかる。本解析では、T_{sc}-dプロットの勾配から算出した値（表5.3(a)）をW_{sc}の値として採用した。

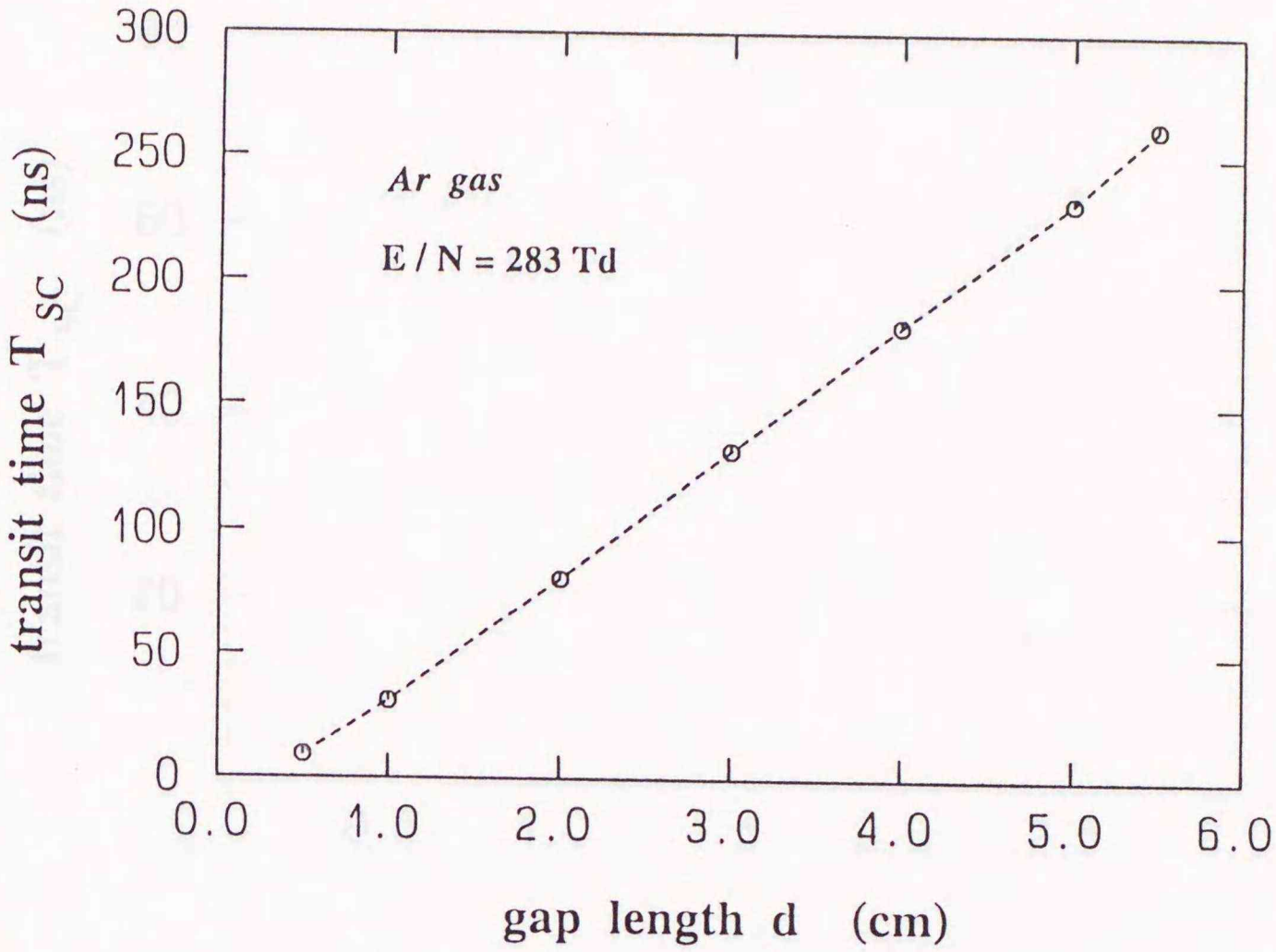


図5.5(a) 経過時間T_{sc} E/N=283Td

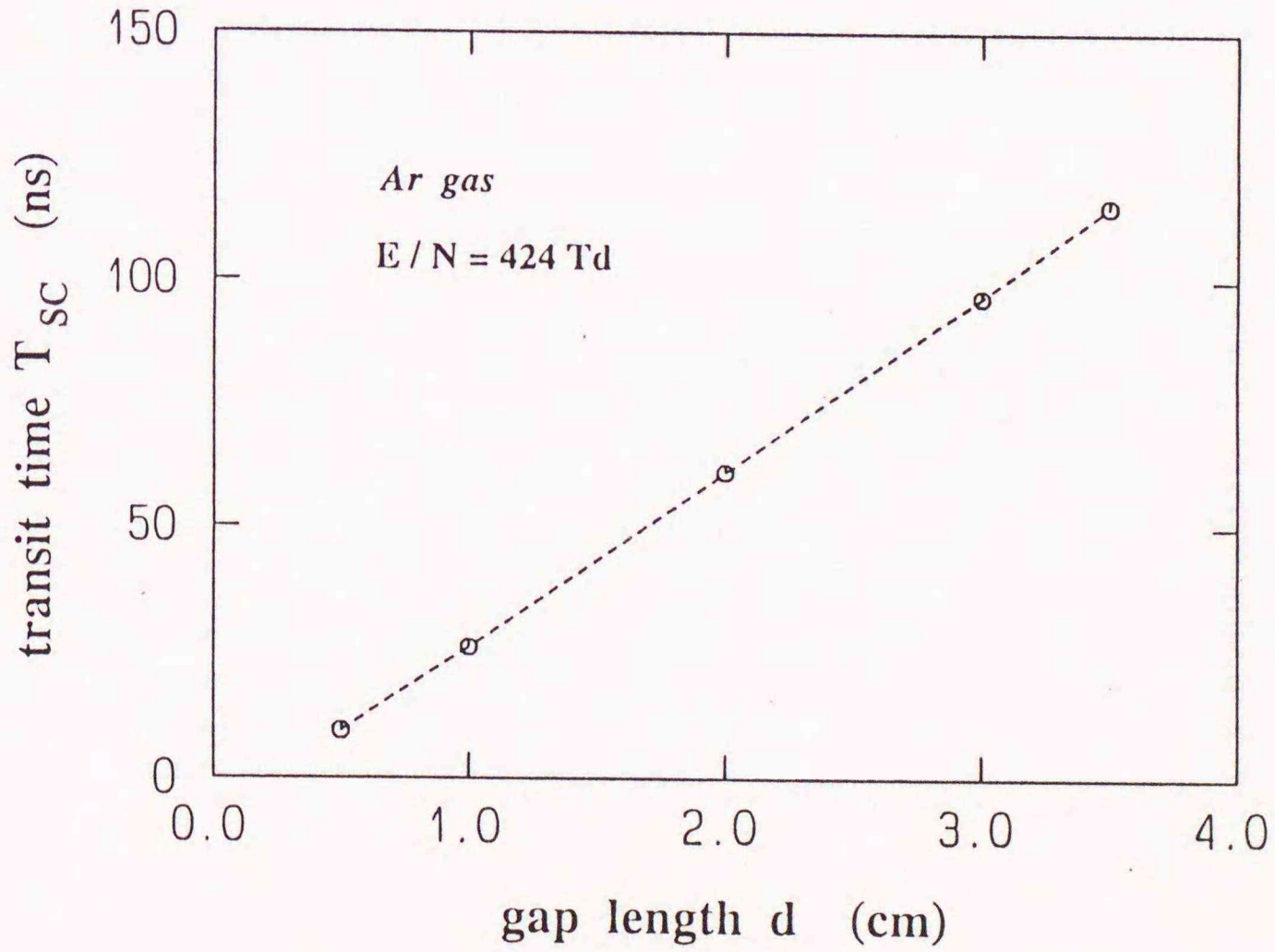


図5.5(b) 経過時間T_{sc} E/N=424Td

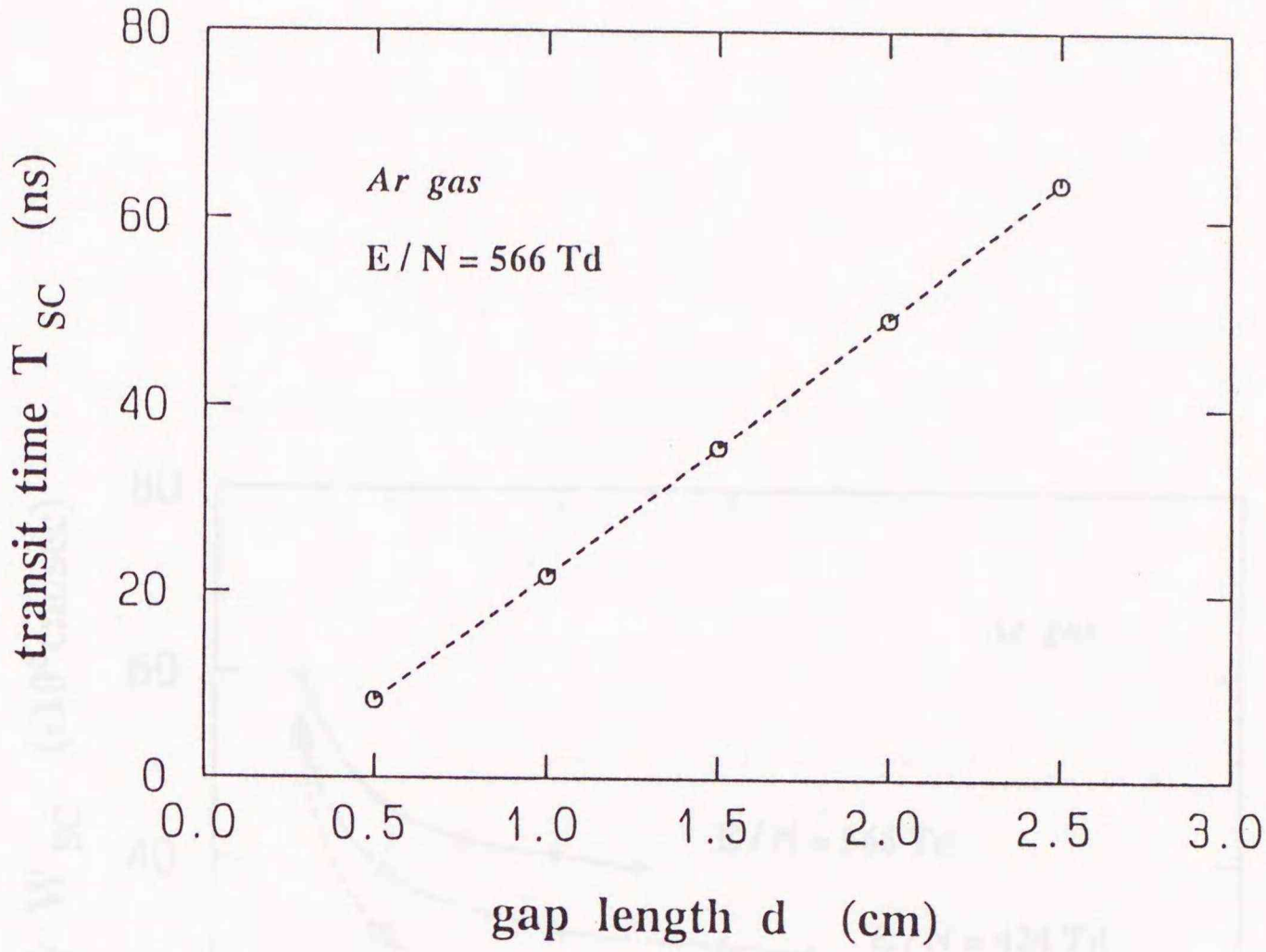


図５．５（ｃ） 経過時間T_{sc} E/N=566Td

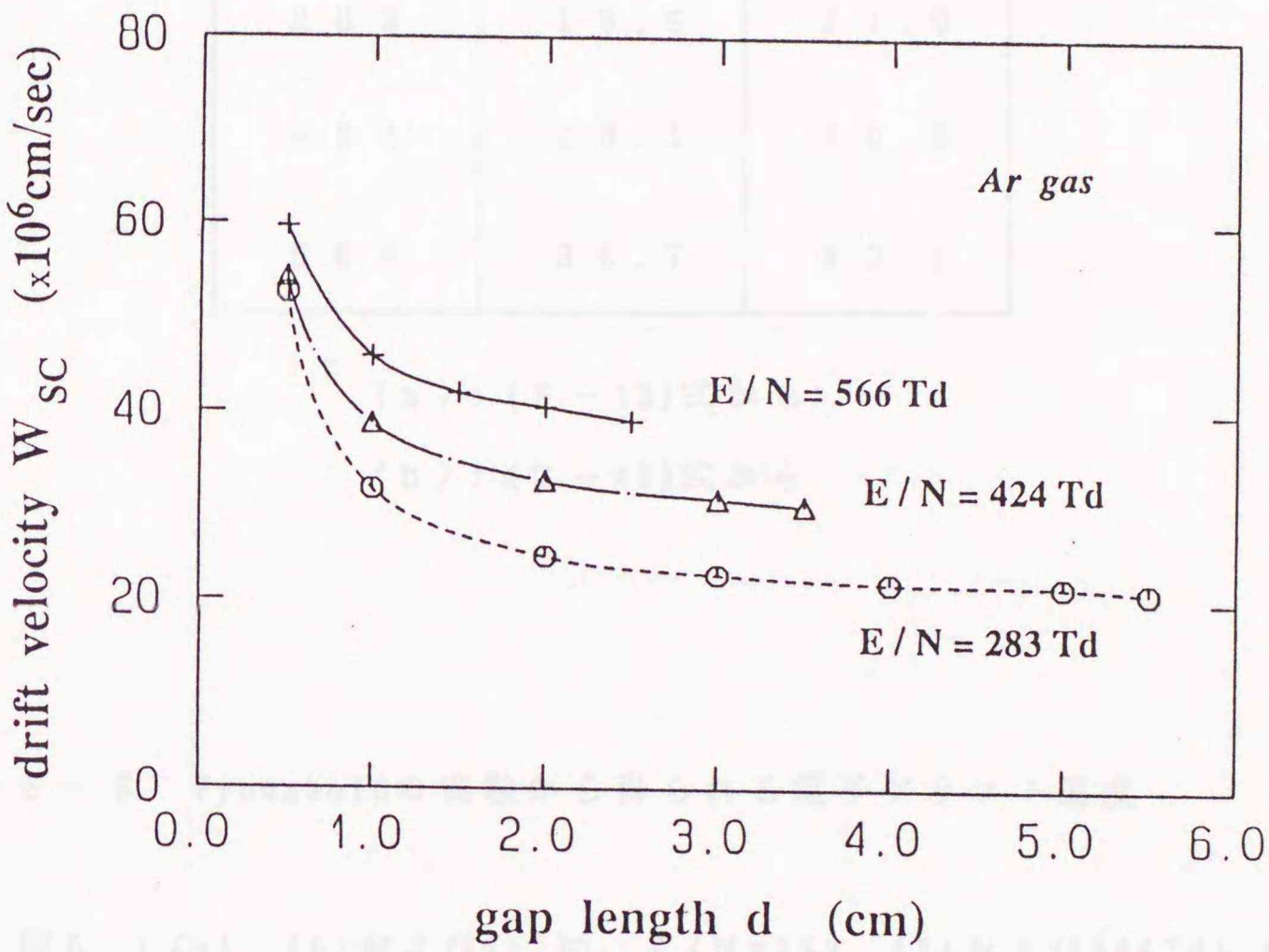


図5．6　電子ドリフト速度 W_{SC}

表５．３　Ａｒガス中の電子ドリフト速度W_{sc}

E／N (Td)	W_{sc} ($\times 10^6$cm/sec)	
	(a)	(b)
283	19.9	21.0
424	28.1	30.3
566	35.7	39.1

(a)：(3－13)式から

(b)：(2－49)式から

５－３－３　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度

図５．７(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424および566TdにおけるT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットをそれぞれ示す。○印がT_{FD1}、＋印がT_{FD2}を示している。これらから(2－50)式にしたがって、W_{FD1}およびW_{FD2}を算出すると図５．８となる。○、△、および□はT_{FD1}から、＊、＋、および×印はT_{FD2}から算出された電子ドリフト速度である。図５．７(a)、(b)および(c)において、T_{FD1}とT_{FD2}の値が僅かに違っているために、図５．８のW_{FD1}とW_{FD2}にも違いがみられる。また、T_{FD1}-d、T_{FD2}-dプロットの延長が原点を僅かにずれて通過するため

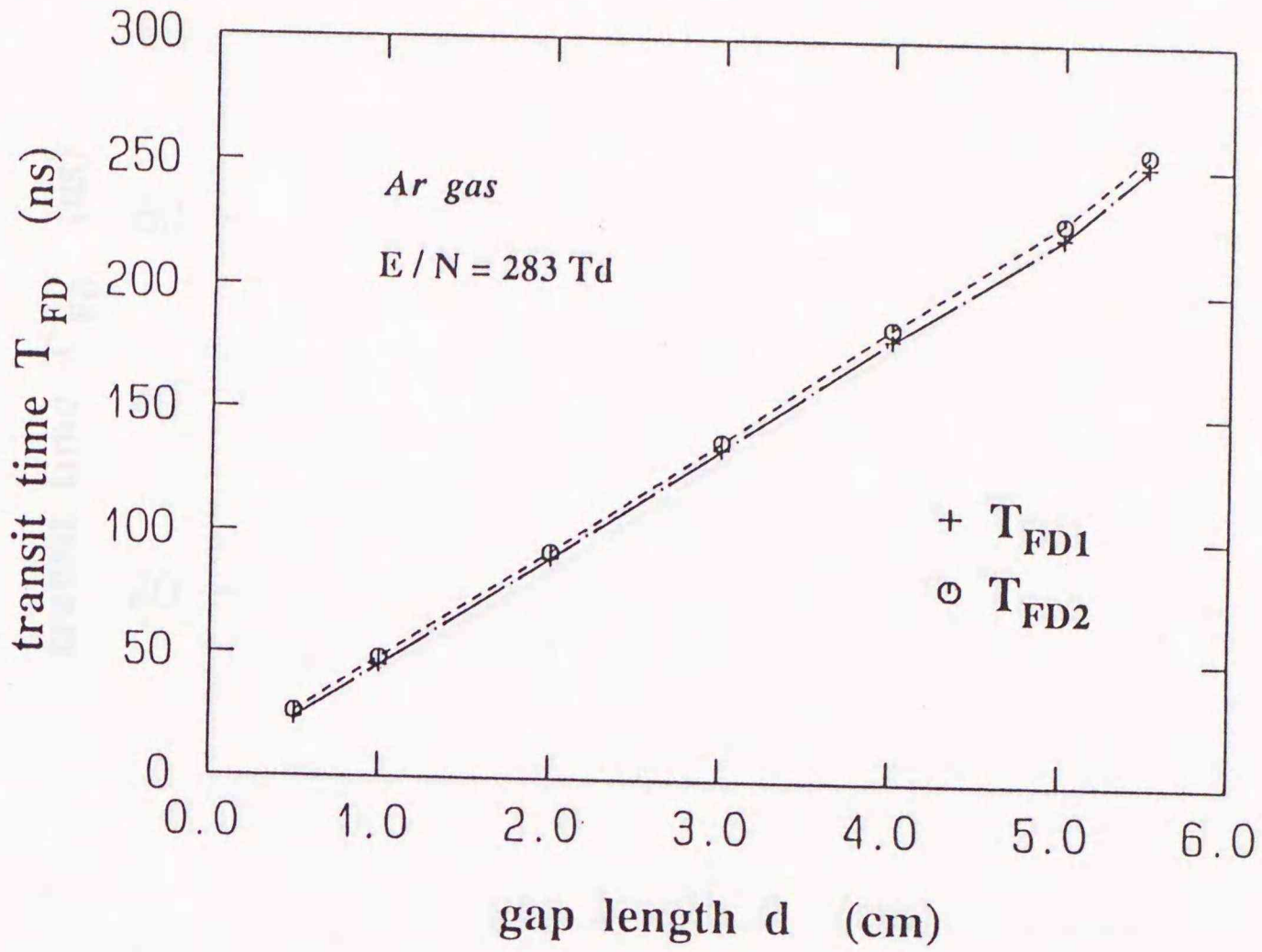


図5．7（a） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=283Td

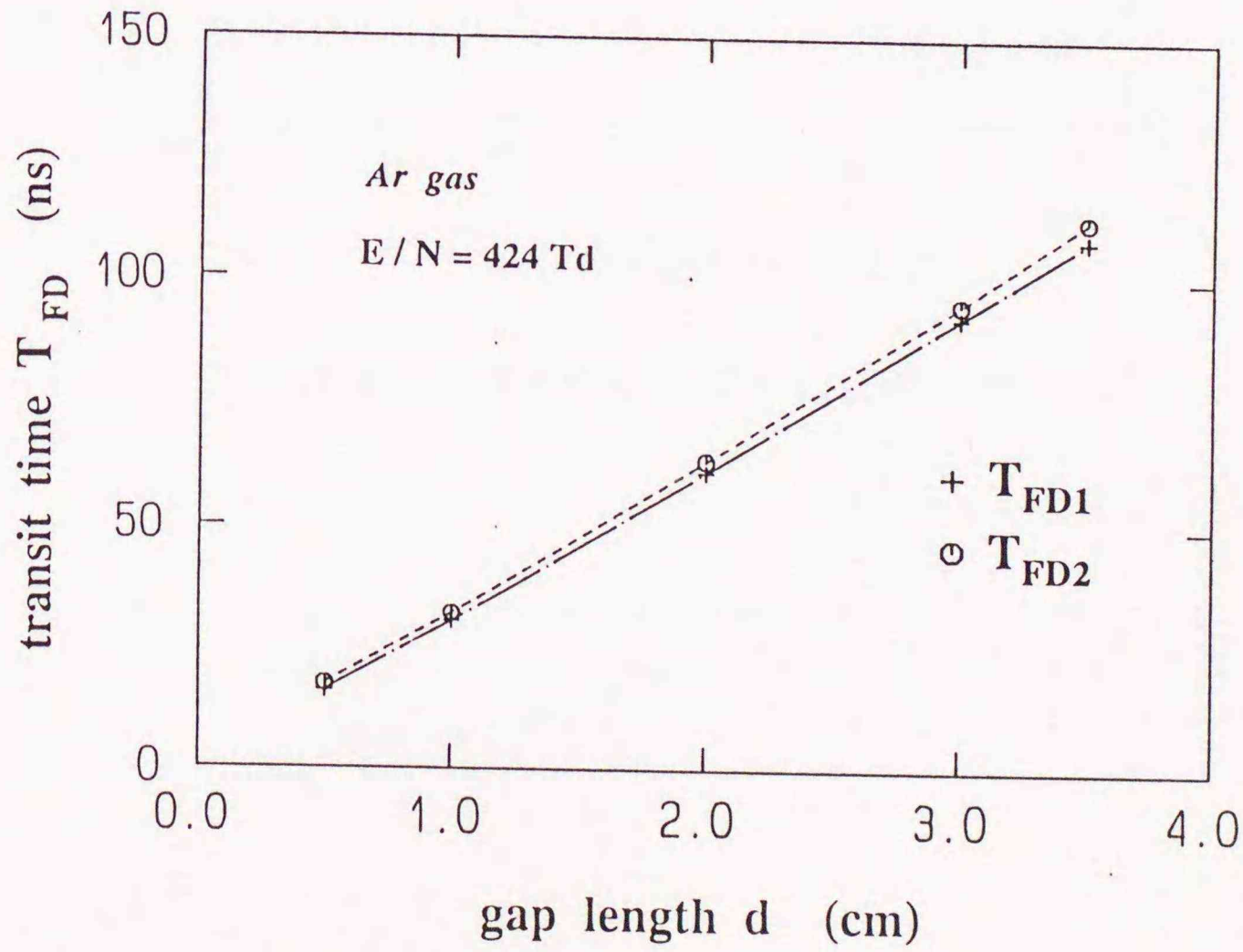


図5．7（b） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=424Td

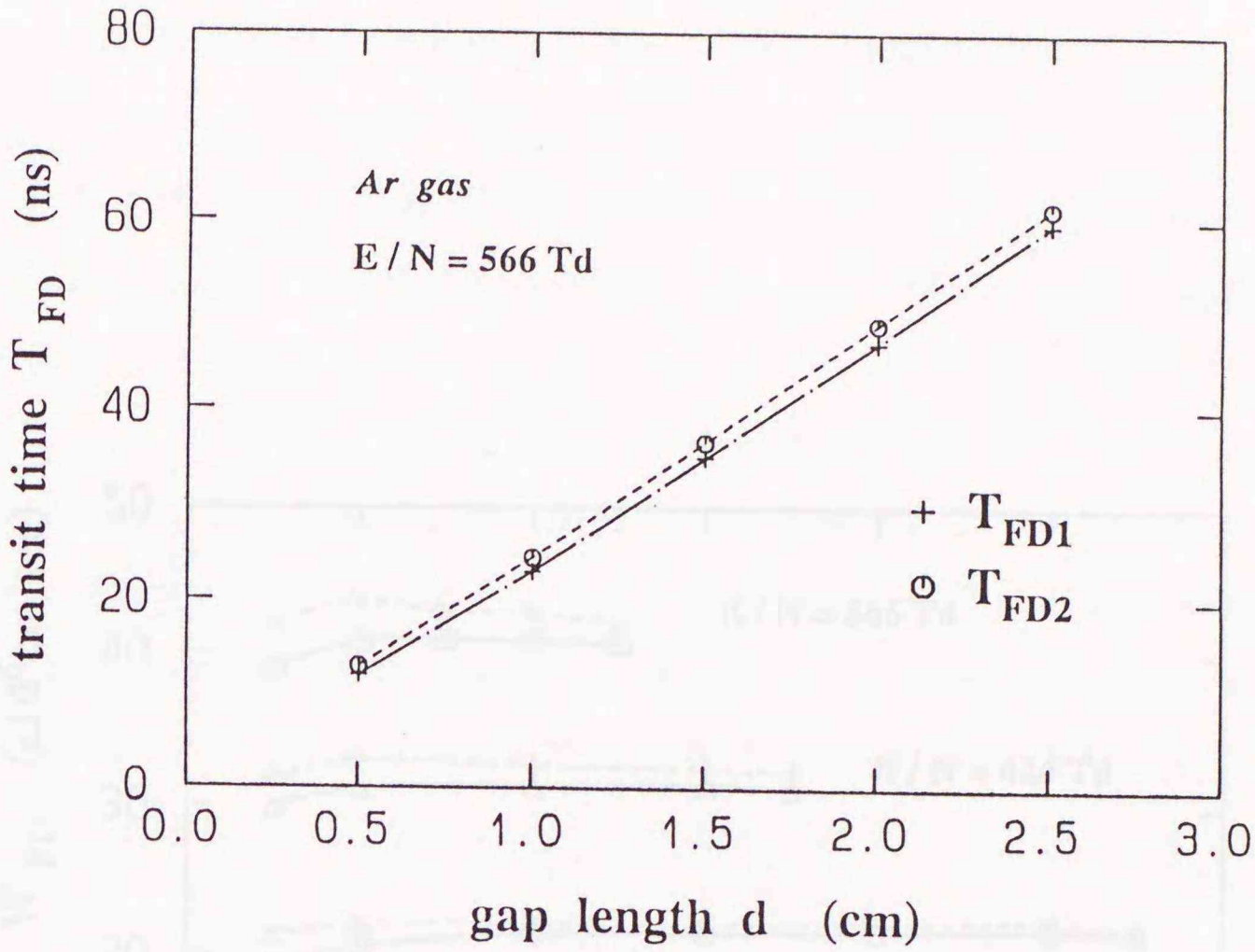


図５．７（ｃ） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=566Td

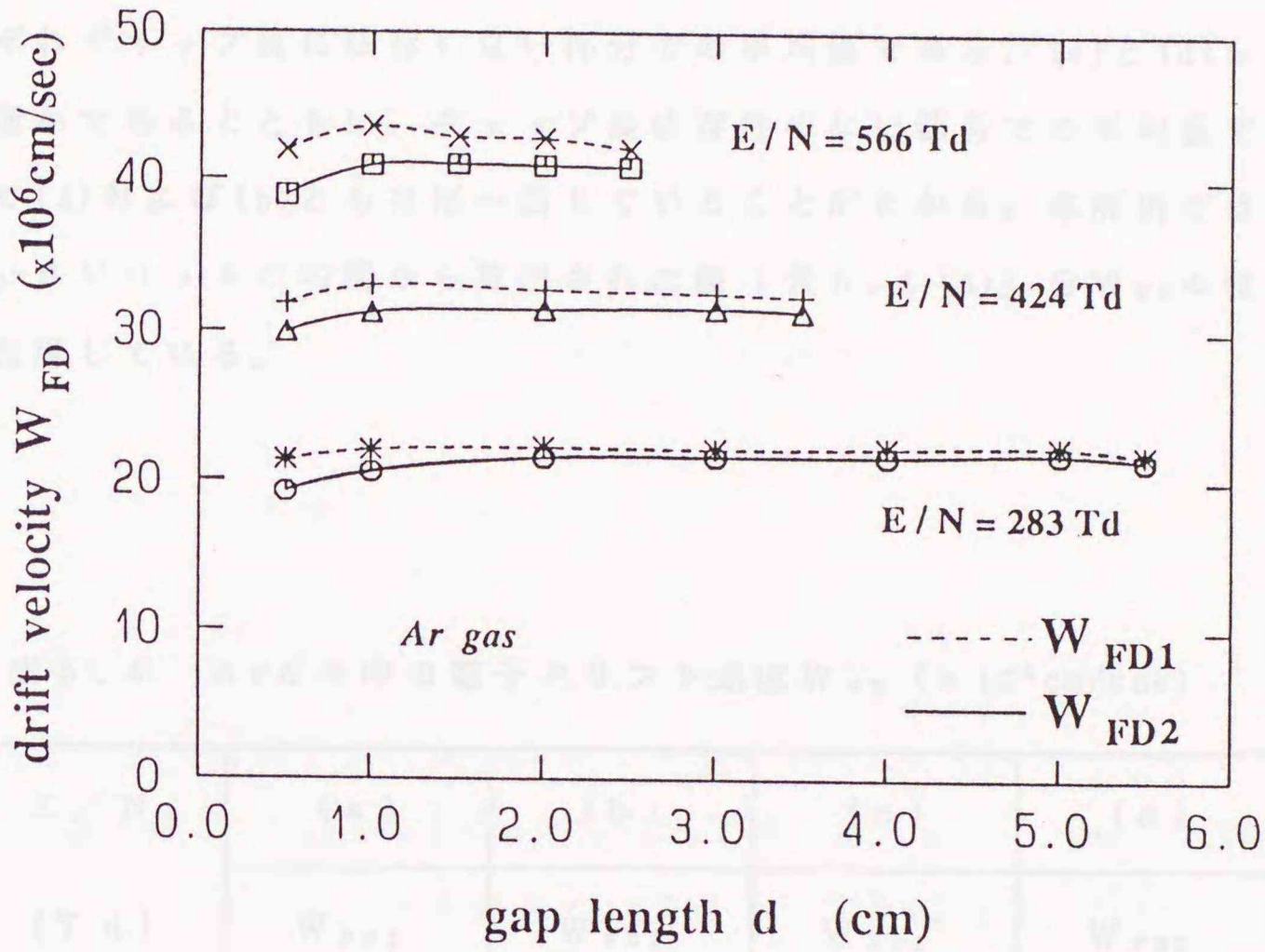


図5.8　電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}

に、ギャップ長が小さい部分で、W_{FD1}およびW_{FD2}に依存性が見られる。このギャップ長依存性を排除するために、(3－14)式を用いてT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの傾きからW_{FD1}およびW_{FD2}を算出すると表5.5(a)および(b)に示す値となる。表5.5(a)と(b)は、よく一致しており、T_{FD1}およびT_{FD2}のどちらからも、同じ値の電子ドリフト速度が得られることがわかる。

表5.4(c)および(d)は、図5.6において、W_{FD1}およびW_{FD2}がそれぞれギャップ長に依存しない部分での平均値である。(c)と(d)の違いが僅かであるとともに、ギャップ長依存性のない部分での平均値であるので(a)および(b)ともほぼ一致していることがわかる。本解析では、T_{FD1}-dプロットの勾配から算出された値（表5.4(a)）をW_{FD}の値として採用している。

表5.4　Arガス中の電子ドリフト速度W_{FD}（$\times 10^6$cm/sec）

E／N	(a)	(b)	(c)	(d)
(Td)	W_{FD1}	W_{FD2}	W_{FD1}	W_{FD2}
283	21.8	22.2	21.7	22.2
424	31.7	32.2	31.4	32.6
566	40.8	41.2	40.9	42.8

(a)、(b)：(3－14)式から

(c)、(d)：(2－50)式から

5－3－4　電子ドリフト速度の比較

図5.9に、本解析で得られたW_{sc}およびW_{FD}を、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較して示す。Arガスの場合には、W_{sc}が、計算を行なった全てのE/Nにおいて、WvおよびWmと非常によく一致していることがわかる。したがって、W_{sc}は、WvおよびWmと等しい電子ドリフト速度として取り扱うことが可能であると考えられる。W_{FD}は、図5.9に示したいずれの理論電子ドリフト速度とも一致していないが、図5.10に示すように$W=\frac{1}{2}(Wr+Wm)$と比較すると、E/N＝566Tdにおいて、3.9%の違いがあるのを除くと、その他では非常によく一致している。また、図5.10からもわかるように、W_{FD}とW_{sc}は、明らかに異なる電子ドリフト速度であることがわかる。

5－3－5　実測値との比較

図5.11は、W_{sc}およびW_{FD}をKücükarpaci et al.が報告している電子ドリフト速度の実測値と比較したものである。Kücükarpaci et al.の実験方法は、Schlumbohmの実験と同様であるので、本解析で得られたW_{sc}と一致することが予想され、図においても両者は、近い値となっている。しかし、E/Nが低い部分で、わずかながら一致していない。

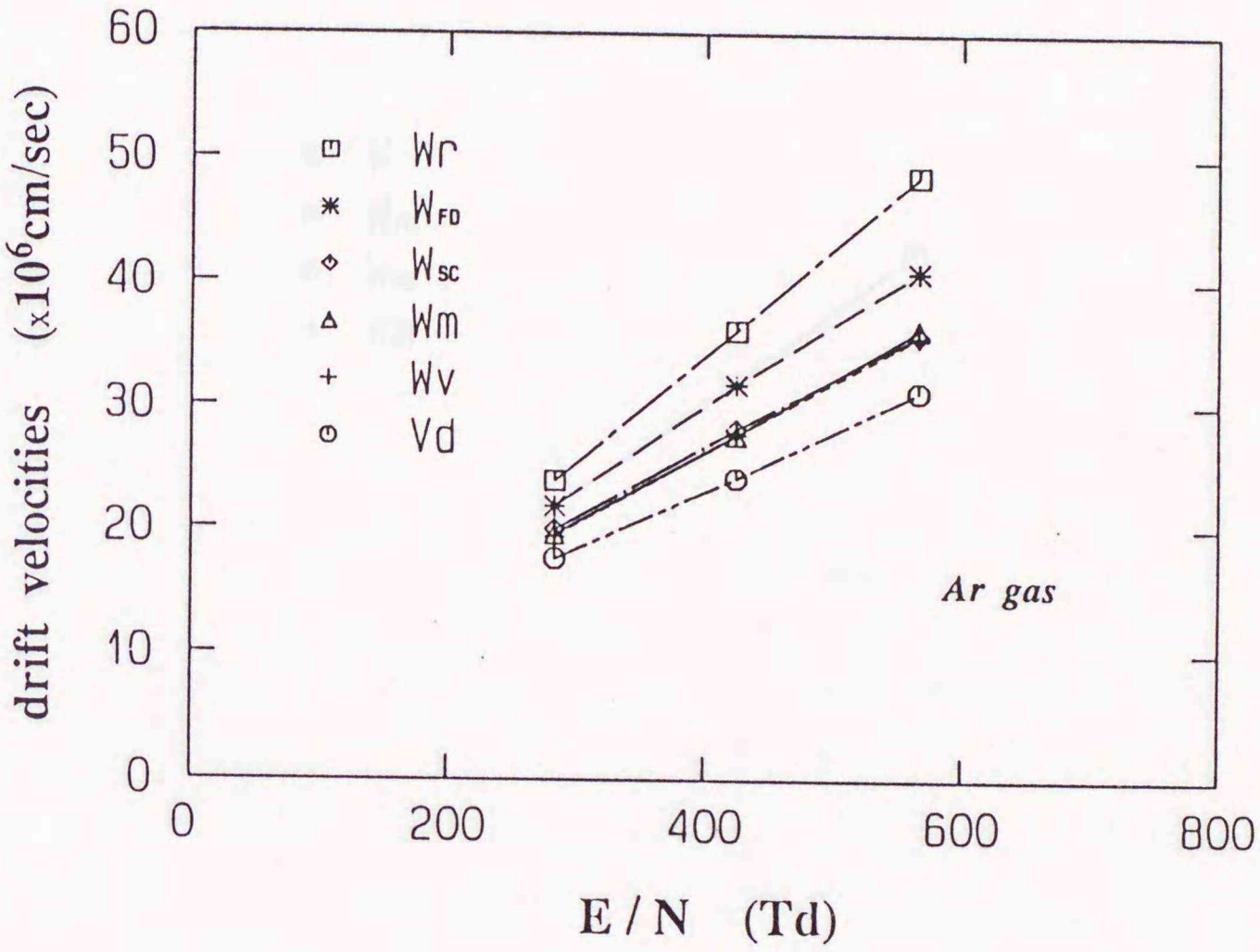


図5．9　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}と理論電子ドリフト速度の比較

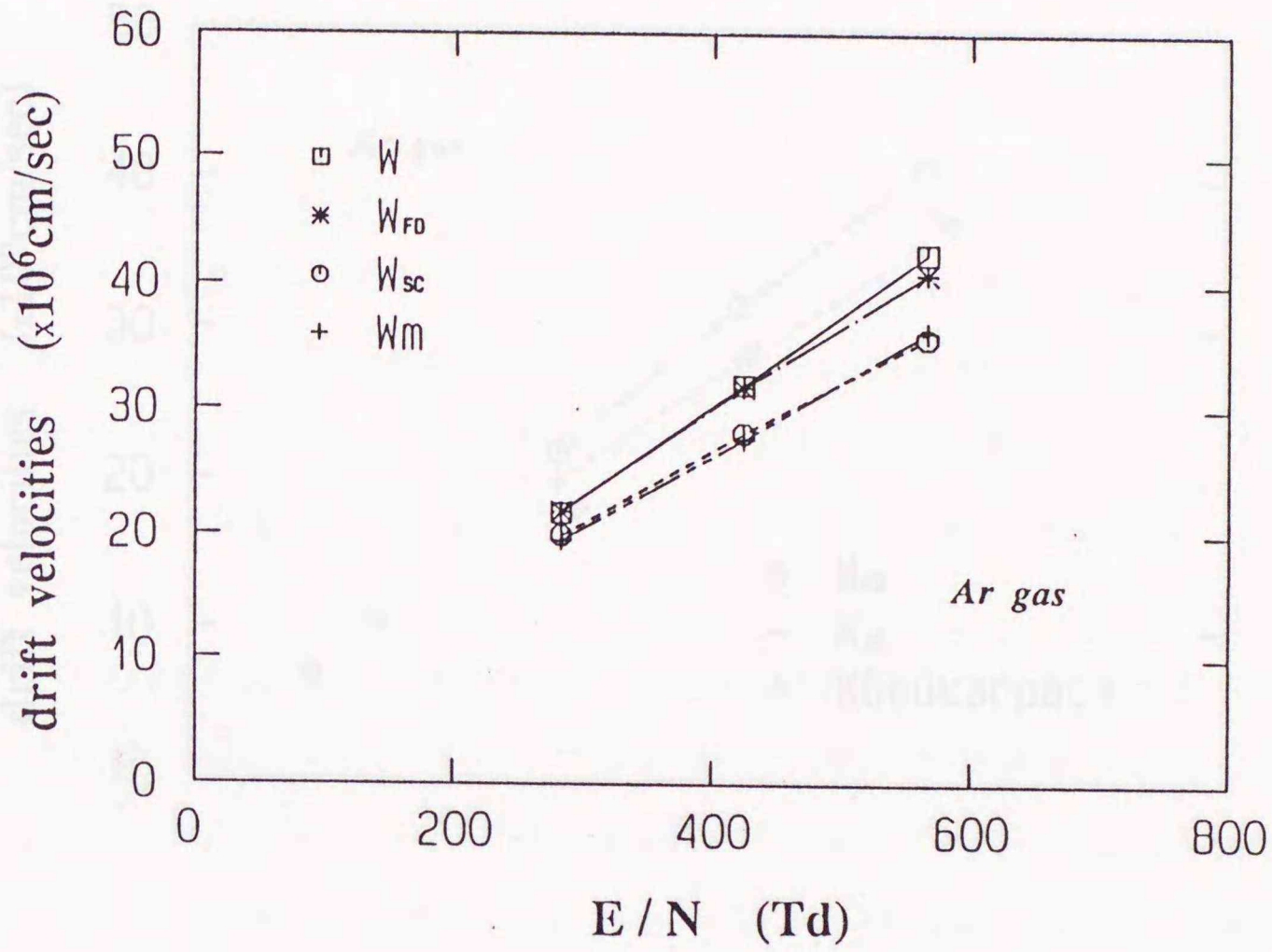


図5.10 電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}、WおよびWm

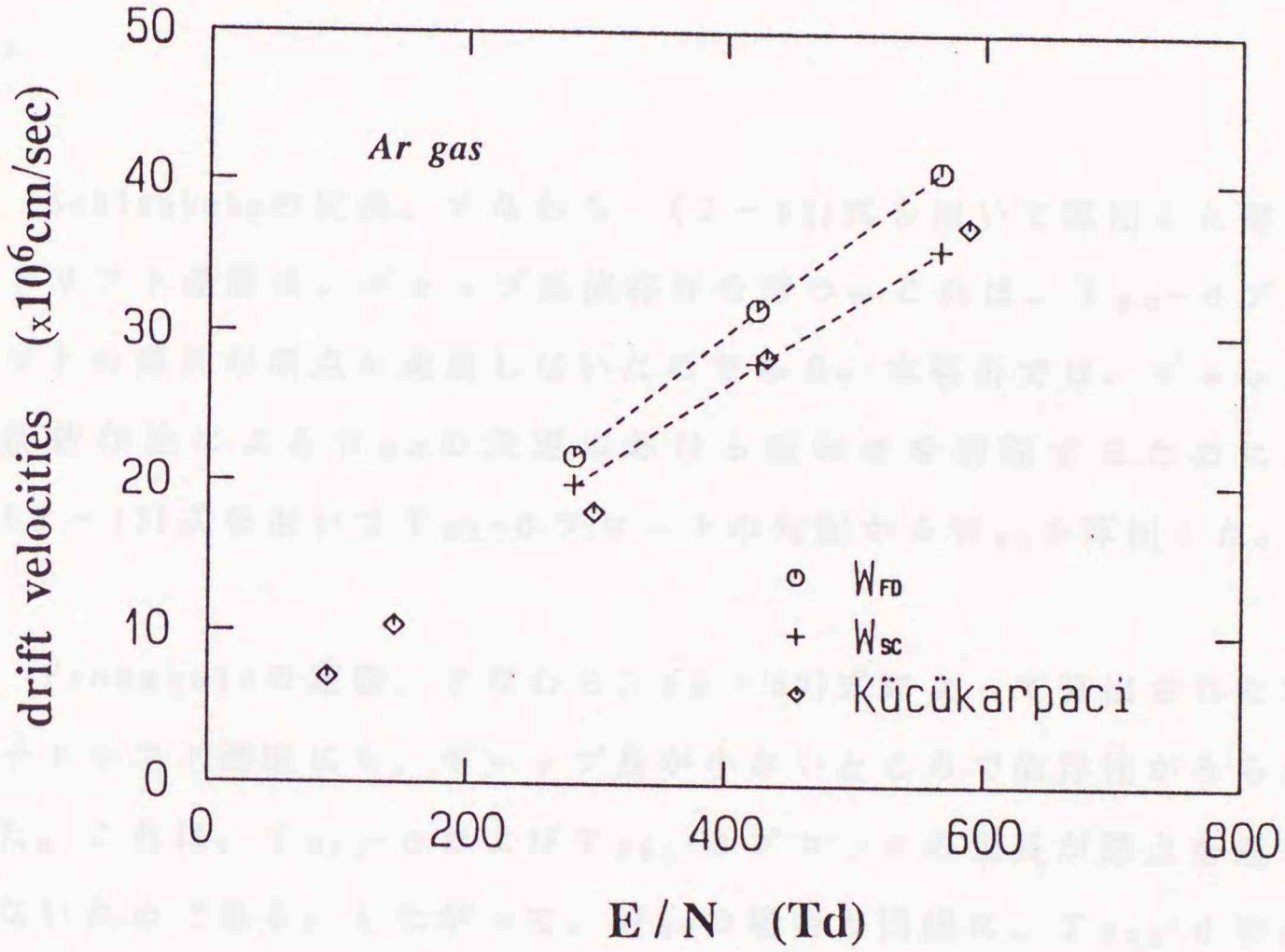


図５．11　実測値との比較

5－4　結言

本章では、Arガスに対し、電離による電子増倍を伴うE/NにおいてSchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から得られる電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出した。また、W_{SC}およびW_{FD}を、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較し、対応関係を検討した。その結果を以下に示す。

（1）　Schlumbohmの定義、すなわち、(2－49)式を用いて算出した電子ドリフト速度は、ギャップ長依存性を持つ。これは、T_{SC}-dプロットの延長が原点を通過しないためである。本解析では、ギャップ長依存性によるW_{SC}の決定における曖昧さを排除するために、(3－13)式を用いてT_{SC}-dプロットの勾配からW_{SC}を算出した。

（2）　Frommholdの定義、すなわち、(2－50)式によって算出された電子ドリフト速度にも、ギャップ長が小さいところで依存性がみられた。これは、T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの延長が原点を通らないためである。したがって、W_{SC}の場合と同様に、T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの勾配からW_{FD1}およびW_{FD2}それぞれ算出した。W_{FD1}とW_{FD2}はよく一致しており、T_{FD}の決定方法によらず、ほぼ同じ値が得られることがわかった。本解析では、W_{FD1}の値をW_{FD}として採用している。

（3）　W_{SC}とW_{FD}は、計算を行なったすべてのE/Nにおいて異なる値を持ち、E/Nが高くなるにしたがって、不一致の傾向が顕著になった。したがって、W_{SC}とW_{FD}は、本質的に異なる電子ドリフト速

度であると考えられる。

（4） W_{sc}およびW_{FD}を理論電子ドリフト速度と比較した結果、W_{sc}は、W_vおよびW_mと非常によく一致する電子ドリフト速度であることがわかった。したがって、Arガスの場合には、W_{sc}をW_vあるいはW_mに等しい電子ドリフト速度として取り扱うことが可能であると考えられる。W_{FD}は、いずれの理論電子ドリフト速度にも一致していないが、高E/Nを除いて、$\frac{1}{2}(W_r+W_m)$とよく一致することがわかった。

（5） Schlumbohmの実験と同様な方法を用いているKücükarpaci et al.による実測値とW_{sc}およびW_{FD}を比較した結果、Kücükarpaci et al.の実測値は、E/Nが低い部分で僅かに違いが見られるが、その他ではW_{sc}とよく一致することがわかった。

参考文献

[1] P.Herreng 1943 C.R.Acad.Sci. Paris 217 pp.75-7

[2] D.D.Erret 1951 Ph.D. Thesis Purde University, Indiana
(see also Dutton 1975)

[3] G.Jager and W.Otto 1962 Z.Phys. 169 pp.517-25

[4] J.Brambring 1946 Z.Phys. 179 pp.539-43

[5] R.A.Nielsen 1936 Phys.Rev. 50 pp.950-4

[6] H.N.Kücükarpaci, J.Lucas and H.T.Saelee
1981 J.Phys.D: Appl.Phys. 14 pp.9-25

[7] S.R.Hunter, J.G.Carter and L.G.Christophorou
1988 Phys.Rev.A 38 pp.5539-51

[8] M.Suzuki, T.Taniguchi and H.Tagashira
1990 J.Phys.D: Appl.Phys. 23 pp.842-50

[9] S.Sawada, Y.Sakai and H.Tagashira
1989 J.Phys.D: Appl.Phys. 22 pp.282-8

[10] N.J.Mason and W.R.Newell
1987 J.Phys.B: At.Mol.Phys. 20 pp.1357-77

[11] Y.Sakai, H.Tagashira and S.Sakamoto
1972 J.Phys.B: 5 pp.1010-16

第６章　ＳＦ$_6$ガスに対する解析

６－１　緒言

ＳＦ$_6$ガスは、電子付着性の強いガスであり、ガス絶縁材料として用いられているが、最近では、その他にプラズマエッチング、ガスレーザの媒質としても利用されている。ＳＦ$_6$ガスは、低エネルギー部に非常に大きな電子付着衝突断面積を持つとともに、高エネルギー部には、大きな電離衝突断面積を持っており、Ｅ/Ｎの上昇にともなって、電子付着性の強いガスから、電離の著しいガスへと変化する。

ＳＦ$_6$ガス中の電子ドリフト速度は、Harris and Jones(1971)[1]、Naidu and Prasad(1972)[2]、Teich and Sangi(1972)[3]、Aschwanden(1984)[4]、Nakamura(1988)[5]などによって報告されている。Harris and Jonesは、Bradbury(1932)[6]と同様な方法の測定から電子ドリフト速度を決定しており、Yoshizawa et al.(1979)[7]によれば、この電子ドリフト速度は、Ｖdに相当するドリフト速度であると報告している。AschwandenおよびTeich and Sangiらは、電流のスペクトルから電子ドリフト速度を決定しており、これは、Ｗvに相当する電子ドリフト速度であるとされている[8]。また、Naidu and PrasadおよびNakamuraの報告している電子ドリフト速度は、Ｗmに相当するとされている[8]。しかし、Itoh et al.(1988)[8]は、ボルツマン方程式解析から得られた理論電子ドリフト速度Ｖd、ＷvおよびSatoh et al.(1988)[9]の報告したＷr、Ｗmを、上述じた実測値と比較しているが、実験と理論の一致は見られない。

本章では、ＳＦ$_6$ガスに対してSchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、理論電子ドリフト速度

および実測値と比較し、対応関係の検討を行なう。

6－2　シミュレーション条件

図6.1に、計算に使用したSF_6ガスの電子衝突断面積のセットを示す。このセットは、運動量移行σ_m、振動励起σ_v、電子状態の励起σ_{ex}、電離σ_iおよび5種類の電子付着$\sigma_{aSF_6^-}$、$\sigma_{aSF_5^-}$、$\sigma_{F_2^-}$、$\sigma_{aSF_4^-}$、σ_{aF^-}によって構成されている。また、このセットは、実測値をできる限り利用し、実測値のないσ_{ex}を推定し、実効電離係数$\bar{\alpha}$が実測値の$\bar{\alpha}$と一致するように決定されたものである。

SF_6ガスにおいても、電離による電子増倍を伴うE/Nにおいて、ガス圧p＝1Torr一定とし、ギャップ長を変化させてシミュレーションを行なった。表6.1は、各E/Nにおける初期電子数、微小時間⊿tおよびサンプリング間隔を表わす。E/N=424、566および707Tdにおいてν_Tは、10^{10}のオーダであるので、本解析では⊿tの値を表6.1のように設定した。

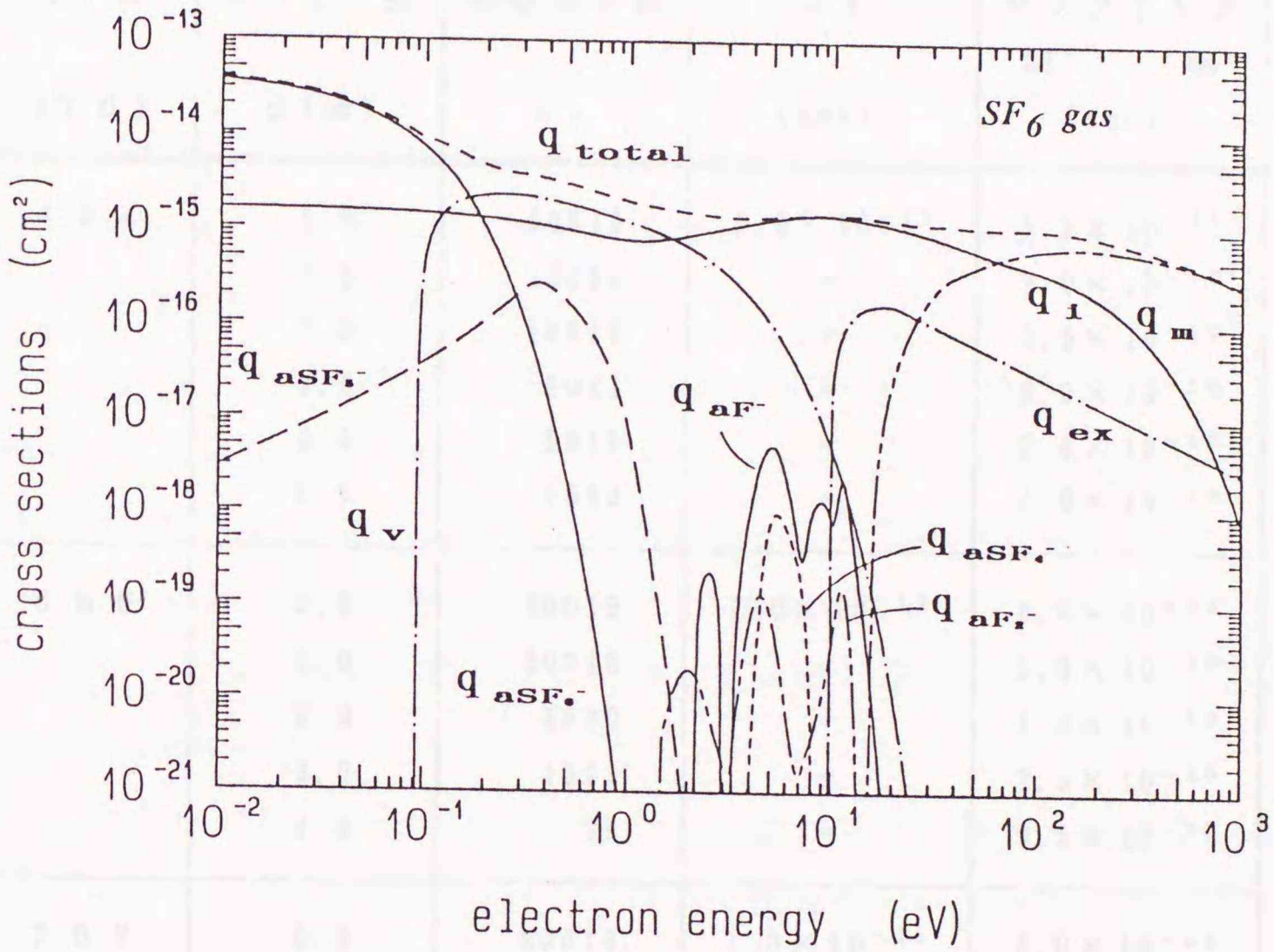


図6．1　ＳＦ$_6$ガスの電子衝突断面積

表６．１　計算条件（ＳＦ$_6$ガス）

Ｅ／Ｎ (Ｔｄ)	ギャップ長 ｄ(cm)	初期電子数 n_0	⊿ｔ (sec)	サンプリング間隔 (sec)
４２４	1.0	50016	1.0×10^{-11}	1.2×10^{-10}
	2.0	15050	〃	2.0×10^{-10}
	3.0	10018	〃	2.5×10^{-10}
	4.0	6021	〃	3.0×10^{-10}
	5.0	5017	〃	3.8×10^{-10}
	6.0	3020	〃	4.0×10^{-10}
５６６	0.5	80015	1.0×10^{-11}	6.0×10^{-11}
	1.0	50016	〃	1.0×10^{-10}
	2.0	3520	〃	1.8×10^{-10}
	3.0	1023	〃	2.5×10^{-10}
	4.0	79	〃	3.5×10^{-10}
７０７	0.5	80015	1.0×10^{-11}	5.0×10^{-11}
	1.0	10018	〃	1.0×10^{-10}
	1.5	4022	〃	1.2×10^{-10}
	2.0	1023	〃	1.5×10^{-10}
	2.5	79	〃	2.0×10^{-10}

6－3　解析結果

6－3－1　計算結果

図6.2、6.3および6.4にE/N=424、566および707Tdにおける各ギャップ長に対するギャップ電流I(t)および電圧V(t)の時間変化をそれぞれ示す。ギャップ電流I(t)の時間変化において、○印がピークを示しており、t＝0からピークまでの時間が経過時間T_{SC}となる。SF_6ガスは、電子付着性を持つガスであるので、CH_4ガスの場合と同様に、電圧V(t)のセミログプロットでは、IIの部分で実効電離周波数$\overline{R_i}$の傾きを持つ直線となる部分が存在すると考えられる。図6.2、6.3および6.4において、破線は、$\overline{R_i}$の傾きを持つ直線とlogV(t)=Const.の延長を示しており、t=0からこれら2本の直線の交点までの経過時間がT_{FD1}となる。また、一点鎖線は、$\frac{1}{2}\overline{R_i}$の傾きを持つ直線であり、t=0からこの直線とlogV(t)-t曲線の接点までの時間がT_{FD2}となる。ここで、用いた$\overline{R_i}$の値および、その他の電子スオームパラメータを表6.2に示す。

E/N=566および707Tdの結果では、他のガスの場合と同様に、ギャップ長が大きくなると、logV(t)が$\overline{R_i}$の傾きをもって増加する部分が見られる。また、ギャップ電流I(t)の時間変化は、ピークを中心にして、ほぼ対称的な形状を示している。しかし、E/N=424Tdの結果では、ギャップ長を大きくしても、logV(t)が、$\overline{R_i}$の傾きを持って上昇する部分が僅かであり、また、ギャップ電流の時間変化も、図6.2(d)～(f)に示すように、ピークを越すと急激に減少しており、対称形になっていない。これは、ギャップ電流のピークを過ぎてアノードに到着する電子は、一般に遅い電子であると考えられる。そのため電離衝突を起こす確率が低く、さらに、SF_6ガスでは低エネルギー部分に非常に大きな電

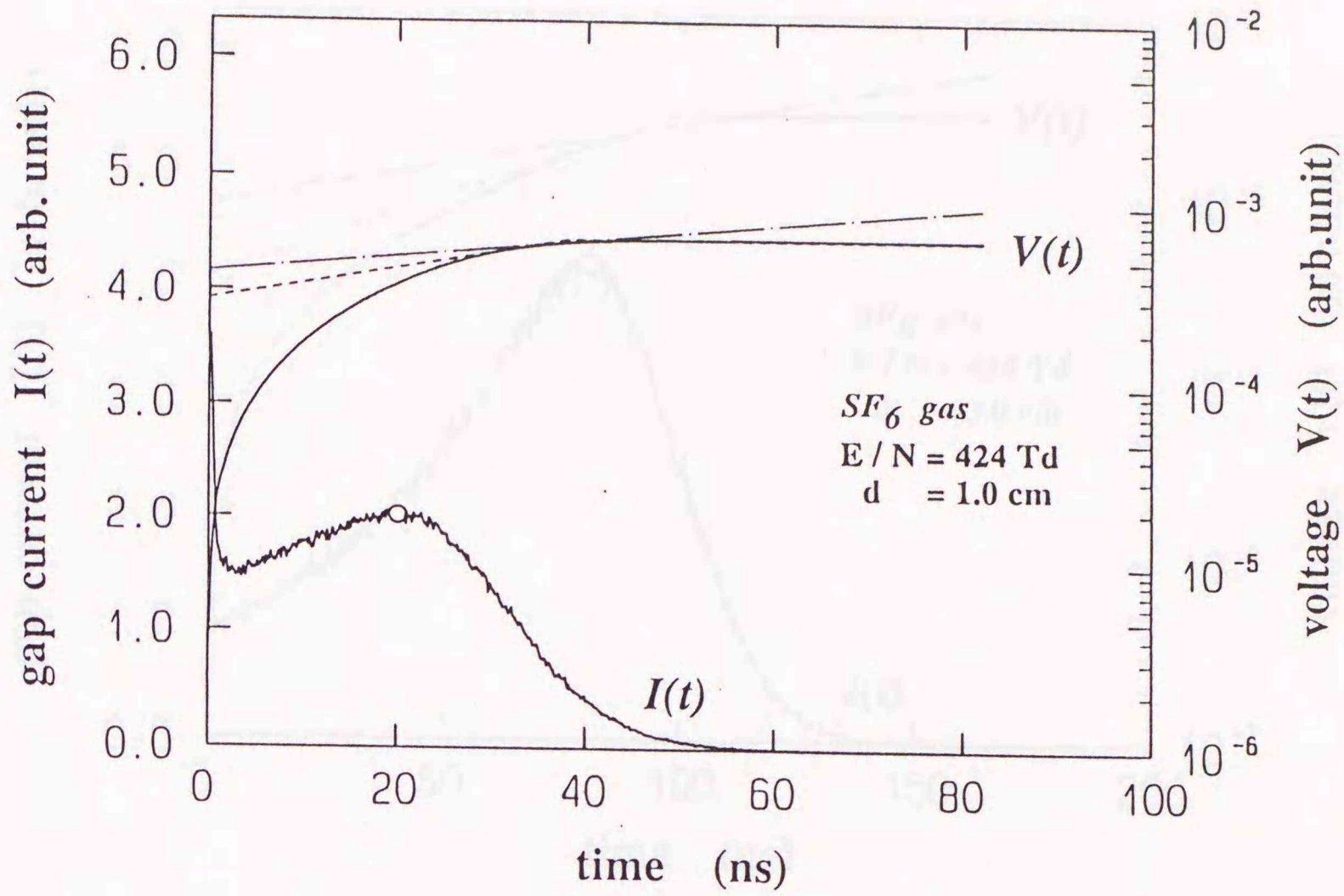


図6．2（a） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=1.0cm

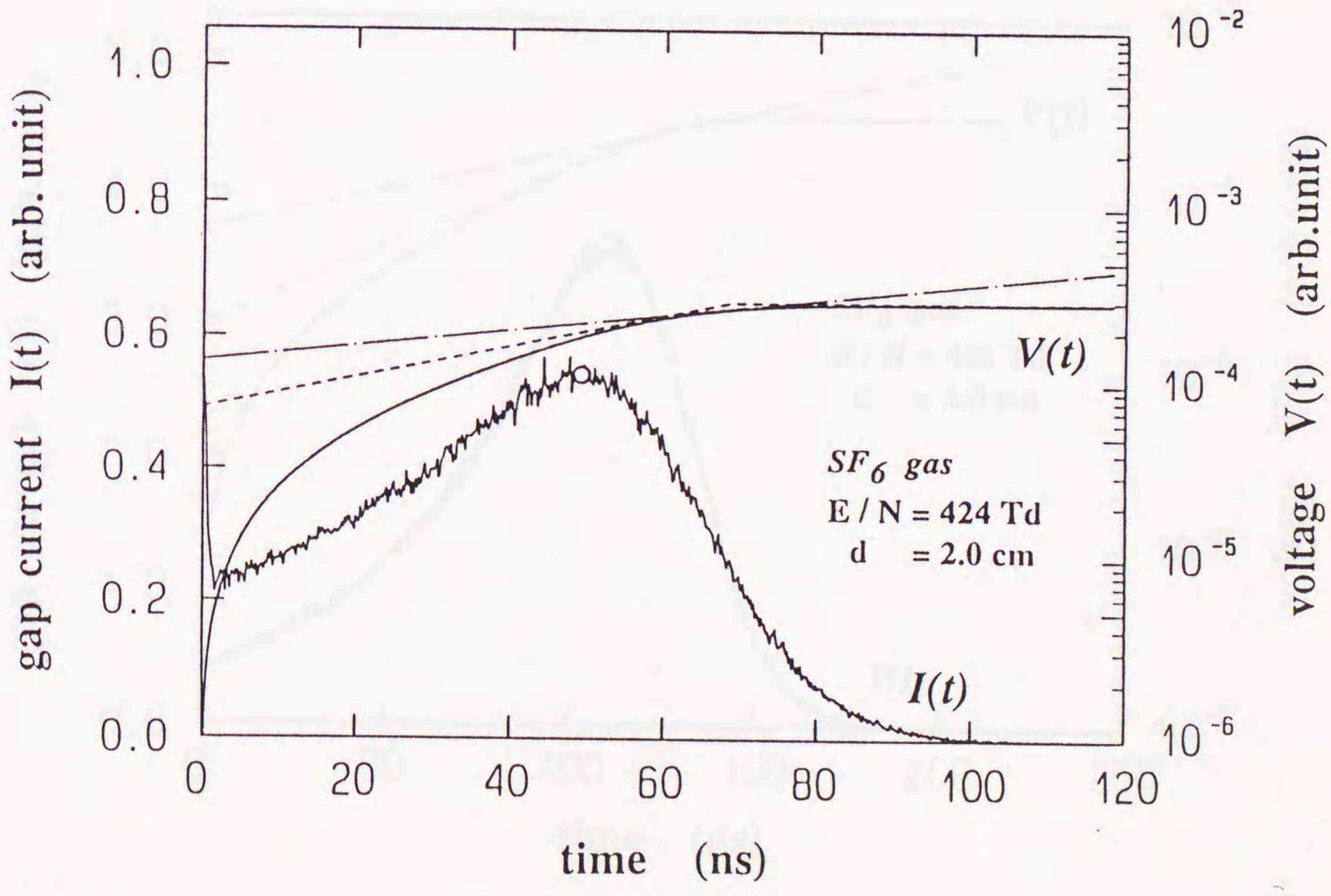


図6．2（b） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=2.0cm

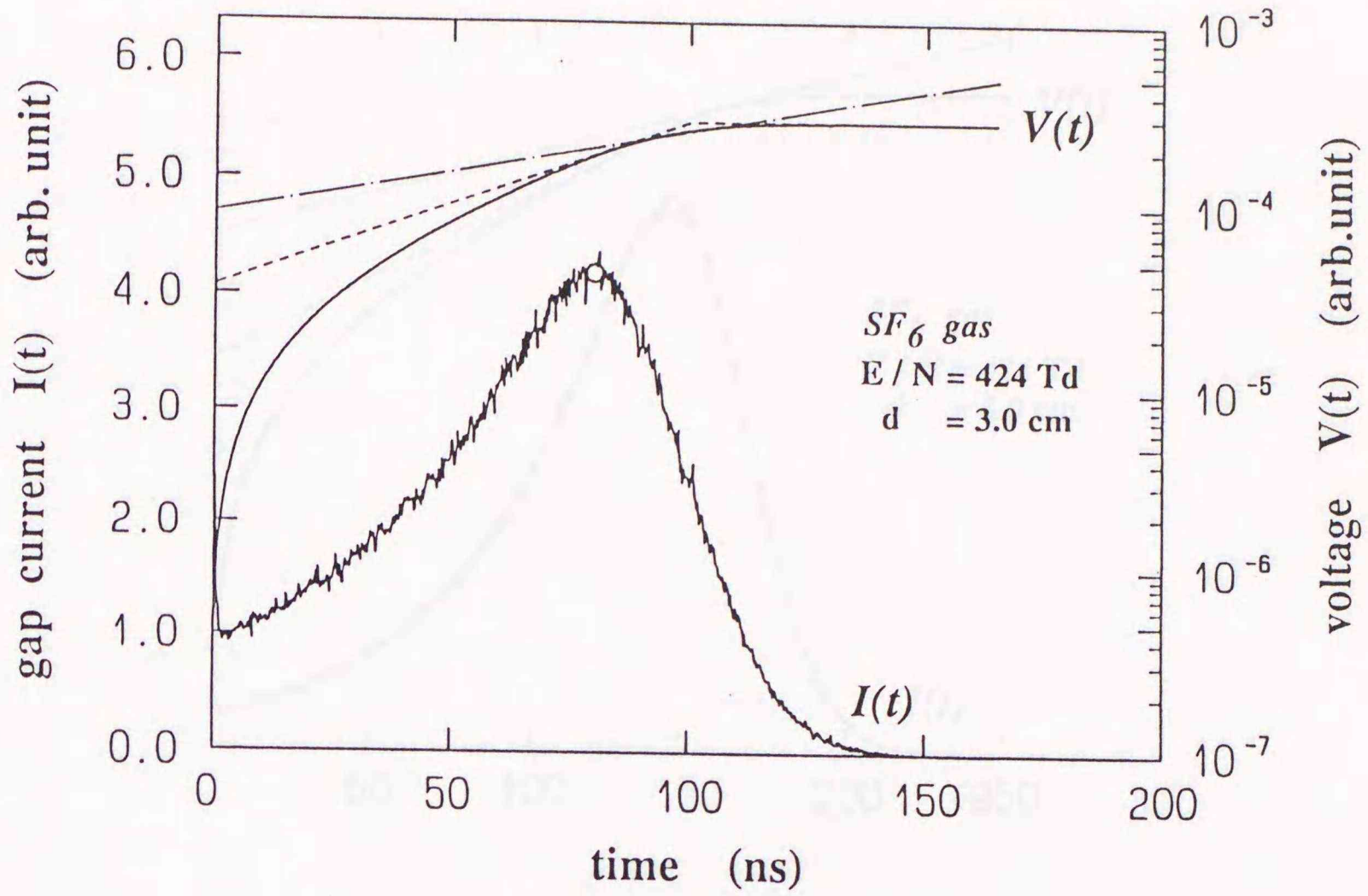


図6．2（c） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=3.0cm

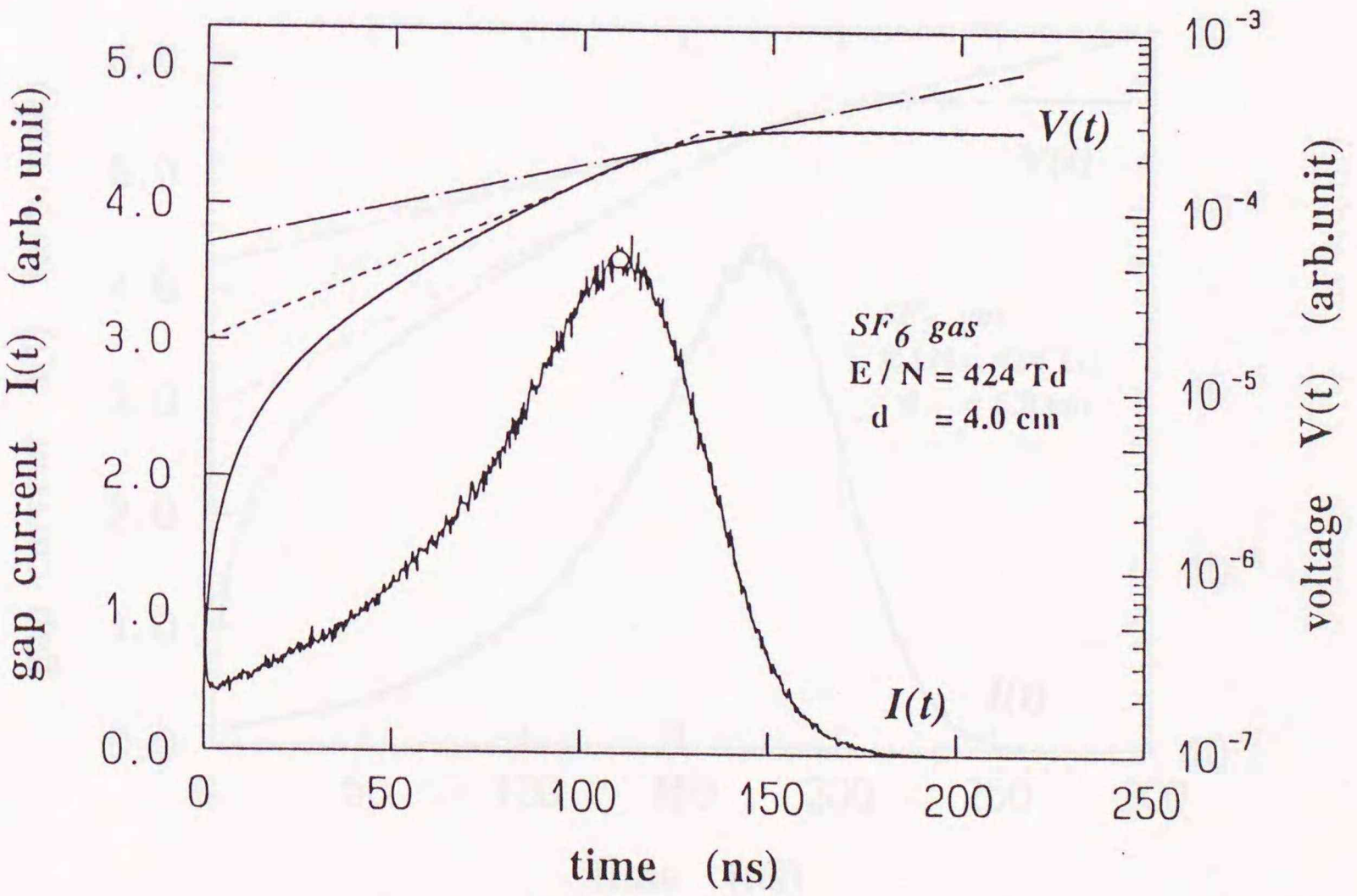


図6．2（d） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=4.0cm

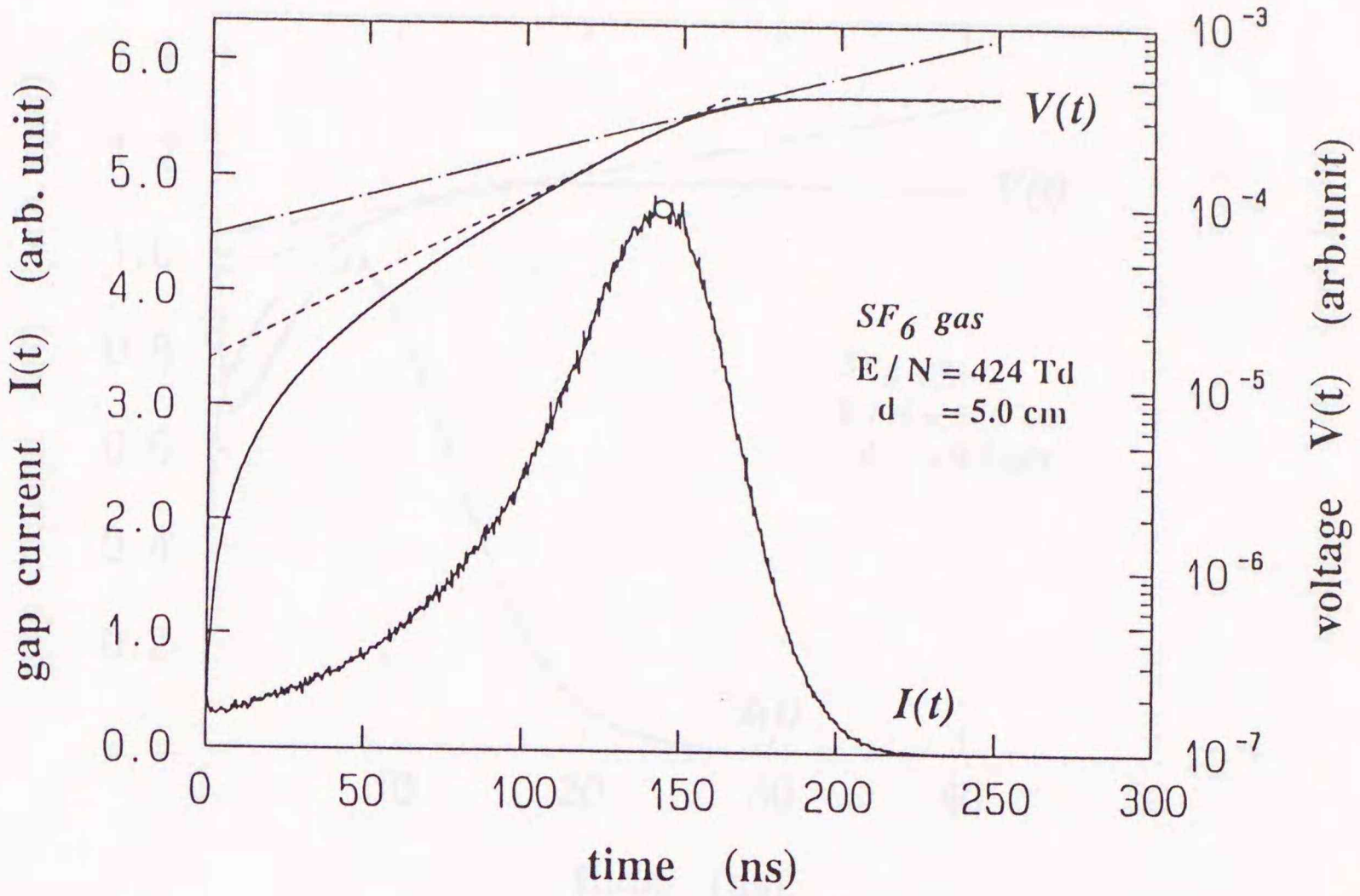


図6．2（e） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=5.0cm

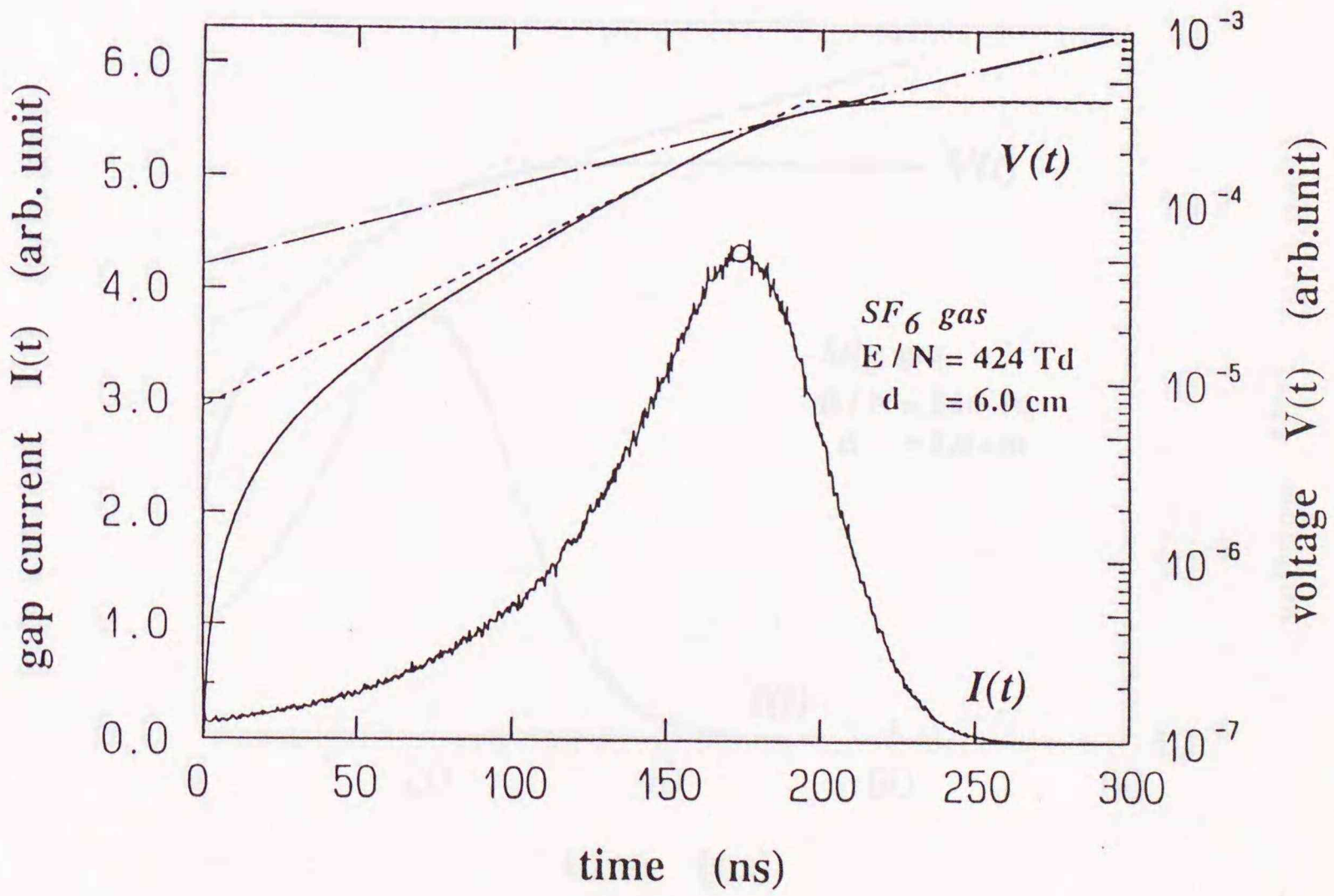


図6．2（f） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=424Td, d=6.0cm

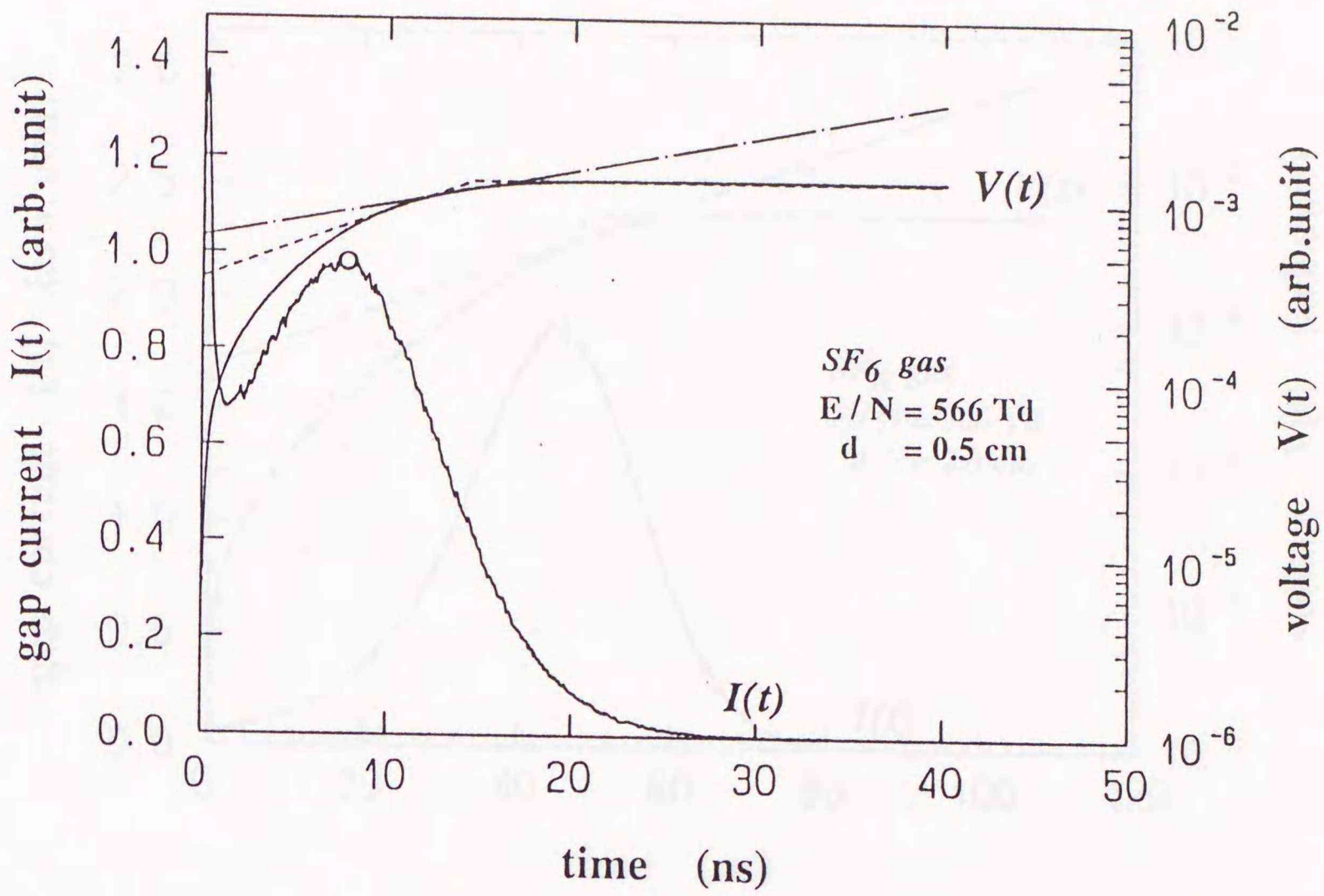


図6．3（a） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=0.5cm

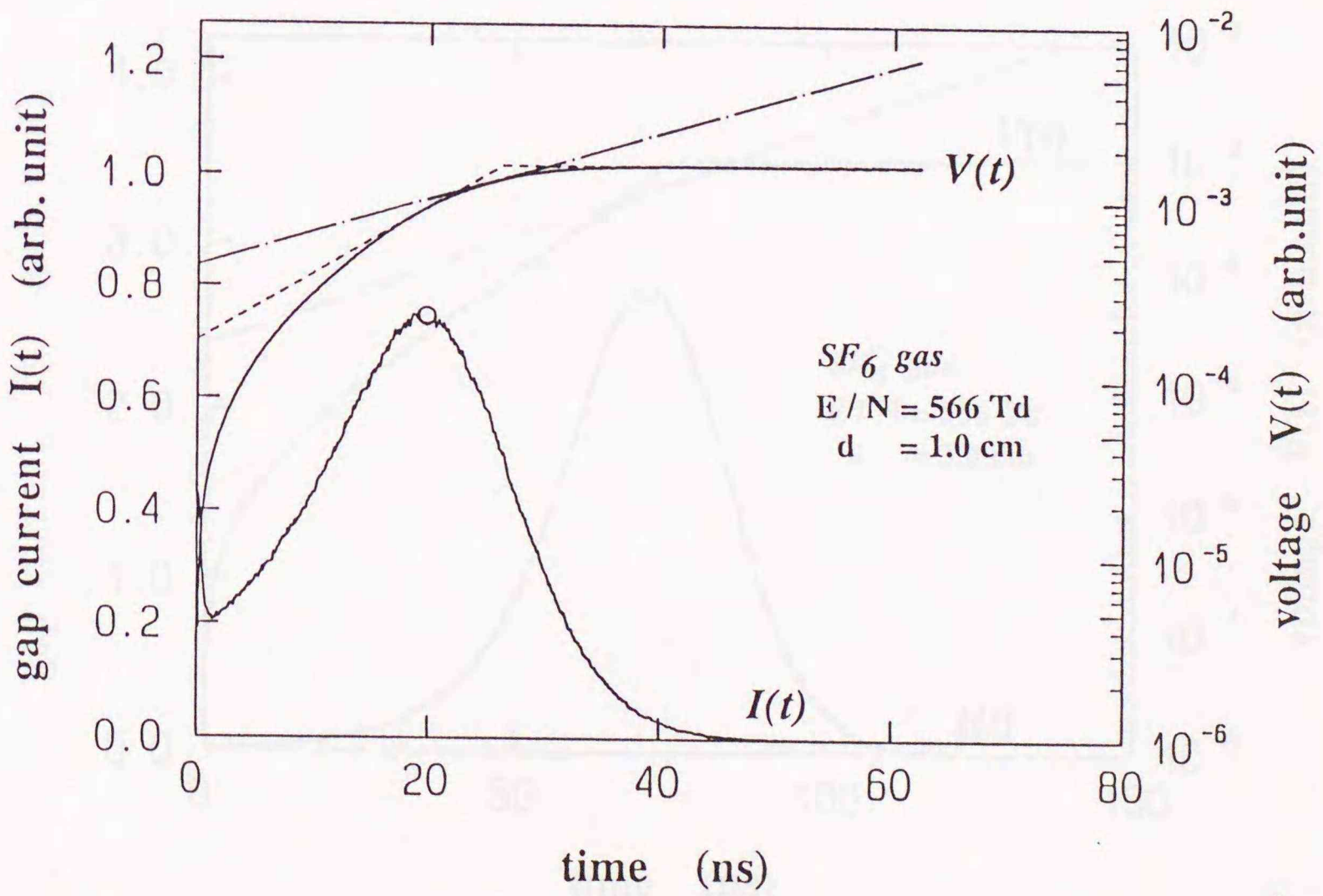


図6．3（b） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=1.0cm

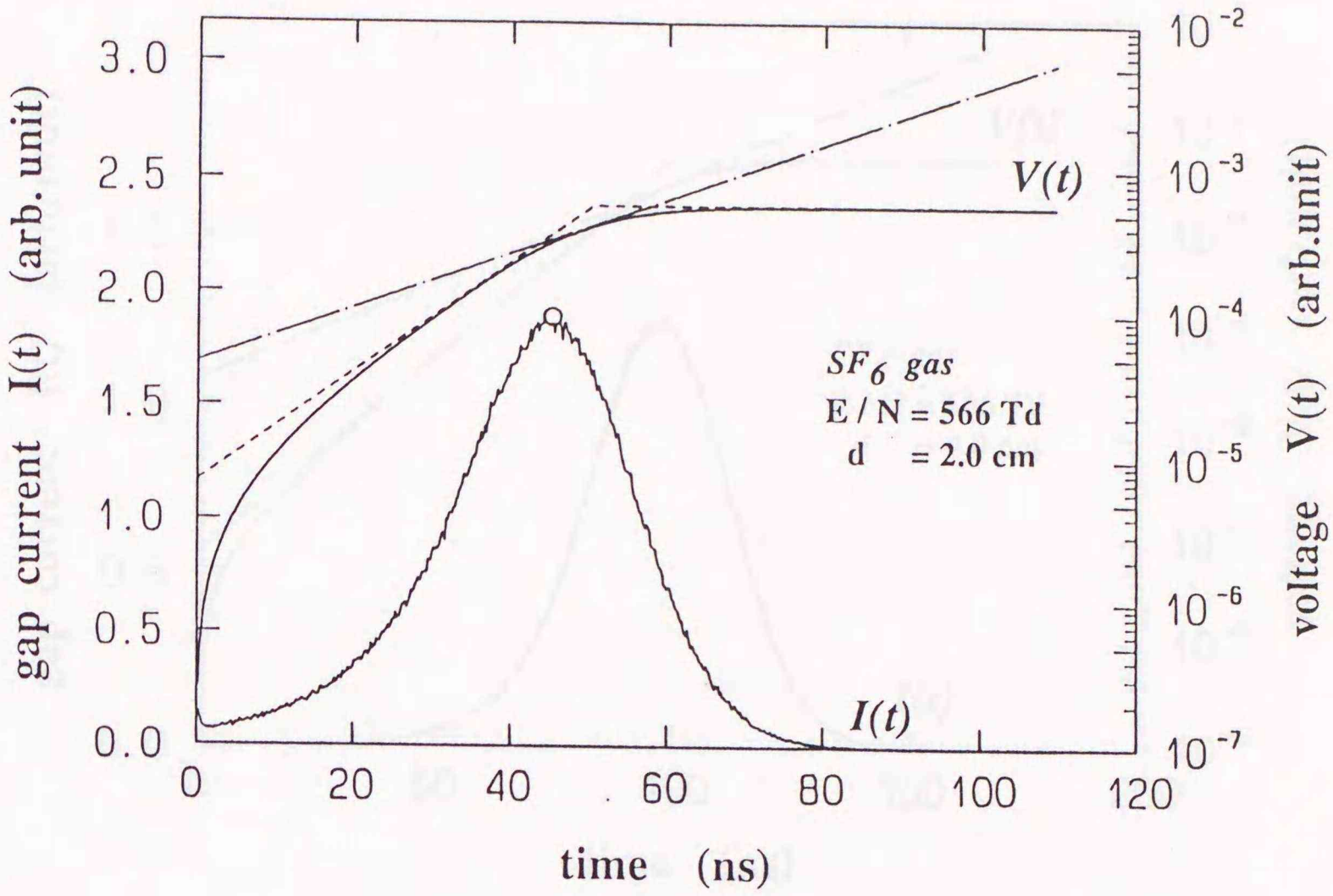


図6．3（c） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

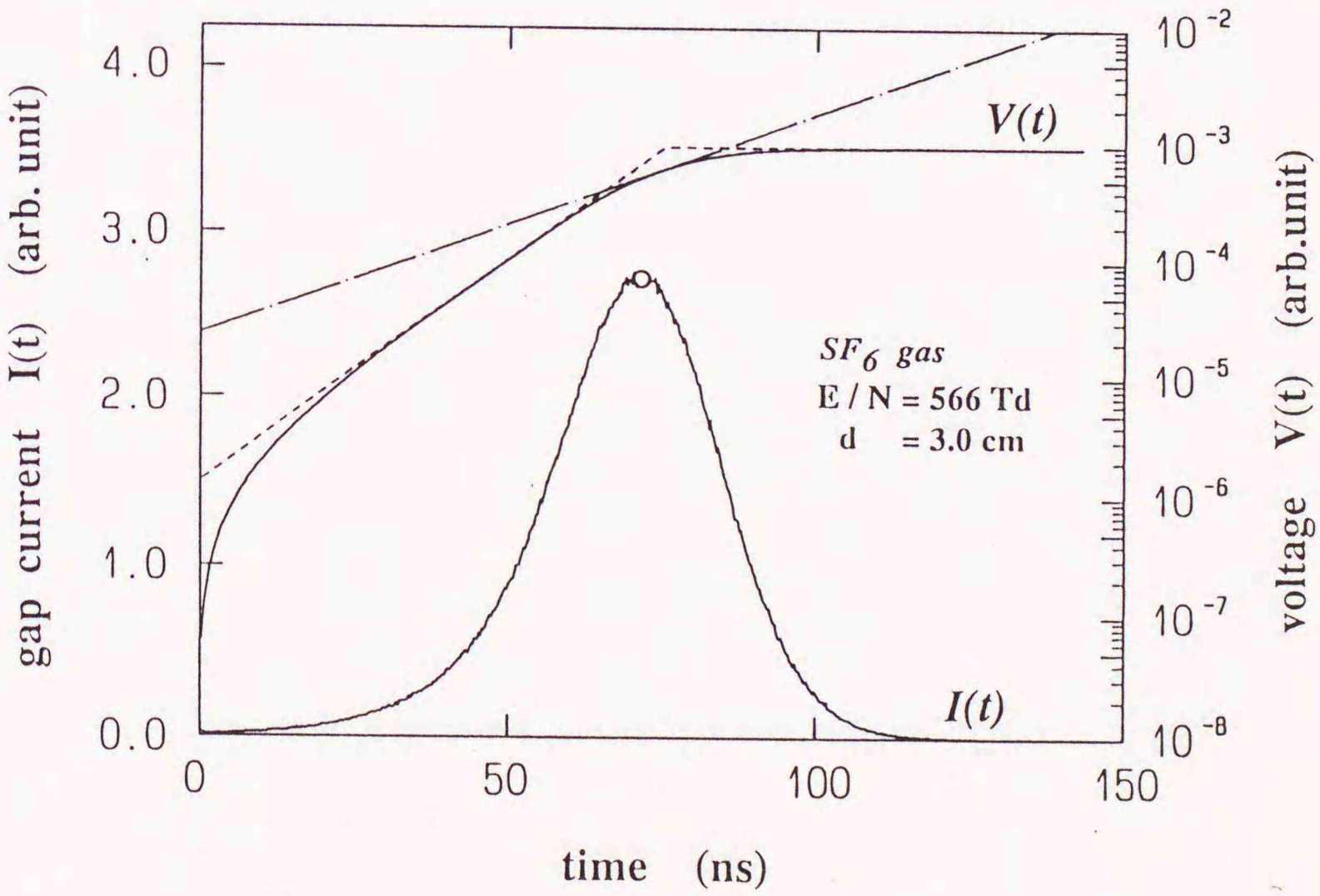


図6．3（d） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=3.0cm

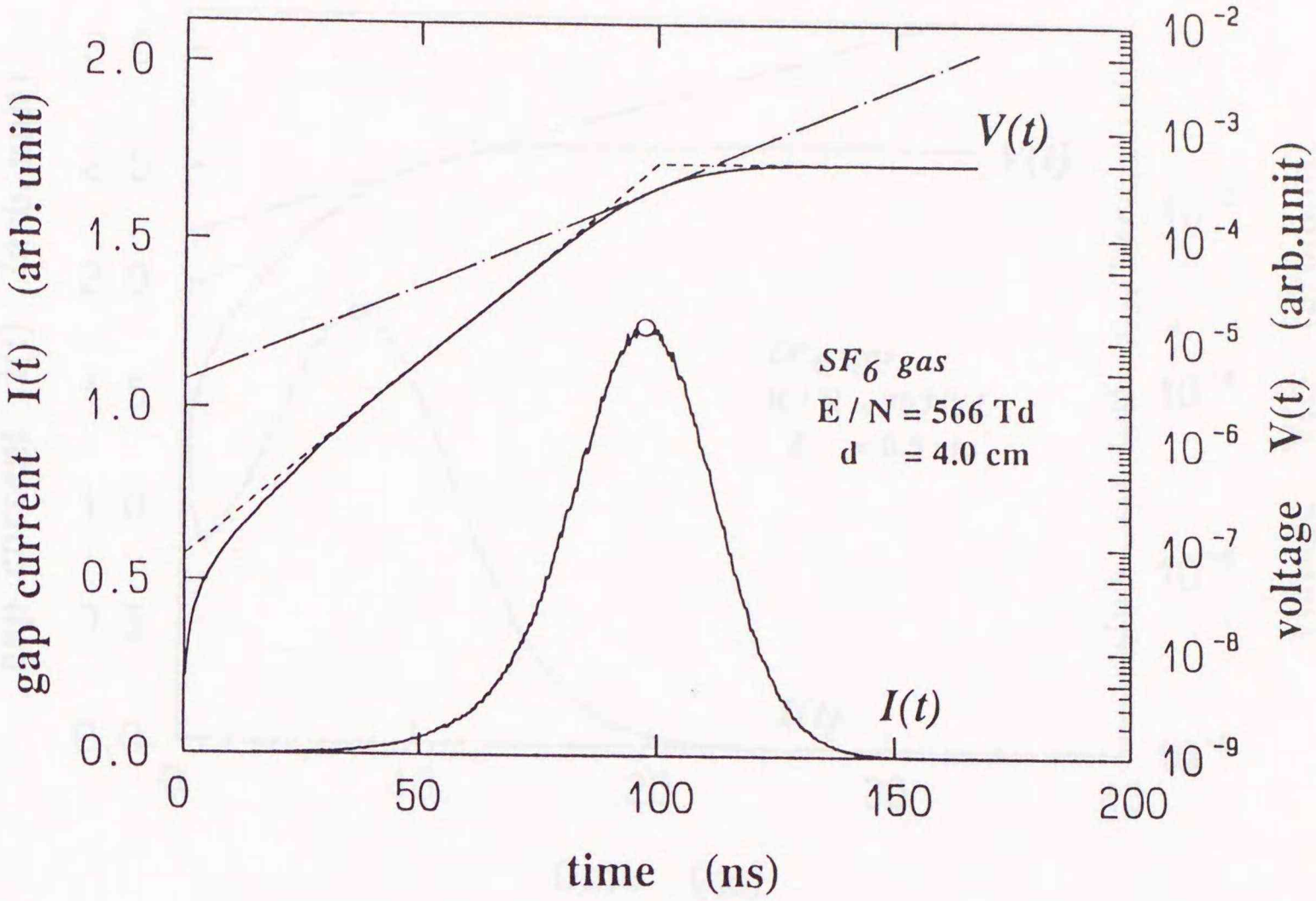


図6．3（e） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=566Td, d=4.0cm

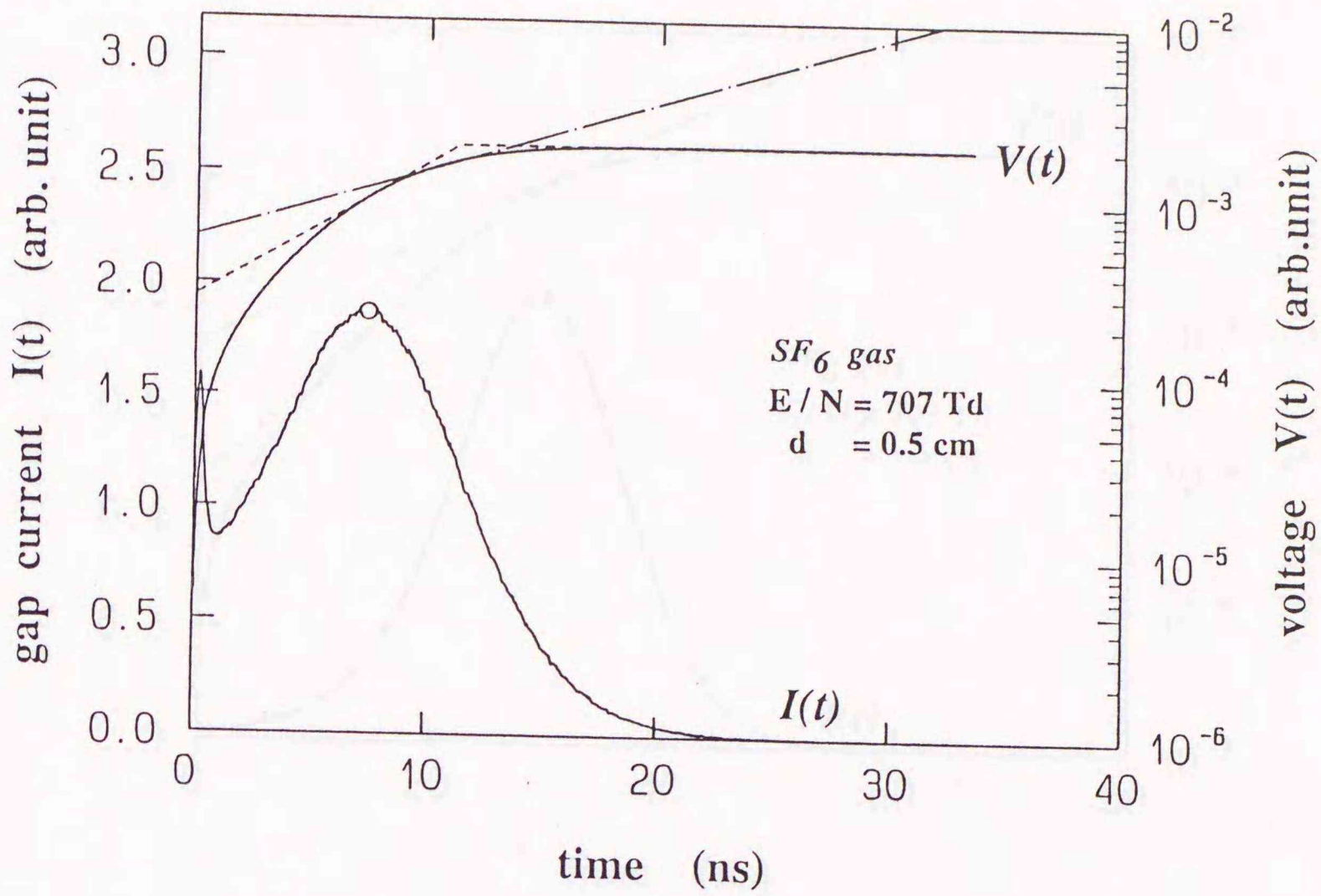


図6．4（a） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=707Td, d=0.5cm

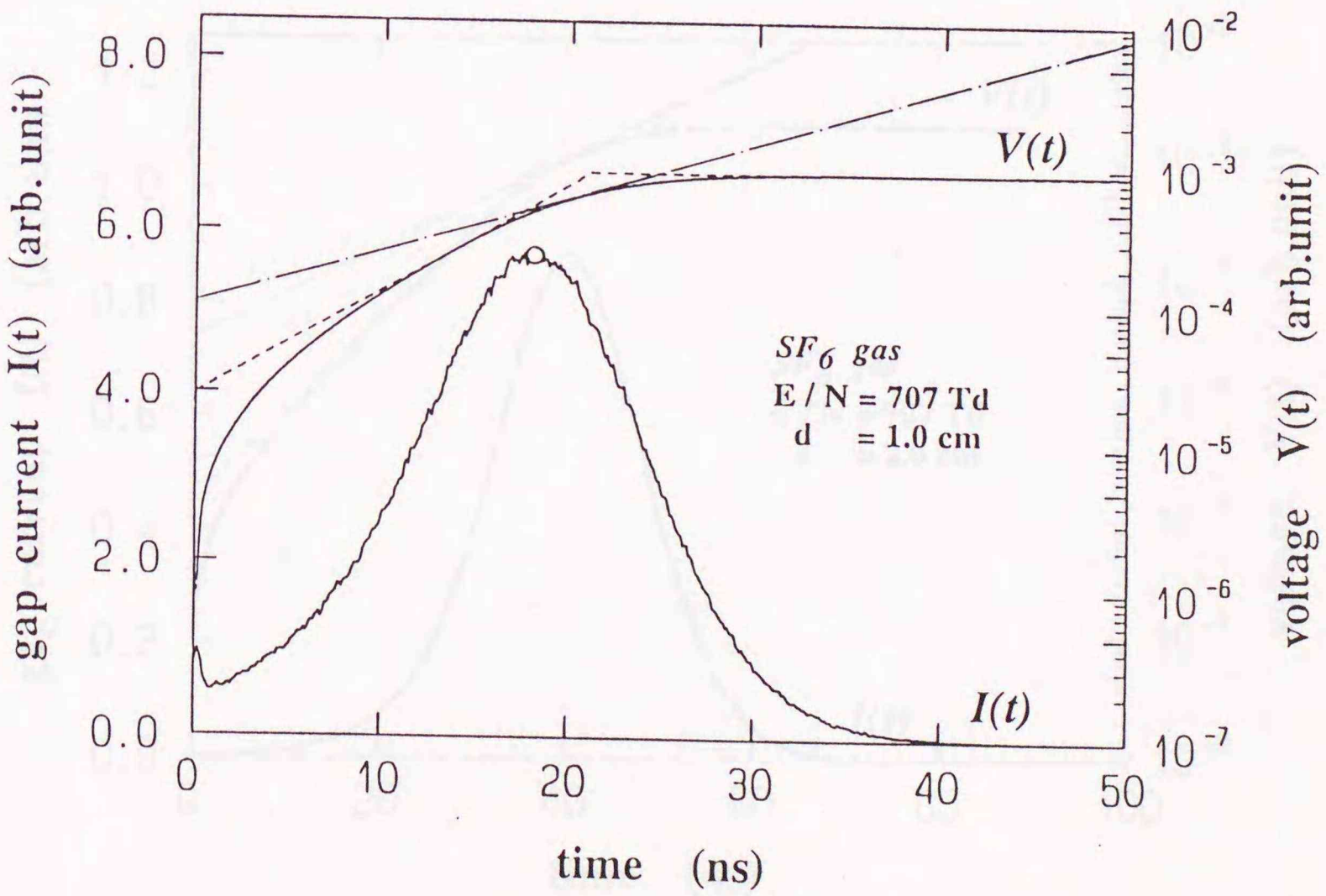


図6．4（b） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=707Td, d=1.0cm

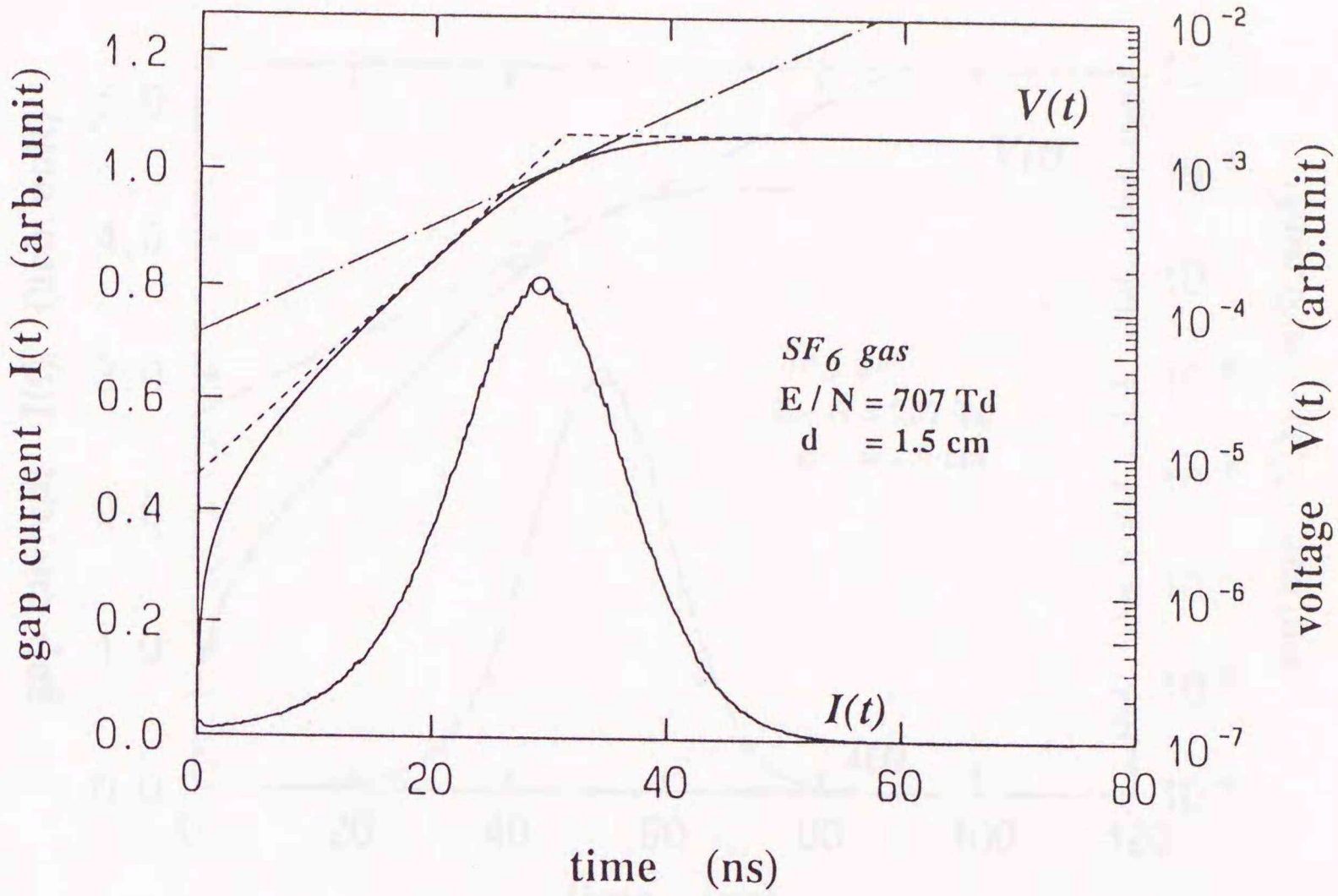


図6．4（c） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=707Td, d=1.5cm

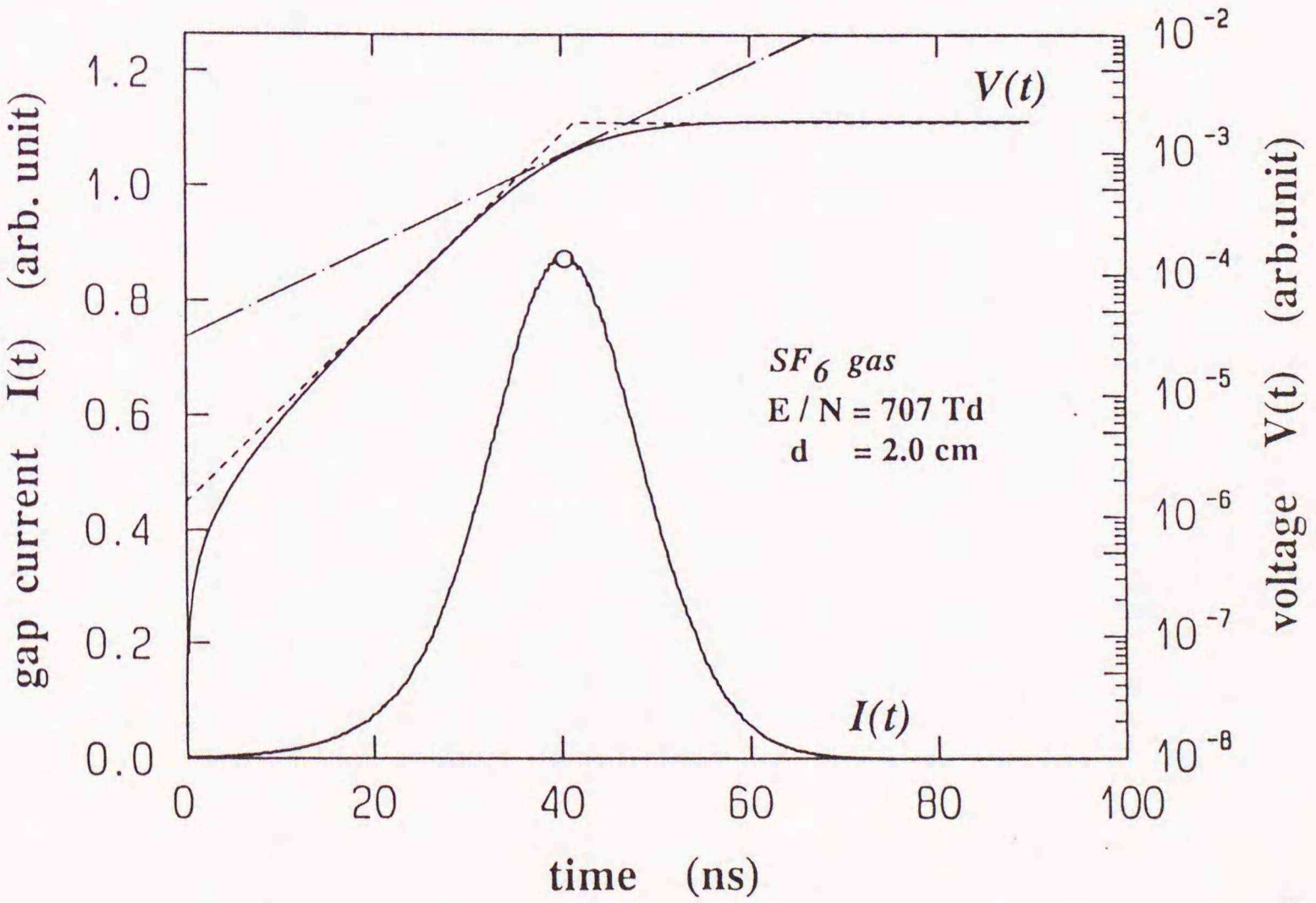


図6．4（d） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=707Td, d=2.0cm

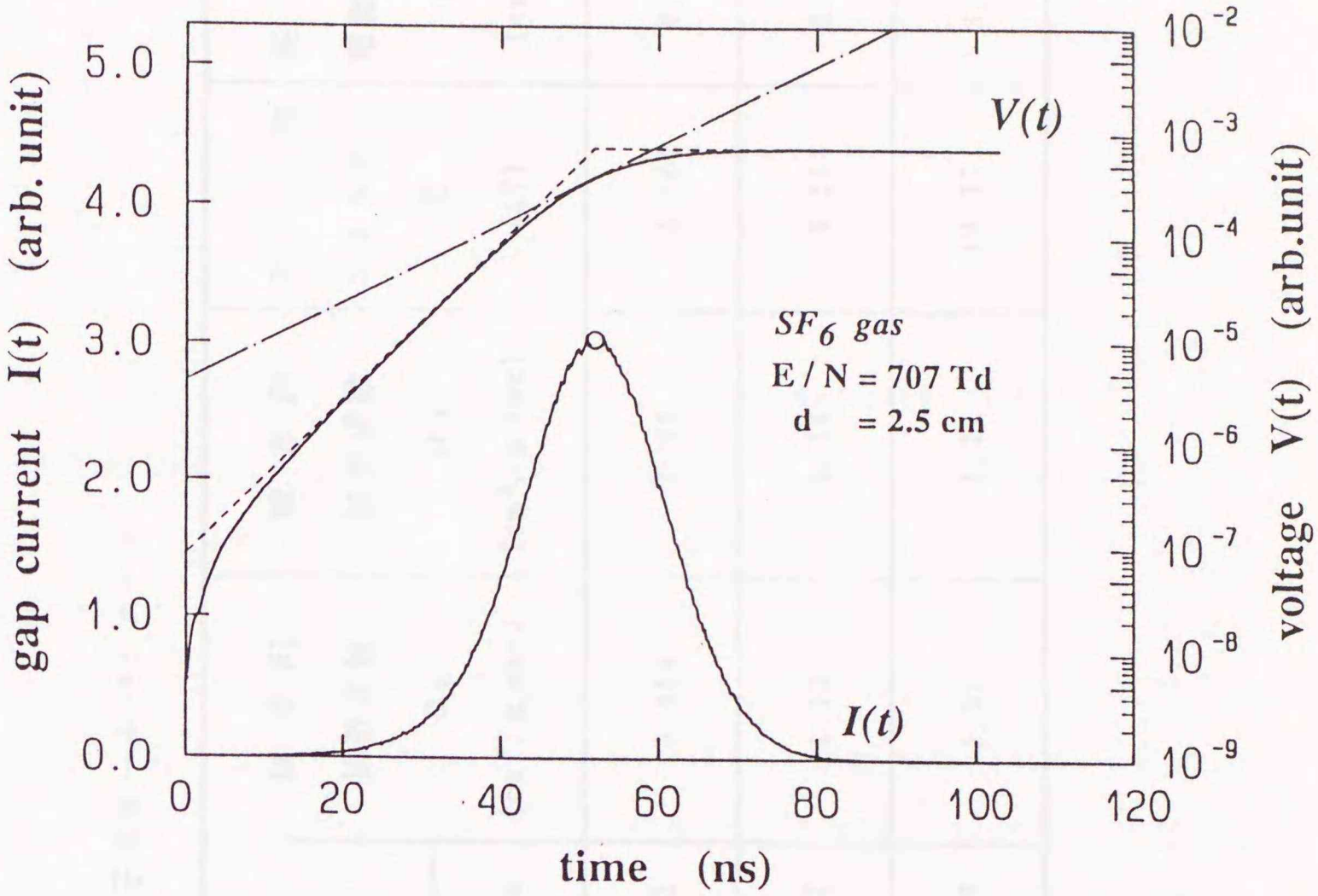


図６．４（ｅ） ギャップ電流および電圧の時間変化 E/N=707Td, d=2.5cm

表6.2　SF_6ガス中の電子スオームパラメータ

換算電界 E／N (Td)	実効電離周波数 $\overline{R_i}$ (μsec^{-1})	理論電子ドリフト速度 (cm/μsec)				縦方向拡散係数 D_L ($cm^2/\mu sec$)	横方向拡散係数 D_T ($cm^2/\mu sec$)	平均エネルギー $\overline{\varepsilon}$ (eV)	実効電離係数 $\overline{\alpha}$ (cm^{-1})
		Vd	Wv	Wr	Wm				
424	20.52	25.8	26.32	31.5	30.2	0.984	1.02	8.164	0.68
566	87.24	30.7	33.12	42.5	37.7	1.12	1.14	9.517	2.16
707	174.5	35.9	39.25	52.8	43.2	1.33	1.21	10.77	3.62

子付着衝突断面積があるため、それによって遅い電子が消失していると考えられる。したがって、電子数の減少が急激になり、I(t)の形状に変化が現れたものと考えられる。

6－3－2　Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度

図6.5(a)、(b)および(c)に、E/N=283、424Tdおよび566Tdにおける経過時間T_{sc}のギャップ長dに対するプロットを示す。図6.5(a)、(b)および(c)から、(2－49)式を用いて電子ドリフト速度W_{sc}を算出すると、図6.6となり、W_{sc}はギャップ長に対して、強い依存性を示している。このような依存性は、T_{sc}-dプロットの延長が原点を通らないためである。T_{sc}-dプロットがよい直線性を示していること、W_{sc}のギャップ長依存性がギャップ長を大きくするにしたがって減少していることを考えると、他のガスの場合と同様に、(3－13)式を用いてT_{sc}-dプロットの勾配からW_{sc}を決定するべきである。表6.3(a)は、この方法で決定したW_{sc}の値を示す。また、表6.3(b)は、図6.6において、各E/Nでの、最大のギャップ長のときのW_{sc}の値である。(a)と(b)の値は、全てのE/Nにおいて異なっており、(2－49)式によってW_{sc}を決定するためには、本解析の条件よりもさらに大きなギャップ長が必要であると考えられる。本解析では、T_{sc}-dプロットの勾配から算出した値（表6.3(a)）をW_{sc}として採用している。

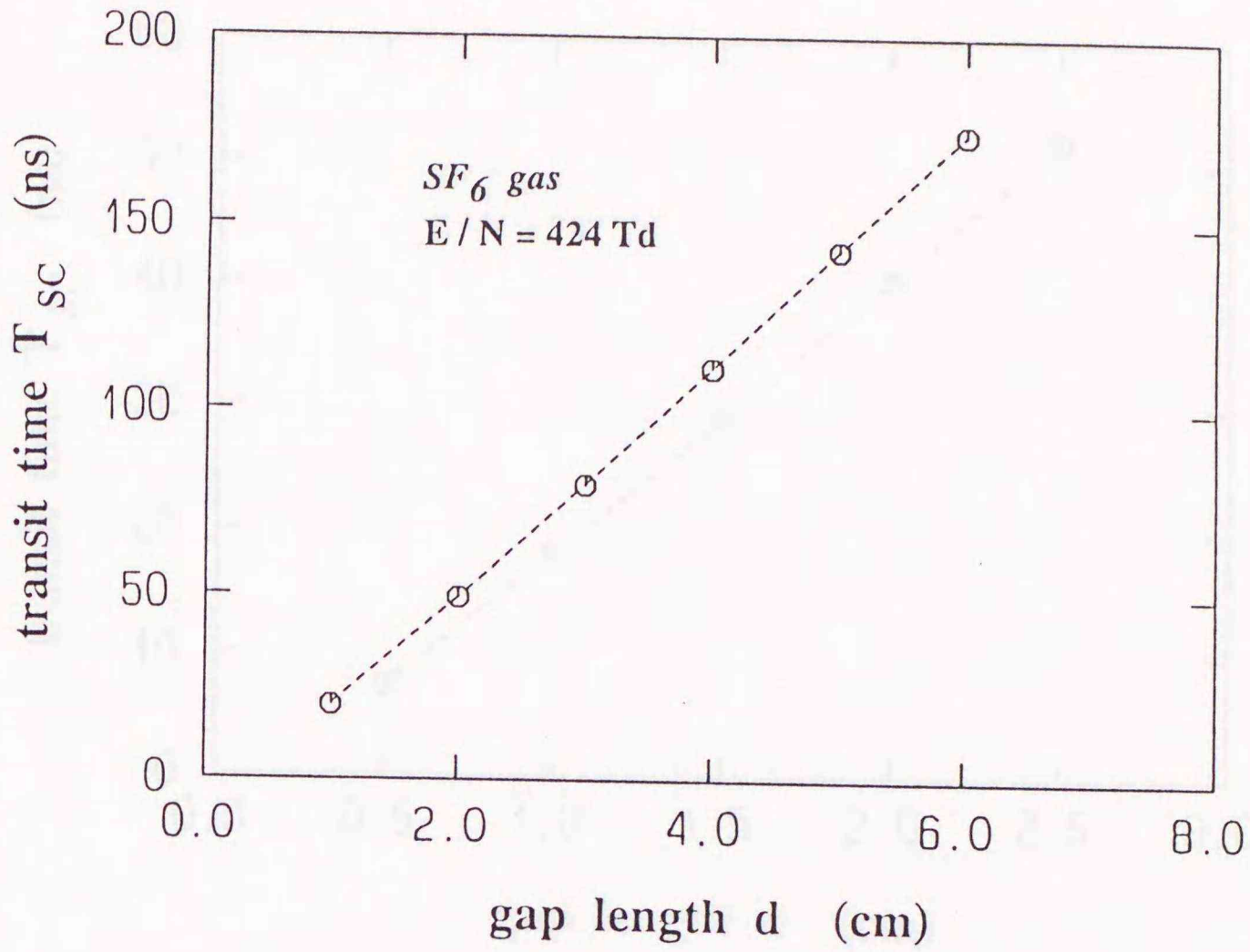


図6．5（a） 経過時間T_{sc} E/N=424Td

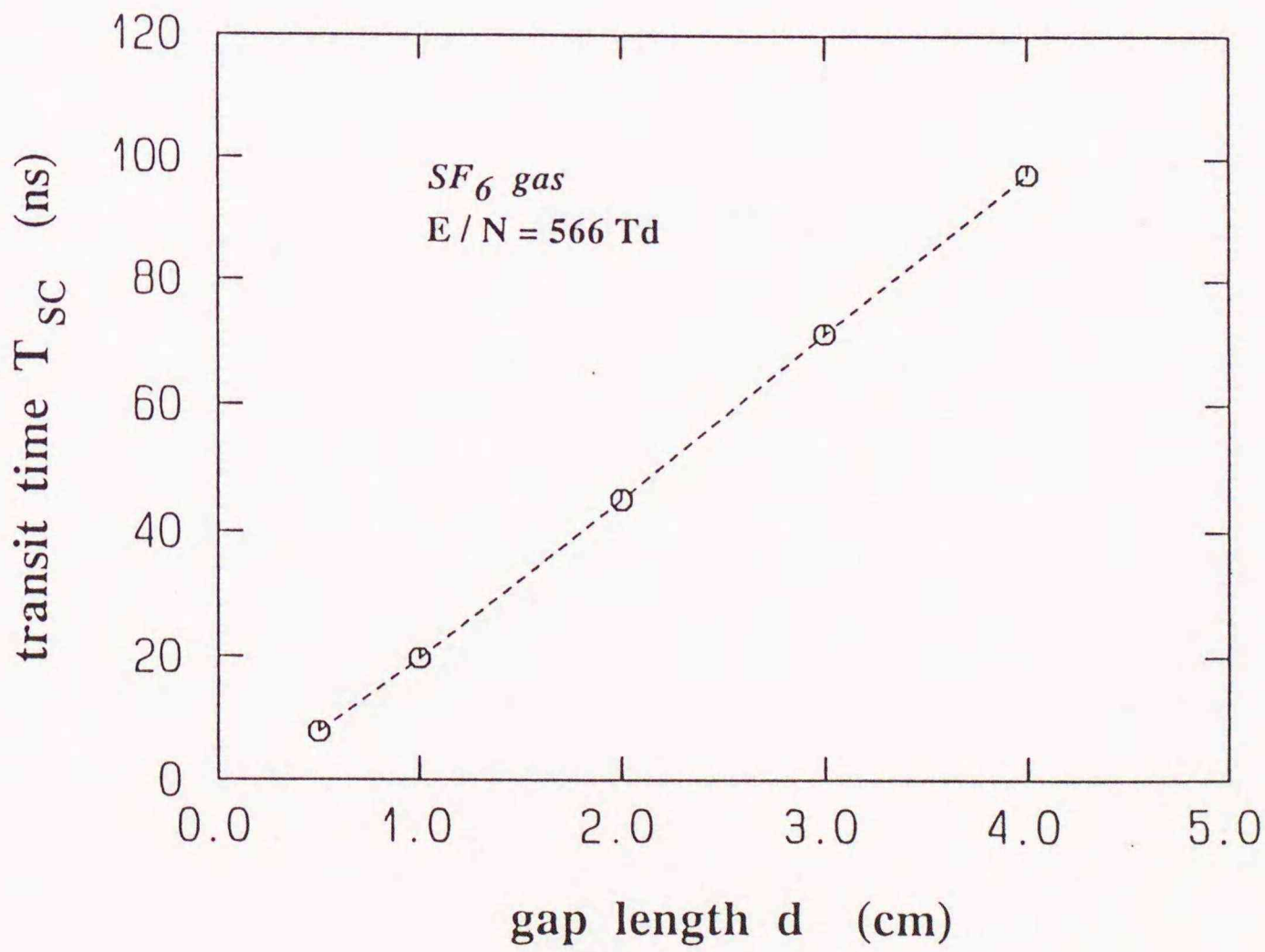


図6．5（b） 経過時間T_{sc} E/N=566Td

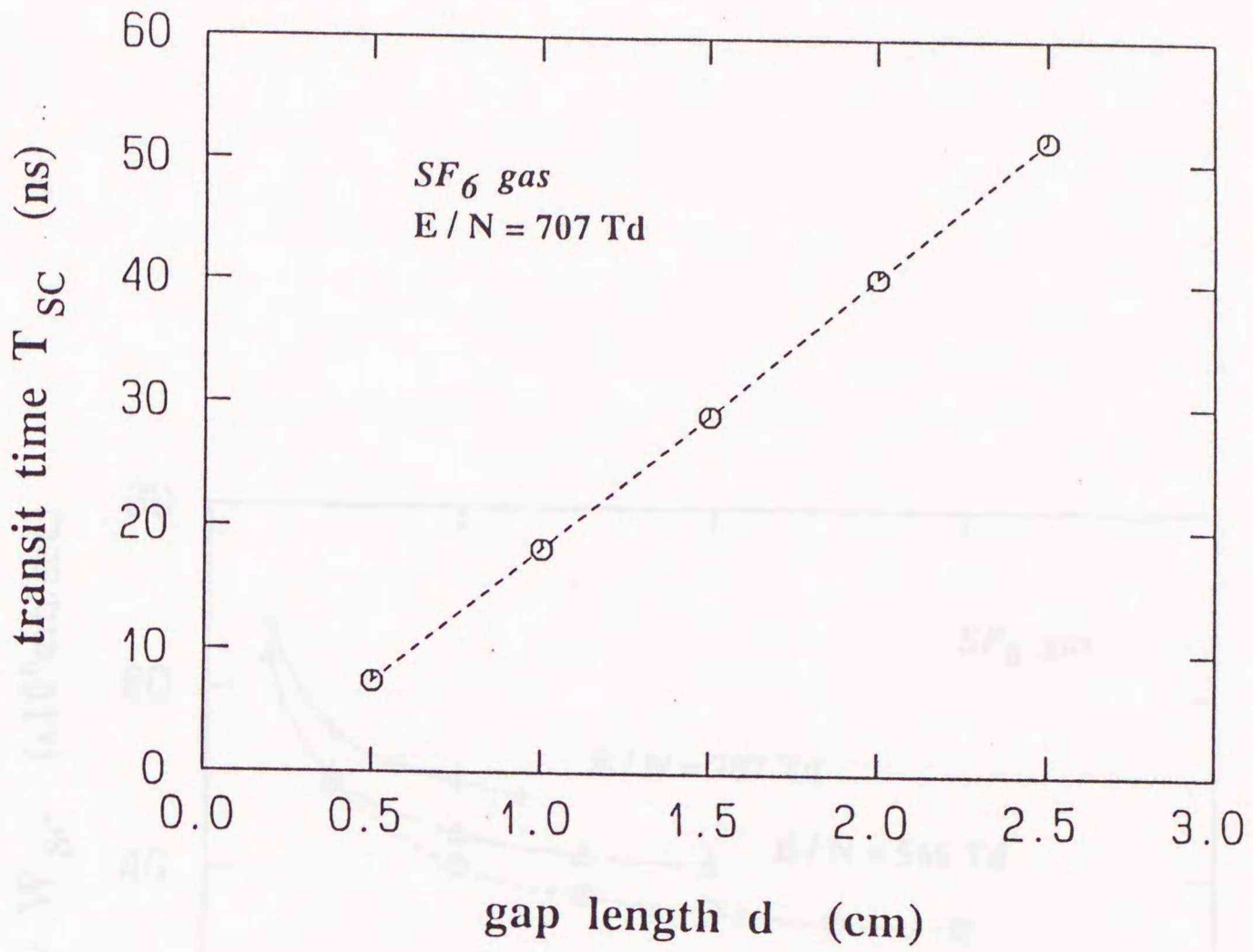


図6.5(c) 経過時間T_{sc} E/N=707Td

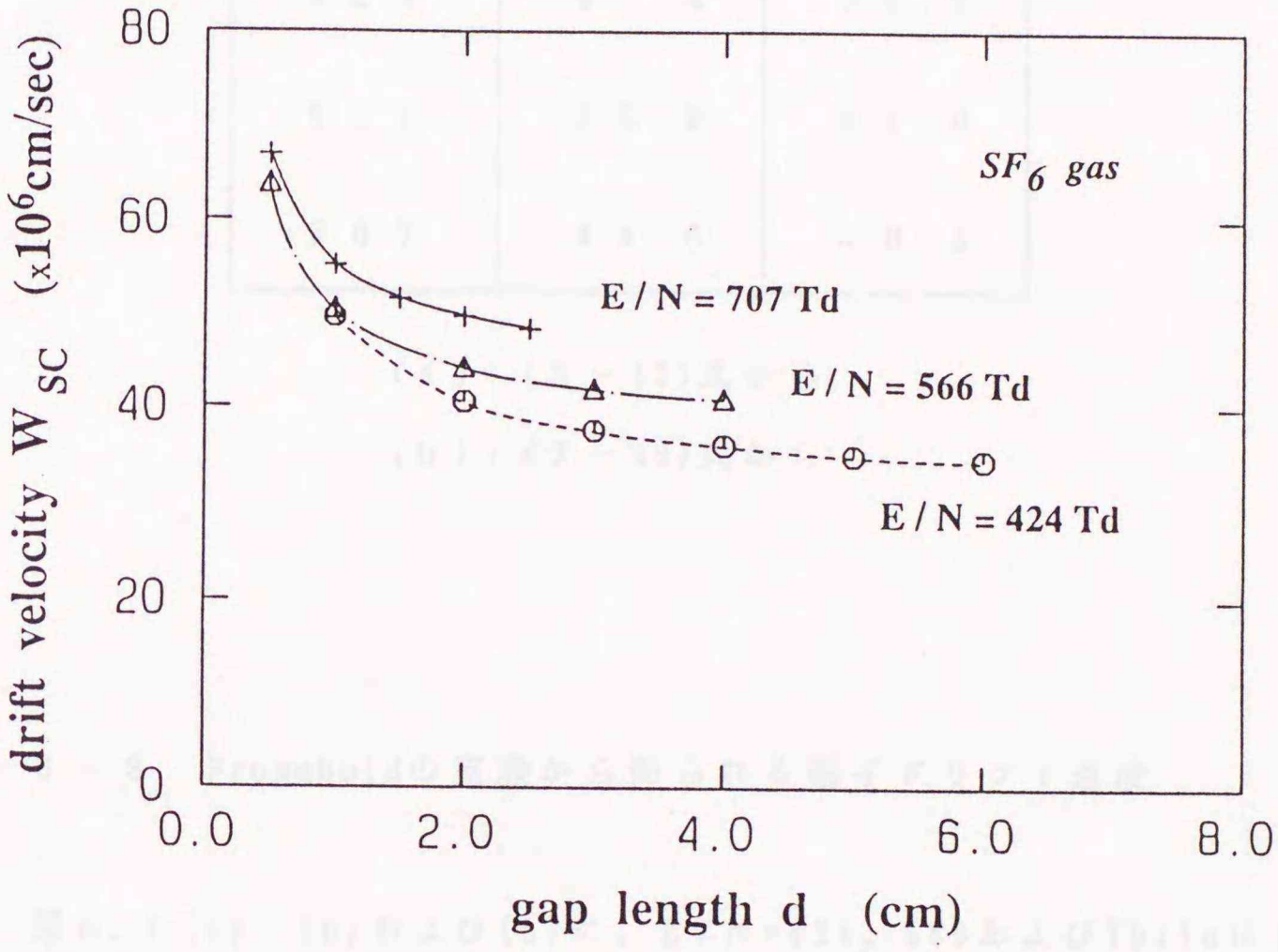


図6．6　電子ドリフト速度 W_{SC}

表６．３　ＳＦ$_6$ガス中の電子ドリフト速度Ｗ$_{sc}$

Ｅ／Ｎ (Ｔｄ)	Ｗ$_{sc}$ (×10^{6}cm/sec)	
	(ａ)	(ｂ)
４２４	３２．４	３４．５
５６６	３８．９	４１．０
７０７	４４．６	４８．３

(ａ)：(３－13)式から

(ｂ)：(２－49)式から

６－３－３　Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度

図６．７(a)、(b)および(c)に、Ｅ/Ｎ=424、566および707TdにおけるT_{FD1}-ｄおよびT_{FD2}-ｄプロットをそれぞれ示す。これらから(２－50)式を用いて電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}を算出すると図６．８となる。W_{FD1}およびW_{FD2}のいずれにも、ギャップ長依存性が見られるが、図６．６のW_{sc}の場合と比較すると、いずれのＥ/Ｎにおいても小さい。これは、T_{FD1}-ｄおよびT_{FD2}-ｄプロットの延長が、比較的原点に近い点を通過するためである。ギャップ長依存性によるW_{FD1}およびW_{FD2}の決定の曖昧さを排除するために、(３－14)式を用いて、

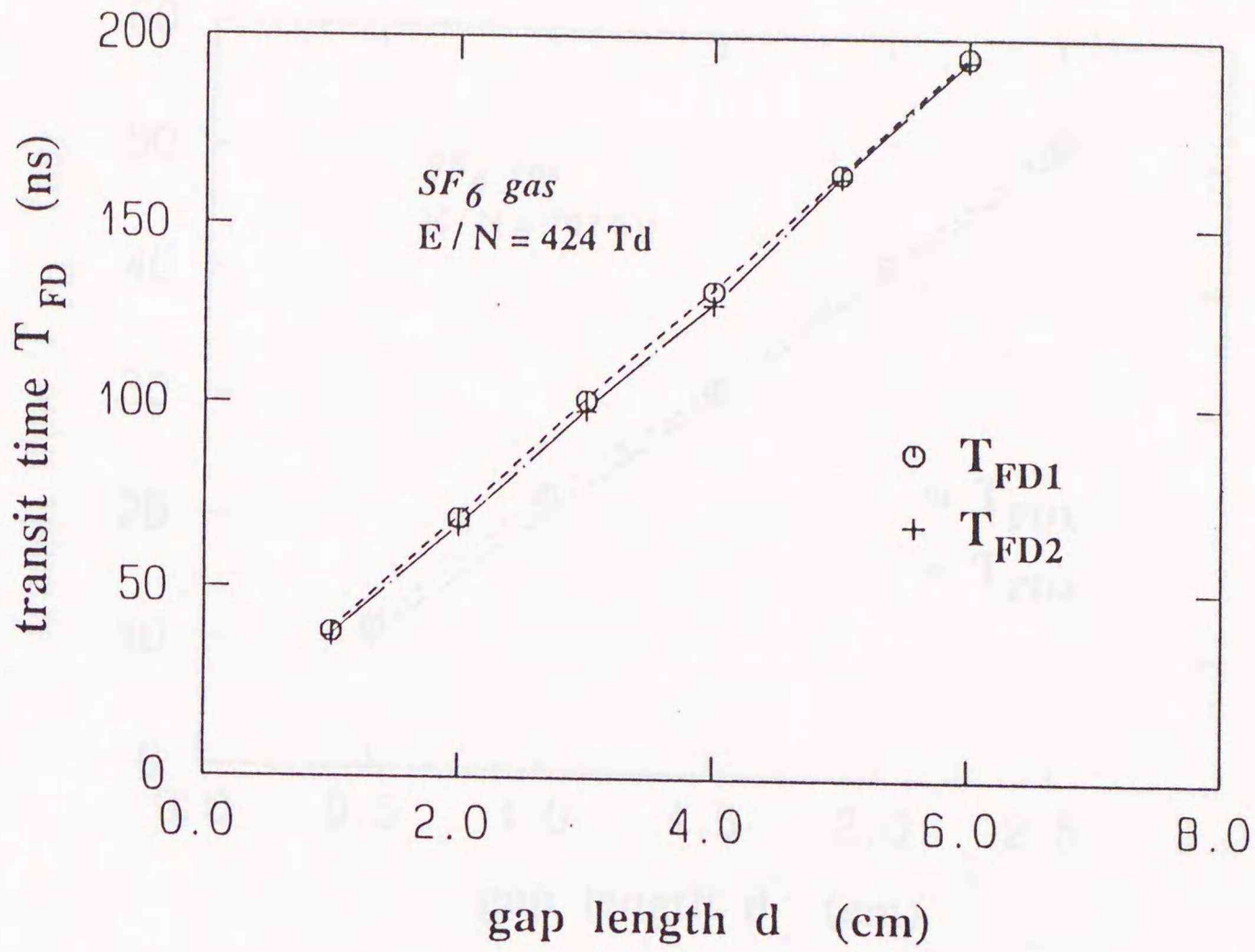


図6．7（a） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=424Td

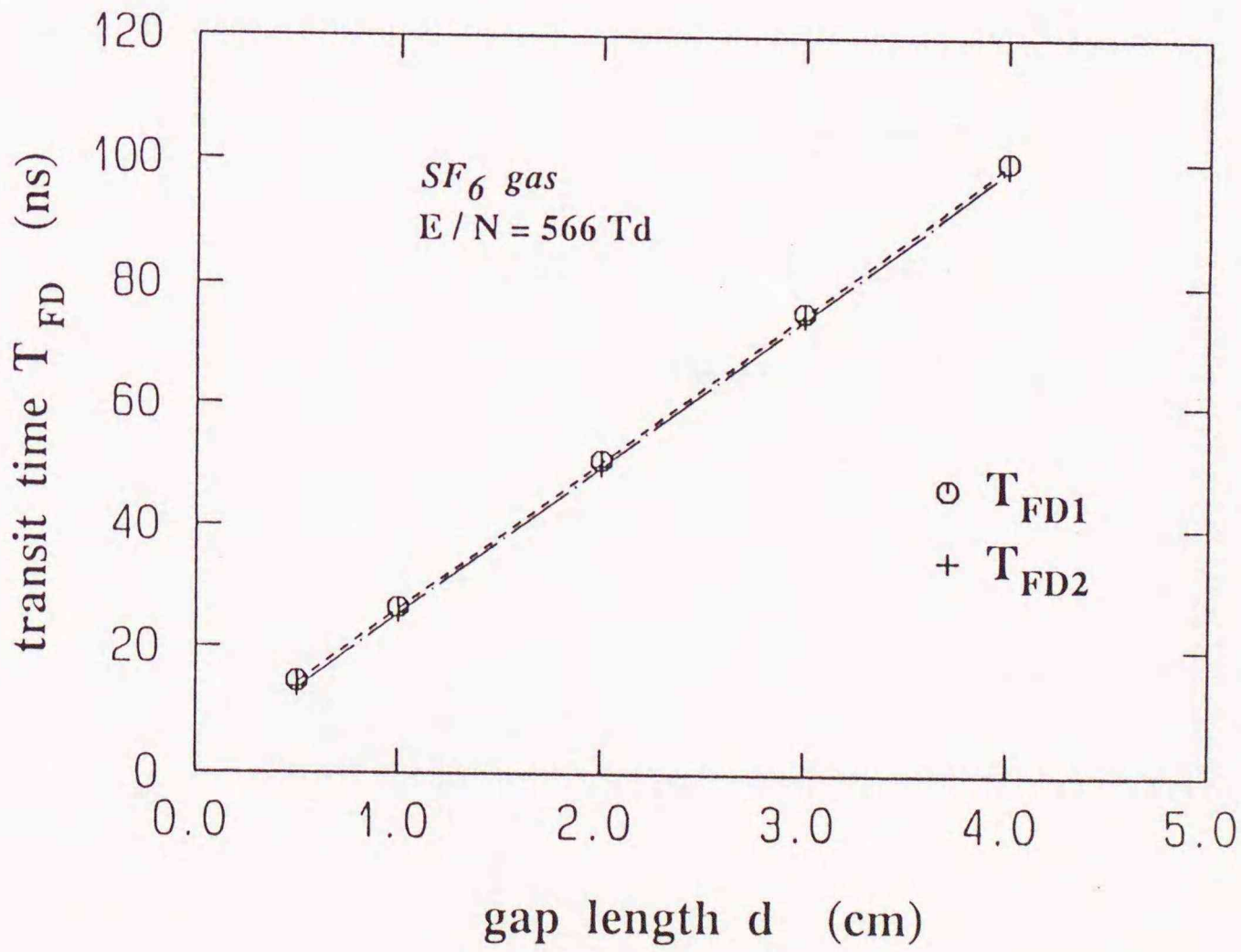


図6．7（b） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=566Td

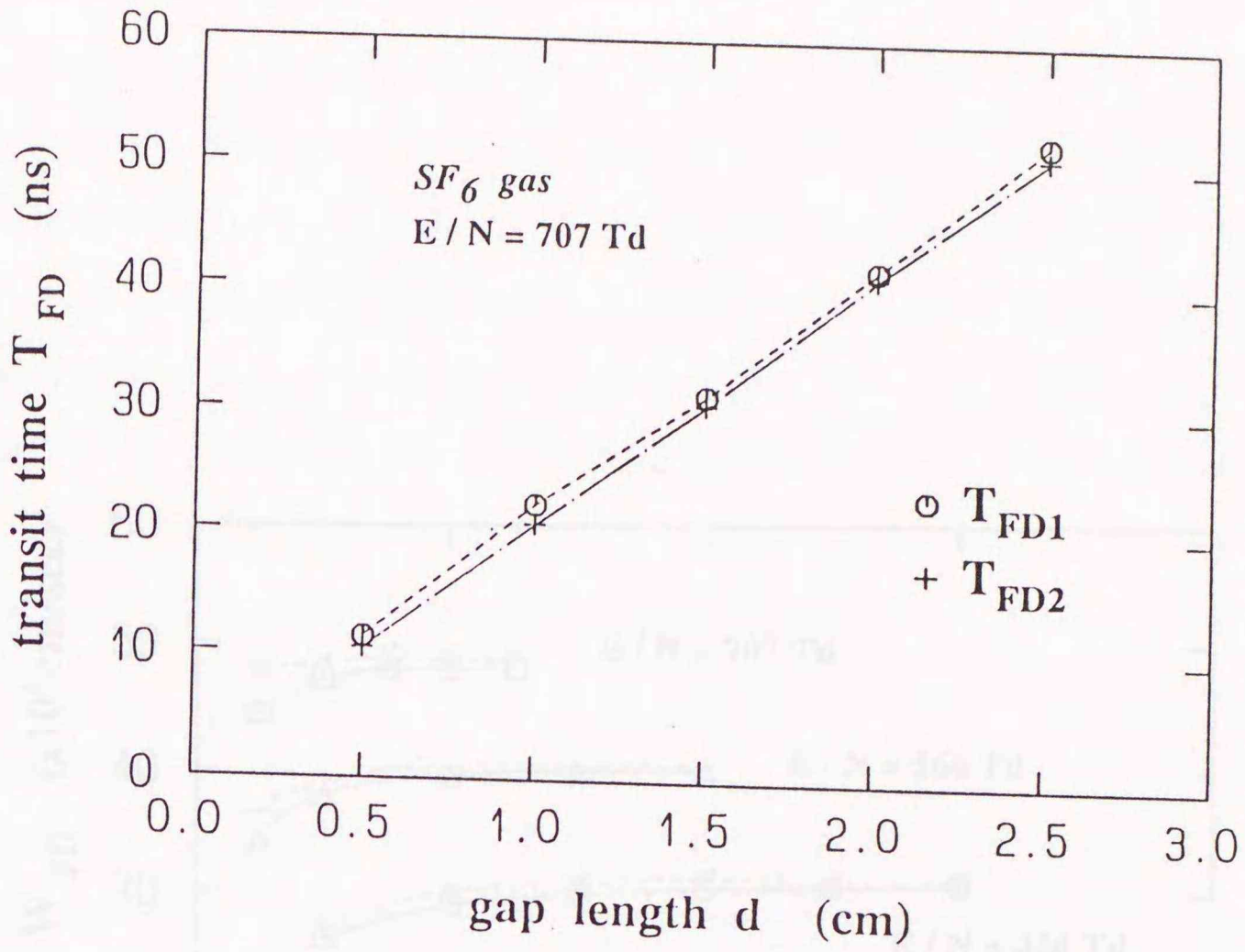


図6．7（c） 経過時間T_{FD1}およびT_{FD2} E/N=707Td

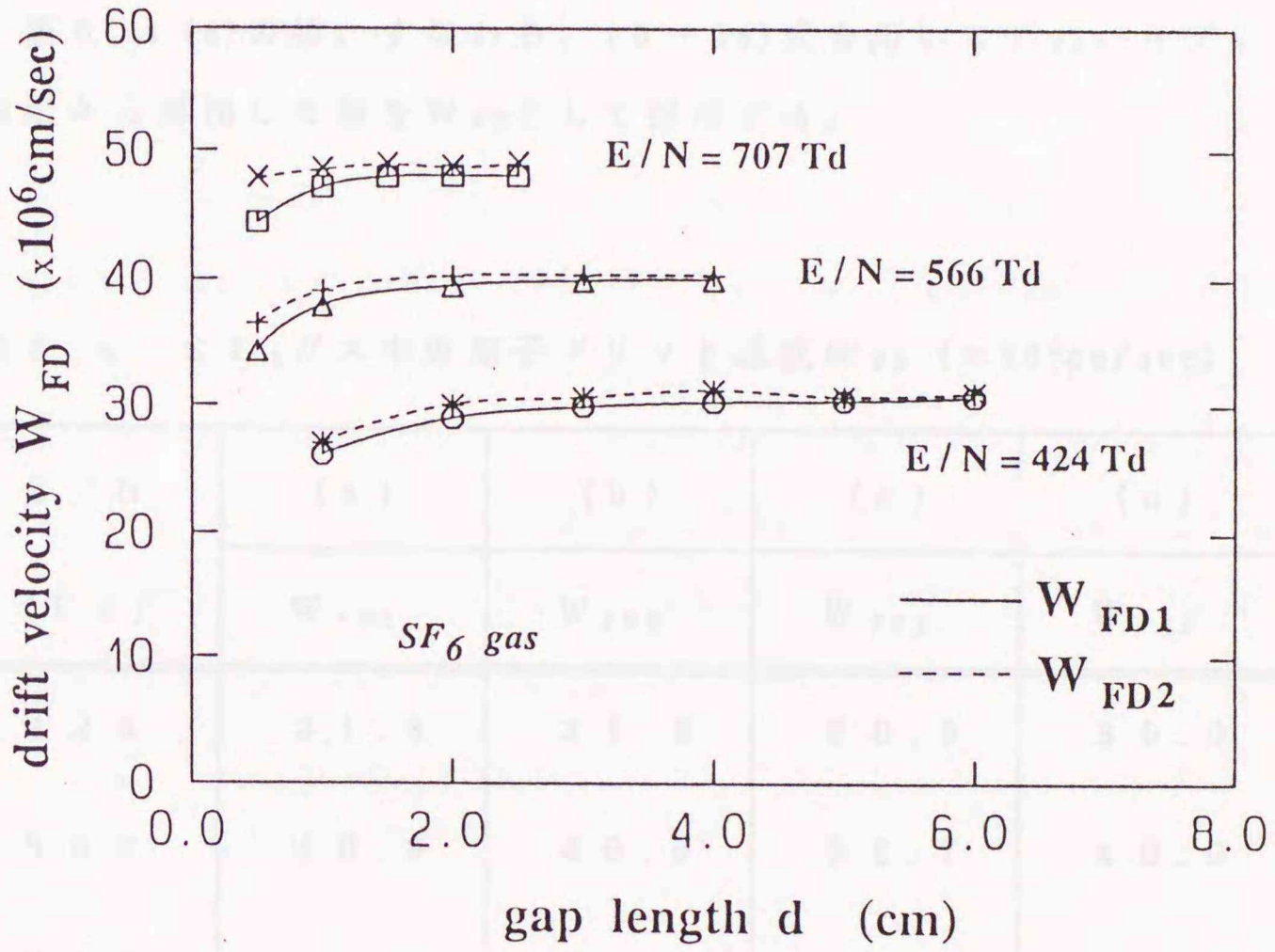


図6．8　電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}

T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの勾配からW_{FD1}およびW_{FD2}を算出すると、表6.4(a)および(b)となる。(a)と(b)の値は非常によく一致しており、SF_6ガスの場合にも、T_{FD}の決定法によらず、同様な結果が得られることがわかった。また、表6.4(c)および(d)は、図6.8において、ギャップ長依存性が見られない部分におけるW_{FD1}およびW_{FD2}の平均値である。表6.4(c)および(d)の値が、ギャップ長依存のない部分での平均値であるために、(a)と(b)の値の差はほとんどない。本解析では、表6.4(a)の値、すなわち、(3－14)式を用いてT_{FD1}-dプロットの勾配から算出した値をW_{FD}として採用する。

表6.4　SF_6ガス中の電子ドリフト速度W_{FD} ($\times 10^6$cm/sec)

E／N (Td)	(a) W_{FD1}	(b) W_{FD2}	(c) W_{FD1}	(d) W_{FD2}
424	31.8	31.8	30.5	30.9
566	40.9	40.9	39.7	40.9
707	49.6	49.1	48.0	49.0

(a)、(b)：(3－14)式から

(c)、(d)：(2－50)式から

6－3－4　電子ドリフト速度の比較

図6.9は、本解析で得られたW_{SC}およびW_{FD}と理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmの比較を示す。E/N=424Tdにおいて、W_{SC}およびW_{FD}がWrに近い値となっているが、E/N=566および707Tdにおいて、W_{SC}およびW_{FD}はいずれの理論電子ドリフト速度にも一致していない。また、W_{SC}とW_{FD}とを比較すると、E/N=424Tdでは近い値であるが、E/Nが高くなるにしたがって両者の差は大きくなってきており、2つの電子ドリフト速度は、本質的に異なるものであると考えられる。他のガスの場合と同様に、$W=\frac{1}{2}(Wr+Wm)$を、W_{FD}と比較すると図6.10となる。また、図6.10において、W_{SC}を比較的近い値であるWmと比較している。W_{FD}は、Wと似た傾向を持って上昇しているが、わずかに大きな値である。W_{SC}は、E/N=424Tdにおいて、Wmとの差が大きくなっているが、その他ではWmと同じ傾向を持って上昇している。特にWmの上昇の割合がE/N=566Tdから変化しているとき、W_{SC}も同様な変化をしていることが注目される。

6－3－5　実測値との比較

図6.11は、W_{SC}およびW_{FD}を、Naidu and Prasad、Teich and Sangi、AschwandenおよびNakamuraの実測値との比較を示す。本解析で対象とした実験と、上記の報告の実験で用いられた方法が、必ずしも一致するわけではないが、W_{SC}およびW_{FD}は、これらの実測値とは、全く一致していない。Nakamuraらの測定値がWmに相当するとされているが、Wmに近い値であるW_{SC}とは大きく違っている。また、電極を考慮しない自由空間を仮定したモンテカルロシミュレーションで得られたWmにも一致していない。

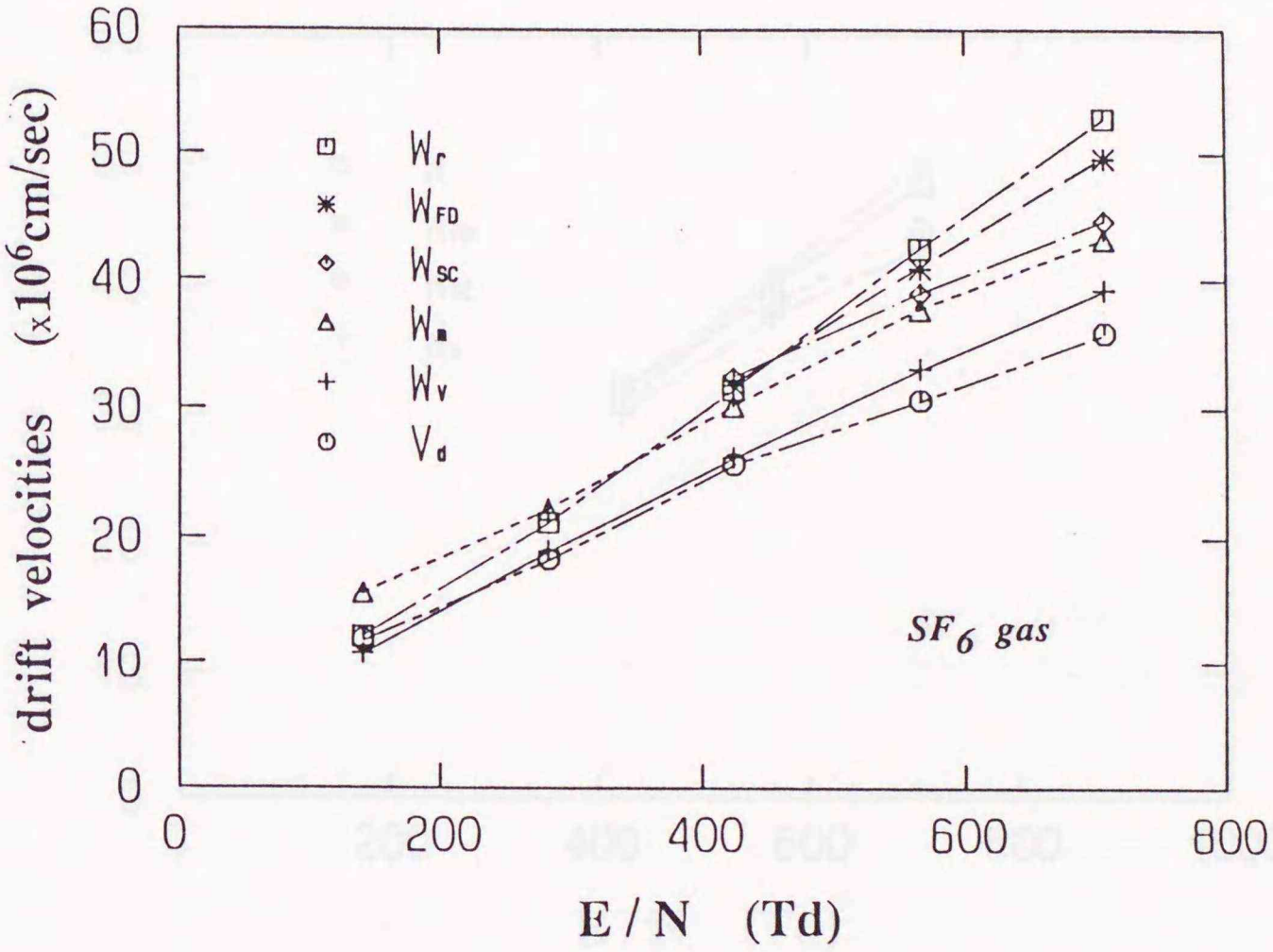


図6．9　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}と理論電子ドリフト速度の比較

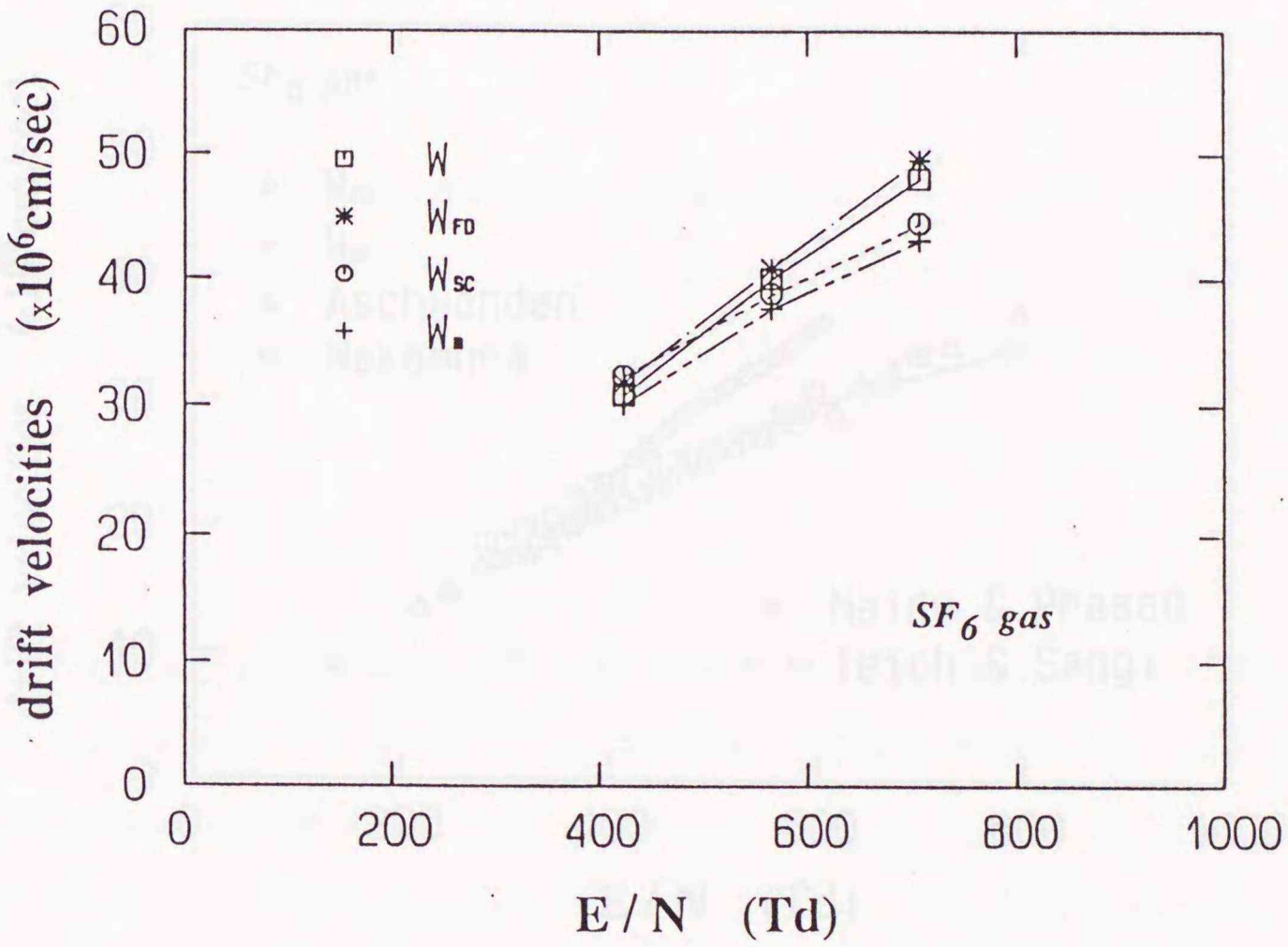


図6.10　電子ドリフト速度W_{SC}、W_{FD}、WおよびW_m

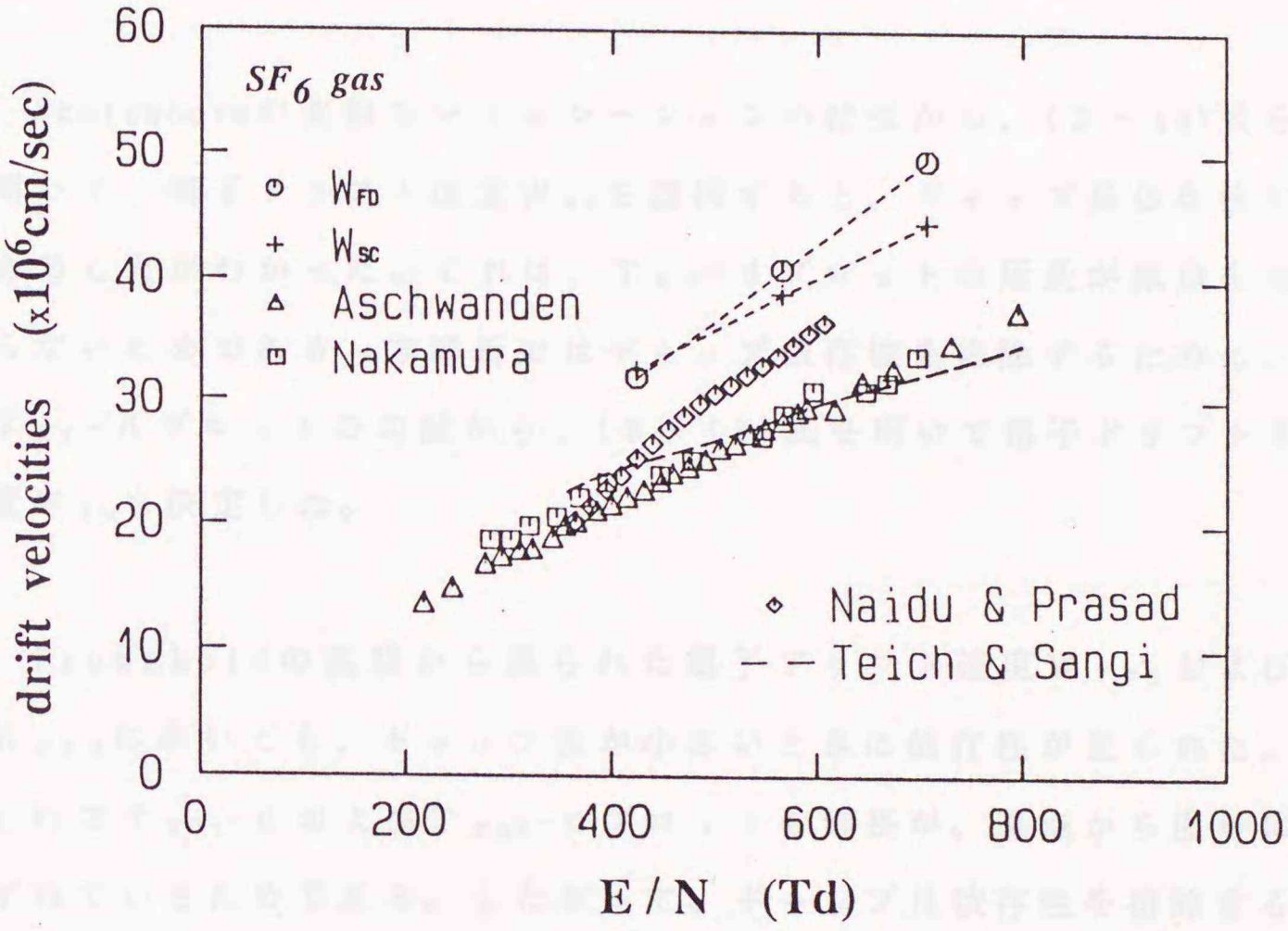


図６．11　実測値との比較

6－4　結言

本章では、SF_6ガスに対して、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をモンテカルロ法を用いてシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmと比較し、対応関係を検討した。その結果を要約すると、以下のようになる。

（1）Schlumbormの実験のシミュレーションの結果から、(2－49)式を用いて、電子ドリフト速度W_{SC}を算出すると、ギャップ長依存性があることがわかった。これは、T_{SC}-dプロットの延長が原点を通らないためである。本解析ではギャップ依存性を排除するために、T_{SC}-dプロットの勾配から、(3－13)式を用いて電子ドリフト速度W_{SC}を決定した。

（2）Frommholdの実験から得られた電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}においても、ギャップ長が小さいときに依存性が見られた。これはT_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの延長が、原点から僅かにずれているためである。したがって、ギャップ長依存性を排除するために、(3－14)を用いて、T_{FD1}-dおよびT_{FD2}-dプロットの勾配から電子ドリフト速度W_{FD1}およびW_{FD2}を算出した。また、W_{FD1}とW_{FD2}はよく一致しており、T_{FD}の決定法によらず、一致する結果が得られたことがわかった。

（3）W_{SC}とW_{FD}は、E/N=424Tdでは、比較的近い値であるが、E/Nが高くなるにしたがって、両者の差が大きくなった。したがって、W_{SC}とW_{FD}は本質的に異る電子ドリフト速度であると考えられる。

（4） W_{SC}とW_{FD}を、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびWmを比較すると、E/N=424Tdにおいて、W_{SC}およびW_{FD}がWrに近い値となったが、E/Nが高くなるにしたがって、W_{SC}およびW_{FD}はいずれの理論ドリフト速度にも一致していない傾向を示した。しかし、W_{SC}はWmに近く僅かに大きな電子ドリフト速度である。また、W_{FD}は$\frac{1}{2}$(Wr＋Wm)に近く僅かに大きな値であることがわかった。これにより、W_{FD}が必ずしも$\frac{1}{2}$(Wr＋Wm)に一致する電子ドリフト速度ではないことが見いだされた

（5） W_{SC}およびW_{FD}を電子ドリフト速度の実測値と比較すると、いずいずれの実測値にも一致しなかった。計算に使用した電子衝突断面積が不十分であるこ、実験方法の違いなどが考えられる。

参考文献

[1] F.M.Harris and G.J.Jones
1971 J.Phys.B: Atom.Molec.Phys. 4 pp.1536-40

[2] M.S.Naidu and A.N Prasad
1972 J.Phys.D: Appl.Phys. 5 pp.1090-5

[3] T.H.Teich and B.Sangi
1972 Proc.Int.Symp. High Voltage Technology (Munchen)
(Munchen:IEEE) pp.391-5

[4] Th.Aschwanden 1984 Gaseous Dierectric IV
ed. L.G.Christophorou and M.O.Pace (New York:Pergamon)
pp.24-33

[5] Y.Nakamura 1988 J.Phys.D:Appl.Phys. 21 pp.67-72

[6] N.E.Bradbury 1932 Phys.Rev. 40, pp.980-7

[7] T.Yoshizawa, Y.Sakai, H.Tagashira and S.Sakamoto
1979 J.Phys.D: Appl.Phys. 12 pp.1839-52

[8] H.Ioth, Y.Miura, N.Ikuta, Y.Nakao and H.Tagashira
1988 J.Phys.D: Appl.Phys. 21 pp.922-30

[9] K.Satoh, H.Itoh, Y.Nakao and H.Tagashira
1988 J.Phys.D: Appl.Phys. 21 pp.931-6

第７章　連続の式による解析

７－１　緒言

これまで、第３章から第６章において、モンテカルロ法を用いて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、W_{SC}およびW_{FD}と理論電子ドリフト速度の対応関係を検討してきた。モンテカルロ法を用いた解析は、非平衡領域も考慮できる点では優れており、現段階で定量的に最も優れている。しかし、統計変動の少ない結果を得るためには、膨大な計算時間が必要となる。

連続の式を用いた解析は、モンテカルロ法を用いた解析と比較して、1/100～1/1000程度の計算時間で結果を得ることができる。Ohmori et al.(1986)[1]は、Schlumbohmの実験を連続の式を用いてシミュレートし、電子ドリフト速度W_{SC}を算出している。しかし、連続の式中で用いられる電子スオームパラメータは、平衡状態の値であり、電極近傍などの非平衡領域に、これをそのまま使用していることに対して疑問が残る。

本章では、一定衝突周波数モデルガス、CH_4、ArおよびSF$_6$ガスに対し、連続の式を用いて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をシミュレートし、それぞれの実験から得られる電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、モンテカルロ法による解析で得られた結果と比較し、連続の式による解析の評価を行なう。

7－2　解析方法

電子スオームの時間的および空間的発達を記述する連続の式は、次式のように書かれる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = R_i \cdot n - Wr \frac{\partial n}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - D_3 \frac{\partial^3 n}{\partial x^3} + \cdots \qquad (7-1)$$

ここで、R_iは電離周波数、Wrはスオームの重心のドリフト速度、D_Lは縦方向拡散係数、D_3は高次の係数である。

(7－1)式の右辺3次以上の項を無視し、ギャップ長dの平行平板ギャップを仮定して解くと、(7－2)式となる。

$$n(x, t) = \frac{n_0 \cdot \exp(R_i \cdot t)}{(4\pi D_L \cdot t)^{1/2}} \left[x \cdot \exp\left\{ -\frac{(x - Wr \cdot t)^2}{4 D_L \cdot t} \right\} + (x - 2d) \exp\left\{ -\frac{(x - Wr \cdot t)^2 + 4d(d - x)}{4 D_L \cdot t} \right\} \right] \qquad (7-2)$$

ここで、n_0は初期電子数である。(7－2)式から、位置x、時刻tにおける電子数密度n(x, t)を知ることができる。

SchlumbohmおよびFrommholdの実験をシミュレートするためには、電流および電圧の時間変化がそれぞれ必要であり、そのためには、任意の時刻tにおいてギャップ間に存在する全電子数N(t)を知る必要がある。N(t)は、(7－3)式のように、(7－2)式を位置xに関して0(カソード)からd(アノード)まで積分することにより、求めることができる。

$$N(t) = \int_0^d n(x, t)\, dx \qquad (7-3)$$

解析に用いられる電子スオームパラメータR_i、W_rおよびD_Lは、電極を考慮しない自由空間におけるモンテカルロシミュレーションで求められた値である。ギャップ電流I(t)および電圧V(t)の計算は、(2－51)および(2－52)式を用いて行なった。なお、ギャップ電流I(t)の計算で用いられる電子の平均速度W(t)は、ある時刻における全電子の平均値であるので、理論電子ドリフト速度W_vを用いている。ここで用いたW_vの値も、自由空間におけるモンテカルロシミュレーションで得られた値である。

7－3　解析結果

7－3－1　モデルガスに対する解析

図7.1(a)～(d)は、E/N=424Tdで、ギャップ長dを変化させたときの、ギャップ電流I(t)の時間変化を示している。シミュレーションでは、表3.2に示した電子スオームパラメータを使用した。計算条件は、表3.1と同様である。

本解析(Cont.Eq.)で得られたI(t)は、モンテカルロ法の解析(MCS)で得られたI(t)と、すべてのギャップ長において一致していないことがわかる。MCSと比べて、本解析のI(t)は、全体として左にシフトしているとともにピークの値が大きい。連続の式による解析では、モンテカルロ法による解析のように、初期電子のエネルギー分布を低い値に設定することができないことが原因の一つであると考えられる。また、解析に使用されたスオームパラメータが、平衡状態の値であるため、初期電子のエネルギーとして、平衡状態の値が仮定されたことになる。E/N=424Tdでは、初期電子の平均エネルギーは7.764eVであり、モ

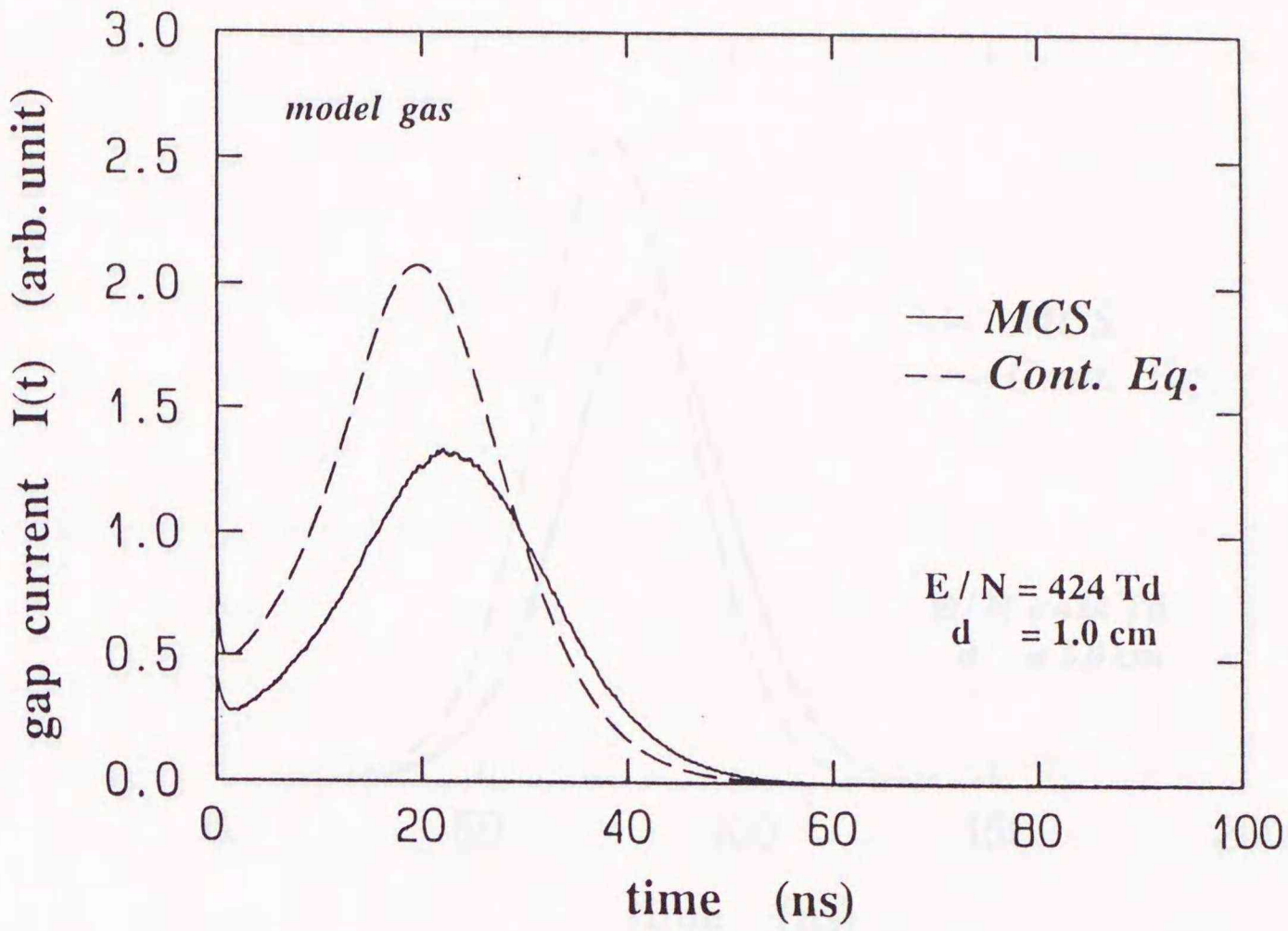


図７．１(a)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=1.0cm

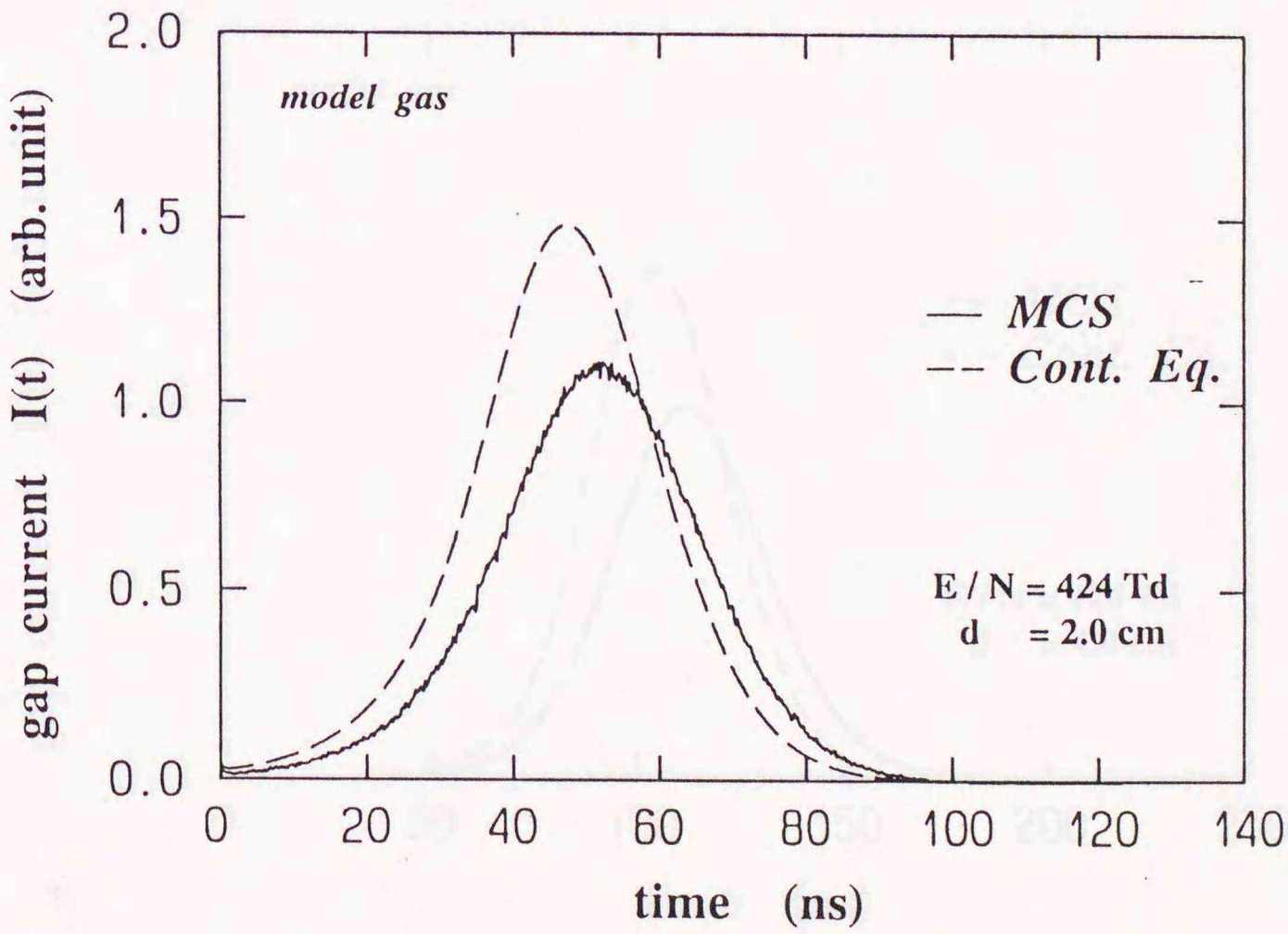


図７．１(b)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=2.0cm

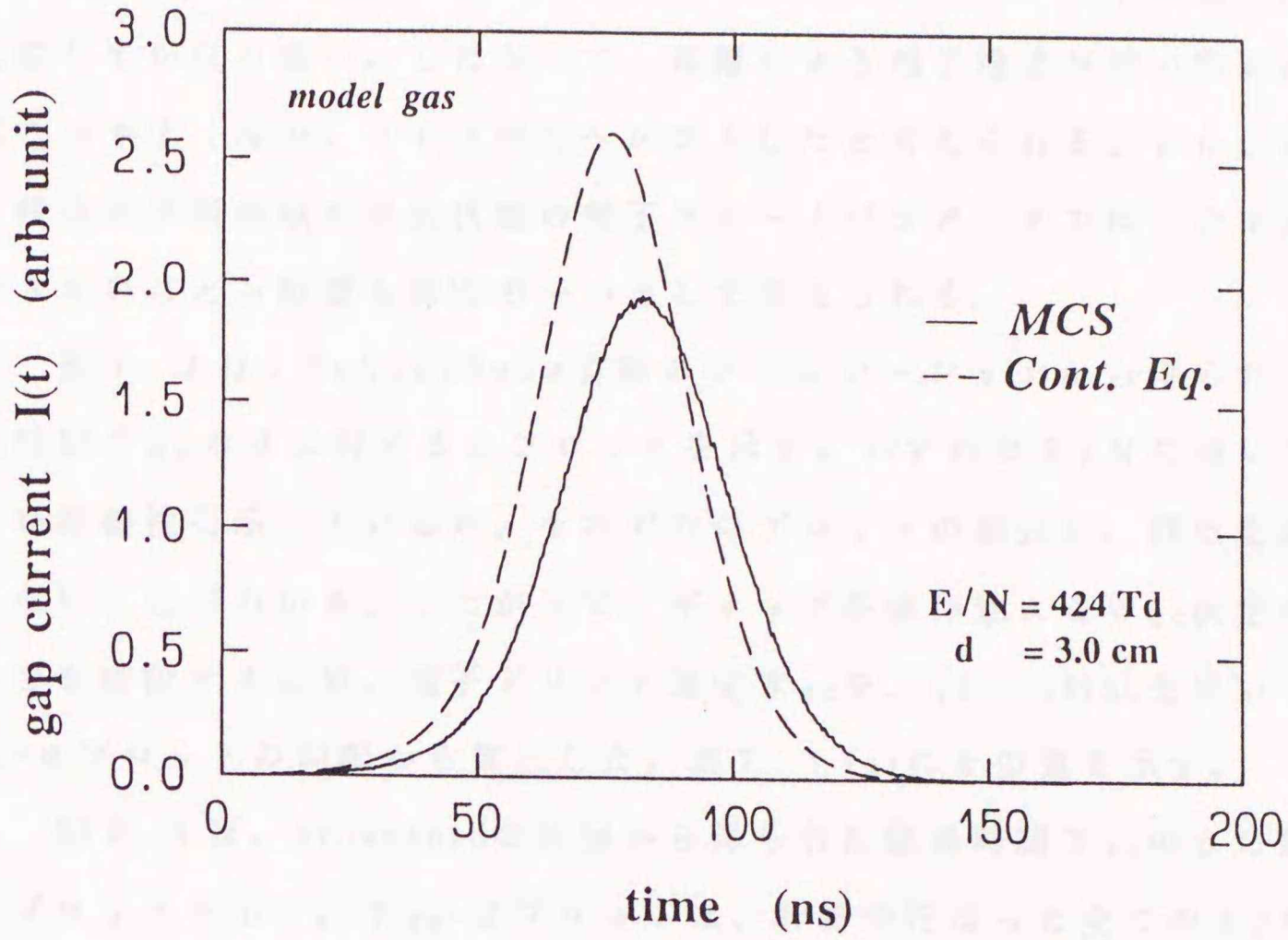


図7．1(c)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=3.0cm

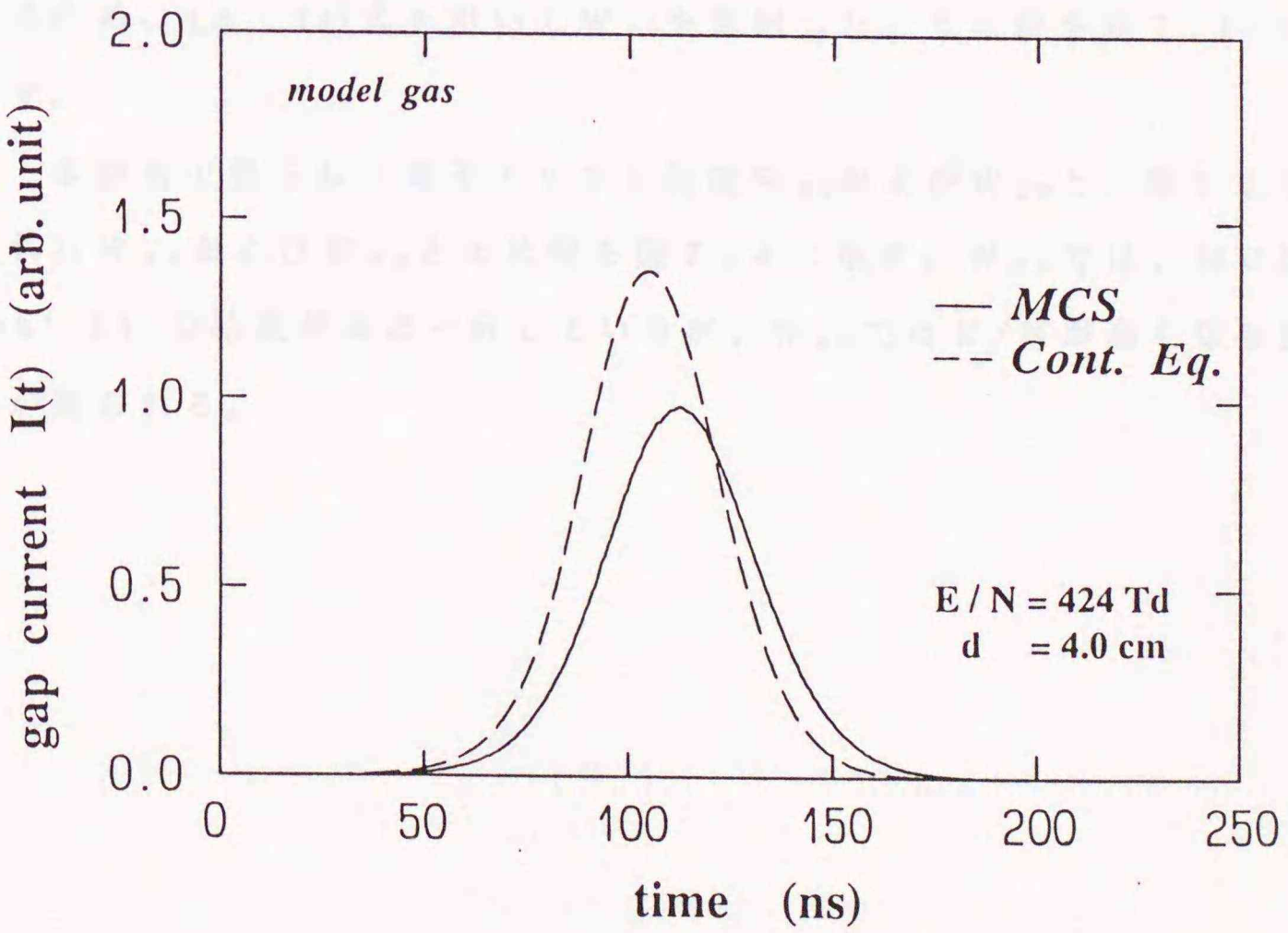


図7．1(d)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=4.0cm

ンテカルロ法による解析で設定した初期電子のエネルギー（平均値１eV）と比較してかなり高い。したがって、電離による電子増倍が早い時間から起こりやすくなり、I(t)が左へシフトしたと考えられる。また、電極近傍の非平衡領域を平衡状態の電子スオームパラメータでは十分に表現できないことも影響も原因の一つとして考えられる。

図７．２は、Schlumbohm実験のシミュレーションから得られた経過時間T_{sc}のｄに対するｄプロットを示す。いずれのＥ/Ｎにおいてもよい直線性を示しているが、それぞれのプロットの延長は、原点を通過しないことがわかる。したがって、ギャップ長依存性よるW_{sc}決定の曖昧さを排除するため、電子ドリフト速度W_{sc}を、(３－13)式を用いてT_{sc}-ｄプロットの勾配から算出した。表７．１(a)にその値を示す。

図７．３は、Frommholdの実験から得られた経過時間T_{FD}のｄに対するプロットを示す。T_{FD}-ｄプロットは、計算を行なった全てのＥ/Ｎにおいてよい直線性を示している。T_{FD}-ｄプロットの延長も、原点を通過しないので、ギャップ長依存性によるW_{FD}決定における曖昧さを排除するため、(３－14)式を用いてW_{FD}を算出した。その値を表７．１(b)に示す。

本解析で得られた電子ドリフト速度W_{sc}およびW_{FD}と、第３章で得られたW_{sc}およびW_{FD}との比較を図７．４に示す。W_{FD}では、ＭＣＳとCont.Eq.の結果がほぼ一致しているが、W_{sc}ではＥ/Ｎが高くなると違いが見られる。

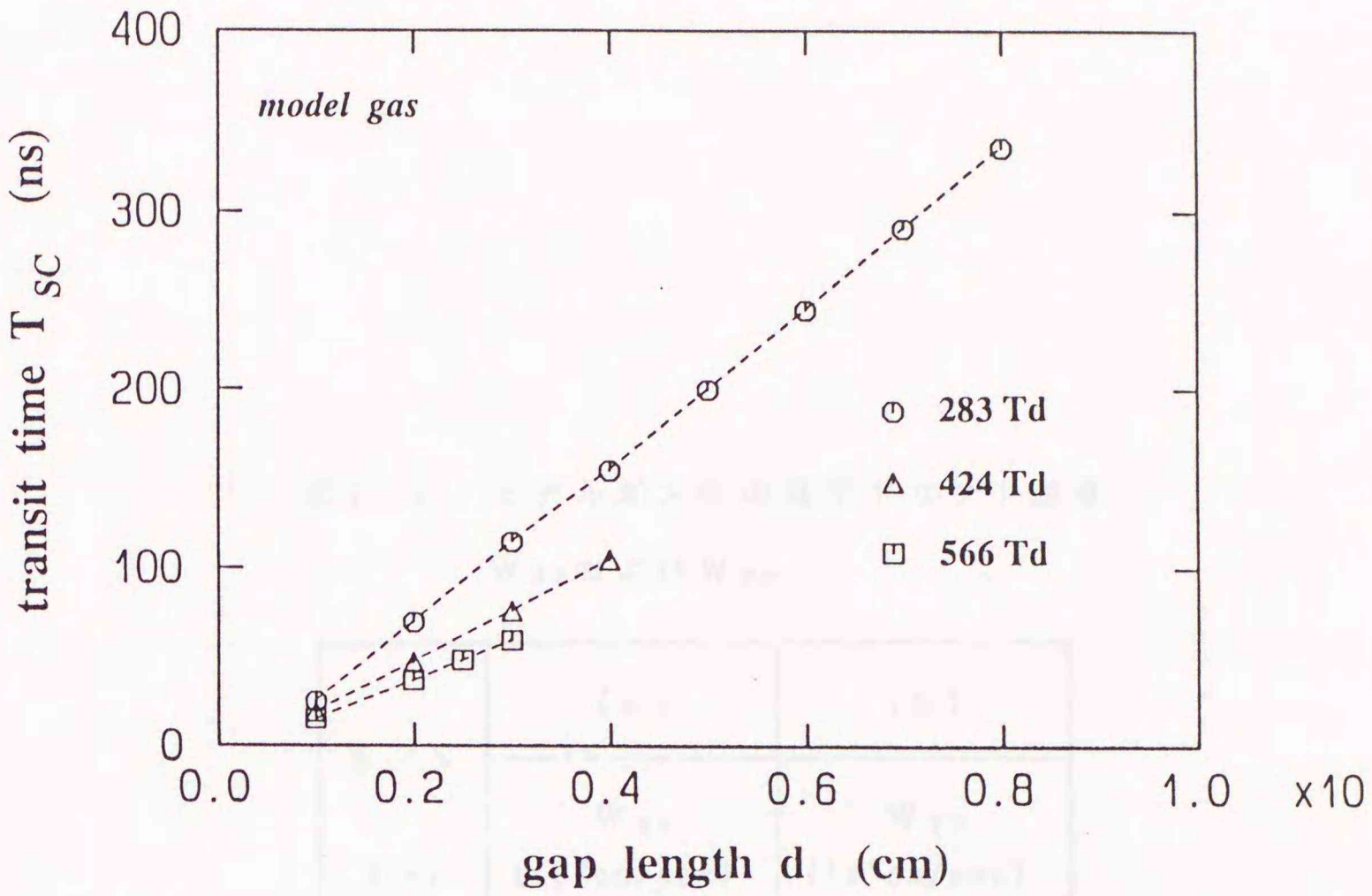


図7．2　経過時間　T_{SC}

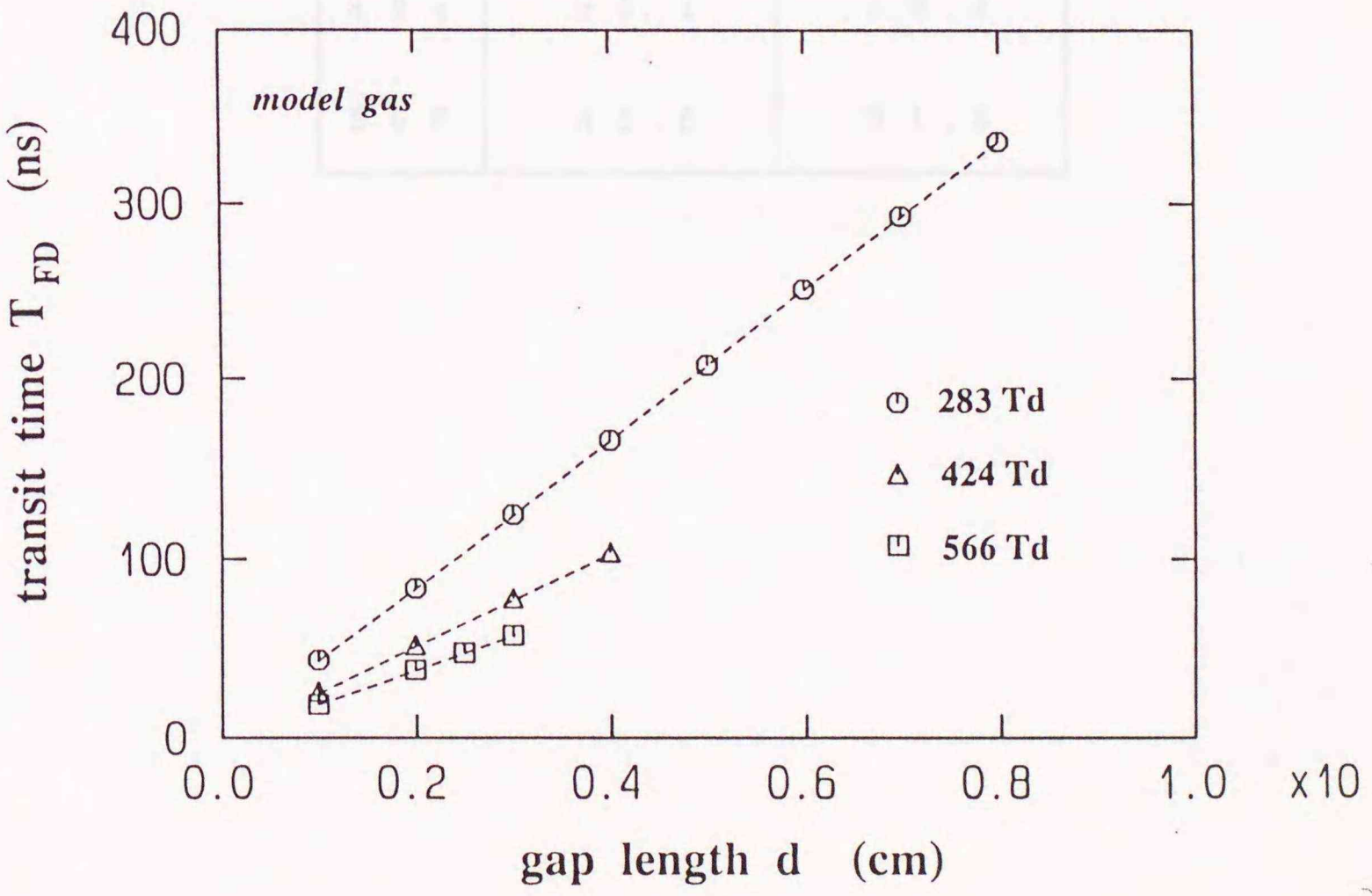


図7．3　経過時間　T_{FD}

表７．１　モデルガス中の電子ドリフト速度

W_{SC}およびW_{FD}

E／N (Td)	(a) W_{SC} (10^6cm/sec)	(b) W_{FD} (10^6cm/sec)
２８３	２２．６	２３．９
４２４	３５．１	３８．４
５６６	４５．５	５１．８

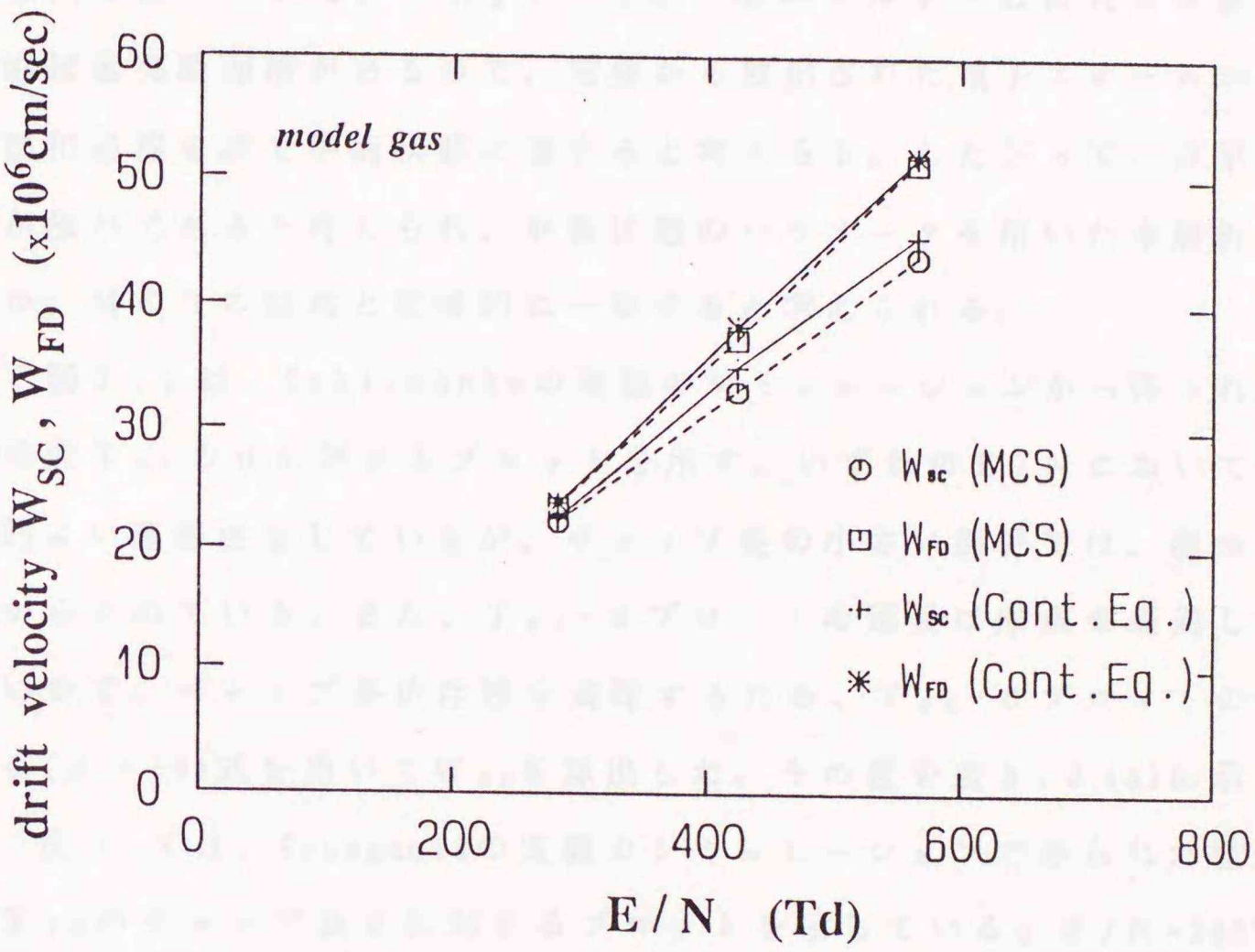


図7．4　電子ドリフト速度の比較

7－3－2　CH_4ガスに対する解析

図7.5(a)～(d)は、E/N=424Tdで、ギャップ長を変化させたときのギャップ電流I(t)の時間変化を示す。モデルガスの結果と比較すると、MCSとCont.Eq.の違いは小さくなっているが、両者は、完全には一致していない。しかし、ギャップ長を大きくすると、定性的に一致する傾向を持っている。CH_4ガスでは、低エネルギー部に大きな値の振動励起衝突断面積があるので、電極から放出された電子スオームが、短い緩和過程を経て平衡状態に達すると考えらる。したがって、非平衡状態が僅かであると考えられ、平衡状態のパラメータを用いた本解析の結果が、MCSの結果と定性的に一致すると考えられる。

図7.6は、Schlumbohmの実験のシミュレーションから得られた経過時間T_{SC}のdに対するプロットを示す。いずれのE/Nにおいても比較的よい直線性をしているが、ギャップ長の小さい部分では、僅かに直線からずれている。また、T_{SC}-dプロットの延長は原点を通過していないので、ギャップ長依存性を排除するため、T_{SC}-dプロットの勾配から(3－13)式を用いてW_{SC}を算出した。その値を表3.2(a)に示す。

図7.7は、Frommholdの実験のシミュレーションで得られた経過時間T_{FD}のギャップ長dに対するプロットを示している。E/N=283Tdにおいてギャップ長が小さい部分の2～3点の結果を除くと、T_{FD}-dプロットは、非常によい直線性を示している。また、CH_4ガスでは、T_{FD}-dプロットの延長が原点を通過していることがわかる。表3.2(b)は、(3－14)式を用いて算出したW_{FD}の値を示す。

図7.8は、本解析で得られたW_{SC}およびW_{FD}と、モンテカルロ法による解析で得られたW_{SC}およびW_{FD}との比較を示す。E/N=566TdにおけるW_{SC}の値にのみ違いが見られ、その他は非常によく一致していることがわかる。

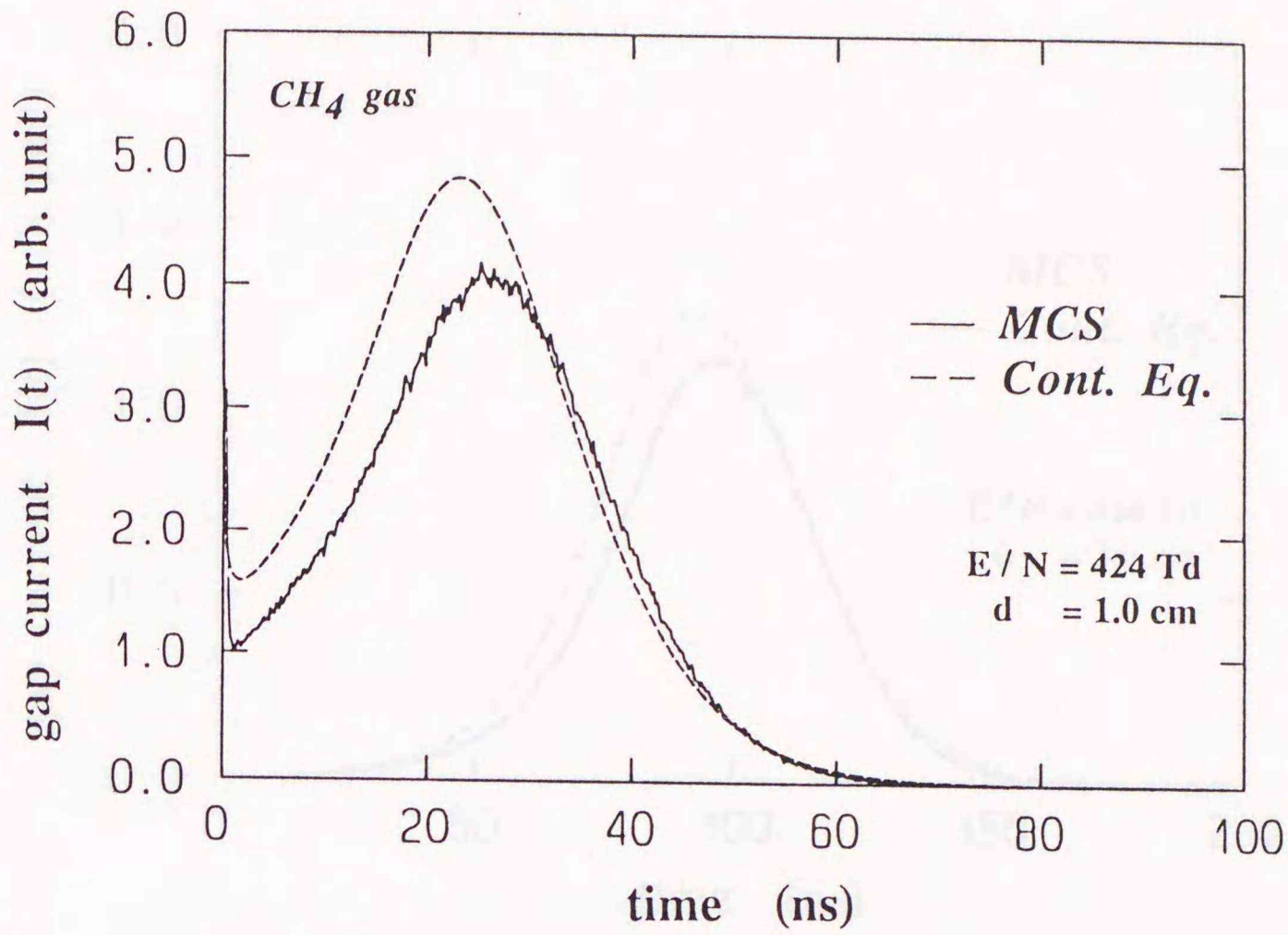


図７．５(a)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=1.0cm

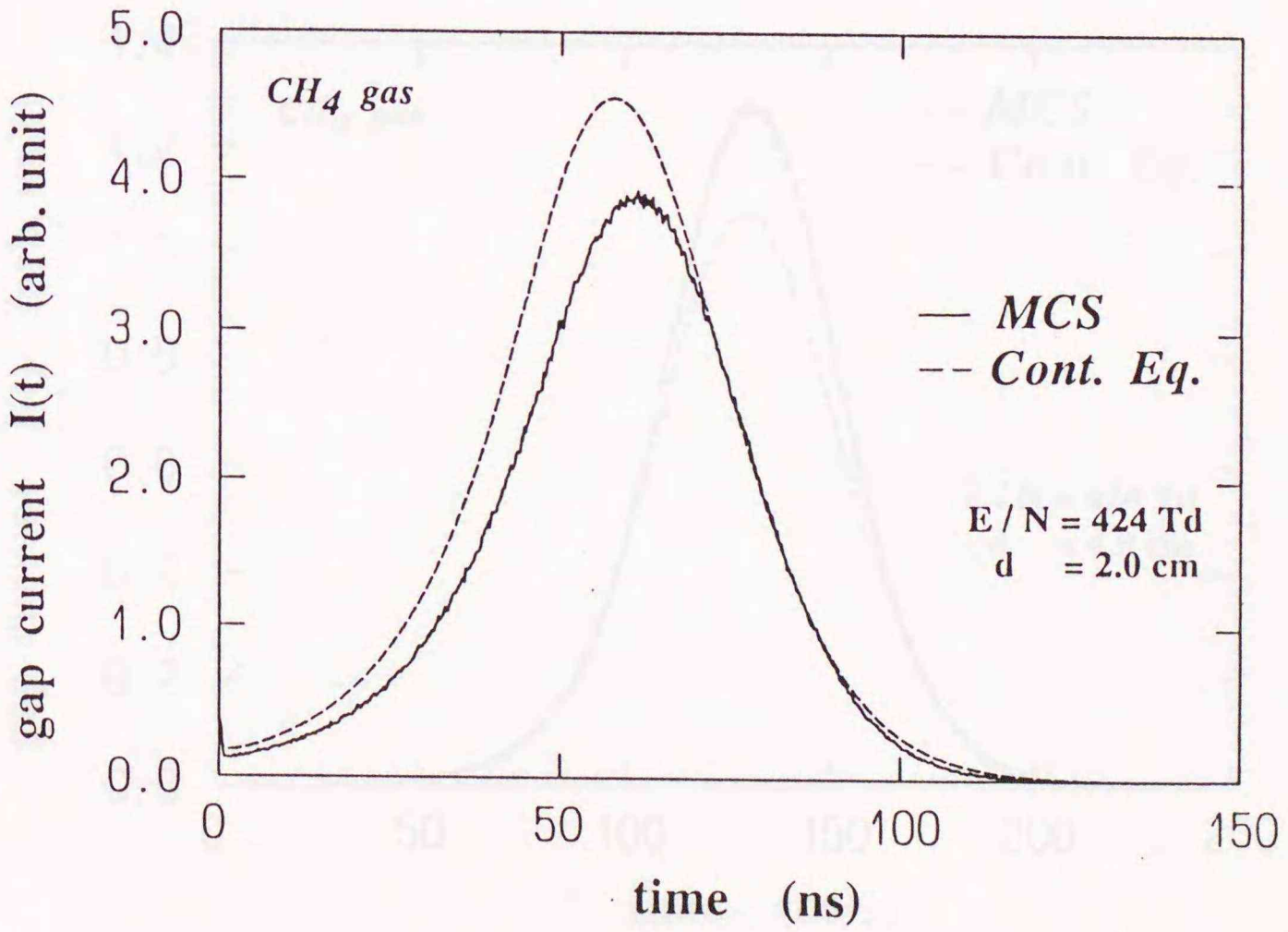


図７．５(b)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=2.0cm

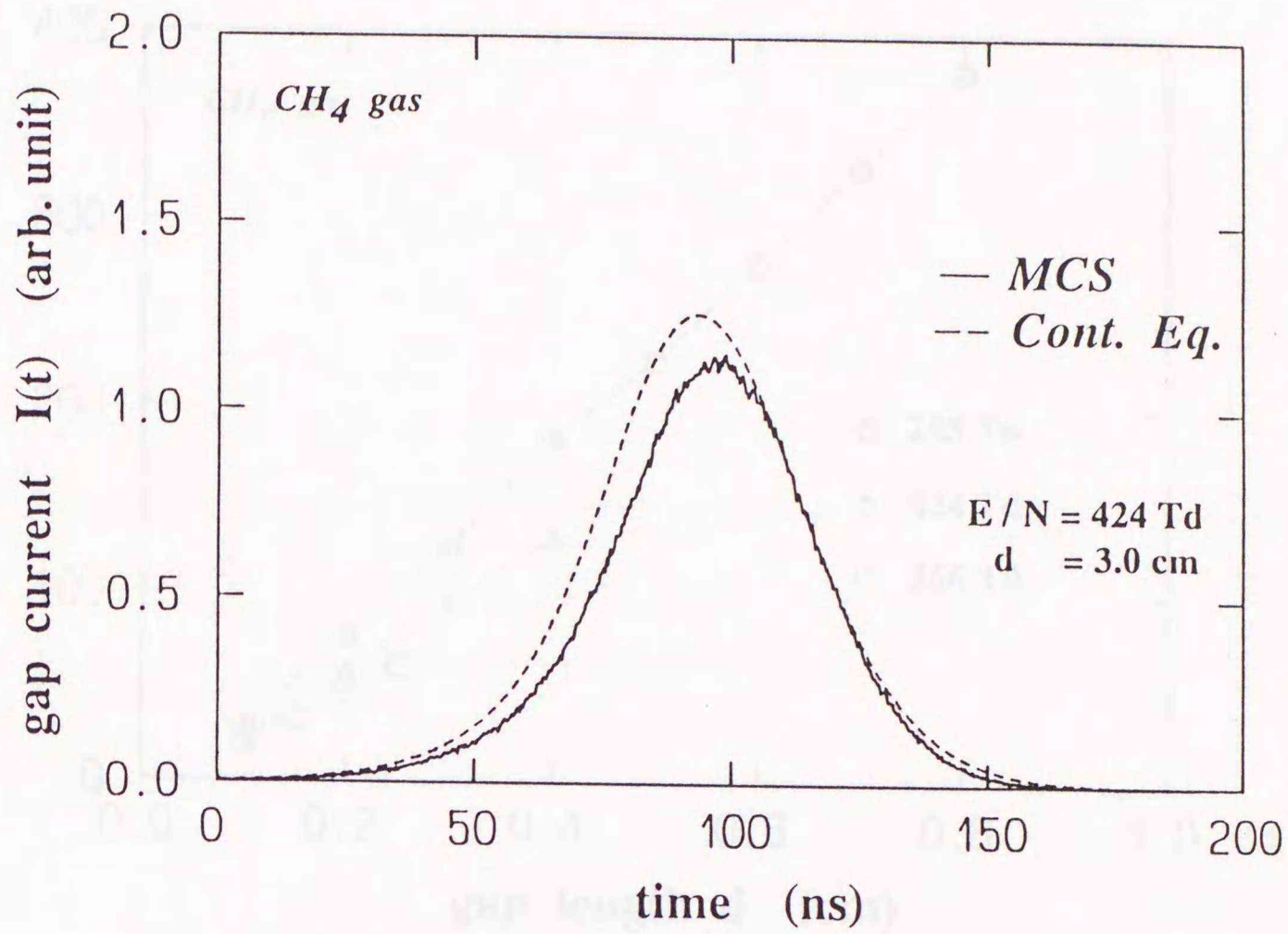


図７．５(c)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=3.0cm

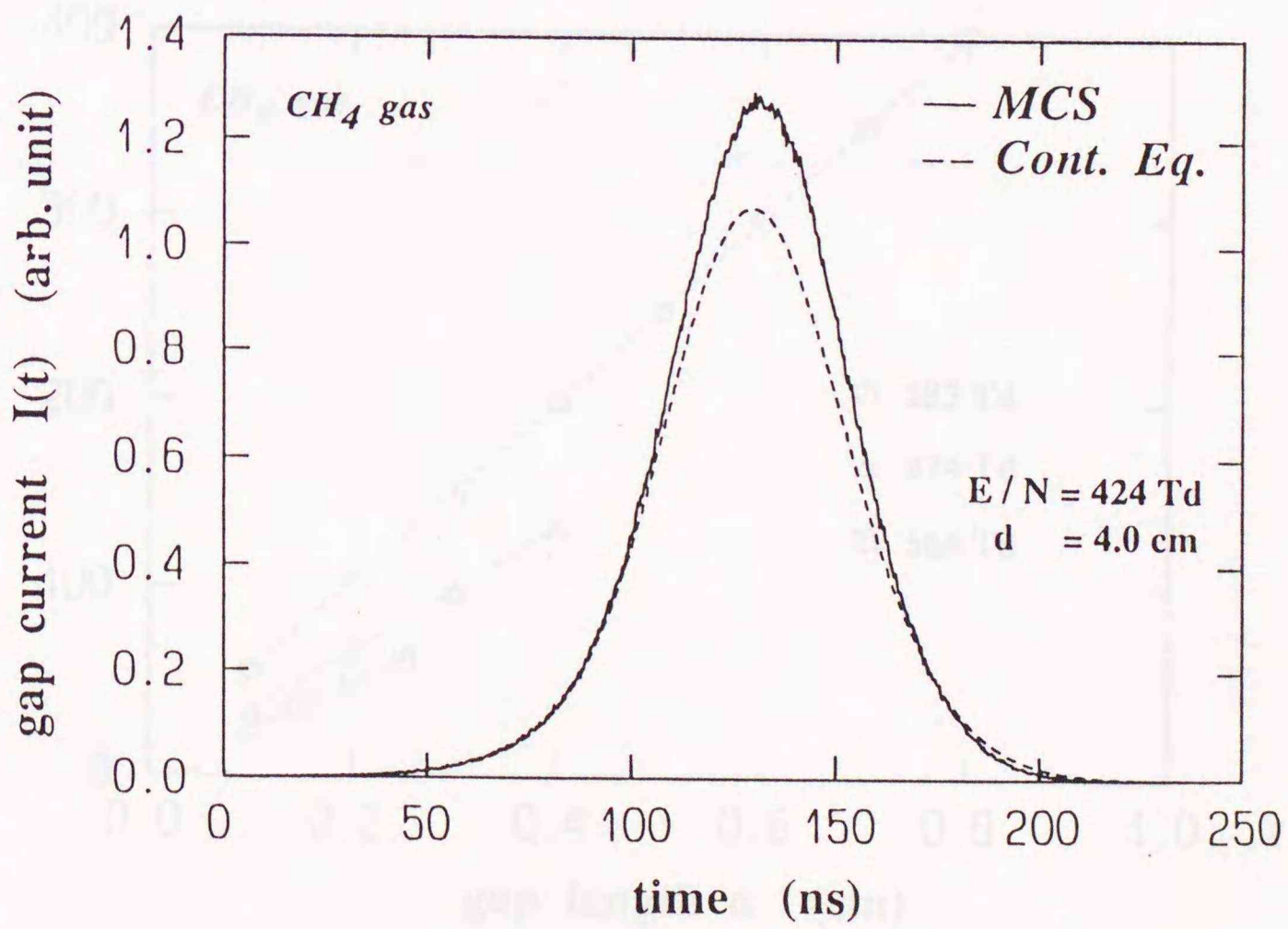


図７．５(d)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=4.0cm

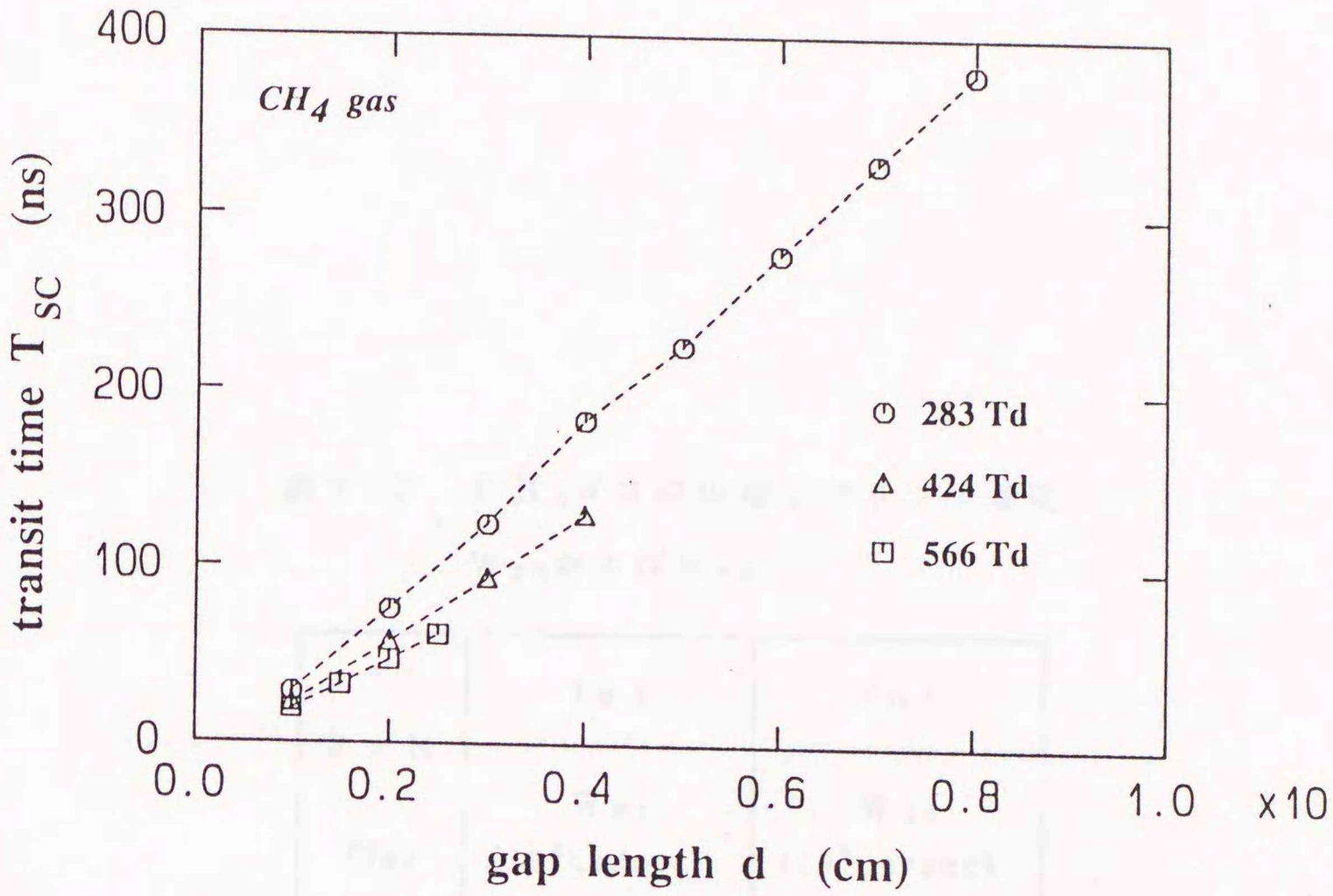


図7．6　経過時間　T_{SC}

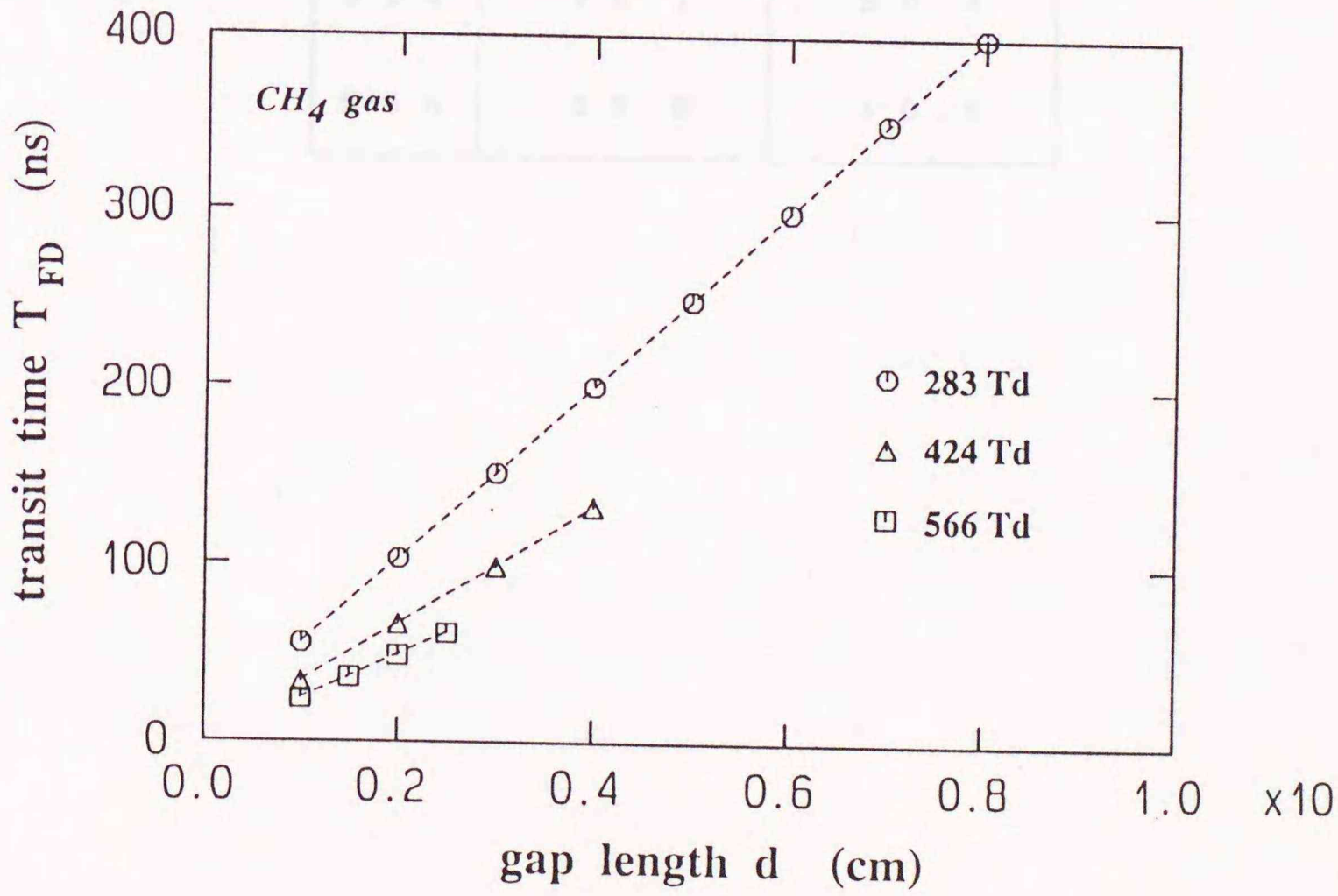


図7．7　経過時間　T_{FD}

表７．２　ＣＨ$_4$ガス中の電子ドリフト速度

W_{SC}およびW_{FD}

E／N (Td)	(a) W_{SC} (10^6cm/sec)	(b) W_{FD} (10^6cm/sec)
２８３	１９．９	２０．３
４２４	２８．１	３０．３
５６６	３５．８	４０．８

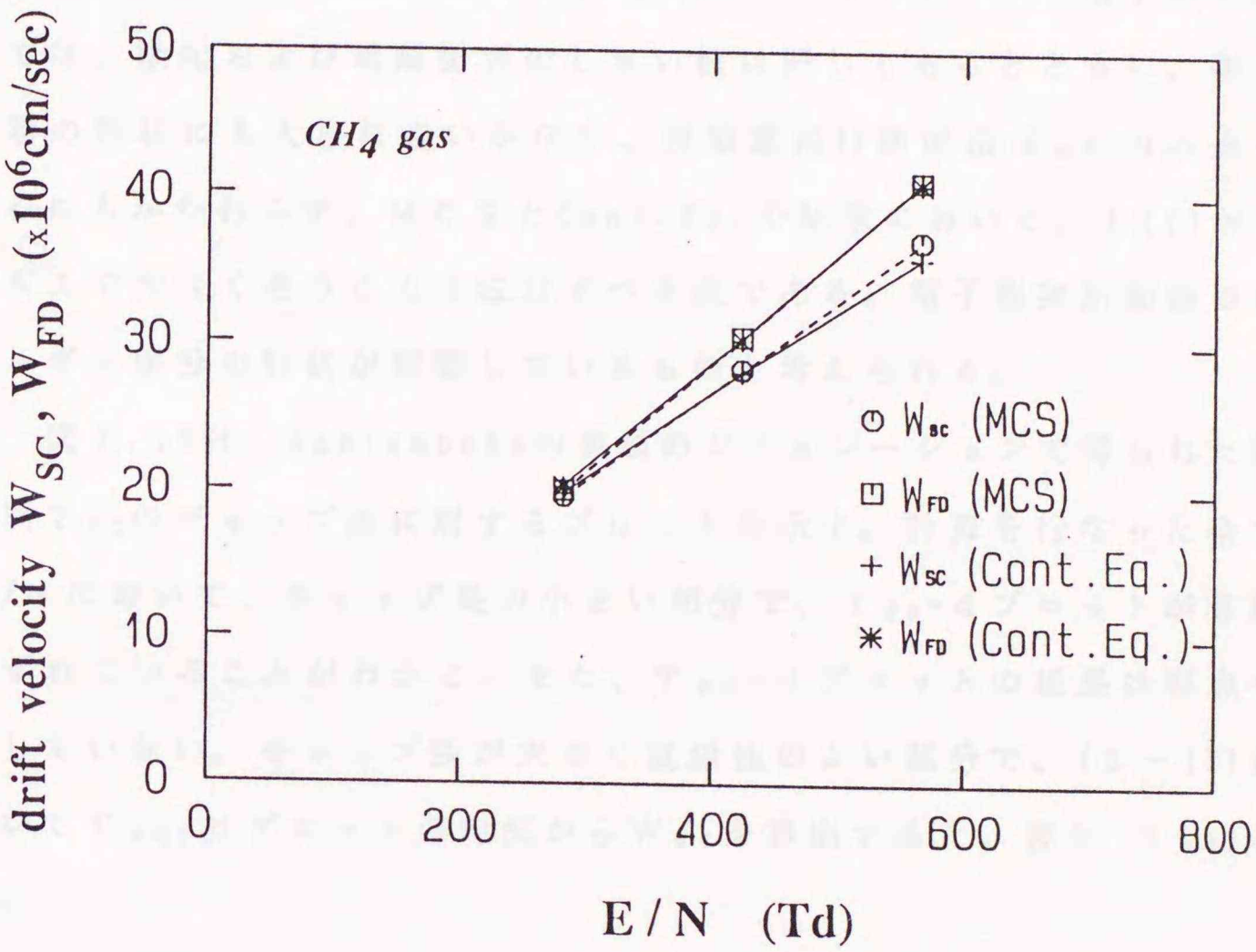


図7．8　電子ドリフト速度の比較

7－3－3　Arガスに対する解析

図7.9は、E/N=424Tdでギャップ長dを変化させたときのギャップ電流I(t)の時間変化を示す。シミュレーションには、表5.2に示した電子スオームパラメータを用い、条件は表5.1と同様である。Arガスの場合、他のガスの結果よりもMCSとCont.Eq.の結果が、定性的によく一致していることがわかる。モデルガスとArガスの電子衝突断面積では、励起および電離衝突のしきい値は同じであるとともに、衝突断面積の形状にも大きな違いがなく、運動量移行断面積δ_mにのみ違いがあるにもかかわらず、MCSとCont.Eq.の結果において、I(t)が2つのガスで大きく違うことは注目すべき点である。電子衝突断面積の低エネルギー部分の形状が影響しているものと考えられる。

図7.10は、Schlumbohmの実験のシミュレーションで得られた経過時間T_{sc}のギャップ長に対するプロットを示す。計算を行なった全てのE/Nにおいて、ギャップ長の小さい部分で、T_{sc}-dプロットが直線からずれていることがわかる。また、T_{sc}-dプロットの延長は原点を通過していない。ギャップ長が大きく直線性のよい部分で、(3－13)式を用いてT_{sc}-dプロットの勾配からW_{sc}を算出すると、表3.3(a)となる。

図7.11は、Frommholdの実験のシミュレーションで得られた経過時間T_{FD}のdに対するプロットを示す。T_{sc}-dプロットと同様に、ギャップ長の小さいところで、直線からずれていることがわかる。直線性のよい部分で、(3－14)式を用いて、W_{FD}を算出すると、表7.3(b)となる。

図7.12は、本解析で得られたW_{sc}およびW_{FD}と、モンテカルロ法による解析で得られた結果との比較を示す。Arガスの場合には、モンテカルロ法と連続の式による解析がよく一致していることがわかる。

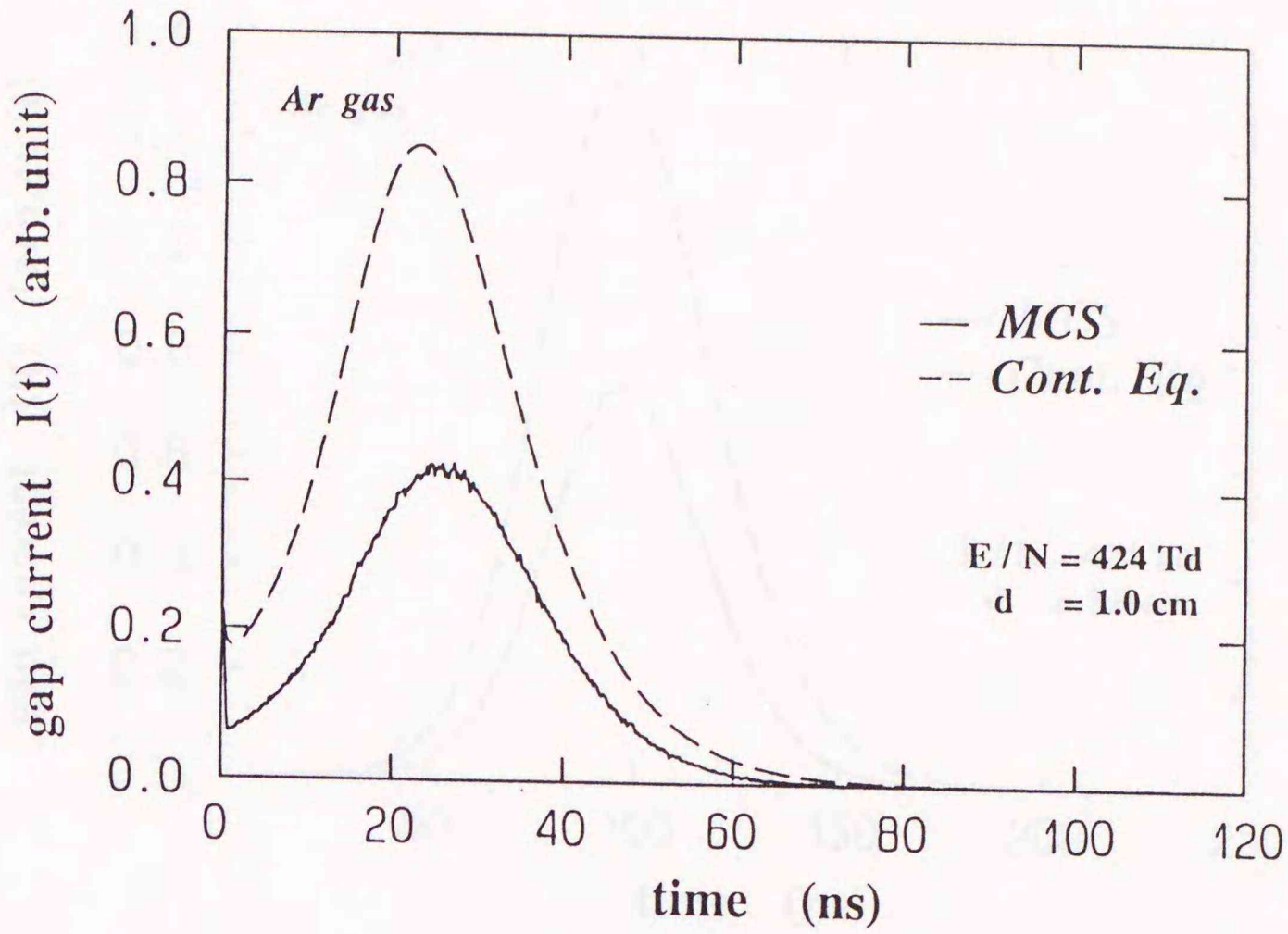


図7．9(a)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=1.0cm

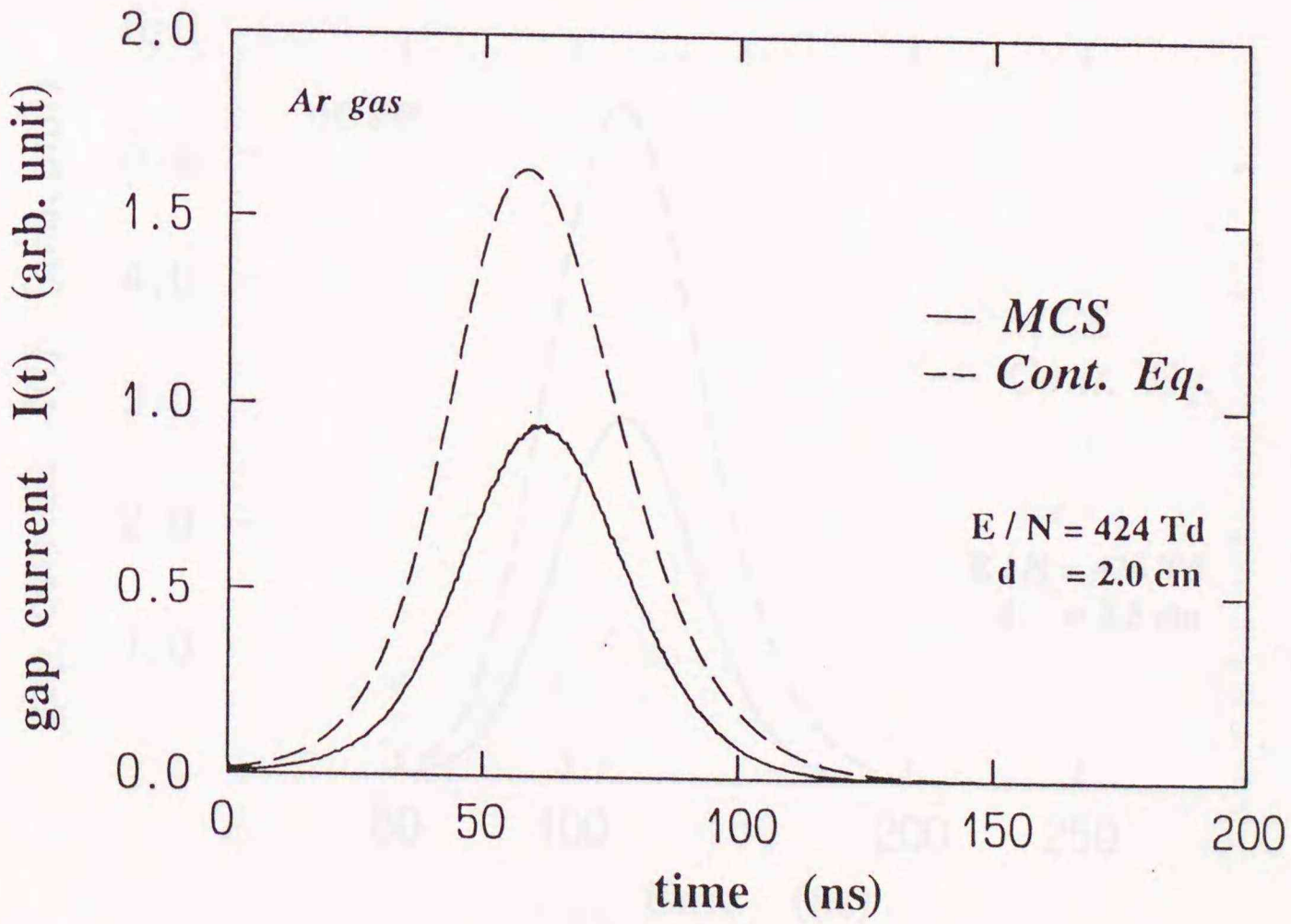


図7．9(b)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=2.0cm

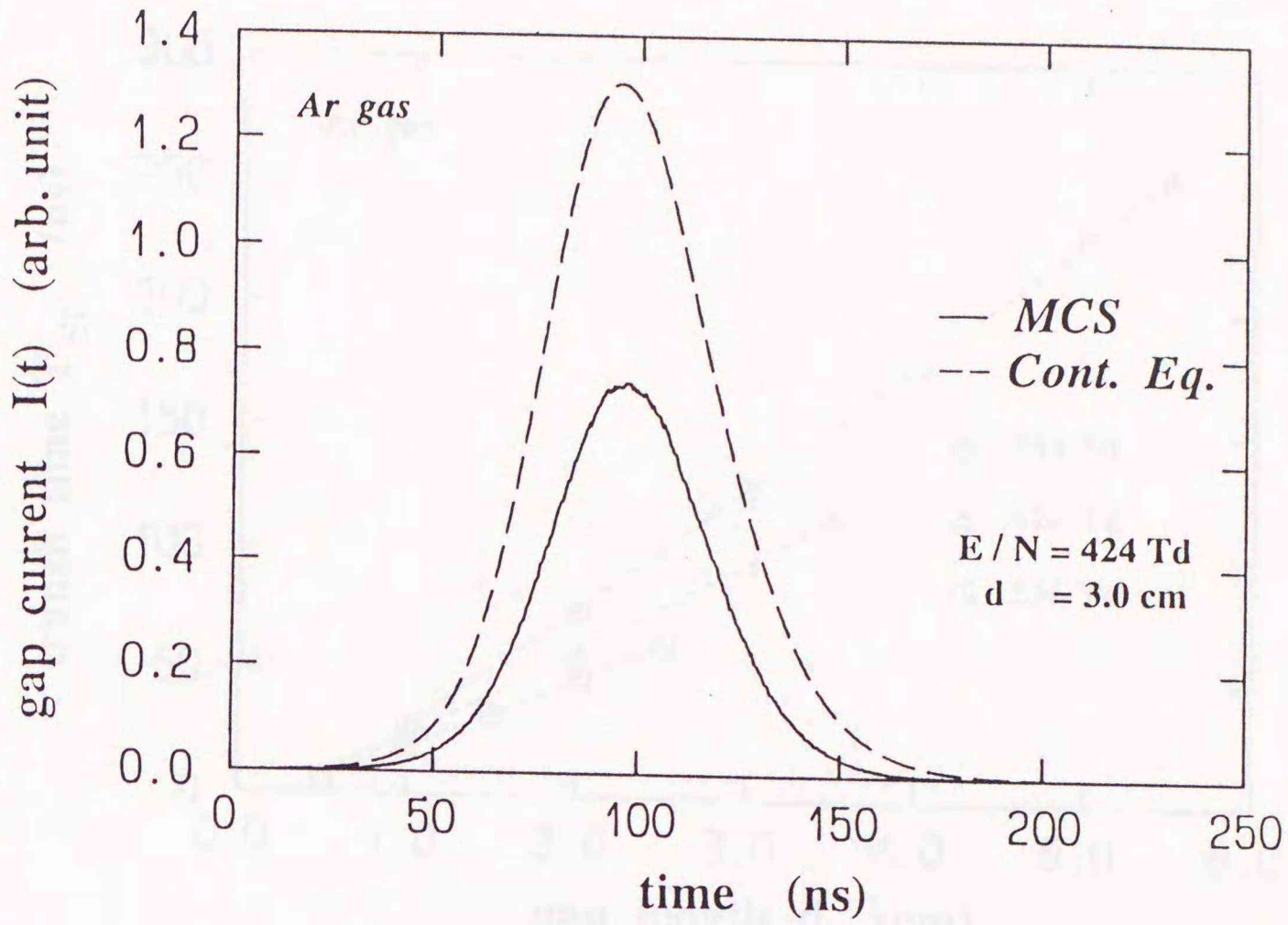


図7．9(c)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=3.0cm

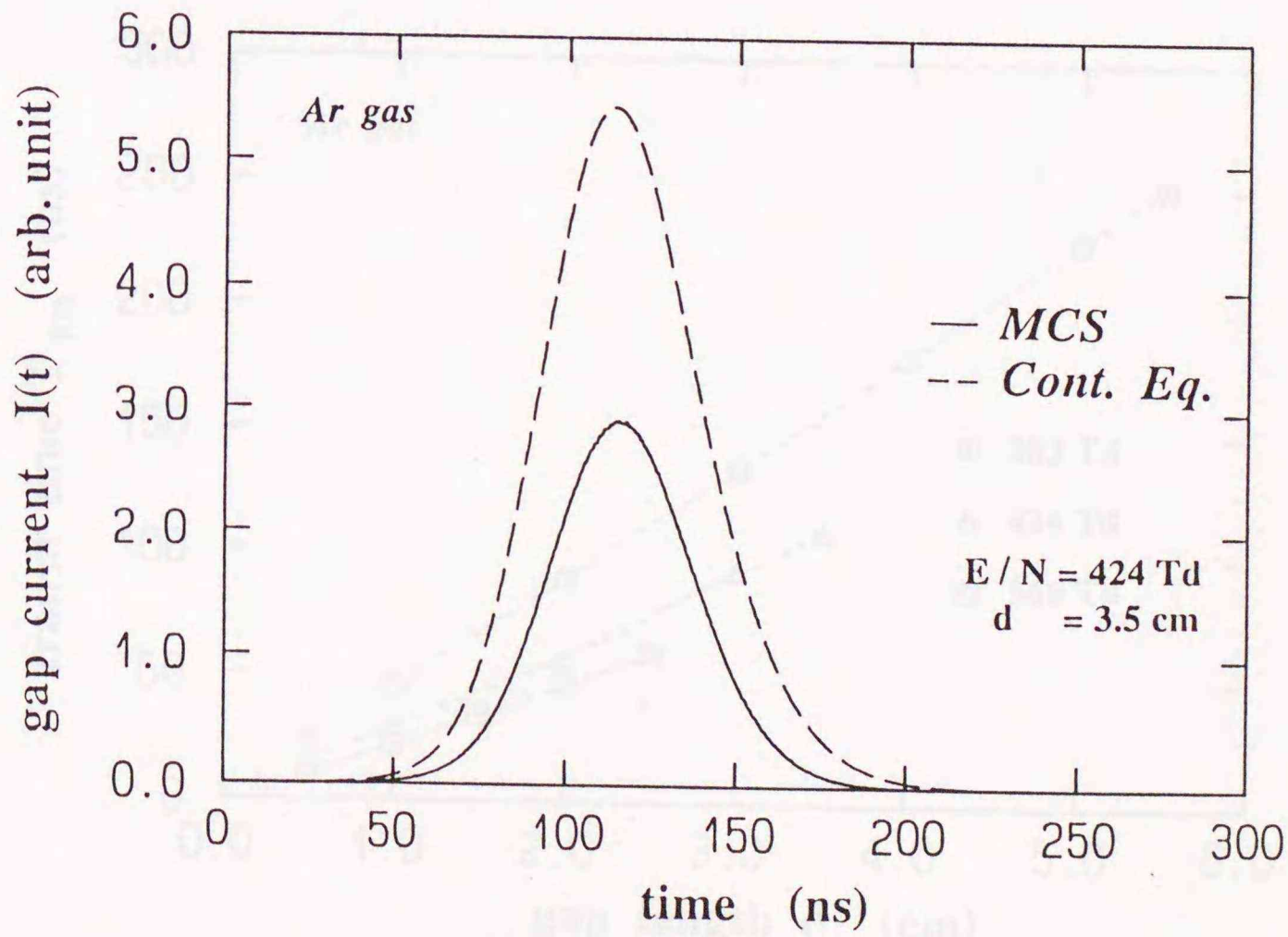


図7．9(d)　ギャップ電流の時間変化　E/N=424Td, d=3.5cm

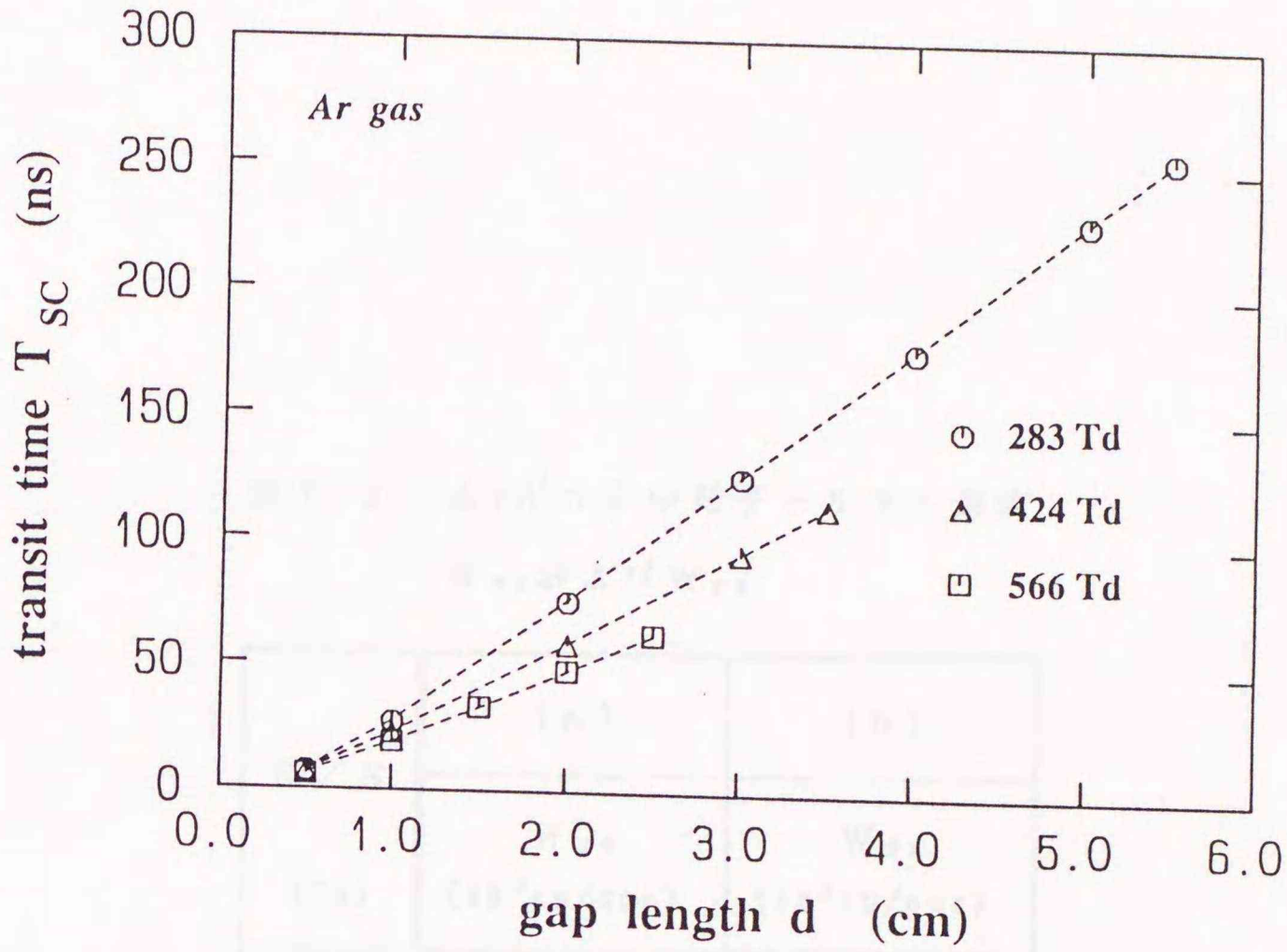


図7.10 経過時間 T_{SC}

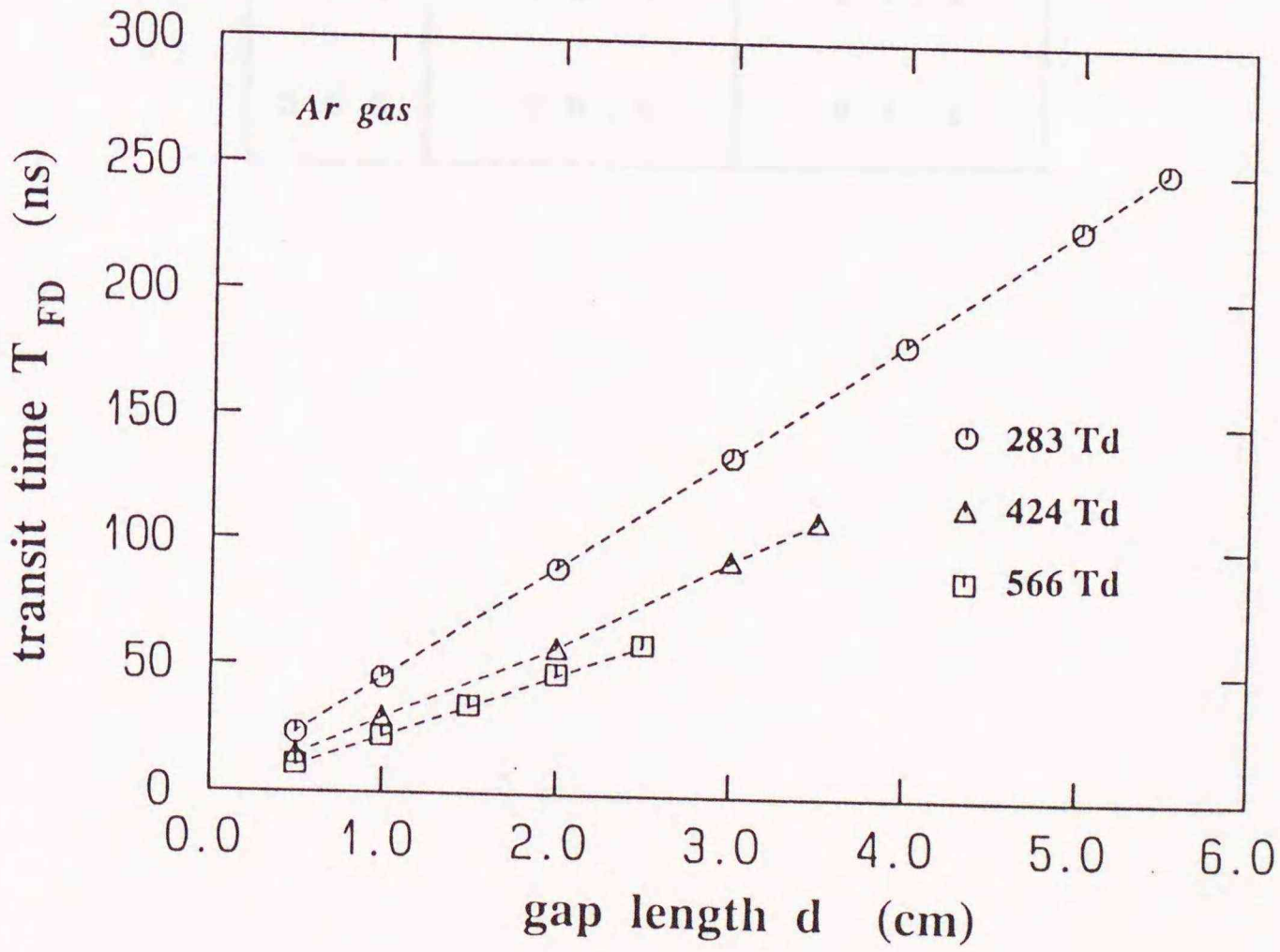


図7.11 経過時間 T_{FD}

表７．３　Ａｒガス中の電子ドリフト速度

W_{SC}およびW_{FD}

E／N (Td)	(a) W_{SC} (10^6cm/sec)	(b) W_{FD} (10^6cm/sec)
２８３	２０．２	２２．０
４２４	２８．０	３１．２
５６６	３５．４	４１．１

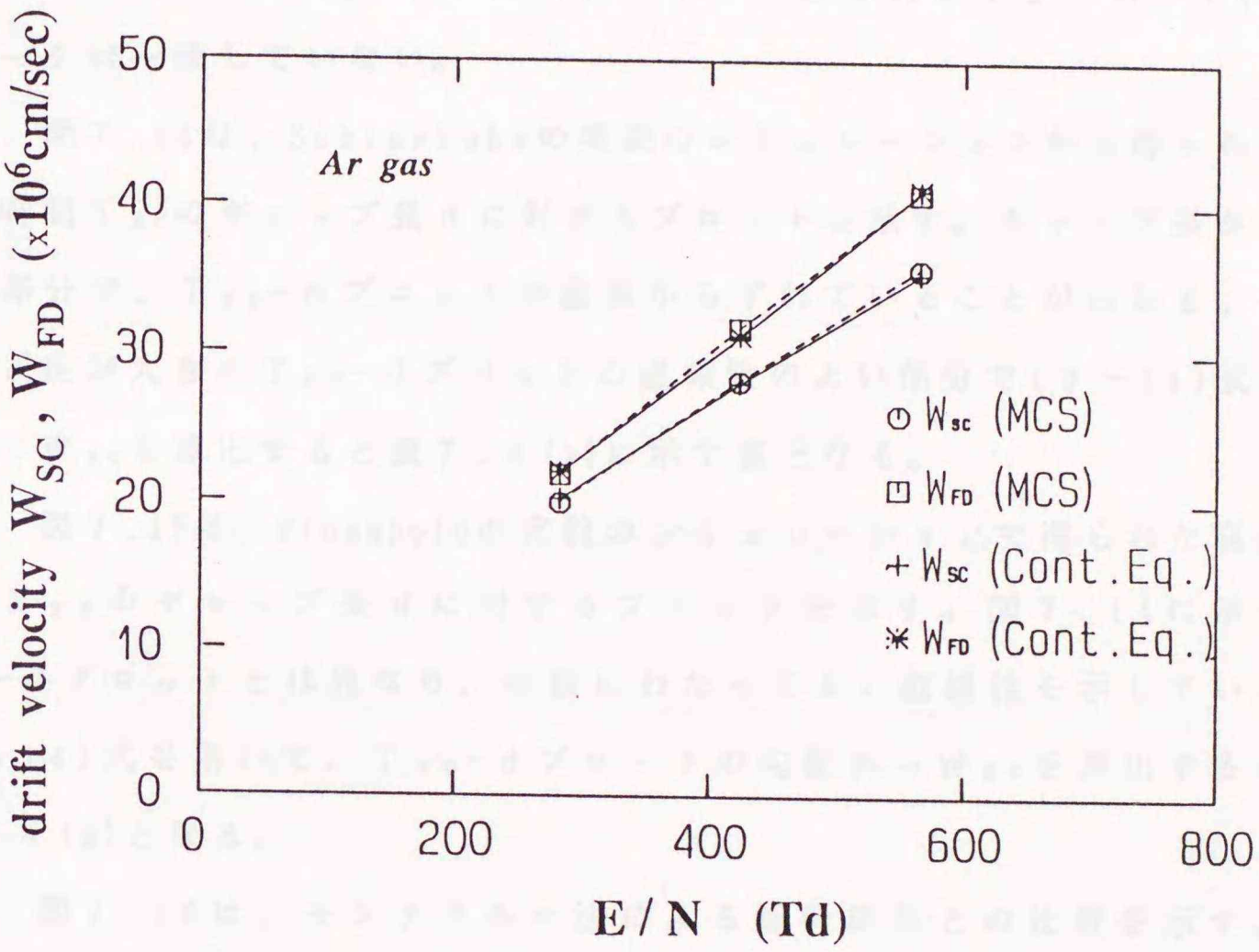


図7.12　電子ドリフト速度の比較

7－3－4　　SF_6ガスに対する解析

図7.13は、E/N=566Tdにおいて、ギャップ長を変化させたときのギャップ電流I(t)の時間変化を示す。シミュレーションには、表6.2に示した電子スオームパラメータ使用し、条件は表6.1と同様である。MCSに対して、Cont.Eq.の結果は、いずれのギャップ長においても左にシフトしている。また、ギャップ長を大きくしても、I(t)のピークは一致していない。

図7.14は、Schlumbohmの実験のシミュレーションから得られた経過時間T_{sc}のギャップ長dに対するプロットを示す。ギャップ長が小さい部分で、T_{sc}-dプロットが直線からずれていることがわかる。ギャップ長が大きくT_{sc}-dプロットの直線性のよい部分で(3－14)式を用いてW_{sc}を算出すると表7.4(a)に示す値となる。

図7.15は、Frommholdの実験のシミュレーションで得られた経過時間T_{FD}のギャップ長dに対するプロットを示す。図7.14に示すT_{sc}-dプロットとは異なり、全般にわたってよい直線性を示している。(3－14)式を用いて、T_{FD}-dプロットの勾配からW_{sc}を算出すると表7.4(b)となる。

図7.16は、モンテカルロ法による解析結果との比較を示す。W_{sc}およびW_{FD}は、E/N=566Tdにおいて違いが見られるが、その他では、よく一致していることがわかる。

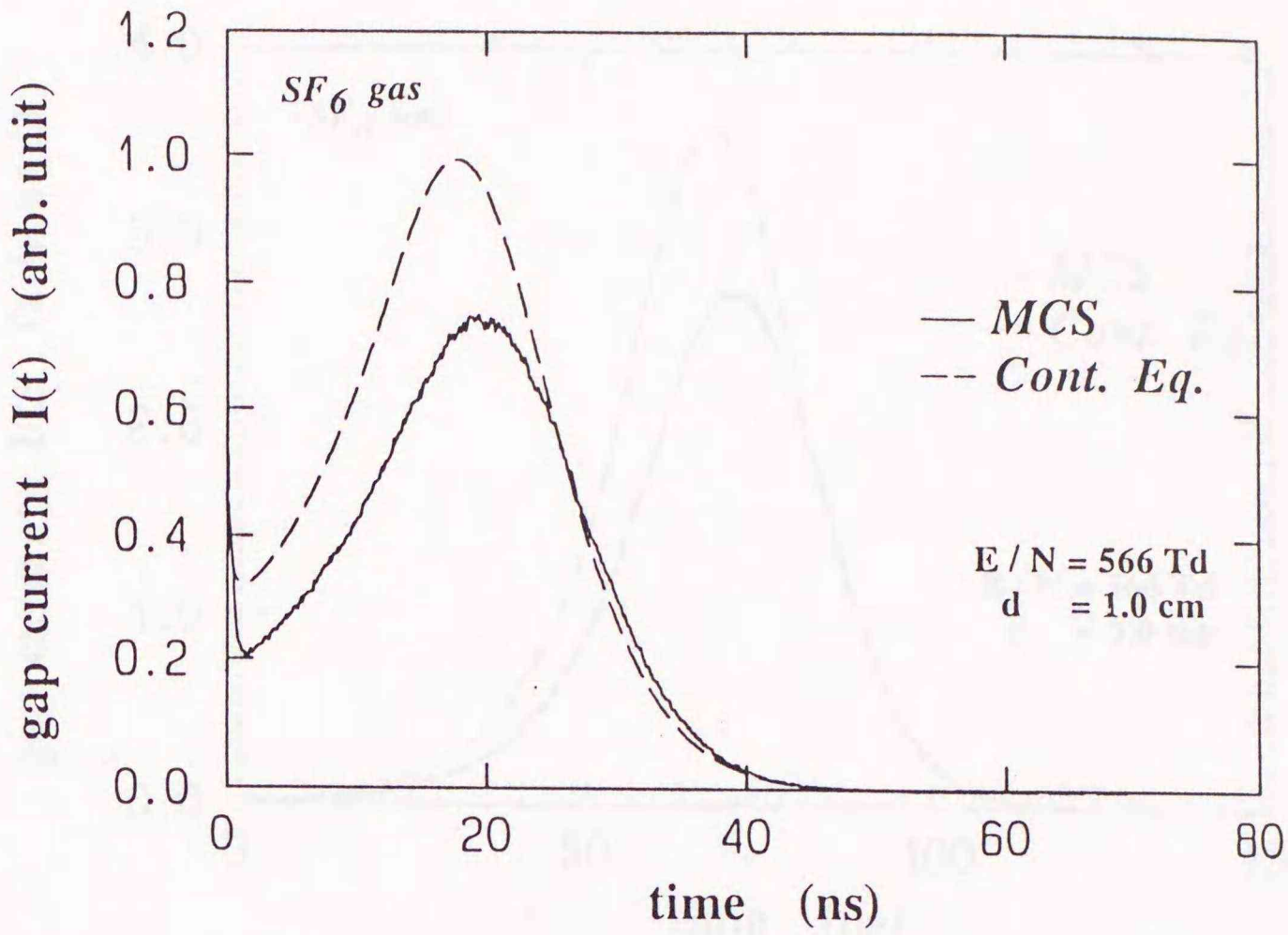


図7.13(a) ギャップ電流の時間変化 E/N=566Td, d=1.0cm

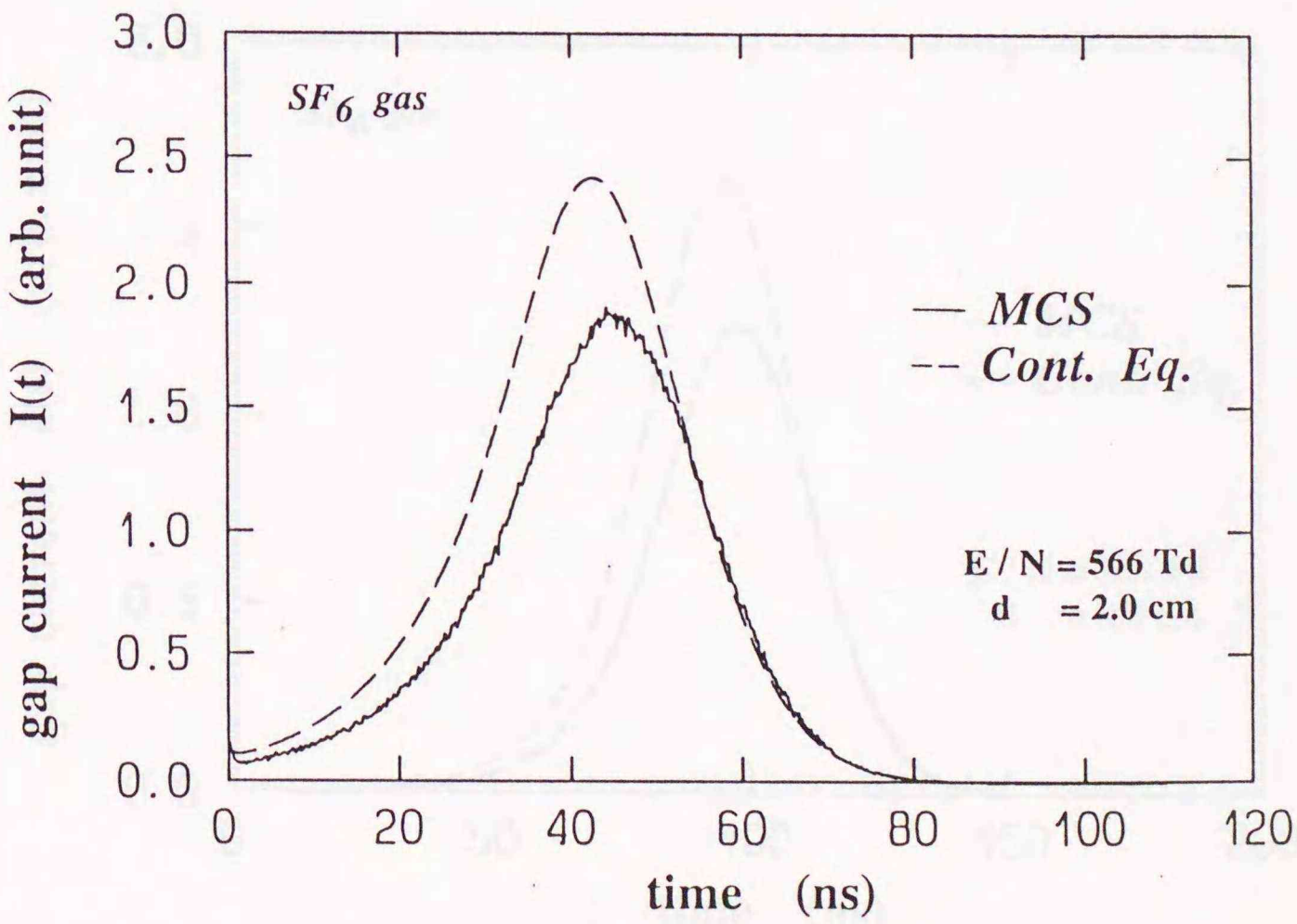


図7.13(b) ギャップ電流の時間変化 E/N=566Td, d=2.0cm

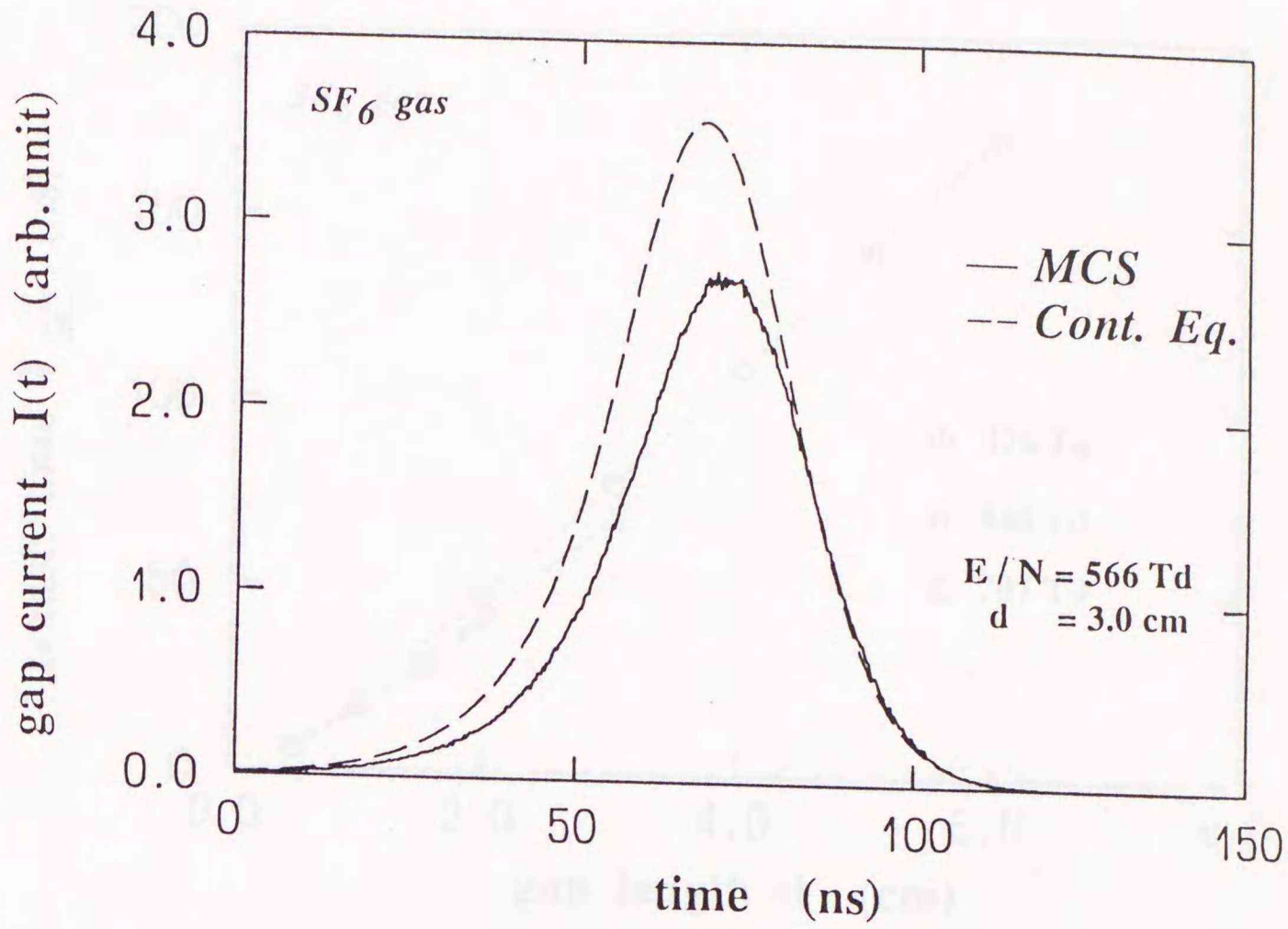


図7.13(c) ギャップ電流の時間変化 E/N=566Td, d=3.0cm

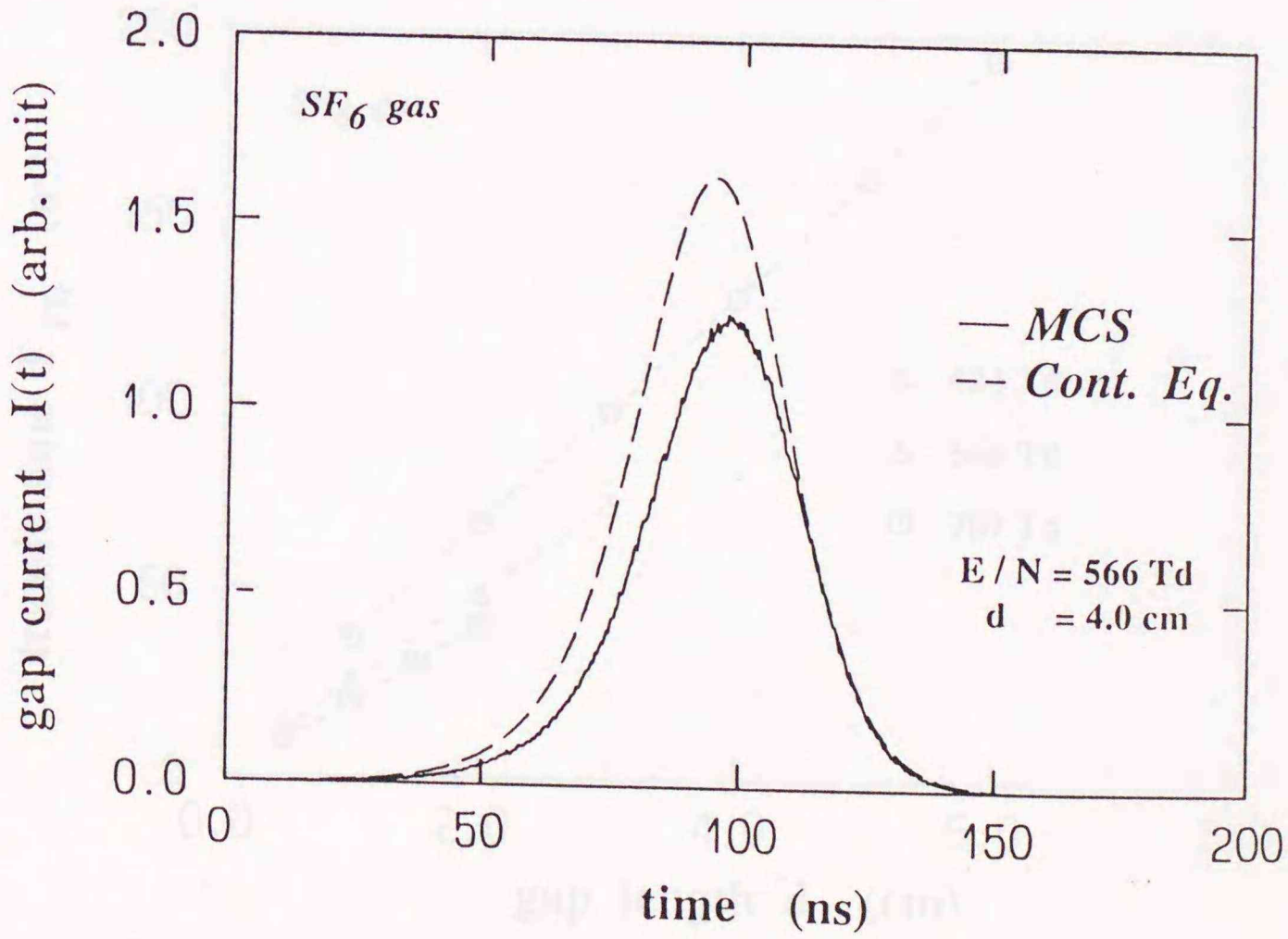


図7.13(d) ギャップ電流の時間変化 E/N=566Td, d=4.0cm

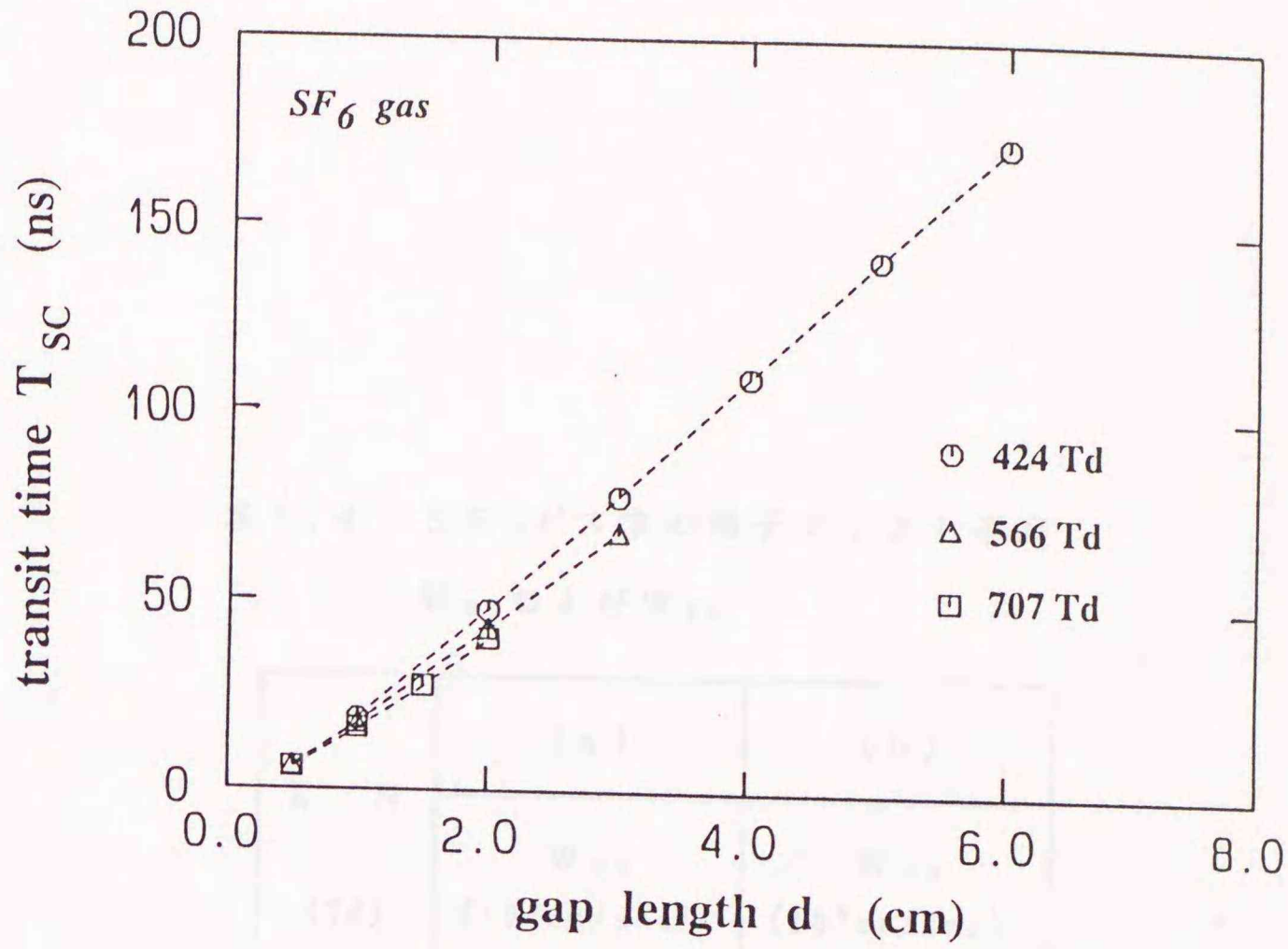


図7.14 経過時間 T_{SC}

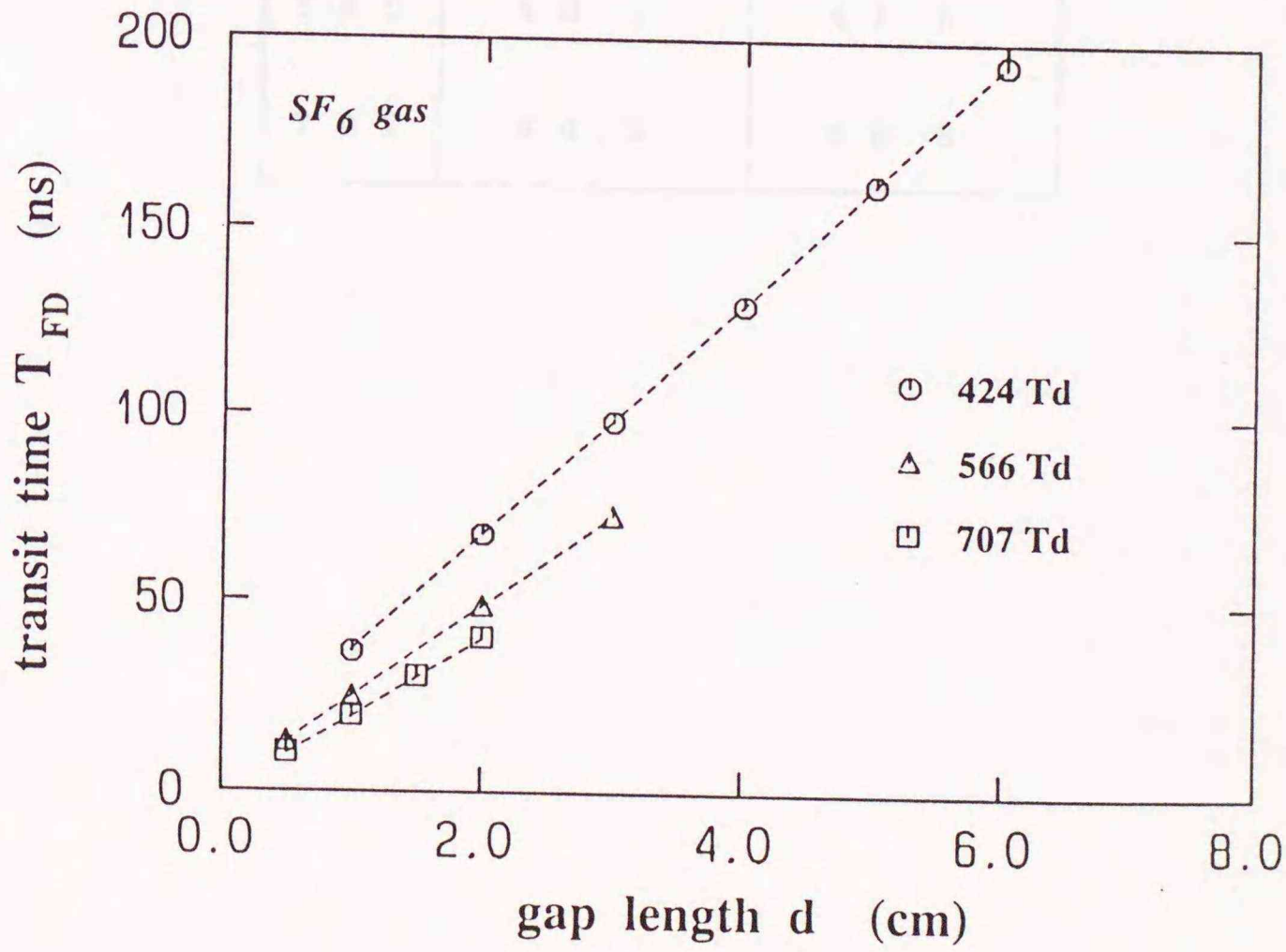


図7.15 経過時間 T_{FD}

表７．４　ＳＦ$_6$ガス中の電子ドリフト速度

W_{SC}およびW_{FD}

E／N (Td)	(a) W_{SC} (10^6cm/sec)	(b) W_{FD} (10^6cm/sec)
４２４	３２．５	３１．８
５６６	４０．１	４１．６
７０７	４４．２	４９．８

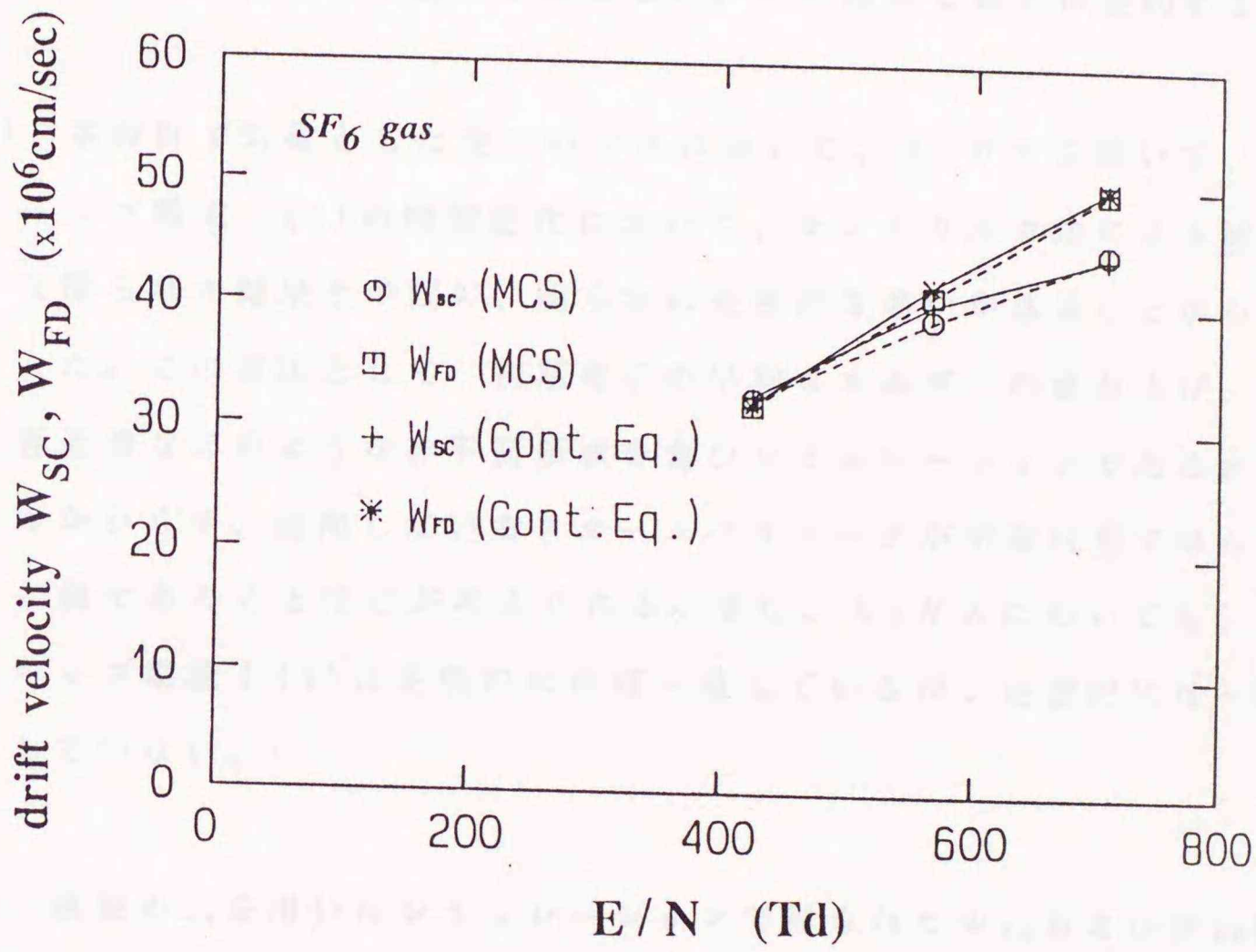


図7.16　電子ドリフト速度の比較

7－4　結言

本章では、一定衝突周波数モデルガス、CH_4ガス、ArガスおよびSF_6ガスに対し、連続の式を用いてSchlumbohmおよびFrommholdの実験をシミュレートし、それぞれの実験から電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を算出するとともに、得られた電子ドリフト速度を、モンテカルロ法による解析で得られた結果と比較した。その結果を以下に要約する。

（1）　本解析で対象とした全てのガスにおいて、Arガスを除いて、ギャップ電流I(t)の時間変化において、モンテカルロ法による解析で得られた結果との間に、明らかに定性的な違いがあることがわかった。この原因として、初期電子の平均エネルギーの値および、電極近傍などのような非平衡領域を含むシミュレーションであるにもかかわらず、使用しているスオームパラメータが平衡状態で得られた値であることなどが考えられる。また、Arガスにおいても、ギャップ電流I(t)は定性的にほぼ一致しているが、定量的には一致していない。

（2）　連続の式を用いたシミュレーションで得られたW_{SC}およびW_{FD}をモンテカルロ法による解析で得られた値と比較すると、比較的よく一致した。また、全般的にW_{FD}よりもW_{SC}が、解析方法の違いによる影響が現われやすいことが見いだされた。

以上の結果から、SchlumbohmおよびFrommholdの実験のシミュレーションでは、連続の式による解析結果と、モンテカルロ法を用いた解析の結果において、得られる電子ドリフト速度W_{SC}およびWFDに、大きな違いはないことがわかった。しかし、ギャップ電流I(t)の時間変

化では、連続の式による解析とモンテカルロ法による解析の結果に、大きな違いが見られた。したがって、連続の式を用いた解析では、電子スオームの基本的挙動を正確に表現できな可能性があると考えられる。

参考文献

[1] Y.Ohmori, K.Kitamori, M.Shimozuma and H.Tagashira
1986 J.Phys.D:Appl.Phys. 19 pp.437-55

[2] L.G.Huxley and R.W.Crompton
1974 "The diffusion and drift of electrons in gases",
Wiley-International, New York

第８章　結　論

電子ドリフト速度は、電子スオームの特性を記述する最も重要なパラメータの一つであり、理論的にあるいは実験的にその値が求められてきている。しかし、電離あるいは電子付着などよりスオーム中の電子数が非保存となる場合には、一般に、理論電子ドリフト速度の値が、観測方法によって異なる値を持つこと[1]、現実の実験が、原理的に、１－２で述べた実験と必ずしも一致しない場合もあり、現実の実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度の対応は十分に解明されていない。また、理論電子ドリフト速度は、モンテカルロ法あるいはボルツマン方程式法を用いて求められるが、これを現実の実験から得られる電子ドリフト速度と比較するときには、上述した解析で用いられる電子衝突断面積の妥当性を検討する必要があり、これも、理論と実験の対応を困難にしている原因の一つとなっている。

本論文では、電離衝突による電子増倍を伴う場合において、現実の実験から得られる電子ドリフト速度と理論電子ドリフト速度との対応関係について論じた。理論電子ドリフト速度と実験で得られる電子ドリフト速度の関係を明らかにするために、電離衝突による電子増倍を伴う場合に用いられる典型的な実験であるSchlumbohmおよびFrommholdの実験を対象として、これらをモンテカルロ法を用いて正確にシミュレートし、電子ドリフト速度をW_{SC}およびW_{FD}をそれぞれ算出した。さらに、W_{SC}およびW_{FD}を、同一の電子衝突断面積を用い、電極を考慮しない自由空間を仮定したモンテカルロシミュレーションによって得られた理論電子ドリフト速度、すなわち、拡散を考慮したドリフト速度Vd(ＳＳＴ)、全電子の平均値として定義されるドリフト速度Wv(ＰＴ)、スオームの重心のドリフト速度Wrおよび平均到着時間ドリフト速度Wm(ＴＯＦ)と比較し、対応関係を検討している。この解析を、電子衝突断面積に特徴

を持つ4種類のガス、すなわち、一定周波数モデルガス、CH_4ガス、ArガスおよびSF_6ガスに対して行った。また、連続の式を用いて、前述したガスに対して解析を行ない、その結果をモンテカルロ法による解析で得られた結果と比較し、連続の式による解析の妥当性を評価した。

本研究で得られた成果を以下に要約する。

(1)モデルガスに対する解析

電子ドリフト速度の一般的傾向を定性的に把握するため、計算時間の短縮が可能である全衝突周波数が一定値であるモデルガスに対し、電離による電子増倍を伴うE/N=283、424および566Tdにおいて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験をシミュレートした。

SchlumbohmおよびFrommholdの定義からそれぞれ算出したW_{SC}およびW_{FD}は、ギャップ長が小さい部分でギャップ長依存性を持ち、これは、T_{SC}-dおよびT_{FD}-dプロットの延長が原点を通らないことに起因している。したがって、電子ドリフト速度の決定における曖昧さを排除するために、本論文では、(3－13)式および(3－14)式のようにT_{SC}-dおよびT_{FD}-dプロットの勾配からW_{SC}およびW_{FD}を決定した。また、他のガスにおいても、この方法でW_{SC}およびW_{FD}を決定した。

W_{SC}およびW_{FD}を理論電子ドリフト速度と比較すると、完全に一致するものはないことが見出された。しかし、W_{SC}は、W_mに近く僅かに大きな値の電子ドリフト速度であり、W_{FD}は、$\frac{1}{2}(W_r+W_m)$にほぼ一致する電子ドリフト速度である可能性が示唆された。また、$\frac{1}{2}(W_r+W_m)$は、(3－18)および(3-19)式の電子ドリフト速度W_wに等しく、また、(3－23)式の形に書かれた連続の式を満足する電子ドリフト速度に等しい。

電極における電子の反射を考慮したシミュレーションの結果から、

電極における電子の反射を考慮しても、得られる電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}の値には事実上影響が現れないが、電子スオームの振舞いは、大きな影響を受けていることが見出された。

(2)CH_4ガスに対する解析

CH_4ガスは、プラズマCVDによるカーボン膜の堆積に用いられる気体材料として注目されているガスであり、電子衝突断面積では、弾性衝突に対し、低エネルギー部にラムザウアータウンゼント極小を持つとともに、その付近で、非弾性衝突が弾性衝突よりも大きな確率をもつことが特徴である。

電離衝突による電子増倍を伴うE/N=283、424および566Tdにおける解析の結果、W_{SC}はW_mに近く僅かに大きな値を持つ電子ドリフト速度であり、W_{FD}は$\frac{1}{2}(W_r+W_m)$とよく一致する電子ドリフト速度であることが見出された。実測値との比較では、W_{SC}がDavies et al.[2]の結果とよく一致した。Hunter et al.[3]の結果はW_{FD}にほぼ一致し、Al-Amin et al.[4]の結果はW_{SC}とW_{FD}の間に位置し、W_{SC}に近い値であることが見出された。また、Schlumbohm[5]が示した近似式から求めた電子ドリフト速度は、W_{SC}およびW_{FD}のどちらにも一致しなかった。

(3)Arガスに対する解析

Arガスは、プラズマエッチングおよびエキシマレーザのバッファガスなどに用いられている。電子衝突断面積では、最低励起準位が高く、運動量移行断面積は、低エネルギー部にラムザウアータウンゼント極小を持っているのが特徴である。

電離による電子増倍を伴うE/N=283、424および566Tdにおける解析の結果から、W_{SC}は、W_mおよびW_vと非常によく一致すること

が見出された。W_{FD}は、E/N=283および424Tdでは$\frac{1}{2}$(Wr+Wm)とよく一致したが、E/N=566Tdでは、僅かに大きな値となった。

Kucukarpaci el al.[6]の実測値は、W_{SC}とよく一致した。

(4)SF_6ガスに対する解析

SF_6ガスは電子付着性が強いガスであり、ガス絶縁材料として用いられている。また、最近ではプラズマエッチング、ガスレーザなどにも用いられている。このガスは、低エネルギー部に非常に大きな電子付着衝突断面積を持つとともに、高エネルギー部に大きな電離衝突断面積を持っている。

電離による電子増倍を伴うE/N=424、566および707Tdにおける解析の結果、W_{SC}はWmに近く僅かに大きな値を持つ電子ドリフト速度であった。W_{FD}は、$\frac{1}{2}$(Wr+Wm)に近い値であるが僅かに大きな値であり、W_{FD}が必ずしも正確に$\frac{1}{2}$(Wr+Wm)となるとは限らないことが見出された。

(5)連続の式を用いた解析

モンテカルロシミュレーションによって求められた電子スオームパラメータを用いて、SchlumbohmおよびFrommholdの実験を連続の式を用いて、一定衝突周波数モデルガス、CH_4ガス、ArガスおよびSF_6ガスに対して解析を行なった。

得られた電子ドリフト速度W_{SC}およびW_{FD}を、第3章から第6章までの解析で得られた値と比較した結果、いずれのガスにおいてもほぼ一致した。しかし、ギャップ電流の時間変化をモンテカルロ法による結果と比較すると、いずれのガスのシミュレーション結果においても明らかに違いが見られた。したがって、連続の式を用いた解析では、電子スオームの基本的挙動を十分に正確に表現できない

可能性があると考えられる。

以上、本論文では、電子衝突断面積に特徴を持つ4種類のガスに対する解析の結果、

・W_{SC}およびW_{FD}は、一般に、理論電子ドリフト速度Vd、Wv、WrおよびW_mのいずれにも一致しない。

・W_{SC}およびW_{FD}は、本質的に異なる電子ドリフト速度である。

・W_{SC}は、W_mに近く僅かに大きな値を持つ電子ドリフト速度である。

・W_{FD}は、SF_6ガスを除いて、$\frac{1}{2}$（Wr＋W_m）とほぼ一致する電子ドリフト速度である。

・W_{SC}およびW_{FD}を、SchlumbohmおよびFrommhold実験からそれぞれ算出する場合には、ギャップ長依存性を持つため、実験においては十分に大きなNdを設定する、あるいはT_{SC}-dおよびT_{FD}-dプロットの勾配から算出するべきである。

ことを、はじめて明らかにした。したがって、Schlumbohmの実験から得られる電子ドリフト速度は、W_mと比較するのが適当であると考えられる。ただし、一般に、W_mよりも僅かに大きな値となることに注意をしておかなければならない。また、Frommholdの実験から得られる電子ドリフト速度は、$\frac{1}{2}$(Wr＋W_m)と比較するのが適当であると考えられる。ただし、SF_6ガスのように、大きな電子付着断面積を持つガスでは、W_{FD}と$\frac{1}{2}$(Wr＋W_m)が必ずしも一致しない可能性がある点に注意しなければならない。

本論文では、電子スオームの基本的特性を十分に正しく表現できる方法であるモンテカルロ法を用いて解析を行なってきが、今後、細かな点として、

（1）初期電子パルスの幅

（2）2次電子の影響（特にγ_p作用）

(3)イオンの影響

(4)初期電子のエネルギー

(5)電極における電子の反射の影響(反射係数)

(6)ガスの種類

について考慮する必要もあると思われる。(4)、(5)および(6)については、本論文でも議論されているが、さらに多くのケースについて解析を行なう余地も残されていると考えられる。

気体放電を電子、気体分子、イオンなどの粒子の振舞いから解析する気体電子工学において、電子と気体分子の衝突確率を表す電子衝突断面積が理論解析において極めて重要であり、その正確な値が要求されている。したがって、電子衝突断面積の導出の際に用いられるスオームパラメータ、特に電子ドリフト速度において、理論と実験の定量的な対応関係を明らかにするため、本研究分野がこれまで以上に重要になるものと考えられる。

参考文献

[1] H.Tagashira, Y.Sakai and S.Sakamoto
1977 J.Phys.D: Appl.Phys. 10 pp.1051-63

[2] D.K.Davies, L.E.Kline and W.E.Bies
1989 J.Appl.Phys. 65 pp.3311-23

[3] S.R.Hunter, J.G.Carter and L.G.Christophorou
1986 J.Appl.Phys. 60 pp.24-35

[4] S.A.J.Al-Amin, H.N.Kucukarpaci and J.Lucas
1985 J.Phys.D: Appl.Phys. 18 pp.1781-94

[5] H.Schlumbohm 1965 Z.Phys. 182 pp.317-27

[6] H.N.Kücükarpaci, J.Lucas and H.T.Saelee
1981 J.Phys.D: Appl.Phys. 14 pp.9-25

謝　辞

本研究に対し、多大なる御指導御討論を頂きました北海道大学工学部田頭博昭教授に心より感謝致します。機会あるごとに貴重な御意見、御助言を頂きました北海道大学工学部酒井洋輔助教授、金子良松助手、澤田貞夫技官に謝意を表します。また、本研究に対し種々の御討論を頂きました北海道大学医療技術短期大学部下妻光夫助教授および伊達広行助手、北海道工業大学北守一隆助教授、北海道職業訓練短期大学校大森義行先生および中村聡先生ならびに秋田大学鉱山学部鈴木雅史助手に感謝の意を表します。さらに、本研究に対して御理解を頂くとともに、全般にわたって励ましを頂きました室蘭工業大学中尾好隆教授および伊藤秀範助教授に厚くお礼を申し上げます。また、本研究に対して御助言を頂いた北海道大学工学部電気工学科電気応用工学講座研究生三好功氏(北海道旅客鉄道株式会社)、および博士後期課程伊達亜由美氏、栃谷元氏、さらに本論文作成にあたり御協力を頂いた博士前期課程明石治朗氏、角田勝巳氏、中村充氏、菅原広剛氏、安藤禎宣氏、および長縄圭介氏、辻崇氏、長浜義博氏をはじめとする卒論生諸氏に心よりお礼を申し上げます。

筆者の文献

(1) K.Satoh, H.Itoh, Y.Nakao and H.Tagashira
1988 J. Phys. D: Appl. Phys. 21 931-6

(2) H.Itoh, M.Kawaguchi, K.Satoh, Y.Miura, Y.Nakao and H.Tagashira
1990 J. Phys. D: Appl. Phys. 23 299-303

(3) 佐藤孝紀、大森義行、酒井洋輔、田頭博昭
電気学会論文誌A 平成3年3月号掲載決定

(4) K.Satoh, Y.Ohmori, Y.Sakai and H.Tagashira
J. Phys. D: Appl. Phys. (Submitted)

(5) 佐藤孝紀、伊藤秀範、中尾好隆、田頭博昭
昭和62年 電気学会放電研究会資料 ED-87-41

(6) 佐藤孝紀、伊藤秀範、中尾好隆
昭和61年 電気関係学会北海道支部大会講演論文集 119

(7) 佐藤孝紀、永井剛、伊藤秀範、中尾好隆
昭和62年 応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 B31

(8) 佐藤孝紀、永井剛、伊藤秀範、中尾好隆、田頭博昭
昭和62年 電気学会全国大会講演論文集[2]電気物理 83

(9) 佐藤孝紀、伊藤秀範、中尾好隆
昭和62年　電気関係学会北海道支部大会講演論文集 187

(10) 川口優、三浦美治、佐藤孝紀、伊藤秀範、中尾好隆
昭和63年　応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 B41

(11) 佐藤孝紀、宮地敏聡、伊藤秀範、中尾好隆、田頭博昭
昭和63年　第35回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 30a-F-4

(12) 佐藤孝紀、宮地敏聡、伊藤秀範、中尾好隆、田頭博昭
昭和63年　電気学会全国大会講演論文集[2] 139

(13) 川口優、三浦美治、佐藤孝紀、伊藤秀範、中尾好隆、田頭博昭
昭和63年　電気学会全国大会講演論文集[2] 129

(14) 川口優、関谷俊治、佐藤孝紀、伊藤秀範、中尾好隆、田頭博昭
昭和63年　電気学会全国大会講演論文集[2] 111

(15) 佐藤孝紀、伊達広行、酒井洋輔、田頭博昭
昭和63年　電気関係学会北海道支部連合大会 219

(16) 佐藤孝紀、伊達広行、下妻光夫、酒井洋輔、田頭博昭
平成元年　応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 B5

(17) 明石治朗、佐藤孝紀、伊達広行、酒井洋輔、田頭博昭
平成元年　応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 B4

(18) 佐藤孝紀、伊達広行、下妻光夫、酒井洋輔、田頭博昭
平成元年　電気学会全国大会講演論文集[2] 177

(19) 大森義行、佐藤孝紀、下妻光夫、田頭博昭
平成元年　電気学会全国大会講演論文集[2] 165

(20) 佐藤孝紀、伊達広行、下妻光夫、酒井洋輔、田頭博昭
平成２年　応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 B4

(21) 佐藤孝紀、大森義行、酒井洋輔、田頭博昭
平成２年　電気学会全国大会講演論文集[2] 157

(22) 佐藤孝紀、大森義行、酒井洋輔、田頭博昭
平成２年　電気関係学会北海道支部大会講演論文集 162

(23) 佐藤孝紀、大森義行、酒井洋輔、田頭博昭
平成２年　電気関係学会北海道支部大会講演論文集 164

(24) 佐藤孝紀、大森義行、酒井洋輔、田頭博昭
平成３年　応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集

(25) 長縄圭輔、佐藤孝紀、下妻光夫、田頭博昭
平成３年　応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集

(26) 長浜義博、佐藤孝紀、下妻光夫、金子良松、田頭博昭
平成３年　電気学会全国大会講演論文集

付　　録

1．モデルガスに対するシミュレーションプログラム
　－モンテカルロ法－（電子衝突断面積を含む）

2．モデルガスに対するシミュレーションプログラム
　－連続の式によるシミュレーション－

3．電子ドリフト速度の測定方法（原理）
　（1）拡散を考慮した電子ドリフト速度Ｖｄ
　（2）スオーム中の電子の平均速度として定義されるドリフト速度Ｗｖ
　（3）スオームの平均到着時間ドリフト速度Ｗｍおよび重心のドリフト速度Ｗｒ

付録１．モデルガスに対するシミュレーションプログラム
　　ーモンテカルロ法ー

```
C ==================================================================
C     MONTE CARLO SIMULATION    : (C)COPYRIGHT 1987 JE8UYO A.E.L.
C       for sun-4 260c          :    Hokkaido University
C                 sparc1        :    PROGRAMED BY KOHKI.S
C                 330ml         :
C                               :  FROM 1989-11-01 TO 1991-03-25
C     PROGRAM NAME : MODEL-02   :
C                    TYPE3      :
C                               :
C       --- 1/V MODEL GAS       :    --- ELECTRONIC EXCITATION
C                               :        IONISATION
C                               :        MOMENTUM TRANSFER
C                               :
C                    DEVICE     :  (11) : CONDITION & RESULTS
C                               :  (12) : ENERGY & VELOCITY ETC.
C                               :  (13) : PT ENERGY DISTRIBUTION
C                               :  (14) : SPATIAL DISTRIBUTION
C                               :  (15) : SST PARAMETERS
C                               :  (16) : SST ENERGY DISTRIBUTION
C                               :  (17) : UNDEFINED
C                               :  (18) : UNDEFINED
C ==================================================================
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C  +                                                                +
C  +                BLOCK 1  *****  INITIAL                         +
C  +                                                                +
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      PROGRAM MODEL2
C
      PARAMETER ( NELCH=100000, NSSTP=20)
C
      DIMENSION
     >   RND(10), XMB(102), MBN(102)
C
      DIMENSION
     >   NUM(1000),  ENGY(1000), EPL(1000),  EPP(1000),
     >   PVZ(1000),
     >   DV(1000),   DVPL(1000), DVPP(1000),
     >   TFTL(1000), TFMM(1000), TFEX(1000), TFI(1000)
C
      DIMENSION
     >   FPTO(100,11), IDPZ(400,20), NOR(11)
C
      DIMENSION
     >   ENGCH(NELCH), POSCH(NELCH,3), DTRCH(NELCH),
     >   IMESH(NELCH)
C
      REAL*8 DPZ(1000), DMZ(1000), DMR(1000)
C
      DATA  FPTO,  IDPZ,   NOR   / 1100*0.0, 8000*0,    11*0/
      DATA  DPZ,   DMZ,    DMR   /  1000*0.0,1000*0.0, 1000*0.0/
      DATA  NUM,   ENGY,   EPL   /  1000*0  ,1000*0.0, 1000*0.0/
      DATA  EPP                  /  1000*0.0/
      DATA  TFTL,  TFMM,   TFI   /  1000*0.0,1000*0.0, 1000*0.0/
      DATA  TFEX                 /  1000*0.0/
      DATA  ICMM,  ICION,  ICEX  /      0,       0,        0/
C
C      CALL CLOCK
C
C ------------------------------------------------------------
C              INITIAL CONDITION FROM DATASET OR KEY BOARD
C ------------------------------------------------------------
      OPEN ( UNIT=5, FILE='cnd.data' )
        READ  (5,*) LOOP1
        READ  (5,*) EBP
        READ  (5,*) DLTO
        READ  (5,*) DLTE
        READ  (5,*) CGL
        READ  (5,*) IX
        READ  (5,*) IEN
        READ  (5,*) ENGM
      CLOSE (5)
C==================================================================
C      DLTO  : INTARVAL OF SAMPLING
C      DLTE  : ENERGY DISTRIBUTION *** DLTE*100->MAX ENERGY
C      ISPTSF: SAPMLING TIME OF PT ENERGY DISTRIBUTION
C      CLGH  : LENGTH OF Z DIRECTION
C==================================================================
C THRESHOLD ENERGY OF IONOSATION & EXCITATION
      ESHION=15.0
      ESHEX =10.0
C
C SET CONSTANT VALUES
      V1=5.9309438E+07
      EMAX=0.0
      EMIN=1.0
      FDNS=1.0/(4.0E-15*3.5355E+16*V1)
C
      DLTV0=0.5*V1*EBP*DLTO
      STM  =DLTO*LOOP1
      DSPZ =CGL/400.0
      MESP =100
C
      IF ( CGL .LE. 0.0 ) CGL=2.0
C
      DLVM=SQRT(20.0*ENGM)/100.0
C ------------------------------------------------------------
C                 MAXWEL-BOLTZMANN DISTRIBUTION
C ------------------------------------------------------------
      FMB=0.0
      DO 1000 I=1,102
```

```
      VH1=DLVM*(I-1)
      VH2=VH1+DLVM
      VH1S=VH1**2
      VH2S=VH2**2
        FMB1=VH1S*EXP(-1.5*VH1S/ENGM)
        FMB2=VH2S*EXP(-1.5*VH2S/ENGM)
          XMB(I)=DLVM/2*(FMB1+FMB2)
          FMB=FMB+XMB(I)
 1000 CONTINUE
      DO 1001 I=1,102
        MBN(I)=INT(XMB(I)/FMB*IEN)
        TENRG=TENRG+DLVM*I*MBN(I)
        IEC=IEC+MBN(I)
 1001 CONTINUE
      EMXWL=(TENRG/IEC)**2
      IF (IEC.EQ.0) THEN
        GOTO 9000
      ENDIF
      M1=1
C
C OUTPUT TO FILE NO 3
        WRITE (11,*) '========== CONDITION ========================='
        WRITE (11,*) 'PROGRAM : model02.f ( DISK VERSION )'
        WRITE (11,*) 'REDUCRD ELECTROC FIELD : EBP        =',EBP
        WRITE (11,*) 'NUMBER OF SAMPLING                  =',LOOP1
        WRITE (11,*) 'SIMULATION TIME                     =',STM
        WRITE (11,*) 'NORMAL CALCULATION MESH : DLTO      =',DLTO
        WRITE (11,*) 'NORMAL CALCULATION MESH : DLTVO     =',DLTVO
        WRITE (11,*) 'MESH OF EEDF SAMPLING : DLTE        =',DLTE
        WRITE (11,*) 'GAP LENGTH                          =',CGL
        WRITE (11,*) 'INITIAL VALUE OF RANDOM NUMBER      =',IX
        WRITE (11,*) 'INITIAL ELECTRON NUMBER IEC         =',IEC
        WRITE (11,*) 'MEAN ENERGY OF INITIAL ELECTRONS    =',EMXWL
C
      M1=1
      OPEN ( UNIT=1, FILE='vpdata1.data' )
C
 2001 IF ( M1 .GE. 101 ) GOTO 2801
        IF ( MBN(M1) .EQ. 0 ) THEN
          M1=M1+1
          GOTO 2001
        ELSE
          GOTO 2909
        ENDIF
C
 2909 JX=3
        CALL RANDOM( IX, JX, RND )
        CALL ANGL( RND(1), RND(2), COST, SINT, COSF, SINF )
        VMO=(M1-1+RND(3))*DLVM
        MBN(M1)=MBN(M1)-1
          VXO=VMO*SINT*COSF
          VYO=VMO*SINT*SINF
          VZO=VMO*ABS(COST)
C
          POSXO=0.0
          POSYO=0.0
          POSZO=0.0
C
          TAU=0.0
          WRITE (1,*) VXO,VYO,VZO,POSXO,POSY1,POSZ1,TAU
          GOTO 2001
C
 2801 CONTINUE
C
      CLOSE (1)
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C  +                                                                  +
C  +                BLOCK 2  *****  FRIGHT ROUTINE                   +
C  +                                                                  +
C  +                     START MAIN LOOP                              +
C  +                                                                  +
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      IEL=0
      ITM=0
      IFACSS=1
C
      ICH=0
      NION=0
C
      OPEN ( UNIT=1, FILE='vpdata1.data' )
      OPEN ( UNIT=2, FILE='vpdata2.data' )
C
 2002 READ ( 1, *, END=4444 ) VXO,VYO,VZO,POSXO,POSYO,POSZO,TAU
C
        VXYS=VXO**2+VYO**2
        ENGO=VXYS+VZO**2
C
        IF ( TAU .LE. 0.0 ) THEN
          IFNOC=0
         ELSE
          IFNOC=1
        ENDIF
C
        DLT1=DLTO
        DLTV1=DLTVO
        IFREM=0
      GOTO 2008
C
 2900 CONTINUE
        ICH=ICH+1
        IF ( ICH .GT. NION ) GOTO 2002
C
        ENGO=ENGCH(ICH)
        CALL RANDOM( IX, 2, RND )
```

```
      CALL ANGL( RND(1), RND(2), COST, SINT, COSF, SINF )
      VM0=SQRT(ENG0)
        VX0=VM0*SINT*COSF
        VY0=VM0*SINT*SINF
        VZ0=VM0*COST
        POSX0=POSCH(ICH,1)
        POSY0=POSCH(ICH,2)
        POSZ0=POSCH(ICH,3)
        DLT1=DTRCH(ICH)
        DLTV1=DLTV0*DLT1/DLT0
        VXYS=VX0**2+VY0**2
        ENG0=VXYS+VZ0**2
      IFNOC=0
C
      IF ( DLTV1 .LE. 0.0 ) THEN
        IFREM=0
        DLTV1=DLTV0
       ELSE
        IFREM=1
      ENDIF
C ---------------------------------------------------------------
C                CALCULATE FLIGHT TIME TAU
C ---------------------------------------------------------------
 2008 CONTINUE
      IF ( IFNOC .EQ. 0 ) THEN
       CALL RANDOM ( IX, 1, RND )
       TAU=-ALOG(RND(1))*FDNS
      ENDIF
C ---------------------------------------------------------------
C                     JUDGEMENT OF COLLISION
C ---------------------------------------------------------------
C ##################
C    NO COLLISION
C ##################
 2009 IF ( TAU .GT. DLT1 ) THEN
        IFNOC=1
        IFREM=0
        TAU=TAU-DLT1
        VZ1=VZ0+DLTV1
        POSZ0=POSZ0+(VZ0+0.5*DLTV1)*V1*DLT1
        POSX0=POSX0+VX0*DLT1*V1
        POSY0=POSY0+VY0*DLT1*V1
        ENG0=VXYS+VZ1**2
        IF ( ENG0 .GT. EMAX ) EMAX=ENG0
        IF ( ENG0 .LT. EMIN ) EMIN=ENG0
        DLT1=DLT0
        DLTV1=DLTV0
        VM0=SQRT(ENG0)
        VZ0=VZ1
        GOTO 3800
      ENDIF
C ####################
C    JUST COLLISION
C ####################
      IF ( TAU .EQ. DLT1 ) THEN
        IFNOC=0
        IFREM=0
        TAU=0.0
        VZ1=VZ0+DLTV1
        ENG1=VXYS+VZ1**2
        VM1=SQRT(ENG1)
C
        POSZ1=POSZ0+(VZ0+0.5*DLTV1)*V1*DLT1
        POSX1=POSX0+VX0*DLT1*V1
        POSY1=POSY0+VY0*DLT1*V1
C
        DLT2 =DLT0
        DLTV2=DLTV0
        GOTO 2010
      ENDIF
C ####################
C    PAST COLLISION
C ####################
      IFNOC=0
      IFREM=1
      DLT2=DLT1-TAU
      DLTV3=DLTV1*(TAU/DLT1)
      DLTV2=DLTV1-DLTV3
      VZ1=VZ0+DLTV3
      ENG1=VXYS+VZ1**2
      VM1=SQRT(ENG1)
        POSZ1=POSZ0+(VZ0+0.5*DLTV3)*V1*TAU
        POSX1=POSX0+VX0*TAU*V1
        POSY1=POSY0+VY0*TAU*V1
 2010 CONTINUE
C ##############################
C   JUDGE THE KIND OF COLLISION
C ##############################
      CALL CROSSM ( ENG1, QM1, QE1,  QI1, QT1 )
      CALL RANDOM ( IX, 1, RND )
C (IONISATION)
        RT1=QI1/QT1
          IF ( RND(1) .LE. RT1 ) GOTO 3100
C (ELECTRONIC EXCITATION)
        RT2=RT1+QE1/QT1
          IF ( RND(1) .LE. RT2 ) GOTO 3200
C (MOMENTUM TRANSFER)
        RT3=RT2+QM1/QT1
          IF ( RND(1) .LE. RT3 ) GOTO 3001
C
      WRITE (11,*) 'ERROR OCCURS AT JUDGEMENT ROUTINE',IEL,ICH,ITM
      WRITE (11,*) '                                ',RT3,RND(1)
      GOTO 3001
C ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
```

```
C +                                                                  +
C +                 BLOCK 3  *****  COLLISION                        +
C +                                                                  +
C ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C ##############################################
C   IONISATION COLLISION (THRESHOLD EION=15.0 )
C ##############################################
 3100 NION=NION+1
      IF ( NION .GE. NELCH ) THEN
        WRITE (11,*) 'SUBSCRIPT OUT OF RANGE '
        GOTO 9000
      ENDIF
      ICION=ICION+1
      E=ABS(ENG1-ESHION)
      CALL RANDOM( IX, 1, RND )
      E1=E*RND(1)
      E2=E-E1
C (SCATTERED ELECTRONS)
      ENG0=E1
C (EJECTED ELECONS)
      ENGCH(NION)=E2
      POSCH(NION,1)=POSX1
      POSCH(NION,2)=POSY1
      POSCH(NION,3)=POSZ1
      DTRCH(NION)  =DLT2
      GOTO 3500
C ##########################################################
C   ELECTRONIC EXCITATION COLLISION (THRESHOLD ESHEX=10.0)
C ##########################################################
 3200 CONTINUE
      ENG0=ABS(ENG1-ESHEX)
      ICEX=ICEX+1
      GOTO 3500
C ##########################################################
C   MOMENTUM TRANSFER (ELASTIC COLLISION) NO ENERGY LOSS
C ##########################################################
 3001 CONTINUE
      ICMM=ICMM+1
      CALL RANDOM ( IX, 2, RND )
      CALL ANGL( RND(1), RND(2), COST, SINT, COSF, SINF )
      VX0 =VM1*SINT*COSF
      VY0 =VM1*SINT*SINF
      VZ0 =VM1*COST
      ENG0=VX0**2+VY0**2+VZ0**2
      VM0 =SQRT(ENG0)
      GOTO 3501
C ################################################
C   CALCULATE ENEGY & VELOCITIES AFTER COLLISION
C ################################################
 3500 CONTINUE
      VM0=SQRT(ENG0)
      CALL RANDOM ( IX, 2, RND )
      CALL ANGL( RND(1), RND(2), COST, SINT, COSF, SINF )
      VX0=VM0*SINT*COSF
      VY0=VM0*SINT*SINF
      VZ0=VM0*COST
C
 3501 CONTINUE
      DLT1 =DLT2
      DLTV1=DLTV2
      CALL CROSSM( ENG0, QM0, QE0, QI0, QT0 )
      VXYS =VX0**2+VY0**2
C
      POSX0=POSX1
      POSY0=POSY1
      POSZ0=POSZ1
C ################################
C   SAMPLING and CONTINUE or END
C ################################
 3800 CONTINUE
C ABSORBED AT THE CATHODE
 3806 IF ( POSZ0 ) 2900, 2900, 3808
C
C ABSORBED AT THE ANODE
 3808 IF ( CGL-POSZ0 ) 2900, 2900, 4000
C
 4000 IF ( IFREM .EQ. 1 ) GOTO 2008
C ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C +                                                                  +
C +                 BLOCK 4  *****  SAMPLING                         +
C +                                                                  +
C ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C ##################################
C   SAMPLING OF PT & TOF PARAMETERS
C ##################################
 4005 NUM(ITM)=NUM(ITM)+1
      CALL CROSSM ( ENG0, QM0, QE0, QI0, QT0 )
C (ENERGY & VELOCITY)
      EPL(ITM) =EPL(ITM) +VZ0**2
      EPP(ITM) =EPP(ITM) +VXYS*0.5
      ENGY(ITM)=ENGY(ITM)+ENG0
      PVZ(ITM) =PVZ(ITM) +VZ0
C (CENTRE-OF-MASS & MOMENT)
      DPZ(ITM)=DPZ(ITM)+POSZ0
      DMZ(ITM)=DMZ(ITM)+POSZ0**2
      DMR(ITM)=DMR(ITM)+0.5*(POSX0**2+POSY0**2)
C (FREQUENCIES)
      FTL =VM0*QT0
      FMM =VM0*QM0
      FION=VM0*QI0
      FEX =VM0*QE0
      TFTL(ITM)=TFTL(ITM)+FTL
      TFMM(ITM)=TFMM(ITM)+FMM
      TFI(ITM) =TFI(ITM) +FION
```

```
      TFEX(ITM)=TFEX(ITM)+FEX

C (DIFFUSION COEFFICIENTS)
      FREQ=FION+FTL
      DVPL(ITM)=DVPL(ITM)+VZ0**2/FREQ
      DVPP(ITM)=DVPP(ITM)+VXYS  /FREQ*0.5
      DV(ITM)  =DV(ITM)  +ENG0  /FREQ/3.0
C
C #######################
C   ENERGY DISTRIBUTION
C #######################
      IT=ITM/MESP
      IF ((ITM.GE.(IT*MESP)).AND.(ITM.LE.(IT*MESP+10))) THEN
        IHE=INT(ENG0/DLTE)+1
        IF ( IHE .LE. 100 ) THEN
          FPT0(IHE,IT)=FPT0(IHE,IT)+1.0
          NOR(IT)=NOR(IT)+1
        ENDIF
      ENDIF
C #######################
C   SPATIAL DISTRIBUTION
C #######################
      IT=ITM/50
      IF ( ITM .EQ. IT*50 ) THEN
        IF ( POSZ0 .GE. 0.0 ) THEN
          IPZ=INT(POSZ0/DSPZ)+1
          IF (IPZ .LE. 400) IDPZ(IPZ,IT)=IDPZ(IPZ,IT)+1
        ENDIF
      ENDIF
C
 4002 CONTINUE
C ###########################
C   BACK TO THE FLIGHT START
C ###########################
C
      WRITE (2,*) VX0,VY0,VZ0,POSX0,POSY0,POSZ0,TAU
C
      GOTO 2900
C
 4444 CONTINUE
      CLOSE (1)
      CLOSE (2)

      ITM=ITM+1
      NION=0
      ICH=0

      IF ( ITM .GE. LOOP1 ) GOTO 5000

      IF ( IFACSS .EQ. 1) THEN
        OPEN ( UNIT=2, FILE='vpdata1.data' )
        OPEN ( UNIT=1, FILE='vpdata2.data' )
        IFACSS=2
      ELSE
        OPEN ( UNIT=1, FILE='vpdata1.data' )
        OPEN ( UNIT=2, FILE='vpdata2.data' )
        IFACSS=1
      ENDIF

      GOTO 2002
C
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C  +                                                              +
C  +                BLOCK 5  *****  PARAMETERS                   +
C  +                                                              +
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
 5000 CONTINUE
      DO 5100 I=1, LOOP1
        IF ( NUM(I) .EQ. 0 ) THEN
          WRITE (11,*) 'ELECTRON NUMBER IS ZERO !! AT LOOP=',I
          IEND=I-1
          GOTO 5002
        ENDIF
C DRIFT VELOCITY
      PVZ(I)=PVZ(I)*V1/NUM(I)
C POSITION
      DPZ(I)=DPZ(I)/NUM(I)
C MOMENT
      DMZ(I)=0.5*(DMZ(I)/NUM(I)-DPZ(I)**2)
      DMR(I)=0.5* DMR(I)/NUM(I)
C MEAN ENERGY
      ENGY(I)=ENGY(I)/NUM(I)
      EPL(I) =EPL(I) /NUM(I)
      EPP(I) =EPP(I) /NUM(I)
C COLLISION FREQUENCY
      TFTL(I)=TFTL(I)/NUM(I)*V1
      TFMM(I)=TFMM(I)/NUM(I)*V1
      TFI(I) =TFI(I) /NUM(I)*V1
      TFEX(I)=TFEX(I)/NUM(I)*V1
C DV
      DV(I)  =DV(I)  /NUM(I)*V1
      DVPL(I)=DVPL(I)/NUM(I)*V1
      DVPP(I)=DVPP(I)/NUM(I)*V1
C
C OUTPUT TO FILE [ fort.12 ]
      WRITE (12,5004) I,
     >      NUM(I),
     >      PVZ(I),  ENGY(I), EPL(I),  EPP(I),
     >      DPZ(I),  DMZ(I),  DMR(I),
     >      DV(I),   DVPL(I), DVPP(I),
     >      TFTL(I), TFMM(I), TFEX(I), TFI(I)
 5016 FORMAT ( 4I13 )
 5018 FORMAT ( I8 )
 5004 FORMAT ( 2I13, 4E13.4 / 6E13.4 / 4E13.4 )
```

```
 5100 CONTINUE
      IEND=I
 5002 CONTINUE
C
C OUTPUT ENERGY DISTRIBUTION [ FORT.13 ]
      DO 5007 J=1,IEND/100+1
        DO 5006 I=1,100
          IF ( NOR(J) .EQ. 0 ) THEN
            FPTO(I,J)=0.0
          ELSE
            FPTO(I,J)=FPTO(I,J)/NOR(J)/DLTE
          ENDIF
 5006   CONTINUE
        WRITE ( 13,5019 ) (J-1)*100,(J-1)*100+10
        WRITE ( 13,5008 ) ( FPTO(I,J),I=1,100 )
 5007 CONTINUE
 5019 FORMAT ( I5,' - ',I5 )

      DO 5102 J=1, IEND/50
        WRITE ( 14,5018 ) J*50
        WRITE ( 14,5110 ) ( IDPZ(I,J),I=1,400 )
 5102 CONTINUE
C
 5008 FORMAT ( 19(5E13.4/), 5E13.4 )
 5110 FORMAT ( 39(9(I7,1X),I7/),9(I7,1X),I7 )
 5030 CONTINUE
C
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C  +                                                              +
C  +              BLOCK 6  *****  EDING                          +
C  +                                                              +
C  ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
C     CALL CLOCK( TIM )
      CALL ETIME (TIM)
      ITIM1=INT(TIM/3600)
      ITIM2=INT((TIM-ITIM1*3600.0)/60)
      ITIM3=INT(TIM-(ITIM1*3600.0+ITIM2*60.0))
C
C OUTPUT TO DISPLAY
      WRITE (11,*) '========== RESULT ============================'
      WRITE (11,*) 'EXECUTION TIME ( HOUR )              =',ITIM1
      WRITE (11,*) 'EXECUTION TIME ( MINUTE )            =',ITIM2
      WRITE (11,*) 'EXECUTION TIME ( SECOND )            =',ITIM3
      WRITE (11,*) 'NUMBER OF ELASTIC    COLLISION       =',ICMM
      WRITE (11,*) 'NUMBER OF EXCITATION COLLISION       =',ICEX
      WRITE (11,*) 'NUMBER OF IONISATION COLLISION       =',ICION
      WRITE (11,*) 'MAXIMAM ELECTRON ENERGY              =',EMAX
      WRITE (11,*) 'MINIMUM ELECTRON ENERGY              =',EMIN
      WRITE (11,*) 'LAST IX                              =',IX
 9000 STOP
      END
C ==========================================================
```

```
C                 SUBROUTINE BLOCK
C ==========================================================
C
C  SUBROUTINE RANDOM
C
      SUBROUTINE RANDOM ( IX, N, X )
       DIMENSION X(10)
       DO 30 I=1,N
         IX=IX*48828125
         IF(IX) 10, 20, 20
   10      IX=(IX+2147483647)+1
   20      X(I)=FLOAT(IX)*0.4656613E-09
   30  CONTINUE
      RETURN
      END

C  SUBROUTINE ANGL
C
      SUBROUTINE ANGL ( PN1, PN2, COST, SINT, COSF, SINF)
        PAI=ATAN(1.0)*4.0
          COST=2.0*PN1-1.0
          COST2=COST**2
          SINT2=1.0-COST2
          SINT=SQRT(SINT2)
          FAI=2.0*PAI*PN2
          COSF=COS(FAI)
          SINF=SIN(FAI)
        RETURN
      END
C ==================================================
C
C       CALCULATE MODEL CROSS-SECTIONS QT(V)=1/V
C       (C)COPYRIGTH 1989 JE8UYO APPLIED ELECTRICITY
C          PROGRAMED BY KOHKI.S
C            VERSION 1.00 1989-11-14 CHECKED
C
C ==================================================
      SUBROUTINE CROSSM ( ENG, QM, QE, QI, QT )

C Q-TOTAL
        QT=4.0E-15/SQRT(ENG)
C
C Q-IONISATION [THRESHOLD=15.0 eV]
        IF ((ENG .GT. 15.0).AND.(ENG .LE. 500)) THEN
          QI=2.0E-16*(1.0-EXP(ENG*(-1.0)/10.0))**6
     >      *EXP(-0.0015*(ENG-15.0))
          GOTO 1050
        ENDIF
C
        IF (ENG .GT. 500.0) THEN
          QI=2.0E-16*EXP(-0.0015*(ENG-15.0))
          GOTO 1050
```

```
      ENDIF
C
 1040 QI=0.0
 1050 CONTINUE
C
C Q-EXCITATION [THRESHOLD=10.0 eV]
      IF (( ENG .GT. 10.0 ).AND.( ENG .LE. 300.0 )) THEN
        QE=1.5E-16*(1.0-EXP(ENG*(-1.0)/4.0))**10
     >    *EXP(-.01712*(ENG-10.0))
        GOTO 1070
      ENDIF
C
      IF ( ENG .GT. 300.0 ) THEN
        QE=1.5E-16*EXP(-.01712*(ENG-10.0))
        GOTO 1070
      ENDIF
C
 1060 QE=0.0
 1070 CONTINUE
C
C Q-MOMENTUM TRANSFER
      QM=QT-QE-QI
C
      QM=QM*3.5355E+16
      QE=QE*3.5355E+16
      QI=QI*3.5355E+16
      QT=QT*3.5355E+16
C
      RETURN
      END
```

付録２．モデルガスに対するシミュレーションプログラム
　　－連続の式によるシミュレーション－

```
C ==================================================================
C       (C)Copyright 1990 JE8UYO Applied Electricty Laboratory
C          Hokkaido University.   Programed by Kohki Satoh
C          Simulation of Schlumbohm's and Frommhold's experiments
C          using continuity equation for model gas
C ==================================================================
      PROGRAM CONTEQ

      DIMENSION CUR(2000)
      COMMON N0, RI, PAI, DL, WR, D

      PAI=3.141592
      E  =1.6021892E-19
      CAP=1.0E-12

 1230 CONTINUE

      WRITE (6,*) 'Reduced Electric Field  : EBP'
      READ  (5,*) EBP
      WRITE (6,*) 'Initial Electron Number : N0'
      READ  (5,*) N0
      WRITE (6,*) 'Sampling Interval       : DLT0'
      READ  (5,*) DLT0
      WRITE (6,*) 'Gap Length              : D'
      READ  (5,*) D

      IF (EBP .EQ.  50.0) THEN
        WRITE (6,*) 'RETRY !!'
        GOTO 1230
      ENDIF

      IF (EBP .EQ. 100.0) GOTO 1002
      IF (EBP .EQ. 150.0) GOTO 1003
      IF (EBP .EQ. 200.0) GOTO 1004

      WRITE (6,*) 'RETRY !!'
      GOTO 1230
 1001 CONTINUE

 1002 CONTINUE
C     EBP=100
        RI=35.00
        WR=25.02
        DL= 1.13
        WV=20.84
      GOTO 1005

 1003 CONTINUE
C     EBP=150
        RI=101.1
        WR=40.32
        DL= 1.16
        WV=31.14
      GOTO 1005

 1004 CONTINUE
C     EBP=200
        RI=195.1
        WR= 55.67
        DL=  1.46
        WV= 40.92

 1005 CONTINUE
      RI=RI*1.0E+06
      WR=WR*1.0E+06
      WV=WV*1.0E+06
      DL=DL*1.0E+06

      DLTD=0.01
      IMAX=0
      CMAX=0.0
      I=0

 2000 I=I+1
        T=DLT0*I
        EN=0.0
        DO 2001 J=0, INT(D*100), 2
          Z=DLTD* J
            CALL CALN( T, Z, ELN1 )
          Z=DLTD*(J+1)
            CALL CALN( T, Z, ELN2 )
          Z=DLTD*(J+2)
            CALL CALN( T, Z, ELN3 )

          EN=EN+DLTD/3.0*(ELN1+4.0*ELN2+ELN3)

 2001   CONTINUE


        CUR(I)=E*EN*WV/D

        IF ( CUR(I) .GT. CMAX ) THEN
          CMAX=CUR(I)
          IMAX=I
        ENDIF

        WRITE (31,*) DLT0*I, CUR(I)
        WRITE (33,*) DLT0*I, EN

       IF ( EN .LT. 1.0 ) THEN
         NN=I
```

```
          GOTO 2222
        ELSE
          GOTO 2000
        ENDIF
C
 2222  CONTINUE

C CALCULATION OF VOLTAGE
      V=0.0
      DO 2002 I=1, NN-1
        V=V+.5*DLT0*(CUR(I)+CUR(I+1))/CAP
        WRITE (32,*) DLT0*(I+I+1)*.5, V
 2002 CONTINUE

C       write (6,*) num

      CALL ETIME ( TIM )
      ITIM1=INT(TIM/3600.0)
      ITIM2=INT((TIM-ITIM1*3600.0)/60.0)
      ITIM3=INT(TIM-(ITIM1*3600.0+ITIM2*60.0))
C
C ##################
C   OUTPUT MESSAGE
C ##################
      WRITE (30,*) '=========== CONDOTION ========================='
      WRITE (30,*) 'REDUCED ELECTRIC FIELD E/P          =',EBP
      WRITE (30,*) 'CALCULATION INTERVAL DLT            =',DLT0
      WRITE (30,*) 'MESH OF SIMPSON INTEGRARION         =',DLTD
      WRITE (30,*) 'THE GAP LENGTH D                    =',D
      WRITE (30,*) 'INITITAL ELECTRON NUMBER            =',N0
      WRITE (30,*) 'NUMBER OF SAMPLING                  =',NN
      WRITE (30,*) ''
      WRITE (30,*) '=========== RESULT ============================='
      WRITE (30,*) 'EXECUTION TIME ( HOUR )             =',ITIM1
      WRITE (30,*) 'EXECUTION TIME ( MINUTE )           =',ITIM2
      WRITE (30,*) 'EXECUTION TIME ( SECOND )           =',ITIM3
      WRITE (30,*) 'MAXIMUM VALUE OF GAP CURRENT        =',CMAX
      WRITE (30,*) 'POINT OF MAXIMUM : MESH POINT       =',IMAX
      WRITE (30,*) 'POINT OF MANIMUM : TIME (ns)        =',IMAX*DLT0
      STOP
      END

C ==============================================================
C                 SUBROUTINE CALCULATION NUMBER
C ==============================================================
      SUBROUTINE CALN( T, Z, ELN )
      COMMON N0, RI, PAI, DL, WR, D

        C1=N0*EXP(RI*T)/(SQRT(4.0*PAI*DL*T)*WR*T)
        C2=Z*EXP(-(Z-WR*T)**2/(4.0*DL*T))
        C3=(Z-2.0*D)*EXP(-((Z-WR*T)**2+4.0*D*(D-Z))/(4.0*DL*T))
        ELN=C1*(C2+C3)

      RETURN
      END
```

付録３．電子ドリフト速度の測定方法（原理）

（１）拡散を考慮した電子ドリフト速度Ｖｄ　（ＳＳＴ実験）

図１の回路において、平行平板ギャップに直流電圧を印加する。ただし、このときの電圧は、回路に電流を流さない（あるいは、極めて微弱な値で無視することができる）大きさとする。温度は室温、気圧は10Torr程度とする。なお、他の実験においても、印加電圧、温度および気圧の条件は同様である。

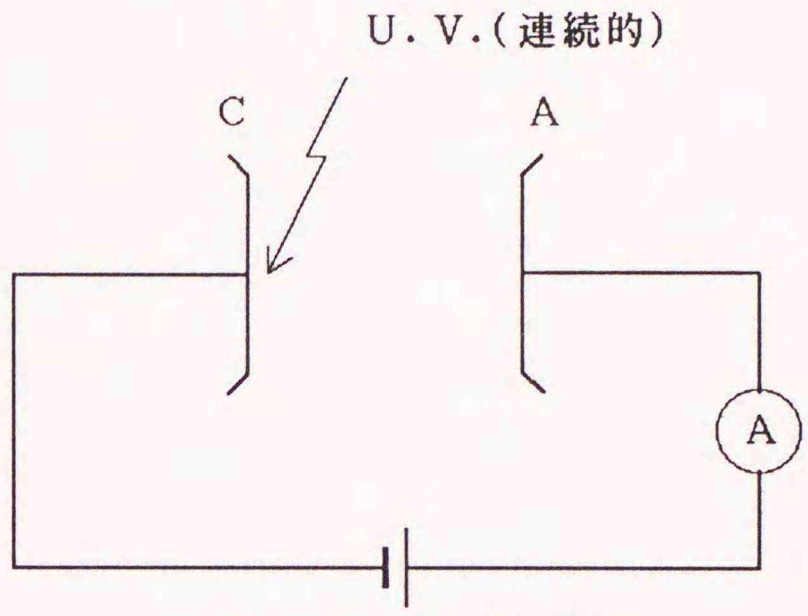


図１　ＳＳＴ実験回路

カソードに連続的に紫外線照射を行なって一定な初期電子を供給し、ギャップ間に電子の定常流をつくる。このとき外部回路に流れる電流Ｉ(ｄ)を電流計で測定する。

ＳＳＴ実験で得られる平均の電子ドリフト速度Ｖｄは、測定される電流Ｉ(ｄ)と次のように関係している。

$$I(d) = e \cdot Vd \cdot n(d) \qquad (1)$$

ｅ：電子の電荷、ｎ(ｄ)：電子数

ここで、ｎ(ｄ)は、

$$n(d) = n_0 \cdot \exp(\alpha d) \qquad (2)$$

n_0：初期電子数、α：電離係数

であるから、(２)式を(１)式に代入すると、

$$I(d) = e \cdot Vd \cdot n_0 \cdot \exp(\alpha d) \qquad (3)$$

となる。したがって電子ドリフト速度Ｖｄは、

$$Vd = \frac{I(d)}{e \cdot n_0 \cdot \exp(\alpha d)} \qquad (4)$$

となる。また、電流は次式で表わされるので、

$$I(d) = I_0 \cdot \exp(\alpha d) \qquad (5)$$

I_0：初期電子電流

E/p（電界/気圧）を一定に保ったまま、ギャップ長d_1およびd_2における電流の測定から（6）式によって電離係数αが決定できる。

$$\alpha = \frac{\log I(d_2) - \log I(d_1)}{d_2 - d_1} \qquad (6)$$

したがって、初期電子数n_0が決定できれば、（4）式から電子ドリフト速度Vdを決定できる。

(2)スオーム中の電子の平均速度として定義されるドリフト速度　Wv
（ＰＴ実験）

図２の回路において、平行平板ギャップに直流電圧を印加する。カソードに紫外線フラッシュを照射して初期電子を発生させる。このとき、外部回路に流れる電流Ｉ(ｔ)の時間変化をオシロスコープで測定する。

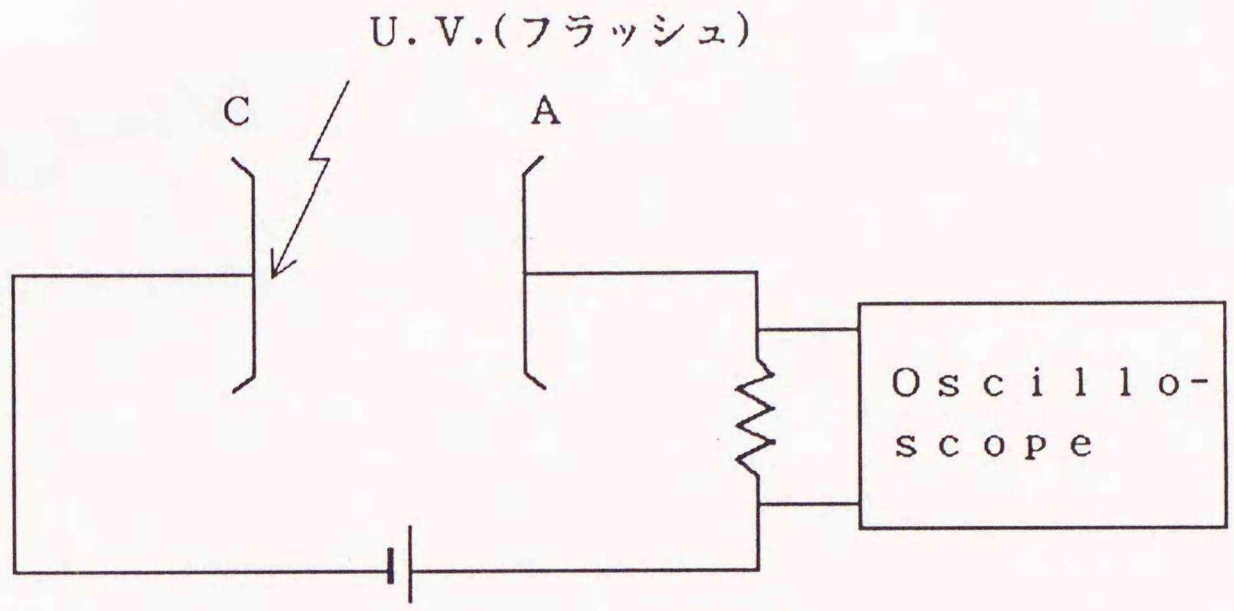


図２　ＰＴ実験回路

測定された電流Ｉ(ｔ)は、全電子の平均速度として定義されるドリフト速度Wvと次のように関係している。

$$I(t)=\frac{e\cdot n(t)\cdot Wv}{d} \qquad (7)$$

ここで、ｎ(ｔ)は

$$n(t)=n_0\cdot\exp(R_1\cdot t) \qquad (8)$$

であるから、(8)式を(7)式に代入すると、

$$I(t)=\frac{e\cdot n_0\cdot\exp(R_1\cdot t)\cdot Wv}{d} \qquad (9)$$

となる。したがって電子ドリフト速度Wvは、

$$Wv=\frac{I(t)\cdot d}{e\cdot n_0\cdot\exp(R_1\cdot t)} \qquad (10)$$

となる。また、電流Ｉ(ｔ)は、

$$I(t)=I_0\cdot\exp(Ri\cdot t) \qquad (11)$$

と表されるので、時刻t_1およびt_2における電流の測定からR_1が(12)式によって決定される。

$$R_1 = \frac{\log I(t_2) - \log I(t_1)}{t_2 - t_1} \qquad (12)$$

したがって、初期電子数n_0が決定できると、電子ドリフト速度Wvを決定できる。

(3)スオームの平均到着時間ドリフト速度Wmおよび重心のドリフト速度Wr
（ＴＯＦ実験）

ＴＯＦ実験からは、スオームの平均到着時間ドリフト速度Wmとスオームの重心のドリフト速度Wrが得られる。これらの速度を求めるために、電極間を進展するスオームの時刻ｔ、電極間の位置xにおける電子数密度あるいはそれに比例した量を測定する。

図３に実験回路を示す。平行平板ギャップに直流電圧を印加する。ギャップ間に、カソードから$x$cm離れたところに、ワイヤー製の２層の電気的シャッターを設置する。ただし、シャッターは、電圧パルスが印加されていないとき、電子の運動に影響を与えないものとする。ある時刻ｔで、シャッターに電圧パルスを印加し、そのときシャッター間に電子が存在すると、その数に比例した量の電圧をオシロスコープで測定できる。このようにして、位置x、時刻ｔにおける電子数に比例した値の電圧を測定できる。

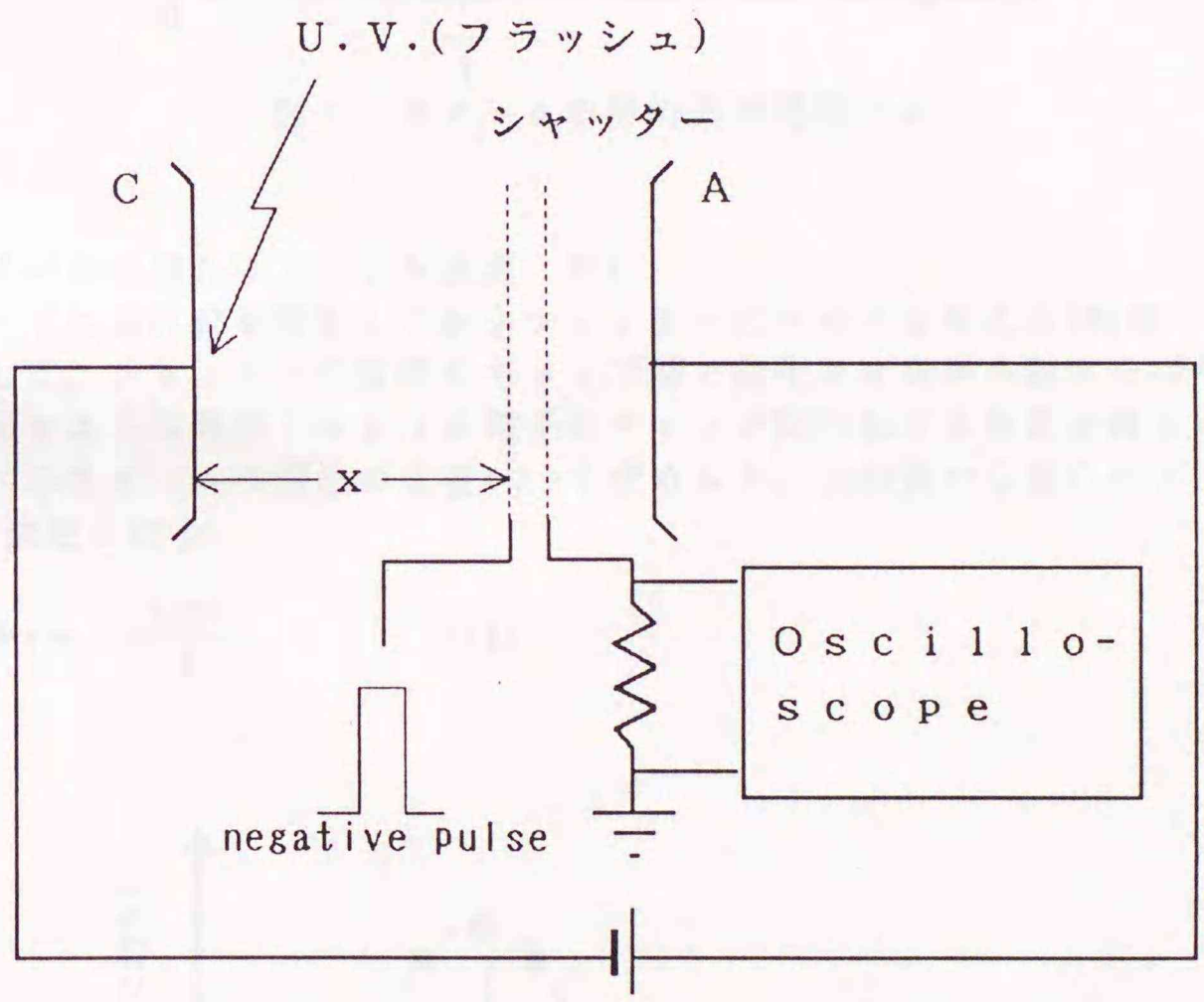


図３　ＴＯＦ実験回路

ａ）スオームの平均到着時間ドリフト速度　Wm

シャッターの位置を$x$cmに固定し、紫外線フラッシュをカソードに照射して電子を放出させる。次に、時刻$t = t_1$でシャッターに電圧パルスを印加し、その時の電圧を測定する。紫外線フラッシュをカソードに照射してからシャッターにパルスを印加するまでの時間を変化させながら測定を行なうと、図４に示すような位置xにおける電子の到着時間分布が得られる。この分布から平均到着時間$\overline{t}$

を求めると、(13)式によって平均到着時間ドリフト速度Wmが決定できる。なお、ＴＯＦ実験では、紫外線フラッシュで発生する初期電子は、全て同じであるという仮定をしている。

$$Wm = \frac{x}{\bar{t}} \qquad (13)$$

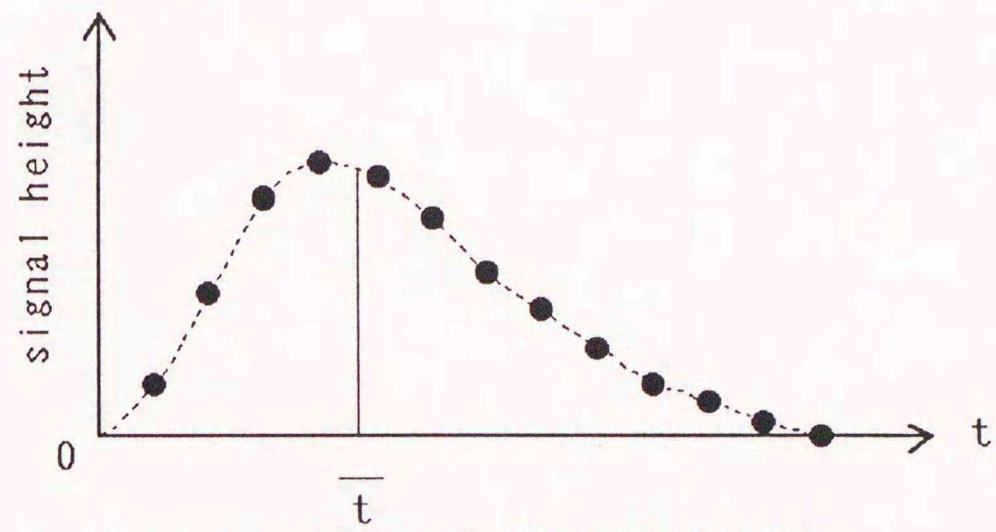


図４　スオームの平均到着時間分布

ｂ）スオームの重心のドリフト速度　Ｗｒ

カソードに紫外線を照射してからシャッターにパルスを与える(時刻ｔ)時間を一定にして、シャッターの位置をギャップ間で変化させながら測定を行なうと、図５に示すような時刻ｔにおける電子のギャップ間における分布が得られる。この分布からスオームの重心の位置〈x〉を求めると、(14)式から重心のドリフト速度Ｗｒが決定される。

$$Wr = \frac{\langle x \rangle}{t} \qquad (14)$$

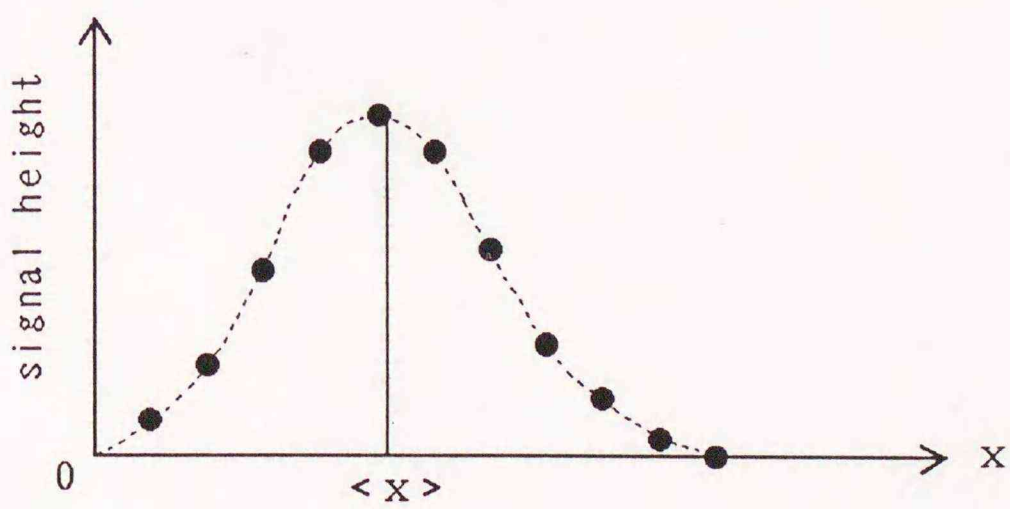
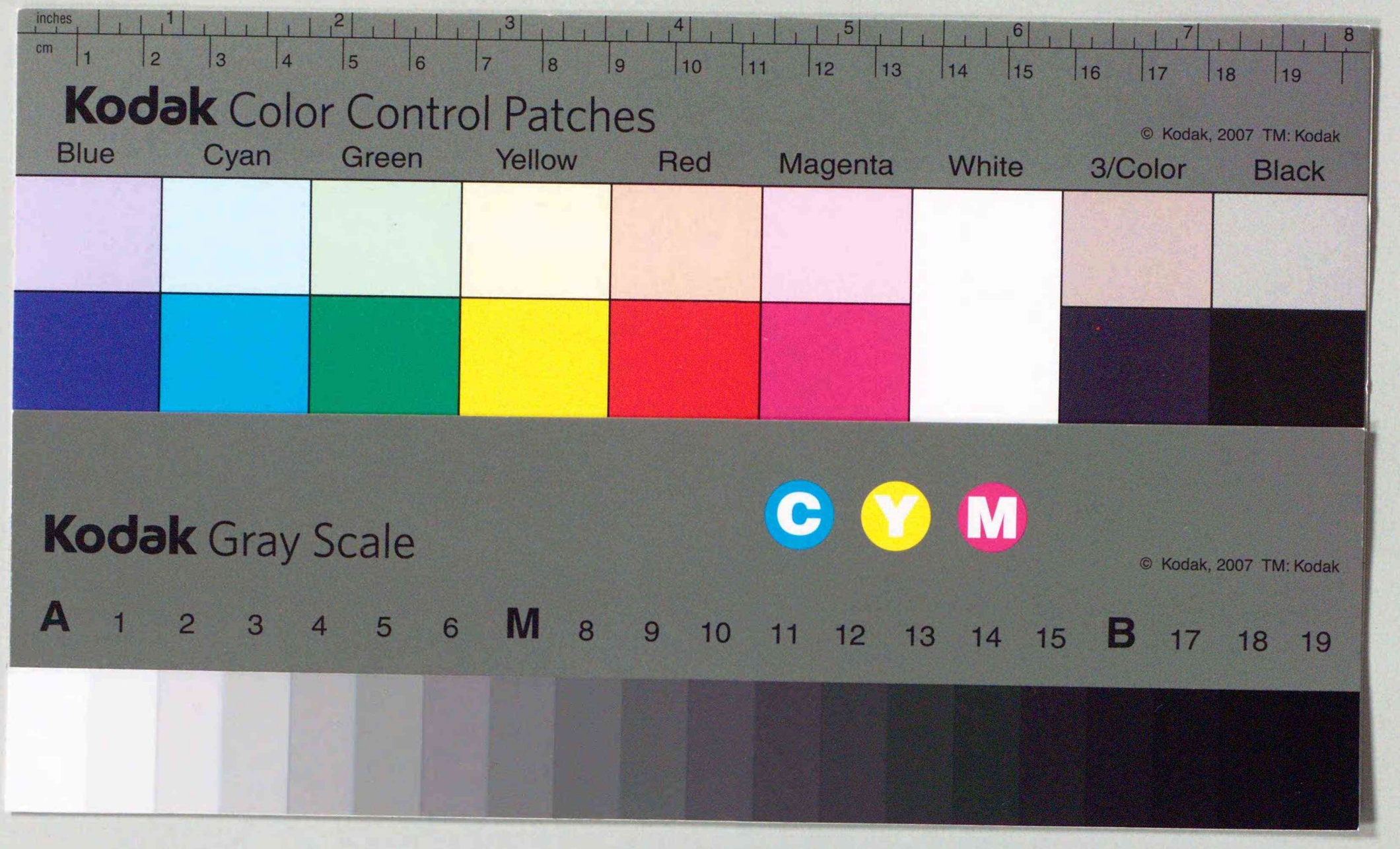


図５　電子のギャップ間分布


inches
cm
Kodak Color Control Patches
© Kodak, 2007 TM: Kodak
Blue
Cyan
Green
Yellow
Red
Magenta
White
3/Color
Black
Kodak Gray Scale
C
Y
M
© Kodak, 2007 TM: Kodak
A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19