

竣工初年度における基礎断熱床下空間の温湿度環境に関する熱水分同時移動解析

基礎断熱 初期発湿 結露
カビ指数 シミュレーション

正会員 ○香西 里美*1 同 立松 宏一*2
同 本間 義規*3 同 鈴木 大隆*4
同 羽山 広文*5 同 菊田 弘輝*6

1. はじめに

基礎断熱工法は、床下空間の高湿化防止、地盤や基礎の熱容量の活用、施工の合理化などに優位性があり、寒冷地のみならず温暖地においても、今後、普及が期待される工法である。しかし、基礎断熱した床下空間においても、竣工後1年間は高湿化するという報告もなされており、適切な設計情報が必要である。そこで本研究では、この工法の竣工1年目に焦点を置き、数値シミュレーションにより高湿化の要因や床下温湿度環境に対して影響を与える要因について検討を行なう。

2. シミュレーション概要

2.1 数値計算手法

床下温湿度は室内外の移流に伴う湿気の流れと材料の吸放湿の影響を大きく受けるため、空間・材料内部の温湿度環境予測においては、壁体構造をハイグロスコピック領域の1次元非定常熱水分同時移動問題として扱い、シミュレーションには換気系と連成した多数室温湿度性状解析プログラム¹⁾を用いる。また、気象データには、拡張アメダス気象データの各都市標準年を使用し、温湿度、日射、夜間放射量を考慮に入れた計算を行なう。

2.2 対象住宅のモデル化

住宅モデルはIBECの自立循環型住宅モデル²⁾(表-1)を参考に、検討対象である床下空間4室の他、居住空間3室、非居住空間2室の9室モデルとする(図-1)。また、断熱仕様は次世代省エネルギー基準を満たすものとし、気密性能や換気方式などは図-2、表-2のように設定する。

2.3 温湿度条件

床下4室を含む非居住空間の温湿度はなりゆきとし、居住空間は(1)、(2)、(3)式に示す空調条件によりコントロールされているものとする。

$$\text{温度}[^{\circ}\text{C}] : T = 4.5 \cos \frac{48\pi(D-212)}{8760} + 22.5 \quad (1)$$

$$\text{相対湿度}[\%] : h = 5.0 \cos \frac{48\pi(D-212)}{8760} + 55.0 \quad (\text{I 地域}) \quad (2)$$

$$h = 10.0 \cos \frac{48\pi(D-212)}{8760} + 60.0 \quad (\text{II} \sim \text{IV 地域}) \quad (3)$$

また、温湿度の初期条件は、未知室9室と全壁体の各部材については表-3のように設定し、地盤の初期温度のみ図-2に示す領域で1年間の助走計算を行い、押さえコンクリート直下における温度の平均値を用いる。

2.4 評価指標

本研究で評価指標として用いるカビ指数(FI)は、カビの生長の観点から場の温湿度環境を指標化したもので、温度(0~40℃)と相対湿度(60~100%RH)により定義さ

表-1 住宅モデル概要

自立循環型住宅(一般モデル)	
延床面積	120.07 m ²
1F床面積	67.90 m ²
2F床面積	52.17 m ²
基礎断熱	34.58 m
床下高さ	350 mm
家族構成	夫婦+子供2人

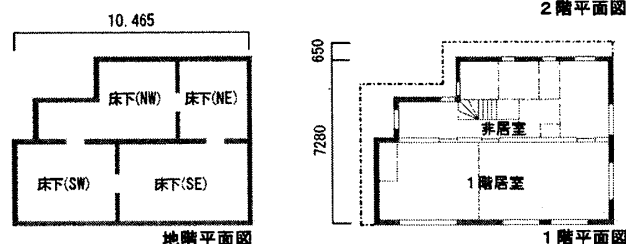


図-1 住宅モデル平面図

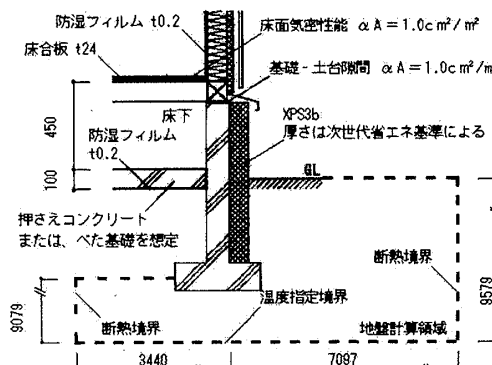


図-2 基礎断面詳細図及び地盤計算領域

表-2 隙間・換気関係設定値

隙間・換気モデル	
住宅気密性能	$\alpha A = 2.0 \text{ cm}^2 / \text{m}^2$
隙間分析	基礎-土台: 10%、開口部: 50%、外壁: 30%、天井: 10%
換気給気量	$\alpha A = 20 \text{ cm}^2$ 、 $n = 1.5$ 、8箇所
入開口	$\alpha A = 1470 \text{ cm}^2$ 、 $n = 2.0$ 、4箇所
換気種別	第3種換気(0.5回/h)

表-3 温湿度初期条件

部材	湿度(%RH)	温度(℃)
壁	98	竣工日における外気温の平均値
床の裏材	80	
室内空気	竣工日における外気温の平均値	

表-4 カビ指数FIとカビの生長度合い

カビ指数FI	カビの生長度合い
FI < 20	好乾性カビ孢子が1週間で発芽する
20 < FI < 35	中湿性カビ孢子が1週間で発芽する
35 < FI	好乾性カビの無性的ライフサイクル(孢子発芽→菌糸生長→孢子飛散→新孢子の着生)が1週間で営まれる

れる。このFIの特定の期間における平均値を表-4と照合することで、カビの生長度合いを予測することができる³⁾。本研究では、床下空間の毎時の温湿度から算出したFIの1週間毎の移動平均値が、連続して7以上となる最長の期間をFI ≥ 7 最長連続日数とし、床下温湿度環境を評価する。

また、床下空間において結露の危険性が最も高い部位と考えられる押さえコンクリート(土間スラブ)に注目し、毎時の押さえコンクリート表面における温度が床下空間の絶対湿度から算出した露点温度以下となる頻度を累積し、これを累積結露日数として評価する。

3. 建設地、竣工時期による影響

建設地を旭川、札幌(I地域)、盛岡(II地域)、仙台、長野(III地域)、東京、名古屋(IV地域)とした場合における竣工初年度の床下高湿化の要因について検討する。また、竣工日は3/1、6/1、9/1、12/1とし、基礎断熱工法の標準的仕様について、竣工時期別の検討も行なう。なお、本研究では、3年目の計算結果を年周期定常状態として扱う。

3.1 カビ指数FI(図-3)

竣工初年度におけるFI ≥ 7 最長連続日数は、いずれの都市においても、9/1竣工では短く、竣工3年目の値と同等であるのに対し、3/1、12/1竣工では長く、カビ発生の危険性が竣工3年目よりも高いと予測できる。この傾向は、寒冷地において顕著に見られ、FIの定義範囲内における竣工初年度の温度と相対湿度の関係を見ると、図-4(a)に示

す通り、寒冷地・旭川において3/1竣工時には、FIがピーク値をとる8月下旬~9月初旬以降も相対湿度が高くなっている。これは、地盤温度の立ち上がりの遅れの影響により温度が低く抑えられるためであり、このため、高湿化期間が延び、FI ≥ 7 最長連続日数がより長くなっている。

また、温暖な地域ほどFI ≥ 7 最長連続日数が増大しており、地域特性が見られるが、特に6/1竣工時に顕著である。これはコンクリートからの初期発湿が続いたまま夏期に至るためであり、仙台、長野では3/1竣工時より長くなる。図-4(b)に示す通り、湿潤温暖地・仙台では、6/1竣工時に竣工月から相対湿度が高くなり、高湿化する期間が長期化するため、FI ≥ 7 最長連続日数がより長くなっている。

さらに、温暖地において6/1竣工時に、7月~9月の長期間にわたって基準値FI=35を越しており、カビ発生の危険性は夏期に高いことが分かる。

3.2 押さえコンクリート表面の結露(図-5)

押さえコンクリート表面における竣工初年度の累積結露日数は、地盤温度の初期温度が低く、立ち上がりの影響を大きく受ける3/1、12/1竣工時に多いが、札幌、東京、名古屋では、12/1竣工時に0日となる。結露の危険性が高い6~9月の期間におけるスラブ表面温度と床下絶対湿度の関係(図-6)を見ると、長野と東京では、絶対湿度は同程度であるものの、温度は長野の方が低くなっており、表面温度が露点温度を下回るのは、絶対湿度によらず表面温度

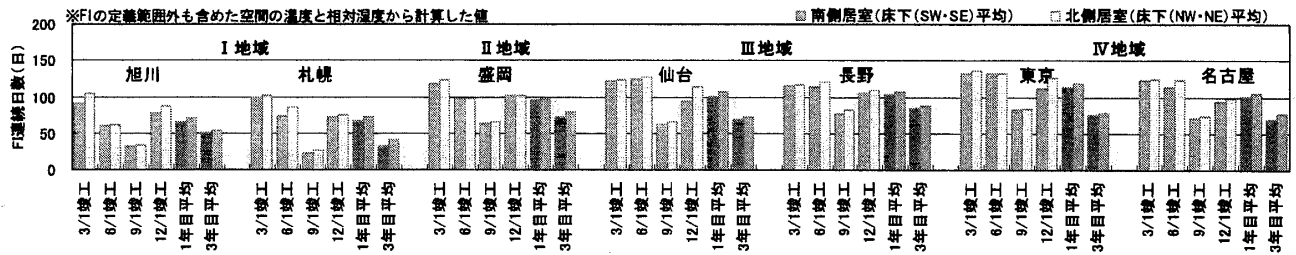


図-3 カビ指数(FI)1週間移動平均値 ≥ 7 となる最長連続日数

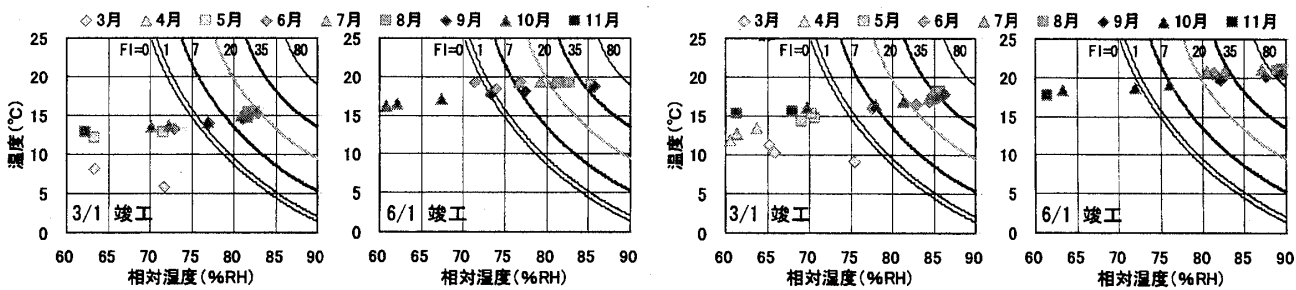


図-4 FI等値線上における床下温度と相対湿度の関係(旬平均)

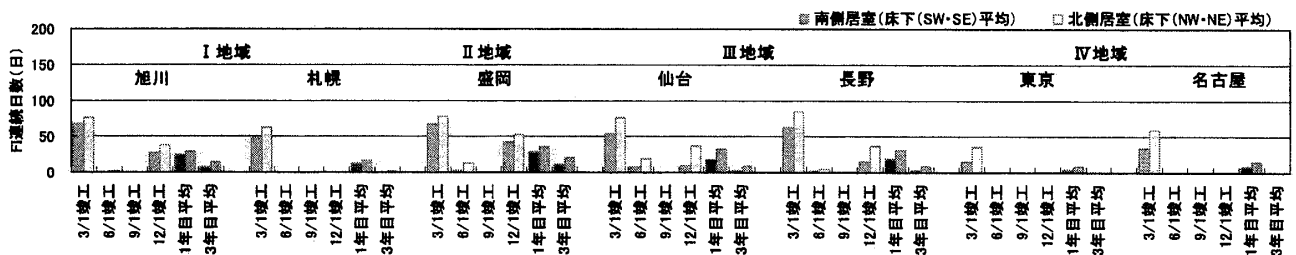


図-5 押さえコンクリート表面(土間スラブ)の累積結露日数

が20℃を下回る際である。これは札幌と旭川でも同様であり、表面温度が比較的低温、湿度の高いⅡ・Ⅲ地域で結露期間が長期化する可能性がより高くなると考えられる。

4. 床下温湿度環境に影響を及ぼす要因

4.1 検討パラメータ

前節までの検討から、地盤温度の低い時期や温暖地において湿度の高い夏期の直前に竣工した基礎断熱床下空間では、初年度の夏期に高湿化し、カビや結露の発生が懸念される。また、この際の床下空間への水分供給源の約8割が基礎-土台間の隙間を通じた湿潤外気の流入であり、残りの2割が1階床材を通じた湿気流入であることが明らかとなっている⁴⁾。本節では、これらの知見を参考に、床下温湿度環境に影響を及ぼすと考えられる要因について、表-5に示すようなパラメータを設定し、検討する。

4.2 検討手法

検討パラメータの全計算条件は2203通りと膨大になるため、直交表の利用により少ない計算回数でパラメータ水準の評価をすることが出来る、タグチメソッド⁵⁾を用いる。この手法は、入力値、ノイズ、出力値、設計パラメータの4要素を持ち、パラメータ設計を中心的手法としている。

本研究では、ノイズを竣工時期・床下各室とし、出力値はFI \geq 7最長連続日数・累積結露日数としてパラメータ設計を行なう。パラメータ設計では、パラメータ水準ごとに出力値の平均とSN比を算出し、それぞれ要因効果図を作成することで、ノイズによる各パラメータへの影響度や水準ごとの床下温湿度環境へ対する影響を検討する。ここで、

SN比とは(4)、(5)式で定義される出力値のばらつき度合いを示す値であり、高い値ほどノイズの影響を受けない安定したパラメータ水準であることを意味する。

$$y = \beta M \quad (4) \quad M: \text{ノイズ (竣工時期, 床下各室)}$$

$$\text{SN比} \eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (5) \quad y: \text{出力値 (FI} \geq 7 \text{最長連続日数, 累積結露日数)}$$

σ : ばらつき

直交表にはL27 (3¹³)を用い、パラメータ間の交互作用を考慮し、割り付ける。建設地は札幌、盛岡、東京、竣工日は、夏期の高湿化が顕著に見られる3/1、6/1竣工とする。

4.3 検討結果 (図-7、図-8)

SNに対する要因効果図より、床断熱、床下換気、土間下断熱パラメータは、水準によるSN比に対する影響が大きい。竣工時期、または、各床下空間の違いによる影響を受けやすいパラメータであることが分かる。一方、基礎断熱仕様、1階床面防湿、基礎-土台隙間量は、SN比に対する影響が小さいため、影響を受け難いパラメータであり、さらに、出力平均に対する影響も比較的小さいため、床下温湿度環境に影響をほぼ与えていない。また、建設地別に比較すると、FI \geq 7最長連続日数では、パラメータ毎のSN比への影響が最も大きい都市は札幌であり、温暖地ほど影響が小さくなる傾向が見られる。一方、累積連続日数では、全

表-5 検討パラメータ

パラメータ		水準1 (標準)	水準2	水準3
居住空間の温湿度条件	室温(管理)	制御	制御	全室+床下温度
	非居住(空調)	制御	成り行き	
床の断熱仕様	床断熱位置	なし	和室のみ(床下(SW))	全室あり
	断熱仕様		XPS 40mm	GW 100mm
基礎の断熱仕様	①断熱材の種類	XPS	EPS	GW
	②断熱材の厚さ(種別)	1.50	10.00	141.26
	③施工位置	外側断熱	両側断熱	内側断熱
床下換気	床面開口	なし	1	2
	強制換気	なし	床下(NW)	床下(SE-NE)
床の防湿仕様	強制換気	なし	床下給気	床下排気
土間下断熱	1階床面にポリエチレンフィルム0.2mm相当の透湿抵抗			
基礎-土台隙間量	押さえコンクリートの下にXPS50mmを施工			
	基礎-土台の隙間量を施工精度の向上により半減			

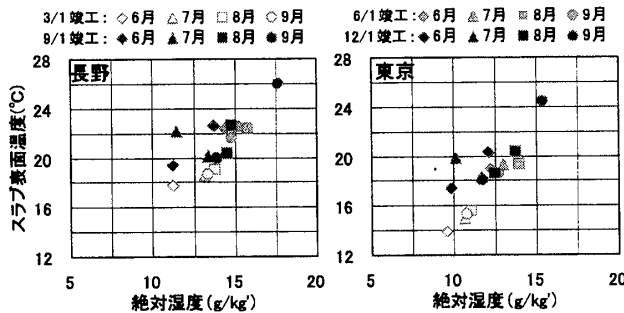


図-6 スラブ表面温度と床下絶対湿度の関係

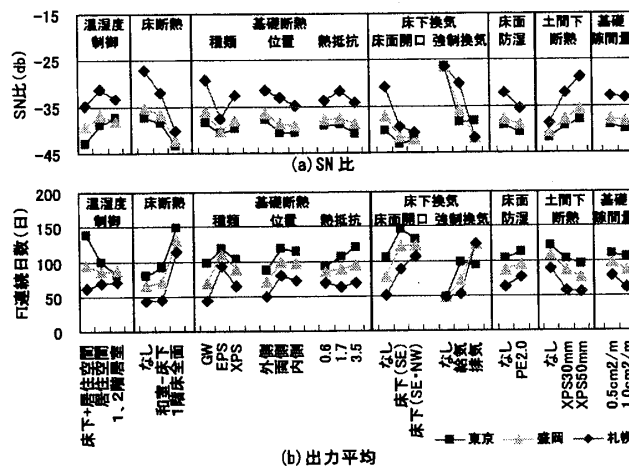


図-7 要因効果図 (FI 連続日数、床下4室)

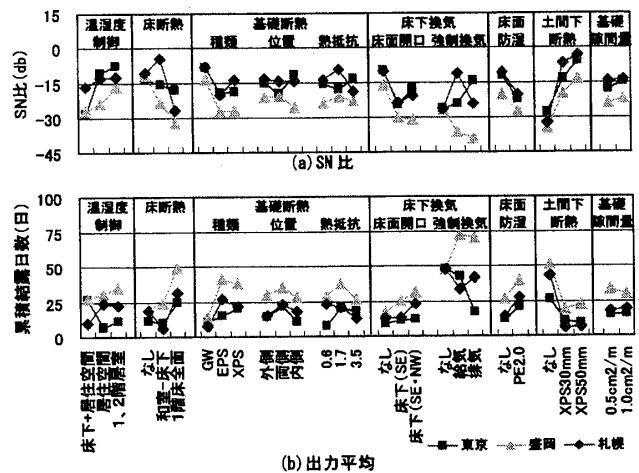


図-8 要因効果図 (累積結露日数、床下4室)

パラメータを通じた傾向は見られず、また、建設地によって、SN比への影響に違いが見られる。

4.3.1 床の断熱仕様による影響

床断熱を行なうと安定した1階居住空間の温度の影響が減少し、床下温度が低下する。この温度低下に伴う水分流入量の変化が十分ではないため、高湿化が起り、FI \geq 7最長連続日数、結露日数ともに出力平均が増大している。また、和室のみ床断熱とした場合は、出力平均が減少はしているが、床断熱直下に位置する床下(SW)では、温度が隣室床下空間よりも低く推移しているため、人通口を通じて隣室からの湿気が集中し、局所的な高湿化が起きている。

4.3.2 床下換気による影響

(1) 床面開口: 床下点検口のガラリとしての利用を想定した場合、全体の空気流れは大きくは変化しないものの、1階居住空間の絶対湿度が床下空間よりも常に高いため、1階から床下への新たな空気流れが湿気の流入を招き、FI \geq 7最長連続日数、結露日数ともに出力平均が増大する。

(2) 床下給気: 床下空間への外気導入は、夏期以外では外気絶対湿度が床下空間よりも低いため、低湿化につながり、FI \geq 7最長連続日数はやや短くなる。しかし、外気の絶対湿度が高い夏期には、床下温度の上昇と同時に湿気の流入も起るため、結露日数にはあまり影響を与えない。

(3) 床下排気: 1階居住空間の温度と絶対湿度は常に床下空間よりも高いため、1階居住空間の空気の導入は床下温度の上昇には寄与するが、年間を通じて湿気の流入を招くことになる。このため床下空間が長期に渡って高湿化し、FI \geq 7最長連続日数が著しく増加する。また、初期温度の立ち上がりは促進されるものの、押さえコンクリートの温度上昇が追い付かず、結露日数も増加する。

4.3.3 土間下への断熱施工による影響

SN比への影響は、FI \geq 7最長連続日数では小さく、結露日数では大きい。出力平均はどちらも減少しているが、結露日数の減少が顕著である。これは土間下への断熱材の敷き込みにより地盤温度の立ち上りの遅れの影響が緩和し、初期の床下温度が上昇して上階の室温に近い挙動となるためであり、相対湿度が概ね75%以下で推移し、FI \geq 7最長連続日数が短縮する。また、押さえコンクリート表面の温度も上昇するため、結露の発生が大幅に抑えられる。

4.4 最適パラメータの検討

図-7、図-8の要因効果図より、床下温湿度環境を改善させる最適なパラメータを抽出する。まず、出力値のばらつきを抑える水準として、SN比への影響が大きく、かつ、出力平均への影響が小さいパラメータの中から、SN比の高い水準(温湿度条件-居住空間、土間断熱-XPS50mm)を選択する。次に、出力値を減少させる水準として、出力平均への影響が大きく、かつ、SN比への影響が小さいパラメータから、出力平均の小さい水準(床下換気-なし・給気、温

湿度条件-床下)を選択し、最適パラメータとして設定する(表-6)。残りのパラメータは標準的な水準とし、札幌と盛岡における床下改善手法について検討を行なった結果を図-9に示す。SN比、出力平均どちらも標準仕様による出力値と比べ、温湿度環境の改善が見られ、盛岡ではSN比は最大で45db、FI \geq 7最長連続日数は80日、結露日数は72日減少しており、最低でも6割改善している。

5. まとめ

本研究では、基礎断熱床下空間の温湿度環境について、竣工初年度における検討をシミュレーションによって行ない、各部位の材料や地盤の初期温湿度条件を仮定した上ではあるが、以下に示すような傾向が見られた。

- 1) 竣工初年度の高湿化は、地盤温度が低い時期や、温暖地の6月に竣工した場合に、竣工初年度の夏期に起こる。
- 2) 基礎外周部の断熱仕様や隙間量の違い、1階床面の防湿の有無は、床下温湿度環境へ影響をほぼ与えない。
- 3) 1階居住空間の部分暖房や床断熱の併用、1階居住空間の空気の導入は、床下環境を悪化させる。
- 4) 床下空間への外気の導入は、高湿化期間を短縮する効果がみられたものの、結露の防止には至らない。
- 5) 土間下への断熱材の敷き込みは、冷房負荷増大の懸念があるものの結露やカビの発生防止に効果的である。

参考文献

- 1) 本間義規ほか: 小屋裏を対象とした防露性能評価手法の開発その1、熱・空気・湿気連成シミュレーションに基づく小屋裏温湿度性状、日本建築学会学術講演梗概集D-2、pp.277-278、2008.9
- 2) 建築研究所監修: 自立循環型への設計ガイドライン、エネルギー消費50%削減を目指す住宅設計、2005
- 3) 建物外皮における結露防止のためのガイドライン、財団法人建築環境・省エネルギー機構、pp.208-210、2003.5
- 4) 香西里美ほか: 熱水分同時移動解析による基礎断熱住宅の床下温湿度環境に関する研究その2、空気調和・衛生工学会大会学術講演会、pp.1215-1218、2009.9
- 5) 田口玄一: 第3版実験計画法上巻、丸善、1976・1977

表-6 最適パラメータ

パラメータ	水準1	水準2
	温湿度条件	居住空間
床断熱	なし	床下給気
土間断熱	なし	XPS50mm

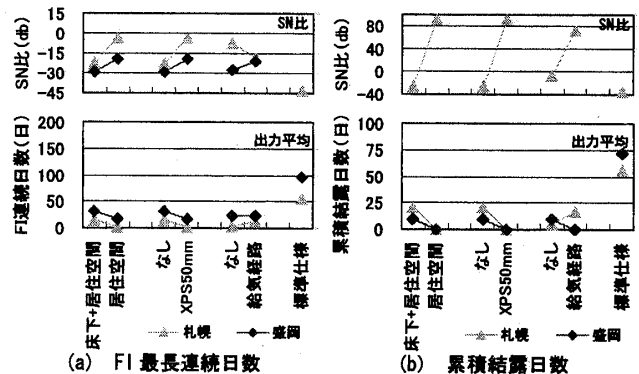


図-9 要因効果図

*1 札幌市 修士(工学)
 *2 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 修士(工学)
 *3 岩手県立大学盛岡短期大学部 准教授 博士(工学)
 *4 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 博士(工学)
 *5 北海道大学大学院工学研究院 教授 博士(工学)
 *6 北海道大学大学院工学研究院 助教 博士(工学)

*1 Sapporo Municipal Office, M.Eng.
 *2 Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, M.Eng.
 *3 Assoc. Prof., Morioka Junior College, Iwate Prefectural Univ., Dr.Eng.
 *4 Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, Dr.Eng.
 *5 Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
 *6 Assis. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.