HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	寒冷地および通常期の施工時におけるアスファルト舗装の温度と空げき率
Author(s)	徳光, 克也; 森吉, 昭博; 川村, 和幸 他
Citation	石油学会誌, 38(3), 173-184
Issue Date	1995-05-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40045
Type	journal article
File Information	moriyoshi_JJPI38_173.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

[一般論文]

寒冷期および通常期の施工時における アルファルト舗装の温度と空げき率

徳光 克也[†1]*, 森吉 昭博[†1], 川村 和幸[†2], 笠原 彰彦[†3]

[†1] 北海道大学工学部, 060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
[†2] 北海道開発局, 060 札幌市北区北 8 条西 2 丁目
[†3] 日本鋪道(株), 140 東京都品川区東品川 3-32-34

(平成 6 年 8 月 29 日受理)

本研究は寒冷期と通常期に 3 種類の初転圧用ローラーを用いた場合におけるアスファルト舗装の温度と空げき率について検討を行ったものである。また, 施工面を加熱した場合と常温切削した場合についても同様の検討を加えた。

実験の結果, 空げき率は施工面の温度に著しく依存し, 寒冷期施工のアスファルト混合物は通常期のそれと比較して空げき率が大きいこと, また転圧機械の種類, 施工面の凹凸形状, 施工厚さや配合によっても空げき率とその深さ方向の分布は異なることが明らかにされた。

1. 緒 言

外気温が 5°C 以下でのアスファルト舗装の寒冷期施工は, 外気温が 10°C 以上の通常期施工と比べてアスファルト混合物の温度低下が早いことから, 空げき率が大きくなることが懸念され, 耐久性の面で問題が生じる場合があると指摘されている[1),2)]。このため, 特に寒冷地においては寒冷期施工を極力避ける傾向にあるが, 最近は工事量の平準化といった観点から通年施工を目指した寒冷期施工の事例も多くなりつつある[3),4)]。

一方, 舗装工種は新設に比べ維持修繕工事の占める割合が増えており, 維持修繕工事のライフサイクルの短縮化といった問題が顕在化してきている。アスファルト舗装の品質管理は, 施工中のアスファルト混合物の温度, 採取コアの締固め度 (マーシャル密度に対する割合) や厚さで評価しているものの, 供用性能との関連性については不明な点が少なくない。

アスファルト混合物の締固めに関する研究例[5)~7)]は多数あるものの, 転圧に関する影響因子が複雑であることからこれらの因果関係を明確に示すまでには至っていないのが現状である。

本研究は, 屋外で寒冷期および通常期にアスファルト舗装を施工したときのアスファルト混合物の温度ならびに空げき率が初転圧のローラーの種類, 施工面の温度や凹凸形状, 施工厚さや配合等にいかに依存するかについて検討を行ったものである。実験の結果, 舗装表面の冷却速度はローラー面への散水の有無やローラーの導入時期に依存し, 寒冷期施工でのアスファルト舗装は通常期施工と比較して混合物の敷き均し温度が同一でも空げき率が大きいこと, また空げき率はローラーの種類, 施工面の温度や形状に依存し, その分布は深さ方向によって異なることが明らかにされた。

* 連絡先

アスファルト舗装の施工は, プラントで製造されたアスファルト混合物をダンプトラックで現地に搬入し, フィニッシャーによって一様に敷き均す。その後, 鉄輪ローラーにより転圧 (初転圧) を行った後, さらにタイヤローラーによって転圧 (二次転圧) を実施する。本文ではこれらの施工機械の使用開始を「導入」と称す。昭和 30 年代後半から初転圧はマカダムローラー, 二次転圧はタイヤローラーを使用する転圧工法が最も一般的である。また, アスファルト舗装は路床, 下層路盤, 上層路盤, 基層, 表層といった舗装構成からなり, 通常上層路盤はアスファルト安定処理混合物, 基層は粗粒度アスファルト混合物が使用され, 施工厚さの制限から 2 層に分けて施工する場合が多い。

一方, アスファルト舗装の維持修繕工事は既設舗装の損傷の程度によってその工法も異なってくるが, 常温切削工法とは既設面を加熱することなく, 常温切削機によって所定の厚さと幅を切削した後, アスファルト混合物層の施工を実施するものである。

2. 実験材料の配合および使用ローラー

2. 1. 実験材料の配合

実験に使用したアスファルト混合物は, 表層用の細粒度ギャップアスファルト混合物と基層用の粗粒度アスファルト混合物であり, A 地区では表層と基層, B 地区では基層のみの実験を行った。これらの粒度を **Table 1** に示す。

2. 2. 初転圧ローラの特徴

実験には初転圧として一般の施工に使用されるマカダムローラーのほかに, オシレトリローラーと加熱型タンデムローラーの計 3 種類のローラーを用いた。これらの主な機械仕様を **Table 2** に示す。

オシレトリローラーは, 進行方向に対して水平方向に振動を

与え，周囲への振動の影響を低減したものである[8]。加熱型タンデムローラーは，鉄輪の表面を遠赤外線ヒーターで加熱しながら無水と有振の状態で転圧を行うもので，混合物の付着防止のための散水は不要である。

転圧回数は各ローラーとも一定（4 往復）とし，オシレトリローラーと加熱型タンデムローラーは，無振で 1 往復，有振で 3 往復の転圧を実施し，その後いずれの場合もタイヤローラーによる二次転圧を 5 往復程度行っている。なお，フィニッシャーとタイヤローラーはすべての工区にわたり同一機械を使用した。

Table 1 Gradation of Mixtures

Sieve opening [mm]	Weight percent passing [%]		
	Location A		Location B
	Surface course	Binder course	Binder course
	Fine-and-gap graded asphalt concrete	Coarse graded asphalt concrete	
		Type A	Type B
26.5			100.0
19.0	100.0	100.0	98.8
13.2	87.3	78.0	81.7
4.75	61.1	43.1	47.1
2.36	49.8	27.7	32.2
0.6	42.8	15.9	15.9
0.3	34.4	12.4	10.2
0.15	11.4	5.9	6.4
0.075	8.9	3.9	4.9
Asphalt content [%]	5.6	5.0	5.3

Table 2 Characteristics of 3 Roller Types

Item	Oscillatory	Hot tandem	Macadam
Total weight [t]	6.4	7	12.4
Direction of vibration	Horizontal	Vertical	None
Spray of water	Yes	None	Yes
Heating of wheel surface [°C]	None	60	None

3. 試験箇所および測定方法

3. 1. 試験箇所

試験箇所は A 地区と B 地区の舗装構成が同一の新設の 2 箇所である。**Table 3** に示すように，A 地区では寒冷期施工の基層 2 層と通常期施工の表層でそれぞれ初転圧ローラーの種類を変えた 3 工区，B 地区では通常期施工の基層を 1 層目で初転圧ローラーの種類を変えた 3 工区，基層 2 層目では初転圧ローラーの種類を変えた 3 工区のほかに，施工表面を路面ヒーターで加熱した 1 工区（Heating と称す）と常温切削機で切削した同一条件の 2 工区（Cold Cutting と称す）の計 6 工区を設定した。これらの工区では，すべて初転圧をマカダムローラーで実施している。各工区は約 80 m のスパン長であり，舗装構成は **Fig. 1** に示すように基層が 6 cm の 2 層，表層が 5 cm，上層路盤はアスファルト安定処理路盤の厚さ 9 cm，2 層である。なお，A 地区，B 地区とも施工は同一機械で同一業者が行った。

3. 2. 測定方法

3. 2. 1. アスファルト混合物の温度測定方法

舗装施工時におけるアスファルト混合物の各層の温度測定

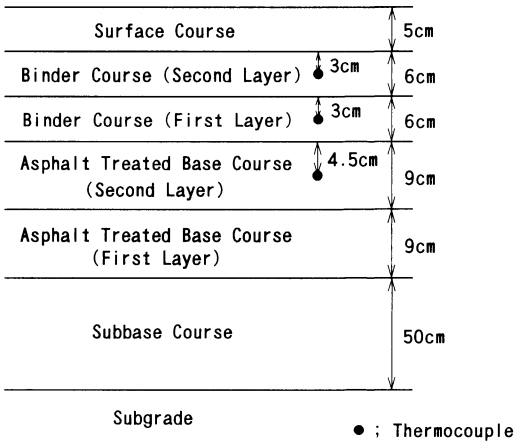


Fig. 1 Pavement Structure

Table 3 Test Conditions for 2 Locations

Items	Location A			Location B	
Layers	Binder course		Surface course	Binder course	
	First	Second		First	Second
Constructed season	Cold		Ordinary	Ordinary	
Atmosphere temp. [°C]	0-5	1-3	17-20	17-27	13-18
Type of first roller	Oscillatory Hot tandem Macadam			Oscillatory Hot tandem Macadam	
Treatment	None			None	None
Lower layers					Heating (macadam) Cold cutting (macadam : 2 section)

は，舗装表面を赤外線放射温度計で計測し[9]，基層ならびに加熱アスファルト安定処理路盤の2層目では各層の中央部に埋設した熱電対（**Fig. 1**）を用いて実施した。

赤外線放射温度計は，施工方向にほぼ垂直な角度の高さ約1.5 m 上方から施工幅員の中央へ向けカメラを固定した。温度計測領域は約 1.5×1.0 m である。表面温度の測定はフィニッシャー敷き均し直後からタイヤローラーの転圧完了までを目標とし，各層ごとに熱画像画面内の高温部と低温部を選定し，各層の施工完了後それぞれ2本，計4本ずつのコアを採取した。

3. 2. 2. アスファルト混合物の空げき率の測定方法

採取したコアの空中重量と水中重量から密度を求め，理論密度を用いて空げき率を算出した。さらに，各コアを同一厚さで2〜3層にスライスし，上部および下部，または上部，中央部，および下部の個々の空げき率をそれぞれ測定した。

4. 測定結果

4. 1. 外気温がアスファルト混合物の温度に与える影響

4. 1. 1. 外気温が舗装表面温度に与える影響

寒冷期施工と通常期施工における基層の舗装表面温度の測定結果をそれぞれ **Tables 4, 5** および **Figs. 2, 3** に示す。ここでの舗装表面温度とは4本のコア採取箇所における平均値である。

図表中の Time とは，フィニッシャーによる敷き均し直後からの経過時間であり，表には10分と30分では敷き均し直後からの温度差を，また30分では同一施工時期での加熱型タンデムローラーとの冷却温度の差も併記した。表中のアンダーライン部は初転圧が開始されたポイントである。

実験を行った時の外気温は寒冷期で 0〜5°C，通常期で 13〜

Table 4 Surface Temperature of Binder Course Constructed in Cold Season (Location A)

Time [min]	Oscillatory		Hot tandem		Macadam	
	First layer temp. [°C]	Second layer temp. [°C]	First layer temp. [°C]	Second layer temp. [°C]	First layer temp. [°C]	Second layer temp. [°C]
0	147.8	147.0	144.0	145.0	130.0	142.0
2	140.8[a)]	133.5	135.5	130.5	123.5	133.7
4	134.0	131.6	131.0	123.0	109.5	124.5
6	131.0	129.0	126.3	121.0	106.8	121.0
8	127.3	125.3	124.3	115.0	108.3	107.0
10	115.0(−32.8)[b)]	121.2(−25.8)	122.3(−21.7)	109.5(−35.5)	106.3(−23.7)	90.0(−52.0)
30	97.0(−50.8)[−7.8][c)]	85.6(−61.4)[+3.6]	101.0(−43.0)[0]	80.0(−65.0)[0]	84.3(−45.7)[−2.7]	69.0(−73.0)[−8.0]
Atmosphere temp. [°C]	0-3	1-3	3-5	3-2	5-2.5	2-1
Maximum velocity of wind [m/s]	2	1	1	1	4	1

a) Underlines indicate the starting points of rolling.
b) Numbers in parentheses are temperatures which are different from the initial temperature.
c) Numbers in brackets are temperatures which are different from the cooling temperature using Hot-Tandem-Roller for 30 min.

Table 5 Surface Temperature of Binder Course Constructed in Ordinary Season (Location B)

Time [min]	Oscillatory		Hot tandem		Macadam	
	First layer temp. [°C]	Second layer temp. [°C]	First layer temp. [°C]	Second layer temp. [°C]	First layer temp. [°C]	Second layer temp. [°C]
0	160.3	149.8	164.2	164.2	141.3	159.2
2	154.7	131.1	154.4	144.6	130.0	146.3
4	135.2[a)]	124.0	149.6	137.8	121.3	137.2
6	135.2	124.9	145.6	131.4	119.2	125.5
8	133.4	124.0	144.1	126.5	109.9	131.6
10	131.6(−28.7)[b)]	120.6(−29.3)	142.7(−21.5)	119.8(−44.4)	112.1(−29.2)	129.6(−29.6)
30	107.0(−53.3)[−14.8][c)]	94.2(−55.6)[−17.1]	125.7(−38.5)[0]	103.5(−60.7)	90.0(−51.3)[−12.8]	98.2(−61.0)[−22.5]
Atmosphere temp. [°C]	25-27	18-16	27-25	16-18	17-18	13-15
Maximum velocity of wind [m/s]	5	7	4	6	7	2

a) Underlines indicate the starting points of rolling.
b) Numbers in parentheses are temperatures which are different from the initial temperature.
c) Numbers in brackets are temperatures which are different from the cooling temperature using Hot-Tandem-Roller for 30 min.

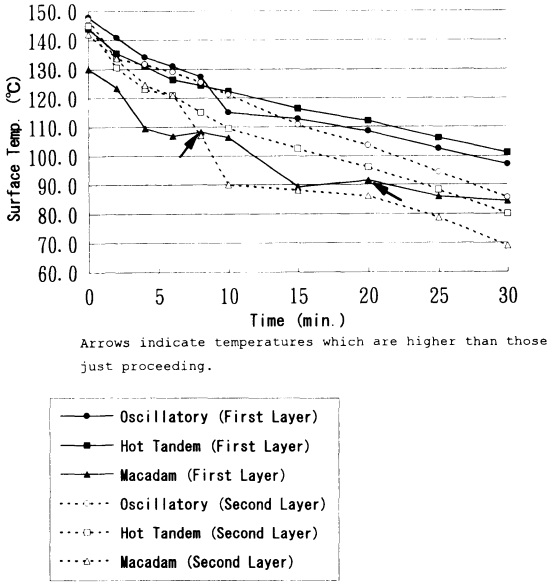


Fig. 2 Surface Temperature of Binder Course Constructed in Cold Season (Location A)

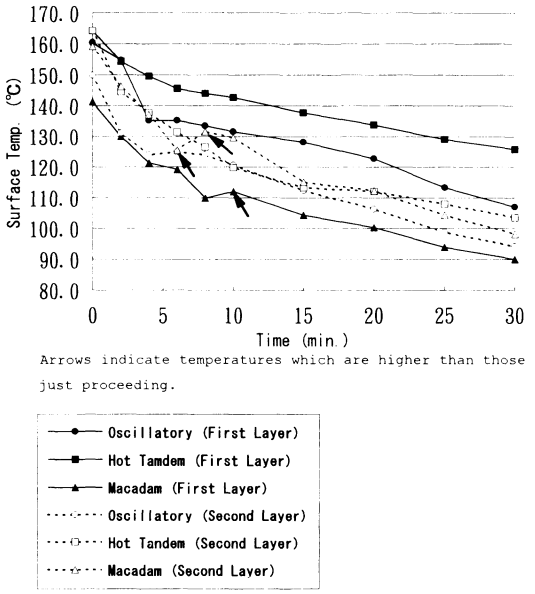


Fig. 3 Surface Temperature of Binder Course Constructed in Ordinary Season (Location B)

27℃であり，変動の大きい風速は最大風速でそれぞれ1～4 (m/sec)，2～7 (m/sec) であった。

Table 4 および **Fig. 2** に示すように，寒冷期施工の基層2層目はいずれのローラーにおいても1層目に比べ表面の温度冷却が速くなっている。これは基層2層目の施工中に断続的に降雪があったためである。したがって，舗装表面温度の各種因子の比較は降雪の影響のある基層2層目の結果を除いた評価を行った。

初転圧を行っている10分と初転圧がほぼ完了する30分の表面の冷却温度を寒冷期と通常期施工で各層のローラー種別ごとに比較すると，敷き均し直後の温度は異なるもののオシレトリローラーでは寒冷期でそれぞれ33℃と51℃，通常期でそれぞれ29℃と53～56℃であり両者に顕著な差はみられない。加熱型タンデムローラーでは，寒冷期でそれぞれ22℃と43℃，通常期でそれぞれ22～44℃と39～61℃，マカダムローラーでもそれぞれ24℃と46℃，29～30℃と51～61℃を示しており，むしろ寒冷期施工の方が温度低下は小さくなっている。通常期施工における加熱型タンデムローラー使用時の2層目の冷却がかなり進行しているのは，初転圧の開始が他より6分程度遅かったことに起因すると思われる。したがって，本実験での外気温と風速の差が表面温度の冷却に与える影響は極めて小さく，表面の冷却温度は初転圧の導入時期に影響を受けると考えられる。

Figs. 2, 3 より，オシレトリローラーとマカダムローラー使用時には，一部で表面温度が上昇している箇所がみられ，散水によって表面温度が急冷し，内部からの熱伝達により再び温度が上昇する現象を繰り返しながら徐々に冷却していく過程が確認できる。当然のことながら同一条件であれば混合物のローラー面への付着防止を加熱により行う加熱型タンデムローラーの舗装表面温度の冷却は他のローラーより小さく，寒冷期施工では30分経過後で2.7～7.8℃，通常期施工では転圧の導入が遅れ冷却が著しく速い2層目の結果を除くと12.8～22.5℃の差がみられる。

Figs. 4, 5 は，寒冷期と通常期の高温側と低温側のコア採取位置における表面温度の温度差（2点の平均値）をそれぞれ示したものである。図中のマイナスの値は，高温側として選定したコアの表面温度が低温側のそれより低いことを意味している。

施工時期によって顕著な差はみられず，敷き均し直後では－3.8～15.0℃の温度差が存在している。敷き均し直後の温度差が大きいものは30分までの平均値も大きい傾向を示しており，小さい場合でもローラー転圧によってその差が大きくなるものもみられる。全工区同一のフィニッシャーを使用していることから，敷き均し直後の表面の温度むらはアスファルト混合物を製造するプラントから運搬車への積み込み時，およびプラントから現場への運搬時での温度むらとその変動によるものと考えられる。

転圧や散水の有無でこれらの温度差は刻々と変化しているが，高温と低温の温度関係は初転圧時でほぼ安定している。

なお，タイヤローラーによる二次転圧の導入はほぼ30分以降からである。

4. 1. 2. 外気温が舗装内部温度に与える影響

Tables 6, 7 は，1層目の基層を施工しているときのそれぞれ寒冷期と通常期におけるアスファルト混合物中央と上層路盤2層目の中央の温度測定結果である。

上層路盤2層目の中央の温度は施工面から4.5 cm下方の位置であり，敷き均し直後の温度は外気温等の影響で寒冷期では－0.5～6.7℃，通常期では33～48℃程度を示し，両者には26～49℃の温度差がみられる。30分での温度上昇はそれぞれ18～22℃，20～21℃，施工がほぼ完了する60分ではそれぞれ

Table 6 Inner Temperature of First Binder Course Constructed in Cold Season (Location A)

Time [min]	Oscillatory				Hot tandem				Macadam			
	Lower layer (−4.5 cm)		Middle of binder course		Lower layer (−4.5 cm)		Middle of binder course		Lower layer (−4.5 cm)		Middle of binder course	
	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]
0	−0.5	0.0	187.0	0.0	2.3	0.0	159.8	0.0	6.7	0.0	155.0	0.0
30	21.0	21.5	125.6	−61.4	19.8	17.5	90.2	−69.6	24.8	18.1	101.9	−53.1
60	27.6	28.1	89.0	−98.0	31.7	29.4	64.1	−95.7	33.4	26.7	72.7	−82.3

Table 7 Inner Temperature of First Binder Course Constructed in Cold Season (Location B)

Time [min]	Oscillatory				Hot tandem				Macadam			
	Lower layer (−4.5 cm)		Middle of binder course		Lower layer (−4.5 cm)		Middle of binder course		Lower layer (−4.5 cm)		Middle of binder course	
	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]	Temp. [°C]	Difference from initial temp. [°C]
0	48.1	0.0	166.5	0.0	40.8	0.0	147.5	0.0	33.1	0.0	150.6	0.0
30	68.4	20.3	121.6	−44.9	Impossible	None	116.7	−30.9	54.2	21.1	94.6	−56.1
60	72.2	24.1	96.3	−70.2	Impossible	None	101.5	−46.0	58.9	25.8	73.3	−77.3

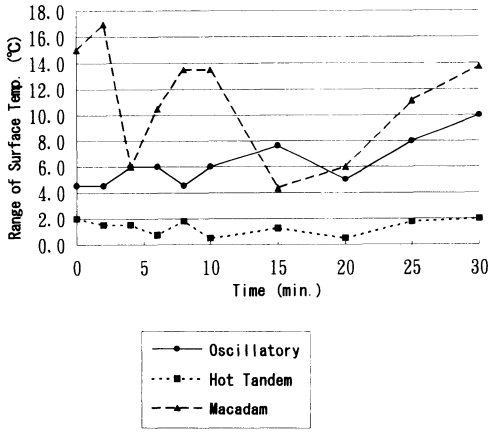


Fig. 4 Range of Surface Temperature of First Binder Course Constructed in Cold Season (Location A)

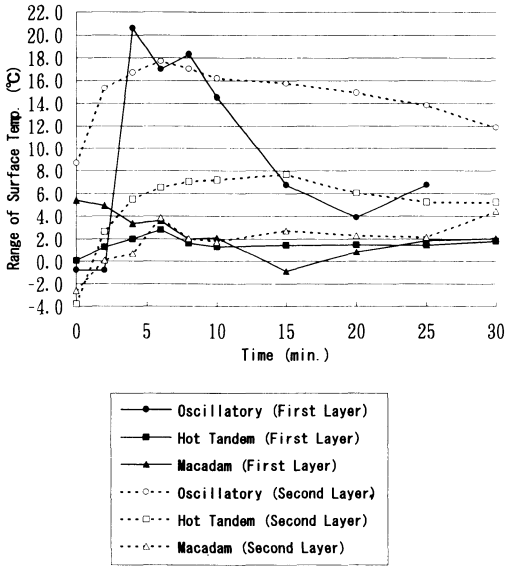


Fig. 5 Range of Surface Temperature of Binder Course Constructed in Ordinary Season (Location B)

27～29°C, 24～26°C であり，両者に大きな差はみられない。60 分までは寒冷期，通常期ともに温度は上昇していることから，ほぼ初期の温度差がそのまま継続している。すなわち，施工中における施工面下層の温度変化は外気温に関係なく，その温度は施工混合物が本実験のような 148～187°C 程度の温度範囲であれば敷き均し直後，換言すれば施工前の温度に依存するといえる。

アスファルト混合物の中央部の 30 分と 60 分における温度低下は，寒冷期にそれぞれ 53～70°C と 82～98°C，通常期にはそれぞれ 31～56°C と 46～77°C を示し，寒冷期の方が温度冷却は速くなっている。したがって，中央より下方の混合物下部では，その差がさらに顕著であることは明白である。寒冷期施工では初期温度が比較的高かったことから，30 分における混合物中央では寒冷期，通常期ともにほぼ同程度の温度であった。

4. 2. 舗装表面温度と舗装内部温度の関係

寒冷期と通常期の基層 1 層目における同一経過時間での舗装表面温度と混合物中央部の温度との関係をそれぞれ **Figs. 6, 7** に示す。敷き均し直後では表面温度の冷却に比べ，混合物中央部の温度冷却は遅く，上に凸の緩い曲線を描いている。ローラー面に散水を伴うオシレトリローラーとマカダムローラーには大きな差はみられず，冷却が進行するに従い両者のこう配は一定値に近づく。$y=x$ 式と比較すると，加熱型タンデムローラーは寒冷期，通常期ともに一部で表面温度の方が高い状態を

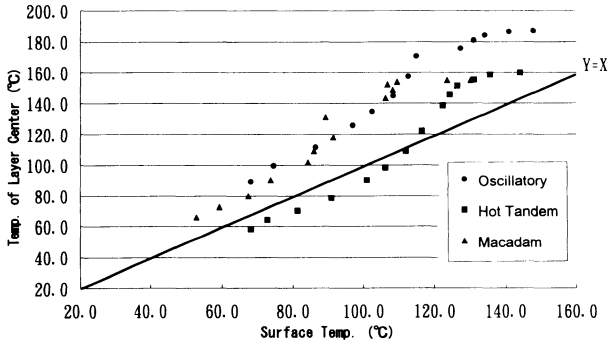


Fig. 6 Relation between Temp. of Layer Center and Surface Temp. Constructed in Cold Season (Location A)

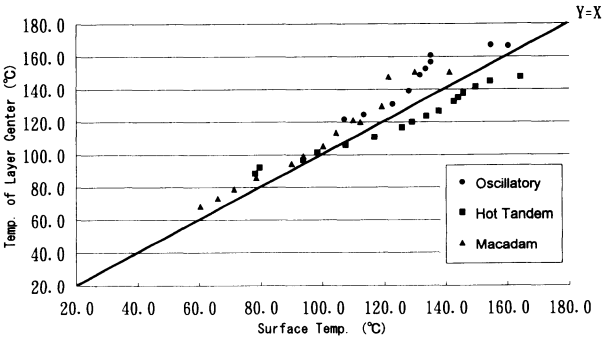


Fig. 7 Relation between Temp. of Layer Center and Surface Temp. Constructed in Ordinary Season (Location B)

Table 8 Relation between Temp. of Layer Center (y) and Surface Temp. (x) in First Binder Course (thickness : 6 cm)

Season	Type of roller	Revision of fixed numbers				Numbers of sample
		Coefficient of correlation	Linear regression	Coefficient of correlation	Linear regression	
Cold	Oscillatory	0.98	$y=1.37x-2.3$	0.98	$y=1.33x+(1.5^{a)})$	13
	Hot tandem	0.98	$y=1.55x-55.4$	0.98	$y=1.03x+(4.0)$	14
	Macadam	0.96	$y=1.37x-6.0$	0.96	$y=1.27x+(3.8)$	14
Ordinary	Oscillatory	0.93	$y=0.96x+19.4$	0.93	$y=0.91x+(26.0)$	10
	Hot tandem	0.99	$y=0.71x+31.4$	0.99	$y=0.75x+(26.0)$	16
	Macadam	0.98	$y=1.13x-2.8$	0.98	$y=0.93x+(18.0)$	14

a) Atmosphere temp.

示しており，同一表面温度における混合物中央の温度が他の2者よりも低く表面温度が高く維持されることがわかる。また，寒冷期においては中央部との温度差が小さいといえる。

Table 8 は，**Figs. 6, 7** に示した寒冷期と通常期における舗装内部温度と表面温度の相関係数と1次回帰式を示したものである。寒冷期，通常期とも両者の相関係数は0.93以上を示し，1次回帰式におけるこう配は寒冷期の方が大きい傾向を示している。このこう配は表面温度の変化に対する中央部温度の影響度合いを示し，こう配が大きいほど内部温度は表面温度の変化に対し敏感に対応することを示している。これは寒冷期と通常期で表面温度の冷却に差はみられないのに対し，混合物中央では寒冷期の方が温度冷却が速いことに対応するものである。この1次回帰式は，冷却が進行するに従い両者の差は小さくなり $y=x$ 式に漸近すると同時に外気温に収束するものと思われる。したがって，y 切片を施工時における外気温と仮定し，両者の関係式を補正した場合の式も **Table 8** に示した。補正後の結果でローラー種別ごとにこう配を比較すると，寒冷期，通常期ともにオシレトリローラーとマカダムローラーには顕著な差がみられず加熱型タンデムローラーが最も小さいことから，ローラー面を加熱したものは表面の温度冷却も小さく，かつ内部温度に与える影響も小さいといえる。

4. 3. 外気温がアスファルト混合物の空げき率に与える影響

Fig. 8 は，基層の各工区で採取した4本のコアの空げき率の平均値を示したものである。

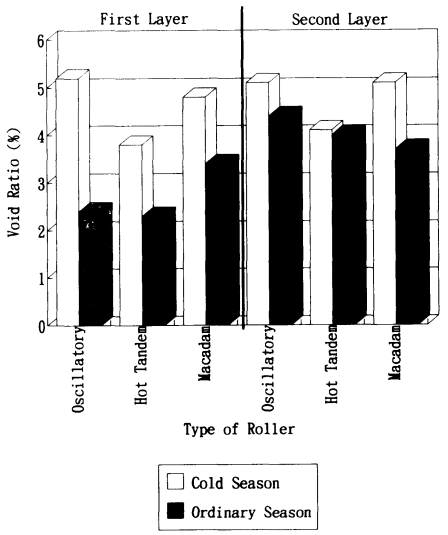


Fig. 8 Void Ratio in Binder Course

ローラーのタイプによらず通常期施工に比べ，寒冷期施工の方が空げき率の大きい傾向を示している。寒冷期施工の2層目は施工中に断続的に降雪があり表面の冷却温度が速かった

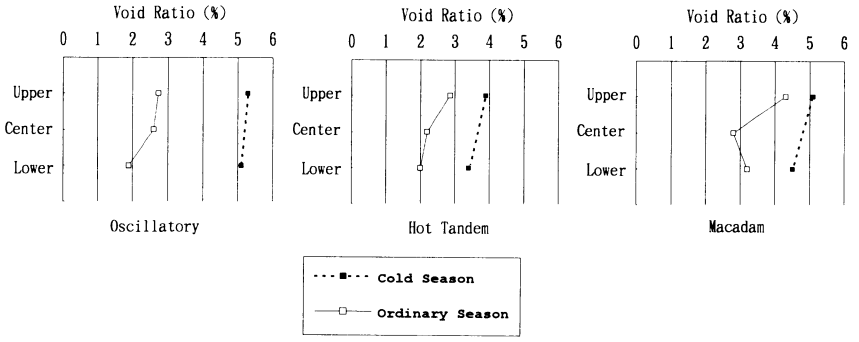


Fig. 9 Vertical Distribution of Void Ratio in First Binder Course

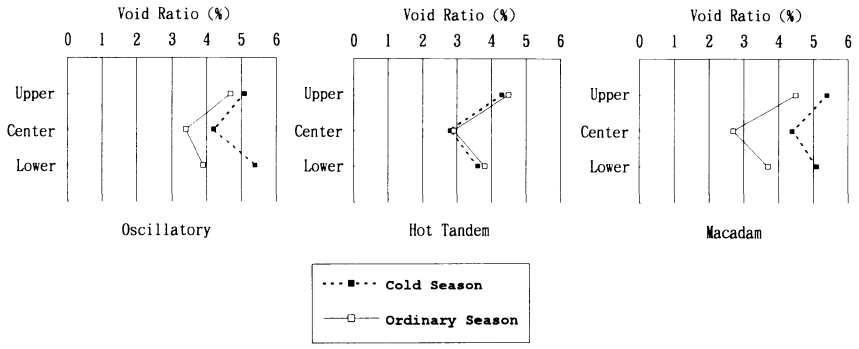


Fig. 10 Vertical Distribution of Void Ratio in Second Binder Course

が，1層目と比較し顕著な差はみられない。通常期施工では2層目の方が空げき率の大きい傾向を示しており，これは **Table 5** より1層目と2層目の施工時の外気温にオシレトリローラー，加熱型タンデムローラーおよびマカダムローラーでそれぞれ9°C，9°C，4°C程度の気温差が存在したためと思われる。寒冷期と通常期の基層1層目では初転圧終了時の30分における混合物中央の温度はほぼ同一であったことから，アスファルト混合物の空げき率は外気温に支配的影響を受ける施工面下層の温度に著しく依存するといえる。

各種ローラーを比較すると加熱型タンデムローラーの空げき率が他より小さい傾向を示しており，特に寒冷期にその効果が顕著である。通常期施工2層目における加熱型タンデムローラーの空げき率が比較的大きいのは，ローラーの導入時期が遅れた影響と思われる。

Figs. 9, 10 は，各コアをさらに厚さ2 cmずつ3層（寒冷期施工の基層1層目は3 cm 2層）にカッティングした個々の空げき率（4本のコアの平均値）を深さ方向に示したものである。

2層にカッティングした寒冷期施工1層目では，ローラー種類にかかわらず上部に比べ下部の空げき率が小さい傾向を示している。3層にカッティングした通常期施工の1層目におけるオシレトリローラーと加熱型タンデムローラーでは下部が最も小さい空げき率を示すのに対し，2層目では寒冷期，通常期ともに中央部が最も小さくなっている。これら平均値で示した空げき分布の形態はいずれも個々のコアのそれと一致している。したがって，オシレトリローラーや加熱型タンデムローラーのような有振転圧では，外気温が比較的高い場合に下部が最も締め固まる空げき分布の形態を示すと思われる。マカダムローラーは施工時期によらず，中央部，下部，上部の順に空げき率が大きくなる形態を示している。なお，本実験で使用した寒冷期および通常期の粗粒度アスファルト混合物のマーシャル試験における基準密度は，それぞれ2.395 (g/cm^3)，2.392 (g/cm^3) とほぼ同値である。

4. 4. 施工面の温度や凹凸形状がアスファルト混合物の空げき率に与える影響

通常期に施工面（基層1層目の粗粒度アスファルト混合物）を路面ヒーターで加熱した工区（Heating），常温切削機で切削した同一条件の二つの工区（Cutting 1，Cutting 2）および通常期施工2層目のマカダムローラーの工区（Normal 2）での舗装体内温度を **Table 9** に示す。常温切削の工区では，施工面下層の温度の計測は実施していない。

Tables 7 および **9** より，通常期施工の基層1層目のマカダムローラーの工区（Normal 1）における施工面下層の敷き均し直後の温度は33.1°C，2層目のそれは15.0°Cと深さ方向の位置は異なるものの両者に18.1°Cの差がみられる。したがって，施工面下層がアスファルト混合物の場合，維持修繕工事の実施頻度の高い夜間施工を含めた一般の通常期施工においてはその変動もかなり大きいものと思われる。

路面ヒーターによる施工面の加熱は表面温度で110°C程度まで行い，フィニッシャー敷き均し直前で50°C程度の温度であった。通常期施工のマカダムローラーと比較すると施工面から3 cm下方の基層1層目の中央で37.4°Cの温度差であった。

Table 9 Inner Temperature of Second Binder Course with Heating and Cold Cutting of First Binder Course Constructed Using Macadam-roller in Ordinary Season (Location B)

Time [min]	Normal 2		Heating		Cutting 1	Cutting 2
	Lower layer (−3 cm) temp. [°C]	Middle of mixture temp. [°C]	Lower layer (−3 cm) temp. [°C]	Middle of mixture temp. [°C]	Middle of mixture temp. [°C]	Middle of mixture temp. [°C]
0	15.0	161.0	52.4	173.0	165.9	165.5
30	45.5	102.5	79.8	114.4	125.0	112.8
60	49.5	74.1	76.9	83.9	88.6	89.4
Atmosphere temp. [°C]	13-15		15-16		16-15	16-15
Maximum velocity of the wind [m/s]	2		5		3	3

Normal 2 : Macadam-roller at second binder course (ordinary season).
Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

舗装表面温度の冷却速度は通常のマカダムローラーを使用したものと大きな差はみられず，施工中においてはこの程度の施工面の加熱が表面温度に与える影響は小さいといえる。

切削面の内部温度は通常期施工のマカダムローラーより若干高温であった。

Fig. 11 は，通常期における基層 1 層目と 2 層目のマカダムローラーを使用した工区と路面ヒーターならびに常温切削機を使用した工区の空げき率（4 本のコアの平均値）の測定結果である。

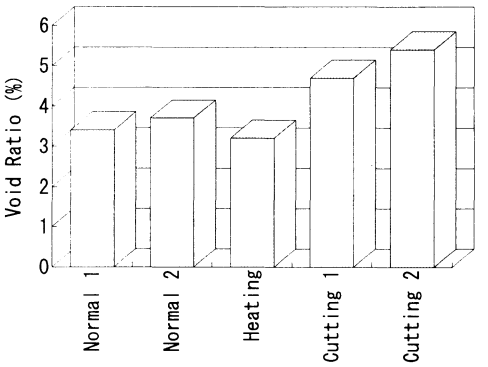
空げき率は施工面を加熱した工区が最も小さく，常温切削面では大きくなっている。**Figs. 12～14** は各コアをさらに 3 層にスライスした空げき率（4 本のコアの平均値）の測定結果である。施工面を加熱したコアは全体に空げき率は小さい傾向にあるが，その効果は特に下部にみられ，中央部と下部の空げき率はほぼ同程度である。一方，施工面を常温切削した場合の空げき率は相対的に大きく特に上部で顕著である。

Table 10 は，通常期にマカダムローラーを使用した基層各層の深さ方向の空げき率とその範囲を示したものである。空げき率の深さ方向の範囲を通常の施工時のものと比較すると，施工面を加熱したものに差はみられないが，切削面では約 2.5% と他より大きいバラツキを示している。

以上のことから，施工面の温度と形状は空げき率とその分布に大きな影響を及ぼし，施工面の温度が高い場合アスファルト混合物は締まり易く特に下部に，また切削面では締まりにくく特に上部にその影響が大きい結果が得られた。混合物の転圧メカニズムは，骨材が回転，移動しながら締め固まる[10]といわれ，下層面の硬さや凹凸による摩擦が骨材の動きに大きく影響を与えていると思われる。このような現象は，維持修繕工事におけるライフサイクルの短縮化の現状と一致し，特に初期わだちの発生の一因といえよう。

4. 5. 施工厚さや配合がアスファルト混合物の空げき率に与える影響

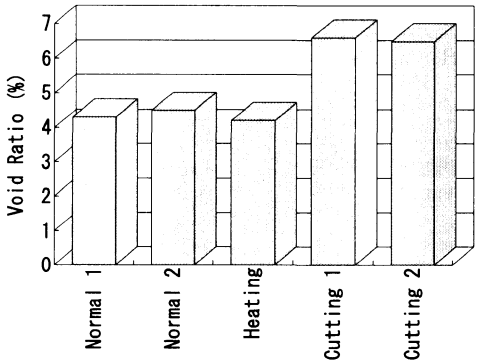
通常期に実施した表層での細粒度ギャップアスファルト混合物の施工時における舗装表面温度の測定結果を **Table 11** および **Fig. 15** に示す。経過時間 30 分における表面温度の冷却は 78～96°C を示し基層の冷却速度よりかなり速くなっている。風速の計測は実施していないが基層施工時と特に大きな差は認められなかったことから，施工厚さと配合の違いが表面温度に与える影響は極めて大きいと思われる。基層の粗粒度アスファルト混合物の結果と同様に，加熱型タンデムローラーの温度冷却は他の 2 者に比べ 30 分で 8.2～17.7°C 小さくなっている。



Normal 1 : Macadam-roller at first binder course (ordinary season).
Normal 2 : Macadam-roller at second binder course (ordinary season).
Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

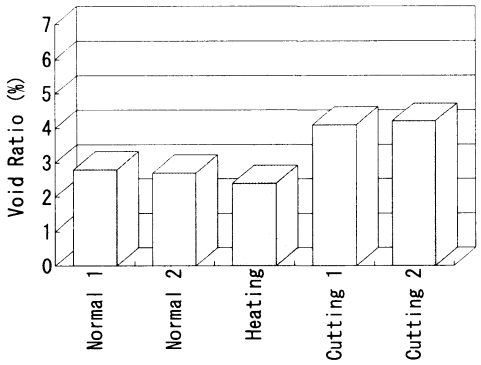
Fig. 11 Effect of Temperature and Roughness of Surface of Lower Layer on Void Ratio in Binder Course Using Macadam-roller

Fig. 16 は深さ方向の空げき分布を示したものである。凡例内に 4 本のコア全体の平均値を示した。加熱型タンデムローラーが最も空げき率が小さく，オシレトリローラーでは 6%



Normal 1 : Macadam-roller at first binder course (ordinary season).
Normal 2 : Macadam-roller at second binder course (ordinary season).
Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

Fig. 12 Upper Void Ratio in Binder Course Using Macadam-roller

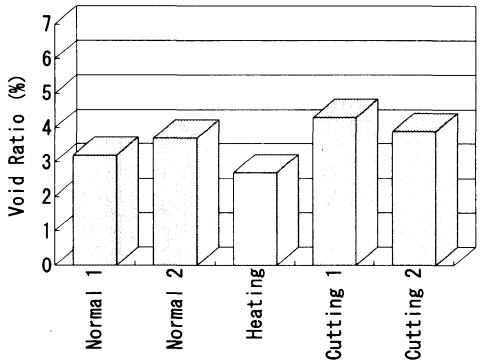


Normal 1 : Macadam-roller at first binder course (ordinary season).
Normal 2 : Macadam-roller at second binder course (ordinary season).
Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

Fig. 13 Center Void Ratio in Binder Course Using Macadam-roller

を越えており，初転圧ローラーの違いが空げき率に与える影響は施工厚さや配合によって異なるといえる。空げき率の分布は，加熱型タンデムローラーとマカダムローラーは中央部が，オシレトリローラーは下部が最も小さい空げき率を示しており，基層の分布形態と顕著な差はみられなかった。

Table 12 に示すように，細粒度ギャップアスファルト混合物では深さ方向の空げき率の範囲が 2% 以上を示し，**Table 10** の粗粒度アスファルト混合物の空げき率範囲より大きく，施工厚さと配合の違いによって空げき率の深さ方向のバラツキは異なっている。また，マカダムローラーでは 3.3% と極めて大きな空げき率範囲を示しており，施工厚さや配合によってローラーの種類が深さ方向の空げき率のバラツキに与える影響も異なるといえる。



Normal 1 : Macadam-roller at first binder course (ordinary season).
Normal 2 : Macadam-roller at second binder course (ordinary season).
Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

Fig. 14 Lower Void Ratio in Binder Course Using Macadam-roller

Table 10 Vertical Void Distribution of Binder Course Using Macadam-roller in Ordinary Season

Type	Void [%]	Difference [%]
Normal 1	2.8-4.3	1.5
Normal 2	2.7-4.5	1.8
Heating	2.4-4.2	1.8
Cutting 1	4.1-6.6	2.5
Cutting 2	3.9-6.5	2.6

Normal 1 : Macadam-roller at first binder course (ordinary season).
Normal 2 : Macadam-roller at second binder course (ordinary season).
Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

4. 6. 舗装表面温度が空げき率に与える影響

アスファルト混合物の空げき率は，締固め時の使用アスファルトの粘度の影響を著しく受けることから，転圧中の混合物温度は空げき率と密接な関係にある[11]。

Table 11 Surface Temperature of Surface Course Constructed in Ordinary Season (Location A)

Time [min]	Oscillatory temp. [°C]	Hot tandem temp. [°C]	Macadam temp. [°C]
0	156.0	160.4	157.3
2	143.7	146.5	143.7
4	137.1	138.8	126.2
6	128.2[a)]	131.4	118.9
8	118.0	127.2	109.2
10	113.7 (−42.3)[b)]	120.5 (−39.9)	97.4 (−59.9)
30	69.7 (−86.3) [−8.2][c)]	82.3 (−78.1) [0]	61.5 (−95.8) [−17.7]
Atmosphere temp. [°C]	18-19	17-18	19-20

a) Underlines indicate the starting points of rolling.
b) Numbers in parentheses are temperatures which are different from the initial temperature.
c) Numbers in brackets are temperatures which are different from the cooling temperature using Hot-Tandem-Roller for 30 min.

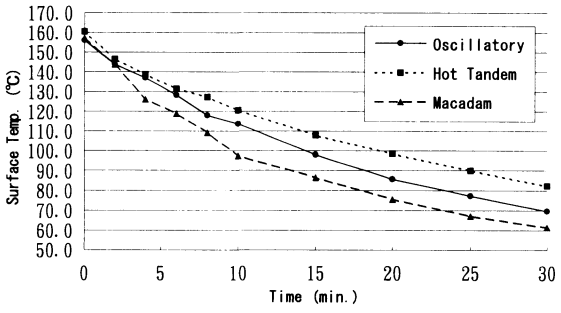


Fig. 15 Surface Temperature of Surface Course Constructed in Ordinary Season (Location A)

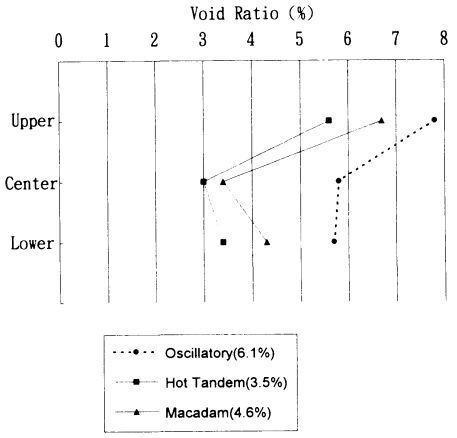
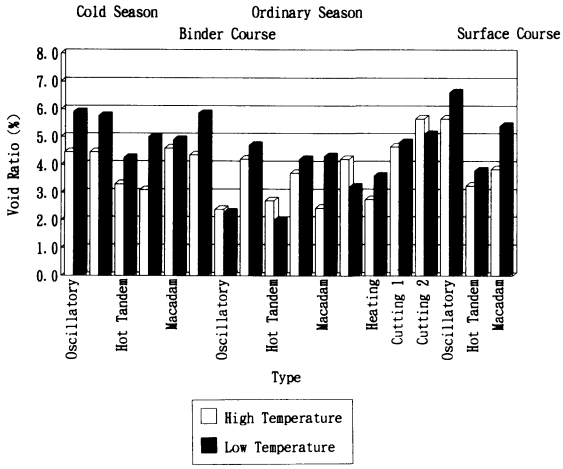


Fig. 16 Vertical Void Distribution in Surface Course

Table 12 Vertical Void Distribution of Surface Course in Ordinary Season (Location A)

Type of roller	Void [%]	Difference [%]
Oscillatory	5.7-7.8	2.1
Hot tandem	3.0-5.6	2.6
Macadam	3.4-6.7	3.3



Heating : Macadam-roller at second binder course with heating of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 1 : Macadam-roller at second binder course with cold cutting of surface in the lower layer (ordinary season).
Cutting 2 : Ditto.

Fig. 17 Void Ratio for Different Surface Temperatures

Fig. 17 は，舗装表面温度の高温側と低温側のコアの空げき率（2 本のコアの平均値）を示したものである。**Figs. 4, 5** に示した高低温の温度差と空げき率の差には明確な相関はみられず，一部に低温側のコアの方が空げき率が小さい場合もみられるが，概して表面温度が高いほど空げき率も小さい傾向を示している。

空げき率は施工面下層の温度に大きな影響を受けることから，施工面下層の敷き均し時の温度と舗装表面温度を独立変数とした重回帰分析を行った。その結果を **Table 13** に示す。舗装表面温度はローラーの散水の有無やローラーの導入時期に影響を受けることから，初転圧がほぼ終了する 30 分における測定値を用いた。

Table 13 Multiple Regression Analysis of Void Ratio (y) between Initial Temp. of Lower Layer (x_1) and Surface Temp. after 30 min (x_2) in Binder Course

Type of roller	Void ratio [°C] y	Initial temp. of under layer [°C] x_1	Surface temp. after 30 min [°C] x_2	Multiple regression analysis	
Oscillatory	5.2	−0.5	97.0	$y=-0.44x_1-0.030x_2+7.96$	$R=0.97$
	5.1	0.4	85.6		
	2.4	48.1	107.0		
	4.4	25.7	94.2		
Hot tandem	3.8	2.3	101.0	$y=-0.032x_1-0.013x_2+5.38$	$R=0.93$
	4.1	3.6	80.0		
	2.3	40.8	125.7		
	4.0	15.2	103.5		
Macadam	4.8	6.7	84.3	$y=-0.020x_1-0.026x_2+6.84$	$R=0.92$
	5.1	3.3	69.0		
	3.4	33.1	90.0		
	3.7	15.0	98.2		
	3.2	52.4	111.0		

データ数が少ないにもかかわらず，重相関係数は 0.9 以上の高い数値を示している。施工面下層の敷き均し時の温度と舗装表面温度の偏回帰係数は両者とも負の値であることから，空げき率とはマイナスの関係を示している。施工面下層の敷き均し時の温度の偏回帰係数は有振のオシレトリローラー，加熱型タンデムローラー，無振のマカダムローラーの順に小さくなっており，有振転圧はその影響度合いが大きいと思われる。また，舗装表面温度の偏回帰係数では加熱型タンデムローラーが最も小さく，ローラーの種類によって両者の影響度合いは異なっている。本実験での限られた条件下での結果であるが，データ範囲を拡張した実験を実施することにより表面からの温度情報で信頼性の高い舗装体内部の空げき率の推定も可能と思われる。

5. 結　　語

本研究で明らかになった事項を以下に列記する。

1) 施工時における舗装表面温度は外気温の影響が極めて小さく，ローラー面への散水の有無とローラーの導入時期，施工厚さや配合に依存する。しかしながら，混合物中央の温度は外気温の影響が支配的な施工面下層の温度の影響を受け，外気温が低いほど冷却速度は速い。したがって，この冷却速度が施工面下層への熱の移動速度と考えると混合物の中央より下方でその速度が著しく速い。

2) 施工中の舗装表面温度とアスファルト混合物中央の温度の関係は，外気温と初転圧のローラーの種類によって異なり，混合物中央の温度は外気温が低いほど表面温度の変化に対する変化量が大きく，ローラー面を加熱したものは小さい。

3) 空げき率とその深さ方向の分布は初転圧ローラーによって異なり，施工厚さや配合によらずローラー面を加熱したものは高い締固め能力を示す。初転圧の振動の有無は，施工面下層の温度が高い場合に混合物下部の締固めに有効と思われる。また，マカダムローラー使用時の空げき率は，施工厚さや配合によらず混合物の中央部，下部，上部の順に大きくなる傾向を示し，施工面下層の温度が高いほど中央部と下部の空げき率の差が小さくなる。

4) 空げき率とその深さ方向の分布は，施工面下層がアスファルト混合物の場合その温度に著しく依存し，施工面下層の温度が高いほど小さく，特に混合物下部でその傾向が顕著である。また，施工厚さや配合によって深さ方向の空げき率のバラツキは異なり，これは初転圧ローラーの種類によっても影響を受ける。

5) 常温切削面のような凹凸が施工面に存在した場合，その上に施工した混合物の空げき率は大きく，特に混合物上部でその傾向が著しく，深さ方向の空げき率のバラツキも大きいと思われる。

References

1) Puangchit, P., Hicks, R. G., Wilson, J. E., Bell, C. A., *Transportation Research Record*, **911**, 70 (1983).
2) Japan Road Association, "Manual for Design and Construction of Asphalt Pavement," (1992), p. 135.
日本道路協会, "アスファルト舗装要綱," (1992), p. 135.
3) Hotta, N., Kitagawa, K., Nagayoshi, T., *Nippondorokodan gijutujoho*, **84**, 53 (1986).
4) Madokoro, M., *Asphalt*, **29**, (150), 23 (1987).
5) Symposium-Compaction of Asphalt Concrete, *Proc. AAPT*, **36** (1967).
6) Pell, P. S., ed., *Applied Science Pub.*, (1978).
7) Nitta, N., Kasahara, A., Sugawara, T., *Sekiyu Gakkaishi*, **23**, (2), 118 (1980).
8) Sato, T., Kensetukikai to Sekoho Symposium, (1987).
9) Moriyoshi, A., *Proc. of JSCE*, (409), 177 (1989).
10) Nitta, N., *Sekiyu Gakkaishi*, **16**, (6), 446 (1973).
11) Bahri, G. R., Rader, L. F., *Highway Research Record*, **67**, 59 (1965).

Summary

Temperature and Void Ratio of Asphaltic Layers Constructed in Cold and Ordinary Seasons

Katsuya TOKUMITSU[†1], Akihiro MORIYOSHI[†1], Kazuyuki KAWAMURA[†2], and Akihiko KASAHARA[†3]

[1] Faculty of Engineering, Hokkaido University, Nishi 8, Kita 13, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060
[2] Hokkaido Development Bureau, Nishi 2, Kita 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060
[3] Nipponhodo Co., Ltd., 3-32-34 Higashishinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 140

This paper describes temperatures and void ratios of asphaltic layers constructed using three roller types in cold and ordinary seasons, and the effects of heating and cold cutting of the surfaces in lower layers.

The following conclusions were obtained:

The void ratios of asphaltic layers constructed in cold season were larger than those of layers constructed in ordinary season due to the effect of temperatures in the lower layers.

The void ratios and their vertical distributions of asphaltic mixtures were influenced by roller types, roughness of the surfaces in the lower layers, gradation and thickness of the mixtures.

Keywords

Asphalt pavement, Asphaltic mixture, Void ratio, Surface temperature, Roller type, Surface roughness