



図1 外観

空気膜構造の膜面に水を溜め冷却する 「エンジニアド・ポンディング」の開発と展開

1. 計画背景

空気膜構造の室温の上昇には日射量と外気温の上昇が大きな影響を及ぼしている。空調設備としてはパッケージ型空調機や中央熱源方式が用いられることが一般的だが、これに加えてポンプ、スプリンクラーを用いて膜面を冷却する散水設備も用いられてきた。これまで行われてきた膜面への散水試験によりその室温低下効果も確認されているが、散水を止めた途端に下がった室温が元に戻ることで、散水中の騒音などが課題として挙げられている*1。空気膜構造への散水試験を経験した設計者らが、大阪・関西万博トイレ3を対象として、これまでの課題でもあった冷却効果及び持続性を向上させることを目的として、散水ではなく膜の上に水を溜める「エンジニアド・ポンディング」を計画し、実証実験を行った。同技術は大阪・関西万博トイレ3においては空気膨張式の屋根として計画されているが、空気支持式の膜構造への応用、展開も視野に入れながら実証実験を行った。

*1 小俣裕亮：空気膜構造を採用した移動式仮設建築物における予冷外気冷房及び放水冷却に関する実測研究，日本建築学会技術報告集第26巻第63号，2020.6

2. 建築概要

2-1.EXPO2025 大阪・関西万博トイレ3

対象建築物は EXPO2025 大阪・関西万博の会場内のトイレ棟で、木造平屋建の基壇部とその上に乗った空気膜構造による屋根によって構成されている。内部では中央に混雑待機列のための広い空間が設けられており、それを囲むように男性トイレ、女性トイレ、バリアフリートイレ、ジェンダーフリートイレが配置され、性別やトイレに求める用途の異なる多様な来場者が、ホールや手洗い場からひとつの膜屋根を見上げる空間構成としている。膜屋根は中央の空間へ太陽光を柔らかく透過させ、昼間の照明コストを抑え、夜間は内部の照明によって行灯のように夜空に浮かび上がる効果を意図して計画された。

対象建築物の外観写真を図1、内観写真を図2、図3、図4、平面図を図5、長手断面図を図6にそれぞれ示す。



図2 内観（ホール）

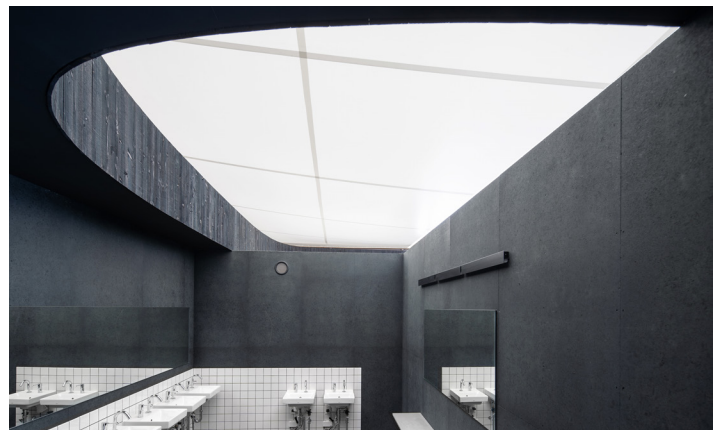


図3 内観（女性用手洗い）



図4 内観（男性用手洗い）

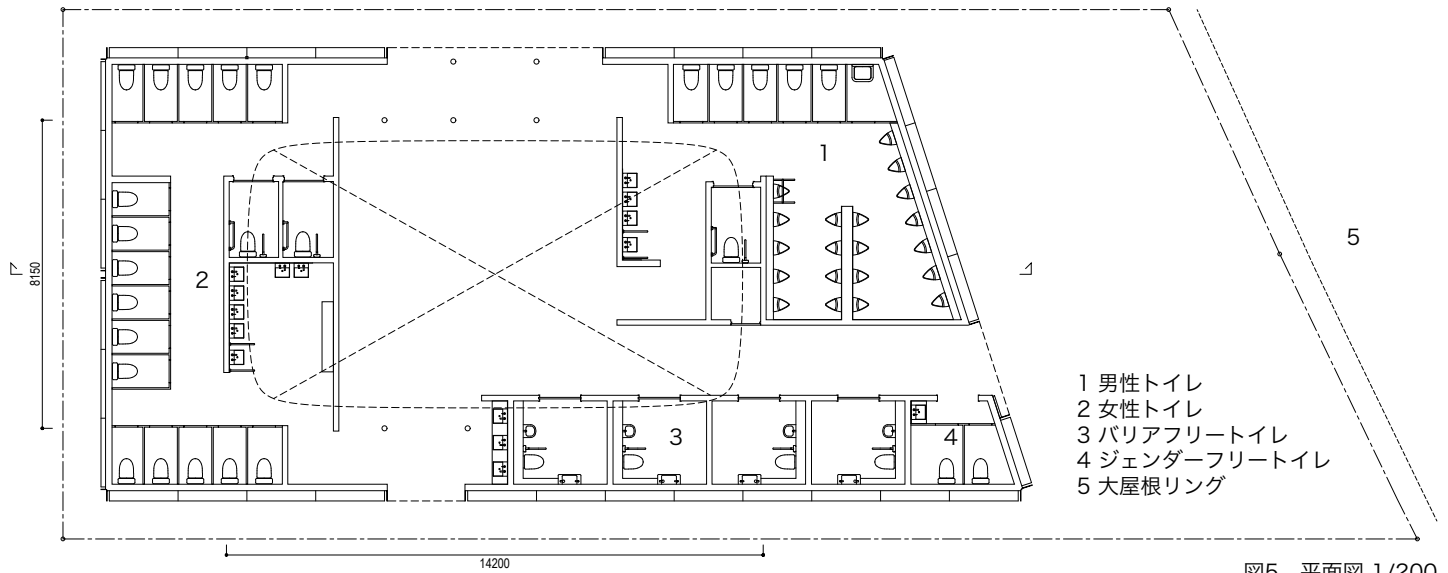


図5 平面図 1/200

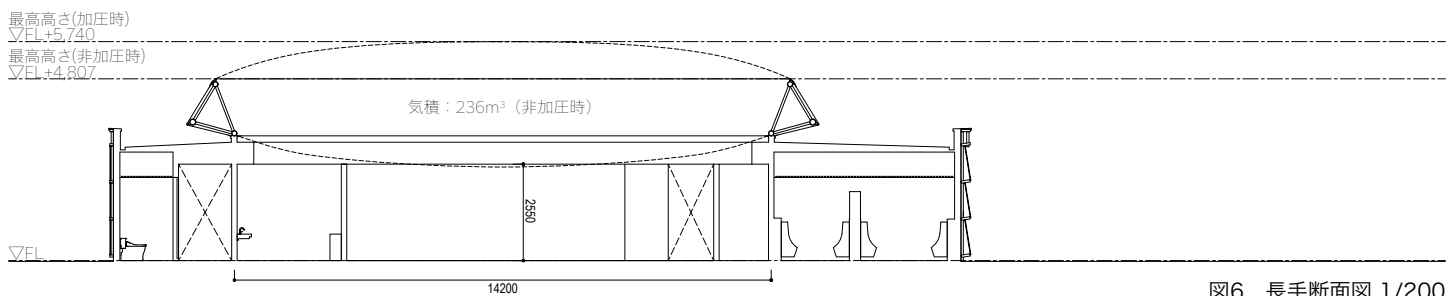


図6 長手断面図 1/200

2-2. 呼吸する屋根

空気膜構造の送風コストを削減し、風速や天候といった環境に
 応答して形状を変化させる、呼吸をするように伸縮する屋根を計画
 した。木造基壇部に設けられた風速計によって常時風速をモニ
 タリングしており、低風速時 (0m/s-10m/s) は送風機を停止して
 加圧せず、時折吹く微風に天井面全体が揺られるにまかせ (図
 7)、従来では忌避されてきたフラットリングを取り込み、夏季に
 涼感を得られる要素として風を可視化することを意図している。
 強風時 ($\geq 10\text{m/s}$) には加圧して膨らむことで膜面を安定させ、風
 圧力に対抗する運用としている (図 8)。また雨天は降雨センサー
 によって検知され、加圧して膜屋根を膨らませ、流量の制御でき
 ない雨水が膜屋根上に溜まらないような膜形状へと変化させる。
 また、風がなく外気温も高くない時の演出として、加圧・減
 圧を行って膜屋根形状を変化させる演出モードも 2 時間に一回実
 施した。トイレ 3 には 3 台の送風機が設けられており、そのうち
 1 台を膜屋根内の空気を排出する向きに設け、演出時の負圧モー
 ド用に割り当てている。

2-3. エンジニアド・ボンディング

夏季の気温が高い時 (外気温 30°C 以上) は膜屋根の内圧とつり
 合うように、上に水を溜めて屋根自体を冷却し、膜屋根下の空間
 が高温になった膜屋根の影響により暑くなることを避ける計画と
 している。所定の量の給水が完了したのちに 10 分間水たまりを
 維持し、その後膜屋根をインフレートさせて冷却水を押し流し、
 その水が木造部分の屋根に落ちることで木造部分も冷却すること
 を意図した断面計画としている。また、対象建築物ではコスト面
 から実現できなかったが、その冷却水を貯水トイレの洗浄水と
 することも併せて利用できればより環境に配慮した計画となると

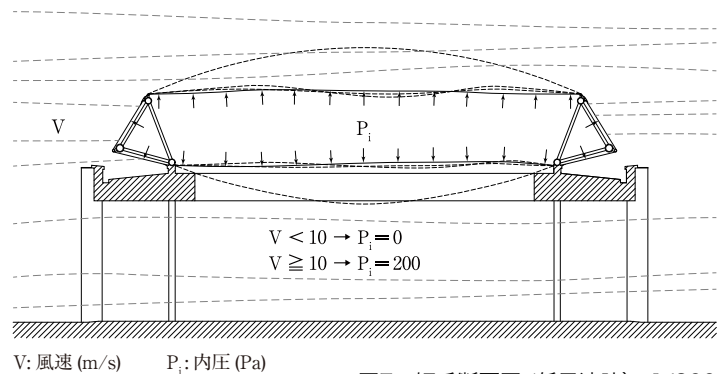


図7 短手断面図 (低風速時) 1/200

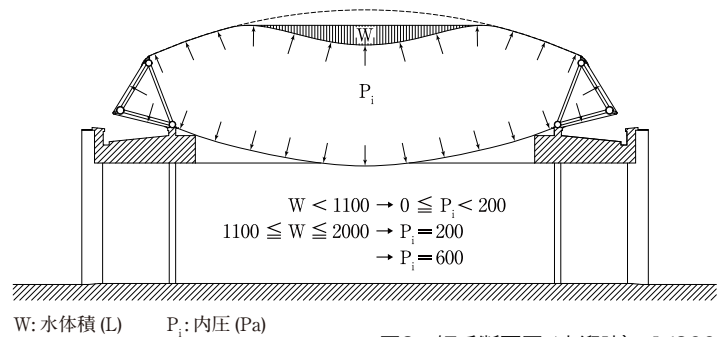


図8 短手断面図 (水溜時) 1/200

考えられる。
 フラットリングと同様にこれまで空気膜構造では忌避されてきた
 ボンディングを意図的に行うことで、環境に
 応答し、生きているように形を変える膜屋根と再生可能エネルギーによる空気膜構造
 の冷却を実現した。

3 実証実験

3-1 測定項目

エンジニアド・ボンディングの効果を確認するため、データロガー測定機器を用いて、以下の項目の測定を行った。

1. 膜屋根内温度 測定器を排水ホースに取付
2. 膜面温度 1 測定器を膜屋根頂部（内側）に取付
3. 膜面温度 2 測定器を膜屋根底部（内側）に取付
4. 膜屋根外温度 測定器を膜屋根下空間の壁面に設置
5. 日射量 日射量計を屋上に設置

またネットワークカメラを用いて、以下の撮影を行った。

6. 膜屋根内部挙動 ネットワークカメラを鉄骨部材に取付
各測定機の設置箇所を図9に示す。

また測定の期間は EXPO2025 大阪・関西万博の会期である 2025 年 4 月 13 日から 10 月 13 日とし、測定間隔は 10 分とした。

3-2 測定結果

6 月 19 日に測定された温熱環境データを図 10(次頁)に、水溜を開始してからの加圧状況、水溜状況と経過時間、膜屋根内温度等を図 11 に示す。また、膜屋根内部に設置したカメラで撮影した膜屋根の挙動を図 12 に示す。

6 月 19 日は 2 回水溜が実施された。水溜が開始されると膜面温度は即座に 7-9℃程度低下し、それに伴って膜屋根内温度も 3℃程度低下した。膜屋根上に水を溜めた状態を 10 分間維持する運用としていたが、給水を完了すると水溜維持中に徐々に膜面温度は上昇したが、膜屋根内温度は緩やかに低下を続けるか低下した温度を維持することが確認された。1 回目の排水後は再び膜面温度は上昇し、膜屋根内温度も上昇した。2 回目の排水後は外気温、日射量ともに低下するに伴い膜面温度、膜屋根内温度ともに低下した。水溜による膜屋根内温度低下への効果は概ね図 10 に示すグレーに塗られた部分である。

トイレ 3 のような空気膨張式の屋根内部の温度上昇を水溜によって抑制する効果は確認された一方で、10 分としていた水溜の継

続時間を延長することや水量を増やすことによる冷却効果への影響についてさらなる検討が必要である。また膜屋根内温度が上昇した際には送風量を増やし、中の空気を換気して外気温に近づける外気冷房との併用も効果が期待できる。

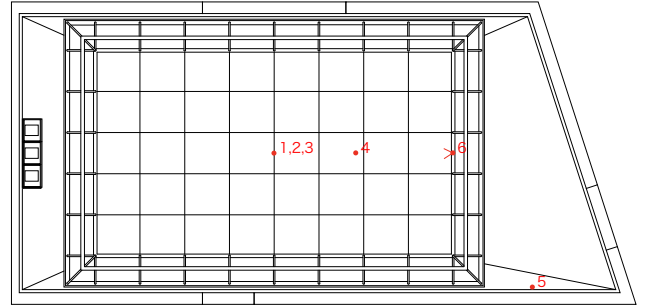
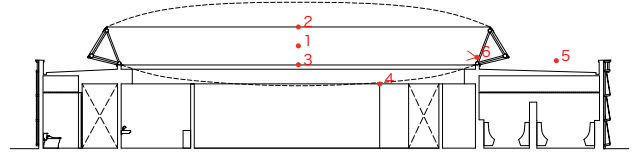


図9 測定機器設置箇所

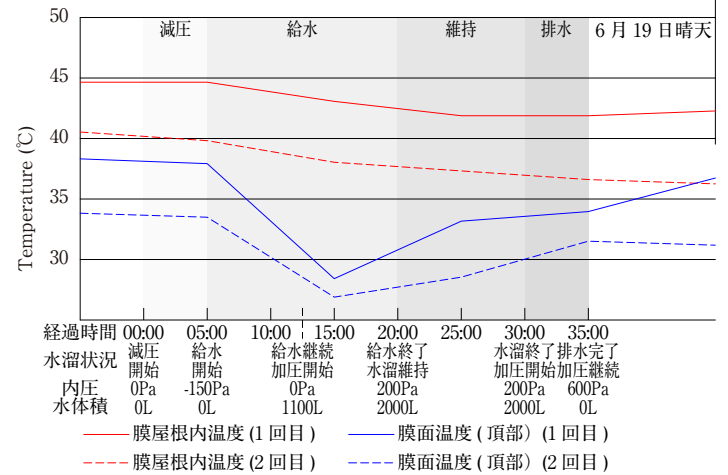
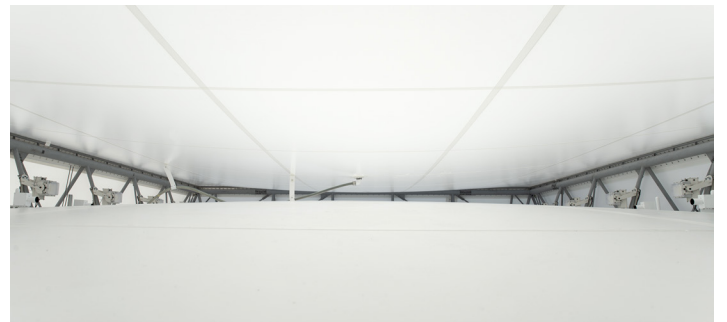


図11 エンジニアド・ボンディングによる膜屋根の温熱環境変化(詳細)



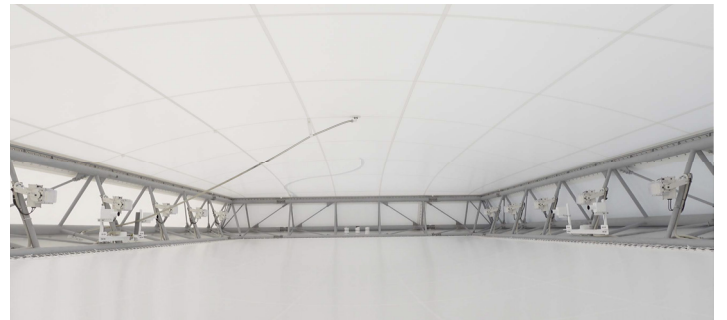
0.膜屋根内部 (常圧時)



1.膜屋根内部 (負圧時)



2.膜屋根内部 (水溜時)



3.膜屋根内部 (加圧時)

図12 膜屋根の挙動

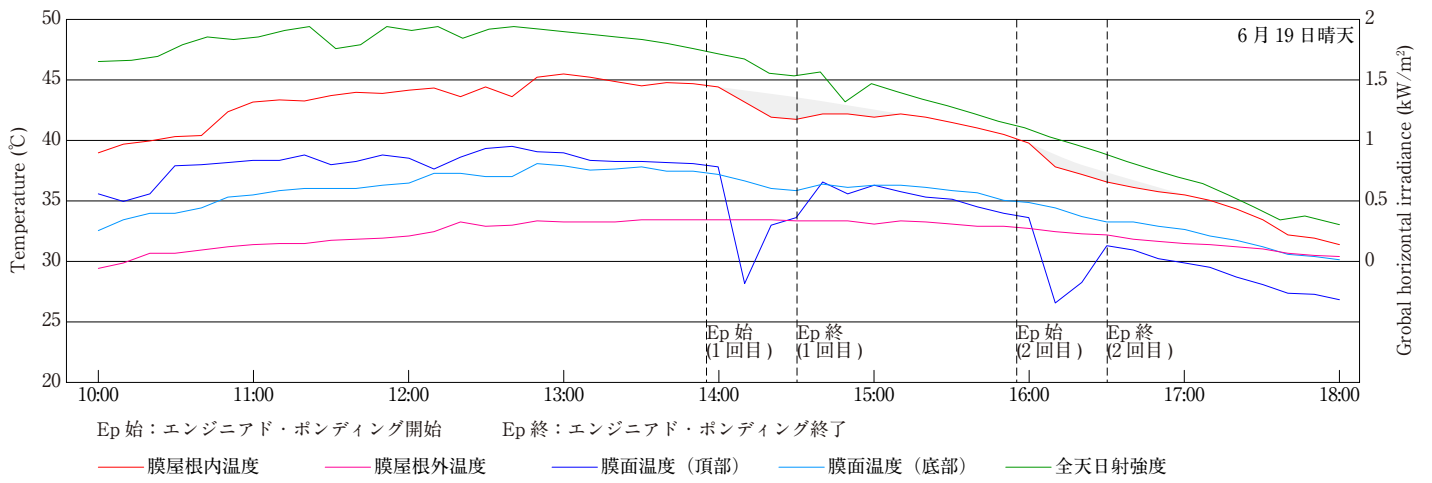


図10 エンジニアド・ボンディングによる膜屋根の温熱環境変化

4 応用と展開

エンジニアド・ボンディングを用いることで、水溜中は空気膜構造ではつくることのできなかつた凹面状の膜架構を形成することができた。また、水盤と膜を透過した太陽光のゆらめきも見られた。(対象建築物の施工中に見られたボンディングによる光のゆらめきの様子を図13に示す)。これらに加えて、放水冷却では放水時の膜屋根を叩く散水音が騒音となり静寂性が求められるコンサート時には実施できなかったが、上に水を溜めるボンディングであれば、演奏中も実施することが可能であり、先述の凹面状の膜架構とゆらめき効果と併せて、空気支持式のコンサートホールとして応用することを検討している。図14に模型写真、図15に

平面図、図16、図17に断面図をそれぞれ示す。凹面状の屋根はステージ上においては音響拡散体として機能することが期待でき、これまでの膜構造では別途設ける必要があった音響反射板等を減らし、構造とより一体となった音響空間が作られる。また水溜時の光のゆらめきは美しく、空間演出効果としても期待できる。空気支持構造へエンジニアド・ボンディングを用いる場合は気積に応じて別途空調設備を設け、水溜による冷却効果と組み合わせることで空調負荷を低減する効果が期待できる。

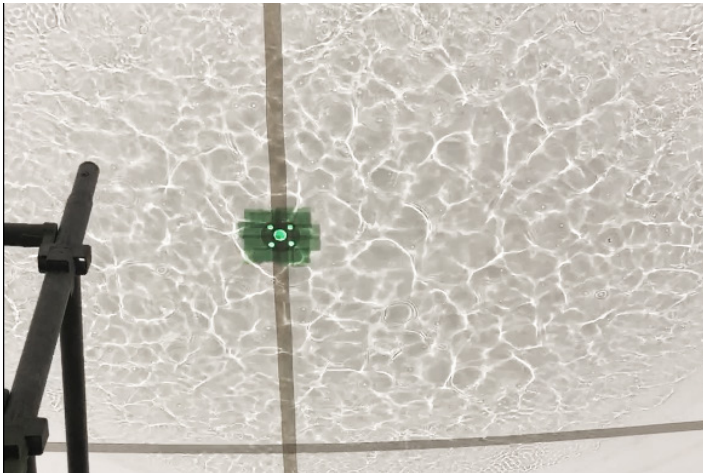


図13 ボンディングによる光のゆらめき効果

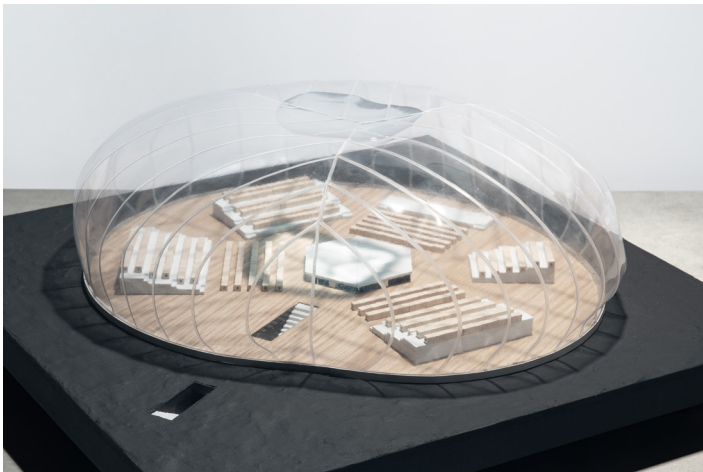


図14 エンジニアド・ボンディングの空気支持構造への応用

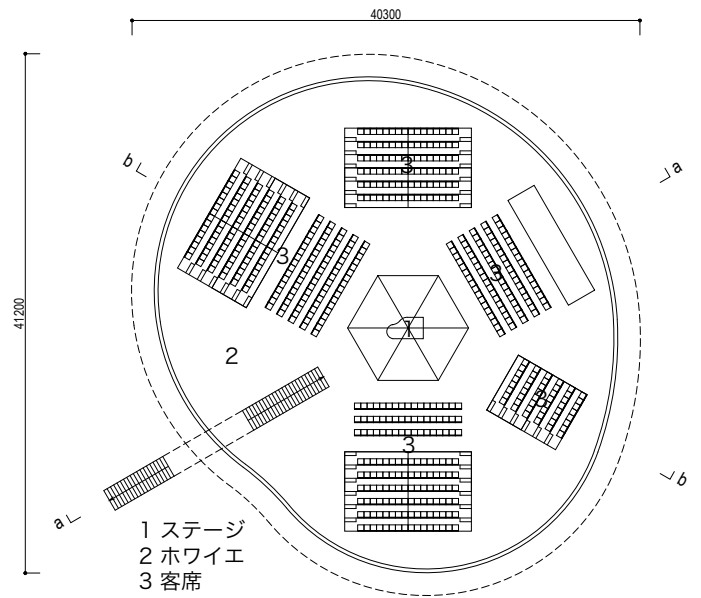


図15 平面図 1/600

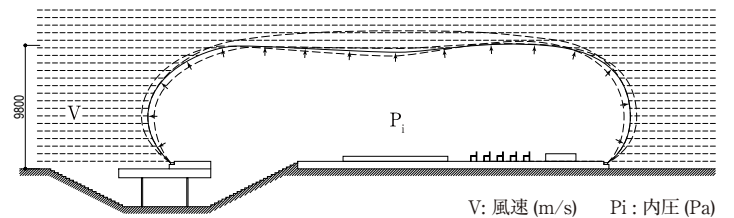


図16 断面図 a (低風速時) 1/600

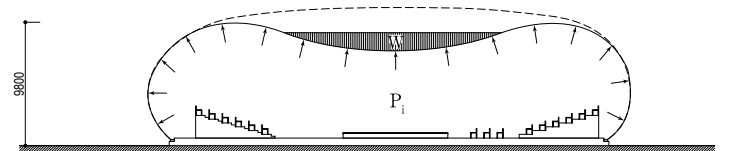


図17 断面図 b (水溜時) 1/600