

溶断時の熱伝導に関する実験結果について

Experiments on thermal conduction when the steel is cut by a melt cutting machine

加 藤 和 利*

神 田 淳*

概 要

電車事故などで車体に挟まれた人を溶断器を使い救助する場合、熱傷等の苦痛を与えない溶断方法を速かに決定する必要がある。

本目的のため、各種鋼材等で溶断実験を行った。溶断時間、溶断器、溶断材料、気温等により異なるが、次に示す方法が熱的影響の少ない有効な手段であることが判明した。

- (1) 速く切断し、早く救出する。
- (2) 水により冷却しながら切断する。

When a fire company uses a melt cutting machine for saving persons who were caught in a train and so forth. The company needs speedy decision on a cutting position of holding materials a way for uninflction pain and measure for minimizing the degree of burn to the persons.

So, we cut various steel materials under several conditions which were differ from cutting time, type of machine, cutting material, air temperature and so forth.

Next descriptions are a effective way in spite of these differnt situations.

- (1) Speedy cutting and early rescue.
- (2) Cooling cut by water.

1. は じ め に

昭和63年12月5日、JR東中野駅構内で起きた電車追突事故で多数の死傷者が発生し、車内で挟まれた人を救出するために溶断器により電車の床等を切断する方法が採られたが、溶断時の熱伝導による人体への影響が懸念された。

そこで、溶断器を使用して救助活動を行う場合の熱伝導について基礎的な実験を行ったので、その概要を報告する。

2. 実験方法等

(1) 実験項目

溶断に要した時間及び時間経過に伴う溶断材の表面温度測定

(2) 供試溶断器

ア 酸素ヤリ 1 式
溶断棒 $\phi 13.8 \times 2000 \text{ mm}$

酸素圧力 7 kgf/cm^2

イ アーク溶断器 1 式

溶断棒 $\phi 6.5 \times 559 \text{ mm}$

酸素圧力 $5 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$

(3) 供試溶断材

ア 鋼板 (幅 $300 \times$ 長さ $1,300 \times$ 厚さ 20 mm)

イ H 鋼 (幅 $200 \times$ 高さ $200 \times$ 長さ $1,700 \times$ 厚さ 10 mm)

ウ 棒鋼 (直径 $70 \times$ 長さ $1,300 \text{ mm}$)

エ 電車の床板 (図 1 参照)

(4) 使用資器材

ア 温度測定器

イ パソコン

ウ 熱電対 (C-A 線 $\phi 0.32 \text{ mm} \times 5 \text{ m}$)

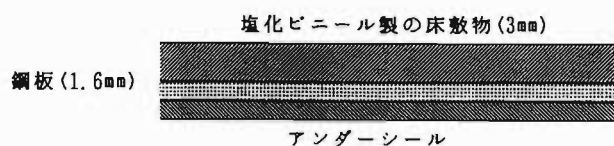


図 1 電車床板の断面

* 第三研究室

(5) 実験方法

ア 鋼板、棒鋼、H鋼の溶断

(ア) 冷却なしでの溶断

図2に示すように、各種溶断材に溶断面から5 cm間隔で10ヶ所に深さ約2 mm、直径約4 mmの穴を開け、そこにハンダを溶着させて熱電対を取付け温度測定器に接続し、パソコンにデータを格納、ディスプレイに温度変化をグラフ化して表示するものとした。

溶断は、酸素ヤリで鋼板、棒鋼及びH鋼をアーク溶断器で鋼板及び棒鋼を特別救助隊員が通常行う要領で実施し、その溶断に要した時間と溶断開始後6秒間隔で概ね30分間の温度を測定した。

なお、溶断の際の火花及び輻射熱の影響を受けないように熱電対を不燃材で覆って実施した。

(イ) 冷却しながらの溶断

前アと同様であるが、図3に示すように溶断面から100 mm離れた位置を中心に幅約80 mmのせきをつくり、そこに水道水を毎分3 l 流しながら行い、溶断開始後6秒間隔で概ね15分間の温度を測定した。

なお、冷却しながらの溶断は、熱容量の大きい酸素ヤリを使用し、供試溶断材の中では表面から逸散する熱量が最も少ない形状である棒鋼について実施し、他の溶断材については棒鋼以上に放熱すると判断し省略した。

イ 電車床板の溶断

図4に示すように電車の床板を①②③の順序で溶断し、溶断開始後6秒間隔で概ね30分間の温度を測定した。

なお、アーク溶断器を使い一辺1 m合計3 mを溶断した。

3. 人体が耐え得る温度の限界

人体がある程度の時間、苦痛なく耐え得る温度の限界は明確でないが、Moritz & Henriquesの人体実験と豚を使った実験¹⁾によると熱による皮膚への障害は、図5に示すように75°Cの場合は1秒で発生し、45°Cでは6時間で発生する。しかし、

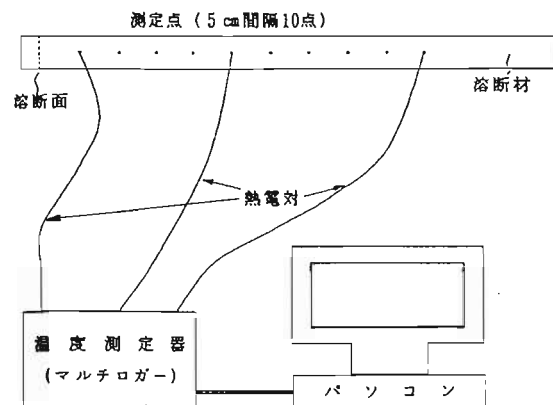


図2 実験設備

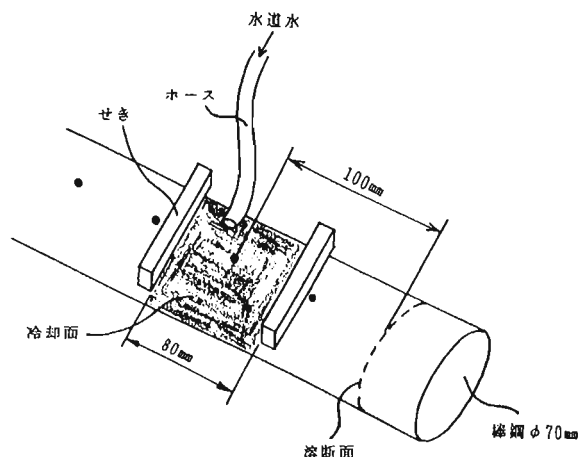


図3 冷却溶断の設定状況

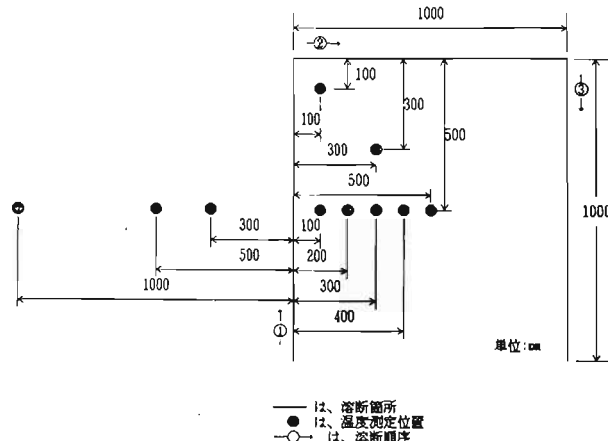


図4 電車の床板溶断時の設定状況

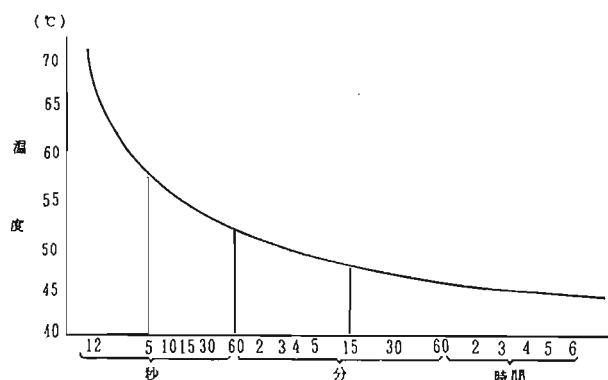


図5 熱による組織の破壊

それらの時間以内であれば耐えられるというのではなく、あくまで熱障害が残らない（治癒するもの）というものである。本実験では、要救助者に対する安全度等を考えて40℃を耐え得る温度の限界として考察する。

4. 実験結果及び考察

(1) 鋼板、棒鋼、H鋼の溶断

(冷却なし、写真1参照)

溶断材において時間経過に伴う熱移動における差異はほとんど認められないが、溶断面に近いほど温度勾配（上昇、降下）が急である。従って、溶断面から離れるに従い温度勾配は緩やかで温度は低く、また最高温度に達する時間は遅れてくる。

溶断に要した時間、各測定点での最高温度及び最高温度に達するまでの所要時間を表1、

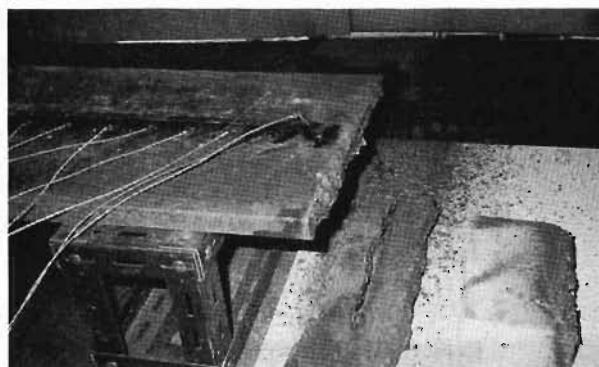


写真1 鋼板を酸素ヤリで溶断した状況

時間経過に伴う温度変化を図6～12に示した。

ア 酸素ヤリによる溶断

溶断に要した時間は、鋼板55秒、棒鋼65秒、H鋼78秒で一気に溶断することができた。図6～8をみると各測定点とも5～30分後には温度がほぼ安定あるいは降下しており、最高温度が40℃以下を示したところは、溶断面から鋼板45cm、棒鋼45cm、H鋼

表1 溶断に要した時間、各測定点での最高温度に達するまでの所要時間

単位：℃

溶断器 及び 溶断材	溶断 時期	溶 断 面 か ら の 距 離										溶断 時間 (秒)	備 考
		5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm	40cm	45cm	50cm		
J E T 鋼 板	夏期	191 (3)	98 (7)	77 (11)	66 (15)	57 (20)	50 (27)	45 (33)	42 (36)	※36 (37)	※36 (37)	55	初期温度 34℃
	冬期	215 (3)	115 (5)	78 (9)	58 (13)	46 (20)	39 (25)	33 (28)	※29 (33)	※26 (33)	※23 (33)	60	初期温度 19℃
J E T H 鋼	夏期	189 (3)	110 (7)	78 (10)	59 (13)	49 (20)	/	38 (27)	35 (32)	22 (36)	32 (37)	78	初期温度 28℃
	冬期	175 (2)	98 (5)	66 (9)	49 (13)	39 (16)		28 (24)	※24 (26)	※21 (26)	※19 (26)	56	初期温度 17℃
J E T 棒 鋼	夏期	/	147 (7)	99 (12)	75 (18)	62 (25)	53 (32)	47 (39)	※42 (41)	※37 (41)	※35 (41)	65	初期温度 29℃
	冬期		175 (3)	97 (7)	65 (12)	48 (20)	39 (26)	33 (35)	※28 (35)	※23 (35)	※20 (35)	42	初期温度 15℃
J E T 棒 鋼 (冷 却)	夏期	193 (3)	ほとんど温度上昇なし（水温19℃） 20～25℃									77	初期温度 23℃
	冬期	95 (2)	ほとんど温度上昇なし（水温12℃） 15～16℃									37	初期温度 16℃
A R C 鋼 板	夏期	312 (3)	160 (6)	105 (11)	80 (15)	64 (20)	54 (26)	48 (32)	42 (36)	※39 (43)	※35 (43)	正味 109	初期温度 26℃
	冬期	291 (7)	133 (9)	93 (13)	68 (19)	54 (23)	43 (29)	37 (34)	32 (40)	29 (49)	※26 (49)	正味 209	初期温度 17℃
A R C 棒 鋼	夏期	150 (5)	96 (10)	73 (17)	59 (23)	50 (31)	45 (41)	※40 (44)	※36 (44)	※34 (44)	※31 (44)	正味 72	初期温度 27℃
	冬期	188 (4)	111 (10)	79 (16)	59 (22)	48 (31)	40 (40)	※34 (41)	※28 (41)	※24 (41)	※21 (41)	正味 119	初期温度 16℃

() 内は溶断開始から最高温度になるまでの所要時間

J E T —— 酸素溶断器（ジェットランス）

A R C —— アーク溶断器（アークエアー）

※は、最高温度に達する以前に測定を終了したものであるが、温度上昇率からみて、ほぼ最高温度に近いと思われる。

35cm以遠の測定点だった。これは、溶断時間にも影響を受けるが、最も溶断時間の長かったH鋼（78秒）が35cmと最も短い距離となっているのは、他の溶断材に比べて表面積が非常に大きいので放熱しやすいためである。

イ アーク溶断器による溶断

鋼板の溶断は溶断棒4本、棒鋼では3本使い溶断することができた。溶断に要した時間は、鋼板109秒、棒鋼72秒（正味溶断時間）であった。酸素ヤリに比べると溶断能力が低いため、多くの時間を要する。また、溶断棒が短いため頻繁に溶断棒を取り替える必要があった。

熱の伝導についてみると、図9、10に示すとおり、各測定点とも10～30分後に温度がほぼ安定あるいは降下しており、最高温度が40℃以下を示したところは鋼板が45cm、棒鋼が35cm以遠の測定点だった。

鋼板については、酸素ヤリでの溶断と同じ距離であるのは、単位時間当りの熱量が酸素ヤリに比べ小さいものの溶断に要した時間が長いためである。

ウ 気温の影響

前ア、イについては、冬期と夏期の2回実施した。しかし、溶断技術等が異なるため全ての実験について比較することは困難であることから、溶断時間のほぼ同じである酸素ヤリによる鋼板の溶断（冬期60秒、夏期55秒）について比較した。図11をみる

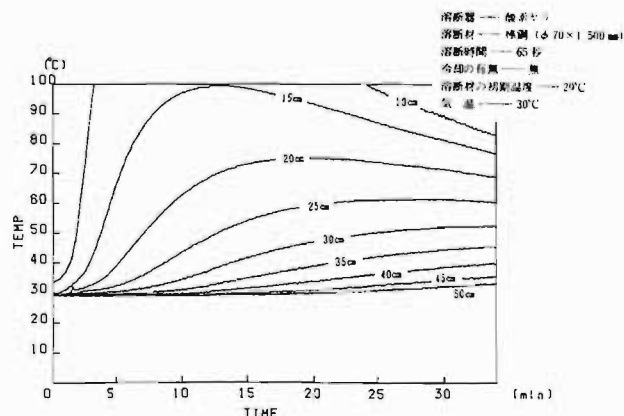


図7 酸素ヤリによる棒鋼の溶断

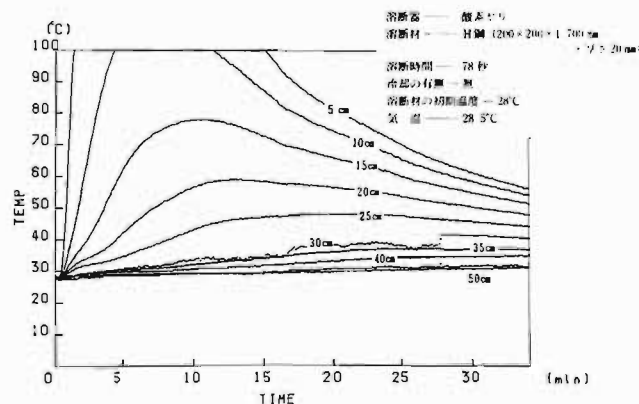


図8 酸素ヤリによるH鋼の溶断

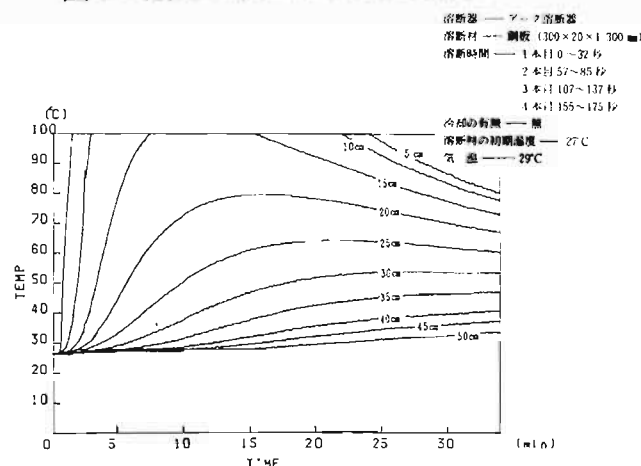


図9 アーク溶断器による鋼板の溶断

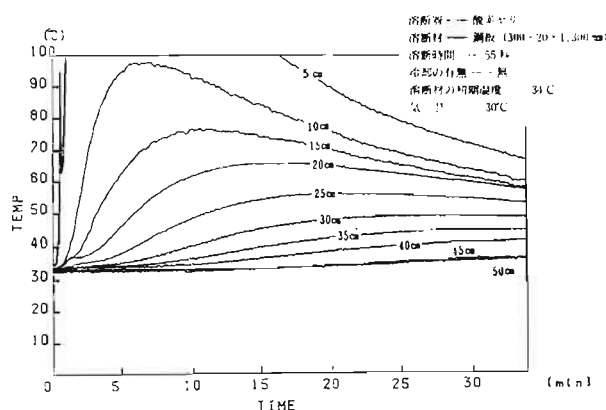


図6 酸素ヤリによる鋼板の溶断

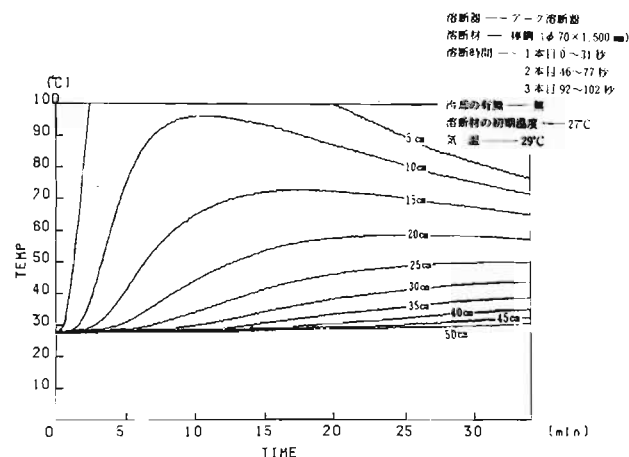


図10 アーク溶断器による棒鋼の溶断

と溶断開始前の鋼板温度が冬期約19℃、夏期約33℃（気温はそれぞれ14℃、30℃）で14℃の差がある。溶断後の温度変化は、冬期、夏期ともほぼ同じ傾向をたどり、夏期の温度は冬期の温度を10℃から13℃高く平行移動したものに近いものである。

これは、熱量の基本方程式である $dQ = c \cdot m \cdot dt$ から dQ , c , m が一定ならば、 dt は当然一定である。ここで、 dQ : 熱量, c : 比熱, m : 質量, dt : 温度の上昇 (温度差)

このことは、同じ溶断材に同じ熱量が加えられているとすれば上昇する温度差が等しいことを示している。よって、理論的に夏期の温度変化は、冬期に行った温度変化のグラフを溶断前の温度差の分だけ平行移動させればよいわけであるが、図11をみてもわかるように溶断前の温度差よりも溶断後の温度差の方が少ない。これは冬期のほうが若干溶断時間が長かったことから、溶断前の温度差よりも1℃から4℃低い値となっているものである。

(2) 棒鋼の溶断 (冷却あり, 写真2 参照)

水道水で冷却しながら溶断した結果は、図12のとおりであり、冷却位置(溶断面から100mm)から以遠への熱移動はほとんどなく、溶断材の表面に対する冷却効果の高いことが認められた。

(3) 電車床板の溶断 (写真3 参照)

表2に溶断時間経過を示す。

図13に示すとおり第1辺目溶断開始約4分後(1辺目の約1/2付近溶断時)にNo.5が急激に上昇している。

No.1~4及び9も溶断開始約4分後に若干上昇し、No.1はその後、徐々に上昇し、第3辺目溶断開始後、さらに上昇し、約52℃に達した。No.2及び3は33℃付近、37℃付近でそれぞれ安定し、第2辺目の溶断にはほとんど影響を受けず、第3辺目溶断開始後に上昇を始めNo.2及び3ともに約43℃まで上昇した。No.4は若干上昇し53℃付近で安定し、緩やかに降下している。No.9は42℃付近で安定し、第2及び3辺目の影響をほとんど受けていない。No.6は溶断開始から徐々に上昇し、溶断開始15分後(第2辺目中央付近溶断時)ピー

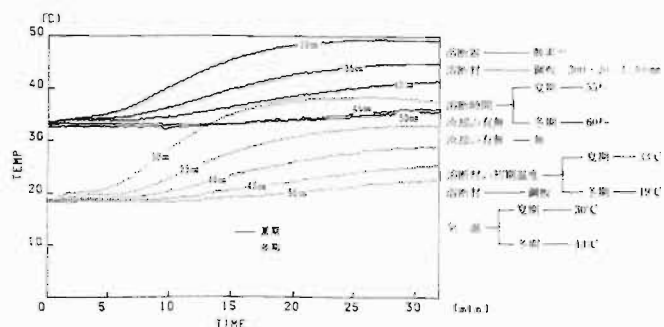


図11 酸素ヤリによる鋼板溶断時の冬期と夏期との比較



写真2 冷却しながら酸素ヤリにより棒鋼を溶断した状況

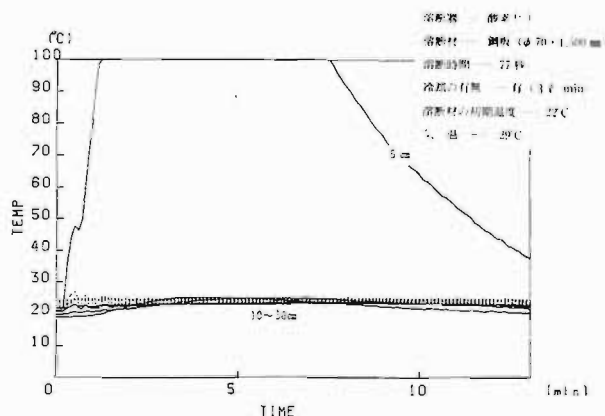


図12 冷却しながら酸素ヤリによる棒鋼の溶断

クに達し、その後降下している。No.7及び8はほとんど25℃付近で安定している。No.10は、第1辺目と第2辺目の角付近の溶断時に急激に上昇している。

いづれの熱電対も第1辺目の溶断時に若干の輻射熱の影響を受けている。No.5及び10に

表2 アーク溶断器による電車床板溶断時の時間経過

時間経過 (分)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
	1辺目の溶断				8' 31"	9' 26"	2辺目の溶断				18' 14"	18' 34"	3辺目の溶断				29' 03"
溶断終了時間29分03秒					(24秒の中断1回)												
正味溶断時間14分50秒																	
0	1' 18"~5' 28"				7' 07"	9' 26"~13' 04"				14' 35"~19' 37"				20' 43"~29' 03"			
5	(23~25秒の中断5回)					(18~32秒の中断4回)				(20~37秒の中断5回)				(14~23秒の中断7回)			
20"					8' 31"												

※ ←→ は、溶断中を示す。

ついては溶断面に近接しているため、早い時期に大きな熱エネルギーを受け急激に温度が上昇し、ピーク値を示した後、急激に降下している。これは、電車の床板が1.6mmと薄いため熱伝導が速く、また、表面積が大きいために放熱も速いものである。No.4は第1及び2辺目の熱エネルギーの伝導で温度の上昇が認められ、その後、降下の傾向を呈しているがNo.1, 2及び3と同様に若干温度上昇の傾向が認められる。これは、第3辺目からの溶断熱エネルギーの伝導のためである。No.2及び3は溶断

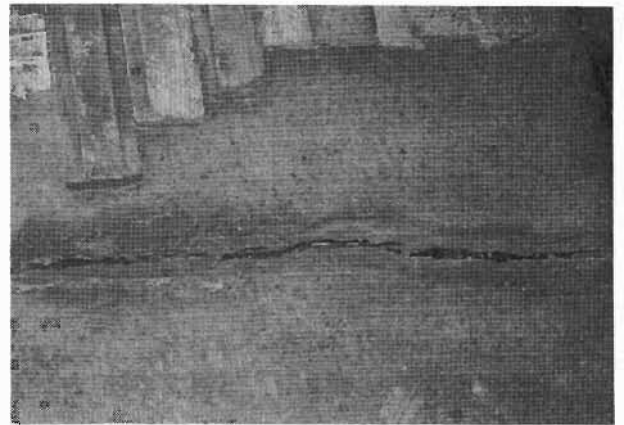


写真3 電車の床板をアーク溶断器によりコの字に溶断した状況

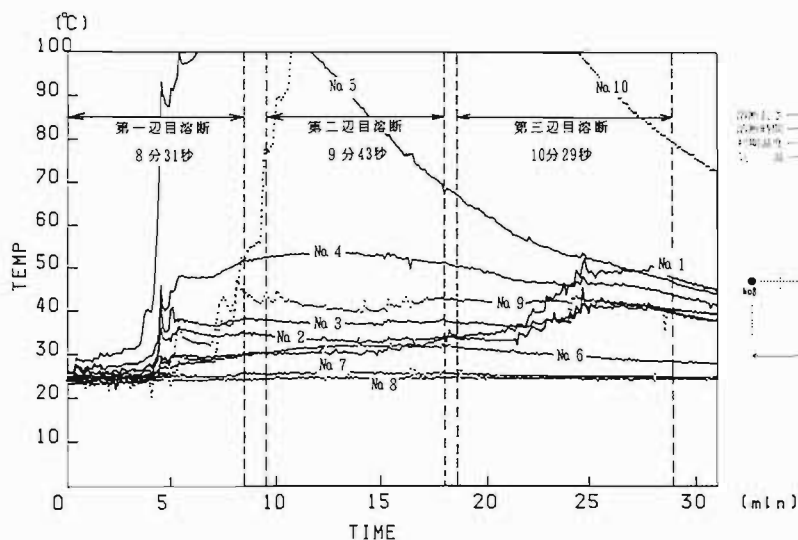
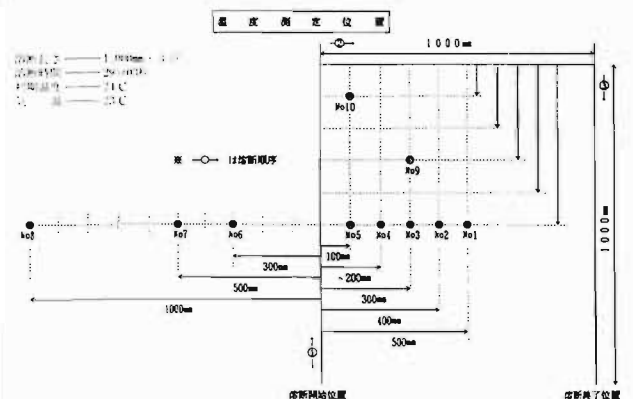


図13 アーク溶断器による電車床板溶断時の温度変化



時の伝導熱エネルギーと放熱エネルギーの熱的平衡状態が続く、第3辺目の溶断に至って第3辺目からの伝導熱エネルギーのため、温度の上昇が顕著に認められる。これは第3辺目の溶断に10分29秒もかかっているため、供給された熱量が大きくなったものである。

「コの字」の溶断面の内と外を比べると外側の測定点は、第2及び、3辺目の溶断に影響を受けていないのに対し「コの字」の溶断面内にある測定点は第2及び、3辺目の溶断に影響を受け、その相乗効果で温度が上昇しているものである。

5. ま と め

今回の実験に関しては、溶断面から概ね50cm以上離れていれば熱伝導による熱傷の心配はないが、鋼板の初期温度、溶断時間、溶断器、溶断の仕方による相乗効果（今回の実験では、「コの字」に溶断した内側に対しては50cm離れていても40°Cを越えている）などで大きく異なるものであり、どの位置を溶断すればよいという一般化したものを結論づけるのは、非常に困難である。

しかし、溶断に際しての注意事項や有効な手段は、次のとおりである。

- (1) 要救助者から可能な限り離れた位置で溶断する。
- (2) 発生熱量は溶断時間に比例して大きくなる

ので溶断時間をできるだけ短くする必要がある。

- (3) 溶断能力の大きい溶断器は、単位時間当たりの熱量が大きく、溶断が早く終了するのに対し、溶断能力の小さい溶断器は溶断時間が長いため、全体としての熱量はかえって大きくなる結果、溶断箇所付近の温度も高くなることがある。
- (4) 溶断位置と要救助者の間に水を流しながら溶断すれば、ほとんど熱伝導は止められる。
- (5) 溶断時には、火花や高熱のスラグが広範囲に飛散するため、要救助者を不燃材や濡れた布等で保護する必要がある。

以上のことから、溶断は速く行うことと必要により冷却しながら行うことが肝要で、速く溶断するためには、溶断箇所の見極め、溶断棒の選択、酸素圧力の設定等適切に行うとともに要領よく溶断する技術が必要である。

6. 参 考 文 献

- 1) Moritz, A. R., Henriouse, F. C., Jr: Study of thermal injury II. The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. Am. J. Pathol. 23:695-720, 1947.